

行星轮式爬楼梯轮椅的设计与分析

章玮滨 唐 炜

(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要** 针对老年人和身体残障人士安全地爬楼和在地面上高效移动的需求,设计了一种行星轮式电动爬楼梯轮椅,详细介绍了该轮椅机构组成、控制系统及其功能特点。通过建立基于拉格朗日方程的行星轮组动态模型,研究了不同等效转矩下行星轮组的角加速度曲线,详细分析了轮椅在爬楼梯过程中的稳定裕度。研究表明,防倾翻支架能有效地提高轮椅爬楼的稳定性。该行星轮式爬楼梯轮椅能够安全有效地帮助老年人和身体残障人士,满足日常出行与攀爬楼梯的实际需求。

**关键词** 行星轮 电动轮椅 拉格朗日方程 稳定裕度

Design and Analysis of Planetary Wheeled Stair-climbing Wheelchair

Zhang Weibin Tang Wei

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract** Aiming at safe stairs climbing and efficient locomotion on the ground for aged or physical disabled people, a planetary wheeled electric powered wheelchair (EPW) is designed and the composition of the wheelchair mechanism, control system scheme and its functional characteristics are introduced in detail. Through establishing the dynamic model of the planetary wheel clusters based on the Lagrange equation, the angle acceleration curves with various given equivalent torques are studied, the stability margin of the EPW is analyzed in detail in the process of a single step climbing which has demonstrated that the anti-tip-over bracket can effectively enhance the stability. The planetary wheeled stair-climbing wheelchair can effectively help those who are in need and meet the actual needs of daily travel and climbing stairs.

**Key words** Planetary wheel Electric powered wheelchair Lagrange equation Stability margin

0 引言

电动轮椅(EPW)是老年人和残疾人的主要移动辅助设备。随着控制技术、操纵技术和安全技术的发展,许多人将电动轮椅作为日常活动的主要手段<sup>[1]</sup>。如今,电动轮椅可以到达许多必要的日常活动区域。然而,对于电动轮椅用户来说,克服现有的建筑障碍,例如,建筑物内的楼梯,仍然是一个现实的问题。在过去的二十年中,具有爬楼梯能力的特殊电动轮椅的发展引起了人们的极大关注。

电动轮椅有3种基本的运动结构,分别是腿式、履带式和轮式<sup>[2]</sup>。表1中列举了这3种不同结构方案的爬楼梯轮椅的优缺点,并进行了比较。可见,在爬楼梯过程中需要有人辅助的行星轮式爬楼梯轮椅重量轻、结构紧凑、设施灵活,适合于室内楼梯,是一种理想可行的解决方案。

表1 3种不同结构爬楼梯轮椅的优缺点对比

类型	优点	缺点
腿式	适用于几乎所有的楼梯,具有自主攀爬的可能	机械结构和控制方法过于复杂,可能给乘客带来恐惧心理
履带式	具有自主攀爬的可能,适用于大多数室外楼梯和一部分室内楼梯,履带具有防倾翻功能	爬楼过程中需要特殊机构辅助,对台阶边缘会施加高非线性力,比较笨重
轮式	适用于大多数楼梯,紧凑轻便,使用就像普通轮椅一样简单	爬楼过程需要有人协助,爬楼梯过程可能对乘客造成不适

Morales 等<sup>[3]</sup>提出了一种新型爬楼梯轮椅,它最大的特点是8个平均安装在4个轴上的解耦机构。这种设计能有效提升轮椅的爬楼梯性能,但是也使控制任务大大复杂化,而且最好加上激光传感器或视觉系统<sup>[4]</sup>。本文研究的爬楼梯轮椅没有使用过多的传感器,使得控制任务得到了简化。在陀螺仪模块实时反馈倾角状态的帮助下,助手能够有效地保证轮

椅的倾斜在一个安全的范围内。

Yu 等<sup>[5]</sup>提出了一种配备可变几何形状履带机构的轮椅。该轮椅采用力-角稳定措施,通过主动控制履带张力,使履带能够适应凸面地形,并向凹面几何形状转变,提高了轮椅机器人的地形适应性,但是,履带式轮椅共有的缺点依然存在。Tao 等<sup>[6-7]</sup>设计了一种新型爬楼轮椅,并通过仿真和实验验证了其功能。这款轮椅能够在轮式和履带式运动模式之间切换,可以稳定地爬楼梯;尽管如此,该研究仍然有所不足,当用户不需要爬楼梯时,该轮椅的能效相对较低。

对于行星轮式爬楼梯轮椅,应考虑的关键点是它的稳定性。为了提高爬楼时的稳定性,本文提出了一种带有防倾翻支架的行星轮式爬楼梯轮椅。介绍了机构和控制系统的的设计,阐述了爬楼梯的过程,利用拉格朗日方程建立了轮椅的动力学模型,详细分析了爬楼梯的稳定性裕度,最后检验了轮椅的爬楼梯性能。

## 1 行星轮式爬楼轮椅的设计

### 1.1 机构设计

行星轮式爬楼梯轮椅的结构如图1所示。轮椅框架两侧对称地设有两个行星轮组,每个行星轮组由两个行星轮组成。为了实现爬楼梯运动,行星轮组的旋转由直流电机驱动,直流电机带有行星减速器和蜗轮蜗杆减速器,它们安装在横向对称平面上。轮椅底盘的底部配备有防倾翻支架,该支架通过线性致动器伸展或缩回。

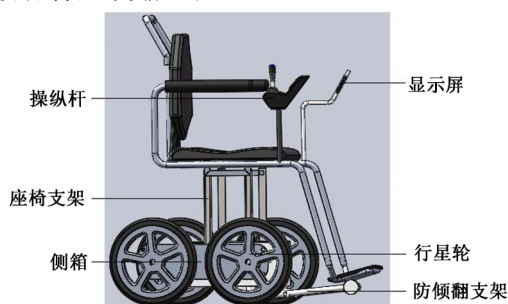


图1 电动爬楼轮椅三维模型图

该轮椅可根据行星轮系的不同位置在3种不同的模式下运行,分别为:手动模式、电动行走模式和爬楼梯模式。当轮椅电量耗尽时采用手动模式,轮椅可以作为普通轮椅推动;当轮椅电量充足时采用电动行走模式,它可由乘坐者通过操纵杆来控制,就像普通的电动轮椅,也可由助手通过手机App控制;当乘坐者需要上楼或下楼时采用爬楼梯模式,两个行星轮组在爬楼电机的驱动下同步旋转,实现轮椅的上下楼梯功能。在此期间,防倾翻支架将实

时伸展到合适的角度,以确保轮椅在爬楼梯过程中的安全性。

爬楼梯轮椅的单侧轮系传动如图2所示,在行走模式时,行走电机与行星减速器连接,小锥齿轮与大锥齿轮啮合,大锥齿轮通过外轴与中心的行星齿轮连接,5个行星齿轮依次啮合,此时行星轮系的各齿轮绕各自中心自转,通过输出轴带动车轮自转。

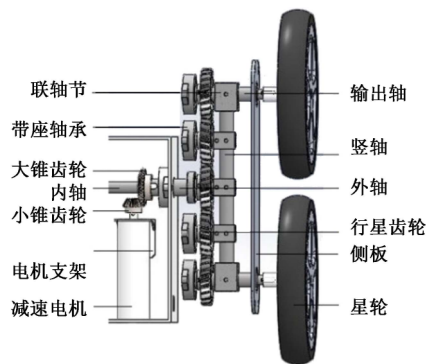


图2 行走机构示意图

如图3所示,在爬楼梯模式时,翻转电机与翻转减速器连接,通过内轴与翻转机构连接,此时行星轮系内各齿轮围绕内轴中心轴公转。

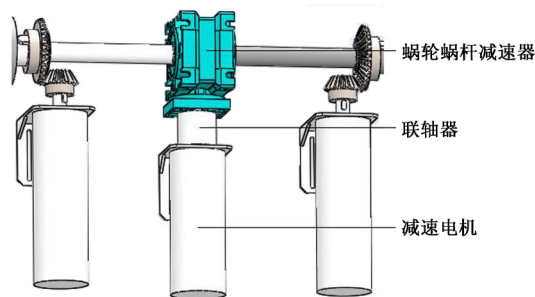


图3 爬楼机构示意图

### 1.2 控制系统设计

爬楼梯轮椅的控制系统如图4所示,使用一组12V和24V的锂电池为其供电,使用STM32作为其嵌入式微控制器。通过驱动模块对行走机构中的直流电机进行控制,可以实现轮椅的停止/启动、速度调节和转向。在底盘内安装有MPU6050传感器,用于检测三轴角度、角速度和加速度。

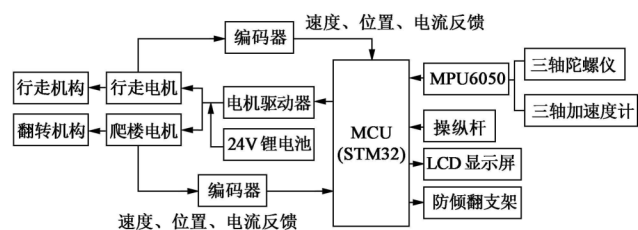


图4 控制系统框图

### 1.3 爬楼过程

为了简化问题的描述,研究假设轮椅在楼梯横截面上始终保持平面运动,忽略轴向扰动或偏转对轮椅运动的影响<sup>[8]</sup>。因有助手的存在,所以实际操作

中也可以忽略该影响。

爬楼梯的过程可分为3个阶段,在第一阶段,轮椅切换到爬楼梯模式,助手应站在轮椅后面,使轮椅向后移动到楼梯前面,线性致动器将驱动防倾翻支架打开,直到支架的前部接触地面,如图5(a)所示(此处,未显示助手)。防倾翻支架继续伸展,直到轮椅向后倾斜到一定角度,如图5(b)所示。

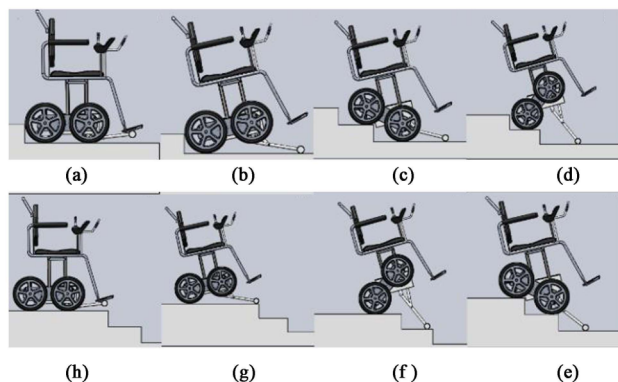


图5 爬楼过程示意图

在第二阶段,如图5(b)图~5(g)所示,行星轮组开始翻转,轮椅在助手的控制下开始爬上第一步。同时,防倾翻支架继续伸展。行星轮组继续翻转,轮椅上升到第二级台阶,防倾翻支架打开到一定角度,直到其位置锁定,如图5(g)所示。

第三阶段是结束阶段,如图5(h)所示。在所有楼梯爬完之后,防倾翻支架收回,轮椅返回到水平位置。此时,轮椅切换到手动模式或电动行走模式。

## 2 行星轮系动力学建模与仿真分析

### 2.1 行星轮系动力学建模

为了简化动力学分析,建立了行星轮系的坐标系,如图6所示。以行星轮A与台阶的接触点为基点,以旋转臂CA线与水平线之间的角度 $\theta$ 为广义坐标。 $M$ 表示电机驱动的等效转矩, $m$ 表示EPW的质量。当行星轮对地面的支撑正好为0时,指定此时为系统的初始状态。

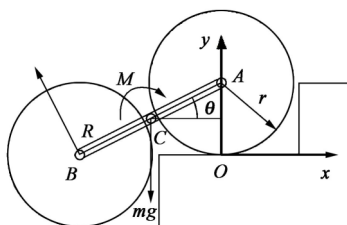


图6 行星轮系的坐标系图

系统的拉格朗日函数导出为

$$L = T - V = \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 - mg(r - R \sin \theta) \quad (1)$$

式中, $T$ 为动能; $V$ 为系统的势能; $J$ 为等效转动惯量; $\dot{\theta}$ 为角速度; $r$ 为行星轮的半径; $R$ 为转动臂的半径。

因为 $V$ 没有明确包含 $\dot{\theta}$ ,所以可以导出

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = \frac{d}{dt} (J \dot{\theta}) = J \ddot{\theta} \quad (2)$$

式中, $\ddot{\theta}$ 为角加速度。然后,将EPW的拉格朗日动力学方程确定为

$$J \ddot{\theta} + mgR \cos \theta = M \quad (3)$$

由式(3)可得角加速度 $\ddot{\theta}$ 与角度 $\theta$ 之间的关系为

$$\ddot{\theta} = (M - mgR \cos \theta) / J \quad (4)$$

### 2.2 行星轮系动力仿真

根据式(4),可以用广义坐标 $\theta$ 的变化来模拟行星轮角加速度 $\ddot{\theta}$ 。轮椅系统的一些关键参数可以用来搭建CAD模型,在该模型中,轮椅和乘客的总质量为 $m=130 \text{ kg}$ ,等效转动惯量 $J=14.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

为了研究不同等效转矩下角加速度的变化,将转矩大小分别设置为 $150 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $200 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $220 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。如图7所示,计算了在各种等效力矩下的角加速度 $\ddot{\theta}$ 。该图表明,当角度 $\theta=0$ ,等效转矩 $M=200 \text{ N} \cdot \text{m}$ 或 $M=150 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,角加速度 $\ddot{\theta}$ 为负,如虚线和点状线所示。可见,所设定的转矩太小,不能驱动行星轮系以克服重力。如图中实线所示,当 $M=220 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,角加速度 $\ddot{\theta}$ 为正,这意味着爬楼电机可以驱动轮椅攀爬楼梯。当角度 $\theta=0$ 时,角加速度最小。这是因为当转动臂处于水平位置时,重力的阻力臂达到最大。

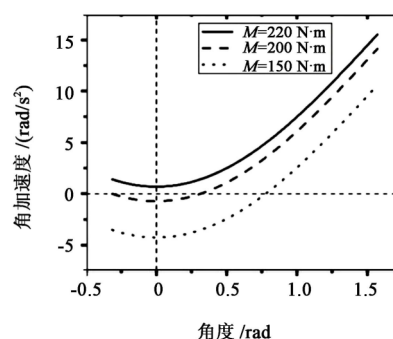


图7 动力仿真图

## 3 稳定裕度分析

为了分析轮椅的稳定性,建立相应的坐标系,如图8所示。 $O_w(X_w Y_w Z_w)$ 为世界坐标系,原点在两行星轮和行星轮转臂的中心所形成的平面内, $z$ 轴垂直于地面向上, $y$ 轴则沿着台阶与地面的交线指向纸面内。 $O_s(X_s Y_s Z_s)$ 为行星轮坐标系,原点与行星轮的中心重合,将其固定在行星轮上以表示行星轮的旋转。 $O_A(X_A Y_A Z_A)$ 为临时坐标系,原点与行星轮和地面的接触点重合,3条轴与 $O_w(X_w Y_w Z_w)$ 的3轴相应平行。 $O_B(X_B Y_B Z_B)$ 为车身坐标系,原点与底盘的中心重合,将其固定在底盘上以表示爬楼轮椅的运动。 $CG$ 为整个系统的重心,在坐标系 $O_B(X_B Y_B Z_B)$ 中的坐标



为 $(x_{CG}, y_{CG}, z_{CG})^T$ 。

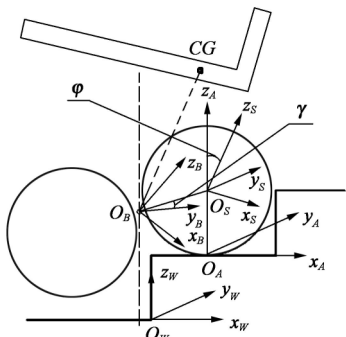


图8 轮椅的坐标系

根据这些坐标系之间的关系，可以通过以下方式实现世界坐标系与车身坐标系之间的齐次坐标变换：

$$T_A^W = \text{Trans}(x_A, 0, z_A) \quad (5)$$

$$T_S^A = \text{Trans}(0, 0, r) \text{Rot}(\bar{Y}_S, -\varphi) \quad (6)$$

$$T_B^S = \text{Trans}(-R, 0, 0) \text{Rot}(\bar{Y}_B, -\gamma) \quad (7)$$

其中， $\varphi$  为对应于临时坐标系的轮系旋转角； $\gamma$  为对应于行星坐标系的轮椅俯仰角； $(x_A, z_A)$  为世界坐标系中  $O_A$  点的坐标。因此，齐次变换矩阵可以导出为

$$T_B^A = T_S^A T_B^S = \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \gamma) & 0 & -\sin(\varphi + \gamma) & -R\cos\varphi \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\varphi + \gamma) & 0 & \cos(\varphi + \gamma) & -R\sin\varphi + r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

如果  $CG$  点在车身坐标系中的坐标为  $(x_{CG}, 0, z_{CG}, 1)^T$ ，则其在临时坐标系中的齐次坐标可确定为

$$\begin{bmatrix} x'_{CG} \\ y'_{CG} \\ z'_{CG} \\ 1 \end{bmatrix} = T_B^A \begin{bmatrix} x_{CG} \\ 0 \\ z_{CG} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{CG}\cos(\varphi + \gamma) - z_{CG}\sin(\varphi + \gamma) - R\cos\varphi \\ 0 \\ x_{CG}\sin(\varphi + \gamma) + z_{CG}\cos(\varphi + \gamma) - R\sin\varphi + r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

显然，当  $x'_{CG}=0$  时， $CG$  点在行星轮与台阶表面间的接触点之上。同时，轮椅处于暂时平衡状态，助手受力为 0。

当  $x'_{CG}=0$  时，可得

$$\frac{x_{CG}}{l_{CG}} = \cos\lambda, \frac{z_{CG}}{l_{CG}} = \sin\lambda \quad (10)$$

式中， $l_{CG}$  为  $CG$  点与行星轮系的旋转轴之间的距离，

$$l_{CG} = \sqrt{x_{CG}^2 + z_{CG}^2}。$$

联立式(9)和式(10)，可得

$$\cos(\lambda + \varphi) - \tan\varphi \sin(\lambda + \varphi) = \frac{R}{l_{CG}} \quad (11)$$

式(11)中提出的达到临时平衡的条件应满足与行星坐标系相对应的角  $\varphi$  和轮椅的俯仰角  $\gamma$ 。

轮椅的重心和支撑边界在水平面上的投影如图9所示。 $SM_1 \sim SM_4$  为轮椅在不同方向上的稳定裕度。当  $CG$  的投影接近坐标轴  $y_A$  时，如果没有防倾翻支架，轮椅有倾翻的趋势。当防倾翻支架存在时， $SM_1$  延伸至  $SM_5$ 。当  $SM_1=0$  时， $CG$  的投影与轴线  $y_A$  一致，稳定裕度  $SM_5$  足以保证乘客的安全。

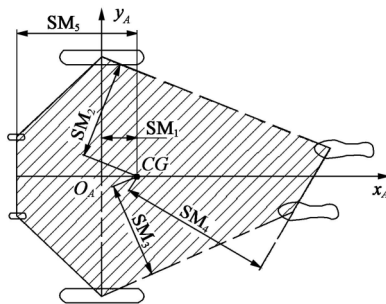
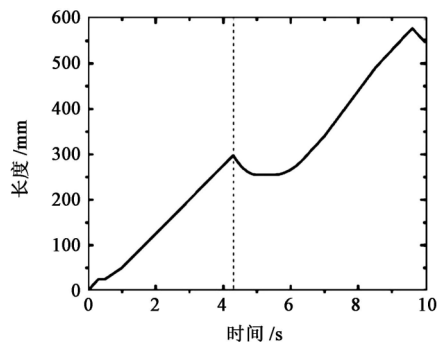


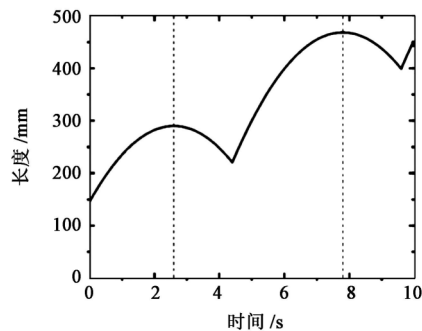
图9 稳定裕度图

## 4 仿真与实验结果分析

将轮椅的 Amads 模型和模糊自整定 PID 控制引入 Matlab/Simulink 进行联合仿真，在 Simulink 中构造了双电机的协同模糊自整定 PID 控制。车轮两侧的旋转角速度设定为  $0.3 \text{ rad/s}$ ，轮椅载荷为  $80 \text{ kg}$ 。仿真结果如图10所示。



(a) y轴方向的质心位移



(b) z轴方向的质心位移

图10 轮椅爬楼时的质心位移曲线

如图10(a)所示，轮椅在  $4.3 \text{ s}$  内向前移动了约  $290 \text{ mm}$ ，即楼梯的宽度。从图10(b)可以看出，从大约  $2.6 \text{ s}$  开始至  $7.8 \text{ s}$  结束，是爬楼梯的完整阶段。轮椅  $z$  轴方向质心位移增加了  $170 \text{ mm}$ ，即楼梯的高度。

(下转第115页)

## 6 结论

(1) 建立RV传动机构的作用力分析模型,系统推导了输入轴、行星轮、曲柄轴、摆线轮、针齿壳及行星架作用力的矢量计算公式,包括切向力、径向力、重力及各向力空间角度,并通过行星架的受力平衡,验证了推导过程的正确性,所得结论可用于各型号RV减速器的结构设计和优化中。

(2) 分析了两种不同输出方式的RV传动机构的输入轴、行星轮、曲柄轴、摆线轮、针齿壳、行星架的之间的减速比、转矩关系。

(3) 基于VB.NET编写各传动级作用力分析程序,能快速准确计算出不同曲柄转角下各作用力的实时变化情况。基于某型号RV减速器,进行了具体的计算应用,有效指导RV减速器产品研发。

(4) 通过计算分析表明,摆线轮(4A/4B)分别受转臂轴承(7Ai/7Bi)的作用力,及曲柄转轴 $3i$ 分别受支撑轴承(8Ai/8Bi)的作用力均呈现类正弦的周期性变化,周期均为 $1.77\pi$ 。摆线轮(4A)受转臂轴承(7A1)的作用力在曲柄转轴转角 $160^\circ$ 达到最低点,而摆线轮(4B)受转臂轴承(7B1)的作用力在曲柄转轴转角 $160^\circ$ 达到最高点;曲柄转轴(31)受支撑轴承(8B1)

的作用力在在曲柄转轴转角 $160^\circ$ 达到最低点,曲柄转轴(31)受支撑轴承(8A1)的作用力在曲柄转轴转角 $160^\circ$ 达到最高点。

## 参 考 文 献

- [1] 郑州工学院机械原理及机械零件教研室.摆线针轮行星传动[M].北京:科学出版社,1978:59-71.
- [2] 董向阳,邓建一,陈建平.RV传动机构的受力分析[J].上海交通大学学报,1996(5):67-70.
- [3] 郑钰馨,奚鹰,袁浪,等.RV减速器曲柄轴受力分析及其传动精度影响研究[J].机械设计,2017(8):48-54.
- [4] 郑钰馨,奚鹰,李梦如,等.基于密切值法的RV减速器传动受力影响分析[J].中国工程机械学报,2017(2):153-164.
- [5] 张振强,王东峰,刘胜超,等.RV减速器用轴承的受力分析[J].轴承,2016(10):1-3.
- [6] 何卫东,李力行.RV传动的效率及其受力分析[J].大连铁道学院学报,1992(1):73-81.
- [7] 李剑锋,营迎宾.卧枕式针齿结构的摆线传动受力分析[J].机械设计与制造,2014(10):49-52.

收稿日期:2018-11-05 修回日期:2018-12-05

基金项目:江苏省重点研发计划项目(BE2015006)

作者简介:叶小芬(1984—),女,浙江龙泉人,硕士,高级工程师,主要从事机械传动设计及相关研究。

(上接第106页)

轮椅爬楼实验中,行星轮系以 $0.2\text{ rad/s}$ 的速度翻转爬楼。图11所示为爬楼过程中 $y$ 轴倾角的变化。图中, $t_1\sim t_6$ 时间段分别为轮椅爬上6级台阶的过程,每爬1级大约需要 $7.5\text{ s}$ 。实验显示,轮椅爬上每一级台阶时虽然倾角变化有些抖动,但整体效果良好。在爬楼过程中, $y$ 轴倾角基本保持在 $-20^\circ$ 以内,体现了爬楼的顺畅性,并能使乘坐者感到舒适。

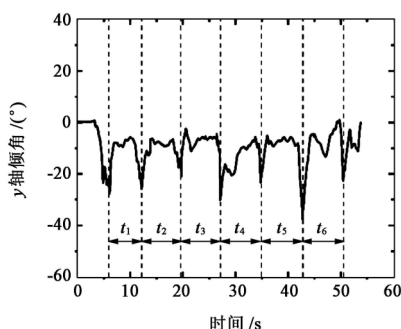


图11 轮椅爬楼时的 $y$ 轴倾角变化曲线

## 5 结束语

具有爬楼梯能力的电动轮椅利用行星轮系的翻转实现爬楼的目的,通过实时采集姿态变化信息来控制爬楼结构的运动,以保持轮椅在楼梯上保持平衡。利用由MPU6050采集并输出转速信号给电机以保持平衡,从而可以提高爬楼功能的安全性,进一步提高轮椅的使用性。轮椅的爬楼梯机构与行走机

构合理地集成与一体,整体结构紧凑,具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] LAURA M C, JAN F, REINKENSMEYER D J. A robotic wheelchair trainer: design overview and a feasibility study[J]. Journal of Neuro-engineering & Rehabilitation, 2010, 7(1): 40-51.
- [2] GONZALEZ A, OTTAVIANO E, CECCARELLI M. On the kinematic functionality of a four-bar based mechanism for guiding wheels in climbing steps and obstacles[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(8): 1507-1523.
- [3] MORALES R, CHOCOTECO J, FELIU V, et al. Obstacle surpassing and posture control of a stair-climbing robotic mechanism[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(5): 604-621.
- [4] JOSE C, RAFAEL M, VICENTE F B. Enhancing the trajectory generation of a stair-climbing mobility system[J]. Sensors, 2017, 17(11): 2608-2638.
- [5] YU S Y, WANG T, LI X F, et al. Configuration and tip-over stability analysis for stair-climbing of a new-style wheelchair robot[J]. 2010: 1387-1392.
- [6] TAO W J, JIA Y X, LIU T, et al. A novel wheel-track hybrid electric powered wheelchair for stairs climbing[J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2016, 10(4): 53-74.
- [7] TAO W J, XU J Y, LIU T. Electric-powered wheelchair with stair-climbing ability[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(4): 1-13.
- [8] 顾艳红,王晟楠,刘占民,等.轻载型电动载物爬楼机[J].机械传动,2018,42(9):166-169.

来稿日期:2018-11-02 修回日期:2019-01-14

作者简介:章玮滨(1994—),男,江苏江阴人,硕士研究生,研究方向为机电控制及自动化。