

文章编号: 1006-2343(2023)03-135-04

轴承刚度对光测设备跟踪架谐振频率影响

栾云杰^{1,2}, 程路超¹, 王强龙^{1,2}, 董泉良^{1,2}, 王晓明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033, E-mail: luanyunjie20@mails.ucas.ac.cn
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 跟踪架是影响光测设备性能的关键部件, 轴承又是跟踪架的关键零件, 轴承刚度直接影响光测设备的动力学特性。以 400 mm 口径光测设备跟踪架为研究对象, 基于光测设备跟踪架的模态试验结果, 采用弹性薄层单元等效轴承刚度, 利用 Monte Carlo 法对弹性薄层单元进行参数修正, 建立了准确的有限元模型, 有限元分析结果表明: 光测设备跟踪架有限元分析结果与试验结果最大误差为 8.5%; 通过对等效轴承刚度的弹性薄层单元刚度进行参数化分析, 研究了轴承刚度对光测设备跟踪架结构谐振频率的影响, 为后续工程应用提供了依据。

关键词: 光测设备跟踪架; 轴承刚度; 动力学模型修正; 模态试验; 有限元分析

中图分类号: TH743 文献标识码: A

DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2023.0120

Influence of Bearing Stiffness on Resonant Frequency of Optical Measuring Equipment Tracking Frame

LUAN Yunjie^{1,2}, CHENG Luchao¹, WANG Qianglong^{1,2},
DONG Quanliang^{1,2}, WANG Xiaoming¹

(1. China Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The tracking frame is a key component affecting the performance of optical measuring equipment, and the bearing is a key component of the tracking frame. Bearing stiffness directly affects the dynamic characteristics of optical measuring equipment. In this paper, the tracking frame of a 400 mm aperture optical measuring equipment is taken as the research object. Based on the modal test results of the tracking frame, the elastic thin-layer element equivalent bearing stiffness is adopted, and the Monte Carlo method is used to modify the parameters of the elastic thin layer element to establish an accurate finite element model. The maximum error between the finite element analysis result and the test result is 8.5%. Through parametric analysis of the elastic thin-layer element stiffness, the influence of bearing stiffness on the resonant frequency of the optical tracking frame structure is studied, which provides a basis for subsequent engineering application.

Key words: optical measuring equipment tracking rack; bearing stiffness; dynamic model modification; modal test; finite element analysis

随着科技的发展, 光测设备逐渐向大口径、高分辨率、高精度、高机动性方向发展, 导致跟踪架的质量不断增加, 谐振频率不断降低; 光测设备在车载、舰载运输和使用的过程中会承受多种激励载荷, 而且这些激励载荷十分复杂, 结构的谐振频率和激励载荷频率接近时, 就会引起光测设备结构的共振从而严重影响其使用功能, 甚至会造成结构破坏^[1-2]。因此, 为了更好的满足系统高机动性高精度跟踪测量的需

求, 必须提高系统的谐振频率。跟踪架是光测设备的核心部件, 提高其轴系结构刚度是提高系统谐振频率的有效途径。为此, 国内外的学者们对光测设备跟踪架轴系设计和分析进行了研究。王涛对某型号跟踪架的方位轴系动态特性进行研究, 提出了增大方位轴系固有频率与选取控制带宽的参考方案^[3]; 杨立保等对某型号跟踪架方位轴系的结构进行了设计, 提出了以双向止推密封轴承结合定心轴系的结构形式, 通过模态分析和伺服扫频实验, 证明该结构形式有效的提高了系统的刚度^[4]; 张岩等人针对 700 mm 口径地平式望远镜系统, 提出了一种 U 型跟踪架的结构设计方案, 通过模态分

收稿日期: 2022-10-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(6210031610)

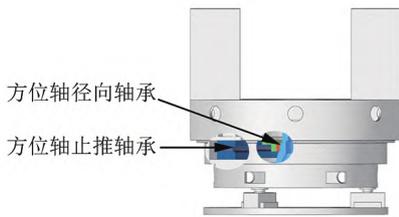
析和实验测试,证明了该结构具有高刚度和高回转精度^[5];毛雨辉对1 m的大型光电经纬仪的俯仰轴系进行了结构设计和校核,并进行了轴系精度分析和计算^[6]。目前,对光测设备的轴承选型的研究工作较少。

本文以400 mm口径光测设备的跟踪架为研究对象,基于模态试验数据以轴承的径向刚度和轴向刚度为修正参数对跟踪架光测设备的有限元模型进行修正,能够建立较为准确的有限元模型。在此基础上对等效轴承刚度的弹性薄层单元刚度进行参数化扫描,定量分析了轴承刚度对光测设备跟踪架谐振频率的影响。

1 光测设备结构

光测设备结构主要包括方位轴系、俯仰轴系、主镜和次镜及其组件等。跟踪架的方位轴系结构主要由转台、基座、轴承连接件、轴承、中心轴、调平机构、编码器、力矩电机等部分组成,轴承是方位轴系关键组件,它的精度、承载能力和摩擦力矩变化等性能直接影响整个系统跟踪的精确程度和稳定性^[7-8]。

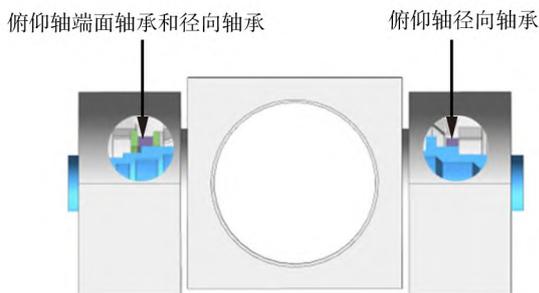
光测设备跟踪架的方位轴系采用轴向止推轴承和径向轴承组合的轴系结构形式,两种轴承分别承受轴向载荷和径向载荷,轴系的晃动误差小^[9]。光测设备跟踪架方位轴系轴承结构示意图如图1所示。



▲图1 光测设备跟踪架方位轴的轴承结构图

俯仰轴系主要由左右立柱、四通(传感器主承载平台)、俯仰编码器、俯仰力矩电机、轴承和左右轴及其组件等部分组成^[10]。

光测设备跟踪架的俯仰轴系通常一端采用端面轴承和径向轴承组合方式支撑的固定端,另一端采用可沿轴向窜动的径向轴承支撑的自由端的结构形式,这种结构形式可以补偿机械误差和热变形对回转精度的影响^[11]。光测设备跟踪架俯仰轴系轴承结构示意图如图2所示。



▲图2 光测设备跟踪架俯仰轴的轴承结构图

2 跟踪架模态试验

2.1 模态分析理论

系统的结构振动微分方程为^[12]:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}$$

在动力学方程中, $[m]$ 是系统的质量矩阵, $[c]$ 是系统的阻尼矩阵, $[K]$ 是系统的刚度矩阵, x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别是系统的位移向量、速度向量以及加速度向量, F 为力向量。

对于无阻尼系统或不考虑阻尼时,系统的结构振动微分方程为:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}$$

上式对应的结构振动特征值方程可表示为:

$$([K] - \omega_i^2 [m])\{\varphi_i\} = \{0\}$$

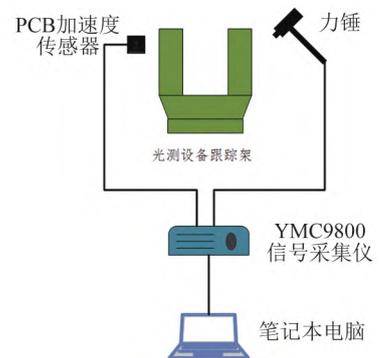
式中: ω_i 是结构的第*i*阶频率; $\{\varphi_i\}$ 是结构的第*i*阶振型向量。结构的谐振频率是评价结构动态特性的重要指标,当光测设备的结构谐振频率与工作产生的激励频率一致时,就会引起结构的共振,从而影响其使用功能。

2.2 模态试验

光测设备跟踪架模态试验主要包括对结构进行激振、测量激振力和响应数据、数据采集、信号分析及模态参数识别^[13]。

模态试验需要的设备有:光测设备跟踪架、PCB压电式加速度传感器、YMC力锤、YMC9800动态信号采集仪和PC机。试验设置如图3所示。

对光测设备跟踪架采用多点激励多点响应的锤击模态试验法获取跟踪架的约束



▲图3 模态试验设计示意图

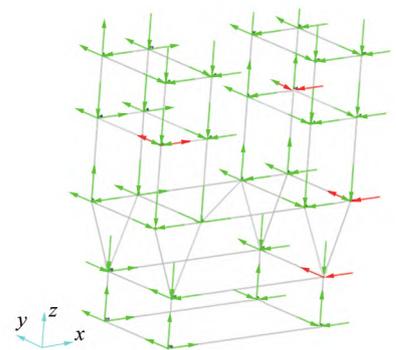
模态,试验布点如图4所示,在左右立柱分别布置12点表征立柱晃动模态;在基座布置4点表征整机晃动模态,底部支撑板布置4点为固定点^[14]。本次试验过程中采样频率设置为1 kHz,传感器为PCB三轴加速度传感器,灵敏度为50 mv/m/s²。由于光测设备跟踪架结构较大,所以采用力锤为YMC1Kg力锤,弹性力锤。

在图4中:红色部分为参考点,也即敲击点。试验过程中布置4个参考点,分别位于左右立柱中部,转台上表面,以及基座上沿。

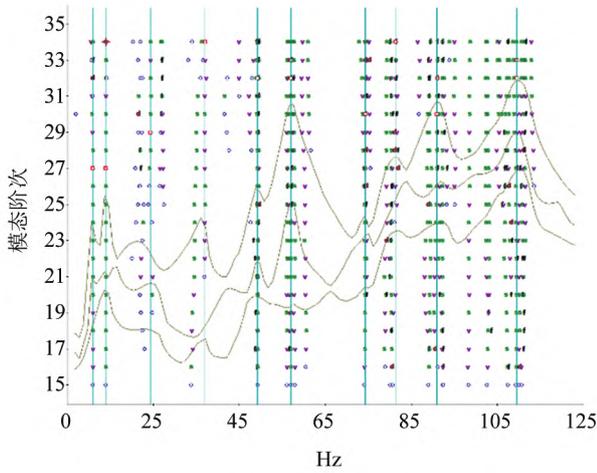
在模态试验过程中,光测设备的俯仰轴朝向天顶并保持不变。

在N-modal数据分析软件中利用MIMO2参数识别方法辨识模态参数。参数辨识结果如图5所示。

模态试验振型图和谐振频率如表1所示。



▲图4 模态试验布点图



▲图 5 模态识别稳定图

表 1 模态识别结果

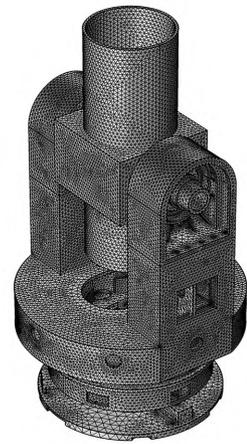
阶次	振型图	谐振频率/Hz	振型
1 阶		10.61	整机 X 向晃动
2 阶		13.58	整机 Y 向晃动
3 阶		49.17	整机 Z 向晃动
4 阶		56.61	X 向单轴弯曲
5 阶		74.51	整机扭转

3 有限元模型修正及分析结果

3.1 有限元模型建立

光测设备跟踪架的结构较为复杂。在 UG 软件中根据实际工作的受力状态对跟踪架结构进行合理的简化, 去除不必要的组件和各电器元件, 略去圆孔、倒角等的细节特征; 将

实体模型导入到 COMSOL 中采用四面体二次元单元进行网格划分, 生成节点和单元, 网格划分结果如图 6 所示。



▲图 6 光测设备跟踪架有限元模型

根据光测设备跟踪架的实际工作状态施加边界条件。在跟踪架调平机构的底部施加固定约束; 轴承连接采用弹性薄层单元, 根据轴承的轴向和径向刚度定义弹性薄层单元在 X、Y、Z 三个方向的刚度; 在四通和镜筒上加载与光学系统实际质量相同的附加质量;

跟踪架的各构件之间的螺栓连接采用压力角方法, 在建模过程中将螺栓忽略可以有效的减少模型计算时间, 将螺栓压紧区域近似为一个锥形区域, 将相连两个面分割出相应面积, 施加刚性连接^[15-16]。

3.2 有限元模型修正

在动力学建模过程中, 大部分都需要试验数据和仿真数据, 并利用模态试验数据对初始模型进行修正, 有限元模型修正是对有限元模型中的不确定参数进行调整, 使数值模型能够准确反映实际结构的动态特性^[17-18]。轴承是光测设备跟踪架的关键零件, 轴承刚度的取值直接影响动力学模型分析的结果, 由于初始跟踪架的各个轴承是非标准轴承, 通常情况下只能采用经验法来估计其刚度的近似值。本文以弹性薄层单元 X、Y、Z 三个方向的刚度值为修正参数对有限元模型进行修正, 减少模态试验结果与仿真分析结果之间的误差。

基于多阶谐振频率以同阶的模态试验结果与仿真分析结果的残差最小为目标, 以弹性薄层单元的刚度值为修正参数, 建立优化算法。

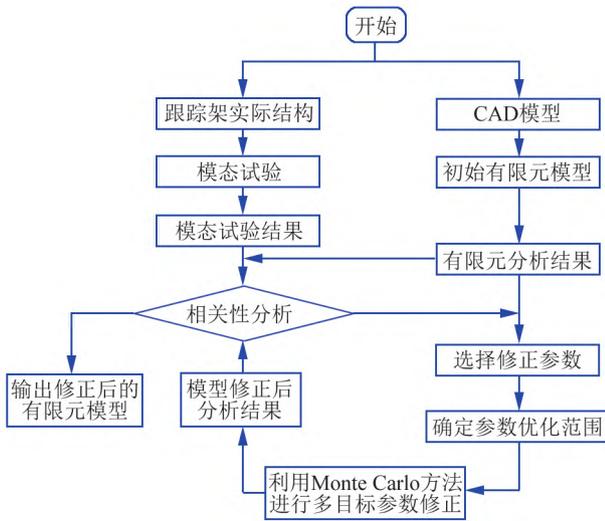
$$\text{Find } K_n \left. \begin{aligned} & \text{Min } J = \sum_{m=1}^i (f_{\text{FEM}}^m - f_{\text{test}}^m)^2 \end{aligned} \right\}$$

式中: K_n 为弹性薄层的刚度值; f_{FEM}^m 为仿真分析的第 m 阶谐振频率值; f_{test}^m 为模态试验的第 m 阶谐振频率值; i 为需要控制的谐振频率的阶数; J 为仿真分析结果与模态试验结果谐振频率值的绝对误差;

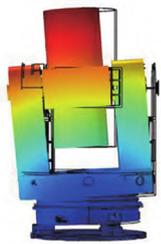
有限元模型修正流程图如图 7 所示。在 COMSOL 软件中采用弹性薄层单元等效轴承刚度建立有限元模型, 以弹性薄层的等效刚度为修正, 在优化模块中利用 Monte Carlo 法寻找修正的最优解, 获得较为准确的有限元模型。

3.3 有限元分析结果

通过对弹性薄层单元的刚度值进行修正, 使仿真分析结果与模态试验结果更加接近。针对模态识别结果的前五阶谐振频率和振型进行参数修正。对修正后的有限元模型进行仿真分析, 仿真分析结果如图 8 - 图 12 所示。



▲图 7 有限元模型修正流程图



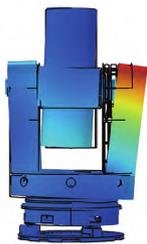
▲图 8 1 阶 X 向晃动



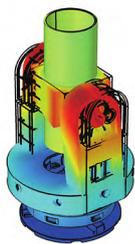
▲图 9 2 阶 Y 向晃动



▲图 10 3 阶 Z 向晃动



▲图 11 4 阶 X 向单轴弯曲



▲图 12 5 阶整机扭转

如图 8 - 图 12 所示, 模态试验结果和有限元分析结果的模态振型图基本保持一致, 为了验证该方法的准确性, 将模态试验结果与仿真分析结果的谐振频率进行对比分析。

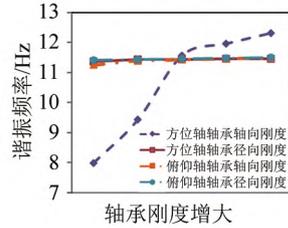
表 2 有限元分析结果和模态试验结果对比

阶次	有限元分析结果/Hz	模态试验结果/Hz	误差/%
1 阶	11.45	10.61	7.9
2 阶	12.43	13.58	-8.5
3 阶	48.08	49.17	-2.2
4 阶	52.75	56.61	-6.8
5 阶	73.78	74.51	0.9

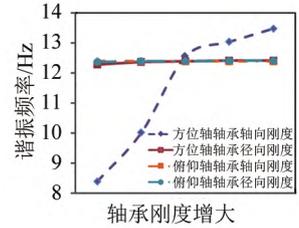
如表 2 所示, 仿真分析结果和模态试验的误差最大为 8.5%, 充分证明使用弹性薄层单元能够准确的模拟轴承连接部位的力学特性。

4 轴承刚度对谐振频率影响

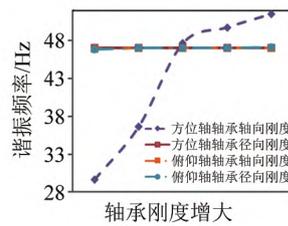
在建立有限元模型过程中采用弹性薄层单元等效轴承的轴向、径向刚度, 通过对弹性薄层单元的刚度进行了参数化扫描, 分别研究了轴承轴向刚度和轴承径向刚度对谐振频率的影响, 分析结果如图 13 - 图 17 所示。



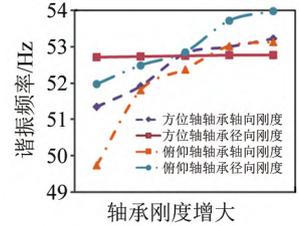
▲图 13 1 阶谐振频率随轴承刚度变化



▲图 14 2 阶谐振频率随轴承刚度变化

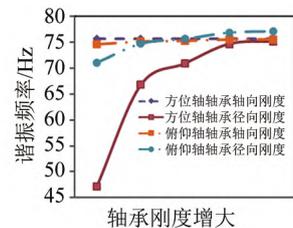


▲图 15 3 阶谐振频率随轴承刚度变化



▲图 16 4 阶谐振频率随轴承刚度变化

分析结果表明: 光测设备跟踪架的谐振频率随着轴承刚度增大而增大, 不同轴系的轴承刚度对谐振频率的影响不同。方位轴承的轴向刚度对前 4 阶的谐振频率影响较大, 对 5 阶谐振频率几乎没有影响; 方位轴承径向刚度对 5 阶的谐振频率影响较大, 对前 4 阶谐振频率较少; 俯仰轴承轴向刚度只对 4 阶谐振频率影响较大, 这主要是由于俯仰轴采用一端固定一端可以沿轴向窜动的结构形式导致的。俯仰轴承径向刚度对 4、5 阶的结构谐振频率影响较大, 对前三阶谐振频率的影响不大。



▲图 17 5 阶谐振频率随轴承刚度变化

5 结论

在有限元模型建模过程中, 采用弹性薄层单元等效轴承刚度建立有限元模型, 基于模态试验结果, 利用 Monte Carlo 法对轴承刚度进行了参数辨识, 有限元分析结果和模态试验结果最大误差为 8.5%, 说明该轴承等效建模的方法能够准确模拟轴承的力学特性, 能够建立较为准确的有限元模型。

为了保证光测设备跟踪架的结构谐振频率满足工作要求, 本文通过参数化分析的方法分析了轴承刚度对谐振频率的影响, 分析结果表明: 不同的轴系的轴承轴向刚度、径向刚度对跟踪架的结构谐振频率影响不同, 在后续的工程设计中可依据分析结果, 针对性地对光测设备跟踪架结构谐振频率进行提升。

(下转第 149 页)

并将其引入设计的阻抗控制器,实现机械流水线速度的整体控制。该方法为机械流水线速度无线控制方法提供了重要信息依据。

参考文献

- [1] 黄颖博,汤文光,肖小平,等. 稻田不同种植模式对土壤养分表观平衡和氮素生产效率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1119-1126.
- [2] 郭俊,王新. 基于 PLC 的生产线输送速度分时段控制模型[J]. 包装工程, 2021, 42(11): 220-226.
- [3] 何瑞. 电机无速度传感器控制在包装生产线中的应用[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 233-237.
- [4] 王艺霖,郑建国. 离散蝙蝠算法在三阶段装配流水线调度问题的应用[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2267-2278.
- [5] 江琴,戴伟,唐鼎. 基于 YOLOv4 及其变体的白车身焊点外观检测[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(4): 150-153.
- [6] 石鑫盛,李云. 公平性机器学习中基于分类间隔的歧视样本发

(上接第 138 页)

参考文献

- [1] 谢军. 基于接触和振动仿真的经纬仪结构设计及轻量化研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [2] 高国华,汪进. 某伺服跟踪转台结构与模态分析[J]. 机械设计, 2018, 35(S1): 151-154.
- [3] 王涛,伞晓刚,高世杰,等. 光电跟踪转台垂直轴系动态特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48(4): 1099-1105.
- [4] 杨立保,李艳红,伞晓刚,等. 应用新轴系结构改善光电跟踪系统谐振频率特性[J]. 光学精密工程, 2017, 25(11): 2889-2894.
- [5] 张岩,陈宝刚,李洪文,等. 地平式望远镜跟踪机架结构设计与分析[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 885-890.
- [6] 毛雨辉,张进,李国华. 大型光电经纬仪跟踪架水平轴系的结构设计[J]. 机械设计, 2014, 31(12): 49-53.
- [7] 黄金龙. 大型望远镜精密轴系关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [8] 高七一,余伦. 光电经纬仪中径向密珠滚动轴承设计要素的分析[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(6): 89-94.
- [9] 张景旭. 地基本口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
- [10] 邹冀,伞晓刚,李耀彬,等. 光电经纬仪转台动态特性研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(1): 93-98.

(上接第 144 页)

- [22] 王博,罗玉梅,董慧慧,等. 结合粒子群优化的滑模控制算法在泵控电液制动器的应用[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(4): 145-148.
- [23] 周宇. 基于特征模型的磁轴承全系数自适应控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 27-39.

现和消除算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(8): 1255-1266.

- [7] JONGHWAN P, HAEICHEON C. Machine-learning-based feedback control for drag reduction in a turbulent channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 904(424): 24-50.
- [8] 李美,裴卉宁,丁满. 关于深度学习的在线评论挖掘及需求获取方法[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(6): 184-189.
- [9] 张晓芳. 基于机器学习的光纤网络激光器异常功率数据采集系统设计[J]. 激光杂志, 2020, 41(9): 111-115.
- [10] 贾骏恺,齐臣坤,高峰,等. 基于足地接触特性辨识的六足机器人自适应阻抗控制[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(6): 40-45.
- [11] 许哲,朱海洋,王庆诚. 基于 S 型速度曲线的机器人连续多轨迹规划[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(6): 59-65.

作者简介: 陈素霞(1973—),女,博士,高级讲师;主要研究方向:大数据分析、与挖掘、计算机应用,已发表论文 10 篇。

- [11] 赵勇志,王文攀,段文. 1.2 m 望远镜跟踪架结构设计与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 64-67.
- [12] 田科. 某乘用车前副车架振动性能分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(5): 180-183.
- [13] 魏莎,郑冰月,张忠,等. 基于模态试验的对接圆柱壳结构有限元模型修正[J]. 振动与冲击, 2022, 41(17): 9-17.
- [14] MENON A, ZHAO W. A review of multishaker excitation modal testing methods[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(3): 1928.
- [15] 王涛. 近地激光通信端机粗跟踪系统非线性振动特性分析与优化[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- [16] 高飞,张澍,梁国利. 螺栓连接振动特性的仿真与试验研究[J]. 环境技术, 2020, 38(6): 147-153.
- [17] SUZANA E, IVAN D, JAVIER F J-A. Review of finite element model updating methods for structural applications[J]. Structures, 2022, 41: 684-723.
- [18] ZANG C, SCHWINGSHACKL C W, EWINS D J. Model validation for structural dynamic analysis: An approach to the sandia structural dynamics challenge[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2008, 197(29-32): 2645-2659.

作者简介: 栾云杰(1997—),男,硕士研究生;主要从事光测设备跟踪架结构优化设计技术研究。

- [24] 王国明,李兴瑞,章斌. 基于多目标优化 NSGA-II 算法的电动汽车复合制动模糊控制研究[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(4): 149-152.

作者简介: 胡业发(1961—),男,博士,教授,博士生导师;主要研究方向为磁悬浮技术、机电一体化、数字制造等,已发表论文 110 篇。