

# 基于JACK的老年人下肢屈伸锻炼人因分析及仿真

张旭壮, 王卫星\*

贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年9月15日; 录用日期: 2023年10月26日; 发布日期: 2023年11月2日

## 摘要

为了获得关于老年人下肢康复锻炼的人体工程学信息, 为康复训练产品的参数设定提供支持和指导。本研究采用了JACK人体工程学分析软件, 建立了针对下肢屈伸运动的三维模型和数字人体模型, 进而构建了虚拟运动环境, 将虚拟化的老年人数字模型融入其中, 以全面分析老年人康复锻炼任务的整个过程。在康复运动过程中, 收集并分析了与舒适度、力学解算、工作姿势、下背部受力以及静态力强度相关的数据结果。通过对这些测试数据的深入分析, 我们得出了与人机工程学相关的产品尺寸范围, 为设计出更加符合人体工程学原理的康复训练产品提供了有力支持。

## 关键词

下肢屈伸, 人体工程, Jack, 舒适度, 虚拟仿真

# Ergonomic Analysis and Simulation of Lower Limb Flexion and Extension Exercises for the Elderly Based on JACK

Xuzhuang Zhang, Weixing Wang\*

School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Sep. 15<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 26<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2023

## Abstract

In pursuit of comprehensive human factors insights pertaining to lower limb rehabilitation exercis-

\*通讯作者。

es among the elderly, with the intent of facilitating parameter support and guidance for the development of rehabilitation training products. This study employed the JACK Human Factors Analysis software, we established three-dimensional models dedicated to lower limb flexion-extension movements, along with digital representations of the human form. Subsequently, we constructed an immersive virtual exercise environment, incorporating the virtualized representation of elderly individuals, thereby facilitating an exhaustive analysis of the complete spectrum of rehabilitation tasks undertaken by this demographic. Throughout the course of the rehabilitation exercises, data encompassing factors such as comfort levels, biomechanical computations, ergonomic postural assessments, lower lumbar stress analysis, and static strength predictions were meticulously collected and subjected to rigorous analysis. Through an in-depth scrutiny of these empirical findings, we derived a product size range aligned with the principles of human factors engineering, thereby furnishing substantial empirical underpinning for the design of rehabilitation training products that harmonize more effectively with the fundamental tenets of ergonomic science.

## Keywords

Lower Extremity Flexion and Extension, Ergonomics, Jack, Comfort, Virtual Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着人口老龄化进程的迅速推进,老年人的康复问题愈发显著。脑卒中是一种常见的临床多发疾病,尤其在老年人中更加常见。其典型症状包括患者失去控制的脸部、手臂或腿部,同时也有头痛、大小便失禁等症状[1]。鉴于医疗资源有限,目前治疗该疾病患者的康复方法逐渐转向了使用康复设备来锻炼患者的身体。因此,康复设备行业正逐渐成为热门领域,所以设备的人机适宜性就很重要。人机工程学已大量应用到汽车、机械设计、航空航天等领域,大量的研究者运用 Jack 仿真软件进行各种场景下的人机因素分析[2]。下肢屈伸锻炼作为一种常见且有效的方式,被广泛应用于老年人的健康管理与康复中[3]。国内大学和科研机构也开展了相关产品的研发,清华大学、哈尔滨工程大学、燕山大学、浙江大学、国家康复辅具研究中心等机构在下肢康复机器人开发方面取得了一定研究成果[4] [5] [6]。然而,传统的下肢屈伸锻炼模式存在着个体差异、缺乏个性化指导以及无法实时反馈等问题,限制了其应用。近年来,下肢康复训练器械的设计方式主要可划分为低自由度、穿戴式、悬挂式和坐卧式等[7]。由于其构造轻便且价格相对便宜,少自由度康复锻炼器械已在家庭康复方面得到广泛应用[8]。这种器械令病患肢体按照一定的旋转轨迹规划动作,从而实现特定的康复目标[9]。尽管如此,这种类型的康复设备自由度较低,其旋转轨迹是固定的,无法进行调整。因此,在患者使用时,可能会因动作不当或幅度控制不合适而导致额外的伤害。同时缺乏人机交互过程的设备可用性、易用性和舒适性研究[10]。因此,初期必须考虑人机工程问题,包括不同个体的适应性和适宜性。为了解决这些问题,并提升老年人下肢屈伸锻炼的效果和安全性,本论文通过将医学知识、人机交互和仿真技术相结合,旨在为个体提供个性化、可靠的运动指导与训练模拟。

本研究旨在分析老年人下肢屈伸锻炼的人因特征,通过采集大量老年人的生物特征数据、运动表现及主观感受,结合 JACK 的算法模型和人机交互情况,探索个体差异对于下肢屈伸锻炼效果的影响,并验证 JACK 在个性化指导与反馈方面的可行性与有效性。本论文的研究成果有望为老年人下肢屈伸锻炼的个性化设计、运动评估及康复提供科学依据和技术支持。

## 2. 下肢屈伸康复虚拟环境的建立

### 2.1. 仿真实验流程设计

仿真实验分为两个步骤：首先是准备人体模型，建立任务环境；随后使用 JACK 仿真软件，获取实验结果。人机工效仿真分析流程如图 1 所示。

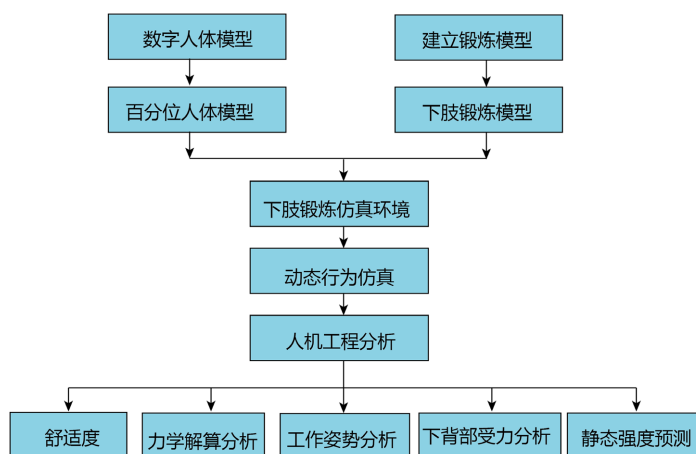


Figure 1. Virtual simulation process

图 1. 虚拟仿真流程

### 2.2. 虚拟数字人体模型和康复锻炼器械模型的建立

JACK 软件是创建虚拟人体模型和进行人体工程学分析最广泛使用的优秀程序之一[11]。为了对下肢进行虚拟情境下的锻炼，确保设备能够最大程度的满足大部分患者的要求，就需要进行大量的实验以得到测试数据，使得实验结果更加准确。根据国家标准《中国成人人体尺寸》，选择第 95 百分位男性和第 5 百分位女性的身体尺寸作为下肢康复训练器械的人机交互仿真实验的最大和最小值。

本研究主要聚焦于中国老年人的下肢康复锻炼，通过在北京地区的调查，得到了一份合适的老年人身体数据[12]。该数据包含大量老年人身体尺寸值，使用 JACK 软件中的“Advanced Scaling”功能，建立男性和女性共两个老年人数字人体模型，如图 2 所示。同时在 Rhino 中建立锻炼器械模型，其中组成部分有踏板、仪表盘、座椅等。将建立的模型经过进一步的操作，并打开到 JACK 软件中如图 3 所示。

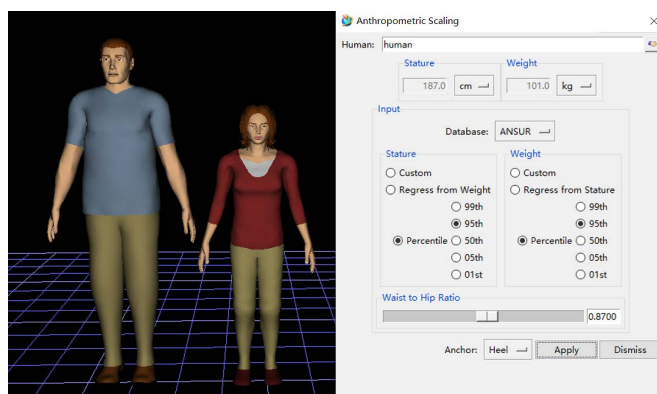


Figure 2. Digital mannequin figure

图 2. 数字人体模型

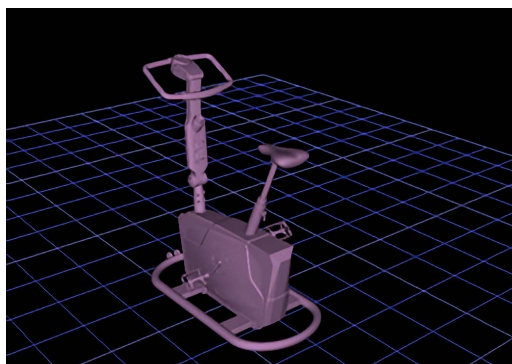


Figure 3. Jack equipment model

图 3. Jack 器械模型

### 2.3. 创建虚拟康复任务

该康复设备的主要功能和使用方式是坐式康复训练。先将座椅设置到合适高度，让人体坐在上面，双手放在扶手位置，双脚放在踏板上，沿特定轨迹作屈伸锻炼。在锻炼的过程中，我们可以看到练习时间、运动圈数等信息，并可以变更器材阻力的大小，增加下肢锻炼的强度，从而提高锻炼成果。把虚拟老人模型设定到器械座位上，下肢动作为一屈一伸，踏板的所在是  $0^\circ$  和  $180^\circ$ 。当人的脚踩在踏板上时，踏板从  $0^\circ$  位置开始移动，绕中心轴旋转一圈，然后以一个完整的动作回到起始位置。该机械结构原理就是旋转进行，一屈一伸。锻炼时主要是坐下姿势，手臂主要是扶在把手状态下工作，可得到人体可达域范围，如图 4 所示。

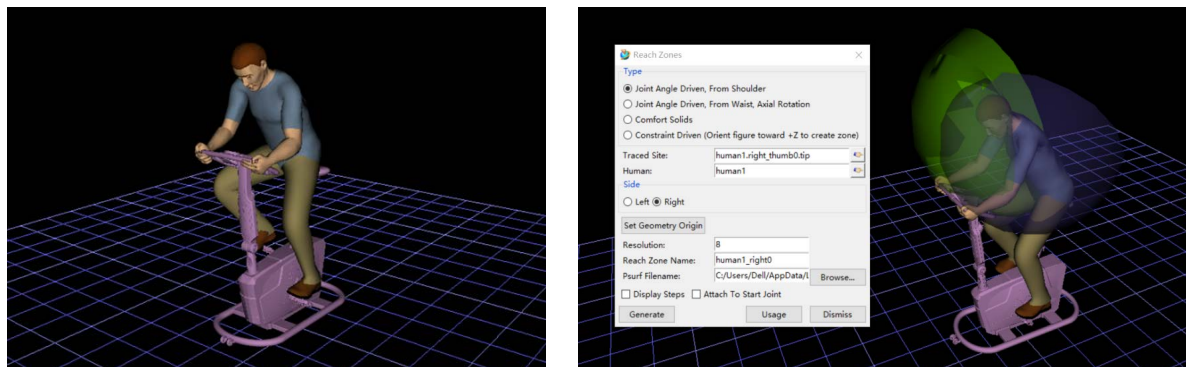


Figure 4. Task scenario and reachable workspace

图 4. 任务场景及可达域

## 3. 下肢屈伸系统人因分析

JACK 有许多性能分析环节，但并非所有工具都适用于该环节。为了模拟老年人的下肢屈伸运动，我们选择了舒适度分析、力度解算分析、工作姿势分析和静态强度预测等模块。

### 3.1. 舒适度分析

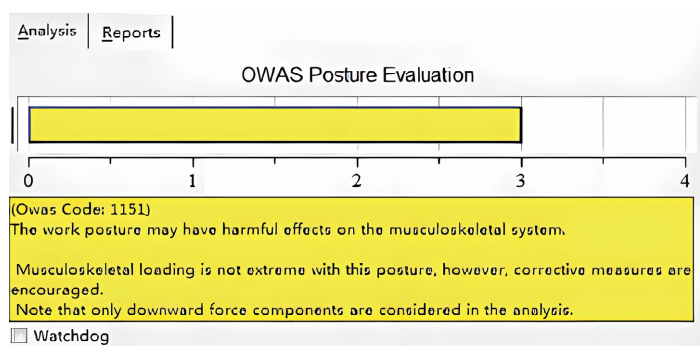
舒适度评估工具可分析运动时每个数字人体关节的舒适度。它以每个关节的弯曲程度为标准，并以柱状图的形式直观地显示出来。当关节的弯折程度超过一定的数值，数值会变大并变为黄色。但是假如一直是有害的运动状态，关节就会受到伤害。舒适度数值会随着运动的变化而变化，特别是在垂直极限位置时，膝关节和髌关节的不舒适程度达到最大值。图 5 分析表明，在所有百分位数位置上，老年人的髌关节和膝关节的运动角度都过大，在康复活动中存在不适甚至关节损伤的风险。



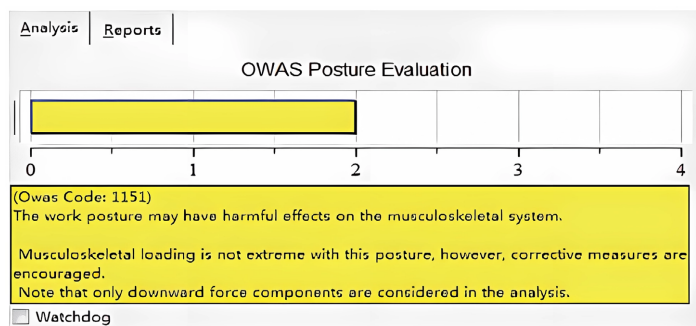
在模拟实验的过程中, 当 P95 老年男性将下肢移动到踏板垂直区域时, 右膝关节的百分比承载力值为 78%。这种状态基本上相当于踩踏运动中左膝关节伸直放松和右膝关节弯曲受力的阶段, 这对右膝关节来说是一个很大的负荷, 很容易造成损伤。P5 的老年女性仿真能力百分比值为 42%, 百分位数较高的模拟者完成动作的能力较强; 百分位数较低的模拟者由于力量、体型和其他因素, 完成动作的能力较弱。

### 3.3. 工作姿势分析

JACK 工具中的“OWAS Working Posture Analysis”可用于迅速检查工作姿势的舒适度并采取改正措施。该工具具有四个等级: (1) 姿势是正常的, 不需要提醒; (2) 姿势可能会产生某些不利影响, 不需要提醒, 但在不久后需要改正; (3) 姿势不正常, 必须马上进行改正; (4) 姿势极度危险, 必须立即进行纠正。OWAS 工作姿势分析结果如图 7 所示。很明显, 目前的设备可能会对康复锻炼产生不利影响, 因此需要做出一些改变。



(a) 老年男性姿势分析



(b) 老年女性姿势分析

Figure 7. Work posture analysis

图 7. 工作姿势分析

### 3.4. 下背部受力分析

腰椎压力分析是在特定情境下对脊柱的压力进行测量研究, 保证锻炼内容符合 NIOSH 标准, 并找到哪些锻炼内容需要在人因工程方面做出最大改进。如图 8 所示, 该分析用于计算 L4/L5 脊柱所承受的压力, 并将其与 NIOSH 建议的 3400 N 压力限值进行比较, 以确定是否超出了建议的压力限值。老人在做这一动作时, 脊柱受力小于 2000 牛顿, 远低于国际标准所建议的受力极限, 脊柱力量也正常。韧带力量、肌肉力量和肋间肌力量均在正常范围内, 因此老人的下背部力量是健康的。

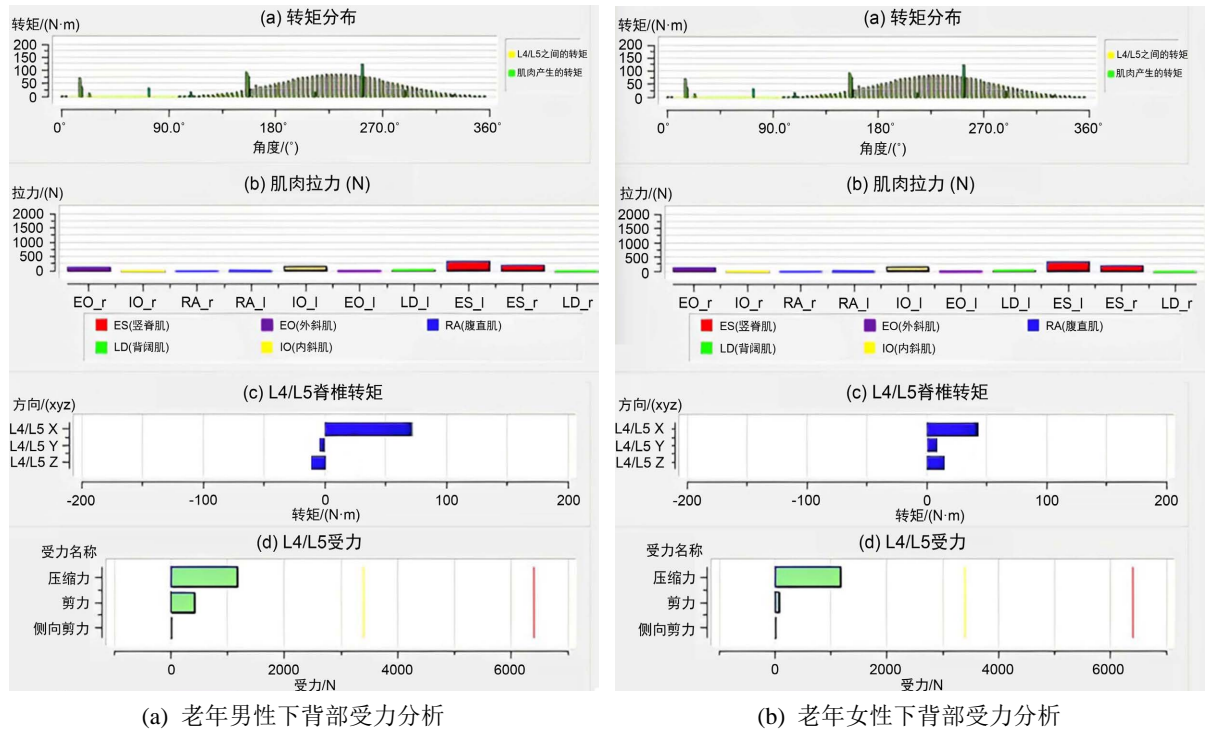
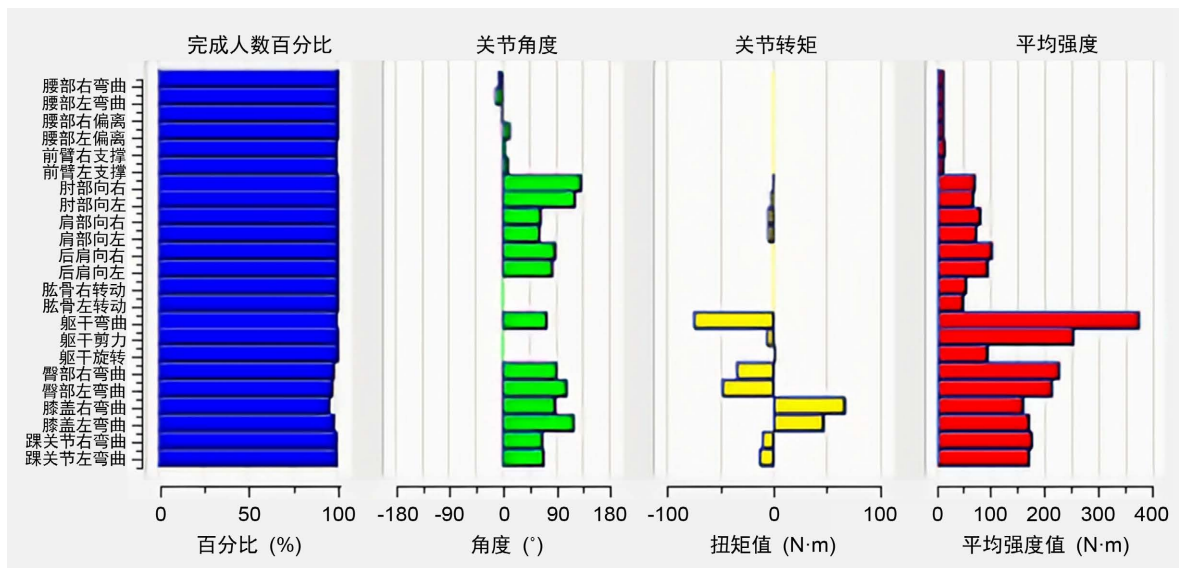
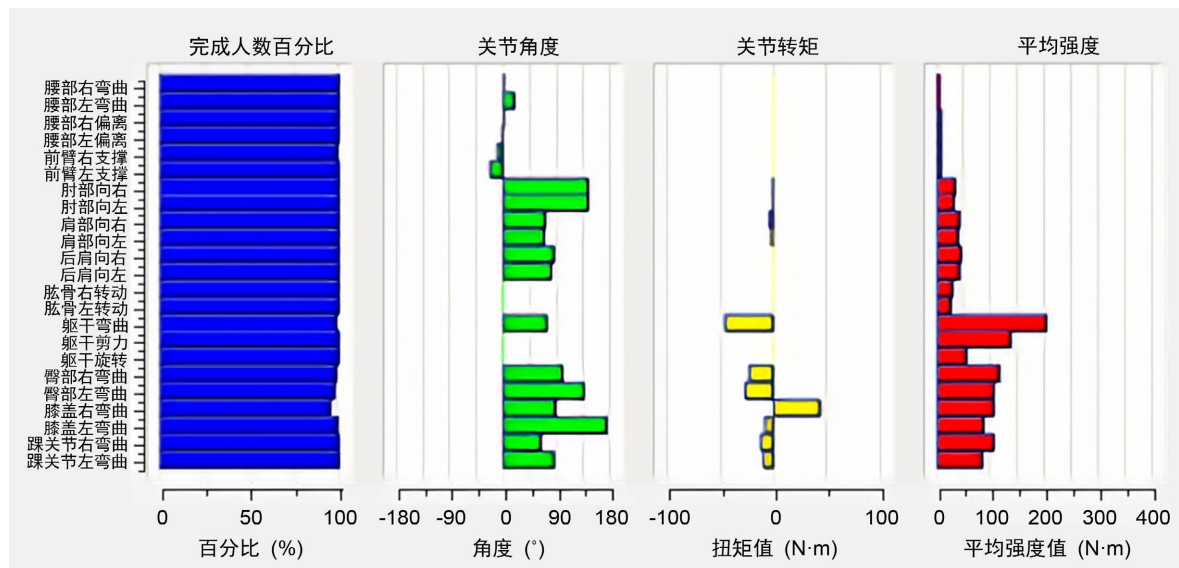


Figure 8. Analysis of lower back force distribution  
图 8. 下背部受力分析

### 3.5. 静态强度预测

使用 Jack 软件静力预测工具对老年人进行人机分析, 并使用四种图表分析老年人使用康复锻炼器械时的关节力值百分比、角度、关节旋转角度和平均力值。如图 9 所示, 关节角度在 $-180^{\circ}$ 和  $180^{\circ}$ 之间, 属于正常情况; 关节扭矩值在 $-100$  和  $100$  N/m 之间, 属于正常情况; 在平均用力测试中, 躯干屈曲和接近  $400$  N/m, 说明老年人在使用设备时膝关节和踝关节健康状况不佳。





(b) 老年女性静态强度预测

Figure 9. Static strength prediction

图9. 静态强度预测

#### 4. 总结

通过对老年人下肢屈伸锻炼进行人因分析和仿真研究, 确定了老年人进行锻炼时相对舒适的肢体尺寸和关节角度范围。这一研究有助于有效提高康复器械的安全性和设计合理性。实验结果表明, 老年人康复器械结构角度的变化受脚踏板方向和脚踏板间距的影响, 因此需要综合考虑髋关节的内/外旋和缩/放运动的舒适性。通过仿真实验, 我们得出髋关节的内/外旋转角度应在 $-15^{\circ}$ 至 $15^{\circ}$ 范围内, 回缩/释放角度应在 $-5^{\circ}$ 至 $20^{\circ}$ 范围内。此外, 为分析和解决老年人下肢屈伸运动的强度问题, 我们建议在设计和调整设备时考虑不同人群体形的差异性, 并根据不同体型进行相应调整。在分析老年人下肢屈伸锻炼的工作姿势时, 我们注意到低自由度装置具有独特的康复轨迹, 但其调节范围较窄。长期反复使用这类装置可能会产生一些不利影响, 这也是目前这类装置的局限性之一。

本研究将用户主观锻炼舒适性与 JACK 软件测试相结合, 可便捷地获取测试数据, 提高人体测试的舒适性, 并验证锻炼测试数据的精准性。这为康复运动设施的设计提供了数据支持和优化建议。然而, 值得注意的是, 本研究所使用的老年人数据库仅覆盖了部分地区, 样本范围较为有限。同时, 我们的研究主要关注健康老年人在使用设备时的测试数据, 未来的研究将考虑将设备应用于患者身上以及穿戴外骨骼等多个方面进行更全面地分析。

#### 基金项目

贵州省省级科技计划重点项目, 面向车载终端自然人机交互控制的用户共识手势动作图像识别研究, 编号: 黔科合基础-ZK[2023]重点 015。

#### 参考文献

- [1] 李秀振. 早期康复治疗对脑卒中患者日常生活能力的改善作用[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2017, 20(7): 126-128.
- [2] 张芳燕, 刘国闯, 张磊, 等. 基于 Jack 的反铲式挖掘机驾驶室人机工程仿真分析与设计改进[J]. 机械设计, 2023, 40(6): 145-152.



- [3] 尹清松, 廖前芳, 周前祥, 等. 基于 JACK 的驾驶姿势的下肢关节受力及舒适度分析[J]. 航天医学与医学工程, 2016, 29(6): 440-445.
- [4] 陈鹏, 刘启栋, 王人成, 等. 一种减重步行训练机器人的研制[J]. 中国康复医学杂志, 2011, 26(9): 847-851.
- [5] 程方, 王人成, 贾晓红, 等. 减重步行康复训练机器人研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2008, 23(4): 366-368.
- [6] 潘国新, 张秀峰, 李剑. 偏瘫步行康复训练机器人减重支撑系统的研究[J]. 中国康复医学杂志, 2013, 28(11): 1041-1045.
- [7] 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]: [博士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [8] 贺鑫. 穿戴式人体下肢康复机构设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [9] 王年文, 陈明含, 谭晓萌, 等. 坐式下肢康复训练机器人人机舒适度设计[J]. 包装工程, 2021, 42(20): 125-131.
- [10] 杨爱慧, 王秋惠, 赵芳华, 等. 减重步行康复训练机器人机工程设计[J]. 机械设计, 2017, 34(4): 124-128.
- [11] 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.
- [12] 胡海滔, 李志忠, 肖惠, 等. 北京地区老年人人体尺寸测量[J]. 人类工效学, 2006, 12(1): 39-42.