

# 电能扰动检测和识别线调频三角样条小波方法

胡国胜<sup>1,3</sup>,朱锋峰<sup>2,3</sup>,任震<sup>2</sup>

(1. 广东科学技术职业学院,广东 广州 510640; 2. 华南理工大学电力学院,广东 广州 510640; 3. 华南理工大学理学院,广东 广州 510640)

**摘要:** 线调频小波变换是傅里叶变换和小波变换的一般情况,它具有更灵活的时频局部化特性。但连续线调频小波变换实质上是积分的数值计算,传统的方法是用多项式插值函数代替被积函数求积分。对电能扰动信号来说,计算的精度不高,影响检测效果。文中用连分式有理插值函数代替被积函数,提高了积分精度。最后,以三角样条小波函数作为线调频小波变换的母函数,并用线调频三角样条小波变换来检测和识别电能扰动,它的等高线可以清楚地显示出干扰发生时刻和持续时间。

**关键词:** 电能质量; 干扰; 线调频小波变换; 三角样条小波; 连分式有理插值

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)02-0046-07

## 0 引言

电能质量问题的提出由来已久,在电力系统发展的早期,电力负荷的组成比较简单,主要由同步电动机、异步电动机和各种照明设备等线性负荷组成,因此衡量电能质量的指标比较简单,主要有频率偏移和电压偏移两种。20世纪80年代以来,随着电力电子技术的发展非线性电力电子器件和装置在现代工业中得到了广泛的应用,同时,为了解决电力系统自身发展存在的问题,直流输电和 FACTS 技术不断投入实际工程应用,调速电机以及无功功率补偿电容器也大量投入运营。这些设备的运行使得电网中电压和电流波形畸变越来越严重,谐波水平不断上升。另外,冲击性、波动性负荷,例如电弧炉、大型轧钢机、电力机车等,运行中不仅会产生大量的高次谐波,而且还会产生电压波动、闪变、三相不平衡等电能质量问题。但另一方面,随着各种复杂的、精密的、对电能质量敏感的用电设备不断普及,人们对电能质量的要求越来越高,因此电能质量成为目前研究的热点<sup>[1,2]</sup>。

舒恩伯格于1946年说明了如何用样条插值来逼近一个函数<sup>[3]</sup>,作者在文献[4,5]中讨论了三角样插值逼近问题。众所周知,小波变换的本质是选择合适的小波基函数与待处理的信号相匹配,三角样条小波是一种能与电力系统的信号很好相匹配的小波基函数,而且它的时频窗口与样条小波一样满足测不准原则的下限,计算量也小,能很好地应用于

电力系统故障信号的分解、消噪和重构<sup>[4,6]</sup>。本文用线调频三角样条小波变换(小波变换的一般形式<sup>[6~8]</sup>)来检测和识别电能扰动类型,它是应用尺度化的三角样条窗口来伸缩和平移。与傅里叶变换相比,它克服了后者对平衡信号处理效果较好,对突变信号的处理无能为力的缺点。与小波变换不同,线调频小波变换比小波变换有更灵活的时频窗口,克服了小波变换对非等Q信号的处理效果不佳等缺点<sup>[6,7]</sup>。线调频小波变换等高线类似于扰动的自然形态,是一种可视化图形,它既能简单地检测干扰发生的时刻,也能直观地看出干扰持续的时间和干扰的强度,这是其它信号处理工具很难做到的。

## 1 三角样条小波<sup>[4]</sup>

三角样条函数,定义迭代关系式如下

$$T_j^n(x) = \left[ \sin\left(\frac{x-t_j}{2}\right) T_j^{n-1}(x) + \sin\left(\frac{t_{j+n}-x}{2}\right) T_{j+1}^{n-1}(x) \right] / \sin\left(\frac{t_{j+n}-t_j}{2}\right) \quad (1)$$

其中:  $T_j^1(x) = c(x - t_j)$ ,  $t_j = j - 1$ ,  $j \in \mathbf{Z}^+$ ,  $c(x)$  为单位函数。记

$$T_n(x) = \sin\left(\frac{x_{1+n} - x_1}{2}\right) T_1^n(x) \quad (2)$$

记  $\tilde{T}_i(x) = T_n(x - i)$  和  $\bar{T}_i(x) = T_{(n)/2}(x - i/2)$  (3)

其中:  $T_n(x)$  是节点为  $\{0, 1, 2, \dots, n\}$  的三角样条,  $T_{(n)/2}(x)$  是节点为  $\{0, 1/2, 1, \dots, n/2\}$  的三角样条。定义

$$w_n(x) = \sum_{j=1}^{3n-1} (-1)^{j-1} w_j \bar{T}_{j-1}(x) \quad (4)$$

基金项目: 国家自然科学基金(50077008); 广东省自然科学基金(033044)

其中:  $w_j = \int_R \tilde{T}_0(x) \bar{T}_{2n-j}(x) dx$  (5)

上式满足:  $\sum_{j=1}^{3n-1} (-1)^{j-1} w_j = 0, \forall n \in \mathbf{Z}^+, \int_R n(x) dx = \sum_{j=1}^{3n-1} (-1)^{j-1} \int_R \bar{T}(x) dx = 0$ 。由式(4)、(5)确定的  $n(x)$  称为  $n$ 次三角样条函数  $TSW_n$ (见图 1)<sup>[5]</sup>。

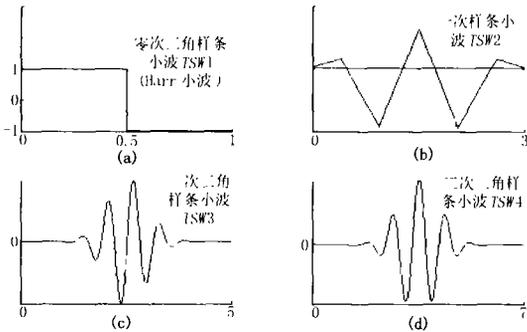


图 1 四种三角样条小波 TSW1 ~ TSW4

Fig 1 The four kinds of trigonometric spline wavelets TSW1 ~ TSW4

## 2 线调频小波变换

现在,我们引进线调频小波变换。母函数  $(t)$  小波包定义为具有  $(t)$ 包络的所有小波的集合:

$$h_{b, \dots, 0}(t) = \left[ \frac{t-b}{c} \right] \exp(i t + \phi) \quad (6)$$

其中:小波的相移  $\phi \in \mathbf{R}$ 为常数, 决定窗口的宽度,称为尺度参数。通常要求母函数  $(t)$ 小波包具有单位能量,若记  $c = \int_R |(t)|^2 dt$ ,则单位能量的

$(t)$ 小波包由下式定义:

$$h_{b, \dots, 0}(t) = \frac{1}{c} \left[ \frac{t-b}{c} \right] \exp(i t) \quad (7)$$

不妨设  $c = 1$ 。将母函数  $(t)$ 小波包加以推广,便得到关于  $(t)$ 的线调频小波包<sup>[11]</sup>:

$$h_{b, \dots, q}(t) = \frac{1}{c} \left[ \frac{t-b}{c} \right] \exp(i(qt^2 + t)) \quad (8)$$

式中: $q \in \mathbf{R}$ 代表线调频斜率。仿照短时 Fourier变换和小波变换的内积表示法,定义信号  $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 的连续线调频小波变换为

$$CCT_f(b, q) = \langle f(t), h_{b, \dots, q}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \left[ \frac{t-b}{c} \right] \exp(i(qt^2 + t)) dt \quad (9)$$

由于它是利用母函数  $(t)$ 的线调频小波包(见式(8))得到的变换,故称作关于  $(t)$ 的线调频小波变换。Fourier变换、短时 Fourier变换和小波变换

都是连续线调频小波的特例<sup>[8]</sup>。其中,连续 Fourier变换定义为:  $FT(f) = \langle f(t), e^{-i\omega t} \rangle$ ;连续短时 Fourier变换定义为:  $STFT(f, g) = \langle f(t), g(t-b) e^{-i\omega t} \rangle$ ;连续小波变换定义为:  $WT(f, \psi) = \langle f(t), \psi(t-b) \rangle$ 。

在本文的计算中,我们取母函数  $(t)$ 为 3次三角样条小波,即  $(t) = TSW_3(x)$ (式(4)中  $n=3$ )。线调频三角样条小波可以很好滤除噪声、重构信号<sup>[6]</sup>。

## 3 线调频小波变换的数值计算方法

连续线调频小波变换的计算一般用积分方法,其基本思想是以插值多项式为工具,将积分问题转化为求和问题。常用算法如矩形法、梯形法及抛物算法等均采用常见的 Newton-Cotes公式

$$\int_a^b g(x) dx \approx \int_a^b p_n(x) dx \quad (10)$$

计算数值积分,这里  $p_n(x)$ 是  $g(x)$ 关于  $[a, b]$ 上  $n+1$ 等分节点的插值多项式。

然而,多项式插值具有插值精度不高以及高次插值的振荡性的缺陷,这些方法的计算精度受到一定程度的限制,特别是在对工程中非平稳故障信号。但连分式有理插值可以克服多项式插值的上述不足,在此用连分式有理插值代替传统的多项式插值来计算数值积分,给出了连续线调频小波变换的新算法。

### 3.1 有理插值

设给定节点组  $[x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, \dots] \subset \mathbf{R}$ ,称形如

$$b_0 + \frac{x-x_0}{b_1} + \frac{x-x_1}{b_2} + \dots + \frac{x-x_{n-1}}{b_n} + \dots \quad (11)$$

的分式为连分式。

一般地设

$$R_n(x) = b_0 + \frac{x-x_0}{b_1} + \frac{x-x_1}{b_2} + \dots + \frac{x-x_{n-1}}{b_n} = \frac{P_n(x)}{Q_n(x)} \quad (12)$$

根据连分式特征定理,有  $\deg P_n = [(n+1)/2]$ ,  $\deg Q_n = [n/2]$ ,这里  $[u]$ 表示不超过  $u$ 的最大整数。

若连分式  $R_n(x) = b_0 + \frac{x-x_0}{b_1} + \frac{x-x_1}{b_2} + \dots + \frac{x-x_{n-1}}{b_n}$ 满足  $R_n(x_i) = g(x_i), i=0, 1, \dots, n$ 。则称该连分式为函数  $g(x)$ 的  $\left[ \frac{n+1}{2} \right] / \left[ \frac{n}{2} \right]$ 型连分式插

值。

对于区间  $[a, b] \subset \mathbf{R}$  上的连续函数  $g(x)$ ,  $\forall [x_0, x_1, x_2, \dots, x_n] \subset \mathbf{R}$ , 只要取  $b_k = \phi[x_0, x_1, \dots, x_k]$  为  $g(x)$  在  $x_0, x_1, \dots, x_k$  处的  $k$  阶逆差商, 即

$$R_n(x) = \phi[x_0] + \frac{x-x_0}{\phi[x_0, x_1]} + \frac{x-x_1}{\phi[x_0, x_1, x_2]} + \dots + \frac{x-x_{n-1}}{\phi[x_0, x_1, \dots, x_n]} \quad (13)$$

其中:  $\phi[x_0, x_1, \dots, x_k] = 0, k=0, 1, \dots, n$  为  $g(x)$  在  $x_0, x_1, \dots, x_k$  处  $k$  阶逆差商, 满足  $\phi[x_0] = f(x_0)$  和  $\phi[x_0, x_1, \dots, x_k] = \{ \phi[x_1, x_2, \dots, x_k] - \phi[x_0, x_1, \dots, x_{k-1}] \} / (x_k - x_0)$ 。很容易验证  $R_n(x_i) = g(x_i), i=0, 1, \dots, n$  成立且插值唯一。

现在, 可以以插值 (13) 取代 (10) 中的多项式插值计算数值积分, 给出 CCT 的连分式插值算法。

### 3.2 连分式插值积分数值方法

将区间  $[a, b]$  等距剖分成  $n$  等分, 节点为  $x_k = a + kh, h = (b-a)/n, k=0, 1, 2, \dots, n$ , 记  $x = a + th$ , 式 (12) 改写成

$$\bar{R}_n(x) = b_0 + \frac{th}{b_1} + \frac{(t-1)h}{b_2} + \dots + \frac{(t-n+1)h}{b_n} \quad (14)$$

用有理插值  $R_n(x)$  替代积分  $\int_a^b g(x) dx$  中的  $g(x)$  得

$$\int_a^b g(x) dx \approx \int_a^b R_n(x) dx = \frac{b-a}{n} \int_a^b \bar{R}_n(t) dt \quad (15)$$

我们称式 (15) 为等距节点的连分式有理插值求积公式。

实际应用时被积函数  $\bar{R}_n(t)$  分子分母的次数一般满足  $\deg P_n = 3, \deg Q_n = 3_0$ 。如  $t=3$  时, 式 (15) 简化成

$$\int_a^b g(x) dx \approx \frac{b-a}{3} \int_0^3 R_3(t) dt$$

$$R_3(t) = b_0 + \frac{b_2 b_3 th + t(t-2)h^2}{b_1 b_2 b_3 + b_1(t-2)h + b_3(t-1)h},$$

$$h = (b-a)/3 \quad (16)$$

对无限区间上的广义积分  $\int_{-\infty}^{+\infty} g(x) dx$  可化为有限区间的问题求积

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(x) dx = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \int_k^{k+1} g(x) dx = \frac{1}{3} \sum_{k \in \mathbf{Z}} \int_0^3 R_{3,k}(t) dt \quad (17)$$

其中:  $R_{3,k}(t)$  表示  $g(x)$  在区间  $[k, k+1]$  上的等距节

点连分式有理插值函数。

对连续线调频小波变换式 (9), 应用公式 (14) 得

$$CCT_f(\cdot, b) = \frac{1}{Z} \sum_{k \in \mathbf{Z}} \frac{1}{n} \int_0^n R_{n,k}^{b,w}(t) dt \quad (18)$$

此式即为连续线调频小波变换的连分式插值数值积分基本公式, 这里  $R_{n,k}^h(t)$  表示区间  $[k, k+1]$  上  $\tilde{f}(t) = f(t) \left[ \frac{t-b}{Z} \right] \exp(j(qt^2 + t))$  的连分式型插值函数。

特别地, 当  $n=3$  时, 我们得到四点式的连续线调频小波变换的  $[2/1]$  型连分式插值算法:

1) 三等分  $[k, k+1]$ , 其节点为  $\{k, k+1/3, k+2/3, k+1\}$ 。

2) 计算  $\tilde{f}(t) = f(t) \left[ \frac{t-b}{Z} \right] \exp(j(qt^2 + t))$  在  $\{k, k+1/3, k+2/3, k+1\}$  上的各阶逆差商  $b_{k,0}, b_{k,1}, b_{k,2}, b_{k,3}$ 。

3) 给出  $R_{3,k}^h(t)$  的表达式

$$R_{3,k}^h(t) = b_{k,0} + \frac{t^2 + (3b_{k,2}b_{k,3} - 2)t}{3[(b_{k,1} + b_{k,3})t + (3b_{k,1}b_{k,2}b_{k,3} - 2b_{k,1} - 2b_{k,3})]}$$

4) 计算  $\int_0^3 R_{3,k}^h(t) dt$ 。

5) 对  $k$  进行截断  $k \in \{-5, \dots, -1, 0, 1, \dots, 5\}$ , 此时

$$CCT_f\left(\frac{n}{NT}, b\right) = \frac{1}{3} \sum_{k=-5}^5 \int_0^3 R_{3,k}^h(t) dt \quad (19)$$

在本文中, 取  $b = jT, \frac{n}{NT} = \frac{n}{NT}, T$  为采样周期。

## 4 应用举例

一般来说, 电能质量主要包括电压质量、频率质量和供电可靠性 3 个方面。决定电压质量的指标很多, IEEE 第 22 标准协调委员会和其他国际委员会采用 11 种专用术语来说明电压质量的主要扰动。它们是电压中断、频率偏差、电压下跌、电压上升、瞬时脉冲、电压波动、电压切痕、谐波、间谐波、过电压和欠电压。电能质量问题归结起来主要包括以下 4 个方面: 电压波动 (fluctuation); 谐波 (harmonics); 电压三相不平衡 (unbalance); 电压降低和供电中断。

对于电压波动和闪变、谐波、三相不平衡这些变化相对较缓慢、持续时间较长的电能质量问题, 对称

分量法、谐波分析法是最常用的时域分析方法。它们的特点是数学表达式简单,物理概念明确。但时域分析方法计算量大、耗时长,不能实现实时、在线控制,因此必须采用变换的方法,快速、准确地得到所需的控制信号。傅里叶变换作为最经典的信号处理手段在电能质量检测中发挥了重要作用。目前,各种算法的离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)已经成为频谱分析和谐波分析的基础。

对于电压下跌、电压上升、瞬时脉冲、电压瞬时中断、频率偏差、闪变以及短时谐波干扰这类电能质量扰动,由于它持续时间短,发生时间具有很大的随机性,傅里叶变换已不能满足要求,因此必须采用新的信号分析方法,如加窗傅里叶变换、短时傅里叶变换和小波变换等。本文采用了上述变换的一般变换——线调频三角样条小波变换——来检测和识别6种电能质量扰动信号:频率偏差(frequency deviation)、瞬时电压中断(momentary voltage interruption, outage)、含有基波整数倍频率的谐波(harmonics)、瞬时脉冲(impulse)、短时暂态电压闪变、暂态电压失真及其线调频三角样条小波变换情况。以下信号采样频率均为1 kHz。

1) 频率偏差(frequency deviation)。图2(a)中的信号为频率偏差电压模拟信号,在20 ms时,频率从48 Hz变化到50 Hz,然后在60 ms时,频率又变成52 Hz。图2(b)为线调频三角样条小波的结果。从图中的等高线能清楚地识别出频率的偏差发生的位置在采样点20和60两点(对应时刻为20 ms和60 ms,因为采样频率为1000 Hz)。

2) 瞬时电压中断(interruption, outage)。在一

定时间内,一相或多相完全推动电压(低于0.8(标么值))称为断电。按时间长短,分为瞬时断电(0.5周期~3 s)、暂时断电(3~60 s)和持续断电(大于60 s)。图3(a)显示的是瞬时电压中断模拟波形,中断时间从20 ms到60 ms之间(因采样频率为1000 Hz,故中断时间对应采样点20到60之间),中断间隔为40 ms(40个采样点)。从线调频小波变换的三维图3(b)可见电压的变化。图3(c~f)为线调频小波变换的等高线,它是可视化图形,从中可清晰地看到中断的起始时间和持续时间。

3) 谐波(harmonics)。含有基波整数倍频率的正弦电压或电流称为谐波。它是由于电力系统和电力负荷设备的非线性特性造成的。为了说明线调频小波变换对这类扰动的识别能力,我们用图4(a)从20 ms到60 ms之间幅值下降50%的有谐波干扰的电压信号为例。图4(b)为该信号的线调频小波变换矩阵的三维图,从图中可知干扰发生。图4(c)~(f)显示扰动发生的时刻(对应采样点20)和持续时间(相当于40个采样点)。

4) 瞬时脉冲(impulse)。它是指在两个连续稳态之间的一种在极短时间内发生的电压(或电流)变化。瞬时脉冲可以是任一极性的单方向脉冲,也可以是发生在任一极性的阻尼振荡波第1个尖峰。图5(a)显示的信号是在20 ms时刻的瞬时脉冲干扰电压模拟信号。线调频小波变换可检测和分类这类电能质量问题。从线调频小波变换的等高线(图5(c)~(f))可以清楚地看出脉冲干扰发生在20 ms处(因为采样频率为1000 Hz,20 ms对应采样点20)。

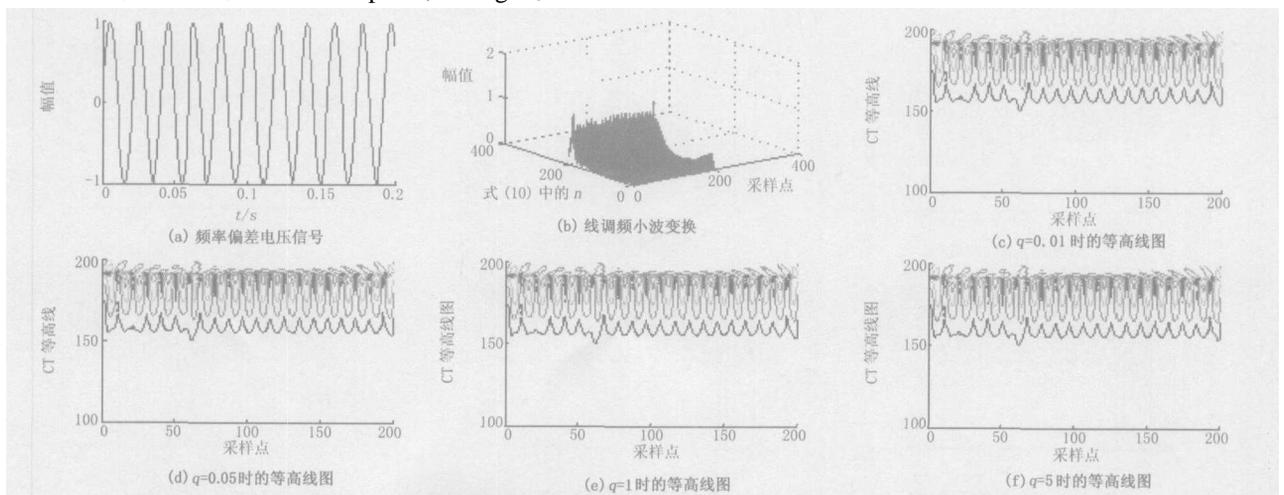


图2 频率偏差电压信号、线调频小波变换三维图、 $q$ 取不同值时的等高线图

Fig 2 Frequency deviating voltage signal, 3d plot of Chiplet transform and contours with different parameter  $q$

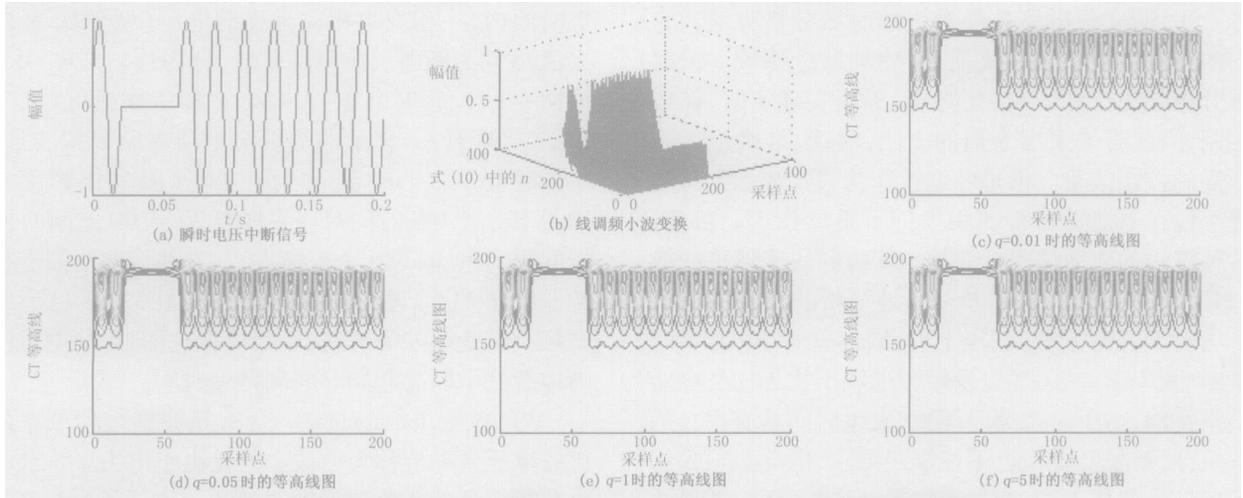


图 3 瞬时电压中断信号、线调频小波变换三维图、 $q$ 取不同值时的等高线图

Fig 3 A momentary interruption voltage signal, 3d plot of Chiplet transform and contours with different parameter  $q$

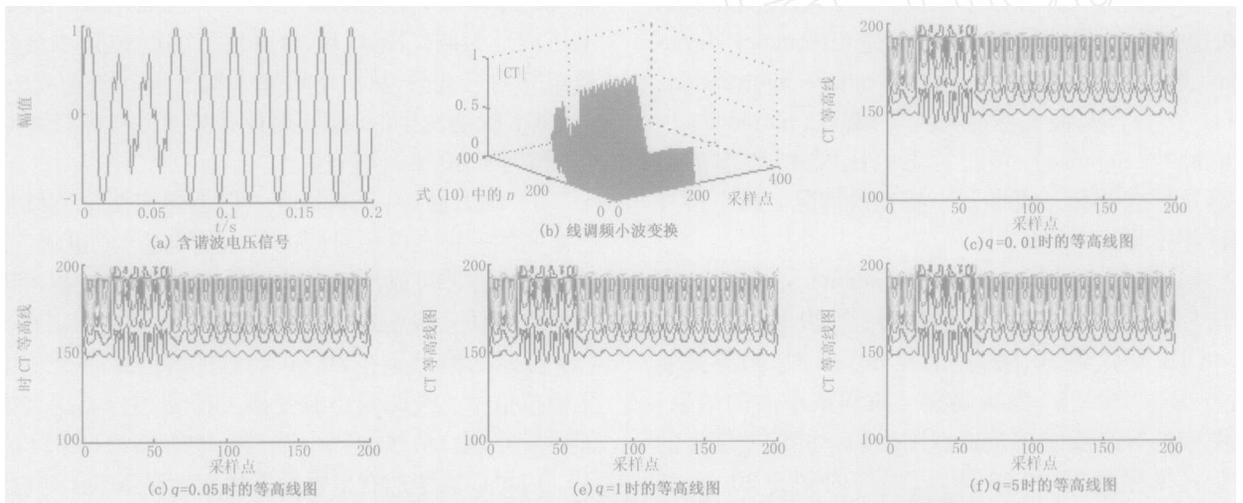


图 4 含谐波电压信号、线调频小波变换三维图、 $q$ 取不同值时的等高线图

Fig 4 A harmonic distorted voltage signal, 3d plot of Chiplet transform and contours with different parameter  $q$

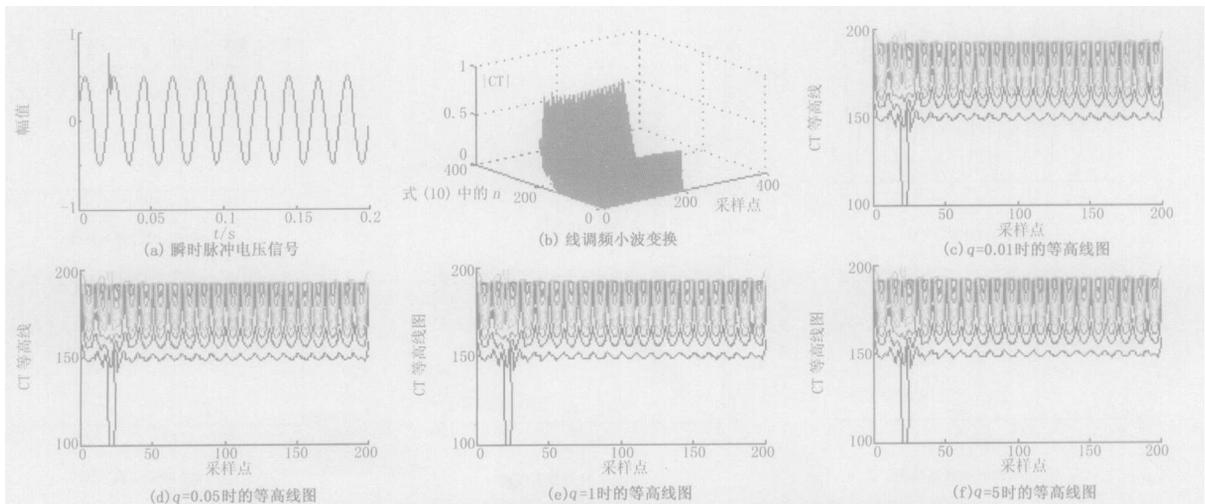


图 5 瞬时脉冲电压信号、线调频小波变换三维图、 $q$ 取不同值时的等高线图

Fig 5 An interruption voltage signal, 3d plot of Chiplet transform and contours with different parameter  $q$

在上述四种情况中,  $q$  取为 0.01、0.05、1 和 5。图中显示结果变化不大,这是因为我们积分区间较小。当积分区间变大,或者  $q$  取值超过 20 后,仿真实验表明图形变化非常明显。同时,时-频等高线可视化地显示出电能质量信号干扰发生类型和时刻。

下面再以  $q=0.01$  为例说明本文方法在电压闪变检测中应用。

5) 短时暂态电压闪变信号。图 6(a) 为短时暂态电压闪变信号,其表达式为

$$u(t) = A[1 + Mp(t) \sin t] \sin 2ft$$

式中:  $20\text{ms} \leq t \leq 60\text{ms}$  时  $p(t) = 1$ ; 其它时刻  $p(t) = 0$ ;  $A = 1\text{V}$ ;  $M = 0.1$ ;  $\omega = 6\text{ rad/s}$ ;  $f = 50\text{Hz}$ 。图 6(b) 为  $q=0.01$  时线调频小波变换矩阵等高线,从

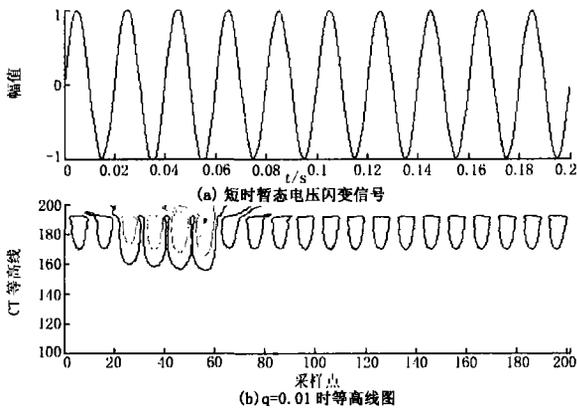


图 6 短时暂态电压闪变信号、 $q=0.01$  时等高线图

Fig 6 A short time transient voltage flash signal and Chiplet transform contours with  $q=0.01$

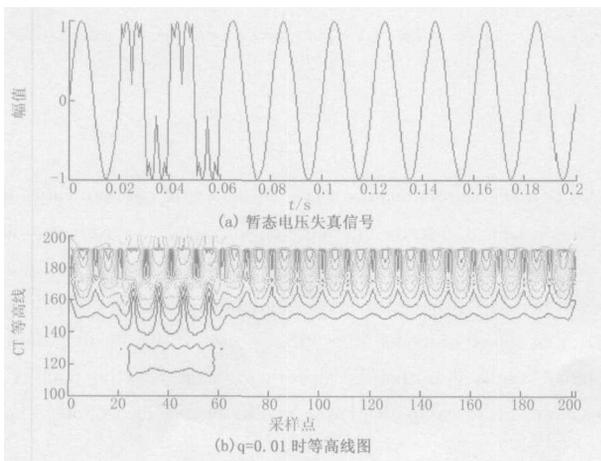


图 7 暂态电压失真信号、 $q=0.01$  时等高线图

Fig 7 A transient voltage distorted signal and Chiplet transform contours with  $q=0.01$

图中可以清楚地看出突变发生在  $20\text{ms}$  处 (采样频率为  $1000\text{Hz}$ , 即第 20 个采样点处)。

6) 暂态电压失真信号。设暂态电压失真信号表达式为

$$u(t) = A_1 \sin 2ft + p(t) \sum_{i=2}^3 A_i \sin 2n_i ft$$

式中: 当  $20\text{ms} \leq t \leq 60\text{ms}$  时  $p(t) = 1$ ; 其它时刻  $p(t) = 0$ ;  $A_1 = 1\text{V}$ ,  $A_2 = 0.5\text{V}$ ,  $A_3 = 0.3\text{V}$ ;  $m_2 = 3$ ,  $m_3 = 7$ ;  $f = 50\text{Hz}$ , 采样频率为  $1000\text{Hz}$ 。

图 7(a) 显示的是暂态电压失真信号, (b) 显示是  $q=0.01$  时等高线图, 它是可视化图形, 清楚地显示出干扰发生的时刻和干扰的强度。

### 5 结论

电能质量的好坏直接影响社会生产、生活的各个方面, 提供和维护高品质的电力能源, 不仅是电力部门的责任, 也是全社会共同追求的目标。电能质量检测和识别的变换方法有傅里叶变换、短时傅里叶变换、快速傅里叶变换和小波变换等, 本文用上述变换的一般形式——线调频三角小波变换来对检测和识别 6 种电能质量扰动信号: 频率偏差、瞬时电压中断、含有基波整数倍频率的谐波、瞬时脉冲、暂态电压失真、短时电压闪变信号进行检测和识别。

针对不平稳的电能信号影响连续积分的精度, 本文利用连分式有理插值代替多项式插值进行积分计算, 提高了连续线调频小波变换的计算精度。

仿真实验表明, 线调频三角样条小波变换的等高线图是一种可视化图形, 它能清楚地显示出和识别出各种模拟电压信号干扰发生的时刻、持续时间以及干扰强度, 它克服了傅里叶变换不适应于电力系统突变信号处理的缺点, 也克服了小波变换对非等  $Q$  信号的检测缺乏灵活的时频窗口的不足。线调频小波变换是在电力系统信号处理中应用刚刚起步, 相信随着研究的不断深入, 它的优越性会不断地显现出来。

### 参考文献:

- [1] Bingham R P, Kreises D, Santoso S. Advances in Data Reduction Techniques for Power Quality Instrumentation [A]. Proc Third European Power Quality Conf Power Quality. Bremen: 1995.
- [2] Santoso S, Powers E J, Grady W M. Power Quality Disturbance Data Compression Using Wavelet Transform Methods [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12: 1250-1257.
- [3] Schoenberg I.J. Contribution to the Problem of Approximation E-rigidistant Data by Analytic Function [J]. Quart Appl Math,

- 1946, 4: 45-49.
- [4] Hu G S, Ren Z Construction Method of Trigonometric Spline Wavelets[J]. Power System Technology, 2003, 27 (2): 25-29.
- [5] Hu G S A Collocation Method of the Second Fredholm Integration Equation on Global Surface[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1998, 15 (1): 73-78.
- [6] HU Guo-sheng, REN Zhen, HUANG Wen-ying Motor Fault Signals Denosing Based on Chiplet Transform [J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2002, 17 (3): 59-62, 11.
- [7] HU Guo-sheng, REN Zhen, HUANG Wen-ying Location of Slight Fault in Electric Machine using Trigonometric Spline Frequency Modulation Wavelet Transforms [J]. Power System Technology, 2003, 27 (3): 28-31.
- [8] Mann S, Haykin S Chiplets and Wavelets: Novel Time-frequency Methods[J]. Electronic Letters, 1992, 28: 114-116.

收稿日期: 2005-06-03; 修回日期: 2005-07-18

作者简介:

胡国胜 (1965 - ), 男, 博士, 副教授, 研究方向为小波变换、支持向量机及其在电力系统中应用; E-mail: jam\_hu@21cn.com

朱锋峰 (1963 - ), 女, 博士, 副教授, 研究方向为小波理论在电力系统中应用。

### Power quality disturbance detection and identification using Chiplet transform with trigonometric spline kernels

HU Guo-sheng<sup>1,3</sup>, ZHU Feng-feng<sup>2,3</sup>, REN Zhen<sup>2</sup>

(1. Guangdong Vocational College of Science and Technology, Guangzhou 510640, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. School of Mathematical Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** Chiplet transforms are generalized cases of Fourier transforms and wavelet transforms and have more flexible time-frequency characteristics than wavelet transforms. But the calculation of continued Chiplet transform is naturally numerical calculation of integration. Traditionally, the integrand of Chiplet transform is replaced by polynomial interpolation function and the precision is not high enough for detecting power quality disturbance signals. In this paper, the new calculation of Chiplet transform is presented, that is, to enhance calculation precision, continued fraction rational interpolant function is replaced to integrand. Finally, trigonometric spline wavelet function is regarded as mother function of Chiplet transform, and Chiplet transforms are used to detect and identify power quality disturbances. The contours of Chiplet transforms can clearly show the location information of disturbances and lasting time.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50077008) and National Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 033044).

**Key words:** power quality; disturbance; Chiplet transforms; trigonometric spline wavelet; continued fraction rational interpolation

(上接第 45 页 continued from page 45)

**Abstract:** Interharmonics are defined as the signal that have frequencies between two harmonics. As the problem of interharmonics in electric power system is increasingly serious, it becomes more and more important to measure interharmonics exactly. To overcome the limitations of FFT based algorithms in interharmonics measurement, a new algorithm based on AR model spectral estimation and suitable for measuring interharmonics is presented in this paper. The two algorithms of AR model spectral estimation, the Burg method and the modified covariance method, are detailed. Some essential issues, such as choice of model order, the spectral distinguishing ability and the antinoising ability of the algorithm, are investigated. The simulation results show that the algorithm is more effective than FFT on both antinoising ability and measuring accuracy in interharmonics measurement, so its application in interharmonics measurement has a good future.

**Key words:** interharmonics; AR model; spectral estimation; FFT