

DOI: 10.3901/JME.2022.11.109

# 盘轴过盈力不足-支座松动耦合故障的转子系统的振动特性研究\*

李志农<sup>1,2</sup> 陈世尧<sup>1</sup> 乔芳<sup>1</sup> 周世健<sup>1</sup> 王冬<sup>3</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;

2. 国防科学技术大学装备综合保障技术重点实验室 长沙 410073;

3. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

**摘要:** 转子在交变载荷作用下极易产生盘轴过盈配合失效, 过盈配合失效将导致盘轴打滑、微动等, 同时还易引起其他孪生故障。针对盘轴过盈力不足-支座松动耦合故障, 建立了转子系统有限元模型。仿真分析了转速及接触过盈量对转子系统动力学特性的影响, 并搭建了盘轴过盈力不足-支座松动耦合故障转子试验台, 通过试验验证了仿真结果的合理性。结果表明: 转盘的时域振动响应有明显的拍振特性, 且随着转速的增加, 拍振现象越来越明显, 拍振周期变大; 由于盘轴间的过盈力不足, 盘和轴的转速不完全相同, 且随着转速的增加, 盘轴转速差的稳态值呈增大趋势。盘心轨迹随着转速的增加而逐渐向圆心靠拢; 随着过盈量的增加, 盘心轨迹不仅逐渐向圆心靠拢, 而且还出现了“内8字”形轨迹。

**关键词:** 过盈失效; 支座松动; 耦合故障; 振动特性; 转子系统

**中图分类号:** TH17; TH132

## Vibration Characteristics of a Rotor System with Coupling of Insufficient Interference Fit of Disc-Shaft and Pedestal Looseness

LI Zhinong<sup>1,2</sup> CHEN Shiyao<sup>1</sup> QIAO Fang<sup>1</sup> ZHOU Shijian<sup>1</sup> WANG Dong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing Ministry of Education,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063;

2. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense

Technology, Changsha 410073;

3. State Key Laboratory of Mechanical Systems and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** The rotor is easy to produce the interference fit failure between the disc and the shaft under alternating load, this interference fit failure will cause the skidding, slight loosening between the disc and the shaft etc, also easy to cause other twin faults. In order to reveal the vibration characteristics of the rotor with coupling faults of insufficient interference fit and pedestal looseness, a finite element model of the rotor system with coupling faults of insufficient interference fit and pedestal looseness, is proposed. The simulation analyzes the influence of the loosening stiffness, loosening damping, rotating speed and interference range on the dynamic characteristics of the rotor system. A test bench for the rotor system with coupling of insufficient interference fit and pedestal looseness is built to verify the rationality of the simulation results. The results show that obvious beat vibration characteristics appear in the time domain vibration response of the rotor system with the loose disk. The beat vibration phenomenon becomes more and more obvious, and the beat period becomes larger with the increase of the rotating speed. Due to the insufficient interference force

\* 国家自然科学基金(52075236, 51675258)、装备预研基金(6142003190210)和江西省自然科学基金重点(20212ACB202005)资助项目。20210708 收到初稿, 20220308 收到修改稿

between the disc and the shaft, the rotating speed of the disk is not exactly the same as that of the shaft, and the difference of the disc speed to that of the shaft shows an increasing trend with the increase of the speed. The orbit of the disc centre gradually moves closer to the circle centre with the increase of the speed. With the increase of the amount insufficient interference, the orbit of the disc centre gradually moves closer to the circle centre and occurs an inner-8 shape.

**Key words:** interference failure; pedestal looseness; coupling faults; vibration characteristics; rotor system

## 0 前言

机械松动故障是一种常见的机械故障,主要分为两种:一种是非旋转件松动,如支座松动、紧固件松动;另一种是旋转件松动,如轴承内圈与轴的配合松动、外圈与支座的配合松动、转子松动的等<sup>[1-2]</sup>。盘轴作为主要做功部件,其工作条件复杂多样,容易发生松动故障。盘轴的松动会使得整个机械的振动增加,同时会导致孪生故障的产生,这种耦合故障的非线性特性和振动特性更加复杂,使得整个转子系统更加不稳定<sup>[3]</sup>。所以研究转子系统的盘轴松动耦合故障是很有必要的。

目前,机械松动故障的研究主要集中在非旋转件松动的上。闻邦椿院士团队在故障转子动力学领域研究多年,建立了支承松动-碰摩故障耦合的转子系统动力学模型,分析讨论了转子系统在不同松动间隙下发生碰摩的规律特点<sup>[4]</sup>。然后利用有限元方法分析了支承松动-碰摩故障耦合的转子系统动力学特性<sup>[5]</sup>。他们还建立了双盘松动-碰摩耦合故障转子滑动轴承系统的动力学模型,分析了不同转速下耦合故障转子系统动力学特性的变化规律<sup>[6-7]</sup>。他们的结果都表明,虽然碰摩故障会降低松动故障的低频振动,但会激发高频振动。JIANG 等<sup>[8-9]</sup>分段计算了松动支承的刚度和阻尼,建立了滑动轴承支承松动-碰摩故障耦合转子的非线性动力学模型。通过数值仿真计算了不同松动间隙大小系统动力学行为的非线性度,建立了松动程度与非线性强弱之间的量化关系。王海飞等<sup>[10-12]</sup>针对航空发动机连接件松动故障及支承松动故障,建立了松动故障的模型,并利用数值积分求得了系统响应。结果表明系统的频谱中有明显的变化特征存在。QIN 等<sup>[13]</sup>利用三维非线性有限元模型,计算了螺栓松动引起的时变关节刚度及其对转子稳态系统的影响,研究了螺栓松动对转子系统的影响。徐洪志等<sup>[14]</sup>建立了双转子系统轴承座松动的动力学模型,对不同转速下系统的振动特性进行了分析。何振鹏等<sup>[15]</sup>建立了双跨

转子系统非线性动力学模型,分别分析了系统在无故障、碰摩故障及一端松动故障等多种工况下转速变化对转子动力学响应的影响。章健等<sup>[16]</sup>采用转子横向和角向振动特性耦合的动力学模型对振动耦合的产生机理及影响规律进行了研究。YANG 等<sup>[17-18]</sup>考虑不平衡-碰摩-轴承座松动的耦合故障,建立了三自由度转子系统的动力学模型。通过分叉图、轨迹图和庞加莱截面分析了转子系统的动力学特性变化。结果表明:在严重不平衡和支座松动的的影响下,转子-定子碰摩具有更高的潜在风险。

BEHZAD 等<sup>[19-20]</sup>建立了简单的盘轴松动模型。但他假设盘轴总是处于接触状态。韦淞瀚等<sup>[21-22]</sup>建立了盘轴松动的动力学模型,对盘轴接触应力及系统的振动特性进行了分析。他还设计了一套专门的实验装置来诱发松动故障。WANG 等<sup>[23]</sup>采用有限元法建立了考虑轴承外圈与轴承座配合松动的转子动力学模型,在不同配合松动间隙下进行了仿真。结果表明:增加拧紧力矩可以抑制振动。刘杰等<sup>[24-26]</sup>对盘轴松动故障进行建模仿真,分析了不同的结构参数对系统运动状态的影响,并分析了油膜力对盘轴松动故障系统振动的影响。

当盘轴配合失效后,系统振动的加剧会引起支座松动等孪生故障的出现。本文针对过盈力不足-支座松动故障,建立了单盘转子系统有限元模型。基于时频图、盘心轨迹图及盘轴转速差图,分析了不同转速和不同过盈力时系统动力学特性的变化规律。通过对过盈力不足-支座松动耦合故障的转子系统振动特性的研究,为该类耦合故障的诊断奠定重要基础。因此将盘轴过盈力不足-支座松动耦合故障的转子系统作为研究对象、分析转子系统的振动特性对多故障诊断具有重要意义。

## 1 过盈力不足-支座松动故障系统模型

### 1.1 系统力学模型

本文的研究对象是如图 1 所示的单圆盘双支承

转子系统<sup>[27]</sup>。

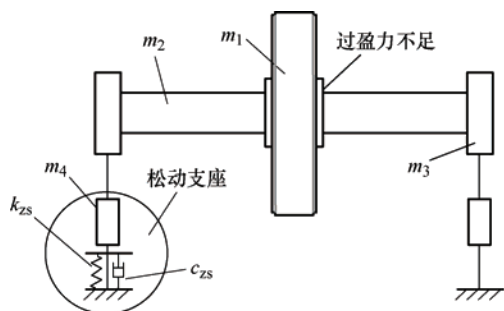


图1 过盈力不足-支座松动转子模型

图中,  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  分别为圆盘、转轴及轴承的质量。为简化研究, 将圆盘设为刚体, 即不考虑转盘的弹塑性变形, 同时将圆盘与转轴间的接触设为摩擦接触。左侧支承轴承支座设为松动的, 松动质量为  $m_4$ 。松动支座仍有一定的刚度与阻尼, 其与基座间的接触可简化为具有一定刚度和阻尼的弹簧, 松动支座端的松动刚度及松动阻尼分别为  $k_{zs}$ 、 $c_{zs}$ 。

## 1.2 系统有限元建模

(1) 建立盘轴接触几何模型。依据转子系统模型的尺寸参数, 在 SOLIDWORKS 软件中画出转子系统三维几何模型。

(2) 构建盘轴接触有限元接触模型。将三维几何模型导入有限元分析软件 ANSYS 中, 设置单元体的材料、网格等, 同时设置接触模型的接触副、约束及载荷等。轴与轴承的材料为结构钢; 盘轴接触副设为摩擦系数为 0.2 的摩擦接触; 轴与轴承过盈配合, 过盈量在 offset 中调整; 轴承与轴的接触设为旋转副。轴承与松动支座的接触设为具有刚度和阻尼的弹簧联接。

(3) 求解盘轴接触有限元接触模型。系统的求解方程为<sup>[28-29]</sup>

$$M\ddot{a}(t) + C\dot{a}(t) + Ka(t) = Q(t) \quad (1)$$

其中,  $\ddot{a}(t)$  和  $\dot{a}(t)$  分别为系统的节点加速度向量、节点速度矢量,  $M$ 、 $C$ 、 $K$ 、 $Q(t)$  分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、载荷向量。

## 2 过盈力不足-支座松动故障仿真分析

转子系统的主要参数为:  $m_1=2.01$  kg, 圆盘外径为 76.2 mm, 内径为 9.5 mm。结构钢的材料密度

为  $7\,890\text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为 209 GPa, 泊松比为 0.269;  $m_2=0.75$  kg,  $m_3=0.16$  kg,  $m_4=0.29$  kg, 松动端支座的刚度、阻尼为 2 000 N/m、900 N·s/m。

### 2.1 转速对系统特性的影响

这里, 过盈量设为 0 mm, 即支座存在松动间隙。由于松动支座在径向的自由度不受约束, 则松动支座在径向由转子旋转的惯性力矩带动产生位移。因此, 只研究了转子系统的径向的动力学特性。图 2~图 4 分别是轴速为 900 r/min、1 800 r/min 和 2 700 r/min 时, 过盈力不足-支座松动耦合故障转子系统松动支座端的时频响应图。

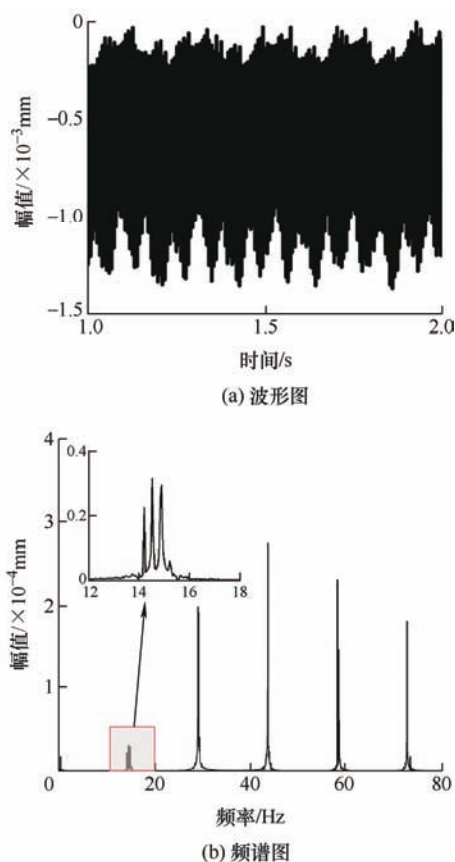
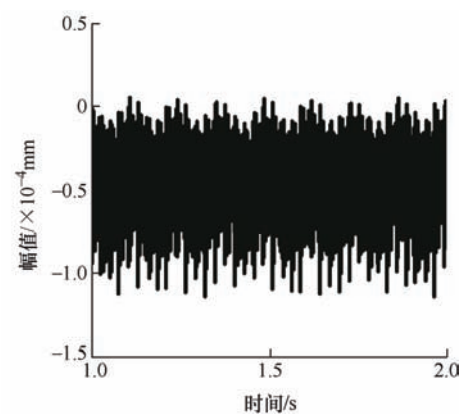
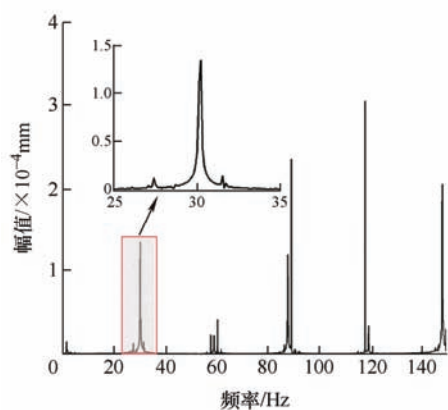


图2 轴速  $\varphi=900$  r/min 时, 系统时频图

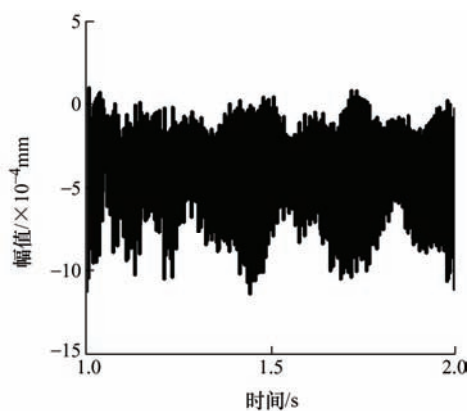
对比图 2~图 4 的时域波形图不难发现, 振动幅值在逐渐减小。此外还可以看到明显的拍振特性, 图 2a 中的拍振周期为 0.071 s, 图 3a 中的则为 0.125 s, 图 4a 中的为 0.25 s。不难发现随着转轴速度的增大, 拍振周期逐渐增大。同时, 波形图的振幅有一定程度的减小。仔细观察频谱图的局部放大可以看到, 一倍频处有两个峰值, 即圆盘和轴的转频。盘轴不同速的现象也印证了盘轴间过盈力的不足。随着转速的增加, 一倍频的幅值明显增大, 盘轴间的转速差越来越大。



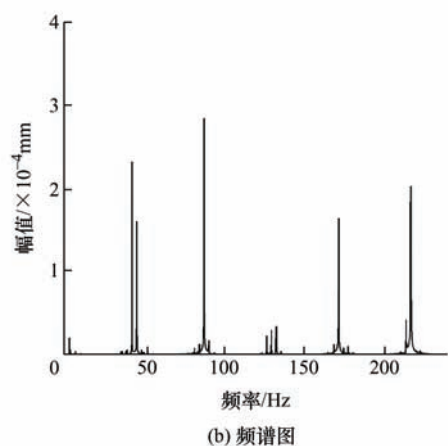
(a) 波形图



(b) 频谱图

图 3 轴速  $\varphi=1\ 800\ \text{r/min}$  时, 系统时频图

(a) 波形图



(b) 频谱图

图 4 轴速  $\varphi=2\ 700\ \text{r/min}$  时, 系统时频图

为进一步地研究转速对盘轴转速差的影响, 图 5 给出了不同转速下盘轴转速差随时间的变化曲线。观察图 5 可以发现, 在启动阶段, 盘轴转速差都有爬升的过程, 但爬升时间和爬升路径有细微差别。当经过一段时间后, 转子系统进入稳定运行阶段, 盘轴转速差也稳定了下来。对比图 5a~c 可以发现, 盘轴转速差的稳态值有明显的增大。

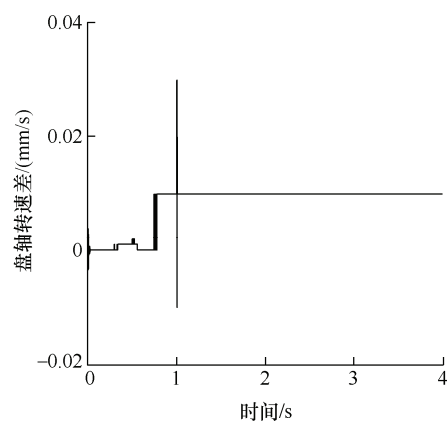
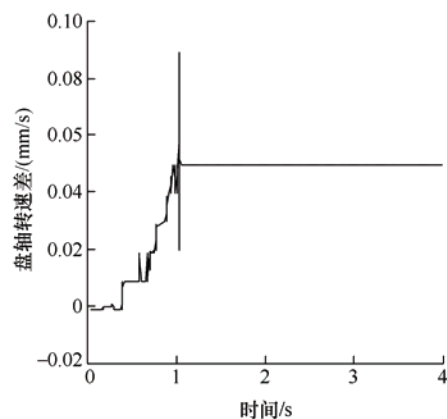
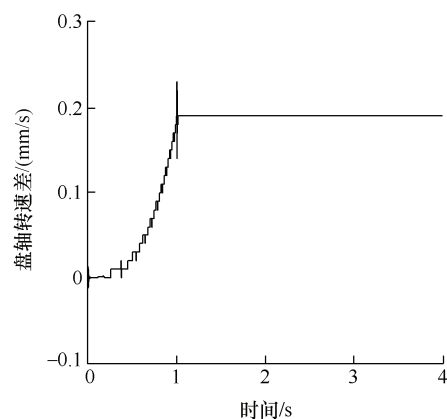
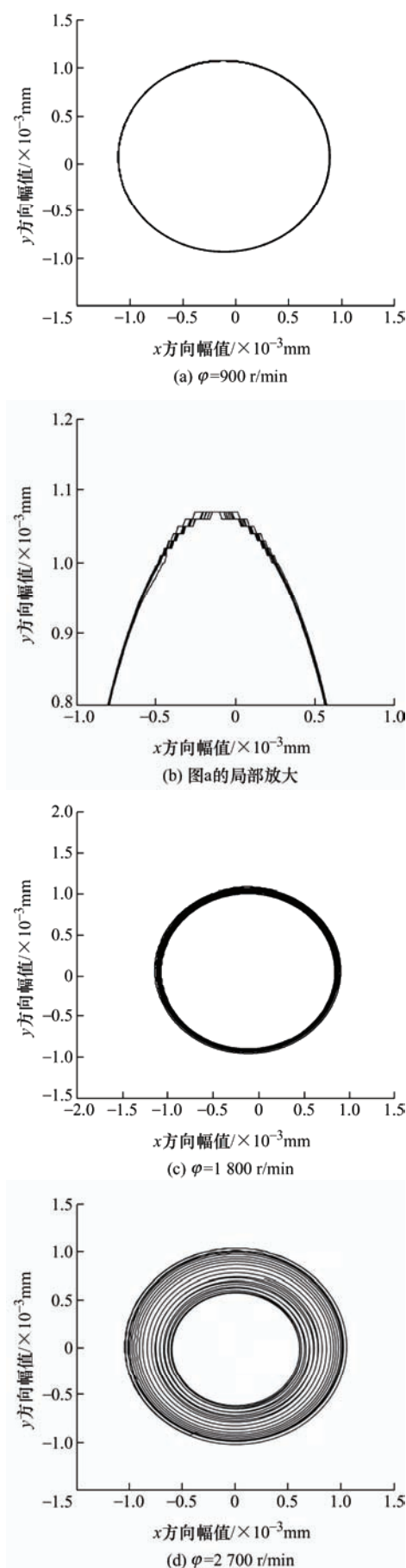
(a)  $\varphi=900\ \text{r/min}$ (b)  $\varphi=1\ 800\ \text{r/min}$ (c)  $\varphi=2\ 700\ \text{r/min}$ 图 5 不同轴速  $\varphi$  时的盘轴转速差

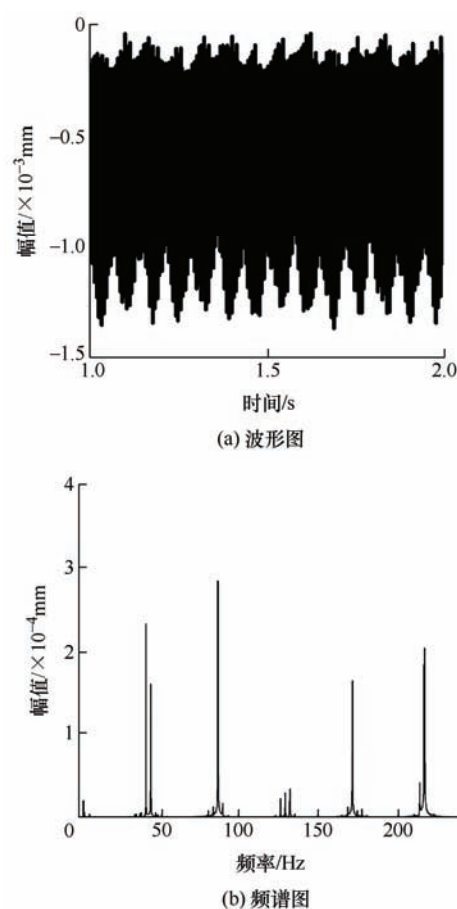
图 6 为不同轴速时, 圆盘的盘心轨迹图。在不同转速下, 盘心轨迹都为圆形。但不同的是, 随着转速的增大, 轨迹逐渐向内延伸, 说明转盘的振幅会在一定范围内有所减小, 这也印证了时域波形图

图6 不同轴速  $\varphi$  时盘心轨迹图

的结论。从盘心轨迹的局部放大图可以看到明显的锯齿状特征, 这是由松动支座与基座发生碰摩而产生的。

## 2.2 盘轴过盈量对系统特性的影响

为了研究在转速恒定时, 盘轴配合过盈量的变化对系统振动特性的影响。这里设置轴速为 2 700 r/min, 过盈量  $\gamma$  分别为 0.01 mm、0.012 mm、0.014 mm、0.016 mm。分析了不同过盈量下的过盈力不足-支座松动耦合故障转子系统的时频图、转盘的盘心轨迹及盘轴转速差。

图7 过盈量  $\gamma=0.01$  mm 时, 系统时频图

由于过盈量为 0.012 mm、0.014 mm、0.016 mm 系统时频图与过盈量为 0.01 mm、0 mm 时系统时频图相似, 所以未进行绘图描述。图 7 为盘轴过盈量为 0.01 mm 时, 转子系统的时频图。对比图 7 与图 4, 可知, 过盈量的改变对系统的振动特性影响较小, 几乎没有明显变化。

图 8 为过盈量 0.01 mm 时的盘轴转速差。对比图 8 与图 5c 可知, 过盈量为 0.01 mm 时的盘轴转速

差与过盈量为 0 mm 时的盘轴转速差都为 0.019 mm/s。

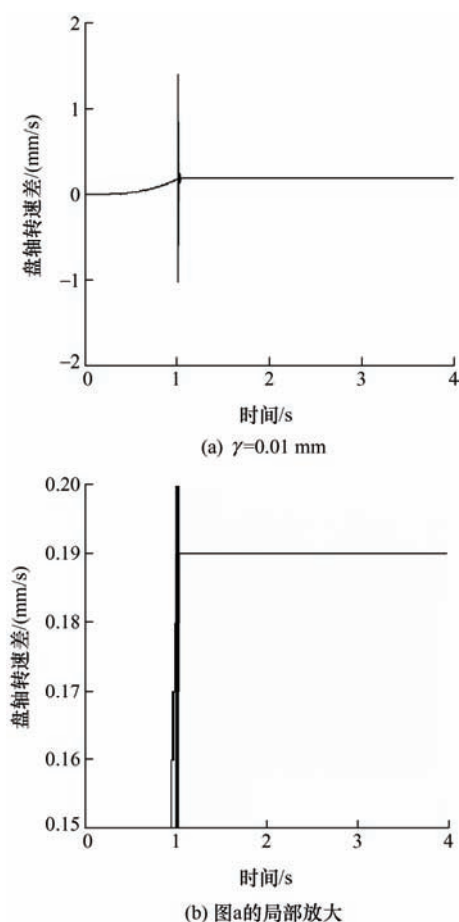


图 8 过盈量  $\gamma$  为 0.01 mm 时, 盘轴转速差

图 9 为不同过盈量时, 过盈力不足-支座松动耦合故障转子系统中的盘心轨迹图。对比图 9 与图 6 可发现, 当无过盈量时, 盘心轨迹为较规则的圆形; 当存在过盈时, 轨迹会进一步向圆心靠拢。并且轨迹图中会出现心形轨迹, 随过盈量的增大, 会出现“内 8 字”形轨迹。

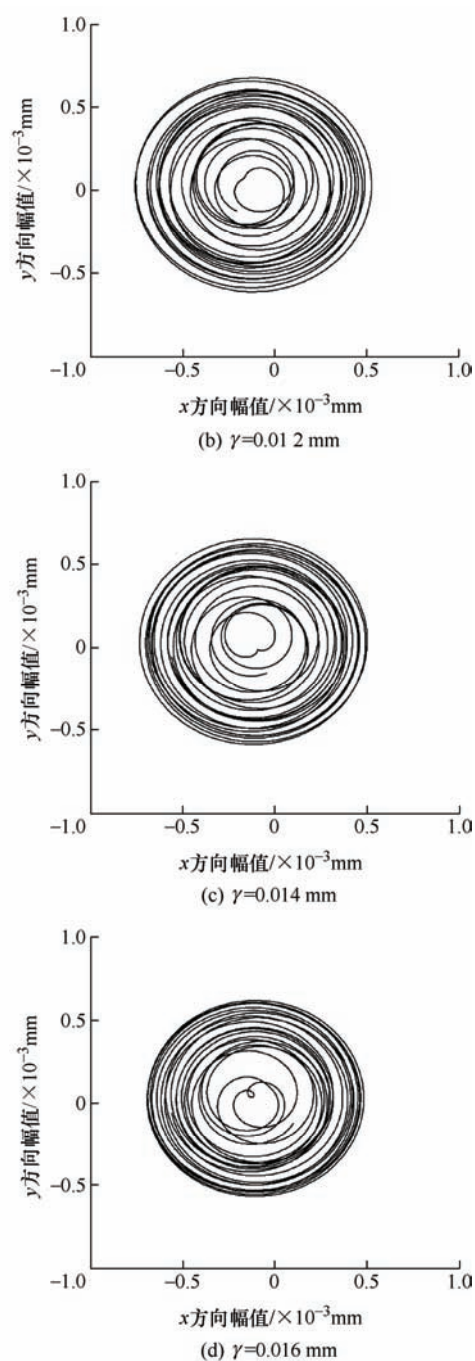
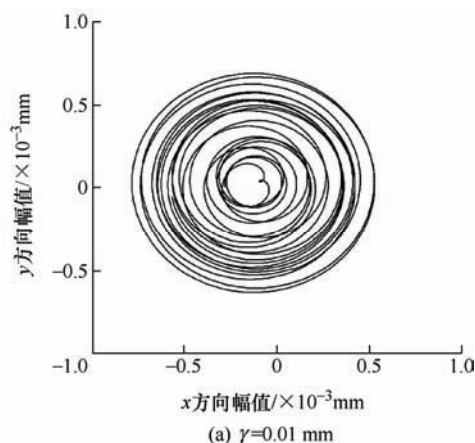


图 9 不同过盈量  $\gamma$ , 盘心轨迹图

### 3 试验研究

为验证构建的有限元模型的合理性, 设计了过盈力不足-支座松动耦合故障转子试验系统。下图为设计的转子试验台。

试验台主要有电机、联轴器、圆盘及轴承支撑等。电机轴与转轴采用挠性联轴器连接, 可以保证在试验过程中只传递转矩, 而不传递电机的振动。圆盘外径 76.2 mm, 内径 9.5 mm, 两支撑座之间的间距为 422 mm, 圆盘质量 0.612 kg。试验用两个电

涡流位移传感器分别测量转盘  $x$ 、 $y$  方向的振动位移; 用光电传感器检测键相器的转频, 即可以得到转轴的实时转速。

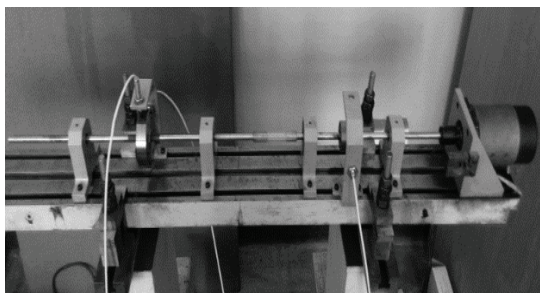


图 10 ZT-3 转子试验台

为分析过盈力不足-支座松动耦合故障转子系统的振动特性, 须调整盘轴的配合过盈力及支座松动间隙。试验中的圆盘如图 11 所示, 圆盘由锥形内圈和外环通过螺纹连接组成, 螺距为 1.25 mm。调节螺纹的旋进程度可以调整圆盘与轴之间的过盈力。松动支座部分的结构如图 12 所示, 试验中设置支座松动的间隙为 1 mm。



图 11 转盘结构

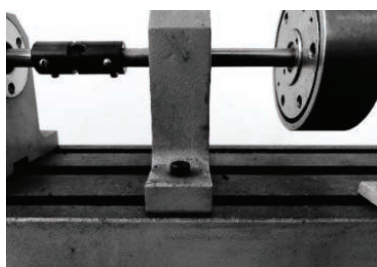


图 12 松动支座结构

图 13~图 16 分别是轴速为 816 r/min、1 266 r/min、3 114 r/min 和 4 398 r/min 时, 过盈力不足-支座松动耦合故障转子系统的时频图。在波形图中可以看到明显的拍振特性, 拍振周期随转速的增加而逐渐增大, 这一特征与仿真结果相似。由频谱图可发现, 转频的幅值最大, 且随着转速的增大, 转频的幅值逐渐增大。同时, 在频谱的局部放大图中可以看到, 在转频附近还有转盘频率, 即存在盘轴转速差, 这一特征与仿真结果相同。

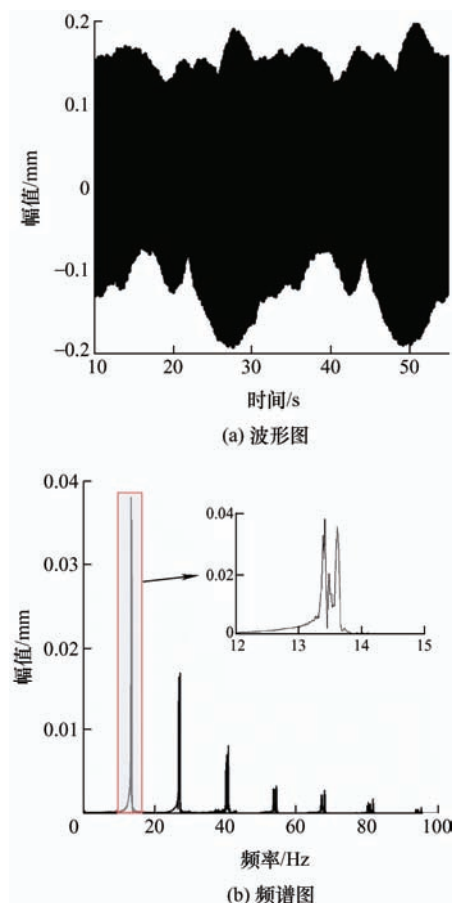


图 13 轴速  $\varphi=816$  r/min 时, 系统时频图

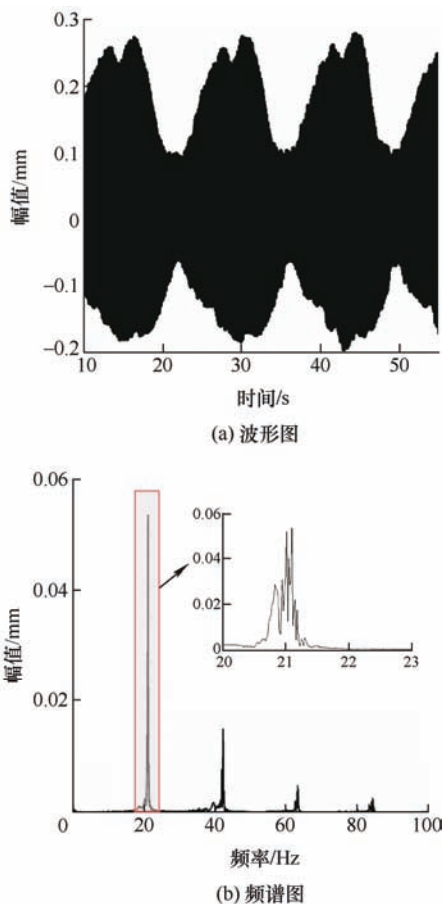
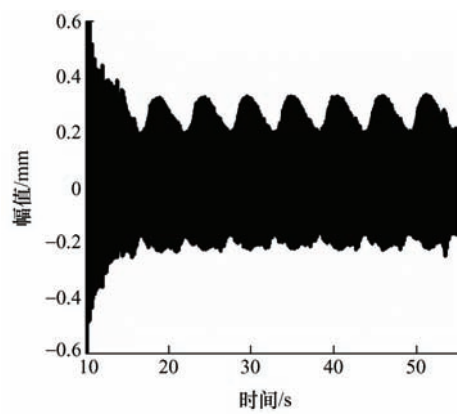
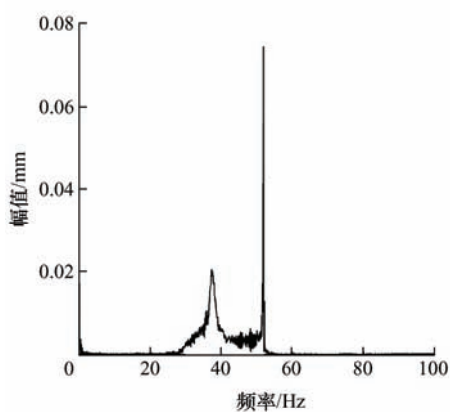


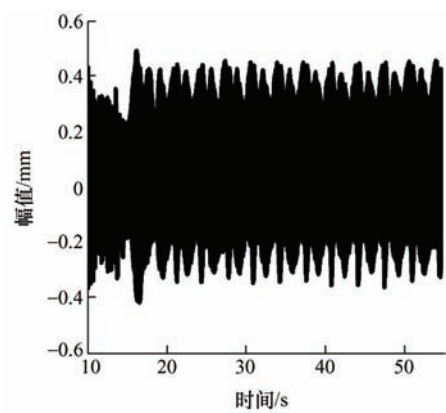
图 14 轴速  $\varphi=1\,266$  r/min 时, 系统时频图



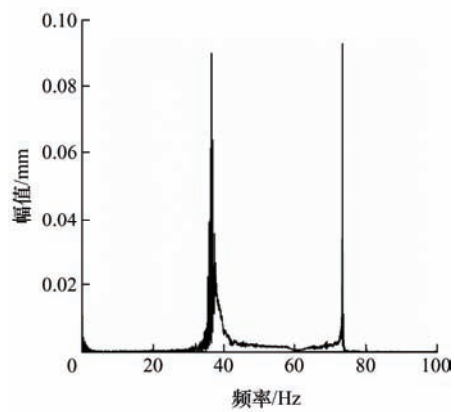
(a) 波形图



(b) 频谱图

图 15 轴速  $\varphi=3\ 114\ \text{r/min}$  时, 系统时频图

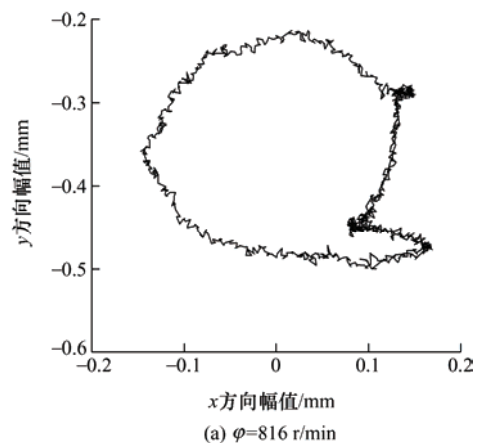
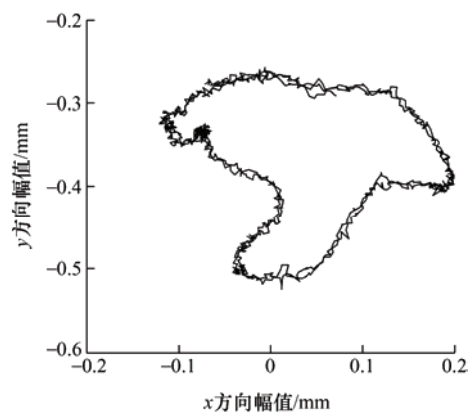
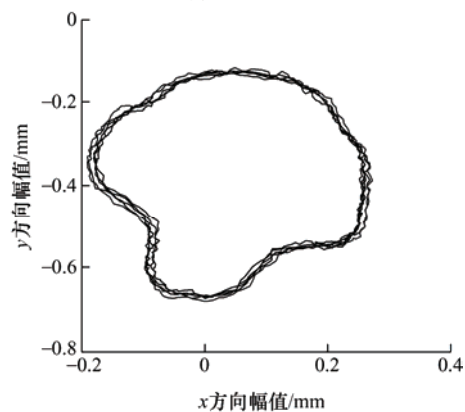
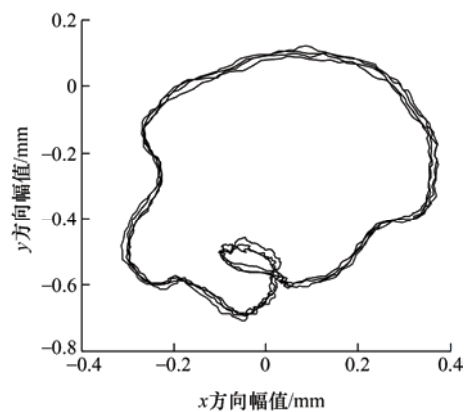
(a) 波形图



(b) 频谱图

图 16 轴速  $\varphi=4\ 298\ \text{r/min}$  时, 系统时频图

图 17 为不同轴速时, 过盈力不足-支座松动耦

(a)  $\varphi=816\ \text{r/min}$ (b)  $\varphi=1\ 266\ \text{r/min}$ (c)  $\varphi=3\ 144\ \text{r/min}$ (d)  $\varphi=4\ 398\ \text{r/min}$ 图 17 不同轴速  $\varphi$  时盘心轨迹图

合故障转子系统的盘心轨迹图。可以发现, 转速较低时支座松动所引起的盘心轨迹突变现象非常明显, 随转速的增大轨迹的突变现象在减弱。表明转速的增大会减小松动支座在径向的冲击振动。另外轨迹突变部分都在  $y$  轴最低点, 即松动支座与基座的碰摩区域。同时, 轨迹上有明显的锯齿状特征。

## 4 结论

针对过盈力不足-支座松动耦合故障, 建立了转子系统有限元模型。通过分析系统时频特性、盘心轨迹及盘轴转速差, 讨论了转速及盘轴过盈量等参数对系统动力学特性的影响规律。并对过盈力不足-支座松动耦合故障进行了转子试验研究, 试验结果与仿真结果相似。因此, 将有限元仿真用于对转子系统耦合故障的研究, 具有很好的可行性, 对多故障的识别诊断也有重要的意义。结果表明:

(1) 转子系统的波形图中存在拍振特性, 拍振周期会随转速的增大而增大。转子系统的盘轴转速差为一个稳定的数值, 稳态值随转速的增大呈增大趋势。

(2) 转子系统的盘心轨迹图中存在明显的锯齿状特征, 同时存在明显的轨迹突变部分。轨迹突变部分是由松动支座与基础的碰摩而引起的。随转速的增大盘心轨迹的突变部分会逐渐变得平滑, 即转速增大会减小松动支座与基础碰摩时的冲击振动。

## 参 考 文 献

- [1] WANG Haifei, GUAN Xiaoying, CHEN Guo, et al. Characteristics analysis of rotor-rolling bearing coupled system with fit looseness fault and its verification[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(1): 29-40.
- [2] AN Xueli, ZHANG Fei. Pedestal looseness fault diagnosis in a rotating machine based on variational mode decomposition[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(13): 2493-2502.
- [3] WANG Haifei, CHEN Guo, SONG Peipei. Asynchronous vibration response characteristics of aero-engine with support looseness fault[J]. Journal Computational Nonlinear Dynamics, 2016, 11(3): 031013.
- [4] 刘丽群, 刘挺, 闻邦椿. 松动发展过程中转子碰摩动力学特性分析[J]. 中国工程机械学报, 2013, 11(5): 390-393.  
LIU Liquan, LIU Ting, WEN Bangchun. Dynamical property analysis on rotor rubbing during loosening propagation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2013, 11(5): 390-393.
- [5] 马辉, 太兴宇, 汪博, 等. 松动—碰摩耦合故障转子系统动力学特性分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 80-86.  
MA Hui, TAI Xingyu, WANG Bo, et al. Dynamic characteristic analysis of a rotor system with pedestal looseness coupled rub-impact fault[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 80-86.
- [6] 刘杨, 李炎臻, 太兴宇, 等. 转子-滑动轴承系统松动-碰摩耦合故障分析[J]. 振动工程学报, 2016, 29(3): 549-554.  
LIU Yang, LI Yanzhen, TAI Xingyu, et al. Characteristic analysis of looseness-rubbing coupling fault in rotor-sliding-bearing system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(3): 549-554.
- [7] LIU Yang, XUE Zengyuan, JIA Lei, et al. Response characteristics of looseness-rubbing coupling fault in rotor-sliding bearing system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 8742468.
- [8] JIANG Mian, KUANG Yingwei, WU Jigang, et al. Rub-impact detection in rotor systems with pedestal looseness using a nonlinearity evaluation[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-15.
- [9] 蒋勉, 伍济钢, 彭鑫胜, 等. 基于非线性度的滑动轴承-转子系统支承松动状态评估[J]. 机械设计, 2018, 35(9): 50-56.  
JIANG Mian, WU Jigang, PENG Xinsheng, et al. Method for evaluating the pedestal looseness of the sliding bearing rotor system based on the non-linearity degree[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(9): 50-56.
- [10] 王海飞, 陈果, 廖仲坤, 等. 含支承松动故障的弹用涡扇发动机整机振动建模与机匣响应特征[J]. 航空动力学报, 2015, 30(3): 627-638.  
WANG Haifei, CHEN Guo, LIAO Zhongkun, et al. Modeling for whole missile turbofan engine vibration with support looseness fault and characteristics of casing response[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(3): 627-638.
- [11] 王海飞, 陈果, 廖仲坤, 等. 含支承松动故障的航空发动机非同步响应特征[J]. 振动.测试与诊断, 2016,

- 36(5): 858-864+1020-1021.
- WANG Haifei, CHEN Guo, LIAO Zhongkun, et al. Characteristics of aero-engine asynchronous response with support looseness fault[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 858-864+1020-1021.
- [12] 王海飞, 陈果. 连接件松动的非同步振动响应特征分析与验证[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 225-232.
- WANG Haifei, CHEN Guo. Asynchronous vibration response characteristics of connectors with looseness fault and its verification[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 225-232.
- [13] QIN Zhaoye, HAN Qinkai, CHU Fulei. Bolt loosening at rotating joint interface and its influence on rotor dynamics[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59: 456-466.
- [14] 徐洪志, 王南飞, 蒋东翔. 双转子系统轴承座松动的动力学模型及故障特性[J]. 航空动力学报, 2016, 31(11): 2781-2794.
- XU Hongzhi, WANG Nanfei, JIANG Dongxiang. Bearing pedestal looseness dynamic model of dual rotor system and fault feature[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(11): 2781-2794.
- [15] 何振鹏, 仲崇高, 王宇博, 等. 发动机转子系统碰摩-裂纹-松动耦合故障作用下动力学特性分析[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(7): 1139-1148.
- HE Zhenpeng, ZHONG Chonggao, WANG Yubo, et al. Dynamic characteristics analysis of the rotor-crack-loose coupling fault of engine rotor system[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(7): 1139-1148.
- [16] 章健, 张大义, 王永锋, 等. 共用支承-转子结构系统振动耦合特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(9): 1902-1910.
- ZHANG Jian, ZHANG Dayi, WANG Yongfeng, et al. Coupling vibration characteristics analysis of shared support-rotors system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(9): 1902-1910.
- [17] LIU Jie, LI Zhinong, LU Wenxiu, et al. Effects of unsteady oil film force on rotor system with loose disk and shaft[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 268-275.
- [18] YANG Yang, OUYANG Huajing, YANG Yiren, et al. Vibration analysis of a dual-rotor-bearing-double casing system with pedestal looseness and multi-stage turbine blade-casing rub[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 143: 106845.
- [19] BEHZAD M, ASAYESH M. Vibration analysis of rotating shaft with loose disk[J]. IJE Transactions B: Applications, 2002, 15(4): 385-393.
- [20] LIU Jie, LI Zhinong, LU Wenxiu, et al. Effects of unsteady oil film force on rotor system with loose disk and shaft[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 268-275.
- [21] 韦淞瀚, 卢文秀. 盘轴系统配合松动的振动特性研究[J]. 动力学与控制学报, 2018, 16(3): 244-249.
- WEI Songhan, LU Wenxiu. Analysis on vibration characteristic of disk-shaft system with loose fit[J]. Journal of Dynamics and Control, 2018, 16(3): 244-249.
- [22] WEI Songhan, LU Wenxiu, CHU Fulei. Speed characteristics of disk-shaft system with rotating part looseness[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 469: 115127.
- [23] WANG Haifei, GUAN Xiaoying, CHEN Guo, et al. Characteristics analysis of rotor-rolling bearing coupled system with fit looseness fault and its verification[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(1): 29~40.
- [24] 刘杰, 李志农, 卢文秀. 非稳态油膜力对转子系统盘轴松动故障的影响研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 268-275.
- LIU Jie, LI Zhinong, LU Wenxiu, et al. Effects of unsteady oil film force on rotor system with loose disk and shaft[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 268-275.
- [25] 李志农, 刘杰, 卢文秀, 等. 转子系统盘轴松动故障动力学建模和仿真研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(7): 60-71.
- LI Zhinong, LIU Jie, LU Wenxiu, et al. Research on dynamic modeling and simulation of rotors with loose disc[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(7): 60-71.
- [26] 周世健, 陈世尧, 李志农, 等. 过盈失效时轴毂微动的转子系统特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(4): 413-419.
- ZHOU Shijian, CHEN Shiyao, LI Zhinong, et al.

- Characteristics of rotor system with shaft-hub micro-motion subjected to interference failure[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(4): 413-419.
- [27] NATARAJ M , BASKARAN G. Experimental investigation of misalignment and looseness in rotor bearing system using bartlett power spectral density[J]. Journal of Scientific and Industrial Research, 2017, 76(5): 308-313.
- [28] LIN Junzhe , ZHAO Yulai , WANG Pengfei , et al. Nonlinear responses of a rotor-bearing-seal system with pedestal looseness[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 9937700.
- [29] SAMPATH K K , MOHIT L. Dual flexible rotor system with active magnetic bearings for unbalance and coupling misalignment faults analysis[J]. Sāadhanā, 2019, 44(8): 188.
- 
- 作者简介:** 李志农(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械设备状态监测与故障诊断, 转子动力学。  
E-mail: lizhinong@tsinghua.org.cn
- 陈世尧, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为转子动力学,  
E-mail: 1037823055@qq.com
- 乔芳, 女, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为转子动力学,  
E-mail: 1654511145@qq.com
- 周世健, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为机械动力学与故障诊断。  
E-mail: 408608628@qq.com
- 王冬, 男, 1984 年出生, 博士, 副教授。研究方向为机械动力学与故障诊断。  
E-mail: dongwang4-c@sjtu.edu.cn