

人因模拟的腰部助力外骨骼机器人舒适性设计

余从刚^{1,2}, 杨雯卉¹, 朱璐莎¹

(1.湘潭大学, 湘潭 411100; 2.湖南大学, 长沙 410082)

摘要: **目的** 针对腰部助力外骨骼机器人穿戴过程繁琐、身体感受不良、交互体验不佳等舒适性因素, 提出一种舒适性分析评估方法和设计提升方案, 为外骨骼机器人舒适性设计提供参考。**方法** 以 Jack 人因模拟软件为分析工具, 模拟腰部助力外骨骼机器人使用过程, 从人体模型构建、负载状态模拟、可达区域分析、视野区域分析、静态受力分析等角度, 对腰部助力外骨骼机器人舒适性影响因素进行分析。基于一款腰部外骨骼机器人原型机的不舒适因素, 对机械匹配尺寸、设备自重分布、绑缚结构设计、交互体验设计等方面提出优化改进方案, 并对改进方案进行模拟验证。**结论** 可以通过人因模拟的方式, 对腰部外骨骼机器人进行舒适性提升设计, 改进后的腰部助力外骨骼机器人舒适性有显著提升。

关键词: 人因模拟; 外骨骼机器人; 舒适性; 体验设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)08-0036-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.08.005

Comfortable Experience Design of the Waist Exoskeleton Robot Based on Human Factor Simulation

YU Cong-gang^{1,2}, YANG Wen-hui¹, ZHU Lu-sha¹

(1.Xiangtan University, Xiangtan 411100, China; 2.Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the comfort factors of the waist exoskeleton robot, including cumbersome wearing process, poor wearing experience, and poor interactive interface experience. A comfort analysis method and design improvement scheme are proposed to provide reference for the comfort design of exoskeleton robot. Using JACK human factor simulation software as an analysis tool to simulate the use process of the waist exoskeleton robot, and the influencing factor of comfort are analyzed from the aspects of the human body model construction, load status simulation, reachable area analysis, view field, and static force analysis. Based on the uncomfortable factors in a prototype of the waist exoskeleton robot, propose optimization schemes such as mechanical dimensions, equipment weight distribution, binding structure design and interactive experience design, and the improvement schemes are simulated and verified. The comfort design of the waist exoskeleton robot can be improved by human factor simulation, and the waist exoskeleton robot comfort after the optimized design is significantly improved.

KEY WORDS: human factor simulation; exoskeleton robot; comfort; experience design

外骨骼机器人是一种通过匹配使用者肢体, 能够主动或被动配合人体运动, 有效辅助使用者完成各项运动过程的智能化装备^[1]。外骨骼机器人可通过结合机械结构、驱动单元、控制方式、人机交互等关键技术, 为穿戴者提供肢体保护或动作助力。外骨骼机器

人作为一种可应用于医疗、物流、工程机械等诸多领域的助力设备, 与传统工作方式相比, 能够更加灵活地为使用者提供持久助力, 减轻使用者作业负担。由于助力过程中使用者需要与助力设备长时间接触, 所以外骨骼机器人使用舒适性将直接影响使用者情况。

收稿日期: 2021-01-04

基金项目: 湘潭大学教学改革研究项目“工业设计专业实验教学创新人才培养的研究与实践”(0729/2904067)

作者简介: 余从刚(1979—), 男, 湖北人, 博士, 湘潭大学副教授, 主要研究方向为机器人设计研究、数据驱动复杂系统。

通信作者: 朱璐莎(1983—), 女, 湖南人, 硕士, 湘潭大学讲师, 主要研究方向为动画仿真模拟。

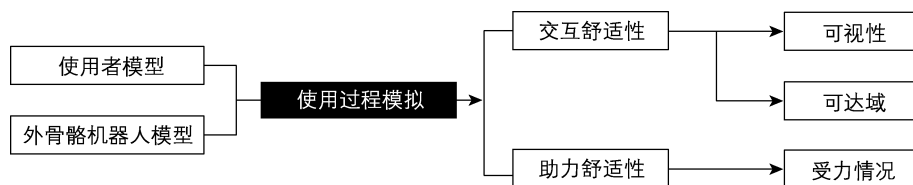


图 1 外骨骼机器人舒适性影响因素

Fig.1 Factors influencing the comfort of exoskeleton robots

随着外骨骼助力设备逐渐进入应用领域，外骨骼机器人助力设备的安全性和舒适性广受关注^[2-3]。

根据外骨骼机器人的工作原理，现阶段研究成果主要从优化控制方法、改进动力学模型和运动意图识别等方面，提升外骨骼助力设备舒适性。HE Yong^[4]团队研发了三种生成步行模式的通用算法，通过提升外骨骼机器人运动柔顺性，提升使用过程舒适度。邱琳^[5]通过建立动力学模型和仿真模拟，从力学层面分析了下肢外骨骼机器人助力性能，通过优化动力学模型改善了外骨骼设备助力情况。李瀚哲^[6]针对人脑前运动准备电位（RP）展开了研究，提出了一种预先感知下肢运动意图的方法，通过预知使用者运动意图提升助力过程柔顺性，优化助力效果。李佳璐^[7]采用了模糊层次分析法，对外骨骼机器人舒适性进行了评估并提出了改进方案。

以上研究可有效解决外骨骼机器人使用过程中的技术问题，但是较少从使用者体验过程出发，提升使用舒适性，并且现有的侧重用户舒适性的研究较多依赖于受测体验者的主观感受，数据客观性略有不足。因此，采用人因模拟软件模拟某款腰部外骨骼机器人原型机结构尺寸、穿戴过程、交互方式等，分析原型机设计中的不舒适因素，基于此提出整改方案并进行模拟验证，旨在为腰部外骨骼机器人舒适性设计提供参考依据。

1 舒适性设计基本框架和内容

在外骨骼机器人使用过程舒适性的分析过程中，首先需要构建使用者及外骨骼机器人的虚拟模型。其次模拟使用者的使用过程，针对使用过程的舒适度模拟主要包括对交互过程舒适性和助力过程舒适性的研究。其中交互过程舒适度主要包括穿戴与固定外骨骼机器人和对外骨骼机器人的控制与调节，涉及对交互界面位置的可视性及可达性分析；助力过程舒适度主要为使用者使用过程中的受力情况，包括肌肉负荷情况、关节压力情况等。外骨骼机器人舒适性影响因素见图 1。

为完成使用过程舒适性分析，选用 Jack 人因模拟软件进行模拟。相比于其他模拟软件，Jack 人因模拟软件具有人体模型丰富、仿真程度较高、模型兼容性高等优势^[8]。在探究外骨骼机器人舒适性过程中，可使用 Jack 人因模拟软件中的视域模块、可达域模

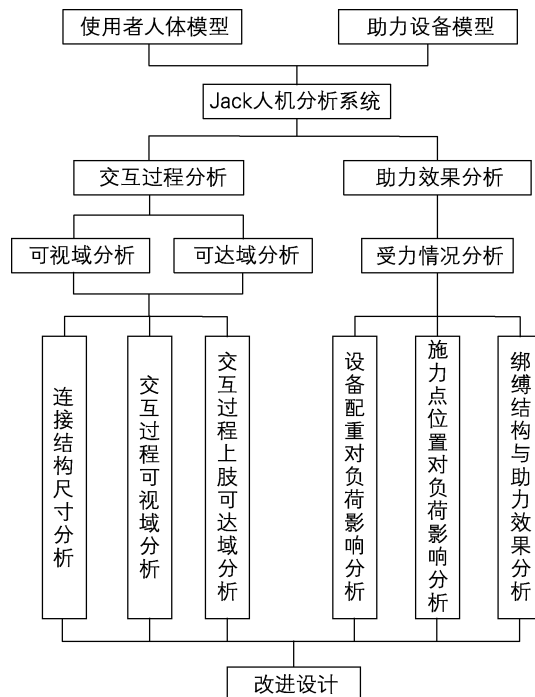


图 2 人因模拟软件舒适性分析流程

Fig.2 Comfort analysis process of human factor simulation software

块、静力分析模块等工具将舒适性影响因素数据化，以得到客观性较强的结论。应用 Jack 人因模拟软件进行舒适性分析的具体流程，见图 2。

2 腰部助力外骨骼机器人舒适性分析

2.1 使用者模型构建

在外骨骼机器人设计过程中，为满足更广泛使用者的操作需求，在构建使用者模型过程中，选择将第 95 百分位和第 5 百分位数字人尺寸作为设计对象生理尺寸的上限和下限。

使用 Jack 软件中的 Build Human 模块，依据《中国成人体尺寸（GB 10000-1988）》分别构建第 5、10、50、90、95 百分位的数字人模型，以获得不同百分位使用者各部位的生理尺寸。中国成年人人体数据模型建立见图 3。

2.2 连接结构尺寸分析

腰部助力外骨骼机器人原型机见图 4，主要由驱动组件、能源组件、控制组件、绑缚结构与连接结构组成。其中，驱动组件为外骨骼助力设备运动提供动

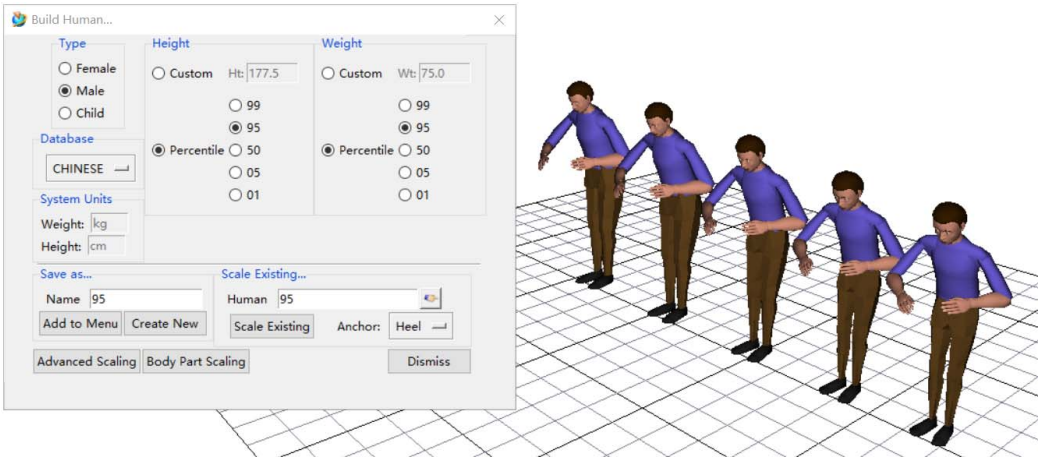


图 3 中国成年人人体数据模型建立
Fig.3 Build human body figure model of Chinese adults

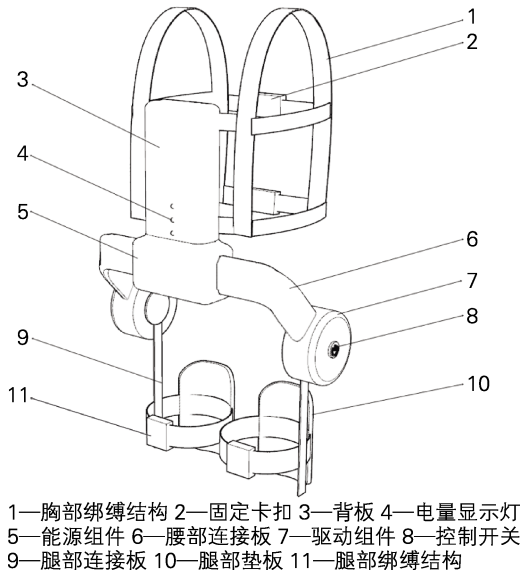


图 4 腰部助力外骨骼机器人原型机
Fig.4 Prototype of the waist exoskeleton robot

力；能源组件为组合电池板，保证助力设备长时间高效运转；控制组件为用户提供控制助力装备开关与档位调节功能；绑缚结构主要包括胸部绑缚结构和腿部绑缚结构，用于固定助力装备与使用者相对位置；连接结构包括腰部连接板、背板、腿部连接板和腿部垫板，均为刚性组件，其作用是实现使用者与腰部外骨骼机器人之间的物理交互，其中腰部连接板为连接驱动组件与背板的刚性结构；背板上固定胸部绑缚结构及能源组件；腿部连接板首端连接驱动组件，末端连接腿部垫板，可将驱动组件动力传递到腿部。

在腰部助力外骨骼机器人使用过程中，连接结构长期与使用者腰部、背部及腿部接触，其各连接结构尺寸对使用舒适性有较大影响，因此连接结构的尺寸设计需根据使用者具体部位生理尺寸确定。为获得广泛使用者生理参数，使用 Jack 软件中的 Advanced Scaling 模块，准确获知使用者各部位生理尺寸。使用者身体各部位生理参数见图 5。

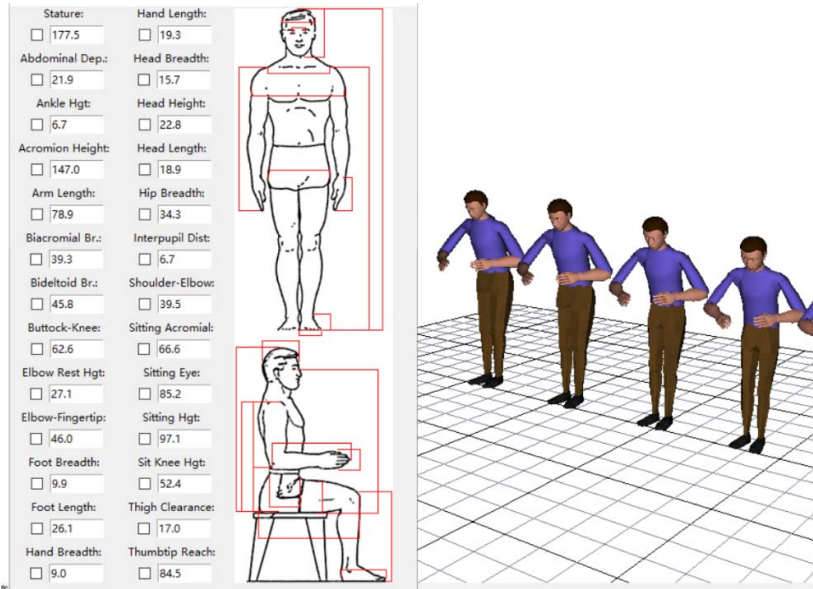


图 5 使用者身体各部位生理参数
Fig.5 Physiological parameters of various parts of the user's body

参考不同百分位使用者腕部、背部、腿部等与连接结构直接接触部位的尺寸参数,发现腰部助力外骨骼机器人原型机存在腿部连接板尺寸较长、腰部连接板过宽、背板宽度过大等问题。因此将腰部助力外骨骼机器人原型机结构尺寸进行调整,腰部外骨骼机器人尺寸修改见表 1。

2.3 交互过程可视域分析

在外骨骼机器人使用过程中,使用者需要进行设备开关或档位调节等操作,同时需随时获知外骨骼机器人运行状态,因此在外骨骼机器人设计过程中需要保证交互界面在可视范围内。人体视野区域^[9]见图 6,

表 1 腰部外骨骼机器人尺寸修改

Tab.1 Size modification of the waist exoskeleton robot

部件	原型机尺寸/mm	修改后尺寸/mm
腿部连接板(长)	230	190
腰部连接板(长)	390	430
腰部连接板(宽)	85	55
背板(宽)	150	100

在水平方向上,双目 60°以内为中央清晰视觉区域,该区域可提供最佳观测效果,双目最大视野区界限为 120°,对于超出此区域的物体则难以清晰辨别;在垂直方向上,眼球最佳转动范围为标准视线以上 25°,以下为 30°,最大视区范围为标准视线以上 50°,以下 65°。在交互界面设计过程中需要保证各操作界面位于最大视区以内。

根据使用者生理运动舒适范围,使用者头部转动范围左右不超过 45°。通过对人体颈部旋转角度和眼球视线的调节,使用 Jack 人因模拟软件中的 Visual Fields 工具将半径为 100 mm 视野范围区域化,分别得到在站立工作过程中使用者前方、左侧及右侧视域范围。站立工作状态视域分析见图 7。

通过对使用者使用过程进行视野分析后可知,在使用过程中电量指示灯、控制开关等交互界面信息处于视区以外,对使用者观察和操作造成了一定不便。

为保证操控界面的可视性,将控制开关及电量指示灯分别设置于驱动组件前端的最佳位置,由此使用者可在舒适视野范围内对腰部助力外骨骼机器人进行观测和操控。控制界面最佳位置见图 8。

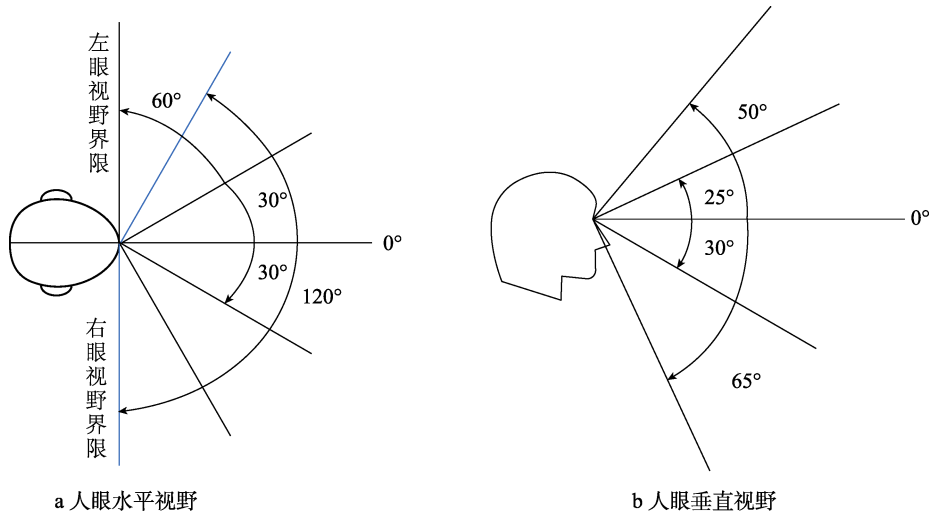


图 6 人体视野区域
Fig.6 Human visual field

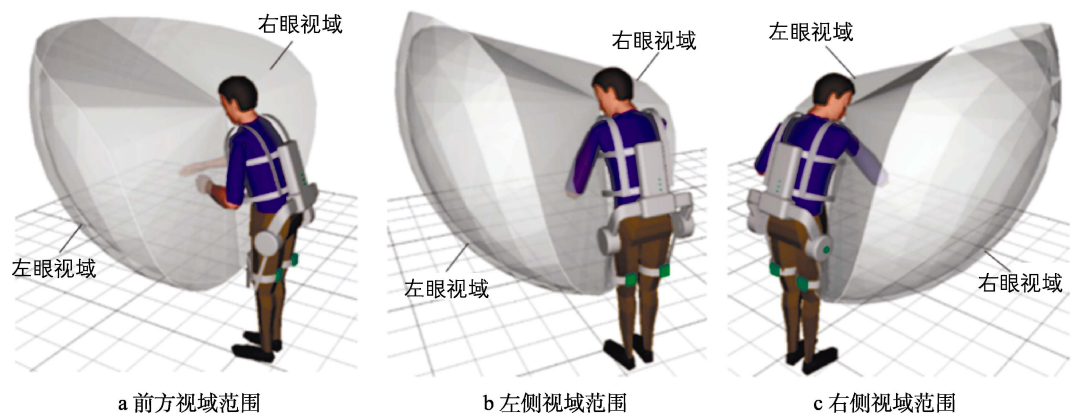


图 7 站立工作状态视域分析
Fig.7 Visual analysis of standing working status

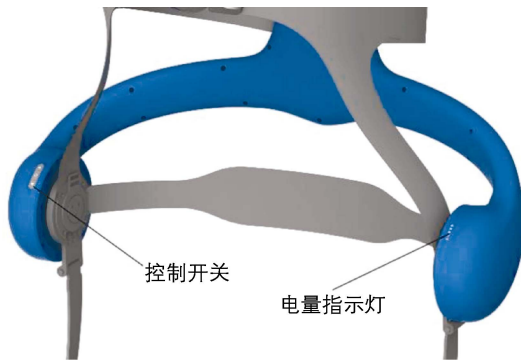


图 8 控制界面最佳位置
Fig.8 The best position of the control interface

表 2 外加载荷下关节最大运动范围
Tab.2 Maximum motion range of joint under applied load

序号	关节	动作	100%ROM/°
1	肘关节	屈曲	140.5
2	肩关节	前伸	183.6
		后展	63.2
		内收	56.4
		外展	184.1
3	腕关节	掌屈	67.6
		背屈	60.0
		尺屈	49.6

2.4 交互过程上肢可达域分析

为保证外骨骼机器人穿戴过程的便捷性和操作的舒适性,需要分析使用者上肢可达区域,以确定操作最佳空间。根据人体运动学规律^[10],外加载荷下关节最大运动范围见表 2。使用过程需要保证腰部助力外骨骼机器人绑缚结构固定卡扣、操控界面等处于上肢可达区域内。

使用 Jack 人因模拟软件中的 Advanced Reach Analysis 仿真模块,对使用者手部舒适活动空间进行模拟仿真。将使用者右侧肩关节作为移动末端,右手

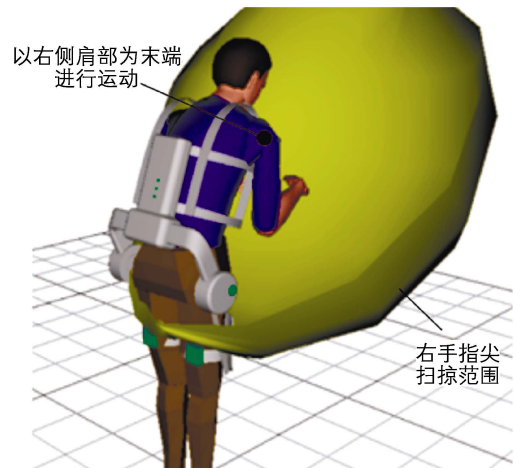


图 9 使用者右侧上肢可达区域
Fig.9 Accessible area of the user's right upper limb

指尖扫掠区域即上肢最大可达区域,使用者右侧上肢可达区域见图 9。从图 9 中可知,胸部绑缚结构均处于上肢活动范围内,但腿部绑缚结构卡扣位于上肢可达区域外,需要额外进行大幅度弯腰等动作才能完成绑缚过程。

为提升穿戴过程的便捷性,对腿部连接板和绑缚结构进行改进设计。将腿部垫板位置由腿侧改为腿前,绑缚结构中的固定卡扣位置由后部改为侧部,保证固定卡扣位于上肢可达区域内。腿部绑缚结构设计见图 10。

2.5 配重情况分析

在助力装备使用过程模拟中发现,外骨骼助力设备的自重由肩部和腰部共同承担。为探究助力装备不同配重情况对使用者腰背部负荷影响,采用 Jack 中的下背部分析模块进行不同配重下的使用情景模拟。

为适应更广泛使用者生理情况,提升模拟结果客观性,分别创建代表 P_1 、 P_5 、 P_{50} 、 P_{95} 、 P_{99} 的男性人体模型。不同百分位人体生理参数见表 3。

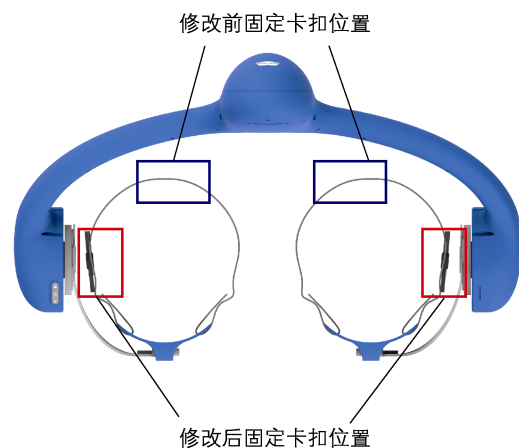
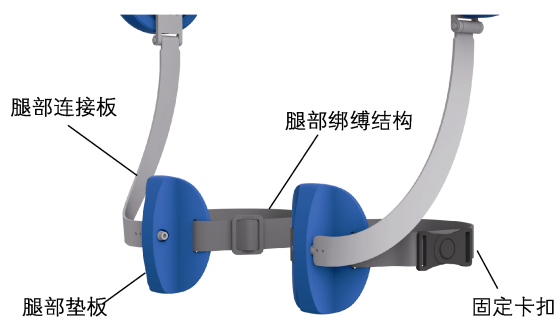


图 10 腿部绑缚结构设计
Fig.10 Leg binding structure design

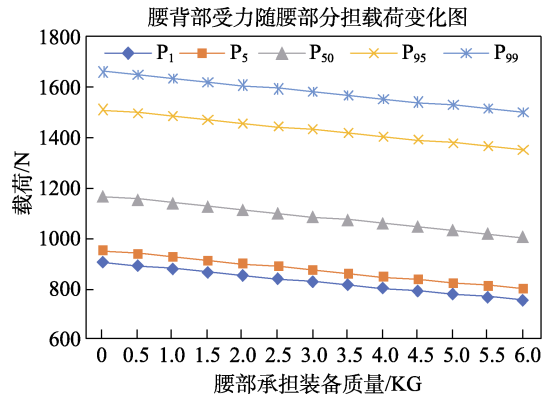


图 11 L₄/L₅ 处分担重量对使用者腰背部载荷影响
Fig.11 Effect of load sharing at L₄/L₅ on user's waist and back pressure

表 3 不同百分位人体生理参数
Tab.3 Human physiological parameters with different percentiles

生理特征	P ₁	P ₅	P ₅₀	P ₉₅	P ₉₉
身高/cm	154.3	158.3	167.8	177.5	181.4
体重/kg	44	48	59	75	83

以助力装备质量为 6 kg 为例，在改变肩部与腰部承担质量的情况下，不同百分位使用者身体 L₄/L₅ 处受力情况，见图 11。从图中可知：（1）在相同质量分布情况下，L₄/L₅ 处受力随着数字人百分位增加而增大；（2）相同百分位人在质量分布情况变化的条件下，L₄/L₅ 受力随腰部承受负载增加而减小。

通过对上述曲线进行线性回归分析，得到不同百分位使用者腰部受力 Y 轴（N）与腰部承担载荷 X 轴（kg）之间的关系分别为：

$$P_1: Y_1 = -12.571X_1 + 917.62 \quad R_1^2 = 0.9997 \quad (1)$$
$$P_5: Y_2 = -12.797X_2 + 964.73 \quad R_2^2 = 0.9997 \quad (2)$$
$$P_{50}: Y_3 = -13.654X_3 + 1182.1 \quad R_3^2 = 1 \quad (3)$$
$$P_{95}: Y_4 = -13.269X_4 + 1525.1 \quad R_4^2 = 0.999 \quad (4)$$
$$P_{99}: Y_5 = -13.314X_5 + 1675.5 \quad R_5^2 = 0.999 \quad (5)$$

根据相关统计学理论，基于线性回归方程中的相关系数 $R^2 > 0.85$ ，即可确定该模型是可靠的。从上述的结果可以看出，各回归方程相关系数均高于标准，符合统计学规律。

优化设计过程中，为了减小使用过程中使用者腰背部负荷，通过调整设备重心，改变电池位置等方式增加腰部配重，提升使用舒适性。

2.6 施力点位置配置分析

外骨骼机器人背板高度与绑缚结构固定位置决定助力施力点位置，为探究助力施力点位置对助力效果影响，在工作姿势下的数字人两侧手部各加载 10 kg 重力模拟搬运重物过程，再由下至上选取 L₄、L₃、L₂、L₁、t₁₀、t₇、t₄、t₂ 八个位置加载助力，这 8 个点位置与腰椎距离，见表 4。

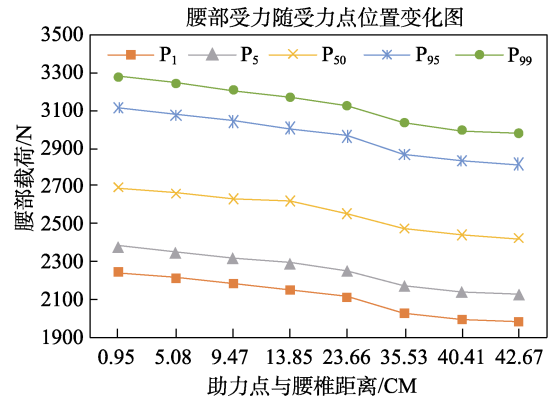


图 12 不同助力点位置对使用者腰部载荷影响
Fig.12 Effect of different power point locations on user load

表 4 施力点位置与腰椎距离
Tab.4 Position of force point and distance of lumbar spine

位置	L ₄	L ₃	L ₂	L ₁	t ₁₀	t ₇	T ₄	T ₂
距离/cm	0.95	5.08	9.47	13.85	23.66	35.53	40.41	42.67

表 5 背板高度调整
Tab.5 Backplane height adjustment

人体及背板尺寸	高度/mm
人体背部尺寸	346~408
原型机背板高度	280
改进后背板高度	340

针对不同百分位数字人分别在上述 8 个位置点加载 50 N 助力，在改变背部施力点位置时，数字人下背部压力的变化，见图 12。

如图 12，随着作用点位置与腰椎的距离增大，使用者腰部负荷逐渐减小，因此在负荷生理数据的前提下为减小使用者负荷，背板高度应尽量加高。同时需考虑使用者背部生理尺寸，避免背板过长造成穿戴不适，根据使用者背部尺寸调整背板高度，见表 5。

2.7 绑缚结构设计分析

外骨骼机器人通过绑缚结构传递助力，绑缚结构位置决定助力施力点位置及作用效果，改进前后绑缚结构设计见图 13。原型机中绑缚结构呈梯形，如图 13a，穿戴过程需要完成上下两个卡扣的紧固，操作较为繁琐。侯小伟^[11]指出，当背包肩带等绑缚结构宽度处于 4.8~6 cm 时，包带倾角处于 15.2°~27.4°时，具有较为舒适的体验过程。因此增加绑缚结构倾斜角度，如图 13b，同时将固定卡扣数量减少为一个，即仅需固定一次即可完成助力装备的固定，提升穿戴便捷性。

使用 Jack 人因模拟软件中的静力分析模块，模拟各工作姿势下不同绑缚结构助力效果。由于使用者工作过程中蹲起动作占比较大，为减轻腰部载荷，增加连接两侧驱动装置的臀部受力带，如图 13b，让在使用者在蹲起搬运作业时可有效获得助力。

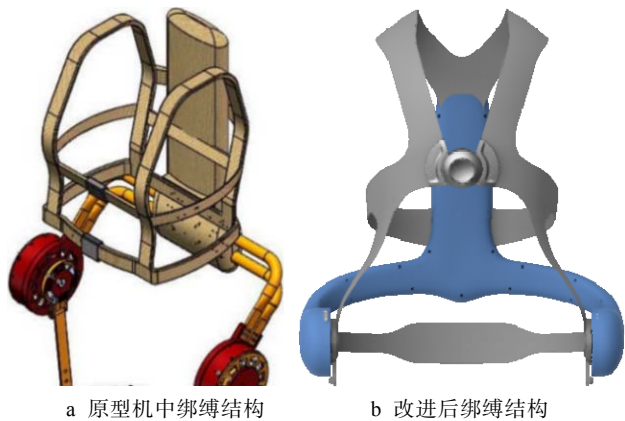


图 13 改进前后绑缚结构设计

Fig.13 Improved front and rear binding structure design

3 腰部外骨骼机器人设计

3.1 外骨骼机器人改进设计

通过人因模拟软件模拟腰部助力外骨骼机器人使用过程，得出外骨骼机器人原型机在连接结构尺寸、交互界面位置、装备重心配置及绑缚结构设计方面难以达到舒适性要求。针对上述问题对外骨骼机器人原型机进行改进设计，改进后外骨骼机器人设计见图 14。改进后腰部助力外骨骼机器人相比于原型机存在 4 个优势。

1) 与原型机相比较，通过调整背板、腰部连接板、腿部连接板等连接结构尺寸，同时将腿部连接板由直线结构改为曲线结构，使改进后外骨骼机器人与使用者具有了更好的适应性，减少了由于尺寸设计不合理造成的作业负担。

2) 通过调整供电设备位置，保证了整体助力装备重心位于使用者下背部，减轻了使用者腰部负担。

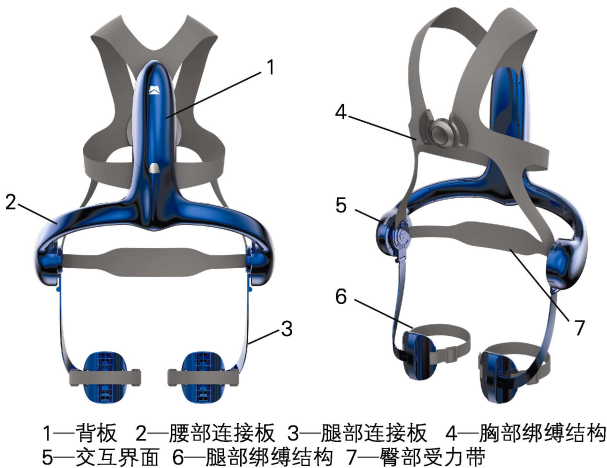


图 14 改进后外骨骼机器人设计

Fig.14 Improved exoskeleton robot design

3) 与原型机设置于驱动组件侧面的交互界面相比，通过将交互界面设置于驱动组件前部，保证了交互界面整体位于使用者舒适视野范围内。

4) 通过修改胸部绑缚结构，简化了穿戴流程；同时调整了腿部绑缚结构固定方式，与原型机相比，修改后绑缚结构固定方式更加便捷；针对蹲起搬运过程，增加了驱动组件间的臀部受力带，减轻了使用者搬运过程中腰部负荷。

3.2 改进后使用效果验证

通过增加连接两侧驱动组件的臀部受力带，在搬运过程中可减轻腰部所承载负荷，改进前后腰部受力情况见图 15。其中 G_1 、 G_2 分别为使用者上半身自重及搬运重物重力， N_y 及 N_x 为垂直和水平方向上腰椎关节反力， F 为上肢肌肉、背肌及外骨骼机器人提供助力的合力， α 为臀部受力带提供助力与垂直面夹角。

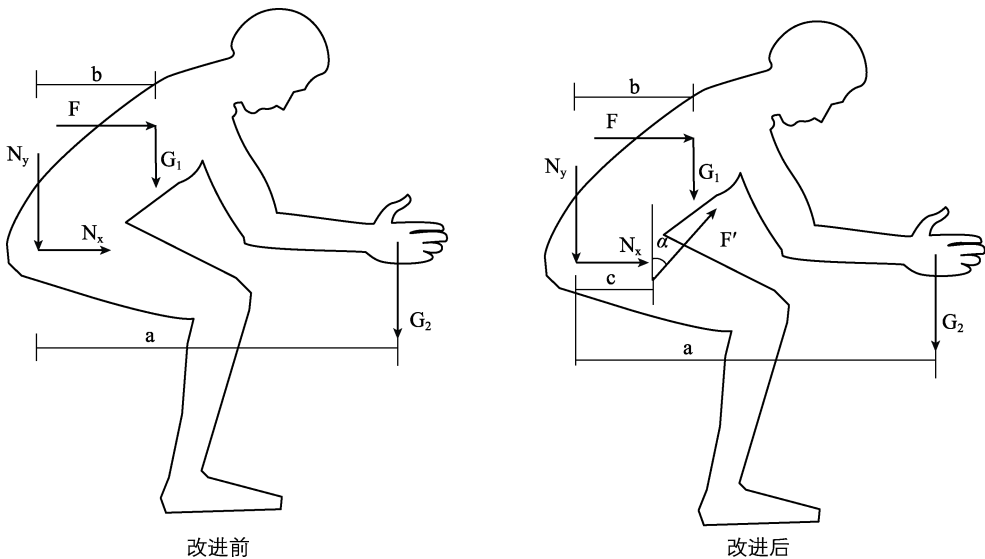


图 15 改进前后腰部受力情况

Fig.15 Lumbar stress before and after modification

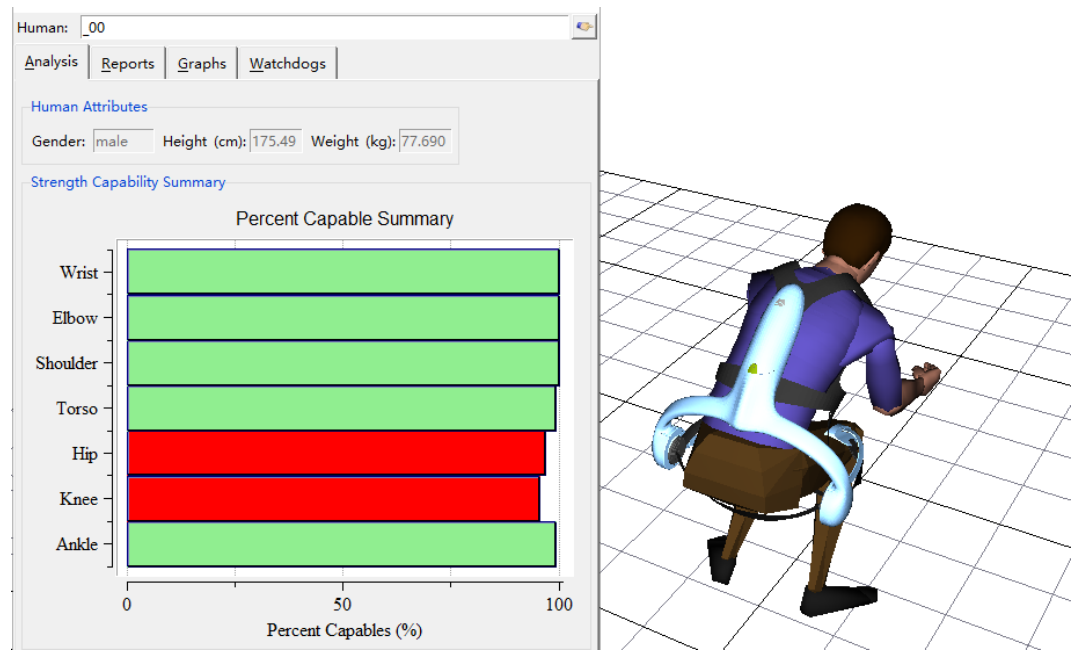


图 16 搬运过程使用者各部位受力
Fig.16 Stress on different parts of the user during handling

表 6 改进前后使用者受力情况
Tab.6 Improve the user’s stress before and after the design

	P ₁		P ₅		P ₅₀		P ₉₅		P ₉₉	
部位（N/m）	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
躯干	189.0	152.0	198.0	162.0	228.0	192.0	255.0	214.0	271.0	229.0
髋关节	46.5	33.1	48.5	35.4	55.9	42.4	62.3	47.2	66.1	50.6
踝关节	21.2	9.9	28.9	17.2	32.3	20.3	21.5	11.2	21.5	13.2

改进前腰椎所受力矩 M 为：

$$M = G_1 \times b + G_2 \times a \tag{6}$$

改进后增加臀部受力带提供的助力 F' 腰椎所受力矩 M' 为：

$$M' = G_1 \times b + G_2 \times a - F' \cos \alpha \times c \tag{7}$$

对比加载助力前后腰椎所受力矩 M 与 M' 可知，增加臀部受力带可有效分担腰椎载荷，减轻使用者腰部负担。

为验证改进设计效果，使用 Jack 人因模拟软件中的 Static StrengthPrediction 对改进后的腰部外骨骼机器人进行受力分析，搬运过程使用者各部位受力见图 16。

通过模拟蹲起搬运过程中使用者不同部位的受力情况，反映改进前后助力效果变化，其中优化设计前后躯干、髋关节和踝关节负荷情况有较大改进，改进前后使用者受力情况见表 6。从表 6 可知，改进后躯干负荷、髋关节负荷及踝关节负荷均有较为明显的减轻。

经过改进设计的外骨骼机器人在操作界面可视性、穿戴过程简便性及对蹲起动作的助力效果方面都得到了一定改善。优化设计前后效果验证见表 7。

表 7 优化设计前后效果验证 Tab.7 Validation before and after optimization design	
验证类别	设计优化结果
可视性	改善绑缚结构位置、电量指示灯位置等均处可视范围内
交互区域	改变交互界面位置，保证控制界面的可视性和可达性；简化穿戴流程，提升穿戴便捷性
助力效果	通过增加臀部受力带，在蹲起搬运过程中为有效减轻使用者躯干、髋关节及踝关节负荷

4 结语

基于 Jack 人因模拟软件，分析了腰部助力外骨骼机器人原型机舒适性，通过对使用过程中视野、可达域、受力情况等方面的模拟，得到原型机舒适性方面设计的不足，将提升操作过程与使用过程舒适性作为改进设计的重点，并据此提出可行设计方案。新方案根据使用者生理参数改进了连接组件尺寸，通过改进交互界面位置及绑缚结构设计等方式，提升了助力效果。经模拟验证，修改后方案可有效减轻使用者负荷，提升腰部助力外骨骼机器人使用舒适性。

参考文献:

- [1] 杨海乐, 朱惠盈, 林星羽. 外骨骼穿戴式康复机器人研究综述[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(3): 40-44.
YANG Hai-le, ZHU Hui-ying, LIN Xing-yu. Review of Exoskeleton Wearable Rehabilitation System[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(3): 40-44
- [2] 戴宗妙, 都军民. 外骨骼机器人研究现状及面临的问题[J]. 现代制造工程, 2019(3): 154-161.
DAI Zong-miao, DU Jun-min. Research Status and Facing Problem of Exoskeleton Robot[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(3): 154-161.
- [3] SHI Di, ZHANG Wu-xiang, ZHANG Wei. A Review on Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton Robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(4): 12-22.
- [4] HE Yong, LI Nan, WANG Chao. Development of a Novel Autonomous Lower Extremity Exoskeleton Robot for Walking Assistance[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019, 20(3): 318-329.
- [5] 邱林, 钟佩思, 李东民. 下肢外骨骼助力性能评价方法研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(9): 1331-1335.
QIU Lin, ZHONG Pei-si, LI Dong-min. Load-carrying Augmentation Performance Evaluation Method of Lower Extremity Exoskeleton[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(9): 1331-1335.
- [6] 李瀚哲, 张小栋, 李睿. 利用运动准备电位的人体下肢自主运动意图预先感知方法[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 16-23.
LI Han-zhe, ZHANG Xiao-dong, LI Rui. A Preperception Method for Voluntary Movement Intention of Lower Limb Using Readiness Potential[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 16-23.
- [7] 李佳璐, 涂细凯, 伍赛. 基于用户体验的外骨骼机器人舒适性研究[J]. 机械设计, 2019, 36(7): 125-130.
LI Jia-lu, TU Xi-kai, WU Sai. Exoskeleton Robot Comfort Based on User Experience[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(7): 125-130.
- [8] ZHANG Yong-bao, WU Xiang, GAO Jing-qi, et al. Simulation and Ergonomic Evaluation of Welders' Standing Posture Using Jack Software[J]. Pubmed, 2019, 16(22): 4354.
- [9] 姚维维. 基于 OCULUS VR 全景立体视频的视觉设计舒适度探究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
YAO Wei-wei. The Research about Virtual Reality Visual Design Comfort Level of OCULUS VR Panoramic Stereoscopic Video[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [10] 张睿明, 柳忠起, 周前祥. 人体上肢关节活动范围的舒适性评价[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 75-80.
ZHANG Rui-ming, LIU Zhong-qi, ZHOU Qian-xiang. Comfortableness Evaluation Method for Node Importance in Complex Networks Based on Grey Relational Analysis[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2018, 28(8): 75-80.
- [11] 侯小伟. 单肩包带舒适性模型的建立[J]. 纺织科技进展, 2011(3): 84-86.
HOU Xiao-wei. The Establishment of Comfort Model of Shoulder Bag Strap[J]. Textile Technology Progress, 2011(3): 84-86.