

# 基于 SSWPT 汽轮机轴承油膜失稳故障诊断\*

王涛<sup>1</sup>, 张泽<sup>1</sup>, 许永伟<sup>2</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 吕蒙<sup>1</sup>

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司西安分公司 西安, 710000)

(2. 华北电力科学研究院有限责任公司 北京, 100045)

**摘要** 针对时频分析方法在转子油膜失稳诊断方面的不足, 提出采用同步压缩小波包变换(synchro-squeezed wave packet transform, 简称 SSWPT)对汽轮机运行过程中非平稳多分量信号进行连续小波变换, 对不同种类信号选取不同主频率小波, 得到信号时频图, 通过算法可由时频图对原始信号进行重构, 并与现有时频方法的精度进行对比。以某电厂 1 000 MW 机组为研究对象, 针对调试过程中出现的轴系振动大问题, 运用 SSWPT 方法进行了转子油膜振荡故障诊断分析。利用现场汽轮机诊断管理(turbine diagnosis management, 简称 TDM)系统采集数据, 进行小波包变换得到小波变换系数, 以及故障中非平稳信号的瞬时频率, 最后在瞬时频率尺度下对小波包变换系数进行压缩, 得到更为准确的频率成分组成。结果表明, 该方法对现场非平稳信号的特征提取具有优越性, 能够精准判断故障发生的位置和类型, 为机组后期故障处理提供可靠依据。

**关键词** 轴系振动; 故障诊断; 非平稳信号; 同步压缩小波包变换; 频率成分

**中图分类号** TH17

## 引言

轴瓦自激振动是汽轮机调试过程中常见的故障类型<sup>[1]</sup>, 油膜振荡为自激振动的一种, 对转子的危害巨大<sup>[2-3]</sup>。电厂在运行过程中, 现场 TDM 系统提取的信号大多为非平稳、非线性的多分量信号。目前, 常用的信号分析方法及其不足包括: ①短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, 简称 STFT)<sup>[4]</sup>受限于频窗面积的固定, 分析信号的频率范围受限, 不能完全反映信号特征; ②连续小波变化(continue wavelet transform, 简称 CWT)<sup>[5]</sup>克服了 STFT 频窗面积的影响, 但小波选取直接影响故障诊断结果; ③维格纳准方程(Wigner-Ville distribution, 简称 WVD)<sup>[6]</sup>由于多分量的调频信号会产生交叉项, 从而影响信号分析的分辨率; ④希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, 简称 HHT)<sup>[7]</sup>受限于经验模态分解方法本身的不足, 存在模态混叠、断点效应等问题。基于同步压缩变换的振动信号分析是目前较为先进的研究方向<sup>[8]</sup>, 结合了重排算法的思想, 可以获得较高的时频分辨率, 实现信号的重构。该方法在医学<sup>[8]</sup>、交通<sup>[9]</sup>等领域得到了广泛应用。

笔者将同步压缩小波包变换应用到旋转机械振

动故障信号分析中, 提出基于 SSWPT 转子油膜振荡故障诊断分析方法, 并以内蒙古某电厂为研究对象, 对现场调试采集的信号进行分析, 为后期故障预警和诊断提供了理论依据。

## 1 同步压缩小波包变换

### 1.1 同步压缩小波包变换原理

SSWPT 通过结合小波变换和重排算法的优势, 获得高时频分辨率, 通过重排算法根据时频对原始信号进行重构。

给定一个多分量信号

$$f(t) = \sum_{k=1}^k f_k(t) = \sum_{k=1}^k A_k(t) e^{i\varphi_k(t)} \quad (1)$$

对该信号进行连续小波变换

$$W_f(a, b) = \frac{1}{2\pi} \int \hat{f}(\xi) a^{1/2} \hat{\psi}(a\xi) e^{ib\xi} d\xi = \frac{A}{4\pi} \int [\delta(\xi - \omega) + \delta(\xi + \omega)] a^{1/2} \hat{\psi}(a\xi) e^{ib\xi} d\xi = \frac{A}{4\pi} a^{1/2} \hat{\psi}(a\omega) e^{ib\omega} \quad (2)$$

选取母小波, 满足以下条件

\* 陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBGY-132)

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-07-15

$$\hat{\psi}(\xi) = 0 \quad (\xi < 0) \quad (3)$$

当  $\hat{\psi}(\xi)$  频率中心为  $\xi = \omega_0$  时, 则  $W_f(\alpha, b)$  以  $\alpha = \omega_0/\omega$  为频率中心。

当  $W_f(\alpha, b) \neq 0$ , 多分量信号  $f(t)$  频率为

$$\omega_f(a, b) = -i(W_f(a, b))^{-1} \frac{\partial}{\partial b} (W_f(a, b)) \quad (4)$$

对信号进行坐标映射, 小波系数从时间-尺度域变换到时间-频率域, 即

$$\langle a, b \rangle \rightarrow \langle \omega_f(a, b), b \rangle \quad (5)$$

离散状态下同步压缩小波包变换为

$$T_f(\omega_l, b) = (\Delta\omega)^{-1} \sum_{a_k: |\omega(a_k, b) - \omega_l| \leq \Delta/2} W_f(a_k, b) a_k^{-\frac{3}{2}} (\Delta a)_k \quad (6)$$

非离散形式, 同步压缩小波变化表达式为

$$T_f(\omega, b) = \int_{A(b)} W_f(a, b) a^{-\frac{3}{2}} \xi(\omega(a, b) - \omega) da \quad (7)$$

实际信号分析中, 对于满足  $W_f(\alpha, b) \neq 0$  的点  $(a, b)$  设定一个标准值, 当提取信号包含噪音较多时, 样本集不满足标准值的不计入样本集选取, 样本集用  $A(b) = \{a; |W_f(a, b)| \geq \epsilon\}$  表示。

### 1.2 各时频分析方法对比分析

以模拟信号为分析对象, 展示各种典型时频分析方法对信号的实际分析效果, 通过图例进行优缺点的比较。

构建模拟信号

$$S_1(t) = \sin(2\pi 20t) + \sin(2\pi 40t) \quad (0 \leq t \leq 2)$$

图1为模拟信号波形图。

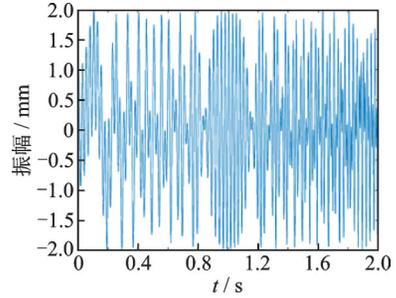


图1 模拟信号波形图

Fig.1 Analog signal waveform plot

笔者分别运用6种传统信号分析方法 STFT, CWT, 广义S变换 (generalized Stockwell-transform, 简称 GST)、维格纳准方程、改进维格纳准方程以及改进连续小波变换得到该信号的时频图, 并将其与笔者提出的同步压缩小波包变换方法得到的时频图进行对比。图2为各种方法时频图。

由图2可以看出, STFT由于自身视窗面积的固定, 频谱图中时间分辨率和频率分辨率在整个时段和频段上都是恒定的。对于同一个信号采用不同宽度的窗进行STFT, 通过窄窗处理, 在时间轴上分辨率很高, 几个频率主要组成部分基本成矩形。通过宽窗处理, 各主要频率组成比例减小, 但是频率的分辨率更高。STFT窗口大小确定, 无法满足非稳态信号变化的频率需求。如图2(a)~(c)所示,

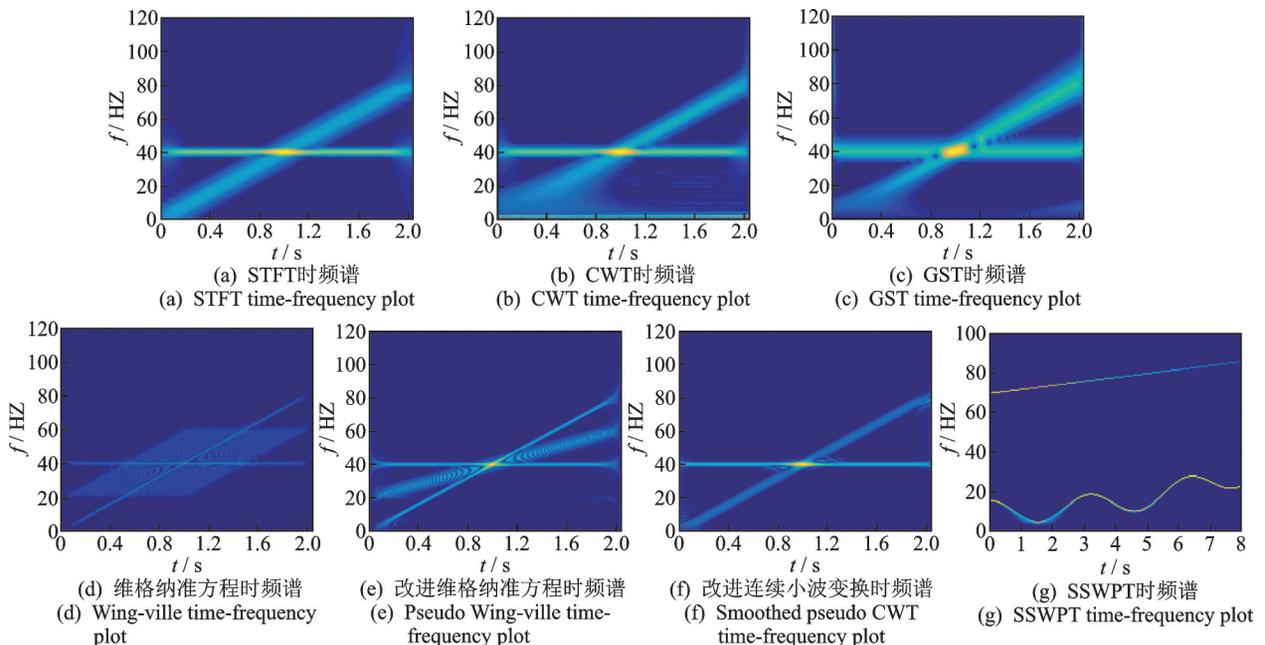


图2 各种方法时频图

Fig.2 Comparison of time-frequency plots of different methods

40 Hz 单频信号的时频分辨率较高且 2 种信号成分能量交叉地方相互干扰较小。图 2(d) 中, 采用维格纳准方程得到的模拟信号时频谱在 2 个时频能量轴交汇的地方, 时间轴、频率轴分辨率上存在较为严重的交叉干扰能量。如图 2(e) 所示, 改进后的维格纳准方程通过加窗函数在一定程度上减小了交叉干扰项的负面影响, 但时频分辨率有所降低。由图 2(f) 可以看出, 在不假设波形的条件下, 可恢复出具有任意瞬时频率规律的非平稳信号和多分量信号, 有效信号得到增强, 随机噪声被抑制, 但是在压制交叉干扰项的同时, 时频分辨率在一定程度上有所降低。由图 2(g) 可知, 同步压缩小波包变换的时频谱在保持与小波变换时频关系的基础上, 大大提高了时频分辨率, 对复杂多分量非平稳信号的时频关系表达更为清晰, 较前 6 种方法有很大的优势。

## 2 油膜失稳故障机理分析

油膜失稳是旋转机械设备振动故障中常见的故障类型, 属于自激振动中的一种<sup>[10]</sup>。故障前期为油膜涡动, 涡动发生后, 轴颈中心持续偏离轴承中心, 推动轴颈持续涡动, 发展成为油膜振荡。由于该类型故障对旋转机械造成的危害是不可估量的, 所以对其进行早期预判和干预十分必要<sup>[11]</sup>。

油膜失稳机理<sup>[12]</sup>如图 3 所示。理想状态下, 在轴承内旋转时, 轴颈中心与轴承中心保持高度一致并进行稳定旋转。如果此时外界一个小的扰动使轴颈中心偏离轴承中心, 轴承内面积会被不同心的转轴分割成面积不同的区域, 润滑油在不同的工作面积下会有不同的工作状态<sup>[13]</sup>。收敛油楔会产生油膜压力, 对转轴产生一个径向力和一个切向力。径向力像一个柔性支撑系统, 使轴颈中心返回轴承中

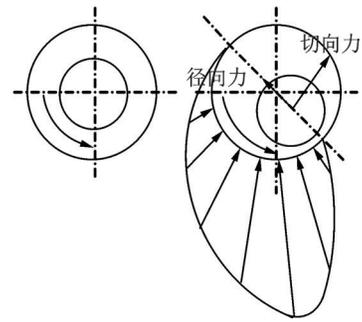


图 3 油膜失稳机理

Fig.3 The oil film unstable

心。切向力垂直于外界干扰方向, 使转子沿着垂直于径向偏移方向运动。随着切向力不断变化, 转轴中心位置也会发生变化, 继而转轴产生涡动。一旦涡动发生, 将会带来严重的恶性循环, 切向力持续增大, 进一步破坏转轴系统阻尼, 推动轴颈涡动, 形成自激振动<sup>[14]</sup>。可见, 转轴稳定旋转的关键在于减小垂直于转子偏转方向的切向力和增大转轴系统的阻尼。

油膜涡动发生在轴承自激振动的前期, 对其特点<sup>[15]</sup>的把握有利于故障类型判别和分析: 油膜涡动大多发生在两倍临界转速以下区域, 故障特征不易被察觉, 涡动频率不恒定。

油膜振荡发生在轴承自激振动的后期, 其振动频率成分主要为低频, 振动幅值大且不可控, 幅值会在短时间内剧增, 通常达到机组跳机值, 危害极大。油膜振荡常发生在超速实验中, 具有转速滞后现象。

## 3 工程应用

以哈尔滨汽轮机厂 1 000 MW 机组为研究对象, 该机组为该厂研制的一次中间再热、单轴、四缸、四排汽的 1 000 MW 等级超临界间接空冷凝汽式汽轮机组。机组轴系结构如图 4 所示。

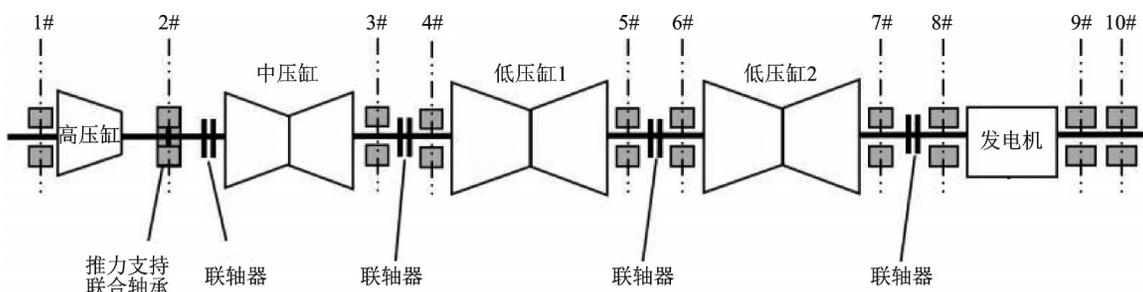


图 4 机组轴系结构

Fig.4 Unit shafting structure

针对某电厂调试过程中汽轮机组振动异常问题,以现场采集的数据为原始信号进行故障判断分析。在2号机组调试过程中,#8,#9轴瓦振动异常,机组无法正常启动,极大影响机组后期满负荷运行和正式投运。在现场振动测试工作中,分别在转轴部分布置2个互相垂直的涡流传感器,分别对 $x,y$ 方向振动进行测量,在轴承座上固定一个传感器进行座振振动幅值的测量。

该机组装有型号为TN8000的汽轮机诊断管理系统,调取振动异常期间各轴瓦振动数据进行分析,现场采集的各轴瓦振动幅值如图5所示。

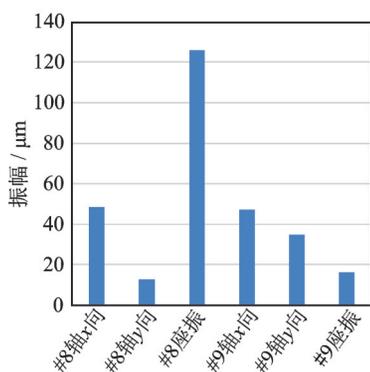


图5 各轴瓦振动幅值

Fig.5 Vibrating replication of each bearing

对现场采集信号直接采用傅里叶变换,其时频图精度达不到故障分析的要求,各振动频率分布无法精准区分,不能精准判断机组故障类型。

采用笔者提出的SSWPT方法对原始信号进行处理,得到各轴瓦振动频率分布如表1所示。

表1 各轴瓦振动频率分布

Tab.1 The vibration frequency of each bearing

轴瓦	$f_1/$	$f_1$ 幅值/	$f_2/$	$f_2$ 幅值/	$f_3/$	$f_3$ 幅值/
	Hz	$\mu\text{m}$	Hz	$\mu\text{m}$	Hz	$\mu\text{m}$
#8轴 $x$ 向	9.5	39.57	12.5	31.62	19.0	19.84
#8轴 $y$ 向	100.0	9.67	9.5	3.10	12.5	2.52
#8座振	50.0	104.04	9.5	52.35	12.5	40.80
#9轴 $x$ 向	9.5	30.99	50.0	27.33	12.5	24.54
#9轴 $y$ 向	50.0	18.92	9.5	3.94	12.5	12.30
#9座振	9.5	13.56	12.5	10.39	19.0	6.23

表1清晰地反映出机组#8,#9轴瓦振动主要频率组成,引起机组#8,#9轴瓦振动的主要频率为0.19倍频、0.25倍频和0.38倍频。由此可以精准判断机组发生油膜振荡故障,对机组后期振动故障处理提供了方向。通过调节发电机汽端轴瓦轴承环垫

片,使轴瓦中心提高0.2 mm,增加#8轴瓦载荷。#7,#8,#9轴瓦载荷变化如表2所示。

表2 轴瓦载荷变化

Tab.2 Bearing load variation

轴瓦	载荷变化/%
#7(#2低压缸电端)	-15.8
#8(发电机汽端)	10.4
#9(发电机励端)	-1.6

现场方案实施后,机组启机,各轴瓦振动情况良好,顺利进行后期超速实验及168 h满负荷试运。可见,基于SSWPT方法对汽轮机故障诊断分析准确率高达100%,可精准判断故障位置和故障类型。

## 4 结论

1) 与传统算法比较,SSWPT算法对于非平稳多分量信号在时间和频率上具有很大的精度,能够有效避免模态混叠现象,对油膜振荡早期故障特征提取具有很大优势。

2) 油膜失稳故障对机组危害极大,SSWPT能够对信号特征进行放大,对故障进行早期预警,挽回巨大损失。

3) 通过对现场案例进行分析,SSWPT算法能够精准判断故障类型和位置,为后期故障处理提供可靠思路,为转子油膜失稳故障提供精准的时频分析方法。

## 参 考 文 献

[1] 王妮妮,马萍,张宏立,等.基于多尺度深度卷积网络特征融合的滚动轴承故障诊断[J].太阳能学报,2022,43(4):351-358.  
MA Nini, MA Ping, ZHANG Hongli, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on feature fusion of multi-scale deep convolutional network [J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2022, 43 (4) : 351-358. (in Chi-nese)

[2] 周恺,张睿哲,叶宽,等.基于同步压缩小波变换的接地扁钢缺陷电磁超声SH导波检测方法[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(12):1-8.  
ZHOU Kai, ZHANG Ruizhe, YE Kuan, et al. Electro-magnetic ultrasonic SH guide wave detection method for grounded flat steel defects based on synchronous com-pression wavelet transform [J]. Journal of Tsinghua

- University (Natural Science Edition), 2022, 62(12): 1-8. (in Chinese)
- [3] 曾哲, 邓丰, 张振, 等. 基于VMD-WVD的故障行波全波形时-频分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 49-57.  
ZENG Zhe, DENG Feng, ZHANG Zhen, et al. Time-frequency analysis method of fault traveling wave based on VMD-WVD [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 49-57. (in Chinese)
- [4] 李亦佳, 王静, 王正方, 等. 基于多重同步压缩变换的微震信号去噪方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(2): 486-500.  
LI Yijia, WANG Jing, WANG Zhengfang, et al. Research on microshock signal denoising method based on multiple synchronous compression transformation [J]. Journal of Applied Basic and Engineering Science, 2022, 30(2): 486-500. (in Chinese)
- [5] 何昕. 基于希尔伯特黄变换和支持向量机优化的脑机接口技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [6] 唐贵基, 徐振丽. 基于SSWPT的转子油膜失稳故障分析[J]. 动力工程学报, 2021, 41(5): 387-393.  
TANG Guiji, XU Zhenli. Fault analysis of rotor oil film instability based on synchrosqueezed wave packet transform [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(5): 387-393. (in Chinese)
- [7] 许泽玮, 杨建刚, 沈德明. 热应力引发的轴颈中心位置测量误差分析[J]. 动力工程学报, 2021, 41(3): 208-213.  
XU Zewei, YANG Jiangan, SHEN Deming. Analysis of measurement error of axial neck center position caused by thermal stress [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(3): 208-213. (in Chinese)
- [8] 张文涛, 夏亚磊, 李勇, 等. 汽轮发电机密封瓦引发的不稳定振动分析[J]. 动力工程学报, 2020, 40(7): 549-555.  
ZHANG Wentao, XIA Yalei, LI Yong, et al. Analysis of unstable vibration caused by confidential sealing of steam turbine power generation [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(7): 549-555. (in Chinese)
- [9] 田松峰, 魏言, 郁建雄, 等. 基于变分模态分解云模型和优化LSSVM的汽轮机振动故障诊断[J]. 动力工程学报, 2019, 39(10): 818-825.  
TIAN Songfeng, WEI Yan, YU Jianxiong, et al. Turbine vibration fault diagnosis based on variational mode decomposition cloud model and optimized LSSVM [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(10): 818-825. (in Chinese)
- [10] 李恒, 张氢, 秦仙蓉, 等. 基于短时傅里叶变换和卷积神经网络的轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(19): 124-131.  
LI Heng, ZHANG Qing, QIN Xianrong, et al. Bearing fault diagnosis method based on short-time Fourier transform and convolutional neural network [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(19): 124-131. (in Chinese)
- [11] 席亚军. 基于经验小波变换和奇异值分解的旋转机械故障诊断[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [12] 刘尚坤, 唐贵基. 改进的VMD方法及其在转子故障诊断中的应用[J]. 动力工程学报, 2016, 36(6): 448-453.  
LIU Shangkun, TANG Guiji. Improved VMD method and its application in rotor fault diagnosis [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(6): 448-453. (in Chinese)
- [13] 张艾萍, 谢媚娜, 林圣强. 椭圆滑动轴承油膜厚度对汽轮机振动的影响[J]. 动力工程学报, 2013, 33(9): 425-429.  
ZHANG Aiping, XIE Meina, LIN Shengqiang. Effect of oil film thickness of oval sliding bearing on vibration of steam turbine [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(9): 425-429. (in Chinese)
- [14] 朱瑜, 张朋波, 王雪. 转子系统油膜涡动及油膜振荡故障特征分析[J]. 汽轮机技术, 2012, 54(4): 306-308.  
ZHU Yu, ZHANG Pengbo, WANG Xue. Analysis of fault characteristics of oil film vortex and oil film oscillation in rotor system [J]. Turbine Technology, 2012, 54(4): 306-308. (in Chinese)
- [15] 李旭, 周雪斌, 韩彦广. 1000MW超超临界汽轮机设计特点及调试技术[J]. 热力透平, 2011, 40(1): 50-53.  
LI Xu, ZHOU Xuebin, HAN Yanguang. Design characteristics and commissioning technology of 1000MW ultra-supercritical steam turbine [J]. Thermal Turbine, 2011, 40(1): 50-53. (in Chinese)



**第一作者简介:**王涛,男,1987年6月生,学士、工程师。主要研究方向为旋转机械故障诊断分析。曾发表《分布式电源对配网接地方式的影响分析》(《西安工程大学学报》2018年第32卷第5期)等论文。

E-mail: wang87\_tao@126.com

**通信作者简介:**张泽,男,1994年4月生,硕士、工程师。主要研究方向为机械健康监测与智能诊断。

E-mail: zz13096619735@163.com