

踝关节矫形器设计及应用技术研究进展

王年文, 李园园, 陈明含, 姚天伊, 刘雪
(燕山大学, 秦皇岛 066004)

摘要: **目的** 为提升踝足矫形器 (Ankle-Foot Orthosis, AFO) 的设计研究水平, 介绍了 AFO 在医疗领域中的应用及国内外研究进展, 综述其设计发展趋势。**方法** 概要性阐述 AFO 的型制分类方式, 以其设计特性为基础, 梳理近年来相关设计发展研究取得的成果, 归纳 AFO 发展过程的主要应用技术, 并依据智能医疗技术发展的现实落点, 系统地探讨了 AFO 设计的发展方向、关键技术及相互间的关系。**结论** 在 AFO 设计发展中, 产品的功能结构、应用材料、应用技术等方面极大地促进了其设计质量的提高, 针对设计和科学技术的融合发展, 提出了智能化设计、人机交互是 AFO 设计的发展趋势, 也是未来应用研究的热点和难点。

关键词: 康健产品设计; 踝足矫形器; 智能化设计; 人机交互

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)08-0008-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.08.002

Research Progress of Ankle Foot Orthosis Design and Application Technology

WANG Nian-wen, LI Yuan-yuan, CHEN Ming-han, YAO Tian-yi, LIU Xue
(Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the design research level of Ankle Foot Orthosis (AFO), introduce the application of AFO in the medical field and its research progress at home and abroad, and review its design development trend. The type system classification of AFO was briefly described. Based on its design characteristics, the related design development research achievements in recent years were sorted out to summarize the main application technologies in the development process of AFO, and the development direction of AFO design, key technologies and their relationship were systematically discussed according to the reality placement of the development of intelligent medical technology. In the development of AFO design, the product's functional structure, applied materials, applied technology and other aspects have greatly promoted the improvement of its design quality. Aiming at the integration of design and science and technology, it is proposed that intelligent design and human-computer interaction are the development trend of AFO design, and the hotspot and challenge of future application research.

KEY WORDS: health product design; ankle foot orthosis; intellectualized design; human-computer interaction

根据第二次残疾人抽样调查结果显示, 我国残疾人口总数涉及 2.6 亿家庭人口, 而实际配置康健产品仅有 7.31%; 近代医学虽然已取得长足进展, 但是脑卒中、脑外伤、骨外伤、肿瘤等疾病的后期康复, 仍然需要踝足矫形器^[1]。面对广大功能障碍者群体对康复辅具需求不断提升的现状, 以及“发展中国特色康

复辅具产业”政策的推动, 相应康健产品得到快速发展, 其中 AFO 作为康复辅具产品的重要组成部分, 同样也受到了极大的关注^[2]。一方面 AFO 设计多依据设计人员的经验, 患者佩戴舒适性差、易疲劳, 减弱了功效; 另一方面市场上 AFO 的设计质量参差不齐, 在满足功能障碍者基础代偿需求的前提下, 较少

收稿日期: 2020-02-06

基金项目: 2020 年度河北省社会科学基金项目 (E2018203140)

作者简介: 王年文 (1979—), 男, 湖南人, 博士, 燕山大学教授, 主要研究方向为康复辅具人机交互与智能设计。

通信作者: 李园园 (1993—), 女, 河南人, 燕山大学硕士生, 主攻康养辅具工业设计。

注重产品的感性功能^[3]，因此其设计面临着巨大的机遇与挑战^[4]。目前，很多学者在 AFO 的制造工艺、应用材料、应用技术等方面作出了较多的探索。AFO 制作工艺的提升使得产品制作周期缩短，由型号制作到按需定制^[5]；材料的变革使得产品越来越轻便，产品由单一材料制作发展至多种材料结合，对于病症更具有针对性^[6]；应用技术为实现 AFO 产品提供了必要的支撑和功能保障^[7]。随着患者对设计质量需求的不断提升，使传统模式逐渐从“形式追随功能”的实用主义，逐渐向“形式追随情感”的体验设计转变^[8]。由此观之，面向 AFO 设计因素分析，并结合应用材料和科学技术，提升设计质量的研究显得尤为重要。

1 踝足矫形器

1.1 踝足矫形器型制

1992 年国际标准化组织（ISO）以矫形器装配身体部位的命名原则定义了 AFO。从功能结构、装配部位等方面阐述 AFO 的型制，不同功能的矫形器有不同的需求，见图 1。按照功能结构，可分为静态踝

足矫形器（Static Ankle Foot Orthosis, SAFO）、动态踝足矫形器（Dynamic Ankle Foot Orthosis, DAFO）以及定制型矫形器（Custom Ankle Foot Orthotics, CAFO）^[9]。SAFO 在结构上没有运动装置，多采用一体式设计，主要用于固定、支持、制动，患者活动范围较为局限，起矫正、矫形作用；DAFO 有运动装置，采用部件组合式设计，能控制和帮助肢体运动，促进运动功能的恢复^[10]；CAFO 根据每个患者的情况进行匹配设计，在设计制作时可从型制、结构、外观等方面进行修改，较其他两种踝足矫形器具有更好的康复效果和多样性^[11]。

涉及不同身体部位需要不同的 AFO，按照装配部位可分为踝足矫形器（Ankle Foot Orthosis, AFO）、膝踝足矫形器（Knee Ankle Foot Orthosis, KAFO）、髋膝踝足矫形器（Hip Knee Ankle Foot Orthosis, HKAFO）^[12]。AFO 是具有小腿到足底的结构，根据踝关节运动进行控制的矫形器，针对患者各类神经疾患造成的足下垂、足外翻、足内翻、马蹄足等病况；KAFO 是用于膝关节、踝关节及足部位的构造，应对膝关节变形、肢体残疾人、手术后的功能外部固定等



图 1 AFO 型制分类
Fig.1 Type system classification of AFO

症况；HKAFO固定于骨盆，在KAFO的基础上连接髌关节及骨盆带，多用于下肢瘫痪患者，其作用是提供支撑、免荷，辅助站立和行走，稳定下肢关节，防止肌肉萎缩^[13]。

1.2 踝足矫形器设计特征

AFO是一种作用于踝关节及足全部或部分的矫形器。通过控制踝足关节运动，对踝足畸形进行预防和矫正，代偿踝足功能并促进下肢功能恢复^[14]。AFO是目前应用最广泛、最常见的矫形器，其用户人群分布在各个年龄阶段内，其设计主要按照人体生物力学三点受力和动态力学的原理，主要结构有足托、护板、绑带等，此外还具有其他规格不同的部件，且每个部件都有各自的形态特点^[15]，具体形态特征见图2。包裹感较强的AFO多使用柔软的材料，加以金属支撑杆，整体造型也较厚重；半包裹感的AFO多采用强度较硬的塑料和柔软内衬；简洁感的AFO使用塑料、碳纤维、高分子等材料，整体更加轻薄，不影响患者外穿鞋子，但产品足托的尺寸是以型号来界定的，与用户适配程度上存在一定的问题^[16]。由此可以看出，AFO功能用途的多样性在一定程度上影响着产品采用的不同结构，同时也影响着形态和材质的选择。

AFO设计依据于现实真实形体变化、人体各部件的性状，以及与人直接接触并装配于人体的外

部，除了产品功能需求外，其产品形态与人体的适配性尤为重要，并表现出不同的设计特征。充气式DAFO适配性相对较高，其主要构造包括足托、防护气囊、支撑杆、角度调节装置、尼龙绑带等，结构示意图见图3。其中产品的造型、材料、人机等方面，为改善患者使用AFO易产生压痕的问题，选择适合长时间穿戴、舒适度较好的进口布料制成，可拆卸充气气囊的设计能灵活根据不同体型、年龄的患者部位尺寸调整，增加患者的舒适度，两侧支撑杆与足部连接，保证足部和腿部可承正常重力，角度调节装置增加患者活动的范围，足托造型设计便于直接穿戴出去。

目前AFO应用材料大致可分为金属、塑料、碳纤维、橡胶、树脂、纤维等^[17]类别，基于材料的抗压、抗疲劳等多种物理性能，近年来国内研究者更多采用塑料、碳纤维作为AFO的材料载体。如张韶华等人^[18]运用清华大学研制的步态分析系统采集了穿塑料矫形器、穿碳纤维矫形器等情况下的数据，研究结果表明碳纤维矫形器步态较好，比塑料矫形器强度高、穿着较省力，具有储能作用，塑料材质中的聚丙烯抗疲劳度比其他塑料高，适合长期穿戴行走；黄宏亮等人^[19]的研究表明，穿戴聚丙烯踝足矫形器可提高行走的速度且步长明显增大，碳纤维矫形器的生物相容性极高，耐高温、耐摩擦，可加工成各种外形，抗疲劳性能好。



图2 AFO形态特征

Fig.2 AFO morphological characteristics

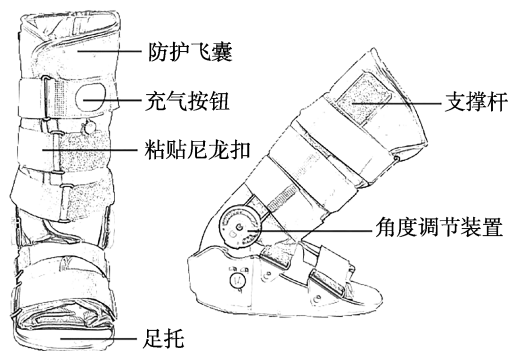


图 3 DAFO 结构
Fig.3 DAFO structure

2 国外踝关节矫形器研究进展

1989 年 Eng 等人首次将三维步态分析技术应用于足部矫形器^[20]，这为以后 AFO 适配技术的研发开辟了道路。2005 年 Romkes 使用肌电信号技术对比分析了穿戴和不穿戴 AFO 时肌肉活动性的不同反应，结果发现穿戴 AFO 能够改善步幅，减少步频，提高步速。2007 年 Willen 的研究表明，应用小腿肌肉的肌电积分值、肌电平均值可有效影响偏瘫患者使用 AFO 的效果。国外机构尝试了应用表面肌电图来评估脑卒中患者步行功能恢复的情况，取得了较好的效果，肌电技术在 AFO 领域的研究应用得到了进一步发展。2014 年 Van S 等人的研究发现，AFO 结合腓神经电刺激的方式能改善患者的避障能力、步态平衡，以及提高步行稳定能力。德国奥托博克假肢矫形器公司研制了 WalkOn 系列产品，采用先进的碳素纤维材料制作的 AFO，具有轻便性、稳固性、适应性较好的优点。里约残奥会英国骑手 Megan Giglia 穿上了定制的碳纤维 AFO，为骑手提供了更加趋于生理性、对称性的步态。美国密歇根大学与 Altair Engineering、Stratasys 公司合作，致力于开发出一种利用 3D 打印和工业 4.0 来改造 AFO 设计、舒适性、实用性和定制的方案，解决了传统 AFO 制造时需要诸多环节、熟练的技师、交货周期较长等问题^[21]。传统制造方式的 AFO 通体使用厚度不变的板材，限制了其优化结构和重量，并且无法兼容现代分析技术以优化 AFO 的强度和弹性，以及最大化患者的行动能力^[22]。英国的医疗技术公司 Andiamo 在基于云平台之上，使用大数据和人工智能技术，为残疾儿童设计和提供 3D 打印 AFO，并为矫形师提供了一个可上传数据并 3D 打印的平台，通过机器学习和人工智能检查扫描得到可穿戴踝关节矫形器的精确尺寸，解决了原有方式获取矫形器质量差和等待时间较长的问题。悉尼大学研究人员表示，新型特异性 3D 打印 AFO 在舒适性、灵活性、易于使用性上让患者更加满意，将对其使用率和整体健康相关结果产生显著影响。

针对上述研究进展的论述，国外 AFO 的研究不

仅关注产品功能结构和应用材料，并且考虑了科学技术在 AFO 设计过程中功能构成的重要性，为提升产品功能质量，国外的 AFO 较早涉及步态分析、肌电信号等科学技术，并取得了较大的成果。

3 国内踝关节矫形器研究进展

福州市康复科与德国奥托博克假肢矫形器公司合作，制作的“T”矫形器可根据患者不同的功能需求进行调节，提高了适用性和方便性。假肢矫形康复研究应用生物力学的原理设计的 DAFO，制作的功能性足托和动态踝，在应用康复治疗中取得了较好的效果。在 AFO 功能结构方面，医科工作者研制了一种新型足部矫形外固定器，连接小腿、足部两个点，进行三维矫形，通过临床应用并与经典的 Ilizarov 外固定器进行对比，得出新型足部三维矫形外固定器较好，相对结构更简单，安装更方便，舒适感更强^[23]。矫形科研工作者针对肢体长时间受压等问题，从原有矫形器的结构设计和应用材料方面进行了改进，并研制了多功能、舒适的 AFO，同时越来越多的研究者用现代高分子材料制作 AFO。康复医学科的临床研究数据表明，穿戴可调节式踝足矫形器，可根据环境需求或患者情况，随时调整踝关节活动范围，弥补了动态踝足矫形器和静态踝足矫形器的不足。康复医学临床研究试验，采用二维步态分析仪并结合表面肌电作为评价指标，有助于评估患者步行功能的恢复状况，并为脑卒患者在后期康复 AFO 的矫正效果提供保障。国内 3D 打印 AFO 投入应用，打破了传统矫形器石膏取型、手工制作、加热成型的生产方式。足踝外科的工作人员使用三维扫描仪，获得患者脚踝准确的三维数据，然后使用 CAD 软件通过 3D 扫描数据创建一个 AFO 的 3D 模型，并根据病人的需求快速 3D 打印出产品，为克服现有扫描仪获取数据的“瓶颈”，结合互联网+大数据模式进行三维重建与相关参数的提取。刘震等人^[24]采用 Artec 三维扫描仪扫描患肢，利用软件 Meshlab 进行 STL 文件的表面处理，通过软件 Instep 将 STL 文件转换为 STP 文件，利用 Abaqus 软件建立有限元模型，对 AFO 进行有限元分析，最后利用软件 Evolve 进行拓扑优化分析，对 AFO 模型结构进行优化，去除多余的结构，设计合理的 AFO 外形，再通过 3D 打印机打印制作所需的 AFO。

从以上所述发现，功能结构和应用材料是 AFO 设计考虑得较多的模块，与其密切相关的是科学技术的发展及应用材料的创新。近年来，AFO 功能结构与科学技术结合日益紧密，目前 AFO 的研究多以步态分析技术、表面肌电技术、3D 打印技术等为辅助，主要考虑穿戴 AFO 的舒适性评价和功能效果，但对 AFO 造型的形式美并没有较多关注，专门探讨其形式设计的文献也较少。AFO 作为可穿戴式康养辅具，从 AFO 造型和色彩心理入手，也是体现设计多样性

的一种方式^[25]。

4 踝关节矫形器的应用技术发展

科学应用技术是产品设计发展不可或缺的部分,AFO 在设计的过程中,需要一定的科学技术检验、促进设计质量,其相关的技术包括 3D 打印技术、三维步态分析技术、虚拟仿真技术、脑机接口技术等。

4.1 3D 打印技术

3D 打印技术以智能化数字模型为基础,采用金属或塑料等可粘合材料,通过逐层打印的方式来构造物体,是一种可直接成型、个性化定制的技术^[26]。3D 打印支具可以减少原有产品皮肤贴合度及舒适度差的问题,也可为患者量身定做踝关节支具,通过分析穿着踝支具的试验者的步态,分析符合试验者的人体结构和步态生物力学曲线,得出人因适配度高的产品^[27]。3D 扫描技术可与人体扫描技术、有限元技术、三维步态分析技术等结合,建立更加符合人机的产品,同时产品的造型会更加美观、多样,使用更轻便,成本更低,可提高患者的生存质量。

4.2 三维步态分析技术

三维步态分析技术根据生物力学原理,应用科学技术,检测得出人在步行状态下的相应数据,实验得出的数据可指导患者术后的行走训练、踝足矫形器的适配,最大程度地代替和代偿缺失的运动功能^[28],踝足矫形器的设计与三维步态分析技术的结合,是研制新型矫形器及个性化定制不可或缺的条件^[29]。目前,美国等国家的矫形器领域广泛应用三维步态分析技术,并取得了良好的成果,我国引进三维步态分析技术时间较短,应用研究也较少。2016 年美国 MiniSun 公司设计和制造出智能化步态分析产品——Insole X 智能鞋垫,鞋垫是基于智能算法和传感技术的便携式步态分析仪,三维步态分析技术的快速发展为踝足矫形器智能化设计提供了新的方向。

4.3 虚拟现实仿真技术

虚拟现实仿真技术又称 VR 技术,是一种计算机人机交互的手段,逐步使计算机适应人,通过建模和仿真模拟现实环境中的事情,使人能够切身体验事物变化的规律和具体特征,从而实现产品制造的本质过程。VR 技术被广泛应用于医学、康复训练,其康复训练能为患者提供实时的视觉反馈,在矫形的同时还能够训练患者的动作^[30],相对于其他技术,具有虚拟性、高度逼真、娱乐性的特点,用虚拟的系统 and 自然的科学方式实现人与产品的交互。

4.4 脑机接口技术

脑机接口技术(BCI)是一种人脑与外部设备实时通信系统,把人的思维活动转变成命令信号驱动的

外部设备,实现人脑和外部环境的人机交互^[31]。动作模式识别是 BCI 的核心内容之一,在无人照看的情况下患者可进行功能性的辅助训练。基于脑电信号的 BCI 能够反映不同患者的运动功能状态,并作为反馈自适应调节康复训练难易,利用触觉感知接口实现力觉反馈,使患者感觉到肢体受力的作用^[32]。BCI 技术起步较晚,造价昂贵,未来将会不断完善和成熟,是康健产品智能化设计的重要技术之一。

5 结语

通过对踝关节矫形器设计与应用技术相关内容的综述,明确了踝足矫形器的发展趋势。随着现代科学技术的快速发展、康复护理理念的深入影响,促进了 AFO 的一系列改良,从佩戴方式、制作材料或是配合治疗方法上,都有不同程度的进步,从传统的支具、SAFO、DAFO、CAFO、功能的演变,到结合智能化技术的设计,都表明了踝关节产品设计研究的进步。3D 打印技术、三维步态分析技术、虚拟现实仿真技术、脑机接口技术等科学技术作为医疗领域研究的热点,同样可用于 AFO 设计的研究之中。可以预见,当前设计理念的转变,科学技术的快速发展,人机交互、智能化将会成为踝关节矫形器设计研究的热点。

参考文献:

- [1] 范雨轩,韩淑艳,ANTONIOJEVIC D,等.工业 4.0 时代我国康复辅具产业园发展模式探究[J].广州体育学院学报,2019,39(3): 62-67.
FAN Yu-xuan, HAN Shu-yan, ANTONIOJEVIC D, et al. Research on the Development Model of China's Rehabilitation Aids Industrial Park in the Age of Industry 4.0[J]. Journal of Guangzhou Sport University, 2019, 39(3): 62-67.
- [2] 樊瑜波. 康复工程研究与康复辅具创新[J]. 科技导报,2019,37(22): 6-7.
FAN Yu-bo. Rehabilitation Engineering Research and Innovation of Rehabilitation Aids[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(22): 6-7.
- [3] 周爱民,苏建宁,阎树田,等.基于形态美度的产品多意象预测模型[J].图学学报,2018,39(4): 654-660.
ZHOU Ai-min, SU Jian-ning, YAN Shu-tian, et al. Product Multi-Image Prediction Model Based on Aesthetic Measure of Form[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(4): 654-660.
- [4] 王年文,王剑.基于 QFD/TRIZ 的热透灸理疗仪创新设计[J].包装工程,2018,39(22): 218-224.
WANG Nian-wen, WANG Jian. Innovative Design of Hot Moxibustion Therapy Apparatus Based on QFD/TRIZ[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(22): 218-224.
- [5] 侯利业. 3D 打印技术对工业产品形态的影响分析[J]. 包装工程,2019,40(14): 41-44.
HOU Li-ye. Influence of 3D Printing Technology on

- Industrial Product Form[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(14): 41-44.
- [6] 林志伟, 王应球, 郑群香. 不同材料矫形器的生物力学性能[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(21): 3965-3968.
- LIN Zhi-wei, WANG Ying-qiu, ZHENG Qun-xiang. Biological Properties of Orthoses Made of Different Materials[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2011, 15(21): 3965-3968.
- [7] 戴璐璐, 章茜, 饶高峰. 踝足矫形器辅助本体感觉训练对脑卒中后偏瘫患者运动功能及表面肌电图的影响[J]. 中国康复, 2019, 34(6): 287-290.
- DAI Luo-luo, ZHANG Xi, RAO GAO-feng. Effects of Ankle-Foot Orthosis Assisted Proprioceptive Training on Motor Function and Surface Electromyography Stroke Patients with hemiplegia[J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2019, 34(6): 287-290.
- [8] 邵景娇, 陶毓博, 潘玲, 等. 康复矫形器的设计与材料的应用现状[J]. 现代生物医学进展, 2019, 19(4): 794-797.
- SHAO Jing-jiao, TAO Yu-bo, PAN Ling, et al. Application Status of Design and Materials of Rehabilitation Orthotics[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2019, 19(4): 794-797.
- [9] 方新. 矫形器的医疗器械监管分析[J]. 中国康复理论与实践, 2016, 22(6): 737-740.
- FANG Xin. Analysis on Medical Device Supervision of Orthoses[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2016, 22(6): 737-740.
- [10] 李伟, 吴燕丹. 踝足矫形器在脑瘫儿童运动康复中的应用研究进展[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 102-108.
- LI Wei, WU Yan-dan. Research Progress in Application of Ankle Foot Orthosis in Sports Rehabilitation of Children with Cerebral Palsy[J]. Journal Of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2017, 33(3): 102-108.
- [11] 张芳兰, 邵帅. 踝足矫形器发展现状与设计研究[J]. 科技创新与应用, 2019(3): 100-101.
- ZHANG Fang-lan, SHAO Shuai. Development and Design of Ankle Foot Orthotic[J]. Technology Innovation and Application, 2019(3): 100-101.
- [12] 张晓玉. 截瘫行走矫形器智能技术研究进展[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 51-59.
- ZHANG Xiao-yu. Advances in Intelligent Technology of Paraplegic Walking Orthotics[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(22): 51-59.
- [13] 陈殿生, 宁萌, 阮子喆, 等. 电动往复式步态矫形器机构优化设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 33-41.
- CHEN Dian-sheng, NING Meng, RUAN Zi-zhe, et al. Mechanism Design and Optimization for Electric Reciprocating Gait Orthoses[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 33-41.
- [14] 李鹏程, 陈奇刚, 耿春梅, 等. 踝足矫形器在脑卒中的应用[J]. 中国康复, 2019, 34(2): 98-100.
- LI Peng-cheng, CHEN Qi-gang, GENG Chun-mei, et al. Application of Ankle Foot Orthotics in Cerebral Apoplexy[J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2019, 34(2): 98-100.
- [15] 王年文, 王剑. 基于模糊综合评价的动态踝足矫形器设计评价研究[J]. 机械设计, 2019, 36(5): 139-144.
- WANG Nian-wen, WANG Jian. Design and Evaluation of Dynamic Ankle-foot Orthosis Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(5): 139-144.
- [16] 毕翼飞, 王年文, 朱亦吴. 基于感性工学的老年陪护机器人造型设计[J]. 包装工程, 2018, 39(2): 160-165.
- BI Yi-fei, WANG Nian-wen, ZHU Yi-wu. Form Design of Accompany Robot for the Elderly Based on Kansei Engineering[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(2): 160-165.
- [17] 辛玉甫, 荣姗姗, 尤爱民, 等. 脑卒中偏瘫临床应用的支具材料: 种类及其生物相容性[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(30): 4887-4891.
- XIN Yu-fu, RONG Shan-shan, YOU Ai-min, et al. Brace Materials for Patients with Post-stroke Hemiplegia: Categories and Biocompatibility[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2015, 19(30): 4887-4891.
- [18] 张韶华, 刘劲松, 王林. 偏瘫患者碳纤维踝足矫形器的设计和制作[C]. 第三届北京国际康复论坛文集报, 2009.
- ZHANG Shao-hua, LIU Jin-song, WANG Lin. Design and Manufacture a Carbon Fiber Ankle-foot Orthosis[C]. The 3rd Beijing International Forum on Rehabilitation, 2009.
- [19] 黄宏亮, 黄方. 踝足矫形器对脑瘫患儿步行周期的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2008, 23(2): 175.
- HUANG Hong-liang, HUANG Fang. Effect of Ankle Foot Orthotics on Walking Cycle in Children with Cerebral Palsy[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2008, 23(2): 175.
- [20] ENG J J, PIERRYNOWSKI M R. Effect of Foot Orthotics on the Kinematics of the Knee Joint[J]. Journal of Biomechanics, 1989, 22(10): 1007.
- [21] 王云霞, 冉春风, 唐映, 等. 计算机辅助下可动式踝足关节计量矫形器的临床应用[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(11): 1730-1736.
- WANG Yun-xia, RAN Chun-feng, TANG Ying, et al. Clinical Application of the Computer-aided Movable and Measurable Ankle-foot Orthosis[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2017, 21(11): 1730-1736.
- [22] 刘震. 基于 3D 打印技术的康复辅具数字化设计、材料优化和智能制造研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2019.
- LIU Zhen. Research on Digital Design, Material Optimization and Intelligent Manufacturing of Rehabilitation Aids Based on 3D Printing Technology[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2019.
- [23] 陈香. 一种新型足下垂矫形器的创新设计[J]. 机械设计, 2016, 33(10): 113-115.
- CHEN Xiang. Innovation Design of a Kind of New Orthoses for Foot Drop[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(10): 113-115.

- ZUO Mei-yun. Connotation and Model of Smart Elderly Care[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [3] 吴金良, 马玲, 王伟. 智慧居家养老系统的构建——以需求为视角[J]. 电子商务, 2018(3): 42-44.
- WU Jin-liang, MA Ling, WANG Wei. Construction of Smart Home Pension System: from the Perspective of Demand[J]. Electronic Commerce, 2018(3): 42-44.
- [4] SAPCI A H. Innovative Assisted Living Tools, Remote Monitoring Technologies, Artificial Intelligence-Driven Solutions, and Robotic Systems for Aging Societies: Systematic Review[J]. JMIR Aging, 2019, 2(2): 15429.
- [5] 胡飞. 定义“服务设计”[J]. 包装工程, 2019, 40(10): 37-51.
- HU Fei. Definition of “Service Design”[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(10): 37-51.
- [6] POLAINE A, LAVRANS L, BEN R. Service Design: from Insight to Implementation[M]. Louis Rosenfeld, 2013.
- [7] 高颖. 服务设计中体验价值的创新路径研究[J]. 新美
- 术, 2019, 40(4): 92-96.
- GAO Ying. Innovation Path of Experience Value in Service Design[J]. New Art, 2019, 40(4): 92-96.
- [8] KUMAR K D, REDDY P K, REDDY P B, et al. Improving the Performance of Collaborative Filtering with Category-Specific Neighborhood[C]. Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, 2016.
- [9] 石刚, 李子平. 社区智能养老服务体系构建研究[J]. 电子政务, 2015(4): 82-89.
- SHI Gang, LI Zi-ping. Construction of Community Intelligent Pension Service System[J]. E-Government, 2015(4): 82-89.
- [10] 刘梦非, 凌亚利, 何人可. 智慧养老领域隐式交互的应用现状及前景[J]. 包装工程, 2020, 41(2): 13-20.
- LIU Meng-fei, LING Ya-li, HE Ren-ke. Application Status and Prospects of Implicit Interaction in the Field of Smart Pension[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(2): 13-20.

(上接第 13 页)

- [24] 刘震, 张盘德, 容小川, 等. 脑卒中踝足矫形器的 3D 打印研究[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32(8): 874-878.
- LIU Zhen, ZHANG Pan-de, RONG Xiao-chuan, et al. A Study of 3D Printing for Stroke Patients Specific Ankle-foot Orthoses[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2017, 32(8): 874-878.
- [25] 李辉, 刘琦, 李剑. 基于形态体验的老年康复辅具设计[J]. 包装工程, 2018, 39(20): 152-158.
- LI Hui, LIU Qi, LI Jian. Design of Elderly Rehabilitation Aids Based on Morphological Experience[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(20): 152-158.
- [26] 邹瞿超, 金锦江, 黄天海, 等. 3D 打印技术在医疗领域的研究进展[J]. 中国医疗器械杂志, 2019, 43(4): 279-281.
- ZOU Qu-chao, JIN Jin-jiang, HUANG Tian-hai, et al. Research Progress of 3D Printing Technology in Medical Field[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2019, 43(4): 279-281.
- [27] 王岩, 张明. 足踝矫形器及其生物力学研究进展[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 60-68.
- WANG Yan, ZHANG Ming. Biomechanics of orthoses of the foot and ankle[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(22): 60-68.
- [28] 张彦新. 三维步态分析技术的现状与发展[J]. 康复学报, 2017, 27(3): 1-4.
- ZHANG Yan-xin. Three-dimensional Gait Analysis: Current Status and Future Developments[J]. Rehabilitation Medicine, 2017, 27(3): 1-4.
- [29] 李阳, 宋毓, 姜淑云, 等. 三维步态分析技术在矫形器领域的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2018, 33(7): 874-877.
- LI Yang, SONG Yu, JIANG Shu-yun, et al. Application of Three Dimensional Gait Analysis Technique in Orthotics[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2018, 33(7): 874-877.
- [30] 吕屏, 杨鹏飞, 李旭. 基于 VR 技术的虚拟博物馆交互设计[J]. 包装工程, 2017, 38(24): 137-141.
- LYU Ping, YANG Peng-fei, LI Xu. Virtual Museum Interaction Design Research Based on VR Technology[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(24): 137-141.
- [31] 陈树耿, 贾杰. 脑机接口在脑卒中手功能康复中的应用进展[J]. 中国康复理论与实践, 2017, 23(1): 23-26.
- CHEN Shu-geng, JIA Jie. Application of Brain-computer Interface in Rehabilitation of Hand Function after Stroke (Review)[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2017, 23(1): 23-26.
- [32] 谢平, 陈迎亚, 郝艳彪, 等. 基于脑肌电融合的混合脑机接口研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2016, 35(1): 20-30.
- XIE Ping, CHEN Ying-ya, HAO Yan-biao, et al. Multimodal Fusion of EEG and EMG Signals for a Hybrid BCI[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2016, 35(1): 20-30.