

基于小波分析的透平机械 振动故障特征定量识别研究^{*}

侯敬宏, 黄树红, 申, 张燕平

(华中科技大学能源与动力工程学院, 430074, 武汉)

[摘要] 通过对透平机械振动信号的连续小波变换, 利用小波滤波器良好的时频特性, 研究了振动故障信号的统计特征. 在信号的特征提取中引入“灰度矩”, 并把一阶矩作为定量指标. 对8种典型振动故障信号的初步研究表明, 这种方法能够简单有效地提取信号的特征, 区分振动故障.

[关键词] 小波变换, 故障诊断, 信号处理, 特征提取

[中图分类号] TH165.3; [文献标识码] A; [文章编号] 1672-1292(2002)02-0026-04

透平机械是动力系统的关键设备, 其主要故障往往通过振动的形式表现出来. 现有的透平机械振动信号的分析方法大多只是定性指出机组可能存在的故障, 但现实中并不是设备一有隐患就立即停机处理, 而是希望能定量评价故障的危害程度以及发展趋势, 以便科学决策, 从而有效避免“维修不足”和“过剩维修”所带的经济损失.

小波滤波器是一个具有恒Q特性的滤波器, Q为品质因子, 定义为滤波器的中心频率与带宽之比. 因此, 小波滤波器可以随信号频率增高减小时窗宽度, 并相应增加频窗宽度, 即具有“变焦”分析的特性, 故而在信号的时频分析中具有特殊的地位和性能. 从数学上看, 对机械振动信号进行小波分析, 是将一维信号在二维空间进行分解, 使得在一维空间中无法提取的特征在二维空间中得到很好的反映. 从物理上看, 对振动信号进行连续小波变换和分析, 实际上就是将无法从一维时域或者频域中体现的信号特征, 在具有良好滤波器特性的小波时频窗中得以体现, 以获得信号所包含的特征信息^[3]. 利用连续小波分析信号时, 一般用每个尺度下小波能谱图提取信号的定性特征. 这在很大程度上依赖于人的主观判断. 如果要实现自主式的状态诊断, 则必须要提取能反映信号特征的定量指标.

本文引入一种“灰度矩”的统计量, 对8种转子振动故障信号波形经连续小波变换后的系数矩阵进行处理, 提出区分这些故障的定量指标, 对透平机械振动故障诊断提供定量分析依据. 所选取的8种转子振动故障信号为^[2]: 不平衡、不对中、油膜振荡、轴裂纹、支座松动的轴振动信号、支座松动的支座振动信号、碰摩故障的轴振动信号、碰摩故障的支座振动信号. 本文所采用的所有故障信号均为本单位转子模拟试验台的实验数据.

1 连续小波变换

一般所讨论的小波, 是指一个被称之为母小波或基本小波的函数, 经伸缩和平移所产生的函数簇 $\Psi_{a,b}(t)$, 式中 $a > 0$ 是尺度因子, b 反映位移, 其值可正可负. 定义满足“容许条件”^[1]:

$$\int_0^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

的函数 $\Psi(t)$ 为基本小波函数, 简称小波函数.

^{*} 收稿日期: 2002-08-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(50105004).

作者简介: 侯敬宏, 1974-, 华中科技大学能源与动力工程学院硕士研究生, 主要从事动力机械故障诊断方面的研究工作.

若函数 $f(t)$ 是平方可积函数, 即 $\int |f(t)|^2 dt < \infty$, 定义:

$$WT_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt = \langle f(t), \Psi_{ab}(t) \rangle \quad (2)$$

为 $f(t)$ 的小波变换. 上标 * 代表共轭, $\langle x, y \rangle$ 代表内积.

要实现 $WT_x(a, b)$ 所定义的内积, 除少数情况可做解析计算外, 大多数情况只能通过计算机做近似数值计算. 按数字信号处理的习惯可将式(2)变成:

$$WT_x(a, k) = \frac{\Delta T}{\sqrt{a}} \sum_n f(n) \Psi \left[\frac{(n-k)}{a} \right] \quad (3)$$

对每一个固定 a 值, 依次求不同 k 值下的乘积和, 便得到该 a 值下一组 WT 系数. $f(t)$ 如果是 512 个离散点组成的时间序列, 每一个给定的 a 值(尺度), 有 512 个系数值, N 个尺度下经小波变换后便组成一个 $N \times 512$ 的系数矩阵.

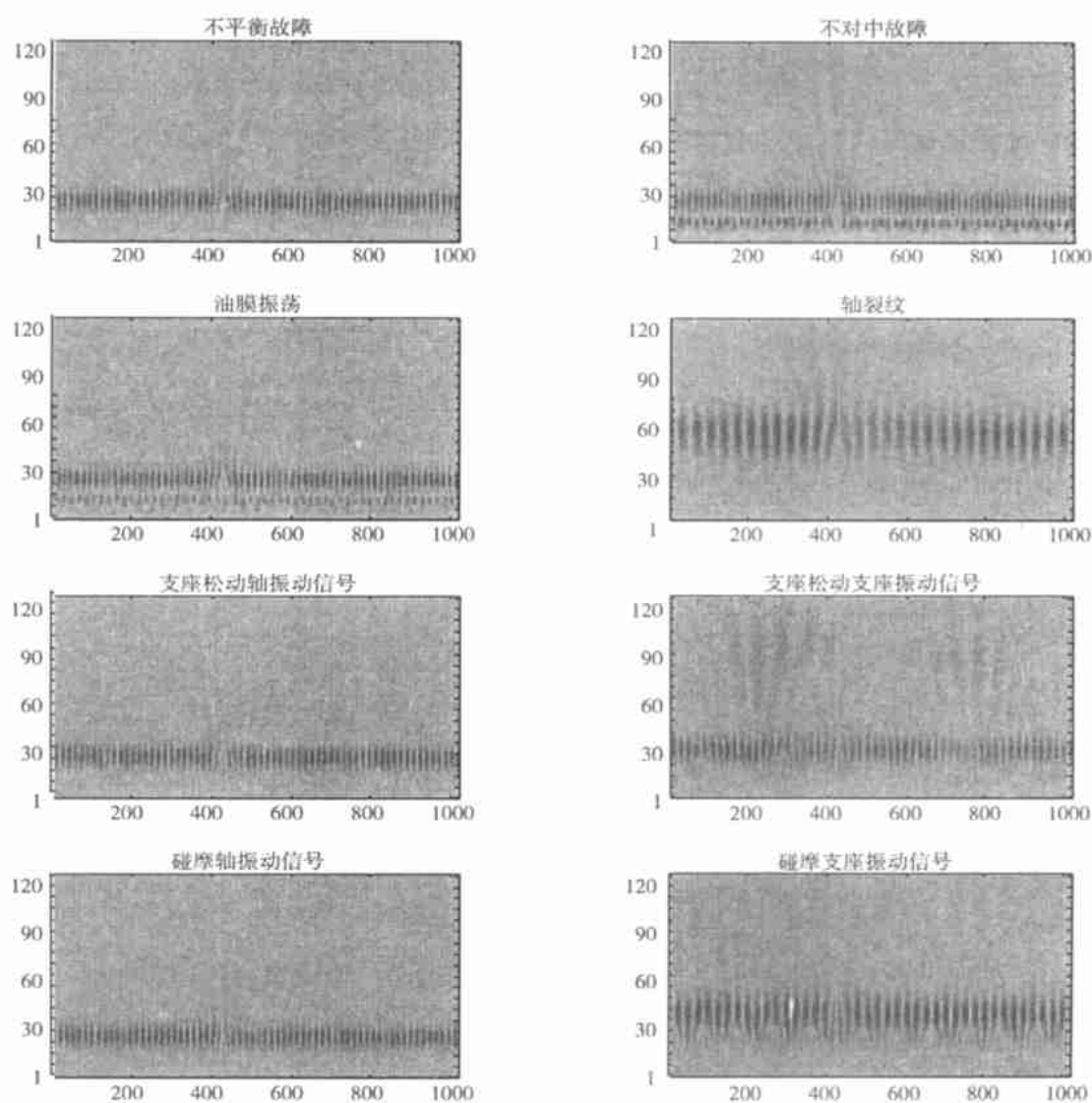


图1 用 morl 小波分析的 8 种振动故障的 128 尺度下的灰度图

2 小波系数矩阵的灰度图和灰度矩

转子振动信号经连续小波变换后的小波系数往往以灰度图的形式呈现出来. 对于透平机械一类的旋转机械来讲, 其振动故障特征周期出现, 小波变换的结果可用灰度图表示, 参见图 1. 显然, 不同故障的灰度图呈明显差异, 即通过灰度图可直观分辨不同的故障. 但实际故障诊断时, 对灰度图的人为判断会存在模糊性和个体差异, 必须找出一种定量指标来区分灰度图之间的总体差异.

本文定义一个 $m \times n$ 矩阵的 k 阶“灰度矩”来定量描述小波灰度图的差异:

$$M_k = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^k \sqrt{(i-1)^2 + (j-1)^2}^2 \tag{4}$$

这里的权值 $\sqrt{(i-1)^2 + (j-1)^2}$ 表示元素 a_{ij} 与 a_{11} 之间的“距离”, 相当于灰度图中某一个像素点与参考点之间的几何长度. (4) 式不直接采用灰度图中的几何距离, 是为了不受灰度图自身几何尺寸的影响.

图 2 是对应 8 种振动故障信号 morl 小波系数矩 M_k 的灰度矩, 其中灰度矩的阶数为 $k=1 \sim 50$. 可以看出, 高阶矩与低阶矩对故障的区分度相差不大, 因此可以采用一阶灰度矩 M_1 来描述故障灰度图的差异, 以减少计算量, 有利于实时故障诊断.

研究表明, 对于长时间内比较稳定的信号, 用 Fourier 分析比较合适. 小波滤波器是一个具有恒 Q 特性的滤波器, 它可以随信号频率增高减小窗宽度, 并相应增加频窗宽度, 即具有“变焦”分析的特性, 能突现局部特性, 并且同时照顾时、频两域. Fourier 变化无法做局部分析, Fourier 是一种纯频率的分析方法, 不具有时域分辨能力. 不平衡类故障, 故障特征明显, 用 FFT 是比较好的. 我们研究小波的目的, 是期望从另一些角度区分旋转机械的多种典型故障, 与其他方法互为补充.

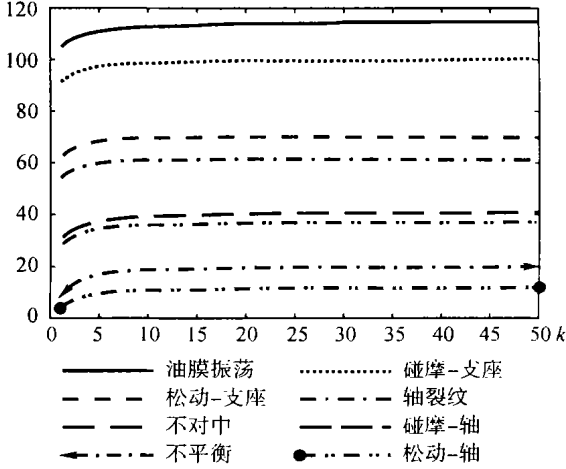


图 2 用 morl 小波分析 8 种故障的 $M_k(k=1 \sim 50)$ 分布

3 故障信号灰度矩 M_1 的处理方法和结果

图 2 同时给出了另外一个结果, 即 morl 小波的灰度矩可以很好地区分 8 种振动故障. 显然, 这对于定量故障诊断是极有吸引力的. 如果能找到几种故障区分性很好的小波, 就有可能从多个角度进行定量故障诊断, 减少由于信号畸变而导致某一个小波灰度矩不稳定造成的误诊断. 为此, 本文进行了以下工作:

对采集到的振动故障信号(假设由 512 个离散点组成)进行归一化处理, 若处理后的序列为 $\{x_1, x_2, \dots, x_{512}\}$, 有 $\sum_{i=1}^{512} x_i^2 = 1$ 成立;

- (1) 选择 8 种常用的连续小波 db4、sym3、coif4、bior6. 8、rbio6. 8、dmey、meyr、morl 分别对每一种故障进行 N 尺度连续小波变换, 得到小波系数矩阵 coefs ($N \times 512$ 矩阵), 本文采用 MATLAB 进行计算;
- (2) 对小波系数求绝对值;
- (3) 依公式(4)求得 coefs 矩阵的 1 阶“灰度矩” M_1 .

之所以对故障信号进行归一化处理, 是因为故障的原始波形振幅差异较大, 经归一化处理以后, 相

当于在保证能量守恒的前提下,把不同波形限制在一定的范围内,增强不同波形之间的可比性,使研究的结果具有普遍意义。

如果以 8 种小波为横轴, M_1 的大小为纵轴,把每一种故障的 8 个 M_1 用线连起来,便得到对应故障的灰度矩分布线。图 3 是 64 尺度的灰度矩分布线。

由图 3 可以看出,8 种故障被灰度矩分布线很好的区分开了,只有轴裂纹和碰摩-轴 2 种故障基本重合在一起。而且,db4、sym3、dmey、meyr、morl 5 种小波区的分度较好,因此,在以下的分析中,将主要采用 dmey、meyr、morl 3 种小波。

如将分析的尺度再增加 1 倍,变为 128 尺度,且只用 dmey、meyr、morl 小波进行分析,则 M_1 的分布线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,从上到下 8 种故障线的相对位置没有发生改变,说明尺度的变化对灰度矩影响不大,这个结果非常有利于故障识别。

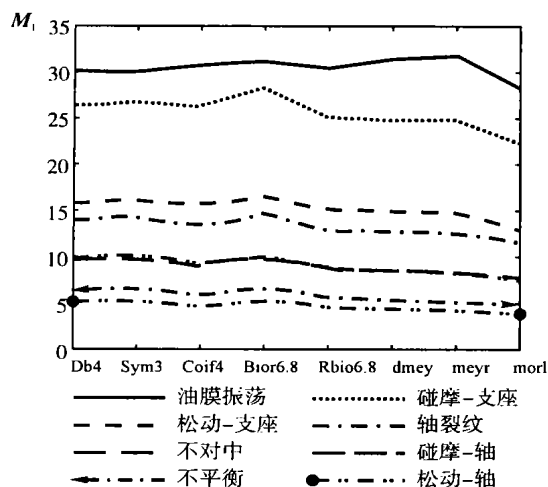


图 3 8 种故障经 3 种小波分析后的 64 尺度 M_1 分布线

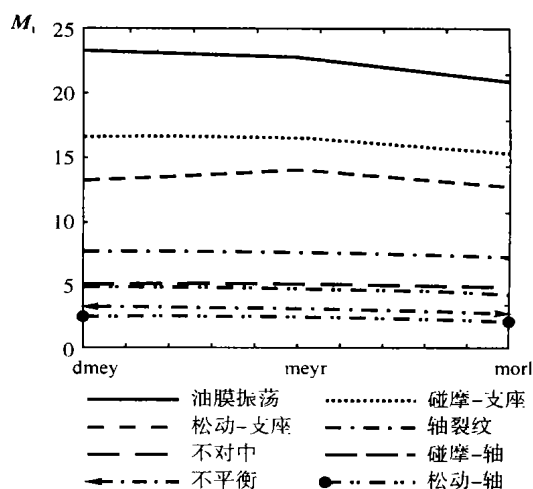


图 4 8 种故障经 3 种小波分析后的 128 尺度 M_1 分布线

通常情况下振动不平衡故障与不对中故障所测得的振动波形特征还是有比较明显的区别,只是肉眼观察时域波形时一般不注意。在频谱分析时,区别更加明显。 M_1 直接来源于小波系数,而小波变换能捕捉到信号细微的变化。但从作者近期的研究成果看,文章所列的几种故障,除了不对中,均可达到有效区分。我们做这个研究的目的是希望能找到若干种诊断方法,从不同的角度对文章中描述的振动故障进行诊断,从而提高诊断的准确性。 M_1 方法是其中的一种。

依照这种思路,若对每种故障多取几组信号,可能得到 M_1 线的分布带区间。在实际应用中,若采集的信号波形的 M_1 线落在某种故障的分布带区间内,则可断定为何种故障。从我们近期的研究和所取得的结果看,灰度矩量值与机组故障之间确有定量变化规律,我们正从信号融合的角度在进行深入研究,可望取得理想的进展。这也是作者拟进一步开展的工作。

4 结语

本文为了对透平机械一类的旋转机械振动故障进行诊断,对转子振动信号的连续小波系数进行总体定量刻画,并从中提取信号特征,引入了小波系数矩阵的 k 阶“灰度矩”概念。初步研究表明,小波系数矩阵的一阶灰度矩能够很好地表征转子振动信号的特征,并且能定量地描述透平机械振动故障的特征,有望成为新的、有效的故障诊断工具,在故障诊断中有良好的应用前景。

(下转第 36 页)

性曲线如图4、图5所示。

从特性曲线可见,当负荷由高到低变换时,在45%的切换点上调节系统由串级切换到单回路,此时由于给水流量在切换的过程中有一个较小的扰动,引起了水位的微小波动,但在调节系统的作用下很快就达到了新的稳定状态。而当负荷由低到高变换时,在55%的切换点上,由于负荷的变化和给水流量的扰动方向相同,两者对水位的扰动相互减弱,水位的变化量比负荷由高到低的变化量更小。试验所得的特性曲线和目前实际运行情况证明:该调节系统完全能满足汽包水位全量程调节中调节质量的要求。

[参考文献]

- [1] 陆德民. 石油化工自动控制设计手册[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- [2] 王常力, 罗安. 集散型控制系统选型与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [3] 熊淑燕, 王兴叶, 田建艳, 等. 火力发电厂集散控制系统[M]. 北京: 北京科学出版社, 2000.

Full-range Control for the Boiler Drum Water Level

Wei Ming

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: This paper discusses the control of the boiler drum water level in full range. When a boiler operates at various load, this method helps to avoid control quality which exists in a common control system. In DCS system, the method improves the quality of the system without any extra investment.

Key words: load, range, control, SAMA Fig

[责任编辑: 严海琳]

(上接第29页)

[参考文献]

- [1] 申. 大型透平机械智能监测诊断中信息融合理论与技术的研究[D]. 华中理工大学博士学位论文, 武汉: 华中理工大学, 1999.
- [2] 刘刚, 屈梁生. 机械信号连续小波系数的统计特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(3).
- [3] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 张志涌. 精通MATLAB 5.3版[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.

Wavelet-based Quantitative Analysis of Vibration Signal of Turbine Machines

Hou Jinghong, Huang Shuhong, Shen Tao, Zhang Yarping

(Huazhong University of Science and Technology, 430074, Wuhan, PRC)

Abstract: On the basis of the very good time-frequency domain features of wavelet, this paper studies the continuous wavelet coefficients of turbine mechanical vibration signal. Considering feature extracting, this paper puts forward new statistics and proves that this kind of one-order moment is very effective with 8 kinds of fault analysis results given. Preparatory research shows that this quantitative analysis method can be used for extracting features of vibration signal.

Key words: wavelet transform, fault diagnosis, signal processing, feature extracting

[责任编辑: 刘健]