热点探索

脑机接口赋能运动医学的伦理挑战与治理路径

陈梓鹏，黄　健
重庆三峡科技大学体育与健康学院，重庆　万州　404000

摘　要：脑机接口作为赋能运动医学高质量发展的核心技术，在监控神经动态、解码运动意图及评估神经特质等方面发挥重要作用，却也面临数据隐私泄露、主体地位削弱、生命健康威胁和责任主体模糊的伦理挑战。基于此，文章提出健全数据治理体系、维护应用主体地位、筑牢生命安全屏障、厘清权责归属界限等治理路径，并分别从“预防—过程—预后”阶段提出脑机接口嵌入运动医学的具体举措，推动脑机接口向规范、高效的方向发展。

关键词：脑机接口；运动医学；科技伦理；技术赋能
中图分类号：R-052　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-0479(2026)05-459-008
doi：10.7655/NYDXBSSS260030

智能设备作为新质生产力的关键载体，为各领域的高质量发展提供新动能。在体育领域，智能设备助力竞技体育实现科学训练与精准裁决，为大众健身提供个性化方案与即时反馈，辅助运动损伤患者进行康复训练，推动体育发展从经验驱动转向数据驱动。然而，技术的发展往往利弊共存。智能设备在创新赋能过程中可能会催生一系列伦理问题，而脑机接口作为智能设备的重要组成部分，在相关政策和制度尚未完善的背景下，基于大脑思维的可读取性及技术本身的缺陷性，其在实际应用中也易带来数据隐私泄露、生命安全威胁、责任主体模糊等伦理问题。当前学界研究多聚焦脑机接口在医疗器械、临床试验、神经哲学等领域的应用价值，并从伦理学角度分析其可能催生的伦理挑战及应对策略，但在运动医学领域仍缺乏系统的探讨与剖析。基于此，研究全面审视脑机接口赋能运动医学的伦理问题以及实际案例，并根据现有研究结果提出创新治理方案，以期为我国脑机接口技术在运动医学领域的应用研究提供借鉴与参考。

一、脑机接口赋能运动医学的概念厘定

1973年美国加利福尼亚大学洛杉矶分校教授Jacques Vidal首次提出“脑机接口”概念。脑机接口是一种将有机生命与任何可以进行计算的设备进行直接连接的通信与控制技术[1]。脑机接口技术通过解读中枢神经系统活动产生的特定信号，将其转化为能够控制软件或硬件设备的指令，从而实现大脑对外部世界的直接干预或与内部状态的交互反馈[2]。进入21世纪，脑机接口技术在严重神经损伤的治疗方面取得显著进步。2004年美国布朗大学研发名为BrainGate的脑机接口系统，首次在人类身上证明，来自运动皮层的神经信号可以实时被解码，并用于控制外部设备。2024年国家科技伦理委员会人工智能伦理分委员会研究编制了《脑机接口研究伦理指引》(以下简称《伦理指引》)，旨在指导脑机接口研究合规开展，防范脑机接口研究与技术应用过程中的科技伦理风险。依据《伦理指引》，脑机接口可基于采集方式和使用目的的差异进行分类。①根据采集方式(侵入程度)的不同，主要分为侵入式、非侵入式和半侵入式(介入式)脑机接口三类。②根据使用目的的不同，大体分为增强型脑机接口和修复型脑机接口。伴随医疗人工智能的深入发展，脑机接口在各领域展现出广阔的应用前景。

作为医学与运动相结合的综合性交叉临床学

基金项目：重庆市社会科学规划项目(2024BS104)；重庆市教育委员会科学技术研究项目“数字技术驱动下成渝双城经济圈体育产业协同发展机制与路径研究”(KJQN202501253)；重庆市高等教育教学改革研究项目“人工智能背景下基于BOPPPS教学模式的大学体育课程教学创新与实践研究”(254096)
收稿日期：2026-01-18
作者简介：陈梓鹏(2002—)，男，广东中山人，硕士研究生在读，研究方向为运动人体科学；黄健(1965—)，男，重庆万州人，教授，硕士生导师，研究方向为运动人体科学，通信作者，19120347019@163.com。

科，运动医学在运动学、康复学、创伤学等学科的交叉融合下，不仅应用现代医学理论、方法和技术防治运动创伤与相关疾病，同时也运用科学运动方法治疗因缺乏运动诱发的慢性疾病，从而实现防治伤病、促进健康、恢复机体功能和维持健康状态的目标[3]。在“健康中国”国家战略的全面贯彻下，运动医学有望在运动损伤防治、运动康复和运动促进健康三个方向实现纵深发展。其一，运动损伤防治。利用智能设备赋能不同场景预防体系的建立，实现从被动救治到主动防治的科技转型。其二，运动康复。将人工智能、大数据融入运动康复网络构建，驱动运动康复到功能重塑的系统化升级。其三，运动促进健康。基于大数据推动科学运动处方应用，建立运动促进健康的新模式[4]。

诚然运动医学在各领域中发挥巨大潜能，但伴随脑机接口技术的嵌入，将有望突破传统康复不精准和数据维度少的痛点[5]，通过直接解码与调控中枢神经活动，推动运动医学的技术升级与疗效突破。主要体现在：一是脑机接口通过神经控制维度的动态监控和训练，实时监测患者的神经状态变化，进行基于运动想象的训练强化特定动作模式的神经网络连接，实现运动损伤防治。二是脑机接口通过解码患者运动意图并驱动外部设备执行动作，形成“意图—执行—反馈”的闭环，促进受损运动环路的神经可塑性重组。研究表明，高位截瘫患者在经过植入式无线脑机接口系统的训练后，能够实现对智能轮椅或辅助机器狗的稳定操控，实现外设“内化”操控。三是脑机接口通过评估患者的运动皮层兴奋性、学习能力等神经特质，生成个性化的处方并量化其运动频率、强度与总量，形成目的明确的运动指导方案。但脑机接口为运动医学实践赋能的同时，运动医学各场景的现实应用需求也不断为脑机接口实时性和稳定性的技术提供持续牵引，倒逼技术的迭代升级。

二、脑机接口赋能运动医学的伦理挑战

脑机接口通过在大脑与外部设备间建立直接通信通路，为运动医学领域开辟神经功能重建与运动能力增强的新路径，其在卒中后神经环路修复、脊髓损伤后的运动功能代偿以及运动员神经状态监测与优化方面展现出巨大潜力。近年来，脑机接口技术在医学领域的伦理讨论已渐成体系。然而，运动医学聚焦于运动机能的优化、损伤康复及竞技表现提升，其核心目标与一般医学的治疗与康复目标存在本质差异。因此，当这一技术以修复和增强人体运动能力为核心目标时，也催生了一系列伦理问题。

（一）数据隐私泄露：数据管理失范引发歧视风险

在运动医学领域，脑机接口技术通过实时采集运动员在执行复杂或高强度动作时的大脑信号，为运动状态监测、运动技能优化提供技术支持。然而，神经数据与运动员的竞技状态、战术意图乃至职业发展深度关联，其泄露或滥用可能带来前所未有的隐私侵犯，催生新型社会歧视，对运动员的职业生涯造成冲击。对技术而言，隐私风险与滥用担忧将侵蚀公众信任，引发对技术本身的抵制，削弱技术服务于人类社会的价值效能。

1. 知情同意虚化致使数据二次滥用

理想的知情同意是指数据控制者以清晰方式向主体告知数据收集的目的、范围、风险等，数据主体在完全理解的基础上，自由做出同意或拒绝的决定[6]。然而，脑机接口所产生的神经数据数量庞大且高度复杂。患者在当下难以预判其数据在未来可能被激活的全部应用场景，这使得仅基于医护人员提供的有限信息难以构成“充分知情”的决定基础。因此，这些数据面临在后续的科学研究、商业产品优化或未经明确授权的第三方共享中被二次利用的风险[7]。延伸至运动医学领域，运动员的知情同意通常嵌入俱乐部合约、赞助协议与赛事征召等多重契约中，以致其决策常被利益或竞技目标消解，背离知情同意所要求的自愿性原则。同时，俱乐部可能借神经数据评估运动员的心理稳定性以决定是否续约，博彩机构可能通过分析神经数据预判比赛走势以调整赔率等，致使运动医学领域的知情同意机制陷入实质性虚化的伦理困境。

2. 隐私数据泄露诱发多重安全危机

运动医学领域实践中，脑机接口通过采集运动状态下的脑电信号和运动数据，可以评估患者运动控制或运动技能学习的有效性[8]、监测运动员在应对关键比赛时的心理压力和视觉注意力，并根据其特定心理、身体特征提供个性化指导[9]。这些数据不仅是运动意图的反映，更可能包含其肌肉疲劳阈值等与运动表现有关联的身体数据。不仅能够记录其当下的机能状态，更能预判其竞技状态的起伏与潜在的伤病风险。数据一旦在传输、存储过程中被黑客窃取或被内部人员不当访问，必将带来严重后果。例如，运动员在训练中通过脑机接口进行动作技术优化，其伴随产生的焦虑或压力数据若被竞争对手获取，可能被用于制定针对性的心理干扰战术。

3. 法律保护滞后加剧数据权属模糊

脑机接口技术通过实时采集与分析患者的神经数据，为训练优化、损伤预防与康复促进开辟重要应用前景。然而，现有法律体系在应对神经数据这类新型生物识别信息的特殊性、敏感性与所有权争议时，显露出明显的滞后与不足[10]。2023年智利的一起案件，关注的核心在于脑机接口设备收集的神经数据是否属于个人数据保护及私密信息的隐

私权保护范畴。尽管当前数据保护法律已将生物识别信息纳入敏感信息范畴，但其条款未能精准回应神经数据在连续性、私密性与人格关联等方面的独特属性，致使法律文本与技术现实间出现显著脱节[11]。数据产权法律规制存在明显局限。运动医学中神经数据直接映射患者和运动员的思维、情感与记忆轨迹，兼具无形性与强人格依附性，难以被既有权利框架直接适用或有效规制。现行法律虽从隐私与安全维度对数据进行规范，却尚未明晰其作为潜在数字资产的权属划分。

（二）主体地位削弱：人机边界模糊侵蚀公平根基

脑机接口技术对大脑与设备边界的突破，促使我们重新审视主体与技术的关系。在运动医学领域，脑机接口将干预的核心作用于大脑神经活动，对运动员和患者最根本的主体性构成直接挑战。伴随脑机接口技术的应用由损伤康复治疗转向运动功能增强，运动员生理和心智的提升使其在未来的竞技体育与技术资源分配中占据有利地位，动摇了体育竞技中的公平原则[12]。于个人而言，资源分配不均可能催生一系列公平性问题。

1. 决策自主让渡引发主体意识弱化

主体性是指人在实践活动中表现出的自主、能动与创造性特质，体现人与世界关系的核心地位[13]。在运动医学领域，脑机接口可实时监测大脑神经信号，以优化动作模式、预防损伤或提升竞技表现。然而，脑机接口技术在损伤修复或功能增强的同时，深度介入运动意图生成、执行与控制的内在生理过程，不可避免地将外部算法逻辑与干预机制嵌入主体内在的运动控制环路中[14]。于运动员而言，运动员对动作的执行并非完全基于其意愿，而是由脑机接口系统代理执行，并受到系统本身的限制，且往往超出人类的控制范围，使得运动员在高压、复杂竞技环境中的直觉、判断力和创造性可能因长期的数据依赖而退化[15]。这种“新型驯化”使其为达成外在目标而让渡对神经活动与精神体验的控制权，最终危及人的尊严与根本自由。

2. 技术赋权越界模糊治疗与增强的界限

脑机接口技术在达到治疗或恢复目的的同时，可能会赋予超出正常范围的功能，或以治疗为目的的技术被正常人使用后，产生增强的效果[16]。技术在治疗过程中存在不足需要改善，因此便需以较高的标准设计和开发相应的技术，进而可能产生高于正常均值的增强效果。鉴于应用目的和伦理属性的差异，脑机接口技术的“增强”功能可划分为康复性增强和竞赛性增强。康复性增强是指以治疗或康复为目的的脑机接口在恢复运动员基线运动功能的过程中，使其部分机能超出伤病前的基线水平或正常人群的平均阈值，其伦理属性遵循现代医学伦理中的有利原则与不伤害原则。即便治疗或康复后的运动功能水平可能超出损伤前的基线，但技术应用的初始目的是恢复。换言之，增强并非技术应用的初衷，而是治疗过程中的伴随现象。同时，康复性增强的伦理关切聚焦于对治疗终点的审慎界定，当技术应用出现治疗终点界定失当时，可通过医疗监管或伦理审查予以纠正。竞赛性增强是指身体机能正常的运动员主动利用脑机接口技术以获取竞技优势、突破人类自然极限。此类增强通常发生在竞技体育场景中，如滑雪运动员借助脑机接口刺激大脑特定部位以提高成绩、欧美国家职业足球联赛采用i-BrainTech脑机接口技术帮助运动员提升运动表现。由于运动表现的可量化性与竞技利益存在直接关联，当技术赋能通过弱化个人努力演变为能力本体，成为竞技表现的决定因素时，运动员的价值追求与体育精神中的公平原则存在内在张力，催生对技术滥用、规则失效及体育精神异化的担忧，迫使运动医学领域重新定义“增强”的范畴。

3. 资源分配不均形成技术获取鸿沟

技术公平是人们对技术应用于社会时所期望达成的一种价值诉求，体现为技术的广泛普及以促进社会均衡性发展[17]。但脑机接口应用过程中，仍会加剧资源分配不均，使得技术获取机会不平等等公平性问题频发。在运动医学领域，脑机接口技术研发与维护成本高昂，该技术主要面向具备相应支付能力的患者、运动员或俱乐部，故而经济条件有限的群体被排斥在技术受益范围之外，从而加剧身体机能或竞技能力层面的社会不平等[18]。以青少年运动员选拔为例，较早接触脑机接口辅助训练的青少年运动员，其技术动作的规范程度、神经反馈的优化效率等方面可能远超同龄人，从而在人才选拔中占据优势。此外，脑机接口技术可能被少数经济优越的运动员或团队垄断，而弱势群体即使具备卓越天赋，也可能因资源匮乏而被边缘化。

（三）生命健康威胁：干预调控失序造成身心伤害

运动医学领域的根本宗旨在于通过科学方法维护、恢复乃至优化人体的运动机能与整体健康，任何干预手段都必须以“不伤害”为首要伦理原则[19]。但技术内在的不确定性与神经系统的复杂性，使得脑机接口的干预可能存在难以预测的级联效应。同时，运动医学中应用场景的特殊性与竞技环境的高风险性增加了系统故障、误判或人机协同失效的概率，可能直接带来身体伤害甚至社会信任崩塌的严重后果。

1. 技术过度依赖重塑传统健康定义

随着脑机接口在运动医学中的嵌入，大脑在对外部设备进行控制的同时，设备也通过反馈系统对

大脑进行刺激、控制甚至读取和编辑神经数据，长期的技术依赖可能面临健康标准异化的深层威胁。一方面，过度依赖脑机接口技术可能导致本体感知、运动直觉和自主调控能力的退化。例如，长期借助脑控外骨骼系统进行步态训练的脊髓损伤患者，其大脑逐渐依赖外部设备的辅助，从而在设备失效时完全丧失行走能力。另一方面，脑机接口系统产生大量的神经生理数据，使得运动功能评估从传统的临床定性观察转向多维数据指标的定量分析，这种转变使得健康标准被量化为可测量的性能参数。以运动损伤康复为例，康复目标应旨在帮助运动员恢复至伤前的身心机能水平，并预防再伤风险的发生。如若将“数据优化”等同于“健康改善”，可能使得传统的健康标准和运动本质被异化为对数据指标的追逐。如脊髓损伤患者借助脑控外骨骼系统恢复行走能力，其核心能力源于技术赋能，并非生物学意义上的恢复。当这种状态被视为“健康”时，传统的健康概念便被重新定义。

2. 手术植入创伤带来长期生理风险

脑机接口现有电极材料的生物相容性不足，以及人体复杂免疫反应等因素，致使侵入式手术与长期植入伴随多重生理风险。在日常训练与竞技比赛中，运动员借助侵入式脑机接口实现运动增强，需面临手术植入与长期佩戴所带来的生理风险。主要表现为手术植入过程中急性机械损伤可能引起脑出血、水肿或神经细胞损失，随着植入时间推移脑内会逐渐形成包围电极的瘢痕组织，且电极长期使用后功效会显著下降[20]。一位脑机接口受试者在植入电极3~5年后，电极周围形成致密神经胶质瘢痕包裹电极，导致信号信噪比持续下降[21]。在常规医疗场景中，此类风险通常会终止治疗。然而在竞技体育中，运动员为突破极限或赢得关键荣誉而主动接纳这些风险，动摇了传统医学伦理中的“不伤害”原则。此外，系统算法误判增加了意外伤害风险。脑机接口的解码算法通常在实验环境下，基于有限时长的校准数据训练而成。然而，患者和运动员的神经状态受到疲劳、药物等影响，其产生的神经信号模式会存在偏差，容易诱发严重的二次伤害。

3. 神经闭环调控诱发心理行为副作用

脑机接口为优化运动功能介入特定神经环路时，可能波及目标环路在解剖或功能关联的其他脑区，进而干扰情绪、认知与行为的调控。基于脑机接口闭环调控的技术特性，其通过实时解码特定神经信号并触发相应的电刺激或神经反馈时，可能打破神经网络原有的平衡状态，催生一系列非预期的心理与行为改变。主要表现为情绪紊乱、人格特质微变或执行功能障碍等。以侵入式脑深部电刺激手术治疗帕金森病为例，部分帕金森患者在运动症状显著改善的同时，出现严重的冲动控制障碍[22]。迁移至运动医学领域，脑机接口的嵌入可能伴随情绪波动、冒险倾向增强等副作用，从而对康复效果与运动决策带来负面影响。

（四）责任主体模糊：多元决策黑箱催生问责困境

在医学领域，责任归属常面临责任主体模糊的问题，主要是脑机接口无法准确辨别语言或行为的发出主体是患者还是脑机接口本身[23]。而在运动医学领域，脑机接口技术涉及运动员、教练团队、体育协会等主体，若各方主体协作不畅、算法过程不透明，将使得责任界定变得困难。加之未能解决责任归属问题，将阻碍技术转化落地，动摇脑机接口可持续发展的伦理基石。

1. 多方主体参与导致责任归属分散

脑机接口的研发及应用涉及技术研发、临床实践等环节，任何单一环节出现操作失误、设备故障等问题，均可能带来严重后果。以运动损伤康复为例，一个完整的康复训练周期需要硬件制造商、数据服务平台以及患者等多个独立法律实体与个人的协同运作，但缺乏对康复效果与安全风险负最终责任的明确主体。责任稀释将带来严重的伦理与社会影响。其一，受害者追责途径受阻。当运动员或患者因技术应用遭受身心损害时，涉事各方相互推诿，受害者难以获得及时补偿。其二，技术发展生态受扭曲。责任边界模糊使合规企业因恐惧不可预估的连带风险而过度保守，抑制创新并扰乱市场秩序。其三，系统信任受侵蚀。若事故无法追溯到具体责任方，不仅会削弱公众对技术及医疗体系的信任，更将造成风险长期积累且无法得到根本性解决。

2. 算法黑箱决策导致过失界定困难

在竞技体育场景中，运动员的运动意图需要经过脑机接口系统的转译与执行，可能造成意图偏差、信息衰减或情境误判，致使赛场上实际动作的执行偏离运动员的可控范围。此外，脑机接口算法的核心特性在于其动态演化的决策逻辑，即使设计者设定了初始框架与训练数据，系统在运行中也会基于个人数据对内部模型进行自主调整，使得其决策模式与输出行为具有不可完全预见性与不可完全追溯性[24]。当脑机接口依赖复杂的非线性模型做出判断并引起损害时，难以厘清是源自技术风险、算法缺陷还是人为操作不当。

3. 人机融合深化催生新型责任难题

在日常训练与状态监控的过程中，随着脑机接口的长期使用，患者和运动员可能发展出对技术的生理性或心理性依赖。由于人机交互过程本身具有动态性与不可预测性，当人机融合体做出错误决策或导致损害时，传统法律框架所依赖的“行为能

力”“故意过失”等概念将难以适用，行为主体的模糊化也将催生新的责任归属难题。例如，教练团队在训练中依据脑机接口反馈的神经数据调整训练负荷，运动员则借助系统反馈判断自身疲劳程度，当因过度训练出现肌肉撕裂、疲劳性骨折等伤害时，责任划分变得极其复杂。

三、脑机接口赋能运动医学的治理路径

脑机接口在增强人类健康水平和福祉的同时，其应用于运动医学的风险也在不断扩展和延伸。纵观国际涉及脑机接口科技伦理的专门性政策，欧盟人工智能高级别专家组于2019年发布《可信人工智能伦理指南》(以下简称《伦理指南》)，明确规定“尊重人类”“预防伤害”“追求公平”“可解释性”等原则。因此，需要及时调整并建立应对脑机接口伦理挑战的规制方案，遵循“预防为先—过程严控—预后追责”的治理逻辑，构建覆盖全生命周期的治理体系，以最大限度避免风险的发生并降低已有风险的持续侵害。

(一)健全治理体系：实现数据治理框架的构建

脑机接口研究过程中采集的神经数据，是反映患者与运动员的运动状态、心理健康以及性格特征等的隐私数据。《伦理指引》中明确要求“按照信息安全管理相关法律法规和技术标准要求，对数据进行全流程系统性的保障”“防止神经数据泄露，保障数据安全和被试的隐私和个人信息”。因此，神经数据的管理与保护要超越传统个人信息保护框架，构建兼具技术稳健性、法律明确性与伦理前瞻性的综合治理体系。

1. 预防为先：建立透明化的知情同意机制

《伦理指南》规定：“应将人工智能系统的各种功能性描述向用户透明，特别是在研发阶段要遵守隐私设计原则来保护信息。”目前我国已出台脑机接口等技术应用的知情同意制度，明确要求在尊重个体自主权的前提下取得患者的知情同意[25]。在此基础上，基于“分层同意”，针对医疗场景与竞技场景明确知情同意边界。“分层同意”是指根据数据使用的风险程度区分不同类型数据主体，如用于运动医疗康复的数据，需要与医生及患者组成的团队达成协议；但在竞技训练与比赛场景中，涉及神经数据采集的知情同意须独立于俱乐部合约、赞助协议等商业契约，由运动员本人授权后方能使用。

2. 过程严控：加强神经数据全链条的安全管控

脑机接口主要采集大脑的一般性数据和主体的个性化数据，倘若神经数据出现外泄，则可能带来隐私泄露的风险[26]。对此，需要在数据采集、存储、共享等全链条环节构建差异化的安全管控体系。其一，在神经信号采集端进行本地加密，在采集、存储和传输环节完成对原始数据的加密处理。其二，数据共享时应实时记录共享主体的应用频次、目的及时间，确保采集、存储以及共享的数据能够追溯并公开。在此基础上，区分可用于训练优化的常规数据与涉及战术意图、心理状态等的敏感数据。常规数据可在匿名化处理后用于科学研究或产品优化，敏感数据须经运动员本人特别授权方可访问。

3. 预后追责：完善数据治理与权益保障机制

法律作为维护个人合法权益的根本保障，能够对已发生的侵权行为进行追溯、判定与定责，助力脑机接口技术治理水平的提升。因此，亟需建立神经数据的专门性立法。一方面，在《中华人民共和国个人信息保护法》的框架下，制定以神经数据为核心规制对象的专门法规，明确其作为特殊生物识别信息的法律地位，设定较一般数据类型更为严格的保护义务；另一方面，确立患者与运动员作为数据来源的主体地位，明确俱乐部、设备制造商、教练团队等不同主体的数据权限边界。同时，赋予监管机构出台临时性合规指引的权限，对脑机接口应用运动医学可能引发的隐私泄露、数据滥用等事件迅速作出响应，严格惩戒非法获取以及对数据主体造成重大精神损害的行为，确保主体权益在法律制度框架下不受侵犯。

(二)维护主体地位：保障技术应用过程的公平

脑机接口通过替代个体的行为与认知能力，为人的主体性发展提供技术路径[14]。《伦理指引》明确强调，“脑机接口研究应尊重被试的个人尊严，尊重其自主决策权，最大限度保障人脑在结构功能和精神意识上的完整性”“保障人们在获取脑机接口技术的机会方面的公平性”。因此，需要在脑机接口应用前明确患者和运动员的主体地位、应用中监督人机协同的合规训练、应用后长期跟踪其认知完整性与自我认同，确保他们对脑机接口作用下的内在神经活动与外在实践行为均有理性的认知，而非在技术介入下侵犯其认知主导性。

1. 预防为先：确立人的主体性与自主权

技术本应作为一项辅助工具应用于运动医学领域，因此技术赋能的前提，首先要维护人在控制环路中的主导地位，以及在关键决策上的主要决策权。一方面，坚定“以人为本”的技术应用理念。在脑机接口赋能运动康复与竞技训练中，须保留患者与运动员实时确认、否决或干预的操作权限。如脑控外骨骼技术在解码“站立”的运动意图时，要通过闭环神经反馈主动请求并获得患者的明确授权，以此防范因信号误解码所引发的非预期动作。另一方面，建立心智隐私保护机制。脑机接口系统应保障患者与运动员拥有心智隐私空间，系统通过立法规范

与技术标准双重路径，明确区分用于外部控制的运动指令信号与表征内部状态的神经活动信号，防止战术意图、心理波动等信息被不当读取或利用。

2. 过程严控：建立动态监督与原则界定机制

研发者和应用者应严控脑机接口技术运用于运动意图转译、运动功能修复等场景，而不应该替代人类或僭越人类。于康复性增强而言，需由临床医师、康复师与伦理委员会等，基于循证医学标准审慎界定治疗终点，当功能恢复达到社会参与及基本生活能力所预设的基线水平时，便应审慎评估后续脑机接口应用的伦理正当性。对于竞赛性增强而言，应秉持更为严格的规制原则。算法研发要通过大量自然性、低认知负荷的试错行为捕捉运动员独有特征，寻找适用于个体的最佳“神经控制点”，并基于医学评估的运动功能基线标准，客观衡量技术应用是否超越人类自然极限，如若在技术应用过程中超出规则允许或违背公平精神，应立即重新启动或干预终止程序。

3. 预后追责：健全资源公平分配与机会补偿制度

针对资源不均形成的数字鸿沟，国家应通过专项资金援助、技术培训等方式，加强区域、城乡、校际的脑机接口基础设施建设，降低技术使用门槛，确保不同经济背景的患者和运动员均能平等接受技术的普及与赋能。同时，应在运动员选拔环节引入技术接触评估机制，从源头防范因技术资源差异而形成的技术特权。此外，体育主管部门应建立脑机接口技术应用的公平性监测指标体系，定期评估不同层级、不同地区患者及运动员的技术获取差异，为政策干预提供科学依据，确保技术发展始终服务于体育公平的价值根基。

（三）筑牢安全屏障：构建生命健康风险防控体系

脑机接口的运动医学康复主要融合神经科学、临床医学和计算机科学等学科，不同领域对同一行为的操控存在较大差异。因此，《伦理指引》明确提出，“在人体上开展脑机接口研究应根据《涉及人的生命科学和医学研究伦理审查办法》等相关法规申请并通过伦理审查”“应严格遵守相关法律法规和标准规范”。为有效管控脑机接口潜在的安全风险，既需在技术引入与应用过程层面的双重优化提升，也需要技术应用后的长期监测与应急响应，使技术发展始终与生命安全保障协同演进。

1. 预防为先：健全技术健康准入与风险预警框架

技术健康准入是避免安全风险发生的关键防线，政府、技术研发等部门亟须通过标准化程序明确脑机接口的作用目标，防止数据滥用导致健康定义的异化。《伦理指南》中明确提出，“安全考量是伦理框架的基石，涉及身体、心理和社会伤害的预防。”因此，在技术应用前要构建一个融合实时监测与量化评估的风险管控网络。在技术准入阶段，应构建多维健康评估标准，明确区分生物学意义上的功能恢复与技术赋能下的功能替代，防止将“数据优化”简单等同于“健康改善”。康复目标应严格基于运动员伤前的基线数据及个体特征，使其回到受伤前的身体和心理状态，而非追求性能参数优化。在技术应用前，应建立“风险—收益”评估机制，由伦理委员会审查运动员的知情同意，防止存在来自俱乐部、教练团队或国家荣誉的话语压力，确保“不伤害”原则在技术应用过程中得以落实。

2. 过程严控：加强算法安全监控与实时失效保护

脑机接口的运行环境复杂且不稳定，需要将安全理念嵌入数据感知、物理执行的全过程，以有效抵御复杂环境下因算法误判、系统故障或外部干扰所诱发的未知风险。因此，技术研发部门需开发基于上下文感知的意图解码算法，通过融合肌电、运动姿态等多模态传感器数据动态甄别神经指令，以区分疲劳、疼痛等生理噪声与真实运动意图，预防因误解码引起的意外行为发生。同时在脑机接口运行过程中，若检测到输出力与预期指令存在偏差或接收到急停信号，便立即进入锁定状态。再者，脑机接口在调控运动皮层前，应预先设立同步监测前额叶皮层等关联脑区活动的系统，一旦监测到与冲动、焦虑等状态相关的异常电生理信号，便即刻触发警报，并自动切换至保守调控模式或暂停干预。

3. 预后追责：健全长期监测与应急响应制度

生命健康和技术行动导向的终极问题在于如何及时应对高风险与不确定性场景，这是整个脑机接口运行结束后最现实的难题。预防患者的生理与健康风险，需要建立针对脑机接口医疗器械的安全标准，通过对植入式电极材料进行生物相容性测试、加速老化与长期植入动物实验，以评估胶质瘢痕形成、材料降解及信号稳定性衰减等远期风险。要确保长期性地保护患者生命健康，还应推行侵入式脑机接口植入物登记制度，要求医疗机构对植入者实施定期的多模态监测，包括神经影像学评估、认知与心理状态测评，实现对神经信号安全性与临床疗效持久性的动态评估，以便紧急状况时能够及时采取应对措施。对于已出现电极周围瘢痕形成、信号衰减等问题的患者，应建立应急预案，包括设备参数调整或计划性取出手术等处置流程，确保技术生命周期与生命健康管理的有效衔接。

（四）厘清权责归属：守住责任追究体系的底线

脑机接口技术的超强智能性可能导致侵权、僭越、危害生命健康等伦理风险的发生，应以辩证视角审视脑机接口技术的“善”与“恶”，使得技术真正发挥服务于人类的价值[27]。《伦理指引》中强调，“脑机接口研究应增强系统透明性、可解释性、可靠性、可控

性，确保技术设计、研发、使用、部署等阶段可追责”。因此，还需前瞻性地明晰技术研发、应用等各流程的具体责任方，确保社会规范与技术发展的同步进行。

1. 预防为先：构建全链条分层责任框架

脑机接口技术运用中的责任自负是近代民法的一项基本原则，也是民事行为能力制度的基础。脑机接口技术本身不能作为责任主体存在，需要在技术使用前构建全周期的分层责任框架。一方面，建立脑机接口产品与服务责任链条。针对运动医学各场景多主体协同的特点，明确康复训练效果与安全风险的最终责任主体。如硬件制造商需对产品的材料安全性、基础功能承担严格责任，算法开发者须为解码模型的决策逻辑缺陷负责，医疗机构或运动团队则对适应证把握、操作规范培训与实时监护过程负有专业责任，在发生侵权或安全问题时，对应主体须承担如实反馈自身状态与遵循安全指引的义务。另一方面，从法规层面厘清制造商与医疗机构的共同责任。双方需共同制定并提前向监管机构报备覆盖植入物全生命周期的应急预案，方案需涵盖设备紧急故障的处置流程、计划性取出或更换手术的标准操作规程，确保技术生命周期与患者、运动员生命健康管理的有效衔接。

2. 过程严控：实施算法透明与行为全程记录

预防阶段对责任主体的界定仅是技术应用管理的基础，技术的可持续落地还需要持续记录技术的实际运行过程。针对体育竞赛场景出现疑似因脑机接口辅助失误导致的危险动作或犯规时，可基于算法日志、神经阈值设置、实时解码记录等数据，综合判断该动作是源于运动员的自主意图、算法的隐性诱导，还是人机交互过程中的意图偏差，确保判罚的公正性与可解释性。在脑机接口应用于运动医学的临床实验与竞技训练中，监管机构应积极开发与脑机接口技术相关的伦理、法律和社会问题监管流程，要求公开透明技术的治理过程，增强公众对技术的信任。例如，在脑机接口辅助脊髓损伤患者康复训练时，要求系统公开训练的脑电信号、神经阈值等数据，并全程记录各环节的技术操作，确保安全风险发生时能够迅速定位主要责任主体。此外，还应设置独立的算法安全监督机构，制定算法安全与透明标准并审核高风险算法的临床准入，基于设备的算法日志、训练数据和操作记录区分事故的缘起，如算法固有缺陷、系统性风险或操作不当等。对于竞技比赛中的争议判罚，该机构可出具责任鉴定报告，作为体育仲裁和司法裁决的核心依据，为追究相关责任人的法律责任提供保障。

3. 预后追责：健全责任界定和认知归因引导制度

技术应用后的责任追溯不仅需要法律层面的归责，更需从认知层面帮助患者和运动员深化主体意识与责任边界，并引导其建立正确的技术观念。故而要将价值塑造与认知干预融入技术应用后风险防御的各阶段。例如，在脑机接口运动康复实践中，告知患者与运动员有关增进运动功能的相关生物学与神经学知识，协助其辨别主动训练、内在康复潜能及外界技术辅助作用的相互影响关系，强调运动功能的实质性改善源于自身专注力、持久度及应对性的改善，强化以自我能动为主导的心理归因，重塑康复主体的信念与自我效能感。

二十世纪六七十年代，脑机接口技术研究进入起步阶段。至今，脑机接口的发展取得了一定成果，并在运动医学领域中展现出巨大的发展潜能，有望在将来发展成为重要的新质生产力。面对新技术，其潜在风险和应用价值始终并存。脑机接口技术在赋能进程中面临诸多亟待解决的伦理问题，而究其原因，主要源于政策法规、技术发展、监管机制、问责体系等方面的不成熟。因此，社会各界应积极反思并做出相应举措，未来努力探索各类伦理挑战的规约路径，运用多种有效手段为伦理风险增设防线，推动人类社会向有保障、有质量、有温度的未来迈进。

参考文献

[1] 巫嘉陵，高忠科. 脑机接口技术及其在神经科学中的应用[J]. 中国现代神经疾病杂志，2021，21（1）：3-8
[2] 吴毅. 从无创神经调控到有创神经调控：脑机接口技术在康复医学中的应用进展[J]. 中国康复医学杂志，2025，40（6）：801-805
[3] 王炎明，谢代俊，吴萌，等. 人工智能在运动医学领域应用的进展[J]. 中国矫形外科杂志，2025，33（9）：791-795
[4] 陈世益，华英汇，陈天午. 中国运动医学的发展机遇和方向[J]. 中华医学杂志，2023，103（11）：783-786
[5] 姚国章. 脑机接口发展进展与典型案例研究[J]. 南京医科大学学报（社会科学版），2025，25（2）：105-112
[6] 肖峰. 脑机接口数据的现象学特征、规制困境与治理路径[J]. 新疆师范大学学报（哲学社会科学版），2026，47（2）：125-134
[7] 李筱永. 脑机接口技术临床应用中知情同意的法律规制[J]. 政法论丛，2025（4）：140-154
[8] Seidel-Marzi O，Ragert P. Neurodiagnostics in sports：investigating the athlete’s brain to augment performance and sport-specific skills[J]. Front Hum Neurosci，2020，14：133
[9] Brady C，Tuyls K，Omidshafiei S. AI for Sports[M]. Boca Raton：CRC Press，2021：109
[10] 张曼. 人机共生：脑芯片的监管挑战和三维建构[J]. 东

北师大学报(哲学社会科学版),2025(2):116-125
[11] 吕炳斌. 人工智能法学之类比方法及其省思:以AIGC著作权保护问题为例[J]. 法学研究,2025,47(6):148-166
[12] 张学义,潘平平,庄桂山. 脑机融合技术的哲学审思[J]. 科学技术哲学研究,2020,37(6):76-82
[13] 褚小山. 马克思主体性思想主要内容及重要意义[J]. 人民论坛,2014(17):206-208
[14] 高慧琳,王垚. 人机交互:脑机接口对主体性的消解与重构[J]. 科学技术哲学研究,2025,42(4):74-81
[15] 马兰. 脑机接口:应用价值、伦理风险与治理框架[J]. 中国医学伦理学,2026,39(2):159-166
[16] Greely H, Sahakian B, Harris J, et al. Towards responsible use of cognitive-enhancing drugs by the healthy[J]. Nature,2008,456(7223):702-705
[17] 武文凯,张建云. 脑机接口赋能人类发展的哲学反思[J]. 河南社会科学,2025,33(7):109-115
[18] 张晟婕,赵长丽,宁伟程,等. 脑机接口技术的伦理风险及应对措施[J]. 中国医学伦理学,2024,37(1):61-68
[19] 徐俊杰,王玉学. 脑机接口增强人体的伦理风险及治理[J]. 医学与哲学,2025,46(21):30-33
[20] 周吉银,刘丹. 医学领域应用脑机接口技术的伦理困境[J]. 中国医学伦理学,2019,32(10):1261-1266,1276
[21] Bullard A J, Hutchison B C, Lee J, et al. Estimating risk for future intracranial, fully implanted, modular neuroprosthetic systems: a systematic review of hardware complications in clinical deep brain stimulation and experimental human intracortical arrays[J]. Neuromodulation, 2020,23(4):411-426
[22] Demetriades P, Rickards H, Cavanna A E. Impulse control disorders following deep brain stimulation of the subthalamic nucleus in Parkinson's disease: clinical aspects[J]. Parkinsons Dis,2011,2011:658415
[23] 唐远雄,孙嘉伟. 审视脑机接口:后人类未来的技术演化与治理[J]. 科学·经济·社会,2021,39(1):81-90
[24] 李珍. 脑机接口伦理的人机共同责任范式建构[J]. 中国社会科学,2025(10):91-107
[25] 崔丽. 脑机接口技术发展中神经信息的法律属性与保护路径[J]. 上海政法学院学报(法治论丛),2026,41(1):94-105
[26] 谢宗旺. 医学领域脑机接口技术应用的伦理挑战与应对路径[J]. 南京医科大学学报(社会科学版),2025,25(6):540-546
[27] 宁晓路,曹永福,张颖,等. 脑机接口技术应用的伦理问题分析[J]. 医学与哲学,2018,39(17):35-38,44

(本文编辑:姜 鑫)

Ethical challenges and governance pathways for brain-computer interfaces in sports medicine

Chen Zipeng, Huang Jian
College of Physical Education and Health, Chongqing Sanxia University of Science and Technology, Chongqing 404000, China

Abstract: As a core technology enabling the high-quality development of sports medicine, brain-computer interfaces (BCIs) play a vital role in monitoring neural dynamics, decoding motor intentions, and assessing neural characteristics. However, the application of BCIs in sports medicine still faces ethical challenges, including data privacy breaches, the undermining of human agency, threats to life and health, and ambiguity regarding responsibility. In response, the paper proposes governance pathways, including establishing a comprehensive data governance system, protecting human agency, reinforcing safeguards for safety, and clarifying the boundaries of rights and responsibilities. It further proposes specific measures to integrate brain-computer interfaces into sports medicine across the stages of prevention, process, and prognosis, thereby promoting the standardized and efficient development of brain-computer interfaces.

Key words: brain-computer interface; sports medicine; technology ethics; technology empowerment