

《Progress in Brain Computer Interface: Challenges and Opportunities》阅读笔记

人工智能学院 202528014628061 刘子昊

一、论文核心概况

《Progress in Brain Computer Interface: Challenges and Opportunities》(《脑机接口研究进展：挑战与机遇》) 发表于 2021 年 2 月的《Frontiers in Systems Neuroscience》期刊，是一篇系统性综述论文。作者团队来自澳大利亚、孟加拉国、阿联酋等多个国家的高校和研究机构，涵盖电气工程、生物医学工程、神经科学等多个领域，为论文提供了跨学科的研究视角。

论文核心目标是总结过去几十年脑机接口 (BCI) 领域的最新进展，剖析当前面临的挑战，并展望未来发展机遇。脑机接口作为一种大脑与计算机或外部设备直接通信的技术，无需肌肉参与，既能增强人体原有功能，也能替代受损的外周工作能力，在康复医疗、情感计算、机器人控制、游戏娱乐、神经科学研究等多个领域具有巨大应用潜力。

论文通过梳理 BCI 系统的分类、性能影响因素、技术瓶颈、应用场景及伦理问题，构建了完整的 BCI 研究框架，为该领域的科研人员、工程师及相关从业者提供了全面且权威的参考依据。全文逻辑清晰，从基础概念到前沿应用，从技术难题到伦理考量，层层递进，展现了 BCI 技术从实验室走向实际应用过程中的复杂性与广阔前景。

二、BCI 的基础概念与分类

2.1 核心定义

脑机接口 (BCI) 是大脑与计算机或外部设备之间直接、有时甚至是双向的通信连接，不依赖肌肉刺激。其核心价值在于为运动障碍患者提供康复途径，同时从生理或认知层面增强人体工作能力。自 1973 年 J.J. Vidal 首次实现基于脑电图 (EEG) 的 BCI 系统以来，该技术已从最初的神经康复辅助工具，发展为跨多领域的多功能技术。

2.2 系统分类

2.2.1 按大脑信号利用方式分类

- 被动 BCI: 解码大脑非故意产生的情感或认知状态，无需用户主动配合。例如通过检测驾驶员脑电波判断嗜睡状态，进而预防交通事故。
- 主动 BCI: 依赖用户自愿产生的脑活动，如运动想象 (MI) 引发的脑信号，用户需主动进行思维控制。
- 反应性 BCI: 利用大脑对外部刺激产生的反应信号，如视觉刺激诱发的 P300 电位，常见于脑机接口拼写器等设备。

2.2 按信号采集方式分类

- 非侵入式 BCI: 无需手术, 通过头皮或体表传感器采集信号, 常见技术包括脑电图(EEG)、功能性近红外光谱(fNIRS)、脑磁图(MEG)、功能性磁共振成像(fMRI)等。其中 EEG 因便携性强、成本较低, 是目前应用最广泛的非侵入式技术。
- 侵入式 BCI: 通过手术将电极植入大脑皮层或颅内, 如皮质内电极、脑皮层电图(ECoG)。其优势是信号信噪比高、脑活动定位精准, 但存在手术风险, 仅适用于严重运动障碍患者等特定人群。

2.2.3 按通信方向分类

- 单向 BCI: 仅将大脑信号转换为计算机指令, 是目前主流应用形式, 如通过脑信号控制轮椅移动。
- 双向 BCI: 既能解码脑信号, 也能向目标脑区传递外部刺激以诱导神经可塑性, 如结合经颅磁刺激(TMS)或经颅直流电刺激(tDCS)的康复系统, 甚至可实现脑-脑直接通信。

2.3 关键技术组件

BCI 系统主要由三部分构成: **信号采集** (通过神经传感器捕获脑信号)、**信号处理** (对原始信号进行滤波、特征提取与分类)、**效应器设备** (执行计算机指令的外部装置, 如假肢、轮椅、机器人等)。此外, 部分应用还需**辅助模式**, 如本体感觉反馈、功能性电刺激等, 以增强人机交互的准确性和自然性。

三、BCI 的发展历程与应用领域

3.1 发展历程

BCI 技术的发展可追溯至 20 世纪 70 年代: 1973 年, Vidal 利用 EEG 记录大脑皮层诱发电位, 实现首个系统性 BCI; 1988 年, 研究人员采用 P300 电位为严重运动障碍患者构建直接通信渠道; 21 世纪以来, 随着神经科学、传感器技术和机器学习的进步, BCI 应用场景不断拓展, 从单一康复功能向多领域渗透。

从发表论文数量统计来看 (基于 PubMed 数据), 2010 年后 BCI 领域的研究文献呈显著增长趋势, 表明全球科研社区对该技术的关注度持续提升, 技术成熟度逐步提高。

3.2 核心应用领域

根据欧盟“脑/神经计算机交互地平线 2020”项目定义, BCI 的六大应用主题涵盖了从医疗康复到日常增强的广泛场景:

3.2.1 康复医疗领域

这是 BCI 最核心的应用场景, 主要针对运动障碍患者 (如中风后遗症、肌萎缩侧索硬化症、脊髓损伤等)。通过 BCI 技术可人工增强或重新激活受损神经回路的突触可塑性, 帮助

患者恢复运动功能。例如，基于运动想象的 BCI 系统可辅助中风患者进行上肢或下肢康复训练；植入式 BCI 可帮助“闭锁综合征”患者实现交流（如拼写文字）或控制假肢。此外，BCI 还可用于帕金森病的深部脑刺激参数优化、抑郁症的经颅磁刺激治疗等。

3.2.2 替代与辅助技术

为严重残疾患者提供生活自理能力，如 BCI 控制的轮椅、假肢、智能家居系统等。例如，通过 EEG 信号控制轮椅导航，帮助截瘫患者自主移动；利用脑信号驱动的外骨骼机器人，增强患者的肢体活动能力。

3.2.3 功能增强领域

面向健康人群，提升生理或认知能力。在游戏娱乐中，用户可通过脑信号直接控制视频游戏角色或虚拟现实（VR）环境；在工作场景中，BCI 可检测驾驶员或操作人员的嗜睡状态、注意力水平，提高工作安全性；甚至可通过脑-脑接口实现多人协作，如联合决策、协同游戏等。

3.2.4 科研工具领域

为神经科学研究提供实时反馈手段，帮助科学家解码大脑活动机制。例如，利用 fMRI 结合 BCI 研究注意力缺陷的神经基础，通过 EEG 分析运动想象过程中的脑区激活模式。

3.2.5 其他新兴领域

包括情感计算（通过脑信号识别情绪状态）、艺术创作（如“脑绘画”，让运动障碍患者通过脑信号进行艺术表达）、太空应用（监测宇航员工作状态、驱动太空服外骨骼）等，展现了 BCI 技术的跨界融合潜力。

四、BCI 性能的影响因素

BCI 系统的性能直接决定其应用效果，核心评价指标包括信号分辨率、分类准确率、信息传输速率、用户适配性等。影响性能的因素可分为生理因素和技术因素两大类：

4.1 生理与心理因素

4.1.1 个体神经生理差异

大脑的神经解剖结构、功能网络连接存在天然个体差异，导致脑信号的稳定性和可识别性因人而异。例如，感觉运动皮层的灰质体积、静息态网络（RSNs）的动态变化，都会影响 BCI 的解码效果；年龄增长会改变静息态网络和认知反应，进而影响 BCI 性能。

4.1.2 心理与认知状态

用户的注意力、记忆力负荷、疲劳程度、动机水平等心理因素会显著影响脑信号质量。例如，低共情能力者在 P300-BCI 范式中可能产生更高振幅的 P300 波，表现更优；而注意力不集中或疲劳会导致信号噪声增加，降低系统准确率。

4.1.3 生理波动

时间变化的心理生理因素（如心率变异性、激素水平）和神经解剖因素会导致脑信号在个体内（不同时段）和个体间（不同用户）存在波动，增加信号解码的难度，需要系统进行自适应调整。

4.2 技术因素

4.2.1 信号采集模态的局限性

不同信号采集技术在时空分辨率、便携性、侵入性上存在权衡：EEG 便携且非侵入，但空间分辨率较低（约 10mm）；fMRI 空间分辨率高（约 1mm），但设备庞大、成本高昂，无法用于移动场景；侵入式技术信号质量优，但手术风险和维护成本限制了其应用范围。

4.2.2 信号处理与分类算法

脑信号具有非线性、非平稳性特征，且易受噪声干扰，如何有效提取特征并准确分类是技术难点。传统算法（如公共空间模式、线性判别分析）在处理个体差异和信号波动时存在局限性；虽然迁移学习、深度学习等新技术可缓解这一问题，但仍需大量数据训练。

4.2.3 系统校准需求

由于脑信号的个体差异，现有 BCI 系统通常需要用户进行繁琐的校准训练，既耗时又可能让用户产生挫败感，影响技术普及。开发无需个体校准的通用型 BCI 是当前研究热点。

4.3 “BCI 文盲”现象

约 15%-30% 的个体因无法产生足够稳定的脑信号，或技术限制导致特征提取失败，无法有效操作 BCI 系统，这一现象被称为“BCI 文盲”。其原因既包括用户自身神经生理特征，也涉及传感器性能、算法适配性等技术因素，需要通过自适应算法、多模态融合等方式解决。

五、BCI 面临的关键挑战

5.1 心理生理与神经科学挑战

5.1.1 脑信号的不稳定性

大脑的情感、认知过程和神经生理状态具有动态变化特征，导致脑信号的时域和空域特性存在显著的个体内和个体间差异。例如，同一用户在不同时间（如早晨 vs 傍晚）、不同状态（清醒 vs 疲劳）下的脑信号特征可能截然不同；不同用户的脑解剖结构差异也会导致信号模式差异，增加系统泛化难度。

5.1.2 神经可塑性的个体差异

神经可塑性是 BCI 康复应用的核心机制，但不同个体的神经可塑性水平（如脑区重组能力）存在差异，导致康复效果参差不齐。例如，中风患者的病灶位置和大小会影响脑信号波动，需要个性化的 BCI 设计，但这又阻碍了康复系统的大规模推广。

5.1.3 脑信号解码的局限性

现有技术难以精准解码复杂脑状态，尤其是涉及高级认知功能的信号。例如，被动 BCI 对情绪、注意力等状态的识别准确率仍有待提高；对于皮层下脑区的信号，非侵入式传感器（如 EEG）的检测能力有限，难以捕捉深层神经活动。

5.2 技术层面挑战

5.2.1 信号采集技术的权衡

目前尚无完美的信号采集模态：非侵入式技术（如 EEG）虽安全便携，但信号信噪比低、空间分辨率不足；侵入式技术（如 ECoG）信号质量优，但手术风险高、维护复杂；新兴技术（如 fNIRS）虽兼具便携性和安全性，但时间分辨率低，单独使用时性能有限。如何在侵入性、分辨率、便携性和成本之间找到平衡，是技术突破的关键。

5.2.2 信号处理与算法瓶颈

- 特征提取难度：脑信号易受噪声（如肌电干扰、环境电磁干扰）影响，有效特征淹没在噪声中，需复杂滤波技术处理。
- 分类算法泛化性差：传统算法依赖大量标注数据，对个体差异和信号波动的适应性弱；迁移学习和深度学习虽能提升泛化能力，但对计算资源要求高，且缺乏解释性。
- 协变量偏移问题：训练数据与测试数据的特征分布差异会导致分类性能下降，需要自适应方法补偿特征空间变化。

5.2.3 系统实用性不足

现有 BCI 系统大多局限于实验室环境，难以满足日常应用需求：非侵入式系统的长期稳定性差，长时间佩戴传感器会导致信号质量下降；侵入式系统的植入手术风险和术后维护问题尚未完全解决；部分技术（如 SSVEP-based BCI）会导致用户视觉疲劳，限制连续使用时间。

5.3 伦理与社会经济挑战

5.3.1 安全与伦理风险

- 生理安全：侵入式 BCI 可能引发手术并发症（如出血、感染）或神经副作用；外部刺激技术（如 TMS）若参数不当，可能影响大脑功能。
- 隐私保护：脑信号包含个人认知、情感、记忆等敏感信息，可能被非法解码和利用（如通过 BCI 获取密码、识别面部），存在严重隐私泄露风险。
- 认知自主权：双向 BCI 和脑-脑接口可能影响用户的情绪、人格甚至道德判断，其长期影响尚不明确，存在伦理争议。

5.3.2 社会接受度与公平性

- 技术依赖：部分人群担忧过度使用 BCI 会导致对技术的依赖，削弱自身生理功能。

- 可及性：高端 BCI 设备（尤其是植入式系统）成本高昂，可能加剧医疗资源分配不均，仅少数人能受益。
- 知情同意：严重运动障碍患者（如闭锁综合征）可能无法充分理解 BCI 技术的风险与收益，难以实现真正意义上的知情同意。

5.3.3 法律法规缺失

目前尚无针对 BCI 技术的完善法律法规，对脑信号数据的所有权、使用范围、安全保障等缺乏明确规定，可能阻碍技术的商业化和规范化发展。

六、BCI 的技术进展与创新方向

6.1 神经可塑性利用与康复技术创新

神经可塑性是 BCI 康复应用的核心基础，即大脑在外界刺激下重组神经突触连接的能力。近年来，研究人员通过闭环 BCI 系统（结合神经反馈）促进神经可塑性，显著提升康复效果。例如，将运动想象 EEG 信号与功能性电刺激结合，可增强中风患者受损肢体的神经肌肉连贯性，加速运动功能恢复；针对帕金森病患者，BCI 可优化深部脑刺激的参数设置，提升治疗精准度。

此外，多模态刺激（如视觉-触觉联合刺激）可增强运动想象的有效性，进一步提升康复训练的效率。研究表明，个性化康复方案（结合患者神经解剖特征和残障程度）能显著改善 BCI 康复效果，但如何实现方案的快速定制仍是挑战。

6.2 信号采集与传感器技术进步

6.2.1 非侵入式传感器创新

- 干电极技术：无需导电凝胶，解决了传统湿电极佩戴不便、长时间使用信号衰减的问题，且部分干电极系统的信号质量已接近湿电极，适合日常应用。
- 高密度 EEG 阵列：通过增加电极数量（如 700-800 个电极的超密集阵列）提升空间分辨率，信号信噪比是传统高密度 EEG 的两倍。
- 柔性便携传感器：如耳廓电极、柔性弯曲电极系统，提升佩戴舒适度和便携性，支持长期连续监测。

6.2.2 侵入式传感器优化

- 生物相容性材料：开发有机电化学晶体管传感器、碳纳米管涂层电极等，降低植入后的免疫排斥反应，提升信号稳定性和使用寿命。
- 微创植入技术：如支架电极阵列（Stentrode），通过导管血管造影技术植入脑内血管，无需开颅手术，显著降低侵入风险，目前已进入人体临床试验阶段。
- 无线植入系统：如 WIMAGINE 无线植入式多通道 ECoG 记录仪，支持长期神经信号采集和无线传输，减少术后维护负担。

6.2.3 多模态融合采集

单一模态存在固有缺陷，多模态融合成为趋势。例如，EEG 与 fNIRS 结合，可同时捕获电信号和血流动力学信号，互补时空分辨率优势，显著提升分类准确率；EEG 与 MEG 融合，能更全面地捕捉皮层和皮层下脑区的神经活动，增强信号解码的完整性。

6.3 信号处理与机器学习算法突破

6.3.1 特征提取与滤波技术

时频分析方法：如小波变换、短时傅里叶变换，有效提取脑信号的时频特征；

空间滤波技术：如公共空间模式（CSP）、独立成分分析（ICA），增强信号的信噪比；

源定位技术：如基于小波的最大熵方法，解决脑信号逆问题，提升脑活动定位精度。

6.3.2 机器学习与人工智能应用

- 迁移学习：利用不同用户或不同会话的数据共性，减少个体校准需求，提升系统泛化能力，是解决个体差异问题的关键技术。
- 深度学习：卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）等模型可自动提取脑信号的深层特征，无需人工设计特征，显著提升复杂任务的分类准确率（如多类运动想象识别）。
- Riemannian 几何方法：基于脑信号协方差矩阵的几何特性进行分类，对噪声和个体差异具有较强鲁棒性，已在多类 BCI 系统中得到应用。

6.3.3 自适应算法

针对脑信号的动态变化，自适应算法可实时调整模型参数，补偿信号波动和协变量偏移，维持系统性能稳定。例如，无监督子空间学习方法能实现会话间和个体间的信息迁移，减少校准次数。

6.4 新兴应用技术创新

6.4.1 脑-脑接口（BBI）

作为双向 BCI 的高级形式，BBI 可实现大脑间的直接通信：解码发送者的认知意图，转换为刺激信号传递给接收者的大脑。目前已实现动物（如大鼠）间的传感器运动信息共享，人类层面也通过 EEG 结合 TMS 实现简单信号传输（如伪随机二进制流编码的文字）和协作游戏，未来可能应用于军事、医疗等特殊场景。

6.4.2 虚拟现实（VR）/增强现实（AR）与 BCI 融合

VR/AR 技术为 BCI 提供沉浸式交互环境，提升用户体验和系统性能。例如，VR-based BCI 康复系统可模拟真实生活场景，增强训练的趣味性和实用性；AR 技术可辅助 BCI 控制机器人，用于远程操作或注意力缺陷多动障碍儿童的康复训练。研究表明，沉浸式 VR 环境能提升 BCI 的准确率，因为虚拟场景能增强用户的注意力和参与感。

6.4.3 情感计算与艺术应用

BCI 可解码用户的情绪状态（如积极/消极情绪），应用于心理评估、人机交互优化等领域；在艺术创作中，“脑绘画”让运动障碍患者通过脑信号在虚拟画布上创作，为其提供情感表达和艺术参与的渠道。

七、BCI 的未来展望与关键发展方向

论文指出，BCI 技术的未来发展将依赖于以下四大核心方向的突破：

7.1 揭示影响 BCI 性能的心理生理与神经机制

深入研究大脑认知过程、神经解剖特征与 BCI 性能的关联，明确个体差异的根源。例如，通过神经影像学技术识别 BCI 性能的生理预测因子（如感觉运动皮层灰质体积、静息态 EEG 的熵），为个性化系统设计提供依据；探索神经可塑性的调控机制，优化康复方案以提升治疗效果。

7.2 开发低侵入性、高可靠性的传感器技术

未来传感器需在侵入性、分辨率、便携性和成本之间实现更好平衡：非侵入式传感器需进一步提升空间分辨率和长期稳定性，降低使用门槛；侵入式传感器需优化生物相容性和微创植入技术，减少手术风险；新型传感器（如纳米线场效应晶体管、超声波神经尘埃）可能成为未来突破方向，实现对深层脑区的高精度、低损伤监测。

7.3 构建通用型 BCI 模型

通过迁移学习、跨模态融合、自适应算法等技术，减少系统对个体校准的依赖，开发“即插即用”的通用型 BCI。例如，利用跨个体脑动力学共性，实现无需校准的运动想象 BCI；结合多模态信号（EEG+fNIRS+MEG）提升系统的鲁棒性，适应不同用户和场景需求。

7.4 建立伦理与社会规范

制定 BCI 技术的伦理准则和法律法规，保障用户安全与隐私：明确脑信号数据的所有权和使用规范，开发加密技术防止数据泄露；评估双向 BCI 和脑-脑接口的长期伦理影响，设定技术应用的边界；提升 BCI 技术的可及性，避免医疗资源分配不均；加强公众教育，提升社会对 BCI 技术的认知和接受度。

八、总结

脑机接口（BCI）作为连接大脑与外部世界的直接通信技术，经过几十年的发展，已从实验室原型走向实际应用，在康复医疗、辅助技术、功能增强等领域展现出巨大潜力。其核心优势在于无需肌肉参与，为运动障碍患者提供了新的康复途径，同时也为健康人群的功能增强提供了可能。

然而，BCI 技术仍面临多重挑战：心理生理层面，脑信号的不稳定性和个体差异影响系统泛化能力；技术层面，传感器性能、信号处理算法和系统实用性仍需突破；伦理社会层面，安全风险、隐私保护和公平性问题亟待解决。

近年来，随着神经科学、传感器技术、机器学习和人工智能的进步，BCI 领域涌现出诸多创新方向，如多模态信号采集、迁移学习算法、微创植入技术、VR/AR 融合应用等，为解决上述挑战提供了新思路。未来，BCI 技术的发展将依赖于跨学科合作，不仅需要工程技术的突破，还需神经科学、伦理学、法学等多领域的协同推进。

总体而言，BCI 技术有望在未来十年实现从“实验室应用”向“日常化、普及化”的转变，成为改善残障人群生活质量、增强人类能力的重要技术工具。但要实现这一目标，需科研人员、工程师、医生、伦理学家和政策制定者的共同努力，在技术创新的同时，确保技术的安全、伦理和公平应用。