

# 重载铁路机车的车体设计

程学锋

国能朔黄铁路发展有限责任公司 北京 100080

**摘要:** 重载铁路机车车体设计至关重要。本文介绍底架、整体、混合承载式车体结构类型与特点, 阐述关键部件设计要点, 分析车体受力并优化, 探讨车体与转向架接口、与钩缓系统协同设计。通过多种方法提升车体性能, 满足重载运输需求, 保障运输安全可靠, 为相关设计与优化提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 重载铁路机车; 车体结构; 关键部件设计; 受力分析; 协同设计

引言: 重载铁路运输对机车车体设计提出高要求。车体需承受复杂载荷, 确保运输安全稳定。不同结构类型车体各有特点, 关键部件设计影响整体性能。车体受力分析与优化及与相关系统协同设计, 是提升车体性能关键, 对重载铁路发展意义重大。

## 1 车体结构类型与特点

### 1.1 底架承载式车体

底架承载式车体设计将所有载荷集中于底架结构, 车顶与侧墙仅需满足自身功能所需的强度与刚度要求。这种结构形式通过简化受力路径, 使底架成为主要承载单元, 车体其他部分无需承担复杂载荷<sup>[1]</sup>。制造过程中, 底架可采用高强度钢材整体焊接成型, 工艺成熟度高且质量控制稳定。模块化设计理念在此类车体中应用广泛, 底架、侧墙、车顶等部件可独立预制后组装, 显著提升生产效率。部件标准化程度高, 不同车型间可共享通用模块, 降低研发成本与维护难度。该结构在维修环节优势明显, 局部损坏时仅需更换对应模块, 无需整体拆解, 缩短停机时间。由于车体自重相对较大, 此类设计多应用于对轻量化要求不苛刻的场景, 如中短途货运机车或调车机车。在纵向载荷传递方面, 底架通过牵引梁与缓冲装置直接连接, 形成清晰的力传导路径, 确保重载工况下结构稳定性。

### 1.2 整体承载式车体

整体承载式车体采用司机室、车顶、侧墙与底架一体化组焊工艺, 形成封闭式受力框架。侧墙与底架共同构成主要承载结构, 通过优化筋板布局与截面形状, 实现载荷的均匀分布。这种设计显著提升车体抗扭刚度, 尤其适应重载机车频繁启停、曲线通过等复杂工况。纵向力传递路径得到优化, 车钩作用力经牵引梁分散至侧墙与底架, 避免局部应力集中。车体整体性增强后, 可承受更大垂向载荷, 满足重载列车轴重提升需求。制造环节需采用高精度焊接设备与工艺控制, 确保各部件连

接处的力学性能一致性。该结构在重载货运机车领域应用广泛, 其高强度特性为轴重增加提供结构保障, 通过拓扑优化减轻局部冗余质量。垂向与纵向刚度匹配设计使车体在动态载荷下保持良好稳定性, 减少车体与转向架间的耦合振动。

### 1.3 混合承载式车体

混合承载式车体结合底架承载式与整体承载式的优势, 通过结构分区设计实现载荷的差异化分配。其核心特征在于: 车体端部采用整体承载结构, 通过司机室、侧墙与底架的刚性连接形成高强度框架, 以应对钩缓系统传递的纵向冲击载荷; 中部区域则采用底架承载式设计, 侧墙仅承担自身重量与气动载荷, 通过轻量化设计降低整车自重。这种结构在纵向载荷传递路径上, 牵引梁与缓冲装置的连接区域采用箱型截面加厚设计, 确保重载工况下结构稳定性; 横向载荷通过侧墙与底架的柔性连接实现分散, 避免局部应力集中。制造工艺方面, 端部框架采用高精度组焊技术, 中部底架延续模块化预制模式, 兼顾生产效率与质量控制。混合承载式设计尤其适用于轴重30吨以上的重载货运机车, 既满足大轴重对车体强度的要求, 又通过结构分区优化降低自重, 提升运输效率。动态特性分析显示, 该结构在垂向弯曲刚度与扭转刚度匹配上表现优异, 能有效抑制车体与转向架间的耦合振动, 提升运行平稳性。

## 2 车体关键部件设计

### 2.1 底架设计

底架作为车体主要承载结构, 其设计需兼顾强度、刚度与轻量化需求。纵向梁系采用变截面设计, 牵引梁前端通过高强度钢板焊接成箱型结构, 后端与枕梁过渡区域设置加强筋板, 确保车钩作用力传递路径的连续性。侧梁采用双腹板桁架式结构, 通过局部加厚与斜撑布置提升抗扭刚度。枕梁作为转向架支撑关键部位, 采用多层板叠合焊接工艺, 在满足垂向承载要求的同时,

通过优化腹板间距控制横向刚度。针对重载工况，底架局部区域增设辅助梁，形成多梁协同受力体系。强度计算环节需覆盖牵引、制动、曲线通过等典型工况，重点校核牵引梁与枕梁连接焊缝、侧梁与底架过渡区的应力水平。刚度优化通过拓扑分析实现，在保证结构完整性的前提下，对非关键区域进行材料减薄处理。动态特性分析需验证底架一阶垂向弯曲频率与转向架点头频率的错频设计，避免运行过程中产生共振现象。

## 2.2 侧墙设计

侧墙结构形式选择需与车体承载类型匹配。整体承载式车体多采用板梁复合结构，侧墙外板与竖向筋板组焊成箱型截面，通过纵向通长筋与底架侧梁形成框架受力体系，纵向通长筋数量可设置为10根。压型件式侧墙则通过冷弯成型工艺制造波浪形板件，利用波形褶皱提升结构刚度，适用于对自重敏感的轻量化设计，波形褶皱高度可设置为20毫米<sup>[2]</sup>。连接设计方面，侧墙与底架采用高强度螺栓连接与焊接混合形式，关键受力区域设置定位销实现精准对中，定位销数量可设置为4个。纵向力传递通过侧墙竖筋与底架侧梁的连续焊接实现，侧向力则由侧墙外板与车顶边梁的角焊缝承担，角焊缝长度可设置为500毫米。针对重载机车，侧墙下部增设抗剪切连接板，提升车体与转向架间的纵向刚度匹配度，抗剪切连接板数量可设置为2块。

## 2.3 司机室设计

安全性设计遵循碰撞能量吸收原则，前端设置三级吸能结构，第一级采用可溃缩式铝合金吸能管，第二级布置蜂窝铝缓冲块，第三级通过司机室骨架塑性变形吸收剩余能量，可溃缩式铝合金吸能管数量可设置为2根，蜂窝铝缓冲块数量可设置为4块。结构耐撞性验证需满足特定速度下的冲击力-位移曲线要求，特定速度可设置为30千米/小时。舒适性设计从人机工程学出发，操纵台采用可调式布局，仪表显示区域与控制按钮按操作频率分区布置，操作频率分区可划分为高频区、中频区和低频区。视野优化通过增大前窗玻璃倾角与侧窗面积实现，前窗玻璃采用夹层安全玻璃并设置电加热除霜功能，前窗玻璃倾角可设置为60度，侧窗面积可设置为2平方米。隔音设计采用双层隔板结构，中间填充多孔吸声材料，关键连接部位设置弹性密封条，多孔吸声材料厚度可设置为50毫米，弹性密封条数量可设置为10条。通风系统集成空调装置与自然通风口，通过气流组织仿真优化送风均匀性，确保作业环境温度湿度控制在适宜范围，适宜温度范围可设置为20-25摄氏度，适宜湿度范围可设置为40%-60%。

## 2.4 车体与转向架接口设计

车体与转向架的接口设计是确保重载机车动力学性能的关键环节。接口设计需从载荷传递、运动协调与振动隔离三方面综合考量。载荷传递方面，转向架的垂向动载荷通过枕梁传递至车体底架，横向摇摆力由侧墙与底架的连接结构承担，纵向牵引力则通过牵引梁与车钩缓冲装置直接传递。为优化载荷分布，枕梁采用多层板叠合焊接工艺，通过调整腹板间距控制横向刚度，避免转向架横向力引发的车体扭曲变形；牵引梁与枕梁的过渡区域设置渐变截面，并增设加强筋板，确保纵向力传递路径的连续性。运动协调设计需兼顾车体与转向架的相对运动自由度，采用拉杆式定位装置限制横向位移，同时允许垂向与纵向的弹性变形，避免运动干涉。振动隔离方面，一系悬挂与二系悬挂的刚度参数需与车体垂向弯曲频率错频设计，防止共振现象；关键连接部位采用橡胶堆或液压减振器，通过阻尼特性衰减振动能量。接口设计的可靠性需通过多工况疲劳试验验证，重点关注焊缝、螺栓连接等应力集中部位的疲劳寿命，确保在循环载荷作用下结构完整性。

## 3 车体受力分析与优化

### 3.1 受力分析方法

有限元分析技术为车体结构评估提供精确的数值模拟手段。通过建立包含几何细节与材料特性的三维模型，可模拟牵引、制动、曲线通过及空气动力学等典型工况下的载荷分布。分析过程需考虑车体自重、设备载荷、货物重量及动态附加力的叠加效应，重点校核牵引梁与枕梁连接区域、侧墙与底架过渡段等应力集中部位的强度裕度。变形分析则关注车体垂向弯曲刚度与扭转刚度是否满足运营要求，确保车体在满载工况下的最大垂向变形量控制在允许范围内。多物理场耦合分析突破单一力学边界条件限制，将热膨胀、振动疲劳等影响因素纳入评估体系。热-力耦合分析需考虑制动系统散热、环境温度变化对结构材料性能的影响，通过定义温度场与应力场的双向交互作用，预测车体在极端温差条件下的变形协调性。流-固耦合分析则针对高速运行时的空气动力学载荷，评估侧墙外板在气动压力作用下的动态响应，为车体外形气动优化提供依据。振动特性分析通过模态叠加法计算车体固有频率，避免与转向架振动频率产生共振现象。

### 3.2 结构优化设计

拓扑优化以材料分布最优化为目标，通过变密度法或水平集法迭代计算，在满足强度刚度约束条件下，生成具有最佳承载效率的结构拓扑。该方法可识别非关

键传力路径上的冗余材料,为底架、侧墙等大型部件的轻量化设计提供理论支撑。优化结果需结合制造工艺可行性进行后处理,确保提出的结构形式可通过焊接、铸造等常规工艺实现。形状优化聚焦关键部件的几何参数调整,通过参数化建模技术对筋板厚度、圆角半径、过渡斜率等特征进行灵敏度分析。针对应力集中区域,采用变半径圆角过渡或局部加厚处理,使应力分布趋于均匀。形状优化需与疲劳寿命评估相结合,确保修改后的结构在循环载荷作用下仍能满足设计寿命要求。优化后的部件需重新进行多工况力学验证,形成“分析-优化-验证”的闭环设计流程。

### 3.3 多目标协同优化方法

多目标协同优化方法通过统筹强度、刚度、轻量化与疲劳寿命等多维度性能指标,实现车体结构的全局最优设计。该方法以参数化建模为基础,将车体关键几何特征(如筋板厚度、圆角半径、截面形状)与材料属性(如弹性模量、密度)定义为设计变量,以强度裕度、刚度比、质量、疲劳寿命等为优化目标,构建多目标函数。优化过程中采用加权系数法或帕累托前沿分析,平衡各目标间的冲突关系。例如,在轻量化与强度约束下,通过拓扑优化识别底架中的冗余材料区域,结合形状优化调整局部几何参数,实现结构减重与强度提升的协同;在刚度与疲劳寿命协同优化中,通过调整侧墙筋板布局与截面形状,既提升抗扭刚度,又降低应力集中水平,延长结构疲劳寿命。多目标优化需与多学科仿真紧密结合,通过有限元分析验证结构在牵引、制动、曲线通过等典型工况下的力学性能,通过多物理场耦合分析评估热-力、流-固耦合效应对结构可靠性的影响。优化结果需经过制造工艺可行性校验,确保提出的结构形式可通过现有焊接、铸造工艺实现,避免因工艺限制导致设计失效。最终形成“设计-分析-优化-验证”的闭环迭代流程,推动重载机车车体设计向高性能、高可靠性方向发展。

## 4 车体与钩缓系统的协同设计

### 4.1 钩缓系统的作用与要求

钩缓系统作为列车纵向力传递的核心部件,其性能直接决定重载运输的安全性与可靠性。该系统需同时满足拉伸、压缩及冲击载荷的传递需求,在列车启动、制

动及调车作业过程中,通过车钩缓冲装置吸收能量、衰减振动,避免纵向冲动对车体结构造成损伤<sup>[1]</sup>。重载运输场景下,钩缓装置需具备更高的能量吸收能力,以应对大轴重列车频繁启停产生的巨大纵向力。车体设计阶段需充分考虑钩缓系统的力学特性,确保车体端部结构强度与钩缓装置的额定载荷相匹配,避免因局部强度不足引发结构失效。

### 4.2 协同设计要点

车体强度匹配需从载荷传递路径出发,针对钩缓装置产生的纵向力,优化车体端部牵引梁与枕梁的连接结构。牵引梁前端需采用箱型截面设计,通过增加腹板厚度与加强筋数量提升抗拉压能力。枕梁与底架的过渡区域应设置渐变截面,避免应力集中现象。动态载荷分析需覆盖紧急制动、低速连挂等极端工况,确保车体在最大纵向力作用下的应力水平低于材料许用值。空间布局协调需兼顾功能性与可维护性。车体端部需预留足够的安装空间,确保钩缓装置各部件的装配精度与操作便利性。车钩中心线高度应与车辆匹配,避免连挂时产生附加弯矩。连接接口设计需采用标准化结构,通过高强度螺栓或焊接工艺实现可靠连接。针对重载机车,可在车体端部增设辅助支撑结构,分散钩缓装置传递的局部载荷。电气连接与气路接口的布置需考虑检修便捷性,通过模块化设计缩短故障排查时间。协同设计过程需通过多学科仿真验证,确保车体与钩缓系统在动力学性能、疲劳寿命等方面达到最优匹配状态。

### 结束语

重载铁路机车车体设计是复杂系统工程,需综合考虑多方面因素。通过合理选择结构类型、优化关键部件设计、精准受力分析与优化以及与钩缓系统协同设计,可提升车体性能,满足重载运输需求。持续探索创新设计方法,对推动重载铁路技术发展具有重要意义。

### 参考文献

- [1]何宇强,胡坤镜.新型智能重载电力机车车体设计[J].电力机车与城轨车辆,2025,48(4):39-43.
- [2]杨富,王文静,曾祥莉,等.新型30t轴重重载敞车车体关键技术研究[J].铁道车辆,2025,63(3):159-166,203.
- [3]于雷,姜恒.铁路煤炭漏斗车大载重及智能化技术研究[J].智慧轨道交通,2025,62(4):17-21.