

# 基于全频谱技术的油膜诱发转子失稳的故障诊断

曹家瑜, 于洪亮, 闫 锦, 廖建彬

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了解决传统的频谱技术在转子-轴承系统故障诊断中存在的问题, 采用全频谱技术诊断方法, 对油膜诱发转子失稳故障进行诊断。该方法可以完整描述转子的进动状态, 对整个进动平面进行监测, 且能够同时容纳空间上两个垂直的传感器的信号。结果表明, 全频谱技术可以对油膜诱发转子失稳的故障进行有效诊断, 提高了故障诊断的便捷性与准确度。

[关键词] 转子失稳; 故障诊断; 油膜; 全频谱技术

[中图分类号] U 664.21

## Diagnostic Analysis of Oil Film Induced Rotor Instability Based on Full Spectrum Plot Technology

CAO Jiayu, YU Hongliang, YAN Jin, LIAO Jianbin

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In view of the fact that the traditional spectrum plot can only express vibration information in a fixed direction in the fault diagnosis of rotor-bearing system, which has poor reliability and contingency, and causes misjudgment of the results. In this paper, the fault diagnosis of oil film induced rotor instability is carried out by using the full spectrum plot. The full spectrum plot can completely describe the rotor precession state and monitor the whole precession plane, and it can accommodate the signals of two vertical sensors in space. The results show that the full spectrum plot can diagnose the fault characteristics of oil film induced rotor instability, and it can improve the convenience and accuracy of fault diagnosis.

**Keywords:** rotor system instability; diagnosis; oil film; full spectrum plot technology

## 0 引言

对轴系故障进行诊断时, 传统的频谱技术采用单通道信息进行故障识别与诊断。古成中等<sup>[1]</sup>利用频谱技术对船舶轴系不对中, 转子不平衡以及机械共振进行了故障诊断; 许小伟等<sup>[2]</sup>使用频谱技术对增程器轴系的1谐次及2谐次进行研究, 对轴系不对中进行了故障诊断。但利用频谱技术进行故障诊断维度单一, 具有局限性。近年来利用空间垂直的两个传感器收集轴系振动信号, 并将其进行融

[收稿日期] 2020-01-02

[基金项目] 福建省科技计划项目(2019H0020, 2017Y0065, 2019H6017); 福建省自然科学基金项目(2018J01494, 2017J01484)

[作者简介] 曹家瑜(1992—), 男, 硕士生, 从事振动检测及故障诊断。通信作者: 于洪亮(1963—), 男, 教授, 博导, 从事振动检测及故障诊断、现代轮机管理工程研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

合,成为新的解决方案。屈梁生等<sup>[3]</sup>和廖与禾<sup>[4]</sup>提出全息谱技术,研究了转子平衡过程中全息谱的表现;马凌云等<sup>[5]</sup>以滑动轴承转子系统为研究对象,采用 ANSYS 软件研究了滑动轴承双盘转子-滑动轴承系统的有限元模型,表明全矢谱 Hilbert 解调信号可以较好地识别油膜失稳的故障特征;陈超宇等<sup>[6]</sup>针对传统手工提取故障特征的工作量大和人为误差,提出了全矢深度学习智能诊断方法。美国本特利公司提出的全频谱技术<sup>[7-8]</sup>在转子故障诊断中发挥了重要的作用。上述基于同源信息融合的全信息分析方法在转子诊断领域显示出明显优势<sup>[9]</sup>。

国内对全信息分析方法的研究主要基于全息谱技术与全矢谱技术,少有学者对全频谱技术进行研究。本文根据油膜诱发转子-轴承系统失稳故障的产生机理,建立油膜-转子的动力学模型,研究油膜诱发转子失稳的全频谱诊断方法。

## 1 故障诊断的基本理论

### 1.1 油膜引起转子-轴承系统失稳故障特征

关于油膜引起转子-轴承系统失稳这一现象已有许多相关的研究<sup>[10-12]</sup>,这些研究为转子-轴承系统故障诊断奠定了有力的基础,根据油膜引起转子-轴承系统失稳故障的基本理论,可以总结出该故障形式的特征<sup>[13-14]</sup>:

1) 油膜诱发失稳属于一种自激振动现象,往往表现为亚同步振动现象,当油膜诱发转子失稳发生时,通常会出现小于 0.5X 的分倍频分量。

2) 油膜流动时所产生的切向力总是与转子转动方向一致,因此发生油膜诱发失稳时,转子进动方向与转子旋转方向一致。

### 1.2 转子-轴承系统故障诊断基本理论

不同的激励频率可以对转子-轴承系统产生不同的影响,部分频率可以反映出系统的运行状况,因此,对转子-轴承系统进行故障诊断时,需要用某种方法确定振动信号的频谱。实现这一目的最方便的办法便是利用频谱图,利用单个传感器的信号,通过傅里叶变换获取时域信号的频谱信息。

全频谱将转子的进动分解为各谐波频率下的进动,是对传统频谱的一种改进。而每一谐波频率下的进动都是一个椭圆,该椭圆又可以分解为一组正反进动的圆;正进动圆的直径即为该谐波下的正进动幅值,反进动圆的直径即为该谐波下的反进动幅值;将各个谐波下的幅值都绘入频谱图中,即为全频谱图,全频谱数据处理流程如图 1、图 2 所示。

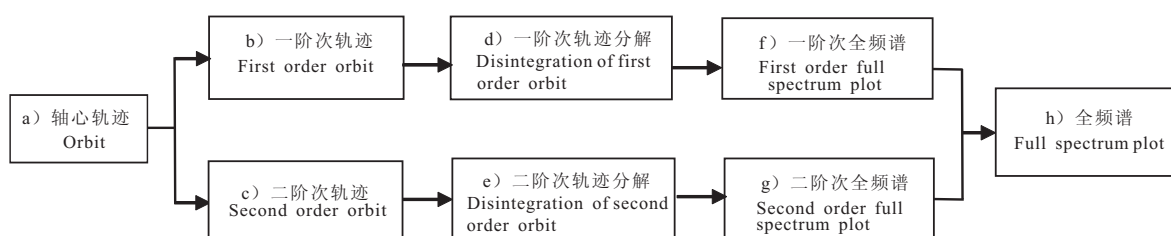


图 1 全频谱数据处理流程图

Fig. 1 Full spectrum data-processing sequence

利用全频谱的特征可对转子-轴承系统进行诊断:正进动幅值高于反进动幅值时,转子的进动方向与转子的旋转方向相同;正反进动幅值的差越大,转子的进动轨迹越接近圆,反之则椭圆度越大。

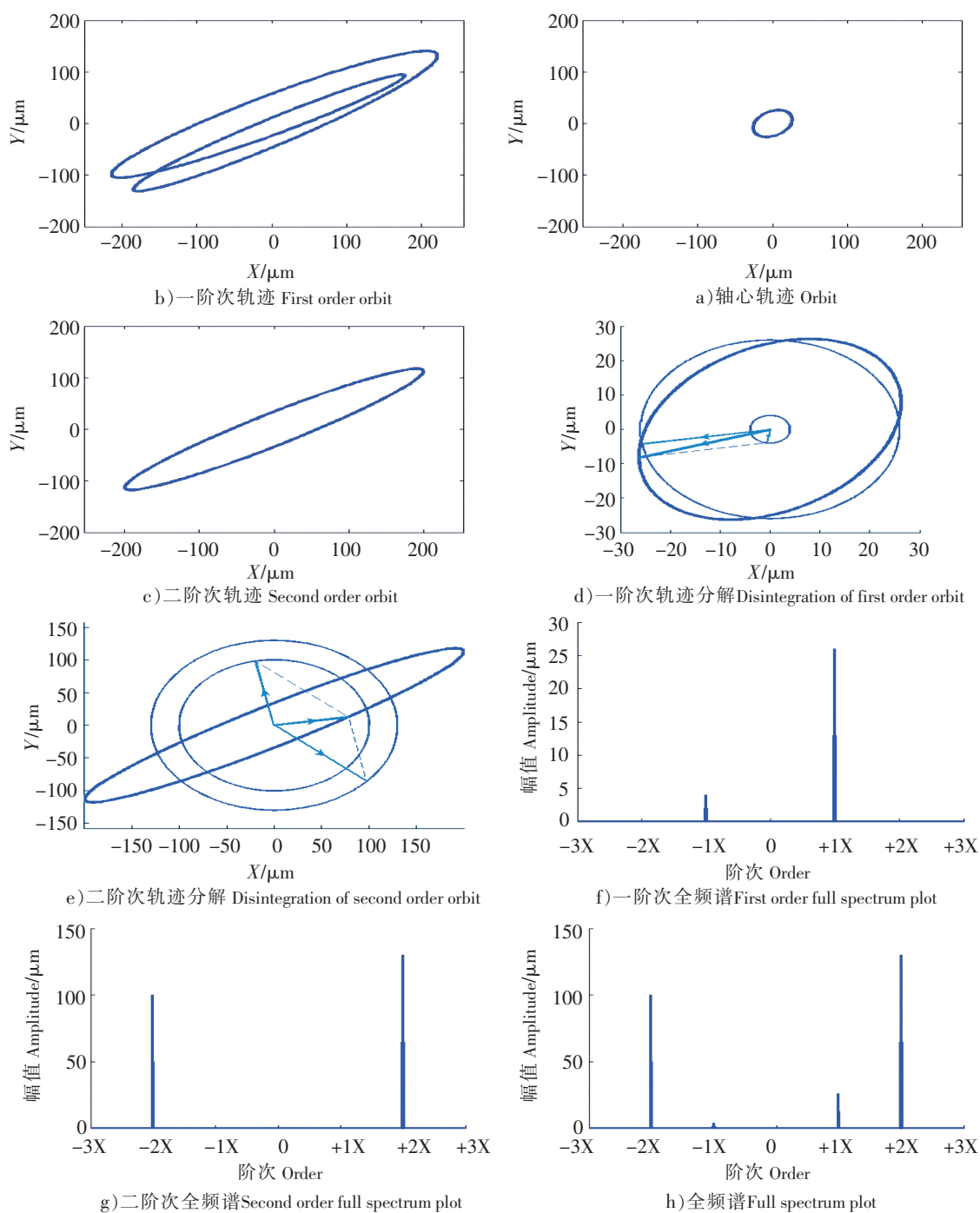


图 2 全频谱提取过程图

Fig.2 Extraction process of full spectrum plot

## 2 油膜诱发转子-轴承系统失稳故障的诊断方法

### 2.1 利用频谱技术与全频谱技术对油膜诱发失稳的故障诊断

以某型转子实验系统为例, 分别利用频谱技术和全频谱技术对油膜诱发转子-轴承系统失稳进行诊断。

该转子实验系统由转速可调的电机、带有圆盘的轴系、轴承、一个键相传感器和空间上两个相互垂直的电涡流传感器组成。轴承采用油杯滴油润滑方式。实验过程为转子系统在 120 s 内由静止匀加

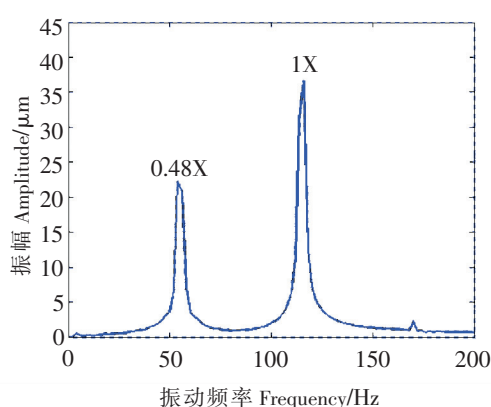
速到 10 000 r/min, 键相传感器采集键相信号, 利用两个电涡流传感器分别采集转子垂直方向与水平方向的位移信号, 采样频率为 1 024 Hz。可以观察到, 当转速达到 7 000 r/min 附近时, 转子轨迹变得杂乱, 如图 3 所示。

### 2.1.1 利用传统频谱诊断油膜诱发失稳

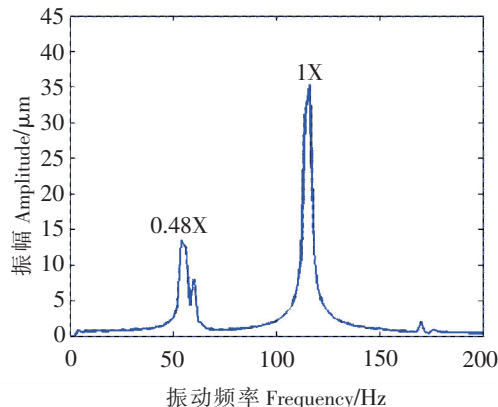
提取 7 000 r/min 时两个电涡流传感器采集到的振动信号, 利用 FFT 对时域信号进行变换, 获得该转速下的频谱图, 如图 4 所示。图 4a、图 4b 分别为水平与垂直方向的振动信号的频谱图。

提取频谱图中的峰值, 其分倍频分量为 0.48X, 略小于整数倍 0.5X。符合油膜诱发失稳的特征。

截取两个电涡流传感器信号以及键相信号, 绘制 7 000 r/min 时的转子轴心轨迹图, 如图 5 所示。



a) 水平方向频谱图 Spectrum in horizontal direction



b) 垂直方向频谱图 Spectrum in vertical direction

图 4 转速为 7 000 r/min 时的频谱图

Fig.4 The spectrum plots at 7 000 r/min

图 5 中, 每一个空白/点都是一个键相信号, 从空白到点的方向即为轴心轨迹进动方向。由图 5 可以看出, 进动方向与转子方向一致, 因此该转子处于正进动状态, 且轴心轨迹的形状不断发生着变化, 符合油膜诱发转子失稳的故障特征, 因此可以判断该转子系统在转速为 7 000 r/min 时产生了油膜诱发的失稳现象。

### 2.1.2 利用全频谱技术对诊断油膜诱发失稳故障

利用传感器采集的振动信息绘制各个速度下的全频谱图, 将全部全频谱图绘制成一张谱阵, 即全频谱级联图, 如图 6 所示。

图 6 中标注的 +1X 与 -1X 分别代表转子正进动时的一倍频振幅与反进动时的一倍频振幅。从该级联图可以看出, 该转子的转速低于 10 000 r/min 时, 正进动的幅值高于反进动的幅值, 因此转子的进动方向与转子的旋转方向相同。当转速达到 7 000 r/min 附近时, +1X 振幅内侧出现了亚同步振动的频率分量, 虽然振幅比该速度下的 +1X 振幅低, 但依然不可被忽视。为了进一步对这一分量振幅的产生原因进行判断, 绘制该速度下的全频谱图, 如图 7 所示。

由图 7 可以对该转子实验台产生亚同步振动的原因进行诊断。由于正进动的振幅比反进动的振幅要

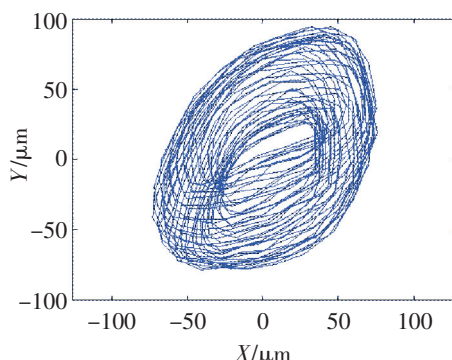


图 3 转速为 7000 r/min 时的转子轨迹

Fig.3 The rotor trail at 7000 r/min

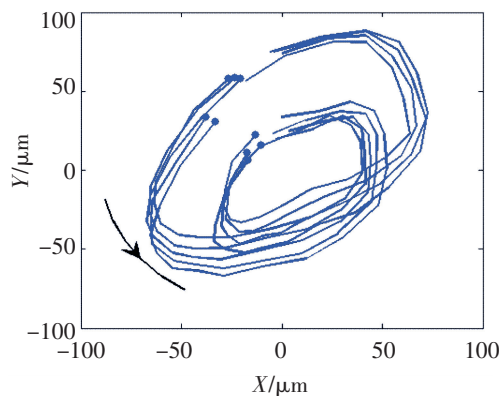


图 5 转速为 7000 r/min 时的轴心轨迹图

Fig.5 The orbit at 7 000 r/min

高得多, 所以该转子发生的是以正进动为主导的亚同步进动, 且进动轨迹接近正圆; 由于亚同步振动的频率与转子一倍频的比例并不是整数比, 排除与油膜失稳特征接近的摩擦故障, 说明该速度下, 转子系统发生了油膜诱发的失稳故障。

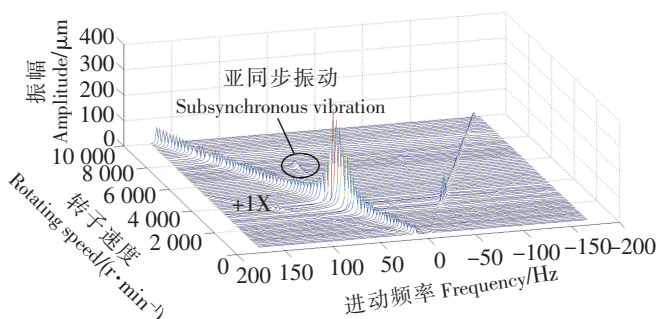


图 6 某型转子实验台的全频谱级联图

Fig.6 The full spectrum cascade plot of the experimental ring

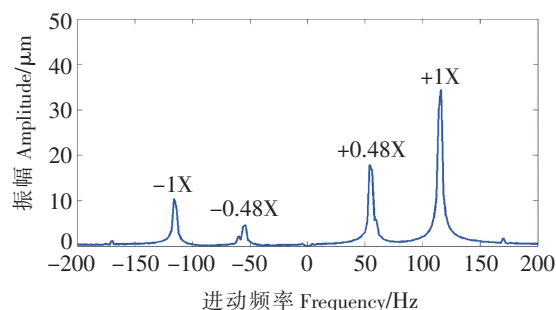


图 7 转速为 7 000 r/min 时的全频谱图

Fig.7 The full spectrum plot of the rotor on the experimental at 7 000 r/min

## 2.2 应用全频谱技术对某转子系统故障诊断实例

现有一转子系统, 其示意图如图 8 所示, 轴承处为油杯滴油润滑, 参数如表 1 所示。通过建立其有限元模型, 利用有限元法<sup>[15]</sup>计算出其一阶临界转速为 3 600 r/min, 二阶临界转速为 14 000 r/min。

该系统运行转速达到 6 000 r/min 时, 转子发生异常振动。为判断该振动的产生原因, 安装两个相互垂直的电涡流传感器以及一个相位传感器, 采样频率为 1 000 Hz, 转子系统在 720 s 内经历匀加速过程、匀速过程以及匀减速过程, 利用传感器记录其振动信号, 转速随时间变化曲线如图 9 所示。

表 1 某转子系统参数

Tab.1 The parameter of the rotor system

转轴半径 $r$ Shaft Radius/m	转轴长度 Shaft Length/m			转盘 Disk/m		轴承刚度 Bearing stiffness $\times 10^{-9}/$ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$		密度 Density/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	杨氏模量 Young's mduls $\times 10^{-11}/\text{Pa}$	泊松比 Poisson's ratio
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	半径 Radius	厚度 Thick	$K_x$	$K_y$			
0.005	0.028	0.170	0.300	0.039	0.020	1.3	1.2	7 800	2.1	0.3

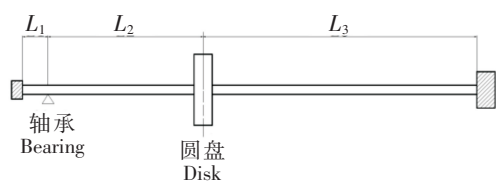


图 8 某转子系统的示意图

Fig.8 The diagram of the rotor system

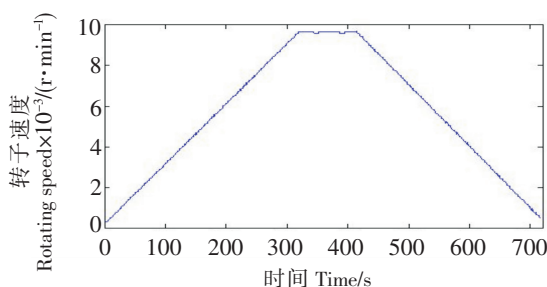


图 9 某转子系统转速曲线

Fig.9 The speed curve of the rotor system

利用电涡流传感器采集的转子振动信号绘制该系统的全频谱级联图, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 在 0 ~ 9 000 r/min 范围内, 该转子系统的 1X 振动以正进动主导, +1X 振动的峰值出现在 3 500 r/min 附近, 该转速为转子系统的一阶临界转速, 与计算结果吻合。在转速达到 6 000 r/min 时, 可以看到剧烈的亚同步振动, 因此绘制出 6 000 r/min 时的全频谱图, 如图 11 所示。

通过图 11 判断亚同步振动发生的原因, 根据计算可知, 亚同步振动的频率刚好为 1X 振动频率的 1/2; 且该亚同步振动的正反进动幅值相近, 由全频谱图的规律可知, 该系统的轴心轨迹高度椭圆化。



当转子在油膜诱发失稳后继续进动,大幅振动可能会令轴承中的油膜破损,导致转子与轴承发生金属间的直接接触,产生摩擦,同时产生频率为转速整数比的次同步振动,摩擦力的作用方向与旋转方向相反,会使转子的反进动振幅增大,导致轴心轨迹的椭圆化。由此判断该转子系统在转速为6 000 r/min时的振动是由油膜诱发的转子失稳,经历转子涡动,转子振荡,最终发生转子与轴承摩擦。

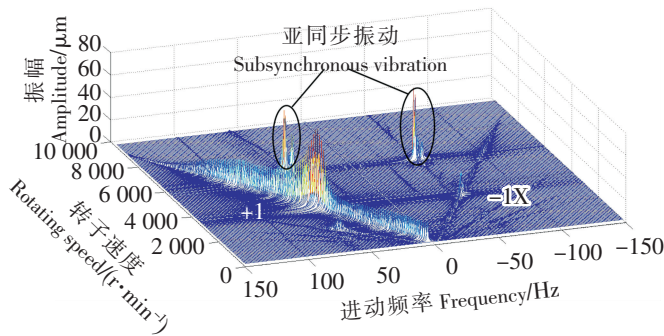


图 10 某转子系统的全频谱级联图

Fig.10 The full spectrum cascade plot of the rotor system

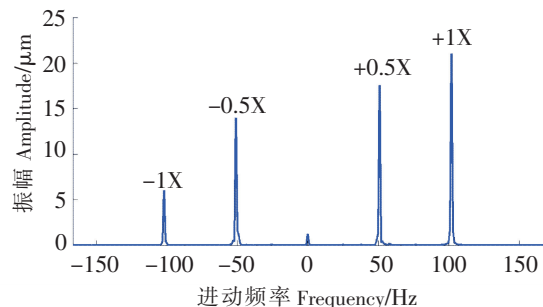


图 11 某转子系统 6 000 r/min 时的全频谱图

Fig.11 The full spectrum plot of the rotor system at 6 000 r/min

### 3 结论

1) 全频谱技术可以完整描述转子的进动状态,克服了传统频谱无法描述转子进动信息,不能单独用于轴系故障诊断的缺点,提高了轴系故障诊断的便捷性。2) 全频谱技术可以对整个进动平面进行监测,克服了传统频谱技术只能监测单一选定方向振动的缺点,提高了轴系故障诊断的准确度。3) 全频谱技术对转子系统进动情况的变化十分敏感,特别适用于诊断轴系不平衡,转子不对中等会产生异常进动的故障,而且全频谱技术可以快速正确地提取进动特征,因此具有较好的应用潜力。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 古成中,刘勇,罗日荣,等. 船舶轴系弹性支撑振动过大原因及对策 [J]. 中国航海, 2018, 41(1): 34-37.
- [2] 许小伟,刘振兴,严运兵,等. 增程器轴系不对中故障动力学响应特性分析 [J]. 武汉科技大学学报, 2019, 42(1): 45-50.
- [3] 屈梁生,邱海,徐光华. 全息动平衡技术: 原理与实践 [J]. 中国机械工程, 1998(1): 70-73, 79.
- [4] 廖与禾. 多故障转子进动趋势分析与平衡策略 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 45-51.
- [5] 马凌云. 全矢谱在滑动轴承转子系统油膜失稳中的应用 [J]. 组合机床与自动化技术, 2018(12): 4-8.
- [6] 陈超宇. 全矢深度学习在轴承故障诊断中的应用 [J]. 2019, 43(1): 144-149.
- [7] DONALD E, BENTLY, CHARLES T, Hatch, BOB GRISSOM. Fundamentals of rotating machinery diagnostics [M]. Minden Navada: Bently Pressurized Bearing Press, 2002: 131-153.
- [8] MUSZYNSKA A, HATCH C T, BENTLY D E. Dynamics of anisotropically supported rotors [J]. International Journal of Rotating Machinery, 1997, 3(2): 133-142.
- [9] 杨世锡. 大型旋转机械状态监测与故障诊断研究进展 [J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(1): 1-11.
- [10] 孙攀龙,汪庆华,陈鸿,等. 转子-轴承系统油膜失稳过程的实验分析 [J]. 机械工程师, 2018(3): 83-85.
- [11] 马辉,王雪玲,朱和强,等. 升降速过程中转子系统油膜失稳规律 [J]. 振动. 测试与诊断, 2016, 36(1): 56-61, 197.
- [12] 马辉,李辉,牛和强,等. 滑动轴承-转子系统油膜失稳参数影响分析 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(23): 100-104.
- [13] 刘峰,等. 基于定向自适应核分布的滑动轴承油膜失稳信号分析 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 151-156.
- [14] F SORGE. Preventing the oil film instability in rotor-dynamics [J]. Journal of Physics: Conference series, 2016, 744(1).
- [15] 钟一谔. 转子动力学 [M]. 清华大学出版社, 1987: 41-63.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)