

# 旋转机械转速波动检测及故障诊断\*

谭媛<sup>1</sup>, 孙文磊<sup>1</sup>, 温广瑞<sup>1,2</sup>, 黄鑫<sup>2</sup>

(1. 新疆大学机械工程学院 乌鲁木齐, 830047) (2. 西安交通大学机械工程学院 西安, 710049)

**摘要** 针对旋转机械运行转速波动导致信息获取及诊断决策困难问题,以非平稳信号的瞬时频率估计为切入点,结合快速路径优化算法进行非平稳信号的瞬时频率估计,以实现转速波动信息的准确获取。基于参数化时频分析理论的短时阶比原理,依据估计的振动信号瞬时频率变化函数构造匹配旋转算子,将转速波动信号的时频特征进行旋转,获得各时频窗内的短时阶次谱,进而完整保留转速波动信号的瞬态信息。仿真及实验结果表明,该方法可以准确提取出旋转机械转速波动工况下的状态信息及故障特征,为后续故障精密诊断奠定基础。

**关键词** 转子; 故障诊断; 参数化时频分析; 转速波动

**中图分类号** TH17

## 引言

旋转机械是工业生产中最为常用的机械之一,广泛应用于电力、化工、冶金等行业,随着科学技术的进步与实际应用的需要,旋转机械向着高速化、大型化、自动化的方向发展,设备的尺寸越来越大,结构也越来越复杂,出现了大量的强度、结构、振动、可靠性等问题,旋转机械运行的环境也更加复杂,高温、高寒、交变载荷等恶劣环境导致机组的工况频繁发生变化,极易产生转速波动,此时机组产生的振动信号是典型的非平稳信号,直接进行傅里叶变换会产生频率混叠现象,无法区分转速波动过程各频振动分量。

Potter<sup>[1]</sup>提出阶比跟踪(order tracking,简称OT)法,对振动信号进行角域重采样后再进行谱分析,消除转速波动引起的频率调制成分,构造角域阶次谱进行特征提取及故障诊断,有效避免了将非平稳信号直接进行傅里叶变换导致的频率模糊现象。

顾煜炯等<sup>[2]</sup>利用阶比重采样方法将时域信号转化为角域信号,使原始采集信号平稳化,利用无量纲指标分析早期故障趋势,基于多元统计分析建立故障预警模型,另外建立进行边界值检测的多元离群检测公式,后期应用主成分-灰色关联分析法精确故障。文献<sup>[3]</sup>采用经验模态分解方法得到包含故障

信息的本征模态分量,对合成新信号进行阶次谱图以及倒阶次谱图分析,识别齿轮故障类型。姜战伟等<sup>[4]</sup>用参数优化变分模态分解将采集信号分解,然后通过重采样技术与 Hilbert 变换得到包络信号后,对包络谱进行阶比分析,得出故障特征。柏林等<sup>[5]</sup>将计算阶比跟踪方法与峭度图算法优势相结合,提出了阶比峭度图算法,并将其运用到滚动轴承故障特征提取中。程卫东等<sup>[6]</sup>通过对计算阶比跟踪技术与包络分析结合的集成故障诊断方法理论与实验验证,得出包络变形中相邻峰值间间距变化会对阶比分析产生影响,并提出消除影响的方法。王栋等<sup>[7]</sup>根据自适应拾取的不同频率分量的时频峰量,拟合实现瞬时频率估计,计算采样时标,进行重采样,并通过快速傅里叶变换实现阶比分析,提出旋转机械故障诊断新方法。以上方法舍弃了设备转速变化时的瞬态信息,具有一定的局限性。

杨扬等<sup>[8-9]</sup>提出了一种新的非平稳信号分析方法——参数化时频分析(parameterized time-frequency analysis,简称PTFA),其本质思想是通过构造与信号匹配的变换核来对其进行时频域旋转,从而使信号时频表示的集中性达到最优。针对文中要解决的旋转机械运行转速波动导致状态信息获取及诊断决策困难问题,笔者在参数化时频分析理论基础上,引入单窗阶比理论及方法,进行旋转机械转速波动信息检测及故障诊断。

\* 国家自然科学基金资助项目(51565055,51365051);新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJGRI2017026)  
收稿日期:2017-09-21;修回日期:2018-03-07

# 1 基于 PTFA 理论的短时阶比分析

## 1.1 PTFA 基本原理

定义某信号  $s(t) \in L^2(R)$  的解析信号为

$$s(t) = A \exp[j2\pi \int IF(t) dt] \quad (1)$$

其中: 瞬时频率  $IF(t)$  为时间  $t$  的函数。

为有效处理上述非平稳信号, 假设任意函数  $k_p(t) \in L^2(R)$ , 定义参数化时频分析如式(2)所示

$$TF_s(t_0, \omega; P) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(\tau) G_P^R(\tau) G_{t_0, P}^S(\tau) g_\sigma^*(\tau - t_0) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} G_P^R(\tau) = \exp[-j \int k_P(\tau) d\tau] \\ G_{t_0, P}^S(\tau) = \exp[j\tau k_P(t_0)] \end{cases} \quad (3)$$

$P$  为变换核函数;  $G_P^R(\tau)$  和  $G_{t_0, P}^S(\tau)$  分别为由变换核函数  $P$  构造的频率旋转算子和频率平移算子;  $k_P(\tau)$  为参数化时频变换的变换核函数;  $t_0$  遍历整个时间轴, 起平移作用。  $G_P^R(\tau)$  的相位为  $k_P(\tau)$  的积分,  $G_{t_0, P}^S(\tau)$  的相位为时间的线性函数, 斜率为窗函数中心点处  $k_P(\tau)$  的值。特殊地, 当  $k_P(\tau) = 0$  时, 式(2)变为短时傅里叶变换, 当  $k_P(\tau) = c\tau$  时, 式(2)变为线性调频小波变换。

参数化时频分析的关键在于其变换核参数的估计, 变换核参数与信号时频特征越匹配, 其时频分辨率越高, 对信号的时频特征表示越准确<sup>[8]</sup>, 具体到转子振动信号处理, 变换核参数的确定依赖于对转子瞬时转速(转频)的精确估计。

## 1.2 振动信号的瞬时频率估计方法

如何在无键相信号的情况下精确估计转子瞬时转速一直是一个热点和难点问题<sup>[10]</sup>, 传统的基于 STFT 的瞬时频率估计方法假设待分析信号为拟平稳信号, 在每个分析窗内具有平稳信号的统计特征, 并不适用于转速波动剧烈的振动信号处理。

Iatsenko 等<sup>[11]</sup> 基于动态规划思想提出了快速路径优化算法(fast path optimization, 简称 FPO), 可以有效提高信号瞬时频率估计的精度和效率。

对于转子振动信号  $z(t)$ , 其短时傅里叶变换(short time Fourier transform, 简称 STFT)为

$$\text{STFT}_s(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(\tau) g_\sigma^*(\tau - t) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (4)$$

$$Q_m(t) = |\text{STFT}_s(v_m(t), t)| \quad (m=1, 2, \dots, N_p(t)) \quad (5)$$

$$v_m(t) : \begin{cases} [\partial_m |\text{STFT}_s(\omega, t)|]_{\omega=v_m(t)} = 0 \\ [\partial_m^2 |\text{STFT}_s(\omega, t)|]_{\omega=v_m(t)} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $Q_m(t)$ ,  $v_m(t)$  分别为时频平面  $t$  时刻第  $m$  个局部极大值点的幅值和频率<sup>[12]</sup>。

实际运算中由于频率的离散性导致瞬时频率估计出现误差, 为提高估计精度, 需对局部极大值点的频率坐标进行插值校正<sup>[13]</sup>。

$$v'_m(t) = v_m(t) + \frac{\Delta\omega}{2} \frac{a_3 - a_1}{2a_2 - a_1 - a_3} \quad (7)$$

$$a_{\{1,2,3\}} = |\text{STFT}_s(\omega_{\{k_p(t), -1, k_p(t), k_p(t)+1\}}, t)| \quad (8)$$

其中:  $a_1$  和  $a_3$  为时频平面局部峰值  $a_2$  相邻的两点。

瞬时频率变化曲线  $\omega_p(t)$  可通过追踪每一时刻局部极大值点的位置  $m_c(t)$  进行估计

$$\omega_p(t) = v_{m_c(t)}(t) \quad (9)$$

通过构造代价函数

$$\begin{aligned} F[Q_m(t_n), v_m(t_n), v_k(t_{n-1})] = \\ \log Q_m(t_n) + \omega(v_m(t_n) - v_k(t_{n-1})) \\ (m=1, 2, \dots, N_p(t_n)) \\ (k=1, 2, \dots, N_p(t_{n-1})) \end{aligned} \quad (10)$$

可将式(9)转化为优化问题

$$\omega_p(t) = \underset{\{m_1, m_2, \dots, m_N\}}{\text{argmax}} F[Q_m(t_n), v_m(t_n), v_k(t_{n-1})] \quad (11)$$

代价函数  $F[t_n(\dots)]$  的值仅与当前时刻  $t_n$  与前一时刻  $t_{n-1}$  有关, 因此可通过如下步骤估计瞬时频率变化规律  $\omega_p(t)$ <sup>[11]</sup>

1) 当  $n=1$  时

$$q(m, t_1) = 0 \quad (12)$$

$$U(m, t_1) = \log(Q_m(t_1)) \quad (13)$$

2) 当  $n \geq 2$  时

$$q(m, t_n) = \underset{k}{\text{argmax}} \{F[Q_m(t_n), v_m(t_n), v_k(t_{n-1})] + U(k, t_{n-1})\} \quad (14)$$

$$U(m, t_n) = F[Q_m(t_n), v_m(t_n), v_{q(m, t_n)}(t_{n-1})] + U(q(m, t_n), t_{n-1}) \quad (15)$$

## 1.3 基于 PTFA 的短时阶比原理

对 OPT 算法求得的瞬时频率变化曲线  $\omega_p(t)$  进行高阶多项式拟合

$$f^W(\tau) = \omega_p(t) = \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} b_k t^{k-1} + b_1 \quad (16)$$

其对应的倍频分量瞬时频率变换为

$$f_m^{W_i}(\tau) = m \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} b_k t^{k-1} + m b_1 \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (17)$$

针对时窗  $W_i = [\tau_i - \Delta t/2, \tau_i + \Delta t/2]$  分别构造频率旋转算子  $G_{W_i}^R(\tau)$  与频率平移算子  $G_{W_i}^S(\tau)$

$$G_{W_i}^R(\tau) = \exp\left[-j \int (f_m^{W_i}(\tau) - m b_1) d\tau\right] \quad (18)$$

$$G_{W_i}^S(\tau) = \exp[j f_m^{W_i}(\tau_i) \tau] \quad (19)$$

并进行参数化时频变换

$$TF(\tau_i, \omega_i, W_i) = \int \overline{z_{W_i}(\tau)} g(t - \tau_i) \exp(j\omega_i \tau) d\tau \quad (20)$$

其中

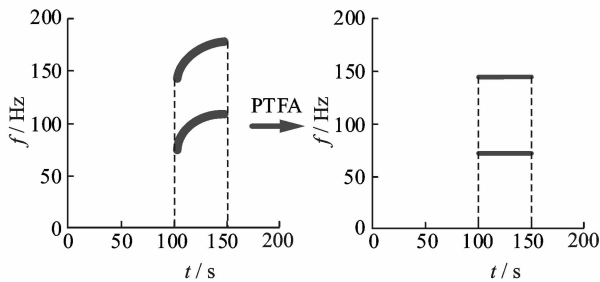
$$\overline{z_{W_i}(\tau)} = z_{W_i}(\tau) G_{W_i}^R(\tau) G_{W_i}^S(\tau) \quad (21)$$

从而获得更加精确的时频域表示。

对于多分量信号而言,在  $W_i$  时窗内分别针对各分量信号的时频特征构造频率旋转算子  $G_{W_i}^R(\tau)$  并进行时频域旋转变换,其实质是消除转频及其倍频波动所带来的频率调制信息  $M_k^{W_i}$ 。

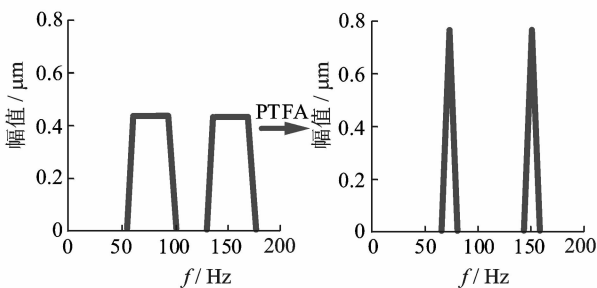
$$M_k^{W_i} = \exp\left[j \int \left(m \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} b_k \tau^{k-1}\right) d\tau\right] \quad (22)$$

如图1所示,PTFA的变换结果等价于在  $W_i$  时窗内对信号进行角域重采样,在频域内表现为原来频率模糊的各分量频谱集中于一点  $m b_1$ ,其实质



(a) PTFA时频域变化示意图

(a) Time-frequency domain variation after PTFA



(b) PTFA频域变化示意图

(b) Frequency domain variation after PTFA

图1 参数化时频分析短时阶比示意图

Fig.1 The short-time order tracking based on parameterized time-frequency analyze

上是对  $W_i$  时窗内的信号进行阶次分析,频率旋转后的频谱为对  $W_i$  时窗的各阶分量进行角域重采样之后的阶次谱,

将各时窗内的阶比谱按照时间轴排列可以得到振动信号的短时阶次谱,其保留了设备转速变化时的瞬态信息,可以更加清晰地了解机械设备的运行状态与故障信息。

## 2 仿真信号分析

### 2.1 仿真信号构造

为验证 FPO 方法检测转速波动的准确性,首先构造仿真信号进行分析。仿真信号采用 Jeffcott 模型,其数学表达式<sup>[14]</sup>为

$$y = A \cos(\omega t + \alpha) \quad (23)$$

其中

$$A = \frac{e(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2c_n/\omega_n)^2 (\omega/\omega_n)^2}} \quad (24)$$

$$\tan \alpha = \frac{(2c_n/\omega_n) (\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (25)$$

其中:  $e$  为偏心距;  $\omega_n$  为转子固有频率;  $c_n$  为阻尼系数。

按式(23)~(25)分别构造转频分量、倍频分量与分倍频分量,仿真信号转速波动规律为

$$\omega(t) = 100 + 20 \sin(t) \quad (26)$$

### 2.2 仿真信号分析

根据 FPO 方法与 STFT 峰值搜索方法分别进行仿真信号基频瞬时频率的估计,处理结果如图2所示;根据所估计的瞬时频率构造旋转算子和频移算子对仿真信号进行参数化时频变换,结果如图3所示。

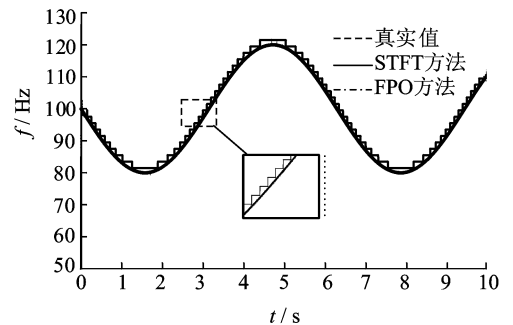
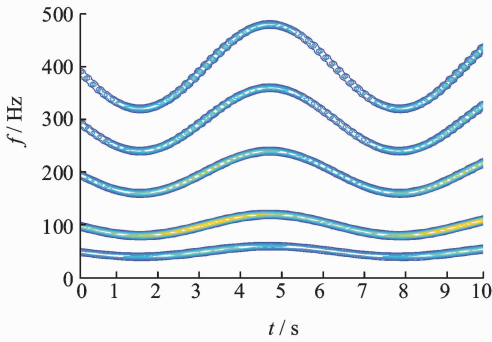
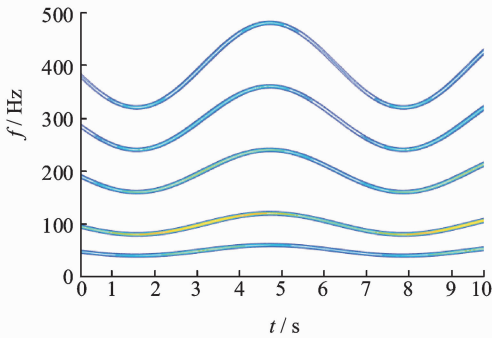


图2 仿真信号瞬时频率估计示意图

Fig.2 Instantaneous frequency estimation of analog signal



(a) STFT时频分布  
(a) Spectrogram by STFT



(b) PTFA时频分布  
(b) Spectrogram by PTFA

图 3 仿真信号时频域谱图

Fig. 3 Time-frequency spectrogram of simulation signal

仿真结果表明该方法相比 STFT 而言具有更好的精度,定量分析两种方法估计的误差如表 1 所示。计算结果表明 FPO 瞬时频率估计方法能够有效地检测信号的瞬时波动,可以将其计算结果作为振动信号状态特征提取与故障诊断的依据。

表 1 仿真信号瞬时频率误差分析

Tab. 1 Error analysis of instantaneous frequency estimation

误差指标	最大相对误差	平均相对误差	平方和误差	%
FPO 方法	2.62	0.07	0.35	
STFT 方法	3.09	1.51	1.62	

### 3 实验

在 Bently RK4 转子实验台上进行实验。为了充分考虑转子支撑各向异性的影响,分别在 A,B 两测量面上安装相互垂直的电涡流传感器,实验台结构和传感器安装如图 4 所示,K 为键相传感器。

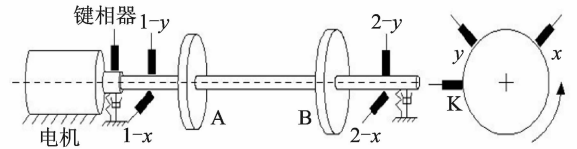


图 4 传感器安装示意图

Fig. 4 The arrangement of sensors

### 3.1 转速波动检测实验

在 Bently RK4 实验台上采集真实转速波动信号进行验证,信号时域如图 5 所示。

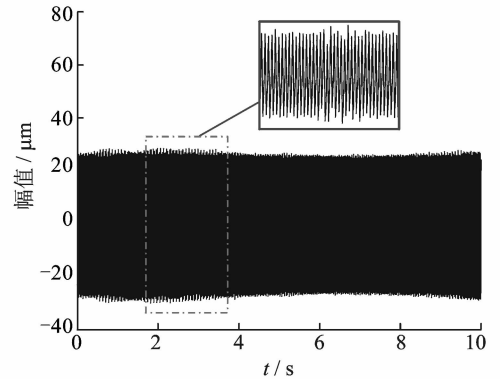


图 5 转速波动信号时域波形

Fig. 5 Time domain waveform under speed fluctuations

根据 FPO 方法对实测信号进行转速波动检测,其结果如图 6 所示,处理结果表明振动信号转速波动变化剧烈时,STFT 估计瞬时转速存在明显的阶梯效应,不适用于转速波动的检测与处理。根据所估计瞬时频率进行参数化时频分析,结果如图 7 所示,FPO-PTFA 较传统的 STFT 具有更高的时频分辨率,可有效处理转速波动信号。

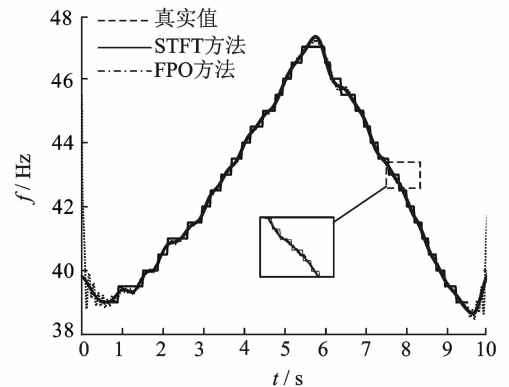


图 6 实测信号瞬时频率估计示意图

Fig. 6 Instantaneous frequency estimation of measurement signal

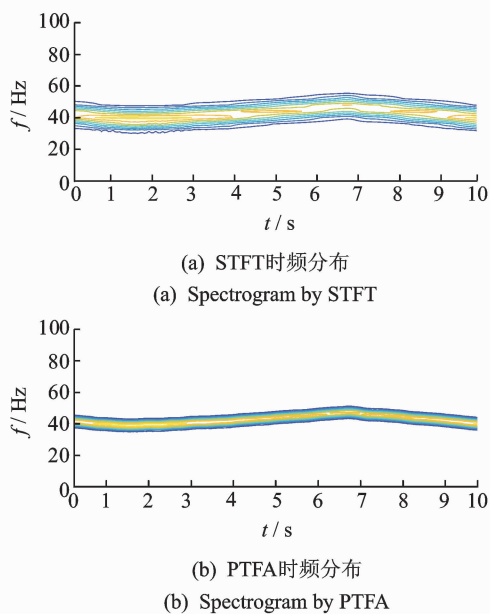


图7 实测信号时频域谱图

Fig. 7 Time-frequency spectrogram of measurement signal

表2分别给出了两种方法瞬时频率估计误差的定量评价结果,显然,FPO频率估计方法得到的结果相比于传统的STFT方法而言具有更高的精度。

表2 实测信号瞬时频率误差分析

Tab. 2 Error analysis of measurement signal instantaneous frequency estimation

误差指标	最大相对误差	平均相对误差	平方和误差	%
FPO方法	2.86	0.74	1.56	
STFT方法	7.67	4.88	5.08	

### 3.2 故障识别

分别采集正常,不平衡,不对中三种故障的转速波动工况下的振动信号,根据所估计的瞬时频率首先构造频率旋转算子进行时频域旋转变换求得振动信号的短时阶次谱,如图8~10所示。

由转子三种状态的短时阶次谱可得,不平衡故障时的短时一阶谱较大,不对中故障时存在明显的二倍频分量,进一步观察发现,不对中故障时其短时二阶谱存在明显的波动现象,图10(b)所示为短时二阶谱波动与转速波动对应关系,在3500 r/min时,其二倍频阶次谱最大,在其他转速处较小。

为了进一步研究不对中故障二倍频阶次谱与转速的关系,分别采集不对中故障3000~4500 r/min的启车数据与停车数据,并比较启停车状态下转速

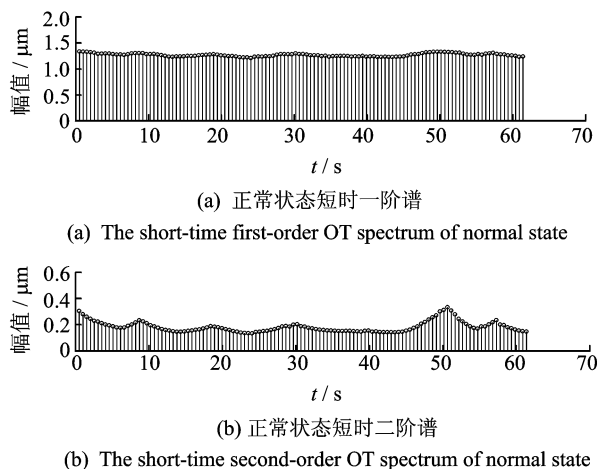


图8 正常状态转速波动阶次谱

Fig. 8 The short-time OT spectrum of normal state

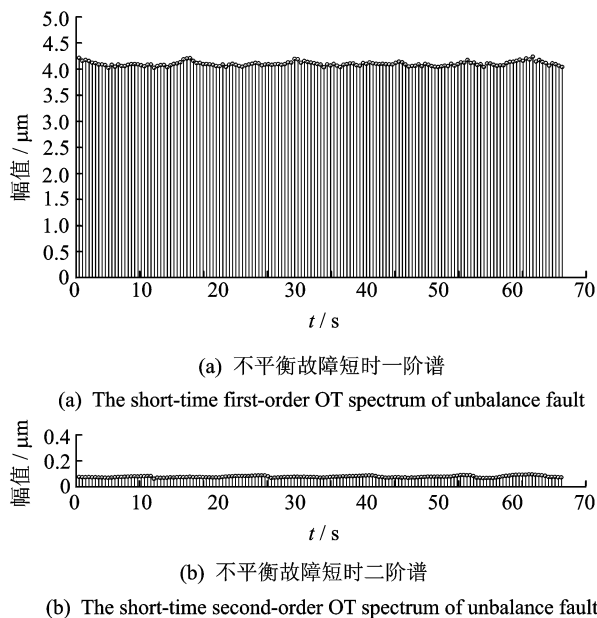


图9 不平衡故障转速波动阶次谱

Fig. 9 The short-time OT spectrum of unbalance fault

与二倍频阶次谱对应关系,如图11所示,启停车振动信号短时二阶谱在3500 r/min转速时达到峰值。

转子不对中主要影响振动信号的偶次倍频,当转子的转速远离其一阶临界转速的整数分频时,系统振动信号中以旋转引起的同步强迫振动为主,含有较少的偶次倍频分量;当转子的转速接近或等于其一阶临界的整数分频时,会引发偶次倍频的共振,振动信号中含有较多的偶次倍频分量,大型旋转机械一般工作在全亚临界转速下,不会激发出转子系统的偶次倍频,因此某个固定转速下以二倍频分量

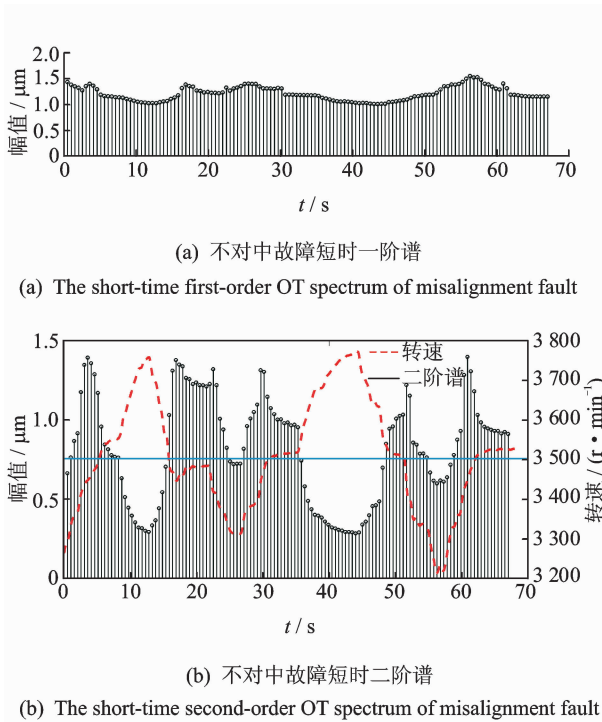


图 10 不对中故障转速波动阶次谱

Fig. 10 The short-time OT spectrum of misalignment fault

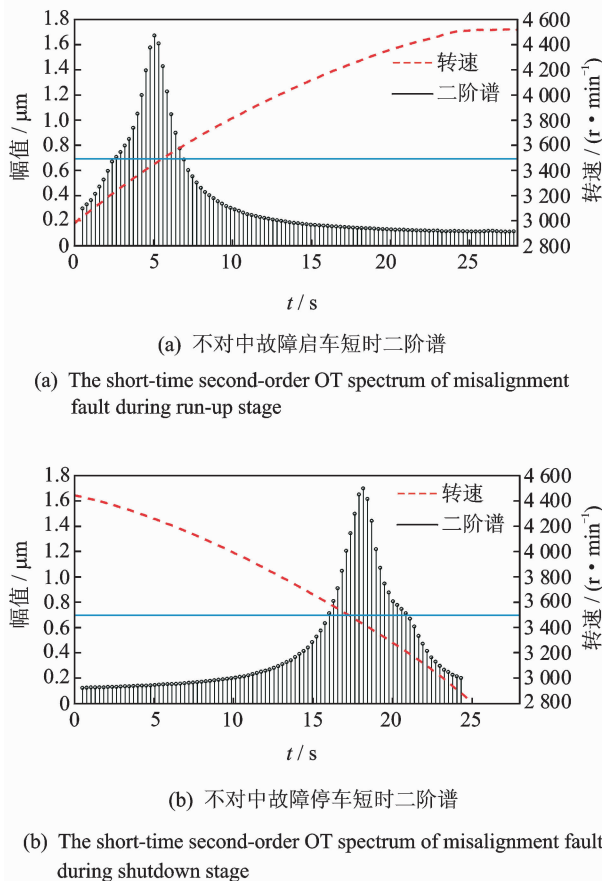


图 11 不对中故障启停车阶次谱

Fig. 11 The order spectrum of misalignment fault during run-up and shutdown stages

作为不对中故障的特征有可能发生误诊、漏诊。充分利用旋转机械转速波动的信息可以丰富故障诊断的手段,提高故障诊断的准确性。

### 4 结束语

采用快速路径优化算法进行旋转机械转速波动的检测,并进行了仿真信号分析和实验验证。结果证明,该检测方法较传统方法更为精确,为后续的故障特征提取提供更为可靠地依据。基于参数化时频分析理论提出了短时阶比分析方法,并应用于转子不平衡与不对中故障的诊断,阐述了转速波动工况下不对中故障的二阶谱波动现象并分析了产生波动的原因。实验结果表明,应充分利用旋转机械转速波动的瞬态信息进行机械运行状态监测与故障诊断。

### 参 考 文 献

[1] Potter R W. Tracking and resampling method and apparatus for monitoring the performance of rotating machines; US, US 4912661 A[P]. 1990-03-27.

[2] 顾煜炯, 宋磊, 苏璐玮,等. 基于多元角域指标离群检测的风电齿轮箱故障预警方法[J]. 振动与冲击, 2015,34(1):80-87.  
Gu Yujiong, Song Lei, Su Luwei, et al. Early warning method for wind turbine gearbox based on multivariate outlier detection of angle domain parameters[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(1): 80-87. (in Chinese)

[3] 王博磊, 崔彦平, 鲁朝静. 基于传动误差检测法的齿轮故障测试系统设计[J]. 机械传动, 2017, 41(2): 157-160.  
Wang Bolei, Cui Yanping, Lu Zhaojing. Design of the Gear Fault test system based on the method of transmission error detection [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(2): 157-160. (in Chinese)

[4] 姜战伟, 郑近德, 潘海洋,等. POVMD与包络阶次谱的变工况滚动轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3): 609-616.  
Jiang Zhanwei, Zhang Jinde, Pan Haiyang, et al. Fault diagnosis under variable conditions based on parameter optimized variational mode decomposition and envelope order spectrum [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 609-616. (in Chinese)

- [5] 柏林, 甄杰, 彭畅, 等. 变转速下滚动轴承阶比峭度图法故障特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(4): 653-658.  
Bo Lin, Zhen Jie, Peng Chang, et al. COT-kurtogram based fault features extraction for rolling element bearing under varying speed [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(4): 653-658. (in Chinese)
- [6] 程卫东, 刘东东, 赵德尊. 基于线调频小波路径追踪的滚动轴承故障特征提取[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 155-160.  
Cheng Weidong, Liu Dongdong, Zhao Dezun. Fault feature extraction method for rolling bearings based on chirplet path tracing [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 155-160. (in Chinese)
- [7] 王栋, 丁雪娟. 基于自动搜峰瞬时频率估计的自适应多阶比分析技术研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(18): 19-24.  
Wang Dong, Ding Xuejuan. Tachless adaptive multi-order tracking technology based on instantaneous frequency estimation with automatic peak search algorithm and its application [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(18): 19-24. (in Chinese)
- [8] 杨扬. 参数化时频分析理论、方法及其在工程信号分析中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [9] Yang Yang, Peng Zhike, Dong Xingjian, et al. General parameterized time-frequency transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(11): 2751-2764.
- [10] 赵明, 林京, 廖与禾, 等. 基于自适应短时 Chirp-Fourier 变换的瞬时转速估计及应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 8-14.  
Zhao Ming, Lin Jing, Liao Yuhe, et al. Instantaneous rotating speed estimation using adaptive short-time chirp-fourier transform and its applications [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 8-14. (in Chinese)
- [11] Iatsenko D, Mcclintock P V E, Stefanovska A. Extraction of instantaneous frequencies from ridges in time - frequency representations of signals [J]. Signal Processing, 2016, 125(1): 290-303.
- [12] Tu Xiaotong, Hu Yue, Li Fucui, et al. Instantaneous frequency estimation for nonlinear FM signal based on modified polynomial chirplet transform [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2017, 66(11): 2898-2908.
- [13] Iatsenko D, Mcclintock P V E, Stefanovska A. Linear and synchrosqueezed time - frequency representations revisited: Overview, standards of use, resolution, reconstruction, concentration, and algorithms [J]. Digital Signal Processing, 2015, 42(C): 1-26.
- [14] 钟一谔. 转子动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987: 3-5.



**第一作者简介:** 谭媛, 女, 1990 年 2 月生, 博士生。主要研究方向为非平稳信号处理, 机械故障诊断及运行状态监测。  
E-mail: tanyuan2016@163.com

