

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.06.017

## 超声波局部放电检测法在电缆终端中的应用

赵爱华, 李 伟, 叶剑涛, 丁国成

(安徽省电力科学研究院, 合肥 230002)

**摘 要:**为研究电缆终端局部放电超声波检测时放电点深度对检测结果的影响,根据检测结果有效分析放电点位置及放电严重程度,采用理论分析、模拟计算、实验室模拟实验、现场应用等方式,结合超声波传播及衰减理论,分析了放电信号在电缆终端表面的沿切向、沿轴向衰减的分布规律,提出了通过迭代及最小二乘法进行局部放电点的源点深度及真实放电水平计算的方法。结果表明:信号量随轴向距离与夹角增大而减小,放电点深度对信号量随放电点与测量点间的轴向距离与夹角的变化率影响较大,放电点深度越小,变化率越大,反之变化率越小。模拟实验与现场应用表明,通过文中的迭代法得到的放电点深度及放电水平与实际基本相符。

**关键词:**电缆终端;局部放电;最小二乘法;放电点深度;放电水平

**中图分类号:**

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2014)06-112-07

## Application of ultrasonic detection for partial discharge to cable terminals

ZHAO Aihua, LI Wei, YE Jiantao, DING Guocheng

(Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230002, China)

**Abstract:** This paper studies the influence of the discharge point depth on the ultrasonic detection results of partial discharge in cable terminals to find an effective method to analyze discharge position and discharge level according to the results of cable terminal discharge ultrasonic signal field test. With ultrasonic wave propagation and attenuation theory, this paper analyzes the tangential and longitudinal distribution pattern of discharge signals in cable terminal surface and puts forward a calculation method about the true depth and discharge level of partial discharge source on the cable terminal by the way of theory analysis, simulated calculation, laboratory test and field application. The result reveals that the detected ultrasonic signal level decreases as the axial distance or the central separation angle between the discharge point and the test point increases, and the depth of discharge point influences the change rate of the detected ultrasonic signal level along with the axial distance and the central separation angle. The lower depth means the larger change rate and the higher depth means the less change rate. It's also revealed that the measured discharge point depth and discharge level by the proposed iteration method are consistent with real situation.

**Key words:** cable terminals; partial discharges; generalized least square; discharge point depth; discharge level

**收稿日期:**2014-04-09

**基金项目:**安徽省电力公司 2009 年科技项目(2009146)

**作者简介:**赵爱华(1978-),男,安徽省电力科学研究所高级工程师,主要从事高压绝缘及电缆专业技术工作,(E-mail) aslem@126.com。

电力设备状态检修模式的推广应用,对电缆的在线监测及带电测试提出了更高的要求。目前,国内对电缆终端的局部放电<sup>[1-8]</sup>带电测试主要有甚高频法及超声波法。甚高频法由于很难将外界干扰信号与内部局部放电信号区分开来,现在正处于实验室研究阶段<sup>[9-18]</sup>,现场应用较少,而超声波法因为受外界干扰影响小,近年来在国内开始了广泛的应用。不过从目前的应用情况来看,超声波法存在一个不足,即无法通过测量结果判断出放电点的真实放电水平及放电点的深度,从而无法对放电性质及放电水平作进一步的分析判断。

迄今,安徽电网电力电缆主要应用于 10 kV 和 35 kV 电压等级中,终端类型以干式终端为主。文中结合安徽电网实际,以干式电缆终端为例,结合超声波传播理论,对放电点深度和放电点真实放电水平的方法进行理论分析和实验室模拟实验,得到可供现场使用的分析判断方法。

## 1 局部放电超声波信号的产生与传播

电缆终端在局部放电时会伴随着产生许多物理、化学现象,例如:放电空间内有电荷变化,出现脉动电荷;有电磁波辐射;有粒子撞击而发射超声波等。

在放电源点超声波产生后,以球状向周围传播,由于超声波的波长很短,传播过程中衍射能力很差,表现出一定的定向传播特性;超声波传播过程中在不同介质分界面发生折射、反射;此外,超声波携带能量,在其传播过程中必然受到损失,使声强逐渐降低,发生衰减。

电缆终端内部因局部放电产生超声波时,超声波向周围传播,在传播时随着传播距离的增加衰减增大,超声波传播过程中的衰减公式为

$$A_x = Ae^{-a_f x}, \quad (1)$$

式中: $A_x$  为距离探头  $x$  处的声振幅, $A$  为声源振幅, $a_f$  为衰减系数, $f$  为超声频率, $x$  为探头与声源之间的距离。

$$a_f = af + bf^2 + cf^4, \quad (2)$$

式中: $a$  为介质弹性摩擦吸收系数, $b$  为介质粘滞性与热传导的吸收系数, $c$  为介质内散射体的瑞利散射吸收系数。

## 2 模拟计算

### 2.1 坐标系及相关参量说明

为便于分析计算,采用圆柱坐标系 $(\rho, \varphi, Z)$ ,以放电源点  $p$  所在切平面与轴心的交点作为坐标原点  $O$ ;以坐标原点  $O$  放电源点  $p$  连线所形成的射线作为  $\rho$  轴;纵轴心作为  $Z$  轴,沿向端部方向为正方向,各坐标意义如图 1 所示。假设  $p$ 、 $m$  分别表示放电点及传感器测量点, $p$ 、 $m$  点坐标分别为 $(\rho_1, 0, 0)$ 、 $(\rho_2, \varphi_2, Z_2)$ 。

假设  $R$  表示不计伞裙尺寸时终端横截面半径(切向), $R$  表示放电点深度, $d$  表示放电点对应终端表面与测量点之间的轴向距离, $\theta$  表示放电点与测量点之间切向圆心角。则

$$\left. \begin{aligned} R &= \rho_2 \\ r &= \rho_2 - \rho_1 \\ \theta &= \varphi_2 \\ d &= |Z_2| \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对于某终端表面的点,不考虑伞裙时其  $\rho$  坐标等于电缆终端半径时,终端表面点坐标可简略表示为 $(\varphi, Z)$ 。

以  $U_p$  表示放电点局部放电信号量, $U_m$  表示测点局部放电信号量, $U_p$ 、 $U_m$  单位为 mV。

### 2.2 终端表面超声波分布规律

按应用场合不同,电缆终端可分为 GIS 终端、变压器终端、户外终端等类型,户外终端又可分为充油式终端、油纸绝缘终端及干式终端等类型,终端类型不同,其结构差异较大。结合安徽电网实际情况,以现场经验

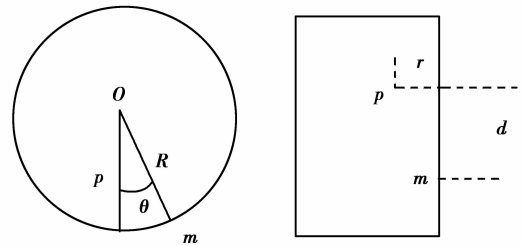


图 1 参量示意图

获得的衰减系数 0.3, 直径 60 mm 的干式电缆终端为例, 假设在其内部  $r$  深处有个局部放电超声波源, 源点的超声波强度设为 100 mV, 通过数学软件模拟计算其表面信号分布规律如下。

### 2.2.1 沿切向的分布规律

图 2 为轴向距离为 0 时测点信号量与切向夹角的关系图。从上图可以看出信号量与切向夹角的关系, 信号量随夹角增大而减小, 在  $45^\circ$  内, 降低较快; 放电点深度对信号量随夹角的变化率影响较大, 放电点深度越小, 变化率越大, 反之变化率越小。

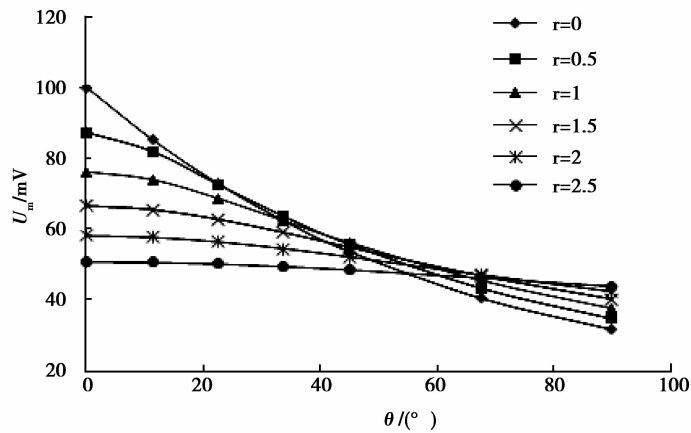


图 2 切向分布规律

### 2.2.2 沿轴向分布规律

图 3 为切向夹角为  $0^\circ$  时测点信号量与轴向距离的关系图。从图中可以看出信号量与轴向的关系, 信号量随轴向距离增大而减小; 放电点深度对信号量随轴向距离的变化率影响较大, 放电点深度越小, 变化率越大, 反之变化率越小。

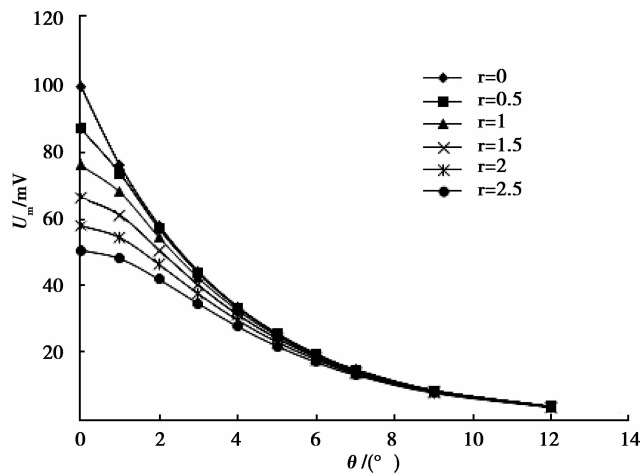


图 3 轴向分布规律

### 2.2.3 表面分布规律

在放电点表面投影  $(0^\circ, 0 \text{ cm})$  及点  $(45^\circ, 4 \text{ cm})$  组成的表面区域内, 超声波信号量分布规律如图 4 所示, 从图中可以看出, 在  $(45^\circ, 4 \text{ cm})$  点的超声波信号量最小。

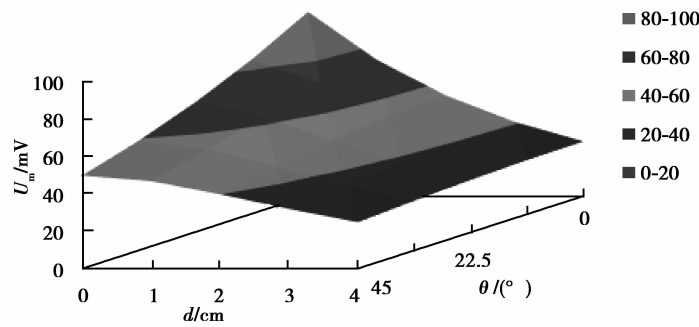


图 4 分布曲面图

### 2.3 源点放电量及放电点位置的估算

通过理论分析模拟计算可以看出,对于某个电缆终端或接头,当其结构已知且一定时,信号量值沿其表面的分布规律与放电点的深度之间存在函数关系,根据各测点的测量值通过数学方法分析计算放电源点的深度及信号量值是可行的。

由超声波衰减公式可得到以下的放电源点信号量与测点信号量关系方程为

$$C_i = \ln U_{mi} = \ln U_p - a_f \sqrt{d_i^2 + r^2 + 2R(R-r)(1 - \cos \theta_i)}, \quad (4)$$

式中:信号量值  $U_0$  为计算时以  $d$  为 0、 $\theta$  为 0 的测点;  $U_i$  为第  $i$  个测点的测得信号量值;  $d_i$  为第  $i$  个测点与之间的轴向距离;  $\theta_i$  为第  $i$  个测点与之间的切向夹角;  $R$  为该电缆终端的半径。

终端表面最大点信号自然对数值  $C_0$  为

$$C_0 = \ln U_{m0} = \ln U_p - a_f r. \quad (5)$$

基于最小二乘法的近似迭代求解方法如下:

1) 将电缆终端半径等分为  $n$  个等分,得到  $n+1$  个假定深度值,分布为  $0, 1, \dots, n$ 。

2) 设第  $j$  个假定深度值为  $r_j$ ,  $a_j$ 、 $C_{ij}$  分别为对应的第  $j$  个深度值的超声衰减系数和第  $i$  个测点信号量计算值;  $C_i$ 、 $d_i$ 、 $\theta_i$  分别为第  $i$  个测点的测得信号量自然对数值、第  $i$  个测点与  $A_1$  之间的轴向距离、切向夹角。

令

$$Q = \sum_i (C_{ij} - C_i)^2,$$

对每个假定深度,按下式分别计算出其  $a_j$ 、 $Q$  值为

$$a_j = \frac{\sum_i (C_0 - C_i)}{\sum_i [\sqrt{r_j^2 + d_i^2 + 2R(r - r_j)(1 - \cos \theta_i)} - r_j]}, \quad (6)$$

$$Q_j = \sum_i (C_{ij} - C_i)^2 - \sum_i \{C_0 - C_i - a_j [\sqrt{r_j^2 + d_i^2 + 2R(R - r_j)(1 - \cos \theta_i)} - r_j]\}^2. \quad (7)$$

3) 比较各深度  $Q$  值的大小,取  $Q$  值最小的假定深度(第  $k$  个)作为基准深度。

4)  $r_k$  等于 0 时取  $k$  至  $k+1$  区间,等于  $R$  时,  $r_k$  取  $k-1$  至  $k$  区间,其余情况下取  $k-1$  至  $k+1$  区间,将所取区间分为  $m$  等分,并从第 2 条开始重新计算;当所取区间长度小于所需的精度时,停止计算,则所得的  $r_k$  值及由此计算出的  $a_k$ 、 $U_p$  即分别为所求的放电点深度、超声波衰减系数及源点超声波信号量。

## 3 实验室模拟试验

为了验证理论分析的正确性,在实验室针对电缆终端的超声波信号表面分布规律进行了模拟实验。实验采用厚 1 cm,半径 4 cm 的环氧套管电缆终端。实验时将高压尖端引到终端套管外、内表面,让高压尖端对其放电,通过常规局部放电仪监测尖端对终端套管的放电量,并利用超声波局放仪测量终端套管全方位的超声信号。通过模拟试验得到了放电源深度分别为 0 cm、1 cm 时,不同切向圆心角或轴向表面距离时的测点测量结果,如表 1 所示。

测试结果表明:测得的信号量随轴向距离或夹角的增大而减小,放电点深度对信号量随放电点与测量点

间的轴向距离与夹角的变化率有影响,放电点深度较小时,变化率较大,反之,变化率较小。变化规律与理论分析结果一致。

表 1 实验室模拟试验结果

影响因素	水平	$r=0$ cm 时声信号		$r=1$ cm 时声信号	
		$U/\text{mV}$		$U/\text{mV}$	
切向 圆心 角 $\theta/(\circ)$	0	21.0		16.0	
	15	15.7		14.5	
	30	11.9		12.0	
	45	9.2		9.7	
轴向 距离 $d/\text{cm}$	0	21.0		16.0	
	3	9.4		8.8	
	5	5.5		5.2	
	7	3.1		3.0	
	9	<2(噪音下)		<2(噪音下)	

为验证前文迭代方法的正确性,选取其中轴向距离 0 cm、3 cm、5 cm、7 cm 4 个测点的实测值作为已知量,按照文中的迭代方法计算其放电点深度  $r$ 、衰减系数  $a$  以及放电源点信号量。通过模拟计算得到当高压尖端引到环氧套管外表面时  $r$  为 0.1 cm,  $a$  值 0.273, 源点信号量 20.9 mV; 当高压尖端引到环氧套管内表面时  $r$  为 1.01 cm,  $a$  值 0.275, 源点信号量 21.2 mV; 迭代法计算的结果与实际情况基本相符。

为了进一步检验理论模型及理论分析的正确性,文中将通过迭代计算得到的放电点深度、衰减系数、源点信号量作为已知量进行仿真计算,将各测点的仿真计算结果与实测结果比较,各测点计算值及其与实测值之间的误差如表 2 所示。从表中可以看出,计算结果和测量结果之间的差别很小,最大误差不超过 3%,验证了理论分析的正确性。

表 2 理论模型计算值及与实测值之间的误差

影响因素	水平	$r=0$ cm 时声信号		$r=1$ cm 时声信号	
		计算值 $U/\text{mV}$	误差 $\Delta U/\%$	计算值 $U/\text{mV}$	误差 $\Delta U/\%$
切向 圆心 角 $\theta/^\circ$	0	21.0	0.00	16.0	0.06
	15	15.7	0.76	14.5	0.48
	30	11.9	0.67	12.0	0.33
	45	9.2	0.43	9.7	0.41
轴向 距离 $d/\text{cm}$	0	21.0	0.00	16.0	0.06
	3	9.4	0.96	8.8	1.25
	5	5.5	1.64	5.2	1.35
	7	3.1	1.29	3.0	3.00
	9	<2(噪音下)	/	<2(噪音下)	/

## 4 现场应用

在电缆终端的现场超声波局部放电带电检测过程中,有效的发现了某 35 kV 电缆终端的局部放电缺陷。

该电缆终端为直径 6 cm(不计伞裙尺寸)的干式硅橡胶电缆终端,测量结果如表 3 所示。

表 3 某 35 kV 电缆终端查局部放电现场检测结果

影响因素	测量位置	声信号测量值 $U/\text{mV}$
切向圆心角 $\theta/(\text{°})$	0	1.21
	45	0.81
	90	0.50
轴向距离 $d/\text{cm}$	0	1.21
	2	0.81
	4	0.45

根据文中的迭代法,选取其中轴向分布的 0 cm、2 cm、4 cm 3 个点测量值作为已知量,通过迭代计算得到放电点深度大约在 0.9 cm 处,衰减系数为 0.309,局部放电水平 1.60 mV。该终端解体后发现在最大放电信号位置电缆半导体层切割不齐,有突出尖角,缺陷位置深度约 1 cm,按其衰减系数计算的局部放电水平为 1.63 mV,与分析结果基本一致。

比较现场测量结果与实验室模拟实验结果,二者终端的类型不同、材质不同,对超声信号的衰减系数也不同,而采用文中的方法计算均得到了其放电点或缺陷的深度。

## 5 结 论

文中通过模拟计算分析了放电信号在电缆终端表面的分布规律,并由此提出了根据测得的表面放电信号分布数据通过迭代得到放电点深度及真实放电水平的分析计算方法,为超声波法在电缆检测的实际应用提供依据。通过该方法,可以根据测试结果计算出放电点的位置和放电量的大小,为放电缺陷的位置、危害程度的判断以及检修策略的制定提供技术支持。

### 参考文献:

- [1] 鲍明晖,尹小根,何俊佳,等. 高频电压下交联聚乙烯中电树枝的形态特性[J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):184-191.  
BAO Minghui, YIN Xiaogen, HE Junjia, et al. Electrical tree structure characteristics in XLPE power cable insulation under high-frequency voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 184-191.
- [2] 廖瑞金,周天春,刘玲,等. 交联聚乙烯电力电缆电树枝生长的混沌特性分析[J]. 电工技术学报,2012,27(5):63-69.  
Liao Ruijin, Zhou Eanchun, Liu Ling, et al. The chaos characteristics analysis for electrical treeing propagation in XLPE power cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 63-69.
- [3] 郑晓泉, Chen G, Davie A E. 交联聚乙烯电缆绝缘中的电树枝与绝缘结构亚微观缺陷[J]. 电工技术学报,2006,21(11):28-33.  
ZHENG Xiaoquan, Chen G, Davie A E. Electrical tree and submicroscopic insulation structure weakness in XLPE cable insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(11): 28-33.
- [4] 顾金,王俏华,尹毅,等. 高压直流 XLPE 电力电缆预制式接头的设计[J]. 高电压技术,2009,35(12):3159-3163.  
GU Jin, WANG Qiaohua, YIN Yi, et al. Design of prefabricated joints for HVDC XLPE power cables[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3159-3163.
- [5] Krivda A, Gulski E, Satish L, et al. The use of fractal features for recognition of 3-D discharge patterns[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 889-892.
- [6] 谢安生,李盛涛,郑晓泉,等. 高频电压下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长的动力学模型[J]. 物理学报,2008,57(6):3828-3833.  
XIE Ansheng, LI Shengtao, ZHENG Xiaoquan, et al. Dynamics model for electrical tree propagation in cross-linked polyethylene cable insulation under high frequency voltage[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(6): 3828-3833.
- [7] 李盛涛,郑晓泉. 聚合物电树枝化[M]. 北京:机械工业出版社,2006:10-15.
- [8] 谢安生,郑晓泉,李盛涛. XLPE 电缆绝缘中的电树枝结构及其生长特性[J]. 高电压技术,2007,33(6):168-173.

- XIE Ansheng, ZHENG Xiaoquan, LI Shengtao. Structures and propagation characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2007,33(6):168-173.
- [9] Chen H C. Fractal features-based pattern recognition of partial discharge in XLPE power cables using extension method[J]. Generation Transmission & Distribution IET,2012, 6(11) : 1096-1103.
- [10] 郑文栋,杨宁,钱勇,等.多传感器联合检测技术在XLPE电缆附件局部放电定位中的试验研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(20):84-88.
- ZHENG Wendong, YANG Ning, QIAN Yong, et al. Experimental research on partial discharge localization in XLPE cable accessories using multi sensor joint detection technology[J]. Power System Protection and Control, 2011,39(20):84-88.
- [11] 魏钢,唐炬,文习山,等.局部放电信号在交联聚乙烯高压电力电缆中的衰变及其检测[J].高电压技术,2011,37(6):1377-1383.
- WEI Gang, TANG Ju, WEN Xishan, et al. Decay and detection of partial discharge signals in high-voltage cross-linked polyethylene power cable[J]. High Voltage Engineering, 2011,37(6):1377-1383.
- [12] 廖瑞金,周天春,刘玲,等.交联聚乙烯电力电缆的电树枝化试验及其局部放电特征[J].中国电机工程学报,2011,31(28):136-142.
- LIAO Ruijin, ZHOU Tianchun, LIU Ling, et al. Experimental research on electrical treeing and partial discharge characteristics of cross-linked polyethylene power cable[J]. Proceedings of the CSEE, Proceeding of the CESS, 2011, 31(28):136-142.
- [13] 姜芸,闵红,罗俊华,等.220 kV 电缆接头半导体尖端缺陷的局部放电试验[J].高电压技术,2011,36(11):2657-2661.
- JIANG Yun, MIN Hong, LUO Junhua, et al. Partial discharge pattern of semi-conductor layer tip defect in 220kv cable[J]. High Voltage Engineering, 2011,36(11):2657-2661.
- [14] 郭灿新 勇明,徐敏骅,等.S变换在电力电缆局部放电信号时频分析中的应用[J].电工技术学报,2010,25(11):9-14.
- GUO Canxin, YONG Ming, XU Minhua, et al. Application of S transform for time-frequency analysis of partial discharge signals in power cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(11):9-14.
- [15] 姜芸,闵虹,夏荣,等.高压交联电缆接头局部放电的电容耦合检测及分析[J].高电压技术,2010,36(8):2005-2011.
- JIANG Yun, MIN Hong, XIA Rong, et al. Capacitive coupling detection and characteristic analysis of partial discharge in high-voltage XLPE power cable joints[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(8):2005-2011.
- [16] 唐炬,朱黎明,龚宁涛.高压电缆中间接头局部放电统计特性分析[J].重庆大学学报,2009,32(8):965-970.
- TANG Ju, ZHU Liming, GONG Ningtao. Statistical characteristics analysis of partial discharge in high voltage cable joint [J]. Journal of Chongqing University, 2009,32(8):965-970.
- [17] 唐炬,龚宁涛,李伟.高压交联聚乙烯电缆附件局部放电特性分析[J].重庆大学学报,2009,32(5):528-534.
- TANG Ju, GONG Ningtao, LI Wei. Characteristic analysis of partial discharge in high voltage XLPE cable accessories[J]. Journal of Chongqing University, 2009,32(5):528-534.
- [18] 唐炬,李伟,杨浩.高压电缆附件局部放电超高频检测与分析[J].高电压技术,2009,35(7):1571-1577.
- TANG Ju, LI Wei, YANG Hao. Ultra-high frequency detection and analysis for partial discharge in high-voltage cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(7):1571-1577.

(编辑 詹燕平)