

老人洗浴防摔助力装置设计及优化

何淑婷,申燧,汤雨辉,陆天阳,袁明新

(江苏科技大学 机电与动力工程学院,江苏 张家港 215699)

摘要:为防止老人洗浴时因体力不支而摔倒,设计一种防摔助力装置。介绍该装置结构总成,包括环抱防摔机构、防摔高度调节机构、座椅倾角和高度调节机构等;基于连杆传动关系及矢量封闭方程进行环抱防摔机构的静力学建模及遗传算法优化;基于慧鱼零件完成防摔助力装置的快速搭建及实验验证。实验结果表明:该装置能够根据人体胖瘦进行环抱防摔机构自适应张开和收缩;能根据人体高度进行座椅倾角、高度自适应调节,可满足不同体型老人洗浴时最佳助力,能有效防止因长时间站立而造成体力不支,避免老人洗浴摔倒。

关键词:老人;洗浴;防摔机构;助力装置;优化

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0167-04

Design and Optimization of Anti-fall Assist Device for Elderly Bathing

HE Shuting, SHEN Yi, TANG Yuhui, LU Tianyang, YUAN Mingxin

(School of Mechanics and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215699, China)

Abstract: To prevent the elderly from falling due to lack of physical strength in bathing, an anti-fall assist device is designed. The paper introduces the overall structure of the device including embracing anti-fall mechanism, anti-fall height adjustment mechanism, seat inclination and height adjustment mechanism. The static modeling and genetic optimization of the embracing anti-fall mechanism are carried out based on the link transmission relationship and the vector closed equation. And the anti-fall assist device based on fischer parts is quickly built and verified by experiments. The results show that the device can adaptively expand and contract the embracing anti-fall mechanism according to the fatness and thinness of the human body, and can adaptively adjust the height and tilt angle of the seat surface in light of the height of human body, which satisfies the optimal support for the elderly of different sizes, and effectively prevents the elderly from falling in bathing due to physical exhaustion for long time standing.

Keywords: elder; bathing; anti-fall mechanism; assist device; optimization

0 引言

随着人口的老齡化,独居老人越来越多。老人摔倒的潜在威胁不亚于心脏病、中风发作,而老人家中洗浴时因体力不支、关节不灵活和供氧不足导致摔倒是最大诱因^[1]。因此,开发洗浴防摔助力装置已成为关爱老人、关注民生的焦点^[2-3],并引起了广大学者注意。郝鹏翔等^[4]设计了一种洗浴移乘轮椅床,具备室内移动、垂直升降功能,并能辅助使用者行动,但无法满足老人站立洗浴需求,洗浴体验感不强。李浩等^[5]设计了一种多功能老人洗浴凳,包括坐垫、扶手等,方便老人在坐着洗浴后起身,但无法进行扶手和座椅的高度调节,不具有普适性。杜露露等^[6]设计了一种具有座椅支撑、小腿清洗等功能的老人智能洗浴装置,但只适合坐着洗浴,且无防摔环抱功能。陈友莲等^[7]设计了一种无障碍老年浴缸,全开放式进出设计为老人移动提供了便捷,但未考虑老人腿脚不便、体力不支带来的打滑摔倒隐患。从已有文献可以看出,现有助力装置大多功能单一,或仅提供支撑,使得老人洗浴时

间会因体力而受限;或仅能坐着洗浴,使得老人体验感不好。为了满足老人不同洗浴姿态时最佳体验感需求,同时又能起到有效的安全保护,本文设计了一种老人洗浴防摔助力装置。通过装置中环抱防摔机构和座椅面等自适应调节来实现不同体型老人的洗浴防摔和助力,进而提高老人洗浴体验感和安全感。

1 防摔助力装置总体设计

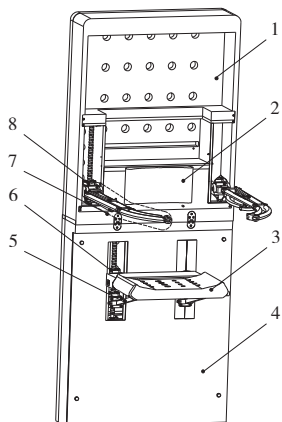
根据老人体质以及洗浴需求,完成了如图1所示的装置总体设计,包括上框架机构和下框架机构。上框架机构包括靠背、环抱防摔机构、防摔高度调节机构。下框架机构包括座椅、座椅倾角调节机构和座椅高度调节机构。

1.1 环抱防摔机构

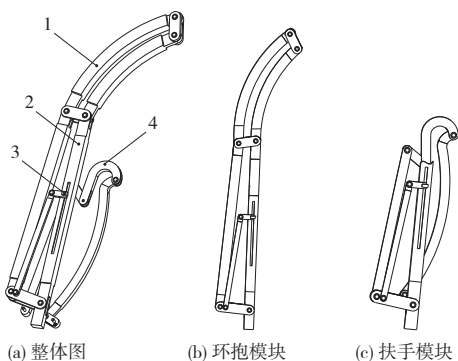
浴室地湿易滑,老人在洗浴时容易体力不支或缺氧,为防止老人摔倒,基于欠驱动^[8]原理设计了如图2所示环抱防摔机构对老人上身助力。

基金项目:江苏省高校大学生创新创业训练计划立项项目(202013991019Y)

第一作者简介:何淑婷(2000—),女,江苏靖江人,学士,研究方向为机械结构设计与优化,1204330301@qq.com。



1—上框架机构;2—靠背;3—座椅;4—下框架机构;
5—座椅倾角调节机构;6—座椅高度调节机构;
7—环抱防摔机构;8—防摔高度调节机构。
图1 老人洗浴防摔助力装置整体外观图



1—环抱模块;2—带槽直杆;3—滑块;4—扶手模块。
图2 环抱防摔机构整体图

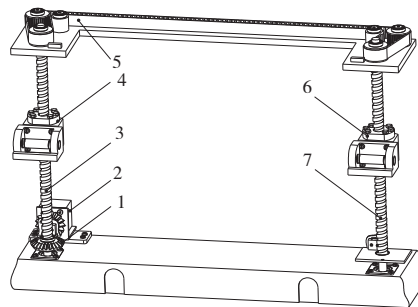
环抱防摔机构由环抱模块和扶手模块组成,其中环抱模块由一个曲柄滑块机构和两个四连杆机构组成,通过环抱老人防止其摔倒。扶手模块由一个五连杆机构和一个曲柄滑块机构组成,通过手掌支撑来缓解老人体力不支。两模块的曲柄滑块机构共用,且是两者的驱动件。

该机构由老人手动驱动,通过推动带槽直杆中滑块来调节环抱模块的包围范围与扶手模块位置。当老人较胖时,向后移动滑块,环抱范围变大,扶手位置向外移动;当老人较瘦时,向前推动滑块,环抱范围变小,扶手位置向内收缩,从而根据老人体型进行老人自适应^[9]贴身环抱,在有效防止老人摔倒的同时也能对老人上身起到搀扶式助力作用。

1.2 防摔高度调节机构

为了能对不同身高老人实现最有效的上身助力防摔,针对环抱防摔机构设计了高度调节结构,如图3所示。

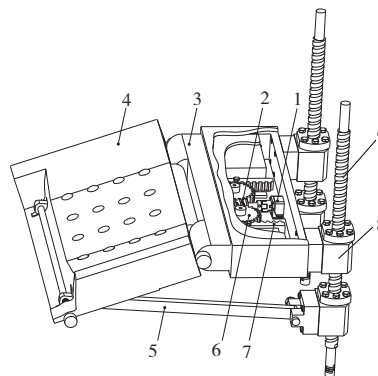
该机构包括左右对称安装的丝杠传动部分,电机驱动圆锥齿轮组来带动左丝杠转动,左、右丝杠上方均装有同步轮,通过同步带带动左、右丝杠同步转动,使得支撑着环抱模块的左右螺母座同步上下移动,进而实现环抱模块高度的同步调节。



1—电机;2—圆锥齿轮组;3—左丝杠;4—左螺母座;
5—同步带;6—右螺母座;7—右丝杠。
图3 防摔高度调节机构图

1.3 座椅及其调节机构

为了对不同身高、不同洗浴体验感(站或坐)需求的老人都能实现下肢助力,设计了如图4所示的座椅及其调节机构,后者包括倾角及高度调节。



1—电机;2—蜗杆;3—活动底座;4—座椅;
5—支撑杆;6—齿轮;7—齿条;8—螺母座;9—丝杠。
图4 座椅及调节机构图

座椅倾角调节机构主要通过电机驱动蜗杆来带动齿轮转动,齿轮再通过与齿条啮合实现活动底座伸缩,而座椅又与活动底座、支撑杆连接形成转动副,进而实现座椅倾角按需调节。当老人站立洗澡时,可以控制座椅倾斜一定角度,既能满足老人洗浴体验感又能对老人臀部起到斜向支撑作用;当老人体力不支时,可以放平座椅来对老人下肢完全助力。

高度调节机构主要通过丝杠转动来驱动固定着座椅相关机构的螺母座,进而实现座椅上下调节来满足不同身高老人的需求。

2 环抱防摔机构的静力学建模

2.1 机构分析

环抱防摔机构是整个助力装置的关键,为了实现老人简洁、有效驱动,采用了欠驱动方式。而机构尺寸的合理性不仅决定了装置能否实现防摔功能,而且决定了能否对老人上身进行周向均衡助力。环抱防摔机构包括环抱模

块和扶手模块,文中拟在对两者进行静力学建模基础上开展结构优化^[10]。鉴于环抱防摔机构左右对称,文中以左边机构进行建模分析。

2.2 环抱模块静力学建模

图5为环抱模块左单边简图,模块中主要连杆及其角度定义如图所示,其中连杆 O_3F 是环抱模块实现老人环抱的主要连杆,文中将其作为研究对象。

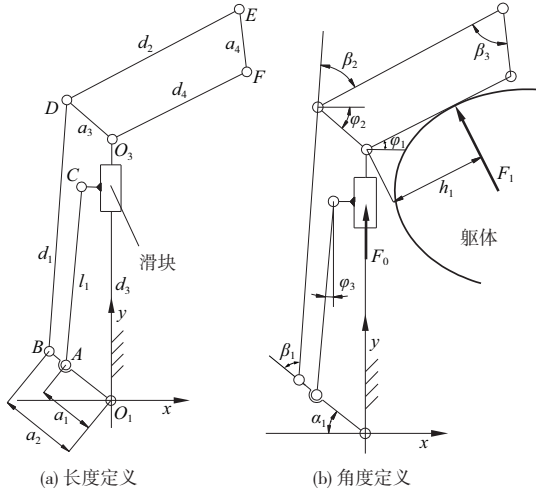


图5 环抱模块简化图

根据老人施加于手推滑块上力 F_0 ,而滑块给定单位时间内位移为 Y ,则 C 点 y 轴方向速度为

$$v_{cy} = Y \quad (1)$$

基于虚功原理: $\sum F_i = 0$, F_0 为主动动力, F_1 为反作用力,从而列出该机构的虚功方程为

$$F_0 v_{cy} - F_1 v_{f1} = 0 \quad (2)$$

式中: F_1 为环抱部分与老人的接触力; v_{f1} 为接触点力处的虚速度。

根据刚体速度公式,可得该接触点虚速度为

$$v_{f1} = \delta_{\varphi_1} h_1 \quad (3)$$

式中: δ_{φ_1} 表示环抱连杆 O_3F 水平夹角 φ_1 的虚角速度。

根据给定手推滑块位移 Y ,可得 C 点位移:

$$\begin{cases} x_c = 0 \\ y_c = Y \end{cases} \quad (4)$$

根据连杆 CA 速度关系可列出:

$$v_{cy} = v_{cA} \cos \varphi_3 \quad (5)$$

分别列出 CA 、 O_1B 杆上 A 点垂直于 O_1B 杆的速度:

$$\begin{cases} v_A = v_{cA} \cos \alpha_1 \\ v_A = a_1 \delta_{\alpha_1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_{cA} 为连杆 CA 速度; v_A 为 A 点在 O_1B 垂直方向速度。

连立式(2)一式(4)可得出 O_1B 水平夹角 α_1 角速度:

$$\delta_{\alpha_1} = \frac{\cos \alpha_1}{a_1 \cos \varphi_3} Y \quad (7)$$

对于四连杆机构 O_1BDO_3 ,将水平方向作为 x 轴正方向,将竖直方向为 y 轴正方向,列出其矢量封闭^[11]方程:

$$O_1B + BD + DO_3 = O_1O_3 \quad (8)$$

将其按 x 、 y 方向分解可列出:

$$\begin{cases} a_2 C_{\alpha_1} = -d_1 C_{\alpha_1 + \beta_1} + a_3 C_{\varphi_2} \\ a_2 S_{\alpha_1} + d_1 S_{\alpha_1 + \beta_1} + a_3 S_{\varphi_2} = d_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中: C_* 表示余弦 $\cos(*)$; S_* 表示正弦 $\sin(*)$,下同。

对 φ_2 、 α_1 求导,有

$$\frac{\delta_{\varphi_2}}{\delta_{\alpha_1}} = -\frac{a_2 a_3 C_{\alpha_1} S_{\varphi_2} + a_2 d_1 S_{\varphi_2} S_{\alpha_1 + \beta_1} + a_3^2 S_{\varphi_2}^2}{a_2 a_3 C_{\alpha_1} C_{\varphi_2} + a_2 d_3 S_{\alpha_1} + d_1 d_3 S_{\alpha_1 + \beta_1}} \quad (10)$$

令式(10)等号右边项等于 m ,则

$$\delta_{\varphi_2} = m \delta_{\alpha_1} \quad (11)$$

同样,对四连杆 O_3DEF 列出矢量封闭方程:

$$O_3D + DE + EF = O_3F \quad (12)$$

与四连杆机构 O_1BDO_3 求解相同,将其按 x 、 y 方向分解并对 φ_1 、 φ_2 求导可得

$$\delta_{\varphi_1} = n \delta_{\varphi_2} \quad (13)$$

式中

$$n = \frac{a_4 d_4 C_{\varphi_1} C_{\alpha_1 + \beta_1 + \beta_2 - \beta_3}}{a_3 d_2 C_{\varphi_2 - \varphi_1} + a_3 d_4 C_{\varphi_2} C_{\alpha_1 + \beta_1 + \beta_2 - \beta_3} + a_3 d_2 C_{\varphi_2 - \varphi_1} + a_4 d_2 S_{\varphi_1} S_{\alpha_1 + \beta_1 + \beta_2 - \beta_3}}$$

$$a_3 d_2 C_{\varphi_2 - \varphi_1} + a_3 d_4 C_{\varphi_2} C_{\alpha_1 + \beta_1 + \beta_2 - \beta_3}$$

将式(11)代入式(13)可得:

$$\delta_{\varphi_1} = mn \delta_{\alpha_1} \quad (14)$$

将式(14)代入式(3):

$$v_{f1} = \frac{mnh_1 C_{\alpha_1}}{a_1 C_{\varphi_3}} Y \quad (15)$$

将式(2)和式(15)代入式(1)可得:

$$F_1 = \frac{F_0 a_1 C_{\varphi_3}}{mnh_1 C_{\alpha_1}} \quad (16)$$

由此得到环抱防摔机构环抱部分接触力 F_1 与给定推力 F_0 的关系,且接触力 F_1 受 α_1 、 β_1 、 β_2 、 $\varphi_1 \sim \varphi_3$ 等角度以及机构尺寸影响。

2.3 扶手模块静力学建模

图6为扶手模块左单边简图,图中定义了连杆长度及其角度,其中连杆 HI 是给老人提供扶手助力的主要连杆,文中将其作为研究对象。

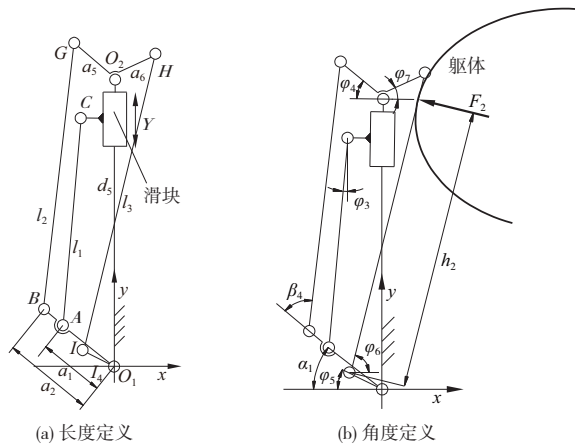


图6 扶手模块简化图

基于虚功原理: $\Sigma F_i = 0$, F_0 为主动动力, F_2 为反作用力, 从而列出该机构的虚功方程为

$$F_0 v_{cy} - F_2 v_{f_2} = 0 \quad (17)$$

式中: F_2 为扶手部分与老人的接触力; v_{f_2} 为接触点力处的虚速度。

根据刚体速度公式, 可得该接触点虚速度为

$$v_{f_2} = \delta_{\varphi_6} h_2 - \delta_{\varphi_5} l_4 C_{\varphi_5 + \varphi_6} \quad (18)$$

式中 δ_{φ_5} 和 δ_{φ_6} 分别为水平夹角 φ_5 和 φ_6 的虚角速度。

与环抱模块中 $O_3 F$ 杆位移方程求解相同, 针对扶手模块简图中四连杆机构 $O_1 B G O_2$, 通过其矢量封闭方程获得连杆 $O_2 G$ 和水平夹角 φ_4 的虚角速度为

$$\delta_{\varphi_4} = u \delta_{\alpha_1} \quad (19)$$

式中

$$u = - \left(\frac{a_2 a_5 C_{\alpha_1 - \varphi_4} + a_5 l_2 C_{\varphi_4} C_{\alpha_1 + \beta_4}}{a_2 a_5 C_{\alpha_1 - \varphi_4} + a_5 l_2 C_{\varphi_4} C_{\alpha_1 + \beta_4} + a_5 l_2 S_{\varphi_4} S_{\alpha_1 + \beta_4}} + \frac{a_2 d_3 S_{\alpha_1} + d_3 l_2 S_{\alpha_1 + \beta_4} - a_5 l_2 S_{\varphi_4} S_{\alpha_1 + \beta_4}}{a_2 a_5 C_{\alpha_1 - \varphi_4} + a_5 l_2 C_{\varphi_4} C_{\alpha_1 + \beta_4} + a_5 l_2 S_{\varphi_4} S_{\alpha_1 + \beta_4}} \right)^{-1}$$

针对扶手模块简图中四连杆机构 $O_2 H I O_1$, 通过其矢量封闭方程获得连杆 $O_1 I$ 水平夹角 φ_5 的虚角速度 δ_{φ_5} 以及连杆 $I H$ 水平夹角 φ_6 的虚角速度 δ_{φ_6} :

$$\delta_{\varphi_5} = -t \delta_{\varphi_4} \quad (20)$$

$$\delta_{\varphi_6} = -k \delta_{\varphi_4} \quad (21)$$

$$\text{式中: } t = - \frac{2a_6 l_4 C_{\varphi_5} C_{\varphi_7} + l_4^2 C_{\varphi_5} - l_3 l_4 S_{\varphi_5} S_{\varphi_6}}{2a_6 l_4 S_{\varphi_5} S_{\varphi_7} + 2a_6 l_3 C_{\varphi_6 - \varphi_7}};$$

$$k = - \frac{a_6 l_3 C_{\varphi_6 - \varphi_7} + l_3 l_4 C_{\varphi_5} C_{\varphi_6} + d_5 l_3 C_{\varphi_6}}{a_6 l_4 S_{\varphi_5} S_{\varphi_7} + a_6 l_3 C_{\varphi_6 - \varphi_7}}$$

将式(19)代入式(20)和式(21)得:

$$\delta_{\varphi_5} = -t u \delta_{\alpha_1} \quad (22)$$

$$\delta_{\varphi_6} = -k u \delta_{\alpha_1} \quad (23)$$

将式(7)、式(22)、式(23)代入式(18)得:

$$v_{f_2} = (-k u h_2 + t u l_4 C_{\varphi_5 + \varphi_6}) \frac{C_{\alpha_1}}{a_1 C_{\varphi_3}} Y \quad (24)$$

将式(5)和式(24)代入式(17)得:

$$F_2 = \frac{F_0 a_1 C_{\varphi_3}}{(t u l_4 C_{\varphi_5 + \varphi_6} - k u h_2) C_{\alpha_1}} \quad (25)$$

由此, 得到扶手模块扶手部分接触力 F_2 与给定推力 F_0 的关系。由式(16)和式(25)的接触力 F_1 、 F_2 和 F_0 之间关系可以看出: 接触力 F_1 和 F_2 受 α_1 、 $\beta_1 \sim \beta_3$ 、 $\varphi_1 \sim \varphi_7$ 等角度以及结构尺寸的影响。

3 环抱防摔机构的参数优化

3.1 优化变量确定

环抱防摔机构参数涉及: $a_1 \sim a_6$, $d_1 \sim d_5$, $l_1 \sim l_4$ 。基于传动主次关系, 文中先将主要纵向长度作为已知, 即 $d_1 = 300 \text{ mm}$, $d_2 = 200 \text{ mm}$, $d_3 = 240 \text{ mm}$, $d_4 = 170 \text{ mm}$, $d_5 = 225 \text{ mm}$; 然后根据参数稳定性影响主次关系, 将部分宽度也作为已知, 即 $a_2 = 60 \text{ mm}$, $a_3 = 40 \text{ mm}$, $a_4 = 40 \text{ mm}$ 。将其余机

构结构参数作为优化变量, 即 $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7] = [a_1, a_5, a_6, l_1, l_2, l_3, l_4]$ 。

为提高老人环抱防摔的周向稳定性和有效性, 老人与机构接触力应尽可能周向均匀分布。因此, 限制接触点到对应转动中心距离: $90 < h_1 < 110$, $210 < h_2 < 260$ 。

为了使防摔机构包络范围更大, 且有更好的传力性, 设定结构尺寸约束: $35 < a_1 < 55$, $35 < a_5 < 45$, $30 < a_6 < 45$, $175 < l_1 < 195$, $225 < l_2 < 245$, $265 < l_3 < 285$ 。

设定角度参数约束: $\varphi_4 + \varphi_7 = 5\pi/4$, $0 < \beta_4 - \beta_1 < \pi/6$, $0 < \varphi_2 - \varphi_1 < \pi/4$ 。

3.2 优化目标函数建立

以老人环抱防摔时上身周向助力均衡为目标, 建立如下结构参数优化目标函数:

$$\min f(x) = (F_1 - F_2)^2 \quad (26)$$

3.3 参数遗传优化

为了实现多变量参数的全局优化, 文中引入具有分布式全局搜索能力的遗传算法进行参数寻优。遗传算法的种群数为 50, 交叉概率和变异概率各为 0.7 和 0.3。鉴于算法的概率性搜索, 文中进行了 50 次独立测试。现列出其 3 组较优解, 结果如表 1 所示。

表 1 结构参数优化对比

参数	第 1 组	第 2 组	第 3 组
a_1/mm	43.6	43.6	46.2
a_5/mm	40.1	41.2	39.2
a_6/mm	38.3	37.8	38.8
h_1/mm	104.5	100.1	105.4
h_2/mm	227.0	229.9	241.2
l_1/mm	184.6	185.7	184.0
l_2/mm	234.6	237.0	230.9
l_3/mm	275.4	274.8	275.0
l_4/mm	19.9	19.1	21.4
$\min f(x)$	8.6×10^{-3}	9.2×10^{-3}	15.4×10^{-3}
$\sigma/\%$	4.51	4.54	4.90

由表 1 可知, 最优结果的目标函数值为 8.6×10^{-3} , 其接触力的偏差也达到了最小值, 而机构参数为: $a_1 = 43.6 \text{ mm}$, $a_5 = 40.1 \text{ mm}$, $a_6 = 38.3 \text{ mm}$, $l_1 = 184.6 \text{ mm}$, $l_2 = 234.6 \text{ mm}$, $l_3 = 275.4 \text{ mm}$, $l_4 = 19.9 \text{ mm}$ 。对应接触力 $F_1 = 2.04 \text{ N}$, $F_2 = 1.95 \text{ N}$, 两者相近达到了优化目的。

4 实验验证

为了验证老人洗浴防摔助力装置的可行性, 基于德国 Fischer 零件进行了装置的快速搭建。装置包括了核心功能所需的环抱防摔机构、防摔高度调节机构、座椅、座椅倾

(下转第 180 页)

- 究[J]. 机械设计与制造, 2018(2):74-77.
- [10] CHEN G Y. Deep neural network approximations for the stable manifolds of the Hamilton-Jacobi equations[EB/OL]. (2020-07-30)[2022-03-10]. <https://arxiv.org/abs/2007.15350>.
- [11] MADERO V, ARACIL J, GORDILLO F. A nonlinear control law for two-wheeled self-balanced vehicles[C]//Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valletta, Malta: IEEE, 2010:1557-1562.
- [12] SPONG M W. Partial feedback linearization of underactuated

mechanical systems [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94). Munich, Germany: IEEE, 2002:314-321.

- [13] SAKAMOTO N, VAN DER SCHAFT A J. Analytical approximation methods for the stabilizing solution of the Hamilton-jacobi equation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(10):2335-2350.

收稿日期:2022-07-11

(上接第170页)

角和高度调节机构等,控制器选用ROBO TX接口板,装置搭建如图7所示。

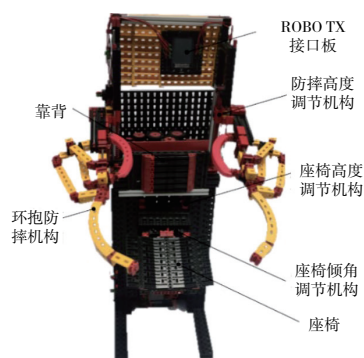


图7 老人洗浴防摔助力装置

图8给出了洗浴防摔助力装置的实验测试结果。图8(a)显示环抱防摔机构处于张开状态,老人洗浴前可以自由走进,并根据自身胖瘦进行自适应环抱调节,如图8(b)所示。图8(c)和图8(d)显示该防摔机构的高度调节,以满足不同身高需求老人。图8(e)和图8(f)显示了座椅倾斜和平放两种状态。前者可以满足老人站立洗浴,同时对臀部起到一定支撑助力,若老人体力不支可以控制座椅平放,让老人安全坐着洗浴。同时,该座椅也可以调节高度来满足不同身高需求。

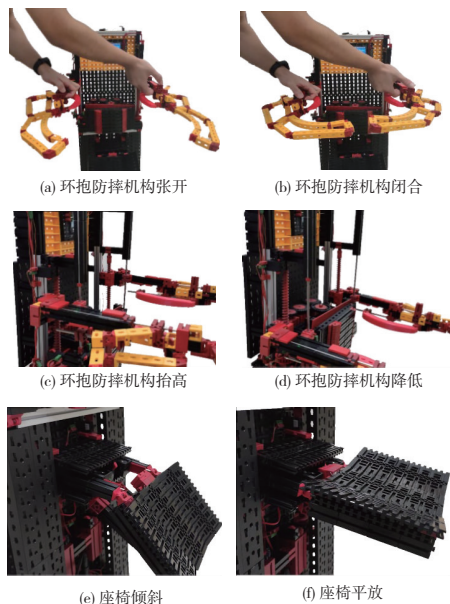


图8 装置实验测试结果

5 结语

老人常因体力不支等情况摔倒,而家中浴室则是主要摔倒场所,为此文中设计了一种老人洗浴防摔助力装置,通过理论分析和实验可得出以下结论:

1) 基于多连杆机构的欠驱动环抱防摔机构,能根据老人身体胖瘦实现自适应收缩和张开,满足了老人洗浴时对上身的有效助力,而防摔高度调节机构满足了不同身高老人的需求;

2) 基于齿轮蜗杆和连杆机构的座椅倾角和高度调节机构,满足了老人站立和坐着不同洗浴体验感需求,实现了不同洗浴姿态下的下肢有效助力;

3) 针对多变量环抱防摔机构设计,基于连杆传动关系及矢量封闭方程,在构建机构静力学和优化模型基础上,利用遗传算法实现了结构参数的全局寻优,有助于提高环抱防摔助力时的周向稳定性。

参考文献:

- [1] 李同林. 老人洗浴死亡浴室是否担责[J]. 中国老年, 2020(17):59.
- [2] 李媛,郑开元,文川,等. 助老产品家庭淋浴防摔倒装置的研发[J]. 科学技术创新, 2021(9):43-45.
- [3] 张林静. 面向老龄人群的洗浴产品设计研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
- [4] 郝鹏翔,柳杰,赵静静. 洗浴移乘轮椅床创新设计[J]. 科技与创新, 2019(7):58-60.
- [5] 李浩,李永浩,吕文兴,等. 一种多功能老人洗浴凳:中国, CN211155463U[P]. 2020-08-04.
- [6] 杜露露,阮航,赵起飞. 老年人智能洗浴装置研究与设计[J]. 现代盐化工, 2021, 48(3):187-188.
- [7] 陈友莲,许焱炼,钟尚联. 一种无障碍老年浴缸:中国, CN112932298A[P]. 2021-06-11.
- [8] 黄自鑫,王乐君. 一类平面欠驱动机械系统控制方法综述[J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43(4):448-454, 467.
- [9] 张颖,乔贵方,万其,等. 具有自适应能力的3指机械手爪的设计与实现[J]. 机械设计, 2020, 37(11):102-108.
- [10] 丛明,任杰,秦文龙,等. 一种绳索驱动的仿下颌机构设计与分析[J]. 机械设计与制造, 2021(11):251-256, 261.
- [11] 李鹏飞,伞红军,陈久朋,等. 基于封闭矢量法和D-H法的四足机器人逆运动学分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4):161-165.

收稿日期:2022-05-09