

# 城轨车辆转向架构架强度有限元分析与研究

董超

神铁二号线(天津)轨道交通运营有限公司 天津 300300

**摘要:** 转向架构架作为轨道车辆转向架的核心承载部件,其结构强度直接决定车辆运行的安全性与可靠性。以城轨车辆转向架构架为研究对象,采用有限元分析方法,建立构架精细化有限元模型,开展静强度、疲劳强度及自由模态分析。通过施加超常载荷与模拟运营载荷的多工况组合,计算构架在不同工况下的应力分布、位移变形,并采用第四强度理论与Goodman-Smith疲劳极限图分别评定静强度与疲劳强度,同时完成构架前四阶非刚体模态的提取与分析。结果表明:构架在所有超常载荷工况下,各部位等效应力均小于对应材料许用应力,静强度满足设计要求;模拟运营载荷下,构架焊缝、母材的应力点均位于疲劳极限图内,疲劳强度达标;构架前四阶模态频率避开轮轨激励主要频率范围,动力学特性良好。研究为城轨车辆转向架构架的工程化应用提供了理论依据,也为同类转向架构架的结构设计与强度校核提供参考。

**关键词:** 转向架构架;有限元分析;静强度;疲劳强度;模态分析

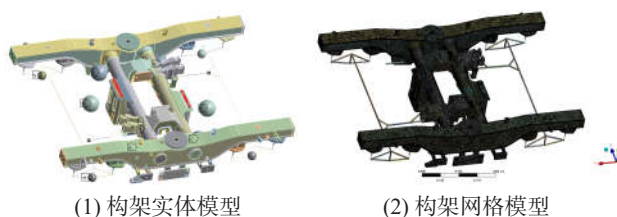
## 引言

转向架是轨道车辆走行核心部件,构架作为其骨架,承担传递载荷、部件安装定位等关键作用,运行中需承受多向静、动载荷及复杂工况考验。随着轨道车辆向高速、重载发展,对构架结构强度、刚度及疲劳性能要求更高,强度不足会威胁行车安全。城轨车辆转向架构架侧梁由板材焊接,横梁为圆管型材,安装座与主体焊接,兼具轻量化与承载性。为验证其设计合理性与可靠性,需开展结构强度计算分析<sup>[1]</sup>。有限元法作为高效数值分析方法,能精准模拟结构力学响应。基于此,建立城轨车辆转向架构架三维实体有限元模型,确定基本参数,设计多工况组合,完成边界与载荷设置,通过静强度、疲劳强度分析及自由模态分析,获取相关数据,验证设计方案可行性,为其生产运用提供理论保障。

## 1 构架有限元仿真模型的建立

### 1.1 有限元模型建立

转向架构架为焊接结构,是零部件安装基础,承受多种载荷。侧梁板材焊接,横梁圆管型材,各部件安装座与主体焊接可靠,结构布局合理,满足安装使用要求。采用实体建模法构建三维实体模型,简化不影响力学特性的结构后导入软件划分网格。主体结构用四面体10节点及六面体20节点三维体单元离散;轴箱体等用梁单元模拟;驱动系统以质量点通过梁单元连接;一系簧用弹簧单元模拟。最终模型节点1166337个,单元632311个,网格质量达标。计算模型采用车辆坐标系,整体与局部坐标系定义清晰,为后续操作提供基础,如图1所示。



(1) 构架实体模型

(2) 构架网格模型

图1 转向架构架有限元模型

### 1.2 载荷加载

转向架构架用于动车与拖车,车辆及转向架基本计算参数依设计要求和实际运用确定,含轴重、质量、轴距、弹簧刚度等关键指标。基于EN 13749标准,按参数、载荷性质与工况,将计算载荷分超常载荷与模拟运营载荷两类,前者模拟极端工况载荷用于静强度校核,后者模拟正常运营常规载荷用于疲劳强度校核。超常载荷计算工况考核构架极端载荷组合下静强度,设35种工况,涵盖单一垂向等多种极端工况载荷组合,模拟最不利受力状态<sup>[2]</sup>。模拟运营载荷计算工况考核构架正常运营载荷组合下疲劳强度,设33种工况,涵盖常规垂向等多种常规运营工况载荷组合,反映长期运营载荷循环特性。

### 1.3 边界条件加载

为保证有限元计算准确,依构架实际受力与约束状态制定边界条件与载荷施加规则:

车体垂向载荷以节点力作用于构架二系簧座处,模拟垂向载荷传递。

横向载荷依二系簧横向刚度及止档间隙分配,反映缓冲传递特性。

在模拟车轮节点施加三向固定及绕轴转动约束,模拟车轮与轨道接触约束。

模拟轨道扭曲工况，在对角线一系弹簧处施加10%（超常）或5%（模拟运营）垂向位移约束。

模拟车轮100%减载工况，在一对角车轮一系弹簧处不施约束。

模拟转向架菱形工况，纵向力直接施加在车轮处。

模拟起吊工况，在起吊座中心区域施加固定约束。

所有载荷依计算结果以节点力等形式施加于模型相应位置，与实际受力状态高度一致，确保计算真实可靠。

## 2 静强度计算分析

静强度是构架结构强度基本要求，考核其在超常载荷工况下抗变形与抗破坏能力。针对35种模拟超常载荷工况，用第四强度理论（Von Mises 强度理论）评定构架

静强度，计算等效应力分布、最大应力值及位置，与材料许用应力对比验证是否满足设计要求。等效应力的计算公式为：

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]} \leq [\sigma]$$

式中： $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 分别为第一、第二、第三主应力； $[\sigma]$ 为许用应力， $[\sigma] = \sigma_s/n$ ， $\sigma_s$ 为材料屈服强度。焊缝在静强度各工况下的许用应力为 $0.9\sigma_s$ 。通过有限元软件完成35种工况静强度计算，提取最大等效应力、位置、应力类型，计算应力利用率与安全系数。结果均显示构架各部位等效应力小于对应材料许用应力（母材355MPa，焊缝311MPa），静强度达标<sup>[3]</sup>。最大应力主要分布在侧梁一系簧座焊缝等多处，典型工况计算结果见表1。

表1 转向架构架典型超常载荷工况静强度计算结果表

| 工况             | 最大应力位置     | 母材/焊缝 | 最大应力/MPa | 利用率  | 安全系数 | 结论 |
|----------------|------------|-------|----------|------|------|----|
| 1.纯垂向          | 侧梁一系簧座焊缝处  | 焊缝311 | 93.6     | 0.30 | 3.32 | 满足 |
| 2.垂向+正向横向      | 横向止挡安装座筋板处 | 母材355 | 204.6    | 0.57 | 1.73 | 满足 |
| 9.垂向+反向横向+轨道扭曲 | 横向止挡安装座筋板处 | 母材    | 229.77   | 0.64 | 1.54 | 满足 |
| 12.紧急制动        | 侧梁制动座焊缝处   | 焊缝    | 128.51   | 0.41 | 2.42 | 满足 |
| 21.电机振动        | 电机安装座焊缝处   | 焊缝    | 240.34   | 0.77 | 1.29 | 满足 |
| 28.过充限位        | 侧梁过充钢索座处   | 母材    | 265.08   | 0.74 | 1.33 | 满足 |
| 33.齿轮箱防脱       | 防脱座连接处     | 母材    | 278.64   | 0.78 | 1.27 | 满足 |
| 34.转向架起吊       | 起吊座圆孔处     | 母材    | 137.35   | 0.38 | 2.58 | 满足 |
| 35.整车起吊        | 空簧过充钢索座圆孔处 | 母材    | 232.69   | 0.65 | 1.52 | 满足 |

从各工况计算结果来看，构架在纯垂向载荷、车轮失载等工况下的应力水平较低，应力利用率均在0.4以下，安全系数较高；而在齿轮箱防脱（工况33）、轨道扭曲+横向载荷（工况6-9）等工况下，构架的应力水平相对较高，为构架静强度的关键薄弱部位。

各工况下构架的位移变形均在合理范围内，无明显过大变形，表明构架在超常载荷下具备良好的刚度特性，能够抵抗极端载荷引起的变形，满足结构刚度要求。通过应力云图分析可知，构架的应力集中主要出现在焊接接头、安装座筋板、圆孔边缘等部位，此类部位因结构形式变化易产生应力集中，在生产制造过程中需重点关注。

## 3 疲劳强度计算分析

轨道车辆转向架构架长期运营中，疲劳破坏是主要失效形式之一，日常受循环载荷，易在应力集中处产生裂纹影响安全。针对33种模拟运营载荷工况，采用疲劳极限设计方法，基于Goodman-Smith疲劳极限图评定构架疲劳强度，校核焊缝与母材，计算利用率，明确薄弱部位，验证抗疲劳能力。

Goodman-Smith疲劳极限图是常用评定方法，通过确

定循环载荷下最大主应力 $\sigma_{max}$ 与最小主应力 $\sigma_{min}$ ，计算应力均值 $\sigma_m$ 与应力幅值 $\sigma_a$ ，绘制于图中，应力点在图内则疲劳强度满足要求。确定 $\sigma_{max}$ 与 $\sigma_{min}$ 步骤：确定构架各工况下最大拉伸主应力 $\sigma_{max}$ 及方向；将其他主应力向其投影得等效应力 $\sigma_e$ ，确定 $\sigma_{min}$ ；计算 $\sigma_m$ 与 $\sigma_a$ 。

本次评定采用ERRI B12/RP 17的钢材疲劳极限图，针对Q355NE钢材。构架疲劳问题集中在焊缝，因焊接应力集中等致疲劳强度下降，统一用高缺口应力区焊缝的Goodman曲线（a2曲线）评价。分析覆盖所有焊缝及母材区域，确保考核全面。

通过有限元软件提取33种工况下构架节点主应力及方向余弦，联合有限元与数值计算，完成相关计算，绘制焊缝、Q355母材的Goodman疲劳极限图（图2、图3），计算疲劳强度利用率。

构架主要结构母材Q355模拟运营工况Goodman疲劳极限图和疲劳强度利用率位置图如图6所示。

33种工况下，焊缝、Q355母材所有节点应力点均在图内，各部位利用率 $\leq 0.97$ ，满足设计与标准要求；焊缝利用率整体高于母材，一系簧座等焊缝个别节点接近

0.97, 是关键薄弱部位; Q355母材利用率  $\leq 0.63$ , 安全储备充足。

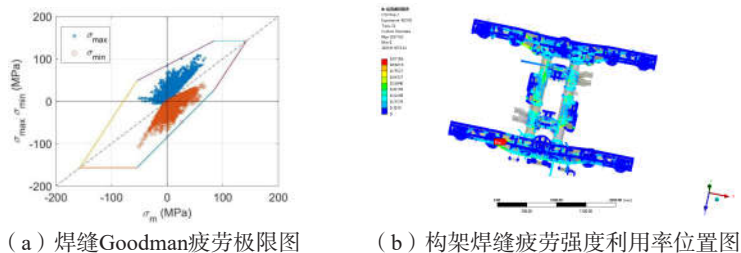


图2 焊缝疲劳强度计算结果

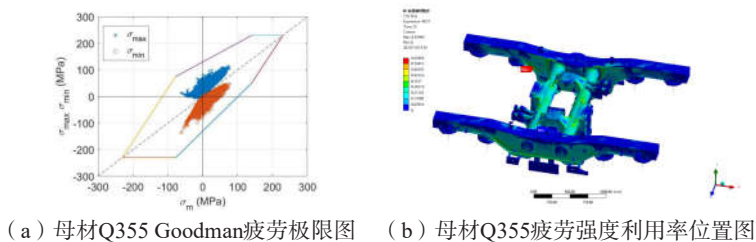


图3 母材Q355疲劳强度计算结果

#### 4 模态分析

模态分析是研究结构动力学特性的关键方法, 可提取构架固有频率与振型, 明确其动力学特性, 判断是否与轮轨激励、车体振动等共振, 为构架动力学优化及车辆整体分析提供基础数据。

对转向架构架开展自由模态分析, 不考虑外界约束与载荷, 基于有限元自由模态分析模块, 用子空间迭代法提取前四阶非刚体模态固有频率与振型。自由模态边界条件为无约束, 模拟自由振动特性, 排除刚体位移模态, 确保结果反映固有振动特性<sup>[4]</sup>。

通过分析提取前四阶非刚体模态固有频率与振型, 结果如表2、图7所示。前四阶非刚体模态固有频率在24.952Hz - 64.047Hz之间, 各阶振型特征明确, 分别反映构架抗扭、横向弯曲、整体抗变形、垂向弯曲刚度。

轨道车辆轮轨激励主要频率范围一般在0 - 20Hz<sup>[13]</sup>, 构架第一阶固有频率高于此范围, 能有效避开轮轨激励共振, 避免过大振动与应力; 各阶模态振型无明显局部共振, 整体振动特性良好, 动力学刚度满足设计要求。

表2 转向架构架前四阶非刚体模态分析结果表

| 模态阶数 | 振动频率/Hz | 模态振型   | 振型特征                          |
|------|---------|--------|-------------------------------|
| 1    | 24.952  | 侧梁垂向扭转 | 构架两侧梁绕纵向轴发生反向垂向扭转, 为构架的主要低阶振型 |
| 2    | 47.397  | 侧梁横向弯曲 | 构架两侧梁沿横向发生反向弯曲变形, 横向刚度为主要控制因素 |
| 3    | 52.352  | 侧梁菱形变形 | 构架整体发生菱形变形, 横梁与侧梁连接部位产生扭转变形   |
| 4    | 64.047  | 侧梁垂向弯曲 | 构架两侧梁沿垂向发生同向弯曲变形, 垂向刚度为主要控制因素 |

结语: 以转向架构架为研究对象, 依据国内外标准, 运用有限元分析方法开展系统静强度、疲劳强度与模态分析, 通过建立精细化模型、设计多工况载荷组合、制定科学评定方法, 全面校核了构架结构强度与动力学特性。静强度上, 35种模拟超常载荷工况下, 构架各部位Von Mises等效应力小于许用应力, 应力利用率  $\leq 1.0$ , 安全系数  $\geq 1.0$ , 位移变形合理, 刚度良好, 应力集中于多处焊缝部位, 电机短路工况下齿轮箱吊杆安装座焊缝为最不利部位; 疲劳强度方面, 33种模拟运营载荷工况下, 构架焊缝、Q355母材所有应力点均在Goodman疲劳极限图内, 疲劳强度利用率  $\leq 0.97$ , 焊缝为考核重点, 部分节点为关键薄弱部位, Q355母材安全储备充足; 模态分析显示, 构架前四阶非刚体模态频率为24.952Hz~64.047Hz, 振型明确, 能有效避开共振, 动力学特性良好。综上, 该构架结构设计方案合理, 具备工程化应用条件。

#### 参考文献

[1] 邹晓龙, 杨广雪, 张波, 等. 高速动车组转向架构架动应力特征研究 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (8): 212-221.

[2] 李雨晗. 基于模态频率设计的地铁车辆转向架支架振动疲劳研究 [J]. 机车车辆工艺, 2025, (3): 39-42.

[3] 刘玉佩, 盛嘉兴, 庄娇娇, 等. 高速变轨距转向架结构优化及动力学性能分析与预测 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2024, 54 (2): 453-462.

[4] 郑志伟, 任尊松, 王帆. 轮径差耦合下电机弹性架悬转向架横向稳定性影响研究 [J]. 振动与冲击, 2025, 44 (11): 111-118.