

【工业设计】

坐式下肢康复训练机器人人机舒适度设计

王年文, 陈明含, 谭晓萌, 季晨, 高慧渊
(燕山大学, 秦皇岛 066000)

摘要: **目的** 从满足脑卒中偏瘫患者或行走能力弱的患者, 进行下肢康复训练时对设备的使用需求出发, 对传统坐式下肢外骨骼康复机器人进行改造, 以增强机器人的人机舒适度。**方法** 通过主观评价的方法, 对坐式下肢康复训练机器人的座椅椅背处于不同角度时不同患者的舒适度进行评价; 并借助 JACK 软件创建第 95 百分位男性和第 5 百分位女性虚拟人体模型, 利用受力分析模块对虚拟人体第 4 节和第 5 节腰椎 (L4/L5) 进行受力分析, 得到座椅相对舒适角度区间; 通过分析使用者与设备的人机交互过程, 对外骨骼匹配性和显示装置的可视性进行人机工效评估。**结论** 通过对康复训练机器人的舒适度分析, 得出了更加符合人机关系的产品尺寸区间, 为康复训练产品舒适度方面的设计提供了有效的方法。

关键词: 人机工程; 坐式下肢康复机器人; JACK; 产品尺寸

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)20-0125-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.20.011

Improved Comfort Design of Sitting Lower Limb Rehabilitation Training Robot

WANG Nian-wen, CHEN Ming-han, TAN Xiao-meng, JI Chen, GAO Hui-yuan
(Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China)

ABSTRACT: A sitting lower limb rehabilitation training robot was designed to enhance the human-machine comfort of the rehabilitation training robot in order to meet the needs of lower limb rehabilitation training for stroke patients with hemiplegia or patients with weak walking ability. Subjective evaluation method was used to evaluate the comfort degree of the chair and back of the sitting lower limb rehabilitation training robot at different angles for different patients, and the relative comfort angle range of the seat and back was obtained. The 95th percentile male and 5th percentile female virtual human models were created with the help of JACK, and the force analysis module was used to conduct force analysis on the 4th and 5th lumbar vertebrae (L4/L5) of the virtual human body to obtain the relative comfort angle interval of the seat. Got the ergonomics assessment of exoskeleton fit and display device visibility by analyzing the human-machine interaction process between the user and the device. Through the analysis of the comfort degree of rehabilitation training robot, the product size range which is more in line with the human-machine relationship is obtained, which provides an effective method for the design of the comfort degree of rehabilitation training product.

KEY WORDS: ergonomics; sitting lower limb rehabilitation training robot; JACK; product size

下肢康复训练机器人是康复训练机器人中较为重要的一种, 通过辅助患者下肢进行有规划、适量的重复训练, 促进大脑皮质的重组, 进而恢复其运动功能^[1-2]。目前下肢康复训练机器人的形式主要分为单自由度、穿戴式、悬挂式和坐卧式等, 坐卧式下肢

康复机器人可以避免患者因康复初期虚弱肢体无法支撑整个身体的问题, 其逐渐成为近几年研究的热点^[3]。从国外的研究来看, 瑞士的 Motion Maker 机器人是首款由机械带动, 并结合功能性电刺激的设备^[4]; 由土耳其耶尔德兹技术大学研发的下肢康复机器人

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 2020 年度河北省社会科学基金项目 (HB20YS009)

作者简介: 王年文 (1979—), 男, 湖南人, 博士, 燕山大学教授, 主要研究方向为产品意象及康复辅具创新设计与评价。

通信作者: 陈明含 (1996—), 女, 河北人, 燕山大学硕士生, 主攻康养辅具工业设计。

Physiotherabot, 可以实现主动训练、被动训练和助动训练等多种模式^[5]。国内的燕山大学、哈尔滨工程大学等, 也对坐卧式康复机器人进行了大量研究^[6-7]。这些设备大多集中在对机器人智能控制、驱动方式、传感器、模拟算法等方面的研究, 对产品外观的简洁性、美观性、体验性和人机交互的适应性方面研究较少。针对上述问题, 根据坐式下肢康复机器人的主要功能和结构, 对康复机器人外观进行设计; 并通过主观评价法与 JACK 虚拟仿真相结合的方法, 对机器人的座椅舒适性、外骨骼匹配度和显示装置的可视域进行人机工程分析, 得出符合人机关系的产品尺寸区间, 从而提高康复机器人的舒适度, 减少患者在康复训练过程中因设备不符合人机工程学而造成的身体不适感。

1 坐式下肢康复训练机器人

1.1 传统坐卧式下肢康复训练机器人

坐式下肢康复训练机器人的主要目的是利用自动化设备帮助行走能力弱或无行走能力的患者进行科学有效的下肢康复训练, 以提高关节活动度, 防止肌肉萎缩, 促进身体血液循环, 从而帮助患者正常行走, 参与正常的社会生活。传统下肢康复训练机器人主要由座椅、下肢外骨骼和可视化显示装置 3 部分组成。虽然传统的机器人在功能上能够满足一般患者对下肢康复训练的基本需要, 但是在外观上还存在机械感较强、缺少人性化、造型风格不统一的缺点; 而且对于不同身高、体型的患者不能普遍适用, 在人机交互适应性方面还有待提高。传统坐式下肢康复机器人见图 1。

1.2 新型坐式下肢康复训练机器人外形设计方案

坐式下肢康复训练机器人的结构组成见图 2。对传统的坐式康复训练机器人外形进行改造, 通过美学设计使产品风格统一化, 使其更具人性化特点, 减少了冰冷的机械感, 同时对裸露线等进行包裹, 增加了其安全性。然而, 在人机交互适应性方面的问题还有待解决。



图 1 传统坐式下肢康复机器人

Fig.1 Traditional sitting lower limb rehabilitation robot

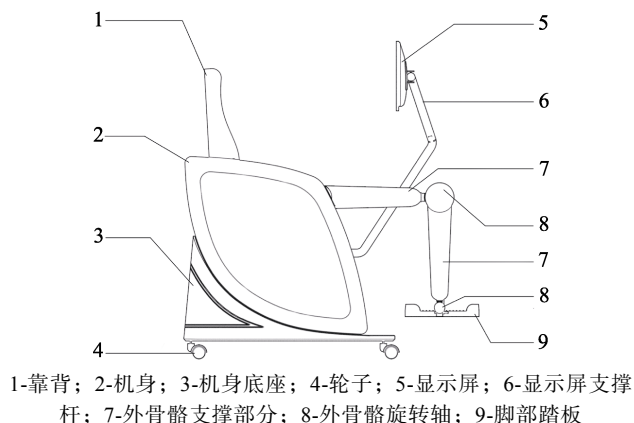


图 2 坐式下肢康复训练机器人的结构组成

Fig.2 Structural composition of a sitting lower limb rehabilitation training robot

2 新型康复训练机器人舒适性分析

坐式下肢康复训练机器人舒适性分析具有复杂性, 由于患者在进行下肢康复训练时是坐在座椅上, 通过显示装置的引导, 借助下肢外骨骼设备完成主动或被动的下肢运动的, 所以在分析人机之间的交互关系问题时, 主要从座椅舒适度、外骨骼匹配度和显示装置的可视性 3 个方面获取数据。整体下肢康复训练机器人舒适性分析框架见图 3。

2.1 虚拟人体模型建立

JACK 软件是当前应用较为广泛、较为成熟的一款可以建立虚拟人体模型, 并能够进行人机工效分析的软件^[8]。对下肢康复训练机器人进行虚拟仿真测试, 设备要尽量满足我国大多数患者的需求, 为使结果更加准确, 须采集大量的人体数据进行实验, 根据 GB 10000-1988《中国成人人体尺寸》, 选取第 95 百分位男性 (姓名 Make, 身高 177.5 cm, 体重 75 kg) 和第 5 百分位女性 (姓名 Jane, 身高 148.4 cm, 体重 42 kg) 作为身体尺寸的最大和最小值, 进行坐式下肢康复训练机器人人机交互仿真实验。人体生物力学模型见图 4。

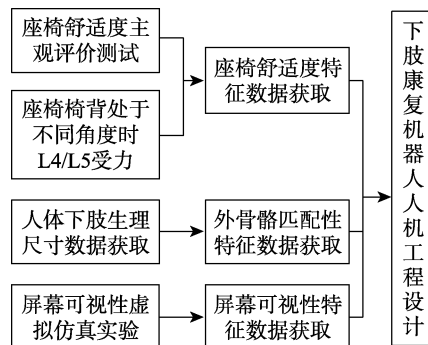


图 3 整体下肢康复训练机器人舒适性分析框架

Fig.3 Overall lower limb rehabilitation training robot comfort analysis framework



图 4 人体生物力学模型
Fig.4 Human biomechanical model

2.2 座椅舒适度分析

座椅是康复训练机器人的重要组成部分,分析座椅舒适度的主要目的是在患者进行久坐下肢康复训练时,避免对患者上半身的身体部位造成损伤,使患者处于舒适、放松的状态。座椅椅背角度是影响座椅舒适度的重要指标,对座椅舒适度的评价主要是对座椅椅背不同角度进行舒适度评价,在人体后倾不同角度时腰部位置可能会处于悬空状态,导致不能维持脊柱的正常生理弯曲,因此有无腰靠支撑也应作为舒适度分析的重要方面。为了获取更为准确的数据对坐式下肢康复机器人座椅舒适度进行分析,主要分为主观舒适度评价和虚拟仿真实验分析。

2.2.1 主观舒适度分析

主观实验主要采用调查问卷的形式,将被测者的主观感受分为 3 个梯度:轻松、适中和不适。被测者对座椅椅背处于不同角度时和有无要靠支撑时的舒适度进行评价,并说出整体实验中上半身感觉最不适的部位。首先,挑选 50 名健康正常成年人,年龄分布为 16~60 岁,身高分布为 148~178 cm,体重分布为 42~75 kg。然后设定座椅椅背与椅面之间的钝角为 α ($90^{\circ}\leq\alpha\leq180^{\circ}$),以 10° 为 1 个梯度将椅背的角度划分为 90° , 100° , 110° , 120° , 130° , 140° , 150° , 160° , 170° 和 180° 10 个角度梯度(采用数显尺确定),分别询问被测者处于不同角度时的舒适度感受。为了避免被测者因身体疲劳而造成实验结果误差,对每个角度梯度测试 5 min 后,设置 2 min 的休息时间,然后改变座椅椅背的角度继续进行测试。在测试结束后,让被测者说出上半身感觉最不适的部位。座椅椅背与椅面之间的夹角见图 5。

结束后进行数据统计分析,腰部无腰靠支撑条件下主观舒适度评价见表 1,腰部有腰靠支撑条件下主观舒适度评价见表 2,根据表 1 和表 2 的数据可知,随座椅椅背角度的增加,主观舒适度呈现先上升再下降的趋势,在腰部无腰靠支撑的条件下,座椅椅背角

度梯度的主观舒适度顺序为 $110^{\circ}>100^{\circ}>180^{\circ}>90^{\circ}>170^{\circ}>120^{\circ}>140^{\circ}>130^{\circ}>150^{\circ}>160^{\circ}$;在腰部有腰靠支撑的条件下,当座椅椅背与椅面之间的夹角处于 $90^{\circ}\sim160^{\circ}$ 时,有腰靠支撑明显比无腰靠支撑更加舒适。从整体上来看当座椅椅背与椅面之间的钝角夹角处于 $100^{\circ}\sim110^{\circ}$ 时,主观舒适度最高。测试结束后发现测试者上半身最不舒适的部位为腰部,在进行下肢康复训练时可以通过靠腰提高腰部舒适度。



图 5 座椅椅背与椅面之间的夹角
Fig.5 The angle between the seat back and the seat surface

表 1 腰部无腰靠支撑条件下主观舒适度评价 Tab.1 Subjective comfort evaluation of waist without lumbar support			
座椅靠背角度 $\alpha/^{\circ}$	轻松/人	适中/人	不适/人
90	21	25	4
100	25	24	1
110	27	21	2
120	19	25	6
130	16	26	8
140	18	25	7
150	14	27	9
160	13	27	10
170	19	26	5
180	22	25	3

表 2 腰部有腰靠支撑条件下主观舒适度评价 Tab.2 Subjective comfort evaluation under the condition of lumbar support			
座椅靠背角度 $\alpha/^{\circ}$	轻松/人	适中/人	不适/人
90	21	26	3
100	27	22	1
110	28	21	1
120	19	25	6
130	18	26	6
140	15	30	5
150	12	29	9
160	13	27	10
170	10	30	10
180	0	25	25

2.2.2 虚拟仿真分析

通过 JACK 虚拟仿真分析模拟患者进行下肢康复训练的过程,得出座椅椅背与椅面之间的钝角在 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 各个角度梯度下的人体关节受力。由于在进行主观舒适度评价时,根据问卷显示腰部为最不舒适的部位,所以选取第 4 节腰椎 L4 和第 5 节腰椎 L5 的受力情况进行分析。康复训练过程仿真见图 6。

根据虚拟仿真得出第 95 百分位男性和第 5 百分位女性第 4 节腰椎 L4 和第 5 节腰椎 L5 受力,见表 3。

根据表中数据分析,坐式下肢康复训练机器人在工作状态下,对第 95 百分位男性和第 5 百分位女性而言较为舒适的座椅部分椅背角度为 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 。

2.2.3 座椅舒适度分析结果

对坐式下肢康复训练机器人座椅椅背角度分别进行主观舒适度测试和 JACK 虚拟仿真测试,结果基本一致。当座椅椅背角度范围处于 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 时,处于工作状态的坐式机器人座椅最为舒适。

2.3 外骨骼匹配性分析

下肢外骨骼的作用,主要是辅助无行走能力或者

行走能力弱的患者,在坐姿状态下主动或被动完成下肢的一系列康复运动,对提高关节活动度、促进血液循环、防止肌肉萎缩有一定作用,能为患者行走训练做好准备,因此下肢外骨骼必须与患者下肢的关节活动结构相匹配。

以虚拟人体髋关节、膝关节、踝关节作为测量的重要基准点,利用 JACK 软件测量第 95 百分位男性和第 5 百分位女性人体模型髋关节到膝关节、膝关节到踝关节、踝关节到脚底和脚部长度的尺寸。下半身生理尺寸测量见图 7。

根据图 7 中测量数据显示,下肢外骨骼的尺寸应该能够根据患者下肢尺寸的不同进行调节,有利于增大外骨骼的适用人群范围,因此下肢外骨骼应满足: X_1 部分的长度可调节范围为 $200\sim 270\text{ mm}$ (减去大腿受座椅部分影响的尺寸); X_2 部分的长度可调节范围为 $339\sim 426\text{ mm}$; X_3 部分的长度可调节范围为 $60\sim 68\text{ mm}$;脚底踏板应以第 95 百分位男性的尺寸(257 mm)为标准,将踏板长度 V 设置为 270 mm 。下肢外骨骼见图 8。

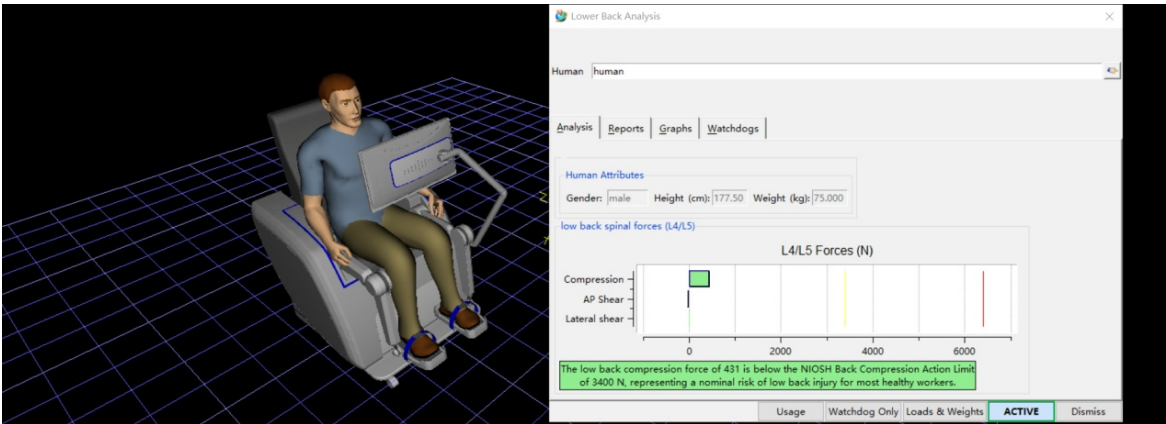


图 6 康复训练过程仿真
Fig.6 Rehabilitation training process simulation

表 3 第 4 节和第 5 节腰椎 (L4/L5) 受力
Tab.3 The fourth and fifth lumbar vertebrae (L4/L5)

座椅靠背角度 $\alpha/^{\circ}$	第 95 百分位男性第 4 节和第 5 节腰椎 (L4/L5) 受力			第 5 百分位女性第 4 节和第 5 节腰椎 (L4/L5) 受力		
	压力/N	切应力/MPa	剪应力/MPa	压力/N	切应力/MPa	剪应力/MPa
90	436.4	-25.0	-0.1	242.4	3.7	-3.9
100	505.0	-24.3	1.1	290.4	10.3	-3.0
110	650.0	-3.1	2.4	375.5	30.8	-1.9
120	772.0	19.2	3.5	448.9	50.6	-0.7
130	863.9	36.2	-5.0	508.2	68.9	0.4
140	911.1	48.5	-5.5	550.9	82.8	1.7
150	950.6	66.8	-6.3	571.0	93.1	2.6
160	961.0	83.0	-6.9	575.4	100.8	3.5
170	941.9	96.7	-7.3	562.6	104.7	-5.7
180	893.8	107.4	-7.4	534.8	107.8	-5.3

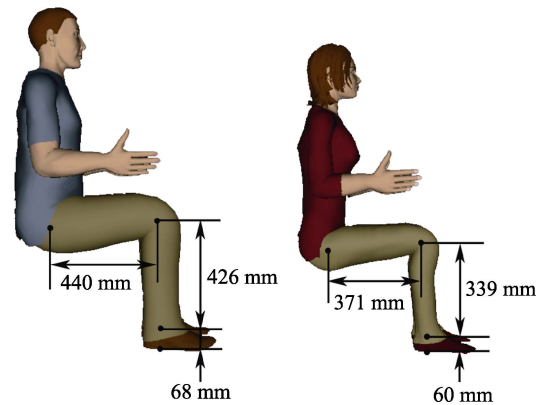


图 7 下半身生理尺寸测量
Fig.7 Lower body physiological size measurement

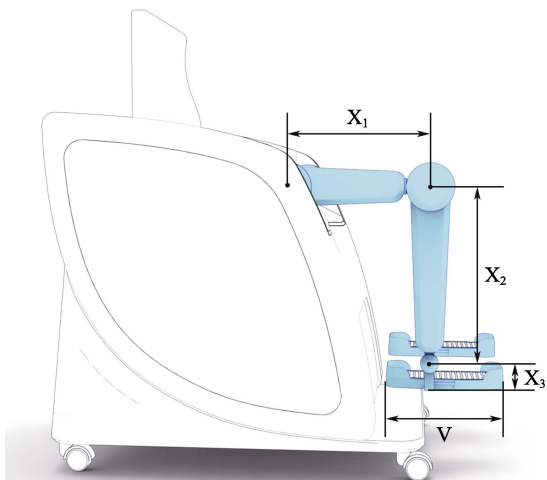


图 8 下肢外骨骼
Fig.8 Lower exoskeleton

2.4 显示装置的可视性分析

显示装置具有设置任务、模拟动作、记录患者康复情况的重要作用,是患者与康复训练机器人进行人机交互的重要媒介。由于在进行康复训练过程中患者观看屏幕的时间较长,所以需要 对患者的可视域进行虚拟仿真,得到合适的屏幕位置,减少患者的疲劳度。利用 JACK 软件模拟患者的使用状态,将座椅椅背与水平面之间的夹角分别设置为 100°和 110°(座椅舒适度分析中得出的椅背相对舒适角度区间的极限值)。由于任何关节偏离中立位置,即关节的活动角大于 0°时,基本偏离角度越大,人体越不舒适^[9-16]。因此,将实验过程中虚拟人体颈部关节的角度设置为理想角度 0°,使屏幕在实验过程中始终保持与虚拟人体模型的视线垂直。利用 JACK 虚拟仿真中的 Eye View 功能创建双眼视角,将视锥角度设置为 40°,长度设置为 200 mm,验证屏幕宽度设置为固定值 L=300 mm。将显示装置的屏幕中心对准人的视线中心,屏幕与视线垂直时的最佳视距为 X;β 为屏幕与水平面之间的锐角夹角(0°≤β≤90°);M 为人眼到大转子之间的人体长度(忽略人体厚度);以显示屏

支撑杆最底端旋转轴底面圆心 O 为参考点(O 点固定),设屏幕中心到 O 点在左视图上的水平距离为 L₁,屏幕中心到 O 点的垂直距离为 L₂(L₁和 L₂用以调节屏幕与人体距离),根据椅背角度和人体模型的不同得到 L₁与 L₂的值。双眼最佳可视区域见图 9。当屏幕与水平面之间的夹角不同时 L₁和 L₂的值见表 4。

人体进行康复训练时大转子位置固定,左视图 中与 O 点的水平距离为 200 mm,与 O 点的垂直距离为 200 mm,此时 L₁和 L₂如下:

$$L_1 = \frac{X}{\cos 20^\circ} \cos(70^\circ - \beta) - (M + \frac{1}{2}L) \cos \beta - 200 \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{X}{\cos 20^\circ} \sin(70^\circ - \beta) + (M + \frac{1}{2}L) \sin \beta + 200 \quad (2)$$

依据座椅最佳舒适度得出的数据,屏幕与水平面之间的角度 β(0°≤β≤90°)调整范围应为 70°~80°;根据表中数据可知,针对不同人群屏幕的位置应该能够进行适当的调整,屏幕中心到 O 点在左视图上的水平最佳距离 L₁的调整范围应为 68~99 mm;屏幕中心到 O 点的垂直最佳距离 L₂的调整范围应为 1 031~1 175 mm。

3 坐式下肢康复训练机器人人机工程设计

根据以上数据,对坐式下肢康复训练机器人进行 人机工程设计,坐式下肢康复训练机器人参数化设计 见图 10。

1) 模型中座椅椅背与水平面之间夹角的范围为 100°~110°,腰部可通过增加腰靠来减少疲劳。

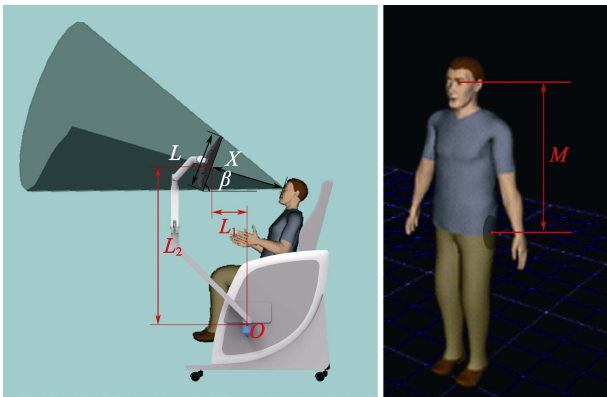


图 9 双眼最佳可视区域
Fig.9 The best visible area for both eyes

表 4 当屏幕与水平面之间的夹角不同时 L ₁ 和 L ₂ 的值 Tab.4 Values of L ₁ and L ₂ when the angle between the screen and the horizontal plane is different				
屏幕与水平面的夹角	第 95 百分位男性		第 5 百分位女性	
β/°	L ₁ /mm	L ₂ /mm	L ₁ /mm	L ₂ /mm
80	68	1 175	90	1 072
70	80	1 139	99	1 031

2) 下肢外骨骼髌关节到膝关节长度 (X_1) 可调节范围为 200~270 mm; 膝关节到踝关节长度 (X_2) 可调节范围为 339~426 mm; 由于外骨骼踝关节到脚底的可调节长度 (X_3) 较小 (8 mm), 所以直接将长度设置为中间值 64 mm; 脚底踏板长度为 270 mm。另外为保证下肢与外骨骼的活动相一致, 可以考虑在大腿和小腿位置添加帮助固定的绑带。

3) 屏幕的旋转角度 β 可在 $70^\circ \sim 80^\circ$ 调整; 根据角度不同, 屏幕支撑杆在人体前后方向上据 O 点参考点可调整范围为 68~99 mm; 在垂直方向上据 O 点参考点可调整范围为 1 031~1 175 mm。另外, 为了不妨碍患者由轮椅等设备向训练机器人移动, 屏幕的支撑结构应具有旋转功能, 屏幕支撑杆旋转结构见图 11。



图 10 坐式下肢康复训练机器人参数化设计
Fig.10 Parametric design of a sitting lower limb rehabilitation training robot

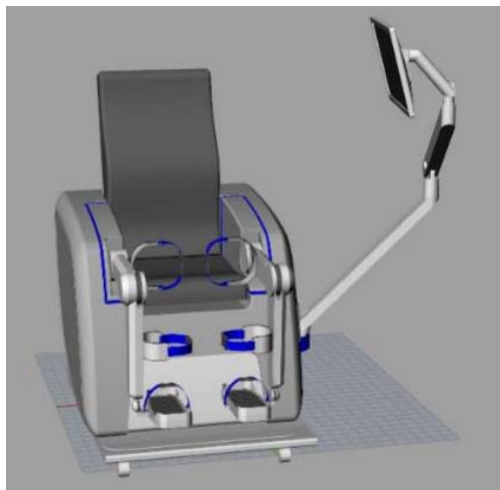


图 11 屏幕支撑杆旋转结构
Fig.11 Screen support rod rotation structure

4 结语

通过对坐式下肢康复训练机器人的座椅舒适度、外骨骼匹配度和显示装置的可视域进行分析, 得到相对舒适的尺寸和角度区间, 对其进行人机工程设计, 有效地提高了产品的整体舒适度。基于用户主观舒适度测试与 JACK 虚拟仿真相结合的方法, 能够快速获得提高人机匹配度的数据并验证数据准确性, 为康复训练设备的人机工程设计提供了有效方法。然而, 本文中研究的舒适度仅限于患者使用设备时的舒适度, 研究对象主要是患者, 接下来要从医护人员角度进行分析, 通过患者设备转移和外骨骼穿戴等多个方面进行舒适度的研究。

参考文献:

- [1] 潘志超, 徐秀林, 肖阳. 下肢康复机器人研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2016, 22(6):680-683.
PAN Zhi-chao, XU Xiu-lin, XIAO Yang. Research Progress of Lower Extremity Rehabilitation Robot[J]. Chinese Rehabilitation Theory and Practice, 2016, 22(6): 680-683.
- [2] 张娇娇, 胡秀枋, 徐秀林. 下肢康复训练机器人研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2012, 18(8): 728-730.
ZHANG Jiao-jiao, HU Xiu-fang, XU Xiu-lin. Research Progress of Lower Limb Rehabilitation Training Robot[J]. Chinese Rehabilitation Theory and Practice, 2012, 18(8): 728-730.
- [3] 冯永飞. 坐卧式下肢康复机器人机构设计与协调控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
FENG Yong-fei. Research on Mechanism Design and Coordinated Control of Low Limb Rehabilitation Robot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [4] KOUKOLOVÁ I L. Overview of the Robotic Rehabilitation Systems for Lower Limb Rehabilitation[J]. Transfer Inovácií, 2015(31): 107-111.
- [5] ERHAN A, MEHMET A A. The Design and Control of a Therapeutic Exercise Robot for Lower Limb Rehabilitation: Physiotherabot[J]. Mechatronics, 2011, 21(3): 509-522.
- [6] 王秋惠, 魏玉坤, 刘力蒙. 康复机器人研究与应用进展[J]. 包装工程, 2018, 39(18): 83-89.
WANG Qiu-hui, WEI Yu-kun, LIU Li-meng. Research and Application Progress of Rehabilitation Robot[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(18): 83-89.
- [7] 孙洪颖. 卧式下肢康复机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
SUN Hong-ying. Research on Horizontal Lower Limb

- Rehabilitation Robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [8] 高春华, 黄晓琳, 黄杰, 等. 下肢康复机器人训练对早期脑卒中偏瘫患者下肢功能的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2014, 29(4): 351-353.
- GAO Chun-Hua, HUANG Xiao-Lin, HUANG Jie, et al. Effects of Lower Limb Rehabilitation Robot Training on Lower Limb Function of Hemiplegic Patients With Early Stroke[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2014, 29(4): 351-353.
- [9] 张立博, 袁修干, 王黎静, 等. 基于主观感觉的人体关节活动舒适性评价[J]. 航天医学与医学工程, 2006, 19(6): 412-416.
- ZHANG Li-bo, YUAN Xiu-gan, WANG Li-jing, et al. Comfort Evaluation of Human Joint Activity Based on Subjective Feeling[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2006, 19(6): 41-416.
- [10] 郑彭, 黄国志, 彭生辉. 下肢康复机器人对改善脑卒中偏瘫患者下肢肌力及运动功能障碍的临床研究[J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(9): 955-959.
- ZHENG Peng, HUANG Guo-zhi, PENG Sheng-hui. Clinical Study of Lower Limb Rehabilitation Robot on Improving Lower Limb Muscle Strength and Motor Dysfunction in Hemiplegic Patients With Stroke[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2016, 31(9): 955-959.
- [11] 王年文, 朱亦吴, 姜文博, 等. 下肢外骨骼康复机器人人机交互系统分析[J]. 现代商贸工业, 2018, 39(1): 181-183.
- WANG Nian-wen, ZHU Yi-wu, JIANG Wen-bo, et al. Analysis of Human-Computer Interaction System of Lower Extremity Exoskeleton Rehabilitation Robot[J]. Modern Business Industry, 2018, 39(1): 181-183.
- [12] 杨爱慧, 王秋惠, 赵芳华, 等. 减重步行康复训练器人机工程设计[J]. 机械设计, 2017, 34(4): 124-128.
- YANG Ai-Hui, WANG Qiu-Hui, ZHAO Fang-Hua, et al. Ergonomic Design of Walking Rehabilitation Training Machine for Weight Loss[J]. Mechanical Design, 2017, 34 (4): 124-128.
- [13] 石元伍, 江书圯. 动力式老年人助行器人机工程设计[J]. 机械设计, 2018, 35(2): 105-108.
- SHI Yuan-Wu, JIANG Shu-wei. Ergonomic Design of Powered Walking Aids for the Elderly [J]. Mechanical Design, 2018, 35(2): 105-108.
- [14] 胡志刚, 孙泽明, 马园园. 牙科椅不同俯仰角度的人体舒适度研究[J]. 包装工程, 2017, 38(16): 108-112.
- HU Zhi-Gang, SUN Ze-Ming, MA Yuan-Yuan. Human Comfort of Dental Chairs at Different Pitch Angles[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(16): 108-112.
- [15] 屠尧, 朱爱斌, 宋纪元, 等. 下肢外骨骼康复机器人人机交互力自适应导纳控制[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 9-16.
- TU Yao, ZHU Ai-bin, SONG Ji-yuan, et al. Adaptive Mobility Control of Human-Computer Interaction of Lower Extremity Exoskeleton Rehabilitation Robot[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 9-16.
- [16] 王年文, 徐丽. 基于感官评价方法的多线切割机造型设计研究[J]. 机械设计, 2018, 35(5): 116-120.
- WANG Nian-wen, XU Li. Research on Modeling Design of Multi Wire Cutting Machine Based on Sensory Evaluation Method[J]. Mechanical Design, 2018, 35(5): 116-120.