

# 基于脉冲电流和紫外脉冲的多源局部放电诊断方法

苏志雄<sup>1</sup>, 孙康<sup>1</sup>, 丁浩<sup>2</sup>, 张周胜<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网盐城市大丰区供电公司, 江苏 盐城 224100)

**摘要:** 本研究提出了一种基于脉冲电流法和紫外脉冲法联合检测的多源局部放电诊断方法, 针对4种基本缺陷模型, 搭建了开关柜多源局部放电实验平台。对联合检测得到的局部放电信息特征进行提取并构建数据库, 使用 $k$ 近邻(KNN)算法和有向无环图支持向量机(DAG-SVMs)算法对局部放电类型进行识别。结果表明: 脉冲电流法测得的放电图谱中放电次数和放电量的变化与模型中缺陷种类有关, 气隙、沿面缺陷的引入使放电电量增大和图谱对称性提高, 电晕缺陷的引入使放电次数增多; 紫外脉冲法测得的放电脉冲数与多源放电模型中缺陷个数和缺陷的紫外/可见光比值有关, 缺陷个数和紫外/可见光比值越高, 放电脉冲数越大; KNN算法识别准确率最高可达到99.67%。

**关键词:** 开关柜; 多源放电; KNN; DAG-SVMs; 脉冲电流法; 紫外脉冲法

中图分类号: TM855 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.01.015

## Multi-source partial discharge detection method based on pulse current method and ultraviolet pulse method

SU Zhixiong<sup>1</sup>, SUN Kang<sup>1</sup>, DING Hao<sup>2</sup>, ZHANG Zhousheng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Yancheng Dafeng District Power Supply Company, Yancheng 224100, China)

**Abstract:** In this paper, a multi-source partial discharge diagnosis method based on joint detection of pulse current method and ultraviolet pulse method was presented. A multi-source partial discharge experimental platform of switchgear was constructed for four basic defect models. The characteristics of partial discharge information obtained by joint detection were extracted and a database was constructed, and then the discharge types were identified by  $k$ -nearest neighbor (KNN) algorithm and directed acyclic graph SVMs (DAG-SVMs) algorithm. The results show that the change of discharge number and discharge quantity in discharge pattern measured by pulse current method are related to the defect type in model. The existence of void and surface defects will increase the discharge quantity and pattern symmetry, and the existence of corona defect will increase the discharge number. The discharge pulse number measured by ultraviolet pulse method is related to the defect number in multisource discharge model and the ratio of ultraviolet to visible light. The higher the number of defects and the ratio of ultraviolet to visible light, the larger the discharge pulse number. The recognition accuracy of the KNN algorithm can reach up to 99.67%.

**Key words:** switchgear; multi-source discharge; KNN; DAG-SVMs; pulse current method; ultraviolet pulse method

## 0 引言

电气设备在运行过程中会在介质内部出现气泡、杂质等物质, 导致绝缘介质内部或表面出现高场强区域, 当场强达到一定程度时会引起局部放电<sup>[1-2]</sup>。常见的局部放电检测方法有脉冲电流法、特高频法、超声波检测法和暂态地电压法等。从原始局部放电信息中提取能够反映故障本质特征的主要特征量, 并借助分类算法进行识别是目前局部放电模式识别研究的热点<sup>[3]</sup>。模式识别通过将数据归

一化、高维特征降维处理和建立样本标签号, 生成局部放电特征数据库, 再由神经网络、聚类分析和支持向量机等算法进行分类<sup>[4-8]</sup>。开关柜内部具有多个不同的电气设备, 如断路器、互感器等, 而且开关柜实际运行过程中一般是多柜并排运行, 故存在多源放电的情况。

多源局部放电模式识别的相关研究已有报道, 文献[9]采用小波变换对局部放电信号进行高效去噪, 提取相位-放电量-放电次数图谱中相位和幅值的平均特征, 通过神经网络算法实现多源局部放电模式的高效分类, 识别准确率在98%以上。多源放电有时存在部分模式重叠的现象, 增大了模式识

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(20020500800、21DZ2205000)。

别的难度,文献[10]通过KSVM分类算法和two-step回归算法基于单源样本和多源样本之间的概率关系进行真实建模来识别多源放电模式有一定的效果,算法综合识别准确率可达到80%。以上文献能够获得较高的识别准确率是在算力充足和运算速度要求不高的前提条件下完成的,不能满足实地实时检测的需求。为了满足实地实时检测需求,对识别算法的复杂度和运算速度进行分析,使其符合实地实时检测指标是有必要的。

文献[11]通过对3种不同绝缘缺陷的指数型信号模型和局部放电数学模型制造混合局部放电信号,并提出使用一种基于联合近似对角化(JADE)的盲源分离算法来分离信号,发现该方法具有良好的鲁棒性但对极高混合信号的分离性能较差。文献[12]为解决局部放电源诊断中放电样本的不平衡问题,并克服传统多源放电诊断方法对脉冲聚类分离效果的依赖,提出基于辅助分类-边界平衡生成式对抗网络(AC-BEGAN)的局部放电数据增强与多源放电识别方法,该方法可以有效扩充和均衡局部放电样本,分类识别准确率也得到了提高。上述文献中的多源放电数据都是通过软件算法融合已有的单源放电数据源得出,缺乏一定的真实性。为了针对真实的多源放电进行模式识别,构建真实合理的多源放电数据库十分必要。

本研究在开关柜母线舱内搭建多源局部放电平台,借助脉冲电流法(pulse current method, PCM)和紫外脉冲法(ultraviolet pulse method, UPM)对开关柜进行局部放电联合检测,对两种方法检测到的局部放电信号特征进行提取融合,通过 $k$ -近邻算法和支持向量机算法对其进行模式识别,分析算法的复杂度、识别准确度和运算时间,以验证该多源局部放电诊断方法的合理性。

## 1 多源局部放电实验设计

### 1.1 实验回路和检测系统设计

多源局部放电实验平台主要包括交流电源、保护电阻、多源放电缺陷平台和检测系统等(如图1所示)。其中检测系统由脉冲电流局部放电检测系统、紫外测弧系统构成。脉冲电流信号借助开关柜带电显示器配套的绝缘子式电容传感器获取<sup>[13]</sup>,紫外测弧信号由日盲型紫外光敏管获取,紫外光谱范围为185~260 nm。脉冲电流和紫外测弧信号经同轴电缆传输至检测仪表。实验选取JZF-10型脉冲电流校正仪对JFD-2010型局部放电检测仪进行离线校正<sup>[14]</sup>,检测带宽为0.1~1 MHz,灵敏度 $\leq 5$  pC。

### 1.2 多源局部放电平台搭建

多源局部放电平台的搭建示意图如图2所示,紫外光敏管放置在中心轴位置,从3个角度对多源

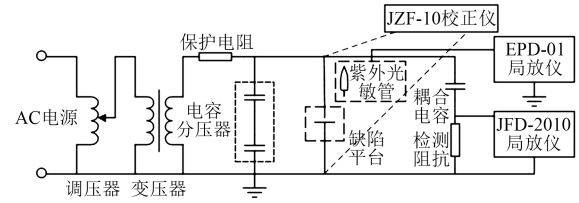


图1 多源局部放电实验平台

Fig.1 Multi-source partial discharge experiment platform

局部放电过程中产生的电弧进行紫外脉冲检测。多源局部放电平台放置在开关柜母线舱中,用4种不同缺陷(如图3所示)的组合模拟开关柜内部可能发生的缺陷放电,4种缺陷与平台平面之间有一定的距离,紫外光敏管在三维空间上进行紫外脉冲测量。以平台左下角为原点,对4种缺陷模型和3个紫外检测装置的中心坐标进行标定,单位均为cm。

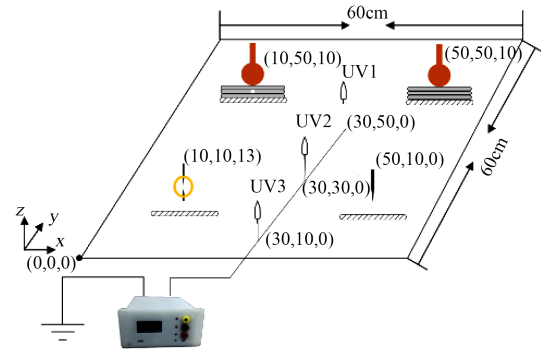


图2 多源局部放电平台示意图

Fig.2 Diagram of multi-source partial discharge platform

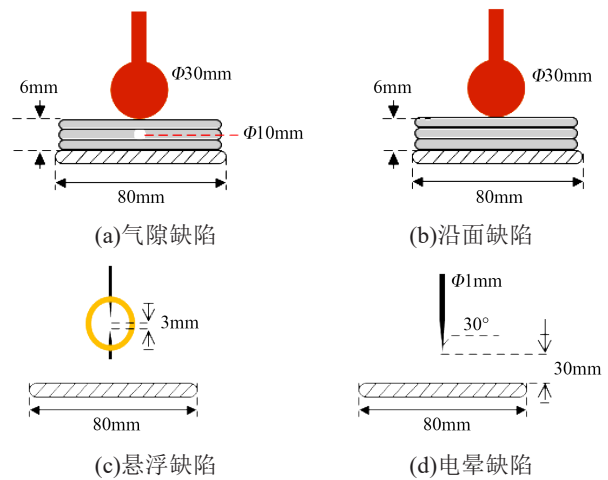


图3 基本缺陷模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of basic defect models

采用交流电源对开关柜母线舱进行加压,根据多缺陷的组合方式将要加压的缺陷高压端连接至母线,其余缺陷则进行接地处理,从而在开关柜内部模拟多源局部放电的产生。4种缺陷均单点接地,接地电阻均为0.9  $\Omega$ 。

### 1.3 加压和采样方式

进行局部放电实验时,施加在缺陷模型上的电压从起始电压(加压系统初始电压)7 kV开始,最高不超过13 kV。

为了准确反映局部放电规律,减少采样数据量,当施加电压达到预定值且稳定30 s后,检测系统开始对局部放电信号进行信息采集,每隔30 s采集1次信息(检测系统内部多次采集滤波输出局部放电信息),采样3次后求取局部放电特征量的平均值,减少放电波动对局部放电特征量及其变化趋势的影响。

### 1.4 多缺陷设计

本研究以气隙、沿面、悬浮、电晕缺陷为基础,对气隙、沿面、悬浮、电晕、气隙-电晕、沿面-电晕、气隙-悬浮、沿面-悬浮、气隙-悬浮-电晕、沿面-悬浮-电晕等不同形式的缺陷组合的局部放电特征变化进行研究。

为了验证文中多缺陷局部放电平台设计的合理性,使用紫外光敏管在悬浮-电晕缺陷放电条件下对各缺陷独立进行放电检测,各缺陷放电次数随电压的变化趋势如图4所示。从图4可以看出,电晕缺陷起始检测电压为11 kV,悬浮缺陷起始检测电压为9 kV,不同缺陷的放电次数随电压的变化趋势也不同,说明本研究设计的多缺陷局部放电平台合理有效,不同缺陷之间有其独立的放电特征。

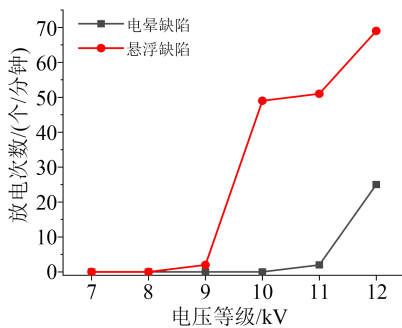


图4 不同缺陷下放电次数随电压的变化

Fig.4 Change of discharge number with voltage under different defects

## 2 局部放电检测图谱特征分析

### 2.1 脉冲电流检测图谱

通过JFD-2010型局部放电检测仪软件自带的数据分析,对脉冲电流法得到的原始数据进行处理,生成单源局部放电和多源局部放电下的三维放电图谱,为后续放电特征数据库的建立提供数据来源。为减少开关柜背景噪声(约50 pC)对放电数据的影响,通过阈值滤波将背景噪声消除,得到12 kV电压等级下的单源局部放电和多源局部放电脉冲序列相位分布图谱(phase resolved pulse sequence,

PRPS),如图5~6所示。

从图5(a)可以看出,气隙缺陷放电单个周期内的放电次数主要集中在负半周,少数在正半周,具

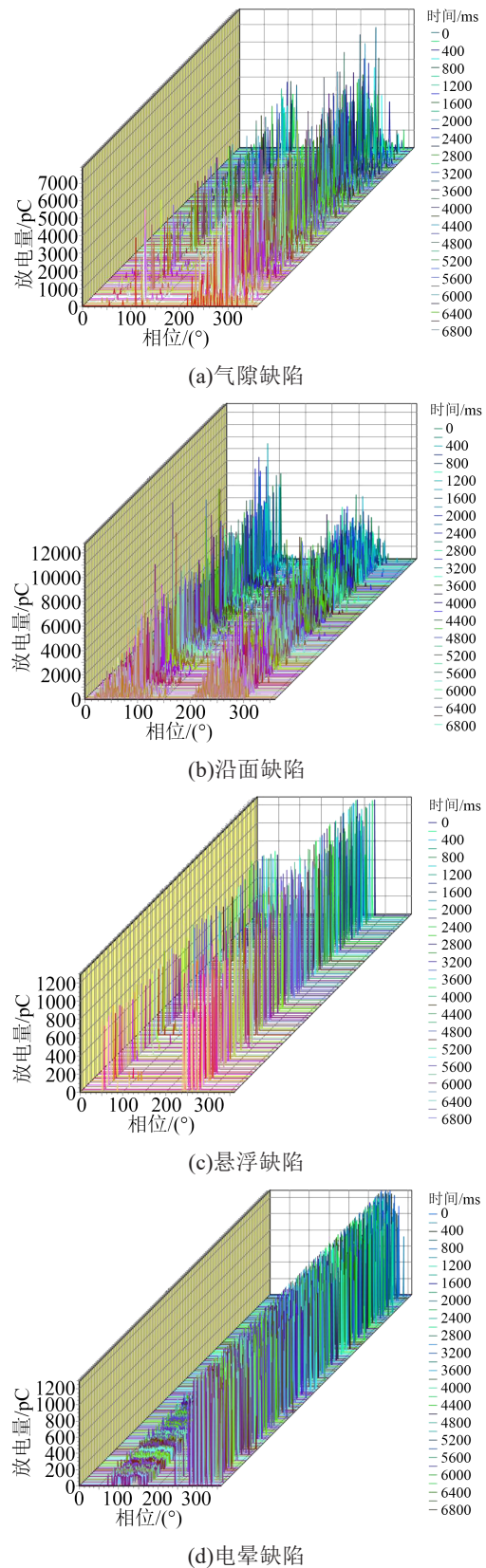
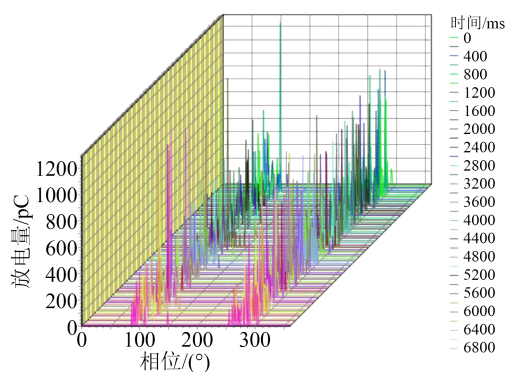


图5 单源局部放电PRPS图谱

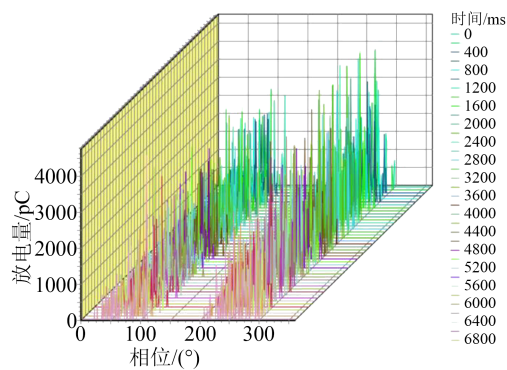
Fig.5 PRPS spectra of single-source partial discharge

有较强的不对称性。在 $110^\circ$ 和 $280^\circ$ 处均有一个放电尖峰。正负半周期之间放电量的包络线具有一定的对称性<sup>[15]</sup>。从图5(b)可以看出,沿面缺陷放电单个周期内的放电次数主要集中在 $30^\circ\sim 100^\circ$ 和 $220^\circ\sim 300^\circ$ 附近,负半周放电次数略多于正半周放电次数,最大放电尖峰出现在正半周期内,且随时间变化幅度明显。从图5(c)可以看出,悬浮缺陷放电单个周期内在 $50^\circ$ 和 $250^\circ$ 附近出现大量高幅值放电点,放电重复率低。从图5(d)可以看出,电晕缺陷放电集中在负半周期,放电图谱具有极不对称性质。4种基本缺陷的PRPS图谱与文献[16-18]中典型的缺陷图谱基本一致。

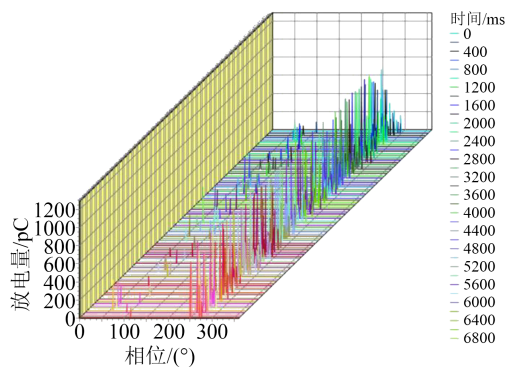
从图6(a)可以看出,气隙-电晕缺陷放电图谱中单独电晕缺陷放电的极不对称特性消失,正负半周期内出现了气隙放电中放电量包络线对称的特性。从图6(b)可以看出,沿面-电晕缺陷放电的图谱由沿



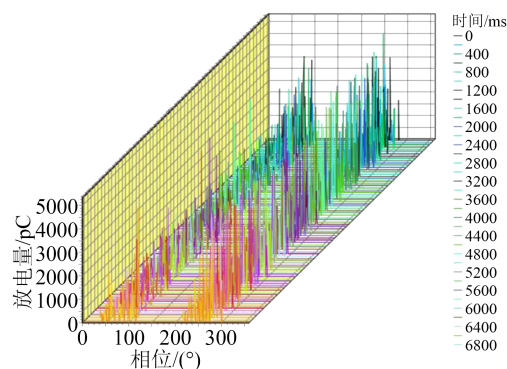
(a)气隙-电晕



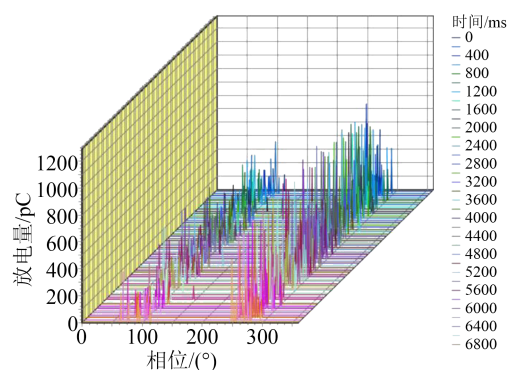
(b)沿面-电晕



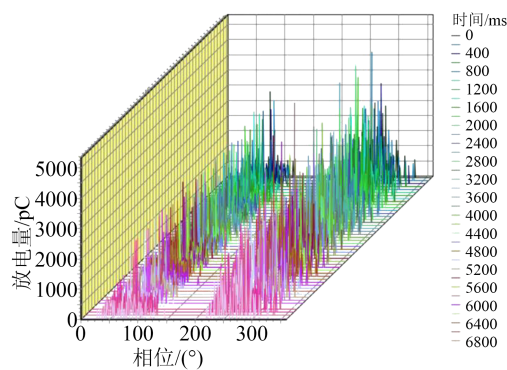
(c)气隙-悬浮



(d)沿面-悬浮



(e)气隙-悬浮-电晕



(f)沿面-悬浮-电晕

图6 多源放电PRPS图谱

Fig.6 PRPS spectra of multi-source discharge

面缺陷放电的不对称变为对称,整个放电周期内的放电量也明显的增加。分析图6(a)~(b)可知,电晕缺陷引入气隙或沿面缺陷后,原先的放电相位分布被引入的缺陷所替代。

从图6(c)可以看出,与气隙缺陷相比,气隙-悬浮缺陷的放电特征没有明显改变。悬浮缺陷放电有别于尖端毛刺类局部放电,为电容性放电,此时气隙内的残余电荷积聚能力要弱于电容充电能力<sup>[19]</sup>,气隙放电现象不明显,因此整体放电重复率仍然较低。

沿面-悬浮缺陷的PRPS图谱如图6(d)所示,此时沿面缺陷放电的残余电荷积聚能力强于电容充电能力,最大放电量、放电重复率和图谱对称性得

到了提高。

气隙-悬浮-电晕缺陷和沿面-悬浮-电晕缺陷的PRPS图谱如图6(e)和图6(f)所示。从6(e)~(f)可以看出,气隙-悬浮缺陷和沿面-悬浮缺陷在引入电晕缺陷后,最大放电量没有发生明显变化,周期内放电次数却明显增加。这是因为电晕放电中的残余电荷只能在针尖附近空气内积聚,当积聚到一定程度时就会发生放电。

综上所述,多源放电中气隙、沿面缺陷的引入会增大最大放电量,并使放电在相位上对称分布,电晕缺陷的引入则会增加放电周期内的放电次数。由于气隙、沿面、电晕缺陷中的残余电荷积聚能力不同,对放电图谱特征中最大放电量和放电次数的影响也不同。

## 2.2 紫外脉冲检测结果

通过EPD-01型主机和紫外测弧传感器以及配套的上位机检测系统,对各个缺陷模型放电进行脉冲次数采集,获得单位时间内(每分钟)各种缺陷模型的紫外放电脉冲数。

实验中发现紫外测弧系统对单个缺陷模型的放电检测不敏感,即使加压至13 kV,系统也只能检测到十分微弱的放电脉冲;对于组合缺陷模型的放电,系统则可以检测到一定数量的紫外放电脉冲。这是由于当紫外光敏管距离局放源超过20 cm时,由于光子衰减,低于13 kV的单源放电不能被有效检测<sup>[20]</sup>,而多源放电时,光敏管对局部放电源的综合距离减小,放电过程中产生的光子数增加,光子衰减得到改善,较低电压下紫外光敏管也可以有效检测到放电电弧的产生。

不同类型缺陷局部放电的脉冲数变化趋势如图7所示。从图7可以看出,多源放电模型中,沿面-电晕缺陷和沿面-悬浮缺陷放电的脉冲数最少,沿面-悬浮-电晕缺陷放电的脉冲数最多,随着电压等级的提高各缺陷模型放电脉冲数增加。沿面、电晕缺陷的残余电荷积聚能力与悬浮缺陷的电容充电能力不同,其放电脉冲数随电压升高呈非线性变化。紫外测弧系统对含有3个缺陷的多源放电模型局部放电检测的起始电压低于含有两个缺陷的多源放电模型。

根据文献[21]研究结果,紫外光/可见光的放电强度比值从高到低分别是沿面缺陷、电晕(尖端)缺陷、悬浮缺陷。由于电晕缺陷的紫外光/可见光比值大于悬浮缺陷,气隙-电晕缺陷的放电脉冲数大于气隙-悬浮缺陷,沿面-电晕缺陷的放电脉冲数大于沿面-悬浮缺陷。

根据上述分析,紫外测弧系统对多源局部放电的检测规律可归纳为:紫外测弧系统对局部放电检测的起始电压与放电模型的缺陷数量呈负相关;紫

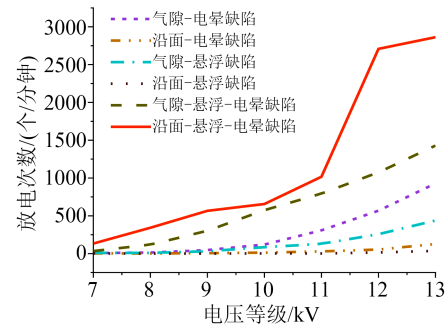


图7 不同类型缺陷放电脉冲数随电压的变化

Fig.7 Change of discharge pulse numbers with voltage of different type of defects

外测弧系统测得的放电脉冲数与缺陷数量和缺陷性质有关:缺陷数量越多,放电脉冲数越大;相同数量缺陷情况下,放电脉冲数与缺陷的紫外/可见光比值呈正相关。

## 3 多源局部放电数据库的建立

### 3.1 归一化

为了避免多源局部放电中不同缺陷数据值的差异较大,以及数据本身具有波动的影响,提取后需要对数据特征进行归一化处理。本文归一化区间为[0,1],归一化公式如式(1)所示。

$$X_{\text{NewInfo}} = \frac{X_{\text{OldInfo}} - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (1)$$

式(1)中: $X_{\text{OldInfo}}$ 和 $X_{\text{NewInfo}}$ 分别代表原始的和归一化后的特征值信息量; $X_{\text{max}}$ 和 $X_{\text{min}}$ 分别代表原始特征值信息量中各类信息量的最大值和最小值。

### 3.2 多源局部放电特征提取和分析

本研究根据检测方法的不同,分别对脉冲电流法和紫外脉冲法所测得的局部放电信号进行特征提取。

对脉冲电流法所测得的局部放电信息进行特征值提取,得到正半周期中心相位 $\varphi_+$ 、负半周期中心相位 $\varphi_-$ 、最大放电量 $Q_{\text{max}}$ 、最大放电次数 $N_{\text{max}}$ 和平均放电量 $Q_{\text{av}}$ 共5种放电特征值<sup>[22]</sup>。

由前文对不同缺陷类型放电脉冲数随电压等级变化的趋势分析可知,不同缺陷间的放电脉冲数、上升速度和波形变化程度是不同的。因此,对紫外脉冲法局部放电信息进行特征值提取,得到脉冲数(PN)、波动程度(FL)、陡峭指标(SI)、脉冲数变化(PNC)、波动指标变化(FLC)和陡峭指标变化(SIC)共6种放电特征值。

归一化处理后的多源局部放电特征雷达谱图如图8所示。从图8(a)可以看出,采用脉冲电流法时,4种基本缺陷具有鲜明的放电特征,分辨率很强;多源局部放电中仅气隙-电晕缺陷和气隙-悬浮-电晕缺陷在雷达谱图中具有较强的放电特征分

辨能力。从图8(b)可以看出,采用紫外脉冲法时,4种基本缺陷的放电特征没有分辨能力;多源局部放电中除沿面-电晕缺陷和沿面-悬浮缺陷放电在雷达谱图中形状相似外,其余多缺陷类别均有明显的特征分辨能力。

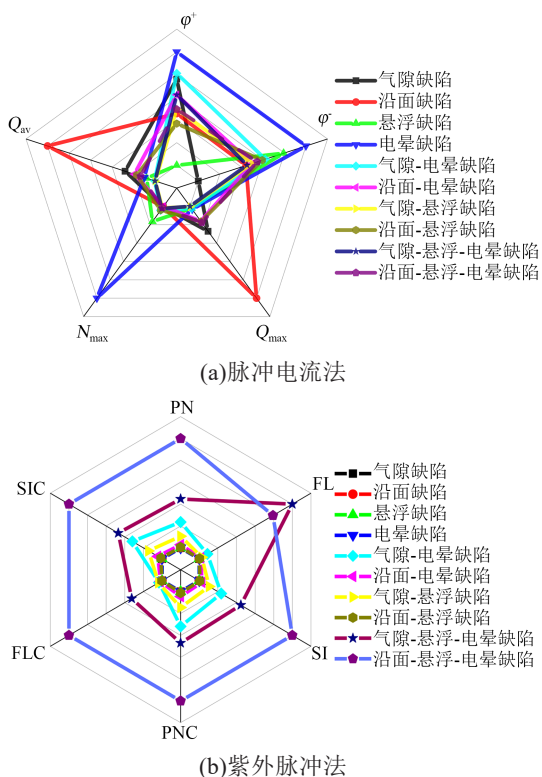


图8 多源局部放电特征雷达谱图

Fig.8 Radar maps in multi-source partial discharge

将两种方法提取出的11种放电特征值融合成11维的特征向量。在样本空间内对特征向量进行主成分分析(principal component analysis, PCA),各成分方差占比如图9所示。为了降低特征维度、提高数据自我分辨能力和增加算法识别准确率,选取方差占比为99.94%的前8个特征值组成特征向量,作为输入数据进行算法模式识别计算。

对特征向量降维分析,得到特征向量二维分布如图10所示。从图10可以看出,特征向量在二维

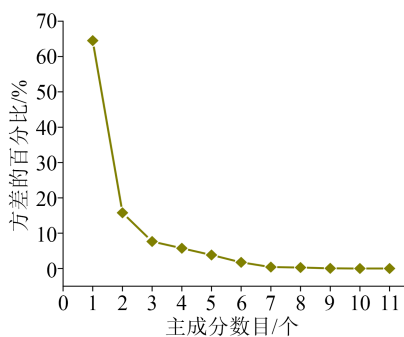


图9 主成分分析结果

Fig.9 Principal component analysis result

空间内的投影具有簇类聚集现象,聚集成一团或在一条线上。除了气隙缺陷和沿面-悬浮缺陷、悬浮缺陷和电晕缺陷之间的特征向量在二维空间的投影存在部分重叠区外,其他放电类型的特征向量在二维空间的投影均相互独立,特征向量在二维空间内具有很好的分辨能力。

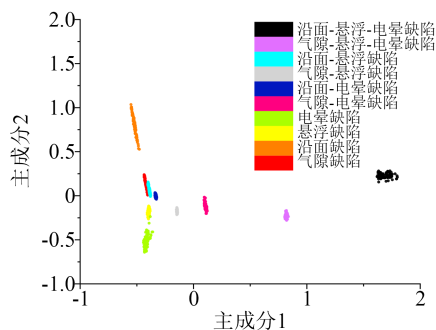


图10 特征向量的二维分布图

Fig.10 Two dimensional distribution diagram of vectors

在本文实验场景下,紫外光敏管具有弱单源放电检测、强多源放电检测性质,对单、多源局部放电的辨别具有一定的作用。通过脉冲电流和紫外脉冲的特征叠加融合,增强了数据特征的分辨度,数据本身具有良好的簇类聚集能力和高分辨能力。

### 3.3 多源放电特征数据库的建立

对不同缺陷放电类型定义样本标签,各放电类型样本数目为100,建立的放电特征数据库如表1所示。

表1 局部放电特征数据库

Tab.1 Partial discharge feature library

缺陷类型	样本数目	样本标签
气隙	100	1
沿面	100	2
悬浮	100	3
电晕	100	4
气隙-电晕	100	5
沿面-电晕	100	6
气隙-悬浮	100	7
沿面-悬浮	100	8
气隙-悬浮-电晕	100	9
沿面-悬浮-电晕	100	10

## 4 基于KNN和DAG-SVMs算法的多源局部放电模式识别

### 4.1 KNN和DAG-SVMs算法的参数设置

使用k-近邻(k-nearest neighbor, KNN)算法和有向无环图支持向量机(directed acyclic graph SVMs, DAG-SVMs)算法对多源放电类型进行模式识别<sup>[23-24]</sup>,对脉冲电流法和紫外脉冲法提取出的特

征值融合的有效性和合理性进行验证。使用 Python 2.7 编程环境对两种算法进行运行。

KNN 算法训练集和测试集的比值为 7:3。采用“投票法”作为样本分类方法,距离度量采用欧式距离,参数  $k$  值设置为 3。

DAG-SVMs 算法训练集、验证集和测试集的比值为 6:1:3。分类器由 45 个分支节点和 10 个叶节点组成,完成一次分类需要 9 个节点。使用 Platt SMO 算法最优化求解,选用径向基函数作为核函数,核参数值  $C$  和  $\sigma$  分别为 1 和 0.1。

#### 4.2 两种算法结果分析和性能比较

两种算法的最终运行结果如表 2 所示,仅采用脉冲电流法,在单源放电条件下,算法识别准确率均接近 100%;在多源放电条件下,KNN 算法和 DAG-SVMs 算法的识别准确率分别为 91.33% 和 85.00%。引入紫外脉冲法后,在多源放电条件下,两种算法的识别准确率为 99.67% 和 99.00%,分别提高了 8.34% 和 14.00%。说明引入紫外脉冲法后,通过特征值融合手段,对多源放电的识别能力得到了提高。

表 2 两种算法准确性比较

Tab.2 Comparison of accuracy between two algorithms

算法名称	单源放电		多源放电		
	算法识别准确率/%		算法识别准确率/%		算法耗时
	单一 PCM	单一 PCM	PCM 和 UPM 联合检测	训练时间/s	运行时间/ms
KNN	100.00	91.33	99.67	—	66.16
DAG-SVMs	99.00	85.00	99.00	47	530.00

在相同硬件平台和编程环境中,对两种算法的运算时间进行了定量分析,其中 KNN 算法不需要进行训练,测试运行时间为 66.16 ms, DAG-SVMs 算法的训练时间为 47 s,测试运行时间为 530 ms。

对两种算法的鲁棒性进行测试。将测试的 40 个样本的特征值进行修改、删除处理,然后重新进行算法分类识别。其中,KNN 算法识别错误的样本数为 9, DAG-SVMs 算法识别错误的样本数为 0。说明 DAG-SVMs 算法的鲁棒性优于 KNN 算法,面对实际工作环境中的复杂情况,可以选取鲁棒性较高的 DAG-SVMs 算法进行分类识别。

进一步对算法的时间复杂度和空间复杂度使用大 O 记法进行对比分析,令  $n$  为训练样本数,  $d$  为特征数,  $s$  为支持向量的个数,  $b$  为样本种类数,  $k$  为 KNN 算法近邻个数。算法<sup>[10,23-24]</sup>的复杂度分析如表 3 所示。从表 3 可以看出,训练时间复杂度从小到大排序分别为 KNN 算法、二重逻辑回归算法、DAG-SVMs 算法。预测时间复杂度从小到大排序分别为 KNN 算法、DAG-SVMs 算法、二重逻辑回归算法。运行空间复杂度从小到大排序分别为二重逻辑回归算法、DAG-SVMs 算法、KNN 算法。

KNN 算法的时间复杂度低,运算速度较快,但空间复杂度高。通过二叉树算法进行改进<sup>[25]</sup>,可以

将原有的  $O(n)$  复杂度降到  $O(\log(n))$ ,进一步减少算法复杂度。DAG-SVMs 算法的时间复杂度和空间复杂度都居于中间水平,且对本研究中的数据有较好的鲁棒性。二重逻辑回归算法的空间复杂度低但预测时间长。

#### 4.3 算法应用前景

用于检测紫外脉冲的 EPD-01 主机 (ARM 架构) 也具有脉冲电流检测的功能<sup>[25]</sup>,当解决开关柜电缆走线问题后,通过替换掉原先的带电显示器<sup>[13,22]</sup>,可以根据本文的方法同时提取脉冲电流和紫外脉冲两种信号特征值,进而通过算法进行模式识别。DAG-SVMs 算法分类器内包含了单源放电类别,因此该算法不仅可以进行多源放电识别,也兼容了单源放电的识别。当样本数较大且需要快速识别故障类型时,可以考虑仅使用脉冲电流法(即 5 维特征向量)进行 KNN 算法识别,多源放电下算法也有较高的识别准确率。

对算法进行适当修改,可以部署在嵌入式设备 (ARM+FPGA 架构) 中,将数据样本或训练生成的特征向量加载在 RAM 中,通过 LTU 等计算单元进行计算,输出相应的识别结果<sup>[26-28]</sup>,从而极大缩短开关柜局部放电诊断流程。

### 5 结论

通过 4 种基本缺陷搭建了多源局部放电平台,结合脉冲电流法和紫外测弧脉冲法,能够快速准确地对多源放电进行模式识别,为局部放电检测设备多源放电的在线监测提供一种检测方法,主要得到以下结论:

(1) 脉冲电流法和紫外脉冲法提取得到的局部

表 3 算法复杂度分析

Tab.3 Algorithmic complexity analysis

算法种类	训练时间复杂度	预测时间复杂度	运行空间复杂度
KNN	$O(1)$	$O((n+k) \times d)$	$O(n \times d)$
DAG-SVMs	$O(b^2 \times n^3)$	$O(b \times s \times d)$	$O(b^2 \times s)$
二重 logistic 回归	$O((d \times n)^2)$	$O(d^2)$	$O(d)$

放电特征,在雷达图谱中具有不同的分辨程度。脉冲电流法对单源放电的分辨能力强而对多源放电的分辨能力较弱,紫外脉冲法对多源放电有较好的分辨能力而不能有效分辨单源放电,两者联合检测可以优势互补,大幅提高放电识别能力。

(2)对10种放电缺陷各采集100组数据,通过主成分分析得到各个特征值的贡献度排名和占比,将第一、第二贡献度的特征在二维平面可视化显示,从二维平面上可看出降维后的特征在二维平面上有明显自我聚类特性。

(3)采用KNN和DAG-SVMs算法进行分类识别,算法识别准确率分别为99.67%和99.00%,后者的鲁棒性优于前者,测试运行时间分别为66.16 ms和530 ms。实际使用中,在数据库样本数目较少(几千个样本以内)的理想工作环境情况时,为了快速分类可以使用KNN算法,其余场合宜采用DAG-SVMs算法。

### 参考文献:

- [1] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.
- [2] 陶诗洋,冯义,张天辰,等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(9):145-149.
- [3] 唐志国,唐铭泽,李金忠,等. 电气设备局部放电模式识别研究综述[J]. 高电压技术,2017,43(7):2263-2277.
- [4] 范路,陆云才,陶风波,等. 人工智能在局部放电检测中的应用(二):模式识别与状态评估[J]. 绝缘材料,2021,54(7):10-24.
- [5] MA H, CHAN J C, SAHA T K, et al. Pattern recognition techniques and their applications for automatic classification of artificial partial discharge sources[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(2):468-478.
- [6] 王卓,朱宁宁,郑祥. 基于LDA和RBF神经网络的开关柜局部放电模式识别方法研究[J]. 电子测量技术,2021,44(14):148-152.
- [7] 陈继明,许辰航,李鹏,等. 基于时频分析与分形理论的GIS局部放电模式识别特征提取方法[J]. 高电压技术,2021,47(1):287-295.
- [8] 张翼,朱永利. 图信号与图卷积网络相结合的局部放电模式识别方法[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6472-6481.
- [9] SURESH D. Feature extraction for multi source partial discharge pattern recognition[C]//2005 Annual IEEE India Conference. Chennai, India:IEEE,2005.
- [10] JANANI H, KORDI B, JOZANI M J. Classification of simultaneous multiple partial discharge sources based on probabilistic interpretation using a two-step logistic regression algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(1):54-65.
- [11] 刘鑫,朱宁宁,郑祥. 基于联合近似对角化的多源局部放电混合信号分离方法研究[J]. 电子测量技术,2021,44(17):101-104.
- [12] 朱永利,张翼. 基于辅助分类-边界平衡生成式对抗网络的局部放电数据增强与多源放电识别[J]. 中国电机工程学报,2021,41(14):5044-5053.
- [13] 白鹭,李冠良,郑志宏. 基于脉冲电流法的10kV开关柜局部放电检测装置的研发[J]. 山西电力,2020(3):23-26.
- [14] 郭恒,王昌长,朱德恒,等. 带电校正局部放电电量方法的研究[J]. 电工技术学报,1990,8(3):51-55.
- [15] CHANG W Y, YANG H T. Partial discharge pattern recognition of molded type transformers using self organizing map[C]//2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials. Bali, Indonesia:IEEE,2007.
- [16] 布赫. 基于35 kV高压开关柜的综合局部放电检测技术[J]. 电器与能效管理技术,2019(21):48-51.
- [17] 黄洪逸. 典型局部放电微观过程仿真与脉冲信号分析[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [18] 段大鹏,王彦卿,江阳,等. SF<sub>6</sub>气体绝缘开关设备典型绝缘缺陷的局部放电发展规律及诊断方法研究[J]. 电测与仪表,2017,54(8):114-122.
- [19] 陈曦,陶霞韬,潘成,等. 固体绝缘材料内部气隙局部放电物理模型概述[J]. 绝缘材料,2015,48(12):6-11.
- [20] 王春雷,沈正华,刘鹏. 电站开关柜电晕放电的紫外脉冲法在线检测研究[J]. 电工技术,2020(14):67-70.
- [21] ZHOU J, REN M, HUANG W G, et al. Partial discharge multi-spectral detection in air with a SiPM-based sensor[C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China:IEEE,2018.
- [22] 高兴波,冯广敬,陈奎焯,等. 基于KNN算法的用电安全智能监控系统设计[J]. 无线通信技术,2020,29(2):51-56.
- [23] 邱浩宇. 电力设备局部放电声光联合检测装置研究与实现[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [24] 王毅,徐元源,李松浓. 基于DAG-SVMs的非侵入式负荷识别方法[J]. 电子技术应用,2021,47(10):107-112.
- [25] 丁浩,苏志雄,王婷婷,等. 基于脉冲电流和紫外测弧的开关柜局部放电缺陷识别方法[J]. 高电压技术,2022,48(11):4527-4539.
- [26] VIEIRA J, DUARTE R P, NETO H C. KNN-STUFF: KNN streaming unit for fpgas[J]. IEEE Access, 2019, 7: 170864-170877.
- [27] 武小军,周文心,董永新. 一种改进的嵌入式特征选择算法及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(2):153-159.
- [28] MAI J, XU D, LI H, et al. Implementing a SoC-FPGA based acceleration system for on-board SVM training for robotic transtibial prostheses[C]//2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics. Kandima, Maldives:IEEE,2018.
- [29] 吴传奇,汪洋,王伟,等. GIS悬浮局部放电的超声波现场检测典型应用[J]. 湖北电力,2015,39(10):5-8,14.

收稿日期:2023-02-08;修回日期:2023-03-23。

作者简介:苏志雄(1998-),男(汉族),江苏兴化人,硕士生,主要从事局部放电的在线监测、电力设备的智能化研究;通信作者:张周胜(1969-),男(土家族),湖北恩施人,教授,主要从事电力设备状态监测与故障诊断、电力设备智能化、电介质物理理论与介电现象、气体放电等的研究工作。