

基于 EEG 的脑机接口发展综述

姜 耿¹, 赵春临²

(1. 武警工程大学 研究生大队, 西安 710086; 2. 武警工程大学 装备保障与管理学院, 西安 710086)

摘要: 随着无线传输、机器学习、人工智能等技术的进步, 基于脑电图 (EEG) 的脑机接口 (BCI) 技术的研究相应增加, 作为一种变革性的通讯和控制技术, 脑机接口可以广泛地应用于康复医疗、游戏娱乐、军事应用、家居智能等领域, 具备千亿级别的应用市场; 综述了基于 EEG 的典型脑机接口范式, 包括 MI-BCI、P300-BCI、SSVEP-BCI 等范式的基本原理、研究现状和典型应用场景, 对各类范式的优缺点进行了评价, 提出了当前研究中面临的技术和伦理等方面的风险挑战, 并对其发展和应用前景作了展望。

关键词: 脑机接口 (BCI); 脑电图 (EEG); 运动想象 (MI); P300; 视觉稳态诱发电位 (SSVEP); 感觉运动节律 (SMR)

A Review of the Development of Brain-computer Interface Based on EEG

JIANG Geng¹, ZHAO Chunlin²

(1. Postgraduate Brigade, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China;

2. College of Equipment Management and Support, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

Abstract: With the progress of wireless transmission, machine learning technology and artificial intelligence, the research on brain-computer interface technology based on electroencephalogram (EEG) is increasing accordingly. As a revolutionary communication and control technology, brain-computer interface can be widely used in rehabilitation medicine, games and entertainment, military applications, home intelligence and other fields, with hundreds of billions of application market. This paper summarizes the basic principles, research status and typical applications of brain-computer interface paradigms based on EEG, including MI-BCI, P300-BCI, SSVEP-BCI, etc., evaluating the advantages and disadvantages of these paradigms. It also puts forward the main technical and ethical risks and challenges the current research faces, and looks forward to their development and application prospects.

Keywords: brain-computer interface (BCI); electroencephalogram (EEG); motor image (MI); P300; steady-state visual evoked potential (SSVEP); sensorimotor rhythm (SMR)

0 引言

近年来, 中、美、欧等国家和地区纷纷启动了脑科学计划^[1]。我国将“脑科学与类脑研究”列为“十四五”规划纲要重大项目, 美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 较早展开了脑机接口 (BCI, brain-computer interface) 在军事领域的应用研究, 特斯拉创始人埃隆·马斯克创立的 Neuralink 公司在脑机接口技术前沿领域广受关注。当前, 该技术已经在康复医疗、人工智能、机械控制、家居智能、游戏娱乐、军事应用等领域展开了广泛而深入的研究。但基于脑电图 (EEG, electroencephalogram) 技术的脑机接口技术相关综述文章鲜见发表, 已发文章大多是对信号处理方法的研究现状分析, 对其各类应用、发展和挑战则着墨较少。

1 脑机接口技术

1.1 脑电图 (EEG)

从大脑采集电信号的方法分为植入式、半植入式和非

植入式。脑电图 (EEG)^[2]是从人类或动物的头皮上记录到的电位变化, 是最常见的非侵入式大脑信号采集技术。侵入式技术和半侵入式技术具有显著的缺点: 手术存在风险和所记录信号将逐渐减弱甚至消失。非侵入性电信号采集方式包括脑电图 (EEG)、脑磁图 (MEG, magnetoencephalography)^[3]、近红外光谱 (NIRS, near-infrared spectroscopy)^[4]、正电子发射型断层显像 (PET, Positron Emission Tomography)^[5]、功能性核磁共振成像 (fMRI, functional magnetic resonance imaging)^[6-7]等方法^[8]。其中 EEG 信号的明显优势在于它可以达到毫秒级别的高时间分辨率, 可以较好的进行实时监测和在线传输, 且采集设备简单, 操作方便、安全, 便于临床使用, 因此 EEG 技术更受重视^[9-11]。

脑机接口使用的 EEG 信号主要有两种: 自发脑电 (Spontaneous EEG) 和诱发脑电 (Evoked EEG)。自发式的脑电信号是通过被试主动执行特定的大脑意识活动任务, 产生相应的特征电位。被试所执行的认知任务主要包括运

收稿日期: 2022-01-09; 修回日期: 2022-03-09。

作者简介: 姜 耿 (1992-), 男, 甘肃民勤人, 硕士研究生, 主要从事脑机接口方向的研究。

赵春临 (1974-), 男, 陕西西安人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生物医学信号检测与处理、脑机接口方向的研究。

引用格式: 姜 耿, 赵春临. 基于 EEG 的脑机接口发展综述[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 1-8.

动想象 (MI, moter imagery)、音乐想象 (music imagery)、心算 (mental arithmetic), 以及用于改变慢皮层电位 (SCP, slow cortical potential)^[12] 的意念控制任务等。诱发脑电是在给予特定刺激 (如声、光、电) 时诱发产生的脑电位变化, 包括听觉诱发 (AEP, auditory evoked potential)^[13]、视觉诱发 (VEP, visual evoked potential)^[14]、触觉诱发 (SEP, somatosensory evoked potential)^[15] 等。自发脑电具有背景噪声强、信号幅度微弱、非平稳性和随机性强、频域特征比较突出等特点^[16], 且受被试个体差异影响较大, 需要进行大量训练, 因此在 BCI 中的应用范围不及诱发脑电广泛。相较于自发脑电, 诱发脑电不需要经过特别训练就可以获得时间较为集中、特征更加明显的信号, 且正确率较高^[17]。

1.2 脑机接口的定义

1973 年, Jacques Vidal 首次使用 BCI 这一概念, 他使用该术语描述任何能够产生关于脑功能详细信息的基于计算机的系统^[18]。第一次 BCI 国际学术会议对 BCI 做出了比较权威的定义: 是一种不依赖于大脑外周神经与肌肉正常输出通道的通讯控制系统^[19~20]。它通过采集和分析人的脑电信号, 在人脑与计算机或其它电子设备之间建立起直接的交流和控制通道, 从而可以不需语言或肢体动作, 直接通过控制大脑电信号来实现对外通联或控制设备。人们通过大脑信号而不是肌肉来行动, 这种可能性吸引了全球各领域广泛的重视和研究, 而其潜在的价值和意义也在不断推动 BCI 研究这一新兴领域的发展。图 1 是近 21 年来关于 BCI 技术的科研文章数量趋势图, 可见其近年来呈快速增长态势。

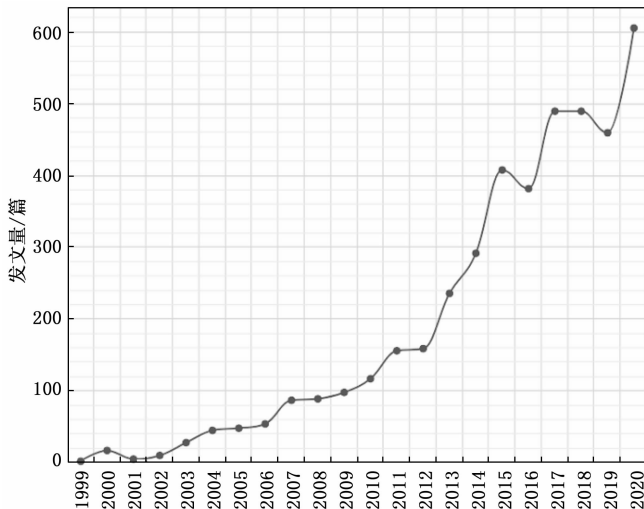


图 1 最近 21 年来关于 BCI 技术的发文数量趋势图

(数据来源于 CNKI 总库)

1.3 基于 EEG 的 BCI 系统组成

基于 EEG 的 BCI 系统组成包含信息采集、信息处理、信号控制和反馈 4 个部分, 其结构如图 2 所示。该系统工作流程为: 从头皮或大脑皮层采集反应大脑活动的 EEG 信

号, 经过预处理 (放大并数字化) 后, 提取 EEG 信号中反应用户意图的相关特征, 将其转换为可以控制外部应用设备的命令, 如光标控制、轮椅转动等。反馈环节可以将命令实施的具体结果反馈至用户, 可以有效增强交互效果^[21]。

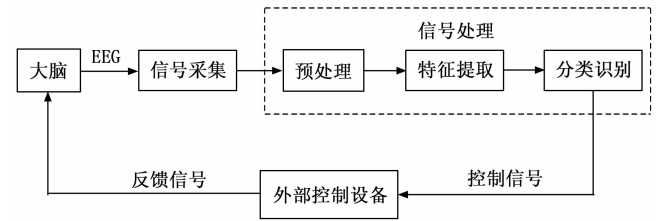


图 2 基于 EEG 的 BCI 系统结构框图

1) 信号采集: 信号采集模块负责采集和放大脑源信号, 并将信号传送至信号处理模块。该部分主要包括电极帽、放大器、滤波器和 A/D 转换器。

2) 信号处理: 信号处理模块是 BCI 系统的核心部分, 主要过程包括信号预处理、特征提取、分类识别。预处理是通过主成分分析 (PCA)、独立成分分析 (ICA)、非线性滤波等方法最大程度去除信号中的噪音干扰, 提高 EEG 信号的信噪比。特征提取和分类识别过程是从繁复无章的背景信息中提取出所需的源信号并将这些信息转化为简单的控制命令, 这需要较好的信号处理技术和针对性的分类算法^[8, 10]。

3) 设备控制: 设备控制模块是 BCI 系统的输出端, 可以将 EEG 信号转换为设备操作的控制命令。当前应用于医疗和研究的主要输出设备包括机械臂、计算机屏幕、应用程序、无人机和轮椅等。

4) 反馈: 反馈环节将操作结果及时反馈至被试, 可以提高系统的准确率。当系统运行终端出现问题时, 及时的反馈能够帮助被试及时调整状态, 增加了系统的人机交互性, 也提高了系统的工作效率。

2 基于 EEG 的 BCI 系统及其应用

本文重点讨论基于 EEG 的单一模式的 BCI 系统。该系统的主要研究方向包括基于慢皮层电位 (slow cortical potential, SCP) 的 BCI、基于运动想象 (MI, motor image) 电位的 BCI、基于事件相关电位 (ERP, event-related potential) P300 的 BCI 和基于稳态视觉诱发电位 (SSVEP, steady-state visual evoked potential) 的 BCI 等^[21]。其中, SCP-BCI 系统在脑机接口发展初期研究中占主导地位, 并且在一些临床研究中投入应用。但由于该系统需要大量训练且 ITR 较低^[22], 因此学者们基本放缓了对该系统的进一步研究, 因此本文不作讨论。

2.1 基于 MI 的 BCI 系统

基于运动想象 (MI) 的 BCI 是以感觉运动节律 (SMR, sensorimotor rhythm) 信号^[23] 作为输入的 BCI。SMR 信号相伴运动或感知运动产生, 包括 μ 节律 (频率为 8~12 Hz)、 β 节律 (频率为 18~26 Hz) 等, 但主要以 μ 节律为主。研究表明^[24], 在进行运动准备、想象或执行活动

时, 大脑对侧的 μ 节律会减弱, 而在空闲状态时则会增强, 这种现象被称为事件相关去同步 (ERD, event-relate desynchronization) 和事件相关同步 (Event-relate synchronization, ERS)。ERD/ERS 事件即出现在产生于大脑皮层的 μ 节律和 β 节律的频率范围^[25]。

奥地利 Graz 技术大学的 BCI 研究室最早提出事件相关去同步/同步 (ERD/ERS) 概念来区分运动想象任务^[24], 对该领域进行了大量的研究, 现在已经开发出包括计算机游戏、拼写设备、功能性电子刺激器和虚拟环境控制等 BCI 系统^[16, 26-27]。在该类 BCI 系统中对 SMR 信号的主要应用方法是根据 ERD/ERS 在大脑皮层的空间分布特异性来识别大脑的运动想象状态。目前主要的运动想象任务有想象左手、右手、双脚和舌头的运动, 加上空闲状态则可以产生 5 种脑状态。不同状态结合, 可用来实现对外设的运动控制。

2014 年, 美国 Tulsa 大脑研究所的 Yuan 和 Minnesota 大学的 He 通过基于运动想象和实际运动的控制系统, 实现了通过脑电操作外接设备完成温度调节、光标移动等任务^[23]。

2019 年, 清华大学的张文昌等人将机器人自动控制技术和 BCI 技术相结合, 开发了一种基于运动想象的异步 BCI 共享控制系统, 被试在实验中实现了通过运动想象操控机器人避障抓取实物的功能, 且准确率达到 80%^[28]。

Donati 等人利用基于运动想象的 BCI 控制下肢外骨骼对 8 例慢性脊髓损伤 (SCI) 患者进行了为期 12 个月的多阶段步态神经康复训练。其结果显示患者已经丧失功能的部分肌肉恢复了自主控制, 具备了部分活动能力。该实验证明通过脑控假肢可以实现神经功能恢复, 且在医疗领域具有广泛的应用前景^[29]。另外, 我国清华大学智能与生物机械实验室研发的上肢康复辅助机器人和上海交通大学机器人研究团队研发的脑控外骨骼设备, 均可以实现通过解析患者运动意图来实现对患者进行辅助训练, 以帮助患者神经康复^[30]。

除了上述的几种应用外, SMR 控制信号还被应用于包括仿生机械手^[31]、虚拟无人机^[32]、四轴飞行器^[33]、家居设备^[34]等控制对象, 目前该类范式已经成为四肢瘫痪、脊髓损伤和肌萎缩侧索硬化症 (ALS) 患者最有希望的治疗模式之一。

由于自发脑电信号存在很多不确定性和不稳定性, 因此还存在着信号解码准确率低、个体差异性大和在线性能差等问题, 使用 SMR 节律的人员可能要数月的时间来学习如何调节大脑的神经活动来控制光标或设备, 部分脑发育水平较低的人群甚至无法按照系统要求通过运动想象来完成规定动作^[35], 这些问题制约了该类系统的发展。

2.2 基于事件相关电位 P300 的 BCI 系统

P300 是一种事件相关电位 (ERP)^[36-37], 在 1965 年首次被发现。它是 EEG 信号在刺激出现之后 300 毫秒左右产生的正向偏移, 并因此而得名^[38]。相关刺激事件发生的概率越低, 所出现的 P300 波形越显著。视觉刺激是 P300 最常用的诱发模式, 但学者对触觉刺激范式也有不少研究^[39]。

P300 拼写器是一种允许用户使用脑电输入文字的典型 BCI 文字输入系统, 是 P300 信号最常见的应用, 对患有肌萎缩侧索硬化症 (ALS)^[40]和脑中风^[41]的人的治疗有很好的辅助作用。早在 1988 年, Illinois 大学的 Farewell 等人就利用 P300 事件相关电位设计出了虚拟打字机^[42]。该系统是将 36 个备选目标 (英文字母或数字等) 在屏幕上显示为 6×6 矩阵, 如图 3 所示。被试只需要注视屏幕的行列闪烁, 就可以诱发脑电刺激, 产生 P300 信号, 对比行列的闪烁时间和 P300 出现时间, 就可以完成目标的选择。美国 Wadsworth 研究中心、我国浙江大学求是高等学院均研究出了实用的基于 P300 的字符或中文输入系统, 可作为瘫痪患者的临床辅助应用。李远清等人还设计了一种新的基于三维立体视觉刺激的 P300 拼写范式, 显著提高了 P300 拼写系统的分类准确率和 ITR, 有效减少了用户的工作量^[43]。近年来, P300 拼写系统研究者着力于通过改进算法、改进诱发界面或模式、提出新的混合模式等方法来尝试进行技术突破^[44-45], 拼写器的拼写速度、应用舒适度、人机交互性均有很大提升^[46]。

A	G	M	S	Y	•
B	H	N	T	Z	•
C	I	O	U	•	TALK
D	J	P	V	FLN	SPAC
E	K	Q	W	•	BKSP
F	L	R	X	SPL	QUIT

图 3 P300-BCI 使用的 6×6 刺激界面

除了应用于拼写器外, P300 信号在网页浏览^[47-48]、身份验证^[49]、游戏领域^[50]、轮椅控制^[51]、家居智能^[52]、手部矫形器控制^[53]等方面均有应用。

Nikhil Rathi 等人设计了一款基于 P300 信号的身份验证系统, 用一种新的 2×2 画笔拼写替代了传统的 6×6 字符拼写器^[49]。

王飞等人设计了一款名为 MindGomoku 的基于 P300 信号的在线 BCI 游戏^[50]。该游戏采用贝叶斯卷积神经网络算法, 将游戏规则和 BCI 系统的特点相结合, 参与实验的 10 名玩家均成功完成了游戏控制且平均准确率达到了 90.7%。

COIMBRA 大学系统与机器人研究所的 Aniana Cruz 等人设计了一种基于 P300 信号的 BCI 轮椅控制系统^[51], 该系统允许用户在空闲状态和控制状态之间自由切换。在 7 名健康人和 6 名残疾人参与的实验中, 所有被试者均在办公室环境中成功操控轮椅完成既定动作。

P300 信号还可以应用于军事领域。Al-Nuaimi 等人提出了一种利用基于 P300 的 BCI 控制无人机的方法^[54], 可以作为辅助技术在无人机侦察和打击等任务中发挥作用。

常用的 P300-BCI 最重要的优点是大多数被试者都可以非常准确地使用它, 并且可以在几分钟内进行校准, 并且

其信号稳定、便携易用。但同时也存在视觉 P300-BCI 系统 ITR 较慢,需要被试高度注意并引起视觉疲劳的问题,因此应用范围较窄^[46]。在康复医疗领域多应用于对其他辅助通信技术有障碍的重度残疾患者,而在游戏领域的应用也因其控制性能较差或易引起疲劳而难以得到广泛推广。

2.3 基于 SSVEP 的 BCI 系统

稳态视觉诱发电位 (SSVEP) 由持续波动的刺激 (重复频率大于 6 Hz) 产生。当屏幕上的目标以不同频率的视觉刺激进行闪烁时,被试只需要注视闪烁目标,就可以在大脑的枕叶区测到同样频率的 EEG 信号,这一信号被称为稳态视觉诱发电位 (SSVEP)^[55]。通过分析刺激后大脑产生的脑电信号的频谱特征,系统就可以选择被试所注视的目标并执行相应操作。可用于 SSVEP 的视觉刺激频率一般在 6~50 Hz,分为低频段 (6~12 Hz)、中频段 (12~30 Hz)、高频段 (30~50 Hz)。视觉刺激光源通常由独立的发光二极管 (LED),或者 CRT、LCD、LED 电脑显示器等设备提供。目前,为了使用者更加易用和便携,越来越多的研究者使用全息 Holo Lens 眼镜等智能便携式 AR 设备作为视觉刺激器^[56-58]。

基于 SSVEP-BCI 的字符拼写器具有较为广泛的研究和应用^[59]。其中最著名的范例是 Bremen Speller^[60],其原理是将所有目标显示在屏幕上,并使用 5 个框来控制光标,如图 4 所示。5 个光标显示框通过不同的频率闪烁,引起被试不同的视觉刺激反应。最初相关研究的平均准确率为 22.6 bpm,后来 Volosyak 等研究者相继对其进行改进^[61],其识别准确率不断提升。发展至今,基于 SSVEP-BCI 的高速拼写器得到了快速发展。天津大学的明东团队为提高基于 SSVEP-BCI 的高速拼写器的实用性,通过改进脑电数据采集设备、刺激设备和滤波器,优化滤波过程和程序,大大提高了在线拼写识别率水平,其平均水平达到了 330.4±45.4 bpm^[62]。

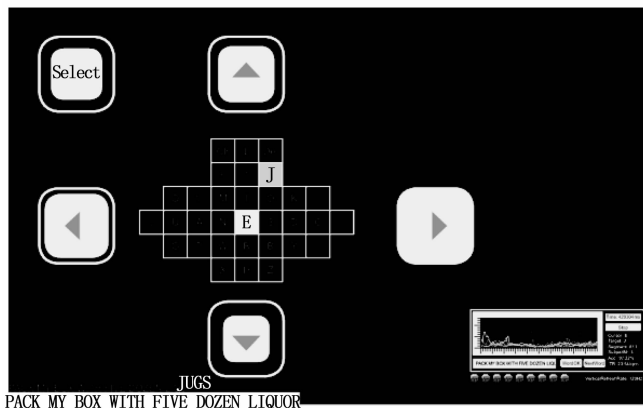


图 4 此为经典 Bremen 拼写器界面,5 个目标显示框以不同频率闪烁,引起不同的视觉刺激反应,以实现字符输入。摘自文献^[61]

陈晓刚等人将增强现实 (AR)、计算机视觉和 SSVEP-BCI 相结合,设计并实现了一个机械臂控制系统。用户只需

要通过 SSVEP-BCI 系统将任务传达至计算机,机械臂即可借助计算机视觉自行抓取对象^[63]。另外,罗志国等人在不借助计算机视觉的情况下,在 AR 环境下用户界面同时显示机械臂和视觉刺激界面的控制方式也被证明是一种可行的人机交互方式^[57]。

Yang Dalin 等人在 2020 年设计开发了一个用于家庭自动控制的混合脑机接口系统,在传统的 SSVEP 刺激界面选择指令基础上,结合眨眼方式校准指令,其实验准确率达到到了 96.92%,可以很好的应用于轮椅和机械臂上^[64]。

Miguel Angel L-G 等人提出了一种由 SSVEP-BCI 控制的通过注意力驱动的视频游戏^[65]。游戏模拟了一种战斗场景,敌人的攻击被设计为一个移动的闪烁环形棋盘,在游戏过程中,如果检测到玩家对敌人的攻击注意力足够集中,则该次攻击就可以避免。该款游戏不仅可以作为娱乐用途,更可以应用于存在注意力障碍的学生或其他人群中。

SSVEP-BCI 在军事领域也有应用。Li-Wei Ko 等设计了一款基于 SSVEP-BCI 的智能头盔^[66],计划将这种头盔用于支持士兵在作战行动时实现脑控通信或遥控设备等额外任务。北京航空航天大学的郑德智等人设计了一种基于 SSVEP 脑机接口的单兵作战无人武器控制系统^[67],使士兵在作战时不用双手就可以操作各类武器。

除了上述各类应用外,SSVEP-BCI 系统还被用于二维游戏导航^[68],甚至被用于通过人脑对蟑螂行动实施导航^[69]。

与 P300 和 MI 等 BCI 系统相比,SSVEP 在信息传输率 (ITR) 和识别准确率方面更具优势,可以比事件相关电位更可靠地分类,且不需要对被试进行训练,可操作性强,不易受到运动伪影的影响。屏幕刺激以许多不同的频率闪烁,可以产生更多命令通道来控制外接设备。因此 SSVEP-BCI 技术在 BCI 领域得到了更为广泛的关注^[70]。但要实现 SSVEP-BCI 系统更快地从实验走向实际应用,还需要重点解决以下几个问题:

- 1) 实现脑接口信息采集设备的舒适性、易用性和便携性。
- 2) 该类范式需要高度精确的眼睛控制,尤其在低频闪烁时容易引起视觉疲劳^[71],开发者必须尽量减少被试在使用设备时因视觉刺激带来的不适。
- 3) 研究更加高效智能的高速 SSVEP-BCI 系统,提高屏幕刷新频率和信息在线传输速率。

3 基于 EEG 的 BCI 系统面临的挑战

基于脑电图 (EEG) 技术的 BCI 系统为那些不能通过正常渠道实现与外界沟通的患者提供了一种新的通信和控制方式,也为正常人实现智能环境控制提供了新的思路。尽管国内外学者对基于 EEG 的 BCI 系统展开了大量的研究和实验,但脑机接口技术从实验室走向军事和商业应用,还面临着较大的技术和人文挑战^[1, 72]。

- 1) 依赖于脑电图 (EEG) 技术的发展。在所有脑监测

技术中,脑电图技术因其低成本而具备面向普通民众市场普及的商业化潜力^[73]。但由于缺乏对脑电信号中信息编码的潜在神经机制的了解,脑电信号和各类感官刺激之间的复杂关系,仍然是神经科学、人体工程学等领域面临的重要挑战。神经信号采集过程中存在的低信噪比、脑电图非线性、非平稳性、容易产生伪影等问题同样制约着脑电图技术的发展。但目前已有学者将脑电图技术用于驾驶员的疲劳检测^[74],与之相关的便携式可穿戴 EEG 耳机也已开发出来^[75-76],可用于睡眠质量和认知功能等方面的实时监测,NeuroSky、BrainCo、Brainno 等公司都在做这方面的研究。尽管如此,但便携式脑电采集设备使用的干电极技术同样存在局限性,如运动伪影和环境噪音难以避免,人体对设备穿戴的不适、设备微型化存在困难等问题。进一步加深对该领域的研究,有助于尽早实现通过无线穿戴设备来破译大脑密码,并促进基于 EEG 的脑机接口系统在现有水平上的应用。

2) 信号处理技术制约 BCI 系统的发展。信号处理技术的关键在于特征提取和分类识别算法。已经研究应用的特征提取算法主要包括时域分析(幅值分析、波形分析、相干平均分析)、频域分析(傅里叶变换、功率谱)、时频分析(连续小波变换、经验模态分解)及共空间模式(CSP, common spatial pattern)等其他分析方法^[21]。目前应用的主要分类识别方法主要有线性判别分析(LDA, linear discriminant analysis)、支持向量机(SVM, support vector machine)和朴素贝叶斯分类器等^[32]。尽管这些算法被证明在一定条件下是行之有效的,但 BCI 系统存在的被试者个体差异大、训练集小、信噪比低等问题仍未得到根本性解决,这些问题影响着 BCI 系统的分类准确率、信息传输率(ITR)等重要技术指标。这需要学者们不断研究和改进鲁棒性和复杂度更高的脑电信号解码算法,以实现脑电信号的高效、准确处理。

3) BCI 系统的实际应用水平有待开发。由于脑电图测量的复杂性,将 BCI 系统从控制良好的实验室环境转换到现实生活环境仍然具有挑战性。目前已经投入使用的少量 BCI 系统主要集中在游戏领域,且能够实现应用的外控设备及其功能十分简单。而在康复医疗领域的应用则大多停留在临床和实验阶段,其他领域的应用则因 BCI 系统的造价昂贵、可靠性低、人机交互性差、便携性不足等缺点而难以广泛推广。另外,健康人和脑部疾病患者的大脑信号存在很大差异,其认知水平同样差异较大,用户的不同应用需求也为系统开发者带来了较大的挑战。一个实用的 BCI 系统必须满足良好的用户体验和稳定的系统性能的要求^[78]。因此,在应用端如何实现 BCI 系统的实用性和可行性,提升用户的使用舒适度和操作便捷性都是研究者必须面临的挑战。

4) 脑机接口面对的伦理问题不可忽视。BCI 可以读取和解码人的大脑信息,这些神经特征信息包含着人的思想、情感、利益等个人隐私,这将存在个人隐私泄露的风险。由于设备的设计缺陷,会存在可能的技术漏洞,这为黑客攻击带来了可能,BCI 使用者会面临信息被盗、意志被控制

或损害、被欺骗等威胁。高技术带来的不公平性和偏见同样存在。BCI 和智能增强已经被证明可以让用户获得更强的认知和行动能力,这会让使用者在不同财力、不同阶层的竞争中导致明显的社会优势,可能扩大贫富差距,加剧不公平性。同时,普通人对那些因使用 BCI 技术而获得智能或技能增强的人可能存在歧视或偏见,这是一种可以预见的可能伤害。建议相关人员及时研究制定新的伦理准则,以促进脑机接口技术的科学发展。

总之,脑机接口是一个跨学科的领域,包含神经科学、工程学、计算机科学和应用数学等。该技术的发展需要基础理论、工程技术等多个领域的研究突破,同时也需要解决可能面临的伦理困境。

4 结束语

本文综述了基于 EEG 的 BCI 系统的发展概况,重点对基于运动想象电位(MI)、事件相关电位 P300 和稳态视觉诱发电位(SSVEP)的 3 种 BCI 系统的基本原理和当前研究、应用的主要方向进行了归纳梳理,将 3 种范式进行了对比分析,提出了各类范式的优缺点和研究中面临的主要问题。其中基于 SSVEP 的 BCI 系统在信息传输率、识别准确率和可操作性等方面具有较为显著的优势,使用 EEG 的 BCI 研究者们的主要研究方向,应用范围更为广泛。在应用层面的技术选用上,通常根据患者或健康人的不同需求而选择。临床应用上,会根据不同患者的脑损伤程度和特定需求,结合不同情况,选择最合适的范式来正确操作神经假体或神经康复设备。如有些 MI 盲人员无法通过运动想象完成任务,视觉神经损伤人群不能使用视觉诱发,运动神经损伤者普遍使用 MI-BCI 来刺激运动神经恢复。而在健康人的应用研究上,则以高速率的信息传输和设备穿戴方便、便于操作作为主要考量因素,各类范式的学者们正在致力于优化 BCI 系统性能以加快该技术从实验室走向实际应用。本文还从技术研究、应用需求和伦理风险等方面分析了基于 EEG 的 BCI 系统面临的风险挑战,提出了制约系统发展的重难点问题,尤其是一些不可预见的伦理挑战,必须引起相关研究者的足够重视。

尽管基于 EEG 的脑机接口技术还存在较多的技术困难有待攻克,但其发展前景仍然十分广阔。在技术层面上,除了不断提升 EEG 采集技术和研究改进高复杂度的算法外,基于 EEG 的混合脑机接口(hybrid, hBCI)是当前学者们寻求技术突破的一个主要研究方向,包括基于多种范式的 hBCI、基于多种感官刺激的 hBCI、基于多种信号的 hBCI。研究证明^[77],该方法在当前技术下可以有效提高 BCI 系统的分类准确率和 ITR,尤其在系统性能和灵活性上具有显著优势。

在应用领域上,EEG 技术及设备因为便于采集处理和其便携性受到游戏和军事领域的重视,具备巨大的市场前景。目前,脑机接口在军事上的应用已占全球脑机接口总应用的 25%^[78]。根据已经公开的资料显示,美、欧等国家

和地区均在努力进行该领域的研究。美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 一直在资助 BCI 领域的创新科学研究和发展^[79], 提出了包括“无声计划”^[80]、“阿凡达计划”等研究项目, 目的是研发可以实施战场脑意念通信和可以远程脑意念控制的“机器战士”, 他们还计划开展以控制神经元增强士兵认知和决策能力为目的的下一代无外科手术神经技术项目。英国研究人员也致力于脑控飞船的脑机接口装置研究^[81]。通过 BCI 技术实现对战时指挥控制系统的实时控制, 实现具备强大作战功能的机械外骨骼“超级战士”, 士兵通过意念直接控制武器, 实现战后受伤士兵的认知功能恢复^[80, 82]等都是各国在 BCI 在军事领域的重点研究的应用方向。我国国防科技大学也致力于脑机接口技术在军事领域的应用研究, 其认知科学基础研究与创新团队已实现通过“意念”控制机器人行动和驾驶汽车, 清华大学、浙江大学等高校研究的利用脑机接口技术进行瘫痪患者康复训练的设备和技术在临床上已经初见成效, 这将为战后伤员救治和康复提供新的治疗方式。各个国家军事力量的竞争将有效促进 BCI 技术的发展和應用。

BCI 与人工智能技术的深度融合, 实现新的混合智能系统, 是脑机接口性能寻求突破的必然方向。Facebook 公司早已展开对脑机接口技术的研究, 该公司创始人扎克伯格近期宣布将在五年内实现 Facebook 向元宇宙 (Metaverse) 公司的转型, 这将为脑机接口的应用带来更为广阔的领域: BCI 技术在元宇宙中与增强现实 (AR)、虚拟现实 (VR) 实现深度交互。尽管有些场景仍显得遥不可及, 但在应用端的广阔前景将快速推动学者们的研究进度, 我们将很快看到相关技术的突破性进展。

参考文献:

- [1] 葛松, 徐晶晶, 赖舜男, 等. 脑机接口: 现状, 问题与展望 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2020, 47 (12): 1227 - 1249.
- [2] BERGER H. Über das elektroenkephalogramm des menschen [J]. Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten, 1929, 87 (1): 527 - 570.
- [3] MELLINGER J, SCHALK G, BRAUN C, et al. An MEG-based brain-computer interface (BCI) [J]. NeuroImage, 2007, 36 (3): 581 - 593.
- [4] TORONOV V, WEBB A, CHOI J H, et al. Investigation of human brain hemodynamics by simultaneous near-infrared spectroscopy and functional magnetic resonance imaging [J]. Med Phys, 2001, 28 (4): 521 - 527.
- [5] TER-POGOSSIAN M M. Positron emission tomography (PET) [J]. J Med Syst, 1982, 6 (6): 569 - 577.
- [6] RAUT S V, YADAV D M. A Review on fMRI Signal Analysis and Brain Mapping Methodologies [C] //Singapore: Springer Singapore, 2017: 309 - 320.
- [7] DALE A M, BUCKNER R L. Selective averaging of rapidly presented individual trials using fMRI [J]. Human Brain Mapping, 1997, 5 (5): 329 - 340.
- [8] 龚怡宏, 洪晓鹏. 认知科学与脑机接口概论 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2020: 121 - 163.
- [9] ABIRI R, BORHANI S, SELLERS E W, et al. A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms [J]. J Neural Eng, 2019, 16 (1): 011001.
- [10] 王登, 苗夺谦. 监测脑活动: EEG 解码及其应用研究 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2017: 6 - 10.
- [11] 于淑月, 李想, 于功敬, 等. 脑机接口技术的发展与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (10): 5 - 11.
- [12] BIRBAUMER N, ELBERT T, CANAVAN A G, et al. Slow potentials of the cerebral cortex and behavior [J]. Physiol Rev, 1990, 70 (1): 1 - 41.
- [13] EGGERMONT J J. Development of auditory evoked potentials [J]. Acta Otolaryngol, 1992, 112 (2): 197 - 200.
- [14] ODOM J V, BACH M, BARBER C, et al. Visual evoked potentials standard (2004) [J]. Doc Ophthalmol, 2004, 108 (2): 115 - 123.
- [15] CRUCCU G, AMINOFF M J, CURIO G, et al. Recommendations for the clinical use of somatosensory-evoked potentials [J]. Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 2008, 119 (8): 1705 - 1719.
- [16] PFURTSCHELLER G, NEUPER C. Motor imagery and direct brain-computer communication [J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89 (7): 1123 - 1134.
- [17] ZHANG Y, JIN J, QING X, et al. LASSO based stimulus frequency recognition model for SSVEP BCIs [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2012, 7 (2): 104 - 111.
- [18] VIDAL J J. Toward direct brain-computer communication [J]. Annu Rev Biophys Bioeng, 1973, 2: 157 - 180.
- [19] WOLPAW J R, BIRBAUMER N, HEETDERKS W J, et al. Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting [J]. IEEE Trans Rehabil Eng, 2000, 8 (2): 164 - 173.
- [20] WOLPAW J R, BIRBAUMER N, MCFARLAND D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control [J]. Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 2002, 113 (6): 767 - 791.
- [21] 赵学文. 基于 SSVEP 和 EMG 的混合脑机接口系统的设计与研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
- [22] HAYAKAWA M, UEDA S, FUNASE A, et al. The saccadic EEG analysis in slow cortical potential before the eye movement [C] // Kitakyushu, Japan, 2014: 270 - 274.
- [23] YUAN H, HE B. Brain-computer interfaces using sensorimotor rhythms: current state and future perspectives [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2014, 61 (5): 1425 - 1435.
- [24] PFURTSCHELLER G, LOPES Da Silva F H. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles [J]. Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 1999, 110

- (11): 1842 – 1857.
- [25] THOMAS K P, GUAN C, LAU C T, et al. A new discriminative common spatial pattern method for motor imagery brain-computer interfaces [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56 (11 Pt 2): 2730 – 2733.
- [26] NEUPER C, MULLER-PUTZ G R, SCHERER R, et al. Motor imagery and EEG-based control of spelling devices and neuroprostheses [J]. *Progress in brain research*, 2006, 159: 393 – 409.
- [27] PFURTSCHELLER G, MULLER-PUTZ G R, SCHLOGL A, et al. 15 years of BCI research at Graz University of Technology: current projects [J]. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2006, 14 (2): 205 – 210.
- [28] ZHANG W, SUN F, WU H, et al. Asynchronous brain-computer interface shared control of robotic grasping [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2019, 24 (3): 360 – 370.
- [29] DONATI A R, SHOKUR S, MORYA E, et al. Long-Term Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 30383.
- [30] 蒋 勤, 张 毅, 谢志荣. 脑机接口在康复医疗领域的应用研究综述 [J]. *重庆邮电大学学报 (自然科学版)*, 2021, 33 (4): 562 – 570.
- [31] 何大权. 运动想象脑电信号识别方法及仿生机械手控制研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [32] 沈永龙. 基于运动想象的脑机接口关键技术研究 [D]. 保定: 河北大学, 2021: 45 – 51.
- [33] LAFLEUR K, CASSADY K, DOUD A, et al. Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain-computer interface [J]. *J Neural Eng*, 2013, 10 (4): 046003.
- [34] 李家东. 基于脑电运动想象的智能家居控制系统 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [35] AHN M, JUN S C. Performance variation in motor imagery brain-computer interface: a brief review [J]. *J Neurosci Methods*, 2015, 243: 103 – 110.
- [36] SARASA G, GRANADOS A, RODRIGUEZ F B. Algorithmic clustering based on string compression to extract P300 structure in EEG signals [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2019, 176: 225 – 235.
- [37] CHANGOLUISA V, VARONA P, DE BORJA RODRIGUEZ F. A Low-Cost Computational Method for Characterizing Event-Related Potentials for BCI Applications and Beyond [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 111089 – 111101.
- [38] SUTTON S, BRAREN M, ZUBIN J, et al. Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty [J]. *Science*, 1965, 150 (3700): 1187 – 1188.
- [39] FLEURY M, LIOI G, BARILLOT C, et al. A Survey on the Use of Haptic Feedback for Brain-Computer Interfaces and Neurofeedback [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 528.
- [40] CIPRESSO P, CARELLI L, SOLCA F, et al. The use of P300-based BCIs in amyotrophic lateral sclerosis: from augmentative and alternative communication to cognitive assessment [J]. *Brain Behav*, 2012, 2 (4): 479 – 498.
- [41] ZHANG Y, XU H, ZHAO Y, et al. Application of the P300 potential in cognitive impairment assessments after transient ischemic attack or minor stroke [J]. *Neurol Res*, 2021, 43 (4): 336 – 341.
- [42] FARWELL L A, DONCHIN E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials [J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1988, 70 (6): 510 – 523.
- [43] QU J, WANG F, XIA Z, et al. A Novel Three-Dimensional P300 Speller Based on Stereo Visual Stimuli [J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2018, 48 (4): 392 – 399.
- [44] KSHIRSAGAR G B, LONDHE N D. Improving Performance of Devanagari Script Input-Based P300 Speller Using Deep Learning [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2019, 66 (11): 2992 – 3005.
- [45] YU Y, ZHOU Z, JIANG J, et al. Toward a Hybrid BCI: Self-Paced Operation of a P300-based Speller by Merging a Motor Imagery-Based “Brain Switch” into a P300 Spelling Approach [J]. *International Journal of Human – Computer Interaction*, 2016, 33 (8): 623 – 632.
- [46] ALLISON B Z, KUBLER A, JIN J. 30+ years of P300 brain-computer interfaces [J]. *Psychophysiology*, 2020, 57 (7): 13569.
- [47] MARTINEZ-CAGIGAL V, GOMEZ-PILAR J, ALVAREZ D, et al. An Asynchronous P300-Based Brain-Computer Interface Web Browser for Severely Disabled People [J]. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2017, 25 (8): 1332 – 1342.
- [48] CITI L, POLI R, CINEL C, et al. P300-based BCI mouse with genetically-optimized analogue control [J]. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2008, 16 (1): 51 – 61.
- [49] RATHI N, SINGLA R, TIWARI S. A novel approach for designing authentication system using a picture based P300 speller [J]. *Cogn Neurodyn*, 2021, 15 (5): 805 – 824.
- [50] LI M, LI F, PAN J, et al. The MindGomoku: An Online P300 BCI Game Based on Bayesian Deep Learning [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21 (5): 1613.
- [51] CRUZ A, PIRES G, LOPES A, et al. A Self-Paced BCI With a Collaborative Controller for Highly Reliable Wheelchair Driving: Experimental Tests With Physically Disabled Individuals [J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2021, 51 (2): 109 – 119.

- [52] AYDIN E A, BAY O F, GULER I. P300-Based Asynchronous Brain Computer Interface for Environmental Control System [J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2018, 22 (3): 653 – 663.
- [53] DELIJORGE J, MENDOZA-MONTOYA O, GORDILLO J L, et al. Evaluation of a P300-Based Brain-Machine Interface for a Robotic Hand-Orthosis Control [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 589659.
- [54] AL-NUAIMI F A, AL-NUAIMI R J, AL-DHAHERI S S, et al. Mind Drone Chasing Using EEG-based Brain Computer Interface [C] // Madrid, Spain, 2020: 74 – 79.
- [55] MIDDENDORF M, MCMILLAN G, CALHOUN G, et al. Brain-computer interfaces based on the steady-state visual-evoked response [J]. *IEEE Trans Rehabil Eng*, 2000, 8 (2): 211 – 214.
- [56] 张翔. 基于增强现实脑机接口的仿人机器人控制系统 [D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [57] CHEN L, CHEN P, ZHAO S, et al. Adaptive asynchronous control system of robotic arm based on augmented reality-assisted brain-computer interface [J]. *J Neural Eng*, 2021, 18 (6): 3044.
- [58] ARPAIA P, DURACCIO L, MOCCALDI N, et al. Wearable Brain – Computer Interface Instrumentation for Robot-Based Rehabilitation by Augmented Reality [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69 (9): 6362 – 6371.
- [59] LI M, HE D, LI C, et al. Brain-Computer Interface Speller Based on Steady-State Visual Evoked Potential: A Review Focusing on the Stimulus Paradigm and Performance [J]. *Brain Sci*, 2021, 11 (4): 450.
- [60] VOLOSAYAK I, CECOTTI H, VALBUENA D, et al. Evaluation of the Bremen SSVEP based BCI in real world conditions [C] // Kyoto, Japan, 2009: 322 – 331.
- [61] VOLOSAYAK I, MOOR A D, GRÄSER A. A Dictionary-Driven SSVEP Speller with a Modified Graphical User Interface [C] // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011: 353 – 361.
- [62] TANG J, XU M, HAN J, et al. Optimizing SSVEP-Based BCI System towards Practical High-Speed Spelling [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20 (15): 4186.
- [63] CHEN X, HUANG X, WANG Y, et al. Combination of Augmented Reality Based Brain-Computer Interface and Computer Vision for High-Level Control of a Robotic Arm [J]. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2020, 28 (12): 3140 – 3147.
- [64] YANG D, NGUYEN T H, CHUNG W Y. A Bipolar-Channel Hybrid Brain-Computer Interface System for Home Automation Control Utilizing Steady-State Visually Evoked Potential and Eye-Blink Signals [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20 (19): 3390.
- [65] PEREZ-VALERO E, LOPEZ-GORDO M A, VAQUERO-BLASCO M A. An attention-driven videogame based on steady-state motion visual evoked potentials [J]. *Expert Systems*, 2021, 38 (4): 1111.
- [66] KO L W, CHANG Y, WU P L, et al. Development of a Smart Helmet for Strategic BCI Applications [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19 (8): 1867.
- [67] 郑德智, 那睿, 孙颖, 等. 基于 SSVEP 脑机接口的单兵作战无人武器控制系统 [P]. 中国台湾: CN110658810A 2019 – 08 – 27.
- [68] CHEN J, ZHANG D, ENGEL A K, et al. Application of a single-flicker online SSVEP BCI for spatial navigation [J]. *PLoS One*, 2017, 12 (5): e0178385.
- [69] LI G, ZHANG D. Brain-Computer Interface Controlled Cyborg, Establishing a Functional Information Transfer Pathway from Human Brain to Cockroach Brain [J]. *PLoS One*, 2016, 11 (3): e0150667.
- [70] 何柳诗, 谢俊, 于鸿伟, 等. 融合眼动追踪和目标动态可调的稳态视觉诱发电位脑机接口系统设计 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55: 87 – 95.
- [71] CHANG M H, BAEK H J, LEE S M, et al. An amplitude-modulated visual stimulation for reducing eye fatigue in SSVEP-based brain-computer interfaces [J]. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 2014, 125 (7): 1380 – 1391.
- [72] MRIDHA M F, DAS S C, KABIR M M, et al. Brain-Computer Interface: Advancement and Challenges [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21 (17): 5746.
- [73] WANG Y, NAKANISHI M, ZHANG D. EEG-Based Brain-Computer Interfaces [J]. *Adv Exp Med Biol*, 2019, 1101: 41 – 65.
- [74] 王永祥. 基于 EEG 的疲劳检测技术的研究与应用 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [75] MCWILLIAMS E C, BARBEY F M, DYER J F, et al. Feasibility of Repeated Assessment of Cognitive Function in Older Adults Using a Wireless, Mobile, Dry-EEG Headset and Tablet-Based Games [J]. *Front Psychiatry*, 2021, 12: 574482.
- [76] LOONEY D, KIDMOSE P, PARK C, et al. The in-the-ear recording concept: user-centered and wearable brain monitoring [J]. *IEEE Pulse*, 2012, 3 (6): 32 – 42.
- [77] 李自娜, 徐欢, 潘家辉. 混合脑机接口的研究进展 [J]. *计算机系统应用*, 2019, 28 (9): 1 – 8.
- [78] 范科峰, 董建, 余云涛等. 脑机接口标准化白皮书 (2021 版) [R]. 中国电子技术标准化研究院, 2021.
- [79] MIRANDA R A, CASEBEER W D, HEIN A M, et al. DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies [J]. *J Neurosci Methods*, 2015, 244: 52 – 67.
- [80] KOTCHETKOV I S, HWANG B Y, APPELBOOM G, et al. Brain-computer interfaces: military, neurosurgical, and ethical perspective [J]. *Neurosurg Focus*, 2010, 28 (5): E25.
- [81] 霍梦兰. “脑机接口”技术及其军事应用 [J]. *科技视界*, 2016 (26): 193.
- [82] 吴敏文. 脑机接口军事应用的潜力与挑战 [J]. *军事文摘*, 2021 (1): 56 – 60.