

局部放电实验中用于放电点定位的边界电场测量 误差分析

曹荣浩¹, 程养春², 许翰伟¹, 赵丽¹, 王博文³

(1. 高电压与电磁兼容北京市重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 3. 国网山东省电力公司沂水县供电公司, 临沂 276499)

摘要: 实验室中的绝缘材料局部放电实验是揭示局部放电现象的重要手段, 跟踪放电点具体位置有助于研究电树枝的生长机理。而边界电场测量结果的准确度对放电点位置计算误差有着重要影响。该文通过高压试验和仿真计算, 研究了用于边界电场测量的二维测量电极阵列中测量电极直径(D)、测量电极间距(S)以及测量电极与地电极距离(H)3 个结构参数对测量误差的影响规律, 得到了最佳结构参数, 即 $D=1.5$ mm, $S=4$ mm, $H=0.154$ mm。给出了测量电极、分压电容和信号采集卡引入的系统性误差, 以及分压电容数值分散性引入的随机误差的修正方法。经过误差修正后, 系统性误差和随机性误差小于 3%, 能够保障放电点定位误差小于 0.01 mm。

关键词: 局部放电; 边界电场测量; 场源电荷定位; 测量电极阵列; 误差分析

Error Analysis of Boundary Electric Field Measurement for Charge Localization in Partial Discharge Experiments

CAO Ronghao¹, CHENG Yangchun², XU Hanwei¹, ZHAO Li¹, WANG Bowen³

(1. Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC(North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 3. Yishui Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Corporation, Linyi 276499, China)

Abstract: The partial discharge experiment of insulating materials in laboratory is an important means to reveal the phenomenon of partial discharge, and tracking the specific location of discharge points is helpful to study the growth mechanism of electric trees. The accuracy of boundary electric field measurement results has an important influence on the calculation error of discharge point position. In this paper, the influence rules of measuring electrode diameter (D), measuring electrode spacing (S), and measuring electrode distance from ground electrode (H) on the measurement error of two-dimensional measuring electrode array used for boundary electric field measurement are studied. The optimal structural parameters are obtained, that is, $D=1.5$ mm, $S=4$ mm, and $H=0.154$ mm. The correction methods of the systematic errors introduced by the measuring electrode, the divider capacitor and the signal acquisition card, and the random errors introduced by the numerical dispersion of the divider capacitor are given. After error correction, the systematic error and random error are less than 3%, which can ensure that the discharge point positioning error is less than 0.01 mm.

Key words: partial discharge; boundary electric field measurement; field source charge localization; measuring electrode array; error analysis

0 引言

局部放电(partial discharge, PD)信号是实验室可测、能够直接反映局放缺陷的表征信号^[1-2], 由 PD 导致的绝缘缺陷在绝缘材料中表现为电树枝或炭痕。如果任由电树枝生长, 最终将导致材料击穿,

从而严重影响电气设备的安全运行^[3-4]。因此, 人们希望通过研究绝缘材料中电树枝生长过程的内在机理, 找到利用 PD 信号评估电树枝的形态和生长信息, 进而在现场准确预警电力设备绝缘故障的方法, 这对于保障高压电力设备的安全运行具有重要现实意义。

目前实验室中的电树枝检测方法主要有可见光显微成像^[5-7]、X 射线断层扫描(XCT)^[8-11]、扫描电子显微镜(SEM)^[12-13]、荧光成像技术^[14]等, 但均

局限于材质透明或者介质均匀的绝缘材料。对于不透明且内部孔隙较多的绝缘材料如浸油纸板, 通常只能解剖观察, 缺乏更有效的观察手段^[15-17]。

1 基于放电点定位的电树枝检测方法

若能利用 PD 发生时的电场信息, 确定在绝缘材料内部发生的每一次放电的具体位置, 则能够通过跟踪放电点位置的变化来监测电树枝的生长过程, 可极大促进电树枝生长机理的研究, 如图 1 所示, 假设某次放电时场源电荷量 q 和位置坐标 (x, y, z) 未知, 但是可以测量场域里 i 个点位(坐标为 x_i, y_i, z_i)上的电场值 E_i 。利用场源与电场之间的函数关系 $f_1(q)$ 、 $f_2(x, x_i)$ 、 $f_3(y, y_i)$ 和 $f_4(z, z_i)$ 构建矩阵方程, 来求解这次放电点的位置 (x, y, z) 。将电树枝生长过程中众多放电点位置连在一起, 即可勾勒出电树枝的基本形状。

出于实验室中局部放电点具体位置的定位需求, 程养春等人提出了一种一维电树测量方法并验证了其可行性^[18], 在此基础上又提出了基于静电场逆问题求解的纸板中电树枝生长监测方法, 并搭建了一维电场测量阵列进行实验验证, 如图 2 所示^[19]。其中, 位于印刷电路板(printed circuit board, PCB)中的测量电极(measuring electrode, MED)沿 x 轴布置, 浸油纸板条隔着石英玻璃板置于 MED 阵列上方。石英玻璃板的作用是防止因纸板击穿导致采集系统损坏。MED 上的信号经接口传输至采集系统。

程养春、杨紫淇等利用一维 MED 阵列测量 PD 遗留电荷产生的空间电场在地电极边界处的电场数值, 通过基于多次镜像法的静电场计算公式和粒子群优化算法(PSO)进行逆问题求解, 算出每次 PD 的具体位置, 再利用各 PD 位置重构电树枝^[20], 其研究路线见图 3。从图中可见, 边界电场测量的误差将会对电树枝反演重构结果的准确度造成影响。

为了实现电树枝的三维重构, 余海博在 COMSOL 中构建了二维 MED 阵列仿真模型, 并选取 MED 直径 D 、MED 之间间距 S 以及 MED 与地电极距离 H 3 个参数进行仿真分析, 发现上述参数变化后 MED 的测量误差也会改变, 随后讨论了测量误差随上述参数的变化规律, 并通过 PSO 进行参数优化, 得到了一组测量电极最优参数: $D=1.2$ mm, $S=5$ mm, $H=2.6$ mm^[21]。

杨紫淇在基于二维 MED 阵列的静电场逆问题求解研究中, 提出了直接利用 MED 测得的边界电场数

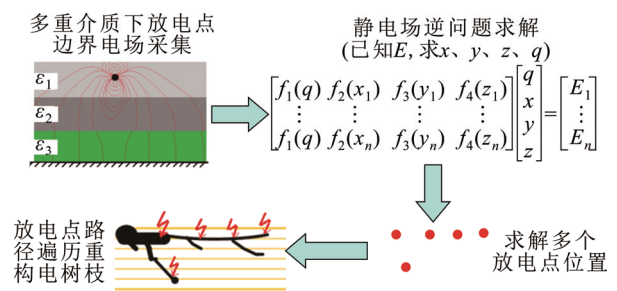
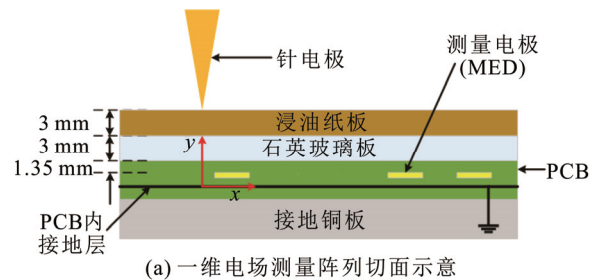
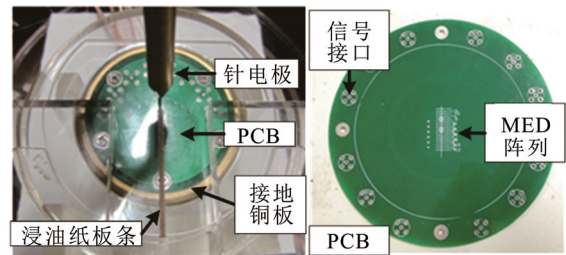


图 1 利用 PD 电场信息的电树枝重构过程

Fig.1 Branch reconstruction process using PD field information



(a) 一维电场测量阵列切面示意



(b) 一维电场测量阵列实物

图 2 边界电场一维测量阵列^[19]

Fig.2 One-dimensional electrical branch measuring platform^[19]

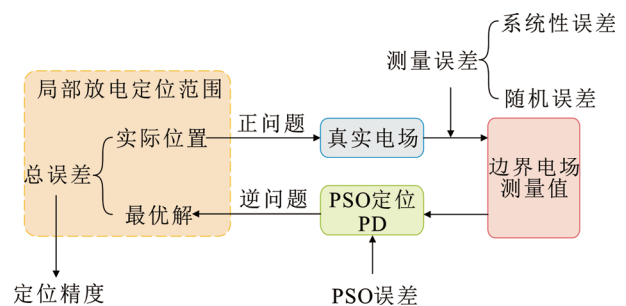


图 3 PD 定位研究路线^[20]

Fig.3 PD localization research route^[20]

据进行求解的“直接法”, 与将不同 MED 测得的边界电场作比进行求解的“电场作比法”。基于这两种方法构造静电场逆问题求解的 PSO 目标函数, 并通过理论计算比较二者定位误差随测量噪声的变化, 其计算结果见图 4。结果表明“直接法”抗干扰能力更强, 且在 3% 的随机噪声扰动内, 场源电荷定位误差仅为浸油纸

板中电树枝直径的 1.98%^[22]。

本文基于以上背景,通过真实试验数据进一步研究边界电场测量误差的来源、误差修正方法以及随 MED 结构变化的误差规律。制作 MED 阵列印刷电路板,通过实验分析测量系统的系统性误差和随机误差随 D 、 S 、 H 3 个参数的变化情况,确定测量误差最小的参数组合;并提出系统性误差与随机误差的修正方法,从而将随机误差控制在 3% 以内。

2 边界电场测量原理与误差来源

2.1 边界电场测量原理

本文使用的二维 MED 阵列在 xz 切面排列如图 5(a)所示,在 xy 方向排列如图 5(b)所示。MED 为具有微米级厚度的铜圆盘,PCB 为内接地层即地电极。由于无法测量 PCB 内地电极表面的边界电场 E_0 ,故在其上方较小距离 H 处设置 MED 阵列,通过测量 MED 上的电压 U_m 可知 MED 到地电极的空间中的平均电场 E_{av} ,近似代替 E_0 ,表达式为:

$$E_0 \approx k_1 E_{av} = k_1 U_m / H \quad (1)$$

式中: k_1 为 E_{av} 与 E_0 之间的转换系数。

二维 MED 测量平台结构切面与图 2(a)类似。但为使 MED 上电压在数据采集(data acquisition, DAQ)系统量程范围内,需在 MED 与地电极之间接入 1 nF 分压电容^[23]。MED 阵列及其测量电路的等效电路如图 6 所示。其中 C_x 为场源电荷(局部放电遗留在介质中的空间电荷)到 MED 之间的介质等效电容; U_x 为场源电荷的电势; C_m 为 1 nF 分压电容; R_m 为信号采集卡内阻,为 1 M Ω ; 各通道差距不超过 0.004 M Ω ; C_b 为 DAQ 系统通道电容(包括信号电缆电容),测量值为 0.159~0.163 nF, R_m 与 C_b 一起组成 DAQ 系统阻抗。 C_m 的接入,使得 MED 上的电压 U_m 降低到几伏至几百毫伏。因此, E_{av} 与 E_0 之间需要转换系数 k_1 。

2.2 误差来源分类

整个测量系统的误差来源分为以下两个方面:

1) 系统性误差:其来源包括测量电极阵列嵌入到空间电场中所造成的电场畸变,测量电路中 R_m 和 C_b 的引入、 C_x 的偏差等。

2) 随机误差:其来源主要为各测量电路中 C_m 、 R_m 、 C_b 的数值差异,以及信号采集系统的噪声。

2.3 测量误差分析思路

为了研究 MED 阵列及其测量电路中的系统性误差和随机性误差,开展高电压下边界电场的实测试验,并将实测结果与仿真结果进行对比分析。

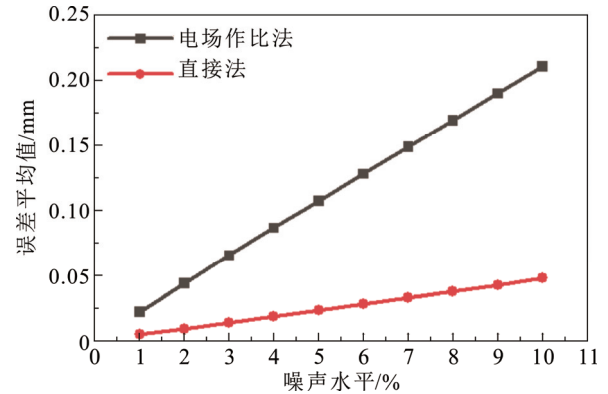


图4 “电场作比法”和“直接法”误差的对比曲线^[22]

Fig.4 Contrast curve of error between “electric field comparison method” and “direct method”^[22]

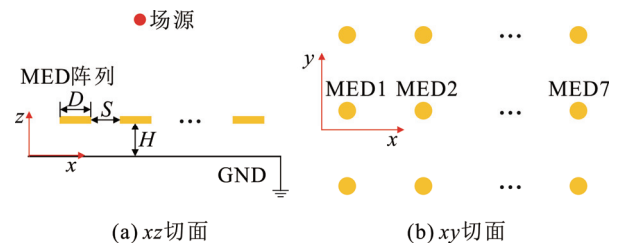


图5 MED 阵列切面

Fig.5 MED array section

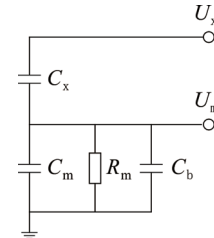


图6 等效测量电路

Fig.6 Equivalent measurement circuit

仿真模型依照实际测量环境设置,只是存在个别简化。例如,将 PCB 板的介电常数设置为单一数值,忽略 PCB 中各层材料的差异;忽略各层固体材料之间的微小缝隙等。这些简化带来的影响很小,因此仿真结果非常接近真实值。

整体分析流程见图 7。鉴于边界电场的真值 E_0 无法直接测量,采用仿真模型 2(该模型中的 PCB 板中不存在 MED)计算 E_0 ,作为真值。MED 对电场的畸变(即电容 C_x)也难以定量测量,因此也采用仿真模型 1(该系列模型中的 PCB 中含有 MED 和 C_m)计算 E_{av} 的理论值,进而计算转换系数 k_1 。实测到的不同 MED 结构参数下 MED 电压值 U_m ,经 k_1 — k_3 修正后得到边界电场测量值 E_s ,继而与仿真得到的边界电场 E_0 相比较,得到误差随结构参数的变化规律。

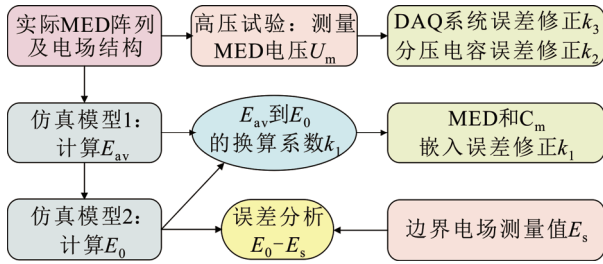


图7 误差分析流程

Fig.7 Error analysis process

3 边界电场测量试验与仿真

3.1 边界电场测量试验

用于边界电场测量的二维 MED 平台如图 8 所示。在 PCB 板的不同区域, 设置 13 组不同 D 、 S 、 H 参数的 MED 阵列。为统一各 MED 电压以便分析随机误差, 场源设置为高压板电极。另外由于本实验探究目标为随 MED 参数变化测量系统的误差变化规律, 所以中间介质只保留石英玻璃板。

高压板电极与接地板电极之间形成均匀电场, 使得各 MED 阵列处于同样的电场中, 便于研究这些参数与测量误差的关系。 D 、 S 、 H 的参数设置如表 1 所示, 其中 L 为高压电极到 MED 的距离。从表 1 中可以看出当单独分析 D 、 S 、 H 3 个参数其中任一个变化对测量误差影响时, 第 5 组的测量数据都可以被用到。第 5 组参数选择依据 PCB 制板经验设置为 $D=1.2$ mm, $S=5$ mm, $H=0.375$ mm, 其余各组参数值在第 5 组对应参数基础上增减。

试验时高压电极上施加 6 kV 工频电压, 利用 PicoScope 4000 A 八通道采集卡测量 U_m 。采集卡的 8 个通道对应编号 A—H。选取图 5(b)所示的 MED1—7 作为数据采集对象, 接入采集卡 B—H 通道。采集卡 A 通道用于测量高电压数值, 据此归一化 13 组实验所加高电压。

3.2 仿真分析

仿真的目的是通过仿真计算, 为边界电场 E_0 提供一个真值, 并且计算出 MED 和分压电容对电场的畸变效果, 给出每一组 MED 结构参数下的 E_0 和 E_{av} 之间的换算系数 k_1 , 如式(2)所示。按照 13 组 MED 结构参数各设置一个仿真模型, 统称模型 1, 计算 U_m , 再除以 H 得到 E_{av} 。在模型 1 的基础上, 去掉所有的 MED 与 C_m , 成为仿真模型 2, 用于计算 E_0 。其中模型 1 第 5 组 z 轴方向的电场 E_z 仿真计算结果如图 9(a)所示, 其余 12 组与第 5 组仿真模型结构相似, 但由于测量电极阵列参数设置不同, 电

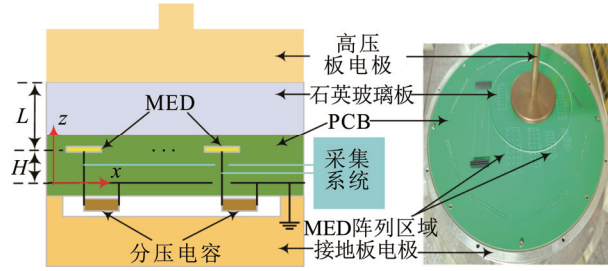


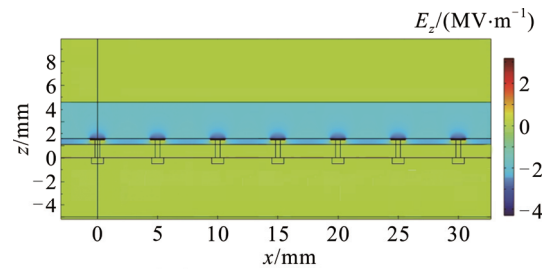
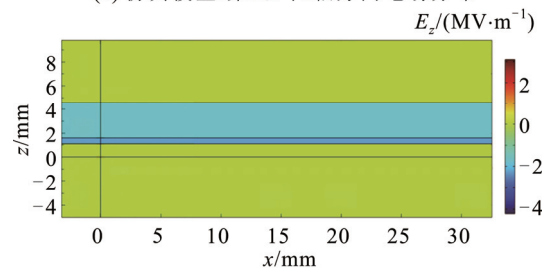
图8 二维 MED 测量平台结构示意图

Fig.8 Section of the actual structure of the two-dimensional electric field measurement platform

表 1 MED 阵列结构参数设置

Table 1 MED array structure parameter settings

组别	L /mm	S /mm	D /mm	H /mm
1				0.077
2				0.154
3	3.1	5	1.2	0.25
4				0.308
5				0.375
6		3		
7		4		
8	3.1	6	1.2	0.375
9		7		
10			0.6	
11			0.9	
12	3.1	5	1.5	0.375
13			1.8	

(a) 仿真模型1第5组中 z 轴方向电场分布(b) 仿真模型2第5组中 z 轴方向电场 E_z 分布图9 仿真模型中的 xz 切面电场分布Fig.9 Electric field distribution in xz section of simulation model

场计算结果也不同。模型 2 电场仿真计算结果如图 9(b)所示。

$$k_1 = \frac{E_0}{E_{av}} \quad (2)$$

4 试验数据的处理

4.1 数据处理内容

第5组7个MED上采集到的电压原始波形如图10所示。受测量电路的高通滤波器性质的影响,电源中的谐波与基波的比例被放大,该问题在下文4.2中通过修正系数 k_3 排除了50 Hz下DAQ系统的阻抗从而解决。后续数据处理中采用了傅里叶变换,求得各通道的50 Hz基波幅值作为MED上的电压幅值。

数据处理的目標为尽可能排除因DAQ系统参数阻抗引入MED和分压电容的引入造成的系统性误差,以及外加高电压幅值不一致、分压电容值与理想值之间的差异等随机误差,得到边界电场测量值 E_s 。其中外加高电压通过高压分压器和采集卡通道A进行测量,以消除外加电压不一致带来的误差。

4.2 DAQ系统阻抗误差修正

在电场仿真计算模型中,不包含DAQ系统的输入电阻 R_m 和电容 C_b 。因此, R_m 和电容 C_b 引入的误差需要通过修正和标定的方式加以消除。根据图6所示等效电路可知:

$$X_{Cm} = \frac{1}{j\omega(C_m + C_b)} \quad (3)$$

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{X_{Cm}} \quad (4)$$

U_m 远小于 U_x ,可简化为:

$$U_m = \frac{Z_m}{X_{Cx}} U_x \quad (5)$$

若不考虑DAQ系统阻抗,设理想的1 nF电容电抗为 X_{Cm0} ,此时的MED电压为 U'_m ,则:

$$U'_m = k_3 U_m = \frac{X_{Cm0}}{Z_m} U_m \quad (6)$$

实测某通道的 $C_b=0.16$ nF(包含信号电缆的电容和采集卡输入电容), $C_m=1$ nF, $R_m=1.001$ M Ω ,可计算出修正系数 k_3 。

4.3 分压电容误差修正

一般电容元件的实际数值与其标称值有较大差异。各MED通道 C_m 的实测值 C_{re} 在0.96~1.08 nF之间波动,需将MED电压实测值 U'_m 归算到1 nF下的电压 U''_m :

$$U''_m = k_2 U'_m = \frac{C_{re}}{C_m} U'_m \quad (7)$$

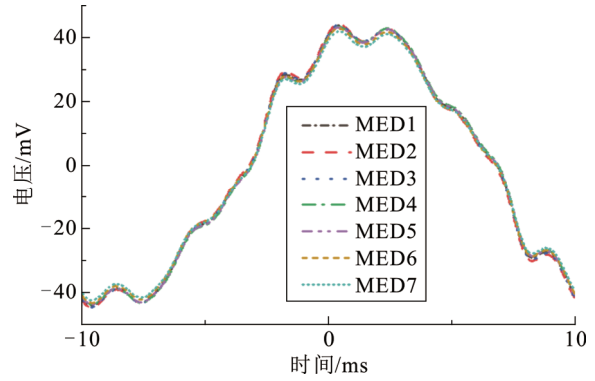


图10 MED电压信号原始波形(第5组)

Fig.10 The original waveform of the voltage signal on the MEDs (group 5)

4.4 边界电场测量值

MED上电压实测值 U_m 经过DAQ系统阻抗误差修正和分压电容误差修正之后,即可用于计算平均电场。而平均电场与边界电场之间的换算系数已由仿真模型给出,则边界电场实测值 E_s 为:

$$E_s = k_1 \frac{U''_m}{H} = k_1 k_2 \frac{U'_m}{H} = k_1 k_2 k_3 \frac{U_m}{H} \quad (8)$$

式中: k_1 为 E_0 和 E_{av} 之间的换算系数; k_2 为分压电容误差修正系数; k_3 为DAQ系统误差修正系数。

5 修正效果与误差分析

5.1 阵列参数对MED电压的影响

理想情况下希望式(1)准确成立,且系数 k_1 为固定的分压系数。即希望MED引入到空间电场之后对于电场的畸变尽量小,实际上,MED的引入对于空间电场造成显著畸变,体现在MED电压随MED结构参数有显著变化。MED电压经过DAQ系统阻抗误差分压电容误差修正(即 k_3 和 k_2 修正)之后的数值随MED结构参数的变化如图11所示。

MED电压随结构参数的变化趋势符合图6所示的等效电路。当MED直径 D 增大时,等效电路中的电容 C_x 增大,则MED电压随 D 的增大而增大。当MED间距 S 增大时,等效电路中的电容 C_x 增大到饱和稳定(MED对应的高压电极面积有增长趋势,但会饱和),则MED电压也会增大后饱和稳定。当MED与地电极距离 H 增大时,电容 C_x 增大,则MED电压随 H 的增大而增大。可见,试验结果验证了理论分析。在采用“电场比值法”反演局部放电位置算法中,对于系统性偏差的要求不高,MED电压幅值随结构参数的变化规律可用于根据DAQ

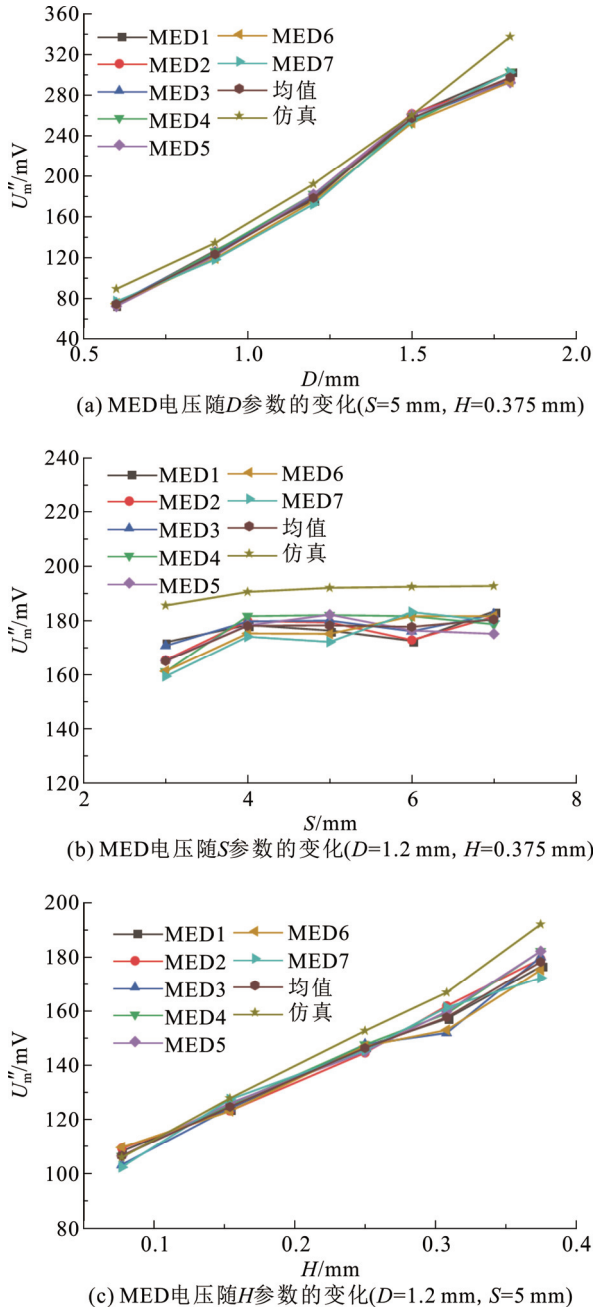


图 11 修正后 MED 实测电压随结构参数的变化

Fig.11 Changes of the measured MED voltage with structural parameters after modification

系统的输入电压范围来选择 MED 结构参数及后续测量电路参数。

5.2 误差修正效果

定义测量误差计算式为:

$$\sigma = \frac{E_0 - E_s}{E_0} \times 100\% \quad (9)$$

将同一组 MED 中 7 个 MED 的边界电场测量误差的平均值记为 σ_{av} , 该值能够代表系统性误差。各试验组经 k_2 和 k_3 修正前与修正后的 σ_{av} 列于表 2。

表 2 各组参数的 σ_{av} Table 2 The σ_{av} values of each group of parameters

参数	$\sigma_{av}/\%$	
	仅经过 k_1 修正	经 k_1, k_2, k_3 修正
$D=0.6\text{ mm}$	90.371	16.740
$D=0.9\text{ mm}$	89.637	8.364
$S=5\text{ mm}$, $H=0.375\text{ mm}$	$D=1.2\text{ mm}$ 88.979	7.229
	$D=1.5\text{ mm}$ 88.707	1.110
	$D=1.8\text{ mm}$ 89.638	11.792
	$S=3\text{ mm}$ 89.637	11.076
	$S=4\text{ mm}$ 89.231	6.492
$D=1.2\text{ mm}$, $H=0.375\text{ mm}$	$S=5\text{ mm}$ 88.979	7.229
	$S=6\text{ mm}$ 89.533	7.678
	$S=7\text{ mm}$ 89.047	6.416
	$H=0.077\text{ mm}$ 88.571	-0.598
	$H=0.154\text{ mm}$ 88.742	2.454
$D=1.2\text{ mm}$, $S=5\text{ mm}$	$H=0.250\text{ mm}$ 88.940	4.216
	$H=0.308\text{ mm}$ 89.045	5.498
	$H=0.375\text{ mm}$ 88.979	7.229

可见经 k_2 和 k_3 修正后系统性误差极大减小, 平均降低幅度在 80% 左右。

由于仿真时对 PCB 板层的简化, 对 MED 层上方的 PCB 来说相当于改变了介质电容, 是残余系统性误差的来源之一, 其消除或标定方法仍需后续深入研究。对 MED 层下方的 PCB 来说, 由于其杂散电容与 1 nF 分压电容为并联关系, 且经计算二者相差 4 个数量级, 故无论 PCB 板层是否简化处理其影响都可以忽略不计。

5.3 剩余随机误差

定义随机误差为:

$$\delta = \frac{\max(|E_{s1} - E_{sav}|, \dots, |E_{s7} - E_{sav}|)}{E_{sav}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $\max(\cdot)$ 为最大值函数; $E_{s1} - E_{s7}$ 为同一组 MED 中 7 个 MED 的边界电场测量值; E_{sav} 为 $E_{s1} - E_{s7}$ 的平均值。各组试验经 k_2 和 k_3 修正前后的 δ 如表 3 所示。可见修正后随机误差也得到一定程度的减小, 修正后的随机误差整体上小于 3%。

5.4 MED 结构参数对测量误差的影响

为直观展示修正后 σ_{av} (即系统性误差) 与 δ (即随机误差) 随 D 、 S 、 H 3 个参数的变化情况, 将各组 MED 结构参数下边界电场测量误差 σ 绘制折线, 展示于图 12。

从系统性误差来看, 改变 D 参数对测量误差的影响最大。当 $D=0.6\text{ mm}$ 时, σ_{av} 最大, 可达 16.74%; 从误差曲线的趋势来看, D 参数测量误差曲线近似二次函数, 在 $D=1.5\text{ mm}$ 时 σ_{av} 最小, 为 1.11%。从

表3 各组参数的 δ

Table 3 The δ values of each group of parameters

参数	$\delta/\%$		
	仅经过 k_1 修正	经 k_1, k_2, k_3 修正	
$S=5\text{ mm}, H=0.375\text{ mm}$	$D=0.6\text{ mm}$	4.200	2.712
	$D=0.9\text{ mm}$	6.679	3.197
	$D=1.2\text{ mm}$	3.128	2.203
	$D=1.5\text{ mm}$	3.648	1.393
	$D=1.8\text{ mm}$	1.272	1.629
$D=1.2\text{ mm}, H=0.375\text{ mm}$	$S=3\text{ mm}$	6.354	3.487
	$S=4\text{ mm}$	2.173	1.978
	$S=5\text{ mm}$	3.128	2.203
	$S=6\text{ mm}$	6.222	2.769
	$S=7\text{ mm}$	4.783	2.874
$D=1.2\text{ mm}, S=5\text{ mm}$	$H=0.077\text{ mm}$	4.168	3.141
	$H=0.154\text{ mm}$	2.476	1.352
	$H=0.250\text{ mm}$	3.434	1.175
	$H=0.308\text{ mm}$	4.925	3.008
	$H=0.375\text{ mm}$	3.128	2.203

随机误差来看, $D=0.9\text{ mm}$ 时 δ 最大, 为 3.197%。其他情况下 δ 小于 3%。综合系统性误差与随机误差考虑, $D=1.5\text{ mm}$ 最优。

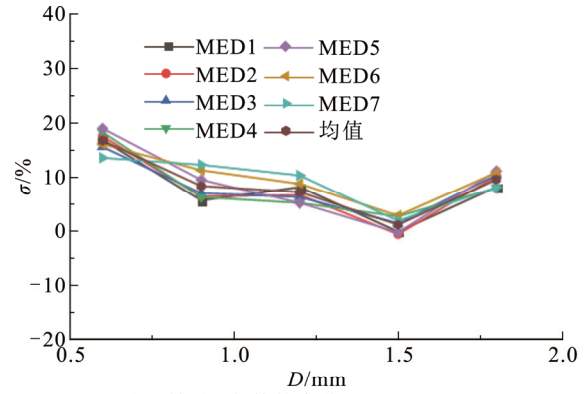
S 参数的改变对测量误差影响较小, 但在 $S=4\text{ mm}$ 时, 系统性误差与随机误差最小。综合考虑 σ_{av} 和 δ , S 最优参数为 4 mm。

H 参数的改变对测量误差的影响也较为显著, H 越大, 系统性误差越大。若只考虑 σ_{av} , $H=0.077\text{ mm}$ 无疑是最优参数, 但其 δ 值较大, 超过了 3%。综合 σ_{av} 与 δ 来考虑, H 最优参数应选择 0.154 mm。总体上, 若选择 $D=1.5\text{ mm}, S=4\text{ mm}, H=0.154\text{ mm}$, 则 σ_{av} 和 δ 均可控制在 3% 之内。根据文献[22]中探究得到的误差对放电点定位精度的影响曲线, 对于“直接法”构造的逆问题, 直接利用各 MED 测到的边界电场数值反演场源电荷位置, 边界电场噪声控制在 3% 以内时, 场源电荷定位的总体误差小于 0.01 mm, 仅为纸板中电树枝直径 (0.71 mm) 的 1.98%。对于以各 MED 测到的边界电场数值之比来构造逆问题目标函数的“比值法”而言, 测量误差中的系统性偏差被比值运算消除, 测量误差中的随机误差在 3% 以内时, 场源电荷定位的总体误差小于 0.1 mm。

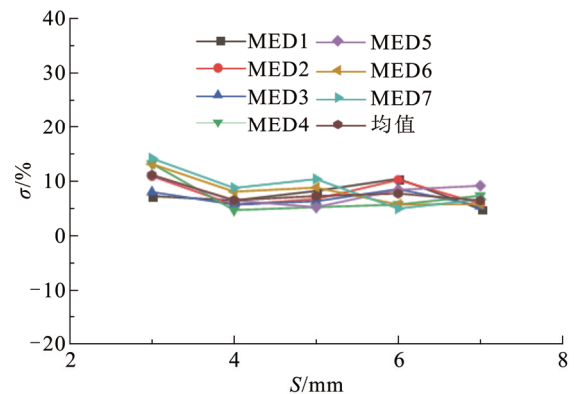
6 结论与展望

1) 给出了 MED、分压电容和 DAQ 引入的系统性误差修正系数, 修正后, 系统性误差小于 16.74%, 随机性误差整体上小于 3%。

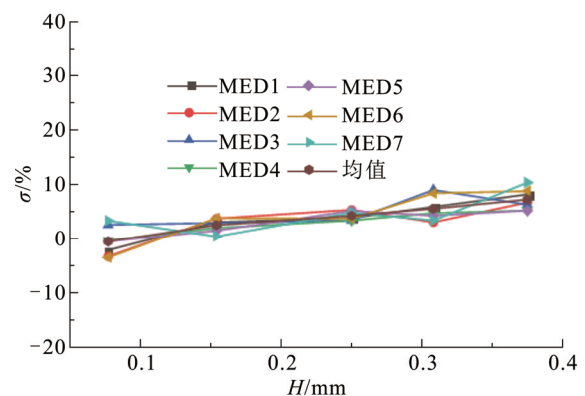
2) 当 $D=1.5\text{ mm}, S=4\text{ mm}, H=0.154\text{ mm}$ 时最



(a) 测量误差随 D 参数的变化 ($S=5\text{ mm}, H=0.375\text{ mm}$)



(b) 测量误差随 S 参数的变化 ($D=1.2\text{ mm}, H=0.375\text{ mm}$)



(c) 测量误差随 H 参数的变化 ($D=1.2\text{ mm}, S=5\text{ mm}$)

图 12 边界电场测量误差随 MED 结构参数的变化

Fig.12 Variation of boundary electric field measurement error with MED structure parameters

优, 系统性误差和随机性误差均可小于 3%, 可使局部放电点定位误差小于 0.01 mm。

综上, 将文中得到的误差分析结果应用于边界电场测量电极阵列的制作中, 并结合文中的误差修正方法进行数据处理可极大提高局部放电实验中边界电场测量的准确度, 从而有效减小放电点定位以及电树枝重构的误差。这对绝缘材料尤其是浸油纸板内部电树枝生长机理的研究具有重要意义。此外本文在仿真过程中对实际测量环境的个别简化使仿

真模型得到的边界电场与实际真值之间仍然存在微小的系统性误差, 可通过“比值法”构造逆问题目标函数以及测量电极阵列的特殊取点方式(比如相对于放电点位置的“对称取点法”)来解决, 其详细内容将在后续发表的文章中进行阐述。

参考文献 References

- [1] 汲胜昌, 赵德华, 贾云飞, 等. 变压器绝缘缺陷放电发展特性及检测方法研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4297-4314. JI Shengchang, ZHAO Dehua, JIA Yunfei, et al. Research status and prospects of development characteristics and detection methods of transformer insulation defect discharge[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4297-4314.
- [2] 刘世涛, 徐兆国, 杨凯, 等. 典型缺陷下电力电缆局部放电特征与识别[J]. 高电压技术, 2023, 49(增刊1): 36-39. LIU Shitao, XU Zhaoguo, YANG Kai, et al. Characteristics and identification of partial discharge in power cables under typical defects[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(Supplement1): 36-39.
- [3] 吕立翔, 杨卓然, 姚天翼, 等. 芳香族化合物含量对交联聚乙烯绝缘树枝及局部放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1949-1957. LÜ Lixiang, YANG Zhuoran, YAO Tianyi, et al. Effect of aromatic compounds content on electrical treeing and partial discharge characteristics of XLPE insulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1949-1957.
- [4] 林国海, 张洪亮, 郑喆, 等. 交联聚乙烯直流电树枝降压阶段的局部放电特性[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 348-358. LIN Guohai, ZHANG Hongliang, ZHENG Zhe, et al. Partial discharge characteristics of DC electrical tree in XLPE during voltage drop[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 348-358.
- [5] 郑晓泉, CHEN G, DAVIES A E. 交联聚乙烯电缆绝缘中的双结构电树枝特性及其形态发展规律[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 79-85. ZHENG Xiaquan, CHEN G, DAVIES A E. Characteristic and developing law of a double structure electrical tree in XLPE cable insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 79-85.
- [6] CHAMPION J V, DODD S J. The effect of material composition and temperature on electrical tree growth in epoxy resins[C]//2000 Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications. Edinburgh, UK: IET, 2000: 30-34.
- [7] 常文治, 阎春雨, 毕建刚, 等. 硅橡胶中局部放电发展与电树枝生长的关系研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2493-2501. CHANG Wenzhi, YAN Chunyu, BI Jiangang, et al. Study on the relationship between partial discharge development and electrical tree growth in silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2493-2501.
- [8] SCHURCH R, ARDILA-REY J, MONTANA J, et al. 3D characterization of electrical tree structures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 220-228.
- [9] SCHURCH R, ROWLAND S M, BRADLEY R S, et al. Three dimensional imaging of electrical trees in micro and nano-filled epoxy resin[C]//2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Des Moines, USA: IEEE, 2014: 39-42.
- [10] CLOETENS P, PATEYRON-SALOMÉ M, BUFFIÈRE J Y, et al. Observation of microstructure and damage in materials by phase sensitive radiography and tomography[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(9): 5878-5886.
- [11] BRADLEY R S, MCNEIL A, WITHERS P J. An examination of phase retrieval algorithms as applied to phase contrast tomography using laboratory sources[C]//Proceedings Volume 7804, Developments in X-Ray Tomography VII. San Diego, United States: SPIE, 2010: 1-10.
- [12] ICHIMURA K, MIYAZAKI N, SADAYAMA S, et al. Three-dimensional architecture of podocytes revealed by block-face scanning electron microscopy[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8993.
- [13] 程祥, 陶霏韬, 叶刚, 等. 连续雷电冲击下的变压器油纸绝缘老化特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1958-1966.

- CHENG Xiang, TAO Xiantao, YE Gang, et al. Aging characteristics of transformer oil-paper insulation under continuous lightning impulses[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1958-1966.
- [14] 周远翔, 张旭, 刘睿, 等. 硅橡胶电树枝通道微观形貌研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 9-15. ZHOU Yuanxiang, ZHANG Xu, LIU Rui, et al. Study on micromorphology of electrical trees in silicon rubber[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 9-15.
 - [15] OKABE S, UETA G, WADA H, et al. Partial discharge-induced degradation characteristics of oil-impregnated insulating material used in oil-immersed power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1225-1232.
 - [16] MITCHINSON P M, LEWIN P L, STRAWBRIDGE B D, et al. Tracking and surface discharge at the oil-pressboard interface[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(2): 35-41.
 - [17] YI X, WANG Z D. Surface tracking on pressboard in natural and synthetic transformer liquids under AC stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1625-1634.
 - [18] MENG H L, CHENG Y C, LI G M, et al. The one-dimensional potential measurement system for the carbonization trace detection in oil-impregnated pressboard[C]//2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester, UK: IEEE, 2017: 1-4.
 - [19] CHENG Y C, DUAN B T, LI F R. Electrical tree reconstruction method for oil-impregnated pressboards based on the inverse problem for the electrostatic field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 94-102.
 - [20] CHENG Y C, YANG Z Q, ZHAO L, et al. Partial discharge location accuracy in oil-immersed pressboards based on PSO[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(5): 2587-2594.
 - [21] 余海博. 用于绝缘材料中电树枝检测的分布式电场测量技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021. YU Haibo. Research on the distributed electric field measurement technology for the electrical tree in insulation materials[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2021.
 - [22] 杨紫淇. 浸油纸板中局部放电定位法的研究及误差分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2024. YANG Ziqi. Study and error analysis of partial discharge positioning method in oil-impregnated pressboard[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2024.
 - [23] 段博涛. 绝缘纸板中电树枝发展规律的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017. DUAN Botao. Research on the development laws of the electrical tree in oil-paper[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2017.



CAO Ronghao

曹荣浩

2000—, 男, 硕士生

主要从事高压试验技术、绝缘材料放电检测方面的研究工作

E-mail: crh13843277621@163.com



CHENG Yangchun

Ph.D., Professor

Corresponding author

程养春(通信作者)

1974—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事高压试验技术、状态监测、电力变压器、电缆诊断和状态评估方面的研究工作

E-mail: chych@ncepu.edu.cn

收稿日期 2024-10-09 修回日期 2025-04-03 编辑 曹昭君