

编者按

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, BRAIN-COMPUTER INTERFACE)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。清华大学特聘教授高小榕作《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。

脑机接口的艺术迁移与感知实验现场。

高小榕

学博物馆

高小榕作《脑电百年与脑机接口》报告。

脑机接口的艺术迁移与感知实验现场。

人类历史上首个脑电波记录图。

受访者供图

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,上方标记为脑电信号,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·伯格森开启了一场“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。而在伯格森看来,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异质性: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”的话题开展热烈讨论,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·洛温巴克首次发现,在睡眠中播放英语单词,记忆的效果会更好,但由于睡眠状态下没有主观判断能力,因此这也存在伦理的争议。但无论如何,睡眠研究是脑电图应用的第二件大事。

彼时,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图培训班,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,国际临床神经生理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的区分。

又经过 30 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

大脑“直连”世界后,我们还需要身体吗?

■本报记者 赵宇彤

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系主任陈海丹表示,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

整夜会经历 4~6 个睡眠周期。但不同人群的睡眠情况不一样。

事实上,做梦的时候思维能力是白天的 1.5 倍。尽管从理论上讲,梦境是可以被诱导的,在睡梦中播放英语单词,记忆的效果会更好,但由于睡眠状态下没有主观判断能力,因此这也存在伦理的争议。但无论如何,睡眠研究是脑电图应用的第二件大事。

事实上,做梦的时候思维能力是白天的 1.5 倍。尽管从理论上讲,梦境是可以被诱导的,在睡梦中播放英语单词,记忆的效果会更好,但由于睡眠状态下没有主观判断能力,因此这也存在伦理的争议。但无论如何,睡眠研究是脑电图应用的第二件大事。

事实上,做梦的时候思维能力是白天的 1.5 倍。尽管从理论上讲,梦境是可以被诱导的,在睡梦中播放英语单词,记忆的效果会更好,但由于睡眠状态下没有主观判断能力,因此这也存在伦理的争议。但无论如何,睡眠研究是脑电图应用的第二件大事。

事实上,做梦的时候思维能力是白天的 1.5 倍。尽管从理论上讲,梦境是可以被诱导的,在睡梦中播放英语单词,记忆的效果会更好,但由于睡眠状态下没有主观判断能力,因此这也存在伦理的争议。但无论如何,睡眠研究是脑电图应用的第二件大事。

事实上,做梦的时候思维能力是白天的 1.5 倍。尽管从理论上讲,梦境是可以被诱导的,在睡梦中播放英语单词,记忆的效果会更好,但由于睡眠状态下没有主观判断能力,因此这也存在伦理的争议。但无论如何,睡眠研究是脑电图应用的第二件大事。

事实上,做梦的时候思维能力是白天的 1.5 倍。尽管从理论上讲,梦境是可以被诱导的,在睡梦中播放英语单词,记忆的效果会更好,但由于睡眠状态下没有主观判断能力,因此这也存在伦理的争议。但无论如何,睡眠研究是脑电图应用的第二件大事。

大脑“直连”世界后,我们还需要身体吗?

■本报记者 赵宇彤

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系主任陈海丹表示,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

事实上,做梦的时候思维能力是白天的 1.5 倍。尽管从理论上讲,梦境是可以被诱导的,在睡梦中播放英语单词,记忆的效果会更好,但由于睡眠状态下没有主观判断能力,因此这也存在伦理的争议。但无论如何,睡眠研究是脑电图应用的第二件大事。

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、计算机科学与信号分析技术、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·唐坎首次使用脑电 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 μ 节律(脑电图中一种典型的正常变异波形)的幅值,通过 μ 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去同步(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者尼尔·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,航天员在上天完成任务之前,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。

目前,脑机接口形式分为侵入式、半侵入式和 non-invasive 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

清华大学特聘教授。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?

高小榕

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

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 脑控机器人大赛。

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,这不仅可以用于记忆恢复,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。

近日,清华大学科学博物馆举办了一场激烈又精彩的圆桌讨论。谈论焦点正是一项颠覆性技术——脑机接口。

脑机接口技术的发展正以前所未有的力量重塑着人类对自身、意识乃至生命本质的认知。当大脑能够直接连接物理世界,人类该如何保持自我?是否还需要身体?身体又将扮演何种角色?

本次讨论是清华大学科学博物馆“界面中的我:脑机接口与意识的未来”系列活动之一,主题为“解码‘我’:脑机接口与意识的边界”。讨论中,多位专家学者齐聚一堂,探讨脑机接口技术发展中的意识、自我、伦理问题,及其在技术发展中的边界。

守护“自我性”

“在英文当中,‘界面’和‘接口’都是 interface,而中文表达却截然不同。”北京大学哲学系博士胡翌霖率先表示。

在他看来,“界面”代表二维的、可视化的平面,而“接口”的含义却并不相同,比如脑机接口和脑机界面。脑机接口会让人联想到头上插着管子,但后者听起来就