

R. DOUGLAS FIELDS

ELECTRIC BRAIN

认识 脑电波

脑科学如何实现人机交互;如何教我们学习, 让我们变得更好

中信出版集团

[美] R. 道格拉斯·菲尔茨 著

阮南捷 译

认识脑电波

[美]R. 道格拉斯·菲尔茨 著

阮南捷 译

中信出版集团

目录

推荐语

引言

第一部分 发现脑电波

第1章 心灵的电波

透过颅骨

耶拿之旅

肿胀的大脑

登上雷尼尔山

登山者的大脑

纳粹和脑电波

伯格和贝克

希特勒的黑名单

理查德·卡顿

第2章 它活过来了！生命的火花

萤火虫的诞生

生命的起源？

人造大脑

我们需要一具尸体

从带电的大脑到电椅

第二部分 了解脑电波

第3章 破解脑电波

从电休克疗法到神经反馈疗法

电休克疗法

我自己的脑电波

解码脑电波

命名脑电波

第4章 破解大脑的密码

看大脑如何学习

运转中的大脑

美丽的错觉还是神秘的代码？

第5章 脑电波，通往心灵的窗口

神经反馈训练：改变我的想法

另一种观点

面对现实

大脑中的波——虚幻还是根本？

第6章 意识，驾驭脑电波

昏迷和植物人状态

麻醉

第7章 我们沉睡时，脑电波变化巨大

梦：夜间的疯狂之旅

心电图、电刺激和睡眠

睡眠障碍因何而生

山姆，倒回去再放一遍：学习和睡觉都靠它

遗忘和记忆如何发生，为何发生

第三部分 利用脑电波

第8章 思维控制：脑机接口

从无线电波到脑电波

德尔加多的研究

当前的大脑刺激研究

第9章 脑电波揭示你的想法、优点和弱点

脑电波预测你的学习潜能

看透你的心思

大脑网络和大脑基础结构的评估

第10章 脑部检查和精神疾病

神经系统疾病

第11章 掌控自己的脑电波

被边缘化的神经反馈

增强学习和认知能力

神经疾病的神经反馈治疗

心理障碍的神经反馈

脑部刺激

第12章 迈向未来

脑电波衍生设备

监视大脑活动的新方法

神奇旅程

Stentrode

电子时代与脑电波的干扰

别忘了神经胶质：绝缘的大脑

脑电波2.0版

窥探思想的伦理问题

神经武器

区别虚构与事实、轰动效应与科学

致谢

延伸阅读

图片授权

推荐语

*The Deep History of Oursel ves: The Four-
Bill ion-Year-Story of How We Got Conscious
Brains*

The Nature Fix

*The New Science of Consciousness: Exploring
the Complexity of Brain, Mind, and Self*

Rhythms of the Brain
The Brain from Inside Out

献给我的父亲
理查德·L. 菲尔茨

引言

封闭的玻璃房内，一排排黑色计算机上的蓝色指示灯在诡异地闪烁着。走过超级计算机的中央控制室，我沿着昏暗且空荡的走廊继续前行，来到了一扇门前。我打开它，进入一个像洞穴一样通体被刷成黑色的房间。安装在房间四周的24个摄像头紧盯着我的一举一动。两名男子从一排显示器后面站了起来。我知道，通过那些精密的仪器，他们可以检测到我大脑里一闪而过的电流，可以看到我心中最隐秘的部分，可以预先知道我头脑中的想法，也可以看到我的大脑怎么学习。他们可以评估我的智力，了解到我爱冒险的性格，识别我体内精神疾病和神经系统病变的蛛丝马迹，并预测我在某些方面的学习能力。我是不是爱阅读，但数学很差劲，还容易抑郁？我是不是处于帕金森病的早期阶段？这些藏在个人思想深处的个性化信息对这些脑科学家来说已不再是秘密。他们正在推动神经科学的革命性飞跃，并终将改变我们的世界。

我来这里与两位神经科学家见面，让他们监测我的脑电波，并观察我的大脑如何学习。要想接入我的神经回路，不再需要打开我的颅骨，也无须将电极粘在我的头上。在我大脑皮质深处的成千上万个神经元之间穿行的电流会产生电磁波，这种能量可以穿透我的头皮。这些神经元的放电活动可以被连接在我头部的电极检测到，并将这些来自大脑的电信号通过电线输入计算机。在《认识脑电波》一书中，我将带你到这个实验

室以及世界各地的许多其他实验室，去了解当前正在蓬勃发展的这门令人振奋的新兴脑科学，并追溯这一科学发现的源头。

20世纪初，对脑电波的检测是神经科学史上最重要的进展之一。然而，公众对脑电波及其重要意义却知之甚少。没有学校传授有关脑电波的知识。实际上，很多大学的神经科学教科书中都没有关于脑电波的章节。这种情况持续了将近一个世纪。但是，了解脑电波并不复杂——任何真正感兴趣的人都可以轻松地理解这门新学问。

但是，脑电波这个话题一直充满争议。20世纪20年代，德国一家精神病院的一位深居简出的医生发现他的病人脑中会发射电波。从那一刻起，脑电波引发了人们的惊讶和浓厚的兴趣。这位医生的秘密实验显示，来自大脑的神秘电磁辐射会随着人们的思想和心理状态而变化。今天，我们知道这些生物电波可以揭示人们内心深处的秘密：有意识的思想、无意识的认知，以及在大脑中激荡的情绪。

从20世纪初科学家首次瞥见脑电波的那一刻起，它就被视为复杂而神秘的信号。至今，神经科学家们依然在为脑电波而争论不休。有些人对脑电波嗤之以鼻，认为它只是大脑活动时产生的噪声，就像汽车发动机工作时会产生声响一样。其他人则认为脑电波是大脑在最复杂的水平下运作的方式。这些科学家认为，脑电波能解释人类思维的许多复杂问题，这些问题长期以来一直困扰着哲学家和科学家。

尽管围绕脑电波的起源和功能而展开的科学争论一直没有停止过，但是没有人怀疑通过监测和改变脑电波将会产生伟大

的成果。比如，神经科学家可以通过将脑电波输入计算机来控制软件、机器人和假肢。通过脑电波，人和机器的融合可以达到无与伦比的水平，在感知、分析和解决问题方面都将远远超出计算机或人脑单独工作时的能力。从驾驶电动轮椅到操纵无人战斗机，人们可以用意识甚至是前意识来控制一切。意识和脑电波密不可分，因此现在界定一个人死亡的标准是看脑电波，而非心跳。再比如，心理学家通过分析一个人静坐并神游时的脑电波模式，可以判断此人的大脑是否正常。如果大脑的电磁振荡不正常，那么开发人员可以用计算机编程向患者发出信号，大脑获得这个反馈后会纠正其脑电波活动——患者不需要药物即可痊愈。

其他科学家则使用可视化的磁性方法读取大脑的电活动，还有一些科学家试图将电极和计算机芯片植入人的大脑。思维和机器的融合意味着信息流可以是双向的：既可以通过计算机产生的电流或电磁脉冲刺激神经元来控制人脑功能，也可以把一个人的脑电波用计算机下载下来，并上传到另一个人的大脑中，就像心灵感应一样在大脑之间传递信息。当特斯拉的埃隆·马斯克和脸书的马克·扎克伯格这些亿万富翁投入数百万美元，开发用于商业目的的脑机对接技术时，这个一度被边缘化的科学领域突然变成了主流。马斯克声称，这将为人脑提供第三个层次智能——“数码超级智能”。这些宣言是真实的，还是虚幻的（只是为了营销）？下面是现实和悬而未决的问题。

在人类历史上，智人首先发展出提问和动脑筋的能力。但是，现在人类有了操纵脑电波的能力，就会产生许多应用和伦

理上的问题：用这种无创的方法将人的大脑与计算机连接起来，以了解人的大脑能或不能做哪些事情，这样做的风险和收益是什么？这种洞察人类天生的心理极限的技术将如何影响教育和职业选择？对于某些人来说，这项新技术可以通过电波控制思想或向大脑植入思想从而达到独裁的目的，这让他们深感恐惧。

所有这些能改变我们的未来、改变我们对大脑的理解的伟大科技进步都是有可能实现的，因为与其他身体器官不同，大脑是靠电力来运行的。脑电波这个伟大的发现是如何取得的？谁是第一个发现脑电波的人？是什么让这些人大胆地认为电磁波可能会从人的头部发射出去？他们以为自己发现了什么？其他科学家对此做何反应？为什么发现人类脑电波这件事多年来一直是个秘密？为什么大多数人不知道是谁发现了脑电波？为什么这项工作没有获得诺贝尔奖？科学与世俗在有关大脑的问题上一直纠缠不清，我们只有厘清这些纠葛，才能找到前面那些问题的答案。

每当科学得以突破并开创新的领域时，奇怪的现象总会使人们感到困惑并引发争议。但是，我写这本书并非要论证我的观点，而是想和读者分享科学探索过程中那些令人振奋的事物，希望读者有切身的感受，就像通过在该领域工作的神经科学家的眼睛直接看到一样。我希望为读者提供最新的科研成果（其中有一些尚未发表），并让读者形成自己的观点。当然，我会把事实与夸张区分开——大众媒体对脑电波的炒作既浮夸又肤浅。我会科学地解释什么是脑电波，它有什么用，关于脑电波我们知道什么，以及我们还不知道什么。我将带你走访世

界各地的实验室，向你介绍进行这项研究的同行，让你了解我们所掌握的数据，让你自己学习并得出结论。毕竟，这就是科学——一个发现的过程。不过，我们首先要回顾一下历史，去寻一寻“电动大脑”的根。

第一部分

发现脑电波

我们绝大多数人都想对尸体进行防腐处理，以保留其生前的样子，虽然这对于埋在黑暗的地下6英尺深的尸体来说毫无意义。然而，那些愿意将尸体献给解剖学家和医学生的人知道，他们的尸体完全是无用的，只不过是虫子的食物，但他们尊重肉体存在的意义，它是一个存放灵魂的神圣的容器。他们献出尸体以挽救其他生命，训练医师，并让科学家深入了解人体这台奇妙的机器。他们是勇敢的普通人，我们每个人都所拥有的生命和健康都应该归功于他们。

第1章

心灵的电波

一名15岁男孩的头部遭到枪击——历史没有记下该事件的细节，但它的结局却改写了历史。因意外枪击而留在男孩脑中的子弹无法通过手术取出，这造成他一侧身体瘫痪，并终身被眩晕折磨。男孩虽幸免于难，但枪伤使他缺了一块颅骨。后来，他被送往德国耶拿的一家精神病院。他的医生汉斯·伯格想要的正是这样一个病人。让伯格医生感兴趣的不是这名当时已经23岁的男子的精神状况，而是他头上的那个弹孔。

透过颅骨

1902年11月，伯格迫不及待地让人将这个年轻人带到精神病院底层的实验室进行单独研究。该男子是否以为这是某种针对他的治疗方法，我们不得而知。现在我们知道的是，伯格医生（他于1919年成为该精神病院的负责人）并没有把所有人的生命都视为同样神圣的。

那个年轻人按照指示坐在椅子上，瘫痪的手臂悬在一侧。他感觉到被人从身后揪着头发，听到剪刀的咔嚓声。他听见水声和木杵撞击陶瓷杯发出的空洞的声响。过了一会儿，他的脑

袋就被涂上了肥皂沫，散发着浓烈的辛辣气味。满是泡沫的剃须刷让他觉得无比温暖。伯格医生用剃刀一下一下慢慢地剃掉了年轻人的头发，然后用毛巾擦干他的脑袋。伯格特别留意头部伤口周围的区域。那里由于缺失一块颅骨而留下了一个形状不规则的洞，只有薄薄的皮肤和疤痕组织覆盖在上面。

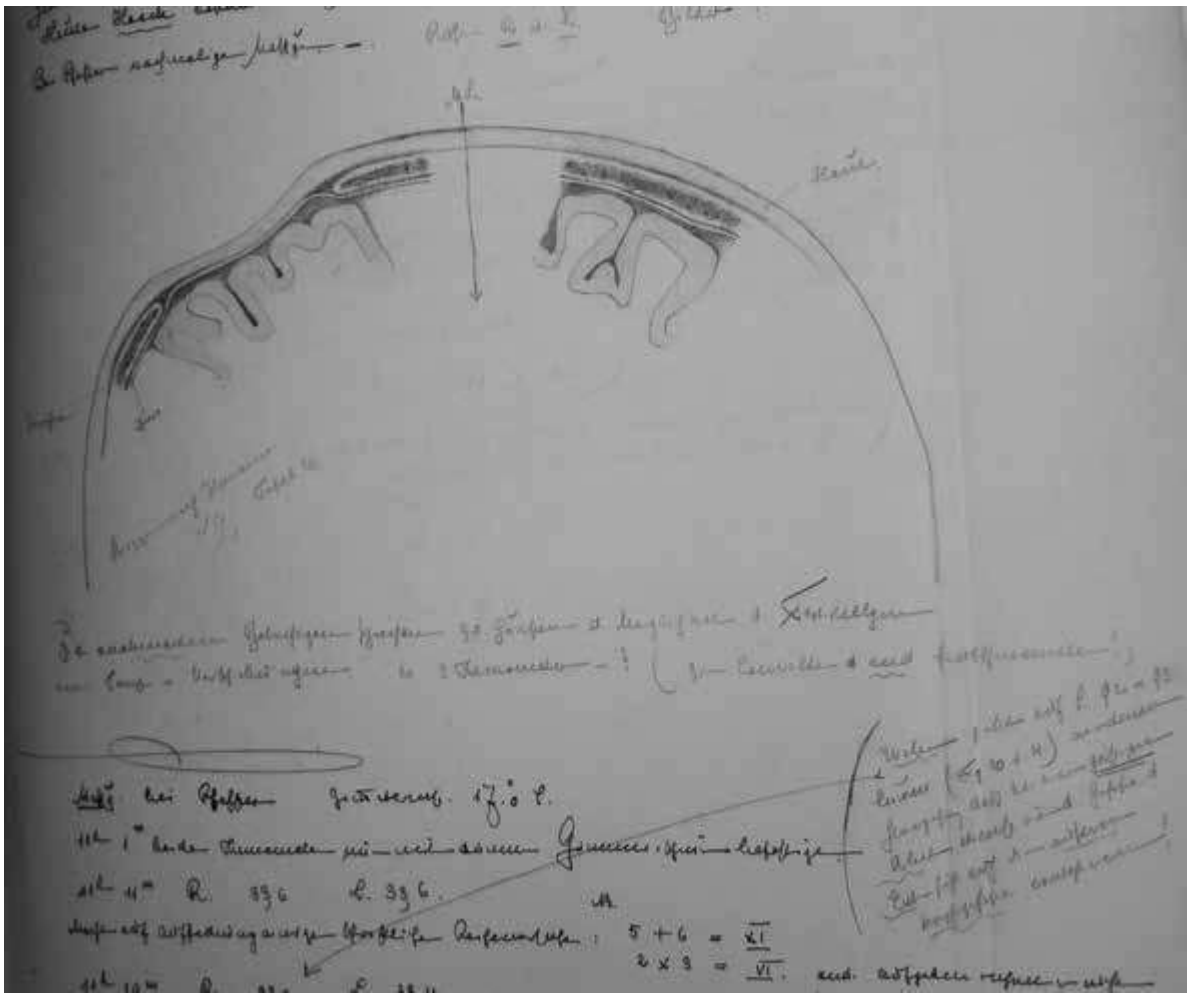


图1 汉斯·伯格的实验记录本记载了他在20世纪初所做的关于精神能量和身体能量之间关系的实验。在伯格的患者中，有的颅骨缺损了，缺损的部位仅被一层皮肤覆盖，这使伯格能够监测大脑随着感觉刺激、药物、体位和情绪的改变而产生的容积变化

伯格医生在这个洞上安装了一个用古塔波胶（一种天然橡胶）做成的样子很奇怪的帽盖，并将帽盖连接到充满液体的橡胶管上。这套装置类似于压力计，可以用来测量大气压力的变化。伯格医生小心地把橡胶管和帽盖上的接头连上并密封好，以确保不会泄漏。管子的另一端与旁边桌上的一个设备连接，这个设备的滚筒上悬挂着一根锋利的金属笔。帽盖和橡胶管连接好以后，只要缓缓转动滚筒，金属笔就会在滚筒带动的炭粉纸上画出一道细细的白色痕迹。

当血液被泵入黏稠的脑组织中时，大脑会稍微膨胀，然后又略微回缩，就像气喘吁吁的狗的胸部一样。这个年轻人的大脑随着心跳的节律而膨胀和收缩，橡胶管内的液体也随着头部伤口处的微小压力变化而上升和下降。同时，它们所连接的记录设备通过微微颤动的金属笔在滚筒纸上留下了锯齿状的、间隔规律的纹路。伯格目不转睛地盯着这些波浪线——多亏这个缺了颅骨的“窗口”，伯格才可以观察到大脑的脉动——这使他兴趣盎然。

伯格医生并没有为这个年轻人提供治疗，他的目的并非要了解患者的病情，也并非要缓解他的精神或神经功能障碍。伯格的兴趣在于检验他自己的一个理论，即人的心理状态与大脑内部的物理过程之间会产生相互作用。在那个时代，人类心理的起源和机制以及一般的心理功能仍然是个谜。因此，伯格的理论的确具有革命性的意义。

尽管年轻人的大脑搏动与他的心脏搏动同步，但是大脑搏动的幅度却时强时弱。伯格认为，这些振幅的变化与大脑组织

正在进行的思想和情绪活动有关。他把这些观察结果在笔记本上记录下来，之后在1904年的专著中发表。[\[1\]](#)这种大脑搏动会受各种药物和身体姿势变化（坐、站立或头部向一侧倾斜）的影响，这些都不足为奇。对于伯格而言，更有意思的是，他发现，大脑搏动形成的波浪线也会因思索、情绪和感觉输入的变化而改变。除了这名年轻人，伯格还在其他归他管理的患者身上，利用各种刺激方法和认知方面的测试做了类似的实验：他让患者伸出舌头，然后把糖水、柠檬水或奎宁（味道非常苦）滴到他们的舌头上，以刺激味蕾；他还用含有各种刺激性物质的棉球凑到他们的鼻孔下，或者让他们闻装有胡椒粉或其他香料的小瓶；他用一支很细的画笔在患者的手、胳膊和脸颊上轻轻画线。做每个实验的时候，伯格始终盯着那条在滚筒上画出的波浪线，观察受试者脑部随血流进出而产生的膨胀和收缩。通常，伯格施加的这些刺激会扰乱大脑搏动的正常节律，这让他更加相信，难以捉摸的心理活动（例如味觉、嗅觉和触觉的体验）与生物和物理过程之间是会产生相互作用的。



图2 汉斯·伯格使用体积描记仪研究一名颅骨缺损患者的脑容量波动

伯格怀疑人类的情感也是以身体作为物质基础的，因此，他相信这个脑容量监测装置（或称体积描记仪）可以记录喜悦、悲伤或恐惧所引起的反应。人类的情感只能在人类身上进行研究，伯格正是要利用这名年轻人的大脑来检验他的理论。他悄悄地走到这名男子坐的椅子后面……突然开了一枪。枪声震耳欲聋。自从头部遭受枪击以来，这名男子再也没有听到过这种声音。此刻，这名可怜的年轻受害者立刻陷入惊恐和休克的状态。伯格看到强烈的恐惧心理状态导致脑循环迅速减少，这令他激动万分。他在1904年和1907年出版的两部专著中分两部分详细介绍了他的发现。这两部专著的题目都是《精神状态

的物理表现》（*Über die Körperlichen Äusserungen Psychischer Zustände*）。[\[2\]](#)

此后，伯格继续对脑压变化进行研究，并将研究领域逐渐扩展到大脑的电活动。他是第一个进行人类脑电图（EEG）实验，第一个发现并记录人类头部发射出的电波的人。他所开创的技术和方法让科学界第一次看到人类思维运转的过程。

伯格的发现具有如此重大的意义，你一定会认为他的名字将被写进教科书吧？但是相反，他始终是个像影子一样模糊的人物。为什么？很不幸的是，用患者进行实验的做法在伦理上是令人难以接受的，这使伯格在那个时代的精神病学研究领域中很难出人头地。那么，汉斯·伯格是谁？他是如何取得这个举世震惊的研究成果的？

耶拿之旅

我去了德国耶拿市，想亲自找找看，一个世纪前在这里工作过的伯格可能还会留下点儿线索。耶拿经历了两次世界大战的蹂躏，后被苏联划归民主德国。柏林墙倒塌后，联邦德国和民主德国最终恢复为民主的、统一的德国，这是20世纪最重大的事件。从那以后，耶拿便开始衰落。历史是由人书写的，会随着政治变革而扭曲，而重建历史真相必不可少的天然和人工物证很容易随着时间的流逝而散落、丢失或遭到破坏。伯格是一个谜。我希望能够亲眼看一看他生活和工作过的地方，以便更好地理解脑电波这一大脑基本特征的发现。

一座中世纪的石头教堂数百年来被煤烟熏得发黑，像玛雅人的庙宇一样被枯萎的藤蔓缠绕着。在教堂后面的一片空地上，我发现了一座坟墓，它乍一看只不过是一个长满常春藤的绿色凸起。大树遮挡了阳光，坟墓四周环绕着常春藤和蕨类植物，粗纹花岗岩墓碑上面刻着伯格的名字，短短两个日期就概括了他的生平。铭刻在石头上的字被漆成黑色，与灰色的墓碑形成对比。在墓地的一片寂静中，伯格仿佛变得越来越清晰和真实，而不再是一种历史的抽象。他，作为人类一员的汉斯·伯格，以及他的妻子和儿子就被埋葬在我面前的这片土地下。伯格的儿子是一名士兵，第二次世界大战时在苏联战死，当时距伯格逝世只有几个月。

我离开墓地，步行到附近的弗里德里希·席勒大学的解剖大楼，与神经解剖学家克里斯托夫·雷迪斯及其同事、历史学家苏珊·齐默尔曼见面，前者同意将我带到汉斯·伯格工作过的精神病院。在大学走了一小段路后，我们来到了一栋现在以伯格的名字命名的建筑。那是一栋被刷成黄色和红色的三层砖砌建筑，天窗从高耸的屋顶凸出。那栋楼正在翻修，没有人居住。外面的门有两扇朝外敞开着，门前是伯格医生的半身像。冰冷的石头雕像跟伯格那一本正经且严肃的容貌很吻合。



图3 汉斯·伯格在德国耶拿的坟墓。他与妻子乌尔苏拉和儿子克劳斯埋葬在一起。墓地离伯格工作的精神病院（他就是在那里发现了人类脑电波）不远

伯格在这里工作了30年，致力于寻找肉体（大脑）和精神（精神能量）之间的边界。他孜孜不倦的探索最终指引他从研究血流和脑容量，逐渐拓展到研究一种在20世纪初令科技和社会都发生翻天覆地变化的新能量——电。伯格开始投身科学研究时，还身处一个靠马车运输、靠煤气灯照明的时代，到他结束科学生涯的时候，世界上已经有了电灯、汽车、飞机、无线电和原子裂变。在此期间，对人类大脑的研究也从哲学和心理学的根基上生根发芽，逐渐形成了一门新的学科。这门学科把

显微技术应用于细胞分析，把生物化学应用于化学成分分析，并使用电子设备研究神经组织的电学特性——这就是后来众所周知的神经科学。

在弗里德里希·席勒大学的另一栋建筑中，我们找到了伯格的一些旧笔记本。它们用特殊的速记符号书写，刻画精确，但即使对于我的德国土生土长的东道主来说，这些符号有时也让人颇为费解。当我翻阅其中一本页面发黄、书脊破裂的笔记本时，我发现了一些记录，这表明伯格还用了另一种方法来检验人的心理功能与物理和化学过程有相互作用的假设。根据热力学定律，能量所做的功总是伴随着温度的变化。伯格由此得出结论，即精神活动的变化（他称之为精神能量）也应该与大脑温度的变化相关。[\[3\]](#)伯格用细小的钢笔字在笔记本上画了草图，记下图表数据和注释。这是另一个实验的场景。

他的受试者还是医院的患者。这次是两名女孩，一个是12岁的癫痫患者，另一个是11岁的头痛症患者。外科医生在患者的颅骨上钻了一个洞后，伯格将直肠温度计插入女孩的大脑。根据铅笔画的解剖图来看，温度计插入的深度为21毫米。然后，伯格继续进行类似于体积描记的实验——给孩子施加各种感觉刺激，但这次是观察温度的变化。伯格1910年在专著《脑部温度的研究》（*Untersuchungen über die Temperatur des Gehirns*）中展示了他的研究成果。[\[4\]](#)

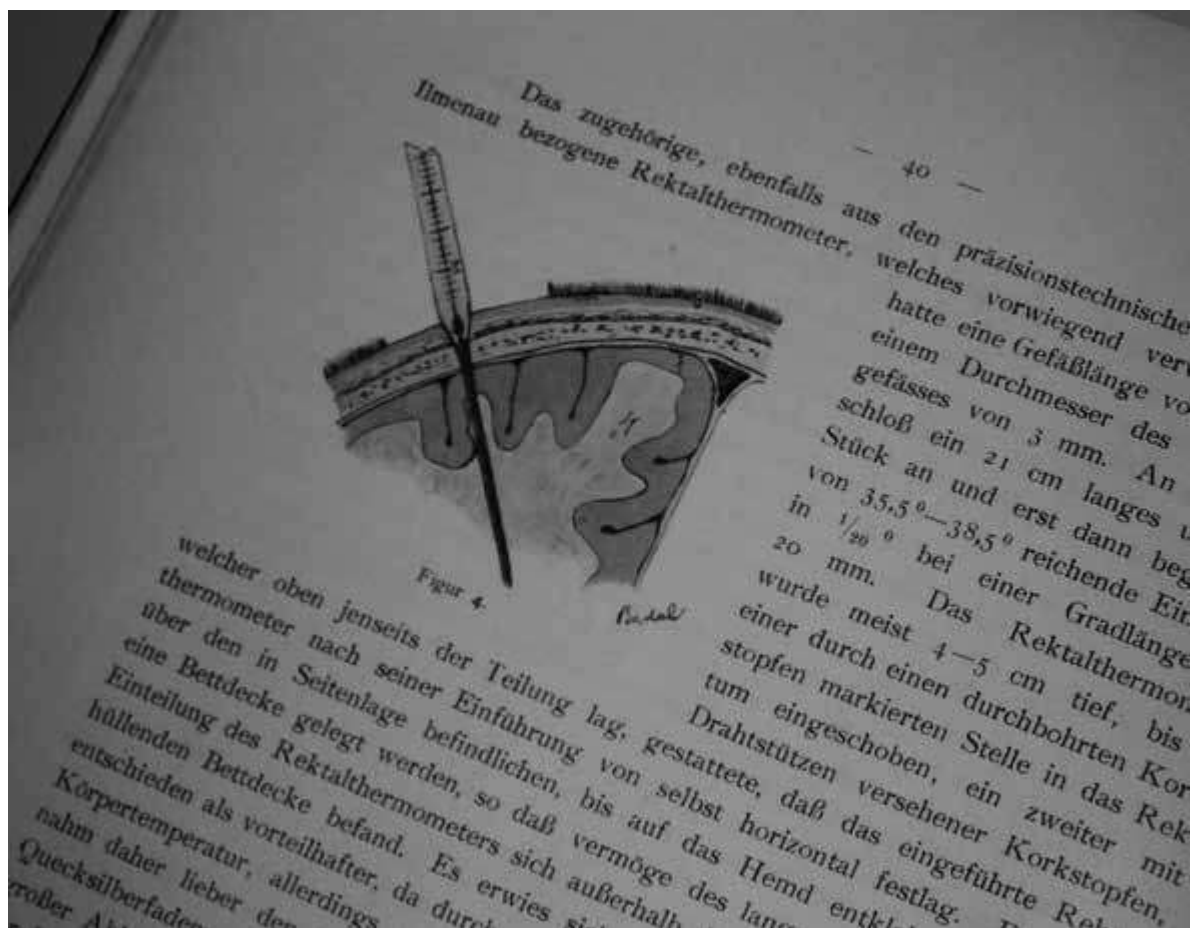


图4 汉斯·伯格认为，根据能量守恒定律，心理功能和情绪相关的精神能量变化应该伴随有温度的变化。为了检验这一理论，他把直肠温度计插入人和猴子的大脑中进行测量，并且记录下了大脑由于精神活动和感觉刺激而产生的温度变化

克里斯托夫·雷迪斯和我在精神病院的旧址附近找到了一处建筑，那里曾经是伯格的实验室。20世纪20年代初，伯格在这座附属建筑的地下室秘密工作，开始组装记录人脑电活动的设备。下班后，他独自工作，将精神病患者和自己的儿子作为实验对象。他的儿子克劳斯，就葬在我刚刚探访过的那座坟墓里。克劳斯后来也成为一名医生，但在1941年11月的战斗中阵亡，年仅29岁。

历史悠久的实验室大楼现在是一个小型图书馆。这里是人类第一次瞥见脑电波的地方。毋庸置疑，脑电波是近100年来电生理学领域最重要的发现，但这里却没有一块纪念牌匾。不过，图书管理员知道这座建筑的历史。他告诉我们，伯格的实验室就在地下室，但没有任何东西存留下来。图书管理员给我看了几张褪色的照片，上面是伯格摆满稀奇古怪的电子仪器的房间，还有头部连接着电线的第一批脑电图受试者，可惜伯格的所有设备都没有被保存下来。

伯格一直在用体积描记仪研究脑搏动，不过在研究脑电波的时候，他用其他设备取代了体积描记仪。在患者头部颅骨缺损的部位，他用镀锌的针头刺穿皮肤，让针头触及大脑表面。他将针头连接到仪器上以检测电流，但收集到的信号微弱且不稳定。对于他来说，很难区分检测到的信号究竟是代表流过大脑的电流，还是由于大脑搏动、心跳或肌肉的细微运动而引起的电噪声。他记录了部分患者大脑的信号，它们的波动似乎与患者的呼吸无关。这些患者包括一名40岁的男子。这名男子在5个月前刚做了切除脑瘤的手术，但伯格还是通过手术在颅骨上留下的孔把电极插入他的大脑。这名男子在伯格做完实验几周以后死亡，他的大脑出现了水肿，这让人们高度怀疑该男子是否为正常死亡。

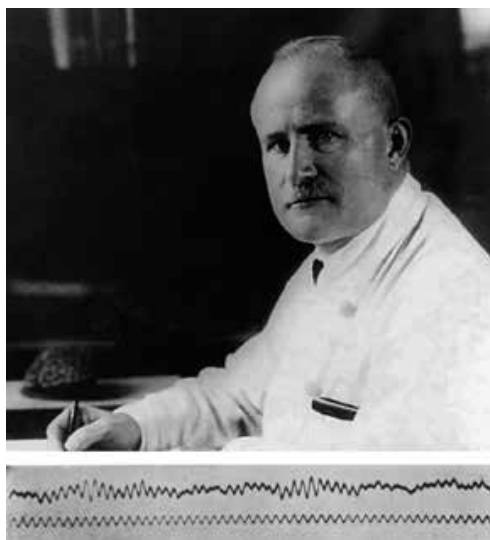


图5 汉斯·伯格医生在精神病院工作期间做了关于脑电图的研究，他是第一个记录人类脑电图的人。他于1927—1938年担任德国弗里德里希·席勒大学校长。在伯格的肖像下方是他发表的第一篇关于人类脑电图的论文中的一幅脑电图

又过了一段时间，伯格的仪器有了改进，技术也提高了很多。1924年的一个晚上，在同一栋楼内，他将两大片金属箔电极连接到12岁的儿子克劳斯身上，一个电极放置在后脑勺的头皮上，另一个电极放置在额头上，然后他把微弱的电信号输入一个被称为检流计的装置中。电信号转换为移动的光束，并在滚动通过设备的感光纸上记录下电压的波动。当克劳斯闭着眼睛坐着时，光束描绘出的脑电波图形是一种低频而缓慢的振荡。但是，当伯格要求克劳斯睁开眼睛时，克劳斯的脑电波突然变成一种不规则的高频率振动。伯格在患者、他的儿子甚至他本人身上进行了大量实验。结果表明，这些振荡的电波会因心理活动、觉醒、注意和感觉刺激等因素而改变，而且患有癫痫等疾病的人的脑电波形态会变得混乱。因此，这些脑电波不仅可以让人们深入了解大脑的运作机制，重新给出思维的定义，而且有助于医生诊断大脑疾病、判断智力水平和人格特

质。但是汉斯·伯格并不满足于此，他希望脑电波像无线电广播一样发挥更多作用。

二元论哲学认为，身心是相互独立且截然不同的。二元论者认为，我们的想法和情感等心理现象在本质上是非物质性的，但是心灵、精神或思想与物理世界会有相互作用。对于当时的大多数科学二元论者而言，这只不过意味着身体刺激会产生精神活动，而头脑中的情绪或想法由大脑产生。然而，伯格将思维描述为一种力量——一种可以与物质相互作用的“精神能量”。他认为，根据能量守恒定律，产生心理活动的精神能量改变时，必然会引起大脑中其他能量形式的改变，例如温度和电。他认为，在人脑中检测到的电波是精神能量和身体能量进行转换时产生的像涟漪一样的反射波。令人惊讶的是，伯格的发现证明，人脑的能量可以穿透颅骨进行传播，而且可以在远处被检测到。

在曾经是伯格实验室的这栋楼里，图书管理员检索到一部伯格于1940年出版的题为《灵魂》（*Psyche*）的专著。^[5]伯格在扉页上用他特有的小体字题了词，但是除了每个句子开头的华丽大写字母外，其他文字潦草到几乎难以辨认，题词的最末更是变成了歪歪扭扭的细线。在这部专著中，伯格将心灵感应和精神能量联系在了一起。他描述了自己1893年春季担任德国军队的志愿者时的经历，相信自己用心灵感应与姐姐进行了交流。在一次训练中，伯格的马突然直立起来，他摔到了地上。这时，一架马拉的炮车正好疾驰过来。幸亏驾车的炮兵及时刹住车，只是让年轻的伯格受到了惊吓，但没有受重伤。^[6]就在同一时刻，伯格的姐姐在遥远的家中，突然强烈地感到他

处于危险之中。于是，她坚持要父亲立即给伯格发电报。这一事件给伯格留下了深刻的印象，从而改变了他的职业生涯。战争结束后，伯格放弃了学习天文学的计划，转而投身医学。^[7]多年以后，他在这部专著中写道：“这是一个自发的心灵感应的例子。在生命危在旦夕时，我想到了死亡。这种想法被传递了出去，而与我特别亲近的姐姐则充当了信息的接收者。”^[8]

即使在他那个时代，伯格的研究也是游走在超自然心理学领域的边缘，因此，他被科学家同行们质疑也就不足为奇了。而且几乎可以肯定，这是他的工作难以成为主流的原因之一。他发现在人的头上放置电极就可以接收从大脑放射出的电波，这证明了精神能量与大脑物质之间的确存在相互作用。人们理所当然地认为，一个人不可能知道另一个人的想法，但是，伯格在一个与世隔绝的精神病院独立完成的工作颠覆了这一认识。这是有史以来第一次，人们有可能直接监测人脑的认知和情绪状态。有了这一成就，人类通过脑电波远距离传播思想将不再是神话。

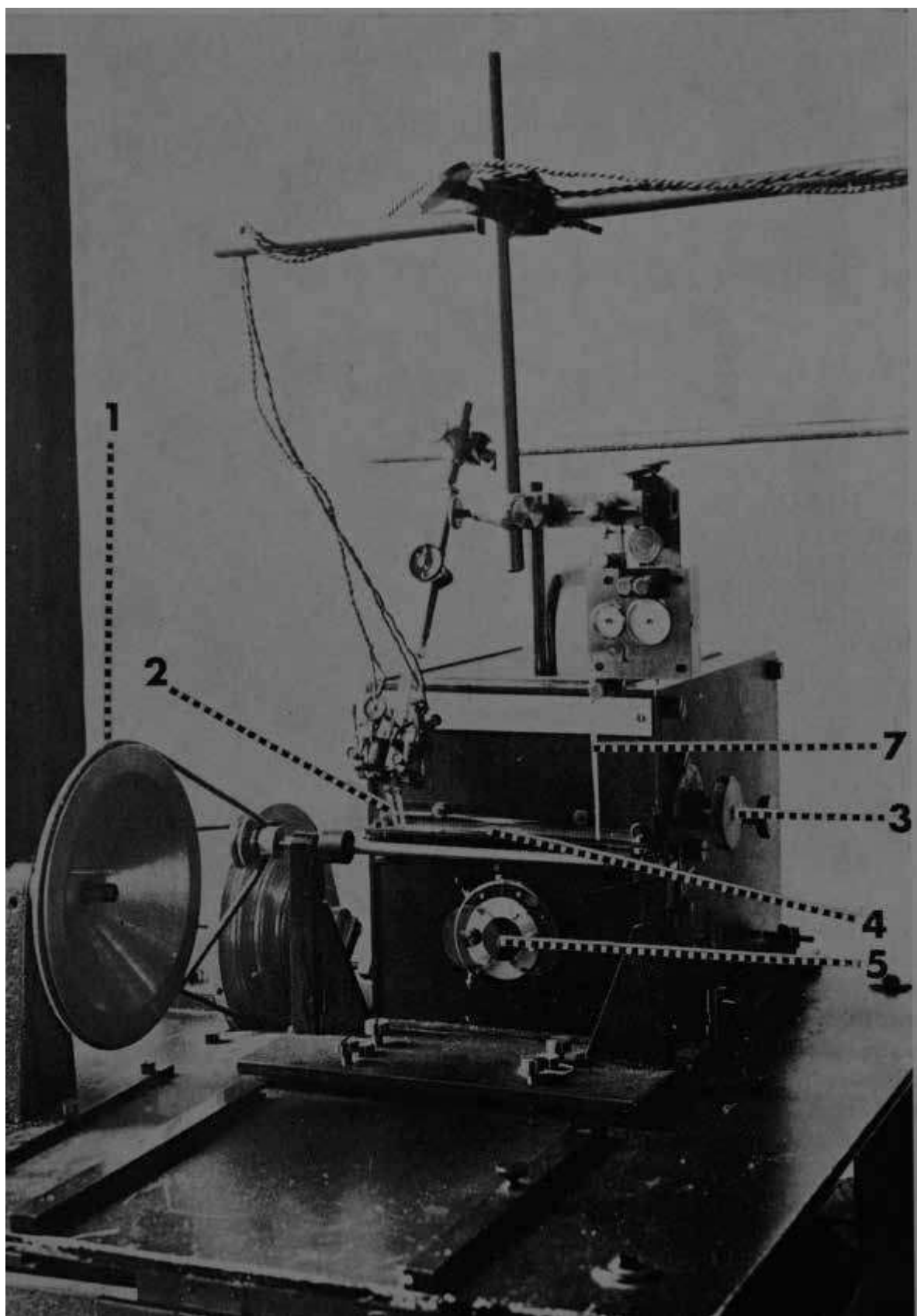


图6 汉斯·伯格首次用艾德曼扭弦检流计 (Edel mann string gal vanometer) 在实施了颅骨环锯术 (出于医疗目的而在颅骨上钻孔) 以及颅骨受伤的患者头部记录脑电波。这些患者颅骨缺损的部位只覆盖薄薄的皮肤和疤痕组织。检流计中的扭弦通过透镜 (2) 聚焦到一卷溴化银相纸 (4) 上。相纸由皮带传动装置 (1) 卷起来, 并显影形成照片。计时标记由音叉 (7) 产生。音叉以10赫兹的频率振动, 由发条装置维持其振动。后来, 人们在这套装置的扭弦上安装了一面小镜子, 可以将光束反射到卷过的感光纸上

1924年, 伯格在他位于耶拿的地下实验室中首次记录了人类的脑电波, 但他没有把他所做的事情告诉任何人。直到1929年, 他在《精神病学》杂志上发表了一篇标题为《人类的脑电图》(“Über das Elektrenkephalogramm des Menschen”) 的论文, 才算与世人分享了这一令人震惊的成果。^[9]但当时很少有科学家注意到这一点。科学家们仍在使用还原论的方法: 他们在显微镜下检查脑细胞; 把不同的功能仔细地定位到某个大脑区域; 研究单个神经细胞如何产生和传输电脉冲……人们在了解大脑的细胞基础和生理机制方面的确取得了长足的进步, 因此, 伯格对大脑整体的活动进行记录的方法在当时顶尖的科学家看来没什么意义。他的工作看起来确实有点儿奇怪, 因为大多数头皮电极记录到的电压波动是由肌肉活动产生的电干扰, 而不是由大脑产生的脑电波。(当肌肉收缩时, 它们产生的放电电压要比神经元产生的电压大得多; 肌肉细胞比神经细胞大, 而且位于连接传感器的皮肤下面, 距离传感器更近。)

伯格发表的论文表明, 他是最先发现人类脑电波的人, 但他根本不愿意分享他的工作成果。他更多只是在保护, 而不是促进这项研究。“好几个学期以来, 我一直是他的助教, 但我从没见过他在课堂上提过自己的研究领域。”鲁道夫·莱姆克

说。莱姆克于1931年加入精神病院，担任伯格的助理。[\[10\]](#)

“直到1931年，在耶拿医学学会的一次会议上，我才知道伯格发表了一篇有关脑电图的论文。”莱姆克回忆说，“我清楚地记得，听他演讲的同行对这个东西不是很感兴趣。”[\[11\]](#)

但是，正如1931年1月4日刊登在《巴尔的摩太阳报》上的一篇报道所示，伯格石破天惊的发现并没有逃脱大众媒体的关注：

[汉斯·伯格测量到了！]他发明了一种仪器，可以记录大脑在精神活动过程中释放的电。几年前，意大利神经学家费迪南多·卡扎马利博士也进行了类似的尝试，他用一种经特殊设计的无线电接收器来接收被认为是来自大脑的电波。这是“脑电波”的一个真实例子。但是，当卡扎马利要把这些“脑电波”和血流、心脏跳动、肌肉收缩等其他重要活动产生的脉冲区分开时，他遇到了困难。而伯格教授认为，他已经通过一种特殊的装置克服了这一难题。该装置使用附着在人体上的电极来接收所谓的大脑脉冲，而不是依靠伴生的无线电波。[\[12\]](#)

约翰·雷蒙德·斯迈西斯编辑过一本名叫《科学与超自然感知》（*Science and ESP*）的书，里面有一篇西里尔·伯特写的文章，他在文章中介绍了费迪南多·卡扎马利做过的实验：记录一个大脑将信息直接传递给另一个大脑时产生的“电磁波”。伯特指出，伯格认为他发现的脑电波可能是心灵感应的方式，因此卡扎马利做了在人与人之间进行脑电波传输的实

验，但是他并没有得到电磁辐射能产生这种传输效应的实验证据。因此，伯特得出结论：心灵感应的传播是通过精神能量的传递而发生的。[\[13\]](#)

20世纪20年代和30年代，人们对心灵感应和其他形式的超自然感知（例如透视和预感）的兴趣达到了巅峰。著名的普利策奖得主、《屠场》（*The Jungle*）一书的作者厄普顿·辛克莱就是超自然感知的坚定信徒。1930年，他自己出版了《心灵无线电》（*Mental Radio*）一书，详细介绍了他关于心灵感应的诸多实验，其中大部分是他与妻子合作完成的。无线电是“咆哮的20年代”的潮流。新兴的无线电技术和脑电波的结合迅速在社会上激起一阵狂热，但是就像1929年飙升后旋即崩溃的股市一样，这阵热潮也转眼间归于沉寂。

20世纪20年代到30年代，费迪南多·卡扎马利一直在罗马大学神经精神病诊所任职。与此同时，伯格在耶拿研究脑电波，但卡扎马利的研究重点是形而上学和心灵感应。卡扎马利不是把电极安装在头皮上，而是在一个人的头部附近放置一个无线电接收器来监视微弱的脑电波辐射。[\[14\]](#)卡扎马利在著名无线电工程师欧金尼奥·格莱塞塔的帮助下制造了复杂而精密的电子设备。卡扎马利投身于他的“心灵无线电”研究长达10年，并于1925年首次发表了发现。他的大部分研究成果是用意大利语发表的。[\[15\]](#)此外，还有一篇1935年用法语发表的论文。[\[16\]](#)因此，对于那些不懂这些语言或对超自然现象不感兴趣的主流科学家来说，卡扎马利的研究仍然晦涩难懂。

卡扎马利选择了他认为可能具有最强的心灵感应能力的人作为受试者——艺术家和音乐家。其中有一个受试者既是画家，也是登山爱好者。这个男人被领进一个陌生的房间，房间的墙壁上铺满了铅片，一只红色的灯泡发出诡异的微弱的光。铅墙对屏蔽人造无线电波和交流电产生的电磁干扰是必不可少的，这样，微弱的脑电波辐射才有可能被检测到。

在房间的角落里放了一个金属架，上面装有电子放大器、整流器和一个频率被调到300兆赫的振荡器——这些就是无线电接收器的所有组件。墙边有一张沙发，画家被要求躺在上面并全身放松。卡扎马利将一个偶极天线放在距离画家头部约2.5英尺[\[17\]](#)的位置，信号会通过电线输入无线电接收器，然后胶片上就会记录下振荡器的输出。

卡扎马利请画家闭上眼睛，把脑袋放空。当画家保持放松的被动状态时，卡扎马利做了几分钟的记录。这位画家的登山经历不仅局限在意大利，他还到过安第斯山脉，也就是在那里发生过一场悲剧。正因如此，卡扎马利特意要求画家回忆他在巴塔哥尼亚的特罗纳多山遭遇的痛苦经历——在险象环生的山上寻找遇难同伴的尸体。此时，原先在记录胶片上绘出规则条纹的光束突然中断了，片刻后又恢复了之前的轨迹。卡扎马利得出的结论是，那些能让情绪激动的想法从受试者的大脑传播到了无线电接收器中，并中断了信号——这是心灵感应具有物理基础的有力证据。

在科学出版物数据库PubMed的所有记录中，你找不到任何文献引用过卡扎马利的研究。尽管神经科学家基本上都不认识

卡扎马利，但在意大利，他却因为对超自然现象的研究而声名鹊起。1937年，费迪南多·卡扎马利与乔瓦尼·斯凯皮西和埃米利奥·塞尔瓦迪奥共同创立了意大利形而上学协会，以支持超自然现象的实验研究。[\[18\]](#)该协会一直维持到今天，并出版了《玄学：意大利超心理学杂志》（*Metapsychic, the Italian Journal of Parapsychology*）这本刊物。它由卡扎马利于1946年创刊，不公开出售，仅限于协会成员内部交流传阅。[\[19\]](#)

为了避免将这一段神秘的插曲视为历史的异端，我们有必要认识到，科学就是在探索未知的世界，因此难免被真和伪的潮流裹挟，不时地陷入科学与伪科学纠缠的旋涡。2018年12月在博洛尼亚举行的意大利形而上学协会年度会议上，威廉·吉罗尔迪尼是发言人之一，他介绍了关于心灵感应和脑电图的研究。[\[20\]](#)

科学研究被庸俗化及其所产生的轰动效应可能会让科学界内部的人对科研成果本身的看法产生扭曲。这样的教训古已有之，但时至今日依然没有什么改观。1930年7月，在德国报纸上发表的一篇文章中，作者用更加狂热和浮夸的语句向公众吹捧伯格的发现：“今天，大脑书写的信号对我们来说还是神秘的；明天，我们可能就可以解读神经系统病变和精神疾病；后天，我们就要开始用脑电波写生平第一封诚实的信了。”[\[21\]](#)

达成这样的成就一直是人类一个不灭的梦想。当我在2019年撰写本书时，有报道称脸书的创始人、亿万富翁马克·扎克

伯格和电动汽车公司特斯拉的创始人埃隆·马斯克正在投资一些项目，它们旨在从人的脑电波中提取思想和情感，并将其通过互联网进行传播，然后直接下载到其他人的大脑，让人们实现单靠意念就可以操纵电子设备和计算机的梦想。[\[22\]](#)在本书的第三部分，我们将拜访世界各地的研究人员，他们也在利用脑电波来研究“读心术”和“心灵感应”这类交流方式。这样你就可以进行对比，看看大众媒体上的报道和它们背后的现实。与伯格所处的时代相比，这个话题现在已经不那么容易引起轰动了。

1929—1938年，在将近10年时间里，伯格每年发表一篇或多篇关于脑电波研究的论文，但全部14篇论文的标题都是一个——《人类脑电图》，并且都发表在同一刊物——《精神疾病与神经疾病案例》（*Archiv. für Psychiat. Nervenkr*）上。这种特殊的做法进一步掩盖了他的实验结果。科学家发表论文的标题通常会对所要报道的新发现做一个简要的描述，但是在伯格这一系列论文的标题中，人们找不到有关他的实验发现的任何线索。任何科学家如果对伯格在实验中发现的东西感兴趣，都必须仔细研究这14篇标题相同的论文，就好像要找一份隐藏在不是3扇，而是14扇相同的门背后的奖品一样。伯格的这些论文也很难被引用，因为这14篇论文仅在出版年份上有所不同。他用这种方式掩盖他的发现，将它们隐藏在主流科学界的视线之外，并尽量减少这些发现所产生的影响。

自1924年首次记录人类脑电图以来，伯格的工作几乎一直鲜为人知。直到1934年，诺贝尔奖得主埃德加·道格拉斯·阿德里安注意到脑电活动现象，并且在他与布赖恩·哈罗德·卡

伯特·马修斯合著的论文中重复了伯格的实验。这篇论文发表在著名的科学杂志《大脑》（*Brain*）上。[\[23\]](#)在那篇论文中，阿德里安和马修斯含蓄地嘲讽了他们所谓的“伯格波”的重要性，其中有一张图把阿德里安在睁眼和闭眼时脑电图的变化与龙虱在有光照和黑暗条件下产生的电波变化进行了比较——结果龙虱产生的电波与诺贝尔奖得主产生的脑电波相同。[\[24\]](#)此后，阿德里安没有继续从事脑电图的研究，整个医学领域对伯格记录脑电图的兴趣仍然不大。

“伯格每年在耶拿医学学会上都会发表有关他研究的演讲，但并没有得到几个人的赏识。”鲁道夫·莱姆克说，“1934年，在德国明斯特市召开的神经学家和精神病学家会议上，伯格做了关于脑电图的报告，也没有引起他所期望的反响。”[\[25\]](#)神经科学家和历史学家玛丽·布拉齐尔在她1961年出版的优秀学术著作《脑部电活动的历史：第一个五十年》的最后一行中写道：“伯格（对人类大脑电活动的研究）在头50年里所做的贡献只有他自己知道，那就是成功记录了人的脑电图。”[\[26\]](#)

离开伯格做出重大发现的地方之后，我跟随克里斯托夫·雷迪斯来到校园里另一个图书馆的地下室。该图书馆刚刚收到了汉斯·伯格的一位前同事的捐赠，捐赠物品包括他保存下来的伯格的信件、照片和便笺，这些物品还没有被图书馆登记入册。我拿起一张照片，上面是人类最早的脑电图的真实记录，这正是近一个世纪前汉斯·伯格手里拿着的那份记录。

伯格在这家精神病院几乎与世隔绝地工作了近30年。这家医院距离他的墓地仅几步之遥。伯格看起来并不像是那种能够取得重大科学突破的人。为什么当时没有其他人从事这一研究呢？[\[27\]](#)是什么促使伯格做了那些奇怪的实验，并让他走上了发现脑电波的道路？

为了追溯伯格的灵感来源，我要去意大利都灵的山区。19世纪80年代，即伯格进行实验的近20年前，安杰洛·莫索第一个记录了人脑活动。但是，莫索记录的不是大脑的电活动。他开发了后来伯格所使用的体积描记法，并用它来监测大脑中的血流如何因劳累、呼吸的变化以及其他一些为适应都灵周围山区的高海拔环境而发生变化。伯格关于脑容量变化的早期研究直接借鉴了莫索的研究和方法，伯格在1901年出版的第一本著作中高度赞扬了莫索。[\[28\]](#)现在的fMRI（功能性磁共振成像）就是利用大脑局部区域的血流变化来定位某些神经活动发生的位置。它的起源也可以直接追溯到安杰洛·莫索，而莫索只能使用19世纪科学家的原始方法进行类似的研究。

我去莫索位于都灵的实验室这一路并非一帆风顺。

肿胀的大脑

在意大利阿拉西奥一个沿海的村庄，我为了躲避冰冷的雨水而逃进了罗姆咖啡屋，欧内斯特·海明威曾经在这家咖啡屋的墙上潦草地写下他的名字。在墙上留名这个具有传染性的习俗让我无法抗拒。前一天，我去西班牙萨拉戈萨的一家医院。

当我滑入fMRI设备的扫描舱，看着机房天花板消失时，几周前母亲的责骂声又在我的脑海中回荡：“为什么要弄坏你的脑子？你的脑子好得很。”

这是个好问题。

当我读到两位西班牙研究人员——放射科医生尼古拉斯·费耶德博士和神经学家佩德罗·莫德雷戈博士——的论文时，一切就开始了。[\[29\]](#)在对一个珠穆朗玛峰登山探险队的13名队员进行的一项研究中，他们发现返回的队员除了一个人外，其他所有人都有物理性脑损伤，这在fMRI检查时清晰可见，就像在X射线下看到的骨折一样。这些损害是永久性的。



图7 安杰洛·莫索（1846—1910），意大利科学家，最早使用仪器进行脑功能定量研究的人之一。他使用体积描记法测量颅骨缺损患者的脑容量波动，这给汉斯·伯格的研究带来了启发。莫索特别感兴趣的研究是高海拔对大脑有什么影响。他在意大利都灵的罗莎峰建立了实验室，以进行这项研究

登山者都很清楚，高海拔地区的稀薄空气会造成所谓的高原脑水肿（HACE），从而引起严重的疾病。在极端的情况下，它甚至会导致大脑损伤和死亡。人体对缺氧的反应会增加毛细血管内部的压力，导致液体渗到周围的脑组织中，使大脑肿胀并造成灰质被颅骨压迫，从而对性命构成威胁。这正是安杰洛·莫索所研究的现象，并且在未来它将给伯格的工作带来启发。莫索将他的压力测量装置安装在颅骨缺损的人的头上，在他们攀登罗莎峰到达15 000英尺时（莫索在那里建立了一个山顶实验室，研究高原反应和适应高海拔条件的生理机制），对他们大脑水肿的程度进行了监测。

海拔对某些资深登山者的认知能力会产生持续的影响，这在登山者中是广为人知的——他们通常用“嗨”来形容这种感受——但大多数攀登高海拔山峰的登山者认为，如果一个人能正确地自我调适，就可以避免严重的高原反应和脑损伤。实际上，有关高原反应最早的报道来自僧侣，他们跟随西班牙征服者在16世纪深入安第斯山脉。机敏的僧侣们注意到，将军们出现了严重的高原反应，但他们手下的士兵却安然无恙。他们很快意识到，这是因为将军骑马很快就登上了山峰，而士兵们徒步攀登，速度慢得多。（除了服侍上帝，僧侣既是历史学家，又是酿酒大师；他们的所有活动都产生了持久的影响。）

登山的速度要慢，因为身体适应的过程很缓慢。身体需要足够的时间来适应高海拔处的低氧环境，这涉及一系列神奇而复杂的生理变化。周末的勇士们不但付钱给导游，让他把包扛到山顶，还为自己因缺乏耐心而导致的严重疾病付出了高昂的代价。适应是需要时间的。虽然费耶德和莫德雷戈的论文中的

受试者对高海拔的反应比较温和——只是出现头痛、恶心、疲劳这些几乎所有登山者都能忍受的症状，没有人出现更严重的症状——但这些都是高原脑水肿的标志。简而言之，他们根本不知道自己的大脑受到了伤害，更不用说永久伤害了。西班牙研究人员随后研究了那些攀登较低海拔山峰（比如颇受欢迎的阿空加瓜山、乞力马扎罗山和勃朗峰）的登山者。尽管这些攀登较低海拔山峰的登山者中出现脑损伤的概率较低，但还是在一些登山者的脑部MRI（磁共振成像）检查中发现了同样的损害。同样，他们中没有一个人出现高原脑水肿症状，但是，他们的大脑在高海拔条件下肿胀的程度足以造成伤害。

作为神经科学家，同时也是登山爱好者，我发现费耶德和莫德雷戈的论文特别有意思。我意识到，对于那些关注登山对大脑有什么影响的普通读者而言，在这个主题上可以大做文章。我与《户外》杂志的一位编辑接触，并提出要亲自去攀登“美国的勃朗峰”——雷尼尔山。当然我会格外小心，让自己先适应环境，并在登山前后都进行MRI检查，以证明登山是安全的。他们很喜欢这个提议，于是跟我约了稿。[\[30\]](#)

这个时候，我遇到了一个问题：没有科研机构愿意跟我合作，给我做大脑MRI检查，哪怕我自己掏钱去医院或者是到大学的实验室去做。仅仅因为研究某种损伤的课题很有意思，就要把一个人置于可能受伤害的环境，很显然，这样做在伦理上是说不过去的。

我的计划陷入了停滞。后来，我忽然想到应该与费耶德博士联系。最初，就是他对登山者的大脑进行了研究。“没问

题！”他同意了，“诊所下班后，你就可以过来，等我们为您做完MRI检查，大家一起出去吃饭。”

这就是我决定要做的。我没有“以前”的MRI图像，但是至少我会看到多年的登山经历是否损害了我的大脑。在去萨拉戈萨的路上，我要顺道去意大利都灵，看看安杰洛·莫索进行脑肿胀研究的实验室，那是汉斯·伯格的灵感来源。不过，首先我要去爬山。

登上雷尼尔山

我和我的登山搭档、我儿子迪伦会合了。每一个登山季都会有数百名业余登山者尝试征服雷尼尔山，因此，它是调查高海拔疾病的理想之地。雷尼尔山坐落在华盛顿州西雅图，是一座被冰川覆盖的活火山，从海平面陡然上升到海拔14 410英尺。大多数登山者从这里开始攀登。像勃朗峰一样，人们经常选择在周末去尝试攀登雷尼尔山，但周末的时间太短，无法让身体在高海拔地带充分适应稀薄的空气。不过，迪伦和我会多花点儿时间做前期的适应准备。

登山季节已经结束，在雷尼尔山上的登山队和大多数其他登山者已经为即将来临的暴风雨做好了准备。即使有可能出现雪盲，迪伦和我还是决定在帐篷里等待恶劣天气过去，风暴一过就准备登顶。我带了脉搏血氧仪来监测我的血氧饱和度和心率。在攀登过程中，有一段时间特别难熬，我的血氧饱和度迅速降至75%，而心率飙升至每分钟165次。（提高心率是人体为

了弥补氧气供应减少的生理机制之一。)我见过自己的血氧饱和度降到过更低的水平，那是在攀登厄瓜多尔海拔19 347英尺的科托帕希峰时。还有记载说，攀登珠穆朗玛峰的登山者的血氧饱和度甚至会降到50%左右。在正常海拔下，可能只有在重症监护病房才能看见人的血氧饱和度那么低，并且从医学角度来看，血氧饱和度一旦低于90%，就应该引起重视。但是在高海拔地区，血液中的血红蛋白与氧气之间结合的紧密程度变化（当然还有其他一些因素的变化）使我们的需氧量减少了。这证明，如果适应时间足够长，人体自身可以解决很多问题。

当然，所有的生理指标都无法排除登山带来的某些风险。在下山的路上，我的冰爪在冰冻的山坡上被绊了一下，于是我头朝下摔了下去。当你听到某个登山者丧生的消息时，通常是这样的：一个人尖叫着从冰冷的斜坡上滑下来，接着飞过悬崖，坠入裂谷间的深渊（我讨厌裂谷），或者被一块突出的岩石挡住，就像砸在汽车挡风玻璃上的虫子一样被摔成肉泥。我跌跌撞撞地从山峰上摔了下来，知道自己唯一的逃生机会是将冰斧凿入地面，阻止身体呈指数级加速下滑（科学家都知道这个加速度是32英尺/秒²）。一旦速度太快，你将无能为力——你的斧头会从冰面滑过，如果达到每小时60英里[\[31\]](#)的速度，冰面将变得像混凝土一样坚不可摧，而你的搭档只能眼看着你掉下去……就是这样。除非像迪伦和我当时那样拴在一起，在这种情况下，你的伙伴还可以尝试用自己的斧头来固定住绳子的另一端，然后把你猛地拽住……不过，一旦失败，他将和你一起摔死。我在不断加速下滑的过程中意识到了这种状况，于是，我迅速弓身一挺，把自己调整到适当的位置（头部朝

上），使劲地朝山坡挥了一下冰斧。我的冰斧劈进了冰面。我用左手抓住斧头，用右肩猛撞，将斧刃推入冰雪中，在山上拖出一条沟。我下滑的速度慢了下来，最后终于在撞到迪伦之前停了下来。而他已经摆好姿势，像保罗·班扬一样举起斧子做好挽救我们两个人的准备了。

这是一段难忘的回忆——缺氧难受，坠崖更糟糕。

回到西雅图的海滨，富含氧气的空气像奶油一样浓稠，我感觉自己可以像蛙人一样在里面游泳。由于我的身体在山间稀薄的空气中是超负荷运转的，现在一切回归正常，我感觉自己像超人一样有无穷的体力和精力。这种感觉只会持续几天，却令人印象深刻。不难看出，住在都灵的群山之中的莫索为什么会心动要去研究海拔的影响了。

登山结束后，我去了意大利，看看莫索工作的地方……然后去西班牙检查我的脑袋。

登山者的大脑

詹尼·洛萨诺博士在生理研究所（Istituto de Fisiologia Umana）外面等我，那是都灵大学的一幢建于19世纪的石头建筑。洛萨诺是一个温柔的男人，当时就在安杰洛·莫索曾经用过的办公桌上工作。巨大的橡木桌子和皮革座椅摆在一间宽敞的办公室中央。办公室的拱形天花板足足有20英尺高，地上铺的是拼花木地板。今天是星期六，大楼里空无一

人。洛萨诺带我去见他的同事达里奥·坎蒂诺，后者是研究莫索的专家，专门把莫索的著作由意大利语翻译成英语，并在互联网上发布。

坎蒂诺本人既是科学家又是登山者，是一个瘦小精干的男人，有着旺盛的精力和开朗的性格。他还是个挑剔的科学机械仪器收藏家。他带我一个房间一个房间地参观：其中一个房间里是他收藏的电子显微镜——从20世纪50年代最早的设备（类似于鲍里斯·卡洛夫的老电影中的东西），到最新的模型。另一个房间里摆满了各式各样的印刷机，盒子里堆满了配套的铅字。坎蒂诺收藏的印刷机数量如此之多，以至于都没有地方存放了，有些只好放在户外，用篷布遮盖，以免受到侵蚀。

“为什么要收藏印刷机？”我问他。在回答我的问题之前，坎蒂诺想了足足有一分钟，他说也许是因为印刷机记录并翻译了信息和思想。这正是他本人所做的工作——既作为一位科学家将数据转化为见解，又作为一位译者将莫索的著作翻译成英语。坎蒂诺走到一台巨大的印刷机旁，挑选了一个有我手掌大小的铅字，送给我留作纪念：一个“？”。这是一位科学家送给另一位科学家最好的礼物了。（我妈一定会觉得，将其作为我目前工作的标志性符号也挺合适）。

接下来，洛萨诺和坎蒂诺带我去图书馆。在那里，安杰洛·莫索的笔记本和仪器被井井有条地分类摆放在一个仅对学者开放的房间内。涂了炭黑的记录鼓由黄铜发条装置带动旋转，测量血压和脑容量变化的装置摆放在桌子上或存放在展柜里。有一些照片记录了受试者在做脑容量测量时的样子，还有一些

照片记录了莫索做的其他各种高海拔对人体影响的实验。当我拿起一张发黑的纸条时，我的手指上弄上了一层淡淡的炭黑。纸条上描绘了精细的振荡痕迹，这些痕迹是人类大脑活动最早的记录之一。我心里明白，我现在有幸触摸到了这样两份前所未有的历史记录（一份是监测血流的记录，另一份是监测电信号的记录），每一份记录上都留有一个世纪前创造它们的科学家的指纹。

我从都灵出发，开了几乎一天一夜的车才到达西班牙的萨拉戈萨。其间我想绕道去瑞士，但是却在法国某个地方转弯时走错了路。萨拉戈萨健康保健医院的放射科医生尼古拉斯·费耶德博士个子很高，头发灰白，态度随和友善，还挺有幽默感。他的同事海梅·梅德拉诺博士在我们交流时给我们当翻译。费耶德问了我登山的情况，然后笑着说：“要想成为一名登山者，必须要有一点点疯狂。”这意味着我的情况还不算太坏。

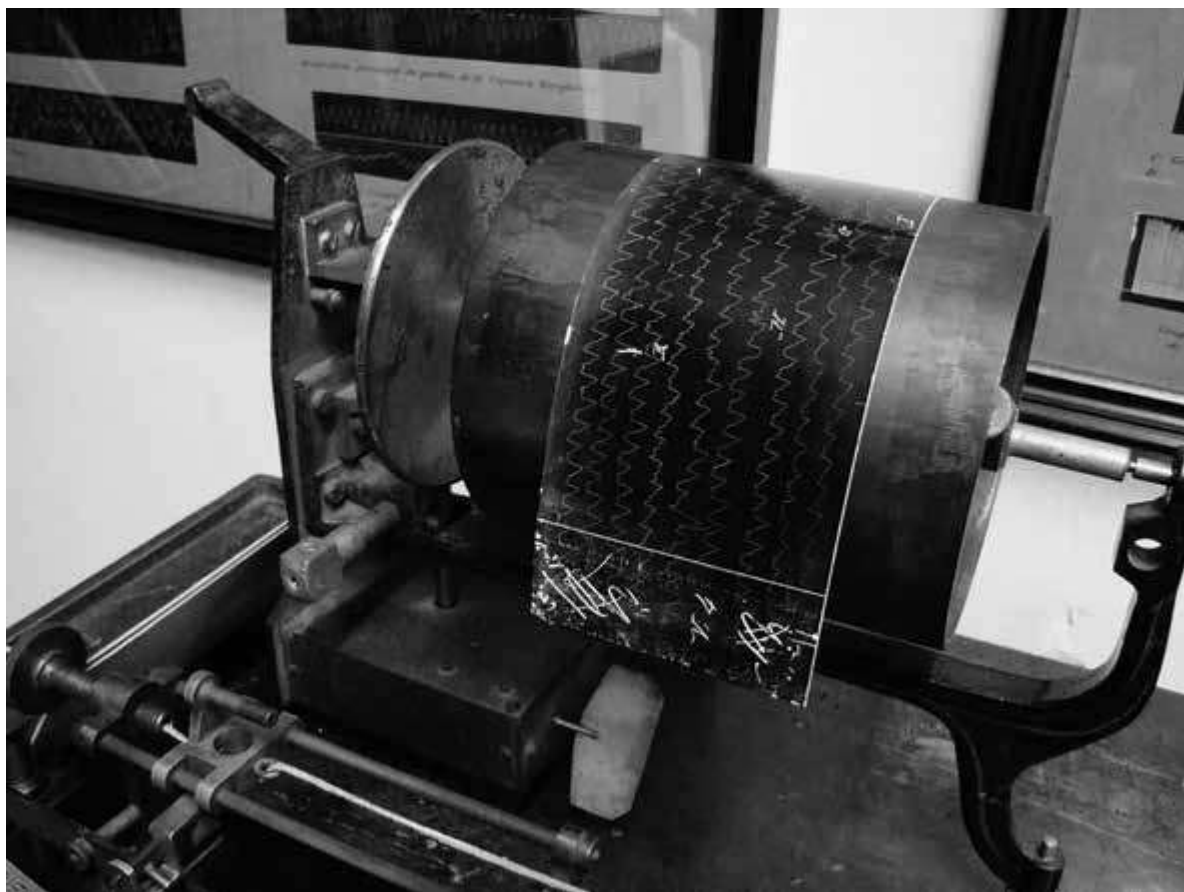


图8 安杰洛·莫索用于研究高海拔对大脑和身体影响的仪器。体积描记仪有一个缓慢旋转的滚筒，上面是涂过炭黑的纸。仪器检测脑容量波动时，会用一支笔把纸上的炭黑刮下来进行记录

MRI控制室旁边就是费耶德博士的办公室。我们走了进去，他取出一些资料，桌子很快就被登山者的大脑扫描图像铺满了。

他指着黑白胶片上的一张大脑断层图说：“额叶萎缩。”前额的后面就是前脑的位置，在那张扫描图像中，它像干果一样枯萎了。这是在前额叶切除术中被切断的大脑区域。做了这种手术的患者智力没有受损，但某些高级执行功能，如注意力和计划能力——换句话说就是“空间感”——出现了缺陷。我曾带着对临床的兴趣，在已发表的论文中仔细研究过类似的图

像，但是这次的情况有所不同——每一幅图像上都标有一个登山者的名字。

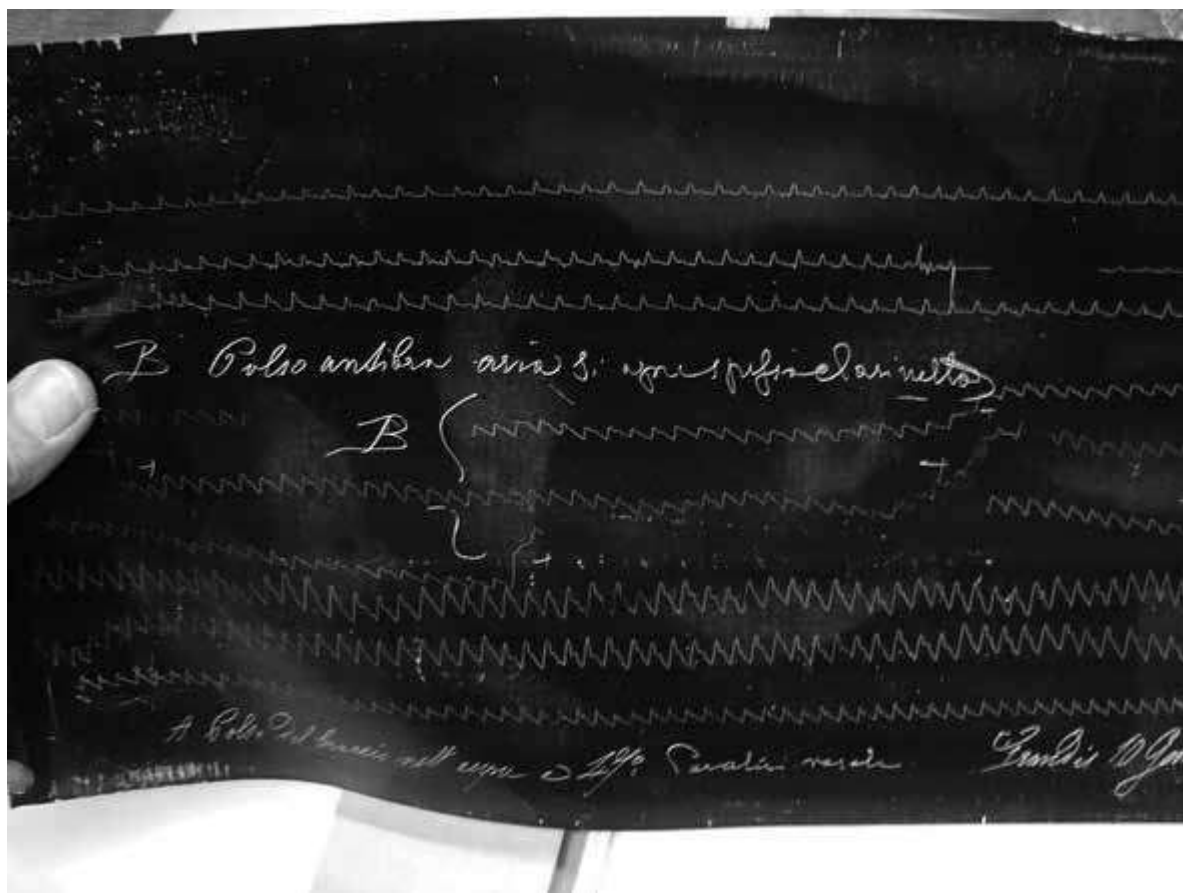


图9 作者手上拿的是安杰洛·莫索使用体积描记仪做的一份生理反应记录

“何塞遭受了最严重的伤害。”费耶德说。他递给我一张照片，上面是一个穿着红色冲锋衣的健壮男子，站在阿空加瓜山白雪皑皑的山坡上，他的黑发随风飞扬，胡须浓密，皮肤被高海拔的太阳晒成了古铜色。他看起来健康又坚毅，是我很乐意交往的那种人。费耶德接着说：“当何塞回来时，他不记得自己的电话号码了。他的妻子要他去商店买一条面包，他居然忘记他为什么去商店，然后空着手就回家了。”

“看到前脑的病变了吗？”费耶德指着另一张扫描的片子问我。这类病变是由于脑部小范围的卒中或出血引起的。它们在登山者的整个大脑中都有分布，表现为MRI上的亮点，但在白质区域尤其常见。白质就像棒球的核心一样，由数百万条紧密连接的神经束组成，这些神经束将大脑表层的神经元连接成网络。大脑中任何地方的白质损伤都可能造成严重而广泛的后果，就像挖掘机挖断1码[\[32\]](#)长的电缆就可以造成整个城市大面积停电一样。白质似乎特别容易发生缺氧，因为它的毛细血管供应很少。

11名登山者的脑部MRI结果都显示他们的菲-罗间隙（Virchow Robin Space，脑部血管与周围脑组织之间的空隙）扩大了，这是由于脑部肿胀和脑组织缺失造成的。不一定非得医学院毕业的人才能看懂这些东西：它们看起来像是散布在大脑深处的白色霰弹枪眼。菲-罗间隙是我们每个人都有的结构，随着我们大脑的衰老，这些空腔也在扩大。虽然老年人和阿尔茨海默病患者大脑中普遍存在多个菲-罗间隙或菲-罗间隙显著增大，但是这种情况在二三十岁（也就是这些登山者的年龄）的健康人身上并不常见。

后来，我在MRI控制室遇到了科拉尔·罗娅。令我吃惊的是，她告诉我说自己是攀登乞力马扎罗山（海拔19 340英尺）的受试者之一。所有7名登山者都出现了典型的轻度高山病症状，但是没有人发生高原脑水肿或其他严重的高原反应。他们在登山之前进行了MRI检查，都没有发现异常，但是在返回后，其中一个人的大脑菲-罗间隙扩张了。在参加攀登勃朗峰（海拔

15 781英尺)测试的另外7名业余登山者中,其中一人回来后出现了皮质下病变,另有两人脑部出现多个扩张的菲-罗间隙。

这些参与实验的登山者大多是医生和工程师。我问费耶德,他们当中有多少人在看到自己大脑受损后停止了攀登。“他们都还在攀登。”费耶德告诉我。

“我们的目的不是阻止人们去攀登,”莫德雷戈博士强调,“而是想让人们意识到危险,并且做好适应环境的准备。”

现在轮到我了——揭晓的时刻。我脱到只剩内裤,穿上绿色的纸靴子和浅蓝色的医用罩袍。这身装束让我立刻感到脚瘫手软。

助手伊丽莎白·佩雷斯微笑着递给我一对柔软的粉红色耳塞,让我在做检查的时候塞进耳朵,以阻挡MRI机器扫描时产生的噪声。一条狭长的检查台从一台像工业干衣机的巨大机器里伸出来,我像法老的木乃伊一样直挺挺地躺在上面。她根据照射到我头上的光网调整我头部的位置。接着,她将一個看起来像棒球捕手面罩的东西拉到我的脸上,然后启动机器,将我头朝前地送入扫描舱。如果这是詹姆斯·邦德的电影,那么现在就应该亮出Q博士的发明,搂住佩雷斯女士的腰,然后和她一起逃出生天……但是我勇敢地将幽闭恐惧症压制住了,尽量不动肌肉,不然会使照片模糊。

检查开始了。即使用了耳塞,我还是觉得震耳欲聋,听起来就像在我的颅骨内施工——锤子和电锯的声响中间穿插着奇

异的电子游戏的音效。我忽然觉得这可能不是一个好主意。他们把我的大脑像切薄火腿片那样一层一层进行扫描时到底会看到什么？登山留下的伤疤根本不算什么——如果他们发现我有致命的脑瘤怎么办？霍默·辛普森的头部X射线图像令人印象深刻，他的脑壳里只剩下一个核桃大的脑子，这让我心神不宁。

通过挂在我眼睛上方的镜子，我可以从两只绿色靴子之间看到医生和技术人员。很少有人愿意把头伸到机器里，因为从我这个角度来看，这台机器就像个断头台，所以，镜子的作用是减轻患者的压力。他们聚在玻璃窗后面，盯着计算机屏幕上的扫描结果，但是我没有戴眼镜，无法分辨他们究竟是看到了什么令人困惑的东西，还是看到了什么见不得人的东西，正在拿它开玩笑呢。

检查结束后，我焦急地走向围着计算机屏幕的那群人，他们可比把我送进扫描舱的医生热心多了。屏幕上正在显示我的检查结果。

费耶德博士说：“完全正常。”他和梅德拉诺博士快速浏览着屏幕上的图像。这些断层图像从头部一侧开始，一层层进入皱褶的大脑皮质，然后抵达大脑的核心部分，最后从头部的另一侧穿出来。而与此同时，我真正的大脑正高速运转，试图完全理解这些图像。费耶德博士停下来，指着一张图像说：“一个很小的菲-罗间隙。”他上下拖动看了看，然后说：“还有一个。”

“完全正常，”莫德雷戈博士向我保证，“与您的年龄相符。”

见鬼！这意味着什么？

费耶德博士将我大脑的3D图像刻录到CD上，然后微笑着递给我，仿佛递给我一副算命用的塔罗牌。

纳粹和脑电波

汉斯·伯格是自杀身亡的。颇具讽刺意味的是，对于一位非常熟悉供血不足对大脑的致命影响的科学家来说，他选择了上吊。

伯格1919—1938年一直担任弗里德里希·席勒大学精神病院的负责人。后来，他被授予名誉教授并退休。退休后，他在新主管的领导下继续工作，直到1941年去世。鲁道夫·莱姆克是弗里德里希·席勒大学的教授，也是伯格的助手，他协助伯格记录脑电图。莱姆克在1956年写了一篇纪念汉斯·伯格的文章，发表在一份专门研究脑电图的科学期刊上。[\[33\]](#)“伯格不是希特勒的追随者，因此他不得不离开他所供职的大学。”他写道，“没想到，这让他深受其害。”

在20世纪30年代的德国，凡是不与纳粹结盟的各界领袖都遭到了清洗。伯格是残暴的纳粹政权的又一牺牲者。他在耶拿医院里上吊自杀，用的是电线（这真是又一个讽刺）。人们认为，伯格自杀是为了表达他对纳粹的反抗，或者是纳粹对他的报复使他彻底绝望。在接下来的50年里，这种观点在神经病学界得到了回应和强化。在2001年出版的一本书中，癫痫和脑电

图专家伊莱·戈尔登松博士写道：“伯格表现出对政权的不满，他们对他进行了报复。1938年，他被纳粹官员羞辱，他们突然将他解职。”^[34] 2005年，该领域的另一位开拓者恩斯特·尼德迈耶写道：“伯格与纳粹政权的关系不好，他被授予名誉教授，这让他自己也感到非常突兀。”^[35]

众所周知，纳粹恐怖的“最终解决方案”最早就是用在精神病院。“种族卫生”的概念包括清除社会中所谓的“劣等人”，因为这些人不利于保持基因的纯洁性，所以要么阻止这些人繁衍后代，要么直接消灭他们。精神病院在20世纪早期这场优生学的疯狂中冲在最前面。早在纳粹主义兴起之前，强迫有精神疾病或身体残疾的人绝育已是当时精神病院里的普遍做法。希特勒的首个灭绝方案就是对精神病人实施安乐死。纳粹分子使用的杀戮方法和工具（包括毒气室），是在德国的精神病院开发出来的，用在精神病患者身上，后来被用到死亡集中营进行大规模种族灭绝。优生运动和种族卫生政策标志着纳粹主义的兴起，而伯格此时担任精神病院的负责人，正好处在风暴的中心。

战争结束后，耶拿被苏联接管，但战争期间在大学和医院中的许多负责人战后仍在担任要职。这种情况妨碍了苏联调查前纳粹分子或保存资料，导致真相被掩盖。由于许多记录丢失或毁坏，那些幸存者撰写的历史往往是一种混杂了当时的伤感情绪的叙述。正如我访问耶拿时遇到历史学家苏珊·齐默尔曼时发现的那样，这种叙述可能准确，也可能不准确。

伯格的同事鲁道夫·莱姆克实际上是纳粹党成员，不过他在战后的回忆录中认为伯格是反对纳粹的。莱姆克是纳粹党的成员，从遗传健康法庭（Erbgesundheitsgericht）成立之初就在那里工作。1934年1月1日，德意志帝国设立了遗传健康法庭，对精神和身体不健全的人进行强制绝育。“不健全”这一定义非常广泛，它包括残疾人、精神病患者和酗酒者等。[\[36\]](#)到1945年5月，约有35万人通过遗传健康法庭被强制绝育。[\[37\]](#)战后，莱姆克留在耶拿，他的活动以及他反犹太人和反同性恋的恶毒观点被当局掩盖了起来。1945—1948年，莱姆克成为精神病院的负责人。他荣耀的学术生涯一直持续到他1957年去世，即他发表为汉斯·伯格进行粉饰的回忆录的第二年。

伯格对发生在自己身边的种族清洗、安乐死和强制绝育的暴行做何感想呢？齐默尔曼向我展示了伯格的笔记本中的一些评论。这些评论抱怨说，希登塞岛是波罗的海最受欢迎的旅游目的地，但现在岛上的犹太人太多了，已不再适合度假胜地的美名。这些是他的个人笔记，由此可以大致推想出他的真实情感，但究竟是什么原因促使他在自己的实验笔记本中写下这样的反犹主义评论呢？是不是他正在拿一个犹太教徒做实验？我们不知道。但是带着种族主义的嘲讽就摆在那儿，是他亲手写的。

齐默尔曼告诉我：“伯格是1934年党卫军的支持者。”“支持者”本身不是党卫军成员，但他们通常会以经济贡献来换取成员资格。“许多人想成为党卫军成员，以图在职业上得到升迁。”齐默尔曼解释道，“伯格是不是纳粹党的成员还未

可知，他有可能不是这个纳粹核心组织的成员，但当时有许多小型纳粹组织。纳粹团体并非只有一个。”

齐默尔曼抽出一沓她从民主德国的斯塔西（民主德国的国家安全机构）警察那里获得的档案。她递给我一份法院诉讼程序的官方文件。这份文件记录了伯格参加过那些因被要求绝育而提出上诉的人的听证会。其中包括一名18岁的智障人士、一名精神分裂症患者、一名癫痫患者、一名61岁的酗酒者和一名智力和记忆力均低下的妇女。这名妇女在丈夫的陪同下出席听证会，她的丈夫恳求法院不要对他的妻子实施绝育手术。伯格否决了所有上诉，判处他们所有人强制绝育。

我问：“他有没有可能是为了维持自己的地位而被迫服从纳粹？”

“不可能。”齐默尔曼回答道。伯格于1938—1939年在上述法庭的健康与遗传疾病（强制绝育）部门任职。“那是他退休以后发生的事。”她说，“那个时候，他不再有与纳粹或绝育组织合作的职业上的动机。”

伯格与另一个纳粹党成员卡尔·阿斯特尔也过从甚密。阿斯特尔因追求所谓“种族纯洁”的所作所为而声名狼藉。阿斯特尔于1939年成为弗里德里希·席勒大学的校长，并努力将该大学塑造为党卫军机构的典范。他还是纳粹“健康事务部”的负责人和“种族卫生研究所”所长。1941年3月4日，伯格应阿斯特尔的邀请，继续从事在医院监督强制绝育的工作，并写道：“我很乐意再次担任弗里德里希·席勒大学的顾问，对此我深表感激。”但是伯格生病了，无法工作，仅两个月后，他

自杀身亡。伯格患有慢性抑郁症，他感觉身体不适，后来在医院里做检查时自杀。齐默尔曼说：“尸检没有发现伯格有患病的迹象。”1945年4月3日，卡尔·阿斯特尔也用枪结束了自己的生命。许多跟纳粹同流合污并在战争结束时才发现自己是失败者的人都是这个结局。

在我结束与齐默尔曼的交谈后，克里斯托夫·雷迪斯带我去了大学的解剖系，该系因其收藏的标本而著名。他打开门，然后我们走进一个房间，里面整齐地摆满了装着人体解剖标本的瓶瓶罐罐和陈列着人体骨骼的玻璃柜子。我惊奇地看到了各种各样被肢解的人体器官标本：女性生殖器官、剥了皮的勃起的阴茎、睾丸，以及从婴儿、儿童到成人的骨骼。房间里有很多装着胎儿的罐子，有些胎儿有严重的先天畸形，其中有一个双头的胎儿；还有头部被切开后各个部分的标本；有四肢、手掌、手臂和腿的标本，被剥去皮肤，露出肌肉和骨骼。

这些标本都是无价之宝，是人体解剖教学的重要辅助工具。我们需要为科学家和医生提供有关人体解剖学的培训，只有对人体有所了解，人们才能获得药物治疗和缓解痛苦的方法。不过，很难想象那些为了科学而将尸体捐献出来的人竟然那么慷慨，明明知道医学生会把他们切开，还愿意在死后让他们的肉体被肢解：每一根手指、每一个器官被一点一点地分割；他们的脸皮被剥去；为了展示大脑，他们的头被切成像火腿片一样的薄片；他们的生殖器被切开检查。

我们绝大多数人都想对尸体进行防腐处理，以保留其在生前的样子，虽然这对于埋在黑暗的地下6英尺深的尸体来说毫无

意义。然而，那些愿意将尸体献给解剖学家和医学生的人知道，他们的尸体完全是无用的，只不过是虫子的食物。他们尊重肉体存在的意义，它是一个存放灵魂的神圣的容器。他们献出尸体以挽救其他生命，训练医师，并让科学家深入了解人体这台奇妙的机器。他们是勇敢的普通人，我们每个人所拥有的生命和健康都应该归功于他们。

在我拜访期间，雷迪斯和齐默尔曼在刚刚发表的科学论文中说，他们发现弗里德里希·席勒大学收藏的解剖标本中有大约203具尸体来自1933—1945年被纳粹处决的囚犯；其他200具尸体是精神病院和养老院中被实施安乐死的患者；另有数十具尸体是在强制劳改营中死亡的人。[\[38\]](#)

“当时有人支持医院实施安乐死，因为解剖学家需要标本，他们欢迎这种尸体来源。”齐默尔曼说，“这也解决了纳粹处置尸体的问题。”

将人类的大脑捧在手中并进行解剖，我敢说任何人在这样做的时候总会想到死去的这个人。这是对一个人无私地把自己的身体奉献给科学时应有的神圣、庄严和感激之情。但如果所展示的解剖标本是来自一场谋杀的受害者，那么这件事就不是因不敬而让人感到厌恶那么简单了，它是人性的堕落。任何体面的科学家或医生都不会愿意参与其中的。雷迪斯和齐默尔曼揭开真相以后，所有被鉴定为来自劳改营的死者标本均从解剖展览室中被移除了，大楼外还悬挂了一块牌匾，以向这些死难者表达敬意。但是，由于解剖工作的性质，许多身体部位的标

本已无法追查到来源。于是，这些珍贵的藏品笼罩了一层永远都无法褪去的阴影。

同样，伯格的遗产也蒙上了一层灰色调。汉斯·伯格到底应该被认作领先那个时代一个世纪，努力尝试用原始设备来铸就知识上的伟大成就的拓荒者，还是为了解开精神和肉体的分界这个亘古之谜而不惜采用怪异的，有时甚至是残忍的方式和使用简单的设备（例如压力计、温度计和检流计）的科学怪人？

“他是天才还是疯子？”结束耶拿之旅时，我问一小群学者。他们当中的一个人回答我：“他疯了。”其他人没有发表任何意见。

他怎么能将直肠温度计插入年轻女孩的大脑呢？[\[39\]](#)他怎么能在病人苦苦哀求的情况下，还坚持判处他们强制绝育呢？漠视精神疾病患者的人权并非伯格或德国所独有，但无论发生在哪里，这种事情都是暴行。无论历史如何书写，伯格本质上就是个纳粹分子。但他也做出了重大发现，人类世世代代都因他的发现而获益，并能从中不断获得启发。这两个伯格都是真实的。

伯格和贝克

到目前为止，这个故事给人的印象是，伯格决定探索大脑中的电活动是天才的思想产生了飞跃的结果，但事实并非如

此。自18世纪以来，人们就知道信号可以通过生物电在神经系统中传输。不过，神经系统的工作原理以及电本身的性质在当时还是个谜，更不用说诸如思想之类的心理功能可以形成穿透人类颅骨的电活动波——而且是普普通通的可被识别的电波——的想法了。但是，伯格并不是第一个使用电极连接到电子仪器来探索大脑可能产生电能的人。实际上，就像他重复莫索监测血流的方法一样，伯格只是重复了别人曾经做过的事情——你可能从未听说过的一个人。

希特勒的黑名单

在许多方面，波兰科学家阿道夫·贝克与伯格正好相反。这两个男人都受相同的好奇心和激情驱使，也都被同一个邪恶的政权吞噬，但他们的命运却迥然不同——一个是帮凶，另一个是受害者。这两位科学家的命运因纳粹狂热的战争暴行而纠缠在一起，并因灵感而相互联系：贝克在波兰的工作启发了伯格在耶拿的秘密研究——探索人类大脑通过产生电磁能来运作的可能性。

19世纪80年代，脑科学家们专注于确定大脑的哪些部分执行特定的功能。第一种实验方法是切除实验动物脑组织的特定部位，并观察结果。这种方法在20世纪初就已被广泛应用。在许多情况下，这种方法很有用。例如，人们发现一侧大脑半球某些区域的皮质损伤会导致身体另一侧瘫痪，从而找到运动功能的定位，但有时这种方法无法提供任何线索。例如，早在20世纪20年代，美国心理学家卡尔·拉什利就训练大鼠跑迷宫，

然后系统地切除它们的一部分大脑，并让大鼠再次执行跑迷宫的任务，目的是探明记忆的存储位置。拉什利发现，大脑皮质的什么部位被切除似乎并不重要。经过数十年的研究，他最终放弃并承认失败。他于1950年得出的结论是，不可能在大脑的任何地方给“记忆痕迹”进行定位。[\[40\]](#)如今，我们在如何对心理功能进行大脑定位的方向上已经走了很长一段路，并且知道，“寻找特定心理功能在大脑中的定位”这个根本假设是错误的。尽管大脑的某些位置确实与具有特定功能的神经元群体相对应（例如，大脑的背侧与视觉功能相关，大脑皮质的布罗卡区与语言表达功能相关），但许多心理功能的完成，需要在大部分脑区的神经网络间进行广泛的信息传递。尽管如此，探索与特定的心理、运动或感觉功能相关的大脑区域和大脑回路这项工作依然非常重要，它不仅有助于我们理解大脑的工作原理，而且对于治疗颅脑损伤和进行神经外科手术也是必要的。



图10 波兰科学家阿道夫·贝克（1863—1942），他在1891年发表的博士论文中记录了放置在实验动物裸露的大脑和脊髓上的电极所产生的脑电波。贝克在第一次世界大战期间被俄国人囚禁了两年。第二次世界大战期间，纳粹分子要把贝克带到亚诺夫斯卡集中营，当时贝克就快要过80岁生日了。他吞下一颗氰化钾胶囊，结束了自己的生命

19世纪80年代，通过简单地破坏一部分大脑皮质来定位控制运动功能区的实验取得了丰硕成果，但是要确定感觉信息在哪里进行处理的问题却复杂得多。人们很早就知道，神经是通过电脉冲来传递信息的。19世纪发展起来的用于记录电信号的设备也为确定传递感觉信息的神经回路提供了一种新技术：在大脑的某个点上放置一个记录电极，来检测对感觉刺激的反应，就像电工用电压表探测电子设备的电路一样。

但是，相比电工使用电压表，19世纪后期的神经科学家所做的事情要困难得多。要知道，对神经系统电活动的所有开创性研究都远远早于电子放大器以及我们现在耳熟能详的任何电子设备的发明。这些实验是在用煤气灯和蜡烛照明的房间里进行的。那时人们使用的交通工具还是马车，更谈不上了解电的基本性质了。请想象一下，没有电气设备，只能用简陋的装置和厨房里可以找到的东西来记录实验动物大脑的电反应，你会怎么做？

当时，用于检测大脑和神经系统中电现象的最灵敏的仪器是弦线检流计。在弦线检流计中，一根磁化的针被一根细线悬在两个线圈之间。当电压通过电路时，针周围的电场会受到干扰，使指针略微偏转，就像指南针在靠近金属物体时那样。由于神经系统的电活动非常微弱，指针的偏转角度非常小，所以需要借助放大镜进行观察；但是，就像在演示PPT时使用激光

笔，手的轻微颤动会被激光笔放大一样，如果把一面小镜子固定在细线上并用一束光照射小镜子，那么指针的偏转就可以等同于镜子的反射光的偏转；这样一来，指针的偏转就可以被放大了。镜子将光束反射到一个刻度尺上，我们在刻度尺上可以容易地测量出指针的偏转，就像把孩子的身高画在门框上那样。因此，大脑和神经中的电活动强度不是以毫伏为单位记录的，而是以反射光束偏转的毫米数来度量。请注意，这束指示光不是激光笔。小镜子挂在优雅的抛光黄铜和木制装置内部，它反射的是火光。



图11 阿道夫·贝克在他的早期实验中使用魏德曼检流计记录了脑电活动。在此期间，出现过各种版本的检流计。这里显示的是达松伐耳检流计。请注意悬挂在扭弦上的那面圆形小镜子，它可以将光束反射到刻度尺上，读数大小与测量到的电信号成比例

由古斯塔夫·海因里希·魏德曼、赫尔曼·冯·亥姆霍兹和约翰·丁达尔设计的魏德曼检流计在1874年开发成功时，是同类测量电压变化的仪器中最先进的。1886年，年轻的阿道夫·贝克进入克拉科夫雅盖隆大学（今天的雅盖隆大学），在著名的波兰生理学家拿破仑·齐布尔斯基的指导下进行研究。贝克在研究中就使用过这种检流计。[\[41\]](#)另一个研究神经系统电活动所必需的设备是电极，这在19世纪也是一个难题。金属电极与生理盐溶液（这样才能导电）接触时，会产生严重的电池效应。这些电极因电化学反应而产生电压，于是会干扰神经组织产生的微弱电活动的记录。事实上，意大利科学家亚历山德罗·伏打（1745—1827）和路易吉·伽尔瓦尼（1737—1798）关于人体是否会产生生物电的争论持续了数十年之久。质疑者认为所谓的生物电只是因金属探针接触裸露的神经而产生的人造电池效应，就像锡纸碰到金属铈会产生振动一样。为了克服这个问题，人们用非金属电极或浸泡在盐溶液中的纸和织物来接收肌肉、神经和大脑产生的微弱生物电信号。阿道夫·贝克在论文中描述了他使用的电极：“这些（电极）是用黏土浸在1%氯化钠溶液中制成的，它们插在装有硫酸锌溶液的玻璃管中，然后用锌丝连接到魏德曼检流计上。”[\[42\]](#)（贝克的理论研究显然遇到了之前提到过的电池效应的问题；氯化钠就是食盐，而硫酸锌是一种膳食补充剂——两者都可以在现代厨房的橱柜中找到。）

阿道夫·贝克开始了他对青蛙的研究。他仔细地解剖青蛙，把它的大脑、脊髓和后腿暴露出来。贝克将青蛙的腿绑扎好后放在钟形玻璃罩内，里面放上潮湿的棉花，用来增加空气

湿度，延缓组织干燥——它看起来就像一道野鸡大餐。与检流计相连的黏土电极被小心地放在青蛙的大脑上，然后用电脉冲刺激腿部坐骨神经，并用电极记录电脉冲造成的反应。电脉冲是由一个感应线圈产生的。它是缠绕在一个圆筒上的导线圈，这组线圈外面还有另一个缠绕导线的圆筒，外部的线圈比内部的线圈多。内部线圈由自制电池供电，当电池与线圈之间的连接断开时，其周围的电场突然消失，这个力使外部线圈突然产生电子振荡，从而产生比电池高得多的瞬时电压。现代汽车的发动机点火的工作原理也一样：当电池和感应线圈内部流过的电流随活塞运动反复通断时，汽车电池产生的12伏电压会在外部线圈中转变为2.5万伏的瞬时高压电脉冲，并在发动机的火花塞上产生强火花。

准备好青蛙和检测设备，贝克开始了他的实验。他充满期待地注视着从检流计射出的光束。他接通了感应线圈的电流以刺激坐骨神经——光束弹了起来！微小的偏转表明，青蛙大脑中与贝克的黏土探测电极接触的部位正在产生电能，这是由于坐骨神经受到电击而引发的。贝克将电极移动到大脑和脊髓的各个区域，并刺激不同的感觉神经，于是，他找到了大脑中处理不同感觉的位置。

在这个实验中，贝克提出了一个更为本质的发现：他注意到，即使没有刺激神经，光束也会剧烈地振动。许多人会认为这些微小的振动是精密测量系统固有的噪声，但是贝克敏锐地得出结论说，他看到的是大脑内涌动的电流所引起的自发性电振荡。他在1891年发表的博士论文中写道：“我们研究的是神经中枢的自发兴奋。” [\[43\]](#)简而言之，这就是脑电波。

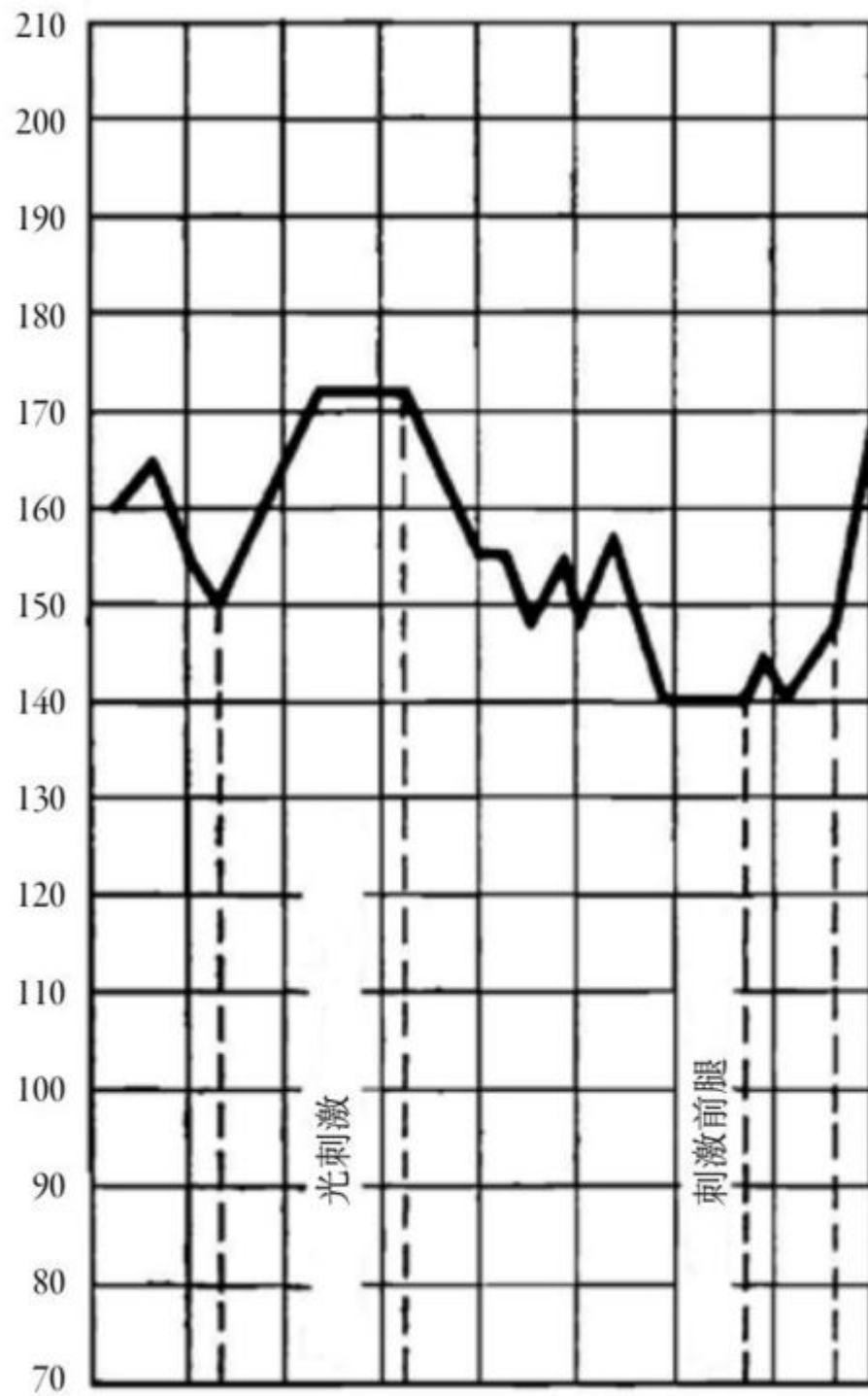


图12 狗的大脑对视网膜的光刺激和对前腿的刺激产生电反应的曲线图。这是阿道夫·贝克的博士论文里面的实验，该论文于1891年发表。电信号会引起检流计内部

的一根细丝发生轻微扭转，细丝上挂着一面小镜子，镜子可以把反射光束投射到刻度尺上，通过望远镜可以读取刻度

贝克把实验对象从青蛙换成了兔子和狗。他从动物头部的一侧打开颅骨，露出动物的大脑。他发现，当他给动物施加不同的感觉刺激时，动物大脑皮质的特定部位会出现电活动的突然变化：

用光刺激视神经，用声音刺激听觉，用感应电流刺激皮肤的不同感觉神经。为了刺激眼睛，我使用了一条燃烧的镁带。镁带通过特殊的机械装置移动，以使镜子反射到眼睛的火光保持恒定。[\[44\]](#)

令人感到奇怪的是，感觉刺激不但没有增加正在进行的电活动的强度，反而使它减弱了。每次实验，贝克都发现感觉输入抑制了动物大脑皮质中原本持续的电活动。我们现在知道，在施加感觉刺激后，大脑皮质内正在进行的脑电波活动变得不同步了。这就好比一个孩子在泳池边有节奏地往池壁划水一样，最终会产生巨大的波浪，但是如果两个孩子同时以不稳定或“不同步”的节奏划水，那么在水面上产生的波纹就会变小，而且不规则。新的感觉输入以某种方式扰乱了大脑之前由同步电活动产生的较大幅度的振荡。

贝克凭借出众的才华，用最原始的装置就做出了两个基本的发现：一个是 he 检测到了由感官进入大脑的信号所引起的脑电活动；另一个是他正确地意识到，大脑皮质每时每刻都在自发地产生节律性的电活动，这种持续的电活动会受到感觉输入的干扰。他认为，“有理由相信，对某些中心的刺激会导致其

他中心的活动受到抑制……因此，这些受到抑制的中心一定存在某种固有的活动状态，而且被抑制的只是这种内在的固有活动”。[\[45\]](#) 大脑这种有趣的反应让他在后来提出了通过控制这些脑电波来止痛的想法，这是今天的前沿研究。经颅直流电刺激和带有植入电极的脑深部电刺激（DBS）都已被用来抑制某些部位的脑电波，以调节疼痛感。更重要的是，正如我们将在下一章中看到的那样，感觉和认知活动会使脑电波突然去同步化。贝克的这一发现已被用于脑机接口（BCI）的开发，从而使人们仅凭思考就能够控制假肢。

这些由阿道夫·贝克（以及我们即将介绍的其他人）在波兰进行的开创性实验，揭示了动物大脑中的电磁波，这启发了汉斯·伯格在人的头皮上记录电活动的尝试。阿道夫·贝克将他的研究对象从青蛙、兔子和狗扩展到猴子身上，它们都表现出相同的脑电波反应。对于贝克来说，下一步可能就是用人类做实验了。但很不幸，他进行研究的地方正好处在第一次世界大战爆发期间国际冲突的中心。在脑科学刚取得巨大进步的关键时刻，贝克的研究因政治事件、战争和偏执而被搁置。

1895年，贝克接受了利沃夫（Lwów）大学新成立的生理学系主任的职务。当时波兰已被瓜分，利沃夫市归属奥地利。在过去两个世纪的动荡中，利沃夫市被多次易手。20世纪初，它成为波兰、乌克兰和犹太文化的多元化中心，也是许多波兰民族社团和第一份意第绪语日报的故乡。但是在1914年第一次世界大战爆发时，这座城市被俄国人占领了。波兰人竭力保持自己的文化和语言的独立性，这使得波兰学者实际上充当了抵抗俄国占领和统治的反抗者角色，并对俄国的统治构成了威胁。

波兰被入侵的第二年，贝克与其他9位杰出公民在从德奥联军占领区撤退时被俄国人绑架，并被送到基辅当人质。

贝克在被囚期间曾经写信给著名的俄国生理学家伊万·巴甫洛夫教授，后者最著名的研究是让狗听见铃声就流口水。贝克请求巴甫洛夫为他向俄国当局辩护。1916年，在被囚禁了两年之后，阿道夫·贝克通过红十字国际委员会安排的一次人质交换得以返回利沃夫，他对巴甫洛夫的营救心存感激。然而，1916年的利沃夫仍处在战争的前沿，此时已被乌克兰军队包围（当时乌克兰还不属于俄国）。刚经历了第一次世界大战的利沃夫，紧接着又遭受了波乌战争和波苏战争的蹂躏。1919年，波兰赢得了自1795年以来的第一次独立，但是利沃夫一直是有争议的领土，直到1923年才被正式承认为波兰的一部分。

入狱后，贝克没有再继续他关于大脑电活动的研究，而是将注意力放到了生理学上。贝克和他的导师拿破仑·齐布爾斯基共同出版了一本生理学方面的教科书，随后他自己也专门出版了一本神经生理学的教科书。贝克继续在大学任教，是学术和文化团体的顶梁柱，也是一位尽职尽责的父亲。1930年，67岁的他退休了，但之后并没有得享安宁。1939年9月1日，德国入侵波兰，动荡再次爆发。作为回应，9月17日，苏联人也入侵波兰。9月22日，利沃夫市被苏联红军占领，并把利沃夫市改成了今天的名字Lviv。在此期间，利沃夫大学以一位乌克兰作家的名字被重新命名，乌克兰语被定为正式的教学语言。在接下来的一年半中，许多波兰学者被免职，还有12名学者被苏联人杀害。

1941年6月22日，纳粹德国入侵苏联，利沃夫市被德国人占领。海因里希·希姆莱和莱因哈德·海德里希领导的纳粹死亡别动队对该市的犹太人进行了一系列屠杀。第一次屠杀是在乌克兰民族团体的帮助下进行的，约有7 000名波兰犹太人被杀害。第二次屠杀的目标是大约2 500名被认为对纳粹政权怀有敌意的公民。除了策划针对平民的大规模屠杀，纳粹别动队在入侵一个国家后，还根据精心罗列的打击名单，有选择地清除异己。针对英国的暗杀名单被称为“希特勒的黑名单”，这本144页的小册子一共印制了2万册，列出了要追杀的2 820个人的姓名和详细信息。[\[46\]](#)德国入侵波兰后也印发了一套类似的黑名单。名单上不仅包括犹太人，还包括神职人员、政治家、作家、艺术家和科学家。对希特勒的统治来说，知识分子、自由思想家、学者和科学家就像政治家和游击队一样危险。德国将军汉斯·弗兰克在德国入侵波兰后曾担任波兰总督，其间他写道：“波兰这片土地将变成知识分子的沙漠。”[\[47\]](#)身为知识分子、波兰人和犹太人的贝克处境非常危险。

1941年7月3日，在纳粹别动队的指挥下，纳粹占领军逮捕了25名波兰学者及其家人。[\[48\]](#)他们把抓到的人带到一个经过改建的集中营，在那里对他们进行拷打和审问，然后把他们杀害。

第二次世界大战初期，苏联入侵波兰，当时大约有15万名犹太人居住在利沃夫市，其中包括9万名儿童。[\[49\]](#)到战争结束时，利沃夫的15万名犹太人几乎无一幸存。[\[50\]](#)利沃夫市西北郊的亚诺夫斯卡街134号，以前是一家工厂，后来被改建为集中

营，有超过20万人在那里被杀害，阿道夫·贝克教授就是遇难者之一。

得知许多教授在利沃夫遭到屠杀后，贝克在大学附近的家中待了一年，拒绝逃亡。[\[51\]](#)在80岁生日即将到来时，贝克病倒了。德国人要把他从医院带到亚诺夫斯卡集中营。贝克的儿子是一名医生，他曾给全家人分发过氰化钾胶囊。贝克吞下了自己的致命药丸，选择结束生命，而不是被纳粹送进毒气室。[\[52\]](#)

世界上有些地方的历史并不是线性的，而是一个灾难、破坏和死亡的漩涡，反复将当地的居民吸进去。今天，利沃夫已成为乌克兰的一部分。20世纪90年代苏联解体后，乌克兰独立，但2014年，俄罗斯军队控制了乌克兰领土克里米亚，将其并入俄罗斯联邦，该地区再次陷入冲突。回顾神经科学发展初期的这些故事是想提醒人们，我们始终生活在历史的背景下，并且希望从中吸取教训。贝克所处的时代与现在的距离并没有想象中那么遥远：在利沃夫策划屠杀教授的一个盖世太保军官，在数十年后被发现用了一个假名居住在阿根廷，直到1985年才被捕，但他在被引渡之前便离世了。

理查德·卡顿

世界其实很小。离我家不远就是马里兰州的卡顿斯维尔，靠近巴尔的摩华盛顿国际机场。1720年，欧洲人最早开始在那里定居。1787年，卡顿家族也从英国搬到卡顿斯维尔居住。

[\[53\]](#) 1887年，来自英国利物浦的医学博士理查德·卡顿顺道拜访了他的祖先们所创建的这个小镇。他此行的目的是去参加位于华盛顿哥伦比亚特区的乔治敦大学举办的会议。在会议上，他要就他的研究成果做报告。卡顿报告的题目是《脑灰质电现象的研究》。[\[54\]](#)



图13 英国医生理查德·卡顿（1842—1926）在对兔子和猴子的研究中，第一个发现了脑电波活动。这张照片是在他30岁左右拍的，那时他正在进行脑电波的研究

事后，他在日记中写道：“我的关于大脑电流的论文虽然广受好评，但其实大多数人没看懂。”[\[55\]](#)

不同国家的科学家使用不同的语言。这种相对隔离的状态造成的后果是，哪怕重要的发现也可能会被大型科学团体忽略。现在情况仍然没有变化，如果没有互联网或其他快速可靠的国际交流方式，那么这种忽视可能还会更常见。事实上，当阿道夫·贝克在1891年发表论文时，他根本不知道16年前在英

国已经有人通过实验在兔子和猴子身上发现了脑电波。1887年，当理查德·卡顿在华盛顿公布自己的研究成果时，贝克刚刚开始他关于感觉刺激的电反应的研究。而且值得注意的是，卡顿早在12年前就开始了这项研究。卡顿在1875年的英国医学会议会议上发表了他初步研究结果的简报。据这份简报描述，通过使用检流计，他成功地记录到了兔子和猴子脑部的自发电流：“我们发现感觉印象可以影响某些脑区的电流活动，例如，费里尔博士已证明与兔子眼睑运动有关的那部分脑区的电流会因为对侧视网膜受到光线的刺激而产生显著影响。”[\[56\]](#)这篇简短的文章详细记述了兔子脑电波的发现，但包括阿道夫·贝克在内，几乎没人知道它。

卡顿将他的研究范围扩大到40只兔子、几只猫和猴子，并在1877年5月5日的《英国医学杂志》上发表了论文，对实验结果做了更全面的描述。他得出结论：“有证据表明，所有被检查的动物大脑都有电流……电流通常处于恒定的波动状态；指针的波动通常很小，大约为20~50度；有时则可以观察到较大的波动，在某些情况下，动物的肌肉运动或心理变化会造成这种明显波动。”[\[57\]](#)但是，这些论文仍然没有引起人们的注意。

一般来说，那个时代的生物科学主要是由像卡顿这样的医学从业者来做的。他们通过行医获得收入，而他们的科研工作既没有收入，也很难出名。当时，生理学（更别提神经生理学）尚未被当成一门科学，也没有自己的学术机构、科学社团和学术期刊，而且卡顿的科研工作对医生来说几乎没有实用价值，也跟医学毫不相干。卡顿带着经过12年研究的成果参加了1887年的医学大会，然而那些听众还是未能理解他的发现的重

要性。尽管卡顿的研究并未引起医学界的共鸣，但他始终是位受人尊敬的医生和教授。1904年，他成为利物浦大学医学系的主任。

1890年，贝克发表了他论文研究的摘要，详细介绍了他对脑电波的记录，从而引发了关于谁最先发现脑电波的争论。俄国生理学家瓦西里·达尼列夫斯基声称自己在1877年的论文中记录了动物的脑电波，早于贝克的实验。他没有公布他的发现，而是将它们装在信封里密封起来，保存在位于维也纳的帝国科学院的一个地下室里。现代的科学协会和学术期刊可以记录和传播各个领域的发现，但在此前的时代，把研究结果藏在地下室这种保存科学发现的方式并不罕见。但在1891年2月，卡顿给《生理学杂志》（*Centralblatt für Physiologie*）写了一封信，指出他在1875年的论文击败了所有人。[\[58\]](#)他在信中说：“1875年，我在英国医学会生理学分会上做过一个演讲，向大家展示了温血动物的大脑能产生电流，并且明确了这些电流与脑功能有关。请允许我提醒大家注意这篇文章：《英国医学杂志》，1875年，第2卷，278页。”[\[59\]](#)

FORTY-THIRD ANNUAL MEETING
OF THE
BRITISH MEDICAL ASSOCIATION.

Held in EDINBURGH, August 3rd, 4th, 5th, and 6th, 1875.

The Electric Currents of the Brain. By RICHARD CATON, M.D., Liverpool.—After a brief *résumé* of previous investigations, the author gave an account of his own experiments on the brains of the rabbit and the monkey. The following is a brief summary of the principal results. In every brain hitherto examined, the galvanometer has indicated the existence of electric currents. The external surface of the grey matter is usually positive in relation to the surface of a section through it. Feeble currents of varying direction pass through the multiplier when the electrodes are placed on two points of the external surface, or one electrode on the grey matter, and one on the surface of the skull. The electric currents of the grey matter appear to have a relation to its function. When any part of the grey matter is in a state of functional activity, its electric current usually exhibits negative variation. For example, on the areas shown by Dr. Ferrier to be

图14 第一个发现脑电波的是伦敦医生理查德·卡顿。卡顿于1875年8月在爱丁堡举行的英国医学会年会上宣布了他的发现，但这一成果并未引起人们的注意。卡顿于1887年前往美国华盛顿哥伦比亚特区，在乔治敦大学公布了有关他的研究的论文，但他的研究并不为人们所理解，这一发现也被历史遗忘。直到半个世纪后，阿道夫·贝克开始脑电波研究时，依然对卡顿的早期工作一无所知

问题就这样被解决了。英国医学博士理查德·卡顿确实是第一个观察到脑电波的人。他在19世纪70年代就使用简单的设备在实验动物的大脑中发现了脑电波，但距离全世界承认这一重要成就为时尚早。1891年，49岁的卡顿辞去了教授职务，并放弃了对大脑电活动的研究，将注意力转向与发热、中毒和肢端肥大症（一种巨人症）有关的医学问题。有趣的是，卡顿于1897年参加了在莫斯科举行的国际医学院大会，拿破仑·齐布爾斯基-阿道夫·贝克的导师——也出席了。[\[60\]](#)

理查德·卡顿于1926年去世，距离伯格开始人类脑电图研究不过两年。他不认识汉斯·伯格。伯格的发现于1929年首次发表，但是就像50多年前卡顿的第一个动物脑电图一样，这个成果一开始也被打入了冷宫。 [\[61\]](#)

从现代性的角度看，我们很容易指责那些没有看到卡顿演讲的意义的人，也很容易质疑为什么从发现动物脑电波到发现人类脑电波要花这么长时间。但你要知道，19世纪初，人类还没有创造出一样通电的东西，卡顿和贝克认为大脑有电流通过的想法更可谓石破天惊。在与世隔绝的实验室里，一些古怪的科学家绞尽脑汁地从天上捕获电，或者自己制造电，思考这种自然力，但当时的大众对它一无所知。电就像今天的暗能量一样稀有而神秘。

[\[1\]](#) Berger, H. (1904) Über die körperlichen äusserungen psychischer zustände: Weitere experimentelle beiträge zur lehre von der blutzirkulation in der schädelhöhle des menschen. Jena, Germany: Gustav Fischer.

[\[2\]](#) Berger, H. (1904 and 1907) Über die körperlichen äusserungen psychischer zustände: Weitere experimentelle beiträge zur lehre von der blutzirkulation in der schädelhöhle des menschen. Jena, Germany: Gustav Fischer.

[\[3\]](#) Millett, D. (2001) Hans Berger: From Psychic Energy to the EEG. *Perspectives in Biology and Medicine* 44: 522 - 542. <https://pdfs.semanticscholar.org/75ca/e9df1a8ddb0724b53e778cacbf4be8cae983.pdf>.

[4] Berger, H. (1910) Untersuchungen über die Temperatur des Gehirns. Jena, Germany: Gustav Fischer.

[5] Berger, H. (1940) *Psyche*. Jena, Germany: Gustav Fischer.

[6] Radin, D. (2006) *Entangled Minds: Extrasensory Experiences in a Quantum Reality*. New York, NY:Paraview Pocket Books.

[7] La Vaque, T. J. (1999) The History of EEG Hans Berger: Psychophysilogist. A Historical Vignette. *The Journal of Neurotherapy* 3: 1 - 9.

[8] Berger, H. (1940) *Psyche*, 6. Jena, Germany: Gustav Fischer.

[9] Berger, H. (1929) Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie* 87: 527 - 570.

[10] Lemke, R. (1956) Personal Reminiscences of Hans Berger. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 8: 708.

[11] Ibid.

[12] *Baltimore Sun*, January 4, 1931: 33.
<https://www.newspapers.com/newspage/214988483/>

[13] Burt [sic], C. Psychology and Parapsychology. In Smythies, J. R., ed. (1967) *Science and ESP*. London:Routledge, Taylor and Francis Group, 61-142. See also Mundle, C. W. K. The Explanation of ESP. Chapter 8 in Smythies, J. R., ed. (1967) *Science and ESP*. London: Routledge, Taylor and Francis Group, 201.

[14] Caldwell, W. E. (1959) Some Historical Notes and a Brief Summary of the Experimental Method and Findings of Ferninando Cazzamalli. *The Journal of General Psychology* 60: 121 - 129.

[15] Cazzamalli, F. (1925) Fenomeni Telepsichice E Radioonde Cerebrali. *Neurologica* 42: 193 - 218;Cazzamalli, F. (1929 - 1930) Esperienze, Argomenti E Problemi Di Biofisica Cerebrale. *Quad. Di Psichiat.*: 81 - 105; Cazzamalli, F. (1935) Di un Fenomeno radiante

cerebro-psichico (reflesso cerebro-psichico-radiante) come mezzo di esplorazione psichio-biofisica. *Giornale Di Psichiat. E. Di Neuropathol.* 63: 45 - 56.

[16] Cazzamalli, F. (1935) Phenomenes electromagnetiques du cerveau humain en activite psychosensorielle intense et leur demonstration par des complexes oscillateurs-revelateurs a triodes pour ondes ultracourtes. *Arch. Internat. De Neurol.* 64: 113 - 142.

[17] 1英尺= 30.48厘米。——编者注

[18] Association of Italian Science of Metaphysics. <http://www.metapsichica.net/home/home.asp?sid={A92545DD-98F2-4C3F-8D4F-DE98369D46D3}&idca=3&idpa=1>.

[19] *Metapsychic, The Italian Journal of Parapsychology*. A. I. S. M. (Associazione Italiana Scientifica di Metapsichica.) <http://www.metapsichica.net/home/home.asp?sid={68F482E7-66FE-4EFE-BEEE-A768C23A76C9}&idca=2&idpa=1>. Accessed September 18, 2019.

[20] Association of Italian Science of Metaphysics. <http://www.metapsichica.net/home/home.asp?sid={A92545DD-98F2-4C3F-8D4F-DE98369D46D3}&idca=6&idpa=1>. Accessed 2018.

[21] Finkler, W. (1930) Die elektrische Schrift des Gehirns [The Electric Writing of the Brain]. *Neues Wiener Journal* 38: 7. See also Borck, C. (2005) Writing Brains: Tracing the Psyche with the Graphical Method. *History of Psychology* 8:79 - 94.

[22] Moses, D. A., et al. (2019) Real-time Decoding of Question-and-Answer Speech Dialogue Using Human Cortical Activity. *Nature Communications* 10, no. 3096. See also Musk, E., and Neuralink(2019). An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels. *BioRxiv*. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/703801v4>; and Hanson, T. L., et al. (2019) The “Sewing Machine” for Minimally Invasive Neural Recording. *BioRxiv*. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/578542v1>.

[23] Adrian, E. D.; and Matthews, B. H. C. (1934) The Berger Rhythm: Potential Changes from the Occipital Lobes in Man. *Brain* 57: 355 - 385.

[24] Ibid., Figure 3.

[25] Lemke, R. (1956) Personal Reminiscences of Hans Berger. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 8: 708.

[26] Brazier, M. (1961) *A History of the Electrical Activity of the Brain: The First Half-Century*. London: Pitman Medical Publishing Co., 114.

[27] Borck, C. (2005) Writing Brains: Tracing the Psyche with the Graphical Method. *History of Psychology* 9, 79 - 94.

[28] Berger, H. (1901) Zur Lehre von der Blutzirkulation in der Schädelhöhle des menschen namentlich unter dem Einfluss von Medikamenten (Experimentelle Untersuchungen) [On the theory of the blood circulation in the human skull, especially under pharmaceutical influences (experimental investigations)]. Jena, Germany: Gustav Fischer.

[29] Fayed, N.; Modrego, P. J.; and Morales, H. (2006) Evidence of Brain Damage after High-Altitude Climbing by Means of Magnetic Resonance Imaging. *The American Journal of Medicine* 119: 168.E1 - 6.

[30] Fields, R. D. (2009, September 30) Are the Mountains Killing Your Brain? Outside. <https://www.outsideonline.com/1884846/are-mountains-killing-your-brain>.

[31] 1英里= 1.609 344千米。——编者注

[32] 1码= 0.9144米。——编者注

[33] Lemke, R. (1956) Personal Reminiscences of Hans Berger. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 8: 708.

[34] Goldensohn, E. D. (2001) Cellular Electrical Phenomena in Focal Epilepsy. In Luders, H. O.; and Comair, Y.; eds. *Epilepsy Surgery*, 2nd ed. Philadelphia, PA: Lippincott and Williams and Wilkins, 1 - 18.

[35] Niedermeyer, E. (2005) Historical Aspects. In *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*, 5th ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams and Wilkins, 1 - 16.

[36] Das Gesetz zur Verhütung erbkranken Nachwuchses. Reichsgesetzblatt, Part I, July 14, 1933: 529;reprinted in Meier-Benneckenstein, P.; ed. *Dokumente der deutschen Politik*, Volume 1: *Die Nationalsozialistische Revolution 1933*, edited by Axel Friedrichs. Berlin, 1935: 194 - 95.

[37] Forced Sterilization, United States Holocaust Memorial Museum. <https://www.ushmm.org/learn/students/learning-materials-and-resources/mentally-and-physically-handicapped-victims-of-the-nazi-era/forced-sterilization>. Accessed September 15, 2019.

[38] Redies, C.; Viebig, M.; Zimmermann, S.; and Frober, R. (2005) Origin of Corpses Received by the Anatomical Institute at the University of Jena During the Nazi Regime. *The Anatomical Record Part B: The New Anatomist* 285B (1): 6 - 10. Redies, C.; Frober, R.; Viebig, M.; and Zimmermann, S. (2012) Dead Bodies for the Anatomical Institute in the Third Reich: An Investigation at the University of Jena. *Annals of Anatomy* 194 (3): 298 - 303. doi: 10.1016/j.aanat.2011.12.004.

[39] Pierre Gloor states that at this time, before the existence of brain imaging technology, surgeons would sometimes stick probes in the brain in an attempt to localize tumors. Gloor, P. (1969) *Hans Berger on the Electroencephalogram of Man*. New York, NY: Elsevier Publishing Company, 5.

[40] Fields, R. D. (2011) Imaging Learning: The Search for a Memory Trace. *The Neuroscientist* 17: 185 - 196.

[41] Chapman, H. C.; and Brubaker, A. P. (1888) Researches upon the General Physiology of Nerve and Muscle No. 2. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia* 40: 155 - 161. <http://www.jstor.org/stable/pdf/4061244.pdf>.

[42] Brazier, Mary A. B. (1961) *A History of the Electrical Activity of the Brain: The First Half-Century*. London: Pitman Medical Publishing Co.: 30.

[43] Beck, A. (1891) The Determination of Localization in the Brain and Spinal Cord by Means of Electrical Phenomena. Doctoral thesis published in *Polska Akademia Umiejetności* 2: 187 - 232.

[44] Brazier, Mary A. B. (1961) *A History of the Electrical Activity of the Brain: The First Half-Century*. London: Pitman Medical Publishing Co., 33. Beck, A. (1891) The Determination of Localization in the Brain and Spinal Cord by Means of Electrical Phenomena. Doctoral thesis published in *Polska Akademia Umiejetnosci* 2: 212.

[45] Brazier, Mary A. B. (1961) *A History of the Electrical Activity of the Brain: The First Half-Century*. London: Pitman Medical Publishing Co., 33. Beck, A. (1891) The Determination of Localization in the Brain and Spinal Cord by Means of Electrical Phenomena. Doctoral thesis published in *Polska Akademia Umiejetności* 2: 187 - 232.

[46] Hitler's Black Book—List of Persons Wanted. Forces War Records. <https://www.forces-war-records.co.uk/hitlers-black-book>. Accessed September, 15, 2019.

[47] The Polish Ministry of Information (1943) *The German New Order in Poland*. London: Hutchinson and Co., 432, quoted in Wrobel, P. (2000) *The Devil's Playground: Poland in World War II*. Montreal: The Canadian Foundation for Polish Studies of the Polish

Institute of Arts & Sciences. <http://www.warsawuprising.com/paper/wrobell.htm>. Accessed September 15, 2019.

[48] Krętosz, J. Likwidacja kadry naukowej Lwowa w lipcu 1941 roku. In Heska- Kwaśniewicz, K. ; Ratuszna, A. ; and Żurawska, E., eds. (2012) *Niezwykła więź Kresów Wschodnich i Zachodnich*. Uniwersytet Śląski:13 - 21. Retrieved December 12, 2014. <http://wydawnictwo.us.edu.pl/node/2822>. See also https://en.wikipedia.org/wiki/Massacre_of_Lw%C3%B3w_professors. Accessed September 18, 2019.

[49] The Yivo Encyclopedia of Jews in Eastern Europe. L'viv. <http://www.yivoencyclopedia.org/article.aspx/Lviv>. Accessed September 15, 2019.

[50] Nagorski, A. (2015). *The Greatest Battle*. New York, NY: Simon and Schuster, 83.

[51] Coenen, A. ; and Zayachkivskar, O. (2013) Adolf Beck: A Pioneer in Electroencephalography in Between Richard Caton and Hans Berger. *Advances in Cognitive Psychology* 9: 216 - 221. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3902832/pdf/acp-09-216.pdf>.

[52] Brazier, Mary A. B. (1961) *A History of the Electrical Activity of the Brain: The First Half-Century*. London: Pitman Medical Publishing Co., 48. And https://en.wikipedia.org/wiki/Janowska_concentration_camp. Accessed September 18, 2019.

[53] U-S-History.com. History of Catonsville, Maryland. <https://www.u-s-history.com/pages/h2789.html>. Accessed September 15, 2019.

[54] Caton, R. (1887) Researches on Electrical Phenomena of Cerebral Grey Matter. *Ninth International Medical Congress* 3: 246 - 249.

[55] Brazier, Mary A. B. (1961) *A History of the Electrical Activity of the Brain: The First Half-Century*. London: Pitman Medical Publishing Co., 16.

[56] Ibid., 7.

[57] Ibid. Also Caton, R. (1877) Interim Report on Investigation of the Electric Currents of the Brain. *British Medical Journal* 1: 62 - 65.

[58] Brazier, Mary A. B. (1961) *A History of the Electrical Activity of the Brain: The First Half-Century*. London: Pitman Medical Publishing Co., 62.

[59] Caton, R. (1891) Die Strome der Centralnervensystems. *Centralblatte der Physiology* 4 (1890 - 1891):785-786, translated by Brazier, ibid., 62, in reference to his prior paper, Caton, R. (1875) The Electric Currents of the Brain. *British Medical Journal* 2: 278.

[60] Brazier, Mary A. B. (1961) *A History of the Electrical Activity of the Brain: The First Half-Century*. London: Pitman Medical Publishing Co., 20 - 21.

[61] Berger, H. (1929) Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie* 87: 527 - 570.

第2章

它活过来了！生命的火花

对于伦敦城的半数居民来说，忙碌的上午开始了……这天上午正值集市。地上的污泥浊水深可齐踝，不断从牛身上腾起的白茫茫的汗蒸气，同仿佛停在烟囱顶上休息的迷雾混合成低垂的浓云。广场中央所有的牲畜栏以及占去全部空地的临时围栏里，都挤满了羊群；沿水沟一边的界桩上拴着长长的三四排菜牛和牯牛。乡下人、屠户、牲口贩子、叫卖小贩、顽童、扒手、看热闹的和各色游民杂凑成密密麻麻的人群。牲口贩子的唢哨声、狗的吠声、牛的吼声和撒野声、羊的咩咩声、猪的咕噜声和尖叫声；小贩的叫卖声；四面八方的嚷嚷声、诅咒声和吵闹声；从每一家酒店里传来的铃声和嘈杂的话声；挤挤压压、推推搡搡、驱赶、打架、呐喊、号叫；来自市场每个角落的震耳欲聋的噪声；老是跑来跑去、奔出奔进于人群之间的那些不洗脸、不刮胡子、寒碜而邋遢的人——所有这一切组成了一幅令人头晕目眩、手足无措的纷扰景象。

——查尔斯·狄更斯，《雾都孤儿》，第21章
(上海译文出版社，1984年，荣如德译，188~189页)

在19世纪的头50年里，伦敦是世界上最大的城市，仿佛宇宙的中心。许多人到这里寻找工作，城市人口急剧膨胀，130万

名居民在尘土、污泥、肥料和秽物中辛苦劳作。工人们不辞劳苦地奔波，只为了保住来之不易的在工厂和市场里的繁重工作。街道上车水马龙，马蹄踏在满是泥泞的鹅卵石路上，泥水四溅，一路发出巨大的声响。医学陷入了无知和迷信的境地，而所谓的医院通常也只是破败公寓里的一个房间——靠烧泥煤加热，没有自来水和卫生设施——隐没在遍布这座灰色城市的贫民窟当中。妇女悲惨地死于难产或产后感染，其他人则被霍乱、结核病和一些来历不明的疾病突然夺去生命。

然而，上流社会的人们却过着休闲和奢华的生活，他们住在豪华的庄园里，拥有华贵的家具和精致的花园，有仆人替他们收拾房间，清扫地板（当然也为他们准备好丰盛的饭菜）。富人从来不会冒险去城镇中贫苦百姓待的地方，他们只是作为雇主的时候才会跟穷人见上一面。富婆们的日常就是管理整个家和操办复杂的社交聚会，而有钱的绅士们则热衷于跟同样有钱的人攀亲道故、打桃射柳。当然，他们也只跟有钱人做生意。他们中的许多人出于好奇心而涉猎自然哲学，并逐渐成了业余的实验主义者。只有那些有财力得到科学实验所需的设备和资源，并且有大量闲暇投入无利可图的学术研究的人，才会发展出这种特殊的爱好。在许多社交俱乐部和社团里，会员们可以聚集在一起分享和讨论各自的发现，例如在1807年成立的地质学会和在1820年成立的天文学会。这对于业余科学的发展来说是必不可少的。此外，大学教授的公开讲座也为受过教育并对科学感兴趣的公民提供了一种颇有启发性的消遣方式。这些有钱的绅士为大学里的医生和学者做研究提供了资金支持。因此，讲座这种公开展示的形式就要求这些学者承担起科学家和表演者的双重角色。

1837年5月16日，一个叫爱德华·克拉克的科学仪器制造商跟伦敦的几位绅士见了面，其中有化学家和富裕的葡萄酒酿造商，他们共同创立了一个致力于电学研究的科学社团。其他科学社团都是按专业来划分的，但是对电的研究可以应用于生物和物理等不同的科学领域，“使我们对动物、植物和矿物之间的联系以及自然界的运作方式有更深入的了解……”，诺阿德先生在伦敦电气协会会议的闭幕式上致辞表示。[\[1\]](#)电能的广泛适用性不但显示出巨大的技术革命的潜力（例如，用于工业革新，用于夜间照明，取代蒸汽动力等），而且促进了微电子技术的发展，并开创了数字时代——尽管这已经远远超出了当时人们的想象。

电力在技术和工业上的应用将带来持久的变革。不过，19世纪盛行的靠通电进行医学治疗的方法在接下来的一个世纪基本上被淘汰了。从痛风到女性高潮机能缺陷，几乎所有疾病都用通电的办法来治疗，大多数这些“疗法”都是可疑的，甚至是彻头彻尾的骗术。尽管如此，在19世纪初，电力作为自然界最强大、最神秘的力量，还是吸引了许多人去探索电能与生物学之间的交叉点，并推测电这种神秘力量可能是生命力产生的火花，甚至是生命本质的体现。电可以解释生物体的机能，尤其是控制肌肉和将感觉传递到大脑的机制。电可以驱动心脏跳动，可以控制思想活动。理解并驾驭这种力量甚至可能让人类获得上帝般的威力——让人死而复生。玛丽·雪莱的经典作品《弗兰肯斯坦》捕捉到了那个时代人们共同的抱负。她的小说出版于1818年，正是19世纪的绅士科学家们试图驾驭电的力量，并用这种电力来解码生命、起死回生的时代。

萤火虫的诞生

克罗斯家族的费恩庄园坐落在英国萨默塞特郡的塞奇穆尔区。庄园建于1780年，由整洁的英式庭院和周围的65英亩[\[2\]](#)原始林地构成。[\[3\]](#)在父母去世后，安德鲁·克罗斯于1805年开始掌管家业。他没有循规蹈矩，而是在偏僻的费恩庄园里建起了一个实验室，并埋头于电的研究。他在柱子和树木间拉起的导线长度超过了1.25英里，为的是捕获天空中的闪电，然后将可怕的雷电储存在莱顿瓶中，以供他实验时使用。[\[4\]](#)莱顿瓶是具有很大容量的电容器，能收集并保存大量电荷，然后可以根据实验者的需要将其释放。除了用莱顿瓶捕获电能外，克罗斯还自己制造了很多能产生强大电压的电池来提供电能。放电的时候，电光伴随着炮声一样的巨响，因此，克罗斯被当地人称为“雷电人”。[\[5\]](#)据说，玛丽·雪莱跟克罗斯认识。[\[6\]](#)她在日记中记载，1814年12月28日，星期三的晚上，她参加了“萨默塞特郡的电学家”安德鲁·克罗斯的“电和元素”的讲座。这是克罗斯第一次公开演讲。玛丽和她的情人珀西·比希·雪莱参加了讲座，那时的玛丽还在用她的娘家姓戈德温。1816年，玛丽从情人变成了诗人的第二任妻子。[\[7\]](#)尽管没有证据表明玛丽·雪莱曾去过费恩庄园，但有些人认为克罗斯的实验室是《弗兰肯斯坦》这个故事的灵感来源。[\[8\]](#)不论克罗斯是否对雪莱的创作产生了影响，有一点毫无疑问，那就是在《弗兰肯斯坦》出版后大约20年，克罗斯后来的实验真的让人们喊出了那句不朽的名言：“它活过来了！”

克罗斯开始研究各种盐溶液通电后的变化。他对电极周围形成的晶体感到非常惊讶，惊叹它们“跟天然的一模一样”。克罗斯得出结论：电是“动物、矿物、植物和气体系统发生的每一次变化的次要原因”。[\[9\]](#)

1836年，克罗斯在实验室工作时，配制了一种碳酸钾、硅酸盐和盐酸的混合溶液，然后将这种溶液缓慢地滴在一块多孔的红色氧化物（维苏威火山的火山铁）上。他用两根铂金丝把岩石和他自己做的名为伏打堆的电池两极连在一起，这样就可以提供连续的电流。在接下来的一个月中，他仔细观察并记录了潮湿的带电岩石的变化，每天用放大镜对它进行检查。他本来希望通过给吸了盐溶液的多孔岩石施加稳定的电流，从而产生二氧化硅晶体。但是事与愿违，他看到的是“人类创造的自然奇迹”。1837年，他在给伦敦电气协会（他是该协会的成员）的报告中写道：

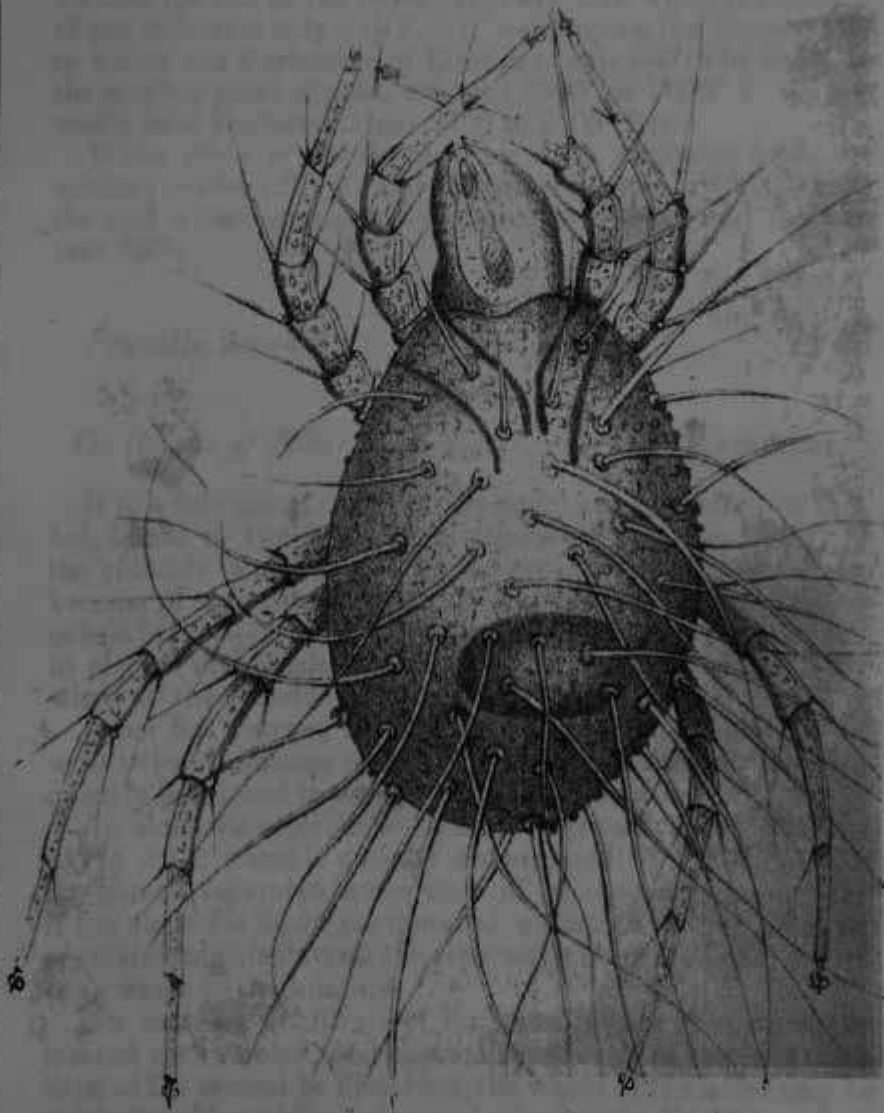
到第14天，可以看到在两根导线之间的石头表面出现了两到三个非常细小的白点（也可以叫作白色突起）……到第18天，这些突起被拉长，并被细丝覆盖。到第22天，它们的大小和长度都增加了。到第26天，这些东西怎么看都像是一种昆虫，立在尾端的几根纤毛上。到第28天，这些昆虫的腿开始动了；又过了几天，它们从石头上爬了下来，并且随意地在石头表面爬来爬去；不过它们通常不太喜欢动，尤其是在刚孵化出来的时候。[\[10\]](#)

克罗斯多次重复实验，都得到相同的结果。这些小虫子在他给火山石通电的实验装置里大量繁殖。克罗斯不知道这是什

么虫子，所以他取了一个样本，寄给了巴黎科学研究院的专家图尔平先生。这位专家认定这种虫子属于螨虫的一种。但是，图尔平先生说这种螨虫他以前从未见过，它可能是一个新的物种。后来，克罗斯把这种奇怪的昆虫标本寄给了伦敦几家知名的机构，他们都赞成图尔平的判断。其中一位专家是伦敦皇家外科医学院的比较解剖学家理查德·欧文——他就是创造了“恐龙”（Dinosauria，意思是“可怕的爬行动物”）这个了不起的单词的生物学家。欧文认为这些微小的生物确实是一种螨虫，但并不认可它们来源于通电的石头这个离奇的说法。克罗斯用自己的名字给这种似乎是他创造的生命取名为“克罗斯螨”（*Acarus crossii*）。

大众媒体大肆渲染这个发现的重要性，认为业余电学家克罗斯在实验室里重现了创世记的神话。例如，《创世记》2: 7中“神用地上的尘土造人”，还有《诗篇》29: 7中“耶和华的声音使火焰分岔”。一些人谴责克罗斯染指上帝管辖的事物是对神的亵渎，据说他甚至收到了死亡威胁。农民将农作物歉收归咎于克罗斯在实验室里鲁莽造出的螨虫。[\[11\]](#)可以想见，克罗斯被惹火了，他不厌其烦地解释他根本不知道这些螨虫是怎么来的，只知道它们就这样出现了。他评论说：“不好意思，没想到邻居的信赖就这么被螨虫的爪子掀翻了。”[\[12\]](#)其他许多科学家，像早就以电学实验闻名的迈克尔·法拉第，都得出结论，认为克罗斯的装置里潮湿的环境仅仅是给螨虫的繁殖提供了合适的条件而已。[\[13\]](#)有些科学家则认为，电并不是从无到有地创造了螨虫，而是以某种方式“活化”了多孔岩石中早就存在的虫卵。[\[14\]](#)

ACARUS.



*Microscopic View of a Female containing an Egg. The Insect is a Specimen of
those which appear in Mr Crookes Galvanic Experiments.*

图15 “克罗斯螨”，安德鲁·克罗斯相信这种螨虫物种是他给维苏威火山多孔的石头通电后产生的。他于1838年向伦敦电气协会报告了这一发现。这个螨虫标本被鉴定为一个新物种，而且是雌性的，体内有个卵。图尔平于1838年在《电、磁和化学年鉴》（*The Annals of Electricity, Magnetism and Chemistry*）和《实验科学守护者》（*Guardian of Experimental Science*）2: 355-360发表的文章描述了这个标本。这个卵让图尔平的心中起了疑惑，他不太相信螨虫是用电创造出来的：“……有不同的性别；两性之间的交配和受精对物种的个体繁衍是必要的，因此，我们必须承认它们有生殖器官；最终，雌性产下卵，幼虫孵化出来……”

1837年6月，克罗斯受邀在电气协会的一次会议上展示他的发现，然后协会委托其他成员在密封的环境中重复克罗斯的实验，以排除普通尘螨污染的可能性。1841年，外科医生（也是电气协会的成员）威克斯声称他成功地复制了克罗斯在玻璃罩里的实验。[\[15\]](#) 弗朗西斯·马切罗尼抓住了这一重大突破，在《机械杂志》上发表的文章中写道，克罗斯的实验“充分证明……所有生命的组成物质与构成电、电化学反应产物、磁或太阳的物质具有一致性”。[\[16\]](#) 但是，其他人未能重复出克罗斯的研究结果，因此争议并没有平息。著名的空想社会主义者托马斯·西蒙斯·麦金托什就“宇宙的电学理论”[\[17\]](#) 这个主题发表了一系列演讲，提到了克罗斯的实验。他也在《机械杂志》[\[18\]](#) 上发表文章，对批评科学家不应该扮演上帝的角色这一观点提出异议。他说：“我们应该把人视为被组装起来的机器。如果我们要探寻驱动人体行使功能的物质基础，是一定可以找到的，而不是在我们所不了解且无法控制的领域搜索，那是误入歧途。”[\[19\]](#)

生命的起源？

把时间往后推一个世纪，还是为了相同的目的，人们用另一种类似的方法，试图再次用电创造生命并揭示生命的起源，这成了20世纪的一个经典实验。20世纪50年代初，斯坦利·米勒在芝加哥大学哈罗德·尤里的实验室工作。米勒将纯净水密封在玻璃球体内，在玻璃球中充满了混合气体，这些气体模拟了35亿年前生命首次出现时的大气环境。米勒通过铂电极在“雪花瓶”玩具一样的实验装置内部产生电火花，相当于在一个微缩版的原始世界里制造出闪电的效应。

经玻璃球内的电弧作用两天后，水开始变成淡黄色，内部的电极周围沉积了一些黏稠的残留物。米勒收集了这些黏稠的物质，用纸色谱法来确定是否大气中的简单元素被化合成了有机分子。他特别想要找到的是氨基酸——蛋白质和生命的组成单位。他的分析结果表明，的确有甘氨酸产生。延长放电时间后，他发现了其他几种氨基酸。通电后的无机分子形成了氨基酸，氨基酸又可以自动组装成长链，从而形成大分子的蛋白质。这些蛋白质通过和其他分子结合，在某些特殊的时候就可以产生活细胞。简单的细胞可能会组装成原始生物（这一切都因电火花而发生），然后，再经历漫长的进化过程，生命之树将不断扩展，最终产生智人——“最聪明的物种”。后来，智人拥有了认知能力，有一天可以在芝加哥的实验室里在一个玻璃球中再造生命……

1953年，在介绍米勒的研究成果的一个研讨会上，哈罗德·尤里回答恩里科·费米的问题时说：“如果上帝不这么做，那他错过了一个好时机。”[\[20\]](#)许多参与“曼哈顿计划”的著名科学家都出席了这次会议；实际上，爱德华·泰勒（“氢弹

之父”）曾与斯坦利·米勒在这个揭示生命起源的实验项目的早期进行过合作，但泰勒后来放弃了，转而研究另一种神力——原子能。

从19世纪到20世纪，我们看到人类一直孜孜不倦地想要解决这些巨大的科学谜团：生命是什么？生命是如何产生的？成为人类意味着什么？肉体和精神如何相伴相生？

当然，要将科学实验分析的方法应用于诸如肉体如何获得并失去生命、电是否真的是驱动生命的力量这样的问题，光是用水和岩石做实验是不够的，还应该活着或至少曾经活着的人身上进行验证。

人造大脑

如今的新闻充斥着关于人工智能、制造人造细胞[\[21\]](#)以及用干细胞在实验室造出“在培养皿里生长的大脑”[\[22\]](#)这一类科学进展的报道。但是，制造人造大脑的探索可以追溯到神经科学发展的早期。

玛丽·雪莱创作《弗兰肯斯坦》的另一个灵感来源是卡尔·奥古斯特·魏因霍尔德进行的令人不寒而栗的研究。[\[23\]](#)这项研究比克罗斯“制造”蠕虫的实验还要早20年。魏因霍尔德的惊人目标正是雪莱的书中所虚构的内容——用他在实验室制造的人造大脑代替尸体的大脑，让人死而复生。魏因霍尔德看到了莱顿瓶的神奇效果：它不但能刺激死亡动物的神经系统，

甚至还能让尸体按照科学家的指挥做动作（将在下文中描述）。因此，他想再向前跨一大步——直接将电源安装到空的颅腔内。他推断，制造人造大脑所要做的就是将适当类型的金属混合在一起制成一块电池，用这种人造的电化学能源代替动物的生物电。[\[24\]](#)

他的第一步是弄清楚电动大脑的细节，并进行了动物实验。他认为：“天然脊柱和人工改造过的脊柱（用金属填充椎管）之间没有明显的区别。”实验动物恢复了“生命”，并且“脊柱的开口被封闭后再次刺激它跳来跳去，它一直很用力地蹦，直到精疲力竭。”[\[25\]](#)

不过，一只鲜血淋漓的实验动物在实验室的工作台上跳来跳去的可怕场面还只是个开始。下一步，魏因霍尔德要尝试用他的双金属电池制成的电动大脑替换死去的实验动物的大脑，使它“死而复生”。他用银锌汞合金将实验动物的颅腔和脊髓腔填满。魏因霍尔德写道：

在将近20分钟的时间里，实验动物进入了一种复活状态。它抬起头，睁开了眼睛，呆呆看了一会儿，试图爬起来，但又倒了下去，这样反复了几次。不过，它最终还是努力爬了起来，并且跳来跳去，最后筋疲力尽地趴下。在这些观察过程中，心跳、脉搏以及循环都非常活跃，15分钟后我打开胸腔和腹腔时还在持续……体温也完全恢复了。[\[26\]](#)

魏因霍尔德确实是一个“弗兰肯斯坦”，一个被边缘化了的科学疯子，一生形单影只——这就是问题所在。这些“奇

迹”般的实验结果没有目击者，而且显然被夸大了。就算魏因霍尔德能观察到动物有任何反应，也不是动物被电“复活”的结果，而是肌肉对电池电压产生的简单反射，这会引起肌肉抽搐——实验动物仍然是死的。即使在魏因霍尔德那个时代，其他科学家也拒绝承认他的奇谈怪论。奥地利医生麦克斯·诺伊布格说：“没必要浪费时间去批评这项实验以及他那些哗众取宠的结论，这人就是闲极无聊。” [\[27\]](#)

魏因霍尔德曾是一位受人尊敬的教授，也是德国科学界的一分子，但是1820年以后，他的名声就不行了。据学生说，他的演讲就是“胡扯”，重复些没用的东西。人们批评他对外科诊所的病人“粗鲁而笨拙”，“不是外科医生，而是屠夫”。诊所负责人给出的一份官方调查的结论是，魏因霍尔德是一个“空想家”，“有欺诈和撒谎的倾向”。 [\[28\]](#)

根据医学史学家汉斯——西奥多·科赫的说法，魏因霍尔德感到自己受到了迫害和威胁。科赫怀疑魏因霍尔德的职业生涯一败涂地的根本原因是他患有慢性抑郁症。魏因霍尔德从未结过婚，尸体解剖显示他的生殖器是畸形的。 [\[29\]](#) 这一发现很有讽刺意味，因为魏因霍尔德还有另一个“宠物项目”：1829年，在脑电波研究者汉斯·伯格主管强制绝育的一个世纪前，魏因霍尔德就发表了一篇论文，他主张把乞丐、穷人、单身汉，以及那些无法工作或患有慢性疾病的人的生殖器箍住（或者缝合），并穿上金属环，防止他们生育：

操作本身很简单……就像金属焊接和密封一样，这是我的发明。把包皮拉起来，轻轻地夹在一对有孔的金属板之间，然后用一根空心的针刺穿，再把4到5英寸[\[30\]](#)长的铅丝从针管中穿过去，这样病人就不会有什么感觉了。[\[31\]](#)

毫无疑问，魏因霍尔德的实验是令人发指的，但从他研究的基本原理上来说却没有错。大脑和神经系统确实靠自己产生的电来执行功能。他的想法因为原始的技术和神经科学仍处于蒙昧阶段而受到束缚。推测一下，如果让他现在来做这个实验，他会采用什么方法，这是件有趣的事情……很有可能他要做的就是将微电子芯片植入大脑，让脑机进行连接。

无论是用碳粉制造出纯净的钻石晶体，用能够执行器官功能的机器替代心脏、肺或肾脏，还是在“雪花瓶”模拟的地球早期环境中创造生命……要想验证任何关于自然现象的科学知识，没有比在实验室中重现这些现象更好的办法了。

19世纪早期的研究得出的结论是：为神经系统提供动力的能量，乃至整个人体的生命之源，就是电。但是，要证明这一点的唯一办法就是在人类身上做实验。

我们需要一具尸体

犯罪和惩罚——长盛不衰的人类活动——使得对人体进行电学研究成为可能。1829年之前，伦敦还没有警察，精英阶层和普通民众之间的贫富悬殊加剧了本就猖獗的犯罪活动。犯有

从盗窃到谋杀等一系列罪行的罪犯会被处以绞刑。这是一种公开展示，有成千上万名病态、粗鲁的人围观。直到1868年，行刑场所才被转移到室内。

绞刑在英国历史悠久，从18世纪初开始，直到1965年废除死刑为止。^[32] 20世纪60年代，为了加速罪犯的死亡，英国对绞刑技术进行了改进：通过称量罪犯的体重来调整绞索的长度，这样罪犯坠落后，既不会因为绳子太长导致脖子断了但头也被扯下来，也不会因为绳子太短导致罪犯吊在空中踢腾半天还没被勒死。但是在过去，绞刑过程是漫长和令人毛骨悚然的。18世纪和19世纪，人们特意使用短的绞索，让绑了手脚的死刑犯挂在空中挣扎。这时，行刑官通常会“慈悲地”允许罪犯的朋友和家人往下拽犯人的腿，以加速其死亡。绞刑会吸引成千上万名来自各行各业的人前来围观。在公开场合行刑不仅是为了阻止犯罪活动，也是因为公开羞辱罪犯被认为是合理惩罚的一部分。

有时，对罪犯的尸体进行解剖也是对其进行羞辱的一种方式。允许医生和解剖学家解剖死刑犯的尸体，不但丰富了科学知识，同时还有侮辱罪犯的尸体的效果，起到杀鸡儆猴的作用。解剖通常是在公众场合进行的。

1779年，23岁的詹姆斯·布罗迪因谋杀一名8岁的男孩而被定罪，并被判处绞刑。布罗迪恳求法院不要解剖他的尸体，但法官拒绝了他的上诉，因为他谋杀的是一个孩子。布罗迪的尸体被交给外科医生进行解剖，然后在公共大厅展示。赫伦在报告中写道：“成群的男男女女还有小孩们沉醉于他们病态的好

奇心，聚集在一起，只为一睹那最令人憎恶的景象。”他引用了县志中的记载：[\[33\]](#)

残破不堪的尸体直挺挺地躺在一张长桌子上，可怕极了……展览现场那些人发出的声音里充斥着粗俗野蛮的玩笑、淫秽的品评以及恶毒的诅咒。这一切几乎无法用言语形容……人群中间有一群妇女。一个心怀叵测的家伙对尸体做了一个最下流的动作。他的行为激起了一些人的不满，惹得女人们发出惊声尖叫，但是却让大多数人哄堂大笑。展览在这个时候达到了高潮。

赫伦解释说：“据说有个男人一把抓住了尸体的生殖器。”[\[34\]](#)

死者的结局都很不光彩。罪犯的尸体除了有一部分被保存在解剖博物馆中展览或供研究之用外，其余的部分会被当作垃圾扔到下水道里。许多被判处死刑的人很害怕自己的尸体被胡乱处置，就像害怕死亡本身一样。

但是，这些新鲜的尸体确实促进了科学的发展。它们不仅是普通解剖学家的研究对象，还让科学家的各种理论能够得到检验，其中包括生物电（当时被称为流电）控制人体的理论。1818年，马修·克莱德斯代尔在苏格兰的格拉斯哥被判处死刑。同时法院还对西蒙·罗斯、詹姆斯·博伊德和玛格丽特·肯尼迪做了同样的判决。罗斯和博伊德因入室盗窃而被定罪，而玛格丽特·肯尼迪因使用假钞而被定罪。克莱德斯代尔被指控醉酒后暴怒地用煤镐杀死了一名男子。克莱德斯代尔因罪大

恶极而被绞死，并且不允许把他埋葬在监狱墓地，而是判处把他的尸体交给格拉斯哥大学的解剖学教授詹姆斯·杰弗里进行公开解剖。玛格丽特·肯尼迪和詹姆斯·博伊德后来被减刑了——绞死妇女的情况在当时极为罕见，自1765年开始实施公开处决以来，格拉斯哥只有4名妇女被绞死，而博伊德只有14岁——所以，最后只有小偷罗斯和杀人犯克莱德斯代尔在1818年11月4日被处死。

克莱德斯代尔在牢房内能够听见人群开始在草地上聚集。前来观看公开绞刑和解剖的人从城市和周边的农村涌向这里。克莱德斯代尔穿的白色囚服就像一件带兜帽的睡衣，他双手被绑住，由护卫拥着从人群中穿过。

头一天晚上，刽子手的4名助手就已经把绞架搭建好了。绞架的楼梯只到齐肩的高度，为的是让围观的人们能够看得更清楚。爬上绞刑架的楼梯后，克莱德斯代尔和与他一同被判刑的西蒙·罗斯面对刽子手塔玛斯·扬和他的4名助手站住。囚犯的腿被绑住，防止他们从活板门坠落的时候抵抗。他们已经吓得脚瘫手软。两个人开始祈祷时，克莱德斯代尔跪到了地上。刽子手把绞索套在他们的脖子上。克莱德斯代尔因为头被兜帽罩住，什么也看不见，但他可以听见闹哄哄的人群在等着看他被绞死，然后被解剖。

镇上的钟敲了3下，塔玛斯·扬把克莱德斯代尔脚下的活板门打开了。克莱德斯代尔摔了下去，直到绳子在他脖子上猛然拉紧时才在空中停下来。为了确保他俩必死无疑，罗斯和克莱德斯代尔在大庭广众下被悬挂了一个小时，然后刽子手才将绳

索砍断，把他们放下来。罗斯的遗体被交给他父亲拿去埋葬。克莱德斯代尔的遗体则在士兵护卫下用马车拉走，送到附近的格拉斯哥大学解剖学院。在马车后面，浩浩荡荡的急于目睹解剖盛况的人群尾随着。穿过整个小镇的道路两旁挤满了围观者，有的人为了找个有利的位置观看，甚至爬上屋顶。尸体经过时引得人们欢呼雀跃。在大学里，他们遇到了另一群人。当尸体被送进建筑物时，聚集的群众发出阵阵吼声。

法院将克莱德斯代尔的尸体交给杰弗里教授进行解剖，但杰弗里知道刚去世的人体对他的同事安德鲁·尤尔博士来说是难得的样本，因此慷慨地允许尤尔在罪犯尸体上进行实验。安德鲁·尤尔的物理学和生理学讲座都颇受欢迎，他对电特别感兴趣。他热衷于用270层合金、能产生强大电击的伏打堆做实验。他想检验他的理论，即电是驱动身体运动、维持心脏跳动、赋予大脑心理功能的能量来源，因此它有可能让死者复活。尤尔的目的不是让这个被绞死的罪犯活过来，而是了解神经系统功能的电学基础，从而开发出利用电来拯救溺水者和猝死者的方法。

演讲厅里挤满了观众。有报道说，克莱德斯代尔的尸体仍穿着他被绞死时所穿的白色囚服，被摆在教授面前的桌子上。遮在他狰狞的脸上的头套和绑住他手脚的绳索被拿开了，凶手被抬到椅子上坐着，椅子直接面对着狂暴的观众。

在克莱德斯代尔到达前几分钟，尤尔用硝酸汞水为他的电池充满了电。由于尤尔并非外科医生，因此杰弗里的助手托马斯·马歇尔被派来协助，并按照尤尔的要求进行解剖。解剖开始

了，尤尔让马歇尔在克莱德斯代尔的脖颈后方切开一个大口，露出颈椎和脊髓。接着，他在左髋部做一个贯穿臀部的大切口，以暴露出坐骨神经，并在左脚后跟处也切开一个口子。尤尔拿起两根连接着电池的长长的导电探针，把其中一根金属探针放到克莱德斯代尔的脊髓上，并用另一根金属探针触碰他的坐骨神经，这立刻让尸体产生了戏剧化的反应，人们被这恐怖的一幕惊呆了。尤尔在1818年12月10日给格拉斯哥文学协会的致辞中描述了整个过程，他写道：“尸体的每块肌肉都立即抽搐起来，就像因寒冷而剧烈颤抖一样。”^[35]尤尔的描述是客观和符合临床实际的。与之形成鲜明对比的是媒体上出现的耸人听闻和哗众取宠的报道，说什么尤尔让死去的恶魔复活了。尤尔在致辞中继续写道：“每次重复电击时，都是左侧的抽搐最强。如果把第二根探针从臀部移到脚后跟，原先弯曲的膝盖突然伸直，腿使劲弹起来，差点儿踢翻了其中一位助手，助手想按住这条腿不让它伸展，但无济于事。”人群中一片骚动。^[36]

尤尔指示马歇尔做一个切口，暴露出控制呼吸的膈神经，他相信这条神经也控制心脏。尤尔希望通电能够让呼吸恢复，并让停跳的心脏再次跳动：

实验大获成功。吸气——呼气，吃力的呼吸立刻出现了。胸部和腹部都开始随着膈肌的张弛而起伏。只要我继续通电，这个过程就会一直持续下去。^[37]

接下来的实验在观众当中产生了更加戏剧性的效果。克莱德斯代尔的眉弓处被切开，暴露出眶上神经。当尤尔在切口处

接通电流时，死者的面部开始扭曲变形，显现出一系列活灵活现的古怪面容；尤尔通过调节刺激电流的强度来控制表情。他回忆说：“他面部的每一块肌肉都同时开始活动，形成狰狞的面容：愤怒、恐惧、绝望、痛苦和惊悚的微笑。天下最丑恶的表情都集中到了死者的脸上，哪怕菲斯利或凯恩（著名演员）最疯狂的表演也不及其万一。”有些看客被吓得夺门而逃。剩下的人无不感到恶心，不止一个人当场晕了过去。[\[38\]](#)

但是，尤尔令死去的凶手“复活”的可怕演示还没完。实际上，他的演示才刚到高潮部分。尤尔将一个电极搭在死者的尺神经上，同时用另一个电极去碰脊髓，克莱德斯代尔的手指立即像小提琴手在演奏时一样疯狂且快速地动了起来。尤尔断开电路，于是手指停止了抽搐，紧握成拳头。接下来，他用电极触碰克莱德斯代尔的食指尖，死者的手臂弹了起来，似乎直指那群看客。

正如报道中描述的那样，许多围观的人都确信克莱德斯代尔已经复活。尤尔对此并不抱幻想，但这次实验更加促使他下定决心要找到一种方法，有朝一日能拯救窒息、卒中或心脏病发作的病人：“我对绞死的罪犯进行实验的目的并非要让尸体复活，而是要获得有关流电在这些情况下是不是可发挥作用、是不是最佳方法的实用知识。”[\[39\]](#)他总结道：“这是有可能实现的。实际上，用浸泡过氨盐（氯化铵）溶液的布包裹两小块黄铜，在胸前和后背各放一块，分别贴在膈神经和膈肌所在的区域，无须任何外科手术即可恢复（心脏跳动）。”[\[40\]](#)尤尔所构思出来的就是现代自动体外除颤器（AED）。如今，这种

设备在许多公共场所都很常见，例如学校、企业、机场以及社交和体育活动场所，救护车和医院也都有配备。

大多数人认为，如果按照时间顺序，尤尔在1818年11月对马修·克莱德斯代尔进行的实验不可能是玛丽·雪莱创作《弗兰肯斯坦》的灵感来源，因为这部小说出版于当年1月份，而尤尔的公开实验发生在10个月之后。另一些人则认为流电并不是这本书的灵感来源，反驳的理由不是根据时间顺序，而是根据方法论。[\[41\]](#) 好莱坞所塑造的怪物在栩栩如生的闪电中复活，与此不同的是，雪莱对怪物如何重获新生的描写却显得模棱两可，不过，更有可能是通过化学途径，而不是电：

已经是凌晨一点了，雨滴打在窗户上，窗外一片模糊，我的蜡烛也即将燃尽。就在蜡火快要熄灭时，我看到那个家伙睁开了灰黄的双眼，目光呆滞。它呼吸急促，四肢抽动起来。[\[42\]](#)

然而，化学和电是密不可分的，例如克罗斯和其他电学家用来发电的伏打堆（自制电池）。克罗斯的庄园里散落着2 500个这样的瓶子，大部分是通过把空酒瓶的瓶颈敲下来做成的。此外，流电和闪电也作为线索贯穿在雪莱的故事中，她通过罗伯特·沃尔顿给姐姐写的信和笔记作为叙事的框架将它们联系起来。维克多·弗兰肯斯坦为了追捕他亲手创造的怪物，已经累得精疲力竭。这时，他碰到一艘正驶向北极的船。船长沃尔顿救了弗兰肯斯坦，并记下了他在生命最后一刻所讲述的悲惨故事。

此前，我对一些更显而易见的电学定律也略有所知。当时，一位对自然哲学颇有研究的先生和我们在一起。他对这场灾难兴奋不已，于是开始向我们解释他在电和流电这个主题上形成的理论。他的理论让我耳目一新，也让我惊讶不已。[\[43\]](#)

在尤尔对绞死的凶手进行实验之前，用电使死者复活的意图以及相关研究很可能已经广为流传了。确实，通过电击让尸体活动以展示电的威力，这在历史上早有记载。最著名的例子是意大利科学家乔瓦尼·阿尔迪尼于1803年1月17日在伦敦新门监狱进行的实验。此外，玛丽的最后一任丈夫珀西·雪莱对电也有着浓厚的兴趣，这也是在玛丽开始写书的两年前，这对鸳鸯要一起参加罗斯1814年讲座的原因。她写这本书的起因是回应拜伦勋爵在日内瓦湖畔夏游时向她发起的写鬼故事的挑战。

乔治·福斯特由于把他的妻子和孩子溺死在运河里而被判处绞刑。随后，他的尸体被交给阿尔迪尼进行公开解剖。阿尔迪尼是路易吉·加尔瓦尼的侄子，而路易吉·加尔瓦尼是“流电”或生物电的发现者。《泰晤士报》曾做过这样的报道：

“一开始将这种方法用在面部时，死者的下巴开始颤抖，附近的肌肉扭曲着，一只眼睛竟然睁开了。在此后的实验里，死者右手举起，像是要抓住什么，整条腿开始动起来。”[\[44\]](#)接着，阿尔迪尼把电极贴在福斯特的耳朵和直肠上，导致尸体全身剧烈收缩。阿尔迪尼此前在博洛尼亚的时候用动物做过类似实验，但这次对人体进行电刺激的展示是他研究的顶峰。意大利科学家安东尼奥·玛丽亚·瓦萨利·安迪（1761—1825年）

此前曾在都灵对几名刚被斩首的罪犯进行过一系列类似的实验，在公众当中造成了同样的震惊和轰动。[\[45\]](#)

从带电的大脑到电椅

1881年，纽约州布法罗市一个名叫阿尔弗雷德·索思威克的牙医，寻思要把有着生杀予夺神力的电用在一种比绞刑更人性化的行刑方法上——于是他想到了电椅。托马斯·爱迪生是该项目的热情支持者，并为牙医提供了资金。爱迪生有着不可告人的动机，那就是击败他的竞争对手尼古拉·特斯拉和乔治·威斯汀豪斯（西屋电气创始人），从而夺得国家电网的订单。爱迪生推广的是他开发的直流电模型，而特斯拉和威斯汀豪斯则倡导他们的交流电模型。为了让公众相信交流电很危险，爱迪生公开演示了用交流电把狗、牛犊和马电死，以证明其致命性。为了让他的竞争对手与致命的交流电紧密联系起来，爱迪生打出的广告语是将罪犯“关进西屋，坐上电椅”。

威廉·克姆勒是第一个被绑在牙医的发明上电死的人，他的罪名是用斧头谋杀妻子。克姆勒于1890年8月6日在纽约奥本监狱的电椅上被处决，但行刑的过程并不顺利。用1 000伏的交流电通电17秒钟，罪犯失去了知觉，并被烧焦了……但他还活着。发电机重新充电，电压也提高了两倍，产生的电火花击穿了血管，与电极接触的皮肉燃烧起来。克姆勒的大衣后面着火了，烧焦的肉散发的恶臭混合着烟雾和恐怖弥漫在空气中，令人作呕，有两名目击者昏了过去。过了好几分钟，克姆勒才终于咽气。

乔治·威斯汀豪斯讥讽说：“用斧头效果会好得多。”

[\[46\]](#)

美国的亚拉巴马州、阿肯色州、佛罗里达州、肯塔基州、俄克拉何马州、南卡罗来纳州、田纳西州和弗吉尼亚州还在用电椅执行死刑，目前只有特拉华州、新罕布什尔州和华盛顿州被准许使用绞刑。[\[47\]](#)

有想让死人复活的，有在战争和暴行中挣扎的，有在心灵感应的超自然领域探秘的……这些都是关于发现大脑带电的离奇故事。现在我们知道，所有复杂的大脑，甚至包括章鱼和其他无脊椎动物的大脑，都会产生脑电波。但是，脑电波到底是什么呢？它能告诉我们什么，我们如何发现它的功能呢？我们将在下一章中探讨这些问题。

[\[1\]](#) Morus, I. R. (1998) *Frankenstein's Children*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 109.

[\[2\]](#) 1英亩 $\approx$ 4 047平方米。——编者注

[\[3\]](#) BritainExpress.com. Fyne Court.
<https://www.britainexpress.com/attractions.htm?attraction=3623>. Accessed September 15, 2019.

[\[4\]](#) Crosse, C. A. H. (1857) *Memorials Scientific and Literary of Andrew Cross, the Electrician*. London: Longman, Brown, Green, Longmans and Robert.

[\[5\]](#) Adams, S. Letters of Scientist who Inspired Frankenstein Go on Public Display. Telegraph, December 8, 2008:

<https://www.telegraph.co.uk/technology/3684107/Letters-of-scientist-who-inspired-Frankenstein-go-on-public-display.html>. Retrieved August 23, 2016.

[6] Ibid.

[7] Wright, B. (2015) *Andrew Crosse and the Mite That Shook the World*. Leicester, England: Troubador Publishing.

[8] Finger, S.; and Law, M. B. (1998) Karl August Weinhold and His “Science” in the Era of Mary Shelly’s *Frankenstein: Experiments on Electricity and the Restoration of Life*. *Journal of the History of Medicine* 53: 161–180.

[9] Morus, I. R. (1998) *Frankenstein’s Children*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, reference 63.

[10] Crosse, A. (1836–7) On the Production of Insects by Voltaic Electricity. *Annals of Electricity* 1 :242–244, quote on p 242–243. Also quoted in Cross, A. (1838) Description of Some Experiments Made with the Voltaic Battery, by Andrew Crosse, Esq. of Broomfield, near Taunton, for the Purpose of Producing Crystals; in the Process of which Experiments Certain Insects Constantly Appeared. Communicated in a letter dated December 27, 1847, addressed to the Secretary of the London Electrical Society and read on January 20, 1838, 246–257; and in Morus, I. R. (1998) *Frankenstein’s Children*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 139–140.

[11] Dougan, A. (2008) *Raising the Dead: The Men Who Created Frankenstein*. Edinburgh, Scotland: Birlinn Limited, eBook edition, location 1764 of 2384.

[12] Wright, B. (2015) *Andrew Crosse and the Mite That Shocked the World*. Leicester, England: Troubador Publishing, 117.

[13] Stallybrass, O. (1967) How Faraday “Produced Living Animalculae”: Andrew Crosse and the Story of a Myth. *Proceedings*

of the Royal Institution 41: 597 – 619, quoted in Morus, I. R. (1998) *Frankenstein's Children*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 142.

[14] Turpin, M. (1838) Note on the Kind of Acarus presented to the Academy at the Session of the 30th of October, by M. Robertson to whom Mr. Crosse had communicated it; by M. Turpin. *The Annals of Electricity, Magnetism, and Chemistry and Guardian of Experimental Science* 2 (1838): 355 – 360.

[15] Morus, I. R. (1998) *Frankenstein's Children*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 142.

[16] Ibid.

[17] Ibid., 138, referencing Mackintosh's electrical theory of the universe, *New Moral World* 3 (1836 – 7):239.

[18] Ibid., 138, referencing Mackintosh's lectures in *Mechanics' Magazine* 27 (1837): 9 – 10.

[19] Ibid., 138, quoting Thomas S. Mackintosh, The Electrical Theory of the Universe, or the Elements of Physical and Moral Philosophy, Boston 1838, 360 – 361.

[20] Bada, J. L.; and Lazcano, A. (2000) *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 30: 107 – 112. <https://doi.org/10.1023/A:1006746205180>.

[21] Berhanu, S., et al. (2019) Artificial Photosynthetic Cell Producing Energy for Protein Synthesis. *Nature Communications* 10 (1325).

[22] Devlin, H. Scientists Grow “Mini-Brain on the Move” That Can Contract Muscle. *The Guardian*, March 18, 2019. [https://www.theguardian.com/science/2019 / mar/18/scientists-grow-mini-brain-on-the-move-that-can-contract-muscle](https://www.theguardian.com/science/2019/mar/18/scientists-grow-mini-brain-on-the-move-that-can-contract-muscle).

[23] Also spelled as Carl August Weinhold.

[24] Weinhold's experiments published in Weinhold, K. A. (1817) *Versuche über das Leben und seine Grundkräfte, auf dem Wege der experimental-Physiologie* [Experiments on Life and Its Primary Forces through the Use of Experimental Physiology]. Magdeburg: Creutz. https://books.google.com/books/about/Versuche_%C3%BCber_das_Leben_und_seine_Grund.html?id=viU_AAAAcAAJ.

From Finger, S.; and Law, M. B. (1998) Karl August Weinhold and His "Science" in the Era of Mary Shelly's *Frankenstein: Experiments on Electricity and the Restoration of Life*. *Journal of the History of Medicine* 53: 169.

[25] Morus, I. R. (1998) *Frankenstein's Children*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, eBook edition, location 1667 of 2384.

[26] Finger, S.; and Law, M. B. (1998) Karl August Weinhold and His "Science" in the Era of Mary Shelly's *Frankenstein: Experiments on Electricity and the Restoration of Life*. *Journal of the History of Medicine* 53: 169.

[27] Ibid., 179.

[28] Eberle, H.; and Weinhold, K. A. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (in German). https://www.catalogus-professorum-halensis.de/weinholdkarl_august.html. Accessed September 15, 2019, citing Hans-Theodor Koch, Karl August Weinhold (1782-1829) and his suggestion for infusion (1827), in Piechocki/Koch, *contributions* (1965): 182-188.

[29] Mörgeli, C. (1993) Chirurgischer Eingriff gegen die Übervölkerung: Professor Weinholds Verhaut Infibulation. *Gesnerus* 50: 264-273.

[30] 1英寸= 2.54厘米。——编者注

[31] Weinhold, K. A. (1929) *Das Gleichgewicht der Bevölkerung, als Grundlage der Wohlfahrt der Gesellschaft und der Familien*. Verlag von Carl Focke, Leipzig, 67. See also Lorenz, M., *Menschen*

Zucht Frühe Ideen und Strategien 1500 – 1870, Wallstein Verlag, Göttingen, 2018, 137–138.

[32] HistoryExtra.com. A Brief History of Capital Punishment in Britain. <https://www.historyextra.com/period/modern/a-brief-history-of-capital-punishment-in-britain/>. Accessed September 15, 2019.

[33] Hurren, E. T. (2016) *Dissecting the Criminal Corpse: Staging Post-Execution Punishment in Early Modern England*. Basingstoke, UK: Palgrave Macmillan. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK384636/>.

[34] Ibid.

[35] Dougan, A. (2008) *Raising the Dead: The Men Who Created Frankenstein*. Edinburgh, Scotland: Birlinn Limited, eBook edition, location 2012 of 2384, eBook location 1532 of 2384.

[36] Ibid., eBook location 1534 of 2384.

[37] Ibid., eBook location 1547 of 2384, citing Ure, A. (1819) *The Journal of Science and the Arts* VI (John Murray, 1819): 283 – 293.

[38] Ibid., eBook location 1561 of 2384

[39] Ibid., eBook location 1205 of 2384.

[40] Ibid., eBook location 1605 of 2384.

[41] Wright, B. (2015) *Andrew Crosse and the Mite That Shook the World*. Leicester, England: Troubador Publishing.

[42] Shelley, M. W. (1869) *Frankenstein The Modern Prometheus*, Sever, Francis, and Company, Boston and Cambridge, 30.

[43] Ibid., 37.

[44] Dougan, A. (2008) *Raising the Dead: The Men who Created Frankenstein*. Edinburgh, Scotland: Birlinn Limited, eBook edition, eBook location 1195 of 2384.

[45] Hurren, E. T. (2016) *Dissecting the Criminal Corpse: Staging Post-Execution Punishment in Early Modern England*. Basingstoke, UK: Palgrave Macmillan. See also Aldini, J. (1803) *An Account of the Late Improvements in Galvanism, with a Series of Curious and Interesting Experiments*. London: Wilks and Taylor, 221 pages. <http://www.gutenberg.org/files/57267/57267-h/57267-h.htm>.

[46] King, G. Edison vs. Westinghouse: A Shocking Rivalry. Smithsonian.com, October 11, 2011. <http://www.smithsonianmag.com/history/edison-vs-westinghouse-a-shocking-rivalry-102146036/>.

[47] Death Penalty Information Center. 125 Years Ago, First Execution Using Electric Chair Was Botched. DeathPenaltyInfo.org, August 7, 2015. <http://www.deathpenaltyinfo.org/node/6216>. Also Death Penalty Information Center. Methods of Execution. <https://deathpenaltyinfo.org/methods-execution>. Accessed September 15, 2019.

第二部分

了解脑电波

我来到加州大学圣迭戈分校很酷的超级计算机中心，拜访了神经科学家霍华德·波伊兹纳（Howard Poizner）。他说，用复杂的仪器可以监听到我的大脑皮质一闪而过的电信号，他可以通过这种方式读懂我的心思。他可以看到我的大脑如何学习。当我闭着眼睛神游的时候，他可以分析流过我大脑的电信号的模式，而且可以知道我有一个什么样的脑子。我头脑中最隐秘的细节都逃不过他的眼睛。

第3章

破解脑电波

小房间里很暗。一个钢架上摆满了装有密密麻麻的旋钮和开关的电子设备，计算机显示器发出的蓝光照亮我的轮廓。我身穿实验室的白大褂，屏息凝神地坐在显微镜前。显微镜头下方，聚光灯明亮的白光打在大鼠毛茸茸的脑袋上。它顶部的颅骨已被去掉，露出了鲜活的大脑，湿润而有光泽，表面布满微微跳动的血管。在聚光灯的中央，一根4英寸长的细针（类似于针灸师用的那种针）插进灰色的脑组织中。麻醉后的大鼠在平静地呼吸。房间里很安静，除了电子设备嗡嗡作响、扬声器发出轻微的嘶嘶声和气体充入人工脑脊髓液（用于实验的药物溶液，向内不断充入95%的氧气和5%的二氧化碳）时汩汩作响外，再也听不到其他声音。

在神经元之间进行交流的电脉冲只有大约1/10伏的电压，持续时间只有1/1 000秒，就像照相机闪光灯闪一下那么短。为了检测这些微弱且短促的信号，需要把尖锐的微电极刺入单个神经元来进行记录，插在大鼠大脑上的针就是这种微电极。之所以这么称呼，是因为这种针的尖端细得可以插进单个神经细胞里。它被夹在一个被称为显微操作器的设备上，通过一对导线连接到放在钢架上的高增益电子放大器，而昏迷的大鼠就躺在旁边的不锈钢操作台上。不锈钢操作台的四个脚分别装有四个空气活塞，可消除任何振动。通过旋转显微操作器的三个控制旋钮，我可以把

电极以极高的精度在3D空间中进行定位，并让它前进或后退非常小的距离。

当我一边慢慢转动显微操作器的控制旋钮时，我还要一边监听着微电极通过放大器和扬声器反馈回来的声音，同时观察扫过计算机显示器的电压轨迹。我慢慢地把微电极刺进脑组织时，扬声器发出沙沙的声音，听起来就像是收音机里的无线电噪声。当我在背景噪声中听到轻微的爆裂声时，我知道自己找到了一个神经元，并且针尖已经离它很近了。这种爆裂声表示在离微电极尖端不远的地方有神经元在放电。现在，我像个找水的掘井人一样小心翼翼地操纵着电极缓慢地进退，留意着爆裂声是在逐渐变弱还是增强。

突然间，爆裂声大作，就像暴风雨中的冰雹砸在汽车引擎盖上一样。我果断地把电极往前一推，于是接入了单个神经元的生物电信号。每次神经元发出爆裂声时，我都能看到计算机显示器上的电压轨迹出现峰值后又回落，看起来像医院里的心跳监视器。

我必须非常小心，不要碰到任何东西，以免使电极产生哪怕最微小的移动。我开始疯狂地收集数据。我知道，能够用来记录这个神经元放电过程的时间可能非常短暂。多长时间？我无法预测，因为在任何时候，细胞都可能会被破坏或断开与电极的联系，因此几秒钟、几分钟或几十分钟都有可能。

这种记录神经元活动的方法很有启发性。例如，通过研究受刺激的神经元的放电反应，电生理学家已经掌握了大量有关神经元电学特性的知识。观察单个神经元的行为，可以让我们知道它

们如何在神经回路中共同发挥作用。但是如您所见，记录单个神经元的脉冲是一个漫长、困难且乏味的过程：要会做精细的脑部手术，要注意保持处于麻醉状态的动物的呼吸和体温，要能在处理数据的时候争分夺秒地做实验。

与记录“单个神经元”的辛苦过程不同，大量相关的神经元同时放电会引起周围电场的波动。这种波动可以被放置在头皮上的电极检测到。是的，我们又回到了脑电波的话题。用脑电图在颅骨外部记录到的大脑活动有点儿像在停车场听到从体育场传来的欢呼声。你听不到个别观众的对话（即个别神经元的活动），相反，你听到的是集体的躁动——例如，进球时，人群的吼声会发生很大改变。不过，我们可以精确地在头皮的不同位置上安放十来个甚至上百个电极，每个电极的作用都相当于一个掌声计数器，它可以记录体育场特定区域内每个人的掌声。所有电极都会把各自收集到的来自脑部的信号传递给放大器，于是我们可以从头部的不同位置同时采集上百条不同的电压波动轨迹，然后再输入计算机进行回放和分析。因此，与单个神经元发放电脉冲产生的波形不同，脑电图描绘出的是摆动的波浪线，看起来就像测谎仪绘出的波纹。

然而，脑电波到底是大脑工作时产生的电噪声还是大脑工作的方式？改变我们的脑电波能影响我们的大脑吗？如果我们能够确定与神经系统或心理功能障碍相关的脑电波模式，那么改变这些模式可以矫正这些功能障碍吗？这正是接下来将要出场的两位女性想要做的。

从电休克疗法到神经反馈疗法

乔伊是个漂亮的婴儿，有一双闪亮的蓝眼睛，小脸胖乎乎的。但在6个月大的时候，他的表情仍然像个洋娃娃。他不会对母亲的微笑产生快乐的反应，虽然他的眼睛在四处张望，但他不愿意与其他人的目光有任何接触。乔伊的父母很期待能和他们的宝宝共度快乐时光，但事与愿违，这几个月的观察令他们非常担心儿子是不是缺乏社交反应的能力。到乔伊一岁的时候，他们的担忧变成了恐惧和痛苦。乔伊对别人喊自己的名字没有反应，这种反应甚至连家养的小狗都能很快学会。乔伊不会像其他婴儿一样咿咿呀呀试图用语言进行交流，他会伸出他的小手或挥动手臂，但他不会说话，对照顾他的人的反应很冷淡——出问题了。

医生检查了乔伊的听力，发现他听力正常，后又对他进行了一系列其他医学检查。所有结果都表明，乔伊是个非常健康的孩子。乔伊的父母坐在检查室外的走廊里，就在给乔伊做检查的医生的办公室对面。这时候，医生把他们请进办公室。医生坐在一张光洁的橡木桌子后面，背后的墙上挂着裱框的毕业证书。他告诉乔伊的父母一个不幸的消息：乔伊患有孤独症。那一天让他们终生难忘。

孤独症谱系障碍（ASD）是一种心理异常状态，发生的原因是大脑发育异常，导致大脑处理信息的方式有所不同——尤其是对感觉刺激的处理，常常引起异常强烈的感觉，让患者不知所措。科学家正在对孤独症的病因进行深入研究，他们发现遗传可能是一个很重要的因素。尽管发现了许多有意思的线索，但对导致人类孤独症的原因尚无明确的结论。根据美国疾病预防控制中心

心的数据[\[1\]](#)，孤独症谱系障碍的发病率高得令人担忧。在美国，每59名儿童里面就有1名受到孤独症的折磨。从统计数据看，男孩被诊断为孤独症的可能性大约是女孩的4倍。[\[2\]](#)

顾名思义，由于孤独症患者跟其他人的差异，他们可能会遇到各种各样的困难。就拿乔伊来说，即使是日常生活或周围环境的微小变化也会让他心神不宁。当他感到惶恐不安又孤立无援的时候，他会一遍又一遍地重复某些单词和短语。到了该上学的年纪，他仍然没有好朋友。

当乔伊8岁的时候，一位名叫杰西卡·厄尔的医生出现在他身边，情况得到了巨大的改善。乔伊的母亲非常高兴，她很乐意分享乔伊的经历。“通常，厄尔一天只能给他做一两次治疗，因为如果她做得太多，乔伊就会吃不消，会开始抓狂。”厄尔从乔伊妈妈的报告中获悉乔伊的变化，她告诉我说：“今天，他们出去逛了。乔伊在一家新开的理发店理了发，还到一家餐馆尝了新的食物。他妈妈则去了一家新开的店买了一些衣服。他们去了邮局和杂货店。她的丈夫最近带乔伊去看过电影，还去商场吃午餐。”

“这从未发生过，”乔伊的母亲告诉厄尔，“他做得很好，他很开心……还有很多改变我都想不起来了——很多都是第一次。”[\[3\]](#)

乔伊没有用什么新药。他的改变也并不是因为用了某种新的心理疗法或行为矫正疗法。杰西卡·厄尔和她的同事罗宾·伯恩哈德对乔伊采用了一种全新的、革命性的方法。她们让乔伊安静

地坐在椅子上，什么都不做，把头脑放空几分钟。在此期间，他们记录了他的脑电波。然后，他们将记录到的脑电图数据发送给在加利福尼亚的同事杰伊·冈克尔曼，请他分析乔伊的脑电波，检查他的大脑神经回路的电活动模式是否有什么异常。收到冈克尔曼的报告后，厄尔和伯恩哈德再次约见乔伊，然后对他使用一种无创也不用服药的方法来改变他的脑电图模式——神经反馈治疗。（更d书f享搜索雅 书.YabookK）

他们使用的神经反馈方法需要实时监控乔伊的脑电波。只要他的脑电图模式对训练内容有反应，计算机就会给他一个积极的（语音）信号。每一次的训练方案都是在评估了之前训练结果的基础上拟定的。在此过程中，不需要任何刻意的努力。通过神经反馈，大脑会得到必要的指导，就可以自动地、无意识地进行自我纠正。

尽管这个方法得到最新的神经科学研究的支持，但可惜大多数健康保险并没有把这种治疗包括在内。许多人并不认可神经反馈疗法，认为它不过是流行于20世纪60年代的一种时尚。当时，该领域的研究数量激增，大量提供各种生物反馈治疗的从业者涌现出来，而这些人技能和水平却参差不齐。从熔岩灯 [\[4\]](#) 时代开始，科学已经取得了很大进步。尽管如此，医生要想将新的科学研究成果应用于临床治疗还需要等待数年的时间。厄尔和伯恩哈德有可能走到了医学的最前沿——未来精神病学家可能都将用脑电图仪取代传统治疗方法。实际上，他们也有可能只是打了个擦边球，利用大脑产生的强烈的安慰剂效应 [\[5\]](#) 来替代药物作用的一种疗法。我想了解更多信息，于是联系了杰西卡·厄尔。我问她是否同意给我测测脑电波，让我也体验一下她曾经用在孤独

症、成瘾和强迫症等多种心理疾病患者身上的神经反馈疗法。她爽快地答应了。

杰西卡·厄尔对脑电图的兴趣始于2001年，当时她正在做一篇关于快速眼动（REM）睡眠的本科荣誉论文。脑电图揭开了睡眠的神秘面纱，显示了人在熟睡时大脑产生的变化（这将在第7章中详细介绍）。记录睡眠状态下的脑电图是厄尔研究内容的一部分。2002年，厄尔开始在精神病院里为长期患有严重精神疾病的患者服务。眼看着病人遭受痛苦，想要帮助他们却又力不从心的感觉让她很沮丧。她告诉我：“这是我在心理健康领域的第一份工作。但是，看着眼前的一切，我不确定自己是否还想在心理健康领域继续干下去。”很多患者都在接受的电疗或叫作“电休克疗法”（ECT）让她觉得特别困惑。[\[6\]](#)

电休克疗法

20世纪30年代，在精神病院工作的匈牙利医生拉迪斯拉斯·冯·梅杜纳提出了用电击大脑来治疗精神疾病的想法。他不是精神科医生，而是神经病理学家。梅杜纳对尸体的大脑组织做检查，也在脑外科手术期间做过脑组织活检。他对一种叫作神经胶质的脑细胞进行观察，发现了很有趣的现象。与神经元不同，神经胶质不能发放电脉冲，因此被大多数神经科学家忽视了（现在仍然不被重视）。[\[7\]](#)但是梅杜纳注意到，癫痫发作患者脑组织中的神经胶质明显增多，而且这些细胞出现异常肿胀。另一方面，精神分裂症和抑郁症患者的脑组织中的神经胶质却比正常人要少得多。

梅杜纳将他的观察结果与另一个让人好奇的事实联系在了一起：1926年，德国蒂宾根的精神病学教授罗伯特·高普博士报告说，虽然精神分裂症和癫痫是两种非常常见的疾病，但很少有人同时患有这两种疾病。1929年，奥尔宾·雅布隆斯基和尤利乌斯·尼罗博士在布达佩斯政府救济院调查的报告中说，在极少数情况下，癫痫患者会发展为精神分裂症，而在这种情况下，他们的癫痫也会痊愈。第一次精神病发作后，癫痫的治愈率就提高到普通癫痫患者的16倍。梅杜纳在医院工作的时候也观察到，精神分裂症患者偶尔会出现自发性癫痫发作，随后，其精神病症状通常会有所减轻。[\[8\]](#)

把这些线索串起来后，梅杜纳得出结论，精神分裂症和癫痫症都是由于神经胶质失调引起的疾病：精神分裂症中的神经胶质过少，而癫痫中的神经胶质过多。于是，他提出一个理论：在精神分裂症患者身上诱发癫痫发作会增加大脑中的神经胶质，并使他们的精神分裂症治愈。梅杜纳关于精神疾病治疗的这个古怪想法被他的同僚们视为荒诞不经，于是他像汉斯·伯格一样，开始了自己的秘密研究。

1934年1月23日，为了试验治疗效果，拉迪斯拉斯·冯·梅杜纳在一个精神分裂症患者身上诱发了剧烈的癫痫发作。该男子患有紧张型抑郁障碍——一种令人绝望的精神分裂症。他在床上躺了4年，不能动弹，只能通过插管进食。梅杜纳向这个紧张型抑郁障碍患者的血液中注射了一种化学物质——樟脑。注射立即引起了剧烈的癫痫发作，这名男子被全身强直和抽搐折磨了整整一分钟。梅杜纳目睹了一切，吓得腿脚发软，瘫倒在地。他不得不在两名护士的帮助下回到公寓休息。

但是4天后，梅杜纳继续勇敢地做他的实验，在他的病人身上再次诱发了癫痫。2月10日，即患者注射引起第五次癫痫发作后的第二天，离第一次注射不到3周，该名男子醒了过来。他自己穿上衣服，还要求吃早餐，并高兴地喊着梅杜纳博士的名字，跟他打招呼。“我听他们说您要做一些疯狂的实验？您做了吗？”他问。[\[9\]](#)

梅杜纳发明的治疗方法似乎很野蛮，但效果的确很好。梅杜纳后来又在很多精神病患者身上进行了同样的实验，那个男人只是其中的第一个。后来，化学注射诱发癫痫发作被电刺激的方法取代。在意大利，乌戈·切莱蒂和卢西奥·比尼把屠宰场用来杀猪的电击器进行了改装，改装后的电极可以用于向他们的精神病患者头部输送电流。他们首先在狗身上做实验，以测定动物在不被电死的情况下可以承受多少电压以及可以耐受多长时间。然后，他们就开始着手在精神病患者的脑袋上实施电击。比尼曾经问梅杜纳，他觉得用杀猪的电击枪来引发惊厥与用化学方法诱发的癫痫发作是否具有相同的效果。梅杜纳预言他们会成功的。

1938年4月11日，某个精神分裂症患者的太阳穴上被安上了电极。切莱蒂、比尼和他们的几位同事目睹了人类首次使用电诱发的癫痫发作来治疗精神疾病。经过7次电击治疗后，这个患者出院了——他的精神分裂症被治愈了。

如果按照当今人体实验的道德标准来看，这些实验都不可能获得准许。抽搐令观察者和患者都感到恐惧，癫痫发作可能会很危险。在电休克疗法盛行的早期，许多患者因身体剧烈的痉挛而导致骨折。如今，通过使用肌肉松弛剂和更严格地控制通电可以

防止骨折。梅杜纳的实验不仅开辟了一种针对致命疾病的全新治疗方法，而且改变了人们对精神疾病的看法。

以前，人们认为要治疗诸如抑郁之类的心理疾病，只有心理疗法一种。精神分裂症等更严重的精神疾病被认为是遗传缺陷所导致的不治之症。患有这些疾病的人通常被关起来，他们的生活看不到一点儿希望。梅杜纳提出了一个观点，即精神疾病可能也有其生物学基础，因此是可以通过物理干预的方法进行治疗的。这是一个转折点。从此，把精神疾病看作大脑的机能障碍成为一种共识，并促使人们开发出针对抑郁症、精神分裂症和许多其他心理疾病的药物。药物成为现代精神疾病治疗的主要手段。

梅杜纳对神经胶质如何参与癫痫发作，以及这些神经胶质如何影响精神疾病的生物学机制一无所知，但是今天我们知道，神经胶质能够调节理智与疯狂之间的平衡。例如，有一种被称为星形胶质细胞的神经胶质会把突触[\[10\]](#)包裹起来，并清除在突触之间堆积的神经递质（进行信息传递时神经元所释放的化学物质）。一般来说，神经元之间并不直接传输电信号，信息主要是通过把化学信使（即神经递质）释放到突触间隙（神经元突触之间的微小空隙）中进行传递。当电脉冲到达神经纤维的末端时，就会促使那个部位释放神经递质，从而激活另一个神经元上的受体。要想终止信号传递，就必须清除掉这些神经递质。星形胶质细胞就是执行这一重要功能的。神经递质的平衡如果被打破，就会影响大脑的正常功能，进而影响我们的情绪和心理状态，并导致各种精神疾病的症状。所有致幻药都是通过破坏大脑回路中神经递质的正常平衡来发挥作用的，而这些受影响的大脑回路跟情绪和更高水平的认知功能有关。所有用于治疗抑郁症和精神病的

药物都是通过调节大脑中特定的神经递质的水平来发挥作用，例如选择性5-羟色胺再摄取抑制剂（selective serotonin reuptake inhibitors, SSRIs）可以调节大脑中5-羟色胺（一种神经递质）的含量。负责调节神经递质的量的正是星形胶质细胞的作用。虽然我们对星形胶质细胞如何影响突触传递的了解只有短短25年，但现在看来，梅杜纳的直觉似乎并不是很离谱。如今，电休克疗法仍然是耐药型重性抑郁症最有效的疗法，但科学家对其作用机理仍然不是很清楚。

电休克疗法改变了很多人的生活，让他们恢复了健康，重新焕发出光彩，但这种治疗方法也并非总是有效的。此外，向人的大脑输入高压电击来诱发癫痫可能会引起一些严重的后果——记忆丧失是最常见的，此外还会产生其他认知障碍或性格改变。杰西卡·厄尔在精神病病房工作，她发现许多重性抑郁症患者不得不反复接受电休克疗法；就算治疗有效，通常也只是暂时缓解患者的症状。厄尔每天都目睹这些令人沮丧的失败。一方面，看着这些病人受苦让她感到不安；另一方面，在精神病院工作的有些人的冷漠态度也让她感到难以接受。许多人似乎觉得精神病是无法治愈的，他们使用电休克疗法的时候也就显得麻木不仁，何况他们可能认为治疗是毫无意义的。

在大学学习过脑电图后，厄尔可以身临其境地想象患者在接受电休克疗法的时候脑内发生了什么变化——他们的脑电波就像被猛烈的电风暴扫荡过一样。她能够看到在脑电图仪上显示的正常波动在电击时突然陷入一片混乱，就像地震监测仪在地震时疯狂绘出的图形一样。大脑遭到电击时，每条回路都会瘫痪，而且在大脑皮质中来回振荡的电流会破坏正常的信息流和大脑功能，

从而导致意识丧失、记忆力减退和癫痫发作。厄尔可以想象，这场破坏了正常脑电波功能的冲击过后，大脑会以各种方式努力重启并试图恢复原来的状态，但是这种治疗方法似乎太粗糙。它无法针对出现问题的特定大脑回路进行修复，这种方法太粗鲁、太残酷、太不可靠了。对病人采取电休克疗法的经验与在大学学到的关于脑电图的知识之间产生了交集，使厄尔产生了新的想法——脑电图也许能够检测出大脑的某些薄弱环节或者异常状态，那么通过神经反馈的方式就可以纠正它们。

我自己的脑电波

在一个闷热的夏日午后，我开车去弗吉尼亚州的夏洛茨维尔，空气湿漉漉的。夏洛茨维尔是一座大学城，由托马斯·杰斐逊创办的弗吉尼亚大学为中心拓展而成。大学主体是红墙镶着白边的建筑，显得肃穆庄严。第二天早上，我要去见厄尔和她的同事罗宾·伯恩哈德，让他们记录我的脑电波。他们一起经营弗吉尼亚神经反馈治疗中心，那儿离弗吉尼亚大学医学院不远。就在几个月前，我还在弗吉尼亚大学做过关于大脑可塑性的演讲。

[\[11\]](#) 当我早上8点到达神经反馈治疗中心时，我发现这里避开了医院和学校的紧迫感与喧闹。它坐落在一条阴凉、安静的小路上，是一栋整洁的用白色和绿色装饰的房子，门廊宽阔。我觉得在这里接受治疗的患者（其中很多是儿童）应该会感到很放松，因为这里没有医院和诊所的那种紧张气氛。当我走近房子时，看到一名年轻女子穿着鲜艳的蓝色无袖衫，上面印着白色的芙蓉花。她从阳台的藤椅上站起来向我打招呼。握手的时候，她自我介绍道：“杰西卡·厄尔。”

在进行脑电图测试之前的准备过程中，我完成了一个包含数百个问题的问卷调查。这些问卷涵盖了测试者可能出现的所有精神问题，并要求测试者对这些问题的严重程度或出现频率进行打分排序。比如，其中包括“我会一遍又一遍重复某句话”和“我记不住别人的脸”等类似的问题。完成了调查，我对厄尔在给患者进行治疗时可能遇到的各种困难有了更多的了解。我感到自己很幸运。比起那些病人，我实在没什么好抱怨的。

检查前，我收到的书面通知上写着：检查当天早上要洗两次头发并使之完全干燥，不要使用任何发型固定产品；另外，在记录脑电图之前不要使用任何兴奋剂。因此，我顶着一蓬鸡窝似的乱发来到治疗中心，并且因早上没喝咖啡而感到昏昏欲睡。我告诉厄尔，她应该把脑电图仪上的放大器增益调到最大，因为如果早上不来一杯咖啡，我不确定自己是否还会有脑电波产生。她说：“都给你准备好了。”她的导师兼同事罗宾·伯恩哈德带着咖啡一会儿就到。等我做完脑电图记录后，就给我一杯新鲜的咖啡。她带着同情的微笑说：“但愿你不会出现咖啡戒断症状。”

等待期间，我们坐在她舒适的办公室里。她回答了我的一些问题，也回顾了促使她与伯恩哈德一起工作的历程。她总结自己在精神病院的早期经历，说：“我眼看着人们生病，却无能为力。”除了病情很严重或有暴力倾向的精神病患者需要住在精神病院进行看护外，其他许多患者是老年人，他们住在疗养院，情绪低落。她说：“他们很沮丧，生活无法自理，变得神经兮兮的。”最终，他们会被送到精神病院接受治疗。“医生对他们使用电休克疗法，能使他们的精神状态改善几个月，”厄尔解释

说，“但最终又会回到原来的状态，而且还可能会造成记忆力丧失。这真的让我很沮丧。”

在工作中体会到的那种绝望的感觉是厄尔生活中一段非常重要的经历。现在回首过去，她说：“我刚从大学毕业，就被现实的情况震惊了。我觉得这很可怕。我觉得在某种程度上，电休克疗法太原始了，它只是在大脑中掀起一阵电风暴，然后就指望大脑会抹去生病时的状态，所以我开始研究电休克疗法的替代方法。”厄尔对正在使用的某些药物治疗也同样感到失望：“我开始思考我们的目的是什么——我们如何治愈患者？”

“我对身心的交互非常感兴趣。我决定购买用于神经反馈的设备，然后在自己身上进行实验。我买第一台脑电图仪的时候22岁，现在已经38岁了。”

“您第一次在自己身上做实验的体验如何？”我问。

“我训练过度了，使自己过于平静，但是到了半夜，惊恐发作（反弹效应）让我醒了过来。这对我是个很好的提醒：即使我认为这个方法是安全的，但也可能引起不良反应。我认为经验很重要，在对自己的客户进行实践之前，应该先在自己身上试试。目前，我自己已经做了数百个疗程。”

她的合伙人罗宾·伯恩哈德对神经反馈治疗方法的倚重与她有所不同，她说：“伯恩哈德首先是心理治疗师，然后才是神经反馈治疗师。”2003年，厄尔成为伯恩哈德的技术员，负责让患者接受用神经反馈设备进行治疗。“我真的很喜欢它。这个感觉

不错——临床工作与科学研究之间有了交集，感觉很前沿……一种非药物的干预措施，不会造成伤害，但会有效果。”

厄尔又回到学校，获得了心理咨询专业的硕士学位，并最终获得了心理健康顾问的资格和神经反馈疗法的国家认证。从2007年开始，她和伯恩哈德共同运营该中心。她们从不同的方向而来，最后都成了神经反馈治疗师，形成了一个能相互取长补短的团队。

这时，罗宾·伯恩哈德到了（手里拿着暂时不让我喝的咖啡），加入我们的对话。知道了厄尔对脑电波产生兴趣的由来以及她在精神病院工作的经历是她选择神经反馈疗法的重要因素之后，我问伯恩哈德，她是如何脱离标准的心理疗法，转而采用脑电图分析和神经反馈疗法的。

“我一开始工作的地方有遭受各种创伤的人。”她告诉我，“我开始的工作是临终关怀，照顾那些垂死的母亲，她们的孩子都还小。我开始为那些曾经目睹暴力的孩子做心理辅导，后来我加入了为父母离异的孩子做心理辅导的团队。再然后，我的工作就拓展到一般的创伤后应激障碍（PTSD）了。”

过去，她用的是已经成熟的技术来帮助这些患者，但是发现疗效不是很好，对于那些在发育早期就遭受过创伤的人来说尤其如此。大多数传统的心理治疗形式注重的是帮助患者自觉地发展和运用洞察力，但是对于那些对自我尚未形成完整认识的小患者而言，这是非常困难的。伯恩哈德解释说：“我对神经反馈感兴趣，是因为它为这些客户提供了另一种形式的帮助。患者不需要

那么费劲，神经反馈疗法直接作用于患者的大脑，避免了思维的过程。”

“这是一种无意识的生理干预。”厄尔解释道，“我们对大脑的奖励中枢进行干预，并通过声音将大脑的活动反馈给自身。”

根据厄尔的说法，她们的客户有大约一半是自己找上门的，而另一半是其他临床医生推荐过来的。

“对我们的许多客户来说，这是他们最后的希望。他们去过各种医疗机构，尝试了所有药物；他们有时会接受电休克疗法，也曾用过多种药物联合治疗……这些药物可能有长期的副作用，哪怕停药了，副作用也不会消失。患者感到绝望，但我们可以说，‘嘿，有种方法您还没有尝试过，它可能会对您有用’。这真是一件很棒的事情。”

“这是给我们的礼物。”伯恩哈德表示同意，“当你看到一个患者进来的时候萎靡不振，而出门的时候他感觉……有时好很多，有时好一点儿——但总之是更好了！”

但是在刚开始的时候，厄尔和伯恩哈德注意到有些人做了神经反馈治疗后并没有好转，她们找不到原因。当时，她们只是根据患者的症状实施神经反馈治疗，并没有使用医疗级别的脑电图作为指导。这些设备可以实时监测用户的脑电活动，当脑电活动在某些频率的通道上发生增减变化时（与诸如心情放松等一般情绪状态有关）会提示用户。她们发现，如果在神经反馈治疗之前为患者提供全面的19通道脑电图分析，就可以发现患者脑电图中

的细微偏差，这很可能与他们所遭遇到的认知和情感问题有关。令人惊讶的是，她们发现这种脑电图分析还可以提示临床上异常的脑电图活动。在这种情况下，她们会建议患者去看神经科医生，医生会进行医学脑电图分析和其他检查以便诊断。如果能做到精准的诊断，这些疾病有许多都可以通过药物治疗（并辅以神经反馈治疗）。这种“定量”的脑电图分析数据让她们能够获得脑电图信号的客观测量结果，并提供更有针对性的神经反馈治疗。例如，如果发现一个人的脑电图中有某些部分减弱了，那么就可以有针对性地去增强它。检查前填写的那份问卷有助于确定病根在哪些皮质区域。“调查问卷中鉴别出的症候群所对应的大脑区域，几乎总是与脑电图数据显示异常的大脑区域吻合。”厄尔解释说，“我们通过症状判断患者的问题可能出在右颞叶和边缘叶区域，当我们进行脑电图分析时，也会出现相同的提示，说右颞叶不稳定，这就是我们需要训练的地方。”复杂的脑电图分析需要大量时间、专业知识和昂贵的设备，但它极大地提高了神经反馈疗法的成功率。

现在该记录我的大脑活动了。为了尽快喝到那杯咖啡，我只好耐心地坐着。厄尔在我身上连上导线，在头皮的各个位置涂上导电凝胶，并装上像衬衫纽扣一样的电极。她在我耳朵后面骨头凸起的地方[\[12\]](#)涂了一点儿黏胶，然后在它上面按下一个电极。“您的乳突太直了。”她一边说，一边努力把电极粘牢。

“从来没有人告诉过我。”我回答，不确定她的评论是夸我还是损我。乳突是在颞骨乳突部的底面形成的锥形突起，位于耳朵后方。这块骨头是颞骨的一部分，也是人体中最致密的骨骼。[\[13\]](#)保存在这块超硬的骨头里的DNA就像保存在保险柜里一

样，因此人们有可能从几千年前的干尸骨头中复原人类的遗传密码。颞骨乳突部可以让遗传学家追踪我们物种的进化，从而探究人类的起源。但现在，它却成为探测我大脑的障碍。

尽管如此，她们还是很快用透明胶把19个电极粘在了我的头上。现在，我的脑袋跟疯狂的朋克摇滚歌手的刺猬脑袋一样怪诞。连接电极的导线被编成辫子，从我头上垂下来，接到一个非常小巧、外观朴素的白色塑料装置上。它的形状像个细长的雪茄盒子，这就是连接到计算机的脑电图放大器。厄尔告诉我可以转身看看显示器。我一转身就惊呆了：19条剧烈波动的轨迹覆盖了整个屏幕。这是我带电的大脑！

只要我一动，这些轨迹就会立即有反应。我眨眼、伸下巴或动脖子，这些原本轻微波动的线条会突然振荡。“不要那样做，”厄尔告诫我，“保持放松。”这些干扰是我的肌肉释放的电信号。任何肌肉纤维的收缩都会产生大量的电信号。要记录穿透颅骨的微弱的大脑皮质信号，我必须保持平静并且一动不动。

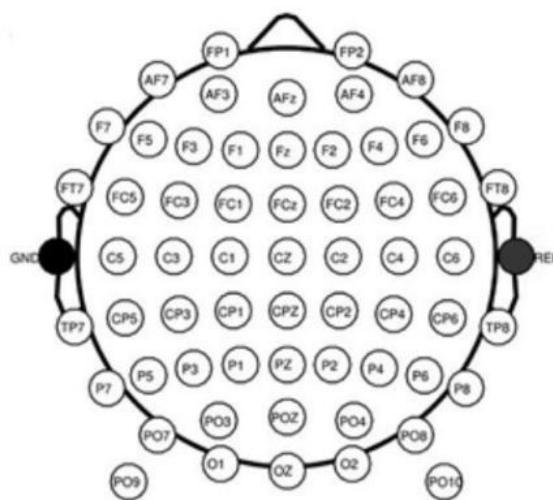


图16 通过头皮上的电极采集脑电波进行分析（脑电图）。电极的标准位置见右图。前额叶（Fp）、额叶（F）、颞叶（T）、顶叶（P）、枕叶（O）和中央区（C）。零位（Z）表示中线位置。数字表示电极的横向位置，中线右侧为偶数，左侧为奇数

看着19个通道记录的电压波动，我发现其中一些通道的变化是同步的，有两个电极记录到的响应几乎相同，而有一些通道的记录则看起来不相关。同步的信号是由两个功能上有关联的大脑皮质区域一起发出的。但这种联系是动态的，就像乐团的两个声部可能在某个时刻一起演奏，在其他时候又各奏各的一样。当两个相邻的电极都对大脑皮质的同一区域进行采样时，也会出现两条轨迹同步的现象。通过分析同步通道的电极在颅骨上的精确位置，脑电图研究人员可以对信号进行三角测量并确定其起源，这被称为“源检测”。它让我们能够对同时放电的神经元组进行定位。

厄尔让我闭一会儿眼睛。我的脑电图密集的波形突然不见了，取而代之的是缓慢的振荡——当高频波消退的时候，低频的 α 波逐渐增强。视觉是信息进入人脑的主要通道，一旦视觉系统被关闭，大部分大脑皮质就闲下来了，只剩下内部的信息流动。我再睁开眼睛，在屏幕上看到的脑电波活动图表显示了这种变化。



图17 作者睁开双眼时的脑电图样本。每一条水平线代表一个电压通道的记录，这样的通道共有19个，分别由放置在头皮上不同位置的19个电极进行采样

最初被叫作“伯格波”的，现在我们称之为 α 波。我有一种强烈的感觉，仿佛置身于当年汉斯·伯格在德国耶拿首次观察到人类脑电波时的场景之中。我仿佛看到他要其子克劳斯闭上眼睛，然后观察到他心理状态的变化转变为身体的电能变化。突然，我被一个关于存在性的奇怪想法震惊了：脑袋里没有光，我们“看到的”光是由脑电波构造出来的幻象。

当我静静坐着的时候，厄尔给我做了两次脑电图记录，先是闭上眼睛做一次，然后睁着眼睛再做一次，每次10分钟。看到我的脑电波，我产生了一种奇特的感觉，仿佛在商店橱窗中意外看见自己的影子。是我的大脑！是我！我？我以前从未见过它的真面目，但是它就生动地展现在我面前，而且随着我的思想和动作不断变化——由一个藏在肉体里的、内在的“我”所展示出来的

外在的“我”。这是《绿野仙踪》里在幕后讲故事的那个人，是一个既令人迷醉又让人毛骨悚然的启示。

他们告诉我，要把我的脑电波记录交给在加利福尼亚脑科学国际中心的杰伊·冈克尔曼和他的同事，他们需要花一周的时间来分析。分析结果出来后，我要返回夏洛茨维尔听他们给我讲解，然后决定需不需要做神经反馈治疗。当我坐等厄尔揭开我大脑的秘密的时候，我有点儿紧张，不知道会是什么结果。杰伊会找到什么？我有点儿害怕，想象着现在似乎听到冈克尔曼在对我说：“在你这个年龄，这很正常……”费耶德博士在萨拉戈萨看了我登山后的MRI检查后，我也听到过同样的话，这一幕突然浮现在我的脑海里。我知道在我回忆这些事情的时候，涟漪般的电信号正从我的大脑里面溢出来，进入厄尔的电脑。信息就在那儿，挑战在于如何提取和解读信息。

在第5章里，我们将回到夏洛茨维尔，谈一谈我的大脑所传输的那些不是秘密的秘密。但是在这里，我们首先需要深入地探讨一下脑电波向我们透露了什么，以及它是如何做到的。

解码脑电波

脑电图仪检测到的电信号很复杂，就像股票市场的波动一样难以捉摸，令人迷惑。股市在不同的时间跨度上——从分钟到小时、天、季度，甚至更长的时间单位——都会显示出波动（一些投资者就利用每分钟的波动，借助计算机算法以每秒数千次的频率进行自动高频交易）。在不同时间跨度上的价格波动都是同时

发生的，我们的脑电波变化也是如此。它们以不同的频率同时波动，每秒从不到一个周期到数百个周期（或赫兹）。根据波动的频率，脑电波可以分为不同的类型（我们将在稍后详细介绍）。

正如股票价格反映了交易活动的波动一样，脑电波的波动反映了神经元组周围的电压变化。我们把脑电波与股价进行的比较到此为止。脑电波不仅告诉我们哪些神经元在放电，现在我们知道，脑电波本身也可以直接导致神经元放电。脑电波是一种通信方式，就像来自不同无线电台的广播一样，不同频段的脑电波同时从大脑辐射出来。每个频段的脑电波都携带各自类型的神经元信息，这些信息可以在不同脑区间传递。你有没有听说过“神经元一起激活，就会连在一起”的说法[\[14\]](#)？实际上，脑电波可以将不相连的神经元群体协调到一起，组成统一的功能单元。这些功能单元可以有节奏地一起放电，就像士兵步调一致地前进一样。甚至更远处的神经元也可以通过脑电波联系在一起，就像在大型游行队伍中的士兵通过鼓点来协调步伐一样。“一起波动的神经元，一起动。”

要想理解神经元和脑电波的关系，就要先了解神经元如何产生电压以及如何放电。在静息的时候，神经元内的负电荷比周围的体液多大约1/10伏，从而在神经元的细胞膜上产生了净的负电压，就像电池一样。这个负电压是由于带正电的离子和带负电的离子分离而产生的——细胞内带正电的钠离子比细胞外部少，从而产生负电压。神经元的细胞膜中有传感器，会随时监测细胞膜内外的电压。当细胞外的钠离子迅速流入细胞内的时候，神经元迅速放电，它就会“激发”，这就是神经冲动或“动作电位”。

当一个神经元释放神经递质时，它所携带的信号可以通过突触激活另一个神经元，使受体神经元细胞膜上的离子通道短暂打开，让带电离子通过。带电离子快速流过这些通道时会干扰静息电位，使受体神经元中的负电荷略微减少。当细胞膜中的传感器检测到电压已下降到某个点时（例如，从负70毫伏到负50毫伏），它们会打开更多的通道，让神经元周围液体中带正电的钠离子大量涌入细胞。神经元内部剩余的负电荷会在一瞬间完全释放，从而产生电脉冲。1/10伏的放电听起来并不多，但在细胞的微观尺度上，这相当于一道闪电。[\[15\]](#) 如果你把1/10伏的电压平均分配到细胞膜的厚度上，就相当于把闪电携带的数千伏电压分布到从云端到地面的距离。

神经元在发放电脉冲之前，细胞内已经蓄积了大量的负电荷，一旦放电，就把之前积累的负电荷所形成的“电池”耗干了。要发放下一个电脉冲，就必须重新建立负的跨膜电压，就像相机闪光灯必须重新充电才能再次放电一样。神经元发放电脉冲后，细胞膜上的不同通道会感应到细胞膜上的负电压已耗尽。为了恢复原来的负电荷水平，这些通道会打开并把带正电的钾离子喷出细胞。这些钾离子是被细胞膜上的钾离子泵浓缩并堆积在细胞内部的，作为随时恢复和建立跨膜负电压的储备。当神经元发放电脉冲后，钾通道打开，这些正电荷就会冲出细胞，就像把船上的压舱物倾倒掉一样。钾离子排出后就可以恢复静息时细胞内部的净负电荷。

总而言之，当流入细胞的正电荷（钠离子）使整个细胞膜上的净负电荷减少，从而触发神经元负电压的快速释放时，神经元就会被激发。然后，带正电的钾离子会冲出细胞，为“电池”充

电，并准备发放另一次电脉冲。神经元就像漂浮在海水中的香蕉——内部的钾含量很高，但是被富含氯化钠的海水包围。关键是，当神经元细胞膜中的电压传感器检测到跨膜的电压已达到特定阈值时，才会触发电脉冲。实际上，电压下降到特定点才触发动作电位的概念并不比抽水马桶的工作原理复杂。当手柄压到特定的位置（触发点）时，坐便器水箱中存储的水就像神经元中存储的负电荷一样，会迅速流失，然后水箱必须重新被灌满。

你以前在学校可能对神经元如何放电的知识有所了解，但你可能从未听说过，教科书里只讲了故事的一半——脑电波则是故事的另一半。神经元发放电脉冲是因为是神经元细胞膜两侧的净电压差减小了，所以，在两种不同的情况下都可以使电压达到触发点——神经元内部的电荷可以朝正的方向变化，或者，神经元外部的电荷朝负的方向变化。这两种改变都会使神经元细胞膜上的电压差接近触发动作电位的阈值。换句话说，你至少还有另一种冲马桶的方式——当然，这是一个思想实验。那就是，固定住手柄，把马桶的水箱抬高。

现在应该比较容易理解脑电波（神经元外部电压的波动）是如何触发神经元放电的了。如果神经元或神经元组周围的电场强度朝负方向变化，那么跨膜电压差可能降低到阈值，就可以激发电脉冲。相反，如果神经元周围的细胞外液的电压朝正向变化，那么细胞的“电池”效应会更强，跨膜电压差增大，从而抑制神经元放电。在这种状态下，即使一个神经元受到了另一个神经元的刺激，被刺激的神经元也可能不会触发动作电位，因为它的电压已经远远低于激活阈值。换句话说，当脑电波使跨膜电压达到

峰值时，神经元会被激活；反之，当脑电波使跨膜电压降到最低时，会抑制神经元的激活。

教科书中关于神经元如何进行通信的描述（通过突触将信号从一个神经元传递到另一个神经元）很简单，但是脑电波的活动要复杂得多。研究它的人都是些物理学家和数学家，他们使用的是复杂的分析方法。从根本上讲，这就是为什么脑电波科学超出了大多数神经科学家的经验范围，也是为什么科学界以外（公众、记者和其他人）很少有人理解脑电波的原因。分析脑电波的人只要把电极放在头上，接收大脑传来的微弱电信号，就可以确定这些信号从大脑的哪个位置发出来……但实际并不像听起来那么容易：电场辐射是三维的。一个地方产生的电场会与其他位置产生的电场发生相互作用，它们是动态变化的；它们在空间中的传播不但取决于大脑内部电场的综合强度，还取决于各处电阻的差异。要定位在均匀介质中传播的波相对容易（就像在空气中定位无线电广播的源头一样），但是大脑根本不是均匀介质，脑组织及其电阻随解剖结构和微观结构的差异而变化，因此要完成这种复杂的三维拼图相当困难。

脑电波是由大量的电压波动和各种波动模式组成的洪流，它们统统混合在一起，并且在毫秒到数十秒的时间跨度上不断变化。因此，要从这些混合的电波中提取所需的信号，就像美国国家安全局（NSA）要在全球汹涌的电信数据中追查某一个感兴趣的通话一样，需要用到复杂的数学方法。

傅立叶分析是一种数学方法，可以用来把复杂的波动行为分解成不同频率的多个分量。例如，当敲击钢琴的A键时，琴弦产生的大部分声波是以440赫兹的频率振动的。但是，这根琴弦同

时还以许多不同的频率在振动，混合后才产生了钢琴独有的音色，让我们不会把它错认为是吉他演奏出来的音符。利用傅立叶分析，人们可以确定以不同频率同时振动的每种声音的功率，并将结果绘制成简单的图表，这样就可以轻而易举地区分钢琴演奏的A音符和吉他演奏的A音符了。

分析脑电波也用相同的原理。就像将零钱分为一分、五分、一角和五角的硬币一样，用傅立叶分析可以将脑电波活动分解为不同频段的分量——从 α 到 θ 。脑电波分析是把傅立叶分析和其他方法结合起来，从而识别同时发射的不同频段的脑电波，并确定这些脑电波的振幅、相位、同步性以及与大脑不同部位之间的关系，还可以确定这些特征如何随时间、刺激或认知任务的改变而变化。

命名脑电波

脑电波与光波一样，按照其振动频率在频谱带中的分布进行分类，并用希腊字母 α 、 β 、 γ 、 δ 和 θ 表示不同的频段。但要注意的是，希腊字母的顺序与脑电波频率的大小并非一一对应，因为有些频率较小的脑电波被发现的时候，靠前的字母已经被分配给先发现的其他频率的脑电波了。此外，就像颜色一样，不同脑电波频带的界线在使用中也会有所变化，就像我们称之为“黄色”光波的频率无法被明确定义一样，因为它在较低频率时接近橙色，而在较高频率时接近绿色。

颅骨内产生的脑电波不可能都被头皮电极探测到。例如，在大脑深处的神经元因为距离太远，其发射的脑电波就无法被头皮上的电极检测到。电场强度随着电场源的距离增大而迅速减小，因此脑电图中使用的电极主要用来检测大脑表层中的振荡电场源。大脑皮质仅有3毫米厚，但是大脑的这层“皮肤”里的神经元却被组织成非常复杂的结构。它分为六个层次，每一层之间相互都有联系。尽管如此，能够检测到大脑皮质的活动仍然有非常重要的意义，因为这里是我们执行感觉和运动功能并产生意识的地方。几乎所有能对意识产生影响的事物都会以某种方式在皮质神经元的活动中反映出来——正是那3毫米使我们得以成为人类。

除了距离的问题外，颅骨和皮肤的导电性不佳，也使得头皮电极检测到的脑电波大打折扣。如果要检测更高频率的脑电波，可以用一种被称为脑皮层电图（ECoG）的技术。不过，这种方法需要打开颅骨并将电极直接放在大脑表面，因此做脑皮层电图需要一个手术团队和熟练的神经外科医生。显然，这是一种侵入性的方法，而且对精度的要求非常高，这也是脑皮层电图的主要局限性。尽管我很想让杰西卡·厄尔和罗宾·伯恩哈德给我做脑电波记录，但我并不想让她们打开我的颅骨。不过，在某些情况下，脑皮层电图技术是非常有用的。例如在癫痫患者手术期间，它可以用来帮助确定患者癫痫发作的病灶。脑皮层电图技术还被用于脑机接口（我们将在本书的第三部分讨论）。脑机接口让人们可以直接通过激活神经元（即通过思想）来控制诸如假肢之类的设备。

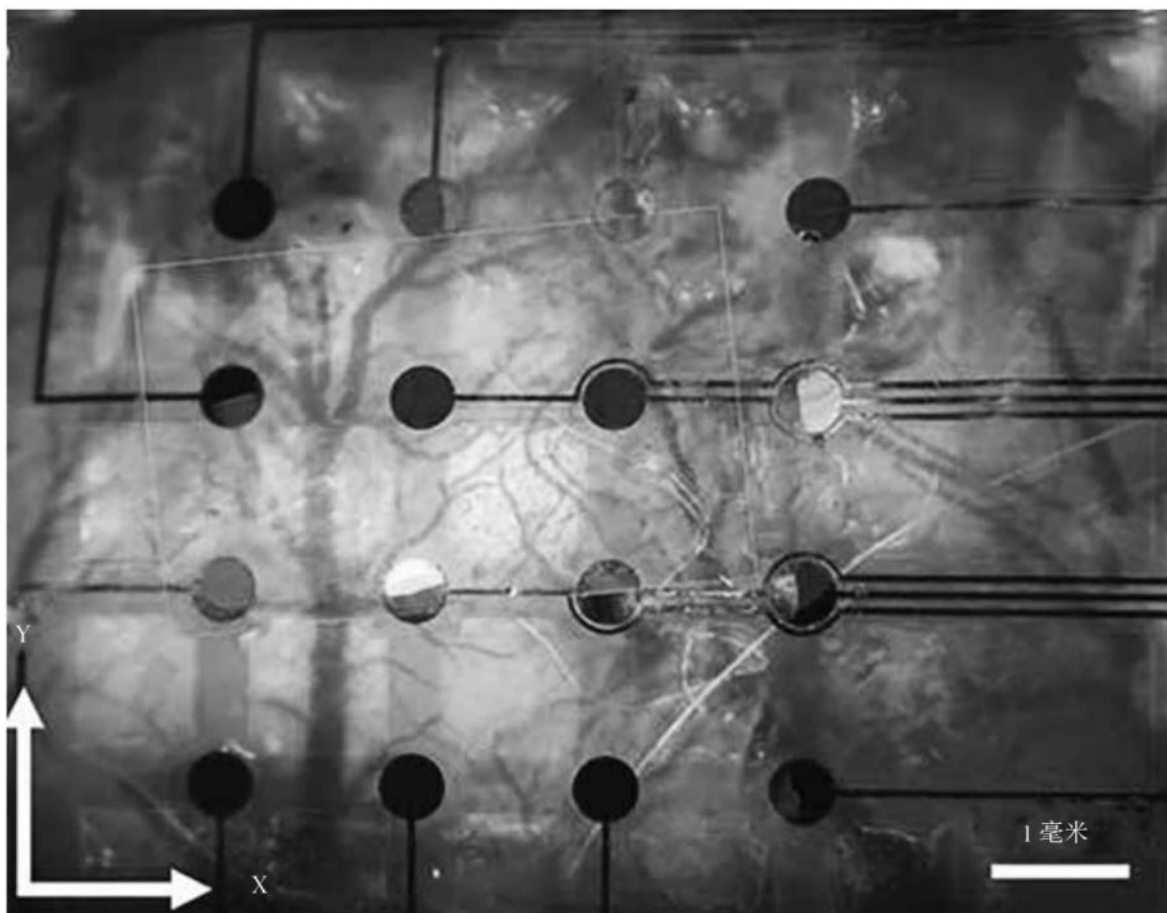


图18 将电极放置在大脑表面可以获得更好的脑电波记录，这是一种被称为脑皮层电图的技术

记录神经元周围电场的最佳方法是使用我之前介绍过的那种尖锐的微电极。如果只是记录电波而不是记录单个神经元的发放，就不需要把微电极紧贴或刺进神经元（像我在本章开头在大鼠身上做的那样）。当我将电极穿过大鼠的大脑组织时听到的时高时低的噼啪声是由神经元和非神经元细胞（神经胶质）周围波动的电场产生的，而就在我的针尖所及的范围内，成千上万的神经元正在各自的神经回路中各行其是。这些细胞外电场被称为局部场电位。头皮电极记录不到极高频率和极低频率的神经振荡，这些特殊频率的波动就要靠植入大脑的微电极来记录。

多亏有了印刷电路技术，人们可以像制造计算机芯片的微电路一样，将多个微电极蚀刻到一个尖锐的电极针上。利用这种多电极阵列，只需要一个电极针就可以同时获得很多记录。神经科学家已经在动物实验研究中广泛使用这种电极。这种电极在人类脑机接口中也大显身手。然而，植入电极并不能给出大脑活动的全景，而使用脑电图的方法却可以弥补这种缺陷。使用脑电图就可以将大脑作为一个系统进行研究，在这个系统中，信息在一个地方进行处理并传递到其他区域。把大脑看作一个复杂的网络，这种全局观正在改变人们对大脑运作方式的理解。

为了叙述完整起见，我要说一说脑磁图（magnetoencephalography, MEG）。它是一种更为复杂的技术，也是对脑电图的一种补充。顾名思义，电磁场既有电的性质，又有磁的性质。电流中的电力和磁力可以相互转换，这是电磁铁和电动机工作的基础。脑磁仪使用极其敏感的超导传感器来监测大脑中的神经活动。传感器被置于人的头部外周，并用液氮冷却至大约零下269摄氏度，它可以探测到脑电波引起的磁力变化。[\[16\]](#)最后，我们再说一说fMRI技术。它是MRI技术的一种变体，被广泛用于研究大脑的内部解剖结构（在第1章中提到过，我登山后做的检查就是这个）。fMRI可以辨别脑组织内局部血氧含量的差异，这种差异与神经元的活跃程度有关。尽管fMRI技术无法监测脑电波，但它可以显示那些活跃的大脑区域。例如，在认知测试的时候，甚至在人安静地坐着什么也不想的时候，总有一些脑区比其他地方更活跃，这些区域就可以在fMRI上显示出来。在第9章，我们将详细介绍这项技术。通过这项技术，特别是把它与脑电图记录结合使用后，我们得以对大脑功能有更深入的了解。

下面列出的是脑电图记录的脑电波的主要类型，按照振荡频率从慢到快依次排列，振荡频率以周期每秒或赫兹的形式表示。

δ 波 振荡频率非常低，在0.5 ~3赫兹。这种波是深度睡眠的特征，它们也会在昏迷或麻醉等无意识状态下出现。

θ 波 以大约4 ~7赫兹的频率振荡。它们是在安静并且清醒的时段产生的，例如，做白日梦和快要入睡的时候。人们已经发现这种神经电波的频率对增强海马的突触连接特别有效（海马是大脑颞叶的一部分，对空间感知和记忆形成非常重要）。

α 波 以8~13赫兹的频率振荡。当进入非常放松的状态，尤其是处于闭着眼睛冥想的状态时，这些脑电波占主导。这就是汉斯·伯格首次在人脑中记录到的脑电波。在头的后部，这些脑电波有更大的振幅（更大的电压波动）。

β 波 以14~30赫兹的频率振荡。当头脑忙于处理脑力任务时，以这类波形为主。

γ 波 以30~120赫兹的高频率非常快速地振荡。在美国，交流电流的频率为60赫兹，我们以此为参考。这个频率对于我们的视觉系统来说太快了，快到人眼已不能分辨。我们感觉灯泡产生的是恒定的光束，但实际上钨灯是以60赫兹的频率在闪烁。然而，大脑中的许多回路都在这些高频（或更高频率）下工作。 γ 波与大脑皮质的警觉性精神状态和主动信息处理能力相关。

重要的是，我们要理解脑电波的各个频带并不是在“执行”特定的认知功能，这与我们有时在大众媒体上看到的简单描述不同。尽管这些脑电波的每一个频段都与某些心理状态相关联，但这只是一种概括。就好比有超过100万种颜色，不仅仅是我们命名的9种基本颜色，脑电波也有几乎无限的变化和组合。在脑电波的某个波段内还有子波段，并且这些子波段也跟不同的心理状态有关。例如，低频 α 波和高频 α 波就分别对应不同的认知状态和功能。

脑电波活动除了这5种典型的模式外，还有其他模式（我们将在后面讨论），其中包括几种异常的脑电波类型。许多异常的脑电波类型对神经系统疾病的诊断很有价值（根据最新研究，它可能对神经性精神疾病的诊断也有价值）。

δ 波
(0.2~3 赫兹)



θ 波
(3~8 赫兹)



α 波
(8~12 赫兹)



β 波
(12~27 赫兹)



γ 波
(27~100 赫兹)



图19 脑电波的几种主要类型（根据电波的频率分类）

每个频带的脑电波振荡都是数百万个神经元同时进行许多复杂活动的结果，一个频带也并非指在单个频率上的谐振，因为不同脑电波之间是相互影响的。看着翻滚的海浪撞碎在岸边着实是一件令人着迷的事情，我们可以在海边这样静静地坐上几个小时。人们陶醉于云舒浪卷的自然景色不仅是因为它美，还因为它无穷无尽、变化多端。波浪是有节律的，但这个节奏并非始终如

一，它在变化。一排排巨浪滚滚而来，然后又归为沉寂，在潮头退去的短暂间隙，留下微波荡漾，在潮湿的沙子间嘶嘶作响。海浪上有水波，水波上有涟漪，它们都是无尽的自然力量的产物：犹如微风变成阵风，阵风变成大风，大风变成狂风，再变成席卷全球的飓风；漩涡、潮起潮落中流体的力；沙层对流水的摩擦阻力；时而犹如岩石相互猛烈撞击时的反弹……当波浪靠近海岸时，所有这一切都会被记录并显示出来。脑电波也是如此。波浪裹挟着波浪，每一朵浪花都是无数波浪相互作用的产物，就像一道有节奏的风景，充满席卷全球的力量，在盐和涛声中留下痕迹。

[1] Center for Disease Control and Prevention. Autism Spectrum Disorder (ASD). <https://www.cdc.gov/ncbddd/autism/index.html>. Accessed September 15, 2019.

[2] Ibid.

[3] Reported to me by Jennifer Eure in July 2017, quoting from her medical notes about one of her patients with the consent of “Joey’s” mother who wished to share her experience with readers of this book. The names and other details have been changed to respect privacy.

[4] 熔岩灯是一种装饰灯，用密封玻璃瓶装上透明的液体和蜡，在底座进行加热和照明，利用热对流原理形成不断循环的光影变幻效果，于20世纪60年代一度风行。——译者注

[5] 安慰剂效应是指人们感觉自己吃了药后病情有好转了，但实际上他们所吃的“药”只是糖丸而已。

[6] Fink, M. (2009) *Electroconvulsive Therapy, a Guide for Professionals and Their Patients*. Oxford, UK:Oxford University Press.

[7] Fields, R. D. (2009) *The Other Brain*. New York, NY: Simon and Schuster.

[8] Wright, B. A. (1990) An Historical Review of Electroconvulsive Therapy. *Jefferson Journal of Psychiatry* 8 (2): 68 - 74. https://jdc.jefferson.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1256&context=jeff_jpsychiatry.

[9] Shorter, E.; and Healy, D. (2007) *Shock Therapy, A History of Electroconvulsive Treatment in Mental Illness*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 27.

[10] 突触是神经元之间接触并传递信息的关键部位。——译者注

[11] Fields, R. D. (2015) A New Mechanism of Nervous System Plasticity: Activity-Dependent Myelination. *Nature Reviews Neuroscience* 16: 756 - 767.

[12] 凸起的地方即颞骨乳突的位置。——译者注

[13] Guarino, B. Ancient DNA Solves Mystery of Canaanites, Reveals the Biblical People's Fate. *The Washington Post*, July 27, 2017. https://www.washingtonpost.com/news/science/wp/2017/07/27/ancient-dna-solves-mystery-of-the-canaanites-reveals-the-biblical-peoples-fate/?utm_term=.0862ebe404a3.

[14] 这是赫布理论的一种概括的说法，即突触前神经元对突触后神经元的反复刺激，会导致突触传递效能的增加。通俗来说就是“脑子越用越灵活”。——译者注

[15] Fields, R. D. Lightning in your Brain. *BrainFacts.org*, May 23, 2014. <https://www.brainfacts.org/brain-anatomy-and-function/cells-and-circuits/2014/lightning-in-your-brain>.

[16] Liu, Z.; Ding, L.; and He, B. (2006) Integration of EEG/MEG with MRI and fMRI in Functional Neuroimaging. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 25: 46 - 53.

第4章

破解大脑的密码

今天，我们正在探索脑电波的路上阔步前行，而且，脑电波的知识正在从根本上改变许多科学家关于大脑如何运作的看法。我也是一名神经科学家，对我而言，脑电波的研究最令人着迷的地方是，这门学科对人们理解大脑的运作方式产生了革命性的影响。这是一门充满活力的科学。脑电波究竟是破解大脑工作原理的钥匙，还是神经元之间用电脉冲进行通信而产生的“电噪声”，神经科学家们在这个问题上已经产生了巨大的分歧。就像所有科学上的重要进展一样，脑电波的许多方面仍然是神秘而且充满争议的。科学家以及任何研究科学史的人都知道，人们很容易被新奇的想法或激动人心的发现迷惑而误入歧途。

每当科学将知识向前推进时，反对者和预言家就会蹦出来，对抗大自然向我们展示的新奇事物，也会有夸夸其谈者把他们自己都没搞明白的东西吹得天花乱坠——很可能只是为了从中牟利。从伯格对精神能量和心灵感应的探究，到魏因霍尔德试图用电源代替实验动物的大脑，再到克罗斯想用电火花再造生命……我们已经看到脑电波的研究经历了无数曲折。在很多人看来，这就是天方夜谭。有些人对于神经反馈疗法或将大脑和计算机连接来读取思想的尝试也抱有相同的怀疑态度。实际上，有些专家对脑电波的总体看法是不信任的。大众媒体对

脑电波的描述过于简单，实际情况要复杂得多。有种流行的说法认为，科学家破解大脑的秘密就像我们弄懂计算机代码一样轻而易举。如果你相信这种说法，那就大错特错了。事实远非如此简单，但因此也更加引人入胜。科学发展从已知领域进入未知领域的时候总是要面对这种情况。随着时间的流逝，科学的方法终将成为主流。

科学的方法要求我们仔细考察所遇到的新奇事物，客观、定量地对它进行衡量：先戳它一下，看看它会不会动（当然，这只是个比喻），然后要了解其他人对这个新东西的看法。在这一部分，我将带你一起探索大脑研究的这一有趣领域，让我们以科学家的角度看待问题并寻找答案。我将尽我所能为普通读者提炼这些新信息，并给出我综合各方见解后形成的观点。我会尽量保持客观。出于公正，我也会介绍那些不同的观点，因为目前，事实已经摆在我们面前，只是我们还无法确定自己所看到的究竟是什么。

看大脑如何学习

我们回到本书开头的场景：封闭的玻璃房内，一排排黑色计算机上的蓝色指示灯在诡异地闪烁着。走过超级计算机的中央控制室，我沿着昏暗且空荡的走廊继续前行，来到了一扇门前。我打开它，进入一个像洞穴一样通体被刷成黑色的房间。安装在房间四周的24个摄像头紧盯着我的一举一动。两名男子从一排显示器后面站了起来……

我来到加州大学圣迭戈分校很酷的超级计算机中心，拜访了神经科学家霍华德·波伊兹纳。他说，用复杂的仪器可以监听到我的大脑皮质一闪而过的电信号，他可以通过这种方式读懂我的心思。他可以看到我的大脑如何学习。当我闭着眼睛神游的时候，他可以分析流过我大脑的电信号的模式，而且可以知道我有一个什么样的脑子。我头脑中最隐秘的细节都逃不过他的眼睛。

波伊兹纳教授的目标是了解我们的记忆是如何形成的，从而更好地理解学习的神经生物学基础——这是最迷人也是最复杂的心理功能之一。作为一名科学家，我自己的实验室也在研究记忆的细胞基础。我在波伊兹纳的研究公开发表之前就了解他的这一研究，现在它已经在著名的专业期刊上发表了。[\[1\]](#)美国海军为波伊兹纳的项目提供资金，他们希望利用神经科学研究的这些最新成果来培训人员并提高个人成绩。

学习理论是基于100年前伊万·巴甫洛夫做的实验，他训练的狗听到铃声就会流口水。这种通过惩罚和奖励进行学习的简单模型被称为“条件反射”，很适合用来训练宠物，但人类也是这样学习的吗？无论是在人群中辨别出一个朋友，还是适应新的环境，或者学着说脏话，抑或是通过阅读小说透视人性……我们的大脑始终不停地对信息进行计算、组织、存储和回忆，总之就是在不停地学习——只不过没有美味的奶酪作为奖励或痛苦的电击作为惩罚。但是，如果你问大多数神经科学家这是怎么做到的，他会无奈地耸耸肩。

“我们的大部分学习都是不需要监督的，”波伊兹纳说，“巴甫洛夫的学习实验只是一个简单的反射。奖励（食物）强化了特定的刺激（响铃）所引起的特定反应（分泌唾液）。大多数时候，只要进入某种环境，你就自动开始学习。你会学习周围环境的空间布局，学习如何在这个环境中移动以及如何与环境互动。”

“但是，如果我们一直都是这样学习的，而且这可能是人类最重要的学习方式，那为什么不对它进行更多的研究呢？”我问道。

他说：“这个嘛……太难了。”例如，要了解我们如何学习适应新环境所面临的挑战之一，就是要开发出一种技术，能记录人的大脑在新环境中活动时的反应。波伊兹纳解决这个问题的思路是让人置身于计算机生成的虚拟现实中，在他们探索虚拟环境时观察他们的脑电波变化。

我要尝试的就是探索这个虚拟环境。波伊兹纳和他的同事约瑟夫·斯奈德给我戴上一个看起来像游泳帽的东西，上面安装了70个电极。电极上的导线被捆扎成一根长长的麻花辫，连接到一个监测仪上，这个监测仪装在我身上的一个黑色小背包里。通常情况下，人们在测量脑电波的时候必须坐着一动不动，以避免身体运动所产生的强大电脉冲会掩盖大脑活动产生的微弱信号，但波伊兹纳的研究小组开发出了一种能消除这些肌肉产生的电信号的软件，还设计了配套的硬件设备，让人在虚拟3D环境中自由活动时，能通过无线方式把脑电波数据从监测仪传输到实验室的计算机，并进行实时分析。

波伊兹纳的同事给我戴了一副大大的黑色电子VR眼镜，罩住我的眼睛。VR眼镜的12个微型屏幕可以生成详细的三维场景，为我提供虚拟世界的120度全视角影像。我穿了一套连体衣，上面带有红外线发射器。布置在房间周围的24台摄像机可以检测到我身上发出的红外线，并采集我的动作后输入计算机。计算机会根据我的动作及时调整虚拟3D环境，以便我在探索时能跟我的移动进行无缝对接。围绕房间布局的高保真扬声器可以创建一个立体的声音环境，让虚拟场景显得更为真实。

“我们的想法是，把你带入视频游戏，但重点不在游戏。”波伊兹纳解释说。他不是在开玩笑：打开VR眼镜的那一刻，我惊呆了，发现自己置身于计算机生成的场景中，就像电影《黑客帝国》中的角色一样。我不是在实验室里，而是在美国海军航空母舰“中途岛号”的储藏室中。这个场景实在是太真实了。

“这绝对是非常重要的，”波伊兹纳说，“不仅对全身心投入（虚拟现实的错觉）至关重要，而且对弄清楚大脑中与空间相关的区域也举足轻重。”我们的大脑能够整合所有感知到的丰富信息——视觉、声音、身体位置和躯体运动的反馈，并在大脑内建立起周围环境的立体空间地图。当我们在现实世界中移动时，大脑会构建多维地图。这份地图的构建在很大程度上取决于我们的运动，正如波伊兹纳说的那样：“如果你只是移动操纵杆或按下按钮，并不会激活在构造空间地图中起作用的大脑回路。”



图20 加州大学圣迭戈分校神经科学家霍华德·波伊兹纳和他的同事让作者在实验中体验了虚拟现实。他们通过监测脑电波来了解我们在没有指导或训练的情况下如何学习（无监督学习）。在控制室，神经科学家约瑟夫·斯奈德监控着作者透过VR眼镜探索储藏室时（在“中途岛号”航空母舰内）看到的虚拟场景。受试者的任务是在储物架上找到绿色的泡泡（在这张黑白照片中显示为灰色）。作者手中的设备用来戳破虚拟场景中的泡泡，并显示隐藏在泡泡中的物件

在虚拟的航空母舰储藏室中，我看到的每个细节都栩栩如生。抬起头，我看到钢制三角形桁架加固了的天花板，上面就是飞行甲板。低头看，脚底下是恶心的政府配发的蓝色油毡。我走到一个椭圆形的舱门前，看到外面机库的甲板上陈列着一排排战斗机。我抬起腿来刚要跨过高高的门槛，就听波伊兹纳说：“别出去，你必须待在储藏室里。”我赶紧把腿从门口缩回来——在其他人看来，我在空荡荡的黑屋子里所做的一切，就像是在表演默剧或在梦游一样。

回到储藏室，我看到在储物架上有一些沙滩排球大小的灰色泡泡。波伊兹纳在他的计算机屏幕上可以看到我所看到的内

容，也可以监测我对这些东西的反应。他给我下了一道指令：“请寻找一个绿色的泡泡。”

我搜索了一下架子，在灰色泡泡中间发现了那个绿色泡泡。我伸手去触摸它。它“啵”的一声爆开了！露出藏在里面的一个灭火器。我转过身，在房间的对角找到另一个神秘的绿色泡泡。当我把这个泡泡弄破时，我看到里面有一把扳手。

当他的测试对象在房间里移动并四处探索时，波伊兹纳可以看到受试者的大脑顶叶中有一种特定频率的脑电波活动（ θ 波，以大约4~7赫兹的频率振荡）会随着测试对象建立空间地图的过程而增强。顶叶位于大脑的后上方，大约是无檐帽盖住的范围。我们知道， θ 波对于增强突触连接和形成记忆非常重要。突触连接的增强意味着形成突触的神经元之间的通信信号得到了增强。在对记忆的细胞机制的研究中，我曾用 θ 频率的电波刺激神经元，以增强在培养皿中的大鼠脑切片的突触连接。（回想一下，通过突触传递的信号可以在突触后神经元中引发一个短暂的电脉冲。在更高的电压条件下，突触连接就会增强，那么，不论突触后神经元是否发放神经冲动，增强的突触连接都会对突触后神经元的行为产生更大的影响。）

如果在脑电波分析中使用特定的刺激，就可以让我们对认知功能有更深刻的认识。由刺激引发的脑电波反应被称为“事件相关电位”或“诱发电位”。这些刺激引起的脑电波跟把石头扔进池塘引起的涟漪很像。研究特定的石头所产生的涟漪（特定刺激产生的脑电波），我们就可以了解石头的性质与它所引起的涟漪之间的关系。例如，医生利用测试音产生的诱发

电位（神经对刺激产生的反应）来确定婴儿是否患有听力障碍。新生的婴儿无法与人对话交流，但医生会通过测试音调引起的脑电波来判断孩子是否可以感知到声音。我在实验中也使用了相同的技术。我们想要确定一种奇特的深海鱼——银鲛鱼，它是鲨鱼的远亲——是否能够在海水里感知到其他动物产生的极其微弱的生物电场。[\[2\]](#)我先把银鲛鱼麻醉，并在它那古怪的鼻子附近施加不同频率和强度的电场，然后我记录到了银鲛鱼大脑的诱发电位。这说明银鲛鱼的大脑能够接收并处理人类永远无法理解的一种感觉，这也许就是所谓的第六感。[\[3\]](#)至于波伊兹纳，他打算在我身上利用诱发的脑电波电位接入我的大脑，看看我在虚拟情景的体验中是否学到了什么东西。

受试者在触摸绿色泡泡并发现里面还藏着东西后，其大脑立即出现了诱发的脑电波反应，波伊兹纳对此进行了分析。他的分析显示，我的脑电波活动中出现了一种典型的波纹，它在我戳破绿色泡泡后仅过16万分之一秒就暴发了。“这真是太快了，”波伊兹纳告诉我。“我的意思是，眼动都需要200毫秒呢。这是大脑检测到有什么东西不正常的时候产生的前意识感知——‘我无法告诉你它是什么，但就是感觉有些不对劲。’”换句话说，在我们有意识地“看到”一个隐藏的物体之前，我们的大脑就已经对有东西隐藏在泡泡里这一意外事件做出了反应。

对这些刺激引起的脑电波变化进行分析后，波伊兹纳的团队得到了一些令人惊讶的发现，这些发现与人类无时无刻不在进行的自动学习和记忆形成息息相关。第二天，他的实验对象再次回到虚拟的储藏室场景，不过这一次，波伊兹纳和他的同

事把一些隐藏在绿色泡泡中的物体调换了。受试者在固定的地方戳破一个绿色泡泡，并发现其中藏了个扳手，但是在头一天，这个绿色泡泡里藏的是灭火器。当他发现东西变成了扳手以后，所引起的脑电波响应要比他当初发现泡泡里面有东西时所引起的脑电波反应更强烈。从这些受试者的反应可以明显看出，在没有任何提醒、预示的情况下，受试者只是在探索过程中就毫不费力地记住了场景设置的细节。它比眨眼的速度还要快。当环境中的某些事物发生了变化的时候，我们的大脑就已经知道了，而且是在我们意识到这一点之前就已经知道。

显然，海军对利用这些快速的前意识信号很感兴趣。这些先进的技术和脑电波分析不仅有助于他们甄选那些思维快速的人，而且可以帮助他们挑选最适合面临严峻形势的军事人员。此外，通过将脑电波监测与电脑系统结合，可以让美国军队在战争中增强战斗力。读取飞行员的脑电波可以使计算机在飞行员意识到威胁到来之前就采取避险的行动。在枪战中最快的出手莫过于连自己都没反应过来就已经扣动了扳机。

不论是出于军用还是民用的目的，人们都希望有一天，脑电波提供的信息能让人们在评估大脑功能方面，像当今的医学在评估人体健康状况方面一样有价值。杜克大学和美国国防部高级研究计划局（DARPA）已联合申请了一项专利。这项专利是“获取和传输神经信号的设备”，可应用的范围包括但不限于“武器或武器系统，机器人或机器人系统”。这是有史以来科学家第一次发展出能够直接探测并改变人类思想的能力。控制脑电波的能力在军事上可用于审讯，也可以通过磁场干扰和轰击，使敌人丧失战斗力。

为了应对这一新情况，英国纳菲尔德生物伦理委员会召集了一批杰出的神经科学家，讨论人脑与计算机对接的伦理意义。在2013年发表的报告中，他们得出结论，认为《日内瓦公约》已经过时，没有能力应对在战争中滥用神经技术的情况。神经技术不但可以应用在审讯上，也可以用在脑机接口技术上，从而提高战斗机的作战能力，这些都引起人们的担忧。报告中还提到，“现有的国际公约中虽然禁止在战争中使用生物和化学制剂，但并未禁止使用神经装置”。[\[4\]](#)在第三部分中，我们还会再次讨论把监视和改变脑电波功能用于神经武器可能引起的伦理问题，但是现在我们先来讨论脑电波如何参与记忆的科学问题。

波伊兹纳的研究还有我们即将介绍的其他研究表明，脑电波是形成记忆的基础，因为记忆需要把在大脑不同区域处理的无数认知要素（视力、嗅觉、情感、时间顺序和预先存储的记忆）编织在一起。我们的大脑能够把热苹果派散发出的肉桂和肉豆蔻的香味，与我们对母亲的爱联系起来；与母亲用最心爱的擀面杖将面团薄薄地碾开，然后铺在馅饼上面的景象联系起来；与父亲拿了属于他的那一块苹果派总是要就着一勺香草冰激凌吃下去的景象联系起来……还有什么比我们的大脑更能创造出如此丰富的层次感？很多记忆都需要调用大脑中数以百万计的神经元，而且为了形成一个连贯的场景，这些记忆必须按照一定的时间顺序进行排列，还要符合适当的上下文的关系。通过与远处大脑区域中大批神经元的活动产生联系，脑电波可以控制信息的处理、编码、存储和检索过程。就像所有电磁波在相互作用时会相互增强或抵消一样，这些电活动产生的波以各种频率在我们的脑组织中传播，产生复杂的相互作用，对信

号进行过滤和分类。它们携带来自我们感官的大量数据，并同时调用来自大脑多个区域的存储信息，使我们能够快速回忆，或让我们在面临新环境时能够不费吹灰之力地进行学习。如果按照教科书所介绍的大脑如何运作的观点，是很难理解我们的大脑如何完成这种信息的整合和分类的。

运转中的大脑

通观整个历史，人类的大脑一直是个奇迹。就算跟当今最复杂的技术进行比较也是如此。今天的人们可以参考计算机来理解大脑的工作原理，但是在计算机出现之前，人们用液压系统、光和电路等各种类比来解释人脑的功能。在不久的将来，数字计算机将被量子计算机超越。毫无疑问，更先进的亚原子技术将可以更好地模拟大脑的工作原理。但是类比仅仅是模型——就像一根精神的拐杖，其作用只是帮助我们理解那些过于复杂的事物。20世纪，人们以为神经系统的功能跟门铃电路的工作原理一样简单，这种简单的类比显然是不够充分的。只是简单地把许多“电子门铃”的电路连接在一起，并不能实现人脑非凡的功能。但是，人脑也不是像电子计算机那样工作。我们的大脑是已知的最先进的信息处理系统，其工作方式必然要复杂得多。许多神经科学家可能不同意，但脑电波的确不是一个类比。它们是大脑实际运行的方式，是大脑创造思想——这种宇宙中最复杂的网络——的方式。

在大致了解了圣迭戈的虚拟场景实验和脑电图实验所取得的成就之后，让我们继续前往世界各地的实验室，看看研究人

员如何发现脑电波是通向思想的窗口的。他们中的一些人发现脑电波是意识的基础，另一些人则用脑电波把大脑和计算机连接在一起，让信息在人与人的大脑之间传递。能说明脑电波与精神活动之间联系的最好的例子莫过于睡眠了。其实，睡眠的几个阶段正是按照我们整个晚上的脑电活动的系统性变化来定义的。脑电波可以揭示神经系统和心理的健康状况，而脑电图分析可以让我们知道怎样去改变大脑内部的连接，以克服个人的认知弱点。然而，争论的焦点依然存在：脑电波究竟是精神活动的动力还是副产品？

法国神经科学家卡里姆·本彻内恩和他在巴黎高等物理化工学院（ESPCI）的同事正在进行有趣的研究，试图解开这一逻辑难题。本彻内恩和他的同事用脑机交互的手段把噩梦植入了大鼠的大脑。在这个实验里，他们采集了受惊吓的大鼠所产生的脑电波，然后对另一只大鼠发射相同频率的电波，并引起了这只大鼠的惊恐反应。他深信脑电波是大脑进行信息处理的一个重要维度，但是他仍然对自己的实验结果感到有些惴惴不安。当我们在他在巴黎的办公室见面时，本彻内恩告诉我：“我可不希望有人在五到十年内证明我所发现的是人为现象。”（科学家说人为现象时，指的是实验过程中无意间产生的错误结果。）

美丽的错觉还是神秘的代码？

创办于1257年的索邦大学经历了将近8个世纪的风风雨雨，目睹世界动荡和变革。它比克里斯托弗·哥伦布的诞生、印刷

机的发明和文艺复兴的起源还要早两个世纪。几个世纪以来，该大学一直在蓬勃发展，这证明了学习是人类最强大的力量。就在同一时代的1163年，巴黎圣母院的地基放上了第一块石头。这座不朽的建筑是人类力量、品格、灵性和宗教的又一支柱。塞纳河穿过巴黎市中心，从东向西追逐着太阳流去，巴黎圣母院就坐落在塞纳河中一个纺锤形的小岛上。距高耸的大教堂没多远有两座桥（其中一座桥直接通到索邦大学）连接着巴黎市的拉丁区。这个区在塞纳河的南岸（左岸），集中了众多大学院校。之所以把它叫拉丁区，是因为拉丁语这门古老而通用的学术语言曾经一度弥漫在那些著名学术机构周围的鹅卵石街道上。

庄严的石拱门对面是一堵高大的褐色石墙，由一道沧桑的六格饰棕色木门连通高墙内外。大门的中央有一个闪亮的黄铜把手，虽然时尚，但并不起作用。门的底部已经开裂，而且有一处严重磨损的痕迹——那是无数人用脚把门踢开所留下的痕迹。木门边上挂有一块小牌子。牌子上的铭文记下了发生在这里的重大事件。当时，一位年轻的女教师在这里做出的科学发现改变了历史。后来，她成为第一位获得诺贝尔奖的女性。

“您可不能进那个实验室，”索邦大学的一位科学家告诉我，“它仍然有污染。她的所有笔记本还具有很高的放射性。”镭的半衰期为1600年，这意味着该实验室内部的放射性污染强度与玛丽·居里在这里工作时相比并没有减轻多少。那些日子，她在实验服口袋里随时放着装有高放射性元素的小瓶子。她的发现被应用于医学领域。人们利用X射线挽救了数百万条生命，但她的成就却是以牺牲自己的生命为代价的。当时，

她和其他人都不知道，从她所研究的神秘元素中发射出来的看不见的高能粒子，摧毁了她骨髓细胞核中的DNA，终结了骨髓细胞正常分裂和制造新的血液细胞的能力。她工作所遗留的物品上的放射性很难被清除，这些放射性污染存在的时间可能比人们在巴黎市中心建造的象征知识和宗教的石头建筑的寿命还要长。

我漫不经心地走过一个实验室，里面的学生穿着实验服，手里拿着玻璃器皿和实验记录本窜来窜去。我一路在找本彻内恩的办公室，但没人理会我。终于，我来到了一条走廊，每个实验室的门都没有编号，取而代之的是“杏仁核”“前额皮质”，或者大脑其他部分的名字。我知道他的办公室不远了。我终于见到了本彻内恩，可以坐下来聊聊了。本彻内恩留着小平头，脸上的络腮胡子楂儿看上去像是永远也刮不干净一样。他左耳上挂着一个小小的金耳环，看起来就像一个被放逐的快活的海盗。

我开门见山，从公认的事实开始，也罗列了反对的声音：大脑中有振荡的电活动（脑电波）是一个事实，没有人质疑它，并且任何人只要有电极就可以测量它。这些电压的波动可以跟驻波一样是平稳的，像儿童跳绳一样在一个地方上上下下；它也可以穿透大脑，就像所有波都可以传播一样。但是问题在于，脑电波与信息处理、认知功能和行为相关的几乎所有方面都是有关联的。例如，当闭上眼睛时， α 波会增加，但是这种相关性是如何产生的？这种相关性对神经回路和行为有什么意义？这种关联究竟是原因还是结果？

“从我的角度来说，我相信脑电波确实非常重要。”本彻内恩用带着法语口音的英语对我说。他说，自然界中到处都有波，它们具有许多重要的特性，因此也非常适合大脑中的信息处理。他特别指出，波能非常有效地产生和传输能量。以鼓掌为例，他说，如果许多人同时鼓掌，就可以产生震撼整个体育场的雷鸣般的声音。但是，如果每个人不是同时鼓掌的话，虽然消耗了相同的能量，但不会产生相同的效果。当摩天大楼与地震的频率产生共振的时候，我们就会看到这种效果。振动的能量会被有效地传递和聚集，从而使整个建筑坍塌。

“问题在于如何证明脑电波的重要性。没有几个研究能清楚地证明脑电波是重要的。”他说。为了证明（脑电波与脑功能之间的）因果关系，就必须打破它们之间的关联。在脑电波研究里的做法是以某种方式改变振荡，然后观察相应的神经活动或个体行为是否按预期的方式改变。本彻内恩和他的同事着手用光遗传学的方法激活某些神经回路（已知这些神经回路在动物的行为中起关键作用）中的神经元，并改变大鼠的脑电波频率，然后看看是否能由此改变大鼠的行为。

光遗传学是一种激发神经元电活动的新方法。这种方法是用激光来激活那些通过基因工程插入特定神经元表面的离子通道。光遗传学的优点在于，只有经过遗传修饰的特定神经元才会被激光激活。而微电极产生的电刺激则是通过神经组织传递并作用于许多神经元，如果电极附近有远处脑区的神经元伸过来的轴突，那么这些远处的神经元也会被激活。

本彻内恩和他的同事选择研究的行为是恐惧反应。如果他们能够在适当的神经回路中以适当的频率产生脑电波并破坏大鼠的恐惧记忆，那么这将证明脑电波在神经功能中的重要性，并为焦虑症（如创伤后应激障碍）提供新的治疗方法。

动物要学会对特定的刺激产生恐惧（被称为恐惧训练），需要它的不同大脑区域之间有信息交流。海马结构负责编码空间信息；杏仁核和边缘系统负责评估潜在威胁并调节情绪反应；前额皮质负责整合大脑可用的复杂信息，为事件提供适当的背景……这一系列大脑活动使动物可以准确地评估突发性事件是否具有危险性。例如，我们的前额皮质为我们提供了一种背景，使我们会因为身后小巷子里的陌生人手中拿着一把刀而感到害怕，但我们不会因为餐厅的厨房里有陌生拿了一把刀而感到害怕。

为了研究这种恐惧学习的过程，首先要训练大鼠。研究人员在发出提示音后立即给笼子的金属丝地板通电，让大鼠的脚被轻微电击。久而久之，大鼠就会对提示音产生恐惧而僵住不动。当大鼠再次听到提示音时，即使脚部没有被电击，它们也会立刻僵住。如果在恐惧训练过程中记录大鼠杏仁核和前额皮质的电活动，我们会发现，当动物对提示音做出反应而僵住时，前额皮质和杏仁核中4赫兹频率的两组脑电波会突然变成锁定相（同步）。前额皮质和杏仁核中这种明显的 θ 波共振锁定可能是引起恐惧反应的一种方式——通过共振在这些大脑区域之间进行信息传递并产生功能联系。提示音的信息被传输到大脑的威胁检测中心——杏仁核，并与声音的位置信息一起在海马和与之相连的前额皮质中进行编码。动物此前在测试笼中经

历的记忆也会汇集在一起，由前额皮质进行解释。如果换到其他地方或不同的环境中，即使出现提示音，大鼠也不会出现僵立的现象。杏仁核与前额皮质之间的 θ 波共振包括了分布在整个大脑的所有信息，一旦和皮质——杏仁核反馈回来的 θ 波进行同步，动物就会立即产生恐惧和僵立的反应。与此同时，大脑其他区域的脑电波以不同的频率振荡，不受干扰地执行各自的神经功能（视觉和运动等），就像不同广播电台以不同的频率广播，你只能把收音机调到适当频道才能接收一样。

为了检验这种相关性，研究人员使用光遗传学技术在大鼠的前额皮质中产生4赫兹的电波，大鼠因恐惧而僵住了，这是4赫兹电波会引起恐惧反应的有力证据。他们如果增加刺激时间，则大鼠的僵立行为会增加；反之，如果缩短刺激时间，则大鼠的僵立行为出现的频率就会降低。[\[5\]](#)通过产生4赫兹的电波并在两个大脑区域进行同步，研究人员可以在这种情况下调节大鼠的恐惧和行为。

本彻内恩作为一位训练有素的严谨的科学家，保持了怀疑的精神和客观的态度。不管理论有多完美，检验假设所做的实验结果有多漂亮，结论都有可能是错误的，这在历史上不是没有过教训。因此，科学家会尽量设想所有可能的解释，并尝试推翻自己心爱的理论。这就是信念和证明之间的区别。这个实验的目的是要证明电波和行为之间的因果关系，但是这种看似牢靠的检验方法是有可能犯错误的。所以，首先要考虑一个基本问题，即信息是如何在神经系统中编码的，这非常重要。

大脑中的神经元发放动作电位来编码信息的基本方法有两种：1. 速率编码，2. 时间编码。“什么最重要？”本彻内恩反问道，“是锋电位出现的精确时间，还是锋电位的数量？”显然，两者都很重要。例如，（眼睛感受到的）光的强度由神经脉冲发放的频率决定，这就是“速率编码”。

我关于速率编码的最早体验是在做研究生的时候。我记录了马蹄蟹、鱿鱼和青蛙的视觉唤醒反应，还研究了鲨鱼、鳐鱼和银鲛的特殊感受器对电场的感知。这些是我的硕士[\[6\]](#)和博士学位论文的课题。[\[7\]](#)

我的导师戴维·兰格（加州大学圣迭戈分校神经科学教授）在这项技术上对我们进行了耐心的培训。我和我的搭档在一个黑暗的房间里工作，用尖细的玻璃针在显微镜下将青蛙的视神经分离出来。我们用修表匠的镊子将氯化银丝弯成钩状，就像缩小版的挂肉的钩子，然后将纤细的视神经纤维挂在一对连接着电子放大器的氯化银钩子上。当把麻醉后的青蛙放在屏幕前时，从青蛙的视网膜传递到大脑的动作电位就可以被放大器采集到。

我们可以看到示波器上闪现的动作电位，也可以听到电位的信号在扬声器里转变成“噼啪”的声音。屏幕上的光线越强，视网膜中的神经元向大脑发出动作电位的速度就越快。光线昏暗的时候，扬声器里的声音像响尾蛇发出的拨浪鼓一样的咯咯声；在光线明亮的时候，扬声器发出尖厉的呜呜声，就像在深海钓到大鱼时，钓竿上的线轮被拉扯而快速旋转时发出的声音。我们可以绘制出动作电位的发放频率与视网膜接收到的

光强度的关系图，这样就得到一个准确的生物光度计。我们只需参考动作电位发放的频率，就可以精确地判断光线的亮度。

为了不跑题，还有很多有趣的神经生物学细节，我在这里就不多说了。但是为了准确起见，还有一点重要的补充：青蛙（以及大多数动物）的视网膜神经元放电的频率不仅跟刺激的光强度有关，而且跟光斑的形状、对比度、边缘的方向性、是否运动以及光斑出现还是消失都有关。传递到大脑的所有这些视觉信息的特征都是以锋电位的速率来编码的。

当然，神经元并不是以一个稳定的频率持续放电。它们的放电速率会逐渐减慢，就像钓鱼线轮发出的声音也只是在鱼刚咬钩那会儿比较大，越往后声音就越小。保持恒定的刺激，但动作电位发放的频率逐渐降低的现象被称为适应，这是感觉系统的共同特征。从暗处走到明亮的地方，刚开始我们会觉得阳光很刺眼，那是因为我们的视网膜神经元受到光线刺激，正以最大的速率放电。但随着视觉神经元的放电频率逐渐降低，我们很快就能适应。同样，我们早晨起床刚穿上T恤的时候会感觉T恤的棉布很凉，但是接下来的一整天，我们都不会感觉到T恤的存在，虽然它一直都在身上。这是由于我们皮肤里那些对触觉敏感的神经元已经适应了持续的刺激。我们的神经系统对环境中的变化最为敏感，例如灌木丛中突然有动静。实际上，青蛙对视野中静止的物体是视而不见的，因为如果这些视觉神经元未检测到物体运动，它们就会停止放电。这听起来可能很奇怪，但是从生物学的角度来说，忽视静止物体的特性非常适合青蛙，它们因此可以迅速锁定嗡嗡飞舞的苍蝇或察觉到悄悄靠近的掠食者。投射在屏幕上的苍蝇图像如果一动不动，那它对

青蛙来说就是不存在的，正如我们平时感觉不到身上穿的T恤一样。这对青蛙来说并非感觉系统的缺陷。

在其他情况下，神经系统传递信息的方式就不像我们在青蛙身上所看到的那样，是通过动作电位的发放速率来编码了，而是通过神经冲动到达的确切时间，这被称为“时间编码”。例如，我们之所以能够在环境中定位一个声音的来源，是因为大脑可以辨别传递到大脑的锋电位信号的微小时间差。如果声源在我们的右边，那么声波将先传入右耳再传入左耳，我们的大脑能够精确记录分别来自左、右侧听神经的锋电位到达的时间，并通过计算锋电位到达的时间差来确定声音的位置。

脑电波使神经回路中的信息编码有了第三种可能性——相位编码，即锋电位出现的时间点与局部场电位（或神经元有节律地发放脉冲）的振荡相位相对应。在振动的波峰处出现的锋电位与在波谷处出现的锋电位可能会产生不同的影响，就像击打绳球的作用力在很大程度上取决于击打的精确时间，但这需要参考球在围绕轴杆摆动时的位置。在本彻内恩用大鼠做的实验中，相位编码就是用4赫兹的持续电波把前额皮质和杏仁核联系起来并造成动物恐惧。

我们可以将恐惧条件实验的结果解释为电波起了很重要的作用，但是本彻内恩警告说：“问题是，施加电波刺激后，会有更多的锋电位出现，因此这也可以解释为还是基本的速率编码。”施加4赫兹电波刺激会增加锋电位，并且诱导电波持续的时间越长，产生的锋电位也越多。

另一个棘手的问题是，大脑的电波也会和某些身体功能（例如心跳和呼吸）的频率变化重合，甚至手臂的动作都是振动的——我们都看到过自己的手发抖。身体系统的生理波动会影响大脑产生电波吗？例如，血流的脉动和氧气含量的上升、下降可能会对神经回路的功能产生某些影响。大脑中的电极（或由脑电图）采集到的这种来自身体的电流也可以简单地呈现出有节奏的振荡，这在电生理研究中就是一种人为现象。行为引起的生理变化也可能会改变呼吸或心率，因此，从神经回路的角度来看，心功能或呼吸的改变会导致大脑产生振荡的电波，但这与行为无关。例如，动物在受惊吓时，脑电波会改变，但呼吸在很大程度上也会受到突发威胁的影响。因此，难以区分电极记录到的脑电波变化究竟是受惊吓引起的，还是行为反馈导致的呼吸节律变化引起的。所以，另一种可能的假设是，脑电波的突然变化是呼吸变化的结果，而不是因为控制行为的神经回路受到直接调节。

感觉输入和节律性的运动都可能对脑电波产生相同的影响。许多冥想训练就是通过控制呼吸节奏来改变认知状态的，同时脑电波频率也会随之变化（在第11章中讨论）。闪烁的灯光和有节奏的声音会使大脑产生有节律的活动波，一旦跟脑电波的活动同步，在某些极端情况下甚至会导致皮质电活动大量增加而引起癫痫发作。躯体运动也可以与脑电波频率一致。例如，当大鼠奔跑时，它的头部会按照 θ 波的频率前后移动；在大鼠探索环境时，它们到处嗅闻和动胡须的节奏都跟 θ 波的频率一致。有节律的感觉输入伴随着有节律的运动对大脑会产生什么后果？嗅觉系统与皮质和海马都有很紧密的联系，因此呼吸会在这些大脑区域引入 θ 节律。不过，把神经回路中的信息

处理频度与走动、呼吸的自然节奏同步起来可能是有好处的，因为这样的话，大脑中的神经活动与人体的感觉和运动节奏就同步了。“这就是我们现在的处境。”本彻内恩说，因为他们无法证明因果关系。

也许海马结构是说明脑电波和相位编码之间的重要关系的最好例子。当动物在环境中移动到特定位置的时候，海马中有一种“位置细胞”就会被激活。当这种神经元被激活时，动物在环境中所处的那个点就称为该细胞的“位置场”。当大鼠在Y形迷宫的右侧岔路中时，A细胞会被激活；当大鼠在岔路口时，B细胞会被激活；当大鼠在左侧岔路时，C细胞会被激活。这是一种典型的速率编码：当大鼠在左侧岔路时，A细胞中没有锋电位，而当大鼠进入右侧岔路时，A细胞中出现了高频的锋电位。但是，海马中也存在 θ 节律，而且如果锋电位在相对于电波相位的最佳时机触发，那么空间编码将变得更精确。当大鼠移向位置场的中心时， θ 电波的相位会提前，这被称为相位旋进。 θ 波的这种相位偏移提供了动物所在位置的两种信息。同时，相位变化还包含了速率编码的附加信息，因为随着动物移动， θ 电波的位移相位会提示有关动物之前的位置、现在的位置以及将要去哪里信息。

其他人则认为，这种相位耦合和相位旋进只是一种巧合。如果在局部场电位中把神经元在 θ 波峰处的放电时间延长，你会发现明显的相位耦合和相位旋进现象。这是由于单个锋电位发生的时间间隔与 θ 电波的周期略有不同，尤其是当 θ 电波随着动物的移动而变化时。更令人费解的是，某些动物（例如蝙蝠）的海马中存有位置场信息，因此具有非常好的空间定位能

力，但它们根本不产生 θ 脑电波。“如果实际情况就是这样，那你一定会感到困惑。”本彻内恩说。

在研究电波的相关性方面，面临着更大的技术问题，因为电极在测量局部场电位节律性变化的同时，也会对其他大量神经细胞发放的脉冲所产生的电流进行采样。例如，在一个大脑区域（前额皮质）中采样的电极可能会记录到在不同大脑区域（如杏仁核）的神经元发放电脉冲所产生的电场，这就造成了人为的假象。这可能是造成4赫兹电波在实验中出现相关性的原因，而4赫兹电波显然在这两个大脑区域中都参与了恐惧行为的调节。只要有一个电极从其他大脑区域收集信号，就会造成明显的电波振荡的巧合。要想清除这种干扰信号源特别困难，这在脑电图记录中是个非常令人头疼的问题。“我们能够做脑电图的原因是电场可以传播。这对使用头皮电极进行大脑电活动的远程记录是很有利的，但是当你将电极插入大脑时，这反而变成了一个麻烦。”本彻内恩说，“我认为，脑电波这东西是如此美丽诱人，以至于我们有时可能做得太超前了。”

研究位置细胞得到了一项令人振奋的成果——使人们更加了解睡眠是如何促进长期记忆的（这一问题将在第7章中更深入地讨论），睡眠学习与此有关。本彻内恩在一项巧妙的实验中，利用睡眠学习来确定这些位置细胞是否真的编码了动物的位置信息。海马是编码信息所必需的，但是所编码的信息必须从海马转移到前额皮质才能长期保存。纽约大学医学院神经科学教授捷尔吉·布扎基发现，海马和前额皮质中的两个局部场电位之间具有很强的相关性。动物解决了Y迷宫任务，这表明两个脑区之间的电波可能是通过相位耦合来传递信息。他们通过

对大鼠的位置细胞进行记录发现，当大鼠沿着长长的迷宫通道向前移动时，不同的位置细胞会因它到达不同的位置而依次被激活。研究人员在大鼠睡觉的时候也对它们进行了记录，他们发现，在白天激活的同一批位置细胞再度被依次激活了，这表明大鼠在睡觉的时候，脑子里还重复着穿越迷宫的经历。1989年，捷尔吉·布扎基提出，信息是在 θ 电波形成的时候进行编码并传递到前额皮质的，这些信息主要在睡眠的时候重现并被整合到长期记忆中。[\[8\]](#)最近，布扎基的研究组发现，在大鼠的慢波睡眠中也表现出类似的情绪记忆重现过程。在他们对大鼠进行训练时，其海马和杏仁核中的一些神经元会被协同激活；在大鼠睡眠的时候，相同的神经元会再次出现这种被协同激活的现象。[\[9\]](#)

这些发现令人瞩目，但它们仍然是相关性（并非因果关系）的研究。为了检验睡眠在大脑编码和传输信息的过程中到底发挥了什么作用，本彻内恩和他的同事设计了一个漂亮且富有想象力的实验。[\[10\]](#)研究人员设想，如果在大鼠睡眠时刺激它的神经元，就可以把某个位置场景的梦境植入它的大脑中，然后再看醒过来的大鼠是否能按照那个梦里出现的场景行动，这样就可以清楚地证明位置细胞能够编码空间记忆，而且长时记忆是在睡眠时产生的。这项雄心勃勃的实验可以消除许多人为因素的干扰，因为研究人员在唤醒大鼠后不再记录或刺激大脑的任何部分。实验结果不会有任何人为现象，也不会有记录电极的污染，人们所要做的只是观察大鼠，看他们给大鼠睡觉时植入的梦是否会起作用。

为了实现这一目标，他们将脑机接口技术与海马位置场的研究结合起来。他们记录了在睡眠中重新被激活的位置细胞，当特定的位置细胞被激活时，计算机会发出电刺激，使动物的“奖励通路”（前脑内侧束，人和动物在得到奖励时，该区域的神经元被激活）的神经元发放电脉冲。然后他们唤醒这只动物，并将其放入测试环境。

“从某种意义上说，我们是在问一只大鼠，你是否梦见过这个地方。”本彻内恩解释。只不过大鼠是用脚回答的：它直接跑到了科学家在它梦里鼓励它去的那个测试位置。“这是我们第一次证明神经元的锋电位代表着自然界的地理位置。”

“大鼠第一次跑到那个地方的时候，你的感觉如何？”我问。

“它第一次跑到那里的时候，我都不敢相信……效果非常明显。”他说。本彻内恩随即开始在实验中寻找可能导致大鼠跑到那个地方的其他原因。“它第二次跑到那里的时候，你会说：哇！”此后，研究人员一直在默默地重复这些实验，特别是因为这些实验的难度很大，而且周期很长。但是毫无疑问：当大鼠睡觉时，某个特定的位置细胞会自发激活；如果同时对大鼠大脑中的奖励中枢施加刺激，那么大鼠第二天就会去找目标位置。

在自然界中，波动无处不在，它们是如此美丽。我们看到它们在起伏的云层中，在摇曳的麦田里，在绚烂的朝霞和晚霞燃烧的地平线上。本彻内恩和一些人认为，神经电波在大脑信息的编码和传输过程中非常重要，但问题在于要提供明确的证

据。脑电波就在那里，就算它们是由于自然界中各种振动波相互作用的结果，而不是大脑为处理信息而产生的，大脑也必须进化出一种与这些电波共存的方式。有一个设计好的能避免其他电波干扰的机制，对于大脑处理信息来说是必不可少的。因此，不论是出于精巧的设计还是出于一种偶然，脑电波都与大脑的功能密切相关。

现在，我们已经有了关于脑电波的一些必要的背景知识。让我们回到夏洛茨维尔看一看我的脑电图分析结果。这些结果让人有点儿意外，但肯定会令汉斯·伯格感到疑惑不解——我的脑电波不正常。

[1] Snider, J.; Plank, M.; Lynch, G.; Halgren, E.; and Poizner, H.; et al. (2013) Human Cortical Theta During Free Exploration Encodes Space and Predicts Subsequent Memory. *Journal of Neuroscience* 33(38): 15056 - 15068.

[2] Fields, R. D. (2007) The Shark's Electric Sense. *Scientific American* 297 (2): 74 - 81.

[3] Fields, R. D.; Bullock, T. H.; Lange, G. D. (1993) Ampullary Sense Organs, Peripheral, Central and Behavioral Electoreception in Chimaeras (Hydrolagus, Holocephali, Chondrichthyes). *Brain, Behavior and Evolution* 41: 269 - 289.

[4] Montgomery, J.; et al.,. (2013) *Novel Neurotechnologies: Intervening in the Brain* Nuffield Council on Bioethics, London, page xxiv.

[5] Karalis, N.; et al. (2016) 4 Hz Oscillations Synchronize Prefrontal-Amygdala Circuits During Fear Behavior. *Nature*

Neuroscience 19 (4): 605 – 612. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4843971/>.

[6] Fields, R. D.; and Lange, G. D. (1980) Electoreception in the Ratfish (*Hydrolagus colliei*). *Science* 207(4430): 547 – 548. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7352266>.

[7] Fields, R. D.; and Ellisman, M. H. (1985) Synaptic Morphology and Differences in Sensitivity. *Science* 12:197 – 199.

[8] Buzsaki, G. (1989) Two-Stage Model of Memory Trace Formation: A Role for “Noisy” Brain States. *Neuroscience* 31 (3): 551 – 570.

[9] Girardeau, G.; et al. (2017) Reactivations of Emotional Memory in the Hippocampus–Amygdala System During Sleep. *Nature Neuroscience* 20 (11): 1634 – 1642. doi:10.1038/nn.4637.

[10] De Lavileon, G.; et al. (2015) Explicit Memory Creation During Sleep Demonstrates a Causal Role of Place Cells in Navigation. *Nature Neuroscience* 18: 493 – 495. <https://www.nature.com/articles/nn.3970>.

第5章

脑电波，通往心灵的窗口

我等了一个月才得到脑电波分析的结果。在这段等待的时间里，我内心充满了好奇和忧虑，毕竟，我很想知道自己的大脑究竟有没有问题。（延迟主要是由于我的日程安排。对于他们的客户来说，周转时间要快得多。）今天，我就要直面检查结果了，想躲也躲不了。无论脑电图记录显示了什么，我都得接受。我想象中最坏的情况是：他们可能发现我有癫痫或者脑肿瘤。

一个月前，当我访问弗吉尼亚的神经反馈治疗中心时，还是烈日炎炎，闷热难耐，而这次造访时，夏洛茨维尔的街道已被乌云笼罩，汽车轮胎碾过潮湿的路面时嘶嘶作响。虽然雨刮疯狂地来回摆动，还是挡不住雨水要蒙在挡风玻璃上。几天前，哈维飓风刚把休斯敦市变成一片泽国，现在我正驾车行驶在飓风的边缘。尽管天公不作美，但神经反馈治疗中心依然是一派繁忙的景象。在门廊前面有几把撑开来准备晾干的湿雨伞，就像一排卫星天线一样。客户坐在休息室里等待，我也在那儿候着，可以听见楼上楼下几个房间传来人说话的声音。杰西卡（我们现在直呼其名了）跟我打过招呼后就送我上楼到她的办公室与罗宾见面。她们正用杰西卡桌子上的一台计算机跟加利福尼亚脑科学国际中心的杰伊·冈克尔曼连线进行实时视频会议，讨论我的脑电波结果并解释其含义。

脑电波分析是一个复杂的过程。它需要一个团队，里面要有具备不同专业技能和知识的人，才能把从我头皮渗出来的波动的电压曲线整理成通俗易懂的报告。我的原始脑电波记录已经被发送给脑电图分析人员了，他们要对记录进行梳理，以剔除干扰（肌肉和眼球运动造成的），用多种技术对来自19条通道的脑电图记录进行分析。然后他们会把处理过的数据发送给休斯敦的神经科医生迈耶·普若勒，让他对这些数据进行临床分析，看是否有异常。普若勒再把报告和脑电图数据发送给加利福尼亚脑科学国际中心的杰伊·冈克尔曼进行进一步分析。其中有一项统计分析是将我的脑电图与人脑研究所的1 000名健康人的对照数据库进行比较（这是瑞士和俄罗斯圣彼得堡的研究人员的一个合作项目）。最后，根据与相应年龄的对照组的数据差异，冈克尔曼会提出具有针对性的神经反馈治疗建议，并由杰西卡·厄尔和罗宾·伯恩哈德提供治疗。

我拿到一份封面上印有我名字的整洁的报告，里面是普若勒博士写的几段简洁的分析，还附了我的几段脑电图曲线图以及跟庞大的正常组脑电图数据库比较后的得分和谱系分布图。数据以图表和示意图方式显示，还附有我脑电波的不同频段（ δ 、 θ 、 α 、 β 和 γ ）的相对功率。定量脑电分析的彩色图叠加在一个卡通脑袋的俯视图上。这些色块显示了我大脑不同部位的脑电波的各种特性。着色后的卡通脑袋就像哈维飓风的气象图叠加到美国地图上一样。报告中还有一些蓝色和红色的线条，连接在我头上的19对电极之间，每条线代表不同大脑区域之间活动的相关程度。在报告的最后，冈克尔曼做出总结，并特别建议我做神经反馈训练。

我一瞥功率谱，就发现我的脑电波不是典型的。我在闭眼时本应出现典型的 α 波功率的峰值，但里面什么都没有。为了不对他们的结论造成干扰，我决定什么都不说。

“这是正常的临床脑电图，”冈克尔曼总结了普若勒博士的分析后说，“可以排除癫痫和脑病。”我真感觉如释重负！我记得杰西卡曾经告诉我，他们的客户中有三分之一的人临床脑电图表现异常。异常率如此之高实在出人意料，因为这些人并没有明显的癫痫发作。不过，这些被诊断患有多种心理疾病的客户在进行脑电图分析后发现，他们中的许多人在大脑的某些部位有局部的轻微癫痫发作——这充分说明他们的心理疾病跟生理状态有关。这个信息对治疗精神疾病时选用什么处方药物来说至关重要，因为某些药物可能会加剧癫痫发作。

这个感觉就像劫后余生，我只有等拿到另一个检查结果后，心里的石头才能落地。冈克尔曼说：“我们发现一个低电压脑电图波形。”他用鼠标指针圈起其中一条脑电图波形，说：“虽然我们确实看到在八九赫兹上有一点点活动，但 α 波没有持久性。”

“大多数人认为波只是大脑无所事事的时候出现的一个背景，但实际上，当大脑处于休息状态但随时准备接收信息时， α 波就会增强。”冈克尔曼解释说，“当 α 波的数值较小时，实际上会降低大脑接收感觉信息包的效率；当 α 波转变为负相时，丘脑-皮质通路打开，信息流向大脑皮质。”（冈克尔曼用“感觉信息包”来指那些通过一系列短脉冲而不是连续流动的方式传递的信息。）在丘脑-皮质通路中，我知道他强调的是丘

脑——信息在大脑内部的中转站，它将感觉信息分流到能产生意识的大脑皮质。

“当它（ α 波）进入正相时，丘脑-皮质通路会短暂关闭。”冈克尔曼继续说道。他所说的正相是指 α 波振荡的波峰位置，是相对于波谷而言的。“当波形从正相转为下降的期间所呈现的信息实际上不会被察觉。所以，你的信息是按 α 波的节奏来传递的。你的 α 频率就是你对外界信息的基本采样率。 α 波速度越快，采样的分辨率越高； α 波越慢，分辨率越低。”

尽管你可能不熟悉这些专业术语，但是你在日常经验中能体验到丘脑-皮质通道的作用。当你看见一个家伙在餐馆里对着他的手机大喊大叫时，他其实对周围的所有人和事物都一无所知，这就是丘脑-皮质通道的作用。为了使他的注意力集中在手机通话上，外界的感觉输入以及他对外界的意识都被隔绝在他的头脑之外了。在这种情况下，丘脑限制了感觉信息向大脑皮质的流动，使人们忽略了周围发生的事情。通常，大脑以电脉冲的方式在神经回路中传递信息包的同时也会产生脉冲式的电波，以协调感觉信息流传递到大脑皮质，然后在那里进行分析并整理成有意义的体验。就像电影一样，我们看到影片中似乎是连续的运动，实际上是分离的、以每秒24帧的速度快速闪烁的单帧图像，这与在皮质回路中快速闪现和穿梭的信息类似。我们的大脑要把感觉信号解码为有意义的信息，并且跟其他感觉输入进行协调。如果信息流是连续的，这个过程就会非常复杂，但是这种将信息打包的方式把这个过程分解并简化了。这

就像我们在看视频时遇到的缓冲，当大量复杂的视频信息被下载到我们的计算机时，会因为来不及处理输入的信息而中断。

我们举一个例子来说明封包信息的工作方式：有研究表明，如果把一段讲话的录音每隔几十微秒就做一次截断，然后把这些录音片段反转后再拼接起来播放，听众不会发现录音有异常，他们觉得这是一段正常的讲话。^[1]（我亲自验证过这种现象。纽约大学的戴维·珀佩尔在一次科学会议上发表他的实验结果时，就让大家听过这样一段录音。）如果这些短小的音频片段信息是按照合适的频率打包发送的话，神经回路会把它们当成普通的符合特定脑电波频率的听觉信息，并按照正常的听觉处理程序来进行解释——只要能把这些片段拼接成完整的信息流，大脑就认为它们是有意义的。但是，录音片段的长度很关键（它们必须短于50毫秒），因为我们的听觉系统解码信息包的精度就是这个频率。^[2]（有趣的是，在阅读过程中也存在类似的现象，大脑会自动将打乱的单词重排，以使句子变得有意义。^[3]）

冈克尔曼说：“而且，扫过整个皮质的 α 波也有助于协调编排的过程。”回想一下，任何种类的波都可能是定点的，即只在一个地方起伏，就像在两个人之间摆动的跳绳一样；波也可以向四周传播，例如，用绞盘收钓鱼线时产生的抖动可以从钓竿尾部一直传递到钓竿尖端。“因此，当 α 波不规则的时候（显然我的就是这样），大脑打包信息和处理信息流的效率就会很低。”

尽管我的脑电图分析显示有点儿问题，但我感觉自己在处理信息方面好像没有任何困难。如果有这样的障碍，我也不可能在学术和科学事业上取得成功。这也是脑电图分析有趣的地方，因为非典型的脑电图不一定意味着有认知障碍。每个人的大脑是不同的，比如，一个人的 α 脑电波频率峰值减弱或消失，但其他频带的脑电波可能会抵消这种差异，使大脑依然能够有效地（在某些方面甚至更好地）处理问题，就像在典型的脑电波模式下工作一样。冈克曼总结说，与普通人相比，我大脑中的 β 、 θ 和 δ 波的功率增强可能就是一种补偿机制。

一般来说，不正常的脑电图模式也有其特征。但这种普遍性不一定适用于特定个体，就像吸烟与肺癌肯定有关系，但是也有很多吸烟者并没有患上癌症，而且还挺长寿。

冈克尔曼说：“没有明显 α 波的低电压脑电图（像我的脑电图）是一种常见的变异。”他说，大约10%的人有这种情况。

“也就是说，这在医学上没有什么问题。但是，显示有低电压快速脑电图的人更容易抱怨，因为他们容易感到焦虑、神经质或紧张。脑电波背景是高频低电压的人很容易感到情绪低落或焦躁不安。”

“你的 α 波基本上消失了，这相当于你一整天都睁着眼睛。此外，我们看到在低频率范围内有一个峰值。这个峰值在空间半球出现的频率在比语言半球多一点，但是在（你大脑皮质的）整个感觉整合区域，它无处不在。它不在初级视觉感知区域，而是在感觉整合区域。”

他继续指给我看，我大脑的许多区域都有更高频的脑电活动（ β 波）。“当我们既有慢速波又有 β 波（同时出现）时， β 波被认为是对慢波内容的补偿——大脑产生更快的 β 波以补偿慢速（ α ）波动。例如，商业精英和高水平运动员比普通人（由他用作参考的大型脑电图记录数据库定义）有更多的中央 β 波。从某种程度上来说，这是他们成功的原因之一。通常，优秀运动员和企业高管可能会出现睡眠问题。”冈克尔曼解释说，这是由于在睡眠不同阶段产生的脑电波活动发生了改变（我们将在第7章讨论这个主题）。

但是，还有另一个因素会影响头皮电极记录到的脑电图功率。“颅骨密度会影响脑电波的振幅。如果你的颅骨密度低且钙含量较少，则脑电波不会衰减（降低脑电波电压）太多。当我们在整个头部记录到的信号都显示减弱时，我们不得不问……这是因为颅骨太厚吗？”在不同频率上比较脑电波的相对功率而不是绝对功率，可以帮助校正增厚的颅骨所引起的脑电波信号衰减。打个比方，两张照片的色彩亮度可能有很大不同，但是如果在同一张照片中把色彩进行相互比较，那么即使有一张照片褪了色，也可以通过对比来精确调整图像的内容。冈克尔曼的分析表明，虽然我的颅骨造成了这种信号衰减，但是，基本情况还是很清楚的。

在长达一个小时的交流中，冈克尔曼仔细查看了所有数据，对信息进行了详细的解释，并回答了我的所有问题。在把我的脑电图数据与数据库进行比较时，他发现我的脑电图有点儿不寻常。他说：“从在头部后方测到的 θ/β 值来看，大多数人都不会出现 θ 波峰。”他把我的脑电图与大型数据库进行了

比较，并指着一张色块分布图说：“与你同年龄段的健康人群没有 θ 波峰值。”

然后，他开始进行另一套分析。他指着画在电极之间的红色线条解释说，这表示我的这两个大脑区域之间相关联的脑电波活跃度高于正常状态。总体来说，我的大脑是过度联通了，特别是在额叶区域（额叶是位于前额处的皮质部分，它执行更高级的功能）和慢脑电波区域。

冈克尔曼总结说：“大多数时候，我们把低电压的快速脑电图看作过度兴奋的标志。”他建议我进行神经反馈训练，以增加我的 α 波，并减少 δ / θ 和 β 波的活动。

但是，脑电图能在多大程度上反映大脑的状态呢？我想知道，仅仅记录几分钟的脑电图如何能够提供有关大脑的基本结构或活动方式的信息。当杰西卡和罗宾为我记录脑电图时，我感到非常好奇，而且兴奋莫名。难怪我的 α 波功率那么低——我当然不是处于平心静气的 α 波状态。但是冈克尔曼回答说，他看过成千上万的脑电图，一个人在静息状态时的脑电图确实反映了大脑连接和活动的内在特征，对此他信心十足。实际上，在他职业生涯的早期，记录脑电图是要把针头扎在头皮上的。“如果换到从前，你会更兴奋的，因为我们得在你头上扎21根针。”

冈克尔曼说，他在进行脑电图分析之前，不会提前阅读患者的病史或主诉症状。拿我来说吧，几年前，我的一只耳朵失去了听觉。[\[4\]](#)当我告诉他时，冈克尔曼说他可以看出我的大脑

对这种感觉剥夺的反应，因为脑电波的变化反映了我的听皮质的连通性和活跃度已经被改变了。

冈克尔曼认为，低电压高频脑电图人群的另一个风险因素是对酒精的依赖。“具有这种脑电波模式的人更容易沉迷于某些让他们感到放松的事物，他们会上瘾。现在你有了低电压高频脑电图，晚上回到家再喝几杯小酒，那你就有 α 波了。”他说。出现这种效果是因为酒精作用于大脑皮质的抑制性神经元，而这些神经元对确定脑电波振荡的频率非常重要。酒精会激活 γ -氨基丁酸（GABA）神经递质受体，从而减缓大脑的电波振荡，这样就使低频 α 波同步化并被放大。不过我很幸运，没有酒精依赖的问题。冈克尔曼补充说，这也合情合理，因为还有许多其他的认知和社会因素都会影响并控制过度饮酒。

接下来，他为我列出了神经反馈训练的详细步骤。第一步是增强我的感觉——运动节律，加强我大脑的 α 波功率，并降低 β 波和 δ 波的功率。然后他们将转换到 α/θ 训练，以改变 α 波和 θ 波的相对功率。这些技术利用神经反馈来增强大脑特定位置（即不同的电极记录位置）和特定频率的脑电波强度。

听着冈克尔曼谈论我的大脑并查看它的电活动数据，这一个小时过得让人意犹未尽。在咨询结束时，我总结了冈克尔曼的结论：“我的颅骨太厚，医生建议我多喝几杯，只要不把我老婆惹毛了就行。”

大家发出一阵欢笑声。

神经反馈训练：改变我的想法

与冈克尔曼的视频连线结束后，杰西卡开始把电极连到我的头部，准备进行神经反馈训练。她将一根导线连接到我的耳垂，把另外两根电极分别连到我颅骨上称为Pz和C4的两个点。这两个名称分别表示在大脑中线后方的一个电极（Pz：p表示后面，z表示中线）和在大脑右侧顶叶/中央区域（C4）的一个电极。当她在我的脑袋上涂上胶水并把电极固定到我头皮上的时候，她一定感觉到我的担心了——我怀疑通过神经反馈训练去改变大脑可能不是个好主意。虽然某些东西与标准不一样，但不一定意味着它不好。甚至可能正是因为我的大脑中缺少 α 波，才使我得以成为我。我的大脑不仅状态良好，而且在某种程度上，它可能是我成为一个成功的科学家的关键。

“我们的许多客户在某些方面都是杰出的，”杰西卡试图安慰我，“但在其他方面会有问题。”她接着告诉我，做神经质反馈训练不会让我丧失那些卓越的能力，让我不用担心。

“要我说的话，这就像换挡。如果你开一辆跑车的时候始终挂在五挡上，那么当你想要把车停到车位上时就很有难度了。我们所有人都既要能够停车，也要能够倒车。我们需要不同挡位提供的灵活性。”神经反馈训练能使我获得这种灵活性。

罗宾向我解释了神经反馈训练的计划：“冈克尔曼的建议是，在C4位置（即我的颅骨中线右侧的脑电图电极位置，在我的耳朵和头顶之间，以我后脑中线上的Pz电极作为参考）训练感觉运动节律（SMR）。”它指的是感觉运动皮质中12~15赫兹

的特征脑电波。“训练感觉运动节律将使你感到更加放松和专注。”她说道。

我准备好了。杰西卡让我放松身心，避免肌肉紧张。“把注意力集中在感觉上，因为特别是在开始时，变化将非常微妙。所以，只需要注意感觉自己的身体即可，留意哪些地方僵硬或紧张，在你的唤醒水平去感受就可以。”

在显示器上，我看到三个绿色的竖条上下伸缩。屏幕中间有条水平线，当绿色条柱上升到水平线上方时就会变成亮红色。在这些竖条上方，有一条我现场脑电图记录的示波轨迹在屏幕上划过。摇摆的光点从左向右扫过屏幕，留下一条波动的轨迹。当光点到达屏幕边缘时，屏幕的大部分留下一片空白，波动线从屏幕另一边再次出现，就像在颠簸的车子里用颤抖的手画下的线条。这是在两个电极之间记录到的我大脑的原始电信号。绿色竖条实时反映了我大脑中不同频率脑电波产生的能量。

“如果愿意，你可以看着它（计算机显示器），但这可能会使你的注意力从身体上移开，并进入大脑——你正在思考的大脑。我们实际上在试图使你的思维放缓。你最好闭上眼睛，让听觉（即音调指示器，她指的是在神经反馈过程中，当我的脑电波模式朝着他们希望的方向移动时所发出的声音信号）起作用，”罗宾说，“但是如果你实在好奇想要偷看，那也无所谓。”杰西卡补充说：“有些人觉得显示这些东西很刺激，但是当我刚开始给某个人做神经反馈训练时，我会开着显示器。”

声音响起来了，听起来像一种深沉的共鸣，有点儿神秘，犹如新时代的爵士乐手操纵着音符在木琴上漫不经心地游走，在切入主题之前先寻找灵感。

“我应该怎么做？”我问。

“你不需要……”罗宾没有继续回答我的问题，她转向杰西卡，屏住呼吸说，“你知道他对我说了什么吗？”

我换了个问题继续问她：“那个屏幕上的东西是什么意思？”

“你看，我就知道会这样。”罗宾虽然好脾气，但还是忍不住温柔地责备我。杰西卡会心地笑了。“你这个思想家，”她嗔怪道，“有件很酷的事情是，你的杏仁核早就知道发生了什么。有意识的头脑实在太愚蠢，没有办法可以影响它。”她和罗宾咯咯笑起来。她们已经让机器闯入了我的大脑。她们知道我在神经反馈训练时会采取左脑优势的分析方法，而这种方法对训练并不会有太大帮助。

“但是，”罗宾强调说，“万一你感兴趣……”她知道我一定会偷看。

叮，叮，噗……铃声响起。

“这是要增加的频率，”她指着屏幕中间跳动的绿柱，“这一道（左侧的绿柱）是你应该抑制的 δ 慢波，而这（右侧的跳动的柱状条）是你正在抑制的高频 β 波。”她还解释说，

眨眼和肌肉紧张会产生影响，因此必须将它们与我大脑皮质内部的真实电活动区分开。

神秘的提示音还在继续，我想尽力弄清楚它们。有趣，我暗自想到。也许我应该以某种方式改变提示音？音调可能代表不同的脑电图频率。也许我应该抑制低音和高音部分，并试着加强中音部分。但是，该怎么做呢？

我反复问自己：也许不是。这些音调可能毫无意义，只是随机变化。是的，有可能是这样。单调或简单的音符会让人觉得无聊。没有任何意义。对，但是，它们会不会真的发了信号呢？我反驳自己：我的杏仁核会弄清楚的。我的杏仁核会怎么做？没有人告诉它该怎么办。是的，但既然你能知道，所以你的杏仁核也肯定知道。你无法躲开大脑的潜意识。也许我应该试着组织这些声音——像演奏乐器一样。我可以给它们加上节奏吗？来一首曲子怎么样？我可以奏出哆来咪吗？四分音符？快速连续地敲钟？

我大声问：“这些音调……到底是什么意思？”

杰西卡解释说：“你会注意到，这两个功率条从红色变为绿色。”我看到左右的绿色功率条在上下跳动，只要一越过水平线就会变成红色。“这是设置好的阈值。”她指着那条界定功率条是绿色还是红色的水平分界线说道。“你看这两个功率条，我们要尽量压制它们，而中间那条是我们要增加的。”也就是说，要增加中间那条表示感觉运动节律功率的能量条，要降低分别表示 δ/θ 和 β/γ 活性的另外两个能量条。“当功率超过阈值时，它将变为红色。变红色时，表示训练达不到要

求；绿色表示训练达到要求。当你在屏幕上看到所有功率条都变成绿色时，你会听到铃声快速响起。”

“所以我要努力使所有频道变绿？”为了确认我的理解，我问道。

她们俩异口同声道：“是的，是的。”

“我正在尝试做的事情让铃声改变了吗？”

杰西卡回答：“呃，你实际上并没有尝试做任何事情。”
“一点儿没错。”罗宾强调说。

这不是我预期中的神经反馈的工作原理。我以为这就像电子游戏一样，你会因为表现出色而得分。“你们不告诉客户他们尝试做的事情，对不对？”

“是的，我们不告诉客户。”罗宾回答。

这无疑使我感到惊讶，我一脸的困惑。“许多其他从事神经反馈治疗的人为了使患者更加积极地参与训练，都在扮演客户的教练的角色。”杰西卡说，“由于来找我们的客户往往是心灵受创、患有注意障碍（ADD）和有其他问题的人——他们经常会身不由己地去努力迎合治疗。我们采取的态度是，这是一种生理干预，无论他们主观上是否努力，它都会奏效的。”

我想我明白了。她指的是我在波伊兹纳的虚拟情景实验中体验到的一种隐式学习。没有人告诉我，我的任务是要了解哪个泡泡藏着灭火器，但是我的大脑自动、无意识地发现了这一

点。不过，这令我感到惊讶。我假设神经反馈也是通过有意识地去尝试完成任务，从而起到影响脑电波的作用。它可能通过音调提示任务完成情况，就像玩电子游戏一样。我对此有些困惑，所以我试着这样做。

“所以，我并没有意识到发生了什么事？”我反复问，同时感到困惑，没法很快就接受她们所告诉我的话。

“你不必刻意去意识它。”罗宾回答，“实际上，接下来的三分钟，你何不尝试着放松所有的肌肉，闭上眼睛，顺其自然，也许这才是你想要的。看看你是否可以追随体内的感觉，这会让你明白自己是不是放松了。”

好吧，抛开杂念，我思忖道。我不太擅长这个。人们喜欢冥想——它的确很棒，但是我没有那么多时间，不过我尽力吧。

“我希望能借助仪器来帮助客户体验到他们自身的感觉。他们以后想要再找回这种感觉就会比较容易了。”

三分钟的神经反馈训练和记录结束了。杰西卡敲着键盘，一边分析一边在计算机屏幕上展示出结果。柱状图不见了，取而代之的是不同颜色的线组成的走势图。这些线条犬牙交错、起伏不平，就像孩子在蚀刻素描板上画出来的一样。我意识到这是我们刚刚完成的三分钟神经反馈训练的脑电压曲线。我不清楚不同颜色的线条代表什么，也许它们代表不同频率的脑电波。

“深蓝色和浅蓝色线分别是随时间变化的 δ 波和 θ 波。”杰西卡解释说，“深褐色和红色是更高频率的脑电波。那个是我们要抑制的 β 活动波。”她边说边指向一条爬到其他线条之上的红线。

罗宾指着一个实验过程中突然出现的波峰，就像突然出现的山峰一样，说：“你可以看到，就是在这儿，杰西卡开始跟你交谈。”

“是的，你有太多的 β 波和 γ 波。”杰西卡指着一些波峰说道，“在这个区域，你的（精神）状态已经发生了变化。”

“在这个地方，他有可能刚好对你说的话产生兴趣。”罗宾建议。在神经反馈训练的过程中，有一个波峰出现在她们向我解释如何解读计算机显示的内容和奇怪的提示音的那一刻。

“是的。”杰西卡同意。

罗宾补充说：“也有可能你在听我们说话的时候，多眨了几下眼睛。”她暗示这种突然暴发的信号也可能是肌肉造成的干扰。

第一次尝试神经反馈训练只是让我对这个方法有所了解，并确认脑电图记录设备、分析和视觉/听觉奖励功能都正常。“在下一轮训练时就不能看屏幕了，也不能说话。”罗宾吩咐道。

杰西卡轻轻按下开始键，又开始了另一次训练：“又开始了。”

铃声再次响起。

好吧，不去想它，我暗自想道。敲铃，只是敲铃……铃声，铃声。那是噗噗声。停下！不要胡思乱想……去感受。

叮，叮……噗。

太好了，敲响了！我在心里表扬自己。我做了什么？我在心里问自己。不知道啊，但是再来一次怎么样？好啊……

什么声音都没有。

我脑海中的对话再次响起。安静了好长时间了。这不是你干的。你不能去想，你必须去感受。但是，我不能停止思考啊，没有人可以停止思考。我的思绪在脑壳里弹来弹去。好吧，想想怎么冷静下来……很好，我平静下来了。是的，但是就像你在接受采访的时候，怎么可能保持冷静。是的，但是如果你做得不对，这些技术就不会起作用，训练就会失败。是的。好吧，不要乱想……

叮，叮……

好，就是这样！……但它停下来了。你得再做一次刚才所做的才能让铃声响起……尽是噗噗的声音。他有精神病，所以他是天才。试图自杀。悲剧。神经反馈疗法可能对他有用。

停下来！清醒一下！

好的，好的……

叮，嘣，锵锵锵……

现在在我脑海中，爵士乐手用圆头槌敲击木琴键的画面突然变成了铁皮鼓手敲出卡里普索（一种源自牙买加的二拍舞曲）节奏的场景。是的，听起来像是卡里普索的鼓点。丰富而优美的曲调……那鼓点让人迷醉。他们怎么能在铁皮桶上敲出这么美妙的声音？太奇妙了。上周，我在加勒比海旅行途中听到过卡里普索的鼓声。自由潜水感觉棒极了。还记得游向那个崖洞口时，一条6英尺长的鲨鱼跟你并驾齐驱的场景吗？很惊人，是吧？但我知道那是一条铰口鲨。那些印头鱼也很有趣。我眼前出现了一条长长的黑色的鱼，在昏昏欲睡的大鲨鱼周围绕来绕去。它们离我那么近，几乎碰到我的潜水面罩，我甚至可以看到这些印头鱼脑袋上像肋骨一样的吸盘，它们就是用这个吸盘把自己固定在鲨鱼身上。吸盘其实是高度改良后的背鳍。我很高兴我在水下憋气这么长时间。我真搞不明白，那些变幻无穷的共鸣声是怎么从凹陷的铁皮桶盖子上敲出来的。我想知道人们是怎么发现这种乐器的。人类的创造力真是惊人。我不知道自己能不能做一个铁皮鼓。卡里普索鼓手有着像乌木一样黝黑的皮肤，长发绺垂到腰间。他戴着一条红色的头带，眼神遥远而空灵。鲍勃·马利（牙买加说唱歌手，雷鬼乐的鼻祖）仿佛就站在他身后，甩着头，随时准备翩翩起舞。

叮，嘣，嘣……随后是一阵长时间的停顿。

但是曲调不见了，也没有了节奏。杂乱的鼓点，空洞的眼神。可能吸了太多大麻的缘故吧，没有了丰富的旋律……他僵住了，好像嗜睡病发作了一样。或许他是因为吸食了毒品而神情呆滞。铃声没有响……他神经兮兮的。也许不是大麻，可能海洛因才会有这样的效果。

停下来！你不应该有任何想法！

对。

死一般的寂静之后，传来两声铃响。

……我认为马利并不在那里。马利太优秀了，当那个鼓手想要让音乐飞起时，他绝不可能只是站在那里袖手旁观。对，马利踩着节拍。他已经死了。他什么时候去世的？我不记得了。无论如何，这是雷鬼音乐，它来自卡里普索，但不是卡里普索。很酷的音乐。这个小伙子是业余的。他僵住了……可能无法再打鼓了。

没有人在那里！你不应该胡思乱想！你应该让自己的脑袋一片空白。完全不用理会那些声音。是的，但是我必须把奖励的声音弄出来，否则就白费劲了。你必须让铃响。但是，你又不能去思考。正是这样……

铃声响了。然后又急促地连续响了三下。

就这么干！我想知道自己是怎么做到的。你必须再做一次。你不要去思考。你必须去感受。但是，刚才我感觉到了

什么？什么都没感觉到……

叮，叮，咔锵锵……

也许这声音更像是木琴发出的。

牙买加的卡里普索演奏家消失了，爵士乐手又回来摆弄他的木琴了。那是一种漆得光鲜亮丽的木琴。有些硬木发出的共鸣声真是令人称奇。就像我在澳大利亚弄到的节奏棒（伴奏乐器，用两根小木棒相互摩擦或敲击发出各种声响）一样。想用这种硬木做吉他一定很不错。澳大利亚真是个好地方。铁皮鼓的声音有点儿像这种铃声，但带有金属质感。没错，不完全是铁皮鼓，但也差不多。或者说真正是用硬木做的风铃。是的，那更接近……这可以解释为什么没有节奏。这个调子很欢快。我很高兴这不是单调的纯音。我喜欢这种声音。人们喜欢风铃声。风铃声能让人平静。对，想象这是一个风铃，全身放松。什么都别想，用心听就是了……

叮，嗒叮……

我曾把铜水管切成不同的长度串成一圈，做了一套风铃，它们会按五声音阶发出声音，那真的很有趣。我是按五声音阶做的吗？不，我可能是按半音音阶做的。我不确定是不是用了那么多管子。如果我用半音音阶，那听起来就不像音乐了。可能还是五音音阶。你用不着把十二个音符都用上，它们也可以是半音音阶。我好像没用十二根管子，最多六个。也许组成和弦1—3—5、1—4—5之类的，我不记得

了。大调、小调、多里安调式。小调显得非常宁静祥和。也许我就是按这个做的。对，小七和弦或减七和弦，这确实很和谐。我最喜欢的和弦是Cmaj7（C大调吉他7和弦）。我真的很喜欢那些爵士乐的和弦。我加了和声吗？我是不是跨了八度？我不记得了。毕达哥拉斯弄清楚了管子和弦线的长短跟音调的关系，并利用这个原理来确定所有音符，这真是了不起。他只用几何学知识就完成了这些工作。是的，有这么一个公式，但我记不起来了。不过，我曾用它来计算风铃管子的长度。不管怎么说，用几何方法更有趣。太神奇了，你只需要一个量角器。梅拉妮在外面等我。我们要去哪里吃午饭呢？我现在还不是很饿。取一段绳子，把绳子的一头固定在角铁的一条直边顶端，另一头绕在角铁另一端的螺丝上，拉成一个三角形，然后拧紧螺丝，就可以得到第一个音符。然后，只要一直拧下去就会得到不同的音符……有意思。这是我为儿童科学杂志《奥德赛》写的。没错，但是它没有发表——《奥德赛》倒闭了，可惜，很棒的杂志。贝丝是一位出色的编辑。风铃的声音听起来有点儿不对劲了。我明白，听起来就像在风中碰来碰去的垃圾。因为本来就是那样。可是，你已经按照毕达哥拉斯的方法，把管子切成适当的长度了啊。是的，但是效果不佳。有趣的是，某些频率的声音听起来会让人感到愉悦。都是比率决定的。它可能与物理学有关，当物体的长度按特定的比例变化时，发出的声音就显得有意思。一切皆有声。就像折断一根棍子或敲打一段空心的树干一样，当物体按精确的比例，比如二分之一、三分之二或其他比例断裂时，伴随的声音就会对人产生刺激，人脑喜欢这种声音，并主动去寻求这种刺激。你不会因为思考而获得奖励！铃没有响！你不应该再多想，停下来！

叮，锵……

……或者可能跟中耳的物理特性有关，会对某些比例的声音感到愉悦。这就是我们的神经系统的构建方式，声音刺激耳蜗的方式。这些对我们的神经系统有一定激励作用的感觉信息形成了音乐。可能是吧。也许两者兼而有之。我的风铃很有意思，但听起来确实不怎么样。铜可能不是最好的材料，太软了，需要用黄铜或其他东西。我不知道发生了什么事，所有的线都缠在一起了。铜现在真的很贵，所以有人偷铜。我的威士忌醒酒器就是用铜做的。尝起来有点儿像拉加维林威士忌的味道。不能完全用物理学来解释，因为它有文化的成分。亚洲的音乐只有七个音符，西方音乐有十二个音符。对。亚洲音乐听起来很糟糕。我的意思是理解起来不难，因为它充满异国情调，但感觉怪怪的。十二音阶的音乐要好得多。是的，但是你有儿种族倾向，这可糟透了。的确不好听，我宁可听摇滚和管弦乐，也不愿听歌舞伎表演里奏的弦乐。不好说，我在日本时喜欢亚洲音乐。还记得你在那里购买的所有这些亚洲音乐CD吗？是的，但是我好几年没碰它们了。我忘了把它们放在哪儿了。反正我再也不用CD了。现在流行潘多拉流媒体了。潘多拉很烦人，我觉得它很无聊。我喜欢日本，那里的一切都不同——食物、艺术、人民。对称。他们不喜欢对称，可我们喜欢。不过这有点儿奇怪。梅拉妮在外面等着。我们要去哪里吃午饭？我现在不太饿。西方音乐很好，全世界的人们都在听。摇滚、民谣、布鲁斯、爵士、乡村音乐（我说的不是肥皂剧里的那种乡村音乐）、蓝草音乐、歌剧。歌剧让你感动。为什么会这样呢？

说唱很烂。披头士乐队了不起。无论我身处哪个国家，我都能听到西方音乐，出租车的收音机里总会播放。是的，但这是个文化现象。由于全球交流以及西方文明、政治和商业的主导地位，世界各地的人们现在都听得到西方音乐。圣战组织憎恨我们。是文化冲突引起了所有问题，还引发了“9·11”恐怖袭击事件。他们的音乐很奇怪，尽是小舌音、肚皮舞娘、半音、走调的音，根本不是音乐。还记得我们在葡萄牙听到的法多音乐吗？真的很好听，美丽而忧伤。我们和摩根一起在里斯本的那家咖啡馆度过了一段难忘的时光。她让服务员卖给她一瓶葡萄牙白兰地，好作为一个惊喜礼物送给我，因为晚餐后我喝了不少。她竟然还不到21岁。他悄悄地卖了一瓶给她。味道太好了。现在一切都消失了。我再也受不了了。梅拉妮还在外面等着呢。我们要去哪里吃午饭？蓝调中的那些蓝色音符虽然也不合比例，但却很好听。那些决定整首曲子风格的旋律和那些特定的曲调，总是比语言更能表达情感。发自内心，对，这就是你现在应该做的！去感受！你现在不应该思考……

嘟……嘟……时间一分一秒过去。

我要集中精力让铃声响起来，把能量条变成绿色。但我什么都没感觉到啊……梅拉妮在外面等着。我们去哪里吃午饭？毫无疑问，文化经验是植根于大脑的。就像杰西卡和罗宾的许多客户一样，他们的生命早期遭受了可怕的创伤经历，而且由于这种悲剧已经改变了他们的大脑活动，因此他们还将遭受长期的折磨。我替他们感到难过。但是杰西卡她们可以用神经反馈训练来帮助这些人，重塑他们的大脑。我

很高兴自己没有任何精神问题。也许你有毛病，谁知道呢？我没有毛病，否则我会感到难过并想要去改变。我对自己的想法很满意，对自己的生活也很满意。你很幸运。是的，我为患有抑郁症的人感到难过，而且很遗憾我们无法治愈精神分裂症。患上这种疾病就是一场悲剧。还记得加拿大温尼伯的那个精神科医生吗？就在你去的那一天，他的病人自杀了。他们不会称其为自杀。他们说“解脱了”，因为没有自杀成功这样的事情。他伤心欲绝，告诉了我关于那个人的一切，一个悲伤的故事。你不应该说精神分裂症患者，应该说“被精神分裂症困扰的人”。数度进出监狱，没有朋友，可怕的幻觉。像他这样的精神科医生真的很令人尊敬，愿意照顾那些患有严重精神疾病的人，特别是我们对患者的大脑出了什么问题都还一无所知。“是的，我很久以前就知道，作为一个精神科医生要做的更多是护理而不是治疗。那就是我努力在做的。”他说。我很高兴自己没有患精神分裂症。他人很好，我希望他现在过得很好。他告诉我他有帕金森病的早期症状；我希望他没事。你也可能患上这个病。谁知道呢。每100个人中就有1个人得病，但是没人讨论这件事。任何人都有可能患上精神分裂症。你可能会感到沮丧或遭遇一些可怕的悲剧。车祸、谋杀或其他可怕的事情。到目前为止，你很幸运。对，我家的每个人都有福。不是每个人都这样。的确，不是每个人都有福。但是你不应该想这些，应该排除杂念。放松并聆听激励型的提示音。集中注意力。想象一下，它们是在风中轻轻摇曳的风铃。好的，我试试。

蹦蹦蹦，蹦蹦蹦……

杰西卡和罗宾真的很好。她们对我很宽容，她们所做的工作非常重要。她们的团队很了不起。罗宾讲话冷静、轻缓、深思熟虑，我都快被催眠了，而且她在遣词造句的时候谨小慎微，既要清楚表达，又生怕冒犯我。杰西卡活泼、热情、开朗的态度很讨人喜欢。她俩的风格都让人感到自在，因为她们都是如此宽容、善良和友好。一个了不起的团队。我真的希望这种神经反馈疗法能起作用。我可能暂时无法做到，但是稍后再多加练习，我敢打赌自己一定可以做到的。我应该尽量不要去想……

我想知道状态条现在是否更长时间是绿色的。我看不到。不要偷看，不要偷看，那是作弊。你会毁了圣诞节。专心听铃声就好……风铃的声音不会总是那么让人平静，一开始会，但随后会变得有点儿烦人，而且一遇到暴风，风铃就毁了，你不得不把它们扔掉。你不应该再买风铃了。我不买。我收到一些不错的风铃，是别人送的礼物。对，摩根和迪伦送给我的，我也送风铃给摩根和莉迪娅，这种风铃是用白色半透明皂石做成的，切成蝴蝶和鸟的形状。那是我去年去古巴途经墨西哥的时候买的。希望我能再次去古巴，但是现在看起来很难了。摩根喜欢蝴蝶，她一直都喜欢。是的，但是你的蝴蝶风铃可能已经让她不堪重负了。风铃出现在她的婚礼上真是很棒的装饰品，它对我们来说具有特殊的意义。还记得她离开家上大学时我写给她的关于蝴蝶的信。但我敢打赌，我送给她的蝴蝶风铃发出的声音肯定很难听。它们的比例不合适，绳子也纠缠在一起。巴赫改变了毕达哥拉斯的音律。确实。当你沿吉他的琴颈向上移动手指弹奏不同的调门时，永远不会做到真正准确。对，很可惜。但是，没

有办法解决。班卓琴永远都是跑调的。这就是为什么最初的弦乐器都带有活动的品格（让弦发出不同频率的声音的卡位装置）。这也是为什么大提琴和小提琴等真正的管弦乐队乐器没有品格的原因。凯利是一位出色的大提琴手。我喜欢大提琴的声音，但我根本不会玩儿那个东西。为什么现代吉他没有可移动的品格？我们其实没必要将它们从琴弦上拿掉，它们可是真正的高科技啊。琴颈会很光滑。我讨厌那些嵌在吉他琴颈上的品格。我不知道其他乐器制造商怎么能做得如此出色。把乐器打磨得那么平整、光滑，而且有着完美的琴颈——真的很难。啊哈，完美的琴颈。归根结底还是吉他的琴颈，不是吗？它的形状、手感和角度。对了，还记得你1980年与梅拉妮一起在富莱德港实验室工作时，有一次在圣胡安岛的农场集会上，你拿起一把吉他，它的琴颈给你的感觉是什么样吗？它具有深V的形状。是的，我一碰到它的瞬间就感觉到了。梅拉妮在外面等我。但这把琴非常个性化。不同的人喜欢不同形状的琴颈。大家的手形各异，这就是原因，而且演奏的音乐类型也不一样。马丁吉他的琴颈是最棒的。我应该把我的琴颈也弄成这个样子。我的大部分琴的琴颈都太宽了。是的，但是你以前喜欢这种款式。是的，但现在不那么喜欢了。为了弹奏凯利的歌，我做了一把吉他，我要把它完成。是的，但可能永远也完成不了。她很想要一把镶嵌螺钿的吉他，这就是我花了这么长时间的原因。我讨厌镶嵌螺钿。是的，这真是很乏味，而且我觉得自己并不擅长做这活儿。是的，我把她吉他音孔周围的镶嵌装饰弄坏了。我想我可以用一些黑色涂料细心地掩盖它。她可能没有注意到。她会注意到的。其他人也会注意到。看起来很业余。是的，但是既然到了这地步，现在我也只能硬着头皮干了。我

得修复它。我可以从头开始。做一把全新的吉他。你才不想这样做呢。它花了太长时间。停止思考并放松。让铃声响起来。对。

断断续续的铃声打破了房间的寂静。

我怎样才能使铃声响起呢？想象我在打瞌睡之类？就是 α 波增强的时候。我试一试……伯格第一个记录到了 α 波——是在他儿子和精神病患者身上记录到的。他是纳粹分子。我想回到耶拿。也许我可以像演奏乐器一样用这种神经反馈仪器奏出一首曲子来——《铃儿响叮当》之类。不，不是《铃儿响叮当》，那听起来太幼稚了。也许是克莱普顿的《泪洒天堂》（*Tears in Heaven*）之类的。他们会喜欢的。罗宾和杰西卡听到我用脑电波演奏《泪洒天堂》绝对会感到惊讶！你可能办不到，因为你还没有弄清楚音调的含义和音阶的高低，更不用说随心所欲地演奏了。总之，声音可能是杂乱无章的。但我敢打赌，我可以做到。她们一定会大吃一惊！就像是斯皮尔伯格的电影《第三类接触》。你做不到！我敢打赌肯定行。开始……我想知道她们的客户有人能做到吗？也许这就是我应该做的。弄清楚如何奏出这些声音，或者至少可以弄出节奏来。不！这只是一种激励，你无法通过思考来做到。我不会再想了。我要让我的潜意识去做。来点儿卡里普索的鼓点。也许是“刮刮胡子理理发”……“刮刮胡子理理发”……“刮刮胡子理理发”。不起作用，“刮刮胡子理理发……”你必须停止思考！我认为没有人能停止思考。另一方面，你也无法知道别人的想法。杰西卡和罗宾可以知道别人的想法。我仍然觉得每个人的内心都

在不断进行着对话。与谁对话？我讨厌跟我对话的这个家伙。我想可能是我的前额皮质。是的，但是在对谁说话呢？你的联想皮质？没有道理啊。默认网络[\[5\]](#)。额叶、顶叶、颞叶、小脑。后扣带回皮质（PCC），腹内侧前额皮质（mPFC）。我在跟谁说话？我不是在自言自语。我在和你说话呢。你是谁？我的脑袋里就像有两个人一样。而且你总是对我指手画脚，告诉我该怎么做，做什么。不是我在跟我说话，而是你在跟我说话；其实，根本不是交谈，而是教训我该怎么做。你应该停下来。别想了。放松。好，我试试。这个很难。你的 α 波很弱而脑区又过度关联，特别在前额皮质，可能就是它在跟你说话。是的，但是没有 α 波看起来也没什么大不了。你需要 α 波来协调并打包信息流。是的，但是同步性过高也不是好事情，它意味着更多的信息。如果你的大脑可以分别保存和处理不同的信息，并在不同区域同时独立进行计算，然后将信息发送到网络的下一个阶段，那么你会拥有更大的带宽。在相对较慢的 α 波约束下，脑电波频率越高，可能计算就做得更快。也许是，也许不是。是的，你的 θ 波很强。 θ 波非常适合增强突触可塑性。在长时程增强（LTP）研究中，你就是用 θ 波刺激大鼠海马切片的突触。我很高兴欧力尔关于长时程增强的论文发表了。低能量-高频率的脑电图可能是阿尔茨海默病的指标。我可能会患上阿尔茨海默病。杰伊不会告诉我的。就像萨拉戈萨的费耶德博士一样。“完全符合你的年龄。”真讨厌。没有什么可以天长地久。告诉她们，如果早上没有喝咖啡，我的脑电图功率就会降低。你的大脑快要痴呆了。不要这样想。你可能还没有意识到。随着年龄的增长，认知储备可能正在被慢

慢覆盖。你无能为力。你变老了。我不觉得自己老。老妈说：“没有人能活着离开这个世界。”梅拉妮在外面等我。他们说你需要同时降低 θ 波和 β 波，也许你会觉得自己的精神状态变得更好了。它可能会使你过于专注。我集中注意力没有任何问题。我可以持续几个小时专注于一件事。这是因为我的前额皮质中的多巴胺含量很高，而多巴胺含量升高是由于我在做23andMe的基因检测时发现有个基因变异所引起的。我是那3.8%的尼安德特人。23andMe基因检测很不错，但是现在它让我感觉很不爽。FDA（美国食品药品监督管理局）毁了这家公司，现在他们正在开发数据。我想看看有更高的 α 波功率会是什么感觉。有可能只是脑电图记录时产生的伪影——记录的灵敏度降低了。我的 α 波和脑电图功能可能是正常的。或者只是暂时降低，而不是先天缺失。这些脑电图数据是真实的。我想增加 α 波看看是什么样子。但是你必须停止思考，让铃声响起来……

叮，咚，叮……

在《泪洒天堂》中要弹出那个C和弦很难。我上手总是有点儿慢。你需要多加练习。你练习不够。

你在思考！停止思考，去感觉自己的身体。

我不知道你是谁。我不是在跟我说话，你是在对我指手画脚。也许是我的两个大脑半球在相互辩论？是这样吗？左右互搏？推理和分析？我不知道。也许其他人没有这种心理对话。当然大家都有。让他们彻夜难眠。也许别人有，你没

有。你怎么知道的？你是我肚子裡的蛔虫吗？不，那是内心的、潜意识的。你的母亲。对，她总是对的，但是有时候很容易错失。你良知的声音太小了。这是一种感觉，必须聆听。是的，但你不是我的意识；你在发号施令。你告诉我要怎么做。停止思考，见鬼，把铃弄出声！你做得不对。

叮，嘞，叮叮。

嘿！我弄出来一串音符。太酷了！铁皮鼓手又回来了。大口灌下一瓶“红条”啤酒，他又开始演奏了。很好。让他想怎么演奏就怎么演奏吧。然而，他还是有点儿僵硬。无法跟上节奏。铃声不响了。他们如何清洁那些小辫子的？克莱有长长的发辫，但他必须剪掉才能戴上登山头盔。杰克·凯鲁亚克的整本书都是用意识流写的。我想这就是头脑的运作方式。反正，我认为他的想法很有趣，但并不是那么了不起。任何人都可以做到这一点。但不管怎么说，那本书终究是销售了上百万册的畅销经典。我希望能搞明白这是怎么回事儿。出书要做很多工作，我希望我能成功。也可能不会成功。你不可能知道，也没人知道，这就是营销。没有人真正了解营销，否则每个人都会成功了。这是非常随机的。一场投机。铃声没有响。不要再想了，放松。

三分钟到了。

“怎么样，感觉如何？”杰西卡问。

我想要概括在这三分钟里的体验并准确地表达出来，但这需要很长时间。我做不到。我憋了半天，却只能笑着说出一

句：“挺有意思的。”我笑得很尴尬，我可不希望她们把我的笑声理解为不屑一顾，所以我又跟她们交流了一下自己刚才的经历。“我一直在猜不同的音调是什么意思……也可能什么都不是。”

她们向我解释，音调的变化没有任何特殊含义。杰西卡说：“老的设备只有一种声音，它会让人抓狂的。”

“你感觉自己的身体能适应吗？”罗宾满怀希望地问。

我必须如实回答。“适应不了。”我垂头丧气地说道，我被彻底打败了。她们不知道在那沉默的三分钟里，我的内心经历了怎样疯狂的变化。

“你肯定在思考。”罗宾戳穿了我，就像当场抓到小朋友在偷偷拿饼干一样。

我只好承认自己当时正在尝试演奏《铃儿响叮当》。

她俩忍不住大笑起来。

杰西卡看了看训练结果，然后在计算机屏幕上指着图上的一个时间点说：“这就是那个时候所发生的事情。还是有很多 δ 波……”

她敲着键盘，检查了其他频率的脑电波：“很有意思！你确实放松了一些。”

“是的。”罗宾也同意。

“就在这个区域。因为这里变成了绿色，也就是你的波和慢速 α 波，看浅蓝色和绿色的部分，超过了其他频率脑电波的幅度并达到了峰值。”我能看到图表上那些彩色的线条上升了。“然后它们又降下来了。”

罗宾补充说：“另一个好消息是，我们试图抑制的那个 θ 波也降下来了，就是最上面那条深蓝色的曲线。”

我认为这种改变是发生在训练的过程中，我努力压抑思想并试图放松的时刻。我只是无法持续这么做，在训练快结束时，我内心关于谁在控制我的思想和行为的想法缠斗不休，都快让我发狂了。也就是在那个时候，我的 α 波曲线掉回到了基线水平。

“他的感觉运动节律怎么了？”罗宾问。她指的是感觉运动节律。她继续说：“很难改变他的感觉运动节律。”看样子我的结果并不让人乐观。杰西卡回答：“他的感觉运动节律是——”这时罗宾指着下降的曲线插话说：“它降下来了。”

所以，这个疗程在他们看来也并非完全失败，但是收效不是很大。罗宾给了我一些有益的指导——她建议我想一些令人振奋的事情：“你真正喜欢做的事情，例如攀岩。或者你喜爱的人和宠物。这通常会增加感觉运动节律。”我们又开了三分鐘的训练，这次我闭上了眼睛。

但是当我闭着眼睛静静地坐在那里，沉浸在愉悦的回忆中并等待神经反馈的激励铃声时，没人知道我的内心经历其实跟上次训练时一模一样——我的思绪总是快速翻滚，记忆在我的

脑海中盘旋。我的脑袋经常嗡嗡作响。我通常会从暴风雪一般的各种想法中挑选出一个来，发展成连贯的思想体系并讲述出来。思考就像在捕捉雪花。思想除了言语的表现形式之外，还有图像，而且非言语和非视觉的思维可能比前两者更重要，即通过认知进行思考。例如，自然而然地从正确的一侧上车并驾驶汽车。无意识的思考不断在指导着你的行为。如果你在英国，当你打算拉开副驾驶侧车门（现在位于汽车“错误”的一侧）时会发现自己正在打开驾驶室的车门。

第三次为时三分钟的神经反馈疗程结束了，脑电图结果与前两个没什么不同。我的脑电图变化不够理想。我问是否可以再尝试一次。罗宾建议我休息一下，也许第二天再做会好些。这一天我们已经做得够多了，而且神经反馈训练很花时间。我坚持要再试一次。“这次，我想看看铃响时我是否有其他感觉。”我说，“这是全新的事物，令人振奋，我不能只是无所事事地坐在那儿（等着增强 α 波），这次我想看看如果钟声响起时，我的感觉会不会有所不同。”

杰西卡说：“好吧，让我们再试一次。”仿佛在分享一个秘密，罗宾对我小声说道：“这样行不通的。”大家都笑了。“不过，没事的，”杰西卡说，“你可以再试试。”

所以，我再次闭上眼睛，开始第四次训练。

我试着回想上周在加勒比海自由潜水时体验到的失重感。我漂浮在水面上，大口地呼吸，然后一个猛子扎下去，弯腰然后双腿向后使劲一蹬，我就可以入水更深。我脑海中浮现出崖洞里那条6英尺长的鲨鱼的形象。不要去想鲨鱼，那会让你太兴

奋。想想悬浮在水中的感觉。随着海潮的起落而漂荡；与色彩斑斓的鱼群同步摇摆；从摇荡的珊瑚上面游过；潜到珊瑚礁的边缘，咫尺之外就是隐没在深蓝色海水中的万丈深渊；我可以毫不费力地随着洋流漂浮，像海豹一样在水中翻来滚去。我向下潜入水中，向下，一直向下，直到刺眼的阳光照不到的地方，那是60英尺以下的深海，是靛蓝色的昏暗、寂静的宇宙；在我身体的一侧是垂直的珊瑚崖壁，另一侧就是无限的蓝色海水。我是另一个世界的访客。我仿佛遨游在外太空。

铃声有好长一段时间没有响了，我才意识到训练应该已经结束了。“结束了吗？”我问。

“嗯。”杰西卡回答道。

我不记得在那个疗程中发生的其他事情。

训练结果在计算机屏幕上蹦出来，并且与之前的训练结果明显不同。记录开始后曲线以指数级的速度从峰值骤然下降，并维持在一个较低的水平。我说：“ δ 波出现了一条学习曲线。”

“是的，的确是这样！”杰西卡回答，“你的 δ 波减少了很多，这很棒，太棒了。”

她在检查我脑电图的其他频段时说：“不同频段的曲线更干净，而且没有纠缠在一起。它们更稳定……我喜欢这个样子的图形；这说明，你的大脑已经开始理解任务了，那就是镇定和平静。”

我眼前的只是数据。我的脑子发生了变化了。我的大脑完全按照我想要的方式改变了它的电活动波。我不知道它是如何做到的——有意识的大脑不可能单独完成这个任务——但是我的整个大脑会知道怎么做，各个部分同心协力改变了它自身——意识决定了物质。

另一种观点

微弱的波！谁知道呢？我是应该继续进行神经反馈训练（毕竟它让我的大脑在短短三次训练后就有了改变），使其恢复正常状态，还是应该让脑电波继续保持它们原先不寻常的振荡模式？做完神经反馈训练后的第二个星期，我找到了一位脑电图研究的专家。这位权威在一家世界领先的机构中领导着一项大型研究计划，因此他希望我不要提他的名字。我给他看了我的脑电图结果，并向他咨询低功率 α 波和高功率的 β 、 γ 和 δ 波脑电图的含义。这位专家对我的脑电图报告不屑一顾。他认为这些脑电图数据没什么意义，而且他并不赞同滥用脑电图来鉴别精神疾病或人格特质的做法，也不认可通过神经反馈来改变脑电波的治疗方法。他引用了40年前的一位研究人员的话，这位研究人员因为将脑电图用于这些方面而广为人知，但他表示，这项工作漏洞百出：“这让脑电图蒙羞。”（他所指的这位研究人员仍然活跃在脑电图研究领域，并且非常出名，因此我不透露他的姓名。）在这位专家看来，这些早期的科学文献中所记载的脑电图实验记录不够可靠，而且这些实验结果不可重复。

我找到的这位专家并不认为我的 α 波功率低，他根本不认可相关的数据。“你不必担心。”他说，试图向我保证我的脑电功能并没有明显的异常。他说，光有脑电图数据和分析是不够的。而且，他认为这些静息状态下的脑电图的记录并不能反映我的大脑功能连接的基本特性，因为它们很可能反映的是我在记录过程中大脑活动的状态——而不是其固有的状态。

我反驳他说，那么多有关脑电图与大脑内在特性、功能连接性、心理障碍和其他心理特征的科学研究不都是在静息状态下进行的吗？（我们将在第9章中更深入地讨论这些研究。）他也同意确实有一些证据，但是在把静息状态的脑电图用于心理障碍的临床诊断之前，或者在把神经反馈用于治疗之前，还需要做更多的研究。

这位专家是世界知名的科学家，而不是治疗师，而怀疑的态度是科学家绝对不可缺少的品质。我本人作为一名科学家就亲历过这样的事情：过早地肯定自己的假设，结果却被证明完全不是那么回事，在做了其他实验后才发现，原来大自然欺骗了我们的直觉，我们不过是被自己脆弱的愿望蒙蔽罢了。（如果你把结论发表在科学期刊上之前就得到这种启示的话，那你还有救。）处理这种讨厌的不确定性真是让人感到恶心，就好像行走在悬崖峭壁之间的独木桥上一样，但这就是科学研究的意义所在——探索未知。因此，任何理论假设在采用正确的科学方法，经得起别人独立重复实验的检验并获得严格的实验数据支持之前，都是可疑的。这位专家认为，在进入临床使用之前，这些方法必须有基于数据的有力证据来证明方法有效而且可靠。显然，许多健康保险公司目前尚未批准覆盖脑电图分

析和神经反馈治疗费用的原因，也是基于这种严格的科学观点。这是一个处在前沿的研究领域，全世界都积极参与其中，包括这位专家自己的实验室也在进行相关研究。但神经科学研究在不断发展，不管这些新研究看起来多么有希望或令人振奋。按照这位专家的观点，在有确凿的科学证据之前，将脑电图用于精神疾病的诊断或治疗为时尚早。

他也赞同静息状态的脑电图可以提供一些有关人脑功能连接以及某些精神疾病和个体人格与行为的特征信息（我们将在第10章中讨论），但是要想从脑电图获得这些信息，必须经过非常严格和复杂的程序。在记录脑电图的过程中，个人的状态必须得到精确控制，而且对记录的质量要求非常高，用于分析数据的方法，也必须是恰当的。他说，特别是相关性检验很难做到精确，而且特别容易出错。他提醒说，进行相关性检验要用到复杂的数学方法，才能得出有效的结论。我做脑电波检测时用的是19个电极，与此不同的是，在他的研究中，为了获取大量复杂的脑电波数据，他使用了128个脑电图记录电极。同时，他还用强大的计算机进行复杂的运算分析，并有一个由科学家和数学家组成的专家团队支持。他说，我做的两次脑电图都只有10分钟，记录的时间不够长，并且在这些短时间的记录中，肌肉收缩和电极移动造成了太多伪影。他说：“你确实可以利用脑电波来做一些事情。”他指的是使用静息状态的脑电图来鉴别认知功能，但前提是你必须使用更加复杂的设备和分析方法。他列举了一些评估阿尔茨海默病（或称为老年痴呆症）、帕金森病和其他脑部疾病患者的认知功能与大脑先天连接模式的研究。这些研究就使用了静息状态脑电图，并结合fMRI与最新的图论方法来分析大脑网络。

他认可神经反馈训练在改善认知功能、记忆、睡眠、注意力和精神放松等方面有一定作用，并且在一些心理疾病的治疗中可能会有一点儿帮助，但是在将其用于诊断和治疗之前，还需要进行更多基础研究。

我们应该认识到，治疗师和科学家看待这个问题的角度是不同的。治疗师希望用脑电图和神经反馈训练来缓解人们的心理问题，而科学家的目的是在世界首屈一指的研究机构里利用脑电图对大脑进行研究。他们的目的不太一样。这位研究人员在他的实验室中使用的设备和资源是世界上最先进的，比我做脑电图分析时所用的设备要复杂得多。尽管神经反馈中心的杰西卡和罗宾拥有很好的设备和能够进行定量脑电图分析的专家团队，但他们不是研究机构，他们也没说自己是科学家。只要对客户有用，他们就会采用。

肌肉收缩会产生非常大的电压，从而干扰脑电图记录，因此必须仔细地把这种干扰排除掉。说到这个问题，当我和卡里姆·本彻内恩在巴黎他的实验室见面时，他告诉我，这是神经反馈治疗的一个大难题。因为如果人体处于 α 波为主的放松状态时，也会改变来自肌肉的信号。不过一些研究人员已经开始利用肌肉张力的变化来矫正神经反馈训练，效果还不错。（请注意，与神经反馈不同的是，生物反馈通过监测所有的身体反应——例如心率——使人能够自我调节精神状态或其他身体功能。）

“你怎么知道自己所做的事情能真正控制脑电波，而不是（肌肉松弛或紧张带来的）副作用？”他举了一个具体的例

子，“在神经反馈训练里调节感觉运动节律起到放松的作用，但是当你严格控制实验条件时，神经反馈训练造成的EMG（肌肉收缩的肌电图记录）变化会与脑电图完全相同。”（要记录肌电图，研究人员只需要降低脑电图设备的放大器的增益，让设备只采集来自肌肉的强得多的电信号，而不会检测到神经元中较弱的电活动。）从科学的角度来看，这的确很重要，但它不会有损神经反馈训练的优势。“你是想做治疗还是想做学问？”本彻内恩问道。

在本书的第三部分中，我们将回到利用脑电图分析来对个人的认知优势和劣势以及心理和神经功能障碍进行诊断的问题，并详细探讨神经反馈的最新研究进展。在此之前，我要做一些铺垫，并且由于我们现在正处于已知与未知的十字路口，因此让我们先深入地讨论一下神经振荡。此外，我们还需要把神经振荡已知的作用和神经科学家认为可能的作用区分开。

面对现实

这座两层楼的独栋小屋有白色的隔板和黑色百叶窗，它是爱因斯坦从1935年起直到1955年去世时在普林斯顿大学一直居住的地方。[\[6\]](#)这里现在是一处私人住所，但出租车司机告诉我说，有时候那些探头探脑的游客仍然让房主感到困扰。路过19世纪的老房子，穿过宁静的住宅区，就进入大学的中心。普林斯顿神经科学研究所建于2013年的巨大的绿色和银色的玻璃建筑映入眼帘。这一路走来，就像穿越了时空。该研究所的心理

学助理教授蒂莫西·布施曼正在进行的研究是人的大脑如何制定决策并指导人体依照目标采取行动（即行为的执行控制）。

他说：“对我来说，这背后的动力就是思考。”他继续说，我们的脑海中萦绕着无数种想法，我们会挑选出一种想法，考虑考虑，然后再采取行动，这与巴甫洛夫实验中的狗对外部刺激（敲铃）以特定方式做出简单的条件反射不同。行为的执行控制是大脑自己的内部认知或信息处理的结果，从而决定了要思考的内容以及要采取的行动。

行为执行控制这项重要任务是由位于额头的前额皮质（就是前额叶切除术中被切除的那部分脑叶）执行的，但是没有一个大脑区域能够单独完成这项复杂的任务。决策需要整合大脑不同区域的各种信息，这些信息跨越整个大脑网络，从前额皮质（负责高级整合和决策）到顶皮质（对于把所有的感觉信息组织在一起非常重要）和位于大脑深处的基底神经节（大脑的奖励效应中枢，人在实现目标时感到兴高采烈的情绪就是奖励中枢在起作用）。顶皮质位于大脑的后上方。行为的执行控制也需要其他大脑区域的参与，例如海马（提供记忆和空间映射）和杏仁核（检测威胁）。布施曼和他的同事认为，神经振荡和脑电波对于联结大脑不同区域的神经元活动，在它们之间形成动态的、灵活的联系，对于个体快速做出决策并行动至关重要。

尽管布施曼的著名研究表明了神经振荡的同步在注意力和决策中的重要作用，[\[7\]](#)但他认为要把这项前沿的研究变成有说服力的“有效理论”，还需要进一步的证明。他说：“即使在

神经科学界，人们对于神经振荡到底有没有作用还存在争议。”有些神经科学家觉得，在大脑的某些地方，神经振荡发挥了重要作用。例如在海马中， θ 波和 γ 波之间的相互作用对于记忆编码的计算与信息处理显然很重要。但这并非一种放之四海而皆准的信息编码机制，人们还需要进行更多的研究。

他说：“反对者认为，这（神经振荡）只不过反映了某种过程——就像大脑运算后排放的废物，而真正的原理依然藏在背后不为人知。”造成这种不确定性的原因是，当前的大多数证据都是基于相关性的研究，即某些大脑活动的节律与神经元的放电行为同步（或相关）。但是有关联并不意味着一定存在因果关系。（我每次醒来后太阳就升起来了，但是我不能说太阳出来是因为我醒过来了。）用一些新的实验方法，例如经颅磁刺激（TMS）和光遗传学，有节律地刺激神经元放电，这样可以检验它们的因果关系。“经颅磁刺激会产生影响。”布施曼说，“如果经颅磁刺激所用的频率与大脑自然产生的频率产生共振，你会获得不错的增强效果，但这并不总是百分之百有效的。”（在第三部分中，我们将看到经颅磁刺激在其他心理任务中如何促进学习和行为表现。）

在啮齿类和灵长类的动物实验中，人们也许可以获得更多因果关系的证据。布施曼等人正在使用经颅磁刺激和光遗传学方法对动物的大脑进行不同节律的刺激，并观察神经元放电节律的改变如何影响信息加工和行为。例如，在一个实验中，他们刺激小鼠的躯体感觉皮质以增强 γ 波的频率；实验数据表明，在加快频率的某些阶段，动物会对感觉输入表现出更明显的感知。

神经元在神经回路中放电时有一个非常普遍的特征就是它们放电的节律性，这就引出了一个问题：如果没有目的，为什么神经元会有节奏地放电？“神经振荡无处不在，”布施曼说，“各个物种都有，大脑的各个区域也都有，但是在许多神经精神疾病和神经发育障碍患者的大脑中，这种节律性却遭到了破坏。”波动现象普遍存在于自然界中，在许多情况下是非常明显的。从物理学的角度来看，许多自然现象都表现出振荡的形式——摆锤由于不断受到重力牵引而摆动，或尺子敲到硬物上产生振动（从而发出声音）。振荡是许多敏感电子设备（例如高增益放大器）的克星。在这些设备中，电势遇到阻力就会造成来回振荡，从而产生“交流声”，或者像礼堂中的扩音系统。当麦克风离扬声器太近时，音频不断反馈放大，就会产生尖锐刺耳的啸叫声。有很多例子可以说明，振荡行为控制着某些过程，或者说它是某些设备运行的关键机制。例如，祖父留下的摆钟。但并非所有事物都由振荡控制。神经振荡到底是推动大脑工作的发条，还是大脑工作产生的噪声？

这是全世界的神经科学家正在努力解决的一个基本问题。西班牙马德里卡哈尔研究所的奥斯卡·埃雷拉斯·埃斯皮诺萨博士研究了神经元在放电时产生的电场（这种电场被称为局部场电位）的形状和动力学。我们知道，这些细胞外电场是脑电波的基础。在我访问埃雷拉斯·埃斯皮诺萨在马德里的实验室期间，他的计算机里保存了在大鼠海马中采集到的电场记录。“振荡就在那里。”他指着屏幕上上下下移动的波浪线说。但是，埃雷拉斯·埃斯皮诺萨表示：“关键要确定是什么使神经元产生振荡波。”

振荡通常是兴奋型和抑制型神经元综合作用的结果，它们共同决定了神经元放电的节律。兴奋型神经元会刺激其他神经元的电活动，而抑制型神经元则会减少神经元的发放，就像“油门和刹车”，使信号在神经回路中以适当的速度传递。但是，埃雷拉斯·埃斯皮诺萨提醒说，不能因为仅仅观察到两个神经元群体的同步振荡，就认为这两种神经元一定会结合在同一个功能网络中。“输入刺激在这里引起了振荡。”他指着来自海马的一段同步振荡的记录说，“如果把这个输入加到另一个脑区，产生的结果可能完全不同。”

他说：“肯定还有许多振荡波是我们看不到的，因为它们不会产生场电位。”他指的是人们面临的另一个重要的难题。回想一下，像海浪一样在神经元周围涌动的电场是许多因素之间相互作用的结果，其中也包括其他神经元产生的电场的干扰。尽管用细胞内电极直接监测到的某个神经元放电可能是有节律的，但由于那些相互作用，可能会抵消这个地方的场电位所产生的波。他警告说，这会造成局部场电位记录和脑电图记录中的数据缺失，犹如少了某些拼图，可能会导致已有的数据拼合成的整体图像被完全破坏。

埃雷拉斯·埃斯皮诺萨的告诫言犹在耳，我现在听布施曼谈到，神经振荡是保持神经元处于平衡的激发状态所必需的，这样神经元才能以最佳状态运转。如果神经元过于兴奋，并以最大速率发放，那么它就无法传递表示更高活动水平的信号；同样，如果神经元的活动被过度抑制，它就不能传递代表活性下降的信号。振荡波有助于神经元找到并维持兴奋和抑制的最

佳平衡状态。在这种平衡状态下，神经元可以编码的信息量最大。

神经元产生的电波频率时高时低，是为了维持神经元兴奋性的最佳状态，这样才能让电场电位产生的波和其他神经元的电波同步。这种同步可能把大脑中的相关信息绑定到一个临时的功能网络中，进行信息的记录、集成、处理和检索，并行使复杂的认知功能（例如执行决策）。但是，同步性过高也是一个问题。“你想，如果所有神经元都在同时放电——那信息量就很少，对吗？”布施曼问，“如果所有的神经元都做同样的事情，那么你只需要一个大神经元就好了，干吗还要上百万个呢？”

“我认为大脑试图维持一个兴奋/抑制的平衡状态，但这是一个生物系统，会产生很多噪声（工程系统中的噪声就比较容易控制）。我认为振荡的意义可能在于对兴奋/抑制的平衡状态进行采样。因此，神经网络会在相对的激活和抑制状态之间波动。在某些特定的振荡周期内，神经网络会获得更稳定的平衡，从而使网络有更强的可塑性”，这样才能有效地处理大量的信息。“然后你得增加一些抑制作用，否则神经网络会发疯——就像癫痫发作那样。”布施曼总结说，“振荡的电波使神经网络能够采样并表现出不同形式的动力学。”振荡就像你为了在冲浪板上保持平衡而做出的调整一样。

他分享了一些目前尚未发表的研究成果。他发现在决策过程中，神经振荡和前额皮质与其他大脑区域之间的同步化有一定因果关系。“在学习的某些阶段，前额皮质和基底神经节之

间会形成同步化，但具体是怎么做到的还不得而知——不知道究竟是什么类型的细胞在促成这些相互作用。信息从基底神经节传递到皮质有两条非此即彼的途径，从而形成了我们之前讨论过的‘推拉效应’。不同的神经振荡节律让你可以主动或被动地参与到前额皮质神经元的‘合唱’中。”布施曼的意思是前额皮质中与基底神经节的神经元发生“共振”的神经元在功能上耦合，而其他以不同频率共振的神经元则被排除在外。

“你在顶皮质和前额皮质中看到的强烈振荡（即这些 β 振荡）似乎在自上而下的信息处理中发挥着重要作用。（自上而下的信息处理是有意的行为，受大脑皮质更高级别的认知功能控制，与自下而上的信息处理相反。自下而上的信息处理是指信息从我们的感官流入大脑，引起我们的注意并指导我们的行为反射。）这些在基底神经节中也非常明显。帕金森病患者的 β 振荡出现病理性变化。”帕金森病由于控制基底神经节兴奋/抑制平衡的特定神经元死亡而削弱了对自主运动的控制。

在他目前的研究中，布施曼试图解决的问题是，神经元与功能网络形成一个整体的过程中，神经振荡与之到底是关联关系还是因果关系。“我们施加不同类型的节律（使用光遗传学驱动神经元放电），并研究它们如何在大脑中传播。”他还在孤独症转基因小鼠的动物模型中进行这些实验，以查看这种疾病是否真的会导致正常脑节律的破坏。到目前为止，数据支持以下假设：这些振荡有助于把神经元和执行决策的功能网络联系起来。

在另一项仍在进行但尚未发表的开创性研究中，布施曼和他的同事正在进行一些实验；他们试图对人的思想进行解码，

然后将这些信息输入动物的大脑，达到移植思想并控制行为反应的目的。这是一个有趣的主题，我们将在本书的后面进行探讨（请参阅第9章）。

总结一下到目前为止我们在探索中所学到的东西，这是一个奇怪的发现：振荡的电磁波从人脑辐射出来，只要用一根导线接触头皮，结合原始的设备（这些设备是人类开始研究电的神秘力量时所使用的）就可以轻易地检测到。让我带您回到圣迭戈。

大脑中的波——虚幻还是根本？

我早早来到这里，希望占到个好位置。但当我转过拐角朝大厅瞟了一眼时，我惊呆了。许多科学家挤在门口，因为无法进入拥挤的礼堂而怨声载道。他们后面还有好多人踮着脚尖，想要从人群的头顶上看过去，发言者的声音从大厅的扩音系统传出来已经变得低沉而模糊了。

我正在参加2018年11月在圣迭戈举办的神经科学学会会议，这场会议的内容是关于 γ 波的。会议的主题是：“大脑中的 γ 波——虚幻还是根本？”两位专家在辩论中各执己见。这次活动的起因是《神经科学杂志》（*Journal of Neuroscience*）上最近发表的两篇文章。这两篇文章争论的焦点是， γ 波究竟重不重要。它是大脑运作的关键，还是像电子放大器的嗡嗡声一样，是无关紧要的副产品。[\[8\]](#)脑电波长期以来一直是一个神秘的领域，突然间却变成了一个主流话题，吸

引了各领域的神经科学家，他们也因此分成了两个阵营。来自世界各地的神经科学家蜂拥至礼堂，因为人们正在重新审视信息如何在大脑中编码和处理这个最基本的问题。

我站在大厅里，可以听到发言人的开幕词，但看不到讲台上的人。我慢慢地挤过人群，想办法从门口挤进房间，里面的座位都坐满了。房间里人满为患，连过道上都挤满了站着的人。消防警长如果看到这样的场面，一定会抓狂的。我慢慢地往前挪，站在正厅的人群已经挤得贴墙边了。我被挤到中间的过道上，就像在满载的电梯里一样。

主持人和两位发言者提出了这个话题：教科书对信息编码的解释是，信息由神经冲动的发放速率（锋电位编码）决定并以数字化的方式编码，这一点已得到充分认可，但这个观点可能存在不足。发言者评论道，在大脑中也检测到了神经电活动所产生的高频电波，其振荡频率与美国的交流电频率大致相同（60赫兹）。神经冲动是数字化的，每个冲动都是离散并且彼此相同的，但大脑中还有另一种相似却不同的信号——脑电波。跟无线电波一样，脑电波可以通过振荡的相位、频率和幅度来编码信息，就像广播电台用AM和FM（调幅和调频信号）的方式编码和传输信息。可以看到，神经振荡引起的电压远远小于激发神经元所需要的电压；流过神经组织周围的电流也是在60赫兹附近有规律地波动；神经元在这个频率（60赫兹）下有规律地发放神经脉冲；在脑组织中的 γ 波频率也是大约60赫兹……这是为什么呢？

有人提出， γ 波能够通过复杂的方式促进信息处理，从而赋予人脑认知能力，这是简单的锋电位编码所无法实现的。如果神经元只有锋电位可利用，那它只能根据锋电位发生的时间以及锋电位连续发放的速度来编码信息。（锋电位的速率和锋电位的时程如何编码神经信息已经在第4章中讨论过。）但是，由于神经元激活的时候总是在 γ 波的波峰处，而抑制作用总是发生在波谷处，因此，当神经元产生锋电位的时候， γ 波会对其有强烈的影响（其他频率的脑电波也会以同样的方式起作用）。从理论上讲，有节律的脑电波振荡可以根据确切的时间和同步性来对诸如思考、感知世界、集中注意力以及形成和调取记忆等活动的信息进行归类、过滤和组织。

当神经元在不同的时间尺度上发放（产生电脉冲）时，其他频率的脑电波可能会对其产生影响，但是 γ 波的频率与学习和信息处理过程中突触强度变化的时间框架可以完美地匹配。1949年，心理学家唐纳德·赫布提出了“学习发生在细胞水平上”这一基本原理。随后的研究证实了他的假设：当突触的信号输入与突触后神经元的发放同步且反复发生时，神经元之间的突触将被增强。最近的研究精确地测定了“同步”发放的时间窗口。如果突触输入与突触后神经元发放的时间间隔不超过20毫秒，那么就会启动某些生化机制，使突触联系更强。增强后的突触在激发时，突触将在突触后神经元中产生更大的电压变化，因此会对突触后神经元产生更大的影响。但是，如果突触触发较晚，也就是说，在突触后神经元发放神经冲动之后（神经电脉冲在20毫秒内就会结束）突触才有输入的话，那么它会像晚会上迟到的人一样失去机会，突触联系就会减弱。同样，过早触发的突触输入也会减弱突触联系。这个对增强和减

弱突触很关键的20毫秒时间窗，正好与 γ 波的两个波峰之间的时间差相吻合。与 γ 波频率相同的电波可能会在学习过程中对突触的增强或减弱产生决定性影响。在集中注意力和认知加工的过程中，大脑中的 γ 波活动会增强；相反，频率较慢的 α 波和 δ 波与头脑的静息状态有关。

此外，正如本彻内恩所指出的（请参见第4章），波非常有效地传递了力。这就是特斯拉的交流电注定要胜过爱迪生的直流电，成为美国电网最有效的电力分配手段的部分原因。汽车陷进车辙里，就算许多人合力去抬汽车的保险杠，可能也不足以把它弄出来，但如果同一批人以精确的频率一下一下地朝同一个方向去推汽车，那么每推一下都会增加汽车摇摆的幅度，于是可以迅速积累起足够的动力而将卡住的汽车推离车辙。

自然界中的各种波都有复杂的相互作用。请想一想，宇宙间无数天体之间有着复杂的相互作用，最后的结果却是我们的地球24小时自转一圈这样一个简单的事实。而地球的昼夜节律又会影响到从天气到生物节律的万事万物的变化。

如果有多个波源，会导致复杂的相互作用。两个或更多的波会相互增强或相互抵消，使得信号被放大或消除，信号的相位关系也会被改变。当不同频率的波相互作用时，也可能形成更高级的振荡模式。低频波中可以嵌套着高频波，从而协调和构造出更复杂的信号，就像把四分音符作为一拍放到一个小节里一样（例如，三分音符或四分音符组成的小节可以用来创作华尔兹或进行曲）。我们能在脑电波中看到所有这些自然界中出现的波的特征。

如果两个神经元群体的发放频率都跟 γ 波相同，它们之间的共振耦合就可以将这些神经元组合在一起，形成一个有功能的组织，就像乐队里拉小提琴的部分与敲鼓的部分在时间和节奏上协调起来，可以奏出乐曲一样。适当频率下的共振耦合可能把记忆的位置、顺序、情感等所有元素组合在一起。这些元素本来在不同的神经回路中进行处理，现在就可以形成一个相互联系的、可回忆的场景。

沃尔夫·辛格是德国法兰克福恩斯特·斯特龙曼研究所（Ernst Strüngmann Institute）的神经科学家，也是 γ 波研究领域的领军人物。他在辩论中提出了自己的观点：“局部神经回路的电波难免出现振荡，但是 you 一旦把这些振荡联系在一起，就可以获得非常丰富的行为表现”，这能极大地扩展大脑处理复杂信息的能力。

争论相持不下。在脑电波的振荡为大脑信息处理提供了新维度这一点上，大家没有争议，但缺乏确凿的实验证据。不赞同脑电波是大脑的一项基本功能的人指出，自然界到处都有振荡；神经回路有电波振荡并不意味着振荡是神经功能机制的一部分。

耶鲁大学医学院神经科学家杰西卡·卡丹表示：“目前，很多理论看起来都很漂亮，但并没有足够的实验证据。”她指出，目前大部分的实验证据是相关性的，而不是对因果关系的严格检验，因为任何两个波都会偶然达到同步。要想知道 γ 波是否有助于信息处理，还需要更有力的证据来检验。

旧金山大学心理学家维卡斯·索哈尔持相反的观点，他认为 γ 波对于信息处理很重要。不过，他尊重卡丹的批判性观点，承认“科学之所以进步，是因为科学家都是怀疑论者，这是必需的”。

不管人们选择哪一方的立场（ γ 波很重要或者 γ 波是噪声），科学家之间都有一个共识，那就是神经和心理疾病患者的 γ 波通常是不正常的。“我是个精神病学家，我对这门学科感兴趣的原因之一是，在许多精神疾病状态下，尤其是精神分裂症和孤独症， γ 波的节律会明显受到干扰。”索哈尔后来跟沃尔夫·辛格、我和其他发言者进行会后交流时对我这样说。改变的 γ 波是大脑功能障碍的标志还是精神疾病的原因尚不清楚。不过辛格说，还有其他人的研究显示，人们可以通过使用神经反馈训练来学习控制大脑皮质特定区域中的 γ 波强度，这可能有治疗作用。华盛顿大学神经科学家伊丽莎白·布法罗则持折中的态度补充说：“关于对孤独症儿童进行生物反馈治疗的一些小型研究倒是获得了一些看似有希望的结果。”

其他研究人员则开始着手用节律性的脑电刺激（通过将电极植入大脑或对颅骨发射电磁脉冲）来改变 γ 波（以及其他频率的神经振荡），看是否对慢性抑郁症、孤独症、精神分裂症等多种疾病的治疗有所帮助。卡丹警告说，这种治疗方法不但可能无法纠正异常的脑电波，反而会因为过度刺激或抑制而使大脑过载，并破坏神经回路。这也是人们为什么认为脑深部电刺激的方法可以治疗帕金森病。在极端情况下，电击或电休克疗法可有效治疗抑郁症，但这并不意味着高电压的脑部刺激可

以纠正异常的脑电波并治疗疾病。没有人真正知道电休克疗法为何会起作用。

脑电波到底是大脑行使功能的基础，还是“认知的引擎”在运行过程中产生的“废气”？为此人们做了很多实验研究。但是大家除了对用电刺激来调整脑电波以达到治疗目的的可能性充满质疑外，对刺激实验所产生的结果的不确定性也同样充满了批评。人们用经颅刺激、脑深部电刺激和光遗传学（用基因工程改造神经元，使它们变得对光敏感，并可以被激光激活）等方法来改变脑电波。这确实可以影响行为，但是这些方法对大脑活动的影响过大，无法提供令人信服的结果。卡丹说：“如果整个大脑都陷入这种人工节律，那么锋电位编码可能会消失。”

在辩论结束时，大家达成的共识是，我们需要新的技术来精确控制特定神经元的电波相位和神经冲动发放的时机，而不是用目前这些会对大脑的整体活动产生剧烈影响的方法。换句话说，只有将来发展出新的技术，我们才可能找到解决这一难题所需的证据。索哈尔同意这种说法，不过他提出了另一种可能。他认为也许并没有一个“银弹”（奇迹般的解决方案）实验能证明 γ 波对大脑功能至关重要。相反，就像进化论一样，无数的实验观察结果将随着时间的推移而被积累起来，最终形成一个无可辩驳的事实。到那时，这个理论也就不证自明了。

在会议结束后，我又抓紧时间听了其他主题的科学演讲，但是那场辩论的争议和影响一直萦绕在我的脑海中。艾奥瓦大学神经科学家菲利普·甘德对我说：“即使我是这个领域的，

我也没能挤进去。”他指的是辩论会场人满为患，“但它们（脑电波）绝对不是‘废气’。”他跟我分享了一些新的实验结果，是关于 γ 波在记忆中的作用的。他的实验对象是手术前将电极植入大脑进行诊断的癫痫患者。他的实验表明，当一个人在对某个音调进行记忆时，从测试音出现到受试者回忆测试音之间的这段时间内，受试者脑中的 γ 波会呈现爆发式的增强。甘德说，在听皮质和前额皮质中涌动的 γ 波（绝对没有刺激，所以不会产生锋电位编码）把这个声音存到了工作记忆中。

他承认，这个结论是一种信念，而不是证据。但是，信念和怀疑才是促使科学进入未知世界的原因。

无论你在这一问题上形成了什么样的信念，还有更多有趣的证据可以为你提供参考。除了我们已经探讨过的记忆外，大脑还有两个最有趣也是最神秘的功能，那就是意识（我们对自己和周围世界的意识）和睡眠（一种令人困惑的意识状态，我们一生要花三分之一的时间在上面）。脑电波是我们在这两种大脑状态下执行心理功能的最好的、可衡量的指标。为了阐明大脑这两个功能的奥秘，也为了进一步收集有关脑电波作用的证据，并在“脑电波的作用（如果有的话）到底是什么”这个神经科学领域的根本问题上得到一个结论，让我们仔细探讨一下意识和睡眠过程中的脑电波研究。

[1] Saberi, K.; and Perrott, D. R. (1999) Cognitive Restoration of Reversed Speech. *Nature* 398: 760.

[2] Luo, H.; and Poeppel, D. (2007) Phase Patterns of Neuronal Responses Reliably Discriminate Speech in Human Auditory Cortex. *Neuron* 54: 1001-1010; and Giraud, A. L.; and Poeppel, D. (2012) Cortical Oscillations and Speech Processing: Emerging Computational Principles and Operations. *Nature Neuroscience* 15 (4): 511-517. doi:10.1038/nn.3063.

[3] Wolchover, N. Breaking the Code: Why Your Brain Can Read This. *LiveScience* .com, February 9, 2012. <https://www.livescience.com/18392-reading-jumbled-words.html>.

[4] Fields, D. Guitar Hero. *Washington Post Magazine*, September 9, 2007. <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2007/09/04/AR2007090401785.html>.

[5] 默认网络是指大脑皮质的一些离散的、双侧对称的功能区域，分布于大脑的内侧和外侧顶叶、内侧前额叶、内侧和外侧颞叶。——译者注

[6] Meichle, A. Albert Einstein in Princeton. *Albert Einstein in the World Wide Web*. http://www.einsteinwebsite.de/z_biography/princeton-e.html. Accessed September 15, 2019.

[7] Buschman, T. J.; et al. (2012) Synchronous Oscillatory Neural Ensembles for Rules in the Prefrontal Cortex. *Neuron* 76: 838-846.

[8] Cardin, J. A. (2016) Snapshots of the Brain in Action: Local Circuit Operations Through the Lens of Gamma Oscillations. *Journal of Neuroscience* 36: 10496-10504; and Sohal, V. S. (2016) How Close Are We to Understanding What (if Anything) Gamma Oscillations Do in Cortical Circuits? *Journal of Neuroscience* 36: 10489-10495.

第6章

意识，驾驭脑电波

对哲学家和科学家来说，意识一直是个谜。什么是意识？动物有意识吗？意识触及哲学、心理学和生物学中一个最基本的问题——大脑是如何产生思想的？现在我们知道，当人的大脑皮质中有正常的脑电波活动时，就会有意识。脑电波活动过多（癫痫发作）或过少（麻醉或睡眠）都会导致意识丧失。这种观点对我们了解意识是什么以及它是如何在神经网络中产生的会有所启发。虽然大脑皮质下的区域对于了解大脑神秘的无意识和前意识活动也很关键，但是在这里，我们关注的是意识与脑电波之间的关系，因为脑电图检测的是皮质而非皮质下的电活动。人处于昏迷状态时，脑电波的活动异常平稳，而且振荡节律也不正常。无论我们的心脏是否还在跳动，当脑电波完全消失时，人就死了。

昏迷和植物人状态

1984年7月13日，星期五，39岁的特里·瓦利斯在出车祸之前刚刚为女儿的诞生庆祝了一番。他驾驶的皮卡车失控，冲破护栏掉到了一条小河里。当他恢复知觉时，他的女儿安伯已经19岁了。

人可能会昏迷很多年。当患者处于毫无反应的状态时，医生和家人很难判断患者对自己及周围环境是否有感知。在这种情况下，医生通常无法预测患者何时能恢复意识或者是否还能恢复意识，这让他的亲人和看护者都陷入痛苦的境地。用脑电图监测大脑中的电活动可以为医生提供重要的参考，而且就我们当前的目标而言，关于脑电波和意识的研究也提供了证据，让人更加相信脑电波会与神经活动协调并完成高级认知功能。

这是另一个案例：2007年，瑞安·芬利的妻子吉尔先天性心脏病发作。医生成功地使吉尔的心跳恢复了，但她的大脑由于缺氧而受到损伤，陷入了深度昏迷。整整11天，莱恩坐在她的床边为她读《圣经》，做了一切他所能做的，只希望能对她有所慰藉。但吉尔一直处于植物人状态，康复看起来遥遥无期。莱恩相信吉尔也不愿意以这种悲情的方式来延续生命。最后，莱恩不得不做出一个痛苦的决定，他郑重地签署了文件，授权医生撤除妻子的生命维持系统。

当天下午6点，医生拔掉了插头。吉尔没有立即死亡，莱恩决心陪她到最后一刻。晚上11点45分，她开始出现轻微的动弹。医生告诉莱恩，这是回光返照，很常见的。“带我离开这里！”吉尔突然开口说话了。然后她又说：“带我去泰德，带我去吃熔炉火锅。”泰德是夫妻俩喜欢的一家墨西哥餐厅。看来，吉尔在用管子进食两周后，还是觉得墨西哥菜和火锅最好吃。[\[1\]](#) 康复之后，她又和丈夫幸福地生活在一起了。

一个人在遭受严重的头部创伤（例如车祸或暴力袭击）之后，神经系统检查不一定能判断伤者的意识水平。昏迷的人能有

多少感知？他们有哪怕一点点意识吗？他们是平静地游荡在另类的梦境中，还是在遭受痛苦和绝望的折磨？一个人可能因为外伤引起的闭锁综合征[\[2\]](#)而对外界完全没有反应。在这种可怕的状态下，患者知道周围有人，也完全明白自己的处境，但却无法让任何人知道。有科学文献记载，被诊断为无意识的患者中，有40%属于误诊，他们其实是有意识的，只是无法做出回应。[\[3\]](#)此外，很难判断一个昏迷的人是否能醒来，如果能，什么时候醒来？每个脑损伤的患者都不一样。如果一个人能够从昏迷中醒来，脑部损伤会对他的大脑功能、性格和生活质量产生什么影响？终止爱人的生命维持系统这种最艰难的决定在于如何权衡。如果一定要做出这样一个痛苦的决定，那么除了要考虑患者当前的严重病情可能令他昏迷很多年后，还应该考虑到他也有可能突然醒过来。

监测大脑电活动的方法对于评估严重颅脑损伤患者当前的认知状态非常有帮助，但这项研究也得到一些令人感到意外的结果，让人们对于意识如何产生有了新的认识。[\[4\]](#)在许多情况下，处于重症监护中的患者的脑电图记录显示，他们的大脑皮质在听到语音或音乐时会有电反应。2017年，马萨诸塞州综合医院的研究人员布赖恩·艾德劳及其同事在《大脑》杂志上发表了他们的研究成果，他们用fMRI和脑电图来评估那些因严重颅脑损伤而被送进重症监护病房（ICU）的患者的意识状态。[\[5\]](#)由于这些被研究的患者无法活动，不能说话，也不会回答问题，研究人员只能让这些一动不动、看似毫无知觉的患者去想象自己在执行某种任务。例如，研究人员要求他们想象自己握紧右手，然后再放松，与此同时对他们进行fMRI扫描或脑电图记录。研究人员还试

图了解患者的高级皮质区域对语言或音乐是否会有反应。这些高级皮质区域的主要功能是负责处理和理解声音，而不是像低级皮质区域那样只负责声音的检测和听觉的产生。这些患者的脑电波活动记录清楚地显示，在临床检查时被认为对语言无反应的8名患者中，有4人具有意识，其中3人被认为处于最糟糕的植物人状态。

但是，在这些研究的对照组中，有25%的健康受试者的脑电记录显示他们对这些刺激没有产生反应，同样对刺激没有反应的一名昏迷的患者却在6个月后有明显的恢复。造成这种情况的原因有可能是技术问题，但是，就算评估无意识状态时没有发现大脑的电反应，也不能说缺乏证据就等于没证据。当然，如果语言或其他刺激能让大脑皮质产生电反应，那说明这些神经回路正在处理信息，患者可能对其自身状况和周围环境有所认知。不过即使有了这些信息，也很难判断患者的预后。总体而言，实验数据并未显示患者处于昏迷状态时，大脑对这些感觉刺激的电反应与长期预后之间存在可靠的联系。但是研究确实提示，即使一个人处于深度昏迷且对外界完全没有反应，他的大脑（产生意识的大脑皮质）在某些情况下仍可以正常工作并具有感知。

比起把电极放在头皮上测量脑电图，还有更灵敏的测量脑电波的方法可以获得关于昏迷患者认知功能的信息，但是把电极接触到脑组织的风险也更高。在本书的第三部分，我们将介绍一种新的监视大脑电活动的无创方法。这个新方法目前只用于实验，但不久就会应用到临床。有一种我们许多人普遍都经历过或将要经历的昏迷状态，那就是全身麻醉。有新的研究对人从接受麻醉

失去知觉到苏醒的整个过程进行了大脑电活动的记录。实验得到的数据显示，意识与脑电波之间有联系。

麻醉

最近，我在麻醉状态下进行了一次常规的医学检查。我赤身裸体地躺在病床上，身上盖了一片褪色的蓝色棉质罩布，背后留了两条毫无用处的带子，看起来很古怪。此时，我很渴望与麻醉师进行一次关于麻醉的来龙去脉、意识、无意识、昏迷、 γ -氨基丁酸A型受体（我知道那是麻醉剂所作用的受体）的对话，尤其想跟她聊聊脑电波。但医生似乎以为我的问题是在质疑她的权威。她一边在12毫升的塑料注射器中调和乳白色的麻醉剂，一边礼貌而专业地应付着我，却没有真正回答我的问题。她不会把那些白色的鬼东西注射到我的血管里吧？我心想。会的，她会注射的，我在心里自问自答。一个念头闪过：它是白色的，我不喜欢它。她将注射针头插入我的静脉并开始推针管。很快，一种坠入深沉而虚幻梦境的愉悦感向我袭来，我像被人用拳头击中下巴一样昏了过去。我很羡慕她只需要简单地用拇指一推塑料针管就可以终止与烦人鬼的对话。那是一种什么样的权力感啊！

我立刻醒了。奇怪的是，她在我们谈话的过程中消失了，现在只有我的医生和一名护士守在我的床边。他们一边查看脉搏血氧仪一边低声说着什么，可能是在报告我的脉搏和血氧含量。我现在已经完全醒了。我已经昏睡了半个多小时，但是我完全没有感觉到时间的流逝。这事本身很奇怪，因为如果我们只是从熟睡中醒来的话，即使无法确切地说出睡了多长时间，也总是知道时

间已经过去。但是，麻醉并不是睡眠，脑电波让这一点变得更清楚。

我用的麻醉药是异丙酚，它通过诱发 δ 波来发挥作用。麻醉剂通过干扰大脑皮质神经回路的兴奋和抑制平衡，扰乱正常的大脑节律，从而达到麻醉的目的。大脑中的抑制性神经元的作用就像踩刹车一样可以抑制其他神经元的活性，它们释放的神经递质是 γ -氨基丁酸。异丙酚通过激活神经元上的 γ -氨基丁酸受体来抑制神经活性。当白色的“失忆乳液”被注入你的静脉时，效果就好比大脑中的每个抑制性神经元都突然踩下刹车一样，强大的抑制作用减慢了皮质回路中电活动的波动频率，破坏了抑制和激活作用之间微妙的平衡，脑电波会被调整成缓慢的低频 δ 波，从而使人昏昏欲睡。

麻省总医院的麻醉师、麻省理工学院教授埃默里·N. 布朗博士及其同事，在手术患者麻醉后失去知觉的过程中，对大脑中如何产生意识的本质进行了探索。布朗博士的方法之所以独特，是因为他用脑电图记录了麻醉生效、意识消失的那一刻大脑内部的电活动。令我吃惊的是，2010年以前，居然没有人做这样的实验。[\[6\]](#)脑电波研究通常是与神经科学以及医学分开进行的。除了在癫痫研究和治疗等特殊领域，脑电图记录被用于确定脑中癫痫发作的位置。脑电图脑科学及其技术在临床的应用如此姗姗来迟实在令人担忧，因为全身麻醉存在造成严重的脑损伤甚至死亡的风险。[\[7\]](#)而且为了保持患者的无意识状态，麻醉师需要根据患者的情况随时精确计算和调整混合用药的剂量，但目前他们主要是通过监测间接的意识体征（例如心跳和呼吸频率），而不是通过直接监测大脑内部情况来判断意识状态。麻醉药剂量太少，

你可能会陷入无法想象的恐怖境地：在手术台上醒来，却被药物麻痹而动弹不得，没法移动或叫喊，同时却清楚地意识到医生会割开你的身体，造成剧烈的疼痛，他们还可能边做手术边聊天。麻醉剂量过大，你可能就永远也醒不过来了。每个人的身体对不同药物的反应和代谢都有个体差异。举一个例子，红头发的人可能需要更高剂量的普鲁卡因（牙科常用药）才能达到相同的止痛效果。[\[8\]](#)因此，麻醉师的技能和他的药理学知识一样重要，共同决定了麻醉的效果。

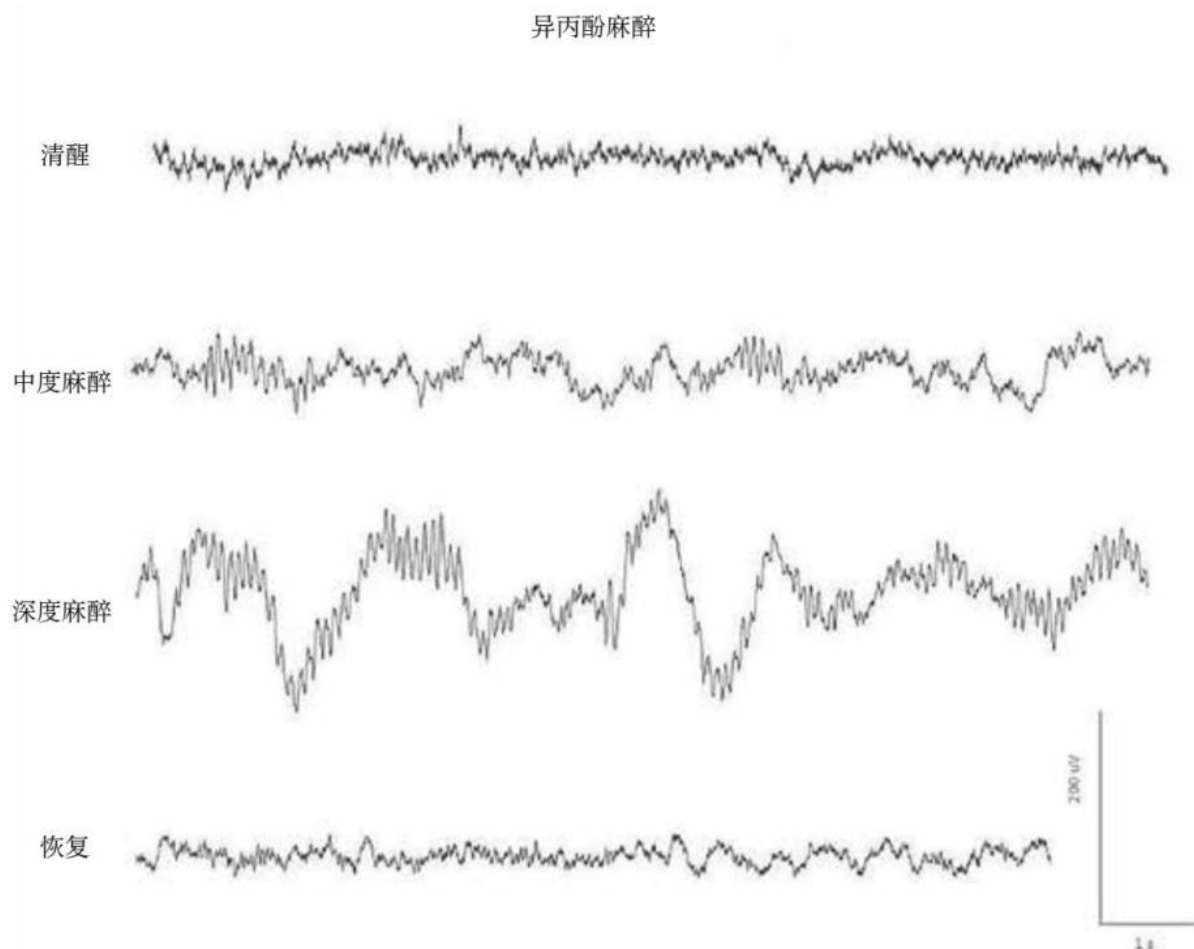


图21 脑电波和意识密切相关。图中显示了当患者失去知觉时，麻醉剂异丙酚对脑电图活动的影响

让人匪夷所思的是，一直在思考意识本质并且推出各种论点的神经科学家们，竟然从未想到利用麻醉药（让大脑在意识和无意识之间随意转换的药物）并结合电生理学、脑电监测，来研究思维与大脑之间的关系。布朗凭借麻醉师的本事开始在人身上进行此类实验，所要做的只是在患者头部安装上脑电图电极，然后观察麻醉状态下脑电波的变化。

2016年的时候，我曾经坐在一个巨大的演讲厅里，与数千名神经科学家一起聆听布朗博士在神经科学学会会议上做的一次有趣的演讲。布朗在演讲时用PPT展示了一名正在接受甲状腺手术麻醉的60岁妇女的脑电波。礼堂的投影大屏幕正在播放记录脑电图的视频，上面显示了脑电波活动的伪彩叠加在大脑上的图像，旁边是脑电图的记录。这些伪彩脑电图看起来跟我在夏洛茨维尔的神经反馈中心获得的大脑图像差不多，不同的颜色代表了不同的脑电波频率。不过布朗播放的是视频动画，因此观众可以看到彩虹般的色彩扫过大脑，这反映的是脑电波随着麻醉程度和意识的改变而变化。在实验中，他要求测试对象在注射异丙酚的同时通过回答一系列预先准备好的问题或按下按钮来回应研究人员，这样布朗和他的同事能够准确地知道患者失去知觉和恢复知觉的时间。对应脑电图的记录，他们就能够查明在注射麻醉剂后，患者失去知觉或恢复意识时，脑电波活动出现了什么明显变化。

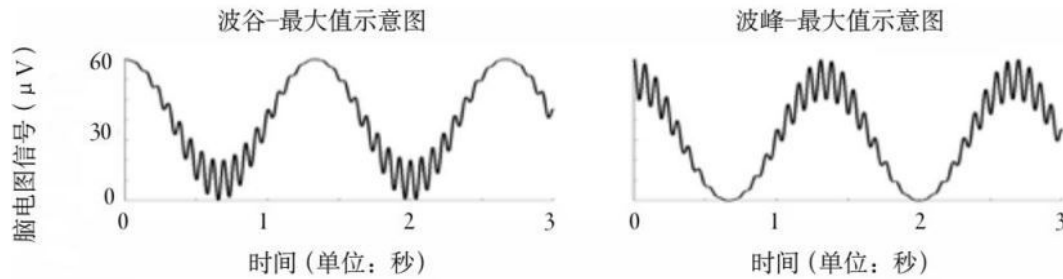


图22 在使用异丙酚做麻醉剂的情况下，如果 α 波（8~12赫兹）和慢波/ δ 振荡（0.1~1.5赫兹）以如下相位耦合： α 波达到峰值时，慢波达到波谷（波谷-最大值），这时就会出现意识丧失，如该图所示。在深度麻醉状态下，相位耦合反转： α 波达到峰值时，慢波也达到峰值（波峰-最大值）处。停止麻醉后，一旦出现“波谷-最大值”的脑电波模式，意识就会恢复

在无意识状态期间，非常缓慢的、每秒不到一个周期的非同步振荡（慢速 δ 波）会出现在大脑皮质各处。记录表明，大脑皮质不同部位的神经元群体不再有节奏地同步被激活：它们在振荡，但彼此分离，不再协调。就像看着桌上一幅美丽的沙画在地震的抖动中逐渐消融一样，当大脑皮质中的脑电波相互干扰并出现破坏性的振荡时，我们思维中关于世界的图景也就土崩瓦解了。

他解释说，当他和同事对 α 波和慢波/ δ 波振荡的相互作用进行比较时，他们注意到在无意识期间，处于振幅峰值的 α 波周期与低频 δ 波的波峰周期同步的现象，布朗称之为“波峰-最大值”。这就好像有人坐着小船漂在海面上，随着缓慢的波浪上下起伏，这个人在达到浪尖的时候才挥舞他的手。但是在恢复意识的时候， α 波振幅的最大值周期掉转了180度，变成不同步。也就是说，在低频波出现波谷（布朗称之为“波谷-最大值”）时， α 波振幅达到峰值。他说，“波峰-最大值”的脑电波模式类似于在深度睡眠研究中出现的缓慢脑电波振荡（我们将在第7

章中进行讨论），但是，麻醉期间的脑电波活动与睡眠还是有很大差异的。

因此，意识肯定来自我们大脑皮质中许多不同神经元群体之间协调的、精确定时的活动，从而把不同的认知过程联系在一起。如果脑内复杂的通信网络被打乱，整个皮质的神经元群体依然会有节奏地发放电脉冲，但变得孤立且不协调，于是意识就会丧失，就像在异丙酚麻醉期间那样。如果用给舞台上的乐队录音来打比方，那么无意识情况下记录到的脑电波模式，就像乐团在交响乐开始之前调音时发出一片嘈杂混乱的声响，而有意识情况下记录到的脑电波模式，就像乐团一起开始演奏出和谐的音乐。同样，如果皮质中的所有神经元都绝对同步地发放脉冲（这是在癫痫发作时出现的情况），那么意识也会丧失，因为如果所有神经元一起发放脉冲，那么大范围的皮质区域之间就没有任何信息交换——如果管弦乐队中的每件乐器都随着定音鼓的节奏同时敲打，就没有任何旋律可言了。

布朗博士说，尽管我们通常将麻醉称为“让某人入睡”，但他监测患者麻醉期间的脑电波的研究表明，睡眠中的大脑状态与全身麻醉下的大脑状态完全不同。睡眠是意识状态的改变，不是严格意义上的意识缺失。相反，正如他接下来要说明的那样，麻醉状态下的脑电波跟头部外伤导致意识丧失时的脑电波非常相似。布朗说：“全身麻醉是药物引起的可逆性昏迷。”患者更喜欢“睡眠”的委婉说法，这可以理解，但事实是一个陌生人在他们的静脉输液管上动动手脚就会使他们陷入昏迷——哪怕只是暂时的。

布朗解释说，医生在给患者做全身麻醉时通常会使用多种药物。苯二氮卓类药物（例如安定）或其他安眠药可引起失忆。他指出，大多数人都不想听到或感觉到有关手术的任何东西。异丙酚或巴比妥类药物可使人失去知觉，手术中经常还要加乙醚类气体或一氧化二氮以维持麻醉状态。抗胆碱能药，像箭毒（南美原住民涂在长矛或飞镖尖端的一种毒药），注射后可以麻痹肌肉，防止身体在外科医生切割肌肉的时候产生抽搐和扭动。你肯定不希望医生在一个移动的靶子上做精细手术的。还要用其他药物把血压、肾脏功能和氧气/二氧化碳水平维持在正常范围内。最后，还要用能够逆转这些药物作用的药物，让患者清醒过来。布朗博士说，即使是一个简单的手术，在麻醉期间也会用到大约10种药物。任何药物都可能产生副作用，但是，为了使人失去知觉，感觉不到疼痛，而且防止形成对创伤的可怕记忆，仅仅用一种药物是不够的，我们不得不对大脑实施这种“药浴”。（有什么问题吗？）

他说：“我让大家看一下她的脑电图是如何随时间变化的。”屏幕上展示了这位即将接受甲状腺手术的60岁妇女的脑电图记录。一开始，她的脑电图处于活跃状态，跟普通人在清醒状态下记录到的典型脑电图没什么两样。她眨眼睛的时候会产生周期性暴发的强烈的肌电干扰。与来自大脑神经元穿过颅骨发射出来的微弱信号相比，位于薄薄的皮肤下的肌肉所产生的电信号太过明显。

当布朗将异丙酚注射到她的静脉中时，他说：“脑电波将变得非常非常混乱。”而且确实如此。她的脑电图记录中的所有轨迹开始变成狂乱刮擦出来的锯齿状线条。“这是因为，当异丙酚

被注射到小静脉中时，它会产生强烈的灼痛感，让她的肌肉紧张起来。”（肌肉收缩导致的巨大电压波动会在脑电图记录中显示出来。）我不记得当麻醉师把看起来像奶浆草汁一样的东西注射到我的静脉中时，我有任何烧灼感。不过，我当然记不得。在异丙酚起作用期间所发生的所有事情的记忆都被抹去了，或者更确切地说，就没有形成记忆。

“现在请注意，你们将看到麻醉剂起作用的时候……就在这儿！”噪声消失了，脑电图轨迹开始缓慢振荡，就像港口的海面一样微波起伏。“这是一种非常规则的 β 振荡，每秒约12~16个周期。如果你服用安眠药——比如唑吡坦或苯二氮卓类药物，脑内就会出现这种 β 振荡。如果你睡不着觉，就需要获得这种 β 振荡。”他解释说，同时屏幕上播放着脑电图记录。（在下一章，当我们讨论睡眠中的脑电波时，布朗博士在这里所说的话的含义将变得更加明白。睡眠是一个多阶段、复杂的过程。虽然 β 波是睡眠某些阶段的特征，唑吡坦可以促使这些脑电波形成，但要进入睡眠还需要更多因素和其他脑电波的参与。）

“看看接下来会发生什么，几秒钟以后——缓慢的大振荡。”每秒不到一个周期的极低频率的 δ 波开始在这位女性患者的大脑中出现。布朗解释了为什么她的脑电图会突然发生巨大变化。“因为血液现在正在流过基底动脉并到达脑干，它作用于这些来源于视前区的 γ -氨基丁酸能神经回路，并且使一部分脑干受到抑制，于是就产生这些缓慢的振荡。”（脑干是位于脊髓顶部的柄状结构。大脑的其余部分都连接到这个“柄”上，它控制着整个大脑的觉醒水平。由于脑干里的兴奋型神经回路被麻醉剂强烈地抑制了，大脑在最低的唤醒状态下变得迟钝，所以只剩下

非常缓慢的、有节奏的脑电波活动。) “慢波睡眠也一样，当大脑处于抑制状态时，就会出现这种情况。”此刻，这个女人已经一动不动了，所有的肌电干扰都消失了。她的眼睛紧闭，眼球固定在中间，好像死了一样。但是，这一阶段的麻醉是短暂的，类似于深度睡眠的状态。几秒钟后，她的脑电图突然改变。“现在是深度麻醉，”他说道，“她正处于暴发-抑制状态……这儿是抑制，暴发在那儿！”他指着屏幕解释说：“这是一个深度麻醉的状态，在体温过低或颅脑损伤的患者中也会看到类似的脑电波。”这个女患者本质上是处于昏迷状态。“在暴发的间隙，她的脑电活动实际上是等电位的（水平线）。 ”

在平坦的脑电图轨迹中出现的一阵阵暴发的脑电波就像炮弹落在原本宁静的海面上，激起一排排巨浪一样。处于清醒状态的正常人，其脑电图振幅约为5微伏，是一节1.5伏的手电筒电池电压的1/3 000。布朗解释说：“当人进入麻醉状态时，脑电图会变得高度组织化，变得非常非常规律，而且会产生这些大的振荡。因此，脑电波振幅可以从大约5微伏变为大约10~20微伏，甚至高达500~1 000微伏的电压。”在正常、清醒的状态下，大脑中不会出现这种脑电波活动。

接下来，布朗博士分享了他记录到的一名19岁女性在麻醉状态下的脑电图。不过，这次的原始脑电图记录已被处理成频谱图，脑电波被分解成它们各自的组成频率，并且用伪彩标记在大脑图像上，这样就可以展示扫过整个大脑皮质的脑电波活动如何随时间而变化。他说：“当一个人被麻醉时，脑电波会出现另一种非常重要的动态变化。这是一种空间上的动态改变。”也就是说，脑电波扫过大脑皮质不同区域的方式发生了改变。在说到 α

波（最先由汉斯·伯格发现）的时候，布朗博士解释道，当人闭上眼睛时，脑后部的 α 波（约10赫兹）的振荡频率会增加。“几乎每个人都有（ α 波），但是随着年龄的增长，它们往往会消失。也许有5%至10%的人根本没有 α 波。”（显然，我就是其中之一。）在乙醚麻醉下，头后部的 α 波振荡会移动至前额皮质，人们从在猴子身上做的实验中得知这个现象已经至少有40年了。当猴子从麻醉中醒来时， α 波又会回到头的后部。在布朗的实验中，他和同事要对一名志愿者做同样的事情。为了系统地揭示人在意识丧失时的脑电波活动变化，也为了检验人脑内的 α 波是否也会出现从大脑后部向前额皮质大规模迁移的现象，这名志愿者同意接受不同剂量的异丙酚注射。跟用猴子做的实验不同，如果人脑内也出现同样的现象，人在快要昏迷的时候是可以描述他们脑海中正在发生的事情的。

“这个人坐在那里，有很强的 α 振荡（闭着眼睛时会出现）。”他指着缓慢摆动的脑电图说，“现在，正在注射麻醉剂……后方的 α 波开始被破坏。”当 α 波开始在前额皮质中形成时，脑后部的 α 波变得不规则并开始减弱。“它开始出现在前面，现在你可以在前面看到这些非常强烈的 α 波振荡。”

以不同颜色显示的频谱分析图使人们可以看到其他脑电波发生了什么改变。 δ 波的活动很强，它以小于1赫兹的频率缓慢振荡，范围分布在整個大脑中。此外，通过比较在每个电极上记录到的脑电波的时程，我们可以看到一个显著的效应：在所有记录额叶区域的电极上采集到的 α 波都在同步振荡。“换句话说，它（ α 波活动）在头部前方的移动是同步的，而整个大脑的低频振荡是完全不相关的。”布朗博士停止给药，患者的意识开始恢复

时，额叶中的 α 波消退，并开始在头后部的大脑皮质中再次集中出现。

布朗试图用神经回路来解释 α 波产生的这些变化，于是他问道：“这里发生了什么？”对实验动物、数学模型以及癫痫患者的数据（这些癫痫患者的大脑中植入了电极，以帮助医生确定癫痫发作的位置）进行的研究表明，这两个大脑区域之间的活动反馈回路会在额叶区产生大振幅的、密切相关的 α 波振荡。大脑深处的神经元（位于丘脑）与前额皮质之间相互接收和投射神经纤维。这些神经元以大约10赫兹的频率在前额皮质和丘脑之间形成往返的电波振荡。大脑额叶负责协调、处理和解释从其他大脑区域传递来的所有复杂的信息。如果大脑额叶的所有神经元都被同步到同一个频率的电波振荡中，那就跟整个额叶只剩下一个神经元没什么两样了。一个神经元是不会让你产生意识的。

请记住，脑电波振荡是神经元周围电场的变化引起的。神经元去极化（在波谷处）促成了电脉冲的发放和神经元之间的信息传递，但是在脑电波的峰值处产生的超极化会抑制神经冲动的发放。因此，当前额皮质中的数百万个神经元都被锁定在10赫兹的同一相位时，信息的传递能力就会遭到极大的破坏。就像只有一个汽缸点火的引擎只会噼啪作响一样，这样的大脑是无法运转的。由于频率非常低的振荡的周期比较长，因此在无意识的状态下就只剩下低频脑电波了。意识是通过分析感觉输入并整合了记忆和其他认知功能，从而在头脑中形成的内部和外部的印象，单一频率的振荡是不可能完成这些功能的。脑电波是意识的关键。

但是到目前为止，研究结果都只是相关性的，依然不能证明其中的因果关系。为了确定麻醉期间的脑电波变化究竟是意识产

生的原因，还是仅与意识伴随出现，布朗和他的同事用小鼠进行了实验。在实验中，他们通过光遗传学刺激来控制脑电波活动。光遗传学利用基因工程技术将离子通道插入神经元中，这些离子通道会被特定颜色的光激活而开放。研究人员可以通过光纤用激光束照射大脑来控制这些神经元的活动（激活或者抑制）。我和观众在投影屏幕上看到了小鼠实验的视频。当他们用 α 波频率刺激丘脑和皮质之间的神经回路时，同步的 α 波就会使小鼠在没有麻醉的情况下昏迷。

麻醉药有很多不同的类型，它们对脑电波的作用并不都像异丙酚那样。但是，无论哪种麻醉药，都会破坏大脑皮质神经元群体之间的交流，从而中断脑电波活动并导致意识丧失。

布朗说，他觉得目前的麻醉操作准则不合理。“监测热量消耗、呼吸、温度、氧气、二氧化碳是必需的，但监测大脑不是必需的。具有讽刺意味的是，这些药物对大脑产生的影响最大，但我们却不监测大脑，而是盯着其他器官的生理反应！”他主张，借助脑电图监测患者的意识水平应该是麻醉过程中的标准流程。通过跟踪患者在麻醉状态下的脑电图，他已经做到把异丙酚的标准用量减少到原来的三分之一，而且仍然可以确保患者处于昏迷状态。另外，这些患者从麻醉中恢复得更快，副作用也更小。通常，接受异丙酚麻醉的人在24小时内不得驾车或从事其他需要认知能力的活动，因为需要那么长的时间才能使这种药物被肝脏分解并使大脑恢复正常功能。我记得在我做完手术后，是我的妻子开车送我回家的。我利用当天剩下的时间来休息和写作。但是第二天当我阅读并整理自己写的这些东西时，我觉得简直惨不忍

睹。虽然句子连贯、结构清晰明了，但是内容极其贫乏，于是我把它们从这本书里删除了。

布朗和他的同事们将这项研究进一步发展，他们想开发出最出色的实验技术，就可以不再需要麻醉师了。脑机接口设备监视在手术台上的患者的脑电波，并调节麻醉药的给药量，使患者在整个手术过程中都持续处于安全的无意识状态（由脑电波模式决定的），从而取代了麻醉师。病人的大脑连接到电脑，然后电脑根据患者的脑电波状态自动将药物输送到他的体内，并保持深度昏迷的脑电波状态。就这样，患者的大脑成了麻醉师，并且无意识地直接完成了操作。

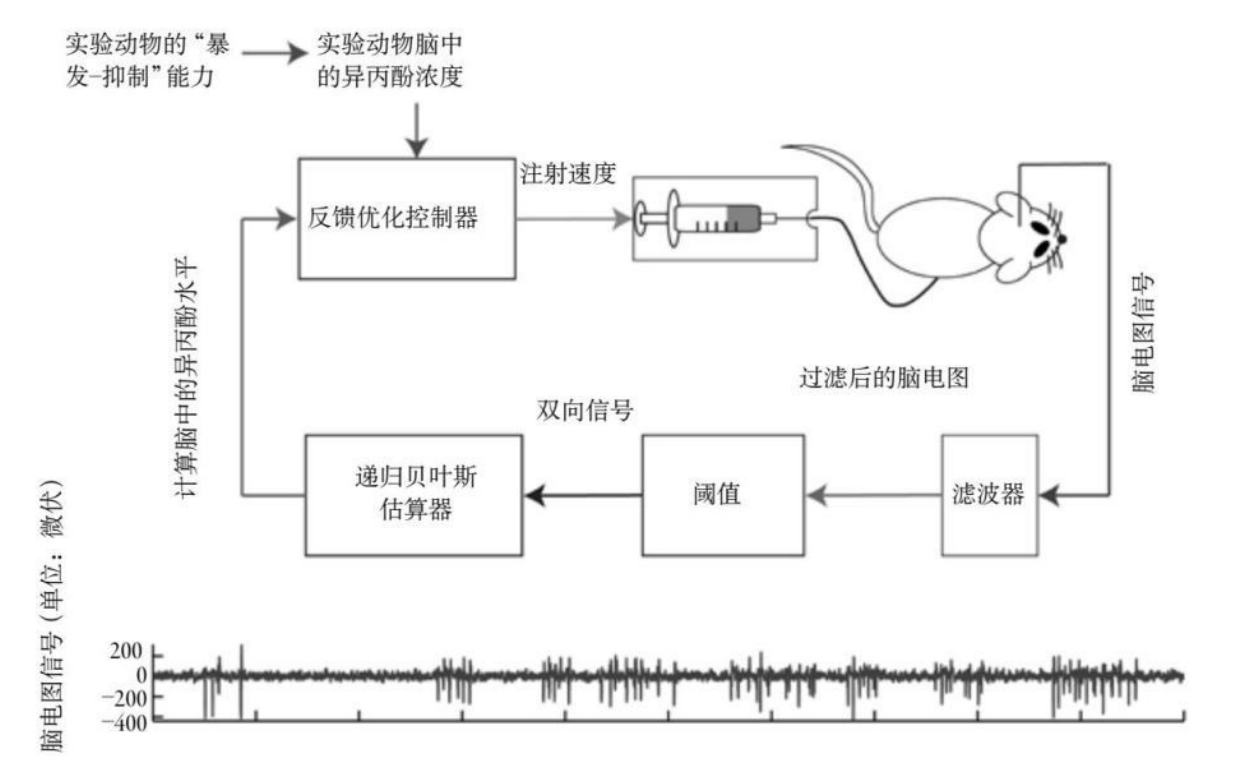


图23 电脑监控脑电图活动并输送麻醉剂以维持暴发-抑制型脑电图活动，并通过脑机接口自动保持麻醉状态。与安静、平滑的脑电图不同，暴发-抑制型脑电图活动

是高压脑电波的瞬时暴发，仅在深度麻醉或昏迷状态才出现。图中显示了一分钟的脑电波记录

从布朗博士观察麻醉过程中患者意识的变化与脑电活动变化的关系的经验来看，他肯定认为脑电波是驱动或消除意识的原因。

并非每个人都有全身麻醉的经历，但是我们每天晚上都会失去知觉。梦是最神秘的心理状态，也是复杂的大脑活动的反映。睡眠也许是用脑电波分析人类行为最有成效的领域了。实际上，睡眠的各个阶段都可以通过其特征性的脑电波来识别。睡眠分为五个阶段：从打瞌睡到深度慢波睡眠，再到快速眼动睡眠和做梦。这些话题将在下一章中进行探讨。

[1] Celizic, M. Doctors Pull Plug, Comatose Woman Wakes Up. TODAY.com, September 10, 2007. <https://www.today.com/news/doctors-pull-plug-comatose-woman-wakes-wbna20689992>.

[2] 闭锁综合征是指患者意识清楚，但控制全身（除眼部外）随意肌的神经丧失功能，导致患者不能运动、不能说话的一种综合征。——译者注

[3] Edlow, B. L.; et al. (2017) Early Detection of Consciousness in Patients with Acute Severe Traumatic Brain Injury. *Brain* 140 (9): 2399 – 2414. <https://doi.org/10.1093/brain/awx176>.

[4] Carey, B. “It’s Gigantic”: A New Way to Gauge the Chances for Unresponsive Patients. *New York Times*, June 26, 2019. <https://www.nytimes.com/2019/06/26/health/brain-injury-eeg-consciousness.html>.

[5] Edlow, B. L.; et al. (2017) Early Detection of Consciousness in Patients with Acute Severe Traumatic Brain Injury. *Brain* 140 (9): 2399 – 2414. [https://doi.org/10.1093/ brain/](https://doi.org/10.1093/brain/).

[6] Lewis, L. D.; et al. (2012) Rapid Fragmentation of Neuronal Networks at the Onset of Propofol-Induced Unconsciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (49): E3377 – 86. doi:10.1073/pnas. And Purdon, P. L.; et al. (2013) Electroencephalogram Signatures of Loss and Recovery of Consciousness from Propofol. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110: E1142 – E1151.

[7] Guohua, L.; et al. (2009) Epidemiology of Anesthesia-Related Mortality in the United States, 1999 – 2005. *Anesthesiology* 110 (4): 759 – 765. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2697561/>.

[8] Parker-Pope, T. The Pain of Being a Redhead. *New York Times*, August 6, 2009. <https://well.blogs.nytimes.com/2009/08/06/the-pain-of-being-a-redhead/>.

第7章

我们沉睡时，脑电波变化巨大

什么是睡眠？我们为什么要睡觉？有意思的是，尽管睡眠是人类和大多数动物不可或缺的，人们在这种奇异的意识变化状态上花费了大量时间，但我们仍然不清楚人类为什么要睡觉。不过，通过对脑电波的研究，我们了解到很多有关睡眠如何产生的知识。

在探讨睡眠状态下的大脑电活动之前，让我们先考察一下睡眠这种介于意识和无意识之间的特殊状态的一些独特方面。然后，我们看看脑电波分析如何揭示睡眠和梦境，以及睡眠异常时大脑内部发生的事情。睡眠最迷人的部分是做梦。什么是梦？我们为什么会做梦？

梦：夜间的疯狂之旅

我们一生中有三分之一的时间是在完全改变的意识状态下度过的，这的确可以被认为是疯狂。做梦与一种严重的精神疾病非常类似。这些夜间的幻觉可以是令人振奋的、富于启发的、无意义的、荒诞不经的或是令人恐惧的。几乎每个人都经历过这些。你的梦里有什么——尤其是那些反复出现的梦境？重复的梦特别奇怪，常常令人感到不安。你是否因为梦见自己在别人头顶上高

飞而欣喜若狂？你是否梦见过与爱人在一起的温馨时刻？还是梦见过自己被怪物或凶手追击而仓皇逃命？也许你还梦见过自己无助地在空中翻滚或遭受了严重的伤害。最近有研究者对人们最常见的反复出现的梦做了研究，发现成年人与儿童的梦境有很大不同。

蒙特利尔大学心理学家阿林·戈沙和同事对数百名11~15岁的儿童（男女都有）进行了研究。他们发现，大多数反复出现的梦境并不是令人愉快的。[\[1\]](#)在这类梦境中，最常见的可怕场景是面对某种致命威胁。但有趣的是，儿童、青少年和成年人的重复梦境各有不同。

根据戈沙的研究，以下是重复出现的梦中最常见的内容：

被追逐：梦中自己被追逐，但没有受到身体攻击。

人身攻击：梦见自己遭受人身或人格的威胁或攻击，包括性侵、谋杀、绑架或囚禁。

坠落：梦见坠入空中，从悬崖上坠落或从另一个高架物体上坠落。

车祸：梦见自己或其他人卷入了车祸。

面对陌生人。

梦见自己死亡。

梦见家人死亡。

对峙：梦见自己面对怪物、野兽、僵尸或类似的东西。

梦见自己受伤或生病。

梦见陌生人进入房间：梦见陌生人闯入自己的房子或试图闯进来。

梦见被卡住或困住。

梦见自己会飞或能够控制/对抗自然力。

该研究发现，在11~15岁的儿童中，反复出现的梦里只有9%的经历是积极的，这与我们对儿童和噩梦的了解相符合。最常见的儿童反复做的梦一般会涉及严重的威胁，例如与怪物、动物或僵尸的对抗。占第二位的涉及人身攻击、跌倒和被追逐。87.9%的儿童反复梦到过自己被威胁。6.9%的儿童反复梦见车祸。不过男孩和女孩在某些方面也存在差异，女孩反复梦见自己被追逐的比例是男孩的两倍（11.3%： 6.5%）。上面所列出的其他内容的重复梦境在儿童中仅占6%。

把这些对儿童的研究与1996年对成人的一個研究进行比较后，我们会发现一些有趣的事情。[\[2\]](#)与儿童一样，大多数成年人（77.3%）反复做的梦也是令人不安的。儿童做的受到威胁的梦境有45.5%涉及攻击和暴力，而这一令人恐惧的主题在成人的梦里只排前五个主题的第三位。逃避和被追逐是成年人最常重复的梦（25.9%）。有趣的是，成年人经常做身体畸形的梦，但这种恐怖的事情在儿童的梦中没有出现过。

在这项研究中，儿童最常反复出现的梦是：

1. 攻击和暴力（45.5%）
2. 事故和不幸（28.8%）
3. 逃避和追逐（22.7%）
4. 灾害（4%）

儿童没有报告关于失败和身体异常的梦。

成人最常见的反复出现的梦是：

1. 逃避和追求（25.9%）
2. 事故和不幸（19.7%）
3. 侵略和暴力（19%）
4. 身体异常（17%）
5. 失败（6.9%）

在童年时代不常出现的梦境反而在成年后反复出现，比如掉牙、找不到厕所、在房屋里发现新房间或探索新房间。一个让人惊讶的结果是，女孩反复做的梦中有近1/3是友好的互动关系，而男孩经常做的梦中只有不到3%有这种友好互动的关系，比例不到女孩子的1/10。在对成年人的研究中，女性的噩梦更多地集中在人际冲突上，而女性做到包含友好互动关系的梦的可能性是男性的两倍。

研究人员推测，反复出现的梦与生活压力有关。在梦境中想象这些威胁可以让人模拟现实生活中的事件，并演练避免和应对此类威胁的策略。由于现实世界中的威胁对男孩和女孩，以及男人和女人来说有所不同，这也会反映在他们反复出现的梦境里。例如，与成年人相比，孩子更容易梦见遭受想象出来的怪物的威胁，但是成年人通过生活经验已经知道，怪物的确存在，他们就是人类。

睡眠麻痹

梦里，一个蒙面人站在卧室门口的阴影里，于是我从梦中惊醒了。我可以清楚地看见他穿着深色的衣服，兜帽扣在头上，然而他的脸被遮住了。他从阴影中走出来，慢慢地向我的床边靠近，想要袭击我。恐惧笼罩了我的全身，一阵惊慌袭来，让我背脊发凉，我的心狂跳不止。我真担心我的心脏会因胸腔内暴增的压力而爆裂。我无法呼吸。我想，在凶手攻击我之前，自己恐怕就先死于心脏病发作了！我努力想要挪动，但是我的身体完全僵住了。我全身的肌肉动弹不得，也无法尖叫唤醒睡在我旁边的丈夫。我试着尖叫或至少是呻吟，但我无法动弹，也完全不能发出任何声音。我可以听见家里的德国牧羊犬拉斯提在床脚睡着，呼吸沉重而急促，但是我无法把它唤醒去赶走入侵者。我一动也不能动，但还是竭尽全力想要朝丈夫滚过去，把他弄醒，但我做不到。现在，另一个穿深色衣服的男人也闯了进来，我能听到他们的窃窃私语。我喘着粗气，好像从头到脚被绑住了，嘴还被塞住。突然，我丈夫靠了过来，轻轻抚摸着，我立刻醒了。我突然从床上坐起来，心脏狂跳，浑身是汗。但是那

里没有人，只有我的丈夫在我身边熟睡，拉斯提在床脚轻轻地打鼾。

这个场景是一个样板，是根据很多经历过这种噩梦的人的报告而生成的。他们都做过这种相当可怕的梦：身体睡熟了，精神上却完全清醒着，但不能动弹。他们觉得自己受到了致命的威胁。他们是完全有意识的，这种体验很真实，一点儿也不像梦。在历史上，对睡眠麻痹的描述非常多。有7%的人在一生中至少经历过一次睡眠麻痹，这是一种刻骨铭心的恐怖经历。^[3]28%的学生和32%的精神病患者报告患有睡眠麻痹（可能是因为这两个群体比普通人更愿意承认有这种经历）。一般认为，有睡眠麻痹经历的实际人的比例要比报道的高得多，因为这种经历非常痛苦，而且对许多人来说会觉得不光彩，所以有很多人不愿意说。有的人一生可能只会经历一次睡眠麻痹；有些人可能会反复发作，每次发作都像最近一次发作一样可怕。一些反复发作的睡眠麻痹患者在发作时可以意识到正在发生的事情，意识到他们还在梦中，但一动也不能动，只是睡眠麻痹再次发作了。尽管知道自己动不了，而且充分意识到自己是被困在梦中，但他们还是竭尽全力想要挪动，也就是在这个时候，他们才真的可以动了。当他们的肌肉（任何肌肉）能够活动的那一刻，他们才算是醒了过来。高血压、睡眠不足、发作性睡病、睡眠呼吸暂停和饮酒都会增加睡眠麻痹发作的风险。此外，焦虑症患者，包括创伤后应激障碍的患者，更容易出现睡眠麻痹。

清醒梦

在梦境中依然保持意识和觉醒，这种状态与睡眠麻痹有所不同。在前面我们已经讲过，梦见会飞只是一个普通的梦。但是在下述场景中，情况就很不一样了：

我梦到我会飞。我像蛙泳一样毫不费劲地在人们头顶上翱翔。我知道人不可能在空中游泳。我当时在做梦，而且我完全清楚地意识到那是一场梦。

（这是根据很多人的描述得到的一个清醒梦的样板。）

我们做过无数稀奇古怪的梦。这些梦通常都有声有色，有复杂的角色和细腻的场景，而且我们会觉得梦中发生的一切都非常真实。无论做的梦有多么匪夷所思或富于启发，我们在一个普通的梦里所体验到的与我们清醒时的体验没有什么两样。清醒梦就不一样了。这是一种做梦的状态，在梦境中，他们具有完整的意识，而且知道自己在做梦。一些会做清醒梦的人很享受这种幻觉体验，有人甚至会下意识地去“导演”梦境并乐在其中。在清醒梦的状态下，一个人可以创造出自己的虚拟现实，并能够在梦幻与现实之间自由地穿梭。

发作性睡病

睡不着觉的另一个极端是突然睡着。“我会在谈话过程中、步行去洗手间或看电视的时候突然摔倒，在大约三分钟内睡得像死人一样，全然不知道周围发生了什么事。”阿曼达在嗜睡网上写道。[\[4\]](#)“有一天，我又昏了过去，我的头砸在水泥地上。”到了晚上，阿曼达却经常失眠。嗜睡病发作通常由诸如大笑和开

玩笑之类的情绪诱发。发作性睡病有许多实验动物模型，包括15种犬，如拉布拉多犬、贵宾犬和腊肠犬等，它们具有发作性睡病的遗传易感性。[\[5\]](#)

失眠

缺乏睡眠（在刑讯逼供中经常用到）会让人发疯、产生幻觉，并最终导致死亡。但阿尔·埃尔潘（1862—1947年）却是一个例外。埃尔潘住在新泽西州的特伦顿，但他的家里没有床。他声称自己不需要床，因为他从没睡过觉。埃尔潘看上去很正常，他活到了94岁。如果一个人一生中有1/3的时间花在睡觉上，那就意味着，不睡觉的埃尔潘一辈子所获得的人生经验，是其他（睡觉的）人要花125年才能获得的。据报道，还有其他几例不睡觉的人，但他们中有些人的命运很悲惨。患有致命性家族失眠症这种罕见遗传病的人会突然停止睡眠，经过数月的不眠之夜后在极度疲惫中死亡。[\[6\]](#)

梦中的脑电波

在这些奇怪的案例中出现的睡眠障碍和古怪梦境是怎么产生的？用脑电图分析可以揭示在这些人的大脑中发生了什么。但在此之前，我们首先要了解睡眠的各个阶段，以及在我们沉睡时，大脑的电活动发生了怎样的改变。

大脑从有意识的清醒状态转变为无意识状态（我们称之为睡眠）是一个极其复杂的过程，不是简单地“关掉”大脑的开关就

可以进入睡眠状态了。这个过程要从根本上改变身体的每个系统。脑电波会把这种心灵与肉体在梦与醒之间的切换，跟日出日落的24小时周期协调起来。

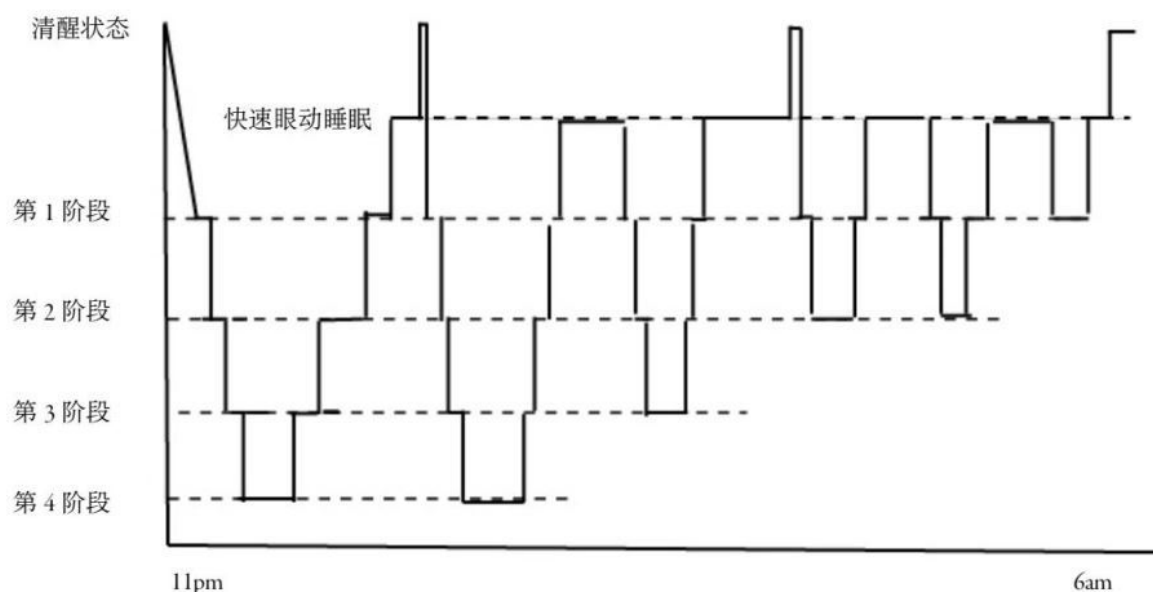


图24 各睡眠阶段：从清醒到慢波睡眠（或非快速眼动睡眠），再到快速眼动睡眠，这个时候开始做梦。我们在一夜的睡眠中要经历几次这样的循环

20世纪50年代的脑电图研究首先揭示了在睡眠的几个阶段中大脑和身体的变化。灯关了，在接下来的一个小时左右的时间，你的大脑将经历一系列变化，最后进入无意识状态。当你闭上眼睛时，波会迅速增强并压制其他高频脑电波，而就在几分钟前，你刷牙和检查警报器的时候，这些高频脑电波在皮质中还很活跃。随着 α 波的涌动，你开始进入一种平静的状态—— α 状态，你将感到轻松舒适。你闭上眼睛，任思绪静静飘荡，注意力转向内心世界。当你打瞌睡时，脑电波开始放缓。它们变得更加同步，振幅也變得更大。这种进入睡眠的状态被称为“催眠状态”。你睡得很浅，进入了慢波睡眠，也称为非快速眼动

（NREM）睡眠。在慢波睡眠期间，你的肌肉得到放松和舒展，心率减慢，血压下降，体温降低。这时候如果邻居的狗叫起来，把你从慢波睡眠中吵醒，你不会记得任何做过的梦。慢波睡眠不会展现梦的魔力。那是发生在后面阶段的事。

（假设你在慢波睡眠期间被邻居的狗打扰了）现在，你又睡着了，睡眠过程在你的大脑中继续发展。正如布朗博士所描述的麻醉早期状态那样，你的脑电波继续减慢，并且越来越同步。但是在接下来的半个小时左右，你的大脑皮质产生的脑电波会类似于醒着的时候所产生的脑电波。在睡眠的这个阶段，你的脑电波处于活跃状态，但是不再同步，而且脑电波振荡的频率在加快。不过，这与清醒状态有根本的区别。尽管在这个睡眠阶段，大脑皮质的脑电波表现为清醒时的模式，但实际上你是四肢瘫软的。除了维持呼吸和带动眼球转动的肌肉以外，身体的其他肌肉都处于麻痹状态（张力缺失）。你现在正在做梦。这种频繁的眼球运动就是意识状态改变后的大脑所产生的幻象的外在表现，也是这个睡眠阶段名称的来历：快速眼动睡眠。你的眼睛动来动去，是在追踪大脑产生的幻觉中的物体。你的心率、血压和体温会随着梦境而变化，因为这些幻觉对你而言是真实的。在快速眼动睡眠阶段，由于血管张力的变化，男性通常会出现阴茎勃起，而女性也会出现阴蒂充血，这并不一定是受到性的刺激。在清醒状态下，平滑肌收缩会限制血液流向阴茎和阴蒂。但是在快速眼动睡眠阶段，这些肌肉松弛了，因此血液流入这些组织，使其充血和肿胀。[\[7\]](#)可能有些人会说自己从未做过梦，其实如果你在快速眼动阶段醒来，就可以报告刚做的一个生动的梦。也许你认为自己不会做梦，事实上每个人都会做梦，只不过第二天早上就忘了而已。（正如我们将看到的，遗忘是睡眠的重要组成部分。）

人在夜间睡眠的第一个快速眼动阶段通常只持续10~15分钟，刚好够大脑播放一小段“剪辑视频”。难怪有些梦看起来是零零碎碎的。快速眼动状态之后接着会出现一个慢波睡眠周期。于是，大脑整夜就在快速眼动睡眠和非快速眼动（慢波）睡眠之间交替。到早晨，慢波睡眠会变得越来越浅，而快速眼动周期会变得更长。在黎明前的这个时候，你就有足够的时间在快速眼动状态下制作画面精美、情节曲折的梦境了。你的闹钟马上就要响了，但是你早已习惯在它响之前就醒过来。当你迷迷糊糊地从睡梦中慢慢清醒过来的时候，处于一个叫作“半醒睡眠”的过渡阶段。这个阶段非常短暂，处在意识改变的临界状态，此时你正在无意识和有意识之间挣扎。你的意识程度在不断增强，在整个大脑皮质中开始出现高频的脑电活动，显示意识正在与无意识进行斗争，要把它从原先舒适安逸的梦境的摇篮里赶出来。意识通常会控制并约束我们的思想，但是在意识和无意识短暂融合的这个瞬间，它正处于微弱的状态，因此创造性的思想通常会突破意识思想的束缚脱颖而出。

所有脊椎动物都有非快速眼动睡眠，但是快速眼动睡眠只有在哺乳动物中才有。婴儿每天要花16个小时睡觉，其中一半的时间是快速眼动睡眠，这与成人有很大不同。很难想象，婴儿的大脑在清醒时向一个陌生的新世界学习后，还要花相同的时间在梦境里继续学习。（我想我现在算是明白婴儿那不情不愿的表情的含义了。）

心电图、电刺激和睡眠

1949年，朱塞佩·莫鲁齐和霍勒斯·温切尔·马古恩发现，对中脑网状结构进行电刺激会立即使缓慢振荡的脑电图失去同步，从而唤醒睡眠中的动物。[\[8\]](#)巴里·斯特曼和卡迈恩·克莱门特后来发现，对前脑基底节进行电刺激可在清醒的动物中产生慢波睡眠。[\[9\]](#)就我们现在的目的而言，了解在哪些神经解剖部位刺激大脑会影响睡眠并不那么重要；重要的是，将脑电刺激与脑电图记录相结合的这些研究表明，睡眠受大脑中特定回路的主动控制。从这个角度来看，就不难理解阿尔·埃尔潘和其他神经功能失调的人为何失去睡眠的能力了。

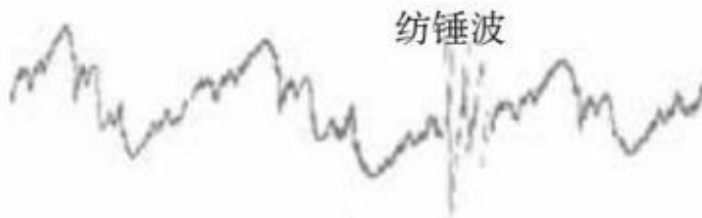
清醒状态



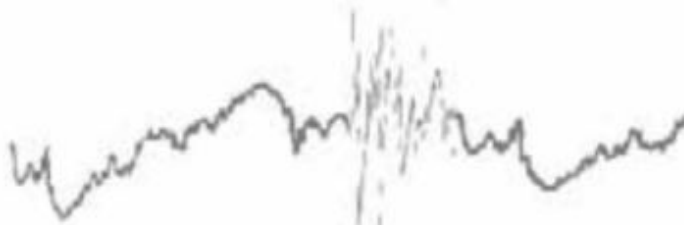
第1阶段
(犯困)



第2阶段
(浅睡眠)



第3阶段
(深度睡眠)



第4阶段
(熟睡阶段)



快速眼动睡眠



图25 不同睡眠阶段脑电波活动的变化。从清醒到进入深度睡眠，脑电波会逐渐变慢，并且在每个睡眠阶段都表现出独有的特征。注意第2和第3阶段中的纺锤波活动，以及在做梦时（快速眼动睡眠阶段）出现的高频脑电图活动与清醒状态下的高频脑电图活动相似

但是，意识不能简单地用清醒或睡眠来区分。研究取得的一个进步就是，根据脑电波活动的转变，非快速眼动睡眠期可以分为四个阶段。在第一阶段的睡眠中（眼睛闭上后不久），脑电活动会从以 α 波为主的状态转变为更慢的 θ 波频率（4~7赫兹）。

第二阶段睡眠的特征是睡眠纺锤波的出现。睡眠纺锤波由振荡瞬间快速上升和下降的频率为12~15赫兹（ β 波段）的脑电波构成。名字里的“纺锤”是指在脑电图图表记录中所描绘出的波形从前端突然暴发，振幅逐渐增大，而后逐渐减小并在后端收敛，形状类似于纺锤。就像汽车轮子碾过坑洼时突然出现剧烈的摇摆震动，然后又迅速恢复正常一样。脑电图记录中的“纺锤”是一个瞬态事件，振荡突然暴发，然后迅速消退。后面，我们会再回到这些有趣且重要的脑电波。

第三阶段睡眠的特征，是在非常慢的波（ δ 波，1~4赫兹）活动增加的背景下，产生电压非常高的“纺锤”。这时的脑电波频率已经减慢到跟心跳的节奏差不多了。

第四个睡眠阶段的脑电图主要由高电压慢波（1~3赫兹）构成。此时你对世界已经浑然不觉了，因为你的大脑和身体处于 δ 波睡眠最深的阶段，在这个阶段唤醒一个人是最困难的。随着脑电波频率的降低和电压的升高，肌肉张力也逐渐松弛。在慢波睡眠阶段，垂体释放的生长激素和性激素会增加。

在经历了非快速眼动睡眠的这四个阶段之后，脑电图周期突然反转并依次从第四阶段又回到第三、第二和第一个睡眠阶段，一路不断增加其振荡频率。然后，脑电图切换到低电压、快速的

脑电波活动（就像在清醒时的大脑中看到的那样），这就是快速眼动睡眠，梦就是在这个阶段产生的。当人在梦中产生幻觉时，眼睛会跟踪（扫视）运动，不过与清醒状态不同，在快速眼动睡眠期间，肌肉张力会被强烈抑制。如果我们在梦中不是处于麻痹状态，我们的身体就会在大脑经历幻觉的时候活动起来。对于梦游或说梦话的人来说，这种肌肉的抑制作用显然失灵了。所有哺乳动物（还有水生动物和飞禽类）的睡眠和脑电波活动都是以这种方式来组织的。大多数哺乳动物在快速眼动睡眠和非快速眼动睡眠之间一般有三个或更多的周期，但是人类在每晚的睡眠中，平均会有4~5个快速眼动周期，每个周期约90~100分钟。在剥夺睡眠后的恢复过程中，脑电图记录显示慢波睡眠和快速眼动睡眠均会增加。[\[10\]](#)

睡眠中的皮质活动受上脑桥和中脑的神经元调节。如前所述，它们通过释放神经递质乙酰胆碱来输出信号并激活丘脑。脑桥和中脑控制着大脑的自主功能，无须意识的参与。然而丘脑才是大脑最核心的开关，出入大脑皮质的信息都经过丘脑进行传递。丘脑被激活后，它给大脑皮质发送信息并将其激活，同时产生唤醒模式的脑电波活动。尽管乙酰胆碱能神经元的突触输入在皮质会产生类似清醒时的警觉的脑电波活动，但在快速眼动睡眠中，大脑对外部的刺激没有反应。因为在脑干中，位于蓝斑核（其中的神经元产生的神经递质是去甲肾上腺素）和位于中缝核背部和内侧（其中的神经元释放神经递质5-羟色胺）的神经元会影响大脑的觉醒状态。下丘脑中用组胺作为神经递质的神经元也起到同样的作用。去甲肾上腺素和组胺这类神经递质在清醒状态下活性最强，但这些脑干神经元的放电速度在慢波睡眠过程中会减慢，在快速眼动睡眠时会停止。（这就是为什么抗组胺药苯海

拉明会让你感到如此困倦的原因。其他睡眠诱导药物，例如唑吡坦，会抑制大脑的觉醒系统，也会增加梦游和其他睡眠障碍发生的概率。[\[11\]](#)）这些脑干神经元从下丘脑接收神经元输入，并控制许多基本的身体节律，如呼吸、心率、生殖和昼夜节律。下丘脑外侧的一组重要的神经元分泌神经递质食欲肽，也可以产生唤醒作用。对发作性睡病患者的研究发现，他们的大脑和脊髓液中的食欲肽水平非常低。前面说过，人们通过遗传手段破坏这种神经递质的作用，已经在动物身上建立起发作性睡病的实验模型了。

人体的昼夜节律时钟是由下丘脑中的一簇称为视交叉上核的神经元控制。这些神经元可以控制某些基因的表达，就像钟表一样在24小时内循环。来自眼睛的信息会通过视网膜输入这个大脑区域并设定好时钟，这就是为什么有人建议在调整时差的时候要晒太阳；另外，这也是为什么失明的人有时会经历睡眠周期的中断（称为非24小时睡眠周期障碍），因为他们的睡眠与一天中的时间不匹配了。前脑基底部的神经元有大量神经纤维直接投射到更广泛的大脑皮质区域，它们对控制睡眠/苏醒状态也很重要，这在斯特曼和克莱门特刺激小鼠大脑的实验中也提到过。

轮班工人的睡眠周期与正常的昼夜节律不同步，他们因此会遭受各种各样的有害影响，包括激素失衡、炎症加重、葡萄糖代谢受损、肥胖、代谢综合征、2型糖尿病、胃肠功能紊乱、免疫功能受损、心血管疾病、过度嗜睡、情绪和社交障碍，以及增加患癌症的风险。[\[12\]](#)显然，打瞌睡这种看似简单的行为绝不简单。难怪睡眠障碍如此普遍。现在看来，我们在本章开头讨论的那些奇怪的睡眠障碍应该也不是那么神秘了。

睡眠障碍因何而生

睡眠麻痹发作的时候，人被困在由快速眼动睡眠阶段、非快速眼动睡眠第一阶段和部分觉醒的催眠状态交织而成的炼狱中不能动弹。脑电图记录表明，睡眠麻痹是一种具有较高觉醒状态的快速眼动睡眠。当意识被唤醒时， α 波活动会被增强的高频 β 波活动抑制。如果区分不了现实和幻觉，大脑就会陷入异常状态。

日本东京早稻田大学心理学系的竹内及其同事[\[13\]](#)观察到，在睡眠麻痹期间， α 波的模式经常被 β 波打断，特别在那些报告有幻觉的受试者中，这个现象更明显。要么是某些事情改变了正在做梦的大脑的状态并且引起了大脑的注意（例如，产生有人闯入他们卧室的可怕幻觉），要么反过来，从 α 波活动为主的平静状态转变为更高频率的 β 波活动为主的状态。在这两种情况下，都可能使脑电波在大脑还处于快速眼动睡眠麻痹和幻觉状态时，就打开丘脑通路并唤醒意识。在慢波睡眠状态下，脑电波可以使丘脑通路保持关闭状态，因为当大量神经元的活动被缓慢的、有节奏的振荡绑定在一起时，会阻碍许多不同神经回路之间的神经元进行信息传递。但这又是一个“先有蛋还是先有鸡”的难题——我们大脑皮质中这些电活动的节律性波动到底是使我们具备认知功能的原因，还是仅仅是认知的痕迹？

一般认为，睡眠麻痹是由于在夙兴夜寐的周期中，从快速眼动睡眠状态到清醒状态的有序变化出现生理机能障碍所导致的。这样的个体可能具有较短的快速眼动和非快速眼动睡眠周期以及不连贯的快速眼动睡眠。前面说过，特定的乙酰胆碱能神经元会引起觉醒。在睡眠麻痹患者中，这些神经元会变得过度活跃，但

与此同时，又没有足够强的信号来抑制诱导睡眠的血清素能神经元活性。结果，在快速眼动睡眠期间，大脑被唤醒并产生意识知觉，而在快速眼动睡眠过程中，来自外界的感觉输入和整个身体的肌肉运动又被抑制住了，人处于真正的麻痹状态。在睡眠麻痹的快速眼动睡眠阶段恢复了意识，这就好比一个打了麻药的人在手术台上全身肌肉都瘫了，但意识却是完全清醒的，或者就像一个人因颅脑损伤或疾病而导致闭锁综合征一样可怕。睡眠麻痹发作的时候，感觉输入（例如听到看门狗拉斯提打鼾，感觉到你丈夫睡在旁边）会进入意识，并且跟做梦的幻觉混合起来。

睡眠麻痹过程中出现的典型幻觉说明大脑的某些部分无法正常工作——它们本应该入睡，但却被激活了。在睡眠麻痹发作的时候，人们普遍会感到恐惧，会梦见入侵者朝自己走来，而自己却被固定在床上不能动弹。睡眠麻痹期间做噩梦可能是由于大脑皮质颞叶和顶叶交界处的多感官信息处理区域的功能出现障碍所致。这部分大脑皮质负责协调丘脑（调节对大脑皮质的感觉输入）和边缘系统（执行情感和威胁检测功能的区域）的活动，并负责整合人体外部和内部环境的信息。它们是大脑的安全警报系统的枢纽。如果这部分大脑区域受损或受到电刺激，人就会产生灵魂出窍的体验。这些皮质中枢的损伤还与焦虑症、阿尔茨海默病、精神分裂症和孤独症谱系障碍有关。癫痫患者的脑电图记录显示，额叶癫痫发作时常常会伴有惊恐和其他睡眠异常。[\[14\]](#)

从睡眠麻痹到发作性睡病，我们都可以从脑电波的活动看出大脑如何失去对睡眠的控制。发作性睡病患者在发作时的脑电图常出现快速眼动睡眠的脑电图模式（4~7.5赫兹），而不是正常清醒状态下的8~13赫兹的 α 脑电图活动。这些人没有经过正常

的睡眠步骤，他们的脑电图模式在毫无预兆的情况下突然从清醒状态转变为睡眠状态。

睡眠障碍的另一个极端是失眠。比萨大学的安杰洛·杰米尼亚尼发现，致命性家族失眠症患者（失去睡眠能力，然后精疲力竭而死）的脑电图显示，他们缺少正常的慢速脑电波。[\[15\]](#)他的研究显示，这些人的慢波睡眠振荡和纺锤波活动明显减少，尤其在额叶区域更为明显。这些改变可能是由于传递信息到皮质的丘脑神经元变性而引起的。如果这些神经元因疾病而受损，那么丘脑就无法关闭对大脑皮质的输入，人就无法入睡。也就是说，没了开关，灯就一直亮着。

山姆，倒回去再放一遍：学习和睡觉都靠它

我们睡觉的原因之一是做梦，而我们做梦的部分原因是为了记住和遗忘。

第一阶段的睡眠以 θ 波为特征，第三阶段和第四阶段以 δ 波为特征。如前所述，一种特殊的脑电波突然暴发（被称为睡眠纺锤波）出现在轻度睡眠的第二阶段。它也叫作 σ 波，是分为高频（13~15赫兹）和低频（11~13赫兹）的纺锤形活动波，它会随着我们睡眠的加深而增加。人们认为纺锤波与海马（对于空间记忆很重要）和新皮质（对整合感觉、思想和记忆很重要）之间的信息传递相关，因此纺锤波被认为在记忆巩固中起到重要作用。记忆巩固是指将短期记忆转换为持久性长期记忆的过程。在继续探讨睡眠和睡眠纺锤波与记忆之间的关系之前，我想简短地解释一

下记忆是如何在我们的脑中存储的。梳理一下这些关键点可能对读者会有所帮助。

短期记忆和长期记忆之间的根本区别在于，短期记忆是通过暂时增加突触所产生的电压来维持的（称为突触增强）。突触连接是神经回路之间的联系的重要代表，它们会暂时保存头脑中出现的新体验，使其功能得到增强。因此，当我们尝试回想最近的事情时，这些回路会特别活跃，因此很容易回忆起来。然而，在很短的时间内，编码这些瞬时记忆的突触连接的强度开始减弱，也可以说“黑板”被擦干净了，于是上面又可以记新的信息了。有人给我们介绍某个人后，我们马上可以记住他的名字，所用到的就是短期记忆。这种记忆非常重要，特别当人们步入老龄的时候会更加明显。人们会因为短期记忆暂时失效而忘记下楼去是要拿什么东西，或者忘了把车钥匙放在哪儿了。

长期记忆具有不同的特点，这些更永久的心理记录（例如你的姓名、地址、7乘以6等于几这些信息）会以另一种方式存储在大脑中。显然，这些经历在我们最初遇到它们时也是保存在短期记忆中的，但是不知什么原因，它们从此就永久地刻在了我们的记忆中。这种转变的过程就是记忆的“巩固”。这种转变需要一个生长的过程，即在储存某种经验的神经回路中生长出作为“硬件连接”的突触，并让这些突触得到永久性的加强。为了制造将这些突触永久结合在一起的蛋白质，神经元必须激活某些基因，并按照指示去合成所需的蛋白。在过去的几十年中，许多实验室的研究工作已经找到一些记忆巩固的细胞和分子机制。短期记忆和长期记忆之间的主要区别在于，长期记忆的形成一定会涉及打开某些基因并制造新的蛋白质，而短期记忆则不必。

通过使用一些药物阻止基因激活或抑制蛋白质合成，我们可以轻而易举地阻止短期记忆变成长期记忆。电影《黑衣人》中的“记忆消除棒”可以消除目睹外星人入侵的痛苦经历，这可不是科幻小说，我们知道怎么可以做到消除记忆。科学家可以制造暂时的失忆，也可以清除任何最近的记忆，这应该不是什么太令人震惊的事。我们都知道，在头部遭撞击（脑震荡）、麻醉或酒精中毒导致的“停电”后，记忆巩固的过程会受到阻碍。我们无法回忆起最近的经历，是因为这些信息根本没有被编码。更令人惊讶的是，每天晚上我们睡着后，大脑都会帮我们清除记忆。奇特的 β 纺锤波是“夜间记忆消除棒”起作用的重要环节。

有趣的是，纺锤波活动的增加与高智商有关，并且这种关系在女性中尤为明显。[\[16\]](#)一个人在学习了新东西后，夜间纺锤波出现的量也会增加。而且测试证明，一个人执行新的学习任务的好坏程度与他前一天晚上睡眠中纺锤波的数量成正比。纺锤波可能表示大脑轻度睡眠时正在处理和整合新信息，这可能也是睡眠被剥夺后记忆力和认知能力会受损的原因之一。[\[17\]](#)

在睡眠和学习的过程中，海马中出现的脑电波是很特别的尖锐的波形。这种纺锤样的电波活动被认为是200赫兹或更高频率振荡的短暂暴发，在海马中最为明显。神经元这种暴发式的高频放电速度极快：比电影放映的帧速还要快10倍。在神经元高频发放电脉冲期间，5万~10万个神经元会同步放电。为什么大脑在没有任何感觉输入的情况下会有10万个神经元突然同步放电呢？在慢波睡眠期间以及清醒但安静的情况下，会产生这种尖锐的波形。我的实验室对大鼠脑中尖锐波形的电波进行了研究，并且发现了一些有趣的现象。[\[18\]](#)我们对大鼠海马的脑切片进行了研

究。脑切片被养在精心调节过温度并且充氧的培养皿内，我们使用电极刺激海马神经元，并记录了单个神经元的放电，测量了局部场电位振荡（也就是脑电波活动），其中包括所有尖锐波形的脑电波复合体。我和实验室的博士后研究员奥莱纳·布卡洛发现的一些东西与常规的对神经元的认识有所不同。[\[19\]](#)我们发现了一种新的改变突触可塑性的方式，这对睡眠中的记忆巩固非常重要。比如，我们睡眠中的大脑如何决定一天中应该记住哪些事，又该忘记哪些事。

学习的基本原则是“神经元一起激活，就会连在一起”。必须将铃铛和食物放在一起，巴甫洛夫的狗才能学会将铃铛的声音与食物联系起来，并在期待中开始流口水。要了解这条规则如何在细胞水平上发挥作用，我们需要先回顾一下神经元和神经回路的一些基本特征。

神经元的根状树突可以接受成千上万的突触输入。我们把神经回路中接收突触输入的受体神经元称为“突触后神经元”。复杂的神经网络通过这种方式将许多神经元连接在一起。每个神经元既是突触前神经元，也是突触后神经元，因为电脉冲在神经元中的传递是单向的——从树突到轴突，然后再把信息传递到下一个神经元。这条神经科学的基本定律是由诺贝尔奖获得者、解剖学家拉蒙·卡哈尔在20世纪初提出的，它被称为神经元学说。突触前神经元在放电的时候，突触就会释放神经递质，这会使得受体树突的电压发生改变。激活型的突触使突触后神经元的树突去极化（使负电压降低），而抑制型的突触使突触后神经元的树突超极化（使负电压升高）。我们在前面讨论过（请参阅第3

章），当突触后神经元的跨膜电压达到某个阈值时，就会诱发电脉冲（动作电位）。

许多不同神经回路的活动都会传递到同一个受体神经元，这个神经元的树突上就会有成千上万个活跃的突触输入。这些突触在不同的时间被激活，每一个突触对突触后神经元的整体跨膜电压的影响都是独立的。突触后神经元的树突只需要简单地进行“投票表决”，把来自所有突触的信号相加得到一个累积效应，然后由突触后神经元来做出“全或无”的决定——放电还是不放电。如果树突树上来自激活型突触的累积输入把跨膜电压推到触发点，那么突触后神经元就会被激活。神经元激活后会在神经元胞体和导线一样的轴突的交界处产生一个动作电位，动作电位会沿着轴突飞快地传递到下一个神经元的树突。

在细胞水平上，“神经元一起激活，就会连在一起”的学习规则意味着，当突触与突触后神经元同时激活时，就会启动某些生化过程并增强突触的强度。也就是说，如果某个突触使突触后神经元去极化产生的电压是0.5毫伏，那么在突触增强后，它让突触后神经元去极化的电压就会增加约一倍——达到1毫伏。增强的突触对突触后神经元是否激发动作电位具有更大的影响。虽然都连接到同一个突触后神经元，但相对于来自其他回路的没有经过增强的突触，增强过的突触激活突触后神经元的能力大大提高了。实际上，这种增强的突触作用更大，因此，增强的突触及其所属的神经元和神经回路将对突触后神经元的行为产生更大的影响。

当我在大鼠的海马切片中用电刺激突触前神经元，然后用微电极记录引发突触后神经元发放电脉冲的跨膜电压时，就可以看

到这种现象。在示波器和计算机屏幕上有一条发光的线，可以显示神经元在细胞膜上产生了多大的电压。当给这个神经元施加一个突触输入时，我可以看到屏幕上的轨迹突然弹起来，就像心电图监护仪上显示的心跳，这表明突触已经被激活，并且立即就把突触后神经元的膜电位推向动作电位的阈值。突触激活所引起的电压变化就是“突触后电位”，我们很容易就可以测量出它的振幅（电压）。

如果我在突触后神经元发放动作电位的同时激活突触，那么当我对突触前神经元再次施加电刺激时，突触后电位的大小会突然变得更大。神经元一起激活，就会连在一起。如果我没有把握好时间，在突触后神经元发放脉冲之前或之后几毫秒才激活突触，那么突触（突触后电位）不会增强。值得注意的是，用这种方式增强的突触在所有记录期间内可以一直保持其突触的强度（在自由行动的动物大脑中植入电极后进行这个实验，增强的突触可以维持长达数周）。这种突触强度的长期增强作用被称为长时程增强。长时程增强是突触激活和突触后神经元发放动作电位同时进行所诱导产生的。

蒂姆·布利斯和泰耶·勒莫于1973年首次描述了长时程增强现象，他们发现了一些非常有趣的东西。为了使突触后神经元发放动作电位，需要强烈的高频电刺激使足够多的突触输入同时被激活，突触后神经元才能去极化达到足以产生动作电位的阈值。施加高频电刺激时，所有这些同时被激活的突触都得到了增强，但这毕竟是人为造成的现象。海马的神经元是不会以这种方式发放电脉冲的，所以这种人为刺激多少有点儿削弱了这个发现的重要性。不过研究人员发现，如果他们以一种较温和的方式，用海

马中常见的动作电位的重复模式进行刺激，也可以在没有人工高频刺激的情况下诱发长时程增强。后来的证据表明，能有效诱导长时程增强的刺激模式是一系列 θ 频率的动作电位的瞬时暴发，重复频率约为5赫兹。[\[20\]](#)

这本身就证明，神经回路传递信息的基本方式可以被脑电波调节。如果神经脉冲发放的节奏与神经回路的共振频率相匹配，那么这种神经冲动就易于传播；反之，如果神经脉冲的频率与神经回路不匹配，那么神经回路的信息传输会受到损害，甚至失败。（如前所述，这是自然界中所有波的特征——同步振荡可以把能量进行有效的复合，就像有节奏的掌声可以把体育场的地基都震撼一样，但是用相同的能量拍手，如果掌声不协调，就只会产生噪声。）不同的神经脉冲发放节奏会与不同神经网络的共振特性产生更好的匹配，就像歌剧演唱家可以用歌声来震碎高脚水晶杯一样，无非是因为唱出的音符（声音频率）正好与能使酒杯产生剧烈振动的物理特性匹配罢了。其结果就是，不同频率的脑电波将不同的神经群体连接在一起，形成功能回路。 θ 节律能特别有效地使海马突触后神经元去极化，正如那场关于 γ 波的辩论（参见第5章）中所提到的，如果突触按照 θ 波的节奏被激活，将使更多的突触在一个最佳的频率被同步激活，从而非常有效地影响突触后神经元的膜电压。

长时程增强被发现的数年后，当时还在布朗大学的马克·贝尔和他的研究生塞雷娜·杜德克等人发现了突触可塑性的另一种形式，被称为长时程抑制（LTD）。实验表明，如果突触不能在正确的时间被激活（即当突触后神经元触发动作电位时，突触没有被同步激活）就会减弱。这很有道理。选择性地抑制那些与突

触后神经元发放不同步的突触，可以提高神经回路的整体性能，就好比一个单簧管演奏者吹的曲调如果与交响乐的其他部分不一致时，我们就需要让他安静。人们对长时程抑制中突触被弱化的生化机制有了详细的了解，但直到神经科学家意识到它是遗忘的一种细胞机制，即削弱并最终破坏有功能的突触连接时，长时程抑制的真正意义才凸显出来。数十年来，神经科学家们一直痴迷于寻找某种方法来增强突触以发现编码记忆的细胞机制，却完全忽略了突触强度也可能被主动地、有选择性地削弱。

当塞雷娜·杜德克在我的实验室做博士后时，我们探索了“用正确的方式”（突触与树突树上的大多数突触同时被激活）来改变突触强度的机制。[\[21\]](#)突触特异性对于学习来说至关重要，因为离散的信息在离散的神经回路中编码，分散在这些神经回路中的信息通过特定的突触连接分别传递给特定的突触后神经元，然后再传递到这些突触后神经元所在的神经回路中。[\[22\]](#)长时程增强和长时程抑制概念的重要性在于，突触与突触后神经元是否被同时激活，决定了突触特异性的增强或减弱，而且突触强度的变化取决于神经递质信号的传导，尤其是被称为NMDA受体的谷氨酸能神经递质受体。

布卡洛和我分别在大鼠海马切片中进行了实验。我们的实验结果完全违背了这条关于突触可塑性机制的规则，你可以想象我们有多么惊讶。我们正在研究突触后动作电位如何向神经元的细胞核发送信号并改变基因的读取，因为只有通过遗传指令才能合成蛋白质并永久性地增强突触连接。细胞核中的基因必须被正确激活，才能制造这些蛋白质，而且这些蛋白质还必须被运送到（或专门作用于）这个神经元的某些突触上。但是，我们发现了

一种新形式的长时程抑制。它不是突触特异性的，不依赖于NMDA受体。实际上，它根本不受突触激活的影响。相反，这种长时程抑制效应是由突触后神经元发放的动作电位以非常特殊的方式驱动的——动作电位发生在纺锤波产生的过程中，结果使突触后神经元树突上所有突触的强度都改变了。我们称这种新形式的可塑性为“动作电位诱导的长时程抑制”。要了解这种纺锤波波动期间发生的非常规形式的可塑性及其意义，我们需要了解遗忘的重要性以及睡眠期间大脑如何积极地进行重启和遗忘。

遗忘和记忆如何发生，为何发生

此时此刻，我们曾经经历过的大多数事情都已经被遗忘了。谁需要记住自己两年前某个星期天的下午在沃尔玛的哪个停车位停的车？但是，大脑如何决定哪些经历对未来很重要，需要保留，哪些经验又可以抛弃呢？做这个决定就像清除收件箱中密密麻麻的电子邮件一样，需要对每种新体验进行评估，考虑它与大脑中存储的其他信息的相关性，并判断这个事件在未来可能具有的重要性。对于学习和记忆来说，主动又精确的遗忘与主动又精确的回忆同样重要。我们曾提到过本彻内恩的研究（请参阅第4章）。他们对白天学会走迷宫的大鼠的海马神经元进行脑电图记录发现，当大鼠晚上睡觉时，它会在大脑中再次体验走迷宫。大鼠白天穿过迷宫时依次被激活的海马神经元在睡眠时会按顺序在大脑里重现放电活动。大鼠在夜间的“重播”越强，第二天在迷宫中的表现就越好。如果大鼠的睡眠受到干扰，那么第二天跑迷宫的记忆就会变差。相似的研究表明，在人类身上所发生的情况也大致相同。这些研究都说明，当我们睡觉时，大脑会重播当天

的经历，把这些新信息与现有的记忆联系起来，那些重要的突触连接（记忆）会被整合到长期记忆中，而其他信息会消失。选择性的遗忘至关重要。

海马中快速振荡的纺锤波出现在清醒并安静的时候（暂时的“走神”）和慢波睡眠期间。请记住，在慢波睡眠期间，我们并不会像快速眼动睡眠时那样做梦。在快速眼动睡眠期间，我们的眼睛飞快地转来转去，脑电波像爵士乐一样快速发放，跟清醒的时候很相似。在慢波睡眠中，我们与外界隔绝，大脑处于放空的状态，脑电波减慢到最低的振荡频率，但会周期性地被奇怪的瞬时高频脉冲打断。在这种时候，大脑会停止从外界接收信息，并自发地产生这种专门针对海马和与之相关的皮质区域的脑电波活动模式。这些振幅非常大的、极高频率的瞬时振荡不会向大脑报告传入的信息。它们一定是在大脑内部传递信息，就像在文字处理过程中自动保存文档一样。大量研究表明，这正是它们所做的事情，是为了巩固记忆。

处于静息状态的大脑脑电图记录以及使用植入电极得到的类似数据显示，大脑自发产生的许多神经活动都很奇怪。与靠感觉输入驱动的大脑活动相反，大脑的许多固有神经活动是波动的，而且在教科书里根本没有提到过这种神经活动。自发产生的神经发放可能存在非经典的模式，但如果把大脑看作一台电子输入输出设备，从这个角度来看，这种非经典的发放模式就显得毫无意义了。（在白天把大脑比作电子设备是恰当的，因为大脑要对感觉输入做出响应，但在晚上我们睡着的时候就不是那么回事了。显然，当没有感觉输入时，我们的大脑的电活动仍然很活跃。但是在这个时候，神经网络的活动是由大脑自身驱动的。）在成千

上万的海马神经元同时发放，从而产生“锐波涟漪”时，神经电活动和谐的高频振荡就产生了；因此，通过“神经元一起激活，就会连在一起”的规则，振荡将这数千个神经元连接成一个暂时性的功能集合。这相当于合唱团的某些成员暂时一起开口合唱的时候，他们旁边的人得保持安静。

这些神经元参与“锐波涟漪”的发放，但令人惊讶的是，它们同步的动作电位发放却不是由突触输入引起的：这些神经元向后发放脉冲！动作电位不是由树突触发，而是在轴突的远端区域触发，并向后（反方向）传递到细胞体并进入树突。这种奇怪的行为被称为“逆向发放”，它违背了神经元传递、整合信息的方向是从树突到轴突这一神经元学说的基本原理。其他人早就观察并描述过这种逆向发放，但是神经元为什么这样做一直是个谜。显然，在锐波涟漪产生期间向后发放电脉冲的神经元并没有在神经回路内传递信息，它们跟周围的神经元不一样。周围的神经元只是正常地发放冲动，而且不参与锐波涟漪的发放。如果神经元一起向后发放高频率的电脉冲，会发生什么？

再回到学习理论的基本原则“神经元一起激活，就会连在一起”，这里就出现一个显而易见的问题。我们的神经元整天都是在一起发放脉冲的。一天之内，突触后神经元收到的大量输入信号将使突触不断被增强，直到最后所有突触都达到它们的最大强度。此时，神经回路将变得饱和，无法再编码或传递新的信息。不过，在考虑学习理论的基本原则的同时，我们也会想：在没有突触输入时，如果神经元发放电脉冲，会发生什么？

我们实验室的研究发现，当神经元在锐波涟漪期间逆向发放时，其树突上的所有突触都会减弱。根据突触可塑性理论，发生

这种现象的原因是这些突触在应该被激活的时候没有被激活。也就是说，当突触后神经元发放脉冲时，它们没有被同时激活。就好比管弦乐队的指挥虽然用指挥棒敲打出节拍，指挥乐队演奏，但所有的演奏家都坐在那里一动不动。这样反复几次以后，那些依然保持沉默的演奏家将被淘汰。我们通过使用药物阻断海马脑切片的突触活动，从而发现了这个现象。然后，我们将刺激电极放置在轴突束（海马神经纤维）中，海马神经元的动作电位通过这些神经纤维向外传导，放置的电极可以模拟神经元的电流向后传递（逆向），就像在慢波睡眠时产生的锐波涟漪一样。我们去除了药物，重新检查这些神经元的树突上的突触输入强度，发现所有的突触都被削弱了。结果，在逆向发放电脉冲之前，那些最弱的突触将减少——从最初强度很弱直至减少到没有。原本较强的突触也变弱了，但并未完全消失，它们的突触强度只是下调。降低树突上所有突触的强度会调整突触后神经元的输入。这个过程修剪掉了最弱的那部分突触输入，稍微降低了最强突触的强度，从而改善了从神经回路输入神经元的信息的模式。就像修剪灌木丛一样，对整个树突以及对突触的修剪提高了神经网络的精度。

例如，我们曾经说过，当你移动至环境中的特定位置时，海马中被称为“位置细胞”的神经元会被激活。首先，位置细胞的发放具有相当宽的“调频曲线”，这意味着它们的“GPS功能”的精度较低，要靠积累经验来提高。想象你入住一家酒店时，带着房卡来到分配给你的201号房间，然后将它插入门锁。当门锁上的绿灯闪烁时，海马中的一个位置细胞神经元就会被激活，发出代表周围环境的信号。第二天，当你走到同一扇门时，同一个细胞会再次被激活。但是，当你来到门的附近时，这个神经元

也会被激活，因为它还没有被调整到识别插房卡那个位置的精度。你甚至可能走到大厅对面的门前，直到插房卡打不开门时，才惊讶地发现走错了房间。发生这种情况是因为位置细胞的定位功能还没有被细化，当你走到自己的房门附近时，也会激活这个位置细胞。最终，当你有了经验后，这个位置细胞（神经元）就会提高其精度，直到你来到201号门前才会被激活。现在，你走出电梯后再也不会犹豫了，你会径直穿过大厅，来到自己的房门跟前并打开锁。

在细胞水平上，这个神经元会被激活并发放电脉冲，因为连接到这个神经网络是由你所处的位置激活的。这是一个新的位置，对你来说很重要，因此你的大脑把这种体验看作将来需要回忆的事物。当你首次入住时，这个神经元的某些输入就已经对走廊上相邻的位置信息进行了大量调整，但位置细胞这时的敏感性与201房门的位置还是有些重叠。你离不开这些位置细胞，例如，假如你需要记住灭火器就在201号门对面。随着经验的积累，神经元同时发放会增加突触的强度，为你的房门位置建立起记忆回路，但是当这些神经元在锐波涟漪期间逆向发放冲动时，这个神经元功能群体中所有的突触强度都会减弱。于是，最强的连接将占主导地位，形成更精细的记忆回路，而最弱的突触连接则被移除并加入携带不同信息的另一组神经元中（例如，灭火器所在的位置信息）协同激活。在我们睡眠时，奇怪的脑电波通过这种方式造成的选择性遗忘（消除微弱的突触）可以使记忆变得更精确。

对于学习和记忆，我们过于强调实证和学术的层面，却往往忽略了大脑中时刻进行的看似毫不费劲但实际非常复杂的学习过

程。直到我们看到患有阿尔茨海默病等认知功能障碍的人，他们自动学习和回忆的神经回路因疾病而受损，才使我们意识到大脑为了学习和使用信息，每天都进行自我调整。一位患有阿尔茨海默病的老人很可能走到灭火器跟前，并用房卡往灭火器上插。

人们认为，通过在慢波睡眠时降低突触强度，细化和突出先前获得的记忆以使新记忆同化到一个简图（记忆中的场景）中，这对于防止突触在大脑清醒的时候过度激活是必要的。[\[23\]](#)

我们的实验结果表明，动作电位是逆向产生还是通过突触产生（顺势产生）是影响突触可塑性的一个关键因素。在此之前，没有人想过这个问题。在睡眠和安静并清醒的时候大脑会产生锐波涟漪也是有道理的。在这种时候，感觉输入减少，大脑不用处理外部输入，就有利于大脑回放那些内部诱导并逆向发放的神经信号，从而有助于记忆巩固。

由逆向动作电位诱导的突触可塑性可能治疗人类疾病具有实际意义。稍后，我们将讨论大脑的几种电刺激模式，看它们如何帮助患有帕金森病、强迫症、抑郁和成瘾的人。[\[24\]](#) 帕金森病（及其他一些疾病）可以改变神经回路的特性，但是脑深部电刺激对这些患者有多大用处尚不清楚。当插入大脑的电极放电时，就像我们在实验中所做的那样，突触发放和逆向发放都会被激活。可能是由于逆向发放引起的突触抑制削弱了功能失调的神经网络中的突触，把它们“修剪”掉了，才使神经网络恢复了一部分功能。

从全球最先进的实验室的最新研究中，我们对大脑有了一些了解。我们将在第三部分探讨个人如何利用这些新信息，以及脑电波研究的进展会如何改变世界。脑电波无论是一种复杂的参与神经信息处理的调节方式，或者仅仅是数百万个神经元发放电脉冲产生的副产品，当它变成一种读取和控制大脑的力量时，这些都无关紧要了。脑电波可以应用在下面这些领域，这可能让你大吃一惊：读取人的想法、预测人的行为、了解个人智力的优劣势、预计个人学习特定类型信息的潜能、了解人的个性、诊断心理和神经系统疾病、将人的大脑与计算机连接、将思想在大脑间传递……甚至更多。大脑刺激和其他操纵脑电波的方法可以让你改变大脑。驾驭脑电波将赋予人类前所未有的能力：通过直接影响大脑回路来控制行为的能力，以及用机器控制大脑或用大脑控制机器的能力。

[1] Gauchat, A.; Seguin, J. R.; McSween-Cadieux, E.; and Zadra, A. (2015) The Content of Recurrent Dreams in Young Adolescents. *Consciousness and Cognition* 37: 103 - 111.

[2] Zadra, A. Recurrent Dreams: Their Relation to Life Events. In Barrett, D., ed. (1996) *Trauma and Dreams*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 231 - 247.

[3] Sharpless, B. A. (2016). A Clinician's Guide to Recurrent Isolated Sleep Paralysis. *Neuropsychiatric Disease and Treatment* 12: 1761 - 1767.

[4] Vasas, A. Amanda's Story. Narcolepsy Network. <http://narcolepsynetwork.org/amandas-story/>. Accessed September 15, 2019.

[5] Chen, L.; et al. (2009) Animal Models of Narcolepsy. *CNS & Neurological Disorders Drug Targets* 8 (4):296 - 308.

[6] Robson, D. The Tragic Fate of the People Who Stop Sleeping. BBC Future, January 19, 2016. <http://www.bbc.com/future/story/20160118-the-tragic-fate-of-the-people-who-stop-sleeping>.

[7] Dean, R. C.; and Lue, T. F. (2005) Physiology of Penile Erection and Pathophysiology of Erectile Dysfunction. *Urologic Clinics of North America* 32 (4): 379 - 395, v.

[8] Moruzzi, G.; and Magoun, H. W. (1949) Brain Stem Reticular Formation and Activation of the EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 1: 455 - 473.

[9] Sterman, M. B.; and Clemente, C. D. (1962) Forebrain Inhibitory Mechanisms: Sleep Patterns Induced by Basal Forebrain Stimulation in the Behaving Cat. *Experimental Neurology* 6: 103 - 117.

[10] Brunner, D. P.; et al. (1990) Effect of Partial Sleep Deprivation on Sleep Stages and EEG Power Spectra: Evidence for Non-REM and REM Sleep Homeostasis. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 75 (6): 492 - 499.

[11] De Noon, D. J. Ambien Linked to "Sleep Eating" : Rare Cases of Unconscious Eating and Cooking Seen in Patients Using Sleeping Pill. WebMD.com, March 15, 2006. <https://www.webmd.com/sleep-disorders/news/20060315/ambien-linked-to-sleep-eating#1>.

[12] James, S. M.; et al. (2017) Shift Work: Disrupted Circadian Rhythms and Sleep- Implications for Health and Well-Being. *Current Sleep Medicine Reports* 3: 104 - 112.

[13] Takeuchi, T.; et al. (1992) Isolated Sleep Paralysis Elicited by Sleep Interruption. *Sleep* 15 (3): 217 - 225.

[14] Derry, C. (2012) Nocturnal Frontal Lobe Epilepsy vs Parasomnias. *Current Treatment Options in Neurology* 14 (5): 451 - 463.

[15] Gemignani, A.; et al. (2012) Thalamic Contribution to Sleep Slow Oscillation Features in Humans: A Single Case Cross Sectional EEG Study in Fatal Familial Insomnia. *Sleep Medicine* 13: 946 - 952.

[16] Ujma, P. P.; et al. (2017) The Sleep EEG Spectrum Is a Sexually Dimorphic Marker of General Intelligence *Scientific Reports* 7 (1): 18070. doi:10.1038/ s41598-017-18124-0.

[17] De Gennaro, L.; and Ferrara, M. (2003) Sleep Spindles: An Overview. *Sleep Medicine Reviews* 7 (5):423 - 440.

[18] Stix, G. (2013) Sleep Hits the Reset Button for Individual Neurons. *Scientific American*, March 22, 2013. <https://blogs.scientificamerican.com/talking-back/sleep-hits-the-reset-button-for-individual-neurons/>.

[19] Bukalo, O.; et al. (2013) Synaptic Plasticity by Antidromic Firing During Hippocampal Network Oscillations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (13):5175 - 5180.

[20] Larson, J.; and Munkacsy, E. (2015) Theta-Burst LTP. *Brain Research* 1621: 38 - 50.

[21] Dudek, S. M.; and Fields, R. D. (2002) Somatic Action Potentials Are Sufficient for Late-Phase LTP-Related Cell Signaling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99: 3962 - 3967.

[22] Fields, R. D. (2004) Making Memories Stick. *Scientific American* 290: 74-81.

[23] Tononi, G.; and Cirelli, C. (2006) Sleep Function and Synaptic Homeostasis. *Sleep Medicine Reviews* 10(1): 49 - 62.

[24] Krack, P.; Hariz, M. I.; Baunez, C.; Guridi, J.; and Obeso, J. A. (2010) Deep Brain Stimulation: From Neurology to Psychiatry? *Trends in Neurosciences* 33 (10): 474 - 484.

第三部分

利用脑电波

一个十来岁的年轻女孩的颅骨被打开了，露出微微反光的布满血丝的大脑，随着医生拔插金属探针而一阵阵搏动。探针拔出来时会带出一团脑组织，就像在潮湿的沙子上挖出一个小坑。然而，这个时候，她还在不停地快速说着内心的独白。

第8章

思维控制：脑机接口

人们对脑电波如何产生、如何编码和协调大脑中的信息处理等方面的研究已经取得了突破性的进展，这引起了一场把大脑直接与计算机相连的技术革命。这项新技术被称为脑机接口，它使人的思维能够直接与计算机连接并控制轮椅、军用无人机等各种设备，同时也使得用计算机发出信号来控制人的头脑成为可能。

从无线电波到脑电波

德尔加多站在热浪滚滚的斗牛场上，面对着一头愤怒的公牛，它天生就是个杀手。它斗志昂扬，压低尖利的牛角，随时准备发起进攻。德尔加多不是训练有素的斗牛士，他也没有带剑。公牛向他飞奔过来，蹄声如雷鸣般响亮，卷起一阵尘土。可是就在这头狂暴的公牛即将残忍地把德尔加多刺穿的时候，它突然在距离他几英寸的地方停了下来。西班牙神经学家何塞·曼努埃尔·罗德里格斯·德尔加多的手藏在红色披风后面，按下了一个小型无线电发射器的开关，让这头狂奔的牛停了下来。无线电信号激活了他早已通过外科手术植入公牛大脑里的电极。1964年夏天，德尔加多通过直接操纵大脑回路并控制动物行为，生动地展示了他用微型电极可以做到刀剑所做不到的事情——精神控制，

从而震惊了整个世界。德尔加多用电极阻止了公牛的致命攻击，但这只是一个戏剧化的表演。德尔加多真正的兴趣在于控制人类。



图26 1964年，西班牙神经科学家何塞·曼努埃尔·罗德里格斯·德尔加多表演制止狂暴的公牛。他在公牛大脑内植入了一个电极，按下一个小型无线电发射器的开关后，电极会放电。德尔加多的研究旨在通过用刺激大脑的方法来了解和控制正常和异常的人类行为

德尔加多得到了众多科幻迷的狂热崇拜，同时，用电波刺激大脑可以达到“精神控制”的可怕前景也在公众当中引起了警觉。精神控制是许多人心头挥之不去的梦魇。它使一些患有精神疾病的人陷入妄想症，导致幻听或强迫症。他们认为这是美国中央情报局或其他邪恶的政府机构给他们的大脑植入了微芯片。但是，自从德尔加多首次尝试通过植入电极直接刺激大脑中的神经回路来控制动物（和人类）的行为开始，人类就不得不面对“究竟是什么让人成其为人”这个根本问题，不得不去寻找个人与社会之间那条相互独立却又相互依存、关键却又模糊的界限。从德尔加多的角度来看，社会是通过控制个人来建立秩序的，现在科

学家们直接掌握了这种控制权。剥夺人的自由意志——甚至思想——直接操纵人们的大脑，意味着人类最后也是最神圣的庇护所被攻破了。20世纪中叶，德尔加多和其他研究人员在刺激大脑以控制行为的研究上取得了令人瞩目的进展，但此后的数十年里，这一研究领域逐渐没落，这主要是由于公众担心这类研究会打开潘多拉的魔盒。后来，由于人们发现脑深部电刺激对帕金森病等神经系统疾病有治疗意义，另外，开发假肢和其他辅助设备必须连接到神经回路，这些对人类具有深远影响的治疗方法的出现使得这个领域的研究又逐渐活跃起来。现在盖子已经被打开了，在不久的将来，人们就可以知道我们打开的究竟是潘多拉魔盒还是一个百宝箱。

何塞·曼努埃尔·罗德里格斯·德尔加多1915年出生于西班牙的龙达。一开始，他在马德里大学攻读医学学位，但在西班牙内战（1936—1939）爆发后，他作为一名医疗兵加入了共和军[\[1\]](#)——他跟作家欧内斯特·海明威和乔治·奥威尔的政治立场一样。乔治·奥威尔为共和军战斗了7个月，并出版了他的回忆录《向加泰罗尼亚致敬》。海明威做战地记者的经历让他写出了伟大的小说《丧钟为谁而鸣》。

内战使社会分裂，其本质就是场残酷的悲剧。西班牙内战像一口沸腾的大锅，掺入了世界上最邪恶的力量——站在民族主义一边的纳粹和法西斯主义者以及举着共和大旗的苏联和无政府主义者。暴徒肆虐、系统性的杀戮和双方的暴行造成大量平民死亡是西班牙内战的标志，[\[2\]](#)西班牙内战夺去了将近100万人的生命。[\[3\]](#)最终，共和军被军事独裁者弗朗西斯科·佛朗哥领导

的、纳粹和法西斯支持的民族主义者击败。德尔加多、海明威和奥威尔他们三个人都属于战败一方，但都在战争中找到了自我。

战争结束后，德尔加多在集中营被关押了5个月。[\[4\]](#)他被拘押的细节鲜为人知，不过他活了下来实属幸运。1939年内战结束时，约有50万西班牙共和党人逃往法国，这是愿意接纳西班牙难民的少数几个国家之一。难民被安置在拘留营中，但是当德国人在1940年击败法国时，纳粹当局判处西班牙共和党人进入强迫劳动营，并将3万多人驱逐到德国，其中约有一半被囚禁在集中营中。这些囚徒中约有7 000人被关进奥地利的毛特豪森集中营，而其中一半以上的西班牙难民在那里丧生。[\[5\]](#)

毛特豪森是一个大规模的集中营，是纳粹建立的第一个，但却是盟军最后解放的一个集中营。毛特豪森以其极端的残酷和暴虐的杀人手段而臭名昭著，犯人主要死于苦役和饥饿。因此，可以说它是所有集中营中最恐怖的一个。它有一个特殊目标，就是消灭可疑的政治对手和社会上那些受过高等教育的人，例如科学家、艺术家、教师和大学教授。西蒙·维森塔尔是在毛特豪森集中营中幸存下来的工程师，他的余生都致力于追踪纳粹战犯并将其绳之以法，他也因此闻名世界。[\[6\]](#)维森塔尔曾是利沃夫市（现为乌克兰利沃夫）的犹太居民。在这个城市的大学里，阿道夫·贝克教授毕生致力于研究大脑的电活动（请参阅第1章）。纳粹首先将维森塔尔囚禁在利沃夫西北郊的一家工厂里，而阿道夫·贝克为了避免被送进集中营，就是在这家工厂里自杀的。这个工厂后来被改建为亚诺夫斯卡集中营。

德尔加多获得医学博士学位后，又在马德里的拉蒙·卡哈尔研究所获得了博士学位。1950年，他获得了耶鲁大学的奖学金，并师从约翰·富尔顿。富尔顿首先在黑猩猩身上实施了前额叶切除术。这一开创性的工作启发了葡萄牙精神病医生埃加斯·莫尼斯，后来他把这种手术用到精神分裂症患者身上。莫尼斯因为这种治疗精神疾病的外科手术方法颇具革命性而获得了1949年的诺贝尔奖。但是，由于前额叶切除术被滥用于精神不健全的患者，甚至用在有行为问题的儿童身上而最终遭到唾弃。前额叶切除术之所以被抛弃，一方面是因为它给病人带来巨大的伤害，另一方面是因为许多治疗精神分裂症和其他精神疾病的药物的出现，不再需要冒风险做脑部手术了。正是在这种情况下，德尔加多开始构思一种控制精神疾病的革命性的新方法——通过将电极植入大脑来激活或抑制神经回路，从而达到控制行为、情感和治疗精神疾病的目的。

德尔加多在马德里斗牛场上进行的戏剧性表演，以及1974年在耶鲁大学任教期间进行的其他用电刺激进行精神控制的研究让他陷入了争议的泥淖，因此他决定接受马德里医学院（即现在的拉蒙·卡哈尔医院）聘任他为生理学教授的邀请。卡哈尔研究所（1974年德尔加多加入的卡哈尔医院就在附近）是他获得博士学位的地方。这是一幢建于20世纪80年代的红砖建筑，被漆成铁锈色的铁栅栏围住，与喧闹的街道分隔开。铁栅栏围出的庭院里绿树成荫。建筑内有一把螺旋形的楼梯，连通了不大的门厅和楼上三层实验室。每个实验室都藏在一道绿色的门后面，门上有一个圆形小窗，让人感觉好像在船舱里一样。在这里，我遇到了正在访问研究所的一位科学家，他是来参加国际神经科学研讨会的。我在研讨会上介绍了自己在大脑可塑性方面的研究。他现在已经

退休了，不过据我了解，他曾是德尔加多在卡哈尔医院的同事，曾在与德尔加多同一部门的实验室工作过。

“你觉得他怎么样？”我问。

“他很疯狂。”德尔加多的前同事立刻回答。

“疯狂？‘疯狂’是什么意思？”我追问道。

“你读他的书就知道了。他疯了。”神经科学家回答我。

德尔加多发表了500篇科学论文，写了6本书。我觉得德尔加多的这位同事指的是他出版于1969年的著作——《心灵控制的肉体：迈向精神文明的社会》。[\[7\]](#)这本书颇有启发性，它阐述了这样一种可能性：通过刺激大脑来控制人类思维，并将人类带入一个精神疾病和邪恶人性都能被控制的新时代。经历了恐怖的西班牙内战，劫后余生的德尔加多相信脑部刺激可能是人类的救赎。正如他在这本书中所写的那样，他的电极将创造“人类精神文明的未来，创造一个富于同情的、更快乐的也是更完美的人”。[\[8\]](#)千百年来，宗教、规章和惩罚一直被用来控制人类本性，但都归于失败。在德尔加多看来，脑科学完全可以做到它们所无法做到的事情。

“你用‘疯狂’这个字眼，是想说他领先于时代，还是说他真的发疯了？”我问。

“他疯了！他自以为懂得人脑的运作方式，疯狂地以为自己可以用电极控制它。他也把大脑刺激用在人身上（不仅对动

物）！他的大部分工作无法重复。他甚至不知道把电极放在大脑的哪个位置。这些电极又长又软——他连该怎么做实验都不知道。他的实验结果水分太大了。”这位科学家说。他的话里充满了对德尔加多的动机和方法的不屑，以及对其逢迎非科学媒体的鄙夷。

“他把电极放在牛脑的什么部位？”我问。“如果电极放置的位置不正确，比如放到纹状体上，那么他的电击可能会使动物瘫痪。”

“或者电到网状组织！”他说。（网状结构控制着唤醒和意识。电击大脑的这个区域使动物失去知觉并不比敲打颅骨来得优雅。）“我们不知道电极放在哪里，他也不知道。他只在一头公牛身上做了实验，后来没有重复这个实验。我们不知道他在此前做了多少次尝试。”

“也许他的确领先于那个时代。”他承认，“他确实取得了很大的成就，将脑科学——电生理学——带到了马德里。他建立了一个非常强大的部门。但他是个疯子。”

在马德里短暂逗留期间，我没有找到德尔加多的笔记本或实验仪器，不过我最终找到了他之前的一个博士研究生——奥斯卡·埃雷拉斯·埃斯皮诺萨博士（请参阅第5章）。他现在是卡哈尔研究所的一名研究人员。[\[9\]](#)也许你还记得，埃雷拉斯·埃斯皮诺萨与我分享了他在海马记录到的神经振荡。他努力想找出产生神经振荡的原因，辨别这些神经振荡究竟对大脑处理信息来说是至关重要的，还是神经回路在工作时产生的副产品。埃雷拉斯·埃斯皮诺萨于1981年加入德尔加多的实验室，当时他只有21

岁。他的课题是研究与 θ 节律和癫痫有关的神经递质。德尔加多是他的导师。为了寻找神经递质，埃雷拉斯·埃斯皮诺萨使用特殊的电极来记录神经活动，刺激神经元放电，并通过显微插管对神经元周围的细胞外液进行采样。如果神经元之间的化学信号传递或神经递质水平失衡，会导致神经元异常激活或抑制，这是造成许多神经疾病和心理功能障碍的因素。因此，通过药物控制某些神经递质的水平以达到治疗目的这条路是有前途的。（例如选择性5-羟色胺再摄取抑制药，它增强了血清素这种神经递质的信号传导。）埃雷拉斯·埃斯皮诺萨在办公室的一些抽屉里翻来找出，发现一根沾满尘土的玻璃管，大小跟跑步用的接力棒差不多，里面塞满了电极。这些东西是他在德尔加多的实验室工作时用过的。他微笑着，高兴得就像在一个装老照片的鞋盒中发现一张旧时的照片一样。他把这些东西交给了我。它们看上去就像一束透明的光缆，但是随着时间的流逝，这些东西已不再如崭新的时候那般光洁耀眼了。

“德尔加多是个什么样的人？”我问。

“呃，我跟他联系很少，因为他负责整个部门。他时不时地会来找我，说：‘嘿，我有个想法，请照这个思路去做。’”

“他是一个有着强烈好奇心的人。有些人爱他，有些人恨他。我认为他的想法很棒。”他说。

“我经常看到他接受报纸和电视台的采访。这很令人惊讶！他很强势……非常有说服力——你知道，他非常非常清楚怎么跟媒体打交道。他简直就是个演员”，但也是一位非常出色的科学家，他说。德尔加多的“演员范儿”引起了一些学者的批评和厌

恶，因为他们认为科学方法就应该把个人因素排除在外，实验数据才能说明问题。任何著名的科学家在试图与公众直接交流的时候都会掉入这种“演员范儿”的陷阱。这个现象在科学家们当中被叫作“卡尔·萨根效应”（这个名词来源于广受赞誉的天文学家卡尔·萨根，他后来成了公众人物）——看来一个人不能兼得这两种身份。

埃雷拉斯·埃斯皮诺萨显然对德尔加多保持着深深的敬意。“当我回顾那些日子时，我看到的是我们现在正在做的事情——我们现在已经给动物长期植入电极，这些或多或少就是德尔加多50年前所做的事情。”（“长期植入”的电极是一种在行动自由的动物脑部植入并进行长期记录的电极，与之前我所述过的记录电极类型不同。我之前提到的那种植入电极是通过麻醉将电极插入动物的大脑中，需要固定动物的头部以保持稳定，记录完成后再将电极拆下。）

“他超前于他那个时代吗？”我问。

“我不确定。”他惊讶地说道，“我认为我们做得晚了。他那个时候是做这些事情的最佳时机。”他补充道，也暗示现代科学家已经错失良机。“现在的技术用来做那些实验会非常好，而且那是一种很好的调节行为的方法。但后来这个领域的研究停了下来，或者说放慢了脚步，直到现在才重新引起人们的关注——在不到10年前，行为主义者才开始进入电生理学领域——这个领域又火起来了。”

我说德尔加多的实验令公众感到恐惧，他也同意。“把脑深部电刺激用于难治性癫痫或帕金森病已经有20年了，但是当你与

人们谈及此事时，他们一无所知。当我与某个普通人谈这个话题时，他们会说：‘不管怎么说，我可不希望任何人在我身体里放什么东西！’这是我们仍然要克服的障碍。”他说，神经外科医师跟他合作治疗偏头痛和皮质传播抑制，但是，“当我告诉他们，‘我们为什么不给病人植入电极来做这个或那个？’他们说：‘不，不，不……你不能在病人体内放任何东西。’可是，他们已经为患有癫痫症的人做过植入电极了，他们还是会说，‘不，这在社会上是不被接受的’。”（皮质传播抑制是脑细胞中的电荷流失，以波的形式扩散到整个大脑皮质，在脑电图中看起来就是整个大脑的脑电波活动停止了。皮质传播抑制与疼痛、偏头痛和其他类型的脑损伤和疾病有关。）[\[10\]](#)

科学是一种奢侈品。一个社会只有在满足了人们所有的基本生活需求之后，科学才会诞生，因为科学研究需要大量的资金和公众支持。因此，科学与科学创新的速度并不一致。科学前进的步伐和发展的方向取决于公众或企业的资助。法规可能会使研究停滞不前。在乔治·W. 布什执政期间，美国政府于2001年宣布禁止干细胞研究就是一个很好的例子。[\[11\]](#)现在的特朗普政府也可以举出新例子：终止对气候变化的研究也许是最广为人知的了。

埃雷拉斯·埃斯皮诺萨在回顾德尔加多半个多世纪以前所做的研究时说：“每当我回首当年，都觉得我们浪费了很多时间。他们掌握了这项技术，本应在很多年前就开始研究行为控制，或者至少开始研究行为的神经基础。”埃雷拉斯·埃斯皮诺萨的白发梳成一个长长的马尾辫，有点儿像个年老的嬉皮士，却有着激进思想和独立的见解。

我想知道德尔加多是不是个马虎的人，因为他甚至不知道电极放置的位置。埃雷拉斯·埃斯皮诺萨回答：“这么说吧，甚至到现在，我们都不知道电极放置的确切位置。”他解释说，这是由于我们对大脑的详细神经回路的了解太过肤浅。他用自己确定海马回路的工作做例子，这项工作给他带来了很大的困扰。如果神经元在电极探测的时候正好沉默，那么，“你甚至都不知道有神经元在那里”。即使采用了最先进的方法，我们也没有十足的把握说已经完整地绘制出复杂的神经回路，因为我们无法保证它包括了所有连接。“在德尔加多的时代，没有人确切地知道他们记录到的信号是从哪里来的。”

我问他关于未来的问题，例如马克·扎克伯格和埃隆·马斯克心心念念的脑机接口——从此人们不再需要打字就可以通过互联网进行交流，或者使用脑电波来操作机器。埃雷拉斯·埃斯皮诺萨回答说：“我不喜欢思考未来，因为我觉得自己正在做未来的事。”对于那些科幻小说里才有的东西——比如通过脑电波或植入的电极将思想和机器联系起来，他说：“我认为这是必然出现的，我们最好习惯它们。”

德尔加多在1969年出版的书中写道：“可以对许多大脑功能进行物理控制，这是一个不争的事实，但是这种控制的可能性和局限性仍然鲜为人知。” [\[12\]](#)

德尔加多的研究

在详细介绍那些“正在做未来的事”（脑机接口研究工作）的科学家之前，让我们先了解一下德尔加多和他的同事们做了什么，以及他们几十年前的那些想法。

德尔加多写道：“大脑有负责所有心理活动——包括感知、情感、抽象思维、社会关系和进行最精致的艺术创作——的基本机制。这些机制可以通过物理和化学的方法进行检测、分析，也可以被这些理化方法影响，有时甚至被替代……可以通过直接操纵大脑来诱发可预测的行为和心理反应。” [\[13\]](#)

早在1955年和整个20世纪60年代，德尔加多在猫和猴子身上所做的实验表明：用电波控制的电极来刺激动物特定的大脑区域，可以唤醒、改变或抑制动物的侵略、统治、交配和其他社会互动行为。 [\[14\]](#) 德尔加多的工作是基于沃尔特·赫斯在20世纪20年代进行的一项开创性的研究。沃尔特·赫斯用刺激电极探入猫的大脑，并在大脑深处发现了一个点（这个部位现在被称为“下丘脑攻击区”）。当这个部位受到刺激时，动物会对笼子里的其他动物发动猛烈攻击。 [\[15\]](#) 1954年，神经外科医生怀尔德·彭菲尔德发现，用手术植入的电极刺激患者大脑中特定的点，可以中断患者的思维过程，阻止他们说话或运动，也可以让他们开口说话，让他们产生愉悦、大笑、友善、敌对、恐惧、幻觉和生动的回忆等各种反应。 [\[16\]](#)

德尔加多总结了她的发现，她说：“如果观察者（科学家）有目的地在猫、猴子或人类的大脑深处发射无线电波，在电脉冲

的作用下，动物都会产生弯曲肢体、拒绝食物或情绪激动等行为。” [\[17\]](#)

“瞳孔的直径可以像摄像机的光圈一样由电控制。” 德尔加多解释说。他发现，患者左顶皮质在受到植入的电极刺激时会引起患者的右手指屈曲。虽然他提醒患者即将开始电刺激并要求患者伸开手指，但无线电控制的信号还是胜过了患者的意图。这名男子说：“医生，我觉得你的电要比我的意志强大。”

“对内囊的头端（大脑控制运动的区域之一）进行电刺激会让人扭头，并向左右两侧慢慢转动身体，就好像患者在寻找东西一样，而且他们扭头和转身的方向和顺序看上去都很正常。” 当德尔加多问病人（被无线电信号控制）他为什么要转头时，病人对他的行为给出了明确的解释：“我正在寻找拖鞋”，“我听到了声音”，“我看看床底下”。德尔加多不仅用电极控制了人的身体，还让人的头脑为不受控制的行为编造了合理的解释。

用无线电来刺激和控制大脑非常容易，猴子都可以操作。德尔加多训练一只猴子去按笼子里的杠杆，这样会对另一只猴子的大脑产生无线电刺激。一旦按下操纵杆，被植入电极的猴子就会绕着笼子奔跑，而且协调性极好——毫无疑问，对孩子来说，这比无线遥控汽车好玩多了。

患有癫痫和其他行为障碍的儿童与成人的脑中会被植入无线电信号控制的电极。德尔加多将他的设备称为“刺激采集器”。他的设备利用脑——计算机——脑反馈的特点（即记录大脑中的脑电图活动，当检测到癫痫活动时刺激大脑），可以抑制黑猩猩和人类的癫痫发作。

德尔加多重复了赫斯早期在实验动物身上进行的攻击性实验，不过他是用猴子（这是更接近人类的模型）做的实验。给猴子大脑中植入无线电控制的电极后，他获得了相同的实验结果。刺激猴子的“下丘脑攻击区”和相关区域会使猴子发怒，并猛烈攻击笼中的其他猴子或无生命的物件。人类也有同样的大脑区域，对人类大脑的“下丘脑攻击区”进行刺激也会引起类似的发怒反应。诱发动物攻击行为的这些研究总是引起人们的质疑和批评，大家认为用电击大脑这种方式肯定会引起疼痛或刺激动物，从而激怒它们。但是，如果在人体上进行实验，人们就可以描述发生的事情。“我不知道发生了什么事，”一位患者后来说，“我感觉自己就像只野兽。” [\[18\]](#)

德尔加多总结这方面的研究说：“尽管个体和集体的暴力行为与神经元放电之间似乎风马牛不相及，但我们应该记住，人格不是由环境决定的，而是由神经组织决定的。” [\[19\]](#) 德尔加多无疑是回想起了他在战争期间和被囚禁在集中营的经历，他写道：“暴力及其极端的表现形式——战争，是由多种经济的和意识形态的因素决定的，但是我们必须意识到，那些做出决定的统治者，甚至那些服从命令开枪的人，他们的行为表现都取决于脑内的一系列电信号……”他说这些暴力行为可以通过电刺激来抑制，但随后又补充说：“人与人的关系不会由电极来支配，但如果我们不仅考虑环境因素，也考虑到使人际关系变得如此微妙的脑内机制的话，那么我们可以对此有更好的理解。”

不仅癫痫之类的神经系统疾病可以通过在脑内植入无线电控制的电极来进行电刺激治疗，心理疾病也可以通过这种方式进行研究和治疗。德尔加多描述了一名女性患者，她因为极度焦虑而

精神崩溃。她患有慢性抑郁症，并多次试图自杀。药物和心理治疗对她都收效甚微。“对丘脑的背外侧核进行刺激可以引起完全相同的（焦虑）类型。”[\[20\]](#)此外，可以通过控制施加刺激的强度来调节这名女患者所感受到的焦虑程度。“我们或许能找到轻度焦虑的电阈值，或者能做到只需转动刺激器的旋钮就可以把焦虑的水平提高。她可以用手调节旋钮来控制自己的焦虑程度。”另一名患者也进行了类似的实验。在实验中，她带着恐惧的表情不停地左右转头，仿佛在她身后有什么危险。她说自己感觉到威胁正在逼近，觉得有什么可怕的事情即将发生。

德尔加多检查了精神分裂症患者以及因无法自控而犯下残虐暴行的疯子的大脑。例如，一个“迷人”的20岁女孩“曾有10多次袭击（暴怒地扑向）别人，例如一刀扎到一个陌生人的心脏上或用一把剪刀捅进一个护士的胸膜腔”。[\[21\]](#)用普通脑电图记录的方法对这类患者进行研究实际上是不可能的，因为他们不可能忍受自己头上顶着电极坐着一动不动。因此，德尔加多在这名年轻女患者的大脑中植入了一个“刺激采集器”，这样就可以看看她在进行正常活动的时候，脑海里发生了些什么事情。他记录了杏仁核和海马的神经活动。当她突然脱离正在做的事情并开始漫无目的地走来走去时，德尔加多观察到了异常的脑电波（自发的锐波）。在这些锐波暴发的时刻，她停止说话有几分钟。“短暂的情绪激动与（脑电活动）暴发的次数和持续时间的增加有关，这种脑电活动的频率是每秒16个周期。”

德尔加多在她的右杏仁核中埋入一个电极，当施加1.2毫安的电流刺激时，她停止了正在进行的吉他弹唱，怒气冲冲地把东西摔掉，对着墙壁又踢又打。[\[22\]](#)后来，“她逐渐安静下来，

继而恢复了往常的开朗。在不同的两天里重复这个实验，都得到了相同的效果”。[\[23\]](#) H. E. 金在一名患有抑郁症和精神错乱的女性患者身上也观察到了类似的结果。[\[24\]](#) 她突然面无表情，用平静的口气说道：“我感觉自己想从椅子上站起来！请不要让我这样做！别这样对我，我不想发火……我想砸东西。我想撕点什么东西。” [\[25\]](#)

但是，用遥控人脑电活动的方法也可以起到镇静的作用，引发生动的回忆，还能减轻慢性疼痛。德尔加多写道：“通过直接干预能在知觉意识水平产生感觉的大脑结构，可以缓解顽固性疼痛所带来的难以忍受的痛苦，这种痛苦一般无法通过常规镇痛药缓解。” [\[26\]](#)

在激发愉悦感和奖励体验的那部分大脑中植入电极的动物会不停地，有时甚至是疯狂地按压操纵杆多达每小时5 000次。按下操纵杆所激活的奖励回路跟可卡因和海洛因激活的大脑回路相同，但电刺激大脑回路所带来的愉悦感最强。刺激患者大脑纵隔区域会使他们感到突然的快感并达到性高潮。“她开始咯咯地笑，并开起了玩笑，说她非常喜欢这种感觉。反复的刺激使患者变得话很多，而且很轻浮。最后，她公然提出想与治疗师结婚。” [\[27\]](#) 在WiFi和计算机芯片出现的半个世纪前，德尔加多利用他的无线电遥控“刺激接收器”来操控大脑，控制人们的行为，就像控制电子游戏里的角色一样。如今，精神控制的技术已经变得更加先进和强大，但是在跨越思维与机器之间的边界时，我们还是面临同样的道德和哲学问题。

当前的大脑刺激研究

现在的许多研究都是在小鼠身上进行的，但是在许多方面，尤其是在高级认知和神经精神疾病方面，小鼠的大脑是很难替代人类大脑的。（可以想象，人的大脑就算因受伤或疾病造成脑功能损伤，也是最聪明的小鼠无法企及的。）我们最亲近的生物学近亲（非人类灵长类动物）具有更复杂的大脑和认知功能，因此它们是研究人脑的最好的模型。在20世纪50年代和60年代，黑猩猩是这类研究的主要对象，但是现在美国和欧洲大部分地区的法律都禁止使用黑猩猩做实验[\[28\]](#)，对生病的人进行脑刺激的研究也受到严格监管。

把大脑与假肢相连

人工耳蜗可以让许多失聪的人恢复听力，是一个了不起的成功的大脑接口案例。麦克风采集声音并使植入耳蜗（位于内耳）的一系列电极刺激听觉神经。尽管人工耳蜗无法提供正常听力的逼真度，但它改变了患者的生活，它们使聋哑人能够听到声音，理解对话。给盲人提供类似帮助的设备已经处于实验阶段，它的工作原理是把来自摄像机的信号输入已经植入视网膜或视觉皮质的电极阵列中。这种方式所产生的视觉感觉是非常粗糙的，但是光线变化的感觉对于那些完全失明的人来说可能是有用的。它主要的技术障碍是如何增加可以接收信号的电极的数量。不过这仅仅是一个开始，脑机接口研究人员今后要努力实现的是神经假肢设备。

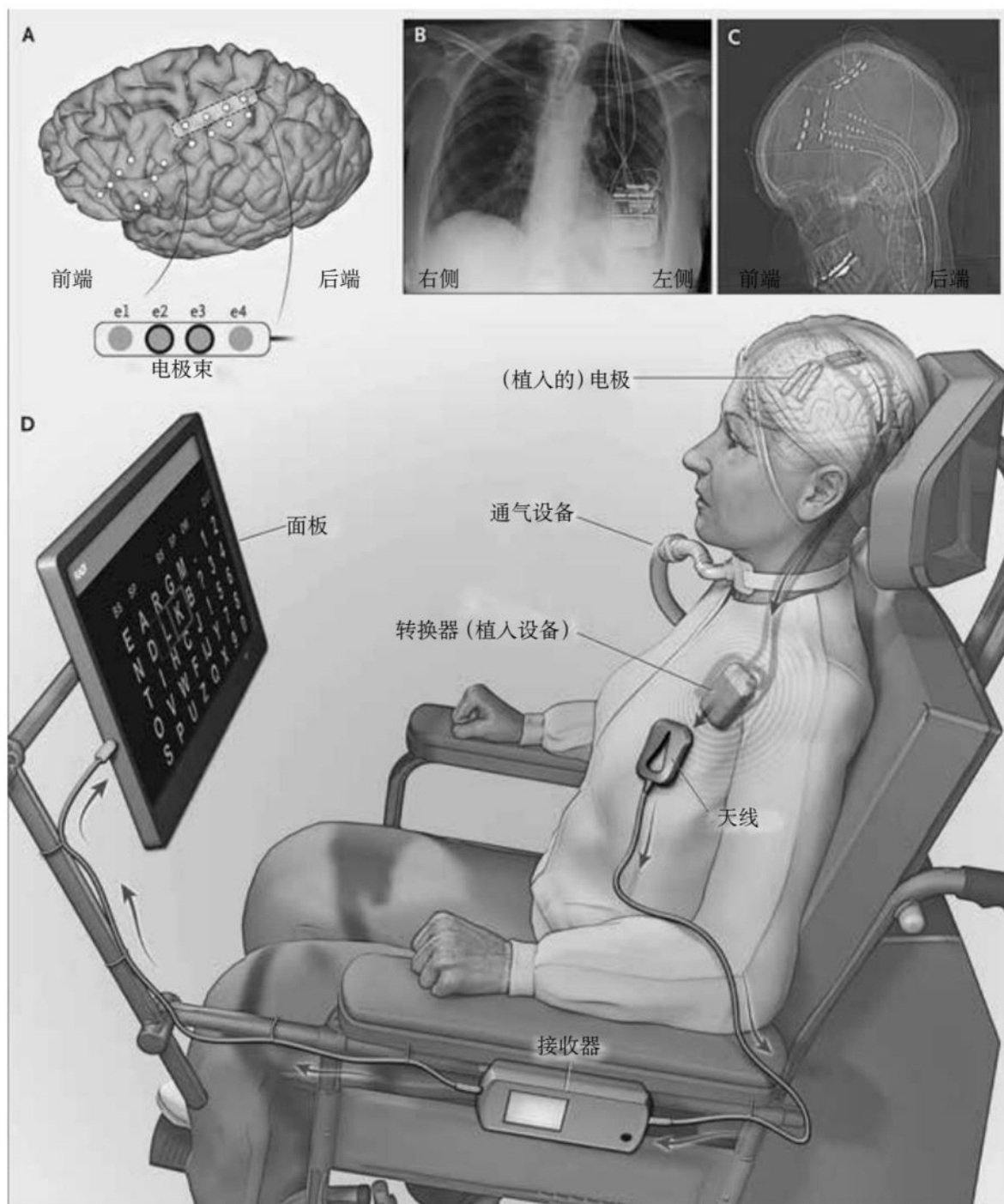


图27 脑机接口，让闭锁综合征患者能够进行交流。当人们想选择适当的字母输入时，脑皮层电图电极会感应到脑电波的变化

解锁

她瘫坐在轮椅上，空气通过脖子上的一根管子从她瘫痪的肺部进出。乌得勒支大学神经科学家埃里克·阿诺茨和他的同事聚在汉内克家舒适的客厅里。阿诺茨博士有着维京人般的体魄和一头齐肩的金发。他专注地观察着汉内克，双臂交叉着站在她前方，尽量避免由于肢体语言而影响她的反应。阿诺茨告诉我：“她非常聪明，很愿意主动进行交流。”但是，她不会说话。这位59岁的金发女子被自己的身体困住了，她因肌萎缩侧索硬化而全身瘫痪。她是2008年患病的，疾病侵袭了她控制肌肉运动的神经元。她只能控制微小的肌肉群，所以她的蓝眼睛还能透过僵硬的身体凝视外面的世界——这是一个她无法再与之互动的世界。汉内克的这种情况被称为“闭锁综合征”。

在2016年11月的神经科学学会年会上宣布了一项技术成就，同时，这项技术成就也发表在了《新英格兰医学杂志》上。这项技术能通过解密她的脑电波来帮助她冲破身体的束缚。[\[29\]](#)她每输出一个字母需要56秒钟，然后拼写成单词以分享她的想法，并将它们显示在计算机屏幕上。围在她周围的科学家们充满了期待。她一个字母一个字母地慢慢说出了自己的第一个想法：“T…… R……Y……I……N……G……”直到她拼完整个句子，她的想法才清晰起来“……沟通就像驾驶帆船一样，要见风使舵。”她告诉大家说。这个比喻一定是来源于她人生中曾经驾驭帆船迎难而上的经历。

在用脑电波进行沟通的技术取得如此突破之前，这位女性患者唯一可以使用的方法是用一台能让红外摄像头跟踪她眼睛的设备，但是这个设备很难让一个无法移动的人来精确操作，而且在许多情况下（例如在阳光灿烂的室外），它无法正常工作。



图28 一位名叫汉内克的闭锁综合征患者在她家客厅里用脑机接口设备通过输入消息进行交流

她头脑清晰，控制躯体运动的那部分大脑运作正常，但是来自大脑的信号永远到达不了肌肉，因为负责把信号从大脑传递到肌肉的运动神经元已经受到肌萎缩侧索硬化的侵袭。著名的物理学家斯蒂芬·霍金也是被这个病折磨。但是霍金的脸颊还有一点儿活动能力，他利用那些微弱的活动来控制计算机，把文本翻译成计算机合成的语音。

神经活动与计算机耦合的设备已被实验性地用在患有一系列神经系统疾病（包括闭锁综合征）的患者身上，但取得的成效很

有限。在1998年一项具有开创性的研究中，神经信号公司的神经学家菲利普·肯尼迪将一个电极阵列植入因卒中而瘫痪的患者脑中。2015年，由布朗大学神经学家利·霍赫贝格领导的一组研究人员把一个由96个电极组成的阵列植入一名患有闭锁综合征的58岁女性的大脑皮质中。在这些实验中，患者只需要集中精神，就能对电脑屏幕上出现的单词进行选择。但是，将电极植入大脑存在一定的风险。由于有巨大的健康风险，因此对人类大脑进行植入的实验遭到了法律的禁止，肯尼迪对此感到非常沮丧，于是将电极植入了自己的大脑。[\[30\]](#)他成功地获得了实验研究所需的重要数据，但由于手术后的并发症，他有一段时间无法说话。最后，由于感染，他不得不把电极取出。宾夕法尼亚大学脑机接口专家安德鲁·施瓦茨说：“任何时候，哪怕只有一根导线穿透皮肤，都有感染的危险。”他正在开发可由植入大脑皮质的电极控制的假肢设备。此外，由于需要庞大的仪器设备，先前在脑机接口上进行的各种尝试都只能在实验室中进行。

为了克服这些障碍，乌得勒支大学的研究人员开发了一种微创的大脑植入物。这种植入物可以与笔记本电脑进行无线通信，患者可以使用笔记本电脑在家或户外进行沟通。外科医生抬起一小块头皮瓣，在女人的颅骨上钻了两个手指大小的孔，然后把一条细小的塑料条滑进去。它看起来像是透明胶带，上面有四个小点。塑料条穿过颅骨上的孔，贴在了她的大脑表面。这四个小点是微型电极，它们位于颅骨下方，但是不会穿透脑组织。它们会与大脑形成良好的接触，并以高保真度来记录脑电波（脑皮层电图）。由于手术不损伤脑组织，因此风险相对较小。实际上，这个在颅骨上钻孔的所谓“环锯术”，是所有外科手术中最古老的一种，其历史可追溯到新石器时代。当时用的外科手术器械是用

石头砸出来的石片。然后，外科医生将连接电极的很细的导线从皮肤下面穿出，连接到一个小小的电子控制装置。这个电子控制装置被植入她胸部下方的皮肤里，这样就可以通过无线发射器与普通平板电脑进行通信。

外科医生将电极放在患者大脑的运动皮质上。当患者想象着捏拢手指时，这部分脑区就会被激活。通过分析脑电波，研究人员观察到了一种简单且可靠的模式。每当她想象着捏拢手指时，某些频率的脑电波的强度就会突然改变。约80赫兹的高频脑电波（ γ 波）就像被一阵狂风搅起的波浪一样涌起，而同时，约20赫兹的低频脑电波（ β 波）会突然消失。通过简单地测量持续扫过其运动皮质的 γ 波与 β 波功率之比，电脑可以察觉到她正在想象闭合手指。这位女士很快学会了在视频游戏上操作光标，而且她在手术后仅仅两天就掌握了这个技能。接下来，科学家用平板电脑向她展示了排成行和列的字母。当按顺序显示每个字母时，这位女士只需要想象所要选择的字母，就可以像单击鼠标一样选中它。

一些专家仍然担心，为了帮助这些脆弱的肌萎缩侧索硬化患者沟通而对他们进行任何手术都是不合理的。并未参与这项研究的德国蒂宾根大学脑机接口专家尼尔斯·比尔鲍默警告说：“像报道里的这个案例，这种植入手术可能给晚期肌萎缩侧索硬化患者带来未知的风险。”但是据施瓦茨说，患有闭锁综合征的许多人选择在疾病达到晚期时不使用呼吸机，因为他们无法交流，并且他们觉得自己是亲人的累赘。研究发现，像霍金一样患有闭锁综合征的患者只要能够以某种方式进行交流，就可以过上丰富且

有意义的生活。施瓦茨说：“我们应当竭尽所能地去帮助这些人……我们谈论的是生与死。”

在植入这个设备一年多以后，汉内克与丈夫和她的一个孩子住在家里，她已经能更快地输入自己的想法了。而且，这套设备在阳光灿烂的户外也能很好地工作，而视线跟踪装置就不行。

“她很高兴，”阿诺茨说，“交流的能力赋予了她更多的自由，使她变得更加独立。最近，她带着这套设备与丈夫去度假了。”

这类研究的步伐正在加快。2019年，我听斯坦福大学脑机接口研究人员克里希纳·谢诺伊[\[31\]](#)介绍了他的研究。在这项研究里，3名肌萎缩侧索硬化患者使用了点击式输入系统进行交流。这个系统通过植入运动皮质的微电极阵列来操作。与脑皮层电图不同，这些微电极可以检测单个神经元的放电。据报道，使用这种脑机接口设备，瘫痪的病人能够以每分钟24~32个字符的速度打字，而不需要动肌肉！

义眼、假肢和人工耳

20世纪70年代，在实验动物（大鼠和非人类灵长类动物）的大脑中植入电极来确定大脑皮质中神经回路的运作方式（例如，当动物移动四肢的时候）的研究方兴未艾，所以关于直接与神经系统交互的假肢装置的研究也开始加速。后来，科学家开始把合适的电脉冲模式传递给神经回路以模仿神经元激活四肢的信号，这样就可以控制猴子的大脑，让它用爪子抓住杯子。有了这些信息和技術之后，使用计算机来分析大脑中产生的神经脉冲并控制人身体运动也就成为可能，比如让脊髓损伤的人靠想象来抓住杯

子。研究人员绕过损伤部位，直接向肌肉传递适当的电刺激。这样，人就可以通过思维来控制瘫痪的肢体。类似地，来自摄像机的信号可以用来刺激视觉皮质，使盲人产生视觉。人工耳蜗的工作原理是通过麦克风采集声音并刺激内耳耳蜗的听觉神经纤维，让听力恢复。

动物研究显示出脑机接口与大脑交互的巨大潜力。例如，检测猕猴运动皮质活动的电极可以用来操纵机械臂，这样它们就可以自己进食。[\[32\]](#)在人类身上用这种方法的缺点是需要把电极植入人的大脑，而且随着时间的流逝，电极会逐渐腐蚀和移动，最终它们会失效。不过，人们对认知活动所产生的脑电波的研究取得了新的进展，因此在某些情况下不再需要把电极植入脑中。一个人只需要戴上一个装有探测电极的帽子，计算机会分析这些脑电波信号，识别人的大脑想要做什么，然后就可以操作机械臂或其他设备。

许多实验室正在进行此类研究，例如杜克大学神经科学家米格尔·尼可莱利所在的实验室。我最早是在德国的一次神经科学会议上遇见尼可莱利的，他在会议上介绍了一些尚未发表的很棒的研究成果，这些研究成果可以让瘫痪的人变成“钢铁侠”。尼可莱利是巴西队的球迷，在2014年世界杯足球赛期间，他向大众展示了这种未来技术。他是一名截瘫的男子装上了可以用脑电波控制的机器骨架，而且作为开场仪式，这位瘫痪的年轻男子还在成千上万名足球迷的注视下，为比赛开出了第一个球。[\[33\]](#)

一些人对这一成就过分苛责了，因为他们觉得这一脚踢得太没力量，而且觉得用尚有功能的肌肉控制（而不是用脑电波控

制)的机械假肢可以表现得更好。[\[34\]](#)实际上,我有一个截瘫的同事在加利福尼亚举行的一次神经再生会议的休息间隙,向我展示了他如何按一下实验装置上的按钮就可以对腿部肌肉进行电刺激,从而产生移动并行走。他坐在轮椅上,按了一下按钮,植入大腿肌肉中的电极就输出了刺激,他那条瘫痪的小腿猛地弹了起来。但是,如果踢足球的动作确实是由瘫痪病人的脑电波所触发的(而不是由头部和面部的肌肉收缩所产生的较强的电信号所触发,这些肌电信号也是进行脑电图记录时最让人头疼的),那么尼可莱利的成就还真不小。

对脑电图记录技术的改进以及对脑电波更深入的了解,使得人们利用脑电波控制假肢装置的可靠性大大提高。请记住,到达头皮的脑电波活动是数百万个神经元放电的结果,它们产生电信号,并在整个大脑的范围内传播和相互作用。因此,通过脑电图控制假体设备和计算机所面临的挑战是解决“体育场嘈杂不堪,掩盖了个别观众的声音”的问题。当体育场内人群的咆哮声传到停车场时,我们从中可以收集到一些关于体育场内所发生的事情的基本信息,但无法提取和辨别成千上万名观众的个别对话。你无法与整个体育场进行对话。精确地控制运动和感觉功能,需要监测和控制复杂的神经回路中活跃的单个神经元(这样的神经元有成千上万个),即时分析和解读这些复杂的信息流,并有选择地向成百上千个单一神经元传递适当的触发模式。

尽管植入式电极存在风险,而且当前的设备比起要完成的任务来说还显得太粗糙,但是,人们在制造具有生物相容性的多电极设备方面已经取得了巨大的技术进步。这些设备可以长时间地植入脑中,并跟成千上万的神经元同时相互作用。美国国防部高

级研究计划局生物技术办公室主任贾斯廷·桑切斯正在资助许多实验室为控制卒中、外伤或疾病导致脑损伤的人而开发假肢脑机接口设备。这些技术可以让残障人士用其他方式（例如发送电子邮件）有效地与电脑进行互动，而美国国防部高级研究计划局正在资助的研究可以使这项技术更进一步。这个项目正在研究如何将假肢传感器的信息回传给大脑，从而形成感觉反馈。如果你不知道该用多大力气，也不知道玻璃杯是否很滑，那么想要用机械手抓住水杯是非常困难的。桑切斯说：“从机械手臂接收信号并将其发送回大脑，让这个信号通路变得完整对于执行日常活动确实很重要。” [\[35\]](#)

当奥巴马于2016年到匹兹堡大学参观安德鲁·施瓦茨的实验室时，一名瘫痪的男子坐在轮椅上，操纵机械臂握住了美国总统的手。[\[36\]](#) 只需要用脑子去想，这些想法就能被电脑提取出来进行分析，从而让瘫痪的人实现他梦寐以求的事——再次与现实世界进行互动。当年28岁的内森·科普兰想象着与总统握手时，他看到他的机械臂完成了这些动作。而且，当他用机械臂握住总统的手时，他再次体验到了珍贵的触摸感。匹兹堡大学神经外科系的医生伊丽莎白·泰勒——卡巴拉在内森的运动感觉皮质中植入了四个很小的微电极阵列，每个电极阵列只有大概衬衫纽扣的一半大小。机械手配备了感觉反馈功能，可以激活植入内森感觉皮质中的电极。所以，当总统握住机械手的时候，他感觉就像自己麻木的肢体复苏了一样。[\[37\]](#)

内森的脊椎在一次车祸中受到了损伤。“我的每个手指几乎都有感觉，这真是一种奇怪的感觉。”他说，“有时候感觉是电动的，有时感到有阻力，但是在大多数情况下，我能以一定的精

确度区分大部分手指头。感觉就像我的手指被触摸到或被推动了。” [\[38\]](#)

未来的先锋：在脑中植入电脑芯片的人们

内森·科普兰，那个用脑机接口驱动的机械臂与奥巴马总统握手的人，有点儿冷幽默。他爱玩电子游戏，打了耳洞，一脸浓密的黑胡子。他暴躁的脾气有点儿让我吃惊。“这件事发生在我18岁那年。”他说，“它把我的生活彻底毁了。每个与此有关的人都受到了连累。”

谈到已经在眼前徐徐展开的未来，内森预测，脑机接口将改变脊髓损伤患者和其他外伤致残者的生活，一个新的时代即将到来。“有一天它会像《星球大战》里的情节一样。当你醒来，你知道，就像‘你遭遇了一件可怕的事。你瘫痪了。你的手不能动了，但是我们已经把它修好了……你的保险公司已经替你支付了。没事儿了。’”

我很高兴见到内森和其他几位第一批吃螃蟹的人——他们勇于尝试在大脑中植入实验设备来控制假肢。他们应犹他州立大学脑机接口研究员弗洛里安·佐尔茨巴赫的邀请，于2018年11月在圣迭戈举行的神经科学学会会议上分享了他们的经验。这些了不起的人来自全美各地，他们坐着电动轮椅，医护人员在旁边守护。他们从患者的角度向神经科学家们提出对脑机接口的看法。显然，他们热切地希望人们对脊髓损伤有更深入的了解，希望激励科学家们能开发出更好的设备，使残障人士能够通过大脑回路与计算机直接连接，恢复某些已经丧失的功能。

“我32岁。”内森说，他半躺在四轮电动轮椅上，身上盖着毯子。“18岁那年，我出了车祸，颈椎骨折了。我现在是从C5以下高位截瘫。”

C5是脖子上7块椎骨中的第五块。这5块椎骨称为颈椎，从C1开始编号。它们支撑着颅骨，从脖子一直延续到肩膀。胸部及以下的椎骨分别是12块胸椎、5块腰椎和5块尾椎骨。脊髓受伤的位置越高，造成身体运动麻痹和感觉丧失的区域越大。C1或C2的骨折，会导致四肢瘫痪并危及生命，通常要靠呼吸机维持生命，例如美国演员克里斯托弗·里夫就是因骑马摔伤了这个部位。C6或C7椎骨受伤会导致截瘫，患者的上肢有一定的感觉和运动能力，但躯干和下肢完全瘫痪。

“我的皮质中植入了四个电极阵列。我是第一个在感觉皮质中植入两个电极阵列的人。”他不无自豪地说道。

南希·史密斯是一位金发的中年妇女，她分享了自己的故事：“10年前，我和女儿一起参加女童子军的旅行，结果与一辆18轮的大卡车正面相撞。”南希生命垂危，被空运到医院抢救。

“我的鼻子塌了，锁骨骨折，左腿股骨完全骨折，肋骨断了几根，内脏出血，最严重的是脊髓损伤——我不得不做了C3、C4和C5的融合术（椎骨融合术是骨折后固定脊椎的外科手术）。我再也不能动了。”

“我还没有完全明白这一切意味着什么——没想到，现在我的生活发生了这么大的变化。我因此出现了创伤后应激障碍的症状。”南希艰难地分享了因自己的生活突然间崩溃而带来的焦虑

和沮丧。“我是一个母亲，也是一名高中老师。我是一个非常积极向上的人，现在却完全不能自理，所以我非常不习惯。”

就像一个熟练的老师在为学生讲课一样，南希讲述了自己的故事。她不是为了博取同情，而是要告诉大家生活给她的教训。

“我失去了一切。我已经教了22年书。我真的很喜欢和年轻人在一起，帮助他们渡过一生中最艰难的时光，我非常想念他们。我并没准备退休，但是我已经不可能回去上班了。我的手或腿没用了，当然也不能再为教室里的年轻人提供帮助。”

肉体上的创伤令人痛苦，但对南希来说，残疾才是最难以承受的。“经历了这样的事故以后，从此不得不让别人为你做每一件事……从擦鼻涕到洗头，呃，大小便失禁，这都是非常令人沮丧的。我因为感到难堪而流过很多眼泪。”

她分享了在事故后进行康复的几个月中所感到的绝望和那种黑暗的心境，当时她的医生和丈夫甚至担心她会做出什么不理智的事情来。“因为沮丧和焦虑而不负责任。”她解释说，“没人可以让我释怀。我丈夫不会把后门开着让我独自一人留在家里，因为我们有一个游泳池……就是到了那种地步。”

突然，她的情绪从绝望转化为愤怒，她说：“我如此努力地获得这些学位，获得知识，成功地做我自己，难道就是为了让生活把所有东西都拿走？这不公平。”

这次事故夺走了她的能力、她的职业和她的独立性，也夺走了她意料之外的一些东西。“最艰难的事情之一就是你失去了很多朋友。”她回忆起，朋友们一开始还会带玉米卷饼砂锅来看望

她，来帮帮忙或者表达慰问，但后来他们不来了。“我不知道为什么。他们不能忍受见到我变成这个样子？他们来过一两次就不再来了，这很让人伤心，很让人伤心。”

但是，南希和其他自愿参加脑机接口研究的人都是勇敢而坚定的战士。“我们知道生活必须继续下去。这件事发生时，我的女儿才14岁。多可悲啊！女儿正在这个年纪，母亲却出事了，再也没有比这更糟糕的事情了。她非常热衷于女童子军和水球运动。她的成绩很不错。我们不想失去这些。想到要失去这些，我就害怕得要命。我就要失去她了。”

母性唤起了她强大的决心，南希要保护自己的孩子——无论她自己的处境多么艰难。“当你只能躺在走廊上时，你是很难尽父母的责任的。这可不成。”她叙述了自己如何坚持参加女儿的水球比赛和女童子军活动。“为了她，我必须在那里。我们必须继续前进。”

会议的另一位参与者伊恩·伯克哈特于1991年出生于俄亥俄州的哥伦布市。伊恩是一名运动员，也是一个探险家，他曾是一名童子军和曲棍球守门员。2009年，他刚进入俄亥俄大学上学。暑假期间，他到北卡罗来纳州的外滩冲浪，我们大多数人都玩过很多次，但是他却撞到了一个隐藏的沙洲，摔断了脖子，从此四肢瘫痪。医生告诉伯克哈特，他还能耸耸肩膀，但在他的余生中，他的脖子以下将无法动弹，也感觉不到任何东西。

当他说这番话时，我发现在他的左耳上方贴着一个看起来像黑色塑料瓶盖的东西，连接处用螺栓固定在颅骨上。这东西把植入他大脑皮质的电极与计算机连接到一起。与南希和内森一样，

伊恩大脑中的电极也不是德尔加多时代那种像巫蛊娃娃一样扎满电极针的垫子。人的大脑皮质只有3毫米厚，所以这些被称为“犹他阵列”（因为它们起源于犹他大学）的电极，看起来就像一小块尼龙搭扣。[\[39\]](#)“尼龙搭扣”上的“毛刺”实际上是128个细小的毛状微电极，这些电极只有1毫米长。

用皮带绑在伊恩瘫痪的前臂上的东西看起来像是罗马角斗士手臂上的护具。植入脑中的电极采集他心理活动的电信号并输入实验室的计算机，再通过手臂上的这个装置，透过他的皮肤刺激神经和肌肉，他的手臂就可以根据脑海中的想法移动。电脑会分析他的意图——他的思考过程与你想去拿咖啡杯的想法没有什么不同——然后将指令发送到他前臂的电极，刺激适当的肌肉，以执行所需的手部动作。但是，那些我们平时无意识就能做到的事，对伊恩来说却必须下意识地专心去想。

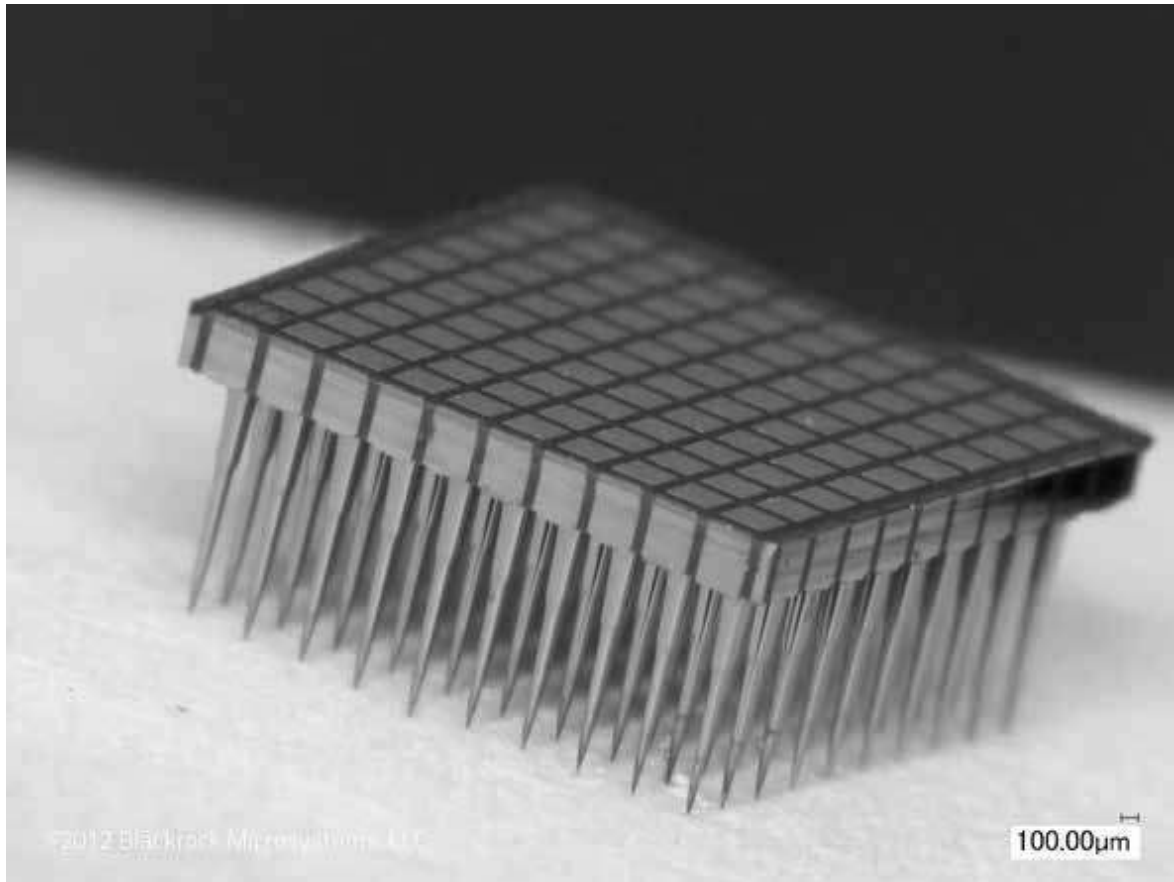


图29 微电极“Utah阵列”植入大脑皮质，用于脑机接口和控制假肢。这种电极阵列提供了128个通道，用于记录神经活动。这种微型电极只有大约1毫米长

“当我第一次能够让自己的手动起来时，我感到特别震惊。我已经有三年半没有动过我的手了。现在它动得如此顺畅，仿佛回到了我受伤之前。我只需要想我要做什么，然后我就可以做到。这个系统实际上是用人工脊髓替代了我的脊髓。”伊恩说。

2016年，关于这一成就的科学论文发表了。在随后的新闻发布会上，团队成员之一，费恩斯坦医学研究所的查德·布顿说：“这是有史以来第一次，一个完全瘫痪的人只需要靠想象就能够恢复运动功能。”[\[40\]](#) 这项技术不仅可以帮助脊髓受损伤的

人，而且可以使那些因卒中或颅脑损伤而瘫痪的人重新获得对麻痹肢体的控制。

南希的脑内植入物没有与刺激肌肉的设备相连，而是被连接到一台计算机上。她正在学习如何通过自己的思想来控制设备。在电脑屏幕上，模拟的机械手会对她心里想的指令做出回应。当南希终于能够靠自己的想法让机械臂上指定的手指动起来时，她欢欣鼓舞。从她在车祸中折断了脊椎以来，这是她第一次能够与外部世界互动。训练的任务是要用电脑屏幕上的模拟机械臂的特定手指去触摸键盘上的某个点。“我能够摸到那些点，但要看我用哪个手指。我在尝试的第一天就做到了！”屏幕上的机械臂可以很容易地转换为真正的机械臂，就像内森用来跟奥巴马握手的机械臂一样；也可以转换为屏幕上的虚拟电脑键盘，让南希能够输入文字或命令来操作其他设备，这对她重新获得独立很有帮助。

南希微笑着说：“我在受伤前可是会弹钢琴的哦。”令她感到高兴的是，科学家们为她编写了一个电子键盘的程序，于是南希开始演奏《一闪一闪亮晶晶》，这是她通过脑海中的想象完成的音乐表演。

“我可以靠想象来弹钢琴，就像我的手真的在键盘上演奏一样，这对我来说真是太神奇了！”当南希告诉我们，给键盘编程的技术人员没有经过音乐训练时，她笑了，因为技术人员不清楚中央C键的位置在哪儿。当南希用她的想象去弹奏中央C键时，发出了错误的音符。她意识到了错误，笑了起来。然后技术人员迅速对键盘重新编程，把中央C键调整到位于虚拟的右手拇指下方，那才是它在钢琴上的正确位置。

犹他州盐湖城的凯文·沃尔加莫特小心翼翼地从一个箱子里捡起一个鸡蛋，然后仔细地将其放到另一个空箱子里。如此简单的任务没有什么特别之处，任何人在厨房里都可以不假思索地做到，但是在这个案例中，拿取鸡蛋的手是一只仿真的塑胶机械手。

由于一次电力事故，凯文做了两次截肢手术，他失去了一只手和一只脚。他现在正在操作一只假手，就像用自己的手一样灵活，不过假肢中的传感器和电机是通过凯文残肢上的电极（探测神经与肌肉信号）与大脑相连接的。与直接在大脑中植入电极的方式不同，把电极与周围神经系统相连具有很大的优势。它可以利用人脑的强大计算能力，通过适当的神经通路把信息传递到四肢，从而与世界进行互动。如果你曾经提心吊胆地看过一个孩子笨手笨脚地去拿生鸡蛋，却把鸡蛋打破，那么你就会明白用人造手臂完成这项任务的要求有多高了。如果不是因为这种假肢装置中装有感应器的话，凯文几乎不可能在不破坏蛋壳的情况下拿起鸡蛋。这些感应器会刺激凯文的感觉神经，并把信息反馈给大脑，从而使他恢复很大一部分的触觉。我们神经中的信息是通过动作电位传递到大脑的。无论这些动作电位是自然触发还是通过电刺激触发的，引起的触摸感觉对大脑来说都没有区别。

在安装假肢之前，凯文要先训练自己控制计算机屏幕上的虚拟机械手。“第一次体验到这种感觉时，我几乎流下了眼泪。”凯文在他观看了自己操作假肢的视频后说，“这是自截肢以来我第一次感觉到握住我妻子的手。”

经过14个月的实验研究后，医生从凯文身上移除了实验装置。“不幸的是，他们已经把所有的植入物都取出来了，所以我

很期待他们下一阶段进行的无线设备的研究，这样我就可以把它带到实验室外了。”

我希望这项技术所创造的“奇迹”的表象不会喧宾夺主，在这里我所希望的是人们能对所发生的事情有更深刻的理解。他们是人，是真正勇敢和无私的人。为了能帮助别人，他们愿意献身并承担真正的风险。回想当初，在面临是否愿意将一种设备植入自己大脑以供神经科学家进行实验研究的重大抉择时，伊恩很矛盾。其他人也经历过同样的矛盾。“我愿意承受至少两次神经外科手术吗？”伊恩陷入了沉思。

内森补充说：“这对受试者有很多要求，因为它具有侵入性，特别是还要在你的脑袋里塞个东西。”

伊恩在回忆手术后的恢复过程时说：“我头疼得很厉害。我的意思是，这毕竟是脑外科手术，会有很大的风险。”

内森说：“你必须对康复过程的艰辛有充足的心理准备。”不过，他又补充了许多人可能会忽略的一件事——这个不可逆的决定会对亲人产生什么影响。“一些家人可能不同意你的决定。”内森的母亲非常关心自己儿子的幸福，她坚决反对他冒着有可能遭受更多痛苦的风险，去做科学实验的小白鼠。“在我对她说我决定做这件事之后，我妈妈好几个月都不跟我说话。”内森进行脑部手术时，他的母亲并没有陪伴在他身边。

我曾提到过，内森是第一个在大脑中植入四个电极阵列的人，但是我没有解释原因。“我的第一次手术进行了12个小时，我的恢复情况确实不容乐观。”

经过这么长时间的手术，恢复可能很困难。“经过这么长时间的麻醉，你不可能感觉好受的。我过得不愉快。我想我对奶奶——是她来陪我的，因为那时候妈妈不愿意和我说话——说的第一句话是，‘也许妈妈是对的’，因为当时我疼得很厉害。”

内森的睡眠出现了很大的问题，他还经历了其他严重的并发症。“我患上了失语症。所以，有时候我会突然词不达意。那太令人沮丧了，我感到很焦虑。”

接受言语治疗后，内森最终克服了失语症。内森在谈到言语治疗师时说：“他是一个很棒的人，专业能力超强。”

除了脑外科手术的技术障碍之外，神经外科医生面临的一个更大问题是，每个人的大脑都稍有不同。在相同的解剖部位，一个人的大脑不一定跟其他人的大脑行使同样的功能。这就是为什么癫痫或其他脑部疾病患者在做手术去除脑组织之前，神经外科医生要在患者还清醒的时候先用电极检查他的脑部功能，并绘制出患者大脑皮质的功能图谱。内森的第一次植入手术失败了。

“第一个植入电极的位置不正确，因此效果不好。他们给了我一些选择：‘你现在可以先用着它。我们可以看看电极阵列能做到什么程度……’”

或者，“你可以放弃”。

第三种选择是：“或者……你知道……我们可以再做一次。”

内森最好的朋友（是他送内森去的医院）听了他和医生在床边的谈话。在回家的路上，内森告诉他的朋友说：“我知道你想说什么。因为从高中以来，你一直是我最好的朋友。”

没有丝毫犹豫。“是的，我们决定重做。”内森说。当时他还在努力克服失语症。

内森浑身的肌肉无法动弹。他就像一个执行任务的勇敢的海军陆战队员一样，无论风险多大，都会义无反顾地冲上去，只为了取得成功。“我对自己说，总得有人去做，我可以的。为什么不呢？万事开头难。”

其他人都有同样的想法和勇气。凯文说：“我并不是真的认为，参与这项研究，自己一定可以从中受益，但是研究的成果在未来可能会改变年轻人的生活。”

曾是鹰级童子军的伊恩也表达出同样无私的情怀，他说：“我觉得，如果别人处在我的情况下，他们也同样会义无反顾的，但他们可能没有机会参与这样的尝试。这是在为子孙后代着想。”

就像所有外科手术一样，患者必须知情并且医生必须征得他们的同意。医生和科学家必须向患者或实验对象充分地解释所有潜在的风险。内森说：“我想都没想就同意了。”他说他的承诺非常坚定，“我甚至都没有读他们寄给我的信。那封信里说什么已经不重要了。这不一定让我好起来，但我希望它可以让别人过得更好。”

内森就像一个骑牛大赛上戴着手套、牢牢控制住野牛的骑手，有那么一点儿牛仔的幽默。他对风险嗤之以鼻：“风险……我的意思是，吃抗生素都可能会要人命。什么事都有风险。”

内森的第二轮手术出了名。他说：“谢天谢地，第二次手术快多了，因为我的头上已经有一个洞了。有时候，我还是会出现失语的症状，但是我知道怎么解决。”对于手术的副作用，他轻描淡写，就像一个在骑牛大会上得胜的牛仔，轻松地用牛仔帽拍去裤腿上的灰尘一样。

你现在应该有了一个比较清楚的了解。无论那些博人眼球的文章里说过些什么，神经科学家其实至今还不知道思想、情感和意图究竟是如何编码的。这种编码以神经冲动的形式穿过神经回路，变成振荡的脑电波扫过大脑组织。神经编码仍然是一个谜，但是，现在的电脑可以利用“高级机器学习”来识别与特定感觉或运动功能相关的脑电活动模式，并将这些模式作为可靠的信号来指挥假肢设备执行功能。这是一个复杂的过程，解码神经脉冲远不像读取计算机代码那样简单。

在机器学习中，先进的电脑的计算功能已经够强大了，但是人脑的功能更强大——它能学会控制假肢设备。机器学习的确令人印象深刻，但它毕竟只是在模仿人类大脑的学习过程。人脑的学习在很大程度上是一个无意识的、反复试错的过程，就像我在神经反馈训练中学会控制自己的脑电波时所经历的那样（请参见第5章）。我的大脑做到了，但是我说不出它是怎么做到的。装有脑机接口的患者都要通过神经反馈训练来学习如何让大脑与计算机进行互动。

大脑要借助人工植入物来学习如何操作与电脑相连接的设备，这是一个非常复杂的过程。南希说：“我感觉精疲力竭，必须马上回床上休息。”为了让大脑学会与硬件进行通信，她花了大量精力进行神经反馈训练。“我必须真正专注于自己所做的事情。”

凯文也同意。“太累了！真是太累了，不仅是我手臂上的肌肉感到累，而且精神上也感到疲惫不堪。”在学习控制机械手的过程中，他肯定弄碎了很多鸡蛋。

为了使瘫痪的手臂恢复运动功能，伊恩在学习控制腕部的设备时也有相同的体验。“学习如何控制它非常费劲。感觉就像是经过了10个小时的考试，就是精疲力竭，不想做任何事情。我的肌肉因长期不动而萎缩了很多，所以训练时体能上也有大量的消耗。现在情况好多了。对我来说，这已经习以为常。”他说。

凯文看着做这项研究的科学家的眼睛说：“我对您所取得的成就感到万分钦佩。”

伊恩更是对他们佩服得五体投地。他从未指望做了脑机接口植入后会从中受益，但是令他和医生惊讶的是，他不但能克服脊髓损伤，利用电子设备直接刺激手臂的肌肉，而且在经过多次神经反馈训练之后，伊恩还学会了如何在没有腕部设备的情况下移动瘫痪的肢体！

后来，伊恩坐在轮椅上和我见了面。我介绍了自己，并递给他一张名片。他举起那只曾经瘫痪的手臂，用手指捏住我的名片，朝两面都看了看。尽管他的手臂已经瘫痪了多年，但是，经

过神经反馈训练后，电刺激可能活了闲置的神经通路，也可能激活了的新通路。曾经四肢瘫痪的伊恩现在可以操纵轮椅的操纵杆了，也能够轻松地刷信用卡，他甚至能驾驶一辆装有特殊设备的汽车。



图30 伊恩·伯克哈特借助脑机接口设备，用瘫痪的手抓起杯子。他因脊髓受伤，造成颈部以下瘫痪。植入他运动皮质的电极采集神经活动信号并启动臂带中的电极，刺激适当的肌肉收缩并让手和前臂产生所需的运动

通过电刺激，伊恩锻炼了他萎缩的手臂肌肉，使它们恢复了一些力量，也恢复了一些神经功能。现在，研究人员把电刺激的方法应用于脊髓损伤患者，再加上物理疗法，可以使以前被认为是无可救药的患者得到很大改善。一些脊髓损伤的患者在电刺激和物理疗法结合治疗一段时间后，已经恢复了一定的行走能

力。[\[41\]](#)电刺激是直到最近才被用于脊髓损伤的，因为之前人们认为一旦脊髓断了，再去增强肢体的肌肉力量也是毫无用处的。但是，大脑的目的是控制身体与世界互动，只要有任何方法可以学习，它都会去学的。

“我知道参加这项研究可能不会从中得到任何好处。”伊恩说，“能推动科学前进确实是一件造福子孙后代的事情。何况我已经从中受益了。我恢复了一部分控制肌肉和协调的能力，这改善了我的生活。我已经搬出父亲的家，独自一人居住了。我基本上可以独立生活。对我来说，那是我受伤后真正想要的东西。需要别人不停地为你做事情确实很容易令人厌烦。能自食其力的确带给我很多快乐。”

当前无线通信技术的进步将使植入脑机接口的患者能够做更多的事情。内森说：“我希望这项研究能更进一步，让我可以在家中使用这些设备并独立做事。”借助脑机接口设备，内森喜欢上了制作工艺品质和玩电子游戏。

所有的与会者都说，他们在这项研究中得到的益处超出了他们的想象。冒着脑部手术的风险并承受了交互训练的艰辛，这除了让他们的身体受益外，参与科学研究还为他们带来了一些宝贵的财富，而这些宝贵的东西曾经一度被悲惨的事故剥夺了。它让他们每个人目标明确，让他们不再孤单，每个人都成了团队的重要组成部分。他们和科学家成了密友。尽管经历了磨难，但他们每个人都毫不犹豫地表示愿意再次参与实验。

内森说：“回头看，只要他们愿意，让我做多少次手术都行。如果他们说：‘嘿，我们有了新东西。你想把它放进去

吗？’我肯定会说：‘想啊，来吧。嘿，不就是把一个有机玻璃盒子和一个开关放在那里吗？’”

伊恩补充说：“它给人以希望。一旦我再次看到自己的手能动了，我就看到了隧道尽头的光明。现在，我们只需要继续努力就可以了。”

“这是现实中发生的事情。”内森说，“我很荣幸能参与其中。希望我们能做得更好。”

然后，拥挤的大厅里每个听众都站了起来，向他们致以雷鸣般的掌声，这是在科学会议上没有发生过的事情。这是一次感人的经历。看到这些先驱者不但没有被惨痛的事故和严重的肢体残疾击倒，反而勇敢无私地为造福人类的科学和技术献身，这让每个人都感到震撼、感恩和惭愧。参与会议的所有人都感到团结一致，目标就是脑机接口的未来，大家都期待看到这一天的到来：

“嘿，没问题。一切都弄好了。你的保险可以报销。”

会思考的机器

想象一下，有一个黑红相间的棋盘，转45度，使其变成菱形，棋盘的角位于上下左右四个位置。现在，用频闪灯照射棋盘，就像在迪斯科舞厅里一样，这就是最早的基于脑电图的脑机接口系统。它是由计算机科学家雅克·维达尔在20世纪70年代初期在加利福尼亚大学洛杉矶分校开发的。[\[42\]](#)维达尔用五个电极来记录盯着闪烁棋盘的人的脑电图。每次灯光闪烁时，图像引发的脑电波都会在大脑中产生视觉诱发的反应。也就是说，在这

个例子中，图像闪现后大约100毫秒，脑电图就会出现明显的响应波纹。然后，维达尔让受试者盯住棋盘的一个角。由于棋盘的图案模式投射在视网膜上的不同位置，这取决于棋盘的哪个角位于视网膜中央的中央凹，因此在视觉皮质中产生的脑电图反应也不同。如果你的眼睛盯着左边的角，那么棋盘的其余部分会落在视网膜中心的一侧；如果盯住右边的角，那么棋盘其余部分的图像会落在视网膜的另一侧。因此，维达尔可以从计算机对脑电图响应的分析中看出这个人正在看棋盘格的哪个角。有了这些信息，他便可以让被试对象仅仅靠脑电图响应（例如向左看，朝左走）的引导就走出迷宫。计算机通过分析诱发的脑电波来确定受试者正在看什么地方，然后将光标移动到类似视频游戏的迷宫中相应的位置。在当时，需要一台大型IBM系统 / 360大型计算机来处理脑电图实时的监测、分析和控制。不过，脑机接口系统运行结果还算不错，准确率达90%。

后来的脑机接口设备利用了脑电图的其他特点，例如，在“P300响应”中，如果受试对象遇到一个新颖的或对其有意义的事件，300毫秒（“300”）后，就会出现一个正（“P”）的电压峰值。[\[43\]](#) 这个事件可以是声音、图片或句子中一个出人意料的词。“P300响应”反映了与任务相关的大脑认知过程。人们可以利用P300的脑电图特点来发出信号，命令计算机采取某种行动——移动虚拟操纵杆在迷宫中导航、控制视频游戏、挑选字母拼写、使用脑电波打字或操作机械臂。[\[44\]](#) 其他用于脑机接口的脑电图信号类型还包括那些当运动出现或想象运动时会发生改变的脑电波，例如感觉运动节律[\[45\]](#)和 μ 节律或 β 节律。[\[46\]](#) 如本书开头章节所述，这种能够探知人类意图的方法还得归功于

一个世纪前，理查德·卡顿和阿道夫·贝克在动物中发现了脑电波的存在，而且他们还注意到，脑电波的活动通常在移动肢体或感官受到刺激时会被抑制。

其他非侵入性的监测神经活动的方法也被用于脑机接口，包括fMRI [\[47\]](#) 和脑磁图。 [\[48\]](#) 脑磁图类似于脑电图，不同之处在于它通过头皮电极检测波动电场的磁性成分。因为所有电磁场都具有电和磁两种分量，所以脑电波也具有磁矢量。近红外光谱（NIRS）可检测到神经活动变化引起的血氧含量改变，通过头上的传感器阵列，它也能被用于脑机接口。 [\[49\]](#)

在脑内植入多电极 [\[50\]](#) 或者通过脑皮层电图将多电极放置在大脑表面（而不是头皮），可以更好地检测到神经活动。 [\[51\]](#) 但这种侵入性手术仅适用于病情比较严重（例如瘫痪）的个体，或因癫痫而必须接受脑外科手术的人。

由脑电图驱动的脑机接口有着广泛的应用，它们可以通过多种方式来改造世界，这一切只需要靠思维活动。例如，奥地利格拉茨科技大学的格特·普富尔谢勒利用头皮电极收集人的心理活动，通过脑机接口技术，可以做到在虚拟现实环境中为人们导航。亚利桑那州立大学的“智慧型机器人与控制”实验室主任帕纳约蒂斯·阿特米亚蒂斯正在进行一个由美国空军和美国国防部高级研究计划局资助的脑机接口研究项目。在阿特米亚蒂斯的研究中，人只需要靠思维就可以通过脑机接口装置控制无人机。他们的实验结果是一个生动的例子——一个人靠想象力就可以做到真人驾驶所做不到的事——控制无数的无人机攻击敌人。当受试者在观察多架无人机飞行并想着使它们一起移动的时候，电脑会

通过头套上的128个电极来检测受试者大脑的电活动。随后，计算机向无人机发送命令并控制其飞行。大脑和无人机之间的认知循环将思想转化为行动。这种能力令阿特米亚蒂斯感到惊诧不已，他说：“我们虽然有手有脚……但（通常）我们不能控制一个群体。令我惊讶的是，大脑会注意到这一点，而且它可以适应（控制多架无人机的群体活动）。”[\[52\]](#)但它就是可以。想象力是没有边际的，输入计算机的脑电波可以把想象力变为现实。

大脑之间的传输

通过无线电信号激活大脑植入物进行精神控制已经有很长的历史了，但是，结合非侵入性的方法来记录并解读脑电波，并让受试者脑电波活动发生改变的能力，让人们实现了利用脑电波在大脑间传输信息的梦想。

2015年，当我到西雅图访问神经心理学家尚特尔·普拉特在华盛顿大学的实验室时，她告诉我说：“我们可以利用从一个人的大脑获得的信号与另一个人进行交流。我们可以将信息编码到人脑中。”普拉特与丈夫安德烈亚·斯托科合作，他是华盛顿大学学习与脑科学研究所的心理学家。斯托科和同事用一个脑电图电极帽来记录一个正在玩“射击”电子游戏的人的脑电波。然后，斯托科和同事通过互联网把一个玩家的大脑信号传输到远在校园另一端某个房间里的电脑，并让另一个受试者头部上方的经颅磁刺激线圈启动，同时这个受试者也在观看同样的游戏场景。磁刺激线圈直接放置在信号接收者控制手部运动的那部分大脑的上方。通电后，电磁脉冲会改变处于其射线焦点处的神经元的电活动，从而使受试者的手做出反应。亲自参与了实验的斯托科描

述了当远处的另一个受试者在考虑按下视频游戏中的按钮进行射击时的感受。“我甚至没有意识到我的手已经动了。我只是在等待某些事情发生。”他说。他的同伴的意图是用脑电波编码的，这使得斯托科会“以心灵感应”的方式扣动扳机。[\[53\]](#)用相同的技术激活视皮质后，斯托科和他的同事可以利用大脑到大脑的传输，让两个人进行远程视觉合作，共同识别电脑屏幕上显示的对象。“发件人”看到某个物体的反应所引起的脑电图通过经颅刺激会使“收件人”感觉到一道闪光。“如果我刺激你的视觉皮质，你就会（因此）产生视觉，那么你是用大脑在看，而不是用眼睛来看。”普拉特告诉我。[\[54\]](#)

斯托科进行脑对脑信息传输的工作是脑机接口获得成功后的自然产物。脑对脑通信通过检测一只动物的大脑神经活动来判断其意图，然后使用计算机去刺激另一只动物的大脑，让它产生响应。通过脑机接口设备检测一只猴子的运动皮质中的神经活动，然后根据这些信息给另一只猴子施加皮质内电刺激，这样两只猴子就能够在虚拟现实任务中一起行动。在感觉皮质和运动皮质植入了电极的两只猴子通过脑机接口联系在了一起。猴子要完成的任务是用一只虚拟的手臂去探索一系列虚拟物体，并选择具有特定纹理的对象以获取奖励。两个动物的大脑在这项任务中相互联系并合作，向人们展示了两个灵长类动物的大脑如何通过直接的双向交流来操作工具。[\[55\]](#)



图31 用脑电波进行脑对脑的交流。在上图中，研究人员正在记录一位受试者的脑电图信号。这位受试者正在观看电脑游戏（位于画面之外）。研究人员用采集到的脑电波命令远处的另一个人在视频游戏中进行射击。玩家的脑电波通过互联网传到接收方，并通过经颅磁刺激使接收方的运动皮质产生响应。下图显示，通过笔记本电脑上的Skype软件可以看到脑电波的接收方，经颅磁刺激线圈位于他的头顶

由于许多不同种类动物的大脑都使用相似的神经机制，因此，不仅在人与人之间或相同物种的动物之间可以进行大脑到大脑的信息传输，而且在不同物种的大脑之间也应该可以进行信息传递。2013年，韩国的研究人员实现了人与动物之间的脑—脑交互。当实验中的人在脑海中形成让大鼠动尾巴的意图时，大鼠的

尾巴果然抽动了。[\[56\]](#)而且，这个系统使用的是完全无创的方法来获取人的思想，并将其加诸大鼠的大脑。为了达到这个实验目的，可以将一个微电极植入大鼠的大脑。但是如果要在人与人之间实现脑对脑传输，人们就不情愿将刺激电极植入自己脑中

了。

在这些实验中，人的脑电波由脑电图电极记录，电脑分析和判断这个人什么时刻希望让大鼠抖尾巴。然后，计算机向设备发送指令，刺激大鼠运动皮质中控制尾巴运动的神经元。经颅磁刺激和经颅直流电刺激（tDCS）可以通过非侵入性的方法（就像斯托科做的实验）来对人脑的神经元放电进行调节，但是这些技术会影响到相对较大的脑区，因此限制了“编码”到接收者大脑中的信息的类型和精度。但是，超声波可以更精准地聚焦。实际上，聚焦超声技术有时被用于精确的外科手术，比如用于对大脑特定部位的神经元进行消融的手术。当强度较低的超声波能量射入大脑并被聚焦时，超声波束焦点处的神经元就会发射脉冲。超声波引起神经元发放的确切机制是一个活跃的研究领域，但是有证据表明，神经元细胞膜的微小移动会激活膜中的“牵拉活化离子通道”而产生动作电位，不过局部加热也可能激活神经元。无论如何，这个方法被认为是无害的，而且特异性比较高，还可以通过放置在头皮上的简单的超声换能器进行传输。

在这些实验中记录的脑电图信号是由视觉刺激引发的脑电波反应，即视觉诱发电位或VEP，这跟维达1977年所用的信号非常相似。有趣的是，当以一定频率快速闪烁的视觉刺激反复出现时，诱发VEP的效果特别好。在这些把人和大鼠的大脑连接起来的实验中，一个圆形的图像以15赫兹的频率在计算机屏幕上快速

闪烁。人的大脑会以同样是15赫兹的频率响应图像并生成脑电波，而且这些波的振幅非常恒定。这种恒定性使这些脑电波对干扰特别敏感。例如，这时候如果受试者有使大鼠尾巴抖动的意图，就会对脑电波产生干扰。发生这种情况时，这些脑电波的振幅突然达到峰值，就会触发电脑生成超声波脉冲去刺激大鼠运动皮质中的神经元，使动物的尾巴抖动起来。这种人与鼠大脑之间的交流可以达到94%的准确性。通过访问在线发表的论文，就可以观看这些实验的视频。[\[57\]](#)这个系统可以用于人类（或其他动物）之间的脑对脑通信，而且这类信号可以通过互联网或无线电进行远距离传输——由计算机辅助的通过脑电波产生的心灵感应。用类似的方法把无线传输信号转换成电刺激，施加到昆虫的触角上，就可以把蟑螂变成一个可以由人的脑电波控制方向的机器人。[\[58\]](#)

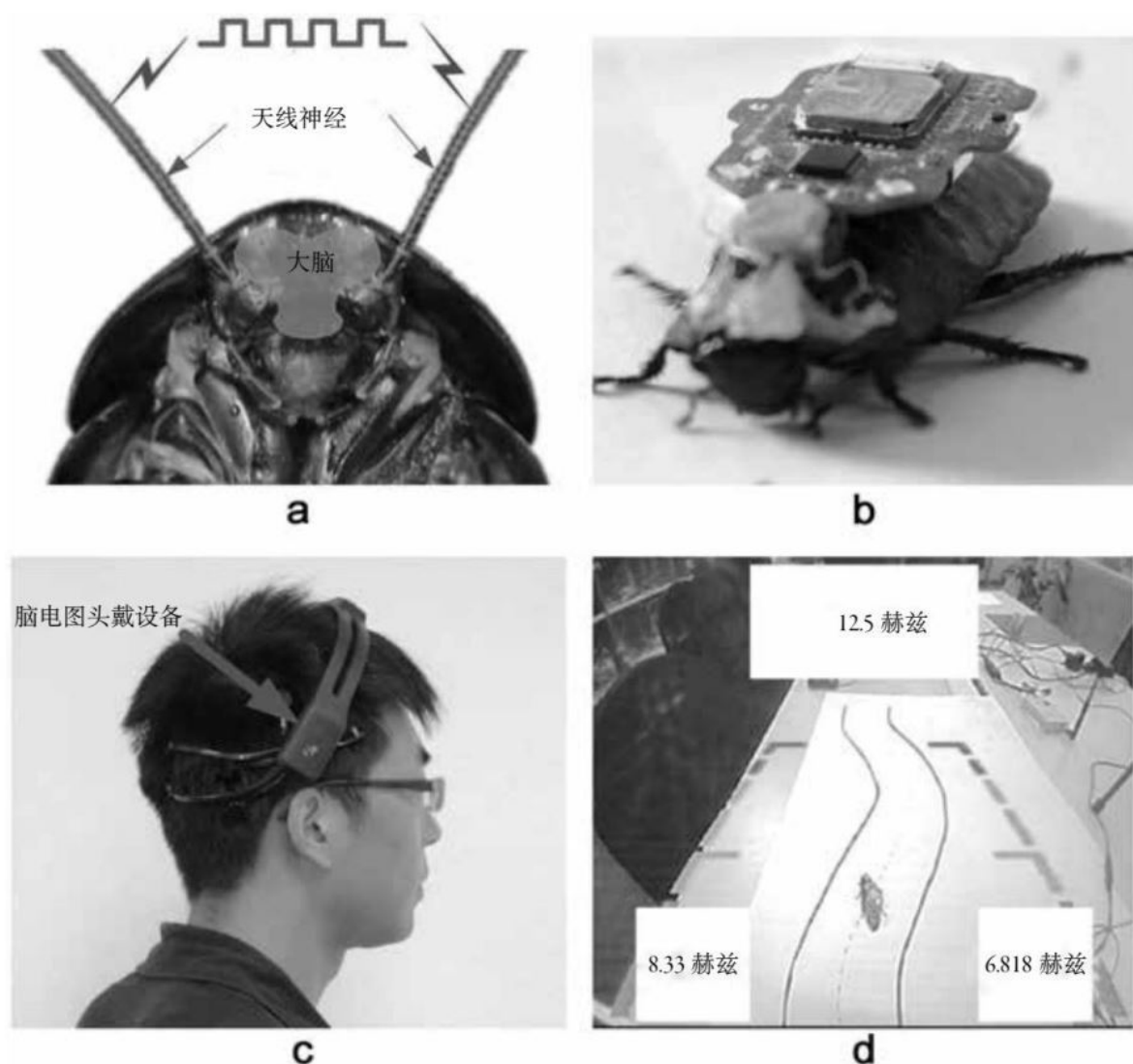


图32 人通过脑电波与蟑螂进行交流。经过脑电图分析确定人的意图，然后把无线信号传输到蟑螂触角上的电极并产生刺激，人便能够操纵昆虫爬行的路线

脸书和特斯拉的计划或脑对脑交流的梦想

为了了解蒂莫西·布施曼关于神经振荡以及大脑中信息的编码方式的研究，我访问了普林斯顿大学。脸书的马克·扎克伯格和特斯拉的埃隆·马斯克要开发脑对脑接口设备，并希望通过互联网进行交流。我询问布施曼对于这件事的可行性的看法。

“从大脑中读出信号，我想这是可能做到的。但我认为后面会遇到问题，因为受试者间的差异性很大。”布施曼说。他在一定程度上觉得，检测大脑中的信号还是可能的。但是，读取信号与全面通信不是一回事。你可以用脑电波启动计算机并激活设备，但这与解码思维相去甚远。布施曼说，读取大脑活动非常容易：“我只看瞳孔直径就可以知道你的认知状态怎么样，你脑海中现在承载了多少东西。我还可以说出你的觉醒程度，你集中了多少注意力……的确有很大的可能性，但是如果他们想把东西放回大脑，那就是另一回事了，这就是我认为最困难的地方。”

如果脑机接口或脑对脑的交流仅限于事件引起的脑电波，那么它的实用价值将非常有限。当然，一些特殊情况下另当别论，比如用来对付神经系统疾病所造成的损害，或者通过检测脑电图里的前意识扰动而做出快速反应。事件引起的脑电图变化可以用作触发器。与这类信息相比，推特上发一条280个字符的消息所携带的信息量可谓巨大了。为了在探测人的思维时获得更高的保真度，必须同时对数以万计的单个神经元进行电活动采样。人们已经可以在动物实验中达到这个水平了，但是出于道德和实际操作的原因，不可能将多电极植入健康人的大脑中。

传递信息是一个更加困难的问题，它存在两个难以克服的障碍，使得想要用有意义的方式将信息编码到大脑中变得困难重重。首先，神经科学家尚不知道大脑如何编码和处理信息，更不用说像流行的反乌托邦科幻电视剧《黑镜》所描绘的那样，在电脑交互程序水平上将信息下载到人的大脑了。“我可以知道应该对准哪个大脑区域，但是无法知道应该对准哪个神经元。”布施

曼说，“即使我可以在不同的人身上找到同样一个神经元，但这个神经元在不同的人脑中所起的作用也是大不相同的。”

直接将信息传回神经回路面临巨大的技术障碍。布施曼问：“你如何同时刺激300个、1 000个或10 000个神经元？”布施曼指出，从数学角度来看，困难在于就算你把神经元的状态简化为两种反应，即激活或不激活，这已经是经过极大简化了，那么在有300个神经元的网络中，所有可能的状态数目就会上升至2300个。“这是个无法想象的数字。”他说，“这个数字比宇宙中所有的原子总数还多。”

尽管如此，布施曼仍在积极地研究如何将思想植入实验动物的大脑。他的发现表明，这确实有可能实现——不是因为我们的电子设备先进，而是由于大脑的能力超强。

“我们正在尝试用电极刺激（动物的视觉皮质）神经元，并分析它们激活的所有模式。我们将电极贴在V1（视觉皮质区域）上，此外还需要确定目标：我们同时记录32个神经元，希望这个神经元成为高频（发放）的，而那个神经元是低频（沉默）的。我们已经能够让系统快速执行这些操作了。”

这种刺激会让动物产生“视觉”。而人们可以利用动物的这种“视觉”来训练它们做出特定的行为反应。“下一步，我们要努力的目标是，用（多电极神经元刺激）系统使动物能够重现行为上相关的活动模式，而不仅仅是一些随意的模式。”布施曼说。换句话说，研究人员先对小鼠或猴子看到蓝色方块时被激活的神经元网络的电活动进行采样，然后再将相同的刺激传递回神经网络中，这应该会在动物的神经网络中生成蓝色方块的图像。

要想知道这种刺激是否起作用，可以先用蓝色方块作为提示来训练动物，比如让它们在迷宫中向右转。

我问他，这个领域的进展距离能够在大脑中编码有意义的信息还有多远。“大约一年前，我会说真的很遥远，但我们取得了令人惊喜的进展。”他回答说，“到目前为止，我们所得到的结果表明，这种刺激可以产生与视觉刺激相似的模式。最后，我认为这其实也在意料之中，因为你仔细想一下，大脑系统本身就有很强的可塑性。基本上，我认为目前的情况是，我们可能发出了某种奇怪的信号，然后使大脑变得看起来有意义了。我们正在做的只是弄清楚这些奇怪的信号中哪一个是对大脑最有意义的，并让大脑能够从中学习。我认为大脑确实有很强的学习能力。”

这些实验让人想入非非，不过布施曼和其他人只是闷头努力做实验。他还没有得到把视觉图像编码到实验动物大脑中的实验结果，但是他说：“我认为这是可行的。”

[1] The Spanish Civil War. *Encyclopedia Britannica*.
<https://britannica.com/event/Spanish-Civil-War>. Accessed October 3, 2019.

[2] The Spanish Civil War. *Holocaust Encyclopedia*.
<https://www.ushmm.org/wlc/en/article.php?ModuleId=10008214>.
Accessed October 3, 2019.

[3] The Spanish Civil War. *Encyclopedia Britannica*.
[https://www.britannica.com/event/Spanish-Civil War](https://www.britannica.com/event/Spanish-Civil-War). Accessed
October 3, 2019.

[4] Blackwell, B. (2012) Jose Manuel Rodriguez Delgado.
Neuropsychopharmacology 37 (13): 2883 -
2884. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3499727/>.

[5] The Spanish Civil War. *Holocaust Encyclopedia*.
<https://www.ushmm.org/wlc/en/article.php?ModuleId=10008214>.
Accessed October 3, 2019.

[6] About Simon Wiesenthal. Simon Wiesenthal Center.
<http://www.wiesenthal.com/about/about-simon-wiesenthal/>. Accessed
September 9, 2019.

[7] Delgado, J. M. R. (1969) *Physical Control of The Mind: Toward a Psychocivilized Society*. New York, NY:Harper and Row.

[8] Ibid., 232.

[9] <http://www.cajal.csic.es/departamentos/herrerasespinosa/datos.html>.

[10] Charles, A.; and Brennan, K. C. (2009) Cortical Spreading Depression-New Insights and Persistent Questions. *Cephalalgia* 29 (10): 1115 - 1124.

[11] Murugan, V. (2009) Embryonic Stem Cell Research: A Decade of Debate from Bush to Obama. *Yale Journal of Biology and Medicine* 82 (3): 101 - 103.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2744932/#s1title>.

[12] Delgado, J. M. R. (1969) *Physical Control of The Mind: Toward a Psychocivilized Society*. New York, NY: Harper and Row, 71.

[13] Ibid., 68.

[14] Delgado, J. M. R. (1952) Permanent Implantation of Multilead Electrodes in the Brain. *Yale Journal of Biology and Medicine* 24: 351 - 358; Delgado, J. M. R. Chronic Implantation of Intracerebral Electrodes in Animals. In Sheer, D. E., ed. (1961) *Electrical Stimulation of the Brain*. Austin, TX: University of Texas Press, 25 - 36; Delgado, J. M. R. (1960) Emotional Behavior in Animals and Humans. *Psychiatry Research Reports* 12: 259 - 271; Delgado, J. M. R. (1963) Cerebral Heterostimulation in a Monkey Colony. *Science* 141: 161 - 163; Delgado, J. M. R. (1965) Sequential

Behavior Repeatedly Induced by Red Nucleus Stimulation in Free Monkeys. *Science* 148: 1361-1363; Delgado, J.M. R. Aggression and Defense Under Cerebral Radio Control. In Clemente, C.; and Lindsley, D. (1965) Aggression and Defense. Neural Mechanisms and Social Patterns. *UCLA Forum in Medical Sciences* 7 (5): 171-193; Delgado, J. M. R.; Hamlin, H.; and Chapman, W. P. (1952) Technique of Intracranial Electrode Implantation for Recording and Stimulation and Its Possible Therapeutic Value in Psychotic Patients. *Confinia Neurologica* 12: 315-319; Delgado, J. M. R.; et al. (1968) Intracerebral Radio Stimulation and Recording in Completely Free Patients. *Journal of Nervous and Mental Disease* 147: 329-334; Delgado, J. M. R.; Roberts, W. W.; and Miller, N. E. (1954) Learning Motivated by Electrical Stimulation of the Brain. *American Journal of Physiology* 179: 587-593; Mahl, G. F.; Rothenberg, A.; Delgado, J. M. R.; and Hamlin, H. (1964) Psychological Responses in the Human to Intracerebral Electric Stimulation. *Psychosomatic Medicine* 26: 337-336.

[15] Hess, W. R. (1927) Stammganglien-Reizversuche. (*Verh. Dtsch. Physiol. Ges.*, Sept. 1927). *Ber. Ges. Physiol.* 42: 554-555, 1928. See also Fields, R. D. (2015) *Why We Snap: Understanding the Rage Circuit in Our Brain*. New York, NY: Dutton Press; and Fields, R. D. (2019) The Roots of Human Aggression. *Scientific American* 320: 64-71 for a further description of the discovery and operation of the brain's hypothalamic attack area.

[16] Penfield, W.; and Jasper, H. (1954) *Epilepsy and the Functional Anatomy of the Human Brain*. Boston: Little, Brown.

[17] Delgado, J. M. R. (1969) *Physical Control of The Mind: Toward a Psychocivilized Society*. New York, NY: Harper and Row, 75.

[18] Heath, R. G.; Monroe, R. R.; and Mickle, W. (1955) Stimulation of the Amygdaloid Nucleus in a Schizophrenic Patient. *American Journal of Psychiatry* 111: 862-863.

[19] Delgado, J. M. R. (1969) *Physical Control of The Mind: Toward a Psychocivilized Society*. New York, NY: Harper and Row, 133.

[20] Ibid., 135.

[21] Ibid. 136 - 137.

[22] Ibid., 137.

[23] Ibid., 137.

[24] King, H. E. Psychological Effects of Excitation in the Limbic System. In Sheer, D. E., ed. (1961) *Electrical Stimulation of the Brain*. Austin, TX: University of Texas Press, 477 - 486.

[25] Ibid., 485.

[26] Delgado, J. M. R. (1969) *Physical Control of The Mind: Toward a Psychocivilized Society*. New York, NY: Harper and Row, e-book location 2353 of 4043.

[27] Ibid., e-book location 2059 of 4043.

[28] Kaiser, J. NIH to End All Support for Chimpanzee Research. Science, November 18, 2015. <http://www.sciencemag.org/news/2015/11/nih-end-all-support-chimpanzee-research>.

[29] Fields, R. D. (2016) Wireless Brain Implant Allows “Locked-In” Woman to Communicate. *Scientific American News*, November 17, 2016. <https://www.scientificamerican.com/article/wireless-brain-implant-allows-labeled-locked-in-woman-to-communicate/>.

[30] Engber, D. The Neurologist Who Hacked His Brain — and Almost Lost His Mind. *Wired*, January 26, 2016. <https://www.wired.com/2016/01/phil-kennedy-mind-control-computer/>.

[31] Pandarinath, C.; et al. (2017) High Performance Communication by People with Paralysis Using an Intracortical Brain-Computer Interface. *eLIFE* 6: e18554.

[32] Velliste, M.; Perel, S.; Spalding, M. C.; Whitford, A. S.; and Schwartz, A. B. (2008) Cortical Control of a Prosthetic Arm for Self-Feeding. *Nature* 453: 1098 – 1101.

[33] Paraplegic Wearing Robotic Suit Kicks Off World Cup in Brazil. YouTube, uploaded by SuperRoboHead, June 13, 2014. <https://www.youtube.com/watch?v=inCvbDLfXBo>.

[34] de Hond, M. What Went Wrong when the Paraplegic Man in Robotic Suit Kicked Off the World Cup 2014? YouTube, uploaded by Marc de Hond Producties, June 13, 2014. <https://www.youtube.com/watch?v=WaQcC8yJmMU>.

[35] Sutherland, S. (2016) Melding Mind and Machine. BrainFacts.org. <https://www.brainfacts.org/Diseases-and-Disorders/Therapies/2016/Melding-Mind-and-Machine-080216>. Accessed September 30, 2019.

[36] LaPook, J. President Shares Monumental Handshake with Paralyzed Man. *CBS News*, October, 16, 2016. <https://www.cbsnews.com/videos/president-shares-monumental-handshake-with-paralyzed-man/>.

[37] Flesher, S. N.; et al. (2016) Intracortical Microstimulation of Human Somatosensory Cortex. *Science Translational Medicine* 8 (361): 361ra141. <http://stm.sciencemag.org/content/early/2016/10/12/scitranslmed.aaf8083>.

[38] Paralyzed Man Regains Sense of Touch. Neurological Surgery, University of Pittsburgh, October 13, 2016. <http://www.neurosurgery.pitt.edu/news/paralyzed-man-regains-sense-touch>.

[39] Utah Array. Blackrock Microsystems. <http://blackrockmicro.com/electrode-types/utah-array/>. Accessed October 4, 2019.

[40] Geddes, L. (2016) First Paralysed Person to Be “Reanimated” Offers Neuroscience Insights. *Nature*, April 13, 2016. <https://www.nature.com/news/first-paralysed-person-to-be-reanimated-offers-neuroscience-insights-1.19749>.

[41] Wagner, F. B.; et al. (2018) Targeted Neurotechnology Restores Walking in Humans with Spinal Cord Injury. *Nature* 536: 65 – 71; and (2018) Paralysed People Walk Again After Spinal-Cord Stimulation. *Nature* 563: 6. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07237-9>.

[42] Vidal, J. J. (1977) Real-Time Detection of Brain Events in EEG. *Proceedings of the IEEE* 65: 633 – 642.

[43] Farwell, L. A.; and Donchin, E. (1988) Talking Off the Top of Your Head: Toward a Mental Prosthesis Utilizing Event-Related Brain Potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 70 (6):510 – 523.

[44] Krusienski, D. J.; Sellers, E. W.; McFarland, D. J.; Vaughan, T. M.; Wolpaw, J. R. (2008) Toward eEnhanced P300 Speller Performance. *Journal of Neuroscience Methods*. 167(1):15-21.

[45] Wolpaw, J. R.; McFarland, D. J.; Neat, G. W.; and Forneris, C. A. (1991) An EEGBased Brain Computer Interface for Cursor Control. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 78(3): 252 – 259; Pfurtscheller, G.; Flotzinger, D.; and Kalcher, J. (1993) Brain-Computer Interface — a New Communication Device for Handicapped Persons. *Journal of Microcomputer Applications* 16:293 – 299; Muller, K. R.; and Blankertz, B. (2006) Towards Noninvasive Brain-Computer Interfaces. *IEEE Signal Processing Magazine* 23: 125 – 128.

[46] Müller, K. R.; Tangermann, M.; Dornhege, G.; Krauledat, M.; Curio, G.; and Blankertz, B. (2008) Machine Learning for Real-Time Single-Trial EEG-Analysis: From Brain-Computer Interfacing to Mental State Monitoring. *Journal of Neuroscience Methods* 167 (1): 82 – 90.

[47] Sitaram, R.; Caria, A.; Veit, R.; Gaber, T.; Rota, G.; Kuebler, A.; and Birbaumer, N. (2007) FMRI Brain Computer Interface: A Tool for Neuroscientific Research and Treatment. *Computational Intelligence and Neuroscience* 2007: 25487; Yoo, S. S.; Fairney, T.; Chen, N. K.; Choo, S. E.; Panych, L. P.; et al. (2004) Brain-Computer Interface Using fMRI: Spatial Navigation by Thoughts. *Neuro Report* 15:1591 - 1595.

[48] Mellinger, J.; Schalk, G.; Braun, C.; Preissl, H.; Rosenstiel, W.; Birbaumer, N.; and Kubler, A. (2007) An MEG-Based Brain-Computer Interface (BCI). *Neuro Image* 36 (3): 581 - 593.

[49] Coyle, S. M.; Ward, T. E.; and Markham, C. M. (2007) Brain-Computer Interface Using a Simplified Functional Near-Infrared Spectroscopy System. *Journal of Neural Engineering* 4 (3): 219 - 226.

[50] Hochberg, L. R.; Serruya, M. D.; Friehs, G. M.; Mukand, J. A.; Saleh, M.; Caplan, A. H.; Branner, A.; Chen, D.; Penn, R. D.; and Donoghue, J. P. (2006) Neuronal Ensemble Control of Prosthetic Devices by a Human with Tetraplegia. *Nature* 442 (7099): 164 - 171; Taylor, D. M.; Tillery, S. I.; and Schwartz, A. B. (2002) Direct Cortical Control of 3D Neuroprosthetic Devices. *Science* 296 (5574): 1829 - 1832.

[51] Leuthardt, E. C.; Schalk, G.; Wolpaw, J. R.; Ojemann, J. G.; and Moran, D. W. (2004) A Brain Computer Interface Using Electrocorticographic Signals in Humans. *Journal of Neural Engineering* 1(2): 63 - 71.

[52] ASU Researcher Creates System to Control Robots with the Brain. *ASU Now*, July 8, 2016. <https://asunow.asu.edu/20160710-discoveries-asu-researcher-creates-system-control-robots-brain>.

[53] Rao, R. P.; Stocco, A.; Bryan, M.; Sarma, D.; Youngquist, T. M.; Wu, J.; and Prat, C. S. (2014) A Direct Brain-to-Brain Interface in Humans. *PLoS One* 9: e111332.

[54] Much of this research has been published since this interview. See Jiang, L.; et al. (2019) Brain Net: A Multi-Person Brain-to-Brain Interface for Direct Collaboration Between Brains. *Scientific Reports* 9 :6115.

[55] O’ Doherty, J. E.; Lebedev, M. A.; Ifft, P. J.; Zhuang, K. Z.; Shokur, S.; et al. (2011) Active Tactile Exploration Using a Brain-Machine-Brain Interface. *Nature* 479: 228 - 231.

[56] Yoo, S. S.; et al. (2013) Non-Invasive Brain-to-Brain Interface (BBI): Establishing Functional Links between Two Brains. *PloS One* 8 (4): e60410.

[57] Ibid. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0060410>.

[58] Li, G.; and Zhang, D. (2016) Brain-Computer Interface Controlled Cyborg: Establishing a Functional Information Transfer Pathway from Human Brain to Cockroach Brain. *PLoS One* 11 (3): e0150667.

第9章

脑电波揭示你的想法、优点和弱点

汉斯·伯格的梦想是通过分析脑电波来识别特定的精神疾病、不同的情绪和各种认知状态。当时的技术和对神经科学的了解还非常有限，但是如今，脑电图记录已成为神经学诊断的标准工具。脑电波的诊断价值远远超出了最初用来检测大脑中癫痫发作的位置这一用途。许多精神疾病（从精神分裂症到抑郁症）都可以通过异常脑电波来进行评估。

我们将在第10章中讨论这些显著的成就，但首先我必须与你分享一些眼下正在发生的更加了不起的进展。这些新进展可以揭示人的大脑是如何连接的。科学家们不仅可以辨别你当前的精神状态，还可以准确地预测你的学习能力和接下来的意图，并评估你患上特定神经系统疾病和精神疾病的风险——对你可能已经患有的疾病进行诊断也不在话下。这些具有开拓精神的科学家利用最新的技术，发现了大脑的神经回路如何作为一个产生思想的系统在运行。也就是说，大脑这个器官（本质上是生物机器）如何创造智力：我们的想法、感知、情感、想象力、记忆、性格、从经验中学习的能力、思考的能力……所有这些使我们成为独一无二的个体。智慧与大脑之间的边界一直是一个永恒的谜。如果用脑电图分析和fMRI来监测大脑的功能活动，科学家就可以知道一个

人拥有哪种类型的大脑和认知能力。还有，他们可以读懂一个人的想法。

脑电波预测你的学习潜能

想象一下，你在教室里看到一张张新鲜的面孔，如何才能够准确地判断哪些学生可以快速学习新语言，哪些学生会遇到困难？西雅图华盛顿大学的研究人员尚特尔·普拉特博士声称她可以做到这一点，只需记录一个人安静地坐着时的脑电波即可。我被吸引住了，遂联系了普拉特博士，问她我是否可以参观她的实验室，让她检测我的脑电波，并预测一下我学习第二语言的能力。她热情地答应了。

在她把电极贴在我头上之前，我们在办公室讨论她的研究。普拉特告诉我说：“我认为语言是人脑所能执行的最复杂的功能。”通过研究这些从大脑截获的电能，普拉特希望弄明白我们如何学习说话，以及学习语言如何改变了我们的大脑。而且最引人注目的是，她希望能马上确认一个人是否天生就具有轻松学习第二语言的大脑回路，或者天生就有学习第二语言的困难。

当我们还是孩子的时候，所有人都只是通过体验来学习口语。“我们知道，还在子宫内的时候，胎儿就已经开始了解其语言的特性。”普拉特说，“由于我们每天都在不断地听自己的母语，并在我们的思想活动、内心独白和日常交谈时练习，所以我们并没有真正明白人类的语言究竟有多么复杂。但是，当我们学

习第二语言时，通常是在教室里学习，这种复杂性和学习的难度立即变得很明显了。”

通过筛查那些学习外语的学生的脑电波数据，普拉特有了一个惊人的发现：如果在学习第二语言的是一个成年人，她通过受试者的脑电波变化就可以将那些能迅速掌握新语言的学生与学习速度较慢的学生区分开来。结果一目了然——普拉特发现，经过外语训练后的人，在他们大脑皮质右侧的特定区域， β 脑电波的强度增加了。她说：“变化越大，他们学习的效果就越好。”

普拉特的脑电波研究还揭示了更加令人惊讶的事情。此前，普拉特没有找到一个可以预测学生学习第二语言潜力的有用指标，但是她说：“我绝对相信如果让某人闭上眼睛5分钟，测量他大脑活动的模式，我就可以判断他们是否会有更好的表现。”

大脑在闲置状态下的活动给出了一个人的学习潜能的重要线索，因为大脑在安静状态下的行为（静息状态脑电图）给出了它如何连接以及如何作为系统运行的信息。普拉特发现，当受试者静静坐着什么都不做，只是让思绪随便漂移，这时如果他们的大脑右侧颞叶和顶叶区域中的 β 波的强度越大，那么他们学习第二种语言的速度会越快。

普拉特和她的研究生布里亚娜·山崎将电极贴在我的头上，并用盐溶液润湿每个电极，以改善电信号在大脑和电极之间的传导。当她一个个测试电极时，我颅骨上的电极的相应位置就会显示在电脑屏幕上。当信号强度很强时，颜色会从红色变为绿色。当它们全部变绿后，普拉特说：“闭上眼睛5分钟，请保持安静。”她在调暗灯光并溜出门时说：“放松，把头脑清空。”

我试着静下来，但我的思维正在加速运转。我回想起去其他实验室的经历，科学家们可以用电极探查我的大脑，并让我的思想展露无遗。我对普拉特可能会发现的东西感到兴奋和好奇，也有点儿紧张。5分钟后，普拉特和山崎回来了。

“您获得的数据还好吗？”我问道。

两位研究人员一边敲着键盘，一边分析电脑屏幕上不同频率的脑电波活动的强度。

“这一条比平均水平要低一点儿。”普拉特看着我那微弱的 α 波说。（我的脑电波缺乏 α 谱带再次被确认了，但这到底是我的脑电图本来的特征，还是仅仅由于我感到很兴奋而导致的，还有待商榷。）她调出自己在安静状态下的脑电波记录，上面显示的脑电波在 α 频段处有一个尖峰。它看起来像是股票价格走势图中的一个小峰。我的脑电波没有这个峰，只有高频的 γ 波活动。

“我能把第二语言学好吗？”我问。

“不行。”

我突然感到自己好像没穿衣服一样，有点儿生气。我觉得自己好像被飞碟吸了进去，外星人正在解剖我的大脑。

“您的斜率约为0.5，平均值约为0.7。”普拉特果断地说道。

看来是真的！我在高中时学过西班牙语，在大学时学过德语，但两种语言都没学好。这比塔罗牌的预测更令人毛骨悚然！

回想起我听说过的那些双语带来的认知优势，我感到十分不满。

“一定有什么好处的！”我坚持。

“当然……也有很多好处……”

“告诉我一个！”我要求她。

“你的母语掌握得非常牢靠。”

我失望地叹了口气。

“你的大脑抗干扰的能力更强。在美国，你会做得非常好。你不应该搬到欧洲。”

她善意地嘲笑我的才智较高但第二语言学习能力较弱，这算是一个小小的安慰吧。

然后，她慷慨地补充说：“贝塔系数与阅读的关系是相反的。你可能在阅读方面很优秀。我们的大脑经过了优化，当你在一件事上变得更好时，就会牺牲其他东西作为代价。”

确实，在我回到实验室一周后，剑桥大学的研究人员发表了一项新研究。报告说，在被称为“关于思想的思想”的“元认知”能力上，单语种的人优于双语种的人，并且单语种的人在出错时能更好地自我纠正。[\[1\]](#)

文章将元认知描述为“渴望考虑复杂的问题，而不是满足于与熟悉的事物相伴。”思考人类思维的问题……并从失败的实验中吸取经验。这正是我作为一个神经科学家所做的事情！在业余

时间，我喜欢爬山、阅读和写作——当然是用英语。我刚才提到的研究后来发表在科学杂志上了。[\[2\]](#)

当我静静地坐在黑暗中，任由我的思绪漫游时，尚特尔·普拉特为我记录了5分钟的脑电图，然后她立即宣布，由于我顶皮质的一个关键区域的 β 波能量低，我无法轻松地学习第二语言。这太诡异了。思想是一个人最个性化的东西，就是我们的身份。我们要相信，潜能和实现目标的能力至少在很大程度上取决于我们的决心和努力，这不是生物学上预先确定的。如果有人说，他可以知道你的认知潜能能预测你将来是否成功，这会令人不安，尤其是这个判断只基于5分钟的脑电图。普拉特预测的我学习特定类型信息的能力，是否与学习外语无关呢？或者说，我那天所经历的正是通向广阔舞台的大门，脑科学家们可以通过脑电波进入人们的大脑并了解他们的思想？一年后，我出现在西雅图以北，继续寻找问题的答案。

学习阅读

刚进入不列颠哥伦比亚省温哥华市的会议中心大礼堂，嘈杂的声浪像一阵风一样扑面而来，成千上万的人像在鸡尾酒会上一样热切交谈。人群嗡嗡作响，挤在展板周围，一排排展板布满了整个大厅。钢梁上的汞灯发出耀眼的光，照亮了全场。展板上贴满了各式各样的印刷海报，拥挤的人群围着它们，仿佛在盯着一个个奇迹。就像美术馆里的游客挤在一幅著名的画作前面一样，除了前排的，其他人什么也看不到。观众竖起耳朵听着，不时地参与讨论，而研究人员在展板前一边讲解一边做着手势。要想挤过人群很困难，他们大多数都背着包或挎着袋子，还一边疯狂地

记笔记。一排排海报板之间零星点缀着绿植，这些地方没有人聚集。有一个孤独的人背对着她的海报站在那里，像饭店的女主人注视着人行道上的每个过客，希望招揽到吃饭的顾客一样。我走上前去看海报的标题，那个女人站在那儿礼貌地看着我，看我是否对她所提供的“菜单”感兴趣，说不定愿意跟她聊上几句。

这位女科学家不希望我提她的名字，除非她的研究成果在期刊上发表了。她是来自东海岸某大学的助理教授。她和聚集在礼堂中的那数千人一样，都是来自世界各地的科学家。他们分享自己的工作成果，并从其他科学家那里获悉有关脑成像研究的最新进展。

在人脑测绘组织会议上所讨论过的许多研究项目还在进行当中，而且至少在一两年内还不会在任何科学期刊上发表。在一个有1万至3万名神经科学家参加的会议上，不可能让每个参会者都上台发表关于自己最新研究成果的演讲。因此，科学会议上的大多数交流都通过“海报会议”进行。在这里，科学家们站在一张4英尺×8英尺的海报旁边，展示他们的最新研究成果，并热心地向那些感兴趣的人做介绍。展览形式的交流在许多方面都优于演讲，因为主讲人在演讲结束后只留有很少的时间给听众提问。同样，从展示者的角度来看，展览也比一个人按照预先设计好的演讲稿说一通，然后再换个人上去说一通要更有意义得多。在展览会上，你可以随意地进行一对一的深入交流。

简短的介绍之后，她开始详细介绍展示的内容。她解释说，她的兴趣在于学会阅读需要哪些神经回路的参与。阅读对于现代人的生活至关重要，但这不是一个自然现象。人必须靠学习才能掌握阅读，学习阅读需要经过多年的实践。人们很容易就忘记

了，将纸上的墨水形迹解码为具有含义、情感和想象力的过程是多么奇怪和困难。一些孩子在阅读方面会遇到很大的困难，这可能会严重妨碍他们接受普通教育。当我们机械地移动视线，在页面上从左到右（英语）自动地、不自觉地、毫不费力地为字母、单词、字符串和句子添加上含义时，有哪些大脑回路参与了这个过程呢？这些大脑回路在学习阅读的过程中是否得到了加强？这些脑回路的个体差异是否会导致有的人学习阅读更有效，而有些人却感到很困难？

科学家用来识别和监视参与阅读的大脑回路的技术，是一种被称为功能性近红外光谱（fNIRS）的大脑成像技术。与功能性MRI一样，这种方法可以测量由大脑局部区域的神经活动引起的血氧变化，但功能性近红外光谱是利用光谱学原理，而不是MRI的原理。光谱技术是一种将光分解成不同颜色的成分的技术。而且，由于化学反应和许多物理现象通常伴随着颜色的变化，因此这项技术非常有用。例如在天文学中，对远距离的星光进行光谱分析可以让科学家辨别遥远天体上存在哪些元素。这些天体与地球的距离以光年计，超出了人类直接探索的能力。类似地，功能性近红外光谱利用光来确定大脑内部特定部位组织中的血液颜色的细微变化。蓝光是可见光中频率最高的，不容易穿透组织，但是长波长的深红光可以穿透组织。如果你试过在黑暗中用手掌蒙住手电筒的光束，会看到手变成半透明的红色，并显露出骨头和指关节的轮廓，那么其实你已经看到了红光穿透身体的能力。人眼无法看到最红的红外光，它比可见的红光更容易穿透组织。红外波长只能由电子传感器检测到，像电视遥控器使用的红外线。

这项技术的优点在于，做功能性近红外光谱时无须像MRI检查一样滑入一个巨大的甜甜圈形的强磁检查舱，只需要用一条简单的头带就可以记录大脑的活动。在这个例子中所使用的头戴设备类似于有多个传感器的泳帽，它可以覆盖整个大脑区域。头带上镶嵌有二极管激光器，这些二极管激光器发出不可见的红外光束，可以通过头皮穿透颅骨并进入脑组织，光线再以特定的颜色反射回来，然后被头带上的传感器检测到。含氧丰富的血液是鲜红色的，而脱氧的血液呈暗红色甚至紫色，就像我们在腿和手臂的浅静脉中所看到的那样。缺氧的血液返回肺部进行氧气交换。组织中氧气的消耗引起血液颜色的变化可以被传感器检测到。在大脑中，活跃的神经元从附近的血液中吸收氧气，以满足其较高的新陈代谢。通过用红外光探测大脑，参与特定认知任务的神经活动中心由于血液中的氧气脱离了血红蛋白，这些脑组织在图像上就呈现出斑点。就像做脑电图一样，这些变化也可以随着时间的推移进行跟踪，从而揭示出这些离散位置的脑组织活动的波动和反应。而且，通过关联成对活动的大脑区域，可以跟踪那些活跃的大脑回路。与脑电图或fMRI相反（两者均要求对象保持静止，以避免运动造成的伪影），功能性近红外光谱更易于操作，因为它不易受到肌肉收缩和身体运动的干扰。尽管大脑发育是神经科学中最有趣的领域之一，但在儿童身上进行功能性脑成像操作相对较少，因为很难让一个三岁的孩子配合把他的头伸进吓人的MRI仪器中，何况还要让他们在成像检测过程中保持足够长的时间一动不动——通常约30分钟。



图33 功能性近红外光谱通过把红外激光透过头皮射入大脑来监测大脑活动。活跃的神经元会消耗附近血液中的氧气，因此血液的颜色会从鲜红色变为暗红色。功能性近红外光谱帽中的传感器能检测到大脑反射的红外光，从而监视神经活动。它是脑电图和fMRI 等功能性大脑成像（速度较慢）的一种补充

研究人员解释说，功能性近红外光谱非常适合孩子们。她给年龄在三岁半到四岁半的孩子听单词——向他们大声朗读有实际意义的词和无意义的词——同时用功能性近红外光谱检测他们大脑内的神经活动。功能性近红外光谱信号在大脑每个区域的亮度代表那个部位的神经元活跃程度。她通过比较在两种情况下检测到的大脑反应，再减去孩子听到废话时激活的神经回路网络，就显示出他们有意识地处理和理解真实单词时那些活跃的大脑网络。她认为，理解单词是说话和阅读的基础。因此，这种方法也许能够显示幼儿大脑中特定的神经连接，这些神经连接对于学习单词的含义和获得阅读能力是必不可少的。毕竟，如果一个孩子

不知道我们用来描述“猫”这个动物的英语词汇，就无法学会阅读和理解“猫”这个词。她的分析表明，大脑会对听见的真实单词做出回应——儿童大脑的左额下回与右颞上回之间的功能联系加强了。

这里简要解释一下大脑的解剖结构。人的大脑就像西梅干一样，有很多深深的皱褶。每个皱褶凸起的部分被称为脑回，而凸起之间的凹陷被称为脑沟。当然，解剖学家为这些脑回和脑沟命名的方式与地理学家为地形特征命名的方式相同，都是为了识别位置并与其他人交流。额叶下回是拉丁语，意为“下方和朝前”，是指大脑额叶中一个明显的卷曲，人们现在已经知道这个卷曲的脑区与语言和其他功能有关。布罗卡区是处理语言和控制说话的关键区域，位于额叶下回，但是如果你的优势手是右手，那么你的布罗卡区位于大脑的左侧；如果你的左手是优势手，那么你的布罗卡区位于大脑右侧。法国医生皮埃尔·保罗·布罗卡（1824—1888年）观察到，这一部位有损伤的患者会出现语言障碍。颞上回是大脑颞叶顶部附近的另一条脑回。颞叶像肉质耳罩一样覆盖在大脑两侧，听皮质就位于颞叶，负责处理声音。这个区域对于处理语言也很重要，尤其是在一个名为韦尼克区的区域。德国医生卡尔·韦尼克（1848—1905年）发现，除了破坏布罗卡区外，对韦尼克区的损害也会导致语言理解上的困难。因此，当这些孩子听到真实单词而不是无意义单词时，功能性近红外光谱检测到大脑在这些地方的神经活动增加就不足为奇了。但是，接下来的研究发现却让人大吃一惊。

后来，研究人员对同一批孩子学习阅读的过程进行了长期跟踪。她发现，孩子们开始上学并学习阅读后，他们阅读测试的成

绩与一年前的实验结果（听到有意义的单词并做出反应的大脑回路的关联性）相关。

想想这意味着什么。只需要对幼儿的大脑活动进行10分钟的采样，就可以大致预测这个孩子将来的阅读能力。

当她分享正在进行的实验时，一群科学家像海鸥受到食物诱惑一样被吸引了过来，专心聆听她讲解研究成果。

我问她，如果在学校中运用这种方法来预测哪些学生会有出色的阅读表现，而哪些学生又会遇到困难，她对此有什么想法？另外，是否可以用这种方法来区别学童，让他们进入不同的教育轨道？

她警觉地说：“那是一个敏感话题。”显然，她没有想到自己研究大脑如何学习阅读的成果可能会被用在这种地方。她像是自我保护一样补充说：“我们对大脑的了解还不够。”

我进一步追问她相关的生物标记、基因分析和其他医学诊断测试等指标，这些方法通常在物理医学中会用到。例如，我们知道血液中的胆固醇升高会使人增加心脏病发作和卒中的风险，所以我们可以根据这些生物学信息来改变行为，比如改善饮食和运动，或者服用药物来纠正异常指标。

她对这个话题也感到不安。如果通过大脑分析就可以预测孩子的学习潜能，那么生物决定论就与自力更生相矛盾。对这些生物信息的利用可能会限制个人自由，甚至会用一些强制的计划来取代个体自由，并决定儿童的命运。不过她也同意，通过对大脑进行分析来预测阅读能力的方法类似于用胆固醇检测来预测心脏

病发作的风险。这只适用于大脑，而不适用于其他身体器官。尽管如此，她还是畏缩了。

然后我问她：“如果您有一个孩子，而他在三岁时显示在这方面的脑部连接性比较低，您会怎么做？”

也许用针对个人的方式提出我的问题有些不公平，显然这让她有些惶惑不安。气氛有些尴尬，这使她不得不停下来沉思了一会儿。她看起来很矛盾，但是考虑片刻后，她认真地说：“我会让我的孩子去做每一种神经成像检查。然后，如果有迹象表明的确存在（潜在的阅读）问题，我会和他一起增加阅读量，帮助他建立起这些大脑回路。”

不管喜欢与否，精灵已经从魔瓶里出来了，我们最好面对她。

看透你的心思

你能想象吗，透过颅骨，人们可以窥见一个人比另一个人更聪明的原因；可以识别出谁患有精神分裂症、阅读障碍、孤独症或阿尔茨海默病；甚至像我们刚刚看到的那样，可以区别谁的阅读能力强，谁的阅读能力弱；也可以判断谁天生就是音乐家，谁又天生五音不全。如果辨别大脑的差异作为一种新技能被人们掌握，或者——就像终极幻想一样——人们能够读取他人的想法，我们该怎么办？

在美国国防部一个办公室内举行的神经科学家闭门会议上，我第一次听到心理学家马塞尔·贾斯特报告了他在读取人的思想方面所取得的惊人成就。贾斯特和他在卡内基梅隆大学的同事报告说，他们可以准确地猜出一个人脑海中正在想的是一把椅子还是一扇门；能猜中他们正在想的数字是从1到7里的哪一个；甚至能预测他们此时此刻的感受。所有这些都可以简单地通过fMRI所显示的大脑活动进行预测。

读心术不是科学家研究的目标。相反，科学家只是想检验他们对脑功能研究的结论。贾斯特和他的同事们积累了大量的数据，这些数据包括：当给受试者呈现各种图像、声音和文字，以及受试者被某种特定的情绪打动，或者受试者正在思考特定事物时，用fMRI扫描到的特定类型的信息在大脑网络中的流动。使用这种方法，贾斯特和世界各地的研究人员都绘制出了人脑的功能“活动图”。要想验证他们发现的神经回路与特定的认知过程有关，最严格的办法就是对整个流程进行反向操作。既然特定的想法会引起特定模式的大脑活动，那么用fMRI仪分析一个人的大脑活动模式，应该就可以知道这个人的脑袋里在“思考”什么。

在实践中，首先对受试者进行fMRI扫描，同时给他展示空白的屏幕，然后再显示一张房屋的图片。研究人员将一遍又一遍地重复这个过程，然后用得到的所有fMRI图像数据来合成在两种状态下大脑平均活动的复合图像。就像“找不同”的视觉游戏一样，计算机要比较这两个大脑扫描图像，任务是找出两张照片的细微差别。然后把这两个图像做“减法”，就可以显示大脑在执行任务时发生了什么变化——在这个例子中就是看到了一座房子。看见房屋的视觉任务自然会增加视觉皮质（还有其他一些大

脑区域)的神经活动,但除此之外,通过用fMRI分析不同大脑区域活动的同步性,研究人员可以在给定任务中检测出功能上相互有联系的神经元群体——这里的任务是看见房屋的图像。这种研究方法与脑电图研究人员对来自不同电极的脑电图信号的同步性进行分析,然后绘制出大脑中相互连接的网络的原理一样。

在“读心术”的研究中,研究人员在给受试者看了一座房子的图片后,会再给他看一个不同的对象(例如锤子的图片),然后再对两张大脑活动图(由不同物体的形象激活)进行比较。看到任何一个物体都会刺激视觉皮质,但人在看到房屋和锤子时所产生的认知表现却大不相同。我们的家是一个避难所,在家里我们可以享受亲朋好友的陪伴,可以吃饭和睡觉等等。锤子是工具,它很重,必须握紧在我们的手中才能用来敲钉子和其他物体。因此,感知这两个对象应该会激活大脑中不同的区域。确实如此。

马塞尔·贾斯特和他的同事发表了一系列论文。他们表示,用上述方法,他们能够很有把握地辨别一个人正在看或正在思考什么,能够判断他们所想的对象的数量以及他们可能会感受到的情绪,因为这些概念或情绪会增加大脑不同位置的活动。值得注意的是,大脑的这些活跃区域在人与人之间是一致的。

通过与一群学习物理的学生合作,他们最新的研究更进了一步。他们发现这种现象也适用于学习新的抽象概念,例如科学概念。研究人员分析了学生上物理课时的大脑活动fMRI图像,然后就可以判断他们正在学习和思考30个物理概念中的哪一个。[\[3\]](#)有一项研究特别有意思,数据表明,科学抽象概念所映射到的大

脑区域可能执行相关或类似的功能。例如，在学习和思考“波传播的周期性运动”这一科学概念时，被激活的脑区与跳舞时活跃的大脑区域相同。似乎抽象的科学概念是锚定在各个身体功能中。也许这就是神经科学的象征意义。

马塞尔·贾斯特提出，这些对大脑功能的研究可以用来改变教学的方法。毕竟，爱因斯坦是想象自己骑在光束上才顿悟到时间、空间、物质和能量是可以相互转换的。这种想象力可能激活了他的感觉运动皮质和纹状体，即控制身体运动的大脑区域。在贾斯特的研究中，所有关于辐射的物理概念——光、热和声音都激活相同的大脑区域。这些科目通常不会在物理课程中一起讲授，但也许应该这么做。为什么不以大脑组织概念的自然方式，而偏要按照人为的“逻辑”方式来收集材料和呈现主题呢？大学的物理课程通常被认为是一门很难的科目，如果按照我们大脑的构造来教授这些内容，可能就没那么难了。显然，人脑的进化是为了控制身体并与环境产生相互作用，而不是为了求解微分方程。人类利用自己的大脑结构和功能框架创造、计算和分析抽象概念，但是这些东西本不属于我们大脑的组织结构或内在功能。

他的研究给了我很多启发，我对他的工作很有兴趣，所以问他是否可以访问他的实验室以了解他的最新工作进展。他同意了。

心灵的语言

我在清晨的冷雨中驱车驶向宾夕法尼亚州匹兹堡。薄雾在绿色的山凹中涌动，从闪闪发光的湿路面上升腾起来，沥青路一直

蜿蜒穿过阿勒格尼山脉。76号州际公路沿途点缀着艳丽的秋色，透过山坡的遮蔽物可以看到一片片橙色、深黄色、浅褐色和赭红色，其间夹杂着苔藓般斑驳的绿色，那是有些树木还不愿褪去夏天的色彩。高耸的橡树光秃秃、湿漉漉的，描绘出山脊的轮廓，潮湿的空气中弥散着秋天落叶的味道。这是一个安静的星期天早晨，我开车去卡内基梅隆大学拜访心理学家马塞尔·贾斯特。他正在用最新的大脑成像技术来揭示颅骨里的那几磅组织为什么会思考。

乡下风景如画，红白相间的谷仓上方的钢屋顶闪闪发亮，周围由白色栅栏围着，就跟儿童的农舍玩具一模一样。一路上，所有FM广播频道里播放的都是心灵鸡汤和乡村音乐。直到临近匹兹堡，高速公路拓宽了，乡土气息浓厚的钢琴曲和康威·特威蒂若隐若现的歌声才被佛利伍麦克和皇后乐队的歌曲取代。广播里时不时地传出熟悉的、狂热的波尔卡舞和一位斯洛伐克播音员热切而轻快的声音，接着就是一阵手风琴狂热的演奏。穿过城市蜿蜒的街道，我发现卡内基梅隆大学位于较陡的沙迪塞区。宽敞的大道两旁都是维多利亚风格的豪宅，这些建筑可追溯到匹兹堡还是工业重镇的时代。1910年，匹兹堡是美国第八大城市，钢铁的年产量几乎占到全美国的一半，但由于钢铁厂关闭已久，现如今的匹兹堡已经没落，成了一个像鬼城一样的地方，它现在在美国的大城市中排名第63。但是，安德鲁·卡内基和其他工业时代富有的慈善家所遗留的财产仍然在匹兹堡杰出的学术机构中发挥着作用。今天，卡内基梅隆大学与附近的匹兹堡大学的科学和工程学科得到了广泛的认可，其中就包括机器人技术和蓬勃发展的神经科学。

第二天早上，我在贝克·霍尔楼（那是一幢宽敞的三层黄砖建筑，带有大拱形窗户，建于1914年，现在被定为历史文物）的实验室里见到了马塞尔·贾斯特和他的同事蒂姆·凯勒、罗伯特·瓦尔萨、弗拉基米尔·切尔卡斯基和罗布·梅森。我们的讨论从清晨开始，一直持续到下午。他们分享了各自的研究进展，探讨了该领域的发展方向，并展望了未来。贾斯特的团队一直在尝试使用fMRI来解密一个人阅读时所看到的内容。我想起在两个月前参加的一次科学会议上，贾斯特在对他的最新研究进行陈述之后，得出结论说：“我们找到了思维语言的通用模型的开端。”在他2008年发表在《科学》杂志上的一项研究中，他的研究团队监测了受试者在阅读60个不同的单词后的大脑活动状态。他们训练计算机识别每个单词引起的fMRI活动模式，然后科学家们便能够通过fMRI扫描，识别出一个人在阅读时读到了哪个单词。这项成就不仅令人印象深刻，而且这一研究也揭示出大脑是如何组织语义信息的。语义是指含义如何通过语言传达给我们的头脑。这也正是你现在在做的事情，即在脑海中绘制出景象并通过观察抽象符号来理解其中的信息。这些抽象符号可以是折叠的代码（按适当顺序书写的单词），也可以是口语中特定的发音（也按适当的顺序）。

有意思的是，在分析大脑阅读特定单词的反应时，他们发现，由不同单词唤起的大脑活动模式与单词所代表的概念的相似性有关。例如，“房屋”和“壁橱”在概念上都是“被包围”的，因此阅读这两个词会唤起大脑相似的活动模式。代表不同食物的词语也会激活大脑相同的活动模式。这也许不足为奇，但他们也发现“勺子”与“食物”这两个词会引起相同的活动模式。

它激活大脑中相同的区域，因为所有这些词都与饮食的概念有关。

这方面的研究已经取得了很大的进步。实际上，贾斯特发现这些分类有一种比较恒定的组织形式。他告诉我：“这些概念的神经表征在不同的人身上都一样。”

其他人也在做类似的研究。加州大学伯克利分校的杰克·加朗所领导的小组于2016年发表在《自然》杂志上的一篇论文就是关于这方面的，他们对收听公共广播节目《蛾类广播时间》的人的大脑进行了成像研究。利用fMRI，他们能够在人的大脑皮质上描绘出与特定含义的英语单词相对应的“地图”。这幅地图在不同的人脑中的位置是一致的——这就是大脑组织人类语言的语义系统。[\[4\]](#)

因此，当我读“热狗”这个词，或者在键盘上敲出它时，我的大脑活动模式与你在阅读“热狗”这个词时诱发的大脑活动模式相同。热狗！看，我又说了一次！既然能够识别单个词语，如果你在阅读本书的时候进行fMRI扫描，科学家们难道不会猜到你正在阅读哪个句子吗？

当然，问题在于阅读和理解完整句子的行为远比仅仅识别一个特定单词复杂得多。另一个巨大的困难在于fMRI的速度非常慢。这种方法怎么可能跟得上我们每分钟200个单词的平均阅读速度呢。如果大脑只是通过简单地解码大量单词（像计算机那样的方式）来阅读文本，那么其他人就不可能知道一个人正在阅读的内容。但是研究表明，大脑并不是通过逐字翻译来阅读的。人脑解码单词，并将其收集的信息存储为集成的概念。

“如果你观察人在阅读时的眼球运动，就像我以前研究过的那样，会发现眼球运动在句子结尾的时候有一个大约200毫秒的停顿。因此我认为，如果你在读到句子末尾的时候做一个大脑成像的话，会看到所有概念都出现在那里。”贾斯特告诉我说，“在读完句子的时候，你会把（这个句子中的）所有概念恰当地汇总到一个结构中。”阅读并理解句子后所形成的完整的思想，会产生复杂的大脑活动模式，因此可以被fMRI检测到。为了检验这一理论，贾斯特和他的同事们列出了240个完整的句子，例如“老人把石头扔进了湖里”，并让受试者在fMRI扫描的时候阅读这些句子。他们希望通过观察受试者的大脑活动模式来识别受试者正在阅读的句子。他们发现这是可以做到的，而且准确率相当高。有了这个了不起的成就后，他们做了进一步的研究。他们想知道，根据受试者阅读列表中的240个句子产生的fMRI数据信息，是否能够对新的句子进行预测。为此，他们对所有阅读包含特定单词的句子时采集的大脑成像数据求平均值，例如所有包含“人”这个词的句子。这样就可以抵消句子中其他单词的影响，结果“人”这个概念就在大脑活动图上留下了烙印。“人”这个词不仅是一个名词，它在不同的句子中可能有不同的含义，这取决于整个句子的意思。研究人员还根据这些单词的性质来绘制大脑活动图，例如，“人”是行动的主语还是宾语。

借助这些信息，贾斯特和他的同事们能够用fMRI对大脑活动图进行分析，从而破解受试者正在阅读的新句子，而且可以达到86%的准确度，甚至可以辨别出相对细微的含义。例如，阅读“工程师走过宁静的公园”这个句子和阅读类似的句子“老医生走过医院”这两个任务很容易区分开。研究小组还发现，哪怕两个句子包含完全相同的单词，只是词序不同，通过fMRI也可以区

分开。贾斯特解释说，一句话不仅仅是一堆词语的堆砌，fMRI数据显示大脑并不是以这种方式对句子进行解码的。他所用的方法可以很轻松地区分“狗追猫”和“猫追狗”这两句话。他说：“如果只是通过一堆单词来进行识别，就不可能做到这一点，你就看不出这两句话有什么差别。”

也许那些fMRI解析失败的案例会更有启发性。例如，阅读“洪水破坏了医院”和“风暴摧毁了剧院”这两句话时的脑部活动就很难用fMRI扫描区分开。这揭示了大脑如何感知世界的一些基本知识。

“大脑不是按字面意思去处理。”贾斯特说，“医院看起来跟剧院完全不同，但这两句话有相同的概念——建筑物、破坏和自然力量。这就是我们可以捕捉到的编码层次。”贾斯特和同事们还发现，由英语阅读者形成的大脑活动图也可以用来解码其他语言的句子，只要他们用的是母语——例如葡萄牙语或普通话的句子。这是“概念优先于词汇”这一重要观点的进一步证明。

“破坏医院不是一个英语才有的概念。”贾斯特解释说，“这是一个人类普遍都有的概念。”通过这种方式直接询问大脑，不同语言间的差异就变得不重要了。贾斯特说，这是一个自动的过程。想象一下这种能力的潜在应用吧。从理论上讲，它可以让普通的翻译人员在所有语言之间自由切换，从而给在联合国、医院和其他地方工作的大量翻译人员和口译人员避免了麻烦。当然，尽管从理论上讲，这种方法是可行的，但从技术上来说，这显然不是那么容易达成的。不过，贾斯特清楚地意识到，其他更直接的科学应用也正在显示出思维的语言通用性。“就拿

人机交互来说，你不希望这种互动只能用英文。你肯定更想要一个通用语言版的。”

关于利用fMRI读取人的思维，这位心理学家说：“这很有趣，它是一个不错的小把戏。”不过，贾斯特最终想要实现的目标是：能在人们阅读任何句子、引发任何思想或情感时，预测他们大脑的活动如何变化。同样，这个目标背后的动机也是科学地验证用fMRI进行大脑（思维）解码的正确性。

他先给电脑一个句子，利用他开发的数据和公式，让电脑预测人在阅读句子时，fMRI扫描会产生什么样的大脑神经活动模式，然后让一个人阅读这个句子，再把所诱发的神经活动图与预测的神经活动图进行匹配，结果证明它们的吻合度很高。贾斯特说：“在两个方向上的准确性非常相近。”顺便说一句，这种逆向过程恰恰是把思想或感觉植入人脑，或者说激发人脑产生回应所需要的。如果电脑可以通过电刺激或磁刺激来激活人特定的大脑活动模式，那么信息就可以直接从电脑输入他的大脑。或者，一个人的想法或感觉可以被计算机读取，然后通过计算机“以心灵感应”的方式进行传输，并植入另一个人的头脑中，就像我们之前在安德烈亚·斯托科和尚特尔·普拉特的研究中已经看到的那样（请参见第8章）。现在，让我们转向另一个问题——是否可能通过检测大脑活动的方法来预测人们未来的行为，而不仅仅是读取他们脑海中的一个词语？

看透你的意图，预测你的未来

有人给佐治亚理工学院的安保人员打电话，描述了一个可疑的人：“白人男性，有着长长的金发，穿白色的T恤和蓝色的牛仔褲。”“可能吸过毒，手里拿着刀子，后腰上可能还别着一把枪。”

校警迅速做出反应，找到的嫌疑人与描述相符。后来确认了嫌疑人的身份为佐治亚理工学院21岁的学生斯考特·舒尔茨。

现场的监控视频显示，泰勒·贝克警长举起枪朝他叫道：“得了吧，伙计，把刀放下。”[\[5\]](#)

“朝我开枪啊！”嫌疑人大喊。

警官往后退了几步，说：“没人想伤害你，伙计。”

舒尔茨现在被警察包围了。“放下刀子！”其中一个警官喊道。

舒尔茨愣了一下，然后朝着另一名警官慢慢走了三步。他没有威胁的意思，而是故意像走钢丝一样犹豫不决。他的双臂僵硬地贴在身体两侧，活像个僵尸。他又迈出了一步，这时枪声响了。

不久后，舒尔茨在格雷迪纪念医院死亡。

警方发现舒尔茨并没有携带枪支。打电话报案的人说他挥舞的刀其实是一把多功能刀，而且刀口并未露出来。

“你为什么要开枪？”在新闻发布会上，舒尔茨的父亲质问道，“你为什么杀死我的儿子？”

那名警察被调查了。进一步的调查显示，打电话报警的正是斯科特·舒尔茨本人。人们在他的宿舍房间里发现了三封遗书。

舒尔茨的父母痛苦地说，他们的孩子患有焦虑症和抑郁症已经很长时间了。他两年前曾因企图上吊自杀而接受了治疗。但是后来，舒尔茨似乎已经克服了心理问题。他的朋友们都说，舒尔茨最近几周的状况还不错。舒尔茨的母亲琳内·舒尔茨在对记者的一份声明中说：“我们没有任何线索。” [\[6\]](#)

这件惨案很复杂，但它生动地说明了自杀难以预测和预防。一个人如果有自杀的意图，他的挚友、父母甚至心理医生通常是不会知道的。如果我们所爱的人真的身处困境，我们肯定希望知道他是否有这种想法。但是，许多引人注目的自杀事件，像著名厨师安东尼·布尔丹、喜剧演员罗宾·威廉斯、时装设计师凯特·斯帕德以及其他领域的上层人士，虽然他们也有朋友和家人的支持，但事实表明，除非自杀的人想告诉别人，否则其他人不可能知道他们打算自杀。

马塞尔·贾斯特意识到，察觉别人自杀的意图也许不是不可能。如果他能读懂一个人的想法，那么他也许能够通过查看他们大脑的活动模式来确定一个人是否有自杀的念头。

他们做的一项研究包括17名临床上记录有自杀念头的人和17名对照。贾斯特和同事向测试对象展示了一系列可能产生自我毁灭感以及相反感觉的词语。这些词包括“死亡”“丧葬”“自

杀”“残忍”“麻烦”“无忧无虑”“好”“称赞”等。贾斯特告诉我，和对照组相比，那些有自杀念头的人在看到“死亡”这个词时的大脑表征明显不同。研究人员仅凭功能性脑部扫描就能基本正确地判断受试者是有自杀念头的人还是对照组，只有两个例外。此外，有自杀念头的17个人中有9个人以前曾尝试过自杀行为，而贾斯特实际上可以辨别出这些采取过自杀行为的人，准确率达到94%。之所以会这样，是因为某些单词激活了他们与非自杀倾向的人所不同的大脑神经反应。

贾斯特在试图找出哪些情绪可能促使这些人产生自杀的念头时，发现了一些东西，比仅仅通过神经反应来进行识别还要有用。在先前的研究中，他的团队已经能够通过人们对人们进行fMRI得到的神经活动模式来识别受试者当时的情绪状态。[\[7\]](#)他使用相同的方法来分析这两组人在读到同样的单词表时所产生的情绪反应。仅仅从他们大脑的情绪特征（以负责情绪反应的大脑区域中的神经活动模式表示），贾斯特就可以识别出目前正在考虑自杀的人，准确率达到了85%。他将对照组和一群有自杀念头的人进行比较，并指出：“在这些不同概念（所表达的词语）引起的情感方面，它们是不同的。总的来说……像‘死亡’和‘麻烦’这一类的概念在有自杀念头的人群中会唤起更多的悲伤和羞耻感，但会减少愤怒。因此，你可以具体了解到有自杀念头的人的思想是如何改变的。你可以直接对自杀的念头做出评估。”按照贾斯特的说法，这种方法可以用于指导治疗，并监测这些疗法（无论是药物治疗、咨询还是神经反馈）的有效性。这一惊人的成就可能会让精神科医生和其他行为健康专业的人士真正拥有了解患者想法的能力，虽然直到现在，这还只是处于设想的阶段。

当你的想法不再私密

这些技术引起的道德问题也显而易见。能够进入一个人的思想，不但能知道一个人在想什么，而且可以将他们的思维与所谓的“正常思维”进行比较，这一切意味着什么？如果一个人坚持说自己没有自我伤害的意图，可是他的fMRI却给出一个完全不同的报告，那么我们是否可以把他们看管起来？两个暗藏杀机的青少年在哥伦拜恩高中进行了大规模屠杀。拉斯维加斯一名邪恶的狙击手杀害了58名无辜平民，并使其他参加室外音乐会的869人受伤，警察赶到的时候，他已经自杀了。对于这些杀手的隐秘想法，“读心术”的潜在应用可以揭示出什么呢？

我们将进一步探讨随着人类对思想的了解，伴随而来的道德标准的变化（请参阅第12章）。但需要记住的是，我们在过去曾面临新技术和科学进步所带来的令人不安的道德挑战。例如，知识和技术的进步使我们能够通过医学测试来监测身体的机能和排查遗传风险，这使我们面临同样的难题：你是否想知道自己的胆固醇水平（高胆固醇水平增加了卒中的风险），或者你是否想知道自己的基因会不会增加患阿尔茨海默病的风险？此外，你想让政府或保险公司知道这些信息吗？当然，“读心术”仍然是棘手的领域。“我们的思想是我们最私密也是最后的避难所，”贾斯特说，“没有什么比思想更私密的了。”

如前所述，尽管将来可能会出现能够快速且简便地控制思想的技术，但在目前的实际应用中，fMRI这种方法还是显得烦琐、缓慢且复杂。贾斯特指出：“只有参与者完全地合作，才能让我晚上睡得安稳。如果他们不想让我们知道他们的想法，那么我们

的方法就很容易被否定。”参与者之所以如此重要，是因为在fMRI记录他们的大脑活动时，他们必须专注于思想、对象或概念。他们不能让自己的思想开小差或想到其他事情。“你的想法如果超出了我们的研究范围，我们就白忙活了。”他的同事弗拉基米尔·切尔卡斯基解释道，“我们要求受试者去想一个苹果六次。所以他们要做的就是第一次想象一个红苹果，第二次想象一个绿苹果，也许第四次他想的是一台苹果电脑，我们就前功尽弃了。”

既然人们能够监视和解码思想，那么通过改变特定的神经回路状态来改变思想的可能性也增加了。目前，这在人类身上还不太可能实现，但是在动物研究中已经取得了一些成功。经颅刺激可以调节神经回路的活动。在施加经颅刺激时，电流可以从头皮电极传送到大脑，也可以通过位于外部的电磁体产生经颅磁刺激在大脑内部诱发电活动。但是，要实现植入思想或操纵思想，必须对神经回路的活动进行精确的控制，需要将电极阵列植入颅腔内，把它们直接连接到大脑表面，或植入深处的脑组织。这两种方法目前在人类仅限于用来控制假肢装置并向大脑提供感觉输入。然而，在动物研究中，科学家已经成功地用多电极进行适当的刺激，从而激活由数十个或数百个编码感知和认知的神经元形成的网络。切尔卡斯基认为，即使还没有达到精确控制，使用目前的方法（例如经颅磁刺激），也可以操纵人类的思想。他告诉我：“我认为人们至少可以做到对人的思想进行一定程度的修改。例如，关于一个苹果的想法。你可以让人们朝着美味的方向去想，使人们更多地去考虑苹果的美味。”尽管经颅磁刺激的方法还不够精确，但它可以激活我们对美味或肮脏的东西产生反应的那些大脑区域。

在人们努力破解大脑如何形成思想的永恒之谜时，重要的是我们应该再次提醒自己：这个器官不是一台按部就班的机器。它的工作方式不像电脑，也不像任何能执行计算或显示任务的精巧的人造设备。它是一个器官，经过进化可以协调完成生命所需的无数机体功能，能感知并与环境互动，从而满足动物的生存需要。

“思维语言源于大脑的结构和本质。”当我们在实验室的讨论转向贾斯特研究所面临的更为现实的问题时，他解释说。大脑进化出非常特殊的执行信息处理功能的子系统，例如，感觉系统、运动系统和情绪反应系统，这些子系统要协调工作。“协调是关键，所以……如果我在想‘苹果’，那么构成苹果这个概念的各种因素和神经回路共同作用，于是产生了‘苹果’的想法。”

既然我们可以看穿人们脑海中涌现出的各种思想，并且开始理解大脑是如何产生思想的，那么它的启发意义是不言而喻的。贾斯特评论道：“这表明人脑限制了我们的思维方式。”我们都以为想象力是无限的，但是那些超出人类大脑进化所能达到的神经功能之外的抽象概念和思想可能是无法想象的。换句话说，可能存在人类无法理解的广阔的现实领域。贾斯特希望自己的研究能让人们多知道一些有关人类思想的新知识。“大脑系统能够产生、理解思想，并使我们成其为人类。我们要做的就是探索这个极其复杂的大脑系统的本质。”

大脑网络和大脑基础结构的评估

跟静息状态的脑电图（一个人无所事事时记录到的脑电波）一样，静息状态的fMRI也可以反映一个人不做任何事情时大脑自发产生的低频振荡波。这种静息状态的大脑活动显示了人脑的内在功能组织结构。据报道，利用静息状态下的fMRI差异可以预测一个人的年龄[\[8\]](#)和智商[\[9\]](#)，但是静息状态下的fMRI更多地被用于反映其他正常和异常的神经和心理特征。最近十来年，神经科学家对大脑运作方式的认识有所转变，才使得这种应用得以诞生。

脑电图谱显示你是谁

汉斯·伯格从事脑电图研究时，为了确定大脑的各个部分具备哪些特定的认知和生物学功能，脑科学已经进行了长达一个世纪的探索。例如，解剖学家科比尼安·布罗德曼在20世纪初的工作是根据组织细胞结构的细微差异，将人类大脑皮质划分为52个不同的区域，形成覆盖整个大脑皮质的一个大拼图。数十年来的研究已将特定的认知功能对应到不同的皮质区域，这些解剖区域至今还为科学家所使用。如前所述，语言能力依赖于左侧大脑皮质的布罗卡区和横跨布罗德曼区的44区和45区。但是，这种还原论或只关注局部而忽视整体的方法是伯格那个时代的大脑科学研究的主流，也是他的研究成果难以引起大家兴趣的主要原因，因为他研究的是整个脑部的电活动。

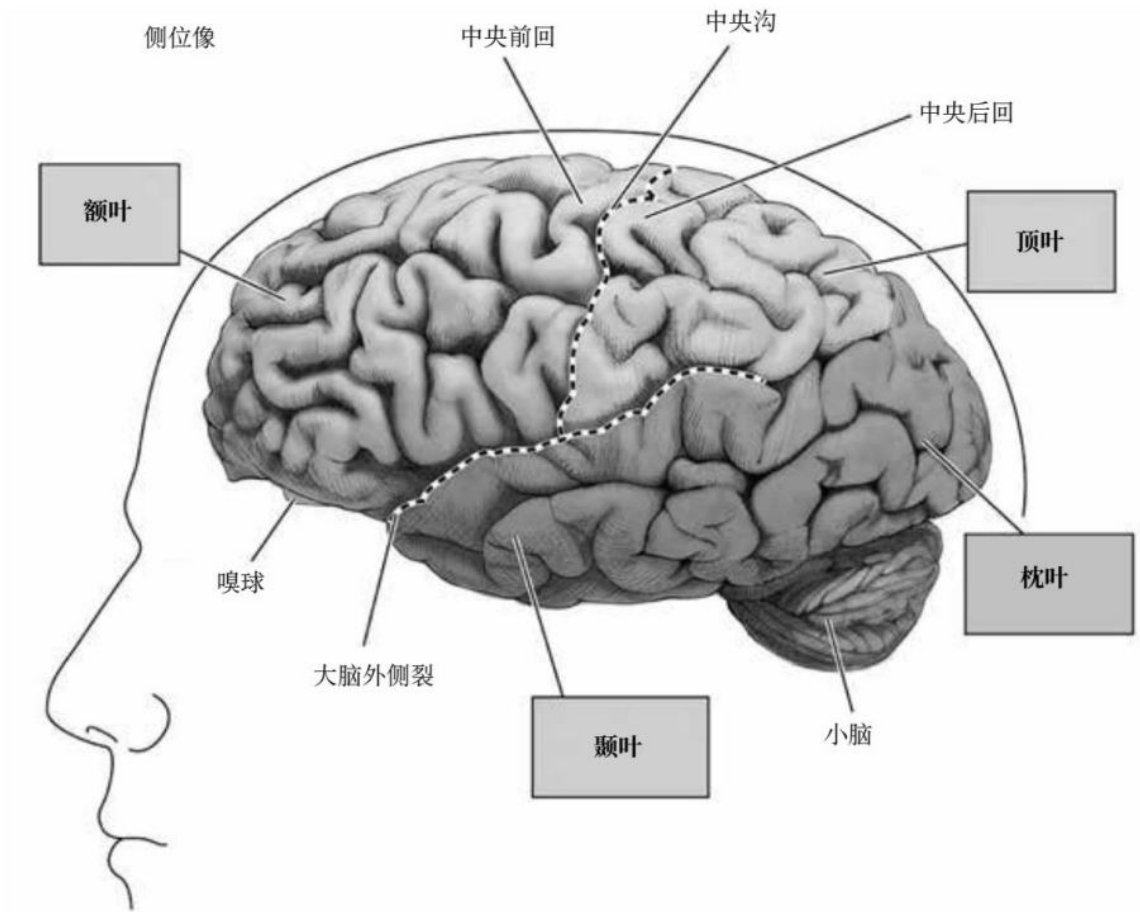


图34 人脑的大脑皮质、小脑和嗅球等主要区域

直到现在，还原主义依然是几乎每位科学家所采用的方法。科学家仍然醉心于寻找大脑中特定的点或负责某些认知功能的特定细胞。研究所采用的技术也是还原主义盛行的原因之一。由于显微镜技术和脑组织染色等新技术的发展，组织学（即确定大脑组织的细胞结构）成为19世纪末和20世纪初大脑研究的主要方法。值得注意的是，西班牙神经解剖学家圣地亚哥·拉蒙·卡哈尔认为，神经元是与所有其他细胞分离的单个细胞，它们跨越一个被称为突触的肉眼看不见的间隙进行交流。这一理论为所有细胞神经科学分支的建立奠定了基础。[\[10\]](#)同样，意大利神经解

剖学家卡米洛·高尔基开发出了用氯化银对神经元进行染色的方法。他把还原论的方法推进到了脑细胞的水平。有趣的是，由于人们的观察和思维受到先入为主的假设的约束，高尔基并不认可卡哈尔的“神经元学说”。他在脑组织中看到互相连接的神经细胞形成了复杂的网状结构，因此他也赞成当时许多人都认可的神经纤维形成网络的观点。这种结构使得神经信号可以通过非常复杂的路径广泛传播，就像邮政服务能够把离散的信息通过复杂且相互连接的道路网进行传递一样。在整个19世纪和20世纪，解剖学完全处于还原论的影响之下，生理学也是如此。由于深受卡哈尔的神经元学说的影响，记录大脑中特定部位的单个神经元所产生的电信号成了生理学家孜孜以求的目标，不过这也是电子放大器和用于采集单个神经元电反应的微电极等新技术发展的结果。

（高尔基和卡哈尔因在神经系统结构方面的出色工作而于1906年共同获得了诺贝尔奖。）

这种大脑功能局限在特定位置的观点已经被大大扩展了。在现代的神经网络概念中，认知功能依赖于大范围的神经网络的信息整合，其范围甚至可以跨越整个大脑。

这个观点是更富于启发还是只是更时尚？神经网络学说直接起源于新技术发展，就像过去的还原论观点源自组织学和电生理学方法的进步一样。如果从这个角度来看脑功能的转变，那么两种说法都有道理。2013年，奥巴马总统发起了一项旨在绘制人脑功能图谱的“脑科学计划”，这是现代技术方法（例如脑电图和fMRI）进步的产物。这些方法可以记录大量神经元的功能活动。从那以后，现代的大脑网络概念开始占据主流。我们现在对大脑

功能的看法与汉斯·伯格的思想更加接近，因为我们正在采用他所使用的方法：监测整个大脑的功能活动。

这种新的大脑功能网络化的观点很有启发性。记录人在安静状态下的全脑活动——受试者没有任何任务，他们只需要安静地坐着，让思想放松，同时用脑电图或fMRI监测大脑内在的活动，这是来自神经网络研究的最令人惊讶的发现之一。通过监视大脑中的活动信号如何从一个位置到其他位置在时间上进行协调，研究人员就可以绘制出大脑所有区域之间的功能连接。

当大脑静息时，脑电图会继续波动，fMRI检测到的信号也会波动。这些在静息状态下记录到的全脑网络的电信号与独特的认知功能有关。只需要监视一个人静息状态下的大脑活动，研究人员就可以获得这个人的大脑连接的大量信息。这些关于大脑的私密信息为研究人员提供了可靠的科学依据。通过它们，研究人员就可以了解你的认知能力、人格特质、学习能力、心理或神经功能状态，并可以预测你的大脑功能和思想轨迹。

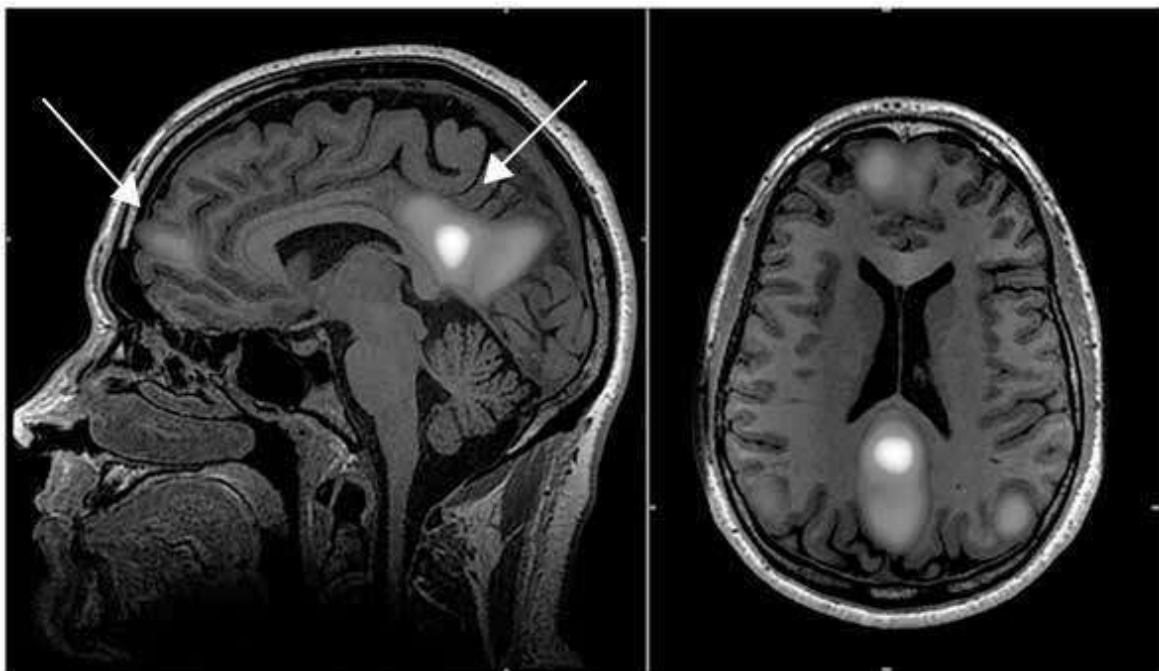


图35 fMRI 所显示的默认网络（DMN）。它是神经网络之一，在人不做任何事、静息出神的时候处于活跃状态。这些神经网络，特别是凸显网络和执行控制网络，决定了个人的认知能力和性格

静息状态下的fMRI和脑电图分析揭示出大脑功能活动的一些主要网络，这将在后面几页中进行介绍。要查看这些功能性网络在大脑中的映射，可以参考图36，那会很有帮助。

默认网络

默认网络在自省、做白日梦和思想开小差期间是活跃的，但是当一个人有目的地执行任务时，默认网络就会被破坏。默认网络是自我意识的神经生物学基础。默认网络会忽略感觉输入并唤起自传信息的回忆，例如与自己有关的事件和事实的记忆，以及对未来的想法和对可能发生的事件的预测。默认网络承载着自己的个人特征、以自我为参照的思想、对自我的描述、对自己的情

绪状态的反思以及对他人的价值判断和思考。对他人的判断属于“智力理论”，即理解他人情感和意图并对他人具有同理心，这是人脑的一种高度发达的能力。默认网络还承载了有关道德、是非的思想，以及社会对他人的评价和对社会观念的评价。

如果你回看我在神经反馈训练期间（杰西卡·厄尔和罗宾·伯恩哈德对我进行了三分种的脑电图测量）脑海中盘旋的想法的描述（请参阅第5章），会看到当时在我的大脑中运转的正是默认网络。回想一下我那些自传般的想法：最近在加勒比海自由潜水的旅行、与家人的经历以及对其他人（包括杰西卡·厄尔、罗宾·伯恩哈德，甚至埃德加·爱伦·坡）的看法。我也预测过未来可能发生的事情并做出个人的判断，例如，为女儿制作的吉他如果完工了，我会是什么感觉。

用默认网络的网络节点可以解释为什么这些类型的想法会在我们静息的大脑中出现。（枢纽或“节点”是神经网络的主要交叉点，就像曼哈顿的华尔街是金融枢纽，世界各地的金融力量都在这里汇集一样。）与自我有关的想法需要后扣带回皮质和楔前叶的参与。在这些皮质区域中，来自记忆的信息和传入的感知被组合在一起，形成注意的焦点。在进行与自我和他人有关的思想活动、回忆过去、对未来进行思考、处理概念以及空间图像时，腹后侧扣带回皮质都会被激活。颞叶、海马和海马旁回负责回忆过去、想象未来以及识别位置和场景。背侧扣带回皮质在无意识警觉时激活，例如当火灾警报器响起时，你会从脑海中抛开所有其他想法而专注于环境中的潜在威胁，否则，注意力就会集中在内心的想法上。楔前叶涉及注意力以及视觉和感觉运动的整合。内侧前额皮质负责做出有关自我的决定，例如个人信息、自传式

记忆、未来的目标和事件，以及做出和与你关系密切的人（例如家庭成员）有关的决定。前额皮质的腹侧部分则参与处理积极的情绪信息和有价值的自我奖励。

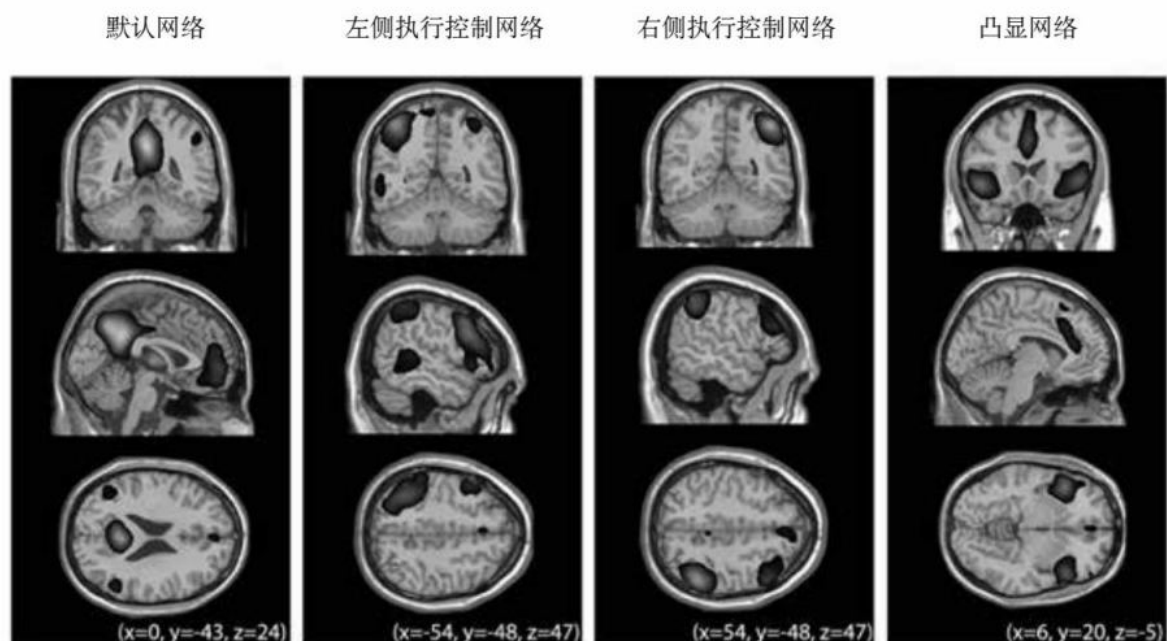


图36 四个主要的长程活跃网络。活跃的脑区在这里显示为灰色团块，通常是着上伪彩的。默认网络在一个人出神时会被激活，它涉及前额皮质、颞叶和海马之间的相互联系。当你制订计划、决策，将想法保存在工作记忆中，进行推理，解决问题以及进行抽象思考时，执行控制网络就会处于活动状态。它还调节冲动行为、攻击性和反社会行为。凸显网络监视来自外部和内部输入的状态信息

凸显网络

凸显网络激活前岛叶和背侧前扣带回皮质。这些区域参与检测和过滤明显的刺激，也就是那些重要且需要引起注意的刺激。该网络还与黑质、腹侧被盖区、腹侧纹状体、杏仁核、背侧丘脑和下丘脑区域相连，这些区域可检测并整合情绪和感觉刺激；调

节默认网络中的内部定向认知与外部定向认知之间（关于人的处境和位置）的快速切换；以及参与和执行控制网络（如下所述）的相互作用。突然闯入我白日梦中的想法，把情境信息带入我的意识（梅拉妮在外面等我）……这些现象意味着我静息时的大脑从默认网络暂时过渡到凸显网络。这种切换可能是由环境中的某些事物引起的，但是静息时的大脑会定期检查正在发生的事情，然后又切换回其他网络功能。人的生存依赖于功能强大的凸显网络，大脑的大片区域会参与其中，这样我们才能对自己所处的位置、所做的事情以及可能出现的危险始终保持清醒的认识。所有这些活动都是人无意识地自动进行的。

执行控制网络

以左、右前额皮质为中心的执行控制网络参与处理和整合复杂的信息。当你在做计划、制定决策、将想法保存在工作记忆中、进行推理、解决问题和进行抽象思考时，执行控制网络会变得很活跃。它调节冲动行为、攻击行为和反社会行为。前额皮质的三个子区域专门负责处理这些认知功能（尽管存在重叠）：背外侧前额皮质负责处理信息流和推理，当然还有其他功能；前扣带回皮质参与情绪驱动、感觉整合以及做出相应行为的决定；眶额皮质与控制冲动和攻击有关。我的执行控制网络一旦启动，就会对我的默认网络进行评估（这是风铃，而不是木琴！），并命令我的默认网络停止做白日梦，于是铃声响起。

其他几个网络负责视觉和听觉控制，例如视觉和听觉网络，但是就更高级别的认知能力、个性和行为（包括正常和异常行为）而言，默认网络、凸显网络和执行控制网络是起主要作用的。

网络。这些都是重要的网络，是我们每个人特有的、由遗传和我们的个人经验所决定的。当你静静地坐在那儿让自己的思想信马由缰的时候，只需要对你的脑电波进行几分钟监测，就可以显示出你有什么样的大脑和思想。

让我举几个例子：

个性：我们的个性是我们身份的核心特征，它产生于大脑的神经回路。这些神经回路使我们每个人天生地在与环境互动时多少有那么一点儿不同。一些人大胆、勇敢，另一些人则谦和、顺从；一些人标新立异、勇于探索，而另一些人则按部就班、墨守成规。心理学家按照人对环境做出的反应把一般人格特征分为三个维度：逃避伤害型、追求新奇型和奖励依赖型（大致相当于“我很害怕”、“那是什么！”和“我想要”）。你落在这种三维动机量表上的位置就显示了你的特殊心理气质。中国科学院的研究人员姜荣涛及其同事的研究结果认为，通过一个人的大脑功能连接方式可以确定他的性格。脑网络组图谱[\[11\]](#)使这成为可能。脑网络组图谱是一个庞大的涵盖人脑解剖和功能连接的中文数据库，其中也包含所涉及的个人的脑功能和认知特征的注释。[\[12\]](#)

在他们对360名健康的大学生进行的研究中，研究人员能够根据受试者在静息状态下由fMRI所确定的脑功能连接来准确预测他的气质评分。已知杏仁核、丘脑、海马旁回和眶额回之间的联系是形成人格特征的很重要的基础，[\[13\]](#)这些联系出现功能障

碍是导致某些精神疾病的原因。[\[14\]](#)他们的分析表明，通过杏仁核、丘脑、扣带回、颞下回和海马旁回之间的神经回路的活动状态可以预测受试者逃避伤害的倾向。所有这些回路都属于边缘系统的核心区域。

追求新颖的性格与眶额回、海马旁和丘脑的功能性连接有关。奖励行为的人格属性与中脑边缘-多巴胺系统为中心的神经网络的连接性有关。杏仁核、海马、基底神经节、前额叶和颞下回也参与这些网络。这些神经回路属于额叶-边缘系统。

知道这些解剖学术语对于理解这些研究提供的重要信息并不是必不可少的：一个人对恐惧、焦虑的感知和调节，对奖励的处理以及被新颖事物和探索吸引，这些基本的人格特征很大程度上是（但不是全部）由基因决定的。一个人的人格特征可以用fMRI来确定——他什么都不用做，只需要在扫描大脑时让思绪神游（大脑静息状态下的活动）。[\[15\]](#)

对刺激后的脑电图反应的研究表明，在左前额皮质和右前额皮质中产生的 α 波强度是不对称的，这与个体对刺激产生的行为反应是倾向于亲近还是回避有关。 α 波的活性降低，表明 α 波去同步化明显，而且皮质回路的活跃程度增加了。左前额皮质（对应于身体右侧）的 α 节律受到抑制与个体接受刺激后产生接近的行为倾向有关，而右前额皮质的 α 节律受到抑制与个体接受刺激后产生回避的行为倾向有关。[\[16\]](#)为了更好地将广告投放给适合的年龄和性别的观众，人们用这个规律来检验电视广告的有效性。[\[17\]](#)

脑部衰老：在德国，一个团队在迪布提·瓦里库提的领导下进行了一项研究。他们对693位健康老年人（55~75岁）脑部的同一个位置进行扫描，另外对2 018位健康成年人（18~81岁）脑部的多个位点进行扫描。研究表明，利用机器学习并通过fMRI，他们能够准确地猜测一个人的年龄。[\[18\]](#)（机器学习是一种电脑数据分析方法，它利用数学方法和人工智能对计算机进行训练，让计算机识别模式并做出决定。这与马塞尔·贾斯特和他的同事所使用的分析方法相同。）

性别：男人和女人的大脑，就像男人和女人的身体一样，是有差别的。新的研究显示，通过用fMRI监测静息状态的大脑，人们很容易就能确定一个人的性别。宾夕法尼亚州盖辛格卫生系统的张超（音译）和安德鲁·米歇尔进行了一项研究。受试者由年龄在22~27岁的366位男性和454位女性组成。研究人员能够根据受试者静息状态的fMRI结果预测出受试者的性别，准确率达到80%。[\[19\]](#)他们发现，性别特异的功能性神经回路连接主要出现在默认网络中。

智力：智力是一个棘手的话题，它有文化的（和历史上种族的）偏见、定义的差异以及界定上的困难。然而，智商是一个公认的衡量认知能力的指标，它与一个人的学识、个性特点和能力相关。在智商相关的研究领域中有许多类型的脑成像研究方法，

它们有明显的区别。例如，人类大脑连接组计划（该计划囊括广泛的行为数据，其中包括每个测试对象的智商）[\[20\]](#)就是利用静息状态下的fMRI，并根据功能性连接的模式来预测受试者的流体智力。[\[21\]](#)（流体智力是指抽象、快速思考、准确识别模式并快速推理以解决问题的能力。它与晶体智力不同，晶体智力是指利用所获得的知识去推导和识别模式并找到正确解决方案的能力。两者的区别大致类似于“脑子转得快”与“有智慧”。）

2000年，诺伯特·乔索维克和克塞尼娅·乔索维克发表的论文指出，他们可以通过受试者闭眼时静息状态的脑电图差异来预测受试者的智力和创造力。[\[22\]](#)他们发现脑电波活动的强度和频率之间存在弱相关性，但是脑电波活动的一致性却与创造力和智力都密切相关。在睁开眼睛进行测量时，差异主要出现在右侧大脑半球。

皮特·尤马在匈牙利布达佩斯的塞麦尔维斯大学进行的另一项研究中发现，睡眠期间的脑电波图谱的差异与智力相关，但这种相关性是性别特异的。[\[23\]](#)在这些研究中，研究人员用瑞文智力测试（Raven's intelligence test，检测人的非语言推理能力和逻辑能力）来评估流体智力。在快速眼动睡眠期间，研究人员对女性的额叶区域进行扫描发现，智力和 β 波强度（反映了纺锤波的活动增强）之间有明显的关联，但在男性中，这种关系并不明显。作者得出结论，认为半睡半醒时的脑电活动与智力有关，但智力的神经学基础在男性和女性身上可能不同。

慢波睡眠以及随之而来的高强度 δ 波脑电图与神经可塑性有关。衰老导致的认知能力下降和慢波睡眠障碍可能相伴相生。智

力较高的个体在衰老时认知能力的下降不明显，而且2017年的一项研究发现，具有较高智力（IQ等于或大于120）的人群中，衰老导致的慢波睡眠 δ 波脑电图下降也较小。[\[24\]](#)另一项研究发现，智商正常的孤独症儿童在非快速眼动睡眠的第二阶段中出现的纺锤波数量少于正常儿童。正常儿童的睡眠纺锤波持续时间与言语智商相关，但在孤独症儿童中没有发现这种相关性。研究人员得出结论，认为这两组人群的大脑皮质神经元可能存在组织上的差异。[\[25\]](#)

在另一项针对学龄儿童的研究中，研究人员发现纺锤波的强度与全量表智商和流体智商相关，于是认为“睡眠时的脑电图可以成为学龄儿童智力的标志”。[\[26\]](#)这些发现与2006年一些早期研究的结论一致。这些研究显示，有学习障碍的儿童的 δ 波、 θ 波和 α 波的强度比没有任何学习问题的对照组儿童的同类脑电波强度要大。由于观察到儿童发育过程中脑电波强度变化的差异，研究人员得出结论，认为这些与低智商和学习困难相关的脑电波特征可能反映了有学习障碍的儿童的大脑发育还不成熟，所以不能处理较复杂的信息。[\[27\]](#)另一个可能性是智力与思维的速度有关。更快的脑电波振荡频率表明信息处理速度更快，因此信息处理的速度可以从脑电图测量中得到。成年人的大脑处于放松状态时的脑电波主频率约为10赫兹（ α 频带），但这在个体之间是有差异的。有几项研究发现，较高的峰值频率和较高的智力有关，但其他一些研究并没有发现这种关联，所以他们得出结论：“聪明的大脑似乎并没有转得更快。”[\[28\]](#)最后，有趣的是，研究人员发现聪明的儿童可能也是要付出一些代价的。研究人员对一群儿童进行了一项跟踪研究，他们发现8岁时具有较高

智商（与正常范围内的其他人相比）的儿童成长到22~23岁时会出现躁狂的倾向，这表明儿童期的高智商可能是个体以后发展为躁郁症的一个危险因素。[\[29\]](#)

创造力：创造性思维的能力不仅对那些从事艺术、科学、写作或音乐创作等行业的人有价值，而且对每个人都很重要。人们靠创造性思维来有效地解决问题。新的研究正在寻找产生创造性思维的大脑回路。2018年发表的fMRI研究发现，极具创造力的人的默认网络、凸显网络和执行控制网络之间的有效连接有明显的特征，这已在本章前面进行了介绍。[\[30\]](#)

在这些研究中，受试者一边由fMRI监测他们的大脑活动，一边从事不同的思维任务。在一项任务中，研究人员向受试者展示了一个常见物体的图片（比如一把锤子），然后要求受试者考虑如何将这个物体用于特殊的用途。在一项对照任务中，研究人员要求相同的受试对象考虑同一物体的常见用法。然后研究人员对他们在这些测试中口头给出的答案进行评估，并对他们的创造力水平打分。研究人员还比较了这两项任务（一项有创造性，另一项没有创造性）在大脑中引起的功能性反应。研究结果（将在后面进行更详细的描述）显示，研究人员不仅能够通过大脑的功能活动方式判断一个人何时具有创造力（或者何时缺乏想象力），而且通过静息状态下的fMRI观察到的大脑功能性连接模式，他们可以准确地从人群中辨别出那些具有创造思维能力的思想家。在不做任何事的静息状态下，只需要对你的脑电图进行8分钟的监

测，研究人员就可以知道，你大脑回路的连接方式会让你变得富于创造力还是缺乏想象力。

研究人员发现，所有这三个大脑网络（默认网络、凸显网络和执行控制网络）同时参与了富有创造力的人的大脑激活模式，因此他们推断，这是促进创造性思维产生的因素。这是一个有趣的发现，因为通常这些网络是此消彼长的。例如，当默认网络处于活跃状态时，人的思维处于游离状态，沉醉于内心世界，但是，当人们开始有意识地行动或凸显网络开始迅速查看外部环境时，默认网络会停止活动。通过测量不同大脑区域之间的功能性连接的强度，研究人员发现，在极富创造力的个人身上，这三个网络的节点之间的功能性连接特别密集。这些影响创造力的网络的中心是后扣带回皮质（默认网络）、右背外侧前额皮质（执行控制网络）和左前脑岛（凸显网络）。研究人员认为，默认网络通过调用记忆来产生想法；凸显网络选择符合实际情况或背景的想法；执行控制网络会对概念进行评估和阐述。研究人员指出，这种动态交互不一定是按顺序进行的，但在极富创造力的头脑中，相互作用可以在这三个网络之间同时出现。

从这些新的研究成果中，我们可以科学地、客观地看到，创造力需要几乎整个大脑的参与。此外，参与创造性思维的大脑区域是执行最高级别认知功能的地方。创造力与认知功能之间存在联系这种观点应该在评估教育时发挥作用。特别是现在学校为了节约资金去支持那些被认为是更正统的学术性课程而减少艺术和音乐课程时，人们更应该重视。大人很容易忽视幼儿园小朋友的蜡笔涂鸦，刻板地认为它们只不过是小朋友在找乐子或者在发展运动控制的能力。但实际上，在孩子的大脑内，记忆力、心理刺

激、判断力和对认知控制的能力正随着色彩鲜艳的条纹和蜡笔的柔和气味而逐渐增长和强化。

除fMRI的方法外，还有大量的脑电图研究试图揭示脑电波与创造力之间的联系。[\[31\]](#)奥地利研究人员于2006年进行的一项研究发现，在测试口头创造力的任务中，最有创意的个体的脑电图模式显示其皮质觉醒水平较低。也就是说，从创造性行为开始就可以看到 α 波的强度急剧增加，并且受试者给出最有创意的回答时，后皮质（中央顶叶）区域的 α 波振荡出现了更明显的同步化。[\[32\]](#)

问题又来了，相关关系不是因果关系。创造性涌现的时候所伴随的 α 波激增可能是创造性思维的结果，而不是原因。在2015年发表的一项研究中，科学家通过对前额皮质施加和 α 波同样频率（10赫兹）的经颅交流电刺激来验证因果关系。[\[33\]](#)结果表明，以这种方式增强 α 波活性也可以导致创造力的增加。对受试者的创造力进行检验用的是托兰斯创造性思维测试（Torrance Test of Creative Thinking），这是最常用的创造力分析方法。当给受试者施加40赫兹的刺激时，他们的创造力没有受到任何影响。这个结果支持以下结论：脑部刺激引起的 α 波能促进提升创造力，而对其他方面（例如新颖性或唤醒性）的影响不大。研究人员认为，活跃的 α 波激活了神经网络，并抑制了自上而下的控制（来自前额皮质）和工作记忆，从而阻止了人对当前想法的严格评估。（如前所述，自上而下的控制是指刻意且经过慎重考虑的行为，而自下而上的控制是指回应外部刺激所产生的反射性行为。）

音乐：卫斯理大学的研究人员于2017年发布的一项研究通过比较非音乐人士、即兴爵士乐演奏家和非即兴演奏家在听了一段和弦后的脑电波反应。研究人员发现，脑电波可以帮助他们找出更具创造力的音乐制作人。[\[34\]](#)基准测试表明，爵士音乐家更喜欢不同寻常的音乐演奏风格，而不是众所周知的和弦顺序。即兴爵士音乐家因听到意外的和弦而激发的脑电波反应（与事件相关的电位）比其他人要大得多。

加拿大西安大略大学的研究人员于2017年发表的另一项研究通过分析音乐家在聆听、重复演奏和即兴演奏时的脑电波活动而对创作过程有了新的见解。[\[35\]](#)实验结果表明，音乐家在进行富于创造性的即兴演奏时，额叶的 α 波活性比重复演奏听过的音乐（创造性较低）时有所增加。此外，对于受过正规爵士乐即兴演奏训练的音乐家来说，他们的脑电波变化是最明显的。这表明创造力和额叶 α 波强度之间存在联系。的确，当研究人员把即兴演奏的爵士乐片段按创造力排序后发现，音乐家在即兴演奏时出现的 α 波活动的强度与其所演奏片段的创造力大小相关。这表明创造力是一种独特的心理状态，可以通过创作过程中产生的额叶 α 波活动的强度来衡量。

一项类似的研究也发现，经验丰富的音乐家在即兴演奏和照谱演奏时的 α 波和 β 波的谱带强度存在差异。[\[36\]](#)研究人员把这种效应定位到了5个脑区：左上额回、运动辅助区、左下顶叶、右外侧前额皮质和右颞上回。这些网络意味着音乐即兴演奏需要更强的实时创造力，其中涉及的神经网络参与每时每刻的决

策，参与监控演奏者的演奏，这样才能自发地产生新的旋律变化。音乐训练还增强了人在听到节奏出差错时的脑电图反应（这是音乐家擅长的能力）。音乐家在听到演奏的音符延迟时，大脑的额叶和额叶中心区域会立即出现脑电波的变化。与非音乐人相比，音乐家的这种脑电波变化更明显。这表明，他们的大脑回路在辨别音乐节奏变化的能力上增强了。[\[37\]](#)

视频游戏：研究人员在2017年报道称，他们发现那些沉迷于网络游戏的男性的大脑连接与普通人相比有差异。[\[38\]](#)韩国首尔大学的研究团队对处于静息状态的受试者的脑电波只进行10分钟的采样后发现，与不沉迷于网络游戏的人相比，沉迷于游戏的人的左右脑之间的30~40赫兹频段（ γ 波）的脑电波活动有更高的同步性。

人们认为沉迷于网络游戏是一种带有强迫性质的、成瘾的行为。研究人员假设，嗜酒如命的人可能与沉迷于网络游戏的人一样，在 γ 波段都存在大脑间的超连通性。人们推测，成瘾、奖励和冲动行为相关的大脑回路可能与酒精依赖以及沉迷于网络游戏有关。这种推测也是合理的。但是，实验发现了一些不同的东西。酗酒者的大脑在 γ 波频带上并没有显示出大脑半球之间的高互连性，但是酗酒者的脑电波在较低频的 θ 波段（4~8赫兹）上却存在更高的大脑半球间互连的趋势。与健康对照组相比，酗酒者的脑电波变化并不十分明显，不像网络游戏成瘾患者的 γ 脑电波出现较高的脑半球间连接性那样明显。这是可以解释的，因为酒精依赖的人不一定像网络游戏成瘾者那样带有强迫性。但这也表明脑电图分析在确定精神病和其他精神问题的神经生理学基础方面有着启发性的作用。纠正酒精依赖和网络游戏成瘾的干预措

施应该会改变大脑的连通状态，恢复的效果会反映在脑电波振荡和同步性的变化中。

阅读障碍：对阅读障碍的遗传分析表明，这种疾病背后的神经网络特性在患者还处于识字的年龄阶段就可以通过检测静息状态的脑电图查出来。一些研究支持了这一推论。例如，本章开头曾提到的研究表明，通过用近红外光谱法测量幼儿的大脑活动，研究人员可以预测儿童到达入学年龄后的阅读能力。2014年的一项研究用静息状态的脑电图数据也得到了类似的结果。荷兰和意大利的研究人员让一些3岁的孩子坐在他们父母的腿上，然后给他们测量了静息状态下的脑电图。[\[39\]](#)当这些孩子长到9岁（读三年级）时，研究人员发现，他们仍然可以根据孩子们几年前测量的脑电图数据来辨别哪些儿童能够流利阅读，哪些儿童在阅读方面有困难。与那些能够毫不费力地阅读的学生相比，不能熟练阅读的学生在3岁时测量的静息状态脑电图显示，其 δ 波的活跃水平显著降低，而 α 波的强度明显增加。许多研究都报道，有阅读障碍的儿童的 α 和 β 脑电波的活性较低。[\[40\]](#)澳大利亚的研究人员在2016年报告了类似的发现，即一个患有阅读障碍的孩子在学习阅读之前，他的闭眼静息状态脑电图以 θ 波的活动为主。这表明他的大脑语言网络的成熟过程被延迟了。[\[41\]](#)

在儿童时期，脑电波的模式会发生变化。在人发育早期（从出生至两岁）的脑电图中， δ 波的活动占主要地位，随着发育其强度逐渐减弱。研究阅读障碍的科学家推测， δ 波相对于其他脑电波的功率可以作为大脑成熟的标志，并且， δ 波的活跃程度与

灰质体积之间的相关性也与这种解释相一致。[\[42\]](#)人在2~6岁时， θ 波的活动增加；在5~8岁时， α 波的活动增加；在8~12岁时， β 波的活动增加；[\[43\]](#)而 γ 波的活动则在4~5岁达到峰值。[\[44\]](#)随着孩子发育的成熟，脑电波的活跃程度逐渐增加，其中大部分与髓鞘形成有关——让轴突绝缘可以实现电脉冲的高速传输。在胎儿和产后发育的不同阶段，大脑中不同通路的神经元会裹上髓鞘，并且在大脑的许多区域，形成髓鞘的过程会一直延续到青春期和成年早期。

一项根据静息状态脑电图数据对大脑网络连通性进行比较的研究表明，与对照组相比，患有阅读障碍的人在 θ 波频带上的网络整合较弱。与这项分析相一致的是，其他fMRI数据显示，阅读障碍患者的大脑网络存在异常，使得这些人在学习阅读时感到困难。[\[45\]](#)据报道，阅读障碍患者的脑电图显示，他们双侧大脑半球的脑电波的连贯性降低了；[\[46\]](#)对语音反应的能力改变了（由声音引起的短暂的脑电图响应）；[\[47\]](#)在非快速眼动睡眠期间的脑电图振幅振荡变慢了；[\[48\]](#)还有就是他们在非快速眼动睡眠期间的纺锤波的活性和功率增加了。[\[49\]](#)

阅读障碍通常被认为是一种功能障碍。虽然它在现代社会无疑是严重的残疾，但我不认为它是功能障碍，因为阅读不是大脑的正常功能。阅读是以前的人类从未做过的事情，直到历史发展到近代，人类才开始阅读。在几百年前，几乎没人能阅读。在我看来，学习阅读的困难不是一种脑功能障碍，就像没有人会认为学习钢琴很难是一种功能障碍一样。有些人擅长文字，但对其他

人来说却显得困难或者完全不行。从这个角度来看，阅读障碍是一种教育的弊病——每个人的大脑之间的差异被忽视了，而且每个人的能力是以不同的速率和程度在发展的。马修·施奈普斯于2014年发表在《科学美国人》上的一篇有趣的文章指出，他们发现的证据表明，有阅读障碍的人有科学天赋。可能当句子还没有被自动解码，每个句子都代表一个问题时，年轻的大脑就已经变得非常精通如何从碎片信息中提取和分析含义了。[\[50\]](#)从这个角度看，前面讲过的静息状态脑电图的特征也许可以被用来预测一个3岁的孩子是否有成为科学家的潜质的指标。

大脑回路形成的网络是构成人独特的认知能力、个性和心理的基础，跟生物的其他方面一样，都是由基因、经验和一些偶然事件决定的。经验如何影响大脑回路和脑电波的一个很好的例子来自一项对罗马尼亚孤儿的长期研究。20世纪80和90年代，在尼古拉·齐奥塞斯库的残酷统治下，这些儿童被遗弃在罗马尼亚的孤儿院中。[\[51\]](#)波士顿儿童医院的查尔斯·尼尔森、马里兰大学帕克分校的内森·福克斯和杜兰大学的查尔斯·泽纳的研究发现，这些孤儿的脑电波与正常人有显著差异。[\[52\]](#)与同年龄的正常儿童相比，这些被遗弃的孤儿的 α 和 β 脑电波功率都比较低，而 θ 脑电波功率较高。脑电波信号的这种改变与注意缺陷多动障碍（ADHD）、学习障碍、破坏性行为障碍和社会心理风险因素有关。12年后的评估显示，后来被安置在寄养家庭中的孤儿发展出了正常的脑电图，然而，那些仍被收容的孤儿的脑电图仍然具有这些异常特征。

虽然这个悲惨的例子说明，痛苦的经历对大脑发育会产生有害的影响，但它也证明，积极的体验能改变大脑的神经网络和脑

电波。我们将在第11章讨论这个话题。接下来，让我们把目光从脑电图和fMRI分析的作用转向如何利用它们看出认知功能的差异和人格差异，以及如何确定功能异常。

[1] Folke, T.; et al. (2016) A Bilingual Disadvantage in Metacognitive Processing. *Cognition* 150: 119 - 132.

[2] Prat, C. S.; Yamasaki, B. L.; and Peterson, E. R. (2018) Individual Differences in Resting-State Brain Rhythms Uniquely Predict Second Language Learning Rate and Willingness to Communicate in Adults. *Journal of Cognitive Neuroscience* 21: 1 - 17; and Prat, C.; Yamasaki, B.; Kluender, R.; and Stocco, A. (2016). Resting State qEEG Predicts Rate of Second Language Learning in Adults. *Brain and Language* 157 - 158: 44 - 50.

[3] Mason, R. A.; and Just, M. A. (2016) Neural Representations of Physics Concepts. *Psychological Science* 27: 904 - 913.

[4] Huth, A. C.; de Heer, W. A.; Griffiths, T. L.; Theunissen, F. E.; and Gallant, J. L. (2016) Natural Speech Reveals the Semantic Maps That Tile Human Cerebral Cortex. *Nature* 532: 453 - 458.

[5] Stack, L. (2017) Georgia Tech Student Leader Is Shot Dead by Campus Police. *New York Times*, September 18, 2017. <https://www.nytimes.com/2017/09/18/us/georgia-tech-killing-student.html>.

[6] Selk, A.; Shapiro, T. R.; and Lowery, W. Call about Suspicious Man Was Made by Georgia Tech Student Killed by Police, Investigators Say. *Washington Post*, September 18, 2017. https://www.washingtonpost.com/news/grade-point/wp/2017/09/17/knife-wielding-campus-pride-leader-killed-by-police-at-georgia-tech/?utm_term=.eb0a1588fa59.

[7] Kassam, K. S.; et al. Identifying Emotions on the Basis of Neural Activation. *PLoS One* 19 (6): e66032.

[8] Dosenbach, N. U. F.; Nardos, B.; Cohen, A. L.; Fair, D.; Power, J. D.; Church, J.; et al. (2010) Prediction of Individual Brain Maturity Using fMRI. *Science* 329: 1358 – 1361. doi:10.1126/science.1194144.

[9] Finn, E. S.; Shen, X.; Scheinost, D.; Rosenberg, M. D.; Huang, J.; Chun, M. M.; et al. (2015) Functional Connectome Fingerprinting: Identifying Individuals Using Patterns of Brain Connectivity. *Nature Neuroscience* 1 – 11. doi:10.1038/nn.4135.

[10] Fields, R. D. Why the First Drawings of Neurons Were Defaced. *Quanta Magazine*, September 28, 2017. <https://www.quantamagazine.org/why-the-first-drawings-of-neurons-were-defaced-20170928/>.

[11] Brainnetome Atlas. <http://atlas.brainnetome.org/>. Accessed October 3, 2019.

[12] Fan, L.; et al. (2016) The Human Brainnetome Atlas: A New Brain Atlas Based on Connectional Architecture. *Cerebral Cortex* 26 (8): 3508 – 3526.

[13] Krebs, R. M.; et al. (2009) Personality Traits Are Differentially Associated with Patterns of Reward and Novelty Processing in the Human Substantia Nigra/Ventral Tegmental Area. *Biological Psychiatry* 65:103 – 110.

[14] Van Schuerbeek, P.; et al. (2011) Individual Differences in Local Gray and White Matter Volumes Reflect Differences in Temperament and Character: A Voxel- Based Morphometry Study in Healthy Young Females. *Brain Research* 1371: 32 – 42.

[15] Jiang, R.; et al. (2017) Predicting Temperament Dimension Scores Using Brainnetome-Atlas based Functional Connectivity. Poster Presentation at Organization for Human Brain Mapping Meeting, June 25 – 29, 2017.

[16] Allen, J. J. B.; Kline, J. P. (2004) Frontal EEG Asymmetry, Emotion, and Psychopathology: The First, and the Next, 25 years. *Biological Psychology* 67 (1 - 2): 1 - 5.

[17] Cartocci, G.; et al. (2016) Gender and Age Related Effects While Watching TV Advertisements: An EEG Study. *Computational Intelligence and Neuroscience* 2016: 3795325.

[18] Varikuti, D.; et al. (2017) Evaluation of Non-Negative Matrix Factorization of Grey Matter in Age Prediction. Poster Presentation at Organization for Human Brain Mapping Meeting, June 25 - 29, 2017; and Varikuti, D.P., (2018) Evaluation of Non-Negative Matrix Factorization of Grey Matter in Age Prediction. *Neuroimage*, 173: 394 - 410.

[19] Zhang, C., and Micheal, A. (2017) The DMN Contributes Most to Gender Prediction: A Large Resting fMRI Study, Poster Presentation at Organization for Human Brain Mapping Meeting, June 25 - 29, 2017.

[20] Van Essen, D. C. (2013) The WU-Minn Human Connectome Project: An Overview. *Neuro Image* 80:62 - 79.

[21] Ma, F.; Guntupalli, J.; and Haxby, J. (2017) Hyperalignment Improves Prediction of Fluid Intelligence from Functional Connectivity. Poster Presentation at Organization for Human Brain Mapping Meeting, June 25 - 29, 2017.

[22] Jausovec, N.; and Jausovec, K. (2000) Differences in Resting EEG Related to Ability. *Brain Topography* 12 (3): 229 - 240.

[23] Ujma, P. P.; et al. (2017) The Sleep EEG Spectrum Is a Sexually Dimorphic Marker of General Intelligence *Scientific Reports* 7: 18070.

[24] Potari, A.; et al. (2017) Age-Related Changes in Sleep EEG Are Attenuated in Highly Intelligent Individuals. *Neuroimage* 146: 554 - 560.

[25] Tessier, S.; et al. (2015) Intelligence Measures and Stage 2 Sleep in Typically-Developing and Autistic Children. *International Journal of Psychophysiology* 97 (1): 58 – 65.

[26] Geiger, A.; et al. (2011) The Sleep EEG as a Marker of Intellectual Ability in School Age Children. *Sleep* 34 (2): 181 – 189.

[27] Fonseca, L. C.; et al. (2006) Quantitative EEG in Children with Learning Disabilities: Analysis of Band Power. *Arquivos de Neuro-psiquiatria* 64 (2B): 376 – 381.

[28] Posthuma, D.; et al. (2001) Are Smarter Brains Running Faster? Heritability of Alpha Peak Frequency, IQ, and Their Interrelation. *Behavior Genetics* 31 (6): 567 – 579.

[29] Smith, D. J.; et al. (2015) Childhood IQ and Risk of Bipolar Disorder in Adulthood: Prospective Birth Cohort Study. *BJPsych Open* 1 (1): 74 – 80.

[30] Beaty, R. E.; et al. (2018) Robust Prediction of Individual Creative Ability from Brain Functional Connectivity. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America* 115 (5): 1087 – 1092.

[31] Boot, N.; et al. (2017) Widespread Neural Oscillations in the Delta Band Dissociate Rule Convergence from Rule Divergence During Creative Idea Generation. *Neuropsychologia* 104: 8 – 17; and Marmpena, M.; et al. (2016) Phase to Amplitude Coupling as a Potential Biomarker for Creative Ideation: An EEG Study. *Engineering in Medicine and Biology Society, Annual International Conference of the IEEE* 2016: 383 – 386. doi:10.1109/EMBC.2016.7590720; and Schwab, D.; et al. (2014) The Time Course of EEG Alpha Power Changes in Creative Ideation. *Frontiers in Human Neuroscience* 8: 310; and Fink, A.; and Benedek, M. (2014) EEG Alpha Power and Creative Ideation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 44: 111 – 123. doi:10.1016/j.neubiorev.2012.12.002; and Junk, E.; Benedek, M.; and Neubauer, A. C. (2012) Tackling Creativity at Its Roots: Evidence for Different Patterns of EEG α Activity Related to Convergent and

Divergent Modes of Task Processing. *International Journal of Psychophysiology* 84 (2): 219 - 225.

[32] Fink, A.; and Neubauer, A. C. (2006) EEG Alpha Oscillations During the Performance of Verbal Creativity Tasks: Differential Effects of Sex and Verbal Intelligence. *International Journal of Psychophysiology* 62 (1): 46 - 53.

[33] Lustenberger, C.; et al. (2015) Functional Role of Frontal Alpha Oscillations in Creativity. *Cortex* 67:74-82.

[34] Przysinda, E.; Zeng, T.; Maves, K.; Arkin, C.; and Loui, P. (2017) Jazz Musicians Reveal Role of Expectancy in Human Creativity. *Brain and Cognition* 119: 45 - 53.

[35] Lopata, J. A.; Nowicki, E. A.; and Joanisse, M. F. (2017) Creativity as a Distinct Trainable Mental State: An EEG Study of Musical Improvisation. *Neuropsychologia* 99: 246 - 258.

[36] Adhikari, B. M.; Norgaard, M.; Quinn, K. M.; Ampudia, J.; Squirek, J.; and Dhamala, M. (2016) The Brain Network Underpinning Novel Melody Creation. *Brain Connectivity* 6 (10): 772 - 785.

[37] Habibi, A.; Wirantana, V.; and Starr, A. (2014) Cortical Activity during Perception of Musical Rhythm: Comparing Musicians and Non-musicians. *Psychomusicology* 24 (2): 125 - 135.

[38] Park, M.; et al. (2017) Neural Connectivity in Internet Gaming Disorder and Alcohol Use Disorder: A Resting-State EEG Coherence Study. *Scientific Reports* 7: 1333.

[39] Schiavone, G.; Linkenkaer-Hansen, K.; Maurits, N. M.; Plakas, A.; Maassen, B. A.; Mansvelder, H.D.; van der Leij, A.; and van Zuilen, T. L. (2014) Preliteracy Signatures of Poor-Reading Abilities in Resting-State EEG. *Frontiers in Human Neuroscience* 8: 735.

[40] Rumsey, J. M.; Coppola, R.; Denckla, M. B.; Hamburger, S. D.; and Kruesi, M. J. (1989) EEG Spectra in Severely Dyslexic Men:

Rest and Word and Design Recognition. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 73 (1): 30-40; and Rippon, G.; and Brunswick, N. (2000) Trait and State EEG Indices of Information Processing in Developmental Dyslexia. *International Journal of Psychophysiology* 36(3): 251-265; and Klimesch, W.; Doppelmayr, M.; Wimmer, H.; Gruber, W.; Rohm, D.; Schwaiger, J.; and Hutzler, F. (2001) Alpha and Beta Band Power Changes in Normal and Dyslexic Children. *Clinical Neurophysiology* 112 (7): 1186-1195; and Babiloni, C.; Stella, G.; Buffo, P.; Vecchio, F.; Onorati, P.; Muratori, C.; Miano, S.; Gheller, F.; Antonaci, L.; Albertini, G.; and Rossini, P. M. (2012) Cortical Sources of Resting State EEG Rhythms Are Abnormal in Dyslexic Children. *Clinical Neurophysiology* 123 (12): 2384-2391.

[41] Papagiannopoulou, E. A.; and Lagopoulos, J. (2016) Resting State EEG Hemispheric Power Asymmetry in Children with Dyslexia. *Frontiers in Pediatrics* 4: 11.

[42] Whitford, T. J.; Rennie, C. J.; Grieve, S. M.; Clark, C. R.; Gordon, E.; and Williams, L. M. (2007) Brain Maturation in Adolescence: Concurrent Changes in Neuroanatomy and Neurophysiology. *Human Brain Mapping* 28 (3): 228-237. doi .org/10.1002/hbm.20273

[43] Anderson, A. J.; and Perone, S. (2018) Developmental Change in the Resting State Electroencephalogram: Insights into Cognition and the Brain. *Brain and Cognition* 126: 40-52.

[44] Takano, T.; and Ogawa, T. (2007) Characterization of Developmental Changes in EEG-gamma Band Activity During Childhood Using the Autoregressive Model. *Pediatrics International* 40: 446-452.

[45] Fraga González, G.; Van der Molen, M. J. W.; Žari , G.; Bonte, M.; Tijms, J.; Blomert, L.; Stam, C.J.; and Van der Molen, M. W. (2016) Graph Analysis of EEG Resting State Functional Networks in Dyslexic Readers. *Clinical Neurophysiology* 127 (9): 3165-3175.

[46] Dhar, M.; Been, P. H.; Minderaa, R. B.; and Althaus, M. (2010) Reduced Interhemispheric Coherence in Dyslexic Adults. *Cortex*

46 (6): 794 – 798.

[47] Lohvansuu, K.; Hamalainen, J. A.; Tanskanen, A.; Ervast, L.; Heikkinen, E.; Lyytinen, H.; and Leppanen, P. H. (2014) Enhancement of Brain Event-Related Potentials to Speech Sounds Is Associated with Compensated Reading Skills in Dyslexic Children with Familial Risk for Dyslexia. *International Journal of Psychophysiology* 94 (3): 298 – 310.

[48] Bruni, O.; Ferri, R.; Novelli, L.; Finotti, E.; Terribili, M.; Troianiello, M.; Valente, D.; Sabatello, U.; and Curatolo, P. (2009) Slow EEG Amplitude Oscillations During NREM Sleep and Reading Disabilities in Children with Dyslexia. *Developmental Neuropsychology* 34 (5): 539 – 551.

[49] Bruni, O.; Ferri, R.; Novelli, L.; Terribili, M.; Troianiello, M.; Finotti, E.; Leuzzi, V.; and Curatolo, P. (2009) Sleep Spindle Activity Is Correlated with Reading Abilities in Developmental Dyslexia. *Sleep* 32(10): 1333 – 1340.

[50] Schneps, M. H. The Advantages of Dyslexia: With Reading Difficulties Can Come Other Cognitive Strengths. *Scientific American*, August 19, 2014. <https://www.scientificamerican.com/article/the-advantages-of-dyslexia>.

[51] Hamilton, J. Orphans’ Lonely Beginnings Reveal How Parents Shape a Child’s Brain. *NPR Morning Edition*, February 24, 2014. <https://www.npr.org/sections/health-shots/2014/02/20/280237833/orphans-lonely-beginnings-reveal-how-parents-shape-a-childs-brain>.

[52] Nelson, C. A.; Fox, N. A.; and Zeanah, C. H. (2013) Tragedy leads to study of severe child neglect. *Scientific American*, April 1, 2013.

第10章

脑部检查和精神疾病

既然通过脑电图和fMRI 监测大脑电活动可以了解一个人的性格和认知能力，那么用这些技术来发现各种神经功能障碍就不足为奇了。尽管在某些情况下，例如癫痫可以用脑电图和fMRI 进行诊断，但在大部分情况下，这些研究手段还没有达到可以进行诊断的程度。大脑活动与神经、心理功能障碍之间的联系是基于群体的研究。这类似于高血压清楚地预示着卒中的风险会增加，但是这并不意味着高血压患者一定会卒中，尽管两者相关性的生物学基础已广为人知。不过，随着时间的推移，通过记录脑部电活动来诊断神经系统疾病和心理疾病将会变得越来越常见。

神经系统疾病

神经系统疾病是由于大脑、脊髓、感觉器官、肌肉和神经遭受疾病或损伤引起的。当神经功能改变时，大脑电活动的模式和传输也会改变。结果，许多神经系统异常可能会在脑电图中留下痕迹，因而这种直接检测大脑电活动的方法可能成为诊断和治疗的有力手段。

癫痫

在癫痫的研究和治疗中，脑电图的重要性已广为人知；确实，当人们提到脑电图记录时，首先想到的就是癫痫发作期间，脑部出现风暴一般的电活动所造成的脑电图混乱的图形。不过，并非所有的癫痫发作都是这样。赫伯特·贾斯珀是把脑电图研究应用于癫痫领域的先驱之一。他的职业生涯与神经科学领域的一些最著名人士有交集。我很希望通过他的例子来说明，科学是一个高度协作的过程（可以在全球范围内跟相对较少的一群热衷于探索大自然奥秘的人分享思想和实验结果），当然也希望能通过本书的探索，让大家了解脑电波研究的现状。



图37 癫痫发作伴有高度同步的脑电波暴发

赫伯特·贾斯珀于1906年出生于俄勒冈州，是美国第一位发表人脑电图记录的人。由于脑电图记录可能被用于诊断癫痫，因此贾斯珀对这项技术产生了兴趣。汉斯·伯格发现人脑电波的事曾受到广泛的质疑，其成果也一直被忽视，直到1934年，诺贝尔奖获得者埃德加·道格拉斯·阿德里安重复了伯格

的实验，与布赖恩·马修斯合著论文，并发表在科学杂志《大脑》上，质疑的声音才小了一些。1935年，贾斯珀前往德国与汉斯·伯格会面，他还拜访了英国剑桥的阿德里安和马修斯。同年，贾斯珀在著名的《科学》杂志上发表了他对人脑做的脑电图记录，肯定了伯格的这一重要发现。贾斯珀在题为《完整的人类大脑的电势能》的论文中写道：

耶拿的汉斯·伯格博士发表了一系列论文。他在论文中说，利用适当的真空管放大系统和示波器，可以放大并记录与人脑活动相关的电位变化。这些变化是通过放置在头部不同位置的针或表面电极获取的……他认为，通过这种普通的技术获得的可靠记录表明，有两种典型的有节奏的电波振荡形式，除此以外还有一些其他现象。他把具有最大振幅的波称为 α 波。另一种振幅较小的波有时会单独出现，有时会叠加在 α 波的上部，他称之为 β 波……伯格博士在这些实验中表明，在某些类型的麻醉过程中以及在癫痫发作期间， α 波的强度会降低。而且，当受试对象受到感觉刺激或出现精神问题时， α 波的强度会降低，这乍一看似乎很矛盾。[\[1\]](#)

怀尔德·彭菲尔德是一位著名的神经外科医师，在治疗癫痫方面成绩斐然。他也因为使用电刺激指引脑部手术的方法以及探索人类认知的成就而闻名。应贾斯珀的邀请，怀尔德·彭菲尔德于1935年在布朗大学心理学系举办了一次研讨会。根据马西莫·阿沃利撰写的历史回顾，彭菲尔德描述他与贾斯珀的会晤时说：“他（贾斯珀）说他可以通过从颅骨外部扰乱脑电波节律来确定癫痫发作的位置。我对此表示怀疑，但希望它是真的。”

彭菲尔德同意给做过脑电图检查的两名患者进行手术，以查明其癫痫发作的位置。打开颅腔后，彭菲尔德发现贾斯珀的脑电图分析准确地定位了癫痫发作的中心位置。在这件事的促进下，两人从1938年开始密切合作。那时，贾斯珀会把一台便携式脑电图仪装到他的汽车上，开车到彭菲尔德工作的蒙特利尔神经学研究所。贾斯珀很快搬到蒙特利尔，在那里与彭菲尔德进行了长达30年卓有成效的合作。如今，脑电图分析是指导内科医师和神经外科医生治疗癫痫的最强大的工具。

阿尔茨海默病

中国科学院深圳先进技术研究院的隆晓菁及其同事利用结构MRI数据来检验大脑的解剖学差异。这些差异可用于预测阿尔茨海默病，并能非常准确地从患有轻度认知功能损害（MCI）症状的人中区分出谁更容易患上阿尔茨海默病。[\[2\]](#)（轻度认知障碍是指比正常衰老造成的认知能力下降更为严重的退化。随着年龄的增长，轻度认知功能损害可能发展为痴呆，因此可能是阿尔茨海默病发展的一个指标。但并非所有轻度认知功能损害患者都会发展为阿尔茨海默病，有些轻度认知功能损害患者可以得到改善。）目前，医生很难将轻度认知障碍与早期阿尔茨海默病区分开。人们很希望能做到这种区分，因为这样就可以在疾病的早期阶段进行适当的治疗。

他们对阿尔茨海默病神经影像学计划（ADNI）数据库中的227人进行了分析。[\[3\]](#)阿尔茨海默病神经影像学计划是阿尔茨海默病患者脑成像数据的一个全球数据库，其中包括每个被收

录的患者的遗传学、认知测试和生物标记数据。研究人员把患有轻度认知障碍且在60个月内未转变为阿尔茨海默病的受试者与患有进行性轻度认知功能损害并在基线随访的36个月内转变为阿尔茨海默病的受试者进行了比较。基于MRI查看到的解剖学差异，研究人员能够将仅患有轻度认知功能损害的患者与罹患进行性轻度认知功能损害并最终导致阿尔茨海默病的患者区分开。通过使用一种检测海马和杏仁核变化的算法，他们进行辨别的准确率能够达到89%。

脑成像显示，有结构差异并可能发展为阿尔茨海默病的人，应该也伴有脑电图可检测到的功能差异，这方面的研究有不少。

静息状态的脑电图分析显示，在阿尔茨海默病早期，患者 α 频段的脑电波功率降低， α 波的节律减慢，出现更多低频的波段。[\[4\]](#)阿尔茨海默病患者的典型脑电图特征是 δ 波或 θ 波的频率增加，而 α 波或 β 波的节律性活动减少。有研究报告指出，阿尔茨海默病患者除了 δ 波功率增强， α 波功率减弱之外，他们的 γ 波功率也有增强。[\[5\]](#)研究人员得出结论，认为阿尔茨海默病患者的 γ 波段功率出现病理性增高可能是由于 γ -氨基丁酸能神经元网络被破坏所致。（回想一下， γ -氨基丁酸能神经元抑制大脑皮质中的兴奋型神经元。它们在产生 γ 波振荡中起着非常重要的作用。）此外，研究人员观察到，阿尔茨海默病患者的 γ 波谱带中的跨频电波的同步性增强了，这可能意味着神经元网络的复杂性减小。为了弥补这一点，阿尔茨海默病患者可能不得不调用更多的神经资源来维持静息时的大脑功能状态。脑电波的振荡不是孤立的，它们会相互作用，并且跨

频率调节多个神经网络。[\[6\]](#)例如，海马中的“ θ - γ 相”和“振幅耦合”随工作记忆负荷的变化而变化[\[7\]](#)，并且 θ - γ 相耦合的破坏与阿尔茨海默病小鼠模型的认知缺陷相关。[\[8\]](#)

2018年发表的一项研究显示，阿尔茨海默病患者发生神经病变的生物标志物（脑脊髓液中的分子）水平与全脑电波的功率和同步性有关系。[\[9\]](#)他们发现患者脑脊髓液中的淀粉样蛋白 β 42的水平降低与全脑电图的 θ 波和 δ 波的强度和同步性都增加相关；而p-tau蛋白和t-tau蛋白的增加与 α 波和 β 波的强度和同步性都降低相关。这些变化与受试者的认知能力下降程度一致。

对阿尔茨海默病患者静息状态的MRI研究显示，他们的默认网络功能被破坏。同时，如上所述，静息状态的脑电图一致显示他们 α 波频段的功率降低。最近一项同时记录阿尔茨海默病患者静息状态MRI和脑电图的研究发现，在对照组的默认网络中，静息状态下的脑电图功率与fMRI信号之间存在很强的相关性，但在阿尔茨海默病患者的默认网络和其他许多大脑区域中，脑电图的功率与fMRI的相关性却降低了。[\[10\]](#)

除了以上关于大脑静息状态的研究以外，人们还发现，参与认知任务时的脑电波变化可以用来诊断阿尔茨海默病，并提供受损神经网络的更详细信息。例如，阿尔茨海默病患者的一个突出特征是语言能力逐步下降。最近的一项研究比较了失忆型轻度认知功能损害患者与正常老年人对照组在词汇理解测试中的脑电波活动。他们发现了痴呆的指标，并且能够利用它来

预测谁会从轻度认知功能损害演变为阿尔茨海默病。[\[11\]](#) 研究人员向测试对象展示一个单词，同时记录他们的脑电波反应。例如，研究人员让测试对象找出“一种树木”。作为回应，受试者要确定一幅与提示语言相对应的图片（比如橡树）。通常，当将提示词呈现给健康对照组时，他们大脑后部区域（这个区域与处理单词有关）的 θ 波活性会快速增加。随后， α 波的活动很快被抑制，这个过程与大脑初次感知到单词后对该单词的含义和上下文进行处理的活动有关。

α 波被抑制的现象仅在健康的同年龄对照组中观察到，而在轻度认知功能损害患者或后来患阿尔茨海默病的人中均未观察到这个现象。脑电图结果表明，在给后来发展为阿尔茨海默病的轻度认知功能损害患者呈现目标词组后，所诱发的后顶叶 θ 波的活跃度减少了。此外，与健康对照组相比，这些人在处理测试词时的脑电波表现出不同的振荡特征，其中掺杂了其他频率的脑电波。研究人员并没有在轻度认知功能损害患者或后续发展为阿尔茨海默病的患者中检测到 θ 波和 α 波/ β 波之间明显的跨频连接，这种跨频连接通常在健康的受试者身上才出现。在这个测试中，抑制 α 波的能力减弱或许可以作为诊断轻度认知功能损害患者和可能进展为阿尔茨海默病的轻度认知功能损害患者的有用指标。轻度认知功能损害患者和可能进展为阿尔茨海默病的轻度认知功能损害患者的脑电波差异反映了他们的一些神经网络可能受到了损害，而这些网络对隐式和显式记忆过程均很重要。

这些对脑电波信号的研究都可以预测早期痴呆，并找出那些功能失调的神经网络。作为一个群体，那些最终发展为阿尔

茨海默病的轻度认知功能损害患者在语言理解上存在些许缺陷，这可以从他们做文字处理时的脑电波振荡变化中看出来。这些脑电波变化被认为是由于提供语言理解能力的神经网络退化所致。因此，通过监测脑电图，人们有可能在疾病恶化之前就判断它是否会发展成阿尔茨海默病和失忆，从而进行早期干预。

帕金森病

任何神经退行性疾病都会损害正常的大脑网络功能。因此，大脑中的电场在强度、连贯性和位置上都会发生变化。理论上，这种影响也会引起脑电波的改变，而头皮电极可以检测到这些变化。因此，脑电图记录可以作为一种无害且无创的方法，为诊断提供有用的信息。

许多神经退行性疾病在一开始时并没有任何症状，病情甚至可能隐蔽地发展数年或数十年。帕金森病是一个很好的例子。人们希望任何退行性疾病都能得到早期的干预。如果脑电图记录可以检测出疾病的早期征兆，那么它所带来的好处可能会彻底改变人们的生活。帕金森病除了造成运动障碍外，通常还会造成认知缺陷。人们在帕金森病患者中观察到 δ 波和 θ 波频段的功率增加，同时 α 波和 β 波的功率降低——这使人联想到阿尔茨海默病。[\[12\]](#)这两种疾病有很大的区别。最近的一项研究中，研究人员用高密度脑电图记录（就是说，不是之前所述的研究中使用的20个电极，他们使用更多的脑电图电极——多达256个通道）可以准确地区分这两种疾病。受试者所要做的

只是闭上眼睛，做12分钟静息状态的脑电图记录。阿尔茨海默病和帕金森病患者的脑电图有相似的特征。然而，与阿尔茨海默病患者相比，帕金森病患者的脑电波节律明显减慢。[\[13\]](#) 大脑左中部区域的 α/θ 值和颞部左侧区域的 θ 波功率是用脑电图区分阿尔茨海默病、轻度认知功能损害和帕金森病的两个最重要的指标。[\[14\]](#)

2017年发表的一项对帕金森病患者（这些患者同意死后将大脑捐赠给帕金森病脑库。他们在接受治疗的同时也进行了脑电图记录）的研究发现，帕金森病患者的 δ 波频带功率改变与其脑组织中的病理蛋白质沉积之间有很强的关联。这种脑部病理性蛋白沉积的疾病被称为路易型突触核蛋白病（Lewy type synucleinopathy），在路易体痴呆（Lewy body dementia）患者脑中也发现有相同的蛋白质沉积。[\[15\]](#) 脑组织的活检和组织学分析通常只是在尸检的时候才做，因此，静息状态的脑电图也许可以作为这些方法的替代。除了静息状态的脑电图，执行特定任务时的脑电图也可以显示一个人是否患有帕金森病。例如，帕金森病患者的脑电波电位达到峰值的反应时间比对照组要长。[\[16\]](#)

心理疾病

神经系统疾病会改变神经回路中的电活动，这是不言而喻的——如果大脑的硬件发生故障，那么其功能自然也会出现异常。因此，用脑电图或其他方法应该可以检测到这种异常。认为心理障碍具有生物学基础曾经是一种革命性的观点，不过如

今这已是众所周知的事了。正如通过脑电图能够揭示我们的性格特征一样，用脑电图和fMRI等技术方法应当也能揭示心理疾病。目前，人们正在积极探索，试图阐明大脑中的电活动与心理健康之间的这种联系。在这里，我不可能一一介绍这一庞大研究领域的细节。但是，在脑电图分析领域中，这些关于心理障碍的研究有望使医生的诊断水平大大提高，促进人们从生物学角度去理解和治疗心理障碍。为了说明这些重要性，我们举几个例子。

注意缺陷多动障碍

2013年，FDA批准使用脑电图数据中的 θ/β 功率比作为注意缺陷多动障碍的诊断指标。它是FDA批准的第一种用于诊断心理问题的脑电图方法。患有注意缺陷多动障碍的人表现为注意力一直不集中、活动过度和冲动的行为模式。大量对注意缺陷多动障碍的研究发现，患者的 θ 波（4~7赫兹）的功率增加，同时伴有 β 波（13~30赫兹）的功率降低。FDA批准的这一诊断方法正是基于这一发现。这种独特的脑电图特征在患者额叶的Cz位置最容易被观察到。[\[17\]](#) 2006年发表的一篇研究综述表明，这种方法在诊断注意缺陷多动障碍方面的准确率高达94%。[\[18\]](#) 但是，最近的研究表明，尽管大部分注意缺陷多动障碍患者表现出这种 θ/β 比值的特征性变化，但有的患者的脑电波并没有这种特征性变化。因此，目前仅仅靠脑电图一种方法还不能够确诊。[\[19\]](#)

尽管有科学依据，但在实际情况中，很多因素使得脑电图分析在诊断注意缺陷多动障碍（及其他精神障碍）时面临很多问题。会对脑电波的强度造成影响的因素实在太多了，例如疲劳、注意力、兴奋剂和镇静剂等，而且脑电图记录结果的可靠性会因为脑电图分析所使用的仪器和专业人员的知识结构不同而产生巨大的差异。由于在科学研究中所使用的是最佳的设备、最好的专业人才和最优的流程，所以脑电图可以用来进行诊断，但是根据美国神经病学会2016年发表的结论，对于心理健康从业人员的常规使用来说，只用脑电图给患者做诊断可能还不够可靠。考虑到人们由于被误诊为注意缺陷多动障碍可能造成的伤害，神经病学会建议不应该用脑电图分析取代标准的临床评估，但 θ / β 分析可以和注意缺陷多动障碍的其他诊断方法结合使用。[\[20\]](#)这是目前的情况，不过随着脑电图研究和科学技术的迅速发展，这种情况在不久的将来必将改变。

注意缺陷多动障碍的另一个重要特点是患者的个体差异很大，脑电图分析可能会对此有所帮助。例如，有一部分患注意缺陷多动障碍的成年人智商很高，但很难专注地完成任务，而且组织能力也有问题，表现出拖延和情绪不稳定的倾向。2017年发表的一项对40名高智商（IQ值120以上）的成年注意缺陷多动障碍患者的研究显示，这些人在闭眼静息状态下的 β 波和 θ 波功率增加。研究人员得出结论，认为额叶、中央区和顶叶脑区的 β 波功率增加与控制冲动的能力降低有关，并且这种脑电图模式可能是造成成年注意缺陷多动障碍患者出现不良行为的风险因素。[\[21\]](#)

侵略性与精神病理学

20世纪70年代，不列颠哥伦比亚大学名誉心理学教授罗伯特·黑尔提出了一种关于反社会行为的理论，他认为较低的唤醒水平会使个人容易出现犯罪和暴力行为。20世纪50年代早期的脑电图研究发现，监狱中的成年精神病患者 [\[22\]](#) 和暴力犯罪分子的 θ 和 δ 慢速脑电波具有关联性。 [\[23\]](#) 之前有一些研究也支持这一结论，即慢波脑电活动与唤醒状态较低有关。从那以后，又有一些针对具有侵略性或暴力行为的男性以及有暴力倾向的精神病住院患者的研究。研究人员发现，这些人的前额叶出现活跃的慢波频率的脑电活动。从理论上讲，唤醒程度不够的大脑可以通过冒险、冲动甚至可能是暴力的活动达到更高的唤醒水平。其他研究发现，儿童如果出现高强度的 α 波，其将来出现犯罪行为的可能性也越大。这些研究大多数是针对男性的，主要是因为男性的侵略和暴力行为普遍比女性多。反社会行为和 α 波强度受遗传的影响比较大，这表明大脑连接的先天遗传因素以及由此产生的脑电活动可能是侵略和反社会行为的基础。

南加州大学心理学家莎伦·尼芙及其同事于2015年发表的一项研究更加仔细地探讨了这种相关性。以前的研究用的是交叉比较的方法（例如，在对照组和精神病患者之间进行比较），但是纵向研究的设计可以对同一个人不同时间点进行重复测试，从而提供更加可靠和有启发性的结果。在2015年发表的这项研究中，研究人员在900对双胞胎的儿童期晚期（9~10岁）和青春期中期（14~15岁）分别对他们进行了脑电图检查，

并通过心理测试对他们每个人在儿童期和青少年时期的反社会行为水平做了评估。[\[24\]](#)

结果表明，男性受试者在儿童期的脑电图记录如果显示其大脑额叶区域的 α 波功率更高，那么他们在青春期可能出现更强的攻击性。这种关联在女孩中并不明显。研究人员得出的结论是：“脑电波模式可能是一种潜在的指标，可以识别出那些成年后在生活中容易遇到困难（出现反社会行为）的儿童，它也可以作为一种有用工具起到早期发现的作用。” [\[25\]](#)

额叶与反社会行为有关是有道理的，因为这是大脑抑制冲动行为并评估风险与回报的区域。这项研究的一个有趣的发现是，具有较强的额叶 α 波的儿童虽然当时没有表现出攻击行为，但是他们在成年后出现攻击行为的可能性却与此密切相关。童年时出现较强的额叶 α 波的孩子在长大后更容易出现攻击行为。非侵略性的反社会行为（例如违反规则）与高功率的 α 波毫无关系，说明这两种类型的反社会和犯罪行为涉及不同的神经回路。为什么较强的额叶脑电波与反社会行为的联系只在男性身上表现出来而在女性身上不明显？这其中的缘由也有助于解释为什么两性的反社会行为通常表现为不同的形式。与男人相比，女人的身体通常更弱小，她们的反社会行为多倾向于间接的攻击（消极怠工、拉帮结派、散布流言、投毒等等），而不是进行直接的身体搏斗；而男人（以及其他雄性脊椎动物）通常会发起直接的攻击。人们从脑电图分析得到的结论与用其他测量唤醒水平的方法——例如用皮肤电导（测量排汗量）来衡量神经紧张程度——所得到的结论相吻合。在精神

病患者中，紧张反应大为减弱了，这与他们的唤醒程度较低是一致的。

孤独症谱系障碍

安原昭弘对日本大阪的1 014名孤独症儿童进行调查研究后发现，有37%的儿童的大脑电图记录显示有轻微癫痫发作出现。

[\[26\]](#) 安原昭弘得出结论，部分患有孤独症谱系障碍的儿童也患有癫痫，而且癫痫发作（脑电图记录有明显的放电）损伤了他们的大脑镜像神经元系统的功能。当一只动物移动并且观察到另一只动物也在做相同的动作时，它额叶中的这些镜像神经元就会做出反应。在人类中，镜像神经元系统在较高级的认知过程（例如语言、理解他人行为的意图以及对他人的同理心）中具有重要作用。

精神分裂症

精神分裂症的诊断通常是基于自我报告和异常行为表现，但是通过全脑功能网络分析可以将精神分裂症患者与对照患者区分开。中国上海复旦大学的研究员王俞（音译）及其同事，以及位于洛杉矶南加州大学的孙凤竹（音译）研究员开发了一种算法，能利用fMRI数据识别出精神分裂症患者。他们的研究对象是398名精神分裂症患者和375名作为对照的健康人。研究人员能够通过fMRI的诊断特征准确地识别出那些患有精神分裂症的人。[\[27\]](#)

另一项基于“畸变试验”的研究也使用fMRI来识别患有精神分裂症的人。[\[28\]](#)畸变试验是一种心理测试，检验人在一连串重复刺激过程中出现新型刺激时所做出的反应。例如，受试者可能听到一连串军鼓声，但是中间突然出现了钢琴声。新出现的钢琴音符就是一个奇怪的事件。出现刺激约300毫秒后，在受试者脑电图中可以观察到顶叶中部区域出现与事件相关的电位变化，但是当受试者感知到意外的刺激时，这个“P300”电波暴发的幅度要远远大于重复刺激产生的幅度。（“P”表示诱发的脑电波反应为正极性，300表示感知到刺激后脑电波反应达到峰值的时间，以毫秒为单位。）fMRI扫描的结果显示，背外侧前额皮质参与了畸变反应，这部分脑区与依赖于注意力的认知状态有关。这一发现是可以解释的，因为精神分裂症患者的注意力也出现障碍，这使得他们无法集中精力并专注于任务，而且没法控制不让自己分心。精神分裂症患者的脑电图显示，他们对听觉刺激的畸变反应受到极大的破坏（这意味着他们的反应不那么强烈），但是有趣的是，他们对视觉刺激的畸变反应虽然也受到损害，但是表现形式却跟听觉刺激的畸变反应缺陷有所不同。[\[29\]](#)由于视觉和听觉信息是通过不同的神经回路处理的，因此这种严重的精神疾病患者对声音和图像的新颖刺激所做出反应的差异对神经网络的病变应该具有指导意义。

其他研究表明，精神分裂症的遗传风险与P300脑电波反应的差异有关；[\[30\]](#)精神分裂症患者的快速睡眠纺锤波活动减少；[\[31\]](#)他们在工作记忆过程中的 θ - γ 耦合受到损害[\[32\]](#)——这一系列对脑电波的研究，使我们对这种疾病及其治疗有了更多的了解。

成瘾

最近，利用脑电图和fMRI分析大脑活动模式的研究也被应用到包括烟草、酒精和海洛因引起的成瘾以及药物滥用成瘾上。一项2018年的研究发现，酒精依赖的人群在静息状态下的前扣带回皮质 β 波频带活动的增加幅度与他们对酒精的渴望程度相关。而且fMRI显示，他们在 θ 波频段上的同步性和连接性都异常高。研究人员得出结论：“我们的研究结果表明，外界暗示和内在渴望所引发的人们对酒精的依赖表现出一致性。”

[\[33\]](#)

2017年发表的另一项研究成功地用静息状态脑电图来筛查酒精使用障碍（酒精中毒的技术术语）的患者。[\[34\]](#) 受试者分别做了睁眼和闭眼各5分钟的脑电图记录，研究人员可以通过大脑半球间脑电波的连贯性和功率的差异，把酒精依赖者从对照组中区别出来，其准确率达到80.8%。研究人员总结道：“基于实验结果，可以得出的结论是，脑电图数据（ θ 波、 β 波和 γ 波的综合强度以及它们在大脑半球间的连贯性）可以用作区别酒精依赖患者和健康对照组的客观指标。” [\[35\]](#) 静息状态脑电图也被成功地用于海洛因成瘾的研究。[\[36\]](#)

新西兰奥克兰大学的王葛瑞（音译）及其同事在2015年的报告中指出，与对照组相比，接受美沙酮治疗的阿片类药物成瘾者在静息状态下的脑电图具有更强的 γ 波。[\[37\]](#) 澳门大学的梁方夏（音译）和袁振于2017年发表的研究得出的结论是，阿片类药物成瘾的人的大脑奖励系统的连接性明显增强，同时 β

波和 α 波的强度也明显增加，经过美沙酮治疗后颞叶区的脑电波振荡趋于正常。[\[38\]](#)

静息状态脑功能分析的一个特别有用的功能是预测治疗的预后。似乎没有办法知道谁可以戒掉烟瘾，但是就像所有行为一样（尤其是成瘾的行为），吸烟行为也是由神经网络驱动的。因此，你自然会想到，那些沉迷于尼古丁不能自拔的人和能够戒除烟瘾的人的大脑神经功能网络应该存在差异。巴尔的摩美国国立卫生研究院（NIH）的丁晓宇（音译）及其在杜克大学的同事报告称，他们用fMRI可以预测谁能够戒掉烟瘾。[\[39\]](#) 研究人员分析了受试者的12个大型脑网络的功能连接图谱，而受试者什么也不用做，只需要让思想神游即可。（如同先前为了解释大脑网络时所提到的，除默认网络、凸显网络和执行控制网络外，fMRI还识别出了其他许多神经网络。我们打算对所有网络进行解释，但在对吸烟者的这项研究里，被分析的网络还包括：前、后默认网络，左、右执行控制网络，纹状体网络，注意力网络，听觉网络，感觉运动网络和三个视觉网络。）这些人参与了戒烟计划，其中一半的参与者戒烟有效。仅仅使用测量静息状态功能连接的方法，研究人员就能够深入吸烟者的大脑内部，并以67.5%的准确率预测谁可以成功戒烟。研究人员发现，吸烟复发者的功能神经网络的状态倾向于保持不变。也就是说，完成戒烟计划前后，他们的大脑与其他人相比没有发生任何明显的变化。研究人员发现，那些能够戒烟的人的大脑功能网络可能在两种特定状态之间发生了转换。2017年发表的另一项利用静息状态的脑电图分析的研究发现，戒烟成功的受试者右额叶区域和左后枕叶区之间的 δ 波和 θ 波活动

的相关性增加，提示吸烟者在戒烟过程中对吸烟的渴望减少。这一发现表明，大脑回路中增加的这种连通性在减少烟瘾方面具有重要作用。研究人员认为，在正确的位置反复进行经颅磁刺激可以增强这种回路功能，并有可能减少吸烟者对尼古丁的依赖。[\[40\]](#)

抑郁症

重性抑郁症的脑电图指标已经发布了。例如，塞巴斯蒂安·奥尔布里希和马丁·阿恩斯在2013年对科学文献进行了查询，并总结了几项重性抑郁症的脑电图指标，包括脑电波强度和事件相关电位。这项研究表明，对P300反应和额叶 θ 波活动的脑电图分析除了有助于诊断抑郁症和了解该病的潜在病理机制外，还可以预测患者对5-羟色胺再摄取抑制药治疗的反应。然而，在心理学家依靠脑电图分析诊断抑郁症之前，有必要先优化脑电图记录的方法并使其标准化。[\[41\]](#)

本章简单地梳理了脑电图分析如何从一种诊断癫痫的手段迅速发展成为诊断和治疗其他心理疾病的工具。这项前沿性的研究不仅显示了脑电图分析有助于心理疾病的诊断，而且也说明通过监测脑电波能发现心理障碍的神经学基础，并开辟新的治疗途径：从精确的电刺激到神经反馈训练。下一章的主题是学习如何操纵脑电波以缓解神经和心理疾病，以及如何增强认知功能。

[1] Jasper, H. H.; and Carmichael, L. (1935) Electrical Potentials from the Intact Human Brain. *Science* 81:51 - 53.

[2] Long, X.; et al. (2017) Prediction of Alzheimer's Disease based on MRI Deformation Poster presentation 3912 at Organization for Human Brain Mapping Meeting, June 25 - 29, 2017; and Long, X.; et al., (2017) Prediction and Classification of Alzheimer Disease Based on Quantification of MRI Deformation. *PLoS ONE* 12(3) e0173372.

[3] Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. <http://adni.loni.usc.edu>.

[4] Brenner, R. P.; Ulrich, R. F.; Spiker, D. G.; Scwabassi, R. J.; Reynolds, C. F.; and Marin R. S.; et al. (1986). Computerized EEG Spectral Analysis in Elderly Normal, Demented and Depressed Subjects. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 64: 483 - 492; and Dierks, T.; Ihl, R.; Frolich, L.; and Maurer, K. (1993) Dementia of the Alzheimer Type: Effects on the Spontaneous EEG Described by Dipole Sources. *Psychiatry Research* 50: 151 - 162; and Huang, C.; Wahlund, L. O.; Dierks, T.; Julin, P.; Winblad, B.; and Jelic, V. (2000) Discrimination of Alzheimer's Disease and Mild Cognitive Impairment by Equivalent EEG Sources: a Cross-Sectional and Longitudinal Study. *Clinical Neurophysiology* 111: 1961 - 1967; and Jeong, J. (2004) EEG Dynamics in Patients with Alzheimer's Disease. *Clinical Neurophysiology* 115: 1490 - 1505.

[5] Wang, J.; Fang, Y.; Wang, X.; Yang, H.; Yu, X.; and Wang, H. (2017) Enhanced Gamma Activity and Cross-Frequency Interaction of Resting-State Electroencephalographic Oscillations in Patients with Alzheimer's Disease. *Frontiers in Aging Neuroscience* 26 (9): 243. doi:10.3389/fnagi.2017.00243.

[6] Buzsáki, G.; and Watson, B. O. (2012) Brain Rhythms and Neural Syntax: Implications for Efficient Coding of Cognitive

Content and Neuropsychiatric Disease. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 14:345 – 367.

[7] Axmacher, N.; Henseler, M. M.; Jensen, O.; Weinreich, I.; Elger, C. E.; and Fell, J. (2010) Cross Frequency Coupling Supports Multi-Item Working Memory in the Human Hippocampus. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America* 107: 3228 – 3233.

[8] Zhang, X.; Zhong, W.; Brankack, J.; Weyer, S. W.; Müller, U. C.; and Tort, A. B.; et al. (2016) Impaired θ – γ Coupling in APP-deficient Mice. *Scientific Reports* 6: 21948.

[9] Smailovic, U.; Koenig, T.; Kareholt, I.; Andersson, T.; Kramberger, M. G.; Winblad, B.; and Jelic, V. (2017) Quantitative EEG Power and Synchronization Correlate with Alzheimer's Disease CSF Biomarkers. *Neurobiology of Aging* 63: 88 – 95.

[10] Brueggen, K.; Fiala, C.; Berger, C.; Ochmann, S.; Babiloni, C.; and Teipel, S. J. (2017) Early Changes in Alpha Band Power and DMN BOLD Activity in Alzheimer's Disease: A Simultaneous Resting State EEG-fMRI Study. *Frontiers in Aging Neuroscience* 9: 319.

[11] Mazaheri, A.; Segaert, K.; Olichney, J.; Yang, J. C.; Niu, Y. Q.; Shapiro, K.; and Bowman, H. (2017) EEG Oscillations During Word Processing Predict MCI Conversion to Alzheimer's Disease. *Neuroimage: Clinical* 17: 188 – 197.

[12] Han, C. X.; Wang, J.; Yi, G. S.; and Che, Y. Q. (2013) Investigation of EEG Abnormalities in the Early Stage of Parkinson's Disease. *Cognitive Neurodynamics* 7: 351 – 359; and Chaturvedi, M.; Hatz, F.; Gschwandtner, U.; Bogaarts, J. G.; Meyer, A.; Fuhr, P.; and Roth, V. (2017) Quantitative EEG (QEEG) Measures Differentiate Parkinson's Disease (PD) Patients from Healthy Controls (HC). *Frontiers in Aging Neuroscience* 23 (9): 3.

[13] Benz, N.; Hatz, F.; Bousleiman, H.; Ehrensperger, M. M.; Gschwandtner, U.; Hardmeier, M.; Ruegg, S.; Schindler, C.;

Zimmermann, R.; Monsch, A. U.; and Fuhr, P. (2014) Slowing of EEG Background Activity in Parkinson's and Alzheimer's Disease with Early Cognitive Dysfunction. *Frontiers in Aging Neuroscience* 6: 314.

[14] Chaturvedi, M.; et al. (2017) Quantitative EEG (QEEG) Measures Differentiate Parkinson's Disease (PD) Patients from Healthy Controls (HC). *Frontiers in Aging Neuroscience* 9: 3. doi:10.3389/fnagi.2017.00003

[15] Caviness, J. N.; Beach, T. G.; Hentz, J. G.; Shill, H. A.; Driver-Dunckley, E. D.; and Adler, C. H. (2017) Association Between Pathology and Electroencephalographic Activity in Parkinson's Disease. *Clinical EEG and Neuroscience* 49(5): 321 - 327.

[16] Annamaki, T.; Palmu, K.; Murros, K.; and Partanen, J. (2017) Altered N100-potential Associates with Working Memory Impairment in Parkinson's Disease. *Journal of Neural Transmission* 124 (10):1197 - 1203.

[17] Lubar, J. E. (1991) Discourse on the Development of EEG Diagnostic and Biofeedback for Attention Deficit/Hyperactivity Disorders. *Biofeedback and Self-Regulation* 16: 201 - 225.

[18] Snyder, S. M.; and Hall, J. R. (2006) A Meta-Analysis of Quantitative EEG Power Associated with Attention-Deficit Hyperactivity Disorder. *Journal of Clinical Neurophysiology* 23: 440 - 455.

[19] Arns, M.; Conners, K.; and Kraemer, H. C. (2012) A Decade of EEG Theta/Beta Ratio Research in ADHD: A Meta-Analysis. *Journal of Attention Disorders* 17: 374 - 383.

[20] Gloss, D.; Varma, J. K.; Pringsheim, T.; and Nuwer, M. R. (2016) The Utility of EEG Theta/Beta Power Ratio in ADHD Diagnosis. Report of the Guideline Development, Dissemination, and Implementation Subcommittee of the American Academy of Neurology. *Neurology* 87: 2375 - 2379.

[21] Li, H.; Zhao, Q.; and Huang, F. (2017) Increased Beta Activity Links to Impaired Emotional Control in ADHD Adults with High IQ. *Journal of Attention Disorders* 23: 754 – 764.

[22] Ellingson, R. J. (1954) The Incidence of EEG Abnormality Among Patients with Mental Disorders of Apparently Nonorganic Origin: A Critical Review. *American Journal of Psychiatry* 111 (4): 263 – 275.

[23] Hill, D. (1952) EEG in Episodic Psychotic and Psychopathic Behaviour; a Classification of Data. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 4 (4): 419 – 442.

[24] Niv S.; Ashrafulla, S.; Tuvblad, C.; Joshi, A.; Raine, A.; Leahy, R.; and Baker, L. A. (2015) Childhood EEG Frontal Alpha Power as a Predictor of Adolescent Antisocial Behavior: A Twin Heritability Study. *Biological Psychology* 105: 72 – 76.

[25] Ibid., 9.

[26] Yasuhara, A. (2010) Correlation Between EEG Abnormalities and Symptoms of Autism Spectrum Disorder (ASD). *Brain and Development* 32: 791 – 798.

[27] Wang, Y.; et al. (2017) Classification of Schizophrenia Using Functional Connectivity Based on fMRI Data. Poster Presentation 3913 at the Organization for Human Brain Mapping Meeting, June 25 – 29, 2017.

[28] Gheiratmand, M.; et al. (2017) Functional Network Patterns as Multivariate Predictors of Symptom Severity in Schizophrenia. Poster presentation 3939 at the Organization for Human Brain Mapping Meeting, June 25 – 29, 2017; and Gheiratmand, M.; et al, (2017) Learning Stable and Predictive Network-Based Patterns of Schizophrenia and Its Clinical Symptoms. *NPG Schizophrenia*, 3, number 22.

[29] Azurii, K.; Collier, D. H.; Wolf, J. N.; Valdez, B. I.; Turetsky, M. A.; Elliott, R. E.; and Gur, R. C. (2014) Comparison of Auditory and Visual Oddball fMRI in Schizophrenia: Progressive Reduction of Visual P300 Amplitude in Patients with First-Episode Schizophrenia: An ERP Study. *Schizophrenia Research* 158: 183–188; and Oribe, N.; et al. (2015) Progressive Reduction of Visual P300 Amplitude in Patients with First-Episode Schizophrenia: An ERP Study. *Schizophrenia Bulletin* 41: 460–470.

[30] Schilling, C.; Schlipf, M.; Spietzack, S.; Rausch, F.; Eisenacher, S.; Englisch, S.; Reinhard, I.; Haller, L.; Grimm, O.; Deuschle, M.; Tost, H.; Zink, M.; Meyer-Lindenberg, A.; and Schredl, M. (2017) Fast Sleep Spindle Reduction in Schizophrenia and Healthy First-Degree Relatives: Association with Impaired Cognitive Function and Potential Intermediate Phenotype. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience* 267 (3): 213–224.

[31] Sharma, A.; Sauer, H.; Smit, D. J.; Bender, S.; and Weisbrod, M. (2011) Genetic Liability to Schizophrenia Measured by P300 in Concordant and Discordant Monozygotic Twins. *Psychopathology* 44 (6): 398–406.

[32] Barr, M. S.; Rajji, T. K.; Zomorodi, R.; Radhu, N.; George, T. P.; Blumberger, D. M.; and Daskalakis, Z. J. (2017) Impaired Theta-Gamma Coupling During Working Memory Performance in Schizophrenia. *Schizophr Research* 189: 104–110.

[33] Huang, Y.; Mohan, A.; De Ridder, D.; Sunaert, S.; and Vanneste, S. (2018) The Neural Correlates of the Unified Percept of Alcohol-Related Craving: A fMRI and EEG Study. *Scientific Reports* 8 (1): 923.

[34] Alcohol Use Disorder. National Institute on Alcohol Abuse and Alcoholism. <https://www.niaaa.nih.gov/alcohol-health/overview-alcohol-consumption/alcohol-use-disorders>. Accessed October 3, 2019.

[35] Mumtaz, W.; Vuong, P. L.; Xia, L.; Malik, A. S.; and Rashid, R. B. A. (2017) An EEG-Based Machine Learning Method to Screen Alcohol Use Disorder. *Cognitive Neurodynamics* 11 (2): 161 – 171.

[36] Hu, B.; Dong, Q.; Hao, Y.; Zhao, Q.; Shen, J.; and Zheng, F. (2017) Effective Brain Network Analysis with Resting-State EEG Data: a Comparison Between Heroin Abstinent and Non-addicted Subjects. *Journal of Neural Engineering* 14 (4): 046002.

[37] Wang, G. Y.; Kydd, R. R.; and Russell, B. R. (2015) Quantitative EEG and Low-Resolution Electromagnetic Tomography (LORETA) Imaging of Patients Undergoing Methadone Treatment for Opiate Addiction. *Clinical EEG and Neuroscience* 47: 180 – 187.

[38] Jeong, H. F.; and Yuan, Z. (2017) Resting-State Neuroimaging and Neuropsychological Findings in Opioid Use Disorder during Abstinence. *Frontiers in Human Neuroscience* 11: 169. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2017.00169/full>.

[39] Ding, X.; et al. (2017) Predicting Smoking Cessation Treatment Outcomes Using Dynamics Between Large-Scale Brain Networks. Poster presentation 3923 at the Organization for Human Brain Mapping Meeting, June 25 – 29, 2017.

[40] Li, X.; Ma, R.; Pang, L.; Lv, W.; Xie, Y.; Chen, Y.; Zhang, P.; Chen, J.; Wu, Q.; Cui, G.; Zhang, P.; Zhou, Y.; and Zhang, X. (2017) Delta Coherence in Resting-State EEG Predicts the Reduction in Cigarette Craving after Hypnotic Aversion Suggestions. *Scientific Reports* 7 (1): 2430.

[41] Olbrich, S.; and Arns, M. (2013) EEG Biomarkers in Major Depressive Disorder: Discriminative Power and Prediction of Treatment Response. *International Review of Psychiatry* 25 (5): 604 – 618.

第11章

掌控自己的脑电波

因为一个人的性格、智能以及神经和心理特征的各个方面都可以通过脑电波的差异表现出来，所以改变脑电波也可以作为一种手段，用来对脑功能或者脑功能障碍施加影响。有大量证据支持这一推论：改变脑电波作为一种相对安全的方法可以使我们的大脑变得更好，同时为脑电波与脑功能之间存在联系的理论提供了额外的支持。冥想、生物反馈和一些可以直接改变脑组织电场的方法已经被人们用来控制自己的脑电波，从而改变他们的精神状态和认知能力，甚至可以治疗神经和心理疾病。如果你学会控制脑电波，就可以改善情绪、增强注意力、促进放松和冥想、减轻慢性疼痛、增强心理和身体机能。

优秀运动员正在使用其中的一些技巧。例如，美国奥林匹克队的摔跤手会用适当频率的声音来控制他们的脑电波，以增强注意力并加快反应速度，或者用来放松和促进睡眠，为下一场比赛做准备。这些技术利用生物反馈、有节奏的声响和有节奏的灯光将脑电波调整到所需的频率并同步化。许多公司开始销售这些技术。

被边缘化的神经反馈

熔岩灯和“权力归花儿”运动这些事物属于反文化的20世纪60年代。神经反馈也在那个时候萌芽、发展。随后，它经历了一段漫长而奇怪的旅程，走过20世纪70年代的新时代神秘主义，如今又借着“神经可塑性”的光环跃入“大脑训练”的热潮，鼓吹大脑可以自我修复的奇迹。利用脑电图指导的冥想被认为是一种包治心理百病的手段，还可以提高创造力和认知能力。这些边缘科学之所以能形成短暂的流行趋势，与神经网络和脑电波研究的进步密不可分。但是，这两个领域的实践者都在各自的领域中运作，几乎没有交集，而且双方都非常担心自己的特质、信念和实践会受到对方的影响和扰乱。神经反馈疗法曾经一度被视为——现在仍然被许多人视为——伪科学。

如今，许多人对脑电波神经反馈是完全排斥的，理由是相关的科学证据太少，而且他们表达了对对其进行商业开发潜力的明显担忧。的确，已发表的关于神经反馈的研究论文质量通常很差，实验控制不可靠，缺乏客观的测量方法，其结果可以有不同的解释。[\[1\]](#)

神经反馈治疗的操作方法和标准还不完善。反馈的疗程应如何确定？需要多少次治疗？应该改变脑电波的什么方面？以及什么疾病需要反馈治疗，或者说希望从反馈治疗中得到什么好处？需要什么设备以及如何分析脑电图数据？这些问题通常都留给个人从业者去解决。

一篇综述文章回顾了1994—2010年有关用神经反馈治疗小儿注意缺陷多动障碍的研究。作者发现（大多数，但并非全部实验，都使用在Cz处放置单极电极测到的 θ/β 值作为神经反馈

的参考指标），这些文献缺乏必要的科学严格性，但它们还是得出神经反馈疗法对小儿注意缺陷多动障碍“可能有效”的结论。[\[2\]](#)

2017年发表的另一篇评论文章对神经反馈疗法相关的同行评审的出版物进行了调查，并得出了类似的结论——这些治疗的结果可能存在“普遍的安慰剂效应”。[\[3\]](#) 2017年，《柳叶刀精神病学杂志》发表了一项研究，德国研究人员在有双盲随机对照的情况下用神经反馈疗法对成人注意缺陷多动障碍患者进行为期超过15周的治疗实验。在118位受试者中，有38位接受了 θ/β 神经反馈训练，39位接受了模拟神经反馈疗法，另外41位接受了元认知疗法（谈话疗法）。所有三组受试者都自我报告注意缺陷多动障碍症状有所减轻，这说明神经反馈疗法并不能为成人注意缺陷多动障碍的治疗带来更多好处。[\[4\]](#) 这项研究用了所有实验方法，包括设置对照组，但由于这类研究很少见，因此还不清楚他们所采用的神经反馈治疗程序是不是最佳的。即使是在药物研究中，如果只有39名受试者接受治疗，这样少的样本量在统计学上也是缺乏说服力的，尤其是考虑到患者的个体差异以及不同个体的预后存在各种可能性。

神经反馈疗法始于20世纪50年代末60年代初。芝加哥大学的乔·卡米亚博士和加州大学洛杉矶分校的巴里·斯特曼博士是该领域公认的先驱。如今，神经反馈疗法在心理和认知领域的用途如此广泛，仿佛就是“蛇油”的现代版——被吹捧为包治百病的神药，这本身就引起了人们对神经反馈疗法的怀疑。神经反馈已被用于以下方面：放松精神、帮助睡眠、唤醒意

识、提升认知、提高运动成绩、加强冲动控制、增强记忆力、治疗注意缺陷多动障碍、提高智商、增强创造力、提高精神集中度和注意力、提高算术成绩、降低血压、减轻压力、减轻焦虑并治疗创伤后应激障碍、治疗强迫症、改变心情和个性、增强音乐表现力、改善拼写能力、治疗阅读障碍、控制癫痫发作、治疗阿斯佩格综合征和孤独症、缓解疼痛、治疗头痛和偏头痛、治疗药物和酒精成瘾、缓解抑郁症、减少耳鸣、治疗躁郁症、促进创伤性脑损伤和卒中的恢复、改善平衡、治疗尿失禁、治疗肌肉疼痛、治疗慢性疲劳和莱姆病、提高高尔夫成绩。

作为治疗神经和精神疾病潜在的方法，神经反馈最引人注目的案例来自基础科学研究。这项研究探索了脑电波振荡和脑功能/功能障碍的关系，神经反馈在其中被用作一种检验脑功能理论的技术。如前所述，此类研究表明，神经反馈可以调节与认知、情绪和行为变化相关的神经网络功能，但通常实验设计的目的并不是把它作为一种治疗性的手段。神经反馈疗法的研究项目在资金方面很难与神经科学其他领域的研究项目竞争，因为它背了“赶时髦的边缘科学”的污名，而且这项技术可以结合不同的实践和应用，任何人都可以使用。你在互联网上就可以买到神经反馈设备。

想要从事神经反馈治疗，你可以先获取国际生物反馈认证协会的认证。[\[5\]](#)有一些组织，例如应用心理生理学和生物反馈协会（AAPB）和国际神经反馈与研究协会（ISNR），会主办全国性的会议，将科学家和从业者召集在一起讨论该领域的进展。大多数保险公司尚未将神经反馈治疗费用纳入理赔范围。

但现在的情况是，神经科学的研究重点是了解大脑疾病背后的脑电波振荡、神经网络和神经回路功能障碍，这与神经反馈治疗师的目标和特长相符。二者的融合会让科学取代伪科学，这种事情经常发生在知识的最前沿。从业者只关心它对病人有什么帮助，而不在乎它的原理。科学家却持有相反的观点。假以时日，科学家一定会发现有效利用神经反馈（如果可能）减轻人类痛苦的方法及其背后的机理。

增强学习和认知能力

在2017年发表的一项研究中，科学家用fMRI指导的神经反馈疗法来对抗衰老造成的认知能力下降。[\[6\]](#)这项研究包括10例早期阿尔茨海默病患者、16例健康的老年人和4例接受模拟神经反馈治疗作为对照的健康人。受试者先接受回忆道路的训练，同时应用fMRI指导的神经反馈疗法增强左海马旁回的活跃度，然后再对受试者进行一些认知能力和记忆神经心理学的标准化测试。结果表明，健康的老年受试者和早期阿尔茨海默病患者在进行神经反馈训练后，视觉空间记忆能力得到了改善，但是在训练过程中并未发现大脑的活跃程度发生明显的变化。受试者在神经反馈训练结束后做的结构MRI显示，楔前叶和前额皮质的灰质体积增加。在接受模拟神经反馈训练的对照组中没有发现这些变化。研究人员得出结论，认为通过fMRI指导的神经反馈训练，健康的老齡化人群和早期阿尔茨海默病患者可以抵抗衰老造成的认知能力下降。另外两篇使用fMRI指导的神经反馈训练的研究报告指出，通过训练背外侧前额皮质，受试者的工

作记忆得到了改善。[\[7\]](#)不用说，你是不可能在互联网上购买MRI设备的，因此，尽管这一研究得到的客观数据能支持神经反馈训练的功效，但神经反馈的实际应用还需要有更简单的方法。

有一项研究是用脑电图指导的神经反馈训练来提高注意力。做这项研究的人也用弥散张量成像（DTI）来确定神经反馈训练是否改变了额叶和顶皮质区域的白质束结构。（弥散张量成像是一种MRI方法，可以揭示大脑主要连接区域——白质束——的微观结构特征。这种方法在检测神经纤维分支、髓鞘形成和其他细胞特征的差异方面很灵敏。）大学生受试者被随机分为接受神经反馈的实验组或接受模拟神经反馈的对照组。脑电图指导的神经反馈训练的目的在于增加电极F4和P4所在区域（额叶和顶叶）的 β 波振幅。经过神经反馈训练后，实验组在视觉和听觉注意力上的得分更高。弥散张量成像分析显示，实验组的白质通路的纤维组织增加了。已知这些白质通路与注意力有关，而皮质区域中与之相连的灰质的体积也相应增加，这表明神经反馈训练改变了受试者的大脑结构。[\[8\]](#)

这些结果与蒙特利尔大学研究人员在2013年发表的另一项研究一致。在这项研究中，科学家用脑电图指导的神经反馈训练来加强注意力和工作记忆。受试者被随机分为神经反馈训练组和对照组。训练组的任务是增加大脑额叶中线区域的 θ 波活性，而对照组所接受的神经反馈训练与该项任务无关。[\[9\]](#)相比对照组，训练组在注意力和工作记忆测试上的表现更好，而且反馈训练对老年个体也有明显的好处。因此，研究人员得出结

论，认为神经反馈训练可以增加额叶中央处的 θ 脑电波的强度，这对认知衰退是一种有效的干预措施。

如第10章所述，脑电图中的 γ 波活动与流体智力和记忆有关，但是随着年龄的增长，快速的 γ 波活动会减少，而 β 波频带的功率会增加。也就是说，像许多其他身体机能一样，脑电波的振荡频率往往会随着衰老而变慢。这些脑电波变化可能是正常衰老过程中认知能力下降的基础。实际上，人们已经在痴呆和轻度认知损害患者中发现了 γ 波段同步性的丧失。托比内·施陶芬比尔及其同事在2013年发表的一项研究中设计了双盲实验来测试脑电图引导的神经反馈训练是否可以改变与衰老相关的脑电波功率，以及是否可以改善认知能力。[\[10\]](#) 在一个测试组中，只要一个电极（F2）检测到 γ 波强度增加，就会发出提示音；而在另一组受试者中，只有这个电极检测到的 β 波功率超过指定值时才会发出提示音。受试者在21天内进行了8次长达30分钟的神经反馈训练。研究人员在给20位老年受试者做神经反馈训练之前和之后分别对他们进行了智商和记忆力的标准测试。结果表明，神经反馈训练增加了这些老年受试者的 γ 波和 β 波功率。这些变化在训练期间很明显，但在静息状态的脑电图中不明显。

结果表明，即使是老年人，经过神经反馈训练，也可以改变他们 β 波和 γ 波的强度。但是，没有发现他们的智力或记忆力有明显的改善。研究人员指出，对年轻健康人的神经反馈训练可以改善认知能力（包括记忆能力、流体智力和创造力）并使人放松，但他们提醒说，由于研究对象样本相对较少，因

此，很难将认知能力的变化与神经反馈产生的脑电波功率变化联系起来。

研究已证实，神经反馈训练可以使人提高创造力。例如，伦敦大学的约翰·格鲁泽列及其同事进行的几项研究表明，基于 α / θ 值和感觉运动节律的神经反馈训练可以提高新手和专业人士的音乐表现力——这是由两位经验丰富的音乐演奏家做出的判断。[\[11\]](#) 在闭眼状态下，受试者通过训练，将 θ 波强度提高到 α 波强度之上，这类似于黄昏时打瞌睡的催眠状态（请参见第7章）。

神经疾病的神经反馈治疗

用基于脑电图或功能性大脑成像的神经反馈来控制神经系统疾病属于前沿的研究，但还仅限于实验阶段。目前，已经有研究结果在科学会议和科学杂志上陆续发布。显然，神经反馈治疗有潜力成为一种有价值且需求广泛的新方法。已发表的在人身上的实验研究表明，通过练习、强化和神经反馈训练，人们可以学会通过意志来控制自己大脑回路中的神经活动。[\[12\]](#) 这在单个神经元的微尺度上，在通过测量一小群神经元周围的局部场电位（LFP）或脑皮层电图[\[13\]](#)的中等尺度上，以及通过脑电图或fMRI检测[\[14\]](#)的整个大型皮质网络的宏观尺度上都得到了验证。这种对脑功能的控制效果是医生一直努力想要通过外科手术和药物实现的。随着技术和知识的进步，神经反馈似

乎有可能成为一种既有效风险又小的治疗各种神经系统疾病的方法。

帕金森病

这种神经退行性疾病是由于控制自主运动的神经元死亡造成的。这些神经元位于大脑中被称为黑质的区域，它们利用多巴胺作为突触神经递质传递信号。许多因素，包括遗传风险、接触毒素和其他形式的疾病都可以导致这些神经元死亡。据报道，在美国，每年大约有100万新增的帕金森病病例。[\[15\]](#)这种病开始的症状通常是手或四肢出现震颤，但随着疾病的发展，控制运动、说话、走路、写字和吞咽的能力都可能会严重受损。目前尚无治愈该病的方法，但可以通过药物来增加多巴胺神经递质的水平，或者通过脑部手术和脑深部电刺激（稍后讨论）[\[16\]](#)来缓解症状。所有这些疗法都可能有明显的副作用和风险。基于脑电图的神经反馈正被试验性地用于帕金森病的治疗和干预。这种方法的风险最小，它的原理是改变控制运动的神经回路中的功能连接以缓解症状。

运动皮质（M1皮质）中的脑电波显示出的特征性变化与自主运动有关。这些脑电图信号可用于指导神经反馈训练或控制脑机接口设备。在实验研究中，植入人体运动皮质的电极检测到受试者的 β 波在运动任务中表现出明显的去同步化。此外，他们的运动皮质中出现异常的 β 波振荡（13~30赫兹），这些现象与帕金森病相关。用于治疗帕金森病的脑深部电刺激方法和增加多巴胺水平的药物均会降低这些区域的 β 波频带的强度，

这表明异常的 β 波与该病造成的运动障碍之间存在因果关系。在帕金森病患者身上，除了观察到他们脑电波的功率增强之外，还观察到在不同皮质区域之间，10~35赫兹的振荡的统一性增强。人们认为，皮质神经元群体之间的这种异常振荡耦合会损害初级运动皮质神经元的计算能力。因为初级运动皮质区域是大脑产生的运动信号的最终输出区域，所以，通过神经反馈来降低M1区域中 β 波的功率，可能是克服运动皮质中 β 波频率过度同步化的一种策略。最近的一项研究表明，帕金森病患者可以通过使用长期植入的神经反馈设备来学习如何调节自己大脑皮质神经活动的节律。

在2017年发表的一项研究中，研究人员在三名帕金森病患者的大脑中植入了治疗性深部脑神经刺激器，该设备也可以记录脑皮层电图，并将神经数据无线传输到计算机上。[\[17\]](#)（用电刺激大脑以缓解神经疾病的方法稍后会在本章中讨论。）脑皮层电图提供的高分辨率皮质电波振荡数据被用于指导神经反馈训练，让帕金森病患者能够调节感觉运动皮质的 β 频段的强度。这与我在本书第二部分（第5章）中描述的，用神经反馈疗法来降低大脑目标区域的 δ 波功率的想法相同。以我为例，头皮上的电极感应到我的脑电图，当电脑检测到特定区域的脑电图功率发生所期望的变化时，就发出奖励音。在接受神经反馈训练一到两个小时后，这项研究中的三名患者控制其皮质 β 波振荡的能力都显著提高了。用治疗性脑深部电刺激电极对患者的大脑进行刺激，是治疗严重帕金森病的标准方法。可以看到，无论这三名受试者曾经接受过什么样的脑深部电刺激，神经反馈训练对改善他们的病情都有所帮助。停下来思考一下前面所说的话：这些人通过非手术、无药物干预的神经反馈训练

改变了脑电波。研究人员指出，这是第一次使用完全植入的神经记录系统对神经反馈进行指导，尽管我注意到德尔加多的“刺激记录器”是一个跟这套系统非常相似的装置，但他并没有研究神经反馈的作用（请参阅第8章）。这项研究证明，通过完全植入的自助式神经反馈设备进行神经反馈训练是可行的。这种设备可以在家中使用，不像目前使用的设备那样笨重，只能在实验室使用。人们正在研究这种植入设备指导的神经反馈训练是否可以缓解帕金森病患者的运动障碍。从动物研究的结果来看，这种可行性还是有的。

在一项研究中，科学家用神经毒素线粒体通透性转换孔（MPTP）[\[18\]](#)在非人类灵长类动物（狨猴）身上诱发帕金森病，而对照组用的是安慰剂。研究人员发现，对动物的感觉运动节律进行神经反馈训练[\[19\]](#)可以减轻帕金森病的症状。感觉运动节律是在感觉运动皮质测量到的丘脑皮质电波的节律性振荡，它们在12~17赫兹频段上出现同步化。当身体一侧的肢体移动，甚至只是想象肢体在移动时，对侧脑部的感觉运动节律就会被抑制。[\[20\]](#)

2017年发表的对狨猴的研究发现，在对感觉运动节律进行神经反馈治疗后，无论是给动物使用L-DOPA（治疗帕金森病的标准药物）还是停药时，动物的帕金森病症状都会减轻。先前已有实验证明，对猫进行类似的感觉运动节律神经反馈训练后，可以降低它们癫痫发作的易感性。[\[21\]](#)

在这项研究中，研究人员在猴子脑部植入了脑电图电极，并通过遥感（即通过电脑和脑电极之间的无线通信）监测它们的脑电波。当猴子的脑电图显示感觉运动节律活动增加时，就给予猴子食物奖励，这样就可以达到神经反馈训练的目的。对照组的猴子获得了相同数量的食物奖励，但是它们得到食物的原因跟脑电波的活动无关。经过神经反馈训练，与对照动物相比，受过训练的猴子的感觉运动节律活性大大提高了。研究人员证实，在两组实验猴中，神经毒素杀死了超过一半的黑质神经元，从而引起了帕金森病，但是在接受感觉运动节律神经反馈的实验组中，帕金森病症状有明显减轻。如果可以在猴子身上做到这一点，为什么在人类身上不行呢？另有一些对人类帕金森病患者进行的研究把感觉运动节律神经反馈和基于呼吸的生物反馈（通过呼吸节律而不是脑电图记录指导反馈）相结合，结果也显示患者的帕金森病症状减轻，并且可以减少L-DOPA的用药剂量。[\[22\]](#)

最近有两项对帕金森病的研究采用了实时fMRI而非脑电图指导的神经反馈方法。第一项研究在5名帕金森病患者身上使用fMRI指导的神经反馈训练，以增加补充运动区（SMA）的活跃度并提高运动（敲击手指）速度。与5名未接受神经反馈训练的对照组帕金森病患者相比，接受神经反馈训练的患者的临床症状评分获得了提高。[\[23\]](#)第二项研究将帕金森病患者随机分为两组，实验组的15位患者除了进行运动训练外，还接受了fMRI引导的神经反馈训练来增加大脑补充运动区的活跃度，而对照组仅接受运动训练。[\[24\]](#)接受神经反馈训练的实验组患者能够增

加SMA的活跃度，但是两组患者的运动控制能力和临床评分没有差异。

脑卒中

脑卒中是突然导致严重残疾的一种常见原因，每年受其影响的美国人约有520万。在发病后的长期康复过程中，神经反馈训练可能对引导神经可塑性有所帮助。2017年有研究报告称，三名装有无无线脑电图电极（可以进行传输和记录）的脑卒中患者在家进行神经反馈训练后，上肢运动功能得到了改善，并且这些改变与脑回路的结构变化有关。经过神经反馈训练后，他们的MRI结果显示，控制身体运动的脑区的白质完整性增加了。

[\[25\]](#)

有一种基于脑电图的神经反馈方法可以向脑卒中患者提供他们自己的脑电图视觉反馈，这与我做神经反馈训练时所经历的看彩色能量柱而不是听提示音（“把状态条变成绿色”）的方式大致相同（请参阅第5章）。当脑卒中患者的左脑和右脑皮质之间的脑电图模式出现平衡异常时，实时脑电图信号会提示他们。每隔一天进行一次的训练持续了四个星期。结果表明，神经反馈训练改变了患者脑电波的活跃度，使他们的脑电波活动朝着正常的方向变化，患者的运动皮质的神经可塑性得到了改善。在没有任何干预的情况下，脑卒中发作或其他创伤后，大脑也会尽可能地修复受损的回路（取决于损伤的程度），但是神经反馈训练可以帮助引导神经重塑的过程，从而加快神经回路的修复。

慢性疼痛

慢性疼痛折磨着成千上万受伤或患有神经系统疾病的人。不幸的是，随着时间的推移，哪怕对慢性疼痛最有效的药物（麻醉药）也可能会随着机体耐药性增强而失去效力，如果增加用药量又会产生明显副作用，而且药物最终会失去抑制疼痛的能力。由德国和瑞士的研究人员进行的一项最新研究想要确定神经反馈是否可以缓解疼痛，并探讨为什么每个人对疼痛耐受的程度不同。研究人员对28名健康受试者施加无害的疼痛刺激，同时对他们进行实时的fMRI扫描，用以指导神经反馈训练。[\[26\]](#) 研究人员把热电探针放在每个受试者的右前臂上，然后缓慢加热。随着探针逐渐升温，受试对象开始按1到10级报告他们感受到的疼痛程度。研究人员还算仁慈，没有将金属探针加热到让受试者的疼痛反应达到7级的程度。研究人员记录受试者报告的疼痛刺激强度的同时，也记录下探针的温度，然后将同一温度下不同受试者报告的疼痛程度进行比较。数据记录显示了一个众所周知的事实，即不同的人对疼痛的耐受程度完全不同。

当诱发疼痛时，fMRI显示参与疼痛感知的大脑区域（主要和次要感觉皮质以及脑岛后部皮质的回路）的活动增加。疼痛导致的后果（例如，唤醒和情绪激动）会激活前额皮质负责更高级别认知的区域，包括前扣带回皮质、前脑岛和前额皮质区域。皮质下区域，包括基底神经节和丘脑也会被疼痛激活，这与它们向大脑皮质传递信号以吸引注意力并评估刺激是好还是坏的功能有关。我们有时候会感觉不到疼痛。例如，每个护士

都知道，只要分散了孩子的注意力，在给他们撕掉创可贴的时候，他们就不会疼得哇哇叫。还有，一个战士在生死攸关的时刻被子弹击中后可能也不会感到疼痛。从脊髓传递到较高级的大脑区域的疼痛信号在大脑深处（脑干的导水管周围灰质和腹侧被盖区域）受到调节。在基线研究中，人们发现疼痛感与纹状体、前扣带回皮质和前脑岛皮质失活有关。数据显示，与疼痛敏感性较低的人相比，疼痛敏感性较高的人在这些疼痛相关区域的神经元活性增加。这一发现告诉我们，他们对疼痛的高度敏感并不是夸张做作。他们的感知准确地反映了大脑疼痛回路的活动水平，这些人的回路对疼痛的敏感程度比那些具有较高疼痛耐受度的人要高。

然后，研究人员要求受试者通过神经反馈训练来抑制这些大脑区域的活跃度。他们的神经反馈训练是通过实时fMRI分析来进行指导的。在神经反馈训练过程中，可以清楚地观察到受试者对疼痛的耐受力增强了，并且前扣带回皮质、前额皮质、海马和视觉皮质的活动出现了预期的变化。

实时fMRI指导的神经反馈训练是一种相对较新的方法，具有巨大的应用潜力，因为它能对被认知激活的大脑区域进行准确的定位，而且可以检测整个大脑的神经活动。这与只记录大脑皮质电活动的脑电图技术是不同的。但是，由于这些仪器造价昂贵，而且操作它们需要专业的知识，因此目前fMRI在神经反馈中的应用还仅限于实验研究。有许多研究用到fMRI引导的神经反馈训练，例如用于减轻耳鸣[\[27\]](#)和缓解慢性疼痛[\[28\]](#)，以及用于治疗精神疾患，如精神分裂症[\[29\]](#)和抑郁症[\[30\]](#)。尽管fMRI指导的神经反馈训练作为临床治疗方法并不可行，但它

在科学研究中的应用可以为我们如何利用脑电图进行神经反馈治疗提供一个参考。

亨廷顿病

最近的一个例子再次展示了fMRI指导的神经反馈训练在治疗严重的神经系统疾病时的潜力。伦敦大学学院的玛丽娜·帕普契及其同事在温哥华举行的人脑图谱组织2017年会议上报告了他们的发现。我在那个会议上也介绍了自己实验室的研究成果——神经系统可塑性的一种新机制。亨廷顿病（HD）夺走了民谣吉他演奏家伍迪·格斯里的性命。这是一种遗传性疾病，会损害运动和认知功能，病情进展缓慢，患者最终在症状首次出现后10~30年死亡。该研究小组发现，对亨廷顿病患者进行实时fMRI神经反馈训练可以使他们学会控制病变大脑区域的神经元活动，而且在患者脑回路中重建的可塑性与患者的运动表现改善密切相关。[\[31\]](#)

心理障碍的神经反馈

通过神经反馈训练增加 α/θ 值有望缓解多种焦虑症。在回顾文献时，犹他州大学的科里登·哈蒙德总结道，通过神经反馈训练可以增强 α/θ 值并缓解抑郁症、焦虑症和强迫症。[\[32\]](#)众所周知，创伤后应激障碍很难治疗，因为复发率很高。尤金·佩尼斯顿和鲍尔·库尔斯基于1991年进行的一项设置了随机对照的研究报道称，接受创伤后应激障碍标准治疗的所有14

名越南退伍军人，在30个月后都复发了，但是接受了15小时 α/θ 神经反馈训练的15名退伍军人中，只有3名复发。[\[33\]](#)接受神经反馈治疗的实验组可以减少用药量，相比接受创伤后应激障碍标准治疗的对照组，其焦虑评分明显改善。

伊丽莎白·赫特和她在莱特州立大学的同事最近对一些儿童进行脑电图指导的神经反馈治疗。基于12次随机分组实验的结果，他们对疗效进行评估后认为，那些患有注意缺陷多动障碍的孩子经过常规治疗后效果不明显，可以尝试进行基于脑电图的神经反馈治疗。[\[34\]](#)在这些研究中，他们发现，神经反馈训练可以让孤独症儿童的注意力、感官/认知意识、沟通和社交能力得到明显改善。

然而，英国南安普敦大学的萨缪尔·柯蒂斯及其同事在2016年发表了一篇论文，他们对科学文献进行了类似的分析，但得出了相反的结论。他们分析认为，许多研究的规模太小，而且不够严格。[\[35\]](#)问题在于这些研究所采用的神经反馈方法和实验方案差异很大。争论双方的研究人员一致认为，想要得出神经反馈训练对注意力缺陷多动障碍有效的结论，还需要进一步优化研究的方法。一项小型研究如果不够严谨，就可能使我们误入歧途。但同时，少量虚假数据也会破坏大量研究的成果。因此，我们还需要进行更多研究。

脑部刺激

在实验中，人们用一些直接刺激大脑的方法来增强认知能力，治疗神经和心理疾病。这些刺激大脑的方法也是研究神经回路如何控制行为的实验工具。

脑深部电刺激

加州大学洛杉矶分校神经外科医生伊扎克·弗里德所面对的是那些已经被神经系统疾病改变命运的患者。2018年在以色列举行的一次科学会议上，他展示了一个病人的视频片段：一个瘫坐在轮椅上的少女衣着不整，仿佛是一个被扔在椅子上的木偶。她的胳膊和腿软塌塌地蜷缩着，脑袋呆呆地垂在一侧，长长的黑发拖到地板上。她患有一种被称为肌张力障碍的疾病，这种疾病会损害大脑控制肌肉的能力。在影片接下来的一个场景中，这个年轻的女孩像其他少女一样洋溢着欢乐的笑容，在走廊上走来走去，这是因为弗里德博士和他的同事在她的大脑中放置了电极，刺激了大脑的苍白球区域。人们知道大脑的这一部分区域与运动控制有关，但对脑深部电刺激的技巧（以及放置电极的位置和要用到的刺激方式）甚至它的作用机理却知之甚少。不过正如弗里德告诉我的那样：“我们还不完全了解它的工作原理，但是我们等不及在果蝇和小鼠身上进行了；我们必须在人体上进行实验。”



图38 植入帕金森病患者脑部，用于脑深部电刺激并改善对身体运动控制的电极

20世纪90年代，脑深部电刺激作为治疗帕金森病的方法被引入，如今它已作为治疗药物耐受型帕金森病的方法被广泛接受。虽然脑深部电刺激的工作原理尚不清楚，但这个疗法非常有效。苏珊·莫洛汉患有帕金森病。2016年9月，她在迈克尔·福克斯基金会（Michael J. Fox Foundation）网站的博客里描述了自己接受脑深部电刺激治疗的经历：“我不再发抖了，脚趾也不再扭曲了。过去，我每天服用五种息宁片（左旋多巴-卡比多巴），而现在只服用两种。我又开始骑自行车了，我在为‘新英格兰帕金森患者骑行’活动做准备……我可以坦诚地说，这个脑深部电刺激手术做得值。” [\[36\]](#)

不幸的是，医生无法预测脑深部电刺激对每一个患者的有效性，甚至根本无法确定是否能起作用，因为尽管有几个理论看似不错，但实际上它们还是不能解释脑深部电刺激如何发挥作用。另外，手术过程本身就是在摸着石头过河，这也是为什么将电极植入大脑时，患者必须处于清醒状态。医生很快发现，如果把本来对准调节运动的神经元簇（底丘脑核）的刺激

电极扎得稍微深一点，帕金森病患者会立即变得烦躁不安，他们开始哭泣并有想自杀的感觉。不过刺激一旦停止，他们心理崩溃的状态就消失了。

你能想象吗？有人在给你的大脑做手术时，你还清醒着……“为了确保外科医生将电极放置在正确的位置，我不得不处于‘朦胧状态’，保持部分清醒。”莫洛汉写道，“我非常着急……医生将电极放在我大脑的不同位置，观察我的身体如何反应。在某一时刻，他们碰到了一个地方，我开始不停地快速颤抖。电极在有的地方会让我丧失自己的声音，我的声音变得陌生又缓慢。医生将电极放置在控制运动的大脑区域，当我看到自己曾经颤抖不停的右手几乎能够像左手一样快速且随意地开合时，我感到非常激动。我已经有8年不能这样了。”

在FDA批准脑深部电刺激治疗帕金森病后，这项技术开始被更广泛地用于许多其他神经系统疾病和精神疾病的临床治疗。

[\[37\]](#) 脑深部电刺激疗法适用的各种疾病包括：肌张力障碍、亨廷顿病、多系统萎缩、癫痫、疼痛、丛集性头痛、抑郁症、强迫症和抽动秽语综合征，以及冲动和暴力行为。在使用脑深部电刺激治疗强迫症等精神疾病的早期研究中，施加电刺激的区域跟实施有效手术治疗的大脑区域相同——都是额叶-基底大脑网络（眶额皮质、前扣带回、尾状核和丘脑）。[\[38\]](#) 20世纪50年代，人们曾尝试用脑深部电刺激刺激尾状核来治疗抑郁症和厌食症。[\[39\]](#) 1963年，人们首次用脑深部电刺激刺激中隔区来治疗精神分裂症。[\[40\]](#) 今天，脑深部电刺激被用于强迫症、重

性抑郁症、精神分裂症、肌张力障碍、厌食症和许多其他疾病的治疗。[\[41\]](#)

值得一提的是，虽然用电直接刺激大脑回路的方法可以对一系列神经和精神疾病有效，但在大多数情况下，人们并不清楚电刺激是如何减轻症状的，也不知道应该将电极放置在什么位置，以及什么类型的电刺激（模式和强度）最有效。没有理由认为用于治疗帕金森病的刺激参数（经FDA批准）也可以有效地治疗强迫症，因为它们涉及的大脑回路是完全不同的。

此外，动物研究的结果对指导外科医生如何用脑深部电刺激来治疗他们绝望的患者帮助并不大。尽管可以在动物模型中模拟精神病状况的某些方面，但小鼠毕竟不是一个很好的精神病动物模型。（你见过患有精神分裂症的小鼠吗？）医生用脑深部电刺激来治疗帕金森病以外的疾病，实际上是在还没有弄清楚这种疗法的机理，不知道受影响的神经回路，不明白这些神经回路如何受影响的情况下做的人体实验。但是他们之所以这样做，是因为它对患者有用，有时确实可以改善患者的生活。

当电流流经脑组织时，将激活某些神经元并抑制其他神经元，因此，人们并不清楚刺激是如何改变神经回路功能的。另一个问题是，如果远处的神经元的轴突正好经过电极附近，那么除了目标神经元会受到刺激外，那些远离电极尖端的神经元也会受到刺激。此外，来自植入的刺激电极的电流会激发神经冲动，这些冲动以正常方式沿着轴突向下传播，并刺激突触连接着的其他神经元。但是沿轴突的某个点触发的冲动也会向后

（反方向）进入神经元细胞体和树突内，并且会产生非常不同的效果，其中一些效果在谈睡眠期间的脑电波那一章中进行了讨论（请参见第7章）。

最后，脑深部电刺激带来的所有好处并非都可以归结为电刺激本身。电极植入后，脑组织的愈合反应也可能产生这些效果。电极植入和慢性刺激所造成的组织损伤会引起非神经元细胞（星形胶质细胞和小胶质细胞）的细胞反应，并生成一些神经活性物质，如神经递质和生长因子。由于长时间人工放电造成的生物学和电生理学反应可能会改变神经元的结构、基因表达和功能，从而可能间接地减轻疾病症状，并非脑深部电刺激驱动神经回路的正常活动模式所取得的功效。最后，尽管在细胞水平上，人们对帕金森病有较多的了解，但其他许多神经系统疾病，尤其是心理疾病，在神经回路水平上的病因还不清楚。

尽管有这些好处，脑深部电刺激也有一定风险。除了接受任何脑部手术都会面临的风险外，接受脑深部电刺激治疗帕金森病的患者中，有10%的患者会遇到包括认知、语言和记忆障碍的问题，还有情绪和行为的改变以及睡眠障碍——这些情况部分取决于刺激电极的放置位置。[\[42\]](#)

尽管如此，通过直接刺激神经回路来操纵大脑功能的方法在很多其他治疗措施无效的情况下是有作用的。尽管目前人们对这一方法的知识还不足，当前的技术手段尚不完善，但这种直接、精确地调节大脑回路以改善大脑功能并减轻痛苦的方法仍有巨大的潜力。用手术去除一部分脑组织以及用药物来治疗

心理和神经系统疾病，收效并不尽如人意。外科手术达不到处理这些问题所需的微电路级别的精度。药物不仅影响整个大脑，而且还会影响所有对该化合物敏感的细胞。例如，5-羟色胺再摄取抑制药对大脑起作用的同时，也会对肠道产生影响。

随着人们对大脑的了解不断增加，有了更好的技术可以操纵特定大脑回路中的电活动，电刺激将成为治疗神经系统疾病、精神疾病甚至学习障碍的更精确和更有效的方法。

溯源脑深部电刺激疗法

如前所述，脑深部电刺激的历史实际上就是修正主义的历史。伦敦大学学院神经外科医生和脑深部电刺激治疗专家马尔万·哈里兹批评这种一再重复的历史套路：用脑深部电刺激可以安全有效地治疗帕金森病，然后就被推广应用到其他精神疾病的治疗上。如果只追溯到20世纪90年代，这个发展套路用在这段有限的历史上也许是正确的。但事实是，运用脑深部电刺激的最初动机是希望控制精神病患者。这段历史已被确凿地保存在科学文献中，但是许多这类在人身上做的实验被认为是不道德的，因此脑深部电刺激的真正起源被掩藏了起来。[\[43\]](#)何塞·德尔加多一生的工作都围绕着脑深部电刺激（请参见第8章）。这清楚地表明，他的动机是想要理解和操纵人类的行为，尤其是不正常的行为。

根据马尔万·哈里兹等人的说法，脑深部电刺激起源于20世纪三四十年代风行的前额叶切除术和其他形式的精神外科手术。尽管精神外科手术是一个重大的进步，因为它将精神疾病

视为可以治疗的脑功能障碍，但这些手术方法也带来了严重的副作用。更为令人不安的是，前额叶切除术越来越多地被滥用于驯服那些不守规矩的患者。美国神经外科医师沃尔特·弗里曼在这方面可谓臭名昭著。他设计了一套类似凿冰的手术流程，将前额叶切除术简化到几乎任何人都可以操作。弗里曼对2900名患者进行了手术，其中包括18名儿童！用他的简化方法，医生将一个形似冰镐的器械从眼窝钉入前脑，然后将其左右滑动以割断额叶。他做最多的一次，当天进行了20台前额叶切除手术。[\[44\]](#)这种手术使许多人处于植物人状态，大约有490人因此丧命。[\[45\]](#)约翰·肯尼迪总统的姐姐罗斯玛丽天生患有轻度学习障碍。1941年，沃尔特·弗里曼对她进行了前额叶切除术。从那以后，她生活不能自理，只能在别人的照顾下度过余生。

为了找到一种更好的直接将电力输送到脑部以治疗精神疾病的措施，人们开发出了电休克疗法。由于精神外科手术的害处太大，因此电休克疗法成了治疗精神疾病的一种更具吸引力的替代方法。后来，这两种方法（定位手术和电刺激）融合在一起，成为治疗精神疾病的新方法。在大脑的特定部位施加脑深部电刺激刺激提高了治疗的精确度，减少了副作用，从而达到治疗精神病的目的。

20世纪50年代初，耕耘在脑深部电刺激领域的人除了德尔加多外，还有精神病学家罗伯特·希斯。他从20世纪50年代初开始在新奥尔良的杜兰大学进行了长达30年的类似实验研究。希斯对精神分裂症患者实施脑深部电刺激，也用脑深部电刺激来寻找大脑的愉悦中心。他在后一个领域的研究，进一步延伸

到用脑深部电刺激的方法在男性同性恋身上唤起异性恋行为。

[\[46\]](#) 2000年，心理学家艾伦·鲍迈斯特发表了一篇颇有影响力的论文，他把杜兰大学的脑部电刺激项目作为研究医学伦理学历史的案例做了一番回顾。[\[47\]](#)他在文中写道：“杜兰大学的脑部电刺激实验既没有科学依据，也没有临床依据……就算按照过去的标准看，这些实验也是可疑且危险的。”希斯于1972年发表的一篇关于性高潮的文章，以及他早期进行的让大脑自我施加电刺激以识别愉悦中枢的研究，还有那些治疗同性恋的工作都被认为违背了所有道德标准。

查理·莫昂和罗伯特·希斯在1972年发表的论文中记述了一名同性恋受试者的父亲的观点：“他认为儿子是个令人失望的年轻人，他在童年和青春期是个失败者，是个胆小鬼。”

[\[48\]](#) 医生希望通过用电极刺激他的与异性恋相关的大脑愉悦中枢，以及与同性恋相关的大脑厌恶区域，来治愈这名24岁的同性恋者。

“（电极）被植入以下大脑区域：右中隔、右侧海马、左右杏仁核、右下丘脑、右后丘脑、左侧尾状核以及小脑左叶内的两个皮质下位点。”[\[49\]](#)莫昂和希斯描述了他们如何将电极戳在这个人大脑的各个区域。

受试者在实验之前、之中和之后都做了脑电图记录。“常规头皮脑电图显示，受试者的双侧颞叶异常，特征是出现慢波活动，左侧最强。氯醛糖（一种全身麻醉剂）起效后在右颞部也出现阵发性 δ 波活动。”[\[50\]](#)

研究人员通过植入他大脑各个部位的电极施加刺激，将刺激电流从0.5毫安提高到6毫安，直到他们找到了一个点。这个位于中隔区域的点在被刺激时，受试者会产生强烈的性快感。做好这些准备以后，研究人员开始了实验：

此时，（患者）观看了一部15分钟的8毫米胶片“小黄片”。这部电影描述了一个男人和一个女人性交及相关活动。同时连续记录患者的脑电图，并通过双向镜对他进行观察。在电影放映过程中，他没有表现出明显的语言或手势反应，但他显得非常委屈、愤怒，并且在影片的结尾拒绝做出回应。（电影放映前）他的脑电图基础频率显示出低电压和低振幅活动，这说明他在观看电影之前感到紧张和高度警觉。在患者观看影片的过程中，脑电图无明显变化。但是在电影放映结束时，我们注意到出现了高振幅的α波活动，这表明他精神放松，因为电影结束了。[\[51\]](#)

在接下来的几天里，他们将一个带三个按键的刺激装置交给那个人控制，这样他就可以在任何时候将电刺激传递到自己的中隔区域。

“（患者）无论在行为上还是内心里，他使自己兴奋到了那种程度——尽管他强烈地抗议，但他仍不停地刺激让自己产生无法抗拒的欣快和愉悦，因此我们不得不把刺激设备的连接断开。经过频繁刺激后，他的脑电图无明显变化。”他们记录道。

然后，他们又给这个人看了同一部黄色电影。这一次，他产生了性兴奋，并开始手淫。

接下来，研究人员开始着手进行最后的实验：

安排一个21岁的妓女在专门准备的完全私密的实验室里与他一起度过2个小时……在他们会面的那个下午，患者的电极通过一根延长线连接到脑电图仪上，这样他就可以自由地活动。先对他进行了45分钟的脑电图记录，然后在中隔区域给予患者20秒钟的被动刺激。接下来，（患者）被介绍给妓女，在患者与她相处的整个过程中进行脑电图记录。[\[52\]](#)

两人相处过程中的事件是用图表进行描述的，但总结起来就是记录到了两次“成功”的性交：“随着性唤起的增强，在几个位置出现了 δ 波，就在性高潮即将发生之前，中隔区记录到了强烈的信号改变，类似于癫痫发作一样的放电……但是，在刚开始后不久，信号就被运动产生的肌电信号淹没了。虽然不可能把有意义的信号与干扰信号分开，但中隔区阵发性的电活动似乎在整个性高潮反应中都持续存在。”

人们不知道这个人最终的命运。

鲍迈斯特在其2000年的论文中写道：“接受这类论文发表的编辑也应该被追究道德责任。”[\[53\]](#)编辑、同行评议审稿人和资助机构都注意到了这一点。后来，这一类的研究都受到了资金和出版的限制。

一直到20世纪70年代，脑深部电刺激还主要被用于治疗行为和精神疾病，但是迫于道德上的批评，这一类研究终于告一段落。用脑深部电刺激治疗神经系统疾病时所面临的伦理问题远不及用在治疗精神疾病时来得严峻。在后一种情况下，甚至连患者知情同意的声明都是不可靠的，因此关于脑深部电刺激的研究转向了治疗帕金森病和其他神经系统疾病，以及用于控制假肢，但不再用于治疗心理疾病。现在，脑深部电刺激再次被用于精神疾病的治疗，希望我们能从过去的经验中得到启发。

用电刺激恢复记忆

一个十来岁的年轻女孩的颅骨被打开了，露出微微反光的布满血丝的大脑，随着医生拔插金属探针而一阵阵搏动。探针拔出来时会带出一团脑组织，就像在潮湿的沙子上挖出一个小坑。然而，这个时候她还在不停地快速说着内心的独白。当你面对这种景象时，难免会感觉到残忍。她的生活完全被神经系统疾病毁了，否则她也不会选择做脑部手术。为了让外科医生植入电极并去除患病的组织，同时还要保留健康组织以执行重要功能，在手术过程中，她需要保持意识清醒。心脏外科医生靠精确的解剖图谱来指导手术。每个人心脏的解剖结构都一样，然而大脑却是不一样的，这也是我们之所以成为自己的原因。任何外科医生都面临患者失去生命的风险，而神经外科医生面临的风险则有可能是虽然挽救了病人的生命，但患者却失去了自我。大脑没有痛觉，因此医生可以在病人清醒的状态下

进行脑部手术，从而了解思维如何在神经回路层面产生。这一便利已经并将继续给人类带来启发。

著名的神经外科医师怀尔德·彭菲尔德（前面提到过他与赫伯特·贾斯珀合作治疗癫痫，参见第10章）是第一位认识到可以仅使用局部麻醉药就进行脑部手术的外科医生。这样的话，患者就可以在完全清醒的状态下与医疗团队合作。这有助于医生在患者脑中放置手术器械和电极。

“大脑本身没有感觉。因此，除非告知患者或者患者意识到产生了积极的生理作用，否则他们不知道电极在什么时候起作用。”彭菲尔德描述道。[\[54\]](#)然而，对大多数大脑区域的刺激并不会引起人有意识的思考，因为它们执行的都是无意识的脑功能。不过，电刺激更有可能使正常的神经网络功能瘫痪。彭菲尔德描述了他在手术期间对患者大脑皮质的不同区域施加轻微电刺激后得到的实验结果，他写道：

许多东西是电刺激永远也无法做到的。（电刺激）不可能产生富有建设性的思想，不会产生意愿或有目的的行为。通常，贸然施加电流似乎会干扰电极所在区域皮质本身的正常功能。例如，如果将电刺激施加到某一个优势半球语言区（例如布罗卡区），患者会变得沉默。通过电刺激不会产生任何言语。如果在使用电极的情况下还要求患者回答问题，他们会惊讶地发现自己患上了失语症。也就是说，患者再也找不到能表达思想的词语。但是，一旦把电极拿走，他们的语言能力会很快恢复，然后会说出那些电极对皮质语言区域进行干扰时他们想说但说不出的话。[\[55\]](#)

德尔加多在二十世纪五六十年代进行研究时最常观察到的现象是脑功能遭到电刺激的破坏，但彭菲尔德在刺激患者大脑颞叶区域时却发生了令他感到诧异的事情：电刺激唤起了患者非常生动的记忆。在那一天发生的事件早已被患者遗忘，但现在却能像电影里的情节一样以恰当的顺序展现出来。记忆犹如在现实生活中一般清晰。彭菲尔德描述了这次令人困惑的实验：1931年，他用电刺激了一个女人的大脑颞叶。突然间，这个女人生动地回忆起她生下女儿时的情景。彭菲尔德写道：“那是几年前发生的事，此时，女孩已经长大了。她的母亲现在躺在我手术室的台子上，希望我能治好她的癫痫。”[\[56\]](#)这个神秘的现象令彭菲尔德疑惑不解。起初，他将这位女士的反应归因于女人的不可捉摸（这是一个更大的谜）：“我认为，此刻她谈论以前的经历是一件很奇怪的事情。但后来，我想了一下，女人是难以捉摸的，她们从来没有打算让男人完全理解自己。”[\[57\]](#)

在接下来的5年中，彭菲尔德都满足于这种解释，直到“5年以后，在一次对病人的电刺激过程中又出现了这种类似的心理状态。但是，这次似乎可以肯定，施加的刺激以某种方式唤起了病人以往的经历”。[\[58\]](#)这一次，他是对一名患有严重癫痫的14岁女孩进行电刺激操作。

他叙述道：“在局部麻醉下，为了定位，我把（病人的）躯体感觉区和运动区域描画出来，然后将刺激器用在颞叶皮质。‘等一下，’她说，‘我想告诉你。’我从她的脑皮质上

取下了电极。片刻后，她说：‘ 我看见有人朝我走来，他好像要打我。’ 很明显，她突然受到了惊吓。” [\[59\]](#)

在其他几名患者身上也重复出现了这种类型的反应。

有一位患者在彭菲尔德刺激她的颞叶皮质时说：“我又听到了音乐，就像广播。” 关于这个病人，彭菲尔德写道：

然后，我一次又一次地在这个位置施加电极刺激。每次，她都会听到同一个乐队演奏的同一首音乐。音乐显然是从同一个位置开始的，从诗歌到合唱一直在进行。她看见手术巾下面的电刺激器的盒子，以为这就是留声机，有人隔一会儿就打开来播放。 [\[60\]](#)

由于通电的电极唤起了音乐的记忆，彭菲尔德意识到，这是那个女人对这一事件的记忆正在她的颞叶脑回路中实时播放：“我们要求她描述是什么音乐。当我们再次用电极进行刺激时，她开始哼起歌来，手术室中的所有人都惊讶得说不出话来。很明显，她正和着乐队的节奏一起哼那首曲子。” [\[61\]](#)

一年后，这位女士描述了自己在彭菲尔德的手术台上经历的奇异事情：“它就像是由乐队演奏的。绝对不是我自己想象出来的歌声。我真的听到了。它不是我最喜欢的歌曲，所以我也不知道为什么听到那首歌。”

彭菲尔德得出的结论是，我们的大脑会根据我们的经历，永久地记录下意识流的信息，它就存储在大脑的颞叶处。 [\[62\]](#)

他总结道，回忆过去的事件可能是容易的，也可能是不可能的，但它们就在那里，可以被电刺激释放。“许多患者告诉我，电极刺激带来的体验比回忆要真实得多。他仍然清楚当前的情况。这是双重意识，但他知道哪一个是现实。” [\[63\]](#)彭菲尔德写道：

意识流的记录永久地存储在大脑中。它保留了惊人的细节。没有人能靠自己的意愿将这些细节重新从记忆中唤醒。但是，有一把钥匙，它可以通过某种机制解锁过去，并自动对记忆进行扫描以解释现在。这把钥匙就隐藏在颞叶的解释区。当我们有意识地把当前经验和过去的类似经验进行比较时，这种机制似乎也在起作用。 [\[64\]](#)

近年来，电极（和电脑）已经变得更加复杂，使研究人员可以同时接入多个大脑回路。借助MRI可以给电极精确地定位，因此，彭菲尔德率先在人体上开展的关于大脑和思维如何运行的实验方法，现在正打开一片令人惊讶的新天地。

神经外科医生伊扎克·弗里德和他的同事利用这些现代技术，让病人躺在手术台上完成一个探索电脑生成的虚拟城镇的任务，同时他记录了患者大脑中单个神经元的放电情况。我们对海马中的位置细胞和空间导航能力的所有知识都来自对啮齿动物和其他实验动物的研究，但是这些理论对于人脑是否也成立？例如，我们知道蝙蝠和大鼠的位置细胞的行为存在很大差别，因此，只有通过记录人的大脑，我们才能知道动物实验中发现的那些机制是否同样适用于人。

弗里德和他的同事记录了受试者颞叶和额叶的317个神经元的电活动。他们发现有些神经元只有当受试者看到显示屏呈现特定地理标志的时候才做出反应。这些神经元就像啮齿动物的位置细胞一样，主要位于海马和海马旁的大脑区域。[\[65\]](#)大量研究证实，啮齿类动物的 θ 波节律与运动和导航有关。弗里德和他的同事在2017年对人类的另一项研究也证实了上述关系。他们在病人的脑中植入电极以控制癫痫发作，在患者自由走动的时候就记录并分析他们的神经元的放电模式。人脑中植入的电极记录到了神经元以 θ 波的节律放电，而且 θ 波节律的强度随着身体的运动而增加，就跟在啮齿动物中发现的一样。[\[66\]](#)

当前学界的看法是，位置细胞并非一种特殊的细胞，它们的功能和其他种类的神经元一样，在高级大脑皮质中发挥作用——对环境中的非常明显的特征做出反应。弗里德等人曾经发现了一些对非常特别的面孔有反应的神经元，像比尔·克林顿、哈莉·贝瑞或詹妮弗·安妮斯顿的面孔。[\[67\]](#)但值得注意的是，这些神经元并没有进行面部识别——无论这些面孔以何种方式呈现，是侧面照、正面照、近照还是老照片，甚至当人听到或者看见这个人的名字，这些细胞都会做出反应。这些神经元编码了特定人物的完整概念。这与马塞尔·贾斯特及其同事用fMRI做的“读心术”实验得到的结果是一致的。大脑中的信息是以集成的概念来进行编码的，这是因为电极记录的那些发放动作电位的神经元是连接到其他庞大的神经元网络的，比如编码关于詹妮弗·安妮斯顿的完整概念的网络。

在特拉维夫举行的一次科学会议上，弗里德展示了他的实验结果。在实验中，他的病人观看了不同电视节目的简短视频片段。当他的病人看到喜剧演员杰里·塞恩菲尔德的电视节目中的场景时，电极所记录的神经元之一开始放电。当《宋飞传》的片段开始播放时，那个神经元就开始放电，并且在整个12秒的视频片段中一直在放电，直到研究人员切换到其他电视节目。当研究人员把影片切换回塞恩菲尔德的视频时，受试者的那个神经元又被激活。[\[68\]](#)有的神经元会对动画片《辛普森一家》的视频片段做出特别的反应。

似乎这个神经元编码了塞恩菲尔德这个概念，包括我们知道的这个明星的所有丰富特征，但是我们如何确定呢？用动物实验很难回答这个问题，但是在人体实验中，你只需要提问就可以了。实验结束后，研究人员问受试者是否记得在测试中看到的東西，她准确地回忆起播放过的不同节目的细节。当她辨认出就是自己看过的《宋飞传》片段时，之前研究人员播放《宋飞传》片段时激活的那个神经元又开始放电了。

在受试者适应电脑生成的模拟环境的实验中，弗里德和他的同事发现，如果以 θ 频率的瞬时电脉冲刺激海马神经元，就像在增强大鼠脑切片的神经元突触强度时所做的那样（这个效应叫作长时程增强，请参阅第7章），受试者的记忆力可以得到增强。当受试者到达虚拟环境中的特定位置时，或者给受试者呈现一系列面孔，但只在其中一些特定面孔出现时，研究人员就对受试者的海马神经元施加 θ 频率的刺激，然后对受试者进行记忆力的测试。研究人员发现，那些接受了 θ 频率的刺激的海马神经元的“记性”更好。[\[69\]](#)

弗里德告诉我，关键是刺激与海马相连的白质束，而不是刺激灰质（灰质是由相互连接的神经元细胞体形成的密集网络，但是位于灰质下面的白质是由神经元的轴突束形成的。白质把神经元连接到神经回路中）。增强与特定神经元连接（这些神经元编码的概念被存储在记忆中并被唤醒），可以更有效地控制神经回路的激活。灰质组织形成的神经回路过于错综复杂，所以刺激白质比刺激灰质有效得多。它的原理就像插上电视机的插头就可以看电视，但直接用电流轰击电视机却没有用。

这项研究表明，对海马进行电刺激可以改善记忆。这种刺激大脑的方法将来有一天可能会对阿尔茨海默病患者或其他患有认知和记忆问题的患者有所助益。用电流对涉及记忆的神经回路进行刺激可以弥补大脑出现的问题，就像起搏器可以弥补出问题的心脏一样。这种刺激（取决于刺激的时间以及如何应用）可以改善记忆编码，巩固短期记忆，并转化为长期记忆或恢复记忆。在2019年的一项研究中，研究人员用经颅磁刺激使额颞皮质中的 θ 波和 γ 波同步化，结果显示，老年人的工作记忆得到了显著改善。[\[70\]](#)

彭菲尔德用电极随机地刺激患者颞叶的不同部位，电刺激随机唤醒了被人们遗忘的生动的记忆。此时，他一定已经瞥见了这种大脑刺激方法的潜力。今天所用的技术已经得到了很大的改进，而且更好的技术层出不穷。从20世纪50年代到70年代，大脑刺激实验的光怪陆离的历史阻碍了人们接受大脑刺激作为一种治疗认知功能障碍的方法，但是弗里德认为，用电刺激大脑是一种很有潜力的治疗方法，应该大力开发。

经颅脑刺激

安东尼奥·埃加斯·莫尼斯从1935年才开始他的精神外科医生的生涯，他因为切除精神病患者的前额皮质（前额叶切除术）的点子而获得了诺贝尔奖。德尔加多从20世纪50年代就开始尝试对脑部进行深层刺激的实验。他们的动机都是想找到能有效控制精神病患者的异常行为，尤其是暴力行为的办法。尽管两位科学家都遭到严厉谴责，他们的方法最终也都被禁止，但他们大胆地开拓了新的领域，在正确的方向上开辟了一条道路，只不过使用原始的技术和对脑功能的粗浅理解还不足以让他们实现自己的目标。通过让微弱的直流电透过颅骨传输到大脑来调节大脑回路的电活动的新方法，结合fMRI，人们对愤怒和侵略的生物学基础有了新的认识。至少，实验研究的结果为直接操纵这些神经回路中的电活动，从而控制愤怒和进攻性提供了一种的新方法。

15岁的德文特·华盛顿为了准备复活节礼拜仪式，要去理发店理发，他和母亲以及两个妹妹正在华盛顿特区地铁站的平台上等车。年轻人抬头瞥了一个陌生人一眼，这个陌生人——17岁的莫里斯·贝拉米——立刻发动了攻击。他掏出一把38毫米口径的手枪，将德文特·华盛顿枪杀了。三个星期前，贝拉米在一桩抢劫案中谋杀了一名下班的特勤局特工。这个少年枪手冲动易怒，动不动就诉诸暴力的表现由来已久。他的家人试图通过适当的药物治疗和心理咨询对他加以控制，但无济于事。2019年1月，贝拉米因两起谋杀案被判处65年监禁。[\[71\]](#)检

方起诉书中要求判处贝拉米80年监禁，法官考虑到他是个未成年人，因此减少了刑期。

与许多充斥在每日新闻报道中的悲剧一样，这个案例凸显了一个显而易见的事实，即大多数暴力犯罪是由那些容易暴发病理性愤怒和暴力行为的个人（主要是男性）犯下的。看起来，似乎对他们的行为的反应只能是永久地将这些人排斥在社会之外，但科学可能会提供更好的选择。

众所周知，边缘系统是检测威胁和愤怒情绪的中枢，但是前额皮质可以通过调节边缘系统的下行连接来抑制愤怒和进攻行为。儿童很爱发脾气，就是因为这些来自前额皮质的连接要到青春期后才发育完全。这就是为什么最高法院认为未成年人负有与成年人程度不同的刑事责任的生物学基础——他们不具备成年人控制冲动性愤怒所必需的神经回路。这些回路可能会因遗传、生活经验、毒品或疾病而受到破坏，因此无法发挥其抑制暴力冲动的正常功能，从而引发愤怒、攻击和暴力犯罪。

[\[72\]](#)

前额皮质抑制攻击的冲动，相比之下，前额叶切除术则通过完全切断这些神经回路的连接来使患者平静下来。但是，切断分布于整个大脑的高级认知控制中心的所有连接，会使患者变成一个废人。

新的研究正在确定负责愤怒情绪和攻击性的神经回路。这些发现为理解正常个体如何触发和抑制暴力冲动，以及这些神经回路的异常如何导致疾病带来了希望。[\[73\]](#)特拉维夫大学的加迪·吉拉姆及其同事在《皮质》（*Cortex*）杂志发表的研究

报道说，透过颅骨对大脑的特定区域施加微弱的直流电刺激，可以抑制人的愤怒和攻击性。[\[74\]](#)经颅直流电刺激技术就是将一个电极放在受试者前额上（以上述研究为例），并施加22分钟的弱直流电（1.5 mA）。电休克疗法是驱动强大的电流通过大脑来诱发广泛的癫痫发作。与电休克疗法不同，将这种微弱的电流施加到额头上并不会产生明显的反应，只是在正电极下方的大脑神经元会变得更加兴奋。相反，负电极下方的神经回路的电活动会受到抑制。用这种非侵入性的技术，就可以刺激或抑制人脑神经回路的活动。在前述研究中，他们使用经颅直流电刺激调节一个与冲动控制有关的神经回路，同时对受试对象进行fMRI扫描，因此当受试者被激怒时，可以监视到这些脑回路中神经活动的变化。

腹内侧前额皮质是前额皮质的一个特殊区域，在人发怒和进攻时会参与这些情绪与行为，这可以通过使用fMRI观察到。在吉拉姆等人的研究中，研究人员通过使用fMRI证明经颅直流电刺激能够有效地增加腹内侧前额皮质中的神经活动——当这个回路被所施加的电流激活时，受试者的愤怒受到了抑制。

这项研究的受试者参加了一个游戏。在该游戏中，受试者分到的钱可能公平，也可能不公平。受到“欺骗”自然会激起测试对象的恼怒。受试者的恼怒程度被分为1~10级。当游戏中的参与者感到受骗时，用经颅直流电刺激激活受试者的腹内侧前额皮质神经回路从而抑制边缘系统中的杏仁核，他们的愤怒程度就会降低。对照组接受的假刺激只是在皮肤上产生类似的感觉，但并未影响神经回路的活动。

这项研究的目的是确认并理解愤怒和攻击性神经回路的神经生物学基础，但作者指出，这些发现具有潜在的临床应用价值。人际关系遭遇挑战时所引起的愤怒和攻击性经常出现在许多精神疾病和医疗状况中，因此需要一种比药物、心理咨询以及诉诸监禁或收容更好的治疗方法。作者指出，他们的发现表明，经颅直流电刺激可能提供“一种非侵入性的辅助方法，以改善有病态愤怒表现的个体应对愤怒情绪的能力，也为有可能发展成这种病症的风险人群提供了一种预防手段”。[\[75\]](#)换句话说，经颅直流电刺激的作用就像大脑的起搏器一样，它也许可以作为一种干预措施，来防止贝拉米（以及像他一样的人）这样的定时炸弹爆炸。毕竟，之前他身边的每个人想要阻止却未能阻止他，只能眼睁睁地看着悲剧发生。

直流电刺激增强脑功能

透过颅骨传输电刺激来调节大脑神经回路的方法消除了脑部手术的风险，节省了治疗费用，从而使这项技术有了更广泛的应用空间。最简单的方法是将电极贴到头皮上，直接接通适当极性的直流电，或者施加交流电来刺激/抑制局部大脑区域的神经元兴奋性（取决于电压的极性）。这种技术可以用来增进学习。

训练空军飞行员操纵无人机最大的挑战之一是如何在纷繁芜杂的雷达影像或视频图像中挑选出目标。目前，训练飞行员是部署这些新型致命武器的最大瓶颈之一。空军研究人员发现，如果在通过视频模拟器进行训练的同时，向飞行员的大脑

施加适当的电流（2毫安直流电，持续30分钟），他们能够将训练时间减少一半。电流通过放置在头皮上的脑电图电极传输。我在2011年的神经科学学会年会上第一次听说这项研究。[\[76\]](#) 生物医学工程师安迪·麦金利及其同事在莱特-帕特森空军基地的空军研究实验室将经颅直流电刺激与咖啡因和其他能促进学习的兴奋剂所导致的认知增强进行了对比。他告诉我：“我不知道有什么可比的。”经颅直流电刺激的应用不仅加快了学习速度，而且表现得更好。飞行员识别威胁的准确性通常会在20分钟后逐步下降，但在长达40分钟的实验中，飞行员的准确性一直保持不变。这种提升大脑性能的方法也可以应用在脑部疾病或损伤后引起的功能丧失的训练和恢复中。



图39 美国军方正在使用脑电图和脑机接口技术来增强战斗力。这里展示的是电脑正在监测处于虚拟情景中的一位军方研究人员的脑电波

接受经颅直流电刺激的受试者能感知到刺激，不过他们说这种刺激并不会引起不适。本科生劳伦·布拉德告诉我：“感觉有点儿痒痒或者有点儿轻微的灼烧感。”她作为测试对象描述了刺激引起的感觉。她说：“之后，我会变得更加敏锐。”目前尚不清楚引起这些感觉的原因：可能是安慰剂作用（预期结果会产生积极作用），也可能头皮上的特殊感觉会引起唤醒。众所周知，提高唤醒程度和注意力可以增进学习。但是，在对照组身上使用的电刺激也会使头皮发痒，但不能有效地刺激大脑。

布拉德和她的合作者想要知道的是，受试者在接受经颅直流电刺激后，大脑是否会出现任何明显的变化，这样就可以解释该方法如何促进学习。在施加经颅直流电刺激之后，研究人员着重寻找大脑的功能性（脑电波活动的改变）和器质性（通过脑部MRI扫描检查）两方面的变化。

麦金利、布拉德和他们的同事用脑磁图记录了受试者接受经颅直流电刺激时由感觉刺激（例如声音、触摸和光线）所引起的脑电波。他们发现，经颅直流电刺激让刺激手臂的感觉神经所诱发的脑电波强度比基准值升高了6倍。对照组用模拟经颅直流电刺激刺激时并未观察到这种效果，虽然模拟刺激也能在头皮上产生相同的感觉，但对脑组织没有刺激作用。

在经颅直流电刺激停止后很长一段时间内，它的效果会持续存在。在经颅直流电刺激结束后50分钟，测量到感觉输入诱

发的脑电波强度仍然是正常人的2.5倍。这些结果表明，经颅直流电刺激可能会增加大脑皮质的兴奋性，从而增强觉醒，加快大脑对感觉输入的反应，并加速皮质回路中的信息处理。

值得注意的是，脑部MRI扫描显示，大脑结构在经颅直流电刺激后五天出现变化。经颅直流电刺激后，皮质下白质中的纤维束更粗壮，并且有更高的组织性。这个结果是通过一种被称为弥散张量成像的MRI扫描技术检测到的，它显示了水在通道中扩散时的各向异性增加（即脑组织的水在沿神经纤维某一个方向上的扩散受到更大的限制）。就像画笔的刷毛吸住颜料一样，白质区域中排列更有序的轴突会限制水沿轴突的扩散。这种更有序的结构可能是由于轴突的分支和交叉减少，以及髓鞘（髓鞘是轴突上的电绝缘物质，可以加快电脉冲在神经元之间传播的速度）增多而造成的。在没有接受头皮电极刺激的另一侧大脑半球则未见明显变化。

在神经科学学会的会议上与其他科学家讨论空军的研究成果时，德国莱比锡马克斯·普朗克人类认知与脑科学研究所神经物理学组的脑成像专家罗伯特·特纳赞同髓磷脂的增加可能是经颅直流电刺激后导致结构变化的原因。他说道：“我目前认为……当白质中那些没有髓鞘的轴突纤维开始承载频繁的动作电位时，它们就会迅速髓鞘化。”他的意思是，大脑纤维束中这些裸露的轴突经过经颅直流电刺激后变成有髓鞘的纤维，这可能有助于提高学习能力。

我也赞成这种观点，因为这一直是我自己实验室的研究重点。在过去的30年中，我和我的同事们发现，用髓鞘绝缘膜包

裹轴突的细胞（称为少突胶质细胞）可以感觉到神经冲动，而且我们已经了解到许多有关少突胶质细胞如何感觉动作电位并形成髓磷脂的细节。[\[77\]](#)我们实验室的最新研究更进一步，我们发现完整、成熟的髓鞘可以改变其厚度来调节神经冲动的传播速度。正如我们后面还要进一步讨论的，适当的脉冲传输速度可以确保神经脉冲在正确的时间到达神经网络中的关键节点，从而改善学习和神经回路的性能。[\[78\]](#)

进行这项研究的空军研究人员相信，经颅刺激可以促进学习。其他实验室的大量实验也表明了这一点。即使在2011年的科学会议上，德国蒂宾根大学的医学、心理学和行为神经生物学的另一位研究员马蒂亚斯·维特科夫斯基也证明了经颅直流电刺激在不同情况下有加速学习的可能。维特科夫斯基的研究方向是通过脑机接口控制假肢。正如本书前面所述（参见第8章），使用脑机接口设备的患者经过大量训练后可以仅靠思维就学会产生适当的脑电波来控制机械手。维特科夫斯基发现，如果患者在为期5天的训练中每天接受20分钟的经颅直流电刺激，他们就能更快地学会用思维控制假肢。经颅直流电刺激通过把电流输入神经元来影响神经元放电，它有可能使神经元超极化或者去极化，也有可能减弱或增强神经元发放脉冲的能力，这取决于电流的极性。如果施加到正确的大脑区域，经颅直流电刺激将是一种直接控制大脑电活动的简单方法。它无毒无害，而且可使学习的速度加倍。

尽管有了关于经颅直流电刺激的这些发现，但纽约大学的捷尔吉·布扎基和他匈牙利塞格德大学的同事于2018年发表了一篇论文提出质疑，他们认为这种技术根本不能影响脑电波振

荡或神经元放电。[\[79\]](#)他们的研究通过测量流入人的尸体头部和啮齿动物头部的电流发现，施加到头皮的电流有3/4不能进入大脑组织，因为电流在到达大脑之前就已经被皮肤和颅骨分流了。他们发现，要想使脑组织内部的电场达到足以影响神经元放电的程度，经颅直流电刺激必须传输大得多的电流。

与直流电不同，交流电也被用于经颅电刺激，通常用于检验脑电波振荡频率的改变是否会影响人的信息处理能力和行为。当通过电极施加足够强的经颅刺激时，脑电波的振荡频率和神经元放电会受到明显影响。布扎基的研究表明，当以1赫兹的正弦低频模式对人体施加6毫安的电流时，通过脑电图监测到 α 波的活动发生了明显的改变。 α 波的振幅与经颅刺激同相激增。 α 波的强度在经颅刺激传输的电流最大时达到峰值，在经颅刺激的电流最小时受到抑制。然而，在4.5毫安或以上的电流刺激下，受试者会产生刺痛感和灼烧感。他们还会反映感到头晕并看到与刺激频率同步振荡的水平光影，即使他们在黑暗的房间中闭着眼睛。受试者还报告说，自己会听到与1赫兹刺激频率相同的从左向右移动的噪声，口中会感到有金属的味道。当刺激停止时，所有这些感觉都消失了。

研究人员利用这些信息设计了一种更有效的调节人脑电波的新方法。这种方法通过头皮上排列的多个电极发出经颅高频刺激脉冲，使它们在大脑的局部区域交叉并产生足够大的电压，这称之为交叉短脉冲（ISP）刺激。他们的实验表明，这种刺激对神经元放电和脑电波振荡具有明显的影响。

布扎基及其同事认为，对经颅直流电刺激的大量研究表明，它能有效地调节神经元的多种功能和行为，但是其中许多结果可能是由刺激的间接作用或安慰剂效应引起的。同时，他们也承认，跨膜电压接近触发电脉冲阈值的神经元会被很小的电压激活，因此，即使是微弱的经颅直流电刺激也会激活此类神经元。

重要的是要认识到，我们检测大脑的电生理变化（包括脑电图）的能力是有限的。与用电极进行记录相比，人类的大脑和行为通常对刺激更为敏感。换句话说，正如对控制无人机的飞行员进行的研究所显示的，经颅直流电刺激在控制精神状态、促进学习、机敏和行为表现方面的作用可能说明了它真正的生物学影响。但同时，经颅刺激方法也非常重要。如果采用的方法不对或者对照实验不恰当，则可能出现安慰剂效应。

经颅磁刺激

我们之前已经讨论过经颅磁刺激这种技术，它能增加或减少神经回路的兴奋性。这种技术可以通过放置在头部上方的线圈将高能磁场脉冲发送到大脑，用于多种心理疾病的治疗。FDA于2018年8月批准经颅磁刺激用于治疗强迫症。[\[80\]](#)在审查了来自多家医学研究机构随机选取的100名患者的研究数据后，FDA做出了这一决定。这些患者中有一半接受了经颅磁刺激治疗，另一半接受的是模拟经颅磁刺激治疗。心理测试评估的结果显示，有38%的患者对该治疗产生了积极反应。有趣的是，有11%的患者对模拟刺激装置也产生了良好的反应。早在2008年10

月，FDA就批准经颅磁刺激用于治疗成年人抑郁症（抗抑郁药治疗无效），随后，用经颅磁刺激治疗强迫症也获得了FDA的批准。因为经颅磁刺激被认为是安全的并且已被批准用于治疗，所以这种方法也可用于帮助其他神经和心理疾病的患者。比如经颅磁刺激可以用于卒中后治疗；用于严重抑郁症、创伤后应激障碍和脑震荡后综合征；用于改善工作记忆、减轻痛苦并治疗注意缺陷多动障碍、帕金森病、阿尔茨海默病、头痛、甲基苯丙胺（冰毒）成瘾、神经性厌食、精神分裂症和多发性硬化等。

人们认为经颅磁刺激是安全的，但是它可以诱发癫痫发作，而且由于向大脑发射的磁场也会刺激面部神经，所以经常会引起疼痛或不愉快的感觉。

使用这种方法时，在磁脉冲的焦点处，大脑组织中相对较大区域的兴奋性被改变了，因此，大脑皮质中的神经元可能被激活，也可能被抑制，这取决于刺激的频率。对于许多疾病来说，人们还不知道应该刺激哪个大脑区域才最有效，但前额皮质区域（眶额叶和背侧额叶前额皮质）是最常用的靶向区。有部分保险公司会承担经颅磁刺激治疗的费用。

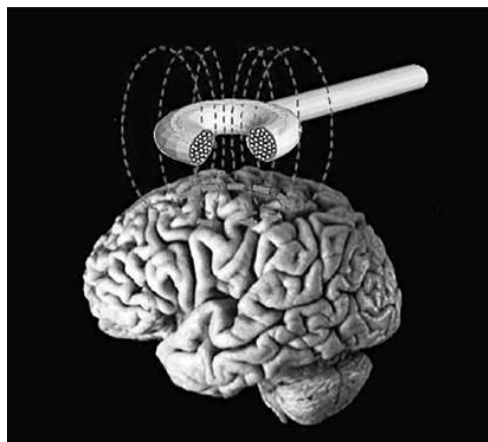


图40 经颅磁刺激可以增强或抑制神经回路中的神经活性。经颅磁刺激的强磁场来自头部上方的电磁体，所产生的强磁场脉冲被输入大脑。经颅磁刺激被用于实验研究与多种神经和心理疾病的治疗

对任何药物，人们都会有不同的反应。这句话对于创伤后应激障碍的经颅磁刺激治疗也适用。最近的一项研究发现，通过脑电图分析，研究人员可以预测用经颅磁刺激治疗这种疾病是否会有效。在罗得岛州普罗维登斯退伍军人医学中心的创伤后应激障碍和重性抑郁症患者接受了5赫兹的经颅磁刺激治疗，刺激位置在背外侧前额皮质，每天进行40次治疗。在施加经颅磁刺激之前和之后，患者分别要做静息状态的脑电图记录。这个疗法对29名患者中的大约一半有效，但是当研究人员在进行经颅磁刺激之前检查这些患者的脑电图时，他们观察到额叶脑区的 α 波相关性较高的患者的临床治疗效果较好。[\[81\]](#)

这个领域的研究正在从实验室转向临床。2019年，我参观了沃尔特·里德国家军事医学中心的国家勇士康复中心，在那里做了一场关于大脑可塑性研究的演讲。我在那里看到医务工作者如何用经颅磁刺激来帮助创伤后应激障碍的退伍军人康复。[\[82\]](#)

调节脑电波的简单方法

由于脑电波对感觉输入和精神状态的反应如此迅速，因此很明显，有节奏地调节感觉体验，比如基于控制呼吸节奏和思想的冥想，也会改变脑电波。这些方法长期以来一直被用于改变认知功能、情绪和脑电波。在人听到有节奏感的音乐时，这

种效果最为明显。在人群中，每个人都会开始踩着音乐节拍有节奏地摇摆。音乐改变了人的情绪和脑电波的活动。在极端情况下，有节奏的灯光会使有些人的脑电波同步化，并使其更加活跃，甚至会在他们身上诱发癫痫发作。

冥想

有书面记载的冥想活动可追溯到公元前1500年的印度，但是考古文物显示，人类在公元前5000年就出现了端坐的冥想姿势。自然地，在这么长的时间跨度内，人类已经发展出了许多冥想的形式。不同的冥想技巧引起的脑电波活动也有差异。因此，你不需要什么复杂的设备就可以像远古的人们那样改变脑电波。冥想或者鼓点就可以达到这个目的。

冥想技术包括从训练集中注意力到提倡达到一种开放的意识状态等一系列方法。例如，喜马拉雅瑜伽传统强调专注，而在另一个极端，艾萨瑜伽传统则强调开放意识。内观禅修介于这两种方法之间，也可以达到冥想状态。需要集中注意力的冥想通常采用反复诵读经文的方法，而开放式冥想则把注意力集中在对身体感觉的意识上。内观禅修使用的方法是在心里一处一处地扫描每个身体部位，并体验每个身体部分的感觉。艾萨瑜伽传统注重呼吸的技巧和对身体感觉的认知。

为了更好地了解在冥想这种意识和情绪改变的状态下，大脑内部发生了什么事情，人们做了大量的脑电图研究。其中的大多数脑电图研究都发现受试者的低频 θ 波和 α 波的功率会发生改变，[\[83\]](#)但最近的研究也发现高频 γ 波存在差异。[\[84\]](#)图

卢兹大学的克莱尔·布拉博斯奇和他在美国大学的同事在2017年进行了一项研究，他们对使用这三种冥想方法的修行者进行了脑电图分析。数据显示，与对照组（而对照组只是简单地让自己走神）相比，他们所有人的脑电波活动都发生了改变。无论冥想者使用哪种技术，他们在顶叶和枕叶区域都具有比对照组更高的 γ 波功率（60~110赫兹）。此外，与其他组相比，内观禅修组的 α 波更活跃。

研究人员认为， γ 波强度的增加反映了受试者注意力的增强，并且可能代表了受试者对精神状态的自上而下的控制（自上而下的控制是由前额皮质执行的有意识的、自主的行为控制）。更高的 α 波强度与将注意力转移到内省状态和关闭感觉输入有关。一些静息状态脑电图的研究将走神的状态与默认网络活动联系在一起，但冥想却与这个网络的失活有关。这是有道理的，因为在冥想状态下，受试者努力使自己的思想从记忆和自传经历中解放出来，并以某种方式集中他们的意识，因此，默认网络就被抑制。

感觉刺激

在某些种类的癫痫例身上，可以看到他们的脑电波能被有节奏的刺激改变，这是最生动的例子。由于大量神经元在许多不同的神经回路中同时处理大脑皮质中的信息，与之相关的脑电波也会处于频繁的变动中，但是当一个人癫痫发作时，他的脑电波会突然被扫过皮质的高度同步的大振幅电波干扰。（在脑电图记录中产生突然的、呈锯齿状的曲线，这些曲线被称为锐波或棘波。）癫痫发作时的神经活动出现异常，但不一定伴

有抽搐。癫痫发作可能会在局部脑区发生，局限在大脑的特定部位，而且患者可能不会意识到自己患有癫痫。一部分局部癫痫发作的患者可能会出现暂时的“失神”，突然改变行为或完全没有表现。然而，正常脑电活动的中断与神经回路正常功能的中断紧密联系。如果神经回路中的所有神经元都同时被激活（做相同的事），那么它们无法处理复杂的信息，就像一群人异口同声地唱同一首赞歌一样没有意义。在全身性癫痫发作时，整个大脑会被高度同步化的异常脑电波覆盖，脑部功能会被全面破坏，从而导致意识丧失和抽搐。（另一个极端是出现暂时性的脑电图沉默并伴有偏头痛，这被称为皮质传播抑制。）

约有3%的癫痫患者会因某些形式的闪光诱发癫痫发作，这种情况被称为光敏性癫痫。闪烁的电视屏幕和电脑显示器或滚动的图像都可以诱发癫痫发作。视频游戏或电视广播中的快速闪光或不同颜色的图案交替以及强烈的频闪灯（以每秒5~30的频率闪烁）都会诱发这种癫痫。大脑中发生的情况是，有节奏的感觉输入会导致脑电波活动与刺激逐渐同步，因此，在容易发病的人中，脑电波的振幅和同步性增高会引起癫痫发作。马里兰州的一名男子向一名患有癫痫的记者发送推特，内容是频繁闪烁的写着“因为你的报道，你活该癫痫发作”字样的动画图像，导致该记者癫痫发作。这名男子因此被“以致命武器攻击他人并致人重伤”的罪名起诉。[\[85\]](#)

有节奏的视觉输入会引起癫痫发作，这足以说明感觉输入能将脑电波组织成高度同步的模式，但是我们所有人在接受有节奏的刺激时都会引起脑电波的不同步化（但不会引起癫痫发

作)。有节奏的声音和灯光可以用来调节特定脑电波的功率，利用这种方法，用市场上可买到的消费电子设备就能诱导产生所需的认知状态，以改善心理甚至身体机能。美国奥运游泳运动员迈克尔·菲尔普斯在比赛前一直戴着耳机听音乐，直到跃入泳池前的最后一刻。他说：“它有助于我放松并进入自己的小小世界。”[\[86\]](#)当然，我们所有人都靠听音乐来调整心情。舒缓的音乐节奏使我们昏昏欲睡，欢快的爵士乐使我们的身体不由自主地疯狂扭动。

当你走进酒吧，会发现所有人的脑袋都在摇摆，人们的脚步踏在音乐的节拍上。这是因为房间里每个人的脑电波（ α 波和 β 波）都与音乐节奏保持同步。当你的 α 波振荡达到峰值时，房间里的其他人也一样（对于振荡更快的 β 波也是如此）。此外，脑电波有节奏的活动模式控制着与节奏同步的信息的输入（让信息进入大脑）。和着某种节拍呈现给人的事件或信息会引起更强烈的脑电波反应，并增强信息接收者的意识。语言表达也一样，具有高度节奏感的语言也能使说话者和听话者的大脑活动同步（通过fMRI检测到）。[\[87\]](#)人们在交谈时大脑的同步被认为可以促进交流。[\[88\]](#)

回到脑电波同步和体育比赛：运动员是否能登上领奖台摘取奥林匹克奖牌，也许就取决于那0.001秒。当两个运动员的成绩非常接近时，脑电波可以将赢家与输家区分开。

起跑太晚可能意味着错失奖牌，但是抢跑又意味着犯规。运动员从听到起跑枪响到做出反应大约需要0.1~0.2秒的时间。在此期间，大脑内部发生了一个非常复杂的过程。快速地感知

到启动信号，进行大量的信息处理并在整个大脑中启动广泛的响应，然后快速精确地执行运动指令，这些操作都是在不知不觉中进行的，这比思考的速度要快。

脑组织电场的振荡有助于协调神经元彼此之间的发放，就像在港口中的船随波浪同步颠簸一样。人们认为，神经元的协调发放对于在大脑不同区域间传输的信息的组织和耦合至关重要。 μ 波是控制运动的最重要的脑电波频带之一。这些脑电波在运动皮质中以7.5~12.5赫兹的频率振荡。运动皮质是一条带状的大脑皮质，就像塑胶头带一样从一只耳朵延伸到另一只耳朵。之前讨论过，脑机接口设备通过检测 μ 波的变化执行操作，就在运动开始之前， μ 波被压制了（或去同步化）。人们认为， μ 波突然变得平静反映出不同回路的运动控制神经元与大部队不再同步，开始独立放电以执行针对特定肌肉的运动指令。

但是 μ 波本身却是包含在较慢的脑电波振荡之中的，就像在频率较慢的海浪上被风吹起的涟漪一样。这些非常缓慢的脑电波活动曾一度被认为是由于心脏跳动引起的血压波动而导致的伪影。但是，血流也会影响大脑功能。因此，大脑和心脏之间存在互动的身心循环，并且两者都一起缓慢地振荡。尽管运动员的心率可能达到每分钟65次，但在几十分钟后，心率会略有变化，振荡的频率大约为0.1赫兹（每10秒一个周期）。血流中这些非常缓慢的振荡会影响大脑中神经元的发放。

因此，当奥运游泳运动员们一动不动准备跃入游泳池时，他们大脑皮质内部的神经元兴奋性以0.1赫兹的周期缓慢振荡。

但是当发令枪响时，有些运动员正好处于神经元兴奋周期的巅峰，而其他运动员处于周期低谷。奥地利格拉茨技术大学神经科学家格特·普茨谢勒专门研究运动控制与脑电波。他说：

“这种兴奋性周期调节着中央 μ 波的节律，因此，可以预见的是，0.1赫兹的兴奋性周期、发令枪和比赛结果之间存在着联系。” [\[89\]](#)

神经振荡与大脑功能之间的联系为我们提供了一座桥梁。通过这座桥梁，我们可以用不同的方式（包括电刺激、药物、神经反馈、冥想和感觉刺激）直接影响脑电波，从而增强认知，提高运动成绩，改善情绪和学习能力。

[\[1\]](#) Cortese, S.; et al. (2016) Neurofeedback for Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: Meta-Analysis of Clinical and Neuropsychological Outcomes from Randomized Controlled Trials. *Child and Adolescent Psychiatry* 55: 444 - 455.

[\[2\]](#) Lofthouse, N.; Arnold, L. E.; Hersch, S.; Hurt, E.; and DeBeus, R. (2012) A Review of Neurofeedback Treatment for Pediatric ADHD. *Journal of Attention Disorders* 16 (5): 351 - 372.

[\[3\]](#) Thibault, R. T.; and Rax, A. (2017) The Psychology of Neurofeedback: Clinical Intervention Even If Applied Placebo. *American Psychologist* 72 (7): 679 - 688.

[\[4\]](#) Schonenberg, M. (2017) Neurofeedback, Sham Neurofeedback, and Cognitive-Behavioural Group Therapy in Adults with Attention-Deficit Hyperactivity Disorder: a Triple-Blind, Randomised, Controlled Trial. *Lancet Psychiatry* 4 (9): 673 - 684.

[\[5\]](#) Biofeedback Certification International Alliance. <https://www.bcia.org/i4a/pages/index.cfm?pageid=1>. Accessed October 3, 2019.

[6] Hohenfeld, C.; et al. (2013) Cognitive Improvement and Brain Changes after Real-Time Functional MRI Neurofeedback Training in Healthy Elderly and Prodromal Alzheimer's Disease. *Frontiers in Neurology* 8: 384.

[7] Zhang, G.; Yao, L.; Zhang, H.; Long, Z.; and Zhao, X. (2013) Improved Working Memory Performance Through Self-Regulation of Dorsal Lateral Prefrontal Cortex Activation Using Real Time fMRI. *PLoS One* 8 (8): e73735; and Sherwood, M. S.; Kane, J. H.; Weisend, M. P.; and Parker, J. G. (2016) Enhanced Control of Dorsolateral Prefrontal Cortex Neurophysiology with Real-Time Functional Magnetic Resonance Imaging (rt-fMRI) Neurofeedback Training and Working Memory Practice. *Neuroimage* 124 (Pt A): 214 - 223.

[8] Ghaziri, J.; Tucholka, A.; Larue, V.; Blanchette-Sylvestre, M.; Reyburn, G.; Gilbert, G.; Levesque, J.; and Beauregard, M. (2013) Neurofeedback Training Induces Changes in White and Gray Matter. *Clinical EEG and Neuroscience* 44 (4): 265 - 272.

[9] Wang, J. R.; and Hsieh, S. (2013) Neurofeedback Training Improves Attention and Working Memory Performance. *Clinical Neurophysiology* 124 (12): 2406 - 2420.

[10] Staufenbiel, S. M.; Brouwer, A. M.; Keizer, A.W.; and van Wouwe, N. C. (2014) Effect of Beta and Gamma Neurofeedback on Memory and Intelligence in the Elderly. *Biological Psychology* 95: 74 - 85.

[11] Gruzelier, J. H.; Hirst, L.; Holmes, P.; and Leach, J. (2014) Immediate Effects of Alpha/Theta and Sensory-Motor Rhythm Feedback on Music Performance. *International Journal of Psychophysiology* 93(1): 96 - 104.

[12] Fetz, E. E. (1969) Operant Conditioning of Cortical Unit Activity. *Science* 163 (3870): 955 - 958; and Taylor, D. M.; Tillery, S. I. H.; and Schwartz, A. B. (2002) Direct Cortical Control of 3D Neuroprosthetic Devices. *Science* 296 (5574): 1829 - 1832; and

Carmena, J. M.; Lebedev, M. A.; Crist, R. E.; O’ Doherty, J. E.; Santucci, D. M.; Dimitrov, D. F.; Patil, P. G.; Henriquez, C. S.; and Nicolelis, M.A. L. (2003) Learning to Control a Brain–Machine Interface for Reaching and Grasping by Primates. *PLoS Biology* 1 (2): e42; and Schafer, R. J.; and Moore, T. (2011) Selective Attention from Voluntary Control of Neurons in Prefrontal Cortex. *Science* 332 (6037): 1568 – 1571.

[13] Engelhard, B.; Ozeri, N.; Israel, Z.; Bergman, H.; and Vaadia, E. (2013) Inducing Gamma Oscillations and Precise Spike Synchrony by Operant Conditioning via Brain–Machine Interface. *Neuron* 77 (2):361 – 375; and So, K.; Dangi, S.; Orsborn, A. L.; Gastpar, M. C.; and Carmena, J. M. (2014) Subject Specific Modulation of Local Field Potential Spectral Power During Brain–Machine Interface Control in Primates. *Journal of Neural Engineering* 11 (2): 026002; and Khanna, P.; and Carmena, J. M. (2015) Changes in Reaching Reaction Times Due to Volitional Modulation of Beta Oscillations. *7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)* 2015: 340 – 343; and Schalk, G.; Miller, K. J.; Anderson, N. R.; Wilson, J. A.; Smyth, M. D.; Ojemann, J. G.; Moran, D. W.; Wolpaw, J.R.; and Leuthardt, E. C. (2008) Two-Dimensional Movement Control Using Electrocorticographic Signals in Humans. *Journal of Neural Engineering* 5 (1): 75 – 84; and Wang, W.; Collinger, J. L.; Degenhart, A. D.; Tyler-Kabara, E. C.; Schwartz, A. B.; Moran, D. W.; Weber, D. J.; Wodlinger, B.; Vinjamuri, R. K.; Ashmore, R. C.; Kelly, J. W.; and Boninger, M. L. (2013) An Electrocorticographic Brain Interface in an Individual with Tetraplegia. *PLoS One* 8 (2): e55344.

[14] Wolpaw, J. R.; and McFarland, D. J. (2004) Control of a Two-Dimensional Movement Signal by a Noninvasive Brain–Computer Interface in Humans. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America* 101 (51): 17849 – 17854; and Millan, J. R.; Renkens, F.; Mourino, J.; and Gerstner, W. (2004) Noninvasive Brain-Actuated Control of a Mobile Robot by Human EEG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 51 (6): 1026

-1033; and Gevensleben, H.; Holl, B.; Albrecht, B.; Schlamp, D.; Kratz, O.; Studer, P.; Wangler, S.; Rothenberger, A.; Moll, G. H.; and Heinrich, H. (2009) Distinct EEG Effects Related to Neurofeedback Training in Children with ADHD: A Randomized Controlled Trial. *International Journal of Psychophysiology* 74 (2): 149-157; and Tan, G.; Thornby, J.; Hammond, D. C.; Strehl, U.; Canady, B.; Arnemann, K.; and Kaiser, D. A. (2009) Meta-analysis of EEG Biofeedback in Treating Epilepsy. *Clinical EEG and Neuroscience* 40 (3): 173-179; Subramanian, L.; Hindle, J. V.; Johnston, S.; Roberts, M. V.; Husain, M.; Goebel, R.; and Linden, D. (2011) Real Time Functional Magnetic Resonance Imaging Neurofeedback for Treatment of Parkinson's Disease. *Journal of Neuroscience* 31 (45): 16309-16317; and Jensen, M. P.; Gertz, K. J.; Kupper, A. E.; Braden, A. L.; Howe, J. D.; Hakimian, S.; and Sherlin, L. H. (2013) Steps Toward Developing an EEG Biofeedback Treatment for Chronic Pain. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* 38 (2): 101-108.

[15] *Brain Facts, A Primer on the Brain and Nervous System*. Published by the Society for Neuroscience. 2008, Washington, DC. <https://www.brainfacts.org/the-brain-facts-book>. Accessed October 3, 2019.

[16] Khanna, P.; Swann, N.; De Hemptinne, C.; Miocinovic, S.; Miller, A.; Starr, P. A.; and Carmena, J. M. (2016) Neurofeedback Control in Parkinsonian Patients Using Electrocortigraphy Signals Accessed Wirelessly with a Chronic, Fully Implanted Device. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 25 (10): 1715-1724. doi:10.1109/TNSRE.2016.2597243.

[17] Swann, K.P. (2017) Neurofeedback Control in Parkinsonian Patients Using Electrocortigraphy Signals Accessed Wirelessly With a Chronic, Fully Implanted Device. *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.* 25 (10): 1715-1724.

[18] Jacqueline, A.; et al. (2017) Sensorimotor Rhythm Neurofeedback as Adjunct Therapy for Parkinson's Disease. *Annals*

of Clinical and Translational Neurology 4 (8): 585 – 590.

[19] Philippens, I. H.; and Vanwersch, R. A. P. (2010) Neurofeedback Training on Sensorimotor Rhythm in Marmoset Monkeys. *Neuro Report* 21: 328 – 332.

[20] Roth, S. R.; Sterman, M. B.; and Clemente, C. D. (1967) Comparison of EEG Correlates of Reinforcement, Internal Inhibition and Sleep. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 23:509 – 520.

[21] Sterman, M. B.; and Egner, T. (2006) Foundation and Practice of Neurofeedback for the Treatment of Epilepsy. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* 31: 21 – 35.

[22] Thompson, M.; and Thompson, L. (2002) Biofeedback for Movement Disorders (Dystonia with Parkinson’ s Disease): Theory and Preliminary Results. *Journal of Neurotherapy* 6: 51 – 70; and Thompson, M.; and Thompson, L. (2011) Improving Quality of Life Using Biofeedback Plus Neurofeedback. *Neuro Connections* Winter 2011: 18 – 21.

[23] Subramanian, L.; Hindle, J. V.; Johnston, S.; Roberts, M. V.; Husain, M.; Goebel, R.; and Linden, D. (2011) Real-Time Functional Magnetic Resonance Imaging Neurofeedback for Treatment of Parkinson’ s Disease. *Journal of Neuroscience* 31 (45): 16309 – 16317.

[24] Subramanian, L.; Morris, M. B.; Brosnan, M.; Turner, D. L.; Morris, H. R.; and Linden, D. E. (2016) Functional Magnetic Resonance Imaging Neurofeedbackguided Motor Imagery Training and Motor Training for Parkinson’ s Disease: Randomized Trial. *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 10: 111.

[25] Zich, C.; et al. (2017) High-Intensity Chronic Stroke Motor Imagery Neurofeedback Training at Home: Three Case Reports. *Clinical EEG and Neuroscience* 48 (6): 403 – 412. doi:10.1177/1550059417717398.

[26] Emmert, K.; et al. (2017) Active Pain Coping Is Associated with the Response in Real-Time fMRI Neurofeedback During Pain. *Brain Imaging Behavior* 11 (3): 712 – 721.

[27] Haller, S.; Birbaumer, N.; and Veit, R. (2010) Real-Time fMRI Feedback Training May Improve Chronic Tinnitus. *European Radiology* 20 (3): 696 – 703; and Miller, R.; et al. (2016) Slow Cortical Potential Neurofeedback in Chronic Tinnitus Therapy: A Case Report. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* 41 (2): 225 – 249.

[28] De Charms, R. C.; Maeda, F.; Glover, G. H.; Ludlow, D.; Pauly, J. M.; and Soneji, D.; et al. (2005) Control over Brain Activation and Pain Learned by Using Real-Time Functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102 (51): 18626 – 18631.

[29] Ruiz, S.; Lee, S.; Soekadar, S. R.; Caria, A. R.; and Kircher, T.; et al. (2013) Acquired Self-Control of Insula Cortex Modulates Emotion Recognition and Brain Network Connectivity in Schizophrenia. *Human Brain Mapping* 34 (1): 200 – 212.

[30] Linden, D. E.; Habes, I.; Johnston, S. J.; Linden, S.; Tatineni, R.; and Subramanian, L.; et al. (2012) Real Time Self-Regulation of Emotion Networks in Patients with Depression. *PLoS One* 7 (6): e38115.

[31] Papoutsis, M.; et al. (2017) Stimulating Neural Plasticity with Real-Time fMRI Neurofeedback in Huntington's Disease: a Proof of Concept Study. *Human Brain Mapping*, 39 (3): 1339 – 1353.

[32] Hammond, C. D. (2005) Neurofeedback with Anxiety and Affective Disorders. *Child and Adolescent Psychiatric Clinics of North America* 14: 105 – 123.

[33] Peniston, E. G.; and Kulkosky, P. J. (1991) Alpha-Theta Brainwave Neurofeedback Therapy for Vietnam Veterans with Combat-

Related Posttraumatic Stress Disorder. *Medical Psychotherapy: An International Journal* 4: 47 – 60.

[34] Hurt, E.; Arnold, L. E.; and Lofthouse, N. (2014) Quantitative EEG Neurofeedback for the Treatment of Pediatric Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder, Autism Spectrum Disorders, Learning Disorders, and Epilepsy. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* 55:1090 – 1091.

[35] Cortese, S.; et al. (2016) Neurofeedback for Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: Meta-Analysis of Clinical and Neuropsychological Outcomes from Randomized Controlled Trials. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* 55: 444 – 455.

[36] Molloyhan, S. My Journey with DBS: Wired Up, Tuned In, and Turned On. The Michael J. Fox Foundation. September 8, 2016. https://www.michaeljfox.org/foundation/news-detail.php?my_journey-with-dbs-wired-up-tuned-in-and-turned-on.

[37] Tarsy, D.; Vitek, J. L.; Starr, P. A.; and Okun, M. S.; eds. (2008) *Deep Brain Stimulation in Neurological and Psychiatric Disorders*. Totowa, NJ: Humana Press.

[38] Shah, D. B.; et al. (2008) Functional Neurosurgery in the Treatment of Severe Obsessive Compulsive Disorder and Major Depression: Overview of Disease Circuits and Therapeutic Targeting for the Clinician. *Psychiatry* 5: 24 – 33.

[39] Pool, J. L. (1954) Psychosurgery of Older People. *Journal of American Geriatric Association* 2: 456 – 465.

[40] Heath, R. G. (1963) Electrical Self-Stimulation of the Brain in Man. *American Journal of Psychiatry* 120:571 – 577.

[41] Herrington, T. M.; Cheng, J. J.; and Eskandar, E. N. (2016) Mechanisms of Deep Brain Stimulation. *Journal of Neurophysiology* 115: 19 – 38.

[42] Troster, A. I.; McTaggart, A. B.; and Ines, A. H. Neuropsychological Issues in Deep Brain Stimulation of Neurological and Psychiatric Disorders. Chapter 21 in Denys, D.; Feenstra, M.; and Schuurman, R.; eds. (2012) *Deep Brain Stimulation: A New Frontier in Psychiatry*. New York, NY: Springer, 399 – 452.

[43] Hariz, M. History of “Psychiatric” Deep Brain Stimulation: A Critical Appraisal. Chapter 26 in Denys, D.; Feenstra, M.; and Schuurman, R.; eds. (2012) *Deep Brain Stimulation: A New Frontier in Psychiatry*. New York, NY: Springer.

[44] Caruso, J. P.; and Sheehan, J. P. (2017) Psychosurgery, Ethics, and Media: A History of Walter Freeman and Lobotomy. *Neurosurgical Focus* 43: E6.

[45] Walter Freeman: The Father of the Lobotomy. MedicalBag.com May 21, 2015. <https://www.medicalbag.com/despicable-doctors/walter-freeman-the-father-of-the-lobotomy/article/472966>.

[46] Moan, C. E.; and Heath, R. G. (1972) Septal Stimulation for the Initiation of Heterosexual Behavior in a Homosexual Male. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry* 3 (1): 23 – 26, IN1, 27 – 30.

[47] Baumeister, R. F. (2000) The Tulane Electrical Brain Stimulation Program: A Historical Case Study in Medical Ethics. *Journal of the History of the Neurosciences* 9: 262 – 278.

[48] Moan, C. E.; and Heath, R. G. (1972) Septal Stimulation for the Initiation of Heterosexual Behavior in a Homosexual Male. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry* 3 (1): 23–30, 24.

[49] Ibid., 25.

[50] Ibid., 25.

[51] Ibid., 26.

[\[52\]](#) Ibid., 28.

[\[53\]](#) Baumeister, R. F. (2000) The Tulane Electrical Brain Stimulation Program: A Historical Case Study in Medical Ethics. *Journal of the History of the Neurosciences* 9: 262 - 278.

[\[54\]](#) Penfield, W. (1958) Some Mechanisms of Consciousness Discovered During Electrical Stimulation of the Brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 44: 51 - 66; 57;60.

[\[55\]](#) Ibid., 60.

[\[56\]](#) Penfield, W. (1958) Some Mechanisms of Consciousness Discovered During Electrical Stimulation of the Brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 44: 51 - 66.

[\[57\]](#) Ibid., 53.

[\[58\]](#) Ibid., 54

[\[59\]](#) Ibid.

[\[60\]](#) Ibid., 57.

[\[61\]](#) Ibid., 57.

[\[62\]](#) Ibid.

[\[63\]](#) Ibid.

[\[64\]](#) Ibid., 65.

[\[65\]](#) Ekstrom, A. D.; Kahana, M. J.; Caplan, J. B.; Fields, T.A.; Isham, E. A.; Newman, E. L.; and Fried, I. (2003) Cellular Networks Underlying Human Spatial Navigation. *Nature* 425: 184 - 188.

[\[66\]](#) Aghajan, M.; et al. (2005) Theta Oscillations in the Human Medial Temporal Lobe during Real-World Ambulatory Movement. *Current*

Biology 27 (24): 3743 – 3751.

[67] Quiroga, R. Q.; Reddy, L.; Kreiman, G.; Koch, C.; and Fried, I. (2005) Invariant Visual Representation by Single Neurons in the Human Brain. *Nature* 435 (7045): 1102 – 1107.

[68] Gelbard-Sagiv, H.; Mukamel, R.; Fried, I.; et al. (2008) Internally Generated Reactivation of Single Neurons in Human Hippocampus During Free Recall. *Science* 322: 96 – 101; and Mormann, F.; et al. (2017) Scene-Selective Coding by Single Neurons in the Human Parahippocampal Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114 (5): 1153 – 1158; and De Falco, E.; et al. (2016) Long-Term Coding of Personal and Universal Associations Underlying the Memory Web in the Human Brain. *Nature Communications* 7: 13408.

[69] Titiz, A. S.; et al. (2017) Theta-Burst Microstimulation in the Human Entorhinal Area Improves Memory Specificity. *eLife Sciences* 6: e29515.

[70] Reinhart, R. M. G.; and Nguyen, J. A. (2019) Working Memory Revived in Older Adults by Synchronizing Rhythmic Brain Circuits. *Nature Neuroscience* 22: 820 – 827.

[71] Keith, A. Convicted of Killing Two when He Was 17, District Man Is Sentenced to 65 Years in Prison. *Washington Post*, January 4, 2019. https://www.washingtonpost.com/local/public-safety/convicted-of-killing-two-when-he-was-17-district-man-is-sentenced-to-65-years-in-prison/2019/01/04/6e20e5b2-1051-11e9-84f0c-d58c33d6c8c7_story.html?noredirect=on&utm_term=.768f402bce10.

[72] Fields, R. D. (2019) The Roots of Human Aggression. *Scientific American* 320: 64 – 71.

[73] Fields, R. D. (2015) *Why We Snap: Understanding the Rage Circuit in Your Brain*. New York, NY: Dutton/Penguin.

[74] Gilam, G.; et al. (2018) Attenuating Anger and Aggression with Neuromodulation of the vmPFC: A Simultaneous tDCS-fMRI Study. *Cortex* 109: 156 – 170b.

[75] Ibid., 170.

[76] Fields, R. D. Amping Up Brain Function: Transcranial Stimulation Shows Promise in Speeding Up Learning, *Scientific American News*, November 25, 2011. <https://www.scientificamerican.com/article/amping-up-brain-function>.

[77] Fields, R. D. (2012) Regulation of Myelination by Functional Activity. Chapter 45 in Kettenmann, H.; and Ransom, B. R.; eds. (2012) *Neuroglia*, third edition. Oxford, UK: Oxford University Press; and Fields, R. D. (2015) A New Mechanism of Nervous System Plasticity: Activity-Dependent Myelination. *Nature Reviews Neuroscience* 16: 756 – 767.

[78] Fields, R. D. (2008) White Matter in Learning, Cognition and Psychiatric Disorders. *Trends in Neurosciences* 31: 361 – 370.

[79] Voroslakos, M.; et al. (2018) Direct Effects of Transcranial Electric Stimulation on Brain Circuits in Rats and Humans. *Nature Communications* 9 (1): 483.

[80] FDA Permits Marketing of Transcranial Magnetic Stimulation for Treatment of Obsessive Compulsive Disorder. U.S. Food and Drug Administration press announcement, August 17, 2018. <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-permits-marketing-transcranial-magnetic-stimulation-treatment-obsessive-compulsive-disorder>.

[81] Zandvakili, A.; et al. (2019) Use of Machine Learning in Predicting Clinical Response to Transcranial Magnetic Stimulation in Comorbid Posttraumatic Stress Disorder and Major Depression: A Resting State Electroencephalography Study. *Journal of Affective Disorders* 252: 47 – 54.

[82] National Intrepid Center of Excellence. <https://www.wrnmmc.capmed.mil/NICoE/SitePages/index.aspx>. Accessed October 4, 2019.

[83] Cahn, B. R.; and Polich, J. (2006) Meditation States and Traits: EEG, ERP, and Neuroimaging Studies. *Psychological Bulletin* 132: 180 – 211.

[84] Braboszcz, C.; Cahn, B. R.; Levy, J.; Fernandez, M.; and Delorme, A. (2017) Increased Gamma Brainwave Amplitude Compared to Control in Three Different Meditation Traditions. *PLoS One* 12(1): e0170647.

[85] Park, M. (2017) Assault Charge Filed after Tweet Sent to a Journalist with Epilepsy. CNN, March 20, 2017. <https://www.cnn.com/2017/03/17/us/twitter-journalist-strobe-epilepsy/index.html>.

[86] Puglise, N. (2016) What Is Michael Phelps Listening to on His Trademark Olympics Headphones? *The Guardian*, August 8, 2016. <https://www.theguardian.com/sport/2016/aug/08/michael-phelps-headphones-music-swimming-olympics-rio>.

[87] Fields, R. D. The Power of Music: Mind Control by Rhythmic Sound. *Scientific American*, October 19, 2012. <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/the-power-of-music-mind-control-by-rhythmic-sound>.

[88] Fields, R. D. Of Two Minds: Listener Brain Patterns Mirror Those of the Speaker. *Scientific American*, July 27, 2010. <https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/of-two-minds-listener-brain-patterns-mirror-those-of-the-speaker>.

[89] Fields, R. D. (2016) Olympic Gold for Brainwave Performance. BrainFacts.org, August 21, 2016. <http://www.brainfacts.org/Brain-Anatomy-and-Function/Cells-and-Circuits/2016/Olympic-Gold-for-Brainwave-Performance>.

第12章

迈向未来

从增强认知到控制假肢，从无人驾驶汽车到监视，脑电波再次处于风口浪尖。利用脑电波进行人机交互的技术逐步离开科学实验室，进入市场。有许多新公司向消费者提供各种款式的头戴设备，号称用户可以用不用键盘和鼠标，只需通过简单的脑电图记录设备就可以控制笔记本电脑和其他电子设备。

我采访了华盛顿特区的一些高中生，他们将一个这样的消费电子产品连接到电动轮椅上，“不用双手”，仅靠脑电波就可以驱动轮椅在校园内行驶。我还尝试了一种脑电图设备，用它来控制电子游戏，只需要用意念就能够使对象在屏幕上移动。不过，我不相信在这两个例子中的操作真的是由于响应了我的脑电图，因为制造脑机接口设备的公司会保护有关设备如何工作以及设备实际检测的内容等专门信息。当我皱眉时，这些设备可能检测到的是肌肉拉力，一样可以让电脑界面服从我的命令，但并不是通过检测脑电波。

通过在头皮上施加直流电，经颅直流电刺激可以调节脑电波，它是一种能直接影响脑功能的简单方法。如第11章所述，美国空军正在使用经颅直流电刺激来加快对无人机操控者的培训，让他们在扫视战场反馈的视频时能精神抖擞、保持专注，从而提高表现。如果你有兴趣通过这种方式增强自

己的脑力，倒是不需要加入空军。在互联网上或本地电脑城，你就可以获得所需的东西。

脑电波衍生设备

经颅磁刺激需要复杂的设备才能从位于头顶的线圈向大脑传递高能量的电磁脉冲。与经颅磁刺激相比，经颅直流电刺激是DIY爱好者的理想选择。自己攒一套设备所需的无非是四节9伏的电池、一些粘贴式电极和电线。大学生技术控们已经在使用自制的经颅直流电刺激设备来改善情绪和提升注意力了，甚至在考试前临时抱佛脚的时候用它们。例如，北亚利桑那大学的学生马特·黑里希为了在大学数学的在线课程中学得更快，使用了另一名大学生自制的大脑刺激器，让自己处于精神高度集中的状态。

[\[1\]](#)对于那些不擅长鼓捣电烙铁的人来说，有许多新公司在网上出售廉价的家用经颅直流电刺激头戴设备，售价约为300美元。当然，使用未经FDA批准且未按照严格标准制造的DIY医疗设备是有风险的，当你将电流输送进大脑时可能会发生不良的后果，例如诱发癫痫。

就在2016年圣诞节前，英国华威大学生物医学工程学主任克里斯托弗·詹姆斯教授宣布，他的团队开发出了改良的头戴式设备，可以让儿童仅靠集中注意力就能操作玩具机器人、遥控汽车和玩具直升机。“接下来还会发生什么才是最令人兴奋的事情——离我们用脑电波开门或者通过脑机接口接听电话还会远吗？”他问。[\[2\]](#)

人们正在开发可改变我们日常生活的新型脑电波设备。用脑电波作为生物ID（身份证明）的识别装置可以取代密码设备。测谎仪检测的是情绪变化引起的心率、呼吸和排汗的变化，脑电波可以揭示一个人真实的想法，这超越了测谎仪。通过解读证人面对犯罪现场的照片或其他证据时的脑电波，可以显示证人之前是否看过这些东西。当我们看到或听到新颖的事物时会造成P300“新奇”脑电波暴发（请参见第10章），但如果呈现给目击者的物体或信息对他们来说不是新鲜事物，就不会引起这种反应。

2018年1月，日本汽车制造商日产汽车公司在拉斯维加斯举行的消费电子展（CES）上宣布，他们正在开发一种利用驾驶员的脑电波来操纵的自动驾驶汽车。日产表示，未来的驾驶员将戴上一款时髦又轻巧的头盔——有点儿像网状自行车头盔——用于采集脑电波。脑电波将被传输到车载电脑上，驾驶员无须做任何下意识的动作，汽车就会被自动引导。

日产汽车的研究人员称，无论驾驶员出现向左转、向右转或踩刹车的前意识，他们都可以识别。日本日产公司的高级创新研究员卢西恩·格奥尔基博士说：“假设你要改变车道，在打方向盘改变行车路线之前，你在头脑中已经做出了决定，而在做出决定之前，大脑肯定已经察觉到某些情况，让你考虑要改变车道。”^[3]格奥尔基认为，能够借助人的脑电波来驾驶汽车将极大地增加驾驶的乐趣，因为这可以让驾驶员从匆忙赶路的紧迫感和烦琐的驾驶细节中解脱出来。想象一下，在拥挤的洛杉矶高速公路上驾着一辆车在车流中钻进钻出，在交通堵塞的时候走走停停，但是在这个过程中，你却可以自在地交谈、发短信、打电话

或者把思绪转向更紧迫的事情，而不用担心与其他车辆相撞，因为你的前意识脑电波会把你毫不费力地送到目的地，就像是豪华轿车的司机一样。

必须承认，消费电子展和车展的吸引力很多是来自它们所展示的电子设备和概念车非常前卫，但其中的许多产品后来再回头看简直就是荒唐。^[4]比如在20世纪40年代，火箭和喷气发动机的发展引发了20世纪50年代末和60年代初一大批体现“喷气式”和“火箭”设计特征的概念车出现。有的汽车古怪又新潮，把车门铰链装在车体正中间，开门时旋转出一个角度；有的汽车具备水陆两栖功能；有的汽车甚至能飞行……看得大家眼花缭乱。但是，也有一些在过去车展上出现的令人难以置信的创新最后演变为今天在路上行驶的汽车的标配，例如，自动刹车系统、涡轮动力发动机和转眼间就可以弹出的安全气囊（可以在汽车发生碰撞的几毫秒内弹出，避免乘客撞到仪表板或从挡风玻璃飞出去）。从理论上讲，由脑电波引导车辆行驶的想法可能没有听起来那么荒唐，因为你的大脑通常是在没有意识的情况下驾驶汽车。它的应用所面临的障碍主要是技术上的，但也是生物学上的。目前，神经科学领域对脑电波的研究除了证明这个概念的可行性外，还不能提供必要的支持或更深入的知识，但是脑电波分析科学和记录技术正在迅速发展。

就算未来的运输系统都使用无人驾驶汽车，仍然需要一个“紧急开关”让驾驶员可以把电脑的控制权接手过来，转换成人工操作。就像尼尔·阿姆斯特朗在“阿波罗11号”登陆月球前几秒钟从电脑那里接回引导阿波罗号着陆的控制权，才勉强避免了一场可能的悲剧。

格奥尔基说：“我们的（车载）系统能够告诉自动驾驶汽车，‘驾驶员将在接下来的300毫秒内转向’。”这是通过检测驾驶员的前意识脑电波得知其意图的。“然后，我们可以及时利用这个时间窗口同步支持自动驾驶汽车的执行，不需要你动手。” [\[5\]](#)

监视大脑活动的新方法

如果能让消费类电子设备也具备检测脑电波的功能，那么这些设备应该更简单，而且对人体侵入性更小。由微软IE浏览器的发明者托马斯·里尔登和他的合作伙伴成立的一家初创公司CTRL-Labs正在开发一种新颖的脑机接口。[\[6\]](#)为了解决电极需要植入大脑以及测脑电图要戴的帽子太难看的问题，里尔登和同事正在开发一种脑机接口设备，它可以通过手臂接入大脑。

在曼哈顿中心区一栋九层的办公楼中，电梯直通CTRL-Labs的神经中心。电脑屏幕前，一群精力旺盛的人在摆弄电子元件或者在操纵机械臂。其他人则在一个光洁的玻璃会议室内开会。越野自行车靠在墙上，正对电梯门的桌子上是埃里克·坎德尔、詹姆斯·施瓦茨和托马斯·杰塞尔合著的一本《神经科学原理》。

托马斯·里尔登身穿海蓝色连帽运动衫，胸前的白色字母印着“哥伦比亚大学”几个字。当我走进去时，他瞥了我一眼。首席战略官乔希·杜扬跟我打招呼并做介绍。帕特里克·凯福什与里尔登共同创立了这家公司，这是他们在哥伦比亚大学读研究生时共同努力的结果。他们都在哥伦比亚大学攻读神经科学博士学

位，分别师从两位一流的细胞神经科学家：托马斯·杰塞尔和阿蒂拉·洛松齐。

杜扬的手腕上戴了一个东西，就像带刺的项圈（标新立异的朋克族会喜欢），但在他手里有几个金色的方形铆钉，紧贴在他的手心，一条电缆连接着腕带和笔记本电脑。在电脑屏幕上，一只白色的模型手在做着分开手指、挥手、弯曲手腕和握紧拳头的动作，所有动作都是在模仿杜扬的手部动作。这些信号都是通过那条腕带获取的。

腕带并没有感应来自大脑的神经冲动。它检测的是肌肉细胞收缩时产生的电压变化。电脑对手臂上放电的肌肉进行分析，并计算这种电信号将产生的手部动作、运动速度和力量大小。然后，计算机驱动虚拟手臂做出相同的动作。屏幕上的虚拟肢体很容易转变为真正的黑铬机械臂，就是在办公室里随处可见的像钢铁侠的衣服那样的设备。在一个视频演示中，里尔登用手指在空无一物的桌面上轻敲，然后在电脑屏幕上就会以每分钟20个单词的速度拼写出句子。这套系统可以识别特定肌肉收缩，从而为特定的字母进行编码——不需要键盘！

把每一条肌肉的收缩与字母相对应并进行编码的打字方法是一项了不起的成就，因为在皮肤上检测到的电信号是前臂中成千上万根单条肌肉纤维收缩的综合结果。横贯电脑屏幕的曲线是腕带探测到的原始电压波动记录，它看起来就像地震发生时在地震监测仪上留下的不稳定的轨迹。近年来，神经生理学家已经开发出一些数学方法，可以在肌肉收缩时分辨出同时活跃的数千条肌肉纤维中的每一条。这个过程就好比为了分辨出嘈杂房间中的某个人说话的声音而进行的复杂的声学分析和过滤。无论你是在空

中比画还是在口袋里动动手指，（从理论上来说）都可以用这种腕带来获取神经肌肉信号并打字发消息，而不用再想着去点手机触摸屏或敲键盘了——特定的肌肉收缩就对应特定的字母，当然，这些应用程序不仅可以用来打字。一条机械臂可以做人的手臂无法做的事情，比如说穿过主动脉伸到患者胸腔内，然后对有问题的心脏瓣膜进行手术。它的应用潜力还不止这些。

人的双手是一个奇迹，人类的大脑通过双手与世界产生互动，并将我们的思想传播给别人。例如，从美国手语的丰富性就可以看出，远在泥板、铅笔和QWERTY键盘（全键盘）出现之前，智人就开发出利用身体动作进行信息传输的技术了。在21世纪，我们拥有的工具有更强大的功能。

里尔登说：“你的孩子不需要打字。”这意味着他可以通过前臂的肌肉收缩，将命令传输到电脑，打字的功能就用不上了。里尔登说，心理、肌肉和机器之间的电子交互不仅比以前的工具更快、更强大，而且这些新技术还将使人脑突破进化所带来的解剖学限制。“人脑接收大量的信息输入，但其输出能力却很弱。”我们的五种感官在吸收有关世界的信息流方面的确有着惊人的能力，但大脑唯一的输出手段是通过肌肉进行书面或口头语言表达。相对于大脑处理信息的速度和能力而言，这两种方式的速度都很慢。CTRL-Labs的目标是克服这种限制人脑信息输出的锁孔效应。

钢琴演奏者通过敲击钢琴键，把自己脑海中的音乐传递给听众。杜扬可以只用一张钢琴键盘的图片就做到同样的事情。无论是单调乏味的调子还是肖邦的曲子，他只需要通过想象自己在弹奏就可以做到。手指肌肉不必带动骨骼，也不用花力气压下木杆

（钢琴键），肌纤维微弱的收缩就足以产生电流，这些电信号很容易就能被脑机接口设备检测到。如果杜扬想象自己有12根手指，每根手指控制一个半音音阶的音符（正好控制一个八度音阶中所有的白键和黑键），不再局限于哺乳动物进化赋予我们的每只手5根手指，会是什么情形？肖邦的《波兰舞曲》中疯狂的和弦和暴风雪般的琵琶音就变成小菜一碟了。当然，这样的钢琴演奏家必须学会习惯用另一种方式来激活手部的肌肉纤维，虽然用的还是他的5根手指。能有这样的能力，为什么不试试呢？学习控制12根手指与学习控制5根手指没有什么差别。蜘蛛轻而易举就能控制8只脚，你也没见过千足虫被自己的腿绊倒。那些是虫子的大脑都能做到的事，何况人类的大脑。

神经反馈被用于大脑和计算机进行交互的训练，这个过程就像玩电子游戏一样轻松。例如，杜扬只需要想象屏幕上的模特儿在用食指点击，计算机就会做出反应。他的运动皮质内部发生的事情超出了他的感知范围，但是当人体模型伸出手指时，他的大脑就学会了控制。“你也在训练计算机。”里尔登说。最终，你控制屏幕上的手部移动的技能会在不知不觉中自动提高。

但是，极限在哪里？这些研究人员努力要达到的目标是让接口设备与控制手臂的每一个运动神经元进行连接。例如，控制我们肱二头肌中所有肌肉纤维的运动神经轴突有774个。每个运动神经轴突通常与几条单独的肌肉纤维（被称为运动单元）形成连接。当动作电位通过轴突传递到这里刺激这些肌纤维时，它们会一起收缩。为了让整块肌肉收缩，需要几个运动单位同时收缩。里尔登说，CTRL Labs的硬件和软件升级让他们能够实现“单个运动单元的检测”。这意味着，肱二头肌中的774个运动单元与

外界的互动不再是单一的（收缩前臂）。从理论上讲，它们可以与计算机进行多达774种不同类型的交互。为此，人脑需要具备控制单个运动单元的能力。大脑是否具备这种能力尚存疑问，但他们的研究表明，它似乎能够达到这种控制水平。你仔细一想就会发现，控制单一的运动单元就是我们的大脑一直在做的事情，这样才能为我们的四肢提供精细、流畅的控制。通过训练达到对单个运动单元的控制只是把大脑已经在做的事情换到脑机接口上。

他们没让我尝试那个腕带设备。对我来说，这可能意味着设备仍处于开发的早期阶段。不过，技术娴熟的帕特里克·凯福什在和我进行对话时坐了下来并绑上设备，开始在连接腕带的手机上玩《爆破彗星》的小游戏。他控制着屏幕上的太空飞船，用激光攻击入侵者，躲避外星人的导弹……但他的手掌放在桌子上没什么动作，只是有些部位的皮肤在轻微跳动，这说明他在控制各个运动单元。

“感觉怎么样？”我问。

他觉得不知如何回答这个问题是好，于是反问道：“你活动自己的手指是什么感觉？”

确实，我现在可以轻松地用手指在电脑键盘上敲26个字母，然后把思想传达给你。如果不是只有这20多个字母键，而是有数百个键全部由我的大脑自动控制，那是什么感觉？

神奇旅程

另一种带有未来主义气息的接入脑电波的方法让我联想到穿着湿淋淋、闪闪发光的白色紧身橡胶潜水衣的拉蔻儿·薇芝。她是20世纪六七十年代美国最受欢迎的美女演员之一。在她1966年出演的根据艾萨克·阿西莫夫的小说改编的科幻电影《神奇旅程》中，一艘微缩潜水艇带着救援人员被注射到一名男子的颈动脉中，展开了一次疯狂的冒险。他们要在血管系统中穿行并清除凝血块。

神经外科还做不到这一点，但是当一位正在做开创性研究的神经科学家通过电子邮件告诉我，他和同事正在开发监测脑电波活动的技术时，我想亲眼看看。我赶上开往纽约市的火车，然后乘纽约地铁去布朗克斯区。纽约的地铁站里灯光昏暗，不断有水从隧道壁上滴下来。破旧的荧光灯挂在天花板上，闪着冷冷的光。生锈的钢梁从孔中突出，上面的油漆一片片剥落后就像桉树皮。地铁站里噪声震耳欲聋，臭气熏天。我从地铁站出来后，冒着寒冷的毛毛雨走了一小段路，就到了这项研究的所在地——繁忙的西奈山医学中心。

我在一个类似《神奇旅程》中的场景的现代手术室里，穿着白色的无菌服，吃惊地看着一群医生用一根细细的导线穿过一个男人蜿蜒的颈静脉，通过迷宫一样的血管丛，最后穿入大脑。西奈山医学中心神经学家托马斯·奥克斯利博士站在我身边，给我解释了这个叫作Stentrode的新发明是如何利用血管作为进入大脑的通道进行脑部微电极植入的。他的目标是将思维与机器结合起来，不过科学家们在用新型电极探索大脑的同时，也在探索大脑如何运作的知识的边界。

手术台上的医生、护士和技术人员身着蓝色手术服和口罩，只露出眼睛。他们像美国国家航空航天局的工程师一样紧盯着8台平板显示器，追踪着像蠕虫一样在患者大脑内蠕动的探头。这名处于麻醉状态的男性患者被罩在手术单下面，头部位于一个巨大的陀螺仪一样的钢拱架中间，这些拱形架上挂着可移动的X射线仪。X射线使探头进入大脑的位置形成实时的血管3D影像，显示在显示器上。外科医生在患者的腹股沟处将一根探针（套管）从股动脉刺入，再将另一根探针穿过他的颈静脉，两根探针将在患者发生血管瘤的位置会合。这是个危险的地方，患者的脑血管在压力下膨胀，随时可能破裂，危及生命。

这名患者正在接受脑部血管畸形的矫正治疗，但奥克斯利认为，如果在血管搭桥（神经外科医生经常在脑部血管中插入的一种治疗卒中的设备）中加入微电极，就可以在血管内部以高保真度记录脑部的电活动，不需要在颅骨上钻孔。



图41 人们正在开发像Stentrode这样能监测大脑电活动和刺激神经元的非侵入性设备。这种设备通过血管系统植入大脑。图中的神经外科医师正在治疗脑部血管畸形的患者。神经外科医师将细长的套管插入腿部的股动脉和颈部的颈静脉，两根导管在大脑血管变形的位置会合。此处的血管可能会破裂并危及生命

“他们是如何把套管穿过错综复杂的血管网的？”我问。来自墨尔本的奥克斯利操着一口澳大利亚口音说道：“问得好！”他愿意让我见识一下。我们脱去无菌服，来到旁边的房间。神经外科模拟中心经理霍利·约姆克和外科手术示范程序负责人卡特·沙蒂永正在操作计算机。这些计算机根据患者做血管搭桥术之前的MRI影像汇编，生成了他的大脑彩色3D渲染图，并显示出来。每个人的大脑和血管的解剖结构都稍有不同，因此，神经外科医师在对大脑实施手术之前，要像喷气式战斗机飞行员先在飞行模拟器中训练一样，先按计划对他们的治疗任务进行模拟演

练。技术人员拖动鼠标就可以对这个人的大脑3D图像进行旋转、切片和放大的操作，可以从任何角度展示大脑的解剖学细节。



图42 上图：外科医生在实时X射线下观察插管进入大脑血管系统的过程。下图：用于脑机接口的Stentrode是从标准血管支架开发而来的，但是它配备了电极，可以对脑内神经元进行记录和刺激

轮到我了。他们让我两只手各拿一个手持式操纵杆，并给我戴上VR眼镜。在3D立体视角下，我悬浮在患者头部上方。我挥舞双手，控制着自己的运动方向。我像一个晕头转向的直升机飞行员，在一个人的脑袋上盘旋着寻找紧急着陆点。我扣动扳机，当

射线枪射出绿色的激光束时，我吓了一跳，赶紧确定了轨迹，并在数字显示器上报告了距离。在约姆克的指导下，我开始掌握它的窍门了。我把双手一前一后地来回动，仿佛在爬行，让自己逐渐接近头皮。很快，我的视野变成了整个头皮，就像是“阿波罗11号”太空舱降落在月球上的景象。突然，我穿过了病人的颅骨，我发现自己身处他的大脑中。太棒了！在我目光所及的地方，能清楚地看到患者大脑内部的细节！我低头看到他脊椎的开口。我回头看见枕叶和它们的脉管系统。我停留在深红色的血管上方，像无人机一样沿着它们飞行，追踪它们曲折的轨迹，直到需要放置支架的地方。

奥克斯利展示了一种非常简单的方法，可以引导套管穿过曲折的动脉和静脉。他在一根细细的塑料套管上穿了一根纤细的导线。套管很柔软，直径从意大利面条那么粗到半毫米不等。当导线的尖端从套管的末端推出时，他让导线的头稍微弯曲。通过在套管内扭动金属丝，从开口处探出的尖端就可以向任何方向旋转弯曲。如果他想进入颈静脉的右侧分支，只需要扭曲导线，使弯头向右翻转。他将包裹导线的套管一点一点地向前滑动，就算遇到发卡式和回环式弯曲的血管也可以轻松穿过。我在手术室的监视器上看着外科医生们操作，导线的尖端在患者的脑内扭动，就像水管工的螺旋钻在疏通堵塞的下水道一样。

通过套管安装的典型血管支架是一个微小的管状网，可以扩张血管壁，但是奥克斯利改良的支架——Stentrode——装有16个电极。安装支架后大约6天，支架便会因人体的愈合反应而永久性地植入血管壁，从而形成良好的电接触，电极可以透过薄薄的血管壁接收从脑组织发出的电信号。奥克斯利和他的合作伙伴

正在开发一些利用Stentrode的方法。这些方法可以利用大脑自身的电信号操作假肢设备或用于其他目的，也可以通过激活血管支架中的电极来刺激神经回路。

许多有关脑机接口的哗众取宠的文章给人的印象是，科学家能轻易提取和解读神经网络中的电活动，好像神经代码对神经科学家来说就跟计算机代码对程序员一样简单明了。当被问及这种科学知识和技术能力是否存在时，西奈山医学中心神经外科主任约书亚·贝德森博士说：“我们还没有达到这种水平，甚至连门都没摸到呢。”

奥克斯利也同意这种说法，但是他说，关键是不要把事情复杂化。目前尚无法破译在复杂的神经回路中一闪而过的电脉冲的神经代码，但是大脑整体的电活动产生的电波会因特定心理状态和功能而波动。脑电波活动会随着某些特定的运动和认知功能变化而变化。通过检测这些关键的脑电波变化，神经科学家可以为计算机编程，让患者学习驱动假肢里的马达或点击鼠标与计算机互动，就像一个人学习如何靠听发动机的声音来决定换挡的时机一样。

Stentrode

当人有感觉输入或开始运动时，脑电波的节律性振荡会立即被破坏，就好像乐团突然停止演奏，乐手们各自调整乐器后又恢复演出一样。脑电波的这个特点从英国利物浦的医生理查德·卡顿首次发现脑电波的那一天起——他于1875年对兔子进行了实验

（请参阅第1章）——就很明显。一个人在想象做动作的时候，他的脑电波会突然去同步化；为了检测这种去同步化，神经科学家要分析脑电波同步性的变化以及不同频率的脑电波的综合表现。

贝德森说：“大脑替我们做完了。”人脑的工作原理仍然是一个深奥的谜，我们可能永远也无法理解它，但是脑机接口能起作用，因为人脑会利用计算机提供给它的新的信息渠道，学会控制假肢设备。它通过反复试错进行学习，调整某些大脑区域的脑电波，从而学会单击鼠标或移动机械假肢。人们还不清楚大脑究竟是如何做到的。

通过头皮电极记录到的大脑皮质电活动（脑电图）就像是隔着房门偷听到房间里含糊不清的谈话。大脑发出的电信号由于颅骨的阻挡而衰减，特别是高频部分的损失更明显。如前所述，电极也可以通过手术打开颅骨后直接放在大脑表面，这样就可以接收到更清晰的信号。这种方法被称为脑皮层电图，就好比在房间内放置了麦克风进行监听一样。

这两种方法（脑电图和脑皮层电图）均可用于脑机接口，但它们只能收集表层脑组织（大脑皮质）的电活动。奥克斯利发明的Stentrode既可以放置在大脑表面，也可以插入大脑深处，它可以通过血管系统到达任何位置。Stentrode检测到的脑电波信号会通过锁骨附近植入的无线发射装置传输给电脑。这个装置类似于心脏病患者使用的起搏器。

使用脑电图的脑机接口有个主要缺点：受试者需要戴上一顶像游泳帽一样的脑电图电极帽，显得很扎眼。这些电极从头上冒

出来，把信号传输到笨重的电子仪器中。脑电图设备在实验室里很好用，但要用它进行正常的社交活动就很难了，会让人看起来像个外星人。

如果在颅骨上钻个孔并在大脑中埋入一个尖尖的电极或微电极阵列，就可以获得更好的信号。内森·科普兰和其他脊髓损伤患者使用大脑植入电极的脑机接口设备让他们的残肢恢复了功能（请参阅第8章）。实际上，植入的电极可以检测到单个神经冲动，它与脑电图或脑皮层电图检测神经元群体产生的电活动波不同。不过，植入电极是一种侵入性的方法。随着时间的推移，电极周围形成疤痕组织，电极可能移动并脱离神经元的接触。此外，对任何人来说，脑外科手术的場景都令人心生畏惧，但是将支架插入血管是一种常见的手术。对于大多数人来说，这更容易被接受。Stentrode可以达到脑皮层电图记录的灵敏度，却没有开颅手术的风险。

西奈山医学中心血管神经外科医生克里斯·凯尔纳博士经常给患者做脑部血管搭桥，他认为将支架放入大脑血管的风险非常低。他说，并发症的发生率不到“千分之一”。将支架放置在动脉中比放置在静脉中有更高的风险，因为如果在动脉中形成血栓，它可能会卡在血管的狭窄段，阻断部分大脑的血液供应并导致卒中；但如果是静脉栓塞，侧支血管会将氧气耗尽的血液输送回心脏。

奥克斯利及其同事在绵羊的脑内植入Stentrode并放置长达6个月，[\[7\]](#)实验取得了成功。基于此，他们开始申请FDA批准他们在人体中进行临床试验。同时，为了完善控制假肢的设备并开

发更好的解码神经信号的方法，他们成立了一家初创公司 Synchron。因为 Stentrode 既可用于检测神经信号，又可用于刺激神经，所以它有可能做到让假肢提供感觉反馈并刺激大脑的感觉皮质，从而让患者获得触感（这对于处理精致的物体至关重要）。除了在假肢上的应用，他们还打算开发电脑接口，让患有卒中或运动神经元疾病（例如肌萎缩侧索硬化）的人能够通过电脑接口进行交流，患者动动鼠标就可以打出或说出所选择的单词。

通过脑血管与大脑进行通信的这项新技术为基础研究和临床医学提供了新的工具。贝德森博士认为，把 Stentrode 应用于诊断比用于脑机接口更为重要。他说：“如果可能的话，我现在就要用它。”他的一些颅脑损伤患者昏迷不醒，在这种情况下很难衡量患者的意识水平。他说：“许多患者的意识状态可能已经出现明显的改变，但他们的脑电图却显示正常。”神经科医生可以用 Stentrode 来探查昏迷患者整个大脑的电活动状态，包括脑电图无法检测到的那些区域，并用这些信息指导治疗。

基础科学和医学研究在脑机接口技术上的结合，正让前景黯淡的、小众的神经科学领域融入主流。如今，脑机接口技术正被由埃隆·马斯克和马克·扎克伯格这样一些有远见的商人所代表的工业力量进一步推动。另有许多生物技术初创公司，也在开发能够利用并控制大脑电活动的非侵入性方法。这是一场开发脑电波新技术的激动人心的竞赛，必将导致更强大也更安全的监测和操纵神经活动的技术出现，但是电子设备与神经元的结合也会带来新的技术风险。

电子时代与脑电波的干扰

虽然监测和利用大脑电脉冲孕育出了像脑机接口这样新颖的治疗方法，但在我们日常生活中无处不在的电子器件可能会对我们的脑电波产生影响。

每个电子设备都有UL认证标签，它确保了该设备不会对我们家中的其他电子设备造成干扰，或者就算可能产生干扰，也会给出提醒。例如，互联网路由器可能会导致手机或立体声收音机失灵。在最新的科研突破让人们认识到脑电波对认知的重要性之前，我们没有理由怀疑电子设备会破坏我们的大脑功能，但是人们确实有过担心：现代的电子设备会悄无声息、不知不觉地干扰大脑中的生物电活动波。在这个“电子时代”，越来越多的无线电子设备（例如手机）在我们生活的环境中产生电磁辐射，它们干扰人类脑电波的可能性变得越来越大。例如，研究表明，手机辐射会影响睡眠，从而对脑电波产生影响。

根据2008年的一项研究，手机信号会干扰人的脑电波。[\[8\]](#) 澳大利亚斯威本科技大学神经科学家罗德尼·克罗夫特及其同事发现，120个受试者在使用诺基亚6110手机贴耳通话时，他们的 α 波强度改变了。研究人员将受试者进行通话和未进行通话时的脑电图记录进行了比较。脑电图记录显示，受试者与手机接触一侧的 α 脑电波功率突然增强。克罗夫特推测，增强的 α 波可能反映出，大脑为了克服手机电磁辐射对神经回路的干扰，不得不提高注意力。

这与英国拉夫堡大学一位研究人员的发现相符。他发现，当人们在手机关机后立即入睡时，他们所花费的时间几乎是手机处于关机或待机状态下的两倍。该研究的作者之一詹姆斯·霍恩相信，与半杯咖啡相比，手机的作用无害，且对睡眠的干扰更小。霍恩仍然想知道，“如果改变信号强度、持续时间或使用其他装置，是不是会产生更大的影响”。[\[9\]](#)

这项研究还提出了一个问题，即如今充斥于我们生活环境的其他电磁辐射源是否会干扰大脑中的电磁活动。高压电磁场（EMF），例如高压电线辐射的电磁场，可能会产生广泛的生物效应，但目前还很少有人研究它对脑电波的作用。这些设备的使用非常普遍，尚未产生明显的有害影响，所以人们缺少对它进一步研究的动力。但是，2017年发表的一篇文章认为，人们应该进一步研究手机以及其他发射电磁场和广播的电子设备对人类认知可能产生的影响。其理由是，一篇综述文章回顾了过往的研究，并支持以下结论：人暴露在高压电磁场中会增加皮质的兴奋性，并可能会破坏睡眠或产生其他不易察觉的影响，但这并未形成共识。[\[10\]](#)

但毫无疑问，对于脑部有植入物的人来说，周围环境中的电子设备所产生的电磁能量会给他们带来安全隐患。[\[11\]](#)无线广播和电视信号、交流电产生的电磁辐射、头顶的高压线、安防系统、民用电台和对讲机、吸尘器、微波炉等设备都是电磁干扰的来源，它们可能通过干扰脑深部电刺激或脑机接口中使用的其他大脑植入设备而给人造成伤害。装了起搏器的人也面临类似的风险。

别忘了神经胶质：绝缘的大脑

到目前为止我们提供的信息可能让大家以为大脑中所有的细胞都是神经元。实际上，尽管你很少听说过它们，但到目前为止，脑组织中的大多数细胞（多达85%）并不是神经元。这些非神经元细胞被称为神经胶质，它们的名字来源于“胶水”一词。直到最近，神经胶质还被简单地视为神经元的支持细胞。神经胶质曾被认为是大脑中的一种结缔组织，这解释了为什么没有单数名词来描述它们。如果按照“神经元”的单数名词neuron的命名规则，神经胶质的单数名词本来应该是“glion”，但这个词并不存在，因为神经科学家将这些非神经元细胞视为“神经元”之间的“东西”。这种狭隘的观点（我们在提到它们时所用的语言难免流露出这种轻视）对科学家在理解神经胶质以及它们的功能时产生了一种微妙而有力的限制。大多数神经科学家曾经忽略了它们（大多数人现在仍然不重视）。后来人们知道，“神经元之间的东西”（神经胶质）为神经元提供了物理和营养支持，并且能够对损伤和疾病做出反应。但是，会发放电脉冲的神经元更酷，它吸引了所有注意力，也限制了人们的思维，让人们以为学习和记忆等大脑执行的所有功能都是由神经元完成的。研究神经胶质的论文没有在知名期刊上发表，给这些非神经元（支持细胞）的研究划拨的资金很少，而敢于研究神经胶质的科学家由于选择了这个神经科学的冷门领域，也吃了更多的苦。但是，正如我的同事、明尼苏达大学神经科学家阿方索·阿拉克所说：如果从神经元的角度放眼望去，周围所见的都是神经胶质。

一项令人惊讶的研究表明，虽然神经胶质不像神经元那样会产生电脉冲，但它们不用电信号也能进行交流。令神经科学家惊

奇的是，他们发现神经胶质可以通过神经递质进行交流，而且在神经元发放电脉冲的时候会触发神经胶质释放神经递质。神经科学家对此惊讶不已。人们发现神经胶质会释放、吸收和探测神经递质。这些神经递质与神经元在突触部位传递信息时所使用的物质相同。一个神经胶质会利用神经递质把信号依次传递给下一个神经胶质，直至信息传遍整个神经胶质网络。由于神经胶质也使用神经递质这种“通用货币”（人们曾经误以为神经递质是神经元专用的信息载体）进行信息交换，因此神经胶质也可以控制神经元之间的通信。通过调节突触中神经递质的水平并释放神经活性物质，神经胶质可以增强或抑制神经元之间的突触传递。现在我们知道，神经胶质可以感知动作电位和突触活动，并使用化学通信手段（神经递质）通过神经胶质网络传达信息，从而影响大脑中不同位置神经元之间的突触交流。神经胶质进行的这种交流和信息处理并没有包含在神经元学说（这是神经科学赖以建立的基石）之内。由诺贝尔奖获得者拉蒙·卡哈尔提出的神经元学说指出，神经系统中的所有通信都是通过电信号沿一个方向通过神经元之间的突触进行传递的。看来这个基本理论并不完全正确。

大脑的所有活动都是靠神经元之间传输的电信号来执行的。这个隐含的假设意味着，科学家研究大脑的工具中并没有神经胶质的一席之地。电极不能用于探听神经胶质之间的通信，因为胶质细胞之间的通信不需要电。一项研究神经活动的新技术揭示了神经胶质之间的通信。以前，几乎所有关于神经系统功能的细胞机制的研究都未涉及非神经元细胞之间的沟通。

20世纪80年代末90年代初，神经科学家开发出了新型的荧光染料，当与神经元内特定类型的离子结合时，它们可以发出更明

亮的光或改变荧光的颜色。其中最重要的是用于研究细胞内钙离子流动的染料（因为钙被称为细胞的“第二信使”）。在细胞膜上有大量传感器在不停地监控着细胞的周围环境：探测某些化学物质，监控温度、离子通量和跨膜电压的变化。这些受体是细胞的“第一信使”。当检测到环境变化的信号时，这些受体一般都会通过钙离子引发细胞内部的生物化学反应。由于细胞仿佛生活在钙离子的海洋中，钙是理想的第二信使，它可以作为中介，把在细胞外部检测到的事件信息传递到细胞内部。然而，在细胞内部，钙离子是非常稀少的，它们会被主动排出细胞外或被螯合在特殊的细胞隔室内。手电筒发出的光再微弱，也可以在漆黑的夜晚产生显眼的信号——细胞检测到外界环境变化后，在细胞质中引发的少量钙离子喷射也可以起到同样的效果。细胞内的钙信号驱动生化反应，让细胞能对检测到的事件做出适当的反应。它们甚至可以将信息传递到细胞核深处，激活或抑制某些基因，以合成适当的蛋白质，产生适应性反应。例如，根据赫布“神经元一起激活，就会连在一起”的假设，钙信号传导是突触增强的基础，而且到达细胞核的钙信号会打开某些基因，从而将短期记忆转变为长期记忆。[\[12\]](#)

当科学家第一次把培养皿中的神经元或脑部活组织切片浸入对钙敏感的染料中，并用显微镜观察这些活细胞时，他们很高兴地看到在神经元自发发放动作电位或被电极刺激时，细胞内出现了闪烁的荧光。

我第一次看到这种现象是在自己培养的背根神经节神经元中（这种细胞让我们拥有了触觉）。半夜里，当我们刺激神经元发放冲动时，实验室发出阵阵欢呼声，在黑暗空旷的大厅里回荡。

当时，活细胞钙成像还是一门黑手艺。它所用的染料是非常考究的，并且容易失效。用于研究活细胞中的钙信号传导的电脑和显微镜是专门设计的，也是最先进的。我去了位于柯林斯堡的科罗拉多州立大学，向掌握这门新技术的专家斯坦·凯特和彼得·格思里学习第一手的资料。在成功观察到神经元发放电脉冲时产生的荧光后，我将这项技术带回了美国国立卫生研究院的实验室，并开始研究钙信号如何控制神经元轴突的生长，以及哪些基因会根据神经元产生的电脉冲模式开启和关闭。最终，我开始研究海马神经元中的钙信号传导如何将短期记忆转变为长期记忆。

[\[13\]](#)但是，我和当时一起进行钙成像研究的其他人很快发现，钙信号传导在神经胶质中也会出现。更加令人诧异的是，当神经元受到刺激，释放动作电位时，神经胶质也会产生荧光，这意味着它们会响应神经元的发放而产生钙信号。

我在我的上一本书《另一个大脑》[\[14\]](#)中已经描述过这一发现以及我们对这个现象的理解，因此在这里不再赘述。但是我们应该认识到电脉冲只是故事的一半，这对一本关于脑电波的书来说是很重要的。在了解了什么是脑电波及其产生方式后，显然，那些能控制神经递质和离子并因此影响整个神经元膜电压的细胞也必然参与到神经振荡和脑电波产生的过程中。的确如此，一种被称为星形胶质细胞的神经胶质参与了癫痫发作。最近人们还发现这些神经胶质会改变 γ 波，并对依赖 γ 波活动的细胞学习机制产生影响。[\[15\]](#)

我最近对另一种被称为少突胶质细胞（一种神经胶质）的研究表明，神经胶质参与脑电波活动的机制与神经元不同，它们通过控制电脉冲在神经纤维里的传输速度来影响脑电波。这些细胞

会在神经纤维外部形成一层被称为髓鞘的电绝缘层，这对于神经冲动的快速传递是必不可少的。[\[16\]](#) 我们的研究表明，少突胶质细胞可以感知神经冲动并对其做出回应，从而调节髓鞘的形成。[\[17\]](#) 这一结论在其他实验室得到了验证和扩充。最近，我们的研究发现，已经形成的髓鞘结构会被改变，并且这种结构的改变会影响电脉冲在轴突上的传输速度。这些神经胶质通过影响锋电位到达大脑关键节点的时间，从而改变这些神经回路的功能，并改变了动物的行为。具体来说，在我们的实验中，神经胶质可以影响视力。[\[18\]](#)

我认为这种可塑性与突触可塑性是相伴相生的。赫布等人在概述细胞的学习规则（“神经元一起激活，就会连在一起”）时忽略了脉冲信号在突触之间传递所花费的时间。如果两个神经元与所连接的同一个目标神经元的距离不同，那么距离最短的那个神经元的神经冲动将最先到达。锋电位到达的时间对于突触可塑性至关重要，就好比在任何运输网络或信息网络中，到达时间都是至关重要的。然而，当这一概念被用到我们称之为宇宙中最复杂的网络——人脑上时，却令神经科学家们（他们潜心研究在学习和记忆过程中导致突触传递改变的机制）迷惑不解。[\[19\]](#)

这些神经胶质会影响神经冲动在髓鞘上的传输速度。当人们考虑把神经振荡和远距离的、特定频率的脑电波联系在一起时，传输速度就显得很重要了。我们的数学模型显示，脑电波的频率和与之耦合的神经振荡的相位、振幅都跟脉冲传输的速度（因此也与髓鞘）密切相关。[\[20\]](#)

脑电波2.0版

我们目前对脑电波的了解是肤浅的，看到的只是冰山一角。我们所想象的是，人类能够详细了解大脑如何编码、处理和检索信息，并做到真正与脑电波无缝连接时的情形，但是当前的神经回路交互技术还非常原始，与我们的期望相去甚远。我们正处于人类历史的转折点：我们第一次分析人脑中的电活动，也是第一次利用电来控制人脑——正是“电”为大脑这个器官注入了生命，而我们又把电传递到神经回路中。这很有意义，因为在利用这种自然力量时，我们也在运用大脑工作的基本机制。

过去，我们通过访谈、药物和手术来诊断与治疗脑部疾病和精神疾病。这些方法都可以挽救生命，在许多情况下也会获得奇效，但它们都是间接方法，在施治过程中也常常显得力不从心。我们正在进入一个新时代，很像人类开始用心电图监测心脏的电活动进行诊断，并用起搏器控制心率来治疗心脏疾病的那个时代。我们正迈向未来，电将成为我们与颅骨内这个最高级的器官进行互动的手段。很难预测这些愿景何时才能完全实现。要想把电应用在脑生物学中，并达到像应用在心脏病学中那样的成熟水平，可能还需要数十年甚至一个世纪的时间。但是，回顾一下过去的科学进展，我们相信那一天终将到来。

现在的脑电图、脑皮层电图和fMRI让科学家可以了解一个人的认知优势和劣势，可以诊断神经疾病和心理异常，可以了解一个人的思想。这些方法将进一步发展，而且人们为了提高检测和诊断脑功能的能力，还会开发出更复杂的，能分析、解码神经回路电活动的方法。这些科技成果将离开实验室，进入医学和其他

领域。灵敏的诊断技术和“读心术”的实现还要靠脑生物学的深入发展（来源于动物实验的知识）以及人工智能的进步，才能使计算机有能力分析和理解萦绕在大脑中的复杂信号，并超越我们现在的分析能力。未来的科学家通过分析人脑中的电就能了解大脑的机能，就像我们现在通过医学检查就能了解身体功能状态一样。

脑机接口技术将继续发展并取得像人工耳蜗植入（人工耳蜗为失聪的人带来悦耳的声音）这样的革命性的成果，将实现治愈其他感觉和运动功能障碍并缓解认知功能障碍（例如记忆力减退和痴呆）的梦想。然而，用于记录脑电图的头皮电极在实验室外并不实用，并且效率不够高。干式电极（不需要通过涂导电胶来增加皮肤的导电性，也不需要损伤颅骨）一定会被开发出来。即使是现在的植入式电极也无法对神经回路充分采样。电极材料会被腐蚀，引起疤痕组织，产生物理断裂或被电流击穿，所以每隔几年就必须更换。由柔性且具有生物相容性的材料制成，可以精确地记录和刺激数千个神经元的电极也一定会被开发出来。尽管我们能看见的只是当前的技术，不知道如何实现那些梦想中的功能，但可以肯定的是，它一定会实现。

目前，要在大脑和假体设备之间建立接口需要庞大、昂贵和复杂的电子设备，还需要高级技术人员和科学家在实验室里才能完成。将来，植入大脑的电子芯片能与小巧的电子设备进行无线通信，这些设备使用起来就像平板电脑一样简单便携。从今天的平板电脑和手机往回看：1945年，第一台电子计算机ENIAC出现了，它占据了整个房间。以今天的标准来看，它能做的不过是些微不足道的工作，但在当时却让世界眼前一亮。[\[21\]](#) 我们可以

确信，这是工程技术发展的趋势，未来肯定会出现功能强大的、小型化的脑机接口设备。这只是时间问题。

将电脑芯片植入脑部的手术是高度侵入性的。脑外科手术是大型手术——需要慎重考虑，实施起来很有挑战性，而且充满风险。非侵入性的记录和刺激神经元的方法还在开发中。例如，用超声波，但是未来可能会出现纳米颗粒型的检测器。将它们注入大脑就可以与计算机进行无线连接。在脑深部电刺激中使用电极，始终无法做到刺激特定的神经元。电流总是选择电阻最小的路径。电流所经之处的任何神经元都会受到刺激，而且从远处延伸到电极附近的神经纤维也会受到刺激。目前，经颅直流电刺激和经颅磁刺激通过头皮传递电刺激的方法还是太粗糙，无法精确地控制特定神经回路的电活动。这些方法会改变电极下方大量脑组织的兴奋性，而不是精确激活特定的神经回路。

目前的光遗传学技术（使用光来控制细胞的电活动）已经在动物研究中解决了这个问题。人们可以将外源基因精确地引入感兴趣的特定神经元中，并通过一根细长的光纤将激光束射入动物的大脑，从而控制单个神经元的电活动。为了治疗帕金森病等神经系统疾病和精神分裂症或抑郁症等精神疾病，以正确的方式对特定的神经元进行控制是必要的。当这项技术可以完美地用在人身上时，今天人们所用的电休克疗法、经颅磁刺激、脑深部电刺激和经颅直流电刺激等方法都会显得很野蛮，就跟我们现在看待前额叶切除术的态度一样。但是，将光遗传学应用于人类存在严重的伦理障碍。它不像药物，如果产生副作用可以停药。外源基因一旦被引入（通过病毒感染神经元或神经胶质，将特定的基因引入）人体，就无法被移除了。但是，许多专家坚信，我们别无

选择：在可预见的将来，必须使用这种方法来减轻神经和精神疾病给人类带来的巨大痛苦。开发治疗严重心理疾病的方法尤为紧迫。精神外科手术太原始，也太危险；电休克疗法太野蛮了；药物治疗有点效果，但并不总是有效。这些方法在使用的时候常常要通过不断试错来摸索出最佳的条件，并且其造成的影响是全身性的。结果，患有严重精神疾病的人常常被送入收容机构。随着光遗传学技术和神经科学的发展，也出于伦理考虑，使用光遗传学方法的呼声会越来越高。

通过闭环系统自动调节和刺激大脑的设备是近期出现的一些进展。它能感知大脑中的异常电活动，并立即施加刺激加以控制。通过适当的电反馈，大脑会命令设备对自己进行控制。电刺激将被越来越多地用于卒中和外伤的康复。对脊髓进行电刺激的方法已经被用于帮助瘫痪的人恢复运动功能，使他们有能力控制曾经瘫痪的四肢，控制血压、膀胱和肠道功能。电刺激与物理疗法的结合可以加速颅脑损伤和脑部疾病的康复。

进入大脑的另一条有效途径是通过迷走神经（迷走神经在大脑和身体之间建立了广泛的联系）。刺激迷走神经的方法已被有效地用于卒中后的康复和其他疾病的治疗。它通过改变多余神经元的可塑性来达到治疗目的。

脑电波科学技术正在以惊人的速度发展。当我三年前开始写这本书的时候，不需要说话，仅从人们进行简单思考时的脑电波里就能解码人的思想似乎是一个遥不可及的梦想，或者说是个幻想，但是在本书快写完的时候，这些梦想都变成了现实。几个月前，我亲耳听到了电脑解读患者（这些患者的脑部被植入了电极，用以指导癫痫手术）的脑电波所产生的语音。在一次科学会

议的海报展会上，一位进行该项研究的团队成员把耳机递给我让我听。那声音听起来就像亚历克莎（Alexa，一种人工智能产品，可以理解并产生人的语音）一样清晰，但是这个声音直接来自一个人的思想，这些思想就在他的脑袋里以电波的形式回荡。这些进步也会让我们面临新的道德挑战。

窥探思想的伦理问题

大多数人都清楚个人基因组学提出的深刻的伦理困境。你想知道自己是否有患阿尔茨海默病的基因吗？你想让老板或保险公司知道吗？很少有人会意识到，当我们通过测5分钟静息状态下的脑电波就能对一个人的认知能力有更深入的了解时，我们将面临更大的伦理困境。静息状态下的脑电波可以揭示出许多信息。一个人的性别、智商、学习特定类型信息的倾向（例如外语）、创造力和个性特征都可以从脑电波记录中被识别出来。这种评估儿童（或成人）认知能力和智力的方法又将给其教育和就业机会带来怎样的影响？

读取脑电波的新科技除了能增强正常的脑功能外，还有许多潜在的疗效，例如减轻疼痛、治疗脑部疾病，甚至消除创伤性记忆。但是考虑到人脑的独特性，在人的精神功能受损，以及为了建立保护机制以免伤害人的健康和福祉的情况下，它也带来了知情同意的问题。出于医疗目的——例如，为了治疗帕金森病等神经系统疾病或为了控制假肢——而在脑中植入东西的风险或益处也应该被仔细评估，因为将电极植入脑部必然有风险。

除了在神经学上的应用外，这种技术也被用于一些精神疾病的治疗，如重度抑郁症、成瘾和精神分裂症。这也是伦理学家现在争论的一个话题。有必要制定关于精神功能障碍的实验研究和治疗的新准则与法规。在介绍这些新技术的同时，重要的是研究它所带来的现实问题，因为我们处于一种新技术的风口浪尖。这种技术将使人类有史以来第一次拥有直接解读和控制思想的能力。

托马斯·奥克斯利正在开发能把电极通过血管植入大脑的 Stentrode 方法。在与他交谈时，我提出了这个问题，因为这种方法的侵入性比脑外科手术小得多，并且使用起来更容易。这项可检测脑电波和操纵大脑电活动的新技术带来了新的伦理问题，即隐私和精神控制。正如马塞尔·贾斯特在我访问他的实验室时（他正在使用 fMRI 读取一个人的想法）所指出的，没有比思想更私密的东西了。控制人的大脑会产生自由意志和知情同意的问题，它有悖于神经系统疾病或精神病患者的利益——20 世纪 70 年代，人们出于同样的原因停止了脑深部电刺激的研究。例如，如何让昏迷的人知情并同意别人用电极探测和控制其大脑呢？“这里存在重大的安全问题。”奥克斯利说，“我们吸取了脸书的教训（它曾暴露出始料未及的隐私问题）。但是，我对这项技术的发展持谨慎乐观的态度。如何处理基因工程带来的伦理问题为我们如何正确使用这项技术提供了参考。”

西奈山医学中心临床电生理学研究室主任、心脏专家王威廉（音译）博士认为，人们控制大脑电活动的历程与心脏起搏器的发展历程有相似之处。他说：“临床心电图（ECG）花了 70 年的时间才达到今天的水平。”心脏病专家对心脏的工作原理了如指

掌，因此可以用电子干预的方法进行治疗，但是，神经科学家对大脑的了解还很肤浅。神经外科医生用脑机接口帮助患者，实际上是在拿患者做实验。例如，神经外科医生采用脑深部电刺激疗法（已被批准用于缓解帕金森病）治疗其他很多疾病，包括强迫症、抽动秽语综合征、成瘾、肥胖、厌食和抑郁等。

用人脑测试哪些方法可能起作用似乎触及底线了。奥克斯利说：“但那就是医学。实验是医学的基础。”

神经武器

加利福尼亚州科卢萨县一名服役26年后光荣退伍的行政治安官骄傲地将警徽别在他22岁的女儿的警服上。女儿追随着他的脚步，于2018年12月成为一名警察。仅仅一周后的一个晚上，大约7点，科罗纳警官接到报警说戴维斯第5街和D街附近发生一起三车相撞事故。她赶到了现场。克里斯蒂安·帕斯夸尔——加州大学戴维斯分校一名25岁的毕业生，驾驶一辆1996年的英菲尼迪，被另一辆汽车撞上。他的车侧滑后撞上了第三辆汽车。司机们在离被撞瘪的汽车不远处交换信息，警官纳塔莉·科罗纳从他们小组的巡逻车里下来进行协助。她接过帕斯夸尔的驾照并登记了信息之后，将驾照还给了他。

帕斯夸尔说：“就在那个时候，我听到了枪响。” [\[22\]](#) 一个枪手站在他身后15英尺的地方狂射一气，子弹就在帕斯夸尔的耳边呼啸。由于距离太近，枪声使他丧失了听力。帕斯夸尔看到

科罗纳警官被击中数枪，并摔倒在人行道上。枪手将手枪里的子弹打完，然后重新装弹。

这个案子不是因为路怒杀人。实际上，枪手（后来被确认是48岁的凯文·道格拉斯·林博）根本不是车祸的当事人。他发现女警后，立即伏击并杀害了她。后来，林博被发现在附近的一处房屋内开枪自杀。警察在他的尸体旁边找到他的手机，里面的一条信息解释了他的杀人动机。林博声称，警察多年来一直用超声波轰击他。[\[23\]](#)许多被诊断患有分裂型人格障碍的人会认为，政府在他们的大脑中植入了电脑芯片，或者通过能量束控制他们大脑中的电活动，从而远程控制他们的思想和行为。对于患有脑部疾病的人来说，这种错觉是可以理解的。脑部疾病让他们混淆了真实与想象。他们认为自己的思想被邪恶的技术手段控制，这可以理解为他们试图为自己所经历的事情找到一个合理的解释——头脑中“听见”的生动的声音迫使他们采取行动。

但是，确实有监测脑电波并对其进行控制的技术，这让当局不得不提醒心理健康专业人员，如果他们的患者向他们诉说这种“妄想”，先不要仓促得出对方心理有问题的结论。精神分析学家卡罗勒·史密斯在在线新闻通讯《全球研究》（*Global Research*）上的一篇文章中指出，在这个通过现代科技可以控制思想的时代，人们有必要重新评估这些用于诊断精神分裂症的症状。[\[24\]](#)她认为，有些人可能没有出现妄想。她写道：“利用神经科学来为军事服务，这是数十年研究和实验的结果，尤其是在苏联和美国。”这才是现实而又紧迫的威胁。

她发出警告说：“我们并没有真正理解源自苏联与西方之间多年的军备竞赛所带来的技术成果。它使得卫星技术不仅用于监视和通信，还可以锁定人类，通过引导激光束、神经粒子束、电磁辐射、声呐、射频辐射（RFR）、孤子波和挠场，并利用这些能量场来控制大脑频率。” [\[25\]](#)

害怕精神控制的人不止史密斯一个。“目标正义”组织由一群自认为受到精神控制技术袭击的人组成，这个组织号称拥有1080名成员。[\[26\]](#)它在互联网上的公司销售一些据说可以防止通过电磁传输进行精神控制的电子设备。

史密斯警告说，所有人都处于危险之中。“军事技术可以用来在全球传播精神控制，作为使用射频操纵和干扰人类心理过程的系统……心理电子武器，其最终目的是进入大脑和思想。这些研究事先并未经宣布和讨论，而且在很大程度上没有得到科学家或雇用科学家的政府的认可——远程控制思维的技术已经浮出水面。” [\[27\]](#)

随着公众逐渐意识到，在实验研究中出现的新兴技术的确可以探查和操纵大脑，人们的担忧开始扩散，也不再视这种恐惧为精神病患者的错觉而对它嗤之以鼻了。例如，从2016年至撰写本文之时（2019年6月），美国国务院已基本关闭了美国驻古巴哈瓦那大使馆，并发出了旅行警告，建议美国人不要前往古巴，因为他们可能会成为在古巴的美国敌对势力的袭击目标，会遭到声波武器或其他类型的能量束武器的袭击，并对大脑造成伤害。据称，24名使馆工作人员成为袭击目标。用参议员鲍勃·梅嫩德斯的话说就是，对我们的外交官“残酷且恶意的袭击”。此事件震

惊了国际。梅嫩德斯参议员在2018年1月9日举行的参议院调查听证会上做了上述评论。该听证会主题为“对驻古巴美国外交官的袭击：应对和失察”，由参议员马尔科·鲁比奥主持。[\[28\]](#)一位不愿意透露姓名的医学专家在迈阿密和宾夕法尼亚大学对外交官们进行了检查。鲁比奥参议员在报告中引用这位专家的话说，使馆工作人员由非自然原因造成了轻度颅脑损伤或脑震荡。鲁比奥描述声波武器是“美国或世界其他任何地方都没有的非常复杂的技术”。

当何塞·德尔加多利用脑深部电刺激进行的研究引起公众关注并引发恐慌时，人们就开始害怕精神控制。民众的担忧和脑深部电刺激的滥用（例如罗伯特·希斯用脑部刺激“治疗”同性恋的案例），致使美国联邦机构数十年来一直在缩减此类研究的经费。但是随着神经科学在脑电波研究和脑机接口技术领域的发展，又产生了新的恐慌，所谓的古巴声波武器袭击事件就是个例子。自从它第一次被报道以来，这些令人震惊的所谓袭击事件引发的轰动性新闻连续两年一直为主要的纸质媒体和广播媒体所津津乐道。美国政府声称这种可怕的能量束武器会使大脑丧失能力，并造成颅脑损伤。由此引起的政治和经济后果是实实在在的——美国人到古巴旅行受到限制，而需要美国大使馆服务的古巴人出国旅行也遇到了障碍。

发生在古巴的声波武器袭击事件加剧了人们对于神经武器和精神控制的恐惧。但是作为一个贫穷的小岛国，古巴遭受经济封锁长达60年之久，缺乏现代技术和生活必需品，不大可能用神经武器威胁美国人。恐惧是主要原因，对未知的恐惧是人的本能。很少有人了解脑电波，也很少有美国人了解古巴。

我对这个事件很感兴趣，因此进行了深入调查。我前往哈瓦那和附近的乡村，采访了科学家和各个行业的古巴人，还亲自走访了发生声波袭击的地点。我与古巴科学家和街头人士交谈时所听到的东西与新闻界和美国参议院委员会所描绘的观点截然不同。

黎明时分，一辆破旧的1942年产的福特-弗利特伍德汽车在雨中颠簸着穿过哈瓦那的一条街道。一辆出租车的车头灯射出的光划破黑暗。雨水在挡风玻璃上汇成一股股细流，雨刮有气无力地时不时刷一下，司机不得不眯起眼睛盯着前方。副驾驶位置的雨刮器坏了，仪表板上的所有指针也都像雨刮器一样死气沉沉地指在零位。福特车的引擎盖嘎吱作响，下面却组装了一个西班牙巴雷罗斯产的发动机。每当司机换挡避开路上的水坑时，发动机就会发出一阵吃力的嗡嗡声，像一台不堪重负的拖拉机。柴油的味道让我感到胃里一阵翻江倒海。仪表板上放着一部手机，上面显示的是一个两岁的小女孩拥抱着她年轻的父亲的彩色照片。这个通过卫星进行通信的设备显得有些不合时宜，就像一个来自未来的时间旅行者扔下的东西。

当我问他美国大使馆的工作人员遭到声波武器袭击的事件时，驾驶员用蹩脚的英语回答说：“这个故事不靠谱。”

“那么，谁的责任？”我问。

“唐纳德·特朗普。”他回答。

驾驶员努力克服语言障碍想要表达的意思是，美国政府应该对声波袭击事件负责。他说，古巴缺乏这种技术，事实也不支持任何袭击的说法。当我问他有什么证据时，他引用了古巴科学家的分析。（他们对这起令人震惊的事件进行了调查。这件事让美国公民感到恐惧，并造成了美国驻哈瓦那大使馆关闭。）

“为什么？”我问。

他将两个拳头伸出来比了个掰断树枝的动作，说：“为了断掉（把美国和古巴联系在一起的）关系。” [\[29\]](#)

我见了一些古巴科学家。在古巴神经科学中心一座高耸的混凝土建筑中，我见到了该中心的主任米切尔·瓦尔德斯-索萨博士。这栋建筑离劳尔·卡斯特罗戒备森严的房产不远，靠近一个旅游区。他通读了报告，然后一条条地列出了证据。瓦尔德斯-索萨是对美国所报道的袭击事件进行科学调查的古巴科学家委员会成员。他是听觉生理学方面的专家，这使得他说的话特别有分量。

大家所能知道的情况是，现有的事实并不支持在古巴有人对美国人使用神经武器的说法，而且在许多情况下，这些说法不符合自然法则。以前的科学文献中并没有声音会导致颅脑损伤的报道。除了房间里被声波武器“锁定”的那个人以外，其他人什么也听不见。人们用超声波（频率高于听觉范围）对胎儿进行成像检查，大家认为超声波是无害的。做超声波检查时必须将探头直接贴在孕妇的腹部，而且还要在肚皮上涂凝胶才能让超声波透过（超声波会被皮肤和探头之间的空气间隙阻挡）。超声波如何能在远距离秘密发射，并穿透美国大使馆厚厚的混凝土和玻璃墙

呢？人类听觉范围外的低频声音不能被聚焦，也不能被用于跟踪房间里的人，而且产生低频声音的设备都是庞然大物，很难隐藏。在建筑物内部，再大的声响，也会衰减到远低于可能损害听力的水平。退一步说，即使是震耳欲聋的声音，也只会损害听力，而不会引起颅脑损伤。

经古巴科学家鉴定，所谓的声波武器袭击时的手机录音是蟋蟀的鸣叫。后来这种声波武器又被认为是某种会让人产生幻听的微波束。这纯粹是猜测，而不是从现场的证据得出的推论。当科学家驳斥了这一理论后，造成脑部损伤的袭击武器又被说成是某种未知类型的神经武器的能量束。

即使缺少推理、动机不明，也找不到罪魁祸首，媒体对这条消息的狂热追捧一点儿也没有减弱。嫌疑人从古巴人变成古巴的流氓派系，再变成俄罗斯人。当有报道美国驻华使馆人员也遭到类似袭击时，动机变得更加扑朔迷离。

我从科学的角度得出的结论是，现有的证据不支持驻古巴大使馆人员声称自己患有“新医学综合征”的说法（这是国务院医疗服务局主任查尔斯·罗森法尔布博士在参议院关于袭击的听证会上所定义的）。[\[30\]](#) 他们的症状多种多样，其他常见因素也会导致耳鸣、头晕、注意力不集中或睡眠困难。（不同的患者有不同的症状，并非所有受到袭击的患者都有相同的症状。）

也没有证据支持美国国务院所说的这些患者受了外伤。MRI 这样的客观检查没有提示患者有颅脑损伤的迹象。除了有三个人表现出不同类型的轻度听力障碍（这在人群中很常见）外，其他人的听力图（听力测试）显示正常。后来的调查表明，其中两个

人以前就有听力减退。为什么所有人都报告听力减退，但是他们的听力测试结果却显示正常？

然而，人们仍然感到恐惧。恐惧会造成伤害。报告出现症状的人们只是被美国政府告知，他们在遭受先进的神经武器有针对性的袭击中出现了脑损伤，可是这种痛苦却被极度放大了。

20世纪50年代，何塞·德尔加多开始用无线电控制大脑刺激器的那一刻便引发了人们对精神控制的恐惧。他理性而科学的回应并未平息公众或资助机构对精神控制的恐惧，这些人最终停止了对此类研究的支持。

德尔加多写道：“人们担心这种新技术可能会导致有人违背他人意愿对其他人的大脑活动进行不道德的远程控制，但是……这种危险是不可能发生的，而且被过分夸大了。” [\[31\]](#)

他列举了几乎所有大脑刺激过程中出现的不可预测性：“当第一次刺激大脑某个点时，我们无法预知可能出现的效果。”脑部刺激通常无法控制他人思想，不能让人执行某个任务或做出某种行为，反而会破坏大脑的正常功能。“在某些情况下，诱发的反应是动物刻意做出的，但是反应动作和反应顺序通常是无法预测的。”这意味着所诱发的反应是无效的。

德尔加多有着深厚的神经科学知识和丰富的脑部刺激操作经验，他试图通过理性的论证来消减人们对精神控制的恐惧。“人们不太可能用电刺激的方式去指导动物进行预定的活动，例如开门或操纵某个物件。我们可以诱发动物的愉悦感或对其进行惩罚，从而间接地让动物去按操纵杆，但我们无法在动物没有欲望

的情况下控制动物的动作顺序。” [\[32\]](#)（尽管本彻纳恩在大鼠睡眠过程中刺激其大脑，让动物在醒后可以进入迷宫中特定位置的实验已经接近这个目的了。参见第4章。）

他认为，独裁政府用无线电或其他能量束侵入人民的大脑并压制他们的自由意志以达到控制他们的目的是没有科学依据的。

“一个残酷的独裁者站在一台巨大的无线电发射机旁，刺激一群绝望的奴隶的大脑，可能吗？这种奥威尔式的可能性也许可以给一本小说提供很好的素材，但幸运的是，这超出了大脑电刺激的理论和实践范围……我们不能用一种人格代替另一种人格，也不能把人变成一个行为正常的机器人。” [\[33\]](#)

这并不是说人们应该消除对利用脑电波科学发展神经武器的担忧。相反，历史表明，从石斧到冶铁、火药、原子物理学、卫星、基因工程……几乎所有科学发现都会被用于研制武器。那些把神经科学用于审讯，用于使战场上的敌方战斗人员丧失战斗能力，用脑机接口提高人脑的思维能力以及用于人工智能战争机器的发明已经获得了美国专利。 [\[34\]](#) 前额叶切除术曾被滥用。据说，在马萨诸塞州坎顿的乔治·罗滕贝格教育中心，一种经FDA批准用于治疗孤独症和其他行为障碍的儿童行为矫正电刺激器被用于折磨那些不守规矩的儿童。事件引发诉讼，人们呼吁FDA撤回对这种仪器的批文。 [\[35\]](#) 2002年，18岁的安德烈·麦科林斯被人用这种电刺激器电击的可怕视频被广为传播。 [\[36\]](#) 这名男子被绑住，遭受了几个小时的电击，当时他尖叫着恳求停止电击。结果，接下来的几天，他都处于精神紧张的状态。 [\[37\]](#)

1998年1月，法国国家生物伦理委员会年度公开会议在巴黎举行。巴黎巴斯德研究所主席、神经科学家让-皮埃尔·尚热在会议上说：“先进的脑成像技术使得个人隐私被侵犯的可能性越来越大。尽管所需的设备仍然是高度专业化的，但它将变得司空见惯且能远程操作。这将给侵犯人身自由、控制行为和洗脑等行为提供便利。这将不再是科幻小说里的情节……而是‘对社会构成严重威胁’。” [\[38\]](#) 1999年1月，欧洲议会通过了一项决议，呼吁全球禁止开发和部署任何可能操纵人类的武器。 [\[39\]](#) 2001年10月，国会议员丹尼斯·库西尼奇向美国众议院提出了一项名为“H. R. 2977”的议案，禁止“陆基、海基或天基系统使用辐射、电磁、精神控制、声波、激光，以及其他能量，针对个人或目标人群发动信息战、情绪操纵或精神控制”。这项议案将禁止、揭露和终止针对非自愿、无意识的公民进行电子-精神控制实验。 [\[40\]](#)

区别虚构与事实、轰动效应与科学

这个主题之所以让我着迷并促使我写这本书，是因为脑电波研究是一门发展中的科学。大家在这个领域还没有形成共识。

“不要跟我谈论振荡。”我非常尊敬的一位同事（他因在神经回路的水平对脑功能进行研究而闻名于世）对我说。他拒绝接受我的想法。他认为振荡就是大脑产生的“噪声”。另一位同样著名的神经科学家，也是我的同事捷尔吉·布扎基在他的一本备受推崇的关于大脑神经振荡的学术著作《大脑的节律》的扉页上辩驳说：“神经振荡不是噪声，它实际上是我们认知能力的源泉。”

尽管神经科学家通过严谨的实验，煞费苦心地想要理解脑电波和一般的脑电活动，并且非常小心地不将假设与结论相混淆，但公众和媒体似乎陷入了疯狂。对他们来说，事实与幻想之间的区别远不及一个轰动的故事让他们关心。互联网上充斥着各种报道：神经科学家将人脑连接到计算机并将人的思想上传到互联网；人类再也不需要键盘了，我们能靠意念控制电子设备或操纵机械臂；思想和机器的融合（他们经常用瓦肯人的思维融合术进行类比）……媒体大胆地宣告：“这不再是科幻小说了。”但是，耸人听闻的宣传背后并没有科学理论的支持。

除非你患有可以通过脑深部电刺激进行治疗的疾病，或者需要安装假肢，否则谁想在颅骨上钻个洞并把电脑芯片植入大脑呢？很难想象一顶镶有脑电图电极的泳帽会成为下一波时尚。但是就算在公共场合佩戴这种怪异的装置不会招来警察，经过大脑皮质内数万亿个神经回路压缩后的思想又有多少能被萦绕在头皮上的微弱电场反映出来呢？即使梦想能够实现，有先进的技术设备可以一次记录大脑中成千上万条神经回路，但人类目前在神经回路水平上对认知的理解还非常粗浅，做不到通过脑电波解释和传播思想。

读了大众媒体的报道，你会以为自己身处未来世界。这是我在写这本书时遇到的一些例子：

这有可能给残疾人的假肢带来革命性变化，但也可能促使人们放弃自己的生物手臂，而选择安装一个超级机械臂。谁知道呢！

（真的吗？有多少人愿意为了装一个通用电气公司生产的机械臂而砍掉自己的一条胳膊呢？请举手。）

在短短32年内，人类将不再对彼此说话，而将用世界范围的意识进行交流——只用我们的大脑。

（真的吗？为什么不是30年或者31年？）

还是来自同一篇文章：

这项技术将使人们能够在地球上的任何一个角落使用脑对脑通信……直接看透罪犯和受害者的思想，从而有助于打击犯罪。

然后是埃隆·马斯克和马克·扎克伯格在公开场合大胆地宣称他们将把思想和机器进行融合的计划，同时却对细节保持沉默，直到2019年7月举行了一次宣传活动：

埃隆·马斯克宣布了他的计划，即通过一条“神经带”把电脑集成到人体中，使人与机器融合——在皮质和边缘系统中增加一层能够与计算机通信的层次（本质上是创造生物机器人），这将使人脑能力得到提升。

它（神经带）既可以发送信息，也可以在大脑中创建信息。高带宽接口可以让你把信息以无线方式传输到云端、计算机甚至直接传输到另一个人的大脑（装有同样的脑机接口）中。你也可以通过下载内容来增强你的意识：想想《黑

客帝国》中的尼奥怎么学习中国功夫的。如果大脑和电脑都说相同的语言，那么电脑就可以将信息传递给大脑。[\[41\]](#)

来自另一篇文章：

由于计算机和大脑本质上会说同一种语言，因此人类的情感可以被电极读取为数据。

（我想知道是哪种计算机语言？可能是Windows 10。Fortran、BASIC和C语言与大多数人的兼容性可能较差，除了那些真正的书呆子。）

你给朋友发短信时不再需要手机键盘了。

（是可以不需要拼写检查，但是如果你想保持与朋友的友谊，肯定会需要思想检查。）

试想一下，某人使用遥测技术进入一个智能住宅，通过思考就可以操作所有设备。

（现在，弥达斯国王点石成金的寓言有了现代版。）

但是，科学家生活在未来，而科学让我们走向未来。当奥维尔·莱特和威尔伯·莱特在1903年12月17日用苍白的手指紧紧抓住一架由自行车零件、木头和纸做成的飞机进行了持续12秒的飞行，飞了120英尺时，他们可曾想过将来有一天，芝加哥奥黑尔

国际机场每隔30~40秒就有一架搭载数百人的、大小如办公楼的飞机起降，24小时不停歇？1950年，在飞机飞行时可以在手机上看电影的想法是荒唐的，当时的科学证明这是不可能的，因为电线会无可救药地纠缠在一起。

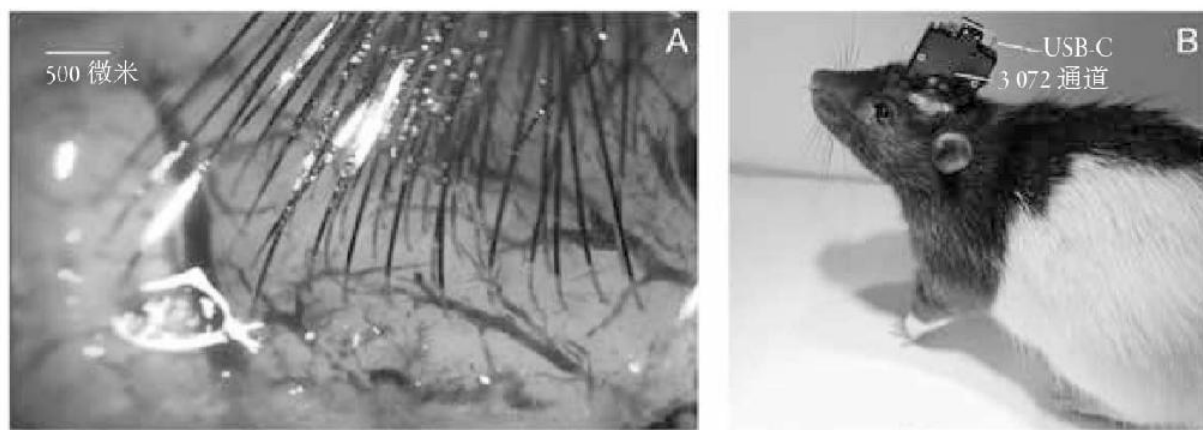


图43 埃隆·马斯克和Neural ink公司在Neural ink脑机接口实验中植入小鼠大脑皮质的是线状电极

毫无疑问，大家都是事后诸葛亮。人们将来回顾在脑电波方面的一些研究和技术时，会像我们现在看待过去那些用填充牙齿的金属材料制成的人造大脑去取代实验动物的大脑，或用电力“创造”出微小的螨虫生命，或者让尸体“复活”的科学家一样。尽管要走一些弯路，但这是人类长久以来一直追寻的“何以为人”的问题的一部分。人脑是一台机器，是一台生物机器。了解它如何运转，了解如何控制它，将为人们的健康带来福音，并实现哲学家、学者、宗教领袖和科学家的雄心壮志。但是，人类的思维可以被简化为一台机器吗？如果我们成功地揭开遮盖在它上面的这层神秘面纱（正是这驱动汉斯·伯格在耶拿用精神病患者做实验），我们是否会从此失去人性？

我问了托马斯·里尔登，他领导着位于曼哈顿的初创公司 CTRL-Labs，致力于脑机接口技术的研究，目标是将机器直接与人脑连接。[\[42\]](#) 鉴于他的特殊背景，我认为他的观点将很有见地。里尔登上高中时就已经在攻读麻省理工学院的高等数学课程。毕业后，他创办了一家软件公司，并因此结识了比尔·盖茨。盖茨聘请了他，作为回报，里尔登发明了IE浏览器。这是一款非常成功的互联网浏览器，在20世纪90年代和21世纪统治了整个浏览器市场。遇到著名的物理学家弗里曼·戴森时，里尔登离开了公司，开始考虑读大学。戴森建议里尔登打开视野。当然，这位软件工程师做到了。他主修古典文学专业，并于2008年以优异的成绩从哥伦比亚大学毕业。从对艺术和文学的研究转向追求理解人的本质，这是探索智慧的核心。里尔登决定从科学的角度去了解人脑的工作原理。他于2010年获得杜克大学神经生物学硕士学位，然后于2016年获得哥伦比亚大学神经科学与行为学博士学位，师从著名神经科学家托马斯·杰塞尔和阿蒂拉·洛松齐。在访问里尔登公司位于曼哈顿的新总部时，我问他的工作是否削弱了他对人类思维和人性的欣赏。

“不，”他毫不犹豫地回答，“这反而让我更加欣赏人类。”

我认识的每一位科学家都是如此，他们为能够投身于研究这一自然的奇迹而感到很幸福。他们通过自己的工作及与世界各地的同行的合作，以期能对它有更多的了解——哪怕新知识总是让我们发现有更多我们不知道的东西。

科学就像一个拼图游戏。无论拼出来的图案看起来多么迷人，你都无法确信自己的作品是完整的。目前让我们对大脑的了解有了突破的是电——这一神秘而惊人的自然力量。你是否认为自然界已经没有更多的秘密了？还有哪些超出我们想象的自然力和机制，在将来会改变我们对大脑的理解呢？

“您认为我们是不是缺少某些大脑工作原理的基本知识呢？”在特拉维夫举行的关于大脑可塑性的科学会议上，我问晚餐嘉宾——神经科学家和脑震荡专家捷尔吉·布扎基，“我们能够了解人的大脑吗？”

他说：“我这辈子是做不到了。”

四万年前，在西班牙坎塔布里亚海边一个坟墓般寂静的山洞里，忽明忽暗的火光划破了黑暗。有人将温暖的手掌放在湿冷的岩壁上，她对血肉之躯与岩石之间的差异惊叹不已。她用右手握住一根填满红色黏土的空心鹿腿骨，小心翼翼地将它对准自己的手。她深吸一口气，把嘴唇凑到骨头上一吹。从肺部呼出的气息使一团锈红色的颜料喷洒在她的手上和石头上。她缩回手，凝视着印在石壁上的四根发光的手指的轮廓。这是自然界中最独特的图案——人类的手。人们在世界各地都发现了同样的场景：在数万年的时间里，无论人类走到哪里，从印度尼西亚到欧洲，再到阿根廷的南端，都会在洞穴的岩壁上留下人类的手印。[\[43\]](#)

从使用石制工具和用骨头、黏土做材料的时代到青铜时代，再到希腊人将大理石凿磨成栩栩如生的男女雕像并有了人类历史

记录的时期，人类一直在试图理解并重新创造人类生活。今天，我们有电视和电影。这些技术能够以最生动的方式重现人类的形象和经历，但这还远远不够。拥有具备智能与意识的全息3D电视和类机器人是我们的梦想。

随着人类开始了解大脑这个使我们得以成为人类的器官，我们试图把它与计算机进行连接或使用电子技术进行模拟，创造出我们称之为“人工智能”的东西。所有这些努力都是希望能够控制和重建人类的思维。卡尔·奥古斯特·魏因霍尔德想要用一种金属合金再造一只实验动物的大脑；汉斯·伯格试图用头皮电极在物质世界中捕捉到人类精神的本质；现在，神经科学家在探索脑电波，想要用细胞或电路制造出人造大脑……他们都在为同一件事而努力：了解自石器时代以来就在人类脑海中燃烧的同一个谜团——人类的生命，人类如何形成，以及我们的生命如何在物质世界中出现，短暂存在后又归于尘土。

作家约瑟夫·康拉德把它归结为一句话：

人的思想无所不能——因为一切尽在其中，无论过去还是将来。

——约瑟夫·康拉德，《黑暗的心》，1899年

[1] Beggin, Riley. Students Zap Their Brains for a Boost, for Better Or Worse. NPR *All Things Considered*, January 7, 2017. <http://www.npr.org/sections/alltechconsidere>

d/2017/01/07/507133313/students zap-their-brains-for-a-boost-for-better-or -worse. Accessed October 17, 2019.

[2] Mind-Controlled Toys: The Next Generation of Christmas Presents? Press release from Warwick News and Events. December 16, 2016. https://warwick.ac.uk/newsandevents/pressreleases/mind-controlled_toys_the.

[3] Finding the Seeds Lying Beyond Our Imagined Futures. Nissan Motor Corporation. May 2017. https://www.nissan-global.com/EN/NRC/FRONTLINES/LUCIAN_GHEORGHE.

[4] <http://oldconceptcars.com>. Accessed October 4, 2019.

[5] Lucchesi, N. Nissan Reveals It Is Working on “Brain-to-Vehicle” Technology. Inverse, January 3, 2018. <https://www.inverse.com/article/39894-nissan-brain-to-vehicle-technology>.

[6] <https://ctrl-labs.com>. Accessed October 3, 2019.

[7] Oxley, T.; et al. (2008) Minimally Invasive Endovascular Stent-Electrode Array for High-Fidelity, Chronic Recordings of Cortical Neural Activity. *Nature Biotechnology* 34: 320 – 327.

[8] Croft, R. J.; et al. (2008) The Effect of Mobile Phone Electromagnetic Fields on the Alpha Rhythm of Human Electroencephalogram. *Bioelectromagnetics* 29: 1 – 10.

[9] Fields, R. D. Mind Control by Cell Phone. *Scientific American News*, May 7, 2008. <https://www.scientificamerican.com/article/mind-control-by-cell>.

[10] Zhang, J.; Sumich, A.; and Wang, G. Y. (2017) Acute Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field Emitted by Mobile Phone on Brain Function. *Bioelectromagnetics* 38 (5): 329 – 338.

[11] Baker, K. B.; and Phillips, M. D. (2008) Deep Brain Stimulation Safety: *MRI and Other Electromagnetic Interactions*.

Chapter 26 in Tarsy, D.; Vitek, J. L.; Starr, P. A.; and Okun, M. S.; eds. (2008) *Deep Brain Stimulation in Neurological and Psychiatric Disorders*. Totowa, NJ: Humana Press.

[12] Fields, R. D. (2004) Making Memories Stick. *Scientific American* 290: 54 - 61.

[13] Fields, R. D.; and Dudek, S. M. (2002) Somatic Action Potentials are Sufficient for Late-Phase LTP Related Cell Signaling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99: 3962 - 3967.

[14] Fields, R. D. (2009) *The Other Brain*. New York, NY: Simon and Schuster.

[15] Lee, H. S.; et al. (2014) Astrocytes Contribute to Gamma Oscillations and Recognition Memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111: E3343 - 3352.

[16] Fields, R. D. (2008) White Matter Matters. *Scientific American* 298: 42 - 49.

[17] Zatorre, R. J.; Fields, R. D.; and Johansen-Berg, H. (2012) Plasticity in Gray and White: Neuroimaging Changes in Brain Structure During Learning. *Nature Neuroscience* 15: 528 - 536.

[18] Dutta, D. J.; et al. (2018) Regulation of Myelin Structure and Conduction Velocity by Perinodal Astrocytes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115: 11832 - 11837; and Fields, R. D.; and Dutta, D. J. (2019) Treadmilling Model for Plasticity of the Myelin Sheath. *Trends in Neurosciences* 42: 443 - 447.

[19] Fields, R. D. (2006) Myelination: An Overlooked Mechanism of Synaptic Plasticity? *The Neuroscientist* 11: 528 - 531; and Fields, R. D. (2015) A New Mechanism of Nervous System Plasticity: Activity Dependent Myelination. *Nature Reviews Neuroscience* 16: 756 - 767.

[20] Pajevic, S.; Basser, P. J.; and Fields, R. D. (2015) Role of Myelin Plasticity in Oscillations and Synchrony of Neuronal Activity. *Neuroscience* 276: 135 – 147.

[21] ENIAC. Computer History Museum.
<https://www.computerhistory.org/revolution/birth-of-the-computer/4/78>. Accessed October 4, 2019.

[22] Egel, B.; Moleski, V.; and Stanton, S. (2019) Witness: Davis Police Officer was Ambushed by Bystander Who Then Targeted “Random People.” *Sacramento Bee*, January 11, 2019.

[23] Helsel, P. Gunman Who Killed California Officer Left Note Saying He Was Hit by “Sonic Waves.” *NBC U.S. News*, January 12, 2019. <https://www.nbcnews.com/news/us-news/gunman-who-killed-california-officer-left-note-saying-he-was-n958071>.

[24] Smith, C. On the Need for New Criteria of Diagnosis of Psychosis in the Light of Mind Invasive Technology. *Global Research*, October 18, 2007. <https://www.globalresearch.ca/on-the-need-for-new-criteria-of-diagnosis-of-psychosis-in-the-light-of-mind-invasive-technology/7123>.

[25] Ibid.

[26] Targeted Justice. <https://www.targetedjustice.com>. Accessed October 4, 2019.

[27] Smith, C. (2007) On the Need for New Criteria of Diagnosis of Psychosis in the Light of Mind Invasive Technology. *Global Research*, October 18, 2007. <https://www.globalresearch.ca/on-the-need-for-new-criteria-of-diagnosis-of-psychosis-in-the-light-of-mind-invasive-technology/7123>. Accessed October 8, 2019.

[28] Attacks on U.S. Diplomats in Cuba: Response and Oversight. Senate hearing. January 9, 2018. <https://www.foreign.senate.gov/hearings/watch?hearingid=6204DFB9-5056-A066-6016-5EF0A1820F88>.

[29] Fields, R. D. “Sonic Weapon Attacks” on U.S. Embassy Don’ t Add Up — for Anyone. *Scientific American News*, February 16, 2018. <https://www.scientificamerican.com/article/ldquo-sonic-weapon-attacks-rdquo-on-u-s-embassy-don-rsquo-t-add-up-mdash-for-anyone>.

[30] Attacks on U.S. Diplomats in Cuba: Response and Oversight. Senate hearing. January 9, 2018. <https://www.foreign.senate.gov/hearings/watch?hearingid=6204DFB9-5056-A066-6016-5EF0A1820F88>.

[31] Delgado, J. M. R. (1969) *Physical Control of the Mind: Toward a Psychocivilized Society*. New York, NY: Harper and Row, e-book location 1506 of 4043.

[32] Ibid., eBook location 1661 of 4043.

[33] Ibid., eBook location 3022 of 4043.

[34] Malech, R. G. Patent #3951134. Apparatus and Method for Remotely Monitoring and Altering Brainwaves. August 5, 1974. <https://patents.google.com/patent/US3951134A/en>.

[35] Pilkington, E. Human Rights Body Calls on US School to Ban Electric Shocks on Children. *The Guardian*, December 18, 2018. <https://www.theguardian.com/us-news/2018/dec/18/judge-rotenberg-center-electric-shocks-ban-inter-american-commission-human-rights>.

[36] Footage of Judge Rotenberg Center Torturing a Person with a Disability Aired in Court. YouTube, uploaded by Lydia X. Z. Brown, April 10, 2012. <https://www.youtube.com/watch?v=aAj9W0ntUMI&feature=youtu.be>.

[37] Miller, G. Judge Rotenberg Educational Center: Please Stop Painful Electric Shocks on Your Students. Petition to Speaker of the House Robert A. DeLeo and 11 others. <https://www.change.org/p/judge-rotenberg-educational-center-please-stop-painful-electric-shocks-on-your-students>. Accessed October 8, 2019.

[38] Changeux, J. P. (1998) Advances in Neuroscience May Threaten Human Rights. *Nature* 391: 316.

[39] Plenary sessions/Europarlament, 1999.
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-%2F%2FEP%2F%2FTEXT+REPORT+A4-1999-0005+0+DOC+XML+V0%2F%2FEN>.
Accessed October 8, 2019.

[40] Space Preservation Act, HR 2977. October 2, 2001.
<https://fas.org/sgp/congress/2001/hr2977.html>.

[41] Neuralink Launch Event. YouTube, uploaded by Neuralink, July 16, 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=r-vbh3t7WVI&feature=youtu.be&t=5405>.

[42] https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Reardon.

[43] Hughes, V. Were the First Artists Mostly Women? *National Geographic*, October 9, 2013.
<https://news.nationalgeographic.com/news/2013/10/131008-women-handprints-oldest-neolithic-cave-art>.

致谢

如果没有我出色的文学经纪人、纽约斯图尔特出版社社才华横溢的安德鲁·斯图尔特，就不会有《认识脑电波》这本书。感谢他对我的指导。是他帮助我构思这本书，并且敏锐地为这本书找到本贝拉书屋这个出版机构。在我写作和制作本书的整个过程中，斯图尔特始终给予我支持。感谢格伦·耶菲斯和本贝拉书屋所有人的辛勤工作，他们的努力使得书稿得以付印。特别感谢亚历克莎·史蒂文森和希拉·柯里·奥克斯作为我的编辑所做的一切；感谢伊丽莎白·德根哈德辛勤的排版；感谢本贝拉书屋主编利娅·威尔逊，她负责最后的编辑，并巧妙地管理着图书制作过程中所有的繁重任务；感谢杰西卡·里克担任产品编辑。您在书中看到的不是作者一个人的成果，而是一种创造性的协作。

感谢《户外》杂志和《科学美国人》杂志允许我为了这本书而对自己在这些杂志上发表的部分文章做出改动，但是我对这些出版物的感谢远远超过版权的许可。作为自由撰稿人，为这些杂志撰写科学文章给作为神经科学家的我带来了新的机会。科学写作是一种冒险，它不仅拓宽了我的经验，而且加深了我对科学的热爱。这种爱超出了我自己的科学研究领域。这本书的思想源于其中的一些文章，在此我要向编辑马里耶特·迪克里斯蒂那、加里·斯蒂克斯、约翰·伦尼、瑞奇·拉斯汀、克劳迪娅·华莱士、迈克尔·莱蒙尼克、迪安·维瑟、罗

宾·劳埃德、英格丽德·威克尔格伦、卡伦·施罗克、坦娅·刘易斯和《科学美国人》杂志为我提供这些机会的其他许多人表示感谢；感谢BrainFacts.org的尼古拉斯·施皮策以及《户外》杂志的玛丽·特纳、贾斯廷·尼贝里和他们的同事。

非常感谢每一位接受我采访的科学家。我不会在这里一一列举，但是这本书里的每一个引文都是他们赠予我的礼物。他们渴望分享自己的激情，并为探索 and 解释脑科学的过程做出贡献。我最感激杰西卡·厄尔和罗宾·伯恩哈德，她们为本书做出了巨大贡献。她们与我分享了她们在脑电波和神经反馈方面的工作。我也要衷心感谢她们的同事杰伊·冈克尔曼，他主管定量脑电图，让我有了分析自己脑电波的独特体验。杰西卡偶然发来的一封电子邮件使我了解了她与罗宾·伯恩哈德在基于脑电图的神经反馈中的工作。那是我写这本书必不可少的经历，我非常钦佩她们为帮助遭受苦难的人所做的努力。写本书的灵感来自我去耶拿的一次经历。我的同事、弗里德里希·席勒大学神经解剖学家克里斯托夫·雷迪斯教授是我此行的东道主。他和他的同事、医学史学家苏珊·齐默尔曼教授在我拜访期间与我分享了汉斯·伯格的笔记本和其他历史信息，这深深地吸引了我。感谢我的同事、米兰大学神经科学家达维德·莱卡博士梳理了关于费迪南多·卡扎马利的晦涩信息。所有这些信息都是用意大利语写的，而我不懂意大利语。

我很高兴将此书献给我的父亲理查德·L. 菲尔茨。当我学前班的朋友开始学习字母表时，身为电气工程师的父亲正在教我关于电子的知识。他用铅笔在纸上画草图，向我解释原子中被称为电子的微小粒子如何像嗡嗡作响的蜂群一样围绕着原子

核飞舞。我接受了他的解释，就像有人向我展示了一只新的蝴蝶一样。电磁学的抽象概念似乎是学龄前儿童无法掌握的，但是从一个天真的孩子的视角看向一个非常陌生的世界时，亚原子物理学与字母表一样抽象。当父亲教我电学知识，向我展示如何用冒烟的焊枪把电线熔在一起，在地面上甩出熔融金属的银色飞溅物时，母亲却在教我念ABC，这是同样奇怪但实用的抽象概念。随着时间的流逝，这些经历逐渐引导我走上科学家和作家的职业道路。

父亲教我和弟弟制作电磁体，让孩子的手指去控制那种神奇的自然力量。我们为房子的照明电路布线，制造电动机，制作晶体收音机取乐，拿他的对讲机玩——无线电波，这是电又一让人惊叹的方面。当我成为一名对神经系统感兴趣的生物学家时，父亲教给我的电学和电子学方面的专业知识继续让我受益。因此，把这本关于发现脑中的电活动和对脑电波的变革性新研究的书献给我父亲再合适不过了。

最后，衷心感谢我的妻子梅拉妮和我的孩子迪伦、摩根和凯利。他们鼓励并支持我写这本书。他们往往最先看到我所写的东西，我的一切都归功于他们。

延伸阅读

关于脑电波活动的研究历史：

*A History of
Neurophysiology in the 19th Century*

*Frankenstein's Children:
Electricity, Exhibition, and Experiment in Early-
Nineteenth-Century London.*

*Raising the Dead: The Men Who Created
Frankenstein.*

关于脑电波和脑部刺激的学术著作：

*Physical Control of the Mind:
Toward a Psychocivilized Society.*

Rhythms of the Brain.

*The New Science of Consciousness:
Exploring the Complexity of Brain, Mind, and Self.*

图片授权

Psychiatrie

Archives für

Electroencephalogram of Man.

Hans Berger on the

*The Annals of
Electricity Magnetism and Chemistry and Guardian of
Experimental Science*

*The Annals of
Electricity, Magnetism, and Chemistry and Guardian of
Experimental Science*

Scientific Data

Microsystems and Nanoengineering

PLoS ONE

PLoS Computational Biology

PLoS Computational Biology

The New Engl and Journal of Medicine

PLoS One

PLoS One

Frontiers in Neurology

Psychology

Frontiers in

图书在版编目 (CIP) 数据

认识脑电波 / (美) R. 道格拉斯·菲尔茨著 ; 阮南捷译. -- 北京 : 中信出版社, 2021. 1

书名原文: Electric Brain

ISBN 978-7-5217-2439-4

I . ①认… II . ①R… ②阮… III. ①脑神经—普及读物 IV. ①R322.85-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第222028号

Electric Brain

Copyright ©2020 by R. Douglas Fields

Published by agreement with The Stuart Agency, through The Grayhawk Agency Ltd.

Simplified Chinese translation copyright ©2021 by CITIC Press Corporation

ALL RIGHTS RESERVED

认识脑电波

著者: [美] R. 道格拉斯·菲尔茨

译者: 阮南捷

出版发行: 中信出版集团股份有限公司

（北京市朝阳区惠新东街甲4号富盛大厦2座 邮编100029）

字数：445千字

版次：2021年1月第1版

京权图字：01-2020-3394

书号：ISBN 978-7-5217-2439-4

版权所有·侵权必究