

轮组式爬楼机器人三维建模与运动仿真分析

王沁渝 张莉 王慧鹏

(江西理工大学机电工程学院 江西赣州 341000)

摘要:为更好的帮助人们解决负重爬楼作业问题,设计了一款轮组式爬楼机器人,并对其进行了运动学仿真分析。该机器人主要由移动架上的两对轮组、固定架上的一对轮组和载物箱组成,具有爬楼运动平稳,平地转向灵活的特点。首先通过三维建模进行结构设计并对主要的关键承重部件进行材料的选择再进行了静应力分析验证零件的安全性,最后通过对爬楼过程进行运动仿真验证了该机器人结构的设计合理性,以及实现爬楼过程的可行性。

关键词:轮组式爬楼机器人;结构设计;应力分析;运动仿真

1. 引言

爬楼梯是人们日常活动中几乎不可避免的活动,如果某项工作需要频繁的攀爬大量的楼梯,并且需要负载庞大的重量,那么这对于人类来说将是一项沉重的负担作业,因此迫切的需要设计出一款可以辅助人工进行负重爬楼机器人以减轻人工负重爬楼作业的负担。国外对爬楼梯装置的研究开始得相对较早,最早的专利是1892年美国的Bray发明的爬楼梯轮椅。此后,各国纷纷开始投入此项研究,其中美国、英国、德国和日本占主导地位,技术相对比较成熟,且有一些产品已经投入市场使用。我国对此类装置的研究虽然起步较晚,但近年来也涌现了很多这方面的专利,然而投入实际使用的还很少。总结目前国内外现有的爬楼梯装置和专利,按爬楼梯功能实现的原理主要分为履带式、步行式、轮组式爬楼梯装置。

履带式爬楼梯装置的原理类似于履带装甲运兵车或坦克,其原理简单,技术也比较成熟,但是这类装置仍存在很多不足之处:重量大、运动不够灵活、爬楼时在楼梯边缘造成巨大的压力,对楼梯有一定的损坏;平地使用所受阻力较大,且转弯不方便等,这些问题限制了其在日常生活中的推广使用。步行式爬楼执行机构由铰链杆件机构组成,模仿人类爬楼的动作,上楼时先将负重抬高,再水平向前移动,如此重复这两个过程直至爬完一段楼梯,爬楼时运动平稳,适合不同尺寸的楼梯,但它对控制的要求很高,操作比较复杂,在平地行走时运动幅度不大,动作缓慢。

而轮组式爬楼梯装置的活动范围广,运动灵活,相对来说结构更为简单,控制更为容易,故障率低,成本低,但也存在不足:上下楼梯时平稳性不高,重心起伏较大,会使乘坐者感到不适。此外,一般的轮组式爬楼梯装置体积较大,很难在普通住房楼梯上使用。因此,本文围绕爬楼机器人结构设计与分析展开研究,设计并研究了一种小型轮组式爬楼机器人,对其采用SolidWorks软件进行三维建模,通过该软件自带的motion插件进行运动仿真,再结合有限元分析验证所设计的轮组式爬楼机器人可行性。

2 爬楼机器人的三维建模和有限元分析

2.1 三维建模

通过对履带式、步行式和轮组式爬楼机器人的代表性结构设计比较,分析各种爬楼机器人在爬楼工作中的地形适应性、移动平稳性灵活性,运行速度等特点。本文设计了如图1所示的负重爬楼机器人的结构。图1a所示为其三维模型,该爬楼机器人由一对固定架,一对移动架,载物箱和六个轮子组成,固定架与移动架对称分布,每个轮子都单独由一个电机驱动控制。电机单独控制轮子的好处在于,能够在不单独设计转向机构的前提下利用差速实现机器的转向,能够有效降低机器结构的复杂性,进而提高整体机构的稳定性。其基本的爬楼原理是:当活动架上的前轮碰到楼梯时,在前轮与楼梯的摩擦力和中轮与后轮的推动力作用下使活动架转动,从而让前轮贴着楼梯向上爬,最终使整个机构向上爬。该爬楼机器人的设计相对其他类型的爬楼机器人来说,结构更为简单,可靠性更高,速度较快,转向灵活,适应能力更好。

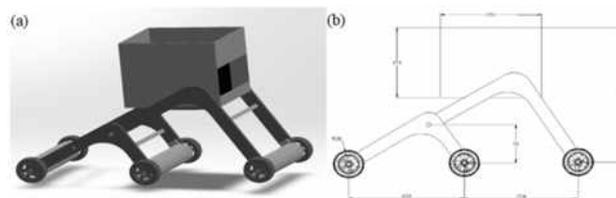


图1 本文设计的爬楼机器人 (a) 三维模型;(b) 几何尺寸(mm)

图1b所示是略有简化的用于运动仿真的三维模型的基本尺寸。其中所有轮子直径均为64mm,前轮与中轮相距260mm,整车长513mm,整车高335mm,载物箱容积约为4L。

2.2 关键部件的力学分析

由于整个机构设计承载力主要在活动架与固定架上,活动架与固定架的连接处以及固定架与载物箱之间的连接处最易产生应力集中,因此主要对活动架与固定架的上述两个位置进行有应力有限元分析,以检验其强度是否符合设计要求。

采用SolidWorks软件自带的simulation插件进行静应力分析,该插件中通常有两种应力度量的表示方法,分别是Von Mises应力和主

应力。由于 Von Mises 应力可以很好地描述许多工程材料结构安全的弹性和塑性性质，因此，通常采用 Von Mises 应力作为应力的度量。对于这些材料，屈服安全系数或最终破坏安全系数可以通过材料的屈服应力（屈服强度）或最终破坏应力（最终破坏强度）除以材料的 Von Mises 应力来得到，即：

$$K = \sigma_s \div \sigma_{eq} \quad (1)$$

其中，K 是安全系数， σ_s 是材料的屈服强度， σ_{eq} 是 Von Mises 应力。当安全系数 K 大于 1 时则证明该零件是安全可靠的。

如图 2 所示为移动架的静应力分析，该零件受力主要为沿中间轴竖直向下的力。设计方案中该机器人自重为 20 kg，最大载重为 50 kg，即总受力 700 N，由于是对称分布，则单侧最大受力为 350 N，即作用在此零件上的最大作用力为 350 N。综合考虑材料的轻量化、强度、经济性等特点，选用 1060 铝合金作为零件材料并进行校核。从图中可以得出该材料的最大屈服应力为 27.57 MPa，最大 von Mises 应力为 4.23 MPa，由上文所提出的安全系数计算公式可以得到，该零件的安全系数 K 为 $27.57/4.23=6.5>1$ 。因此该零件符合设计要求。

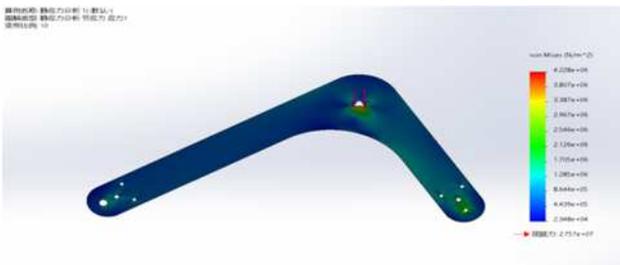


图 2 移动架的静应力分布

图 3 所示为固定架的静应力分析，依然选用 1060 铝合金作为零件材料。从图中可以看出，该材料的最大屈服应力为 27.57 MPa，该零件的最大 von Mises 应力为 20.25 MPa。由上文所提出的安全系数计算公式可得出该零件的安全系数 K 为 $27.57 \div 20.25=1.4>1$ ，该零件符合设计要求。

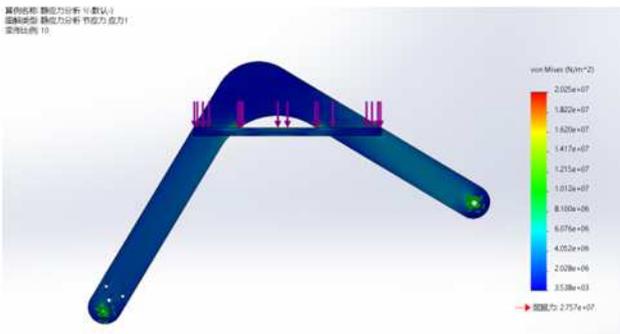


图 3 固定架的静应力分布

3 机器人爬楼运动规划

3.1 机器人爬楼运动轨迹规划

机器人在平地运动时在电机驱动下可以快速前进，当传感器识别到前方的楼梯时，机器人会提前减速，以防止速度过快撞上楼梯上发生倾覆。当活动架上的前轮碰到楼梯时，在前轮与楼梯的摩擦

力和中轮与后轮的推动力共同作用下，活动架绕着与固定架之间的连接件反生转动，前轮扬起并贴着楼梯向上爬，中轮和后轮在前轮的牵引和自身的驱动下前进，最终使整个机构沿着楼梯向上爬。

机器人运动仿真过程如图 4 所示。活动架上的第一对轮组与楼梯相接处之后发生转动，第一对轮组沿着楼梯向上攀爬，此时第二对和第三队轮组还处于平地运动状态并负责主要承重，载物箱依然保持水平（如图 4a 所示）；当第二对轮组接触到楼梯时，它在活动架的带动之下也沿着楼梯向上攀爬此时载物箱开始发生倾斜（如图 4b 所示）。最后一对轮组也爬上楼梯时，载物箱倾斜角度达到最大（如图 4c 所示）。之后一直重复之前的步骤，整个机器人向上攀爬。

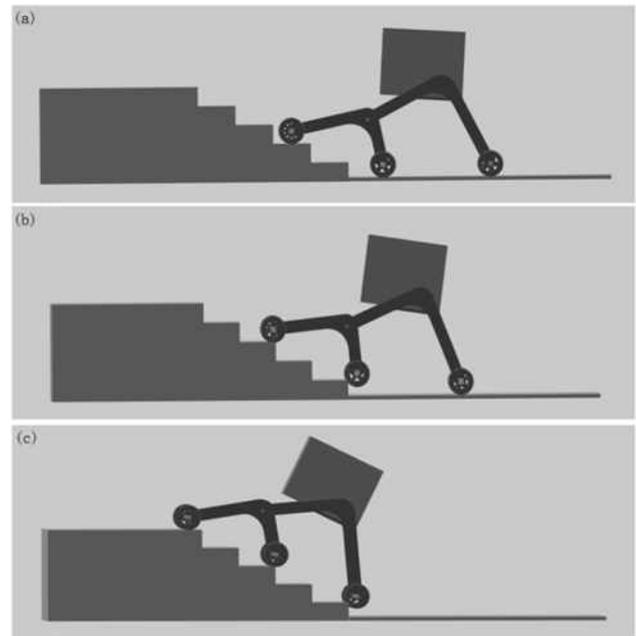


图 4 爬楼机器人攀爬楼梯过程

(a) 第一对轮组爬上楼梯；(b) 第二对轮组爬上楼梯；(c) 第三对轮组爬上楼梯

3.2 载物箱运动过程分析

载物箱在整个爬楼过程中相对于水平面的角度变化如图 5 所示。从图中可看出，角度变化的幅值为 30° ，该幅值较小，说明载物箱发生倾覆的可能性较低。

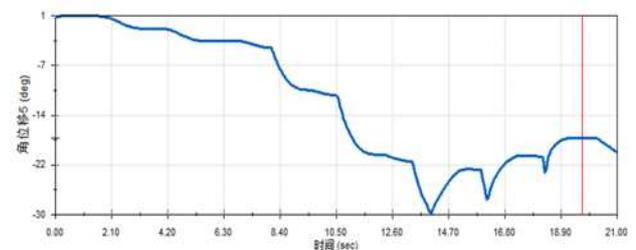


图 5 攀爬楼梯过程中载物箱角度变化

图 6 是储物箱质心在整个过程中的变化趋势。从图中曲线可以看出有规律性的出现了几个拐点，这些拐点对应的就是每一级阶梯的拐角处，说明在拐点处质心的波动较为剧烈，但质心的整体变化

趋势十分平稳,证明了该机构运行的稳定性十分良好,也说明在负重爬楼过程中货物的运行稳定性能够得到保障。

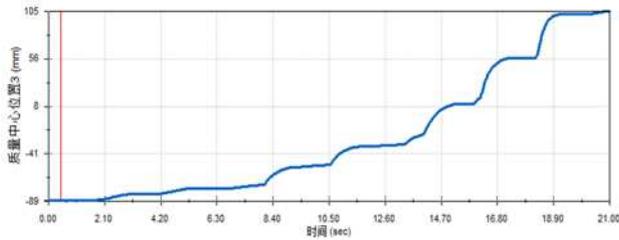


图6 攀爬楼梯过程中载物箱质心变化

3.3 轮子位移曲线分析

图7所示为三对轮组在整个运动过程中分别在X轴和Y轴上的位移变化曲线。从图7a、c、f可以发现,三对轮组在在X轴方向上的位移曲线几乎是一条平滑的斜线,说明在整个机器人在运动过程中没有发生速度的突变,证明整个运动过程是十分连贯的,当图像完全是水平的时候则说明此时轮子是水平运动状态,从图7b、d、e可以发现最开始的图像都是一条水平直线,因为此时机器人正处于水平运动状态,之后我们还发现每个图像都有一段明显的阶梯状部分,在阶梯状曲线中水平部分对应轮子沿台阶的水平面直线运动,上升部分则对应轮子沿台阶竖直面垂直向上攀爬,同时所有曲线在整个过程中都较为平滑,再次说明了机器人在运动过程中的连续性和稳定性。

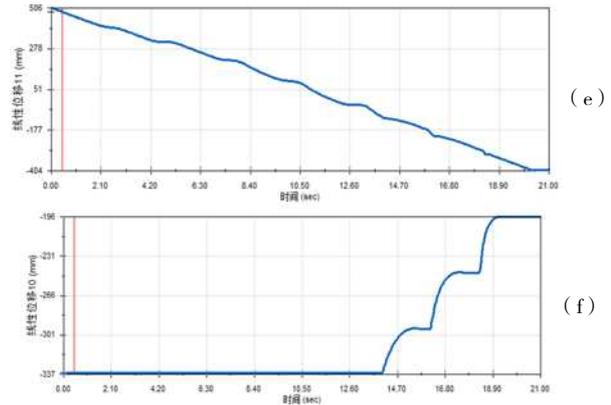


图7 运动过程中三对轮组的位移变化曲线

- (a) 第一组轮在 X 轴上的位移变化; (b) 第一组轮在 Y 轴上的位移变化;
- (c) 第二组轮在 X 轴上的位移变化; (d) 第二组轮在 Y 轴上的位移变化;
- (e) 第三组轮在 X 轴上的位移变化; (f) 第三组轮在 Y 轴上的位移变化。

4. 结论

本研究通过三维建模完成了机器人结构设计,选择了零件材料,并对主要的受力部件进行了静应力分析。分析结果表明,本文所设计零件的安全系数足够,符合实际设计标准。然后使用 SolidWorks 的 motion 插件对机器人的爬楼过程进行了运动仿真,结果显示运动曲线平滑,证明机器运行平稳,验证了该爬楼机器人爬楼运动的可行性,通过仿真分析得出的各主要构件的运动曲线,为后续该轮组式爬楼机器人的样机研制和控制提供了理论参考依据。

参考文献:

- [1] 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 (09): 160-163+167.
- [2] 娄季楠, 桂伟, 张盼盼, 等. 多功能商品载运爬楼车的三维设计与分析[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14 (12): 191-194.
- [3] 王宇, 李胜, 陈文仁, 等. 一种自动爬楼运输车[J]. 机械工程师, 2018 (01): 120-121+125.
- [4] DS SOLIDWORKS 公司. SolidWorks simulation 基础教程[M]. 机械工业出版社, 2018.
- [5] Ge L, Fang Z, Li H, et al. Study of a small robot for mine hole detection[J]. Applied Sciences, 2023, 13 (24): 13249.

