

声脉冲法空间电荷测量系统的研究

刘康淋 廖瑞金 赵学童

Measurement of space charges in air based on sound pulse method

Liu Kang-Lin Liao Rui-Jin Zhao Xue-Tong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 164301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

晶体摆动场辐射及其共振线附近的粒子运动行为

Crystalline undulator radiation and motion behavior in the vicinity of the resonance line

物理学报.2014, 63(8): 084104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084104>

参数激励与晶体摆动场辐射的稳定性

Parametric excitation and stability of crystalline undulator radiation

物理学报.2013, 62(22): 224102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224102>

电子磁矩对同步辐射频谱的修正

Modification from the spin to the synchrotron radiation from a relativistic electron

物理学报.2013, 62(9): 094103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094103>

亚太赫兹波折叠波导扩展相互作用振荡器研究

Study of extended interaction oscillator with folded waveguide in sub-terahertz band

物理学报.2013, 62(2): 024103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024103>

二次等效法求三层媒质中静态电偶极子的场分布

Electric field of a static electric dipole in three-layer medium model using secondary equivalent method

物理学报.2012, 61(24): 244101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.244101>

声脉冲法空间电荷测量系统的研究*

刘康淋 廖瑞金† 赵学童

(重庆大学电气工程学院, 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

(2014年12月19日收到; 2015年3月12日收到修改稿)

气体中空间电荷的分布与电晕放电的机理紧密相关, 获取电晕放电过程中空间电荷分布对深入研究电晕放电起始、自持过程有着重要作用, 但是如何准确获得电晕放电过程中的空间电荷分布一直是国际上尚未解决的难题. 本文基于声脉冲法提出一种电场信号解耦算法, 推导了空间电荷在声场中被调制产生的电场信号与声脉冲信号和空间电荷密度之间的数值关系, 讨论了不同测量情况下声发射系统的设计要求; 搭建了一套可用于实时测量针板电极电晕放电空间电荷分布的非接触式测量系统, 该系统主要包括声脉冲发生模块、空间电荷模块及电场信号解耦算法模块. 运用该系统实现了声脉冲激发作用下电场信号的测量, 通过提出的电场信号解耦算法得到了空间电荷密度, 对其测量结果与电晕电流法测量结果进行比较, 验证了电场信号解耦算法的有效性. 该算法可以应用于空间电荷一维、二维和三维测量系统中.

关键词: 声脉冲, 空间电荷, 空间电场

PACS: 43.20.+g, 41.60.-m, 41.20.Cv

DOI: 10.7498/aps.64.164301

1 引言

伴随特高压直流输电的迅猛发展, 特高压直流输电电磁环境等相关问题备受关注. 电晕放电是电磁环境的一个重要组成部分^[1]. 正常工作电压下的输电线路通常都会发生电晕效应. 由于输电线电压极性固定, 直流电晕产生的离子在背离导线的方向上运动, 充斥着整个输电线空间形成离子流^[2]. 输电线周围空间电场是输电导线产生标称场强和离子流场共同作用的结果.

国内外学者对电晕放电开展了大量的数值仿真计算. 1969年, Sarma和Janischewskyj^[3]首次提出并应用通量线法分析计算了输电线路的离子流场. 该方法建立在Deutsch假设的基础上, 认为空间电荷不改变静电场的方向, 只改变静电场场强强度. 也正是由于该方法基于Deutsch假设, 其计算精度受到很大限制.

1979年, Janischewskyj^[4]针对同轴圆柱结构首次提出有限元法用于计算离子流场, 随后将该方

法推广到输电线路模型的计算中. 该方法的计算结果对网格剖分有很强的依赖性, 较细的网格剖分才能保证计算的稳定性和结果的精度.

1987年, Takuma等^[5]引入上流有限元法对输电线路离子流场进行了计算. 该方法认为节点所在单元空间电荷由上流节点空间电荷所决定, 通过递推的方式对整个空间电荷密度分布进行求解. 该方法在有限元的基础上增加了数值计算的稳定性.

有限体积法在流体力学方面运用广泛, 对其算法的稳定性和计算精度已有充分的认识. 1997年, Li^[6]将有限体积法与有限元法结合对离子流场进行了计算. 该方法在边界电荷密度取值时认为控制体积边界处电荷密度等于迎风控制体积的电荷密度值, 在处理对流问题时反映了物理过程的运输特性, 但是处理对流扩散问题时会出现假扩散的问题, 影响计算的精度.

近年来, 很多学者在此基础上对各类算法进行了改进和推广. Lu等^[7,8]率先将Kaptzov假设应用到数值计算的边界条件中; 周象贤等^[9]在迎风控制

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB209401)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cqklliu@cqu.edu.cn

容积内对棱边中点电荷密度插值采用了迎风差分格式, 利用最小二乘的方法对插值函数进行求解, 使得有限体积法的计算精度达到二阶精度.

为深入探究电晕放电微观机理, 国内外很多学者搭建了电晕放电微观物理数学模型, 分析计算了 Trichel 脉冲放电的微观过程. 文献 [10—12] 在二维流体动力学模型的基础上, 提出了改进的混合数值模型, 考虑了 12 种粒子之间的 27 种碰撞反应, 加入了光电离项和二次电子发射项, 重点分析了 Trichel 脉冲过程中 5 个关键时刻微观特征量的变化. 廖瑞金等 [13] 在此基础上重点讨论了 Trichel 脉冲放电过程中重离子的成分及分布特性, 分析了重离子对电晕放电的影响.

综上所述, 电晕放电离子流场数值计算的方法已经相当完备, 但少有学者从实验测量上对计算结果进行验证. Hazmi 等 [14] 首次尝试利用声脉冲对空间电荷进行测量, 推导了空间电荷调制产生电场与声脉冲及空间电荷之间的函数关系, 搭建了对应的实验平台, 定性分析了空间电荷的分布. 由于工程实际中电极结构较为复杂, 文中推导的关于调制电场与声脉冲及空间电荷之间的函数关系很难适用, 同样其结果未能定量分析空间电荷密度分布.

本文在 Hazmi 等 [14] 的基础上搭建了声脉冲空间电荷测量平台, 利用脉冲声信号对空间电荷进行调制, 调制产生的电场信号经电场天线接收, 提出一种电场信号解耦算法, 推导了调制电场和声脉冲及空间电荷的数值关系, 得到空间电荷密度的数值解; 最后将实验测量推导得到的结果与电晕电流法测得结果进行了对比, 验证测量方法的有效性.

2 理论基础

2.1 声脉冲的调制

在曲率很大的电极附近, 电场强度足以使空气发生游离, 在大曲率电极附近很薄的一层空气将具备自持放电的条件, 称为电晕放电. 电晕放电区域分为两部分, 靠近放电电极很薄的一层区域称为电晕层. 电晕层内电子的碰撞、电子的吸附、光电离、二次电子发射等一系列物理过程反应剧烈. 但是电晕层厚度很薄, 在数值计算中往往忽略电晕层的厚度. 当电压极性一定时, 在电晕层碰撞、吸附等原因产生的正离子(或者负离子)在电场作用下被推离电极, 电极周围空间都充斥着与电极同极性的空间电荷, 这一区域称为传导区. 传导区内正负离子主

要依附于空气中的氮氧分子. 声脉冲信号在空气中传播时, 引起空气密度的周期性变化, 间接引起依附于空气分子的空间电荷的密度周期性变化.

假如在空气中传播的一束正弦声波, 声压在传播过程中的变化情况表示为 [15]

$$P = P_0 + A e^{-\alpha r} \cdot e^{j(\omega t - Kr)}, \quad (1)$$

P 表示声压; P_0 表示空气在稳态时的声压 (1.013×10^5 Pa); A 表示声压的振幅; γ 表示定压比热容 (1.402); α 表示衰减常数; ω 表示声波的角频率; K 表示波系数, $K = \omega/c$, c 表示声速; r 表示声波的传播距离.

在声波的调制作用下, 空间电荷的密度将周期性变化, 其变化规律表示为

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \frac{A}{\gamma P_0} e^{-\alpha r} \cdot e^{j(\omega t - Kr)} \right], \quad (2)$$

其中 ρ 表示空间电荷密度, ρ_0 表示稳态是空间电荷密度; 由于传播距离较短, 声压振幅随距离的指数衰减可以通过线性拟合的结果代替, 电荷密度的变化可以表达为

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \frac{A(x)}{\gamma P_0} \cos(\omega t - Kr) \right], \quad (3)$$

$A(x)$ 表示声压振幅随距离变化的拟合函数. 由 (2) 和 (3) 式可以看出, 在声波的调制作用下, 空间电荷密度变化频率等于声脉冲的频率, 同理, 声脉冲调制产生的电场信号频率也等于声脉冲频率.

2.2 电场信号解耦算法

根据高斯通量定理可知, 变化的电荷将产生变化的电场. 空间电荷在声脉冲的调制下将周期性地变化, 产生变化的电场. 通过电场天线接收电场信号, 对电场信号进行后期解耦处理, 还原得到电场信号与空间电荷之间的对应关系, 实现对空间电荷的测量.

Hazmi 等 [14] 推导了声脉冲激励下电场信号与声脉冲及空间电荷之间的函数关系, 但是存在如下问题: 1) 声脉冲传播方向的假设过于理想化, 声脉冲激发产生的声场很难按照理想圆锥体形状分布; 2) 对于不均匀结构的电极, 电场信号与声脉冲及空间电荷之间的函数关系式不再适用; 3) 多数情况下, 函数表达式很难描述空间电荷分布. 针对上述问题, 本文提出了改进后的电场信号解耦算法, 用电场信号、空间电荷与声脉冲之间的数值关系代替三者之间的函数关系, 一方面避免了上述问题, 另

一方面有利于后期三维空间电荷测量系统的设计. 算法表述如下.

以多针板电极结构为例, 如图 1 所示, 由于针尖所占区域可以近似忽略不计, 整个针板电极空间等效成一个长方体结构. 建立笛卡尔坐标系, 引入有限差分算法, 在空间三个维度上对针板电极均匀划分, 各个方向上等效均匀分割成 N 份, 整个长方体区域被分割成了 N^3 个小长方体区域, 每个小长方体称为单元. 按照每个单元在 X, Y, Z 坐标轴上投影数值 I, J, K 对每个单元进行命名, 例如: 单元 a 在各个坐标轴上投影值都为 1, 因此单元命名为单元 N_{111} , 如图 1 所示.

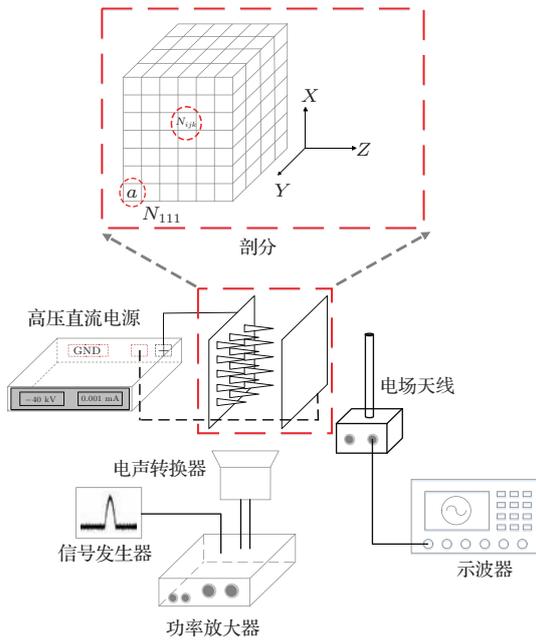


图 1 空间电荷测量系统示意图

Fig. 1. Space charge measurement system.

对于其他电极结构模型, 例如线筒模型、输电线模型, 同理可以按照有限差分算法的思想对待求解区域进行分割. 当 N 取值足够大时, 每个单元内空间电荷近似均匀分布, 每个单元内的电荷密度用 ρ_{ijk} 表示, 其总的电荷量为 q_{ijk} . 实验中声脉冲沿着 X 轴方向传播, 同一波阵面上各单元在声脉冲作用下将同时被调制振动, 不同波阵面上各单元将先后被调制振动.

根据叠加定理, 整个区域在声脉冲调制作用下产生的电场信号是每个单元产生电场信号叠加的结果. 首先讨论每个单元在声脉冲调制作用下引起的电场变化规律.

根据场源关系式, 空间中某一点电荷在远处产

生的电场强度大小可以表示为

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{e}_R, \quad (4)$$

\mathbf{E} 表示电场强度, q 表示源点处电荷量, R 表示场点与源点之间的距离, \mathbf{e}_R 表示源点到场点的向量. 用如图 6 所示的脉冲电信号放大后驱动电声转换装置对针板电极区域进行调制, 将空间电荷密度表达式 (3) 代入 (4) 式, 得到的电场信号在坐标轴上投影:

$$E_{ijk-X} = \rho_{ijk} \frac{A}{\gamma P_0} \cos[\omega(t - t_i)] \frac{\Delta V \Delta X_{ijk}}{4\pi\epsilon_0 R_{ijk}^3} \times [\varepsilon(t - t_i) - \varepsilon(t - t_i - \pi/\omega)], \quad (5)$$

$$E_{ijk-Y} = \rho_{ijk} \frac{A}{\gamma P_0} \cos[\omega(t - t_i)] \frac{\Delta V \Delta Y_{ijk}}{4\pi\epsilon_0 R_{ijk}^3} \times [\varepsilon(t - t_i) - \varepsilon(t - t_i - \pi/\omega)], \quad (6)$$

$$E_{ijk-Z} = \rho_{ijk} \frac{A}{\gamma P_0} \cos[\omega(t - t_i)] \frac{\Delta V \Delta Z_{ijk}}{4\pi\epsilon_0 R_{ijk}^3} \times [\varepsilon(t - t_i) - \varepsilon(t - t_i - \pi/\omega)], \quad (7)$$

$E_{ijk-X}, E_{ijk-Y}, E_{ijk-Z}$ 分别表示单元 N_{ijk} 在电场天线处产生的场强 \mathbf{E} 在 X, Y, Z 方向上的分量; ρ_{ijk} 表示单元 N_{ijk} 内空间电荷密度; ΔV 表示单元的体积; R_{ijk} 表示单元 N_{ijk} 与电场天线之间的距离; $\Delta X_{ijk}, \Delta Y_{ijk}, \Delta Z_{ijk}$ 表示 R_{ijk} 在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴上的投影; t_i 表示声脉冲沿着 X 轴方向传播到达单元 N_{ijk} 的时间, t_i 大小与单元 N_{ijk} 位置有关, $t_i = i \cdot \Delta x/c$, Δx 表示每个单元在 X 轴上的投影长度, c 表示声速; $\varepsilon(t)$ 表示单位阶跃函数, $\varepsilon(t - t_i) - \varepsilon(t - t_i - \pi/\omega)$ 表示声脉冲调制单元的时间.

令

$$C = \frac{A \cdot \Delta V}{4\pi\epsilon_0 \gamma P_0},$$

$$P_{ijk-X} = \frac{\Delta X_{ijk}}{R^3} \cos[\omega(t - t_i)] \times [\varepsilon(t - t_i) - \varepsilon(t - t_i - \pi/\omega)].$$

将 C, P_{ijk-X} 代入 (5) 式, 电场强度 E_{ijk-X} 可以表示为

$$E_{ijk-X} = C P_{ijk-X} \rho_{ijk}, \quad (8)$$

C 为常数, 与声压的幅值有关, 测量声压振幅后计算得到常数 C 的大小; P_{ijk-X} 表示位置函数, 只与单元 N_{ijk} 的位置有关. 因此, 只需通过电场天线测量声脉冲激励单元产生的电场强度 \mathbf{E} , 即可测量得到单个单元内空间电荷的密度.

将单个单元的情况推广到多个单元. 为计算整个区域内每个单元空间电荷密度, 提出如下假设: 声波传播的波阵面上空间电荷密度的大小相同.

根据叠加定理, 将各个单元产生的场强进行叠加可以得到电场天线处接收到的电场信号波形, 即

$$E_X = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N E_{ijk-X}, \quad (9)$$

$$E_Y = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N E_{ijk-Y}, \quad (10)$$

$$E_Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N E_{ijk-Z}, \quad (11)$$

$$E = \sqrt{E_X^2 + E_Y^2 + E_Z^2}. \quad (12)$$

在声脉冲传播过程中, 波阵面上空间电荷的密度相同, 经电场天线测得的电场强度可以简化为

$$E_X = C\rho D_{ijk-X}, \quad (13)$$

$$E_Y = C\rho D_{ijk-Y}, \quad (14)$$

$$E_Z = C\rho D_{ijk-Z}, \quad (15)$$

$$E = C \cdot \sqrt{D_{ijk-X}^2 + D_{ijk-Y}^2 + D_{ijk-Z}^2} \cdot \rho, \quad (16)$$

其中

$$D_{ijk-X} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N P_{ijk-X}, \quad (17)$$

$$D_{ijk-Y} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N P_{ijk-Y}, \quad (18)$$

$$D_{ijk-Z} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N P_{ijk-Z}, \quad (19)$$

D_{ijk-X} , D_{ijk-Y} , D_{ijk-Z} 是每个单元位置函数叠加的结果, 在单个单元位置函数已知后叠加得到, (16) 式可以计算波阵面上空间电荷密度.

2.3 声发射系统设计要求

电场信号解耦算法的有效性建立在前述假设的基础上, 即声波传播的波阵面上空间电荷密度的大小相同. 在不同的测量条件下, 为保证算法的有效性, 应设计相应的声发射系统, 保证声脉冲的传播过程中波阵面上空间电荷均匀分布. 本文讨论了不同测量要求下声发射系统的设计要求, 具体如表 1 所列.

如表 1 所述, 当待测量区域空间电荷均匀分布, 声脉冲在待测区域传播过程中波阵面上空间电荷

始终均匀分布, 这与声源的类型及声波的传播方向无关, 声发射系统无论是球面波还是平面波, 都满足要求. 如图 2 所示, 假设待测区域空间电荷沿着 Z 轴呈一维分布, 空间电荷在 X-Y 平面均匀分布, 此时声源类型只能是平面波源, 且声脉冲的传播方向需沿着空间电荷密度变化方向即 Z 轴传播. 此时, 声脉冲的波阵面与 X-Y 平面平行, 波阵面上空间电荷均匀分布, 满足要求. 最复杂的是, 当空间电荷二维或三维分布时, 声源类型只能是方向性较好的平面波源组成的平面波阵列, 如图 2 所示. 平面波阵列中每个方格代表独立的平面波源, 每个波源的尺寸很小, 且其方向性较好, 声源之间无干涉叠加或者叠加现象较弱. 由于波源尺寸很小, 在传播过程中调制待测空间区域很小, 可以近似认为在很小的区域内空间电荷均匀分布, 因此平面波源的波阵面上空间电荷同样均匀分布, 满足要求.

表 1 声发射系统设计要求

Table 1. Requirements for the design of acoustic emission system.

测量要求	声发射系统类型
空间电荷均匀分布	球面波、平面波
空间电荷一维分布	平面波
空间电荷二维分布	平面波阵列
空间电荷三维分布	平面波阵列

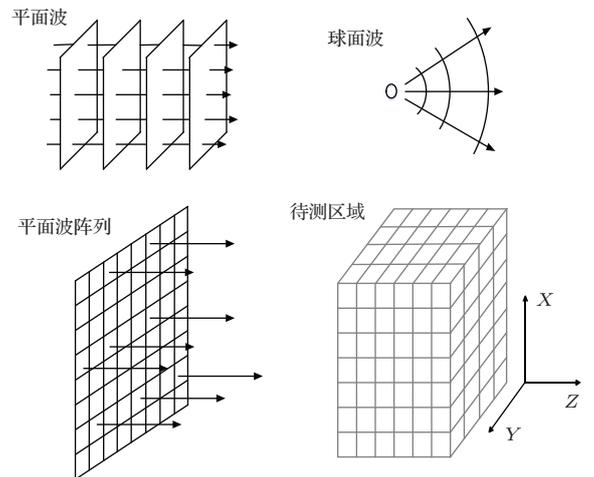


图 2 声发射系统示意图

Fig. 2. Sound emission system.

为了验证前述电场信号解耦算法的有效性, 本文针对最简单的多针板电极模型, 设计了测量所需的声发射系统, 对电晕放电过程中空间电荷进行了调制, 应用电场信号解耦算法对电场天线接收的信

号进行了分析计算, 其结果与电晕电流法的测量结果进行了对比, 验证算法的有效性. 对于空间电荷一维、二维、三维分布的情况较为复杂, 对声源及声源的发射策略要求较高, 这部分的设计及相关计算将在后续文章中讨论.

2.4 空间电荷测量系统的分辨率

测量系统的分辨率即能够测量的最小单元的尺寸, 由于待测区域均匀剖分, 每个单元尺寸相同, 因此测量系统的分辨率即剖分单元的尺寸. 单元的剖分密度应该足够大, 以保证测量系统的测量精度. 在空间电荷解耦算法中, 认为单元内空间电荷在声脉冲的调制下的状态一致, 因此剖分单元的尺寸至少应当小于声脉冲的半波波长, 满足

$$(\Delta X_{ijk})_{\max} < L, \quad (20)$$

$(\Delta X_{ijk})_{\max}$ 表示最大单元的尺寸, L 表示声脉冲的半波波长. (20) 式是单元尺寸的基本要求, 进一步提高单元的剖分密度, 减小单元尺寸, 测量系统的测量精度越高. 不断提高单元的剖分密度, 其计算结果会逐渐收敛于稳定值.

声脉冲的频率与测量系统的精度没有直接的关系. 声脉冲的频率越高, 其半波波长越小, 剖分单元的尺寸也越小, 剖分密度越密, 计算相应地越复杂. 如表 1 所列, 当测量均匀分布和一维分布的空间电荷时, 声脉冲为平面波, 为大尺寸波源, 此时声脉冲的频率不宜过大, 以减小剖分密度, 减小计算的时间. 当测量二维或者三维分布的空间电荷时, 声波源为小尺寸波源组成的平面波阵列, 为避免波源之间的干涉而引入计算误差, 此时应当提高声脉冲的频率, 改善声脉冲的方向性, 减小实验的误差.

3 实验系统及测量结果

3.1 实验系统

实验测量系统主要包括 3 个部分: 声脉冲发射模块、空间电荷模块和电场信号解耦算法模块. 声脉冲发射模块用于产生特征频率的脉冲声信号, 对空间电荷模块产生的空间电荷进行调制, 使其在声脉冲的作用下周期性振动, 产生周期性变化的电场信号; 电场信号经低频电场天线接收后, 利用前述的电场信号解耦算法对电场信号进行分析处理, 求

解得到空间电荷平均值. 为验证算法的有效性, 实验中对针板电极的电晕电流进行测量, 通过电晕电流法推导得到空间电荷大小, 与声脉冲法计算结果进行对比. 整个测量系统如图 1 所示.

3.1.1 声脉冲发射模块

声脉冲发射模块的作用是产生特征频率的脉冲声信号对空间电荷进行调制. 如图 1 所示, 实验中产生脉冲电信号, 经功率放大器放大后驱动电声转换装置产生对应的脉冲声信号. 脉冲声信号的声压通过压电陶瓷片测量, 以确定 (8) 式中常数 C 的大小.

脉冲电信号的发射原理基于直接数字式频率合成技术, 以数控振荡器的方式产生频率、相位、幅值可控的信号波形. 在脉冲信号频率的选取上, 考虑到声信号的衰减, 特征信号频率不宜过大; 方便后级电场天线接收, 特征频率不宜过小, 本文采用的特征脉冲电信号如图 6 所示, 脉冲频率为 1 kHz, 作用时间为半个周期, 脉冲之间的时间间隔为 10 ms.

3.1.2 空间电荷模块

本模块通过多针板电极结构产生空间电荷, 作为空间电场解耦算法有效性验证的模型. 针电极与板电极尺寸为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 材质为紫铜. 针电极接直流负电压, 板电极接地. 随着所加电压的不同, 电晕放电特性也不同, 因此把电晕放电划分成三个阶段: 1) 自持阶段; 2) Trichel 脉冲阶段; 3) 连续电流阶段. 在连续电流阶段, 电晕电流有稳定的直流分量, 针板间隙之中有稳定的空间电荷分布.

3.1.3 电场信号解耦算法模块

为有效测量声脉冲调制下产生的低频电场信号 (1 kHz), 实验选用 DR6901 型有源拉杆天线进行测量. 该天线在较低频段仍具有很好的天线系数, 保证其能够有效接收电场信号. 电场信号经电场天线接收后通过屏蔽导线接入到示波器显示记录, 通过电场信号的解耦算法对空间电荷密度分布进行还原, 实现空间电荷的测量.

3.2 实验结果

3.2.1 声压幅值

脉冲电信号经功率放大器放大后作用于电声转换装置, 在距离电声转换装置不同位置设置压电

陶瓷片, 对脉冲声压信号进行测量, 其声压振幅随距离的变化曲线如图 3 所示.

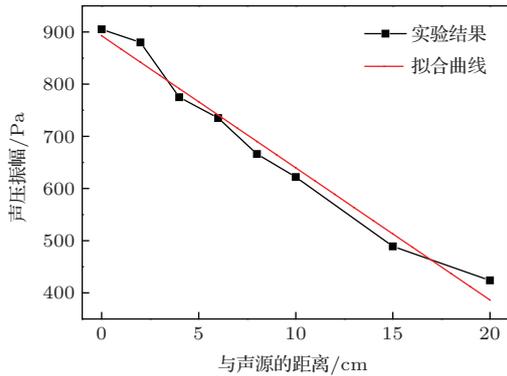


图 3 声压振幅随声源距离变化

Fig. 3. Curve of sound pressure amplitude with distance.

理论上, 声脉冲在空气中传播时, 以指数形式衰减. 实验测量发现在距离声源 20 cm 范围以内, 其声压振幅呈线性规律衰减. 对测量数据进行线性拟合, 如图 3 所示, 其拟合表达式: $A(x) = -25.32x + 892.69$, 声压振幅 A 的单位为 Pa, 距离 x 单位为 cm. 对拟合表达式归一化处理 $A(x) = 892.69(1 - 0.0284x) = A(1 - 0.0284x)$, 应用归一化后拟合表达式作为电场解耦算法中声压振幅的计算式.

3.2.2 电晕电流

对于多针板电极结构, 其空间电荷密度计算公式:

$$\rho_c = \frac{I}{kES}, \quad (21)$$

其中, I 表示电晕电流; k 为离子迁移率, 负离子的离子迁移率取 $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$; E 为接地电极表面的电场场强, 计算中取平均场强 $E = U/d$, d 为针板间隙距离; S 为接地电极的表面积. 针板间隙距离为 5 cm, 高压直流负电压作用于针电极, 板电极经采样电阻后接地, -7.5 kV 作用下电晕电流测量结果如图 4 所示.

在连续电流放电阶段, 电晕电流既存在高频脉冲分量, 也存在稳定的直流分量. 声脉冲的激励作用只对其稳态分量有效, 测量结果反映的是稳态分布的空间电荷. 因此, 对电晕电流进行滤波处理, 得到直流分量, 如图 4 所示. 改变针电极上的电压大小, 得到电晕电流稳态分量随电压变化情况如图 5 所示. 利用 (21) 式计算得到空间电荷密度大小, 与声脉冲法计算结果对比如图 10 所示.

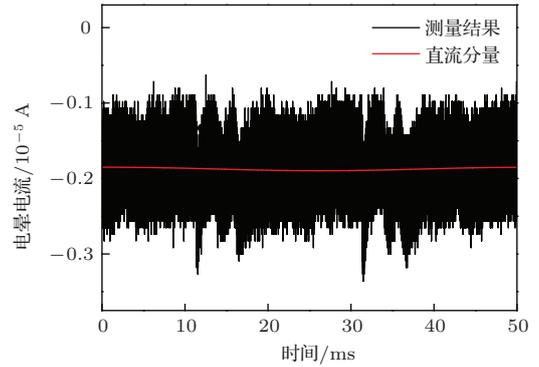


图 4 (网刊彩色) 电晕电流

Fig. 4. (color online) Corona currents.

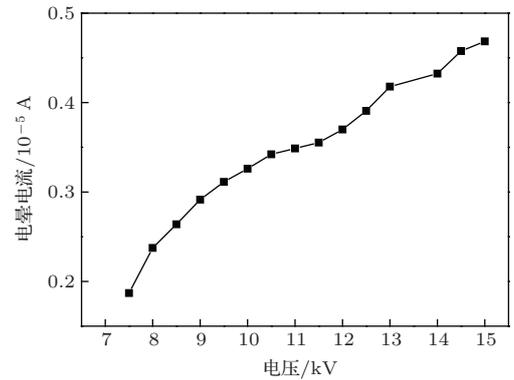


图 5 电晕电流随电压变化曲线

Fig. 5. Curve of corona currents with voltage.

3.2.3 声脉冲法结果

针板间隙距离 5 cm, 针电极电压 -7.5 kV , 板电极接地, 信号发生器产生幅值 0.5 V 的正弦交流信号经功率放大器放大后作用于电声转换装置, 调制产生的电场信号被电场天线接收, 其波形如图 6 所示.

电晕电流中存在脉冲电流分量, 电场天线接收的电场信号中由此存在不同程度的高频、低频干扰及同频干扰, 如图 6 中红色方框部分. 分析干扰的产生原因主要如下: 1) 背景白噪声; 2) 电声转换装置产生同频干扰, 由于作用于电声转换装置的电信号频率也是 1 kHz, 该信号会产生同频干扰信号影响测量的电场信号; 3) 电晕放电过程中本身会产生高频电场信号. 以电信号的发射时间为基准, 考虑声源与针板间隙之间距离产生的信号延迟 (0.54 ms), 从电场信号中提取有效信号 (图中绿色圆框内, 时间范围: 9.08—10.18 ms), 对空间电荷密度进行计算 (如图 6 所示). 由于有效信号幅值很小, 且背景噪声干扰严重, 需对信号进行滤波处理.

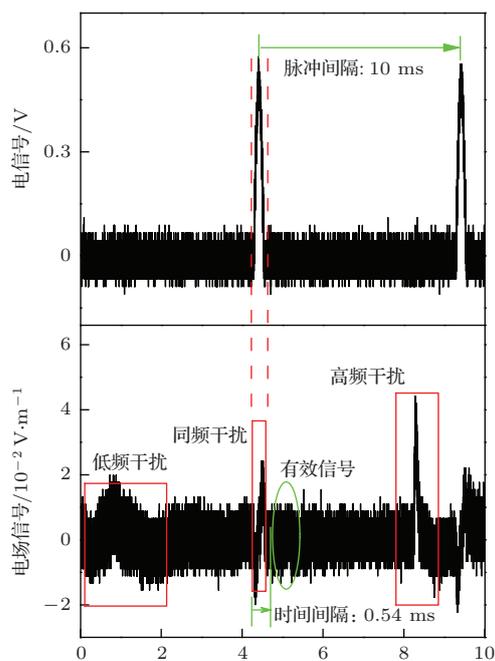


图6 (网刊彩色) 脉冲电信号与电场信号

Fig. 6. (color online) Pulse signal and electric field signal.

在有效信号的时段内, 背景噪声干扰为主要干扰源, 背景噪声的幅频特性曲线如图7所示.

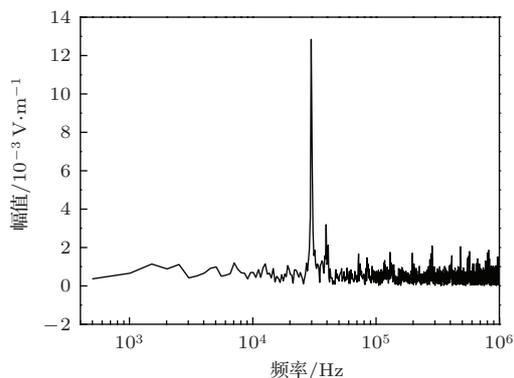


图7 背景噪声幅频特性

Fig. 7. Amplitude-frequency characteristic of background noise.

分析可知, 图7中背景噪声信号的频率主要集中在高频段(>10 kHz), 有效电场信号频率与声脉冲频率相同(1 kHz左右), 因此对图中有效信号进行滤波处理, 保留其中1.5 kHz以内有效信号, 实验数据及滤波后结果与理论结果对比如图8和图9所示.

图9中 $E_{\text{实验}}$, $E_{\text{理论}}$ 表示实验结果与理论计算结果电场强度的幅值. 实验滤波得到的波形与理论波形基本符合. 理论结果是在假定

$$\frac{A\rho_0 \cdot \Delta V}{\gamma P_0} = 1$$

情况下的结果, 实验结果与理论结果满足如下关系:

$$\frac{A\rho_0 \cdot \Delta V}{\gamma P_0} \cdot E_{\text{理论}} = E_{\text{实验}}. \quad (22)$$

通过(22)式计算得到空间电荷密度.

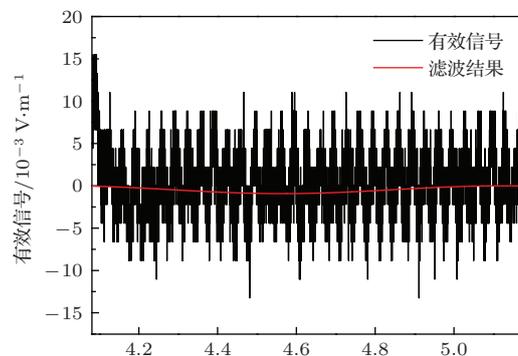


图8 (网刊彩色) 有效电场信号及滤波结果

Fig. 8. (color online) Effective electric field and the filtering results.

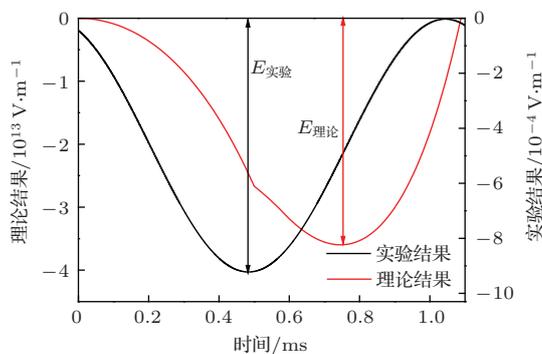


图9 (网刊彩色) 电场信号测量值与理论值

Fig. 9. (color online) Measurement and theoretical results of the electric field.

3.2.4 有效性验证

改变针板电极上电压, 电晕电流法与声脉冲法计算的结果如图10所示.

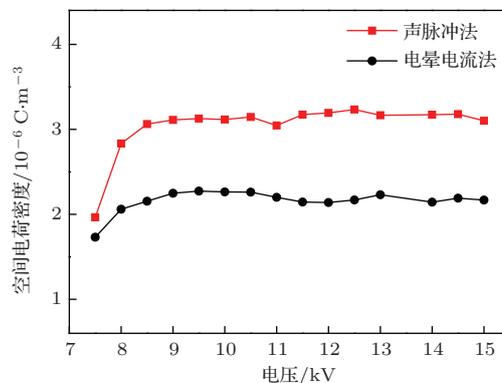


图10 声脉冲法与电晕电流法测量结果

Fig. 10. Results of sound pulse method and corona current method.

如图 10 所示, 两组曲线的变化趋势一致, 声脉冲法测量结果比电晕电流法测量结果大 50% 左右. 多针板电极结构空间电荷近似均匀分布, 设计的声发射系统满足测量的要求, 测量结果与电晕电流法结果符合较好, 验证了电场信号解耦算法的有效性. 对应不同的测量要求, 按照表 1 的要求, 设计不同的声发射系统, 可以实现空间电荷一维、二维、三维的测量.

4 结 论

为了实现气体中空间电荷的测量, 本文设计了一种声脉冲空间电荷测量系统, 通过发射声脉冲对电晕放电产生空间电荷进行调制, 产生变化的电场信号; 提出了一种电场信号解耦算法, 对电场信号进行分析处理, 还原得到空间电荷分布. 本文还讨论了不同测量要求下, 声发射系统的设计要求.

多针板电极结构电晕放电过程中空间电荷近似均匀分布, 其电荷量大小可以通过电晕电流法计算得到, 因此实验室搭建了多针板电极结构, 按照测量要求设计了平面波源, 应用本文提出的空间电场解耦算法对空间电荷进行了求解, 其结果与电晕电流法计算的结果进行了对比, 验证了该算法的有效性. 本文的主要结论如下.

1) 多针板电极结构的结果验证了本文所提出的电场信号解耦算法的有效性. 应用所提出的电场信号解耦算法, 对电场信号还原处理得到了多针板空间电荷密度分布的均值, 其结果与电晕电流法结果符合较好, 因此可以应用电场信号解耦算法对电场信号分析处理还原电荷密度分布.

2) 空间电荷测量系统只能测量稳态分布的空间电荷. 声源与待测区域有一定的距离, 声脉冲信号从声源传播到达待测区域需要相应的时间. 测量结果表示的是声脉冲到达待测区域时刻的空间电荷密度, 由于声脉冲之间有时间间隔, 无法发射连续的脉冲声波, 因此该测量系统无法测量空间电荷随时间的变化情况.

3) 电场信号大小与声压振幅成正比, 电场信号受到各种干扰严重, 且数值滤波降低了有效信号提取的精度, 增加声压振幅以及增加硬件滤波装置都有利于提高测量的精度.

4) 对于不同的测量要求应当设计不同的声发射系统. 本文针对多针板电极结构设计了平面波源, 其波源的尺寸较大, 无法解决空间电荷二维、三维的测量问题. 线筒模型成圆柱体对称, 电晕作用下空间电荷是一维分布, 但是平面波源尺寸较大, 也无法应用该波源进行测量. 实验室对此进行了改进, 设计了超声换能器阵列, 具体内容将在后续工作中介绍.

参考文献

- [1] Liu Z Y 2005 *Ultra-high Grid* (Beijing: China Economic Publishing) (in Chinese) [刘振亚 2005 特高压电网(北京: 中国经济出版社)]
- [2] Shu Y B, Hu Y 2007 *Proc. CSEE* **27** 1 (in Chinese) [舒印彪, 胡毅 2007 中国电机工程学报 **27** 1]
- [3] Sarma M P, Janischewskyj W 1969 *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems* **10** 1476
- [4] Janischewskyj W, Cela G 1979 *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-98** 1000
- [5] Takuma T, Ikeda T, Kawamoto T 1987 *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems* **12** 4802
- [6] Li X 1997 *Ph. D. Dissertation* (Winnipeg: University of Manitoba)
- [7] Lu T, Feng H, Zhao Z, Cui X 2007 *IEEE Trans. Magn.* **43** 122
- [8] Lu T, Feng H, Cui X, Zhao Z B, Li L 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 2939
- [9] Zhou X X, Lu T B, Cui X, Zhen Y Z, Luo Z N 2011 *Proc. CSEE* **31** 127 (in Chinese) [周象贤, 卢铁兵, 崔翔, 甄永赞, 罗兆楠 2011 中国电机工程学报 **31** 127]
- [10] Wu F F, Liao R J, Yang L J, Liu X H, Wang K, Zhou Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 115201 (in Chinese) [伍飞飞, 廖瑞金, 杨丽君, 刘兴华, 汪可, 周之 2013 物理学报 **62** 115201]
- [11] Wu F F, Liao R J, Wang K, Yang L J, Grzybowski S 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 868
- [12] Liao R J, Wu F F, Liu X H, Yang F, Yang L J, Zhou Z, Zhai L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 245201 (in Chinese) [廖瑞金, 伍飞飞, 刘兴华, 杨帆, 杨丽君, 周之, 翟蕾 2012 物理学报 **61** 245201]
- [13] Liao R J, Liu K L, Wu F F, Yang L J, Zhou Z 2014 *High Voltage Engineering* **40** 965 (in Chinese) [廖瑞金, 刘康淋, 伍飞飞, 杨丽君, 周之 2014 高电压技术 **40** 965]
- [14] Hazmi A, Takagi N, Wang D, Watanabe T 2007 *Sensors* **7** 3058
- [15] Fahy F 2002 *Sound Intensity* (Vol. 2)(London and New York: Spon Press)

Measurement of space charges in air based on sound pulse method*

Liu Kang-Lin Liao Rui-Jin[†] Zhao Xue-Tong

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(Received 19 December 2014; revised manuscript received 12 March 2015)

Abstract

The space charge in air is closely related to the mechanism of corona discharge. In order to study the onset and sustainability of corona discharge, acquiring the distribution of space charge is necessary but there still exists a puzzle which has not been settled. According to the sound pulse method, in this paper we present a kind of signal processing algorithm to analyze the electric field which is generated by modulating the space charge in the sound field. The electric field is dependent on the form of sound emission and space charge density. The waveform of electric field is related to space charge density. Through the proposed algorithm, the space charge density can be obtained by analyzing electric field signal.

The area in which the space charges need to be measured, is divided into elements. Each element is small enough so that the space charge quantity in each element is assumed to be the same. The following assumption is accepted during numerical simulation: space charge densities in the wave fronts are the same. The curve of electric field produced, received by electric field antenna, is the vector sum of electric field produced by each element, and then calculated by numerical simulation. In order to satisfy the assumption in each measurement case, the requirements for sound emission system under different cases are discussed. In different cases, different sound emission systems are required. For space charges which are distributed uniformly, plane wave or spherical wave is suitable; for one-dimensional space charge distribution, plane wave is necessary; for space charge two-dimensional or three-dimensional space charge distribution, plane wave array is available. What is more, a corresponding measuring system is developed which can be used for measuring the space charge density. This system mainly contains the producing of sound pulse, producing of space charges and the receiving of electric field signal. The producing of sound pulse is designed according to the measurement requirement for multi-needle-to-plate geometry which is assumed that space charge is distributed uniformly in the gap. With the experimental model, the space charge density in multi-needle-to-plate geometry is calculated according to the algorithm proposed in this paper. The result is compared with the calculated one by the method of corona currents, verifying the proposed method.

Keywords: sound pulse, space charge, electric field

PACS: 43.20.+g, 41.60.-m, 41.20.Cv

DOI: [10.7498/aps.64.164301](https://doi.org/10.7498/aps.64.164301)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB209401).

[†] Corresponding author. E-mail: cqklliu@cqu.edu.cn