

· 康复工程 ·

自助爬楼轮椅的稳定性分析*

周玉兰¹ 吴永超¹ 马雍钧¹

摘要

目的:分析本研究设计的自助爬楼轮椅的稳定性。

方法:计算链条极限拉伸载荷,针对轮椅容易在楼梯上倾翻这一问题,从两个角度着重分析轮椅的稳定性:①分析履带的长度和宽度对轮椅在爬楼梯时重心位置变化的影响。②分析轮椅在楼梯上的受力。

结果:链条的极限拉伸载荷为201.6kN。轮椅爬楼时重心位置可前后移动260mm。左右最大倾角可达32°。轮椅爬楼时沿楼梯方向最小总反力大于重力沿楼梯方向向下的分力。

结论:自助爬楼轮椅设计时采用的32A型滚子链条能够满足链条的抗拉载荷要求,链条的结构稳定可靠。爬楼时重心位置可前后移动260mm,左右最大倾角可达32°,足够保证轮椅爬楼时不发生侧翻。轮椅在楼梯上受楼梯的总反力大于重力沿楼梯向下的分力,能够保证轮椅不下滑,自助爬楼轮椅结构设计安全可靠。

关键词 爬楼梯; 轮椅; 链条; 履带; 稳定性

中图分类号:R496 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2011)-12-1144-05

Stability analysis of a self-driving climbing-stair wheelchair/ZHOU Yulan, WU Yongchao, MA Yongjun// Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2011, 26(12): 1144—1148

Abstract

Objective:To analyze the stability of a self-driving climbing-stair wheelchair designed in this study.

Method: The ultimate tensile load of the chains was analyzed. For the problem of side-tumbling, the stability was analysed in two sides:①The position of center of gravity of the wheelchair affected by length and width of the supporting frame was analysed. ②The friction force between the track and stair when climbing stairs was analysed.

Result: The ultimate tensile load of the chains was 201.6kN. The position of center of gravity of the wheelchair could move 260mm and the tilt angle was 32°.

Conclusion: Roller chain 32A can meet the requirement of tensile load, the structure of chain is reliable. The position of center of gravity of the wheelchair and the maximum tilt angle are enough to ensure the wheelchair not side-tumbling. The total force given by stairs along stairs is larger than the force of gravity down along the stairs which can ensure the stair not sliding down the stairs. The structure design of climbing-stair wheelchair is safe and reliable.

Author's address School of Mechanical and Automobile Engineering, Yantai University, Yantai, 264005

Key word climbing-stair; wheelchair; chain; track; stability

轮椅为下肢不方便者出行必不可少的工具,随着社会的发展,各种基础设施的建设日益增多,传统轮椅所不能通过的障碍物越来越多。提高

传统轮椅的越障能力受到社会的重视^[1-5]。自助爬楼轮椅克服了传统轮椅不能爬楼这一困难,提高了轮椅的实用性。出于经济因素的考虑,自助爬楼轮

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2011.12.012

*基金项目:山东省中青年优秀科学家奖励基金资助(BS200922016);广西先进制造技术开放实验室资助(0842006_038_K)

1 烟台大学机电学院,山东烟台,264005

作者简介:周玉兰,女,讲师;收稿日期:2011-06-04

椅在合理利用传统轮椅结构的基础上不断被改装,有效降低了成本^[6-8],本文对自助爬楼轮椅的稳定性与安全性进行全面分析。

1 工作原理分析

本研究所设计的轮椅综合利用了锥齿轮、蜗轮蜗杆、五星轮等结构实现爬楼功能,见图1。图中下支撑架11为主要受力机构,决定轮椅在楼梯上的安全性。利用驱动手柄3驱动锥齿轮12带动蜗轮蜗杆机构10运动。依据蜗轮蜗杆机构10实现动力轮9的位置转换,以达到爬楼的目的。平地行驶时利用蜗轮蜗杆机构的反向自锁性^[9-13],保持动力轮的位置不变。爬楼时,用手摇动驱动手柄3驱动锥齿轮机构12从而带动蜗轮蜗杆机构10使动力轮9抬起。用手摇动摇杆2,通过链条传动机构驱动履带7带动轮椅在楼梯上运动。导向轮结构采用两个五星轮6,每个五星轮6末端装有小轮。五星轮上小轮能绕各自的轴线自转,并可以由驱动轮带动一起绕中心轴公转。爬楼时五星轮的五个臂依次卡在楼梯上,从结构上保证轮椅顺利爬楼。

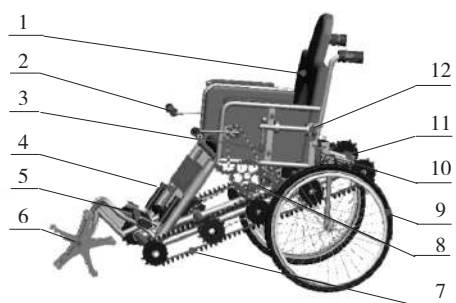
轮椅上楼时位置转换分为三个阶段,如图2所示。上楼时主要靠履带与楼梯之间的摩擦力以及连杆机构的支撑维持轮椅的稳定性。

2 自助爬楼轮椅的稳定性分析

2.1 链条传动的可靠性分析

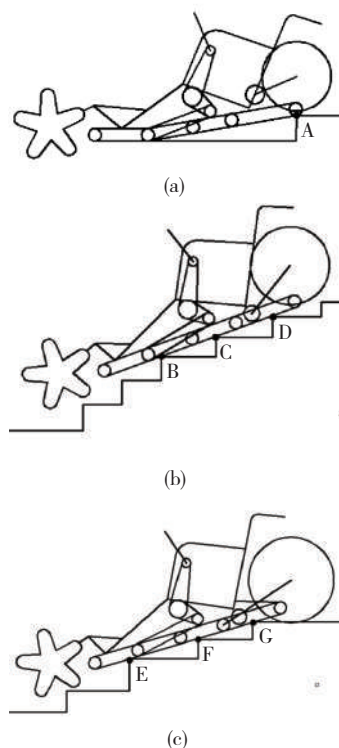
链传动机构为自助爬楼轮椅主要传动机构,受力较大,设计时选用承载能力较强的32A型滚子链条。以下为对链传动机构的强度校核。

图1 总体结构



1座椅;2摇杆;3驱动手柄;4上支撑架;5踏板;6五星轮;7履带;8链轮;9动力轮;10蜗轮蜗杆机构;11下支撑架;12锥齿轮

图2 轮椅爬楼过程及主要受力点



链是由刚性链节通过销轴铰接而成,当链绕在链轮上时,其链节与相应的轮齿啮合后,这一段链条将曲折成正多边形的一部分。该正多边形的边长等于链条的节 p ,边数等于链轮的齿数 z ,链轮每转过一周,链条走过 zp 长,所以链的平均速度 v (单位 m/s)为:

$$v = \frac{z_1 n_1 p}{60 \times 1000} = \frac{z_2 n_2 p}{60 \times 1000}$$

式中: n_1, n_2 分别为主、从动链轮的转速(r/min)。 z_1, z_2 分别为主、从动链轮的齿数。

链条在工作时,存在紧边拉力和松边拉力。如果不计传动中的动载荷,则紧边拉力和松边拉力分别为:

$$\text{紧边拉力: } F_1 = F_e + F_c + F_f;$$

$$\text{松边拉力: } F_2 = F_c + F_f$$

$$\text{有效圆周力为: } F_e = 1000 \frac{P_{ca}}{v}$$

式中: k_a 为工况系数; K_z 为主动链轮齿数系数; K_p 为多排链系数; P 为传递的功率; v 为链速。

离心力引起的拉力为: $F_c = qv^2$ 式中, q 为链条单位长度的质量(kg/m)。

悬垂拉力 F_f 为

$$F_f = \max(F_f', F_f'')$$

其中: $F_f' = k_f q a \times 10^2$

$F_f'' = (k_f + \sin \alpha) q a \times 10^2$ 式中: α 为链传动的中心距; k_f 为垂度系数。

取 $q = 1.2 \text{ kg}$; $\alpha = 420 \text{ mm}$; $k_f = 4$; $k_a = 1$; $k_p = 1$; $k_c = 1.3$; 计算结果如表 1 所示。

通过以上计算结果得出链条的最大载荷为 201.6kN, 32A 型滚子链条的抗拉载荷为 222.4kN, 链条传动机构结构可靠。链条传动机构失效的主要形式是链的疲劳破坏, 即经过一定次数循环引起链板的损坏导致链的断裂^[6]; 同时销轴与套筒的相对运动还会引起松边垂度的变化, 可能会导致跳齿。这些都是在链条传动机构设计合理的情况下可能产生的问题。可通过合理的润滑与防护延长链条传动机构的使用寿命^[14—18]。

表 1 链条承受载荷与速度的关系

	$V(\text{m/s})$	$P(\text{kW})$	$F_e(\text{N})$	$F_c(\text{N})$	$F_f(\text{kN})$
1	0.6	0.15	325	0.27	201.6
2	0.8	0.20	325	0.48	201.6
3	1.0	0.25	325	0.014	201.6

2.2 稳定性和安全性分析

利用 Catia 软件求出整个轮椅的质心位置, 坐标为 $X: 199 \text{ mm}$, $Y: 284 \text{ mm}$, $Z: -50 \text{ mm}$ 。

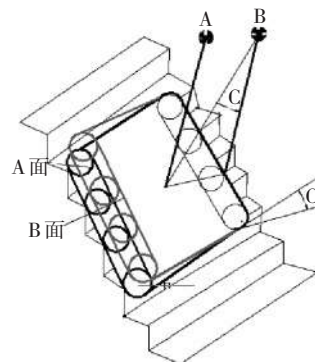
轮椅在台阶上的稳定性是自助爬楼轮椅实用性的核心, 要使轮椅能够应用到实际中必须在上楼时有足够的稳定性和安全性^[19]。以下为自助爬楼轮椅在楼梯上的稳定性与安全性分析。

轮椅在楼梯上的稳定性包括两个方面。一是履带的长度和宽度能否满足轮椅在爬楼梯时重心位置变化而不发生倾翻。二是爬楼时履带与台阶的摩擦力是否足够保证轮椅在台阶上不下滑^[20—22]。设计时下支撑架的宽度为 750mm, 长度为 1120mm。系统重心到下支撑架距离为 600mm。

轮椅在楼梯上的倾翻包括以下两个方面: 一方面在爬楼过程中由于下支撑架摆动使下支撑架与楼梯呈一定的角度, 如图 3 所示。

爬楼时, 理想的重心位置为 A 点。此时轮椅与楼梯接触充分, 接触面为 A 面。实际运行时, 由于下支撑架的摆动使下支撑架平面与理想接触平面 A 呈一定角度。倾角达到临界状态时, 重心恰好落到下支撑架的边缘位置如图 3 中 B 点所示。

图 3 下支撑架宽度方向轮椅重心位置变化图



设临界状态下下支撑架平面 B 与理想状态接触面 A 的角度为 C。实际运行时下支撑架倾角很小, 由倾角引起的重心在高度方向的位置变化可忽略不计。

在 B 为顶点, C 为内角的直角三角形中:

$$\tan \angle c = \frac{750}{2 \times 600} = 0.625$$

$$\angle c = \arctan 0.625 = 32^\circ$$

轮椅最大倾角约为 32° 。实际运行时, 轮椅倾角远小于 32° 。因此, 轮椅不会发生侧翻。

另一方面, 爬楼时系统重心前后位置变化可能导致轮椅前后方向的倾翻。下支撑架的长度是否足够, 决定轮椅能否发生前后倾翻。

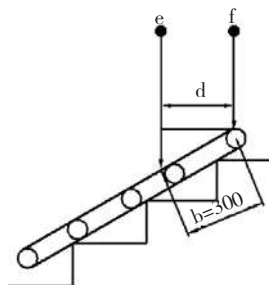
设楼梯坡度 $\beta = 30^\circ$, 系统重心移动时高度不变。

如图 4 所示, 系统重心可在水平位置上向后移动的距离为:

$$d = b \cos \beta = 260 \text{ mm}$$

轮椅稳定运行时, 重心位置在前后方向变化很小。所以, 系统前后方向的重心位置变化主要是由人在座椅上的坐姿不同引起的。而人的重心允许往后移动的距离要大于系统重心可往后移动的距离 260mm。但在爬楼过程中座椅对人的位置有一定的限制作用, 所以轮椅不会往后倾翻。系统重心到下支撑架前端的距离是其到下支撑架后端距离的 3 倍, 因此, 轮椅也不会往前倾翻。轮椅下支撑架的长

图4 下支撑架长度方向轮椅重心位置变化图



度足够保证轮椅在楼梯上稳定运行。

综上所述,轮椅的下支撑架结构长度和宽度设计合理。轮椅在楼梯上运行不会发生倾翻。

刚开始爬楼时小轮端履带在地面上,大轮端履带在楼梯上。支撑架前半部分与后半部分组成连杆机构,可相对转动,使支撑架前半部分与地面充分接触,如图2中(a)所示。地面能给予下支撑架前半部分充足的摩擦力。当轮椅完全在楼梯上时如图2(b),下支撑架前半部分与轮椅的接触由面接触变为点接触。因此,轮椅刚开始上楼时的状态比轮椅完全在楼梯上的状态稳定。

保证轮椅在爬楼过程中稳定运行,必须保证当轮椅完全处于楼梯上时,楼梯与履带间的摩擦力足够大。以下为轮椅在楼梯上所受摩擦力分析。

履带与楼梯的接触点越多,轮椅在楼梯上运行越稳定,因为履带安装在下支撑架上,所以,以下支撑架的结构简图讨论履带在楼梯上的跨度。

设在楼梯上下支撑架两部分的夹角为 30° ,如图5所示。

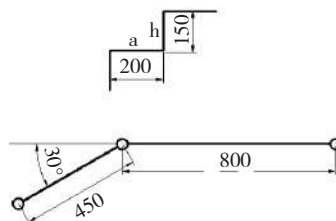
则履带在楼梯上的跨度为:

$$n = \left\lceil \frac{800 + 450 \cos 30^\circ}{\sqrt{150^2 + 200^2}} \right\rceil = 4$$

由于上楼时下支撑架部分不能与楼梯充分接触,为保证轮椅具有充分的安全性,设履带与楼梯有3个接触点。

图6中图(1)为轮椅在楼梯上的整体受力图,(2)为将重力简化到履带上的受力简图。如图(2)所示 G 为人车总重力, F_{fB} 、 F_{fc} 、 F_{fD} 分别为履带在B、C、D三点所受的摩擦力, F_1 、 F_2 、 F_3 分别为履带在B、C、D三点所受楼梯总反力。 L_c 为离质心最近的受力点到

图5 下支撑架的结构简图



质心的距离。

设人车总质量为 100kg 。由力平衡得:

$$F_1 + F_2 + F_3 = \frac{G}{2}$$

由力矩平衡得: $F_1 L_{d1} + F_2 L_{c2} = F_3 L_{d3}$

当 $F_1=0$ 时,履带与楼梯的三个接触点中只有两个接触点受力,轮椅在楼梯上最不稳定。

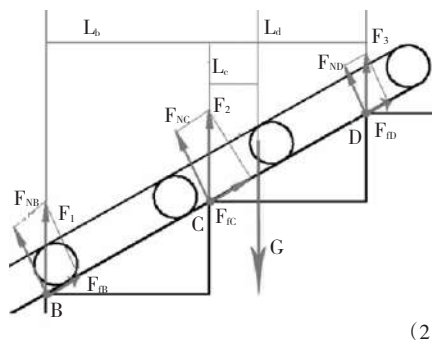
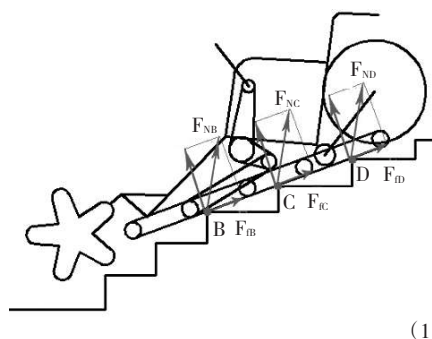
此时: $F_3 = \frac{GL_c}{2 \times 0.25}$, $F_1 = \frac{G}{2} - \frac{GL_c}{2 \times 0.25}$ (其中 0.25m 为楼梯斜边的长度)。

履带受沿楼梯向上的总反力为:

$$F = F_{fD} + F_{fB}$$

当 L_c 取 0.125m 时总反力 F 最小, F 的最小值为:

图6 轮椅在楼梯上的受力图



250N。

$2F=G \sin \beta=500N$, 即当轮椅最不稳定时轮椅受台阶往上的总反力恰好等于重力沿楼梯向下的分力, 轮椅处于临界稳定状态。

此时, 履带与楼梯之间的摩擦力为:

$$F_f = F_D = 125N$$

需要轮椅履带与楼梯的摩擦系数为:

$$\mu = \frac{125}{250 \times \cos 30} = 0.67$$

橡胶履带与楼梯的摩擦系数可达0.71, 能够达到的最大摩擦力为:

$$F_{f_{\max}} = FN \times \mu_{\max}$$

$$F_{f_{\max}} = 216 \times 0.71 = 153.7N$$

所以, 轮椅的临界稳定状态可以实现。履带一侧在台阶上只有2个受力点在实际运行中是不存在的, 履带在楼梯上所受的总摩擦力大于重力沿楼梯方向的分力。即: $F_{f_{\max}} > G \cdot \sin \beta$ 。因此, 自助爬楼轮椅在楼梯上的运行是安全可靠的, 自助爬楼轮椅的结构设计是合理的。

参考文献

- [1] 项海筹, 乌兰木齐, 张济川. 手动爬楼梯轮椅[J]. 中国康复医学杂志, 1994, 9(2): 62—66.
- [2] Newton AM, Kirby RL, Macphee AH, et al. Evaluation of manual wheelchair skills: is objective testing necessary or would subjective estimates suffice[J]? Arch Phys Med Rehabil, 2002, 83: 1295—1299.
- [3] Edlich RF, Nelson KP, Foley ML, et al. Technological advances in powered wheelchairs[J]. J Long Term Eff Med Implants, 2004, 14: 107—130.
- [4] 苏和平, 王人成. 爬楼轮椅的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2005, 20(5): 366.
- [5] Lawn MJ, Ishimatsu T. Modeling of a stair-climbing wheelchair mechanism with high single-step capability[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2003, 11: 323—332.
- [6] Staros A. Testing of manually-propelled wheelchairs: the need for international standards[J]. Prosthet Orthot Int, 1981, 5: 75—84.
- [7] Massengale S, Folden D, McConnell P, et al. Effect of visual perception, visual function, cognition, and personality on power wheelchair use in adults[J]. Assist Technol, 2005, 17: 108—121.
- [8] 徐友平. 蜗轮蜗杆机构的自锁性[J]. 现代机械, 2002, (1): 79.
- [9] Hoffman MD, Millet GY, Hoch AZ, et al. Assessment of wheelchair drag resistance using a coasting deceleration technique[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2003, 82: 880—9; quiz 90—92.
- [10] Crane BA, Holm MB, Hobson D, et al. Development of a consumer-driven Wheelchair Seating Discomfort Assessment Tool (WeS-DAT)[J]. Int J Rehabil Res, 2004, 27: 85—90.
- [11] 杨秀芳, 张峰. 链条传动的受力分析[J]. 机械管理开发, 2003(6): 11.
- [12] 朱国仁, 杨刚, 阚君武. 链条的极限拉伸载荷对疲劳性能的探讨[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(5): 45.
- [13] 黄梅, 兰宏, 孟繁忠, 等. 不同润滑状态下农机传动用链条的磨损特性[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4): 105.
- [14] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 第8版. 西安: 西北工业大学, 2006. 174.
- [15] 武明, 马希金, 项海筹, 等. 一种新型爬楼梯轮椅的动力学建模及稳定性分析[J]. 中国生物医学工程学报, 2000, 1: 19.
- [16] Algood SD, Cooper RA, Fitzgerald SG, et al. Effect of a pushrim-activated power-assist wheelchair on the functional capabilities of persons with tetraplegia[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2005, 86: 380—386.
- [17] Stair lift platforms, Garventa Accessibility[EB/OL]. <http://www.garaventa.ca/sl/index.html>. 2002, Nov 22.
- [18] RH-2001A, (2002, May 20). [EB/OL]. Available (in Chinese only): [http://www.runsoft.com.cn/fwzx/fwzx4\(wtjd\).htm](http://www.runsoft.com.cn/fwzx/fwzx4(wtjd).htm)
- [19] Hiwin Corp, (2002, May 20). LAH Series linear actuators [EB/OL]. Available: <http://www.hiwin.com>
- [20] Eliminating stairway barriers, Max-Ability Inc., (2002, Sept 24), [EB/OL]. Available: <http://www.sonic.net/jtfig/maxability/stair-lift2.html>
- [21] Stair lift platforms, Garventa Accessibility, (2002, Nov 22), [EB/OL]. <http://www.garaventa.ca/sl/index.html>
- [1] 张强, 乔鹏, 杨丽红, 等. 心电图踏车试验与冠状动脉造影对冠心病的诊断分析[J]. 中国误诊学杂志, 2009, 9(1): 51—52.
- [6] Supariwala A, Uretsky S, Singh P, et al. Synergistic effect of coronary artery disease risk factors on long-term survival in patients with normal exercise SPECT studies[J]. J Nucl Cardiol, 2011, 18(2): 207—214, 217.
- [7] Hsieh E, Gorodeski EZ, Starling RC, et al. Importance of treadmill exercise time as an initial prognostic screening tool in patients with systolic left ventricular dysfunction[J]. Circulation, 2009, 119(25): 3189—3197.
- [8] 殷忠, 李兰荪, 张荣庆, 等. 冠心病患者外周血 MMP-9、CRP 的变化及其临床意义[J]. 中国康复医学杂志, 2006, 21(4): 318—321.
- [9] Dursunoglu D, Göksoy H, Öztürk M, et al. A relationship between CRP, adiponectin and Gensini score in the patients with coronary artery disease[J]. Anadolu Kardiyol Derg, 2011, 11(3): 195—200.
- [10] Rankovic G, Milicic B, Savic T, et al. Effects of physical exercise on inflammatory parameters and risk for repeated acute coronary syndrome in patients with ischemic heart disease[J]. Vojnosanit Pregl, 2009, 66(1): 44—48.
- [11] 朱大年. 生理学[M]. 第7版. 北京: 人民卫生出版社, 2008. 58—61.
- [12] Johnston N, Jernberg T, Lagerqvist B, et al. Oxidized low-density lipoprotein as a predictor of outcome in patients with unstable coronary artery disease[J]. Int J Cardiol, 2006, 113(2): 167—173.
- [13] 赵水平. 他汀类降脂药物临床应用展望[J]. 中国实用内科杂志, 2006, 26(16): 1235—1238.

(上接第1143页)