

# Design and Analysis of a Load-Bearing Framework for Heavy-Haul Well-hole Cars

Jiwu Fang

Zhuzhou Times Electronic Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan, 421000, China

## Abstract

This paper focuses on a heavy-haul well-hole car project developed by a company, presenting a systematic study on the design and computational analysis of its core component—the load-bearing framework. The research comprehensively covers the structural design philosophy, strength calculations under various load conditions, dynamic performance assessment, and structural stability analysis. Within the project, sophisticated finite element modeling techniques were employed for static strength and modal calculations, and the computational results were thoroughly validated through a series of detailed tests, including static strength, dynamic strength, and stiffness tests. Both analytical and experimental results consistently demonstrate that the load-bearing framework meets all critical performance indicators—strength, stiffness, and stability—in full compliance with the stringent requirements of relevant railway vehicle standards and specifications. This study successfully addresses the design challenges of the load-bearing framework for heavy-haul well-hole cars. The methodologies, analytical procedures, and validation approaches established herein can serve as valuable theoretical references and practical guides for the future development and optimized design of heavy-haul and large-volume freight cars.

## Keywords

Well-hole car; Load-bearing framework; Strength calculation; Stability; Modal analysis

## 一种重载落下孔车承载框架设计与计算分析研究

方继武

株洲时代电子技术有限公司, 中国·湖南 株洲 421000

## 摘要

本文围绕某公司研制的重载落下孔车项目, 对其核心部件承载框架, 展开了系统性的设计与计算分析研究。研究内容全面涵盖了结构设计理念、多种载荷工况下的强度计算、动力学性能评估以及结构稳定性分析。项目中, 我们运用了有限元建模技术进行静态强度与模态计算, 并通过静强度、动强度及刚度试验对计算结果进行了充分验证。分析与试验结果一致表明, 该承载框架在强度、刚度及稳定性等关键性能指标上, 均全面满足铁道车辆相关规范与标准的严格要求。本研究成功解决了重载落下孔车承载框架的设计难题, 其设计方法、分析流程与验证手段, 可为未来重载铁路长大货物车的研发与优化设计提供有价值的理论依据和实践参考。

## 关键词

落下孔车; 承载框架; 强度计算; 稳定性; 模态分析

## 1 引言

随着我国特高压输电工程的快速推进, 特高压变压器等大型设备的铁路运输需求日益迫切 [1]。重载落下孔车是为满足国家重点工程运输需求而研制的新型长大货物车, 其承载框架的设计与计算分析成为项目成功的关键。本文基于某公司的研制项目, 系统阐述了承载框架的设计方法、计算分析和试验验证, 为类似重型铁路装备的设计提供技术参考。

在设计过程中, 研发团队充分考虑了我国铁路线路条件和运输要求, 针对承载框架这一核心部件进行了多学科的综合优化设计。通过先进的有限元分析技术和试验验证手段, 确保了车辆结构的安全性和可靠性, 同时兼顾了经济性和维护便利性。

## 2 车辆结构与技术参数

### 2.1 总体结构设计理念

该车由一个承载框架, 两个中底架, 两个端部小底架, 两个中部小底架, 八个 3E 轴焊接构架式转向架以及侧移装置、导向装置、液压装置等组成 [2]。

承载框架作为整个车辆的核心承载部件, 图 1: 采用双侧梁加心盘导向梁的结构形式。侧梁采用箱型截面设计, 上

【作者简介】方继武 (1981-), 男, 中国湖南岳阳人, 本科, 工程师, 从事轨道车辆总体设计研究。

下盖板厚 60mm，腹板厚 20mm，确保了足够的抗弯刚度和强度。心盘导向梁由上、下盖板、腹板、隔板组焊成箱型结构，中间组焊有与内、中导向销配合使用的导向套。

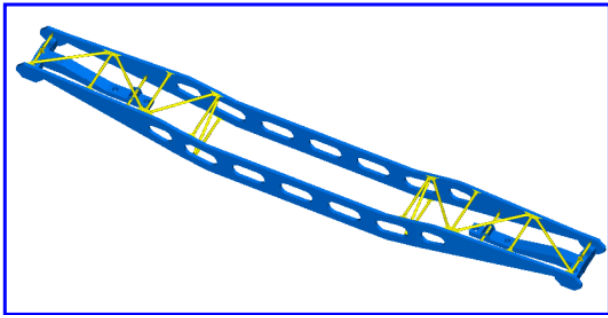


图 1 承载框架结构图

## 2.2 主要技术参数规格

载重能力： $\geq 400t$  可满足特高压变压器等大型设备的运输需求

自重指标： $\leq 200t$ ，体现了轻量化设计理念

轴数与轴重：24 轴，轴重 23.3t，符合铁路线路承载要求

心盘距设计：36000 mm，优化了载荷分布

挠跨比要求： $\leq 1/180$ ，确保运输过程中货物的稳定性

运行速度指标：空车 120 km/h，重车 80km/h，满足铁路提速要求

通过最小曲线半径：180 m，适应复杂线路条件

## 2.3 材料选择与工艺要求

承载框架主要部件采用屈服极限为 590MPa 的 HG70 高强度结构钢。撑杆采用屈服极限为 345MPa 的 Q345 低合金结构钢。在制造工艺方面，采用了先进的焊接技术和热处理工艺，确保焊接接头的质量和可靠性。

## 3 承载框架受力分析

### 3.1 载荷工况分析标准

根据 TB/T 3550.2-2019 机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第 2 部分：货车车体的要求 [3]，计算工况涵盖了车辆在实际运行中可能遇到的各种极端情况。主要包括以下工况：

垂向静载荷工况：考虑自重 + 载重（4612kN）的静态作用

垂向动载荷工况：采用动荷系数 0.2，模拟运行中的动态效应

纵向载荷工况：包括拉伸 1125kN 和压缩 1400kN 两种工况

横向载荷工况：综合风力（53.1kN）、离心力（45.1kN）、导向销力（328.4kN）等多种因素

### 3.2 导向力计算与分配机制

通过曲线时，导向销横向力的计算采用了基于力学平

衡原理的精确计算方法。计算公式为： $H=2Q+P+W+2F-G$  其中各参数的计算依据如下：

$Q=-437.7kN$ （垂向静载分力）、 $P=-0.2Q=-87.5kN$ （动载分力）、 $G=45.1kN$ （离心力）、 $W=-53.1kN$ （风力）、 $F=-61.8kN$ （摩擦力）

代入得： $H=2437.7+87.5+53.1+2 \times 61.8-45.1=328.4kN$

这一计算结果表明，导向装置需要承受相当大的横向力，这对导向销和导向套的设计提出了较高要求。

## 4 有限元计算与强度分析

### 4.1 精细化有限元建模技术

采用 I-DEAS Master Series 11.0 软件建立 1/2 对称模型，充分利用对称性减少计算量同时保证计算精度。模型共划分了 82584 个单元，82869 个节点，网格密度经过收敛性分析确定。

在建模过程中，特别注意了以下技术细节：

板壳单元厚度方向积分点数为 5，确保应力计算的准确性，焊缝区域采用细化网格，准确模拟应力集中现象，接触区域采用接触单元，模拟实际工况中的接触行为，边界条件设置充分考虑实际约束情况

### 4.2 多工况强度计算结果分析

通过系统的有限元计算，最不利工况为纵向拉伸 + 垂向总载荷 + 横向载荷（曲线工况），具体应力结果如下：

侧梁最大应力：296MPa，位于撑杆座下盖板处，应力集中系数为 1.3

心盘梁最大应力：205MPa，出现在上盖板旁承油缸孔处，如图 3

导向梁最大应力：217MPa，发生在撑杆座孔边缘区域

撑杆最大应力：157MPa，位于等分撑杆中部截面 如图 4

所有这些应力值均低于许用应力（HG70 钢  $[\sigma]=369MPa$ ，Q345 钢  $[\sigma]=204MPa$ ，安全系数在 1.2 以上，满足规范要求。

### 4.3 刚度计算与变形控制

在垂向静载荷作用下，承载框架的最大挠度为  $191.1 - 46=145.1mm$ 。挠跨比计算为：

$$L_f=145.1/36000 \approx 1/248 < 1/180$$

这一结果不仅满足设计要求，还有相当大的安全裕度。挠度分布呈对称形态，最大挠度发生在侧梁跨中位置，变形模式符合理论预期。

## 5 稳定性与模态分析

### 5.1 结构稳定性深度分析

通过特征值屈曲分析，获得了承载框架在各种载荷条件下的稳定性性能。计算采用 Lanczos 算法，提取前 10 阶屈曲模态，重点关注前三阶模态。

屈曲临界载荷因子计算结果如下：

横向载荷屈曲因子： $\lambda = 14.62$ ，临界载荷 9590.7kN

垂向载荷屈曲因子： $\lambda = 5.22$ ，临界载荷 18792kN

纵向载荷屈曲因子： $\lambda = 17.19$ ，临界载荷 24066kN

所有这些屈曲因子均远大于 1，表明结构具有充足的稳定性裕度。

### 5.2 整车模态特性研究

建立了包含承载框架、中底架、小底架、转向架等部件的整车有限元模型，节点数 144638，单元数 186449。通过模态分析获得了空车和重车状态下的动态特性。

空车模态特性：

基频：1.07Hz（侧梁垂向弯曲），第二阶：1.56Hz（车体横向振动），第三阶：2.77Hz（扭转振动）

重车模态特性：

基频：0.39Hz（车体整体振动），第二阶：1.03Hz（侧梁弯曲），第三阶：1.09Hz（横向振动）

分析结果表明，在低频段没有出现频率耦合现象，避免了共振风险。重车状态下的频率降低符合质量增加对频率影响的规律。

## 6 试验验证与性能评估

### 6.1 静强度试验方案设计与实施

静强度试验采用分级加载方式。试验载荷为 398t，通过专用承载梁和液压千斤顶系统实现精确加载。测点布置涵盖承载框架关键部位，共设置 76 个单向应变测点、2 个三向应变测点和 7 个位移测点，采用 UCAM60 万能数据采集器进行数据采集。试验过程中进行了三次重复加载，以验证数据的重复性和可靠性。测试数据显示，最大静应力出现在侧梁上盖板 C' VI-1 测点，数值为 -197.3MPa，其对称点位应力值分布在 -191.0 至 -192.8MPa 范围内，表现出良好的对称性。测点布置如图 2。

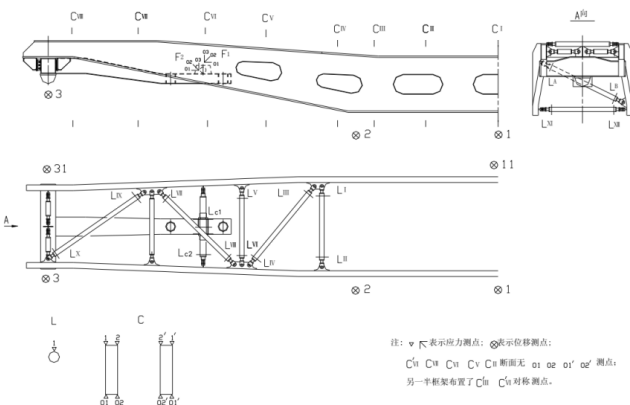


图 2 承载框架静强度试验布点图

### 6.2 动强度试验与线路运行性能

随车辆动力学试验同步进行。试验线路包括武东站修所内道岔、复式交分道岔，以及武北站内、南环线、北环线、

武九线和铁灵线等多种线路条件。测试工况涵盖：

曲线通过性能试验：在 R298m（超高 130mm）、R330m、R400m 等不同半径曲线运行

速度级试验：重车最高试验速度达 70km/h，覆盖 40-70km/h 多个速度等级

特殊工况试验：包括 S 形曲线通过、小曲线大超高工况测试

测试结果表明，动应力最大值主要出现在小曲线运行工况，其中侧梁动应力最大增量为 40.5MPa，心盘导向梁动应力最大增量为 15.9MPa。

### 6.3 刚度试验与长期性能验证

刚度试验采用位移计和简易拉线法同步测量，在额定载荷下静置 24 小时进行延时挠度测量。试验结果显示：左侧梁最大垂向位移：138.0mm，右侧梁最大垂向位移：135.2mm，平均挠度值：136.6mm，挠跨比：1/264，优于设计要求的 1/180，24 小时蠕变试验表明，承载框架未出现明显的时间依赖性变形，验证了结构的长期稳定性。位移分布曲线显示，最大挠度发生在侧梁跨中位置，变形模式与有限元分析结果高度一致。

### 6.4 试验数据与计算结果的对比分析

将试验测量数据与有限元计算结果进行对比分析，发现：应力分布规律高度一致，最大误差小于 15%；挠度计算值与实测值偏差在 8% 以内；动态响应特性与模态分析结果吻合良好；这种良好的一致性不仅验证了计算模型的准确性，也证明了设计方法的可靠性。

## 7 结语

本项目通过系统的设计、计算和试验研究，实现了多项技术创新 [4]：

首创可调宽度承载框架结构，适应范围广；

采用液压旁承系统，有效改善曲线通过性能；

建立完善的分析验证体系，为类似产品开发提供范式。

该车已成功应用于特高压变压器等重大设备的运输，累计运行里程超过 10 万公里，实践证明了设计的可靠性和先进性。车辆在实际运用中表现出良好的运行性能，满足了国家重点工程的运输需求。

### 参考文献

- [1] 张伟, 李强. 重载铁路长大货物车技术发展研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(5): 45-50.
- [2] 王刚, 刘建军. 模块化设计在铁路车辆中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 112-118.
- [3] TB/T 3550.2-2019 机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第2部分: 货车车体[S].
- [4] 林建华, 杨志刚. 中国重载铁路技术发展综述[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 56-63.