

# 行星轮式爬楼梯轮椅的应用研究\*

金 强<sup>1</sup> 吴昌林<sup>1</sup> 刘香香<sup>1</sup>

## 摘要

**目的:**为完善行星轮在爬楼梯轮椅上的应用。

**方法:**系统分析“半控”行星轮和星轮行星轮转换式登楼轮的越障爬楼梯机制,比较分析两者在应用方面的优劣势,并对提出的新的“全控”行星轮通过 ADAMS 软件进行运动学仿真。

**结果:**找出了已有行星轮在应用上的缺陷,并提出了一种新的“全控”行星轮,制作了物理样机进行相关实验。

**结论:**新的“全控”行星轮在爬楼梯轮椅应用上具备优势,能更好地实现轮椅的爬楼梯功能。

**关键词:**“全控”行星轮;爬楼梯轮椅;ADAMS 仿真分析

**中图分类号:**R496 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2011)-01-0065-04

对于缺乏行动能力的人群,轮椅是其必不可少的行走辅助设备,由于我国无障碍设施建设的滞后,这类人群的出行问题十分突出。鉴于楼梯、台阶是常见的障碍,使轮椅具有爬楼梯能力是解决这类问题的关键。世界上爬楼梯轮椅的研究已经有近百年的历史,提出了各种轮椅爬楼梯的解决方案。按照轮椅爬楼梯时运动的连续与否<sup>[1]</sup>,有连续型爬楼梯方案,如履带式;间歇式爬楼梯解决方案,如交替式。在这些方案中,行星轮式爬楼梯轮椅可以兼顾平地行走和爬楼梯,是比较理想的爬楼梯解决方案。不过目前常用的可以攀爬楼梯的行星轮驱动力无法有效转化为攀爬力,或者行星轮在翻转时轮胎会和楼梯发生严重的摩擦,导致这些行星轮无法达到实用的程度。本文就行星轮在轮椅上的应用做出系统的分析,特别分析了星轮行星轮转换式登楼轮由于机构本身特点,导致行星轮在楼梯上翻转时和楼梯严重摩擦的问题,并就该问题提出一种优化的行星轮结构。通过样机实地测试,验证了方案的可行性,很好的实现了轮椅的爬楼梯功能。

## 1 行星轮系的结构演变

对于轮椅爬楼梯,决定性的两个因素是驱动力是否足够并高效地转化为轮椅攀爬楼梯所需要的力,和轮椅在爬楼梯时的安全性问题。目前已有的用于爬楼梯的各种行星轮解决方案中(这里指所有的行星轮爬楼梯方法,不局限于能否使用在轮椅上的行星轮爬楼梯方法),主要有如下两种:①“半控”行星轮:半控行星轮系<sup>[2]</sup>的一个自由度是没有受控的,而是根据路况而调整的,即行星轮的两个自由度只有一半的自

由度受控。②星轮行星轮转换式<sup>[3]</sup>:其主要实现过程是,在轮椅平地行走时,驱动轮和上述普通行星轮运动方式相同,不同的是,在遇到高于行星轮可以爬过的障碍或者楼梯时,不是如“半控”行星轮所述的靠地面的摩擦力将接触到障碍的行星轮锁死,而是用一个离合器,主动将行星轮的中心齿轮和转臂锁死,使其成为一个整体,此时的行星轮转换成星轮状态,通过驱动这个星轮来实现越障和攀爬楼梯。

## 2 “全控”行星轮的提出及分析

### 2.1 “半控”行星轮和星轮行星轮转换式登楼轮的应用优劣分析

较之“半控”行星轮,星轮行星轮可转换式登楼轮越障时不是靠地面的障碍物将接触到障碍的行星轮锁死,来翻转越障,而是用一个离合器主动将行星轮的中心齿轮和转臂锁死,使其成为一个整体,此时的行星轮转换成星轮状态,通过驱动这个星轮来实现攀爬楼梯,因此和“半控”行星轮翻转越障相比,具有更高的可靠性和更好的越障能力,较好地实现了轮椅载人登楼的功能。

不过仔细分析发现,星轮行星轮可转换式登楼轮在翻转越障或者爬楼梯时,行星轮被离合器锁死在转臂上而无法自转,因此,当转换后的星轮转动时,星轮与地面的接触点随着星轮的转动而不断变化(如同轮胎在地面上滚动时,轮胎和地面的接触点也会随着变化一样),使星轮有可能和障碍垂直壁接触而产生摩擦力(在向前翻转越障时,接触点向障碍物方向移动,从而使行星轮车轮和障碍接触,如果星轮继续

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2011.01.014

\* 基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)

1 华中科技大学机械学院,武汉,430074

作者简介:金强,男,助理工程师; 收稿日期:2010-03-15

转动,摩擦就会产生)。由于这个摩擦力为阻力,因此克服它需要消耗驱动系统提供的能量,导致驱动效率不高。摩擦也导致轮胎严重的不必要磨损,而且由于左右星轮有可能不同时接触障碍垂直壁,使得阻力分布不对称,从而导致轮椅底盘运动不稳定,有侧翻的危险。

2.2 “全控”行星轮的提出

星轮行星轮转换式结构克服了“半控”行星轮翻转依靠地面摩擦力的问题,不过新的结构又带来了新的问题。为了克服星轮行星轮可转换式登楼梯时在爬楼梯时和地面接触点变化导致轮胎磨损和驱动效率不高的问题,下面提出一种新的结构。

2.2.1 行星轮系各构件之间运动关系: 根据轮系在运转过程中各齿轮几何轴线在空间的相对位置关系是否变动,轮系可分为定轴轮系、周转轮系和混合轮系。在周转轮系中,根据轮系自由度的个数,将自由度为一的周转轮系称行星轮系,自由度多于一个的称为差动轮系<sup>[4]</sup>。见图 1。

根据反转固定转臂法,得出行星轮系中心轮,行星轮,转臂的运动关系如下:

$$i_{13}^H = W_1^H / W_3^H = (W_1 - W_H) / (W_3 - W_H) = Z_3 / Z_1 \quad (1)$$

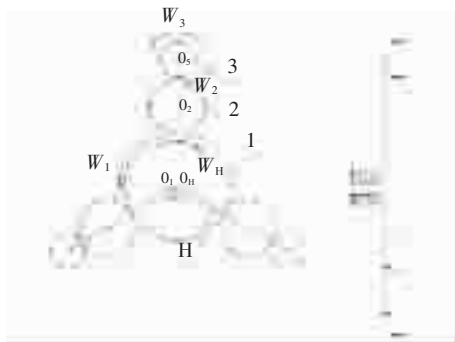
式中  $i_{13}^H$  为中心轮 1 和行星轮 3 在转化机构的传动比;  $W_1, W_2, W_3$  为中心轮 1, 行星轮 3, 转臂 H 对应的绝对角速度;  $W_1^H$  为中心轮 1 在转化机构中的角速度,  $W_3^H$  为行星轮 3 在转化机构中的角速度。  $Z_3, Z_1$  分别为行星轮 3 和中心齿轮 1 的齿数。

设  $Z_1/Z_3=i$ , 则上式可以化简为:

$$W_3 - iW_1 = (1-i)W_H \quad (2)$$

即得出影响行星轮性能的参变量关系式。其中  $W_1, W_H$  一般作为行星轮的输入角速度,  $W_3$  为输出角速度,  $i$  是我们选取的变量(一般的行星轮,  $i$  取 3—4)。

图 1 行星齿轮系原理示意图



1.中心齿轮(太阳轮); 2.过渡行星齿轮; 3.驱动行星齿轮(和车轮固连); 4.转臂(系杆或行星架)H

2.2.2 全控行星轮系的原理分析: 行星轮的自由度为 2, 要使其具有确定的运动, 必须给行星轮输入两个确定的运动。由于“半控”行星轮中, 转臂的运动状态完全由路面的条件控制, 我们无法预知其将要怎么运动, 导致行星轮在越障时运动具有不确定性, 进而导致系统不可靠。如果希望消除这种运动的不确定性, 必须给行星轮输入两个确定的运动。式(2)为行星轮中心轮、最外的行星轮、转臂、和传动比  $i$  之间关系, 下面对其进行分析。

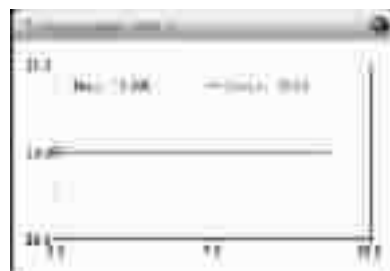
要实现对行星轮和地面的接触点的控制, 即对行星轮和地面的接触位置的控制, 必须对三个行星车轮的运动进行控制, 即控制式(2)中的  $\omega_3$ ; 要实现根据路面状况控制转臂的翻转, 必须对转臂的运动进行控制, 即控制式(2)中的  $\omega_H$ 。由于三个行星轮和转臂在结构上的相互关联, 导致他们的运动不是独立的, 而是有式(2)中的关系, 这为行星轮输入运动的控制带来麻烦, 甚至不可能实现。如果我们可以通过控制中心轮来控制三个行星车轮的运动, 并给转臂一个动力输入来控制转臂的运动, 就可以实现行星车轮的控制和地面的接触点的位置及转臂的适时翻转翻越障碍。要实现“通过控制中心轮来控制三个行星车轮的运动”, 理想的情况就是中心轮和三个行星车轮具有相同的运动关系, 而且其运动情况不受转臂运动的影响。通过观察式(2), 发现当  $i=1$ , 则  $\omega_3=\omega_1$ , 从而可以简单的实现“通过控制中心齿轮来控制三个行星车轮的运动”, 而且中心齿轮和行星车轮的运动关系不受转臂运动的影响。

2.3 “全控”行星轮的运动分析

在“全控”行星轮的提出过程中, 传动比  $i$  对“全控”行星轮各构件之间的运动关系有决定性的影响。下面通过 ADAMS 验证  $i$  等于 1 和不等 1 两种情况下, 中心齿轮和各行星车轮之间的运动关系。

2.3.1 行星轮的传动比  $i=1$  时: 将模型导入 ADAMS, 设置构件属性, 定义各构件之间约束关系。将中心齿轮的运动输入函数设为:  $30.0 \times \text{time}$  不变, 其角速度曲线如图 2 所示, 改变转臂的运动输入函数, 观察在  $i=1$  的情况下, 转臂运动的改变是否影响中心齿轮和行星车轮之间的运动关系。

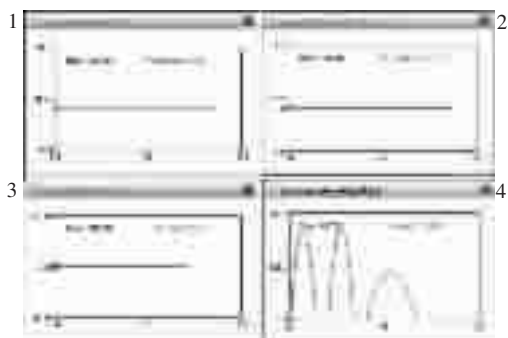
图 2 中心齿轮角速度曲线图



将转臂的运动输入函数设为:0d×time, 转臂角速度曲线图如图3中第一幅图所示,此时行星车轮的角速度曲线如图3中第二幅图所示。

将转臂的运动输入函数设为:step(time,0,0,2,5)+step(time,3,0,5,-5)+step(time,6,0,10,5), 转臂角速度曲线图如图3中第三幅图所示,此时的行星车轮的角速度曲线如图3中第四幅图所示。

图3 行星轮传动比*i*=1时速度曲线图



1:转臂角速度曲线图一; 2:*i*=1时行星车轮角速度曲线图一;  
3:转臂角速度曲线图二; 4:*i*=1时行星车轮角速度曲线图二

对比仿真结果图3中第二幅和第四幅图可以发现:在*i*=1时,改变转臂的运动输入函数,如果中心齿轮的运动输入函数关系不变,那么行星车轮的角速度也不会发生变化,即在*i*=1时,转臂的运动不会影响中心齿轮和行星车轮之间的运动关系,二者是独立的。

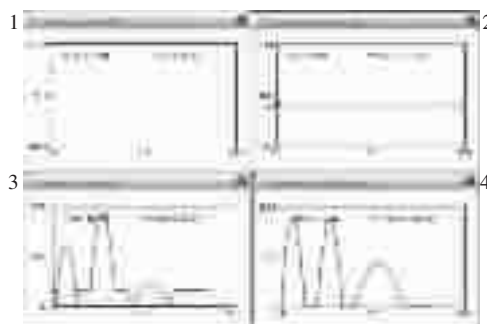
**2.3.2 行星轮的传动比*i*≠1时(在这里仿真分析时,*i*=3):**将中心齿轮的运动输入函数仍设为:30.0d×time 不变,其角速度曲线如图2所示,改变转臂的运动输入函数,观察在*i*≠1的情况下,转臂运动的改变是否影响中心齿轮和行星车轮之间的运动关系。

将转臂的运动输入函数设为:0d×time, 转臂角速度曲线图如图4第一幅图所示,此时行星车轮的角速度曲线如图4中第二幅图所示。

将转臂的运动输入函数设为:step(time,0,0,2,5)+step(time,3,0,5,-5)+step(time,6,0,10,5), 转臂角速度曲线图如图4第三幅图所示,此时的行星车轮的角速度曲线如图4第四幅图所示。

对比仿真结果图4中的第二和第四幅图可以发现:在*i*≠1时,改变转臂的运动输入函数,虽然中心齿轮的运动输入函数关系不变,但是行星车轮的角速度会随着转臂运动特点的改变而发生变化,在转臂不动时,中心齿轮和行星车轮有3倍的运动关系。改变转臂的运动规律为:step(time,0,0,2,5)+step(time,3,0,5,-5)+step(time,6,0,10,5),中心齿轮和行星车轮之间关系随即发生改变。简而言之,在*i*≠1时,转臂的运动会

图4 行星轮的传动比*i*≠1时角速度曲线图



1:转臂角速度曲线图一; 2:*i*≠1时行星车轮角速度曲线图一;  
3:转臂角速度曲线图二; 4:*i*≠1时行星车轮角速度曲线图二

影响中心齿轮和行星车轮之间的运动关系,二者不是独立的。

通过 ADAMS 仿真分析,证明了式(2)中分析的*i*对中心齿轮,转臂,行星车轮的影响,也验证了如果将*i*取为1,可以消除转臂运动对“通过中心齿轮控制行星车轮”的影响,为将“全控”行星轮用于轮椅爬楼梯等需要高越障性能的车辆奠定了理论基础。

**2.4 “全控”行星轮的越障能力分析<sup>②</sup>**

**2.4.1 “全控”行星轮爬过垂直障碍能力分析:**“全控”行星轮在平地行走和越障时,该结构处于行星轮状态,因此其爬过障碍的能力和“半控”行星轮爬过障碍的能力类似。由于“全控”行星轮的传动比*i*=1,无论如何改变行星车轮的结构参数和行星车轮与地面之间的附着系数,“全控”行星轮均无法翻转越过障碍<sup>③</sup>。因此“全控”行星轮爬过垂直障碍的能力为:

$$h = \frac{\varphi^2}{\varphi^2 + 1} \cdot D$$

其中  $\varphi$  为车轮和地面之间的附着系数,*D*为车轮的直径。

**2.4.2 极限越障能力分析:**“全控”行星轮当遇到其无法爬过的障碍后,需要给“全控”行星轮两个运动输入,其中一个运动输入用于控制中心齿轮,另外一个运动输入用于控制转臂的翻转,在“全控”行星轮遇到较高的垂直障碍后,可以先将“全控”行星轮的中心齿轮和轮椅车体锁死,由上面分析可知,此时行星车轮相对地面静止,且*i*=1,转臂的运动不影响中心齿轮对行星车轮的控制,那么如果给转臂一个转动运动,即可以实现:行星车轮相对于地面静止的情况下,控制“半控”行星轮转臂的翻转,可以有效地越过障碍。在使用该结构攀爬楼梯时,由于楼梯的水平面的尺寸可能会有较大的变化,为了适应这种工况,可以在攀爬楼梯时,控制中心齿轮的运动,从而控制“半控”行星车轮在楼梯水平面上的位置,因此“半控”行星轮还可以适应不同尺寸的楼梯。

综上所述,“全控”行星轮可以越过的最大障碍高度为:

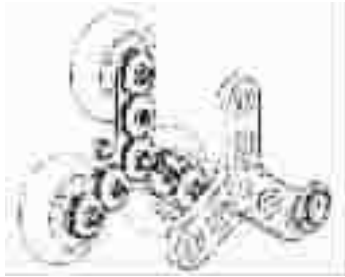
$$H_{\max} = \frac{D}{2} + 2R\sin 60^\circ$$

$D$  为行星轮的直径,  $R$  为行星轮转臂的半径, 并能够很好地攀爬楼梯。

### 2.5 “全控”行星轮的物理样机实地测试效果

图 5 为全控行星轮内部结构示意图, 将“全控”行星轮用

图 5 “全控”行星轮内部原理图



### 3 各种行星轮用于轮椅爬楼梯方案对比分析

表 1 分析对比了“半控”行星轮, 星轮行星轮转换式登楼梯, “全控”行星轮三种结构的越障能力、爬楼梯能力以及可控性。

通过对比分析, 得出: “全控”行星轮综合了“半控”行星轮可以自适应调节和星轮行星轮转换式结构可以通过离合

于轮椅后, 做出的物理样机, 通过实地爬楼梯, 越障测试, 取得了理想的效果, 特别是在楼梯上运动, 由于可以完全控制行星轮在楼梯上的位置和行星轮转臂的翻转情况, 可以很好的适应不同规格的楼梯, 较好地解决了轮椅载人爬楼梯的问题。图 6 为物理样机进行越障爬楼的过程演示。

图 6 采用“全控”行星轮的爬楼梯轮椅样机



器操作来实现主动翻转的优点, 而且该结构具备准确地对行星轮和地面的接触点进行控制和根据路面状态控制行星轮转臂运动姿态的能力, 从而更加可靠(完全控制), 柔性的(根据路况实时调整), 精准的(良好的可控性)控制行星轮越障甚至攀爬楼梯。

表 1 各种行星轮越障、爬楼、可控性对比表<sup>[2]</sup>

	行星轮越过障碍能力					爬楼梯能力	越障和爬楼梯的可控性
	可爬过最高障碍高度	打滑的高度范围		可翻转的高度范围			
		靠地面摩擦力有翻转可能	靠地面摩擦力无翻转可能	靠地面摩擦力有翻转可能	靠地面摩擦力无翻转可能		
“半控”行星轮	$h = \frac{\varphi^2}{\varphi + 1} \cdot D$	$\frac{\varphi^2}{\varphi + 1} \cdot D - h_{\min}$	$\frac{\varphi^2}{\varphi + 1} \cdot D - \infty$	$h_{\min} \sim \frac{D}{2} + 2R\sin 60^\circ$	0	无	有不可控的工况
星轮行星轮转换式	$h = \frac{\varphi^2}{\varphi + 1} \cdot D$	0		$0 \sim \frac{D}{2} + 2R\sin 60^\circ$		有, 但轮胎磨损严重, 驱动效率不高	无不可控工况, 但可控性不够好
“全控”行星轮	$h = \frac{\varphi^2}{\varphi + 1} \cdot D$	0		$0 \sim \frac{D}{2} + 2R\sin 60^\circ$		有, 无轮胎磨损, 驱动效率高	无不可控工况, 控制准确, 可靠

### 4 结论

本文系统地分析了“半控”行星轮和星轮行星轮转换式结构的越过垂直障碍的能力、攀爬楼梯的能力, 以及将其使用在轮椅上用于轮椅攀爬楼梯的优缺点, 为这两种行星轮结构的应用提供了理论参考。本文通过分析“半控”行星轮和星轮行星轮转换式结构应用于轮椅爬楼梯的缺陷, 提出了一种新的结构: “全控”行星轮结构, 并得出该结构中各构件之间的运动关系、越过垂直障碍的能力、攀爬楼梯的能力, 以及将其使用在轮椅上用于轮椅攀爬楼梯的具体控制办法。通过 ADAMS 仿真分析验证和物理样机实地实验验证, 证明了分析结论的正确性, 为“全控”行星轮运用于需要越障和攀爬楼

梯的轮椅、机器人等提供了重要的理论依据。

### 参考文献

- [1] 苏和平, 王人成. 爬楼梯轮椅的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2005, 20(5): 366—367.
- [2] 吴昌林, 金强, 赵青. 行星轮式爬楼梯轮椅的越障能力分析[J]. 机械设计, 2010, 27(1): 48—52.
- [3] 吴昌林, 贝恩海, 金强, 等. 一种星轮行星轮可转换式登楼梯[P]. 中国专利 ZL2006 2 0098761.6
- [4] 申永胜. 机械原理教程 [M]. 第 1 版. 北京: 清华大学出版社, 1999. 251.