

电力系统故障信号小波消噪应注意的问题

胡国胜^{1,2},涂用军¹,任震²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州, 510640; 2. 广东省科技干部学院, 广东 广州, 510640)

摘要: 小波由于其时频窗口的灵活性,使小波变换近几年来在电力系统故障信号处理中得到广泛应用。特别是,电机的故障信号含有大量的噪声,有时噪声将故障信号完全淹没,很难直接用于故障的分析和诊断。所以在故障信号分析之前,必须对故障信号进行消噪。然而小波变换并不是对所有噪声都是有效的。故提出了将三角样条调频小波方法用于噪声的消噪,效果理想。

关键词: 小波变换; 三角样条调频小波变换; 白噪声; 有色噪声

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)02-0005-04

1 引言

电力设备故障引起电压、电流等物理量的变化是检测故障类型及成因的重要依据。故障的有效检测,很大程度上取决于故障突变信号的分析、处理和特征提取技术。对于含有大量突变成分的故障暂态信息,传统的信号分析工具 Fourier 变换只能适用于平衡信号分析和处理,对突变信号的处理缺乏灵活性和有效性,很难提取故障突变信号的特征,不利于诊断故障性质、原因和严重程度。而小波变换现代时频分析方法,具有良好的时频局部性,能通过时频窗口的灵活变化来突出故障信号的突变成分,有效提取故障特征信息,及时识别故障。近几年来,小波变换在电力系统中得到广泛的应用^[1-5]。

一般来说,故障信号含有大量的噪声成份,有时甚至淹没了故障信号。所以在分析故障信号之前,必须用小波变换先对含噪的故障信号进行分解、消噪和重构。电力系统的故障信号所含的噪声成份非常复杂,按功率谱分类,有白色噪声和有色噪声。一般文献中都是用小波变换对白噪声进行消噪,效果理想。而对有色噪声没有讨论。事实上,本文通过仿真实验说明了小波变换对有色噪声是无效的。为了解决这个问题,本文引入调频三角样条小波变换来消除这类噪声,并提出相应的算法。

2 含白噪声电机故障信号消噪

一般地,函数(信号)的局部奇异性用 Lipschitz 指数来描述,简称 Lip 指数,亦即奇异性指数。

定义一个函数 $f(x)$ 在 x_0 点处是一致李普西兹

并且当仅存在一个常数 K ,使得在 x_0 的某一领域内的任意一点 x ,均有

$$|f(x) - f(x_0)| \leq K|x - x_0| \quad (1)$$

如果上式对所有 $x, x_0 \in (a, b)$ 都成立,则称 $f(x)$ 在区间 (a, b) 上一致李普西兹。由此不难看出,函数在某一点的李普西兹指数越大,则在该点函数越光滑。函数在某处有间断或某阶导数不连续,则称该函数在此处有奇异性,该点就为函数的奇异点。函数 $f(x)$ 的局部奇异性与其小波变换的渐近衰减性之间的关系可以描述如下。

设 $f(x) \in L^2(R)$, (a, b) 为 R 上的闭区间, $0 < \alpha < 1, \forall \epsilon > 0$, 则 $f(x)$ 在 $(a + \epsilon, b - \epsilon)$ 上一致李普西兹 α 的充要条件是存在常数 A 和 $x \in (a + \epsilon, b - \epsilon)$, 对 $\forall \epsilon > 0$, 有

$$|W_s f(x)| \leq A \cdot s^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: $W_s f(x)$ 为 $f(x)$ 在尺度 s 上的小波变换。

对信号的 Lipschitz 指数是大于 0 的,即使是不连续的奇异信号,只要在某一邻域内有界,也有 $\alpha = 0$ 。然而,噪声所对应的 Lipschitz 指数 α 往往是小于 0 的。比如高斯白噪声,它是广义随机分布的,几乎处处奇异,它的 Lipschitz 指数 $\alpha = -0.5 - \epsilon$ ($\epsilon > 0$)。由上式易得,信号和噪声在不同尺度的小波变换下呈现的特性截然相反,即随着尺度的增大,信号和噪声所对应的小波变换系数分别是增大和减小。因此连续作若干次小波变换之后,由噪声对应的小波变换系数已基本去除或幅值很小,而所余系数主要由信号控制,可根据这一原理对加噪信号进行处理。

图 1 为电动机单相接地时 A 相电流故障信号,其中含信噪比为 15.36 的白噪声。从图 1 可以看出小波变换方法对白噪声的消噪效果明显。

基金项目: 国家自然科学基金资助(50077008)

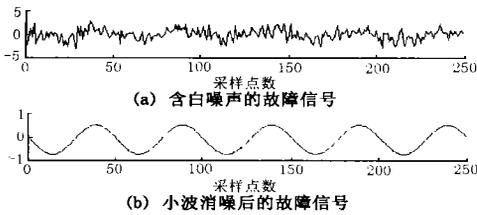


图1 故障信号白噪声的小波消噪效果图

Fig.1 Wavelet - based denosing of white noises of fault signals

3 有色噪声电机故障信号小波消噪存在的问题

故障信号同上,其中含有信噪比为20.53的有色噪声,有色噪声是通过 Matlab 软件小波分析工具箱中函数 $warna()$,它是包含 AR(3) 有色噪声信号满足差分方程:

$$wama(t) = -1.5wama(t-1) - 0.75wama(t-2) - 0.125wama(t-3) + wama(t) + 0.5 \quad (3)$$

域值范围: $[-0.5, 0.5]$ 。

图2为含有色噪声故障信号的小波变换消噪方法的效果图。从图中可看出,小波变换方法对有色噪声的消除无能为力。消噪重构后的信号严重失真。所以对有色噪声的消除方法有待进一步研究。

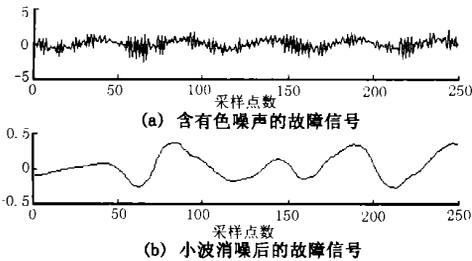


图2 故障信号有色噪声的小波消噪效果图

Fig.2 Wavelet - based denosing of colored signals of fault signals

4 三角样条调频小波变换消噪算法

对任一平方可积信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续三角样条调频小波变换 (Continue TSWFM Transform) 为

$$CT_f(b, \eta) = \langle f(t), \psi_{n,b,\eta}(t) \rangle = \frac{1}{C_n} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_n\left(\frac{t-b}{\eta}\right) \exp[i\eta(t+qt^2)] dt \quad (4)$$

三角样条小波函数 $\psi_n(t)$ 被称为线调频母波 (mother function), 即产生三角样条调频小波的母小波^[2,5]。Fourier 变换、以三角样条小波作为窗口函数的短时 Fourier 变换和三角样条小波变换都是连续三角样条调频小波变换的特例。其中, Fourier 变换

定义为: $FT(\cdot) = \langle f(t), \delta(t) \rangle$; 短时 Fourier 变换定义为: $STFT(b, \eta) = \langle f(t), \psi_{n,b,\eta}(t) \rangle$; 三角样条小波变换定义为: $WT(b, \eta) = \langle f(t), \psi_{n,b,\eta}(t) \rangle$ 。

短时 Fourier 变换的时频窗口大小、形状不变, 三角样条小波变换的时频窗口大小不变, 而形状可变。三角样条调频小波变换时频窗口除了时间平移、频率平移和时频拉伸外, 还有斜方向的拉伸和旋转变化。传统的滤波和干扰分离方法只在时域或频域进行。如果信号或干扰有很强的时频耦合, 即在时频平面呈现斜的分布, 使得这些分布在时间轴或频率轴上的投影均有重叠, 这时小波变换方法就难以在时域或频域得到好的滤波和干扰分离结果。而三角样条调频小波变换能很好地消除干扰。

图3为三角样条调频小波变换的时域局部化窗口的五种形状。

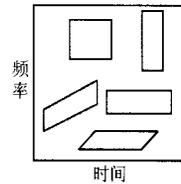


图3 三角样条调频小波变换时频窗口

Fig.3 The time - frequency windows of TSMW Transform

基于小波变换的滤波方法只限在时域或频域内进行。如果信号或噪声有很强的时频耦合, 即在时频平面呈现斜的分布, 使得这些分布在时间轴或频率轴上的投影均有重叠, 这时三角样条小波变换方法就难以在时域或频域得到好的消噪效果。三角样条调频小波变换时频窗口除了时间平移、频率平移和时频拉伸外, 还有斜方向的拉伸和旋转变化。它能很好地消除噪声, 如图4所示。图4显示的信号与噪声, 在时域和频域上都有相重合的部分, 不能用小波变换的矩形时域窗口将它们分离。而具有斜方向拉伸的三角样条调频小波变换时域窗口可以将噪声从信号中分离出来。

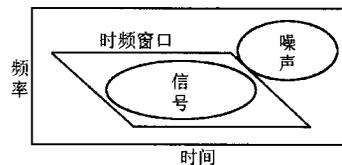


图4 信噪分离的三角样条调频小波变换时频窗口

Fig.4 The TF window of separating between signal and noise based on TSMW Transform

众所周知,小波变换的实质是用合适的小波函数去匹配待分析的信号,三角样条调频小波变换的本质与小波变换一样,即寻找最优的三角样条调频小波函数(即一系列最优的 ω 和 q)去逼近原信号。三角样条调频小波变换算法出发点是基于自适应匹配投影分解方法寻找与信号最相关的三角样条调频小波基,从而达到消除干扰、滤除噪声和重构信号的目的。自适应匹配投影分解方法是将待分析的信号展开成一系列三角样条调频小波基函数的线性组合,其中这些基函数是根据投影能量为最大的准则(即信号与基函数的相关数最大),从一个包含这些基函数的冗余的基函数集中挑选出来的。寻找最佳基函数的问题实质上是一个全局优化问题。考虑到变换式(1)中含有 4 个参数,因而通过四维空间的搜索找到最佳投影基的困难较大,而只能按照一定的搜索策略,进行一系列的一维或多维搜索来逼近这个最佳基,这是解决优化问题时所经常采用的方法。

(1) 计算主要信号分量 ω 、 b 和 q 的近似值

假定待分析的信号是长度为 N 的实信号。由于采样率和信号长度的限制,只能取在 1 和 N 之间。采用二进小波变换快速算法,对每一个 ω 和相应的 b ,产生一窗函数 $w_{\omega, b}(n) = \left[\frac{k-b}{n} \right]$,计算 $w_{\omega, b}(k)$ 与残余信号 R_n 的内积。计算内积的 Fourier 变换,找出频谱上的峰值点频率,该频率就对应于被窗函数 $w_{\omega, b}(t)$ 抽取出的信号的主要频率分量,记为 ω 。改变窗函数的尺度和相应的时间中心,产生新的窗口,用同样的方法求出相应的峰值点频率。找出所有峰值点频率中的最大值 $\omega = \max\{\omega_{[1, N]}\}$,这样 ω 就是对应的主要信号分量的近似值。相应的窗函数参数 ω 和 b 就是 ω 、 b 的近似值。

(2) 计算 ω 、 b 的精确值

分别以近似值 ω 和 b 为中心,在其领域 $[\omega - \Delta, \omega + \Delta]$ 内搜索与信号最匹配的窗函数。即 ω 的改变不再以 2 的整数次方为步长,而是每次只增加 1。采用与(1)相似的步骤,所求出的全部峰值点频率中的最大值 $\omega = \max\{\omega_{[1, N]}\}$ 就是对应的主要信号分量的中心频率。虽然 ω 仍不是精确值,但要比 ω 更接近于 ω 。相应的 ω 和 b 就是尺度参数和时间中心的精确值。

(3) 在确定了 ω 和 b 两个参数后,变换公式(4)中就剩下 ω 和 q 两参数。在 ω 和 q 的二维空间中,以投影值最大(即内积最大)为准则,搜索与 R_n 最

匹配的三角样条调频小波基。事实上,已有初值 ω ,这样就能将 ω 的搜索范围限定在 ω 的领域内进行。 q 值的确定可用最小二乘法算法。这一步的搜索完成后,得到 ω 和 q 的近似值 ω 和 q 。

(4) 求 ω 和 q 的精确值

在第三步的基础上,将这 2 个参数范围限定在 ω 和 q 的较小的领域内。重复步骤(3)相似搜索,就得到比较精确的中心频率 ω 和 q 的值。如有必要可重复搜索多次,每一步都将缩小参数的搜索空间,以进一步提高参数的精度,同时设定阈值,以期作为结束搜索的标准。有了这 4 个参数之后,也就确定了最佳基函数 e_{y_n} ,它满足

$$\langle R_n, e_{y_n} \rangle = \sup_y |\langle R_n, e_y \rangle| \quad (5)$$

其中 ω 是四维指标集。

(5) 残余信号更新

用残余信号 R_n 减去与之最匹配的信号 $\langle R_n, e_{y_n} \rangle$,得到新的残余信号 R_{n+1} 。即

$$R_{n+1} = R_n - \langle R_n, e_{y_n} \rangle e_{y_n} \quad (6)$$

(6) 重复步骤(1)~(5),直到总的迭代次数超过其预置值,或直到残余信号 R_{n+1} 与原始信号的能量比低于一阈值。假设信号 $f(t)$ 有 m 个相干成分(包括基波、整数谐波和分数谐波),可用 m 个三角样条调频小波基函数的线性组合来表示。

$$f(t) = \sum_{n=0}^m \langle R_n, e_{y_n} \rangle e_{y_n} \quad (7)$$

至于上述算法收敛性证明请参见文献[5]。

5 电机故障信号三角样条调频小波消噪

图 5(a)为电动机单相接地时 A 相故障电流信号,含信噪比为 20.53 的噪声(白噪声和有色噪声),有色噪声是上述的函数 $warna(\cdot)$,叠加的有色噪声非常弱,只是标准幅值的 1/30。动模实验环境为电动机 A 相对地短路,直流发电机电流 9.2 A,电压为 111 V。它不经调压器接电动机,满载运行,对地短路阻抗 100 Ω 。图 5(b)、(c)分别为二阶三角样条小波变换方法和三角样条调频小波变换方法消噪后重构的信号。表 1 列出了各种方法消除有色噪声的信噪比和相对误差两项指标。表中数据显示,对含有有色噪声的电力系统故障信号,三角样条小波调频小波变换比小波变换方法的消噪效果好。其中,信噪比(SNR)和相对误差(Err)^[2,5]分别定义为:

$$SNR = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=0}^{N-1} |x_i|^2}{\sum_{i=0}^{N-1} |x_i - \hat{x}_i|^2} \right] \quad (8)$$

$$ERR = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} |x_i - \hat{x}_i|^2}{\sum_{i=0}^{N-1} |x_i|^2}$$

其中: x_i 为原始信号, \hat{x}_i 为消噪重构后信号, N 为抽样点数。

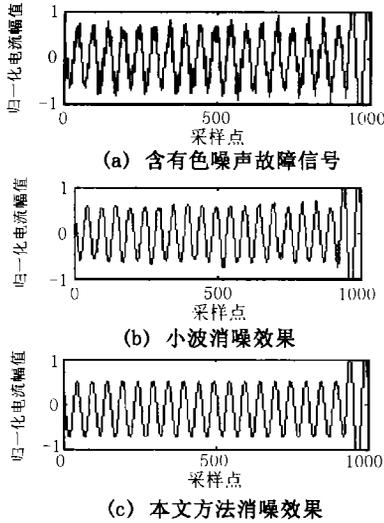


图5 对含有色噪声信号两种消噪方法效果比较

Fig. 5 Comparison of two kinds of denoising methods to colored noise

表1 两种方法消除有色噪声的信噪比和相对误差的比较

Tab. 1 Comparison of SNR and ERR to filter colored noise on two Methods

消噪方法	原信噪比	消噪后信噪比	相对误差 %
小波变换方法	10.53	13.21	45.86
本文方法	10.53	54.76	1.46

6 结论

小波变换由于其灵活的时频特性,广泛地应用到电力系统的故障信号的处理和特征提取中。在特

征提取之前,一般来说,都要进行信号消噪的预处理。但是从文中的仿真效果来看,小波变换是对白色噪声的消噪效果明显,对有色噪声消噪重构后的信号严重失真。为了解决这类问题,本文引入三角样条调频小波变换来处理含有色噪声的消噪问题。由于三角样条高频小波变换的时频窗口除了具有小波变换的时频窗口的灵活性之处,在时间轴和频率轴还有拉伸功能,所以在消噪过程中具有更大灵活性。理论和仿真结果均表明该方法是有效的。

参考文献:

- [1] 胡国胜,任震,黄雯莹,等.基于最小带宽离散小波的故障信号消噪与压缩[J].中国电机工程学报,2001,21(11):5-8.
- [2] 任震,胡国胜,黄雯莹,等.三角样条小波(TSW)及其在电机故障检测中应用[J].中国电机工程学报,2001,21(12):21-23.
- [3] 胡国胜,任震,黄雯莹,等.基于二进制小波变换和三角样条插值的电机故障信号重构方法[J].电网技术,2002,26(4):9-12.
- [4] 胡国胜,任震,黄雯莹.小波变换在电力系统中应用研究[J].电力自动化设备,2002,22(3):71-78.
- [5] 胡国胜.三角样条小波及其在电机故障信号处理中应用(博士学位论文)[D].华南理工大学,2002.

收稿日期:2002-06-25; 修回日期:2002-09-09

作者简介:

胡国胜(1965-),男,讲师,博士,研究方向为小波理论研究及其在电力系统中应用、信号处理;

涂用军(1963-),男,讲师,硕士,研究方向为应用电子技术;

任震(1938-),男,教授,博士生导师,国务院学位委员会电气工程学科组成员,长期从事小波分析及其在电力系统中的应用、高压直流输电、电力系统规划与可靠性等领域的科研和教学工作。

An attentive problem on wavelet - based reduce noises of fault signals of electronic power system

HU Guo-sheng^{1,2}, TU Yong-jun², REN Zhen¹

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Institute of Technical Personal, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Wavelets have inflexible time - frequency windows, so wavelet transforms have been used to process fault signals of electric power systems extensively. In particular, the fault signals contain many kinds of noise. Sometimes, fault signals are submerged by noise, so it is difficult to analyze and diagnose directly. It is essential to denoise before analyzing. But, wavelet transforms are not always validated to denoise all kinds of noise. So, in this paper, LFM trigonometric spline wavelets are being used to reduce noises. The result has been demonstrated by the example.

Key words: linear frequency - modulation trigonometric spline wavelet; wavelet transform; white noise; colored noise