

新型旋片式空中电场传感器及应用¹

白 强 夏善红 陈绍凤 裴 强 龚 超

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要: 该文介绍一种新型的空中电场传感器, 它利用导体在电场中感应电荷的原理, 通过感生电荷的变化检测电场强度。传感器采用了新型的双定子结构以及独特的电路设计, 有效地屏蔽了空中积累电荷以及空间离子流对测量的影响。本器件用以检测 100V/m-50000V/m 的高空电场, 误差小于 5%。此传感器已进行地面至 15km 空中电场探测试验, 得到满意的空中电场测试数据。

关键词: 电场, 电场探测, 传感器

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)04-0651-04

A Novel Fieldmill Used as Space Electric Field Sensor and Its Application¹

Bai Qiang Xia Shan-hong Chen Shao-feng Pei Qiang Gong Chao

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract A novel fieldmill used as space electric field sensor is introduced, accompanying with its application. Amplitude and direction of DC electric field are measured with detecting alternating induced charge varying with the rotation of a rotator. Adopting novel mechanical structure and unique circuit, the unexpected influence of space charge and ion current is eliminated to negligible level. This sensor is used to detect space electric field ranging 100V/m to 50000V/m. The experiment of space electric field detection has finished, and satisfying data are got with this sensor.

Key words Electric field, Electric field detection, Sensor

1 引言

在雷雨天气时发射飞行器是不安全的, 因为这时空间电荷积累区可能出现每米上万伏的强电场。在飞行器穿越强电场区域时, 有可能遭到雷击或诱发闪电, 造成飞行器直接损坏或间接损伤。另外, 过强的电场有可能使精密的电子设备失灵, 带来错误的的数据, 甚至损坏设备本身。据资料, 在国外已发生了多次雷击飞行器事件, 引起国内外航天部门的高度重视, 对雷电开展了一系列的研究和探测工作。空中电场是触发闪电的直接原因, 电场强度的测量是确保飞行器安全升空必要的条件之一, 因此, 研制空中电场探测设备测量空中电场有着重要的意义。

目前存在的电场传感器种类很多。根据其工作原理, 主要有电荷感应式和光学式两种。光学式电场传感器^[1,2]利用光在晶体中传输受场强影响的特性而制成, 其优点是响应速度较快、噪声低, 但大多数光学式电场传感器的测量范围不能完全满足空间电场检测的需求, 且成本较高。电荷感应式电场传感器主要有双球式电场仪^[3,4]、火箭电场仪^[5,6]和旋片式电场仪^[7-11]3种。目前国内外空间电场探测普遍采用球载双球结构电场仪, 它制作技术较成熟, 量程及精度基本满足实用需求, 但是由于其体积大, 成本高, 应用受到了一定的限制。

本文介绍一种新型旋片式空中电场传感器, 它体积较小, 成本较低, 探测精度较高, 是一种较理想的高空电场探测仪器。它在原有的地面电场传感器基础上, 在结构和电路两方面都进

¹ 2003-02-13 收到, 2003-04-17 改回

国家自然科学基金资助项目 (批准号: 60172001)

行了大胆的创新,取得了良好的效果。这种电场传感器已经完成了若干次空中电场探测任务,成功地获得了高空电场探测数据。

2 传感器的机械结构及其工作原理

旋片结构电场传感器既能用于地面^[7],又能用于空中电场测量^[8,9]。它利用接地金属板对电场的屏蔽作用,使另一金属板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。如图1,传感器有两组大小相同、分布均匀的扇形金属片,分别称之为定子(感应片)和转子(接地屏蔽片)。当转子旋转时,定子交替地暴露在外电场中或被接地屏蔽片遮挡。这样,在转子旋转的过程中,定子上的感生电荷不断发生变化,产生交变输出信号。

然而,这种单定子、转子结构并不能满足高空电场测量的需要。在高空中,带电粒子的浓度远远大于地面附近,因此气球升空时与周围带电粒子的碰撞,尤其是水分子或云滴粒子的碰撞会使自身带电而电位改变。若使用传统的结构肯定有很大的噪声,甚至会掩盖信号输出。因此,要想将这种电场传感器用于高空电场探测,就必须采用差分式电路来消除传感器本身电位变化对信号输出的影响。有人曾经提出采用两组定子和转子,一组正置(转子在上),一组倒置(定子在上),两定子信号差分输出^[8],但是由于需要采用复杂的传动方式,这种结构的传感器体积较大、质量较重。

本文介绍的新型空间电场传感器采用双定子、单转子结构,如图2所示,使用两个定子交叉放置,以这两个定子输出的电流差作为输出信号。这使得输出信号与传感器本身电位的变化无关,高空中的带电粒子不会影响电场的测量。另外,由于使用了双定子结构,与相同尺寸单定子传感器相比,它的灵敏度提高了1倍。在机械结构方面,它同地面使用的电场传感器非常相近,体积和重量都可以做得比较小。

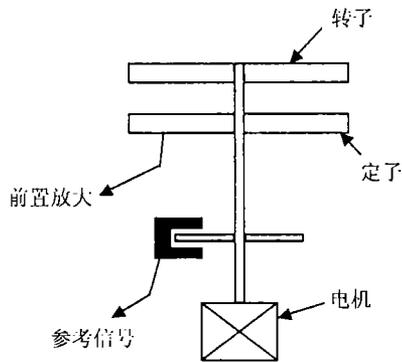


图1 电场传感器示意图

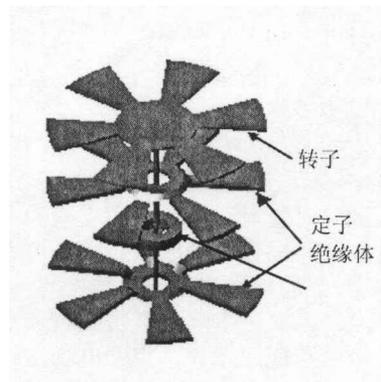


图2 双定子结构示意图

3 电路设计

对于这种用于空中电场探测的传感器,电路设计直接影响到测量的精度,因此设计合理的电路非常重要。从测量原理可以看出,定子采集的电流与其表面电场强度的微分成正比,因此只有对这个电流信号进行积分才能精确地计算出电场强度的大小,完全去除电机转速波动产生的误差。然而由于集成电路中普遍存在偏置电压,传统的连续积分电路在对信号积分的同时,对偏置电压也有积分效果。这样,偏置电压对积分结果的影响也会越来越大。当积分超过一定的时间,积分后的信号就会失真。另一方面,由于高空存在大量的带电粒子,这些带电粒子打到定子上也将形成电流。显然,这种带电粒子引起的电流同感生电荷变化产生的电流在相位上相差 90° 。合理的电路设计要消除空间粒子流对测量的影响。

本文首次提出使用 3/4 周期积分的方法, 能同时解决上述两方面的问题。新型传感器采用如图 3 所示的 3/4 周期积分方法, 每周期有 1/4 的时间用于积分器的回零, 这样解决了长时间积分的漂移。另外, 粒子形成的电流经过滤直、积分后, 在采样点大小为零。这样可以消除带电粒子流对电场测量的影响。

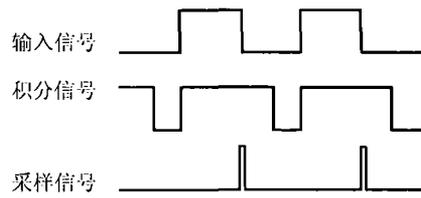


图3 积分方法示意图

4 理论计算与测试结果

旋片结构的电场传感器已经存在很多年了, 但是其理论分析远远滞后于器件的发展, 长期以来一直没有人做出精确理论计算。深入分析转子的旋转, 分析边缘效应对测量结果的影响会使得工作量极其庞大。我们设计的新型电场传感器在电路设计上采用了“积分采样”结构, 采样信号与积分信号同相位, 保证采样值是积分后输出信号的最大值, 采样的结果只与电荷变化量有关, 这使对于传感器输出结果的计算得到简化。采样后的输出电压如下式所示:

$$U = c \cdot \int_0^{T/2} i dt = c \cdot (Q_{T/2} - Q_0)$$

其中 c 是积分系数, 与电路中元件参数有关, i 代表定子上的输出电流, T 代表定子上输出信号的周期, Q_0 是定子被完全屏蔽时的感应电荷, $Q_{T/2}$ 是定子与转子交叉时定子上的感应电荷。从上式可以看出, “积分采样”后的输出电压只与定子上感应电荷的最大值 $Q_{T/2}$ 和最小值 Q_0 有关, 与转子旋转的过程没有关系。这样可以忽略定子上输出信号的波形, 只需考虑感应电荷量的最大值和最小值。根据电磁场理论, 自由面电荷密度 $\sigma_f = n \cdot (D_2 - D_1)$ 。对于均匀电场中的导体, 若电场垂直于导体表面, 则感生面电荷 $\sigma = \epsilon E$, 电场在导体表面产生的感生电荷为 $Q = \epsilon EA$, 其中 E 为电场强度, A 为导体的表面面积。

对于旋片式电场传感器, 若忽略边缘效应, 在“屏蔽”和“交叉”两种状态时, 垂直于定子表面的电场强度分别为 $E = 0$ 和 $E = E_0$, 则根据上述公式, $Q_0 = 0$, $Q_{T/2} = \epsilon E_0 A$, 因此 $U_{out} = c \cdot (Q_{T/2} - Q_0) = c \cdot \epsilon E_0 A$, 其中 ϵ 是空气的介电常数, E_0 是待测电场强度。然而用这种方法计算的结果存在很大的误差, 与实际测试的结果相差约 5 倍。我们使用计算机模拟软件对“屏蔽”和“交叉”两种状态分别进行了模拟计算, 计算结果表明, 定子表面电场强度的平均值在“屏蔽”和“交叉”两种状态时分别是 $0.153E$ 和 $0.345E$, 因此

$$U = c \cdot (Q_{T/2} - Q_0) = c \cdot (0.345\epsilon E_0 - 0.153\epsilon E_0 A) = 0.192c\epsilon E_0 A$$

这一结果与实际测量结果相近。图 4 曲线 A 是经过计算机模拟计算后做出的电场强度输出电压曲线, 曲线 B 是电场传感器实测曲线, 可以看到, 实测曲线与模拟计算的曲线基本一致。

进一步的分析表明, 减少扇片数目可以减小边缘效应的影响, 提高本传感器的灵敏度。但是减少扇片数目会使得定子上感应电荷数目减少, 影响前置放大及积分电路的精度, 因此在实际应用中我们采用的是 6 扇片结构。

5 实地探测

本电场传感器在外场进行了空中电场探测, 取得了满意的结果。所有传感器全部返回电场数据, 数据可信度高。图 5 为雨天放飞的高度电场探空仪测得的高度电场曲线之一, 它成功得获取强电场信号, 为气象部门增添了一份宝贵的资料。

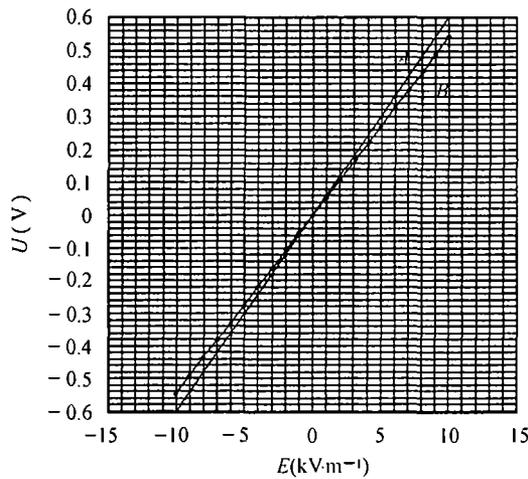


图4 理论计算输出曲线与实测输出曲线

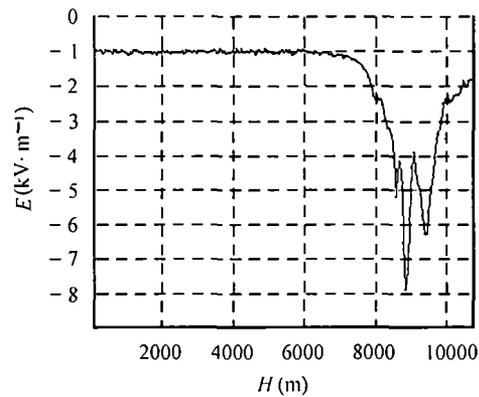


图5 实地探测到的电场强度-高度曲线

6 小结

本文介绍一种新型空中电场传感器,它采取了新颖的结构、独特的电路,有效地减少了电场测量的误差,灵敏度和精度等主要性能有大幅度提高,同时它还具有成本较低、操作方便、可靠性高、适于在恶劣环境工作等优点,是一种理想的空中电场探测仪器。

参 考 文 献

- [1] Rao Y J, Gnewuch, Pannell C N, *et al.*. Electro-optic electric field sensors base on periodically poled $N_iN_bO_3$. *Electronics Letters*, 1999, 36(7): 596-507.
- [2] Tajima K, Kobayashi R, Kuwabara N. Experimental evaluation of broadband isotropic electric field sensor using three Mach-Zehnder interferometers. *Electronics Letters*, 1998, 34(11): 1130-1132.
- [3] William P W, Byerley L G. Electric field growth in thunderclouds. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, 1975, 101: 979-992.
- [4] 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.
- [5] Dettro G J, Smith L G. A rocket borne electric field meter for the middle atmosphere. *Aeronomy Report*, Urbana, University of Illinois, No.105, 1982.
- [6] 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.
- [7] Yeboah-Amankwah D, Van-der-Made D. Sign discriminating field mill. *J. Atm. Ter. Phys.*, 1992, 38(7/8): 851-861.
- [8] Evans W H. Electric fields and conductivity in thunderclouds. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74(4): 939-948.
- [9] Evans W H. The measurement of electric fields in clouds. *Pure Appl. Geophys.*, 1965, 62(III): 191-197.
- [10] Sheahen T P. Model of response of an electric field mill operating during suborbital flight. *Rev. Sci. Instrum.*, 1974, 45(2): 171-177.
- [11] Chauzy S, Raizonville P. Space charge layers created by corona at ground level below thunderclouds measurements and modeling. *J. Geophys. Res.*, 1982, 87(C4): 3143-3148.

白强: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为空间电场探测及MEMS技术等。

夏善红: 女, 1958年生, 研究员, 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。

陈绍凤: 女, 1947年生, 高级工程师, 研究方向为真空微电子、MEMS技术、半导体工艺等。

裴强: 男, 1977年生, 硕士生, 研究方向为空间电场探测及MEMS技术等。

龚超: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为空间电场探测及MEMS技术等。