

# 绝缘子放电声发射的传播特性研究

王成江<sup>1</sup>, 贾智斌<sup>1</sup>, 顾玉凯<sup>2</sup>, 杨 溢<sup>2</sup>

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

Research on Spreading Characteristics of Acoustics Emission Wave from Discharge of Insulators

WANG Cheng-jiang<sup>1</sup>, JIA Zhi-bin<sup>1</sup>, GU Yu-kai<sup>2</sup>, YANG Yi<sup>2</sup>

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

**摘要:** 试验研究了绝缘子放电声发射波的产生及传播的基本规律, 探讨了各种绝缘子放电声发射波的传播路径, 讨论了声发射波在绝缘子本体和空气中的传播速度、反射和折射规律。试验研究了绝缘子放电声发射波的方向性及其在空气中的衰减特性, 发现声发射波具有明显的方向性, 并且呈快速下降的指数规律衰减。

**关键词:** 绝缘子; 放电; 声发射; 传播

**中图分类号:** TM835.4

**文献标识码:** A

**Abstract:** The basic law of producing and spreading of insulator discharge AE wave is researched by experiments in this paper. Spreading route, speed, reflection and refraction of AE wave, in insulators and air, are explored. Directionality and decay characteristic of AE wave from insulators in air are studied. It's found that AE wave has distinct directionality and decay fast by the exponent law.

**Key words:** insulators; discharge; acoustic emission; propagation

## 0 引言

绝缘子放电属于气体放电的范畴, 在放电过程中, 带电质点由于电场的作用而获得加速, 同时由于电弧产生的高温, 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。媒质质点的机械振动由近及远的传播就是声振动的传播, 称为声波。这种声振动的传播方向与质点振动方向一致, 亦称压力波。

局部放电声发射源可能是绝缘子的老化、劣化

或者内部气泡等引起的内部局部放电; 也可能是绝缘子表面积灰形成污秽层, 遇到湿润的气候条件时, 形成的表面污秽放电; 还可能是绝缘子表面的尖端、突起等引起的电晕等。

## 1 声发射波的传播

来自放电源的声发射波到达传感器之前, 经过介质材料的传播, 在传播过程中会出现界面的反射、波模式变换、衰减等现象。

### 1.1 传播路径

通常, 在放电源处, 大多数声发射信号都具有比较简单的振动和冲击特征, 但在材料或结构中经多次反射、折射、衰减以及波型转换后, 其波形将发生很大畸变, 给声发射信号的分析带来很大困难。因为利用声发射技术监测的对象绝大多数是固体中的声发射波, 在固体中有多种不同的声波型式存在, 如压缩波、切变波、板波和表面波等, 这些波的传播速度各不相同, 在边界处还会发生波型转换<sup>[1-3]</sup>。放电源发出的声波除直达波外还可以经多种路径到达传感器, 因此, 所探测到的声信号波形是沿不同路径到达传感器声波的叠加(混响效应), 该效应连同传感器本身具有的“振铃”效应(传感器的响应)等, 将导致输出信号更加复杂。

绝缘子内部缺陷放电引起的声波信号会通过绝缘子本体向外传播, 即内部放电源发出的振动波先通过缺陷——绝缘子本体的交界面传入绝缘子本体中, 在绝缘子本体中传播的声波将发生模式变换, 一部分声波将以原来的传播路径向外传播, 这部分声波的传播方向与质点振动方向一致, 这就是纵波。在绝缘子本体纵向振动的同时, 由于固体介质具有剪切弹性, 将有一部分质点沿波传播方向的垂直方向

收稿日期: 2006-05-31

作者简介: 王成江(1971-), 男, 湖北保康人, 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。

振动,这就是横波。正是由于这种横波的存在,绝缘子内部点源发出的声波,将通过绝缘子的多个表面传播出来,使装在绝缘子周围任意位置的传感器,都能检测到放电声发射信号。因为横波的衰减较大,沿绝缘子裙边传出的纵波比沿表面传出的横波要强,这就决定了绝缘子放电声发射波具有方向性,同时也决定了装在绝缘子表面不同位置的传感器检测到的信号不会相同。

### 1.2 发射与折射

当声波自一种媒质入射到另一种媒质时,若它们的特性阻抗不同就会产生反射和折射,这时分别遵守反射定律和折射定律。

经过绝缘子表面传播到空气媒质中的声波,在传播过程中在两个界面上发生多次反射,每次反射都要发生模式变换,这样的传播方式称为循迹波。在界面处发生多次反射和折射,以致在放电绝缘子周围的大部分空间都可检测到放电声发射波。由波动理论可以求出经过两次空气-固体交接面的透射后,再传出绝缘子的信号已经十分微弱<sup>[4]</sup>,计算后发现传出绝缘子的声信号的能量透射系数T只有 $10^{-3}$ 数量级。一个从放电源发出非常尖锐的声脉冲,经过介质材料传播,波形变钝,传出绝缘子表面时将变成一个复杂的呈箭头状的波形,见图1(a)中通道1下方波形。

发射波具有比较简单的振动和冲击特征,图1(b)中通道1的波形,是由可移动传感器测到的电晕声发射波,通道2的波形是由紧贴在绝缘子上表面上的固定传感器测到的、通过绝缘子本体传播的电晕声发射波,从图1(b)的通道1波形可见,固定传感器不仅可检测放电的声发射信号,还可检测放电的电脉冲,观察通道2的声发射信号,发现检测到的声发射波不但出现了相位延迟,而且出现了波模式的变换,其结果是通道2中的声发射信号不再具有简单的冲击特性。

### 1.3 传播速度

当出现绝缘子内部放电声发射时,在绝缘子本体中将传播纵波和横波。当绝缘子足够大时,其中传播的纵波声速由式(1)决定:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_{ins}(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

当绝缘子足够大时,其中传播的横波声速由式(2)决定:

$$c = \sqrt{\frac{E}{2\rho_{ins}(1+\nu)}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中:E为绝缘子材料的杨氏弹性模量;为泊松比; $\rho_{ins}$ 为绝缘子材料的密度。

当出现绝缘子表面污秽放电和电晕时,其声发射波主要是沿空气中传播的纵波,因为在气体中,只能传播纵波,其声速可由式(3)决定:

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho_{air}}} \quad (3)$$

式(3)中: $\rho_{air}$ 为空气的静态密度;为空气的比热系数;p为空气的静态压力。

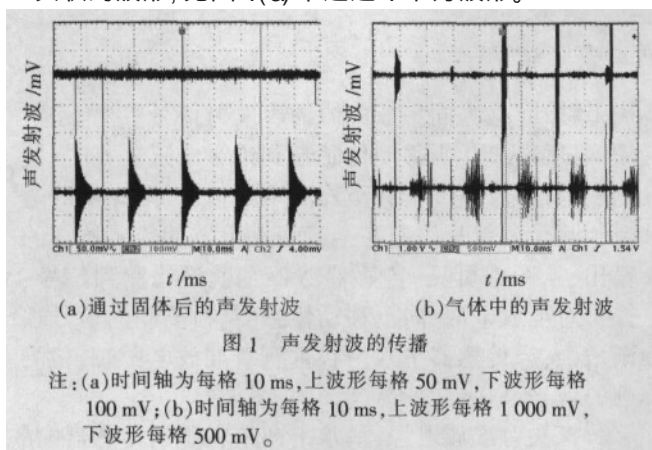
实测的几种常见输电线路材料的声速见表1<sup>[5]</sup>。

## 2 声发射波的衰减

声发射传播的另一个特性是衰减。由于声波的扩散、散射和吸收而使能量衰减;包括向周围扩展的扩散损失和固体内部的摩擦损失。前者与频率无关,振幅与传播距离成反比。后者振幅与传播距离的平方根成反比,且频率越高衰减越大。

超声波在气体中传播时,如含有大量粉尘或蒸汽,由于散射的影响将给超声传播造成很大的影响,解决办法可降低超声频率(有一定限制,频率太低易引入外界机械噪声),或降低测量范围。

图2是在实验室实测到的典型的绝缘子放电声



对于绝缘子表面污秽放电和电晕放电产生的声发射波的传播,和上述内部放电声发射波的传播过程类似,相比之下,表面放电(电晕)声发射波直接经气体传播而直接进入传感器探头,少了内部放电声发射波传播过程中的气体-固体和固体-气体等两次界面的发射和折射,因此,表面污秽放电和电晕声

表1 常见输电线路材料的声速

材料	平面纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	平面横波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	棒中纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	材料	平面纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	平面横波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	棒中纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )
铝(A1)	6420	3040	5000	空气	340.29		
铜(Cu)	5010	2270	3750	硬玻璃	5640	3280	5170
硬铝	6320	3130	5150	铅玻璃	3980	2380	3720
钢	5941	3251	5250	冕玻璃	5100	2840	4540
不锈钢	5790	3100	5000	有机玻璃	2680	1100	1840

发射波。试验发现:随声发射信号传播距离的增加,信号的强度快速衰减。图 2(a), 2(b) 分别对应于传感器放在距同一放电声发射源 15 cm, 100 cm 处测到的声发射波, 图中: 波形纵座标每格 50 mV; 时间轴每格 10 μs。从图 2 可见: 当传感器 1 距放电源约 15 cm 时, 检测到的声发射信号幅值约 200 mV, 沿同一方向后移传感器的位置到距放电源约 100 cm 处时, 传感器 1 检测到的信号的幅值减小到只有约 20 mV。

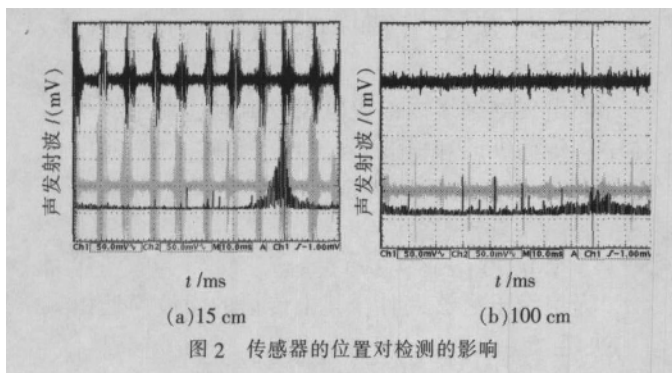


图 2 传感器的位置对检测的影响

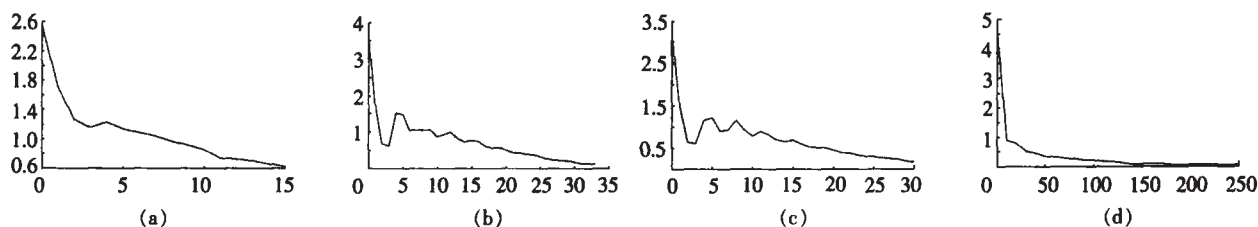


图 3 声发射信号在空气中的衰减特性

为信号的初始幅度均方根值 ( $x=0$ );  $K$  为与传播路径有关的衰减常数;  $X$  为声发射信号的传播距离。

从式 (1) 可见, 信号的沿途衰减与传播距离有关, 而有效检测距离不仅决定于放电的起始强度, 还取决于声发射波的衰减常数  $K$ , 在近场距离 (盲区) 以外, 有效检测距离按快速下降的指数规律衰减, 这决定了检测沿空气传播的声发射波时, 有效距离一般在几米之内, 且随放电强度的变化而变化。当探头紧贴于绝缘子的表面并进行有效的声耦合后, 检测沿绝缘子本体传播的声发射波的灵敏度会高一些, 这是因为绝缘子本体可以导波, 并且, 同沿空气传播相比, 它少了绝缘子到空气、空气到传感器的探头的两次界面反射和折射。

### 3 声发射波的方向性

以绝缘子污秽放电声发射试验为例, 研究声发射波的方向性<sup>[6-7]</sup>。在洁净的双层绝缘子的下层表面上, 用固体涂层法染污一块, 涂层是硅藻土、水及氯化钠按一定比例配成的具有一定电导率和等值盐密的污秽物悬浮液。

两只特性相同的传感器, 传感器 2 固定在绝缘子的正上方; 传感器 1 的探头对准放电源, 在以放电源为圆心、以放电源到传感器 1 的距离为半径的圆

周上移动, 检测同一放电源的声发射信号。为了研究绝缘子放电声发射波在空气中的衰减规律, 在试验室中测量了恒稳声发射波在空气中的直线衰减特性, 图 3 示出的是 4 次实测的声发射波的距离-声压典型波形, 横轴是检测距离, 单位为 cm, 纵轴是声发射传感器检测到的信号的均方根值, 单位为 mV, 图 3(a), 3(b), 3(c) 中, 采样间隔为 1 cm, 图 3(d) 的采样间隔为 10 cm。观察图 3(a), 3(b), 3(c) 的细节, 发现在距声发射源 5 cm 的范围内, 检测到信号的均方根值有一个振荡衰减的过程, 对应图中波形的下陷, 是由近场衍射造成的盲区现象引起的。

研究大量的恒稳声发射波在空气中的直线衰减特性, 发现在近场距离 (盲区) 以外, 随传播距离的增加, 信号的幅值大致按快速下降的指数规律衰减, 见图 3(d)。经统计分析, 数学建模后, 发现声发射波的幅度均方根值随传播距离的变化规律可用式 (4) 表示:

$$F = F_0 e^{KX} \tag{4}$$

式中:  $F$  为检测到的声发射信号的幅度均方根值;  $F_0$

周上移动, 检测同一放电源的声发射信号。

试验发现: 当移动传感器到绝缘子正上方时, 检测到的信号比较弱, 甚至检测不到信号, 图 4 中的通道 2 测量的就是固定在绝缘子正上方的传感器 2 的输出, 从图中可见, 传感器 2 根本就没检测到信号; 探头对准放电源, 向下移动传感器, 检测到的信号逐渐增强, 当传感器呈水平状垂直对准放电源时, 检测到的信号最强。

探头对准放电源, 呈水平向左右移动传感器, 在放电源的正负 90° 范围内能检测到信号, 当传感器呈水平状正对准放电源时, 检测到的信号最强, 偏离此位置后, 检测到的信号逐渐减弱, 当传感器移动到放电源的背后时, 又检测不到信号。

固定传感器的位置, 调整探头的方向, 探头偏离放电源后, 偏离的角度越大, 检测的信号越弱, 偏离到和放电源呈 90° 夹角后, 完全检测不到信号。

探头保持水平方向, 沿绝缘子串 (两片双层绝缘子, 染污下片绝缘子的下层表面) 的方向上下移动传感器, 当探头指向污秽绝缘子的防污裙边时, 检测到的信号最强, 在上片绝缘子的下防污裙边上信号的强度次之, 然后是这两片绝缘子之间的间隙内传出的信号较强, 其他位置检测到的信号都较弱, 离污秽绝缘子越远, 信号越弱, 直至检测不到信号。

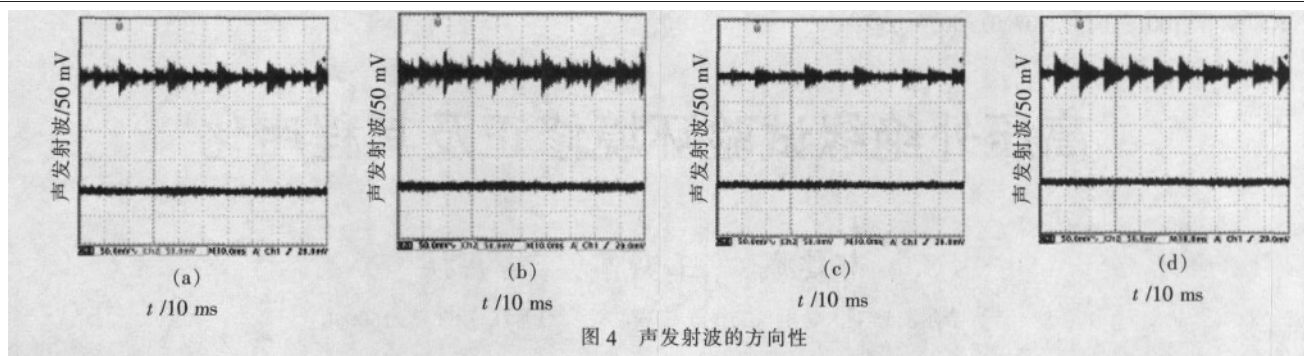


图 4 声发射波的方向性

典型的污秽放电的方向性波形见图 4, 图中分别示出了通道 1(对应传感器 1)和通道 2(对应传感器 2)的实测波形,图 4(a)示出的是在污秽绝缘子的邻近的上片绝缘子的下防污裙边上的测到的信号,图 4(b)示出的是在污秽绝缘子的下防污裙边上的测到的信号,图 4(c)示出的是探头 1 从斜上方呈 45 角对准放电源,距离 25 cm 处测得的声发射信号,图 4(d)显示的是探头 1 从水平方向呈 0 角对准放电源,距离 25 cm 处测得的声发射信号。

#### 4 结语

在放电源处,大多数声发射信号都具有比较简单的振动和冲击特征,但在材料或结构中经多次反射、衰减以及波型转换后,其波形将发生很大畸变,它决定了绝缘子内部放电和表面放电声发射波波形间的差别,和绝缘子内部放电相比,表面放电声发射波直接经气体传播而进入传感器探头,少了内部放电声发射波传播过程中的气体-固体和固体-气体等两次界面的发射和折射,因此,表面污秽放电和电晕等声发射波具有比较简单的冲击特征,而内部放电声发射波却是一个复杂的波形。

由于声信号在空气中的传播速度较慢,只有 340 m/s,而放电的电信号传播速度极快,达到  $3 \times 10^8$  m/s,由电、声信号到达的时间差,可以方便地计算出放电源到传感器之间的距离,很好地实现放电

定位,传播速度的极大差异决定了声发射法定位较电学定位的精度高得多,而声发射数字处理系统的造价较电脉冲数字处理系统的造价低得多。

声发射波快速下降的指数衰减规律,决定了检测沿空气传播的声发射波时,可检测的有效距离一般只在几米之内。

放电声发射波具有方向性,当探头正对放电源时,能够检测到的声发射信号最强,当探头偏离或远离放电源时,或探头和放电源之间有障碍物时,检测到的信号都会大大减弱。

#### 参考文献:

- [1] 于大安. 超声检测技术讲座——超声检测的物理基础(上)[J]. 基础自动化, 1995(6): 53-57.
- [2] 于大安. 超声检测技术讲座——超声检测的物理基础(下)[J]. 基础自动化, 1996(1): 55-58.
- [3] 汪成喜. 全数字化声发射系统研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2000.
- [4] 王成江, 舒乃秋. 真空断路器真空度声学检测方法研究[J]. 三峡大学学报, 2003, 25(6): 53-55.
- [5] 马大猷, 沈 壕. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [6] Bengtsson T, Leijon M, Ming L. Science, Measurement and Technology[J]. IEE Proceedings, 1995: 142(1): 85-88.
- [7] Aloys O Akumu, Noboru Kawaguchi, Ryotaro Ozaki, et al. A Study of Partial Discharge Acoustic Signal Propagation in a Model Transformer [C]// Electrical International Materials, 2001: 583-586.

(上接第 51 页)

自动准同期装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 75-77.

- [3] 陈小桥, 周水斌, 王先培, 等. 一种新的相位(差)算法及其在自动准同期中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(6): 96-99.
- [4] 李振然. 利用富里叶变换实现微机自动化准同期 [J]. 继电器, 1994(4): 35-40.
- [5] 罗苏南, 叶妙元. 电子式互感器的研究进展 [J]. 江苏电机工程, 2003, 22(3): 51-54.
- [6] 罗苏南, 南振乐. 基于电容分压器的电子式电压互感器的研究

- [7] 高电压技术, 2004, 30(10): 7-8.
- [7] 时德钢, 刘 晔, 张丽平, 等. 高电压等级电压互感器综述[J]. 变压器, 2003, 40(6): 11-14.
- [8] 时德钢, 刘 晔, 胡光辉, 等. 一种基于电容分压的电子式电压互感器[J]. 电力电容器, 2003(4): 1-3.
- [9] 段雄英, 廖敏夫, 邹积岩. 基于电容分压器的电子式电压互感器的研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(1): 50-51.
- [10] 张雄伟, 曹铁勇. DSP 芯片的原理与开发应用 (第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!