

文章编号: 1671-7449(2024)06-0618-09

静电电位非接触式测量的偏差和修正

李子博¹, 陈小龙¹, 欧阳吉庭^{1*}, 缪劲松¹, 张宇², 王若珏², 高志良²

(1. 北京理工大学物理学院, 北京 100081; 2. 北京东方计量测试研究所, 北京 100094)

摘要: 非接触式静电电位测试仪是一种不接触待测体, 通过静电感应间接测量导体或绝缘体表面电位的仪器。在现有规范下, 非接触式静电电位测试仪的测试结果具有相当大的不确定性, 难以给出绝对或正确的测试值。本文基于变电容式电场传感器, 分析了非接触式静电电位测试仪准确测试带电体表面电位的条件, 通过试验确定了测试和标定过程对带电体静电状态及表面电位测试结果的影响方式, 以及非接触式电位测量中存在的偏差, 并提出相应的修正方法。指出在非接触式电位测试中, 应该考虑带电体尺寸的有限性、测试探头和测试距离对带电体静电特性的影响、绝缘体带电均匀性及表面电位等效表征等问题。

关键词: 静电电位; 表面电荷; 非接触式测量; 标定; 偏差

中图分类号: TM933.227

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024080

引用格式: 李子博, 陈小龙, 欧阳吉庭, 等. 静电电位非接触式测量的偏差和修正[J]. 测试技术学报, 2024, 38(6): 618-626.

LI Zibo, CHEN Xiaolong, OUYANG Jiting, et al. Deviation and modification of non-contact measurement of electrostatic voltage[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(6): 618-626.

Deviation and Modification of Non-Contact Measurement of Electrostatic Voltage

LI Zibo¹, CHEN Xiaolong¹, OUYANG Jiting^{1*}, MIAO Jinsong¹, ZHANG Yu²,
WANG Ruojue², GAO Zhiliang²

(1. School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Orient Institute of Measurement and Test, Beijing 100094, China)

Abstract: A non-contact electrostatic voltmeter is an instrument that indirectly measures the surface potential of conductors or insulators by electrostatic induction without contacting the charged body. Under the current standards, the measurement of a non-contact electrostatic voltmeter has considerable uncertainty and it is difficult to give the absolute electrostatic voltage. In this paper, the conditions for a non-contact electrostatic voltmeter based on the variable capacitance electric field sensor to precisely measure the surface potential of the charged body are clarified. The influence of the operating process on electrostatic state and measured surface potential of the charged body as well as the deviation of measurement are confirmed by experiments. It is suggested that when measuring the surface potential by using the non-contacting electrostatic voltmeters, one should consider the limited dimension of the charged body, the influence of the field sensor and the measuring distance on the electrostatic state of the charged body, the

收稿日期: 2024-02-06

基金项目: 北京东方计量测试研究所刘尚合院士专家工作站静电研究基金资助项目(BOIMTL SHJD20221002)

作者简介: 李子博(2001-), 男, 硕士生, 主要从事电晕放电与静电效应研究。E-mail: lizibo164@163.com.

* 通信作者: 欧阳吉庭(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事静电与等离子体研究。E-mail: jtouyang@bit.edu.cn.

surface charge distribution and the equivalent characterization of the surface potential of insulators.

Key words: electrostatic voltage; surface charge; non-contact measurement; calibration; deviation

0 引言

静电是电子、航空航天、石油化工、火工品、复合材料、生物医学以及涉及电子设备的许多领域和场所不可忽视的危险源^[1-9]。静电和静电放电(ESD)产生的静电感应、强电场、瞬时大电流可以引发静电吸附、间隙击穿、局部热效应、强电磁脉冲等多种物理效应,会引起电子器件的永久或潜在失效、电子设备和火工品误动作、易燃物的燃爆和火灾,甚至人身伤害,静电防护是必须采取的安全措施。随着智能化和信息工业的发展,电子芯片集成度越来越高,电子器件特征尺寸越来越小,其静电敏感度越来越高,电子产品的静电防护需求也越来越高,工业制造能力的提升对静电防护措施及标准提出了更高要求。

静电测试是静电防护工作必不可少的部分。其中,静电电位测量不仅是评估静电水平、判断ESD的危险性、制定防静电措施的基本依据,也是了解和掌握静电相关科研和静电应用的工艺和环境参数的必要手段。静电电位测量在静电防护的许多相关标准(如IEC 61340、ANSI ESD S2020、GB/T 39587-2020等)中都有明确规定。

静电电位测量分为接触式与非接触式两种测量方法^[9]。一般地,只有静电导体的表面电位才能采用接触式测量,而非静电导体(绝缘体)或不可触及的导体表面电位只能采用非接触式测量。非接触式静电电位测量系统按照电位传感器的不同可分为直接感应式、变电容式、集电式、电压补偿式等。最常见的是变电容式,其电场传感器包括旋叶式(也称场磨式)、振动电容式和MEMS三种。非接触式静电电压测试仪的标定和校准有明确的规范,包括JJF 1517-2015《非接触式静电电压测量仪校准规范》^[10]和GJB/J5972-2007《非接触式静电电压表校准规范》^[11]。非接触式电压测试仪也可应用于绝缘体表面电荷分布^[12]、表面电压^[13]、高电压^[14]监测等方面。近年来,电压测试系统和校准方面的研究较多,主要包括仪器测试性能提升^[15-16]和仪器校准装置及方法^[17-22]等。

理想情况下,非接触式电场探头能够正确反映待测体表面的静电电位,但实际上非接触式电

压测试仪和待测体之间存在一定相互作用。姚安居等^[23]利用电容计算的半经验公式和简易模型,计算分析了测试仪在测量中与待测物电容耦合的影响;Kachi等^[24]提到探头尺寸和探头与待测体之间的电容耦合对颗粒绝缘材料表面电位的衰减速率的影响。实际上,在电位仪器标定和测试过程中,测试仪和探头都带有接地极,而且不同探头的尺寸和形状都不同,近距离测量对导体或绝缘体的表面静电状态都会产生影响。并且,电位仪器标定的静电环境与实际测试时也不相同,导致非接触式电位测试与实际情况存在很大差异。这些因素对测试结果的准确性和可信性产生重大影响,目前,在非接触式静电电位测量中,关于测试仪探头的相关规范和标准以及准确测试静电电位的条件有待讨论和改进。

本文基于变电容式非接触式静电电位测试仪,分析了准确测试带电体表面静电电位的条件,通过导体板和模拟绝缘板的试验,确定测量中存在的偏差和不确定性,进而提出非接触式静电电位测试的修正方法。

1 变电容式非接触式静电电位仪的原理

非接触式电位测量的原理示意如图1所示。其中, U_0 和 E_0 分别表示电荷密度为 σ_0 带电体(标准板或待测体)的表面电位和电场; U_s 和 E_s 为探头处的电位和电场; h 为测试距离。

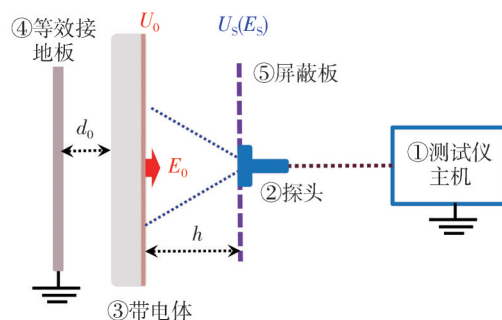


图1 非接触式静电电位测试原理示意图.

Fig. 1 Schematic diagram of non-contact electrostatic voltage measurement

如果带电体是有限尺寸的,其对地电容也是有限,那么存在一个等效对地距离,用 d_0 表示。

变电容式非接触式静电电位测量主要涉及以

下两个过程:

1) 电场探测: 电场探头感应到当地电场 E_s 的过程。一般地, 测试仪获得与当地电场相对应的电流信号 I_s , 它与探头处的电位 U_s 和探头电容 C_s 的变化率具有确定的关系^[9,16]

$$I_s = E_s d_s \frac{dC_s}{dt} = U_s \frac{dC_s}{dt} \quad (1)$$

2) 电位标定: 主机①将探头的当地电场转换为带电体表面电位 U_0 并显示的过程, 即

$$U_0 = f(E_s) = f(U_s) \quad (2)$$

但是, 不同的测试仪获得的电流信号与探头处的当地电场之间确定的关系是不同的, 不同测试仪探头对待测体静电状态的影响也是不同的, 即标定过程的标定曲线也是不同的。

2 试验和结果

为确定测试和标定过程对测试结果的影响, 利用标准导体极板, 在几种典型情形下进行了非接触式静电电位测试。

2.1 试验方法

实验装置与图 1 相同。其中测试仪是基于 MEMS 探头的系统(主机①和探头②), 探头的接地极(屏蔽板⑤)截面尺寸为 $\Phi 3$ cm。按照相关标准和规范, 带电体(③)选择尺寸 10~50 cm, 厚度为 1.5 mm 的导体标准极板, 对地悬空距离为 4 cm(对应④)。但实测对地电容都高于理论值, 相应的等效对地距离 d_0 小于悬空高度。为减小测试过程中的人为因素影响, 测试在较大体积(1 m×1 m×1 m)的测试腔内进行。试验实物图如图 2 所示。

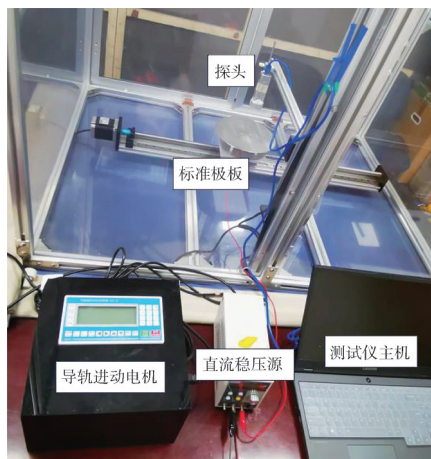


图 2 测试现场图

Fig. 2 Real testing platform

探头的移动和定位由电机操控; 电源及连接线在测试和标定过程中不动, 以减少操作对系统状态的影响。测试仪器的标定和校准符合相关规范 JJF 1517—2015。标定后的测试仪可以直接给出带电体表面的电位值。

测量中, 根据选定探头的测试电流与当地电场之间的确定关系, 还输出了每个测试点的当地电场; 再根据给定位置的定标关系(该位置处的电场值标为标准值“1”)及某测试距离 h 处极板的对地电容, 可以反算出该处的对应于“当地电场”的极板电压值, 文中称为“预期值”。这样, 就可以对比设定电位、测试值和预期值。

此外, 由于难以保证绝缘体表面电荷的均匀性, 提出一种绝缘体表面电位的模拟测试方法, 即将导体极板分割成若干个块或以中心为圆心的同心圆环, 各分割电极之间相互绝缘, 电荷不能在其间移动。这样, 当探头靠近或远离测试板时, 电荷移动仅局限于各个分割电极内, 与绝缘体表面的电荷状态更具相似性。

2.2 测试结果和分析

2.2.1 连接电源极板的电位测试

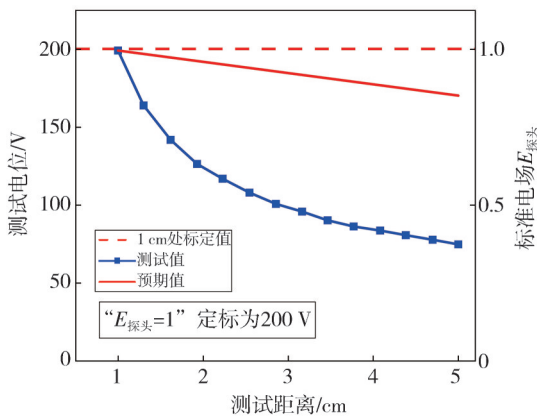
以 $\Phi 20$ cm 金属板为带电体, 将极板始终连接在电源上, 并施加一定电位(测试中为 200 V)。先将测试探头移至 $h=1$ cm 标定, 此时仪器的示数定义为标准电位 200 V, 相应的探头电场为标准值“1”。电位“预期值”按照此时的系统对地电容计算, 得到中心轴上不同 h 位置的测试仪电场值所对应的极板电压。当探头移至其他测试距离($h=1\sim 5$ cm)时不再重新标定而是假定探头电场等于极板表面电场, 且不随距离变化; 测量仪的示数代表电位测试值。(注意: 实际测试时, 应该在各距离重新标定。)

先在较远处 $h=1$ cm 标定, 不同位置的电位预期值和测试值如图 3(a)。可以看出, 当探头从标定处($h=1$ cm)抬高逐渐远离极板时, 探头测试的电场值减小, 计算得到的电位预期值也逐渐减小。但测试值小于预期值, 尽管极板一直连接在电源上, 且保持 200 V 电位。

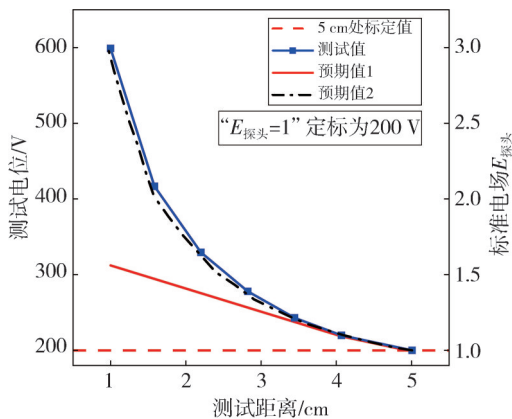
相反, 如果先在较远处($h=5$ cm)标定, 再靠近极板, 则测试结果正好相反。测试值都大于预期值, 如图 3(b)的“预期值 1”。

在极板电位不变时, 对地电容变化, 表面电荷和密度也变化, 导致探头“表观电场”变化, 因

此测试的电位值发生变化。



(a) 在 $h=1$ cm处标定



(b) 在 $h=5$ cm处标定

图 3 连接 200 V 电源极板的测试电位与预期值

Fig. 3 Comparison of measured and expected voltage for plate connected with 200 V source

如果考虑探头位置对系统电容的不同影响,重新计算各点的电位预测值(如图 2(b)的“预测值 2”),则结果与测试值非常吻合。可见,探头位置将影响带电体系统的对地电容,从而影响电位的标定和测试结果。

由于不同位置的探头对系统对地电容的影响不同,因此测试时必须逐点标定,这样测试的静电电位与电源电压基本一致。

2.2.2 浮置极板的电位测试

实际测试的极板是浮置,而不是连接电源的。为此先将极板加载一个电位,然后断开电源,再进行测试。

图 4 为 $\Phi 20$ cm 和 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 极板在设定电位为 200 V 时不同位置的测试结果。可以看出,浮置极板电压的测试值都小于设定值(标定值);距离越小,偏差越大。如测试距离 $h=1$ cm 时, $\Phi 20$ cm 板的测试值约 153 V,接近度(即测试

值与设定值的比值)达到 80%;距离增大到 $h=5$ cm 后,测试值为 182 V,大致接近设定值 200 V,接近度达到 90%。

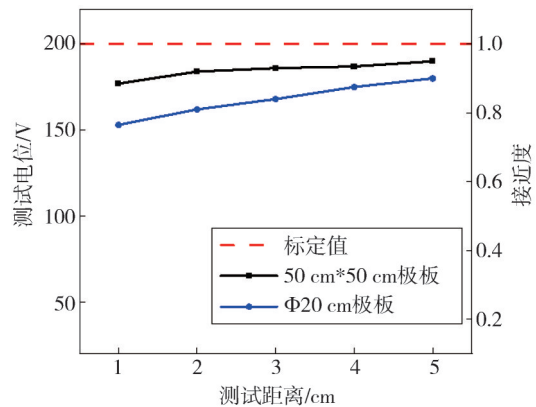


图 4 200 V 浮置极板在不同距离下的测试电位

Fig. 4 Measured voltage for floating plate of 200 V at different distances

固定测试距离 $h=5$ cm, $\Phi 20$ cm 极板在不同设定电位下的测试结果如图 5 所示。可以看到,浮置极板电位的测试值都小于标定值。但在给定的测试距离下,接近度基本相同,约 90%。即如果测试系统的静电状态不变,测试结果的相对偏差也是不变的。当然,具体测试结果还与测试时的周围环境有关,包括周围接地体、探头大小和特性等。

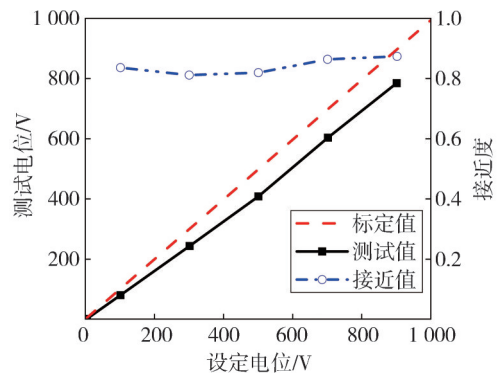


图 5 同一距离下浮置导体电位的测试值($h=5$ cm)

Fig. 5 Measured voltage for floating plate at $h=5$ cm

2.2.3 并联电容的影响

为确定系统对地电容变化对测试结果的影响,进一步在金属板与接地极之间并联了不同电容,改变系统的对地电容。

图 6 为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 极板的测试结果。可以看到,随着并联电容增大(0~5 100 pF),测试值逐渐接近设定值。当并联电容大于 1 000 pF 时,测量值基本准确。此时,探头的靠近对系统整体电容影响相对很小。亦即,只有当系统电容几乎

不受测试过程(如探头位置)影响时,测试结果才是准确可信的。

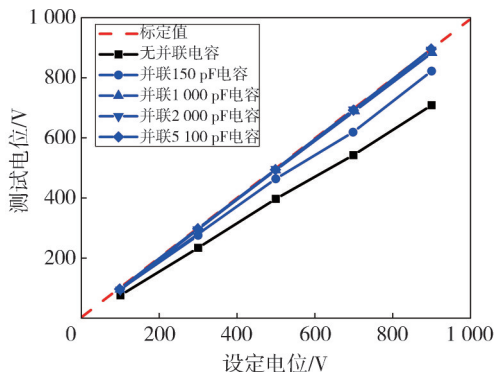


图6 极板并联电容对测试结果的影响

Fig. 6 Effect of shunt capacitance on measured voltage

2.2.4 标定过程的影响

首先考虑标准极板大小的影响。分别用Φ10 cm、Φ20 cm、Φ30 cm极板在h=1 cm处标定,设定电位为200 V,再测试其他尺寸大小的标准极板,结果如图7所示。

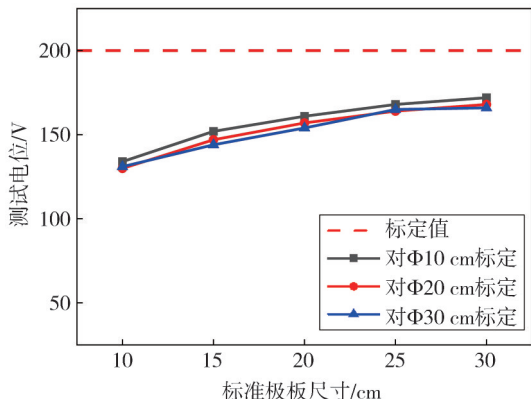


图7 不同极板标定时200V导体的测试电位(h=1 cm)

Fig. 7 Measured voltage with calibration under plates of different size at h=1 cm

可以看出,对不同尺寸极板的标定操作对同一待测极板的测试结果影响不大。因此,在实际测试中,只要标定极板的尺寸足够大,对测试结果都不会产生明显影响。但待测板的尺寸还是会影响测试结果。极板越大,测试结果越接近于设定值。这是因为由于探头的存在,极板对地电容发生明显变化,极板表面的静电状态将随测试探头的引入而发生改变。极板尺寸越小,影响越大,测试结果的偏差也越大。

其次考虑加装屏蔽板的影响。在实际工作中,有时需要保证极板表面电场分布不变。为此,一般是在探头上加装与极板大致相同的接地极板,使之与标准板构成一个准平行板电容器。

图8为探头加装屏蔽板标定的测试结果。可以看出,探头加装屏蔽板后的测试结果要小于未加装屏蔽板的情况,而且两种情况的测试结果差距随测试距离的增大而减小。可能原因是,探头加装屏蔽板后能够有效减小极板表面电场畸变,使电荷向探头附近积聚的程度减小,表面电场减小,标定的电位值相应减小,因此测试结果的偏差增大。

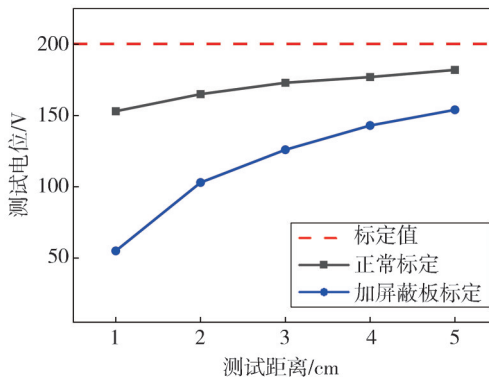


图8 探头加装屏蔽板标定对测试结果的影响

Fig. 8 Influence of calibration with shielding plate on measured voltage

如果待测体的表面电荷不受探头的影响(如绝缘体),加装屏蔽板是更合理的操作。

2.2.5 绝缘体表面电位的模拟测试

绝缘体表面的电荷往往不均匀,不能移动,且在邻近区域内可能存在不同极性的电荷分布。因此,为确定电荷分布对测试结果的影响,利用分割极板来模拟绝缘体的表面电荷状态进行对比测试。

首先利用两块极板组合进行试验。在连接电源的情况下,如果探头距离极板不太近,可以认为其表面电荷是均匀的。因此,两块组合板大致可以模拟不同电荷分布的带电体表面情形。为简单起见,单块极板的电位设定为0,组合板的电位分别为300 V和-290 V,并在整个大极板表面的中心轴上空进行测试,如图9所示。其中单极板面积为20 cm×20 cm,组合板面积各为20 cm×10 cm。

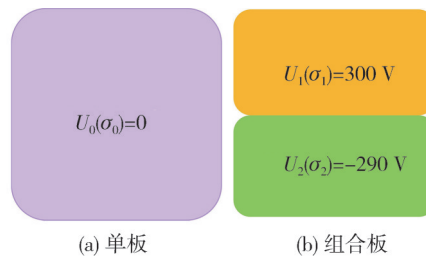


图9 电荷分布影响的模拟测试

Fig. 9 Simulated measurement of different charged plates

结果表明,在中心轴上空不同位置($h=1\sim 5\text{ cm}$),非接触式电压仪感应到的表面电位为0。实际上,只要两块极板的电位极性相反,数值大致相等,测试结果都是0。

此外,还对两块组合极板进行了多种电位组合测试。结果表明,只要他们的设定电位不同,仪器测到的“表面电位”不等于其中任何一块极板上的电位值。这说明在表面电荷不均匀的情况下,测试结果具有很大的不确定性。即如果不知道带电体的表面电荷状态,那么非接触式静电电压测量的结果是不可信的,静电评估可能没有意义。

其次,利用圆形分割电极进行试验。图 10 为分割极板处在浮置状态时的测试结果。可以看到,对两种极板进行相同的标定操作,分割极板的测试结果要小于整体极板情况。这是因为在测试时,两种极板表面的静电状态是不对等的。对于整体极板,其浮置电位的测试结果要小于标定值,并且探头的引入引起了极板表面发生局域电场畸变,表面电荷向探头靠近的方向聚集。而对于分割极板,其表面电荷被限制在各个分割的区域内,因电场变化而聚集或重新分布的程度受到限制,探头所感应的电场减小,测试电位值相对于整块极板更低。亦即,绝缘体表面电位的测量与等效导体存在一定差异。

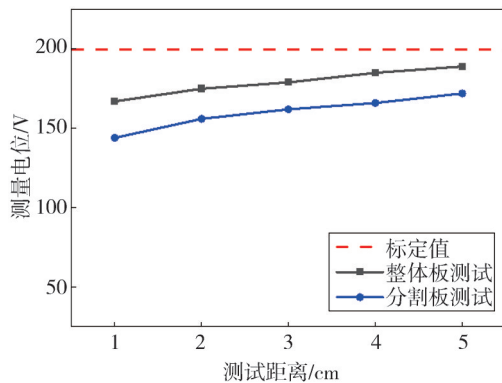


图 10 200 V 分割极板的测试电位

Fig. 10 Measured voltage of segment plate at 200 V

因此,只有在测试环境中包括探头在内的其他带电体干扰可忽略的情况下,表面电荷分布具有物理上相似性的导体和绝缘体,其表面电位才可以认为是等价的。

对照标定方式的影响(见图 8),此时采用加装屏蔽板使表面电荷和电场均匀化的标定方法,对绝缘体表面电位的测试更为合理。

3 讨论

如上试验结果和分析,待测体静电状态将会受到测试和标定过程的影响,表现为测试(或标定)过程对带电体静电状态及其空间电场分布产生了影响。

3.1 有限尺寸带电体

如果测试过程完全不影响待测体和标准极板的静电状态,那么探头的当地电场应该等于带电体表面电荷在测试距离 h 处产生的电场(其中,导体表面 $E_0 = \sigma_0/\epsilon_0$,绝缘体表面 $E_0 = \sigma_0/2\epsilon_0$)。对于选定的探头,其对地电容 C_s 和对地距离 d_s 是确定的,因此,探头的当地电位 U_s 也可以确定,即 $U_s = E_s d_s$ 。这样,待测体(或标准极板)标定的表面电位为

$$U_0 = U_s + E_s h = U(E_s, h). \tag{3}$$

但实际导体带电体(标准极板或待测体)并非无限大,其对地电容有限,而且受到探头和周围接地环境的影响。对于有限尺寸导体带电体,若表面积为 A ,对地电容为 C_0 ,则相当于与等效对地距离为 d_0 的接地导体板构成一个平行板电容器, $C_0 = \epsilon_0 A/d_0$ 。接地的电场传感器(测试探头)接近带电体表面时,必然引起等效对地距离和对地电容的变化,即 $C_0(h) = \epsilon_0 A/d_0(h)$ 。

事实上,探头在不同测试距离时,标准极板的对地电容的确发生了变化,实测值如表 1 所示。

表 1 对地电容随探头位置的变化
Tab. 1 The ground capacitance at different probe positions

测量距离/cm	对地电容/pF	
	Φ20 cm 极板	Φ50 cm 极板
1	22	77
2	18	73
3	16	70
4	13	68
5	11	65

如果电压不变(如标定时连接电源的情形),那么其表面电荷必然变化,表面电荷分布(电荷密度)也将变化。标定曲线必然随不同探头及其位置而变化。如果其电荷不变(如测量时浮置的情形),则表面电位必然变化,表面电荷分布也会变化。因此,测试结果也发生变化。

减小和避免测试过程影响带电体的对地电容和静电状态,是非接触式静电电压仪能够准确测

量电位的重要前提。实际测试中,应该减小探头接地区域的大小,使其靠近待测体时对系统对地电容的影响限制在很低的水平。

3.2 绝缘体表面电位

绝缘体表面电荷一般不均匀,也不能移动,物理上并不存在“绝缘体表面电位”的概念。通常所说的绝缘体“表面电位”实际上是一种“等效表述”,即等价于“表面电荷分布均匀,密度相同,并且不发生变化时的导体表面的静电电位”。由于导体极板对地电容随探头变化,而电荷不变,其电位将变化,相应等效的绝缘体“表面电位”并不是确定的,与探头条件和测试距离相关。如本文图10用分割导体极板模拟绝缘体的测试结果,用导体极板来标定绝缘体“表面电位”的测试结果存在很大的不确定性。

此外,若绝缘体表面电荷分布不均匀,各微小表面的“等效电位”不一致,探头测量的实际上是某一范围内(即探头屏蔽角内所感受到的待测表面积)的表面电荷激发的电场平均值,结果可能不确定,甚至没有意义。

为准确描述绝缘体“表面电位”,一方面,应该发展“微探头”技术以适应高空间分辨测量;另一方面,用“表面电荷密度”(对应于表面电场强度),而不是“表面电位”来描述绝缘体表面的静电特性可能更为合理。但这需要学术界和工业界学者的共同研究和努力。

3.3 测试仪器的正确标定和校准

非接触式电位仪标定和校准的关键是确定探头电场与待测体表面电位之间的关系。由于它将随系统电容变化,而且对于不同的探头,其变化方式也不相同,测试结果也难以相互对比。因此,在实际测试过程中,应该有针对性地选择合适标定方法。原则上应该使“测试”和“标定”过程中的静电环境具有相似性,特别是有精确测量要求的场合,但很难做到。事实上,仪器标定时导体板接电源与测量时浮置的表面静电状态并不对等。因此,减小探头的影响依然更为有效。

此外,对于绝缘体测量,标定时保持标准板表面电场的均匀性可能是必要的。

4 结论

本文从非接触式静电电位测试仪的原理出

发,阐述了测试过程对测量结果的影响,并进行了验证性试验,主要结论如下:

1) 实际测试过程中应该考虑带电体尺寸的有限性,以及其对地电容和静电状态受测试过程的影响,从而在标定过程中,选定相匹配的标准极板,以取得合理的测试结果。

2) 相较于导体的情况,表面电荷分布的不确定性是准确测量绝缘体表面电位困难的主要因素,应该区别对待绝缘体表面电位和导体电位的表征和测量。针对绝缘体表面电位的准确测量,需要考虑采用加装屏蔽板使极板表面电场均匀化的标定策略。

3) 在标定和实际测试过程中,一定尺寸的测试仪探头的介入会影响待测体表面静电状态,而且在两个过程中的影响结果也不具有相似性,对于不同探头而言,其影响方式也各不相同,这是非接触式电位测试出现偏差的主要原因。减小探头接地面积的大小是减小测量出现偏差非常有效的方法。

参考文献:

- [1] 肖集雄,李庆容,王定虎,等.中美两国ESD失效分析研究现状及比较[J].河北大学学报(自然科学版),2007,27(S1):186-189.
XIAO Jixiong, LI Qingrong, WANG Dinghu, et al. Reality and comparison of ESD failure analysis and research between China and America [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2007, 27 (S1): 186-189. (in Chinese)
- [2] 刘浩,刘尚合,苏银涛,等.基于网格状ITO薄膜的航天器太阳能电池阵静电放电防护[J].航空学报,2015,36(10):3494-3500.
LIU Hao, LIU Shanghe, SU Yintao, et al. Electrostatic discharge protection of spacecraft solar cell array based on meshed ITO film [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3494-3500. (in Chinese)
- [3] 刘富品,张皓东.航天产品静电防护的过程控制[J].质量与可靠性,2014(3):49-52.
LIU Fupin, ZHANG Haodong. Process control of electrostatic protection for aerospace products [J]. Quality and Reliability, 2014(3): 49-52. (in Chinese)
- [4] 郭德华,高志良,何积浩,等.静电放电测试模型标准现状的分析研究[J].中国标准化,2021(24):43-53.
GUO Dehua, GAO Zhiliang, HE Jihao, et al. Analy-

- sis and research on the current situation of standards for electrostatic discharge test models[J]. *China Standardization*, 2021(24): 43-53. (in Chinese)
- [5] 季启政, 高志良, 刘尚合, 等. 我国静电防护标准发展现状及对策建议[J]. *安全与电磁兼容*, 2022(1): 9-14.
JI Qizheng, GAO Zhiliang, LIU Shanghe, et al. Development status and countermeasures of electrostatic discharge protection standards in China [J]. *Safety & EMC*, 2022(1): 9-14. (in Chinese)
- [6] 郭飞, 张超, 明朔, 等. 船舶静电防护技术分析研究[J]. *中国设备工程*, 2023(14): 242-245.
GUO Fei, ZHANG Chao, MING Shuo, et al. Analysis and research on ship electrostatic protection technology [J]. *China Plant Engineering*, 2023 (14): 242-245. (in Chinese)
- [7] 王斌, 张翠, 李朝辉, 等. 实验室静电防护措施及技术[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(8): 24-27.
WANG Bin, ZHANG Cui, LI Zhaohui, et al. Technology and measure of electrostatic protection in the laboratory [J]. *Power Electronics*, 2021, 55(8): 24-27. (in Chinese)
- [8] 刘文静, 汪飒, 张宪标. GIS 中绝缘子表面电荷积聚的观测与分析[J]. *高电压技术*, 2008, 34(8): 1573-1577.
LIU Wenjing, WANG Feng, ZHANG Xianbiao. Observation and analysis of insulator surface charge accumulation in GIS [J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(8): 1573-1577. (in Chinese)
- [9] 刘尚合. 静电放电及危害防护 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. 非接触式静电电压测量仪校准规范: JJF 1517—2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
- [11] 国防科技技术工业委员会. 非接触式静电电压表校准规范: GJB/J5972-2007[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2007.
- [12] MARTY-DESSUS D, ZIANI A C, PETRE A, et al. Space charge distributions in insulating polymers: a new non-contacting way of measurement [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(4): 043905.
- [13] SACHINIDOU P, HEUSCHLING C, SCHANIEL J, et al. Investigation of surface potential discharge mechanism and kinetics in dielectrics exposed to different organic solvents [J]. *Polymer*, 2018, 145: 447-453.
- [14] 张泽林, 刘希喆. 基于非接触式电压测量的电压监测系统 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(5): 229-237.
- ZHANG Zelin, LIU Xizhe. Voltage monitoring system based on non-contact voltage measurement [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2024, 38(5): 229-237. (in Chinese)
- [15] 魏明, 王书平. 静电电位动态测量波形重建算法[J]. *高电压技术*, 2012, 38(9): 2230-2236.
WEI Ming, WANG Shuping. Waveform reconstruction algorithm for electrostatic potential dynamic measurement [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(9): 2230-2236. (in Chinese)
- [16] 闻小龙, 杨鹏飞, 储昭志, 等. 基于 MEMS 的距离自适应型非接触静电仪 [J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(10): 3068-3074.
WEN Xiaolong, YANG Pengfei, CHU Zhaozhi, et al. A daptive-distance noncontact electrostatic meter based on MEMS technology [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(10): 3068-3074. (in Chinese)
- [17] 余欢欢. 非接触式静电电压表的校准及测量结果的不确定度评定 [J]. *电世界*, 2021, 62(1): 33-34.
YU Huanhuan. Calibration of non-contact electrostatic voltmeter and uncertainty evaluation of measurement results [J]. *Electrical World*, 2021, 62(1): 33-34. (in Chinese)
- [18] PANDEY A, KIERES J, NORAS M. Verification of non-contacting surface electric potential measurement model using contacting electrostatic voltmeter [J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, 67: 453-456.
- [19] 刘永寿. 718 型非接触式静电电压测试仪校准方法 [J]. *计量与测试技术*, 2007, 34(2): 8-10.
LIU Yongshou. Calibration method for model 718 non-contacting static meter [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2007, 34(2): 8-10. (in Chinese)
- [20] 张卫, 张健. 非接触式静电电压测量仪校准装置设计与开发 [J]. *计量与测试技术*, 2018, 45(6): 21.
ZHANG Wei, ZHANG Jian. Design and development of calibration device for non-contact electrostatic voltage measuring instrument [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2018, 45(6): 21. (in Chinese)
- [21] 郭小妍. 非接触式静电电压表计量误差分析及校准方法研究 [J]. *自动化与仪器仪表*, 2019(11): 48-51.
GUO Xiaoyan. Study on measurement error analysis and calibration method of non-contact electrostatic voltmeter [J]. *Automation & Instrumentation*, 2019(11): 48-51. (in Chinese)
- [22] 张时开, 张宇青, 李玉玲, 等. 非接触式静电电压测量仪校准方法研究 [J]. *宇航计测技术*, 2022, 42(1): 24-28.

- ZHANG Shikai, ZHANG Yuqing, LI Yuling, et al. Research on calibration method of non-contact electrostatic voltage measuring instrument [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2022, 42(1): 24-28. (in Chinese)
- [23] 姚安居, 韩永林. 非接触或静电电位测量中探测仪器对电位影响的研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 1988, 12(2): 129-133.
YAO Anju, HAN Yonglin. On effect of measurement apparatuses on the electric potential in non-connect measurement electrostatic potential [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1988, 12(2): 129-133. (in Chinese)
- [24] KACHI M, NEMAMCHA M, TABTI B, et al. Comparison between three measurement methods for characterizing the charge state of granular insulating materials[J]. Journal of Electrostatics, 2011, 69(4): 394-400.

(上接第 609 页)

- [16] 戴鹏, 周平, 梁延灼, 等. 基于多输出最小二乘支持向量回归建模的自适应非线性预测控制及应用[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(1): 43-52.
DAI Peng, ZHOU Ping, LIANG Yanzhuo, et al. Multi-output least squares support vector regression modeling based adaptive nonlinear predictive control and its application[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(1): 43-52. (in Chinese)
- [17] ZHOU S. Sparse LSSVM in primal using cholesky factorization for large-scale problems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(4): 783-795.

(上接第 617 页)

- [12] LI J S, WANG S C, HWANG C C. Preparation and high-temperature microwave absorbing properties of 6H-SiC/MWCNT/silicon resin composites[J]. Materials Express, 2020, 10(1): 1-9.
- [13] 孙珊珊, 黄卡玛. 双同轴高温垃圾复介电常数测量装置与方法[J]. 微波学报, 2015, 31(4): 89-92.
SUN Shanshan, HUANG Kama. Complex permittivity of waste in high-temperature measurement method with double coaxial-line device [J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(4): 89-92. (in Chinese)
- [14] 徐银芳, 邹样辉, 李恩, 等. 短路波导法测试低损耗透波材料高温复介电常数[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(5): 103-106.
XU Yinfang, ZOU Yanghui, LI En, et al. Complex permittivity measurement of low loss dielectric material for high temperature by short waveguide method [J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(5): 103-106. (in Chinese)
- [15] 冀元, 唐章宏, 王群, 等. 微带线法测量介质材料的高温介电常数[J]. 安全与电磁兼容, 2022(1): 44-48.
JI Yuan, TANG Zhanghong, WANG Qun, et al. Microstrip line method to measure the high temperature dielectric constant of dielectric materials [J]. Safety & EMC, 2022(1): 44-48. (in Chinese)