

油纸绝缘中局部放电时间序列的混沌特性及其模式识别

罗勇芬, 黄平, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了对局部放电进行识别, 建立并使用电脉冲法测量了油纸绝缘中的5种典型缺陷模型, 利用混沌方法研究了局部放电的时间序列信号. 结果表明, 局部放电具有明显的混沌特征, 是一个混沌过程. 根据局部放电的混沌时间序列和由其得到的混沌吸引子能定性地分析和识别局部放电类型. 选取相空间重构参数和重构后的混沌特征量对局部放电的混沌特性进行了定量表征. 利用径向基(RBF)神经网络对相间局部放电(PRPD)和局部放电的混沌分析(CAPD)方法分别作了模式识别的效果验证和比较, 表明两者的识别结果良好且各有优势. 综合选取PRPD模式的统计算子与CAPD模式的混沌特征量作为神经网络的输入向量, 平均正判率达到95%以上, 明显提高了局部放电类型的识别效果.

关键词: 油纸绝缘; 局部放电; 时间序列; 混沌; 模式识别

中图分类号: TM835.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)12-0055-06

Chaotic Characteristics of Partial Discharges Time Series in Oil-Paper Insulation with Applications to Pattern Recognition

LUO Yongfen, HUANG Ping, LI Yanming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To recognize partial discharges(PD), five kinds of typical defects in oil-paper insulation are constructed and measured with current pulse method, and chaos method is used to researched the time series of PD signals. The results reveal that the PD is of obviously chaotic characteristic, and the PD process is chaotic one. The PD patterns can be qualitatively analyzed and recognized by the chaotic time series of PD and their chaotic attractors. Phase space reconstruction parameters and post-reconstruction chaotic characteristic quantities can be selected to quantify the PD chaotic characteristics. The verification and comparison between pattern recognition effects of PRPD and CAPD are performed respectively by adopting the neural network of radial basis function (RBF), it is found that both schemes possess good own advantages. The statistical operators in PRPD mode and chaotic characteristic quantities in CAPD mode are comprehensively selected as the input vectors of neural network, and the average recognition rate can reach 95% to greatly improve the recognition on PD.

Keywords: oil-paper insulation; partial discharge; time series; chaos; pattern recognition

局部放电是电力设备绝缘劣化的重要原因, 对其的监测和识别技术是目前评估电力设备绝缘老化情况及预测绝缘故障的一种重要手段.

研究者在研究局部放电的统计特性方面做了大量工作, 并提出了多种分析方法. 其中, 相间局部放电(PRPD)法广泛地用于识别放电源的类型^[1].

它是在相位域空间进行的,并且采用神经网络、分形理论等技术来提高局部放电的识别和分类准确性。然而,这些方法提取的参数(如陡峭度等)并不是物理参数,而是一种统计规律^[2],导致解释困难。

局部放电的脉冲时间序列隐含着背后的物理特性,对它进行研究是识别局部放电类型和特征的另一个有效渠道^[3]。随着直流输电应用增多,局部放电的时间序列分析显得尤为迫切,因为这时许多直流设备已没有相位可供参考^[4]。在无接触的局部放电测量时,无法获得施加电压及其变化,这时放电的时间序列分析只能使用其他的参数。

局部放电时间序列的混沌特征分析是近年来研究的一个热点问题。文献^[5]从非线性动力学的角度对电缆的局部放电进行了分析,研究的放电参数主要是连续放电间的时间间隔,对由其构成的时间序列提取了最大 Lyapunov 指数和关联积分两个混沌特征。文献^[6]以交联聚乙烯(XLPE)电缆等电力设备中局部放电信号的时间序列为研究对象,研究结果表明,局部放电现象为确定性混沌过程,可对局部放电的混沌特征进行定量的表征,并且提出了局部放电的混沌分析(CAPD)概念^[7]。但是,CAPD 这个概念本身没有包含时间序列这层内涵,更重要的是,对各种局部放电类型的时间序列混沌特征的智能识别未见报道。

综上所述,对于局部放电时间序列混沌特征及智能识别的研究尚处起步阶段。本文对油纸绝缘的典型局部放电模型的时序信号进行了混沌特性的分析,并将混沌特征量应用于局部放电模式的智能识别。

1 局部放电模型的建立

油纸绝缘中放电部位大多在某些油隙、油楔、空气隙、有悬浮电位的金属体、导体尖角和固体表面上,因而这里归纳为气隙放电、悬浮放电、油纸放电、油楔放电和沿面放电等5种典型的放电形式,建立的实验模型如图1所示。

2 局部放电时间序列的混沌特性及特征提取

这里研究局部放电的放电脉冲幅度 p_n 、外加电压差 v_n 和相邻两次放电之间的时间间隔 t_n 3 个时间序列。在对其混沌特性分析前,对采集的局部放电信号进行了压缩和归一化预处理^[8]。

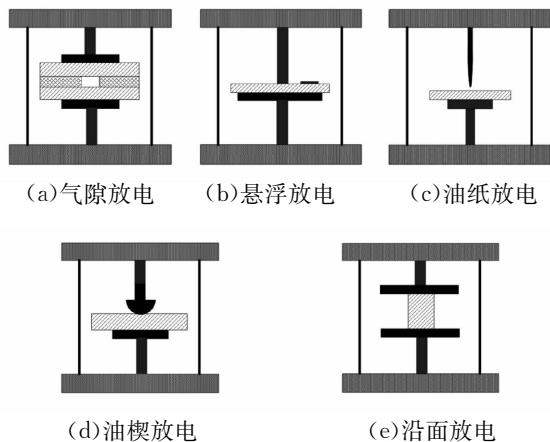


图1 5种典型的油浸式变压器局部放电模型

2.1 相空间重构和重构参数的选取

时间序列是许多物理因子相互作用的综合反映,它蕴藏着参与运动的全部变量的痕迹。把时间序列扩展到高维相空间,即时间序列的相空间重构^[9],才能充分显露时间序列中的信息。

相空间重构的一个目的在于在高维相空间中恢复混沌吸引子,后者是混沌系统的特征之一。混沌系统产生的轨迹经过一定时期的变化后,最终会做一种有规律的运动,产生一种规则的、有形的轨迹(混沌吸引子)。由于混沌系统的策动因素是相互影响的,因而在时间上先后产生的数据点也是相关的。

对测得的一组时间序列 $x_n (n=1, 2, \dots, N)$ 选取时间延迟 τ , 在 d 维相空间中重构可得到新的 d 维时间序列 $y_k (k=1, 2, \dots, (N-(d-1)\tau))$, 并可得到 d 维相空间。

利用延迟坐标法作相空间重构,最佳时间延迟 τ 和最小嵌入维 d 的选取非常重要和困难。依据独立的观点分别对 τ 和 d 的进行选取,本文采用互信息量法和伪邻近法(FNN)来分别确定 τ 和 d ^[10]。互信息量 I 的表达式为

$$I(\tau) = H(x_n) + H(y_n) - H(x_n, y_n) \quad (1)$$

式中:一维时间序列 x_n 的熵 $H(x_n) = -\sum_{i=1}^N P(x(i)) \ln P(x(i))$; $H(y_n)$ 为 x_n 经过 τ 延迟后得到的新一维时间序列 y_n 的熵; $H(x_n, y_n)$ 为 x_n 和 y_n 的联合熵。

由式(1)可得 I 与 τ 的关系,当 I 第1次达到极小值时所对应的 τ 即为最佳时间延迟。

对于一维时间序列 x_n , 在 d 维相空间中重构得到的向量应为 $\{y_k(d)\}$, 定义

$$a(k, d) = \frac{\|y_k(d+1) - y_{n(k,d)}(d+1)\|}{\|y_k(d) - y_{n(k,d)}(d)\|} \quad (2)$$

式中: $1 \leq n(k, d) \leq N - d\tau$, 且 $n(k, d)$ 取整数; $y_{n(k, d)}(d)$ 是 $y_k(d)$ 在 d 维相空间的近邻; $\|\cdot\|$ 是欧氏距离的测度.

$a(k, d)$ 表明了 d 维相空间相邻两个向量在 $d + 1$ 维相空间的分离程度, 其均值为 $E(d)$. 为考察 $a(k, d)$ 从 d 维到 $d + 1$ 维相空间的变化, 定义

$$E_1(d) = E(d + 1)/E(d)$$

(3)

当 d 大于某值 d_0 时, $E_1(d)$ 将停止变化, 取此时的 $d_0 + 1$ 作为最佳嵌入维数. 实际考虑到噪声的影响, 选择 $E_1(d)$ 首次升至 0.90 时的 $d_0 + 1$ 作为最佳嵌入维数.

2.2 局部放电的多维混沌吸引子

对局部放电参数 p_n 、 t_n 和 v_n 一维时间序列在高维相空间重构并获得各种混沌吸引子, 对后者做直观、简便的研究可定性分析局部放电. 根据研究的侧重点不同, 相应获得不同的吸引子, 可从不同的角度定性分析获得不同放电的特征. 这里从相邻放电间关联性和放电参数间关系两方面进行分析.

(1) 相邻放电间关联性. 以放电参数 p_n 、 t_n 和 v_n 的时间序列, 在相空间中构造各自的单变量二维和三维吸引子, 通过这些吸引子展现各种放电模型相邻放电间的关联性, 也展现各种放电模型的放电特性.

图 2 为 5 种典型油纸绝缘放电类型的 v_n 二维吸引子. 由图可知, 各放电的吸引子形状规则, 特点明显, 如悬浮放电 (图 2b) 的 v_n 二维吸引子呈“蝴蝶”状, 主要由两个几乎对称的三角形组成, 中心点为 (0.5, 0.5).

(2) 放电参数间关系. 研究 p_n 、 v_n 和 t_n 之间存在的关联性是获得连续放电脉冲之间放电特性信息的另一种有效手段. 由这 3 个时间序列两两间构造的 3 种二维吸引子、三者间构造的三维吸引子, 可直观地展现局部放电参数两两之间、三者之间存在的内在联系和相互影响.

图 3 为各放电类型的 t_n - v_n 二维吸引子. 各放电类型的 t_n - v_n 二维吸引子形状有明显差别, 如悬浮放电 (图 3b) 的吸引子由两个几乎关于直线对称的三角形组成, 其中两个三角形由许多不同大小的三角形重叠组合而成.

2.3 混沌特征量的提取

对混沌吸引子的分析靠视觉上对形状差别的研判属于定性分析, 且带有主观随意性. 对这个问题的解决途径, 一种是对图形进行智能识别, 另一种是对混沌特征量进行提取, 本文采用后者. 本文方法在选

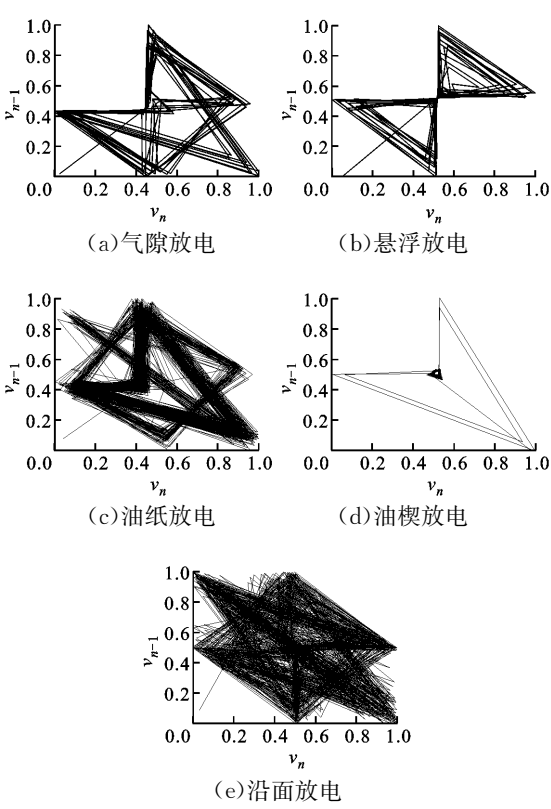


图 2 5 种典型放电类型的 v_n 二维吸引子

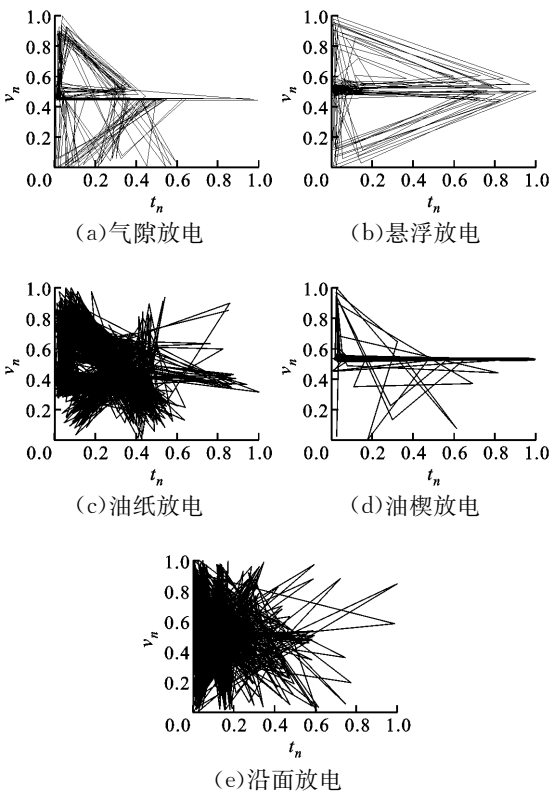


图 3 5 种典型放电类型的 t_n - v_n 二维吸引子

取 τ 和 d 两个相空间重构参数后, 对混沌时间序列在高维相空间中重构, 并对形状差异很大的高维混沌吸引子分别求取最大 Lyapunov 指数、关联维和

Kolmogorov 熵等混沌特征量,如图 2 和图 3 所示.

由表 1 可知,各种放电类型的 p_n 、 t_n 和 v_n 混沌时间序列对应的最大 Lyapunov 指数均大于 0,而 Kolmogorov 熵也均大于 0 且小于 ∞ . 根据混沌判据可以判断油纸绝缘中的局部放电现象并非是完全随机的,具有混沌特征,这说明油纸绝缘中局部放电是

一个混沌过程.

对表 1 中选取的相空间重构参数和所提取得到的各种混沌特征量建立图形,可在一定程度上对放电类型进行人工识别,但因数据量较大,给人工识别造成困难. 所以,将它们构成油纸绝缘局部放电的特征指纹,用神经网络技术来实现模式识别.

表 1 由局部放电相空间重构参数和混沌特征量值构成的特征指纹

放电类型	序列	相空间重构参数及混沌特征量								
		τ	d	λ_1	D_c	D_{b2}	D_{b3}	D_{i2}	D_{i3}	K_{kol}
气隙放电	p_n	4	8	2.243 3	2.689 6	1.622 4	1.972 1	1.983 6	2.719 0	0.284 1
	t_n	8	10	2.167 7	2.626 8	1.026 6	1.125 4	1.675 8	2.443 1	0.250 7
	v_n	7	15	2.024 7	2.444 5	1.343 4	1.287 1	1.339 1	1.659 6	0.223 5
悬浮放电	p_n	2	10	1.974 2	2.686 5	1.621 7	2.060 4	1.930 2	2.926 5	0.301 1
	t_n	4	10	1.235 6	2.504 6	1.162 5	1.287 3	1.741 5	2.195 3	0.271 5
	v_n	9	13	1.784 8	1.936 8	1.382 1	1.303 5	1.370 8	1.777 5	0.184 6
油纸放电	p_n	2	11	1.993 5	2.240 8	1.550 0	1.542 0	1.785 9	2.283 1	0.222 3
	t_n	6	13	1.872 5	2.711 7	1.626 6	1.963 1	1.685 8	2.172 0	0.347 2
	v_n	8	10	1.841 6	2.456 8	1.766 8	2.002 9	1.399 3	2.142 5	0.288 3
油楔放电	p_n	5	10	1.531 0	2.479 1	1.749 3	2.160 9	1.925 9	2.578 8	0.201 2
	t_n	3	16	1.401 6	2.624 1	1.095 1	1.235 2	1.725 9	2.286 6	0.234 6
	v_n	3	11	1.438 2	2.565 0	1.633 9	1.525 5	1.698 8	1.912 5	0.215 8
沿面放电	p_n	2	9	3.015 8	2.638 6	1.596 2	2.057 9	1.968 0	2.880 6	0.284 5
	t_n	5	11	2.960 1	1.949 8	1.493 2	1.869 9	1.687 6	2.109 3	0.175 1
	v_n	6	14	2.767 3	2.706 2	1.810 9	2.161 7	1.408 9	1.801 9	0.253 1

注: τ 表示最佳时间延迟; d 表示最佳嵌入维; λ_1 表示最大 Lyapunov 指数; D_c 表示关联维; D_{b2} 表示二次盒维数; D_{b3} 表示三次盒维数; D_{i2} 表示二次信息维数; D_{i3} 表示三次信息维数; K_{kol} 表示 Kolmogorov 熵.

3 混沌特征应用于局部放电的模式识别

本文使用径向基(RBF)神经网络来识别 5 种典型的局部放电类型. RBF 神经网络是一种 3 层前向网络^[11],传递函数选用 Gaussian 函数. 识别结果见表 2,总样本为 60,每种放电类型的训练样本均为 20.

3.1 采用相空间重构参数和混沌特征量的局部放电模式识别

选取 p_n 、 v_n 和 t_n 混沌时间序列各自的混沌特征量作为神经网络的输入向量,因此输入层神经元个数定为 27.

在 CAPD 方式下对典型局部放电的识别结果

良好,平均正判率达到 85%,其中油楔和油纸放电的识别效果最好,分别达到 92.5%和 87.5%,识别较差的为沿面放电,只有 77.5%.

表 2 各种输入向量下的局部放电模式识别结果

放电类型	CAPD 正判	PRPD 正判	CAPD & PRPD
	率/%	率/%	正判率/%
气隙放电	85.0	80.0	90.0
悬浮放电	82.5	85.0	92.5
油纸放电	87.5	90.0	95.0
油楔放电	92.5	85.0	97.5
沿面放电	77.5	87.5	95.0

3.2 采用 PRPD 的局部放电模式识别

为了对比基于相空间重构参数和 CAPD 模式

的识别结果,采用常用的 PRPD 方法分析了实验数据,并进行模式识别,提取了局部放电的 $H_{q_{\max}}(\varphi)$ 、 $H_{q_1}(\varphi)$ 、 $H_n(\varphi)$ 、 $H(q)$ 和 $H(p)$ 这 5 种重要的二维

放电谱图的统计特征量,所得到的 29 个统计算子如表 3 所示,将它们作为 RBF 神经网络的输入层神经元.

表 3 PRPD 的 29 个统计算子

放电谱图	偏斜度		突出度		局部峰个数		电不对称度	相位不对称度	互相关因子
	+	-	+	-	+	-			
$H_{q_{\max}}(\varphi)$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓
$H_{q_1}(\varphi)$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$H_n(\varphi)$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓
$H(q)$	◆	◆	◆	◆	×	×	×	×	×
$H(p)$	◆	◆	◆	◆	×	×	×	×	×

注:“✓”、“×”和“◆”分别表示该分布谱图具有、不具有和可选对应的统计参数.

在局部放电 PRPD 模式下,典型局部放电的模式识别正确率均在 80% 以上,识别效果良好,其中以油纸放电的识别率最高,达到了 90%.

比较基于相空间重构参数和混沌特征量方法、基于 PRPD 方法这两种方法的局部放电模式识别结果可知,两者总的正判率接近,但两种方法对不同放电类型的正判率互有差别,可以互补.

3.3 采用 PRPD 和混沌特征量组合的局部放电模式识别

综合选取 PRPD 和混沌特征量模式的特征量作为 RBF 神经网络的输入向量,对局部放电模式进行识别. 对于两者特征量的选取,本文对几种组合进行了比较研究后,选取了其中效果最佳的一种:在 PRPD 模式中选取偏斜度、突出度和局部峰个数为统计特征算子;在混沌特征量模式中选取最大 Lyapunov 指数、关联维、三维信息维和 Kolmogorov 熵为特征量. 因此,这时 RBF 神经网络的输入层神经元个数为 30.

从表 2 可以看出,通过综合选取 CAPD & PRPD 模式下的统计算子作为输入向量,典型局部放电的模式识别效果良好,平均正判率达到 95.5%,油楔放电的识别效果最好,可达到 97.5%.

比较 3 种方法,基于 CAPD & PRPD 组合的局部放电模式识别的效果对各种放电类型都有较大的提高,其中悬浮放电和沿面放电两种类型的识别效果提高最多,而油楔放电的识别率最高.

对于基于 CAPD & PRPD 组合的局部放电模式识别方法,两者特征量的选取会直接影响到模式识别的效果,在这方面仍可研究尝试不同的特征量

组合. 另外,这些方法也有待在实际的油浸式电力设备中进一步验证.

4 结 论

油纸绝缘中的局部放电现象并非是完全随机的过程,其中放电信号具有明显的混沌特征,故油纸绝缘的局部放电是一个混沌过程.

对典型放电模型进行了多种混沌时间序列和由其得到的混沌吸引子的特性定性分析,表明各种放电类型的混沌吸引子形状区别较大,特点鲜明,可对局部放电类型作定性的分析和识别. 选取相空间重构参数和重构后的混沌吸引子作为混沌特征量,能对局部放电的混沌特性进行定量表征.

选取局部放电的多种混沌时间序列的相空间重构参数及混沌特征量作为特征指纹,采用神经网络的方法进行模式识别,结果表明,采用混沌特征量作为特征指纹的局部放电类型的识别效果良好,平均正判率达到 85%. 与基于 PRPD 的模式识别方法比较,总体效果较为一致,在具体的放电类型上有所差别. 进一步通过综合使用 PRPD 算子和混沌特征量对局部放电进行模式识别,识别率有很大的提高,平均正判率达到 95%. 因此,在进行局部放电的模式识别时,综合使用 PRPD 的算子和时间序列的混沌特征量作为特征指纹可提高识别效果.

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] ALTENBURGER R, HEITZ C, TIMMER J. Analysis of phased-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach[J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2002, 35(11): 1149-1163.
- [3] PATSCH R, BERTOR F. Pulse sequence analysis—a diagnostic tool based on the physics behind partial discharges[J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2002, 35(1): 25-32.
- [4] SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Digital detection, grouping and classification of partial discharge signals at DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1663-1674.
- [5] MIZUKAMI Y, INOUE T. Nonlinear dynamical study of partial discharge phenomena[C]//Proceedings of the 1999 IEEE 13th International Conference on Dielectric Liquids. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 513-516.
- [6] LIM Y S, KIM S H. Identification of chaotic characteristics in partial discharge[C]//Proceedings of the 1999 IEEE 13th International Conference on Dielectric Liquids. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 556-559.
- [7] LIM Y, KOO J, KANG W, et al. Chaotic analysis of partial discharge (CAPD) as a novel approach to investigate insulation degradation caused by the various defects[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 413-416.
- [8] 黄平, 罗勇芬, 李彦明. 局部放电混沌分析方法的研究现状及发展[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 89-94.
HUANG Ping, LUO Yongfen, LI Yanming. Current status and development of chaotic analysis of partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 89-94.
- [9] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [10] KENNEL M B, BROWN R, ABARBANEL H D. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction[J]. Physical Review: A, 1992, 45(5): 3403-3411.
- [11] WILDE P D. Neural network models: theory and projects[M]. New York, USA: Springer, 1997.

[本刊相关文献链接]

- 真空中绝缘子闪络前表面电荷分布的二维仿真. 2008, 42(4): 476-480.
- 电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 718-722.
- 一种可用于绝缘子沿面放电状态识别的算法. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1269-1274.
- 采用独立成分分析的局部放电脉冲双通道提取技术研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1264-1268.
- 直线及 L 型 GIS 模型电磁波传播特性研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1280-1284.
- 气体绝缘开关直线和 T 型结构中电磁波传播特性的仿真. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1526-1530.
- 油/纸绝缘沿面局部放电特性研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 108-112.
- 雷电冲击电压下油纸绝缘气隙模型的局部放电测量与分析. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 75-80.
- 正脉冲电压下水中流注放电特性的研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 96-100.
- 气体绝缘开关内自由运动金属颗粒的超声波信号特性. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 101-105.
- 带电水蒸气冲洗污秽绝缘子时的交流闪络特性研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 96-100.
- 带电压反馈智能接触器的热分析模型. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 90-95.
- 变压器油流动带电度的微静电测量方法及其影响因素. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 96-100.

(编辑 杜秀杰)