

高压直流电缆附件局部放电信号的特征提取与模式识别

王晨宇

沙电投资（上海）有限公司 上海

【摘要】高压直流电缆在电力传输中地位关键，其附件局部放电信号分析关乎电力系统稳定。本研究围绕信号特征提取与模式识别展开，通过小波变换、经验模态分解等方法，从时域、频域和时频域精准提取信号特征；运用支持向量机、随机森林等机器学习算法，结合卷积神经网络、循环神经网络等深度学习模型，实现放电信号的准确识别。实验证实，该方法在复杂环境下识别效果良好，为电缆状态监测与故障预警提供有力支撑。

【关键词】高压直流电缆；局部放电信号；特征提取；模式识别；机器学习

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250146

Characteristics extraction and pattern recognition of partial discharge signals in high-voltage DC cable accessories

Chenyu Wang

ACWA POWER, Shanghai

【Abstract】 High-voltage DC cables play a crucial role in power transmission, and the analysis of partial discharge signals in their accessories is vital for the stability of power systems. This study focuses on signal feature extraction and pattern recognition, employing methods such as wavelet transform and empirical mode decomposition to accurately extract features from the time domain, frequency domain, and time-frequency domain. By integrating machine learning algorithms like support vector machines and random forests with deep learning models such as convolutional neural networks and recurrent neural networks, the study achieves accurate identification of partial discharge signals. Experiments have shown that this method performs well in complex environments, providing robust support for cable condition monitoring and fault prediction.

【Keywords】 High-voltage DC cable; Partial discharge signal; Feature extraction; Pattern recognition; Machine learning

引言

高压直流输电技术凭借其诸多优势，在长距离、大容量输电领域广泛应用。电缆附件作为系统薄弱环节，易发生局部放电，这不仅影响电缆寿命，还可能引发严重事故，威胁电力系统安全稳定运行。准确提取局部放电信号特征并进行有效模式识别，能够及时发现潜在故障隐患，为设备维护和检修提供科学依据，降低事故风险，对保障电力可靠供应具有重要意义。

1 局部放电信号特性分析

高压直流电缆附件局部放电信号的复杂性如同自然界的混沌现象，每一次放电都蕴含着独特的物

理过程。在时域维度，放电脉冲犹如划破夜空的闪电，以极快的速度攀升至峰值，形成陡峭的上升沿，这一过程往往在极短的瞬间完成，仿佛是能量在绝缘缺陷处瞬间爆发的具象化体现。随后，脉冲以相对缓慢的速度下降，其缓慢的衰减过程恰似余烬逐渐熄灭，释放剩余能量。脉冲宽度窄小，如同转瞬即逝的灵感火花，而放电间隔的随机性则让每次放电都难以预测，这种不确定性使得信号分析充满挑战。

从频域角度观察，局部放电信号的能量分布如同广袤的星空，覆盖了从低频到高频的广阔频段。低频部分恰似低沉的背景音，承载着放电过程中的基础能量信息，反映着放电区域宏观的电磁变化。

高频部分则如尖锐的音符，蕴含着放电瞬间的细节特征，不同类型的局部放电在高频段展现出独特的能量分布^[1]。以内部放电为例，由于其发生在绝缘介质内部，能量的快速释放和复杂的电磁交互，使得高频段出现能量集中现象，就像内部爆发的小型电磁风暴；而表面放电因受介质表面特性和周围环境的影响，能量更多地集中在相对较低频段，形成了具有辨识度的特征标识。这些频域特征为区分不同放电类型提供了重要线索。

在时频域层面，局部放电信号的动态变化如同不断演变的生命轨迹。随着放电过程的推进，其能量在不同时间和频率上的分布持续变化，形成独特的时频图谱。这些图谱记录着放电从初始萌发到发展恶化的全过程，就像一本详细的日记，记录着绝缘缺陷的演变历史。通过对时频域特性的深入研究，不仅能捕捉到放电在某一时刻的瞬时特征，还能追踪其发展趋势，预测放电未来的变化方向^[2]。这种全面的分析视角，为揭示局部放电信号的本质提供了关键钥匙，也为后续的特征提取和模式识别搭建起坚实的理论基础，让研究者能够从复杂的信号表象中抽丝剥茧，探寻隐藏其中的规律。

2 特征提取方法研究

小波变换作为信号处理领域的经典工具，其工作原理恰似将一幅复杂的画作拆解为不同细节层次的拼图。在处理局部放电信号时，它能够依据预设的规则，将原始信号按照不同尺度和频率分解为多个子带信号。选择合适的小波基函数就如同挑选一把精准的钥匙，不同的基函数具有独特的数学形态和特性，能够匹配信号中不同类型的特征。而分解层数的确定则像是决定拆解的精细程度，层数越多，对信号的剖析就越深入，能挖掘出更多隐藏在细节中的特征信息。通过这种分解，原本复杂的局部放电信号被转化为多个具有特定频率和时间特性的子信号，研究者可以针对不同频段的特征进行深入分析，精准提取与放电相关的关键信息，从而为后续的模式识别提供清晰且有价值的输入。

经验模态分解则以一种自适应的方式，如同自然选择般对信号进行解构。它无需预先设定复杂的参数，而是依据信号自身的特点，将其分解为若干个固有模态函数。这些函数就像信号的“基因片段”，各自反映着信号在不同时间尺度上的波动特性。在局部放电信号中，不同的放电过程和干扰因素会在信号中产生

不同频率和幅度的波动，而固有模态函数能够有效地分离出这些波动成分^[3]。对于因绝缘老化导致的缓慢变化的放电特征和因突发脉冲引起的快速波动特征，经验模态分解可以将它们分别提取出来，使得原本混杂在一起的复杂信号变得条理清晰。

分形理论为局部放电信号特征提取开辟了全新的视角，它从几何形态的角度出发，量化信号的复杂程度和不规则性。局部放电信号的波形往往呈现出不规则的形态，其变化过程充满了复杂性和自相似性，就像自然界中的海岸线，无论放大多少倍，都能看到相似的不规则细节。通过计算信号的分形维数，能够将这种复杂程度进行数值化描述。分形维数越大，表明信号的形态越复杂，蕴含的信息越丰富，也意味着放电过程可能更加剧烈或绝缘缺陷更为严重^[4]。在实际应用中，单一的特征提取方法往往存在局限性，因此通常会将小波变换、经验模态分解和分形理论等多种方法结合使用。

3 模式识别技术应用

支持向量机在局部放电信号模式识别领域的广泛应用，源于其独特的理论优势和强大的分类能力。它以结构风险最小化作为核心原则，就像在一片复杂的数据海洋中寻找一条最优的分界线。在处理局部放电信号时，支持向量机将通过特征提取获得的各类特征作为输入数据，然后在高维空间中寻找一个最优分类超平面。这个超平面能够以最大间隔将不同类型的放电数据分开，从而实现对小样本、非线性数据的有效分类。即使面对数量有限的局部放电样本，支持向量机也能通过巧妙的核函数映射，将数据映射到更高维的空间，使得原本在低维空间中难以区分的放电类型变得易于分类。

随机森林算法如同一个智慧的决策团队，通过构建多个决策树并综合它们的判断结果来完成模式识别任务。每一棵决策树都像是一位独立的决策者，基于局部放电信号的特征进行分类判断^[5]。在训练过程中，这些决策树从原始数据中随机选取部分样本和特征进行构建，使得每棵树都具有一定的差异性和独立性。当面对新的局部放电信号时，每棵决策树都会给出自己的分类结果，而随机森林算法则通过投票或平均等方式综合这些结果，得出最终的判断。这种群体决策的方式赋予了随机森林算法出色的泛化能力，即使数据中存在噪声或干扰，也能通过多数决策的方式减少错误判断的概率。

深度学习中的卷积神经网络和循环神经网络为局部放电模式识别带来了革命性的突破。卷积神经网络凭借其独特的网络结构,能够自动从海量的局部放电信号数据中提取深层次特征。卷积层如同敏感的视觉神经元,通过卷积核在信号特征图上滑动,自动捕捉信号中局部的、重复出现的模式和特征;池化层则像一个高效的筛选器,对卷积层提取的特征进行压缩和降维,保留关键信息的同时减少计算量^[6]。随着网络层数的增加,卷积神经网络能够从最初的原始信号特征逐步抽象出越来越复杂、更具代表性的高层特征,这些特征包含了不同类型局部放电信号的本质区别。循环神经网络则专注于处理具有时间序列特性的局部放电信号,其独特的循环结构使得信息能够在时间维度上传递,从而捕捉到信号在不同时刻之间的依赖关系。

4 综合应用与展望

将特征提取与模式识别技术有机结合,构建完整的高压直流电缆附件局部放电监测系统,是保障电力系统安全稳定运行的关键举措。在实际电力网络中,电缆附件如同连接电力传输的枢纽,其运行状态直接影响着整个电网的可靠性。在线监测设备如同电力系统的“感知器官”,实时采集电缆附件产生的局部放电信号,这些信号包含着电缆运行状态的重要信息^[7]。采集到的信号首先经过前端处理,去除噪声和干扰,还原信号的真实面貌。随后,运用精心设计的特征提取方法对信号进行剖析,将其转化为具有代表性的特征向量,这些向量就像信号的“身份证”,蕴含着放电类型、严重程度等关键信息。接着,模式识别算法如同智慧的“裁判”,对特征向量进行分析判断,一旦识别出异常的放电模式,系统便会迅速发出预警信息。

展望未来,随着科技的飞速发展,高压直流电缆附件局部放电监测技术将迎来更多创新与突破。传感器技术的不断进步,将使局部放电信号的采集更加灵敏和精确。新型传感器可能具备更高的分辨率、更宽的频率响应范围,能够捕捉到更微弱、更复杂的放电信号,即使是绝缘材料中极其微小的缺陷引发的局部放电也难以遁形。信号处理技术也将不断革新,新的算法和方法将进一步提升对复杂信号的处理能力,能够更准确地提取信号特征,减少干扰和噪声的影响^[8]。人工智能技术的持续发展,尤其是深度学习算法的不断优化,将催生更高效、智能的特征提取和模式识别

算法。这些算法可能具备更强的自适应性和学习能力,能够自动适应不同工况下电缆附件的放电特性,实现对局部放电更全面、深入的监测和诊断。

5 结语

高压直流电缆附件局部放电信号的特征提取与模式识别研究已取得一定成果,多种方法的应用有效提升了对局部放电信号的分析能力。未来,应持续探索新的信号处理技术和智能算法,以应对复杂多变的运行环境和不断涌现的新问题。加强对实际运行电缆的监测数据积累和分析,进一步优化现有方法,提高系统的可靠性和实用性。通过多学科交叉融合,有望推动该领域技术实现更大突破,为高压直流输电技术的广泛应用和电力系统的高效稳定运行提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 王昱力,黄凯文,王格,等.基于 Comsol 仿真的高压直流电缆附件材料电导率特性研究[J].高压电器,2023, 59(09): 258-267.
- [2] 彭小圣,陈玉竹,贾诗媛,等.多物理场下的高压直流电缆局部放电研究展望[J].中国电机工程学报,2023,43(03): 1210-1222.
- [3] 刘淑军,吴启仁,李栋,等.高压直流电缆附件用 EPDM 与 XLPE 电气性能匹配关系研究[J].绝缘材料,2022,55(12): 75-79.
- [4] 李捍平,丛赞,李小炳,等.基于非线性电导绝缘的随桥敷设高压直流电缆接头电-热场分布及优化设计[J].电气工程学报,2022,17(02):226-234.
- [5] 李栋,陈龙啸,朱智恩,等.高压直流电缆系统安全裕度试验研究[J].电力工程技术,2021,40(06):199-204.
- [6] 李国倡,王家兴,魏艳慧,等.高压直流电缆附件 XLPE/SIR 材料特性及界面电荷积聚对电场分布的影响[J].电工技术学报,2021,36(14):3081-3089
- [7] 张瑞敏,张沛红,宋淑伟,等.界面空间电荷对高压直流电缆终端电场分布的影响[J].高电压技术,2019,45(06): 1762-1766.
- [8] 陈振新,俞恩科,汪洋,等.整体预制式和绕包式 XLPE 高压直流电缆接头电场分布研究及接头结构优化[J].哈尔滨理工大学学报,2018,23(06):77-81.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS