

某汽车中间传动轴轻量化设计研究

马国浩¹, 陈慧慧²

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²湖北师范大学文学院, 湖北 黄石

收稿日期: 2023年9月18日; 录用日期: 2023年10月28日; 发布日期: 2023年11月3日

摘要

对某汽车中间传动轴进行轻量化设计。首先在SolidWorks软件中建立某汽车中间传动轴三维模型, 然后导入到workbench中进行结构静力学分析, 该中间传动轴所受应力远小于材料的抗扭强度, 具有较大的轻量化空间。提出两种不同的轻量化方案对其进行静力学分析, 有限元结果显示两种方案都能满足强度要求, 且降低了质量; 对质量较轻的方案进行基于响应面法的结构优化并进行仿真验证。结果表明, 优化后的结构减重46.5%, 其固有频率与原始结构接近且满足强度要求, 实现了中间传动轴轻量化设计目标。

关键词

轻量化设计, 中间传动轴, 响应面法, Workbench

Research on Lightweight Design of Intermediate Drive Shaft of an Automobile

Guohao Ma¹, Huihui Chen²

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²College of Liberal Arts, Hubei Normal University, Huangshi Hubei

Received: Sep. 18th, 2023; accepted: Oct. 28th, 2023; published: Nov. 3rd, 2023

Abstract

There is lightweight design of an automobile intermediate drive shaft. Firstly, a three-dimensional model of an automobile intermediate drive shaft is established in SolidWorks software, and then imported into workbench for structural static analysis, the stress of the intermediate drive shaft is much less than the torsional strength of the material, and it has a large lightweight space. Two different lightweight schemes were proposed for static analysis, and the finite element results

文章引用: 马国浩, 陈慧慧. 某汽车中间传动轴轻量化设计研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(6): 5082-5089.

DOI: 10.12677/mos.2023.126462

showed that both schemes could meet the strength requirements and reduce the mass. The structure optimization based on the response surface method is carried out for the light mass scheme and the simulation is verified. The results show that the weight of the optimized structure is reduced by 46.5%, and its natural frequency is close to the original structure and meets the strength requirements, which achieves the lightweight design goal of the intermediate drive shaft.

Keywords

Lightweight Design, Intermediate Drive Shaft, Response Surface Method, Workbench

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球燃油消耗量和环境保护等问题日益突出, 汽车轻量化被认为是实现可持续交通的关键策略之一。汽车轻量化是通过降低车辆重量及减少燃料消耗的方式来改善燃油经济性、减少尾气排放, 并提高车辆的性能、安全性和乘坐舒适性。

现有的文献已经证明了轻量化设计对汽车性能和能效的巨大潜力。减少车身重量可以提高燃油经济性, 平均每减少 10% 的车重, 可降低约 6%~8% 的燃料消耗。此外, 轻量化设计还可以提升车辆的操控性能、加速能力和制动效果, 提高乘坐舒适性。现有机械结构主要是通过拓扑优化[1] [2]、尺寸优化[3]和结构优化[4]等方法进行轻量化设计。研究人员对不同车型的车架[5] [6] [7]、轮毂[8] [9] [10] [11]、白车身[12] [13]等基于多种方法进行了轻量化设计, 黄心顺[14]对汽车起重机传动轴轻量化设计做出具体论述, 提出了轻量化设计方案并校核; 张歆伊[15]通过对客车整车模型进行有限元分析, 发现结构尺寸优化比更换材料的性能更好。上述研究者针对不同的机械零部件进行设计, 均能在满足性能要求的基础上进行减重。

本文建立某汽车中间传动轴三维模型, 对极限扭转工况进行静力学分析, 根据分析结果对该中间传动轴进行结构优化, 并对优化前后的应力、频率进行对比, 验证了轻量化方案的可行性。

2. 材料与方法

汽车传动轴的主要作用是将发动机输出的动力传递给驱动轮, 以实现车辆的行驶。它通过连接发动机和驱动桥, 并传输转动力矩来驱动车辆。传动轴是一个高转速、少支承的旋转体, 一般由万向节、中间传动轴、中间支承轴、主传动轴等机件组成[16]。

本文以某汽车传动轴为例, 为了方便分析, 只考虑中间传动轴, 且将中间传动轴不同截面上的花键、轴键、环槽等忽略不计。等截面中间传动轴的直径为 24 mm, 长度为 408 mm, 质量为 1.4526 Kg, 材料为 40Gr, 调质后该材料的属性见表 1。

Table 1. Material properties after 40Gr quenching

表 1. 40Gr 调质后材料属性

材料	密度(kg/m ³)	杨氏模量(GPa)	泊松比	抗扭刚度(MPa)
40Gr	7870	211	0.277	约 900

本文在进行中间传动轴的轻量化设计时, 按照如下步骤:

- 1) 首先对中间传动轴原始结构进行极限扭转工况下的静力学分析, 研究原始结构的轻量化潜能;
- 2) 对原始结构提出两种设计方案, 研究其在质量降低的同时能否满足极限工况下扭转强度的要求;
- 3) 对质量较轻的方案进行基于响应面法的结构优化, 并对优化后的结构进行静力学和模态分析, 验证优化结构的合理性。

3. 结果与分析

3.1. 原始结构静力学分析

在 Solid Works 软件中绘制中间传动轴的三维模型, 将该三维模型导入到 ANSYS workbench, 研究中间传动轴在极限扭转工况下所受的应力大小。中间传动轴在极限扭转工况下左端固定, 右端施加 600 Nm 的扭矩。使用六面体划分网格, 设定网格单元尺寸为 2 mm, 划分完成后共有 249,129 个节点, 59,328 个单元, 平均网格质量 0.779, 满足网格质量要求。仿真得到原始结构的应力云图如图 1 所示:

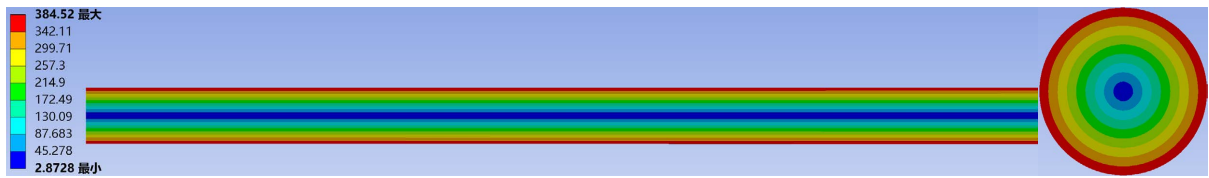


Figure 1. Simulation cloud of the original structural stress

图 1. 原始结构应力仿真云图

由仿真结果可知, 中间传动轴最大应力位于表面, 为 384.52 MPa, 远小于调质后 40Gr 的抗扭强度 900 MPa, 有较大的轻量化空间。因此本文提出两种设计方案, 如图 2 所示。方案 1 在原始结构上内部设置一个直径为 8 mm 的通孔, 长度保持不变; 方案 2 在方案 1 的基础上在中间扩大了孔, 内孔直径最大为 16 mm。

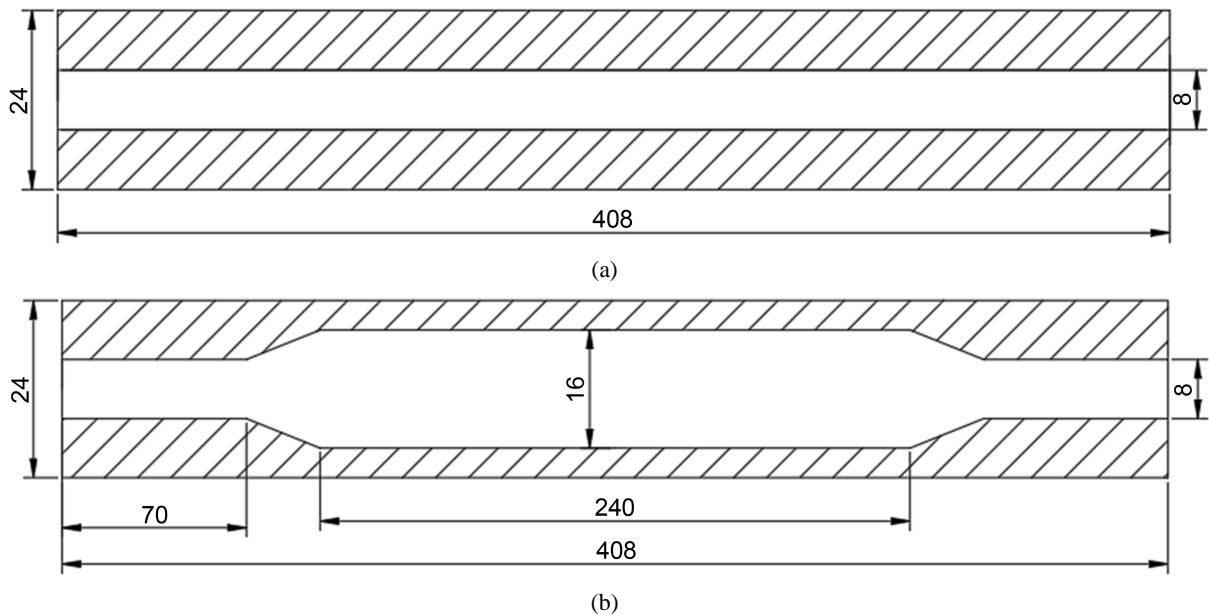


Figure 2. Cross-sectional views of two design options. (a) Programme 1; (b) Programme 2

图 2. 两种设计方案截面图。(a) 方案 1; (b) 方案 2

3.2. 两种设计方案静力学分析

将两种设计方案分别导入到 workbench 中进行静力学分析, 其中施加载荷和条件约束设置与原始结构一致, 得到的应力仿真云图如图 3 所示:

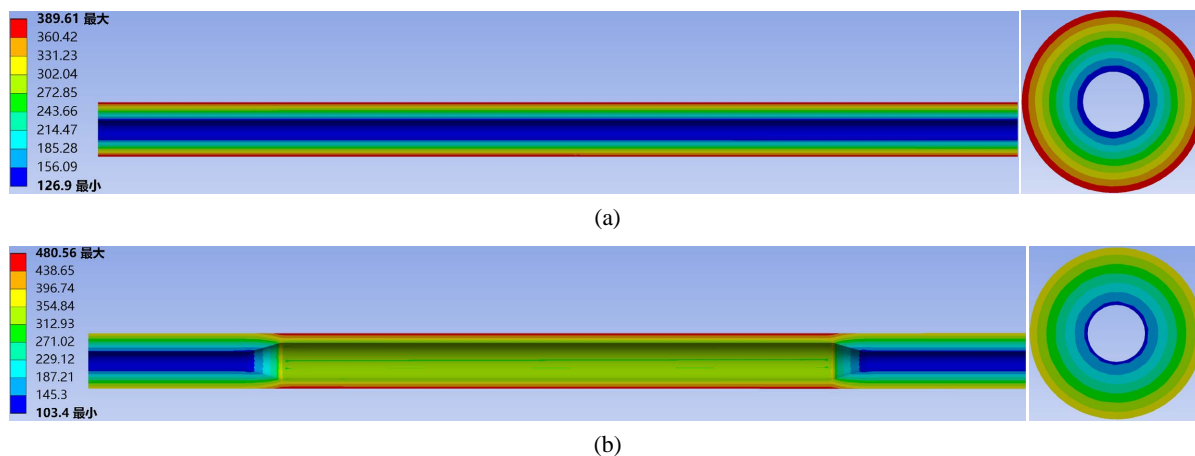


Figure 3. Two scenarios stress simulation cloud diagram. (a) Programme 1; (b) Programme 2

图 3. 两种方案应力仿真云图。(a) 方案 1; (b) 方案 2

由仿真结果可知, 方案 1 和方案 2 所受最大应力均在外表面, 方案 1 最大应力为 389.61 MPa、方案 2 最大应力为 480.56 MPa, 均未达到材料的抗扭强度, 且方案 2 的质量为 0.99 kg, 比方案 1 的质量 1.29 kg 更轻。因此对方案 2 进行基于响应面法的结构优化。

3.3. 基于响应面法的结构多目标优化

多目标优化是在某个情景中在需要达到多个目标时, 由于容易存在目标间的相互冲突, 一个目标的优化是以其他目标劣化为代价, 因此很难出现唯一最优解, 而是要在多个目标之间做出协调和折中处理, 使总体的目标尽可能的达到最优。

3.3.1. 试验设计

试验设计(Design of Experiments, 简称 DOE)是一种系统化的实验设计方法, 它旨在通过合理地设计和规划实验来获取有效的数据, 从而对研究对象或系统进行准确、可靠的推断和分析, 能够提高实验效率和准确性。常用的响应面试验设计类型有两种, 分别是中心复合材料设计和 Box-Behnken 设计。由于中心复合材料设计是包括中心点并使用一组轴点扩充的因子或部分因子设计, 是最常用的响应曲线设计试验, 因此本文使用的是中心复合材料设计, 设计类型选择自动定义的。优化设计变量如表 2 所示。

Table 2. Optimization design variables

表 2. 优化设计变量

变量名	初始值	上限值	下限值
小孔半径 r (mm)	4	4.4	3.6
中孔半径 R (mm)	8	8.8	7.2
中孔长度 L (mm)	240	270	210

3.3.2. 响应面拟合

响应面拟合是一种统计建模方法, 用于建立响应变量与输入因素之间的关系模型。它通过拟合一个数学函数来描述变量与输入因素之间的关系, 并用于预测和优化系统的性能。响应面拟合的目标是找到最佳的输入因素组合, 通过优化响应面模型, 可以确定在给定的因素范围内, 使响应变量达到最优的因素值组合。其直接改变设计变量快速获得响应的估计值, 而不需要耗费大量资源去重新计算真实模型。

选择任意两个设计变量和单个响应可以通过三维图表达三者的响应面关系。本文的设计变量和响应参数较多, 无法直接观察到所有参数的响应面关系, 如图 4 所示 x 轴为变量中孔半径 R 的变化范围, y 轴为变量小孔半径 r 的变化范围, z 轴为对应的相应值质量的变化范围; 图 5 所示 x 轴为中孔半径 R 的变化范围, y 轴为中孔长度 L 的变化范围, z 轴为对应的相应值等效应力的变化范围。

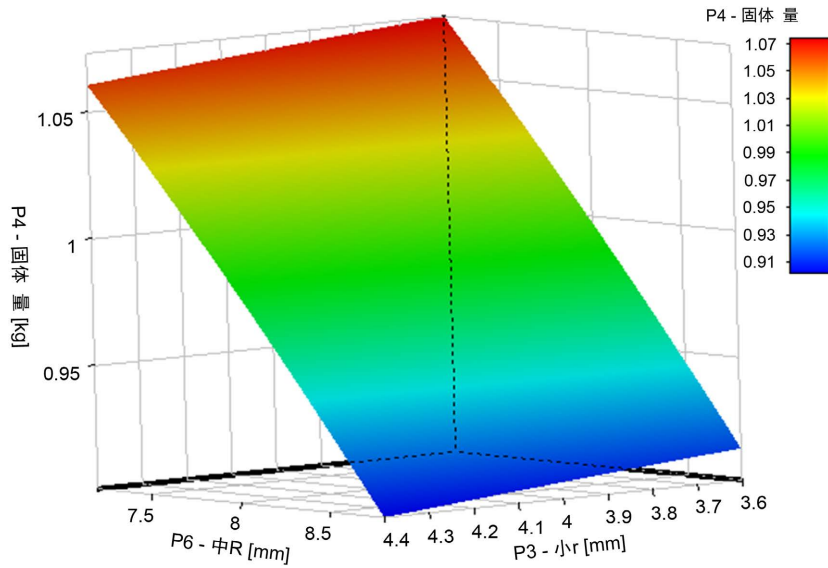


Figure 4. Mass response surface model
图 4. 质量响应面模型

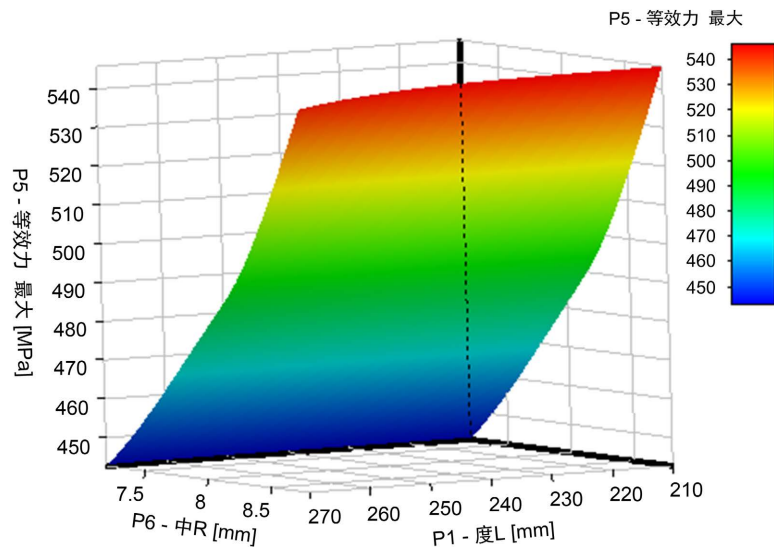


Figure 5. Equivalence force response surface model
图 5. 等效应力响应面模型

由图 4 可知, 当中孔长度 L 保持不变时, 中孔半径 R 取最大值, 小孔半径 r 取最小值时固体质量最小; 中孔半径 R 取最小值, 小孔半径 r 取最小值, 此时固体质量最大。由图 5 可知, 当小孔半径 r 保持不变时, 中孔半径 R 取最小值时等效最大应力最小; 当中孔半径 R 取最大值时等效最大应力最大。此外从图 5 中还可以看出在小孔半径保持不变时, 等效最大应力只取决于中孔半径大小而与中孔长度 L 的取值无关。

3.3.3. 多目标优化

本文以质量最小化和等效应力最小化为目标, 使用 MOGA 优化方法对该结构进行优化。MOGA 即 Multi-Objective Genetic Algorithm, 是一种多优化目标的迭代遗传算法, 用于处理连续设计变量的多目标优化问题。MOGA 方法适合于搜索全局的最优设计, 能同时用于响应面优化系统以及直接优化系统。优化后的候选点数据如表 3 所示。

Table 3. Candidate point parameter value data

表 3. 候选点参数值数据

	候选点 1	候选点 2	候选点 3
长度 L (mm)	269.34	269.05	269.93
小孔半径 r (mm)	4.3844	4.3813	4.3998
中孔半径(mm)	8.5908	8.5931	8.6374
质量(kg)	0.90081	0.90084	0.89477
等效应力最大(MPa)	521.15	521.43	525.41

候选点质量和等效应力参考值的偏差如表 4 所示, 候选点 1 和候选点 2 中质量与参考值的偏差为 0.68%, 候选点 1 等效应力与参考值的偏差-0.81%, 候选点 2 等效应力与参考值的偏差为-0.76%, 候选点 3 的质量和等效应力与参考值无偏差, 因此对候选点 3 进行试验验证。

Table 4. Candidate point mass and maximum equivalence force reference value deviation

表 4. 候选点质量和最大等效应力参考值偏差

名称	长度 L (mm)	小孔半径 r (mm)	中孔半径 R (mm)	固定质量(kg)		最大等效应力(MPa)	
				参数值	与参数值偏差	参数值	与参数值偏差
候选点 1	269.34	4.3844	8.5908	0.90081	0.68%	521.15	-0.81%
候选点 2	269.05	4.3813	8.5931	0.90084	0.68%	521.43	-0.76%
候选点 3	269.93	4.3998	8.6374	0.89477	0.00%	525.41	0.00%

3.3.4. 轻量化方案验证

以候选点 3 的数据进行验证, 取中孔长度为 269.93 mm, 中孔半径为 8.64 mm, 小孔半径 4.40 mm。使用该数据绘制三维模型并导入到 workbench 进行静力学分析, 与原始结构的施加载荷和条件约束一致, 结构优化后应力云图如图 6 所示。

由图 6 可知, 优化后结构最大应力位于中间传动轴外表面, 且最大应力为 526.01 MPa, 低于 40Gr 调质后的抗扭强度, 因此该优化方案合理, 中间传动轴优化后质量为 0.8716 kg。

将优化前后的结构进行自由模态分析, 由于自由模态前六阶为 0, 而高阶模态误差较大且较难激励, 因此这里只对第七阶模态进行分析。优化前后第七阶模态频率与振型见表 5 所示。

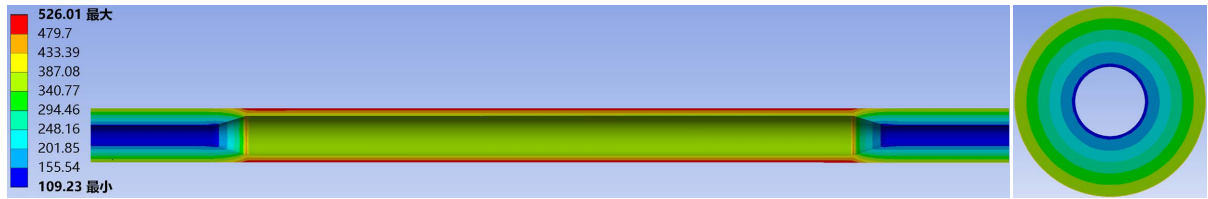


Figure 6. Optimize the post-stress cloud
图 6. 优化后应力云图

Table 5. Comparison of seventh-order modes before and after optimization
表 5. 优化前后第七阶模态对比

	原始结构	优化后结构
频率(Hz)	658.66	691.78
振型		

由表 5 可知, 优化后结构与原始结构频率较为接近, 即不会因为结构改变而导致与其相连的零部件产生共振。且优化前后第七阶振型主要都是 Z 轴方向上的弯曲。经过抗扭强度和频率的对比可知, 优化后的结构在满足性能要求的基础上减轻了质量, 验证了该优化结构的可行性。

4. 结论

本文对某汽车中间传动轴进行了轻量化设计研究, 得到如下结论:

- 1) 通过对原始中间传动轴进行静力学分析可知, 在极限工况下, 中间传动轴最大应力位于结构外表面, 为 384.52 MPa, 远低于 40Gr 调质后的抗扭强度, 即中间传动轴具有较大的轻量化空间;
- 2) 根据中间传动轴的原始结构提出两种轻量化方案, 在施加载荷和条件约束一致的情况下两种方案最大应力均未达到材料抗扭刚度;
- 3) 对质量较小的方案 2 进行基于响应面法的结构优化, 优化后的结构在质量减少 46.5% 的情况下不仅未达到材料的抗扭强度, 而且与原始结构第七阶自由模态的频率和振型基本一致, 验证了该优化结构的可行性。

参考文献

- [1] 冯兆龙, 赵又群, 张陈曦. 基于拓扑优化的机械弹性车轮轻量化分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 511-516+523.
- [2] 宋经远, 邵万仁, 贾东兵, 等. 调节环结构轻量化拓扑优化设计研究[J]. 机械工程师, 2022(9): 93-95+98.
- [3] 谭磊, 孙刚, 王永富. 基于尺寸优化的电铲斗杆轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2022, 377(7): 223-227.
- [4] 刘帆, 黄勤. 某商用车前护板轻量化结构优化及分析[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(11): 61-64.
- [5] 马晓清, 马小明, 孙涛, 等. 无副车架自卸汽车车架多目标轻量化优化[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2023, 38(3): 69-74.
- [6] 丁福生, 张瑞, 吕红明, 等. 重型自卸车副车架强度分析及轻量化设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(8): 16-19.
- [7] 林有淮. 基于灵敏度分析的客车骨架结构优化设计[J]. 机械工程与自动化, 2023(3): 68-71.
- [8] 王宁, 成军宇, 贾明正, 等. 新能源汽车轮毂轻量化设计[J]. 时代汽车, 2023(18): 118-120.
- [9] 杨国营. 面向汽车轮毂轻量化设计的组合优化方法[J]. 机电工程技术, 2023, 52(7): 124-128.

- [10] 赵坤阳, 傅文韬, 张雷. 基于 ANSYS Workbench 汽车轮毂轻量化设计[J]. 内燃机与配件, 2023(12): 37-39.
- [11] 杨国营. 基于概念设计的汽车轮毂轻量化设计[J]. 机电工程技术, 2023, 52(6): 257-262.
- [12] 李洪林, 刘学, 温杨, 等. 电动汽车白车身轻量化设计及性能分析[J]. 装备机械, 2023(2): 43-47.
- [13] 苏彦芳. 纯电动乘用车白车身轻量化实践探讨[J]. 汽车测试报告, 2023(10): 146-148.
- [14] 黄心顺. 汽车起重机传动轴的轻量化设计[J]. 建筑机械化, 2020, 41(4): 54-56.
- [15] 张歆伊. 18 m 电动铰接客车有限元分析及轻量化设计[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [16] 赵福堂, 主编. 家用汽车的选购与使用维护[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.