

基于 ABAQUS 的连杆轴瓦模态分析及优化

崔许,刘洪,王鸿鼎

兰州交通大学

摘要: 针对连杆轴瓦在工作过程中因振动造成的损坏问题,利用 ABAQUS 有限元软件对滑动轴承轴瓦进行模态分析,得到其在安装状态下前 14 阶的固有频率和振型,以及受载状态下前 14 步增量步的振动频率。根据轴瓦的实际工况将镀层材料改为复合材料并进行适当优化,提高了轴瓦的固有频率,缩小了振动变形区域,可有效预防轴瓦在工作过程中产生振动损坏等现象。

关键词: 轴瓦;振动;模态分析;ABAQUS;优化

中图分类号: TG580.23+1;TH161.6 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.05.015

Modal Analysis and Optimization of Connecting Rod Bearing Based on ABAQUS

Cui Xu, Liu Hong, Wang Hongding

Abstract: Aiming at the damage caused by the vibration of the connecting rod bearing bush during work, the ABAQUS finite element software is used to perform a modal analysis on the plain bearing bearing bush, and the natural frequency and mode shape of the first 14 steps in the installed state were obtained, the vibration frequency of the first 14 incremental steps under load. According to the actual working conditions of the bearing pad, the coating material is changed to a composite material, and appropriate optimization is performed to increase the natural frequency of the bearing pad and reduce the vibration deformation area, which can effectively prevent the vibration damage caused by the bearing pad during the working process.

Keywords: bush; vibration; modal analysis; ABAQUS; optimization

1 引言

近年来,为保证机械设备和工程结构等在设计、制造以及生产中更安全、经济、环保与高效,在机械^[1-4]、航空^[5]和建筑^[6]等行业广泛引入有限元分析技术。其中,模态分析技术在结构力学中发挥着

重要作用。美国宇航局运用有限元仿真软件建立模型,分析了 1986 年发射的伽利略探测器,将理论计算与模态试验分析得到的固有频率以及施加多种信号产生的振型进行比较,为探测器理论模型建立的正确性以及后续模型优化提供了有力的验证数据。

轴瓦具有良好的摩擦性能、抗冲击能力、承载能力及较强的抗咬合能力和抗腐蚀性,广泛运用于机械领域。轴瓦的工作环境复杂,对其在设计、制造和安装时提出了较高的要求,运用有限元模态分析技

基金项目: 国家自然科学基金(51565025);甘肃省自然科学基金(1606RJZA036);中科院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室开发课题(LSL-1713)
收稿日期: 2019 年 12 月

参考文献

- [1] 侯云霞,梁东明. 机械加工工艺制订与实施[M]. 北京:中国轻工业出版社,2017.
- [2] 卞洪元. 机械制造工艺与夹具[M]. 北京:北京理工大学出版社,2017.
- [3] 郑耀辉,王江涛,王明海,等. 基于装夹方案的夹紧力及加工变形仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(12):133-135.
- [4] 林泉,冯超,谭琛. 基于 NX Nastran 的缸体加工中心夹具夹紧杆的疲劳分析与优化设计[J]. 模具工业,2017(5):60-65.
- [5] 沈春根,孔维忠,关天龙,等. UG NX 11.0 有限元分析基础实战[M]. 北京:机械工业出版社,2018.
- [6] GB/T 1173-2013, 铸造铝合金[S].
- [7] 吴宗泽. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [8] 邵晓东,张柳,林朝旭. 装夹力导致的加工误差仿真[J]. 中国机械工程,2007(4):391-395.
第一作者:贺东溥,硕士,高级工程师,航天科工惯性技术有限公司,100074 北京市
First Author: He Dongpu, Master, Senior Engineer, Aerospace Science and Industry Inertial Technology Co., Ltd., Beijing 100074, China

术对轴瓦的设计和改进行有重要意义。通过模态分析技术可避免共振引起的损坏,从而使其在最优频率范围内振动以提高轴瓦工作的安全性和可靠性。

2 轴瓦的模态分析

2.1 模态分析理论

模态分析是研究机械结构振动特性的方法,可得到机械结构的固有频率和振型,是分析其他动力学问题的起点^[8]。模态分析的主要目的是防止共振以及因振动产生的危险。机械振动是各阶振动共同作用的结果,但每一阶振动的影响不同,其中最低阶的影响效果最显著。连杆轴瓦在振动时会与车内其他构件产生共振现象,进而对相关结构造成破坏,因此必须了解其模态参数,避免不必要的损伤。模态提取是求解出运动的特征向量和特征值向量的综合表达,模态分析动力学方程为

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\}$$

式中, $\{F(t)\}$ 为外部激力; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[M]$ 为质量矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; \ddot{U}, \dot{U}, U 分别为加速度、速度、位移列向量。

轴瓦的振动因素由内外两部分原因引起,其振动主要有两种类型:转子工作转速在两倍转子第一临界转速以下发生的半速涡动;转子工作转速在高于两倍转子第一临界转速发生的油膜振荡。轴瓦在自由状态下径向弯曲固有频率方程为

$$f_r = \frac{n(n^2 - 1)}{2\pi \sqrt{n^2 + 1}} \times \frac{4}{D^2} \sqrt{\frac{EIg}{\rho A}}$$

式中, n 为共振阶数, $n = 2, 3, \dots$; E 为弹性模量 (kg/mm^2); I 为轴承圈横截面的惯性矩 (mm^4); D 为轴承圈横截面中性轴直径 (mm); A 为轴承圈横截面积 (mm^2); g 为重力加速度 (mm/s^2); ρ 为材料密度 (g/mm^3)。

2.2 三维建模

轴瓦的基本结构参数见表 1。根据表中结构参数,在 SolidWorks 2014 三维软件中建立如图 1 所示的轴瓦的三维模型。

表 1 滑动轴承主要设计参数 (mm)

	轴瓦外径 D_0	轴瓦内径 D_i	轴瓦宽度 B	内槽长 L	内槽宽 b	圆孔直径 R
全轴瓦	242	213.6	84	0	0	0
镀层轴瓦	242	214	84	63	2.4	0
镀层	214	213.6	84	63	2.4	12

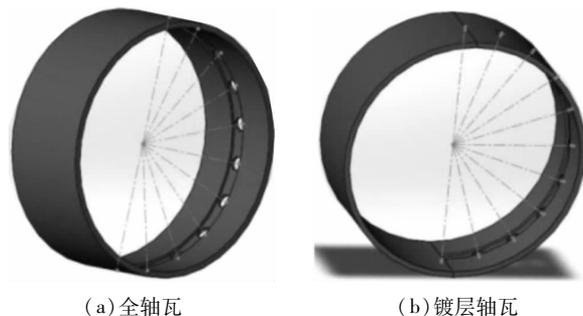


图 1 两种轴瓦的有限元模型

2.3 有限元模型

由于 ABAQUS 有限元软件具有完整的多数据接口,可与较多三维软件进行无损数据共享,因此将模型导入 ABAQUS 有限元软件,对其进行模态仿真分析。

(1) 材料属性的定义

为对比全轴瓦和镀层轴瓦的振动特性,考虑到轴瓦在工作过程中工作环境的复杂多样性,参照现阶段轴瓦的实际工况给出轴瓦材料属性见表 2。

表 2 轴瓦材料属性

类别	材料密度 ρ (kg/mm^3)	材料弹性模量 E (MPa)	材料泊松比 ν
铜合金	8.7E-9	360E+5	0.30
铁	7.85E-9	210E+5	0.30

(2) 设置分析步

分析步模块后,在初始分析步 Initial 后建立分析步 Step1,分析步的类型选择线性摄动中的“频率”。在编辑分析步选项卡中的特征值求解器选择 Lanczos,特征值取 14,仅选取轴瓦前 14 阶振型进行分析。在初始分析步后建立 Step2,分析步的类型选择线性摄动中的“稳态动力学、模态”,在基本信息里设置最高频率 10^7 Hz,阻尼设置里选择直接模式 1 ~ 10 阶,选取阻尼比 0.04,1 ~ 14 阶选取阻尼比 0.05,选取前 14 步的阻尼比。

(3) 创建边界条件

在模态分析中,边界约束条件起主要作用,其它外部载荷均无影响。根据轴瓦的工作方式可知,轴瓦在工作过程只能绕 z 轴旋转,在 x, y, z 三个方向的移动自由度和 x, y 两个方向的旋转自由度受到限制。创建边界条件选择完全固定,选轴瓦瓦背,并集合约束“U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3”,在创建边界条件选项卡中选择力学一位移/转角,选轴瓦瓦面,并集合约束“U1, U2, U3, UR1, UR2”。

(4) 网格划分

综合计算精度和时间^[7],网格的单元格类型选择 C3D4,单元形状为四面体,全局尺寸约 1mm,网

格划分技术为扫掠,划分 17738 个网格单元。通过检查网格工具,显示无分析错误和无分析警告,网格划分模型见图 2。



图 2 轴瓦的网格模型

2.4 有限元分析结果

连杆轴瓦主要受径向激励,故研究径向弯曲振动激励提取。

(1) 安装情况下仿真分析

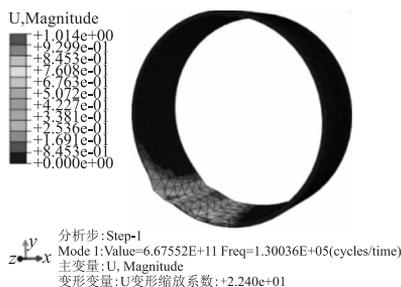
运用 ABAQUS 有限元仿真软件对轴瓦的两种类型进行安装模态分析计算,得到前 14 阶的装配模态分析振型见图 3、图 4 和表 3。分析前 14 阶可知:

①在安装(无载荷)情况下,两种轴瓦的变形量主要分布在接触线附近,无镀层轴瓦的变形量比镀层轴瓦的范围广,且振幅较大;

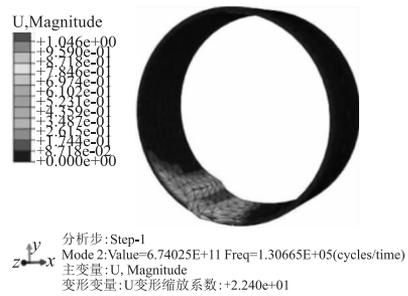
②振型主要表现为绕 z 轴的拉伸变形,绕 x 轴、y 轴的旋转变形以及位移变形,由于轴瓦在工作过程中主要以绕 z 轴的旋转运动和沿 z 轴方向的拉伸运动为主,若产生共振现象,将导致轴瓦的抱死或轴瓦合金的脱落现象;

③随着模态阶数的增加,轴瓦固有频率增加,且前 3 阶的固有频率十分接近,为模态的密集区;第 13 阶和第 14 阶频率差距最大,为模态稀疏区。镀层轴瓦的固有频率明显大于无镀层,且随着阶数的增加,两者之间的差距明显加大。由此可知,随着阶数的增加,镀层轴瓦能更好地避免因振动带来的损伤;

④前三阶变型振幅接近,均在 1mm 左右,但变形量的大小以及方式都不同。



(a) 无镀层轴瓦 1 阶径向弯曲模态

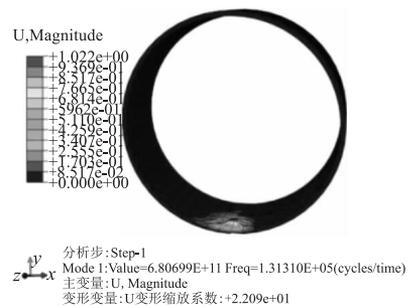


(b) 无镀层轴瓦 2 阶径向弯曲模态

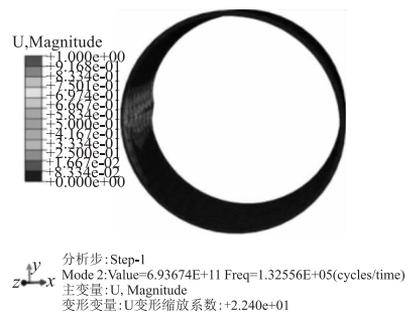


(c) 无镀层轴瓦 3 阶径向弯曲模态

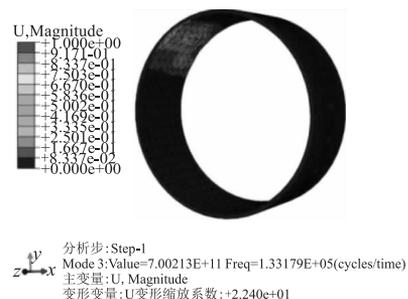
图 3 无镀层轴瓦的前 3 阶模态分析



(a) 镀层轴瓦 1 阶径向弯曲模态



(b) 镀层轴瓦 2 阶径向弯曲模态



(c) 镀层轴瓦 3 阶径向弯曲模态

图 4 镀层轴瓦的前 3 阶模态分析

表3 两种轴承在安装情况下的前14阶固有频率及振型描述

阶数	轴瓦类型			
	无镀层轴瓦		镀层轴瓦	
	频率	振型	频率	振型
1	1.30036E+05	沿z轴、x轴方向拉伸变形	1.3131E+05	沿z轴、y轴方向拉伸变形
2	1.306654E+05	沿z轴方向拉伸变形,绕x轴扭转变形	1.32556E+05	沿z轴、x轴方向拉伸变形
3	1.3136E+05	沿z轴方向拉伸变形,绕x轴扭转变形	1.33179E+05	沿z轴、x轴、y轴方向拉伸变形
...
8	1.33398E+05	沿z轴方向拉伸变形,绕x轴扭转变形	1.36325E+05	沿z轴、x轴方向拉伸变形
9	1.33481E+05	沿z轴、x轴方向拉伸变形	1.36541E+05	沿z轴、y轴方向拉伸变形
...
13	1.34399E+05	沿z轴、y轴方向拉伸变形	1.3743E+05	沿z轴方向拉伸变形,绕x轴扭转变形
14	1.34658E+05	沿z轴方向拉伸变形,绕x轴扭转变形	1.37778E+05	沿z轴方向拉伸变形,绕x轴扭转变形

(2) 工作状态下仿真分析

在实际工作过程中,轴瓦不仅受到来自轴颈的径向力和沿内表面的旋转力,还受到来自装配体和轴径的阻尼作用,因此在采用 ABAQUS 有限元软件模拟装载情况下的模态分析时,给予轴瓦相应阻尼比,得到轴瓦的前14步模态分析及振型结果见表4。

由表可知:①镀层轴瓦的固有频率与无镀层轴瓦几乎一致,说明轴瓦在工作中过程中振动形态一致;②对比图3、图4和表2可知,轴瓦在工作过程中的频率明显低于安装时的固有频率,轴瓦在工作过程中更易避免发生共振现象,尤其是在低阶振动处;③镀层轴瓦和无镀层轴瓦的固有频率增加趋势一致,因此镀层轴瓦的工作性能更好,可以更加有效地防止因振动带来的损坏,且经济效益良好。

表4 两种轴承在安装情况下的前14步固有频率

阶数	频率 (Hz)	
	无镀层轴瓦	镀层轴瓦
1-3	1.5049E-08—9.1532E-08	1.5049E-08—9.1525E-08
4-6	1.8902E-07—1.111E-06	1.89E-07—1.1108E-06
7-8	3.5285E-06—1.6205E-05	3.5276E-06—1.62E-05
9	2.0104E-04	2.0096E-04
10	17.75	17.73
11	220.2	219.9
12	1011	1010
13	3211	3208
14	8318	8308

3 优化轴瓦

镀层轴瓦内表面最易损伤,且随着振动阶数的增加,受损面逐渐扩大。轴瓦的几何尺寸通常根据工艺要求确定,一般情况下不改变轴瓦尺寸。所以镀层轴瓦的形变主要分布在镀层表面上,因而可通过改变镀层材料来增加轴瓦强度和减少振动。将镀层材料更换为复合材料(聚酰亚胺与氧化石墨烯和二氧化硅的复合材料^[9,10]),其性能参数见表5。

表5 复合材料性能

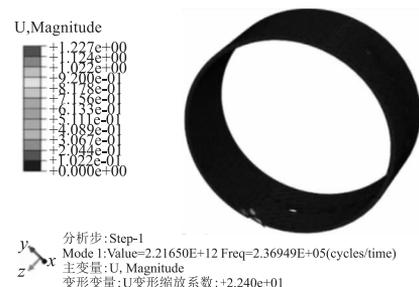
密度 ρ (kg/mm ³)	弹性模量 E (MPa)	泊松比 ν
1.35E-9	120E+5	0.3

3.1 优化后轴瓦安装情况下仿真分析

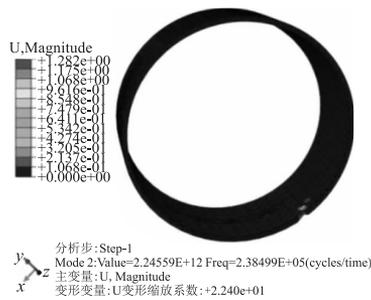
将优化后的轴瓦导入 ABAQUS 有限元软件中进行模态分析,结果见图5和表6,结合图3、图4和表3可知:①优化后轴瓦的固有频率增幅与优化前相似,且前3阶都是振动密集区,第13阶和第14阶为模态稀疏区;②优化后的轴瓦固有频率明显提高,尤其在密集区前3阶时,提高了10%,说明优化后轴瓦固有频率的提高能进一步避免振动损伤,更经济环保;③优化后的轴瓦振动变形范围缩小10倍,振幅增加了16%。

3.2 优化后轴瓦有阻尼状态下仿真分析

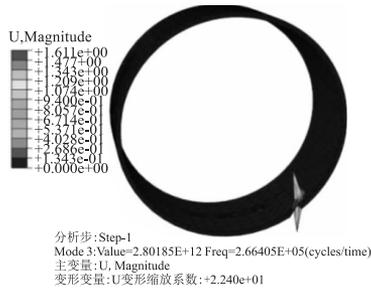
优化前后的阻尼模态分析见表7。由表可知,优化后轴瓦的阻尼频率和优化前几乎一致,随着增量步的增加,二者间增大的差距可忽略。由此可得,轴瓦在优化后能更好地避免共振,尤其在增量步较多时。由于优化前后轴瓦的固有频率的增加趋势和大小都相似,且优化后轴瓦的固有频率远大于优化前,因此优化后的轴瓦对轴瓦的正常工作无影响。综上所述,通过优化轴瓦,不仅缩小了振动过程中的变形区域,有效避免了因振动范围过大造成的剥落损伤,而且提高了轴瓦的固有频率,可有效避免轴瓦在工作过程中因振动带来的共振以及因振动造成的其他损伤。



(a) 优化后轴瓦1阶径向弯曲模态



(b) 优化后轴瓦 2 阶径向弯曲模态



(c) 优化后轴瓦 3 阶径向弯曲模态

图 5 优化后轴瓦径向弯曲模态

表 6 优化后轴瓦的固有频率

阶数	1	2	3	...	8
频率(×10 ⁵ Hz)	1.4259	1.4303	1.43262	...	1.4483
阶数	9	...	13		14
频率(×10 ⁵ Hz)	1.45041	...	1.45764		1.46098

表 7 轴瓦优化前后前 14 步增量频率

频率(Hz) 增量步	轴瓦类型	
	优化前轴瓦	优化后轴瓦
1-3	1.5049E-08 ~ 9.1525E-08	1.5049E-08 ~ 9.1529E-08
4-6	1.89E-07 ~ 1.1108E-06	1.89012E-07 ~ 1.1109E-06
7-8	3.5276E-06 ~ 1.62E-05	3.5282E-06 ~ 1.6203E-05
9	2.0096E-04	2.0101E-04
10	17.73	17.74
11	219.9	220.1
12	1010	1011
13	3208	3210
14	8308	8314

4 结语

(1) 在最初安装时, 镀层轴瓦固有振动频率均大于无镀层轴瓦, 两种轴瓦的变形量主要分布在接触线附近, 无镀层轴瓦的变形量比镀层轴瓦的范围广, 且振幅较大。两种轴瓦的变形主要表现在沿 z 轴的拉伸变形和绕 x 轴、 y 轴的旋转变形。

(2) 当外部载荷作用于轴瓦内表面时, 镀层轴瓦的固有频率与无镀层轴瓦几乎一致, 说明两种轴瓦在工作过程中的振动形式相同。

(3) 优化后的轴瓦的固有频率均比优化前有所增加, 尤其在前 3 阶振动中固有频率比优化前提高 10%, 且振动形变量比优化前缩小约 10 倍, 振动形

式和形变位置相似。

(4) 当施加外部载荷作用于优化后轴瓦内表面时, 两种轴瓦工作时的振动频率几乎一致, 随着增量步的增加, 两者之间的差距可忽略, 且二者的增长方式相同。

参考文献

- [1] 鄂林仲阳, 杜强, 苏瑞峰, 等. 六自由度平台模态试验分析[C]. 第 28 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册), 2019:7.
- [2] 梁家玮, 李凯, 陈艺航, 等. 分体式衬套下控制臂模态特性研究[J]. 现代机械, 2019(4):39-41.
- [3] 周海涛. 模态分析在汽车方面的应用[J]. 技术与市场, 2017, 24(7):143-144.
- [4] 王鲁. 发动机连杆衬套及轴瓦的有限元接触分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [5] 王强, 马志赛, 张欣, 等. 基于模态综合法的含间隙折叠舵面动态特性分析[J]. 航空学报, 2019(10):1-9.
- [6] 肖凯龙, 邬晓光, 安平和, 等. 多梁式桥梁检测的叠加曲率模态差变化率方法[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(11):108-116.
- [7] 杜平安. 结构有限元分析建模方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [8] 孙敬敬. 机械结构的模态分析方法研究综述[J]. 科技信息, 2014(3):80.
- [9] Liu H, Li Y, Wang T, et al. In situ synthesis and thermal, tribological properties of thermosetting polyimide/graphene oxide nanocomposites[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(4):1867-1874.
- [10] Liu H, Cui X, Wang H, et al. Synergistic effect of nano-SiO₂ and graphene oxide: hybrid filled thermosetting polyimide nanocomposites with ultralow wear[J]. Materials Research Express, 2019(6):10.

第一作者: 崔许, 硕士研究生, 兰州交通大学机电工程学院, 730070 兰州市

First Author: Cui Xu, Postgraduate, School of Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

通信作者: 刘洪, 博士, 副教授, 兰州交通大学机电工程学院, 730070 兰州市

Corresponding Author: Liu Hong, Doctor, Associate Professor, School of Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China