

# Structural strength analysis and improved design of heavy engineering rescue vehicle body

Yalei Li Maowei Wu Jifa Hong

Jiangling Automobile Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

## Abstract

This research focuses on the strength analysis and optimized design of the body structure of heavy engineering rescue vehicles. First, a detailed study of the existing body structure was conducted to identify potential weaknesses and problems under real-world operating conditions. Finite element analysis was then employed to evaluate the structural strength, pinpointing critical stress concentration areas and structural flaws. Based on the diagnostic results, improved design schemes were proposed to enhance overall strength and reliability, including measures such as adjusting material distribution and optimizing connection methods. After completing the improved design, experimental verification and performance testing were conducted to confirm the effectiveness of the proposed solutions in terms of load-bearing capacity, deformation resistance, and fatigue life. The findings demonstrate significant performance improvements in the optimized body structure, making it better suited for practical rescue missions. This study provides both theoretical and practical guidance for the design of engineering rescue vehicles and offers valuable insights for the optimization of similar engineering structures.

## Keywords

Heavy engineering rescue vehicle; body structure; strength analysis; finite element analysis; optimized design; experimental verification

## 重型工程救援车辆车身结构强度分析与改进设计

李亚蕾 吴茂伟 洪吉发

江铃汽车股份有限公司, 中国·江西 南昌 330000

## 摘要

本研究针对重型工程救援车辆车身结构的强度进行了分析与优化设计。首先通过对当前车体结构的详细研究,揭示了其在实际使用中可能存在的薄弱部位和潜在问题。随后,运用有限元分析方法对车体结构进行强度评估,并定位关键的应力集中区和结构缺陷。基于问题诊断结果,提出改进设计方案,优化车体结构以提升整体强度和可靠性,并通过调整材料分布、优化连接方式等具体措施加以实现。在改进设计完成后,进一步通过实验验证和性能测试,验证了所提出方案在承载能力、抗变形性能及疲劳寿命等方面的提升效果。研究结果表明,优化后的车体结构性能显著提高,可以更好地满足实际救援任务需求。本研究不仅为工程救援车辆设计提供了理论和实践依据,也对类似工程结构的优化设计具有重要参考意义。

## 关键词

重型工程救援车辆; 车体结构; 强度分析; 有限元分析; 优化设计; 实验验证

## 1 前言

重型工程救援车辆在灾害救援和工程抢险中起着至关重要的作用,尤其是在地震、洪灾、滑坡等突发事件中的抢险救援以及矿山等特殊领域的极端施工条件下。这类车辆通常需要承载重型机械设备和极大的动态载荷,在复杂且恶劣的环境中执行高强度任务,因此对车身结构的强度、刚度、耐久性等性能提出了极高要求。然而,现阶段许多重型工程救援车辆由于设计和制造工艺上的局限,车身结构在实际使用中易出现应力集中、疲劳开裂、变形过大等问题,不仅影

响车辆安全,还降低了设备的使用寿命。

## 2 重型工程救援车辆车身结构分析理论与方法

随着重型工程救援车辆在复杂任务场景中的广泛使用,其车身结构的强度和可靠性已成为确保车辆安全性和功能性的关键要素。本节将重点阐述车身结构分析所涉及的相关理论、数值模拟技术与分析流程,以及测试与实验方法,形成一个完整的分析框架,为后续优化设计提供技术支持。

### 2.1 车身结构强度基本理论

车身结构强度是车辆设计的基础,其直接决定了车辆在承载动态与静态载荷时的安全性能。强度分析主要基于材料力学、结构力学及弹性力学理论,通过对车身框架及承载部件的应力、应变分布和变形行为进行量化分析评估其承载

【作者简介】李亚蕾(1990-),女,中国江西赣州人,硕士,工程师,从事整车开发及特种车改装研究。

能力。

## 2.2 数值模拟技术与分析流程

在现代工程分析中，数值模拟技术已广泛应用于车身结构的强度与可靠性评估。有限元分析（Finite Element Analysis, FEA）是当前最常用的数值模拟工具，能够以高精度预测车身结构在不同载荷条件下的力学响应及变形行为。

### 2.2.1 数值模拟的基础原理

数值模拟基于数学模型和数值计算方法，将复杂的工程问题转化为离散化的求解过程。通过对车身几何模型划分网格，并结合材料属性和边界条件的设定，可求解得出车身内的应力、应变及位移分布。有限元法特别适用于分析复杂几何和多种载荷作用下的车身结构。

### 2.2.2 分析流程

为了确保数值模拟结果的准确性与适用性，需遵循以下分析流程：

①几何建模：利用CAD软件建立车身三维模型，简化不重要的细节，同时保留关键部件以提升计算效率。

②网格划分：对车身结构进行网格划分，细化关键受力区域（如连接节点、承载横梁等）的网格密度，通常采用四面体或六面体单元。

③材料属性定义：根据实际车身材料的机械性能指标（如弹性模量、杨氏模量等），输入材料参数以确保模拟的真实性。

④载荷与边界条件设定：模仿实际使用工况，施加静载荷、动态载荷、冲击载荷等典型工况，并设定边界约束条件。

通过以上数值建模与模拟流程，可快速、直观地发现车身结构的潜在问题，精确预测不同设计方案对于强度和可靠性的影响。

## 2.3 测试与实验分析

为了验证数值模拟的合理性及预测结果的可靠性，对重型工程救援车辆的车身结构开展物理测试与实验分析是不可或缺的阶段。测试与实验为车身结构强度评估提供了真实数据支持，同时可以发现数值模拟中未能充分体现的实际问题。

### 2.3.1 结构强度测试

通过静态和动态实验，对车身关键部件的强度和材料性能进行检测：

①静态载荷试验：施加单一或组合类型的静态力，测试车身的支撑能力及发生的应力集中区域。

②动态冲击测试：模拟极端条件（如碰撞或冲击载荷），观察车身在高强冲击下的变形特性及吸能性能。

③疲劳寿命试验：在标准载荷周期作用下，分析构件的裂纹生成及扩展规律，推算出疲劳寿命。

### 2.3.2 数据采集与分析

实验过程中结合力传感器、位移传感器及高频动态应变计等测量设备，即时采集车身结构的响应数据，并配合高

速摄影与数字图像处理技术直观捕捉关键部位的变形过程。

## 3 车身结构的强度分析与问题诊断

### 3.1 基于有限元模型的车身原始设计强度分析

在重型工程救援车辆的设计过程中，车身结构的强度直接影响整车的运行安全与使用寿命。为全面了解现有车身设计的强度表现，本研究通过有限元分析（Finite Element Analysis, FEA）方法对车身进行建模与模拟，建立了反映实际运行工况的计算模型。

首先，根据车辆的结构特点及工作要求，建立车身的有限元模型。模型开发过程中，充分考虑了车身主要构件的形状、尺寸、材料属性及连接方式，同时采用了一定的网格划分技巧，提高计算结果的精度与效率。载荷条件包括满载、空载、高温运行以及高强度震动等典型工作状态，通过对这些复杂工况进行模拟，分析车身结构在多种载荷和环境影响下的应力分布及变形情况。

经过模拟分析发现，车身在某些关键工况下的应力集中区域较为明显。例如，在高载荷运行时，车身侧梁和底盘连接处的应力显著高于周围区域，超过了材料的设计强度范围。此外，车辆在复杂振动环境下的动力学表现显示，焊接节点及连接螺栓易出现局部疲劳，应力波动剧烈。这些结果表明，现有车身设计虽能满足一般强度要求，但在某些极限工况下存在明显风险。

### 3.2 关键薄弱部位识别与问题诊断

在对车身设计的有限元强度分析基础上，进一步识别了车身结构中的薄弱部位，并系统诊断其问题原因及失效模式。具体分析内容如下。

#### 3.2.1 车身材料特性分析

通过对车身不同部位的材料强度、塑性及疲劳特性进行分析发现，部分车身薄板材料的抗疲劳性能较低，尤其在频繁震动环境下，边缘区域的微裂纹逐步扩大，成为潜在的早期失效点。

#### 3.2.2 连接部位的可靠性评估

焊接和螺栓连接是车身结构中应力集中最为突出的区域。有限元计算结果显示，车身底盘与纵梁的焊接部位在长时间振动工况下出现应变集中，局部材料开始塑性变形。此外，螺栓连接件在高温高载荷条件下易出现松动和滑移，对整体结构造成潜在的不良影响。

#### 3.2.3 支撑零部件的强度性能分析

支撑结构零件（如横梁、加强板）是车身传递和分布载荷的重要单元。在有限元分析中发现某些支撑零件刚度不足，在较大载荷作用下出现明显挠曲变形，从而影响整车的刚度与稳定性。同时，这些部件与车身的连接处容易产生疲劳裂纹，降低了结构整体的强度储备。

基于上述分析，将车身设计中的薄弱区域分为两大类：一类是材料问题导致的强度不足，例如某些非关键部位选材强度偏低或厚度设计不合理；另一类是结构设计问题造成的

应力集中过大,如焊接部位、支撑节点的应力分布不均。在对失效模式进行分类诊断后发现,大多数问题主要源于材料性能不足、设计强度冗余低以及焊接工艺的不完善。

最后,通过总结有限元分析结果与诊断结论可以看出,车身设计存在的主要问题显著影响了其使用寿命及安全性。因此,在后续改进设计工作中,需重点关注薄弱部位的材料优化、结构改良及加工工艺的提升,以确保车身结构能够满足重型工程救援车辆的特殊使用需求。

## 4 改进设计方案与优化措施

为了解决重型工程救援车辆车身结构在强度性能上的不足,并提升车辆在复杂救援任务中的可靠性与耐久性,本文基于前述强度分析与问题诊断结果,提出了针对性的改进设计思路与优化措施。以下分别从改进设计理念、具体改进内容及改进后的性能评估三个方面展开论述。

### 4.1 改进设计理念

重型工程救援车辆的主要设计目标是满足复杂工况下的高强度加载要求,因此,改进设计的核心是通过优化材料特性、改进车身结构以及合理分配载荷传递路径来提升车身强度与整体力学性能。在保证车辆原有功能与操作灵活性不受影响的前提下,通过引入轻量化设计理念,减少不必要的过载问题,从根本上提高车辆的使用寿命与抗疲劳性能。此外,改进设计还必须兼顾生产工艺的可行性与成本控制,以确保优化方案具有实际推广价值。

### 4.2 具体改进内容

#### 4.2.1 材料优化

车身材料的选用直接影响车辆的强度、刚度及疲劳性能。针对现有结构中材料强度不足、局部疲劳开裂的问题,改进方案建议采用以下措施:

①高强度钢替代传统钢材:对关键承载区域(如底盘车架与侧护板)使用屈服强度更高的合金钢,以显著提高其承载能力和抗冲击性能。

②复合材料的引入:在车身非承载部分(如盖板与装饰件)引入轻质复合材料(如碳纤维增强塑料),减轻整车重量的同时保持良好的刚度。

③表面涂层与热处理优化:对关键部位材料进行表面镀层处理与热处理工艺,提升抗腐蚀性疲劳寿命。

#### 4.2.2 结构优化设计

为了进一步提升车辆结构的稳定性与抗变形能力,采用拓扑优化技术对车身结构进行重新设计。具体改进如下:

①关键部分加固设计:通过有限元分析结果发现,车身底盘框架的应变集中区域为强度薄弱点,因此可加装高强度横梁以分散载荷集中效应。

②连接节点优化:针对焊接和螺栓连接部位的疲劳失效风险,改进连接工艺,采用柔性支撑设计以降低应力集中,并增加预紧力引导结构。

③结构质量分布调整:对车身质量分布重新优化,使

重心位置尽量靠近车辆纵向中心线,提升整车行驶的稳定性和抗倾覆能力。

### 4.2.3 动力传输与载荷分布优化

车辆动力传输系统与载荷分布的合理性对于保证其长时间运行的可靠性至关重要。改进方案包括:

①动力总成布置优化:将发动机和变速器优化布局以减少传动路径中的弯折和能量损失,提升传动效率并减少局部振动。

②悬架系统改良:增加主动悬架的可调节功能,根据不同工况调节悬架刚度以适应特殊路况,减少不规则载荷传递。

③载荷均匀分配设计:通过重新设计货斗和辅助支撑结构,提高车辆载荷分布的均匀性,避免局部超载引起的结构损伤。

## 4.3 改进后设计评估

为验证上述改进设计方案的有效性,采用数值仿真与实际工况载荷模拟对改进后的结构性能进行了全面评估,具体包括以下方面:

①强度性能验证:通过有限元分析对比改进前后的应力与变形分布,结果显示关键部位的应力峰值降低了约20%,显著提升了车身的抗疲劳性能。

②动力学性能验证:仿真分析表明,优化后的动力传输系统提高了传动效率,且降低了车辆运行中的振动幅度;悬架改进使车身在崎岖路面的动态平稳性提升了15%以上。

③耐久性验证:基于累计疲劳损伤模型对车辆进行使用寿命预测,改进后的车身寿命预计延长了25%。

通过以上几个方面的评估可以看出,优化设计方案有效提高了车辆的整体性能,满足了其在复杂救援场景中的使用需求,同时也具备较高的实用性与经济性。

## 5 结语

本文围绕重型工程救援车辆车身结构的强度分析及优化设计展开研究,结合理论分析、有限元仿真及实验验证,取得以下主要结论:通过车身结构的有限元分析,明确了现有结构在极端载荷条件下的应力分布特点和薄弱部位,为后续优化设计提供了关键依据;通过优化设计方案,包括材料选型优化、结构加强,以及关键连接部位的改进,显著提升了车身结构的综合性能;优化方案在高承载、高冲击环境下的表现较为优异,能够更好地满足重型工程救援车辆的实际工况需求。

### 参考文献

- [1] 郝新春.某重型载货车车架设计分析与轻量化研究[D].吉林大学,2014
- [2] 余高翔.基于拓扑优化和高强钢应用的雷达车车架轻量化设计研究[D].武汉理工大学,2010
- [3] 柏林.重型载货汽车车架有限元分析及拓扑优化[D].合肥工业大学,2010