

盘轴松动-碰摩耦合故障转子系统振动特性研究^{*}

STUDY ON VIBRATION CHARACTERISTICS OF ROTOR SYSTEM WITH COUPLING FAULT OF DISC-SHAFT LOOSENESS AND RUBBING

田丹阳^{**1} 李志农^{***1} 周世健¹ 李云龙²

(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. 广西大学 机械工程学院, 南宁 530004)

TIAN DanYang¹ LI ZhiNong¹ ZHOU ShiJian¹ LI YunLong²

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing Technology of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

摘要 转子系统在运转过程中可能会发生零件掉落、松动等情况,导致外加物体与转轴发生碰摩。针对这个问题,考虑盘轴松动与碰摩同时发生的情况,建立具有耦合故障的转子系统有限元模型。利用有限元软件对系统进行仿真,分析盘轴间的松动程度对系统振动特性的影响,并通过试验进行验证。结果表明,转子系统的时域波形周期性变化,频谱以转轴转动频率成分为主。随着盘轴松动程度的加剧,频谱中逐渐出现了高频成分;盘轴转速差在启动阶段的初始值随着松动程度的加剧而逐渐增大;盘心轨迹垂直方向的振动幅值也随着松动程度的加剧逐渐变大,且轨迹形状变得更为复杂。由于碰摩的影响,垂直方向的振动明显受到抑制,其幅值小于水平方向的。研究结果对转子系统耦合故障的动力学特性研究具有非常重要的参考价值。

关键词 转子系统 碰摩 耦合故障 振动特性 盘轴松动

中图分类号 TH17 TH113.1

Abstract During the operation of the rotor system, parts may fall and loose, resulting in rubbing between the external object and the rotor shaft. To solve this problem, a finite element model of rotor systems with coupling fault was established by considering the case that disc-shaft loosening and rubbing occur simultaneously. Ansys was employed to simulate the rotor system. The influence of the looseness on the vibration characteristics of the rotor system was analyzed. Experiments were carried out to verify the simulation results. The results show that the time-domain waveform of the rotor system changes periodically, and the spectrogram mainly contains the first harmonic component. With the aggravation of the looseness, high frequency components gradually appear in the spectrum. The initial value of the speed difference of the disc-shaft in the start-up phase gradually increases with the aggravation of the loosening. The vibration amplitude of the disc center trajectory in the vertical direction also increases with the aggravation of the looseness, and the orbit shape becomes more complex. Due to the influence of the rubbing, the vibration in the vertical direction is obviously suppressed, and its amplitude is smaller than that in the horizontal direction. The research results have very important reference value for the study on dynamic characteristics of rotor systems with coupling faults.

Key words Rotor system; Rubbing; Coupling fault; Vibration characteristics; Disk-shaft loosening

Corresponding author: LI ZhiNong, E-mail: lizhinong@tsinghua.org.cn

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52075236), the Key Projects of Jiangxi Natural Science Foundation (No. 20212ACB202005), and the Postgraduate Innovation Special Fund Project of Nanchang Hangkong University (No. YC2021-095).

Manuscript received 20221107, in revised form 20230106.

^{*} 20221107 收到初稿, 20230106 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (52075236), 江西省自然科学基金重点项目 (20212ACB202005), 南昌航空大学研究生创新专项资金项目 (YC2021-095) 资助。

^{**} 田丹阳, 女, 1997 年生, 河南许昌人, 汉族, 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室硕士研究生, 主要研究方向为机械动力学与故障诊断。

^{***} 李志农 (通信作者), 男, 1966 年生, 江西吉安人, 汉族, 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为机械动力学与故障诊断。

0 引言

在旋转机械中,经常会发生松动故障,这通常是零部件的安装精度不高或旋转机械工作时的长期振动导致的。在当前背景下,转子系统的工作效率逐步提高,这就要求较高的转速,还要求转定子之间间隙越来越小。因此,实际工程项目中的松动故障和碰摩故障问题逐渐受到人们的重视^[1]。尹凤伟^[2]基于考虑碰摩故障的单盘转子系统力学模型,研究了模型的关键参数与系统动力学特性间的关系。张悦等^[3]提出了一种碰摩故障下多盘拉杆转子系统的动力学建模方法,研究了不同参数对转子系统动力学特性和非线性行为的影响。针对单盘柔性转子系统,刘德强^[4]分析了不同参数对周期分岔图、轴心轨迹图等系统动力学行为的影响。李文扩等^[5]对转子系统中出现的碰摩故障进行了分类,分析了产生碰摩故障的主要原因,并对近年来国内外的研究成果进行了综述和总结。针对具有基座松动和碰摩的拉杆转子,郑美茹等^[6]建立了系统动力学模型及微分方程,讨论了不同参数对故障拉杆转子的非线性动力学响应的影响。刘俊杰等^[7]建立了由非线性支撑的单盘碰摩-油膜轴承转子系统模型,分析了 Poincaré 截面图和最大碰摩力图等系统非线性动力学特性。曾旭焱^[8]建立了含碰摩故障的双盘转子-滚动轴承系统模型,结合数值积分的方法分析了转速对转子系统的影响。黄志伟等^[9]建立了轴承松动与碰摩耦合故障的转子模型,分析了发电机转子和松动轴承随着转速比、转子质量偏心变化的动力学特性。MERCIER A 等^[10]主要对转定子发生摩擦时系统的振动特性进行了研究,分析了界面上不同节点的速度偏差对系统特性的影响。GOLDMAN P 等^[11-14]建立了含有支座松动故障的转子仿真模型和转定子之间产生碰摩的转子仿真模型,对支座松动、碰摩故障和不平衡故障分别进行了更加深入的研究,又通过分析分叉图、时频特性以及轨迹图研究了系统的振动特性,并进行相应的试验进一步验证了数值仿真结果的准确性。LYU M D 等^[15]研究了一种新的能够识别不同类型转子系统碰摩的方法,并对这些不同的碰摩响应分别采用了不同的算法。XIANG L 等^[16]对裂纹-碰摩-油膜失稳故障的转子系统进行了数值仿真与试验模拟,研究了所建立模型在多故障作用下的振动特征和非线性动力学规律。甄满等^[17]运用龙格库塔法对建立的具有不对中-碰摩耦合故障的转子系统微分方程进行了求解,并分析了转轴不对中度和碰摩刚度等参数对系统动力学响应的影响。LIU Y 等^[18]建立了具有松动-碰摩耦合的双盘转子系统模型,研究了活动轴承支撑的转子系统动力学特性的变化。YANG Y 等^[19-20]为了

揭示耦合故障的影响,分析了不平衡-碰摩-松动耦合故障转子系统的非线性特性。DING K Y 等^[21]对同时含有不平衡和叶壳碰摩故障的转子系统进行了研究。

然而,现有的松动-碰摩故障研究主要是关于基座松动与转定子碰摩的,没有关于盘轴松动故障与碰摩故障耦合的研究,而且转定子碰摩集中在转盘与机匣外壳。但在实际的工程应用中,转子系统在运转时可能会发生零件掉落、松动等情况,导致外加物体与转轴碰摩。关于这个问题,现有的动力学特性研究较为匮乏。因此,本文以盘轴松动-碰摩耦合故障的转子系统为研究对象,用有限元分析软件对模型进行求解,主要讨论盘轴松动程度对系统时频特性、转速差、盘心轨迹的影响。研究结果为转子系统耦合故障的动力学特性研究提供非常重要的参考。

1 转子系统动力学模型

1.1 盘轴松动-碰摩耦合故障转子系统模型

图 1 是盘轴松动-碰摩耦合故障转子系统模型简图。转盘安装在转轴上,转轴两端为轴承基座。这里为了方便研究,假设转盘是刚性体,即不考虑转盘运转过程中发生的弹塑性变形;盘轴间为微间隙配合,摩擦螺钉通过摩擦螺钉支架进行固定,摩擦螺钉支架未画出。

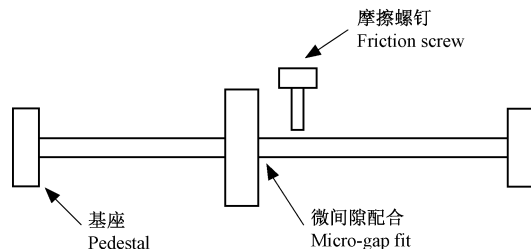


图 1 盘轴松动-碰摩耦合故障转子系统模型简图

Fig. 1 Schematic diagram of the rotor system model with the disc-shaft loosening-rubbing coupling fault

1.2 系统有限元建模

在进行有限元仿真分析时,首先需要构建转子系统三维模型,如图 2 所示。按照系统的实际参数,在建模软件 SolidWorks 中画出模型,并将其导入有限元软件 Ansys Workbench 中。其次,对系统各部件的材料等参数进行设置。设置时间步长为 0.000 1 s,设置摩擦因数为 0.2。然后,进行网格划分、添加接触和约束等。其中,盘轴接触的松动通过间隙量反映,间隙量通过接触设置里的 offset 进行调整。最后,对模型进行求解分析,仿真时摩擦螺钉与转轴接触,系统的求解方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

式中, $\ddot{x}$ 为节点加速度; $\dot{x}$ 为节点速度; x 为节点位移

向量; $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 为载荷向量。

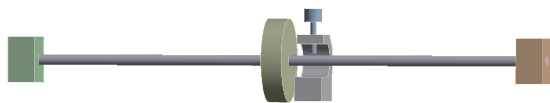


图2 转子系统有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the rotor system

2 仿真研究

对建立的盘轴松动-碰摩耦合故障动力学模型进行仿真研究时,假设摩擦螺钉与转轴全程保持接触,对不同间隙量时系统的振动特性的变化进行分析。

图3~图7所示是盘轴间隙量分别为0.005、0.01、0.015、0.018、0.02 mm时具有耦合故障的转子系统的时频响应,此时的转速为1 500 r/min。由图3~图7的波形图可以看出,在系统的启动阶段波形变化较为明显,系统的时域波形呈周期性变化,随着间隙量的增加,波形的幅值逐渐增大。频谱图中主要包含转轴转动频率成分。然而,转动频率成分的幅值随着间隙量的增加先增大后减小,在间隙量为0.015 mm时达到最大。这是由于随着间隙量的增加,盘与轴的接触力逐渐减小。在间隙量增加到一定程度时,盘轴开始碰撞。碰撞的产生影响了盘和轴的正常运转,因此转动频率成分的幅值产生了下降。正是由于盘轴的碰撞,频谱图中逐渐出现了高频成分。但当间隙量较

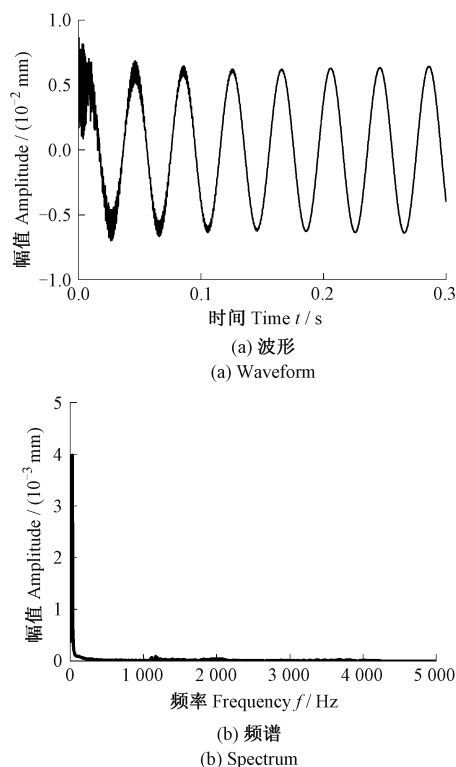


图3 间隙量为0.005 mm时系统的时频图

Fig. 3 Time-frequency diagram of the system when the clearance is 0.005 mm

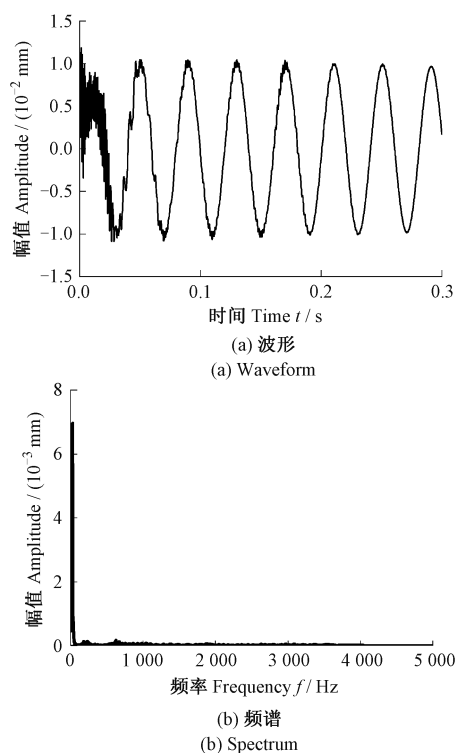


图4 间隙量为0.01 mm时系统的时频图

Fig. 4 Time-frequency diagram of the system when the clearance is 0.01 mm

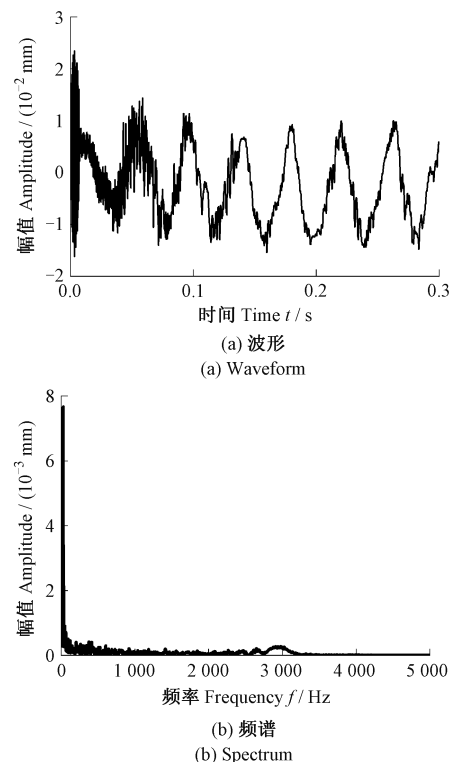


图5 间隙量为0.015 mm时系统的时频图

Fig. 5 Time-frequency diagram of the system when the clearance is 0.015 mm

小时,受摩擦螺钉的影响, y 方向的振动受到抑制,导致几乎看不到高频成分,此时呈现出松动故障和碰摩故障耦合的现象。当间隙量增加至0.015、0.018 mm时,摩擦螺钉对系统的影响有限,因此高频成分开始出

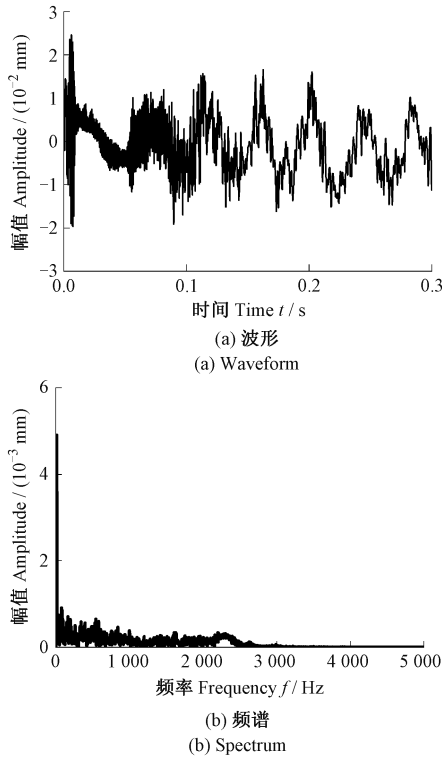


图 6 间隙量为 0.018 mm 时系统的时频图

Fig. 6 Time-frequency diagram of the system when the clearance is 0.018 mm

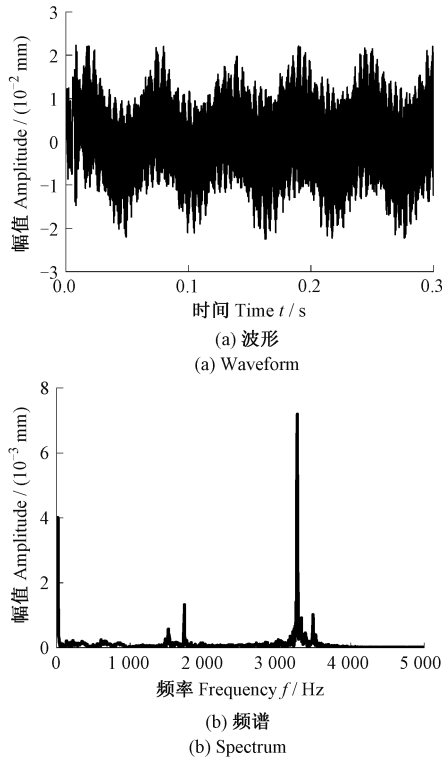


图 7 间隙量为 0.02 mm 时系统的时频图

Fig. 7 Time-frequency diagram of the system when the clearance is 0.02 mm

现明显变化;当间隙量达到 0.02 mm 时,可以看到明显的高频成分,其幅值已经高于转动频率幅值。

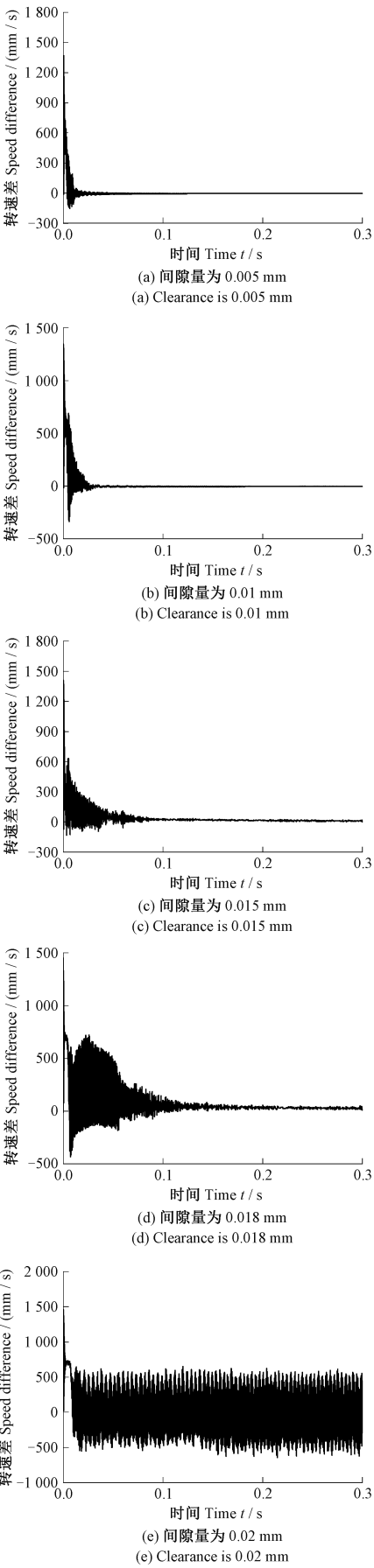


图 8 不同间隙量下系统的盘轴转速差

Fig. 8 Disc-shaft speed difference of the system under different clearances

图8是盘轴间隙量分别为0.005、0.01、0.015、0.018、0.02 mm时系统的盘轴转速差图,此时的转速为1 500 r/min。观察图8可以发现,在启动阶段盘轴转速差较大,且转速差的初始值随间隙量的不断增加而逐渐增大。经过一段时间后,图8(a)~图8(d)中盘轴转速差幅值稳定在0 mm/s,但图8(e)中盘轴转速差变化幅值比较大,说明在间隙量为0.018~0.02 mm时盘轴松动发生了较大变化。

图9是盘轴间隙量分别为0.005、0.01、0.015、0.018、0.02 mm时系统的盘轴轨迹图,此时的转速为1 500 r/min。由图9可以发现,盘心轨迹整体呈椭圆形。盘心轨迹 x 方向的振动幅值比 y 方向的略大,表明摩擦螺钉对转子系统的上下振动有抑制作用。此外,盘心轨迹上出现了锯齿状特征,且随着间隙量的增加,锯齿状特征的变化范围越大,说明锯齿状特征是由于间隙的出现而产生的。盘心轨迹的 x 方向和 y 方向的幅值都随着间隙量的增加而逐渐增加,说明间隙量的增加对系统的影响越来越复杂。

3 试验研究

为验证盘轴松动-碰摩耦合故障转子系统仿真结果的有效性,搭建了转子试验系统,该试验系统由ZT-3型转子试验台、振动数据采集与分析系统及调速器等组成。

图10所示为试验时用到的转子试验台,试验台包含电机、传感器、联轴器、转盘、转轴、滑动轴承座、摩擦螺钉等部分。转轴的长度为500 mm,转盘的外径为76.2 mm,转轴的直径和转盘的內径均为9.5 mm。图11所示转盘是由外环与內圈通过螺纹连接组成的,通过改变螺纹的旋进程度能够控制盘轴间的间隙量。为保证试验的安全性,图12所示为试验用摩擦螺钉,试验时将其固定在摩擦螺钉支架上。盘轴松动程度过大导致转盘內圈与外环分离,使得转盘发生轴向位移,无法进行试验,因此试验时仅选取0.01、0.02、0.03 mm的盘轴间隙量进行研究,未进行更大间隙量的试验验证。

图13~图15分别是盘轴间隙量为0.01、0.02、0.03 mm时试验转子系统的时频图,此时的转速为1 500 r/min。试验时将摩擦螺钉与转轴接触。由图13~图15可以发现,波形图变化均较为稳定,频谱图中以转轴转动频率成分为主,同时包含了一些转动频率的倍频成分。随着间隙量的逐渐增加,波形的幅值也逐渐增加,而频谱图中转动频率成分的幅值随之减小。同时,图13、图14的频谱图中出现了幅值较小的高频成分;当间隙量为0.03 mm时,明显的高频成分出现在1 000~1 500 Hz,此现象与仿真结果中间隙量为0.015~0.02 mm时表现得相似。试验中明显出

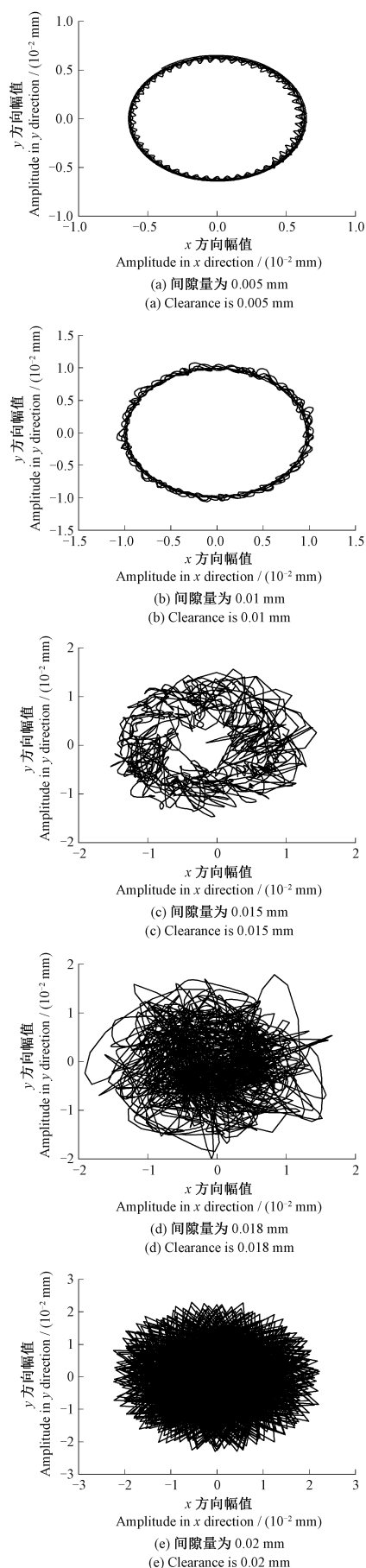


图9 不同间隙量下系统的盘心轨迹图
Fig. 9 Disk center trajectory diagram of the system under different clearances

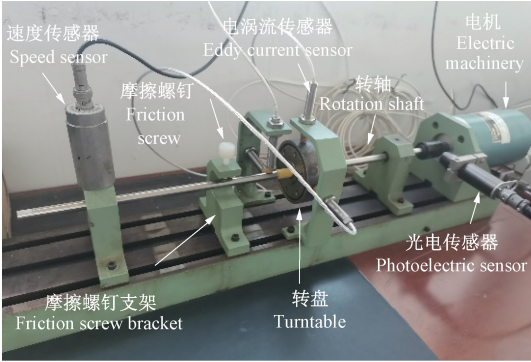


图 10 转子试验台
Fig. 10 Rotor test bench



图 11 转盘结构图
Fig. 11 Diagram of rotary table structure



图 12 摩擦螺钉
Fig. 12 Friction screw

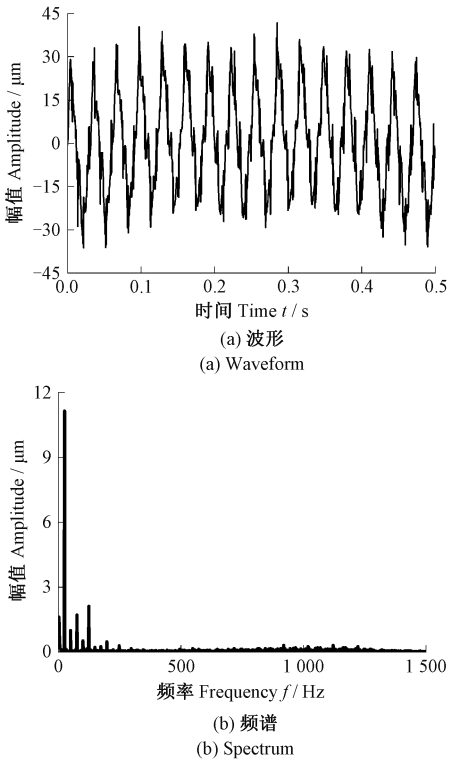


图 13 间隙量为 0.01 mm 时系统的时频图
Fig. 13 Time-frequency diagram of the system when the clearance is 0.01 mm

现高频成分时的间隙量与仿真时存在不同,且频率也不相同,这是因为仿真时为了简化研究,对一些影响因素进行了理想化。

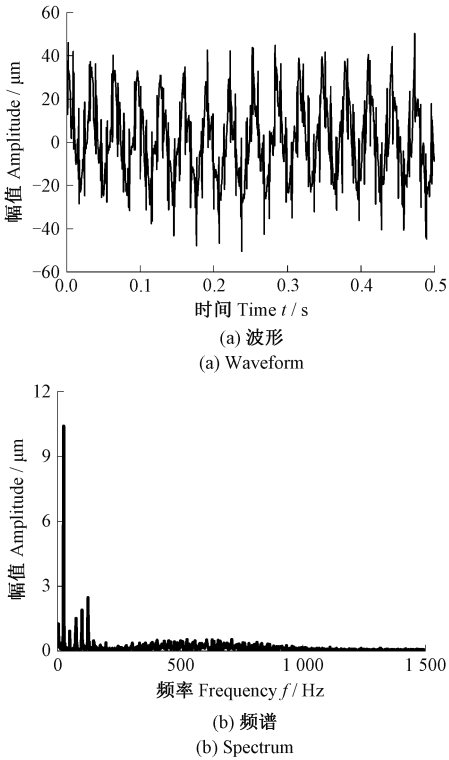


图 14 间隙量为 0.02 mm 时系统的时频图
Fig. 14 Time-frequency diagram of the system when the clearance is 0.02 mm

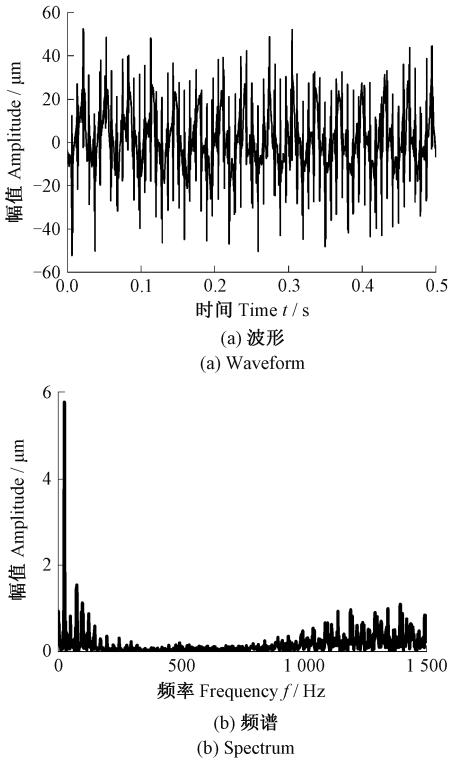


图 15 间隙量为 0.03 mm 时系统的时频图
Fig. 15 Time-frequency diagram of the system when the clearance is 0.03 mm

图16是盘轴间隙量分别为0.01、0.02、0.03 mm时系统的盘心轨迹图,此时的转速为1 500 r/min。由图16可以发现,盘心轨迹为椭圆形,且均有锯齿状特征出现。 x 方向的振动幅值均比 y 方向的大,表明摩擦螺钉抑制了系统的上下振动。盘心轨迹 y 方向的振动幅值随着间隙量的增加而不断增加,说明间隙量的增加对系统的影响越来越复杂。这些结果与仿真结果相一致,说明了建立的盘轴松动转子系统的有限元模型是准确的。

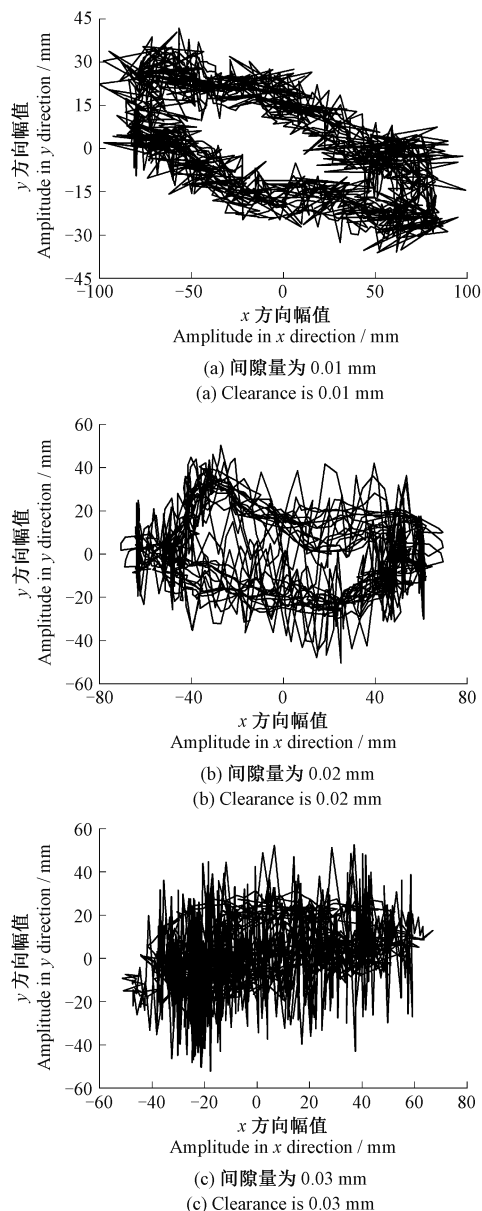


图16 不同间隙量下系统的盘心轨迹

Fig. 16 Disk center trajectory of the system under different clearances

4 结论

针对转子系统的盘轴松动-碰摩耦合问题,本文建立了具有耦合故障的系统模型,利用有限元对模型进行仿真求解,分析了盘轴松动程度对系统动力学特性

的影响,并且,在试验台上进行试验,其结果与仿真结果基本吻合。因此,研究盘轴松动与碰摩耦合对转子系统耦合故障研究具有重大意义。得出主要结论如下:

1) 当碰摩故障与盘轴松动故障同时存在时,转子系统的波形变化较为稳定,频谱图中以转轴转动频率成分为主,随着间隙量的不断增加,波形幅值逐渐变大,且频谱图中会逐渐出现幅值较大的频率成分。

2) 当碰摩故障与盘轴松动故障同时存在时,在启动阶段,盘轴转速差较大,盘轴转速差图中的幅值随着间隙量的增加而增大,经过一段时间后,转速差逐渐稳定。

3) 碰摩抑制了系统竖直方向的振动,导致盘心轨迹水平方向的振动幅值比竖直方向的大,因此盘心轨迹呈椭圆形。由于间隙的影响,盘心轨迹开始出现锯齿状特征,且随着间隙的扩大,锯齿状特征的变化范围越来越大,导致盘心轨迹由规则的椭圆形逐渐变得复杂。

参考文献 (References)

- [1] 吴敬东. 转子系统碰摩的若干非线性动力学问题研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006: 4-13.
WU JingDong. Study on some nonlinear dynamics problems of rotor system with impact-rubbing [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006: 4-13 (In Chinese).
- [2] 尹凤伟. 含碰摩振动的油膜轴承-转子系统非线性动力学特性 [J]. 机械设计, 2021, 38(10): 94-101.
YIN FengWei. Non-linear dynamic characteristics of the oil-film bearing-rotor system with rub-impact vibration [J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(10): 94-101 (In Chinese).
- [3] 张悦, 王凯伦, 胡雅楠, 等. 含碰摩故障多盘拉杆转子系统动力学特性分析 [C]//第十四届全国振动理论及应用学术会议 (NVT2021) 摘要集. 天津: 中国振动工程学会, 2021: 90.
ZHANG Yue, WANG KaiLun, HU YaNan, et al. Analysis of dynamic characteristics of multi disc rod rotor system with rub impact fault [C]//The 14th National Conference on Vibration Theory and Application (NVT2021). Tianjin: Chinese Society of Vibration Engineering, 2021: 90 (In Chinese).
- [4] 刘德强. 单盘柔性碰摩转子系统的非线性动力学特性分析 [J]. 机械强度, 2021, 43(2): 275-280.
LIU DeQiang. Nonlinear dynamics analysis of a single-disk flexible rubbing rotor [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(2): 275-280 (In Chinese).
- [5] 李文扩, 李舜酩. 转子系统碰摩故障研究综述 [J]. 机械设计, 2021, 38(3): 1-9.
LI WenKuo, LI ShunMing. Research summary on the rub impact fault of the rotor system [J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(3): 1-9 (In Chinese).
- [6] 郑美茹, 黑棣. 具有基座松动和碰摩故障的拉杆转子-轴承系统动力学分析 [J]. 机电工程, 2020, 37(12): 1439-1446.
ZHENG MeiRu, HEI Di. Dynamics analysis of rod fastening rotor

- bearing system with pedestal looseness and rub-impact faults [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(12): 1439-1446(In Chinese).
- [7] 刘俊杰, 张凌云, 尹凤伟, 等. 碰摩转子-油膜轴承系统的非线性响应分析 [J]. 机械强度, 2020, 42(6): 1310-1315.
LIU JunJie, ZHANG LingYun, YIN FengWei, et al. Nonlinear response analysis of double disk rubbing rotor-oil film bearing system [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(6): 1310-1315(In Chinese).
- [8] 曾旭焱. 含碰摩故障的双盘转子-滚动轴承系统动力学特性分析 [J]. 现代制造工程, 2020(8): 141-146.
ZENG XuYan. Nonlinear dynamic response analysis of dual-disk rub-impact rotor-rolling bearing system [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(8): 141-146(In Chinese).
- [9] 黄志伟, 周建中, 张孝远, 等. 水轮发电机组轴系松动-碰摩耦合故障的动态响应 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 121-126.
HUANG ZhiWei, ZHOU JianZhong, ZHANG XiaoYuan, et al. Dynamic responses of shaft system of hydraulic generator set with coupling faults of bearing looseness and rotor rub-impact [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 121-126(In Chinese).
- [10] MERCIER A, JEZEQUEL L, BESSET S, et al. Nonlinear analysis of the friction-induced vibrations of a rotor-stator system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 443: 483-501.
- [11] GOLDMAN P, MUSZYNSKA A. Analytical and experimental simulation of loose pedestal dynamic effects on a rotating machine vibrational response [C]// International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Miami, USA: American Society of Mechanical Engineers, 1991: 11-17.
- [12] GOLDMAN P, MUSZYNSKA A. Chaotic behavior of rotor/stator systems with rubs[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116(3): 692-701.
- [13] GOLDMAN P, MUSZYNSKA A. Dynamic effects in mechanical structures with gaps and impacting: order and chaos [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116(4): 541-547.
- [14] MUSZYNSKA A, GOLDMAN P. Chaotic responses of unbalanced rotor/bearing/stator systems with looseness or rubs [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1995, 5(9): 1683-1704.
- [15] LYU M D, LIU T, WANG Z X, et al. A control method of the rotor re-levitation for different orbit responses during touchdowns in active magnetic bearings [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 105: 241-260.
- [16] XIANG L, DENG Z Q, HU A J, et al. Multi-fault coupling study of a rotor system in experimental and numerical analyses [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 97(4): 2607-2625.
- [17] 甄 满, 孙 涛, 田拥胜, 等. 滚动轴承转子系统不对中-碰摩耦合故障非线性动力学分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 140-147.
ZHEN Man, SUN Tao, TIAN YongSheng, et al. Nonlinear dynamic analysis of misalignment-rub-impact coupling fault of rolling bearing rotor system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(7): 140-147(In Chinese).
- [18] LIU Y, XUE Z Y, JIA L, et al. Response characteristics of looseness-rubbing coupling fault in rotor-sliding bearing system [J]. Mathematical Problems in Engineering: Theory, Methods and Applications, 2017, 2017: 8742468.
- [19] YANG Y, CHEN G, OUYANG H J, et al. Nonlinear vibration mitigation of a rotor-casing system subjected to imbalance-looseness-rub coupled fault [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2020, 122: 103467.
- [20] YANG Y, YANG Y R, CAO D Q, et al. Response evaluation of imbalance-rub-pedestal looseness coupling fault on a geometrically nonlinear rotor system [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118: 423-442.
- [21] DING K Y, WANG Z, LU X, et al. Vibration investigation of rotor system with unbalance and blade-casing rubbing coupling faults [J]. Journal of Vibroengineering, 2020, 22(2): 353-365.