

文章编号: 1005-0523(2024)05-0010-08



## 基于Optistruct的某皮卡汽车后桥壳轻量化优化研究

黄志超<sup>1</sup>, 王嘉璇<sup>1</sup>, 胡义华<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 江西江铃底盘股份有限公司, 江西 抚州 344000)

**摘要:**【目的】为研究某新款皮卡汽车后桥壳的静态特性及轻量化优化问题,【方法】采用有限元平台仿真与台架试验结合的研究方法。首先,在Hypermesh软件建立具有高计算精度的有限元模型;其次,使用ABAQUS仿真平台分析了桥壳在满载工况下的应力及位移,确定了危险截面位置;随后,通过Optistruct优化模块对桥壳和钢板板簧座等零部件进行了尺寸优化;最后,通过垂直弯曲静刚度台架试验验证了轻量化优化的可靠性。【结果】有限元分析结果表明,桥壳的危险截面位于钢板板簧座与桥壳连接处,最大应力和变形量分别为307.20 MPa和1.440 mm。Optistruct尺寸优化后的桥壳重量由59.07 kg降低至52.55 kg,减重率11.04%。应力上升至310.10 MPa,但仍小于桥壳材料45钢的屈服强度355.00 MPa,变形量小于标准1.400 mm。台架试验结果表明,桥壳通过垂直弯曲静刚度试验,符合汽车驱动桥台架试验标准。【结论】所建立的有限元模型具有较高的准确性,仿真结果与台架试验结果高度接近。经Optistruct优化后的桥壳具有良好的力学行为表现,该模块在桥壳轻量化优化方面具有较高的可靠性。

**关键词:** 驱动桥壳; 有限元; 尺寸优化; 汽车轻量化; 台架试验

中图分类号: U463

文献标志码: A

本文引用格式: 黄志超, 王嘉璇, 胡义华. 基于Optistruct的某皮卡汽车后桥壳轻量化优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 10-17.

## Research on the Lightweight Optimization of the Rear Axle Housing of a Pickup Truck Based on Optistruct

Huang Zhichao<sup>1</sup>, Wang Jiaxuan<sup>1</sup>, Hu Yihua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Jiangling Chassis Co., Ltd., Fuzhou 344000, China)

**Abstract:** 【Objective】In order to investigate the static characteristics and lightweight optimization of the rear axle housing of a new pickup truck vehicle, 【Method】a research method combining finite element platform simulation and bench testing was adopted. Firstly, a finite element model with high computational accuracy was established in Hypermesh software. Secondly, the stress and displacement of the axle shell under full load condition were analyzed using ABAQUS simulation platform, and the location of the dangerous cross-section was determined. Subsequently, the dimensional optimization of the axle shell and the steel plate spring seat and other components was carried out through Optistruct optimization module, and then the reliability of the lightweight optimization was verified through vertical bending static stiffness bench test. Finally, the reliability of light-

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52375333); 江西省重大科技成果熟化与工程化研究项目(20232AEI92001); 江西省赣鄱俊才支持计划——主要学科学术和技术带头人培养项目(20232BCJ22033)

weight optimization was verified by vertical bending static stiffness bench test. **【Result】**Finite element analysis results show that the dangerous cross-section of the axle housing is located in the housing steel plate spring seat and housing connection with the maximum stress and deformation of 307.20 MPa and 1.440 mm. Size optimization of the axle housing weight decreases from 59.07 kg to 52.55 kg and the weight reduction rate is 11.04%. The stress rises to 310.10 MPa, but it is still less than the yield strength of 45 steel of the axle housing material, which is 355.00 MPa, and the deformation is less than the standard 1.400 mm. The results of the bench test show that the axle housing passes the vertical bending static stiffness test, and conforms to the standard of the automobile drive axle bench test. **【Conclusion】**The established finite element model has high accuracy, and the simulation results are highly close to the results of the bench test. The axle housing optimized by Optistruct has good mechanical behavior performance, and the module has high reliability in axle housing lightweighting.

**Key words:** drive axle housing; finite element; dimensional optimization; automotive lightweighting; bench test

**Citation format:** HUANG Z C, WANG J X, HU Y H. Research on the lightweight optimization of the rear axle housing of a pickup truck based on Optistruct[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 10-17.

**【研究意义】**驱动桥轻量化是汽车工业中降低油耗、实现节能减排的主要措施之一,更是实现整车轻量化的重要途径,对提高汽车的比功率以及经济性有重大意义。

**【研究进展】**有限元软件被广泛应用于汽车零部件的力学性能校核中<sup>[1-3]</sup>。针对驱动桥壳的轻量化问题,国内外学者采用相关有限元软件展开研究<sup>[4-9]</sup>。冯叶陶等<sup>[10]</sup>以拖拉机前驱动桥壳为对象进行轻量化研究,在桥壳强度和刚度有较大余量的条件下以桥壳质量、变形量最小为优化目标进行轻量化设计,优化后桥壳质量减轻7.7%。许文超等<sup>[11]</sup>为提高驱动桥壳的轻量化水平和道路行驶疲劳可靠性,对驱动桥壳进行6-Sigma稳健性多目标轻量化设计。林荣会等<sup>[12]</sup>针对某重型自卸车驱动桥壳轻量化研究过程中出现的桥壳可靠性不受控问题,提出了一种确定性优化与稳健性择优相结合的轻量化研究方法。肖鸿飞等<sup>[13]</sup>基于仿生学理论对某型自卸车驱动桥壳后盖进行轻量化设计,提高了多项桥壳设计参数,在提高零件质量的同时实现降重目标。孙远敬等<sup>[14]</sup>通过Isight集成MATLAB建立了某矿用自卸车驱动桥壳在最大侧向力工况下的近似数学模型,并利用人工蜂群算法对桥壳代理模型的迭代求解,实现桥壳体积减小18.75%以及等效应力下降7.23%的优化目标。现有研究均采用MATLAB、ABAQUS以及ANSYS等优化模块。Optistruct作为功能强大的优化软件,其应用范围贯穿于工程技

术设计的各个阶段,当前采用该模块进行驱动桥壳轻量化工作的研究较少。

**【创新特色】**本文在ABAQUS软件中分别确定了驱动桥壳的最大应力和最大位移以及危险截面位置。基于Optistruct软件对桥壳和钢板板簧座等零部件进行了尺寸优化,随后通过台架试验验证了有限元分析结果。采用多个有限元软件同台架试验相结合的研究方法确保该桥壳在设计阶段具有良好的力学行为表现。**【关键问题】**驱动桥壳在满载工况时符合垂直弯曲静刚强度校核条件时,通过Optistruct软件完成轻量化优化。

## 1 桥壳有限元模型

本文采用网格大小为2.0的直角三角形网格单元对壳单元进行划分,以确保网格的准确性和计算效率。Hypermesh中,Qualityindex功能提供了对于网格质量的检查及优化,建立了Ideal, Good, Warn, Fail, Worse共5个状态下的评价指标, Ideal状态下的检查结果如图1所示。



图1 桥壳网格质量检查结果  
Fig. 1 Mesh quality inspection results of axle housing

Hypermesh对网格的评价指标是多样性的,主要通过评估最小尺寸、最大尺寸、纵横比、扭曲度和雅可比矩阵来检查网格质量。最小尺寸通常设置为2.0,最大尺寸设置为20.0。纵横比对三维网格更重要,由单元尺寸在不同方向上的均匀性控制,通常设置为5。雅可比系数表示六面体网格偏离正六面体的程度,通常设置为0.6以提高网格质量。共划分出313 861个节点,1 354 892个网格单元。深蓝色的网格为理想状态下网格,浅蓝色则为良好状

表1 桥壳网格质量详情

Tab.1 Mesh quality details of axle housing

Evaluation indicators	Failure criteria	Number of failed mesh	Percentage of failure mesh/%
Min size	2.0	200	0.33
Max size	20.0	0	0
Aspect ratio	5.0	0	0
Warpage	15.0	0	0
Skew	40.0	0	0
Jacobian	0.6	0	0
Trias	15.0	1 848	3.10

态下网格,无红色网格,即无失效网格。具体标准及各指标下的网格情况如表1所示。

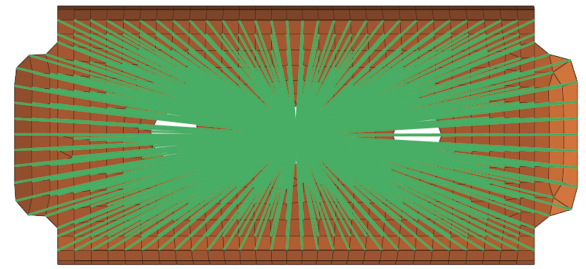
如图2所示,在板簧座中心处,减速器壳螺栓连接处采用RBE2刚性单元进行连接模拟。

新建主减速器壳材料QT450,桥壳及钢板板簧座材料45钢并设置属性。材料的力学性能和属性如表2和表3所示。

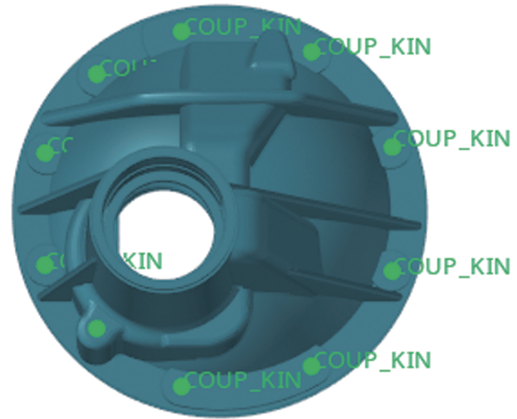
后桥作为一个复杂的装配体,由众多零部件构成,这些零部件在实际生产过程中需要通过多种连接方式,如焊接和螺栓连接等,以实现结构的整体性和功能性。在进行有限元计算时,为了提高计算效率,通常使用1D单元来模拟这些连接。有限元计算模型如图3所示。

## 2 桥壳静力学有限元分析

满载工况如图4所示,在桥壳的左右两侧钢板板簧座处,施加了大小为22 785.00 N且方向垂直于该平面的力,为了实现有效的约束和力的传递,在左右两侧建立了1D-COUP\_KIN单元,并通过SPC进行约束。左侧的约束释放了自由度2,4,即限制了沿X轴和Z轴方向的平动,以及沿Y轴和Z轴方向的转动。而右侧的约束释放了自由度4,即限制



(a) Rigid connection at the center of the leaf spring seat



(b) Bolt rigid connection of the reduction gear housing

图2 1D连接单元

Fig.2 1D connection unit

表2 桥壳相关材料力学性能

Tab.2 Mechanical properties of axle housing

Materials	Poisson's ratio	Density/(g/cm <sup>3</sup> )	Modulus of elasticity/GPa	Yield strength/MPa
QT450	0.30	7.85	210	310
45 steel	0.28	7.30	198	355

表3 桥壳相关材料属性

Tab.3 Material properties of axle housing

Component	Causality	Thickness/mm
Axle shell	SHELL	8
Shell cap	SHELL	4
Reinforcement ring	SHELL	5
Leaf spring seat	SHELL	9
Main reducer housing	SOLID	
Axlehead	SOLID	
Absorbing bracket	SHELL	5

了沿X轴,Y轴和Z轴方向的平动,以及沿X轴方向的转动。

仿真结果如图5所示,桥壳的最大Mises应力出现在右侧钢板板簧座处,为307.20 MPa,这一数

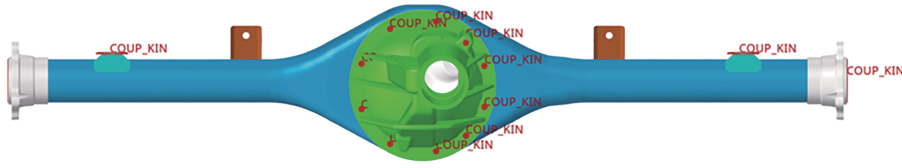


图3 桥壳有限元模型

Fig. 3 Finite element model of axle housing

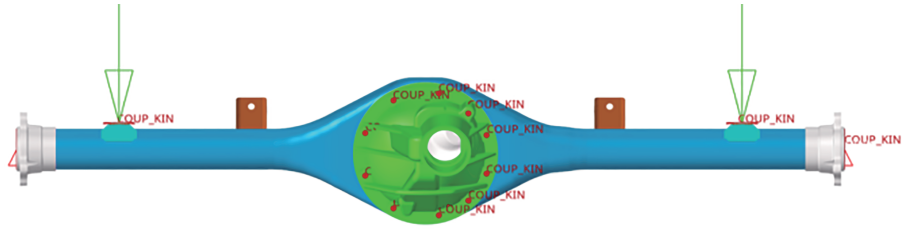
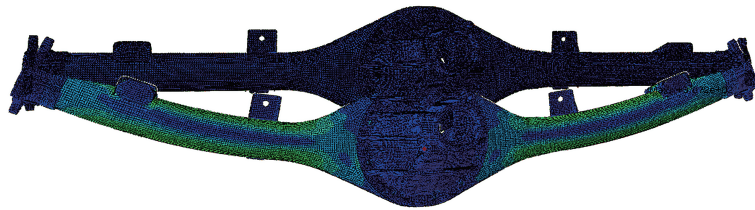
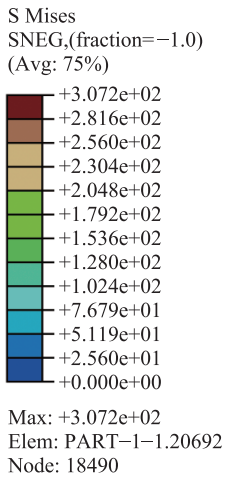
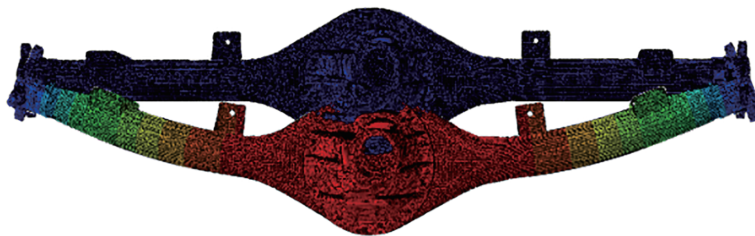
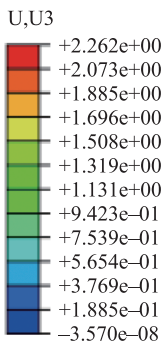


图4 满载工况有限元计算模型

Fig. 4 Finite element calculation model for full load conditions of axle housing



(a) Stress diagram



(b) Displacement diagram

图5 满载工况云图

Fig. 5 Full load condition cloud diagram

值小于45钢的屈服强度355.00 MPa。最大变形量为2.262 mm,根据行业标准《商用车驱动桥总成》

(QC/T 533—2020)(下称标准),在车桥满载时,将变形量换算为每米轮距的变形量为1.440 mm。这

一数值高于标准规定的 1.400 mm,因此驱动桥壳垂直弯曲刚度有待进一步优化。

### 3 桥壳轻量化优化设计

轻量化设计工作的主要方向有 3 个,轻量化结构优化设计,轻量化材料,以及采用先进轻量化制造工艺,如自冲铆接、激光焊接、一体式冲压等<sup>[15]</sup>。采用 Optistruct 软件中的尺寸优化方法,对桥壳这一驱动桥总成的主要支撑部件进行轻量化设计优化。尺寸优化的特点是在保持网格模型不变的前提下,通过调整三维模型的参数值来优化机械零部件的有限元模型相关尺寸参数,如板状件的厚度、梁的横截面尺寸等。这一优化策略旨在现有材料和制造条件下最大限度地提升驱动桥的轻量化程度。

驱动桥壳尺寸优化的相关参数如下:

1) 目标函数为

$$V = \min f(x_1, x_2, x_3) \quad (1)$$

2) 约束条件为

$$\begin{cases} \delta \leq 307.2 \text{ MPa} \\ Y \leq 2.262 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

3) 设计变量为

$$\begin{cases} 5.5 \text{ mm} \leq x_1 \leq 9.0 \text{ mm} \\ 6.0 \text{ mm} \leq x_2 \leq 8.0 \text{ mm} \\ 3.5 \text{ mm} \leq x_3 \leq 4.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $V$  为驱动桥壳体积;  $\delta$  为钢板板簧座和轴管间的应力;  $Y$  为桥壳最大变形量;  $x_1$  为钢板板簧座厚度;  $x_2$  为驱动桥壳厚度;  $x_3$  为壳盖厚度。

桥壳作为汽车驱动桥总成中最为关键的部件,其形状复杂且承载着车身传递至驱动桥的载荷,在

对其进行优化时需全面考虑多种影响因素。假设材料结构密度均匀,则驱动桥壳的质量与其体积成正比关系。基于这一假设,将体积最小化设定为本次优化设计的目标函数。同时设定收敛容差为 0.5%,考虑到桥壳轴管及板簧座部分的质量在整体中占据较大比重,因此在选择设计变量时,将钢板板簧座的厚度、轴管的厚度以及壳盖的厚度作为实现轻量化的设计变量。桥壳在满载工况时的应力和变形量分别为 307.2 MPa 和 2.262 mm,以该组数据作为强度约束和刚度约束的基准条件。

经尺寸优化计算得到的驱动桥壳厚度云图如图 6 所示,钢板板簧座的厚度从初始的 9 mm 减小至 5.611 mm,桥壳的厚度也从 8 mm 减小至 6.188 mm,而壳盖的厚度则从 4 mm 减少至 3.882 mm。

利用 Hypermesh 软件中的 Mass calc 模块对驱动桥壳的质量进行了重新计算,结果显示经过优化后桥壳的质量从 59.07 kg 降低至 52.55 kg,实现了 6.52 kg 的减重,减重率高达 11.04%,且在整个优化过程中,并未对驱动桥壳原结构进行改变,这证明此次轻量化优化设计达到设计目标。

### 4 桥壳优化后力学性能校核

为了确保驱动桥壳优化结果的可靠性,需进一步通过有限元计算进行强度和刚度验证。

模拟结果如图 7 所示,尺寸优化后的桥壳在满载工况下,最高应力集中在板簧座和桥壳的连接处桥壳一侧,最大应力数值从原始的 307.20 MPa 上升至 310.10 Mpa。但依然低于桥壳材料 45 钢的屈服强度 355.00 MPa。位移数据表明,优化后的桥壳在

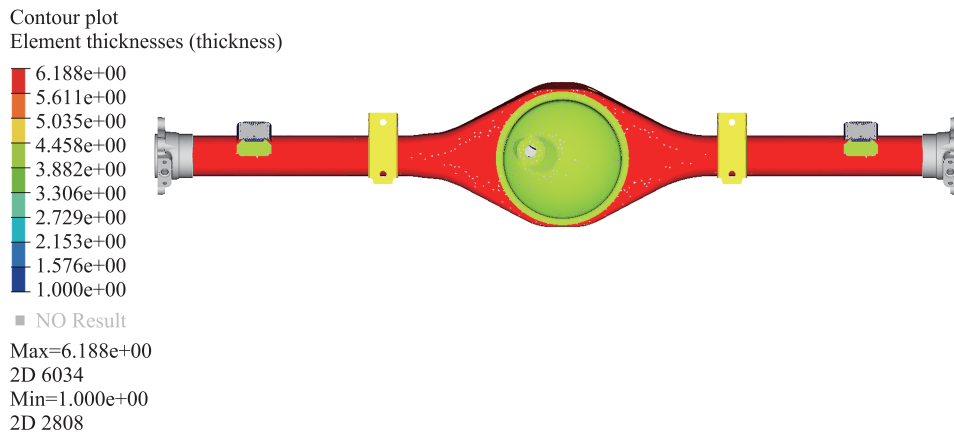


图 6 驱动桥壳尺寸优化后厚度云图

Fig. 6 Thickness cloud diagram after size optimization of axle housing

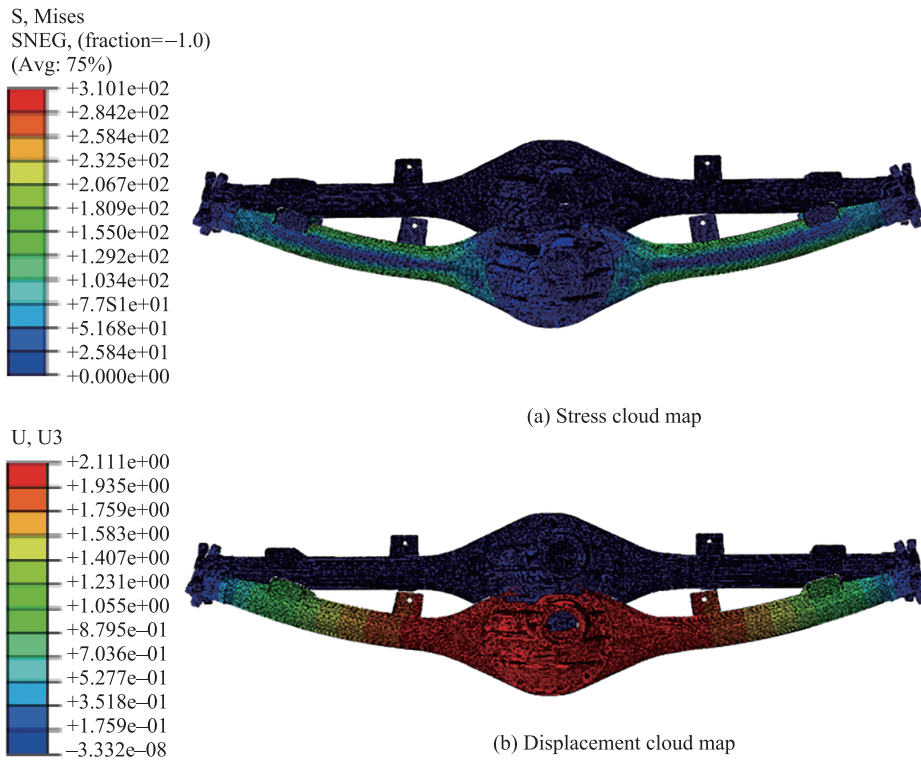


图7 优化后满载工况云图

Fig. 7 Optimized full load condition cloud diagram

满载工况下最大变形量为2.111 mm。该汽车后轴轮距为1 570 mm,根据式(4)转换为每米轮距最大变形量为1.345 mm。

$$2.111 \div 1\ 570 \times 1\ 000 = 1.345\ \text{mm} \quad (4)$$

低于标准中规定的1.400 mm限制,因此优化后的桥壳通过刚强度校核。

### 5 台架试验

汽车在实际行驶过程中会经过各种不确定的路况,司机的驾驶不确定性也会给汽车带来不同的载荷,桥壳也会承受着相应的断裂风险,桥壳在经过有限元分析后还需通过台架试验才能进入整车路试环节。汽车行业驱动桥试验严格遵循标准执行。

试验平台和试验样品的物理布局如图8所示。在同一批次的样品桥中随机且无差别地选择了3个作为试验样本,用于进行桥壳的静强度和静刚度台架试验,以1,2,3分别编号。

选用屏显液压脉动疲劳试验机作为桥壳台架试验的主要设备,以板簧座中心作为施力点,以桥壳的轮距处作为支点。静态垂直弯曲刚度试验应

从零负载到最大负载依次进行,数值从0加载到满负荷轴向负荷的2.5倍。

在加载过程中,载荷从0逐渐增加到22 785 N,位移传感器用于记录测量点的数据,而应变传感器用于记录施加的载荷。

根据标准规定,桥壳静强度试验标准以静强度后备系数  $K_n$  评定,  $K_n$  应满足

$$K_n = \frac{P_n}{P} > 6 \quad (5)$$

桥壳垂直弯曲刚强度实验结果如表4所示,样品桥壳的每米轮距最大变形量均小于1.400 mm,且后备系数均大于6,则试验桥通过桥壳垂直弯曲刚

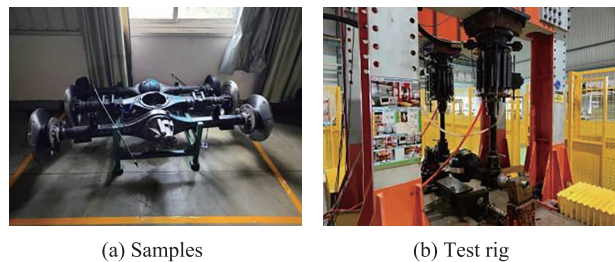


图8 桥壳试验台架及待检样品

Fig. 8 Axle housing test rig and samples

表4 桥壳垂直弯曲静刚度试验结果

Tab.4 Test results of vertical bending static stiffness strength of axle housing

Sample	Maximum deformation per meter of wheelbase/mm	Backup failure factor
1	1.410	6.4
2	1.320	6.3
3	1.250	6.2

强度台架试验。

## 6 结论

本文对某新款皮卡汽车的驱动桥壳采用多个有限元平台仿真与台架试验相结合的研究方法校核了其在满载工况下的力学性能,采用Optistruct平台对其进行轻量化优化,得出以下结论。

1) 基于Hypermesh所建立的有限元前处理模型具有较高的计算精度,该桥壳危险截面位置位于钢板板簧座下与桥壳连接处,优化前最大应力为307.20 MPa,小于45钢的屈服强度355.00 MPa。最大变形量为2.262 mm,换算为每米轮距的变形量为1.440 mm,超过标准要求的不大于1.400 mm限定。

2) 经Optistruct尺寸优化后的桥壳质量从59.07 kg降低至52.55 kg,实现了6.52 kg的减重,减重率达11.04%,效果显著。

3) 优化后桥壳通过有限元仿真校核,最大应力为310.10 MPa,每米轮距的最大变形量为1.345 mm,满足标准规定。且进一步通过台架试验验证,结果表明Optistruct优化平台在驱动桥壳轻量化优化方面具有较高的可靠性。

### 参考文献:

[1] 龚志才,何柳洋,付会鹏,等. 重型叉车前驱动桥壳结构强度研究[J]. 机电工程, 2021, 38(2): 204-209.  
GONG Z C, HE L Y, FU H P, et al. Structural strength for front drive axle housing of heavy-duty forklift[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38 (2): 204-209.

[2] 张兰生,李杨,徐超,等. 基于ANSYS Workbench的驱动桥壳动力学特性仿真与分析[J]. 工具技术, 2021, 55 (11): 64-68.  
ZHANG L S, LI Y, XU C, et al. Simulation and analysis of dynamic characteristics of drive axle housing based on ANSYS Workbench[J]. Tools Technology, 2021, 55 (11):

64-68.

[3] 丁文敏. 汽车驱动桥壳性能仿真分析及其改进[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 269-272.  
DING W M. Performance simulation analysis and optimization of a truck drive axle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(9): 269-272.

[4] 郑彬,张俊杰,李昭. 汽车驱动桥壳静态特性分析与多目标优化研究[J]. 机电工程, 2020, 37(7): 770-776.  
ZHENG B, ZHANG J J, LI Z. Static and dynamic characteristic analysis and multi objective optimization for automobile driving axle housing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37 (7): 770-776.

[5] PAN Z, YANG C, LIU Z, et al. Accelerated performance optimization of drive axle housings based on the pseudo-damage reservation method[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53(Part B): 102612.

[6] ZHENG B, FU S, LEI J. Topology optimization and multiobjective optimization for drive axle housing of a rear axle drive truck[J]. Materials, 2022, 15(15): 5268.

[7] CHEN Y, LIU X, SHAN Y, et al. Lightweight design of drive axle housing based on reliability[J]. International Journal of Vehicle Performance, 2020, 6(3): 294.

[8] JIN D, WANG ZZ, WANG J H, et al. Lightweight design and optimization of three-speed electric drive axle[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(5): 052005.

[9] 王雪梅,薛振国,刘玲玲. 基于有限单元法重载车辆驱动桥壳优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 240-244.  
WANG X M, XUE Z G, LIU L L. Optimization design of drive axle housing in heavy-duty vehicle based on finite element method[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021 (1): 240-244.

[10] 冯叶陶,廖敏,张小军,等. 丘陵山地拖拉机前驱动桥壳组件轻量化设计与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(5): 107-113.  
FENG Y T, LIAO M, ZHANG X J, et al. Lightweight design and experimental study on front drive axle housing assembly of tractors in hilly areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42 (5): 107-113.

[11] 许文超,王登峰. 基于疲劳寿命的驱动桥壳可靠性与轻量化设计[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 178-188.  
XU W C, WANG D F. Reliability and lightweight design for drive axle housing based on fatigue life[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (5): 178-188.

- [12] 林荣会,周鹏. 基于稳健性择优的自卸车驱动桥桥壳优化[J]. 机械传动, 2021, 45(6): 65-70.  
LIN R H, ZHOU P. Optimization of driving axle housing of dump truck based on robustness selection[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021,45 (6): 65-70.
- [13] 肖鸿飞, 范春利, 许可, 等. 基于仿生学理论的自卸车驱动桥桥壳优化设计[J]. 汽车实用技术, 2019(23): 94-96.  
XIAO H F, FAN C L, XU K, et al. Optimization design of dump truck drive axle housing based on bionics theory [J]. Automobile Applied Technology, 2019(23): 94-96.
- [14] 孙远敬, 郭鹰, 李鑫, 等. 矿用自卸车驱动车桥的桥壳结构优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 350-354.  
SUN Y J, GUO Y, LI X, et al. Optimization of the bridge shell structure of the mining dump truck-driven axle[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2022,41 (4): 350-354.
- [15] 周泽杰, 黄志超, 李绍杰. AA5052/SPFC440异种金属自

冲铆接数值模拟及试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(4): 84-93.

ZHOU Z J, HUANG Z C, LI S J. Numerical simulation and experimental study on self-piercing riveted AA5052/SPFC440 dissimilar metals[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022,39 (4): 84-93.



通信作者:黄志超(1971—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为板料连接。1992年本科毕业于江西工业大学,1995年硕士毕业于南昌大学,2003年博士毕业于南昌大学。E-mail: hzcosu@163.com。

(责任编辑:吴海燕)