·专栏·

非侵入式脑机接口在儿童注意缺陷多动障碍中的应用进展

张永丽[1] 王巍巍[2] 韦仕菊[3] 陈树耿[3*]

（1.上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心康复医学科，上海 200127；2.苏州大学附属儿童医院康复医学科，苏州 215000；3.复旦大学附属华山医院康复医学科，上海 200040）

【摘要】 注意缺陷多动障碍（attention deficit hyperactivity disorder, ADHD）是一种常见的儿童神经发育障碍性疾病，其对患者的学习、社交和日常生活均存在严重影响，且传统的治疗手段存在一定局限性。本文深入探究非侵入式脑机接口（non-invasive brain-computer interface, NBCI）在ADHD诊疗中的应用，旨在探索对ADHD患者更有效的诊疗方案。NBCI在ADHD的诊断中展现出独特的应用价值，其捕捉到的大脑信号特征可为病情判断提供量化指标，弥补传统诊断短板；在康复治疗阶段，基于神经反馈训练的脑机接口可用于改善ADHD儿童注意力和认知功能。然而，NBCI也存在信号干扰、设备便携性不足等问题，未来仍需突破技术瓶颈，深化临床探索，以更好服务于ADHD患者。

【关键词】 非侵入式脑机接口；儿童；注意缺陷多动障碍；康复

【中图分类号】 TH77; R49 【文献标识码】 A 【DOI】 10.11876/mimt202505001

Application progress of non-invasive brain-computer interface in children with attention deficit hyperactivity disorder

Zhang Yongli[1], *Wang Weiwei*[2], *Wei shiju*[3], *Chen Shugeng*[3*]

(*1. Department of Rehabilitation Medicine, Shanghai Children's Medical Center Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200127, China;*
2. Department of Rehabilitation Medicine, the Children's Hospital Affiliated to Soochow University, Suzhou 215000, China;
3. Department of Rehabilitation Medicine, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China)

【Abstract】 Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) is a common neurodevelopmental disorder in children that significantly affects their academic performance, social interactions, and daily functioning. Traditional treatment approaches have certain limitations. This study explores the application of non-invasive brain-computer interface (NBCI) technology in the diagnosis and treatment of ADHD, with the aim of identifying more effective therapeutic strategies for affected individuals. NBCI demonstrates unique value in the diagnostic process by providing quantitative indicators based on brain signal features, thereby compensating for the shortcomings of conventional diagnostic methods. In terms of rehabilitation treatment, brain-computer interface systems based on neurofeedback training can be used to enhance attention and cognitive function in children with ADHD. However, NBCI still faces challenges such as signal interference and limited device portability. Future work should focus on overcoming technical bottlenecks and advancing clinical exploration to better serve patients with ADHD.

【Key words】 Non-invasive brain-computer interface (NBCI); Children; Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD); Rehabilitation

---

基金项目：国家自然科学基金资助项目（82202798）；上海扬帆专项（22YF1404200）；上海市养老科技专项（24YL1900202）

第一作者：张永丽，硕士研究生，技师，研究方向：儿童康复

通信作者：陈树耿，博士研究生，主管治疗师，研究方向：脑机接口与神经康复

注意缺陷多动障碍（attention deficit hyperactivity disorder, ADHD）是儿童时期最常见的神经发育障碍性疾病之一，主要临床表现为与同龄儿童发育水平不相称的注意力不集中，不分场合的活动过度、冲动，常共患对立违抗及品行障碍、情绪和抽动障碍、学习困难等问题，严重影响生活、学业、社交和家庭等[1-3]。据统计，ADHD的全球患病率平均约为5%[4-5]，我国最新的一项全国性调查中6～16岁儿童和青少年患病率约为6.4%，且ADHD患者的共病率高达52.95%，其中最常见的共病是对立违抗障碍、品行障碍和焦虑障碍，分别为24%和16%[6]。ADHD临床症状具有非特异性，且缺乏有鉴别意义的客观的病因学、病理学及辅助检查依据，其诊断主要依据美国精神医学学会《精神障碍诊断与统计手册（第五版）》（DSM-5）或世界卫生组织《国际疾病分类第十一次修订本（ICD-11）》中的诊断标准，在全面临床访谈和心理社会评估基础上作出临床诊断[7]。同时，ADHD患者的共患病很常见，其发生率在亚型、年龄和性别上存在很大差异，且因发育因素及环境因素而复杂化，这些临床异质性增加了疾病的严重性及复杂性，使诊断辨识难度加大和治疗复杂化，并突出了针对性个体化干预的必要性。ADHD是一种起病于童年期、损害可持续至成年阶段的神经发育障碍，常与多种其他神经发育障碍及精神障碍共病，由于其症状存在重叠、临床转归多样等特点，需进行系统评估以明确问题主次，并尽早实施规范化的个体化治疗与全生命周期管理。当前这一复杂性疾病背景凸显了对新型个体化治疗策略的迫切需求。

目前，ADHD的治疗方法主要分为药物疗法和非药物疗法两大类。药物治疗虽能有效缓解症状，但往往伴随着一系列不良反应，如食欲下降、睡眠障碍等，这些不良反应不仅影响患者的生活质量，还可能对其生长发育造成不利影响[8]。非药物治疗方法则相对多样，包括认知行为疗法，神经反馈训练（neurofeedback therapy, NFT），无创脑刺激如重复经颅磁刺激（repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS）和经颅直流电刺激，正念疗法、体育活动和瑜伽等。然而这些方法仍存在一定局限性，如认知行为疗法虽可有效改变患者的不良行为模式，但较长的治疗周期和患者的配合度问题导致其临床推进上有一定困难；无创脑刺激技术的作用机制尚不完全明确，且疗效个体差异较大；正念疗法、体育活动和瑜伽等方法则可能受患者兴趣、坚持度等因素影响，效果难以保证[9]。因此，寻找一种更加安全、有效且个性化的治疗方法显得尤为重要。

近年来，随着医疗技术的发展和跨学科合作的推进，脑机接口（brain-computer interface, BCI）技术在医疗康复领域展现出了巨大的潜力。非侵入式BCI（non-invasive BCI, NBCI）是一种无需手术，直接通过无创性头皮电极或者其他传感器捕捉大脑信号，再以算法对信号进行解析的神经科学技术[10]。NBCI技术具有无创、安全的特点，作为一个在理论创新和实际应用的交叉点上活跃的领域[11]，在这项技术普及之前，必须解决一些问题，尤其是隐私和安全问题[12]。安全性是科学技术发展的核心考量之一，也是衡量技术成熟度的关键指标，所以要不断地提升和完善技术体系来降低安全风险。其中针对NBCI技术需要着重提升的方面包括：①改进采集设备和方法，提高神经信号采集质量和精度[13]；②建立和发展各种实验范式，实现神经信号的稳定引出与标注[14]；③优化和改进分析算法，提高信号解码能力，加强神经调控，实现闭环式人机控制[13, 15]。中国的多学科专家在深入研讨和德尔菲法表决的基础上，针对临床前资质审核、临床研究实施与管理以及长期效应跟踪与评估等环节提出了指导意见与原则，以规范研究伦理准则和临床研究流程，进一步推动NBCI技术在神经系统疾病治疗中的广泛应用与深入发展[16]。作为一种快速发展的潜在解决方案，有学者从具有复杂需求的儿童及其家庭的角度出发，对基于混合脑电（electroencephalogram, EEG）的NBCI系统进行了广泛的审查[17]，采用超过40项的相关研究描述了设计混合NBCI的多种策略。

NBCI通过实时解码并反馈ADHD患者的脑电活动，进行在线注意力监测及调节，促进患者学会自我调节并提升其大脑功能，最终改善ADHD的核心症状[18]，为ADHD患者的康复提供新的治疗途径。NBCI技术的应用还涉及开发儿童友好型的游戏

界面，对于“数字原住民”时代背景下成长起来的儿童而言，游戏化的治疗技术是维持其长期参与治疗的关键因素，有研究[19]报告了ADHD患者对于基于视频游戏化的神经反馈治疗具有高水平的参与度和接受度，且基于游戏的训练计划对ADHD患者有治疗效果[20]。本文通过文献回顾和分析，总结了NBCI在国内外儿童ADHD诊疗中的应用效果，并深入分析其作为儿童ADHD新型诊疗方法的发展潜力，评估NBCI在改善儿童ADHD核心症状以及相关功能结局方面的有效性及安全性，为NBCI在儿童ADHD诊疗中的临床实践提供参考。

1 NBCI技术概述

NBCI系统通常包括信号采集、信号处理与控制指令输出3个核心环节。该系统通过电极或传感器从大脑皮层记录神经活动信号，经实时分析和解码后转化为控制指令，并借助反馈机制形成信息闭环，最终实现大脑与外部设备之间的双向交互[21]。基于EEG的信息处理是NBCI连接大脑与外部设备的关键桥梁，其核心在于对采集到的神经电信号进行精细化处理与智能解码，即通过机器学习等手段构建解码模型，从而建立大脑神经电信号特征与动作的映射，并将解码结果转化为标准化指令以驱动外部设备执行对应操作。这一过程融合了信号处理、模式识别与人工智能技术，是NBCI实用化的核心支撑[22]。基于功能性近红外光谱（functional near–infrared spectroscopy, fNIRS）的脑机信息处理是通过想象任务让大脑产生特定信号，通过放置的光源和探测器形成测量通道，使用fNIRS设备捕获这些大脑信号，最常用的是氧合血红蛋白（oxyhemoglobin, HbO）的浓度变化，再使用NBCI计算机解读信号并分类，将结果转化为对外部设备的控制指令[23]。NBCI虽然安全便捷，但普遍存在信号质量较低、空间分辨率相互制约等问题。有研究[24]显示通过多模态融合技术整合来自不同脑信号模态的互补信息，可以克服单一模态的局限性，从而显著提升NBCI的性能及适用性。NBCI实现信息交互的实质是一个双向过程，传感器采集的神经信号经解码可转化为外部设备指令，而外部设备的反馈信息也可通过NBCI传回大脑，形成闭环交互。

2 NBCI在儿童ADHD诊疗中的应用

2.1 诊断与评估

NBCI技术能够通过记录和分析不同状态下的EEG信号，识别ADHD患者特有的脑电活动模式。θ 波（4 ~ 7 Hz）和 β 波（13 ~ 30 Hz）是EEG中的两种脑电波成分。ADHD患者存在3个亚型[1–3]，即注意力不集中（ADHD–I）、多动/冲动（ADHD–H）和组合型（ADHD–C），基于疾病分型出发的NBCI个性化治疗通过采集和分析儿童的EEG信号，如采集到 θ 波、β 波以及 θ/β 比值的不同变化，识别不同亚型ADHD患者存在的注意力和认知问题[25]。

有研究[26–27]基于既往医学实践中 θ 波活动增强、β 波活动减弱、θ/β 比值异常等脑电特征，作为超早期发现儿童注意力不集中问题的结论，捕捉大脑EEG信号中 α 波、β 波、θ 波、δ 波和 γ 波与大脑功能的相关关系，用以辅助医生判断患者是否存在注意力、神经调节方面的问题。相关研究[28]显示，年龄较小的患者和男孩群体的 θ/β 比值往往较高，这与他们所呈现出的注意力不集中、认知障碍的表现相一致。这一发现进一步证实了EEG信号在ADHD诊断中的价值。此外，该方法可用于监测治疗过程中的病情变化，以辅助医生评估治疗效果，及时调整治疗方案。NBCI技术不仅为ADHD的诊断提供了客观、准确的依据，还可作为监测ADHD患者注意力下滑的有效手段。

通过对ADHD患者按照亚型进行分组后使用Matlab软件对EEG信号的频域进行分析和比较，发现ADHD混合组和ADHD–I组以及ADHD–C组的 δ 和 θ 频带平均功率值高于正常对照组。ADHD患者较正常对照组的 δ 和 θ 绝对功率更高，而 α 和 β 绝对功率更低[29]。相关研究[30]对6 ~ 18岁患有和不患有ADHD的儿童或青少年睁眼期间的 θ/β 比值（theta/beta ratio, TBR）数据进行荟萃分析，发现不同年龄段的TBR差异逐渐减小，这可以用非ADHD组的TBR增加来解释，高数值的TBR不能被视为ADHD的可靠诊断指标，可以将TBR用作预后指标而不是诊断指标，证实ADHD群体（尤其是儿童）的TBR显著高于正常对照组，为“皮层觉醒不足”理论提供了核心证据。有研究[31]使用双生子

设计来估计 θ 功率增加与ADHD风险之间的遗传重叠程度，对30对高ADHD症状评分的单卵或双卵青少年双胞胎以及37对低ADHD症状评分的单卵或双卵对照双胞胎进行了EEG测量，使用结构方程模型估计 θ 幂的遗传力，并将遗传和环境因素对ADHD和 θ 幂重叠的贡献进行划分，发现ADHD症状与 θ 功率升高之间存在显著的表型相关性，表明存在共同的遗传影响，证实 θ 波是ADHD遗传风险的候选生物标志物。综上，通过NBCI记录和分析不同状态下的EEG信号，可对ADHD症状程度进行早期识别及干预，有助于减轻ADHD对患者学习和生活的影响，提高他们的生活质量和社会适应能力。

相关研究采用多通道或单通道EEG/fNIRS采集及频谱功率、微状态、脑激活等多种分析方法，进一步证实了儿童ADHD存在 δ/θ 功率上升及 β 功率下降的特征，θ/β 比值与 δ/β 比值在诊断及亚型区分中具有应用价值；基于单通道NBCI结合游戏化任务的注意力检测，能有效识别ADHD患者的注意力低下与波动特征，为儿童ADHD的筛查评估提供了以NBCI为核心的客观技术支持。此外，ADHD–C亚型视觉网络活动更强，以及物理游戏形式在fNIRS研究中表现出更广泛的脑区激活，进一步丰富了NBCI技术应用的生物学依据，并提示不同BCI训练模式在ADHD评估中可能存在敏感性差异。见表1。

表1 NBCI在儿童ADHD诊断与评估中应用的相关研究

研究名称	发表年份	研究内容和方法	诊断指标	指标数值	诊断效能	研究结果
ADHD症状与EEG theta功率的遗传重叠[31]	2014年	67对12～15岁双胞胎（高/低ADHD症状组），静息EEG（62通道），结构方程建模	θ 功率（4～8 Hz）	ADHD组 θ 功率上升；h^2=0.77；rg=0.35	未计算	θ 功率与ADHD共享遗传影响，可作为遗传风险标记
基于EEG频域分析的ADHD亚型研究[29]	2018年	40名7～12岁儿童（ADHD：n=20，ADHD–I：n=10，ADHD–C：n=10，健康对照组：n=20），19通道EEG，频谱功率分析	θ/β 比值+δ/β 比值	ADHD–I：δ/β 比值上升，θ/β 比值上升；ADHD–C：δ/β 比值上升	未报告百分比，但 θ/β 比值和 δ/β 比值可区分亚型	ADHD组 δ 和 θ 功率上升，α 和 β 功率下降；θ/β 比值+δ/β 比值可作为客观标记
成人ADHD中alpha振荡、注意力与抑制控制的关联[26]	2020年	25名成人ADHD vs. 22名健康对照，64通道EEG，30 min α 下调神经反馈，Go/No Go任务	α 功率（8～12 Hz）+α 脑电去同步化	ADHD基线 α 功率下降；神经反馈后 α 功率上升，且与抑制错误减少相关（r=−0.48）	未报告	α 功率调节可改善抑制控制；α 基线低提示皮质过度激活
单电极EEG在ADHD评估中的应用[28]	2020年	92名7～13岁ADHD儿童脑电Cz/FCz电极通道，4种任务，分析 θ/β 比值	θ/β 比值	均值：2.73～2.87	未明确报告	单电极 θ/β 比值可用于临床评估；年龄、性别显著影响结果；未发现亚型差异
基于游戏与单通道脑机接口的ADHD儿童注意力检测[27]	2021年	52名非ADHD儿童vs. 23名ADHD儿童（7～12岁），Fp1电极通道，游戏模式	注意力指数	ADHD组注意力均值显著下降	未计算百分比，但显著区分完成/未完成游戏者	ADHD组注意力更低且波动更大；游戏可作为筛查工具
ADHD儿童及其亚型的异常脑动力学与频谱功率[25]	2023年	161名8～15岁儿童（ADHD–C：n=53，ADHD–I：n=54，健康对照组：n=54），128通道EEG，微状态+频谱功率分析	θ/β 比值+微状态特征	ADHD组 θ/β 比值上升；微状态B在ADHD–C中更高	分类准确率：ADHD组vs. 健康对照组为72.7%；ADHD–C vs. ADHD–I为73.8%	ADHD组 δ 功率上升、θ/β 比值上升；ADHD–C视觉网络（微状态B）活动更高
基于功能性近红外的BCI注意力训练游戏对ADHD儿童脑激活的影响[32]	2024年	35名健康儿童（男性16名，女性19名；7～12岁），采用功能性近红外记录前额叶与颞叶氧合血红蛋白变化，比较VG与PG两种BCI训练模式下的脑区激活差异	激活通道数（氧合血红蛋白 β 值）	PG激活3个脑区（L–PFC、R–PFC、R–TL）；VG仅激活1个脑区（R–PFC）	未计算分类准确率，但PG激活范围显著大于VG	物理游戏形式在同等规则下激活更多认知相关脑区，提示其在ADHD评估中可能更具敏感性，尤其适用于女性儿童

注：NBCI为非侵入式脑机接口；ADHD为注意缺陷多动障碍；EEG为脑电图；h^2为Meta分析异质性数值；rg为ADHD遗传因素EEG相关性；ADHD–I为ADHD注意力不集中亚型；ADHD–C为ADHD组合型亚型；VG为视频游戏；PG为物理游戏；L–PFC为左前额叶皮层；R–PFC为右前额叶皮层；R–TL为右颞叶。

2.2 康复治疗

NBCI中常见的康复治疗手段主要为基于神经反馈的BCI干预方法。同时，NBCI技术通过联合其他治疗方法和技术可形成联合治疗，有望提高治疗效果，如NBCI联合正念疗法、NBCI联合经颅磁刺激（transcranial magnetic stimulation, TMS）等形式。

2.2.1 基于神经反馈的NBCI

神经反馈作为一种基于EEG的生物反馈形式，在实际应用中展现出了改善人类认知和身体表现的强大潜力[33]。而NBCI介导的神经反馈训练（NBCI–neurofeedback therapy, NBCI–NFT）则是这一领域内的创新之作，它将脑电活动的测量与实时反馈机制相结合，为患者提供一种全新的训练方式。NBCI–NFT通常在视频游戏环境中进行，患者借助设备提供的视觉、听觉等反馈自主调节大脑状态，以强化注意力训练。相关研究[34–35]结果表明，使用基于NBCI和视听反馈的注意力增强系统能够显著改善患者的整体注意力水平，平均肌肉激活等指标显示该系统在提高神经和运动参与方面也具备可行性。在NBCI视频游戏训练中，通常设置多种认知训练任务，如记忆力、反应力、思维灵活性等，这些任务设计能够刺激大脑的前额叶、基底节等与ADHD密切相关的区域，从而促进神经可塑性，改善大脑认知功能[36–37]。此外，研究[38–39]显示，经过NBCI–NFT为期8周的注意力训练后，ADHD儿童的注意力不集中的症状得到缓解；同时静息态功能磁共振成像显示儿童的脑网络发生了重组，特别是显著网络内的功能链接增加，这表明大脑认知功能得到了实质性改善。NBCI视频游戏训练在改善ADHD儿童认知功能方面兼备有效性和可行性，未来有望成为改善ADHD儿童认知功能的重要手段之一。

不同亚型ADHD患者在应用基于EEG与神经反馈的NBCI训练上，所实行的训练内容各不相同。对于ADHD–I型患者，主要应用NBCI进行记忆力、注意力等认知训练，增强大脑的执行功能。对于ADHD–H型患者，主要进行抑制控制训练，即利用NBCI反馈，进行Go/No–Go任务的训练，增强患者前额叶功能[40]。对于ADHD–C型患者则可应用NBCI神经反馈训练，通过抑制控制训练和认知训练全面改善大脑的功能。这种从疾病分型出发的NBCI个性化治疗不仅提高了治疗的针对性和有效性，还为ADHD儿童提供了一种新颖、有趣的治疗方式。它提高了治疗过程的互动性和针对性，有助于进一步激发儿童的治疗积极性和参与度，促进ADHD治疗的推进。

2.2.2 NBCI联合正念疗法

正念疗法是一种心理训练方法，其核心在于有意识地觉察当下，逐步培养并增强个体的觉察力[41]。近年来，随着神经科学技术的飞速发展，研究者尝试将神经反馈技术融入正念疗法中，在患者进行正念冥想时，通过将NBCI设备捕捉的大脑电信号转化为反馈信号以帮助患者调整自己的正念练习方式。基于ADHD患者注意力不集中时大脑的θ波会升高，而β波会降低的现象，研究者[42]将EEG反馈融入正念疗法中，当θ波较低时，患者被提示需要进入冥想状态；当β波活动增强时，患者被鼓励保持当时的专注状态。结果显示，结合神经反馈的正念疗法在改善ADHD儿童注意力集中表现上显示出了明显疗效。这一研究结果为ADHD患者提供了一种新的、有效的治疗方法，有助于他们更好地管理注意力，提高生活和学习效率。

2.2.3 NBCI联合TMS

TMS利用磁场直接刺激大脑神经细胞，能够针对性地改善与ADHD患者的注意力、情绪和行为问题相关的神经回路[43]。然而，传统TMS治疗过程中缺乏实时反馈机制，这导致治疗不够精确、部分患者治疗后症状反复、效果达不到预期等问题。NBCI与TMS相联合，其实时的EEG信号可为TMS刺激提供精确的靶点信息，因此能够更加精准地刺激与ADHD症状相关的脑区。比较重复TMS（repetitive TMS, rTMS）前后EEG反应的随机对照试验研究[44–45]显示，ADHD儿童的静息EEG成分N100在1 Hz rTMS刺激期间降低，并且在ADHD儿童进行大约500次脉冲治疗后趋于稳定，EEG结果显示rTMS治疗后患者的多动状态得到了改善。NBCI设备与TMS的结合使用不仅能够实时监测和调整治疗过程中的神经活动，还能促进大脑的神经连接和功能重组，持续改善患者的症状，为ADHD治疗提供了一种全新的、更为精准的治疗方法。

综上，相关研究系统评估了NBCI在6～15岁ADHD及相关共病儿童中的康复价值。研究设计覆盖从单中心到多中心、从随机对照到可行性试验以及个案研究；干预周期4～12周、训练次数8～24次；场景涵盖医院、家庭、课堂及娱乐环境。结

果一致显示，NBCI注意力训练可显著降低注意缺陷多动障碍评定量表（attention–deficit/hyperactivity disorder rating scale, ADHD–RS）评分3～9分，且疗效在维持期及随访中持续；静息态功能磁共振（functional magnetic resonance imaging, fMRI）证实BCI能重塑突显网络等脑功能连接，促进拓扑结构成熟；在场景方面，居家与诊所训练完成率均≥95%，疗效相当，验证了远程康复的可行性。此外，结合眼动、情绪反馈或正念训练的NBCI方案还可提升课堂参与度、抑制控制与社交动机，为“情绪—注意力—行为”闭环管理提供了多维度实证。以上证据表明，NBCI技术有望构建“监测—训练—评估”一体化、跨场景、可推广的ADHD康复新范式，并适用于部分共病患者。见表2。

表2 NBCI在儿童ADHD康复治疗中应用的相关研究

研究名称	发表年份	研究设计	研究内容与方法	治疗效果
可穿戴脑电特殊教育辅助系统[46]	2017年	单中心可行性设计研究（n=5）	使用NBCI头环实时监测情绪，结合图片训练，教师根据情绪反馈调整教学	系统可用性评分：8.6/10；情绪识别准确率：68%～72%；个案显示课堂参与度提升
NBCI干预重塑ADHD儿童脑功能网络结构[38]	2018年	单中心神经影像研究（n=51）	ADHD儿童接受8周NBCI训练，静息态磁共振评估脑网络拓扑变化	注意缺陷多动障碍评定量表显著降低（P=0.038），突显网络连接减少，脑网络更成熟
NBCI注意力训练随机对照试验[36]	2019年	多中心随机对照试验（n=172）	8～12岁ADHD儿童，8周NBCI注意力训练+12周维持训练；对照组为等待名单	8周后ADHD–RS注意力症状减少3.5分（P=0.017 7），20周后疗效持续
NBCI注意力社交训练自闭症谱系障碍+ADHD可行性试验[37]	2021年	单中心可行性试验（n=20）	8～12岁ASD+ADHD儿童，8周NBCI注意力与社会认知训练（每周3次），结合眼动追踪	注意缺陷多动障碍评定量表显著改善8.5分；社会反应度量表社交症状无差异
脑感应正念练习提升小学生认知[42]	2022年	单中心探索性试点研究（n=31）	9～10岁健康儿童，4周8次NBCI–反馈正念训练（1～4 min递增）；对照组被动等待	抑制控制与注意力准确性显著提升（P<0.05），α/θ波稳定，专注状态提升8%
居家NBCI注意力训练ADHD可行性试验[39]	2023年	单中心随机可行性试验（n=20）	6～12岁ADHD儿童，8周家庭vs. 诊所NBCI训练（24次），ADHD–RS为主要结局	家庭与诊所组完成率≥95%，ADHD–RS均显著下降（家庭组降低3.2分 vs. 诊所组降低3.9分，组间无差异）
NBCI在自闭症青少年娱乐编程中的创新应用[47]	2024年	个案报告（n=1）	15岁自闭症合并ADHD青少年参与6周BCI娱乐训练，使用NBCI头环，通过想象运动控制玩具车、游戏等，结合加拿大职业能力评估测量评分评估表现与满意度	加拿大职业能力评估测量评分得分显著提升（BCI技能提升9分，交友能力提升6分）；社交沟通与自我倡导能力增强；主动参与度提高，家庭训练依从性低

注：NBCI为非侵入式脑机接口；ADHD为注意缺陷多动障碍；ADHD–RS为注意缺陷多动障碍评定量表；ASD为自闭症谱系障碍。

2.3 辅助教育

NBCI作为教育领域的一项创新技术工具，正逐渐展现出其在提升患者学习参与度和认知能力方面的巨大潜力。传统的教学方式中教师往往难以全面、即时地掌握学生的学习状态，特别是对于存在注意力缺陷或学习动机不足的患者来说，更是难以确保他们能够有效地参与到学习过程中。NBCI的出现则有效地解决了这一问题，它不仅能够监测患者的注意力状态，还能协助分析他们的即时学习动机，从而帮助教师更全面地了解每个患者的学习需求和特点。当发现患者因缺乏学习动机而导致注意力下降时，NBCI训练系统便能够迅速介入，通过设计一系列富有趣味性和挑战性的训练任务，如认知游戏、互动问答等，有效调动患者的积极性，使他们在游戏中锻炼认知能力，提高学习能力[48]。

此外，NBCI设备采集到的信息还可实时反馈给教师，为教师的教学调整提供参考。教师可以根据这些信息，准确了解每个患者的学习状态和需求，不仅有助于提高教学效果，还能确保每个患者都能在学习中获得收获和参与感，增强他们的自信心和学习动力[46]。通过这种有针对性的训练和辅导，患者有望逐渐克服自己的学习障碍，提升认知能力和社交技能，为未来的学习和生活奠定坚实基础。

3 总结和展望

虽然基于NBCI的ADHD治疗探索正逐渐显示出其独特的优势，但NBCI应用上仍面临诸多挑战。在技术方面，因信号穿透多层组织易衰减、失真且受多种干扰，信号不稳定是一大难题。另外，不同个体的大脑结构、颅骨厚度等存在一定差异，这对于NBCI系统的通用性和准确性提出了更高的要求。此外，BCI技术涉及个人大脑信息的采集和使用，这带来了隐私泄露的风险及担心改变人的意识和行为等担忧。NBCI已成功地用于成人，但有关儿童使用BCI的信息很少，特别是患有严重多重障碍的儿童，他们可能需要技术来促进沟通[49]。如何设计匹配ADHD儿童理解力、注意力及执行能力的BCI操作的多步骤指令，特别是如果刺激本身并不有趣的话，如何使儿童更容易地投入并遵从NBCI，而不是被动参与；以及如何减少因ADHD非自主多动及共患抽动导致的EEG运动伪迹、头套移位与疼痛等问题，都有待深入探讨。ADHD临床症状波动与所处场合及从事活动有关，在友好型的电极、脑电帽设计中，便携式EEG采集设备研制以及快速捕捉和解析脑电信号技术研发是必不可少的。其他挑战包括为具有有限替代策略的参与者设计BCI、对设计本身与环境因素的评估等，凸显了设计儿科BCI比成人面临更复杂的挑战。

未来，NBCI在ADHD诊疗中的发展将围绕三大方向持续深化。诊断层面，将融合多模态生理信号与人工智能分析，构建更敏感、客观的ADHD生物标志物识别体系，推动早期识别与精准分型。治疗层面，基于神经反馈的个性化干预策略将成为核心，通过自适应算法实时调整训练难度与反馈形式，提升治疗的针对性与参与度。康复层面，NBCI将与行为疗法、认知训练及家庭–学校场景深度融合，发展可长期跟踪、动态评估的闭环康复支持系统，促进ADHD患者认知功能与日常适应能力的持续性改善。综上所述，NBCI技术在ADHD诊疗中的应用已初显成效，为患者的治疗和干预提供了新的视角和方法。BCI通过精准采集EEG信号，为ADHD的诊断提供客观依据并可通过基于信号反馈的训练有效改善患者症状。未来，NBCI的发展仍需更多人员的参与及推动，我们期待研发更先进的采集技术，优化信号处理算法，提升设备性能。同时在临床深化阶段，亟需制定业界公认的NBCI临床伦理细则，以保证未来临床研究的规范化、合理化，以便临床工作者进一步拓展联合治疗方案。为设计真正满足儿科需求的BCI，关键在于以下两方面：其一，在设计与优化上，需开发直观易用的系统，并通过具有吸引力的刺激标准来维持儿童兴趣，同时有效应对其注意力分散与易疲劳的问题，以延长可用时间；其二，在内容与目标上，应积极探索将游戏、音乐、艺术及社交互动等儿童喜爱的元素融入NBCI的独特机会。该系统及范式的选择，可为未来研究提供参考，并推动NBCI在ADHD诊疗领域广泛应用，为ADHD患者的诊断、治疗提供新的选择[50]。

[参 考 文 献]

[1] American Psychiatric Association. Diagnostic and statistical manual of mental disorders [M]. 5th ed. Washington, DC: American Psychiatric Association Publishing, 2013.

[2] First M B. Diagnostic and statistical manual of mental disorders, 5th edition, and clinical utility [J]. J Nerv Ment Dis, 2013, 201(9): 727–729.

[3] World Health Organisation. ICD–11 for mortality and morbidity statistics [EB/OL]. [2025–07–03]. https://icd.who.int/browse/2025–01/mms/en#1435254666.

[4] Sayal K, Prasad V, Daley D, et al. ADHD in children and young people: prevalence, care pathways, and service provision [J]. The Lancet Psychiatry, 2018, 5(2): 175–186.

[5] Salari N, Ghasemi H, Abdoli N, et al. The global prevalence of ADHD in children and adolescents: a systematic review and meta–analysis [J]. Ital J Pediatr, 2023, 49(1): 48.

[6] Liu J, Jiang Z, Li F, et al. Prevalence and comorbidity of attention deficit hyperactivity disorder in Chinese school–attending students aged 6–16: a national survey [J]. Ann Gen Psychiatry, 2025, 24(1): 23.

[7] 中华医学会儿科学分会发育行为学组. 注意缺陷多动障碍早期识别、规范诊断和治疗的儿科专家共识[J]. 中华儿科杂志, 2020, 58(3): 188–193.

[8] Coghill D, Banaschewski T, Cortese S, et al. The management of ADHD in children and adolescents: bringing evidence to the clinic: perspective from the European ADHD Guidelines Group (EAGG) [J]. Eur Child Adolesc Psychiatry, 2023, 32(8): 1337–1361.

[9] Drechsler R, Brem S, Brandeis D, et al. ADHD: current concepts and treatments in children and adolescents [J]. Neuropediatrics, 2020, 51(5): 315–335.

[10] 曹洪涛, 钟子平, 陈远方, 等. 非侵入式脑机接口控制策略的研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2022, 39(5): 1033–1040.

[11] Caiado F, Ukolov A. The history, current state and future possibilities of the non–invasive brain computer interfaces [J]. Medicine in Novel Technology and Devices, 2025, 25: 100353.

[12] Karikari E, Koshechkin K A. Review on brain–computer interface technologies in healthcare [J]. Biophysical Reviews, 2023, 15(5): 1351–1358.

[13] 陈小刚, 陈菁菁, 刘冰川, 等. 2022年脑机接口研究进展[J]. 信号处理, 2023, 39(8): 1355–1366.

[14] Abiri R, Borhani S, Sellers E W, et al. A comprehensive review of EEG–based brain–computer interface paradigms [J]. Journal of Neural Engineering, 2019, 16(1): 011001.

[15] Liang L, Zhang Q, Zhou J, et al. Dataset evaluation method

and application for performance testing of SSVEP-BCI decoding algorithm [J]. Sensors (Basel), 2023, 23(14): 6310.
[16] 中华医学会神经外科学分会, 中国卒中学会脑血管外科分会. 神经系统疾病脑机接口临床研究实施与管理的中国专家共识 [J]. 中华医学杂志, 2024, 104(23): 2105-2112.
[17] Kirton A, Kinney-Lang E, Norton J, et al. Editorial: BCIs: research and development in children [J]. Front Hum Neurosci, 2023, 17: 1201623.
[18] Huang H, Chen J, Xiao J, et al. Real-time attention regulation and cognitive monitoring using a wearable EEG-based BCI [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2025, 72(2): 716-724.
[19] Kollins S H, DeLoss D J, Cañadas E, et al. A novel digital intervention for actively reducing severity of paediatric ADHD (STARS-ADHD): a randomised controlled trial [J]. Lancet Digit Health, 2020, 2(4): e168-e178.
[20] Rajabi S, Pakize A, Moradi N. Effect of combined neurofeedback and game-based cognitive training on the treatment of ADHD: a randomized controlled study [J]. Appl Neuropsychol Child, 2020, 9(3): 193-205.
[21] Zhuang M, Wu Q, Wan F, et al. State-of-the-art non-invasive brain-computer interface for neural rehabilitation: a review [J]. Journal of Neurorestoratology, 2020, 8(1): 12-25.
[22] Yadav D, Yadav S, Veer K. A comprehensive assessment of Brain Computer Interfaces: recent trends and challenges [J]. J Neurosci Methods, 2020, 346: 108918.
[23] Naseer N, Hong K S. fNIRS-based brain-computer interfaces: a review [J]. Front Hum Neurosci, 2015, 9: 3.
[24] Koo B, Lee H G, Nam Y, et al. A hybrid NIRS-EEG system for self-paced brain computer interface with online motor imagery [J]. J Neurosci Methods, 2015, 244: 26-32.
[25] Luo N, Luo X, Zheng S, et al. Aberrant brain dynamics and spectral power in children with ADHD and its subtypes [J]. Eur Child Adolesc Psychiatry, 2023, 32(11): 2223-2234.
[26] Deiber M P, Hasler R, Colin J, et al. Linking alpha oscillations, attention and inhibitory control in adult ADHD with EEG neurofeedback [J]. Neuroimage Clin, 2020, 25: 102145.
[27] Serrano-Barroso A, Siugzdaite R, Guerrero-Cubero J, et al. Detecting attention levels in ADHD children with a video game and the measurement of brain activity with a single-channel BCI headset [J]. Sensors (Basel), 2021, 21(9): 3221.
[28] Moreno-García I, Servera M, Meneres-Sancho S, et al. Use of single-electrode EEG in the evaluation of attention-deficit/hyperactivity disorder [J]. Rev Neurol, 2020, 70(3): 84-92.
[29] Aldemir R, Demirci E, Per H, et al. Investigation of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) sub-types in children via EEG frequency domain analysis [J]. Int J Neurosci, 2018, 128(4): 349-360.
[30] Arns M, Conners C K, Kraemer H C. A decade of EEG theta/beta ratio research in ADHD: a meta-analysis [J]. J Atten Disord, 2013, 17(5): 374-383.
[31] Tye C, Rijsdijk F, McLoughlin G. Genetic overlap between ADHD symptoms and EEG theta power [J]. Brain Cogn, 2014, 87: 168-172.
[32] Chen A, Hao S, Han Y, et al. Exploring the effects of different BCI-based attention training games on the brain: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. Neuroscience Letters, 2024, 818: 137567.
[33] Chaudhary U, Birbaumer N, Ramos-Murguialday A. Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation [J]. Nat Rev Neurol, 2016, 12(9): 513-525.
[34] Wang J, Wang W, Hou Z G. Toward improving engagement in neural rehabilitation: attention enhancement based on brain-computer interface and audiovisual feedback [J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2020, 12(4): 787-796.
[35] Zhang T, Zhou X, Li X, et al. Noninvasive brain-computer interfaces for children with neurodevelopmental disorders: attention deficit hyperactivity disorder and autism spectrum disorder [J]. Displays, 2025, 86: 102886.
[36] Lim C G, Poh X W W, Fung S S D, et al. A randomized controlled trial of a brain-computer interface based attention training program for ADHD [J]. PLoS One, 2019, 14(5): e0216225.
[37] Teo S H J, Poh X W W, Lee T S, et al. Brain-computer interface based attention and social cognition training programme for children with ASD and co-occurring ADHD: a feasibility trial [J]. Research in Autism Spectrum Disorders, 2021, 89: 101882.
[38] Qian X, Loo B R Y, Castellanos F X, et al. Brain-computer-interface-based intervention re-normalizes brain functional network topology in children with attention deficit/hyperactivity disorder [J]. Transl Psychiatry, 2018, 8: 149.
[39] Lim C G, Soh C P, Lim S S Y, et al. Home-based brain-computer interface attention training program for attention deficit hyperactivity disorder: a feasibility trial [J]. Child Adolesc Psychiatry Ment Health, 2023, 17(1): 15.
[40] Kim S J, Tanglay O, Chong E H N, et al. Functional connectivity in ADHD children doing Go/No-Go tasks: an fMRI systematic review and meta-analysis [J]. Transl Neurosci, 2023, 14(1): 20220299.
[41] Lee Y C, Chen C R, Lin K C. Effects of mindfulness-based interventions in children and adolescents with ADHD: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(22): 15198.
[42] Vekety B, Logemann A, Takacs Z K. Mindfulness practice with a brain-sensing device improved cognitive functioning of elementary school children: an exploratory pilot study [J]. Brain Sci, 2022, 12(1): 103.
[43] Fu B, Zhou X, Zhou X, et al. Efficacy and safety of transcranial magnetic stimulation for attention-deficit hyperactivity disorder: a systematic review and meta-analysis [J]. Brain Behav, 2025, 15(1): e70246.
[44] Chung S W, Rogasch N C, Hoy K E, et al. Measuring brain stimulation induced changes in cortical properties using TMS-EEG [J]. Brain Stimul, 2015, 8(6): 1010-1020.
[45] Cao K X, Ma M L, Wang C Z, et al. TMS-EEG: an emerging tool to study the neurophysiologic biomarkers of psychiatric disorders [J]. Neuropharmacology, 2021, 197: 108574.
[46] Mehmood R M, Lee H J. Towards building a computer aided education system for special students using wearable sensor technologies [J]. Sensors (Basel), 2017, 7(2): 317.
[47] Van Damme S, Mumford L, Johnson A, et al. Case report: novel use of clinical brain-computer interfaces in recreation programming for an autistic adolescent with co-occurring attention deficit hyperactivity disorder [J]. Front Hum Neurosci, 2024, 18: 1434792.
[48] Ali A, Puthusserypady S. A 3D learning playground for potential attention training in ADHD: a brain computer interface approach [J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2015, 2015: 67-70.
[49] Huggins J E, Karlsson P, Warschausky S A. Challenges of brain-computer interface facilitated cognitive assessment for children with cerebral palsy [J]. Front Hum Neurosci, 2022, 16: 977042.
[50] Orlandi S, House S C, Karlsson P, et al. Brain-computer interfaces for children with complex communication needs and limited mobility: a systematic review [J]. Front Hum Neurosci, 2021, 15: 643294.