

面向康复与辅助应用的脑-机接口趋势与展望^{*}

王仲朋, 陈 龙, 何 峰, 万柏坤, 明 东

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘 要:无需肢体神经肌肉接触便可实现人与外界机器设备信息交互、使“思想”变成“行动”的脑-机接口(BCI)是脑神经科学与工程技术结合的新产物,亦是临床神经功能康复与运动辅助控制的新技术,可望为部分或完全丧失语言交流与肢体运动控制能力患者(如脑卒中、脊髓损伤、脊髓侧索硬化等疾病)提供全新的增强治疗与康复手段,但目前实际应用尚存在信息处理效率欠高、康复训练时间过长、控制模型通用性差等技术瓶颈。综述了上述技术难点并以运动想象(MI)BCI和BCI拼写器(Speller)为典型介绍了其可能的模型优化策略和解决方案,最后展望了未来BCI发展方向。

关键词:脑-机接口;临床康复;辅助控制;模型优化

中图分类号: R318 TH77 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 310.61

Development trend and prospect of BCI technology facing rehabilitation and assisting applications

Wang Zhongpeng, Chen Long, He Feng, Wan Baikun, Ming Dong

(College of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Brain-computer interface can realize the information interaction between human and outer devices and change “thinking” in the mind into real actions without the contact of the limb or neuromuscular system. Brain-computer interface is a novel product combining brain neuroscience and engineering technology, and also a new technique for clinical neural function rehabilitation and assistive motor control. It hopefully provides a brand new enhancing treatment and rehabilitation means for the patients losing the ability of language communication and body movement control partly or completely (such as stroke, spinal cord injury (SCI), amyotrophic lateral sclerosis (ALS) and etc.). However, current practical applications are still facing the technical bottlenecks of low information processing efficiency, long rehabilitation training time and poor control model generality. In this paper, these technical difficulties are reviewed. Then, taking the motor imagery BCI and BCI speller as examples, the possible model optimization strategies and solution schemes are introduced. The future development direction of BCI is discussed in the end of the paper.

Keywords: brain-computer interface; clinical rehabilitation; assistive control; model optimization

1 引言

脑科学定义为研究脑结构和功能的科学,其核心是以大脑为主体的认知神经科学^[1]。随着世界各国纷纷吹响探索大脑奥秘号角,我国亦提出了以解密大脑认知功能、攻克大脑神经疾病为科研导向和以发展类脑人工智能技术为应用目标的“中国脑计划”^[2]。其中,脑-机接口(brain-computer interface, BCI; 或 brain-machine

interface, BMI)的研究与开发是“脑计划”的重要内容之一。BCI是脑认知神经科学与工程技术的一种新型交互结合方式,可以无需采用常规的肢体神经肌肉接触便能实现人与外界机器设备的思维信息交互、使“思想”变成“行动”,现已成为脑科学研究、大脑认知机制解密的全新“窗口”。

2000年首届脑-机接口国际会议定义BCI为“一种不依赖于通常外围神经和肌肉组成大脑输出通路的对外交互控制系统^[3,4]”。2012年Wolpaw J等人^[5]从神经生

理学角度给出了更为严谨的 BCI 定义:“脑-机接口是一个可以改变中枢神经系统与大脑内外环境之间交互作用的系统,它通过检测中枢神经系统(central nervous system,CNS)活动并将其转化为人工输出来替代、修复、增强、补充或改善 CNS 的正常输出”。可见经十几年实践,科学家已体验到 BCI 技术不仅仅能为大脑搭建新的对外交流通路来替代常规交互方式,而更为重要的是 BCI 可修复、增强、补充或改善 CNS 对外交互状态,使之性能趋于正常甚至更优。这意味着,BCI 在康复医学(尤其脑神经疾病)临床具有诱人的潜在应用价值,如可针对完全或部分丧失交流控制能力患者(脑卒中、脊髓损伤、脊髓侧索硬化等病症)提供全新的增强治疗与康复手段以恢复其语言功能、运动能力^[6-9]。

随着神经科学、工程学、心理学、计算机科学和康复医学等学科飞速发展,BCI/BMI 技术应用已广泛涉及康复医疗、生活娱乐、交通运输、工业控制与国防军事等领域。其中,针对脑神经系统损伤所致运动功能障碍疾患,采用 BCI 技术进行损伤修复、补充或功能替代、增强与改善的康复治疗成果更为突出,为人类健康事业带来了全新希望^[10]。

目前临床康复医学中主要有 3 种用于修复或辅助脑神经受损病患与外界交互控制的途径。1)利用功能尚存的神经通路或肌肉取代受损的神经通路或肌肉(如患者可通过眼动或肢体动作代替语音与外界进行交流对话),该途径虽简单有效,但很受病情局限;2)安装与受伤部位神经或肌肉相匹配并可替代相应功能的外部设备(如以帮助脊髓受损患者恢复肢体运动功能的神经假肢),该方案须有精细外科医术与精密器械制造功底做后盾,实施困难较大;3)为大脑提供一个全新的非神经肌肉输出通道(即 BCI),通过检测大脑 CNS 活动并将其思维意愿直接转化为控制外界设备操作指令以替代、修复、增强、补充或改善 CNS 的相应功能^[5]。显然,该方法无需受限于功能尚存的神经通路或肌肉,也不必依赖于现有高精尖技术,而只需设计好功能独到、操控随心、反应灵敏的 BCI 便可。

然而,由于目前 BCI 系统尚存在所采集的头皮脑电信噪比较低,从中提取反映大脑思维意愿信息并将之转化为控制指令的程序过于复杂使之信息传输率(information transfer rate, ITR)难以提高,进而造成系统自校准时间较长、因个体差异导致模型通用性较弱等一系列技术瓶颈问题,以致其研究成果的推广应用及商业化转换与临床化进程迟缓^[3,11-12]。虽然一些性能优良硬件的投入与多种优秀 BCI 实验范式及系统结构的成功设计和开发已促使 BCI 技术经近十年的高速发展,之后基于传统应用目的和设计原则的 BCI 技术已渐渐达到其发展的第一个平台期,而当前 BCI 技术进入了机遇与挑战并存的全新发展阶段^[11]。

本文拟先综述 BCI 在临床神经功能康复与运动辅助控制的主要技术难点,再以运动想象(motor imagery, MI) BCI 和 BCI 拼写器(Speller)为典型介绍可能克服上述技术瓶颈的模型优化策略和解决方案,最后展望了 BCI 未来发展方向,旨在促进 BCI 迈向新的应用前程。

2 BCI 临床神经功能与运动康复应用的技术优势和难点及其解决方案

如前述,BCI/BMI 研究与开发及其应用的飞速发展得益于全世界“脑计划”的实施。自 20 世纪 90 年代美国推出“脑的十年”计划开始,进入 21 世纪以来,欧、美、日及中国相继提出“推进创新神经技术脑研究计划”,巨大科研投入极大促进了相关技术革新与应用,BCI/BMI 作为其中新兴交叉技术的翘楚亦得到了空前发展与实际应用。其中尤以在脑神经疾病治疗与运动功能康复临床应用令人瞩目,凸显其特有的优势。

图 1 所示为 2001 ~ 2012 年 BCI 相关文献数量在 Scopus 和 Pubmed 数据库中的统计结果^[10]。可见进入 21 新世纪以来 BCI/BMI 研究呈指数增长,技术应用也飞速发展,日益彰显其重要科学意义与应用价值。

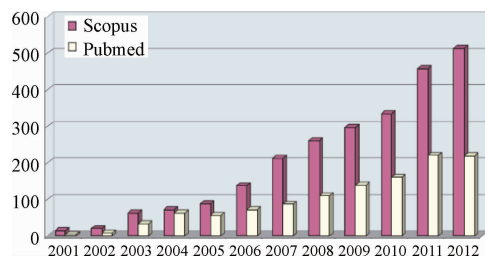


图 1 以“brain computer interface”或“brain machine interface”为关键词在 Scopus 和 Pubmed 数据库中搜索所得 2001 ~ 2012 年发表的文献统计(篇)

Fig. 1 BCI-related publications from 2001 to 2012. The articles and reviews were identified from Scopus and PubMed with the search items ‘BCI’ or ‘BMI’ in either all fields (PubMed) or the abstract, title, or keywords (Scopus)

2.1 BCI 在临床康复与辅助控制中的技术优势

长期以来,脑卒中(Stroke,俗称中风)等脑神经受损累及运动功能障碍疾病的临床康复成为医学一大难题。而基于脑电的运动想象脑-机接口(MI-BCI)技术可直接解码大脑 CNS 的运动思维信息并构成脑-机反馈环路以辅助病人进行“所动即所思”的理想运动康复训练。MI-BCI 在中枢神经可塑理论指导下^[13-14],为运动想象疗法在脑神经康复临床中的应用开拓了全新思路^[15-16]。

应用 BCI 技术进行运动康复训练不仅可以使中风患者重新获得控制患肢的能力,而且可建立主动式闭环刺

激反馈,进而实现运动功能重建。更重要的是通过BCI对CNS功能活动的测量和反馈使患者大脑参与康复训练的过程变得可观察。这带来了两方面的优势:第一,传统运动康复训练中几乎不可观察并难以控制患者的主动参与性,成为困扰临床医生的大问题,而MI-BCI可以很好地监控患者的主动参与度;第二,由于传统运动康复会产生大量代偿训练行为,患者极易习惯性地采用一些不当动作来完成康复任务,以致严重降低康复训练效果,因此需要在康复过程中严密控制和及时矫正患者误动作,这也给临床医师设置了难题,而MI-BCI则能提供很好的靶向任务调控手段。当前,MI-BCI和功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)相结合的MI-BCI-FES康复训练已成为中风治疗的热门方法。有关研究表明MI-BCI-FES比传统单一FES对中风康复治疗更为有效^[17,19];并对MI-BCI系统模型及识别方法优化进行了深入探索^[20-23];作者所在天津大学神经工程与康复实验室研究与开发了基于MI-BCI-FES系统的“神工”系列康复机器人,临床试用已为中风后患者带来新的康复希望^[24-25];应用BCI辅助神经损伤修复与运动功能康复方法学及其疗效评价已成为该领域新的研究焦点^[26-28]。

另外,BCI技术对于一些不可修复型神经损伤(如脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)、肌萎缩性脊髓侧索硬化症(amyotrophic lateral sclerosis, ALS)等疾患)人群的功能替代或辅助也显示出其独特的优势^[29-30],这也与它搭建大脑对外交互控制通路的基本定义相契合。BCI可通过解码用户大脑信息转化为外设控制指令,从而通过外设控制代替用户本身的表达或行动。BCI拼写器(Speller)即为该领域应用典型,BCI-Speller系统可辅助语言障碍人群通过视觉或听觉范式对外交流与控制^[31-32]。其它如BCI控制轮椅、外骨骼等肢体运动辅助设备可帮助丧失行动能力的人群重新获得部分行为控制能力^[33-34];很多系统优化模型研究也令BCI成果应用逐渐向便携化、生活化、商业化转变^[35-38](参见图2所示BCI技术发展至今的趋势^[11])。

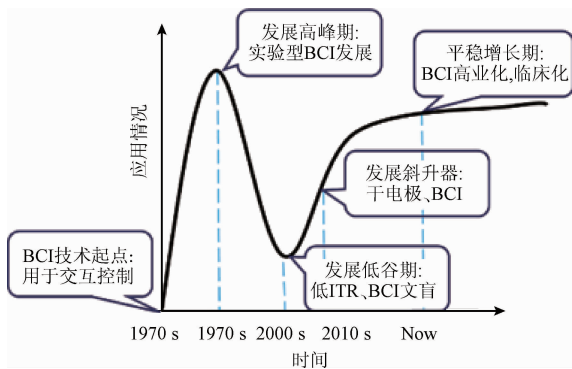


图2 BCI技术发展至今的趋势

Fig. 2 Development trend of BCI technology up to now

2.2 BCI临床康复与辅助控制应用中的技术难题

尽管BCI在临床康复与辅助控制应用中有显著优势,但距离产业化推广应用阶段尚有不少亟待解决的技术难题,可归纳为以下几个方面。

1) 系统信息传输效率较低^[11-12]。常用BCI多采集头皮脑电以提取大脑思维信息,而原始信号本身信噪比低,且采集过程中夹杂着不少干扰成分,进而导致思维信息识别率低、分析处理程序复杂、所付时间代价也大,难以实际推广应用。因此,不少BCI技术尚局限于实验室成果演示而不能满足临床康复应用需求。

2) 系统校准训练时间较长^[39]。BCI须准确识别大脑思维信息才能控制外部设备以精准辅助患者进行正确的康复运动,为此需先对BCI做学习训练以建立实际可行的系统模型。但当前大多数BCI系统模型尚未经足量学习训练。因此BCI使用时为达到一定识别精度要求,往往无法完全脱离系统校准的模型训练阶段^[40],进而使患者在接受康复治疗过程中不得不投入过多精力于模型训练,易产生疲惫感甚至抵制情绪。尤其一些特殊病人根本无法接受这种疲劳康复训练“治疗”。

3) 康复训练过程的反馈监测信息单一^[39]。如前述MI-BCI中风康复系统多只给用户和医师予简单视觉或听觉反馈监测,缺乏实时的运动想象程度量化信息或明确的康复进程反馈信息与监测提示。如此不能起到促进康复训练、提高治疗效果的积极推动作用。

4) 跨人识别和个体识别的难以兼容^[41-42]。BCI康复治疗使用人群较广,脑卒中、脊髓损伤、脊髓侧索硬化症等疾患病人所需治疗要求、训练方案皆不相同。因此BCI系统模型如何兼顾个体特殊性和跨人普适性要求是一大挑战。针对未来系统普适性的要求,实现跨个体识别是BCI模型必然趋势,然而又需要其仍适用于特殊个体,即要求在二者之间博弈中建立最佳的BCI系统模型。

5) BCI系统模型自适应性较差^[43-44]。所谓自适应性是指自动根据数据特征调整其处理顺序、参数、边界或约束条件,使其与所处理数据的统计分布、结构特征相适应,以取得最佳处理效果。当前大多数BCI系统模型尚难以达到上述自适应数据处理水平,无法满足自适应交互控制的要求。

6) 尽管BCI技术为神经科学与工程技术的新型结合产物,优良的学科交叉特性为其发展提供了广阔的应用前景,然而现阶段尚难以对BCI性能进行系统的科学评价,制定科学统一的BCI性能评价标准以推进BCI在临床康复与辅助控制中的实际应用仍是当前重要任务^[28,39]。

2.3 针对BCI临床应用技术难点的技术方案

2.3.1 MI-BCI系统中的识别模型自适应更新方法

目前MI-BCI系统设计大多只存在用户运动想象到指令输出的单向控制通路,缺乏指令输出后的用户反馈(体验信息),因而降低了系统模型运行的自适应性和用

户识别的普适性。为此需在指令输出端与用户间建立信息反馈通路^[45],设计能实时地按用户运动想象模式调节系统控制指令的自适应反馈控制界面,令运动想象过程可视化,才可更好地引导其进行主观意念控制康复训练,提升临床康复效果^[46]。这对提高 BCI 系统信息传输效率、缩短系统校准训练时间、丰富康复训练反馈监测信息、增强系统跨人识别普适性均有益处,对推动 BCI 系统临床实用化具有重要意义。

据此,本课题组进行了系统性的实验研究,图 3 所示为 MI-BCI 用户信息反馈系统设计示意框图。该系统主要由可穿戴头皮脑电采集器(Emotiv EPOC)、计算机信号处理模块、可视反馈界面(能在 MATLAB 平台下进行目标任务、想象次数、训练难度等参数设置的编程设计)和蓝牙等信息传输模块构成。Emotiv 采集 14 通道脑电信号(AF3、AF4、F3、F4、F7、F8、FC5、FC6、T7、T8、P7、P8、O1、O2),可覆盖运动相关脑区导联。

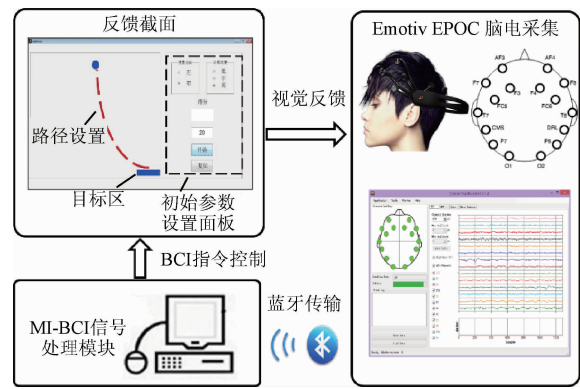


图 3 MI-BCI 系统设计框图

Fig. 3 The design block diagram of the MI-BCI system

MI-BCI 系统实验流程简述如下:用户静坐于屏幕前并注视提示界面进行运动想象(如假想左手或右手抬起),Emotiv 同步采集想象运动相关脑电数据并经放大、滤波后由蓝牙模块传入笔记本电脑;此后脑电数据经处理提取其中运动想象特征信号并用于实验任务的模式识别;识别后随即输出控制指令至外部设备使其按指令动作,产生人脑想象的实时运动;同时将动作效果信息传送到虚拟反馈界面形成人脑运动想象动作相应的视觉反馈,引导用户主动改进想象方式实现更好的靶向控制,从而构成一个闭环反馈控制系统。最终反馈界面将根据用户训练实验情况给出评分。

MI-BCI 系统在线实验流程如图 4 所示。在无初始模型下先后采集用户静息 30 s 与运动想象 20 s 的脑电数据,并计算 MI 期间的事件相关去同步(event-related desynchronization, ERD)能量值^[47],生成初始判定阈值;然后进入 20 s 的 MI 游戏反馈训练,达到阈值则输出目标指令反馈结果;经过两轮反馈训练,利用积累的数据建

立共空间模式(common spatial pattern, CSP) + 支持向量机(support vector machine, SVM)模型^[48],形成更稳定的阈值判定标准;如此反复训练,利用新数据不断更新模型,进一步提高模型适用性,从而提高系统识别精度及稳定性。

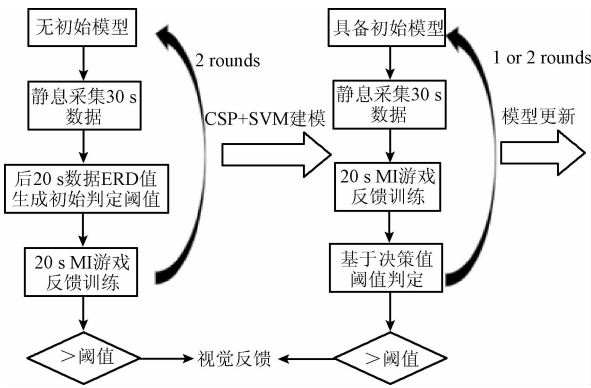


图 4 MI-BCI 系统在线处理流程设计

Fig. 4 Online processing flow design of the MI-BCI system

该系统模型采用的在线数据处理流程:用户面前的反馈控制界面会提示其进行动作想象;每次采集当前 2 s 的脑电数据,运用 SVM 方法进行分类识别;若特征识别结果大于决策阈值时,则触发动作指令,执行目标动作,并将动作信息显示于反馈界面;反之,则不执行目标动作也无动作信息反馈。图 5 所示为 10 名健康受试者在两种不同模型更新策略下分别进行五次 MI-BCI 在线训练实验时系统模型更新的正确率平均结果,表明 MI-BCI 系统识别精度可随模型更新而提高,且应用自适应模型更新策略的 BCI 识别精度提升效果会更显著、更稳定。

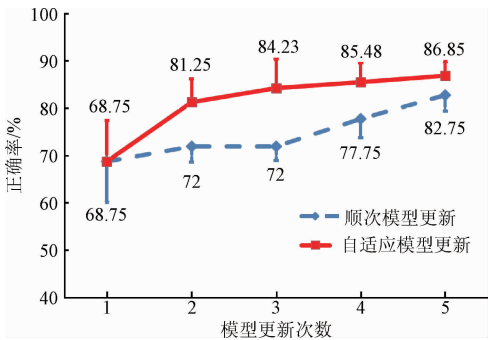


图 5 10 名健康受试者不同策略下 5 次在线模型更新的正确率平均结果

Fig. 5 Average accuracy of 5 online model updates for 10 healthy subjects under different strategies

综上所述,用于临床康复与辅助控制的 BCI 系统应尽可能在设备输出指令与用户间建立信息反馈通路及其自适应反馈控制界面,使用户操作意愿及其指令控制的

过程可视化(或可感知),才可更好地引导用户进行主观意念控制的康复训练。该方案作为一项原理性技术方法,可拓展适用于其他 BCI 系统范式,为目前高效率加快 BCI 自适应系统模型优化、提升临床康复效果、促使其克服上述技术瓶颈以适应大规模产业化推广应用提供了参考依据。

2.3.2 BCI-Speller 系统中的动态停止判别策略研究

BCI-Speller 系统主要用于辅助语言障碍人群对外进行信息交流。信息传输速率 (information transmission rate, ITR) 是评价其性能的重要指标^[47],然而目前其 ITR 尚远不能满足实用要求。主要原因在于其系统模型设计多为针对固定指令集与固定次数视觉刺激后的指令输出模式,缺乏弹性灵活的指令输出,使其系统速度和正确率会相互制约,从而影响 ITR 的提高^[11,50]。于是字符指令输出决策方式的设计成为研究热点之一,实践也证明:通

过改变判别指令输出策略能够有效地改善视觉 BCI-Speller 的性能。由此启示:考虑系统速度、正确率之间的平衡问题,提供一种新型的动态停止判别指令输出的策略,对于 BCI-Speller 系统的实用化研究具有重要意义^[40]。

图6所示为典型视觉 BCI-Speller 系统模型基本设计示意图^[49],含 P300 视觉编码刺激、脑电采集放大与处理及指令控制和显示等单元。系统采集 6 个通道 (Fz、Cz、Pz、Oz、P7、P8) 的脑电数据。实验时,受试者注视屏幕上 Oddball 范式闪烁刺激,同步采集视觉诱发所得脑电经处理提取相应的 P300 电位特征信号,再依据这些特征进行实验任务的模式识别,进而应用基于贝叶斯准则下动态停止标准 (dynamic stopping criterion, DSC)^[50] 决策阈值判别指令输出与否。

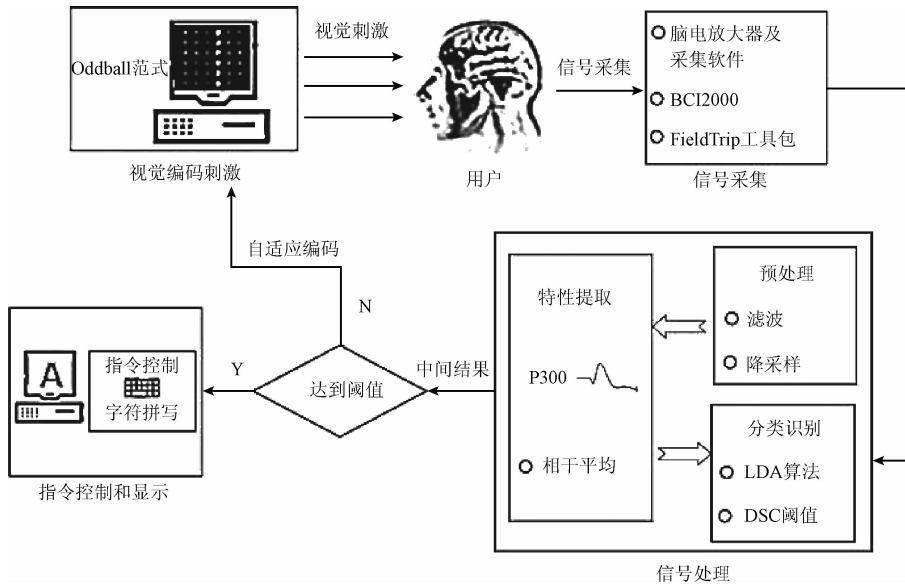


图6 在线系统模型设计示意图^[49]

Fig. 6 The design schematic diagram of online system model

该系统模型的核心问题是寻求最佳动态停止标准以实现自适应地发送视觉刺激指令并能以最高 ITR 在线输出 BCI 结果。基本 DSC 算法流程如图 7 所示,其系统背景为 BCI-Speller,分类算法为线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA)^[51]。

图7上面处理流程应用 Kernel 密度估计算法(适用高斯分布数据)分别得到目标字符概率密度 $p(x_i | H_1)$ 和非目标字符概率密度 $p(x_i | H_0)$,其中 x_i 表示分类器对于一次闪烁的输出, $H_1 (H_0)$ 表示是否为目标字符出现。所得概率参数将作为先验知识用于在线数据处理的实时控制,算法流程如图7下面所示。该过程关键在于根据概

率参数和在线数据分类器输出后验概率 (posterior probability) 所得闪烁字符是否为目标字符进而决定是否继续下一轮次的闪烁刺激。其决策的贝叶斯概率公式如下^[50]:

$$p(C | x_i, S_i, X) = \frac{p(C | X)p(x_i | C, S_i)}{\sum_i p(C | X)p(x_i | C, S_i)} \quad (1)$$

式中: $p(C | X)$ 是当前字符为目标字符的概率估计, $p(x_i | C, S_i)$ 是分类器输出为 x_i 的条件概率,表示字符是否在当前闪烁集合 S_i 中,分母表示到第 i 时刻的所有字符概率之和。

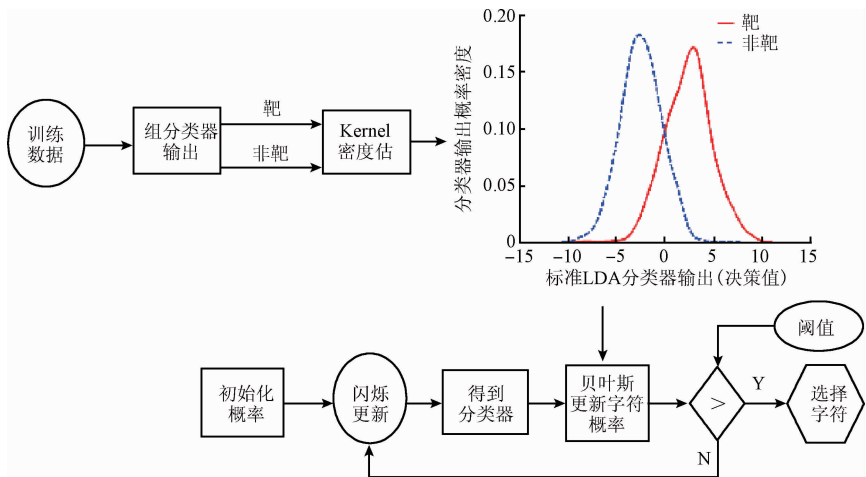


图 7 DSC 算法应用流程^[50]
Fig. 7 The flow chart of DSC algorithm application

每次贝叶斯概率更新之后都会与阈值相比较,当概率值大于设定阈值(代表正确字符是否已被选出的置信度)即输出当前决策结果。阈值是比较多次实验结果的择优经验值,阈值大小直接影响到正确率和运算时间的矛盾组合。

依据该优化策略,作者所在课题组进行了相应实验测试研究。如图 8 所示,对比了 5 名受试者应用该在线 BCI-Speller 系统分别采用 DSC 模型与传统静态标准(static state criterion, SSC)模型下的信息传输率,结果表明应用 DSC 策略可明显提高 BCI-Speller 信息传输率^[50]。

总之,采用基于贝叶斯准则下动态停止判别策略可灵活调控 BCI-Speller 的指令输出,能够自适应、动态地实现脑控拼写过程,即优化调整了其系统模型,克服了传统静态闪烁刺激范式存在的信息传输速率低的缺陷,更接近实际应用,有望为新型 BCI-Speller 提供关键技术保障。该研究也为同原理结构的 BCI 系统范式提供了关键优化改进方法,有力推进 BCI 尽快步入大范围应用。

此外,迁移学习(transfer learning)、语言模型(language models)^[40]、滤波频带组共空间模式(filter bank common spatial pattern, FBCSP)^[20,26]等很多 BCI 系统模型优化策略与技术方法近年来被研究试用,从原理结构、系统范式、场景适用性等方面拓展了 BCI 技术革新的全新思路,为 BCI 系统模型的不断优化完善及克服上述技术瓶颈提供了新的解决方案,不断促进其向实用化、商业化应用发展。

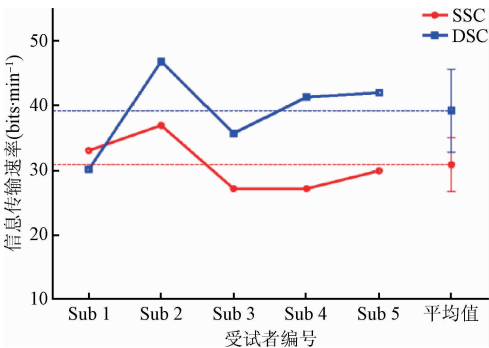


图 8 DSC 模型与 SSC 模型下传输率对比
Fig. 8 The comparison of the transfer rates between DSC model and traditional static model

3 BCI 技术的未来发展及应用方向

2013 年 6 月,第五届脑-机接口国际会议在美国成功召开,来自 29 个国家 165 个研究团队的 301 位 BCI 专家参加了本次会议^[52]。与历届 BCI 国际会议一样,会议主题延续了之前的广谱性,涉及研究领域涵盖了神经科学、工程学、应用数学、计算机科学、心理学和康复工程等诸多领域。本届 BCI 国际会议有两个重大改革:1)特邀有严重残疾的 BCI 用户参会,向大会表达了使用相关 BCI 设备的亲身体会和对未来 BCI 研究开发的重要需求与愿望,他们的积极参与对 BCI 系统研发目标选择和思路与方法的创新,皆有重要的启迪作用,并为 BCI 未来的性能改进和实用性发展指明了方向;2)大会首次强调了关于 BCI 发展和使用的伦理性问题,并进行了有关 BCI 功能的专题讨论,说明随着 BCI 系统性能增强和应用范围扩

大,必须密切关注其可能引发的社会伦理问题并进行系统分析讨论和建立相应必须遵守的准则。

第五届 BCI 国际会议的主题是“定义未来”(“defining the future”),旨在解决如何将 BCI 研究成果转化到实际应用场景当中,为残疾病人群的康复治疗及辅助技术研究赢得更广泛的社会和学术界关注,该次 BCI 国际会议重新定义 BCI 技术的未来,并指明了今后 BCI 技术服务人类健康生活与交互控制的远期目标及发展方向,也预示了其在助老、助残、助特(军事、航天等)等方面的光明前景。

3.1 基于 BCI 的神经康复与接口控制应用

BCI 研究初衷是为残疾人提供一个与外界进行交流的通信方式,让他们通过这样的系统用自己的思维操控轮椅、假肢等^[5]。但随着 BCI 技术的日益成熟,以及不断取得重大的突破性成果进展,人们对智能机器人的需求逐渐增加,BCI 机器人的概念也应运而生,多种技术(如 FES 技术^[53]、机械外骨骼(exoskeleton,Exo)等)融合是其重要特征之一,如图 9 所示是 BCI 技术与 Exo 技术融合的应用范例^[54]。



图9 BCI 技术辅助控制应用举例:利用 BCI-Exo 融合技术,瘫痪少年为 2014 年巴西世界杯开球

Fig.9 Assistive control application example of the BCI technology: The paralyzed teenager kicked off with BCI-Exo fusion technology at the 2014 world cup in Brazil

BCI 机器人采用人机交互方式,由人的思维控制机器人从事各种工作。它不仅在残疾人康复、老年人护理方面具有显著的优势^[55-56],而且在航天工程、军事、人工智能、交通运输、生活娱乐等方面也具有广阔的应用前景。

在神经康复或辅助医学领域,BCI 机器人可以帮助肢体运动障碍患者提高他们的生活质量^[5],如:1)与周围环境进行交流,BCI 机器人可以帮助残疾人使用电脑、拨打电话等;2)控制周围环境设备,BCI 机器人可以帮助残疾人或老年人控制轮椅、家庭电器开关等;3)运动神经康复,BCI 康复机器人可以帮助残疾人或失去运动能力的病患或老年人进行主动康复训练,BCI 护理机器人可以从事基本护理工作,提高残疾人或老年人的生活质量。

目前 BCI 机器人研究主要应用于医学领域,特别是为残疾人与老年人提供帮助。2014 年,由作者所在天津大学神经工程与康复实验室联合天津市人民医院研发的“神工一号”问世^[25]。这是全球首台适用于全肢体中风康复的“纯意念控制”人工神经机器人系统。与图 9(b)所示在世界杯上亮相的脑控机械外骨骼相比,“神工一号”通过 MI-BCI 结合 FES 能够真正实现大脑皮层与肌肉活动的同步耦合^[24],其基本原理及产品结构功能如图 10 所示。期待“神工”系列康复机器人对残疾人与老年人的临床康复治疗做出新贡献。

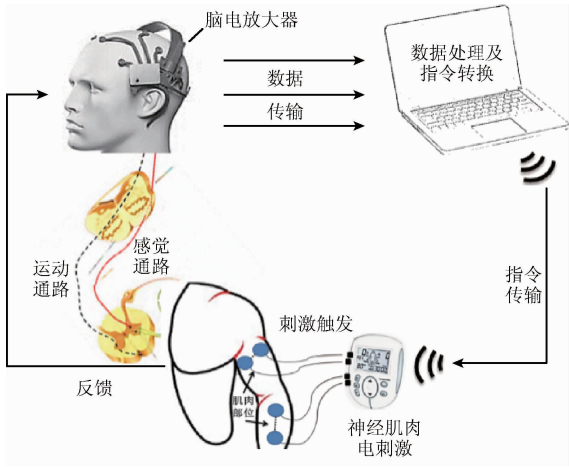
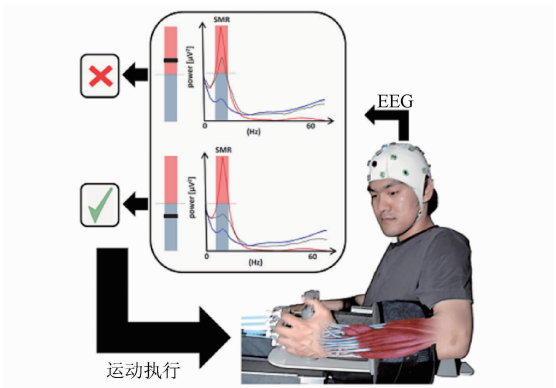
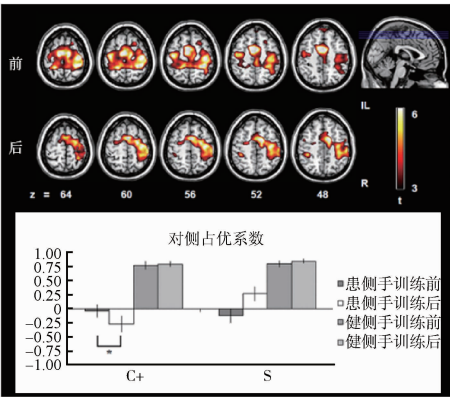


图 10 “神工”人工神经机器人系统
Fig. 10 The TUNEXON artificial neural robot system

在 BCI 系统应用有效性评价及机制研究方面,Ramos-Murguialday A 等人^[27]基于 BCI 控制理论,开展了 MI-BCI 控制机械矫正设备对于中风康复训练有效性的研究。他们跟踪对比研究了 16 名上肢重度偏瘫的患者及 16 名健康者在该套系统下的训练康复过程,系统设计与跟踪实验设置如图 11(a)所示。利用静息态功能磁共振成像结合 Fugl-Meyer 医学评定量表监测了康复训练效果。神经功能激活特性(见图 11(b))及运动功能恢复结果表明,MI-BCI 控制机械矫正设备的中风康复训练方式是有效的,同时也为神经可塑性观察及评价提供了方法学基础。



(a) MI-BCI控制机械矫正设备系统设计示意图
(a) The system design of MI-BCI correction equipment with arm orthoses

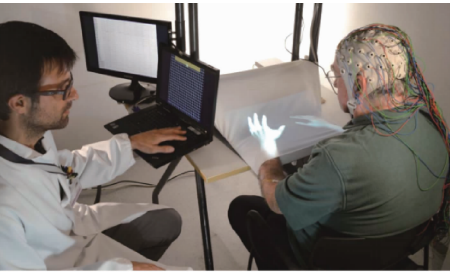


(b) 功能核磁下对侧占优评估结果对比
(b) The comparison of lateralization indexes in fMRI activity

图 11 MI-BCI 康复训练研究

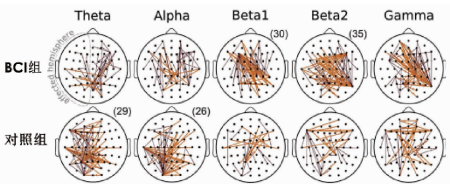
Fig. 11 Research of MI-BCI rehabilitation training system

Pichiorri F 等人^[28]利用 BCI 融合控制虚拟上肢运动的方式开展了该 MI-BCI 系统的中风康复训练有效性研究,如图 12(a)所示。对比研究了 28 名上肢中风患者在不同训练模式下(14 名接受 MI-BCI 控制虚拟上肢运动模式训练,14 名仅接受单纯的 MI 训练)的康复效果。经过一个月的临床跟踪研究,高密度脑电的不同节律响应下功能网络连接特性分析(见图 12(b))及 Fugl-Meyer 医学评定量表结果表明 BCI 技术的引入可强化中风康复训练效果,进一步验证了 BCI 训练对于运动神经功能恢复的有效性。



(a) BCI控制虚拟上肢运动训练系统

(a) The training system of BCI controlled “virtual hands”



(b) 高密度脑电节律响应下功能连接特性对比
(b) The comparison of high-density EEG connectivity patterns under different rhythm response between BCI group and control group

图 12 BCI 运动康复训练研究

Fig. 12 Research of BCI motor rehabilitation training

此外,虚拟现实(virtual reality, VR)^[57]、机械外骨骼^[58]、经颅电磁刺激(transcranial electric/magnetic stimulation, TE/DS)^[59-60]等外设技术的产生与发展也为 BCI 控制应用提供了更多可能,凸显了人-机智能交互的优越前景,不断为 BCI 临床康复与辅助控制应用乃至整个 BCI 技术领域开辟全新格局。

3.2 基于 BCI 的航天、军事、生活娱乐等应用

当然,BCI 技术应用不仅仅限于医学领域。1) 特殊环境作业:BCI 机器人有望代替在轨航天员进行太空作业;代替军人进行野外训练作战;辅助一些危险环境下的工业控制任务等。2) 从临床应用到家庭护理:BCI 有望像一件智能家居一样,融入日常生活,为人们的健康护理提供主观的、人性化服务。3) 生活娱乐:随着人类精神需求的不断提高,BCI 技术作为一种神奇的脑控交互式手段,已经逐渐在娱乐生活方面崭露头角。如从 BCI 到 BCI 游戏已经有相当多的成果。

Finke A 等人^[61]利用 P300-Speller 系统实现了新的游戏功能:将目标字符和非目标字符进行移动分类到目标区域内,为该类游戏 BCI 的娱乐性应用奠定了基础;Kaplan A 等人^[62]整合 P300-BCI 控制 6-DOF 机械臂进行国际象棋游戏(见图 13),实现了娱乐性 BCI 机器人的成功示范,之前他们还应用 P300 范式切换控制 BCI 输出指令,开发了一种拼图游戏,游戏期间刺激范式会根据游戏状态发生改变,以适应当前指令集需求,该成果实现了 BCI 范式设计的自适应匹配,是一次比较成功的 BCI 娱乐应用。



图 13 BCI 游戏应用:控制国际象棋游戏

Fig. 13 BCI game application: controlling chess game

以上这些范例真正实现了BCI技术作为人类“第三只手”的功能,体现其在各个领域辅助控制方面的诸多应用可能,预示未来将会有更多人性化、实用化、安全化的BCI应用成果步入人们的日常生活。

4 结 论

BCI系统已经展现了在临床康复与辅助控制方面的巨大潜力,它利用很多不同的大脑信号类型、记录方法和信号处理方式来控制各种各样的外接设备,从移动光标到拼写输入计算机屏幕上的形象化符号,从轮椅到功能假肢控制,从简单机械臂到智能机器人等等^[5]。无论是正常人还是残障人群都有望能够使用它,而且一些BCI应用已经步入人们的日常生活^[63-65]。随着硬件系统的便携化改进,不断的科学临床验证,有效的通用模型应用及系统可靠性的提高,BCI可能成为残障人群最主要的康复和辅助技术,甚至对于普通人群来说也可能成为电玩新宠。BCI相关研究和发 展将继续受到科学 研究者们的 高度重视,有着令人期待的光明未来。

参考文献

- [1] 唐孝威. 脑科学导论[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006.
TANG X W. Introduction to brain science [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [2] POO M M, DU J L, IP N, et al. China brain project: Basic neurosciences, brain diseases, and brain-inspired computing [J]. Neuron, 2016, 92(3): 591-596.
- [3] 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.
- [4] WOLPAW J R, BIRBAUMER N, HEETDERKS W J, et al. Brain-computer interface technology: A review of the first international meeting [J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 2000, 8(2): 164-173.
- [5] WOLPAW J, WOLPAW E W. Brain-computer interfaces: Principles and practice [M]. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- [6] MÜLLER-PUTZ G R, DALY I, KAISER V. Motor imagery-induced EEG patterns in individuals with spinal cord injury and their impact on brain - computer interface accuracy [J]. Journal of Neural Engineering, 2014, 11(3): 035011.
- [7] MAINSAH B O, COLLINS L M, COLWELL K A, et al. Increasing BCI communication rates with dynamic stopping towards more practical use: an ALS study [J]. Journal of Neural Engineering, 2015, 12(1): 016013.
- [8] HÖHNE J, HOLZ E, STAIGER-SÄLZER P, et al. Motor imagery for severely motor-impaired patients: Evidence for brain-computer interfacing as superior control solution [J]. Plos One, 2014, 9(8): e104854.
- [9] BURNS A, ADELI H, BUFORD J A. Brain-computer interface after nervous system injury [J]. Neuroscientist, 2014, 20(6): 639-651.
- [10] THOMPSON D E, QUITADAMO L R, MAINARDI L, et al. Performance measurement for brain-computer or brain-machine interfaces: a tutorial [J]. Journal of Neural Engineering, 2014, 11(3): 035001.
- [11] CECOTTI H. Spelling with non-invasive brain-computer interfaces-current and future trends [J]. Journal of Physiology-Paris, 2011, 105(1): 106-114.
- [12] AHN M, LEE M, CHOI J, et al. A Review of Brain-computer interface games and an opinion survey from researchers, developers and users [J]. Sensors, 2014, 14(8): 14601-14633.
- [13] CAURAUGH J H, SUMMERS J J. Neural plasticity and bilateral movements: A rehabilitation approach for chronic stroke [J]. Progress in Neurobiology, 2005, 75(5): 309-320.
- [14] CRAMER S C, SUR M, DOBKIN B H, et al. Harnessing neuroplasticity for clinical applications [J]. Brain, 2011, 134(6): 1591-1609.
- [15] IETSWAART M, JOHNSTON M, DIJKERMAN H C, et al. Mental practice with motor imagery in stroke recovery: Randomized controlled trial of efficacy [J]. Brain, 2011, 134(5): 1373-1386.
- [16] DIMYAN M A, COHEN L G. Neuroplasticity in the context of motor rehabilitation after stroke [J]. Nature Reviews Neurology, 2011, 7(2): 76-85.
- [17] TAM W K, TONG K, MENG F, et al. A minimal set of electrodes for motor imagery BCI to control an assistive device in chronic stroke subjects: A multi-session study [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2011, 19(6): 617-627.
- [18] TAKAHASHI M, TAKEDA K, OTAKA Y, et al. Event related desynchronization-modulated functional electrical stimulation system for stroke rehabilitation: A feasibility study [J]. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2012, 9(1): 56.
- [19] YOUNG B M, NIGOGOSYAN Z, WALTON L M, et al. Changes in functional brain organization and behavioral correlations after rehabilitative therapy using a brain-computer interface [J]. Frontiers in Neuroengineering, 2014(7): 26.
- [20] ANG K K, CHIN Z Y, ZHANG H, et al. Filter bank

- common spatial pattern (FBCSP) in brain-computer interface [C]. IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2008: 2390-2397.
- [21] KAISER V, KREILINGER A, MÜLLER-PUTZ G R, et al. First steps toward a motor imagery based stroke BCI: New strategy to set up a classifier [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2011(5): 86.
- [22] TANGWIRIYASAKUL C, MOCIOIU V, VAN PUTTEN M J, et al. Classification of motor imagery performance in acute stroke [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 036001.
- [23] NICOLAS-ALANSO L F, CORRALEJO R, GOMEZ-PILAR J, et al. Adaptive stacked generalization for multiclass motor imagery-based brain computer interfaces [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2015, 23(4): 702-712.
- [24] 明东, 王坤, 何峰, 等. 想象动作诱发生理信息检测及其应用研究: 回顾与展望 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(9): 1921-1931.
- MING D, WANG K, HE F, et al. Study on physiological information detection and application evoked by motor imagery: Review and prospect [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(9): 1921-1931.
- [25] JIANG S, SHEN L, WANG Z, et al. Application of BCI-FES system on stroke rehabilitation [C]. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering IEEE*, 2015: 1112-1115.
- [26] VARKUTI B, GUAN C, PAN Y, et al. Resting state changes in functional connectivity correlate with movement recovery for BCI and robot-assisted upper-extremity training after stroke [J]. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2013, 27(1): 53-62.
- [27] RAMOS-MURGUIALDAY A, BROETZ D, REA M, et al. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: A controlled study [J]. *Annals of Neurology*, 2013, 74(1): 100-108.
- [28] PICHIORRI F, MORONE G, PETTI M, et al. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery [J]. *Annals of Neurology*, 2015, 77(5): 851-865.
- [29] MÜLLER-PUTZ G R, DALY I, KAISER V. Motor imagery-induced EEG patterns in individuals with spinal cord injury and their impact on brain-computer interface accuracy [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 035011.
- [30] MCCANE L M, HECKMAN S M, MCFARLAND D J, et al. P300-based brain-computer interface (BCI) event-related potentials (ERPs): People with amyotrophic lateral sclerosis (ALS) vs. age-matched controls [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2015, 126(11): 2124-2131.
- [31] XU M, CHEN L, ZHANG L, et al. A visual parallel-BCI speller based on the time-frequency coding strategy [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(2): 026014.
- [32] SIMON N, KÄTHNER I, RUF C A, et al. An auditory multiclass brain-computer interface with natural stimuli: Usability evaluation with healthy participants and a motor impaired end user [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, 8(1039): 1039.
- [33] KAUFMANN T, HERWEG A, KÜBLER A. Toward brain-computer interface based wheelchair control utilizing tactually-evoked event-related potentials [J]. *Journal of Neuroengineering & Rehabilitation*, 2014, 11(1): 7.
- [34] ELNADY A M, ZHANG X, XIAO Z G, et al. A single-session preliminary evaluation of an affordable BCI-controlled arm exoskeleton and motor-proprioception platform [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015(9): 168.
- [35] DE VOS M, KROESEN M, EMKES R, et al. P300 speller BCI with a mobile EEG system: Comparison to a traditional amplifier [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 036008.
- [36] POLPRASERT C, KUKIEATTIKOOL P, DEMEECHAI T, et al. New stimulation pattern design to improve P300-based matrix speller performance at high flash rate [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2013, 10(3): 036012.
- [37] KAUFMANN T, KÜBLER A. Beyond maximum speed-a novel two-stimulus paradigm for brain-computer interfaces based on event-related potentials (P300-BCI) [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(5): 056004.
- [38] XU M, QI H, WAN B, et al. A hybrid BCI speller paradigm combining P300 potential and the SSVEP blocking feature [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2013, 10(2): 026001.
- [39] RUPP R. Challenges in clinical applications of brain computer interfaces in individuals with spinal cord injury [J]. *Frontiers in Neuroengineering*, 2014, 7(7): 38.
- [40] KINDERMANS P J, TANGERMANN M, MÜLLER K R, et al. Integrating dynamic stopping, transfer learning and language models in an adaptive zero-training ERP speller [J]. *Journal of Neural Engineering*, 2014, 11(3): 035005.
- [41] CANTILLO-NEGRETE J, GUTIERREZ-MARTINEZ J, CARINO-ESCOBAR R I, et al. An approach to improve

- the performance of subject-independent BCIs-based on motor imagery allocating subjects by gender [J]. Biomedical Engineering Online, 2014, 13(1): 158.
- [42] WOEHRLE H, KRELL M M, STRAUBE S, et al. An adaptive spatial filter for user-independent single trial detection of Event-related potentials [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015, 62(7): 1696-1705.
- [43] BRYAN M J, MARTIN S A, CHEUNG W, et al. Probabilistic co-adaptive brain-computer interfacing [J]. Journal of Neural Engineering, 2013, 10(6): 066008.
- [44] 李勃. 脑-机接口技术研究综述 [J]. 数字通信, 2013, 40(4): 5-8.
- LI B. Brain-computer interface technology research review [J]. Digital Communication, 2013, 40(4): 5-8.
- [45] ANG K K, GUAN C, PHUA K S, et al. Facilitating effects of transcranial direct current stimulation on motor imagery brain-computer interface with robotic feedback for stroke rehabilitation [J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2015, 96(3): S79-S87.
- [46] TEO W P, CHEW E. Is motor-imagery brain-computer interface feasible in stroke rehabilitation? [J]. PM & R, 2014, 6(8): 723-728.
- [47] BLANKERTZ B, TOMIOKA R, LEMM S, et al. Optimizing spatial filters for robust EEG single-trial analysis [J]. Signal Processing Magazine IEEE, 2008, 25(1):41-56.
- [48] YI W, SHUANG Q, QI H, et al. EEG feature comparison and classification of simple and compound limb motor imagery [J]. Journal of Neuroengineering & Rehabilitation, 2013, 10(8):541-544.
- [49] CHEN L, WANG Z, HE F, et al. An online hybrid brain-computer interface combining multiple physiological signals for webpage browse [C]. IEEE International Conference on Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2015:1152-1155.
- [50] THROCKMORTON C S, COLWELL K A, RYAN D B, et al. Bayesian approach to dynamically controlling data collection in P300 spellers [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2013, 21(3): 508-517.
- [51] KEE C Y, CHETTY R M K, KHOO B H, et al. Genetic algorithm and bayesian linear discriminant analysis based channel selection method for P300 BCI [J]. Communications in Computer & Information Science, 2012, 330:226-235.
- [52] HUGGINS J E, WOLPAW J R. Papers from the fifth international Brain-computer interface meeting [J]. Journal of Neural Engineering, 2014, 11(3): 030301-1-2.
- [53] PFURTSCHELLER G, NEUPER C, MÜLLER G R, et al. Graz-BCI: State of the art and clinical applications[J]. IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2003, 11(2):177-80.
- [54] SMITH S. Mind-controlled exoskeleton kicks off world cup [J]. New Scientist, 2014, 6(13): 2973.
- [55] 李明芬, 贾杰, 刘烨, 等. 基于运动想象的脑-机接口康复训练对脑卒中患者上肢运动功能的影响[J]. 老年医学与保健, 2012, 18(6):347-352.
- LI M F, JIA J, LIU Y, et al. Effect of motor imagery based brain computer interface rehabilitation training on upper limb motor function for stroke patients [J]. Geriatrics & Health Care, 2012, 19(6): 347-352.
- [56] 刘小燮, 毕胜, 高小榕, 等. 基于运动想象的脑机交互康复训练新技术对脑卒中大脑可塑性影响[J]. 中国康复医学杂志, 2013, 28(2): 97-102
- LIU X X, BI SH, GAO X R, et al. A new technique of rehabilitation training based on motor imagine using brain computer interface-functional electric stimulation system and it's effect on plasticity of brain of a stroke patient [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2013, 28(2): 97-102.
- [57] IM H, KU J, KIM H J, et al. Virtual reality-guided motor imagery increases corticomotor excitability in healthy volunteers and stroke patients [J]. Annals of Rehabilitation Medicine, 2016, 40(3):420-431.
- [58] SCZESNY-KAISER M, HÖFFKEN O, AACH M, et al. HAL® exoskeleton training improves walking parameters and normalizes cortical excitability in primary somatosensory cortex in spinal cord injury patients [J]. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2015, 12(1):1-11.
- [59] VAN ASSELDONK E H, BOONSTRA T A. Transcranial direct current stimulation of the leg motor cortex enhances coordinated motor output during walking with a large inter-individual variability [J]. Brain Stimulation, 2015, 9(2):182-190.
- [60] TORRES J, DREBING D, HAMILTON R. TMS and tDCS in post-stroke aphasia: Integrating novel treatment approaches with mechanisms of plasticity [J]. Restorative Neurology & Neuroscience, 2013, 31(4): 501-515.
- [61] FINKE A, LENHARDT A, RITTER H. The MindGame: a P300-based brain-computer interface game [J]. Neural Networks, 2009, 22(9): 1329-1333.

- [62] KAPLAN A, SHISHKIN S, GANIN I, et al. Adapting the P300-based brain-computer interface for gaming: A review [J]. IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, 2013, 5(2): 141-149.
- [63] MIRALLES F, VARGIU E, DAUWALDER S, et al. Brain computer interface on track to home [J]. Scientific World Journal, 2015, doi:10.1155/2015/623896.
- [64] HOLZ E M, BOTREL L, KAUFMANN T, et al. Long-term independent brain-computer interface home use improves quality of life of a patient in the locked-in state: A case study [J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2015, 96(3): S16-S26.
- [65] VAN ERP J B F, LOTTE F, TANGERMANN M. Brain-computer interfaces: Beyond medical applications [J]. Computer, 2012, 45(4): 26-34.

作者简介



王仲朋, 2014 年于河北工业大学获得学士学位, 现为天津大学生物医学工程专业在读博士研究生, 主要研究方向为神经康复与脑-机接口。

E-mail: tunerl_wzp1@tju.edu.cn

Wang Zhongpeng received his B. Sc. degree in 2014 from Hebei University of Technology. Now, he is

a doctoral candidate in biomedical engineering in Tianjin University. His main research interest is neural rehabilitation and brain-computer interface.



何峰, 2009 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授, 主要研究方向为神经工程、生物医学信息处理等。

E-mail: heaven@tju.edu.cn

He Feng received his Ph. D. degree in 2009 from Tianjin University. Now, he is an associate professor in Tianjin University. His main research interest includes neural engineering and biomedical information processing.



明东(通讯作者), 2004 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为神经工程与康复、生物医学信息处理等。

E-mail: richardming@tju.edu.cn

Ming Dong (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2004 from Tianjin University. Now, he is a professor in Tianjin University. His main research interest includes neural engineering and rehabilitation, biomedical information processing.