

可穿戴设备在脊髓损伤康复中的应用及发展现状

杜燕宣¹, 李金波²

【关键词】 可穿戴设备; 脊髓损伤; 现状; 康复

【中图分类号】 R49; R683.2 【DOI】 10.3870/zgkf.2022.03.013

脊髓损伤(Spinal Cord Injury, SCI)是由于各种原因导致椎管内神经结构及功能的损害,患者出现SCI水平及其以下脊髓功能(包括运动、感觉和自主神经功能)障碍^[1-3]。近年来,SCI的发生率升高,全球每年约有13万人新发SCI,其中将近50%患者损伤平面达到C6或以上^[4]。流行病学调查显示,我国SCI年患病率为37/百万人口^[5],致残疾总人数超过100万^[6]。SCI患者可能存在不同并发症,如自主神经功能障碍、压疮等。王洋等^[7]指出广东省SCI残疾人的社区融合问卷(Community Integration Questionnaire, CIQ)调查均数以及各亚项目家庭融合(Family Integration, FI)、社会融合(Social Integration, SI)、生产活动参与(Productive Activity, PA)等维度均低于Callaway于2016年发布的CIQ常模^[8]。同时,SCI患者的预后情况、家庭支持及其所在环境条件均影响患者进行日常生活活动及社会融合。作为一种严重致残性疾病,临床上对于SCI的诊断、评估及治疗主要依靠影像学检查及量表评估,以康复医生及康复治疗师的经验为治疗基础进行干预。当前,SCI尚无特异性治疗方法,临床上仍以早期积极规范救治、尽早全面康复介入与长期持续的社区家庭康复等综合处理为主^[9]。因此,临床上需要客观定量可视化的评估及治疗系统,以支持患者进行康复转诊及家庭康复。可穿戴设备通过传感器准确采集患者生理及运动参数并进行储存分析,患者及医疗人员可提取评估及治疗参数以了解及调整康复方案,有效提高康复治疗效率,降低医疗资源浪费。

本文就可穿戴设备在SCI康复中的相关概念及应用进展进行综述,分析及论述可穿戴设备的发展前景及面临挑战。

1 可穿戴设备的概念

可穿戴设备是可以佩戴或放置于人体体表或物件

上,以不同传感器收集人体参数,并通过智能传输及信息处理系统进行分析存储的设备。临床上常见传感器包括生理传感器、压力传感器跟惯性传感单元等3种类型,配合无线传输模块、控制处理单元、用户接口及相关软件,实现将个体功能转化为客观生理参数及运动数据,推动可视化康复治疗方案制定及疗效评估^[10-11]。目前可穿戴设备逐渐实现数据交互及云端交互,推动为患者及特殊行业人群提供健康监护及安全防护服务,同时也可实现对患者家庭或社区康复的精准化远程监测^[11-12]。

20世纪60年代,美国麻省理工学院 Claude Shannon 和 Edward Thorp 将多媒体、传感器及无线通信等技术整合,设计出可穿戴在身上或嵌入鞋子用以预测轮盘赌局结果的设备^[13]。近年来标准化软硬件及互联网的发展,推动可穿戴设备在医学领域功能多样化,如为患者提供生命体征监测^[14]、精准给药及动作捕捉^[15-16]等,成为当下实验研究及产品开发的热点方向,部分产品已从基础研究应用于临床。随着传感技术、云计算技术的研究进展,微型、智能、便携的惯性传感器逐渐被运用于康复医学领域,覆盖疾病诊断、康复评定、治疗方案制定及运动监测等多方面,推动实用安全的可穿戴式设备在医疗机构、社区、家庭康复领域发展^[17-18],与康复工程或康复辅具结合的可穿戴设备成为研究热点之一^[19]。目前,大量可穿戴设备处于实验室基础研究阶段,临床应用较少^[20],针对SCI的可穿戴设备仍然缺乏系统完善的评估及治疗方案指导^[21]。

2 可穿戴设备应用于SCI的优势

SCI是一种严重致残、高致死率、高耗费的神经系统疾病,患者出现损伤水平及其以下运动及(或)感觉、自主神经功能障碍,同时可能存在神经病理性疼痛、泌尿系感染、痉挛、下肢静脉血栓及压疮等并发症。目前,针对SCI患者的医学干预主要为发展残存肌肉运动功能,降低并发症发生率,包括药物治疗^[22-23]、运动训练^[24-25]、物理因子治疗^[26-27]、辅助器具及手术治疗等^[28]。现有的康复医疗模式SCI患者评估及训练主

收稿日期:2021-05-10

作者单位:1.广州市残疾人康复中心康复医学科,广州 510630;2.东莞东华医院康复医学科,广东 东莞 523120

作者简介:杜燕宣(1994-),女,初级技师,主要从事中枢神经损伤作业治疗方面的研究。

要依赖康复医生及治疗师的主观经验及判断,受限于治疗师的体力、精力及康复场地选择,影响个体康复疗效^[11]。可穿戴设备作为一项智能精准化的评估及治疗工具,逐渐被设计及运用于康复医学领域,包括运动功能和日常生活活动(Activities of Daily Living, ADL)能力等功能评定、医疗机构康复治疗及远程康复、并发症监测等方面,实现安全有效系统的康复治疗。

针对SCI患者评估及治疗,可穿戴设备可实现:

- ①提供客观数据:实现客观数据化评估及训练反馈,提高康复精准性及有效性。可穿戴设备的运用可降低医生及治疗师主观判断对患者情况的影响,以精准的数据评估记录患者相关数据。
- ②共享康复方案:实现社区及家庭远程康复监测,实现不同机构数据交互及云端交互;以安全有效的方式共享云端平台数据,不同治疗团队可以实时掌握患者的康复进程,实现患者在不同机构间的治疗方案保持共同的康复方向,进一步提高患者康复疗效;
- ③加强家庭康复疗效:专业治疗团队以线上方式指导患者进行家庭康复,确保患者在家庭及社区环境下康复的有效性及安全性。
- ④减轻家庭负担:调查指出,我国创伤性SCI患者康复治疗总住院费用平均为252309.1元/人,人均住院时间平均数为181d,其中医疗保险患者为34.9%^[7]。可穿戴设备可实现将长期依赖于医疗机构康复的SCI患者康复重心逐渐转移为家庭及社区康复,降低患者及其家属经济负担。贾萌萌等^[29]及Sutton等^[30]的研究指出回归社区康复的SCI患者身体功能与社会功能均有效提高,家庭与社会参与程度提升。
- ⑤缓解医疗压力:减少患者训练轮候时间,降低长期高负荷高患者轮转率的医疗机构患者排队量,让患者在疾病稳定期开展系统全面的康复,降低疾病及其并发症对患者的不良影响等。

3 可穿戴设备在SCI的临床应用

可穿戴设备被运用于康复医学领域,针对SCI患者的评估及训练领域逐渐扩展,包括运动功能和ADL能力等功能评定、医疗机构康复治疗及远程康复、并发症监测等方面,实现了从医疗机构康复期到家庭康复期长时间高质量的精准数据采集及反馈。

3.1 功能评定 可穿戴设备可用于SCI患者的运动能力评估。SCI患者损伤方式及程度不同,运动功能障碍情况不同,个体化精确的可穿戴设备通过运动型传感器(陀螺仪、加速度计、压力及磁力传感器等传感器)可评估记录患者的运动参数,并及时进行反馈^[31]。Bianchi等^[32]将可穿戴式手部重建系统(Hand pose

Reconstruction Systems, HPR)与纺织面料压敏电阻技术(Knitted Piezoresistive Fabrics Technology, KPFT)结合,选择手部固定的5个最佳位置放置传感器,要求测试者执行指面捏、精密夹捏、挤压、钩状抓握、力性抓握、三指捏、侧捏与托举等8种抓握模式,测量其19个自由度的手部姿态准确信息,并使用3D建模系统将手部姿势还原进行可视化处理,定性结果指出建模姿势与原始姿势具有一致性,实现将复杂的手部生物力学转化为可视化精准评估及康复训练。Salazar^[33]研究4名佩戴可穿戴式传感器的受试者上肢进行的够物-按压-返回活动,记录患者的运动轨迹及代偿方式,将患者功能性运动以定量的数据报告呈现,并实现患者初期、中期及末期的疗效对比。

SCI节段不同,患者ADL能力残存功能不同。ADL能力影响患者生活依赖程度及生活满意度,目前ADL的评估以标准化量表评估为主,缺乏活动轨迹检测记录及反馈,可穿戴设备借助惯性传感器可实现动作捕捉及分析。廖梦佳等^[34]设计一款基于多传感器融合的可穿戴上肢动作识别系统,选取Fugl-Meyer量表(Fugl-Meyer motor assessment, FMA)要求测试者执行3个上肢动作,使用放置于手腕背面、肱骨外上髁及肱骨中上三分之一点外侧的3个小型传感器,收集上肢运动的加速度信号,实现上肢动作的自动识别及完成质量评估记录,其识别准确率达97.99%。Lemmens等^[35]将多传感器固定于患者患侧手背、腕关节、上臂及胸部,在标准环境下评估患者喝水、使用刀叉进食及梳头发等ADL执行情况,结果显示可穿戴设备可记录ADL中上臂及手的活动及完成活动的数量及质量。

下肢感觉及运动功能障碍的SCI患者可能合并存在平衡或步态异常问题。研究人员通过放置于人体表面的小体积可穿戴惯性传感器,收集患者足底压力分布情况、步行周期及运动轨迹数据,实现患者精确的平衡功能及步态分析,预防意外摔倒情况^[36-38]。霍洪峰等^[39]使用意大利BTS公司生产的FREEEMG300无线表面肌电采集与分析系统,选取用于稳定踝关节的小腿肌群(包括胫骨前肌、腓骨长肌、趾长伸肌、腓肠肌外侧头及内侧头)及足底8个压强较大的位置(包括足跟内侧、足跟外侧、第一跖骨、第二跖骨、第三跖骨、第四跖骨、第五跖骨、第一趾骨),收集保持4km/h步行速度测试者的5个完整步幅支撑期及摆动期的足底压力及肌肉激活程度数据,用以分析测试者足部的力学结构、步行稳定效率等,预防患者出现关节磨损、疼痛或跌倒等症状。

3.2 康复治疗 可穿戴设备通过微型传感器收集患

者运动信息,并及时为患者提供反馈^[40],提高SCI患者的康复训练有效性。Olivares等^[41]指出由三轴加速度计、陀螺仪和磁强计组成的无线惯性测量单元Wagyromag可以对膝关节进行三维运动轨迹评估记录,实时提供视频反馈,并开发VisIMU软件用以读取、显示和存储通过无线电发送的来自人体的数据,如身体部位的倾斜角度、移动速度及轨迹等,其加速度传感器测量范围为 ± 3 倍重力加速度。同时,治疗团队可对训练强度、时间、频率及训练项目等运动处方进行调整,优化患者训练方案。Radder等^[42]发现可穿戴机械式软手套ironHand(iH)可以有效改善患者日常活动中的手部抓握及手指力量,提高ADL独立性。

与虚拟现实技术(Virtual Reality Technology, VR)及可触游戏结合的可穿戴设备逐渐被运用于临床,以视觉、听觉、躯体感觉等感觉反馈代替数据化重复的训练方式,可提高患者康复训练的主观能动性^[19]。陈兰等^[43]结合美国的情景互动式康复训练系统Gest-Irex、传感器手套与常规康复治疗,选择与平衡及下肢功能相关的6种游戏(空中降落伞、引力球、鲨鱼诱饵、滑雪板、英式足球、上跨台阶),训练时间为30min/d,5d/周,一共持续2周,指出治疗后实验组20例患者Fugl-Meyer下肢运动功能(Fugl-Meyer motor assessment of lower limb, FMA-L)、Berg平衡量表(Berg Balance Scale, BBS)、计时起立-步行测试(time up and go test, TUGT)及改良Barthel指数(modified Barthel index, MBI)均提升。Lipovsky等^[44]提出了一种由功能性电刺激(Functional Electrical Stimulation, FES)、传感器手套及基于智能手机的虚拟3D手部环境显示应用软件的手腕及手指康复系统,通过由一个9轴惯性测试单元及8个肌电图传感器组成的Myo臂环,将健康测试者的运动的空间数据及手势数据复制到患者的运动轨迹中,以游戏的形式可增强患者参与动机,驱动神经可塑性的变化。

针对存在转移困难的患者,日本Cyberdyne公司的可穿戴下肢外骨骼机器人Hybrid Assistive Limb(HAL)具有生物意识控制系统及自主控制系统^[45-46],通过肌电传感器、角度/加速度传感器、地面反作用力传感器等集患者生物电信号,判断患者运动动机,记忆及存储患者运动模式,形成患者的日常运动轨迹。Yukiyo等^[47]选择4名慢性SCI患者(其中完全性SCI 3例,不完全性SCI 1例),将髋关节和膝关节屈伸的HAL电极分别放置于下肢,及其对应的上肢前后肌群,分别为前三角肌、后三角肌、肱二头肌及肱三头肌,进行10次上肢联动的HAL干预,每次持续60~90min,记录标记物的运动轨迹提取患者步行

周期内的摆动相位及站立相位,结果指出HAL干预后患者的步行距离增长,表面肌电图检测到阔筋膜张肌及股四头肌的活跃收缩。同时,患者的髋关节外展,膝关节伸展,踝关节背屈肌群的肌张力均降低,HAL可以提高SCI患者的站立及步行转移能力。具有独立电动机控制及便携式计算机控制系统的ReWalk通过体感技术及腕部传感技术,收集患者下肢运动状态,可对患者的步幅、步速等运动成分进行协调^[48-49]。可选择康复医师辅助训练模式、穿戴者自定义模式和自感应肢体运动触发模式的Ekso^[50-51]可针对性运用于SCI患者下肢运动功能训练和日常转移,减轻照顾者压力,但地面机器人辅助步态康复训练Ekso GT需要患者具备较高的认知及良好的心血管能力^[52]。

3.3 远程康复 SCI患者家庭康复的需求激增,康复治疗团队人员配比不足,调查指出,目前我国康复治疗师人员配比为1.03/10万人^[53],医疗资源的地域分配不均,严重影响SCI患者的康复质量。可穿戴设备打破时间及空间界限,可实现SCI患者进行全面、系统的远程康复指导,确保家庭康复的质量及患者安全性。Kumar等^[54]开发了一种用于上下肢关节活动度测量的自动无线可穿戴传感器系统,并将传感器与中央服务器(移动智能手机、平板电脑等)进行连接,测量19名健康受试者与20名残疾受试者的关节活动度,结果显示该系统所测得关节活动度与传统关节活动度测量仪所测结果高度相关,治疗团队可实现远程检测患者关节活动度,以设计治疗方案。都天慧等^[55]提出一种由可穿戴式传感器设备及患者及治疗团队移动终端组成的程序化智能远程康复系统,以监督指导患者运动功能。可穿戴式传感器可实现准确记录患者的运动状态及生理参数,同时通过移动网络将参数传输到治疗团队数据中心,治疗师可以实时根据患者的训练情况调整治疗方案,监督患者运动训练执行情况,但该系统仍处于试用阶段,需要进行安全性及便利性探索。目前,可穿戴设备的远程康复硬件设备及相关软件的设计开发仍面临巨大的挑战,设备连接兼容性、使用安全性亟需进一步技术保障。

3.4 并发症监测 流行病学调查指出,我国SCI患者颈段损伤比例为47.2%,胸段43.3%,腰段及以下9.5%。患者SCI节段及严重程度与康复质量密切相关,高节段SCI较低节段SCI更易出现严重并发症,颈段SCI患者较胸段及以下SCI患者更常见出现全身炎症反应、交感神经过度激活的继发性肺功能损伤及呼吸肌功能障碍等^[56-57]。可穿戴设备可实现对SCI患者生理功能的监测,并自动实时反馈患者身体信息,辅助医疗人员早期有效预防并发症。Guber

等^[58]收集测试者通过传统指尖脉搏血氧仪与腕戴式脉搏血氧仪 Oxitone-1000 测试的血氧水平及脉搏率值,指出腕戴式脉搏血氧仪 Oxitone-1000 可持续准确有效监测心率及血氧水平,精度为 2.28472%,具有更高的舒适性,在必要时期可自动触发紧急医疗救助提醒。Leaf Healthcare 体位检测仪可监测患者在床上或轮椅上的移动情况,分析患者需要移动的时间,并将数据传输到中心监测站或移动设备,康复团队或照顾者可以实时获得患者数据,定时为患者进行体位转移,防止患者出现压疮^[59]。

电子织物技术是将可穿戴技术集成于纺织品中^[60],在不影响人体正常活动及生活的情况下持续对人体的生理参数及运动参数进行测量及记录。该技术的衣物材质轻便、可长期续航及重复洗涤,被运用于个体活动或生理状态监测,家庭及社区康复训练与反馈,跌倒风险评估及移动辅助等^[61-62]。目前,电子织物技术的研究主要包括 2 个方向:运动感知及肌肉活动的测量或提供肌肉刺激。在运动感知方面,电子纺织品主要用于实现测量个体出现的运动与对比个体是否达到了预定的运动模式;而电子织物用于测量肌肉活动及提供功能性电刺激的研究目前较少。美国 Sensatex 公司使用嵌入式传感器导电纤维与棉纤维织成可穿式智慧型运动 T 恤,实时监测心率、体温、呼吸及热量消耗,将信息同步于电子设备实现实时记录,并及时发送警报记录^[63]。部分可穿戴智能服装可以通过对身体特定部位提供机械推力,以提高局部血流量,减少压疮发生率^[14]。该技术现主要用于运动感知功能,其实用性研究依旧处于基础研究阶段。

4 可穿戴设备的挑战及发展趋势

可穿戴设备具有便携化、智能化、微型化的特点,回顾性研究指出,实验研究型可穿戴设备数据精准度更高,而商用型可穿戴设备舒适性及经济适用性高^[64]。作为一项新型技术,可穿戴设备临床使用性问题亟需针对性的解决方案,提高使用安全性及实用性。可穿戴设备存在问题主要为:①设备精准性欠佳。包括可穿戴传感器敏感性、不同平台软件兼容性、数据传输可信度、电池续航时长等,个体通过可穿戴设备所收集的资料需准确还原个体真实情况;②数据安全性待提升。软件中患者个人及医疗相关信息安全性需要得到严密的保护,防止泄露患者信息,确保操作平台的数据保密;③操作实用性欠规范。可穿戴设备的数据收集依赖于准确的身体定位及设备操作,患者使用可穿戴设备的社区及家庭康复需要详细全面的培训;同时,可穿戴设备适用环境、价格等需要规范化的处理。④

数据读取欠标准。可穿戴设备读取的生理或运动参数读取需要统一的标准,方便专业人员进行患者情况管理及储存,提高数据的专业性;⑤临床实用性研究不足。目前,大量可穿戴设备处于实验室研究阶段,缺乏高质量的实用研究指导临床使用。

随着信息产业的发展,可穿戴设备与新型传感技术、无线通信技术、数据分析技术及低能耗芯片技术领域互相融合推进,与现代康复理念技术及康复工程相结合,实现推进医疗康复及家庭康复的进程^[16]。同时,快速发展的医疗行业也对可穿戴设备提出要求:①设备智能化^[65]。将多传感器融合于同一芯片中,通过小体积可穿戴设备收集患者的多种生理参数及运动参数,监控患者运动负荷过大的不适情况^[14,66];同时,通过可视化设备实时根据患者情况给予患者视频反馈及语音提醒,设置语音控制系统,治疗团队或患者可直接通过语音操作仪器。②数据稳定性及可信度^[67]。提高数据的信度及效度,设置读取数据的标准,加强专业人员的培训,控制不同环境因素对数据的干扰。③数据云端管理^[68]。可穿戴设备实时将患者评估及训练数据上传到云端,后台可以通过安保读取患者信息,实现医院-社区-家庭康复管理,提高患者家庭康复质量,减少医疗压力,减轻患者及其家庭经济负担。

5 小结

SCI 患者身体结构及功能上的损伤,影响其运动及(或)感觉功能,并可能合并神经病理性疼痛、泌尿系感染、痉挛、下肢静脉血栓及压疮等并发症,影响患者进行必要的生活、生产及娱乐活动。同时,疾病的突发性和后遗症带来的不良情绪体验及自我效能感下降,限制患者的家庭及社区融合。便携智能化的可穿戴设备突破治疗场地及时间的限制,降低医疗人员主观性对评估及治疗的干扰,将患者的生理参数及运动轨迹等转化为直观的数据,为 SCI 患者提供运动及 ADL 能力评估、系统全面的康复治疗、远程康复指导与并发症监测。目前,精准的评估及治疗用可穿戴设备逐渐被医疗机构引进,并运用于临床实践中,以提高 SCI 患者的功能。随着智能系统的开发,搭载于智能平台的安全方便实用的可穿戴设备将进入康复医疗领域,为 SCI 患者提供个体精准化服务。

【参考文献】

- [1] 李建军. 脊髓损伤神经学分类国际标准参考手册[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 68-69.
- [2] 美国脊髓损伤协会, 国际脊髓损伤学会. 脊髓损伤神经学分类国际标准(2011 年修订). 李建军, 王方永, 译[J]. 中国康复理论与实践, 2011, 17(10): 963-972.

- [3] 李建军,杨明亮,杨德刚,等."创伤性脊柱脊髓损伤评估、治疗与康复"专家共识[J]. 中国康复理论与实践,2017,23(3):274-287.
- [4] Colachis TS, Bockbrader MA, Zhang M, et al. Dexterous control of seven functional hand movements using cortically controlled transcutaneous muscle stimulation in a person with tetraplegia [J]. *Front Neurosci*, 2018, 12:208.
- [5] 陈星月,陈栋,陈春慧,等. 中国创伤性脊髓损伤流行病学和疾病经济负担的系统评价[J]. 中国循证医学杂志,2018,18(2):143-150.
- [6] 励建安,许光旭.实用脊髓损伤康复学[M]. 北京:人民军医出版社,2013:541-568.
- [7] 王洋,史东东,钟晓欣,等. 广东省脊髓损伤患者社区融合现状及其影响因素的分析[J]. 中国康复,2020,35(5):276-280.
- [8] Callaway L, Winkler D, Tippet A, et al. The community integration questionnaire revised: Australian normative data and measurement of electronic social networking[J]. *Aust Occup Ther J*, 2016, 63(1):143-153.
- [9] Kim HS, Jeong HJ, Kim MO. Changes of functional outcomes according to the degree of completeness of spinal cord injury [J]. *Ann Rehabil Med*, 2014, 38(3):335-341.
- [10] 付晓月.可穿戴式设备指导科学运动与促进健康的可行性分析[D]. 北京:北京体育大学,2018.
- [11] 梁嘉欣,黄国志.可穿戴设备应用于脑卒中康复治疗的研究进展[J]. 中国康复医学杂志,2018,33(9):1108-1112.
- [12] Brennan DM, Mawson S, Brownsell S. Telerehabilitation: Enabling the remote delivery of healthcare, rehabilitation, and self management[J]. *Stud Health Technol Inform*, 2009, 145(2):31-48.
- [13] Amft O, Lukowicz P. From backpacks to smartphones: past, present, and future of wearable computers[J]. *IEEE Pervasive Comput*, 2009, 3(8):8-13.
- [14] 何宏瑾,王跃林. 柔性可穿戴生命体征传感器的研究进展[J]. 传感器与微系统,2018,37(7):1-6,14.
- [15] Gao Yiwen, Li He, Luo Yan. An empirical study of wearable technology acceptance in healthcare[J]. *Ind Manage Data Syst*, 2015, 115(9):1261-1267.
- [16] Ajami S, Teimouri F. Features and application of wearable biosensors in medical care [J]. *J Res Med Sci*, 2015, 20(12):1208-1215.
- [17] Lounis A, Hadjidi A, Bouabdallah A, et al. Healing on the cloud: Secure cloud architecture for medical wireless sensor networks[J]. *Future Gener Comp Sy*, 2016, 55(1):266-277.
- [18] Pigni L, Bovi G, Panzarino C, et al. Pilot test of a new personal health system integrating environmental and wearable sensors for telemonitoring and care of elderly people at home (SMARTA Project) [J]. *Gerontology*, 2017, 63(3):281-286.
- [19] Patel S, Park H, Bonato P, et al. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2012, 9(1):21.
- [20] Shull PB, Jirattigalachote W, Hunt MA, et al. Quantified self and human movement: a review on the clinical impact of wearable sensing and feedback for gait analysis and intervention [J]. *Gait Posture*, 2014, 40(1):11-19.
- [21] 赵科洪,马睿,屈云. 远程康复技术在脑卒中患者平衡康复的应用[J]. 中国康复,2021,36(5):309-312.
- [22] Lui J, Sarai M, Mills PB. Chemodenervation for treatment of limb spasticity following spinal cord injury: a systematic review [J]. *Spinal Cord*, 2015, 53(4):252-264.
- [23] 于建光.巴氯芬治疗脊髓损伤后肌痉挛的疗效观察[J]. 中外医疗,2013,(4):120-121.
- [24] Nardone R, Orioli A, Golaszewski S, et al. Passive cycling in neurorehabilitation after spinal cord injury: A review[J]. *J Spinal Cord Med*, 2017, 40(1):8-16.
- [25] Stampacchia G, Rustici A, Bigazzi S, et al. Walking with a powered robotic exoskeleton: Subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons [J]. *Neuro Rehabilitation*, 2016, 39(2):277-283.
- [26] Mills PB, Dossa F. Transcutaneous electrical nerve stimulation for management of limb spasticity: a systematic review[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2016, 95(4):309-318.
- [27] Naro A, Leo A, Russo M, et al. Breakthroughs in the spasticity management: Are non-pharmacological treatments the future[J]. *J Clin Neurosci*, 2017, (39):16-27.
- [28] 方露,谢财忠,王红星,等. 脊髓损伤后痉挛的机制及其治疗研究进展[J]. 中国康复医学杂志,2020,35(1):112-117.
- [29] 贾萌萌,刘婷,谢粟梅,等. 基于国际功能、残疾和健康分类的居家脊髓损伤患者功能变化的纵向研究[J]. 中国康复医学杂志,2021,36(3):288-293.
- [30] Sutton BS, Ottomaneli L, Njoh E, et al. The impact of social support at home on health-related quality of life among veterans with spinal cord injury participating in a supported employment program[J]. *Qual Life Res*, 2015, 24 (7):1741-1747.
- [31] 何龙龙,黄国志. 可穿戴设备在脑卒中患者康复评定中的应用进展[J]. 中国康复医学杂志,2020,35(2):224-227.
- [32] Bianchi M, Carbonaro N, Battaglia E, et al. Exploiting hand kinematic synergies and wearable under-sensing for hand functional grasp recognition [C]//Wireless Mobile Communication and Healthcare (MobiHealth), 2014 EAI 4th International Conference on. IEEE, 2014:168-171.
- [33] Salazar AJ, Silva AS, Silva C, et al. Low-cost wearable data acquisition for stroke rehabilitation: a proof-of-concept study on accelerometry for functional task assessment[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2014, 21(1):12-22.
- [34] 廖梦佳,秦亚杰,汪源源,等. 基于多传感器融合的用于脑卒中患者的可穿戴式上肢动作识别系统[J]. 中国康复医学杂志,2015,30(5):443-446.
- [35] Lemmens RJ, Janssen-Potten YJ, Timmermans AA, et al. Recognizing complex upper extremity activities using body worn sensors[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3):1-20.
- [36] 李宏恩,鲍申杰,高晓航. 压电式步态分析系统在足底压力监测中的应用[J]. 医用生物力学,2017,32(3):288-292.
- [37] Afzal MR, Oh M, Lee C, et al. Assessing walking strategies using insole pressure sensors for stroke survivors[J]. *Sensors*, 2016, 16(10):1631.
- [38] 金曼,丁辛,甘以明,等. 可穿戴式足底压力测试技术的研发与进展[J]. 纺织学报,2011,32(1):145-148.

- [39] 霍洪峰,孟欢欢,朱瑶佳,等. 鞋垫类型对行走相关肌群肌电活动及足底压力的影响[J]. 中国康复医学杂志,2019,34(4):440-446.
- [40] 孟琳,都天慧,范晶晶,等. 基于微型传感器的可穿戴远程康复设备的设计[J]. 中国医疗器械杂志,2017,41(3):189-192.
- [41] Olivares A, Olivares G, Mula F, et al. Wagymag: Wireless sensor network for monitoring and processing human body movement in healthcare applications[J]. J Syst Architect, 2011, 57(10): 905-915.
- [42] Radder B, Prange-Lasonder GB, Kottink AIR, et al. The effect of a wearable soft-robotic glove on motor function and functional performance of older adults[J]. Assistive Technology, 2020, 32(1):9-15.
- [43] 陈兰,宗丽春,汤禹铭,等. 虚拟现实训练对脑卒中患者步行功能和日常生活能力的影响[J]. 中国康复医学杂志,2019,34(12):1473-1475.
- [44] Lipovsky R, Ferreira HA. Self hand- rehabilitation system based on wearable technology[C]//Proceedings of the 3rd 2015 Workshop on ICTs for improving Patients Rehabilitation Research Techniques. ACM, 2015: 93-95.
- [45] Sandra P, Hideki K, Shigeki K, et al. Reshaping of gait coordination by robotic intervention in myelopathy patients after surgery[J]. Front Neurosci, 2018, 12:99.
- [46] Kyousuke G, Kotani N, Hiroyuki F, et al. Effectiveness of the single-joint HAL robot suit for rehabilitation after orthopedic surgery[J]. Physiotherapy, 2015, 101(1):e806-e807.
- [47] Shimizu Yukiyo, Kadone Hideki, Kubota Shigeki, et al. Voluntary Ambulation by Upper Limb-Triggered HAL in Patients with Complete Quadri/Paraplegia Due to Chronic Spinal Cord Injury[J]. Front Neurosci, 2017, 21:11.
- [48] Esquenazi A, Talaty M, Packel A, et al. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury[J]. Am J Phys Med Rehab, 2012, 91(11):911-921.
- [49] Prassler E, Baroncelli A. Team ReWalk ranked first in the cybathlon 2016 exoskeleton final [Industrial Activities][J]. IEEE Rob Autom Mag, 2017, 24(4):8-10.
- [50] Paolo M, Federico DS, Marco C, et al. Neurore-habilitation in paraplegic patients with an active powered exoskeleton(Ekso)[J]. Digital Med, 2016, 2(4):163-168.
- [51] Ekso B. Ekso GT robotic exoskeleton cleared by FDA for use with stroke and spinal cord injury patients[EB/OL]. (2016-04-04)[2019-07-21]. <https://ir.eksobionics.com/press-releases/detail/570/ekso-gt-robotic-exoskeleton-cleared-by-fda-for-use-with>.
- [52] Silvia Corbianco, Gabriella Cavallini, Marco Dini, et al. Energy cost and psychological impact of robotic-assisted gait training in people with spinal cord injury: effect of two different types of devices[J]. Neurol Sci, 2021, 13(35):pp1-10.
- [53] 任艳苹,郭琪,李雨晴,等. 我国社区康复医疗资源的现状与需求[J]. 中国康复医学杂志,2014,29(8):757-759.
- [54] Kumar Y, Yen SC, Tay A, et al. Wireless wearable range-of-motion sensor system for upper and lower extremity joints: a validation study[J]. Healthcare Technology Letters, 2015, 2(1): 12-17.
- [55] 都天慧,袁梦玮,屈云. 基于安全性和用户体验的远程康复系统设计[J]. 中国医疗器械杂志,2017,41(2):110-113.
- [56] 余凤立,敖雨娟,刘芳,等. 不同平面脊髓损伤患者膈肌运动和肺功能的相关分析[J]. 中国康复,2019,34(1)7-9.
- [57] 王凤霞,吴霜. 急性脊髓损伤后继发肺损伤发生机制的研究进展[J]. 中国康复,2018,33(5):505-509.
- [58] Guber A, Shochet G E, Kohn S, et al. Wrist sensor pulse oximeter enables prolonged patient monitoring in chronic lung diseases[J]. J Med Syst. 2019, 43(7): 230.
- [59] Michael LE. Boise VA Hospital finds Leaf Healthcare wearable sensor improves compliance with pressure ulcer prevention effort[J]. Journal of Clinical Engineering, 2015, 40(20):1-2.
- [60] McLaren R, Joseph F, Baguley C, et al. A review of e-textiles in neurological rehabilitation: How close are we? [J]. J Neuroeng Rehabil, 2016, 13(1):59-62.
- [61] Farina D, Lorrain T, Negro F, et al. High-density EMG E-textile systems for the control of active prostheses[C]. 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering-in-Medicine-and-Biology-Society (EMBC 10), Argentina, 2010.
- [62] Byrne CA, Rebola CB, Zeagler C. Design research methods to understand user needs for an etextile knee sleeve[C]. 31st ACM International Conference on Design of Communication, New York, USA, 2013.
- [63] 方东根,沈雷,胡哲. 智能服装材料及其在安全性服装中的应用[J]. 纺织学报,2015,26(12):158-164.
- [64] Godinho C, Domingo J, Cunha G, et al. A systematic review of the characteristics and validity of monitoring technologies to assess parkinson's disease[J]. J Neuroeng Rehabil, 2016, 3(12):13-24.
- [65] 单新颖,张腾宇,张晓玉. 可穿戴技术在康复辅具领域的应用研究[J]. 中国康复医学杂志,2016, 31(10):1149-1151.
- [66] 刘洪红,都天慧,王婷婷,等. 远程康复设备梯度式运动功能自动评定系统在脑卒中患者中的应用[J]. 中国医疗器械杂志,2018, 42(2):88-91.
- [67] 王晓青,孟殿怀,赵磊,等. 可穿戴设备 uCare 在脑卒中患者社区康复中的应用效果[J]. 中国康复医学杂志,2019,34(10):1188-1192.
- [68] 谭颖,郝红琳,李延峰,等. 可穿戴设备在帕金森病慢病管理中的发展现状[J]. 中国神经免疫学和神经病学杂志,2019,26(1):52-55.