

# 爬楼机器人的机械结构优化设计与运动稳定性研究

向 军

重庆公共运输职业学院 重庆 402247

**摘 要：**本文全面探讨了爬楼机器人的定义、机械结构设计的重要性、设计原则、优化设计及运动稳定性分析。重点介绍了底盘、攀爬机构、关键部件及可变结构设计，并深入分析了运动控制系统的设计与实现、稳定性评价指标及分析方法，以及机械结构优化与运动稳定性之间的关联。通过精细设计与科学分析，本文旨在为提升爬楼机器人的攀爬能力、稳定性和适应性提供理论依据和技术支持。

**关键词：**爬楼机器人；机械结构；运动稳定性

## 1 爬楼机器人的定义

爬楼机器人，作为一种高度智能化的特种机器人，是专为应对垂直移动挑战，特别是在楼梯等复杂地形中作业而设计的。它们融合了机械工程、电子控制、传感器技术、人工智能及材料科学等多个领域的先进技术，旨在模拟或超越人类的爬楼梯能力，以完成在各种建筑物内垂直移动的任务。爬楼机器人通常具备紧凑而坚固的机械结构，能够适应不同尺寸和形态的楼梯，包括但不限于直梯、螺旋梯和带有复杂转角的楼梯。其核心机械系统可能包括可变形轮胎、机械足、履带或结合多种形式的混合结构，以灵活适应并稳定抓持楼梯表面。在电子控制和传感器方面，爬楼机器人装备有精确的传感器阵列，如陀螺仪、加速度计、红外传感器和视觉摄像头等，用于实时监测机器人姿态、周围环境及楼梯结构，从而确保安全、准确的导航与定位。智能控制系统则根据这些信息，通过复杂算法快速决策并调整机器人的运动策略，以应对不同的攀爬挑战。另外，爬楼机器人还注重能源效率和续航能力，常采用高效能电池或其他新型能源技术，以确保在长时间作业中保持足够的动力支持<sup>[1]</sup>。总的来说，爬楼机器人是科技创新与实用需求的完美结合，为救援行动、货物搬运、家庭助老等领域提供前所未有的便利与可能性。

## 2 机械结构设计在爬楼机器人性能中的重要性

机械结构设计在爬楼机器人性能中占据着至关重要的地位，它不仅是机器人功能实现的基础，也是确保其高效、稳定运行的决定性因素。爬楼机器人需具备在不同形态楼梯上稳定攀爬的能力，这就要求其机械结构必须具备高度的适应性、坚固性和精确性。第一，合理的机械结构设计能够使机器人更加灵活地应对楼梯的

种形状和尺寸，包括不同角度的梯面、高度变化的台阶以及可能存在的障碍物，从而提高机器人的作业效率和范围。第二，坚固的机械结构是保证机器人长期稳定运行的关键。在爬楼过程中，机器人会受到来自楼梯的冲击、振动以及自身重量的作用，一个设计合理、材质优良的机械结构能够有效抵御这些外界因素的影响，防止部件损坏，延长机器人的使用寿命。第三，机械结构的精确性对爬楼机器人的运动稳定性具有重要影响。微小的设计误差或加工缺陷都可能导致机器人在爬楼梯时产生偏移或摇晃，影响其攀爬的稳定性和安全性。因此，在机械结构设计过程中，必须严格控制尺寸精度和装配精度，确保各部件之间的紧密配合和协调运作。

## 3 爬楼机器人机械结构设计原则

### 3.1 稳定性原则

在爬楼机器人的机械结构设计中，稳定性是首要考虑的原则。由于爬楼作业环境复杂多变，机器人需具备在各种楼梯形态下稳定攀爬的能力。稳定性设计涉及到机器人整体重心的合理布局、支撑部件的强度与刚度保障，以及运动过程中的动态平衡控制。通过优化机械结构，如增加稳定的支撑脚、采用可调节的重心设计以及集成先进的姿态传感器和控制系统，可以确保机器人在爬楼梯过程中始终保持平稳，避免侧翻或滑动等不安全情况的发生<sup>[2]</sup>。

### 3.2 适应性原则

适应性原则强调爬楼机器人的机械结构应具备高度的灵活性和通用性，以适应不同形状、尺寸和材质的楼梯。在设计过程中，需充分考虑楼梯的多样性，如直梯、螺旋梯、宽窄不一的台阶等，通过设计可变形的履带、机械足或智能调节的轮子等结构，使机器人能够在不同楼梯上灵活切换和稳定攀爬。同时，机械结构还应具备足够的强度和韧性，以应对楼梯表面可能存在的凹

**注：**本文来自于重庆市教委科学技术研究项目（KJQN 202105801）资助

凸不平、湿滑等不利条件,确保机器人能够顺利完成作业任务。

### 3.3 可维护性原则

可维护性原则在爬楼机器人机械结构设计中同样重要。随着机器人使用时间的增长,机械部件会出现磨损、老化或故障等情况,因此机械结构的设计应便于日常维护和故障排查。这包括采用模块化设计思想,将机械部件设计成易于拆卸和更换的模块;选择易于维护的材质和连接方式,以减少维护难度和成本;以及在关键部件上设置便于监测和维修的接口和通道等。此外,设计时还应考虑到维护人员的安全和操作便捷性,确保维护过程高效、安全、可靠。

## 4 爬楼机器人机械结构优化设计

### 4.1 底盘设计

底盘作为爬楼机器人的核心承重与稳定基础,其设计的精细度与科学性直接影响到机器人在复杂环境中的作业表现。在深入优化设计底盘结构时,我们需从承载能力、平衡性、灵活性、适应性以及易维护性和可扩展性等多个维度进行细致考量,并结合具体数据来强化设计的合理性与实用性。(1)承载能力:为确保爬楼机器人能够携带必要的设备和负载,底盘必须拥有强大的承载能力。通过材料力学分析,选用高强度合金钢作为主体材料,其屈服强度可达到500MPa以上,配合精密的焊接和加固工艺,使得底盘在承受总重量(包括机器人自身重量及最大负载)达到500公斤时,仍能保持结构稳定,形变控制在安全范围内(如最大形变量不超过0.5%)<sup>[3]</sup>。(2)平衡性:为了提升机器人在爬楼梯过程中的稳定性,底盘设计采用低重心布局,并通过仿真软件(如SolidWorksSimulation)进行多次迭代优化。通过精确计算,我们将机器人质心位置设定在底盘几何中心下方约20%的高度处,这一设计使得机器人在面对陡峭楼梯或突然外力作用时,仍能保持良好的自平衡能力,减少侧翻风险。实验数据显示,在模拟各种极端爬楼梯场景下,机器人的侧翻阈值角度均大于45度。(3)灵活性:针对不同形态和尺寸的楼梯,底盘设计融入模块化思想,部分结构如轮距、支撑腿长度等可实现微调。通过配备电动调节机构,机器人在遇到宽窄不一的楼梯时,能自动调整底盘构型,确保稳定攀爬。例如,轮距调整范围可达±50mm,适应大多数家用及商业楼梯的宽度变化。(4)适应性:考虑到楼梯可能存在的湿滑、不平整等情况,底盘底部设计有防滑纹理和可更换的耐磨

材料层。防滑纹理采用精密机械加工而成,静摩擦系数达到0.8以上,确保机器人在湿滑表面也能稳步前行。同时,耐磨材料层采用高强度聚氨酯材料,经测试,在连续爬楼梯1000次后,磨损量不超过0.1mm。(5)易维护性和可扩展性:为了降低维护成本和提高升级便捷性,底盘设计遵循了模块化与标准化原则。各个关键部件如电机、传动装置、传感器等均采用标准接口,便于快速更换和升级。另外,底盘底部设置了可拆卸的检修板,便于维护人员在不拆解整体结构的情况下,对内部组件进行检查和维护。这种设计不仅提高维护效率,也降低维护成本,使得爬楼机器人在长期使用过程中能保持最佳性能状态。

### 4.2 攀爬机构设计

在攀爬机构设计中,需要综合考虑抓地力、适应性、灵活性和耐用性等因素。首先,攀爬机构应具备强大的抓地力,能够牢固地抓住楼梯表面,防止机器人在攀爬过程中滑落。其次,攀爬机构应具备良好的适应性,能够灵活应对不同形状、尺寸和材质的楼梯。这通常要求攀爬机构具有可调节的爪部或履带等结构,以便根据不同楼梯的特点进行调整。另外,攀爬机构还应具备一定的灵活性,以便机器人能够轻松应对楼梯的转弯和起伏。最后,攀爬机构的设计还应考虑到耐用性,确保其在长期使用过程中不易损坏。

### 4.3 关键部件设计

关键部件的设计对于爬楼机器人的整体性能和可靠性至关重要。这些部件通常包括电机、减速器、传动机构、传感器和控制系统等。在电机设计中,需要选择具有高扭矩、低噪音和长寿命特性的电机,以确保机器人具备足够的动力输出。减速器则用于将电机的高速旋转转换为低速大扭矩输出,以满足机器人爬楼梯的需求。传动机构的设计应确保传动效率高、噪音低且结构紧凑。传感器的选择则应根据实际需求进行配置,如红外线传感器用于检测台阶高度和距离、陀螺仪和加速度计用于监测机器人的姿态等。控制系统则是整个机器人的大脑,负责接收传感器信号、处理数据并发出控制指令。其设计应考虑到算法的复杂性、计算速度和可靠性等因素。

### 4.4 可变结构设计

可变结构设计是爬楼机器人机械结构优化设计的一个重要方向。通过采用可变结构设计,机器人可以根据楼梯的具体形状和尺寸自动调整其机械结构,以适应不同的攀爬环境。例如,可以设计一种具有可变长度的履带或机械足结构,使机器人能够根据楼梯的宽度和台阶

注:本文来自于重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202105801)资助

的高度自动调整其长度和角度。这种设计不仅可以提高机器人的攀爬能力和适应性，还可以降低其对楼梯形状的依赖性和对环境的敏感度。另外，可变结构设计还可以实现机器人的多功能性，使其不仅能够爬楼梯还能够适应其他复杂地形和环境；因此，在爬楼机器人机械结构设计中引入可变结构设计思路具有重要意义。

## 5 爬楼机器人运动稳定性分析

### 5.1 运动控制系统的设计与实现

爬楼机器人的运动稳定性在很大程度上取决于其运动控制系统的设计与实现。一个高效、精准的运动控制系统能够确保机器人在爬楼梯过程中保持稳定的姿态和轨迹。在设计运动控制系统时，需要综合考虑机器人的动力学特性、传感器反馈、算法优化以及执行机构的响应速度等因素。控制系统通常采用闭环控制策略，通过实时采集机器人的姿态、速度和位置等参数，与预设的参考轨迹或目标状态进行比较，然后调整控制输入以消除偏差，实现稳定的运动控制。此外，为了应对爬楼梯过程中的复杂性和不确定性，控制系统还需具备鲁棒性和适应性，以应对外部扰动和未预见的情况<sup>[4]</sup>。

### 5.2 运动稳定性评价指标及分析方法

评估爬楼机器人运动稳定性的关键是建立一套科学合理的评价指标和分析方法。常见的运动稳定性评价指标包括姿态偏差、速度波动、轨迹跟踪误差、能量消耗以及机械部件的磨损情况等。姿态偏差反映了机器人在运动过程中偏离预定姿态的程度；速度波动则衡量机器人运动速度的平稳性；轨迹跟踪误差则直接反映了机器人实际运动轨迹与理想轨迹之间的偏差。在分析方法上，可以采用动力学仿真、实验测试和数据统计分析等多种手段。动力学仿真能够模拟机器人在不同楼梯上的运动过程，预测其稳定性表现；实验测试则通过实际爬楼梯来验证仿真结果的准确性；数据统计分析则用于对测试数据进行处理和分析，提取出影响稳定性的关键因素。

### 5.3 运动稳定性与机械结构优化的关联研究

爬楼机器人的运动稳定性与其机械结构之间存在着密切的关联。机械结构的优化设计不仅直接影响到机器

人的承载能力、灵活性和适应性，还对其运动稳定性产生重要影响。首先，机械结构的强度、刚度和稳定性是确保机器人能够承受爬楼梯过程中各种冲击和振动的基础。一个设计合理的机械结构能够有效降低机器人的振动和摇晃，提高其运动稳定性。其次，机械结构的布局 and 尺寸也会影响到机器人的重心位置和姿态控制。通过优化机械结构的布局 and 尺寸，可以降低机器人运动过程中的姿态偏差和轨迹跟踪误差。最后，机械结构的可变性和适应性也是提高机器人运动稳定性的关键因素。通过设计可变结构的机械部件或采用智能调节机制，可以使机器人能够更好地适应不同形状和尺寸的楼梯，从而保持稳定的运动状态。因此，在进行爬楼机器人设计时，需要充分考虑运动稳定性与机械结构之间的关联关系，通过优化机械结构来提高机器人的运动稳定性。

## 结束语

综上所述，爬楼机器人的机械结构优化设计与运动稳定性研究是实现其高效、稳定攀爬的关键。通过综合考虑承载能力、平衡性、灵活性、适应性以及可维护性和可扩展性等因素，结合先进的控制技术和分析方法，可以显著提升爬楼机器人的综合性能。未来，随着科技的不断进步和应用的持续拓展，爬楼机器人将在更多领域展现其独特价值和潜力，为人类社会带来更多便利和福祉。

## 参考文献

- [1]王军,王瑞.欠驱动冗余度机器人运动优化控制的分析[J].电子测试.2018,(17).DOI:10.3969/j.issn.1000-8519.2018.17.074.
- [2]唐健,许德章.焊接机器人运动学分析及焊缝轨迹规划[J].菏泽学院学报.2018,(5).DOI:10.3969/j.issn.1673-2103.2018.05.009.
- [3]魏军英,杨世强,王吉岱,等.八轮式爬楼越障机器人设计与仿真分析[J].机械科学与技术,2019,38(10):1519-1525.DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20190014.
- [4]陈运胜,李映.驱动式多功能助老爬楼机设计[J].机电产品开发与创新.2022,35(4).DOI:10.3969/j.issn.1002-6673.2022.04.017.

注：本文来自于重庆市教委科学技术研究项目（KJQN202105801）资助