

基于 WP-AR 模型的双谱估计在高压断路器 振动信号处理中的应用

董 越, 肖登明

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200030)

摘要: 采用小波包(WP)的方法先对现场采集的、噪声干扰较大的信号进行消噪处理,选取目的频带信号;再用奇异值分解(SVD)方法求解修正 Yule-walker 方程,估计 AR 参数及其阶数,进行双谱分析,提取机械性能判据对断路器进行在线故障诊断。经对多组不同时期的现场数据分析、对比,得出该方法可行有效,可为高压断路器实时在线故障诊断提供有效依据。

关键词: 断路器; 小波包; AR 模型; 高阶谱; 故障诊断

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0137-05

Application of Dual Spectrum Analysis to Mechanical Vibration Signal Process of High Voltage Circuit Breakers Based on WP-AR Model

DONG Yue, XIAO Deng-ming

(School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The mechanical vibration signals with noises interference, sampled in site, are de-noised with WP (wavelet package) method to achieve the aim frequency band. Then with the Levinson-durbin solution, the parameters of AR model are obtained in the Yule-walker equation. The high order spectrum analysis is then used to deal with the parameters, which provides the dual spectrum results for the proof of on-line fault diagnosis of circuit breaker. The analysis of field data shows that this method is feasible and efficient to provides a good means for on-line fault diagnosis of CB.

Key words: circuit breaker(CB); wavelet package; AR model; high order spectrum; fault diagnosis;

0 引言

近年来的统计结果表明,断路器机械操动机构故障占总故障的比重超过 60%^[1]。电力系统每年都要投入大量的人力、物力停电检修断路器,成本较高,影响其经济效益。因此,如何提供有效的方法及判据,及时地发现断路器工作状态中潜伏的或可能的故障是目前急待解决的问题。

几乎所有针对断路器振动检测的研究都集中在对振动信号的分析 and 处理上,高压断路器的振动信号是由一系列不同时刻发生的冲击振动波构成的,不同振动波的起始时刻、幅值、频率和衰减指数代表了断路器内部振动的基本特征。因此,提取这些时域特征参量是断路器振动信号分析的首要条件。

国外在这方面工作开展得较早,文[2]在 1988 年提出了将振动信号用一组有时延的指数衰减振荡模型描述的思想,这种依靠数学模型的方法比较理想化,忽略了振动信号中的干扰因素。实践证明,这

种方法能较为准确地提取信号中主要振动子波的发生时刻,其准确性依赖于对振动信号中主要频率分量的合理划分。

国内从 20 世纪 90 年代逐渐开展这方面的研究工作,从文献来看,多数研究集中在断路器机械运动状态识别技术上,一般是参照现场运行中常见的几种单一故障而人工模拟的故障,研究内容主要针对有限的几种机械状态的识别上^[3-9]。

笔者对现场采集的噪声干扰较大的断路器振动信号,采用小波消噪的方法先对信号噪声中的白噪声部分进行预处理,通过小波包(WP)频带能量监测法,分析了频带能量随不同时期机械状态变化而反映出的变化情况,选取分析中出现概率较大的几个频带作为特征频带信号;再用奇异值分解(SVD)方法估计 AR 参数及其阶数,进行双谱分析;理论上双谱可有效地抑制高斯有色噪声,因此,采用高阶统计分析中的双谱估计,能有效地从特征频带信号中提取机械性能判据作为状态识别的依据。

收稿日期:2008-06-02; 修回日期:2008-11-27

作者简介:董越(1977),男,博士,主要研究方向:大型电力设备在线监测与故障分析。

1 断路器振动信号的预处理

高压断路器是一种瞬时动作电器^[10],振动信号有如下特点: 振动信号在断路器机构的传递过程是复杂的,冲击(振源)位置与测量位置的变更都会显著地改变实测振动信号的特性; 动作过程中振动具有高加速运动、高强度冲击的特点; 瞬时非平稳信号,不具有周期性,信号有效时间非常短,一般在数十到数百毫秒之间。

在对振动信号进行离散化采样的过程中,由于采样频率不可能无限高,导致从离散信号恢复为原始信号时会产生波形失真^[11]。在现场运行中,振动信号中总是存在大量的随机噪声,尽管噪声在时域中大部分时刻取值较小,但仍有少数时刻取值较大,且表现为高频信号,而反映断路器状态变化的很多有用信息也包含在高频成分中。

此外,数据采集过程中也不可避免地要受到噪声的影响,产生杂波,实际的振动信号中总是叠加了很多随机的外界干扰,合成后的信号频带很宽。为了尽量减少信号被干扰,使信号中的状态信息得以准确保留,应尽可能提高振动信号的信噪比。通过软件进行振动信号预处理,可以在不增加硬件成本的基础上消除干扰因素的影响,降低在同样的状态和测量条件下振动信号的分散性。因此,消噪是对信号进行处理前的一种必要的预处理手段。

2 采用小波包算法对断路器振动信号消噪、重构

2.1 小波包消噪、重构算法

在实际工程应用中,噪声一般属于加性噪声,一般表现为高频信号,且噪声也不是平稳的白噪声,所分析的信号往往可能包含许多尖峰或突变部分,断路器振动信号中的高频成分,通常包含表达机械运动状态的丰富信息^[12]。

实践表明,采用小波变换方法可以消除一般高、低频噪声干扰信号,在小波去噪的过程中,不仅可以重构原始信号,保留原始信号的细节特征,更重要的是它能滤除带内白噪声,具有普通带通滤波器所不具有的功能^[13]。

小波消噪方法有软阈值和硬阈值两种方法。其中硬阈值消噪原理类似于传统的滤波器消噪方法,软阈值消噪原理充分利用了小波的多分辨率分析特性,对信号分解的每一层分别设定阈值,然后进行重构。实践表明,硬阈值消噪的同时也抑制了原始信号中的高频成分,该消噪方法的效果不够精确^[13],通常采用软阈值消噪法。

一般情况下,利用小波函数消除噪声,按以下3个步骤进行: 分解。选择小波函数 g 和小波包分解

的层数 L ,计算信号 S 到第 L 层的小波包分解; 高频系数的阈值选择。对于第 L 层的每一个高频系数,选择一个阈值,并且对高频系数用软阈值进行处理; 重构。根据修改后的第 N 层高频系数重构信号。

相对来说,影响小波消噪效果的主要是阈值的选择及其量化。究竟选择哪种方法应根据实际信号的特点以及几种阈值选择的优缺点来决定。断路器振动信号的高频成分里往往含有很多重要的信息,消噪处理不仅仅要实现信号噪声的抑制,而且也要保证信号的有用成分不丢失,因此,在选取阈值规则方面,采用效果相对保守的无偏阈值选择规则或最小最大准则阈值选择规则。

2.2 现场采集信号的消噪

笔者采用的是 LC0102T 型压电式加速度传感器,该传感器频响达 13 kHz,量程达 500 g,适用于高压断路器振动信号的检测; 选用的断路器是气动弹簧操动机构的 SF₆ 断路器。加速度传感器安装位置选择在靠近弹簧底部的基座,这样可以比较充分地反映动静触头撞击时的情况,同时操动机构的振动情况也能得到较充分的反映。

断路器振动信号的采样频率为 10 kHz,频率分析上限为 5 kHz; 因为采集的信号数据长度小于 26,分解层数 L 应小于 5^[10],这里 L 取 4; 这里采用 symlets 小波系列的 sym6 小波进行 4 层小波包分解、重构。

以某年 1 月采集的断路器分闸信号为例,消噪效果见图 1。

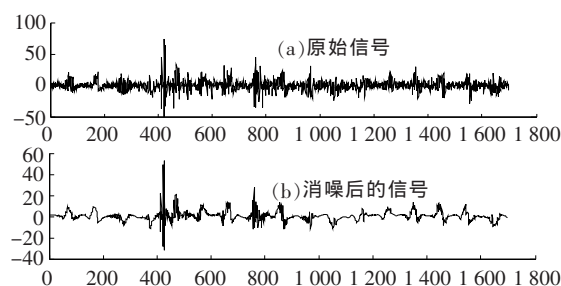


图1 断路器原始合闸信号及消噪后的信号

2.3 断路器振动信号的频谱分析

对振动信号进行频谱分析,可以了解振动信号在各个频段内的分布情况,从而为使用小波包分解和重构信号提供先验知识。使用 FFT 算法对某现场振动信号进行频谱分析,所得结果见图 2。

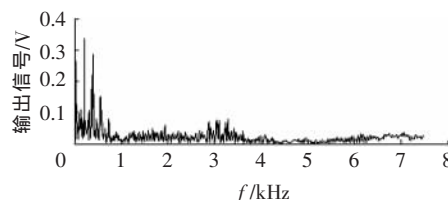


图2 振动信号的基带 FFT 频谱

通过对振动信号进行频谱分析,可看出断路器振动信号由低频成分和高频成分两部分组成,低频成分在1 kHz以下,高频成分在2.5~4 kHz,振动信号在4 kHz以下时具有丰富的频率构成。通过对振动信号进行时频分析,可以得出:低频信号在整个振动过程中一直存在,而高频信号只在动、静触头撞击后短时间(几十毫秒)内存在,因此可以认为高频成分代表动、静触头撞击时产生的冲击信号^[10]。

2.4 选取小波包特征频带信号

对于消噪后的信号,进行第二次小波包分解,分解层数仍为4,分别求解小波包分解后的24个频带能量。笔者采用的都是不同时期现场采集的历史数据,故在同一年内,对于同一断路器,不同月份的信号能反映断路器机械状态的变化。

图3是某月现场采集的两个信号的小波包频带能量监测图。因为这里振动信号频带能量数值较大,所以对频带能量做归一化处理,对比两个信号的小波包频带能量变化,即 $\Delta E = [|\Delta E_1|, |\Delta E_2|, \dots, |\Delta E_{16}|]$,其中 $\Delta E_k (k=1, 2, \dots, 16)$ 表示两个信号第 k 个频带的能量之间的差,可得出16个频带信号的能量变化。

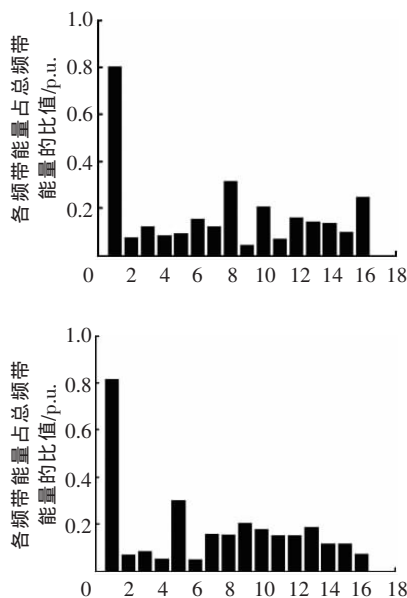


图3 间隔时间较短的两个信号的小波包频带能量监测图

通过图3可得出16(2^4)个频带能量的变化情况,其中频带能量变化较大几个频带的分别是第5、8、9、16频带。

如图4所示,通过对图4的16(2^4)个频带的能量变化进行比较,其中第8、9、10、12频带的能量变化较大。

文^[14]表明,对于同一类型断路器、同一机械状态下,由小波包特征频带组成的特征向量具有良好的重复性,但也只是在一定的区域内相对较稳定;而且由于断路器故障种类的多样性,还不能就此简单判断是否是因为某相传动部件的变形而引起的机械

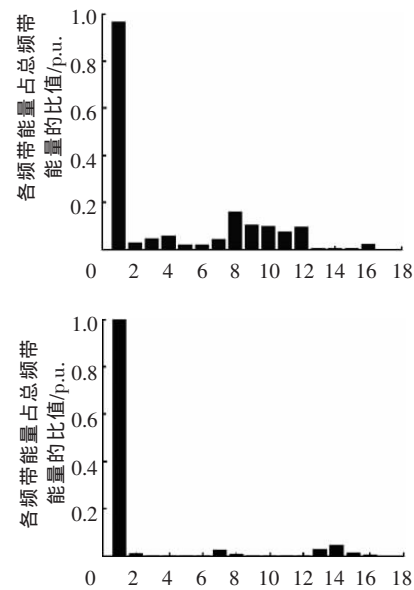


图4 间隔时间较长的两个信号的小波包频带能量监测图

状态变化。

分析上面二组数据发现,对于不同时期、不同程度的断路器机械状态的变化,小波包各频带能量几乎都有不同程度的变化,反映状态变化最为激烈的频带尽管多集中在高频部分,但频带分布比较分散,没有规律地集中在一个频带上,因此只能从概率统计的角度来选择。在代表频带能量变化最为敏感的若干频带中,出现几率较大的是第8、9频带,在小波包分解树中,两个频带分别对应的频率范围为2.5~2.8125 kHz、2.8125~3.125 kHz,选择这两个频带信号作为状态特征向量,对应的频率范围为2.5~3.125 kHz,这与前面图2中确定的高频成分的频率范围一致,同时两个频带均能真实反映断路器的振动过程。

因此,这里将第8、9频带分别重构合并为一个频带信号,作为下一步高阶谱分析的特征频带信号。

3 基于AR模型的高阶谱分析

高阶谱是分析非平稳、非高斯信号的有力工具,它从高阶概率结构表征随机信号,弥补了二阶统计量(功率谱)不包含相位信息的缺陷,能定量地描述非线性相位耦合,可以判别信号的非高斯程度及系统的非线性程度^[15],用高阶谱分析振动信号更容易获得有用信息。高阶谱以双谱(三阶谱)应用最为广泛。

与功率谱相比,双谱保留了系统的非线性信息,可抑制加性高斯噪声,并含有丰富的相位信息,故能在较强的背景噪声中提取故障信息。双谱被认为是传统的二阶功率谱的延伸,相当于频域的歪度,因而可描述为信号的非对称、非线性的特性^[16, 17]。

3.1 非高斯信号的AR模型方程

对于一平稳、非高斯随机过程 $\{x(n)\}$,其AR模

型方程为

$$\sum_{i=0}^p a(i)x(n-i)=e(n) \quad (1)$$

式(1)中, $e(n)$ 为一平稳零均值的非高斯白噪声, 三阶累积量为 β (一常数), 不失一般性, 假定 $a(0)=1$ [18]。

显然, 在式(1)中, $\{a(i), i=1, \dots, p\}$ 为 AR 模型参数, p 为 AR 模型阶数。

3.2 AR 参数辨识及阶数 p 的确定

基于三阶累积量的修正 Yule-Walker 方程 (MYW) 为

$$\sum_{i=0}^p a(i)c_{3x}(m-i, n)=0$$

$$m=1, 2, \dots, p+M(M \geq 0), \forall n \quad (2)$$

式(2)中, $c_{3x}(m-i, n)$ 为信号 $x(n)$ 的三阶累积量, n 为任意整数。

通常 AR 阶数 p 和 AR 参数都是未知的, 但根据已知的观测样本, 可以求得样本累积量矩阵, 文 [19] 给出了奇异值分解 (SVD) 方法来确定 AR 参数及其阶数。

计算过程大致分为两部分: 利用已知观测数据, 构造样本累积量矩阵 $C_e (M_2 (N_2-N_1+1) \times M_2)$, $M_2 \geq p, N_2 \geq 0, N_1 \leq -p$, 利用奇异值分解 (SVD) 方法确定矩阵 C_e 的有效秩, 给出 AR 阶数估计 p ; 在已知阶数 p 的前提下, 利用总体最小二乘法 (TLS) 估计 AR 参数。

3.3 特征频带信号的双谱估计

理论上双谱可有效地抑制高斯有色噪声, 采用双谱估计可有效地分离出有用的高频成分, 并从特征频带信号中提取机械性能判据作为状态识别的依据。

设 $\{x(n)\}$ 为零均值、实平稳随机信号, $\{x(n)\}$ 的三阶矩 (三阶自相关)

$$R(k, l)=E[x(n)x(n+k)x(n+l)] \quad (5)$$

双谱定义为三阶矩的二维傅里叶变换

$$B(\omega_1, \omega_2)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} R(k, l)\exp[-j(\omega_1 k+\omega_2 l)] \quad (6)$$

3.4 现场数据分析

分别取断路器例行检修不久, 即某月 28 日、30 日及次月 8 日的现场采集信号 (同一断路器上采集), 3 个频带信号的双谱估计的三维图分别见图 5。

在断路器经历检修时间不长、间隔时间很短的情况下, 一般断路器的机械状态接近正常工作状态, 不会有明显的变化。从图 5 可以看到, 3 个信号的谱图形状非常相似, 对应的谱峰大小, 分别在 (3~4)、(2.5~3)、(3~4) 的范围内变化, 峰值变化的程度很小, 且只有一个峰值, 谱峰的位置基本不变, 双谱的能量分布非常集中。

再分别取某日、2 周后的及 18 周后的断路器振动信号 (同一断路器上采集), 三个信号的双谱估计的三维图分别见图 6。

实际运行中, 在长达近 5 个月、期间断路器没有

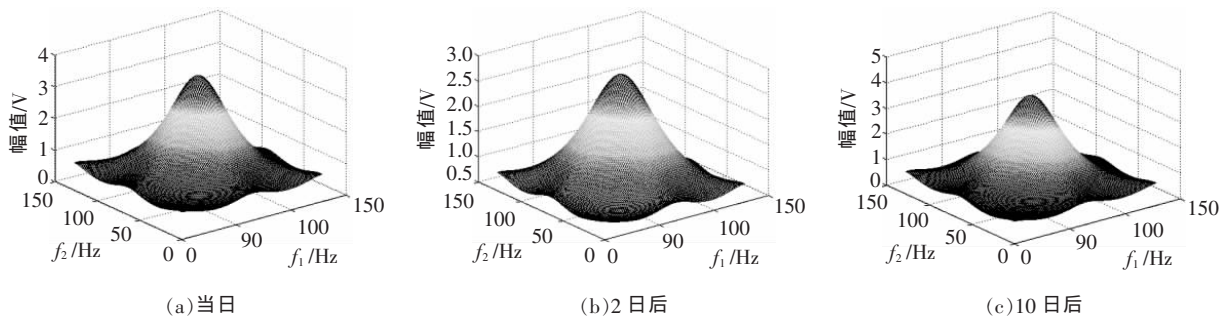


图 5 间隔日期较短的三个振动信号的双谱估计三维图

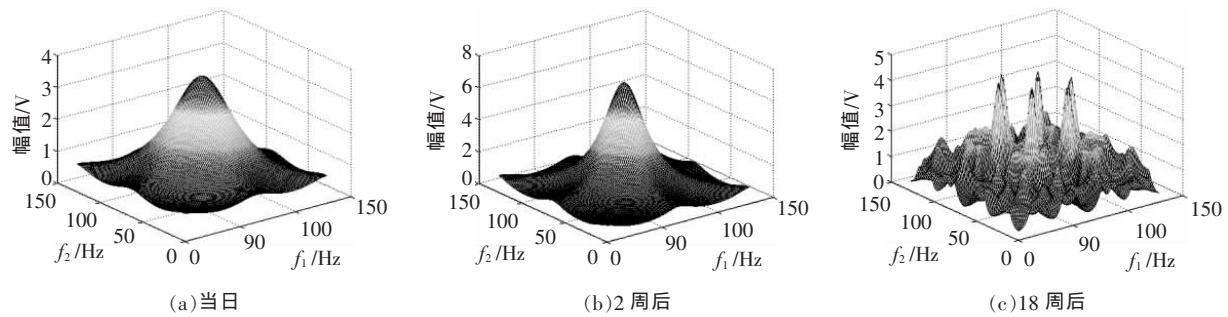


图 6 间隔日期较长的三个振动信号的双谱估计三维图

经历检修的情况下, 一般断路器的机械工作状态都会产生一定程度的变化。从图 6 的结果可以清楚地看到, 3 个信号的谱图变化趋势, 图 6(b) 和图 6(a)

相比, 经历两周的时间后, 谱图的形状轮廓没有明显变化, 仍是单一峰值, 谱峰的位置基本不变, 双谱的能量分布非常集中, 但对应的峰值变化开始明显, 由

(3~4)增大至(6~8);再看图6(c)和图6(b),16周后,对应的谱峰峰值变化不大,由(6~8)变化至(4~5);但谱形发生了很大的变化,双谱的能量分布开始分散,由原来的单一谱峰变化到谱图中出现多个较大谱峰。

根据累积量的性质,高阶累积量对高斯过程是“盲”的,即高斯过程的三阶或高阶累积量恒等于0,由双谱的定义可知,即双谱为三阶累积量的二维傅里叶变换。因此,高斯过程的双谱也为0^[18]。由图5(a)等双谱三维图可看到,信号双谱的幅值存在且不等于0,可以清楚地表明断路器的振动信号是非高斯信号^[18]。

断路器在灭弧室动触头、机械连接机构等动作时,其动作过程往往为非平稳、非线性^[14]。对于非线性系统来说,在某些频率处会显现出较强的相关性,其表现是在双频率坐标下的双谱三维图上出现较高的谱峰^[20],图5、6中信号的双谱幅值存在且不等于0也清楚地表明,断路器机械振动信号总是或多或少存在非线性特征;从图5(a)可看出,存在单一谱峰且能量分布非常集中。且随着长时间没有检修,机械状态变化较大(出现故障或潜在故障的概率较大)的情况下,其非线性特征表现的更为强烈,如产生多个主峰、若干较小谱峰,且能量分布开始发散等(见图6(c))^[21]。

目前断路器机械状态识别的研究表明,断路器的机械状态与特征变量之间存在复杂的非线性映射关系,且振动信号的产生受多方面因素的影响。因此,很难将谱图中的非线性特征与不同的机械状态一一对应,此时应结合其它监测指标的变化程度,判断断路器是否处于正常运行状态;但可以肯定的是,对于相同或相似的机械状态,信号双谱的非线性特征相似;而不同的机械状态,其双谱中体现的非线性特征不同,具有较强的可分性,使得识别不同的断路器机械运动状态(包括可能的故障状态)变得相对容易。

4 结论

(1)小波包频带能量监测法,可以粗略地反映断路器机械状态的变化,且反映能量变化最为强烈的频带分布比较发散,无法简单地取一个频带作为状态识别的判据,只能从概率的角度选取几个频带,合并为一个特征频带,并结合别的信号分析工具进行状态识别。

(2)现场数据分析表明断路器振动信号的高频成分具有非高斯性、非线性的特征,说明断路器在动作过程中,其产生的机械振动信号总是或多或少存在非线性;且随着长时间没有检修,机械状态变化较大(出现故障或潜在故障的概率较大),其非线性特征表现的更为明显。

(3)对比几组现场数据中提取的特征谱图发现,在断路器机械状态没有明显变化,接近或符合正常工作状态时,谱图的能量分布非常集中,且只有一个峰值,采集的几组振动信号的谱图呈现了很好的相似性;断路器的机械状态有明显变化时,谱形发生了很大的变化,谱图的能量分布开始分散,谱图中出现多个较大谱峰,具有明显的可分性;该方法能较好地反映出断路器机械状态的变化,可作为高压断路器在线故障诊断的一种研究手段。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节容,钱家骥,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [2] STOKES A D, TIMBS L. Diagnostics of Circuit Breakers[C]// International Conference on Large High Voltage Electric Systems, New York: GIGRE, 1988: 1-7.
- [3] 沈力,黄瑜琮,钱家骥.断路器振动信号的相频特性及在监测中的应用[J].电工技术学报,1997,12(3):42-44.
- [4] 关永刚,黄瑜琮.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.
- [5] 徐立新.断路器操作振动非平稳信号分析方法的研究[D].北京:清华大学,1992.
- [6] 李庆民,王冠,徐国政.高压断路器振动信号的指数衰减振荡波建模方法[J].高压电器,2004,40(3):177-180.
- [7] 张伟政.高压断路器机械特性监测与振动信号处理[D].西安:西安交通大学,1997.
- [8] 赵霞,熊小伏,郭珂.用细化频谱技术分析断路器操动机构振动信号[J].电力系统自动化,2003,27(12):37-41.
- [9] 胡晓光,戴景民.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):67-71.
- [10] 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.
- [11] 牛玉广,候维宁.振动信号处理过程中的失真及补偿[J].振动、测试与诊断,1997,17(1):23-28.
- [12] 王思明.基于小波分析的电力参数交流采样信号去噪方法[J].兰州交通大学学报,2005,24(3):84-87.
- [13] 张作良,胡志坤,何多昌,等.小波消噪在电力电子装置故障检测中的应用[J].变流技术与电力牵引,2007(1):48-51.
- [14] 孟庆鹏.基于振动信号分析的高压断路器机械状态检测的研究[D].西安:西安交通大学,2006.
- [15] 杨江天,陈家骥,曾子平.基于高阶谱的旋转机械故障征兆提取[J].振动工程学报,2001,14(1):13-17.
- [16] 李军伟,韩捷,李志农,等.小波变换域双谱分析及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2006,25(5):92-95.
- [17] 袁文菊,程得福.双谱特征在地下输水管道泄露检测中的应用[J].水土保持研究,2003,10(2):158-160.
- [18] 张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,1996.
- [19] MENDEL J M. Tutorial in Higher-order Statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory: Theoretical Results and some Applications [J]. Proc. IEEE, 1991(5):278-305.
- [20] 陆爽.基于双谱分析的滚动轴承故障模式识别[J].轴承,2005(5):31-34.
- [21] ENRICH F F. Sum and Difference Frequencies in Vibration of High Speed Rotating Machinery [J]. Trans. of the ASME. Journal of Engineering for Industry, 1972(1):181-184.