

非合成绝缘子内部放电声发射试验及分析

王成江¹, 贾智斌¹, 顾玉凯², 杨溢²

(1. 三峡大学电气信息学院, 湖北省宜昌市 443002; 2. 重庆市万州供电局, 重庆市万州区 404000)

Experimental Research and Analysis on Acoustics Emission from Interior Discharge of Noncomposite Insulators

WANG Cheng-jiang¹, JIA Zhi-bin¹, GU Yu-kai², YANG Yi²

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei Province, China; 2. Power Supply Bureau of Wanzhou, Wanzhou District, Chongqing 404000, China)

ABSTRACT: During Acoustics Emission (AE) monitoring of insulator discharge, discharge type identifying are very important. Interior discharge of noncomposite insulators is researched systematically. Based on numerous experiments the common characteristic of AE wave from interior discharge is summarized: The AE waves have regular periodicity and they appear twice in every work voltage period, non-symmetry between them is determined by eigen scale D of interior flaw of insulator. AE wave change from egg shape to arrowhead shape when transducer is closing to the discharge source; Dimensional methods in mechanics are introduced into AE analysis and then it is be found that AE wave is determined mainly by initial discharge energy, flaw shapes, the eigen scale of flaw, the density and the press of interior gas in flaw; Combining wave theory and gas discharge theory AE phenomena are explored and explained.

KEY WORDS: insulator; interior discharge; acoustic emission; dimensional methods

摘要: 为了研究绝缘子放电声发射检测中不同放电形式的声发射识别问题, 系统地研究绝缘子内部放电声发射现象。在大量试验基础上, 总结绝缘子内部放电声发射波的共有特征: 绝缘子内部放电声发射波具有简单的周期性, 正半周和负半周内之间的信号不对称决定于气隙的特征线尺度 D 。随传感器的安放位置变化, 接收到信号的外形从箭头状向蛋状变化; 引入量纲分析理论, 研究了气体的初始密度、压力、放电能量、气隙的形状和特征线尺度等因素对内部放电声发射的影响; 结合气体放电理论和波动理论探讨并解释了内部放电声发射现象的机理。

关键词: 绝缘子; 内部放电; 声发射; 量纲分析

0 引言

高压输电线路上的劣化绝缘子对电力系统的安全运行存在着很大的威胁。为及时去除劣化绝缘子, 人们一直在寻找在线检测劣化绝缘子的有效方法。目前, 在线检测劣化绝缘子的方法主要有以超声波法、激光多普勒振动法及红外热象仪法为代表的非电量测检法, 及以电压分布法、绝缘电阻法及脉冲电流法为代表的电量测检法^[1-2]。它们各有其特点, 也存在各自的不足。新测量方法的探索及测量装置的设计制造对于解决生产实际中遇到的问题至关重要。

文献[3]研究了利用劣化绝缘子放电时出现的伴随声发射波, 实现对绝缘子劣化进行检测的可行性, 并研究了放电声发射波的识别问题。本文系统地研究非合成绝缘子内部放电声发射波的产生机理、影响因素和试验统计特征。

1 绝缘子内部放电及声发射现象

在架空线路中运行的非合成绝缘子, 长期处于高压场强、机械荷载和大气作用下, 由于内部应力发生变化, 随着时间的推移将会不断地劣化, 使绝缘子的电气性能和机械承载能力不断下降, 逐渐失去绝缘性能和机械承载能力, 绝缘电阻从原来的 $10^{12} \sim 10^{14} \Omega$ 下降到 $300 M\Omega$ 以下, 从而使零值或低值的绝缘子不断产生^[4-5], 以致击穿或破坏, 这种现象就是绝缘子的老化或劣化, 随着绝缘子的劣化, 使串中的绝缘降低、发生闪络或线路故障。

引起零值或低值绝缘子的另一个原因是绝缘子的制造缺陷。质地疏松及细小孔隙裂缝的客观存

在，致使下雨时绝缘子内部发生放电，当雨过天晴空气干燥时，绝缘又得以恢复。在绝缘子内部气隙中放电时，气隙中电荷的交换和累积目前尚无法直接测量，但这种电荷的变化，必然会反映到绝缘体两端电极（或导体）上电荷的变化。这两者之间的关系，可以通过等效电路予以分析^[6-7]。

根据气体放电理论，当发生放电时，会出现发声现象，实际上，放电总伴随着声发射现象。放电是一个能量瞬时爆发的过程，是电能以声能、光能、热能、电磁能等形式释放出去的过程。在空气间隙中发生电气击穿时，放电瞬时完成，其电能瞬时转化为热能导致放电中心气体的膨胀，这种瞬时膨胀的结果以声波的形式传播出去，就是最初的声源。随着最初的声波传播，传播区域内的气体被加热，形成一个等温区，其温度高于环境温度；当这些气体冷却时，气体又开始收缩，收缩的结果就是较低频率和强度的后续波，它可以是可闻声波或超声波。因此，根据运行中的绝缘子是否有声发射现象，可以判断绝缘子是否发生故障。

2 绝缘子内部放电声发射试验

2.1 试验方法

为了研究绝缘子内部放电的声发射特性，我们准备了两片低值绝缘子，一片为瓷质绝缘子，另一片为玻璃绝缘子，都是在现场安装前筛选下来的不合格产品，由于是新的，外观上无污痕或裂纹。清洁后进行加压试验，试验前测得瓷和玻璃低值绝缘子的绝缘电阻分别为 $8.5\text{M}\Omega$ 和 $90\text{M}\Omega$ ，测试仪表为 2500kV 的摇表和 KYORITSU 指针式高压绝缘电阻测试仪。

试验^[8-9]时，负电极直接加在绝缘子的钢帽上，正电极夹在钢脚上，对绝缘子进行加压。特性一致的两套声发射传感器组件检测放电声发射信号，一套传感器组件靠着绝缘子钢帽通过耦合剂耦合在绝缘子的上表面上，另一套传感器组件在绝缘子的周围自由移动，从 0V 开始逐渐增加电压，用数字示波器 TDS3032B 观察加压过程中的放电声发射信号。

为了确认检测到的信号是绝缘子内部放电声发射波，又取一片同型号的正常绝缘子，采用同样的试验方法，在相同的试验环境下进行加压试验，一直加压到 13kV ，两个通道都没检测到任何信号。由于试验环境相同，可以排除气候原因引起的表面放电；因为绝缘子的型号和试验方法相同，并且试

验电压较低，只有 13kV 以下，可以排除电晕放电的声发射现象。因此可以确定，对低值绝缘子加压后出现的声发射波就是绝缘子内部制造缺陷引起的局部放电声发射波。

2.2 试验结果

图 1 示出的分别是外加电压为 6kV 、 8kV 、 10kV 、 12kV 时，实际检测到的放电声发射信号，每个图中的上下两个波形分别为放置在空气中的传感器和贴在绝缘子上表面的传感器测得的信号，其中，空气中的传感器组件沿水平方向固定放置，探头对准绝缘子的下边沿，距下边沿 30cm 左右。

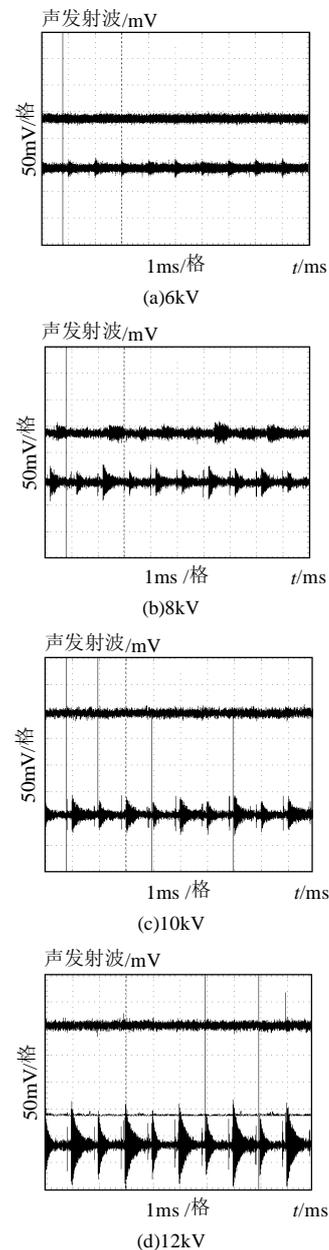


图 1 典型的绝缘子内部放电声发射波
Fig. 1 AE wave from interior discharge of insulator
对两片低值绝缘子进行多次加压试验^[10]，试验

显示,其结果具有可重复性,典型的定性结果如图1所示,定量结果如表1和2所示。从表中可见,绝缘电阻越低,出现内部放电的起始电压值也越低,当出现内部放电声发射后,随外加电压的升高,检测到的声发射波的强度增加,信号的宽度也增加。

表1 低值绝缘子1(陶瓷, 8.5MW)
内部放电声发射试验结果

Tab. 1 Typical experiment results
of low-impedance insulator 1(ceramic, 8.5MW)

外加电 压/kV	声发射波/mV					
	峰峰值		平均值		宽度	
	试验1	试验2	试验1	试验2	试验1	试验2
6	25	20	5	5.3	2	3
8	60	50	6.85	6.36	3.5	5
10	80	60	8.3	8.29	5	6
11	110	80	13.4	14	7	9

表2 低值绝缘子2(玻璃, 90MW)内部放电声发射试验

Tab. 2 Typical experiment results
of low-impedance insulator 2(glass, 90MW)

外加电 压/kV	声发射波/mV					
	峰峰值		平均值		宽度	
	试验1	试验2	试验1	试验2	试验1	试验2
13	20		3		1	
15	50	20	5	3	3	1
17	90	80	7.8	6	4	3
19	110	100	10.1	8.46	5	4

3 内部放电声发射波的特征

多次重做上述内部局部放电声发射试验,发现非合成绝缘子内部放电声发射波具有以下特征:

(1) 每工频周期(20ms)两次检测到放电声发射信号,对应工频的正半周期和负半周期各出现一次,正、负半周内的信号分别对称。一般情况下,每个工频周期内,正负半周内的放电声发射信号也是对称的,偶尔会出现不对称的情况,此时,在工频电压过最大值后的下降区间内,声发射信号的强度较大,而在工频电压过最小值后的电压上升区间内,声发射信号的强度较小。

(2) 绝缘子内部放电产生的放电声发射波的幅值一般不太高,最大峰-峰值可以达到500mV左右,但声发射信号持续的时间较长。传感器接收到的信号的外形一般呈箭头状,有时候也会呈现出多尖峰值的倒立型蛋状,参见图1。

(3) 一般在外加电压不太高时,就可以检测到绝缘子内部放电声发射波,也就是说,绝缘子出现内部放电时的起始电压一般在绝缘子的正常工作电压以下,此时声发射信号的幅值较小,持续的

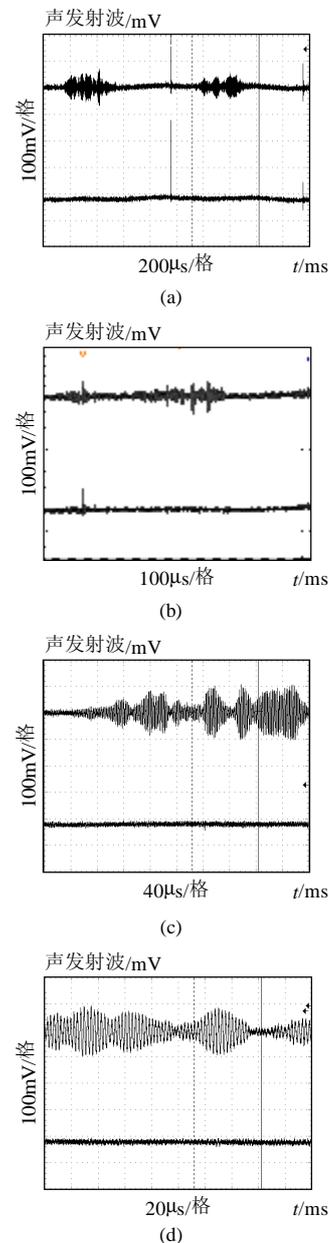


图2 内部声发射波的时间细节
Fig.2 The time detail of AE wave
from interior discharge of insulator

时间也较短。随外加电压的升高,检测到的放电声发射信号的幅值也开始增加,信号持续的时间变长,开始出现多峰值,继续增加电压,检测到的信号差不多连成一片,但仍然可以分辨出独立的声发射事件,参见图1(d)。当外加电压超过某一临界值后,继续增加电压,声发射信号的幅值不再增加,反而开始减小,直至检测不到任何信号,此时绝缘子被完全击穿。

(4) 图2示出了绝缘子内部放电声发射波的细节,图2(a)~(d)分别对应2ms、1ms、400μs、200μs下的细节波形。从图中可见,内部放电声发射波实

实际上是由一系列单个声发射波构成的声发射波群，单个声发射波是图 2(d)所示的蛋状的波形。

(5) 在整个内部放电声发射试验中，都没有出现可闻声波，也就是说，绝缘子内部放电声发射信号的频谱分布在超声的范围之内。

(6) 试验中还发现，对低值绝缘子加压的次数越多，能够检测到放电声发射波的起始电压越低，也就是说，低值绝缘子的绝缘强度随加压次数的增加而降低，从而导致起始放电电压降低；对低值绝缘子完成一次完整的加压试验后，绝缘子的绝缘强度会出现短时增加的情况，比如，在试验前测得的绝缘子的绝缘电阻为 $8\text{M}\Omega$ ，而内部局部放电声发射试验完成后，立即再测绝缘电阻可达 $100\text{M}\Omega$ ，但是间隔较长一段时间后，绝缘电阻又恢复到原来的低值态，甚至比初始值更低，引起这种现象的原因可能是在绝缘子内部放电伴随声发射的同时，还伴随着发光、发热等物理现象，发热的后果是增加气隙内气体和绝缘材料的温度，降低绝缘体材料的湿度，从而使测量的绝缘电阻增加，而几小时后绝缘电阻又恢复到原来的低值态，甚至比初始值更低，则反应了绝缘子在内部放电作用下的逐步劣化过程。

(7) 观察内部局部放电声发射的时间特性发现，维持电压不变时，检测到的信号的周期均方根值是变化的，变化周期大约在 $5\sim 20\text{s}$ 的范围内，变化的幅度有时很大，有时较小，但总的来说，外加电压越高，平均均方根值越大；随着时间的延长，检测到的信号有减小的趋势，直至最后完全没有信号，当增加电压后，声发射信号又开始出现，且比刚才的信号更强。

(8) 贴在绝缘子表面上的传感器和放在空气中的传感器都能检测到绝缘子内部局部放电时的声发射波，一般而言，贴在绝缘子表面上的传感器比放在空气中的传感器检测到的信号强。

(9) 在相同的试验条件下，上述试验具有可重复性。

4 绝缘子内部放电声发射的影响因素分析

实际上，在绝缘子内部气隙中发生的放电可以看成是在放电点发生的强爆炸，为此，力学中的相似方法和量纲分析理论被引入到放电声发射的分析之中，文献[11]以此理论为指导，成功地设计出了火花放电声脉冲发生器。

如果把内部放电看成是强点爆炸并且是发生

在充满绝对刚体之外的整个空间的完全气体^[12]中，则按照所给出的问题提法，按照量纲分析理论^[12-14]，在整体上确定该放电现象所用的参量组可以描述为：

$$g, E_0, r_0, P_0, x = \frac{D}{R}, R, j, f$$

其中， g 为绝热指数； r_0 为气隙中气体的初始密度； P_0 为气隙中气体初始压力； E_0 为放电能量； R, j, f 为与绝缘子内部缺陷相联的某坐标系中放电点的极坐标，参见图 3。

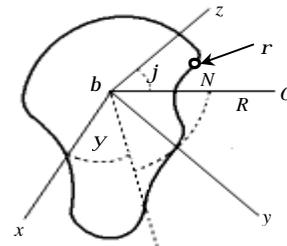


图 3 内部气隙极坐标

Fig.3 Polar coordinates for interior bubble discharge analysis

我们来考察物体上的某一点 N ，并以 P_{\max} 和 I 表示在该点上出现强放电 ($P_0 \approx 0$) 时的最大压力和冲量。由量纲理论可以得到式(1)和(2)

$$P_{\max} = \frac{E_0}{R^3} f_1(x, j, f, N, g) \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{r_0 E_0}{R}} f_2(x, j, f, N, g) \quad (2)$$

点 N 的坐标可以看作无量纲。当点 N 固定时，我们可以将坐标原点 b 取在点 N 上。对于按气隙表面上所有的点求和的总冲量，如式(3)所示

$$J = \sqrt{\frac{r_0 E_0}{R}} D^2 f_3(x, j, f, N, g) \quad (3)$$

从上述三式中可以看出放电某点上的最大声压和声发射波冲量对初值 E_0, r_0, R 的依赖关系：最大声压与初始放电能量 E_0 成正比，与观测点到放电中心的距离 R 的三次方成反比，而声发射波冲量与 E_0, r_0 乘积的平方根成正比，与观测点到放电中心的距离 R 的平方根成反比，而气隙的总冲量还与气隙的特征线尺度 D 的平方成正比。此外，观测点的声压、冲量和总冲量都是放电中心的位置 R, j, f 和观测点位置的函数。事实上，任意几何形状且形状固定不变的绝对刚体，只由一个有量纲参量——特征的线尺度 D 就可以给定，其它的参量可以认为是无量纲的，并且对于一系列几何相似的情况它们保持为常数值。

上述量纲分析中,气隙的特征线尺度 D 是反映气隙的直径和长度对绝缘子内部放电声发射的影响的,这一点从我们的试验中也可以得到证实,正负工频半周内的放电声发射信号出现不对称的情况,应该是绝缘子内部空气隙的不对称,也就是不同的 $x = D/R$ 引起的。对合成绝缘子放电声发射的研究^[15-16]也指出,放电声发射信号的大小和频谱与空气隙的直径和类型有关。气隙直径越小,放电量越小;气隙直径越大,长度越短,放电声发射的数量和最大值越大,放电主频越集中。也就是说,声发射信号中包含了放电气隙的信息,不同的气隙类型,产生不同的放电声发射频谱特征。

5 绝缘子内部放电声发射现象的物理解释

在碰撞电离的过程中,部分电子的动能转换为热能,由于放电的时间极短,只有 10^{-8} s 左右^[8,17],此热能瞬时积累,形成热冲击。空气分子剧烈的热运动,都会使空气分子发生碰撞,从宏观上看,对与放电通道相邻的空气产生了压力,使之向外运动,而由于空气的弹性作用,又产生了阻力,使这部分空气达到最大位移后又开始向平衡位置运动,这样就在平衡位置附近产生振动,这种振动通过相邻的空气媒质会一直传播下去,这就是最初的声源,这种媒质质点的机械振动由近及远的传播就是声波的传播。

这种气泡内的振动通过气泡壁,也就是气体—固体的交接面传入到绝缘子的本体材料中,引起绝缘子的振动,此振动被紧贴在绝缘子表面的声发射传感器探头所接收,也能够通过绝缘子表面,即固体—气体的交接面传入到周围的大气环境中,被放置在空气中的声发射传感器探头所接收,这就是示波器所观察到的放电声发射信号。因为放置在空气中的传感器接收到的信号,比贴在绝缘子表面的传感器接收的信号多一次固体—气体界面反射,所以,一般而言,贴在绝缘子表面的传感器接收的信号要强,这一点已经在试验中得到证实。

放电的初始瞬间,由于热量的瞬时积累,产生冲击的强度很大,此冲击直接加在绝缘子本体上,引起绝缘子本体的振动,当放电停止后,由于气体的粘滞性很差,气隙内气体振动的幅度很快衰减,声发射波很快平息。但是由于固体材料的振动惯性,绝缘子的振动并不会马上平息,当传感器的探头近贴在绝缘子的表面上时,绝缘子本体的振动波

立刻被传感器所接收,在示波器上观察到的就是箭头状衰减的振动波。而距离绝缘子较远的传感器接收到的信号则是经绝缘子表面和空气的交界面产生反射、折射和模式变换后的不同频率分量叠加的混和波,其外形可能不再是简单的箭头状。

实际上,绝缘子内部的气泡放电可以归结为介质—介质间的气体放电,在介质—介质间,产生电子崩的初始自由电子来源于游离在气体中的少量电子,在 50Hz 交变电压的作用下,此自由电子总是朝交变的阳极移动,当电场足够强时,形成交变的电子崩,形成交变的放电电流,形成交变的放电声发射波,这就是内部放电声发射波是每工频周期出现两次即 100Hz 的周期信号的原因。

6 结论

绝缘子内部放电声发射波具有简单的周期性,每工频周期(20ms)内出现两次声发射波,对应工频的正半周期和负半周期各出现一次,正、负半周内的信号分别对称。一般情况下,每个工频周期内,正负半周内的放电声发射信号也是对称的,偶尔会出现不对称的情况,此时,在工频电压过最大值后的下降区间内,声发射信号的强度较大,而在工频电压过最小值后的电压上升区间内,声发射信号的强度较小,正负半周内的放电声发射信号的不对称在理论上取决于气隙的对称程度,或者说决定于气隙的特征线尺度。

随外加电压的升高,检测到的放电声发射信号的幅值也开始增加,信号持续的时间变长。绝缘子内部放电产生的放电声发射波的幅值一般不太高,最大峰—峰值可以达到 500mV 左右,但声发射信号持续的时间较长。紧贴在绝缘子表面上的传感器接收到的信号的外形一般呈箭头状,远离绝缘子本体的传感器监测到的信号有时候会呈现出多尖峰值的倒立型蛋状,同时其信号的强度要小的多。

由量纲分析可知,绝缘子内部放电声发射不仅决定于气隙中气体的初始密度、初始压力和放电能量,而且受气隙的形状和特征线尺度的影响。观测点的最大声压与初始放电能量 E_0 成正比,与观测点到放电中心的距离 R 的三次方成反比,而冲量与 E_0, r_0 乘积的平方根成正比,与观测点到放电中心的距离 R 的平方根成反比。

参考文献

- [1] 程养春,李成榕,丁立健.电晕指纹法地面检测不良绝缘子串的

- 研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 54-58.
Cheng yangchun, Li Chengrong, Ding Lijian. Detecting the insulator string with defaulty insulators on ground based on corona discharge finger prints[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 54-58(in Chinese).
- [2] 张炳达, 陈伟乐, 曾启明, 等. 放电强度矢量不平衡法识别劣化绝缘子的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 130-134.
Zhang Bingda, Chen Wei Le, Zeng Qiming, et al. Identifying faulty insulators by the method of discharge strength vector imbalance [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 130-134(in Chinese).
- [3] 王成江, 贾智斌, 顾玉凯, 等. 绝缘子放电声发射识别的试验研究[J]. 高压电器, 2005, 41 (04): 260-264.
Wang Chengjiang, Jia Zhibin, Gu Yukai et al. Experimental Research of Acoustics Emission Identifying to Discharge from Insulators [J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(04): 260-264(in Chinese).
- [4] 浙江省电力公司编. 输电线路绝缘子运行技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [5] 刘炳尧. 高电压绝缘基础[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1986.
- [6] 张仁豫. 绝缘污秽放电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [7] 李燕青, 陈志业, 律方成. 超声波法进行变压器局部放电模式识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 108-111.
Li Yanqing, Chen Zhiye, Lü Fangcheng. Pattern recognition of transformer partial discharge based on acoustic method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 108-111(in Chinese).
- [8] 胡志强. 气体电子学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985.
- [9] 李锐华, 谢恒堃, 高乃奎, 等. 基于遗传编程的绝缘内部局部放电缺陷模式识别[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 105-109.
Li Ruihua, Xie Hengkun, Gao Naikui, et al. Application of genetic programming for partial discharge pattern recognition of insulation inside defect models[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 105-109(in Chinese).
- [10] 孙才新, 舒立春, 蒋兴良, 等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 115-120.
Sun Caixin, Shu Lichun, Jiang Xingliang, et al. AC/DC flashover performance and its voltage correction of uhv insulators in high altitude and icing and pollution environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 115-120(in Chinese).
- [11] Ronald J W. The design of a spark discharge acoustic impulse generator[J]. IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing, 1975, 23(2): 157-162.
- [12] 谢多夫(苏)著, 沈青, 倪锄非, 李维新译. 力学中的相似方法与量纲理论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [13] M.B.基尔皮契夫. 相似理论[M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- [14] 徐挺. 相似方法及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [15] Tian Y, Lewin P L, Davies A E. Acoustic emission techniques for partial discharge detection within cable insulation[C]. Edinburgh, UK: In Proceedings 8th International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000: 503-508.
- [16] Mukai T M, Kawakami O M. Degradation diagnosis of solid insulation using sound waves emitted by partial discharge[C]. Brisbane Australia: Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1994: 614-617.
- [17] 冯允平. 高电压技术中的气体放电及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

收稿日期: 2005-12-28。

作者简介:

王成江(1971—), 湖北保康人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力设备在线检测和数据库系统等, cj-wang@ctgu.edu.cn。

(编辑 车德竞)