

# 基于二元树复小波能量熵测度的局放模式识别

李 新<sup>1</sup>, 任亚英<sup>1</sup>, 彭 怡<sup>1</sup>, 张从力<sup>2</sup>

(1. 重庆大学电气工程学院输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆大学自动化学院, 重庆 400030)

**摘要:** 二元树复小波变换(DT-CWT)在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力,且二元树复小波还具备近似的平移不变、多方向选择、完全重构和高效计算等优点。而基于小波的信息熵能反映信号统计分布特征,突出系统信号中短暂的异常信号,达到及早发现可能故障的目的。笔者对 4 种典型绝缘缺陷产生的局部放电脉冲波形进行二元树复小波分解,将提取每层分解系数上的能量特征和小波能量熵测度作为模式识别的特征量。通过大量的试验获得放电样本,用构建的 BP 神经网络作为分类器,对 4 种典型绝缘缺陷产生的局部放电进行了有效识别,结果表明:采用此特征量的神经网络识别方法简单、有效、实用,为局部放电信号的识别提供了有效的参考。

**关键词:** 局部放电; 二元树复小波; 小波能量熵测度; 特征提取; 模式识别

中图分类号: TM83

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0044-05

## Partial Discharge Pattern Recognition Based on the Dual-tree Complex Wavelet Energy Entropy

LI Xin<sup>1</sup>, REN Ya-ying<sup>1</sup>, PENG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Cong-li<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. The College of Automation at Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The dual-tree complex wavelet transform (DT-CWT) has the ability to characterize local feature of signal in both time-domain and frequency-domain, and the dual-tree complex wavelet has such merits as approximate shift invariance, good directional selectivity, and high computational efficiency. The information entropy based on wavelet can reveal statistic distribution properties of signal and find transient abnormal signal in system signal, so that some faults can be found early. In this paper, the partial discharge (PD) pulse waveforms which are generated by 4 typical insulation defects are transformed by DT-CWT, and then the energy and wavelet energy entropy in every coefficient are extracted as the features for pattern recognition. Discharge samples are obtained through large number of experiments, and a BP neural network, which plays the role of classifier, is established to recognize the PD signals generated by 4 typical insulation defects. The results show that the PD signals can be easily and sufficiently recognized by the neural network method using the features.

**Key words:** partial discharge; dual-tree complex wavelet transform(DT-CWT); wavelet energy entropy; feature extraction; pattern recognition

## 0 引言

气体绝缘开关设备 (Gas Insulated Switchgear, 简称 GIS) 内可能因生产或长期运行中出现的潜伏性绝缘缺陷而导致不同程度的局部放电 (Partial Discharge, 简称 PD), 长期的 PD 将引起绝缘劣化, 甚至击穿或闪络。通过 PD 在线检测可以及时发现 GIS 内部缺陷, 同时采用自动识别技术可以确定 GIS 内 PD 缺陷的类型, 避免重大事故的发生。目前 PD 的

模式识别有基于  $q, \varphi$  的二维、 $q, \varphi, n$  三维分布图的统计方法、分形维数法、时域波形特征参数法等。而特征量的选取主要有自回归参数模型法、数据压缩法、时频谱图特征法<sup>[1]</sup>。

以上都是单从时域或频域来提取特征量, 所描述的放电特征量不能很好地表征脉冲波形。笔者从二元树复小波变换对 PD 信号分解过程入手, 能完整地描述 PD 信号特征的二元树复小波变换系数作为表征 PD 信号的特征子集, 并从特征子集中提取变换系数的能量和小波能量熵测度作为识别 PD 信

收稿日期: 2009-06-07; 修回日期: 2009-08-10

作者简介: 李 新 (1960), 女, 教授, 博士, 博导, 从事电力系统的信号处理、电气设备故障的智能化诊断技术等研究。

号的特征量,以解决局部放电中几种暂态信号识别问题。

### 1 二元树复小波变换

二元树复小波变换(Dual-tree Complex Wavelet Transform,简称 DT-CWT)由 Kingsbury 提出<sup>[2-5]</sup>,它基于实数小波变换实现复小波变换,通过两个并行的实数滤波器组得到实部和虚部系数<sup>[2]</sup>。DT-CWT 的优秀特性包括:近似的平移不变性,完备重构,滤子

族在二维的多方向选择性,低计算复杂度。

#### 1.1 一维二元树复小波变换原理

二元树复小波变换采用了两个实数离散小波变换(Discrete Wavelet transform,简称 DWT):第一个 DWT 对应变换的实部,第二个 DWT 对应变换的虚部。图 1 所示为一维情形下复小波变换的二元树结构,a 树对应复数小波的实部,b 树对应虚部。

这两个 DWT 分别使用不同的滤波器组,每个滤波器组都能满足完全重构条件。 $h_a, g_a$  为 a 树的滤

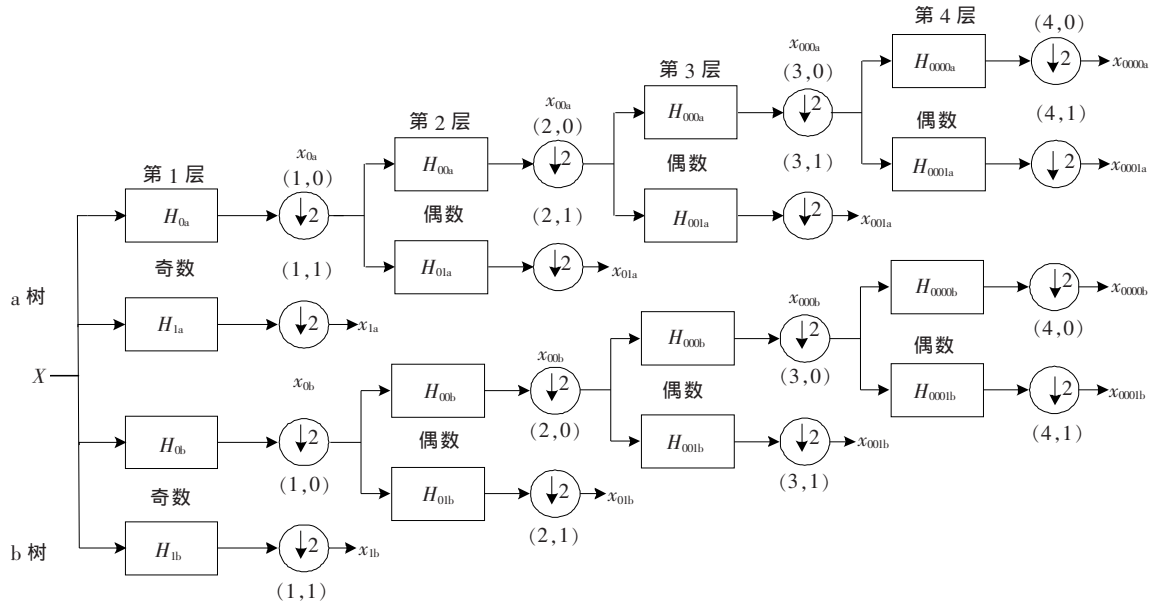


图 1 一维二元树复小波变换结构

波器对,与它相对应的实尺度函数  $\phi_a(t)$  和小波函数  $\psi_a(t)$  定义为

$$\phi_a(t) = \sqrt{2} \sum_n g_a(n) \phi_a(2t-n) \quad (1)$$

$$\psi_a(t) = \sqrt{2} \sum_n h_a(n) \phi_a(2t-n) \quad (2)$$

式(2)中,  $h_a$  为

$$h_a = (-1)^n g_a(d-n) \quad (3)$$

式(3)中,  $d$  为一奇整数。类似定义滤波器  $h_b, g_b$  相对应的实尺度函数  $\phi_b(t)$  和小波函数  $\psi_b(t)$ 。

解析小波的傅里叶变换在负频率处为 0, 可将信号的相位和幅度信息分离, 这是复数小波变换的优点所在。为了使复小波

$$\psi(t) = \psi_a(t) + j\psi_b(t) \quad (4)$$

为近似解析的, 小波变换  $\psi_b(t)$  必须近似为  $\psi_a(t)$  的希尔伯特变换。

若低通滤波器  $g_a, g_b$  均是共轭正交滤波器(CQF), 傅里叶变换  $G_a(w)$  与  $G_b(w)$  满足

$$G_a(e^{jw}) = e^{-j0.5w} G_b(e^{jw}), |w| < \pi \quad (5)$$

则和这些滤波器对应的小波就是一个希尔伯特变换对<sup>[6]</sup>, 即

$$\psi_b(t) \approx H\{\psi_a(t)\} \quad (6)$$

由此可知, 为了使二元树构造的复小波为近似解析小波, 关键在于设计希尔伯特变换对小波, 即合理设计 a 树和 b 树的低通滤波器  $g_a, g_b$ , 使其满足(5)式。这样的复小波具有近似的平移不变性, 也就是说, 对输入信号做一个小的平移, 小波变换系数也随之作小的平移, 系数变化不大, 不同尺度下的能量分布变化不大。

#### 1.2 小波能量熵测度

在信息论中, 熵表示每个符号所提供的平均信息量和信源的不确定性, 它能提供关于信号潜在动态过程的有用信息<sup>[7]</sup>, 而小波变换可以放大某一局部的特性, 因此计算二元树复小波能量熵值就能发现信号中微小而短促的异常<sup>[8,9]</sup>。在暂态信号多尺度表示的基础上, 参照文[8-12], 定义如下沿尺度分布的小波能谱熵。

定义: 设  $E_{jk}$  为信号  $x(t)$  在  $j$  尺度  $k$  时刻上的小

波能量,则  $E_j = \sum_{k=1}^N E_{jk}$  表示  $j$  尺度下  $k=1, 2, \dots, N$  个采样点的信号能量和, 设  $p_{jk} = E_{jk}/E_j$ , 则  $\sum_k p_{jk} = 1$ , 于是定义小波能谱熵  $W_{EE_j}$  为

$$W_{EE_j} = - \sum_k p_{jk} \log p_{jk} \quad (7)$$

以上基于二元树复小波分析方法建立的小波能谱熵可以对时频平面上能量分布的均匀性进行定量描述, 并对局放信号的不确定性和复杂度加以定量度量, 由不同的时频段能量分布的差异来表现不同局部放电信号在时频分布上的差异, 各时频段能量分布的均匀性反映局放信号特征状态的差别, 因而对局部放电具有较好的特征提取和分类能力。

## 2 放电模型试验

试验采用的 4 种缺陷模型<sup>[13]</sup>(即高压导体上金属突出物简称为 N 类放电模型、自由金属微粒简称为 P 类放电模型、绝缘子表面金属污染简称为 M 类放电模型、气隙缺陷简称为 G 类放电模型)在建立的试验装置里进行仿真模拟实验。模拟装置试验接线见图 2, 电源为无晕试验变压器(YDTW-25/100), 传感器为外置环天线<sup>[14,15]</sup>, 示波器为力科 Wavepro7100 (带宽 1 GHz, 最大采样率 20 GS/s, 存储深度双 48 MB), GIS 模拟装置内充以 0.4 MPa 的  $N_2$ 、 $SF_6$  混合气体, 其混合比为 1:4, 环境温度为 22 °C。通过试验获取大量的放电样本(见表 1), 对应的典型放电波形见图 3。(4 种放电波形均为归一化后的波形, 采样点数均为 10 000, 即采样长度为 500 ns, 采样步长为 0.05 ns)。

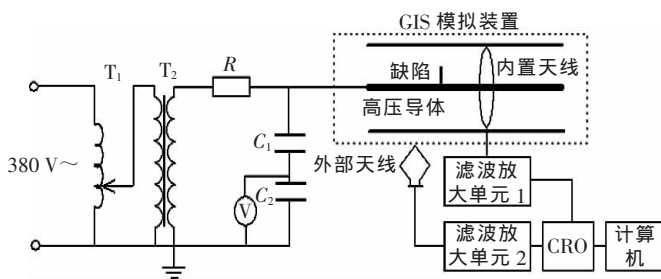


图 2 PD 信号采集装置

表 1 基本实验条件

放电模型	起始放电电压/kV	试验电压/kV	样本数
N	11.3	16.5/18.0	100/100
P	13.5	15.8/19.7	100/100
M	10.0	12.0/14.5	100/100
G	12.5	17.0/19.0	100/100

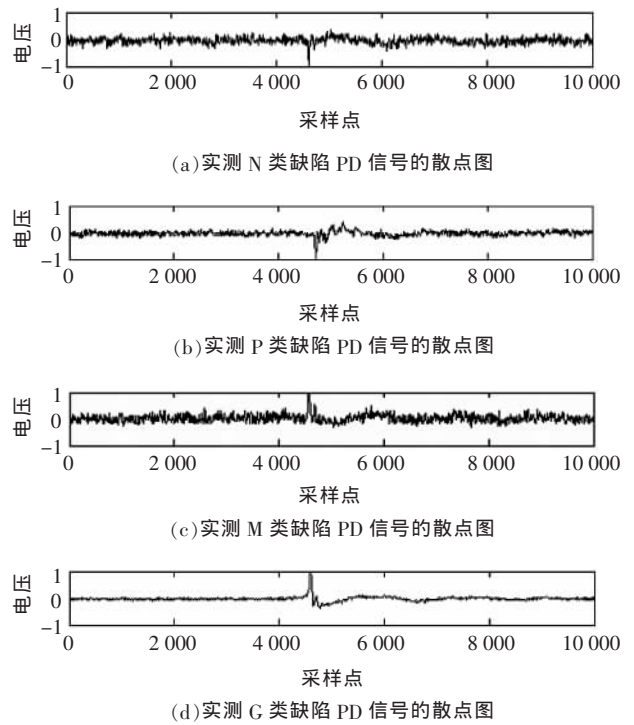


图 3 4 种缺陷的实测 PD 信号的散点图

## 3 局部放电特征选取

从 DT-CWT 对 UHF PD 信号分解过程入手, 综合选用了 UHF PD 信号在各频带投影序列的能量和复合信息的小波熵构造出能描述 UHF PD 信号的特征空间, 其具体步骤如下:

(1) 对 4 种 PD 信号进行二元树复小波多尺度分解。每种 PD 信号采 100 个样本, 每个样本采 10 000 个点。对每种 PD 信号归一化后进行 10 层二元树复小波分解, 得到实部  $R$  系数  $w_{\{1\}\{1\}} \sim w_{\{11\}\{1\}}$ 、虚部  $I$  系数  $w_{\{1\}\{2\}} \sim w_{\{11\}\{2\}}$ 。

(2) 分别计算 4 种 PD 信号从 1 到 10 层实部和虚部的能量, 并分别提取实部和虚部能量较大的五个频段的能量。

(3) 由实部  $R$  和虚部  $I$  系数得到复小波系数的幅值  $M$ , 从而可以得到复合信息  $M^2 R^2 I$  系数, 按式(7)计算  $M^2 R^2 I$  的小波能谱熵  $W_{EE_j}$ 。

### 3.1 二元树复小波变换的复合系数小波熵

目前从小波系数中提取特征量, 其方法主要有以部分小波系数为特征、小波系数统计量为特征、小波系数变换结果为特征等<sup>[10]</sup>。但小波变换不具有平移不变性, 信号在时域上微小平移将导致各尺度上的小波系数发生较大变化, 从而导致分类不精确。基于此, 对 PD 信号进行二元树复小波变换, 得到一系列复小波系数  $(R+iI)$  ( $M$  为复小波系数的幅值), 它完整地描述了 PD 信号的特征, 因此, 不仅可以从实

部  $R$  和虚部  $I$  系数中提取特征量, 还可以根据信号的特点, 把实部、虚部和幅值进行适当的组合以构成复合信息<sup>[16]</sup>, 再从复合信息系数中提取小波能谱熵。选用的复合信息为  $M^2R^2I$ <sup>[17]</sup>。

不同类型的局部放电, 其放电脉冲波形有一定的差别, 这些不同之处经二元树复小波变换之后得到了“放大”, 并且体现在各尺度复小波系数上, 从而

得到各尺度能量的差异, 用小波能谱熵可以较好地反映局放信号特征状态的差别, 对局放信号的不确定性和复杂度加以定量度量。用二元树复小波对每种 PD 信号进行 10 尺度分解, 计算各分解信号的复合信息  $M^2R^2I$  在各频段的小波熵, 并列出了每种放电的 5 到 10 层的小波能谱熵值, 见表 2。

从表 2 可看出, 对于不同 UHF PD 复合信息在

表 2 4 种 UHF PD 复合系数的小波能量熵

特征量	频段	高压导体金属突出物缺陷	自由金属微粒缺陷	绝缘子表面固定金属微粒缺陷	气隙缺陷
复合信息 ( $M^2R^2I$ )	5	0.001 595	0.001 056	2.586 3e-005	3.227e-008
	6	0.029 541	0.213 26	0.026 012	0.025 997
	7	0.158 54	0.109 5	0.018 415	0.270 84
	8	0.006 461 2	0.027 951	0.197 75	0.248 98
	9	0.218 21	0.081 032	0.011 804	0.272 41
	10	0.155 84	0.134 58	0.367 45	0.168 9
	11	0.024 322	0.000 330 36	0.337 54	0.081 749

同一频段的小波熵分布是不同的, 因此, 可以证明从信号小波熵的角度提取特征量是可行的。

### 3.2 二元树复小波变换能量特征

小波变换的能量与原始信号的能量之间存在等价关系。由于不同的局部放电信号在各频段内能量的分布不同, 可以从这一角度出发识别局放信号类型, 但小波变换不具有平移不变性, 信号的平移有可能导致各尺度能量的变化, 而二元树复小波变换最大的特点就是具有优良的平移不变性, 这意味着信

号在时域上的平移不会导致各尺度上的小波系数的能量分布的变化, 因此选取子空间能量作为信号的特征量是最为必要的。

提取信号能量特征的方法: 采用具有 Q-shift 滤波器的二元树复小波对 UHF PD 信号归一化后进行 10 层分解, 计算实部和虚部 1 到 10 层小波系数能量, 从实部和虚部能量中提取 3 个最大值, 并列出了每种放电的前 5 个能量的最大值, 见表 3。

从表 3 可看出, 不同 UHF PD 信号 1 到 10 频

表 3 4 种 UHF PD 的能量特征

特征量	高压导体金属突出物缺陷	自由金属微粒缺陷	绝缘子表面固定金属微粒缺陷	气隙缺陷
实部 1 到 10 频段 前 5 个极大值	13.882	6.676 7	14.69	18.705
	10.082	6.296 1	12.522	10.51
	9.082 1	5.934 8	12.255	7.542 2
	7.474 7	5.466 1	9.057	6.585 8
	6.277 4	5.300 8	8.309 8	6.174 8
虚部 1 到 10 频段 前 5 个极大值	13.475	7.356 7	13.489	16.527
	12.451	7.108 5	12.362	8.646 7
	8.951 7	6.960 7	11.458	8.379 4
	6.449 2	6.334 8	10.522	7.064 8
	5.497 8	4.275 0	9.608 5	6.909 7

段的能量极大值分布全然不同, 且分布具有一定的规律性。例如信号实部和虚部能量分布较为均衡; 自由金属微粒缺陷比其他缺陷的能量极大值较小等。证明, 可以从信号能量极大值特征的角度提取特征量。

## 4 4 种放电类型的识别

由于神经网络自身的特点, 在很多领域得

到了广泛运用。目前用于识别局部放电的人工神经网络主要有前馈网络、自组织特征映射网络、训练向量分区网络和自适应共振网络等, 除了识别率根据放电类型有所差别外, 其有效性没有实质差异。因此, 笔者采用 BP 神经网络。

构建 17 个节点的输入层、一个 12 节点的隐含层和 4 个节点的输出层, 输出层的 4 个节点对应输

出为{1,0,0,0}、{0,1,0,0}、{0,0,1,0}、{0,0,0,1},分别代表N、P、M、G类缺陷。BP网络结构见图4。隐含层传递函数为 tansig 型:  $f(v)=(e^v-e^{-v})/(e^v+e^{-v})$ ; 由于输出值在[0,1]内,输出层传递函数选为 logsig 型:  $f(v)=1/(1+e^{-v})$ 。用动量自适应速率调整梯度下降法训练神经网络。从每类样本中随机选取30组数据用于训练神经网络,余下的用作识别,识别结果见表4(表中  $m$  为待测样本数,  $n$  为正确识别数,  $p$  为正确识别样本数与待识别样本数之比)。采用所选用的特征量,利用神经网络进行局部放电的模式识别时,特征提取容易,神经网络结构不复杂,能够取得较高的识别率,具有一定的实用价值。

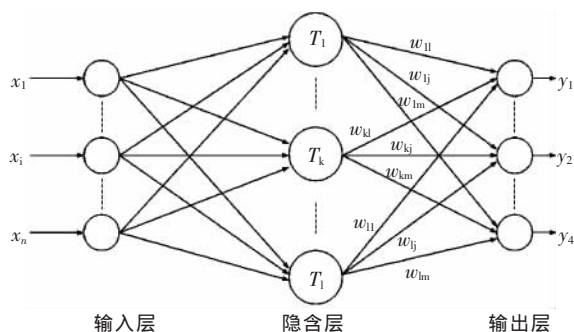


图4 BP网络结构示意图

表4 识别结果

放电类型	$m$	$n$	识别率 $p/\%$
N	70	61	87.1
P	70	66	94.3
M	70	63	90.0
G	70	68	97.1

### 5 结论

(1)对PD信号进行复小波变换后,从实部和虚部的各尺度小波系数中提取用于模式识别的能量特征和基于复合信息的小波能谱熵特征量,能够较好地识别不同的放电类型,说明选取的特征量能较好地描述PD信号的特征。

(2)由于二元树复小波具有平移不变性,信号做微小的平移,小波变换系数也随之作小的平移,系数变化不大,不同尺度下的能量分布基本不变。这就为特征提取提供了良好的平移不变性,能有效地提高识别精度。

(3)针对所提取的特征量构建了相应的BP神

经网络作为识别分类器,并且取得了较好的识别率,表明该方法提取的特征量能够有效区分4种类型的放电形式,且计算量小,易于实现,适用于实时性较强的局部放电在线检测系统。

### 参考文献:

- [1] 王猛,谈克雄.局部放电脉冲波形的时频联合分析特征提取方法[J].电工技术学报,2002,17(2):76-79.
- [2] KINGSBURY N.The Dual-tree Complex Wavelet Transform: a New Efficient Tool for Image Restoration and Enhancement. Proc[C]//European Signal Processing Conference, EUSIPCO 98, Rhodes, 1998:319-322.
- [3] MAGAREY J F A, KINGSBURY N G.Motion Estimation Using A Complex-valued Wavelet Transform[J].IEEE Trans. on Signal Processing, 1998,46(4):1069-84.
- [4] KINGSBURY N.Image Processing with Complex Wavelets, Phil[J].Tran. R. Soc. Lond. A,1999(357):2543-2560.
- [5] KINGSBURY N.Complex Wavelets for Shift Invariant Analysis and Filtering of Signals[J].110 Appl. Comput. Harmon. Anal., 2001,10(3):234-253.
- [6] SELESNICKI W. Hilbert Transform Pairs of Wavelet Bases[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2001,8(6):170-173.
- [7] 李志民,李卫星,李勃龙.熵原理及其在电力设备故障诊断中的应用研究[J].电力系统及其自动化学报,2001,13(3):37-39.
- [8] 何正友,蔡玉梅,钱清泉.小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究[J].中国电机工程学报,2005,25(5):23-43.
- [9] HE Zhengyou, CAI Yumei, QIAN Qingquan. A Study of Wavelet Entropy Theory and Its Application in Power System [C]//IEEE, Robotic and Automation Society, IEEE, Industrial Electronics Society, Proceeding of ICIMA, 2004.
- [10] 张晓文,杨普,许晓鸣.基于小波变换的特征构造与选择[J].计算机工程与应用,2003(19):25-28.
- [11] 印欣运,何永勇,彭志科,等.小波熵及其在状态趋势分析中的应用[J].振动工程学报,2004,17(2):165-169.
- [12] 何正友,刘志刚,钱清泉.小波熵理论及其在电力系统中应用的可行性探究[J].电网技术,2004,28(21):17-21.
- [13] 唐炬,周倩,许中荣,等.GIS超高频局放信号的数学建模[J].中国电机工程学报,2005,25(19):106-110.
- [14] 孙才新,许高峰,唐炬,等.检测GIS局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8):89-94.
- [15] 唐炬,侍海军,许高峰,等.GIS局部放电两种内置传感器响应特性分析[J].高电压技术,2003,29(2):29-31.
- [16] 唐炬,许中荣,孙才新,等.应用复小波变换抑制GIS局部放电信号中白噪声干扰的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(18):30-34.
- [17] 崔雪梅,孙才新,李新,等.实小波与复小波对局部放电在线监测中提取信号特征的特点研究[J].电工技术学报,2004,19(7):90-94.