

doi: 10.7690/bgzdh.2022.07.021

基于人体工学的康复机器人设计及稳定性研究

郝亮超¹, 高学山^{1,2}, 赵鹏³, 牛军道¹

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西 柳州 545616; 2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081;
3. 广西科技大学电气电子与计算机科学学院, 广西 柳州 545616)

摘要: 针对康复机器人居家使用的通过性、稳定性和安全性问题, 设计一种基于人体工程学理论的家用下肢康复训练机器人。通过分析脑卒中患者的运动姿态, 结合康复机器人的运动特性, 提出采用模块化结构的新型随动下肢康复机器人设计方案; 重点对康复机器人可能产生的侧翻进行力学分析, 给出康复机器人的稳定性判断准则。通过虚拟样机仿真, 分析机器人的重心偏移量, 并进行仿真和样机测试。结果表明: 该机器人具备可靠性和稳定性, 具有应用价值。

关键词: 康复机器人; 人体工程学; 模块化设计; 稳定性; Adams

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Design and Stability Research of Rehabilitation Robot Based on Ergonomics

Hao Liangchao¹, Gao Xueshan^{1,2}, Zhao Peng¹, Niu Jundao¹

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545616, China;
2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. School of Electrical, Electronics and Computer Science, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545616, China)

Abstract: In order to solve the problems of trafficability, stability and safety of home use of rehabilitation robot, a home lower limb rehabilitation training robot based on ergonomics theory is designed. By analyzing the motion posture of stroke patients and combining with the motion characteristics of the rehabilitation robot, the design scheme of a new type of follow-up lower limb rehabilitation robot with modular structure is proposed. The mechanical analysis of the possible rollover of the rehabilitation robot is focused on, and the stability judgment criterion of the robot is given. Through the virtual prototype simulation, the offset of the center of gravity of the robot is analyzed, and the simulation and prototype test are carried out. The results show that the robot has reliability and stability, and has application value.

Keywords: rehabilitation robot; ergonomics; modular design; stability; Adams

0 引言

根据世界卫生组织的数据显示, 老龄化水平在世界范围内不断加剧^[1]。随着人口老龄化的发展, 脑卒中患者及中枢神经损伤患者人数也在不断增加。截止到 2019 年底, 我国康复医院数量只有 706 家, 康复医疗场地和家用康复器械不足, 康复医师缺口大。下肢康复机器人以辅助患者恢复行走能力为主要目标, 是脑卒中患者及中枢神经损伤患者不可缺少的后期康复设备^[2]。现有的康复机器人主要以固定式为主^[3], 设备成本高, 患者在固定场所被动训练, 不能产生真实行走感觉。通过与康复医师探讨, 研究患者需求和康复机器人功能, 得到普遍性和差异性, 分析现有康复机器人的功能和参数, 以共性问题为出发点进行创意设计。

由于疫情等不可抗因素限制, 患者不方便到康

复中心或者医院进行康复训练, 家用下肢康复训练机器人结构简单紧凑、成本低, 面向对象为中后期下肢康复患者, 适用空间主要为家庭等私人场所。患者可以在更放松的环境中康复训练, 甚至帮助家人做力所能及的家务, 省去陪护成本。笔者基于人体工程学^[4]的理论和方法, 以国家康复安全通用标准为参考, 使用人体工学评价量 (ergonomic measure, EM) 作为评价标准, 提出一种基于人体工程学的新型家用康复训练机器人实用化设计方案, 使机器人整机稳定性满足设计要求^[5], 以期能够缓解家用医疗器械不足的问题, 实现患者居家康复的目标。

1 康复机器人总体结构设计

1.1 机器人功能和技术分析

1) 以脑卒中患者及中枢神经损伤患者为例, 分

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC2008503)

作者简介: 郝亮超 (1993—), 男, 河南人, 硕士, 从事康复机器人设计和稳定性研究。E-mail: 742019254@qq.com。

析患者下肢行走状态。患者在行走过程中，下肢力量不足以承受自身全部重量，行走无连贯性，设计中考虑有辅助支撑结构。

2) 患者存在重心不稳的潜在风险，二次损伤对患者造成的伤害更大，因此在家用下肢康复训练机器人设计中要加强对患者的保护。

3) 康复机器人是具有运动平台的立体结构，设计中要保证结构件的可靠性和整体的稳定性，减小结构刚强度不足以及车体倾覆的风险。

4) 康复后期患者具有较强的自主行走意愿，机器人要能实时跟随患者主动训练，实现前进和转弯等运动。

5) 康复机器人主要在家庭中使用，要满足居家使用环境，占地面积小，可以在室内房间自由通过。

1.2 总体结构设计

如图1所示，家用康复机器人采用模块化系统设计准则，主要由底座、立柱、传感器、扶手和防护吊环等模块组成，各功能模块相对独立，减少机器人设计层次和设计的复杂性，利于模块的研制和调试。下肢康复机器人采用4轮差速运动控制结构^[6-7]，4个轮子以矩形形式固定在底盘底部，后部采用开放式设计，便于患者进入训练位。根据GB24436—2009康复训练器械安全通用要求，结合人体工程学，设计圆形防护托管大于36 mm。从患者训练稳定性角度设计立柱为上窄下宽的样式。扶手是患者和机器人接触媒介，从人-机理论考虑，扶手采用软包硬的设计方式，硬质扶手骨架为主要受力件，接触扶手位置为可拆卸皮革，扶手依托面宽度大于40 mm。

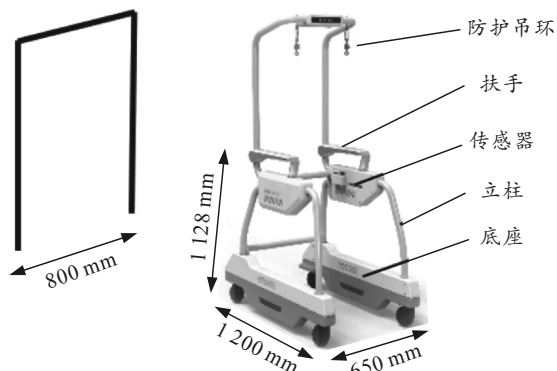


图1 家用下肢康复训练机器人整体机构

机器人中间位置固定着4个拉线位移传感器。4个传感器以矩阵形式布置在机器人扶手内侧，通过传感器对患者运动意图信息进行识别提取。根据患者体态参数，对传感器设定初始值，具体如图2中

标注的 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 。图中虚线为患者初始位置，患者训练时带动拉绳，从而使安装在绳子上的传感器力和变形量发生变化；控制器则实时监测这些传感器的信号变化量，通过预先设置运动算法所给出的参数值求解作为判据判断患者运动意图，从而实现康复机器人跟随患者同步移动。

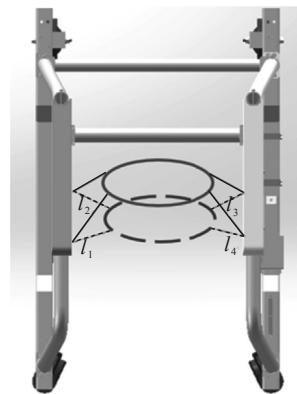


图2 运动意图识别

1.2.1 底盘设计

底盘是康复机器人整体结构中的关键模块。底部的结构和质量决定了康复机器人的体积以及整体结构的稳定性。底部宽度限制患者腿部运动空间；因此，既需要满足患者腿部的运动空间，又要达到使用环境的要求。家用下肢康复训练机器人可以在家中随意活动，则康复机器人底部的宽度需要小于门的宽度。根据国家建筑的有关室内房门标准，家用房门宽度通常取800 mm。根据中国成年人人体尺寸GB10000—88数据显示，99%成年人的臀部宽度小于346 mm，机器人应在满足轻松过门的情况下，同时保证患者的腿部可以在最大范围内自由移动，结合人体工学评价EM优化参数：

$$EM=1-\sum_{i=1}^n|x_i-x'_i|/x_i/n。 \quad (1)$$

式中： n 为待评价的参数个数； x_i 为参数 i 的标准值； x'_i 为参数 i 的实际值。

驱动轮既要满足准确跟随患者运动，又要保证患者腿部空间的开阔。选择带编码器的伺服电机安装在底盘前端两侧，2台电机各自独立驱动，通过电机的差速完成机器人的前进和后退。从动轮选用2个医用静音万向轮。

1.2.2 机器人的驱动力计算

通过前期的计算和实验，确定所研制的家用康复训练机器人重量和速度分别为自重144 kg，速度0.6 m/s。首先，确定电机型号，对机器人正常行驶

力矩和功率进行计算, 对负载工况进行适当放大。当康复机器人在正常行驶过程中, 驱动轮受阻力关系如下:

$$\sum F = F_f + F_j + F_i \quad (2)$$

加速度过大容易引起患者和机器人运动不协调, 式中: a 为家用康复机器人最大加速度, 设计加速时间为 2 s, 得 $a=0.5 \text{ m/s}^2$ 。取滚动加速度阻力 μ 为 0.02, 坡度阻力可忽略不计, 可获得:

$$\sum F = F_f + F_j + F_i = 28 + 72 + 0 = 100 \text{ N} \quad (3)$$

物体转动的刚体动力学公式:

$$M_i = T_i - FR = \alpha J_w \quad (4)$$

式中: F_f 为滚动阻力; F_j 为加速阻力; F_i 为坡度阻力; T_i 为车轮额定转矩; J_w 为轮毂转动惯量; 半径 R 取值 0.065 m; 轮胎质量 m 取 1.95 kg。则有车轮转矩:

$$T_i = \alpha J_w + F_i R \approx 3.28 \text{ Nm} \quad (5)$$

取 $v=1 \text{ m/s}$, 根据扭矩与功率计算公式:

$$P = T_i n / 9550 \approx 50.48 \text{ W} \quad (6)$$

得出家用康复机器人正常行驶时所需功率, 对该值乘以安全系数, 得到驱动电机功率:

$$p' = 50.48 \times 2 = 100.96 \text{ W} < 160 \text{ W} \quad (7)$$

1.2.3 摔倒保护

在患者的康复阶段, 二次伤害会给偏瘫患者带来不可预估的后果。将防护服安装在康复机器人上部的立柱横梁, 使人体处于自然站立, 悬吊防护带始终保持在拉紧的状态。当患者在站立或行走过程中有摔倒的倾向时, 康复机器人的保护装置保证患者始终处于直立站姿。

1.3 运动学分析

如图 3 所示, 在全局坐标系下建立家用康复训练机器人车轮转角和运动速度的关系^[6]。

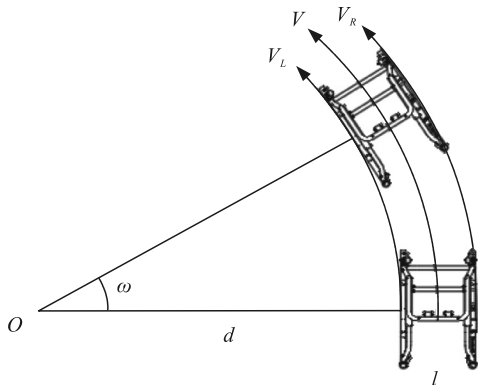


图 3 运动学分析

家用康复机器人为两侧对称结构, 机器人速度关系如下:

$$V = (V_L + V_R) / 2 \quad (8)$$

式中: V 为家用康复机器人刚体运动速度; V_L 和 V_R 分别为两侧车轮运动速度。

家用康复机器人转动角速度和 2 轮速度之间关系为:

$$\omega = (V_R - V_L) / l \quad (9)$$

式中: ω 为机器人转动角速度; l 为 2 轮中心距; d 为转向时内侧转弯半径; ω_L 为家用康复机器人左驱动轮角速度; ω_R 为右驱动轮角速度。合并得:

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d/2 & (d+l)/2 \\ -d/l & (d+l)/l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (10)$$

动力学能量方程:

$$T = m(V_x^2 + V_y^2) / 2 + J\omega^2 / 2 \quad (11)$$

式中 J 为康复机器人空间转动惯量。

2 康复机器人稳定性分析

2.1 侧倾力计算

稳定性是分析康复机器人性能的一个重要指标^[8-9]。建立计算模型, 家用康复机器人重心在世界坐标系中的计算公式为:

$$x_c = \sum_{i=1}^n m_i x_i / \sum_{i=1}^n m_i \quad (12)$$

$$y_c = \sum_{i=1}^n m_i y_i / \sum_{i=1}^n m_i \quad (13)$$

$$z_c = \sum_{i=1}^n m_i z_i / \sum_{i=1}^n m_i \quad (14)$$

式中 x_c, y_c, z_c 为康复机器人的重心坐标。

分析康复机器人的稳定区域, 康复机器人外形为左右对称结构, 康复机器人的稳定范围在 4 个轮子连接的投影区域。通过稳定性分析方法, 结合从 Solidworks 中得到的康复机器人重心参数^[10], 可以得出在静止站立和匀速运动时康复机器人的重心始终在稳定区间内。4 个轮子中心连线即为临界稳定线, 康复机器人处于临界稳定状态, 对于偏瘫患者危险系数极高, 在患者使用机器人康复训练过程中应避免重心落到临界线上。结合人体工程学设计康复机器人主体立柱时, 对立柱造型优化设计, 使得人体在康复机器人中间活动范围缩小, 进一步提升康复机器人的稳定性。

根据中国成年人人体尺寸 GB10000—88 国家

标准, 取人体质量为 83 kg, l_R 为人体两脚心宽度取 0.24 m, 分析偏瘫患者在单腿承重的情况下对康复机器人的作用力, 如图 4 所示。

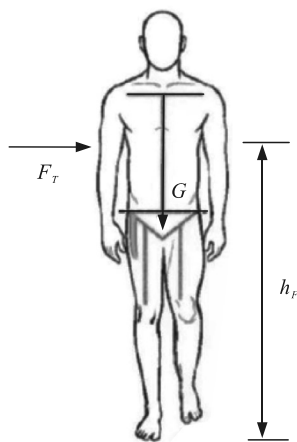


图 4 偏瘫患者受力分析

通过式(15)计算得出人体在单腿受力的情况下对康复机器人扶手的侧推力 F_T 约为 86.17 N。

$$F_T \times h_F = G_R \times l_R / 2 \quad (15)$$

康复机器人扶手高度取为 1.13 m, 根据牛顿第三定律, 康复机器人侧倾力计算公式:

$$F_C \times h_F = G_C \times l / 2 \quad (16)$$

式中: F_C 为家用康复机器人侧倾力; h_F 为家用康复机器人受侧倾力扶手高度; l 为家用康复机器人两侧轮之间的距离。由式(16)可以得出康复机器人扶手位置受到最大侧翻力 F_{Cmax} 为 406.60 N, 即家用康复机器人侧翻稳定裕度为 406.60 N。

$$F_T < F_{Cmax} \quad (17)$$

患者摔倒时的侧推力远远小于家用康复机器人最大侧倾力, 故在患者意外摔倒时, 可以保证康复机器人处于稳定状态。

由式(15)可知, 人体对康复机器人的侧推力和人体的重量成正比, 和康复机器人扶手高度成反比, 具体关系如图 5、6 所示。

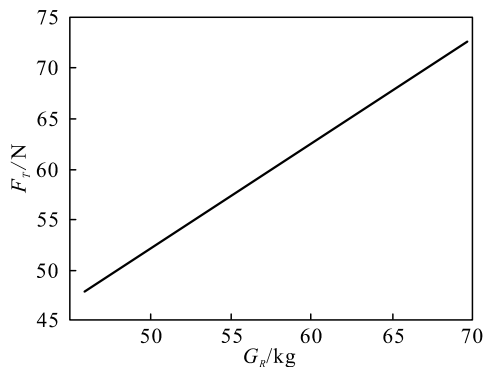


图 5 侧推力和患者体重关系

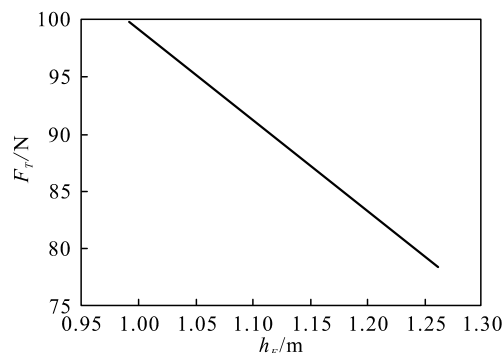


图 6 侧推力和扶手高度关系

如图 7 所示, 康复机器人最大倾翻力和康复机器人的质量、康复机器人两侧轮宽、扶手高度均成反比。图中存在局部最优点, 运用梯度下降法求出最优点, 即在不考虑外部约束情况下, 康复机器人稳定性最高点。

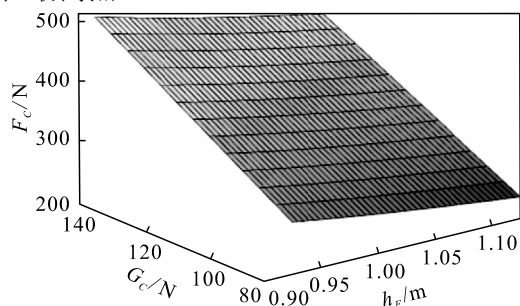


图 7 康复机器人倾翻力和重量、轮宽之间关系

2.2 虚拟样机建立

构建运动平台, 定义各部件的材料属性, 根据实际康复训练情形添加轮子和平台约束力, 设定驱动力^[11]。运用 Adams 软件计算出转动惯量和质量, 确定各部件的重心, 分析虚拟样机的运动状态, 样机模型如图 8 所示。

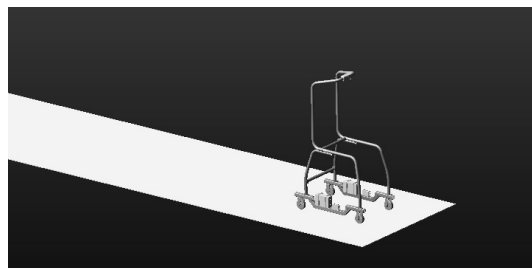


图 8 虚拟样机搭建

2.3 稳定性仿真分析

在稳定性分析中, 平衡状态是前提, 而扰动是引起稳定变化的起因。结合 Adams 仿真软件, 导入虚拟样机模型。在患者不依赖康复机器人, 主动进行康复训练时分析康复机器人匀速直线运动时, 4 轮和重心的波动曲线如图 9、10 所示。

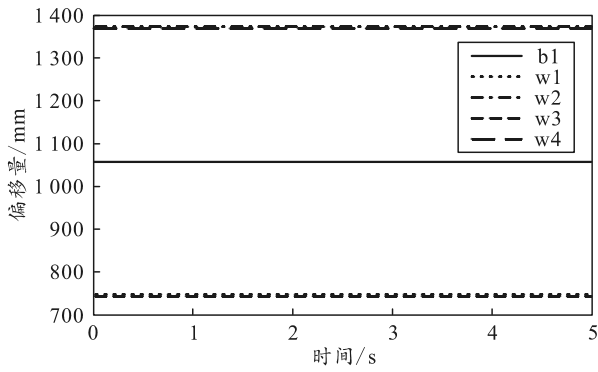


图 9 康复机器人 4 轮及重心在 Z 轴轨迹曲线

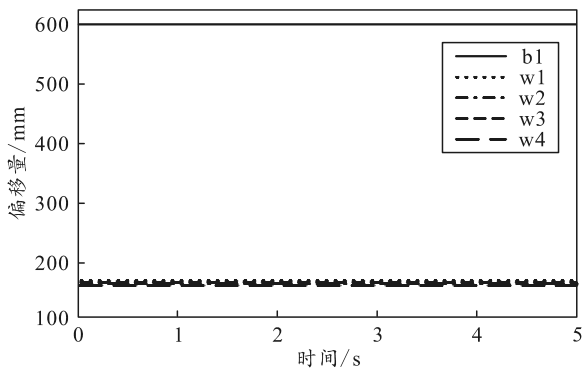


图 10 康复机器人 4 轮及重心在 Y 轴轨迹曲线

康复机器人的重心扰动轨迹曲线如图 11、12 所示，可以看出康复机器人基本保持直线行驶，康复机器人重心没有超出稳定区域，康复机器人处于稳定状态。

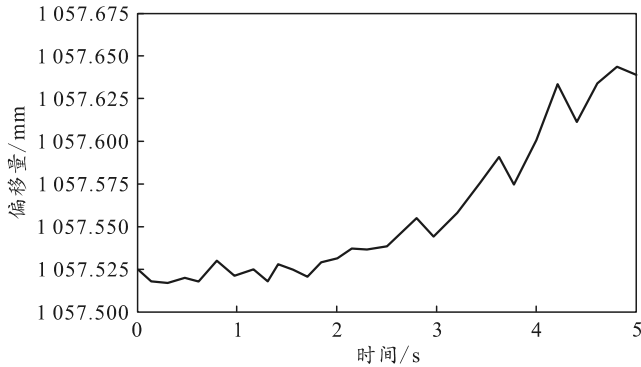


图 11 康复机器人重心 Z 轴轨迹曲线

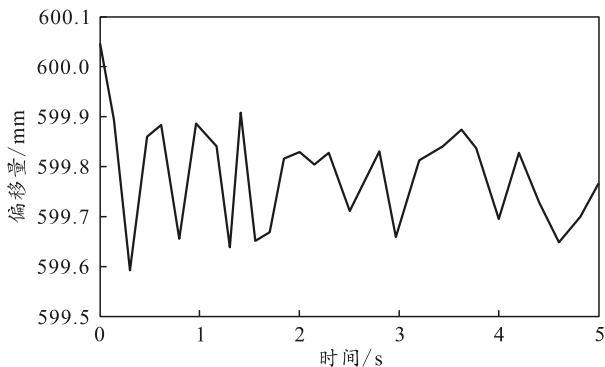


图 12 康复机器人重心 Y 轴轨迹曲线

模拟偏瘫患者摔倒时给康复机器人的侧推力，在家用康复机器人扶手位置添加一个侧倾力，力函数为： $STEP(time, 0, 0, 10, 1\ 000)$ ，分析康复机器人 4 轮和整体重心波动如图 13、14 所示，在超过 400 N 之后侧向轨迹变化明显。在此情况下康复机器人的重心变化如图 15 所示，患者在运动过程中，康复机器人的重心变化始终在稳定范围内。可以看出，在患者康复中后期，康复机器人处于稳定状态。

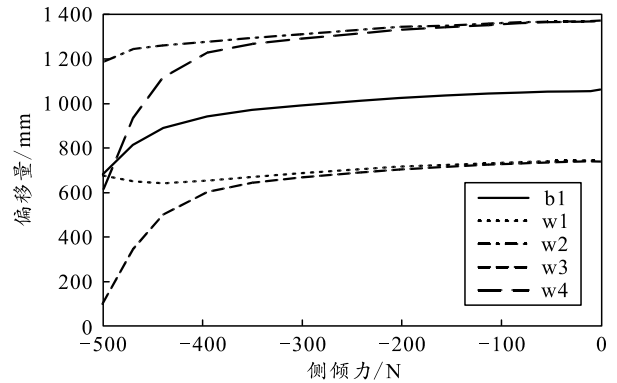


图 13 加载后康复机器人 4 轮及重心 Z 轴轨迹曲线

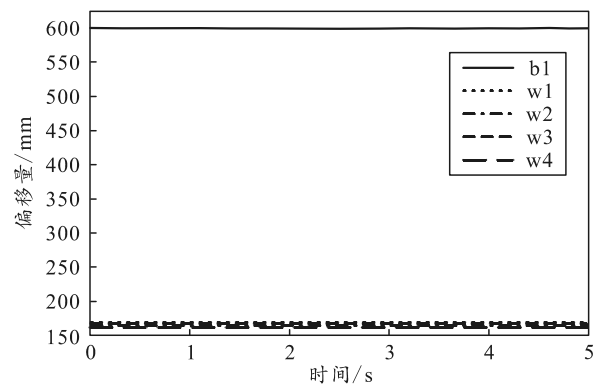


图 14 加载后康复机器人 4 轮及重心 Y 轴轨迹曲线

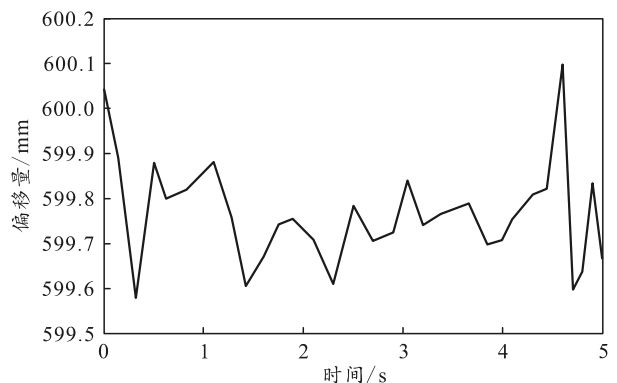


图 15 加载后康复机器人重心 Y 轴轨迹曲线

3 实验验证

3.1 倾倒实验

前文分析了患者摔倒时对家用康复机器人的横向作用力，以此作为康复机器人稳定性的干扰项。

设计倾倒实验，实验设计如图 16 所示，通过拉力传感器测量在扶手处康复机器人倾倒力的最大值。

下肢损伤患者因为腿肌力不足，站立不稳。对患者摔倒姿态进行分析，采用模拟患者偶然摔倒情况进行实验验证，扰动过程如图 17 所示。实验结果证明，在侧向大冲击力下，康复机器人仍然保持稳定状态。

侧倾实验所得数据记录如表 1 所示。通过对数据分析得出，测试结果符合预期要求。

3.2 通过性实验

如图 18 所示，家用康复机器人可以实现自由穿过国家标准室内房门。

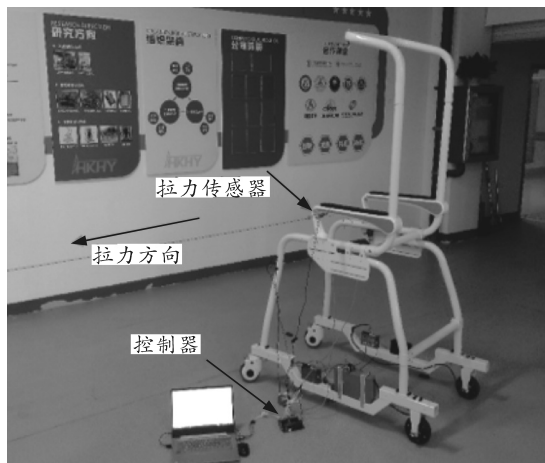


图 16 康复机器人倾翻实验平台搭建



图 17 康复机器人侧向大冲击实验

表 1 侧倾力

次序	1	2	3	4	5	6	7	8
侧倾力/(kg·m/s ²)	402.2	398.6	403.5	405.0	401.8	399.7	405.1	399.5



图 18 康复机器人通过性实验

4 结论

笔者设计的康复机器人在满足使用要求的前提下，采用创新型的设计结构，根据患者肢体尺寸和运动的范围来确定主要部件的尺寸，结合人体使用情况确定模型，为人体工学设计提供方法论指引。通过对康复机器人的分析论证和实验仿真，证实人体下肢康复训练机器人的可靠性和稳定性，为家用

康复训练机器人研制奠定了基础，具有较为重要的指导意义和应用价值。

参考文献：

- [1] MENG W, LIU Q, ZHOU Z, et al. Recent development of mechanisms and control strategies for robot-assisted lower limb rehabilitation[J]. Mechatronics, 2015, 31: 132-145.
- [2] 夏昊昕, 张立勋, 王岚. 下肢康复训练机器人[J]. 应用科技, 2004(2): 3-7.
- [3] MIAO M D, GAO X S, ZHU W. A Construction Method of Lower Limb Rehabilitation Robot with Remote Control System[J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 867.
- [4] 许伟晶, 申黎明, 谈立山, 等. 面向座椅设计的人体尺寸测量与腰臀形态分型[J]. 家具, 2021, 42(3): 39-43.
- [5] 朱思羽, 胡浩, 戚进. 基于美学、人体工学及性能的多因素融合设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 212-220.
- [6] 张立娟. 人体下肢辅助步行康复训练机器人的设计与研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.