

烧伤康复中功能训练机器人的研究进展

田亚菲 刘毅

兰州大学第二医院烧伤整形与创面修复外科,兰州 730030

通信作者:刘毅,Email:liuyi196402@163.com

【摘要】 深度烧伤患者极易出现瘢痕增生或挛缩,导致肢体功能障碍等问题,严重影响患者生活质量,使其难以回归社会,因此深度烧伤后的康复治疗尤为重要。目前运动疗法在烧伤康复中发挥重要作用,但多以人工持续辅助训练、手法牵伸活动等给予患者肢体活动锻炼,纠正患者肢体功能障碍。随着科技的不断进步,功能训练机器人应运而生。功能训练机器人的出现节约了人力,提供给患者精细、标准化的功能锻炼治疗。该文主要从制作技术与多技术整合方面对目前功能训练机器人的革新发展以及功能训练机器人在烧伤康复领域应用的优势进行介绍。

【关键词】 烧伤; 康复; 功能训练机器人; 功能训练
基金项目:国家自然科学基金重点项目(BWS11CD61)

Research advances on functional training robots in burn rehabilitation

Tian Yafei, Liu Yi

Department of Burns and Plastic Surgery & Wound Repair Surgery, Lanzhou University Second Hospital, Lanzhou 730030, China

Corresponding author: Liu Yi, Email: liuyi196402@163.com

【Abstract】 Patients with deep burns are prone to suffer cicatrix hyperplasia or contracture, leading to problems including dysfunction in limbs, which impacts patients' life quality and makes it difficult for them to return to society. Thereby, the rehabilitation treatment after deep burns is particularly important. Currently, exercise therapy plays an important role in burn rehabilitation, which is mainly based on therapies such as continuous manual assistance training and manual stretching practice to provide patients with physical exercise to limbs and to correct the functional dysfunction of limbs in patients. With the continuous progress in technology, functional training robots have been developed to meet the needs. The emergence of functional training robots saves manpower and provides patients refined and standardized functional exercise treatment. From the aspects of production technology and multi-technology integration, this paper mainly introduces the recent innovation and development of functional

training robots and the advantages of the application of functional training robots in the field of burn rehabilitation.

【Key words】 Burns; Rehabilitation; Functional training robots; Functional training

Fund program: Key Program of National Natural Science Foundation of China (BWS11CD61)

深度烧伤患者创面愈合后,仍面临着肌肉萎缩、瘢痕增生、感觉异常、关节畸形、功能障碍等诸多问题,造成患者生活质量严重下降,难以回归社会^[1]。因此给予烧伤患者康复治疗尤为重要,系统康复方案包括功能改善(康复训练和治疗)、辅助器具(矫形器、弹力衣)、肢体替代(假肢和轮椅)和环境改造(无障碍设施和外界的态度)等^[2]。烧伤患者需要物理治疗、作业治疗、手法治疗等多样化的康复治疗,其中运动疗法在烧伤康复中发挥重要作用。运动疗法即通过各种主动、被动的肢体活动训练以改善患者肢体血液循环、提高神经肌肉功能、对抗瘢痕挛缩牵拉、纠正肢体畸形以及功能障碍等^[3]。

传统运动疗法多依靠康复治疗师给予烧伤患者主被动训练,需要采用一对一,甚至多对一模式,占用大量人力医疗资源,且消耗康复治疗师大量体力。另外,人工康复的训练强度、持久性、客观性、精确性、一致性均难以保证,且很难根据客观康复数据来评估康复治疗效果。为应对人工康复训练方法的不足,功能训练机器人应运而生,它是将机器人技术与康复相结合的一种自动化康复训练设备,可执行重复、繁重的劳动任务,并实现标准化、精确化、自动化的功能康复训练。

在烧伤康复领域,功能训练机器人虽然极大地节约了人力医疗资源,给予患者系统、标准的康复训练,但目前临床使用的机器人存在诸多不足,如制作材料多为刚性材质,故机体体积大且笨重,灵活性差,仅能辅助患者肢体完成单一方向、角度、轨迹的运动训练,而无法完成例如肩关节等需要多方向、多角度、多个轨迹的运动训练,训练模式单调且缺乏交互性等。近年来,随着科技的不断进步,材料学、机械学、计

DOI: 10.3760/cma.j.cn501120-20210416-00131

本文引用格式:田亚菲,刘毅.烧伤康复中功能训练机器人的研究进展[J].中华烧伤与创面修复杂志,2022,38(6):580-584. DOI: 10.3760/cma.j.cn501120-20210416-00131.

Tian YF,Liu Y.Research advances on functional training robots in burn rehabilitation[J].Chin J Burns Wounds,2022,38(6):580-584. DOI: 10.3760/cma.j.cn501120-20210416-00131.



算机学、电子学等学科的迅猛发展,新型功能训练机器人不断问世。本文主要介绍烧伤康复领域中,功能训练机器人的制作技术与多技术整合 2 个方面的革新发展以及功能训练机器人的优势进行综述。

1 机器人制作技术的改进

1.1 制作材料的改进

传统功能训练机器人多由刚性材料构成,机体较笨重,操作时适应能力差。由于材质性能的不足,传统功能训练机器人仅可对人体大关节部位进行运动锻炼,且多仅为单一方向、角度、轨迹的训练,对于如手部等多关节部位则无法进行全面、精细化功能训练,因此急需改进机器人的制作材料。应用新型研发的软体材料制作的软体功能训练机器人,则可很好地解决传统刚性功能训练机器人存在的问题。软体功能训练机器人主要由凝胶流体、弹性物质、形状记忆聚合物等材料的组件构成,具有灵活、轻巧、易于成型、使用安全、易于维护等诸多优点^[4]。Haghshenas-Jaryani 等^[5]设计研发了一款可穿戴于患者手部的软体外骨骼功能训练机器人,该机器人由新型软体材料构成,由气动控制装置驱动,具有良好的轻便性和柔顺性,用于患者手部训练时,机器带动关节运动的轨迹与正常手一致。该款机器人较刚性材料机器人重量轻、体积小,易于安装固定于肢体,患者应用其进行功能锻炼时运动角度灵活多变,可使手部功能得到很好的锻炼。

新型软体材料的问世可使功能训练机器人对患者进行更加精密化的训练,如进行多运动方向、多活动自由度训练的手指关节活动训练,尤其是拇指的训练。目前已研发出多种手部功能训练机器人,然而很少有关于拇指功能训练机器人的研究。手的主要功能是抓握、操纵物体,其中拇指承担了手部整体功能的 40%,但因为拇指活动范围广泛,且第 1 掌骨周围软组织厚实,使机械装置难以被固定佩戴在此处,故很难研发设计出拇指训练机器人,而新型软体材料帮助学者们攻克了这一难题。Shiota 等^[6]研发了一款由高弹性软体材料制成的纤维增强型软体拇指功能训练机器人,机器人装配有手辅助锻炼系统的纤维增强弹性体驱动器,该系统可用精准的力度控制手指的弯曲角度、活动自由度,可使拇指的外展、内收及伸展、屈曲活动角度得到充分锻炼,可满足拇指烧伤后其掌指关节多活动自由度锻炼的需求。

此外,学者们还将软体材料与刚性材料相互结合,生产出刚柔耦合机器人,该机器人既具备刚性机器人的稳定性,又具备软体机器人的灵活性。有研究者研发出了一款刚柔混合型外骨骼机器人手套,采用的软体材料可使机器顺应手部运动,刚性材料可较好地稳固关节并固定机器配备的各类电子元件设备,通过刚柔结合可更好地给予手部烧伤患者功能锻炼^[7]。

1.2 驱动装置的改进

传统功能训练机器人常用的驱动装置包括液压驱动器、气压驱动器、电机驱动器等。液压驱动器运行平稳、工作效率高,但机体体积大、内置液压油易泄漏、安全清洁性差^[8]。

气压驱动器器械结构简单、能源成本低、驱动系统具有缓冲作用,但装置体积大、气压低、稳定性差、输出功率低^[9]。电机驱动器易于控制、成本低廉、环保无污染,但安全性、轻便性、柔顺性相对较差^[10]。气动人工肌肉是由外部提供的压缩空气驱动,通过推拉进行驱动,其过程与人体肌肉运动相似,受到了诸多学者的关注。气动人工肌肉可提供强大的驱动力而装置自身小巧轻便,在达到设定的推拉极限时自动制动,不会突破预定的安全力度范围,不会因为驱动力过大造成训练时关节过伸过屈等问题,安全性高,且多个气动人工肌肉可按任意方向、位置组合,故可将气动人工肌肉按类似人体关节肌肉分布进行安装,以此模拟正常人体关节肌肉收缩带动的关节转动轨迹及力度^[11]。Das 等^[12]设计了一款力反馈气动人工肌肉手训练机器人,患者佩戴该装置后,阀门会设定所需的气体压力,调节气动人工肌肉进气量,进而可使气动人工肌肉精准调控拉力驱动负载,其驱动力的产生与人体肌肉工作特性类似,且其力与长度特性曲线与生物肌肉十分相似,并且当机器人传感装置检测到的关节弯曲或伸展角度达到所需值时,该装置就会停止气动收缩,气动人工肌肉停止移动。因此,采用气动人工肌肉驱动的机器人,可精准控制训练力度、强度,避免力度过大对患者造成损伤,特别是深度烧伤后创面形成的瘢痕质地坚硬且缺乏弹性,锻炼强度过大极易造成瘢痕撕裂。

1.3 阻力装置的改进

多数功能训练机器人除给予烧伤患者被动训练,多兼具主动抗阻力训练功能,即烧伤患者使用机器人后,在肢体主动进行屈伸等活动时,机器人可提供不同程度的阻力对抗患者肢体活动,机器不断增强的抗阻力训练可不断提升患者肢体的肌肉力量和运动能力。目前主动训练机器人所用阻力装置主要包括电动、气动、液压装置,这些装置存在机体繁重、精确性差、安全性欠缺等问题。磁流变液的应用解决了这些问题,磁流变液是一种以矿物油、硅油或水等为溶剂的微米级磁性颗粒悬浮液,在无磁场下表现为液态;在强磁场时黏度会大幅增加,呈现类似于固体的力学特性;撤去磁场即可重新恢复为液态。磁流变阻尼器便是利用磁流变液这一特性而制作的一种阻尼装置,该装置小巧轻便,可精确控制阻力大小^[13]。Liu 等^[14]研发了一款外骨骼手指功能训练机器人,主动训练模式下外骨骼手指功能训练机器人装配的磁流变阻尼器提供运动阻力,使患者手指克服阻力完成弯曲或拉伸等动作训练。磁流变阻尼器可通过调节电流大小控制磁场强度,进而精确调控阻尼器产生的阻力,满足不同康复阶段、手指肌肉的训练强度不同的需求,可不断提升患者自身肌肉力量,以对抗因烧伤后制动引起的关节僵硬或烧伤创面瘢痕形成后瘢痕挛缩牵拉等问题。

1.4 传感控制器的改进

传统功能训练机器人仅提供全自动、标准化的单纯被动训练。在烧伤康复的早期阶段,患者因烧伤创面疼痛、长期卧床导致肌肉萎缩、瘢痕挛缩牵拉等,难以完成自主运动,需依靠机器人进行单纯被动训练。而随着功能锻炼的不断加

强,患者自主活动力量逐渐增加,需逐渐减少机械辅助力量,鼓励患者依靠自身力量完成目标训练^[15]。为此,Washabaugh等^[16]开发了一款新型上肢功能训练机器人,在患者完成运动目标过程中,机器人依靠安装的传感控制器不断检测患者肢体产生的力量,进而相应减少机器给予患者的被动驱动力,尽可能使患者利用自身肌肉力量完成运动目标,不断提升患者肌肉力量。功能训练机器人需要安装精密的传感控制器准确感知患者力量,但目前多数功能训练机器人安装的是工业传感器,这些仪器存在诸多不足:体积大、较重、不易安装固定、精确性欠佳、易受噪声及温度等外部环境干扰,故并不适合^[17]。Mancisidor等^[18]开发的装配有虚拟传感器的机器人极好地解决了这些问题。不同于传统传感器,虚拟传感器不是直接测量数据的物理传感器,它是一个数学计算模型。该款传感器通过整合机器人原本配备的成本低廉的光电编码器、线性电位器等传感器输出的数据,通过一个系统模型虚拟加工、虚拟仿真输出所需要的力交互反馈数据,而不是实际安装一台真实力反馈传感器,且虚拟传感器输出的数据与实际传感器无明显差异,但使用虚拟传感器极大地节约了机器人的制造成本,简化了机器人部件构造。

2 多技术整合用于烧伤康复治疗

2.1 结合虚拟现实技术

传统康复治疗模式单一、过程枯燥,患者难以长时间坚持,主动参与程度不高,特别是烧伤儿童因惧怕疼痛,对物理治疗易产生焦虑、抗拒^[19]。虚拟现实技术的出现可有效解决这些问题^[20]。虚拟现实技术是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统,其虚拟环境与现实世界相差无几,可给予人们视、听、嗅、味、触等感知刺激,其超强的仿真系统可实现人机交互,最大限度还原真实世界的环境体验,使人产生身临其境的感受^[21]。近几年虚拟现实技术已发展为沉浸式虚拟现实技术,沉浸式虚拟现实技术是指利用三维图形生成技术、多传感交互技术以及高分辨率显示技术等生成三维逼真的虚拟环境,使得使用者完全沉浸于虚拟世界中,感受不到真实世界的存在。如利用头盔式虚拟显示设备将使用者对真实外界的视觉、听觉封闭,使其产生虚拟视觉、听觉;利用数据手套将使用者的手感知系统封闭,产生虚拟触动感。目前理论研究认为,虚拟现实技术可通过刺激大脑视觉皮层,使感官沉浸于虚拟世界的环境体验,进而分散使用者对真实环境受到的伤害性刺激的反应,增强机体适应真实环境伤害性刺激的能力^[22]。虚拟现实技术现已被广泛用于临床治疗焦虑症、控制疼痛及康复治疗中等^[23]。Garrett等^[24]利用沉浸式虚拟现实技术治疗癌症患者的慢性疼痛,且其治疗效果较使用镇痛药物安全、有效。Lindner等^[25]利用虚拟现实技术模拟真实演讲环境治疗患者公众演讲焦虑症;Khadra等^[26]利用虚拟现实技术有效分散了烧伤儿童浸浴烧伤创面时对创面疼痛刺激的注意力,减轻了疼痛感。

虚拟现实技术在烧伤康复领域也同样极具潜力^[27]。Parry等^[28]观察到,健康儿童在进行交互式虚拟电子游戏时,

肩关节屈曲、外展和肘关节屈曲活动度明显高于接电话、使用餐具吃饭、梳头等日常生活时的活动度。这提示虚拟现实技术不仅可增加烧伤患者训练时活动度,且其中虚拟游戏的趣味性更可分散患者训练时疼痛感,促进烧伤患者积极主动地参与运动锻炼,将此技术与功能训练机器人整合,可极大提升康复治疗效果。Samhan等^[29]给予对照组手部烧伤患儿蜡疗、按摩及主、被动关节运动等传统手部康复治疗,而对试验组患儿在对照组的基础上,增加由功能训练机器人给予的交互式手部康复训练。该款功能训练机器人将机器人辅助训练与虚拟现实游戏结合,机器人给予烧伤患儿可控强度的主、被动手指屈伸运动,以此提高关节活动度,增强肌肉力量,增强手部功能;虚拟现实游戏提供给烧伤患儿轻松趣味的康复环境,有效缓解烧伤患儿功能锻炼时产生的疼痛感,增加烧伤患儿在功能锻炼时的专注度,结果显示试验组烧伤患儿康复效果明显优于对照组。

2.2 结合神经肌肉电刺激技术

烧伤患者常由于创面疼痛、植皮制动、长期卧床等因素使肢体缺乏功能锻炼,导致肢体失用性肌萎缩^[30]。功能训练机器人可为烧伤患者提供高强度和具有重复性的康复训练,然而机器人只能通过连续被动辅助的方式支配肢体运动,无法直接激活肢体运动所需的肌肉群,必须依靠患者积极主动地进行收缩肌肉锻炼,才能达到最佳康复训练效果。将神经肌肉电刺激技术整合到机器人设计中便可有效解决这一问题^[31]。神经肌肉电刺激技术是指通过使用20~50 Hz的低频电流刺激特定肌肉群使其收缩,继而达到锻炼肌肉、恢复肌肉功能的技术^[32]。康复治疗中神经肌肉电刺激能有效地增强感觉反馈,提高肌肉力量,进而增加肌肉质量、促进自主肌肉控制,并且减少肌肉痉挛,提升患者运动功能;对于一些非神经病变引起的失用性肌萎缩还可起到抑制作用^[33]。Huang等^[34]观察到,整合神经肌肉电刺激技术的功能训练机器人对因脑卒中致上肢运动障碍的患者进行上肢关节活动康复训练的治疗效果明显优于单纯功能训练机器人,说明整合神经肌肉电刺激技术的机器人可更大程度地缓解肌肉痉挛,更好地提高肌肉自主运动能力和肌肉协调性。

3 小结

功能训练机器人目前已被广泛应用于烧伤康复领域,因其可为烧伤康复期患者提供精确的运动训练,可全程无疲劳执行重复、标准化康复训练,对患者因烧伤造成的肢体肌肉萎缩、关节僵硬挛缩、运动功能障碍有良好的康复治疗效果。随着科学技术的发展,功能训练机器人得到不断改进,具有材质柔软轻便、体积小巧、治疗精细化、模式多样等诸多优势,但仍存在很多不足,如多只针对单一部位,如肩、手等的治疗,而无法同时给予全身多部位功能训练;机器人无法像康复治疗师一样与患者沟通交流,缺乏人文关怀;机器人生产成本高,治疗价格昂贵,难以普及等^[35]。相信随着未来医疗科技领域的不断发展,学者们会不断研发和改良功能训练机器人,改进其不足、提高其功能,使其更好地为烧伤患者

服务。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Tan J, Chen J, Zhou J, et al. Joint contractures in severe burn patients with early rehabilitation intervention in one of the largest burn intensive care unit in China: a descriptive analysis[J/OL]. *Burns Trauma*, 2019, 7: 1-10[2022-05-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31139664/>. DOI:10.1186/s41038-019-0151-6.
- [2] 励建安. 人机共融,天人合一——关于康复机器人应用与发展的思考[J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(8): 897-899. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2020.08.001.
- [3] Schieffeler DR, van Breda E, Gebruers N, et al. Status of adult inpatient burn rehabilitation in Europe: are we neglecting metabolic outcomes? [J/OL]. *Burns Trauma*, 2021, 9: tkaa039 [2022-05-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33709001/>. DOI: 10.1093/burnst/tkaa039.
- [4] Shahid T, Gouwanda D, Nurzaman SG, et al. Moving toward soft robotics: a decade review of the design of hand exoskeletons[J]. *Biomimetics (Basel)*, 2018, 3(3): 17. DOI: 10.3390/biomimetics3030017.
- [5] Haghshenas-Jaryani M, Patterson RM, Bugnariu N, et al. A pilot study on the design and validation of a hybrid exoskeleton robotic device for hand rehabilitation[J]. *J Hand Ther*, 2020, 33(2): 198-208. DOI:10.1016/j.jht.2020.03.024.
- [6] Shiota K, Kokubu S, Tarvainen TVJ, et al. Enhanced Kapandji test evaluation of a soft robotic thumb rehabilitation device by developing a fiber-reinforced elastomer-actuator based 5-digit assist system[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 111: 20-30. DOI: 10.1016/j.robot.2018.09.007.
- [7] Rose CG, O'Malley MK. Hybrid rigid-soft hand exoskeleton to assist functional dexterity[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(1):73-80. DOI:10.1109/LRA.2018.2878931.
- [8] Suzumori K, Faudzi AA. Trends in hydraulic actuators and components in legged and tough robots: a review[J]. *Advanced Robotics*, 2018, 32(9): 1-19. DOI: 10.1080/01691864.2018.1455606.
- [9] Ma X, Yuan R, Fang S. The system study of pneumatic exoskeleton rehabilitation manipulator[J]. *J Eng*, 2019, 2019(13): 181-185. DOI:10.1049/joe.2018.9005.
- [10] Ho TY, Chen YJ, Chen PH. The design and implementation of a motor drive for foot rehabilitation[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2016, 56: 795-806. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2016.07.017.
- [11] Kalita B, Dwivedy SK. Nonlinear dynamics of a parametrically excited pneumatic artificial muscle (PAM) actuator with simultaneous resonance condition[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 135: 281-297. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.01.031.
- [12] Das S, Kishishita Y, Tsuji T, et al. Forcehand glove: a wearable force-feedback glove with pneumatic artificial muscles (PAMs) [J]. *IEEE Robotics & Automation Letters*, 2018, 3(3):2416-2423. DOI:10.1109/LRA.2018.2813403.
- [13] Gao F, Liu YN, Liao WH. Optimal design of a magnetorheological damper used in smart prosthetic knees[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(3): 035034. DOI: 10.1088/1361-665X/aa5494.
- [14] Liu Q, Zuo J, Zhu C, et al. Design and control of soft rehabilitation robots actuated by pneumatic muscles: state of the art[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 113: 620-634. DOI:10.1016/j.future.2020.06.046.
- [15] Proietti T, Crocher V, Roby-Brami A, et al. Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation: a review on control strategies[J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2016, 9:4-14. DOI:10.1109/RBME.2016.2552201.
- [16] Washabaugh EP, Treadway E, Gillespie RB, et al. Self-powered robots to reduce motor slacking during upper-extremity rehabilitation: a proof of concept study[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2018, 36(6):693-708. DOI:10.3233/RNN-180830.
- [17] Grosu V, Grosu S, Vanderborgh B, et al. Multi-axis force sensor for human-robot interaction sensing in a rehabilitation robotic device[J]. *Sensors (Basel)*, 2017, 17(6): 1294. DOI: 10.3390/s17061294.
- [18] Mancisidor A, Zubizarreta A, Cabanes I, et al. Virtual sensors for advanced controllers in rehabilitation robotics[J]. *Sensors (Basel)*, 2018, 18(3):785. DOI:10.3390/s18030785.
- [19] Scapin S, Echevarria-Guanilo ME, Boeira Fuculo Junior PR, et al. Virtual reality in the treatment of burn patients: a systematic review[J]. *Burns*, 2018, 44(6): 1403-1416. DOI: 10.1016/j.burns.2017.11.002.
- [20] Emmelkamp P, Meyerbröker K, Morina N. Virtual reality therapy in social anxiety disorder[J]. *Curr Psychiatry Rep*, 2020, 22(7):32. DOI:10.1007/s11920-020-01156-1.
- [21] Schieffeler DR, van Breda E, Gebruers N, et al. Data from Campus Bio-Medico University update knowledge in telerehabilitation (virtual reality, augmented reality, gamification, and telerehabilitation: psychological impact on orthopedic patients' rehabilitation[J/OL]. *Burns Trauma*, 2021, 9: tkaa039[2022-05-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33709001/>. DOI: 10.1093/burnst/tkaa039.
- [22] Luo H, Cao C, Zhong J, et al. Adjunctive virtual reality for procedural pain management of burn patients during dressing change or physical therapy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Wound Repair Regen*, 2019, 27(1):90-101. DOI:10.1111/wrr.1.
- [23] Wieland LS. Psychological interventions for needle-related procedural pain and distress in children and adolescents: summary of a cochrane review[J]. *Explore (NY)*, 2019, 15(1):74-75. DOI:10.1016/j.explore.2018.10.014.
- [24] Garrett BM, Tao G, Taverner T, et al. Patients perceptions of virtual reality therapy in the management of chronic cancer pain[J]. *Heliyon*, 2020, 6(5):e03916. DOI:10.1016/j.heliyon.2020.e03916.
- [25] Lindner P, Dagöo J, Hamilton W, et al. Virtual reality exposure therapy for public speaking anxiety in routine care: a single-subject effectiveness trial[J]. *Cogn Behav Ther*, 2021, 50(1): 67-87. DOI:10.1080/16506073.2020.1795240.
- [26] Khadra C, Ballard A, Paquin D, et al. Effects of a projector-based hybrid virtual reality on pain in young children with burn injuries during hydrotherapy sessions: a within-subject randomized crossover trial[J]. *Burns*, 2020, 46(7):1571-1584. DOI: 10.1016/j.burns.2020.04.006.
- [27] Rose T, Nam CS, Chen KB. Immersion of virtual reality for rehabilitation - review[J]. *Appl Ergon*, 2018, 69: 153-161. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.01.009.
- [28] Parry I, Carbullido C, Kawada J, et al. Keeping up with video game technology: objective analysis of Xbox Kinect™ and PlayStation 3 Move™ for use in burn rehabilitation[J]. *Burns*, 2014, 40(5):852-859. DOI:10.1016/j.burns.2013.11.005.
- [29] Samhan AF, Abdelhalim NM, Elnaggar RK. Effects of interactive robot-enhanced hand rehabilitation in treatment of paediatric hand-burns: a randomized, controlled trial with 3-months

follow-up[J]. Burns, 2020, 46(6): 1347-1355. DOI: 10.1016/j.burns.2020.01.015.

[30] Price K, Moiemmen N, Nice L, et al. Patient experience of scar assessment and the use of scar assessment tools during burns rehabilitation: a qualitative study[J/OL]. Burns Trauma, 2021, 9: tkab005[2022-05-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34212058/>. DOI:10.1093/burnst/tkab005.

[31] Smith N, Hotze R, Tate AR. A novel rehabilitation program using neuromuscular electrical stimulation (NMES) and taping for shoulder pain in swimmers: a protocol and case example[J]. Int J Sports Phys Ther, 2021, 16(2): 579-590. DOI: 10.26603/001c.21234.

[32] Rong W, Li W, Pang M, et al. A Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES) and robot hybrid system for multi-joint coordinated upper limb rehabilitation after stroke[J]. J Neuroeng Rehabil, 2017, 14(1):34. DOI:10.1186/s12984-017-0245-y.

[33] Salazar AP, Pagnussat AS, Pereira GA, et al. Neuromuscular electrical stimulation to improve gross motor function in children with cerebral palsy: a meta-analysis[J]. Braz J Phys Ther, 2019, 23(5):378-386. DOI:10.1016/j.bjpt.2019.01.006.

[34] Huang Y, Nam C, Li W, et al. A comparison of the rehabilitation effectiveness of neuromuscular electrical stimulation robotic hand training and pure robotic hand training after stroke: a randomized controlled trial[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2020, 56: 101723. DOI: 10.1016/j.bspc.2019.101723.

[35] 龙艺,贾赤宇. 现代烧伤康复应用技术进展[J]. 中华烧伤杂志, 2012, 28(5): 370-373. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1009-2587.2012.05.015.

(收稿日期:2021-04-16)

《中华烧伤与创面修复杂志》第六届编辑委员会编辑委员名单

终身顾问 盛志勇 程天民 王正国 樊代明 付小兵 夏照帆 卞修武 顾晓松 李校堃
 顾问 肖光夏 杨宗城 汪仕良 孙永华 柴家科 黄跃生 岑 瑛 王 旭
 名誉总编辑 彭毅志
 总 编 辑 罗高兴

以下按姓氏拼音排序

副总编辑 郭光华 韩春茂 胡大海 邰京宁 梁光萍 刘 毅 吕国忠 吴 军 谢卫国
 姚咏明

常务编辑委员 官 浩 贺伟峰 李孝建 李宗瑜 刘 琰 陆树良 马显杰 申传安 沈余明
 孙炳伟 谭 谦 王达利 王一兵 夏成德 肖仕初 徐庆连 于家傲 袁志强
 张丕红 张庆富 张 逸 章一新

编辑委员 巴 特 陈国贤 陈 炯 陈俊杰 陈 欣 陈 旭 陈旭林 陈昭宏 程 飏
 崔正军 邓 君 范锟铄 方 勇 冯世海 冯正直 官 浩 郭光华 韩春茂
 韩军涛 郝岱峰 贺伟峰 胡大海 邰京宁 黄 沙 霍 然 姜笃银 金培生
 赖 文 雷 晋 李德绘 李小兵 李晓亮 李孝建 李学拥 李 毅 李 智
 李宗瑜 梁光萍 刘文军 刘小龙 刘旭盛 刘 琰 刘 毅 陆树良 罗高兴
 吕大伦 吕国忠 马朋林 马显杰 潘云川 彭 曦 齐鸿燕 邱 林 荣新洲
 申传安 沈余明 沈运彪 史春梦 宋保强 宋国栋 宋华培 孙炳伟 孙天骏
 谭 谦 唐洪泰 陶 克 童亚林 王达利 王德运 王光毅 王凌峰 王新刚
 王 杨 王一兵 魏在荣 吴 健 吴 军 吴银生 夏成德 肖厚安 肖 健
 肖仕初 谢 挺 谢卫国 徐庆连 颜 洪 杨 磊 姚咏明 于家傲 袁志强
 曾元临 詹剑华 张恒木 张家平 张建祥 张明华 张丕红 张 勤 张庆富
 张 逸 章一新 赵耀华 赵永健 朱世辉

以下按英文首字母排序

Chong Si Jack(新加坡) David N. Herndon(美国) Fiona Wood(澳大利亚)
 Malcolm Xing(邢孟秋,加拿大) Naiem S. Moiemmen(英国) Ronald G. Tompkins(美国)
 Steven E. Wolf(美国) Tina L. Palmieri(美国) Yong-Ming Yu(尤永明,美国)