

小波变换对瞬态信号特征信息的精确提取*

朱洪俊 王 忠

(西南科技大学制造科学与工程学院 绵阳 621010)

秦树人

(重庆大学测试中心 重庆 400044)

摘要:研究了瞬态信号小波变换的相位特性和小波特征。采用了小波脊线的分析方法,详细分析了瞬态信号的小波脊线与瞬态信号的瞬时特征和特征信息的对应关系,建立了瞬态信号特征信息的精确识别模型和特征参数的精确提取方法。通过工程应用实例的验证,该方法对瞬态信号(特别是信噪比较低的弱信号)特征信息具有相当高的定位精度(误差不大于1个采样点)和识别精度(不存在累积误差),其算法简单、准确,且有较快的收敛性,可实现实时瞬态信号特征信息的实时分析。

关键词:瞬态信号 特征信息 识别模型 瞬时频率

中图分类号:TH165.3 TN911.6

0 前言

在工程信号分析中,常常需要将被分析信号中的特征信息提取出来,从而判定被分析系统的运行特征和运行状态,而这些特征信息总是表现为被分析信号中的频率成分的变化,频率成分的变化将构成被分析信号在时域中的波形奇异。因此,工程信号的特征分析就是要准确提取这些波形奇异点(也称特征点),从而获得其特征信息。

针对波形特征点的提取已有多种方法,如基于特征点的波形检测^[1]、基于一阶导数与二阶导数的检测方法^[2]、基于数字滤波的检测方法^[3,4]、基于模板匹配的波形检测^[5]、轮廓限围波形检测^[6]、基于神经网络的自适应匹配滤波^[7]和小波检测法^[8]。这些方法已在工程信号分析中广泛应用。由于工程信号中往往含有多种噪声信号,特别是一些微弱信号(如生物医学信号等),其信噪比更小,将参考文献[1~7]所述的方法运用于这类信号的分析中,就有一定的局限性,有时甚至不能得出分析结果。而参考文献[8]所述的小波分析方法,虽可以将含有噪声的工程信号的特征信息(特征点)检测出来,但由于在特征尺度上的小波变换与被测信号的特征点不能严格对应,参考文献[8]采用了试验信号的模拟误差来对实际信号的分析结果(特征点)进行修正,因此是一种近似的分析方法。

利用小波变换的时、频局部化和时窗、频窗的

宽度可调特性,采用特定的小波检测方法,就瞬态信号特征信息的精确提取方法进行了研究。

1 瞬态信号的小波特征

瞬态信号的特征信息是以其时域波形的特征点来表述的,其波形形态表现为两种情况:一是位移的急剧变化,即极值特征点;二是信号的频率急剧变化,这时信号的频谱发生了跳变,即频率跳变特征点。针对极值特征点的检测,参考文献[1~5]提供了有效的检测方法;对于频率跳变特征点,可根据其信号的频谱有时间局部性,进行给定时刻的频率分析,同时随着时间的推移跟踪信号频率成分的变化情况,从而确定频率跳变特征点的位置,这正是研究所在。

在实际工程应用中的瞬态信号特征信息提取,都是在含有噪声信号中对短时、非平稳信号进行检测,设其检测模型为

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad t \in [0, T] \quad (1)$$

式中 $f(t)$ ——含噪声的瞬态信号

$s(t)$ ——瞬态信号

$n(t)$ ——噪声信号,其方差为 d^2

设瞬态信号为

$$s(t) = A_s(t) \cos j_s(t) \quad (2)$$

式中 $A_s(t)$ —— $s(t)$ 的幅度

$j_s(t)$ —— $s(t)$ 的相位

则瞬态信号 $s(t)$ 的瞬时频率为^[9,10]

$$f_s(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{dj_s(t)}{dt} \quad (3)$$

* 国家自然科学基金(50075090)和四川省教育厅(200305011)重点资助项目。20050227 收到初稿,20050831 收到修改稿

设函数 $y(t) \in L^2(\mathbf{R})$ ，且满足

$$0 < C_y = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{y}(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (4)$$

式中 $\hat{y}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \exp(-j\omega t) dt$

$\hat{y}(w)$ ——小波基函数

C_y ——小波级数

通过对小波基函数 $y(t)$ 的平移和伸缩，可得一

组小波基序列

$$y_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} y\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad b \in \mathbf{R} \quad a \in \mathbf{R} - \{0\} \quad (5)$$

式中 a ——尺度参数

b ——平移参数

瞬态信号的小波变换为

$$W_s(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) y^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (6)$$

式中 $y^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$ —— $y\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的共轭

$W_s(a,b)$ ——小波系数

其小波系数用幅度和相位表示为

$$W_s(a,b) = \{ |W_s(a,b)|, j_{a,b} = \arg[W_s(a,b)] \} \quad (7)$$

式中 $j_{a,b}$ ——小波系数的相位

利用小波系数的相位信息 $j_{a,b}$ ，就可以提取瞬态信号的特征信息。

2 瞬态信号特征信息的识别模型

设瞬态单频信号为 $s(t) = A(t) \cos j(t)$ ，利用 Hilbert 变换可得到其解析信号为^[11,12]

$$Z_s(t) = (1 + jH)s(t) = A_s(t) \exp[jj_s(t)] \quad (8)$$

假定基本小波 $y(t)$ 本身是渐进的，可表示为

$$y(t) = A_y(t) \exp[jj_s(t)] \quad (9)$$

则有

$$W_s(a,b) = \langle s, y_{a,b} \rangle = \langle Z_s, y_{a,b} \rangle$$

可得瞬态信号的渐进小波系数为

$$A_s(a,b) = \langle Z_s, y_{a,b} \rangle =$$

$$\frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} Z_s(t) y\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} A_{a,b}(t) \exp[jj_{a,b}(t)] dt \quad (10)$$

式中

$$A_{a,b}(t) = A_s(t) A_y^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

$$j_{a,b}(t) = j_s(t) - j_y\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

对于式(10)，其驻点 t_s 满足 $y'_{a,b}(t_s) = 0$ ，即

$$j'_s(t_s) = \frac{1}{a} j'_y\left|\frac{t_s-b}{a}\right| \quad (11)$$

从式(11)可知，相位驻点是 a, b 的函数，假定对每一个确定的相平面上的点 (a, b) ，仅存在相位函数的唯一驻点 $t_s(a, b)$ ，且有

$$y''_{a,b}(t_s) \neq 0 \quad (12)$$

2.1 瞬时频率与小波脊线

小波脊线是在相平面上满足 $t_s(a, b) = b$ 的所有点 (a, b) ，即

$$P = \{(a,b) \in L^2(\mathbf{R}), t_s(a,b) = b\} \quad (13)$$

在小波脊线上有

$$j'_{a,b}(t_s)|_b = 0 \quad a = a_r(b) = j'_y(0)/j'_s(0) \quad (14)$$

因此，小波脊线表示了被分析信号的瞬时频率。

小波脊线上的小波系数为

$$W_s(a_r(b), b) = \frac{1}{|a_r(b)|} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) y^*\left[\frac{t-b}{a_r(b)}\right] dt \quad (15)$$

2.2 瞬时频率与小波曲线

小波曲线是在相平面上通过点 $[a_r(b_0), b_0]$ ，且满足 $t_s(a, b) = b_0$ 的所有点，即

$$C = \{(a,b) \in L^2(\mathbf{R}), t_s(a,b) = b_0\} \quad (16)$$

则在小波曲线上的小波系数为

$$W_s(a_r(b_0), b) = \frac{1}{|a_r(b_0)|} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) y^*\left[\frac{t-b_0}{a_r(b_0)}\right] dt \quad (17)$$

2.3 瞬时频率的提取

由小波变换的相位信息可以准确地得到小波脊线，令

$$j(a,b) = \arg[W_s(a,b)] \quad (18)$$

在小波曲线上

$$\left. \frac{\partial j(a,b)}{\partial b} \right|_{t_s(a,b)=b} = \left. \frac{j'_y(0)}{a} \right|_{t_s=b} = \frac{w_0}{a} \quad (19)$$

式(19)表明：沿一固定小波曲线，小波变换的相位相对于平移量 b 的偏导数，在与小波脊线的交点处，被测信号的瞬时频率等于小波脊线上伸缩小波的中心频率。

其瞬时频率的提取方法为：对于采样周期 $T_s = 1/f_s$ 的离散序列 $s(k) (k=0, 1, \dots, N-1)$ ，在给尺度 a 下的离散信号 $s(k) = s(kT_s)$ 的小波变换为 $W_a(k) = W(a, kT_s)$ ，且 $j_a(k)$ 是其相位，定义 D_b 为 $j_a(k)$ ，关于 b 的离散微分算子，则由式(19)可得

$$D_b j_a(k) = \frac{w_0}{a} \quad (20)$$

设 $a_0(t_0)$ 是 $a_r(t_0)$ 的初始估计值, 则

$$a_r^{(i+1)}(t_0 + kT_s) = \mathbf{w}_0 / [D_k \mathbf{Y}_{a_r}^{(i)}(t_0 + kT_s)]$$

$$a_r^{(0)}(t_0 + kT_s) = a_r^{(i+1)}(t_0 + kT_s) \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (21)$$

根据所要求的精度, 给定一个正数 ϵ , 且

$$\left| \frac{a_{i+1} - a_i}{a_i} \right| < \epsilon \quad (22)$$

满足时, 就可以认为 a_i 为最终收敛值, 即特征尺度。

2.4 小波基的选择

如何选择最佳小波基是小波分析中最为重要的问题之一。一般来说, 应根据被分析信号的具体特征来选择小波基, 使得小波变换能更具体地刻画被分析信号的特征。目前, 最佳小波基的选择算法仍是小波研究领域的热点问题之一, 尚待完善。在实际应用中, 最为常用的方法是试验的方法, 即通过多个小波基函数的选择进行试验和分析, 以找出最为合适的小波基函数。

3 对瞬态信号特征信息的识别实例

3.1 设备性能检测中的应用

汽车硅油风扇离合器是汽车冷却系中的一种有效的新型节能产品, 安装在发动机散热器后面的水泵轴上。图 1 是汽车硅油风扇离合器的温度控制特性曲线, 汽车在运行过程中, 随着发动机热负荷的增加, 高粘度的硅油进入工作腔, 带动壳体与风扇一起旋转, 转速急剧上升, 对发动机进行冷却, 在温控曲线上形成第一个拐点。当工作腔充满硅油后, 转速上升非常缓慢, 在温控曲线上形成第二个拐点, 即离合器的啮合点。当冷却系统达到热平衡后, 随着风扇的继续冷却, 气流温度的下降, 阀门关闭, 工作腔中的硅油在离心力的作用下回到贮油腔, 风扇转速急剧下降, 在温控曲线上形成第三个拐点, 即离合器的始分点。随着工作腔的硅油全部回到储油腔后, 此时, 壳体与风扇一起低速旋转, 在温控曲线上形成第四个拐点, 即离合器的终分点。对离

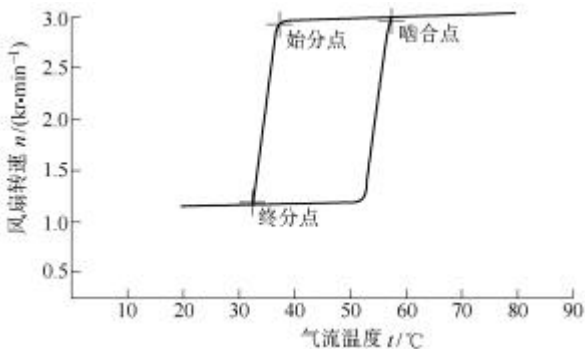


图 1 汽车硅油风扇离合器的温度控制特性曲线

合器的性能的测定就是要判定啮合点、始分点和终分点的温度和转速, 以此来判定离合器的性能指标。

应用所述方法, 在汽车硅油风扇离合器性能检测系统中实现了对上述三个点的温度、转速的实时判定(其结果在图 1 中用“+”示出), 判定结果较曲率法^[13]更为准确。

3.2 生物医学信号检测中的应用

在生物医学信号中, 心电信号是心脏细胞在除极和复极时的电生理现象在人体体外的表现, 如图 2 所示。心脏的病变会使心电信号在周期和形态上发生畸变, 是最典型的瞬态信号。QRS 波群的识别在心率检测和心电信号特征分析中有着重要的意义。通过对 QRS 波群的准确识别, 从而准确地计算瞬时心率, 为心脏的病理检测提供重要依据。

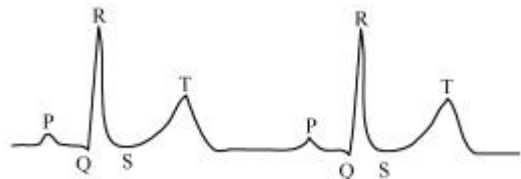
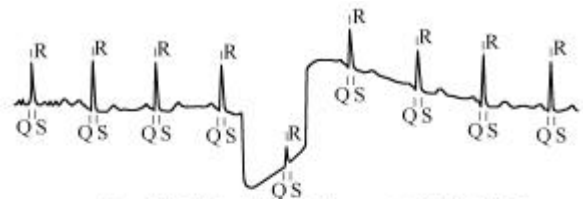
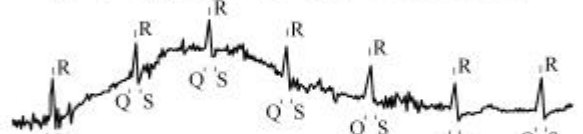


图 2 典型的心电信号

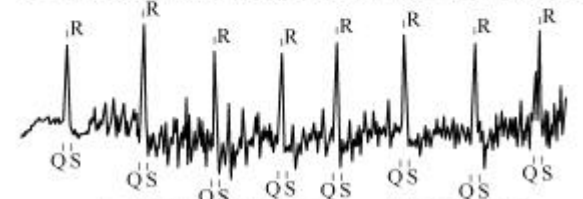
为了验证上述方法的正确性和有效性, 在 MIT/BIH(Massachusetts Institute of Technology / Boston's Beth Israel Hospital)心电数据库中选取有运动伪迹、基线漂移、肌电干扰和工频干扰的心电信号, 应用前面所述的方法对 QRS 波群进行识别, 其分析结果如图 3 所示(在图 3 中用短线示出), 将分析结果与各波的实际位置对照, 其误差不大于 1 个采样点, 其中 89% 的点能准确定位, 且不存在累积误差, 具有较高的识别精度。



(a) 有运动伪迹的心电信号中的 QRS 波群的识别结果



(b) 有基线漂移和肌电干扰的心电信号中的 QRS 波群的识别结果



(c) 有工频干扰的心电信号中的 QRS 波群的识别结果

图 3 有各种干扰的心电信号中的 QRS 波群的识别结果

4 结论

利用小波变换对瞬态信号的瞬时频率进行分析, 通过在特征尺度上对瞬态信号特征波形的识别, 从而提取瞬态信号的特征信息, 该方法有如下一些特点。

(1) 通过小波变换的相位信息提取被分析信号的瞬时频率, 可以快速准确地得到信号的瞬时特征, 与直接进行 Hilbert 变换提取瞬时频率的传统方法相比, 具有明显的抗干扰能力。

(2) 对瞬态信号的特征信息, 特别是对信噪比较低的弱信号的特征信息具有较高的识别精度, 其误差不大于 1 个采样点, 约 89% 能准确定位, 且不存在累积误差, 具有较高的应用价值。

(3) 该方法计算简单、准确, 具有较快的收敛性和较高的实时性, 可实现实测瞬态信号特征信息的实时分析。

参 考 文 献

- 1 Kleizer R E, Millen J P, Bigger J T, et al. Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction. *American Journal of Cardiology*, 1987, 59 : 256
- 2 Friesen G M, Jannett T C, Jadallah M A, et al. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms. *IEEE on BME*, 1990, 37(1) : 85 ~ 136
- 3 Engelse W A H, Veelenberg C. A single scan algorithm for QRS detection and feature extraction. *IEEE Comput., Card. Long Beach* : IEEE Computer Society, 1979 : 37 ~ 42
- 4 Okada M. A digital filter for the QRS complex detection. *IEEE Trans. on BME*, 1979, 26(9) : 700 ~ 703
- 5 Cohen A, Landoberg D. Adaptive real-time wavelet detection. *IEEE Trans. on BME*, 1983, 30(6) : 332 ~ 339
- 6 T Jvan den Akker, Ros H H, Koeleman A S M, et al. An on-line method for reliable detection of wave forms and subsequent estimation of events in physiological signals. *Computer and Biomedical Research*, 1982, 15 : 405 ~ 417
- 7 Xie Q H, Hu Y H, Tompkins W J. Neural-network-based adaptive method filtering for QRS detection. *IEEE Trans. on BME*, 1992, 39(4) : 317 ~ 329
- 8 Li C W, Zheng C X, Tai C F. Detection of ECG characteristic points using wavelet transforms. *IEEE Trans. on BME*, 1995, 42(1) : 21 ~ 28
- 9 Leon C. *Time-Frequency Analysis : Theory and Applications*. Prentice Hall, 1995
- 10 徐佩霞, 孙功宪. *小波分析与应用实例*. 合肥 : 中国科

学技术大学出版社, 2001

- 11 Vakman D E Measuring the frequency of an analytic signal. *Trans. in Radio Eng. and Electron. Phys.*, 1980 : 63 ~ 69
- 12 Vakman D E. Computer measuring of frequency stability and the analytic signal. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurements*, 1994, 43 : 668 ~ 671
- 13 朱洪俊, 朱文, 李敏基. 系统特征值的实时确定方法及算法实现. *重庆大学学报(自然科学版)*, 1999, 22(3) : 24 ~ 27

ACCURATE EXTRACTION FOR THE CHARACTERISTIC INFORMATION OF TRANSIENT SIGNAL WITH WAVELET TRANSFORMS

Zhu Hongjun Wang Zhong

(College of Manufacturing Science and Engineering,
Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010)

Qin Shuren

(Test Center, Chongqing University,
Chongqing 400044)

Abstract : The principle and algorithm of accurate extracting the characteristic information of transient signal with wavelet transforms are described, and the phase characteristics of transient signal with wavelet transforms are analyzed. Using the analytical method of the wavelet ridge of transient signal, the correspondence between wavelet ridge of transient signal and characteristic information of transient signal is described in detail. The distinguishing model and accurate extraction for the characteristic information of transient signal are established. Examples of application demonstrate that this method presented is easy to realize the accurate extracting of the characteristic information of transient signal with serious noise. Results show that the positioning error is less than one sample interval; In addition, this method is also featured by high analysis precision with no accumulative error and real time performing in application as well.

Key words : Transient signal Characteristic information

Distinguishing model Instantaneous frequency

作者简介: 朱洪俊, 男, 1964 年出生, 博士, 副教授。主要从事工程信号处理、识别与分析, 设备故障诊断, 时频分析和虚拟测试技术与仪器的理论与应用研究。发表学术论文 20 余篇, 其中被 EI Compendex 收录 5 篇, ISTP 收录 2 篇。

E-mail : zhu_hgin@yahoo.com.cn