

文章编号: 2095-2163(2021)08-0077-06

中图分类号: TM714

文献标志码: A

# 基于 db4 小波的电能质量去噪及暂态扰动的检测

陈 钊, 李泽滔

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 本文针对暂态电能质量扰动信号具有时间短、变化快、非平稳等特性, 采取一种基于 db4 小波分析的暂态电能检测方法。根据 Mallat 算法, 信号奇异点处的小波变换模极大值能够通过信号的多分辨率分解提取出来, 实现暂态电能质量信号扰动时间的准确定位, 扰动定位前根据信号与噪声在小波变换各尺度上有不同传播特性, 对电能信号小波去噪。利用 Matlab 编程对 5 种暂态电能质量扰动信号进行暂态扰动检测的仿真分析, 结果表明该方法能够准确的获取扰动的起止时间, 精度满足实际的工程需求。

**关键词:** 暂态电能质量; 小波分析; 扰动检测; 小波去噪

## Power quality denoising and transient disturbance detection based on db4 wavelet

CHEN Zhao, LI Zetao

(College of electrical engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** Aiming at the characteristics of short time, fast change and non-stationary of transient power quality disturbance signal, a transient power detection method based on db4 wavelet analysis is proposed. According to Mallat algorithm, the modulus maxima of wavelet transform at singularity points can be extracted by multi-resolution decomposition of signals, and simultaneous interpreting the disturbance time of transient power quality signals. Before the disturbance location, the signals can be denoised by wavelet denoising according to the different propagation characteristics of signals and noises in different scales of wavelet transform. The simulation analysis of transient disturbance detection for five kinds of transient power signals is programmed on MATLAB. The simulation results show that the method can accurately obtain the start and end time of disturbance, and the accuracy meets the actual engineering requirements.

**[Key words]** transient power quality; wavelet analysis; disturbance detection; wavelet denoising

## 0 引言

随着电力系统网络结构的复杂化, 无功补偿、谐波抑制、高压直流输电等新技术的快速出现, 各种冲击性、非线性装置的大规模应用, 以及大量清洁能源接入到电网中, 给电力系统带来了很严重的电能质量问题。然而对电能质量敏感的高精密电力电子设备和可控半导体设备的数量在稳定增长, 这对电能质量的改善提出了更高的要求。其中, 对电能质量进行暂态扰动检测是电能质量治理的前提和基础, 占有及其重要的地位。

电力系统中由各种扰动引起的电能质量问题总体分为稳态电能质量问题和暂态电能质量问题两大类。以谐波为主的稳态电能质量扰动问题研究历史相对较长, 对其进行分析检测的方法较为成熟。而对暂态电能质量扰动问题的关注在近些年才日益增多, 对其研究的起步也相对较晚, 各种检测的方法和

技术还未成熟。由于暂态电能质量具有持续时间短、非平稳、发生随机强等固有特性, 在对暂态电能质量扰动进行检测时, 要求所采用的检测方法具有良好的动态响应特性和实时性。提出了一种暂态电能质量扰动检测的新方法, 该方法非常简单, 不需要设置前置滤波单元, 仅有 2 个参数而且对检测结果的影响不灵敏<sup>[1]</sup>; 利用 STFT 对电能信号进行时频信号分析, 达到对电能质量扰动识别的目的, 同时采用奇异值分解确定扰动时间定位, 检测较为精准, 但该方法窗函数的形状和大小是固定不变的, 自适应能力差, 更适合对平稳信号的分析<sup>[2]</sup>; 提出一种改进多分辨率快速  $s$  变换与二位形态学降噪相结合的暂态扰动识别方法, 该方法在处理含高噪声的信号上优势明显, 但该方法运算量较大, 难以保证实时性<sup>[3]</sup>。目前用于电能质量暂态扰动检测的方法还有局部均值分解 (LMD)、改进的强跟踪 UKF、Prony 分析法、神经网络分析法等。

**作者简介:** 陈 钊 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 故障诊断; 李泽滔 (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能电网、故障诊断、计算机控制技术等。

**通讯作者:** 李泽滔 Email: 2235667181@qq.com

收稿日期: 2021-05-25

小波变换具有良好的时频局部化特性,对突变信号有较强的暂态刻画能力,能通过平移和伸缩等变换对信号进行多尺度分析。在众多小波基函数中, Daubechies 小波具有时域紧支性和正交性,并且具有成熟的快速算法,即 Mallat 算法,被认为是目前最适合用于电能质量暂态扰动分析的基函数<sup>[4]</sup>。有文献证明了其中的 db4 小波是仿真效果最好的<sup>[5]</sup>,因此本文选择 db4 小波变换,用于电能质量暂态扰动分析。由仿真结果可知扰动时间定位的效

果较好,精度满足实际工程的要求。

## 1 暂态电能质量扰动

国际电力电子工程师协会 IEEE 根据电压扰动的幅值变化、频谱特性、持续时间等指标,把由瞬时和短时扰动引起的电能质量定义为暂态电能质量问题,暂态电能质量问题主要可分为电压凸起、电压凹陷、电压间断、振荡暂态、脉冲暂态 5 种,表 1 归纳了这 5 种暂态电能质量问题的定义及相关描述特征。

表 1 暂态电能质量问题的定义及相关描述

Tab. 1 Definition and description of transient power quality problems

类型	定义	相关描述
电压凸起	指供电电源提供的工频电压快速升高	电压有效值上升到额定电压的 1.1~1.8(标么值),然后又恢复到正常电压
电压凹陷	指电力系统中某点工频电压方均根值突然降低	电压有效值下降到额定电压的 0.1~0.9(标么值),然后又恢复至正常电压
电压间断	指电压方均根值降低接近到零值	在较短的时间内系统工频电压下降到 0.1(标么值)以下,然后又恢复至正常电压
振荡暂态	电流或电压在其稳态条件下的一个非工频、突发的变化	这种变化是双极性的,即有正变化也有负变化
脉冲暂态	稳态情况下突发的、非电源频率的变化	在极短的时间内发生的电压或电流或两者以非电源频率发生单一极性的变化

从表 1 看出,电能质量暂态扰动的特征都是电压或电流的急剧变化,持续时间短。小波变换作为一种新型的时频域的分析方法,由于具有良好的时频局部化特性,因而能够很好地用于具有奇异性特征的暂态电能质量扰动信号的检测中。

## 2 电能质量暂态扰动小波检测方法

### 2.1 小波变换

小波分析是在构造基函数的基础上,通过基函数对已知信号进行逼近和展开,从而达到对已知信号的特性进行研究的目的是。

设  $\Psi(t) \in L^2(R)$ ,其傅里叶变换为  $\hat{\Psi}(w)$ ,当  $\hat{\Psi}(w)$  满足容许性条件(1)(完全重构条件或恒等分辨率条件)时,称  $\Psi(t)$  为一个基本小波或母小波。

$$C_{\psi} = \int_R \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{|w|} dw < \infty, \quad (1)$$

将母函数  $\Psi(t)$  经平移和伸缩后得式(2),称其为一个的小波序列。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right), \quad a, b \in R; a \neq 0, \quad (2)$$

其中,  $a$  为伸缩因子,  $b$  为平移因子。

对于任意的函数  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换为式(3):

$$W_f(a,b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \int_R f(t) \overline{\psi \left( \frac{t-b}{a} \right)} dt, \quad (3)$$

其重构公式(4)(逆变换)为:

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a,b) \overline{\psi \left( \frac{t-b}{a} \right)} da db. \quad (4)$$

### 2.2 Mallat 快速算法

信号中的快速变化成分和缓慢变化成分的特性不同,因此要对其分别进行处理, Mallat 提出的信号塔式多分辨率分解与综合算法,很好的达到这一目的,简称 Mallat 算法。Mallat 算法本质就是小波变换的快速算法,基本思想如下:假设已经计算出了信号  $f(t) \in L^2(R)$  在分辨率  $2^{-j}$  下的离散逼近  $A_j f$ , 则  $f(t)$  在分辨率  $2^{-(j+1)}$  的离散逼近  $A_{j+1} f(t)$  可通过用离散低通滤波器对  $A_j f(t)$  获取。

设尺度函数为  $\phi(t)$ , 则对应的小波函数为  $\Psi(t)$ , 由多分辨率分解, 则任意的  $f(t) \in V_{j-1}$  在空间  $V_{j-1}$  的展开式(5)为:

$$f(t) = \sum_k c_{j-1,k} 2^{-(j+1)/2} \phi(2^{-j+1}t - k), \quad (5)$$

将  $f(t)$  分解一次, 则有式(6):

$$f(t) = \sum c_{j-1,k} 2^{(-j+1)/2} \phi(2^{-j+1}t - k) + \sum d_{j-1,k} 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k), \quad (6)$$

此时,  $c_{j,k}$  和  $d_{j,k}$  为  $j$  尺度上的展开系数, 式(7)和式(8):

$$c_{j,k} = \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle = \int_R f(t) 2^{-j/2} \phi^*(2^{-j}t - k) dt, \quad (7)$$

$$d_{j,k} = \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle = \int_R f(t) 2^{-j/2} \Psi^*(2^{-j}t - k) dt, \quad (8)$$

式中,  $c_{j,k}$  为  $2^{-j}$  分辨率下的粗糙系数,  $d_{j,k}$  为  $2^{-j}$  分辨率下的细节系数。通常称  $c_{j,k}$  为尺度系数,  $d_{j,k}$  为小波系数。

经过一系列的变换, 可得式(9)和式(10):

$$c_{j,k} = \sum_m h_0(m - 2k) c_{j-1,m}, \quad (9)$$

$$d_{j,k} = \sum_m h_1(m - 2k) c_{j-1,m}. \quad (10)$$

式(9)和(10)给出了小波变换的快速算法, 即 Mallat 算法。其分解过程如图 1 所示。

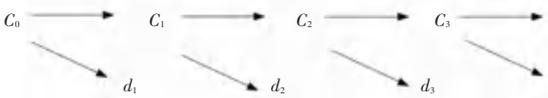


图 1 Mallat 分解算法

Fig. 1 Mallat decomposition algorithm

### 2.3 方法步骤

Mallat 提出信号与噪声在小波变换各尺度上有不同的传播特性, 通过观察不同尺度上的小波变换模极大值的渐变规律和分布规律, 剔除由噪声产生的模极大值点, 用所剩余的模极大值点恢复信号。由于小波阈值去噪是一种实现简单、效果好的小波去噪方法。因此, 本文将采用小波阈值去噪方法。信号小波阈值去噪的主要步骤如下:

- (1) 对含噪信号  $S(t)$  做小波变换, 得到各个尺度下的一组小波系数  $\{d_n^i\}$ ;
- (2) 对  $\{d_n^i\}$  进行阈值化处理, 得到一组新的小波系数  $\hat{d}_n^i$ ;
- (3) 利用新的小波系数  $\{\hat{d}_n^i\}$  进行小波重构, 得到去噪后的信号  $\hat{S}(t)$ 。

小波阈值去噪原理如图 2 所示。

对去噪后的信号进行暂态电能质量信号检测定位流程, 如图 3 所示。



图 2 小波阈值去噪原理图

Fig. 2 Principle diagram of wavelet threshold denoising

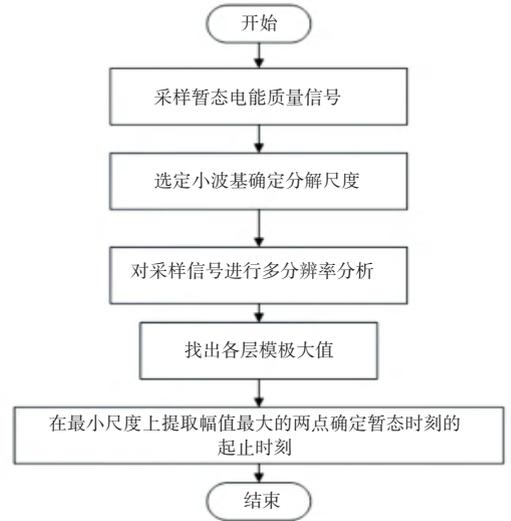


图 3 暂态电能质量扰动时间定位流程图

Fig. 3 Flow chart of time location of transient power quality disturbance

为了对暂态电能质量扰动现象进行检测, 需要确定合理的小波分解层数, 以对信号的频带作出正确的划分。设采样频率为  $f_s$ , 则频带的划分数目可由式(11)取整求得:

$$p = \log_2 \frac{af_s}{ef_0} \sqrt{1/8} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} + 0.5. \quad (11)$$

本文所采用的基频  $f_0 = 50$  Hz, 采样频率  $f_s = 12.8$  kHz。由式(11)可得频带的划分数  $p = 7$ , 即对信号应该进行 6 层多分辨率分析。

对于奇异性分析, 往往采用小波变换多分辨率分析的前两层高频系数来进行判断。本文对 5 种暂态电能质量扰动的分析和判断步骤如下:

- (1) 利用 db4 小波对暂态扰动信号进行 6 层多分辨率分解, 并求得前两层的高频细节系数  $d1$  和  $d2$ ;
- (2) 分别对高频细节系数  $d1$  和  $d2$  求模平均值, 记为  $\text{mean}(dn)$ ,  $n = 1, 2$ ;
- (3) 分别求出高频细节系数  $d1$  和  $d2$  的模极大值, 记为  $\text{max}(dn)$ ,  $n = 1, 2$ ;
- (4) 计算第  $N$  点模极大值和模平均值之比  $m(dn)N$ , 如果  $m(dn) = \frac{\text{max}(dn)N}{\text{mean}(dn)} > 40$ , 则认为信

号在该点附近发生了突变,在该点附近求取最大模极大值点,该点就认为信号的突变点,这里的 40 是本文进行仿真试验后选取的。在实际应用中,该值不是固定的,应根据具体问题具体分析,以找出合适且准确的该值的大小;

(5)对第一层和第二层得到的模极大值点  $N$  计算平均值,以求得信号突变点。

### 3 仿真验证

为验证所提方法的有效性,在 Matlab 上利用 db4 小波对含噪的电压凸起、电压凹陷、电压间断、

振荡暂态、脉冲暂态 5 种电能质量暂态扰动进行仿真验证。仿真波形图如图 4~图 8 所示。

由图 4~图 8 可知,对去噪后信号的奇异性检测的效果较好,说明利用启发式阈值选择的方法对含噪声的 5 种暂态电能质量扰动的去噪效果是满足信号的奇异性检测的。5 种暂态电能质量扰动信号去噪后的信噪比见表 2。用所提方法依次计算出电压凸起、电压凹陷、电压间断、振荡暂态、脉冲暂态的起始时刻和终止时刻,并与实际的起始时刻和终止时刻进行分析比较,得出 5 种暂态电能质量扰动的时间定位结果见表 3。

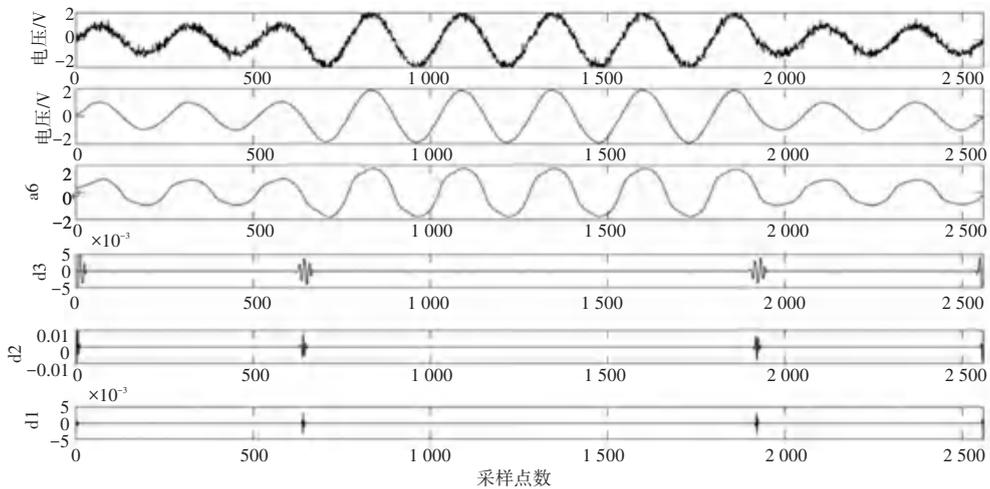


图 4 去噪电压凸起小波分解波形

Fig. 4 Denoising voltage bump wavelet decomposition waveform

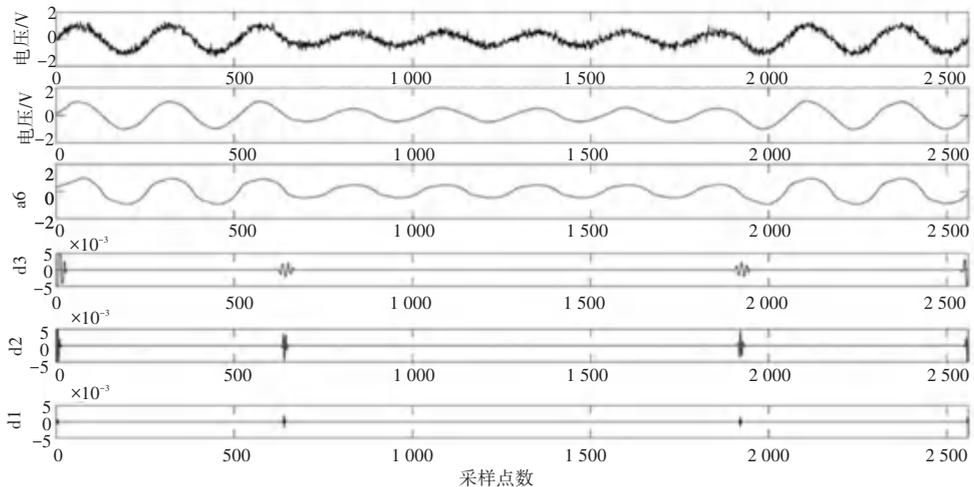


图 5 去噪电压凹陷小波分解波形

Fig. 5 Denoising voltage notch wavelet decomposition waveform

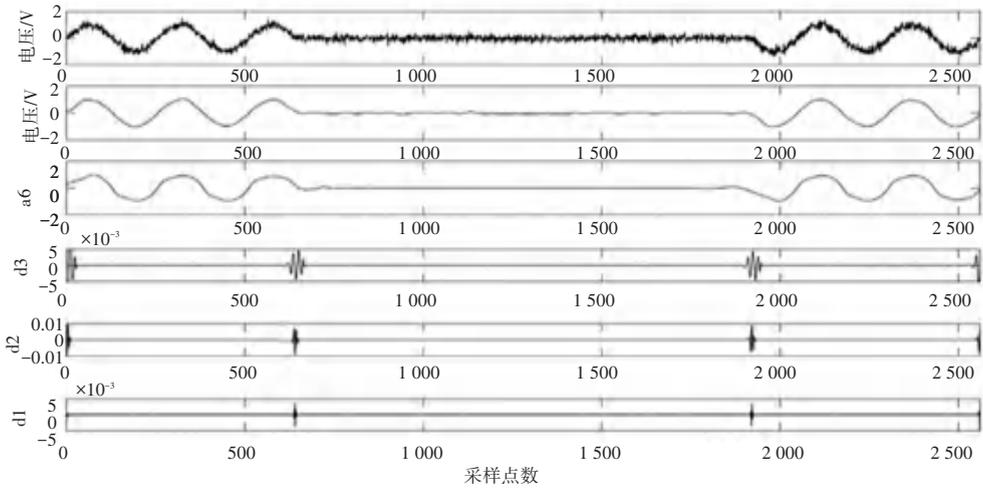


图 6 去噪电压间断小波分解波形

Fig. 6 Denoising voltage discontinuous wavelet decomposition waveform

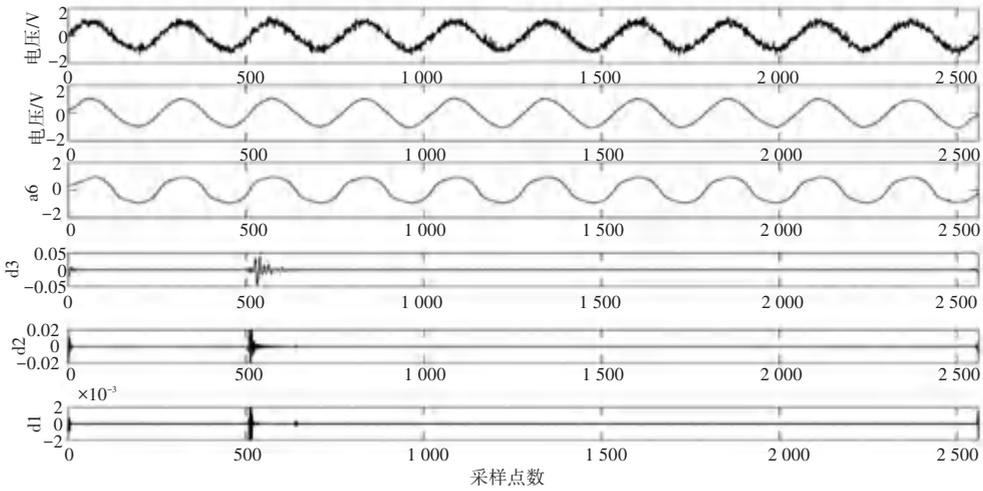


图 7 去噪振荡暂态小波分解波形

Fig. 7 Denoising oscillation transient wavelet decomposition waveform

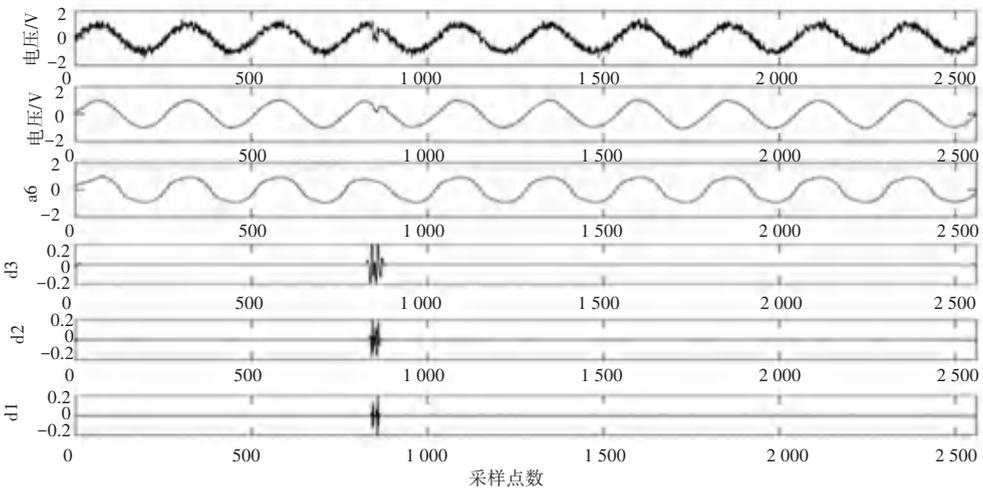


图 8 去噪脉冲暂态小波分解波形

Fig. 8 Denoising pulse transient wavelet decomposition waveform

表 2 暂态电能质量扰动去噪后的信噪比

Tab. 2 Signal-to-noise ratio after denoising of transient power quality disturbance

信噪比 (SNR)	电压凸起	电压凹陷	电压间断	振荡暂态	脉冲暂态
含噪信号	14.894 0	10.037 8	13.973 5	12.104 2	11.898 9
去噪信号	29.074 5	24.112 2	26.957 9	25.748 9	23.486 0

表 3 暂态电能质量扰动的时定位结果

Tab. 3 Time location results of transient power quality disturbances

	实际起始时间/ms	定位起始时间/ms	起始时间绝对误差/ms	实际终止时间/ms	定位终止时间/ms	终止时间绝对误差/ms
电压凸起	50	50.039	0.039	150	150.000	0
电压凹陷	50	50.039	0.039	150	150.000	0
电压间断	50	50.000	0	150	150.078	0.078
振荡暂态	40	40.078	0.078	50	50.078	0.078
脉冲暂态	66	65.977	0.023	67	67.148	0.148

## 4 结束语

本文首先对 5 种电能质量暂态问题的特征描述进行介绍,分析了小波分析在检测电能质量暂态扰动中的优异性,并对检测步骤进行详细描述。在 Matlab 上利用 db4 小波首先对含噪信号进行去噪处理,完成对 5 种暂态电能质量扰动的时定位。由仿真结果可知,在去噪后扰动时定位的效果较好,完全满足工程应用精度。

## 参考文献

[1] 王燕,李群湛,周福林. 一种暂态电能质量扰动检测的新方法

[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7121-7132, 7426.

- [2] 徐永海, 赵燕. 基于短时傅里叶变换的电能质量扰动识别与采用奇异值分解的扰动时定位[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 174-180.
- [3] 黄南天, 张卫辉, 蔡国伟, 等. 采用改进多分辨率快速 S 变换的电能质量扰动识别[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1412-1418.
- [4] AVDAKOVIC, SAMIR, et al. Wavelet transform applications in power system dynamics [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 83(1): 237-245.
- [5] 鲁波涌, 黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 171-177.

(上接第 76 页)

- [9] ZHANG J, SMALL M. Complex network from pseudoperiodic time series: topology versus dynamics. [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(23): 238701.
- [10] LACASA L, LUQUE B, BALLESTEROS F, et al. From time series to complex networks: the visibility graph [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(13): 4972-4975.
- [11] DONNER R V, ZOU Y, DONGES J F, et al. Ambiguities in recurrence-based complex network representations of time series [J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2010, 81(2): 015101.
- [12] BARTOLO L, LUCAS L, BALLESTEROS F J, et al. Feigenbaum Graphs: A Complex Network Perspective of Chaos [J]. Plos One, 2011, 6(9): 22411.

- [13] MCCULLOUGH M, SMALL M, STEMLER T, et al. Time lagged ordinal partition networks for capturing dynamics of continuous dynamical systems [J]. Chaos An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2015, 25(5): 053101.
- [14] GAO Z, JIN N. Flow - pattern identification and nonlinear dynamics of gas-liquid two-phase flow in complex networks [J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2009, 79(2): 066303.
- [15] LACASA L, A NUÑEZ, É. ROLDÁN, et al. Regular Article THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B Time series irreversibility: a visibility graph approach [J]. European Physical Journal B Condensed Matter & Complex Systems, 2012, 85(6): 1-11.
- [16] STEPHEN M, GU C, YANG H. Visibility graphlet approach to chaotic time series [J]. Chaos, 2016, 26(5): 053107.