

基于 BCI 与 VR 的认知诊疗应用

万象隆^{1,2)}, 傅岸峰^{1,2)}, 要逸铎^{1,2)}, 刘天歌^{1,2)}, 段丁娜^{1,2)}, 谢雪光^{1,2)}, 于昊^{1,3)},
李丹阳^{1,3)}, 文冬^{1,2)}✉

1) 北京科技大学智能科学与技术学院, 北京 100083 2) 北京科技大学河北省脑机智能与数字疗法重点实验室, 北京 100083 3) 北京科技大学体育部, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: wencangdong@163.com

摘要 认知涉及注意力、记忆、情感, 是人类获取和应用知识的基本过程. 随着全球老龄化加速, 认知障碍如轻度认知障碍(MCI)、阿尔茨海默病(AD)和痴呆症已成为重大健康问题. 早期诊断和治疗认知障碍能够改善患者生活质量并减轻社会负担, 但药物治疗、功能性磁共振成像(fMRI)和功能性近红外光谱(fNIRS)等传统方法存在诊断准确性低、药物效果有限及评估工具缺乏等问题. 脑机接口(BCI)和虚拟现实(VR)技术的结合, 为认知诊疗提供了新的解决方案. BCI通过分析大脑信号, 实现脑与计算机或其他设备之间的信息交换, 在运动功能障碍康复中已有成功应用. VR通过沉浸式的虚拟环境, 为认知训练和康复提供逼真互动体验. BCI-VR技术结合多感官刺激和实时反馈, 增强了认知训练效果. 本文回顾了BCI和VR技术在认知诊断和治疗中的应用现状, 介绍了基于脑电图(EEG)、fMRI和fNIRS的BCI诊断方法以及基于VR的诊断方法, 并探讨了这些技术的优势与挑战. 此外, 分析了跨个体、跨场景脑电信号分析对提高认知障碍评估精准性和有效性的贡献. 总结了BCI-VR技术在认知行为治疗、记忆与注意力训练、神经康复及情感调节等方面的应用, 强调了BCI-VR技术在认知障碍治疗中的潜力. 尽管BCI-VR技术展现了广阔前景, 但仍面临设备复杂、个性化设计不足, 以及实验样本局限等挑战. 未来的发展方向包括设备的小型化与低成本化、多模态BCI技术及大语言模型的应用, 同时, 需要加强政产学研医的深入合作以推动BCI-VR技术在认知诊疗领域的临床转化.

关键词 认知障碍; 脑机接口; 虚拟现实; 认知诊疗; 神经康复

分类号 TG142.71

Applications of BCI and VR in cognitive diagnosis and treatment

WAN Xianglong^{1,2)}, FU Anfeng^{1,2)}, YAO Yiduo^{1,2)}, LIU Tiange^{1,2)}, DUAN Dingna^{1,2)}, XIE Xueguang^{1,2)}, YU Hao^{1,3)}, LI Danyang^{1,3)},
WEN Dong^{1,2)}✉

1) School of Intelligence Science and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Key Laboratory for Brain Computer Intelligence and Digital Therapy of Hebei Province, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) Sports Department, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: wencangdong@163.com

ABSTRACT Cognition encompasses essential mental processes, such as attention, memory, and emotion, which are fundamental to the way humans acquire and apply knowledge. With the rapid aging in the global population, cognitive impairments, including mild cognitive impairment, Alzheimer's disease, and dementia, have emerged as significant public health concerns. The early diagnosis and effective treatment of these disorders are crucial for improving the quality of life of patients and reducing the societal burden associated

收稿日期: 2024-08-05

基金项目: 国家重点研发计划资助课题(2023YFF1203702, 2021YFF1200603); 国家自然科学基金资助项目(62276022, 62206014)

with these conditions. However, traditional diagnostic and therapeutic methods, such as pharmacotherapy, functional magnetic resonance imaging (fMRI), and functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), face several challenges, including low diagnostic accuracy, limited efficacy, and the lack of comprehensive assessment tools. The integration of brain-computer interface (BCI) and virtual reality (VR) technologies offers innovative solutions for cognitive diagnosis and treatment. BCI facilitates the exchange of information between the brain and external devices by analyzing brain signals, allowing for applications such as the rehabilitation of motor function disorders. Meanwhile, VR creates immersive and interactive environments that provide realistic experiences that can be used for cognitive training and rehabilitation. The combination of BCI and VR technologies enhances the effectiveness of cognitive interventions by providing multisensory stimulation and real-time feedback, making these interventions more engaging and potentially more effective. This paper reviews the current applications of BCI and VR technologies in cognitive diagnosis and treatment. Various BCI diagnostic methods based on Electroencephalogram (EEG), fMRI, and fNIRS, as well as VR-based diagnostic methods, will be introduced, and the advantages and limitations of these technologies will be discussed. In addition, this paper explores the contributions of cross-individual, cross-scenario, and cross-task EEG signal analysis to the precision and effectiveness of cognitive impairment assessment. The review will highlight the significant potential of BCI-VR technology in various cognitive therapy domains, including cognitive behavioral therapy, memory and attention training, neurorehabilitation, and emotion regulation. The discussion will also tackle the challenges faced by BCI-VR technology, such as device complexity, the need for personalized design, and the limitations of experimental samples. Despite the promising outlook for BCI-VR technology, several challenges remain. The complexity of the devices, the lack of customization in virtual environments, and the adaptability of these systems across different individuals and scenarios are key issues that need to be addressed. This paper suggests that future research should focus on the miniaturization and cost reduction of BCI-VR devices, the development of multimodal BCI systems, and the application of large language models to enhance the functionality and accessibility of these technologies. Furthermore, the importance of strengthening the collaboration among government, industry, academia, research institutions, and the medical field is emphasized as a critical factor in advancing the clinical translation of BCI-VR technology for cognitive diagnosis and treatment. The review concludes that, although traditional methods have paved the way for understanding cognitive impairments, BCI-VR technologies have the potential to revolutionize both the diagnosis and the treatment of these conditions. By overcoming the current technical challenges and fostering interdisciplinary cooperation, BCI-VR systems can become integral tools in the global effort to improve cognitive health and enhance the lives of individuals who are affected by cognitive disorders.

KEY WORDS cognitive impairment; brain-computer interface; virtual reality; cognitive diagnosis; neurorehabilitation

认知是人类获取和应用知识的基本过程,涵盖注意力、记忆、情感等多个方面。认知过程指人脑接收外界信息,处理并转化为内在心理活动,从而支配行为的过程^[1]。尽管在多任务处理时,人脑“真正的并行处理”能力有限,但是健康的大脑仍能确定任务优先级、分解任务、排除干扰等以提高执行效率。然而,当大脑出现病变时,这一认知过程可能失效,导致记忆障碍、学习困难、注意力缺陷和失语等症状^[2]。

当前,全球正以空前的速度进入老龄化社会并带来了诸多健康问题,其中因年龄增长引发的精神和认知障碍问题尤为突出。导致认知能力持续下降的主要慢性疾病包括轻度认知障碍(MCI)、阿尔兹海默症(AD)和痴呆症^[3]。患有 MCI 的患者尽管在穿衣、吃饭等基本日常活动上表现正常,但如理财、购物等工具性日常活动能力(IADL)可能受到轻度损伤。患有严重认知障碍的老年人的生活可能难以自理,他们可能失去记忆、空间导航能力和交流能力,因此需要家庭成员更多的照料。此

外,认知障碍不仅影响患者及其家属,还对卫生保健系统造成沉重负担,并可能引发更多社会问题^[4]。

如能在认知障碍早期阶段进行诊断,通过认知训练和康复可以逐步改善病情^[5]。然而目前量表等常用的神经心理学测评方法难以全面、综合地诊断认知状况,并且缺乏更加有效的认知训练手段。在此背景下,脑机接口(BCI)和虚拟现实(VR)技术为探索更多认知障碍的诊断和治疗方案提供了可行途径。这些技术有助于预防和延缓认知衰退,保障老年人的正常生活,并保持他们独立生活的情感和活力^[6]。脑机接口作为新兴技术,其在神经疾病康复治疗中的应用是近年来的热点,具备无限可能^[7-8]。研究表明,VR 环境下的认知训练可以增强大脑的神经可塑性,并帮助修复受损的脑回路^[9-10]。BCI 与 VR 的结合可用于评估康复的有效性或提高认知诊疗效果,进而有效地干预和改善患者的认知功能^[11],同时在虚拟环境中让患者执行任务也能减少其在现实世界时训练的危险^[12]。特别是在价格相对低廉、应用前景广泛的 BCI-VR

技术被用于认知障碍诊疗时, 跨个体、跨场景的脑电信号分析方法可以进一步提升精准性和有效性。

综上所述, 认知障碍, 尤其是老年群体中的 AD 和 MCI, 已经成为全球关注的重要健康问题。随着全球老龄化趋势的加剧, 有效地诊断和治疗认知障碍变得尤为紧迫。认知障碍的早期发现和干预不仅能显著改善患者生活质量, 还能减轻家庭和社会的负担。然而目前临床上常用的诊断和治疗方法仍存在许多不足之处, 限制了认知障碍疾病管理的效果。因此亟需探索新的技术手段, 如 BCI 和 VR 技术, 以提高认知障碍的诊断和治疗水平。

1 传统方法在认知诊疗中的不足

近年来, 针对 AD 等认知障碍疾病的病理生理学研究取得了显著进展。然而传统的诊断方法如神经认知测试和标准神经心理学测试, 其诊断标准尽管已经经过多年发展并达成国际共识, 但准确性仍存在个体差异^[13]。目前国内临床认知评估主要依赖简单的认知功能量表, 缺乏高级认知域的评估工具^[14]。这些测试不仅耗时费力, 还容易受到主观因素的影响^[15]。此外, 这些评估工具通常要求患者执行运动任务, 对于如晚期瘫痪等行动能力受限的群体, 评估其认知能力是一项挑战^[16]。

在治疗方面, 当前针对 AD 的药物治疗方法有限, 难以有效逆转或减缓疾病进展。现有药物仅能部分改善患者的认知和行为症状^[17]。对于 MCI 患者, 药物治疗分为对症治疗和对因治疗。胆碱酯酶抑制剂是目前应用最广泛的对症治疗药物, 但副作用显著, 部分患者甚至可能出现认知能力快速下降的情况。对因治疗药物(如抗氧化剂、中链甘油三酯、他汀类药物)在最初阶段对降低氧化应激水平及延缓衰老是有效的, 但其是否可以在 MCI 预防阶段广泛应用尚需更多证据支持。截至目前, 仍然没有有力的实验数据证明任何药物能够有效停止或逆转 MCI 的病程^[18]。

在此背景下, 寻找新的诊断和治疗方法势在必行。近年来, 基于流体的生物标志物如脑脊液的诊断方法尽管被广泛接受, 但其取样需要腰椎穿刺, 这一侵入性过程成本较高^[19]。在治疗方面, 研究发现大脑神经元具有可塑性, 非药物治疗引起了越来越多的关注。认知刺激、认知训练和认知康复等三种非药物认知干预措施在改善认知障碍和痴呆症患者的认知功能方面显示出了积极效果^[20-21]。然而, 这些传统的认知治疗方法仍然受到时间和资源的限制。

随着智能手机、平板电脑和电脑等新兴技术的发展, 认知障碍的治疗可以借助这些设备实现, 从而成为更具成本效益的替代方案^[22]。其应用为认知障碍患者提供了更加便捷、高效的治疗途径, 展现了广阔的应用前景。然而, 这些常规数字治疗方法也存在显著的局限性。首先, 提供的体验通常缺乏沉浸感和互动性, 难以有效模拟复杂的认知任务和真实场景, 可能导致训练效果的减弱, 特别是在需要高度集中和持续注意的训练任务中。此外, 由于屏幕尺寸和操作方式的限制, 难以实现全方位的感官刺激, 无法充分调动患者的情感和参与度, 从而影响治疗效果。

2 BCI-VR 技术简介及其在认知诊疗应用中的优势

尽管传统的认知诊断和治疗方法在一定程度上取得了进展, 但仍然存在一定的局限性, 尤其是在面对复杂的认知障碍疾病时。为了克服这些不足, 新兴的技术如 BCI 和 VR 逐渐被引入到认知诊疗领域。

本文检索了 2010 年以来在 Google Scholar、中国知网、万方数据上发表的中文和英文文章, 检索词包括“脑机接口”、“虚拟现实”、“认知诊疗”及其英文“Brain-computer interface, BCI”、“Virtual reality, VR”、“Cognitive diagnosis and treatment”。只有当文章内容包括“脑机接口”、“虚拟现实”、“认知诊疗”中的至少两条时才会被纳入分析。本综述纳入了显示积极结果的研究, 以讨论 BCI 与 VR 技术对认知诊疗的建设性影响。

BCI 技术是一种不依赖常规大脑信息输出通路(外周神经和肌肉组织), 在人脑与计算机或其他电子设备之间进行的新型外部信息交换和控制技术^[23]。在 BCI 中, 用户产生的大脑信号被系统识别, 系统将这些信号转换为通过思维而不是运动活动来控制设备的命令。它可以帮助严重运动功能障碍的患者直接与现实世界交流。

BCI 技术常用于诱导大脑神经可塑性, 帮助患者恢复运动功能。研究表明, BCI 被成功应用于许多场景, 在这些情况下, 患者的身体运动被用户产生的大脑信号的命令所取代。例如, BCI 系统被用于帮助运动障碍患者控制假肢^[24]、移动机器人导航^[25]、推动轮椅^[26]、玩电子游戏^[27]、驾驶车辆^[28]、脑卒中手功能康复^[29]等。脑电信号(EEG)是通过记录大脑电活动提供高时间分辨率的信号, 有助于实时监测大脑动态变化, 但空间分辨率较低。功

能磁共振成像(fMRI)通过检测血氧水平依赖信号,提供高空间分辨率的图像,精确定位大脑功能区域,但时间分辨率较低。功能性近红外光谱(fNIRS)介于 EEG 和 fMRI 之间,利用近红外光测量大脑皮层的血氧变化,具有较好的时间和空间分辨率,且设备便携、非侵入性强,是 BCI 研究中的重要工具。这些技术各有优势,通常在 BCI 系统中相互补充使用。

VR 技术通过集成视觉、听觉、触觉等多种感官刺激,为用户提供高度沉浸的虚拟环境,促进其与虚拟世界中的物体和场景进行真实交互。这种沉浸式体验能够克服传统数字疗法的局限性,增强患者的专注力和训练效果,并通过模拟复杂的现实情境,提供更加个性化的治疗方案^[30]。与传统 BCI 系统相比,BCI-VR 系统无需过多的外部设备,VR 技术可以有效替代复杂的康复环境,提供逼真的互动体验和丰富的反馈,从而提高系统输出的准确性并缩短校准时间^[31-34]。此外,VR 还可用于安全、经济的培训和测试场景,降低操作风险^[31]。

Hadjiras 等^[35]回顾了 BCI-VR 系统在多种疾病干预上的应用,包括中风、注意缺陷多动障碍(ADHD)、AD、帕金森病(PD)等。在认知诊疗领域,BCI 技术与 VR 技术不仅使诊疗过程更加便捷智能,而且基于 BCI-VR 系统的诊疗方法能为认知障碍患者提供更快捷和易获取的诊断或评估途径。通过非侵入性方式分析脑电活动生成控制信号,提供沉浸式体验,展现了其在诊断和治疗认知障碍患者方面的实际潜力。与传统的数字治疗方法相比,VR 技术通过位置追踪器、头戴式显示器和触觉传感器,提供多感官模拟,增强了用户的沉浸感和互动体验。用户可以像在真实世界中一样,与虚拟环境中的物体进行互动,这种方式不仅提高了认知训练的效果,还通过实时反馈增强了用户的积极性和治疗依从性^[36-37]。

3 BCI-VR 技术在认知诊疗中的应用

3.1 BCI 与 VR 在认知诊断中的应用

BCI 与 VR 技术中,在认知障碍诊断中以 BCI 的应用为主,然而,VR 技术的应用潜力也不可忽视。需要注意的是,虽然大部分文献集中在使用 BCI 与 VR 技术评估某些特定认知域(如空间认知能力、工作记忆)的研究^[38-39],但这些评估实际上也是认知障碍疾病诊断的重要组成部分,旨在诊断发生障碍的认知域及严重程度。本节将分别介绍基于 EEG、fMRI 和 fNIRS 三种类型的 BCI 诊断

方法以及基于 VR 的诊断技术。基于 BCI 的诊断方法经过多年的研究和改进,已经发展出多种有效、低成本的非侵入性脑功能检测和成像技术,广泛应用于脑功能异常和病理变化的检测^[40]。

3.1.1 EEG-BCI 的认知诊断

EEG 通过测量众多锥体细胞兴奋时突触后电位的同步总和来记录脑电波,是一种在神经科学研究和构建脑机接口时常用的方法,用于检测大脑活动,而不需要在人体大脑上直接植入任何人造材料。EEG 脑信号在疾病早期阶段的诊断中被广泛用作生物标志物。一般情况下,神经退行性疾病的症状难以与衰老导致的常见表现区分开,但大量证据表明,EEG 可以将认知障碍患者与健康群体区分开来,具有不同敏感性和特异性的 EEG 信号可以作为认知障碍疾病诊断的有用生物标志物^[40]。

在 MCI 患者中,通常可以观察到 Alpha 频段的功率显著降低。Alpha 频段的活动与大脑的安静警觉状态相关,功率的降低可能反映了大脑在维持这一状态方面的困难。MCI 患者在执行认知任务时,Beta 频段和 Theta 频段的功率也会出现异常。Beta 频段与注意力和认知处理有关,而 Theta 频段与记忆和信息编码相关。在 MCI 患者中,Beta 频段的功率可能较低,而 Theta 频段的活动可能增多,或两者的功率比值降低,这些变化可以作为 MCI 的早期指征。除了频段功率的变化外,EEG 信号的频谱特征也被用于区分 MCI 患者与健康对照组。通过这些特征的分析,研究人员可以识别出 MCI 患者大脑活动的异常模式,从而实现早期诊断。

Jiao 等^[41]通过从静息状态脑电图记录中提取生物标志物,对健康对照组(HC)、MCI 和 AD 进行分类,并确定了最佳 EEG 生物标志物。该研究利用随机森林回归结合脑电图生物标志物、人口统计学信息(性别、年龄)、脑脊液生物标志物和载脂蛋白 E 表型训练模型,以评估疾病进展和个体认知功能,确定了与脑脊液测量和 AD 患者认知功能特异性相关的神经生物标志物。Hsiao 等^[42]的研究使用基于 EEG 的分类系统区分轻度认知障碍患者与健康对照组,验证了 Katz 分形维数的有效性。大量研究使用人工智能和机器学习技术对 EEG 特征进行计算和分析,以分类患者和健康人群。基于 EEG 的 BCI 诊断已应用于诊断 AD、睡眠障碍和脑肿瘤,近期的研究集中在检测自闭症谱系障碍、抑郁症、癫痫和精神分裂症^[43-44]。

3.1.2 fMRI-BCI 的认知诊断

fMRI-BCI 是一种用于大脑成像的非侵入性

方法, 通过检测脑部血氧水平依赖(BOLD)信号, 即血液中含氧血红蛋白与脱氧血红蛋白的比例, 间接测量大脑的神经活动. 当大脑某个区域活跃时, 该区域的血流量和氧含量会增加, 通过 fMRI 可以捕捉到这种变化. fMRI-BCI 系统的基本步骤包括信号采集和预处理、信号分析(特征提取和解码)和控制信号的应用, 该系统广泛应用于认知障碍领域的筛查和治疗^[45].

Sitaram 等^[45]的研究表明, 支持向量机分类器可以有效区分积极和消极的情绪状态, 如快乐和厌恶. 研究人员通过从多个脑区获取 BOLD 信号并在线进行分类, 开发了 fMRI-BCI 系统, 为用户提供情绪状态反馈. 该系统可用于治疗因 MCI 引起的情绪问题. Owen 等^[46]利用 fMRI-BCI 技术检测在线“神经行为”, 使其成为评估认知障碍疾病进展的重要诊断工具. 该技术可以实时监测和分析大脑活动, 提供关于患者意识状态的关键信息, 有助于早期诊断和病情评估. 通过 fMRI-BCI 系统提供的反馈, 医生可以更好地了解患者的神经功能变化, 从而制定更有效的治疗方案. Shibata 等^[47]通过在线反馈解码 fMRI 信号, 成功诱导视觉皮层中的特定活动模式, 即使在未明确学习目标的情况下也能实现视觉知觉的学习. 这表明, fMRI 解码技术可以提高神经元的可塑性, 有助于改善 MCI. 这种方法展示了通过非侵入性脑成像和实时反馈, 促进神经康复和认知功能提升的巨大潜力. 此外, Liew 等^[48]的研究表明, 该方法可能有助于减缓因衰老导致的运动功能和认知能力下降.

3.1.3 fNIRS-BCI 的认知诊断

fNIRS 是一种非侵入性脑成像技术, 通过近红外光穿透头皮和颅骨, 测量大脑皮层的血氧变化^[49]. fNIRS 技术可分为三种类型: 连续波 fNIRS、频域 fNIRS 和时间分辨 fNIRS. 连续波 fNIRS 通过测量恒定光强的变化来推断血氧浓度, 成本低且易于使用. 频域 fNIRS 通过测量调制光的相移和振幅变化, 提供更高精度的深度信息. 时间分辨 fNIRS 通过超短激光脉冲测量光在组织中传播的时间分布, 适合高精度研究. 每种 fNIRS 技术都有其优劣, 适用于不同的研究需求和场景.

fNIRS 被广泛用于认知障碍脑病理改变的检测和评价. 例如, Yang 等^[50]使用 fNIRS 技术执行各种任务, 评估了 15 种用于 MCI 诊断的数字生物标志物. 此外, fNIRS 也被用来评估认知损伤治疗的有效性. Ghafoor 等^[51]通过检测和比较 MCI 患者、接受针刺治疗的 MCI 患者和健康对照组的工

作记忆 fNIRS 信号, 发现接受针刺治疗的 MCI 患者在工作记忆方面的 fNIRS 信号显著改善, 从而证明了针刺治疗对 MCI 的有效性.

3.1.4 基于 VR 的诊断

VR 技术能够创建高度沉浸式的虚拟环境, 使患者感觉置身于一个真实的情境中. 这种沉浸感使测试过程更加自然和真实, 从而更准确地反映患者的认知能力. 同时, VR 技术允许研究人员设计复杂的任务和情境, 患者可以通过与虚拟环境的交互来完成这些任务. 研究人员能够精确控制任务的难度和复杂度, 以便评估患者在不同情境下的表现. 最重要的是, VR 技术能够同时提供视觉、听觉和触觉刺激, 使得认知评估更加全面和多样化. 这种多感官刺激有助于全面评估患者的认知功能, 包括注意力、记忆、执行功能和空间认知等.

近年来, VR 技术被广泛应用于收集与 IADL 相关的行为数据, 然后利用机器学习技术对这些数据进行分析, 以增强 MCI 的早期检测^[52]. 例如, Park 等^[53]设计了虚拟售货亭测试, 用于收集与手部运动、眼球运动和表现相关的行为数据, 这些数据作为 VR 衍生生物标志物的来源, 并与 MRI 生物标志物和神经心理学测试的 MCI 分类性能进行了比较, 确定了 VR 衍生生物标志物和 MRI 生物标志物的独特特征, 同时强调了整合这两种生物标志物对 MCI 早期检测的重要性.

Burke 和 Rooney^[54]在一篇评论文章中指出, VR 是一种评估双任务能力的可行平台, 强调了在应用 VR 进行双任务评估时, 特别是在神经退行性疾病和神经系统疾病的临床研究中, 需要特别考虑一些认知和神经心理学相关的问题. 此外, VR 技术在评估自我中心和异我中心记忆、情景记忆和空间记忆能力等方面也有许多研究成果^[4].

综上所述, VR 技术在认知诊断的应用领域展现了其巨大的潜力和广泛的应用前景. VR 技术具备高度沉浸感、交互性、任务复杂性和多感官刺激等独特的特性, 将其与 BCI 技术结合进行综合分析, 可以增强其评估患者在某些认知领域的能力的有效性. 通过提供高度沉浸式和多感官刺激的环境, VR 不仅提高了认知评估的准确性, 还为复杂任务和情境的设计提供了新的可能性, 有助于全面评估和早期检测认知障碍.

3.2 BCI-VR 在认知治疗中的应用情况

BCI-VR 技术的研究吸引了运动障碍人群的极大兴趣, 同时在认知治疗方面, BCI-VR 技术已被证明在中风后偏瘫患者的康复训练^[55]、PD 康复^[56]、

上肢假肢训练^[24]等方面取得了成功. 其在认知治疗中的应用可以分为认知行为治疗、记忆和注意力、神经康复、情感和情绪调节四个方面.

3.2.1 BCI-VR 技术在认知行为治疗方面的应用情况

BCI-VR 技术在认知康复训练方面的研究主要集中在认知训练上. 利用 VR 技术, 研究人员可以为认知障碍患者提供一个近乎真实的认知康复训练环境, 通过检测和分析脑电信号来评估训练效果并进行反馈, 从而提高训练效果. Oh 等^[57]的研究, 旨在通过记录注意缺陷多动障碍(ADHD)儿童的存在感和 EEG 来验证 VR 认知训练的有效性. 实验组包括 8 名患有多动症的儿童, 对照组包括 8 名没有多动症的健康儿童. 研究结果表明, ADHD 儿童在 VR 认知训练后存在感明显增强^[57], 说明 VR 认知训练可以帮助缓解儿童 ADHD 症状.

空间认知能力的训练是认知行为治疗的研究重点之一. Zhou 等^[58]在 2020 年的一篇综述文章中回顾了关于 VR、BCI 和 BCI-VR 在空间认知评价与训练(SCET)中的应用文献, 建议将 BCI 与 VR 深度融合, 以充分发挥各自的技术优势突破技术瓶颈, 为 SCET 提供个性化、舒适、实时的技术支持. 2023 年, Wen 等^[59]开发并测试了一种基于 BCI 和 VR 头显的空间认知训练与评估系统, 该系统集成在一个小型可穿戴设备中, 使用该系统对 7 名健康个体进行了为期 20 天的空间认知训练. 通过对行为数据和脑电数据的分析及统计检验, 结果显示受试者的空间认知能力得到显著提升. 2024 年, Wen 等^[60]为老年人设计和开发了一种空间认知训练系统, 通过提取脑电信号的时间功率谱密度特征, 并采用支持向量机(SVM)和极限学习机(ELM)分类方法对 Alpha 频段进行分析. 结果显示, 该分析与先前空间认知训练数据研究中的结果相似. 此外, Beta2 和 Gamma 高频段的分类准确率显著提高. 研究结果表明, 基于空间认知理论的 VR 训练游戏对提升老年人的空间认知能力具有显著效果.

执行功能(EF)是大脑的高级认知活动, 许多因素如 ADHD、自闭症谱系障碍(ASD)、AD 和脑损伤等会影响 EF 的表现. Xie 等^[61]在综述中探讨了 EF 康复与评估的研究现状, 强调了 BCI-VR 技术在有效改善个体 EF 方面的巨大潜力, 并分析了 BCI-VR 系统面临的挑战和未来发展方向. 他们预测, 未来的 BCI-VR 系统硬件设备应向低成本、轻量级和用户友好的方向发展, 同时需要增强虚拟环境的真实感和个性化, 并实现数据驱动的程序

设计和评估. 石瑞航^[62]构建了基于脑机接口和虚拟厨房的执行功能训练系统, 并提出多尺度可分离残差网络用于执行功能脑电信号分类, 以进一步评估受试者的执行功能.

3.2.2 BCI-VR 技术在记忆和注意力方面的应用情况

工作记忆(WM)和注意力是两项关键的认知能力, 前者在复杂认知活动中用于暂时处理和存储信息. 研究表明, 个体的认知水平与工作记忆高度相关^[63]. 传统的认知训练任务通常通过收集数据来完成单一的认知任务, 过程枯燥乏味, 参与者缺乏动力. BCI-VR 技术通过结合 VR 的沉浸式感官反馈与大脑活动的实时脑电图信号, 使得认知训练相比传统方法更具吸引力和效率, 同时在认知任务中引入游戏设计元素, 可以在保持科学价值的前提下提高干预效果, 从而增强参与者的体验和训练效果^[31,64].

BCI-VR 在工作记忆训练与评价中的研究尚处于起步阶段, 近期的一些研究对其有效性进行了初步探讨. Wan 等^[65]采用定量方法, 利用脑电图信号和游戏表现数据来评估认知水平. 研究结果显示, VR 游戏在增强工作记忆和注意力方面优于传统 3D 游戏, 显著缩短了任务完成时间, 加快了注意力峰值, 突显了 VR 在高级认知训练方面的巨大潜力. 另一项研究调查了 VR 对视觉工作记忆的影响, 发现其对准确性和反应时间的影响较小, 但脑电图数据表明, 感知水平的认知变化会影响任务表现^[66]. 吴重琳^[39]设计了虚拟书房游戏训练工作记忆, 并从量表结果、行为数据和脑电信号三方面进行评估, 提出了归一化多维排序条件互信息(NMPCMI)脑电特征提取方法. 结果显示, NMPCMI 在多个频段下的分类准确率更高, 说明该方法提取到了更准确的脑电特征. Duan 等^[67]在综述中探讨了工作记忆训练与评估的研究现状, 强调了 BCI-VR 技术相关的挑战和未来发展方向, 预测更多的交互方式如手势或脑电图信号可以取代传统数字游戏中的手动操作来控制 VR 游戏中的虚拟人物, 从而增强训练体验, 提高工作记忆训练的有效性. 此外, 进一步完善 BCI-VR 系统的软硬件集成, 增强其便携性并降低其制造成本, 对提高工作记忆训练和评估的效率和准确性也很重要.

基于 P300 的脑机接口是目前速度最快的脑机接口之一, 主要与高级注意力过程相关. 它不仅可用于提高游戏中的新颖性水平和作为心理工作量的衡量标准, 还可以用于认知训练. Bulat 等^[68]

调查了 P300 脑机接口游戏对健康成人认知功能的影响, 评估了在不使用湿电极的丰富 VR 环境中玩脑机接口游戏的体验. 初步研究结果表明, P300 训练对选择性注意和抑制分散刺激的能力有积极影响, BCI 影响的定量评估需要进一步研究. 吕锦泉^[69]将 BCI 与 VR 相结合, 搭建了高性能兼备实用性的 BCI-VR 儿童教育游戏系统, 并对虚拟现实游戏中的被试者注意力水平进行了测试. 结果表明, VR 环境中的注意均值普遍高于 2D 环境, 且 VR 环境中的注意水平相对稳定, 统计学意义上证明了虚拟现实游戏对注意力有积极影响. Souza 和 Naves^[70]在综述中对利用神经科学技术从脑电图信号中提取的特征来检测注意力水平的方法进行了概述, 并讨论了这些方法与虚拟现实系统的关联、当前的研究争议、差距及未来的发展方向.

Tan 等^[71]利用 VR 技术构建了具有普遍性且与 MCI 患者相关的特定场景, 恢复和训练患者的场景记忆认知能力. 结合不同场景中患者的脑电图信号进行实时检测, 实验结果表明, 使用特定的刺激场景可以加强记忆康复训练的效果.

3.2.3 BCI-VR 技术在神经康复方面的应用情况

神经康复一直是 BCI 研究的重点领域. Wen 等^[31]在综述中指出, BCI 与 VR 技术的结合为神经系统疾病的康复提供了一种新颖且有前途的方法. 与传统的 BCI 系统相比, BCI-VR 系统不需要大量外部设备即可创建复杂的康复环境. VR 技术可以提供丰富生动的信息和反馈, 使个体能够在有限的物理空间中进行训练, 同时在虚拟环境中增强他们的训练热情和参与度. 通过 BCI 和 VR 的结合, 神经康复过程可以提高训练效果, 减少学习和训练时间.

脑卒中康复一直是神经康复的重点关注领域. 脑卒中患者常常在运动、认知和语言等方面有着不同程度的功能障碍. BCI 系统在运动康复, 特别是上肢运动康复中的安全性和有效性已得到广泛验证^[72]. 徐森威等^[73]利用 WebVR 技术构建了轻量级 BCI-VR 系统, 在不影响受试者体验的基础上快速构建虚拟环境, 并通过健康人群实验初步验证了该系统在手功能障碍患者医疗康复中的可行性. 张明等^[74]在综述中, 以运动想象 (MI) 和运动尝试的脑电信号形式作为 BCI 研究的切入点, 重点总结了基于脑电图的 BCI 技术在改善脑卒中后上肢运动功能方面的研究成果, 并指出基于脑电图的 BCI-VR 系统在康复医学中的应用越来越重要. 高诺和陈鹏程^[75]阐述并验证了 BCI-VR 技术

在软康复外骨骼中的结合是一种有效的康复方案, 实验结果表明手部软康复外骨骼模块具有较高的稳定性, 可替代人工对患者手部进行康复训练.

胡景钊等^[76]针对基于镜像神经理论的运动康复, 选用廉价且便携的设备, 设计了一套基于 BCI 和 VR 技术的康复系统, 该系统可以精确感知患者的运动想象程度并即时展示患肢运动, 具有轻量便携、造价低廉的特点, 对患者康复具有重要意义. 国内大量研究人员也进行了基于 MI 的 BCI-VR 的脑卒中患者运动功能康复研究, 取得了显著成果^[77]. 国外, Camargo-Vargas 等^[78]的综述表明, 整合视觉、听觉和触觉刺激的 BCI-VR 系统提高了康复界面的效率, 增强了患者的生理和情感效果, 且研究结果表明, BCI-VR 系统中最常用的是非沉浸式 VR 类型.

为了进一步加强对运动功能障碍的治疗, 将患者的大脑信号作为自我控制的外部工具被认为是一个非常有前途的选择. Said 等^[79]在综述中总结了机器人治疗和基于 VR 和运动相关皮层电位的 BCI 康复技术在医疗保健领域的最新进展, 结果表明, 这种康复方法有望诱导神经可塑性, 促进持续重复训练, 并提供运动支持. Zhang 等^[80]回顾了 BCI 技术在中风后下肢恢复中的应用, 发现基于 BCI-VR 的康复训练对运动障碍严重的患者更有效, 这可能与此类患者受损运动皮层的输入和输出较少有关, 大脑区域的神经调节更加灵活.

然而使用 BCI-VR 的脑卒中后认知和语言康复领域仍处于起步阶段. 尽管有许多成功的小规模可行性研究, 但这一领域尚未得到广泛关注^[72]. Mane 等^[81]在综述中发现, 运动和认知功能之间具有隐含的关系, 认知康复前的有氧运动有助于增加脑血流量和唤醒, 从而为大脑的认知训练做好准备. 因此, 他建议未来的康复方案应包括运动和认知训练课程, 并密切监测这两种功能的改善情况.

3.2.4 BCI-VR 技术在情感和情绪调节方面的应用情况

情绪不仅影响个体的心理状态, 还能显著影响认知功能和决策过程. 研究显示, 情绪状态可以改变注意力分配、记忆存储和提取效率以及问题解决策略. 因此, 准确识别和科学调节情绪极为重要.

Shih 等^[82]基于 VR 的远程康复系统集成强化了训练和特定的学习任务, 以促进神经重组. 通过使用脑电图技术, 远程治疗师能够识别用户的情绪状态并实时调整康复任务的难度. Chin 等^[83]提出了一种基于 BCI-VR 的系统, 用于收集受试者

观看引发积极或消极情绪反应的 VR 内容时的 EEG 数据. 通过提取 EEG 功率特征, 使用线性判别分析和支持向量机进行分类, 实验结果显示在正面情绪和负面情绪的分类中, 该低成本 BCI-VR 系统在实时情感交互应用中具有良好的潜力. 林璇琨^[84]设计并实现了一个用于情绪诱发的 VR 模拟游戏, 结合 BCI 技术实时监测受试者的情绪状态, 搭建了情绪诱发及监测系统, 实现了一种基于 BCI-VR 的情绪调节训练系统.

4 BCI-VR 在认知诊疗中的问题分析与解决方案

4.1 认知诊断中的问题与解决方案

前文深入探讨了 BCI-VR 技术在认知诊疗中的应用前景, 尽管这些技术展示了显著的潜力, 但在实际应用中仍然面临着诸多技术挑战. 这些挑战包括设备的复杂性、数据处理的精度、虚拟环境的个性化设计、跨个体和跨场景的适应性以及数据隐私和伦理问题. 面对这些问题, 如果不能找到有效的解决方案, 将限制 BCI-VR 技术的广泛应用和实际效能.

4.1.1 跨个体、跨场景 EEG 分析

在认知诊断方面, 基于 EEG 的 BCI 使用最为广泛^[8], 但也存在一些问题. EEG 的非侵入性传感装置在信号传输过程中容易受到外界噪声干扰, 导致结果模糊. 为提升信噪比, 需依赖更先进的信号处理技术. 人工智能和机器学习方法的应用可以显著增强 BCI 设备的智能化水平, 为研究人员提供更加客观的结果^[85].

然而, 不同个体的脑电信号特征差异由于生理特征、个体神经结构、认知能力、情绪状态等多种因素引起^[86-87]. 这些差异降低了脑电分析算法的泛化能力. 因此, 在跨个体分析中, 如何处理和减小这些个体差异的影响, 进而确保分析结果的普适性和准确性, 是当前亟待解决的问题. 此外, 不同的实验场景(如静息状态、任务执行、视觉刺激等)也可能会显著影响脑电信号的特征和模式.

因此, 跨个体、跨场景的脑电分析方法逐渐成为研究热点. 越来越多的研究人员将广泛应用脑电信号分析的特征于跨个体、跨场景的脑电信号分析研究中. Touryan 等^[88]采用经典的独立成分分析的特征分析方法描述特征空间, 计算功率谱密度(PSD), 并采用顺序前向浮动选择方法识别频谱特征中的独立成分集, 结果表明该方法可以识别出跨场景脑电信号中的共同成分. Kakkos 等^[89]采

用了特征融合的方法, 将 PSD 与功能连接特征相结合, 提高了跨场景分类的性能, 并证明了脑特征融合在跨场景中的应用更为有效. Xing 等^[90]将模糊熵特征用于跨场景脑电信号分析, 发现模糊熵特征相对于其他特征更能适合跨场景. 卷积神经网络(CNN)和递归神经网络(RNN)等基于深度学习的新型跨任务模型在跨场景脑电分析中展现了巨大潜力. 这些模型能够自动提取特征和学习复杂的脑电特征, 从而有效地缩小不同任务和场景之间的差距, 提高模型的泛化能力^[91-93]. 近年来, 一些跨学科的方法被创新性地应用于跨场景研究, Zhao 等^[94]提出了一种跨学科的对齐多源域自适应方法, 用于跨个体的 EEG 疲劳状态评估, 显著提高了模型的泛化能力, Zhou 等^[95]在此基础上进行改进, 提出了一种跨任务域自适应方法, 有效提升了跨场景认知诊断的性能.

这些跨个体、跨场景的分析方法, 在认知障碍的精准、有效评估中展现了巨大的潜力, 通过提高脑电信号分析的普适性和准确性, 可以为早期诊断和个性化治疗提供有力支持.

4.1.2 其他模态的 BCI 技术的问题与解决方案

基于 fMRI-BCI 的认知诊断虽然在空间分辨率上具有优势, 但其时间分辨率有限. BOLD 成像的脑活动与 fMRI 反应之间存在延迟, 这限制了其时间分辨率, 从而影响 MCI 检测以及 BCI 神经反馈治疗的效果. 结合多种技术的采样方法可能解决这一问题, 近期研究已表明这一方向具有潜力^[96].

相比之下, 基于 fNIRS-BCI 的认知诊断在时间分辨率和空间分辨率方面表现较好, 其便携性和对普通电气或磁性设备的不敏感性也是显著优势. 然而, fNIRS 易受运动伪影和生理噪声干扰, 且在使用方面存在局限性. 尽管研究人员们提出了许多方法和算法来解决这些问题, 基于 fNIRS-BCI 的认知诊断方法仍需进一步改进.

4.1.3 BCI-VR 技术的问题与解决方案

基于 VR 的认知诊断技术在不同认知域的评估中展现了潜力. 然而, 从本综述搜集整理的文献角度来看, 多数文献关注 VR 在治疗方面的应用, 将 VR 用于认知诊断的研究仍然较少, 对于其潜在副作用缺乏深入研究. 目前距离其推广应用还有很长的路要走. 有研究指出, 将 VR 衍生生物标志物与 MRI 衍生生物标志物结合使用在 MCI 早期检测具有重要意义^[53], 同时将 BCI 技术与 VR 技术结合使用评估某种特定认知域的认知功能的探索也在进行之中, 这或许是今后 BCI-VR 技术应用

于认知诊断的研究方向. 总体而言, 各种技术在认知诊断中的局限性和未来可能的改进方向仍需深入探讨和研究.

4.2 认知治疗中的问题与解决方案

在认知治疗方面, BCI-VR 技术在认知行为治疗、记忆与注意力、神经康复以及情感和情绪调节四个方面均表现出显著效果. BCI 与 VR 技术的结合, 相较于传统技术, 在不同认知治疗领域中展现出更好的训练效果和发展潜力, 但实际应用中仍面临诸多挑战.

首先, 部署 BCI-VR 技术的设备相对复杂, 操作需要经过专业训练且设备成本较高, 限制了其广泛应用. 常用的 VR 设备如 HTC Vive 虽然在沉浸式体验方面独具优势, 但其重量较大, 长时间佩戴易导致用户疲劳, 且与常用的脑电采集设备共同使用时有诸多不便. 此外, 用户的运动可能会引入脑电图信号数据的不稳定性和延迟, 从而影响测量的准确性^[31]. 未来这可能需要进一步改进, 将 VR 设备与脑电采集设备进行硬结合, 设计一种 BCI-VR 一体机或许是未来的研究方向.

其次, 当前 BCI-VR 系统的认知训练虚拟环境主要集中在虚拟厨房、虚拟书房等相对简单的场景, 缺乏个性化和适应性设计, 难以满足不同个体的需求. 未来的发展方向可能是融合个性化和适应性设计的电子科技游戏, 不仅能激发用户兴趣, 还能增强代入感, 培养专注力和执行力. 然而, 制作高质量且个性化、适应化的虚拟场景需要大量时间、资源和技术专长, 这是一个巨大的挑战^[97].

另外, 现有的 BCI-VR 系统多为单模 BCI-VR, 存在自由度低、精度不高的缺点. 例如, 基于 MI 的 BCI 仅支持 2~3 个命令, 并且需要长时间训练以稳定其准确性. 近年来, 研究重点转向混合 BCI-VR 以提升 BCI 性能. 结合多种生理或行为信号如眼电图、肌电图等的混合 BCI-VR 已经被证明可以提供更多操作指令和更高的准确性, 并有助于训练 BCI 系统用户. 然而, 该系统仍需克服包括优化数据融合算法和高维数据特征提取在内的技术难题^[98].

4.3 临床应用中的 BCI-VR 技术融合的问题与解决方案

对现有文献中涉及的实验进行统计分析表明, 国内 BCI-VR 研究的被试对象主要是大学生和职工. 这可能是由于伦理问题或缺乏合适的合作单位等原因造成的. 临床研究相对较少, 且研究时间较短, 缺乏长期大规模的临床实验来验证 BCI-VR 技术在认知诊疗领域的有效性. 同时, 目

前国内 BCI-VR 技术的应用热门方向是脑卒中后运动障碍及认知障碍治疗, 在 MCI、ADHD 等其他认知障碍疾病的研究相对较少. 这些需要未来政产学研医深入合作, 共同促进 BCI-VR 技术临床转化, 推动针对不同认知障碍疾病的高性能 BCI-VR 系统的开发.

5 未来展望

为了进一步推进 BCI-VR 技术在认知诊疗领域的实际应用, 有必要针对这些挑战展开深入研究. 未来的研究方向应当集中于如何克服这些技术瓶颈, 例如设备的轻量化、低成本化以及虚拟环境的个性化设计, 以促进 BCI-VR 技术的广泛临床应用.

(1) 目前, BCI-VR 技术在认知诊疗领域取得了显著的成果. 在认知诊断方面, BCI-VR 技术, 包括 EEG、fMRI、fNIRS 和 VR, 已被广泛应用于识别认知障碍的生物标志物, 进行早期发现、分类和评估. 尤其是 VR 技术, 作为一项新兴技术, 在认知诊断领域展现出巨大的潜力, 亟待研究人员进一步关注和深入研究. 未来, 通过增加样本量, 建立跨个体、跨场景的特征分类方法, 对不同任务进行细分等措施, 有望在认识障碍的精准、有效评估中发挥更重要的作用^[99]. 在认知治疗方面, BCI-VR 技术在多个领域中表现出重要作用, 特别是在脑卒中患者的认知障碍治疗和空间认知能力训练方面, 效果尤为显著.

(2) 然而, BCI-VR 在认知诊疗中仍面临诸多挑战和局限性. 硬件设备需要向低成本、轻量化和用户友好化方向发展. 虚拟环境需要融合个性化和适应性设计, 以提供更高质量的体验. 此外, 需要考虑利用混合 BCI-VR 技术提升系统性能. 未来的发展趋势还包括推动政产学研医的深入合作, 促进 BCI-VR 技术的临床转化, 并针对更多认知障碍疾病进行研究.

(3) 尽管面临诸多挑战, BCI-VR 技术依然具有巨大的发展潜力. 在线和远程康复的发展, 以及场景渲染、数据分析和存储在云端的应用, 将大大降低个人用户的设备购买成本. 基于 3D 高斯飞溅 (GS) 的先进 VR-GS 技术, 包括 VR 自动生成、高分辨率图形和物理模拟, 有望改善对现实世界环境和行为的模拟, 从而提高系统的有效性和生态有效性^[100]. 随着多模态大语言模型如 ChatGPT 和人工智能生成内容 (AIGC) 的发展, 为每位患者个性化虚拟场景的创建已成为可能. Yao 等^[101] 在研

究中指出, 利用 ChatGPT 先进的自然语言处理功能, 可以动态解释患者的语言和行为反应, 通过提供即时和个性化的反馈, 提升诊断的准确性并增强患者的参与度. 未来更方便、更有效、更经济的多模态个性化 BCI-VR 系统将为更多的认知障碍患者提供更大的帮助. 通过克服当前的挑战, 并持续推进技术的创新和应用, BCI-VR 技术在认知诊疗领域的前景将更加广阔.

6 结论

本文系统性地回顾了 BCI 与 VR 技术在认知诊断和治疗中的应用场景, 探讨了其技术优势、实际效果及面临的主要挑战. BCI-VR 技术通过结合脑信号采集、实时反馈和沉浸式虚拟环境, 为认知障碍的诊疗提供了一种创新方法. 研究表明, 该技术在认知功能评估、康复训练以及情感调节等方面表现出显著潜力, 尤其在早期诊断阿尔茨海默病和其他退行性神经疾病方面发挥了重要作用. 尽管如此, BCI-VR 技术的实际应用仍然面临多方面的挑战, 包括设备复杂性、数据处理算法的准确性、跨个体和跨场景的实力不足, 以及临床验证样本的局限性.

总体而言, BCI-VR 技术作为一种新兴工具, 为认知障碍的诊断与治疗提供了革命性的解决方案. 随着技术的发展和应用的深入, BCI-VR 系统有望成为认知健康领域的重要组成部分, 为患者提供更精准、高效的诊疗服务.

参 考 文 献

- [1] Peng, D L. *General Psychology*. 5th Ed. Beijing: Beijing Normal University Press, 2019
(彭聃龄. 普通心理学. 5 版. 北京: 北京师范大学出版社, 2019)
- [2] Anguera J A, Boccanfuso J, Rintoul J L, et al. Video game training enhances cognitive control in older adults. *Nature*, 2013, 501(7465): 97
- [3] Abd-Alrazaq A, Alajlani M, Alhuwail D, et al. The effectiveness and safety of serious games for improving cognitive abilities among elderly people with cognitive impairment: Systematic review and meta-analysis. *JMIR Serious Games*, 2022, 10(1): e34592
- [4] Liu Y, Tan W J, Chen C, et al. A review of the application of virtual reality technology in the diagnosis and treatment of cognitive impairment. *Front Aging Neurosci*, 2019, 11: 280
- [5] Tortora C, Di Crosta A, La Malva P, et al. Virtual reality and cognitive rehabilitation for older adults with mild cognitive impairment: A systematic review. *Ageing Res Rev*, 2024, 93: 102146
- [6] Kazazi L, Shati M, Mortazavi S S, et al. The impact of computer-based cognitive training intervention on the quality of life among elderly people: A randomized clinical trial. *Trials*, 2021, 22: (1): 51
- [7] Liang W D, Guo X H, Cheng B, et al. The application progress of brain-computer interface in rehabilitation medicine. *Med Equip*, 2022, 35(21): 193
(梁文栋, 郭晓辉, 程波, 等. 脑机接口在康复医学中的应用进展. 医疗装备, 2022, 35(21): 193)
- [8] Tan Y, Zong N N, Jiang J L, et al. Application progress of brain-computer interface in neurological diseases. *Chin J Nerv Ment Dis*, 2023, 49(8): 492
(谭逸, 宗宁宁, 江佳柳, 等. 脑机接口在神经系统疾病中的应用进展. 中国神经精神疾病杂志, 2023, 49(8): 492)
- [9] Thapa N, Park H J, Yang J G, et al. The effect of a virtual reality-based intervention program on cognition in older adults with mild cognitive impairment: A randomized control trial. *J Clin Med*, 2020, 9(5): 1283
- [10] Wang B R, Zhou T T, Liao W J. Application progress of virtual reality technology in rehabilitation treatment of stroke patients. *Chin J Rehabil*, 2021, 36(12): 765
(王碧茹, 周甜甜, 廖维靖. 虚拟现实技术在脑卒中患者康复治疗中的应用进展. 中国康复, 2021, 36(12): 765)
- [11] Wen D, Lan X F, Zhou Y H, et al. The study of evaluation and rehabilitation of patients with different cognitive impairment phases based on virtual reality and EEG. *Front Aging Neurosci*, 2018, 10: 88
- [12] Yan Z, Zhang L X. Application of brain-computer interface in rehabilitation therapy. *Chin J Rehabil Med*, 2020, 35(2): 228
(燕桢, 张立新. 脑机接口在康复治疗中的应用. 中国康复医学杂志, 2020, 35(2): 228)
- [13] Dunne R A, Aarsland D, O'Brien J T, et al. Mild cognitive impairment: The Manchester consensus. *Age Ageing*, 2021, 50(1): 72
- [14] Ren R J, Yin P, Wang Z H, et al. China Alzheimer disease report 2021. *J Diagn Concepts Pract*, 2021, 20(4): 317
(任汝静, 殷鹏, 王志会, 等. 中国阿尔茨海默病报告 2021. 诊断学理论与实践, 2021, 20(4): 317)
- [15] Chouliaras L, O'Brien J T. The use of neuroimaging techniques in the early and differential diagnosis of dementia. *Mol Psychiatry*, 2023, 28(10): 4084
- [16] Carelli L, Solca F, Faini A, et al. Brain-computer interface for clinical purposes: Cognitive assessment and rehabilitation. *Biomed Res Int*, 2017, 2017: 1695290
- [17] Pardo-Moreno T, González-Acedo A, Rivas-Domínguez A, et al. Therapeutic approach to Alzheimer's disease: Current treatments and new perspectives. *Pharmaceutics*, 2022, 14(6): 1117
- [18] Zhang H, Zhang S W, Yu D H, et al. Research progress on drug therapy of mild cognitive impairment. *Chin J Gen Pract*, 2019, 17(9): 1571
(张慧, 张韶伟, 于德华, 等. 轻度认知功能障碍的药物治疗研

- 究进展. 中华全科医学, 2019, 17(9): 1571)
- [19] García-Morales V, González-Acedo A, Melguizo-Rodríguez L, et al. Current understanding of the physiopathology, diagnosis and therapeutic approach to Alzheimer's disease. *Biomedicines*, 2021, 9(12): 1910
- [20] Irazoki E, Contreras-Somoza L M, Toribio-Guzmán J M, et al. Technologies for cognitive training and cognitive rehabilitation for people with mild cognitive impairment and dementia. A systematic review. *Front psychol*, 2020, 11: 648
- [21] Aniwattanapong D. Effects of cognitive rehabilitation training in elderly with mild cognitive impairment a randomized controlled trial. *Eur Psychiatry*, 2021, 64(suppl 1): S424
- [22] Rezaeipandari H, Dehghanbanadaki E, Madadzadeh F. Acceptance of information and communication technology and its related factors among older adults; a cross-sectional study in Iran. *Elder Health J*, 2023, 9(2): 64
- [23] Maiseli B, Abdalla A T, Massawe L V, et al. Brain-computer interface: Trend, challenges, and threats. *Brain inform*, 2023, 10(1): 20
- [24] Chmura J, Rosing J, Collazos S, et al. Classification of movement and inhibition using a hybrid BCI. *Front Neurobot*, 2017, 11: 38
- [25] Bi L Z, Fan X N, Liu Y L. EEG-based brain-controlled mobile robots: A survey. *IEEE Trans Hum Mach Syst*, 2013, 43(2): 161
- [26] White P J F, Moussavi Z. Neurocognitive treatment for a patient with Alzheimer's disease using a virtual reality navigational environment. *J Exp Neurosci*, 2016, 10: 129
- [27] Vourvopoulos A, Bermudez i Badia S, Liarokapis F. EEG correlates of video game experience and user profile in motor-imagery-based brain-computer interaction. *Vis Compute*, 2017, 33(4): 533
- [28] Värbu K, Muhammad N, Muhammad Y. Past, present, and future of EEG-based BCI applications. *Sensors Basel*, 2022, 22(9): 3331
- [29] Chen Q X, Li X. Application status of non-invasive brain-computer interface in hand functional rehabilitation after stroke. *Chin J Rehabil Med*, 2022, 37(11): 1566
(陈琼璇, 李鑫. 非侵入性脑机接口在脑卒中手功能康复中的应用现状. 中国康复医学杂志, 2022, 37(11): 1566)
- [30] Georgiev D D, Georgieva I, Gong Z Y, et al. Virtual reality for neurorehabilitation and cognitive enhancement. *Brain Sci*, 2021, 11(2): 221
- [31] Wen D, Fan Y L, Hsu S H, et al. Combining brain-computer interface and virtual reality for rehabilitation in neurological diseases: A narrative review. *Ann Phys Rehabil Med*, 2021, 64(1): 101404
- [32] Kang X Y, Liu L X. The progress in application of intelligent technology in stroke rehabilitation. *Chin J Stroke*, 2022, 17(6): 658
(康晓宇, 刘丽旭. 智能技术在卒中康复中的应用进展. 中国卒中杂志, 2022, 17(6): 658)
- [33] Yuan Z N, Li S Q, Wei X J, et al. Application of intelligent rehabilitation in stroke rehabilitation. *Chin J Med*, 2022, 57(5): 465
(苑梓楠, 李思奇, 危昔均, 等. 智能康复在脑卒中康复领域的应用. 中国医刊, 2022, 57(5): 465)
- [34] Choi J W, Kwon H, Choi J, et al. Neural applications using immersive virtual reality: A review on EEG studies. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2023, 31: 1645
- [35] Hadjarios M, Neokleous K, Shimi A, et al. Virtual reality cognitive gaming based on brain computer interfacing: A narrative review. *IEEE Access*, 2023, 11: 18399
- [36] Cattani G, Andreev A, Visinoni E. Recommendations for integrating a P300-based brain-computer interface in virtual reality environments for gaming: An update. *Computers*, 2020, 9(4): 92
- [37] Lu K, Yue K, Hu H C, et al. Survey on virtual reality technology in neurofeedback training. *J Comput Aided Des Comput Graph*, 2023, 35(8): 1150
(陆凯, 岳康, 胡昊辰, 等. 神经反馈训练中的虚拟现实技术综述. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(8): 1150)
- [38] Sun Y. *Research on BCI-VR Spatial Cognitive Assessment System and Method Integrating Gesture Recognition* [Dissertation]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022
(孙悦. 融合手势识别的 BCI-VR 空间认知评估系统与方法研究[学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022)
- [39] Wu C L. *Working Memory Training and Evaluation System Based on BCI-VR and Its EEG Signal Analysis* [Dissertation]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023
(吴重琳. 基于 BCI-VR 的工作记忆训练评估系统及其脑电信号分析[学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023)
- [40] Chen X Y, Huang Y T, Zhuang S X. Current perspective of brain-computer interface technology on mild cognitive impairment. *Highlights Sci Eng Technol*, 2023, 36: 73
- [41] Jiao B, Li R, Zhou H, et al. Neural biomarker diagnosis and prediction to mild cognitive impairment and Alzheimer's disease using EEG technology. *Alzheimers Res Ther*, 2023, 15(1): 32
- [42] Hsiao Y T, Wu C T, Tsai C F, et al. EEG-based classification between individuals with mild cognitive impairment and healthy controls using conformal kernel-based fuzzy support vector machine. *Int J Fuzzy Syst*, 2021, 23(8): 2432
- [43] Zheng Y H, Liu C, Lai N Y G, et al. Current development of biosensing technologies towards diagnosis of mental diseases. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11: 1190211
- [44] Pérez Valero E. *Automated Detection of Alzheimer's Disease and other Neurophysiological Applications based on EEG* [Dissertation]. Granada: University of Granada, 2023
- [45] Sitaram R, Lee S, Ruiz S, et al. Real-time support vector classification and feedback of multiple emotional brain states. *NeuroImage*, 2011, 56(2): 753
- [46] Owen A M, Coleman M R, Boly M, et al. Detecting awareness in the vegetative state. *Science*, 2006, 313(5792): 1402

- [47] Shibata K, Watanabe T, Sasaki Y, et al. Perceptual learning incepted by decoded fMRI neurofeedback without stimulus presentation. *Science*, 2011, 334(6061): 1413
- [48] Liew S L, Rana M, Cornelsen S, et al. Improving motor corticothalamic communication after stroke using real-time fMRI connectivity-based neurofeedback. *Neurorehabil Neural Repair*, 2016, 30(7): 671
- [49] Hoshi Y. Functional near - infrared spectroscopy: potential and limitations in neuroimaging studies. *Int Rev Neurobiol*, 2005, 66: 237
- [50] Yang D L, Hong K S, Yoo S H, et al. Evaluation of neural degeneration biomarkers in the prefrontal cortex for early identification of patients with mild cognitive impairment: An fNIRS study. *Front Hum Neurosci*, 2019, 13: 317
- [51] Ghafoor U, Lee J H, Hong K S, et al. Effects of acupuncture therapy on MCI patients using functional near-infrared spectroscopy. *Front Aging Neurosci*, 2019, 11: 237
- [52] Kim S Y, Park J, Choi H, et al. Digital marker for early screening of mild cognitive impairment through hand and eye movement analysis in virtual reality using machine learning: First validation study. *J Medl Internet Res*, 2023, 25: e48093
- [53] Park B, Kim Y, Park J, et al. Integrating biomarkers from virtual reality and magnetic resonance imaging for the early detection of mild cognitive impairment using a multimodal learning approach: Validation study. *J Med Internet Res*, 2024, 26: e54538
- [54] Burke T, Rooney B. Multi-modal dual-task measurement: A new virtual reality for assessment. *Front Psychol*, 2021, 11: 635413
- [55] Amini Gough R, Falk T H. Head-mounted display-based virtual reality and physiological computing for stroke rehabilitation: A systematic review. *Front Virtual Real*, 2022, 3: 889271
- [56] Maggio M G, De Cola M C, Latella D, et al. What about the role of virtual reality in parkinson disease's cognitive rehabilitation? preliminary findings from a randomized clinical trial. *J Geriatr Psychiatry Neurol*, 2018, 31(6): 312
- [57] Oh S H, Park J W, Cho S J. Effectiveness of the VR cognitive training for symptom relief in patients with ADHD. *J Web Eng*, 2022, 21(3): 767
- [58] Zhou Y H, Wen D, Lu H B, et al. The current research of spatial cognitive evaluation and training with brain-computer interface and virtual reality. *Front Neurosci*, 2020, 13: 1439
- [59] Wen D, Yuan J P, Li J, et al. Design and test of spatial cognitive training and evaluation system based on virtual reality head-mounted display with EEG recording. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2023, 31: 2705
- [60] Wen D, Fan Y L, Wang S C, et al. Spatial cognitive training system and experiment validation based on brain-computer interface and virtual reality games. *Exp Technol Manag*, 2024, 41(2): 162
(文冬, 凡亚李, 王少昌, 等. 基于脑机接口和虚拟现实游戏的空间认知训练实验系统与验证. *实验技术与管理*, 2024, 41(2): 162)
- [61] Xie X G, Shi R H, Yu H, et al. Executive function rehabilitation and evaluation based on brain-computer interface and virtual reality: Our opinion. *Front Neurosci*, 2024, 18: 1377097
- [62] Shi R H. *Executive Function Training System and EEG Signal Analysis Based on BCI-VR* [Dissertation]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023
(石瑞航. 基于 BCI-VR 的执行功能训练系统及其脑电信号分析[学位论文]. 河北: 燕山大学, 2023)
- [63] Miyake A, Shah P. *Models of Working Memory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- [64] Lumsden J, Edwards E A, Lawrence N S, et al. Gamification of cognitive assessment and cognitive training: A systematic review of applications and efficacy. *JMIR Serious Games*, 2016, 4(2): e11
- [65] Wan B, Wang Q, Su K J, et al. Measuring the impacts of virtual reality games on cognitive ability using EEG signals and game performance data. *IEEE Access*, 2021, 9: 18326
- [66] Redlinger E, Glas B, Rong Y. Impact of visual game-like features on cognitive performance in a virtual reality working memory task: Within-subjects experiment. *JMIR Serious Games*, 2022, 10(2): e35295
- [67] Duan D N, Wu Z L, Zhou Y, et al. Working memory training and evaluation based on brain-computer interface and virtual reality: Our opinion. *Front Hum Neurosci*, 2023, 17: 1291983
- [68] Bulat M, Karpman A, Samokhina A, et al. Playing a P300-based BCI VR game leads to changes in cognitive functions of healthy adults [J/OL]. *BioRxiv preprint* (2020-07-23) [2024-08-05]. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.05.28.118281v3>
- [69] Lü J Q. *Virtual Reality Children's Educational Games and Attention Level Test Based on EEG* [Dissertation]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022
(吕锦泉. 基于 EEG 的虚拟现实儿童教育游戏与注意力水平测试[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022)
- [70] Souza R H C E, Naves E L M. Attention detection in virtual environments using EEG signals: A scoping review. *Front Physiol*, 2021, 12: 727840
- [71] Tan W, Xu Y, Liu P, et al. A method of VR-EEG scene cognitive rehabilitation training. *Health Inf Sci Syst*, 2021, 9(1): 4
- [72] Mane R, Wu Z Z, Wang D. Poststroke motor, cognitive and speech rehabilitation with brain-computer interface: a perspective review. *Stroke Vasc Neurol*, 2022, 7(6): 541
- [73] Xu S W, Zeng H, Kong W Z. A new upper extremity rehabilitation system based on BCI-VR technology. *J Hangzhou Dianzi Univ Nat Sci*, 2020, 40(6): 45
(徐森威, 曾虹, 孔万增. 基于 BCI-VR 技术的新型上肢康复系统. *杭州电子科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(6): 45)
- [74] Zhang M, Wang B, Jia F, et al. Application of brain-computer interface technology based on electroencephalogram in upper limb motor function rehabilitation of stroke patients. *Chin J Tissue Eng Res*, 2024, 28(4): 581
(张明, 王斌, 贾凡, 等. 基于脑电图的脑机接口技术在脑卒中

- 患者上肢运动功能康复中的应用. 中国组织工程研究, 2024, 28(4): 581)
- [75] Gao N, Chen P C. Research on hand soft rehabilitation system based on brain computer interface and virtual reality technology. *J Biomed Eng Res*, 2022, 41(1): 32
(高诺, 陈鹏程. 基于脑机接口与虚拟现实技术的手部软康复系统研究. 生物医学工程研究, 2022, 41(1): 32)
- [76] Hu J Z, Liu Y, Jia Q M, et al. Design of a portable MI-VR BCI rehabilitation system based on mirror neuron theory. *J Northwest Univ Nat Sci*, 2021, 51(4): 567
(胡景钊, 刘阳, 贾巧妹, 等. 基于镜像神经元理论的便携式 MI-VR BCI 康复系统设计. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 567)
- [77] Wang W. *Research on EEG Analysis of Motor Imagination and VR Training for Rehabilitation* [Dissertation]. Shanghai: Shanghai University, 2020
(王伟. 面向康复的运动想象脑电分析及结合 VR 训练研究[学位论文]. 上海: 上海大学, 2020)
- [78] Camargo-Vargas D, Callejas-Cuervo M, Mazzoleni S. Brain-computer interfaces systems for upper and lower limb rehabilitation: A systematic review. *Sensors Basel*, 2021, 21(13): 4312
- [79] Said R R, Heyat M B B, Song K E, et al. A systematic review of virtual reality and robot therapy as recent rehabilitation technologies using EEG-brain-computer interface based on movement-related cortical potentials. *Biosensors*, 2022, 12(12): 1134
- [80] Zhang J Y, Ren X, Guo X L, et al. Progress in the application of brain-computer interface technology in stroke rehabilitation. *Acad J Med Health Sci*, 2024, 5(3): 1
- [81] Mane R, Chouhan T, Guan C T. BCI for stroke rehabilitation: Motor and beyond. *J Neural Eng*, 2020, 17(4): 041001
- [82] Shih C H, Lin P J, Chen Y L, et al. A post-stroke rehabilitation system with compensatory movement detection using virtual reality and electroencephalogram technologies. *IEEE Access*, 2024, 12: 61418
- [83] Chin Z Y, Zhang Z, Wang C C, et al. An affective interaction system using virtual reality and brain-computer interface // 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). Mexico, 2021: 6183
- [84] Lin X K. *Emotion Induction and Its Application Based on Brain-computer Interface and Virtual Reality* [Dissertation]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022
(林璇琨. 基于脑机接口和虚拟现实的情绪诱发及其应用研究[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022)
- [85] Barnova K, Mikolasova M, Kahankova R V, et al. Implementation of artificial intelligence and machine learning-based methods in brain-computer interaction. *Comput Biol Med*, 2023, 163: 107135
- [86] Wang X H, Ren Y M, Luo Z, et al. Deep learning-based EEG emotion recognition: Current trends and future perspectives. *Front Psychol*, 2023, 14: 1126994
- [87] Gibson E, Lobaugh N J, Joordens S, et al. EEG variability: Task-driven or subject-driven signal of interest? *NeuroImage*, 2022, 252: 119034
- [88] Touryan J, Lance B J, Kerick S E, et al. Common EEG features for behavioral estimation in disparate, real-world tasks. *Biol Psychol*, 2016, 114: 93
- [89] Kakkos I, Dimitrakopoulos G N, Sun Y, et al. EEG fingerprints of task-independent mental workload discrimination. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2021, 25(10): 3824
- [90] Xing Z X, Dong E Z, Tong J G, et al. Application of mental fatigue classification in cross task paradigm // 2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Guilin, 2022: 1750
- [91] Zhang P B, Wang X, Zhang W H, et al. Learning spatial-spectral-temporal EEG features with recurrent 3D convolutional neural networks for cross-task mental workload assessment. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(1): 31
- [92] Zhou Y, Xu T, Li S, et al. Beyond engagement: An EEG-based methodology for assessing user's confusion in an educational game. *Univers Access Inf Soc*, 2019, 18(3): 551
- [93] Taori T, Gupta S, Bhagat S, et al. Cross-task cognitive load classification with identity mapping-based distributed CNN and attention-based RNN using Gabor decomposed data images. *IETE J Res*, 2022, 69(12): 8753
- [94] Zhao Y, Dai G, Borghini G, et al, et al. Label-based alignment multi-source domain adaptation for cross-subject EEG fatigue mental state evaluation. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 706270
- [95] Zhou Y Y, Xu Z M, Niu Y F, et al. Cross-task cognitive workload recognition based on EEG and domain adaptation. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2022, 30: 50
- [96] Sedighin F. Tensor methods in biomedical image analysis. *J Med Signals Sens*, 2024, 14: 16
- [97] Wen D, Yao W, Xu J, et al. Electronic science games used to enhance cognitive ability: Opinion of design from personalization and adaptation. *Front Aging Neurosci*, 2021, 13: 789547
- [98] Wen D, Liang B B, Zhou Y H, et al. The current research of combining multi-modal brain-computer interfaces with virtual reality. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2021, 25(9): 3278
- [99] Wen D, Pang Z H, Wan X L, et al. Cross-task-oriented EEG signal analysis methods: Our opinion. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1153060
- [100] Jiang Y, Yu C, Xie T, et al. VR-GS: A physical dynamics-aware interactive gaussian splatting system in virtual reality // *ACM Siggraph 2024 Conference Papers*. Denver, 2024: 1
- [101] Yao Y D, Hasan W Z W, Jiao W L, et al. ChatGPT and BCI-VR: A new integrated diagnostic and therapeutic perspective for the accurate diagnosis and personalized treatment of mild cognitive impairment. *Front Hum Neurosci*, 2024, 18: 1426055