

小型三维电场传感器设计与测试

张星^{①②} 白强^① 夏善红^① 郑凤杰^{①②} 陈绍凤^①

^①(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要:目前电场传感器只能探测大气电场强度矢量一维或者二维方向分量,尚无法精确地反映空中电场强度大小。该文介绍一种结构新颖的小型三维空中电场传感器,由轴向(Z)和径向(X, Y)三路电场测量单元和驱动单元以及电路单元组成,用于探测电场强度的三维方向矢量。在地面实际测试中,传感器输出信号与电场强度的理论关系得到了验证,证明了三维电场传感器结构设计和检测方法的合理性。

关键词: 电场; 电场探测; 三维电场传感器

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-1002-03

Design and Measurement of a Miniaturized Three Dimensional Electric Field Sensor

Zhang Xing^{①②} Bai Qiang^① Xia Shan-hong^① Zheng Feng-jie^{①②} Chen Shao-feng^①

^①(State Key Lab of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Electric field sensors used at present are only capable of measuring one or two dimensional values of electric field intensity. A miniaturized electric field sensor used for measuring three dimensional electric field is introduced, which is composed of axial(Z) and radial(X, Y) electric field measuring units, driving unit and circuit unit. The practicability of the three dimensional electric field sensor is demonstrated, and it is shown that the theoretical prediction and experimental result are in good agreement.

Key words: Electric field; Electric field detecting; Three dimensional electric field sensor

1 引言

电场的探测在导弹、火箭、航天器发射升空中意义重大,是飞行器升空的安全保障之一。国内外先后研制出多种电场传感器对电场强度进行监测,可以直接测量地面或空中电场强度,实施有效的监测和分析,为气象保障提供可靠的手段和依据,避免了强电场的破坏作用。根据其工作原理,电场传感器主要分为光学式电场传感器^[1,2]和电荷感应式电场传感器^[3-7]。对于检测低频电场或静电场,当前一般使用的是电荷感应式电场传感器,这种电场传感器稳定性高,适用于低温、潮湿、振荡等恶劣大气环境的电场检测。

目前已有的电场传感器只能检测一维或二维电场强度,探测方向由传感器结构决定,一般与传感器主轴方向平行或垂直。由于空中电场的方向并不总是平行或垂直于地球表面,不能保证一维或者二维电场传感器的主轴方向与空中电场方向一致,其测量数据仅能反映空中电场三维矢量某一个方向或者某两个方向分量的大小,与实际电场强度矢量不完全一致,有可能造成较大的测量误差。

本文介绍了一种小型三维电场传感器,通过它的结构和

信号处理,可以实现电场强度三维方向矢量的同步检测,更加准确地反映电场强度的真实大小。

2 结构设计

小型三维电场传感器利用接地导体片对电场的屏蔽作用,使感应电极上的电荷发生周期性变化形成电流,通过电流的大小来检测电场强度。它由轴向(Z)和径向(X, Y)3路电场测量单元和驱动单元以及电路单元组成,见图1。

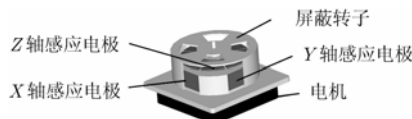


图1 小型三维电场传感器的结构示意图

为了避免高空中带电粒子的影响,设计传感器的感应电极时,每个方向均采用两个对称性结构,即轴向(Z)及径向(X, Y)电场测量单元由6个电场感应电极组成,其中以两个对称感应电极电荷变化的差值作为输出信号^[7],使得所输出信号与传感器本身电位的变化无关。而且,该对称结构与单感应电极相比,灵敏度也提高了1倍。为了对三维方向感应电极产生同步的屏蔽作用,屏蔽转子的设计采用了兼有轴向以及径向屏蔽功能的结构,从而使得对三维方向6个电场感应电极同时起到交替性屏蔽作用。为了使三维方向感应电极之间

的相互干扰减小, 两个相互垂直的径向(X , Y)感应电极均采用平面结构, 而不是圆柱面结构, 从而确保三维方向感应电极的相互垂直度。

屏蔽转子上表面有 4 个叶片状孔, 轴向侧表面为 1/4 圆柱面结构。工作时, 电机通过轴使屏蔽转子产生同速转动, 对轴向(Z)及径向(X , Y)感应电极产生交替性屏蔽作用, 导致感应电极上的感应电荷量 Q 会发生周期性变化, 形成电流输出, 分别反映空间电场强度的三维分量大小, 输出到后面电路单元进行处理。

与一维、二维电场传感器相比, 该小型三维电场传感器的新型电场测量单元结构, 可以同时检测空间电场强度矢量的三维方向分量, 再经合成可更准确地反映出电场强度 E 的真实大小。另外, 该小型三维电场传感器在形状尺寸上也有了质的变化, 只为 $\phi 5 \times 3.2$ cm, 重量也只有 80g, 远远小于当前使用中一维、二维电场传感器。

3 工作原理

根据该三维电场传感器的结构特点, 当屏蔽转子将轴向(Z)感应电极完全屏蔽的一瞬间开始, 随着屏蔽转子的转动, 下面的轴向(Z)感应电极的暴露面积逐渐增大, 其暴露面积 $A_z(t)$ 的增长速率为

$$\frac{dA_z(t)}{dt} = 8\pi f(r_2^2 - r_1^2), \quad 0 < t < T/2 \quad (1)$$

其中 r_1 、 r_2 分别为内外半径; f 为电极旋转频率; $T/2$ 为屏蔽转子暴露出整个感应电极的时间。

同理, 在 $T/2$ 和 T 之间, 感应电极暴露面积开始逐渐减少, 变化速率为

$$\frac{dA_z(t)}{dt} = -8\pi f(r_2^2 - r_1^2), \quad T/2 < t < T \quad (2)$$

由于电场轴向分量垂直于导体表面, 因此轴向(Z)感应电极上感应电荷量 $Q_z(t)$ 的大小与电场强度轴向(Z)分量 E_z 及感应电极暴露面积 $A_z(t)$ 成正比:

$$Q_z(t) = -\varepsilon E_z A_z(t) \quad (3)$$

式中, ε 为空气的介电常数, 取 $\varepsilon = 0.8854 \times 10^{-11}$ F/m。

因此, 流过传感器等效输出电阻上的感应电流 $i_z(t)$ 为

$$i_z(t) = \begin{cases} \frac{dQ_z(t)}{dt} = -8\pi\varepsilon E_z f(r_2^2 - r_1^2), & 0 < t < T/2 \\ \frac{dQ_z(t)}{dt} = 8\pi\varepsilon E_z f(r_2^2 - r_1^2), & T/2 < t < T \end{cases} \quad (4)$$

可见, 当电机旋转频率 f 为恒定时, 三维电场传感器轴向(Z)感应电极所输出的电流 $i_z(t)$ 幅度值与空中电场强度轴向(Z)分量 E_z 成线性关系。

同理, 径向(X , Y)感应电极的输出电流 $i_x(t)$ 为

$$i_x(t) = \begin{cases} -\sqrt{2}\pi f \varepsilon E_x A_0 \cos\left(\frac{\pi}{4} - 2\pi ft\right), & 0 < t < T \\ \sqrt{2}\pi f \varepsilon E_x A_0 \cos\left(\frac{3\pi}{4} - 2\pi ft\right), & T < t < 2T \end{cases} \quad (5)$$

其中 A_0 为径向(X)感应电极在 X 方向投影面积, f 为电极旋转频率, 屏蔽转子暴露出整个感应电极的时间为 T 。

从对称性可知, 径向(Y)感应电极输出电流信号 $i_y(t)$ 也与径向(X)感应电极输出是一样的。

对于上述轴向(Z)以及径向(X , Y)感应电极输出的电流信号, 传感器的电路再将其进行 $I-V$ 转换、差分放大、取峰值、分时信号切换、 $V-F$ 变换等, 从而将 6 路感应电极输出的电流信号转化成可供发射的频率信号, 并把轴向(Z), 径向(X , Y)共 3 路信号分别依次循环输出。

在传感器电路信号处理中, 由于存在工频干扰等其他干扰信号, 因此在电路中设计了几处各种滤波器来消除干扰, 如差分放大之后添加了高通滤波器来滤掉 50Hz 的工频干扰, 在最后 $V-F$ 转换之后也设计了低通滤波器来滤掉不需要的高频信号等。

由于理论上感应电流信号与电场强度成线性关系是电机转速恒定为前提, 但实际中, 尤其是在高空恶劣环境中无法保证电机转速的恒定不变, 因此电机频率信号也要同电场强度信号一起输出, 并且同时可以作为区别 3 路方向电场信号的标志信号, 从而便于区别和处理。所以, 传感器电路最后输出为 4 路信号的循环分时切换, 由 1 路电机频率信号和 3 路电场信号组成。

根据该设计思想, 三维电场传感器 3 路输出频率信号的表达式如下:

$$f_{\text{out}}(t) = \begin{cases} f_{\text{motor}}(t), & 0 < t < T/4 \\ f_z(t) = a_z f_{\text{motor}} E_z + b_z, & T/4 < t < T/2 \\ f_x(t) = a_x f_{\text{motor}} E_x + b_x, & T/2 < t < 3T/4 \\ f_y(t) = a_y f_{\text{motor}} E_y + b_y, & 3T/4 < t < T \end{cases} \quad (6)$$

其中 a_z , b_z , a_x , b_x , a_y , b_y 分别为线性关系中的斜率和截距。

从以上理论分析, 可以得知该三维电场传感器的 3 路输出频率信号, 在电机转速恒定不变时, 均与各方向的电场分量成线性关系。可见, 从这些输出频率随各方向电场强度分量线性变化的关系, 可以通过检测各输出频率以及电极频率来反映各电场强度分量的大小。而实际上, 由于每个方向均存在边缘效应, 因此还需通过实测来验证该理论的合理性和可行性。

4 测试结果

电场传感器的测试需在专用电场标定设备进行。电场标定装置为一平板式电场箱, 主要用途是为电场传感器提供校准用的标准电场环境, 由上下两个大平板构成, 极板间等间距分布 9 根金属丝, 极板与金属丝, 以及金属丝之间由等值分压电阻相连, 其作用是限定两极板之间的边界条件。当极板电极间施加电压 U 时, 每根金属丝上电压依次为 $0.1U$, $0.2U$, $0.3U$, ..., $0.9U$, 电场箱内部电场近似为均匀电场, 箱内电场强度 $E=U/L$, 其中 L 是两极板间的距离。这样, 通

过标定电场箱就可以模拟传感器在均匀电场中的情况,可对每个电场传感器进行测试和标定。

实测时,将三维电场传感器放入电场箱中,使其轴向感应电极垂直于电场方向,并逐渐增加两个平板之间电压来提高电场强度,测量电场传感器的轴向输出随电场强度变化的曲线。改变传感器放置角度,使得径向(X)感应电极垂直于电场方向,按同样方法测量径向(X)输出与电场强度变化的曲线。同样,改变角度之后,测量径向(Y)与电场强度的变化关系。图 2 为传感器各方向输出频率与电场强度以及相关电机频率之间的关系曲线。可见,传感器输出信号与电场强度和电机频率相乘之间形成线性关系,与上述理论结果相符。因此,从该曲线关系进而可以得出,从不同的传感器输出频率可求出相应的 $E \cdot f$ 值,再除以电机频率 f 即可得出各方向相应的电场强度分量。

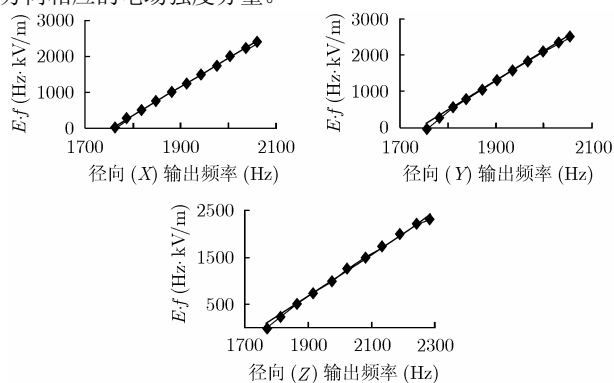


图 2 输出频率信号与电场强度变化关系

由以上理论分析以及测试结果,可知测试结果与理论预测相吻合,证明了该三维电场传感器结构设计和检测方法的合理性和可行性。

5 结束语

目前使用中的双球式电场仪和旋片式电场传感器的探测方向局限在一维或二维方向,因此探测数据与实际电场强度大小可能存在比较大的误差,而该小型三维电场传感器最突出的特点就是它采用了新颖的电场测量结构,可以同时探测电场强度矢量的三维方向分量,从而更加准确地反映电场强度的真实大小,且体积小、重量轻,可用于飞行器的升空安全保障。该小型三维电场传感器在地面测试中,表现出良好的线性度,与理论关系相吻合,因此三维电场传感器是一

种很有应用前景的电场传感器。

参考文献

- [1] Rao Y J, Gnewuch H, and Pannell C N, *et al.*. Electro-optic electric field sensors base on periodically poled NiNbO₃. *Electronics Letters*, 1999, 36(7): 596–507.
 - [2] Tajima K, Kobayashi R, and Kuwabara N. Experimental evaluation of broadband isotropic electric field sensor using three Mach-Zehnder interferometers. *Electronics Letters*, 1998, 34(11): 1130–1132.
 - [3] 罗福山, 庄洪春, 何喻晖等. 球载双球式电场仪及其应用. *地球物理学报*, 1999, 42(6): 772–777.
Luo Fu-shan, Zhuang Hong-chun, and He Yu-hui, *et al.*. Balloon-borne two shpheres electric field instrument and application. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(6): 772–777.
 - [4] Dettro G J and Smith L G. A rocket borne electric field meter for the middle atmosphere. In: *Aeronomy Report*. University of Illinois Urbana. No. 105, 1982.
 - [5] 罗福山, 庄洪春, 何喻晖等. 微火箭电场仪的原理及其应用. *地球物理学报*, 2000, 43(5): 616–620.
Luo Fu-shan, Zhuang Hong-chun, and He Yu-hui, *et al.*. The principle of micro-rocket electric field instrument and its application. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(5): 616–620.
 - [6] Yeboah-Amankwah D and Van-der-Made D. Sign discriminating field mill. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, 38(7/8): 851–861.
 - [7] 白强, 夏善红, 陈绍凤等. 新型旋片式空中电场传感器及应用. *电子与信息学报*, 2004, 26(4): 651–654.
Bai Qiang, Xia Shan-hong, and Chen Shao-feng. A novel fieldmill used as space electric field sensor and its application. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(4): 651–654.
- 张 星: 男, 1980 年生, 硕士生, 从事空中电场探测及系统研究。
夏善红: 女, 1958 年生, 博士生导师, 研究方向为真空微电子、MEMS 技术、空间电场探测等。