

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311488

一种 MEMS 三维电场传感器抗电荷干扰方法研究*

张巍^{1,2}, 张洲威^{1,2}, 彭春荣¹, 夏善红¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院传感技术联合国家重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学
电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要: 三维电场传感器具有广泛的应用需求。在传感器应用环境中存在空间电荷的条件下,带电粒子有可能在电场传感器表面产生电荷积累,对电场检测造成干扰,这是影响测量准确性的一个关键因素。尤其对于 MEMS 三维电场传感器,尚缺乏相关的机理研究和解决方案。针对这个问题,作者探究了表面电荷积累对传感器感应待测电场的干扰,分析了电荷积累产生的干扰与传感器结构尺度的关系,并通过有限元仿真和实验验证了理论分析的正确性。在此基础上,提出一种通过对传感单元感应信号的差分计算消除传感器表面电荷积累对电场测量影响的方法。本文研制出抗电荷干扰的三维电场传感器样机。实验表明,在 0~30 kV/m 待测电场范围内,传感器测量误差在 4.2% 以内。

关键词: MEMS; 电场传感器; 三维; 电荷积累

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Research on the anti-charge-interference method for MEMS three-dimensional electric field sensor

Zhang Wei^{1,2}, Zhang Zhouwei^{1,2}, Peng Chunrong¹, Xia Shanhong¹

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There are wide application requirements for three-dimensional electric field sensors. In the presence of space charges in the surrounding environment, charges may accumulate at the surface of the electric field sensor, which is a key factor affecting the accuracy of electric field measurement. Especially for the MEMS three-dimensional electric field sensor, there is still a lack of relevant mechanism research and solutions. To solve this problem, an anti-charge-interference technology for the three-dimensional electric field sensor is studied. The effect of charge accumulated at the sensor surface on electric field measurement is studied, and the relationship between the interference of accumulated charge and size of the sensor structure is analyzed. The correctness of the theoretical analysis is evaluated by finite element simulation and experiment. On this basis, an anti-charge-interference method for the three-dimensional electric field sensor is proposed. By differential calculation of the signals from the sensing elements, the influence of surface charge accumulation on electric field measurement can be eliminated. An anti-charge-interference three-dimensional electric field sensor is developed. Experiments show that the measurement error is less than 4.2% under the electric field of 0~30 kV/m in the presence of charge accumulation interference.

Keywords: MEMS; electric field sensor; three dimensions; charge accumulation

0 引言

三维电场测量在气象、电力、工业生产、科学研究等领

域具有重要作用。在气象领域,对雷暴云的电场探测数据可用于雷暴云电荷分布研究及雷电预警^[1-3]。雷暴云电场受云中电荷分布的影响,呈现三维动态非均匀分布^[4],因此需要采用三维电场传感器进行探测。在电力领域,通过

对电力设备附近电场监测,可以进行绝缘子缺陷检测、输电线表面结冰厚度检测、电力设备工作状态检测等^[5-7]。高压线周围电场分布与高压线的排布情况相关,往往也需要采用三维电场传感器进行电场测量。在工业生产领域,借助三维电场传感器监测生产环境,可以对环境中的静电、电磁脉冲进行预警和定位^[8-9],避免静电造成生产事故发生。在科研领域,采用三维电场传感器对电离层的电场进行探测,可以获得电场分布信息,对于地球物理科学研究工作具有重要的意义^[10]。在一些领域的三维电场测量过程中,测量区域可能存在带电粒子,例如电离层和雷暴云中存在大量带电粒子^[11-12],高压直流输电线会激发出离子流^[13],某些工业生产环境中存在静电^[14]。

微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)电场传感器由于其体积小、功耗低、成本低等突出优点,成为电场传感器的一个重要发展方向^[15-17],目前已应用于多个领域。然而,当存在空间电荷的情况下, MEMS 传感器封帽表面可能积累电荷,对电场测量产生干扰。针对电荷积累的问题,中科院电子所提出了一种组合差分的方法^[18],但没有进行实验验证。清华大学研制了一种用于高压直流输电线下电场测量的 MEMS 传感器^[19],但该传感器只适用于高压直流输电线下一维电场测量。已报道的 MEMS 三维电场传感器主要有组件型^[20-22]和单芯片型^[23],但目前还未见关于 MEMS 三维电场传感器抗电荷干扰的研究报道。

本文提出了一种 MEMS 电场传感器封装理论模型,探究了传感器表面电荷积累对电场测量的影响。在原理分析和仿真验证的基础上,提出了一种抗电荷干扰的三维电场测量方法;采用 4 个 MEMS 电场敏感芯片研制出抗电荷干扰三维电场传感器样机,并在电荷干扰条件下进行了三维电场传感器的检测实验验证。

1 电荷干扰对 MEMS 电场传感器的影响

1.1 干扰分析

1) 电荷干扰对敏感芯片表面电场的影响

MEMS 电场敏感芯片的电极特征尺寸一般在微米量级,易受环境温湿度、气压、粉尘颗粒等环境因素影响,因此实用化产品需要对敏感芯片进行封装。MEMS 电场传感器封装结构的示意图如图 1 所示,由金属基底、绝缘侧壁和金属封帽组成,敏感芯片置于基底上,与封帽保持一定间距。

当测量区域存在空间电荷时,电荷有可能积累在封帽表面,从而产生附加的干扰电场被敏感芯片感受到。随着电荷积累的增加,干扰电场随之增大,引起的测量误差也会增大。如图 2 所示,图 2(a)表示在待测外电场 E 作用下,封帽上的电荷分布,等量负、正电荷分布在封帽

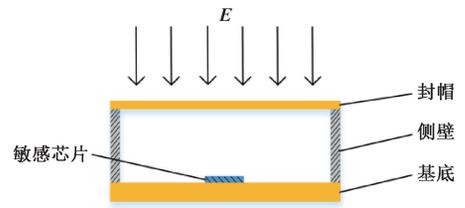
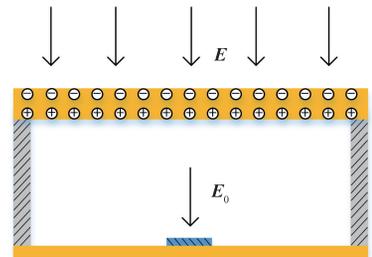


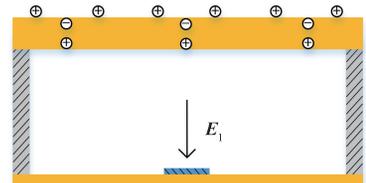
图 1 MEMS 电场传感器封装结构示意图

Fig. 1 Diagram of MEMS electric field sensor packaging

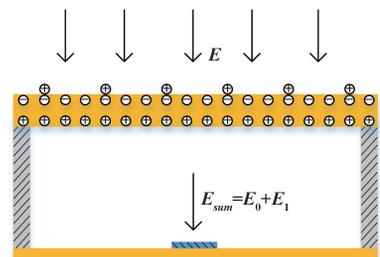
上下表面;图 2(b)表示封帽上积累电荷的分布,当带正电荷的粒子积累在封帽上表面时,吸引封帽中的电子向上移动,电子移动后留下的空穴使封帽下表面带正电,金属内部场强为零;图 2(c)表示图 2(a)和(b)封帽上电荷的叠加。当传感器表面存在电荷积累时,电场敏感芯片处的电场 E_{sum} 受到待测外电场 E 和传感器表面电荷积累产生的干扰电场共同影响。设待测外电场 E 在电场敏感芯片处产生的电场为 E_0 ,电荷积累在电场敏感芯片处产生的电场为 E_1 ,根据电场叠加原理,即 $E_{sum} = E_0 + E_1$ 。



(a) 待测外电场 E 作用下封帽表面电荷分布
(a) Charge distribution at the cap surface under external electric field E



(b) 积累电荷作用下封帽表面电荷分布
(b) Charge distribution at the cap surface under the influence of accumulated charge



(c) 待测外电场与积累电荷共同作用下封帽表面电荷分布
(c) Charge distribution at the cap surface under the influence of external electric field and accumulated charge

图 2 封帽上电荷分布示意图

Fig. 2 Diagram of charge distribution at the cap

2) 外电场在芯片处产生的电场 E_0

在图 2(a) 中,在待测外电场 E 的作用下,封帽上下表面分别感应生成相等的负电荷和正电荷。在封帽下表面与侧壁接触处,正电荷被侧壁上表面的负极化电荷部分中和,为了方便计算,不考虑封帽和侧壁接触处正电荷产生的电场。如图 3 所示,设封帽为半径为 a ,厚度为 h 的圆盘,封帽下表面与芯片上表面间距为 d ,绝缘侧壁宽度为 w ,封帽表面感应出的正负电荷密度为 σ_0 。此时芯片处的电场 E_0 有 3 部分组成:

$$E_0 = E + E_+ + E_- \quad (1)$$

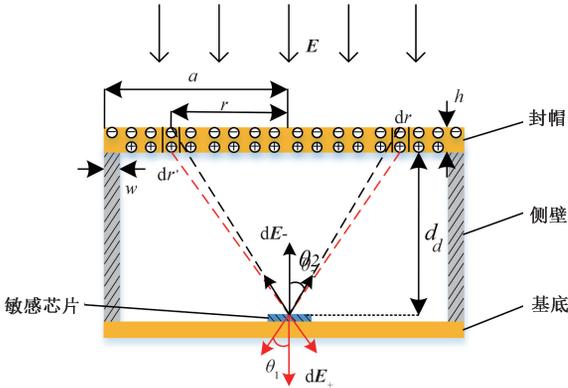


图 3 待测电场产生场强 E_0 的计算方法

Fig. 3 Calculation method of field intensity E_0 generated by external electric field

其中, E 为待测电场, E_+ 和 E_- 分别为封帽表面正负电荷产生的电场。由于芯片的敏感面积相对于封帽很小,可以把芯片中心处的电场强度等效为芯片感受到的电场强度。在封帽上取半径为 r ,宽度为 dr 的环带,这个环带上的正负电荷量均为 $dq_0 = \sigma_0 2\pi r dr$ 。因为这个环带是关于封帽的中心对称的,整个环带上各个点的电荷在芯片中心产生场强平行于封帽方向的分量相互抵消。从而整个环带的正负电荷在芯片中心产生的元场强 dE_+ 和 dE_- 方向垂直于封帽,大小可以用式(2)和(3)表示。

$$dE_+ = \frac{dq_0 \cos\theta_1}{4\pi\epsilon_0 \times \text{环带到芯片中心距离的平方}} = \frac{\sigma_0 2\pi r dr}{4\pi\epsilon_0 (d^2 + r^2)} \times \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} = \frac{d\sigma_0 r dr}{2\epsilon_0 (d^2 + r^2)^{3/2}} \quad (2)$$

$$dE_- = \frac{-\sigma_0 r dr \times (d + h)}{2\epsilon_0 ((d + h)^2 + r^2)^{3/2}} \quad (3)$$

其中, $\epsilon_0 (\approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m})$ 为真空介电常数。对 dE_+ 和 dE_- 进行积分,可以得到整个封帽的正负电荷

在芯片中心的场强大小 E_+ 和 E_- 为:

$$E_+ = \int dE_+ = \frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} \int_0^a \frac{dr dr}{(d^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{d}{\sqrt{(a-w)^2 + d^2}} \right) \quad (4)$$

$$E_- = \int dE_- = \frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} \int_0^a \frac{r dr \times (d + h)}{((d + h)^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\sigma_0}{2\epsilon_0} \left(\frac{d + h}{\sqrt{a^2 + (d + h)^2}} - 1 \right) \quad (5)$$

因为封帽和绝缘侧壁很薄,当满足 $d \gg h, a \gg w$ 时, h 和 w 可以忽略不计。此时 $E_+ \approx -E_-$,则 $E_0 \approx E$,即芯片处的电场约等于待测电场。因此待测电场在芯片处产生的场强大小 E_0 和封帽与芯片间距 d 及封帽半径 a 关系很小。

3) 封帽上积累电荷在敏感芯片处产生的电场 E_1

在图 2(b) 中,为了方便计算,把封帽看作均匀带正电的薄金属圆盘。如图 4 所示,设封帽的半径为 a ,封帽上下表面电荷密度均为 σ_1 ,封帽与芯片间距为 d 。在封帽上取半径为 r ,宽度为 dr 的环带。因为环带包含上下两面,环带上的电荷量为 $dq_1 = 2\sigma_1 2\pi r dr$ 。整个环带的电荷在芯片中心产生的元场强 dE_1 方向垂直于封帽,大小可以用式(6)表示。

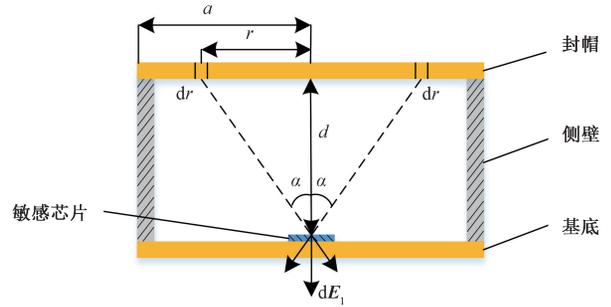


图 4 电荷积累产生场强 E_1 的计算方法

Fig. 4 Calculation method of the field intensity E_1 generated by accumulated charges at the cap

$$dE_1 = \frac{d\sigma_1 r dr}{\epsilon_0 (d^2 + r^2)^{3/2}} \quad (6)$$

对 dE_1 进行积分,可以得到整个封帽的电荷在芯片中心的场强大小 E_1 为:

$$E_1 = \int dE_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_0} \int_0^a \frac{dr dr}{(d^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\sigma_1}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}} \right) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,封帽上的电荷在芯片中心产生的电场强度与电荷密度 σ_1 有关。根据高斯定理,在外电场的作用下,封帽表面的电荷密度为:

$$\sigma_e = \epsilon_0 E \quad (8)$$

当外电场为 10 kV/m 时,根据式(8),封帽上表面感应出的负电荷密度为 $8.85 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ 。根据式(7),取 $d = 1 \text{ mm}$, $a = 13 \text{ mm}$, 通过计算,当封帽上下表面积累的电荷密度 $\sigma_1 = 8.85 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ 时,芯片中心的电场强度为 9 233 V/m,约占外电场的 92%,因此封帽上积累过多的电荷会严重影响电场检测的准确性。

根据式(7),封帽上积累电荷在芯片处产生的电场强度大小 E_1 与封帽与芯片间距 d 及封帽半径 a 有关。假设封帽表面电荷密度 $\sigma_1 = 10^{-8} \text{ C/m}^2$,改变 d 和 a ,根据式(7)得到 E_1 的计算值,如图 5 所示, d 越小、 a 越大, E_1 越大。

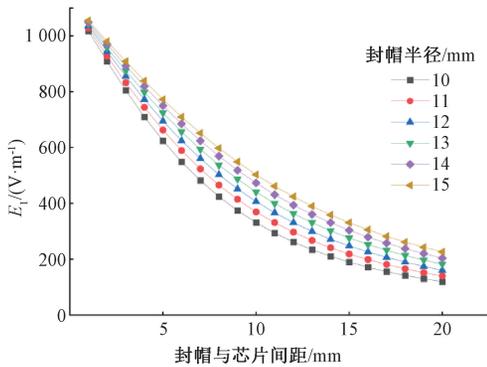


图 5 E_1 和封帽与芯片间距及封帽半径的关系

Fig. 5 The relationship among E_1 , the distance between cap and chip and the radius of the cap

1.2 有限元仿真验证

为了验证 1.1 节 3) 中介绍的封帽上的电荷在芯片处产生的电场强度大小 E_1 的计算方法,根据图 1 所示的传感器封装结构建立三维模型并进行有限元仿真。假设封帽与芯片间距 $d = 1 \text{ mm}$,封帽半径 $a = 13 \text{ mm}$,封帽表面电荷密度为 $10^{-8} \sim 1.5 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$,仿真得到芯片中心处电场强度的值,并与通过式(7)计算得到的 E_1 进行对比。从图 6 可以看出,仿真结果和计算结果接近,验证了 1.1 节 3) 中介绍的 E_1 的计算方法。

为了进一步验证 1.1 节 2) 和 3) 中分析的 E_0 、 E_1 和封帽与芯片间距及封帽半径的关系,进行以下仿真。在空气域中施加 10 kV/m 的电场强度,改变封帽与芯片间距及封帽半径,得到 E_0 的仿真值,如图 7(a) 所示。假设封帽表面电荷密度为 10^{-8} C/m^2 ,改变封帽与芯片间距及封帽半径,得到 E_1 的仿真值,如图 7(b) 所示。通过对比图 7(a) 和(b),可以得出结论: E_0 随封帽与芯片间距及封帽半径变化很小,当封帽与芯片间距大于 5 mm 时,最大变化量仅占施加电场的 0.9%; E_1 随着封帽与芯片间距及封帽半径变化较大,且间距越小、封帽半径越大, E_1 越大。验证了 1.1 节 2) 和 3) 中的分析。

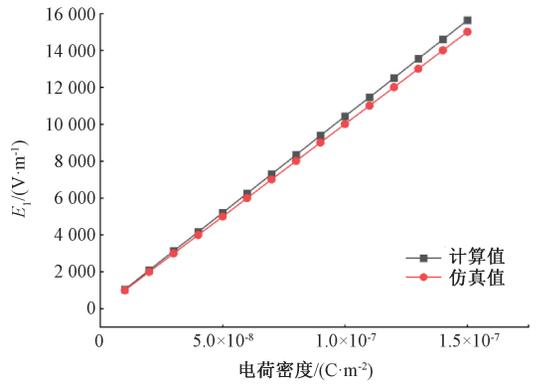
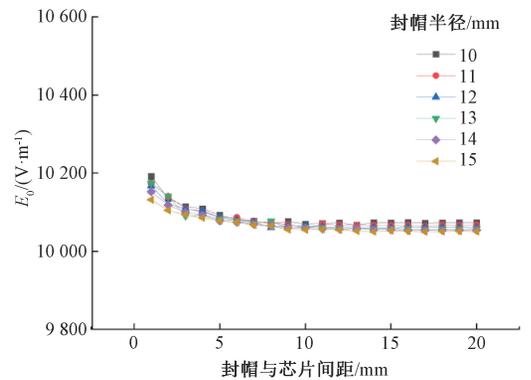


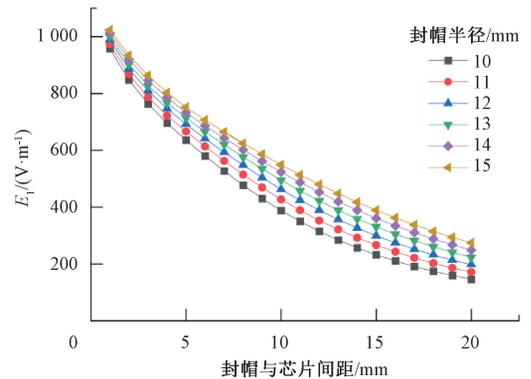
图 6 封帽上电荷密度与 E_1 计算值和仿真值的关系

Fig. 6 The relationship of the charge density with the calculated and simulated values of E_1



(a) 不同封帽半径下, E_0 和封帽与芯片间距的关系

(a) E_0 versus the distance between cap and chip with different cap radius



(b) 不同封帽半径下, E_1 和封帽与芯片间距的关系

(b) E_1 versus distance the between cap and chip with different cap radius

图 7 E_0 、 E_1 和封帽与芯片间距及封帽半径的关系

Fig. 7 The relationship among E_0 、 E_1 , the distance between cap and chip and the cap radius

1.3 实验验证

为了实验验证 1.1 中的理论分析,本文搭建了电场传感器抗电荷干扰测试系统,如图 8 所示。该系统主要

由金属底板、平行排列的电晕丝、离子流控制网板、上下极板和接地极板组成。该系统可以同时产生匀强电场和离子流场。离子流场使得带电离子积累在封帽上,产生电荷积累。

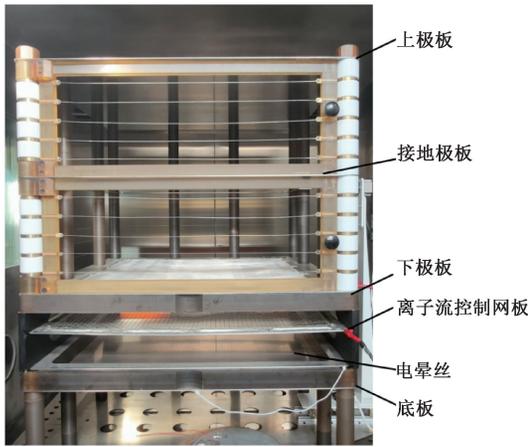


图 8 电场传感器抗电荷干扰测试系统

Fig. 8 Anti-charge-interference test system for the electric field sensor

图 9 为传感单元照片,传感单元由金属外壳、聚四氟乙烯外壳、金属封帽、电场敏感芯片和后端处理电路组成。金属外壳外侧和聚四氟乙烯外壳内侧有相互配合的螺纹,通过旋转卡在金属外壳外的聚四氟乙烯外壳来调节封帽和芯片之间的距离。

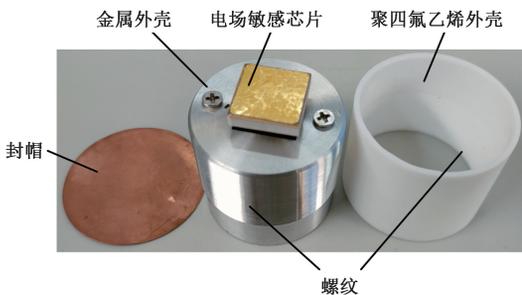


图 9 传感单元照片

Fig. 9 Photo of the sensing element

将传感单元放置到电场传感器抗电荷干扰测试系统的接地极板中间。在下极板上施加 3 kV 电压,使得接地极板和下极板间产生匀强电场。通过旋转聚四氟乙烯外壳,控制封帽与芯片间距,待芯片输出稳定后,记录其输出电压。在测试系统中,施加在各部分上的电压分别为:电晕丝 16 kV,离子流控制网 5 kV,下极板 3 kV。使得接地极板和下极板间产生匀强电场和离子流场,改变封帽与芯片间距,记录芯片输出电压。

实验结果如图 10 所示,当只有匀强电场时,随着封帽与芯片间距的变化,输出电压值变化幅度很小;当电场

和离子流场同时存在时,随着封帽与芯片间距的增大,输出电压明显减小。符合 1.1 节 2) 和 3) 中的理论分析。

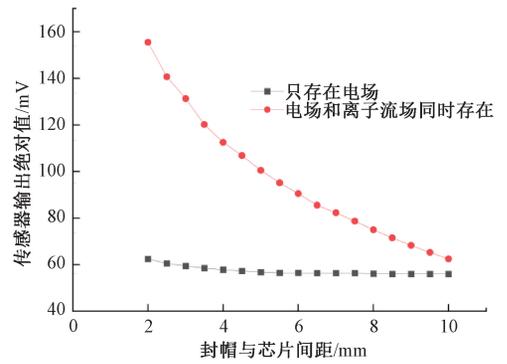


图 10 电场传感器输出值和封帽与芯片间距的关系

Fig. 10 The relationship between the output value of the electric field sensor and the distance between cap and chip

2 三维电场检测抗电荷干扰方法

2.1 传感器结构

如图 11 所示,抗电荷干扰三维电场传感器是由基板及分布在基板上的 4 个不共线的电场传感单元组成。传感单元是封装后的一维 MEMS 电场敏感芯片。把基板看作 1 个薄金属盘,以基板底面中心为原点建立坐标系。Z 轴垂直于基板,X 轴平行于传感单元 A 和传感单元 B 的中心连线,Y 轴平行于传感单元 A 和传感单元 D 的中心连线。

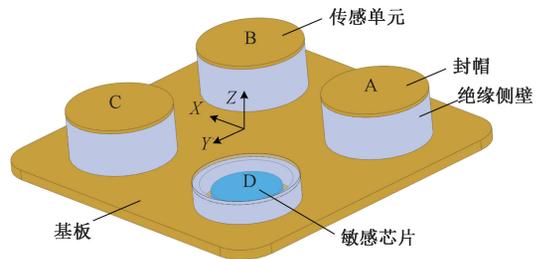


图 11 抗电荷干扰三维电场传感器示意图

Fig. 11 Diagram of the anti-charge-interference three-dimensional electric field sensor

2.2 抗干扰方法

基于上述结构的三维电场传感器,本文提出了一种抗电荷干扰方法,具体方法如下。由于传感器体积相对于整个被测区域极小,可以假设 4 个传感单元附近的带电粒子密度相同,传感单元封帽表面积累了大小相等的电荷。待测外电场和电荷积累在芯片处产生的电场强度

大小分别为 E_0 和 E_1 。那么 4 个传感单元的灵敏度公式为:

$$\begin{cases} V_A = k_A(E_{0A} + E_{1A}) + V_{0A} \\ V_B = k_B(E_{0B} + E_{1B}) + V_{0B} \\ V_C = k_C(E_{0C} + E_{1C}) + V_{0C} \\ V_D = k_D(E_{0D} + E_{1D}) + V_{0D} \end{cases} \quad (9)$$

其中, V_A, V_B, V_C, V_D 分别为 4 个传感单元的输出, $V_{0A}, V_{0B}, V_{0C}, V_{0D}$ 分别为 4 个传感单元的零点输出, k_A, k_B, k_C, k_D 分别为 4 个传感单元的灵敏度。 $E_{0A}, E_{0B}, E_{0C}, E_{0D}$ 为外电场在芯片处产生的场强大小, $E_{1A}, E_{1B}, E_{1C}, E_{1D}$ 为电荷积累产生的场强大小, 该数值与传感单元的封帽与芯片间距有关。从图 12 中可以看出, 传感单元 D 与其他 3 个传感单元高度不同, 设 E_{1D} 与 E_{1A}, E_{1B}, E_{1C} 的比值分别为 $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ 。根据式(7)可得:

$$\lambda_i = \frac{E_{1D}}{E_{1i}} = \frac{1 - \frac{d_D}{\sqrt{a^2 + d_D^2}}}{1 - \frac{d_i}{\sqrt{a^2 + d_i^2}}} \quad (i = A, B, C) \quad (10)$$

因为 4 个传感单元封帽半径 a 相同, 间距 d_i 不变, 所以 $\lambda_i (i = A, B, C)$ 不变。 V_A, V_B, V_C 分别与 V_D 进行差分并简化可得:

$$\begin{cases} \frac{k_D \lambda_A}{k_A} V_A - V_D = k_D(\lambda_A E_{0A} - E_{0D}) + V_{0A-D} \\ \frac{k_D \lambda_B}{k_B} V_B - V_D = k_D(\lambda_B E_{0B} - E_{0D}) + V_{0B-D} \\ \frac{k_D \lambda_C}{k_C} V_C - V_D = k_D(\lambda_C E_{0C} - E_{0D}) + V_{0C-D} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $V_{0A-D}, V_{0B-D}, V_{0C-D}$ 分别为传感单元 A、B、C 零点与传感单元 D 零点的差分。从式(11)可以看出, 通过信号的差分, 消除了电荷积累产生电场 $E_{1i} (i = A, B, C, D)$ 的干扰。 $E_{0A}, E_{0B}, E_{0C}, E_{0D}$ 可以在笛卡尔坐标系中表示为:

$$\begin{cases} E_{0A} = k_{xA} E_x + k_{yA} E_y + k_{zA} E_z \\ E_{0B} = k_{xB} E_x + k_{yB} E_y + k_{zB} E_z \\ E_{0C} = k_{xC} E_x + k_{yC} E_y + k_{zC} E_z \\ E_{0D} = k_{xD} E_x + k_{yD} E_y + k_{zD} E_z \end{cases} \quad (12)$$

其中, k_{xi}, k_{yi}, k_{zi} 分别为传感单元 $i (i = A, B, C, D)$ 对 X, Y, Z 3 个正交方向电场的耦合灵敏度系数, 该系数可由实验标定得出。电场强度差分值可表示为:

$$\begin{pmatrix} \lambda_A E_{0A} - E_{0D} \\ \lambda_B E_{0B} - E_{0D} \\ \lambda_C E_{0C} - E_{0D} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_A k_{xA} - k_{xD} & \lambda_A k_{yA} - k_{yD} & \lambda_A k_{zA} - k_{zD} \\ \lambda_B k_{xB} - k_{xD} & \lambda_B k_{yB} - k_{yD} & \lambda_B k_{zB} - k_{zD} \\ \lambda_C k_{xC} - k_{xD} & \lambda_C k_{yC} - k_{yD} & \lambda_C k_{zC} - k_{zD} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} k_{Ax} & k_{Ay} & k_{Az} \\ k_{Bx} & k_{By} & k_{Bz} \\ k_{Cx} & k_{Cy} & k_{Cz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = S_0 \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (13)$$

其中, k_{ix}, k_{iy}, k_{iz} 分别为传感单元 $i (i = A, B, C)$ 对 X, Y, Z 方向电场的耦合灵敏度系数与传感单元 D 耦合灵敏度系数的差分, S_0 为耦合灵敏度矩阵可由实验标定得出。根据式(11)和(13)得:

$$\begin{pmatrix} \frac{k_D \lambda_A}{k_A} V_A - V_D \\ \frac{k_D \lambda_B}{k_B} V_B - V_D \\ \frac{k_D \lambda_C}{k_C} V_C - V_D \end{pmatrix} = k_D \begin{pmatrix} k_{Ax} & k_{Ay} & k_{Az} \\ k_{Bx} & k_{By} & k_{Bz} \\ k_{Cx} & k_{Cy} & k_{Cz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{0A-D} \\ V_{0B-D} \\ V_{0C-D} \end{pmatrix} = A_0 \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{0A-D} \\ V_{0B-D} \\ V_{0C-D} \end{pmatrix} \quad (14)$$

A_0 为传感器对空间电场的总耦合灵敏度矩阵, 可由标定得出。因此, 空间任意电场的测量算法为:

$$E_0 = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = A_0^{-1} \begin{pmatrix} \frac{k_D \lambda_A}{k_A} V_A - V_D - V_{0A-D} \\ \frac{k_D \lambda_B}{k_B} V_B - V_D - V_{0B-D} \\ \frac{k_D \lambda_C}{k_C} V_C - V_D - V_{0C-D} \end{pmatrix} \quad (15)$$

2.3 仿真验证

根据图 11 所示的抗电荷干扰三维电场传感器结构构建三维模型并进行有限元仿真验证。如图 11 所示, A、B、C、D 为 4 个传感单元, 均匀分布在接地基板表面。其中基板的边长为 10 cm, 传感单元封帽半径为 15 mm。

设传感单元 D 的封帽与芯片间距 $d_D = 6$ mm, 其他 3 个传感单元的封帽与芯片间距 d_A, d_B, d_C 均为 15 mm, 封帽上电荷量为 7×10^{-11} C, 记录 4 个芯片中心区域的电场强度值 $E_{1A}, E_{1B}, E_{1C}, E_{1D}$, 得到 E_{1D} 与 E_{1A}, E_{1B}, E_{1C} 比值分别为 $\lambda_A = 1.78, \lambda_B = 1.78, \lambda_C = 1.75$ 。

分别在 Z, X, Y 方向上施加 10 kV/m 的电场, 记录 4 个芯片中心区域的电场强度值 $E_{0A}, E_{0B}, E_{0C}, E_{0D}$ 。 $E_{0A}, E_{0B}, E_{0C}, E_{0D}$ 与施加电场的比值即传感单元 i 对 Z, X, Y 方向的耦合灵敏度系数 $k_{zi}, k_{xi}, k_{yi} (i = A, B, C, D)$ 。带入式(10)得到耦合灵敏度矩阵 S_0 为:

$$S_0 = \begin{pmatrix} -0.553 & 2.473 & -0.763 \\ 2.49 & 2.49 & -0.781 \\ 2.465 & -0.545 & -0.75 \end{pmatrix} \quad (16)$$

为了研究在不同方向电场下, 该方法的可行性, 进行以下仿真。设封帽表面电荷量为 7×10^{-11} C, 在空气中

施加 10 kV/m 的电场,空气域沿 Y 方向进行旋转,记录每个芯片中心的电场强度值,带入式(17)得出场强仿真值。不同方向电场下场强仿真值如图 12 所示。从图 12 可以看出,在不同方向电场下,该方法都可以较为准确的仿真计算出电场强度。最大偏差在旋转 -20° 处为 347 V/m,占施加电场的 3.47%。

$$E_0 = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = S_0^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_A E_A - E_D \\ \lambda_B E_B - E_D \\ \lambda_C E_C - E_D \end{pmatrix} \quad (17)$$

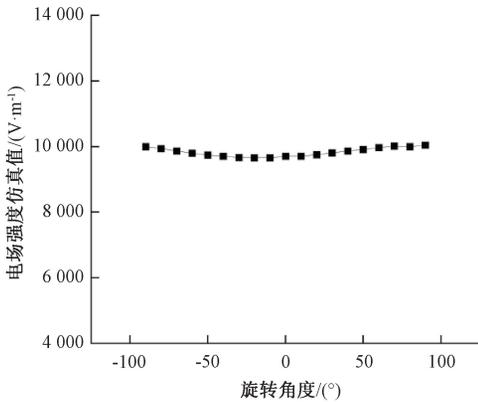


图 12 不同方向电场下电场强度仿真值

Fig. 12 The simulation values of electric fields in different directions

3 实验验证

3.1 实验样机

为了进一步验证 MEMS 三维电场传感器抗电荷干扰方法的可行性,本文设计并制备了抗电荷干扰 MEMS 三维电场传感器样机,如图 13 所示。4 个传感单元被安装在样机顶面,封帽和芯片间距可以通过旋转进行调节,传



图 13 抗电荷干扰三维电场传感器照片

Fig. 13 Photo of the anti-charge-interference three-dimensional electric field sensor

感单元内部是 MEMS 电场敏感芯片。其他部分包括基板、金属外壳和处理电路。三维电场传感器抗电荷干扰标定和测试系统如图 8 所示。

3.2 总耦合灵敏度矩阵标定

总耦合灵敏度矩阵 A_0 反映了三维电场传感器对空间任意电场的响应能力,对于一个确定的传感器,其总耦合灵敏度矩阵唯一,与传感器在空间中的位置及传感器的旋转角度无关。

首先通过标定,得到 4 个电场敏感芯片的灵敏度。旋转传感器使极板分别平行于 X 、 Y 、 Z 方向,在每个方向上施加 0~60 kV/m 的电场,记录 4 个传感单元的输出值,并通过线性拟合得到每个传感单元对于 X 、 Y 、 Z 3 个方向电场的耦合灵敏度系数。测试系统中,施加在各部分上的电压分别为:电晕丝 17.2 kV,离子流控制网 4 kV,下极板 3 kV,上极板 -3 kV。使测试区域内同时存在离子流场和匀强电场。离子流场使电荷积累在传感单元封帽上,以此模拟电荷干扰的情况。记录 4 个传感单元的输出值,根据式(10)可确定 λ 。根据以上标定结果,得到总耦合灵敏度矩阵为:

$$A_0 = \begin{pmatrix} 0.178 & 0.223 & -0.08 \\ 0.183 & -0.038 & -0.08 \\ -0.042 & 0.206 & -0.08 \end{pmatrix} \quad (18)$$

3.3 三维传感器检测实验

受到图 8 所示测量系统的限制,选取 0~30 kV/m 的电场进行检测实验。旋转传感器至 5 组不同的角度 ($\theta_1 \sim \theta_5$),施加 0~30 kV/m 的电场,记录各个传感单元的输出值,通过式(15)计算出电场测量值,并与施加的源电场进行对比,结果如图 14(a) 所示。对比图中的施加电场与电场测量值可以看出,在没有电荷干扰的情况下,测量值与施加电场保持良好的一致性,最大误差为 4.1%。在测试区域内施加离子流场,使电荷积累在传感单元封帽上,对敏感芯片产生干扰。旋转传感器至几组不同的角度,施加 0~30 kV/m 的电场,记录各个传感单元的输出值,通过式(15)计算出电场测量值结果如图 14(b) 所示。对比图中的施加电场与电场测量值可以看出,与没有电荷干扰的情况相比,当存在电荷干扰的情况下,测量值与施加电场亦可以保持良好的一致性,最大误差为 4.2%。

当存在电荷干扰的条件下,若不使用抗电荷干扰方法,利用传感单元的输出值直接计算电场测量值,结果如图 15 所示。对比施加电场与电场测量值得到最大误差为 162%,远大于使用抗干扰方法测量电场的误差。通过以上的实验,证明了本文提出的 MEMS 三维电场传感器抗电荷干扰方法的可行性。

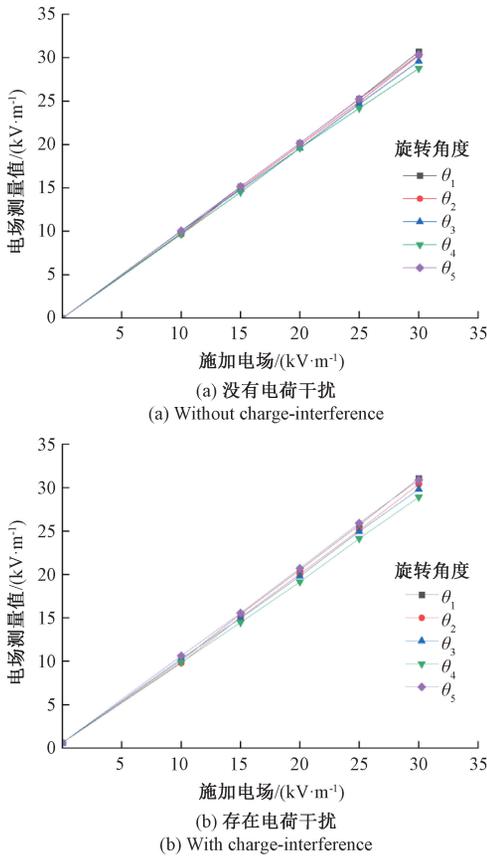


图 14 传感器在空间作不同角度旋转的电场测量值
Fig. 14 Electric field values measured at different angles

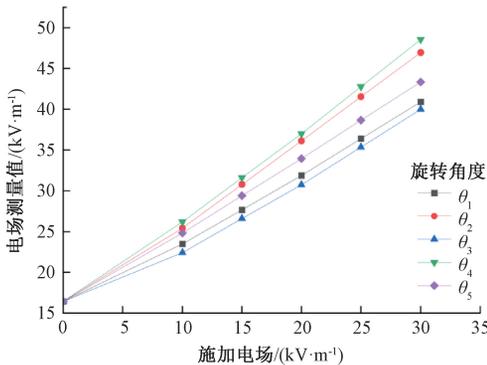


图 15 不使用抗干扰方法的电场测量值
Fig. 15 The electric field values measured without the anti-interference method

4 结 论

本文探究了封帽表面电荷积累对 MEMS 电场传感器产生的干扰,分析了该干扰与传感器结构尺度的关系。在此基础上,本文提出了一种 MEMS 三维电场传感器抗

电荷干扰方法,即利用 4 个高度不同的不共线平面分布电场传感单元的感应信号的差分解算消除电荷积累的干扰。基于 MEMS 电场传感单元研制出抗电荷干扰的三维电场传感器样机。利用三维标定系统标定出传感器的总耦合灵敏度矩阵,通过三维电场传感器实验,检测并计算出电场测量值。电场测量值与施加电场的对比表明,本文提出的方法能有效减小电荷积累对三维电场测量的干扰,在 0~30 kV/m 待测电场范围内,最大误差为 4.2%。

参考文献

- [1] 徐伟,夏志祥,行鸿彦. 基于集成经验模态分解和极端梯度提升的雷电预警方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 235-243.
XU W, XIA ZH X, XING H Y. Lightning warning method based on EEMD and XGBoost [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 235-243.
- [2] 宋琳,丁锋,张金波,等. 有限元法在真实环境下大气电场仪误差修订中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 152-161.
SONG L, DING F, ZHANG J B, et al. Application of finite element method in the revision of atmospheric electrostatic field instrument error in real environment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 152-162.
- [3] 李胤演,行鸿彦. 地表相对介电常数对雷暴云定位影响分析与研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 187-195.
LI Y Y, XING H Y. Analysis and research on the influence of the relative permittivity of the earth surface on thunderstorm cloud positioning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 187-195.
- [4] BARANSKI P, LOBODA M, WISZNIOWSKI J, et al. Evaluation of multiple ground flash charge structure from electric field measurements using the local lightning detection network in the region of Warsaw [J]. Atmospheric Research, 2012, 117(1): 99-110.
- [5] 张元英,张家洪,李英娜,等. 保偏光纤耦合型铌酸锂晶体工频强电场传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 272-278.
ZHANG Y Y, ZHANG J H, LI Y N, et al. Polarization-maintaining fiber coupling type LiNbO3 intensive power frequency electric field sensor [J]. Chinese Journal of

- Scientific Instrument, 2021, 42 (5): 272-278.
- [6] 蒋兴良,刘毓,张志劲,等. 覆冰地区交流输电线路复合绝缘子伞裙结构的电场分布优化[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 210-217.
JIANG X L, LIU Y, ZHANG ZH J, et al. Sheds configuration optimization of AC composite insulators used in AC transmission lines at icing areas based on electric field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 210-217.
- [7] 宋福根,林韩,兰生. 利用无人机对特高压线路上方电场强度实测[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2836-2843.
SONG F G, LIN H, LAN SH. Test research of the electric field intensity in the upper space of UHV AC transmission line using UAV[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2836-2843.
- [8] 司荣仁,石立华,陈锐,等. 球形光纤传输三维电场传感器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2930-2934.
SI R R, SHI L H, CHEN R, et al. Three-dimensional electric-field sensor for spherical fiber transmission[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2012, 24(12): 2930-2934.
- [9] PAILLAT T, MOREAU E, TOUCHARD G. Space charge density at the wall in the case of heptane flowing through an insulating pipe[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 171-182.
- [10] 王志宇,王顺,张群英,等. 一种新型地球物理电容性电场传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2678-2685.
WANG ZH Y, WANG SH, ZHANG Q Y, et al. Research on a novel capacitive electric field sensor for geophysical prospecting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2678-2685.
- [11] SMIRNOV B M. Microphysics of atmospheric phenomena[M]. Switzerland: Springer International Publishing AG Switzerland, 2017.
- [12] WEBER M E, CHRISTIAN H J, FEW A, et al. A thundercloud electric field sounding: Charge distribution and lightning [J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87(C9): 7158-7169.
- [13] XIN E CH, JU Y, YUAN H W. Development and application of a wireless sensor for space charge density measurement in an ultra-high-voltage, direct-current environment[J]. Sensors, 2016, 16(1): 1743.
- [14] GIBSON N. Static electricity-an industrial hazard under control [J]. Journal of Electrostatics, 1997, 40&41: 21-30.
- [15] LEI H CH, XIA SH H, CHU ZH ZH, et al. An electric field microsensor with mutual shielding electrodes [J]. Micromachines, 2021, 12(4): 360-371.
- [16] 唐立军,周年荣,方正云,等. 基于 MEMS 电场传感器的直流验电器系统设计[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(9): 77-80.
TANG L J, ZHOU N R, FANG ZH Y, et al. Design of DC electroscope system based on MEMS electric field sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(9): 77-80.
- [17] YANG P F, PENG CH R, FANG D M, et al. Design, fabrication and application of an SOI-based resonant electric field microsensor with coplanar comb-shaped electrodes [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2013, 23(23): 266-285.
- [18] WEN X L, PENG CH R, FANG D M, et al. High performance electric field micro sensor with combined differential structure [J], Journal of Electronics (China), 2014, 31(2): 143-150.
- [19] MOU Y, YU ZH Q, HUANG K T. Research on a novel MEMS sensor for spatial dc electric field measurements in an ion flows field[J]. Sensors, 2018, 18(1): 1740.
- [20] 闻小龙,彭春荣,方东明,等. 基于共面去耦结构的三维电场测量方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2504-2508.
WEN X L, PENG CH R, FANG D M, et al. Measuring method of three dimensional atmospheric electric field based on coplanar decoupling structure [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(10): 2504-2508.
- [21] 方奕庚,彭春荣,方东明,等. 微型折叠式三维电场传感器[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(5): 67-69.
FANG Y G, PENG CH R, FANG D M, et al. Micro 3-dimensional folding electric field sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(5): 67-69.
- [22] LING B Y, PENG CH R, REN R, et al. Design, fabrication and characterization of MEMS-based electric field sensor with low cross-axis coupling interference[J].

Sensors. 2018, 18(3), 870.

- [23] WANG Y, FANG D M, FENG K, et al. A novel micro electric field sensor with X-Y dual axis sensitive differential structure [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 229(1): 1-7.

作者简介



张巍, 2017 年于山东大学获得学士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院博士研究生, 主要研究方向为电场传感器抗干扰技术。

E-mail: zhangwei178@mails.ucas.ac.cn

Zhang Wei received his B. Sc. degree from Shandong University in 2017. He is currently a Ph. D. candidate in the Aerospace Information Research Institute at Chinese Academy of Sciences. His main research interest is anti-charge-interference technology for electric field sensor.



夏善红 (通信作者), 1983 年于清华大学获得学士学位, 1986 年于中国科学院电子学研究所获得硕士学位, 1994 年于剑桥大学获得博士学位, 现为中国科学院空天信息创新研究院国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为电场传感器和水环境监测传感器。

E-mail: shxia@mail.ie.ac.cn

Xia Shanhong (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Tsinghua University in 1983, M. Sc. degree from Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences in 1986, and Ph. D. degree from University of Cambridge in 1994. She is currently a professor and a Ph. D. advisor in the Aerospace Information Research Institute at Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include electric field sensor and water environment sensor.