

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.018

基于电弧面积绝缘子表面放电强度精细分类与识别方法

方春华¹, 潘明龙², 黄立¹, 周雨秋¹, 张帅¹, 李景¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 广东电网有限责任公司清远供电局, 广东 清远 511518)

摘要: 由于绝缘子放电的复杂性和随机性, 目前研究只将其定性的划分为微弱放电、中等强度放电和强放电, 然后利用泄漏电流对其进行分类识别来实现绝缘子运行状态的判定和预警。文中运用图像处理技术将绝缘子放电试验所得图片中的电弧面积提取出来, 以此量化放电强度, 然后依据电弧面积将中等强度放电又细分为级别一、级别二和级别三, 并分别在3个强度等级下提取了3组泄漏电流样本, 运用数理统计、小波变换等方法对泄漏电流波形提取了17个特征量, 并采用了主成分法和支持向量机对泄漏电流按照强度级别进行分类识别, 测试结果准确率达到93%以上。研究结果表明: 利用该方法能准确的对绝缘子中等强度放电进行进一步细化, 并能按强度级别对泄漏电流进行分类识别, 为判断绝缘子运行状态和评估其放电危害性提供更精确的依据。

关键词: 泄漏电流; 绝缘子放电; 小波变换; 分类识别

Subtle Classification and Identification Method of Surface Discharge Intensity of Insulators Based on Arc Area

FANG Chunhua¹, PAN Minglong², HUANG Li¹, ZHOU Yuqiu¹, ZHANG Shuai¹, LI Jing¹

(1. School of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Guangdong Qingyuan 511518, China)

Abstract: The current study only divides qualitatively the discharge intensity of the insulator into weak discharge, moderate intensity discharge and strong discharge due to its complexity and randomness, then leakage current is classified in accordance with the discharge intensity to identify the status of the insulator. In this paper the area of discharge arc is extracted by the image processing techniques in the image which obtained from insulator discharge test, then, the intensity of discharge is quantified. Based on this the moderate discharge is subdivided into level 1, level 2 and level 3 according to the discharge arc area, and 3 groups of samples of leakage current are taken under the three intensity level respectively. 17 features of leakage current waveform are extracted by using the method of mathematical statistics and wavelet transform, and then the principal component analysis and support vector machine are used to classify and recognize leakage current according to intensity level, the accuracy rate of test results is more than 93%. The research results show that the method can be used to further refine the moderate intensity discharge of insulators and classify the leakage current according to the intensity level. It provides a more accurate basis for judging the operation state of insulators and evaluating the discharge harmfulness.

Key words: leakage current; insulator discharge; wavelet transform; classification and identification

0 引言

绝缘子放电强度可以反映绝缘子放电发展阶段和污秽度大小^[1], 也可以评估绝缘子放电对输电

线路危害性的大小^[2]。绝缘子表面放电强度与泄漏电流的基波幅值、相位差、脉冲幅值、谐波和功率谱等特征量都有密切关系, 因此两者有较好的对应关系^[3], 但是用单一的泄漏电流特征量去表征绝缘子

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-09-20

基金项目: 三峡大学人才启动基金(KJ2014B054)。

Project Supported by Start-up Fund for Talents of Three Gorges University(KJ2014B054).

放电强度是很困难的^[4-6]。

目前国内外学者对绝缘子放电强度与泄漏电流关系做了较多研究,文[7]将绝缘子表面放电程度大致分为微弱性放电、间隙性电弧放电(中等强度放电)、持续性电弧放电(强放电),并描述了不同放电强度下泄漏电流波形的特征;文[8]定性描述了瓷绝缘子表面的放电现象,分析了绝缘子表面泄漏电流幅值与典型放电现象的相关性。文[9]根据放电现象将污秽绝缘子放电定性的分为零星放电(弱放电)、大片放电(中等强度)放电和闪络(强放电),并对泄漏电流和绝缘子污秽度进行了对应分类。绝缘子表面放电具有极大的随机性和复杂性^[10-11],难以对其进行定量分析,所以很少有文献对绝缘子放电强度进行进一步细化研究,因此难以根据泄漏电流去更精确的判定绝缘子运行状态和其放电危害性。

文中在人工污秽放电试验中得到大量绝缘子放电图片以及同步测量的泄漏电流数据,运用图像处理技术将二值图像中的电弧提取出来得到其面

积,并根据电弧面积细化中等强度放电为级别一、级别二和级别三,然后提取了不同级别下的泄漏电流17个波形特征,运用LS-SVM(最小二乘支持向量机)对泄漏电流按照放电强度进行分类识别,为判断绝缘子运行状态和评估其放电的危害性提供更精确的依据。

1 绝缘子放电试验

高压绝缘子放电试验原理见图1。人工雾室大小为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 4\text{ m}$,保护电阻 $R=16.7\text{ k}\Omega$,分压器是变比为1:1 920的电容分压器,高压线通过穿墙套管进入人工雾室与绝缘子相连,试验选用7片XP-70普通瓷绝缘子,高速摄影仪对瓷绝缘子表面放电弧进行拍摄并且同步测量绝缘子表面的泄漏电流,泄漏电流的采集选用美国NI公司的USB-6212数据采集卡及其配套软件,该采集卡具有16路模拟信号输入通道,采样率为 100 kS/s 。

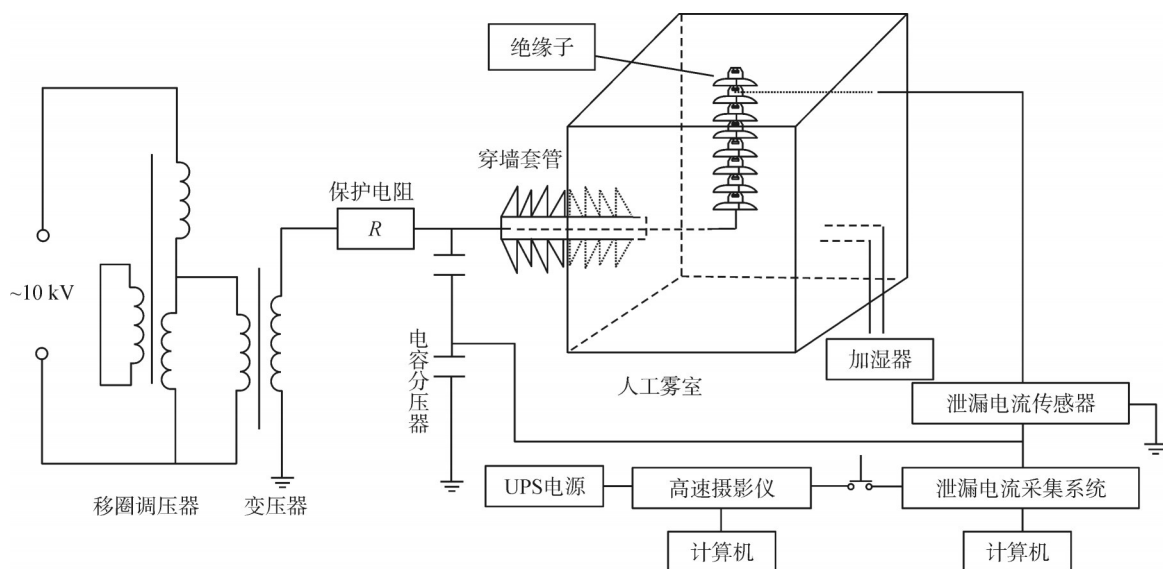


图1 试验原理图

Fig. 1 Test schematic diagram

文中研究绝缘子表面泄漏电流与放电强度的对应关系,均匀升压法的放电发展过程相比恒压升降法快,有利于泄漏电流和放电现象的同步监测^[12],故试验采用均匀升压法进行加压。根据标准在不带电条件下对绝缘子进行湿润,待绝缘子表面污秽充分湿润(即不滴不流)后突然加上一定的试验电压,电压维持不变,直至闪络;如果不发生闪络,再逐级升高电压重复试验,将试验所得图片和泄漏电流数据做好对应储存。

2 基于电弧面积对中等放电强度的细化

根据上述特点,利用图像处理技术对放电电弧

进行量化,图像处理框图见图2。放电弧图像中的白色部分为电弧,见图3。大小随放电强度的变化而变化。将高速摄影仪采集的整个绝缘子表面电弧的RGB图像转化为灰度图像,对灰度图像进行降噪处理,采用图像增强技术对电弧信息进行增强后用阈值分割将图像转化为二值图像从而实现了电弧区域的提取,将电弧从图像中分割出来,由于分割出的图片边缘不平滑,采用边缘检测算子对电弧边缘进行检测;运用填充算法对电弧边缘图像进行填充如图3所示^[13-15]。

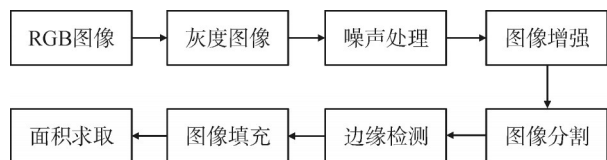


图2 面积求取步骤

Fig. 2 Steps to get the area

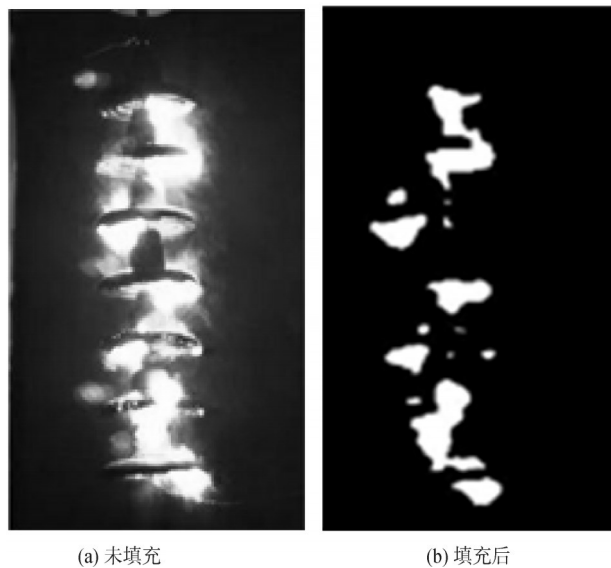


图3 电弧分割出来效果图

Fig. 3 Effect picture of arc segmentation

经过处理后的绝缘子放电电弧图像只由两个像素组成,图像的大小可以由像素点的个数直接反映出来,即像素点为1的个数总和 S 即放电电弧的面积^[16]。像素点的个数计算数学表达式为

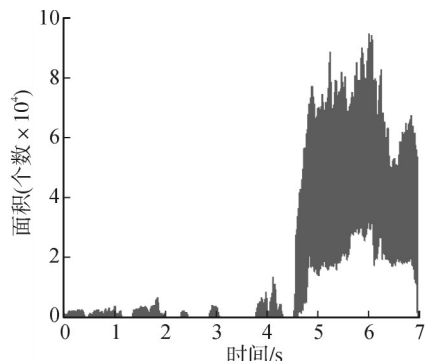
$$N = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f''(i,j) \quad (1)$$

式(1)中, $f''(i,j)$ 代表物体,取值为1。

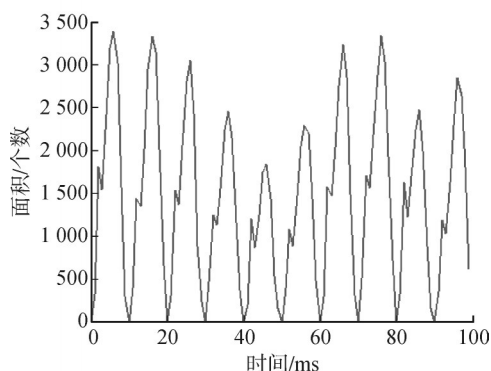
绝缘子表面从刚有局部电弧开始到闪络整个试验过程中的电弧面积随时间变化曲线见图4。图4(b)为刚开始出现电弧时100 ms内电弧面积随时间变化曲线图。由图4可知,4.5 s时绝缘子出现闪络(强放电)后,其图片电弧面积大都集中在 2×10^4 以上;绝缘子上出现零星电弧时,其图片电弧面积在2000个以下;而绝缘子上有明显电弧时,此时为中等强度放电,其电弧面积峰值大都集中在2000~5000个。根据放电电弧面积将中等强度放电又细分为级别一、级别二和级别三,所对应的面积分别为2000~3000个、3000~4000个和4000~5000个。

3 三种级别放电下的泄漏电流特征

试验中共提取了瓷绝缘子放电321个样本,其



(a) 电弧面积随时间变化图



(b) 100 ms细节图

图4 电弧面积

Fig. 4 Arc area

中级别一144个样本、级别二96个样本和级别三81个样本,3组样本下的电弧图片和所对应的泄漏电流波形见图5。级别一时,出现明显电弧,泄漏电流波形明显畸变,但幅值比较平稳,大都在40 mA左右,伴随明显的“零休”现象且脉冲较小;级别二时,绝缘子上有明显电弧,泄漏电流波形畸变严重,且幅值出现较大起伏,范围在30~70 mA之间,伴随明显的“零休”现象,脉冲较大;级别三时,出现贯穿单片绝缘子上下表面的电弧,泄漏电流波形畸变非常大且伴随脉冲,幅值也出现较大起伏,“零休”现象增强。虽然3种级别下的绝缘子放电其泄漏电流波形有所差别,但是在同一级别下,其泄漏电流波形特征也有较大区别,因此依靠单一特征去判别绝缘子中等放电强度是很困难的。因此文中提取了17个泄漏电流波形特征量,并利用主成分分析法及LS-SVM按照绝缘子放电强度对泄漏电流进行降维和分类识别。

4 放电强度的识别方法

4.1 提取泄漏电流波形特征

为了全面的反映泄漏电流波形形貌的变化情况,从时域与频域以及波形特征3方面提取泄漏电流波形特征量,具体提取的特征量见表1。

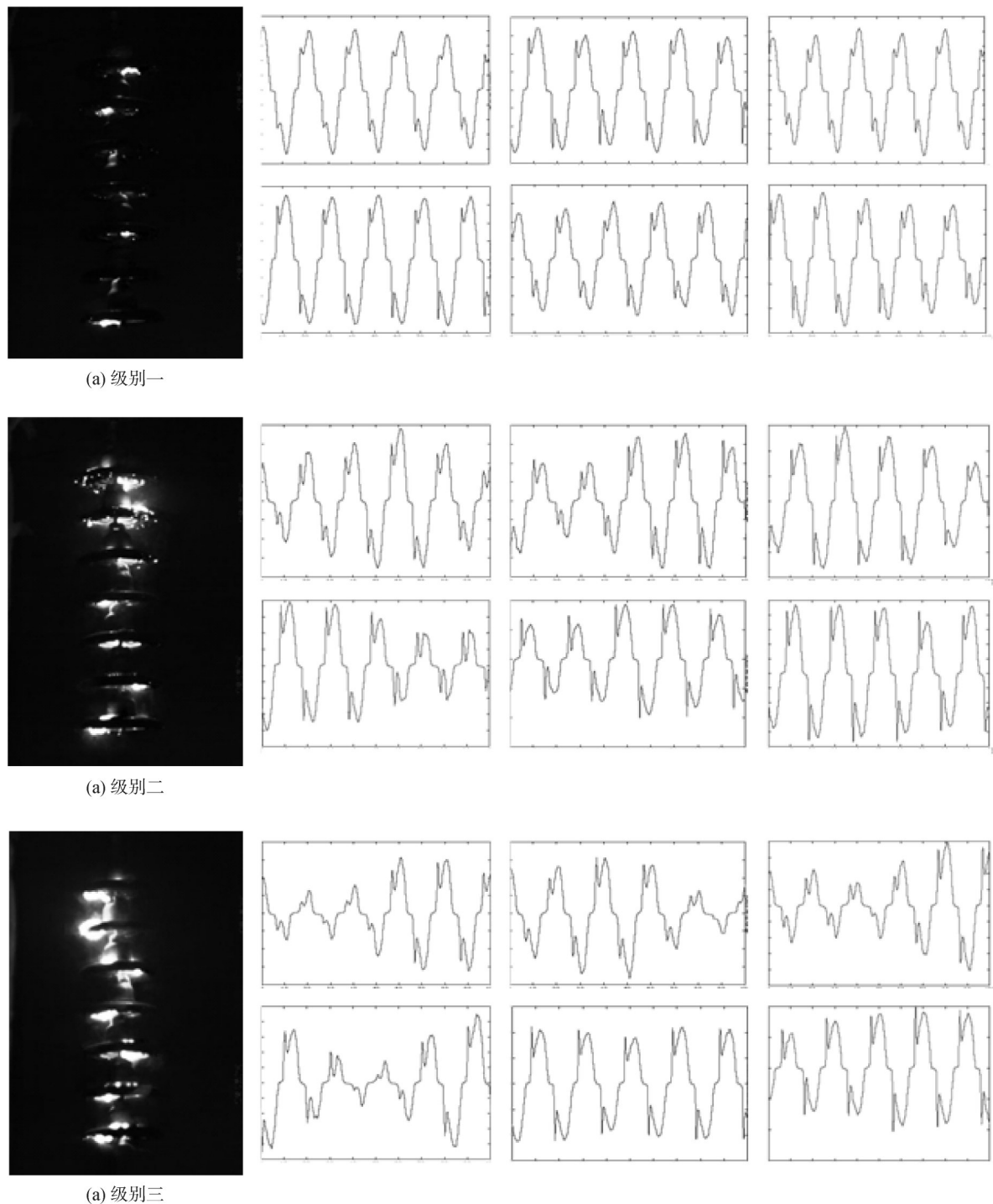


图5 绝缘子中等强度放电的3个级别和对应的泄漏电流波形

Fig. 5 Three levels of the moderate intensity discharge of the insulator and the corresponding leakage current waveform

- 1)泄漏电流基波峰值的期望 $\bar{x}$ 。
- 2)泄漏电流基波峰值标准差 σ_p ,反映泄漏电流峰值的离散程度。
- 3)零休率,反映每种电流波形的零休时间的不同,取原峰值平均值的2%视为零休。

$$L=r/10\,000 \tag{2}$$

式(2)中: r 为小于原峰值2%的点;采样点数为

10 000。

- 4)用波形与横轴所围面积与波形周长的平方之比来反映各种波形的畸峰高度与畸峰持续时间的不同,定义为形状系数 S_{bl} 。

$$S_{bl}=\frac{S}{L^2} \tag{3}$$

式(3)中: S 为波形与横轴所围面积; L 为波形周长。

表1 所取特征量

Table 1 Characteristic parameters

序号	特征值	序号	特征值
1	期望 x	10	5次谐波与基波之比
2	标准差 σ_p	11	D_1/D_7
3	零休率 L	12	D_2/D_7
4	波形形状系数 S_{bl}	13	D_3/D_7
5	不对称度	14	D_4/D_7
6	偏斜度	15	D_5/D_7
7	峭度	16	D_6/D_7
8	总畸变率THD	17	D_8/D_7
9	3次谐波与基波之比	—	—

5)由于放电具有极大的复杂性和随机性,试验所得的泄漏电流数据会含有大量的随机成分,所以泄漏电流与标准正弦波之间的差值也会呈现出类似的正态分布,见图6。

不同级别下的放电强度,其类正态分布波形有一定的差别。因此提取了它们类正态分布的偏斜度、峭度和不对称度来作为泄漏电流的特征量。

6)总畸变率 THD 来表示波形与正弦波的相似程度;另外,绝缘子放电对泄漏电流的3次谐波和5次谐波影响较大^[19]。因此,3次谐波与基波之比 h_3/h_1 和5次谐波与基波之比 h_5/h_1 也提取为波形特征量。

7)为了从泄漏电流波形的细节上提取波形特征,这里用到了小波分析方法,其中运用最为广泛且有效的为STD-MRA。由于母小波要与原始信号有一定的相似性,因此选用 db_4 小波作为母小波^[19],对泄漏电流波形进行了8级分解,每级的频段见表2。

在细节信号图中看出细节信号 d_7 显示了工频泄漏电流波,而STD-MRA方法就是将各细节信号(d_1 、 d_2 、 d_3 、 $\dots$ 、 d_8)归一化后,求取他们的标准差 $D(D_1$ 、 D_2 、 D_3 、 $\dots$ 、 D_8),式(4)。然后将它们分别与 D_7 的比值提取为泄漏电流的特征量,如表1所示。

$$\begin{cases} D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \end{cases} \quad (4)$$

4.2 特征量的降维

由于泄漏电流特征量选取较多,许多特征量之间可能会存在一定的相关性,这不仅会增加波形识

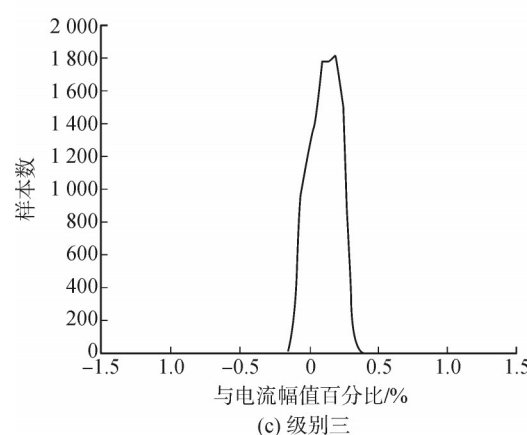
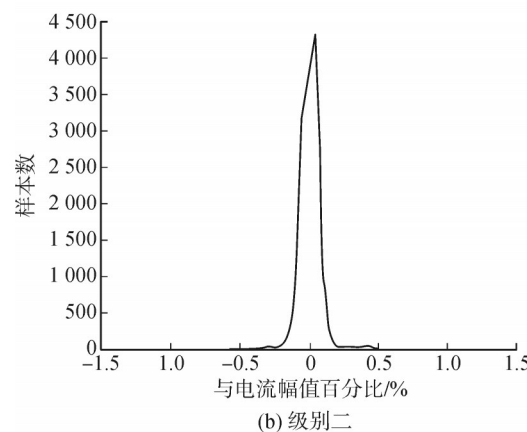
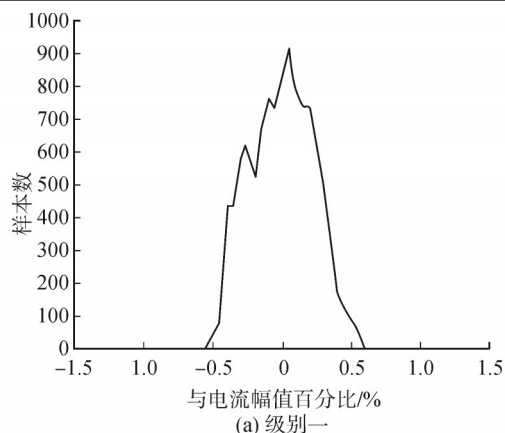


图6 3种级别下类正态分布图

Fig. 6 Similar normal distribution of the three levels

表2 信号分解层次及频率

Table 2 Level and frequency of signal decomposition

分解级别	低频段(逼近信号)/Hz	高频段(细节信号)/Hz
1	0~2 500.000	2 500~5 000.000
2	0~1 250.000	1 250~2 500.000
3	0~625.000	625~1 250.000
4	0~312.500	312.500~625.000
5	0~156.250	156.250~312.500
6	0~78.125	78.125~156.250
7	0~39.062	39.062~78.125
8	0~19.531	19.531~39.062

别的计算工作量并且可能会影响到识别的准确性, 所以必须对提取的特征量进行降维。主成分分析法的基本思想是设法将原来众多的具有一定相关性的指标, 重新组合成一组较少个数的互不相关的综合指标来代替原来指标^[20]。从而达到降维的目的, 计算过程如下。

首先, 计算原始泄漏电流特征矩阵 $\mathbf{X}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{C}$

$$[\mathbf{C} = E((\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})^T)] \quad (5)$$

式(5)中: $\mathbf{X}$ 为泄漏电流原始特征矩阵; $\boldsymbol{\mu}$ 为矩阵每列的均值。

对于对称矩阵 $\mathbf{C}$, 必然存在正交矩阵 $\mathbf{P}$ 将 $\mathbf{C}$ 转化为对角阵

$$\mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p) \quad (6)$$

式(6)中, λ_j 为 $\mathbf{C}$ 的 p 个不同的特征值, 且 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p \geq 0$ 。

可见 $\mathbf{P}$ 由协方差矩阵 $\mathbf{C}$ 的特征值 λ_j 对应的特征向量 p_j 组成, 它们相互归一正交。所以, 原始特征量矩阵 $\mathbf{X}$ 的第 j 个主成分可表示为

$$y_j = p_j^T \mathbf{X} \quad (7)$$

因此第 j 个主成分的方差贡献率为

$$h_j = \lambda_j / \sum_{i=1}^p \lambda_i \quad (8)$$

前 k 个主成分的方差贡献率为

$$h_k = \sum_{j=1}^k \lambda_j / \sum_{i=1}^p \lambda_i \quad (9)$$

当累积贡献率 h_k 大于 85% 时, 就认为能够反映原来的信息了。即原特征量矩阵 $\mathbf{X}$ 的 p 维向量转为主成分矩阵 $\mathbf{Y}$ 的 k 维向量。该主成分矩阵见式(10)。经降维后, 数据由 17 维降为 3 维, 贡献率为 92%, 足够反映原来的波形信息了。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} p_{12} \dots p_{1p} \\ p_{21} p_{22} \dots p_{2p} \\ \dots \\ p_{k1} p_{k2} \dots p_{kp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_p \end{bmatrix} = \mathbf{P}^T \mathbf{X} \quad (10)$$

4.3 特征识别

LS-SVM 被认为是最准确的分类机器之一, 在 LS-SVM 结构设计中, 主要是要选择核函数和选择正规化参数 γ 与核参数 θ , 由于 RBF 核函数具有普遍的适用性, θ 的选择也没有普遍的标准, 只能采用验证法^[21-22], 因此, 文中在确定 RBF 核函数后通过交叉验证确定 θ 的数值为 0.5。

试验数据共有 321 个样本, 其中级别一 144 个样本, 级别二 96 个样本, 级别三 81 个样本。样本分

为两个部分, 一个部分用于 LS-SVM 训练, 另一个部分用于 LS-SVM 的测试。其中测试样本均为 30 个, 其余为训练样本。波形识别的输入量为波形, 输出量为对应的 3 个放电强度。

训练结果见表 3。从表 3 中可以看出, 级别一的 30 个测试样本中有 1 例误判, 级别三的 30 个测试样本中有 2 例误判, 综合评判正确率较高。

表 3 SVM 训练测试结果

Table 3 LS-SVM training test results

实验序列	训练样本数/个	测试样本数/个	测试误分样本数/个	测试准确率/%
级别一	114	30	1	96.7
级别二	66	30	0	100
级别三	51	30	2	93.3

5 结语

根据绝缘子放电图片中电弧面积量化放电强度后, 将中等强度放电又细分成级别一、级别二和级别三, 并且提取了每个级别下泄漏电流的波形特征量, 然后通过主成分分析方法与 SVM 分类器依据这些特征量对绝缘子的中等强度放电的级别进行了分类识别, 实验结果表明该分类器综合评判正确率较高, 所提取的 17 个波形特征量可以全面地反映泄漏电流特性, 同时实验结果也表明在经过主成分分析法对特征量进行降维后仍能被准确的识别, 优化了 LS-SVM 结构。因此, 可以利用该方法对绝缘子中等强度放电进行进一步细化研究, 为判断绝缘子运行状态和评估其放电危害性提供更精确的依据。

参考文献

- [1] 戴云航, 土志刚, 杜欣慧, 等. LXY-120 型绝缘子在不同湿度下的泄漏电流特性的研究[J]. 华东中力, 2006, 34(9): 27-29.
DAI Yunhang, TU Zhigang, DU Xinhui, et al. Leakage current characteristics of LXY - 120 insulator under different moisture[J]. East China Electric Power, 2006, 34(9): 27-29.
- [2] 梅红伟, 毛颖科, 卞星明, 等. 相对湿度对绝缘子泄漏电流最大值的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 627-631.
MEI Hongwei, MAO Yingke, BIAN Xingming, et al. Effect of relative humidity on the maximum leakage current of insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 627-631.
- [3] 吕健双, 文远芳, 文康珍, 等. 单片绝缘子泄漏电流阻容分量研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(5): 135-138.
LYU Jianshuang, WEN Yuanfang, WEN Kangzhen, et al.

- Analysis of resistive and capacitive component of leakage current for single insulator[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(5): 135-138.
- [4] NOURUDDEEN B, HUSSEIN A. Odd harmonics and third to fifth harmonic ratios of leakage currents as diagnostic tools to study the ageing of glass insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3):819-832.
- [5] 高勇宽. 绝缘子泄漏电流数据特征量提取算法的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
- GAO Yongkuang. The research of extraction algorithms of insulators leakage current data characteristics[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [6] 苗鹏超,徐志钊. 输电线路绝缘子泄漏电流特征量提取综述[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 127-138.
- MIAO Pengchao, XU Zhiniu. Summary of the transmission line insulator leakage current characteristics extraction [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 127-138.
- [7] 聂一雄,尹项根,刘 春,等. 用模糊逻辑方法对绝缘子串在线检测结果的评定[J]. 中国电机工程学报. 2003, 23(3): 131-136.
- NIE Yixiong, YIN Xianggen, LIU Chun, et al. Evaluation on the on-line detection results of insulator strings using fuzzy logic method[J]. Proceedings of CSEE, China Academic Journal Electronic Publishing House, 2003, 23(3): 131-136.
- [8] DOUAR M A, MEKHALDI A, BOUZIDI M C. Frequency analysis of the leakage current under non uniform polluted conditions on one insulator plane model[C]//Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. West Lafayette, United states:CEIDP, 2010:17-20.
- [9] SUDA T. Frequency characteristics of leakage current waveforms of an artificially polluted suspension insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(4): 705-710.
- [10] DOUAR M A, MEKHALDI A, BOUZIDI M C. Flashover process and frequency analysis of the leakage current on insulator model under non-uniform pollution conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010, 17(4):1284-1297.
- [11] 关志成,毛颖科,王黎明. 污秽绝缘子泄漏电流特性研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 1-6.
- GUAN Zhicheng, MAO Yingke, WANG Liming. Review on leakage current characteristics of contamination insulators[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 1-6.
- [12] 毛颖科,关志成,王黎明,等. 基于泄漏电流脉冲主成分分析的外绝缘污秽状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 39-45.
- MAO Yingke, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Evaluation of contamination levels of outdoor insulators based on the principal components analysis of leakage current pulses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 39-45.
- [13] 张 晋,汲胜昌,欧小波,等. 基于泄漏电流基波阻性分量的绝缘子污秽度表示方法的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 29-33.
- ZHANG Jin, JI Shengchang, OU Xiaobo, et al. Representation method of insulator pollution degree based on leakage current fundamental resistive component[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 29-33.
- [14] DU B X, YONG L. Pattern analysis of discharge characteristics for hydrophobicity evaluation of polymer insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1):114-121.
- [15] CLAVERIE P, PORCHERON Y. How to choose insulators for polluted areas. power apparatus and systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1973, PAS- 92(3):1121-1131.
- [16] VOLAT C. Monitoring leakage current of ice-covered station post insulators using artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010. 17(2): 443-450.
- [17] 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验:GB/T 4585—2004[S]. 2004.
- Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems:GB/T 4585—2004[S]. 2004.
- [18] 蒋兴良,石 岩,黄 欢,等. 污秽绝缘子泄漏电流频率和相位特征的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7):118-123.
- JIANG Xingliang, SHI Yan, HUANG Huan, et al. Experimental research on the frequency and phase characteristics of leakage current of artificially polluted insulators[J]. Proceedings of CSEE, 2010, 30(7):118-123.
- [19] 赵新德. 人工污秽绝缘子泄漏电流-湿度-盐密关系及对比研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2008:32-42.
- ZHAO Xinde. Research on correlation among equivalent salt deposit density, relative humidity and leakage current in artificially polluted insulators[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008:32-42.
- [20] 宋 毅. 冷雾环境下绝缘子污层饱和湿润特性分析[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 122-127.
- SONG Yi. Analysis on saturated wetting characteristic of pollution layer on insulator in cold fog environment[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 122-127.
- [21] 吴 军,刘 飞. 基于最小二乘支持向量机的复杂气象条件下绝缘子等值附盐密度的预测[J]. 陕西电力, 2011, 39(2): 9-12.
- WU Jun, LIU Fei. Prediction of equivalent salt density of insulator in complex meteorological conditions based on least square support vector machine[J]. Shaanxi Electric

- Technology, 2004.
- [18] 郑建华, 张庆磊. 馈线自动调压器设计方法研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20(24): 162-164.
- ZHENG Jianhua. ZHANG Qinglei. Study on design of feeder automatic voltage regulator[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(24): 162-164.
- [19] 伦涛. 10 kV 晶闸管分级电压调节器研制与特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.
- LUN Tao. Development and characteristics research of 10 kV thyristor graded voltage regulator[D]. BeiJing: North China Electric Power University, 2011.
- [20] 电能质量电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[S]. 2008.
- Power quality-voltage fluctuation and flicker: GB/T 12326—2008[S]. 2008.
- 琚泽立(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电缆与配电运检, 电网设备状态检测与评价。
- 吴玲(1983—), 女, 工程师, 主要研究方向为电磁兼容试验, 不确定度评定等。

(上接第 132 页)

- Power, 2011, 39(2): 9-12.
- [22] 焦尚彬. 基于最小二乘支持向量机的绝缘子等值附盐密度预测[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 149-153.
- JIAO Shangbin et al. Prediction of equivalent salt density of insulator based on least square support vector machine. Chinese[J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(2): 149-153.
- 方春华(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高电压绝缘与在线监测技术方面的研究工作。