

冗余第 2 代小波构造及机械信号特征提取

姜洪开¹, 何正嘉², 段晨东¹

(11 西安交通大学机械学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对强噪声背景下机械信号故障特征的提取问题, 构造了一种提取该类信号时域特征的冗余第 2 代小波方法. 该方法通过对初始预测算子和更新算子插值补 0, 来获得不同分解层上的预测算子和更新算子. 冗余第 2 代小波不需要剖分运算, 直接利用构造的算子对逼近信号进行对称预测和更新, 可使逼近信号和细节信号的数据点数保持不变, 并根据每层细节信号的噪声特点选取降噪阈值门限. 实验和工程振动信号分析表明, 冗余第 2 代小波的降噪效果优于其他类型的小波方法, 较理想地提取出了滚动轴承内圈剥落和汽轮发电机高压缸蒸汽激振的时域故障特征.

关键词: 冗余第 2 代小波; 降噪; 特征提取

中图分类号: TH17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004) 11 - 1140 - 03

Construction of Redundant Second Generation Wavelet and Mechanical Signal Feature Extraction

Jiang Hongkai¹, He Zhengjia², Duan Chendong¹

(11 School of Mechanical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: To extract fault feature of mechanical signal corrupted by noise, a new method to construct redundant second generation wavelet (RSGW) is presented to extract fault feature in time domain. The initial prediction operator and initial update operator are interpolated with zero, and then the prediction operator and update operator at different decomposition scale are gained. Splitting operation is unnecessary for RSGW, and the approximation signal is predicted and updated directly, the length of approximation signal and detail signal for all scales remains identical, and the thresholds at different scales are selected according to the noise characteristics. Experimental and engineering results confirm the advantages of RSGW over the other wavelet methods for signal de-noising, and the fault features of bearing inner raceway damage and vibration excited by steam in high-pressure turbine of turbo-generator in time domain are desirably extracted by RS2GW.

Key words: redundant second generation wavelet; de-noising; feature extraction

在机电设备运行过程中, 故障特征信息往往被淹没在噪声背景中, 因此信号降噪是故障诊断领域中的重要课题. 小波阈值降噪^[1]是一种常用的降噪方法, 由于该方法采用下抽样运算会造成重构信号失真, 因此有学者用冗余小波方法进行心电信号的噪声消除^[2], 它不进行下抽样运算即可使消噪后的心电信号能够较好地保持时域特征. 但是, 该方法不

能根据信号特点改变小波函数特性, 且计算量较大.

第 2 代小波是由 Sweldens 博士于 1996 年提出的一种在时域中使用提升方式来构造小波的方法^[3], 它的所有运算在时域中进行, 计算量小, 可以通过设计预测算子和更新算子构造出符合待分析信号特征的小波基函数. 本文以第 2 代小波为基础^[4], 借鉴冗余小波构造方法^[5,6]构造了一种冗余第 2 代

收稿日期: 2004 - 04 - 19. 作者简介: 姜洪开(1972 ~), 男, 博士生; 何正嘉(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50335030); 国家自然科学基金资助项目(50175087; 50305012).

小波方法.该方法与第 2 代小波^[2]的不同之处在于不将原始信号划分为奇、偶序列(剖分运算),而是通过插值运算来构造不同分解层上的预测算子和更新算子,直接对逼近信号进行对称预测和更新,且信号的数据长度保持不变.将冗余第 2 代小波应用于实验和工程振动信号的降噪处理中,结果表明该方法的降噪效果优于其他类型的小波方法,能有效去除信号中的噪声,并成功地提取出了滚动轴承内圈剥落和汽轮发电机组高压缸蒸汽激振的时域故障特征.

1 第 2 代小波

第 2 代小波的分解过程由剖分、预测和更新组成^[3].假设一个信号序列为 X ,剖分是将信号分成奇样本 X_o 和偶样本 X_e ,用 X_e 预测 X_o ,把得到的估计误差定义为细节信号

$$d = X_o - P(X_e) \tag{1}$$

用 d 更新 X_e ,得到逼近信号

$$c = X_e + U(d) \tag{2}$$

式中: P 为预测算子; U 为更新算子.

第 2 代小波的重构过程为分解过程的逆过程,可直接由分解过程得到.

2 冗余第 2 代小波的构造

2.1.1 预测和更新算子的构造算法

P^l 和 U^l 分别表示第 l 层的预测算子和更新算子. P^l 和 U^l (l 为冗余第 2 代小波的分解层数)的构造是冗余第 2 代小波构造的重要组成部分,它包括时初始预测算子 P^0 和初始更新算子 U^0 的计算,以及第 l 层 U^0 的 P^l 和 U^l 构造.

21111 初始预测算子和初始更新算子的计算 P^0 通过如下算法^[7]获得

$$VP^0 = \tag{3}$$

$$P^0 = [p_1^0, p_2^0, \dots, p_M^0], \quad = [1, 0, \dots, 0]^T$$

U^0 可通过以下计算获得

$$WQU^0 = \tag{4}$$

$$U^0 = [u_1^0, u_2^0, \dots, u_M^0]^T$$

式中: V 、 W 、 Q 分别为 Vandermonde 矩阵.

21112 第 l 层预测算子和更新算子的构造 P^l 和 U^l 是在 P^0 和 U^0 的基础上,通过对其系数进行插值补 0 运算获得,其构造算法为:由 P^0 和 U^0 的计算得到其预测系数和提升系数的序列分别为 p_i^0 和 u_i^0 , $i = 1, 2, \dots, N$. 对 p_i^0 和 u_i^0 进行插值补 0 运算,得到 P^l 和 U^l 的系数分别为 $l'p_i^0$ 和 $l'u_i^0$, l 为插值补 0 算

子,即 $p_{2^l i}^l = p_i^0$, $p_j^l = 0$ (j 取值不等于 2^l 的整数倍), $u_{2^l i}^l = u_i^0$, $u_j^l = 0$ (j 取值不等于 2^l 的整数倍), P^l 、 P^{l-1} 和 U^l 、 U^{l-1} 的关系如图 1 所示.

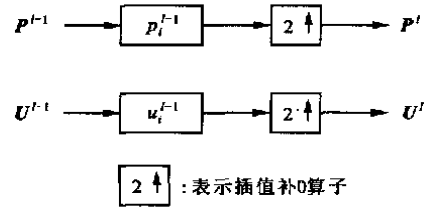


图 1 P^l 和 U^l 的插值补 0 过程

2.1.2 冗余第 2 代小波的分解与重构

本文构造的冗余第 2 代小波方法,去掉了第 2 代小波中对信号序列进行剖分的过程,利用前面计算得到的预测算子和更新算子直接对原信号序列进行预测和更新运算.冗余第 2 代小波的分解过程为,设原始信号序列为 s ,令 $c_0 = s$,则信号的冗余第 2 代小波的分解过程为

$$\left. \begin{aligned} d_{l+1} &= c_l - P^l c_l \\ c_{l+1} &= c_l + U^l d_{l+1} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: c_l 、 d_l 分别为每次冗余第 2 代小波分解后得到的逼近信号和细节信号, c_l 和 d_l 均与原信号的序列长度相同.

冗余第 2 代小波的重构过程可直接由分解过程得到,在第 j 次重构时,设经过反更新运算后得到的信号为 $R_u^j(c_{l+1}, d_{l+1})$,经过反预测运算后得到的信号为 $R_p^j(c_{l+1}, d_{l+1})$,即

$$\left. \begin{aligned} R_u^j(c_{l+1}, d_{l+1}) &= c_{l+1} - U^l d_{l+1} \\ R_p^j(c_{l+1}, d_{l+1}) &= d_{l+1} + P^l c_l \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

则经过冗余第 2 代小波重构后,得到的重构信号为

$$c_j = \frac{1}{2} [R_u^j(c_{l+1}, d_{l+1}) + R_p^j(c_{l+1}, d_{l+1})] \tag{7}$$

3 降噪阈值选择

对含噪声信号,一般采用 Donoho 的阈值降噪法进行滤波^[8].对分解得到的每层细节信号进行噪声方差估计,得到噪声的标准差 σ_j ,然后确定各层细节信号降噪阈值门限 t_j ,对各层细节信号分别进行软阈值或硬阈值处理,而各层的逼近信号保持不变,然后再通过重构得到原信号.

Donoho 的阈值是随数据长度变化的,当数据长时,得到的 t_j 就会过大,当数据较短时,得到的 t_j 就会过小,此时降噪效果不理想.本文采用硬阈值方法进行信

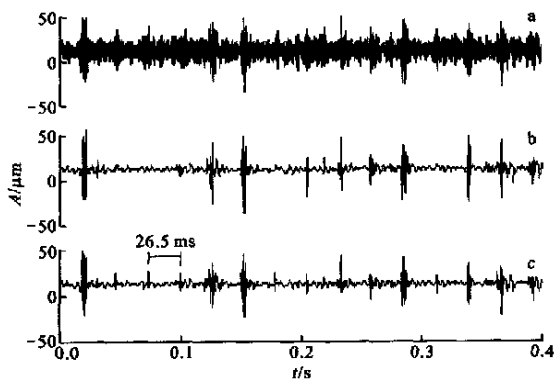
号降噪,并用以下方法进行降噪阈值选择^[9]: $t_j = c_j$,其中 c 是一常数, c 可以根据信号的种类和噪声强度的不同进行选择, c 的取值范围一般为215~315.

4 实验信号分析

实验信号是从轴承实验台上采集的滚动轴承振动加速度信号,轴承型号为NSK308,节圆直径为65 mm,滚子直径为15 mm,共8个.滚动轴承设置的故障状态为轴承内圈剥落,轴的转速为460 r/min(转速为7167 Hz).由于损伤冲击作用会诱发轴承系统的高频固有振动成分,因此采样频率设为20 kHz,经计算得到滚动轴承内圈剥落故障特征频率为37174 Hz.图2中的曲线a为滚动轴承内圈剥落故障振动信号的时域波形,在振动信号的时域波形中,存在着强大的背景噪声,而滚动轴承的振动特征信息不明显,对轴承故障振动信号分别进行第2代小波和冗余第2代小波的4层分解和重构,并取 $c=311$.图2中的曲线b为振动信号用第2代小波降噪处理后得到的信号,降噪后的信号将噪声滤除了,同时也将滚动轴承的一部分冲击信息当作噪声滤除掉,造成了滚动轴承振动信号特征的丢失.图2中的曲线c为振动信号用本文构造的冗余第2代小波消噪处理后得到的信号,从降噪后信号的时域波形中可以清楚地看出,每隔2615 ms就会出现一个冲击信号,其频率为37174 Hz,与计算得到的滚动轴承内圈剥落故障特征频率相符.可见,用本文构造的冗余第2代小波方法能够从强噪声背景中将冲击信号提取出来.

5 工程应用实例

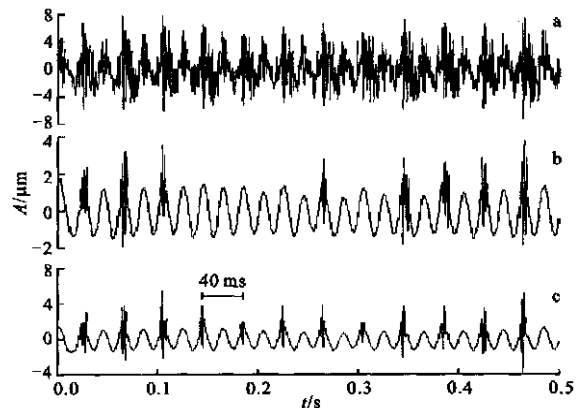
某热电厂一台由高压缸、低压缸、发电机和励磁



a: 滚动轴承内圈剥落振动信号; b: 第2代小波降噪后的信号; c: 冗余第2代小波降噪后的信号;
A: 信号的幅值; t: 信号的时间

图2 用不同第2代小波方法降噪后的信号

机组组成的50 MW汽轮发电机组,其额定转速为3 000 r/min(50 Hz),该机组经过大修后在运行时发现高压缸轴瓦的振动量很大,出现振动超标.为了查清故障的原因,在高压缸2号轴承座垂直方向用振动加速度传感器以2 kHz的采样频率采集振动信号,数据长度为1 024,此时高压缸的抽气量为54 t/h,得到的信号见图3中的曲线a.可以看出,在振动信号中有冲击信号存在,但由于强噪声的干扰,振动信号的时域信息特征不明显.对轴瓦振动信号分别用经典冗余小波和冗余第2代小波进行4层分解和重构,并取 $c=219$,选取db5作为小波函数,第2代小波取具有相同消失矩的预测算子和更新算子.图3中的曲线b和曲线c分别为用冗余小波和本文构造的冗余第2代小波方法对振动信号降噪后的信



a: 高压缸2号轴瓦振动信号; b: 冗余小波降噪后的信号; c: 冗余第2代小波降噪后的信号

A: 信号的幅值; t: 信号的时间

图3 用不同小波方法降噪后的信号

号时域波形,用2种方法降噪后的工频振动信号特征都得到了较好保留,但是冗余小波没能将表征故障特征的冲击信号全部提取出来.本文的冗余第2代小波方法不仅能够将表征故障特征的冲击信号全部提取出来,而且将冲击信号出现的时刻和位置也清楚地显现出来了.冲击信号是等间隔出现的,每隔40 ms出现一次,频率为25 Hz,刚好为工频50 Hz的一半,并且冲击信号每隔一个工频周期出现的位置刚好位于工频振动的峰值位置上.可见,25 Hz冲击信号的出现是造成高压缸轴瓦振动量增大的原因.对5号机组轴系进一步查实,得到其一阶临界转速为1 470 r/min,一阶临界频率为2415 Hz.可见,25 Hz冲击信号的频率略高于一阶临界转速,证明汽轮发电机组高压缸发生了蒸汽激振^[10].

(下转第1164页)

- dimethyl ether [J]. *Fluids Phase Equilibria*, 2000, 174 (1): 3 - 12.
- [11] Boublik T, Fried V, Hala E. The vapor pressures of pure substances [M]. 2nd ed. New York: Elsevier, 1984.
- [12] McGarry J. Correlation and prediction of the vapor pressures of pure liquids over large pressure ranges [J]. In *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1983, 22(2): 313 - 322.
- [13] Maass B O, Boomer E H. Vapor densities at low pressures and over an extended temperature range, I: the properties of ethylene oxide compared to oxygen compounds of similar molecular weight [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1922, 44(8): 1 709 - 1 728.
- [14] 吴江涛. 高精度流体热物性测试实验系统的研制及二甲醚热物理性质的研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2003.
- [15] Wu J T, Liu Z G, Wang B, et al. Measurements of critical parameters and saturated densities of dimethyl ether [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2004, 49(3): 704 - 708.
- [16] Wu J T, Liu Z G, Pan J, et al. Vapor pressure measurements of dimethyl ether from 233 to 399 K [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2004, 49(1): 32 - 34.
- [17] 吴江涛, 刘志刚, 潘江, 等. 293~347 K温度区间二甲醚饱和蒸气压的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2003, 37(3): 252 - 255.
- [18] Wu J T, Liu Z G, Wang F K, et al. Surface tension of dimethyl ether from 213 to 368 K [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2003, 48(6): 1 571 - 1 573.
- [19] Wu J T, Liu Z G, Bi S S, et al. Viscosity of saturated liquid dimethyl ether from 227 to 343 K [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2003, 48(2): 426 - 429.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 1142 页)

6 结 论

(1) 在第 2 代小波的基础上,构造了一种冗余第 2 代小波方法. 根据待分析信号的特点来计算初始预测算子和更新算子,通过插值补 0 运算,获得了不同分解层的预测算子和更新算子. 采用新算子直接对信号进行对称预测和更新运算,可使逼近和细节信号的数据长度保持不变.

(2) 根据不同的分解层细节信号噪声特点,选择相应的细节信号阈值门限,采用硬阈值可以对信号进行消噪和恢复.

(3) 实验信号分析表明,本文构造的冗余第 2 代小波方法能够从强噪声背景中提取出滚动轴承内圈剥落的故障特征信息.

(4) 将本文方法应用于对汽轮发电机组高压缸的故障分析中,可成功地提取出表征高压缸蒸汽激振故障特征冲击信号的出现时刻和位置.

参考文献:

- [1] Coifman R R, Donoho D L. Translation - invariant denoising wavelet and statistics [M]. Berlin: Springer Verlag, 1995: 1125 - 150.
- [2] 高清维,李海鹰,庄镇泉,等. 基于平稳小波变换的心脏信号噪声消除方法 [J]. *电子学报*, 2003, 31(2): 238 - 240.
- [3] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets [J]. *SIAM J Math Anal*, 1996, 29(2): 511 - 546.
- [4] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transform into lifting steps [J]. *J Math Anal Appl*, 1998, 4(3): 247 - 269.
- [5] Nason G P, Silverman B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications in wavelet and statistics lecture notes in statistics [M]. Berlin: Springer Verlag, 1995: 281 - 299.
- [6] Uytterhoeven G. Wavelets: software and applications [D]. Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 1999.
- [7] Stepin J, Zielinski T, Rumian R. Image denoising using scale adaptive lifting schemes [A]. *IEEE Signal Processing Society ICIP 2000* [C]. Vancouver: IEEE Computer Society, 2000: 1228 - 291.
- [8] Donoho D L. Denoising by soft thresholding [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1995, 41(3): 613 - 627.
- [9] Pan Quan, Zhang Lei, Dai Guanzhong. Two denoising methods by wavelet transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(12): 3 401 - 3 406.
- [10] 何正嘉, 訾艳阳, 孟庆丰, 等. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 100 - 105.

(编辑 管咏梅)