

# 变压器局部放电检测方法研究

毕岩滨<sup>1</sup>, 胡文甫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中海油能源发展装备技术有限公司, 天津

<sup>2</sup>西南石油大学, 四川 成都

收稿日期: 2022年2月21日; 录用日期: 2022年3月21日; 发布日期: 2022年3月28日

## 摘要

变压器局部放电故障检测在变压器故障检测中占据重要的一环, 对电网安全稳定运行有着重大意义。近年来, 对局部放电检测的研究越来越多, 本文介绍了几种局部放电故障检测的常用方法, 提出利用PRPD图谱对变压器局部放电信号检测过程中的放电信息进行特征提取, 根据局部放电实验得到的数据绘制了相应的PRPD图谱。PRPD图谱能够反映局部放电几乎全部的放电信息, 将PRPD图谱与已知缺陷图谱进行对比从而判断局部放电缺陷类型。

## 关键词

变压器, 局部放电, PRPD, 特征提取

# Research on Transformer Partial Discharge Detection Method

Yanbin Bi<sup>1</sup>, Wenfu Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd., Tianjin

<sup>2</sup>Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Mar. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Transformer partial discharge fault detection plays an important role in transformer fault detection, and is of great significance to the safe and stable operation of power grids. In recent years, there have been more and more studies on partial discharge detection. This paper introduces several common methods of partial discharge fault detection, and proposes to use PRPD spectrum to extract the characteristics of discharge information in the process of partial discharge signal detection of transformers. According to partial discharge experiments, the resulting data plots the

文章引用: 毕岩滨, 胡文甫. 变压器局部放电检测方法研究[J]. 电气工程, 2022, 10(1): 22-29.

DOI: 10.12677/jee.2022.101003

corresponding PRPD spectrum. The PRPD spectrum can reflect almost all the discharge information of partial discharge, and the PRPD spectrum can be compared with the known defect map to determine the type of partial discharge defect.

## Keywords

Transformer, Partial Discharge, PRPD, Feature Extraction

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

变压器是电力系统中的枢纽设备, 在电网长时间的运行中, 变压器持续运行时, 受到各种因素影响, 容易出现故障, 影响变压器的安全运行。因此, 准确检测变压器技术故障可以有效降低电网运行故障风险。随着电网的智能化提高和人工智能技术的发展, 变压器检测技术发展的越来越完善, 能够更加精确地识别变压器故障。局部放电(partial discharge, 简称 PD)导致的绝缘系统恶化是导致变压器发生故障最主要的原因[1]。一旦绝缘介质被破坏, 会造成电气事故, 造成财产和经济的损失, 甚至威胁电力工作人员的生命。因此对局部放电故障的检测对变压器和电网的安全稳定运行有着关键作用。

局部放电是指由于电场分布不均匀, 局部电场过高, 导致绝缘介质中局部范围内的电气放电或者击穿现象[2]。基于 PD 过程中往往伴随脉冲电流、超声波、光、温度以及油中溶解气体等现象, 针对这些局部放电产生的现象, 目前, 局部放电检测常用的方法主要包括脉冲电流法、特高频法(ultra high frequency, 简称 UHF)、光检测法以及超声波法[3]。局部放电现象作为变压器故障检测中最重要的一环, 大量科研学者对局部放电的测量以及信号提取等当面做了大量研究, 对变压器故障诊断提供了有效依据。文献[4]通过模拟 GIS 局部放电模型, 利用超声波法对局部放电信号进行检测, 不同缺陷在波形、幅值和 PRPD 图谱上都会呈现不同特点, 灵敏度和定位的精确度都比较精确。文献[5]通过特高频自感知检测的仿真研究, 仿真计算变压器部件对局部放电缺陷产生的特高频信号接收特性, 体现了特高频方法灵敏度高和信噪比高的优点。文献[6]通过搭建针尖、颗粒、悬浮等缺陷模型, 利用脉冲电流法采集局部放电波形, 发现不同缺陷对应的波形特征不同, 能够对不同的缺陷类型进行识别。而 PRPD 图谱能够将局部放电不同缺陷类型具象物理化对于局部放电信号的识别具有重大意义。

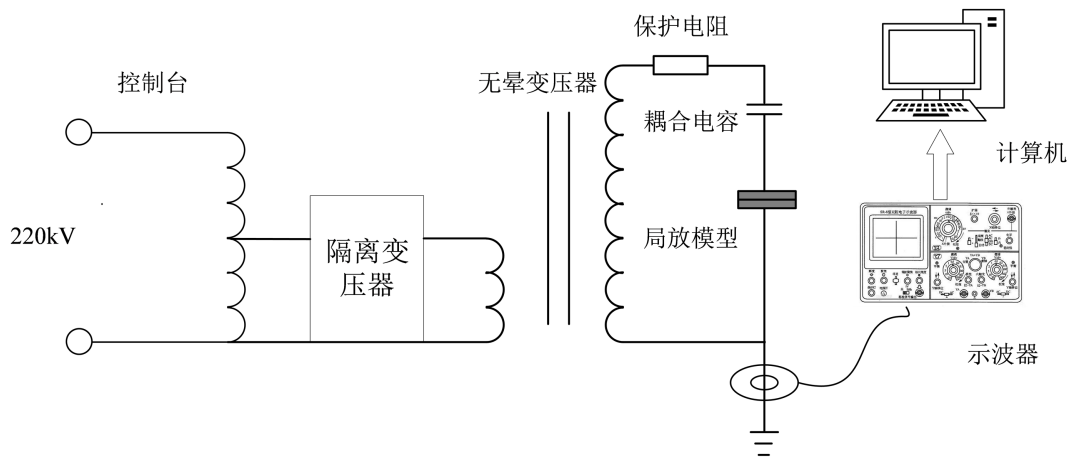
在变压器局部放电故障诊断过程中, 指纹特征基本不受外界干扰影响。指纹特征是指由设备运行状态确定的能重复检测的特征参量。变压器局部放电 PRPD 图谱使用广泛, 技术成熟, 其一般是由多个二维图组成, 每个二维图的信息量低, 较容易实现优质的特征提取, 常使用统计特征参数提取法获取指纹特征, 以形成特征指纹库[7]。通过将得到的指纹特征与已知局部放电故障图谱进行对比就能判断变压器的故障, 判断设备的缺陷类型。PRPD 图谱由于其特殊的性质在变压器局部放电检测中具有重要意义。

本文通过在高压实验室进行局部放电模拟试验提取三种典型局部放电缺陷模型的数据, 根据提取到的数据绘制 PRPD 图谱, 分析三种局部放电各自的特征, 以此来判断局部放电类型。

## 2. 变压器局部放电试验模拟

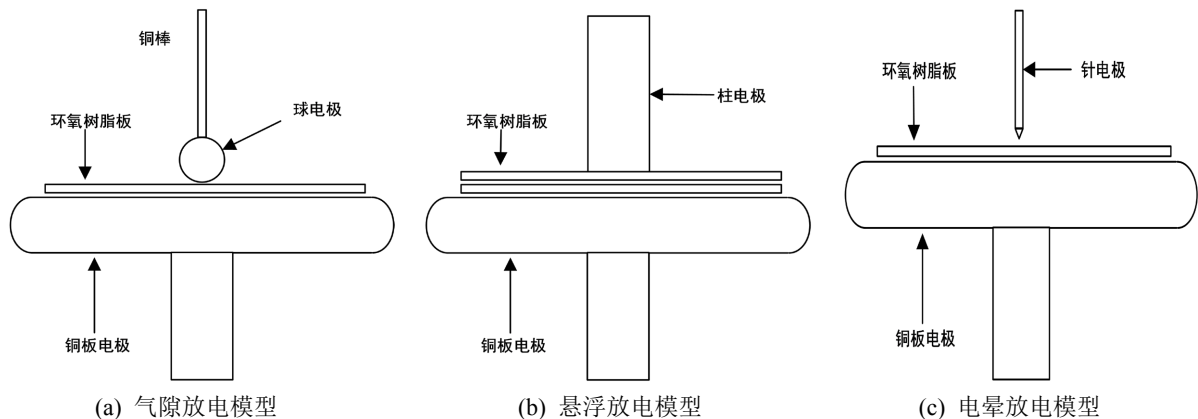
为了研究局部放电典型缺陷, 并对其进行分析, 本文选择三种局部放电典型缺陷进行实验, 分别为

电晕放电、气隙放电和悬浮放电。在实验室中采用脉冲电流法采集局部放电信号, 使用的实验接线图如图 1 所示。



**Figure 1.** Schematic diagram of the connection of the transformer partial discharge test platform  
**图 1.** 变压器局部放电试验平台连接示意图

试验所用设备主要包括控制台、隔离变压器、无晕高压试验变压器、耦合电容、高频电流传感器以及数字示波器等。首先缺陷模型一次侧接入 220 V 交流电压, 控制台对接入点交流电压信号进行处理和操作; 无晕高压试验变压器连接一次侧控制台和二次侧的变压器的局部放电缺陷模型, 将接入的电压信号转变为高压信号; 信号采集传感器采用高频电流传感器(HFCT), 利用示波器接收并显示对应的波形信号并将信号传入计算机进行处理和特征提取。根据标准[8]设计局部放电常见的三种模型如图 2 所示, 分别为电晕放电、悬浮放电和气隙放电。



**Figure 2.** Defect models of different discharge types  
**图 2.** 不同放电类型缺陷模型

### 3. PRPD 图谱信号构造原理

通过绘制变压器局部放电电压信号的相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)图谱能够提取局部放电信号的特征(又称指纹特征), 统计放电特征参量。PRPD 能够反应放电次数、放电量等与相位在多个周期内的关系, 噪声对其的影响较小, 提取的特征信号具有很强的参考性。由于 PRPD 图谱的特殊性, 将局部放电信号量化具有重要的物理意义。

1)  $n-\varphi$  谱图

二维  $n-\varphi$  谱图能够反映放电次数  $n$  与工频周期相位  $\varphi$  的关系, 通过将各个工频周期中放电次数累加得到总的放电次数为:

$$n_j = \sum_{k=1}^M n_{jk} \quad (1)$$

式中,  $M$  表示工频周期个数,  $n_{jk}$  表示第  $k$  个周期的放电次数。

2)  $q-\varphi$  谱图

二维  $q-\varphi$  谱图反映放电量  $q$  随工频周期相位  $\varphi$  的变化规律, 将一个工频周期划分成多个相窗, 统计各个相窗对应的平均放电量、最大放电量、总放电量, 最后统计得到每个相窗的放电量如下:

$$q_{jave} = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{n_{jk}} q_{jki}}{\sum_{k=1}^M n_{jk}} \quad (2)$$

$$q_{jmax} = \max(q_{jki} | i=1, \dots, n_{jk}; k=1, \dots, M) \quad (3)$$

$$q_{jsum} = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{n_{jk}} q_{jki} \quad (4)$$

式中,  $M$  表示工频周期个数,  $q_{jki}$  表示第  $k$  个周期, 第  $i$  次放电的放电量大小。

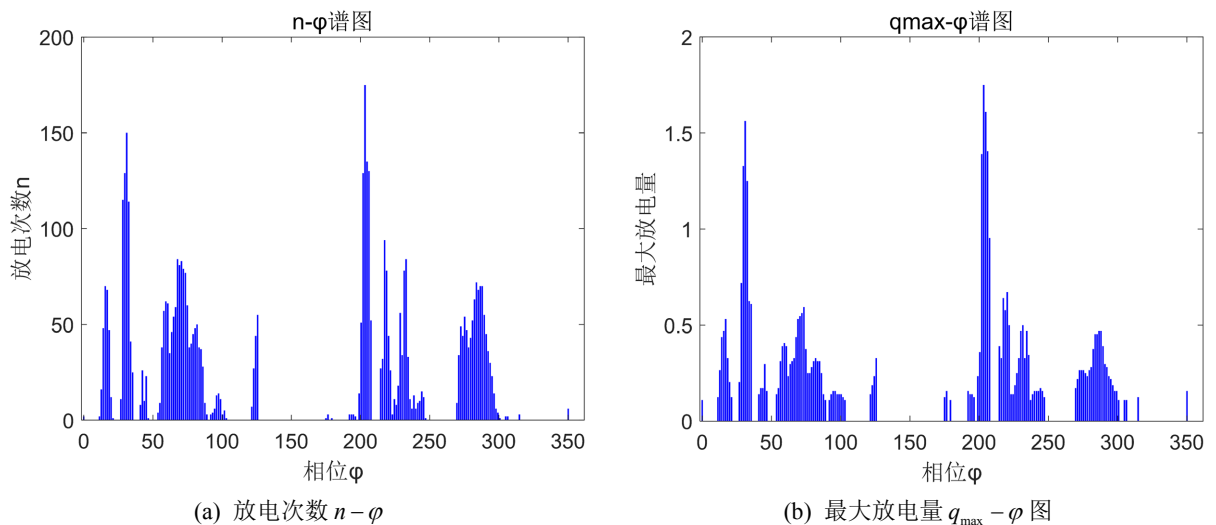
3)  $n-q-\varphi$  谱图

空间三维谱图反映的是放电量  $q$ , 相位  $\varphi$ , 放电次数  $n$  三者之间的关系, 通过分析三者关系可以充分挖掘放电类型隐含的信息, 进而诊断不同的故障类型。将相位和放电量均分为 256 个区间, 整个平面被划分为  $256 \times 256$  的网格。统计其中每个网格内的放电次数  $n(\varphi_i, q_j)$ :

$$n(\varphi_i, q_j) = \sum_{k=1}^M n_k(\varphi_i, q_j) \quad (5)$$

式中  $n(\varphi_i, q_j)$  表示第  $k$  个工频周期下的网格统计的放电次数,  $N$  表示采集的工频周期数。

在局部放电试验条件下, 对缺陷模型施加 9 kV 的工频电压, 得到电晕放电、悬浮放电、气隙放电三种局部放电类型的数据, 在数据库中连续取 50 组数据绘制 PRPD 图谱(图 3~8)。



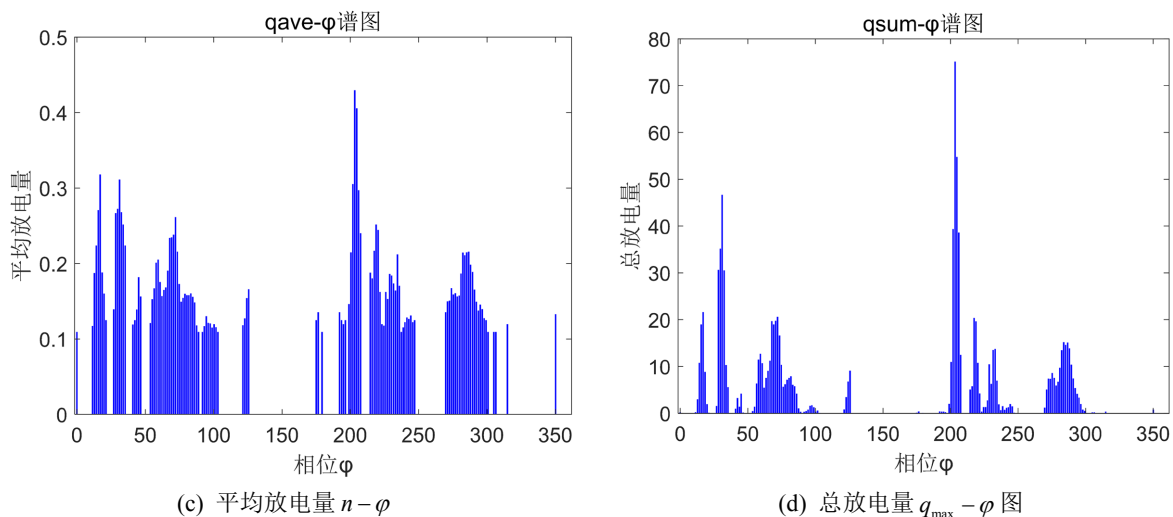


Figure 3. Corona discharge PRPD diagram  
图 3. 电晕放电 PRPD 图

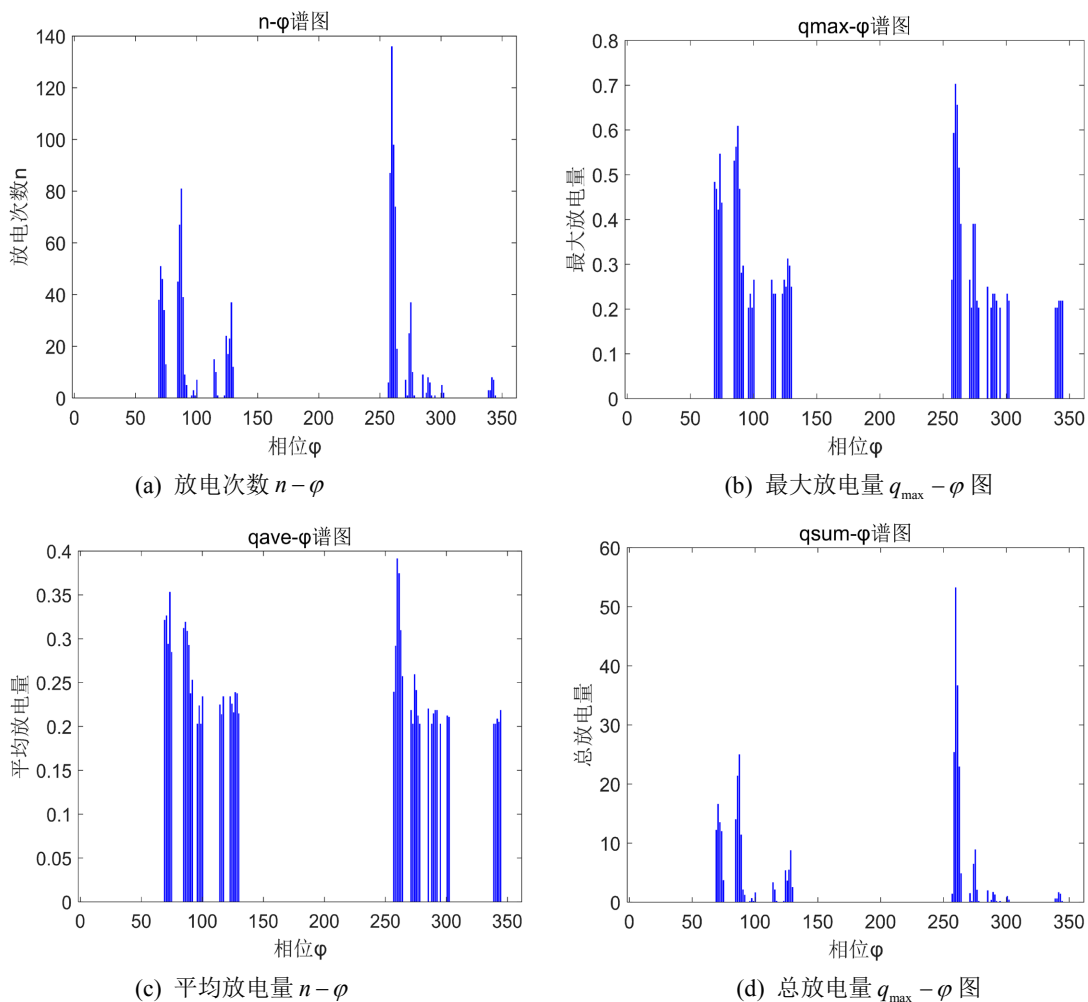


Figure 4. Suspended discharge PRPD diagram  
图 4. 悬浮放电 PRPD 图

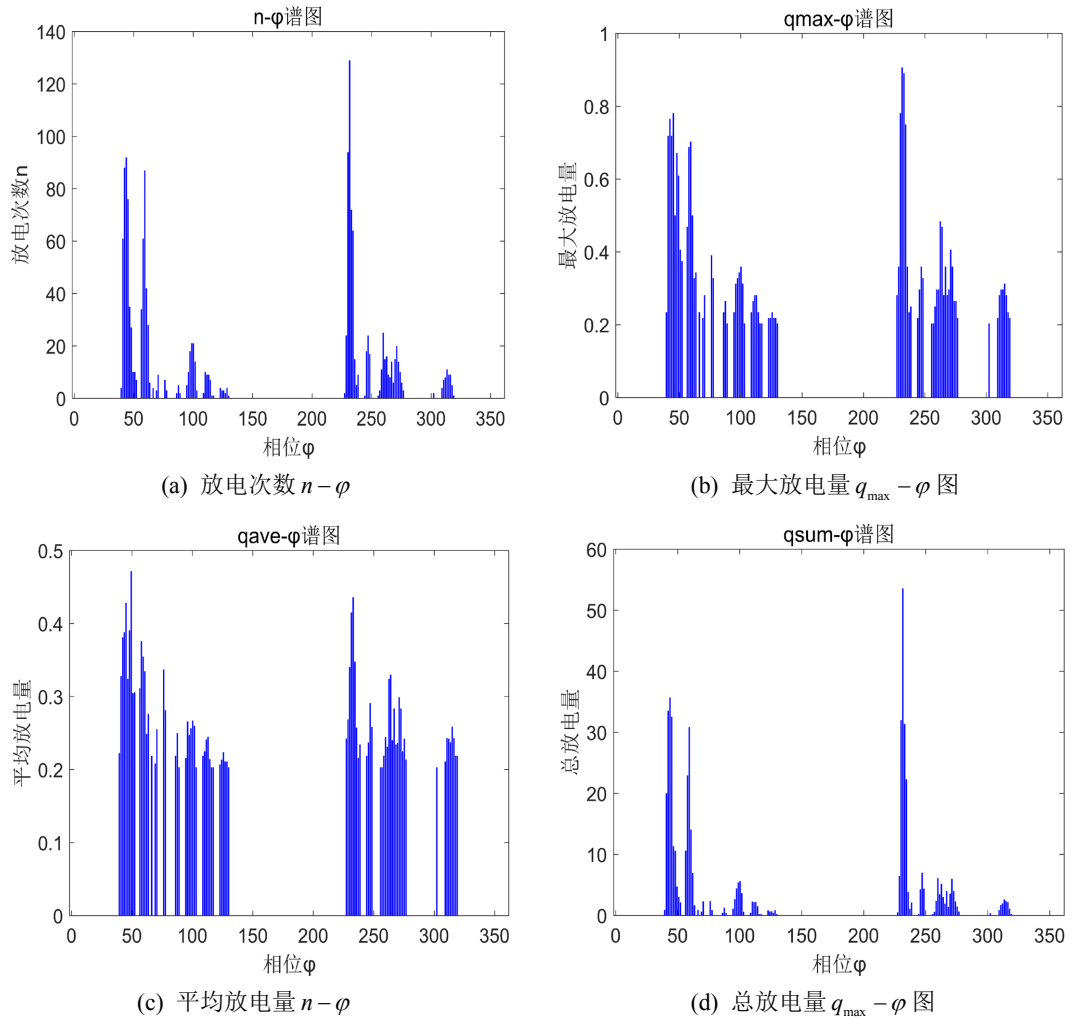


Figure 5. Air-gap discharge PRPD diagram  
图 5. 气隙放电 PRPD 图

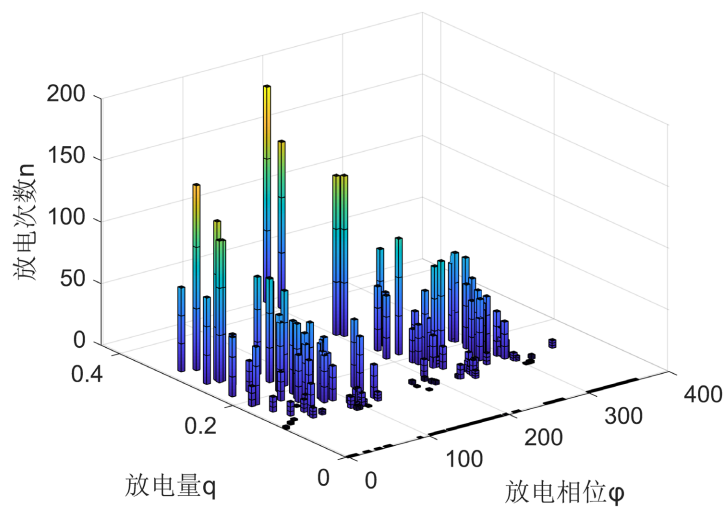
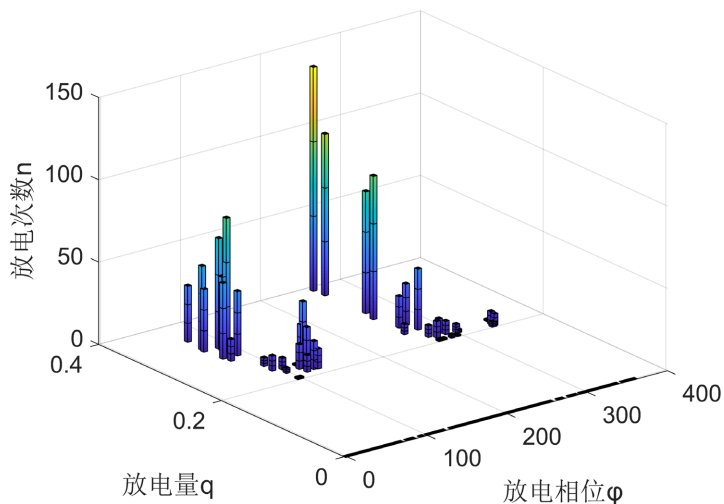
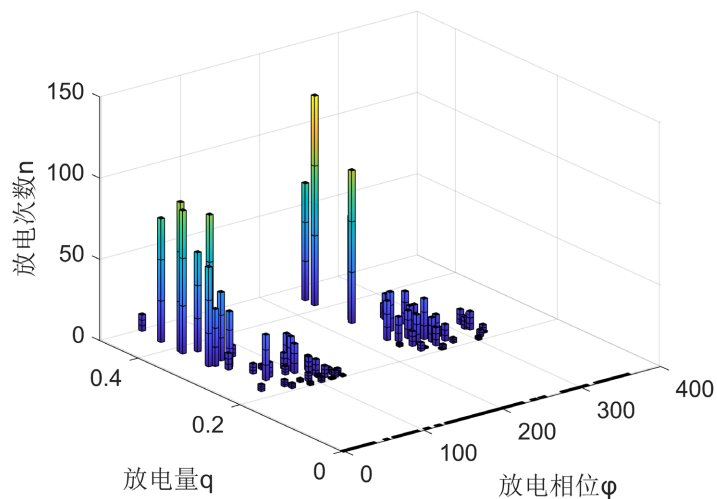


Figure 6. Three-dimensional spectrum of corona discharge  
图 6. 电晕放电三维谱图



**Figure 7.** Three-dimensional spectrum of suspension discharge  
**图 7.** 悬浮放电三维谱图



**Figure 8.** Three-dimensional spectrum of air gap discharge  
**图 8.** 气隙放电三维谱图

从三种放电类型  $n-\varphi$  谱图、 $q-\varphi$  谱图和  $n-q-\varphi$  谱图可以看出不同的缺陷类型对应的图谱有很大的差别。

电晕放电是电极极不均匀下的情况下，导体表面的电场强度达到气体的击穿场强时发生的放电。导体的电荷密度与导体形状曲率息息相关，因此电晕放电常常发生在尖端部分。在本文搭建的电晕放电缺陷模型结构中，针板电极发生局部放电时，正电荷会撞击阴极，同时负极容易发射电子。从 PRPD 图谱可以看出，电晕放电由于极性效应造成其放电相位较为分散且相位不对称，所以脉冲幅值较大，放电信号主要分布在  $50^\circ\sim 120^\circ$  之间和  $200^\circ\sim 270^\circ$  之间，放电次数主要集中在  $70^\circ$  附近。

悬浮放电起始场强较大，放电不易发生，当达到需要的击穿场强时，才会有放电信号。悬浮放电的相位主要在  $70^\circ\sim 130^\circ$  和  $260^\circ\sim 300^\circ$  之间，放电的次数随相位的增加而减小。悬浮放电发生的主要是由于电极和导体间或者外壳间的电场分布畸变导致的悬浮电位体附近发生放电现象，因此放电缺陷相位特征和幅值较稳定，相邻放电时间间隔基本一致。气隙放电相位主要分布在  $40^\circ\sim 130^\circ$  和  $230^\circ\sim 320^\circ$  之间，相位特征相对稳定，放电幅值分散较广。

根据 PRPD 图谱对变压器局放信号的特征提取, 能够反映出局部放电几乎全部的放电信息及特征参量, 根据总结不同放电类型的特点判断变压器局部放电类型, 对于变压器局部放电信号识别和检测具有重大意义。

#### 4. 结语

本文介绍了变压器局部放电检测的常用方法, 在高压实验室中模拟了变压器局部放电故障, 设计局部放电的常见的三种缺陷模型, 对电晕放电、悬浮放电和气隙放电三种放电信号进行采集和特征提取, 绘制 PRPD 图谱, 总结归纳出三种局部放电典型缺陷的 PRPD 特征, 根据 PRPD 图谱总结出三种局部放电类型的图谱特征, 对判断变压器局部放电故障类型具有重要的实际意义。

#### 参考文献

- [1] 黎大健, 李军浩, 李彦明. 基于多传感器的变压器特高频局部放电定位方法研究[J]. 绝缘材料, 2013, 46(2): 53-56.
- [2] 赵来军. 变压器局部放电在线监测中干扰的识别与抑制方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [3] 邵先军, 何文林, 刘浩军, 徐嘉龙, 周华, 张冠军. 利用气体绝缘组合电器盆式绝缘子内部均压屏蔽环诊断局部放电研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 184-193.
- [4] 黎大健, 梁基重, 步科伟, 杨景刚, 李彦明. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 72-75.
- [5] 蔡鋈, 袁文泽, 张轩瑞, 杨玥坪, 吴玖汕, 李军浩. 基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2041-2050.
- [6] 褚鑫. 油纸绝缘典型缺陷局部放电特征提取与模式识别研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [7] 邓冉. 电力设备局部放电信号类型识别方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [8] Casale, M., Schifani, R. and Holboll, J.T. (2000) Partial Discharge Tests Using CIGRE Method II. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7, 133-140. <https://doi.org/10.1109/94.839351>