

基于脑机接口驱动下的针灸“得气”闭环调控策略 及外周-中枢机制探讨

殷 伶^{1,2}, 叶 勇^{1,2}, 李宇翔³, 罗 荆^{1,2}, 周 慧^{1,2}, 田岳伦^{1,2}, 罗 容^{1,2}

(¹湖南中医药大学第一中医临床学院, 长沙 410007; ²湖南中医药大学第一附属医院, 长沙 410007; ³湖南中医药大学中西医结合学院, 长沙 410208)

【摘要】 针灸“得气”是针刺疗效的关键,但其评价长期依赖主观感受,缺乏客观生物学指标。本文系统梳理基于脑电图(EEG)的脑机接口(BCI)技术在解析“得气”外周-中枢神经机制中的研究现状,进一步探讨如何利用BCI的闭环调控能力主动诱导和维持“得气”状态。通过整合国内外文献,分析“得气”的外周启动机制与中枢响应特征,阐述EEG-BCI在“得气”客观识别及闭环反馈系统构建中的应用价值。EEG能够实时捕捉“得气”过程中神经振荡动态,基于机器学习的特征解码方法进一步实现了对“得气”状态的客观识别,而由BCI驱动的闭环反馈策略则为精准化针灸治疗提供了创新路径。目前该领域仍面临信号伪迹干扰、解码精度不足及研究范式不统一等挑战。EEG-BCI与针灸学的深度融合,为解码“得气”科学内涵及主动调控提供了关键技术平台。未来应着力发展动态网络解码技术、深化外周-中枢耦合机制研究,并推进系统向智能化、标准化方向转化。

【关键词】 针灸;“得气”;脑机接口;外周-中枢

Discussion on the closed-loop regulation strategy for acupuncture “*Deqi*” based on brain-computer interface and its peripheral-central mechanisms

Yin Ling^{1,2}, Ye Yong^{1,2}, Li Yuxiang³, Luo Jing^{1,2}, Zhou Hui^{1,2}, Tian Yuelun^{1,2}, Luo Rong^{1,2} (¹First Clinical College of Traditional Chinese Medicine, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410007, China; ²The First Affiliated Hospital of Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410007; ³College of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208)

【ABSTRACT】 It is held that “*Deqi*” is the key to the therapeutic effect of acupuncture, but its evaluation has long relied on subjective feelings and lacks objective biological indicators. In the present article, we systematically review the current research status of brain-computer interface (BCI) technology based on electroencephalogram (EEG) in analyzing the peripheral-cerebral neural mechanism of “*Deqi*”, and further explore how to utilize the closed-loop regulation ability of BCI to actively induce and maintain the “*Deqi*” state. By integrating domestic and foreign literature, we analyzed the peripheral initiation mechanism and central response characteristics of “*Deqi*”, and explored its application value of EEG-BCI in the objective identification and the construction of closed-loop feedback systems. Studies have demonstrated that EEG, with its millisecond-level time resolution, can capture the dynamic changes of neural oscillations during the “*Deqi*” process in real time. The feature decoding method based on machine learning further realizes the objective identification of the “*Deqi*” state, while the closed-loop feedback system constructed by BCI technology provides an innovative path for precise acupuncture treatment. However, this field still faces some challenges such as signal artifact interference, insufficient decoding accuracy, and inconsistent research paradigms. The deep integration of EEG-BCI with acupuncture medicine provides a key technical platform for decoding the scientific connotation of “*Deqi*” and active regulation. In the future, efforts should be made to develop dynamic network decoding

【DOI】10.13702/j.1000-0607.20260385

引用格式:殷伶,叶勇,李宇翔,等.基于脑机接口驱动下的针灸“得气”闭环调控策略及外周-中枢机制探讨[J].针刺研究,2026,51(10): 1-13.

项目来源:湖南省卫生健康委高层次人才项目(No.湘卫函[2024]43号);湖南省自然科学基金项目((No.2024JJ6356);湖南省卫生健康委卫生科研项目((No.W20243084)

通信作者:罗容,E-mail:529488636@qq.com

technology, further deepen the research on peripheral-cerebral coupling mechanisms, and promote the transformation of the system towards intelligence and standardization.

[KEYWORDS] Acupuncture; “Deqi”; Brain-computer interface; Peripheral – central mechanism

针灸通过机械、温热或电等物理刺激作用于特定腧穴^[1],在镇痛、神经系统疾病康复及内脏功能调控等方面疗效显著^[2-6]。古今医家均认为针刺疗效与“得气”密切相关,如《灵枢·九针十二原》所载“刺之要,气至而有效”,但“得气”的传统评价长期依赖于施术者的手下感觉(如涩、紧)与患者的主观感受(酸、麻、胀、重)。这一主观性评价体系缺乏客观、量化的生物学指标,成为制约针灸学标准化、现代化与国际化的关键瓶颈。为解析“得气”的科学内涵,近年来神经影像学技术被广泛应用于“得气”的效应机制研究中,学者借助功能性磁共振成像(fMRI)技术的研究^[7-9]初步揭示了“得气”状态下边缘系统、默认网络及岛叶等多脑区的协同响应,证实了其中枢整合机制的复杂性^[10-11]。然而fMRI较低的时间分辨率难以捕捉“得气”瞬间毫秒级的神经元电活动变化,限制了对其瞬时脑网络调控机制的深入理解。更为关键的是,突破“得气”研究的瓶颈不仅需要提升观测精度,更需实现从被动观察到主动调控的范式转变;实际上是将实时脑状态信息转化为对外部刺激器的精准控制指令,建立闭环调节通路。

脑机接口(BCI)正是实现这一研究范式转变的核心技术。BCI的核心在于实时解码脑活动信号,并将解码结果转化为控制指令以驱动外部设备,从而建立脑功能的外延、支配与操控通路^[12]。这一特性已在神经康复领域得到充分验证,如BCI联合功能性电刺激对卒中后运动功能的改善^[13]。其中,脑电图(EEG)凭借其毫秒级的时间分辨率、非侵入性及便携性,成为构建针灸脑机接口系统的理想信号采集模式^[14]。相较于fMRI,EEG能够实时追踪“得气”诱发的情感、认知及感觉整合过程的神经振荡特征,为动态解码“得气”的中枢机制提供了关键技术路径。因此将EEG与BCI深度融合不仅有望实现对“得气”状态的客观识别,更有可能推动针灸向基于神经反馈的精准化治疗模式发展^[15]。需要指出的是,BCI技术虽具优势,但其空间分辨率有限,且针刺操作产生的运动伪迹与电磁干扰仍对信号提取构成挑战。

在BCI与针灸结合方面,早期研究已实现基于运动想象脑电信号控制经皮穴位电刺激(TEAS)的

反馈调节,近期针灸机器人与闭环电针灸系统的进展亦推动了针刺操作的自动化与闭环化^[16-17]。然而,上述研究多以运动功能康复或一般性神经调控为目标,尚未聚焦于以“得气”特征性脑电模式作为闭环控制的核心目标。因此,本文在系统梳理“得气”外周-中枢神经机制的基础上,将其转化为BCI系统的设计依据,提出以“得气”相关脑电特征为控制目标的闭环调控策略,即通过实时脑状态解码,将反映“得气”状态的神经信号转化为可驱动物理刺激装置(电针等)的反馈指令,从而实现对刺激参数的动态、闭环式调整,以维持最佳“得气”效应,并探讨其临床转化路径,以期针灸精准化、智能化治疗提供新的技术范式。

1 BCI技术及其在针灸“得气”调控中的应用基础

1.1 BCI技术原理与核心特征

BCI是一种实现大脑与外部设备间直接通信的前沿技术,其核心在于建立大脑神经活动与机器控制之间的双向交互通路^[12]。该技术不仅能够实时解码大脑信号并转化为控制指令,还可将外部信息编码为神经可感知的反馈信号,从而构建起闭环的人机智能融合系统。BCI系统的基本工作流程包括脑信号采集、预处理、特征提取、特征分类、控制指令输出及反馈机制等环节^[18]。首先,借助无创或微创传感器(如EEG、脑磁图、皮层电图、微电极阵列等)记录大脑活动产生的电生理信号^[19-21];其次,采用先进的信号处理方法从原始数据中提取出具有判别性的特征模式,如特定频段的振荡能量、事件相关电位(ERPs)或神经元放电序列等;再次,通过机器学习或深度学习算法将这些特征映射为可驱动外部设备的控制指令;最终,指令被执行并实时反馈于用户,形成完整的感知-决策-执行闭环。而BCI区别于常规脑功能检测的本质特征在于其输出端,当识别出的脑信号被解码后可转化为控制指令,直接操控目标设备,形成“信号采集-特征解码-设备控制-感觉反馈”的闭环通路。这种特性使得BCI在神经康复领域展现出广阔前景,目前已在脑卒中、脊髓损伤、肌萎缩侧索硬化等神经系统疾病^[22-24]的运动功能重建、认知增强与康复训练中取得显著成效,为改善患者生活质量与促进神经功能重塑提供

了创新性解决方案。

1.2 BCI驱动针灸闭环调控的可行性基础

目前,BCI技术主要应用于运动功能替代(如为瘫痪患者提供轮椅或机械臂控制)、环境控制、通讯和神经康复等领域^[25-26]。研究^[27]表明针对中风患者的运动障碍,在针灸康复的基础上引入BCI,可以促进运动功能康复的标准化及智能化,以期达到更好的疗效。除此之外,在针灸研究中,BCI的引入不仅有助于客观评价“得气”状态,更有望通过其输出端对外周刺激装置的主动调控,实现以脑信号为导向的闭环针灸治疗,这一设想的可行性可从以下3个方面进行分析。其一,BCI具有高时间分辨率,尤其是以EEG为信号采集装置的BCI具备毫秒级的时间分辨率,足以捕捉针刺手法操作瞬间引发的快速神经电生理变化^[28-29],这与“得气”感觉的瞬时产生特点高度吻合。因此EEG-BCI可实时识别“得气”特征性脑电模式(如特定频段功率变化、事件相关电位等),为后续闭环调控提供精准的信号输入。其二,BCI的核心在于“闭环”理念^[30],借助这一理念,可以构建一个“脑信号监测-特征解码-刺激参数调控-反馈调节”的闭环系统,为实现精准、个体化的针灸治疗提供相关技术路径。一方面实时读取脑电特征,判断当前“得气”状态;另一方面可将解码结果转化为控制指令,即时调节电针的频率、强度或机械刺激的参数,从而实现精准、个体化的针灸调控。其三,该技术能推动“得气”客观化^[31],因BCI依赖于对脑电信号的定量分析和模式识别(如事件相关电位、频谱功率变化等),这将为把主观的“得气”体验转化为客观的、量化的生物学指标提供强有力的技术支持。这些客观指标不仅是识别“得气”的依据,更可作为闭环控制的“设定值”(set point);当系统监测到脑状态偏离目标范围时,可自动调整刺激参数,引导大脑活动恢复或维持理想的“得气”状态,从而实现以客观神经表型为导向的精准治疗。

2 “得气”的外周-中枢神经机制

2.1 “得气”的外周启动机制

针刺“得气”的启动始于穴位局部的机械力传导。穴位作为由皮肤、结缔组织、肌肉、神经、血管及淋巴管构成的多维立体结构,其内部丰富的细胞类型(尤其是成纤维细胞、巨噬细胞、肥大细胞等免疫相关细胞)共同构成了机械力敏感微环境。当毫针刺入后,术者进行提插捻转操作时,机械力首先

作用于穴位多种力学敏感细胞。研究表明针刺得气可在穴位局部诱发肌电信号^[32-34],毫针牵拉力升高(这可能是医者针下沉紧感的客观反映)^[35]。有学者据此提出毫针刺入后外周神经及感受器被激活,神经及穴位皮肤、肌肉、结缔组织等产生相关化学物质形成神经针刺单元^[36],进而发挥针刺效应。

进一步研究揭示,这一机械力传导过程不仅依赖于神经末梢的直接激活,更与穴位非神经细胞的力学感知与响应密切相关。研究^[37]显示,成纤维细胞作为穴位结缔组织中的主要力学感受细胞,在针刺机械力作用下通过“细胞外基质-整合素-黏着斑-细胞骨架”通路将物理信号向细胞内传递,进而调控其分泌功能。而肥大细胞响应机械刺激发生脱颗粒,释放组胺、5-羟色胺等活性物质,激活传入神经末梢^[38];巨噬细胞则在机械力刺激下通过核因子 κ B等信号通路调控免疫平衡^[39]。这些穴位内非神经细胞与感觉神经末梢协同作用,将机械信号转化为化学信号,释放ATP、腺苷及神经肽等,放大针刺效应^[36]。穴位的感觉神经末梢主要包括 $A\beta$ 、 $A\delta$ 和C类纤维,这3类纤维对不同针刺刺激的响应特征存在差异,共同构成了“得气”感觉多样性的外周神经基础^[40-41]。其中, $A\beta$ 纤维主要对轻触、振动等非痛觉刺激敏感,传导速度较快,可能与“触”“麻”感的形成相关; $A\delta$ 纤维对机械痛刺激和温度变化敏感,传导速度较快,可能参与“酸”“胀”“重”等深部感觉的编码;而C纤维对多种伤害性刺激及化学刺激均有反应,传导速度较慢,可能与持久的“酸胀”感和弥漫性感觉有关。上述3类纤维的不同激活阈值与放电模式,意味着不同针刺手法和刺激参数是在激活不同比例的外周神经纤维组合,从而产生多样化的“得气”体验。这些外周传入信号最终沿脊髓-脑干-丘脑-皮层通路上传至中枢,并受到下行调控系统的调制,形成“外周-中枢-外周”的闭环调节网络^[36,42]。

2.2 “得气”的中枢响应特征

外周传入的针刺信号在中枢神经系统引发复杂的动态响应,EEG-BCI研究为此提供了重要证据。目前,基于EEG的中枢响应研究主要从脑电节律变化、脑功能连接重组及事件相关电位(ERP)3个方面入手。

2.2.1 脑电节律变化

既往研究通过分析针刺过程中脑电节律的功率变化,为“得气”的中枢机制提供了初步证据。研究常采用AR-Burg算法^[43]对针灸受试者脑电信号进

行功率谱密度分析,并在此基础上将EEG信号分解为5个子频带: δ (1~4 Hz)、 θ (4~8 Hz)、 α (8~13 Hz)、 β (13~30 Hz)、 γ (30~80 Hz)。研究表明,针刺可特异性调制不同频段的神经营荡活动。例如,在针刺“足三里”时,患者脑电活动的 δ 波、 α 波的振荡频率显著提升;针刺结束后EEG结果显示 δ 波振荡频率恢复至基线水平,而 α 波仍保持较高频率,这可能与针刺的“后效”作用有关^[44]。进一步研究^[45]显示 α 波的变化多发生在大脑顶叶及枕叶区域。Lee等^[46]研究提出针刺神门“得气”可增强枕区与颞区 θ 波的相位同步性,这可能与针刺的内源性调节、预期加工及情绪调节过程密切相关,是“得气”感觉中的“沉”“重”等成分的重要神经基础。然而这些频段特征的变化并非孤立存在,其空间分布具有特异性: α 波的增强常集中于顶枕叶,提示感觉抑制或内省状态; θ 波的增强多见于前脑区,关联认知情感处理。但当前研究多集中于单一频段的绝对功率分析^[47],未来需结合时频分析技术,深入探究“得气”过程中多频段振荡(如 θ - γ 跨频耦合)的动态交互模式及其与主观感觉维度的关联性。

2.2.2 脑功能连接重组

“得气”不仅是局部脑电活动的改变,更涉及大规模脑功能网络的重组。基于脑电相干性、相位锁定值(PLV)、相位滞后指数(PLI)等功能连接指标的研究初步揭示,有效的针刺刺激能够动态调节脑区间的信息流^[48]。在相干性分析方面, Lee等^[46]研究提示针刺神门得气后, θ 频段在颞区与枕区之间的相干性显著增强, α 频段在左颞区与额、顶、枕区之间的相位同步性亦显著提升,提示针刺可增强跨脑区协同作用以调节中枢信息整合。在相位同步性方面, Shen等^[49]采集30例健康受试者针刺后的多通道脑电信号,利用PLI构建大脑功能网络并采用图论分析,结果显示进针时平均PLI值显著高于静息期和留针阶段;且脑功能网络的全局效率、局部效率、节点效率和度中心性均显著升高,最短路径长度显著降低。以上研究表明针刺进针得气状态可改变脑功能网络拓扑结构。Yu等^[44]基于PLI分析进一步提示,针刺足三里可增加 δ 和 α 频段的同步性与左右半球间长距离连接,且 δ 和 α 频段功能网络呈现小世界特性,提示针刺能有效提升脑网络信息传递效率。

除上述基于EEG功能连接的研究外,近年来研究者开始从脑网络视角探讨针刺的神经调节机制。针刺脑网络调节效应具有靶向性、条件性和动态性

特征,边缘系统与默认模式网络(DMN)之间的连接调控可能是针刺发挥治疗作用的关键机制之一^[50]。Si等^[51]采用脑电微状态分析后显示,针刺合谷得气后微状态C的持续时间、发生频率和贡献率显著增加,微状态D参数降低;微状态C的持续时间及微状态B到C的转换概率与得气评分呈正相关。这提示得气增强了视觉网络与突显网络之间的动态信息交换,从而提高信息认知处理能力。

此外,fMRI研究为脑网络重组提供了高空间分辨率的补充证据。方继良等^[52]针刺太冲“得气”时观察到大脑边缘叶-旁边缘叶-新皮层系统(LPNN)出现了广泛而显著的负激活效应,涉及杏仁核、海马、海马旁回等脑区,且负激活脑区之间的功能网络连接增强;而在针刺伴随尖锐性疼痛时,上述脑区的负激活程度降低、区域缩小,部分脑区信号甚至逆转为激活状态。这一结果揭示了针刺得气与疼痛刺激相对抗的脑功能网络效应。后续研究^[53-54]进一步证实,得气常伴随边缘系统与DMN连接减弱,体感皮层与岛叶、前扣带回等负责内感受和注意分配的脑区之间的连接增强,前额叶控制网络可能在这一动态重组中发挥调控枢纽作用。值得关注的是,上述连接重组具有明显的时间动态性,可能遵循从感觉传入网络到情感评估网络,再到自上而下调控的序列模式。当前研究多基于静态功能连接分析,亟须引入动态功能连接检测方法,以揭示“得气”诱发的大脑网络状态瞬时切换与时空演化规律,为BCI系统实时识别“得气”状态提供动态网络特征。

2.2.3 ERP

ERP形成于EEG基础之上,通过触发具有特殊心理意义的事件刺激,诱发特定的脑电位变化。其中P300成分是与认知功能密切相关的内源性成分,其潜伏期反映神经活动与信息处理速度,波幅则体现大脑在信息处理过程中调动资源的广度,在认知功能评估中应用广泛^[55]。

在针刺研究领域,Hsieh等^[56]研究显示针刺足三里可显著降低P300波幅,且该效应在针刺期和针刺后持续存在,而非穴位刺激则未引起类似变化,提示针刺对大脑皮层的调节作用具有穴位特异性。吴永刚等^[57]通过ERP提取运动关联电位(MRCPs),结果显示头针能缩短运动准备时间和提高对侧偏瘫肢体运动功能。李飞等^[58]对早期血管性认知障碍患者的研究显示,针刺井穴和颞三针治疗后P300潜伏期显著缩短、波幅增加,同时简明精神状态检查(MMSE)评分提高,表明针刺能够改善认知功能。

Kim等^[59]研究显示电针内关后,各脑区脑电信号普遍呈现大幅增强,其中体感皮层 β 波(13~30 Hz)呈现事件相关去同步化(ERD)与随后同步化(ERS)的模式变化,初期ERD可能与针刺刺激的初期传入相关,随后出现ERS则可能与感觉信号的整合及“得气”感的维持有关。在长潜伏期反射(LLR)与体感诱发电位(SEP)方面,Nihonmatsu等^[60]研究结果显示针刺双侧合谷可降低LLR和短潜伏期反射(SLR)的出现频率与波幅,且LLR波幅变化与N20 SEP波幅变化之间存在相关性。SLR为脊髓水平的反射电位,LLR则为经脊髓上通路的中枢神经运动反射^[61],这表明针刺可通过脊髓和脊髓上双重调节系统抑制运动神经反射,为针刺得气的脊髓-皮层整合机制提供了电生理学证据。

综上所述,“得气”的外周-中枢机制为BCI闭环调控系统的设计提供了直接依据。外周层面,不同神经纤维对刺激参数的差异性敏感特征及穴区力学响应的时间依赖性,决定了BCI输出刺激参数的可调范围及闭环调控周期的秒至分钟级时间常数。中枢层面,脑电节律、功能连接重组及事件相关电位的动态变化,则为系统提供了实时识别“得气”状态、实施多时间尺度控制及评估疗效的指标集。上述机制共同构成BCI系统的设计参数空间,为闭环神经反馈针灸系统奠定了生物学基础。

3 BCI驱动得气的闭环调控策略构建

基于“得气”的外周-中枢机制及其对BCI系统设计的启示,本小节进一步提出BCI驱动得气的闭环调控系统构建方案。该系统的基本流程是:实时采集并解码脑电信号,提取“得气”相关脑电特征,与预设目标状态比较,根据比较结果生成刺激参数调节指令并输出至外周刺激装置,继而更新脑状态;循环上述过程,形成“监测-分析-调控”的闭环。

3.1 “得气”状态的客观识别与量化

如何将“得气”这一传统上依赖于主观描述的感觉体验,转化为客观、可量化的生物学指标,是针灸客观化定量研究领域的核心任务之一。EEG-BCI为此提供了强有力的工具。其核心在于利用机器学习与深度学习算法,对“得气”状态下特异性改变的EEG特征进行解码,从而实现“得气”与否及其强度的自动、客观判断。现有研究已初步验证了该路径的可行性,研究者^[62]采集针刺过程中(包含静息、进针、得气、留针、出针等不同阶段)的多通道EEG信号,并提取其时域、频域、空域及网络特征。

在此基础上,构建分类与回归模型来探究“得气”的中枢效应机制。传统机器学习方法^[63-64]如支持向量机(SVM)、随机森林(RF)在小样本研究中应用广泛,但需依赖人工设计的特征。近年来,深度学习模型,尤其是卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN)因其强大的端到端特征自动提取能力,展现出更优的分类性能。CNN可自动学习EEG信号的时空模式,RNN(如长短期记忆网络)则擅长捕捉“得气”过程的时序动态信息^[65]。更为重要的是,通过将模型的输出概率与主观“得气”量表评分进行回归建模,有望实现对“得气”强度的连续量化评估,将“酸、麻、胀、重”等抽象感受映射到特定的EEG特征空间,为构建“得气”的客观生物学指标体系奠定坚实基础。

3.2 刺激参数-脑电特征的映射与控制策略

区别于被动监测,BCI驱动得气的核心在于建立脑电特征与刺激参数之间的逆向映射关系,即当系统检测到当前脑状态偏离预设的“目标得气状态”时,应当输出何种调控指令使脑状态向目标方向前进。本节基于现有文献证据,提出目标脑电状态导向的自适应针刺控制策略。

3.2.1 映射关系的生物学依据

建立逆向映射的前提在于掌握外周刺激参数与中枢脑电节律之间的正向调制规律。Lopes Alves等^[6]采用半随机、安慰剂对照、交叉设计对48名健康志愿者给予合谷2.5、10、80 pps的TEAS及假刺激(160 pps),结果显示2.5 pps刺激可选择性地增强海马旁回区域的 θ 波振荡,该效应可持续至刺激结束后10 min;10 pps刺激则主要降低顶叶下回及岛叶的 α 节律。这一结果揭示了外周刺激频率与中枢脑电节律之间存在特异性映射关系,为BCI系统构建逆向映射提供了神经生理学依据。但需要指出的是,TEAS对脑电节律的调节效应与“得气”本身是否具有直接的因果关系,尚需进一步验证。Lee等^[46]研究显示,针刺神门诱导得气可显著改变 θ 和 α 频段的相位相干性,表明“得气”本身具有可量化的脑电特征。据此,TEAS频率特异性研究所揭示的“频率-节律”映射关系,可为BCI系统将目标脑电特征逆向映射为外周刺激参数提供生物学框架。

3.2.2 控制策略的基本框架

基于上述映射关系,系统通过比较当前脑电特征与预设目标之间的差距来动态调整刺激参数。在控制方法上,可根据调控目标的复杂程度选择不同实现方式。当以单一脑电特征(如 θ 波功率)为控

制目标时,比例-积分-微分(PID)控制是一种适用方案。Zeyda等^[66]将神经反馈系统的脑电信号建模为被控变量,通过PID模型拟合发现,成功训练试次往往与积分系数较高相关,提示收敛性在神经反馈中是渐进且完整的。当需要同时优化多个脑电特征(如同时调节 θ 功率和 α 相干性)时,可引入强化学习框架。Humaidan等^[67]首次在人体实现了基于强化学习的闭环脑电-经颅磁刺激,通过算法识别与皮层脊髓兴奋性相关的脑电节律相位并据此调整刺激策略,成功诱导出长时程的功能连接变化。Cho等^[68]则将强化学习与神经仿真相结合,开发了闭环脑深部电刺激系统,优化了刺激参数与能量效率。上述研究表明,强化学习能够有效处理多目标非线性脑刺激优化问题。

在针灸研究领域,已有学者报道了基于脑电反馈的外周电刺激闭环调控系统。Zhu等^[69]设计并实现了基于前额叶脑电特征反馈的经皮耳迷走神经刺激闭环系统,通过实时EEG信号动态调整刺激参数,实现了脑电对外周电刺激的闭环反馈调节。此外,基于运动想象BCI控制外周电刺激的研究也为脑电驱动电刺激提供了方法学参考^[70]。上述研究为本文所提闭环调控策略的针灸场景应用提供了参考。需要说明的是,上述控制框架目前仍处于理论构思或原型验证阶段,其具体参数整定和算法实现尚需根据未来实验数据加以完善。

3.2.3 可行性与收敛性分析

闭环系统的可行性依赖于两个基本条件。其一,刺激参数与脑电特征之间是否存在稳定的剂量-效应关系。TEAS频率特异性研究为低频段(2.5 pps与10 pps)的映射关系提供了初步证据,但对于更高频段及其他参数维度(强度、波形等),相关研究尚不充分。其二,闭环更新周期需与“得气”状态的神经动态特征相匹配。EEG信号的实时采集能够满足快速检测的需求,但外周刺激参数调整后脑电状态的响应存在一定的生理延迟,过快的调控频率可能导致系统振荡,过慢则难以适应状态的动态变化。因此,闭环更新时间常数的设定需要在后续的原型系统验证中通过试验加以确定。

值得注意的是,BCI驱动外周电刺激的闭环调控范式已在神经康复领域获得初步验证。一项纳入10项随机对照试验(共计290例患者)的Meta分析^[71]显示,BCI联合功能性电刺激(BCI-FES)训练对脑卒中患者上肢功能恢复具有中等效应量[标准化均数差(SMD)=0.50, 95%CI: 0.26~0.73];亚组

分析进一步表明,BCI-FES组对比单纯FES对照组的效应量 $SMD=0.37$ (95%CI: 0.00~0.74),常规康复对照组对比FES组的效应量 $SMD=0.61$ (95%CI: 0.28~0.95);且在观察性动作想象(AO)作为心理任务时的效果更优($SMD=0.73$, 95%CI: 0.26~1.20);另一项针对BCI-FES闭环调控范式的综述^[72]指出,BCI技术通过解码大脑运动意图并结合FES的神经肌肉刺激,构建了“脑-肢-脑”闭环反馈系统,在精准康复中展现出潜力。上述研究虽然以运动想象信号为控制目标而非“得气”特征性脑电模式,但证明了BCI解码信号能够有效驱动外周电刺激设备并产生具有临床意义的康复效应,为将类似闭环逻辑迁移至针灸场景提供了技术可行性基础。此外,随着国内闭环神经调控系统在康复领域的逐步应用,BCI闭环调控策略的临床转化可行性正逐步获得验证。

3.3 闭环神经反馈针灸系统初步设想

基于EEG-BCI对“得气”状态的实时客观识别,构建闭环神经反馈针灸系统具有前瞻性价值。早在2021年就有学者^[73]认为闭环式神经调控技术将为探索经络、腧穴、针刺手法、穴位配伍的本源及提高中医针灸的临床疗效提供新机遇和方法。该系统旨在突破传统针灸“开环”刺激模式的局限,形成“刺激-感知-反馈-调节”的智能化治疗闭环,为实现精准、个体化的针灸治疗提供技术路径。本研究结合文献检索发现若是建立这一闭环系统,则需要包含两个核心交互环路。

3.3.1 医师-患者协同调控环路

该系统实时解码患者的EEG信号,并将“得气”状态的识别结果(如未得气、轻度得气、最佳得气)以可视化形式(如仪表盘、波形图、声音提示)实时反馈给施针医师。同时,BCI系统根据当前脑电特征与预设目标状态之间的偏差,生成刺激参数调节指令(如频率、强度、波形),该指令可直接传输至电针或经皮穴位电刺激装置,也可作为操作建议供医师参考确认。当系统判断未达到预期的“得气”状态时,可及时提示医师调整针刺手法(如改变提插捻转的频率、幅度、方向)或由系统根据预设控制规则自动调节电针参数(频率、强度、波形)。这种实时的、基于客观EEG指标的闭环反馈,将医师的操作从依赖“手下感觉”的经验模式,转向基于“患者脑功能状态”的数据驱动模式,有助于实现针灸操作的标准化、精准化,并可作为青年医师教学培训的客观辅助工具。图1展示了该环路的系统架构与

信息流向。

3.3.2 患者-大脑环路

本环路的理论建构基于Hebbian可塑性与操作性条件反射的整合。Hebbian理论指出同步激活的神经元连接增强,这为神经康复提供了生物学基础。当运动意图(中枢激活)与感觉反馈(外周输入)同步发生时,突触连接能得以强化^[74]。神经反馈正是利用这一原理,通过BCI实时采集脑电信号,经特征提取后转化为视觉/听觉反馈,使患者通过操作性条件反射学习自我调节脑活动^[75]。研究证实,健康成年人经过6次 α 波神经反馈训练后,受试者全脑 α 波相对功率显著增强,尤其在前额叶和顶

枕叶区域呈现明显的上升趋势(从第1次到第6次训练持续增加),且该效应具有频率特异性,仅 α 波段显著增强而其他频段无显著变化^[66]。另一项研究进一步证实,基于个体化 α 峰频率(iAPF)划分的神经反馈训练在改善注意缺陷多动障碍儿童注意力方面显著优于固定频段训练^[76]。而针刺的“得气”状态具有明确的神经电生理标志:Lee等^[46]研究团队证实针刺神门诱导得气可显著改变 α/θ 波相干性。最新研究^[6]进一步提示,2.5 Hz的TEAS可增强海马 θ 波振荡,10 Hz则调节顶叶 α 波活动,且效应可持续至刺激后15 min。这为“得气”与特定脑电频段(θ 波、 α 波)的关联提供了直接证据。

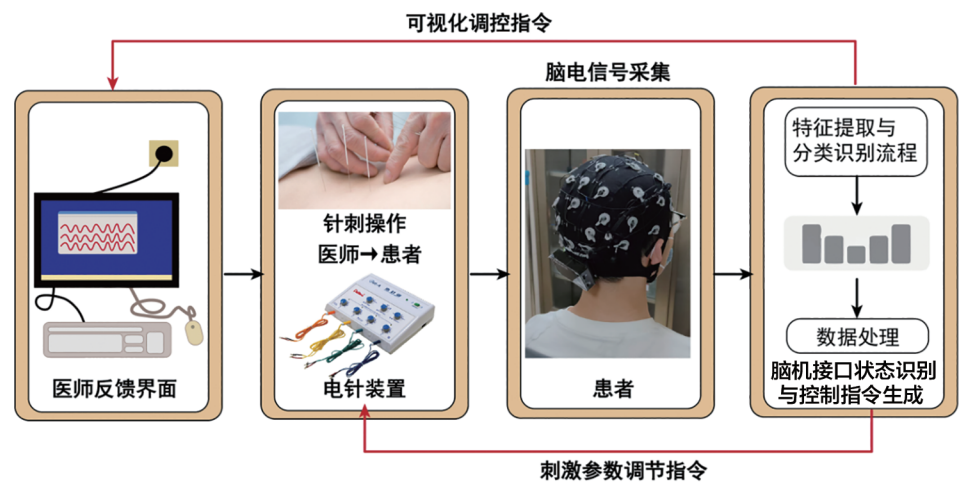


图1 医师-患者协调整控环路
Fig. 1 Physician-patient coordinated regulation loop

基于上述文献依据,本文提出将BCI神经反馈与针刺协同整合的技术路径。旨在于患者接受针刺或电针刺刺激(自下而上的外源性感觉输入)的同时,观察由自身EEG活动(特别是与得气相关的 α/θ 波)驱动的视觉/听觉反馈信号(如虚拟对象移动、音乐音调变化),主动学习调节特定频段脑电活动。与此同时,BCI系统可以根据当前脑电特征与目标状态的偏差,动态调节电针或TEAS装置的输出参数(频率、强度、波形等),实现外源性刺激的自适应调控。当患者成功诱导出与“得气”状态相匹配的脑电模式时,系统给予正性反馈,通过操作性条件反射强化这种“自上而下”的大脑自我调节与“自下而上”的针刺外源性刺激的同步激活。这一“内调外刺”模式的核心机制在于利用Hebbian可塑性原理,通过中枢-外周-中枢(CPC)闭环的正反馈强化,增强突触可塑性和功能重组能力^[77-79],尤其适用于需要长期神经康复训练的功能性脑病(如中风后遗

症、慢性疼痛、焦虑障碍等)。见图2。

3.3.3 初步临床探索

初步的临床探索为以上范式的可行性提供了先导证据。在卒中后康复领域,Wang等^[80]基于运动想象的EEG-BCI系统结合感觉阈值电刺激(SES-MI),可显著增强脑卒中患者感觉运动皮层的ERD激活强度及分类准确率,优于单纯运动想象范式。陆洁等^[81]的前瞻性研究进一步证实,BCI结合针刺疗法干预8周后,脑卒中患者Fugl-Meyer运动功能评定量表、蒙特利尔认知评估量表及Barthel指数评分均显著优于单纯针刺组,同时血清神经损伤标志物水平显著降低,大脑中动脉血流速度明显改善。系统评价证据也表明,BCI联合治疗可有效改善脑卒中患者上肢运动功能及日常生活能力,且安全性良好^[82]。值得关注的是,2026年初全国首个脑控针灸融合神经康复装备平台“神工·华佗”在天津落地,该平台创新性融合“脑机接口+智能穿戴式针灸”

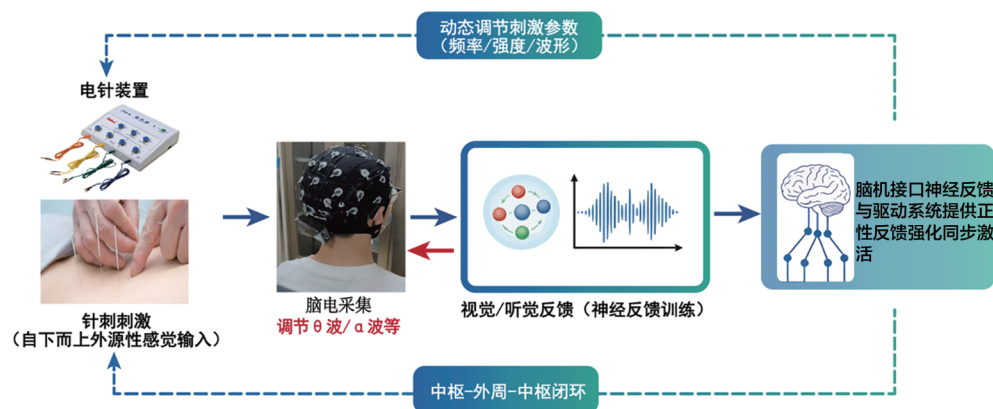


图2 患者-大脑环路

Fig. 2 Patient-brain loop

技术,构建了“主动针灸、量化针灸、融合针灸”三大核心技术路径。主要是通过以下3个方面来实现:其一能通过BCI主动范式增强神经对针灸刺激的参与;其二利用皮层脑电联合近红外耦合特征对针灸刺激进行在线评价和反馈优化;其三通过检测感觉和运动脑区活跃度实现“气机鼓、血脉应”的时域节点量化捕捉。针对“针灸得气”缺乏实时量化评价这一关键难题提供了系统化解方案,目前已在全国多家三甲医院开展临床试验。虽然上述研究多数未以“得气”特征性脑电模式为闭环控制目标,但验证了BCI与针灸刺激相结合的安全性与初步有效性,为未来构建以“得气”为导向的闭环调控系统奠定了基础。

此外,闭环神经反馈针灸系统还存在另一种重要的应用形式,即“设备-患者”自主调控模式。该模式利用智能穿戴式穴位电刺激设备,根据EEG-BCI实时解码的脑功能状态,直接自动调节电刺激参数(频率、强度、波形等),闭环诱导并维持“得气”样脑电模式,从而实现治疗疾病的目的。其科学基础在于电针频率与脑电频段之间存在明确的量效关系^[6,46]。这为通过精确调控电刺激参数来靶向诱导“得气”相关脑电模式提供了神经生理学依据。在技术实现层面,近年已有多项关键技术取得突破,首先是2026年获批的国家专利“一种基于脑电闭环干预的电刺激方法及系统”(公开号:CN122006107A),将脑电采集、信号处理、状态识别、电刺激生成、人机交互等功能高度集成于一个轻便穿戴设备中,实现了“一站式”的闭环干预,用户操作门槛低,便于推广使用。另有河南省重点研发专项“智能BCI驱动闭环电针灸系统在AD精准化治疗中的研发”,致力于融合脑电、肌电等多模态信号对“得气”效应进行客观量化,研发自适应闭环调控算法,并同步

推进小型化、可穿戴式BCI-电针灸智能设备的研发。而天津大学与天津中医药大学团队联合研发的“便携式TEAS装置(太空针灸)”已搭载多艘神舟系列载人飞船开展天基实验,为穿戴式针灸穴位刺激的闭环调控积累了重要经验。这种“设备-患者”自主调控模式无需医师全程实时操作,尤其适用于家庭、社区等非临床场景下的长期康复干预,是上述环路的重要补充与拓展。

4 当前挑战与发展前景

当前,BCI驱动针灸“得气”闭环调控领域正处于从理论探索向临床转化迈进的关键阶段,其在技术、机制和临床应用层面既面临严峻挑战,也展现出广阔的发展前景。

在技术层面,信号质量与干扰处理是首要瓶颈^[83]。针刺操作,尤其是电针刺激,会产生很强的电磁干扰和动作干扰。这些干扰的频率与EEG信号的频率非常接近,导致研究人员很难从中分离出与“得气”相关的神经信号。因此未来需要开发更先进的干扰去除方法,比如独立成分分析、小波变换和深度学习技术。同时当前闭环控制策略的验证尚不充分。如前文提出的PID及强化学习控制策略目前仍处于理论构思阶段,其具体参数整定、收敛性及稳定性尚需通过离线和在线试验加以验证。需建立标准化的验证流程,包括健康受试者的闭环可行性测试及患者人群的初步疗效评估。

在特征解码与模型构建方面,当前面临特征提取与解码准确的挑战。“得气”是一个涉及多维度感觉、情感和认知整合的复杂过程^[84]。其EEG表现因人而异,且随时间变化呈现非线性特点。过去,研究人员常用基于群体平均的传统方法,但这类方法很难捕捉到个体的特有模式。建议未来研究人员

构建相关自适应个体差异、具备良好泛化能力的解码模型。

在神经机制研究层面,目前研究多将“得气”作为整体状态分析,尚未精确解析出特定振荡模式(如 θ - γ 跨频耦合、相位-幅度调制)与“酸、麻、胀、重”等不同感觉维度及情绪认知成分的对应关系。这限制了BCI系统对“得气”亚状态的精细识别与靶向调控。同时,现有研究多聚焦于针刺引起的中枢响应^[85],而对于针刺瞬间外周神经信号(如肌电活动、神经传导速度等)的同步采集与分析尚显不足。针刺信息如何从外周逐步传导并整合至中枢,仍缺乏系统研究。未来,研究视角可逐步转向动态网络解码,可尝试引入动态功能连接分析、时变网络指标及状态转换模型等方法,以更精细地刻画“得气”过程中大脑网络在毫秒级时间尺度上的状态切换与时空演化轨迹,从而为针灸BCI系统提供更具动态特征的神经指标。

在临床转化层面,主要困境在于缺乏统一的研究范式与评价标准。不同研究在穴位选择、针刺手法、EEG导联设置及“得气”判断标准上存在较大差异,导致结果难以横向比较与重复验证。此外,盲法与安慰剂效应的控制是验证系统特异性疗效的关键,需设计严谨的假针刺对照组(如非穴浅刺)和假反馈对照组^[86],以有效排除安慰剂与患者心理效应对研究结果的干扰。随着机制研究与技术瓶颈的逐渐突破,通过EEG-BCI精准识别“得气”的个体化神经特征,有望阐明“得气”状态与远期临床疗效之间的关系,推动针灸治疗从“经验有效”向“循证优化”跨越,最终实现基于神经证据的精准针灸医学。在此过程中,还需同步关注伦理与隐私保护问题^[87]。

5 小结

针灸“得气”作为启动针刺疗效的关键环节,其科学内涵的解析是针灸现代化研究的核心课题。传统基于fMRI的研究揭示了“得气”的脑区响应图谱,但受限于时间分辨率,难以捕捉其毫秒级的动态神经过程。因此本文提出一个基于BCI驱动的针灸“得气”闭环调控系统构建方案,将论述重心从被动解析转向主动调控。

本文系统梳理了“得气”的外周-中枢神经机制,并将其转化为BCI系统的状态检测层指标库与目标设定层依据;同时基于TEAS频率特异性调制脑电节律的文献证据,提出了以目标脑电状态为导向

的闭环调控策略,并讨论了PID与强化学习两种控制实现路径;最后设计了包含医师-患者环路与患者-大脑环路的双环闭环系统架构,前者实现BCI辅助精准施针与刺激参数自适应调控,后者通过神经反馈与Hebbian可塑性强化中枢-外周-中枢的神经重塑效应;该系统架构将有可能为构建智能化、精准化的针灸治疗新模式提供创新构想。此外,虽然本文聚焦于基于EEG的BCI闭环调控,但同步EEG-fMRI、功能性近红外光谱技术(fNIRS)等多模态脑功能检测技术可在空间定位与代谢特征方面提供补充信息,可为优化“得气”脑电特征提取与验证调控效果提供多维度依据。

当前,该领域仍面临信号伪迹处理、解码精度提升、个体差异适应及临床转化标准缺失等挑战。未来应着力于发展动态网络解码技术、深化外周-中枢动态耦合机制研究、建立标准化研究范式。随着“神工-华佗”等脑控针灸平台的临床推进,BCI驱动得气的闭环调控有望从理论构想走向技术实现,为针灸疗法从“经验有效”向“循证优化”的范式转变提供了一条具有可操作性的路径。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Wang M, Liu W L, Ge J Y, et al. The immunomodulatory mechanisms for acupuncture practice [J]. *Front Immunol*, 2023, 14: 1147718.
- [2] 吕鑫霞, 范兹麟, 李淑轩, 等. 不同针灸疗法对慢性非特异性下腰痛疼痛疗效的网状Meta分析[J]. *中西医结合慢性病学杂志*, 2026, 3(3): 29-37.
Lyu X X, Fan Z L, Li S X, et al. Network meta-analysis of different acupuncture therapies in treatment of chronic non-specific low back pain (in Chinese) [J]. *Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine on Chronic Diseases*, 2026, 3(3): 29-37.
- [3] 苏鑫, 杨森, 全婷薇, 等. 针灸对神经再生和修复的作用及其信号通路的前沿研究[J]. *时珍国医国药*, 2025, 36(10): 1938-1943.
Su X, Yang S, Quan T W, et al. Advanced research on the mechanism and signaling pathway of acupuncture on nerve regeneration and repair (in Chinese) [J]. *Journal of Li-shizhen Traditional Chinese Medicine*, 2025, 36(10): 1938-1943.
- [4] 钟峰, 曹越, 罗容, 等. 电针大肠合穴下合穴配穴治疗功能性肠病双向调节效应的临床研究[J]. *世界中医药*, 2018, 13(3): 722-726.
Zhong F, Cao Y, Luo R, et al. Clinical study on bidirectional regulation effects of electroacupuncture at Quchi (LI11) combined with Shangjuxu (ST37) in treating functional bowel disorders (in Chinese) [J]. *World Chinese Medicine*, 2018, 13(3): 722-726.

- [5] 高佳, 孟晓艳, 孙艳杰. 滋阴通络解痉法联合调神解痉针刺法治疗脑卒中后偏瘫疗效及神经功能影响研究: 评《脑卒中针灸康复诊疗》[J]. 世界中医药, 2025, 20(8): 1410.
Gao J, Meng X Y, Sun Y J. Study on the efficacy and neurological function impact of the method of nourishing yin, unblocking meridians and relaxing spasms combined with the acupuncture method of regulating spirit and relaxing spasms in the treatment of post-cerebral stroke paralysis: review of "Acupuncture Rehabilitation Diagnosis and Treatment for Cerebral Stroke" (in Chinese)[J]. World Chinese Medicine, 2025, 20(8): 1410.
- [6] Lopes Alves R, Zortea M, Mayor D, et al. Effect of different frequencies of transcutaneous electrical acupoint stimulation (TEAS) on EEG source localization in healthy volunteers: a semi-randomized, placebo-controlled, crossover study [J]. Brain Sci, 2025, 15(3): 270.
- [7] 刘雁泽, 蒋海琳, 赵晋莹, 等. 基于fMRI的针刺得气脑影像研究进展[J]. 中国中医急症, 2024, 33(11): 2056-2059, 2063.
Liu Y Z, Jiang H L, Zhao J Y, et al. Research progress of brain imaging of acupuncture for relieving qi based on fMRI (in Chinese)[J]. Journal of Emergency in Traditional Chinese Medicine, 2024, 33(11): 2056-2059, 2063.
- [8] 王单, 吕敦召, 帅纪焱, 等. 应用静息态功能磁共振技术研究针刺太溪穴对老年人脑网络的影响[J]. 中国老年学杂志, 2016, 36(12): 2986-2988.
Wang D, Lü D Z, Shuai J Y, et al. Brain network research on acupuncture at Taixi in the elderly adults based on resting-state functional magnetic resonance imaging (in Chinese)[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2016, 36(12): 2986-2988.
- [9] 汪林英, 徐春生, 朱一芳, 等. 针刺左、右侧合谷穴脑功能偏侧性的fMRI研究[J]. 中国针灸, 2015, 35(8): 806-811.
Wang L Y, Xu C S, Zhu Y F, et al. Effects of acupuncture at left and right Hegu (LI4) for cerebral function laterality (in Chinese)[J]. Chinese Acupuncture & Moxibustion, 2015, 35(8): 806-811.
- [10] Hui K K, Marina O, Claunch J D, et al. Acupuncture mobilizes the brain's default mode and its anti-correlated network in healthy subjects [J]. Brain Res, 2009, 1287: 84-103.
- [11] Hui K K S, Liu J, Marina O, et al. The integrated response of the human cerebro-cerebellar and limbic systems to acupuncture stimulation at ST36 as evidenced by fMRI[J]. NeuroImage, 2005, 27(3): 479-496.
- [12] 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.
- [13] 陈松美, 高佳佳, 张孝林, 等. 脑机接口结合功能性电刺激技术对脑卒中患者上肢运动功能影响的Meta分析[J]. 康复学报, 2025, 35(6): 582-591.
Chen S M, Gao J J, Zhang X L, et al. Effects of brain-computer interface combined with functional electrical stimulation on upper limb motor function of stroke patients: a meta-analysis (in Chinese) [J]. Rehabilitation Medicine, 2025, 35(6): 582-591.
- [14] 中国康复医学会脑机接口与康复专业委员会. 非侵入式脑机接口在神经康复临床应用中的专家共识[J/OL]. 康复学报, 2026-02-24. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=FYXB20260224001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
The Professional Committee of Brain Computer Interface and Rehabilitation of Chinese Association of Rehabilitation Medicine. Expert consensus on the clinical application of non-invasive brain-computer interfaces in neurorehabilitation [J/OL]. Rehabilitation Medicine, 2026-02-24. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=FYXB20260224001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [15] Wilson H, Golbabaee M, Proulx M J, et al. EEG-based BCI dataset of semantic concepts for imagination and perception tasks[J]. Sci Data, 2023, 10(1): 386.
- [16] Li Y C, Yu Y, Qiao X, et al. A robot arm-assisted acupuncture system with motion and force monitoring: establishment and validation [J]. Front Bioeng Biotechnol, 2025, 13: 1563263.
- [17] Yuan D, Li Y R, Wang T, et al. A closed-loop electrical stimulation system triggered by EOG for acupuncture therapy [J]. Syst Sci Control Eng, 2020, 8(1): 128-140.
- [18] Zhang H Y, Jiao L, Yang S X, et al. Brain-computer interfaces: the innovative key to unlocking neurological conditions[J]. Int J Surg, 2024, 110(9): 5745-5762.
- [19] Prasad D S, Chanamallu S R, Prasad K S. Optimized deformable convolution network for detection and mitigation of ocular artifacts from EEG signal[J]. Multimed Tools Appl, 2022, 81(21): 30841-30879.
- [20] Caldwell D J, Ojemann J G, Rao R P N. Direct electrical stimulation in electrocorticographic brain-computer interfaces: enabling technologies for input to cortex[J]. Front Neurosci, 2019, 13: 804.
- [21] Bouton C, Bhagat N, Chandrasekaran S, et al. Decoding neural activity in sulcal and white matter areas of the brain to accurately predict individual finger movement and tactile stimuli of the human hand [J]. Front Neurosci, 2021, 15: 699631.
- [22] Carelli L, Solca F, Faini A, et al. Brain-computer interface for clinical purposes: cognitive assessment and rehabilitation [J]. Biomed Res Int, 2017, 2017: 1695290.
- [23] Robinson N, Chouhan T, Mihelj E, et al. Design considerations for long term non-invasive brain computer interface training with tetraplegic CYBATHLON pilot [J]. Front Hum Neurosci, 2021, 15: 648275.
- [24] 连雅雯, 李莹华, 李贺, 等. 间歇性 θ 节律爆发式刺激联合基于运动想象的脑机接口训练对脑卒中患者手功能的影响[J]. 康复学报, 2025, 35(3): 242-249, 259.
Lian Y W, Li Y H, Li H, et al. Effects of intermittent Theta burst stimulation combined with motor imagery-based brain-computer interface training on hand function in stroke patients

- (in Chinese)[J]. Rehabilitation Medicine, 2025, 35(3): 242-249, 259.
- [25] 贺新源, 王正辉, 夏俊博, 等. 康复脑机接口与运动想象疗法在卒中弛缓性瘫痪期上肢运动功能康复中的疗效对照研究[J]. 中国卒中杂志, 2025, 20(10): 1222-1228.
He X Y, Wang Z H, Xia J B, et al. Comparative study on the efficacy of rehabilitation brain-computer interface versus motor imagery therapy in upper limb motor function rehabilitation during the flaccid paralysis phase of stroke (in Chinese)[J]. Chinese Journal of Stroke, 2025, 20(10): 1222-1228.
- [26] 刘丽旭. 融合·闭环·精准: 神经调控技术重塑卒中康复[J]. 中国卒中杂志, 2025, 20(9): 1073-1077.
Liu L X. Integration, closed-loop, precision: neuromodulation technology reshaping stroke rehabilitation (in Chinese)[J]. Chinese Journal of Stroke, 2025, 20(9): 1073-1077.
- [27] Cajigas I, Vedantam A. Brain-computer interface, neuromodulation, and neurorehabilitation strategies for spinal cord injury[J]. Neurosurg Clin N Am, 2021, 32(3): 407-417.
- [28] Abiri R, Borhani S, Sellers E W, et al. A comprehensive review of EEG-based brain - computer interface paradigms [J]. J Neural Eng, 2019, 16(1): 011001.
- [29] Gonzalez Viejo C, Fuentes S, Howell K, et al. Integration of non-invasive biometrics with sensory analysis techniques to assess acceptability of beer by consumers[J]. Physiol Behav, 2019, 200: 139-147.
- [30] 肖松, 程和平, 吴朝晖, 等. 脑机接口技术发展现状及未来展望[J]. 科学与社会, 2024, 14(3): 2-25.
Xiao S, Cheng H P, Wu Z H, et al. Brain-computer interface technology: current development status and future outlook (in Chinese)[J]. Science and Society, 2024, 14(3): 2-25.
- [31] 金传阳, 朱海滨, 熊嘉玮, 等. 基于脑-机接口的针刺手法量子学规范化研究[J]. 南京中医药大学学报, 2021, 37(4): 587-591.
Jin C Y, Zhu H B, Xiong J W, et al. Standardization research on quantification of acupuncture manipulation stimuli based on brain-computer interface (in Chinese)[J]. Journal of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2021, 37(4): 587-591.
- [32] Lu F Y, Gao J H, Wang Y Y, et al. Effects of three needling manipulations of Zusanli (ST36) on deqi sensations and surface myoelectricity in healthy participants[J]. Chin J Integr Med, 2021, 27(2): 91-97.
- [33] 刘志朋, 殷涛, 关晓光, 等. 针刺得气与手法的客观评价参数和方法初步研究[J]. 中国临床康复, 2005, 9(29): 119-121.
Liu Z P, Yin T, Guan X G, et al. Primary study on objective evaluation parameter and method of acupuncture deqi and maneuver (in Chinese) [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2005, 9(29): 119-121.
- [34] 陆凤燕, 陈安莉, 张雯晰, 等. 针刺穴位不同组织结构对得气针感及穴位肌电的影响初探[J]. 针刺研究, 2021, 46(2): 136-144.
Lu F Y, Chen A L, Zhang W X, et al. Characteristics of “deqi” and myoelectricity in different tissue structures of acupoint (in Chinese)[J]. Acupuncture Research, 2021, 46(2): 136-144.
- [35] Langevin H M, Churchill D L, Cipolla M J. Mechanical signaling through connective tissue: a mechanism for the therapeutic effect of acupuncture [J]. FASEB J, 2001, 15(12): 2275-2282.
- [36] Zhang Z J, Wang X M, McAlonan G M. Neural acupuncture unit: a new concept for interpreting effects and mechanisms of acupuncture [J]. Evid Based Complement Altern Med, 2012, 2012(1): 429412.
- [37] Tu S W, Kawanokuchi J, Takagi K, et al. Fibroblasts as key cellular targets in acupuncture therapy: a mechanistic perspective[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2025, 13: 1662525.
- [38] Li Y C, Yu Y, Liu Y H, et al. Mast cells and acupuncture analgesia[J]. Cells, 2022, 11(5): 860.
- [39] Ulloa L, Quiroz-Gonzalez S, Torres-Rosas R. Nerve stimulation: immunomodulation and control of inflammation [J]. Trends Mol Med, 2017, 23(12): 1103-1120.
- [40] Hui K K, Nixon E E, Vangel M G, et al. Characterization of the “deqi” response in acupuncture[J]. BMC Complementary Altern Med, 2007, 7(1): 33.
- [41] Yang X Y, Shi G X, Li Q Q, et al. Characterization of deqi sensation and acupuncture effect[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2013, 2013: 319734.
- [42] He T, Zheng Y J, Yan J L, et al. Skin-brain axis: neural pathways in acupuncture treatment[J]. Chin Med, 2025, 20(1): 163.
- [43] 华伟程, 朱海滨, 张建斌, 等. 基于OpenBCI的足三里穴位刺激脑电监控[J]. 计算机仿真, 2024, 41(10): 260-264.
Hua W C, Zhu H B, Zhang J B, et al. EEG monitoring of Zusanli acupoint stimulation based on OpenBCI (in Chinese) [J]. Computer Simulation, 2024, 41(10): 260-264.
- [44] Yu H T, Wu X Y, Cai L H, et al. Modulation of spectral power and functional connectivity in human brain by acupuncture stimulation[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2018, 26(5): 977-986.
- [45] Yu H T, Li F, Liu J L, et al. Evaluation of acupuncture efficacy in modulating brain activity with periodic-aperiodic EEG measurements [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2024, 32: 2450-2459.
- [46] Lee G E, Yun J M, Yang S B, et al. Deqi induction by HT7 acupuncture alters theta and alpha band coherence in human healthy subjects[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2017, 2017: 7107136.
- [47] Li K, Wang J, Li S S, et al. Latent characteristics and neural manifold of brain functional network under acupuncture [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2022, 30: 758-769.
- [48] 周鹏, 宋雨桐, 张阔, 等. 经皮穴位电刺激对大脑神经功能活动影响研究进展[J]. 航天医学与医学工程, 2019, 32(5): 463-470.
Zhou P, Song Y T, Zhang K, et al. Research progress in

- effects of transcutaneous electrical acupoint stimulation on brain neural activity (in Chinese) [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2019, 32(5): 463-470.
- [49] Shen D Y, Yang B H, Li J, et al. The potential associations between acupuncture sensation and brain functional network; a EEG study[J]. *Cogn Neurodyn*, 2025, 19(1): 49.
- [50] 谢坤男, 尹涛, 马培宏, 等. 基于脑连接组学的针刺网络调节效应特征述评[J]. *针刺研究*, 2021, 46(6): 510-514.
- Xie K N, Yin T, Ma P H, et al. Review on characteristics of acupuncture-activated network regulatory effect based on brain connectomics (in Chinese)[J]. *Acupuncture Research*, 2021, 46(6): 510-514.
- [51] Si X P, Han S L, Zhang K, et al. The temporal dynamics of EEG microstate reveals the neuromodulation effect of acupuncture with Deqi [J]. *Front Neurosci*, 2021, 15: 715512.
- [52] 方继良, Hui KS Kathleen, Liu Jing, 等. 针刺太冲穴得气及疼痛激发相对抗的脑功能网络效应 fMRI 研究[J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2012, 10(1): 4-9.
- Fang J L, Kathleen H, Liu J, et al. Deqi and sharp pain during acupuncture at Taichong eliciting the opposite functional brain network effects: an fMRI study (in Chinese) [J]. *Chinese Imaging Journal of Integrated Traditional and Western Medicine*, 2012, 10(1): 4-9.
- [53] Shi Y, Zhang S S, Li Q, et al. A study of the brain functional network of Deqi via acupuncturing stimulation at BL40 by rs-fMRI[J]. *Complement Ther Med*, 2016, 25: 71-77.
- [54] Si X P, Xiang S X, Zhang L D, et al. Acupuncture with deqi modulates the hemodynamic response and functional connectivity of the prefrontal-motor cortical network[J]. *Front Neurosci*, 2021, 15: 693623.
- [55] Dayan A, Berger A, Anholt G E. Enhanced action tendencies in obsessive-compulsive disorder: an ERP study [J]. *Behav Res Ther*, 2017, 93: 13-21.
- [56] Hsieh C L, Li T C, Lin C Y, et al. Cerebral cortex participation in the physiological mechanisms of acupuncture stimulation: a study by auditory endogenous potentials (P300) [J]. *Am J Chin Med*, 1998, 26(3/4): 265-274.
- [57] 吴永刚, 魏燕芳, 戴双燕, 等. 基于 ERP 探讨头针不同区域治疗卒中瘫痪的特异性研究[J]. *针灸临床杂志*, 2017, 33(9): 1-4.
- Wu Y G, Wei Y F, Dai S Y, et al. Specificity study of scalp acupuncture on different areas for stroke paralysis based on ERP (in Chinese) [J]. *Journal of Clinical Acupuncture and Moxibustion*, 2017, 33(9): 1-4.
- [58] 李飞, 蔡荣林, 翟亮, 等. 辨经刺井配合颞三针对早期血管性认知障碍患者 P300 的影响[J]. *中国针灸*, 2013, 33(9): 784-788.
- Li F, Cai R L, Zhai L, et al. Impacts of acupuncture at Jing-well points on the differentiated meridians and temple-three-needle therapy on P300 of patients with early vascular cognitive impairment (in Chinese)[J]. *Chinese Acupuncture & Moxibustion*, 2013, 33(9): 784-788.
- [59] Kim M S, Kim H D, Seo H D, et al. The effect of acupuncture at PC-6 on the electroencephalogram and electrocardiogram [J]. *Am J Chin Med*, 2008, 36(3): 481-491.
- [60] Nihonmatsu A, Kudo T, Kawanami K, et al. Effect of acupuncture stimulation on the long latency reflex [J]. *JJSAM*, 2020, 70(1): 26-37.
- [61] Kurtzer I L. Long-latency reflexes account for limb biomechanics through several supraspinal pathways [J]. *Front Integr Neurosci*, 2014, 8: 99.
- [62] Yu H T, Zeng F Y, Liu D L, et al. Neural manifold decoder for acupuncture stimulations with representation learning: an acupuncture-brain interface [J]. *IEEE J Biomed Heal Inform*, 2025, 29(6): 4147-4160.
- [63] Chen L, Yin T, He Z X, et al. Deqi sensation to predict acupuncture effect on functional dyspepsia: a machine learning study [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2022, 2022: 4824575.
- [64] Yin T, Ma P H, Tian Z L, et al. Machine learning in neuroimaging: a new approach to understand acupuncture for neuroplasticity [J]. *Neural Plast*, 2020, 2020(1): 8871712.
- [65] Schirrmester R T, Springenberg J T, Fiederer L D J, et al. Deep learning with convolutional neural networks for EEG decoding and visualization [J]. *Hum Brain Mapp*, 2017, 38(11): 5391-5420.
- [66] Zeyda F, Aranyi G, Charles F, et al. An empirical analysis of neurofeedback using PID control systems [C]//2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2015, Hong Kong, China. IEEE, 2015: 3197-3202.
- [67] Humaidan D, Xu J H, Zrenner C, et al. Personalized closed-loop rTMS using reinforcement learning to optimize phase-targeted stimulation of the SMA-M1 network [J]. *Brain Stimul*, 2025, 18(1): 543.
- [68] Cho C H, Huang P J, Chen M C, et al. Closed-loop deep brain stimulation with reinforcement learning and neural simulation [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2024, 32: 3615-3624.
- [69] Zhu L X, Zhao Y N, Jin X K, et al. Design and implementation of electroacupuncture: a study of prefrontal EEG characteristics under taVNS [J]. *IEEE Sens J*, 2024, 24(20): 32533-32545.
- [70] Ming D, Bai Y R, Liu X Y, et al. Brain-computer interface technique for electro-acupuncture stimulation control [C]//2010 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, 2010, Taranto, Italy. IEEE, 2010: 33-37.
- [71] Ren C L, Li X M, Gao Q, et al. The effect of brain-computer interface controlled functional electrical stimulation training on rehabilitation of upper limb after stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. *Front Hum Neurosci*, 2024, 18: 1438095.
- [72] 申亚峰, 薛德友, 焦德让. 脑机接口联合功能性电刺激在卒中康复中的研究进展 [J]. *中国临床神经外科杂志*, 2025,

- 30(12): 747-750.
- Shen Y F, Xue D Y, Jiao D R. Research advances in brain-computer interface combined with functional electrical stimulation for stroke rehabilitation (in Chinese)[J]. Chinese Journal of Clinical Neurosurgery, 2025, 30(12): 747-750.
- [73] 何家恺, 赵亚楠, 贾宝辉, 等. 闭环式神经调控技术给针灸学科带来的机遇和挑战[J]. 针刺研究, 2021, 46(6): 451-454, 491.
- He J K, Zhao Y N, Jia B H, et al. Closed-loop neuromodulation technique brings new opportunities and challenges to acupuncture and moxibustion therapies (in Chinese)[J]. Acupuncture Research, 2021, 46(6): 451-454, 491.
- [74] Yuan Z W, Peng Y, Wang L S, et al. Effect of BCI-controlled pedaling training system with multiple modalities of feedback on motor and cognitive function rehabilitation of early subacute stroke patients[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2021, 29: 2569-2577.
- [75] Tsai P C, Akpan A, Tang K T, et al. Brain computer interfaces for cognitive enhancement in older people - challenges and applications: a systematic review [J]. BMC Geriatr, 2025, 25(1): 36.
- [76] Zhou Q, Cheng R D, Yao L, et al. Neurofeedback training of alpha relative power improves the performance of motor imagery brain-computer interface [J]. Front Hum Neurosci, 2022, 16: 831995.
- [77] Zhang H, Chen H, Yuan Z Q, et al. Neurofeedback training for children with ADHD using individual beta rhythm [J]. Cogn Neurodyn, 2022, 16(6): 1323-1333.
- [78] Jia J. Exploration on neurobiological mechanisms of the central-peripheral-central closed-loop rehabilitation [J]. Front Cell Neurosci, 2022, 16: 982881.
- [79] Ma Y N, Karako K, Song P P, et al. Integrative neurorehabilitation using brain-computer interface: from motor function to mental health after stroke [J]. Biosci Trends, 2025, 19(3): 243-251.
- [80] Wang Z, Liu Y, Huang S F, et al. Enhancing ERD activation and functional connectivity via the sixth-finger motor imagery in stroke patients[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2024, 32: 3902-3912.
- [81] 陆洁, 王平, 李洪艳, 等. 脑机接口结合针刺疗法对脑卒中患者运动和认知功能的影响[J]. 中国临床研究, 2025, 38(5): 725-729.
- Lu J, Wang P, Li H Y, et al. Effect of brain computer interface combined with acupuncture therapy on motor and cognitive function in stroke patients (in Chinese)[J]. Chinese Journal of Clinical Research, 2025, 38(5): 725-729.
- [82] Liu J J, Li Y W, Zhao D J, et al. Efficacy and safety of brain-computer interface for stroke rehabilitation: an overview of systematic review [J]. Front Hum Neurosci, 2025, 19: 1525293.
- [83] 许未晴, 陈磊, 隋秀峰, 等. 脑机接口: 脑信息读取与脑活动调控技术[J]. 科学通报, 2023, 68(8): 927-943.
- Xu W Q, Chen L, Sui X F, et al. Brain-computer interface: brain information reading and activity control (in Chinese)[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(8): 927-943.
- [84] Jang J C, Jung J, Lee H, et al. Multidimensional aspects of deqi sensations in MASS and ASQ assessment: a pilot study [J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2017, 2017: 6249329.
- [85] Qiu W J, Yan B, He H J, et al. Dynamic functional connectivity analysis of Taichong (LR3) acupuncture effects in various brain regions[J]. Neural Regen Res, 2012, 7(6): 451-456.
- [86] Schabus M, Griessenberger H, Gnjezda M T, et al. Better than sham? A double-blind placebo-controlled neurofeedback study in primary insomnia[J]. Brain, 2017, 140(4): 1041-1052.
- [87] 黄永镇. 脑机接口技术的应用风险及其法律规制[J]. 华南理工大学学报(社会科学版), 2025, 27(1): 24-36.
- Huang Y Z. Application risks and legal regulations of brain-computer interface technology (in Chinese)[J]. Journal of South China University of Technology (Social Science Edition), 2025, 27(1): 24-36.

收稿日期:2026-04-02 修回日期:2026-05-20