

DOI: 10.7652/xjtuxb201708019

采用小波包树能量矩阵奇异值分解的 局部放电模式识别

赵煦¹, 刘晓航², 孟永鹏³, 刘圣冠¹, 柴琦¹, 兀鹏越¹, 孟国栋³

(1. 西安热工研究院有限公司, 710054, 西安; 2. 中国华能集团公司, 100031, 北京;
3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了从局部放电信号电磁波大量冗余的频率信息中提取有效的局部放电特征参量,提出了采用小波包和奇异值分解相结合的能量特征提取方法。该方法从大量小波包树节点的能量信息中提取了一组能量特征参量用于局部放电类型识别,首先对4种放电类型的电磁波信号进行小波包分解,计算每个小波包节点系数的能量,接着采用奇异值分解法从小波包树所有节点的能量信息中提取奇异值较大的一组参量,利用这组参量建立识别模型,最后使用支持向量机对4种变压器典型放电类型进行识别。结果表明,小波包树能量矩阵奇异值分解可以从包含有大量无效和冗余频率信息的电磁波信号中提取能量特征参量,从而进行局部放电识别。研究内容可为局部放电类型识别提供一种有效的特征提取方法。

关键词: 局部放电识别; 能量特征提取; 小波包分解; 奇异值分解

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)08-0116-06

Partial Discharge Pattern Classification by Singular Value Decomposition of Wavelet Packet Energy Features

ZHAO Xu¹, LIU Xiaohang², MENG Yongpeng³, LIU Shengguan¹,
CHAI Qi¹, WU Pengyue¹, MENG Guodong³

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. China Huaneng Group, Beijing 100031, China; 3. State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To extract the effective partial discharge (PD) characteristic parameters from a large amount of redundant frequency information, an energy feature extraction scheme combining wavelet packet decomposition (WPD) with singular value decomposition (SVD) is proposed. A set of energy features is selected from vast energy information to represent the energy of each WPD node, by which PD pattern can be classified. The EM signals from four PD patterns are decomposed by WPD and the energy for each WPD node is calculated, then SVD is introduced to select the energy features among the whole WPD tree, and classification model based on these features is used to identify PD pattern. It is shown that SVD of the wavelet packet energy features selected from the information with full of invalid and redundant signals is an effective way to classify partial discharge patterns.

Keywords: partial discharge classification; energy feature extraction; wavelet packet decomposition; singular value decomposition

绝缘材料在电力设备中普遍存在,是保证电力设备尤其是高压电力设备正常运行的重要组成部分,但是由于长期处于电、机械振动、热以及环境等因素作用下,绝缘材料发生着缓慢的老化。在电力设备运行过程中,由于绝缘材料本身老化、加工缺陷、安装失误等因素,均会在绝缘材料内部产生局部放电。局部放电会加速绝缘材料的老化,有些极端情况会迅速导致绝缘材料击穿,引发电力设备故障,带来不同程度的经济损失。由于局部放电对高压电力设备的危害,有必要进行局部放电测量、检测和定位以确定电力设备的绝缘状态。传统的局部放电图谱分析方法能够表征局部放电的统计特征,已经被广泛应用于局部放电类型识别中^[1-3],包括特高频(UHF)局部放电类型识别^[4-5]。

由于局部放电信号电磁波包含了丰富的放电频率特征信息,因此单次波形分析是一种有别于传统局部放电识别技术的分析方法,其主要是对局部放电单次波形的时域特征、频域特征和时频域特征的分析、分形分析、小包和小波包分解等。文献[6]针对传统局部放电识别方法无法解决大型发电机中多源局部放电识别问题,提出了基于局部放电脉冲电流形状的局部放电识别方法。文献[7]根据局部放电脉冲形状及其放电相位,采用模糊逻辑识别局部放电类型。文献[8]根据 GIS 中高压导体上的金属尖刺、高压导体及接地体之间的接触不良、盆式绝缘子上金属颗粒等 7 种常见波形特征,建立了一个基于时域检波波形的 GIS 故障局部放电模式识别库,为 GIS 现场检测局部放电提供了参考依据。文献[9-10]提出了 UHF 局部放电信号的分形分析,采用小波提取技术对放电信号进行分形分析,计算各频段 UHF 局部放电信号的分维数,用分维数量化分析超宽频带局部放电的频谱特性,得到了各频段的放电信号的分形特征,从而发现了 GIS 中不同金属表面缺陷的超宽频带放电分形特征的明显差异,为进一步研究超宽频带放电信号的变化规律奠定了基础。文献[11-12]提出了采用小波分解、尺度变换等方法提取了局部放电电磁波信号的特征,以用于局部放电类型识别。

由于不同放电类型的脉冲电流波形差别不大,其激发的电磁波信号虽然包含大量的频率信息,其中包含了许多存在于不同放电类型中相似的频率信息,而这些信息无法用于局部放电类型识别。由于小波分解在高频段的频率分辨率较差,在低频段的时间分辨率较差,无法全面反映局部放电电磁波信

号的全面特征。因此,本文提出了小波包树能量矩阵奇异值分解的局部放电电磁波信号能量特征提取方法,对局部放电电磁波信号进行小波包分解,计算小波包分解树中所有节点系数的能量,得到小波包全树的能量向量。将多个相同放电类型的电磁波信号能量向量组合成能量矩阵,用奇异值分解(SVD)选取奇异值最大的一组能量特征参量,采用支持向量机进行局部放电模式识别。

1 小波包树能量矩阵奇异值分解

1.1 小波包和奇异值分解

小波分解和小波包分解是分析暂态信号时频特征的有效工具,而局部放电电磁波信号是典型的暂态信号。为了寻找局部放电电磁波信号中包含的特征信息,本文引入的小波包分解能够对信号在低频和高频段同时进行,而小波分解只对低频部分进行,丢失了高频部分的细节信息。

奇异值分解是一种有效的代数特征提取方法,已经在图像数据压缩、信号处理和模式分析中得到了广泛应用。任何一个实对称方阵都可以经过正交变换转化为对角阵,对于任意实矩阵都可以利用奇异值分解将其转化为对角阵。

1.2 能量矩阵

小波包分解树中每个节点记录了不同的小波系数,这些小波系数能够反映信号在某个频率段的时域特征,通过式(1)求解每个节点的小波系数的能量(无量纲),可以得到小波包分解树每个节点的能量,构成节点能量

$$e_x = \frac{1}{N} \mathbf{x}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 表示每个节点的小波系数; N 表示小波系数的长度。小波包分解所有节点的能量构成该信号的节点能量向量。如对于一组电磁波信号进行小波分解得到的能量矩阵如下

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & e_{1,2} & e_{1,3} & \cdots & e_{1,M} \\ e_{2,1} & e_{2,2} & e_{2,3} & \cdots & e_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{n,1} & e_{n,2} & e_{n,3} & \cdots & e_{n,M} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 表示每个信号分解为 n 个节点; M 表示信号的个数; $e_{i,j}$ 表示第 j 个信号经过小波包分解后第 i 个节点的能量。

2 实验系统

为了获得实验数据并验证方法的有效性,本文

建立了变压器典型缺陷模型,包括油楔、纸板中空气隙、悬浮放电和针尖放电4种模型,实验中分别记录了4种典型缺陷发生局部放电时激发的超高频信号。实验系统如图1所示,采集电磁波信号的传感器是微带天线,其带宽为300 MHz~3 GHz,示波器采用LeCroy 104MXs-B,最大采样率为 10^{10} /s,带宽为1 GHz。4种放电类型示意图见图2,其中气隙放电的局部放电电磁波信号如图3所示。表1是4种放电类型激发的电磁波信号的样本数以及测量电压。

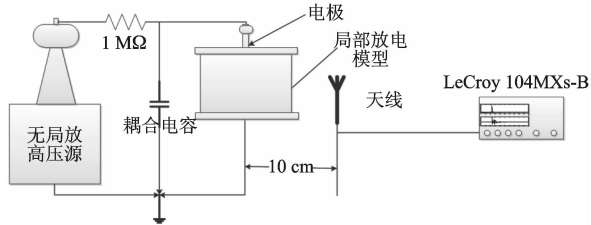
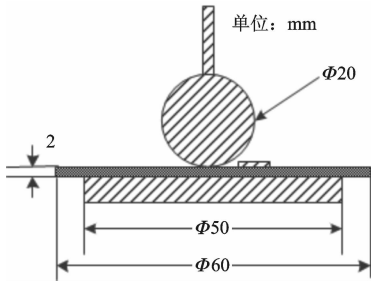
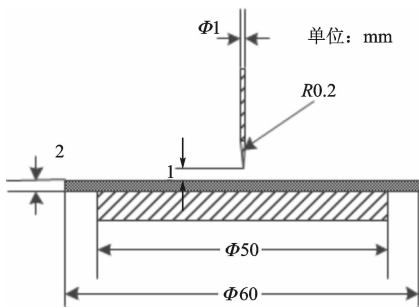


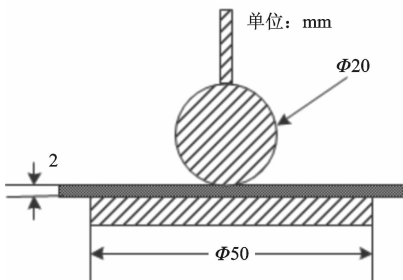
图1 实验系统模型



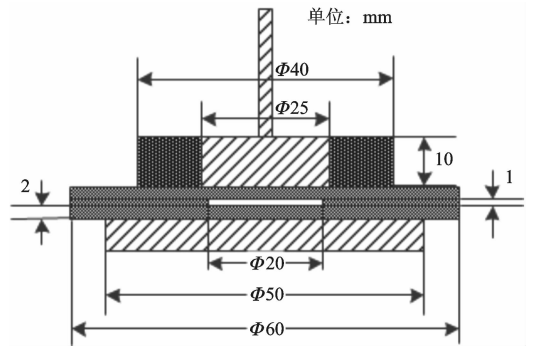
(a) 悬浮放电



(b) 电晕放电



(c) 油楔放电



(d) 气隙放电

图2 4种放电类型示意图

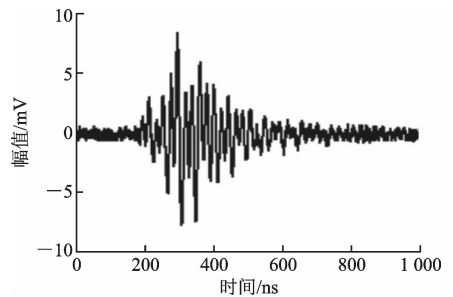


图3 气隙放电的局部放电电磁波信号

表1 4种放电类型实验电压和采集样本数

放电类型	电压/kV	样本数
悬浮放电	20	229
电晕放电	27	301
油楔放电	22	599
气隙放电	7.5	428

3 局部放电信号能量特征提取

对变压器典型缺陷局部放电实验中电磁波信号的分析可知,如果分解层数不足,无法得到有效的区分参量。如对不同放电类型的电磁波信号进行5层‘db8’小波分解,结果见图4,可以看出其能量向量基本除了幅值不同以外(实验中能量为模拟数值,无单位),在小波树中节点的分布特征很近似,无法对放电类型进行有效区分。

对信号进行8层小波包分解(见图5)可以看出,在第8层中不同放电类型的能量向量不同,可见如果小波包分解层数够多,小波包树节点的能量向量可以用来作为区分不同放电类型的特征参量。

如果分解层数很多,小波包分解树的节点必然增多,以8层小波包分解为例,树节点达到了511个。为了能从这些能量向量中提取有效的特征参量,本文采用奇异值分解进行能量向量特征的提取。

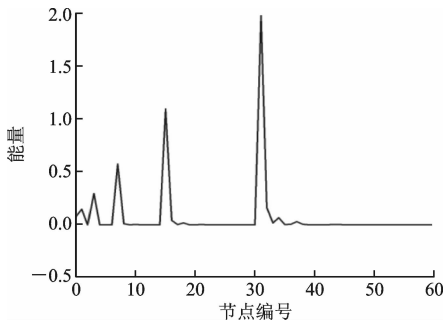


图 4 悬浮放电的电磁波信号 5 层小波包分解能量

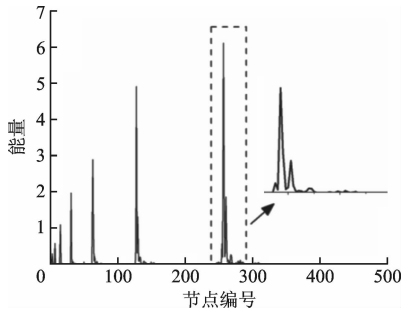


图 5 悬浮放电的超高频信号 8 层小波包分解能量

具体特征提取步骤如下:①对不同局部放电类型的电磁波信号样本进行 8 层小波分解;②求放电信号小波分解树中每个节点的能量,构成该信号的能量向量;③将所有相同放电类型的超高频信号的能量向量组合成能量矩阵;④计算不同放电类型超高频信号能量矩阵的奇异值;⑤根据奇异值大小得到能量的特征向量;⑥从能量特征向量里提取系数较大的节点能量作为特征参量。特征提取原则如下:将大于最大特征向量系数 5% 的量作为能量特征参量;由于在小波分解中,两个子节点构成一个母节点,为了消除特征量的冗余信息,如果一个母节点是特征参量,而且它的两个子节点也是特征参量,那么只保留母节点作为能量特征参量。

下面详细叙述特征提取步骤 4~步骤 6。

根据奇异值分解原理,如果奇异值越大,说明新的向量在新的空间中变化越大,而新的向量中系数越大的参量,说明其在新的空间中的变化越大。本文对 4 种不同放电类型电磁波信号的能量向量矩阵进行奇异值分解,得到了不同放电类型能量向量矩阵的奇异值。

4 种放电类型能量向量矩阵的奇异值(见表 2)中都有 1 至 2 个主要的奇异值,本文用奇异值之间的比值表示奇异值之间的差别

$$\Delta\delta_{12} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1}; \Delta\delta_{23} = \frac{\delta_2 - \delta_3}{\delta_2}; \Delta\delta_{34} = \frac{\delta_3 - \delta_4}{\delta_3} \quad (3)$$

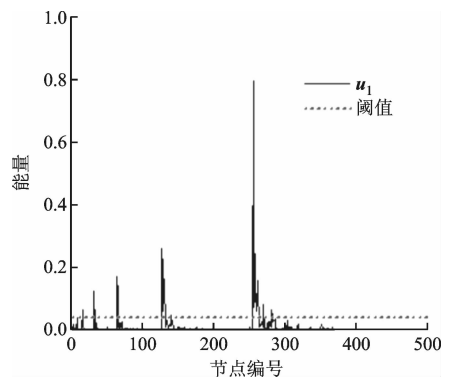
表 2 4 种放电类型的奇异值

放电类型	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
悬浮放电	137	36	10	5
电源放电	0.007 7	0.005 6	9.2×10^{-4}	5.6×10^{-4}
油楔放电	0.006 0	0.001 7	4.6×10^{-4}	3.3×10^{-4}
气隙放电	0.001 6	4.4×10^{-4}	3.8×10^{-4}	1.7×10^{-4}

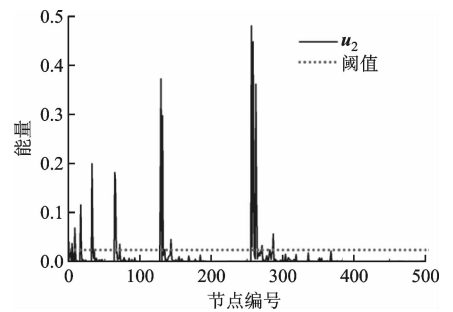
4 种放电类型的奇异值的比值 $\Delta\delta_{12}$ 、 $\Delta\delta_{23}$ 、 $\Delta\delta_{34}$ 如表 3 所示,如果 $\Delta\delta_{12}$ 大于 0.7,即可认为有一组主要的特征向量。因此,从表 3 可以看出,经过奇异值分解,除了电晕放电以外,其余新的能量主要由一组能量特征向量表示,即 u_1 ;电晕放电的能量由两组能量特征向量表示,即 u_1 和 u_2 ,见图 6。

表 3 4 种放电类型奇异值的比值关系

放电类型	$\Delta\delta_{12}$	$\Delta\delta_{23}$	$\Delta\delta_{34}$
悬浮放电	0.74	0.72	0.5
针板放电	0.27	0.84	0.39
油楔放电	0.72	0.73	0.28
气隙放电	0.73	0.14	0.55



(a) u_1



(b) u_2

图 6 奇异值分解提取电磁波信号能量特征参量示意图

对得到的能量特征向量经过阈值选取(步骤 6),最终得到了 7 个能量特征参量,分别是(8,31)、(8,10)、(8,8)、(7,7)、(7,13)、(5,3)、(3,0),如图 7 所示,括号中第 1 个值表示小波包分解层数,第 2 个

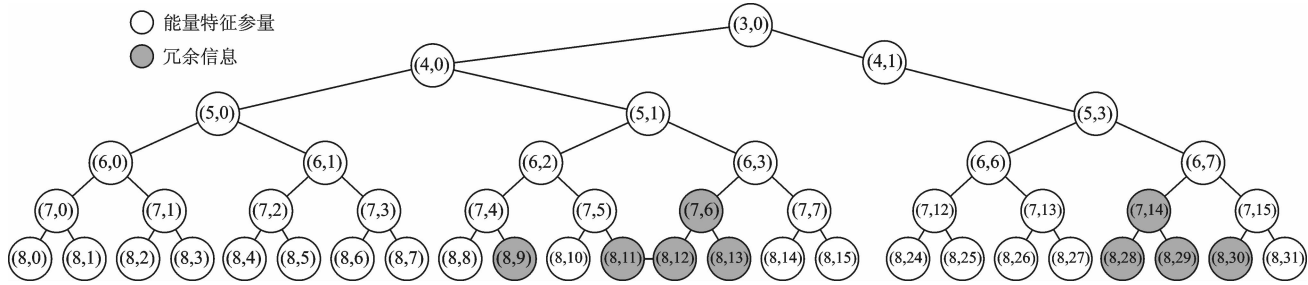


图7 能量特征参量提取图

值表示在该层中的位置。

4 能量特征参量有效性检验

支持向量机是一种十分成熟的分类技术,且在样本量较少时分类效果优于其他分类算法,故本节采用支持向量机分类算法,利用上一节得到的能量特征向量,对测量数据进行分类,以证明能量特征向量的有效性。

由于不同类型放电能量不同,激发的超高频信号能量也不相同,其能量特征向量数量级不同。为了消除能量特征向量数量级间的影响,在进行数据的训练和测试之前,先对数据进行归一化处理,具体处理方法如下

$$e = (e_x - \overline{e_x}) / \sigma \quad (4)$$

式中: e_x 表示能量特征向量; $\overline{e_x}$ 表示能量特征向量的平均值; σ 表示能量特征向量的标准差。

使用MATLAB中的LIBSVM工具包训练支持向量机的识别模型,基函数为径向基函数, γ 为 $1/7$,其中7表示能量特征参量个数,惩罚参数 C 为1。首先将实验数据分为训练样本和测试样本,训练样本用于训练模型,测试样本用于测试模型的分类准确度,训练按照折交叉验证模式进行。

实验样本由4种放电类型的1557个有效样本组成(见表1),取20%的样本为测试样本,其余为训练样本,识别结果见表4,平均识别精度达到了96%以上,高于文献[12]的识别率(91.3%),可见本文提出的能量特征提取方法具有较好的识别效果。

表4 支持向量机测试结果

放电类别	分类结果		准确率 /%
	分类正确数	总测试数	
悬浮放电	49	50	98.0
电晕放电	58	60	96.7
油楔放电	118	120	98.3
气隙放电	80	80	100

5 小结与展望

本文利用小波包分解和奇异值分解方法,分析了局部放电电磁波信号的能量特征,从大量无效和冗余的能量信息中提取了有效的能量特征参量,这些能量特征参量代表了变压器典型局部放电电磁波信号不同频率段的能量特征参量,利用这组能量特征参量有效地区分了变压器不同放电类型激发的电磁波信号,且识别精度达到了96%以上。

局部放电电磁波信号的特征不但取决于放电类型,还与传播路径有关。今后需要把放电类型和传递路径结合起来进行特征参量提取,争取实现对经过不同传递路径的不同放电类型的分类,如传感器采集的超高频信号是经过绕组传播过来的油隙放电信号,或是经过铁心和绕组传播过来的纸板空气隙放电信号。

参考文献:

- [1] OKAMOTO T, TANAKA T. Novel partial discharge measurement computer-aided measurement systems [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(6): 1015-1019.
- [2] GULSKI E, KREUGER F H. Computer-aided recognition of discharge sources [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(1): 82-92.
- [3] STONE G C. Partial discharge and electrical equipment insulation condition assessment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2005, 12(5): 891-904.
- [4] JUDD M D, YANG L, HUNTER I B B. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors: part 1 Sensors and signal interpretation [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2): 5-14.
- [5] JUDD M D, LI Y, HUNTER I B B. Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors:

- part 2 Field experience [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(3): 5-13.
- [6] CAMPBELL S R, STONE G C, SEDDING H G. Application of pulse width analysis to partial discharge detection [C]// Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992: 345-348.
- [7] YU Q, CAVALLINI A, MONTANARI G C. Frequency and time-domain analysis of partial discharge measurements in PWM inverter-fed induction motors [C]// Power Electronics and Motion Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 661-663.
- [8] 李信, 李成榕, 丁立健, 等. 基于超高频信号检测 GIS 局放模式识别 [J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 26-30.
LI Xin, LI Chengrong, DING Lijian, et al. Identification of PD patterns in gas insulated switchgear (GIS) based on UHF signals [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(11): 26-30.
- [9] 成永红, 谢小军, 蒋雁, 等. 基于小波提取的超宽带带局部放电信号分形分析 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(6): 551-554.
CHENG Yonghong, XIE Xiaojun, JIANG Yan. Study on the fractal characteristics of ultra-wideband partial discharge signals based on wavelet analysis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(6): 551-554.
- [10] 成永红, 谢小军, 陈玉, 等. 气体绝缘系统中典型缺陷的超宽带带放电信号的分形分析 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 99-102.
CHEGN Yonghong, XIE Xiaojun, CHEN Yu, et al. Study on the fractal characteristics of ultra-wideband partial discharge in gas-insulated system (GIS) with typical defects [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 99-102.
- [11] 孙才新, 李新, 李俭, 等. 小波与分形理论的互补性及其在局部放电模式识别中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 73-76.
SUN Caixin, LI Xin, LI Jian, et al. Research on complementarity between wavelet and fractal theory and relevant application in PD pattern recognition [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 73-76.
- [12] 唐炬, 李伟, 欧阳有鹏. 采用小波变换奇异值分解方法的局部放电模式识别 [J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1686-1691.
TANG Ju, LI Wei, OUYANG Youpeng. Partial discharge pattern recognition using discrete wavelet transform and singular value decomposition [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1686-1691.

[本刊相关文献链接]

- 崔彦捷, 彭平, 曹沛, 等. 针板电极下局部放电对油浸绝缘纸板表面的影响. 2017, 51(4): 37-44. [doi: 10. 7652/xjtuxb201704006]
- 李威, 鲁华祥, 陈天翔, 等. 采用荧光光纤检测局部放电的自适应阈值方法. 2017, 51(4): 59-66. [doi: 10. 7652/xjtuxb201704009]
- 邵先军, 何文林, 刘石, 等. 电力设备局部放电特高频电磁波数值计算技术研究. 2016, 50(12): 24-31. [doi: 10. 7652/xjtuxb201612005]
- 张亮, 车斌, 韩旭涛, 等. 负极性振荡雷电冲击电压下 SF₆ 尖板模型局部放电特性. 2016, 50(4): 108-116. [doi: 10. 7652/xjtuxb201604017]
- 钟理鹏, 汲胜昌, 刘凯, 等. 低微水的体积分数对 SF₆ 局部放电及分解特性的影响. 2016, 50(3): 112-119. [doi: 10. 7652/xjtuxb201603018]
- 赵煦, 孟永鹏, 成永红, 等. 变压器绕组对局部放电电磁波传播特性的影响. 2015, 49(4): 6-11. [doi: 10. 7652/xjtuxb201504002]
- 钟理鹏, 汲胜昌, 李金字, 等. 吸附剂对 SF₆ 典型分解产物含量及变化规律的影响. 2015, 49(2): 86-92. [doi: 10. 7652/xjtuxb201502015]
- 任重, 董明, 任明, 等. 冲击电压下 SF₆ 气体在极不均匀场中局部放电的时频特征. 2013, 47(8): 115-120. [doi: 10. 7652/xjtuxb201308020]
- 柯春俊, 潘成, 吴锴, 等. 人工气隙面积对局部放电特性的影响. 2013, 47(6): 103-108. [doi: 10. 7652/xjtuxb201306018]
- 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. 2011, 45(12): 82-86. [doi: 10. 7652/xjtuxb201112015]
- 李继胜, 李军浩, 罗勇芬, 等. 用于电力变压器局部放电定位的超声波相控阵传感器的研制. 2011, 45(4): 93-99. [doi: 10. 7652/xjtuxb201104017]

(编辑 杜秀杰)