

计及电磁模特高频信号的局部放电模式识别方法

辛文成¹,姚森敬¹,陈浩敏¹,席禹¹,张凡¹,
敖榜¹,宾峰^{2,3},林晓青³,汪汎³

(1.南方电网数字电网研究院有限公司,广东广州 510000;2.长沙理工大学物理与电子科学学院,湖南长沙 410114;
3.湖南大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410082)

摘要:特高频(UHF)法局部放电检测已经成为高压 GIS 及变压器等设备常用的运维检测手段,但由于该方法是通过测量电磁波间接检测局部放电强度,使得基于该方法的局部放电模式识别技术准确率不高,而且一直没有得到很好的解决。本文引入 TE_{m1} 模截止频率作为 PD UHF 信号时频分布图的分割依据,对单一绝缘缺陷激发的 PD UHF 信号进行预处理、时频分布图分割、特征参数提取和选择以及 PSO-ELM 识别等操作,最终可准确判断出 PD 信号类型,提高 GIS 绝缘缺陷类型的识别准确率。这种分割方法增强了图谱特征的空间分布信息,对改善特高频法识别局部放电的准确率具有实际应用价值。

关键词:气体绝缘组合电器;局部放电;模式识别;电磁模

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.012 中图分类号:TM855 文章编号:1673-9140(2022)06-0108-08

Pattern recognition of UHF signals in partial discharge considering electromagnetic model

XIN Wencheng¹, YAO Senjing¹, CHEN Haoming¹, XI Yu¹, ZHANG Fan¹,
AO Bang¹, BIN Feng^{2,3}, LIN Xiaoqing³, WANG Feng³

(1.China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2.School of Physics & Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
3.School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Detection of partial discharge by UHF signal has become an ordinary operation and maintenance detection method for High Voltage GIS, transformers, and other equipment. However, this method indirectly detects PD intensity by measuring electromagnetic waves, so the accuracy of PD pattern recognition technology based on this method is not high, and has not been well solved. This paper introduces the cut-off frequency of TE_{m1} mode as the division basis of the time-frequency distribution of the PD UHF signal. The PD UHF signal excited by a single insulation defect is used for signal preprocessing, time-frequency distribution segmentation, feature parameter extraction and se-

收稿日期:2021-03-07;修回日期:2021-04-14

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20200001)

通信作者:宾峰(1989—),男,博士,主要从事信号检测与处理、图像处理和人工智能等研究;E-mail: 173704725@qq.com

lection, PSO-ELM recognition, and other operations. Finally, the PD signal type can be accurately determined and the identification accuracy of insulation defect types in GIS can be improved. This segmentation method enhances the spatial distribution information of image features, and it is of great practical value to improve the accuracy of the UHF method in PD identification.

Key words: gis combined electric appliance; partial discharge; pattern recognition; electromagnetic mode

气体绝缘组合电器(GIS)是以 SF_6 作为绝缘气体的开关设备。在 GIS 绝缘结构中,当绝缘弱点的电场强度超过击穿场强,则形成局部放电^[1]。局部放电(partial discharge,PD)是高压 GIS 绝缘劣化的早期表现,如果不能及时被检测并进行有效控制和处理会导致严重的破坏性放电及重大事故。

PD 过程中产生的陡脉冲电流会激发电磁波,其频段集中在 0.3~3.0 GHz,采用 UHF 传感器可以实现 PD 的检测。目前,大多数的研究工作都集中在提取新型的 UHF 信号特征参数^[2-3]或者应用新型的分类器^[4-5]以提高 PD 源识别率方面。

PD UHF 信号属于非平稳信号,单一的时域或者频域描述不能完整表征放电波形信息。已有大量文献研究了电磁波在 GIS 内传播时幅值和能量等参数的变化特点。例如,横电磁波模式(transverse electromagnetic mode,TEM)的所有频率成分都能在 GIS 中传播,但高阶模(包括 TE、TM 模)有相应的截止频率,只有大于该截止频率的成分才能传播^[6];当电磁波通过支撑绝缘子时,信号幅值的衰减主要归因于叠加的 TE、TM 模成分减少了^[7];当电磁波通过断开的高压导体时,大部分的 TEM 模成分会被反射,而高于 TE_{11} 模截止频率的高阶模成分能够继续向前传播^[8];当电磁波遇到 L 型分支结构时,TEM 模成分衰减很小,而高阶模成分则大部分被反射^[9]。可以发现,UHF 信号在 GIS 中的传播特性与电磁模密切相关。由于不同电磁模在 GIS 中的传播特性各异,导致传统的基于时间图谱法(time resolved partial discharge,TRPD)对 GIS 内绝缘缺陷的识别准确率较低^[10]。基于此,本文引入 TE_{m1} 模截止频率作为 PD UHF 信号时频分布图的分割依据。

在 PD 模式识别中,常用的分类器如 SVM、K 近邻法(K-nearest neighbor,KNN)及粗糙集等,具有计算效率低、训练时间长和测试速度慢的缺点,不能较好地满足 PD 在线监测对实时性的要求。近年

来,极限学习机(extreme learning machine,ELM)以训练、测试速度快和泛化性能好等优点被广泛应用于回归和分类任务中^[11]。

本文提出引入 TE_{m1} 模的截止频率作为 PD UHF 信号时频分布图的分割依据,输入降维后的灰度图矩特征到分类器 ELM 中进行辨识,这种分割方法可以增强图像特征的空间分布信息,提高 GIS 绝缘缺陷类型的识别准确率,具有实际应用价值。

1 GIS 局部放电声电联合检测试验

本文选用真型 GIS 作为试验平台,基于高压导体尖端放电、悬浮放电、自由金属微粒放电和气隙放电 4 类绝缘缺陷模型,开展单一缺陷放电试验。

GIS PD 声电联合检测系统包括由杭州西湖电子研究所设计的 GIS PD 模拟试验装置、Koch 互补分形天线、低噪宽带放大器、检测阻抗和高速数字示波器(型号为 DSO9254A,通道个数为 4 个,最大采样率为 20 GSa/s,模数转换精度为 8 bit,模拟带宽为 2.5 GHz)等组成,如图 1 所示。

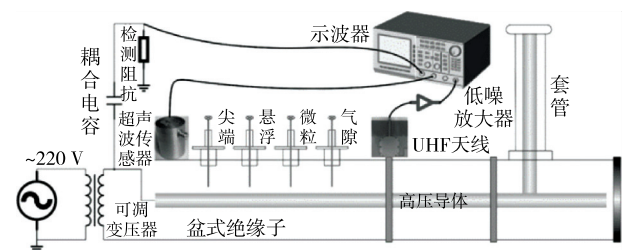


图 1 GIS PD 声电联合检测系统结构

Figure 1 Structure diagram of GIS PD combined acoustic and electric detection system

GIS PD 模拟试验装置实物如图 2 所示,其内置部件有真型 GIS 本体、无局放升压变压器、无局放耦合电容,隔离开关、高压套管、4 种缺陷模型、真空泵以及 SF_6 气体等。GIS 高压导体和外壳的直径分别为 90、320 mm。UHF 天线接收从盆式绝缘子缝隙处泄漏的电磁波信号。

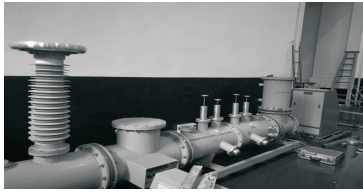


图 2 GIS PD 模拟试验装置实物

Figure 2 Physical picture of GIS PD simulation test device

对预制的 4 种绝缘缺陷模型分别开展 PD 试验。在试验中,利用搭建的 PD 声电联合检测系统对每类放电分别采集 1 800 组 UHF 信号,建立 PD 信号数据库,为后文的特征参数提取及放电类型识别提供真实可靠的数据。

2 特高频信号预处理

2.1 小波阈值去噪

UHF 信号去噪是实现 PD 源识别的关键步骤之一。实测的 PD UHF 信号去噪结果如图 3 所示,4 个 PD 脉冲从上至下依次为高压导体尖端放电、悬浮放电、自由金属微粒放电和气隙放电。与 PD UHF 原始信号相比,去噪后的波形较为平滑,并保留了 PD UHF 信号的局部特征,幅值衰减小。

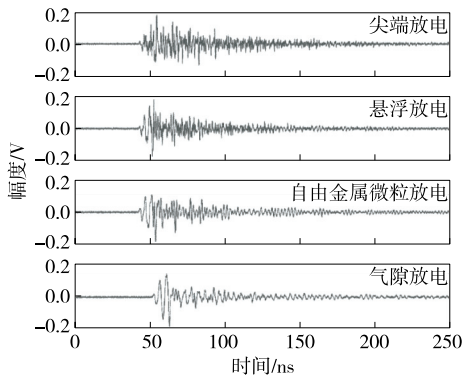


图 3 实测的 PD 信号去噪结果

Figure 3 Measured PD signal denoising results

2.2 基于 S 变换的时频表示

PD UHF 信号为持续时间极短的非平稳信号,单纯用时域或者频域信息无法有效表征 PD 信号频率随时间变化的局部特征。因此,UHF 信号需要进行时频分析。S 变换将一维的时域信号映射至二维时频域内,反映出 UHF 信号频率随时间变化的局部特征。对图 3 的去噪信号进行时频分析,以尖端放电为例,UHF 信号时频分布如图 4 所示,同时包含了频率和时间信息。

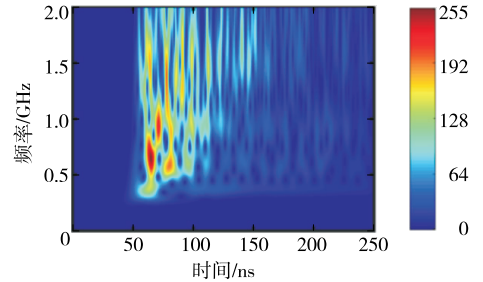


图 4 尖端放电时频分布

Figure 4 Time-frequency distribution diagram of tip discharge

3 基于 TE_{m1} 模截止频率的时频分布图分割

GIS 由中心导体和外壳组成。由电磁波理论可知,在同轴波导中除了可以传播 TEM 波外,还可以传播横电(transverse electric, TE)波和横磁(transverse magnetic, TM)波。

1) TE 模。

① TE 波纵向分量。

$$H_z = [A_1 J_m(k_c r) + A_2 N_m(k_c r)] \cdot \begin{pmatrix} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{pmatrix} e^{-\gamma z} \quad (1)$$

② TE 波横向分量。把全部横向分量用矩阵形式表示:

$$\begin{bmatrix} E_r \\ E_\varphi \\ H_r \\ H_\varphi \end{bmatrix} = \frac{1}{k_c^2} \begin{bmatrix} -\gamma & 0 & 0 & -j\omega\mu \\ 0 & -\gamma & j\omega\mu & 0 \\ 0 & j\omega\epsilon & -\gamma & 0 \\ -j\omega\epsilon & 0 & 0 & -\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial H_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

③ TE 模的截止频率。

$$J_m'(k_c a) N_m'(k_c b) - J_m'(k_c b) N_m'(k_c a) = 0 \quad (3)$$

在本文 PD 试验中,真型 GIS 模型高压导体半径 $a=45$ mm,外壳半径 $b=160$ mm,将 a 、 b 代入式(3),利用 Matlab 中 fsolve 函数求得 TE_{m1} ($m=1, 2, \dots, 5$) 模截止频率,如表 1 所示。 TE_{m1} 模阶数越

高,截止频率越大。 TE_{m_1} ($m > 1$) 模的截止频率近似为 TE_{11} 模截止频率的 $1.86 + 0.7(m - 2)$ 倍,比如, TE_{21} 、 TE_{31} 、 TE_{41} 、 TE_{51} 模的截止频率分别为 TE_{11} 模截止频率的 1.86、2.61、3.31、4.00 倍。

表 1 TE_{m_1} 模的截止频率

Table 1 Cut-off frequency of TE_{m_1} mode

TE 模	f_c /MHz	TE 模	f_c /MHz	TE 模	f_c /MHz
TE_{11}	479	TE_{31}	1 249	TE_{51}	1 914
TE_{21}	891	TE_{41}	1 586		

2) TEM 模。

对于 TEM 波,电场和磁场矢量均与波传播方向垂直。为使式(2)中的其他场分量不为零^[12],必须有

$$k_c^2 = \omega^2 \epsilon \mu + \gamma^2 = 0 \quad (4)$$

任何频率的电磁波均能沿同轴波导以 TEM 波的形式传播,TEM 波是同轴波导的主模。

3) 电磁模的色散效应。

TEM 模的电磁波成分在 GIS 中以光速传播。但是,TE、TM 模具有色散效应,即其在截止频率以下的频率成分不能在 GIS 中传播,在截止频率以上的频率成分的传播速度取决于其自身频率,计算公式^[10]如下:

$$V_{TE} = c \sqrt{1 - (f_c/f)^2} \quad (5)$$

式中 c 为光速; f_c 为 TE 模截止频率; f 为传播频率。

TEM、TE 模频率成分在 220 kV 真型 GIS 中的传播速度如图 5 所示,可以看到,在相同的频率下, TE_{m_1} 模的阶数越高,其传播速度越慢。

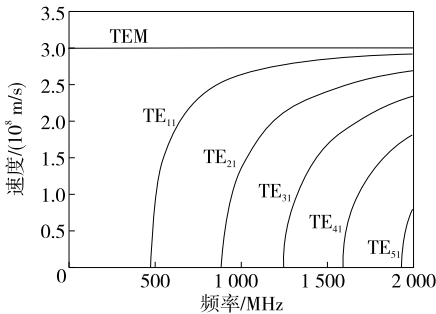


图 5 TEM、TE 模传播速度

Figure 5 Transmission speed of TEM mode and TE mode

TEM、TE 模传播特性的不同主要体现在 3 个方面:①经过 GIS 复杂部件时 TEM、TE 模的传输比例不同;②TEM 模不存在截止频率,而不同阶数的 TE 模具有相应的截止频率;③TEM 模的传播速

度恒定,而 TE 模的传播速度与频率有关,具有色散效应。考虑此 3 点,按 TE_{m_1} 模截止频率将时频分布图分割为 5 个矩形区域,如图 6 所示,分割点在纵坐标的 479、891、1 249、1 586、2 000 MHz 处。

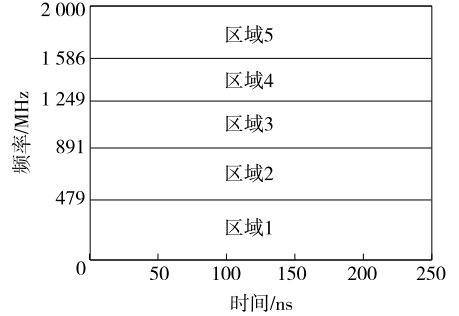


图 6 基于 TE 模截止频率的图像分割

Figure 6 Image segmentation based on TE mode cut-off frequency

由图 6 可知,0~479 MHz 范围存在 TEM 模, 479~891 MHz 范围存在 TEM、 TE_{11} 模, 891~1 249 MHz 范围存在 TEM、 TE_{11} 、 TE_{21} 模, 1 249~1 586 MHz 范围存在 TEM、 TE_{11} 、 TE_{21} 、 TE_{31} 模, 1 586~2 000 MHz 范围主要存在 TEM、 TE_{11} 、 TE_{21} 、 TE_{31} 、 TE_{41} 模。

4 局部放电特高频信号特征选择与分类

4.1 灰度图矩阵特征参数提取

颜色矩的颜色信息主要集中在图像颜色的低阶矩中,采用颜色的一、二、三阶中心矩足以描述图像的颜色分布。此处使用空间关系特征增强区分图像内容的的能力^[13]。这里,获取空间关系的方法是人工地将图像划分为多个区域,分别提取每个区域的图像特征。根据 TE_{m_1} 模的截止频率将时频分布图划分为 5 个矩形区域,分别提取每个子区域的 3 个低阶灰度矩特征。根据 TE_{m_1} 模的截止频率将时频分布图划分为 5 个矩形区域,然后分别提取每个子区域的 3 个低阶灰度矩特征。

每个子区域的 3 个低阶灰度矩的定义如下:

$$\begin{cases} u_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} p_{i,j} \\ \sigma_i = \left(\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} (p_{i,j} - u_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ s_i = \left(\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} (p_{i,j} - u_i)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \end{cases} \quad (6)$$

式中 N_i 为第 i 个子区域的像素数目; $p_{i,j}$ 为子区域 i 的第 j 个像素的灰度级。

分别计算 4 种缺陷类型 20 个样本的矩特征值, 分别是一阶原点矩 u_i , 二阶中心矩 σ_i 和三阶中心矩 s_i 的数值($i=1,2,\dots,5$)。以尖端放电为例, 灰度图低阶矩特征如表 2~4 所示。

表 2 灰度图一阶原点矩

Table 2 First order origin moment of gray-scale image

样本	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
1	2.12	14.75	31.04	30.32	21.11
2	2.01	22.46	41.98	30.47	20.64
3	1.46	13.64	30.69	23.35	16.50
4	1.89	21.58	42.92	29.37	21.89
5	1.97	22.86	51.38	37.19	26.09

表 3 灰度图二阶中心矩

Table 3 Second order central moment of gray-scale image

样本	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5
1	3.44	24.18	33.72	37.54	26.94
2	3.48	30.48	29.84	33.41	25.52
3	2.30	15.63	25.35	19.49	12.84
4	3.16	32.06	37.26	33.84	26.42
5	3.44	28.35	38.37	29.78	29.34

表 4 灰度图三阶中心矩

Table 4 Third order central moment of gray-scale image

样本	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
1	4.85	27.22	45.10	25.04	19.63
2	5.27	34.30	36.58	17.39	19.04
3	3.28	22.23	35.08	25.73	15.49
4	4.59	35.69	44.68	18.69	18.53
5	5.22	29.12	44.28	27.70	21.96

4.2 基于 J 准则的特征选择

特征降维是一种降低特征维度从而提高分类效果和效率的方法, 分为 2 种方式: 特征抽取和特征选择^[14]。最大类间类内散度比准则(J 准则)是过滤式特征选择方法中的一种, J 值定义为类间散度 S_b 与类内散度 S_w 的比值^[15]:

$$J = \frac{S_b}{S_w} = \frac{\sum_{c=1}^L \frac{N_c}{N_s} (m_c - m_0)^2}{\sum_{c=1}^L \frac{N_c}{N_s} \sigma_c^2} \quad (7)$$

式中 L 为样本的总类别数; N_c 为第 c 个类别的样本数目; N_s 为样本总数目; m_c 为第 c 个类别的某一

特征参数的平均值; m_0 为所有样本的某一特征参数的平均值; σ_c 为第 c 个类别的某一特征参数的方差。某一特征参数的 J 值越大, 则该特征参数越有利于样本的分类^[16]。

灰度图提取的 4 种缺陷类型的 15 个三阶矩特征参数的 J 值如图 7 所示。 J 值大于 0.2 的前 6 个特征分别是 s_5 、 s_4 、 σ_5 、 s_2 、 σ_4 和 σ_2 , 其散点图绘制如图 8 所示。经反复试验, 选择该 6 个矩特征作为后续分类器的输入为最佳。

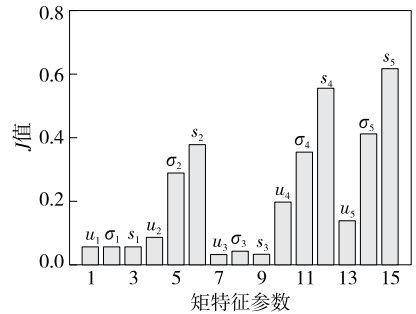


图 7 15 个矩特征的 J 值

Figure 7 The J -values of the 15 moment features

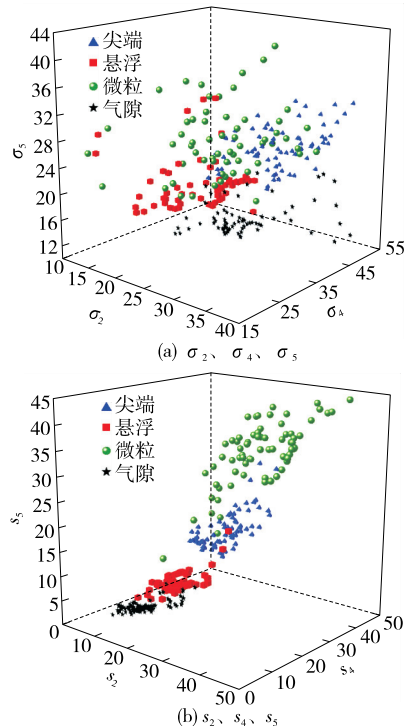


图 8 被选择的 6 个矩特征散点

Figure 8 Scatter plots of the selected six moment features

4.3 PSO-ELM 分类研究

隐含层神经元数目和激活函数类型是 ELM 网络的关键参数。此处使用优化算法对这 2 类参数进

行寻优^[17]。

1) 枚举法确定神经元数目和激活函数类型。

按经验公式计算最少隐含层神经元个数^[18],即

$$k_{\text{neuron}} \geq \sqrt{n+l} + \alpha_0 \quad (8)$$

式中 n 为输入层节点数(输入特征向量维数); l 为输出层节点数(输出分类维数); α_0 为(1,10)范围内的常数,基于该值,合理估计隐含层神经元个数的取值范围,然后测试 5 类激活函数在该神经元个数范围内对 4 种放电的识别率,选择最佳值,即枚举法确定最佳的隐含层神经元个数和激活函数类型。

2) PSO 优化输入权重和隐含层偏置。

粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)是一种基于群体智能的优化算法。在迭代寻优过程中,每个粒子通过跟踪个体历史最优位置和群体历史最优位置来更新自身的位置^[19]。粒子每更新一次位置,就重新计算一次适应度值,然后与个体历史最优位置的适应度值 p_{best} 和群体历史最优位置的适应度值 g_{best} 作比较,依此更新 p_{best} 和 g_{best} ^[20-21]。

5 信号识别结果与分析

从 4 种缺陷类型(尖端、绝缘子表面金属微粒、自由金属微粒和气隙放电)的 PD UHF 信号中随机选取 1 200 组样本作为训练集(4 种放电信号类型各 300 组信号样本),剩余的 600 组 PD UHF 信号样本(4 种放电信号类型各 150 组信号样本)作为测试集。

根据经验公式(8),输入层节点数 $n=6$,输出层节点数 $l=4$,且令 $\alpha_0=10$,可得 $k_{\text{neuron}} \geq 13$,因此,估计最佳的隐含层神经元个数 $n_{\text{num}} \in (10, 20)$ 范围内。通过枚举法最终确定神经元个数为 16,激活函数为‘sig’函数。

8 个样本(4 种放电信号类型各 2 个样本)的 ELM 输出结果如表 5 所示。对于尖端、悬浮、微粒和气隙放电,ELM 的期望输出分别是 $[1, -1, -1, -1]$ 、 $[-1, 1, -1, -1]$ 、 $[-1, -1, 1, -1]$ 和 $[-1, -1, -1, 1]$ 。ELM 分类器根据实际输出向量中最大元素的位置判定 PD UHF 信号的放电类型。比如,对于第 1 个样本,ELM 的期望输出为 $[1, -1, -1, -1]$,实际输出为 $[0.37, -1.07, -0.37, -0.94]$,由于实际输出向量中的第 1 个元

素(0.37)最大,所以 ELM 分类器判定 UHF 信号为第 1 类放电信号(尖端放电),判定的类型与真实的类型一致。第 3 个样本由悬浮放电误判为微粒放电。

表 5 部分样本的 ELM 实际输出结果

缺陷	样本	期望输出	实际输出
尖端	1	$[1, -1, -1, -1]$	$[0.37, -1.07, -0.37, -0.94]$
	2	$[1, -1, -1, -1]$	$[-0.06, -0.90, 0.09, -1.13]$
悬浮	3	$[-1, 1, -1, -1]$	$[-0.25, -0.82, 0.11, -1.04]$
	4	$[-1, 1, -1, -1]$	$[-1.36, 0.33, -0.60, -0.37]$
微粒	5	$[-1, -1, 1, -1]$	$[-0.89, 0.53, 0.00, -1.65]$
	6	$[-1, -1, 1, -1]$	$[0.26, -1.08, -0.61, -0.57]$
气隙	7	$[-1, -1, -1, 1]$	$[-1.17, -0.79, -0.98, 0.93]$
	8	$[-1, -1, -1, 1]$	$[-1.20, -0.31, -1.00, 0.51]$

ELM 分类器的测试准确率如表 6 所示,以表 6 的第 1 列数据为例,对于 150 个尖端放电测试样本,ELM 分类器识别正确的样本 144 个,误判为悬浮放电的样本 2 个,误判为微粒放电的样本 3 个,误判为气隙放电的样本 1 个,识别准确率为 $144/150 = 96\%$ 。气隙放电的识别准确率最高,ELM 对气隙放电的识别率可达到 100%,微粒放电的识别准确率最低,识别准确率为 88.7%,这是由于微粒放电过程中,金属微粒的不规则运动导致激发的 UHF 信号分散性很大。

表 6 ELM 分类器的测试准确率

预测的放电类型	实际的放电类型			
	尖端	悬浮	微粒	气隙
尖端	144	4	9	0
悬浮	2	143	2	0
微粒	3	0	133	0
气隙	1	3	6	150
识别准确率/%	96	95.3	88.7	100

按照上述方法也采用 SVM 和 KNN 分类器测试样本的准确率。SVM 分类器使用台湾大学林智仁教授开发的 LIBSVM 3.22 工具箱,选择 $C=2^1$ 、 $r=2^6$,此时的训练准确率达到最大,为 98.5%。通过反复试验,KNN 分类器的距离类型设置为欧氏距离,最近邻数目设定为 5。

对比 3 种分类器的性能,包括训练准确率、测试

准确率和计算时间,如表 7 所示。所有的计算均基于 Windows7 系统中 Matlab 2018a 软件版本,计算机的中央处理器型号为 i5-6500,主频为 3.2 GHz,内存为 16 GB。另外,基于整幅灰度图的 3 个低阶矩的散点如图 9 所示,与图 8(b)相比,可以明显看到,图 9 中不同类型的散点更加混淆,不易区分。

表 7 3 种分类器的性能对比

Table 7 Performance comparison of three classifiers

分类器	平均识别准确率/%		计算时间/ms	
	训练样本	测试样本	训练样本	测试样本
ELM	96.0	95.0	58	5
SVM	98.5	92.5	99	29
KNN	—	88.0	0	38

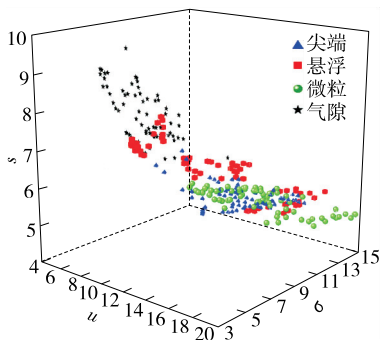


图 9 基于整幅灰度图的 3 个低阶矩的散点

Figure 9 Scatter plot of three low-order moments based on the whole gray image

基于整幅灰度图的 3 个低阶矩的识别准确率如表 8 所示。与表 7 相比,可以看到,2 个分类器 ELM、SVM 的训练准确率分别下降了 26.0%、25.5%;3 个分类器 ELM、SVM 和 KNN 的测试准确率分别下降了 27%、28% 和 37%。结果表明,当按 TE_{m1} 模截止频率将 S 变换后的时频分布图分割为 5 个矩形区域提取的矩特征后,大大提高了 GIS 内 4 类绝缘缺陷的识别准确率。

表 8 基于整幅灰度图的 3 个低阶矩识别准确率

Table 8 Recognition accuracy of three low-order moments based on the whole gray image

分类器	训练准确率/%	测试准确率/%
ELM	70	68.0
SVM	73	64.5
KNN	—	51.0

4 结语

本文在充分调研 GIS PD 特高频信号模式识别的基础上,开展了将 TE_{m1} 模的截止频率作为 PD UHF 信号时频分布图的分割依据,输入灰度图矩特征到分类器中进行辨识的研究。

1)按 TE_{m1} 模截止频率将 S 变换后的时频分布图分割为 5 个矩形区域,分割点在纵坐标的 479、891、1 249、1 586、2 000 MHz 处。以分割后具有最大类间类内散度比的 6 个矩特征作为 ELM、SVM 和 KNN 的输入量,3 个分类器的测试准确率分别高达 95%、92.5% 和 88%,验证了按 TE_{m1} 模截止频率分割所选矩的有效性。

2)与基于整幅灰度图的 3 个低阶矩的测试准确率相比,3 个分类器基于灰度图分割后的矩特征的准确率分别提高了 27%、28% 和 37%。表明计及电磁模的 6 个矩特征对提高不同放电的识别率有明显的优越性。

因而可以看到,引入 TE_{m1} 模截止频率作为 UHF 信号时频分布图的分割依据,提高了 GIS 绝缘缺陷类型的识别准确率。这种分割方法增强了图谱特征的空间分布信息,对改善特高频法识别局部放电的准确率具有实际应用价值。

参考文献:

[1] HAFIZHAH Z, KHAYAM U. Partial discharge induced electromagnetic wave propagation characteristics in 70 kV gas insulated switchgear[C]//IEEE 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), Denpasar, Indonesia, 2014.

[2] TANG J, WANG D, FAN L, et al. Feature parameters extraction of GIS partial discharge signal with multi-fractal detrended fluctuation analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(5):3037-3045.

[3] DAI D, WANG X, LONG J, et al. Feature extraction of GIS partial discharge signal based on S-transform and singular value decomposition[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(2):186-193.

[4] 唐志国,唐铭泽,李金忠,等. GIS 设备局部放电类型表现相似性及模式识别准确性的探讨[J]. 高电压技术, 2018, 44(8):2479-2485.

- TANG Zhiguo, TANG Mingze, LI Jinzhong, et al. Study on apparent similarity of partial discharge type and accuracy of pattern recognition in GIS equipment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2479-2485.
- [5] GAO W, DING D, LIU W. Research on the typical partial discharge using the UHF detection method for GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2621-2629.
- [6] 刘诣, 邹阳, 梁明辉. 基于脉冲激励 GTEM 的特高频局部放电传感器校准方法改进研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 51-58.
- LIU Yi, ZOU Yang, LIANG Minghui, et al. Research on improvement of the calibration method of UHF partial discharge sensors based on pulse excitation to GTEM[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 51-58.
- [7] 杨勇, 邵先军, 金涌涛. GIS 盆式绝缘子结构对局部放电特高频信号泄漏特性的影响研究[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 95-101+108.
- YANG Yong, SHAO Xianjun, JIN Yongtao, et al. Influence of spacers structure on ultra-high frequency partial discharge signal leakage characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 95-101+108.
- [8] HIKITA M, OHTSUKA S, OKABE S, et al. Influence of disconnecting part on propagation properties of PD-induced electromagnetic wave in model GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1731-1737.
- [9] HIKITA M, OHTSUKA S, WADA J, et al. Propagation properties of PD-induced electromagnetic wave in 66 kV GIS model tank with L branch structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 256-263.
- [10] 闫帅, 李朋宇, 王高洁, 等. 基于特高频无线智能传感阵列的敞开式变电站放电定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 52-57+65.
- YAN Shuai, LI Pengyu, WANG Gaojie, et al. Partial discharge localization method based on UHF wireless sensor array in air-insulated substation[J]. Electrical Power, 2021, 54(2): 52-57+65.
- [11] LIANG N Y, HUANG G B, SARATCHANDRAN P, et al. A fast and accurate online sequential learning algorithm for feedforward networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2006, 17(6): 1411-1423.
- [12] 李绪益. 电磁场与微波技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 173-196.
- [13] STRICKER M A, DIMAI A. Color indexing with weak spatial constraints[J]. The International Society for Optical Engineering(SPIE), 1996, 2670: 29-40.
- [14] 奉国和, 郑伟. 文本分类特征降维研究综述[J]. 图书情报工作, 2011, 55(9): 109-113.
- FENG Guohe, ZHENG Wei. A review on dimension reduction of text classification features[J]. Library And Information Service, 2011, 55(9): 109-113.
- [15] 郑艳艳, 朱永利, 高佳程. 基于 SSA 与 ICA 的变压器局部放电混合信号分离[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 84-90.
- ZHENG Yanyan, ZHU Yongli, GAO Jiacheng, et al. Hybrid signal separation of transformer partial discharge based on SSA and ICA[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 84-90.
- [16] CHANG C S, JIN J, CHANG C, et al. Separation of corona using wavelet packet transform and neural network for detection of partial discharge in gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1363-1369.
- [17] SARASWATHI S, SUNDARAM S, SUNDARARAJAN N, et al. ICGA-PSO-ELM approach for accurate multiclass cancer classification resulting in reduced gene sets in which genes encoding secreted proteins are highly represented[J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2011, 8(2): 452-463.
- [18] WANG C, WU F, SHI Z, et al. Indoor positioning technique by combining RFID and particle swarm optimization-based back propagation neural network[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(17): 6839-6849.
- [19] 孙浩飞, 高坤, 花啸昌, 等. 基于路径时间差的变压器局部放电超声定位方法研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(3): 100-107.
- SUN Haofei, GAO Kun, HUA Xiaochang, et al. Ultrasonic positioning method of transformer partial discharge based on path time difference[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 100-107.
- [20] WANG Y B, CHANG D G, FAN Y H, et al. Acoustic localization of partial discharge sources in power transformers using a particle-swarm-optimization-route-searching algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 24(6): 3647-3656.
- [21] LI S, SI W, LI Q. Partition and recognition of partial discharge development stages in oil-pressboard insulation with needle-plate electrodes under combined AC-DC voltage stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1781-1793.