

基于MEMS的距离自适应型非接触静电仪

闻小龙^① 杨鹏飞^② 储昭志^③ 彭春荣^{*④} 刘宇涛^⑤ 吴双^⑤

^①(北京科技大学数理学院北京市弱磁检测及应用工程技术研究中心 北京 100083)

^②(北京信息科技大学理学院 北京 100192)

^③(中国科学院微电子研究所 北京 100029)

^④(中国科学院空天信息创新研究院传感技术国家重点实验室 北京 100190)

^⑤(北京中科飞龙传感技术有限责任公司 北京 100083)

摘要: 静电场测量是检测物体是否携带过量静电最直接的手段,对于静电防护具有重要意义。传统的静电仪主要依赖固定距离测量,在被测物难以维持静止或不容易靠近时,距离改变引起灵敏度变化,造成测量误差。该文基于微机电系统电场传感器,提出一种可根据测试距离自适应调整灵敏度的静电测量思路:通过超声波模块测量被测物的距离,然后通过单片机查找对应的灵敏度系数,结合电场测试结果计算被测电压。针对研制的静电仪,该文提出基于实验室标定及现场标定相结合的校准方法,搭建了动态灵敏度标定系统,计算出不同测试距离、不同被测物尺寸的传感器灵敏度系数对应关系。与定距测量的传统静电仪相比,该文通过灵敏度动态标定,实现了更精确的非接触表面静电电压测量;采用微机电系统电场敏感元件,具有体积小、功耗低、易集成、可批量化制备等优点,封装后无裸露可动部件,可靠性高。经第三方计量检测,在不同测试距离下的平均误差为-2.98%。

关键词: 静电仪;微机电系统;电场传感器;静电电压;动态标定

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)10-3068-07

DOI: 10.11999/JEIT200571

A Daptive-distance Noncontact Electrostatic Meter Based on MEMS Technology

WEN Xiaolong^① YANG Pengfei^② CHU Zhaozhi^③ PENG Chunrong^④

LIU Yutao^⑤ WU Shuang^⑤

^①(Department of Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing Engineering Research Center of Detection and Appli-cation for Weak Magnetic Field, Beijing 100083, China)

^②(School of Applied Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

^③(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

^④(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Transducer Technology, Beijing 100190, China)

^⑤(Beijing TFlying Transducer Technology Co. Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Electrostatic field measurement is the most direct method to detect whether an object carries excessive static charge. Traditional electrostatic meters mainly rely on fixed distance measurement. While the measured object is difficult to maintain still or not easy to approach, the distance change causes a sensitivity change and results in a measurement error. Based on the micro-machined electric field sensor, this paper proposes an electrostatic measurement idea that the meter adjusts the sensitivity adaptively according to the tested distance: measure the distance of the object through the ultrasonic module, to find the corresponding

收稿日期: 2020-07-13; 改回日期: 2020-12-08; 网络出版: 2020-12-30

*通信作者: 彭春荣 crpeng@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01010800), 国家自然科学基金(62031025), 中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-19-045A2, FRF-BD-19-017A, FRF-BD-20-12A)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2018YFF01010800), The National Natural Science Foundation of China(62031025), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (FRF-TP-19-045A2, FRF-BD-19-017A, FRF-BD-20-12A)

sensitivity coefficient through the microprocessor, and then to calculate the measured voltage accompany the electric field result. For the developed meter, this paper proposes a calibration method based on a combination of laboratory calibration and site calibration, builds a dynamic sensitivity calibration system, and calculates the corresponding relation of sensor sensitivity coefficients of different test distances and different measured object sizes. Compared with the conventional measurements in a fixed distance, this paper achieves more accurate non-contact surface static voltage measurement by means of sensitivity dynamic calibration. In the meanwhile, the micro electric field sensing element has the advantages of small size, low power consumption, easy integration, and capable of mass manufacturing. According to the third-party test, the average error at different test distances is -2.98% .

Key words: Electrostatics; Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS); Electric field sensor; Static voltage; Dynamic calibration

1 引言

静电放电具有瞬时电压高、能量大、不易察觉等特点, 容易对集成电路、石油化工、航天、工业生产等多个领域产生严重的危害^[1-5]。静电测量是检测人体、物品及环境等是否带电最直接的手段, 可用于评估静电防护的效果, 研究静电积累及放电机理等, 对于静电防护具有重要意义。基于电场感应原理对带电物表面电位进行非接触测量, 具有不干扰被测表面、测试过程无电荷转移风险等优点, 是近年来静电防护领域的研究热点之一^[6]。

按照检测原理划分, 非接触式静电仪可分为高阻式、场磨式、振动电容式及微机电式等。高阻式静电压仪利用高输入阻抗的直流放大电路进行测量^[7], 测量过程中感应电荷在放大电路中随时间衰减, 造成测试结果不稳定, 需要定期清零, 影响测量的稳定性。场磨式电场仪采用电机带动屏蔽电极旋转, 周期性地屏蔽感应电极, 从而将感应电极的感应电荷调制成交流信号, 避免了信号衰减, 提升了测试精度^[8,9]。由于存在电机驱动、旋转叶片等数十个机械结构, 组装工艺复杂, 不利于批量化制造, 电机旋转磨损造成寿命衰减。振动电容式静电计通过压电陶瓷片驱动感应电极振动, 从而在感应电极上产生交流感应信号^[10,11], 具有体积小、重量轻等优点, 在非接触静电测量领域广泛应用。然而, 压电材料在长期工作时, 温度变化影响压电常数和弹性模量, 造成压电悬臂梁谐振频率和振幅发生改变, 影响长期稳定性^[12]。此外, 场磨式、振动电容式两种静电仪均存在裸露的可动部件, 容易受机械碰撞、粉尘、油气等影响而发生失效。随着微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)技术的发展, 人们采用硅微工艺制备出振动结构, 实现了感应信号的周期性调制, 研制出MEMS电场传感器, 具有体积小、可批量化制备, 无机械磨损、寿命长, 封装后无裸露可动部件、可

靠性高等多种突出优点^[13-16], 在静电测量领域具有广阔的发展前景。本团队曾于2017年报道一种基于MEMS电场敏感芯片的静电测量装置, 实现测量人体不同部位带电分布的非接触式测量^[17]。

通过标定实现电场到被测表面电位的转换, 对保证非接触式静电仪的测量精度十分重要。传统的场磨式及振动电容式静电仪均采用固定距离的方式进行表面电位测量。例如, 日本SIMCO公司的FMX-004型、美国MONROE公司的282A型等, 通过两个光斑重合的方式将测试距离固定为2.54 mm。德国Kleinwachter公司的EFM-022型测试仪利用两根已知长度的绝缘棒固定测试距离。美国TREK公司的520型测试仪将探头设计成尖端形状, 可实现在5~25 mm小范围内的测量。然而, 当测试距离改变时, 到达传感器的电场强度发生改变, 造成灵敏度变化, 影响测试精度。文献^[17]介绍了一种用于测量人体静电的门体结构, 采用两个相对布置的检测电极, 通过共模运算解决了被测人体未居中造成的误差问题, 然而, 对于不同体型的测试人员, 仍存在测试距离不一致的难题, 带来测试误差。在被测物难以维持静止或不容易靠近等复杂环境下, 固定距离可能对测试带来不便。此外, 带电物尺寸不同, 产生的电场分布也不相同, 在固定距离下测试也容易造成偏差。难以实现动态距离测试、对被测物尺寸缺乏标定, 是目前非接触式表面电位测量面临的问题。

本文基于MEMS电场传感器, 开展非接触式表面静电测量技术研究, 区别于传统的定距测量方案, 提出距离可变的测量思路, 研究静电仪的动态标定及测试方法, 实现距离自适应的表面静电位准确测量。本文为复杂环境下非接触表面静电测试提供新的思路, 从而进一步提升静电敏感领域的静电防护效果, 为集成电路、石油化工、航天等多种高端产品制造过程提供先进技术手段。

2 MEMS电场敏感芯片

本文采用谐振式共面电极型MEMS电场敏感芯片, 总体尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 结构如图1所示, 主要包括屏蔽电极、感应电极、驱动电极、弹性折梁等几部分, 屏蔽电极与弹性折梁相连构成水平振动微结构。通过在驱动电极上施加交流电压信号, 驱动电极与屏蔽电极之间产生交变静电吸合力, 带动屏蔽电极进行周期性水平振动。驱动电极与屏蔽电极设计成梳齿形状, 用于增加二者之间的电容, 从而增加静电力。当屏蔽电极振动时, 周期性地屏蔽感应电极, 在静电场及屏蔽电极的共同作用下, 感应电极上感生出正比于被测电场的交流感应信号。屏蔽电极与感应电极相互作用部分也设计成交错梳齿形状, 与条形结构相比, 增大了二者之间的电容, 从而增大了屏蔽与暴露的效率。感应电极设计为两组, 受屏蔽电极交替屏蔽, 产生相位差为 180° 的差分信号, 通过差分减小电路噪声, 提升信噪比。与场磨式电场仪相比, MEMS谐振式敏感芯片无电机等易磨损器件, 寿命长, 工作过程具有更好的稳定性及更高的可靠性。与采用压电陶瓷的振动电容式传感器相比, 避免了长期工作时压电常数和弹性模量的温度漂移, 长期稳定性更好。

敏感芯片的振动特性符合如图2所示的2阶动力学模型。其中, k_s , m_{eff} , c_c , $c_{s,\text{strip}}$ 分别为传感器谐振状态下的等效弹性系数、质量、滑膜阻尼及压膜

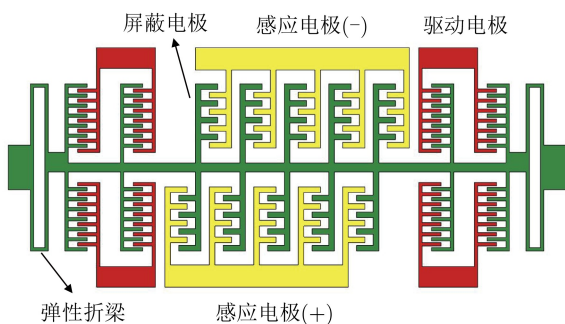


图1 MEMS电场敏感芯片结构示意图

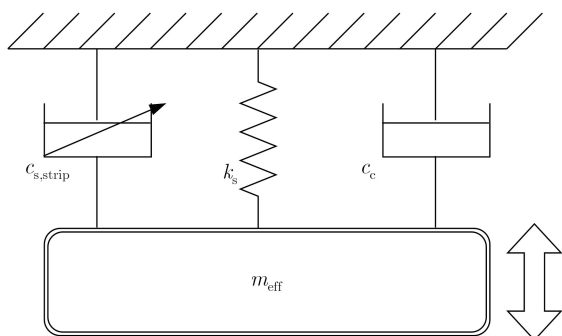


图2 敏感芯片谐振动力学模型

阻尼。目前, 敏感芯片工作在开环状态, 通过扫描确定芯片的谐振点: 在不同的频率下, 读取敏感芯片的输出本底值(由驱动电极产生本底电场, 感应电极在该本底电场下产生输出信号), 峰值所对应的频率即为敏感芯片的谐振频率。

MEMS电场敏感芯片采用绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)晶圆制备, 屏蔽电极、感应电极、驱动电极、弹性折梁等几部分在同一结构层, 工艺简单, 成品率高。工艺流程图如图3所示。

具体的流程如下:

(1) 硅掺杂: 采用1层磷硅酸玻璃(Phospho-Silicate Glass, PSG)沉积在器件层的表面, 并退火1 h, 然后用湿法化学腐蚀方法去除PSG层;

(2) 制作焊盘: 焊盘由20 nm铬和500 nm金构成, 采用第1级掩模版, 通过电子束蒸镀的方法将金属沉积到硅表面;

(3) 器件层图形化: 在器件层旋涂UV光刻胶, 采用第2级掩模版, 图形化器件层的光刻胶, 然后利用等离子深刻蚀(Depth Reactive Ion Etching, DRIE)设备, 刻蚀器件层到氧化埋层停止;

(4) 基板层图形化: 在已刻蚀完的器件层上旋涂保护材料, 采用第3级掩模版, 套刻图形, 利用反应离子刻蚀移除基板层底层的氧化层, 再用DRIE完整地刻穿基板层至氧化埋层停止;

(5) 释放: 移除器件层上的保护材料及氧化埋层。

为了提升敏感芯片的环境适应性及可靠性, 本文采用全密封结构的MEMS敏感芯片封装, 主要由基板、绝缘层、封装盖等几部分组成, 如图4所示。其中, 基于绝缘材料的封帽结构将敏感芯片完全密封在微小腔体内, 实现了对被测电场信号的传导。

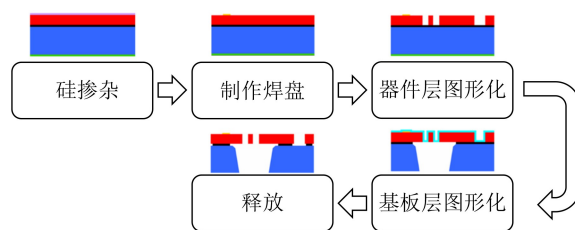


图3 MEMS敏感芯片工艺流程示意图

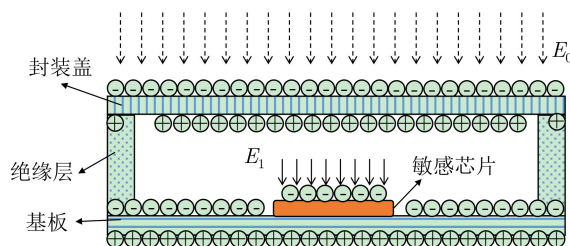


图4 敏感芯片封装结构原理图

E_0 表示封装外部被测电场， E_1 表示封装内部到达敏感芯片表面的电场。与敏感结构直接裸露的其他静电仪相比，该结构封装后无裸露可动部件，可耐高湿度、粉尘、碰撞等恶劣条件的影响，使传感器可在户外、粉尘车间等更多工矿条件下使用。

3 信号处理电路

本文研制的静电仪主要包括MEMS电场敏感芯片、测距模块、信号处理电路、显示屏、蜂鸣器、温湿度传感器、数据存储单元、实时时钟(Real-Time Clock, RTC)、电池等部分，如图5所示。其中，MEMS电场敏感芯片和测距单元位于静电仪前端：通过同时获知电场及距离信息，并利用不同的距离下的标定系数，实现距离可变的表面静电位测量。温湿度传感器主要用于测量环境的温度、湿度，从而对环境是否容易起电、物体是否带电进行评估。RTC时钟用于为整个手持静电仪提供时间信息，便于为数据存储单元上保存的数据标记测试时间。数据存储单元可同时存储时间、电场、距离、温度、湿度、测试电压等信息。显示屏上可实时显示带电体的表面电压、距离等，当测试电压超过预设阈值时，显示屏及蜂鸣器能够实时进行报警。此外，本文研制的静电仪还包括USB充电及数据读取、电池低压报警、自动校零等多种功能，为实际测量提供便利。

在信号处理电路中，通过微控制单元(Micro-Controller Unit, MCU)控制直接数字式频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)模块输出正弦信号，为敏感芯片振动提供交流驱动电压，使敏感芯片的屏蔽电极振动。感应电极上产生正比于被测电场的交流电流信号，在I-V模块进行电流电压变换放大，转换成便于采集的交流电压信号。模拟数字转换器(Analog to Digital Converter, ADC)模块

用于对放大后的芯片输出信号进行高速采集，进入MCU后进行敏感芯片输出信号的幅值信息处理。根据敏感芯片输出信号为pA~nA级微弱电流信号的特征，芯片的第1级放大拟采用低偏置电流、低偏置电压的轨到轨放大器，并按照图6所示的电路原理图进行信号的I-V转换预处理。其中， Sen_out 信号为敏感芯片输出的微弱电流信号，该放大电路的输出信号 $V_{out} = Sen_out \times R_1$ ， C_1 与 R_1 构成低通滤波器对放大的电压信号进行初步滤波处理。

传统静电仪在测量带电物表面静电时，通过两个具有一定夹角光斑重合的方式，固定测试距离，一般为2.54 cm。光斑重合法采用目测观察，可能由于目测重合度不好造成距离误差。固定距离方式也限制了传感器的使用场合，例如，当被测电压较高时，近距离测试可能诱发放电现象，造成仪器损坏或人员触电。当被测物的距离增加时，到达传感器表面的电场减小，造成标定灵敏度衰减，测试结果偏小。为了解决距离变化问题，本文基于超声波原理测距模块，准确获知静电仪与被测物之间的距离，并在不同距离下对传感器进行标定，获知灵敏度与距离的关系。在实际测试时，根据测距结果查找灵敏度数值，计算被测物电压，从而实现了距离可变的自适应测试。本文选用的超声波模块中已对温度漂移进行了补偿，在使用过程中可以忽略温度对测距结果带来的影响。该模块的探测距离范围为2.0 cm~4.5 m，测试精度为0.3 cm。当距离太近时，测量结果偶尔出现较大偏差，可能是由于超声波探头与被测物之间形成的驻波造成的；当距离太远时，测量环境中其他物体可能对电场分布产生干扰，影响测量精度。因此，在实际使用中对测量距离限定在2.5~10 cm，当超过该范围时通过显示屏进行适当提醒。

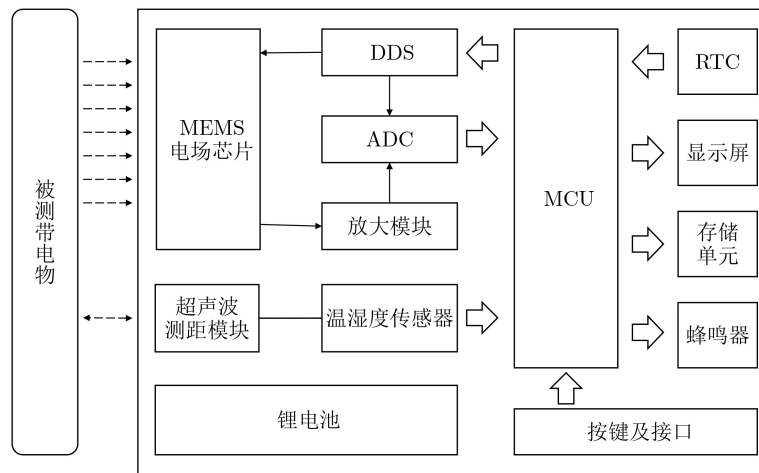


图 5 静电仪电路功能框图

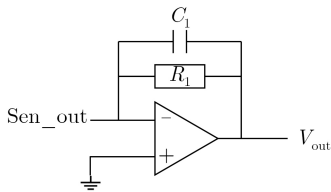


图6 I-V转换电路原理图

本文研制出了手持式的静电仪，电场探测电极及超声波测距单元位于最前端，面向被测带电体。通过正面的显示屏及按键，进行测试、存储等功能操作。

4 标定与现场校准

由于带电人体、固体等被测物形貌及材料不同，产生非匀强电场，静电仪实际感应到的为畸变电场。为了实现对被测物携带静电电压、电荷等的准确测量，本文对静电仪进行实验室及现场两次标定。

实验室标定采用平行极板结构的电场箱完成。其中，一组极板接地，另一组极板接高压。静电仪固定在接地极板上，与高压极板之间的距离为20 cm。在高压极板上施加0~12 kV的电压，从而在两极板之间产生0~60 kV/m的匀强电场。标定过程记录静电仪输出与高电压之间的线性关系。

$$E = (V_{\text{out}} - V_0) / k \quad (1)$$

其中， E 为被测电压值； V_{out} 为静电仪输出原始值； V_0 为静电仪电场零点标定值； k 为静电仪的实验室灵敏度系数。

标定时，共施加6个行程(3个正行程，3个反行程)，记录每个电场下的静电仪原始输出结果(单位为mV)，进行直线拟合。其中，每个测试电场下共记录6次测试结果。标定结果如图7所示，根据GB 18459计算，传感器的总不确定度为2.98%。由于传感器信号解调时包含与驱动信号相关的相位差信息，输出结果也有可能为负值，本次标定出的传感器灵敏度 k 为正。

静电仪的现场标定装置主要包括带电极板、带电极板支架、直线导轨、高压源表及计算机等几部分。其中，静电仪固定在直线导轨上方，与带电极板垂直放置，通过导轨的平移改变静电仪与带电极板之间的距离。在带电极板(标准待测物)上施加一个已知电压 V_C ，通过静电仪的输出结果及式(1)，得到校准前测试电压 V_{C0} ，则现场灵敏度系数 $C = V_{C0} / V_C$ ，静电仪的灵敏度由原来的 k 校准为 $k \times C$ 。即待测电压

$$E = (V_{\text{out}} - V_0) / (kC) \quad (2)$$

静电仪的现场校准系数与被测物尺寸、测试距

离两个关键因素相关。为了研究这一规律，本文加工了不同尺寸的金属圆板作为高压极板，用于模拟不同的被测物尺寸，并在不同测试距离下对静电仪进行标定，获取了直径为15~80 cm金属圆板现场灵敏度系数动态关系，部分结果如图8所示。可以看出，被测物尺寸越小、距离越远，电场衰减越严重，需要进行修正的现场灵敏度系数越高。通过该图也可以反映测距误差对于灵敏度选择的影响，例如，当测试距离为10 cm、被测物直径为50 cm时，0.3 cm的测距误差可造成约1.38%的灵敏度误差。

参考《JJF 1517-2015 非接触式静电电压测量仪校准规范》，本文将研制出的非接触式静电仪在北京东方计量测试研究所进行了检测(检测证书编号：DY19-1982)。分别选取2 cm, 5 cm, 10 cm 3个测试距离，施加不同的测试电压，记录静电仪输出与实际施加电压的偏差情况，结果如表1所示。测试结果表明，本文研制的非接触式静电仪可实现动态距离的表面电位测量，测量平均误差为-2.98%，最大误差为-10%。

5 结束语

本文提出并研制了一种距离可变的非接触式表面静电仪。与传统定距测量模式相比，具有使用场景更加广泛、可靠性更好等优点。在进行第三方检测时，误差最大可达-10%。误差主要来源于以下4个方面。(1)测量距离误差：本文采用超声波反射

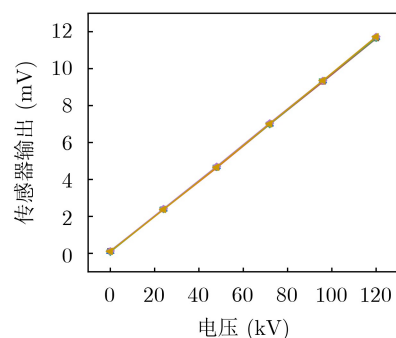


图7 固定距离下静电仪标定结果

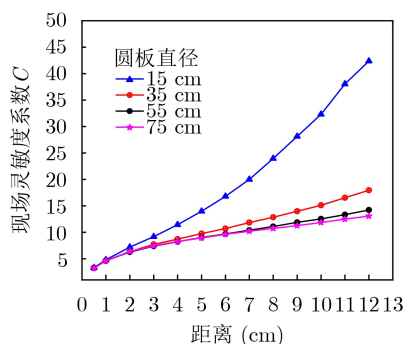


图8 不同尺寸、不同距离的灵敏度系数标定结果

表1 静电仪第三方校准结果

测试距离 标准值(kV)	2 cm		5 cm		10 cm	
	示值(kV)	相对误差(%)	示值(kV)	相对误差(%)	示值(kV)	相对误差(%)
0.50	0.51	+2.00	0.49	-2.00	0.50	0.00
1.00	1.03	+3.00	0.97	-3.00	0.99	-1.00
2.00	2.09	+4.50	1.95	-2.50	2.00	0.00
2.50	2.59	+3.60	2.43	-2.80	2.48	-0.80
3.00	3.10	+3.33	2.93	-2.33	2.99	-0.33
4.00	4.15	+3.75	3.94	-1.50	3.99	-0.25
5.00	5.36	+7.20	4.93	-1.40	4.98	-0.40
-0.50	-0.55	-10.00	-0.53	-6.00	-0.53	-6.00
-1.00	-1.09	-9.00	-1.07	-7.00	-1.06	-6.00
-2.00	-2.20	-10.00	-2.15	-7.50	-2.15	-7.50
-2.50	-2.58	-3.20	-2.67	-6.80	-2.61	-4.40
-3.00	-3.26	-8.67	-3.22	-7.33	-3.09	-3.00
-4.00	-4.29	-7.25	-4.28	-7.00	-4.09	-2.25
-5.00	-5.41	-8.20	-5.32	-6.40	-5.03	-0.60

原理获知被测物距离,在测试距离较小时,容易因超声波多次反射,造成距离误差,从而对表面电位造成误差。(2)角度误差:在静电仪标定及实际测试时,理想情况是静电仪与被测表面垂直,然而实际摆放的垂直度存在偏差,影响电场分布以及测距结果,从而造成最终结果偏差。(3)静电荷干扰:在静电仪测试时,由于感应电极上的静电未消除干净,造成零点存在偏差,正负电压的测试误差存在细微的差别。在实际使用时,如果被测物为非平面结构,例如球面、凸起的尖端等,则不适用于图8所示的标定结果,需要针对被测物形貌进行现场标定。(4)受到温度变化的影响,图2中传感器的等效弹性系数 k_e ,以及受气压变化造成空气阻尼 c_c , $c_{s,strip}$ 的变化,均可能造成敏感芯片谐振频率的改变,从而造成测量结果的温度漂移。通过在不同温度下记录传感器的灵敏度和零点,从而标定出传感器的温度漂移规律,在测量时通过嵌入式软件进行温度补偿,可以消除一部分温度的影响。在实际使用时,在该手持式静电仪上增加了校零功能,在使用前使静电仪测量零电位校准零点,也可以抑制部分温度的影响。

此外,第三方检测施加电压的范围为 $-5\sim 5$ kV,与传统静电仪相比量程偏小。其原因在于,为了提高静电仪在小电压的测量精度,本文增大了静电仪外部感应电极尺寸,从而提升响应信号大小。当被测电场过大时,可能造成局部饱和。在需要测量更大电压时,可通过增加测试距离的方法来解决。

静电测量是静电防护的重要组成部分。本文基于MEMS电场芯片技术,研制出距离可动态适应的非接触式静电仪,与传统静电仪相比,具有以下创新之处:(1)基于MEMS电场敏感元件,具有体积小、功耗低、易集成、可批量化制备等突出优点。(2)设计了敏感元件封装,与传统振动电容式、场磨式静电仪相比,无裸露可动部件,可靠性高。(3)提出动态标定算法,克服了距离变化对测量结果的影响。经第三方检测,本文研制的静电仪在2 cm, 5 cm, 10 cm 3个距离下,平均测试误差为 -2.98% 。

参考文献

- [1] 张成铭,徐晓英,舒晓榕,等. 静电放电对PCB轨线耦合的实验及仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 103-111. doi: 10.13382/j.jemi.B1902854.
ZHANG Chengming, XU Xiaoying, SHU Xiaorong, et al. Experimental and simulation study on the coupling with the PCB trace by electrostatic discharge[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(5): 103-111. doi: 10.13382/j.jemi.B1902854.
- [2] 李亮亮,赵青山,李义鹏,等. 电导率对成品油静电特性影响试验研究[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(7): 9-12. doi: 10.3969/j.issn.1001-425X.2018.07.003.
LI Liangliang, ZHAO Qingshan, LI Yipeng, et al. Experimental study on the effect of conductivity on the electrostatic characteristics of petroleum products[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2018, 44(7): 9-12. doi: 10.3969/j.issn.1001-425X.2018.07.003.
- [3] 魏宏安,吴小清,张昂. 基于能量误差的人体有限元模型网格剖分优化研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(11): 2615-2620.

- doi: [10.11999/JEIT190765](https://doi.org/10.11999/JEIT190765).
- WEI Hong'an, WU Xiaoqing, and ZHANG Ang. Research on mesh generation optimization of finite element model of human body based on energy error[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(11): 2615–2620. doi: [10.11999/JEIT190765](https://doi.org/10.11999/JEIT190765).
- [4] 季启政, 刘志宏, 张书锋. 航天器电子产品静电防护管理初探[J]. *航天工业管理*, 2011(3): 29–32. doi: [10.3969/j.issn.1004-7980.2011.03.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7980.2011.03.007).
- JI Qizheng, LIU Zhihong, and ZHANG Shufeng. The primary research on the ESD protection management system of spacecraft electronic devices[J]. *Aerospace Industry Management*, 2011(3): 29–32. doi: [10.3969/j.issn.1004-7980.2011.03.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7980.2011.03.007).
- [5] SIMICIC M, ASHIF N R, HELTINGS G, *et al*. Electrostatic discharge robustness of amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin-film transistors[J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 108: 113632. doi: [10.1016/j.microrel.2020.113632](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113632).
- [6] YONG Shaohui, HOSSEINBEIG A, YANG Suyu, *et al*. Noncontact human body voltage measurement using Microsoft Kinect and field mill for ESD applications[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, 61(3): 842–851. doi: [10.1109/TEMC.2018.2836869](https://doi.org/10.1109/TEMC.2018.2836869).
- [7] 刘辉, 李川, 卢红彬. 一种人体静电测量系统的设计方法与实现[C]. 2012年全国军事微波会议、2012年全国电磁兼容学术会议、2012年第九届电磁技术学术年会论文集, 桂林, 中国, 2012: 290–293.
- LIU Hui, LI Chuan, and LU Hongbin. New design method and implementation of measurement system to body electrostatic[C]. 2012 National Military Microwave Conference, 2012 National Electromagnetic Compatibility Academic Conference, 2012 Electromagnetic Technology Academic Annual Conference, Guilin, China, 2012: 290–293.
- [8] TANT P, BOLSENS B, SELS T, *et al*. Design and application of a field mill as a high-voltage DC meter[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(4): 1459–1464. doi: [10.1109/TIM.2007.900157](https://doi.org/10.1109/TIM.2007.900157).
- [9] AGARWAL A and BHATTACHARYA S. An approach to study the atmospheric electric field using EFM system[C]. *Futuristic Trends in Engineering, Science, Humanities, and Technology*, Madhya Pradesh, India, 2016: 153–156.
- [10] NORAS M A and PANDEY A. Surface charge density measurements[J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2010, 16(4): 41–47. doi: [10.1109/MIAS.2010.936971](https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.936971).
- [11] FATIHOU A, DASCALESCU L, ZOUZOU N, *et al*. Measurement of surface potential of non-uniformly charged insulating materials using a non-contact electrostatic voltmeter[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(4): 2377–2384. doi: [10.1109/TDEI.2016.7556516](https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.7556516).
- [12] 王德才. 电线电压与电流非接触检测技术研究[D]. [博士论文], 重庆大学, 2018.
- WANG Decai. Study on non-contact detecting technology for electric power line-voltage and current[D]. [Ph. D. dissertation], Chongqing University, 2018.
- [13] 凌必赞, 彭春荣, 任仁, 等. 低轴间耦合的MEMS三维电场传感器[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(8): 1934–1940. doi: [10.11999/JEIT171188](https://doi.org/10.11999/JEIT171188).
- LING Biyan, PENG Chunrong, REN Ren, *et al*. MEMS-based three-dimensional electric field sensor with low cross-axis coupling interference[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1934–1940. doi: [10.11999/JEIT171188](https://doi.org/10.11999/JEIT171188).
- [14] YAN Zimu, LIANG Jiaju, HAO Yongcun, *et al*. A micro resonant DC electric field sensor based on mode localization phenomenon[C]. 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Seoul, Korea (South), 2019: 849–852. doi: [10.1109/MEMSYS.2019.8870880](https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2019.8870880).
- [15] 叶天翔. 基于SOI的电场传感器[D]. [硕士论文], 清华大学, 2014.
- YE Tianxiang. The Electric field sensor based on SOI[D]. [Master dissertation], Tsinghua University, 2014.
- [16] YANG Pengfei, WEN Xiaolong, CHU Zhaozhi, *et al*. AC/DC fields demodulation methods of resonant electric field microsensor[J]. *Micromachines*, 2020, 11(5): 511. doi: [10.3390/mi11050511](https://doi.org/10.3390/mi11050511).
- [17] 闻小龙, 彭春荣, 杨鹏飞, 等. 基于MEMS技术的非接触式人体静电测量装置[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(8): 1835–1840. doi: [10.11999/JEIT161190](https://doi.org/10.11999/JEIT161190).
- WEN Xiaolong, PENG Chunrong, YANG Pengfei, *et al*. Non-contact human body electrostatic voltmeter based on MEMS technology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1835–1840. doi: [10.11999/JEIT161190](https://doi.org/10.11999/JEIT161190).
- 闻小龙: 男, 1988年生, 讲师, 研究方向为微型传感器及系统、电场传感器、磁场传感器。
- 杨鹏飞: 男, 1986年生, 讲师, 研究方向为微传感器与微系统、新型电学量传感器、低频电场探测。
- 储昭志: 男, 1990年生, 助理研究员, 研究方向为新型电场传感器及制备技术。
- 彭春荣: 男, 1979年生, 研究员, 研究方向为微传感器与微系统、新型电学量传感器及应用。

责任编辑: 马秀强