

DOI: 10.7667/PSPC170274

基于灰度共生矩阵纹理特征的局部放电模式识别

陈焕栩, 解浩, 张建文, 严家明

(中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 传统的统计参数特征, 因放电次数及放电相位分布等因素的影响, 会出现无效信息, 降低局部放电识别率。为了减少这些因素的影响, 引入灰度共生矩阵纹理特征对局部放电进行模式识别。首先通过实验构造局部放电相位-放电容量-放电次数(φ - q - n)三维图谱, 获得放电分布矩阵。其次计算其对应的灰度共生矩阵, 并提取出相应纹理特征。最后利用聚类分析对不同放电缺陷进行了有效判别分类。实验结果表明: 基于放电分布灰度共生矩阵的纹理特征可以有效辨识不同局部放电类型, 为局部放电模式识别提供了一种新思路。

关键词: 局部放电; φ - q - n 三维图谱; 放电分布矩阵; 灰度共生矩阵; 纹理特征

Partial discharge pattern recognition based on texture feature of gray level co-occurrence matrix

CHEN Huanxu, XIE Hao, ZHANG Jianwen, YAN Jiaming

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: For the characteristics of the traditional statistical parameters, due to the number of discharge and discharge phase distribution and other factors, there will be invalid information, and reduce the partial discharge recognition rate. In order to reduce the influence of these factors, this paper introduces the texture feature of gray-level co-occurrence matrix to make pattern recognition of partial discharge. First, the (φ - q - n) three-dimensional spectrum of partial discharge phase-discharge capacity-discharge numbers is constructed through the experiment, and the discharge distribution matrix is acquired, and then the corresponding gray level co-occurrence matrix is calculated, and the corresponding texture features are extracted, finally, cluster analysis is used to classify different discharge defects effectively. Experimental results show that texture feature based on discharge distribution of gray-level co-occurrence matrix can effectively identify the different types of partial discharge, which provides a new idea for partial discharge pattern recognition.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2012QNA10) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2013M541755).

Key words: partial discharge; φ - q - n three-dimensional map; discharge distribution matrix; gray level co-occurrence matrix; texture features

0 引言

局部放电是有效反映电力变压器绝缘运行状况的主要特征之一, 同时, 局部放电的存在和发展会进一步加重变压器内部绝缘劣化^[1-2], 促使变压器绝缘故障的发生, 导致其停运而造成巨大的经济损失。变压器绝缘劣化程度和故障类型与局部放电模式之间联系紧密, 因此, 正确辨识局部放电缺陷类型可以有效评估变压器绝缘状态和诊断其故障类型,

并及时制定合理的维修策略。

如何提取出有效区分不同缺陷的放电特征量, 并选取合适的分类器, 对于局部放电模式识别至关重要。国内外学者针对局部放电特征提取和识别取得了大量研究成果: 文献[3-4]基于 PRPD 模式提取出局部放电信号统计特征, 通过主成分分析法降维后, 分别利用概率神经网络和多分类相关向量机进行识别归类, 得到较为满意的效果; 文献[5]对比分析了不同放电类型脉冲波形的特征参数, 发现其具有较大差异, 可应用于局部放电类型识别; 文献[6]采用二次等效时频算法提取出可以表征放电脉冲波形特征的高维特征量, 通过改进的模糊 C 均值聚类

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2012QNA10); 中国博士后科学基金(2013M541755)

算法对获取的脉冲群分类，有效地区分了不同放电脉冲信号；文献[7]通过计算局部放电不同频段信号分形维数，利用最小二乘支持向量机实现了对放电样本的分类；文献[8]应用分形理论从局部放电 φ - q - n 灰度图中提取分形维数，通过支持向量机对放电类型进行了有效识别；文献[9]利用离散小波变换的奇异值分解方法对局部放电信号进行奇异值特征提取，采用神经网络分类器对不同放电类型对应的奇异特征值进行分类识别，获得了良好的效果；文献[10]将局部放电信号的分频段能量作为特征向量，利用马氏距离算法对不同局部放电类型进行了聚类分析，获得了良好的识别结果。近年来，有关局部放电图像的纹理特征也受到了国内外学者的关注^[11-12]，但关于利用图像纹理特征对局部放电进行识别的报道尚不多见。为了更好地研究纹理特征对于局部放电模式识别的应用，本文计算了 φ - q - n 三维谱图对应的放电次数分布矩阵，进一步计算其灰度共生矩阵并提取对应纹理特征，将其应用于不同局部放电缺陷的模式识别。

1 局部放电实验

根据变压器运行中常见的绝缘缺陷，设计了三类型绝缘缺陷模型：尖端放电缺陷、绝缘表面放电缺陷、绝缘气隙放电缺陷，分别模拟变压器空气中导线或电极尖端电晕放电、油中绝缘沿面放电、油中绝缘气隙放电。如图 1 所示。其中，绝缘纸板由厚度 0.2 mm 普通牛皮纸制成，直径为 80 mm；气隙试样是由直径 80 mm 绝缘纸板二侧粘合内、外直径分别为 38 mm、80 mm 的牛皮纸绝缘纸环制作而成。

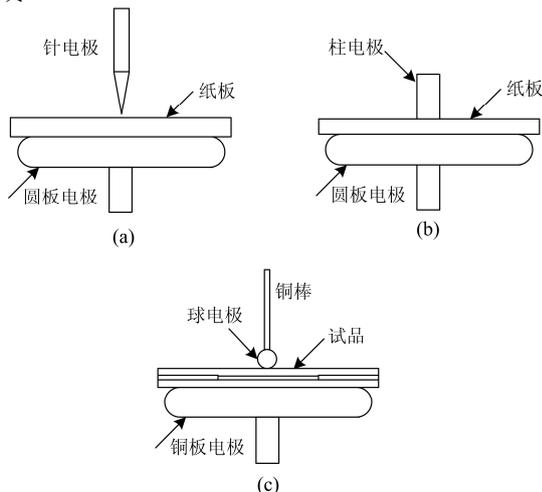


图 1 模型缺陷示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model defect

实验接线见图 2，选择脉冲电流法对局部放电

信号进行测量，每类绝缘缺陷采集 50 组局部放电数据，每组数据采集 100 个工频周期放电信号。

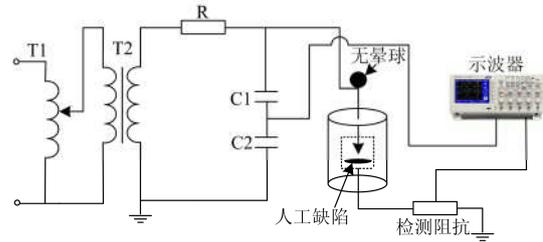
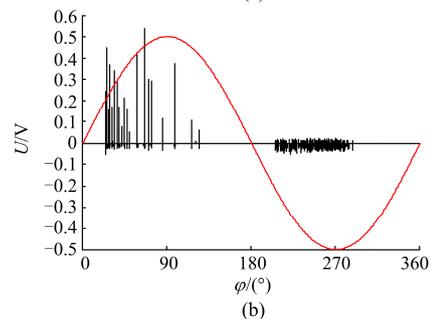
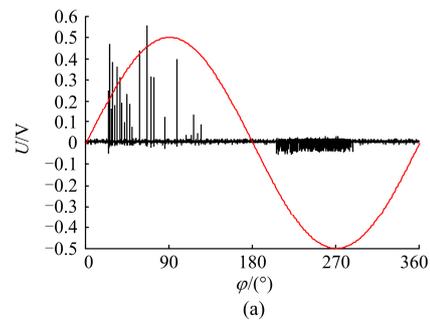


图 2 局部放电测量系统

Fig. 2 Partial discharge measurement system

2 实验结果及分析

图 3 分别为实验所测得的去噪前后三种典型绝缘缺陷单个周期局部放电信号。其中图 3(a)、图 3(b)为空气中电晕模型放电，图 3(c)、图 3(d)为油中沿面模型放电，图 3(e)、图 3(f)为油中绝缘气隙缺陷模型放电。由图可知，放电信号噪声得到有效滤除，去噪后的信号可以用于后续进一步的分析研究；三种类型放电的幅值、相位、频率均有所差异，电晕模型放电在工频正半周时脉冲电压幅值较负半周更大，个别脉冲电压达到 0.5 V 以上，负半周脉冲电压幅值则均在 0.1 V 以下，放电集中在 30°~120°与 210°~290°的相位，且频率较高；沿面模型放电脉冲电压幅值在整个工频周期表现为小而均衡，基本维持在 0.2 V 以下，放电集中在 0°~90°与 180°~270°的相位，频率低于电晕模型放电；气隙缺陷模型放电在工频正负半周较为对称，脉冲幅值介于 0.1~0.6 V，放电主要集中在 20°~80°与 200°~270°外



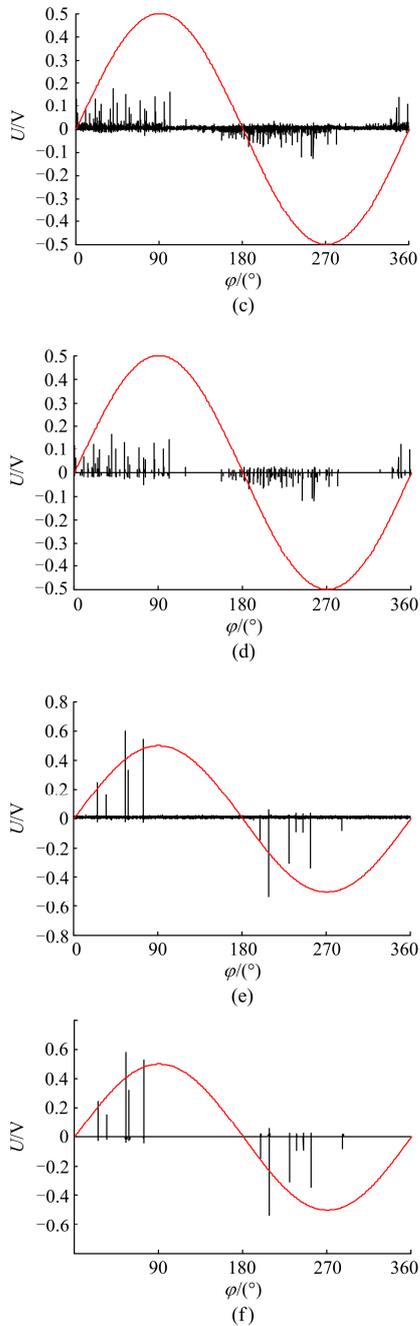


图3 去噪前后单周期局部放电信号

Fig. 3 Single-cycle partial discharge signals before and after denoising

施电压幅值上升处对应相位, 放电频率明显低于电晕及沿面模型放电。由此可初步得知不同缺陷放电信号特征区别较为明显。

2.1 局部放电 PRPD 谱图

根据 1 节所述实验方法, 分别提取了空气中电晕、油中沿面、油中绝缘气隙缺陷模型 100 个工频周期局部放电信号。基于所测得的信号数据, 构造

了不同类型缺陷下相位-放电量-放电次数(φ - q - n)三维图谱, 可同时反映相位、放电量与放电次数三者之间的关系。

将代表相位的横坐标 X 轴平均分成 256 份, 将代表脉冲电压的纵坐标 Y 轴平均分成 128 份, 如此整个 XY 轴截面被分割成 256×128 维的区域矩阵。计算每个分割后区域点的放电次数 $N(\varphi_i, q_i)$, 构造三维统计图谱。绘制的三维谱图见图 4。实验中测得的放电信号是局部放电脉冲电压, 其与局部放电电视在放电量成比例, 因此可用脉冲电压代表实际放电量的大小。

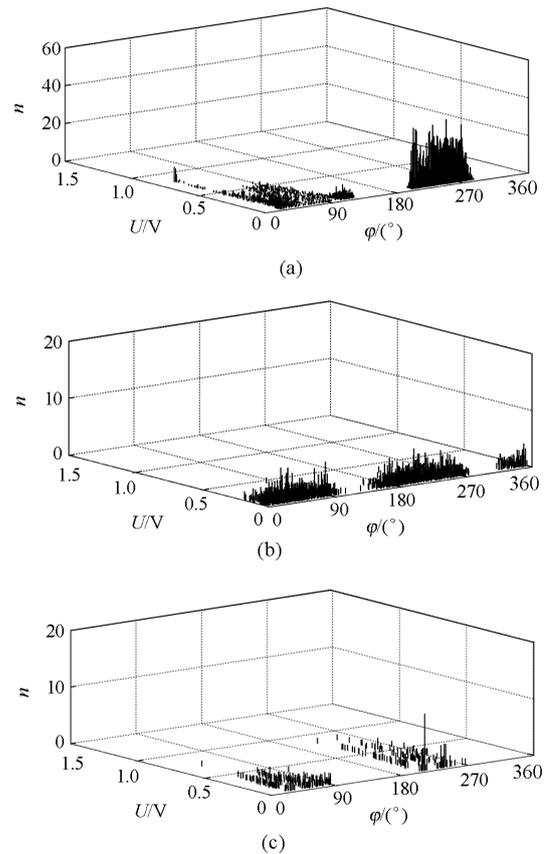


图4 局部放电三维图谱

Fig. 4 Three dimensional map of partial discharge

图 4(a)为空气中电晕模型放电谱图, 图 4 (b)为油中沿面模型放电谱图, 图 4 (c)为油中绝缘气隙缺陷模型放电谱图。由图可知, 空气中电晕放电正负半周放电差异明显, 由于极性效应影响, 正半周放电脉冲次数较少, 但幅值较大, 呈现出大而稀疏的放电, 负半周放电更为剧烈, 但放电强度较小, 呈现出小而密集的放电; 油中沿面放电表现为宽放电相位, 且放电在整个周期内均匀密集; 油中绝缘气隙缺陷正负半周放电对称度较高, 但放电次数较少,

放电集中于外施工频电压幅值上升相位。通过三维 PRPD 图谱可明显得知不同类型缺陷下其放电特征具有较强区分度。

2.2 纹理特征分析的灰度共生矩阵

2.2.1 灰度共生矩阵

灰度共生矩阵是建立在估计图像的二阶组合条件概率密度函数基础上的统计方法，主要描述纹理基元或局部模式随机和空间统计特征，以表示区域的一致性及其区域间的相对性，能反映出图像灰度关于方向、相邻间隔、变化幅度的综合信息，是分析图像的局部模式和它们排列规则的基础^[13-14]。

设 $f(x,y)$ 为一幅二维数字图像，其大小为 $M \times N$ ，灰度级别为 N_g ，则满足一定空间关系的灰度共生矩阵为

$$P(i, j) = \#\{(x1, y1), (x2, y2) \in M \times N | f(x1, y1) = i, f(x2, y2) = j\} \quad (1)$$

式中： $\#(x)$ 表示集合 x 中的元素个数，显然 P 为 $N_g \times N_g$ 的矩阵，若 $(x1, y1)$ 与 $(x2, y2)$ 间距离为 d ，两者与坐标横轴的夹角为 θ ，则可以得到各种间距及角度的灰度共生矩阵 $P(i, j, d, \theta)$ 。

图 5 显示了如何求解灰度共生矩阵，以 $(1, 1)$ 点为例，GLCM(1, 1) 值为 2，说明有两对灰度为 1 的像素水平相邻。GLCM(5, 5) 值为 1，则有一对灰度为 5 的像素水平相邻。

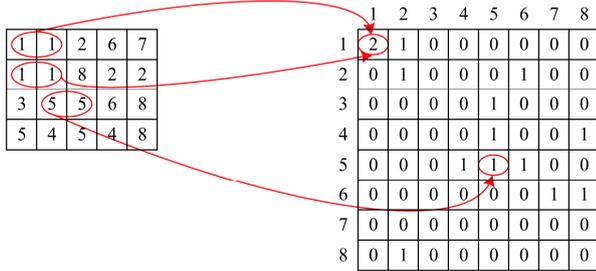


图 5 灰度共生矩阵求解图

Fig. 5 Solution of gray level co-occurrence matrix

2.2.2 灰度共生矩阵的纹理测度

Haralick^[15]等人在灰度共生矩阵的基础上提取了 14 种反映矩阵纹理状况的量化方法，本文从中选取了六种最常用的线性不相关特征。

1) 角二阶矩(Angular Second Moment)

$$ASM = \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} P_{d,\theta}(i, j)^2 \quad (2)$$

式中， N_g 为灰度级，其反映了图像灰度分布的均匀程度和纹理的粗细度。

2) 相关(Correlation)

$$COR = \sum_{i,j=0}^{N_g-1} P_{i,j} \left[\frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{(\delta_i^2)(\delta_j^2)}} \right] \quad (3)$$

式中： $\mu_i, \mu_j, \delta_i, \delta_j$ 定义见式(4)~式(7)。

$$\mu_i = iP_{d,\theta}(i, j) \quad (4)$$

$$\mu_j = jP_{d,\theta}(i, j) \quad (5)$$

$$\delta_i^2 = (i - \mu_i)^2 P_{d,\theta}(i, j) \quad (6)$$

$$\delta_j^2 = (j - \mu_j)^2 P_{d,\theta}(i, j) \quad (7)$$

相关是度量空间灰度共生矩阵元素在行或列向上的相似程度，其大小反映了影像中局部灰度相关性。

3) 熵(Entropy)

$$ENT = \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} P_{d,\theta}(i, j) \log(P_{d,\theta}(i, j)) \quad (8)$$

熵是图像所具有的信息量的度量，它表示了图像中纹理的非均匀程度或复杂程度，共生矩阵中元素越分散，熵值越大。

4) 对比度(Contrast)

$$CON = \sum_{n=2}^{N_g-1} n^2 \left\{ \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} P_{d,\theta}(i, j) \right\} \quad (9)$$

对比度反映了图像的清晰度和纹理沟纹深浅的程度，其值大小反映了图像中局部灰度相关性。

5) 逆差矩(Inverse Moment)

$$INM = \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} \frac{1}{1 + (i + j)^2} P_{d,\theta}(i, j) \quad (10)$$

逆差矩反映图像纹理的同质性，度量图像纹理局部变化状况。逆差矩越大说明图像纹理不同区域间变化越小，局部均匀。

6) 方差(Variance)

$$VAR = \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} (i - \mu)^2 P_{d,\theta}(i, j) \quad (11)$$

方差是纹理周期的度量，纹理周期越大，方差值也越大。

2.3 基于放电分布的灰度共生矩阵纹理特征提取

图像由像素组成，纹理特征提取自像素。一幅数字图像可定义为一个矩阵 $I(m, n)$ ，其中 m, n 分别为矩阵的行和列，矩阵 $I(m, n)$ 的每一个元素代表图像对应的像素点。在 2.1 节构造不同放电模式三维图谱和灰度图的过程中，计算了 X 轴(相位)、 Y 轴(脉冲电压)平面不同区域点的放电次数 $N(\phi, q_i)$ ，其为一个行数为 128，列数为 256 的矩阵，其任一元素即为对应相位和幅值下的放电次数，该矩阵所

定义的图像 N 对应于三维谱图放电信息, 包含了局部放电相位、幅度、频率等统计信息。本文对不同放电类型计算得到的图像 N 计算其灰度共生矩阵, 取灰度共生矩阵灰度级为 256, 步距 $d=1$, 方向 θ 为 45° , 并基于其提取了角二阶矩、相关、熵、对比度、逆差矩、方差共六个常用的可以表征图像信息的纹理特征, 见表 1。

表 1 提取的局部放电纹理特征

Table 1 Extracted partial discharge texture features

放电类型	ASM	COR	ENT	CON	INM	VAR
油中沿面	ASM ₁	COR ₁	ENT ₁	CON ₁	INM ₁	VAR ₁
油中气隙缺陷	ASM ₂	COR ₂	ENT ₂	CON ₂	INM ₂	VAR ₂
空气中电晕	ASM ₃	COR ₃	ENT ₃	CON ₃	INM ₃	VAR ₃

注: ASM 为角二阶矩; COR 为相关; ENT 为熵; CON 为对比度; INM 为逆差矩; VAR 为方差。

3 局部放电类型聚类识别分析

聚类分析的实质就是按照距离的远近将数据分为若干个类别, 挖掘样本内部之间的相互相似性, 使得类别内部的差异尽可能的小, 类别间的差异尽可能的大, 不需要训练样本, 又被称为无监督学习方法^[16]。聚类分析处理速度快, 比较适合电力设备故障的快速诊断。

实验中三种不同缺陷类型放电各提取 50 组局部放电数据。其中, 一组放电数据采集完毕后, 放电模型中换取新的绝缘纸板或绝缘气隙试品, 进行新一组数据采集, 每组数据即为一个样本。提取出每个样本对应局部放电分布下灰度共生矩阵纹理特征后, 进行无需先验知识的系统聚类分析, 计算过程中采用平方 Euclidean 距离法和 Ward 法分别计算样本间和类间的距离, 具体实现步骤可参阅文献^[16]。聚类结果如表 2 所示。

表 2 局部放电类型聚类结果

Table 2 Partial discharge type clustering result

局部放电 类型	聚类样本/个			识别 率/%
	空气中电晕	油中沿面	油中气隙	
空气中电晕	49	0	1	98
油中沿面	0	47	3	94
油中气隙	1	3	46	92
总识别率	—	—	—	94.7

通过表 2 可知, 对局放灰度共生矩阵纹理特征进行聚类分析, 不同缺陷类型放电都得到了合理的识别结果。

4 结论

本文构造分析了不同缺陷局部放电 φ - q - n 三维

谱图, 并计算了 φ - q - n 三维谱图对应放电分布信息二维数字图像 $N(\varphi, q_i)$ 的灰度关联矩阵, 提取了角二阶矩、相关、熵、对比度、逆差矩、和方差共六个纹理特征, 对不同类型缺陷样本进行聚类分析, 得到了准确合理的分类结果。处理结果表明, 基于放电分布信息二维数字图像 $N(\varphi, q_i)$ 灰度关联矩阵的纹理特征具有较强的模式描述能力, 可以较好地区分三种局放缺陷, 聚类分析可以有效处理归类维数较少的纹理特征, 对局放类型实现快速识别。

参考文献

- [1] 吴翔, 何怡刚, 张大波, 等. 基于最优权重与雷达图的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 55-60.
WU Xiang, HE Yigang, ZHANG Dabo, et al. Transformer condition assessment based on optimal weight and radar map[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 55-60.
- [2] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 75-81.
ZHANG Jingjing, XU Xiule, DING Ming, et al. A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 75-81.
- [3] 律方成, 金虎, 王子建, 等. 基于主成分分析和多分类相关向量机的 GIS 局部放电模式识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 225-231.
LÜ Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. GIS partial discharge pattern recognition based on principal component analysis and multi-classification correlation vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 225-231.
- [4] 苑津莎, 尚海昆. 基于主成分分析和概率神经网络的变压器局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 27-31.
YUAN Jinsha, SHANG Haikun. Pattern recognition based on principal component analysis and probabilistic neural networks for partial discharge of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 27-31.
- [5] 王国利, 郝艳捧, 贾志东, 等. 电力变压器典型局放模型放电脉冲的特性研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 5-8.
WANG Guoli, HAO Yanpeng, JIA Zhidong, et al. Study on pulse current of typical PD models in power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 5-8.

- [6] 周沙, 景亮. 基于矩特征与概率神经网络的局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 98-102.
ZHOU Sha, JING Liang. Pattern recognition of partial discharge based on moment features and probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 98-102.
- [7] 任先文, 薛雷, 宋阳, 等. 基于分形特征的最小二乘支持向量机局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 143-147.
REN Xianwen, XUE Lei, SONG Yang, et al. The pattern recognition of partial discharge based on fractal characteristics using LS-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 143-147.
- [8] 弓艳朋, 刘有为, 吴立远. 采用分形和支持向量机的绝缘组合电器局部放电类型识别[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 135-139.
GONG Yanpeng, LIU Youwei, WU Liyuan. Identification of partial discharge in gas insulated switchgears with fractal theory and support vector machine[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 135-139.
- [9] 唐炬, 李伟, 欧阳有鹏. 采用小波变换奇异值分解方法的局部放电模式识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1686-1691.
TANG Ju, LI Wei, OUYANG Youpeng. Partial discharge pattern recognition using discrete wavelet transform and singular value decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1686-1691.
- [10] 陈攀, 姚陈果, 廖瑞金, 等. 分频段能量谱及马氏聚类算法在开关柜局部放电模式识别中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3332-3341.
CHEN Pan, YAO Chenguo, LIAO Ruijin, et al. Application of signals separated band energy spectrum and Mahalanobis clustering algorithm for switchgear partial discharge pattern recognition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3332-3341.
- [11] 于乐. 基于图像特征的 GIS 局部放电严重程度评估的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
YU Le. The assessment of the severity of partial discharges in GIS based on the features of spectra[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [12] REZA ROSTAMINIA, MOHSEN SANIEI, MEHDI VAKILIAN, et al. Accurate power transformer PD pattern recognition via its model[J]. IET Science Measurement Technology, 2016: 1-9.
- [13] 高程程, 惠晓威. 基于灰度共生矩阵的纹理特征提取[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(16): 195-198.
GAO Chengcheng, HUI Xiaowei. GLCM-based texture feature extraction[J]. Computer System Application, 2010, 19(16): 195-198.
- [14] 李智峰, 朱谷昌, 董泰锋. 基于灰度共生矩阵的图像纹理特征地物分类应用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(3): 456-461.
LI Zhifeng, ZHU Guchang, DONG Taifeng. Application of GLCM-based texture features to remote sensing image classification[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(3): 456-461.
- [15] SUGANVA R, RAJARAM S. Feature extraction and classification of ultrasound liver images using Haralick texture-primitive features: application of SVM classifier[C] // 2013 International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT), 2013: 596-602.
- [16] 张文彤, 闫洁. SPSS 统计分析基础教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-05-07

作者简介:

陈焕桐(1989—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断的研究; E-mail: chenhuanyucumt@163.com

解浩(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断的研究;

张建文(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断的研究, 高电压与绝缘检测技术。

(编辑 姜新丽)