

一种新型改进阈值函数的第二代小波降噪方法

赵 鹏¹, 孙 斌², 刘天栋²

(1. 华北电力大学 能源与动力学院, 北京 102206; 2. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 132012)

摘 要: 为了有效去除机械故障信号中含有的噪声并提取故障特征, 在小波阈值降噪的基础上, 提出了一种新型改进阈值函数的第二代小波降噪方法。该方法是利用第二代小波对信号进行分解, 采用新型改进阈值函数对分解信号的小波系数做阈值处理, 同时引入基于类可分离性测度的降噪评价准则, 实现对复杂振动信号降噪效果的评价。将所提出的方法应用于仿真信号和实测信号的分析与评价, 结果表明: 该方法融合了第二代小波和改进阈值函数的优点, 能更好地消除噪声。

关 键 词: 振动信号; 第二代小波; 阈值函数; 阈值降噪; 类可分离性

中图分类号: TH 113.1; TK268 文献标识码: A

引 言

在信号降噪领域采用较多的是小波降噪方法, 其原理是选取一个小波基函数, 通过伸缩和平移运算来实现信号的多尺度分解, 对每一尺度上的高频系数做软、硬阈值处理, 重构得到降噪信号。由于不同的尺度上逼近信号不同, 当小波基函数与各个尺度逼近信号的局部特征不能很好地匹配时, 就会产生较小的细节信号, 阈值处理时大量的细节信号被当作噪声滤除, 使降噪信号丢失了部分有用信息^[1]。对信号做阈值处理时, 硬阈值函数降噪得到的小波估计系数连续性差, 重构信号会引起震荡, 而软阈值函数降噪得到的小波估计系数虽然连续性好, 但和真实小波系数之间存在一定偏差, 重构信号的精度较差。

目前, 第二代小波和在软、硬阈值函数基础上提出的改进阈值函数是信号降噪领域研究的热点。由 Sweldens 提出的第二代小波变换 (Second generation wavelet transform, SGWVT) 是一种基于时域运算的信号分析方法^[2]。相对于传统小波, 第二代小波具有不依赖于傅里叶变换, 构造方法灵活, 占用内存少, 计算速度更快, 计算方法更方便等优点^[3], 更适

合复杂信号的在线处理^[4]。现已证明, 第二代小波可以由第一代小波和一定的提升方案来实现。而针对软、硬阈值函数的缺点和不足, 国内外学者提出了一些解决方案和改进方法, 如多项式插值法、软硬折中阈值法, 最大似然估计法等。文献 [5] 提出的双变量小波阈值函数法较其它改进方法有更好的降噪效果。

本研究提出第二代小波与双变量改进阈值函数相结合的信号降噪方法。通过对仿真信号和实测故障振动信号降噪结果分析比较, 验证了第二代小波双变量改进阈值函数在信号降噪过程中的可行性和有效性。

1 提升模式与第二代小波变换

提升模式是构造第二代小波的常用方法^[6]。设数据序列为 ξ 基于提升模式的第二代小波变换的分解过程为:

(1) 分裂。将信号 ξ 分裂成为两个互不相交的子集 ξ_{-1} 和 ξ_{+1} , 通常将一个数列分为偶数序列和奇数序列, 即:

$$\text{split}(\xi) = (\text{even}_{\xi_{-1}}, \text{odd}_{\xi_{+1}}) = (\xi_{-1}, \xi_{+1}) \quad (1)$$

(2) 预测。用 ξ_{-1} 去预测 ξ_{+1} , 采用一个与数据结构无关的预测算子 P 使得 $\hat{\xi}_{+1} = P(\xi_{-1})$, 用预测偏差来代替 ξ_{+1} , 预测过程为:

$$\hat{\xi}_{+1} = \text{odd}_{\xi_{+1}} - P(\text{even}_{\xi_{-1}}) = \xi_{+1} - P(\xi_{-1}) \quad (2)$$

(3) 更新。由于分裂过程产生的系数子集 ξ_{-1} 的某些性质并不和原始数据一致, 需要采取更新过程。设 U 为更新器, 更新过程为:

$$\hat{\xi}_{-1} = \text{even}_{\xi_{-1}} + U(\hat{\xi}_{+1}) = \xi_{-1} + U(\hat{\xi}_{+1}) \quad (3)$$

对更新后的数据子集 $\hat{\xi}_{-1}$ 进行相同的分裂、预测和更新, 即 $\hat{\xi}_{-1}$ 分解成 $\hat{\xi}_{-2}$ 和 $\hat{\xi}_{-1,2}$ 。经过 n 次分解后, 原始信号 ξ 可分解为低频部分 $\hat{\xi}_{-n}$ 以及高频部分 $\{\hat{\xi}_{-n,1}, \dots, \hat{\xi}_{-1,1}\}$ 。

重构过程认为是分解过程的逆过程, 即:

$$\xi_1 = \xi_1 - U(d_1) \quad (4)$$

$$d_1 = d_1 + P(\xi_1) \quad (5)$$

把偶数序列 ξ_1 和奇数序列 d_1 拼接成原始数据序列, 即:

$$\xi = \text{merge}(\xi_1, d_1) \quad (6)$$

第二代小波变换与传统小波的区别是: 不再采用 Fourier 变换构造小波, 运算在时域进行, 但可以获得同样的时频局部化特性。并且不论 P 和 U 如何选择, 小波变换可以完全重构。小波函数和尺度函数特性由 P 和 U 确定^[7]。本研究采用 db4 小波与其提升方案构造的第二代小波对信号进行降噪处理。

2 小波阈值函数降噪理论

小波降噪是一种较好的降噪方法。小波阈值降噪理论主要基于对小波系数设置阈值^[8~11], 在小波系数处理过程中, 把绝对值较小的系数置为零, 让绝对值较大的系数保留或收缩, 然后对阈值处理后的系数进行小波逆变换, 对信号进行重构, 达到降噪目的。

2.1 传统阈值函数

硬阈值函数表达式为:

$$y(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq T \\ 0, & |x| < T \end{cases} \quad (7)$$

硬阈值函数是将小波分解系数绝对值小于设定阈值 T 的部分变为零, 将绝对值大于设定阈值 T 的部分予以保留。

软阈值函数表达式为:

$$y(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x) (|x| - T), & |x| \geq T \\ 0, & |x| < T \end{cases} \quad (8)$$

软阈值函数是将小波分解系数绝对值小于设定阈值 T 的部分变为零, 将绝对值大于设定阈值 T 的部分做平移收缩处理。

2.2 小波阈值函数改进方法

在软、硬阈值函数的基础上发展起的阈值函数改进方法主要有以下 4 种。

改进阈值函数一为^[12]:

$$y(x) = \begin{cases} x - T / e^{\frac{x-T}{n}}, & \geq T \\ 0, & |x| < T \\ x + T / e^{\frac{-x-T}{n}}, & \leq -T \end{cases} \quad (9)$$

式中: n—任意正常数。当 $n \rightarrow \infty$ 时, 函数为软阈值

函数; 当 $n \rightarrow 0$ 时, 函数为硬阈值函数。新阈值函数是介于软硬阈值之间的一个灵活的选择, 通过改变 n 的取值, 得到有效的阈值函数。图 1 为在 $n=5$ 时改进阈值函数一示意图。

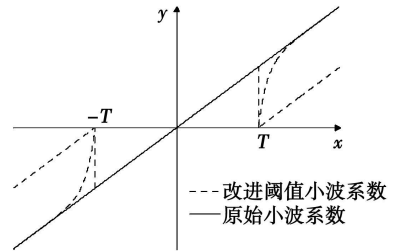


图 1 改进阈值函数一

改进阈值函数二为^[13]:

$$y(x) = \begin{cases} x - \alpha T + 2\alpha T / (1 + e^{\frac{x-T}{n}}), & |x| \geq T \\ 0, & |x| < T \end{cases} \quad (10)$$

式中: α —可变参数, $\alpha \in [0, 1]$ 。 $\alpha=0$ 时, 函数为硬阈值函数; $\alpha=1$ 时, 函数为软阈值函数。改变 α 值可使阈值函数在软、硬阈值函数之间变动, 是一种软硬折中的阈值函数。图 2 为在 $\alpha=0.5$ 时改进阈值函数二示意图。

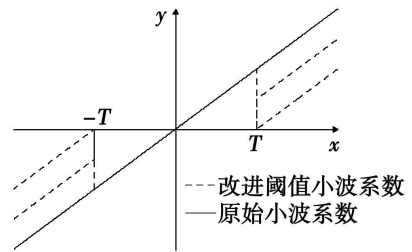


图 2 改进阈值函数二

改进阈值函数三为^[14]:

$$y(x) = \begin{cases} x + T - T / (2\beta + 1), & \leq -T \\ x^{\beta+1} / (2\beta + 1) T^{\beta}, & |x| < T \\ x - T + T / (2\beta + 1), & \geq T \end{cases} \quad (11)$$

式中: β —可变参数, 调节 β 可以调节函数的阶次。当 $\beta=0$ 时, 函数等于原始信号; 当 $\beta \rightarrow +\infty$ 时, 函数等于软阈值函数。图 3 为在 $\beta=1$ 时改进阈值函数三示意图。

改进阈值函数四为^[9]:

$$y(x) = \begin{cases} x - T + \text{karc tan}(bT^{\beta+1}), & \geq T \\ \text{karc tan}(bx^{\beta+1}), & |x| < T \\ x + T - \text{karc tan}(bT^{\beta+1}), & \leq -T \end{cases} \quad (12)$$

其中, $b = \frac{2^{a+1} + m \sqrt{(2^{a+1})^2 - \pi^2}}{\pi \Gamma^{2^{a+1}}}$; $k = \frac{1 + (b \Gamma^{2^{a+1}})^2}{(2^{a+1}) b \Gamma^{2^a}}$; $a > 0$ 且为整数; $m \in [-1, 1]$, a 和 m 是可变参数。

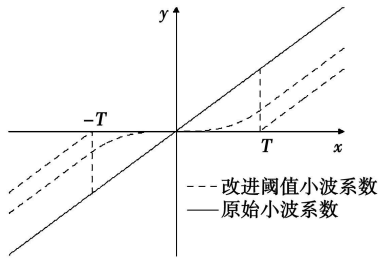


图 3 改进阈值函数三

改进阈值函数四是具有一阶连续导数的阈值函数,它在有用信号和噪声之间有一平滑过渡区。 $m = -1$ 时阈值函数可视为软阈值函数的修正,当 $a \rightarrow \infty$ 时等效为软阈值函数; $m=1$ 时阈值可视为硬阈值的修正,当 $a \rightarrow \infty$ 时,等效为硬阈值函数。图 4 为 $a = 2 \beta = 0.5$ 时改进阈值函数四示意图。

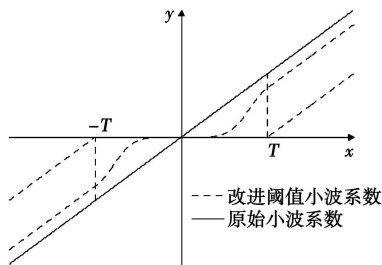


图 4 改进阈值函数四

这 4 种改进阈值函数都具有可变参数,改进阈值的降噪效果随参数的不同而不同。

3 仿真信号处理

选择典型 Doppler 仿真信号进行降噪来测试传统小波和第二代小波软、硬阈值函数以及 4 种改进阈值函数的降噪效果。4 种改进阈值函数的可变参数分别为: $n=3 \alpha=0.2 \beta=1$ 和 $a=5 m=0.2$

加入噪声的仿真信号信噪比 SNR 为 16.7137 均方差为 1.0356 加入高斯噪声,数据长度为 1024 点。采用传统小波与第二代小波对测试信号进行 5 层分解,对每层的小波分解系数分别用软、硬阈值函数和 4 种改进阈值函数进行阈值处理,重构得到降

噪信号。降噪小波选用 db4 小波以及 db4 的第二代小波。降噪效果如图 5 所示。限于篇幅,仅列出传统小波软阈值函数和改进阈值函数四及第二代小波的 4 种改进阈值函数的降噪效果图。

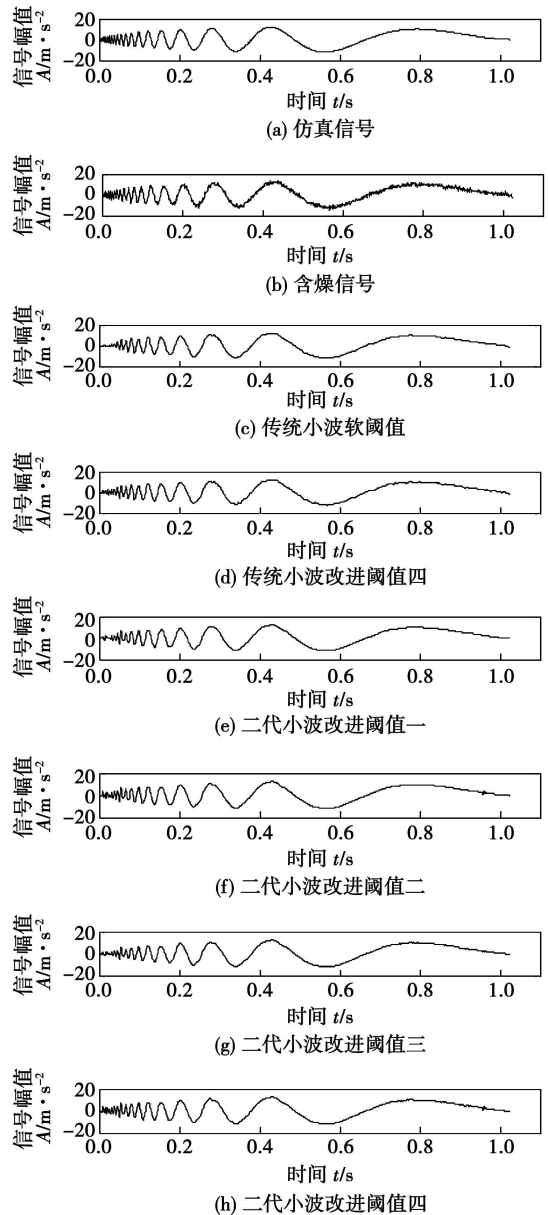


图 5 降噪效果比较

引入信噪比 S 和均方差 σ 对降噪效果进行评价^[15]:

$$S = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^L \bar{x}_i^2}{\sum_{i=1}^L (x_i - x'_i)^2} \right] \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (x_i - x'_i)^2} \quad (14)$$

式中: \bar{x}_i —不含噪声的仿真信号的采样值; x'_i —降噪处理后的信号在 i 时刻的值; L —信号长度。 S 越大, σ 越小降噪效果越好。评价结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看到, 采用基于双变量的第二代小波改进阈值函数四降噪后的信号有最大的信噪比 (23.1934) 和最小的均方差 (0.4911), 说明其降噪效果最好。

表 1 DOPPLE 测试信号的降噪效果比较

小波	阈值函数	信噪比 S	均方差 σ
传统 db4 小波	软阈值函数	21.3358	0.6083
	硬阈值函数	22.0698	0.5595
	改进阈值函数一	22.3274	0.5426
	改进阈值函数二	22.2097	0.5500
db4 提升小波	改进阈值函数三	22.4126	0.5373
	改进阈值函数四	22.7406	0.5147
	软阈值函数	19.3026	0.7687
	硬阈值函数	22.4216	0.5368
小波	改进阈值函数一	22.3829	0.5392
	改进阈值函数二	22.5953	0.5262
	改进阈值函数三	21.5717	0.5920
	改进阈值函数四	23.1934	0.4911

4 在旋转机械故障信号处理中的应用

实验装置主要包括转子振动试验台、ZXP-4A 型数字测振仪主机、DASP 信号采集器和振动传感器以及键相传感器等。通过汽轮机转子振动试验台制造故障模拟转子故障信号, 使用数字测振仪主机处理由光电传感器接收主轴头的反光带的光信号来测定转速, 采用电涡流传感器将轴振动信号转化为电信号, 由 DASP 信号采集器采集, 通过配套软件再转为振动信号。模拟 4 种转子故障, 包括转子不平衡、不对中、径向摩擦和轴承座松动。实验中转子转速为 1000 r/min 采用空间同步采样^[16], 采样频率为 300 Hz 采样点数 n 为 1024 点, 对每种故障各选取 25 组信号, 采用 4 种阈值函数对获取的振动信号进行降噪处理。小波仍然选用 db4 的二代小波, 4 种改进阈值函数的参数设置分别为: $n=5, \alpha=0.2, \beta=1$ 和 $a=3, m=0.43$ 。

4.1 类可分离性降噪效果量化评价

对于仿真信号, 可以用信噪比、峰值误差等指标来定量评价降噪效果, 然后比较降噪前后的信噪比等指标, 是验证降噪效果的常用作法^[17]。转子振动故障信号属于复杂信号, 对其仿真比较困难, 只能对实测的含噪信号进行处理。

对故障信号降噪的目的是为了提高信号的信噪比, 抑制波形失真, 使所提取特征的可分离性更好, 更容易分类。因此, 引入状态特征类的可分离性来评价降噪效果, 采用 Fisher 标准判别率 F 作为类可分离性的度量^[18]:

$$F = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (15)$$

式中: μ_1, μ_2 —两状态类某特征的均值; σ_1^2, σ_2^2 —方差。

采用故障信号降噪前与第二代小波软、硬阈值和 4 种改进阈值函数降噪后提取的状态特征类的可分离性来评价降噪效果。

4.2 数据处理和结果分析

对 4 种汽轮机转子测试故障振动信号分别用第二代小波软、硬阈值函数和 4 种改进阈值函数降噪。选择可以反映故障信号的时间序列分布情况的特征参数做类可分离性度量^[19], 对降噪前后的故障信号进行比较的特征参数包括: 波形指标、峰值指标、脉冲指标、偏度指标、峭度指标和裕度指标。

类可分离性降噪效果的量化评价过程可描述为:

假设故障振动信号经降噪后的数据集为 $\{Q_{p,c,n}, m=1, 2, \dots, M_c; c=1, 2, \dots, C; n=1, 2, \dots, N\}$ 。 $Q_{p,c,n}$ 是经第 n 个降噪函数降噪后的第 c 类的第 m 个样本; M_c 是第 c 类的样本总数, 值为 25; C 是故障类别总数, 值为 4; N 是降噪方法总数, 值为 6。

(1) 对所有降噪后的 $Q_{p,c,n}$ 分别进行 6 个特征参数提取, 对第 n 个降噪方法降噪的 $Q_{p,c,n}$ 提取第 j ($j=1, 2, \dots, 6$) 个特征参数, 得到提取后的特征参数 $P_{p,c,n,j}$;

(2) 求 $P_{p,c,n,j}$ 的第 C 类第 j 个特征参数的 m 个样本的均值 $U_{p,j}$ 和方差 $\sigma_{c,p,j}^2$;

(3) 采用 Fisher 标准判别率对 C 类中任意两个不同类故障的第 j 个特征参数作类可分离性的度量, 将结果线性平均, 得类可分离性的度量:

$$F_{p,j} = \frac{2}{C \times (C-1)} \cdot \sum_{c=1}^C \frac{|U_{p,j} - U_{c,p,j}|}{\sqrt{\sigma_{c,p,j}^2 + \sigma_{c',p,j}^2}} \quad (c, c' \in 1, 2, \dots, C; c \neq c') \quad (16)$$

(4) 按照以上步骤算出降噪前的 6 个特征参数的类可分离性的度量 F_p 并与 N 个降噪方法降噪后的 $\times N$ 个特征参数的类可分离性的度量 F_p 进行降噪效果的评价。

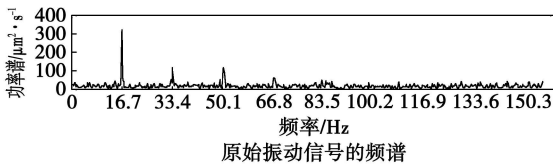
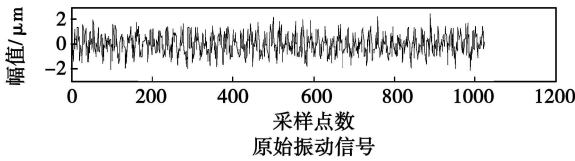
由 Fisher 标准判别率比较的不同方法降噪效果如表 2 所示。

由表 2 可知,采用第二代小波改进阈值函数四(即双变量阈值函数)对信号降噪以后,特征参数的 Fisher 标准判别率较降噪前和其它降噪方法提高明

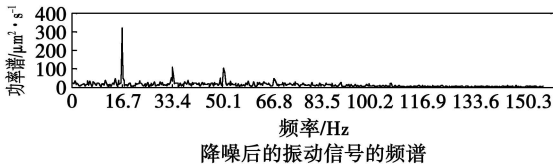
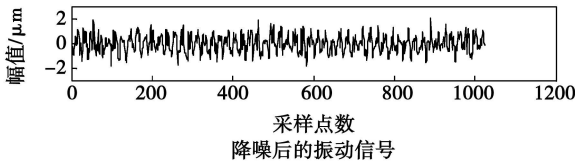
显,说明第二代小波改进阈值函数四能更好的抑制波形失真,提高了特征之间的可分离性,有效消除信号噪声。

表 2 转子振动信号特征的测试结果

特征参数	降噪前	软阈值	硬阈值	改进阈值一	改进阈值二	改进阈值三	改进阈值四
波形指标	0.5344	0.6220	0.8104	1.6057	1.4441	1.3381	2.3344
峰值指标	0.5741	0.6450	0.6263	0.6495	0.6903	0.6468	0.6958
脉冲指标	0.2870	0.3408	0.6350	0.6317	0.7187	0.6121	0.7978
偏度指标	0.1027	0.1384	0.1406	0.1398	0.1507	0.1608	0.2283
峭度指标	0.1097	0.1439	0.1811	0.1110	0.1589	0.1144	0.2004
裕度指标	0.1053	0.1344	0.3466	0.4909	0.6490	0.4050	0.9177



(a) 原信号和信号频谱



(b) 改进阈值函数四降噪后的信号和信号频谱

图 6 实测故障信号降噪效果

选取一组实测故障信号经第二代小波改进阈值函数四降噪,降噪结果如图 6 所示。通过图 6 (a)和 (b)的比较看出,经改进阈值四降噪后的信号中,噪声基本消除,16.7 Hz 的基频以及二次谐波和三次谐波保存完好,降噪后的信号局部特征更加明显,表明本研究提出的基于双变量改进阈值函数的第二代小波能够在全频带内有效地去除噪声,有较好的去噪效果。

5 结论

(1) 第二代小波双变量改进阈值函数降噪方法融合了第二代小波和双变量改进阈值函数的优点,与传统小波相比,降噪后的信号更加平滑,信噪比更高。同时,通过调节两个可变参数,消除了阈值化小波系数偏差,降噪信号更加接近真实信号。

(2) 基于类可分离性的降噪效果评价是一种新的判别准则,通过类之间可分离性大小的比较,为振动信号降噪提供了一个新的量化评价标准。

参考文献:

- [1] 唐贵基,王誉荣,胡爱军,等.基于第二代小波变换的振动信号去噪与故障诊断[J].汽轮机技术,2006,48(4):295-297.
- [2] 段晨东,李凌均,何正嘉.第二代小波变换在旋转机械故障诊断中的应用[J].机械科学与技术,2004,23(2):224-227.
- [3] 何正嘉,管艳阳,张西宁.现代信号处理及工程应用[M].西安:西安交通大学出版社,2007.
- [4] 曹建军,张培林,张英堂,等.基于提升小波包变换的发动机缸盖振动信号特征提取[J].振动与冲击,2008,27(2):34-37.
- [5] 刘卫东,刘尚合,胡小峰,等.小波阈值去噪函数的改进方法分析[J].高压电技术,2007,33(10):59-63.
- [6] SWELDENS W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets[J]. SIAM J Math Anal, 1997, 29(2): 511-546.
- [7] CLAYPOOLE R L, DAVIS G M, SWELDENS W, et al. Nonlinear wavelet transforms for image coding via lifting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(12): 1449-1459.
- [8] 欧阳森,宋正湘,陈得桂,等.小波软阈值去噪技术在电能质量检测中的应用[J].电力系统自动化,2002,26(19):56-60.

- [9] 高 志, 俞啸海. Matlab小波分析工具箱原理与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- [10] 范晓志. 小波变换的信号去噪应用 [J]. 武汉科技大学学报 (自然科学版), 2004 27(3): 286—288
- [11] 刘 刚, 曲梁生. 自适应阈值选择和小波消噪方法的研究 [J]. 信号处理 2002 18(6): 509—512
- [12] 张维强, 宋国乡. 基于一种新的阈值函数的小波域信号去噪 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2004 31(2): 296—299.
- [13] 崔 华, 宋国乡. 基于小波阈值去噪方法的一种改进方案 [J]. 现代电子技术, 2005 28(1): 8—10
- [14] 桂 林, 周 林, 张家祥, 等. MATLAB小波分析高级技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006
- [15] 高立新, 唐文亮, 胥永刚, 等. 基于冗余第二代小波的降噪技术 [J]. 北京工业大学学报, 2008 34(12): 1023—1027
- [16] ALESSANDRO F ROBERTO Q. A low-cost frequency multiplier for synchronous sampling of periodic signals [J]. IEEE Trans On Instrum & Meas 1992 41(2): 577—583
- [17] 曹建军, 张培林, 邵衍振, 等. 提升小波包渐变式阈值选择与量化降噪方法 [J]. 中国机械工程, 2008 19(24): 2991—3023
- [18] SERGDST KONSTANTNOSK 模式识别 [M]. 第 3版. 李晶皎, 王爱侠, 张广渊, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2006
- [19] 雷亚国, 何正嘉, 瞿艳阳. 基于混合智能新模型的故障诊断 [J]. 机械工程学报, 2008 44(7): 112—117.

新技术、新工艺

德国北海的海上风力发电场

据《TheMotorship》2010年5月号报道,德国正在建造可移动的海上应用驳船(MOAB),它是一个自行安装的浮动平台,将被部署在位于北海德国专属经济区的 GlobalTech1风场。

该 MOAB装有变压器和高压配电设备,以便收集并变换由风力涡轮一发电机产生的电力,并输送到德国国家电网。它装有关键的控制系统,用作为在紧急情况下供风场使用的备用电源。

德国的目的在于把从可再生能源产生的电力的百分数在 2020年以前至少提高到 20%,并且在 2050年以前至少提高到 50%。达到此目标的一个主要的要素是进一步开发海上风电部门的装机容量。

GlobalTech1风场将位于德国库克斯港西北约 110 km的北海中,并且将包括 805 MW级风力涡轮一发电机组。当在 2013年全部运行时,该风场每年将能够生产约 14亿 kWh电力,给 100万人提供清洁能源。预期它有助于每年减少 120万 tCO₂排放。

MOAB将为在风场工作的每一个人提供常住的居住舱室,最多可容纳 32人工作居住。通过为输送电能和风场维护功能服务,MOAB有助于增加 GlobalTech1风场运行的可靠性和效率。

预期该驳船将于 2011年第四季度完成并交付使用。

(吉桂明 摘译)

condition for fault diagnosis rules in assigning weights, the demerits existing in subjectively assigning weights were overcome, thereby weakening the influence of uncertainties in the process of fault diagnosis and reasoning. Then the weighted fuzzy logic was used to perform a reasoning of the fault diagnosis rules and identify the fault mode according to the result of the reasoning. The abovementioned method not only fully utilize frequency spectrum characteristics an important fault sign, as a preliminary basis for judging the fault diagnosis but also comprehensively utilize the fault signs in various types which reflect the information of the fault in various aspects, thereby achieving the aim of more accurately identifying a fault. Key words: steam turbine unit, vibration main element analysis, clustering analysis, rough set, weighted fuzzy logic, fault diagnosis

气冷涡轮叶栅流场计算方法及其应用 = Method for Calculating the Flow Field in an Air cooling Turbine Cascade and Its Applications [刊, 汉] ZHOU Hong.ru, GU Zhong.hua, HAN Wan.jin, et al. College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001 // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3), —280~283

Based on the solutions to the three-dimensional Navier-Stokes equation, by using the TVD (total variation diminished) format and division algorithm with a three-order precision and in combination with the free type curved surface complex grid generation technique, developed was an effective method for calculating cold-air mixed and diluted flow fields. A numerical simulation was performed of the flow field in an air cooling turbine with various air jet schemes and the air jet from the leading edge of the blades exercising a relatively small influence on the energy loss of the cascade was pinpointed. The air jet scheme with discrete holes drilled at the top of the blades has a relatively small energy loss and can achieve relatively good air cooling effectiveness. The calculation method developed by the authors can be applicable for calculating complex flow fields mixed and diluted with cold air. Key words: free type curved surface, multi-block grid, air cooling turbine, energy loss

一种新型改进阈值函数的第二代小波降噪方法 = Second-generation Wavelet Noise Reduction Method Based on a New Type Improved Threshold Value Function [刊, 汉] ZHAO Peng (College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206), SUN Bin, LIU Tian.dong (College of Mechanical Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3), —284~289

In order to effectively eliminate the noise contained in mechanical fault signals and extract relevant fault characteristics, on the basis of the noise reduction obtained by wavelet threshold values, presented was a second-generation wavelet noise reduction method based on a new type improved threshold value function. The method in question realized an evaluation of noise reduction effectiveness of complex vibration signals by utilizing the second-generation wavelets to decompose the signals and employing a new type improved threshold value function to perform a thresh-

old value treatment of the wavelet coefficients of the decomposed signals with a criterion for evaluating noise reduction based on measure of quasi separability being introduced. It was used for analyzing and evaluating the simulation signals and actually measured signals. The research results show that the method integrates the merits of the second-generation wavelets and the improved threshold value function, thus capable of better eliminating noise.

Key words: vibration signal; second-generation wavelet; threshold value function; threshold value noise reduction; quasi separability

半开式离心泵内部流场的数值模拟研究 = Numerical Simulation Study of the Flow Field Inside a Semi-open Type Centrifugal Pump [刊, 汉] SHAO Jie ZHANG Guiying (Guohe Electric Power Planning and Designing Institute, Beijing, China, Post Code: 100094), WU Yulin (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 290 ~ 294

The standard $k-\epsilon$, SST (shear stress transport) and DES (detached eddy simulation) three turbulent flow models were used to numerically simulate the flow rate-lift curves and inner flow field of a semi-open type centrifugal pump operating under a small flow rate condition. To verify the simulation result, the two-dimensional PIV (Particle Image Velocimetry) technology was employed to conduct an experiment and measurement of the inner flow field of the pump. It has been found that with respect to the prediction of the flow lift curves of the pump, all the three numerical simulation methods can predict relatively accurately. As for the prediction of the inner flow field, the standard $k-\epsilon$ and SST turbulent flow models can not provide an overall and accurate result while the DES method can relatively accurately predict the details of the inner flow field. Key words: semi-open type centrifugal pump; impeller; PIV (Particle Image Velocimetry) measurement; inner flow detail; turbulent flow model; contrast

离心泵内部非定常数数值模拟与压力脉动研究 = Study of the Non-steady Numerical Simulation and Pressure Pulsation Inside a Centrifugal Pump [刊, 汉] QUAN Liangguo XU Haiying IU Jinxi et al (Jiangsu Zhenhua Pump Industry Manufacturing Co., Ltd., Taizhou, China, Post Code: 225500) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 295 ~ 298

By using the Reynolds number time-average equation and the dual equation turbulent flow model, in combination with the SIMPLEC algorithm, numerically simulated was the three-dimensional non-compressible turbulent flow field inside a centrifugal pump. Furthermore, the internal pressure distribution and pulsations at various monitoring points were obtained. On the basis of the simulation, an outer characteristic experiment was conducted, proving that the simulation results are correct. The research results show that the asymmetry of the volute makes the flow inside the centrifugal pump be of asymmetrical and non-steady characteristics, and force the pressure to change periodically at the frequency of the rotating blades. At the rated flow rate, the pressure fluctuation amplitude at the mo-