

基于粗糙集降维理论的 GIS 超高频局放包络模式识别方法

李 清¹, 段大鹏², 邱武斌¹, 蔡开穗¹, 盛戈皞³, 黄兴泉¹, 江秀臣³

(1. 河南电力试验研究院, 郑州 450000; 2. 北京电力科学研究院, 北京 100000;

3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 判断局部放电类型与局放包络信号之间的关系是实现评估气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)的绝缘状态以及制定合理的维修策略的重要前提。笔者利用粗糙集降维理论, 先对表征 UHF PD 包络信号的 37 个特征向量所组成的特征矩阵进行了离散化与差别矩阵约简, 然后利用简约后的特征向量结合 BP 神经网络分类器, 对 4 种不同类型的 UHF PD 包络信号进行了模式识别, 结果表明此方法具有较高的识别率。

关键词: UHF PD 包络信号; 局放类型; 模式识别; 粗糙集降维; BP 神经网络

中图分类号: TM411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)03-0006-06

Pattern Recognition Method of UHF PD Envelope Signal in GIS Based on Rough Set Reduction

LI Qing¹, DUAN Da-peng², QIU Wu-bin¹, CAI Kai-sui¹, SHENG Ge-hao³,
HUANG Xing-quan¹, JIANG Xiu-chen³

(1. Electric Power Research Institute of Henan, Zhengzhou 450000, China; 2. Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100000, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Determining the relationship between partial discharge (PD) type and PD envelope signal is an important premise to assess the insulation state of gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS) and to make rational maintenance strategy. The matrix of 37 feature vectors, with which a UHF PD envelope signal is characterized, is discretized, and its difference matrix is reduced with the dimension reduction rough set theory. Then the reduced feature vectors combining with the BP neural network classifier are applied to pattern recognition of four different types of UHF PD envelope signals. The results show a high recognition rate of the proposed method.

Key words: UHF PD envelope signal; PD type; pattern recognition; rough set reduction; BP neural network

0 引言

局部放电 (PD) 类型的识别是属于模式识别问题。20 世纪 90 年代以来, 模式识别方法开始应用于局部放电类型的识别, 以代替放电谱图的目测判断, 显著提高了识别的科学性和有效性。但是局放信号的检测方法有多种, 如高频 CT 法、超声法^[1]和超高频法(UHF)^[2-10]等。UHF PD 包络信号对硬件要求低,

被广泛地应用于 UHF 信号检测中。因此 PD 类型与与检测信号之间的关系问题是实现评估气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)的绝缘状态及制定合理的维修策略的重要前提。

目前国内外学者采用的局部放电特征提取方法主要包括统计特征参数、脉冲波形特征参数、变换域特征参数和特征空间的降维等。文[11-12]提出单一放电源脉冲幅值直方图很好的符合两参数的 Weibull 分布; 文[13]认为, 混合放电的脉冲幅值直方

收稿日期: 2010-10-13; 修回日期: 2010-11-17

基金项目: 上海市科委资助项目(10dz1203000)。

Project Supported by the Science and Technology Commission of Shanghai(10dz1203000).

图符合多参数 Weibull 分布, 通过 Weibull 分析, 能够估计出各组脉冲幅值直方图的 Weibull 参数及权重值, 该方法中只有局部放电脉冲的峰值, 没有波形信息; 文[14]利用时频变换后的时频能量分布函数提取 PD 特征参数, 包括时间矩、频率矩、时间边缘密度函数、频率边缘密度函数等, 但时频变换特征参数计算复杂, 特征参数维数高, 影响了它们在实际应用中的推广。特征空间的降维方法有多种, 如主成分分析^[15-17](principle component analysis, PCA)、核主成分分析^[18](kernel principle component analysis, KPCA)、粗糙集理论^[19-20](rough set theory, RST)等。由于特征空间降维可实现特征空间维数的压缩, 是现代模式识别领域的发展方向。

笔者运用粗糙集理论对 UHF PD 包络信号特征空间进行有效降维后, 用反向传播神经网络(back-propagation, BP) 分类器对 UHF PD 包络信号进行了识别, 结果表明粗糙集理论降维效果明显和 BP 网络结合具有较高的识别率。

1 粗糙集理论降维原理

粗糙集理论(rough set theory, RST)是波兰数学家 PARLAK Z 于 1982 年提出的一种处理模糊和不确定信息的新型数据分析工具, 现已成为信息科学最活跃的研究领域之一。目前在数据挖掘、特征值选择和提取、数据约简、模式识别等方面得到了广泛的应用。

在粗糙集理论中, 一个知识表达系统 (或决策表)可定义为

$$S=(U, A, V, f) \quad (1)$$

式(1)中: U 是论域, $A=C \cup D$, C 为条件属性集, D 为决策属性集, 两者构成的集合 A 为非空的属性有限集, 而且 $A=C \cup D$, $C \cap D=\emptyset$ 。 $V=\bigcup_{a \in A} V_a$ 为属性值的集合, V_a 是属性 $a \in A$ 的值域, 信息函数 $f: U \times A \rightarrow V$, $f(x_i, a) \in V$, $x \in U$, $a \in A$, f 指定了论域 U 中每个对象的每个属性的值。

若 $P, Q \subseteq A$, 则有

$$\text{pos}_P(Q)=\bigcup_{x \in U/Q} \underline{P}x \quad (2)$$

$\text{pos}_P(Q)$ 为 Q 的 P 正域, 指 U 中所有根据分类 U/P 的信息可以准确的划分到关系 Q 的等价类中去的对象集合。

若 $U/C=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, $U/D=\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$, 则决策属性 D 关于条件属性 C 的支持度(或称条件属性 C 对决策属性 D 的支持度)定义为

$$K_C(D)=\frac{1}{|U|} \sum_{i=1}^m |\underline{C}Y_i|=\frac{1}{|U|} \sum_{i=1}^m |\text{pos}_C Y_i| \quad (Y_i \in U/D) \quad (3)$$

式(3)中, $|Y_i|$ 表示集合包含的元素个数。该参数是指可以根据条件属性 C 可完全划归于某决策类的样本数占所有样本总数的比例。

知识约简是 RST 的核心内容之一, 它在保持分类能力不变的前提下, 通过知识约简, 导出概念的分类规则。RST 知识约简算法的两个关键问题是连续属性离散化与差别矩阵约简。

1.1 基于支持度的连续属性离散化

设 $S=(U, A, V, f)$ 为一个知识表达系统或决策表, 假定: $\forall a \in C, V_a=[l_a, r_a]$, V_a 上的任一断点集合 I_a 定义了值域 V_a 上的一个区间分类 P_a :

$$I_a=\{c_a^0, c_a^1, \dots, c_a^{k_a+1} | l_a=c_a^0 < c_a^1 < \dots < c_a^{k_a+1}=r_a\} \quad (4)$$

$$P_a=\{[c_a^0, c_a^1], [c_a^1, c_a^2], \dots, [c_a^{k_a}, c_a^{k_a+1}]\} \quad (5)$$

$$V_a=[c_a^0, c_a^1] \cup [c_a^1, c_a^2] \cup \dots \cup [c_a^{k_a}, c_a^{k_a+1}] \quad (6)$$

对条件属性中的所有属性均做上述处理, 用一个对属性值域的区间划分 $P=\bigcup_{a \in C} P_a$ 定义了一个新的决策表 $S=(U, A, V^P, f^P)$ 。

离散化的实质就是把每个条件属性的值域划分为有限个区域, 将区域内的属性的值设为某一个相同的离散值。因此, 连续属性离散化的两个关键问题是每一个条件属性的区间个数 k_a 以及每个区间宽度(即各个断点 c_a^i)的确定。

笔者应用基于支持度的等间隔离散化方法, 目标是在保持原始决策属性支持度不变的情况下, 寻找使得约简效率最高的划分, 具体步骤如下:

1) 对于知识系统 $S=(U, A, V, f)$, 构建决策表

$$A_{m \times (n+1)}=C|D=[\bar{F}_{m \times n}|d] \quad (7)$$

式(7)中: $\bar{F}_{m \times n}$ 条件属性集; m 为观测样本数; n 为条件属性的个数; d 为决策属性列;

2) 设定支持度误差 $\varepsilon=0.1$, 均匀离散化区间数的初始化为 $k_a=10$;

3) 对每个属性 $a(i=1, 2, \dots, n)$ 进行 10 个区间的等间隔划分, 离散化后的属性记作 $\{a_i\}$, 用式计算各条件属性 a_i 对决策属性 d 的支持度 $K_{a_i}(d)$, 并取其其中的最大值作为原始决策支持度

$$K_a(d)=\max_{1 \leq i \leq n} [K_{a_i}(d)] \quad (8)$$

4) 则第 j 个条件属性的等间隔划分区间数为 10 个, 令 $C'=\{a_i\}$;

5) 对剩余的 $n-1$ 个条件属性 $a_i(i=1, 2, \dots, n-1)$ 均作如上处理, 以确定每个条件属性的划分区间个数, 看是否能够在 10 级等间隔划分的基础上减少划分区间;

6) 每个属性 $a(i=1, 2, \dots, n)$ 的等间隔划分区间个数全部确定以后, 对每个属性的各个区间由小到大

用整数 0, 1, 2, ... 进行编码, 全部属性离散化完成。

1.2 连接差别矩阵的计算与约简

对于知识系统 $S=(U, A, V, f)$, 设 $x_i(\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n)$, $x_j(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 都是论域 U 中的对象, 而且只取 A_0 集中的属性, n 为属性的个数, 则做一矩阵如下:

$$D(x_i, x_j) = [z_1, z_2, \dots, z_n] \quad (9)$$

其中各元素的计算方法如下:

$$z_i = \begin{cases} 1 & \nu_i \neq \omega_i \\ 0 & \nu_i = \omega_i \end{cases} \quad (10)$$

则 $D(x_i, x_j)$ 称为 U 中对象 x_i 和 x_j 在 A_0 表示下的差别矩阵。则知识系统 S 中的一个对象 x_i 与其他对象在 A_0 表示下的差别矩阵可以表示为:

$$D(x_i, U) = \begin{bmatrix} c_1^1 & c_2^1 & \dots & c_n^1 \\ c_1^2 & c_2^2 & \dots & c_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^{n-1} & c_2^{n-1} & \dots & c_n^{n-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中: $[c_1^j, c_2^j, \dots, c_n^j] = D(x_i, x_j)$ ($j=1, 2, \dots, n-1$) 且 $x_i \neq x_j$ 。

对象 $x_i \in U$ 与对象集 U 在 A 的表示下的差别矩阵 $D(x_i, U)$, 并将其连接在一起, 称为这个知识系统的连接差别矩阵:

$$D(U, U) = \begin{bmatrix} D(x_1, \{U' | U' = (x_2, x_3, \dots, x_n)\}) \\ D(x_2, \{U' | U' = (x_3, x_4, \dots, x_n)\}) \\ \vdots \\ D(x_{n-2}, \{U' | U' = (x_{n-1}, x_n)\}) \\ D(x_{n-1}, \{U' | U' = (x_n)\}) \end{bmatrix} \quad [:]^T \quad (12)$$

由上述定义可见, 寻找最优属性集的问题等价于在连接差别矩阵 $D(U, U)$ 中找到一条由非 0 元素组成的路, 该路涉及最少数目的属性(列)。下面给出应用连接差别矩阵进行属性约简的计算步骤:

1) 对于知识系统 $S=(U, A, V, f)$, 构建决策表:

$$A_{m \times (n+1)} = C[D] = [\bar{F}_{m \times n} d] \quad (13)$$

式(13)中: A 为已经离散化的决策表; m 为观测样本数; n 为条件属性的个数; d 为决策属性列;

2) 计算知识系统 $S=(U, A, V, f)$ 的连接差别矩阵 $D(U, U)$, 计算过程中, 如果出现元素全为 0 的行 $D(x_i, x_i)$, 则在 A 中将样本行 x_i 删除, 并且将 $D(U, U)$ 中已经计算过的与 x_i 相关的行删除;

3) 删除 $D(U, U)$ 中元素全为 1 的行;

4) 删除 $D(U, U)$ 中元素全为 0 的列;

5) 如果 $D(U, U)$ 存在几个相同的行, 则仅保留一行, 删除其余的行;

6) 如果 $D(U, U)$ 中某行元素只有一个 1, 则删除该行, 并将该列属性加入候选属性集, 并删除这一列上元素为 1 的行;

7) 重复步骤 3)-6), 直到 $D(U, U)$ 不能约简为止;

8) 在约简后 $D(U, U)$ 的中由上向下找一条由非 0 元素组成的路, 该路涉及最少的列, 将这些列的属性加入候选属性集 A_0 , 最后得到知识约简属性集 A_0 。

1.3 RST 知识约简的特征空间降维步骤

基于 RST 知识约简的特征空间降维算法步骤如下:

1) 构建决策表:

$$A_{m \times (n+1)} = [\bar{F}_{m \times n} d] \quad (14)$$

式(14)中: $\bar{F}_{m \times n}$ 为归一化特征参数矩阵, 各属性参数的值域 $V \in [0, 1]$; m 为观测样本数; n 为条件属性(即特征参数)的个数; d 为决策属性列(即绝缘缺陷的种类, 分别用离散值 1、2、3、4 表示);

2) 按照文中 1.2 节的方法对决策表进行离散化, 得到离散化属性表 $\hat{A}$;

3) 按照文中 1.3 节所述的方法对 $\hat{A}$ 进行约简, 得到知识约简属性集 A_0 ;

4) 在连续决策表 A 中提取与知识约简属性集 A_0 相对应的列, 组成约简后的属性表 A' , 用于下文的模式识别。

按照上述计算步骤, 在 MATLAB 环境下, 分别对 2 个归一化的特征空间矩阵进行了降维, UHF PD 包络特征参数列表见表 1。

通过 RST 降维算法在基本保持原来分类能力的前提下, 剔除了冗余的特征参数, 降维结果见表 2。可见对于两组特征参数矩阵, 分别将特征参数个数由 37 减少为 19 个和 18 个, 约简后的条件属性(特征参数序号)分别为 (2, 9, 10, 11, 17, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37) 与 (2, 3, 7, 8, 9, 20, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37)。约简掉的特征参数对决策属性的支持度很低, 因此, 可以不必再提取这些特征参数, 实现了真正意义上的降维。

2 BP 网络分类器设计

笔者分别采用 252 kV GIS 和 126 kV GIS 两类不同 GIS 进行测试试验和识别模型的建立, 其中 252 kV GIS 采用三相共箱结构, 126 kV 为三相分箱结构, 且为不同厂商生产。在 252 kV GIS 试品制作了筒底部的自由金属微粒、高压导体上的金属突出物、环氧绝缘子内部气泡、绝缘子表面的金属污秽等 4 种不同的缺陷模型, 每种缺陷采集 100 组共 4×100 组数据; 在 126 kV GIS 试品上制作了高压导体上的金属突出物、外壳上的金属突出物、绝缘子表面的金属污秽、悬浮电极等 4 种不同的缺陷模型, 每种

表 1 UHF PD 包络信号特征参数表

Tab. 1 The feature parameters of envelope signals in time domain

特征参数	序号	特征参数名称	描述
时域脉冲波形特征参数	1	上升时间 T_r	从 10% 上升到 90% 的时间
	2	峰值时间 T_p	从 0 上升到峰值 1 的时间
	3	下降时间 T_d	从 90% 下降到 10% 的时间
	4	脉冲宽度 T_{w1}	从上升沿 50% 到下降沿 50% 的时间
	5	脉冲宽度 T_{w2}	从上升沿 10% 到下降沿 10% 的时间
	6	极值个数 M_{tp}	10%~10% 之间极大值的个数
	7	脉冲面积 A_t	脉冲的积分面积
	8	脉冲均值 $\bar{\mu}_t$	脉冲对时间的平均值
	9	脉冲方差 σ_t^2	采样点的分散程度
频域特征参数	10	第 1 主频 f_1	第 1 谱峰的频率
	11	第 1 主频谱峰 A_1	第 1 谱峰的幅值
	12	第 2 主频 f_2	第 2 谱峰的频率
	13	第 2 主频谱峰 A_2	第 2 谱峰的幅值
	14	第 3 主频 f_3	第 3 谱峰的频率
	15	第 3 主频谱峰 A_3	第 3 谱峰的幅值
	16	谱峰个数 M_{fp}	50% 以上谱峰的个数
	17	频谱均值 $\bar{\mu}_f$	0~100 MHz 频谱的平均值
	18	频谱方差 σ_f^2	0~100 MHz 频谱的方差
分布特征参数	19	突出度 K_{ut}	脉冲的突出或平坦程度
	20	偏斜度 S_{kt}	脉冲的左右不对称程度
	21	Weibul 参数 a	2 参数 Weibul 分布的尺度参数
	22	Weibul 参数 b	2 参数 Weibul 分布的形状参数
	23-34	MFCC	Mel 倒谱系数
	35	脉冲分布均值 $\bar{\mu}_p$	任意 1 个工频周期内的脉冲均值
	36	脉冲分布方差 σ_p^2	任意 1 个工频周期内的脉冲方差
	37	互相关系数 cc	任意半个工频周期内的相关系数

缺陷采集 150 组共 4×150 组数据。局放缺陷的模式识别采用的 BP 网络分类器为 3 层结构,即输入层、隐层及输出层。输入层神经元的个数与特征参数的个数相同 (对于不同的特征参数矩阵采用不同的神

表 2 基于 RST 知识约简的特征空间降维结果

Tab. 2 Dimension reduction performance based on RST knowledge simplification

特征矩阵	$\bar{F}_1(400 \times 37)$	$\bar{F}_2(600 \times 37)$
原决策表	$A_{400 \times (37+1)}$	$A_{600 \times (19+1)}$
约简后的决策表	$A_{400 \times (19+1)}$	$A_{600 \times (19+1)}$

经元个数),隐层神经元的个数取为 25 个,输出层神经元为 2 个,输出函数采用 Logsig 函数,其输出数值的范围为(0,1)。对于 4 类绝缘缺陷,目标输出分别对应 4 个均匀分布的中心点,具体对应关系见表 3。训练误差设置为 0.001,最大训练步长设置为 5 000。

表 3 BP 网络输出与缺陷类型的对应关系

Tab. 3 Relationship of BP outputs and defects

序号	BP 网络输出	252 kV GIS 缺陷	126 kV GIS 缺陷
1	(0.2, 0.2)	GIS 筒底部的自由金属微粒	高压导体上的金属突出物
2	(0.8, 0.2)	高压导体上的金属突出物	外壳上的金属突出物
3	(0.8, 0.8)	环氧绝缘子内部气泡	绝缘子表面的金属污秽
4	(0.2, 0.8)	绝缘子表面的金属污秽	悬浮电极

对于不同结构的 GIS,同样的缺陷类型对应的 UHF PD 检测包络信号模式特征不尽相同,主要原因是由于三相共箱和三相分箱的 GIS 内部结构差别较大,另外不同厂商设备的制造和设计方式也不同,使得局放 UHF 信号的传播特性和激励特性存在较大差异。因此不同结构和类型的 GIS 需要分别进行多组典型缺陷试验来分析和建立 BP 网络识别模型。

3 实验结果及应用说明

对于降维后的特征参数矩阵,一半样本用于训练 BP 网络分类器,另一半样本用于测试分类器的性能,如果 BP 网络识别的输出结果落在表 4 中的 4 个点为圆心,以 0.2 为半径的圆内,则认为识别正确;若输出结果落在圆以外,则认为识别错误。应用 RST 算法降维后的特征参数矩阵,应用 BP 网络分别对 252 kV GIS 和 126 kV 两类 GIS 典型绝缘缺陷类型进行模式识别。在 MATLAB 环境下,实现 BP 神经网络分类器的设计、训练及分类识别测试,并以图表形式输出结果。测试结果分别见图 1、2,对应的识别正确率见表 4。

在实际应用中,需对同一结构的 GIS 针对不同

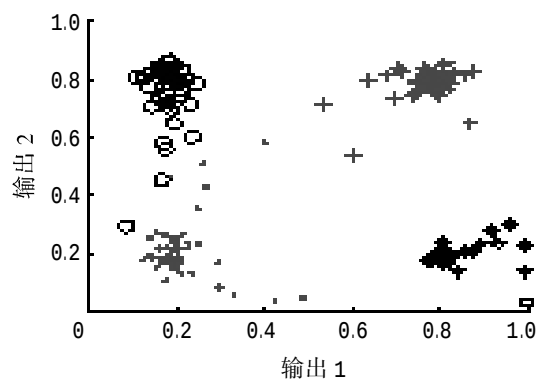


图 1 252 kV GIS 缺陷 BP 网络识别结果

Fig. 1 Performance results of 252 kV GIS defects using BP networks

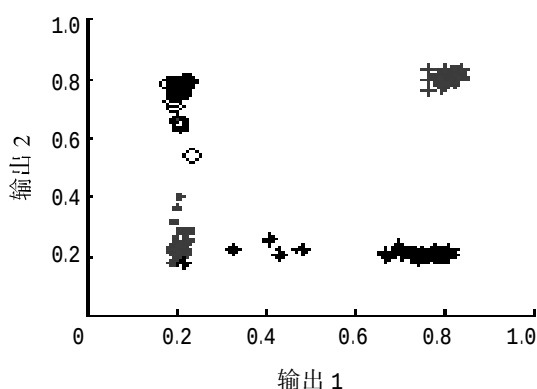


图 2 126 kV GIS 缺陷 BP 网络识别结果

Fig. 2 Performance results of 126 kV GIS defects using BP networks

表 4 GIS PD 包络故障模式识别率对比表

Tab. 4 Performance accuracy of GIS PD defects mode

缺陷类型	1	2	3	4	平均正确率
252 kV GIS	66.00%	92.00%	88.00%	88.00%	83.50%
126 kV GIS	89.33%	90.67%	100%	98.67%	94.67%

的缺陷类型进行多组试验,确定 BP 网络参数后,可以利用实测的局放 UHF 包络信号的降维特征参数实现典型缺陷类型识别,获得较高的识别率。

4 结语

粗糙集降维理论(RST)可以对表征 UHF PD 包络的 37 个特征量进行有效的降维,使之减少 15 维以上。与 BP 神经网络结合后,分别对 252 kV GIS 和 126 kV GIS 的 4 种不同绝缘缺陷进行了识别,结果表明 RST 算法和 BP 网络结合后可以对 GIS 典型故障缺陷进行识别,平均识别率较高,达到工程应用的要求。

参考文献:

- [1] GROEGER J H, ALLEN A, BRAUN J M. Applications of ultrasonic NDE techniques for location and characterization of defects in epoxy composite GIS spacers [C]// Conference Record of the 1990 IEEE International Symposium. Toronto: IEEE, 1990: 443-44.
- [2] METWALLY I A. Status review on partial discharge measurement techniques in gas-insulated switchgear/lines [J]. Electric Power System Research, 2004(69): 25-36.
- [3] KIM J B, KIM M S, PARK K S, et al. Development of monitoring and diagnostic system for SF₆ gas insulated switchgear [C]// Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston: IEEE, 2002: 453-456.
- [4] IEC Pub 270(1981). Partial discharge measurements [S].
- [5] 李立学, 黄成军, 曾奕, 等. GIS 局部放电信号超高频包络检波电路的研制 [J]. 高压电器, 2008, 44(5): 406-408. LI Li-xue, HUANG Cheng-jun, ZENG Yi, et al. Ultra-high frequency envelope detection circuit for GIS partial discharge signal [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5), 406-408.
- [6] 王江, 钱勇, 刘君华, 等. GIS 中局部放电与超高频电磁波关系的仿真研究 [J]. 高压电器, 2008, 44(5): 456-459. WANG Jiang, QIAN Yong, LIU Jun-hua, et al. Simulating the relationship between PD waveform and UHF electromagnetic wave in GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5), 456-459.
- [7] PEARSON J S, HAMPTON B F, SELLARS A G. A continuous UHF monitor for gas-insulated substations [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 6(3): 469-478.
- [8] TOSHIHIRO H, KATSUMI K, NAOKI H, et al. Frequency characteristics of electromagnetic wave radiated from GIS apertures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 552-557.
- [9] JUDD M D, FARISH O, HAMPTON B F. The excitation of UHF signals by partial discharge in GIS [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 213-228.
- [10] PRYOR B M. A Review of partial discharge monitoring in gas insulated substations [C]// IEE Colloquium Partial Discharges in Gas Insulated Substations. London: IEE, 1994: 1-2.
- [11] CACCIARI M, CONTIN A, MONTANARI G C. Use of a mixed weibull distribution for the identification of PD phenomena [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995(2): 1166-1179.

- [12] BARTNIKAS R, McMAHOM E J. Engineering dielectrics[M]. Baltimore: American Society for Testing and Materials, 1987.
- [13] 孙才新, 李 新, 李 俭. 小波与分形理论的互补性及其在局部放电模式识别中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12):73-76.
SUN Cai-xin, LI Xin, LI Jian. Research on complementarity between wavelet and fractal theory and relevant application in PD pattern recognition [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12):73-76.
- [14] SI Wen-rong, LI Jun-hao, YUAN Peng, et al. Feature extraction methods for time frequency energy distribution of PD pulse[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing: CMD, 2008:82-84.
- [15] 张晓星. 组合电器局部放电非线性鉴别特征提取与模式识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
ZHANG Xiao-xin. Study on nonlinear discriminant feature extraction and pattern recognition for partial discharge in GIS[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [16] CHIN T J, SUTER D. Incremental kernel principal component analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(6):1662-1674.
- [17] JOHN S T, CRISTIANINI N. Kernel methods for pattern analysis[M]. Beijing, China Machine Press, 2006.
- [18] DUAN Da-peng, TENG Le-tian, QIAN Yong, et al. Experimental study and feature extraction on UHF partial discharge detection for typical model in air[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008: 1040-1043.
- [19] 张建明, 曾建武, 谢 磊, 等. 基于粗糙集的支持向量机故障诊断[J]. 清华大学学报, 2005, 47(S2):1774-1777.
ZHANG Jian-min, ZENG Jian-wu, XIE Lei, et al. Fault diagnosis based on RS and SVM[J]. Journal Tsinghua University (Science & Technology), 2005, 47(S2):1774-1777.
- [20] PAWLAK Z. Rough sets-theoretical aspects of reasoning about data [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.

李 清(1965—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力设备在线监测, 电力系统自动监视和控制。

邱武斌(1964—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统控制。

蔡开穗(1958—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力设备在线监测, 电力系统自动监视和控制。

盛戈峰(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为输变电设备状态监测及其智能化。

黄兴泉(1959—), 男, 副教授, 研究方向为电力设备在线监测, 电力系统自动监视和控制。

(上接第 5 页)

- ZHANG Jian-hui, GU Le-guan, SUN Cai-xin. An approach of the thyristor-controlled DC Source for pollution test[J]. High Voltage Engineering, 1985, 11(4):35-39.
- [14] 叶汉民. 一种新型的直流污秽试验电源[J]. 高电压技术, 1994, 20(2):85-88.
YE Han-min. A novel DC contamination test power supply [J]. High Voltage Engineering, 1994, 20(2):85-88.
- [15] 许中荣, 唐 炬, 蒋兴良, 等. ± 600 kV 直流污秽试验电源设计与仿真[J]. 高电压技术, 2003, 29(9):10-11.
XU Zhong-rong, TANG Ju, JIANG Xing-liang, et al. The research on the device of ± 600 kV HVDC power source for contamination experiment and its characteristic simulation[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9):10-11.
- [16] 王黎明, 袁法培, 陈 坚, 等. 直流污秽试验系统试验电源控制策略的研究[J]. 电气技术, 2010(3):4-8.
WANG Li-ming, YUAN Fa-pei, CHEN Jian, et al. Research of the control strategy for DC power source used in artificial pollution test[J]. Electrical Engineering, 2010(3):4-8.
- [17] 华中工学院, 上海交通大学. 高电压试验技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [18] 李武峰, 范建斌, 李 鹏, 等. 直流绝缘子串污秽闪络特性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(15):21-24.
LI Wu-feng, FAN Jian-bin, LI Peng, et al. Contamination flashover performance of DC insulator strings [J]. Power System Technology, 2006, 30(15):21-24.
- [19] 廖蔚明. 长串绝缘子直流污闪电压特性[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 1991.
- [20] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22):1-7.
ZHANG Wen-liang, YU Yong-qing, LI Guang-fan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22):1-7.
- 丁 薇(1986—), 女, 主要从事高电压技术的试验研究工作。
张福增(1979—), 男, 博士, 主要从事高电压技术的试验研究工作。
- 马 仪(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压技术的试验研究工作。