

脉冲电声法空间电荷测量波形恢复的数据处理

吴超一, 钟力生, 王霞, 屠德民

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西省 西安市 710049)

DATA PROCESSING OF SPACE CHARGE WAVEFORM RECOVERY IN PEA METHOD

WU Chao-yi, ZHONG Li-sheng, WANG Xia, TU De-min

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Waveform of space charge distribution in solid dielectrics measured by the PEA method is severely distorted due to the wave attenuation in material as well as the intrinsic characteristic of measurement system. The waves of interfacial charges before and after attenuation in sample under low electric stresses were simulated by Gaussian functions, and an attenuation equation was developed. The attenuation function taken as a transfer matrix, a recovery waveform function of the total space charges was obtained. A recovery model was established on transmission analysis of the signal in the dielectric and amplifier, and the test wave was recovered by Matlab processing. It is shown by the treatment results that the amount of interface space charges at the electrode A can be recovered to 90% of those at the electrode B. Moreover, the hetero-charges near the electrode A can be obviously found in the recovered waveform.

KEY WORDS: Insulation technology; Space charge; Solid dielectrics; Waveform distortion; Data processing

摘要: 采用脉冲电声法(PEA)测量固体电介质中空间电荷的分布时, 由于受介质特性和系统硬件的影响, 测量波形会发生畸变。文中用高斯函数模拟低场强下界面电荷波形衰减前后峰形的变化, 建立了波形衰减模型。把介质的衰减因子看作一个传导矩阵, 获得了恢复整个介质中空间电荷分布曲线的方程式。通过对信号在介质和放大器中传输过程的分析和建模, 以 Matlab 软件对实测波形进行了恢复。结果表明: 在电荷分布波形中电极 A 处的峰值可恢复到 90%, 而且被掩盖的异极性电荷得以显现。

关键词: 绝缘技术; 空间电荷; 固体电介质; 波形畸变; 数据处理

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50277030)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50277030).

1 引言

近十年来, 介质中空间电荷的研究一直是国际绝缘领域的一个前沿课题。现有研究表明, 固体中的空间电荷不仅畸变电场, 降低绝缘击穿电场强度^[1-2], 而且是引起聚合物绝缘电老化的主要因素^[3-7]。目前, 电声脉冲法 (PEA) 已经广泛用于固体电介质空间电荷分布的测量^[8], 其原理是检测脉冲电压作用下由样品中的空间电荷产生的声波, 通过检测声波的时间函数求得空间电荷沿试样厚度的分布。由于绝大多数电介质存在介质损耗与色散, 声波在其中传播时, 幅值衰减和传输速度都与声波的频率有关, 当含有不同频率分量的声波通过电介质后, 必然导致波形的畸变^[9]。另一方面, 由于前置放大器的输入阻抗与传感器输出阻抗不匹配, 也会引起被测信号波形的畸变。因此, 要获得介质中空间电荷的实际分布, 就必须对测量波形进行恢复重建。

目前, 国外尤其是日本在界面电荷波形的恢复方面取得了成功^[10], 国内在这方面的详细研究工作较少^[11]。

本文通过分析, 限定恢复信号频率分量的范围在 100MHz 以内, 解决了恢复波形的稳定性; 将介质的衰减因子看作一个传导矩阵, 获得了恢复整个介质中空间电荷分布曲线的方程式, 实现了试样内全部空间电荷分布曲线波形的恢复, 最大程度地再现真实的电荷分布信息。

2 波形恢复的模型

2.1 声波衰减

在图 4 所示 PEA 测量系统中, 将一个较厚试样放在两铝电极之间, 外施低电场使电介质中不出现

空间电荷,由此测得界面电荷波形,与理想波形对比如图1所示。由图可见:电极A处波形比电极B处波形的幅度小、宽度宽,产生了严重的衰减和畸变^[10]。

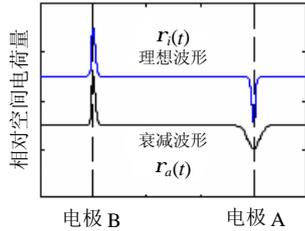


图1 PEA方法中介质衰减对波形的影响示意图
Fig.1 Influence of attenuation in PEA method

2.2 衰减方程

如图1所示,理想波形 $r_i(t)$ 与衰减后波形 $r_a(t)$ 两者之间在时域存在着如下的卷积关系^[9]:

$$r_a(t) = g(t, z) * r_i(t) \quad (1)$$

其中 $g(t, z)$ 是介质衰减与传导时间 t 和位置 z 的函数。如果能够获得介质的传导函数关系,就能够用衰减后的波形通过反卷积运算恢复其真实的波形。对于位置为 z 处的衰减前后的波信号在频域中的关系如式(2)

$$\begin{cases} r_a(f, z) = r_i(f, 0)e^{-a(f)z - jb(f)z} \\ b(f) = 2\pi f / v(f) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $a(f)$ 、 $v(f)$ 分别为损耗和色散效应的频域函数。式(2)反映了损耗与色散衰减因素对波形的影响。由此可得在位置 z 处的频域传导函数

$$G(f, z) = \frac{r_a(f, z)}{r_i(f, 0)} = e^{-a(f)z} e^{-jb(f)z} \quad (3)$$

2.3 恢复方程

2.3.1 高斯函数

用高斯函数模拟图1中的波在电极A处衰减前后的数据,有 $v(f) = \text{const}$ 成立^[10],即说明波中各个频率分量按同一速度前进,也即说明了用高斯函数模拟波的衰减是不计色散衰减的。

如果只有损耗而无色散衰减时,波形中电极A处的波峰会出现幅值下降并展宽现象。但如果只有色散而没有损耗衰减,则会出现振荡现象^[9],这种情况下信号出现了各分量的运动速度根据频率发生变化。由于传播速度不同,那么必然出现高低频分量发生了相对位置变化,亦即会发生振荡。另外,根据数值仿真实验也可说明这一点,如图2所示。

由于在实测空间电荷分布的波形中很少出现如图2所示的高频振荡,可以不计色散衰减的作用^[12],

认为产生信号畸变的主要因素是损耗,因此采用没有色散效应的高斯函数模拟衰减前后的波形,并作为波形恢复的基础是合理的,如图3所示。

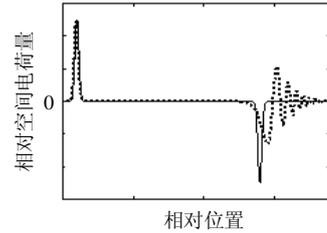


图2 仅有色散衰减的波形仿真
Fig.2 Wave stimulation with only dispersion attenuation

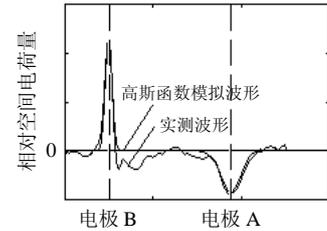


图3 拟合前后的波形
Fig.3 Waves before and after fitting

2.3.2 数学模型

首先考虑在介质中某一位置处所产生的声波的衰减情况。根据式(2)可知,在介质 z_k 处产生的波 $r_1(t, z_k)$ 由于衰减,测到的波为 $r_2(t, z_k)$,两者之间满足关系式(4)。

$$r_2(t, z_k) = g(t, z_k) * r_1(t, z_k) \quad (4)$$

其中, $g(t, z_k)$ 为位于介质 z_k 处的衰减传导函数。

进一步推导,即得对于介质 z_k 处产生的声波在频域中的恢复方程^[10]

$$r_1(f, z_k) = G^{-1}(f, z_k) \cdot r_2(f, z_k) \quad (5)$$

为恢复整个电介质中的波形,如将介质对应的每一位置的衰减传导函数求出,那么整个介质位置上的衰减传导矩阵即可得到。所以,对于整个介质的波形而言,衰减前后的波形 r_i 与 r_a 之间应当满足式(6)所示关系^[9]。

$$G(t, z) = [g(t, z_1) \quad g(t, z_2) \quad \cdots \quad g(t, z_n)] \cdot \begin{bmatrix} r_a(1) \\ r_a(2) \\ \vdots \\ r_a(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(1,1) & g(1,2) & \cdots & \cdots & g(1,n) \\ g(2,1) & g(2,2) & \cdots & \cdots & g(2,n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ g(n,1) & g(n,2) & \cdots & \cdots & g(n,n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_i(1) \\ r_i(2) \\ \vdots \\ r_i(n) \end{bmatrix}$$

即

$$r_a(z) = G(t, z)r_i(z) \quad (6)$$

其中, $g(i, k)$ 是介质空间位置 k 处的衰减传导向量在时间位置 i 处的分量,那么,传导矩阵 $G(t, z)$ 则

是介质整个位置上的传导矩阵，故由此推导可得恢复波形模型，见式(7)。

$$r_i(z) = G^{-1}(t, z)r_a(z) \quad (7)$$

2.4 波形恢复仿真

图 3 为恢复前的波形通过模拟波形数据，利用式(7)所作的恢复，据此检验波形恢复模型的可行性。

首先用高斯模拟低场强下内部基本无空间电荷的波形中前后两个峰，然后根据式(3)与 (4)求取衰减因子 $a(f)$ ，并利用式(3)求取试样中不同位置的传导函数 $g(t, z_k)$ ，再根据式(6)求取传导矩阵 $G(t, z)$ ，求逆即得同类试样的空间电荷波形的恢复矩阵。

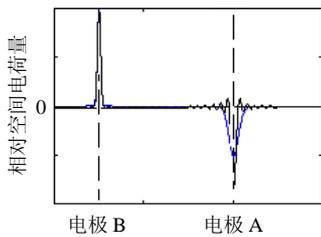


图 4 介质中空间电荷波形的恢复

Fig.4 Recovery of space charge waveform

从图 4 所示的仿真结果来看，无论是幅值还是宽度，都能够比较好的恢复到理想状况，因此可以认为用该模型模拟恢复波形的效果是比较理想的且方法可行。

3 消除前置放大器的阻抗因素的影响

如图 5 所示，由于前置放大器的阻抗 R_2 不可能是理想无穷大，故此所测到的信号 $U(f)$ 不再是通过 B 电极后的真实信号，而是通过了压电传感器 PVDF 的电容 C 和前置放大器阻抗 R_2 组成的滤波电路，在放大器阻抗上的电流信号，实际信号 V_0 应该是所测信号 V_1 与在压电传感器电容上的电压分量之和。

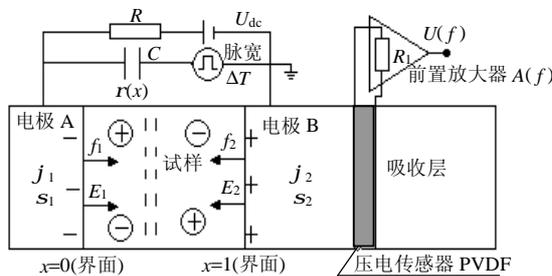


图 5 PEA 方法测量空间电荷的原理图

Fig.5 Schematic diagram of PEA method

V_1 与 V_0 关系为

$$V_1(f) = \frac{j2\pi CR_2}{1 + j2\pi CR_2} V_0(f) \quad (8)$$

式中 C 为 PVDF 的电容; R_2 为放大器的入端阻抗。

由以上分析可知，所测信号 V_1 恢复的第一步应该是消除前置放大器阻抗的影响。

4 实测波形的恢复与讨论

文中采用的数据是在乙丙胶 (EPDM) 试样上测得的。试样厚度为 0.44mm，电极直径为 $\varnothing 25\text{mm}$ 。本实验室所用的脉冲信号脉宽为 20ns，放大器入端阻抗为 50 Ω ，PVDF 的电容约为 1000pF。

第一步纠正因放大器阻抗引起的畸变，利用自编的 Matlab 程序根据式(6)恢复信号如图 6 所示。由图可知，处理后信号得到了很大纠正。

在第一步恢复得到的数据基础上进行第二步恢复，纠正衰减导致的畸变，恢复前后的波形如图 7 所示。由图 7 可见，经过第二步处理后，在靠近电极 A 处的波形得到了明显的纠正。

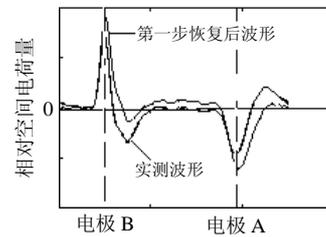


图 6 35kV/mm 场强下波形的第一步恢复

Fig.6 The first step's recovery of the waveform under 35kV/mm

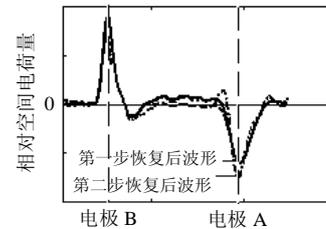


图 7 35kV/mm 场强下波形的第二步恢复

Fig.7 The second step's recovery of the waveform under 35kV/mm

在波形恢复过程中将信号频率分量限制在 100MHz 内，因而恢复处理进行得非常顺利；反之，如果不加这种限制条件，矩阵求逆时，较小的高频分量能导致矩阵奇异，恢复后的波形将会出现极大的振荡，如图 8 所示。从所测信号自身来看，由于理想信号中的高频分量对于实测信号中的高频分量而言太大而无法得到恢复，如果不限定在一定频率范围内恢复，则会出现振荡^[10]。

如图 6 中实测曲线可见：试样中空间电荷属于异极性电荷，在正极性的电极 B 附近介质中出现了负极性空间电荷。异极性电荷可来源于偶极子的极

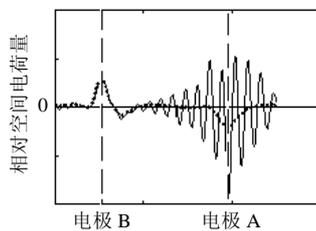


图8 大于100MHz频率分量的恢复出现的波形振荡

Fig.8 Oscillation appeared with the recovery frequency over 100 MHz

化和杂质的电离, 异极性电荷的产生是成对的。极化形成的异极性电荷始终保持在介质中。在低场强下, 电子比正离子更容易在电极上中和, 可是, 从图6可见, 阳极旁的负电荷比阴极旁的正电荷多。因此人们不得不怀疑: 正极性电极B附近介质中的负极性空间电荷峰是测量仪器特性决定的过冲引起的^[13-14], 的确, 如图5可知, 传感器PVDF膜相当于一个电容器, 它与放大器输入阻抗形成高通滤波器, 切除低频分量必然引起信号的过冲; 同理, 从图6也可知, 经过纠正放大器引起的畸变后, 电极B附近的负极性空间电荷减少很多, 消除了放大器输入电路引起的过冲, 抬高了电极A界面电荷峰的峰值, 在介质中部出现了一些正极性空间电荷。

从图7又可见, 第一次恢复的波形再经第二次恢复, 恢复损耗引起波形衰减, 第二个峰的峰值可达到第一个峰值的90%左右; 此外, 电极A(界面)处的异极性电荷也能够清楚地显示出来, 这与试样中异极性电荷分布的一般规律相符合。

5 结论

导致介质中空间电荷分布波形畸变的两个主要因素: 一是硬件系统引起的所谓“过冲”畸变; 二是试样材料具有的损耗衰减特性。

通过采用本文简化进行波形恢复的数据处理方法, 不但可恢复电极的界面电荷峰, 也可以恢复整个介质中空间电荷的分布曲线。

参考文献

- [1] 尹毅, 韩社教, 屠德民. 固体绝缘中空间电荷测量装置的研制和应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 1-5.
Yin Yi, Han Shejiao, Tu Demin. Developing and application of apparatus of space charge measurement in solid insulating materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 1-5.
- [2] Mizutani T. High field phenomena in polymeric insulating material,

1996 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation[C]. Xi'an, China: 1996.

- [3] Dissado L A, Mazzanti G, Montanari G C. The role of trapped space charges in the electrical aging of insulating materials[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(5): 496-506.
- [4] 李忠华, 尹毅, 朱军, 等. 聚合物绝缘电热联合老化的陷阱理论和实验验证[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(2): 70-74.
Li Zhonghua, Yin Yi, Zhu Jun *et al.* Trap theory of combined aging under electrical and thermal stress in polymers and its test verification[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(2): 70-74.
- [5] Li Z, Yin Y, Wang X *et al.* Formation and inhibition of free radicals in electrically stressed and aged insulating polymers[J]. Journal of Applied Physics, 2003: 89: 3416-3425.
- [6] Liufu D, Wang X S, Tu D M *et al.* High-field induced electrical ageing in polypropylene films[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83(4): 209-214.
- [7] 屠德民, 王新生, 阚林, 等. 电荷陷阱对聚乙烯树状化的影响[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(10): 7-12.
Tu Demin, Wang Xinsheng, Kan Lin *et al.* Effect of charge trapping on electric treeing in polyethylene[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(10): 7-12.
- [8] Li Y, Takada T. Progress in space charge measurement of solid insulating materials in japan[J]. IEEE EI Magazine, 1994, 10(5): 16-27.
- [9] 高田达雄. 电声脉冲法测量空间电荷的原理与方法[M]. 西安: 西安交通大学, 1995.
- [10] Tanaka Y, Hanawa K, Suzuki K *et al.* Attenuation recovery technique for acoustic wave propagation in PEA method[C]. Electrical Insulating Materials, Proceedings of 2001 International Symposium on, 2001.
- [11] 扈罗全, 郑飞虎, 张治文. 用于电介质中空间电荷分布测量的Tikhonov反卷积算法[J]. 计算物理, 2004, 21(5): 432-438.
Hu Luoquan, Zheng Feihu, Zhang Yewen. The application of tikhonov deconvolution algorithm for space charge distribution in dielectrics[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2004, 21(5): 432-438.
- [12] Li Y, Aihara M, Murata K *et al.* Space charge measurement in thick dielectric materials by pulsed electro-acoustic method[J]. Rev. Sci. Instrum, 1995, 66(7): 3909-3916.
- [13] Fu M, Chen G, Davies A E *et al.* Space charge measurements in power cables using a modified PEA system[C]. Dielectric Materials, Measurements and Applications Conference Publication, IEE 2000.
- [14] 吕亮, 方亮, 王霞, 等. 硅橡胶中空间电荷的形成机理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 139-144.
Lü Liang, Fang Liang, Wang Xia *et al.* Formation mechanism of space charge in silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 139-144.

收稿日期: 2005-02-24。

作者简介:

吴超一(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。