

【工程与技术研究】

工字梁前桥性能分析及响应面优化

陈 宇, 樊洋洋, 储浏鹏, 高 政, 沈纪元

(巢湖学院 机械工程学院, 安徽 巢湖 238000)

摘 要: 为了获取车辆前桥的性能特性并验证其可靠性, 对所选取的工字梁前桥原型的典型工况进行静态和动态特性分析。为进一步提高前桥的综合性能, 根据制动工况下受力状况及静态分析结果, 对前桥进行有预应力模态分析。根据得到的前六阶模态振型, 对前桥进行谐响应分析, 得出第二阶振型频率下发生的共振影响; 并以前二阶振型频率为输出变量, 材料属性为设计变量进行响应面优化, 得到了不同材料属性对前桥振动性能的影响, 这可为进一步改善前桥结构动态性能提供参考。

关键词: 前桥; 静态特性; 动态特性; 响应面

中图分类号: TD 659 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.06.013

0 引言

前桥是车辆的重要组成部分, 主要功能为承载车身所受到的垂直载荷, 将各向负载和扭矩传递给车辆, 通过转动关节来实现车辆的转向, 以适应不同工况下的车辆承载和转向要求。在行驶过程中汽车受力情况十分复杂, 前桥作为主要承重件, 是汽车出现损坏的重灾区, 因此前桥必须具有良好的静态及动态特性。前桥的合理结构优化有利于车辆悬架系统的轻量化, 能进一步提升车辆的燃油经济性。张泽强^[1]采用有限元分析方法对某汽车工字梁前桥进行仿真分析, 评价了前桥的基本性能。文广等^[2]借助有限元法对车桥结构动态特性进行研究, 通过模态分析和谐响应分析获取该车架结构的动态特性参数, 并考虑尺寸参数对其动态特性的影响。方永利等^[3]对车桥结构进行拓扑优化分析, 在优化方案的基础上, 以车桥结构静态特性为约束条件, 车桥结构质量为主要目标函数进行多学科优化, 旨在减轻结构质量。现有研究采用的方法大多以经验或单种(单目标变量及尺寸参数作为设计变量)优化方法为主, 很少有从前桥静、动态特性的综合性能方面系统的设计前桥结构。

本文根据所选取原型前桥的实际受力情况, 对其结构进行静、动态特性分析, 并在此基础上, 对前桥结构进行谐响应分析, 得出不同材料属性对前桥结构前二阶振动频率的影响, 旨在满足强度刚度的基础上, 进一步提升结构动态特性, 为后续前桥结构设计提供一定的参考。

1 工字梁前桥静态、动态特性分析

本文研究对象为某中型货车前桥, 其型号为 EQ1090E, 具体技术参数: 前轴轴载质量为 2360 kg, 前钢板弹簧座中心距为 851 mm, 汽车质心高度为 900 mm, 轴距为 3950 mm, 前轮距为 1810 mm, 主销中心距

收稿日期: 2023-03-28

第一作者简介: 陈 宇(1991—), 男, 安徽宿州人, 讲师, 博士研究生, 主要从事先进制造系统与技术、新材料性能与应用研究。E-mail: cy3059555@163.com

为 1528 mm。通过 Solidworks 软件对所选的中型货车前桥进行建模,并导入 ANSYS 软件中进行前处理。前桥材料为 45 钢,弹性模量为 2.1×10^5 MPa,泊松比为 0.3,密度为 7.78×10^3 kg/m³,屈服强度为 450 MPa。为了提高仿真分析的计算效率,将前桥划分为 10 mm 的尺寸单元,以防止变形单元的出现,节点数为 325 830,单元数为 220 493。

1.1 前桥的静态特性分析

1.1.1 受力分析

以前桥在垂直冲击工况和制动工况两种工况作为施力条件:前桥在垂直冲击工况下,主要受垂向力;在制动工况下,主要受纵向力和垂向力。(1)在垂直冲击工况下,汽车在不平坦的道路上行驶时,垂直冲击工况下两个车轮的垂向反力为 $F_{z1} = F_{z2} = (k_1 \times m \times g) / 2$ 。式中: F_{z1} 和 F_{z2} 分别是垂直冲击工况时左、右车轮的垂向反力; k_1 是动载荷系数,取 2.5; m 是车辆的前轴荷质量,为 2360 kg。(2)在制动工况下, $F_{z3} = F_{z4} = (k_2 \times m \times g) / 2$ 。式中: F_{z3} 和 F_{z4} 分别是制动工况时左、右车轮的垂向反力; k_2 是质量转移系数,取 1.7。 $F_{x1} = F_{x2} = F_{z3} \times k_3 = F_{z4} \times k_3$ 。式中: F_{x1} 和 F_{x2} 分别是制动工况时左、右车轮中心处的纵向反力; k_3 是轮胎与地面的附着系数,取 0.6。

1.1.2 分析结果

前桥是通过主销把车辆两侧的车轮联结起来的,在车辆正常行驶时,前桥会在板簧安装面上承受来自弹簧的竖向支承负荷。固定转向节臂,在主销孔处添加约束,进行垂直冲击工况下的静态特性分析,在受力分析的基础上,对轮胎接触面施加垂向反作用力 25 223.4 N。图 1 显示了前桥在垂直冲击工况下的应力和位移情况。在垂直冲击工况下,前桥中部为最大变形区域,最大位移量为 0.199 53 mm,最大应力值为 57.719 MPa,位于前桥上部靠近转向节臂连接处。

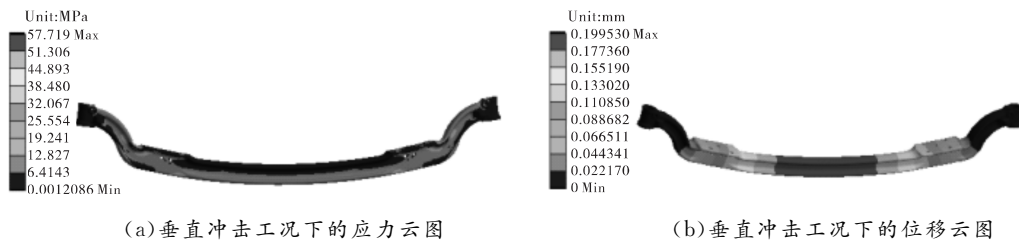


图 1 车桥在垂直冲击工况下应力、位移云图

在制动工况下的静态特性分析:将垂向反力 10 908.1 N 施加到轮胎接点处,得到了前桥在制动工况下的应力和位移云图(图 2),前桥在制动工况下所受等效应力最大值为 60.315 MPa,同样位于前桥上部靠近转向节臂连接处。

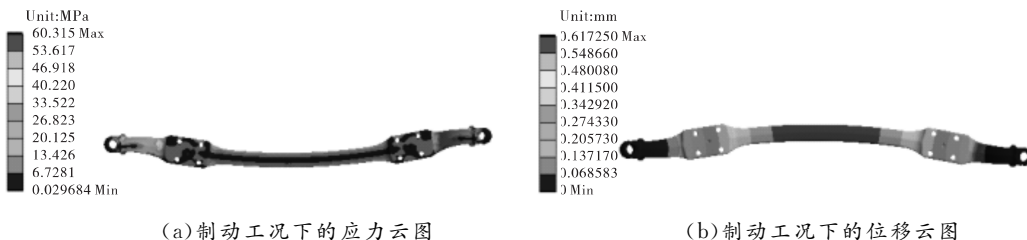


图 2 车桥在制动工况下的应力、位移云图

1.2 前桥的动态特性分析

1.2.1 模态分析

前桥结构在车辆行驶的过程中一般会出现振动的状况,同时在车桥结构所受的载荷作用下,前桥的应力状态可能会影响其固有频率。根据模态分析的基本理论和步骤^[4-5],以制动工况下受力分析为基础,对前桥进行有预应力的模态分析以避免发生结构共振。在分析过程中固定转向节臂,在主销孔处添加约束,

在弹簧板座定位孔处施加载荷,在后处理器中提取结果。本文选择了对比前六阶的模态分析结果,各阶频率响应结果分别为 95.43、222.49、250.75、354.62、437.55、579.42 Hz。

发动机怠速激振频率大小由发动机对应型号确定,发动机怠速激振频率 $f=(n \times m)/60$,其中, n 为发动机怠速时的转速,为 500~900 r/min; m 为发动机气缸数值的一半(本文所选取的中型货车发动机为四缸四冲程柴油机),取值为 2。由此可得发动机的激振频率为 16~30 Hz,不平路面激励为 0~20 Hz,因此该前桥的固有频率均大于外界激励频率,能够有效避免发生共振风险,符合动态特性要求。

1.2.2 谐响应分析

基于模态分析的结果,采用振型叠加法^[6-7]对汽车前桥进行在紧急制动工况下的谐响应分析,得出了该结构的位移频谱、应力频谱。根据前面模态分析结果将求解频率设为 0~580 Hz,频率间隔设为 10 Hz,并对前桥施加简谐载荷。该工况下施力方向上的应力与位移频谱如图 3 所示。由结果可知,虽然在施力方向上的位移、应力频谱显示分别在 98.20、225.12 Hz 时都有较高的波峰,且分别与第一、二模态固有频率接近并发生共振,但是根据频谱具体的数值可知,在 225.12 Hz 处,即第二阶固有频率下发生的共振影响更大,此时最大位移达到了 4.2298 mm,最大应力值为 7.7642 MPa,远小于材料疲劳极限。

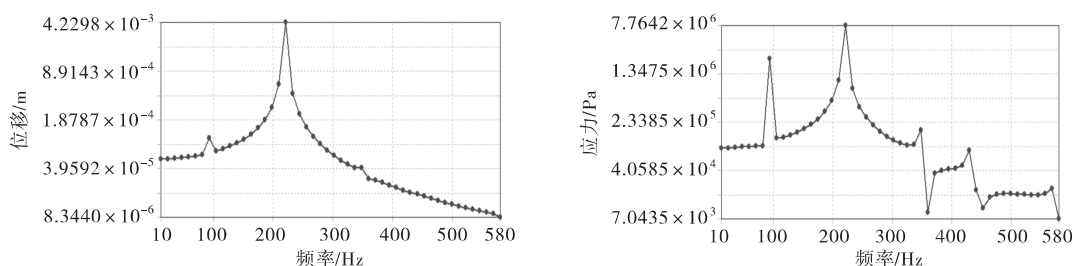


图 3 施力方向上位移及应力频谱

2 工字梁前桥响应面优化

2.1 前桥响应面模型

由同组分析对前桥的谐响应分析结果可知,外界激励频率对前六阶振型固有频率影响都在合理范围内,但与前二阶振型固有频率产生的共振对前桥产生的影响相对较大。故对前桥在制动工况下的响应面分析是通过试验设计(Design of Experiment, DOE)插值或拟合形成的输出变量(第一阶振型固有频率、第二阶振型固有频率)关于制动工况下的设计变量(前桥材料的密度、弹性模量、泊松比)的数学函数关系进行的,前桥的材料参数设计变量如表 1 所示。

表 1 前桥的材料参数设计变量表

设计变量	下限	原设计值	上限
密度/(kg · m ⁻³)	5000	7780	9000
弹性模量/Pa	1.0 × 10 ¹¹	2.1 × 10 ¹¹	3.0 × 10 ¹¹
泊松比	0.15	0.30	0.40

2.2 面心复合设计

该响应面分析的 DOE 取点方法采用 Central Computer Design,设计类型选用 Face-Center 填充。在此基础上,设计了一套样例实验,利用最小的资源、最大的计算量,得到了具有较高相关性的资料,这些能够反映设计的目的。本文采用面心设计的方法获得样本点,这种方法需要的样本数量比较多,且不会影响测量的准确性,从而使得计算结果更为严格。

2.3 响应面分析及优化

完成在 DOE 中的数据分析后,进入 Response Surface 将上述分析结果图示化,设计变量对应输出变

量的响应面分析结果如图 4~6 所示。

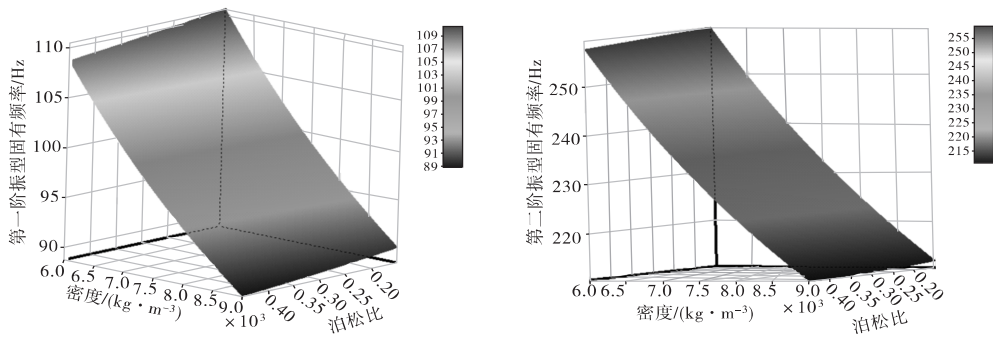


图 4 密度、泊松比对第一、二阶振型固有频率的响应图

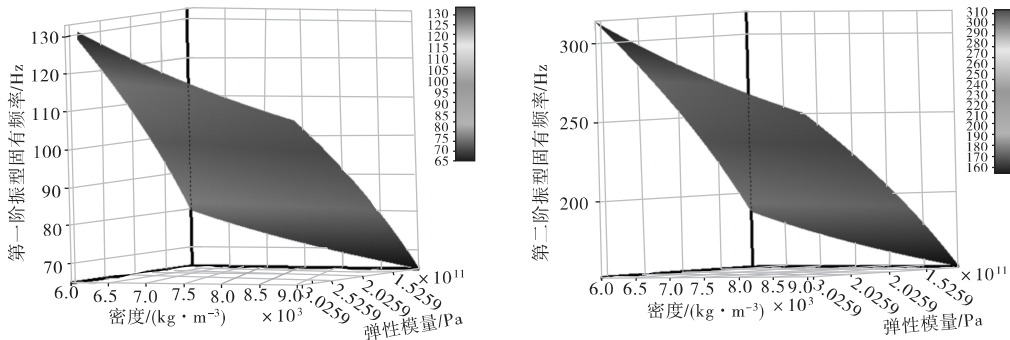


图 5 密度、弹性模量对第一、二阶振型固有频率的响应图

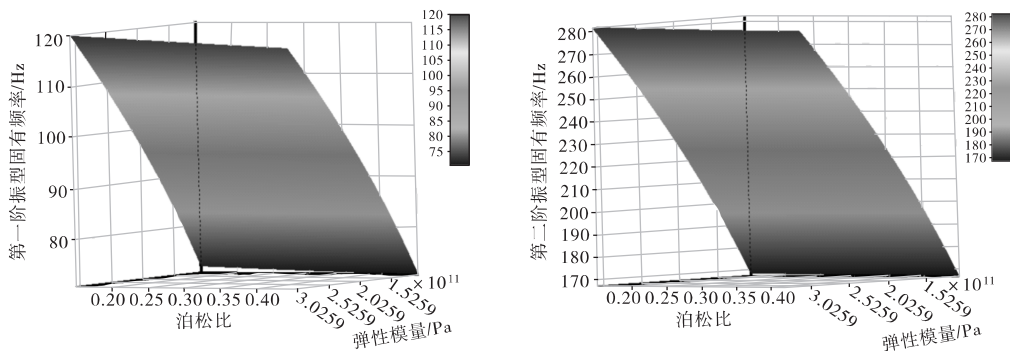


图 6 弹性模量、泊松比对第一、二阶振型固有频率的响应

根据所建立的响应面模型可知:材料设计变量(密度、泊松比)数值减小,会造成前桥在制动工况下的第一、二阶振型固有频率不断减小,但密度对第一、二阶振型固有频率的敏感性较高;当材料设计变量(弹性模量)的数值减小时,在制动工况下的第一、二阶振型固有频率同样不断减小,但敏感性相比密度要小;当材料设计变量(泊松比)的数值减小时,会造成前桥在制动工况下的第一、二阶振型固有频率不断减小,但对输出变量的敏感性比密度和弹性模量要小得多。综上,材料参数对输出变量的敏感性、材料密度影响最大,材料泊松比影响最小。

3 结论

(1)运用 ANSYS 对垂直冲击及制动工况下的工字梁前桥进行静态特性分析,在垂直冲击工况下前桥中部为最大变形区域,最大位移量为 0.199 53 mm;最大应力值为 57.719 MPa,位于前桥上部靠近转向节臂连接处。在制动工况下所受等效应力最大值为 60.315 MPa,同样位于前桥上部靠近转向节臂连接处,前桥所受最大位移量为 0.617 25 mm。(2)在制动工况下前桥静态特性分析结果基础上,对前桥进行模式

分析,得出前六阶振型固有频率,并对此模态分析结果进行谐响应分析,结果表明,第二阶固有频率下发生的共振影响更大。(3)在动态特性分析的基础上,通过响应面优化,得出不同材料属性对前桥振动性能有影响。结果表明,材料密度对在制动工况下的第一、二阶振型固有频率影响最大,材料泊松比影响相对较小。

参考文献:

- [1] 张泽强. 工字梁前桥的静力学及振动分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(9): 148-152.
- [2] 文广, 吴海生, 左芳君, 等. 基于有限元法的车架动态特性分析[J]. 成都工业学院学报, 2023(1): 1-5.
- [3] 方永利, 黄洁, 张峰. 参数驱动的副车架多级轻量化设计方法[J]. 机械设计, 2022, 39(9): 121-127.
- [4] 房建斌, 赵宇博, 张欣. 某机载电子设备托架结构优化设计及动力学分析[J]. 电子机械工程, 2021, 37(2): 13-16.
- [5] 王欣欣, 李中凯, 刘等卓. 基于响应面法的玻璃钻孔支撑结构优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(2): 131-135.
- [6] 高云凯, 申振宇, 冯兆玄, 等. 多目标优化在车门轻量化设计中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 275-280.
- [7] 李永亮, 杜彦斌, 梁强, 等. 基于 FEM 和 DOE 分析的超声切刀结构设计与振动特性研究[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版): 1-9 [2023-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.n.20230313.1003.002.html>.

Performance Analysis and Response Surface Optimization of I-beam Front Axle

CHEN Yu, FAN Yangyang, CHU Liupeng, GAO Zheng, SHEN Jiyuan

(School of Mechanical Engineering, Chaohu University, Chaohu 238000, China)

Abstract: In order to obtain the performance characteristics of the vehicle's front axle and verify its reliability, a static characteristic analysis of its typical working conditions is conducted through the selected I-beam front axle prototype. In order to further improve the comprehensive performance of the front axle, based on the stress condition and static analysis results of the front axle under braking conditions, a prestressed modal analysis is conducted on the front axle, and a harmonic response analysis is conducted on the front axle based on the first six modal vibration modes obtained. The resonance effect occurring at the second mode frequency is greater, and the previous second mode frequency is the output variable, and the material properties are the design variables for response surface optimization. The impact of different material properties on the vibration performance of the front axle is obtained, which provides a certain reference value for further improving the dynamic performance of the front axle structure in the future.

Keywords: the front axle; static characteristic; dynamic characteristics; response surface

(责任编辑:王新亮)