

# 基于经验模态分解的电能质量扰动信号定位方法

黄奂, 吴杰康

(广西大学 电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004)

## A Method to Locate Power Quality Disturbing Signal Based on Empirical Mode Decomposition

HUANG Huan, WU Jie-kang

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** An empirical mode decomposition (EMD) based method to locate power quality disturbing signal is proposed. During the decomposition by EMD, abnormal data will cause local high-frequency abrupt signal in its first intrinsic mode function (IMF) component, and the amplitude of the abrupt signal is evidently higher than that of normal signals. Utilizing this character, at first the EMD is applied to power network voltage containing power quality disturbance; then the obtained first IMF component is derived to get its first-order derivative; and then the first-order derivative is dealt with by adaptive threshold pulse extraction method to determine the position where the disturbance happened and the moments when the disturbance occurred and ended. Simulation results show that the proposed method can locate multi power quality disturbance signals.

**KEY WORDS:** empirical mode decomposition (EMD); power quality disturbance; localization

**摘要:** 提出了一种基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的方法来对电能质量扰动信号进行定位。在EMD方法分解过程中,异常数据会在其第1个固有模态分量中引起局部高频突变信号,此高频突变信号具有幅值相对于无扰动时明显增大的特点。利用此特点,对含有电能质量扰动的电网电压进行EMD分解后得到的第1个固有模态分量求取一阶导数,然后对一阶导数进行阈值处理来确定扰动发生及终止的时刻。仿真结果表明,此方法对多种电能质量扰动信号信号有较好的定位效果。

**关键词:** 经验模态分解; 电能质量扰动; 定位

**基金项目:** 国家863高技术基金项目(2007AA04Z197); 国家自然科学基金资助项目(50767001); 广西自然科学基金资助项目(桂科自0640028); 广西高校百名中青年学科带头人资助计划(RC20060808002); 广西壮族自治区教育厅科技计划项目(200808MS150); 广西壮族自治区研究生教育创新计划资助项目(105930901001, 105930904068)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program(2007AA04Z197); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50767001).

## 0 引言

随着国民经济的飞速发展,电力系统的规模不断扩大,电能的使用在人们的生产生活中占据日益重要的地位。同时,大量非线性、冲击性大功率工业负荷的投运,也使电网产生了大量的电能质量问题<sup>[1-2]</sup>。为有效地改善电能质量、保证供电可靠性,电能质量扰动信号的检测已成为一个研究热点。

不少的研究者将小波变换对突变信号敏感的特性运用到电能质量问题的检测上。文献[3]用db4小波对电压暂降、周期脉冲扰动进行2个尺度的分解,利用其模极大值与信号突变点的对应关系,获得了较好的检测效果;文献[4]采用样条小波对电压暂降、电压暂升、电压中断、暂态脉冲等电能质量扰动信号进行二进小波变换,可在分解尺度一上实现较为准确的检测。但是小波基函数的选择对检测结果有较大影响<sup>[5-6]</sup>。

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)法由Huang提出<sup>[7-8]</sup>,实际上是对信号进行平稳化处理的过程,可将非线性、非平稳信号分解成为若干个频率由高至低排列的固有模态分量(intrinsic mode function, IMF)。分解后的IMF分量可以有效地体现原信号所蕴含的物理特征信息。EMD方法具有小波变换的多分辨率优势,同时其分解的基函数是依据信号的局部时间尺度自适应得到,避免了小波变换中分析结果依赖于对小波基函数选择准确性的缺陷。该方法已被应用于机械故障诊断、图像信号分析与处理、数据预测等众多领域<sup>[9-11]</sup>。文献[12]将EMD分解与Hilbert变换相结合,对多种电能质量扰动信号进行分析,通过求取其瞬时频率、瞬时振幅,从而达到对扰动时刻定位的目的。

的,但是对不同种类的扰动要采取不同的处理方法且未考虑噪声。

文献[13]指出,EMD分解过程中,实际信号中的短时(甚至单点)数据异常(发生了异常事件),将对数据造成干扰,形成局部的高频信号,从而影响EMD分解高频部分的结果,即出现了模态混叠现象。电力系统中的电能质量扰动信号也可视为正常电压信号中的异常事件,故对含有扰动信号的电网电压用EMD方法进行分解,其高频分量也会受到影响,体现出与扰动相关的信息。文献[14]对含有瞬时脉冲干扰的电网电压信号进行EMD分解,得到的第1个IMF分量中在扰动出现时段发生了局部的高频突变信号,使这一推论得到了印证。本文将做更为详细的探讨,提出利用异常数据在EMD分解的第1个IMF分量中引起的高频突变信号的特征,对其进行相应处理后可对多种电能质量扰动信号进行较为准确的定位。

## 1 经验模态分解及其模态混叠问题

经验模态分解对信号进行处理的过程被形象地称为“筛”过程,其结果是将信号分解为有限个具有不同时间特征尺度的固有模态函数和一个数据趋势项之和的形式。每个IMF分量均满足以下2个约束条件:1)分量信号极值点的数目与过零点的数目相同或相差最多不超过一个;2)其局部极大值点与极小值点分别所构成的2条上下包络线在分量信号任意点上的平均值都应接近零,这意味着分量信号是关于时间轴对称的。

EMD对信号 $f(t)$ 进行分解的具体过程如下:

1)提取信号局部极值点的序列。通常,对于信号 $f(t)$ 在 $t_i$ 时刻的值,若满足 $f(t_{i-1}) - f(t_i) < 0$ ,且 $f(t_{i+1}) - f(t_i) < 0$ ,则可判断为局部极大值点;反之则为局部极小值点。

2)对信号 $f(t)$ 的局部极大值和局部极小值点之间分别采用3次样条函数进行插值以确定信号的上/下包络线,以 $e_{\max}(t)/e_{\min}(t)$ 来表示,求其局部均值,记为 $m_1(t) = [e_{\max}(t) + e_{\min}(t)]/2$ 。

3)将信号 $f(t)$ 与局部均值 $m_1(t)$ 之差记为 $h_1(t) = f(t) - m_1(t)$ 。

4)对 $h_1(t)$ 做判断,如果它不满足上述IMF分量的2个约束条件,则 $h_1(t)$ 作为新的信号替代 $f(t)$ ,重复步骤1)~3)的操作 $k$ 次,直到 $h_{1k}(t)$ 为IMF函数。此时可得到信号 $f(t)$ 的第1个IMF分量,记

作 $I_{MF1} = h_{1k}(t)$ 。

5)令 $r_1 = f(t) - I_{MF1}$ ,以 $r_1$ 作为新的信号替代 $f(t)$ ,重复步骤1)~4)的操作,可依次得到各个IMF分量 $I_{MF2}$ 、 $I_{MF3}$ 、...、 $I_{MFn}$ ,直至 $r_n$ 很小或成为单调函数,则整个EMD分解过程完成,可记为

$$f(t) = \sum_{i=1}^n I_{MF_i} + r_n \quad (1)$$

EMD实际上是把信号按时间尺度进行筛选的过程,时间尺度是指两相邻极值点的时间间隔。由于逐级分解得到的各个IMF分量的时间尺度逐渐变大,故EMD也可视为是将信号按其频率成分由高至低进行分解的过程。一般来说,EMD分解所得到的模态分量可与真实物理过程相对应<sup>[11]</sup>,但当信号中有间歇信号(局部嵌入信号)出现时,IMF分量中将出现模态混叠现象,体现为有相近时间尺度的信号出现于不同的IMF分量当中。文献[15]以2个算例对模态混叠出现的原因进行了说明,指出由于局部信号的出现造成极值点值突变,影响EMD计算中的上下包络均值,从而导致EMD筛分过程中出现虚假成分。具体数据处理中表现为异常数据点可视为局部的高频信号,第1个IMF分量中将引起高频信号,而正常信号的信号分量被推移至下一分量,逐级影响<sup>[13,16]</sup>。

## 2 电能质量扰动信号的EMD分解

图1为在第186~823个采样点之间出现了电压暂降、含有少量均匀白噪声的电网信号,并对其进行了EMD分解所得到的各个IMF分量。

从以上仿真波形中可以看到,在电压暂降信号

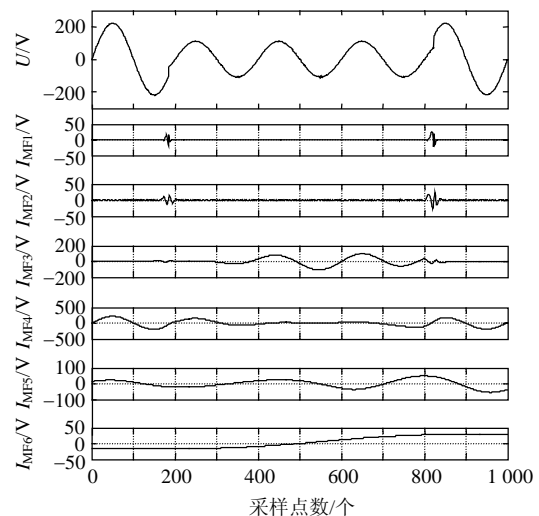


图1 出现电压暂降的电网电压信号及其EMD分解后的IMF分量

Fig. 1 The signal of voltage sags and its IMFs after EMD

发生和终止时刻引起的突变造成的异常数据，使EMD分解中出现了模态混叠现象。在分解所得到的第1个模态分量 $I_{MF1}$ 中，包含了原信号的最高阶频率成分。随着分解的进行，IMF分量中的频率成分逐渐降低。由于突变点所体现的时间尺度很小，在 $I_{MF1}$ 分量中一个局部的高频信号替代了原来的正常信号的频率成分，并导致接下来的各个模态分量中都出现了模态混叠。模态混叠是EMD方法中的难点之一，致力于模态混叠现象的消除及改善已成为一个EMD研究的热点。但在以上仿真中可以观察到，扰动出现及终止时段 $I_{MF1}$ 分量所出现的明显局部的高频突变信号大致地标定了扰动信号发生、终止的时间。

对出现了电压暂升、电压中断、瞬时脉冲、谐波(以上信号中均含少量的均匀白噪声)等电能质量扰动信号的电压波形分别进行EMD分解，仿真结果与上类同。由于扰动所引起的突变点，EMD分解所得到的 $I_{MF1}$ 分量在扰动的发生及终止的时刻附近均出现了与上类似的明显局部的高频突变信号。

对于出现了暂态振荡的电压波形进行EMD分解所得到的IMF1分量略有不同，如图2所示。图2中的暂态振荡的出现时间为第210个采样点。

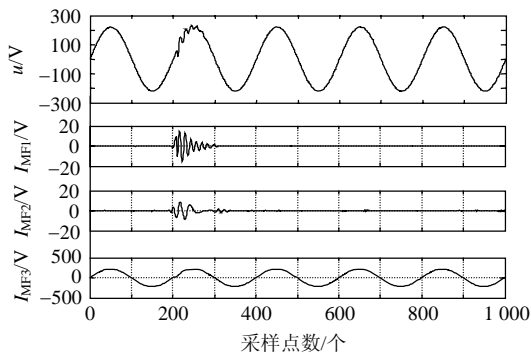


图2 出现暂态振荡的电网电压信号及其EMD分解后的IMF分量

Fig. 2 The voltage signal of oscillatory transients and its IMFs after EMD

### 3 扰动信号的定位

图3(a)是对图1中 $I_{MF1}$ 分量第100~300个采样点的局部放大，从中可以更好地观察到与扰动信号所对应的 $I_{MF1}$ 分量中局部的高频突变信号的波形特征。出现扰动时的局部高频信号的相邻两极值点的幅值差相对于无扰动时明显增大，在与扰动信号突变点出现时刻相对应局部的高频突变信号所反映的局部特征时间尺度很小，突变点处的2个相邻极值有明显跳变(突变点处的极值间隔通常为一个采

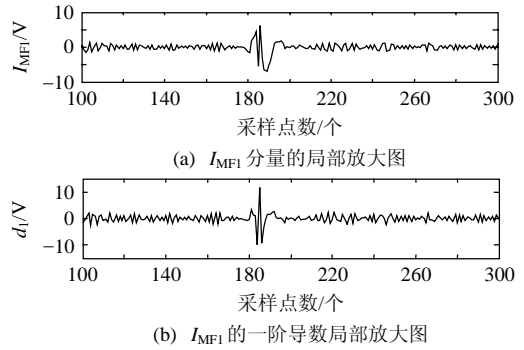


图3 图1中 $I_{MF1}$ 分量及其一阶导数的局部放大

Fig. 3 The local enlarged view of the first IMF and its first derivative of Fig.1

样间隔)<sup>[17]</sup>，波形尖锐，与之相邻的2极值点的时间尺度相对较大，波形变化相对平缓。电压暂升、电压中断、瞬时脉冲、谐波等电能扰动信号EMD分解后所对应的 $I_{MF1}$ 分量中局部的高频突变信号均有类似的波形特征。

根据以上局部的高频突变信号的波形特征，对图3(a)中的信号求取一阶导数<sup>[17]</sup>，结果如图3(b)所示。可以看到，一阶导数信号的模极大值点对应信号的突变时刻，同时与之相邻的极大值点因波形变化相对平缓，求取一阶导数后其幅值也相对减弱，因此通过对与扰动信号所对应的EMD分解所得到的 $I_{MF1}$ 分量求取一阶导数的处理方式可以更为明确地体现扰动信号的突变点的信息。

经过以上处理后得到的波形类似于脉冲信号，可利用自适应阈值脉冲提取方法，以 $\lambda=3\sigma$ 为阈值来提取脉冲信号<sup>[18]</sup>从而确定突变点位置。根据文献[18]，若 $d_1(n)$ 为仅含白噪声的信号，白噪声的标准偏差可近似表示为

$$\sigma \approx \delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_1^2(n)} \quad (2)$$

式中 $N$ 为信号 $d_1(n)$ 的数据长度。

当信号 $d_1(n)$ 中出现脉冲时， $\sigma$ 值增大， $\lambda$ 也随之增大，故此阈值具有随背景噪声、脉冲程度改变而自适应调整的能力<sup>[18]</sup>。

以 $\lambda=3\sigma$ 为阈值对图1中的 $I_{MF1}$ 分量的一阶导数进行阈值处理

$$d_2(n) = \begin{cases} d_1(n) - \lambda, & d_1(n) > \lambda \\ 0, & |d_1(n)| < \lambda \\ d_1(n) + \lambda, & d_1(n) < -\lambda \end{cases} \quad (3)$$

图4(a)为图1中电压暂降信号 $I_{MF1}$  EMD分解后得到的 $I_{MF1}$ 分量；图4(b)是图4(a)信号的一阶导数，图中的虚线为用于进行阈值处理的 $\lambda$ 值；图4(c)是对图4(b)进行阈值处理后的结果。对电压暂升、电

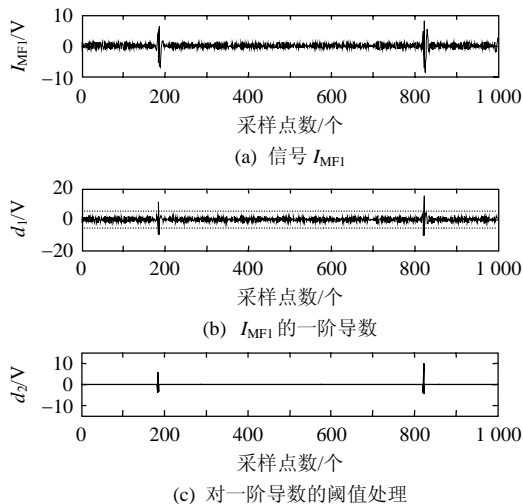


图4 图1中  $I_{MF1}$  分量及其一阶导数的阈值处理  
Fig. 4 The first IMF and the threshold processing of the first IMF's first derivative of Fig.1

压中断、瞬时脉冲、谐波等电能扰动信号进行同样处理, 所得的结果与上类同。

图5为图2中暂态振荡电压信号 EMD 分解后得到的  $I_{MF1}$  分量及其一阶导数阈值处理的结果。

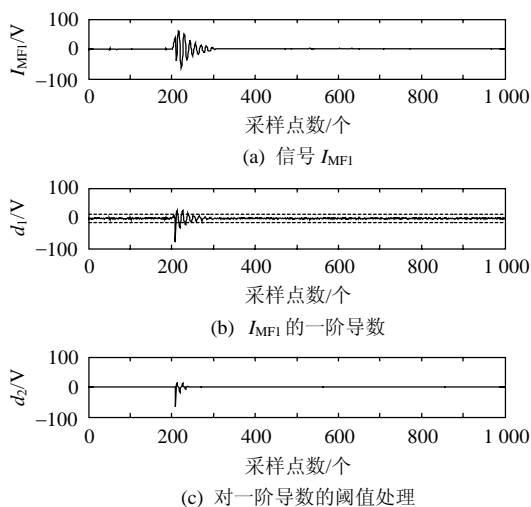


图5 图2中  $I_{MF1}$  分量及其一阶导数的阈值处理  
Fig. 5 The first IMF and the threshold processing of the first IMF's first derivative of Fig.2

即使是同一突变点所引起的  $I_{MF1}$  中的局部高频突变信号, 经过阈值处理后筛选出的非零数据点及其对应的采样点位置都可能是离散的, 故要对所得的非零数据是否属于同一“异常数据”引起进行判断, 以下称之为属于同一数据片。方法如下: 根据上述处理所得到的非零数据点对应的采样点位置, 在  $I_{MF1}$  分量的一阶导数信号中寻找局部极值点。对于连续的数据点认为属于同一数据片, 在其中寻找局部极值点, 单点数据取其本身为局部极值点, 若2个局部极值点符号相反且它们之间的过零点为一个, 或者2个局部极值点符号相同且它们之间的过

零点为2个或无过零点, 则认为这2个极值点相邻, 属于同一数据片。对于出现了电压暂降、电压暂升、电压中断、瞬时脉冲、谐波等扰动的信号, 取数据片中的模极大值的位置作为扰动的起止时刻。对于暂态振荡扰动, 扰动发生时刻应对应于数据片中第1个极值点的位置。

表1是根据上述方法对图1、2中扰动信号进行处理所得到的扰动的起止时间的计算值与理论值(单位: 采样点数)的比对。

表1 图1和图2中电能质量扰动信号的定位结果  
Tab. 1 The localizing results of signals with power quality disturbance of Fig.1 and Fig.2

扰动种类	理论值/个		计算值/个	
	起	止	起	止
电压暂降	186	823	185	824
暂态振荡	210	—	209	—

仿真结果表明, 本文提出的基于 EMD 的电能质量扰动信号定位方法对电压暂降、电压上升、电压中断、瞬时脉冲、暂态振荡、谐波等扰动均有较为准确的定位效果。

当噪声信号太强以致于将信号的突变信息“淹没”时, 算法失效, 因此寻求合适的能兼顾突变点信息保留的消噪方法、高准确率的扰动分类方法是我们后续努力的方向。

## 4 结论

本文将 EMD 方法应用于电能质量扰动信号的处理, 其分解得到的第1个 IMF 分量在扰动的发生及终止时刻出现了明显的局部高频突变信号。利用此局部高频突变信号的特点, 对含有电能质量扰动的电网电压进行 EMD 分解后得到的第1个固有模态分量求取一阶导数, 对其一阶导数进行阈值处理, 可以对扰动发生及终止的时刻进行较为准确的定位。仿真结果验证了此方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.  
Lin Haixue. Main problems of modern power quality[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 5-12(in Chinese).
- [2] 程浩忠. 电能质量讲座第一讲电能质量的研究[J]. 低压电器, 2007(2): 54-58.  
Cheng Haozhong. Lecture on electrical energy quality I. research survey of electrical energy quality[J]. Low Voltage Apparatus, 2007(2): 54-58(in Chinese).
- [3] 耿云玲, 何怡刚, 王群, 等. 采用小波变换检测和定位电能质量扰动[J]. 继电器, 2005, 33(8): 38-40.  
Geng Yunling, He Yigang, Wang Qun, et al. Detection and location

- of power quality disturbances by wavelet transform[J]. Relay, 2005, 33(8): 38-40(in Chinese).
- [4] 王继东. 基于二进小波变换的电能质量扰动检测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 100-103.  
Wang Jidong. Detection of power quality disturbance based on binary wavelet transform[J]. Proceedings of EPSA, 2007, 19(1): 100-103(in Chinese).
- [5] 刘安定, 肖先勇, 邓武军. 基于离散余弦变换和小波变换的电能质量扰动信号检测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 70-74.  
Liu Anding, Xiao Xianyong, Deng Wujun. Detection and analysis of power quality disturbances signal based on discrete cosine transform and wavelet transform[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 70-74(in Chinese).
- [6] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号的小波分析方法及其在应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 1-9.  
He Zhengyou, Qian Qingquan. The electric power system transient signal wavelet analysis method and its application[J]. Proceedings of EPSA, 2002, 14(4): 1-9(in Chinese).
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1998(454): 903-995.
- [8] Rilling G, Flandrin P. On empirical mode decomposition and its algorithms[EB/OL]. <http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/abstractC126.html>, 2004-03-21.
- [9] 于德介, 程军圣, 杨宇. 机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 75-150.
- [10] Yang Z H, Qi D X, Yang L H. Signal period analysis based on Hilbert-Huang transform and its application to texture analysis[C]. Proc of the 3rd Int'l Conf on Image and Graphics, Hongkong, 2004.
- [11] 李天云, 赵妍, 李楠. 基于 EMD 的 Hilbert 变换应用于暂态信号分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 49-52.  
Li Tianyun, Zhao Yan, Li Nan. Apply empirical mode decomposition based Hilbert transform to power system transient signal analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 49-52(in Chinese).
- [12] 李天云, 赵妍, 李楠, 等. 基于 HHT 的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 52-56.  
Li Tianyun, Zhao Yan, Li Nan, et al. A new method for power quality detection based on HHT[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 52-56(in Chinese).
- [13] 赵进平. 异常事件对 EMD 方法的影响及其解决方法研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(6): 805-814.  
Zhao Jingping. Study on the effects of abnormal events to empirical mode decomposition method and the removal method for abnormal signal[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(6): 805-814(in Chinese).
- [14] 罗卫华, 孙云莲. 独立分量分析法在电能质量监测与分析中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 81-84.  
Luo Weihua, Sun Yunlian. Application of independent component analysis in monitoring and analysis of power quality[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 81-84(in Chinese).
- [15] 胡重庆, 李艾华. EMD 间歇信号的检测和提取方法[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(1): 108-111.  
Hu Chongqing, Li Aihua. Method for detecting and extracting intermittency signal in EMD[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2008, 23(1): 108-111(in Chinese).
- [16] 全海燕, 刘增力, 吴庆畅. EMD 模态混叠消除及其在语音基音提取中的应用[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2006, 31(4): 43-45.  
Quan Haiyan, Liu Zengli, Wu Qingchang. Analytical research on the pitch of speech based on EMD[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology Edition, 2006, 31(4): 43-45(in Chinese).
- [17] 黄诚惕. 希尔伯特-黄变换及其在应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [18] 任丽佳, 盛戈皞, 庄启恺, 等. 独立分量分析在输电塔防盗监测系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 97-100.  
Ren Lijia, Sheng Gehao, Zhuang Qikai, et al. Application of ICA on transmission tower theftproof monitoring system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 97-100(in Chinese).



黄奕

收稿日期: 2009-11-21。

作者简介:

黄奕(1974—), 女, 讲师, 主要研究方向为电力系统运行与分析;

吴杰康(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 博士后, 研究方向为现代电力系统分析与控制、电力市场、电力系统经济性与信息化、电力电子技术在电力系统中的应用, E-mail: wuiekang@163.com。

(责任编辑 王晔)