

随着神经工程与信号处理技术的发展，人脑与外部设备的直接连接正在从科幻走向现实。在神经活动与数字系统间建立通信通路的脑机接口(BCI)技术，不仅应用于医疗辅助与躯体功能重建，更引发了关于感知、意识及控制方式的全新探讨。

自1924年首次记录人类脑电波活动以来，人类对大脑的探索已走过百年历程。无论是脑电技术的探索，还是脑机接口的应用，技术跃进的背后都暗藏着对文化的思考和追问。作为科学与文化的碰撞，人脑的百年“进化”正在倒逼我们重新审视“大脑”和“思维”的作用。

2025年底，清华大学科学博物馆主办了“科博文化周”活动“界面中的我：脑机接口与意识的未来”，聚焦脑机接口技术在科学、艺术与认知领域的交叉探索。清华大学长聘教授高小榕作《脑电百年与脑机接口》报告，本报记者赵宇彤根据报告内容整理如下。

人脑的百年「进化」



科学与文化的交汇

脑机接口是人机交互的特殊形态，可以直接从大脑提取信号控制外部设备，替代、恢复、补充或改善大脑的功能。而脑电技术则是脑机接口最核心、最主流的信号采集与处理基础。

1924年，德国精神病学家汉斯·伯杰首次记录了人脑的能量活动，这种能量活动后来被命名为脑电波。那张脑电波记录图也成为人类历史上第一张脑电图。

实际上，汉斯·伯杰的研究动机源自一个看似“灵异”的事件。汉斯·伯杰是个富二代，非常聪明，大学时攻读当时“最牛”的专业天体物理学。德国的大学生需要军训，他在行军途中受伤，住院后意外接到家人的慰问电报。原来是他的妹妹出现“心灵感应”，晚上做梦时“感应”到哥哥受伤了。汉斯·伯杰联想到他13岁在巴西旅游时，曾被电鳗电到的经历，就琢磨是不是自己和妹妹的脑子里有跟电鳗一样的通信工具，能实现电信号的传输？于是，他转专业去学医学，研究脑电问题。

在一次对17岁少年的神经外科手术中，汉斯·伯杰终于捕捉到了脑电图的雏形。然而，记录的图片十分粗糙。他又在自己和儿子身上进行多次实验，才得到这张来之不易的脑电图。

1929年5月，关于脑电图的第一篇论文《人类脑电图的使用》出炉，发表于《精神病学档案》。这篇论文报道了1924年记录的脑电图波形，上方描记为脑电信号，下方为10Hz定时信

号，每次受试者闭眼时都会出现10Hz的信号，可以看出有很强的周期性 α (阿尔法)波成分。

正是基于这首张脑电图，1938年，美国神经学家赫伯特·贾斯珀在寄给汉斯·伯杰的圣诞贺卡中，畅想了从脑电波中解码出语言的可能性。这被认为是对脑机接口的早期科幻式的描绘。

其实，脑电技术的萌芽，乃至人类的发展都离不开科学与文化。这里的科学指的是生物层面的探索，文化则是社会层面的观察。而在19世纪20年代，有关科学与文化的争论正如火如荼地开展。

1922年，爱因斯坦与亨利·柏格森开启了一场“时间”之争。时间究竟是客观存在，还是人类的幻觉？爱因斯坦认为，只存在一种物理时间，且时间与空间相互关联、相互影响，它们共同构成宇宙的基本结构。而在柏格森看来，物理时间之外尚存在哲学时间，他在《创造进化论》《时间与自由意志》中多次举例，假设想要调制一杯糖水，不管再怎么着急也没用，必须等待砂糖在水中溶解，而不管是一杯水，还是一片大洋，糖块扩散的速度是相等的，这揭示了时间与空间的根本属性：时空是两种根本不同的存在形式，不能相互还原。

1923年，东方也上演了一场科学与文化的碰撞，即“科玄论战”。以梁启超为代表的玄学派和以胡适为代表的科学派，围绕“科学的边界是什么”的话题展开热烈讨论，促进了当时学者对科学与文化之关系的深入思考。

不难看出，科学和文化共同构成了人类发展的坚实基础，尽管二者基本遵

循两条不同的路径，但其中一定存在交汇点。恰好，脑电技术就是其中之一。

脑电百年的三件“大事”

尽管1924年汉斯·伯杰就已经首次记录了人类脑部的能量活动，但对当时大多数人而言，脑电波仍然是一个陌生的领域。

直到1934年，美国神经科学家赫伯特·H·费希尔和亚伯拉罕·洛温巴克首次在癫痫患者脑电图中发现特征性棘波，这是脑电图研究的第一件大事。1935年，美国科学家弗雷德里克·A·吉布斯、霍德韦尔·戴维斯和威廉·G·伦诺克斯描述了3Hz棘慢复合波，成为癫痫诊断的金标准，开创了临床脑电图新领域。

1955年，中国也开始了对脑电技术的探索。1955年，我国癫痫和脑电图学的创始人、北京协和医院的冯应琨教授建立了全国首个临床脑电图实验室，1957年举办了全国首届脑电培训班，后来他又编写了《脑电图学》和《脑电图图谱》等图书资料，并在全国推广。

在脑电技术的发展脉络上，尽管东西方都开始了摸索，但始终没有统一的规范。

直到1958年，国际临床神经营养学联合会制定了国际10-20电极系统，这是一种国际公认的方法，共包含21个电极，用于在脑电图检查或脑电研究中描述和应用头皮电极的位置。相当于在大脑中划出经纬线，对不同脑区进行规范化区分。

又经过30多年的发展，科学家发现了 α 脑电波。这是大脑产生的四种基础脑电波之一，通常在清醒闭目、身体放松且大脑活跃时出现。

1988年，科学家第一次使用 α 脑电波控制机器人。机器人会根据受试者的 α 脑电波活动，沿着一条直线行走或停止。受试者放松、闭上眼睛时， α 脑电波活动增加，机器人就会行走；而睁开眼

睛后，机器人就会停止。

纵观脑电技术的百年历程，癫痫诊断、睡眠研究、机器人控制是三件绕不开的“大事”，而最后一件“大事”，也就是我们今天所说的脑机接口。

脑机接口：从科幻到现实

脑机接口的发展离不开“三驾马车”：脑信息采集、计算机科学及信号分析技术、神经科学等学科的相互影响。

当历史的车轮来到1973年，美国计算机科学家雅克·维达尔正式提出了脑机接口的概念与设想。

1988年，美国科学家劳伦斯·法韦尔和伊曼纽尔·唐钦首次使用脑电ERP(事件相关电位)中的P300成分，通过行列闪烁编码范式设计了第一套P300 speller系统，产生了P300-BCI范式。

1991年，美国科学家乔纳森·沃尔帕训练用户自我调节mu节律(脑电图中一种典型的正常变异波形)的幅值，通过mu节律幅值的变化实现光标的一维控制；1993年，奥地利科学家格特·普弗策勒等人构建了基于感觉运动节律的事件相关同步(ERD)电位、事件相关同步化(ERS)电位的脑机接口系统，在运动任务和运动想象中发挥重要作用。

近年来，基于稳态视觉诱发电位的脑机接口，由于其高信息传输率、零训练和低脑机接口盲率，可以帮助包括渐冻症患者在内的人群实现便捷打字，受到了越来越多的关注。

事实上，这项探索在1999年就开始了。当时，德国图宾根大学的神经学家尼尔斯·比尔鲍默等利用慢皮层电位幅度变化控制光标一维运动。这是第一次在病人身上做脑机接口实验，花了1天多时间，病人打出了1条完整的信息。

同年，清华大学团队开发了四目标SSVEP(稳态视觉诱发电位)脑机接口，并将其用于控制光标移动。为什么我们能这么早取得这一成果？实际上，1995年，我们曾接过一个项目，航天员在太空中完成任务之前，都需要进行太空环境适应训练。训练时使用最多的机器是离心机，由于其具有高强度的重力加速度，受训人在训练时通常来不及喊停就会陷入眩晕。我们的工作就是在离心机实验环境中，检测受训人的大脑意识状态，通过脑机接口系统判断受训人是否清醒。这也是中国第一个脑机接口实验室。

目前，脑机接口形式分为侵入式、半侵入式和非侵入式3种，其中非侵入式研究占比超80%，但侵入式研究采集的神经元信号最强。脑电信号采集设备从20世纪三四十年代的真空管放大器，逐步发展为便携、可穿戴、无线通信的隐秘穿戴设备。

从功能上看，主要是康复和替代两类。现在大家对这两种类型有些混淆，比如利用机械臂完成喝水动作，其实是替代功能，而只用自己的肌肉来做这一动作，才是康复。目前，脑机接口可实现打字(T)、写字(W)和说话(S)三大类人机交互(TWS)，侵入式和半侵入式脑机接口均能实现TWS三项功能。

现在，出现了更多脑机接口的应用尝试。比如，“北脑一号”柔性高通量半侵入式无线全植入脑机接口，128通道同时实现信息采集。2023年5月，《自然》

发布的一项最新研究指出，一种“脑-脊髓接口BSI”技术——由一个植入的记录和刺激系统组成，能连接大脑和参与行走的脊髓区域。

为了促进国内外脑机接口的学术交流，自1999年首届国际脑机接口会议举办以来，我们连续参加了第二、三届会议，并作学术报告。此外，2010年起，我们团队承办了3届中国脑机接口比赛，主办了9届世界机器人大赛-BCI脑机接口大赛。

展望下一个百年

尽管脑电技术和脑机接口已取得显著成果，但神经振荡究竟是大脑中的副产物，还是核心运行机制？围绕脑电的起源机制，科学家们仍未形成共识。

在第一个百年间，我们已经利用脑电图实现癫痫、睡眠、脑机接口的研究，我认为面向下一个百年，泛在脑状态、逆图灵测试、梦境解读应当成为研究的重点。

首先，泛在脑状态是什么意思？过去没有脑电技术时，人们只能判断睡眠和清醒两种脑状态，其他状态无法通过观察得知。而有了脑电技术后，不仅睡眠可细分为几个具体阶段，白天的困乏、疲劳、情绪等状态也能被识别。因为除了清醒和睡眠状态，我们的大脑还存在多种状态，如疲劳、高兴、愤怒等，通过脑电图或脑机接口技术，我们可以解读这些信息。

目前已能区分约8个核心脑状态。未来百年，脑状态的识别数量有望提升至64个甚至更多。到时候，机器能比人自身更早感知细微状态的变化。比如人尚未反应过来是否喜欢一张照片，机器已能精准判断。这一技术的实际应用价值很高，例如在自动驾驶中，一旦车辆无法控制，误将控制权交给了处于睡眠状态的驾驶员，泛在脑状态技术就能解决这类问题。

其次是逆图灵测试。AI(人工智能)的发展分为上下半场：上半场以图灵测试为目标，传统的图灵测试是让人类判断与之交流的是机器还是人，如果人类无法区分，那么机器就通过了图灵测试，如今这一目标已实现；下半场就要以逆图灵测试为核心，需要让机器能区分信息是人类还是AI产生的。因为现在主要信息由人类产生，未来可能以AI产生的信息为主，机器智能必须能够区分人类和其他机器，否则社会秩序可能会受到干扰，像假钞过多导致社会混乱一样出现社会问题。

最后，梦境解读也是脑机接口技术的一个重要应用。目前，绝大多数人只能记住最后一个梦，而无法记住整晚的梦境。而通过脑机接口技术，我们未来能够解读梦境，甚至读取记忆，这不仅可以用以记忆恢复，还可以用于测谎等领域。

事实上，脑电技术和脑机接口的发展也对我们的教育提出了新的挑战。传统“德智体美劳”的教育目标中，原来我们认为“智”最后才能解决，但现在借助AI技术、脑机接口技术有了很大发展。同时，“美育”的重要性更加突出，脑电技术本身就是技术和文化的碰撞，怎样在技术进步的同时，让更多人了解美、认知美，是我们未来关注的重点。

清华大学长聘教授。中国神经工程及脑机接口学科的主要创建者，从1998年起在中国率先开展脑机接口研究，提出并实现了基于稳态诱发电位的脑机接口技术。其开发的视觉脑机接口系统在2015年达到267比特/分钟的世界最高通信速率；2019年协助渐冻症患者通过该系统实现意念控制机器打字；2025年提出该领域正进入核心硬件优化与智能解码算法深度融合的双轮驱动新阶段；同年12月，其团队通过高精度脑电设备捕捉观众神经活动进行神经美学实验，探索将神经美学原理拓展至情绪障碍康复、美育教育和老年认知干预等领域。

大脑“直连”世界后，我们还需要身体吗？

本报记者 赵宇彤

很平常，像是手机上的一个页面。

这种语言表述的区分和差异在现实生活中也有所展现。“比如，我去饭店点菜，可以看着菜单自主选择不同的餐品，这是一个界面的、平面的概念，这时候我是自由的。”胡翌霖表示，但如果没

有菜单作为媒介，走进饭店时大脑自动和厨师连接，尽管脑对脑的沟通更加直接，却有可能让人丧失主动性。

“因此，脑机接口的发展虽然是大势所趋，但还是要保留一些间接性，过于直接会破坏我们的自主性。”胡翌霖说，而可视化的界面呈现就是保留间接性的一种方式。

对此，清华大学神经工程实验室博士生郑晖回应，目前实现脑与脑的直接传输并不现实。他结合自身科研和创业经历表示，借助现有脑机接口技术，可以监测一个人处于深睡、浅睡还是做梦状态，而人可以在睡梦中学习。

然而，这也带来了新的伦理风险。“就像现在的广告植入、开屏广告都还处于自主控制范围内，消费者可以自主选择关闭或退出。”胡翌霖说，而某种意义上脑机接口没有提供自主选择权，会在潜移默化中影响人的言语和行为。

“市场上有一些宣扬脑机接口无所不能的广告，这种过度宣传显然存在问题。”北京大学医学人文学院医学伦理与法律系副主任陈海丹表示，由于消费者对脑机接口的了解并不全面，极易被虚假信息误导，“当然这也是许多前沿科技发展过程中普遍存在的现象”。

而在清华大学心理与认知科学系长聘副教授张丹看来，由于无法精准预测未来技术发展情况，伦理规则的制定往往是滞后的。“当行业发展到一定规模时，需要成立一些联盟、协会或者组织，公开向社会公众介绍该技术的发展

和应用场景，尽可能避免信息不对等带来的矛盾和问题。”

身体何去何从？

当前，脑机接口技术的发展仍然离不开身体的参与，尚未实现真正意义上大脑与机器的直接相连。

“如果未来真能实现大脑和机器的无缝对接，不再需要身体介入，会不会出现一种可能：身体反而成了累赘和干扰，影响脑信号与机器的顺畅沟通？”胡翌霖表示，这也与美学认知的变化相关，尽管现在推崇健美的身形，但随着脑机接口技术的发展，未来是否会更加青睐赛博格形态，用机器、义肢替代原有身体。“在脑机接口技术中，身体发挥了怎样的作用？未来是否存在绕过身体，或是对身体进行重新改造的趋势？”

张丹表示，这涉及一个核心概念——智能科学里常提的“具身认知”或“具身智能”。“人类的很多认知必须通过身体与物理世界的交互才能完整形成，不是大脑单独能完成的。”张丹团队通过身体测量研究发现，身体信号对情绪反应至关重要。

而大脑在情绪反应时扮演了什么角色？有理论认为，大脑接收来自身体的各种输入，然后整合建构出明确信号，再传递到意识层面。

“而如果大脑脱离了身体，它是否还是我们现在认知中的‘大脑’？”在张丹看来，如果大脑不发生革命性的重大变化，身体和大脑就一定无法分离，尽管能把两个大脑直接对接，但双方可能都是零散思绪，根本没法准确理解彼此。“正是通过身体器官的动作，比如说话和手势，才能把模糊的概率性想法，转化为明确的、可传递的信号。”

他进一步表示，未来随着大脑和人

工智能、外部机器共同进化，也许会形成全新的生命体。那时或许会出现脱离现有身体形态的存在，但已经是完全不同的生命形式了。

对此，思维画布创始人萧岭表示赞同：“身体对情感和感受的认知、处理能力，有时甚至比大脑更敏锐，我们会感冒、疲惫，本质上都是身体在传递信号，这是大脑难以替代的。”

“人的意识本质上是双向的，既有输入也有输出，因此脑机接口的发展不能只停留在‘读取工具’的定位上，更该往‘表达工具’的方向探索，这会是极具价值的突破。”胡翌霖认为，而在此过程中，要格外重视脑机接口技术应用的边界，避免加剧社会不平等问题。

“无论技术以何种方式推进，此刻，身体还是我们最重要的伙伴，它是我们与世界互动的主要媒介。即便脑电活动与意识状态不断被重新定义，我们与自然的实时接触仍需回到身体这个界面。”清华大学科学博物馆馆员、活动总策划王涵玥说：“策划本次活动是希望参与者在面向未来的技术图景之外，能回到此时此刻，用不可替代的身体感知与生活。”