

# 基于 SIMP 法的钢铝混合车架轻量化设计

## Lightweight design of steel and aluminum hybrid frame based on SIMP method

赵冉阳<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>

Zhao Ranyang<sup>1</sup>, Li Gang<sup>1</sup>

1. 大连理工大学 工程力学系, 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁大连, 116024

**摘要:** 面向典型狭长结构重型牵引车边梁式车架, 本文考虑制造约束, 提出了一种基于 SIMP 法的多材料结构拓扑优化方法, 简化了多材料连续体拓扑优化难制造加工的问题。本文通过对车架纵梁分割, 并对车架不同区域赋予钢或铝材料属性, 以质量分数为约束、结构应变能最小为目标, 开展钢铝混合车架轻量化设计。研究结果表明, 虑制造约束的钢、铝混合轻量化车架, 相比原钢质车架总质量降低 27.1%, 材料成本为原车加的 1.44 倍, 扭转工况最大位移降低了 12.76%, 有效满足设计需求。

**关键词:** 牵引车车架, 制造约束, 钢铝材料结合, 拓扑优化, 轻量化

### 0 引言

在“双碳”目标与汽车产业轻量化技术升级的背景下, 钢铝混合车架因其在减重、成本与性能之间的平衡优势, 成为商用车领域的研究热点。轻量化有利于满足法规要求, 也可使轴荷更好地合理分配, 在不增重的前提下提高舒适性。<sup>[1]</sup>保证强度和刚度的轻量化车架结构可大幅提升整车品质, 减轻牵引车整备质量并提高载质量利用系数, 因此牵引车车架的轻量化设计具有重要意义。<sup>[2]</sup>

在车架轻量化方面, Gawande 等<sup>[3]</sup>通过建立刚度方程, 选择具有确定扭转刚度和所需质量约束的横梁截面, 提高了车架横梁的应变能吸收能力从而提高车架的扭转刚度; MA 等<sup>[4]</sup>基于单材料拓扑优化中材料分布, 提出了一种三段式桁架结构客车底盘框架; LI 等<sup>[5]</sup>对割草机车架弯曲和扭转两种工况开展了拓扑优化, 并在此基础上开展了尺寸优化; 马超等<sup>[6]</sup>针对骨架式车身提出一种以材料类型、梁的截面形状和尺寸为离散设计变量的结构优化方法, 综合考虑了制造成本和结构性能因素; 张凯成等<sup>[7]</sup>采用自适应响应面法对典型工况下某商用车车架同时进行尺寸和材料的优化; 叶盛等<sup>[8]</sup>以某国产 SUV 车架为研究对象, 利用正交试验法确定零部件替换为铝合金, 采用折衷规划法开展多目标形貌优化。

针对多材料连续体拓扑优化难制造加工的问题, 本文提出了一种以质量为约束的多材料拓扑优化方法。以某重型牵引车车架为研究对象, 考虑制造约束将车架纵梁分段并分配一种材料, 运用 Abaqus CAE 有限元分析软件构建车架有限元模型, 以结构总质量为约束、车架应变能最小为目标, 基于 SIMP 法开展典型工况下的车架拓扑优化, 以达到钢铝混合牵引车车架轻量化的设计需求。

### 1 车架有限元模型刚度及频率分析

#### 1.1 车架三维模型

本文分析的某重型牵引车边梁式车架主要由两根纵梁、纵梁上下加强件、四根横梁和连接件等组成, 主结构件为薄壁件其余为铸件。该车架实际尺寸长宽高约为 8×1×0.5 米, 为典型狭长结构。车架纵梁为前宽后窄式 C 型梁, 为适应其他结构装配横梁为变截面 C 型梁,

同时为保证结构强度及横梁安装，每根横梁有 4 个横梁连接件。车架模型中主要有车架结构和附件连接件两部分结构，附件连接件如牵引座等与车架结构通过螺栓连接，车架三维模型如图 1 所示。车架材料采用《GB/T3077—2015》中的 42CrMo 调质处理钢材，其弹性模量为 210GPa，泊松比为 0.3，密度为  $7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，屈服强度为 930MPa，抗拉强度 1080MPa。

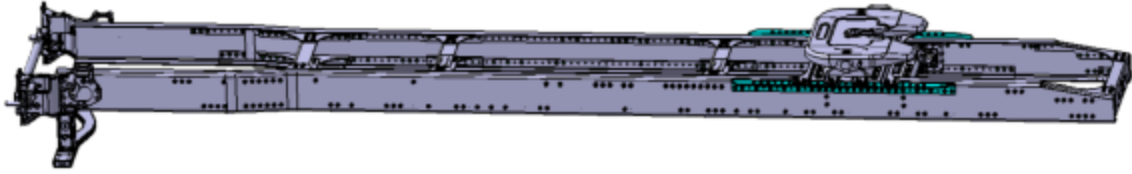


图 1 车架三维模型

### 1.2 车架有限元模型建立

将重型牵引车车架的导入 Abaqus CAE 有限元分析软件中，有限元模型的质量很大程度影响计算精度和计算时间，因此对车架模型进行前处理。前处理去除重型牵引车车架三维模型中半径  $< 5 \text{mm}$  的倒角、直径  $< 10 \text{mm}$  的螺栓孔等非承载特征以保证划分网格时的质量，并对薄壁构件抽取中面。相较三维实体单元，以二维壳单元划分网格可在保证模型精度的同时大幅降低网格数量、缩短计算时间。由于本文设计域为车架主结构件，通过建立刚体结构并赋予惯性点替代车架铸件避免划分复杂实体单元，保留与车架主结构相同接触形状确保有限元模型的正确性。依照驾驶室、电池、冷却系统等附件与车架结构的固定方式，在车架纵梁上划分对应固定区域并耦合质心点，确保仿真分析时附件对车架结构的作用力。本文不考虑螺栓连接、螺栓失效和焊接问题，因此将车架各零件通过绑定约束连接以提高计算效率，有限元模型如图 2 所示。通过有限元模型计算，车架模型总质量为 757.5kg，薄壁结构质量为 543kg，有限元模型共含有 193819 个 S4R 单元，203464 个节点。

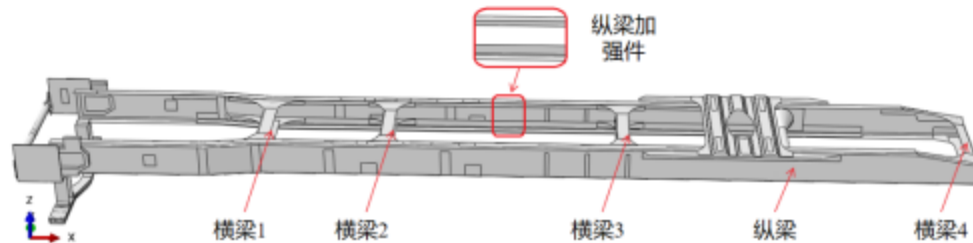


图 2 车架有限元模型

### 1.3 车架模态分析

车架模态分析是车辆结构设计中的核心环节，通过研究车架在自由状态下的振动模态特性，验证其在动态载荷下的安全性、舒适性和可靠性指标。为避免共振风险，需确保车架固有频率避开动力系统工作频率、路面激励等外部激励源的频率区间，规避因共振引发的结构疲劳失效或乘员不适问题。

本文聚焦于新能源动力重型牵引车的研究，其系统工作频率主要分布在 30Hz 以下，而高频激励则集中于 120Hz 以上。车辆在正常行驶过程中，路面激励频率与行驶车速紧密相关。在高速公路及城市优质路面条件下，路面传递至车架的激励频率通常处于 3Hz 以下。由表一可知，该车架的前六阶固有频率避开了动力系统工作频率及路面激励频率区间，满足了动态设计要求。

表一 原车架前六阶固有频率 (Hz)

| 阶数 | 自由模态   |
|----|--------|
| 1  | 45.631 |

|   |        |
|---|--------|
| 2 | 45.934 |
| 3 | 61.545 |
| 4 | 77.892 |
| 5 | 78.601 |
| 6 | 90.077 |

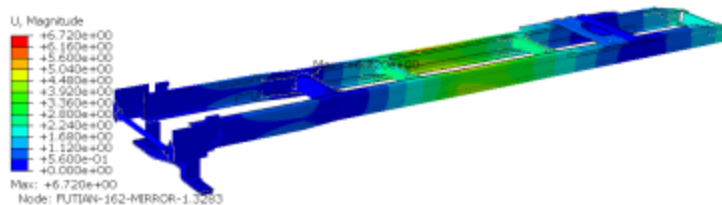
#### 1.4 车架静刚度分析

车辆在行驶过程中，车架作为核心受力部件不允许出现结构断裂或塑性变形以及表面损坏等状况，因此为满足车架刚度要求，需要对车架进行静态分析。车架的受力主要来自整体结构自重、附件质量及车辆工作时产生的力，这些载荷通过安装支架等作用于车架。牵引车在实际行驶过程中的工况复杂多变，本文仅针对弯曲、扭转、转向和制动 4 种典型工况进行分析，参见表二。

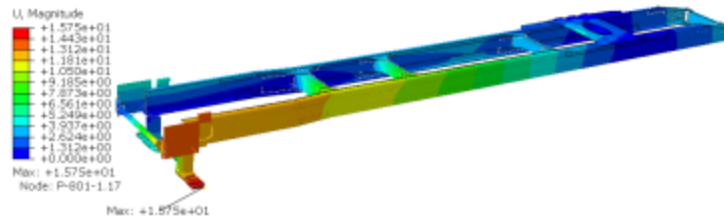
表二 典型工况下加载及约束形式

| 工况   | 加载及约束示意图 |
|------|----------|
| 弯曲工况 |          |
| 扭转工况 |          |
| 转向工况 |          |
| 制动工况 |          |

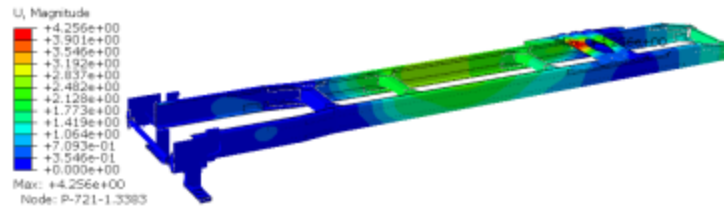
在对新能源重型牵引车车架性能进行研究时，四种典型工况模拟能有效反映其实际受力状态。弯曲工况下，模拟牵引车满载运行场景，车架主要因弯曲应力而产生弯曲变形；扭转工况则针对越障时左前轮受冲击的状况，模拟车架在非平面支撑条件下承受扭转变形的过程；转向工况聚焦于牵引车满载紧急转向时刻，展现离心力引发侧向载荷的情形；制动工况模拟满载行驶中紧急制动时惯性载荷对车架的影响。这四种工况均充分考量挂车对车架产生的弯矩效应，通过在牵引点正上方 600mm 处设置参考点，并施加 160000N 的作用力进行计算。经计算，各工况的位移云图如图 3 所示，各工况下最大位移作为后续优化对比基础。



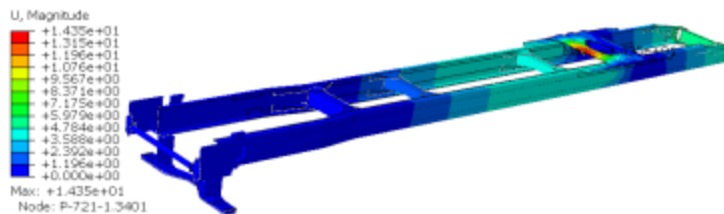
(a)弯曲工况位移云图



(b) 扭转工况位移云图



(c) 转向工况位移云图



(d) 制动工况位移云图

图 3 各工况下位移云图

## 2 钢铝混合车架结构优化

为满足车架轻量化需求,在保证结构力学性能前提下,采用钢铝两种材料开展多材料车架优化。多材料连续体结构拓扑优化中一直存在材料边界难以确定、多材料结构难加工的问题,本部分针对车架典型狭长结构,考虑车架的制造约束对车架纵梁分段,通过 Abaqus CAE 有限元分析软件基于 SIMP 方法对钢铝混合车架开展以质量分数为约束、结构应变能最小为目标的多材料车架拓扑优化。

### 2.1 多材料拓扑优化体化方法

变密度法基于各向同性材料,以连续变量取值为 [0, 1] 的密度函数形式显式地表达单元相对密度与材料弹性模量之间的对应关系,无需引入微结构和附加的均匀化过程。传统的 SIMP 法往往寻找给定体积分数下的最大刚度,即以体分比为约束、结构柔度最小化(刚度最大化)为目标,建立的拓扑优化数学表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find: } \mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \\ \text{min: } C(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \left( E_{\min} + x_i^p (E_0 + E_{\min}) \right) \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i \mathbf{u}_i \\ \text{s.t.: } \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \\ \sum_{i=1}^n x_i v_i - V^* \leq 0 \\ 0 \leq x_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{array} \right. \quad (1)$$

式中  $n$  为离散后的单元总数;  $x_i$  为设计变量,表示离散后的每个单元的密度值;  $\mathbf{u}_i$  为单元位移向量;  $v_i$  为单元初始体积;  $V$  为结构总体积约束。

高彤等<sup>[9]</sup>在多相材料优化过程中以质量作为约束条件进行了研究,结果可以获得较体积

约束更优的结构布局方案要求，因此本文以质量质量分数作为约束。本文所研究多材料拓扑优化方法，提前对每块区域设置材料使得结构由多相材料组成，基于 SIMP 法对结构开展以整体应变能最小为目标的结构拓扑优化，优化列式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find: } \mathbf{X} = [x_{11}, \dots, x_{1n}, x_{21}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{mn}]^T \\ \text{min: } c(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (E_{\min} + x_{ji}^p (E_j - E_{\min})) \mathbf{u}_{ji}^T \mathbf{k}_{ji} \mathbf{u}_{ji} \\ \text{s.t.: } \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \\ \sum_{j=1}^m M_j - M^* \leq 0 \\ x_{ji} \geq x_{\min} \quad 1(i=1,2,\dots,n) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中  $x_{ji}$  为第  $j$  个区域中第  $i$  个单元的相对密度值； $\mathbf{u}_{ji}$  为单元位移向量； $\mathbf{k}_{ji}$  为单元刚度矩阵； $E_j$  为第  $j$  个区域对应材料的弹性模量； $M_j$  为第  $j$  个区域的质量； $M^*$  为总质量约束。

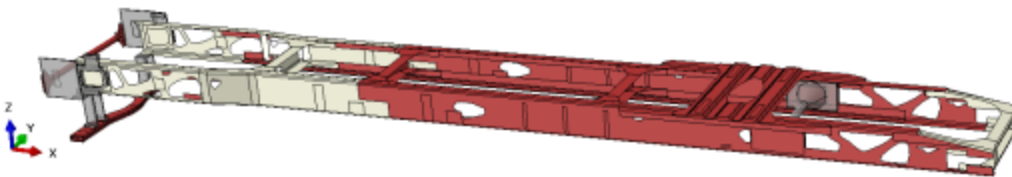
## 2.2 钢铝混合车架拓扑优化

基于上述钢制车架有限元模型，设置 4 个边界控制点形成三条边界分割线将纵梁划分为 2 段，第二条边界分割线位于纵梁  $z$  向高度的一半。考虑到实际生产中的制造约束，将三条分割线处于横梁 2 与纵梁连接区域，以保证各块纵梁的连接，初始钢铝混合车架结构如图 4 (a) 所示。车架主要载荷为挂车通过牵引座传递的各向载荷和弯矩，为保证承载能力，分割后的第 2 段纵梁和横梁 2、横梁 3 依旧采用高强钢材料，对分割后的第 1 块纵梁、横梁 1 和横梁 4 采用 T6 态 7075 铝。材料参数如下：弹性模量 71GPa，泊松比 0.3，密度  $2.81 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，屈服强度 540MPa，抗拉强度 460MPa。

由于车架所处工况较多，通过将四种典型静力工况线性加权开展钢铝混合车架多材料拓扑优化设计，以固有频率验证车架是否满足设计要求。车架弯曲刚度和扭转刚度是车架设计中的重要指标，开展优化设计时将弯曲工况、扭转工况、转向工况和制动工况的应变能按 2:2:1:1 的比例线性加权。牵引车车架为对称结构，确定车架横纵梁腹板为拓扑优化设计域并施加关于  $x$ - $z$  平面的对称，以质量分数为约束条件，单元密度为变量，四种典型工况下的应变能之和最小为目标，开展车架结构拓扑优化，优化后的拓扑构型如图 4 (b) 所示。图中红色区域为高强钢材料，灰白色为 7075 铝，透明零部件为刚体。



(a) 钢铝混合车架初始材料分布

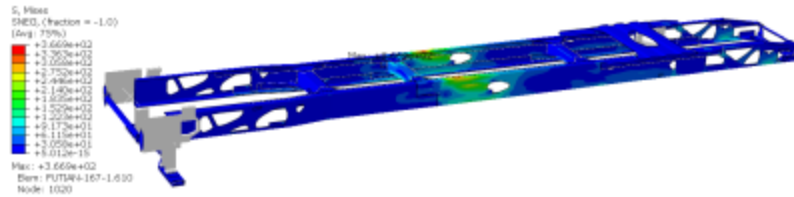


(b) 钢铝混合车架最终拓扑构型

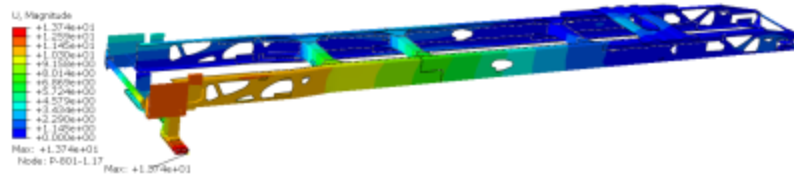
图 4 钢铝混合车架结构图

提取钢铝混合车架最终构型，开展模态分析和四种典型工况下的静刚度分析。结果表明，优化后的车架质量为 396Kg，相比原钢制车架质量降低 27.1%，材料总成本在可接受范围内增加 44%。钢铝混合车架的一阶频率为 39.702Hz，虽有所下降但避开了外部激励源的频率区间。

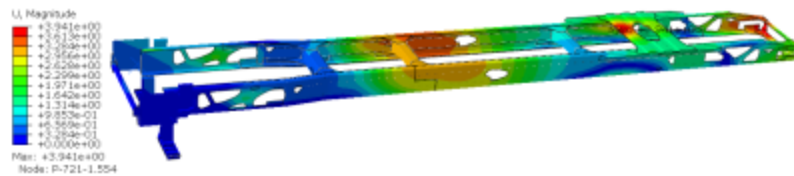
弯曲工况下车架最大位移值为 6.94mm，较原钢制车架增加 0.22mm，增长幅度可以接受。同时，扭转工况和制动工况的最大位移值均降低了 2mm 左右，转向工况下最大位移降低 7.4%，在这三种典型工况下车架刚度有所提升。钢铝混合车架典型工况下位移云图如图 5 所示，与原钢制车架的性能对比如表三。



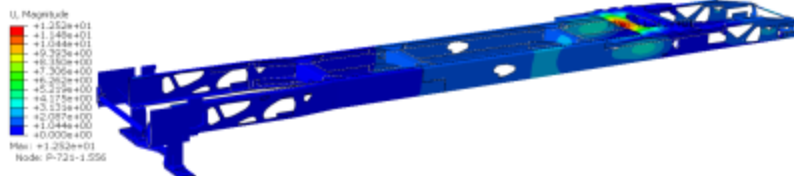
(a)弯曲工况位移云图



(b)扭转工况位移云图



(c)转向工况位移云图



(d)制动工况位移云图

图 5 钢铝混合车架各工况下位移云图

表三 车架性能对比

|         | 原车架    | 钢铝车架   | 变化量     |
|---------|--------|--------|---------|
| 质量/kg   | 543    | 396    | -27.1%  |
| 材料成本    | 1      | 1.44   | +44%    |
| 一阶频率/Hz | 45.631 | 39.702 | -12.99% |
| 弯曲工况/mm | 6.72   | 6.94   | +3.27%  |
| 扭转工况/mm | 15.75  | 13.74  | -12.76% |
| 转向工况/mm | 4.256  | 3.941  | -7.4%   |
| 制动工况/mm | 14.35  | 12.52  | -12.75% |

### 3 结论

本研究通过 Abaqus CAE 有限元分析软件，首先对钢制牵引车车架进行了模态分析和典型工况下的静刚度分析，并将该结果作为后续钢铝混合车架性能对比参考。针对狭长结构牵引

车车架,通过考虑制造约束对车架纵梁划分并分配钢铝材料,基于 SIMP 法开展以质量为约束、结构应变能最小为目标的多材料拓扑优化,有效简化了车架结构中多材料边界难以确定的问题。该方法下获得的钢铝混合车架,相比原钢制车架在可控成本内有效降低了车架质量,同时车架扭转刚度也有大幅提升,很好地适应商用车的复杂工况,满足了多材料牵引车车架轻量化的设计需求。

本研究的多材料拓扑优化方法,通过理论与工程实践结合,不仅提供了钢铝混合牵引车车架的解决方案,同样可以应用于狭长结构的多材料结构优化设计,为边梁式车架的轻量化和结构优化设计提供了技术方案。

#### 参考文献

- [1] 马鸣图,王国栋,王登峰等编著.汽车轻量化导论.化学工业出版社.2020
- [2] 赵紫纯.车架结构轻量化设计研究中北大学.2013.
- [3] Gawande S H,Muley A A,Yerrawar R N.Optimization of Torsional Stiffness for Heavy Commercial Vehicle Chassis Frame[J].Automotive Innovation.2018,1(4):352-361.
- [4] Ma C,Lan F.Application of Comprehensive Optimizat-ion into Bus Structure Lightweight Improvement in 3-Section Chassis Frame[A].Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress[C].2013.
- [5] Li S,Xu K,Wang J.The Light Weight Design of Mo-wing Vehicle Frame with a Combined Method[J].Mo-d-rrn Mechanical Engineering.2018,08:192-203.
- [6] 马超,高云凯,刘哲,等.骨架式车身多材料及梁截面形状和尺寸优化[J].吉林大学学报(工学版).2021,51(05):1583-1592.
- [7] .张凯成,李舜韶,孙明杰.钢铝材料结合的商用车车架多工况轻量化优化设计[J].中国机械工程.2020,31(18):2206-2211.
- [8] 叶盛,辛勇,李长银.基于正交试验-形貌优化法的钢铝复合车架设计[J].机械科学与技术.2014,33(10):1555-1561.
- [9] 高彤,张卫红, Pierre Duysinx. 多相材料结构拓扑优化:体积约束还是质量约束? 力学学报[J]. 2011,43(02):296-305.

第一作者简介:赵冉阳,男,1999年02月生,河南省扶沟县人,大连理工大学力学与航空航天学院工程力学系车辆工程专业硕士在读研究生,研究方向为车辆力学与工程。通讯方式:辽宁省大连市大连理工大学工程力学系,邮箱:1447459134@qq.com 联系电话 13009446864。

赵冉阳，男，1999年02月生，河南省扶沟县人，大连理工大学力学与航空航天学院工程力学系车辆工程专业硕士在读研究生。硕士研究生期间，作为核心人员参与多个汽车研发密切相关的项目，涵盖整车结构轻量化、结构强度与耐久等方面，在系统建模、仿真分析和优化设计工作领域有丰富的实践经验。