·综 述·

智能康复技术在临床应用中的伦理风险及对策

王丽莎[1,2],乔 晋[1],张广健[1],刘玉钢[3],袁子文[1,2],赵 烨[1,2],宋思明[1,2],王 刚[2*]

1 西安交通大学第一附属医院,陕西 西安 710061;
2 西安交通大学生命科学与技术学院,陕西 西安 710049;
3 西安市胸科医院,陕西 西安 710100
*通讯作者:王刚,E-mail:ggwang@xjtu.edu.cn

收稿日期:2025-02-26;接受日期:2025-05-24
基金项目:国家自然科学基金项目(32071372);陕西省重点研发计划项目(2024SF-YBXM-693)
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10007

摘要 人工智能技术快速发展推动了其在医疗康复领域的创新应用,由此衍生的智能康复技术在提升治疗效率和功能代偿方面展现出显著优势。然而,临床应用中引发的安全性隐患、主体尊严争议、隐私泄露风险、资源分配失衡及责任界定困境等复合型伦理问题,已引发跨学科领域的持续关注。本研究系统梳理了脑机接口(BCI)、康复机器人(RR)与虚拟现实(VR)这三大类典型人工智能技术在神经康复、运动功能重建及认知干预中的伦理风险传导情况,从技术研发、临床实施到资源配置的全流程视角,让人们认识到智能康复技术为人类的发展带来的收益及考验,有助于推动该技术在符合法律道德的前提下全面健康发展。

关键词 智能康复技术;人工智能技术;技术伦理;脑机接口;康复机器人;虚拟现实

近年来,人工智能技术以其高速迭代和广泛适用性已在各行各业取得显著突破,其在康复及神经系统疾病防治等方面的应用已展现出巨大的潜力。然而,伴随技术革新的同时,隐私保护、数据安全、公正性等伦理问题也日益凸显,并引发学界及社会各界的广泛关注。2022年国务院《"十四五"国家老龄事业发展和养老体系规划》[1]中指出我国人口老龄化愈加明显,随着社会老龄化带来的康复需求越来越多。我国第七次全国人口普查数据显示,60岁及以上人口约有2.64亿人,65岁及以上人口约有1.9亿人,人口老龄化程度进一步加深[2]。面对庞大的老年人口基数,养老金财政支出不断扩大,加之医疗资源供给紧张、康复专业技术人员短缺等问题,我国社会养老面临严峻挑战。

目前康复医疗机构只能满足约20%的市场需求,在此背景下,利用智能康复技术推动康复医疗发展已成为应对养老问题的新探索[3]。诸如智能穿戴设备、远程监测系统与虚拟诊所等技术的应用,为老年患者提供了连续的康复跟踪与个性化健康管理服务,既缓解了医疗资源不足的问题,又提升了患者生活质量。智能康复技术的发展需要对技术伦理进行深入反思,并予以高度关注。随着智能康复技术在临床中的应用不断扩大,人们对智能康复技术相关的伦理问题提出了新的要求,并推动了相应伦理规则的形成[4]。这一过程不仅有助于智能康复技术的成熟和发展,也使人们更加理性地认识到智能康复技术带来的利与弊。通过完善智能康复技术伦理体系,推动该技术造福人类健康。

1 智能康复概念及常见种类

"人工智能"概念产生于1956年美国达特茅斯学院论坛上,智能机器人作为人工智能系统的重要载体,代表着人工智能技术的发展水平和现实应用[5]。智能康复技术是指在康复医学领域应用人工智能技术,是康复医学与现代科技结合的产物。其主要任务是研究和开发各种康复设备,用于辅助评

引用格式:王丽莎,乔晋,张广健,等. 智能康复技术在临床应用中的伦理风险及对策[J]. 康复学报,2026,36(10):731-738.
WANG L S,QIAO J,ZHANG G J,et al. Ethical risks and countermeasures in the clinical application of intelligence rehabilitation technology [J]. Rehabil Med,2026,36(10):731-738.
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10007
©《康复学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议 © *Rehabilitation Medicine*, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

估、训练和代偿现有功能，可显著提高因疾病导致的功能障碍人群的生活质量。智能康复技术是将临床医学、康复医学、生命科学、生物工程、计算机科学、机械工程和心理学等学科紧密结合的一门交叉学科，目的是研发更有助于康复治疗的新技术[6]。人工智能技术主要有脑机接口（brain-computer interface，BCI）、康复机器人（rehabilitation robot，RR）、虚拟现实（virtual reality，VR），以及互相结合的新型康复设备等，这些技术已逐渐被应用于康复领域并取得了良好的效果[7]。随着人工智能技术的日益成熟，其在康复医学领域将带来巨大的发展潜力。对于治疗手段有限、医疗人力资源紧张的现实问题，具备十分广阔的应用空间。

2 智能康复技术在临床中的应用

2.1 BCI技术在临床中的应用及作用

BCI的概念由雅克·维达尔（Jacques Vidal）于1970年正式提出，最初指的是“通过计算机系统表达脑功能的详细信息”[8]。BCI被定义为一种无需依赖正常神经肌肉系统，而是通过采集和处理大脑活动信号，直接将人或动物的大脑与外部设备连接起来，从而实现对设备控制的技术[9]。在神经康复领域，BCI提供了新的技术途径，能够促进肢体运动障碍康复，对脑损伤及各种神经系统疾病恢复和功能重建起到了重要作用。KRUEGER等[10]研究表明，BCI电刺激训练能够建立“中枢-外围-中枢”闭环康复训练模型，通过促进中枢重塑和外周控制，改善运动功能，多应用在骨科手术后及神经损伤的运动康复中。在言语方面，BCI技术可以辅助脑卒中丧失语言功能患者使用脑控键盘进行交流[11]。在功能代偿方面，该技术通过收集患者的脑电信号，实现对义肢的控制，帮助患者缩短回归社会和家庭的时间[12]。BCI技术还可以通过脑电信号纠正大脑的异常运动模式，从而为肢体功能障碍患者带来福音[13]。FLESHER等[14]使用双向BCI诱发的触觉感知来补充视觉，该接口记录来自运动皮层的神经活动，并通过皮层内微刺激体感皮层产生触觉，极大地提高了四肢瘫痪患者用脑控机械臂操纵物体的能力，为脊髓损伤引起高位截瘫患者提供了有效的功能补偿。此外，BCI技术有望使“脑机互联”甚至“脑脑互联”成为现实，实现人类长久以来“心有灵犀”的梦想。

2.2 RR技术在临床中的应用及作用

RR是一种结合康复医学与智能机器人技术的新型医疗设备[15]。通过三维步态分析系统进行运动学建模，根据功能主要分为上肢康复机器人（upper limb rehabilitation robot，ULRR）和下肢康复机器人（lower limb rehabilitation robot，LLRR）。该类设备可辅助患者完成上下肢的功能评估、功能恢复与运动代偿[16]。目前，RR主要分为治疗与辅助机器人以及功能替代机器人，后者包括假肢和外骨骼等[17]。这些机器人设备不仅适用于治疗外周肌肉、骨骼和神经损伤的疾病，还能用于康复因脑卒中、脑损伤和中枢神经系统损伤导致的上、下肢运动功能丧失[18]。RR的应用及市场发展相当快速，2020年发布的中国RR市场调研与投资战略报告显示，2015年全球RR销售额（行业规模）为5.77亿美元，2016年达到7.14亿美元，到2021年，市场规模达到18.4亿美元，复合年均增长率达21.31%[19]。其中穿戴式外骨骼机器人是近年来发展起来的一种智能康复设备，它通过外周肌电信号传输到监测设备，并根据反馈结果自动调整机器人的强度和方向[20]。屠尧等[21]以健康人体行走步态为LLRR的位置控制参考轨迹，以穿戴者的自身腿部用力作为力控制约束，根据穿戴者自身腿部力量大小，智能控制和调整步态曲线，满足穿戴者的康复需求。RR技术可模拟正常人的肢体功能，早期干预可以帮助患者快速恢复肢体功能，减少肌肉萎缩及静脉血栓的风险，避免关节粘连。目前该技术已在医疗行业得到广泛应用，且与BCI、VR技术都能很好地结合，在康复智能设备中占比较大[22]。

2.3 VR技术在临床中的应用及作用

VR技术是一种由计算机模拟现有真实环境生成的虚拟场景技术，起源于20世纪50年代，它允许患者通过感官和运动反馈在虚拟环境中进行互动[23]。VR技术的特点包括沉浸感、互动性和想象力。通过虚拟场景，患者能够提升参与度并增强信心，并通过虚拟反馈促进神经重塑，实现功能恢复[24]。VR为患者提供自主控制型、助力型和阻抗型康复训练等模式，帮助患者诱发主动运动[25]。ERSOY和IYIGUN[26]研究了虚拟和真实拳击训练方法，该训练作为神经发育治疗之外的干预手段，可有效改善偏瘫脑卒中患者的上肢、平衡、认知功能，证实了VR技术的有效性。将BCI与VR结合的游戏与VR的反馈能提高患者对康复治疗的兴趣和参与度，在实

时多模态的反馈下,可优化运动和认知技能的再学习能力,不断适应患者的需求和状态,改善康复效果[22]。ZHU等[27]发现RR与VR结合在改善脑卒中受试者的上肢运动功能方面具有很大优势。RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ等[28]研究表明,VR在改善脑卒中患者的生活质量方面比传统的康复方法更有效。KIM等[29]提出了一种基于VR的新方法来评估人类感知场和观察场,发现其对半空间忽视(hemispatial neglect,HSN)的诊断有效,并能提供有关视觉空间功能的定量和直观信息。随着VR技术的快速发展,为满足对穿戴设备轻便的要求,已经出现了免提、全身、无系绳VR康复平台,可以使用上下肢传感器,这个系统允许临床医生实时跟踪患者的全身运动和进展,兼具便捷性与高效性,现已成为康复领域广泛应用的新型技术[30-31]。

3 智能康复技术面临的伦理风险

当前,智能康复技术已成为不可逆转的发展趋势,其在提高康复效率与优化医疗资源配置方面具有显著优势,但也伴随着诸多伦理风险,这一事实已难以回避。在智能康复技术迅速渗透于医疗服务体系的背景下,我们不仅需要认识到其在提高康复效果和优化医疗流程方面的积极作用,更应正视其带来的伦理问题。

3.1 智能康复技术的安全性问题

在各国颁布的人工智能指导原则中,均把“安全性”原则放在首位,旨在强调要合理使用人工智能,尊重人的生命安全,避免伤害人类[32]。作为我国人工智能领域的首个系统部署文件,《新一代人工智能发展规划》[33]指出,“在大力发展人工智能的同时,必须高度重视可能带来的安全风险挑战,加强前瞻预防和约束引导,最大限度降低风险,确保人工智能安全、可靠、可控发展”,要求安全性作为人工智能技术发展的首要原则。在现阶段,智能康复技术发展还不是很完善,根据临床使用反馈具体存在以下问题:① 使用VR设备时,由于系统响应速度不足,患者在执行康复动作时容易出现动作反馈延迟,以及情绪紧张、头晕等不适症状。这不仅增加了安全风险,还可能削弱患者使用设备的信心。② 在BCI与VR联合应用的康复系统中,若BCI设备因信号噪声及干扰问题无法稳定传递控制指令和视觉反馈,容易导致设备接收错误指令,从而产生严重安全隐患[34]。③ 在BCI控制下的外骨骼RR可能面临跌倒的风险。④ 由于BCI操作需要精确解码患者神经信号,任何信号传递中的不稳定因素都可能引发设备操作失控,从而引发对患者的无意伤害。

3.2 智能康复技术的人权尊重问题

尊重原则在“以人为本”的理念中得到了最为充分的体现。这一原则要求智能康复技术必须尊重使用者的基本权利,包括尊重其自主权和知情同意权[35]。自主权既是对个体作为主体的承认,也是对其自主判断能力的尊重。然而,在智能康复技术中,如何有效尊重患者自主权和知情同意权尤为关键。且在临床中参与者是医务人员和家属还有患者三方,那自主权及知情同意权也存在于三方:① 医务人员拥有制定患者康复方案的权利,但患者同样有权选择接受传统康复设备治疗的权利,这一过程存在侵犯患者自主权的风险。② 对于认知障碍患者,其家属会代替患者做选择,这种情况下,能否充分考虑其真实需求,会导致患者自主权被侵犯。③ 患者在接受某项智能康复技术时,必须充分了解设备相关风险及优缺点,并能接受新技术的利弊。如果这一过程未能充分保障患者的知情同意权和自主权,这也会导致患者这些权利受到侵犯[36]。

3.3 智能康复技术的患者隐私保护问题

在智能康复技术的应用中,隐私保护是众多伦理问题中最难保障的一项。如果未得到患者知情同意,将收集信息用于治疗之外的目的,会侵犯其隐私权。患者使用智能康复技术前必须同意收集大量个人信息,其中可能包含敏感数据,这增加了隐私泄露和数据被非法利用的风险[37]。根据智能康复技术特点,隐私保护存在以下问题:① BCI通过收集大脑脑电信号,采集用户的心理变化状态、精神状态和专注信息,这些信号能够直接揭示主体和大脑隐私信息,包括个体意识、情感、信仰等信息。如果被不正当使用,会触犯法律,引起社会矛盾[38]。② 通过脑电信号可以实现反向操作,也就是说,部分认知障碍的患者会出现被机器操纵且无法意识到被控制,从而失去自主权,引发一系列伦理问题[39-40]。③ 通过无线技术手段对神经刺激疗法进行恶意编程,使得机器被控制来窃听大脑发出的信号,窃取私人信息,能达到危害他人的恶意目的[41]。

3.4 智能康复技术的应用分配问题

公正可以被视为资源、权力和责任的公平分配,体现了社会的公平与正义。然而,具体到医疗

资源分配，公正性问题尤为复杂。智能康复技术在科研和试验初期就面临分配公正的问题：① 作为一种新型高科技手段，智能康复技术并非人人都能获得，尤其大部分康复患者是残障人士和老年人，这种稀缺资源的分配难以实现真正的公平。② 最新的智能康复技术通常在科技和经济发达地区应用，而由于价格问题，只有高消费能力的群体才能接触到这些技术。这使得资源丰富的人群获得更多的康复机会，而发展较为落后地区和收入较低的人群则失去了最佳康复机会，进一步加剧了贫富差距。如果这种不公平的资源分配不加以调控，不仅会影响智能康复技术的应用效果，还可能增加社会不稳定因素，造成社会秩序混乱[34]。

3.5 智能康复技术的责任归咎问题

在约纳斯的《责任原理：技术文明时代的伦理学探索》[42]中，责任伦理学被确立为伦理学的重要组成部分。该书通过系统分析责任主体的行为目的和产生的后果，结合责任的划分、原因和目标，进行全面的伦理分析和研究。智能康复技术的用户、开发者和政府都应审视自身角色，严格遵循责任原则。在智能康复领域，责任主要存在以下3个方面：① 技术开发人员需增强责任意识。如果未充分考虑患者的需求，使用高风险技术可能导致弊大于利，使患者承担新技术研发带来的负面后果[43]。② 政府在监管时，必须特别关注医疗领域，尤其是康复患者这一弱势群体。政府应承担起监管智能康复技术的责任。如果监管不力，劣质的智能康复产品流入市场，就会给患者带来严重伤害，增加医患矛盾，甚至引发社会问题。③ 虽然康复患者通常是弱势群体，但患者本人或其家属也需要充分了解智能康复技术的风险和收益。如果完全将责任推给医务人员，而对技术的利弊不做充分了解，或在治疗过程中不按照规范使用设备，甚至故意造成设备损坏，那么都可能阻碍智能康复技术的疗效。

4 智能康复伦理问题的对策

4.1 保障智能康复技术的安全性对策

智能康复技术目前主要针对存在不同功能障碍的患者。这些人是弱势群体，我们更应遵循“尊重人的生命安全，避免伤害人类”的基本原则[44]。从产品研发之初，就需充分考虑潜在安全隐患。这要求研发者不断更新技术，确保帮助患者同时避免伤害。例如，智能康复技术设备都应配备一个简易的终止装置，允许患者在任何时候终止运行。终止指令可通过多种方式设置，如意念、眼神、按键操作或特定手势等。研发者应设计多种适应不同功能障碍的终止选项，临床医生在设备运行前应选择适合患者的终止命令。意识障碍患者则可由家属操作终止装置，避免意外，确保患者安全[45]。此外，智能康复设备直接影响患者的生命安全，而智能算法的安全性也是关键环节。目前，BCI技术面临的主要难点为充分采集、稳定的电极信号记录及输出。目前BCI系统的分类准确度过低、同步BCI实现困难，这些都影响了使用的安全性[46]。因此，需各方协同合作，尤其是技术研发方面，应联合临床综合充分考虑各种安全问题，这对未来智能康复的发展尤为重要。

4.2 保障智能康复技术对人权尊重的对策

在尊重问题上，必须遵循“以人为本”的原则，特别是避免患者自主性丧失的潜在风险，明确“个体人”在机器人中的主导地位。需要找到一个平衡点，在确保患者能够独立自主判断的前提下，既能推动技术和设备的进步，同时又能有效约束科研人员的改进方向。无论是产品设计研发还是政府监管，都应遵循“以人为本”的原则，让科技真正服务于人类进步。在维护自主性原则时，需要严格判断医务人员与患者选择之间的关系，确保患者自主选择治疗方式，避免医务人员过度干扰决策。在告知风险的基础上，尊重自主选择，确保患者在充分知情的情况下治疗[47]。例如，由于偏侧性在脑卒中后恢复中的重要性，患者本人惯用手是“左手”或“右手”一定要标注在评估内容中，惯用手对患者的运动和感觉皮层振荡活动有很大关系，对于选择干预方式有影响，要求医护人员要做到“以人为本”，对患者做到认真评估记录。部分患者丧失表达能力，在治疗前，必须仔细评估是否具备参与智能康复设备的意识和能力。患者及其家属应充分了解并同意使用该技术。在应用过程中，应客观真实地向患者及家属说明每个步骤，并听取反馈意见。这不仅是对人权的尊重，也是确保智能康复技术合理有效实施的重要保障。

4.3 保障智能康复技术对患者隐私保护的对策

在隐私保护问题上，只有充分了解信息的内容和用途，并在“知情同意”的基础上，才能有效保障患者隐私权。未经信息主体的知情和同意，严禁将收集的信息用于治疗以外的其他目的。因此，需要

建立严格的信息隐私保护制度,以提高安全性和可控性。同时,政府相关部门应规范技术使用权限,增强操作者和患者的隐私保护意识,共同维护这一权益。例如,在远程康复进行数据传输的过程中,可能会造成数据泄露,降低患者对智能康复医疗的信任度,数据如果被非法利用,可能会使患者的利益受到侵害。从伦理道德角度出发,加强和完善智能设备保护隐私的法律法规,应作为其发展的基石。由于思想信息的泄露比过去基因信息泄露的风险更大,因此智能康复技术对个人隐私的挑战必须引起研发者的高度重视。

4.4 保障智能康复技术公正分配的对策

面对分配公正问题,应遵循社会主义核心价值观中的"自由、平等、公正、法治"原则。技术应用应优先考虑那些真正需要的人,确保其对所有人公平公正,而不是少数人的特权资源。目标是尽可能实现技术的最大效益和最小伤害。目前,国内三甲医院的康复训练系统比较完善,患者在住院期间的康复治疗效果较好,但出院后,在基层医院接触不到先进治疗技术。这需要在社会主义指导的框架下,结合我国全民医保体系,以最大限度地保障科技资源的公平分配,也体现社会主义制度对人民权益的有力保障。

4.5 保障智能康复技术责任归咎的对策

面对责任归属问题,应遵循"人人有责"的原则,从研发、医护救治、政府管理到患者及其家属都应履行各自的权利和义务。① 研发者的责任在于确保产品的有效性和安全性。② 医护救治人员需通过学习和认真掌握相关知识,安全操作设备,并充分告知患者使用方法和风险。例如,固定式机器人步态训练器通常允许调整训练参数,以实现个性化治疗。因此,治疗师会把患者的康复评估和康复目标结合,个性化设置参数,要求为每一个治疗方案负责[48]。③ 政府则需制定明确的标准和资质要求,评估产品的安全隐患,确保研发产品符合临床使用标准,有足够的试验数据支持其有效性和安全性,还需加强对智能康复技术的监管,防止技术的滥用。同时,应加强舆论教育和知识普及,确保智能康复技术能够有效造福社会公众。④ 患者及其家属应全面了解设备的风险,并在知情同意的基础上使用。应以对自己和他人负责的态度,了解并接受智能康复技术的利弊,认真反思自身行为的结果,并愿意承担可能产生的不良后果。

5 智能康复技术伦理问题的现状及展望

智能康复技术目前主要应用于因脑卒中或颅脑损伤引起的中枢神经受损造成的肢体、言语、吞咽、认知、二便障碍等功能减退;也存在因外伤引起的脊髓神经损伤、骨折等疾病。智能康复技术建立在功能医学的基础上,针对不同功能障碍进行整合治疗。不因疾病种类而因功能种类选择干预方式。简而言之,智能康复技术在功能恢复上不局限于病种,故应用广泛。目前的BCI、RR、VR技术均可提高患者运动功能,对中枢神经损伤引起认知、言语障碍的患者,自主表达缺陷,很可能因为技术条件的限制造成患者自身权益的受损。不论是安全性、个人尊重,还是隐私保护、公正分配、责任归咎,治疗决策均受家属或医疗人员影响,这是目前不可避免的缺陷,也是研发人员需要不断探索解决的方向。

任何新技术的发展都必须经过不断完善的过程,智能康复技术也不例外。它是一把"双刃剑",既蕴含巨大的创新潜力,又附带潜在风险。那么未来,针对合并多种功能障碍的患者,目前的智能康复技术仍有很多限制。虽然现有技术已得到广泛应用并取得了一定规模的实际效果,但依然处于发展的初中级阶段。展望未来,智能康复技术将发展速度迅猛,不断突破技术瓶颈,走向技术成熟状态,但技术进步的同时,伴随而来的伦理规范也必须不断更新和完善。我们应以发展的眼光看待它,有效推进,对引发的伦理问题给予充分重视,并逐步探索其潜力,完善措施以规避伦理风险。值得关注的是,联合国教科文组织已经号召各国立即执行《人工智能伦理问题建议书》[49],该建议书是首个人工智能伦理问题的全球框架。同时,我国也在最新印发的《关于加强科技伦理治理的意见》[50]中指出:"为进一步完善科技伦理治理体系,提升科技伦理治理能力,有效防控科技伦理风险,不断推动科技向善,需加强科技伦理理论研究",旨在技术进步和伦理建设的"两个轨道"上同时推进。这不仅依赖于医疗机构和研发机构的紧密合作,还需要患者、政府、媒体等各方的积极参与,形成相互支持的网络,推动新技术的安全性和有效性。只有将智能康复技术的发展与伦理结合,不断更新和优化,人类才能从人工智能技术中获得更为满意的成果。

参考文献

[1] 中华人民共和国国务院.印发《"十四五"国家老龄事业发展和养老服务体系规划》[N].人民日报,2022-02-22(1).
The State Council of the People's Republic of China. Outline of the national plan for the development of the ageing cause and the elderly care service system during the 14th Five-Year Plan period [N]. People's Daily,2022-02-22(1).

[2] SUN S Y,LIN X R,OUYANG X Y,et al. Education and development of rehabilitation therapy in China under the background of aging [J]. Front Public Health,2022,10:1000048.

[3] 谢冰,苟翠萍,陈倩,等.我国老年人口健康状况分析与思考:基于第六次、第七次全国人口普查数据[J].中国初级卫生保健,2023,37(5):38-43.
XIE B,GOU C P,CHEN Q,et al. Analysis and reflection on the health status of the elderly population in China:based on the data of the sixth and seventh census [J]. Chin Prim Health Care,2023,37(5):38-43.

[4] 杨毅,刘卓.人工智能医疗设备应用的伦理问题分析[J].中国医疗设备,2024,39(4):137-141.
YANG Y,LIU Z. Analysis of ethical issues in the application of artificial intelligence medical equipment [J]. China Med Devices,2024,39(4):137-141.

[5] HAMET P,TREMBLAY J. Artificial intelligence in medicine [J]. Metabolism,2017,69:S36-S40.

[6] LANGHORNE P,BERNHARDT J,KWAKKEL G. Stroke rehabilitation [J]. Lancet,2011,377(9778):1693-1702.

[7] TOPOL E J. High-performance medicine:the convergence of human and artificial intelligence [J]. Nat Med,2019,25(1):44-56.

[8] GAO X R,WANG Y J,CHEN X G,et al. Interface,interaction,and intelligence in generalized brain-computer interfaces [J]. Trends Cogn Sci,2021,25(8):671-684.

[9] PETIT J,ROUILLARD J,CABESTAING F. EEG-based brain-computer interfaces exploiting steady-state somatosensory-evoked potentials:a literature review [J]. J Neural Eng,2021,18(5):051003.

[10] KRUEGER J,KRAUTH R,REICHERT C,et al. Hebbian plasticity induced by temporally coincident BCI enhances post-stroke motor recovery [J]. Sci Rep,2024,14(1):18700.

[11] LUO S Y,RABBANI Q,CRONE N E. Brain-computer interface:applications to speech decoding and synthesis to augment communication [J]. Neurotherapeutics,2022,19(1):263-273.

[12] YADAV D,YADAV S,VEER K. A comprehensive assessment of brain computer interfaces:recent trends and challenges [J]. J Neurosci Methods,2020,346:108918.

[13] PANDARINATH C,NUYUJUKIAN P,BLABE C H,et al. High performance communication by people with paralysis using an intracortical brain-computer interface [J]. eLife,2017,6:e18554.

[14] FLESHER S N,DOWNEY J E,WEISS J M,et al. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control [J]. Science,2021,372(6544):831-836.

[15] BANYAI A D,BRIŞAN C. Robotics in physical rehabilitation:systematic review [J]. Healthcare,2024,12(17):1720.

[16] HUSSAIN S,JAMWAL P K,VLIET P V,et al. Robot assisted ankle neuro-rehabilitation:state of the art and future challenges [J]. Expert Rev Neurother,2021,21(1):111-121.

[17] FAREH R,ELSABE A,BAZIYAD M,et al. Will your next therapist be a robot?:a review of the advancements in robotic upper extremity rehabilitation [J]. Sensors,2023,23(11):5054.

[18] STAMPACCHIA G,GAZZOTTI V,OLIVIERI M,et al. Gait robot-assisted rehabilitation in persons with spinal cord injury:a scoping review [J]. NeuroRehabilitation,2022,51(4):609-647.

[19] 罗胜利,孟巧玲,喻洪流.我国康复机器人技术研究与应用概况[J].中国康复医学杂志,2023,38(12):1762-1768.
LUO S L,MENG Q L,YU H L. General situation of research and application of rehabilitation robot technology in China [J]. Chin J Rehabil Med,2023,38(12):1762-1768.

[20] SHI Y J,DONG W,LIN W Q,et al. Soft wearable robots:development status and technical challenges [J]. Sensors,2022,22(19):7584.

[21] 屠尧,朱爱斌,宋纪元,等.下肢外骨骼康复机器人人机交互力自适应导纳控制[J].西安交通大学学报,2019,53(6):9-16.
TU Y,ZHU A B,SONG J Y,et al. Adaptive admittance control of man-robot interaction force for lower limb exoskeleton rehabilitation robot [J]. J Xi'an Jiaotong Univ,2019,53(6):9-16.

[22] SAID R R,BIN HEYAT M 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 [J]. Biosensors,2022,12(12):1134.

[23] HAO J,XIE H Y,HARP K,et al. Effects of virtual reality intervention on neural plasticity in stroke rehabilitation:a systematic review [J]. Arch Phys Med Rehabil,2022,103(3):523-541.

[24] LAVER K E,LANGE B,GEORGE S,et al. Virtual reality for stroke rehabilitation [J]. Cochrane Database Syst Rev,2017,11(11):cd008349.

[25] BONANNO M,DE LUCA R,DE NUNZIO A M,et al. Innovative technologies in the neurorehabilitation of traumatic brain injury:a systematic review [J]. Brain Sci,2022,12(12):1678.

[26] ERSOY C,IYIGUN G. Boxing training in patients with stroke causes improvement of upper extremity,balance,and cognitive functions but should it be applied as virtual or real? [J]. Top Stroke Rehabil,2021,28(2):112-126.

[27] ZHU Y,WANG C,LI J,et al. Effect of different modalities of artificial intelligence rehabilitation techniques on patients with upper limb dysfunction after stroke-A network meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Front Neurol,2023,14:1125172.

[28] RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ M,CRIADO-ÁLVAREZ J J,CORREGIDOR-SÁNCHEZ A I,et al. Effects of virtual reality-based therapy on quality of life of patients with subacute stroke:a three-month follow-up randomized controlled trial [J]. Int J Environ

Res Public Health,2021,18(6):2810.

[29] KIM T L,KIM K,CHOI C,et al. FOPR test:a virtual reality-based technique to assess field of perception and field of regard in hemispatial neglect [J]. J Neuroeng Rehabil,2021,18(1):39.

[30] CHEN J Y,OR C K,CHEN T R. Effectiveness of using virtual reality-supported exercise therapy for upper extremity motor rehabilitation in patients with stroke: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. J Med Internet Res,2022,24(6):e24111.

[31] ZHANG B H,LI D,LIU Y,et al. Virtual reality for limb motor function,balance,gait,cognition and daily function of stroke patients:a systematic review and meta-analysis [J]. J Adv Nurs,2021,77(8):3255-3273.

[32] CHALLEN R,DENNY J,PITT M,et al. Artificial intelligence,bias and clinical safety [J]. BMJ Qual Saf,2019,28(3):231-237.

[33] 国务院.新一代人工智能发展规划[EB/OL].(2017-07-20)[2025-02-15]. https://app.www.gov.cn/govolata/gov/201707/20/408040/article.html.
State Council. Next Generation artificial intelligence development plan [EB/OL]. (2017-07-20)[2025-02-15]. https://app.www.gov.cn/govolata/gov/201707/20/408040/article.html.

[34] 张喆,赵旭,马艺昕,等.脑机接口技术伦理规范考量[J].生物医学工程学杂志,2023,40(2):358-364.
ZHANG Z,ZHAO X,MA Y X,et al. Ethics considerations on brain-computer interface technology [J]. J Biomed Eng,2023,40(2):358-364.

[35] JOTTERAND F,BOSCO C. Artificial intelligence in medicine:a sword of damocles? [J]. J Med Syst,2021,46(1):9.

[36] 王蒲生.《民法典》视域下患者知情同意权的规则阐释与合同进路[J].求索,2021(3):144-151.
WANG P S. The rule interpretation and contract approach of patients′ informed consent right under the civil code [J]. Seeker,2021(3):144-151.

[37] MURPHY K,DI RUGGIERO E,UPSHUR R,et al. Artificial intelligence for good health:a scoping review of the ethics literature [J]. BMC Med Ethics,2021,22(1):14.

[38] LYU X T,DING P,LI S Y,et al. Human factors engineering of BCI:an evaluation for satisfaction of BCI based on motor imagery [J]. Cogn Neurodyn,2023,17(1):105-118.

[39] WEN D,LIANG B B,ZHOU Y H,et al. The current research of combining multi-modal brain-computer interfaces with virtual reality [J]. IEEE J Biomed Health Inform,2021,25(9):3278-3287.

[40] 张曼.脑隐私法律保护的制度建构[J].东方法学,2023(5):128-139.
ZHANG M. System construction of legal protection of brain privacy [J]. Orient Law,2023(5):128-139.

[41] 郭珺,张思齐,薛凯,等.脑机接口的关键硬件技术与未来应用[J].无人系统技术,2023,6(5):1-16.
GUO J,ZHANG S Q,XUE K,et al. Key hardware technologies and future applications of brain-computer interface [J]. Unmanned Syst Technol,2023,6(5):1-16.

[42] JONAS H. The imperative of responsibility:in search of an ethics for the technological age [M]. Chicago:University of Chicago Press,1984.

[43] 徐建.科研伦理治理:进展、挑战与对策[J].天津科技,2021,48(5):1-4,7.
XU J. Research ethics governance:progress,challenges and countermeasures [J]. Tianjin Sci Technol,2021,48(5):1-4,7.

[44] 陈怡.人工智能背景下社会主义核心价值观培育研究[D].镇江:江苏大学,2021:26.
CHEN Y. Research on cultivating socialist core values in the context of artificial intelligence [D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2021:26.

[45] LIU K X,YU Y,LIU Y D,et al. A novel brain-controlled wheelchair combined with computer vision and augmented reality [J]. BioMedical Eng OnLine,2022,21(1):50.

[46] 马诗雯,陈海丹.消费级脑电图产品的伦理问题及其应对策略[J].自然辩证法通讯,2022,44(6):85-93.
MA S W,CHEN H D. Ethical issues and coping strategies of consumer EEG devices [J]. J Dialectics Nat,2022,44(6):85-93.

[47] SAUERBREI A,KERASIDOU A,LUCIVERO F,et al. The impact of artificial intelligence on the person-centred,doctor-patient relationship:some problems and solutions [J]. BMC Med Inform Decis Mak,2023,23(1):73.

[48] VAN DELLEN F,AURICH-SCHULER T,LABRUYÈRE R. Within- and between-therapist agreement on personalized parameters for robot-assisted gait therapy:the challenge of adjusting robotic assistance [J]. J NeuroEngineering Rehabil,2023,20(1):81.

[49] UNESCO. Draft text of the UNESCO recommendation on the ethics of artificial intelligence [EB/OL]. (2022-03-26)[2025-02-26]. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379920,p.14.

[50] 中共中央办公厅、国务院办公厅.印发《关于加强科技伦理治理的意见》[J].科学中国人,2022(7):76-78.
The General Office of the Communist Party of China Central Committee,the General Office of the State Council. Issued the opinions on strengthening the governance of science and technology ethics [J]. Sci Chin,2022(7):76-78.

Ethical Risks and Countermeasures in the Clinical Application of Intelligence Rehabilitation Technology

WANG Lisha[1,2], QIAO Jin[1], ZHANG Guangjian[1], LIU Yugang[3], YUAN Ziwen[1,2], ZHAO Ye[1,2], SONG Siming[1,2], WANG Gang[2*]
[1] *The First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710061, China;*
[2] *School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;*
[3] *Xi'an Chest Hospital, Xi'an, Shaanxi 710100, China*
*Correspondence: WANG Gang, E-mail: ggwang@xjtu.edu.cn

ABSTRACT The rapid advancement of artificial intelligence technology has catelyzed innovative applications in the field of medical rehabilitation, and the resulting intelligent rehabilitation technology has demonstrated significant advantages in enhancing treatment efficiency and functional recovery. However, the compound ethical issues arising from its clinical application, such as safety concerns, disputes over the dignity of the subject, risks of privacy breaches, imbalance in resource allocation, and dilemmas in the definition of responsibility, have triggered sustained attention in the interdisciplinary fields. This study systematically investigates the ethical risks associated with three typical technologies: brain-computer interface (BCI), rehabilitation robot (RR), and virtual reality (VR) in the fields of neurorehabilitation, motor function reconstoration, and cognitive interventions. From a whole-process perspective of technology research and development, clinical implementation, and resource allocation, the study recognizes the benefits and challenges of intelligent rehabilitation technologies for human development, and helps to promote the comprehensive and healthy development of these technologies in compliance with legal and ethical principles.
KEY WORDS intelligent rehabilitation technology; artificial intelligence technology; technology ethics; brain-computer interface; rehabilitation robot; virtual reality
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10007

（上接第730页）

was used to acquire and analyze the integrated electromyography (iEMG) of the rectus femoris and tibialis anterior, muscle onset time, rectus femoris-biceps femoris co-contraction index (RFBF-CI) and tibialis anterior-gastrocnemius co-contraction index (TAGL-CI). **Results** Compared with those before treatment, the FMA scores of the three groups increased after treatment (P<0.05); compared with the LERR group and the FES group, the FMA score of the LERR+FES group was higher after treatment (P<0.05). Compared with those before treatment, the center-of-gravity movement velocity during standing with eyes open, standing with eyes closed, heel-to-toe tandem standing, and single-leg standing decreased in the three groups after treatment (P<0.05), and the postural stabilization time shortened (P<0.05); compared with the LERR group and the FES group, the center-of-gravity movement velocity during standing with eyes open, standing with eyes closed, and heel-to-toe tandem standing in the LERR+FES group was lower after treatment (P<0.05), and the postural stabilization time was shorter (P<0.05). Compared with those before treatment, gait speed and cadence increased in the three groups after treatment (P<0.05), step length increased (P<0.05), KA-ACRP and HK-ACRP values increased (P<0.05), gait cycle shortened (P<0.05), and the percentages of stance phase and double support phase decreased (P<0.05); compared with the LERR group and the FES group, the LERR+FES group had faster gait speed (P<0.05), faster cadence (P<0.05), longer step length (P<0.05), higher KA-ACRP and HK-ACRP values (P<0.05), shorter gait cycle (P<0.05), and lower percentages of stance phase and double support phase after treatment (P<0.05). Compared with those before treatment, the iEMG of the rectus femoris and tibialis anterior increased in the three groups after treatment (P<0.05), and the onset time of the rectus femoris and tibialis anterior, RFBF-CI, and TAGL-CI decreased (P<0.05); compared with the LERR group and the FES group, the LERR+FES group had higher iEMG of the rectus femoris after treatment (P<0.05), and lower onset time of the rectus femoris, RFBF-CI, and TAGL-CI (P<0.05); compared with the LERR group, the LERR+FES group had higher iEMG of the tibialis anterior after treatment (P<0.05), and a lower onset time of the tibialis anterior (P<0.05). **Conclusion** LERR combined with FES treatment can effectively improve gait performance and sensorimotor coordination in stroke patients, and the efficacy is superior to that of single treatment groups.
KEY WORDS stroke; lower-limb exoskeleton rehabilitation robot; functional electrical stimulation; gait function;walking capacity
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10006