

## 伸缩式高空作业车稳定性分析及优化设计

罗颖

山河智能特种装备有限公司, 湖南 长沙 410137

**[摘要]** 伸缩式高空作业车作为一种重要的工程机械装备, 在建筑、维护和清洁等领域发挥着重要作用。由于其特殊的工作环境和复杂的工作任务, 对伸缩式高空作业车的稳定性进行分析和优化设计显得尤为重要。文中在深入研究伸缩式高空作业车的稳定性分析方法和优化设计策略, 探讨如何通过结构优化、控制系统优化和材料选用优化等手段, 提高车辆的稳定性、强度和耐久性, 为其安全可靠地开展高空作业提供技术支持和保障。

**[关键词]** 伸缩式高空作业车; 动力学; 优化设计

DOI: 10.33142/ec.v7i7.12587

中图分类号: TH113.2

文献标识码: A

### Stability Analysis and Optimization Design of Telescopic Aerial Work Vehicle

LUO Ying

Sunward Intelligent Special Equipment Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410137, China

**Abstract:** As an important engineering machinery equipment, the telescopic aerial work vehicle plays an important role in construction, maintenance, and cleaning. Due to its special working environment and complex work tasks, it is particularly important to analyze and optimize the stability of the telescopic aerial work vehicle. In this article, the stability analysis method and optimization design strategy of the telescopic aerial work vehicle are studied in depth, and how to improve the stability, strength, and durability of the vehicle through structural optimization, control system optimization, and material selection optimization, so as to provide technical support and guarantee for its safe and reliable high-altitude operation.

**Keywords:** telescopic high-altitude work vehicle; dynamics; optimal design

#### 引言

伸缩式高空作业车作为一种特殊的工程机械装备, 在建筑、维护和清洁等领域扮演着关键角色。随着城市建设的不断发展和建筑结构的日益复杂化, 对于能够高效、安全地完成高空作业任务的需求也日益增加。针对伸缩式高空作业车的稳定性分析和优化设计显得尤为重要, 研究其工作原理、结构特点以及作业环境的影响, 可以为提高伸缩式高空作业车的稳定性和安全性提供理论基础和实践指导, 从而推动其在各个领域的应用和发展。

#### 1 伸缩式高空作业车概述

##### 1.1 伸缩式高空作业车的定义

伸缩式高空作业车是一种专门设计用于在高空环境中进行各种作业和维护任务的移动设备, 在不同高度工作的需求中, 具备高度可调节的工作平台或臂架结构, 在工业、建筑、维修等领域发挥着关键作用。伸缩式高空作业车通常拥有坚固的底盘和稳定的结构, 确保在高空作业时的安全性和稳定性。其结构设计考虑了载荷承载能力、操作便利性以及安全性等方面, 通常配备有驾驶室和操作控制台, 作业平台上配备有护栏和其他安全设施, 确保作业人员在高空作业时的安全。这种类型的车辆根据其结构和功能特点的不同可以分为多种类型, 例如垂直臂式、旋转臂式和蜘蛛臂式等。垂直臂式车辆主要用于直线上升和下降的作业, 具备较高的垂直作业能力; 旋转臂式车辆除了具备垂直作业

能力外, 还可在水平方向上进行旋转, 适用于需要横向作业范围的场景; 而蜘蛛臂式车辆具备多节伸缩臂的特点, 可在复杂环境中进行作业, 如窄小空间或不规则表面。总之, 伸缩式高空作业车的定义体现了其作为一种移动式高空作业设备的核心特征, 即具备伸缩调节的工作平台或臂架结构, 并且能够在高空环境中进行各种作业和维护任务。

##### 1.2 伸缩式高空作业车的分类

伸缩式高空作业车根据其结构和功能的不同, 可以分为多种类型, 每种类型都针对特定的作业需求和环境条件进行了优化设计。垂直臂式伸缩式高空作业车具有直线上升和下降的能力, 伸缩臂通常沿着车身的垂直方向运动, 能够快速达到目标高度, 并提供稳定的作业平台, 广泛应用于建筑物外墙清洁、灯具更换等需求直线高度变化的作业任务中。旋转臂式伸缩式高空作业车除了具备垂直作业的能力外, 旋转臂式作业车还能够在水平方向上进行旋转, 在需要横向作业范围的场景中更为灵活, 例如在建筑物外墙涂装、窗户更换等作业中, 可以通过旋转臂实现覆盖更广泛的作业范围, 提高工作效率。蜘蛛臂式伸缩式高空作业车具有多节伸缩臂的特点, 臂架结构灵活多变, 能够适应复杂多变的作业环境, 通常采用可折叠式设计, 使其能够在狭窄的空间中自由展开作业, 例如在室内天花板维修、设备安装等需要灵活作业的场景中, 蜘蛛臂式作业车具有独特的优势。

### 1.3 伸缩式高空作业车的结构与工作原理

伸缩式高空作业车主要结构包括底盘、伸缩臂、作业平台、起升机构和支撑系统等部件。底盘提供了车辆的移动和支撑功能，通常配备有驾驶室和操作控制台，使操作员可以方便地操控车辆的移动和作业功能；伸缩臂是连接底盘和作业平台的关键部件，通常由多节伸缩臂段组成，可以根据需要进行伸缩和折叠，以调节作业高度；作业平台安装在伸缩臂的顶部，为作业人员提供一个安全稳定的工作区域，通常配备有护栏和其他安全设施；起升机构用于控制作业平台的升降运动，通常采用液压或电动驱动。支撑系统包括支腿或支撑杆等装置，用于增加车辆的稳定性和安全性。其工作原理是通过操作起升机构和伸缩臂的运动来实现作业平台的升降和伸缩，从而实现不同高度的作业需求。当需要进行高空作业时，操作员首先将车辆移动到目标位置，并展开支撑系统以增加稳定性。然后，通过控制起升机构，将作业平台提升至所需的高度。同时，根据作业任务的需要，可以通过控制伸缩臂的伸缩来调节作业平台的水平位置。在作业过程中，操作员可以通过操作控制台实时监控车辆状态，并调整操作以确保作业的安全和高效进行。

## 2 稳定性分析方法

### 2.1 数值模拟方法

数值模拟方法是一种通过建立数学模型，并运用计算机技术进行仿真分析的稳定性分析方法。在伸缩式高空作业车的设计和优化过程中，数值模拟方法扮演着至关重要的角色。数值模拟方法可以通过建立车辆的三维几何模型和材料属性，运用有限元分析（FEA）等技术，对车辆在不同工况下的受力情况进行仿真，包括模拟车辆在不同高度、不同载荷条件下的稳定性表现，以及在不同作业环境中的动态响应。通过对不同结构参数、材料选择等因素进行参数化分析和优化，可以找到最优的设计方案，以提高车辆的稳定性和性能<sup>[1]</sup>。例如，在伸缩臂的设计中，可以通过数值模拟分析不同伸缩臂长度、截面形状等参数对车辆稳定性的影响，从而确定最佳设计方案。通过模拟车辆在不同外部环境条件下的响应，可以评估车辆的适用范围和工作限制，为实际作业提供参考和指导。例如，可以通过数值模拟分析车辆在强风、不平地面等恶劣条件下的稳定性表现，以确定安全作业的限制条件。

### 2.2 实验测试方法

实验测试方法直接利用实验数据来验证车辆在不同条件下的稳定性表现，具有直观性和可靠性的特点，是稳定性分析中重要的手段。在这种试验中，通过在不同高度和不同位置施加静态载荷，观察车辆的倾斜程度和支撑系统的变形情况，直观地了解车辆在不同工作高度下的稳定性情况，为工程师提供参考和指导。实验测试方法还可以进行动态载荷试验，在移动或作业过程中的稳定性，通过在不同速度和不同路况下进行试验，观察车辆的动态响应

和姿态变化，从而评估其在实际作业中的稳定性表现，帮助工程师了解车辆在实际作业环境中的稳定性，并发现潜在的问题和安全隐患。通过在不同侧倾角度下进行试验，观察车辆的侧倾极限和稳定性边界，从而评估其在侧倾情况下的安全性能。

### 2.3 理论分析方法

理论分析方法是一种基于力学原理和数学模型的稳定性分析方法，通过推导数学表达式和理论模型来评估伸缩式高空作业车的稳定性。理论分析方法可以利用静力学原理，通过分析车辆结构和载荷特性，推导出车辆的稳定性方程，描述车辆在不同工况下的重心位置、支撑力、惯性力等参数，从而评估车辆的稳定性。理论分析方法还可以利用动力学原理，建立车辆的动态模型，分析车辆在运动过程中的稳定性，包括考虑车辆的惯性、惯性力、转向力等因素，通过求解运动方程来评估车辆的稳定性。理论分析方法还可以利用数学模型，通过建立车辆的数学模型，可以分析不同结构参数、材料选择等因素对稳定性的影响，从而确定最佳设计方案。

## 3 伸缩式高空作业车的稳定性分析

### 3.1 动力学模型建立

动力学模型的建立是伸缩式高空作业车稳定性分析中的关键步骤，通过建立动力学模型，可以分析车辆在运动过程中的稳定性行为，考虑到惯性、转向力等因素的影响。车辆的运动状态可以用位置、速度和加速度来描述，即 $x(t), v(t), a(t)$ 。根据牛顿第二定律，可以得到车辆的运动方程：

$$m \cdot a(t) = F_{\text{合}}(t) \quad (1)$$

其中， $m$ 是车辆的质量， $F_{\text{合}}(t)$ 是合力，包括驱动力、摩擦力等。

车辆在运动过程中会受到转向力的影响，其大小与车辆的转向角度和速度相关。转向力可以用转向力矩 $M_{\text{转}}$ 表示：

$$M_{\text{转}} = I \cdot \alpha \quad (2)$$

其中， $I$ 是车辆的转动惯量， $\alpha$ 是车辆的角加速度。

动力学模型还需考虑车辆的支撑系统对稳定性的影响，支撑系统可以提供额外的支撑力，使车辆在运动过程中保持稳定，支撑力可以通过支撑系统的结构特性和操作控制来调节<sup>[2]</sup>。总之，动力学模型的建立是通过分析车辆的运动行为、转向稳定性和支撑系统的作用，来评估伸缩式高空作业车在不同工况下的稳定性表现。

### 3.2 载荷分析

载荷分析是伸缩式高空作业车稳定性分析中的重要环节，通过对车辆所受载荷的分析，可以评估车辆在不同工况下的稳定性表现，并确定其承载能力。载荷分析涉及到对车辆所受外部载荷的考虑，包括静载荷和动载荷，静载荷主要包括车辆自重、作业平台和载荷，而动载荷则包括加速度、惯性力以及外界环境的风载荷等。在静态情况下，车辆所受合力 $F_{\text{合}}$ 可以通过静力平衡方程得到：

$$\sum F_{\text{合}} = 0 \quad (3)$$

其中,  $\sum F_{\text{合}}$  表示合力的合力矢量, 需满足平衡条件。

载荷分析还需要考虑到车辆结构的承载能力, 车辆的结构应能够承受外部载荷带来的各种应力和变形, 通过有限元分析等方法来完成, 从而评估车辆在不同工况下的受力情况, 确保其结构稳定可靠。支撑系统可以提供额外的支撑力, 需要分析支撑系统在不同工况下的支撑能力和稳定性, 以确保车辆在作业过程中的安全稳定。

### 3.3 车辆稳定性评估指标

车辆稳定性评估指标是用于衡量伸缩式高空作业车在不同工况下稳定性表现的标准或参数, 通过这些指标可以对车辆的稳定性进行定量评估, 为设计和优化提供参考依据。倾斜角度是指车辆在作业过程中与地面的倾斜程度, 通常用倾斜角度(单位为度)来表示。较小的倾斜角度表明车辆具有较好的稳定性, 而较大的倾斜角度则可能表明车辆处于不稳定状态。倾翻概率是指车辆在作业过程中发生倾翻的可能性, 通常通过计算车辆的重心高度、支撑底座面积和外部载荷等因素来评估。较低的倾翻概率表明车辆具有较好的稳定性, 而较高的倾翻概率则可能表明车辆处于危险状态。侧倾限制是指车辆在侧倾方向上的最大允许角度, 通过计算车辆结构的稳定性边界和支撑系统的支撑能力, 可以确定车辆的侧倾限制, 从而为安全作业提供保障。动态稳定性是指车辆在运动过程中的稳定性表现, 通过分析车辆的动态稳定性, 可以评估其在不同速度和路况下的稳定性表现, 为实际作业提供参考和指导。

## 4 优化设计

### 4.1 结构优化

结构优化是伸缩式高空作业车设计中至关重要的一环, 旨在提升车辆的稳定性、强度和耐久性, 以满足各种复杂的作业环境需求。通过减轻车辆自身重量, 可以降低对地面的压力, 减少地面沉降, 提高整体稳定性。轻量化设计可以采用优化结构布局、增加材料强度、降低结构厚度等手段来实现, 以达到在不影响车辆强度的前提下减轻车辆重量的目的。优化连接方式, 提高车辆各部件之间的连接强度和稳定性, 增加加强筋可以在不增加结构重量的情况下提高车辆的整体强度和刚度, 增强其抗扭转和抗弯曲能力。建立车辆的数学模型, 可以模拟不同结构方案在不同工况下的受力情况, 评估各种优化方案的效果, 从而确定最佳设计方案。这种方法具有高效、准确的特点, 可以为结构设计提供科学依据。

### 4.2 控制系统优化

控制系统优化是伸缩式高空作业车设计中的关键方面之一, 它直接影响着车辆的动态稳定性、操作性和安全性。引入先进的传感器技术, 如惯性测量单元(IMU)、倾斜传感器、位移传感器等, 可以实时监测车辆的姿态、倾斜角度和位置信息, 从而为车辆的运动控制提供准确的数据支持。采用先进的自动控制算法, 如模糊控制、PID控制、模型预测控制等, 可以实现对车辆运动的精确控制和智

能化管理。增加遥控器的功能、优化操作界面和提升操作人员的培训水平, 可以提高操作员的工作效率和舒适度, 降低操作失误率, 从而进一步提升车辆的安全性和稳定性<sup>[3]</sup>。还可以考虑引入自动化控制技术, 实现部分或全部自动化操作。例如, 采用自动平衡系统、自动防护系统等, 可以在一定程度上减轻操作员的负担, 提高车辆的自动化程度, 从而进一步提高车辆的稳定性和安全性。

### 4.3 材料选用优化

材料选用优化是伸缩式高空作业车设计中至关重要的一环, 它直接影响着车辆的强度、耐久性和整体性能。在材料选用优化方面, 可以采取一系列措施来提高车辆的性能。要选择具有高强度、轻质和良好耐久性的材料, 如高强度钢、铝合金、碳纤维复合材料等, 可以有效降低车辆的自重, 提高结构强度和刚度, 从而提升车辆的载荷承载能力和抗风性能。在选择材料时, 需要综合考虑其成本、可供性和加工性能等因素, 以确保选用的材料既满足性能要求, 又具有经济性和可操作性。通过表面处理技术, 如镀锌、喷涂、防腐处理等, 可以提高材料的耐腐蚀性和耐磨性, 延长车辆的使用寿命。同时, 采用先进的加工工艺和工艺控制手段, 可以提高材料的加工精度和成型质量, 保证车辆的整体性能和外观质量。选择符合环保标准和可持续发展要求的材料, 可以提高车辆的环保性和可持续性, 符合现代社会对环保和可持续发展的要求。总之, 材料选用优化是伸缩式高空作业车设计中不可忽视的一环, 通过选择适当的材料、考虑材料的成本和可供性、采用先进的表面处理和加工工艺以及考虑环保因素, 可以提高车辆的性能和可靠性, 满足不同作业环境下的需求。

## 5 结语

通过对伸缩式高空作业车的稳定性分析及优化设计的探讨, 我们深入探讨了该类型车辆的关键问题和解决方案。从结构优化到控制系统优化再到材料选用优化, 我们全面考虑了提升车辆性能和安全性多种途径, 将有助于提高车辆的稳定性、强度和耐久性, 为其在各种复杂作业环境下的安全可靠运行提供了坚实的保障。未来的研究和还将继续致力于进一步完善伸缩式高空作业车的设计和优化, 以满足不断变化的市场需求和技术挑战。

### [参考文献]

- [1]冯辉, 孟杰, 张小龙. 基于 ANSYS 的折臂式高空作业车作业臂模态分析[J]. 工程机械与维修, 2023(5): 40-42.
  - [2]刘国兴, 岳义, 韦宝琛, 等. 一种全方位高刚度正交结构举升装置设计与仿真研究[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(5): 178-183.
  - [3]翁天浩, 邓旻涯, 李科军. 林区智能作业车臂架动力学建模及优化设计[J]. 森林工程, 2024, 40(2): 159-167.
- 作者简介: 罗颖(1982.3—), 男, 学历: 本科, 毕业院校: 中南大学, 所学专业: 机械设计制造及其自动化, 目前职称: 工程师, 目前就职单位: 山河智能特种装备有限公司。