

# 探索思维的力量:脑机接口研究现状与展望

张丹, 李佳蔚

清华大学社会科学学院心理学系, 北京 100084

**摘要** 脑机接口通过解码人类思维活动过程中的脑神经活动信息, 构建人脑与外部世界的直接信息传输通路。近 20 年来, 脑机接口领域迎来了快速发展, 取得了一系列重要研究与应用成果。本文从信息交流与控制、功能康复与增强、状态识别与监测 3 个主要发展方向综述了脑机接口的研究现状, 并对脑机接口的发展所面临的机遇和挑战进行了展望。

**关键词** 脑机接口; 脑成像技术; 神经信号处理

在电影《黑客帝国》中, 人们在虚拟世界中通过思维进行媲美真实世界的直接交流; 在电影《复仇者联盟》中, 绯红女巫通过她的思维活动控制现实世界, 她所有的心想, 都能事成……用思维直接交流或操纵工具, 长久以来都是科幻作品青睐的话题。随着人类对大脑的了解日益深入, 这些科幻作品中的设想开始逐渐走向现实(图 1)。脑机接口(brain-computer interface, BCI)正是解读人类思维奥秘的重要研究工具。概括地说, 脑机接口不依赖脑的正常输出通路(即外周神经和肌肉组织), 构建脑与外部世界的直接信息传输通路<sup>[1-3]</sup>。首篇脑机接口的研究论文发表于 1973 年, 美国加州大学洛杉矶分校的 Vidal 等首次使用 brain-computer interface 一词来表述脑与外界的直接信息传输通路, 并提出了脑机接口的系统框架雏形<sup>[1,4]</sup>(图 2(a))。然而, 受限于信号处理理论与方法、生物信号采集放大硬件技术、计算机性能等因素, 脑机接口技术直到 20 世纪末才真正开始快速发展(图 3(a))。

脑机接口是一个年轻的交叉学科研究领域, 涉及神经科学、心理学、计算



(a) 科幻电影《黑客帝国》与《复仇者联盟》中脑机接口的应用 (b) 2014 年巴西世界杯上一位瘫痪少年通过脑机接口控制机械外骨骼完成开球仪式<sup>[5]</sup> (c) 一位高位截瘫患者通过脑机接口系统控制机械手臂完成喝水任务<sup>[6]</sup>

图 1 脑机接口: 科幻与现实

Fig. 1 Brain-computer interfaces: Science fiction and reality

机科学、生物医学工程、临床医学等多个学科。脑机接口系统通常主要包含 3 个模块: 1) 脑神经信号采集模块, 负责通过电、磁、光等各种物理学原理, 将脑神经活动采集并实时传输出来; 2) 脑神经信号分析处理模块, 综合运用各类信号处理方法与机器学习算法, 从神经信号中提取特定思维活动的关键特征, 并将人的不同思维活动状态实时识别出来; 3) 应用模块, 将所识别到的思维活动状态翻译为机器指令, 最终实现脑机接口应用(图 2(b))。

目前, 在脑机接口中用于采集神经

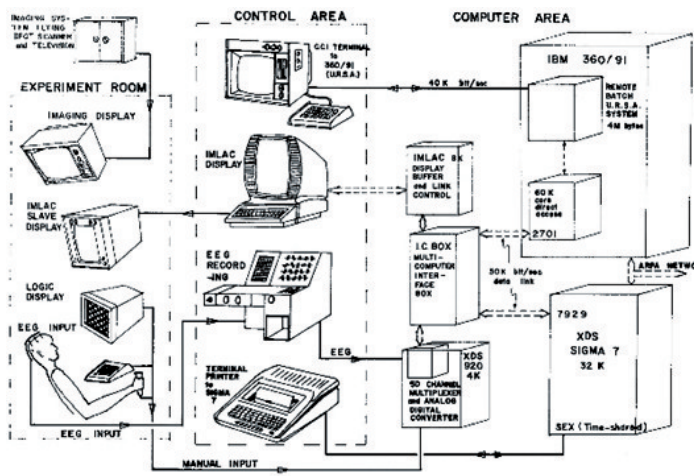
信号的技术统称为脑成像技术, 主要包括无创的脑电(electroencephalogram, EEG)、脑磁(magnetoencephalogram, MEG)、功能磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS), 以及有创的皮层脑电(electrocorticogram, ECoG)、神经元群体记录等。因为脑电设备便携、运行成本低、操作便捷、适用人群广, 在脑机接口中应用最为广泛(图 3(b))。本文以基于脑电的脑机接口为重点, 从信息交流与控制、功能恢复与增强、状态

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-03-27

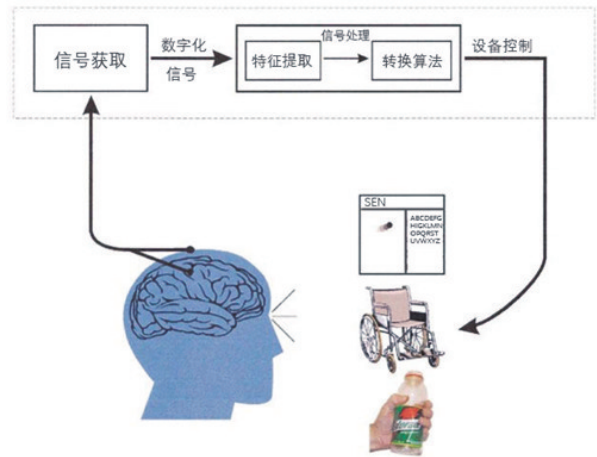
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1001200); 清华大学自主科研计划项目(2014z21043)

作者简介: 张丹, 特别研究员, 研究方向为脑机接口与工程心理学, 电子信箱: dzhang@tsinghua.edu.cn

引用格式: 张丹, 李佳蔚. 探索思维的力量: 脑机接口研究现状与展望[J]. 科技导报, 2017, 35(9): 62-67; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.09.008



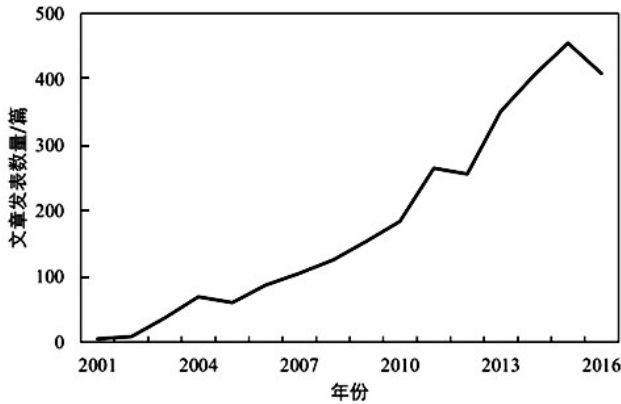
(a) 最早的BCI系统



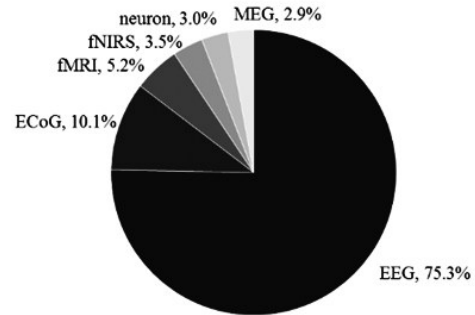
(b) 当代BCI系统

图2 脑机接口系统示意<sup>[1,4]</sup>

Fig. 2 Diagrams of the brain-computer interface systems



(a) 年度文献发表情况(来源:PubMed生物医学文献数据库,以“brain-computer interface”或“brain-machine interface”为关键词)



(b) 2010年以后发表的脑机接口文献中,运用不同脑成像技术所开展的研究文献比例(来源:PubMed)

图3 脑机接口研究现状

Fig. 3 State-of-the-art research of brain-computer interfaces

识别与监测3个方向介绍脑机接口的研究现状和前沿动态,并对其未来发展方向进行展望。

### 1 信息交流与控制

以著名物理学家霍金为代表的脊髓侧索硬化症患者,以及重症肌无力患者、因事故导致高位截瘫的患者等重度运动障碍患者群体,是脑机接口研究的重要应用对象。这些患者的共同特点是,他们有相对完整的思维能力,但丧失了对肌肉和外周神经系统的自主控制能力,因此无法有效地向外界表达自己的需求和想法。将自己脑中所想的信息通过某种辅助手段传达出来是这一患者群体最基本且最重要的需求。

然而,由于人类目前对大脑工作机制的了解还比较有限,直接提取脑的高级思维活动意图尚存在较大的困难,当前脑成像技术仅可识别大脑的部分简单思维活动状态。研究者因此构想了一个巧妙的替代解决思路:将脑成像技术手段可识别的有限简单思维活动状态与待表达的高级思维活动意图建立一一对应关系。当需要表达某特定意图时,让人执行与该意图对应的思维活动。这一间接的思维解读方法是脑机接口在信息交流与控制方向的主要实现方式。根据可用的简单思维活动状态特性,这一方向的脑机接口可分为以下2类(图4)。

第1类是基于自发脑活动(sponta-

neous brain activity)的脑机接口。人通过执行不同的肢体运动想象、音乐想象、心算等思维活动任务,以产生具有可区分度的神经响应。想象运动(motor imagery)脑机接口是其中的典型代表,可以实现2~8种不同肢体运动想象思维活动任务的区分,不同的肢体运动想象,引起相应肢体感觉运动皮层区域mu节律(8~13 Hz)脑电能量的下降。通过识别脑电mu节律能量下降最显著的脑区可以实现对具体运动想象肢体的判断。运动想象脑机接口最常见的应用是控制轮椅、电视、假肢等家用电器或辅助装置<sup>[10-11]</sup>。以控制轮椅为例,人可以通过执行左手、右手或脚的想象运动,实现轮椅左转、右转或前进的意

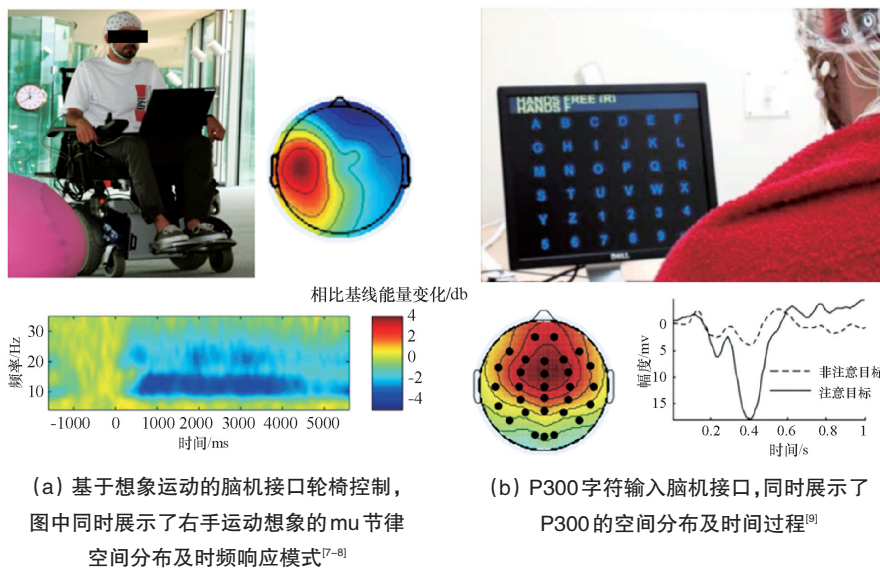


图4 信息交流与控制示例

Fig. 4 Examples of BCI applications for information communication and control

图(图4(a))。解读自发脑活动是最接近科幻作品的脑机接口形态,但由于自发脑活动的信噪比往往较低,这类脑机接口的信息传输速率相对较慢,识别一次运动想象通常需要数秒钟时间。

为了提高信息传输速率,研究者提出了第2类基于诱发脑活动(evoked brain activity)的脑机接口。这类脑机接口中,待表达的高级思维活动意图分别用不同的外部事件(如不同空间位置呈现的图形、不同频率的声音等)进行表示,人通过注意特定的外部事件序列以实现意图的表达。这些外部事件都将多次重复出现,通过叠加平均单次事件诱发的脑电响应,从而分别得到对应不同事件的大脑事件相关响应(event-related response)。根据注意与非注意的事件所对应的大脑事件相关响应的差别,即可实现脑机信息交流。以该类最经典的基于空间注意的P300字符输入脑机接口应用为例:不同的字符按不同的时序进行快速闪烁,人将注意力集中在希望选择的目标字符上;相比非注意目标字符,注意目标字符的闪烁这一事件得到大脑更加充分的信息加工处理,在脑电上体现为目标字符闪烁后300 ms左右在大脑顶区出现的脑电事件相关响应正峰P300(图4(b))。因此,识别该正峰P300并定位其发生时

刻所对应的闪烁字符,即可实现对人的注意目标的判断<sup>[9,12]</sup>,这正是P300脑机接口得名的原因。除了上述时序策略外,将不同字符用不同的频率进行闪烁是另一种常用的策略。类似地,被注意的目标字符也对应更强的事件相关响应,体现为脑电响应在相应字符的闪烁频率处的频谱幅度更大。通过在脑电频谱中识别最显著的响应频率并定位其对应的字符,即可判断人的注意目标<sup>[13]</sup>。与自发脑活动相比,引入外界事件诱发所得的事件相关响应往往具有更高的信噪比,从而可以实现更快的思维活动状态识别。运用前沿的信号处理算法,最新的诱发脑活动脑机接口研究展示了每1 s完成一次字符输入的应

用演示,对应5.32 bit/s的信息传输速率,已经接近实用水平<sup>[14]</sup>,这也是目前有报道的最快脑机接口。

## 2 功能康复与增强

思维活动状态的实时识别可应用于更丰富的临床情境,辅助患者进行脑功能的康复。其核心思想是通过构建脑机接口闭环神经反馈调节系统,让患者主动参与到自身的康复过程中来。以研究最多的中风康复为例,脑机接口系统连续监测患者用运动想象方式表达的患侧肢体运动意图,在识别到主观运动意图时启动相应的功能性肌肉电刺激器或机械式康复仪等设备进行患侧肢体的运动锻炼(图5(a))。基于脑机接口的康复治疗有别于传统依赖理疗师的、患者被动参与的治疗方案,被称为“主动式康复”,并正在得到临床医学领域越来越多的重视<sup>[15]</sup>。

这一主动式康复思路也正在应用于精神类疾病治疗的探索中<sup>[16]</sup>。运动想象脑机接口在针对自闭症儿童的康复训练中正在承担重要的角色:与正常儿童相比,自闭症儿童在观看他人运动情景时模仿动机弱,相应的感觉运动皮层激活程度较低;通过让这些儿童参与基于自身感觉运动皮层激活程度强弱实时反馈的游戏项目,可以提升他们对感觉运动皮层激活程度的自我控制能力,从而改善自闭症症状<sup>[17]</sup>(图5(b))。类似的脑机接口神经反馈训练范式也有望在多动症、抑郁症等治疗中发挥积极作用。

此外,脑机接口技术在感官重建方

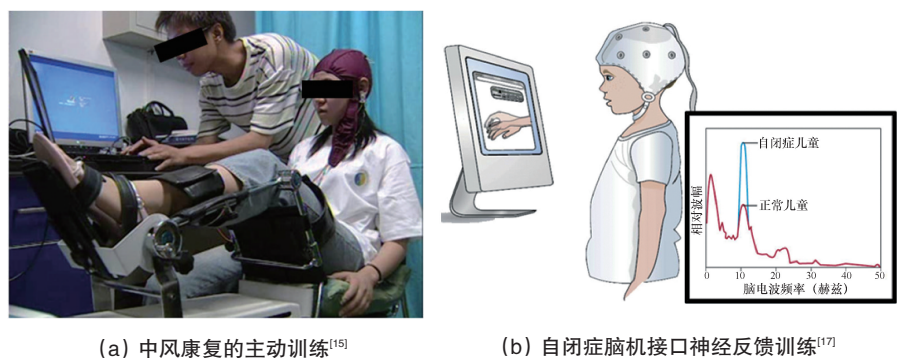


图5 功能康复与增强示例

Fig. 5 Examples of BCI applications for functional rehabilitation and enhancement

面也有望发挥重要作用。基于功能磁共振的研究发现,可以从视觉皮层的神经信号中一定程度上重建出人所感知到的视觉图像信息<sup>[118-119]</sup>,可用于构建帮助盲人恢复视力的视觉假体。基于颞区脑电的研究表明,在存在多个语音源时,可以通过颞区听觉皮层相关脑电活动进行人的听觉注意目标的实时判别<sup>[20]</sup>。这一技术有望与电子耳蜗相结合,实现更加智能的聋人听力辅助,增强电子耳蜗植入者的听力水平。

### 3 状态识别与监测

上述情境中的脑机接口(视听觉感官重建除外)大多依赖人主动发起特定的思维活动任务,被称为“主动式”脑机接口(active BCI)。虽然主动式脑机接口是最广泛研究和应用的脑机接口,与之相对的“被动式”脑机接口(passive BCI)在近 10 年来开始得到快速发展<sup>[21-22]</sup>。被动式脑机接口的发展得益于主动式脑机接口研究过程中所积累的一系列准确、可靠的实时思维活动状态识别算法。这些算法不仅可以用于识别人主动发起的特定思维活动,也可以用于识别和连续监测人的各项基础认知功能状态,如注意水平、认知负荷、疲劳程度、情绪状态等。

基础认知功能状态的识别有广泛的应用需求(图 6)。在工程心理学领域,机动车驾驶员、飞行员、航空空中交通管制员等特殊作业岗位人员的认知负荷、疲劳程度等状态对于作业绩效、工作安全都十分重要,脑机接口所提供的实时监测数据为工作管理提供了重要客观依据<sup>[25-27]</sup>,能够更好地保证人员安全和工作绩效。在教育领域,脑机接口可以对学生的注意水平进行实时评测,为教师教学安排提供参考<sup>[28]</sup>。在市场营销领域,脑机接口技术可用于评价观看广告、电影、电视等媒体内容的观众情绪体验<sup>[29]</sup>,以及更加广义人机交互情景下的用户体验。在游戏娱乐领域,脑机接口为游戏玩家提供了独立于传统游戏控制方式之外的新的操作维度,丰富了游戏内涵并提升了游戏体验<sup>[30]</sup>。



(a) 驾驶疲劳状态监测<sup>[23]</sup>



(b) 观影情绪体验状态识别<sup>[24]</sup>

图 6 状态识别与监测示例

Fig. 6 Examples of BCI applications for status recognition and monitoring.

### 4 前景展望:挑战与机遇

虽然目前主流的脑机接口研究主要运用无创的脑电技术开展,基于有创、侵入式的皮层脑电或神经元群体记录等技术也正在得到越来越多的关注。虽然侵入式记录目前依然面临手术感染、长时间使用的生物兼容性问题,但有创脑机接口有望获取更高的信号质量,解码更加丰富的神经活动信号,从而支持更高的识别速度或准确率<sup>[31-32]</sup>。有创脑机接口的这些特点提供了实现全新范式的可能性,如基于言语输出运动控制脑区的语音合成输出<sup>[33]</sup>、利用运动皮层神经元群体活动的多自由度机械手臂精细控制<sup>[5]</sup>等。有创脑机接口有望在不久的将来真正服务于重度运动障碍的患者群体,通过长期或永久植入的脑神经信号传感器解读他们的思维活动意图,帮助他们与外界进行有效交流。

无创脑机接口离形成稳定可靠的实用产品依然还有一定距离。以最接近实用阶段的脑电为例,可满足脑机接口应用需求的高性能科研级设备成本较高、体积较大,不利于大规模普及;脑电设备佩戴的操作较复杂,往往需要专业人员进行参与,佩戴的舒适性以及长时间记录的可靠性还有待提高。其他无创成像技术也有面临各自的局限:脑磁、功能磁共振设备过于庞大且昂贵,功能性近红外光谱技术的发展时间还相对较短等。为推进实用化进程,科研人员已经进行了多方面的努力:脑电等

各类无创成像技术都在或快或慢地走向便携化、可穿戴化,其各项操作也在逐步减少对专业人员的依赖<sup>[34-35]</sup>;脑机接口中的信号分析处理方法也正在走向更加智能化<sup>[36-37]</sup>。更前沿的,中国科学家已经开始探索脑机接口“意念控制”用于太空任务的可行性。此外,不同类型脑机接口系统之间的结合,以及脑机接口与眼动、肌电、加速度等其他生理或行为信号的深度融合<sup>[5,38]</sup>,有望帮助人们对人类思维活动状态进行更加全面、准确的解读。特别需要指出的是,脑机接口基于个体化的脑神经活动构建脑机信息传输通路,充分考虑了个体神经活动特点,有望向各行业提供更有效、有针对性的应用解决方案。

无论是何种脑机接口应用,其当前可实现的性能距离人们在科幻作品中的设想还有很长的路要走。除了上述传感技术上的局限外,更关键的挑战在于对大脑工作机制的了解还十分有限。神经科学领域学者对大脑工作机制的持续探索发现是脑机接口系统实现的核心基础,而神经工程领域基于这些探索发现所提出的大脑计算神经模型、神经编码与解码方法,则为脑机接口实践应用提供关键技术方法支撑。随着近年来世界各国纷纷启动“脑计划”,如欧盟的 Human Brain Project、美国的 BRAIN Initiative、日本 Brain/Minds Project 等<sup>[39-42]</sup>,有望未来在脑研究方面取得突破性进展,从而为脑机接口技术的进一步发展带来全新的机遇。特别地,中国脑计划的“脑科学与

类脑智能”这一重点发展方向强调脑研究与人工智能研究的结合,可能为脑机接口提供新的突破口<sup>[43]</sup>。

脑机接口技术不仅可以服务于上述3个以人为中心的应用方向,还可以应用到更广阔的脑机融合领域。脑机接口技术对人思维活动状态的实时准

确识别,一方面可以提供更多人类大脑活动特征以指导计算机更好的模仿人脑,另一方面可以让计算机更好的与人协同工作。正如钱学森在1992年3月给国家高技术研究发展计划(863计划)智能计算机主题(306主题)专家组负责人的信中讲道:“我只想说一点:我

不以为能造出没有人实时参与的智能计算机。所以奋斗目标不是中国智能计算机,而是人、机结合的智能计算机体系。”<sup>[44]</sup>随着学界对脑机接口研究的持续关注与投入,脑机接口技术将继续保持快速发展,并有望对人类社会带来全方位的积极影响。

### 参考文献(References)

- [1] Vidal J J. Toward Direct Brain-Computer Communication[J]. *Annual Review of Biophysics & Bioengineering*, 1973, 2(1): 157.
- [2] Lebedev M A, Nicolelis M A. Brain-machine interfaces: Past, present and future[J]. *Trends in Neurosciences*, 2006, 29(9): 536-546.
- [3] Gao S, Wang Y, Gao X, et al. Visual and Auditory Brain-Computer Interfaces[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2014, 61(5): 1436-47.
- [4] Wolpaw J R, Birbaumer N, Mcfarland D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2002, 113(6): 767-791.
- [5] Paraplegic man in mind-controlled robotic suit kicks off World Cup 2014[EB/OL]. (2014-06-13)[2017-03-01]. <http://neurogadget.net/2014/06/13/paraplegic-man-mind-controlled-robotic-suit-kicks-world-cup-2014-video/10434>.
- [6] Hochberg L R, Bacher D, Jarosiewicz B, et al. Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm[J]. *Nature*, 2012, 485(7398): 372-375.
- [7] Wang Y, Wang Y T, Jung T P. Translation of EEG spatial filters from resting to motor imagery using independent component analysis[J]. *Plos One*, 2012, 7(5): e37665.
- [8] Carlson T, Millan J D R. Brain-controlled wheelchairs: A robotic architecture[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2013, 20(1): 65-73.
- [9] Farwell L A, Donchin E. Talking off the top of your head: Toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials[J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1988, 70(6): 510-523.
- [10] Pfurtscheller G, Neuper C. Motor imagery and direct brain-computer communication[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2001, 89(7): 1123-1134.
- [11] Meng J, Zhang S, Bekyo A, et al. Noninvasive electroencephalogram based control of a robotic arm for reach and grasp tasks[J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 38565.
- [12] Jin J, Allison B Z, Sellers E W, et al. An adaptive P300-based control system[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2011, 8(3): 036006-036006.
- [13] Gao X, Xu D, Cheng M, et al. A BCI-based environmental controller for the motion-disabled[J]. *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2003, 11(2): 137-140.
- [14] Meng F, Tong K Y, Chan S T, et al. BCI-FES training system design and implementation for rehabilitation of stroke patients[C]//*IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. New York: IEEE, 2008: 4103-4106.
- [15] Van Dokkum L, Ward T, Laffont I, et al. Brain computer interfaces for neurorehabilitation—its current status as a rehabilitation strategy post-stroke[J]. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2015, 58(1): 3-8.
- [16] Birbaumer N, Murguialday A R, Weber C, et al. Chapter 8 neurofeedback and brain-computer interface: Clinical applications[J]. *International Review of Neurobiology*, 2009, 86(86): 107-117.
- [17] Ramachandran V S, Oberman L M. Broken mirrors: A theory of autism[J]. *Scientific American*, 2006, 295(5): 62-69.
- [18] Miyawaki Y, Uchida H, Yamashita O, et al. Visual image reconstruction from human brain activity using a combination of multiscale local image decoders[J]. *Neuron*, 2008, 60(5): 915-929.
- [19] Dadarlat M C, O'Doherty J E, Sabes P N. A Learning-based approach to artificial sensory feedback[J]. *Nature Neuroscience*, 2014, 18(1): 138-44.
- [20] Mirkovic B, Bleichner M G, Vos M D, et al. Target speaker detection with concealed EEG around the ear[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2016, 10(311): 349.
- [21] Zander T O, Kothe C. Towards passive brain-computer interfaces: Applying brain-computer interface technology to human-machine systems in general[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2011, 8(2): 025005.
- [22] Wolpaw J R, Wolpaw E W. *Brain-computer interfaces: Principles and practice*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2012: 3-12.
- [23] Gharagozlou F, Saraji G N, Mazloumi A, et al. Detecting driver mental fatigue based on EEG alpha power changes during simulated driving[J]. *Iranian Journal of Public Health*, 2015, 44(12): 1693-1700.
- [24] Hasson U, Landesman O, Knappmeyer B, et al. Neurocinematics: The neuroscience of film[J]. *Projections*, 2008, 2(1): 1-26.
- [25] Lal S K, Craig A. Driver fatigue: Electroencephalography and psychological assessment[J]. *Psychophysiology*, 2002, 39(3): 313-321.
- [26] Healey J, Picard R W. Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2005, 6(2): 156-166.
- [27] Hankins T C, Wilson G F. A comparison of heart rate, eye activity, EEG and subjective measures of pilot mental workload during flight[J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1998, 69(4): 360-367.
- [28] Assessing engagement in a classroom: Synchronized neural recordings during video presentation [EB/OL]. (2016-12-27)[2017-03-01]. <https://arxiv.org/abs/1604.03019>.

- [29] Khushaba R N, Wise C, Kodagoda S, et al. Consumer neuroscience: Assessing the brain response to marketing stimuli using electroencephalogram (EEG) and eye tracking[J]. *Expert Systems With Applications*, 2013, 40(9): 3803–3812.
- [30] Vourvopoulos A, Badia S B, Liarokapis F, et al. EEG correlates of video game experience and user profile in motor–imagery–based brain–computer interaction[J]. *The Visual Computer*, 2016, 33(4): 533–546.
- [31] Zhang D, Song H, Xu R, et al. Toward a minimally invasive brain–computer interface using a single subdural channel: A visual speller study[J]. *Neuroimage*, 2013, 71(5): 30–41.
- [32] High performance communication by people with paralysis using an intracortical brain–computer interface [EB/OL]. (2017–02–21)[2017–03–01]. <https://elifesciences.org/content/6/e18554>.
- [33] Guenther F H, Brumberg J S, Wright E J, et al. A wireless brain–machine interface for real–time speech synthesis.[J]. *Plos One*, 2009, 4(12): e8218.
- [34] Lin C T, Ko L W, Chang M H, et al. Review of wireless and wearable electroencephalogram systems and brain–computer interfaces—a mini–review[J]. *Gerontology*, 2009, 56(1): 112–119.
- [35] Wang F, Li G, Chen J, et al. Novel semi–dry electrodes for brain–computer interface applications[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2016, 13(4): 046021.
- [36] Lotte F, Congedo M, Lécuyer A, et al. A review of classification algorithms for EEG–based brain–computer interfaces.[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2007, 4(2): R1.
- [37] Wu W, Nagarajan S, Chen Z. Bayesian Machine Learning: EEG/MEG signal processing measurements[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(5): 172–172.
- [38] Li Y, Pan J, Wang F, et al. A Hybrid BCI System Combining P300 and SSVEP and Its Application to Wheelchair Control[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2013, 60(11): 3156–3166.
- [39] The human brain project[EB/OL]. [2017–03–24].[http://ec.europa.eu/research/participants/portal/doc/call/h2020/h2020–fetflag–2014/1595110–6pilots–hbp–publicreport\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/participants/portal/doc/call/h2020/h2020–fetflag–2014/1595110–6pilots–hbp–publicreport_en.pdf).
- [40] Insel T R, Landis S, Collins F S, et al. The NIH BRAIN Initiative[J]. *Science*, 2013, 340(6133): 687–688.
- [41] Okano H, Miyawaki A, Kasai K, et al. Brain/MINDS: brain–mapping project in Japan[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2015, 370(1668): 20140310–20140310.
- [42] Kandel E R, Markram H, Matthews P M, et al. Neuroscience thinks big (and collaboratively)[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2013, 14(9): 659–664.
- [43] Poo M, Du J, Ip N Y, et al. China Brain Project: Basic neuroscience, brain diseases, and brain–inspired computing[J]. *Neuron*, 2016, 92(3): 591–596.
- [44] 汪云九, 杨玉芬. 意识与大脑——多学科研究及其意义[M]. 北京: 人民出版社, 2003.
- Wang Yunjiu, Yang Yufen. *Consciousness and brain: Multidisciplinary studies and their meanings*[M]. Beijing: People’s Publishing House, 2003.

## Exploring the power of mind: Status and prospect of brain–computer interfaces

ZHANG Dan, LI Jiawei

Department of Psychology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Brain–computer interface establishes a direct communication pathway between the human brain and the external world by real–time decoding the brain activities accompanying our thinking process. In the past two decades, rapid progress has been made in this field, with a series of important research and application results. The article reviews the state–of–art research in three main directions, namely communication and control, function rehabilitation and enhancement, status recognition and monitoring. Finally, opportunities and challenges for future development are discussed.

**Keywords** brain–computer interface; neuroimaging technique; neural signal processing

(责任编辑 刘志远)