

## 井下综保器改进算法的仿真研究\*

王玉梅<sup>1</sup> 冯红坤<sup>1,2</sup>

(1.河南理工大学电气工程学院 焦作 454000;2.国网河南省电力公司郑州供电公司 郑州 450000)

**摘要:**针对目前井下综保器采用的信号检测算法存在的精度问题,提出将傅里叶变换、小波变换、小波熵理论相结合的综合检测算法。根据小波多分辨率分析这一特点,将采样信号分解为稳态信号和非稳态信号,稳态信号采用傅里叶变换进行处理,非稳态信号采用小波熵进行处理。利用 MATLAB 中的电力系统模块搭建井下供电系统模型,获取相应的电信号,采用傅里叶算法、小波算法及综合检测算法分别进行仿真,结果表明,将傅里叶变换、小波变换、小波熵理论融合后的信号检测算法能够更全面的反映井下供电线路的运行状态,对实现井下综保器可靠动作具有较好的理论价值。

**关键词:**傅里叶变换;小波变换;小波熵;综合保护算法;仿真

**中图分类号:** TM774 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Simulation of underground protector improved algorithm

Wang Yumei<sup>1</sup> Feng Hongkun<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China;

2. Zhengzhou Power Company, Henan Electric Power Company, State Grid Company of China Zhengzhou Henan 450000, China)

**Abstract:** Present the comprehensive protection algorithm combining Fourier transform, wavelet transform and wavelet entropy theory for the accuracy of the protection algorithm used by the underground coal mine protector, Resolve the sampled signal into stationary and non-stationary signals using the wavelet multi-resolution analysis characteristic, and process stationary signals using Fourier transform and dealing with non-stationary signals using wavelet entropy. Establish the model of underground power supply and distribution system, and simulate the improved protection algorithm. The result shows that the comprehensive protection algorithm combining Fourier transform, wavelet transform, wavelet entropy theory reflects the operating status of underground power lines more comprehensively, and it has good theoretical value to achieve reliable operation of underground coal mine protector.

**Keywords:** Fourier transform; wavelet transform; wavelet entropy; comprehensive protection algorithm; simulation

## 1 引言

随着自动化技术在煤矿企业的推广,越来越多的非线性电力电子设备被广泛应用到煤矿井下<sup>[1]</sup>,再加上煤矿井下复杂的环境,井下电网综保器采样得到的电信号中除含有基频分量外,常常还包含有高次谐波等其他类型的信号,这些干扰信号的存在对于综保器信号采样精度及保护的可靠动作产生较大的影响,对煤矿井下供电安全构成威胁,所以研究如何消除这些不安全隐患对于煤矿现代化程度的提高具有至关重要的作用。目前井下综保器采用的信号检测算法主要有真有效值算法、全波傅氏算法、半波傅氏算法、加窗傅氏算法、小波算法等<sup>[2]</sup>。真有效值算法与傅氏算法具有计算方便,计算速度快等优点,但对于突变量、衰减信

号、随机信号不具有普适性,而小波算法是一种对信号时间尺度进行分析的方法,可以弥补傅氏算法处理非稳态信号的不足,但计算过程比较复杂<sup>[3-4]</sup>。本文利用小波多分辨率的特点,将傅里叶变换与小波分析相结合,使它们分别发挥各自在处理稳态和非稳态信号时的优势,对采样信号进行高速、精确处理,从而更好的实现井下综保器的保护功能。

## 2 信号检测算法

## 2.1 傅里叶变换

傅里叶变换是利用傅里叶级数可以将周期函数分解为正弦函数和余弦函数之和这一特点,对周期函数进行离散化处理<sup>[5]</sup>,即假定输入信号为周期信号  $x(t)$ ,则:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n X_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

式中： $k$  为谐波次数， $X_k$ 、 $\varphi_k$  分别为  $k$  次谐波的幅值、初相， $\omega$  为基波角频率， $n$  为谐波分量的最高次数。

设  $X_{Rk} = X_k \sin\varphi_k$ ， $X_{Ik} = X_k \cos\varphi_k$ ，则式(1)可表示为：

$$x(t) = \sum_{k=1}^n [X_{Rk} \cos(k\omega t) + X_{Ik} \sin(k\omega t)] \quad (2)$$

对时间域内连续的输入信号  $x(t)$  每周期进行  $N$  次同步采样，可以得到信号的离散采样点序列： $\{x(1), x(2), \dots, x(i), \dots, x(N)\}$ ，则：

$$x(i) = \sum_{k=1}^n [X_{Rk} \cos(k \frac{2\pi i}{N}) + X_{Ik} \sin(k \frac{2\pi i}{N})] \quad (3)$$

对式(3)进行傅里叶分析可得：

$$X^{(k)} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(i) e^{-j\frac{2\pi}{N}ik} =$$

$$\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n [X_{Rk} \cos(\frac{2\pi i}{N}k) + X_{Ik} \sin(\frac{2\pi i}{N}k)] \quad (4)$$

对采样得到的离散数据利用傅里叶算法进行运算可以得到  $X^{(k)}$  的实部与虚部，进而可以求得采样信号的幅值及相位等相关参量，但由于该算法的处理对象是周期函数，而在井下复杂环境中，单一的周期信号几乎是不存在的，致使该算法的应用具有局限性，而小波算法是一种对信号时间尺度进行分析的方法，可用于处理非周期信号，从而弥补傅氏算法的不足。

### 2.2 小波变换

小波变换(wavelet transform)的基本思想是将信号用一簇函数进行表示或者逼近，而所采用的这簇函数是通过基本小波函数经过不同尺度的平移、伸缩构成，从而对信号进行多尺度细化分析<sup>[6]</sup>。

对于任意的函数  $g(t) \in L^2(R)$ ， $g(t)$  的连续小波变换定义为：

$$WT_g(a, b) = \langle g(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-1/2} \int_R g(t) \bar{\psi}(\frac{t-b}{a}) dt \quad (5)$$

式中：

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi(\frac{t-b}{a}) \quad (6)$$

式中： $\psi_{a,b}(t)$  为小波基函数， $a$  为尺度因子， $b$  为平移因子。

由于连续小波变换存在处理数据占用内存过大的缺点，在计算机处理信号时，常对其进行离散化，取  $a = \frac{1}{2^j}$ ，

$b = \frac{k}{2^j}$  ( $j, k \in \mathbf{Z}$ )，则式(6)可表示为：

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (7)$$

$g(t)$  的离散小波变换表达式为：

$$WT_g(\frac{1}{2^j}, \frac{k}{2^j}) = \langle g(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \quad (8)$$

经过对离散小波变换的结果进行逆变换可以得到信号重构公式为：

$$g(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle g(t), \psi_{j,k}(t) \rangle \psi_{j,k}(t) \quad (9)$$

Mallat 根据多分辨率分析的概念对各种小波基的构造方法进行了统一，提出了目前广泛应用的 Mallat 快速小波分解与重构算法<sup>[7-8]</sup>。小波分解与重构的整个过程就是将信号投影到不同频率的子空间当中，然后对小波变换后的高频成分系数或者低频成分系数进行处理并重构。

#### 2.2.1 小波分解

利用 Mallat 算法对采样信号进行分解时，可以把小波变换看成滤波器组<sup>[9-10]</sup>，原理如图 1 所示。

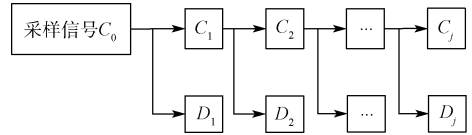


图 1 小波分解算法

选取原始信号  $C_0$  在预定的尺度上进行小波分解，产生两组参数。一组是经由低频滤波器得到的近似信号  $C_1$ ，获得平滑逼近系数；另外一组是经由高频滤波器得到的细节信号  $D_1$ ，获得细节系数。然后继续采用该方法对得到的低频信号  $C_1$  进行处理，分别得到  $C_2$  和  $D_2$ ，以此类推，即可得到小波的多层分解结果，式(10)为小波分解算法。

$$\begin{cases} C_j = \mathbf{H}C_{j-1} \\ D_j = \mathbf{G}D_{j-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{G}$  为滤波器组构成的无穷大矩阵。

#### 2.2.2 小波重构

小波重构是小波分解的逆运算，即利用小波分解第  $N$  层的低频系数和各层高频系数进行小波重构，小波重构算法如图 2 所示。

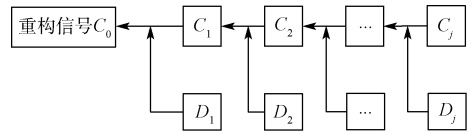


图 2 小波重构算法

### 2.3 小波熵

小波熵是衡量非线性信号动力学行为有序程度的一个量化指标，可以根据信号输入状态判断其复杂程度<sup>[11]</sup>。

设  $E = E_1, E_2, \dots, E_j$  是采样信号  $g(t)$  在  $j$  个尺度上的小波能谱，则小波能谱可以在尺度域上对信号能量进行划分，由正交小波变换的特性可知，在某一时间窗内，信号总功率  $E$  与各分量功率和相等。假设  $p_j = E_j/E$ ，则  $\sum p_j = 1$ ，则相应的小波能谱熵(wavelet energy entropy, WEE)为：

$$WEE = - \sum p_j \log p_j \quad (11)$$

式中：当  $p_j = 0$  时，令  $\log p_j = 0$ 。

根据小波能谱熵的定义可知,信号的小波能谱熵越小表示信号波形越有规律。反之,小波能谱熵越大表示信号越没有规律。当系统出现故障或者受到较大扰动时,相关的电参量发生较大变化,其熵值将随之发生变化<sup>[12]</sup>。本文将小波熵应用于非稳态信号的分析,旨在提取突变点、高频扰动等各种非稳态信号的相关信息。

### 2.4 信号综合检测算法

通过分析井下供电网络中综保器采样得到的电信号特点,即基波及低次谐波存在于信号的稳态部分,而各种扰动、冲击等非稳态信号存在于信号的非稳态部分。基于这样的特点,本文提出融合傅里叶变换、小波变换、小波熵理论的信号综合检测算法。该算法运用小波多分辨率分析这一特点将采样信号的高频部分与低频部分分别进行处理<sup>[13-14]</sup>,对于小波重构得到的高频成分,利用小波能量熵提取其相关信息<sup>[15]</sup>,对于低频成分利用快速傅里叶变换进行处理,确定基波及低次谐波的含量,将小波熵与傅里叶变换的优势融合在一起,提高算法的精度,减少井下综保器的故障误判,该算法原理如图 3 所示。

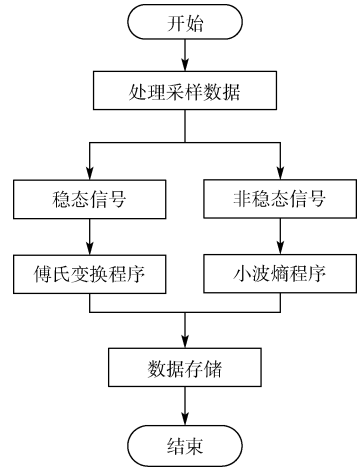


图 3 信号综合检测算法

### 3 信号检测算法仿真分析

利用 MATLAB/Simulink 中的电力系统模块 SPS 搭建井下电网供电系统网络模型,如图 4 所示。

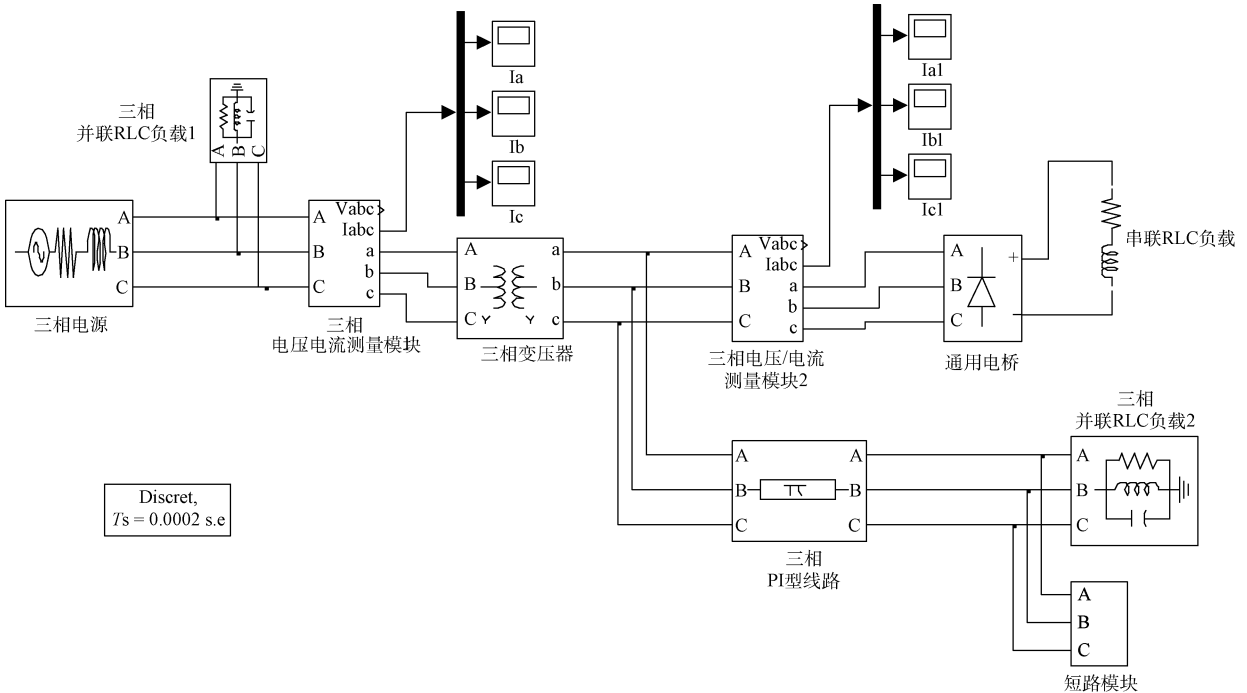


图 4 井下供电网络网络模型

考虑到煤矿井下存在着大量的异步电动机、启动器、变频器等非线性负载这一实际状况,环境较复杂,该仿真模型引入非线性负载、噪声干扰以及短路故障,获取供电线路故障相的电参量,并将采样得到的信号与 Simulink 程序之间建立连接,完成检测功能。得到如图 5 所示的信号时域波形。

#### 3.1 傅氏算法仿真结果

直接对由搭建的井下供电系统得到的电信号进行快

速傅氏分析,得到的快速傅里叶变换幅频特性曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,利用傅里叶变换检测出的信号中除了基波外,还包含有 3、5、7 次等高次谐波。但由于傅里叶变换基于周期信号设计,由于非周期信号的存在对检测结果会产生一定的影响,该算法不再能够准确反映信号的真实情况。

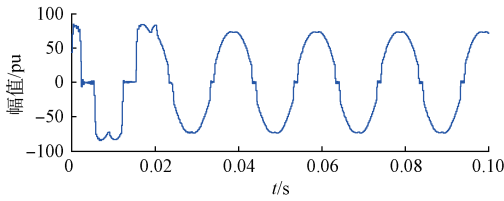


图 5 仿真信号时域波形图

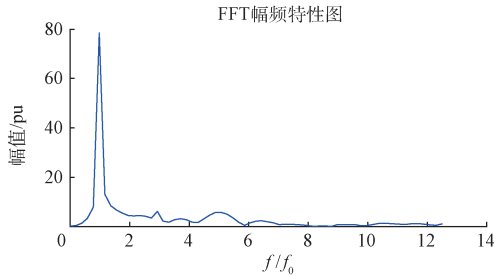


图 6 快速傅里叶变换幅频特性图

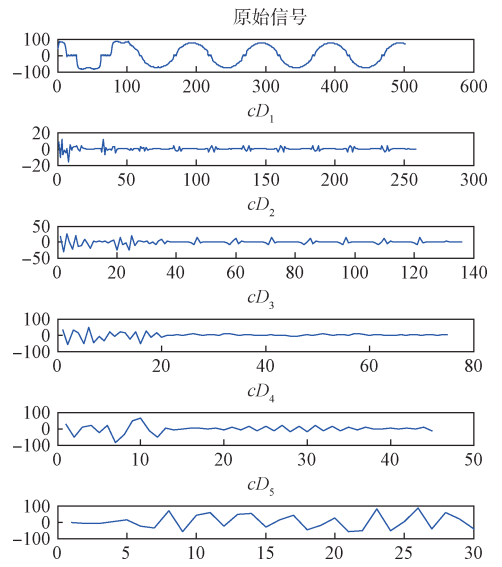


图 7 小波分解后的高、低频系数

### 3.2 小波变换仿真结果

针对傅里叶变换存在的问题,本文利用小波多分辨率分析对该信号进行分解与重构,信号的基波频率为 50 Hz,采样频率选择  $f_s=5\ 000$  Hz,即每周期采样 100 个点,为了使基波与各次谐波及其他非周期信号进行分离,确定对原始信号进行 5 层小波分解比较合适。此时可使得基频处于最低子频带中,第  $k$  层变换的低频系数  $cA_k$  ( $k=1,2,\dots,5$ ) 对应的频率范围为  $0\sim f_s/2^{k+1}$ ,第  $k$  层变换的高频系数  $cD_k$  ( $k=1,2,\dots,5$ ) 对应的频率范围  $f_s/2^{k+1}\sim f_s/2^k$ ,将原始信号进行小波分解得到的高、低频系数如图 7 所示。

根据小波多分辨率分析理论可知,第五层低频带系数  $cA_5$  的范围为  $0\sim 78.125$  Hz,在该频率范围内只有基波成分,故利用  $cA_5$  重构即可得到基波分量;第五层高频带系数

$cD_5$ ,即  $78.125\sim 156.25$  Hz,在该频率范围内只有 3 次谐波成分,即利用  $cD_5$  重构即可得到 3 次谐波分量;同理可知,其他高次稳态谐波也可以利用相应的高、低频系数进行重构。

### 3.3 综合算法仿真结果

本文考虑稳态信号为小于 7 次的谐波成分,将高于 7 次的谐波成分设定在非稳态信号的范围中,即本文利用  $cA_3$  和  $cD_3$  重构出稳态信号成分,重构后的稳态信号波形如图 8 所示。

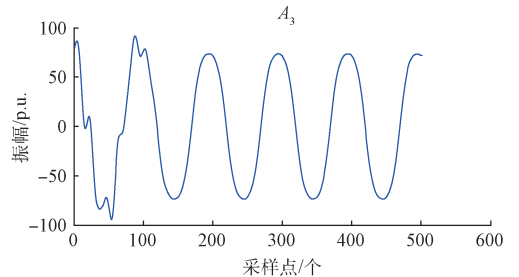
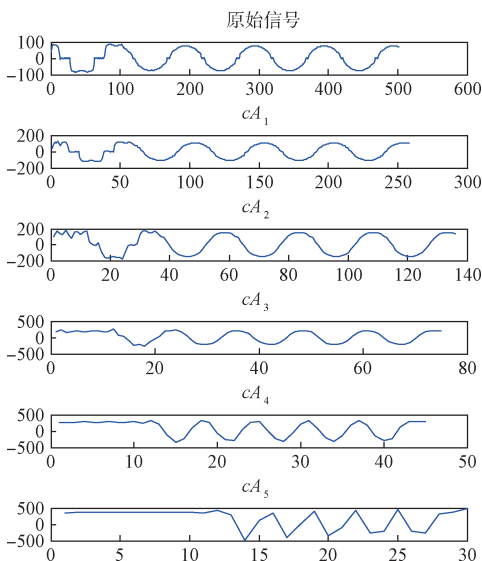


图 8 重构后的稳态信号波形

由图 8 可知,经过小波重构后得到的稳态信号已经基本滤除了非周期信号及高次谐波信号(7 次以上的谐波),对重构后的稳态信号进行傅氏分析可得其幅频特性,如图 9 所示。

同理,利用  $cD_1$ 、 $cD_2$ 、 $cD_3$  可重构出非稳态信号成分,重构后的非稳态信号波形如图 10 所示。

信号  $D1$ 、 $D2$ 、 $D2$  分别由  $cD_1$ 、 $cD_2$ 、 $cD_3$  重构得到,利用小波分析的线性特征可知,三者相加后便是全部的非稳态成分。对非稳态信号用小波熵分析,仿真结果如图 11 所示。

通过观察小波能量熵波形可知,信号的小波能量熵值

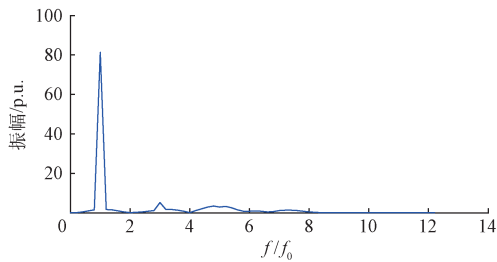


图 9 重构后稳态信号快速傅里叶变换幅频特性图

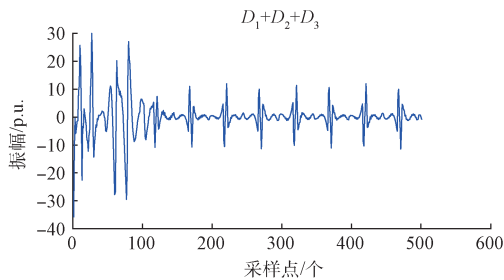


图 10 重构后的非稳态信号波形

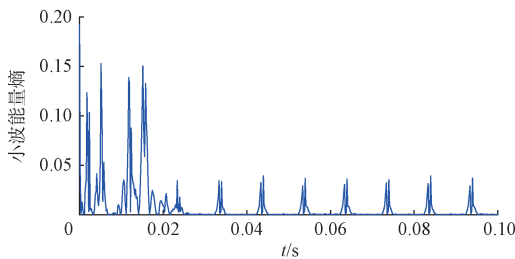


图 11 小波能量熵仿真结果

在 0~0.02 s, 即在这一时间段内, 信号比较复杂, 非周期信号及高次谐波信号含量比较高; 在 0.02 s 之后, 能量熵值较小, 且处于稳定状态。由于非周期信号及高次谐波成分较小, 在原始波形中很难被分离出来, 但小波熵的应用突破了这一难题。

由以上仿真结果可知: 傅里叶变换能够快速准确的处理稳态信号, 而小波熵可以准确的提取出非周期信号及高次谐波信号。

## 4 结 论

本文通过建立井下电网供电系统仿真模型, 利用小波多分辨率分析这一特点, 对采样得到的信号进行分解, 得到稳态和非稳态信号。利用傅里叶变换对稳态信号进行处理; 利用小波熵提取非稳态信号, 可以完成对信号的全面、快速、准确检测。将傅里叶变换、小波变换、小波熵有机结合起来, 共同实现对采样信号的处理, 进而实现对井下故障的判定, 将该算法应用于煤矿井下对实现井下综保器可靠动作具有重要的理论意义与实践价值。

## 参考文献

- [1] 马纳吉, 马安昌. 基于 DSP 的煤矿数字监测系统设  
计[J]. 煤炭技术, 2015, 34(8): 265-266.
- [2] 刘军, 薛蓉, 王得发. 基于小波变换的电力变压器继电  
保护研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 22-26.
- [3] 高玉宝, 陈丁.  $\alpha$  稳定分布下信号的小波分析方法  
[J]. 计算机工程, 2012, 38(5): 186-188.
- [4] 房国志, 杨超, 赵洪. 基于 FFT 和小波包变换的电力  
系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012,  
40(5): 75-79.
- [5] 吴继维, 童晓阳, 廖小君, 等. 一种滤除衰减直流分量  
的全波傅氏改进算法研究[J]. 电力系统保护与控制,  
2016, 44(2): 9-17.
- [6] 龙英, 何怡刚, 张镇, 等. 基于小波变换和 ICA 特征提  
取的开关电流电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报,  
2015, 36(10): 2389-2400.
- [7] 张爱民. 一种基于小波变换的夜视图像去噪和融合  
方法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 38-40.
- [8] 陈靖秋. 基于改进小波分析的电网故障诊断研究[J].  
电测与仪表, 2015, 52(10): 119-123.
- [9] 唐凯, 苏越. 基于连续小波变换的振动故障分析方  
法研究[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(6): 18-20.
- [10] 刘金华, 余堃. 一种采用小波滤波的独立分量分析算  
法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 39-44.
- [11] 陈继开, 李浩昱, 吴建强, 等. 非广延小波熵在电力系  
统暂态信号特征提取中的应用[J]. 中国电机工程学  
报, 2010, 30(28): 25-32.
- [12] 吴炬卓, 牛海清. 基于提升小波分解的小波熵在抑制  
局部放电白噪声干扰中的应用[J]. 高压电器, 2014,  
50(12): 126-132.
- [13] 朱翔, 解大, 高强, 等. 基于 FFT 和 db20 小波变换的  
电力系统谐波联合分析策略[J]. 电力系统保护与控  
制, 2012, 40(12): 62-65, 71.
- [14] 李正明, 徐敏, 潘天红, 等. 基于小波变换和 HHT 的  
分布式并网系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与  
控制, 2014, 42(4): 34-39.
- [15] 陈继开, 周志宇, 李浩昱, 等. 快速小波熵输电系统暂  
态信号特征提取研究[J]. 电工技术学报, 2012,  
27(12): 219-225.

## 作者简介

王玉梅, 教授, 硕士生导师, 主要研究领域为电力系统  
保护及其自动化, 供电技术等。

E-mail: wangym@hpu.edu.cn

冯红坤, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护  
与控制。

E-mail: fhk1991@126.com