

# 手腕康复机器人功能设计与外观设计

赵耀虹, 夏昊, 王自谦, 李瑞琴  
(中北大学, 太原 030051)

**摘要:** **目的** 人体的手腕是活动中易损伤的关节, 为辅助患者对手腕部位进行连续性标准化康复训练, 设计一种结构紧凑、使用方便的手腕康复机器人。**方法** 根据康复医学原理确定腕关节的转动运动范围, 设计一种 3-RRP 球面并联式外骨骼康复机器人。通过虚拟样机对康复机器人进行仿真实验。使用 MATLAB 求解康复机器人的工作空间。根据人机工程学对机器人进行外观安全设计。**结果** 该机器人有 3 个转动自由度, 可实现腕关节掌屈/背伸、尺偏/桡偏、与小臂一起旋转运动。仿真实验表明该机器人可满足手腕关节康复训练要求, 运行平稳, 机器人的工作空间为球面的一部分, 且连续无空洞。外形与色彩及人性化尺度设计使患者能够享受良好的医疗体验。**结论** 使用该机器人可以达到腕关节的康复效果, 研究结果为手腕康复机器人的产品工业化设计奠定了理论基础。

**关键词:** 康复机器人; 功能设计; 工作空间; 外观设计

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)08-0118-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.06.020

## Function and Appearance Design of Wrist Rehabilitation Robot

ZHAO Yao-hong, XIA Hao, WANG Zi-qian, LI Rui-qin  
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT:** The wrist of human body is a joint that is easily damaged in activity. The work aims to design a parallel wrist rehabilitation robot with a compact, safe and flexible structure for assisting the patient to perform the continuous and standardized rehabilitation training of the wrist. According to the principle of rehabilitation medicine, the rotation range of wrist joint was determined and a 3-RRP spherical parallel exoskeleton rehabilitation robot was designed. The rehabilitation robot was simulated by virtual prototype. The workspace of rehabilitation robot was solved by MATLAB. According to ergonomics, the safety design of robot appearance was carried out. The robot had three rotational degrees of freedom and could realize the wrist palmar flexion/dorsi-extension motion, ulnar deviation/radial deviation motion, and rotational motion with the arm. The simulation results showed that the robot could satisfy the requirements of wrist rehabilitation training, and move stably. The workspace of the robot was a part of the spherical surface, and continuous without holes. The shape, color and humanized scale design enabled patients to enjoy a good medical experience. The rehabilitation effect of wrist joint movement can be achieved by the robot. The research results lay a theoretical foundation for the industrialized production of the wrist rehabilitation robot products.

**KEY WORDS:** rehabilitation robot; function design; workspace; appearance design

近年来, 随着智能控制及机器人技术的不断发展, 围绕医疗、养老等迫切民生需求, 我国正加快人工智能创新应用, 为公众提供个性化、多元化、高品质服务, 让人们能够最大限度地享受高质量服务和便捷生活, 应对人口老龄化及对医疗资源需求的增长,

功能康复与辅助机器人现在已经逐步成为临床康复治疗的重要技术手段之一。

人体的手腕是活动中易扭伤或损伤的关节, 并且随着全球老龄化的加剧, 越来越多的中风患者和行动不便的患者出现, 大约六分之一的人一生中可能会有

收稿日期: 2018-12-12

作者简介: 赵耀虹(1977—), 女, 山西人, 博士生, 中北大学副教授, 主要研究方向为机械设计及理论。

中风的风险，其中三分之二患者都会遭受手部麻痹<sup>[1]</sup>。近年来，国内外许多学者对手腕外骨骼机器人开展深入研究，李明强等设计了一款外骨骼式三自由度便携腕部康复机器人，采用 Maxon 电机驱动，具有 3 个独立自由度，手腕的 3 种运动需要 3 种机械传动分别实现<sup>[2]</sup>。Kang Xiang Khor 等将柔性转向平台与机器人集成，以实现手腕和前臂康复训练，训练方式有较大的局限性<sup>[3]</sup>。Lincong Luod 等研究了一种具有 3 个自由度的适用于前臂和手腕的外骨骼康复架，机构虽然实用坚固但比较笨重，携带困难，不利于推广<sup>[4]</sup>。J Houdijn Beekhuis 等研究了一种新型的自对准自由度手腕和前臂的康复外骨骼<sup>[5]</sup>。该设计运用平行四边形来调节使机构转动中心对准手腕中心，动态适应不同人群从而减少用户与设备之间的相互作用力和穿戴的时间。Martinez J A 等研究了有 3 个转动关节组成的串联运动结构实现手腕康复训练的外骨骼<sup>[6]</sup>。总之，目前手腕外骨骼康复机器人研究存在柔性不足、结构庞大、不易携带等问题，功能设计与外观设计是目前急需解决的问题。本文基于机构紧凑性与安全性考虑，提出了一种并联式外骨骼手腕康复机器人。

## 1 功能的安全设计

### 1.1 腕关节运动形式与活动范围分析

人体腕关节由手的舟骨、月骨和三角骨的近侧关节面作为关节头，桡骨的腕关节面和尺骨头下方的关节盘作为关节窝而构成。腕关节是典型的椭圆关节，有凸凹两个椭圆形关节面，属双轴关节，可做前后的轴屈伸运动和左右的伸展运动。当所有的运动联合起来，可形成环转运动。其中伸的幅度比屈的幅度小，这是由于桡腕掌侧韧带较为坚韧，使后伸的运动受到限制<sup>[7]</sup>。腕关节的活动范围见表 1，手与前臂伸直呈一条直线，手掌向下，是腕关节的 0°位。

肢体各个关节都有各自的功能位，即健康人群肢体处于某个位置上时能够很快地做出不同动作的体位，当关节功能出现病患，不能完全恢复原状时，则必须保证其最有效、最起码的活动范围，即以各个关节的功能为中心而扩大的活动范围，这就是患者进行有效康复训练后关节能够达到的范围，例如腕关节伸曲活动范围为 20°~30°。

表 1 腕关节的活动范围  
Tab.1 Motion range of wrist joint

活动方式	具体动作	活动范围
掌屈	向手心方向弯手腕	50°~80°
背伸	向手背方向抬手腕	40°~70°
尺偏（内收）	手腕伸直向小手指的方向偏手掌	30°~40°
桡偏（外展）	手腕伸直向大拇指的方向偏手掌	25°~30°

### 1.2 腕关节外骨骼康复机器人建模

外骨骼康复机器人应用于医疗康复领域，应避免在使用过程中对患者进行二次伤害，外骨骼建模最大的特点在于人机合一，人机交互时两者的契合度、灵活性和舒适度与所建运动模型密切相关<sup>[8-9]</sup>。

腕关节完成掌屈/背伸、尺偏/桡偏及环转运动可以看作是分别围绕直角坐标系 3 条坐标轴的运动，因此手腕外骨骼康复机器人构型需要实现的运动为围绕空间一点的空间三转动机构，机构运动学模型见图 1。

手腕外骨骼康复机构为球面机构，主要由动平台、静平台和 3 条 RRP 支链构成。静平台为圆盘结构，动平台由 3 条均匀分布的弧形杆组成，机构的运动副从静平台到动平台分别为转动副 R、转动副 R、移动副 P，机构的所有圆弧的中心与转动副的轴线都交汇于球心。

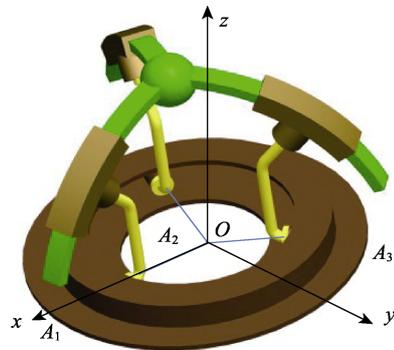


图 1 机构运动学模型  
Fig.1 Kinematic modeling of the mechanism

### 1.3 手腕外骨骼康复机构自由度分析

机构静平台水平放置时，建立固连于静平台的静坐标系 O-xyz。原点 O 位于转动副 A1、A2、A3 三条转动轴线的交点上，x 轴位于 OA1 方向上，z 轴竖直向上，y 轴垂直于 xOz 平面，方向满足右手螺旋定则。

采用修正的 K-G 公式计算手腕外骨骼康复机构的自由度 M，即  $M=d(n-g-1)+\sum_{i=1}^g f_i+v-\zeta$ ，式中：M 表示机构的自由度，d 表示机构的阶数， $d=6-\lambda$ ，由于 3 个约束螺旋相同故  $\lambda=3$ ，所以 d 为 3，n 表示构架在内的构件数，g 表示运动副的数目，fi 表示第 i 个运动副的自由度数，v 表示冗余约束数，ζ 表示机构的局部自由度数，所以， $M=3(8-9-1)+9=3$ 。

该机构的自由度为 3，即有 3 个转动自由度，即绕 x 轴，y 轴和 z 轴的转动自由度。机构自由度符合人体手腕关节康复运动做三维转动要求。

## 2 康复机器人虚拟样机仿真分析

为满足腕关节康复治疗能够达到患者的功能位

要求,并且避免手腕康复机器人在治疗过程中对患者手腕产生较大的刚性冲击,防止二次伤害,将建立好的模型导入 Adams 中,添加相应约束,对构建的手腕康复机构虚拟样机进行运动学仿真。

驱动输入参数曲线与末端点  $P$  绕  $z$  轴转角变化曲线见图 2,对于定平台相连接的 3 个转动副同时施加见图 2a 的驱动参数(转角逆时针时为正)。通过调用 SPLINE 曲线控制 3 个驱动,驱动控制如下:驱动  $i=AKISPL(\text{time}, 0, \text{SPLINE}_i, 0)(i=1,2,3)$ ,仿真控制如下:  $\begin{cases} \text{Endtime} = 4 \\ \text{Step} = 200 \end{cases}$ ,得到动平台中心  $P$  绕  $z$  轴的旋转角度变化曲线如见图 2b。

由图 2b 可以看出,末端点  $p$  由初始位置  $0^\circ$  开始平缓转动,绕  $z$  轴最大转动范围在  $-60^\circ \sim 60^\circ$  之间。

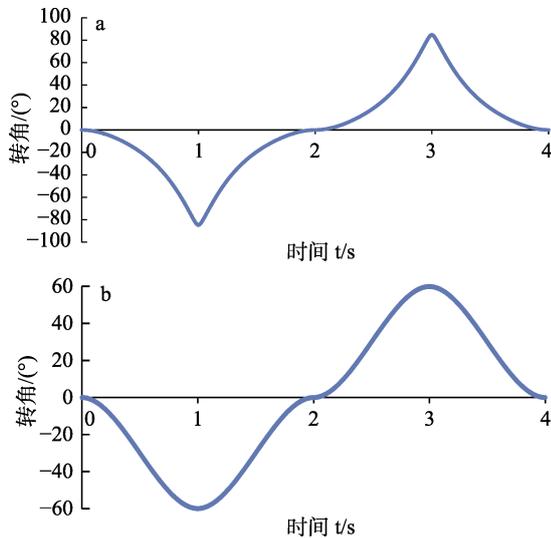


图 2 驱动输入参数曲线与末端点  $P$  绕  $z$  轴转角变化规律  
Fig.2 Curve of driving input parameter and variation of the rotation angle of  $P$  around  $z$  axis

驱动输入参数曲线图与末端点  $P$  绕  $x$  轴转角变化曲线见图 3,对定平台相连接的 3 个驱动  $q_1q_2q_3$  各施加见图 3a 的驱动参数(逆时针转动为正),得到动平台中心点  $P$  绕  $x$  轴转动的转角变化见图 3b。可看出  $x$  轴转动范围在  $-50^\circ \sim 35^\circ$  之间。

驱动输入参数曲线与末端点  $P$  绕  $y$  轴转角变化曲线见图 4,对 3 个驱动各施加见图 4a 的驱动参数(逆时针转动为正),得到动平台中心绕  $y$  轴的旋转角度变化曲线见图 4b。可看出  $y$  轴的转动范围在  $-30^\circ \sim 25^\circ$  之间。

仿真结果表明,手腕外骨骼康复机器人可以输出沿 3 个坐标轴的转动,在工作过程中,曲线平滑没有突变,说明机构的运动性能良好,不会对患者手腕造成大的刚性冲击,避免二次伤害。患者将手臂放置托架上,手握手柄,绕  $x$  轴转动为手腕的屈伸运动,角度范围可以满足康复治疗要求,沿  $y$  轴的转动范围为  $-30^\circ \sim 25^\circ$ ,可以完成患者尺偏桡偏康复训练要求,沿

$z$  轴的转动角度范围最大,可以实现手腕  $-60^\circ \sim 60^\circ$  环转康复训练。

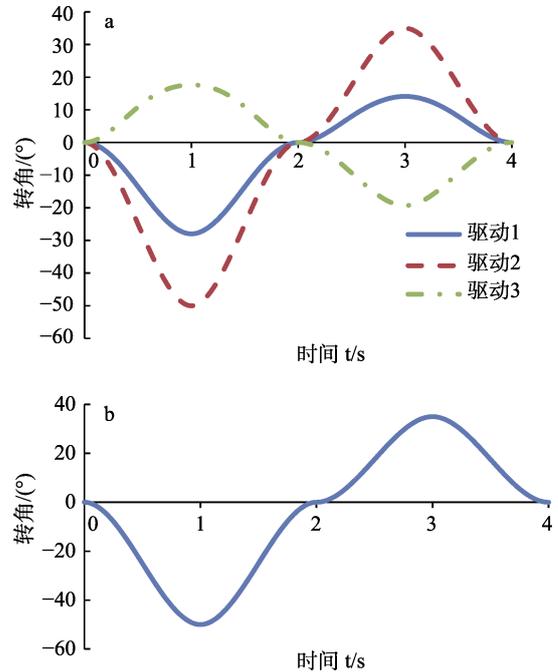


图 3 驱动输入参数曲线与末端点  $P$  绕  $x$  轴转角变化曲线  
Fig.3 Curve of driving input parameter and variation of the rotation angle of  $P$  around  $x$  axis

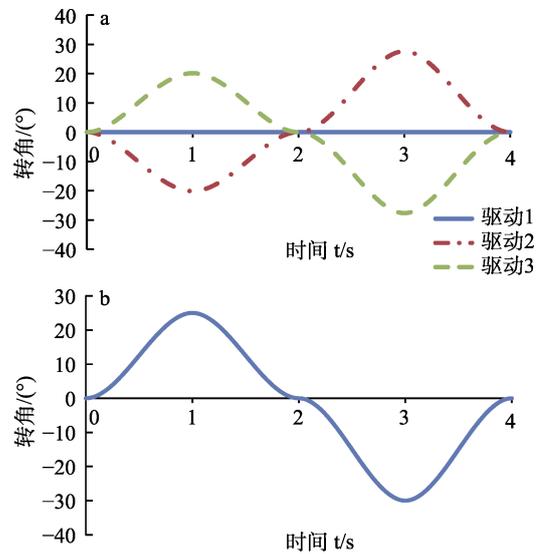


图 4 驱动输入参数曲线与末端点  $P$  绕  $y$  轴转角变化曲线  
Fig.4 Curve of driving input parameter and variation of the rotation angle of  $P$  around  $y$  axis

### 3 手腕外骨骼康复机器人工作空间分析

工作空间是指机器人末端执行器的工作区域,工作空间的大小代表了机器人的活动范围,因此工作空间是衡量一个机器人性能的重要指标。并联机构的工作空间是指并联机构末端执行器参考点的工作区域<sup>[10-11]</sup>。选取该机构动平台中心点  $P$  为研究工作空间

的参考点。理论上,该机构的工作空间应是完整的球面,但由于机构受转动角度及构件之间相互作用,工作空间会是球面的一部分。

基于该机构的位姿正解方程,在 Matlab 中使用 fsolve 函数进行求解,给定机构驱动副  $\theta_i$  的范围是  $(-20^\circ \sim 20^\circ)$ ,球面半径  $R=180 \text{ mm}$ ,两个转动副轴线  $OA_i$  与  $OB_i$  夹角  $\beta=40^\circ$ 。给定该机构的一组初解值(作为 fsolve 函数求解的初值),求出机构的工作空间见图 5。

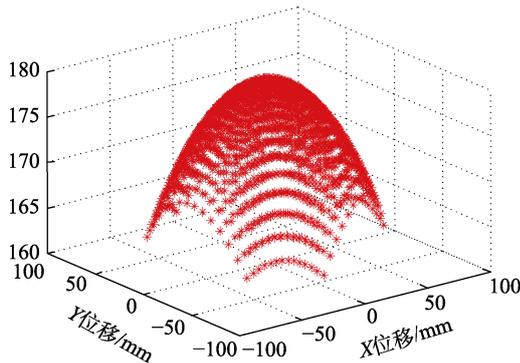


图 5 手腕外骨骼康复机器人的工作空间  
Fig.5 Workspace of the wrist exoskeleton rehabilitation robot

可以看出:该机构的工作空间是一个球面,结构紧凑且连续没有空洞,具有良好的工作空间性能,而且该机构的工作空间是明显对称分布的,与机构构型对称分布形式相吻合,可以验证工作空间求解的正确性,为腕关节康复机器人的控制策略提供一定的理论依据。

## 4 外观的安全设计

手腕外骨骼康复机器人是以老年人或受伤患者为服务对象,老年人由于年龄逐渐衰老,行为退化,缺少尝试现代智能康复机器人治疗疾病的机会,容易丧失康复的信心。受伤患者由于疾病的困扰,往往情绪低落,悲伤痛苦,烦躁不安,在精神上产生恐惧和焦虑。外在视觉安全是保证弱势群体心理上接受和使用的前提。为了消除“人-机-环境”统构筑的医院特殊氛围环境条件下患者产生的紧张、恐惧、焦虑等心理状态,外观设计应营造安全、稳重的氛围<sup>[12]</sup>。

### 4.1 外形与色彩的设计

手腕外骨骼康复机器人见图 6,由圆形托盘底座、上肢前臂托架、手持手柄及内部的工作机构组成。为了给使用者足够的安全感使用康复机器人,机械部分采用外壳遮盖,干净的白色与恰当的曲面造型,既稳重又增加了几分亲和力,底座采用双层圆盘造型,底圆半径为  $200 \text{ mm}$ ,机器人工作重心落于底盘,富有金属质感的色彩给使用者踏实的心理暗示。横平竖直的托架支杆与手持杆相互呼应,直线线条设计使整个

产品凸显康复仪器的严肃性。明亮的天空蓝色给使用者眼前一亮的感觉,可以缓解病痛带来的烦恼,愉快地进行康复训练。浓重的黑色是力量的象征,手柄的颜色给予使用者极大的信心,增加了战胜疾病的勇气。



图 6 手腕外骨骼康复机器人  
Fig.6 Wrist exoskeleton rehabilitation robot

### 4.2 人性化尺度设计

手腕外骨骼康复机器人设计应以用户需求和 Usage 方式为中心,不仅需要关注产品的基本功能与形式,而且应更加关心产品使用过程中的用户体验。产品应给患者以高效便捷的操作体验、安全舒适的医疗体验以及亲和舒心的情感体验,因此机器人的人性化尺度设计应以人机工程学为基础,综合考虑使用者的感受<sup>[13-14]</sup>。

使用该机器人的患者为手腕功能受损者,康复治疗时应采取坐姿,因此康复机器人应放置于工作台。上肢前臂托架的高度为人体手臂自然抬起时的高度,这里设计为  $200 \text{ mm}$ ,托架到手柄的高度应为一个拳头的高度,取值  $50 \text{ mm}$ ,手柄与动平台中心相连,保证康复训练时手腕中心和机构转动中心重合。为适应前臂不同尺寸的患者,托架下方设计了 U 型凹槽轨道,托架可以调节与手柄的相对距离,可调节手臂托架见图 7。手柄设计采用流线型曲面造型,曲面与患者手部握紧时自然吻合,增加了患者的舒适度。操作按钮放置于底板,另一只手可轻松触及,开关用红绿颜色区分,简单易懂,操作方便安全。

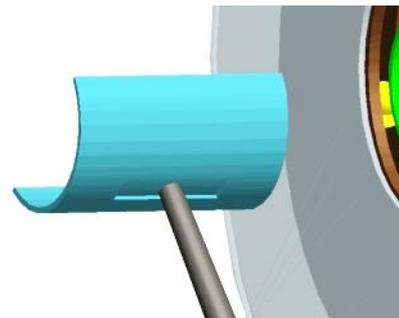


图 7 可调节手臂托架  
Fig.7 Adjustable arm bracket

手腕外骨骼康复机器人工作部分为球面并联机构,并联机构与传统机构相比具有结构紧凑、高精度、高刚度的特点,本文球面机构半径 $R$ 为180 mm,因此,机器人外型尺寸设计为500 mm×400 mm×500 mm,当然,并联机构还有一个优点,如果想要改变整体外型尺寸,只要改变球面并联机构的半径即可,转动范围不受影响。

## 5 结语

以手腕关节康复训练出发,结合手腕运动活动度要求,提出结构紧凑、安全柔性的手腕外骨骼康复机器人。机构具有3个自由度,工作空间紧凑,虚拟样机仿真分析表明机构性能良好,满足手腕康复训练要求,外观设计与人性化尺度设计可以使其良好地协助脑卒中或创伤后手腕功能受损患者进行日常康复训练和生活辅助。康复训练过程轻柔、缓慢,促进血液循环以防止腕关节僵硬,既可在医院康复使用,也可在家庭个人使用,最终达到腕关节的康复效果。

### 参考文献:

- [1] 何雯,王凯. 脑卒中后上肢功能康复研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2014, 20(4): 334—339.  
HE Wen, WANG Kai. Advance in Rehabilitation of Upper Limb Function in Hemiplegic Patients after Stroke[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2014, 20(4): 334—339.
- [2] 李明强,谢叻. 腕功能康复机器人的设计与分析[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(4): 20—23.  
LI Ming-qiang, XIE Le. Research and Development of Wrist Rehabilitation[J]. Robot Machine Design&Research, 2016, 32(4): 20—23.
- [3] KANG X K, PATRICK J H C, CHE F Y. Portable and Reconfigurable Wrist Robot Improves Hand Function for Post-Stroke Subjects[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2017, 25(10): 1864—1873.
- [4] LINCONG L, LIANG P, ZENGGUANG H. Design and Control of a 3-DOF Rehabilitation Robot for Forearm and Wrist[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2017(9): 4127—4130.
- [5] BEEKHUIS H J, ARD J W. Design of a Self-aligning 3-DOF Actuated Exoskeleton for Diagnosis and Training of Wrist and Forearm after Stroke[J]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2013(8): 1—5.
- [6] MARTINEZ J A, NG P, LU S. Design of Wrist Gimbal: A Forearm and Wrist Exoskeleton for Stroke Rehabilitation[J]. 2013 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2013(6): 1—6.
- [7] 陆廷仁. 骨科康复学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2007.  
LU Ting-ren. Orthopedic Rehabilitation[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2007.
- [8] 胡鑫,张颖,李继才. 一种外骨骼式手功能康复训练器的研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2016(1): 23—30.  
HU Xin, ZHANG Ying, LI Ji-cai. S Study on an Exoskeleton Hand Function Training Device[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2016(1): 23—30.
- [9] 许祥,侯丽雅,黄新燕. 基于外骨骼的可穿戴式上肢康复机器人设计与研究[J]. 机器人, 2014, 36(2): 147—155.  
XU Xiang, HOU Li-ya, HUANG Xin-yan. Design and Research of a Wearable Robot for Upper Limbs Rehabilitation Based on Exoskeleton[J]. Robot, 2014, 36(2): 147—155.
- [10] SY KO, JO PARK, S PARK. Workspace Analysis of Upper Limb for a Planar Cable-driven Parallel Robots Toward Upper Limb Rehabilitation[J]. International Conference on Control, 2014(5): 352—356.
- [11] GUPTA A, MK O'MALLEY. Design of a Haptic Arm Exoskeleton for Training and Rehabilitation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(3): 280—289.
- [12] 李剑,李辉,李立峰. 康复辅具安全设计探析[J]. 包装工程, 2012, 33(6): 65—68.  
LI Jian, LI Hui, LI Li-feng. Analysis of Rehabilitation Aids Safety Design[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(6): 65—68.
- [13] 吴新林. 基于人机工程学的人性化医疗器械设计[J]. 重庆科技学院学报, 2014(12): 123—125.  
WU Xin-lin. Ergonomic Design of Medical Devices Based on Humane[J]. Chongqing University of Science and Technology, 2014(12): 123—125.
- [14] 万莹,万依依,朱晓明. 形态与功能融合的医疗器械创新设计研究[J]. 包装工程, 2017, 38(4): 138—142.  
WAN Xuan, WAN Yi-yi, ZHU Xiao-ming. Medical Devices Innovative Design of Form and Function Integration. Design[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(4): 138—142.