

# 基于电场有限元分析的非接触法相对介电常数测量结果的修正方法

魏力强, 苏金刚, 贾伯岩, 张鹏, 伊晓宇

(国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 为了提高基于非接触法的相对介电常数测量的准确性, 利用电场有限元分析建立对应的模型并获得了电极及其附近的电场和电位分布。分析了电极系统存在的边缘效应, 给出了其对相对介电常数测量结果的影响。分析了潜在因素对非接触法测量误差的影响, 确定了修正时需要考虑的因素为电极间隙距离、试样厚度与电极间隙距离之比和试样的相对介电常数。根据电极间隙距离、距离比、相对介电常数测量值到相对介电常数真实值的关系, 采用三维插值法和匹配法修正测得的相对介电常数。采用仿真对修正方法进行了验证并针对实测高温硫化硅橡胶相对介电常数使用了该方法, 结果验证了该方法的有效性。结果表明: 随着电极间隙距离和试样相对介电常数的增加误差幅值增大, 随距离比的增加误差存在减小的趋势。对电极间隙距离、距离比和相对介电常数分别在 0.2~5 mm、0.5~1 和 1~20 内建模获得 2 380 组相对介电常数的真实值和计算值, 发现相对误差在 -0.37%~-41.72% 内变化。

**关键词:** 非接触法; 相对介电常数; 电场; 有限元方法; 修正; 插值

**中图分类号:** TM934.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-9239(2021)04-0078-08

**DOI:** 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.04.013

## Correction Method About Relative Permittivity Measured by Contact-free Arrangement Based on Electric Field Finite Element Analysis

WEI Liqiang, SU Jingang, JIA Boyan, ZHANG Peng, YI Xiaoyu

(State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of relative permittivity measurement by means of non-contact method, we built a corresponding model by electric field finite element analysis and obtained the distribution of electric field and potential of the electrode and around. The edge effect of electrode was analyzed and its influences on the measuring result of relative permittivity were investigated. In addition, the influence of potential factors on the measuring error of non-contact method was analyzed, and then the factors which should be taken into consideration in the correction was confirmed, which were the electrode gap distance, the ratio of sample thickness to electrode gap distance, and the relative permittivity. The results show that the measuring error of relative permittivity increases with the increase of electrode gap distance and relative permittivity of the sample, while decreases with the increase of the ratio of sample thickness to electrode gap distance. Under the model with the electrode gap distance of 0.2-5 mm, the ratio of sample thickness to electrode gap distance of 0.5-1, the relative permittivity of 1-20, 2 380 groups of actual and calculated values of relative permittivity are obtained, and the relative error is -0.37%--41.72%. According to the above relationship among the electrode gap distance, the ratio of sample thickness to electrode gap distance, the measured value and real value of relative permittivity, the measured relative per-

收稿日期: 2020-06-09 修回日期: 2020-07-11

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目(kj2019-059)

作者简介: 魏力强(1985-), 男(汉族), 河北邢台人, 高级工程师, 主要从事电力电缆寿命评估和诊断技术的相关研究。

mittivity is then corrected by the 3D interpolation method and matching method. The correction method is verified by simulation and is used to correct the measured relative permittivity of high temperature vulcanized silicone rubber. The results validate the proposed method.

**Key words:** non-contact method; relative permittivity; electric field; finite element method; correction; interpolation

## 0 引言

介电响应是绝缘材料一个重要的电气性能,主要反映材料在电场作用下的极化及去极化情况。材料的组成和化学结构、老化和受潮会影响其介电响应,因此介电响应在绝缘状况诊断中应用非常广泛<sup>[1-4]</sup>。介电响应的检测主要包括时域法和频域法,前者主要包括回复电压(恢复电压)法<sup>[5-7]</sup>和极化-去极化电流法<sup>[8-10]</sup>,后者主要指介电谱法<sup>[11-14]</sup>。

介电谱法对仪器要求较高,但测量结果比较精细,尤其对材料是否受潮比较灵敏<sup>[1-3,11,13]</sup>。在介电谱测量方法中,较之传统的直接测量的接触法(简称接触法),基于空气参考法<sup>[15]</sup>的非接触法<sup>[16-17]</sup>(简称非接触法)具有能抑制接触电阻给介电谱测量带来影响的显著优点<sup>[16]</sup>,在介电谱测量领域具有良好的应用前景。

不含屏蔽环的电极边缘电场存在畸变,会影响测量结果。实际上即使采用屏蔽电极(三电极)系统,也难以做到电场的绝对均匀,使测得的电容存在误差。因为非接触法对电气测量误差比较敏感,所以非常有必要对测量结果进行验证和修正。本研究建立非接触时电极系统的电场模型,基于有限元法求解该模型,通过具体案例的计算说明对采用该电极的非接触法测量结果修正的必要性。建模定性分析电极间隙距离、试样厚度与电极间隙距离之比(简称距离比)和材料相对介电常数对相对介电常数测量误差的影响。研究测量结果的修正问题,比较采用匹配法和三维插值方法的准确性,最后对修正方法进行初步验证和应用。

## 1 非接触法的原理及特点

本研究采用非接触法,该方法中试样仅与下电极接触,并不与上电极直接接触,如图1所示。在不含和含有试样情况下分别测一次复电容,根据测试结果、电极和试样尺寸计算试样的相对介电常数。

具体原理如下:不含试样和含有试样的情况下测得的复电容分别用 $C_1$ 和 $C_2$ 表示; $s$ 为电极面积; $d_1$ 和 $d_2$ 分别为电极间隙距离和试样厚度; $\epsilon_0$ 和 $\epsilon_r$ 分别为

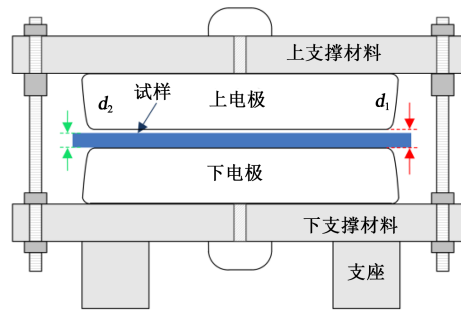


图1 电极示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrode

真空介电常数和试样的相对介电常数。假设电极间电场为均匀电场,则式(1)~(2)成立。

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 s}{d_1} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 s \epsilon_r}{d_2 + \epsilon_r (d_1 - d_2)} \quad (2)$$

为了简化计算过程,定义试样厚度与电极间隙距离之比,即距离比 $d_r$ ,以及含试样时的电容与无试样时的电容之比 $K$ 如式(3)~(4)所示。

$$d_r = \frac{d_2}{d_1} \quad (3)$$

$$K = \frac{C_2}{C_1} \quad (4)$$

最终试样的相对介电常数和介质损耗因数根据式(5)~(7)计算。

$$\epsilon_r' = \text{Re} \left[ \frac{K d_r}{(1 + (d_r - 1)K)} \right] \quad (5)$$

$$\epsilon_r'' = -\text{Im} \left[ \frac{K d_r}{(1 + (d_r - 1)K)} \right] \quad (6)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (7)$$

式(5)~(7)中: $\text{Re}$ 和 $\text{Im}$ 分别为获得复数的实部和虚部。

由于使用了电容之比 $K$ ,该方法无需确定检测阻抗 $Z_M$ 的值,仅要求 $Z_M$ 在测量空气和试样的介电谱时保持稳定即可,从而提高了计算结果的准确性。另外,当试样与电极接触但仍采用空气参考法时,

材料的相对介电常数及介质损耗因数仍可用式(5)~(7)计算。

采用非接触法测量介电谱时,试样承受的电压通常不能忽略,但空气的电阻很大,导致其中的电流几乎为0,也就是说电极表面的自由电子并不能穿过空气层。因此,材料中绝缘电阻支路并没有电流流过,这与绝缘电阻无穷大的结果一致。因此,理论上绝缘电阻对非接触法的测量结果没有影响。

由于非接触法测量介电谱过程中几乎没有自由电子在上、下电极之间通过,仅存在位移电流,因此,理论上试样与下电极之间的表面接触电阻并没有变化。这个结果与表面接触电阻为零一致,因此非接触法也可以抑制表面接触电阻的影响。

为了验证以上分析,本研究在环境温度为22℃时采用接触法和非接触法分别测量了高温硫化硅橡胶(high temperature vulcanizing silicone rubber, HTV)在0.1 mHz~1 kHz的介电谱,介电谱仪型号为IDAX-300,测量时采用饱和食盐水保持恒温箱内湿度恒定。计算得到的相对介电常数虚部与损耗对应如图2所示。

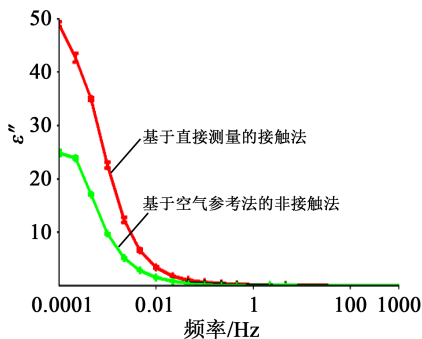


图2 不同频率下接触法和非接触法测得的HTV相对介电常数虚部

Fig.2 Imaginary part of relative permittivity of HTV with contact and contact-free methods at different frequencies

由图2可见,当电压频率较高时,两种方法测得的相对介电常数虚部非常接近,而随着频率的降低,二者差别逐渐变大,在电压频率较低时接触法测得的相对介电常数虚部明显要大于非接触法的测量结果。这是因为两种算法的差别在于非接触法没有绝缘电阻和接触电阻对应的损耗<sup>[6]</sup>,高频时极化损耗在总损耗中的占比较高,绝缘电阻和接触电阻对应的损耗占比较低,因此高频下二者的测量结果差别不大。低频时极化导致的损耗占比减低,绝缘电阻和接触电阻对应的损耗占比增大,故在低

频下非接触法测得的相对介电常数虚部明显小于接触法的测量结果。显然,以上实验结果初步验证了本节关于非接触法特点的理论分析。

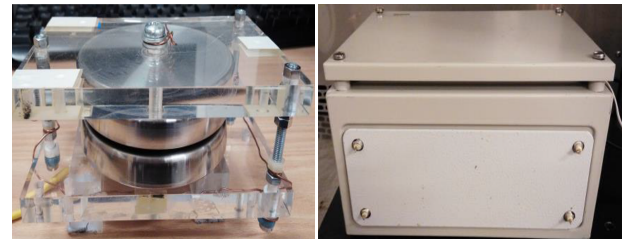
## 2 电极系统的有限元电场分析

如果电极间电场为完全均匀电场,同时不考虑介电谱仪和尺寸的测量误差,则测得的相对介电常数与第1节的计算结果应该一致。但实际电极间电场并非完全均匀,尤其是针对本研究采用的非屏蔽电极,根据第1节的计算结果在理论上存在误差,必须进行修正。

由于本研究涉及的电场分析问题相对比较简单,建模后采用有限元方法计算得到的结果可靠性可以认为有保障。

### 2.1 基于有限元法的电场建模

电极系统主要包括电极及其附件、试样和屏蔽盒等。电极和屏蔽盒的实物如图3所示。考虑到准确性要求,后续要仿真的模型参数组合众多,达数千个,需要对模型进行合理简化。整个电极系统比较接近轴对称的形式,同时考虑到电场和电容计算最为关键的是电极形状及极间距离等,因此将屏蔽盒以及支撑材料按照体积不变的原则进行了轴对称近似,最终建立的模型如图4所示。



(a)电极

(b)屏蔽盒

图3 电极系统实物

Fig.3 Electrode system

模型参数如下:电极厚度为15 mm,最大直径为100 mm;支撑材料的厚度为12 mm,直径为66.6 mm;屏蔽盒高度为150 mm,半径为116.6 mm;底座的宽度和高度均为20 mm;电极间隙距离和试样厚度分别为3 mm和2.241 mm。

### 2.2 计算结果及分析

按实际情况设置材料参数和边界条件,采用有限元方法计算了电极周围的电场分布及其对相对介电常数测量结果的影响。各部分材料及参数如下:电极材料为不锈钢;试样为HTV,相对介电常数

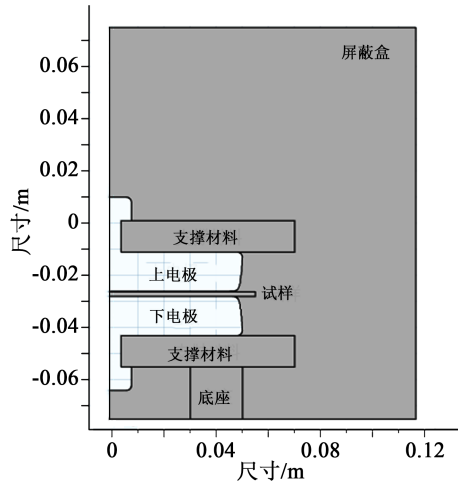


图4 电极系统的建模结果

Fig.4 Modeling results of electrode system

设置为4；支撑材料和底座均为有机玻璃，相对介电常数设置为3。将材料和属性赋给模型中各个部分后需要对求解区域进行网格剖分。为了提高计算准确性，根据待求解问题特征采用自适应剖分方法，选择足够高精度的网格剖分，网格类型为三角形，网格数量为45 593个，剖分结果如图5所示。

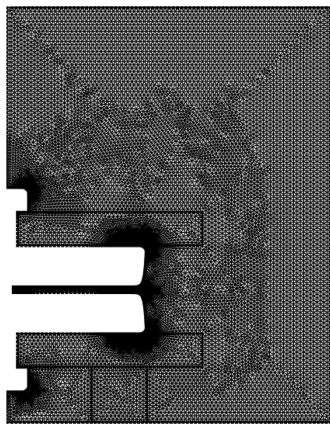
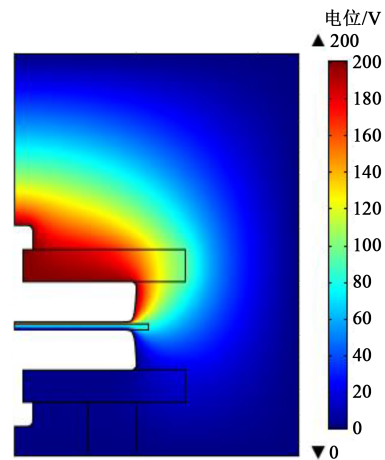


图5 电极系统网格剖分结果

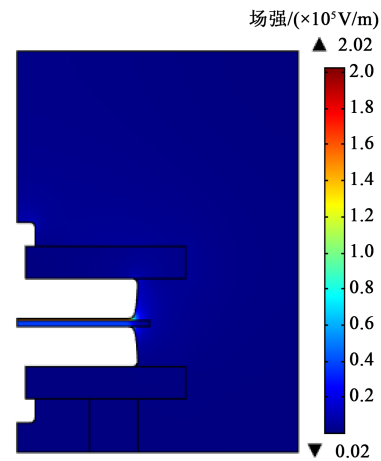
Fig.5 Meshing results of electrode system

在第1节实验中对高压电极(上电极)施加峰值为200 V的交流电位，屏蔽盒接地，此时低压电极(下电极)的电位并不为0，在窗口实时显示了所有频率下高压电极和低压电极上的电位，结果表明低压电极在不同频率下的电位略有差别，其均值近似为2 V。将仿真模型中低压电极电位设置为2 V，设置初始和边界条件后采用有限元法计算得到电极系统的电位和场强分布，如图6所示。其他条件不变，计算得到不含试样时电极系统的电位和场强分

布如图7所示。



(a)电位分布



(b)场强分布

图6 有限元法算得含有试样电极系统的电位和场强分布

Fig.6 Potential and electric field strength distributions of electrode system with sample calculated by finite element method

为了进一步分析上、下极板间电场分布的不均匀性，将电场计算结果导出为文件后获得以电极最大边缘为界的极间电场不均匀系数，不含试样和含试样的对应值分别为1.08和1.11。虽然以上两种情况均不属于极不均匀电场，但也并非均匀电场，此时式(1)~(2)不能严格成立。由于非接触法对电气测量误差比较敏感，因此，根据电场有限元分析结果可知，第1节计算的相对介电常数很可能需要修正。

### 2.3 电容及相对介电常数测量误差

有限元方法计算获得电极上的电荷与极间电压的比值即为对应的电容值。对于以上模型，不含试样和含有试样情况下的极间电容分别为 $2.40 \times$

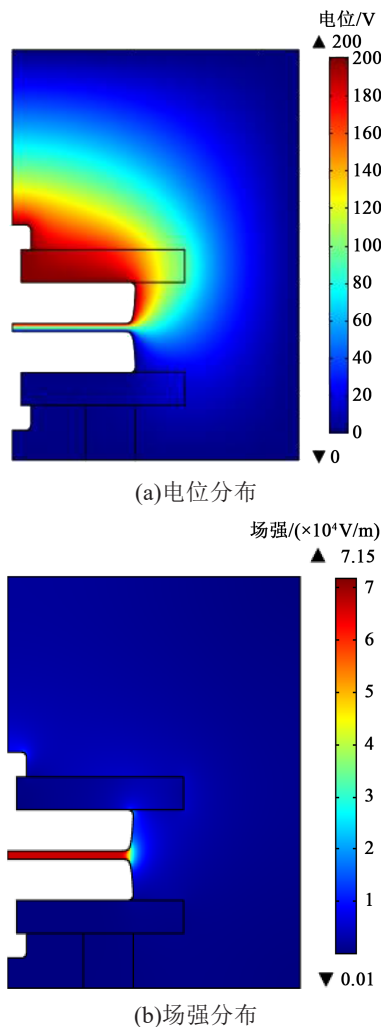


图7 有限元法算得不含试样电极系统的场强和电位分布  
Fig.7 Potential and electric field strength distributions of electrode system without sample calculated by finite element method

$10^{-11}$  F 和  $5.15 \times 10^{-11}$  F。将相关数据代入式(3)~(5)计算得到非接触法对应的相对介电常数(实部)为 3.50, 而对应的准确值为 4.0, 相对误差为 -12.5%。因此非常有必要修正相对介电常数测量结果。

### 3 相对介电常数的修正

#### 3.1 相关影响因素

影响计算结果的主要因素为电极间隙距离( $d_e$ )、距离比( $d_r$ )和试样的相对介电常数( $\epsilon_r'$ )。下面分别分析单一因素对非接触法测得的相对介电常数准确性的影响, 同时观察各个因素的影响程度。另外观察是否可减少影响因素的数量以减少不必要的工作量, 使后续的修正方法更加简洁易用。

因为以上每个量的取值都在一定范围内变化, 所以研究每个影响因素时其他因素在各自的范围

内选择一些典型值。考虑到  $d_e$  太大时电场畸变太严重, 设定最大  $d_e$  为 5 mm。 $d_r$  过小时样本厚度、电极间隙距离和电气测量误差对最终测量结果影响太大, 在实际测量时通常不被采用。因此,  $d_r$  的最小值设置为 0.5。考虑到计算量等因素, 将最大相对介电常数  $\epsilon_r'$  设置为 20。如有必要也可以适当扩大以上因素的仿真范围。

具体来说, 当研究电极间隙距离时, 距离比和试样的相对介电常数分别取值为 0.5 和 2、0.7 和 5、0.8 和 10、0.9 和 20; 当研究距离比时, 电极间隙距离和试样的相对介电常数分别取值为 0.5 mm 和 2、1.0 mm 和 5、2.0 mm 和 10、5.0 mm 和 20; 当研究试样的相对介电常数时, 电极间隙距离和距离比分别取值为 0.5 mm 和 0.5、1.0 mm 和 0.7、2.0 mm 和 0.8、5.0 mm 和 0.9。得到相对介电常数的误差如图 8 所示。由图 8 可知, 在电极间隙距离、距离比和试样的相对介电常数不同的取值情况下, 相对介电常数的所有误差均为负数。随着电极间隙距离和相对介电常数的增加, 相对误差均存在逐渐增大的规律。这是因为随着二者的增加, 电极边缘的电场畸变程度增大, 使其导致的误差也随之增大。随着距离比的增加, 误差幅值存在减小的趋势, 但在电极间隙距离和相对介电常数较大时变化规律可能并不单调。基本上电极间隙距离从 0.2 mm 增加到 5.0 mm, 距离比从 1.0 减少到 0.5 时, 误差增加到原来的 2 倍左右。试样的相对介电常数为 1 时, 误差非常小; 相对介电常数为 20 时, 相对误差为 30%~40%。由此可见, 以上 3 个因素对非接触法相对介电常数计算值都有显著影响, 修正相对介电常数时任何一个均不可以忽略。比较而言, 相对介电常数对误差的影响最为显著。

#### 3.2 非接触法的修正

为了系统修正实测的相对介电常数, 同时考虑到非接触法实际应用时各参数的取值范围, 将电极间隙距离、距离比和试样的相对介电常数在 0.2~5.0 mm、0.5~1.0 和 1~20 内变化建模获得 2 380 组真实和计算的相对介电常数。统计后发现其相对误差在 -0.37%~-41.73% 内变化, 进一步凸显了修正的必要性。由以上结果可知, 没有修正前非接触法测得的相对介电常数小于真实值, 这与 3.1 节中的结果吻合。

将修正系数定义为相对介电常数的真实值与计算值的比值, 因此, 修正系数与(算得的)相对介电常数的乘积即为介电常数的真实值, 如式(8)所示。

$$\epsilon_{r1}' = a\epsilon_r' \quad (8)$$

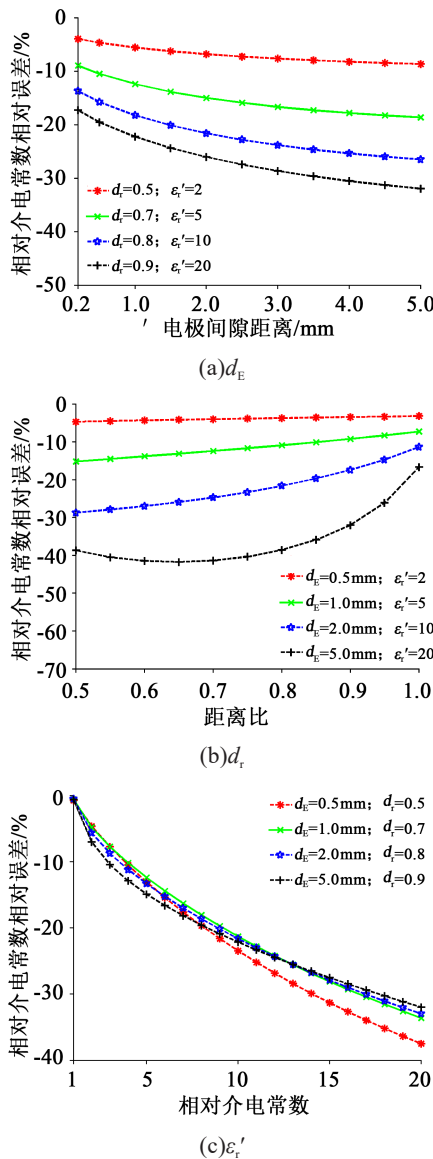


图8 电极间隙距离、距离比和相对介电常数对相对介电常数误差的影响

Fig.8 Influence of electrode space distance, ratio of sample thickness, and relative permittivity on error in the relative permittivity

式(8)中： $\epsilon_r'$ 为测得的介电常数； $\epsilon_{r1}'$ 为修正后的介电常数； $a$ 为修正系数。

根据以上分析可知修正系数均大于1。图9分别给出了电极间隙距离为1 mm和3 mm时，随着距离比和相对介电常数计算值变化时修正系数的变化情况。

比较图9(a)和(b)的数据可知，间隙距离了3mm时的修正系数比1 mm的大 $7.76 \times 10^{-4} \sim 0.15$ 。从图9(b)可以看出，修正系数与电极间隙距离、距离比和相对介电常数不满足简单的函数关系，因此，不能采用最小二乘等方法确定电极间隙距离、距离比和

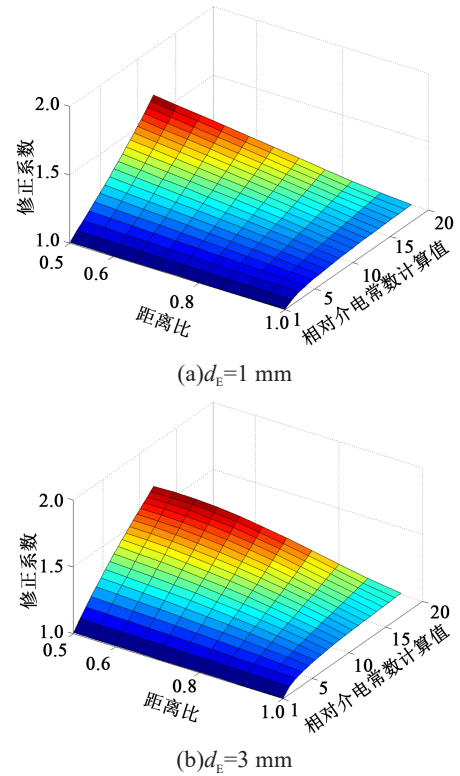


图9 非接触法下不同电极间隙距离时的相对介电常数修正系数

Fig.9 Correction factor of relative permittivity at different electrode space distances with contact-free method

相对介电常数测量值与相对介电常数真实值的函数关系，而是直接根据以上2 380组相对介电常数计算值与真实值的对应关系来获得给定电极间隙距离、距离比和相对介电常数计算值对应的修正系数，进而获得比较准确的相对介电常数。可用插值方法获得修正系数，主要有针对规则单调数据的查表法和针对杂乱数据的快速凸包算法<sup>[18]</sup>。虽然对电极间隙距离和距离比排序可以得到单调变化的数据，但与单调的电极间隙距离和距离比对应的相对介电常数计算值的变化却不单调，如图8(b)所示，难以使用查表法。因此，对于插值方法仅选择了快速凸包算法，其具体的插值方式分别有近邻方式和线性方式。

同时考虑到电极间隙距离、距离比和相对介电常数仿真点选择很密，不同点之间的修正系数差别很小，因此尝试采用另外一种方法，称为匹配法。该方法首先从算得的2 380组数据中寻找电极间隙距离与实际电极间隙距离最接近的样本，然后从这些样本中再寻找距离比与实际距离比最接近的样本，这些样本中相对介电常数计算值与实际测得的相对介电常数最接近的样本即为目标样本，其对应

的修正系数即为实际情况对应的修正系数,其与实际相对介电常数计算值的乘积即为修正后的相对介电常数。

### 3.3 接触法的修正

进行以上电场建模分析时也获得了接触法( $d_r=1$ )对应的数据,根据以上数据不仅可以用于非接触法测量结果的修正,也可以修正该电极接触法下的测量结果。修正接触法测量结果时,根据以上建模结果中距离比为1时的数据,同时结合接触法的计算流程获得了在不同的电极间隙距离和相对介电常数计算值下相对介电常数的修正系数,如图10所示。

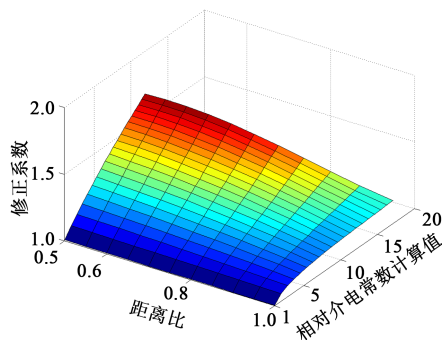


图10 接触法下不同电极间隙距离和相对介电常数计算值时的相对介电常数修正系数

Fig.10 Correction factor of relative permittivity at different electrode space distances and measured relative permittivities with contact method

由图10可知,在大部分情况下的修正系数均大于1,即计算值要小于实际值。在电极间隙距离比较大且相对介电常数比较小的少量情况下修正系数小于1,这与非接触法的修正系数均不小于1略有不同。随着相对介电常数计算值的增加,修正系数增大;随着距离比的增加,修正系数减小,而非接触法的修正系数随着距离的增加而增大。与图9类似,图10也比较光滑致密,因此,也可以用快速凸包等算法修正接触法算得的相对介电常数。

## 4 修正方法的初步验证和应用

### 4.1 修正方法的初步验证

为了验证以上修正方法的有效性,对电极间隙距离、距离比和相对介电常数分别在0.25~4.70 mm、0.55~0.95和1.5~19.5内变化时建立与第2节类似的模型,利用有限元方法和非接触法计算获得570个相对介电常数,然后对计算结果采用以上方法进行修正,修正前后相对介电常数误差的统计值如表1所示。

表1 修正前后相对介电常数相对误差的统计值

Tab.1 Relative errors statistics in the evaluated relative permittivity before and after correction

方法	最大值/%	最小值/%	均值/%	标准差/%
修正前	-1.93	-41.19	21.41	10
匹配法	3.24	-4.18	2.34	1.45
快速凸包-近邻	31.31	-24.35	7.68	8.91
快速凸包-线性	0.71	-7.72	1.02	1.23

由表1可知,修正前采用非接触法测得的相对介电常数误差较大,最大相对误差达到-41.19%,相对误差幅值的均值也达到21.41%。只要选择合适的修正方法,修正后得到的相对介电常数的误差要明显小于未修正时的结果。各种修正方法准确性的差别较大,误差最大的快速凸包-近邻方法最大相对误差可达-24.35%,相对误差幅值的均值也达到了7.68%,而准确性最高的快速凸包-线性方法相对误差幅值的均值为1.02%。由此可见,本研究提出的修正方法能显著提高非接触法测量的准确性。

同时修正方法的选择也非常关键,否则即使利用了大量可靠的数据但得到结果的误差仍然不小。快速凸包-线性方法最大误差达到了-7.72%,略大。相对而言匹配法比较稳定,最大误差接近于4%,但相对误差幅值的均值略大一些。如果需要,也可以通过增加3.2节中电极间隙距离、距离比和相对介电常数组的数量来进一步提高修正的准确性。

### 4.2 实测结果的修正

对第1节中非接触法的测量结果采用以上方法进行修正,修正前的结果及修正前后二者的差距如图11所示。注意,第3节中暂时设置了最大相对介电常数为20,为了能修正实测相对介电常数,现将电极间隙距离和距离比固定为真实值后,将相对介电常数设置在1~100内变化获得从相对介电常数测量值到其真实值的映射。

图11中: $\Delta\epsilon_r'$ 为修正前后相对介电常数的差距 $\Delta\epsilon_r'$ 的最大值超过4。修正前后相对介电常数的相对差距在0.68%~8.49%内变化。以上结果再次验证了对非接触法测得的介电常数进行修正非常有必要。

## 5 结论

(1)根据本研究电极系统及参数设置,非接触法的误差在-0.37%~-41.73%内分布;修正前,非接触法测得的相对介电常数要小于真实值,接触法测得的相对介电常数绝大部分情况下也要小于真实值。

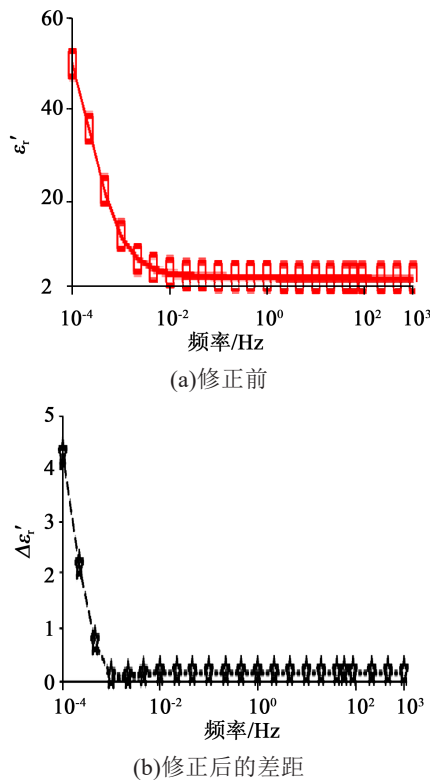


图11 实测的相对介电常数修正前后的差距

Fig.11 Difference between the measured relative permittivity before and after corrections

(2) 相对介电常数的主要影响因素是电极间隙距离、距离比和相对介电常数;随着电极间隙距离和相对介电常数的增加,误差幅值增大;随着距离比的增加,误差幅值减小。3个因素中相对介电常数的影响最为显著。

(3) 根据实测的相对介电常数、已知的电极间隙距离和试样厚度采用匹配法和线性插值的快速凸包算法可显著提高非接触法对相对介电常数测量的准确性。除了能修正非接触法测得的相对介电常数,根据本研究提供的方法也可以对接触法测得的相对介电常数进行修正。

### 参考文献:

- [1] ZAENGL W S. Applications of dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,6(19):9-22.
- [2] ZAENGL W S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,19(5):5-19.
- [3] GUBANSKI S M, BOSS P, CSÉPES G, et al. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,19(3):12-18.
- [4] ILDSTAD E, GÄFVERT U, THÄRNING P. Relation between return voltage and other methods for measurements of dielectric response[C]//Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Pittsburgh, USA:IEEE,1994: 25-28.
- [5] SAHA T K, YAO Z T. Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service-aged transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(1):128-135.
- [6] NEMETH E. Measuring voltage response: A non-destructive diagnostic test method of HV insulation[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology,1999,146(5):249-252.
- [7] 许梦素,莫付江,陈惠,等. 基于回复电压法的变压器油纸绝缘状况的等效仿真分析[J]. 绝缘材料,2018,51(1):70-74.
- [8] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2004,11(1):144-154.
- [9] FOFANA I, HEMMATJOU H, MEGHNEFI F. Effect of thermal transient on the polarization and depolarization current measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(2):513-520.
- [10] 云浩,高轩,汪亮,等. 基于PDC法的核电站XLPE电缆辐照老化研究[J]. 绝缘材料,2020,53(2):64-70.
- [11] FARAHANI M, BORSI H, GOCKENBACH E. Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating machines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2006,13(2):383-393.
- [12] EKANAYAKE C, GUBANSKI S M, GRACZKOWSKI A, et al. Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(3):1309-1317.
- [13] LINHJELL D, LUNDGAARD L, GÄFVERT U. Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(1):156-169.
- [14] 叶文郁,朱孟兆,陈玉峰,等. 温度对植物绝缘油纸介电响应特性的影响[J]. 绝缘材料,2020,53(4):82-88.
- [15] XU H R, ZHANG Y W, ZHENG F H. Study on measuring method of dielectric spectroscopy for polymer dielectrics[C]//2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin,China:IEEE,2009:922-925.
- [16] XU X D, BENGTTSSON T, BLENNOW J, et al. Enhanced accuracy in dielectric response material characterization by air reference method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(3):913-921.
- [17] 许海如,张治文,郑飞虎. 绝缘介质介电频谱测量方法的研究[J]. 绝缘材料,2010,43(1):66-70,74.
- [18] BARBER C B, DOBKIN D P, HUHDANPAA H. The quickhull algorithm for convex hulls[J]. ACM Transactions on Mathematical Software,1996,22(4):469-483.