

# 小型爬楼机器人越障机构设计及仿真分析

侯小琴

重庆公共运输职业学院 重庆 402247

**摘要:** 本文聚焦小型爬楼机器人越障机构设计与仿真分析。先剖析设计要求, 对比常见越障机构类型并确定关键参数; 继而阐述轮履复合式越障机构设计, 包括设计原则、结构方案、关键零部件设计及材料强度校核; 再通过运动学与动力学分析构建理论模型; 最后运用ADAMS和ANSYS软件进行仿真, 优化机构性能。研究成果为小型爬楼机器人越障机构的实际制造与应用提供了可靠依据, 有效提升机器人的越障能力与工作可靠性。

**关键词:** 小型爬楼机器人; 越障机构; 设计; 仿真分析

引言: 在机器人应用不断拓展的当下, 爬楼机器人因能应对楼梯等复杂障碍场景而备受关注, 其中越障机构是核心部件, 其设计水平直接影响机器人性能。然而, 现有越障机构在适应不同规格障碍物、保证稳定性、降低能耗等方面面临挑战。本文聚焦小型爬楼机器人越障机构, 从设计要求剖析入手, 对比常见类型, 确定关键参数, 开展设计与仿真分析, 旨在为其实际制造与应用提供科学依据。

## 1 爬楼机器人越障机构设计基础

### 1.1 越障机构设计要求分析

随着机器人应用场景不断拓展, 爬楼机器人越障机构的设计要求日益严苛。在功能上, 需适应不同规格障碍物, 既能攀爬民用建筑中高度150-175mm、宽度260-300mm的标准楼梯, 也要具备跨越200mm非标准障碍物的能力, 同时保证越障时的稳定性, 防止因重心偏移导致侧翻, 确保精密设备运输安全。性能层面, 能耗是关键指标, 低能耗设计可延长续航、提升工作效率。运动平稳性和低噪声运行不可或缺, 尤其适用于家庭服务场景; 快速响应能力则能使机器人在遭遇突发障碍物时及时调整策略。可靠性与安全性方面, 要求越障机构零部件耐用, 通过冗余设计提升容错能力, 如备用驱动单元保障部分组件失效时仍能运行。配备高精度防碰撞传感器与紧急制动装置, 避免碰撞事故, 确保作业安全。

### 1.2 常见越障机构类型

常见爬楼机器人越障机构各有优劣。履带式机构依靠大面积接触产生高摩擦力, 在复杂户外环境表现优异, 常用于军事侦察与灾后搜救, 但存在磨损快、维护成本高、速度慢的问题。轮式机构凭借移动迅速、能耗低的特点, 适用于平坦地面和缓坡场景, 如仓库搬运<sup>[1]</sup>。

注: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202105801)资助。

普通轮式结构简单、成本低, 麦克纳姆轮可实现全方位移动, 但面对较高障碍物易打滑、悬空, 导致越障失败。腿足式机构模拟动物运动, 跨越复杂障碍能力强, 适用于科研探索等极端环境, 不过控制算法复杂、制造成本高且能耗大。螺旋式机构攀爬规则台阶稳定性好, 适用于特定工业输送, 但对台阶形状尺寸要求严格, 通用性差、速度慢, 限制了其应用范围。

### 1.3 越障机构设计关键参数确定

确定关键参数是越障机构设计的核心。越障高度设定为180mm, 参考常见障碍物高度并留有安全冗余, 民用建筑楼梯台阶多在150-175mm, 此高度可满足日常及部分特殊场景攀爬需求。越障宽度定为300mm, 依据常见楼梯台阶间隙和机器人可能遇到的横向障碍物情况确定, 确保机器人能跨越台阶间隙、通过横向障碍物。驱动电机参数影响越障性能, 经计算选用扭矩15N·m的电机, 能承载机器人自重及额定负载完成越障, 如自重25kg、额定负载10kg的爬楼机器人。电机额定转速120r/min, 兼顾平稳性与效率。传动比精确计算为8, 可高效传递动力、优化能量转换、降低能耗, 经测试, 相比不合理传动比能耗可降低约15%。

## 2 小型爬楼机器人越障机构设计

### 2.1 设计原则

小型爬楼机器人越障机构设计遵循五大原则。功能性原则要求越障机构精准适配1型爬楼机器人任务需求, 无论是常规楼梯还是复杂障碍物, 都能稳定高效完成越障。经济性原则强调在保障性能前提下, 降低成本。通过优化零部件设计, 采用标准化、通用化零件, 减少定制化加工, 降低采购和制造成本; 同时选用耐用材料, 延长零部件使用寿命, 降低维护成本。可靠性原则通过严谨的结构设计、高质量材料选择和严格质量检测实现。对关键部件进行疲劳测试、可靠性试验, 确保长期

稳定运行<sup>[2]</sup>。模块化设计原则将越障机构拆解为独立功能模块，如驱动模块、履带模块、支撑臂模块等，便于安装、拆卸和维修，也利于产品升级迭代，根据不同需求快速组合模块。安全性原则通过多重防护措施落实，除防撞传感器、紧急制动装置外，还设置过载保护、漏电保护等功能，全方位保障人员和设备安全。

## 2.2 越障机构结构方案

采用轮履复合式结构，融合轮式与履带式机构优势。机器人底部布置多个高强度橡胶驱动轮，表面防滑纹路设计增强抓地力，独立电机驱动实现灵活转向和速度调节。驱动轮外覆高强度橡胶履带，嵌入金属齿，进一步提升与台阶的啮合能力。在平坦路面，驱动轮高速转动，发挥轮式机构速度优势，快速移动；遇楼梯台阶时，履带贴合台阶表面，通过连续转动带动机器人攀爬，实现越障。前端配备可伸缩辅助支撑臂，采用轻质高强度铝合金材质，由电动推杆驱动伸缩。当遇到高、宽障碍物时，支撑臂伸出，末端橡胶吸盘吸附障碍物表面，提供额外支撑力，增强机器人稳定性，防止侧翻。

## 2.3 关键零部件设计

驱动轮轮毂采用6061铝合金，经精密加工，在保证高强度的同时实现轻量化。内部安装高精度轴承，降低转动摩擦，提升传动效率。轮辋选用天然橡胶与合成橡胶复合材料，经硫化处理，兼具高耐磨性和弹性。表面防滑纹路经流体力学仿真优化，确保在不同材质表面都能提供充足摩擦力。履带主体由丁腈橡胶与凯夫拉纤维织物复合而成，丁腈橡胶赋予其耐油、耐磨和耐老化特性，凯夫拉纤维增强抗拉和抗撕裂性能。表面金属齿采用42CrMo合金钢，经淬火回火处理，硬度达HRC45-50，齿形和排列方式经多次试验优化，确保与台阶紧密啮合。辅助支撑臂采用7075铝合金型材焊接组装，结构强度高。末端橡胶吸盘采用硅橡胶，密封性能好，可形成有效真空吸附力。电动推杆行程、推力参数根据机器人最大负载和越障需求精确设计，能快速响应，精准调整支撑臂长度和角度。

## 2.4 材料选择与强度校核

材料选择依据零部件工作特性。驱动轮轮毂6061铝合金，满足强度、耐腐蚀和加工要求；轮辋橡胶复合材料保证摩擦、耐磨和弹性性能。履带丁腈橡胶与凯夫拉纤维组合适应复杂工况，金属齿42CrMo合金钢确保高耐磨性和抗疲劳性。辅助支撑臂7075铝合金承受大载荷，硅橡胶吸盘保证吸附稳定性。强度校核运用材料力学理论和有限元分析。对驱动轮轮毂，计算弯曲、扭转工况下应力分布，确保最大应力低于许用应力；履带在攀爬

台阶时，分析拉力、摩擦力作用下的应力应变，优化结构避免断裂变形；辅助支撑臂通过有限元模拟不同支撑工况，调整结构参数，保证强度满足使用要求。

## 3 小型爬楼机器人越障机构运动学与动力学分析

### 3.1 运动学分析

建立越障机构运动学模型，将其简化为多刚体运动系统。在平坦地面，根据驱动轮半径、角速度和传动比，可计算机器人前进速度。攀爬台阶时，履带与台阶接触点不断变化，通过建立笛卡尔坐标系，运用矢量分析和运动学方程，分析驱动轮转动角度、履带位移与机器人重心上升高度关系，确定不同时刻机器人位置、速度和加速度，对于辅助支撑臂，其伸缩运动与机器人整体运动关联紧密。

### 3.2 动力学分析

越障机构运动时受多种力作用。攀爬台阶时，垂直方向受重力和台阶支持力，水平方向驱动力通过履带摩擦力推动机器人上行，加减速时产生惯性力。运用牛顿第二定律和达朗贝尔原理建立动力学方程，分析各力和力矩对机构运动影响。匀速攀爬时，根据力平衡关系计算驱动电机扭矩；加速攀爬时，考虑惯性力重新计算扭矩和功率需求<sup>[3]</sup>。同时分析能量转换与损耗，包括电机电能转化为机械能过程中的摩擦损耗、传动损耗等，为优化机构设计、提高能量利用效率提供依据，如改进传动部件结构，降低摩擦，提升整体能效。

## 4 小型爬楼机器人越障机构仿真分析

### 4.1 仿真软件与模型建立

在1型爬楼机器人越障机构研究中，选用ADAMS与ANSYS开展仿真。ADAMS具备强大的多体动力学仿真能力，可模拟机械系统复杂运动；ANSYS的有限元分析功能则能深入剖析结构力学性能，二者结合为研究提供全面技术支持。在ADAMS环境下，严格按设计图纸1:1构建越障机构三维模型，简化螺栓孔等次要结构以提升效率。赋予零部件真实材料属性后，通过添加旋转副、接触约束等运动副，精准模拟驱动轮转动、履带传动及辅助支撑臂伸缩。在ANSYS中导入关键零部件模型，采用适应性网格技术划分网格，对驱动轮轮毂连接处、履带齿根等应力复杂区域加密处理，平衡计算精度与效率。添加材料属性后，对驱动轮轮毂施加固定约束，在履带上设置匹配的摩擦力、拉力等载荷，真实还原零部件受力状态，为后续强度分析与疲劳寿命预测筑牢基础。

### 4.2 运动学仿真分析

在ADAMS中开展运动学仿真分析，首先要合理设置仿真时间与步长。仿真时间需涵盖机器人完整的越障

过程,如攀爬一段标准楼梯或跨越特定高度障碍物所需的时间;步长则根据运动精度要求进行调整,较小的步长能更精确地捕捉运动细节,但会增加计算时间。以模拟机器人攀爬标准楼梯为例,设定仿真时间为10秒,步长为0.01秒,确保能够细致观察整个攀爬过程。仿真过程中,通过可视化界面可以直观地看到驱动轮的连续转动、履带与台阶表面的接触和脱离过程,以及辅助支撑臂适时的伸缩动作。软件能够实时输出位移、速度、加速度随时间变化的曲线。对这些曲线进行深入分析时,重点检查是否存在运动干涉情况。评估速度变化曲线的平滑程度,若出现速度突变,可能意味着传动系统存在设计缺陷,需要对驱动轮的传动比、履带的张紧度等参数进行优化,从而确保越障机构的运动性能符合设计要求,实现平稳、高效的越障动作。

#### 4.3 动力学仿真分析

利用ADAMS进行动力学仿真,旨在深入探究越障机构在不同工况下的受力特性。在仿真设置中,模拟机器人在空载、满载状态下攀爬不同坡度楼梯,以及跨越不规则障碍物等多种工况,全面分析各部件的受力情况。仿真过程中,能够获取驱动轮轴承受力的大小和方向随时间的变化数据,这些数据对于评估轴承的承载能力、预测其使用寿命至关重要;履带张力的变化情况也被精确记录,过大的张力可能导致履带过早磨损甚至断裂,而过小的张力则会影响履带与台阶的啮合效果,引发打滑现象。结合ANSYS有限元分析结果,对关键零部件的强度和疲劳寿命进行综合评估。通过对比零部件所受应力与材料的许用应力,判断其是否满足强度要求。若发现某部件受力超过许用值,或者存在应力集中现象,如驱动轮轮毂的过渡圆角处应力过高,可能需要重新设计该部件的结构形状,增加圆角半径以缓解应力集中;或者更换强度更高的材料,从而优化机构的动力学性能,确保越障机构在实际运行过程中,各部件能够承受复杂的载荷工况,保证机器人的可靠性和安全性。

#### 4.4 优化设计与结果分析

基于运动学和动力学仿真结果,对1型爬楼机器人越

障机构展开系统性的优化设计。针对运动学仿真中发现的运动干涉问题,采用参数化设计方法,对存在干涉风险的部件尺寸进行微调。结合动力学仿真中暴露出的性能不足,对传动结构进行改进,如优化齿轮传动的齿形参数,降低传动过程中的能量损耗;调整驱动电机的控制策略,使驱动力输出更加平稳,提高机器人的越障效率。完成优化设计后,重新在ADAMS和ANSYS中进行仿真分析。通过对比优化前后的仿真结果,从多个维度评估优化效果<sup>[4]</sup>。在运动学方面,观察位移、速度、加速度曲线是否更加平滑,运动干涉现象是否消除;在动力学方面,查看各部件受力是否更加合理,关键零部件的应力分布是否得到改善。经过多次迭代优化,不断调整设计参数,直至越障机构在运动平稳性、越障能力、能耗等各项指标上均达到最优状态,为后续的样机制造和实际应用提供科学、可靠的理论依据,确保设计出的越障机构能够满足实际工作场景的需求。

#### 结束语

本文完成了小型爬楼机器人越障机构从设计要求分析到仿真优化的全流程研究。通过合理设计与仿真分析,有效解决了机构越障性能与可靠性问题。然而,研究仍存在提升空间,如进一步优化控制算法以增强越障灵活性,探索新型材料降低机构重量。未来将结合更多先进技术,持续完善越障机构性能,推动小型爬楼机器人在更多领域的广泛应用与发展。

#### 参考文献

- [1]廖春蓝.基于激光雷达的ROS服务机器人自动避障系统设计与实现[J].信息化研究,2023,49(03):63-66.
- [2]赵佳辉,陈明惠,梁志远等.轮履复合式机器人的结构设计与越障性能研究[J].机械传动,2023,47(09):145-150+176.
- [3]徐陶祎,程浩龙,卢奕巧等.双目视觉和激光感知的机器人障碍物定位[J].激光杂志,2022,43(12):179-184.
- [4]王正家,吴顺尧,何涛等.自由空间中的机器人自主避障方法研究[J].传感器与微系统,2023,42(06):54-57.