第 50 卷 第 10 期：4297-4314 高电压技术 Vol.50, No.10: 4297-4314
2024 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241278

变压器绝缘缺陷放电发展特性及检测方法研究现状及展望

汲胜昌，赵德华，贾云飞，丘子诚，罗　迅，李斯盟
（西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049）

摘　要：变压器爆燃事故的发生大多源于其内部绝缘缺陷的局部放电，并逐渐发展至火花放电和电弧放电，造成巨大的经济损失。研究内部放电信号特征及其快速检测方法对保障电力变压器安全可靠运行具有重要意义。国内外学者围绕变压器内部绝缘缺陷放电特性及检测方法开展了大量研究工作。为此从局部放电、火花放电和电弧放电 3 个阶段综述了相关研究成果，对不同放电发展阶段的脉冲电流、电磁波、声、光以及化学产物等理化特性进行了总结分析，同时概述了基于不同信号的检测方法和对检测设备的要求，并对比了不同检测方法的优缺点，最后提出了对于变压器绝缘缺陷放电发展检测的研究展望。该文对进一步深入研究油中放电信号特征提取、快速检测以及变压器主动保护技术具有指导意义。

关键词：变压器；放电阶段；信号特性；检测方法；快速检测

Research Status and Prospects of Development Characteristics and Detection Methods of Transformer Insulation Defect Discharge

JI Shengchang, ZHAO Dehua, JIA Yunfei, QIU Zicheng, LUO Xun, LI Simeng
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment , Xi'an Jiaotong University, Xi’an 710049, China)

Abstract：The occurrence of transformer deflagration accidents mostly originates from its internal insulation defects of partial discharge, and gradually develops to spark discharge and arc discharge, causing huge economic losses. The study of internal discharge signal characteristics and its rapid detection methods to ensure the safe and reliable operation of power transformers is of great significance. Scholars at home and abroad have carried out a lot of research work around the internal insulation defects of transformer discharge characteristics and detection methods. This paper summarizes the research results from aspects of partial discharge, spark discharge, and arc discharge three stages, and summarizes and analyzes the physical and chemical characteristics of different discharge development stages such as pulse current, electromagnetic wave, sound, light and chemical products, etc. At the same time, this paper outlines the detection methods based on different signals and the requirements for detection equipment, compares the advantages and disadvantages of different detection methods, and finally puts forward research prospects for the development and detection of insulation defects in transformer discharges. Finally, the research outlook for the development of transformer insulation defect discharge detection is put forward. This paper has guiding significance for further in-depth research on the feature extraction of discharge signal in oil, rapid detection and active protection technology of transformers.

Key words：transformer; discharge phase; signal characterization; detection methods; rapid detection

0　引言

绝缘油是电力设备最常用的绝缘介质之一，油浸式电力设备是高压电力系统输变电的重要组成部分，其正常运行对保证电力系统的稳定可靠起着至关重要的作用[1]。油浸式设备内部短路电弧故障是最严重的故障之一，近年有关变压器起火爆燃事件的报道屡见不鲜[2-4]：国外方面，2010 年圣地亚哥燃气电力变电站和 2013 年圣地亚哥电力变电站均因内部电弧引燃绝缘油，进而变压器箱体爆炸并引发火灾；2018 年，美国夏威夷大学马诺阿分校的变压器内部故障直接点燃了绝缘油，造成火情；而 2022 年，美国胡佛大坝也发生了变压器爆炸事件，

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFB2407001)；国家自然科学基金(52007148)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2407001), National Natural Science Foundation of China (52007148).

具体原因尚待查明。在国内，类似事件也时有发生，如 2017 年山西大同发电有限责任公司因变压器绝缘损坏发生短路起火；2018 年某变电站二号主变压器因绝缘包封问题引发相间短路，造成爆燃；2019 年济南泉城变电站的高压套管电容芯体质量缺陷导致局部放电，进而造成下瓷套损坏、爆炸及对地电弧放电，导致变压器爆燃；2022 年，南昌铁路变电站则遭遇了变压器内部短路故障所引发的火灾。这些油浸式变压器爆燃起火事故严重威胁电力系统正常运行和员工人身安全，亟须采取有效措施加以防范。

目前油浸式变压器的主保护有电流速断保护、差动保护和重瓦斯保护，这些保护的识别往往需要 10 ms 左右[5]。而且，这些保护装置的灵敏度较低，尤其是当绕组匝间发生绝缘故障时。变压器严重故障的产生往往源自内部绝缘的放电缺陷，为防止变压器爆燃，迫切需要对变压器油中放电信号进行灵敏、有效和可靠的检测，以在变压器放电初期或严重电弧故障发生之前剧烈放电时，甚至严重电弧故障发生的瞬间对变压器采取保护措施，从而避免设备损坏，减少经济损失。

绝缘油中各类放电大致可分为局部放电(partial discharge, PD，简称局放)、火花放电和电弧放电。放电往往从局部放电开始，局部放电不会立即导致绝缘整体的击穿，但其对绝缘介质的危害异常严重，局放的发展会造成绝缘劣化，最终导致击穿[6]；电极间绝缘击穿后会进入间歇性的火花放电或者持续性的电弧放电。目前在变压器上广泛使用的绝缘油的产气、温度等非电气信息特征，可以在变压器缺陷长期发展过程中或发生严重故障时检测到其明显的特征变化，也可以检测和识别变压器内部的轻微故障和缺陷，但检测周期长[7-8]。放电发生时伴随着电流、电磁波、声、光等特征信号并产生化学产物，与此相应地出现了电学检测法、电磁波检测法、声学检测法、光学检测法及化学检测法。不同放电阶段下信号的波形、频谱、幅值等特征存在区别，可通过信号的特征量对不同放电类型和发展阶段进行诊断和识别[9-10]。

本文从变压器内部绝缘缺陷发展的局部放电、火花放电以及电弧放电的 3 个过程出发，总结了不同放电阶段电、电磁、声、光、压力波信号和化学产物的特征，并对不同信号的检测方法和对检测设备的要求进行了介绍，对比分析了不同方法的优缺点，指出对放电信号可靠检测、深入挖掘不同阶段信号特征、多信号联合应用、准确识别放电发展阶段以及探讨变压器的主动保护技术是进一步研究重点。

1 局部放电特性及检测方法

电力设备内部不可避免地存在着绝缘缺陷和电场分布不均匀，当绝缘缺陷中的电场或局部固体绝缘沿面场强达到一定值后，会发生局部放电。局部放电不会立即形成贯通性的放电通道，但长期局部放电会促使绝缘劣化，甚至使绝缘击穿[11]。变压器中局部放电的发展阶段主要分为初始阶段、发展阶段和预击穿阶段。尽管这类故障不会立刻造成绝缘失效，但需要及时监测，避免局部放电造成持续的绝缘劣化，导致最终绝缘失效，引发更大范围的事故。

局放过程中存在着正负电荷产生、运动与中和，在这个过程中会产生持续时间为微秒级的脉冲电流，发射电磁波，伴随着光、声等物理现象，造成油中溶解气体的增加。

本章对局放过程中不同阶段的电、电磁、声、光信号和油中溶解气体特性进行概述，同时讨论分析局放发展阶段的判断方法，并总结相关信号的测量方法和局限性。

1.1 电信号特征与检测方法

1.1.1 电信号特征

局部放电发生时伴随着放电产生电荷的中和过程，会产生较陡的电流脉冲。局部放电的脉冲电信号频带分布从数百赫兹到数百兆赫兹[12]。不同缺陷下的频带分布存在差异[13]。

变压器局部放电的脉冲电流信号特征多使用局部放电相位分布(phase resolved partial discharge，PRPD)谱图和放电统计量进行分析。局放过程中典型的 PRPD 谱图如图 1 所示，在局部放电的初始阶段，局放主要发生在电压波形的上升沿和峰值位置；局部放电发展阶段，放电相位向 0°和 180°移动；局部放电预击穿阶段，放电相位越过 0°和 180°，向 0~360°扩展[14-17]。

局部放电存在较大的随机性，油纸绝缘尖端、楔形、匝间、气隙、沿面放电等典型缺陷在放电发展过程中的放电幅值、脉冲重复频率和放电量变化情况不同。

尖端放电过程中，脉冲电流信号在初始阶段平均放电量、脉冲重复频率有明显增加，但脉冲幅值先增大后减小；在发展阶段平均放电量和重复频率

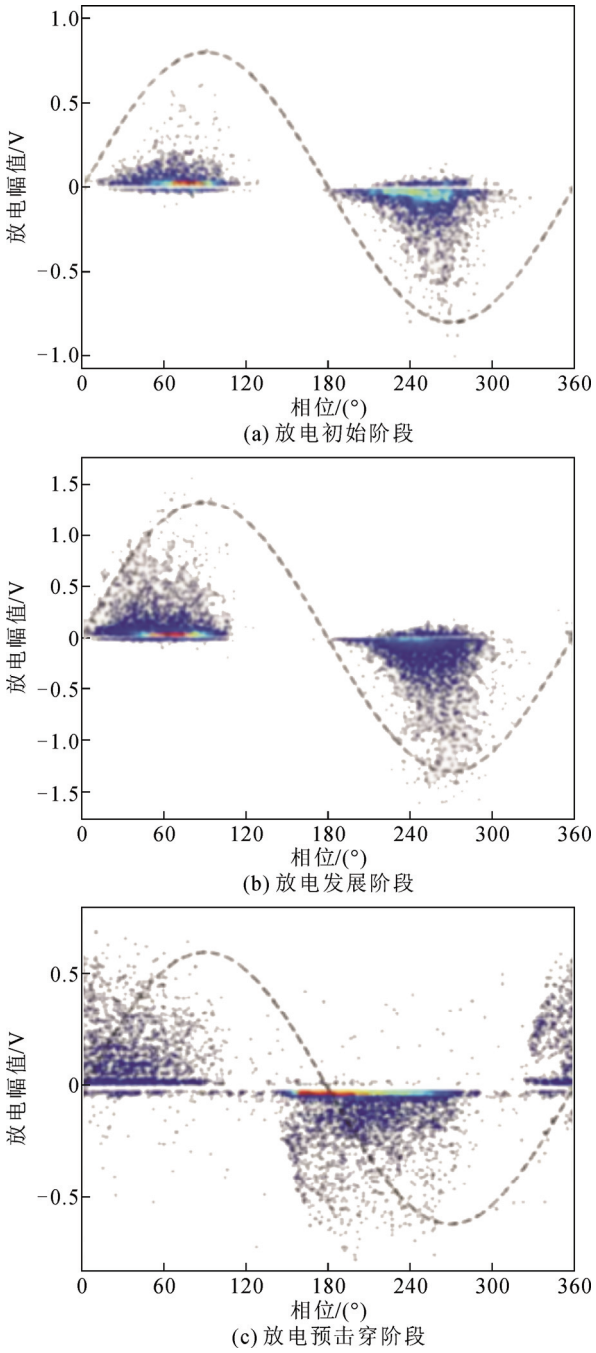


图 1 局部放电发展过程 PRPD 谱图[17]

Fig.1 PRPD spectrum of partial discharge development[17]

减小，但脉冲电流幅值增大；在预击穿阶段，平均放电量和重复频率增加，脉冲电流信号幅值减小[16]。楔形放电过程中，脉冲电流信号在初始阶段脉冲重复频率和信号幅值略有增加；在发展阶段脉冲幅值先增加后减小，脉冲重复频率基本保持不变，但有所波动；在预计穿阶段，脉冲幅值和脉冲重复频率持续增加[18-19]。在匝间放电过程中，脉冲电流信号在初始阶段脉冲重复频率和脉冲幅值逐渐增加，平均放电量逐渐减小；发展阶段脉冲重复频率持续增加，平均放电量继续减小，脉冲幅值先增加后减小；在预击穿阶段，脉冲重复频率有所下降，平均放电量和脉冲幅值增加[20]。油纸绝缘气隙在放电初始阶段的脉冲幅值显著增加，总放电量增加；在发展阶段，脉冲幅值、平均放电量和脉冲重复频率在一定范围内波动，总放电量基本不变；在预击穿阶段，放电幅值等保持波动[21-22]。刘阳等人研究发现沿面放电脉冲电流信号的脉冲重复频率和平均放电量持续增加，但放电幅值先增加，中后期持续减小[17]；而李刚等人研究结果表明在发展阶段，放电次数基本保持不变[15]。放电统计量的差别可能与试验时的加压方式有关[23]。

局放过程中尤其是局放后期，脉冲电流波形特征变化较为明显：在放电初始阶段，放电脉冲脉宽较窄，上升和下降时间约为 7 ns；在发展阶段，放电脉冲脉宽增大，下降时间显著增加；在预击穿阶段，放电量会迅速增大，放电脉冲呈现脉冲序列形式[24]。

对 PRPD 谱图的相位进行分析可直接对放电阶段进行准确判断；采用放电幅值、重复频率等参数判断放电发展阶段时，需要根据放电类型和放电统计参数综合判断；放电的时域信号在传播过程中会存在畸变，无法直接对其进行分析判断，但放电末期的放电脉冲序列可以作为局部放电末期的判断标准。

1.1.2 电信号检测

脉冲电流法通过检测阻抗和耦合电容或通过 Rogowski 线圈从电力设备的中性点或接地点测量由局部放电引起的脉冲电流信号，可获得视在放电量、放电相位、放电次数等数据。IEC 标准规定的脉冲电流法分为宽带法和窄带法[25]，其中，宽带法的下限检测频率在 30~100 kHz，上限检测频率≤1 MHz，检测频带宽度为 100~900 kHz，其具有脉冲分辨率高、信息相对丰富的优点，但信噪比低；窄带法的频带宽度为 9~30 kHz，中心频率为 50 kHz~1 MHz，具有灵敏度高、抗干扰能力强的优点，但脉冲分辨率低、信息不够丰富。

针对传统宽带法和窄带法的不足，采用更高的检测频带进行局部放电脉冲电流的检测，可以更加真实地反映局部放电的脉冲电流特征。Cavallini 等人采用带宽为 30 MHz 的测量阻抗进行局部放电脉冲电流信号的测量，并使用聚类算法实现了对放电信号和噪声的分离[26-27]。为获得更为全面的局放脉冲电流信号，侯恺宁等人采用超宽频带 30 kHz~50 MHz 对局放进行了测量，结果表明测得的放电

次数、平均放电幅值更大，对局部放电原始波形的重现准确率更高，能够更好地识别局放的类别[28]。Cheng 等人设计制作了一种能够测量超高频带脉冲电流的高频电路互感器(500 MHz)，实现了对套管末屏上的脉冲电流的测量，并能够有效避免电晕放电的干扰[29]。但随频带变宽，会造成 PD 测量受到更多干扰，需要进行复杂的软件和硬件处理，使用小波能量分布结合主成分分析(principal component analysis，PCA)和基于密度的空间聚类(density based spatial clustering，DBSCAN)的方法可以从噪声非常多的数据中提取出 PD 脉冲[30]，但这一过程仍需进一步优化，以用于在线检测。

通过提升检测设备的带宽能够获得更多的局部放电信息，但在现场使用脉冲电流法时抗干扰能力差，需通过数字去噪或者极性比较的方法消除干扰。虽然测量干扰较大，但脉冲电流法具有统一的标准和可比性，是局放测量的重要手段。

1.2 电磁信号特征与检测方法

1.2.1 电磁信号特征

局部放电过程中产生正负电荷中和时，伴随脉冲电流的产生，会向周围辐射电磁波。放电的电磁波信号可看作是由一点源发出的球面波，它遵循麦克斯韦电磁场的基本方程。局部放电辐射出的电磁波频率分布与放电间隙的绝缘强度以及局部放电源的几何形状有关[31-33]，当放电间隙较小或其绝缘强度较大时，较快的放电过程形成陡度很大的电流脉冲，脉宽<1 ns，且频带高达 1 GHz 以上[34]。

局部放电的特高频信号谱图分布特点与脉冲电流谱图基本一致，且信号的变化趋势与脉冲电流基本相同，但相比于脉冲电流，电磁信号的脉冲重复频率更能反映放电严重程度[17]；并且变压器油中放电的电磁信号累积能量与视在放电量的平方有较好的一次函数关系，可对电磁信号进行定量标定[35]。

1.2.2 电磁信号检测

油中放电上升沿很陡，脉冲宽度多为纳秒级，能激励起 1 GHz 以上的超高频电磁信号[36]，而变电站现场的电磁干扰一般集中在 300 MHz 以下，采用 0.3~3 GHz 特高频(ultrahigh frequency, UHF)电磁波进行局部放电测量，能有效抑制现场测量的干扰。特高频天线根据天线安装位置的不同可分为内置天线和外置天线 2 种，其中典型的内置天线包括套筒单极子天线、Hilbert 分形天线和 Goubau 天线，通常安装在维修手孔(人孔)和放油阀处。内置天线具有检测灵敏度高以及受电磁干扰小的优点，但是已投运的变压器通常不允许进行改造；而常用的外置天线包括阿基米德螺旋天线、平面等角螺旋天线和介质窗传感器，能够安装在介质窗和套管处。

为了便于特高频传感器的安装并且保证内部安装时不干扰变压器的正常运行，要求特高频传感器具有较小的体积，文献[37]根据分形思想设计了一种紧凑型四阶希伯尔分形天线，但电磁信号受变压器绕组和铁芯折射影响严重，且当变压器绕组足够大时，放电产生的电磁波很难穿过变压器铁芯和绕组，因此，需要适当布置天线位置。

针对特高频信号受绕组铁芯等阻挡会发生折反射畸变、油箱屏蔽导致外置传感器灵敏度低和内置传感器会影响变压器实际运行的问题，陈庆国等人提出可在内部引出线附近安装 UHF 天线[38]；蔡鋆等人使用变压器铁芯、高压绕组和套管末屏作为特高频天线，实现了对变压器油中悬浮放电的“自感知”[39]；Zhao 等人设计了一种在油箱接缝处测量局部放电特高频信号的超带宽单极子 PD 天线[40]，实现了在接缝处特高频信号的可靠测量。

特高频的检测结果与脉冲电流法具有较好的一致性，可以作为脉冲电流法的补充，较好地实现对局部放电信号的测量；同时针对特高频检测中的干扰，可将特高频法与脉冲电流法同时测到的信号作为局部放电信号，而将其他干扰信号剔除。

1.3 声信号特征与检测方法

1.3.1 声信号特征

油中发生局部放电、产生脉冲电流时，放电区域瞬间受热膨胀，并造成变压器油气化和分解，产生气泡并膨胀，放电结束后气泡收缩，由局放产生的气泡体积变化会在外部产生疏密波，对外辐射声波信号。

超声波幅值的大小与真实放电量成比例而与视在放电量不成比例，局部放电的真实放电量发生变化时，超声信号的幅值、频率和信号持续时间明显发生变化[41]，不同放电模型的超声波形明显不同。不同的放电缺陷在局放发展过程中，超声信号的主频逐渐减小[42]。文献[43]中指出在局放发展过程中超声主频分量和放电量呈负相关，放电量增加，主频率降低，临近击穿可到可听声范围内。局部放电过程中，超声信号典型频谱如图 2 所示。局放初始阶段的频谱范围为 85~160 kHz；停滞阶段频谱的 120~160 kHz 部分占比减小；预击穿阶段频谱主要

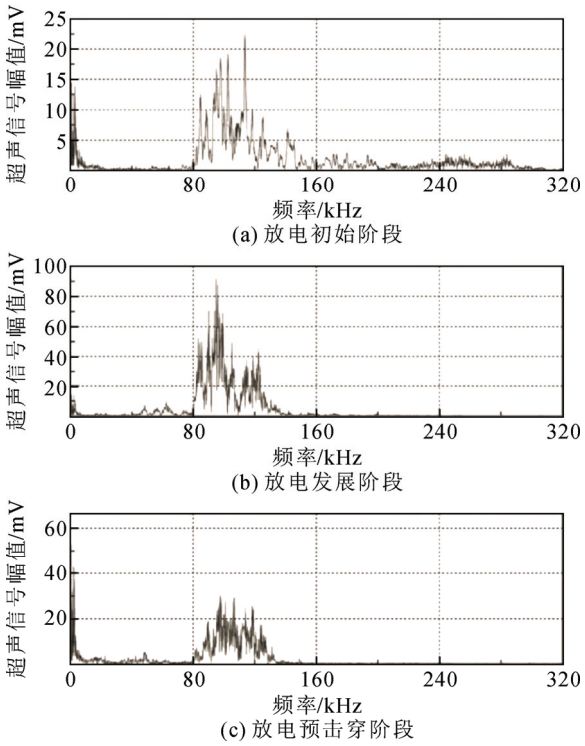


图 2 局放过程中超声信号频谱变化[16]

Fig.2 Spectral changes of ultrasound signals during localized discharge[16]

分布在 85~120 kHz 范围内。沿面放电超声信号的信号主频变化规律基本相同[17]。

不同缺陷的超声信号幅值变化趋势不同，在局放发展过程中，针板和气隙放电的超声信号幅值存在先增大后减小再增大的趋势[16,22]，初始阶段的信号幅值较小，并逐渐增大；发展阶段的信号幅值先增大后减小，击穿前夕超声信号幅值增大；而沿面放电的超声信号在局放至击穿过程中逐渐增大，但是随着放电进入中、后期，其幅值变化不明显[17,44]。

超声信号随着放电的发展和加剧，其频率逐渐降低，通过局部放电主频变化和频谱分布可对其发展阶段进行判断。

1.3.2 声信号检测

超声信号能够避开变电站中的干扰信号，例如空气电晕放电信号、铁芯和冷却泵风机的噪声干扰等，而有载分接开关动作产生与局放频率重合的超声，则可通过噪声判别算法去除[45]。

该方法主要是使用传统的锆钛酸铅压电陶瓷(piezoelectric ceramic transducer，PZT)作为传感元件，将 PZT 安装于设备外壳对局部放电产生的超声波进行检测。超声信号受到油纸、钢板阻挡，信号会衰减但不会畸变，可通过增加灵敏度解决衰减问题，但通过铜绕组时衰减和畸变都加大。因此需调整传感器位置，以更好地获得超声信号[46]。

目前也有采用聚合物压电膜，如聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride，PVDF)[47]和其三氟乙烯共聚物(polyvinylidene fluoride-trifluoroethylene co-polymer，PVDF-TRFE)，已被应用于局部放电超声信号的探测，这些材料具有柔韧性、易成型、响应频率高等优点，可以放置在表面复杂的电力设备上[48]，但与压电陶瓷(如 PZT)相比，PVDF 膜的压电系数较低，在受到阻挡时更难捕获到局部放电超声信号。

随着光纤技术的发展，有学者开始研究利用光纤本身或者外部敏感元件将超声波信号转化为光强信号的变化，进而通过光敏元件转化为电信号进行局部放电的超声-光检测。光纤超声传感器比传统的 PZT 传感器具有更高的灵敏度，并且可进行多路复用、分布式测量，仅使用 1 个光电探测器就可以同时多点检测局部放电产生的超声波信号[49]。

干涉型光纤超声传感器较为常用的超声-光检测，通常采用 Mach-Zehnder、Michelson 和 Fabry-Perot (F-P)这 3 种干涉原理。Mach-Zehnder 光纤采用透射型干涉结构，适合于低频超声波感测，需要参考臂和传感臂 2 个臂，且灵敏度与声波频率相关，并具有明显的方向相关性；Michelson 光纤采用反射型干涉结构，也由参考臂和传感臂构成，体积较大，信噪比较低；F-P 光纤传感器应用较广，采用反射型干涉结构，通过单根光纤实现，结构紧凑，灵敏度较高，检测距离长、频带宽，信号衰减度低，并能够在 0~180°的检测角度范围内检测局部放电信号(90°时衰减最大)[50]，但 F-P 光纤传感器对其他信号也有较高的灵敏度(如温度等)。对此，司文荣等人采用多孔式敏感膜片，避免了完整膜片内外温度差异或压力不平衡对测量结果的影响[51]。

为获得更高的灵敏度和抗干扰效果，有学者采用光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating，FBG)传感器进行局放超声信号检测[52]。相比于相位调制传感器，采用波长调制的 Bragg 光栅具有灵敏度高反射波长带宽窄、易于复用以及抗干扰能力强等优点，但相应检测频带较窄。

光纤超声传感器具有绝缘性能好、抗电磁干扰性能优异、尺寸小等优势，可深入变压器内部感知微弱超声信号，且温度稳定性较好，可以进行长距

离传输，非常适合大型电力变压器等电力设备运行状态的连续在线监测。

1.4 光信号特征与检测方法

1.4.1 光信号特征

油中放电的光信号来源有两部分，一部分是由放电的电子崩头部碰撞电离产生的光子，另一部分是被激励的分子和离子由激励状态恢复到正常状态时，释放出一部分能量以光子形式向外辐射。油中放电产生的光谱主波长范围为 500~700 nm，放电电流越大，辐射功率越大[53]。放电过程中，电流信号波形和光信号波形有相同的变化形式[54]，且光测法得到的信号曲线能够表征 PD 脉冲能量的大小[55]。

不同电压下，局放光信号的谱图具有相似性。提高电源电压，即提高场强时，光信号的强度会增大，但并不影响光辐射谱的形状[56]；并且放电光谱中包含绝缘材料所含化学成分的特征光[57]。

在放电过程中，不同谱段光强的变化趋势不同，变化趋势如图 3 所示。在放电初始阶段，700、800、940 nm 谱段正半周幅值强度增大，负半周减小；在发展阶段，全波段光辐射强度减小，700、800 以及 940 nm 谱段光辐射强度正半周期内占比增加，负半周期减小；在预击穿阶段，辐射强度增加。因此，可根据不同谱段内光辐射强度的占比来判断放电的严重程度。

1.4.2 光信号检测

通过光电转化器可进行局部放电的光信号检测，且变压器内部不存在干扰光源，使用光电探测器测量局放产生的光信号具有更高的信噪比。采用光电倍增管可实现光信号到电信号的转换，但光学检测法会受检测装置灵敏度和光传播路径的影响，探头布置位置、转换电路电磁干扰、多 PD 源光信号都会对测量结果产生干扰[55]；并且放电缺陷被变压器绕组阻挡时，光信号的能量衰减极大，几乎无法检测，而如果直接将光电传感器放置在设备内部的油中，设备内部的电、磁、热会严重干扰光学传感器的正常工作。

为更好地检测局放辐射出的光信号，可以采用荧光光纤进行光信号获取。与普通光纤相比，荧光光纤不受端面数值孔径角的限制，可以接收来自整个侧面的 PD 光信号，对光信号的测量具有较高的灵敏度[58]，且采用不同的晶体进行掺杂，可对不同波长的光进行测量。唐炬等人研制了用于局放检测的荧光光纤传感系统，并实现了对油中 PD 的测量[59]。

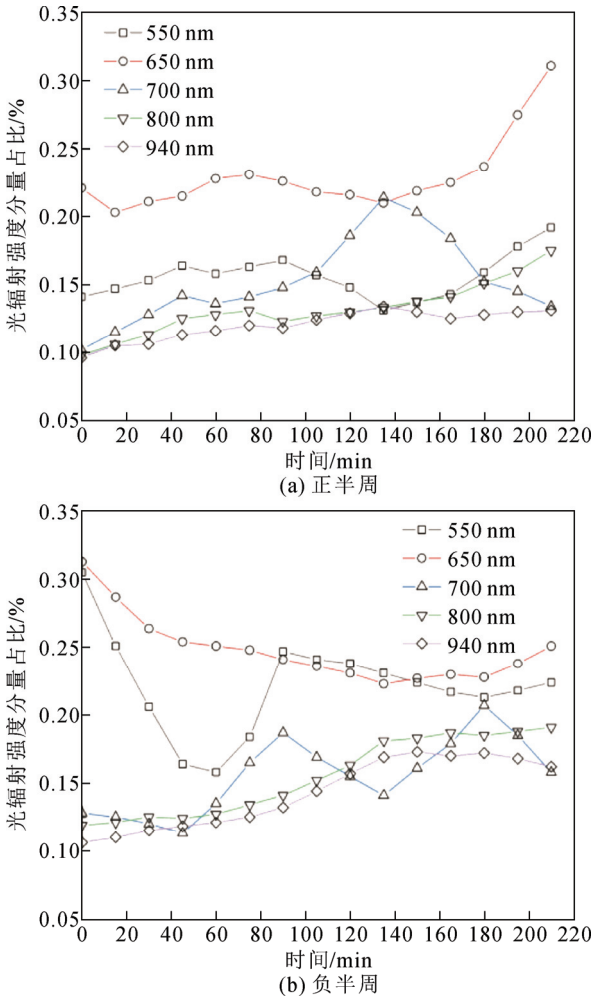


图 3 不同谱段光辐射强度比例[16]

Fig.3 Ratio of optical radiation intensity in different spectral segments[16]

采用荧光光纤可以对复杂绝缘结构内部的局放光信号进行检测，并且光检测法不受变压器内部电磁干扰，具有高灵敏度和信噪比，是一种非常具有推广前景的检测手段。

1.5 化学产物特征与检测方法

1.5.1 化学产物特征

绝缘油由碳氢化合物组成，当绝缘油中存在局部过热或放电时，会发生电分解或热分解，形成 H_2、CH_4、C_2H_2 等产物。纯油隙放电时产物为碳氢化合物，涉及到绝缘纸时，放电产物中含有氧元素。

局部放电所产生的气体中不同成分的占比与放电阶段和放电类型有关。陈曦等人采用恒定电压法对沿面放电和内部气隙放电过程中油中溶解气体进行了测量，根据导则 DL/T 722—2000 的要求，每 30 min 取油样 40 mL，注入 5 mL 氮气作为载气，振荡脱气后每次取 1 mL 样气注入色谱仪进行分析，

共 3 次，得到的沿面放电的特征气体变化如图 4(a)所示。氢气和碳氢化合物含量在放电初期增长较慢，在放电末期迅速增长，主要特征气体是乙烯和乙烷。气隙放电的特征气体变化示例如图 4(b)所示。氢气在放电初期先快速增加，之后增长较慢，临近击穿前碳氢化合物增长较慢，主要特征气体是乙烯和乙炔。2 种放电临近击穿阶段时，氢气和乙炔的含量都出现迅速增长[60]。

总体来说，局部放电产物随放电能量密度的不同而不同[61–63]，一般总烃的体积分数不高，特征气体主要是 H_2，其次是 CH_4，通常 H_2 占氢烃的 85%以上，CH_4 占总烃的 70%以上，放电能量密度增高时也会出现 C_2H_2，但在总烃中所占比例一般小于 2%。局部放电末期 C_2H_4 和 C_2H_2 含量上升，但仍以 H_2 为主。

通过油中不同气体成分含量的比值可以准确判断故障类型，常用的方法为三比值法和改良三比法[64]。三比值法从 5 种特征气体(CH_4、C_2H_6、C_2H_4、C_2H_2 和 H_2)中选取 2 种溶解度相近的气体，计算它们的比值并进行编码，来判断故障类型和趋势，编码表和放电判断故障方法如表 1 和表 2 所示。

除三比值法外，还有依据气体浓度比率，根据图表判断故障的罗杰斯比率法；利用气体比值在杜瓦尔三角形上的位置，进而判断故障类型的杜瓦尔图法；将不同的气体浓度或比值置于五边形的各个顶点或边上，以此判断故障的五角大楼法等[65]。

1.5.2 化学产物检测

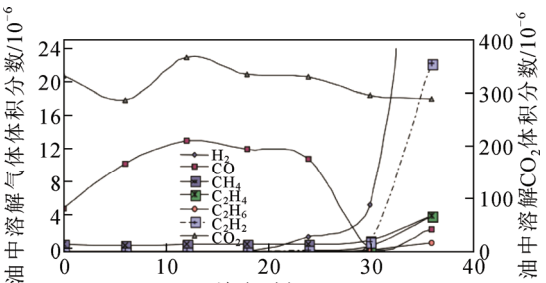
溶解气体分析(dissolved gas analysis，DGA)是用于油浸式电力设备故障诊断的主要技术之一，并且对油中的溶解气体进行检测来判断设备的内部故障的方法发展得较为成熟。通过气相色谱法对油中溶解的氢、烃类以及碳氧化合物的含量和比例进行分析，并采用三比值法对内部故障诊断已有很多成功案例。

2 火花放电信号与检测

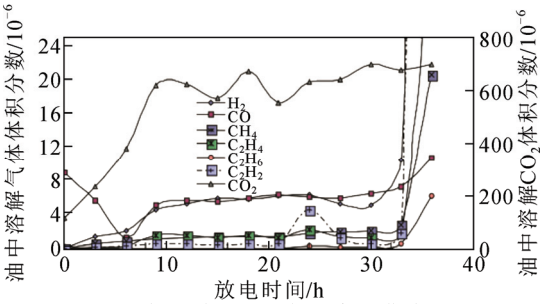
绝缘油中贯穿性放电分为火花放电和电弧放电，均代表着绝缘介质的击穿，但其差别体现在能否维持高能的放电通道。火花放电持续时间短，绝缘会迅速恢复；而电弧放电持续时间往往在几毫秒乃至几十毫秒之间，可在电流非过零点期间内稳定燃弧。

尽管火花放电相较电弧放电能量小，但已是较为严重的绝缘故障，会造成纸板的烧蚀、绝缘油的劣化，极有可能引发电弧放电乃至变压器爆燃事故。

本章对油中火花放电的电、电磁、声、光、压力信号和化学产物特征进行概述，简要对比其与非贯穿性放电信号特征的区别，对火花放电检测方法进行总结分析。



(a) 沿面放电溶解气体变化曲线



(b) 气隙放电溶解气体变化曲线

图 4 局放溶解气体变化曲线[60]

Fig.4 Partial discharge dissolved gas change curve[60]

表 1 编码规则

Table 1 Coding rules

气体含量比值范围	比值范围编码		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
[0，0.1)	0	1	0
[0.1，1)	1	0	0
[1，3)	1	2	1
[3，∞)	2	2	2

表 2 放电故障判断

Table 2 Discharge fault judgment

编码组合			故障类型
C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
0	1	0	局部放电
2	0，1	0，1，2	火花放电或悬浮电位放电
	2	0，1，2	火花放电或悬浮电位放电兼过热
1	0，1	0，1，2	电弧放电
	2	0，1，2	电弧放电兼过热

2.1 电信号特征与检测

2.1.1 电信号特征

火花放电存在多次击穿和绝缘恢复过程，会产生密集的脉冲电流信号。没有贯穿电极或间隙的放电频谱特性差别不大，而贯穿放电(火花)，放电量大，波过程较长，低频分量重，频谱主频在40~80 kHz 范围内[66]。但沿面闪络时，电流信号频率升高，幅值下降[67]。

火花放电中的悬浮电位放电通常与局部放电相比较，但其信号特性有明显不同，放电随电压/场强升高明显增强，而波形参数基本不变，放电波形时间参数和放电量明显大于局放。悬浮放电PRPD 谱图的相位分布很宽，集中出现在 0°~90°、150°~270°和 330°~360°相位范围内，呈典型的矩形分布[68]。

火花放电会产生高频电流信号[69]，放电最多维持半个周波 10 ms，在放电发生和熄灭时，高频电流信号出现峰值，并且整个过程中都伴随着高频电流信号的产生。但高频电流信号在放电发生后信号相对稳定，幅值逐渐衰减，在放电末期，平均幅值逐渐增大，不同燃弧阶段产生的高频电流的频率基本不变，分布在几兆赫兹和 10 MHz 附近[70]。

2.1.2 电信号检测

脉冲电流信号在整个火花放电阶段均存在，且在放电产生和熄灭时存在峰值，可通过脉冲电流法对火花放电进行检测。

Seo 等人采用高频电流互感器对分接开关动作时的脉冲电流信号进行了测量，结果表明在分接开关每个动作阶段开始时均会产生脉冲电流信号[56]。对火花放电的脉冲电流信号测量时，仍需要采用小波变换从噪声中提取信号，并通过 PRPD 谱图判断是否依赖交流电压相位区分局放和火花放电。

2.2 电磁信号特征与检测

2.2.1 电磁信号特征

油中悬浮电位放电特高频信号的谱图特征与脉冲电流的谱图特征基本相同，其放电频谱广泛分布在 400~800 MHz 频带内[71]。

火花放电的电磁信号也在放电产生和熄灭时出现峰值，与高频电流信号不同的是电磁信号只在放电发生和熄灭时产生[70]。

2.2.2 电磁信号检测

对于电磁信号，仍可采用电磁波传感器进行测量，但电磁信号仅在放电发生和熄灭时产生，无法依据测得的信号准确进行放电类型判断，需对其波形和频谱参数进行进一步研究。

2.3 声信号特征与检测

2.3.1 声信号特征

火花放电产生的声信号频带较宽，从可听声频带到超声频带均有分布。与高频电流信号相同，没有贯穿电极或间隙的放电，其声信号频谱特性差别不大，悬浮放电超声波信号能量的频带分布主要在31.25~62.5 kHz 范围内，与局部放电相比，频率更低。

贯穿性火花放电声信号分布频带范围较宽，集中在 10~400 kHz。在建立放电击穿通道时，频率较高，通道建立后，声信号频率降低。Harrold 等人对水中火花放电 4.5 cm 间隙的声辐射能量进行了测量，其最大的范围为在 30~70 kHz[72]，而油中间歇性火花放电击穿的超声信号频率为 40~200 kHz[44]。

火花放电可听声段的声音频谱集中在 1 000 Hz 以内，与放电发生的时间具有较好的对应关系，且表现为包络线状的连续谱[73]。

2.3.2 声信号检测

根据火花放电的声信号的频带分布，仍可采用超声检测对火花放电进行检测，但相比用于局放检测的超声传感器，火花放电的超声传感器需要更宽的检测频带和更高的检测量程。

对于火花放电中可听声频带的信号，符劲松提出可以用其对变压器火花放电进行检测，为避开变压器振动噪声干扰，可选取 150 和 250 Hz 的声信号[73]。但变压器在承受短路电流或发生直流偏磁时，会产生 150 和 250 Hz 的振动噪声，对测量产生干扰。

2.4 光信号特征与检测

2.4.1 光信号特征

火花放电涉及到电极间的击穿，放电产生的光信号谱图中会存在明显的电极材料的发射谱线，光谱强度和放电电流呈正相关。受火花放电能量或瞬时功率的影响，油中火花放电的产物以 C_2H_2 和 H_2 为主，因此火花放电的光谱中会存在较大的 C_2 和 H_α 光谱。

Rozga 等人对液体电介质击穿光谱进行了测量，在矿物油采集的典型光谱中，可见波长 656.3 nm(H_α 线)占主导地位[74]。郭凯航等人研究了铜电极间绝缘油击穿的发射光谱，见图 5。谱中可观察到 H_α 谱线、C_2 谱线和电极金属发射谱线[75]。

2.4.2 光信号检测

火花放电所产生的光信号要强于局部放电的光信号，若仍采用局放的光信号检测装置，会造成光电探测器饱和[76]，无法进行准确测量。因此，需增大探测器量程，且火花放电的能量仍然较低，放电产生的光信号仍会受到设备结构的阻挡，侵入式测量能够更加准确地进行检测。

2.5 化学产物特征与检测

2.5.1 化学产物特征

火花放电能量比局部放电能量更高，短时放电功率高，放电所产生的特征气体以 C_2H_2 和 H_2 为主，也有相当数量的 CH_4 和 C_2H_6，有时还存在 CO 和 CO_2。因故障能量相比电弧等高能放电小，一般总烃的质量分数不高，油中溶解的 C_2H_2 在总烃中所占质量分数可达 25%~90%，C_2H_4 质量分数则小于 20%，H_2 质量分数占氢烃的 30%以上，并会产生游离气体。

2.5.2 化学产物检测

火花放电属于变压器内部较为严重的放电情况，相比于存在一定发展时间的局部放电，火花放电往往需要进行快速检测，以免发展成为严重的高能电弧故障。对油色谱进行分析并采用三比值法进行判断，虽然可靠，但检测周期长。

针对油色谱检测慢的缺点，有学者提出采用光谱技术对油中溶解气进行在线检测，主要检测方法有光谱吸收技术、拉曼光谱技术、光声光谱技术和光热光谱技术，但光谱检测仍需进行油气分离，无法在油液相下直接进行烃类气体检测。为加快油中溶解气检测，王渊等人采用布拉格光栅和光子晶体光纤分布实现了油中溶解氢气和乙炔的高灵敏度检测[77]。该方法无须进行油气分离，可大幅提高诊断的时效性。同时有研究人员提出对收集放电游离气体轻瓦斯继电器进行改造，加装传感器用于检测气体的体积、含量和变化速率，提高轻瓦斯保护的可靠性[78-79]。

虽然上述方法能够实现对放电气体的在线可靠检测，但放电产生的气体从故障位置扩散到检测位置仍需一段时间，因此无法实现快速检测。

2.6 压力信号特征与检测

2.6.1 压力信号特征

放电产生的气泡会挤压绝缘油，产生压力波，放电能量与压力值呈正相关；然而，这种关系因放电类型而异。当放电过程涉及到纸板击穿时，压力会显著增加[42]。

火花放电为短时单次击穿，放电时会产生单次压力脉冲信号，典型波形如图 6 所示。压强波形先出现 1 个较大的初次冲击波，随后振荡衰减。由于未形成连续放电，产生气体总量不大，压力均值不会显著持续上升[67]。

2.6.2 压力信号检测

通过布置在油箱壁上的压力传感器可以对火花放电的压力脉冲信号进行测量，但设备结构内部放电产生的压力信号会受到绕组和围屏等结构的遮挡，由于材料的声阻抗不同，会造成信号衰减，并且测量存在一定的时延。

3 电弧放电信号与检测

油浸式电力设备内部的电弧放电故障是其最为严重的故障，绝缘介质击穿后，形成放电通道，

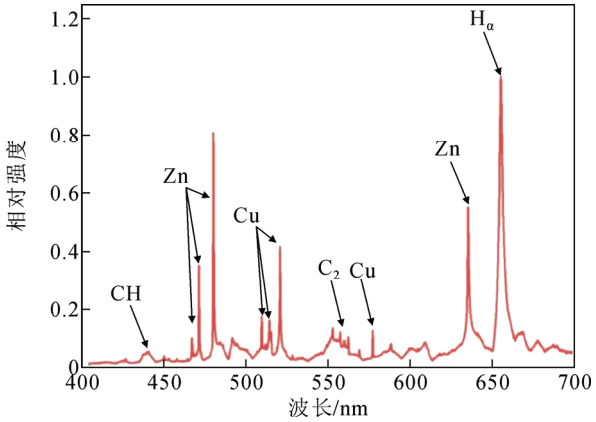


图 5 绝缘油中放电典型发射光谱[75]

Fig.5 Typical emission spectra of discharges in insulating oils[75]

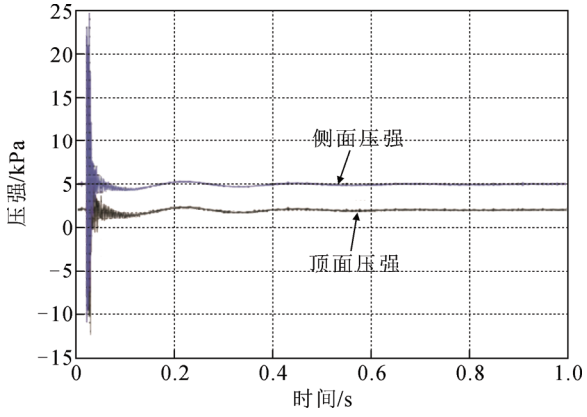


图 6 柱板沿面滑闪放电阶段箱壁压强特征[80]

Fig.6 Pressure characteristics during slip-flashing stage of surface discharge under column-plate structure[80]

能量持续注入，迅速气化周围绝缘油，产生极高的压力波，造成油箱的形变，甚至引发爆燃事故。同时油中电弧放电会产生强烈的电磁、声、光、压力等信号，对这些信号进行检测可实现电弧故障的快速检测并进行切除。

本章对油中电弧的电、电磁、声、光、压力信号和化学产物特征进行概述，并对相关信号的测量方法和局限性进行总结。

3.1 电信号特征与检测

3.1.1 电信号特征

电弧故障会通过电力设备端口处的电压电流信号体现，比如绕组发生匝间短路电弧时，短路匝中的电流可高达额定电流的数十倍，端口电压电流如图 7 所示。设备电流会显著增大，并且电压跌落。

在严重级间短路故障下，换流变压器内部感应出的横向漏磁峰值可达到 3.77 T，短路环流峰值达到 92.87 kA[81]。

3.1.2 电信号检测

匝间短路的大电流电弧故障采用电流速断保护和差动保护，但差动保护从外部感受到的特征量变化微弱，基本上只能反映 3%以上匝数的匝间短路故障，可靠性和灵敏度较低，并且这些保护的识别需要 10 ms 左右。有学者提出使用匝间短路时的漏磁特征进行检测[78,82]，可实现短路电弧故障的可靠辨识，但漏磁传感器的布置位置、具体判据及受绕组结构形式的影响等仍须深入研究。

3.2 电磁信号特征与检测

3.2.1 电磁信号特征

电弧放电的电磁脉冲信号波形如图 8 所示。与火花放电相同，绝缘击穿产生电弧的一瞬间会发出强烈的电磁脉冲，并且在每个电流过零点时发生绝缘恢复、再击穿和电压电流极性反转时，都会产生较强的电磁脉冲。每个 10 ms 的稳定燃弧期间，电弧气泡局部可能不稳定，导致绝缘的恢复和再击穿，形成随机性较大的电磁脉冲。

3.2.2 电磁信号检测

电弧产生和电流过零点时发出的电磁信号可用于电弧故障的检测，且燃弧期间的绝缘恢复和击穿时也会产生电磁波信号。通过对电磁波信号和其时间间隔进行检测，可对电弧故障进行判断。

但电弧放电的电磁信号会受到火花放电的干扰，并且实际电弧过程中，电流为突发短路产生的暂态电流，当直流衰减分量较大时，过零时刻有时

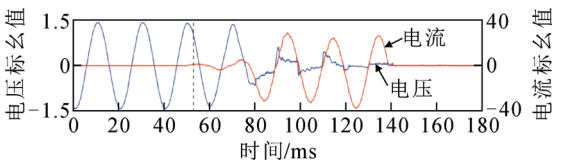


图 7 某换流变压器事故故障录波图[78]

Fig.7 Fault oscillogram of a converter transformer accident[78]

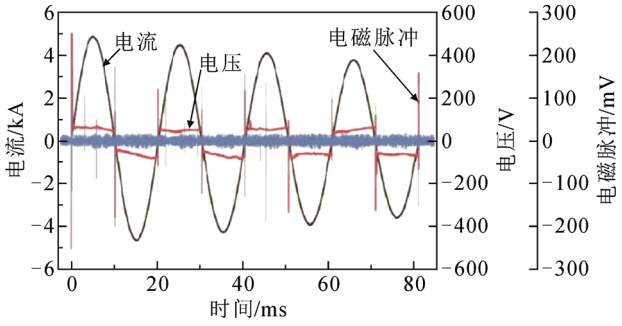


图 8 油中工频电弧的电磁脉冲[83]

Fig.8 Electromagnetic pulse of power-frequency arc in oil[83]

相差不是 10 ms，造成电磁波间隔不为 10 ms，仍须对信号的时域和频域特性进行进一步研究，以实现电弧的可靠检测。

3.3 声信号特征与检测

3.3.1 声信号特征

放电通道建立后辐射的声信号频率降低，稳定放电的电弧声信号的频率低于火花放电阶段。

从局放发展到电弧声音的频率和幅值逐渐减小，电弧的声波频率一般低于 20 kHz[42]。一般来说可以分为 3 个区间——低频区间(20~200 Hz)：主要由电弧在变压器油中的冲击波引起，具有较高的能量和较大的振幅；中频区间(0.2~2 kHz)：主要由电弧使变压器内部部件(绕组、铁芯等)振动引起，具有一定的能量和振幅；高频区间(2~20 kHz)：主要由电弧在绕组和铁芯等部件中的放电和气体击穿引起，具有较小的能量和振幅[84]。同时电弧放电也存在 20~200 kHz 的超声信号。

3.3.2 声信号检测

电弧放电的声信号在可听声频段和超声频段均有分布，但较高频的超声波在油中传播，受到油的吸收和散射影响以及固体材料的衰减和散射影响，衰减较为严重，因此可对电弧放电可听声频段内的声信号进行检测[84]。

3.4 光信号特征与检测

3.4.1 光信号特征

油中工频电弧放电能量大、持续时间长，会造

成绝缘击穿，辐射的光信号更强。

电弧产生的最初 5 ms，紫外光(200~400 nm)、可见光(400~760 nm)、近红外光(760~1 040 nm)都很强，之后可见光和紫外光占主导，电弧产生的光信号强度脉冲间隔约 10 ms，可用于判断电弧故障[85]，但 40 ms 后电弧会被放电产生的碳包裹，无法向外部辐射光信号。

贾云飞等人测量了油中工频电弧的光谱，如图 9 所示。光谱中显示同时存在 1 价和 2 价铜离子，其中 2 价铜离子的光谱峰更为明显；光谱中也可看到 1 价氢和 1 价碳的谱线，并且存在高温形成的连续光谱。

3.4.2 光信号检测

电弧故障发生时会产生强烈的光信号，可在变压器观察窗处进行测量，且用于电弧检测的传感器需要更大的量程，但变压器绕组内部电弧仍会存在被遮挡的可能性，须研究侵入式测量方式并合理布置传感器位置。

3.5 化学产物特征与检测

3.5.1 化学产物特征

电弧放电能量高并产生高温，油液在高能放电后发生裂解，生成的故障特征气体与低能放电产生的气体含量有所不同。在这些气体中，除了 H_2、C_2H_2 外，还存在受热产生的 CH_4、C_2H_6 和 C_2H_4，H_2、CH_4 和 C_2H_4 在逸出气体中的体积分数范围最大，占总体积的 75%以上。

3.5.2 化学产物检测

对小电弧仍可采用游离气体进行检测，但对急剧发展的匝间短路电弧故障，游离气体检测甚至重瓦斯保护都无法实现快速检测和保护。

3.6 压强信号特征与检测

3.6.1 压强信号特征

学者们对油中电弧故障的压强波信号进行了大量研究[86-89]，电弧典型压强波形如图 10 所示。在电弧放电的初期压强快速振荡上升，然后快速衰减，随后压强在交变能量注入下逐渐升高，呈现规律性的脉动，振荡频率为 50~100 Hz，传感器在相对电弧的不同高度处测得的压力信号波形脉动情况不同。

3.6.2 压强信号检测

电弧的压强波波动特征由几种不同的频率分量构成，可分解为低、中、高这 3 种频率分量，其中中频分量可以作为判断油浸式电力设备是否有电

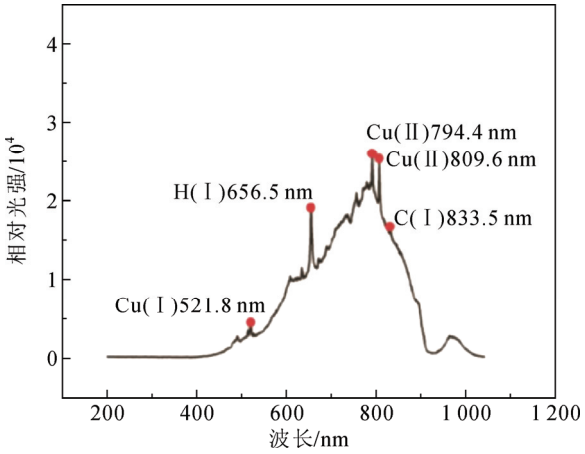


图 9 油中工频电弧的光谱特征[83]

Fig.9 Spectral characteristics of power-frequency arc in oil[83]

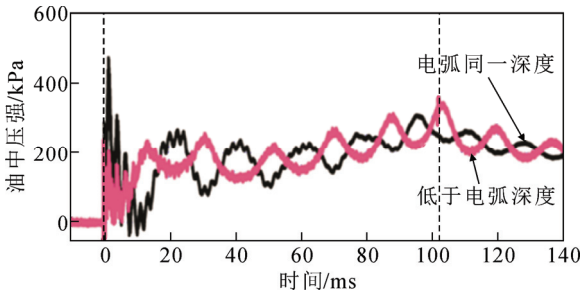


图 10 油中电弧压强波典型波形[90]

Fig.10 Typical waveform of arc pressure wave in oil[90]

弧发生的依据[80]。同时在电弧产生的初期，快速振荡阶段的压强波可用于电弧故障的快速检测，但其容易受到油中火花放电等高能放电所形成的压强波干扰，需对信号进行识别；在压强持续上升阶段的规律性脉动特性，可以保证识别的准确性，但需要一定时间进行识别[83]。

压强信号的时延与距离成正相关[91]，从击穿时刻到压强测点信号出现显著波形时刻的时间延迟是不同的，因此压力检测时传感器布置位置须尽可能靠近潜在故障位置。

4 信号特性与检测方法对比

4.1 不同放电阶段信号特征

1）电流信号：脉冲电流信号在局放过程中的 PRPD 谱图分布逐渐靠近并越过 0°和 180°，放电后期时域信号出现脉冲序列，可进行放电程度判断，不同放电缺陷的放电次数、放电量等参数在放电过程中变化情况存在区别，无法依此直接快速判断；悬浮放电的频谱在 0°~90°、150°~270°和 330°~360°

相位范围内分布，且放电量较大、波形时间长，与局放存在很大不同，同时火花放电波过程长，低频分量中，在放电产生和结束时出现脉冲电流峰值，放电过程中幅值先减小后增大；电弧放电时的匝间短路会产生很大的漏磁和短路电流，但短路电流上升需要一定时间。

2）电磁波信号：电磁波信号在局放阶段的变化情况基本和脉冲电流信号一致，并且电磁信号的脉冲重复频率更能反映放电的严重程度；悬浮放电电磁信号的 PRPD 谱图与脉冲电流一致，频谱范围为 400~800 MHz，火花放电只在放电发生和熄灭时产生电磁信号；电弧在电流过零点时会发出电磁信号，在电弧持续过程中发生绝缘恢复和击穿时也会产生电磁信号。

3）声信号：在局放发展过程中声信号主频逐渐降低，其幅值和真实放电量成比例，不同放电缺陷产生的声信号幅值变化趋势不同，采用声信号幅值进行放电程度判断须区分放电类型；悬浮放电声信号频带更低，在 31.25~62.5 kHz 中，贯穿性火花放电声信号频带在 10~400 kHz 均有分布，并存在 1 000 Hz 以下的可听声；电弧的在可听声至超声范围均有分布，但声信号频率一般<20 kHz。

4）光信号：在局放阶段 700、800 和 940 nm 谱段的光强变化趋势不同，可通过光谱占比判断放电程度；火花放电阶段，由于放电能量较高产物中存在 C_2H_2 和 H_2，光谱中存在 C_2 和 H_α 光谱和电极产生的铜元素光谱；电弧放电能量更高，由于热效应，叠加了连续光谱。多光谱分析可以区分和检测不同放电阶段。

5）化学产物：与放电能量有关，放电初期以 H_2 和 CH_4 为主导，随放电发展和放电能量增大，产物中会出现 C_2H_4 和 C_2H_2，并产生游离气体，功率较大的火花放电产物以 C_2H_2 和 H_2 为主，电弧放电的产物除 H_2 和 C_2H_2 外，还存在大量 CH_4、C_2H_6 和 C_2H_4，并有大量游离气体。

6）压力波信号：大型油浸式设备体积较大，局放能量低，产生的压力信号不如少油设备(如套管)中容易检测；火花放电为电极间单次和多次间隔击穿，会产生单次的压力脉冲，压力不会持续上升；电弧产生的压力波在初期快速振荡上升，并且高频信号快速衰减，随后在交变能量注入下压力信号振荡上升，振荡频率为 50~100 Hz。

4.2 检测方法对比

采用电信号检测的脉冲电流法虽然具有可比性，且通过分析 PRPD 谱图特征可准确获得放电阶段，但是现场应用时要在接地线上接高频电流传感器，测量干扰大，需要进行降噪和信号特征提取；电弧发生时，工频电流上升需要一定的时间，检测存在时延，漏磁检测不失为一种好方法。电磁信号检测与脉冲电流法具有较高的一致性，且受干扰较小，但电磁信号在传播过程中会受到油箱和绕组、铁芯的阻挡，衰减较大，需在介质窗处或变压器内部合理布置传感器；对故障进行判断时，需根据电弧过零点时产生的有间隔的电磁信号判断电弧故障，但容易受到火花放电产生的电磁信号干扰，需要进一步研究信号时域和频域特性以进行区分。声信号使用光纤进行测量比传统 PZT 传感器有更高的灵敏度，且不受电磁干扰影响，但声信号传播仍会受到绕组和铁芯阻挡，需对传感器位置进行合理布置。光信号检测迅速、准确、抗干扰能力强，但也会受到变压器结构阻挡，一般要采取侵入式测量，且设备内部光的折反射、油的老化也会对不同波长的光传播产生不同影响。通过压力特性可以检测火花放电和电弧放电，但火花放电和电弧初期压力检测会相互影响，需进行进一步区分和识别，同时压力波传播会受到变压器结构影响，要根据压力传播特性合理布置传感器。

放电过程中不同信号主要特性和检测方法对比如表 3 所示。不同信号变化趋势不同，且检测方法各有优缺点，可以进行多信号联合检测和对比分析，以提高检测的抗干扰能力和可靠性，并对不同阶段的信号特性进行更深入的研究。

5 展望

对于变压器内部放电，多参量融合的检测手段已有较多的工程应用，取得了较好的效果，避免了事故的发生，但要实现对变压器故障的准确快速检测和放电阶段识别，进而实现变压器的主动保护，仍须进一步对放电特征进行提取并提高检测系统的抗干扰能力。

5.1 放电信号可靠检测

放电信号的可靠检测是实现变压器故障识别和保护的基础。目前各类检测方法均面临测量干扰；同时电磁波、声、光和压力波等信号的检测还面临变压器铁芯和绕组等结构对信号的遮挡和折反射问题。

表 3 不同放电阶段主要特征与检测方法对比

Table 3 Comparison of main characteristics and detection methods for different discharge stages

	电信号	电磁信号	声信号	光信号	化学产物	压力信号
局部放电	随局放发展，PRPD 谱图相位逐渐靠近并越过 0°和 180°；放电后期出现脉冲序列	电磁信号变化情况和高频电流变化情况基本一致	局放发展过程中超声信号的主频逐渐降低	局放发展过程中不同波长的光强占比发生变化	油中溶解气主要为 H_2 和 CH_4，放电末期 C_2H_4 和 C_2H_2 含量上升	
火花放电	1）悬浮放电 PRPD 谱图基本不变，放电较大； 2）火花放电产生和熄灭时出现峰值，放电过程中幅值减小后增大	1）悬浮放电电磁信号特性和高频电流一致，放电频率为 400~800 MHz； 2）火花放电发生和熄灭时产生电磁信号	1）悬浮放电主频更低，在 31.3~62.5 kHz； 2）火花放电频谱范围更宽，存在明显的可听声	光信号图谱中存在较大的 C_2 和 H_α 光谱，同时存在 Cu 的光谱	特征气体以 C_2H_2 和 H_2 为主，放电能量大时，会产生游离气体	产生单次压力脉冲信号
电弧放电	存在很大的漏磁和短路换流	电弧电流过零点时，发生电压突变，发出电磁信号	声波频率一般低于 20 kHz，超声频带也存在分布	光脉冲间隔约 10 ms	特征气体除了 C_2H_2、H_2 还存在大量 C_2H_4、C_2H_6、CH_4，存在大量溢出气体	压力信号存在初期压力快速振荡上升和后期持续上升阶段
检测方法	采用脉冲电流法进行测量，增大传感器的带宽可获得更全面的放电信号。但在现场极易受到干扰，需要对放电脉冲进行提取	使用天线进行检测，受油箱和铁芯绕组影响，要理布置传感器位置，在油箱内部需要小型化的电磁波传感器。无法快速区分火花和电弧放电	外置 PZT 检测超声信号会受到阻挡，内置光纤传感器进行测量仍须合理布置传感器位置，减小铁芯绕组的影响	光信号检测抗干扰能力强，能够快速检测，但绕组内部光信号会受到阻挡，需要合理布置内置检测装置	油中溶解气体检测可准确判断故障，但在线检测和游离气体检测仍耗时较长	采用压力传感器进行测量，基本不存在外部干扰，采用放电初期信号进行检测时，难以区分放电类型

为实现放电信号的可靠检测，需要优化传感器的电磁屏蔽设计和信号处理算法，以降低外部电磁场对检测信号的影响，提高传感器测量的抗干扰能力；研究变压器内部结构对放电信号的传播的影响，提出更加合理的传感器布置方案，以减少信号遮挡和测量盲区的影响。

增大传感器的带宽可以获得更全面的放电信息，但同时也增加了传感器对外部干扰的敏感性。并且，由于局放、火花和电弧放电所产生的信号强度和频率范围存在差别，同一传感器受量程和带宽限制，可能无法同时对不同放电进行检测。因此，需要进一步研究不同放电信号的幅值和频带特征，以优化传感器设计和选型。

对于油中溶解气体检测，虽然耗时较长，但结果可靠，进一步可以对油中气体的扩散行为受温度、内部结构和油流等因素的影响规律进行研究，通过对多台色谱装置安装位置进行优化，基于多点色谱数据对缺陷/故障进行反演。

5.2 信号特征挖掘与发展阶段识别

对变压器进行故障诊断，不仅要对放电信号进行准确检测，还要在此基础上对检测结果进行快速准确的分析，以实现对放电的严重程度和发展阶段的准确判断。对检测信号单一的幅值和放电频率的分析不能完全评估放电源的危害性，还要对 PRPD 谱图、测量信号的频谱等特征随时间的变化趋势进行分析，提出相对简单、可靠的判据，实现对放电故障和严重程度快速可靠的检测。

近年来提出的变压器主动保护注重对放电不同阶段脉冲电流、电磁波、声、光等信号的时域或频域特征变化情况进行对比分析，以实现对放电严重程度的判断。目前局部放电发展过程中特征信号的相关研究已较为成熟，但受限于试验条件，火花放电和电弧放电的信号时频域特征研究较少，须进一步研究火花及电弧放电的相关信号特征及其与局部放电特征之间的联系，尤其是局部放电发展至高能电弧过程中的参数变化特征。

开展长期的放电监测、获取全阶段的放电信号特征，可以有效剔除放电信号的干扰，避免检测过程中对不同放电阶段的误判，实现对变压器的可靠保护。

5.3 多信号联合应用

一方面，单一信号检测容易受到干扰，且变压器内部放电源较多，基于单一信号实现放电阶段判断的难度较大。另一方面，不同类型信号受到的干扰不同，为了进一步提高变压器放电检测的准确性和可靠性，可通过集成多种类型的传感器(如电磁波传感器、声传感器、光传感器和压力波传感器等)，

对放电信号进行多维度联合检测，利用信号之间的互补性，达到增强整体的抗干扰能力的目的。例如，脉冲电流法和特高频法具有较好的一致性，可将 2 个传感器同时测得的信号作为放电信号，而将其他信号作为干扰信号进行剔除。同时，在放电发展过程中，不同信号的强度、频带变化趋势不同，多信号联合分析可以更加准确地判断放电的发展阶段。例如，在油纸绝缘局放临近击穿阶段时，超声信号幅值变小，而脉冲电流信号幅值较大，由此可对放电阶段进行判断。

多信号集成传感器的研制是实现多放电信号的联合检测的重要保障，集成式传感器可以实现数据高效采集和同步检测，并且能够减小传感器体积、提高系统的可靠性，是放电检测传感器设计制造的重要研究方向。

6 结论

1）不同放电阶段的电、电磁、声、光、压力信号和化学产物特征均存在一定区别，通过对信号特征进行分析可反推放电发展阶段；采用单一信号进行放电检测和阶段判断时，会受到干扰；对不同阶段的信号特征仍需进行进一步对比研究，通过不同信号联合分析，可更准确地进行放电阶段判断。

2）脉冲电流法是目前测量放电的主要手段，但容易受到干扰；化学检测法结果可靠，但检测周期长；电磁波、声、光和压力检测是在在线监测的有力方法，能够实现故障的快速检测，但信号传播会受到变压器结构的阻挡，需合理布置传感器位置；通过不同信号联合检测，可提高抗干扰能力。

3）目前对油中放电已经进行了大量的研究，获得了丰硕的成果，但仍有很多值得深入探索的问题。如提升放电检测系统的可靠性和抗干扰能力，研究变压器结构和油老化对信号传播的影响；对不同信号阶段的信号特性和变化情况进行进一步分析，提出依据信号特征对放电进行检测和对放电阶段进行判断的准确判据，实现快速检测；通过多信号测量结果对放电故障进行判断，提升检测结果的可靠性，避免单一测量手段的带来的检测失误。

参考文献 References

[1] 刘泽洪. ±1 100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J]. 中国电机工程学报，2020，40(23)：7782-7791.
LIU Zehong. Findings in development of ±1 100 kV UHVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7782-7791.

[2] 李殿臣，梁 戈. 基于案例分析的变压器灭火系统改进设计研究[J]. 消防科学与技术，2020，39(8)：1127-1129.
LI Dianchen, LIANG Ge. Improved design of transformer fire extinguishing system based on case analysis[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8): 1127-1129.

[3] 张少华，蒋慧灵，刘国平. 某特高压变压器爆炸事故数值模拟重构[J]. 消防科学与技术，2021，40(3)：356-359.
ZHANG Shaohua, JIANG Huiling, LIU Guoping. Numerical simulation and reconstruction of explosion accident of an UHV transformer[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(3): 356-359.

[4] 周榆晓，赵振扬，郭 铁，等. 一起 220 kV 变压器火灾事故分析[J]. 变压器，2021，58(6)：70-73.
ZHOU Yuxiao, ZHAO Zhenyang, GUO Tie, et al. Analysis of a 220 kV transformer fire accident[J]. Transformer, 2021, 58(6): 70-73.

[5] 夏家辉，方 园，刘卜瑞，等. 基于特征电流波宽判据的变压器差动保护方法[J]. 电力工程技术，2020，39(1)：184-190.
XIA Jiahui, FANG Yuan, LIU Burui, et al. The transformer differential protection method based on characteristic current waveform width criterion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 184-190.

[6] CUI Y J, ZHU L Y, JI S C, et al. Partial discharge development in needle-plane configuration of oil-paper insulation under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2469-2476.

[7] 陈如意，江 军，陈 珉，等. 基于最大信息系数的变压器过热故障特征选择[J]. 电力工程技术，2020，39(2)：140-145.
CHEN Ruyi, JIANG Jun, CHEN Min, et al. Feature selection of dissolved gases in power transformer based on maximal information coefficient[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 140-145.

[8] 廖才波，杨金鑫，胡 雄，等. 基于油中溶解气体特征量筛选的变压器故障诊断方法[J]. 电力工程技术，2024，43(1)：192-200.
LIAO Caibo, YANG Jinxin, HU Xiong, et al. Fault diagnosis method for transformers based on feature selection of dissolved gas in oil[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 192-200.

[9] POMPILI M. Partial discharge development and detection in dielectric liquids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1648-1654.

[10] 江长明，黄 猛，郝 震，等. 交流电压下油纸绝缘放电发展过程中电-磁-声特征参量的变化规律[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3805-3813.
JIANG Changming, HUANG Meng, HAO Zhen, et al. Variation of electrical-magnetic-acoustic characteristic parameters during the development of oil-pressboard insulation discharge under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3805-3813.

[11] 严 璋，朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京：中国电力出版社，2002.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2002.

[12] 丘昌荣，王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京：机械工业出版社，1994.
QIU Changrong, WANG Naiqing. Partial discharge of electrical equipment and its testing technology[M]. Beijing, China: China Machine Press, 1994.

[13] 高文胜，王 猛，谈克雄，等. 油纸绝缘中局部放电的典型波形及其频谱特性[J]. 中国电机工程学报，2002，22(2)：1-5.
GAO Wensheng, WANG Meng, TAN Kexiong, et al. Typical pulse shape and frequency characteristic of the PD signal in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 1-5.

[14] 程养春，李成榕，岳华山，等. 变压器油纸绝缘针板放电缺陷发展过程[J]. 高电压技术，2011，37(6)：1362-1370.
CHENG Yangchun, LI Chengrong, YUE Huashan, et al. Developing processes of partial discharge defects of needle-plate structure on oil-paper insulation of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1362-1370.

[15] 李　刚，汪　可，张书琦，等. 变压器油纸绝缘沿面放电缺陷发展特征及阶段识别方法[J]. 电网技术，2018，42(10)：3451-3458.
LI Gang, WANG Ke, ZHANG Shuqi, et al. Evolution characteristics and stage recognition method of surface discharge defects of oil-paper insulation in transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3451-3458.

[16] 范文杰，张志斌，夏昌杰，等. 多手段测量下的油纸绝缘针板电极局部放电的演化规律分析[J]. 高电压技术，2022，48(3)：914-927.
FAN Wenjie, ZHANG Zhibin, XIA Changjie, et al. Evolution law of partial discharge of oil-paper insulated needle-plate electrode based on multi-method measurement[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 914-927.

[17] 刘　阳，董　明，邢亚东，等. 油纸绝缘沿面放电多物理信号发展规律及阶段特征[J]. 中国电机工程学报，2023，43(4)：1611-1621.
LIU Yang, DONG Ming, XING Yadong, et al. Development law and stage characteristics of multi-physical signals of surface discharge in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1611-1621.

[18] 许　庭. 变压器油纸绝缘楔形油隙放电发展及其产气规律研究[D]. 重庆：重庆大学，2012.
XU Ting. Study on discharge development and the gas generation law for wedge oil-gap in transformer oil-paper insulation[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2012.

[19] SI W, LI S M, XIAO H S, et al. PD characteristics and development degree assessment of oil-pressboard insulation with ball-plate model under 1:1 combined AC-DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3677-3686.

[20] 魏金清. 局部放电作用下变压器油纸绝缘劣化缺陷发展规律的研究[D]. 保定：华北电力大学，2014.
WEI Jinqing. Development rules of degradation induced by partial discharge on oil-paper insulation in transformer[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2014.

[21] 陈伟根，龙震泽，谢　波，等. 不同气隙尺寸的油纸绝缘气隙放电特征及发展阶段识别[J]. 电工技术学报，2016，31(10)：49-58.
CHEN Weigen, LONG Zhenze, XIE Bo, et al. Characteristics and development stage recognition of air-gap discharge within oil-paper insulation considering effect of cavity size[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 49-58.

[22] HUANG Q D, SONG H Y, WANG W, et al. Research on the developing law of the air-gap discharge in oil-paper insulation by multiple methods[C]//22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021). Xi'an, China: IET, 2021: 1640-1644.

[23] 刁常晋，程养春，邓　春，等. 阶梯升压试验和恒定电压试验中油纸绝缘局部放电发展规律的对比[J]. 高电压技术，2013，39(2)：365-373.
DIAO Changjin, CHENG Yangchun, DENG Chun, et al. Contrast of the developing regularity of partial discharge of oil-paper insulation using step-stress test and constant-stress test[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 365-373.

[24] 李军浩，司文荣，姚　秀，等. 油/纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 西安交通大学学报，2009，43(6)：108-112.
LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, et al. Partial discharge characteristics over oil/paper interface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 108-112.

[25] Partial discharge measurements: IEC 60270[S], 2015.

[26] CAVALLINI A, CONTIN A, MONTANARI G C, et al. Advanced PD inference in on-field measurements. I. noise rejection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(2): 216-224.

[27] CAVALLINI A, CONTI M, CONTIN A, et al. Advanced PD inference in on-field measurements. II. Identification of defects in solid insulation systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 528-538.

[28] 侯恺宁，王　强，陆信波，等. 基于超宽频带法的油纸绝缘局部放电检测方法[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4770-4779.
HOU Kaining, WANG Qiang, LU Xinbo, et al. Partial discharge detection method in oil-pressboard insulation based on ultra-wideband method[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4770-4779.

[29] CHENG J R, XU Y, DING D W, et al. Investigation of the UHF partial discharge detection characteristics of a novel bushing tap sensor for transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2748-2757.

[30] BAJWA A A, HABIB S, KAMRAN M. An investigation into partial discharge pulse extraction methods[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 964-982.

[31] SELLARS A G, FARISH O, HAMPTON B F, et al. Using the UHF technique to investigate PD produced by defects in solid insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(3): 448-459.

[32] 王国利，袁　鹏，单　平，等. 变压器典型局放模型超高频放电信号分析[J]. 高电压技术，2002，28(11)：28-31.
WANG Guoli, YUAN Peng, SHAN Ping, et al. Study on the ultra-high-frequency discharge signals of typical PD models in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 28-31.

[33] 赵　煦，孟永鹏，成永红，等. 变压器现场超高频局部放电信号的时域特征分析[J]. 西安交通大学学报，2011，45(12)：82-86，128.
ZHAO Xu, MENG Yongpeng, CHENG Yonghong, et al. Time-domain characteristic site analysis for ultra-high frequency partial discharge in power transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(12): 82-86, 128.

[34] 王晓宁，陈庆国，朱德恒，等. 特高频段内油中与空气中放电频谱特性研究[J]. 高电压技术，2004，30(4)：25-27.
WANG Xiaoning, CHEN Qingguo, ZHU Deheng, et al. Study on uhf spectrum characteristics of discharge in oil and in air[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 25-27.

[35] 刘顺成，王　琛，杜　林. 变压器油中典型缺陷的局放特高频信号标定[J]. 高电压技术，2017，43(9)：2983-2990.
LIU Shuncheng, WANG Chen, DU Lin. UHF signals calibration for typical partial discharge defects in transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2983-2990.

[36] JUDD M D, FARISH O, PEARSON J S, et al. Power transformer monitoring using UHF sensors: installation and testing[C]//Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 00CH37075). Anaheim, USA: IEEE, 2000: 373-376.

[37] LI J, JIANG T Y, CHENG C K, et al. Hilbert fractal antenna for UHF detection of partial discharges in transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2017-2025.

[38] 陈庆国，龚细秀，李福祺，等. 变压器油中局部放电超高频检测的试验研究[J]. 高电压技术，2002，28(12)：23-25.
CHEN Qingguo, GONG Xixiu, LI Fuqi, et al. Experimental study on ultra high frequency measurement for partial discharge in transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(12): 23-25.

[39] 蔡　鋆，袁文泽，张轩瑞，等. 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.
CAI Jun, YUAN Wenze, ZHANG Xuanrui, et al. Ultra-high frequency self-sensing detection method for transformer partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2041-2050.

[40] ZHAO Y, ZHENG S S, YAN X H, et al. Research on a new PD detection sensor in transformer oil tank seam[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(20): 25460-25472.

[41] 李燕青. 超声波法检测电力变压器局部放电的研究[D]. 保定：华北电力大学，2003.
LI Yanqing. Study on ultrasonic-based method to detect partial discharge in transformer[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2003.

[42] ZHANG Z X, CHEN W G, LI Z Q, et al. Experimental study on the transition process from partial discharge to arc discharge of oil-paper insulation based on fibre-optic sensors[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(2): 461-468.

[43] 高久国，王新伟，熊军辉，等. 油纸系统典型绝缘缺陷火花放电发展过程的多参量特征分析[J]. 高压电器，2023，59(8)：53-60.
GAO Jiuguo, WANG Xinwei, XIONG Junhui, et al. Multi-parameter characteristic analysis of spark discharge process of typical insulation defects in oil-paper system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 53-60.

[44] 翁佳南，李慕子，卢　波，等. 电力变压器严重受潮时围屏沿面爬电特性研究[J]. 电工电能新技术，2023，42(8)：19-31.
WENG Jiannan, LI Muzi, LU Bo, et al. Creepage discharge performance of oil-pressboard interface in power transformer under severely humidified condition[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(8): 19-31.

[45] KWEON D J, CHIN S B, KWAK H R, et al. The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1976-1983.

[46] 张春燕，张映月，滕　俊，等. 基于光纤超声传感器的油纸绝缘局部放电超声波信号特性试验研究[J]. 现代电力，2016，33(6)：56-63.
ZHANG Chunyan, ZHANG Yingyue, TENG Jun, et al. Test on ultrasonic characteristics of partial discharge in oil-paper insulation for transformers based on fiber-optic ultrasonic sensor[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(6): 56-63.

[47] WEN Z W, XIONG B, GU G B. Detection and localization of partial discharge based on flexible piezoelectric thin film material[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China: IEEE, 2019: 1-4.

[48] SAGUNOVA I V, STROGANOV A A, LOSEV V, et al. Acoustic registration of partial discharge in isolation of high-voltage equipment using piezoelectric polymers[C]//2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2020: 2174-2177.

[49] 周宏扬，马国明，张　猛，等. 基于迈克尔逊光纤干涉的变压器局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报，2022，42(21)：8016-8024.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in power transformer based on the michelson optical fiber interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 8016-8024.

[50] 王　伟，王　赞，吴延坤，等. 用于油中局部放电检测的 Fabry-Perot 光纤超声传感技术[J]. 高电压技术，2014，40(3)：814-821.
WANG Wei, WANG Zan, WU Yankun, et al. Fabry-Perot optical fiber ultrasonic sensing technology for detection of partial discharge in the oil[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 814-821.

[51] 司文荣，傅晨钊，卜　剑，等. 基于多孔式敏感膜片的 MEMS 光纤珐珀传感器及其局部放电检测[J]. 光学　精密工程，2021，29(11)：2613-2621.
SI Wenrong, FU Chenzhao, BU Jian, et al. MEMS fiber optic Fabry-Perot sensors based on porous sensing diaphragms and applications for partial discharge detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(11): 2613-2621.

[52] 史荣斌，林仲钦，秦炜淇，等. 基于有源光纤光栅阵列的局部放电声发射检测与定位技术[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：358-367.
SHI Rongbin, LIN Zhongqin, QIN Weiqi, et al. Partial discharge acoustic emission detection and localization based on active fiber grating array[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 358-367.

[53] 周文俊，汪广武，邹建明，等. 油间隙放电光谱分布初探[J]. 高电压技术，1996，22(4)：52-54.
ZHOU Wenjun, WANG Guangwu, ZOU Jianming, et al. Spectral distribution of discharge in transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(4): 52-54.

[54] 黄文力，刘顺新，严　萍. 纳秒脉冲下变压器油中闪络光信号特性[J]. 强激光与粒子束，2009，21(5)：787-790.
HUANG Wenli, LIU Shunxin, YAN Ping. Optical characteristics of flashover in transformer oil under nanosecond pulses[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(5): 787-790.

[55] JIA S R, JIA Y F, BU Z W, et al. Detection technology of partial discharge in transformer based on optical signal[J]. Energy Reports, 2023, 9(Supplement 1): 98-106.

[56] BOCZAR T, ZMARZLY D, FRĄCZ P. Comparative studies of partial discharge using acoustic emission method and optical spectroscopy[C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Sydney, Australia: IEEE, 2015: 740-743.

[57] SCHWARZ R, MUHR M, PACK S. Partial discharge detection in oil with optical methods[C]//IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005. Coimbra, Portugal: IEEE, 2005: 245-248.

[58] 唐　炬，欧阳有鹏，范　敏，等. 用于检测变压器局部放电的荧光光纤传感系统研制[J]. 高电压技术，2011，37(5)：1129-1135.
TANG Ju, OUYANG Youpeng, FAN Min, et al. System using fluorescent fiber for partial discharge detection in transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1129-1135.

[59] TANG J, ZHOU J B, ZHANG X X, et al. A transformer partial discharge measurement system based on fluorescent fiber[J]. Energies, 2012, 5(5): 1490-1502.

[60] 陈　曦，陈伟根，王有元，等. 油纸绝缘局部放电与油中产气规律的典型相关分析[J]. 中国电机工程学报，2012，32(31)：92-99.
CHEN Xi, CHEN Weigen, WANG Youyuan, et al. Canonical correlation analysis of dissolved gas production with partial discharges in oil paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 92-99.

[61] HAUPERT T, HANSON D, MCDONALD W. The use of diagnostic testing of insulating oil for fault detection in electrical equipment[C]//Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference. Rosemont, USA: IEEE, 1995: 537-541.

[62] MOULAI H, NACER A, BEROUAL A. Dissolved gases analysis in relation to the energy of electrical discharges in mineral oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 498-504.

[63] LEE S J, KIM Y M, SEO H D, et al. New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases part 2: application of relative content of fault gases[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 691-696.

[64] 国家能源局. 变压器油中溶解气体分析和判断导则：DL/T 722—2014[S]. 北京：中国电力出版社，2015.
National Energy Administration. Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: DL/T 722—2014[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2015.

[65] FAIZ J, SOLEIMANI M. Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1239-1248.

[66] 李建明，杨微可，李珈丽. 局部放电信号波形及频谱特性[J]. 高电压技术，1990，26(4)：37-44.
LI Jianming, YANG Weike, LI Jiali. The wave form signals of and frequency spectrum characteristic of partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 1990, 26(4): 37-44.

[67] 李政琦. 变压器内部不同缺陷放电发展过程模拟及多参量信号特性[D]. 重庆：重庆大学，2022.
LI Zhengqi. Simulation and multi-parameter signal characteristics of different defect discharge development process in transformer[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2022.

[68] 王国利，郝艳捧，贾志东，等. 电力变压器典型局放模型放电脉冲的特性研究[J]. 高电压技术，2001，27(2)：5-8.
WANG Guoli, HAO Yanpeng, JIA Zhidong, et al. Study on pulse current of typical PD models in power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 5-8.

[69] SEO J, MA H, SAHA T K. A joint vibration and arcing measurement system for online condition monitoring of onload tap changer of the power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 1031-1038.

[70] 左浩明. 有载分接开关切换过程中的电弧电磁辐射特性及其在状态监测中的应用研究[D]. 西安：西安交通大学，2023.
ZUO Haoming. Research on the electromagnetic radiation characteristics of arc during the switching process of on-load tap changer and its application in state monitoring[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2023.

[71] 李 梅. 油纸绝缘局部放电超高频检测方法的研究[J]. 高压电器，2011，47(8)：38-42，47.
LI Mei. Ultra-high-frequency detection technique for partial discharge in oiled-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 38-42, 47.

[72] HARROLD R T. Acoustic emission signatures of arcs and sparks[C]//1980 IEEE International Conference on Electrical Insulation. Boston, USA: IEEE, 1980: 184-189.

[73] 符劲松. 基于可听声的变压器内部火花放电故障诊断研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.
FU Jinsong. Diagnosis research on internal spark discharge fault of transformer based on audio signal[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[74] ROZGA P, TABAKA P. Spectroscopic measurements of electrical breakdown in various dielectric liquids[C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Sydney, Australia: IEEE, 2015: 524-527.

[75] 郭凯航，章 程，孙建涛，等. 基于发射光谱的绝缘油中放电参数时间演化特性[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3191-3198.
GUO Kaihang, ZHANG Cheng, SUN Jiantao, et al. Temporal evolution characteristics of discharge parameters in insulating oil based on optical emission spectra[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3191-3198.

[76] WENG J, LU W, LI M, et al. Research on the development of photoelectric signal during typical discharges in transformer main insulations[C]//22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021). Xi'an, China: IET, 2021: 140-144.

[77] 王 渊，马国明，谢洋洋，等. 无需油气分离的油中溶解乙炔原位直接检测[J]. 中国电机工程学报，2023，43(20)：8151-8160.
WANG Yuan, MA Guoming, XIE Yangyang, et al. direct detection of oil-dissolved acetylene without oil-gas separation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 8151-8160.

[78] 郑玉平，郝治国，薛众鑫，等. 大型电力变压器安全运行与主动保护技术探索[J]. 电力系统自动化，2023，47(20)：1-12.
ZHENG Yuping, HAO Zhiguo, XUE Zhongxin, et al. Exploration of safe operation and active protection technology for large-capacity power transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 1-12.

[79] 郑玉平，彭 凯，李雪飞，等. 基于游离气体特征的新型轻瓦斯保护技术[J]. 电力系统自动化，2023，47(21)：165-172.
ZHENG Yuping, PENG Kai, LI Xuefei, et al. Novel buchholz protection technology based on characteristics of free gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 165-172.

[80] 李博宇，郝治国，李斯盟，等. 油浸式电力设备内部电弧引发的压力特征[J]. 高电压技术，2023，49(1)：198-206.
LI Boyu, HAO Zhiguo, LI Simeng, et al. Pressure characteristics of oil-immersed power equipment under internal arc[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 198-206.

[81] 闫晨光，张 芃，徐 雅，等. 换流变压器有载分接开关级间短路故障差动保护动作特性[J]. 电工技术学报，2023，38(21)：5878-5888，5912.
YAN Chenguang, ZHANG Peng, XU Ya, et al. Differential protection performance for converter transformer intertap short-circuit faults in on-load tap changers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5878-5888, 5912.

[82] 郑玉平，龚心怡，潘书燕，等. 变压器匝间短路故障工况下的漏磁特性分析[J]. 电力系统自动化，2022，46(15)：121-127.
ZHENG Yuping, GONG Xinyi, PAN Shuyan, et al. Analysis on leakage flux characteristics of turn-to-turn short-circuit fault for power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 121-127.

[83] 贾云飞，贾双瑞，罗 迅，等. 变压器内部电弧故障快速检测方法研究与对比[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2158-2165.
JIA Yunfei, JIA Shuangrui, LUO Xun, et al. Research and comparison on rapid detection methods of transformer internal arc fault[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2158-2165.

[84] 姬 彤. 基于光纤光栅感知的变压器内部电弧放电声纹特征研究[D]. 北京：华北电力大学，2023.
JI Tong. Research on the characteristics of arc discharge voiceprint in transformer based on fiber grating sensing[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2023.

[85] JIA S R, JIA Y F, LUO X, et al. Optical signal characteristics of power frequency arc in transformer oil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(1): 675-678.

[86] BARKAN P, DAMSKY B L, ETTLINGER L F, et al. Overpressure phenomena in distribution transformers with low impedance faults: experiment and theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1): 37-48.

[87] PERIGAUD G, MULLER S, DE BRESSY G, et al. Contribution to the study of transformer tank rupture due to internal arcing development of a computer simulation tool[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.

[88] 闫晨光，张保会，郝治国，等. 电力变压器油箱内部故障压力特征

建模及仿真[J]. 中国电机工程学报，2014，34(1)：179-185.
YAN Chenguang, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Modeling and simulation of pressure characteristics of power transformer tanks' internal faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 179-185.

[89] TADOKORO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Pressure rises due to arc under insulating oil in closed vessel-relationship between bubble behavior and pressure rises[J]. Electronics and Communications in Japan, 2016, 99(12): 91-102.

[90] TADOKORO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Pressure rises due to arc under insulating oil in closed vessel-pressure fluctuation of depth direction in oil[J]. Electrical Engineering in Japan, 2018, 202(2): 43-53.

[91] SHEN J L, LI F, SHAO X J, et al. Internal pressure characteristics of oil-immersed power transformer under internal arc fault[C]//2023 IEEE International Conference on Power Science and Technology (ICPST). Kunming, China: IEEE, 2023: 98-102.



汲胜昌(通信作者)
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事电力设备在线监测及故障诊断、 振动噪声机理及抑制等研究
E-mail: jsc@xjtu.edu.cn

JI Shengchang
Ph.D., Professor
Corresponding author



赵德华
1998—，男，博士生
主要从事油中电弧特性方面的研究工作
E-mail: zhaodehua@stu.xtju.edu.cn

ZHAO Dehua
Ph.D.candidate



贾云飞
1998—，男，博士生
主要从事油中电弧特性、变压器防爆方面的研究工作
E-mail: jiayf98@163.com

JIA Yunfei
Ph.D.candidate

收稿日期 2024-08-05 修回日期 2024-09-09 编辑 曾文君