

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.04.007

断路器操作三维振动信号差异特征的研究

丁巧林¹, 何梦媛², 王亚潇³, 赵书涛¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 国网河北省电力有限公司物资分公司, 石家庄 050000;
3. 国网河北省电力有限公司邯郸供电分公司, 河北 邯郸 056000)

摘要: 针对单轴传感器在断路器中应用的缺陷与不足, 为了获取更多断路器分合闸时的状态信息, 利用三维振动传感器同步采集断路器操作时振动信号, 在时域、频域方面以及时频联合对 X 、 Y 、 Z 3个方向的信号进行分析对比。在时域方面, 运用 X 、 Y 、 Z 3个方向振动信号各个特征和能量的分布; 在频域方面, 运用快速傅立叶算法得出频谱分布图和功率谱图; 在时频联合方面, 运用小波包分解将三维传感器信号进行分解, 并求出能量在各节点的分布和Wigner-Ville分布, 说明三轴传感器放置方向对断路器测量信号故障诊断正确率的影响。实验分析结果表明, 三维振动传感器采集的断路器振动信号时频特征均有显著差异, 可更全面反映断路器分合闸时的状态信息。

关键词: 断路器; 三维振动传感器; 时域; 频域; 时频联合

Difference of Three-dimensional Signals on Breaker Operation

DING Qiaolin¹, HE Mengyuan², WANG Yaxiao³, ZHAO Shutao¹

(1. College of Electrical and Electric Engineering, North China Electric Power University, Hubei Baoding 071003, China;
2. State Grid Hebei Procurement Company, Shijiazhuang 050000, China; 3. State Grid Handan Electric Power Supply Company, Hebei Handan 056000, China)

Abstract: For the defects and deficiencies of single shaft sensor in the application of the circuit breaker, in order to obtain more comprehensive information about the circuit breaker operation, the circuit breaker operation vibration signal was acquire by the three-dimensional vibration sensor synchronization. Three directions of the signal are analyzed and compared in the time domain, frequency domain and time-frequency domain. In the time domain, three vibration directions of the signals of the characteristics and distribution of energy are taken by methods; in the frequency domain, spectrum distribution and power spectrum are acquired by fast Fourier transform; in time-frequency domain, the energy distribution of each node and Wigner - Ville distribution is obtained by wavelet packet decomposition, which illustrate the influence of circuit breaker measurement signal fault diagnosis accuracy in different placement direction of three axis sensor. The results show that there is a differences in frequency characteristic three-dimensional acceleration sensor vibration signal. Using three-dimensional vibration sensor can obtain more comprehensive information about the circuit breaker operation.

Key words: breaker; three-dimensional vibration sensor; time domain; frequency domain; time-frequency domain

0 引言

断路器作为电网中重要的保护和控制装置,其可靠性关系到电网的安全稳定运行^[1]。在高压断路器的各种故障中,机械故障是影响其动作可靠性的主要因素,占到总故障的70%~80%^[2],因此机械性能监测是断路器状态在线监测的主要内容。高压

断路器操作时产生的机械振动信号中蕴含了丰富的信息,特别是动触头在运动过程中产生的振动与冲击直接反应了高压断路器目前的一种状态。而目前对测量振动信号的方法多采用单轴振动传感器,文[3]用单轴振动传感器来获取振动信号并将多种方法进行对比;文[4]采用了安装在断路器表面的一个或多个压电式加速度传感器来采集振动信号,通过信息

融合的方法将多传感器数据进行融合,但多传感器的使用增大了占用空间,降低了工作效率。文[5]提出一种基于三维的变压器振动信号分析方法,将振动信号的三维分析应用于电力变压器监测,为变压器提供了新的监测手段。

断路器操作时的剧烈振动是一种空间三维位置突变信号,目前利用振动信号分析断路器运行状态的文献,仅限于采集一个方向的振动信号^[6-9],从而损失了空间中另外两个方向的信息。三维振动传感器具有频域范围宽、高灵敏度、低功耗等特点,文中采用三维振动传感器同步采集断路器振动信号,通过对比分析X、Y、Z正交三维振动信号之间的差异,证明三维振动传感器更适宜于断路器的信号采集与故障分析。

1 断路器振动信号采集

断路器的振动信号是一种瞬时非平稳信号^[10-13],包含大量设备状态信息,其分合闸时的剧烈振动通过断路器本体架构传到加速度传感器。加速度传感器属于一种惯性式传感器,利用石英晶石的压电效应,在加速度计受振时,质量块加在压电元件上的力也随之变化。当被测振动频率远低于加速计的固有频率时,则力的变化与被测加速度成正比。断路器操作时产生的振动是一种空间三维位置的突变信号,单轴振动传感器在采集安装轴线的振动信号时会收到垂直于安装轴线振动的影响,引起误差。三维振动传感器采用三个不同方向的石英晶石,通过特殊的电路设计方式有效的避免了垂直于轴线对该方向的干扰。

1.1 三维振动信号采集系统

振动信号采集系统主要包括三维振动传感器、同步数据采集卡、工控机3个部分。三维振动传感器将采集到断路器操作时的振动信号转换成电信号,通过带有屏蔽线的电缆传输到工控机,见图1。

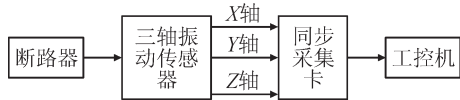


图1 三维振动信号采集系统
Fig. 1 The three-dimensional vibration signal acquisition system

三维振动传感器采用KD1000系列压电式加速度传感器,它具有频响宽、灵敏度高、横向灵敏度高和抗外界干扰能力强的优点,主要技术参数见表1。

1.2 数据采集

将上述三维振动传感器由螺栓固定在某ZN65断路器支架上,进行信号采集,安装示意图见图2。

表 1 KD1005LS 主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of KD1005LS

型号	电荷/电压灵敏 度/mV	安装谐振频率/ kHz	使用频率范围/ Hz	最大横向灵敏 度比	最大量程/ g
KD1005LS	50	~20	0.5~4 000.0	<5	100

注:g=9.8 N/m²

Z轴方向与断路器动触头运动方向相同,X轴垂直与动触头与侧面,Y轴垂直于动触头和正面。断路器分合闸时间参数见表2。在分闸指令发出后,储能弹簧释放带动主轴和凸轮转动,由主轴带动连杆使位于灭弧室内动触头运动进行分合闸操作。分合闸本质上就是机械机构进行能量传递的过程,断路器正常和异常状态可由体现为振动信号的能量变化反应。

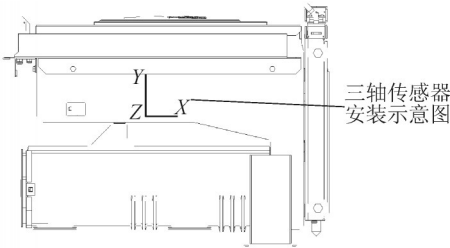


图2 三维振动传感器位于ZN65断路器

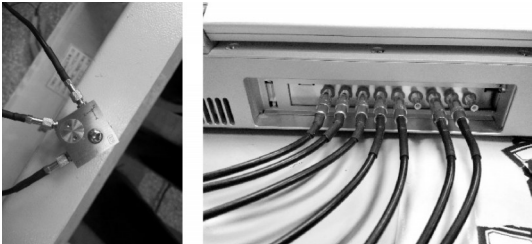
Fig. 2 Three-dimensional vibration sensors located on ZN65 circuit breakers

表 2 断路器分合闸时间参数

Table 2 Circuit breaker closing time parameter

额定及最高电压下分闸时间/ms	最低操作电压分闸时间/ms	额定及最高电压下的合闸时间/ms
45±10	60±10	50±10

按照图2振动传感器安装位置,以断路器分闸电流作为采集触发信号,经由IEPE KD1005和24位动态数据采集卡进行三维振动信号的同步采集,实际试验测量图见图3。X、Y、Z 3个方向 10 000个点的原始波形见图4。时间长度为0.5 s。



(a) 三轴传感器安装 (b) 采集卡接线

图3 实际试验测量

Fig. 3 Actual test measurement

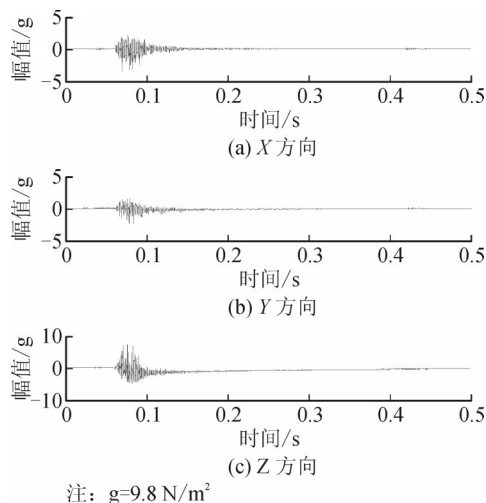


图4 ZN65断路器分闸操作的三维振动信号

Fig. 4 The three-dimensional vibration signal of ZN65 circuit breaker switching operation

2 三维振动信号分析

时域、频域是振动信号发生变化的基本特征,通过科学的特征比对即可发现断路器潜在的故障。

2.1 信号时域分析

取波形指标、峰值指标和脉冲指标等^[14]时域特

征进行比较。

1) 波形指标为

$$W = \frac{X_{\text{rms}}}{|\bar{X}|} = \frac{\text{均方幅值}}{\text{平均幅值}} \quad (1)$$

式(1)中, $|\bar{X}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|$ 表示绝对值的平均值,

该指标具有较好的稳定性,但敏感性较差。

2) 峰值指标为

$$I_p = \frac{X_p}{X_{\text{rms}}} = \frac{\text{峰值}}{\text{均方幅值}} \quad (2)$$

主要用来判断振动信号中冲击能量的大小。

3) 脉冲指标为

$$C_r = \frac{X_p}{|\bar{X}|} = \frac{\text{峰值}}{\text{平均幅值}} \quad (3)$$

对早期故障具有较高的敏感性,但故障发展到一定程度后会下降。

另外还有裕度、偏度和峰度等指标,ZN65断路器正常分闸操作时,由式(1)–(3)时域特征计算结果见表3。波形指标、峰值指标脉冲指标三维之间差距在一个数量级以上,可反映各个方向上振动变化灵敏度不同。

表3 正常状态下三维振动信号时域特征

Table 3 Vibration signal characteristics of three-dimensional time-domain in normal conditions

方向	波形指标	峰值指标	脉冲指标	裕度指标	偏度指标	峰度系数
X轴	2 064 100.000 0	0.003 3	-6 857.321 5	0.085 4	-1.818 3	71.278 9
Y轴	9 900.853 7	0.003 1	-30.744 5	0.068 4	-3.099 0	47.948 2
Z轴	28 399.425 9	0.000 7	-20.868 7	0.073 2	-0.810 7	16.984 0

X轴信号正方向总能量为379.89 J,而负方向能量为412.22 J;Y轴信号方向总能量为144.31 J,而负方向能量为170.65 J;Z轴信号正方向总能量为1 133.49 J,而负方向能量为2 885.13 J。X轴信号能量主要集中在负半轴,Y轴信号总体较为平均,Z轴含有最大的能量。

2.2 信号频域分析

将信号进行快速傅立叶变换^[15]查看信号频率分布范围,三维振动传感器频谱图见图5。三维振动传感器频率功率谱见图6。

由图5的频谱图可以看出,断路器操作信号主要集中在1 kHz附近,垂直于安装轴线的X轴和Y轴信号波形相似,Z轴信号含有较多的高频分量。

由图6的功率谱可以看出,X轴振动信号能量/频率主要集中在-50~100 dB/Hz,而Y轴与Z轴振动信号能量/频率主要集中在-50~150 dB/Hz。

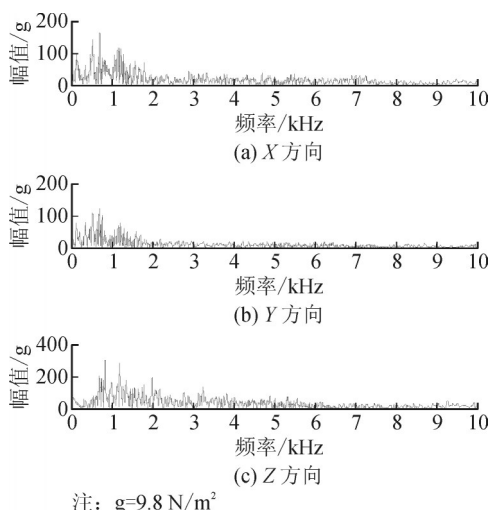


图5 三维振动传感器频谱图

Fig. 5 Three-dimensional vibration sensor spectrum

2.3 时频联合分析

2.3.1 小波包变换

小波包变换作为数字信号显微镜具有放大局

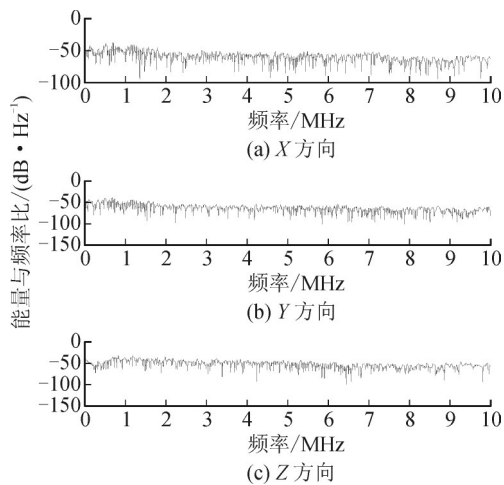


图6 三维振动传感器频率功率谱

Fig. 6 Three-dimensional vibration sensor frequency power spectrum

部特征功能,适合发现断路器操作时振动信号中微

小短促的异常^[16-17]。小波包分解层数较多,各节点所对应频段较窄,导致对频率过于敏感;如果分解层数较少,各节点所对应各频段较宽,则其对频率反应迟钝,在多次试验的基础上选择 db3 基对三维振动信号进行3层小波包分解。三维振动信号小波包节点-能量分布见表4。

从表4可以看出,X轴在前4个节点包含的能量占到总能量的80%,Y轴前4个节点包含的能量则占到75%,Z轴前4个节点能量占到85%,三维信号能量在相同节点具有较大的差异。针对不同方向各节点含有能量的不同,考虑使用表征信号不确定度的能量熵作为表征量。提取正常、分闸拒动、基座松动3种状态信号,其中正常13组,分闸拒动5组,基座不稳6组。并将各信号提取能量熵,部分信号X轴能量熵见表5。

表4 三维振动信号小波包节点-能量分布

Table 4 Three-dimensional vibration signal wavelet packet of node-energy distribution %

节点	[3,0]	[3,1]	[3,2]	[3,3]	[3,4]	[3,5]	[3,6]	[3,7]
X轴	56.77	9.74	6.85	6.71	2.43	3.17	9.42	4.90
Y轴	64.13	7.86	6.39	4.61	2.49	3.17	7.97	3.37
Z轴	55.90	10.63	7.76	11.31	1.37	2.62	6.23	4.16

表5 部分信号X轴能量熵

Table 5 X axis energy entropy of partial signal

节点	[3,0]	[3,1]	[3,2]	[3,3]	[3,4]	[3,5]	[3,6]	[3,7]	状态
1	2.596 9	1.822 2	1.476 9	1.305 2	1.142 7	1.041 2	0.978 7	0.927 7	00
2	2.121 2	1.514 2	1.245 2	1.125 7	0.992 3	0.910 7	0.866 8	0.828 0	00
3	2.482 4	1.759 9	1.444 1	1.296 8	1.142 9	1.045 2	0.991 7	0.948 7	01
4	2.632 6	1.856 7	1.509 9	1.346 1	1.187 3	1.088 9	1.031 5	0.980 7	01
5	0.306 7	0.216 1	0.179 5	0.162 9	0.141 2	0.127 2	0.120 4	0.114 0	10
6	0.345 8	0.239 8	0.195 2	0.175 2	0.151 8	0.135 4	0.128 7	0.121 7	10

表5中:00代表正常;01代表基座不稳;10代表分闸拒动。进一步说明了X,Y,Z 3个方向信号区别。将获得断路器各方向3种状态的能量熵输入支持向量机进行故障分类,见表6。从表6可以看出,由各方向获得的断路器故障分类具有较大的差别。X轴获得了最高的断路器故障诊断准确率。

表6 各轴分类准确率

Table 6 Accurate classification of each axis

方向	X轴	Y轴	Z轴
准确率/%	91.67	70.83	87.5

由表6可知,与断路器动触头水平方向具有最高正确率;与动触头和侧面垂直的方向具有次高准确率;与动触头和正面垂直的方向具有最低准确率。

2.3.2 Wigner-Ville 分布

Wigner-Ville是一种双线性类时频分布,其内部不含任何窗函数,避免了分析中时间分辨率以及频率分辨率不能兼顾的矛盾^[18-19]。Wigner-Ville分布时频分辨率很高,也有很好的时频聚集性,适合分析非平稳信号。断路器三维振动信号 Wigner-Ville 分布见图7。

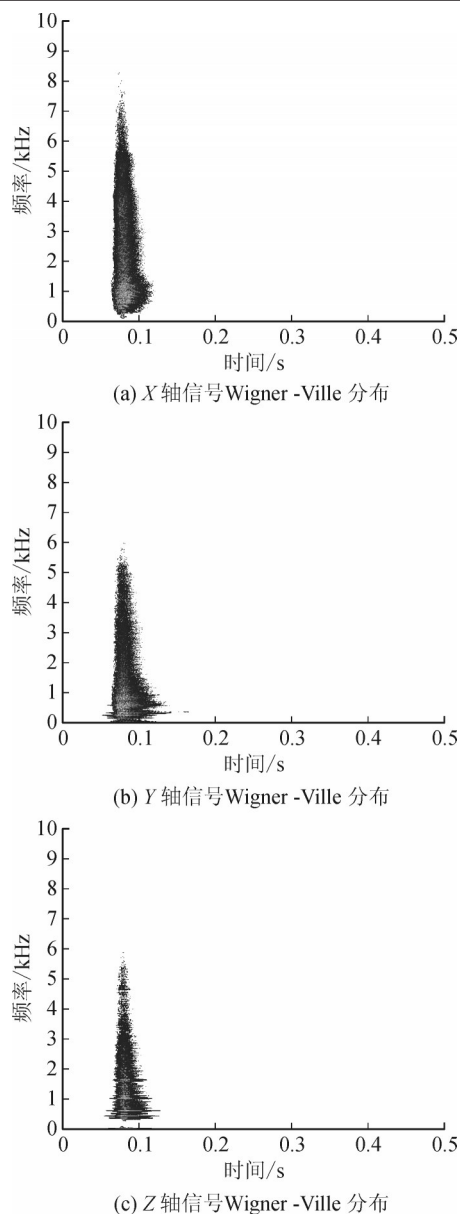


图7 三维振动信号 Wigner-Ville 分布

Fig. 7 Three-dimensional distribution of the vibration signal Wigner-Ville

从图7可以看出,信号X轴信号主要分布在0.3~7.0 kHz之间,Y轴信号主要分布在0~5.5 kHz之间Z轴信号主要分布在0.4~6.0 kHz之间,相较于单轴信号涵盖更广,接收到的信息更丰富。

3 结论

基于时域的波形、峰值和脉冲指标详细讨论了三维信号在故障与正常信号之间的差别。在频域和时频联合方面利用快速傅里叶变换、小波包分解和Wigner-Ville分布方法对三维振动信号进行了频率和能量特征分布的差异进行粗略对比。得出以下结论:

1)分轴判断断路器故障情况,传感器各轴对应

断路器触头运动方向准确率均不同,与动触头运动方向相同的具有最高准确率,适用于3种状态的判断;与动触头和侧面垂直的方向的具有次高准确率,适用于基座不稳和分闸拒动的判断;与动触头和正面垂直的方向的具有最低准确率,适用于正常和分闸拒动状态的判断。

2)断路器在分合闸过程中产生剧烈的三维振动信号可用于设备的故障诊断,利用三维振动传感器对断路器进行采集获取的三维振动信号时频特征均有显著差异,可更好的反映断路器分合闸时的状态,为断路器故障诊断提供更全面的数据信息。

参考文献:

- [1] 孙来军,胡晓光,纪延超. 基于支持向量机的高压断路器机械状态分类[J]. 电工技术学报,2006,21(8): 53-58.
SUN Laijun, HU Xiaoguang, JI Yanchao. Mechanical fault classification of high voltage circuit breakers based on support vector machine[J]. Transactions of China Electrometrical Society, 2006, 21(8): 53-58.
- [2] 杨晓军. 断路器机械特性检测装置设计[D]. 天津:天津大学,2006.
YANG Xiaojun. Design of circuit breaker mechanical properties testing device[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [3] 关永刚,黄瑜珑. 基于振动信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高电压技术,2000,26(3): 66-68.
GUAN Yonggang, HUANG Yulong. High voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis based on vibration signal[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3): 66-68.
- [4] 陈 尚. 基于多信息融合的断路器故障识别研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
CHEN Shang. Research on circuit breaker fault recognition based on multi information fusion[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [5] 院一敏,李宗恩,武晓明. 运行中电力变压器表面三维振动信号小波分析[J]. 电测与仪表,2015,52(15): 96-100.
YUAN Yimin, LI Zong'en, WU Xiaoming. Wavelet analysis on three-dimensional surface vibration signal of the running power transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(15): 96-100.
- [6] 孙来军,胡晓光,纪延超. 一种基于振动信号的高压断路器故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(6): 157-161.
SUN Laijun, HU Xiaoguang, JI Yanchao. A new method of fault diagnosis for high voltage circuit breaker based on vibration signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 157-161.
- [7] HUANG J, HU X G, GENG. X. An intelligent fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on im-

- proved EMD energy entropy and multi-class support vector machine[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(2): 400-407.
- [8] 常 广, 王 毅, 王 玮. 采用振动信号零相位滤波时频熵的高压断路器机械故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 155-162.
- CHANG Guang, WANG Yi, WANG Wei. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers utilizing zero-phase filter time-frequency entropy of vibration signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 155-162.
- [9] 关永刚, 黄瑜珑, 钱家骊. 基于振动信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 66-68.
- GUAN Yonggang, HUANG Yulong, QIAN Jiali. An overview on mechanical failure diagnosis technique for high voltage circuit breaker based on vibration signal[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3): 66-68.
- [10] 常 广, 张振乾, 王 毅. 高压断路器机械故障振动诊断综述[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 85-89.
- CHANG Guang, ZHANG Zhenqian, WANG Yi. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on Vibration diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 85-89.
- [11] 陈 涛. 一种新的支持向量机混合集成算法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(21): 5312-5315.
- CHEN Tao. A new hybrid SVM ensemble algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(21): 5312-5315.
- [12] MENG Y P, JIA S L, SHI Z Q, et al. The detection of the closing moments of a vacuum circuit breaker by vibration analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 652-658.
- [13] 马 强, 荣命哲, 贾申利. 基于振动信号小波包提取和短时能量分析的高压断路器合闸同期性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 149-154.
- MA Qiang, RONG Mingzhe, JIA Shenli. Study of switching synchronization of high voltage breakers based on the wavelet packets extraction algorithm and short time analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 149-154.
- [14] 赖达波. 某齿轮箱故障振动信号特征提取及分析技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- LAI Dabo. Study on feature extraction and analysis technology for a gearbox fault vibration signal[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2013.
- [15] 季 虎, 夏胜平, 郁文贤. 快速傅里叶变换算法概述[J]. 现代电子技术, 2001(8): 11-14.
- JI Hu, XIA Shengping, YU Wenxian. Fast fourier transform algorithms[J]. Modern Electronic Technology, 2001(8): 11-14.
- [16] 何正友, 陈小勤. 基于多尺度能量统计和小波能量熵测度的电力暂态信号识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 33-39.
- HE Zhengyou, CHEN Xiaoqin. Multiscale energy statistics and wavelet energy entropy in power system transient signals identification method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 33-39.
- [17] 胡晓光, 戴景民, 纪延超, 等. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 67-70.
- HU Xiaoguang, DAI Jingmin, JI Yanchao, et al. The fault diagnosis of high voltage breakers based on wavelet singularity detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 67-70.
- [18] 郭 奇, 刘卜瑜, 史立波, 等. 基于二次EEMD的Wigner-Ville分布旋转机械故障信号分析及试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(13): 129-133.
- GUO Qi, LIU Buyu, SHI Libo, et al. Analysis and experimental study of rotating machinery fault signal based on emd secondary wigner-ville distribution[J]. Vibration and Shock, 2012, 31(13): 129-133.
- [19] 来五星, 轩建平, 史铁林, 等. Wigner-Ville时频分布研究及其在齿轮故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 247-250.
- LAI Wuxing, XUAN Jianping, SHI Tielin, et al. Study on gear fault diagnosis by wigner-ville time-frequency distribution[J]. Vibration Engineering, 2003, 16(2): 247-250.
- 丁巧林(1961—), 女, 副教授, 研究方向为电工理论与新技术。
- 何梦媛(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。