

新型倒装式旋转电场仪^{*}

罗福山 何渝晖 张 健

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

郭 虎 陈大任

(北京市气象台)

摘 要

介绍了一种全新设计的倒装式旋转电场仪,通过测量大气电场强度和极性的变化,对局部地区潜在的雷暴活动及静电电击事故发出报警,可用于气象、航天、航空、石油、电力、工矿及森林防火、露天体育场地等易起静电和易受静电及雷电危害的场所安全监测的预警仪器。

关键词 雷电;雷电监测与预警;电场仪

1 引言

雷电是威胁人类最严重的自然灾害之一,任一瞬间,在全世界各地发生的雷暴多达2000多个,平均每秒钟差不多要产生100次闪电。发生闪电的雷雨云通常能产生很强的电场,有时高达每米数十万伏,在闪电时能产生高达3000°C的高温,对人类生命财产造成极大的危害。据不完全统计,我国每年因雷击造成的人员伤亡约有3000—4000人,经济损失达50—100亿元人民币。雷电也是引起航天活动意外事故重要因素之一,自人类开展航天活动以来,美、日等国已发生过多起雷击飞行器事件^[1],就1987年而言,美国因雷击损失了Atlas通信卫星及其Centaur运载火箭和3枚探空火箭。

鉴于雷电的发生、发展、成熟和消散的各个阶段,都伴随着声、光、电、热等不同类型的效应产生,给雷电的监测和预警提供了信息。尤其是电效应中的电场,在雷暴的各个阶段自始至终都有电场变化,所以监测局地电场变化是预警雷电一种直接而简单的方法,美国等工业发达国家在雷电重点防区一般都布设了单站电场仪监测或电场仪和闪电单站定位仪组合预警或多站电场仪联网预报。肯尼迪航天发射中心布设了34台地面电场仪监测网作为航天安全升空保障设备之一^[2],已取得了良好的效果。

电场仪是通过监测大气电场强度和极性的变化来监测被监测地区上空雷雨云起电过程、电荷积累程度和消散过程。可对局部地区潜在的雷暴活动及静电电击危险进行预警。能用作气象、航天、航空、石油、电力、工矿及森林防火、露天体育场地等易起静电和易受静电及雷电危害的场所安全监测的预警仪器。它与闪电定位仪各有特点,互为补充,电场仪能监测雷雨云起电和消散的全过程,有雷电的预警功能,随着对雷电预报的重视,对沙暴和地震过程中静电效应的关注,电场仪将有广阔的应用前景。

^{*} 北京科委项目资助(955300500)

2003-12-26收到原稿, 2004-07-08收到修定稿

2 工作原理

KDY-V 型旋转式电场仪是利用置于电场中的导体, 其上产生感应电荷的原理进行电场测量. 电场传感器为场磨式结构见图 1, 它由两组形状相似的各为 6 片相互连接在一起的导电片, 并分别称之为定子 (感应片) 和转子 (接地屏蔽片) 所组成. 当转子旋转时, 使定子交替地暴露在电场中或被接地屏蔽片所遮挡, 从而产生交变信号输出. 定子上的感应电荷 $Q(t)$ 为时间的函数, 其值与外界电场强度 E 成正比,

$$Q(t) = -\varepsilon_0 EA(t), \quad (1)$$

式中, ε_0 为自由空间介电常数, 一般取 $\varepsilon_0 = 8.754 \text{ pF/m}$; $A(t)$ 为定子的表面积; E 的方向, 指向转子时为正, 电场的极性是采用同步检波的方法来区别, 同步检波的参考相位脉冲由与转子的形状相似, 并与转子同步运行的机械斩波叶片和槽形光电耦合器件产生. 根据文献 [3] 的分析计算, 电场传感器在周期为 $2T$ 期间 (即动片完全屏蔽定片的那一瞬间开始旋转到定片完全暴露, 再旋转到动片完全屏蔽定片的那一瞬间止) 内的输出电压为

$$V_{01} = IR[(K+1) - 2\exp(-t/RC) - 1], \quad 0 < t < T; \quad (2)$$

$$V_{02} = IR\{[(K+1) - 2\exp(T/RC)]\exp(t/RC) + 1\}, \quad T < t < 2T. \quad (3)$$

在定子完全暴露的一瞬间 (即 $t = T$ 时), 电场传感器输出的等效电压幅度 V_n 为

$$V_n = IR[1 - 2\exp(-T/RC) + \exp(-2T/RC)]/[1 - \exp(-2T/RC)] = IRK. \quad (4)$$

式中, I 为电场传感器输出的电流幅度, K 为无量纲常数,

$$I = 4\pi f_0 \varepsilon_0 (r_2^2 - r_1^2) E, \quad (5)$$

$$K = [1 - 2\exp(-T/RC) + \exp(-2T/RC)]/[1 - \exp(-2T/RC)]. \quad (6)$$

一般情况下, R 、 C 可视为电流放大器的反馈电阻和电容, r_1 、 r_2 分别为扇形定子 (感应

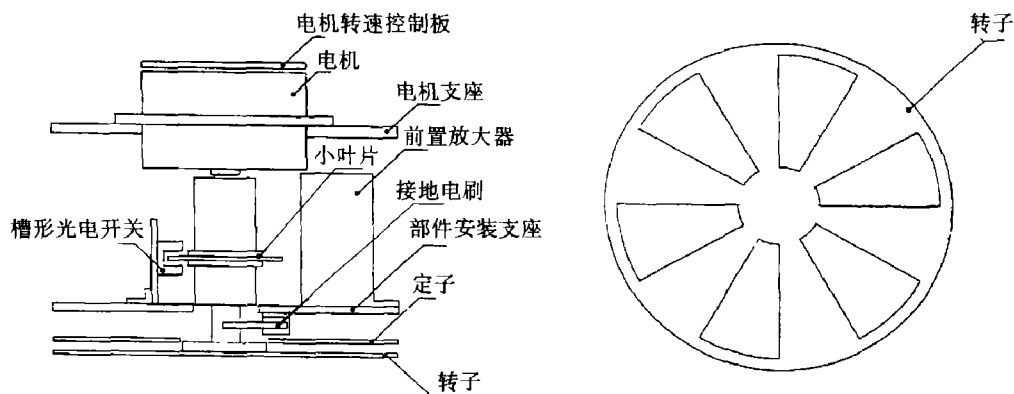


图 1 旋转式地面电场仪原理示意图

Fig.1 Principle scheme of inverted electric field mill

片)或转子(接地屏蔽片)的内外半径, $f_0 = 1/2T$ 为电场信号频率, 0 或 $2T$ 时为动片完全屏蔽定片的那一瞬间的时间, T 为定片完全暴露的一瞬间时间。

本文中的电场传感器的扇形定子或转子的内半径 $r_1 = 0.014\text{ m}$; 外半径 $r_2 = 0.048\text{ m}$; 角度 $\theta = 30^\circ$; 电机的旋转频率 f_0 和旋转周期 $\tau = 1/f_0$ 分别为 80 Hz 和 1.25 ms ; $R = 10^7\Omega$, $C = 470\text{ pF}$; $T = \tau/12 = 1.042\text{ ms}$; $2T = 2.083\text{ ms}$. 将上述参数代入 (5)、(6) 式可得

$$I = 28.1 \times 10^{-12} E(\text{A}),$$

$$K = 0.112.$$

电场传感器在定子完全暴露瞬间输出的等效电压幅度 V_n 为

$$V_n = IRK = 28.1 \times 10^{-12} \times 10^7 \times 0.112 E = 31.5\mu\text{V}.$$

就是说, 电场传感器和前置电流放大器在所选定的设计参数下, 在定片完全暴露一瞬间, 传感器输出电流仅有 28.1 pA , 流过 $10\text{ M}\Omega$ 的等效电阻时产生的等效电压也只有 $31.5\mu\text{V}$. 在这种小电流和小电压情况下, 防止干扰和减少噪声也是本仪器设计中要解决的重要问题. 信号经过进一步放大和处理后, 在 1 V/m 的电场下, 输出的有效值电压约为 $100\mu\text{V}$. 在 4 位半的仪器面板表上, 也只能在最后 1 位显示出 1 (实际上为了使显示值和测量电场值有一一对应关系, 在仪器统调中只能使其显示 1), 通过微机进一步处理, 在屏幕上显示电场平均值及其变化量数据以及它们随时间变化的曲线。

电场仪的标定在一套由两块相互平行的平板导体组成的电容式模拟电场装置和高压直流可控电源构成的电场标定系统^[4]中进行. 在不同的模拟电场值下, 通过改变仪器的内部增益使仪器显示出的电场值和模拟电场值基本上一致. 以 0302# 电场仪为例, 其多次标定数据的平均值和根据 (4) 式计算值列于同一表 (见表 1), 并示于同一坐标图 (见图 2), 可以看出该仪器的标定曲线和计算曲线一样有很好的线性关系, 说明电场仪和模拟电场源采用的设计原理和方法都是正确的。

表 1 KDY-V 型旋转式电场仪标定数据和计算数据表

Table 1 Calibrating data and calculating data of modle KDY-V electric field mill

模拟电场 $/(V \cdot m^{-1})$	0	5	10	100	200	500	1000	2000	3000
显示电场 $/(V \cdot m^{-1})$	0	5	10.1	100.3	200.3	500.5	1000.4	2000.3	3000.5
计算电场 $/(V \cdot m^{-1})$	0	12.5	24.5	245	490	1250	2450	4900	7350
模拟电场 $/(V \cdot m^{-1})$	4000	5000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000
显示电场 $/(V \cdot m^{-1})$	4000.2	5001.5	6003.5	8003.5	10004.5	12003	14003	16003	18001
计算电场 $/(V \cdot m^{-1})$	9800	12500	14700	19600	24500	24900	34300	39200	44100

注: 表中显示电场的各项数值均在减去模拟电场为 0 时的显示电场值; 在模拟电场小于 100 V/m 时, 显示电场只有 2 位有效数字, 是多次测量的平均近似值

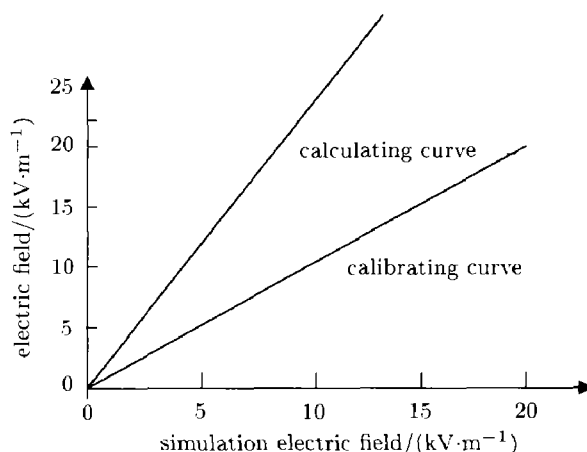


图2 KDY-V型电场仪标定曲线和计算曲线

Fig.2 Calibrating and calculating curve of modle KDY-V electric field mill

3 仪器性能特点和应用情况

本仪器与球载双球式电场仪^[5]和微火箭电场仪^[6]的原理都是导体在电场中感应电荷,但使用的场合是不同的。球载双球式电场仪和微火箭电场仪都是用气球和小火箭直接送到空中,测量云层中电荷所产生的电场,测量时间是有限的,获得的数据也是有限的,且为一次性使用设备,相应成本较高,只适用于航天器发射现场的雷电监测与预警。倒装式旋转电场仪是一种能适用于多种场合、多种用途、长时间连续性运行的设备,相应成本较低。同时它也不同于一般旋转地面电场仪^[3],由于采用倒装方式,且传感器面与地面始终保持1m的定距离,不受特大暴雨和冰雹、大雪的影响,保证了仪器的正常工作和数据的正确性。采用了能连续运行在5万小时以上的可控稳速专用驱动电机,接地双电刷,使用特殊的传感器结构,以减小对电场的畸变和静电屏蔽。传感器的外壳和支架是也采用了不锈钢结构,确保了仪器全天候工作和长期运行的可靠性。

北京市气象台基于“北京地区雷电监测、预报及防护技术研究和防雷示范工程”任务项目*,将闪电定位仪、电场仪、气象卫星、多普勒天气雷达雷电监测网和北京雷电防护中心检测系统作为首都预防雷电灾害中预警设备和手段。现有两套电场仪在北京市气象台工作,积累了雷电在发生、发展及消散等各个阶段的数据,获得了闪电发生前雷雨云在电荷积累过程中电场特征信息,有利于提高对奥运会各个场区局部地区的雷电预报的准确性和及时性。云南昆明雷电防护公司订购了5套电场仪在西双版纳地区进行雷电监测与预警。随着对雷电防护越来越重视,直接能对雷电监测与预警的电场仪将有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Luo Fushan. The events of lightning strike spacecraft and the criteria of the spacecraft launches of aerospace maneuver of USA. *Aerospace China*, 1993, (1):27—29. in Chinese (罗福山. 雷击飞行器事件

* 郭虎, 陈大任等. 北京地区雷电监测、预报及防护技术研究和防雷示范工程, 北京地区雷电监测、预报及防护技术研究和防雷示范工程评议会议研究文集, 2003, 23—25, 62—65

- 与美国航天活动的发射规范. 中国航天, 1993, (1):27—29)
- [2] Luo Fushan. The lightning protection system at Kennedy space center. *Mis. Spacec.*, 1991, (3):43—46. in Chinese (罗福山. 肯尼迪航天中心的雷电防护系统. 世界导弹与航天, 1991, (3):43—46)
- [3] Luo Fushan, Zhuang Hongchun, He yuhui, Zhang Jian. Modle KDY electrical field mill instrument. *Elec. Meas. Inst.*, 1993, **30**(4):17—21. in Chinese (罗福山, 庄洪春, 何渝晖, 张健. KDY 型旋转式电场仪. 电测与仪表, 1993, **30**(4):17—21)
- [4] Luo Fushan, Zhuang Hongchun, He yuhui, Zhang Jian. The calibrating apparatus of electrical field meter. *Elec. Meas. Inst.*, 1993, **30**(6):30—34. in Chinese (罗福山, 庄洪春, 何渝晖, 张健. 电场标定装置. 电测与仪表, 1993, **30**(6):30—34)
- [5] Luo Fushan, Zhuang Hongchun, He yuhui, Zhang Jian. Balloon-borne two spheres electric field instrument and application. *Chin. J. Geophys.*, 1999, **42**(6):772—777. in Chinese (罗福山, 庄洪春, 何渝晖, 张健. 球载双球式电场仪及其应用, 地球物理学报, 1999, **42**(6):772—777)
- [6] Luo Fushan, Zhuang Hongchun, He Yuhui, Zhang Jian. The principle of micro-rocket electric field instrument and its application. *Chin. J. Geophys.*, 2000, **43**(5):616—620. in Chinese (罗福山, 庄洪春, 何渝晖, 张健. 微火箭电场仪的原理及其应用, 地球物理学报, 2000, **43**(5):616—620)

THE NEW INVERTED ELECTRIC FIELD MILL

LUO Fushan HE Yuhui ZHANG Jian

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

GUO Hu CHEN Daren

(Beijing Meteorological Bureau)

Abstract

The paper introduces a new inverted electric field mill. The electric field mill measures the intensity and polarity of atmospheric electric field to forecast the potential thunderstorm and electric shock in local area. It can be used safely as a monitor of the warning in places where are likely regions for the occurrence of static electricity and thunderstorm, for example, meteorological conditions for space-flight, aviation, oil, electric power, mine and open-air stadium.

Key words Thunderstorm, Thunderstorm monitor and warning, Electric field mill