0254-6124/2007/27(3)-223-04 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Luo Fushan, He Yuhui, Zhang Huawei, Zhang Jian, Zhuang Hongchun, Hu Shengbo. Calibration method of electric field. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(3): 223~226

电场的标定方法

罗福山 何渝晖 张华伟 张 健 庄洪春 胡圣波

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要 介绍了球载双球式电场仪、微火箭电场仪和地面旋转式电场仪等 3 种仪器的标定方法. 电场涉及空间物理、空间环境和雷电及地震等多种自然现象的特征参数, 对电场的探测或监测应用日益广泛. 在我国目前尚未建立电场的国家标准和军用标准的情况下, 通过研制的较简易的电场标定系统, 对不同结构的电场仪进行标定, 均获得了与理论计算相符的结果, 为电场测量数据的可信度提供了依据.

关键词 电场仪; 电场标定

中图法分类号 P 353

Calibration Method of Electric Field

LUO Fushan HE Yuhui ZHANG Huawei ZHANG Jian
ZHUANG Hongchun HU Shengbo

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

Abstract The calibration method for the balloon-borne double-sphere electric field instrument, the micro-rocket-borne electric field instrument and the ground mill fieldmeter is introduced. The atmospheric electric field, relating with space physics and space environment, is a key parameter for studying various phenomena in earth science, such as lightning and earthquake, so the atmospheric electric field is becoming more and more important. With the lack of the national standards and military standards for the measurement and calibration of electric field, a set of calibration system is designed and developed to calibrate electric field instruments of different structures. The results are consistent with the theoretical calculation, and provides the foundation for the reliability of the electric field measurement data.

Key words Electric field instrument, Calibration

1 引言

电场是空间物理、大气物理和空间环境等领域的重要特征参数, 其具有数值范围宽、空间分布广、涉及多种自然现象的特点. 它的数值可从每米微伏量级至数十万伏, 分布从地面直到深空, 涉及到太阳活动、雷电活动、冰雹活动、沙暴和地震, 又与磁场和电离层有一定的相关性. 晴天大气电场的年平均值、日振幅和年振幅的长期变化, 均与太阳黑子数的长期变化、太阳耀斑爆发、太阳磁扇形边界的扫过相关, 通过研究太阳活动期间电场的相对变化与磁场变化及电离层参量变化的相关性, 可以研究太阳活动对近地环境的影响. 电场不仅是空间环境探测和空间天气研究的重要参数, 也是空间科学探测卫星和空间环境探测卫星及子午工程各测站主要探测和监测项目之一. 电场又是雷暴、冰雹形成过程中极重要的特征性参量, 雷暴、冰雹的孕育、发展

2006-06-13 收到原稿, 2007-02-28 收到修定稿

都将引起电场数值在一定程度上的变化，监测和探测电场的数值及其变化对雷电及冰雹的预警有重要的作用. 电场是航天活动一个很重要的环境参量，电场数值是航天发射规范的主要安全因素之一. 电场探测仪已作为航天器安全升空的保障设备，同时还是沙尘暴和地震灾害的监测仪器. 所以电场的探测与研究引起多学科科技人员的关注. 国外除在气球、火箭、飞机、气艇和地面进行电场测量外，电场测量也是空间环境探测卫星和空间科学探测卫星重要任务之一.

然而，尽管国外早已建立国家级电场标定系统 [1],[2], 但我国至今尚未建立电场的国家标准和军用标准，为了满足空间电环境和雷电监测与预警需要, 我们研制了一套平板电容式的电场标定系统 [3]. 虽然目前很难证实它的绝对精度，但是通过对微火箭电场仪、球载双球电场仪和地面旋转式电场仪的标定曲线与理论计算曲线对比，3 种电场仪都有很好的线性，且与理论计算曲线也基本一致，这不但说明了电场仪的设计原理是正确的，而且也说明了电场标定系统的设计是正确的，为我国今后建立电场的国家标准或军用基准及为不同形式的电场仪的标定积累了一定的经验.

2 电场标定原理

电场标定采用文献 [3] 和 [4] 介绍的标定系统进行. 电场标定的首要问题是建立一个数值为已知的均匀电场，根据处于不同电位的两块相互平行、且有无限尺度的导电板之间存在均匀电场的原理，设计了一种类似于电容器的电场标定箱 (见图 1), 即以两块有一定距离的金属平行板为电极，以空气为介质构成基本的标定箱，在两极板加一已知的稳定电压，则平行板间电场可根据

$$E = V/L \tag{1}$$

得到. 其中，V 为加在两板间的电压，单位为 V; L 为两板间的距离，单位为 m.

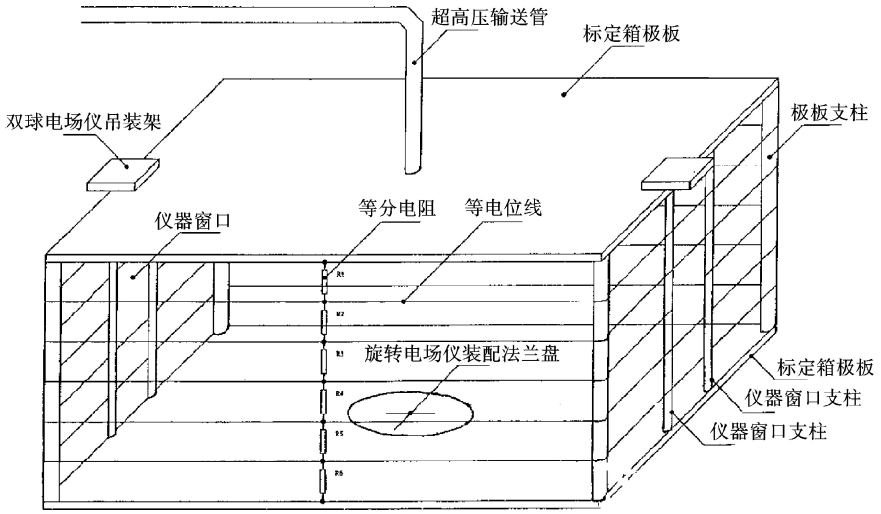


图 1 电容式标定箱结构

Fig.1 Structure of a plate condenser calibration box

由式 (1) 可知，在两平板之间的距离一定时，电场与加在两板上的电压成正比. 电场的精度与电压的测量精度和两板之间距离的装配精度有关，还与两平板的尺寸大小、待标定电场传感器的形状、大小及放置位置有关. 电场标定系统如图 2 所示.

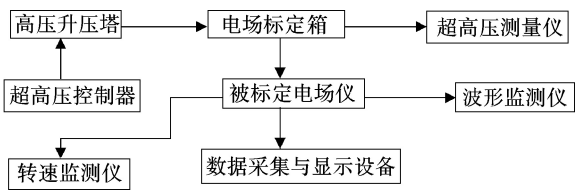


图 2 电场标定系统

Fig.2 Electric field calibration system

3 电场的标定方法

采用的电场标定系统已对不同结构、不同形状的数百套球载双球电场仪、微火箭电场仪和地面旋转式电场仪进行了标定，获得了很好的结果. 在对电场仪进行标定时，还需要考虑仪器实际运行的工作情况、传感器的形状, 以确定电场传感器的放置位置和安装方式. 下面讨论 3 种电场仪的标定情况.

3.1 球载双球电场仪

球载双球电场仪是吊在探空气球上对电场进行测量的 [6]. 在 3 种电场仪中，其传感器体积最大，标定时吊在标定箱的中心处，它引起标定箱内的电力线和等位线的畸变最大，因而产生的相对误差也较大，约 9%[5], 但仍好于仪器 10% 的设计指标. 它有良好的线性 (见图 3), 将仪器的实际参数代入

$$E_{\text{out}} = 9.94 \times 10^{11}[1 + (\omega RC)^{-2}]^{1/2} CV_{\text{o}}/A \quad (2)$$

进行理论计算，可获得一致的曲线 [6]. 式 (2) 中，A 为第二级放大器的闭环增益，V_{o} 为双球电场仪的输出电压 (单位 V); ω 为仪器的旋转角速度；R 和 C 分别为电荷放大器的反馈电阻和反馈电容.

3.2 微火箭电场仪

微火箭电场仪由农用小火箭的头部改装而成，发射到高空进行电场测量，它的传感器面积最小，用夹具固定在标定箱低电位板的中心位置，其标定条件也最差，不能直接对传感器进行标定，而还要通过 1680 MHz 遥测收发系统进行标定，它还会使标定箱内的电力线和等位线产生一定的畸变，但由于体积小，而它的测量误差要求在 15% 以内，由微火箭电场仪传感器引起电力线和等位线的畸变而造成的误差会比双球式电场仪的 9% 要小. 由于微火箭电场仪在国内外尚未见报道，为验证标定特性曲线的真实性，我们又把传感器的实际参数和模拟电场值代入理论公式 (3) 进行计算，所描绘的曲线与标定曲线基本一致 [7] (见图 4), 除标定曲线在低端受灵敏度 (用于探测雷雨云下高电场) 的影响, 线性较差外，其他与理论曲线符合较好，这不仅证明了电场标定系统的原理是正确的，同时也证明了微火箭电场仪的设计原理也是正确的，根据微火箭电场仪传感器的形状和运行状态推导的理论公式如下：

$$E_{\text{out}} = 0.25V_{\text{o}}/\varepsilon ah\omega R\sin\theta. \quad (3)$$

其中，ε 为空气的介电常数，一般取 $\varepsilon = 0.8854 \times 10^{-11}$ F/m; a 为圆筒形传感器的半径；h 为传感器的高度；ω 为火箭自旋角速度；V_{o} 为电场传感器输出电压 (单位 V); R 为电流放大器的反馈电阻; θ 为圆筒形传感器垂直电场的夹角.

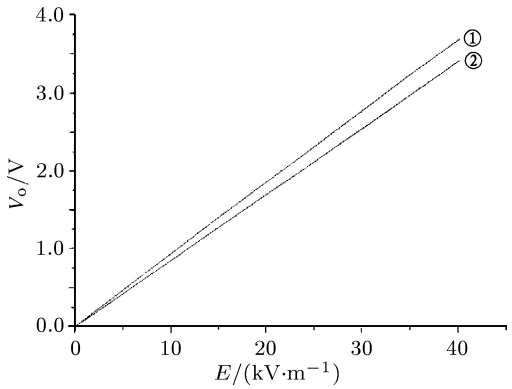


图 3 双球电场仪实际标定曲线①和理论计算曲线②

Fig.3 Real calibration curve ① and theoretical curve ② of the double-sphere electric field instrument

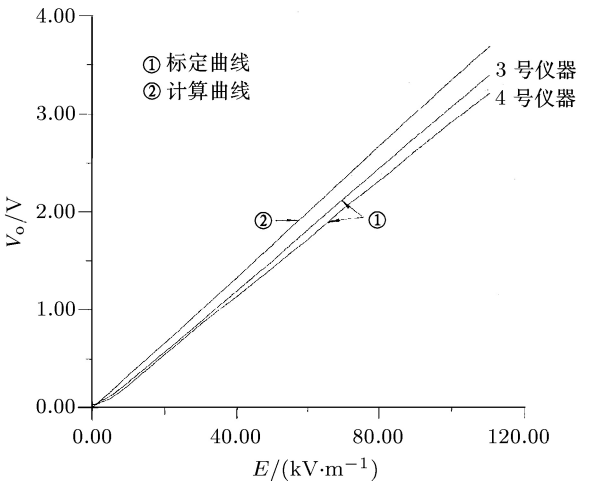


图 4 微火箭电场仪标定曲线①与理论计算曲线②

Fig.4 Real calibration curve ① and theoretical curve ② of the micro-rocket-borne field instrument

3.3 地面旋转式电场仪

地面旋转式电场仪直接安装在地面上进行电场测量，它是旋转式的，由数片扇形构成的传感器在同一平面上，用法兰盘将其固定在标定箱的低电位板的中心位置，并使传感器的平面与标定箱的低电位板处在同一水平面上，因而基本上不会使标定箱内电力线和等位线产生畸变, 它的线性最好, 重复性也很好 (见图 5), 将仪器的实际参数代入式 (4) 可以得到完全一致的曲线 [8], 其是 3 种电场仪中各种特

性最好的仪器. 旋转式地面电场仪的理论计算式[9]为

$$\begin{aligned} V_{o1}(t) &= -IR_f[1-(K+1)\exp(-t/R_fC_f)], \\ &\quad 0<t<T; \\ V_{o2}(t) &= -IR_f\{[2\exp(T/R_fC_f)-(K+1)]\cdot \\ &\quad \exp(-t/R_fC_f)+1\}, \quad T<t<2T. \end{aligned} \tag{4}$$

式中, I 为电场传感器的感应电流, R_f 和 C_f 为电流放大器的反馈电阻和反馈电容, K 为无量纲的常数. T 为仪器的旋转周期.

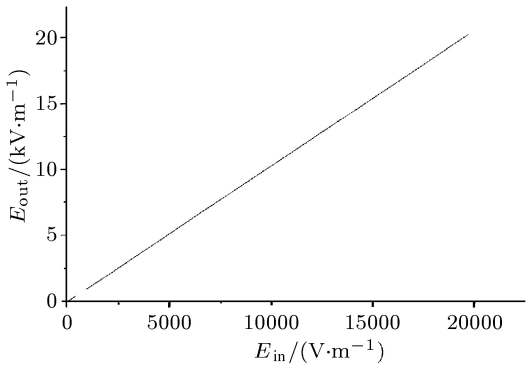


图 5 KDY-VI 型地面旋转式电场仪标定曲线

Fig.5 Calibration curve of the ground mill fieldmeter

4 结束语

电场是空间物理、空间环境和雷暴、冰雹、沙尘暴及地震监测与预警中一个很重要的参量, 电场的探测或监测正被各学科的科技工作者重视, 地震卫星和空间环境卫星有电场探测项目, 子午工程链站也有电场监测项目, 特别是国家气象局基于雷电监测与预警需要, 将建立全国性电场监测网. 在我国目前尚未建立电场的国家标准和军用标准的情况下, 如何保证这些仪器所监测数据的可信性, 我们采用的方法是, 将自制的电场标定系统标定时得出的数据与理论计算值相比较, 通过仪器的实际测量来检验. 如果标定数据与理论计算值相符合, 实际测量的数值又是合理的, 可认为所研制的仪器和设计的标定装置是可信的, 所选用的标定方法是正确的. 实际测量一般在晴天的情况进行, 因为各种自然因素引起电场的相对变化都是基于晴天大气电场的背景, 晴天电场的平均值一般在 130 V/m 左右, 随地区不同有些差异, 根据国内外各地观测结果, 晴天电场的最大值一般不会超过 400 V/m, 如果仪器在晴天测量电场的平均值也在这个范围内, 则数据是合理的. 我们研制的球载双球式电场仪在晴天获得的大气电场随高度分布曲线与国外公布的相类似, 且数值也相近. 有研制的电场仪在晴天测出的电场数值超过了 30 000 V/m, 为正常值的 100 多倍, 显然很不合理. 所以在国家没有统一的标定设备时, 必须通过标定与理论计算比对, 实际测量来验证, 才能确定仪器的可信度. 文献 [3] 介绍的电场标定系统通过对 3 种不同形状、不同结构的电场测量仪器的标定, 均已在实际测量中得到了验证.

参考文献

[1] P Sarma maruvaka *et al.* Development of field-Mill instruments for ground-level and above-ground electric field measurement under HVDC transmission lines. *IEEE Trans. Power Appar. Sys.*, 1983, **102**(3):738~744

[2] Selezneva A N. Instrument for calibrating mean of measuring electric field strength. *Meas. Tech.*, 1983, **26**(10):850~852

[3] Luo Fushan, He Yuhui, Zhang Jian *et al.* Calibration system of electrostatic field. *Lightning Prot. Stand.*, 2004, (2):13~16. in Chinese (罗福山, 何渝晖, 张健, 庄洪春等. 静电场标定系统. 雷电防护与标准, 2004, (2):13~16)

[4] Luo Fushan, Zhuang Hongchun, He Yuhui *et al.* The calibrating apparatus of electric field. *Elec. Meas. Inst.*, 1993, **30**(6):30~34. in Chinese (罗福山, 庄洪春, 何渝晖等. 电场标定装置. 电测与仪表, 1993, **30**(6):30~34)

[5] Zhuang Hongchun, Luo Fushan. Calculation of the calibration of double-sphere electric field instrument. *Lightning Prot. Stand.*, 2002, (1):65~67. in Chinese (庄洪春, 罗福山. 双球电场仪标定的计算. 雷电防护与标准化, 2002, (1):65~67)

[6] Luo Fushan, Zhuang Hongchun, He Yuhui *et al.* 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, 何渝晖等. 球载双球式电场仪及其应用. 地球物理学报, 2000, **42**(6):773~777)

[7] Luo Fushan, Zhuang Hongchun, He Yuhui *et al.* 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, 何渝晖等. 微火箭电场仪及其应用, 地球物理学报, 2000, **43**(5):616~620)

[8] Luo Fushan, He Yuhui *et al.* The new inverted electric field mill. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(6):470~474. in Chinese (罗福山, 何渝晖等. 新型倒装式旋转电场仪. 空间科学学报, 2004, **24**(6):470~474)

[9] Yeboah-Amankwah D, Van der Made P. Sign Discrsiminating Field Mill. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, **38**(7/8):851~861