拓扑优化在一体化桥壳设计中的应用

张娜 关雨墙 于艇 王冬伟 李书仪 刘艺君

（一汽解放汽车股份有限公司，长春 130011）

摘要：空悬一体化桥壳作为整车核心承载部件，其轻量化与可靠性设计对提升整车性能具有重要的意义。为解决传统设计方法难以适应复杂动态载荷的问题，提出了一种基于动态载荷谱与变密度法的非均匀材料分布拓扑优化方法，建立适用于广泛工程场景的多工况拓扑优化策略，在优化过程中根据分析结果调整材料密度，逐步实现结构的优化，得到一体化桥壳最优的材料分布。研究表明，该方法能显著降低桥壳质量，实现质量降低90 kg，同时满足强度与疲劳寿命要求，为空悬一体化桥壳的轻量化设计提供了有效解决方案。

关键词：空悬一体化桥壳 载荷谱 拓扑优化 轻量化设计

中图分类号：U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250287

Application of Topology Optimization in the Design of Air Suspension Integrated Axle Housing

Zhang Na, Guan Yuqiang, Yu Ting, Wang Dongwei, Li Shuyi, Liu Yijun

(FAW Jiefang Automotive Co., Ltd., Changchun 130011)

Abstract: As a core load-bearing component of the vehicle, the lightweight and reliability design of the air suspension integrated axle housing is crucial for improving overall vehicle performance. Addressing the limitations of traditional design methods in adapting to complex dynamic loads, this paper proposes a topology optimization method based on dynamic load spectra and the SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) method for non-uniform material distribution. A multi-condition topology optimization strategy applicable to diverse engineering scenarios is established. During the optimization process, the material density is adjusted iteratively based on analytical results to progressively refine the structure, ultimately achieving the optimal material distribution for the integrated axle housing. The study demonstrates that this method significantly reduces the axle housing mass by 90 kg while meeting strength and fatigue life requirements, providing an effective solution for lightweight design of air suspension integrated axle housings.

Key words: Air suspension integrated axle housing, Load spectrum, Topology optimization, Lightweight design

1 前言

随着汽车工业的快速发展，轻量化已成为提升车辆性能、降低能耗和减少排放的关键技术。根据整车匹配现状，V杆气囊悬架类型是目前空气悬架的主流形式，空气悬架通过U型螺栓与桥壳连接，零部件多且装配复杂，可进一步集成到桥壳上。通过集成化设计，减少连接件和接口实现结构的轻量化，同时优化载荷传递路径，实现各子系统之间的高效协同，可提升整体性能。

在商用车结构集成化趋势下，空悬一体化桥壳面临多物理场耦合挑战。动态载荷复杂性[1]：空悬一体化桥壳在实际使用中承受复杂的动态载荷，如路面冲击、制动扭矩和侧向力，多种载荷

作者简介：张娜（1979—），女，高级工程师，学士学位，研究方向为汽车结构可靠耐久性CAE仿真及轻量化。

参考文献引用格式：

张娜，关雨墙，于艇，等. 拓扑优化在一体化桥壳设计中的应用[J]. 汽车工艺与材料，2026(4)：26-31.

ZHANG N, GUAN Y Q, YU T, et al. Application of Topology Optimization in the Design of Air Suspension Integrated Axle Housing[J]. Automobile Technology & Material, 2026(4): 26-31.

工况增加了设计难度。轻量化矛盾[2]:传统的桥壳设计方法主要依赖经验公式和静态载荷假设,难以适应复杂多变的实际工况,导致设计冗余或者性能不足。制造约束:优化过程中需要考虑一体化桥壳结构的复杂几何形状的铸造要求,要求铸造最小壁厚为8 mm,拔模角≥2°。

本文的研究对象为空悬一体化桥壳,作为一种新型集成化结构,其传统经验匮乏。在产品开发过程中,摒弃传统的“经验设计-仿真验证-迭代优化”串行模型,采用基于载荷谱拓扑优化驱动概念设计的并行模式。通过定义结构最大的设计空间,利用拓扑优化获得材料最优分布与传力路径,并以此概念构型进行三维几何的详细设计。整个优化过程始于一个均匀材料设计空间,其优化历程证明了从初始概念到最优解的有效性。

本文通过构建动态载荷谱-模态特性协同优化模型,以期开发可制造性驱动拓扑优化算法,嵌入工艺约束,确保在满足多工况载荷下强度和刚度要求的基础上显著减轻结构质量,实现轻量化与可靠性的平衡。

2　一体化桥壳结构与工作原理

整车与桥总成的匹配现状如图1所示。该总成由19个桥壳相关部件和22个气囊连接件共同构成,结构复杂。空气悬架系统与桥壳之间的连接件数量较多,可以进一步集成到桥壳上。通过结构重构,将原冲焊桥壳总成内部19个零件、托臂及适配座集成于单一铸造桥壳中,并取消U型螺栓、螺母和定位销等辅助连接件,最终实现41个零件功能的合一。集成后的整体结构如图2所示,不仅在零件数量上大幅精简,降低了装配复杂度与制造成本,也提高了系统的整体性能与装配效率。



图1　整车与桥总成匹配现状

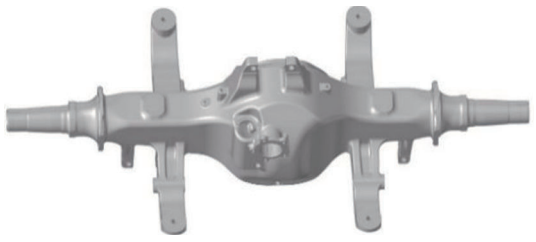


图2　集成后结构示意

在车辆行驶过程中,桥壳承受来自路面的复杂多向载荷。其载荷传递路径明确:垂向力通过空气弹簧传递至车架;纵向力由V型与I型推力杆所组成的杆系共同平衡;侧向力及相应反力矩则由横向稳定杆与推力杆系统协同承受,系统振动由减振器予以衰减。各部件的协同作用共同保障了车辆的操纵稳定性、平顺性与安全性。

3　空悬一体化桥壳多物理场建模

3.1　动态载荷谱获取与预处理

3.1.1　数据采集

载荷谱是开展结构疲劳分析与优化设计的重要依据。本文通过采集桥壳在实际道路行驶工况下各通道的载荷信号,获取了其使用过程中所承受的时变载荷历程,包括应变、加速度及轮心六分力等关键数据。其中,I杆测点的载荷数据如图3所示。

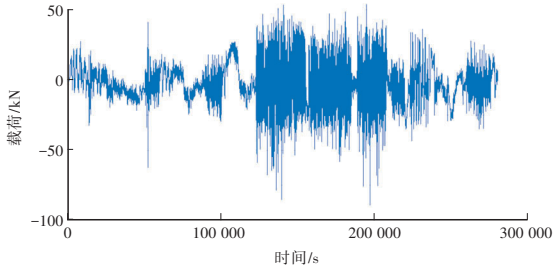


图3　I杆载荷测试数据

3.1.2　载荷谱处理

利用小波变换去除高频噪声,采用雨流计数法[3]对预处理的载荷数据进行统计分析,将载荷-时间历程转化为载荷幅值和循环次数。根据雨流计数结果,结合车辆实际使用情况和设计要求,分析桥壳在各种应用场景下的受力形式,确定9种优化工况的载荷谱,包括各典型工况下的载荷幅值、均值、频次等信息。

3.2　高精度有限元模型构建

3.2.1　几何离散化

采用高阶四面体单元离散复杂曲面,单元类

型为C3D10M，针对关键圆角等高梯度区域部位局部加密网格，整体网格质量满足雅可比(Jacobian)>0.7，体积扭曲度(Vol skew)<0.98。

3.2.2 网格收敛性验证

基于垂直上跳工况进行网格收敛性分析，选取单元尺寸1~5 mm共4种网格配置，关键应力区域不同网格尺寸与最大应力计算结果如表1所示。

表1 不同网格尺寸应力对比

网格级别	网格尺寸/mm	最大应力/MPa	相对误差/%
基准网格	1	320	0
精细网格	2	316	1.25
中等网格	3	305	4.69
粗网格	5	289	9.69

当网格尺寸≤3 mm时，应力变化率<5%，基于圣维南原理，主承载区网格尺寸为2~3 mm，非关键区域尺寸为5~7 mm。

3.2.3 材料模型

基于J2流动理论的弹塑性本构模型，通过冯·米塞斯(von Mises)屈服准则与各向同性硬化法则，为金属材料的弹塑性行为提供了广泛适用的理论描述。本文研究对象桥壳采用QT600-5球墨铸铁材料，依据ASTM E606标准开展应变控制疲劳试验，标定其关键材料参数如下：弹性模量E=169 GPa，泊松比μ=0.275，屈服强度为370 MPa。高周疲劳性能参数包括：Basquin指数b=-0.12，Coffin-Manson系数c=-0.6。

3.2.4 边界条件

根据不同应用场景下桥壳的受力情况，施加约束及等效处理的动态载荷谱。如，对于桥壳垂直上跳工况，整个垂向载荷的传递路径为车轮→轮毂轴承→空气弹簧+V型推力杆，针对该工况约束半轴套管端部及V型推力杆，同时在空气弹簧、减振器及桥壳上限位块接触区域施加动态载荷，其他工况同理。

3.2.5 结构性能指标与校核

为确立校核依据，桥壳关键性能指标、计算方法定义如下：

a. 静强度安全系数：基于最大主应力理论，静强度安全系数n_b定义为材料极限应力σ_u与最大等效应力σ_{max}之比：

$$n_b = \frac{\sigma_u}{\sigma_{max}} \tag{1}$$

b. 疲劳安全系数：采用Gerber修正模型进行高周疲劳评估，疲劳安全系数n_s计算如下：

$$n_s = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + (\frac{\sigma_m}{\sigma_b})^2} \tag{2}$$

式中：σ_{-1}为材料疲劳极限，σ_a为应力幅值，σ_m为平均应力，σ_b为材料抗拉强度；

c. 模态性能：为准确模拟实车状态，本文所述的模态分析均为约束模态分析，旨在精确模拟桥壳在整车安装状态下的动态特性。

4 多约束拓扑优化理论框架

4.1 拓扑优化方法

拓扑优化通过优化材料分布，在满足约束条件下实现目标函数的最优化，常用的方法包括变密度法、水平集法、进化结构优化法[4]等。

本文采用变密度法，该方法通过引入一个虚构的材料密度变量，建立材料的弹性模量与密度的关系，使得在优化过程中，密度可以在0~1范围内连续变化，0代表材料去除，1代表材料保留，从而实现结构拓扑的优化。

4.2 变密度法数学描述

根据桥壳设计空间及装配关系确定桥壳设计区域和非设计区域，如图4所示。设置拓扑优化的设计变量、设计约束和目标函数。根据轻量化指标确定体积百分比的约束条件，驱动桥壳设计的关键是避开齿轮啮合频率与低阶弯曲/扭转模态的重合，同时避开发动机的怠速激励，基于车辆实际使用情况及发动机匹配确定一阶频率的约束范围。

设计变量为单元相对密度$\rho_e \in [0,1]$，设计约束为：

a. $\sum \rho_e v_e \leq V_{max}\left(V_{max} = 0.35V_0\right)$，即体积百分比小于原体积的35%；

b. 安全系数>1.0；

c. 120 Hz≤一阶频率≤220 Hz；

d. 以加权柔度最小化为目标函数：

$$\min f(\rho)=\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot C_i(\rho) \tag{3}$$

式中:$f(\rho)$为目标函数,表示加权柔度;ρ为设计变量,表示材料密度分布;n为工况总数量;w_i为第i种工况的权重系数;$C_i(\rho)$为第i种工况的结构柔度。

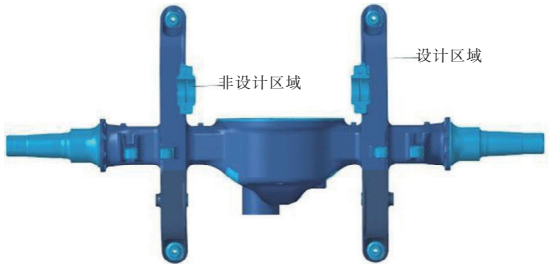


图4　一体化桥壳设计区域示意

4.3　可制造性约束嵌入

在拓扑优化过程中,数值不稳定性(如棋盘格现象、网格依赖性)会导致非物理的材料分布,并使优化结果难以加工。为解决该问题,本文将敏度过滤方法[5]与制造工艺约束相融合,通过数学手段对灵敏度场进行正则化处理,确保优化结果既符合物理规律,又满足可制造性要求。

所采用的灵敏度过滤基于如下Helmholtz型偏微分方程进行求解:

$$\nabla^2 \tilde{s} - \frac{1}{R^2}(\tilde{s} - s) = 0 \tag{4}$$

式中:s为原始灵敏度场(未滤波);$\tilde{s}$为滤波后的灵敏度场;R为特征过滤半径,控制最小结构特征尺寸;∇^2为拉普拉斯算子,表征空间扩散效应。

该方程实现了一种扩散-反应平衡机制。利用扩散项$\nabla^2\tilde{s}$抑制高频振动,控制棋盘格现象,利用反应项$(\frac{1}{R^2}(\tilde{s}-s))$保留原始灵敏度的低频特征即宏观材料的分布趋势,通过调节R,可间接控制优化后结构的最小壁厚,使其符合铸造工艺对最小特征尺寸的要求。

为协调结构力学性能与工艺可行性,本文系统引入3类制造约束:通过施加最小尺寸约束,消除局部应力集中区域并保证铸造顺利充型;明确拔模方向并施加单向生长约束,避免内凹结构以确保高压铸件顺利脱模;同时采用镜像对称约束,使结构在载荷作用下保持响应一致性并改善整体受力分布。这些约束共同将优化导向具备高工程可行性的设计空间,实现了从数学最优解到工程适用解的关键跨越。

5　优化结果与多尺度验证

5.1　拓扑构型演化

拓扑优化的目标函数及约束条件迭代历程如图5与图6所示。优化过程中,目标函数随迭代次数增加呈下降趋势,并于第17次迭代后逐渐收敛,表明结构整体刚度已趋近最优状态。与此同时,约束条件也在第30次迭代时满足所有收敛准则,材料分布形态趋于稳定,确定了一体化桥壳在主传力路径上的最优拓扑构型,优化后的结果如图7所示。

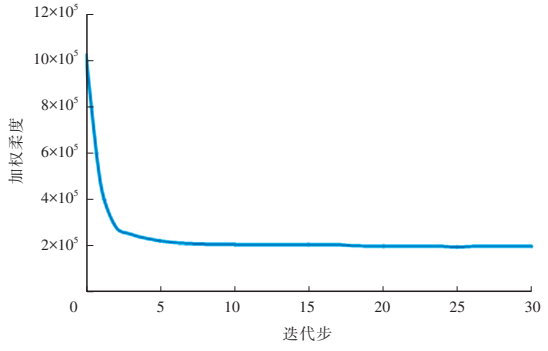


图5　目标函数迭代历程

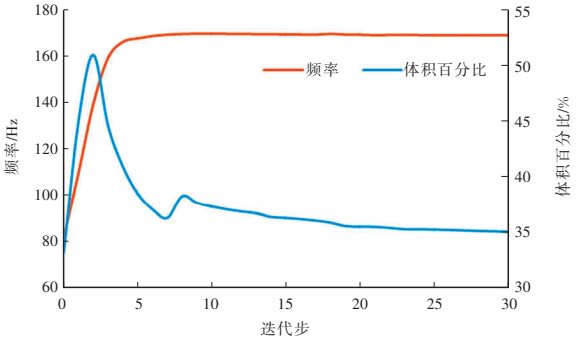


图6　约束条件迭代历程

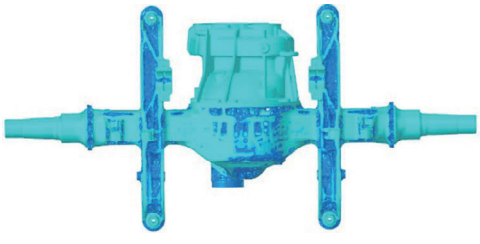


图7　拓扑优化后结果

基于优化后的材料布局结合制造工艺对一体化桥壳进行详细设计,得到最终的设计方案,如图8所示。



图8 优化后结构设计方案

5.2 性能对比

优化后结构仿真结果如表2、表3所示。由仿真结果可知，静强度安全系数最小值为1.45，疲劳安全系数最小值为1.06，满足强度要求。车速按80 km/h计算，齿轮啮合频率为275 Hz，优化后一体化桥壳一阶弯曲频率为169.3 Hz，低阶弯曲频率避开20%齿轮啮合频率，满足要求。疲劳工况1及一阶模态振型仿真结果见图9、图10。

表2 静安全系数计算结果

工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6	工况7
3.23	2.96	2.88	2.66	1.61	1.54	1.45

表3 疲劳安全系数及模态计算结果

疲劳工况1	疲劳工况2	一阶模态频率/Hz
1.06	1.06	169.3

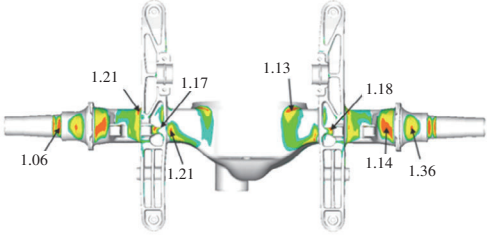


图9 疲劳工况1安全系数分布云图

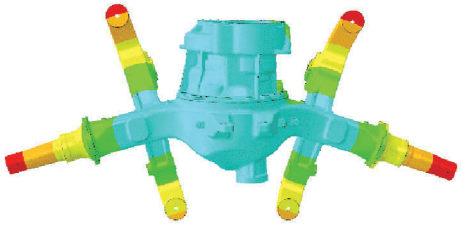


图10 一阶弯曲模态振型图

5.3 试验验证

5.3.1 台架试验

根据结构连接方式，模拟悬架装配连接，搭建台架开展试验，如图11所示。

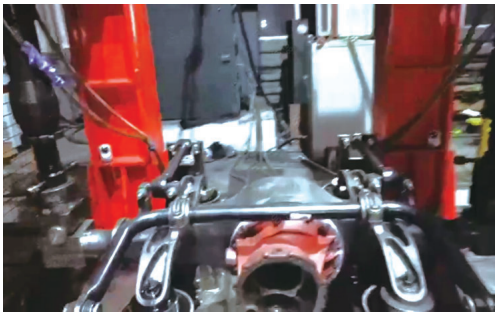


图11 台架试验示意

台架耐久性试验显示，该桥壳在规定的载荷谱与循环次数下未发生失效，满足试验要求。

5.3.2 整车可靠性试验

为系统考核优化后空悬一体化桥壳在真实载荷环境下的综合耐久性能，本研究完成了8 000 km的整车强化道路可靠性试验。试验通过精准复现用户全生命周期内可能经历的各类苛刻载荷工况，对桥壳进行全面的疲劳强度考核。

试验结束后，对桥壳关键区域进行磁粉探伤与宏观形貌检查。检测结果表明，一体化桥壳未出现任何可见裂纹、疲劳源或永久塑性变形，结构完整性保持完好。该试验结果从整车系统层面充分验证了本文提出的基于动态载荷谱的拓扑优化方法在工程实践中的有效性与可靠性。优化后的桥壳结构不仅满足设计寿命要求，更展现出卓越的疲劳耐久性能，为产品的量产与工程应用提供了数据支撑与理论依据。

6 工程应用与讨论

6.1 结构性能提升

一体化桥壳提升了桥壳结构的集成度，实现结构41合1，通过集成消除了传统分体式结构的螺栓连接与焊接接口，实现载荷的连续传递，降低应力集中风险。

6.2 成本效益

本文提出的拓扑优化方案在实现结构创新的基础上，进一步展现出显著的环保效益与多层次经济价值，通过优化使单车降重90 kg，材料上采用球墨铸铁以适应铸造工艺要求。

环保效益方面，尽管球墨铸铁的碳排放因子略高于原设计所用钢材，但由于质量的显著减轻，整体碳足迹仍得到有效优化。经测算，在原材料

生产阶段,优化后桥壳可实现单车二氧化碳减排约47 kg。按年产6 000台计算,预计每年可减少碳排放约282 t。

经济性方面,轻量化所带来的效益覆盖制造与运营全生命周期,具体表现为:

a. 制造方面,优化后的结构可实现单车降成本400元,为制造端带来年均约240万元的直接经济效益。

b. 在运营环节,车辆减重可转化为有效载重能力的提升。参考中国公路货运市场平均收益水平(0.4元/t·km)及单车年行驶里程20×10^5 km的典型工况,预计单车每年可因载重能力提升而增加营业收入约7 000元。规模化推广后,全部6 000台车辆每年可为终端用户创造高达4 200万元的额外运营收益。

综上,本拓扑优化方案在满足各项性能指标的同时,实现了制造端与客户端经济价值的同步提升。预计每年综合经济效益可达4 400万元以上,从商业化角度为空悬桥壳的轻量化设计与工程应用提供了有力支撑。

7　结束语

本文成功构建并验证了一种基于动态载荷谱的空悬一体化桥壳拓扑优化方法,通过多源载荷融合、多工况约束建模与制造工艺性协同,实现了从“载荷输入”到“可制造设计”的闭环。工程验证结果显示,优化后的桥壳在实现高度功能集成的同时,成功降重90 kg,有效兼顾了轻量化与高可靠性的设计要求。

参考文献:

[1] 邹喜红, 刘瑜, 袁冬梅, 等. 桥壳多轴向多激励虚拟试验系统研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(23): 157-163.

[2] 陈金. 32吨矿用自卸汽车驱动桥壳开裂分析和改进[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

[3] 赵晓鹏, 姜丁, 张强, 等. 雨流计数法在整车载荷谱分析中的应用[J]. 科学技术与工程, 2009, 27(3): 67-73.

[4] 马超, 鹿鹏程, 邱娜, 等. 基于强度拓扑优化的乘用车轮毂轻量化设计[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(5): 122-125+129.

[5] 龙凯, 傅晓锦. 考虑密度梯度的敏度过滤方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(4): 161-166.

AT&M