

# 基于动力特性相似的轴承承载能力试验方案设计

蔡文方<sup>1</sup>,刘淑莲<sup>2</sup>,应光耀<sup>1</sup>,李卫军<sup>3</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014; 2. 浙江科技学院 机械与能源工程学院,浙江 杭州 310023;  
3. 浙江杭州意能电力技术有限公司,浙江 杭州 310014)

**摘 要:**提出了一种轴承动力特性试验的试验方法,轴承用真轴承,转子采用模拟转子。计算模拟转子的一阶弯曲临界转速,使其与真实转子转速相同,同时保证轴承的工作转速、静载荷与实际工况完全一致。基于动力相似计算分析基础,提出了滑动轴承性能测试的试验方案设计,给出了滑动轴承性能测试的试验装置。

**关 键 词:**轴承;动力相似;承载能力;试验方案

中图分类号:TK226;TH113 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.05.005

[引用本文格式]蔡文方,刘淑莲,应光耀,等. 基于动力特性相似的轴承承载能力试验方案设计[J]. 热能动力工程,2021,36(5):30-33. CAI Wen-fang, LIU Shu-lian, YING Guang-yao, et al. The design for carrying capacity of bearing based on dynamic property similarity[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5):30-33.

## The Design for Carrying Capacity of Bearing based on Dynamic Property Similarity

CAI Wen-fang<sup>1</sup>, LIU Shu-lian<sup>2</sup>, YING Guang-yao<sup>1</sup>, LI Wei-jun<sup>3</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou, China, Post Code: 310014; 2. School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310023; 3. Hangzhou E-energy Power Technology Co., Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310014)

**Abstract:** A method for bearing dynamic characteristics test is proposed in the paper, which uses a real bearing and a simulation rotor. The critical speed of the first bending the simulation rotor is calculated as the same as that of the real rotor. The working speed and static load of the simulation rotor are also exactly the same as the actual conditions. Based on the analysis of dynamic similarity calculation, the scheme and device for performance testing of sliding bearing are proposed.

**Key words:** bearing, dynamic similarity, carrying capacity, test scheme

## 引 言

流体动压径向滑动轴承在大型高速及精密的旋转机械中得到广泛应用,滑动轴承不仅支撑转子正常运行,而且轴承油膜所提供的阻尼也是转子-轴承系统阻尼的主要来源<sup>[1]</sup>。随着旋转机械的大型化、高速化和大容量化发展,转子-轴承系统的稳定性已经接近极限,滑动轴承性能的优劣直接影响机

组整体工作精度、寿命、可靠性和其他诸多技术经济指标。因此,轴承的设计越来越重要。在发展新产品或对产品质量的确认方面都要求在工况类同的条件下考核轴承的性能和可靠性,有时还需要对滑动轴承的极限承载能力进行考核。影响滑动轴承性能的因素有很多,包括设计、制造、安装及其所支撑的转子性能等,理论计算只能给出方向性的指导意见,真正的滑动轴承性能考核必须依赖实验进行<sup>[2-4]</sup>。

滑动轴承通常用于大型转子,如果用真实轴承

和转子进行试验花费巨大,且一旦出现故障导致转子破坏,其代价更是无法估量。因此,提出一种轴承动力特性试验方案,使用真轴承,但转子则采用模拟转子。设计模拟转子的一阶弯曲临界转速与真转子完全一致,同时确保轴承的工作转速、静载荷也与实际工况完全一致,轴承动载荷与真实工况基本相同且可调。从理论分析可知,在这样的条件下,轴承以及转子-轴承系统的动力特性与真实工况下的动力特性是一致的,但试验成本却大大下降了,从而大大降低了大型转子轴承的设计开发成本。

## 1 试验用小型转子的设计

模型转子的实际尺寸远小于真实转子,而用实际尺寸的轴承来支撑转子,模型轴承的静载荷将远小于轴承的实际静载荷,因此转子-轴承系统动力性能必然是不同的<sup>[5-6]</sup>,所以简单的将实际转子等比例缩小将无法获得对真实转子-轴承的动力特性试验数据。基于动力相似的小型转子设计将通过转子轴颈尺寸的调整和静载荷的施加,同时实现模型转子的一阶临界转速和动力学特性与原型转子一致。

用仿真软件对转子进行有限元建模,选用 Beam188 单元类型,combi214 轴承。原型转子如图 1 所示,轴的总长为 1.02 m,轴上有 6 个圆盘,转子总重约 25 kg,轴承跨距 0.9 m, f32 的全圆轴承支撑,一阶临界转速为 2 820 r/min。基于原型转子的临界转速设计试验转子,在仿真系统中建立一个小型的转子,转子轴颈位置和尺寸和真实的转子一致,调整试验转子的参数,包括轴的直径、长度和圆盘的宽度、质量,直至使试验转子和大型转子的临界转速一致。

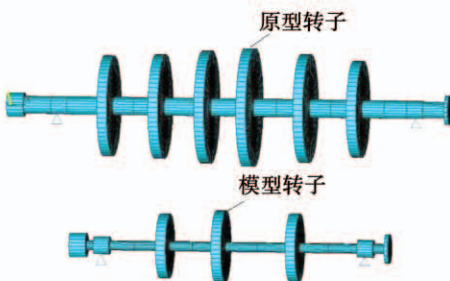


图 1 原型转子和模型转子结构图

Fig. 1 Diagram of prototype rotor and model rotor

由于试验转子的重量与原型转子重量不一致,轴承所承受的静载荷必然与实际工况不符,因此要保证转子的动力特性一致,需在仿真软件中对原型转子进行谐响应分析。试验转子的静载荷比真实转子小很多,在模型转子上用 mass21 形式将静载荷加载在试验转子上,使其与真实转子相一致。计算试验转子的谐响应并与真实转子的谐响应对比,根据对比结果再次微调试验转子的直径、长度、圆盘的宽度等,直至使模型转子和原型转子的动力学特性一致。图 2 给出试验转子与真实转子频率响应特性曲线,可以看到水平振动和垂直振动的频率响应几乎一致,说明动力特性一致。

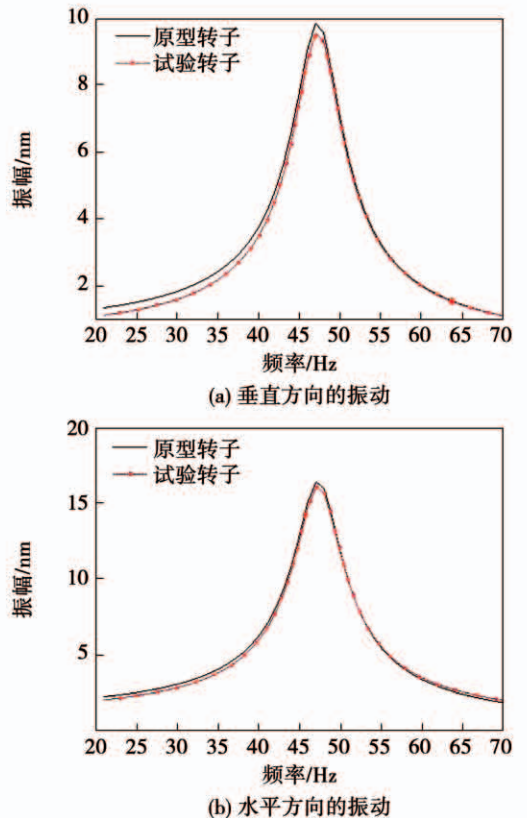


图 2 试验转子与真实转子频率响应特性曲线的对比

Fig. 2 Comparison of the frequency response characteristic curves of the test rotor and the real rotor

## 2 基于动力相似的轴承承载能力试验方案设计

基于动力相似计算分析,设计滑动轴承性能测试的试验装置。装置同时包含了转子和滑动轴承两

部分,如图3所示。转子由待试验的滑动轴承支撑,滑动轴承和轴承座之间有专用工装,以便不同的轴承可以在同一个试验台上进行试验。驱动电机通过增速机构驱动转子转动,转子转速由控制系统控制可调。试验转子是与试验轴承配套的原型转子,轴承在试验台上的运行状态与实际工作状态完全一致。

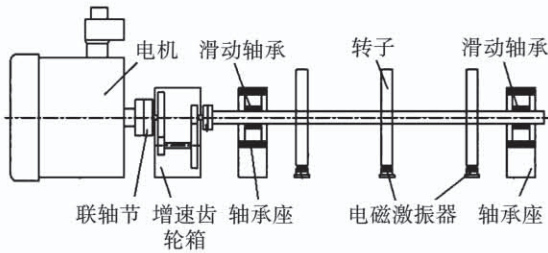


图3 转子轴承试验台

Fig. 3 Test bench of rotor bearing

在试验台上安装带有真实轴承支撑的模拟转子,没有其他辅助支撑,轴承的动载荷通过改变转子的不平衡量来实现。由于模拟转子的重量要小于真实转子,与实际的静载荷不一致,通过改变电磁执行器中的电流大小,可以改变作用于轴承的静载荷。静载荷的施加通过一个电子执行机构实现,电磁执行机构的设计,如图4所示。

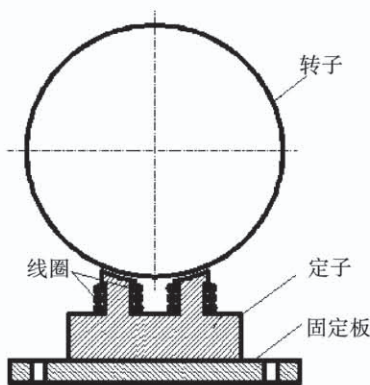


图4 电磁执行机构简图

Fig. 4 Diagram of electromagnetic actuator

电磁执行机构利用励磁线圈在铁芯和衔铁之间产生电磁力<sup>[7]</sup>。电流恒定时,电磁力保持不变,电磁铁所产生的磁力与所通过电流的平方成正比,公式为:

$$F(t) = \alpha I^2(t) \quad (1)$$

式中: $I$ —线圈的静态工作电流,A; $\alpha$ —比例系数,与电磁铁的尺寸、结构、材料与气隙 $\delta$ 的大小有关。比例系数 $\alpha$ 可以表示为:

$$\alpha = \frac{\mu_0 S N^2}{(2c_0 + L_1/\mu_r)^2} \quad (2)$$

式中: $\mu_0$ —真空磁导率; $S$ —气隙横截面积, $m^2$ ; $N$ —线圈匝数; $c_0$ —电磁执行器铁芯和转子的静态气隙,m; $L_1$ —磁路长度,m; $\mu_r$ —磁性材料的相对磁导率。

计算原型转子和模型转子的静载荷差距,得出所需施加的静载荷大小;按照不同位置的圆盘来设计铁芯的大小;根据公式计算电流大小和线圈匝数不同情况下的电磁力,选择合适的线圈匝数;通过改变电磁执行机构中的电流大小,改变作用于轴承的静载荷。静载荷是一种非接触式作用力,不影响转子的正常运转。设计时应考虑允许通过的最大电流和铁芯饱和情况。

通过动力学相似设计,可以用小转子替代大转子,且基本不影响轴承的线性和非线性动力特性,从而降低试验成本。电磁执行机构安装在转子的下面,当执行机构的线圈中通入直流电流时,会在转子上产生一个方向向下、大小不变的电磁力,该力通过转子作用于轴承上,增加了轴承的静载荷。电磁执行机构可以是一个,也可以采用多个。通过调整电磁力的作用位置以及线圈中电流的大小,完全可以确保试验轴承在试验环境中与实际工况中的静载荷完全一致。

通过电磁执行机构所产生的电磁力,可以进行试验轴承的极限承载能力试验,包括最大和最小静载荷2种情况:最大静载荷条件下,容易出现轴承和轴颈碰摩的情况;最小静载荷条件下,转子浮得很高,容易出现油膜振荡的情况。在实际工况中,由于进气(液)的方向不同,或叶轮周围工作介质密度变化等情况,往往会使轴承的静载荷出现变化。另外,即使静载荷保持不变,当动载荷或转速变化时,也会引起轴颈静平衡位置的改变,也就是说动、静载荷是互相影响的,这些影响在试验台上进行分析更有效。

### 3 结 论

利用轴承动力相似理论得到转子模型,为在功率较小的试验台上进行大型滑动轴承的性能测试提供一种可能。大大降低试验成本的同时,保证滑动轴承的试验状态与实际工况一致,并进一步验证所提出的设计方法的可行性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] 潘菁菁,苏 荃,王小静,等.基于质量守恒边界条件的动载滑动轴承性能分析[J].润滑与密封,2005,2: 41-43.  
PAN Jing-jing, SU Hong, WANG Xiao-jing, et al. The analysis of the performance of dynamically loaded journal bearing with mass conserving boundary condition[J]. Lubrication Engineering. 2005, 2: 41-43.
- [2] 张明书,徐自力,漆小兵,等.大型动压滑动轴承动特性系数辨识研究[J].西安交通大学学报,2010,44(7): 75-78.  
ZHANG Ming-shu, XU Zi-li, QI Xiao-bing, et al. Identification investigation of oil-film dynamic coefficients of large-size journal bearings[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University. 2010, 44(7): 75-78.
- [3] 武丽英.流体动压径向滑动轴承试验台的开发研制[D].西

安:西安交通大学研究生学位论文,2000.

WU Li-ying. Development of hydrodynamic radial journal bearings test bench[D]. Xi'an: Thesis of Xi'an Jiaotong University, 2000.

- [4] 黄明强.新型滑动轴承实验台的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学研究生学位论文,2001.  
HUANG Ming-qiang. Development of a new type of sliding bearing experimental bench [D]. Harbin: Thesis of Harbin Institute of Technology, 2001.
- [5] 王艾伦,黄礼坤.转子变态模型与原型的动力相似研究[J].机械设计,2013,30(10):11-15.  
WANG Ai-lun, HUANG Li-kun. Research on dynamic similarities between abnormal model and the prototype of rotor[J]. Journal of machine design, 2013, 30(10): 11-15.
- [6] YANG Yu-hang, QU Xi-long, LUO Yi-ping. Analysis of geometrical non-full-similar scale model based on similarity theorem[J]. Advanced Materials Research, 2011, 216(10): 703-707.
- [7] 刘振萍.多级离心泵湿临界转速数值计算和测试技术[M].杭州:浙江大学硕士学位论文,2012.  
LIU Zhen-ping. Wet critical speeds of multi-stage centrifugal pump: theory and testing technology [M]. Hangzhou: Thesis of Zhejiang University, 2012.

(姜雪梅 编辑)