

基于HOG特征提取的累计PRPD局放类型识别算法优化研究

高存玉 郑嘉楠 黄正

上海欧秒电力监测设备有限公司 上海青浦 201799

摘要: 针对传统相位分辨局部放电 (PRPD) 谱图分析中人工特征提取效率低、噪声干扰敏感等问题, 本文提出一种基于累计PRPD (C-PRPD) 与方向梯度直方图 (HOG) 特征的局放类型识别方法。通过构建时间窗口的C-PRPD谱图, 结合改进的多尺度HOG特征提取算法, 采用3层隐藏层的人工神经网络实现端到端分类。实验结果表明, 该方法在5种典型放电类型中平均识别正确率达96.6%。研究为电力设备智能化局放监测提供了高效解决方案。

关键词: 局部放电; HOG特征提取; 累计PRPD图; 局放类型识别

引言

随着智能电网的快速发展, 电力设备状态监测技术成为保障电网安全运行的核心环节。局部放电 (Partial Discharge, PD) 作为电力设备绝缘老化的重要征兆, 其类型识别对设备故障预警与维护决策具有关键意义^[1]。相位分辨局部放电 (Phase-Resolved Partial Discharge, PRPD) 谱图分析法能直观反映放电信号的相位分布特性, 传统PRPD谱图分析依赖人工特征工程^[2], 存在谱图特征庞大, 有效特征难以提取等问题。

近年来, 计算机视觉技术的突破为局放模式识别提供了新思路。方向梯度直方图 (Histogram of Oriented Gradients, HOG) 特征通过统计局部图像梯度方向分布, 在模式识别领域展现出优异性能。然而, 现有基于HOG的局放识别研究多局限于单帧PRPD谱图分析, 忽略了放电过程的信号累计特性^[3]。

针对上述问题, 本研究提出一种基于HOG特征提取的累计PRPD (Cumulative PRPD, C-PRPD) 局放类型识别算法。通过构建时间序列PRPD谱图的累加模型, 结合改进的多尺度HOG特征提取算法, 引入人工神经网络构建局放类型识别模型。研究成果不仅为局放类型识别提供新方法, 还将推动电力设备智能监测技术的发展。

一、累计PRPD谱图

(一) 基本概念

传统PRPD图谱通过工频周期内的放电信号幅值-相位分布进行二维可视化, 反映短期的放电分布。这种放

电分布易受到环境噪声干扰, 且类型识别随机性较大^[4]。

C-PRPD谱图通过时间窗口内多帧PRPD图谱的叠加, 实现信号增强和噪声抑制等功能。

设时间窗口长度为 N , 包含 N 帧PRPD谱图 P_1, P_2, \dots, P_N , 每帧谱图为 $M \times K$ 矩阵 (相位轴 M 个区间, 幅值轴 K 个等级)。累计PRPD图谱 C 的计算为:

$$C(m, k) = \sum_{n=1}^N P_n(m, k)$$

在本算法中, 时间窗口长度 N 取值为300。每帧谱图为 200×60 矩阵, 其中相位轴在每个工频周期取200个区间窗口, 幅值范围分为60个等级, 包含 $-60\text{dBm} \sim 0\text{dBm}$ 。

(二) C-PRPD谱图的优化

针对原始PRPD图谱存在的极端值干扰与坐标轴刻度压缩效应问题, 本研究提出基于双维度优化的相位窗归一化算法: 首先对幅值轴进行极端值过滤, 即截取按绝对值降序排列后99%的数据点^[5], 同时将工频周期 360° 等角度划分为200个相位窗 ($1.8^\circ / \text{窗}$) 进行离散化编码。

二、HOG算法

(一) 算法原理

方向梯度直方图 (Histogram of Oriented Gradient, HOG) 特征是一种在计算机视觉和图像处理中用来进行物体检测的特征描述子。它通过计算和统计图像局部区域的梯度方向直方图来构成特征。首先将图像分成小的连通区域, 这些连通区域被叫做细胞单元。然后采集细胞单元中各像素点的梯度的或边缘的方向直方图。最后把这些直方图组合起来, 就可以构成特征描述符。

在电力设备局放检测中, HOG可有效提取PRPD图

谱的相位梯度特征：通过统计相位轴方向的梯度分布，捕捉放电信号在工频周期内的相位分布规律^[6]。

(二) 算法应用

本算法运用了OpenCV库的HOGDescriptor类来计算C-PRPD谱图的HOG描述子，并对其参数进行了初始化，参数设置如表1所示。

表1 HOG算法参数列表

参数	取值
检测窗口	(50, 5)
块 (block)	(25, 5)
块的移动步长	(25, 5)
学习率衰减速率	0.1/20000次迭代
每个胞元内梯度方向直方图的数量	6
检测窗口的移动步长	(8, 8)

三、神经网络模型

神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 在局部放电 (PD) 类型识别中，可从C-PRPD图中提取放电特征，提高分类精度和泛化能力。网络由输入层、隐藏层、输出层组成，输入层接收HOG特征数据，隐藏层执行特征映射与模式学习，输出层完成放电类型分类。激活函数控制神经元输出，在实验中ReLU函数提高收敛速度，提升识别精度^[7]。

局部放电信号分类任务采用多层感知机 (MLP) 模型。本算法中，输入层神经元数量设计为685，隐藏层为3层，各层神经元数量分别为342, 114, 38，输出层神经元数量为6。

神经网络模型超参数设置决定了神经网络的训练效率和分类性能，关键超参数包括学习率、优化策略、损失函数。神经网络模型的参数设置如表2所示。

表2 神经网络模型参数列表

参数	取值
迭代次数	0000
初始学习速率	0.001
优化策略	Adam
学习率衰减速率	0.1/20000次迭代

四、实验系统

局部放电信号采集系统的搭建需保证试验数据的高精度、高重复性及低噪声干扰，试验装置包括被测试样、传感器、数据采集设备及数据采集设备。

(一) 实验装置

1. 被测试样

实验选取典型高压电力设备的气体绝缘 (GIS) 组件。试样尺寸根据IEC 60270标准设定^[8]。

2. 传感器

采用超高频 (UHF) 传感器采集局部放电信号：检测频率范围300 MHz-1.5GHz，带宽500MHz。

3. 数据采集设备

数据采集系统采用100MHz的数据采样率，采集局放信号的幅值、相位，经数据压缩后形成200个相位窗口的PRPD谱图，数据幅值范围是-60dBm~0dBm。

(二) 局放模拟装置

局部放电 (PD) 是由于绝缘材料内部或表面缺陷导致的局部电场增强，使局部区域介质击穿产生微小放电现象。PD主要类型包括悬浮放电、尖端放电、自由金属颗粒和气隙放电，每类局放模拟装置的设置方法如图1所示。

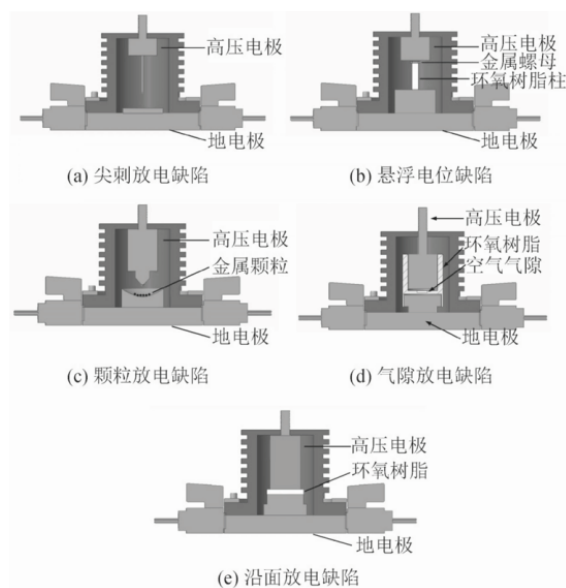


图1 局部放电模拟装置

五、试验结果分析

实验在屏蔽实验室进行，保证局部放电信号不受外部电磁干扰。环境温度控制在 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度40%-50%，实验高压电源输出0-100 kV。实验前设备预热30分钟，保证数据精度^[9]。

实验中使用的局部放电数据集将随机划分为训练集和测试集，为避免数据集各类间样本数量分布不平衡的影响，每类设置相同的样本数。每类中训练集数据量为200，测试集数据量为100^[10]。

从局部放电起止电压开始，测试5种不同电压等级下的局部放电累计PRPD识别情况，测试结果如下所示。

表3 局部放电累计PRPD识别结果统计

测试局放类型	测试次数	识别正确次数	正确率
金属尖端放电	100	98	98%
悬浮放电	100	100	100%
沿面放电	100	96	96%
气隙放电	100	90	90%
金属颗粒放电	100	99	99%
局部放电累计PRPD识别正确率	96.6%		

根据局放类型测试数据，分析结论如下：

1.悬浮放电（100%）和金属颗粒放电（99%）表现最优，金属尖端放电（98%）和沿面放电（96%）表现稳定，气隙放电（90%）正确率最低，可能存在原因是放电模式与其他类型存在特征重叠；

2.累计PRPD识别正确率96.6%，系统对各放电类型的识别权重均等，未出现某类放电被系统性误判影响整体性能的情况；

3.各类型正确率标准差为4.58%，显示系统性能波动较小。

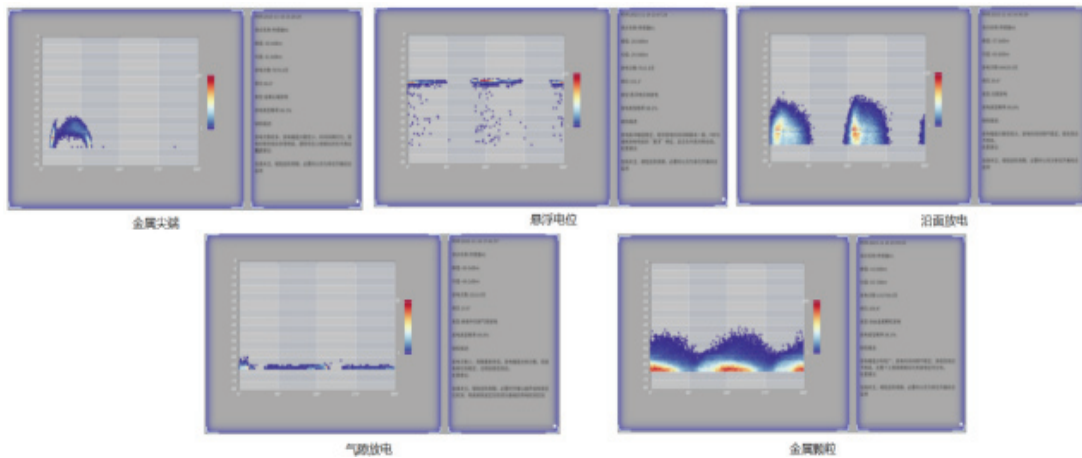


图2 局部放电C-PRPD图谱及识别结果

结论

1.累计PRPD（C-PRPD）结合改进HOG特征与人工神经网络模型，在复杂工况下实现了96.6%的整体识别正确率，各放电类型识别表现稳定；

2.改进的多尺度HOG算法（检测窗口50×5像素，6个梯度方向bin）能高效捕捉C-PRPD谱图的相位梯度分布特征，结合人工神经网络（3层隐藏层结构）实现了特征维度优化与模式分类；

3.为电力设备局放类型识别提供了新方法，对微弱放电信号和复杂环境具有强适应性，可支撑电网设备的智能化状态监测与维护决策。

参考文献

[1]钱勇, 黄成军, 江秀臣, 等. 基于超高频法的GIS局部放电在线监测研究现状及展望[J]. 电网技术, 2005, (01): 40.
 [2]宋思蒙, 钱勇, 王辉, 等. 基于方向梯度直方图属性空间的局部放电模式识别改进算法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2153.

[3]李成榕, 王彩雄, 唐志国, 等. 基于聚类分析的变压器局部放电智能诊断的研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, (06): 7.
 [4]郭俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, (02): 29.
 [5]张微. GIS设备局部放电检测技术的试验研究[D]. 华北电力大学, 2012.
 [6]贾卫军, 张涛, 李智. 基于改进CNN的GIS局部放电故障诊断[J]. 信息技术, 2024, (03): 90.
 [7]王婷婷, 丁浩, 张周胜. 基于深度学习和多模型融合的局部放电模式识别方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(03): 188.
 [8]杨景刚, 邓敏, 马勇, 等. 基于深度学习的PRPD数据特征提取方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(03): 99.
 [9]钟逸诚. 基于轻量化卷积神经网络的局部放电模式识别研究[D]. 东华理工大学, 2023.
 [10]代少升, 任忠, 赖智颖, 等. 基于PRPD图谱多特征融合的局部放电类型识别研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2022, 34(03): 373.