乘用车全铝车架结构性能开发与轻量化设计

张逸飞 卢闯 廖扬扬 纪传鹏 邓容容 张风利

（比亚迪汽车工业有限公司，深圳 518118）

摘要：为提高某车型全铝车架的碰撞性能与轻量化水平，基于多学科性能目标，采用功能导向与材料匹配的设计策略，分区域开发实现性能与轻量化之间的平衡。结构设计阶段采用基于变密度法的拓扑优化方式，覆盖吸能件和铸件关键区域，解决性能冲突及最优架构设计难题。轻量化设计阶段采用基于参数化模型的料厚优化方法，实现各区域材料厚度的最优分布。在满足强度、耐久性、噪声、振动与声振粗糙度（NVH）性能及碰撞安全性能要求的前提下，全铝车架质量减轻16.7%，质量占整车质量比例为7.5%，经系列试验验证，各项性能均满足开发目标要求。

关键词：全铝车架 轻量化 拓扑优化 料厚优化

中图分类号：U465.2+2；U463.32 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260254

Structure Performance Development and Optimization Design of All-Aluminum Frame

Zhang Yifei, Lu Chuang, Liao Yangyang, Ji Chuanpeng, Deng Rongrong, Zhang Fengli

(BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118)

Abstract: To enhance both the crashworthiness and lightweight design of an all-aluminium frame, a multidisciplinary, performance-oriented development strategy was formulated. The methodology integrates functional zoning with material matching, enabling a region-specific development process that achieves an optimal trade-off between structural performance and mass efficiency. During the structural design phase, a topology optimisation approach based on the variable density method is implemented, with particular attention paid to energy-absorbing components and critical cast regions. This facilitated the resolution of conflicting performance requirements and the establishment of an optimal structural architecture. In the subsequent lightweight design phase, a parametric thickness optimisation technique is adopted to determine the most favourable distribution of material gauge across all functional zones. Under the precondition of satisfying requirements for strength, durability, Noise, Vibration and Harshness (NVH), as well as crash safety, the mass of the all-aluminium frame was reduced by 16.7%, corresponding to 7.5% of the total vehicle mass. The final design was subsequently validated through a comprehensive series of physical tests, and all performance indicators were confirmed to meet the predefined development targets.

Key words: All-aluminum frame, Lightweight, Topology optimization, Material thickness optimization

1 前言

随着全球能源危机日益严峻和环保理念不断深入，汽车工业正加快向轻量化、电动化与智能化方向转型。研究表明[1-2]，整车质量每减轻10%，能耗可降低6.3%，行驶里程提升8%。车架作为非承载式车身的主要承载部件，在汽车行驶过程中传递主要载荷，对整车操控稳定性具有显著影响[3]。由于车架质量通常占整车质量的10%左右，其轻量化水平已成为整车开发的重要技术指标。

近年来，车架轻量化研究日益增多，主要聚焦于材料革新与结构优化2个方向。材料革新方面，

作者简介：张逸飞（1998—），男，硕士学位，研究方向为汽车结构强度耐久及轻量化。

参考文献引用格式：

张逸飞，卢闯，廖扬扬，等. 乘用车全铝车架结构性能开发与轻量化设计[J]. 汽车工艺与材料，2026(10)：1-11.

ZHANG Y F, LU C, LIAO Y Y, et al. Structure Performance Development and Optimization Design of All-Aluminum Frame[J]. Automobile Technology & Material, 2026(10): 1-11.

铝合金凭借其高比强度、优异的耐腐蚀性及良好的加工性能，逐渐成为轻量化设计的重要选择[4]。然而，铝材在物理特性上与钢材存在显著差异，其材料强度和刚度低于钢材，车架碰撞变形模式与能量吸收效率也明显区别于钢制车架，因此，在设计过程中需要通过材料分配和结构优化来弥补这一不足。在结构优化方面，概念设计阶段采用拓扑优化方法，详细设计阶段采用参数优化设计方法，在保证车架结构性能的前提下，大幅减轻结构质量，从而实现性能和轻量化设计之间的平衡。

针对车架的优化，国内外学者开展了一系列研究。在拓扑优化方面，丁明亮等[5]通过对公交车车架上的零部件进行敏感性分析，选取合适的零件作为优化对象，对车架进行拓扑优化设计。Zhao等[6]提出多种静态工况和动态工况下的悬置支架多目标拓扑优化流程，对静力加载条件下的动力总成悬置支架进行多目标多刚度拓扑优化设计。在参数优化方面，王登峰等[7]以型材厚度作为设计变量，采用尺寸优化法对客车车架进行轻量化设计。Wang等[8]将车架质量、最大扭转应力和一阶固有频率作为目标函数，采用非支配排序遗传算法Ⅱ（Non-dominate Sorting Genetic Algorithm Ⅱ，NSGA-Ⅱ）对车架进行多目标优化实现轻量化设计。但现有研究多聚焦于整体的性能指标优化，缺乏合理化分区协同考量和精细的轻量化设计。同时，现有设计方法多依赖于经验判断与试错迭代，系统性和科学性有待提升。

本研究旨在通过架构分区与结构特征优化，突破全铝车架性能集成与轻量化设计的技术瓶颈。首先，基于钢铝材料差异，提出铝大梁式车架性能开发难点及结构优化路线；随后，基于性能分区策略，采用变密度插值的折衷规划法对结构进行拓扑优化设计；最后，针对不同成型工艺，提出特征变量映射法，采取代理模型对结构进行参数优化设计，并开展系列试验验证。

2 开发难点及技术方案

2.1 全铝车架工艺及材质

车架作为非承载式车身的核心承载结构，其设计直接影响车辆的碰撞安全、结构强度耐久及噪声、振动与声振粗糙度（Noise、Vibration、Harshness，NVH）性能。为实现轻量化与性能协同优化，全铝车架需根据区域功能差异，合理匹配材料与成形工艺。

针对车架中对刚度、强度要求较高的区域，采用铸造铝合金，该材料具备良好的流动性、可热处理性及较高的强度，便于实现不等厚与复杂空腔设计，有利于提高轻量化水平与结构集成度，适用于主要承载部位。然而，由于其延伸率较低（3%~5%），吸能效果有限，不适用于高冲击能量吸收区域。

在前纵梁、中纵梁等需实现可控溃缩与高效吸能的碰撞关键区采用挤压成形铝合金型材，该材料抗拉强度达310 MPa，延伸率可达10%，兼具高强度与良好的塑性，可通过塑性变形有效吸收碰撞能量。

因此，本文采用“功能导向、材料匹配”的设计策略，实现结构性能与被动安全性能的协同优化。全铝车架材料分布方案如图1所示。

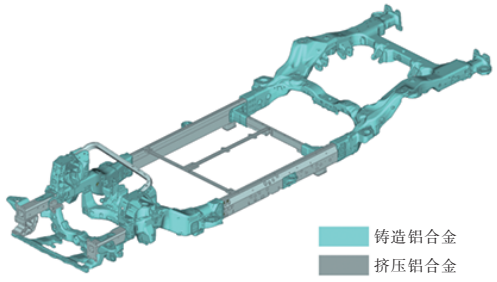


图1 全铝车架结构材料示意

2.2 全铝车架开发难点

全铝车架结构性能及轻量化开发难点如下：

a. 材料性能较低：铝合金虽密度低（约为钢材的34%），具备显著轻量化优势，但其抗拉强度、屈服强度和延伸率均低于钢材，参数对比如表1所示。

表1 铝合金和钢的材料特性对比

参数	铸铝合金	挤压铝合金	钢B750L
密度/t·mm^{-3}	2.7×10^{-9}	2.7×10^{-9}	7.89×10^{-9}
弹性模量/MPa	70 000	70 000	210 000
屈服强度/MPa	227	260	700
抗拉强度/MPa	275	310	750
延伸率/%	3~5	10	12

全铝材料的应用提高了车架开发难度，需结合铸铝与挤压铝的工艺和性能特点，通过拓扑优化、截面设计及局部料厚优化等方法，实现刚度、强度与轻量化的平衡。

b.结构特性约束:铸铝延伸率低,难以通过塑性变形实现传统钢制结构的吸能机制。以S段纵梁为例,其根部在碰撞中需避免脆性断裂以保障力的稳定传递和乘员舱的完整性,设计策略和钢制结构存在本质差异,如图2所示。

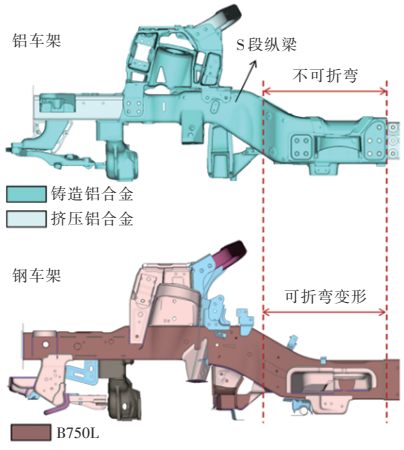


图2　钢车架和铝车架碰撞策略对比

为此,在前段采用挤压铝型材作为主吸能结构,并在S段设置弱化区域以诱导溃缩。然而,该区域同时承担救援牵引载荷,存在吸能需求与结构强度之间的矛盾:弱化过度易导致牵引断裂,强化过度则抑制吸能。如图3所示,如何在保证牵引安全性的前提下实现高效可控吸能,是安全与轻量化协同设计的关键问题。

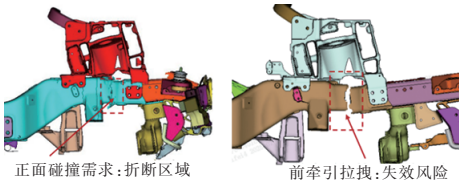


图3　S段纵梁强度与碰撞性能冲突示意

c.铸铝结构轻量化设计:空心铸铝结构可实现非均匀、非对称壁厚分布,成形自由度高,但传统料厚参数优化方法难以适用,无法发挥其优势。而经验驱动的试错设计效率低、周期长、易陷入局部最优解。因此,如何在保证性能的前提下精准减轻质量,是实现极致轻量化的关键难点。

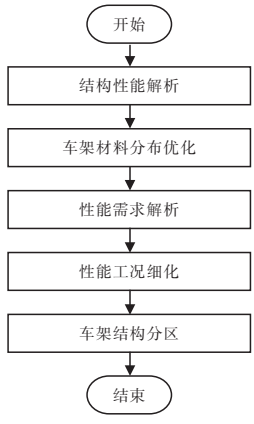
2.3　全铝车架开发技术路线

为解决上述问题,本文采用多学科优化方法开展全铝车架结构设计,以实现性能与轻量化的平衡,技术路线如图4所示。

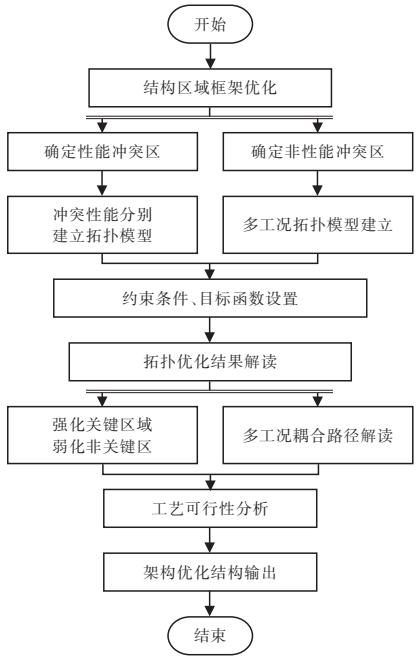
a.基于整车性能目标及实际受力工况对全铝车架进行功能分区,明确各区域性能需求,识别潜在性能冲突区域,为差异化设计提供依据。

b.对不同区域开展架构优化。对存在性能冲突的关键区域,分析多工况下载荷传递路径与失效模式,识别关键设计参数,采用拓扑优化寻求兼顾多性能的平衡方案;对非性能冲突区域,通过拓扑优化强化高效传力路径,在满足刚度与强度要求的前提下使材料利用率最大化,提高结构轻量化水平。

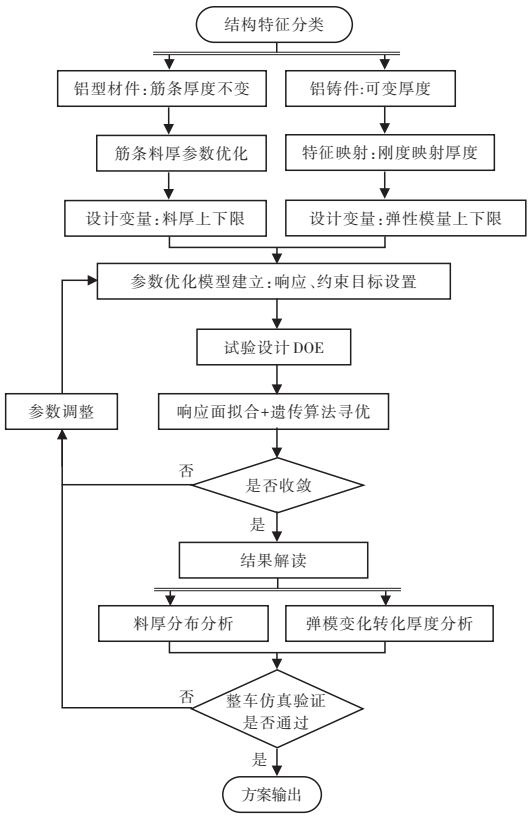
c.在确定结构后进行料厚精准匹配。对料厚均匀的铝挤出型材,直接将其料厚作为设计变量进行尺寸优化;对于结构复杂、壁厚非均匀的铝铸件,则采用“刚度等效映射”策略,先以等效刚度为变量进行参数优化,再通过力学等效关系将优化结果转化为可实现的非均匀料厚分布,提升轻量化潜力并确保结构性能。



(a)开发策略



(b)结构性能开发



(c)轻量化设计

图 4　全铝车架开发及轻量化技术路线

3　基于拓扑优化的结构性能开发设计

3.1　车架分区优化策略

将车架按功能分为 5 个区域，如图 5 所示。区域 1 为关键性能冲突区，如 2.2 节所述，需兼顾碰撞吸能与结构刚度和强度，性能要求对立；其他区域性能需求明确且无冲突，分别基于主导功能采用拓扑优化方法进行轻量化设计。

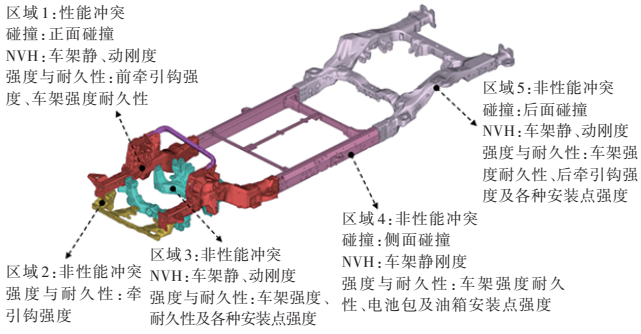


图 5　车架结构分区示意

3.2　性能冲突区域结构设计

性能冲突区域结构设计以 S 段纵梁为例，需同时满足正面碰撞吸能、结构强度和刚度要求，如图 6 所示。

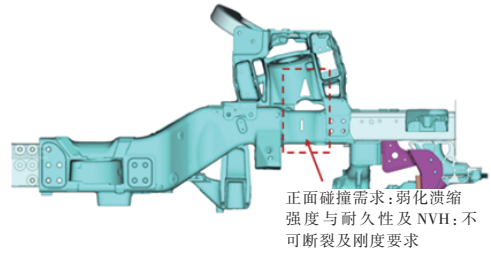
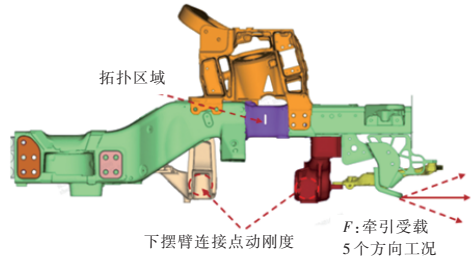
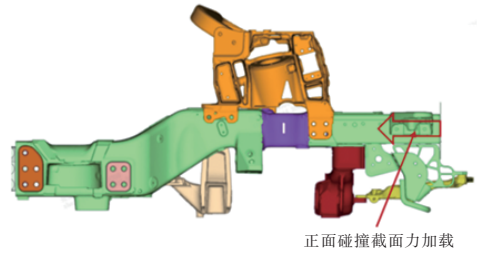


图 6　车架前段性能冲突

针对 S 段纵梁性能冲突区域，建立包含牵引钩、安装点动刚度和正面碰撞的多工况拓扑优化分析，如图 7 所示。



(a)接附点动刚度及牵引救援工况



(b)正面碰撞工况

图 7　各性能分析工况定义

关键拓扑区域为减振塔座下部铸铝部分，采用四面体单元局部填充并进行拓扑优化，如图 8 所示。

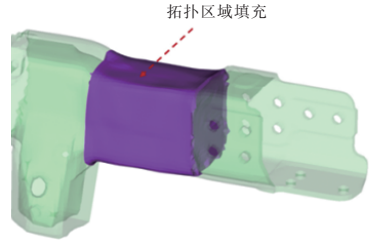


图 8　拓扑区域填充

优化后需满足安装点动刚度要求，且牵引工况下应力不超仿真标准。通过多目标权衡实现性能平衡，建立拓扑优化数学模型如下：

$$\begin{cases} \min\ \{\ M(x)\ \} \\ \text{s.t} \begin{cases} d_x \geqslant d_{x0} \\ d_y \geqslant d_{y0} \\ d_z \geqslant d_{z0} \\ \sigma_{\max} \leqslant 275\ \text{MPa} \end{cases} \end{cases} \tag{1}$$

式中:M为结构质量;x为拓扑区域的密度变量;d_x、d_y、d_z分别为下摆臂安装点x、y、z 3个方向的动刚度;d_{x0}、d_{y0}、d_{z0}分别为安装点x、y、z 3个方向动刚度目标值;σ_{max}为5个牵引救援工况下的最大主应力,约束小于材料的抗拉强度。

最大约束违反百分比是优化过程中衡量当前设计方案满足约束条件程度的指标,数值越接近0,表明设计越满足约束要求。图9给出了目标函数随迭代步数的历程曲线,可以看出,在迭代的第21步收敛。图10所示为最大约束违反百分比迭代历史,收敛误差设置为1×10^{-4}。

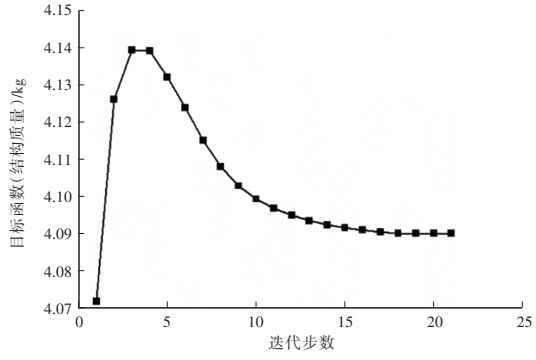


图9　目标函数迭代历史

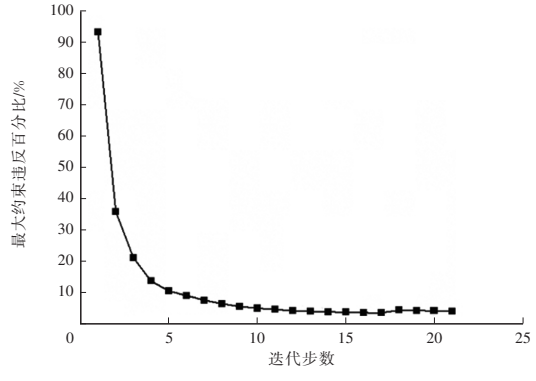
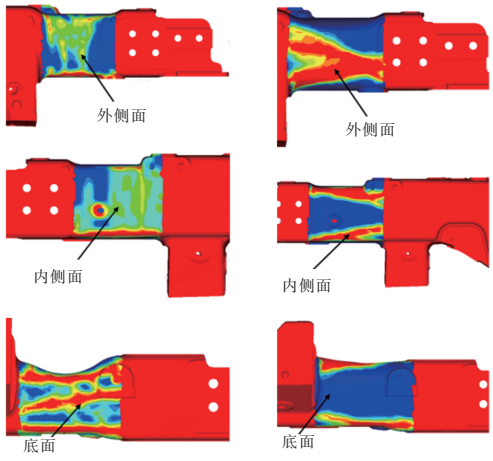


图10　最大约束违反百分比迭代历史

采用变密度插值法[9-10]进行拓扑优化,拓扑结果如图11所示。红色区域表示材料密度高,蓝色表示密度低。结果显示,牵引工况主要依赖底面传力,而正面碰撞工况则更依赖侧面和拐角处传力。

根据拓扑优化结果,将S段侧面设计为弱化区,在左、右侧壁开设弱化孔,以实现正面碰撞时按预定路径断裂,同时保证牵引钩强度,如图12所示。仿真验证结果如图13所示,最大主应力为257 MPa,低于材料抗拉强度275 MPa,满足强度要求,正面碰撞也如设计预期发生溃缩。



(a)牵引工况拓扑结果　(b)正碰力拓扑结果

图11　拓扑结果

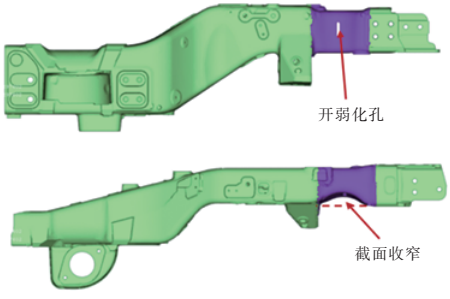


图12　S段纵梁弱化示意

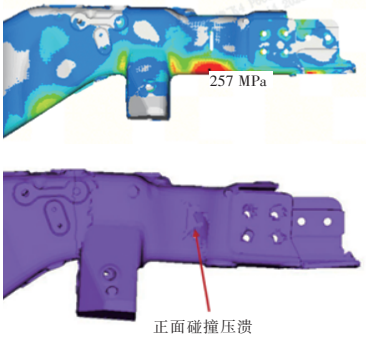


图13　S段纵梁弱化及仿真结果示意

3.3　非性能冲突区域结构设计

非性能冲突区域结构设计以前牵引钩座为例。初始铸铝结构最大应力达739 MPa,远超材料抗拉强度275 MPa,存在断裂风险,不满足强度设计要求,如图14所示。

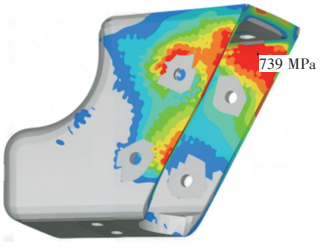


图14　牵引钩座初始结构应力结果

根据此区域布置空间，将模型进行拓扑优化前处理，网格填充实体如图15所示。

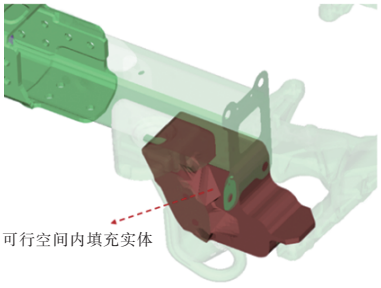


图15 拓扑优化区域

综合考虑5个牵引受载角度工况，建立拓扑优化数学模型如下：

$$\min\{M(x)\}$$
$$\text{s.t}\begin{cases}\varepsilon_{\max}\leqslant 10\% \\ \sigma_{\max}\leqslant 275\ \text{MPa}\end{cases} \quad (2)$$

式中：$\varepsilon_{\max}$为材料的最大塑性应变，设置其不大于最大延伸率10%。

通过多工况协同优化计算，最终获得符合所有性能指标的最优构型，如图16所示。优化后的结构采用铝挤出型材工艺方案，在保持原有质量不变的前提下，同步达成了多工况性能的强度设计目标。

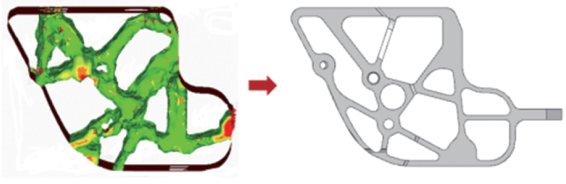


图16 牵引钩座拓扑结果示意

针对非关键性能冲突区域，各项性能指标的要求存在差异。基于铝车架不同区域所对应的主要工况，采用拓扑优化方法对结构进行设计，各区域的具体参数设置如表2所示。

表2 各区域拓扑优化约束及目标参数

区域	考虑工况	约束值
区域2：一横梁	前牵引救援工况	最大主应力≤275 MPa
区域4：中纵梁	a. 车架弯曲工况 b. 车架扭转工况 c. 侧面柱碰撞工况	弯曲刚度不低于目标值；扭转刚度不低于目标值；电芯侵入量不高于4 mm
区域5：七横梁	悬置安装点动刚度工况	3个方向刚度满足目标值

通过多学科目标条件约束方法最终获得的拓扑优化结果及工艺优化后的实体结构如图17所示。

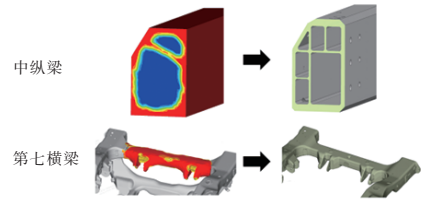
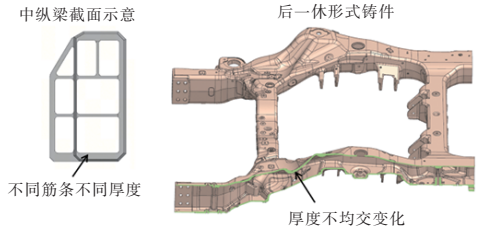


图17 全铝车架其他区域拓扑优化及最终结构

4 基于参数寻优方法的轻量化设计

根据车架各区域的结构差异，优化策略分为两类：一是对于如图18a所示的中纵梁厚度特征明显区域，建立多学科模型进行壁厚参数优化；二是针对如图18b所示的后一体式铸件一类厚度连续变化的复杂区域，应用特征变量映射法优化壁厚。按此策略将车架划分为两类区域，如图19所示。



(a)中纵梁 (b)后一体式铸件

图18 厚度特征示意

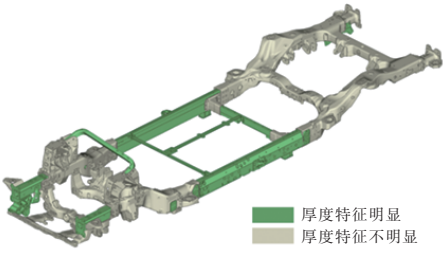


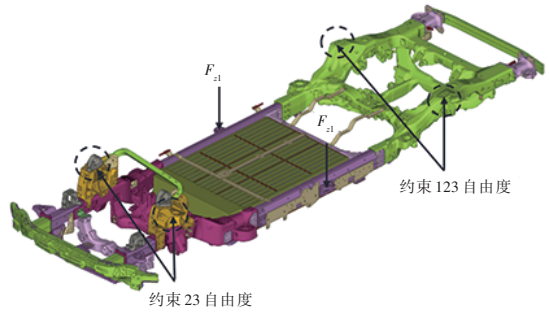
图19 结构厚度特征分区

4.1 厚度特征明显区域参数优化

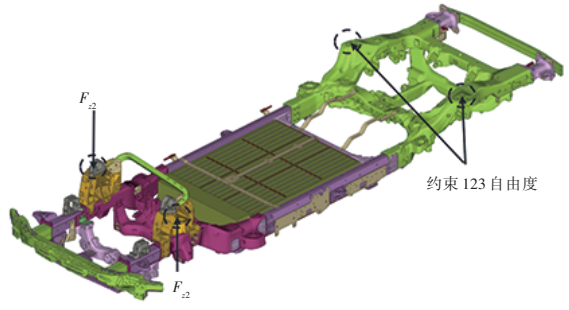
针对厚度特征明显区域，以中纵梁筋条料厚优化为例展开说明。

4.1.1 工况定义

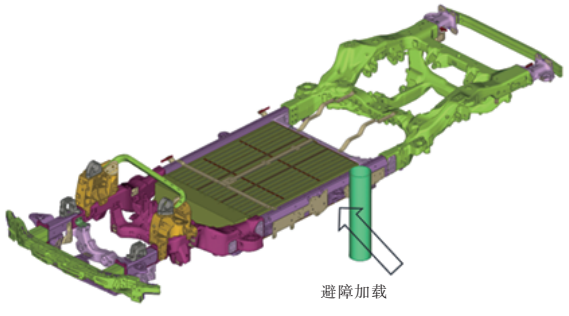
如图5所示，中纵梁结构需综合考虑侧面碰撞安全性、车身静刚度、结构强度及安装点承载能力等性能需求。选取侧面柱碰撞工况和NVH相关的车架弯曲、扭转工况作为关键工况，可有效覆盖其他常规性能要求，据此建立多工况优化分析模型，如图20所示。



(a)弯曲刚度工况



(b)扭转刚度工况



(c)侧面柱碰撞工况

图20　模型参数化工况

4.1.2　参数定义

针对中纵梁型材截面,将14个独立筋条厚度设为离散型变量,如图21所示,基本料厚梯度取工艺下限0.1 mm。为验证内部筋条是否可取消,额外增加0.1 mm变量值。各筋条厚度的具体区间范围如表3所示。

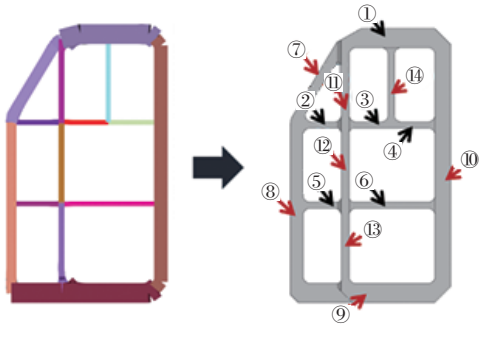


图21　变量设置示意

表3　变量范围

颜色	变量编号	初始厚度/mm	变量范围/mm
	1	12.0	[10.0,14.0]
	2	3.0	[0.1],[2.0,5.0]
	3	3.0	[0.1],[2.0,5.0]
	4	3.0	[0.1],[2.0,5.0]
	5	3.0	[0.1],[2.0,5.0]
	6	3.0	[0.1],[2.0,5.0]
	7	7.0	[6.0,10.0]
	8	6.0	[6.0,10.0]
	9	12.0	[10.0,14.0]
	10	8.0	[6.0,10.0]
	11	3.5	[0.1],[2.0,5.0]
	12	3.5	[0.1],[2.0,5.0]
	13	3.5	[0.1],[2.0,5.0]
	14	3.0	[0.1],[2.0,5.0]

4.1.3　参数优化数学模型

建立优化数学模型如下:

$$\min\{M(x_1,x_2,\ldots,x_{14})\}$$
$$\text{s.t}\begin{cases} d_w \geqslant d_{w0} \\ d_f \geqslant d_{f0} \\ d_r \leqslant d_{r0} \end{cases} \tag{3}$$

式中:d_w、d_f分别为弯曲、扭转刚度;d_{w0}、d_{f0}分别为弯曲、扭转刚度目标值;d_r为承受侧面柱碰撞力值时的中纵梁凹陷的最大位移,约束其不大于初始位移d_{r0}。

首先开展灵敏度分析[11],评估各筋条厚度对中纵梁结构刚度和侧面碰撞吸能能力的影响规律,如图22所示(变量x_1、x_7、x_8、x_9、x_{10}为外侧筋条厚度,其他为内部筋条厚度)。结果显示,外部筋条厚度的灵敏度高于其他内部筋条厚度,表明其参数变化对目标函数影响显著,而内部筋条厚度对整体性能贡献较小,存在轻量化空间。

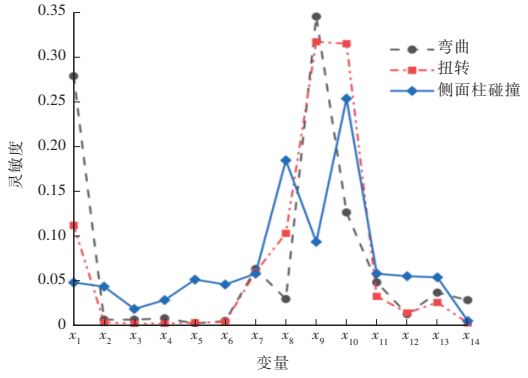


图22　灵敏度分析结果

采用田口法构建代理模型[12-13]，基于 132 个样本拟合总质量、弯扭刚度及承载力参数，并采用 8∶2 的比例划分训练集与测试集。以弯曲刚度为例，通过最小二乘法拟合的响应面如图 23 所示，响应面精度达 0.91，表明模型对优化方向有良好的指导性。

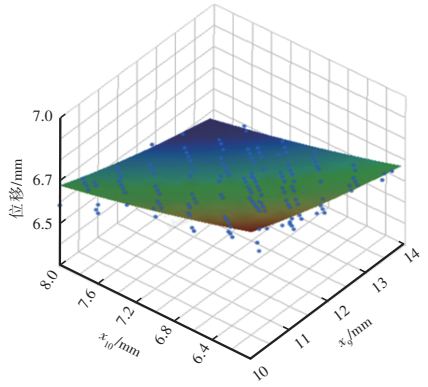


图 23 响应曲面示意

通过遗传算法[14-15]预测最优结果，如图 24 所示，优化后各指标满足性能要求，质量减轻约 2.77 kg。

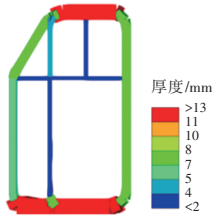
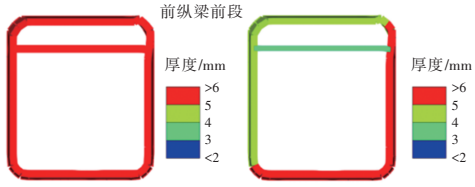


图 24 中纵梁料厚参数优化结果

将中纵梁区域的料厚参数优化方法推广至车架厚度特征明显的其他结构区域。综合各区域工况特点进行料厚寻优，优化结果如图 25 所示。



(a)优化前 (b)优化后

图 25 料厚特征明显区域料厚优化结果

4.2 厚度特征不明显区域特征映射法

针对车架厚度特征不明显区域，本研究提出基于刚度等效映射的优化方法。采用材料参数与刚度之间的数学关系建立等效模型，并结合参数寻优方法进行系统性设计，从而提高轻量化水平。

首先建立刚度与厚度之间的等效模型。对于矩形截面，如图 26 所示。

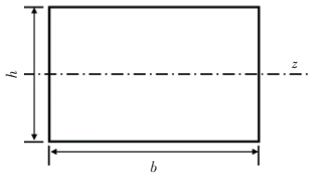


图 26 矩形截面尺寸示意

矩形截面惯性矩 I_z 为：

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \tag{4}$$

式中：b 为矩形截面的长度，h 为矩形截面的宽度。

由此可获得矩形截面的刚度为：

$$K = EI_z = E\frac{bh^3}{12} \tag{5}$$

式中：E 为材料的弹性模量。

在 K 相同的条件下，若 E 提升 a 倍，则等效于其厚度 h 提升 $\sqrt[3]{a}$ 倍，即质量提升 $\sqrt[3]{a}$ 倍：

$$aE\frac{bh^3}{12} = E\frac{b\left(\sqrt[3]{a}\,h\right)^3}{12} \tag{6}$$

空心矩形截面如图 27 所示，其截面惯性矩为：

$$\begin{aligned} I'_z &= \frac{1}{12}\left(BH^3 - b'h'^3\right) \\ &= \frac{1}{12}\left[BH^3 - (B-2t)(H-2t)^3\right] \end{aligned} \tag{7}$$

式中：B 为截面的宽度，H 为截面的高度，b' 为截面空心部分的宽度，h' 为截面空部分的高度，t 为壁厚。

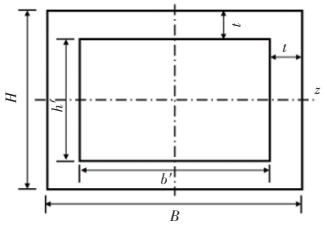


图 27 空心矩形截面示意

空心矩形截面的刚度为：

$$K' = EI'_z \tag{8}$$

设截面初始厚度为 t_1，初始弹性模量为 E_1，假设厚度变化 x 倍，截面的 B 和 H 不变，令变化后截面的刚度 K'_2 不变，则：

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{E_1 I'_{z1}}{I'_{z2}} \\ &= \frac{BH^3 - \left(B-2t_1\right)\left(H-2t_1\right)^3}{BH^3 - \left(B-2xt_1\right)\left(H-2xt_1\right)^3} \cdot E_1 \end{aligned} \tag{9}$$

式中:E_2为变化后的材料弹性模量,I'_{z1}为初始截面惯性矩,I'_{z2}为变化后的截面惯性矩。

基于此,可将结构的厚度的变化映射至弹性模量E的变化。建立简支梁模型如图28所示,参数如表4所示。

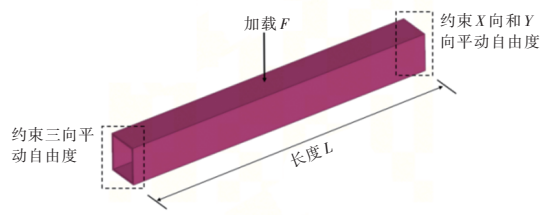


图28　简支梁模型

表4　梁参数

参数	数值
长度L/mm	1 000
宽度B/mm	120
高度H/mm	100
料厚t/mm	5
弹性模量/MPa	210 000
加载力F/kN	100

通过计算得到不同厚度刚度等效的弹性模量,如表5所示,与料厚5 mm的空心截面梁仿真位移结果相比,刚度等效法计算得到的位移误差不超过2%。

表5　不同厚度参数等效

厚度/mm	弹性模量/MPa	最大位移/mm
3	330 263.50	2.430
4	254 982.59	2.415
5(对照组)	210 000.00	2.401
6	180 171.59	2.387
7	159 003.57	2.372
8	143 253.50	2.358

基于上述结论进行轻量化设计。首先,根据性能仿真结果中的应变能分布及结构特性,对后部一体式铸件进行详细分块,共划分为12个区域,如图29所示。随后,为每个分块赋予差异化属性信息,得到12个区域的设计变量。最后,根据工艺下限4 mm的限制,对每个区域设置不同的上、下限参数,如表6所示。

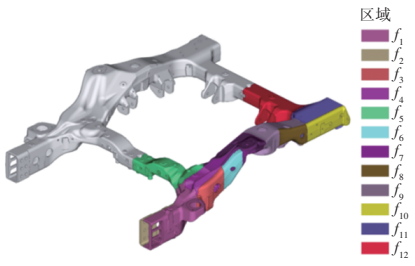


图29　后部一体式铸件设计变量设置

表6　各区域参数上下限设置

变量	初始厚度/mm	初始弹性模量/MPa	厚度范围/mm	弹性模量范围/MPa
f_1~f_{12}	8	72 000	[4.0,10.0]	[9 000,500 000]

对各区域材料的弹性模量进行参数优化,得到基于刚度目标的弹性模量变化倍数,再转换为厚度变量,获得的最终厚度分布如图30所示,经强度及碰撞性能评估,方案可行。

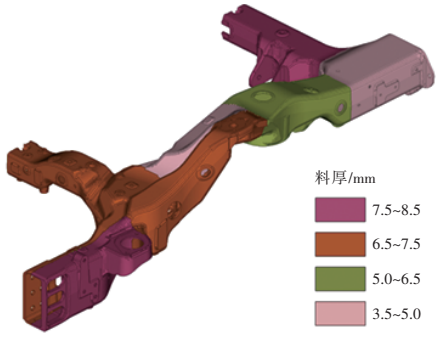
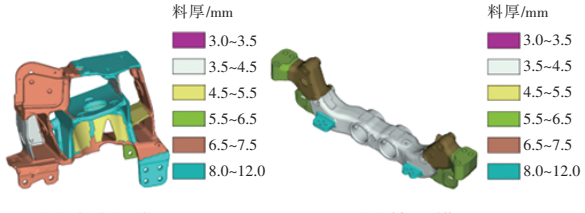
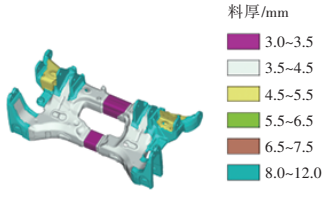


图30　后部一体式铸件料厚分布

将基于后部一体式铸件区域的料厚参数优化方法进一步推广至车架其他厚度特征不明显的结构区域。综合考虑各区域所关注的工况进行寻优,最终料厚分布结果如图31所示。



(a)前减振塔座　　(b)第二横梁



(c)第三、四横梁

图31　各区域基础料厚分布

4.3 全铝车架轻量化效果

全铝车架质量成功减轻16.7%，实现了车架的高效轻量化设计，其质量在整车质量中的占比为7.5%，优于竞品，如图32所示。

轻量化后的车架完成了整车强度、耐久、碰撞及NVH等多项试验验证，最终试验结果如表7所示。

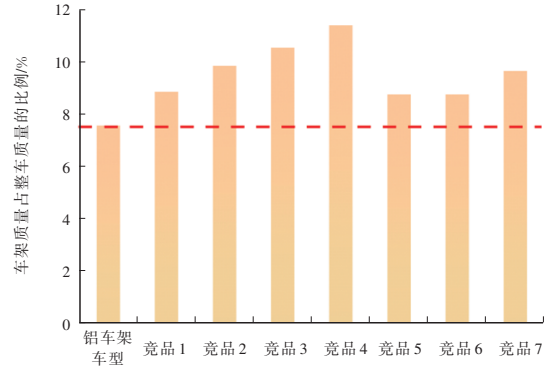


图32 铝大车架轻量化效果

表7 整车试验结果

性能	指标项	试验结果
碰撞安全	正面、侧面及后面碰撞	达到设计目标
NVH(车架相关项)	弯曲、扭转刚度 接附点动刚度	
强度耐久	前、后牵引钩强度 车架强度试验 车架耐久试验	无开裂或结构失效，达到设计目标

试验结果表明，整车通过了完整耐久历程考核，结构可靠性良好。

前牵引钩试验如图33所示，加载过程中无较大结构变形或开裂，满足牵引救援工况下的使用要求。

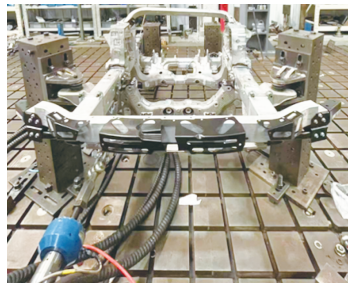


图33 全铝车架前牵引钩试验

碰撞试验中，正面碰撞结果如图34所示，与仿真变形基本一致，车架吸能效果理想，乘员舱保持完整，各项指标达到设计目标。



图34 正面碰撞试验与仿真结果对比

NVH相关车架的弯曲和扭转刚度测试试验如图35所示，实测值均达到目标要求，车架能够有效保证整车模态与振动噪声性能。



图35 NVH弯扭刚度试验

综合验证表明，轻量化设计后的车架在安全性、耐久性及整车性能方面均满足设计目标，具备良好的结构可靠性和工程应用可行性。

5 结束语

本文针对全铝车架开发及结构设计难点，提出了车架“功能导向、材料匹配”的设计策略，即在高刚度、高强度需求区域使用铸造铝合金，在碰撞吸能关键区域采用挤压铝型材件，具体结论如下：

a. 通过系统性的结构和性能特征评估，将复杂车架结构划分为5个具有功能特性的区域，形成结构与性能协同的架构优化与特征细节参数优化的系统设计流程。

b. 在分区架构的基础上，针对各区域特点，构建了性能冲突与非冲突的结构框架设计体系。针对车架不同区域，综合考量碰撞、强度与耐久性及NVH等多方面性能的冲突与耦合，通过拓扑优化设计方法实现了铝车架各区域的最优架构设计。

c. 针对传统参数优化方法在结构应用中的局限性，提出多学科协同料厚优化方法。特别是针对厚度特征模糊区域，采用特征映射方法，实现了各区域材料料厚的精细化匹配设计，经试验验证，各性能满足指标要求。

参考文献：

[1] 贾彦敏, 刘波, 陈鑫, 等. 中国汽车轻量化结构设计发展趋势与展望[J]. 前瞻科技, 2025, 4(2): 73-83.

[2] 李军, 周佳, 王利刚, 等. 中国乘用车轻量化水平发展趋势研究[J]. 汽车工程学报, 2021, 11(5): 313-319+362.

[3] 龚竞, 丁玲, 李秋实. 基于CAE技术某越野车车架结构有限元分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(10): 28-34.

[4] 王璋, 王磊, 聂春红, 等. 某越野车全铝车架性能开发及试验验证[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2021, 50(3): 38-45+54.

[5] 丁明亮, 严运兵, 杨勇, 等. 基于拓扑优化与灵敏度分析的公交车车身骨架轻量化[J]. 机械强度, 2018, 40(2): 363-369.

[6] ZHAO Q H, CHEN X K, WANG L, et al. Simulation and Experimental Validation of Powertrain Mounting Bracket Design Obtained from Multi-Objective Topology Optimization[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(6).

[7] 王登峰, 毛爱华, 牛妍妍, 等. 基于拓扑优化的纯电动大客车车身骨架轻量化多目标优化设计[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 136-143.

[8] WANG D F, JIANG R C, WU Y C. A Hybrid Method of Modified NSGA-II and TOPSIS for Lightweight Design of Parameterized Passenger Car Sub-Frame[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(11): 4909-4917.

[9] ORTIGOSA R, RUIZ D, GIL A J, et al. A Stabilisation Approach for Topology Optimisation of Hyperelastic Structures with the SIMP Method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 364.

[10] ZUO W J, SAITOU K. Multi-Material Topology Optimization Using Ordered SIMP Interpolation[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 55(2): 477-491.

[11] 赵树恩, 杨明森, 彭光旭. 基于NSGA-II混合灵敏度分析的白车身轻量化优化设计[J]. 机械强度, 2019, 41(4): 887-894.

[12] 方献军, 徐自立, 熊春明. OptiStruct及HyperStudy优化与工程应用[M]. 机械工业出版社, 2021.

[13] 任明, 孙涛, 石永金, 等. 基于Kriging近似模型的车架轻量化优化[J]. 机械强度, 2019, 41(6): 1372-1377.

[14] 王伟, 赵栋杰, 楚晓华. 基于遗传算法的车架结构优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2010(5): 38-40.

[15] WOLF M, LANDMAN U. Genetic Algorithms for Structural Cluster Optimization[J]. Journal of Physical Chemistry A, 1998, 102: 6129- 6137.

AT&M