

电力变压器局部放电信号特征提取及故障诊断

郭文举

宁夏宝丰新能源发展有限公司 宁夏 银川 750000

摘要：随着电网规模持续扩大与电压等级不断提升，电力变压器作为输配电系统的核心设备，其运行可靠性直接关系到电网的安全稳定。本文聚焦电力变压器局部放电信号特征提取及故障诊断。首先阐述局部放电的定义、产生原因及其对变压器绝缘的危害；接着介绍电气检测法和非电气检测法等局部放电信号检测方法；然后探讨时域、频域和时频域的局部放电信号特征提取方式；最后分别论述基于机器学习和深度学习的局部放电故障诊断方法，为变压器故障诊断提供理论参考。

关键词：电力变压器；局部放电信号；特征提取；故障诊断

引言：电力变压器作为电力系统的核心设备，其安全稳定运行至关重要。局部放电是变压器绝缘系统在电场作用下发生的一种常见现象，是绝缘劣化的重要征兆，若不及时处理，可能引发严重故障，导致设备损坏甚至大面积停电。准确检测局部放电信号并提取有效特征进行故障诊断，对保障变压器可靠运行意义重大。旨在系统梳理电力变压器局部放电的产生机理、检测方法，深入探讨信号特征提取技术，并研究基于机器学习和深度学习的故障诊断方法，以期为电力变压器局部放电故障诊断提供全面且有效的解决方案。

1 电力变压器局部放电的产生机理

1.1 局部放电的定义

局部放电是指在电力设备绝缘系统中，由于电场分布不均匀，在部分区域（而非整个绝缘间隙）发生的非贯穿性放电现象。这种放电仅局限于绝缘体内的气隙、气泡、杂质或电极边缘等局部区域，不会形成贯穿性导电通道，其能量释放相对微弱但具有持续性。局部放电本质上是绝缘介质在局部强电场作用下发生的击穿或电离过程，表现为短时脉冲电流、电磁辐射、声波或光信号等形式。

1.2 局部放电产生的原因

电力变压器局部放电的产生主要源于绝缘系统中的缺陷与电场畸变。一是绝缘材料内部存在气隙、杂质或局部破损，如油纸绝缘中的气泡、纤维杂质，这些区域的介电常数与周围介质差异较大，易形成局部强电场（超过介质耐受场强），引发气体电离或介质击穿。二是电极结构设计不合理，如电极边缘毛刺、形状不规则，导致电场集中，在高场强区域诱发放电。三是运行环境因素，如温度升高导致绝缘老化、水分侵入降低介质耐电强度，或机械振动使绝缘结构松动，进一步加剧

局部电场畸变，促使局部放电发生。

1.3 局部放电对变压器绝缘的危害

局部放电对变压器绝缘系统的危害具有累积性和渐进性。一方面，放电过程中产生的高能电子、离子轰击绝缘材料表面，导致高分子链断裂、氧化分解，使油纸绝缘的机械强度与耐电性能下降；同时，放电产生的热量会局部升高温度，加速绝缘老化。另一方面，放电生成的臭氧、氮氧化物等化学物质，与绝缘材料中的水分反应生成酸类物质，腐蚀绝缘层，破坏其化学稳定性^[1]。

2 局部放电信号检测方法

2.1 电气检测法

2.1.1 脉冲电流法

脉冲电流法是局部放电检测中应用最广泛的电气检测技术之一，其原理是基于局部放电产生的脉冲电流信号。当变压器内部发生局部放电时，会在回路中产生短时脉冲电流，通过在变压器接地端、套管末屏等位置安装耦合电容或罗氏线圈等传感器，可采集该脉冲信号。该方法依据 IEC 标准建立，具有检测灵敏度高、定量性好的特点，能通过脉冲幅值、频次等参数评估放电强度。但易受外界电磁干扰影响，需结合滤波技术提高信噪比，适用于实验室及现场离线检测场景。

2.1.2 特高频法

特高频法通过检测局部放电过程中产生的特高频电磁辐射信号（300MHz-3GHz）实现监测。局部放电时，电荷快速转移会激发高频电磁波，利用特高频天线传感器可捕捉该信号。其优势在于抗干扰能力强（避开工频及低频干扰）、空间定位精度高，能通过多传感器阵列定位放电点位置。此外，该方法可实现带电在线检测，不影响设备运行。但信号在变压器内部传播时易受结构遮挡衰减，需优化传感器布置，适用于复杂电磁环境下

的局部放电实时监测。

2.2 非电气检测法

2.2.1 超声波检测法

超声波检测法利用局部放电过程中产生的机械振动波（频率通常为 20kHz-200kHz）进行检测。放电时，能量释放会引发周围介质（油或固体绝缘）的瞬间膨胀与收缩，形成超声波信号，通过贴附于变压器外壳的压电传感器可采集该信号。其优势在于抗电磁干扰能力强，能通过多传感器定位放电点的空间位置，且可在设备运行中实时监测。但超声波在传播中衰减较快，对传感器安装位置要求较高，易受机械振动等环境噪声影响，常与电气检测法结合使用以提高可靠性。

2.2.2 光检测法

光检测法基于局部放电伴随的光辐射现象，通过光学传感器捕捉放电产生的光子信号实现检测。局部放电过程中，气体电离或介质击穿会释放紫外线、可见光或红外线，利用光电倍增管、光谱仪等设备可探测光信号的强度、频谱及传播路径。该方法具有极高的空间分辨率，能直接定位放电点，且不受电磁干扰。但光信号在变压器内部传播时受绝缘材料吸收和散射影响显著，需在设备设计时预留光学窗口，实际应用中多作为辅助检测手段，与其他方法协同验证放电存在。

2.2.3 油中溶解气体分析法

油中溶解气体分析法（DGA）通过检测变压器绝缘油中溶解的特征气体判断局部放电状态。局部放电会分解油纸绝缘，产生氢气（ H_2 ）、甲烷（ CH_4 ）、乙烯（ C_2H_4 ）等气体，这些气体溶解于油中，通过气相色谱仪可分析其组分及浓度。该方法能反映长期放电的累积效应，可用于评估绝缘老化程度，且操作简便、不影响设备运行。但气体生成与溶解存在滞后性，难以实时监测突发放电，需结合特征气体比值（如 IEC 三比值法）判断故障类型，是变压器状态评估的经典手段^[2]。

3 局部放电信号特征提取

3.1 时域特征提取

3.1.1 统计特征参数

时域统计特征参数是从局部放电信号的时域波形中提取的量化指标，通过描述信号的幅值分布、波动特性和能量特征反映放电规律。常用参数包括均值、方差、峰值、峭度、偏度等：均值反映信号的整体幅值水平，方差体现信号的离散程度，峰值表征单次放电的最大强度，峭度和偏度则描述信号幅值分布的陡峭程度与对称性。此外，脉冲的上升时间、下降时间、半峰宽等时间参数，可反映放电过程的快慢特性。

3.1.2 脉冲序列特征

脉冲序列特征聚焦于局部放电信号的时序分布规律，通过分析脉冲信号在时间轴上的出现频次、幅值变化及相位相关性，挖掘放电的动态特性。具体包括脉冲重复率（单位时间内的放电次数）、脉冲幅值随时间的变化趋势、脉冲间隔时间分布等。对于工频电压下的局部放电，脉冲序列常呈现与电压相位相关的周期性特征，例如电晕放电的脉冲多集中于电压峰值附近，而气隙放电的脉冲分布更分散。

3.2 频域特征提取

3.2.1 傅里叶变换

傅里叶变换是将局部放电的时域信号转换到频域，通过分解信号的频率成分提取特征的经典方法。其核心是将复杂的时域脉冲信号表示为不同频率正弦波的叠加，从而得到信号的频谱分布。通过傅里叶变换可获取信号的主频成分、频率带宽及各频率分量的幅值，这些特征能反映放电的能量在不同频率上的分布规律。傅里叶变换计算效率高，可直观展示信号的频率特性，但仅适用于平稳信号，对局部放电这类非平稳、短时脉冲信号，难以捕捉频率随时间的变化，且存在频谱泄漏问题，实际应用中常结合窗函数优化，为后续故障诊断提供频域基础特征。

3.2.2 功率谱估计

功率谱估计是用于描述局部放电信号功率在频域上分布的特征提取方法，通过估计信号的功率谱密度，量化不同频率成分的能量占比。常用方法包括周期图法、Welch 法等：周期图法直接对信号傅里叶变换的平方进行平均，计算简单但方差较大；Welch 法通过分段加窗和平均处理，降低了谱估计的方差，提高了稳定性。功率谱估计能清晰反映信号的主要频率分量及其能量强度，例如局部放电信号中若存在特定高频峰值，可能对应绝缘缺陷的类型（如金属尖端放电的高频分量更显著）。该方法弥补了傅里叶变换在能量量化上的不足，可有效区分不同放电类型的频域能量分布差异，但对短数据序列的估计精度有限，需结合足够长的采样数据提升可靠性，是频域特征提取的重要手段。

3.3 时频域特征提取

3.3.1 小波变换

小波变换是处理非平稳局部放电信号的有效工具，通过伸缩和平移小波基函数，同时捕捉信号的时域和频域特征。它可将信号分解为不同尺度的分量，高频分量对应短时细节（如放电脉冲），低频分量反映整体趋势。对于局部放电这类突变信号，小波变换可精准定位

脉冲发生时刻及频率分布,有效抑制噪声。其多分辨率分析特性,能在不同频段聚焦信号特征,适用于区分复杂干扰与真实放电信号,是局部放电信号去噪、特征提取的核心方法,广泛用于绝缘缺陷类型识别。

3.3.2 经验模态分解

经验模态分解(EMD)无需预设基函数,可自适应将局部放电信号分解为若干本征模态函数(IMF),每个IMF代表不同频率尺度的振荡成分。它能有效处理非线性、非平稳信号,分离出包含放电特征的高频IMF和反映趋势的低频分量。通过对IMF的能量、峭度等参数分析,可提取放电的时频特征。EMD适用于处理变压器复杂背景下的局部放电信号,尤其在抑制谐波干扰和揭示信号内在模式方面优势显著,为后续故障诊断提供更具辨识度的特征量。

4 局部放电故障诊断方法

4.1 基于机器学习的故障诊断方法

4.1.1 支持向量机

支持向量机(SVM)通过构建最优分类超平面实现局部放电故障类型的区分,适用于小样本、高维特征的分类场景。其核心是将原始特征空间映射到高维核空间,使非线性可分问题转化为线性可分,通过最大化分类间隔提高泛化能力。在局部放电诊断中,SVM可利用提取的时域、频域特征,有效区分气隙、沿面、电晕等放电类型,且对噪声数据具有较强鲁棒性。但核函数选择和参数优化对诊断精度影响较大,需结合交叉验证调整,是小样本场景下的高效诊断方法。

4.1.2 人工神经网络

人工神经网络(ANN)模拟生物神经网络结构,通过多层神经元的非线性映射实现故障诊断,具有自学习和非线性拟合能力。在局部放电诊断中,ANN以提取的信号特征为输入,通过训练调整神经元权重,建立特征与故障类型的映射关系。例如,反向传播神经网络(BP-ANN)可通过多隐层学习复杂特征模式,精准识别不同绝缘缺陷引发的放电类型。但ANN存在过拟合风险,对训练样本数量和质量要求较高,需通过正则化、早停等策略优化,广泛用于多类型局部放电的智能诊断。

4.1.3 决策树

决策树是一种基于树形结构的分类算法,通过递归划分特征空间构建决策规则,具有可解释性强、计算

高效的特点。在局部放电诊断中,决策树以信号特征(如峰值、峭度、特定频率能量)为划分依据,按“if-then”规则逐层分支,最终输出故障类型(如气隙放电、油中火花放电)。其优势在于能直观展示特征与故障的关联逻辑,便于工程人员理解诊断过程,且对噪声数据不敏感。

4.2 基于深度学习的故障诊断方法

4.2.1 卷积神经网络

卷积神经网络(CNN)通过卷积层、池化层的层级结构自动提取局部放电信号的深层特征,无需人工设计特征。在局部放电诊断中,将时域波形或时频图(如小波变换结果)作为输入,卷积层通过滑动窗口捕捉局部特征(如脉冲波形细节),池化层压缩数据并增强鲁棒性,最终通过全连接层实现故障分类。

4.2.2 循环神经网络

循环神经网络(RNN)通过引入时间递归结构,擅长处理局部放电信号的时序依赖关系,适用于分析脉冲序列的动态变化特征。其核心是隐藏层神经元的输出会反馈至输入,使网络能记忆历史信息,捕捉放电脉冲在时间轴上的关联性(如不同相位下的放电规律)。

结束语

综上所述,电力变压器局部放电信号的特征提取及故障诊断是保障设备安全运行的关键技术。本文系统梳理了局部放电的产生机理、检测方法,深入分析了时域、频域及时频域的特征提取技术,并探讨了机器学习与深度学习在故障诊断中的应用。从传统统计特征到深度学习的自动特征提取,从单一检测方法到多源信息融合,技术的发展为局部放电故障的精准诊断提供了更多可能。

参考文献

- [1]陈轩,黄心汉,范盛荣,等.变压器局部放电在线检测方法研究[J].计算技术与自动化,2022,33(3):31-34.
- [2]刘嘉林,董明,安珊,杨兰均,邝石,张伟政.电力变压器局部放电带电检测及定位技术综述[J].绝缘材料,2023,08:1-7.
- [3]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,2022,40(3):814-821.