

文章编号:1671-5896(2026)04-0824-06

特征模式分解的局部放电信号特征提取算法

田野

(中国人民解放军总医院海南医院 医学工程科, 海南 三亚 572013)

摘要: 针对设备噪声及外界环境干扰的耦合作用下, 掩盖或扭曲了真实的局部放电信号, 增加了特征提取难度的问题, 提出了基于特征模式分解的局部放电信号特征提取算法。采用小波变换分析信号主要边缘, 求出各尺度与邻近尺度间的相关系数, 消除局部放电信号噪声。采用变分模态分解法分解放电信号, 计算固有模态分量的多尺度熵, 进一步滤除干扰; 结合核主成分分析法降维输入信号的特征参数, 计算出频段投影序列的能量、模值和绝对均值, 完成特征提取。实验证明, 所提算法可有效提取局部放电特征, 提供详尽故障信息, 确保设备稳定运行。

关键词: 特征模式分解; 局部放电信号; 小波变换; 特征提取; 相关系数

中图分类号: TP399; TM835

文献标志码: A

Partial Discharge Signal Feature Extraction Algorithm Based on Feature Pattern Decomposition

TIAN Ye

(Medical Engineering Department, Hainan Hospital of Chinese PLA General Hospital, Sanya 572013, China)

Abstract: Under the coupling effect of equipment noise and external environmental interference, the real partial discharge signal is masked or distorted, which increases the difficulty of feature extraction. Therefore, a partial discharge signal feature extraction algorithm based on feature pattern decomposition is proposed. Using wavelet transform to analyze the main edges of the signal, calculate the correlation coefficients between each scale and adjacent scales, and eliminate the noise of partial discharge signals. Using the variational mode decomposition method to decompose the discharge signal, calculating the multi-scale entropy of the intrinsic mode components, and further filtering out interference; Combining the kernel principal component analysis method to reduce the feature parameters of the input signal, calculate the energy, modulus, and absolute mean of the frequency band projection sequence to complete feature extraction. Experimental results have shown that the proposed algorithm effectively extracts partial discharge features, provides detailed fault information, and ensures stable operation.

Key words: feature pattern decomposition; partial discharge signal; wavelet transform; feature extraction; correlation coefficient

0 引言

电气设备在工业、建筑、航空航天、交通以及医疗等领域得到广泛应用^[1]。其稳定运行对监测设备状态、预防故障具有重要意义。如医院用电系统部分电力设备发出的局部放电信号, 在该类信号提取过程中, 受设备噪声、患者自身生理波动以及外界环境等多种噪声和干扰的耦合作用下, 其被掩盖或

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 海南省教育厅基金资助项目(Hnjgzc2023-93)

作者简介: 田野(1984—), 男, 海南三亚人, 中国人民解放军总医院海南医院工程师, 主要从事电子及智能化设备管理, 医用电子技术研究, (Tel)86-15692537903 (E-mail) tianyetianyi@126.com。

扭曲,无法准确提取。因此,如何在复杂的噪声和干扰背景下,准确、快速地识别并定位电力局部放电现象,是保证供电安全的关键^[2-3]。

Djordje^[4]提出了利用超高频排水阀传感器的局部放电信号特征提取算法。采用标准超高频排水阀传感器判断出每个信号中部发生最明显的局部放电时间;对比左、右部分内主要强噪声频谱与每个记录信号的中间段;根据搜索截止频率处理信号,从记录信号中间段获得最大振幅局部放电,实现信号特征提取。但因局部放电信号通常较微弱,容易受环境噪声和电磁干扰的影响,会掩盖真实的局部放电信号,导致无法准确提取特征。尚海昆等^[5]提出了基于经验小波变换与多尺度量子熵的特征提取算法。采用经验小波变换分解局部放电信号,获得多个固有模态与残余分量,求解各固有模态分量的多尺度量子熵序列,通过局部空间排序算法对序列降维,结合层次聚类算法聚类分析结果,实现局部放电信号特征提取。经小波变换分析佳,但处理复杂频谱信号时辨析力不足。江友华等^[6]提出基于奇异值分解(SVD: Singular Value Decomposition)和改进阈值的自适应噪声完备经验模态分解(CEEMDAN: Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise),构建汉克尔矩阵提升信号维,分解奇异值剔除周期窄带干扰,高效提取信号特征。通过改进阈值的自适应噪声完备经验模态分解信号,根据相关系数判断噪声与信号分量间的界限,去除噪声分量。以 Sigmoid 函数为基础,构建改进阈值函数,求解剩余分量中的高频分量,并采用改进阈值去噪重建高频和低频分量,完成局部放电信号特征提取。但奇异值阈值、改进阈值函数的参数需要根据具体信号进行调整,而不恰当的参数设置会影响噪声去除的效果和信号特征的提取。杨攀烁等^[7]提出利用小波变换与灰度-梯度共生矩阵算法的局部放电特征提取算法,依据小波变换在处理非平稳信号时的灵活性,构造局部放电信号的时域频谱图;基于灰度梯度共生矩阵法的时域频谱结构获得特征矢量,并将在支持向量机分类器内引入特征矢量,实现局部放电信号特征提取。但局部放电信号通常伴随噪声干扰,而小波变换和灰度-梯度共生矩阵算法对噪声的鲁棒性有限,若噪声水平较高,会影响算法对局部放电信号特征的准确提取。

为此,笔者提出了特征模式分解的局部放电信号特征提取算法。通过求解邻近尺度上的小波系数,消除局部放电信号的白噪声或窄带干扰,结合 VMD(Variational Modal Decomposition)分解局部放电信号多个固有模态函数,获得多尺度熵,运用核主成分分析法降维特征参数,计算各频带投影序列数值,实现局部放电信号特征提取。

1 局部放电信号消噪

噪声和干扰的存在会显著降低信号质量,使其难以准确获取真实信号特征。通过消噪处理,可最大程度减弱这些不必要的成分,使信号更加清晰、纯净,从而提高其作为诊断依据的可靠性。因此,在提取特征前,首先采用小波变换对信号白噪声或窄带干扰^[8]进行消除,通过尺度空间相关消噪技术分解信号,逐步从粗到细地寻找其主边界,消除噪声。

信号突变点局部特征强^[9],尤其存在正态白噪声时,噪声能量随尺度增大而减小^[10]。小波 $j+1$ 变换后,系数间关系强,尤其在边缘处^[11]。利用相邻尺度系数计算^[12],可降噪并增强局部放电信号。

假定分解最大尺度为 J 。通过对邻近尺度变换值的求解,确定相关系数:

$$C_l(j,n) = \prod_{i=0}^{l-1} W_f(j+i,n), \quad (1)$$

其中 $C_l(j,n)$ 为相关系数; $W_f(j+i,n)$ 为离散小波变换; f 为噪声信号; l 为尺度数目; n 为位置。

由于信号的突变区宽度与尺度数值成正比关系,且邻近的突变点与粗尺度也存在相关性,所以尺度数选择 2。相关系数可简化为

$$C_2(j,n) = W_f(j,n) C_l(j,n)。 \quad (2)$$

为确保小波系数与相关系数可比性,将 $C_2(j,n)$ 的能量标准化到离散小波变换 $W_f(j,n)$, 并确定标准化相关系数:

$$C_{2,\text{new}}(j,n) = C_2(j,n) \sqrt{\frac{P_w(j)}{P_{c2}(j)}}, \quad (3)$$

其中 $P_w(j)$ 为标准化相关系数; $P_{c2}(j)$ 为离散小波变换。

将 $C_{2,new}(j,n)$ 和 $W_f(j,n)$ 的大小进行对比, 判断出信号的重要边缘, 如果 $|C_{2,new}(j,n)| > |W_f(j,n)|$, 则将这个点看作是边缘, 将 $W_f(j,n)$ 的位置和尺寸保存, 并将 $C_{2,new}(j,n)$ 和 $W_f(j,n)$ 对应的点都设为 0, 剩余数据设为 $W'_f(j,n)$ 和 $C'_{2,new}(j,n)$ 。然后将 $C'_{2,new}(j,n)$ 的能量标准化到 $W'_f(j,n)$ 上, 对比二者的绝对值^[13], 得到信号次重要的边缘。反复计算, 直至 $W_f(j,n)$ 内所有未被选取的点皆达到第一尺度下的某特定噪声能量阈值。

设 W_g 是滤波^[14]后的值, 初始值是 0, 操作步骤如下。

第 1 步: 小波分析噪声信号, 求出离散小波变换 $W_f(j,n)$ 。

第 2 步: 计算每一尺度与邻近尺度之间的相关系数 $C_2(j,n)$ 。

第 3 步: 将相关系数 $C_2(j,n)$ 的能量标准化到离散小波变换 $W_f(j,n)$, 获得标准化相关系数 $C_{2,new}(j,n)$ 。

第 4 步: 当 $|C_{2,new}(j,n)| \geq |W_f(j,n)|$ 时, 可判定 n 点处的小波变换系数来自有效信号, 将 W_g 对应位置的系数 $W_f(j,n)$ 置零, 同时将该位置的 $C_2(j,n)$ 也置零; 反之, 则可假定 $W_f(j,n)$ 由噪声贡献, 保持 $W_f(j,n)$ 的数值不变。

第 5 步: 反复进行第 3 步、第 4 步, 直至 $P_w(j)$ 符合某个噪声能量阈值为止, 此时, 消除噪声后的小波系数仍在 W_g 中。

第 6 步: 用小波变换实现信号消噪, 输出局部放电信号结果 W_g 。

2 特征模式分解的局部放电信号特征提取

由于局部放电信号通常包含多种非线性成分, 并且其在消噪过程中很难被完全去除, 而且可能在去除过程中引入新的非线性失真。因此, 为了更全面和准确提取出局部放电信号的特征信息, 针对局部放电信号的非线性^[15]和非平稳特征, 采用变分模态分解-多尺度样本熵法 (VMD-MSE: Variational Mode Decomposition-Multiscale Sample Entropy) 对消除噪声后的小波系数特征提取和量化表征^[16], 并通过 VMD 对局部放电信号进行多个固有模态函数分解, 获得各固有模态的多尺度熵^[17], 从而完成局部放电信号特征的量化表征。

VMD-MSE 法不仅能体现消除噪声后的滤波特征, 还能描述信号局部特征, 从新的角度表示信号特征, 特征提取流程如图 1 所示。

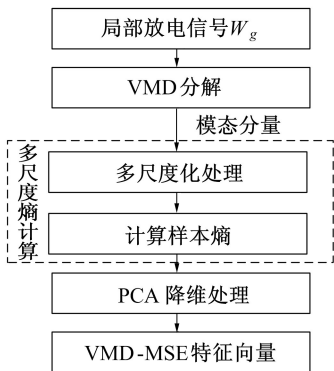


图 1 特征提取流程

Fig. 1 Feature extraction process

以 $W_g = \{w_g^1, w_g^2, \dots, w_g^M\}$ 为输入信号, M 为信号长度, 采用 VMD-MSE 特征提取方法步骤如下。

1) 采用 VMD 法分解消噪后的局部放电信号, 获得一组固有模态分量^[18] u_k 和相应的中心频率 χ_k 。

2) 根据 VMD 分解获得 u_k 的多尺度熵, 然后合并样本信号固有模态分量 $M(u_k)$, 从而得到以尺度因子 $\delta = [1, 2, \dots, \delta_{\max}]$ 为输入信号的特征参数:

$$S = \{M(u_1), M(u_2), \dots, M(u_k)\}, \quad (4)$$

其中 $M(u_k)$ 为信号 VMD 分解后的模态分量 u_k 的多尺度熵, 各模态的 $M(u_k)$ 都是依据不同尺度模态分量组成的; K 为 VMD 分解后的模态个数, 各模态的多尺度熵维数为 $\beta(M(u_e)) = \delta_{\max}$ 。

3) 利用核主成分分析法降维第 2) 步获得的特征参数, 以凸显有用的信息特征, 避免了维数灾难。

对经标准化处理的训练样本进行优化, 得到一套小波包系数, 并通过对每个频段投影^[19]序列的能量、模值和绝对均值, 确定特征空间 $w_g^1, w_g^2, \dots, w_g^M$ 。运用核主成分分析法^[20]提取特征空间的核主成分特征:

$$k(w_g,y)=S\exp\left(-\frac{\|w_g-y\|^2}{2\sigma^2}\right),$$

(5)

其中参数 $\sigma=0.3V$ ， V 为原输入空间的维数。

3 局部放电信号特征提取实验

医院作为一个特殊环境，其用电系统具有高度的复杂性和敏感性。为证明所提算法的可行性，以医院为背景，在图 2 所示现场进行局部放电信号特征提取实验。

实验采用的超高频传感器是频率在 0.3 GHz 范围内的外部传感器。实验参数如表 1 所示。

根据绝缘内部放电形式和特点，利用所提方法消除了 5 种不同的放电形式与波形，如图 3 所示。由图 3 可知，所提方法可以准确消除不同局部放电信号的噪声，识别出相关异常点位，为后续特征提取奠定了良好基础。



图 2 实验现场
Fig.2 Experimental site

表 1 实验参数
Tab.1 Experimental parameters

名称	数值	名称	数值	名称	数值
视在放电电荷/pC	80	放电重复频率/Hz	460	脉冲次数	420
放电相位/(°)	150	平均放电电流/A	12	局部放电熄灭电压/V	35
单次放电能量/J	120	放电重复率/Hz	300	规定的局放值/pC	115

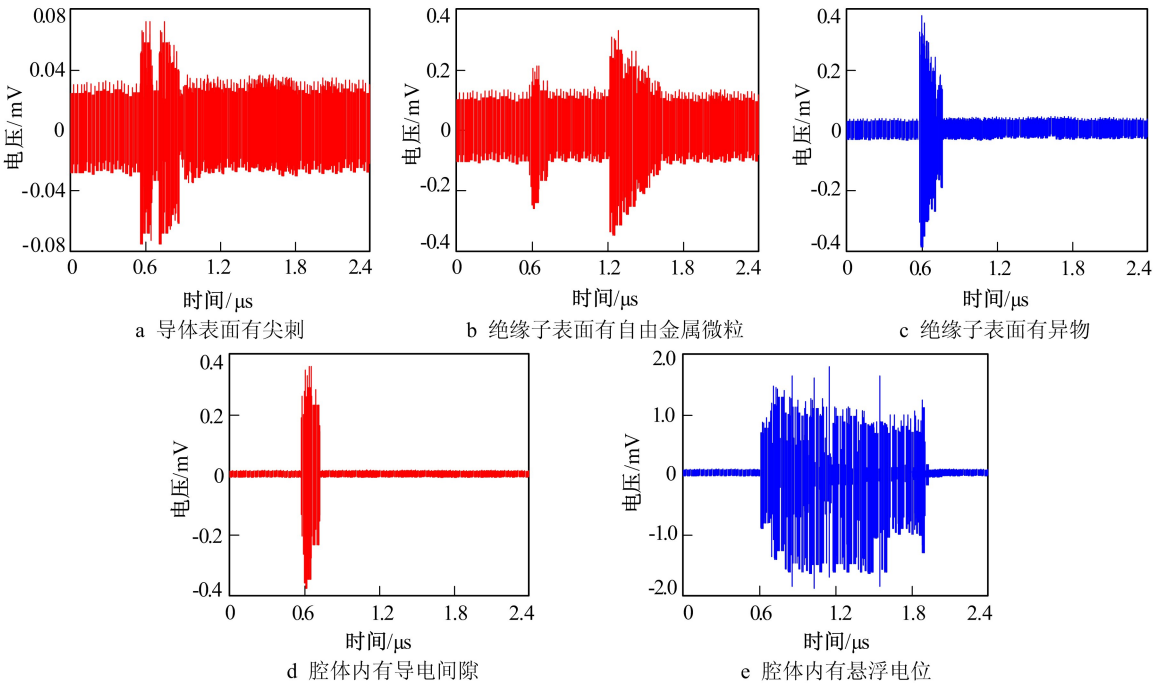


图 3 不同故障类型的局部放电信号

Fig.3 Partial discharge signals of different fault types

通过图 3 的 5 种绝缘故障形式，分别取 90 组数据求解分维数，结果如图 4 所示。

从图 4 可看出，各种故障的分维数在采样点间均有所波动，但整体呈现一定的变化趋势。以悬浮故障为例，其分维数从初始的 1.39 逐渐下降至 1.33，表明随着采样次数的增加，悬浮故障的复杂性有所降低。同样，自由金属微粒故障的分维数也从 1.36 降至 1.30。间隙故障和异物故障的分维数也经历了

类似的变化,但初始值和下降速度略有不同。这些差异反映不同故障类型在物理特性和形成机制上的区别。

将图 4 与图 3 相结合可看出,由图 3a 尖刺、图 3d 间隙和图 3e 悬浮所引起的局部放电信号的分维数可清晰区别于图 3b 自由金属微粒与图 3c 异物两类故障,能明显提取故障特征。通过对比不同故障类型的分维数变化与局部放电信号可知,悬浮和自由金属微粒故障的分维数值下降速度较快,表明这两种故障在采样过程中更容易被识别和消除。而间隙和异物故障的分维数变化相对较为平缓,且局部放电信号仅有一段时间电压幅度出现波动,其余时间的电压比较平稳。

利用所提算法对图 3 中 5 种局部放电电流特征进行提取,并验证其有效性,如图 5 所示。

从图 5 可看出,算法在 0.6 μs 内即能识别局部放电,对 a 尖刺、b 微粒、c 异物、d 导电间隙、e 悬浮电位等类型特征敏感且响应快,验证了其高效可靠的局部放电特征提取能力。

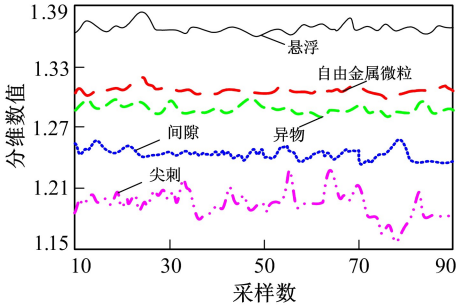


图 4 5 种故障的分维数

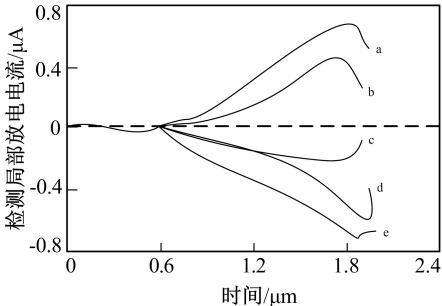


图 5 局部放电电流特征提取结果

Fig. 4 Fractal dimension of 5 types of faults

Fig. 5 Partial discharge current feature extraction results

4 结 语

笔者提出了特征模式分解的局部放电信号特征提取算法。利用小波变换在邻域内对局部放电信号消噪,采用 VMD 方法分解局部放电信号固有模态函数,获取多尺度熵,利用核主成分分析法降维特征向量,计算各频段投影序列的能量、模值和绝对均值,实现信号特征提取。并以医院为实际应用环境进行测试,结果表明,该算法可精确高效提取局部放电特征,为医院电力故障诊断提供可靠依据,助力安全隐患排查,提升电力安全与效率,保障医疗设备与患者安全。

参考文献:

[1] 赵仕策, 赵洪山, 曲岳晗, 等. 基于虚拟通道延拓的局部放电信号压缩采样方法 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3366-3378.
ZHAO S C, ZHAO H S, QU Y H, et al. Compressed Sampling of Partial Discharge Signal Based on Virtual Channel Extension [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3366-3378.
[2] YEO J, JIN H, MOR A R, et al. Localisation of Partial Discharge in Power Cables through Multi-Output Convolutional Recurrent Neural Network and Feature Extraction [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 177-188.
[3] 高宝琪, 马捍超, 毕艳冰, 等. 深度信念网络下的高压电缆局部放电信号捕捉 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2023, 28(2): 92-98.
GAO B Q, MA H C, BI Y B, et al. Partial Discharge Signal Capture of High Voltage Cable under Deep Belief Network [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2023, 28(2): 92-98.
[4] DJORDJE D. Extraction of Partial Discharge Signal in Predominant VHF Range in the Presence of Strong Noise in Power Transformer [J]. Electrical Engineering, 2023, 105(5): 3001-3018.
[5] 尚海昆, 李宇才, 林伟. 基于 EWT-MQE 的变压器局部放电特征提取 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 161-171.
SHANG H K, LI Y C, LIN W. Partial Discharge Feature Extraction of a Transformer Based on EWT-MQE [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 161-171.
[6] 江友华, 朱毅轩, 杨兴武, 等. 基于 Hankel-SVD-CEEMDAN 改进阈值的局部放电特征提取方法 [J]. 电网技术, 2022,

- 46(11): 4557-4567.
- JIANG Y H, ZHU Y X, YANG X W, et al. Hankel-SVD-CEEMDAN Improved Threshold Partial Discharge Feature Extraction Method [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4557-4567.
- [7] 杨攀烁, 贾文阁, 刘森, 等. 基于小波变换和灰度-梯度共生矩阵的局部放电特征提取及识别 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11673-11680.
- YANG P S, JIA W G, LIU S, et al. Feature Extraction and Recognition of Partial Discharge Based on Wavelet Transform and GGCM [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11673-11680.
- [8] 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(3): 373-382.
- DAI S S, REN Z, LAI Z Y, et al. Research on Partial Discharge Type Recognition Based on Multi-Feature Fusion of PRPD Map [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022, 34(3): 373-382.
- [9] 文豪, 张国治, 肖黎, 等. 基于小样本 UHF 信号的变压器局部放电平面定位技术研究 [J]. 变压器, 2022, 59(4): 54-59.
- WEN H, ZHANG G Z, XIAO L, et al. Research on Localization Technology of Transformer Partial Discharge Plane Based on Small Sample UHF Signal [J]. Transformer, 2022, 59(4): 54-59.
- [10] 万中一, 胡岳, 陈炳树, 等. 基于能量谱分析和 DBSCAN 改进算法的多源局部放电分类识别方法 [J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4335-4344.
- WAN Z Y, HU Y, CHEN B S, et al. Multi-Source Partial Discharge Classification and Recognition Method Based on Energy Spectrum Analysis and DBSCAN Improved Algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4335-4344.
- [11] XU N, GOOI H B, WANG L, et al. Loop Optimization Noise-Reduced LSTM Based Classifier for PD Detection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 392-402.
- [12] 王利福, 刘屹江泽, 王焱增. 基于 EEMD 能量矩与 ISSA-SVM 算法的 GIS 局部放电类型识别方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 204-212.
- WANG L F, LIU Y J Z, WANG Y Z. Partial Discharge Identification Method in GIS Based on EEMD Energy Moment and ISSA-SVM Algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 204-212.
- [13] 宁暑光, 何怡刚, 程彤彤, 等. 基于自适应 S 变换与截断紧致奇异值分解的局部放电源复杂染噪特征提取方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3951-3962.
- NING S G, HE Y G, CHENG T T, et al. Feature Extraction of Partial Discharge Source with Complex Noise Based on Adaptive S-Transform and Truncated Compact Singular Value Decomposition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3951-3962.
- [14] DENG Y, ZHU K, ZHAO G, et al. Efficient Partial Discharge Signal Denoising Method via Adaptive Variational Modal Decomposition for Infrared Detectors [J]. Infrared Physics and Technology, 2022, 125: 104230.
- [15] HAO Y, CHEN Y, CHEN Y, et al. Partial Discharge Detection Using the Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometer System for XLPE Cables [J]. Electrical Engineering, 2022, 104(4): 2133-2140.
- [16] 韩雪源. 基于 LSTM 算法的高压交联电缆线路振荡波局部放电检测方法 [J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 41-46, 80.
- HAN X Y. Oscillating Wave Partial Discharge Detection Method of High Voltage Cross-Linked Cable Line Based on LSTM Algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(12): 41-46, 80.
- [17] PEI S, LIU D, YE Z, et al. Optimization Scheme of Partial Discharge Location of External Insulation Based on 2-D Multiple Signal Classification Algorithm [J]. IET Science, Measurement & technology, 2023, 17(1): 11-26.
- [18] 艾嘉伟, 牛海清, 陈泽铭, 等. 基于神经网络的 D-S 多信息融合 GIL 局部放电联合识别方法 [J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4925-4932.
- AI J W, NIU H Q, CHEN Z M, et al. D-S Multi Information Fusion GIL Partial Discharge Joint Recognition Method Based on Neural Network [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4925-4932.
- [19] ZHANG J W, WANG L, CHEN J H, et al. An Optical Measurement Method for Nanosecond Impulse Signal Monitoring of Partial Discharge Based on the Fabry-Perot Interferometer Sensing System [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2022, 61(10): 102006.
- [20] 辛文成, 姚森敬, 陈浩敏, 等. 计及电磁模特高频信号的局部放电模式识别方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 108-115.
- XIN W C, YAO S J, CHEN H M, et al. Pattern Recognition of UHF Signals in Partial Discharge Considering Electromagnetic Model [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 108-115.