

# 基于改进冗余提升方案的汽轮机组 振动故障特征提取

周 瑞<sup>1</sup>, 鲍 文<sup>1</sup>, 左国华<sup>2</sup>, 于达仁<sup>1</sup>, 杨建国<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江省 哈尔滨市 150001;

2. 哈尔滨锅炉责任有限公司, 黑龙江省 哈尔滨市 150046)

## Turbine Vibration Fault Feature Extraction Based on Improved Redundant Lifting Scheme

ZHOU Rui<sup>1</sup>, BAO Wen<sup>1</sup>, ZUO Guo-hua<sup>2</sup>, YU Da-ren<sup>1</sup>, YANG Jian-guo<sup>1</sup>

(1. Department of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;

2. Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** The extraction of fault feature is the key to the condition monitoring and fault diagnosis of large mechanical equipment. The traditional feature extraction methods for vibration fault are mainly based on spectrum analysis, while the development of wavelet transform brings a new tool in this field. An improved redundant lifting wavelet transform was utilized to extract the feature in time domain of fault vibration. This algorithm was based on the second generation wavelet transform and a redundant lifting algorithm is designed. The splitting operation was unnecessary in this algorithm and the signal was predicted and updated directly, so the approximation and detail signal at each level has the same length as the original signal and retains more characteristics in time domain. The causes of frequency aliasing inhere in both lifting and redundant lifting wavelet transform was discussed and also an anti-aliasing algorithm for redundant lifting wavelet transform was presented. A typical simulated signal and real-life vibration fault signal measured from a turbine generator unit were used to test this method. It was shown that the presented algorithm is quite effective for avoiding frequent aliasing and the typical feature of impact-rub and misalignment of turbine generator in time domain are desirably extracted.

**KEY WORDS:** wavelet; redundant lifting scheme; feature extraction; fault diagnosis; turbine generator unit

**摘要:** 故障特征提取是大型机械设备状态监测和故障诊断领域的核心问题。传统的振动故障特征提取方法主要是基于频谱分析的方法, 小波变换的出现则为该领域提供了新的工具。文中提出并构造了一种改进的冗余提升小波变换

算法来提取振动信号的时域特征。算法以第2代小波为基础, 设计了冗余提升小波变换的算法, 不进行分裂, 直接利用构造的算子进行预测和更新, 各层分量和原始信号的数据长度相同, 从而保留了更多的时域信息。研究了提升小波和冗余提升小波算法中存在的频率混叠问题, 阐述了产生频率混叠的原因。通过对冗余提升小波分解得到的近似信号和细节信号采用傅里叶变换的方法消除了与其对应频带无关的频率成分, 以突出相应频带信号的时域特征。对仿真信号和实际汽轮发电机组振动故障信号进行了分析, 结果表明, 改进的冗余提升小波变换算法能够较理想地提取出故障特征, 有效地解决了提升小波算法中存在的频率混叠问题。

**关键词:** 小波; 冗余提升方案; 特征提取; 故障诊断; 汽轮发电机组

## 0 引言

汽轮发电机组是发电厂的关键生产设备, 其运行状况直接关系到安全生产和企业的经济效益, 因此对其进行有效状态监测和故障诊断具有重要意义。汽轮发电机组属于典型的旋转机械, 其振动信号在本质上可分为平稳振动信号和非平稳振动信号两大类, 这两类信号都包含有能够反映旋转机械工作状态的重要特征信息, 有效地提取这些特征对设备的监测和诊断有重要价值<sup>[1]</sup>。

小波变换是一种新兴的信号时频分析方法, 它通过伸缩和平移运算对信号进行多尺度分析, 能够有效地提取信号的时频信息, 因此广泛应用于机械故障的特征提取<sup>[2-5]</sup>。近年来, 基于提升算法的第2代小波变换得到了快速发展。第2代小波变换是

基金项目: 国家自然科学基金项目(50606008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50606008).

一种柔性的小波变换方法，它可以使用线性的、非线性的或空间变化的预测器和更新器来确保变换的可逆性。同经典的小波变换相比，算法更简单，适合于自适应、非线性变换<sup>[6-9]</sup>。提升小波的优良性质使得其在故障诊断领域得到了更加广泛的研究<sup>[10-14]</sup>。

然而小波变换过程中存在的频率混叠问题影响故障特征的有效提取。文献[15-16]研究了经典离散小波变换的频率混叠问题，并从滤波器设计的角度设计了抗频率混叠算法，但是算法过于复杂。文献[17]提出了一种改进的离散小波变换算法，通过与频谱变换方法相结合，有效地解决了经典小波变换的频率混叠问题。

本文以第 2 代小波变换为基础，研究了提升方案和冗余提升方案的构造方法，探讨了 2 种方案在分解过程中存在的频率混叠问题和产生原因，并提出了改进算法。通过对仿真信号和实际汽轮发电机组典型故障信号的分析，结果表明改进算法较理想地提取出了故障的时域特征并有效地去除了各信号分量间的混叠成分。

## 1 基于提升方案的小波变换

### 1.1 提升方案

基于提升方案的小波变换不依赖于 Fourier 变换，具有运算速度快，完全本位计算，逆变换只需将正向变换取反等众多优点。一个典型的提升方案分解过程包括分裂、预测和更新 3 个步骤<sup>[11]</sup>。

第 1 步是分裂：将输入信号序列( $a_l$ )分裂成奇数序列( $a_{l1}$ )和偶数序列( $d_{l1}$ )2 个子集，即

$$\{a_{l-1}, d_{l-1}\} := S(a_l) \quad (1)$$

第 2 步是预测：预测的目的是用 $a_{l1}$ 预测 $d_{l1}$ ，预测误差形成新的 $d_{l1}$

$$d_{l-1} := d_{l1} - P(a_{l1}) \quad (2)$$

式中： $P(\cdot)$ 为预测算子；“:=”表示对变量的更新。

第 3 步是更新：构造一个更新算子 $U(\cdot)$ ，作用于细节系数 $d_{l1}$ 并叠加到偶数样本上得到近似信号 $a_{l1}$ ，更新过程可以写为

$$a_{l-1} := a_{l1} + U(d_{l1}) \quad (3)$$

可以看出，提升小波变换算法的分解方式与经典离散小波变换的思想一致，都是将序列分解成更紧致的表示方式。选择不同的分裂方式和预测方式等价于选择了不同的小波滤波器组。

### 1.2 冗余提升方案

基于冗余提升方案的小波变换算法包括 2 个组

成部分：冗余预测算子和冗余更新算子的构造以及分解和重构算法<sup>[18]</sup>。

冗余预测和冗余更新算子的构造是实现冗余提升小波变换的重要步骤。用 $P^l$ 和 $U^l$ 分别表示第 $l$ 层的冗余预测算子和冗余更新算子，其中 $l$ 为冗余提升小波的分解层数。当选定小波基函数后，初始的预测算子 $P^0$ 和更新算子 $U^0$ 即可以确定下来，其系数用 $p_m^0$ 和 $u_n^0$ 来表示，其中 $m=0,1,\dots,M-1$ ; $n=0,1,\dots,N-1$ ， $M$ 和 $N$ 分别为初始算子 $P^0$ 和 $U^0$ 系数的长度。 $P^l$ 和 $U^l$ 的系数是在 $P^0$ 和 $U^0$ 的基础上通过对 $p_m^0$ 和 $u_n^0$ 进行插值补零运算得到的，其表达式为

$$p_i^l = p_0^0, \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{l-1}}, p_1^0, \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{l-1}}, p_2^0, \dots, p_{M-1}^0, \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{l-1}}, p_{M-1}^0 \quad (4)$$

$$u_j^l = u_0^0, \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{l-1}}, u_1^0, \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{l-1}}, u_2^0, \dots, u_{N-1}^0, \underbrace{0, \dots, 0}_{2^{l-1}}, u_{N-1}^0 \quad (5)$$

冗余提升方案去掉了提升方案中对信号序列进行分裂的过程，利用上述计算得到的冗余预测算子和冗余更新算子直接对原始信号进行预测和更新运算。冗余提升小波的分解过程为

$$\begin{cases} d_{l-1} = a_l - P^l a_l \\ a_{l-1} = a_l + U^l d_{l-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $a_l$ 和 $d_l$ 分别为每层冗余提升小波分解后得到的近似信号和细节信号。

可以看出，冗余提升小波分解后每一层近似分量和细节分量的长度与原始信号相同，和提升小波分解的结果相比，它是对原始信号的一种冗余表达，避免了由于分裂过程的下采样作用所造成的信息丢失，从而可以在故障特征提取中保留更多的时域信息。冗余提升小波的重构过程可以直接从上述分解过程得到：

$$a_l = \frac{1}{2}(a_{l-1} - U^l d_{l-1} + d_{l-1} + P^l a_l) \quad (7)$$

综上所述，基于提升方案和冗余提升方案的小波分解过程如图 1 所示。

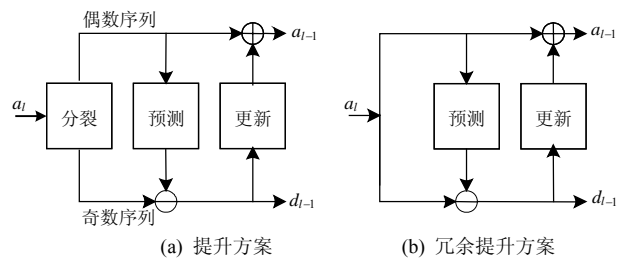


图 1 分解过程

Fig. 1 Decomposition procedure

## 2 改进冗余提升方案

### 2.1 滤波器的频域特性

Daubechies 已经证明所有满足精确重构条件的紧支小波变换都可以分解成有限步简单的提升过程实现, 其对应提升格式的更新和预测算子与原先滤波器组对输入信号的作用是等效的。考察不同小波滤波器组的频域特性, 以 Daubechies 小波滤波器为例, 消失矩分别为 2、4、6、8 时的小波滤波器的频域特性见图 2。可以看出, 随着滤波器系数的增加, 高低通滤波器逼近理想滤波器的程度是增强的, 频带之间的混叠部分也有减小的趋势, 但始终不会具有理想的频率截止特性。

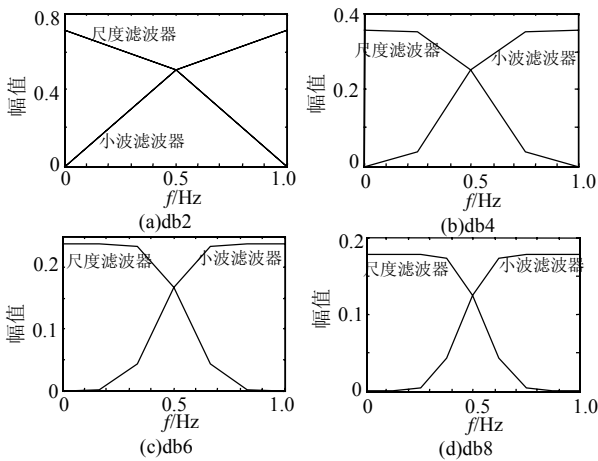


图 2 滤波器的频域特性

Fig. 2 Frequency domain characteristics of filters

### 2.2 改进算法

经典小波变换在分解过程中产生频率混叠的原因有两个方面: 滤波器的非理想频域特性和隔点采样<sup>[17]</sup>。考虑冗余提升方案的实现步骤, 由于没有对原始序列进行分裂, 因此在分解过程中不会存在降采样造成的频率混叠成分, 所以改进算法只需要克服由于滤波器的非理想频域特性产生的频率混叠。改进冗余提升小波的分解过程见图 3。

CA 和 CD 分别是消除近似分量和细节分量中频率混叠的算子。CA 算子首先对预测和更新后获得的近似分量进行快速傅里叶变换, 然后将变换结

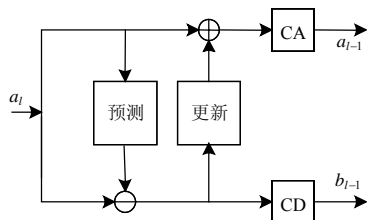


图 3 改进冗余提升方案分解过程

Fig. 3 Decomposition procedure for improved redundant lifting scheme

果中频率大于  $f_s/2^{j+1}$  部分的谱值置零 ( $f_s$  为信号的采样频率), 最后对置零后的结果进行快速傅里叶逆变换, 其输出作为近似分量。CD 算子则对预测后获得的细节分量进行傅里叶变换, 然后将变换结果中频率小于或等于  $f_s/2^{j+1}$  部分的谱值置零, 傅里叶逆变换后的输出作为细节分量。

经过上述 2 个消除频率混叠的算子作用后, 冗余提升小波分解得到的近似信号和细节信号间存在的频率混叠问题得到了解决, 原始信号中各频率分量也能够被有效的分离。

## 3 仿真信号分析

设一信号  $x$  由 30、80、110 和 150 Hz 4 个频率的正弦波组成, 以 400 Hz 的采样频率对  $x$  进行采样, 数据长度为 1024, 如图 4 所示。

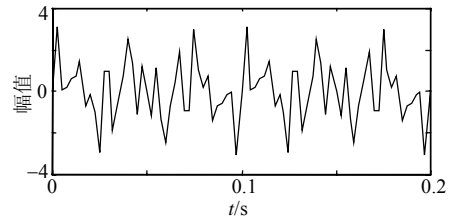


图 4 仿真信号

Fig. 4 Simulation signal

对仿真信号分别采用提升方案、冗余提升方案和改进冗余提升方案进行一层小波分解以对信号进行分离, 分解结果如图 5~7 所示。

图 5 为提升方案的分解结果, 可以看出在近似分量的傅里叶变换中包含了 30、80 和 90 Hz 的频谱分量, 其中 30 和 80 Hz 是应该含有的频谱分量, 而 90 Hz 则是虚假的频谱分量。细节分量中理论上应该只包含 100 Hz 以上的分量, 然而其傅里叶变换中却存在 50、80 和 90 Hz 的低频信号成分。提升方案中虚假频率产生的原因是由于滤波器的非理想频域特性和分解过程中存在的分裂步骤(其作用相当于对原始序列进行了隔点采样)共同作用造成的。

图 6 为冗余提升方案的分解结果, 近似分量中包含 30、80 和 110 Hz 的频谱分量, 其中 30 和 80 Hz 是应含有的频谱分量。细节分量中包含了 80、110 和 150 Hz 的频谱分量, 其中 110 和 150 Hz 是应有的频谱分量。冗余提升方案中各分量间频率混叠产生是由于滤波器的非理想频域截止特性造成的。

图 7 为改进冗余提升方案的分解结果, 可以看出在近似和细节分量中只包含应当属于其频率范围的频谱分量, 从而对原始信号的各频率成分实现了有效的分离。

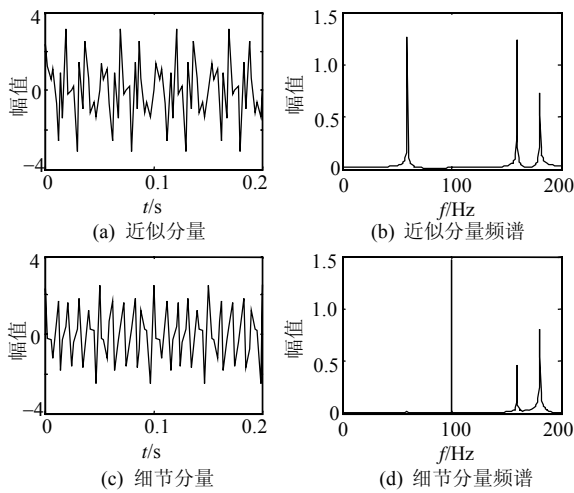


图 5 提升方案分解结果

Fig. 5 Decomposition result of lifting scheme

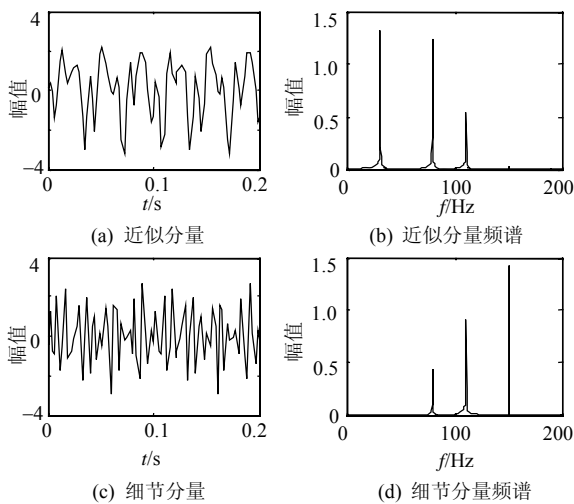


图 6 冗余提升方案分解结果

Fig. 6 Decomposition result of redundant lifting scheme

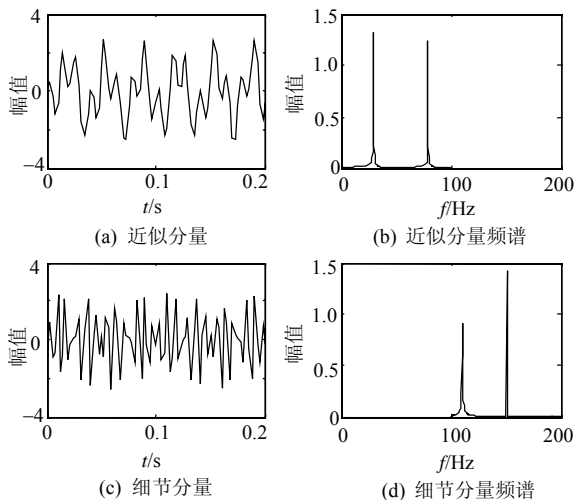


图 7 改进冗余提升方案分解结果

Fig. 7 Decomposition result of improved redundant lifting scheme

### 4 工程应用

为了验证算法的有效性，从东北某发电厂获取了汽轮发电机组发生故障时的轴瓦振动数据。机组额定转速为 3 000 r/min，振动数据的采样频率为 6400 Hz。本文选取其中发生转子不对中和转子碰摩时的两组振动故障数据进行分析。

#### (1) 转子不对中。

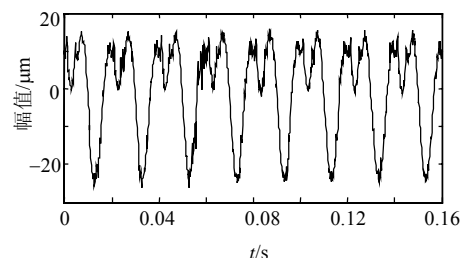
汽轮发电机组发生转子不对中故障时的振动信号波形如图 8(a)所示。可以看出，由于受到噪声以及信号中高频成分的干扰，振动信号的时域特征信息并不是很清晰。对该信号采用改进冗余提升小波分解算法分解到第 5 层，分解结果见图 9。第 5 层近似分量和细节分量的频段范围分别对应 0~100 Hz 和 100~200 Hz。

从图 9(a)可以看出，每个工频周期(20 ms)的振动波形中叠加了两个高频振动波形，即高频振动波形周期约为 10 ms，其频率为 100 Hz，刚好是转子的 2 倍频。图 9(b)中的细节分量不易直接看出其振动成分，对其进行傅里叶变换后发现主要频率成分是 150 和 200 Hz，即 3 倍频和 4 倍频。转子不对中故障的典型特征是转子径向振动出现工频的高次成分，其中 2 倍频成分最明显，因此验证了利用改进冗余提升方案分析的结果是正确的。从分解结果还可以看出，近似分量和细节分量中没有混入属于其频带范围以外的成分，这说明改进算法有效的解决了提升小波分解时的频率混叠问题。

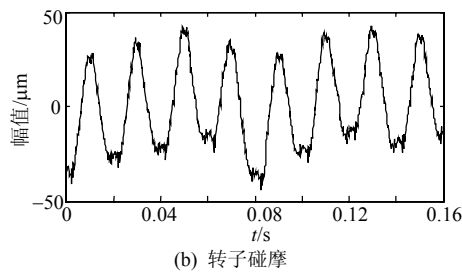
#### (2) 转子碰摩。

汽轮发电机组发生转子碰摩时的振动信号波形如图 8(b)所示。对该信号采用本文算法分解到第 6 层，第 6 层近似分量和细节分量如图 10 所示，其频段范围分别是 0~50 和 50~100 Hz。

从图 10(a)所示近似分量可以看出，大约每 4 个工频周期的振动波形中叠加了一个较小幅值的低频振动，即较小幅值的低频振动周期约为 80 ms，频率为 12.5 Hz。图 10(b)所示细节分量中明显含周期为 10 ms 的振动成分，频率为 100 Hz，即 2 倍频分量。



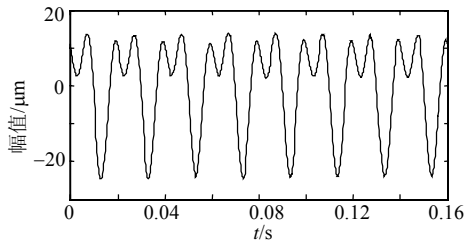
(a) 转子不对中



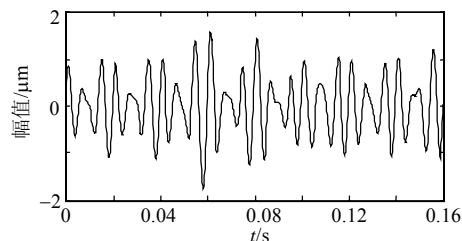
(b) 转子碰摩

图8 轴瓦振动信号

Fig. 8 Vibration signal of bearing bridge



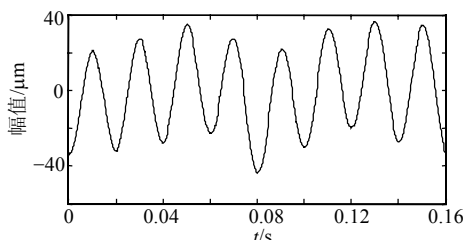
(a) 第5层近似分量



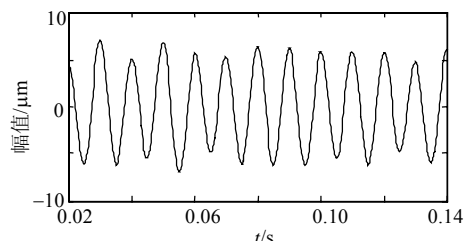
(b) 第5层细节分量

图9 不对中振动信号分解结果

Fig. 9 Decomposition result of misalignment fault vibration signal



(a) 第6层近似分量



(b) 第6层细节分量

图10 碰摩故障振动信号分解结果

Fig. 10 Decomposition result of impact-rub fault vibration signal

碰摩故障的典型特征是振动波形发生畸变,在工频的基波上叠加低频成分,同时2倍频和3倍频成分的幅值与工频成分幅值的比值较大,一般可达0.20~0.50。试验结果同样验证了算法的正确和有效性。

## 5 结论

(1) 在基于提升方案和冗余提升方案小波变换的基础上,构造了一种改进的冗余提升小波变换算法。算法与快速傅里叶变换相结合,对冗余提升小波分解得到的近似信号和细节信号分别进行傅里叶变换,只保留其对应频带中的频谱成分。

(2) 构造了一个仿真信号,分别应用提升方案、冗余提升方案和改进冗余提升方案对仿真信号进行小波分解。结果证明本文提出的算法消除了分解信号间存在的频率混叠问题,能够实现信号的有效分离。

(3) 将改进算法应用于汽轮发电机组转子不对中和转子碰摩2种典型故障振动信号的分析,结果证明算法能够有效地提取2种故障信号的时域特征波形。

(4) 改进算法克服了提升小波变换过程中各子带信号间存在的频率混叠,其实质作用是能够提高各子带内信号的信噪比,因此该算法对于汽轮机不同类型的振动故障特征提取均适用,对于其他大型旋转机械的监测和故障诊断也具有参考和应用价值。

## 参考文献

- [1] 汪江,王青华,陆颂元.基于Internet的大型发电机组远程状态监测与故障诊断技术的若干问题[J].汽轮机技术,2004,46(1):1-4,56.  
Wang Jiang, Wang Qinghua, Lu Songyuan. Research on internet-based remote condition monitoring and fault diagnosis of large turbine-generator units[J]. Turbine Technology, 2004, 46(1): 1-4, 56(in Chinese).
- [2] 王善永,陆颂元,马元奎,等.汽轮发电机组转子动静碰摩故障检测的小波分析方法研究[J].中国电机工程学报,1999,19(3):1-6.  
Wang Shanyong, Lu Songyuan, Ma Yuankui, et al. Application of wavelets to turbo generator unit for impact fault detection [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 1-6(in Chinese).
- [3] Zheng H, Li Z, Chen X. Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(2-3): 447-457.
- [4] 彭志科,何永勇,卢清,等.用小波时频分析方法研究发电机碰摩故障特征[J].中国电机工程学报,2003,23(5):75-79.  
Peng Zhike, He Yongyong, Lu Qing, et al. Using wavelet method to analyze fault features of rub rotor in generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 75-79(in Chinese).
- [5] 蒋东翔,刁锦辉,赵钢,等.基于时频等高图的汽轮发电机组振动故障诊断方法研究[J].中国电机工程学报,2005,25(6):146-151.  
Jiang Dongxiang, Diao Jinhui, Zhao Gang, et al. Study on methods of vibration fault diagnosis based on time-frequency contour map for turbine generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 146-151(in Chinese).

- [6] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets[J]. *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, 1998, 29(2): 511-546.
- [7] Daubechies I, Swekdens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. *Journal of Fourier Analysis and Application*, 1998, 4(3): 245-267.
- [8] Heijmans H, Pesquet-Popescu B, Piella G. Building nonredundant adaptive wavelets by update lifting[J]. *Applied Computational and Harmonic Analysis*, 2005, 18(3): 252-281.
- [9] Claypoole R L, Davis G M, Sweldens W, et al. Nonlinear wavelet transforms for image coding via lifting[J]. *IEEE Transactions on Image Process*, 2003, 12(12): 1449-1459.
- [10] 闫常友, 杨奇逊, 刘万顺. 基于提升格式的实时数据压缩和重构算法[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(9): 6-10.  
Yan Changyou, Yang Qixun, Liu Wanshun. A real-time data compression & reconstruction method based on lifting scheme [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(9): 6-10(in Chinese).
- [11] 杨光亮, 乐全明, 郁惟镛, 等. 基于小波神经网络和故障录播数据的电网故障类型识别[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(10): 99-103.  
Yang Guangliang, Yue Quanming, Yu Weiyong, et al. A fault classification method on wavelet neural networks and fault record data [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(10): 99-103(in Chinese).
- [12] 姜洪开, 何正嘉, 段晨东. 基于提升方法的小波构造及早期故障特征提取[J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(5): 494-498.  
Jiang Hongkai, He Zhengjia, Duan Chendong. Wavelet construction based on lifting scheme and incipient fault feature extraction [J]. *Journal of Xi' an Jiaotong University*, 2005, 39(5): 494-498(in Chinese).
- [13] Jiang H k, He Z J, Duan C D. Gearbox fault diagnosis using adaptive redundant lifting scheme[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(8): 1992-2006.
- [14] Hu Q, He Z J, Zhang Z S. Fault diagnosis of rotating machinery based on improved wavelet package transform and SVMs ensemble [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(2): 688-705.
- [15] 杜天军, 等. 基于混叠补偿小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(3): 54-59.  
Du Tianjun, Chen Guangju, Lei Yong. A novel method for power system harmonic detection based on wavelet transform with aliasing compensation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(3): 54-59(in Chinese).
- [16] 杜天军, 等. 谐波检测的抗混叠小波包滤波器设计[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(19): 25-30.  
Du Tianjun, Chen Guangju, Yuan Haiying. Anti-aliasing wavelet packet filters design for harmonic detection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(19): 25-30(in Chinese).
- [17] Yang Jianguo, Park S T. An anti-aliasing algorithm for discrete wavelet transform[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(5): 945-954.
- [18] 姜洪开, 何正嘉, 段晨东, 等. 自适应冗余第2代小波设计及齿轮箱故障特征提取[J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(7): 715-718, 739.  
Jiang Hongkai, He Zhengjia, Duan Chendong, et al. Adaptive redundant second generation wavelet design and gearbox fault feature extraction[J]. *Journal of Xi' an Jiaotong University*, 2005, 39(7): 715-718, 739(in Chinese).

收稿日期: 2007-10-24。

作者简介:

周 瑞(1980—), 男, 博士研究生, 从事信号处理, 小波分析及动力机械故障诊断方面的研究, hit\_zhourui@163.com;

鲍 文(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 从事动力系统建模、仿真与故障诊断方面的研究。

(责任编辑 王庆霞)