0254-6124/2022/42(5)-0933-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Lei, SU Jianfeng, CHEN Tao, LI Wen, WANG Shihan, TI Shuo, LUO Jing, SUN Hailong, DONG Wei, WU Wei. Design of a Comprehensive Observation Equipment for Atmospheric Electric Field (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(5): 933–940. DOI:10.11728/cjss2022.05.210824090

大气电场综合观测设备的设计*

李 磊[1,2] 苏建峰[1] 陈 涛[1] 李 文[1]
王诗涵[1,2] 提 烁[1] 罗 静[1] 孙海龙[1]
董 伟[1] 吴 伟[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 大气电场反映了地球近地表大气对气象活动、太阳活动与地质活动的综合响应。实现大气电场与气象参数及地磁活动指数等参数的综合测量，对雷电活动、地质灾害和磁暴活动等的研究具有重要意义。设计开发了一种大气电场综合观测设备，能够同时测量包含温度、相对湿度、风速和大气电场等多个参数，在大气电场探测原理的基础上给出了大气电场综合观测设备的详细设计和电场标定过程。通过对该设备在北京市十三陵台站实测数据的分析，与中国科学院国家空间科学中心 FAMEMS-DF02 电场仪以及中国气象网发布的气象数据进行对比，结果表明各气象参数 99% 的时刻对应误差不超过±10%，平均误差不超过±3%，而电场数据的平均误差为±0.166 kV·m^{-1}。

关键词 大气电场，气象观测，综合观测设备，设计开发

中图分类号 P352

Design of a Comprehensive Observation Equipment for Atmospheric Electric Field

LI Lei[1,2] SU Jianfeng[1] CHEN Tao[1] LI Wen[1] WANG Shihan[1,2] TI Shuo[1]
LUO Jing[1] SUN Hailong[1] DONG Wei[1] WU Wei[1]

1(*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract The atmospheric electric field is an important parameter in space physics, which can re-

* 中国科学院战略性先导科技专项（XDA17010301, XDA17040505, XDA15052500, XDA15350201），国家自然科学基金项目（41874175, 41931073），国家重点实验室专项基金项目和中国科学院国家空间科学中心重点培育方向、空间中心攀登计划主任基金（E0 PD41 A11 S），国家重大科技基础设施子午工程项目和云南省基础研究青年项目（2019 FD111）共同资助

2021-08-23 收到原稿，2022-06-01 收到修定稿

E-mail：lilei@swl.ac.cn. 通信作者 苏建峰，E-mail：sujf@nssc.ac.cn；陈涛，E-mail：tchen@nssc.cn

flect the integrated response of the near-surface atmosphere to meteorological activity, solar activity and geological activity. In this paper, a self-designed and developed integrated atmospheric electric field observation equipment is introduced, which integrates meteorological observation and atmospheric electric field, and can simultaneously measure multiple parameters including temperature, relative humidity, wind speed and atmospheric electric field. The observation results can be used for scientific research on lightning activities, geological hazards, and magnetic storm activities. In this paper, the detection principle, data reception, storage and transmission, and electric field calibration of the integrated atmospheric electric field observation equipment were described, the measured data of the equipment at the Beijing Xialing station has been analyzed , then it was compared with the FAMEMS-DF02 electric field instrument acquired by the National Space Science Center and the meteorological data released by the China Meteorological Network. The results show that the error corresponding to 99% of the moments for each meteorological parameter does not exceed ±10%, and the average error does not exceed ±3%, while the average error of the electric field data is ±0.166 kV·m^{-1}. Finally, error analysis and discussion are conducted for the comparison results.

Key words Atmospheric electric field, Meteorological observation, Comprehensive observation equipment, Design and development

0 引言

探测近地表大气中的空间电荷分布有助于揭示空间物理及大气物理等多个学科领域诸多科学现象的物理本质,而大气电场是反映近地表大气环境中电荷分布的重要大气电学参量。大气电场的时空特性会随着地质条件、环境条件、经纬度改变而改变,在不同大气环境和天气条件下,大气电场对应不同的信号变化特征[1–6]。实时探测大气电场的时空变化特性,不仅能够用于大气电学相关领域的科学研究,而且能够用于提前预警雷暴活动[7–9],对运载火箭发射以及人类活动安全等提供保障。

近年来设计研制了多种大气静电场的探测设备,开展了大气电场的测量实验[10–15]。Luo 等[16] 采用场磨式结构,开发了一种倒装式旋转电场仪,该电场仪适用性好、可长时间持续性运行。Li 等[17] 设计了一种基于现场可编程逻辑门阵列数字大气电场仪器,在降低了设备功耗的同时,提高了测量精度。为了实现对大气电场的多维度探测,Lin 等[18] 首次提出三维定向分解算法,并结合 GPS 及三维电场传感器,设计了一种空中三维大气电场定向测量系统,能够实时定向定位测量空中三维大气电场的大小和方向。此外,Adzhiev 等[19] 提出了一种适用于高空测量,能够在–40～55℃ 工作的大气电场仪,其测量范围为±30 kV·m^{-1}。

目前大气电场仪的几种常见类型主要有地面旋转式电场仪、微火箭电场仪、滚筒式电场仪和球载双球电场仪。这些大气电场仪均只能对单一大气电场这一物理参数进行测量。在实际大气电场研究中,常需将大气电场与其他参数进行对比研究,如果不设计为综合观测设备,很难控制环境变量。除此之外,有研究发现震前数小时到一天左右大气电场会出现持续负异常现象[20–24],这对于防震减灾无疑是一重大发现。对于大震,震前气象活动出现明显异常,可以排除气象活动对大气电场信号的干扰[25],但对于中小地震,空间天气和气象活动的干扰难以排除。因此,需将大气电场与气象参数相结合,设计一种大气电场综合观测设备,可以同时测量大气电场和一些气象活动,用于气象活动与大气电场的关联性及排除性研究。本文给出了一种自主设计开发的集气象观测与大气电场于一体的综合观测设备,重点就该综合性观测设备的系统设计、探测原理、数据接收和传输、电场标定等进行分析。使用该设备开展观测实验并与其他设备数据性能进行对比,分析了相关的测量误差。

1 大气电场综合观测设备

大气电场综合观测设备实现对温度、相对湿度、风速和大气电场在垂直方向上的分量等多个参数进

行观测, 在观测大气电场时空特性的同时也可以对比气象参数。基于大气电场与气象参数的综合观测, 需要从整体上综合考虑各个传感器的固定位置、供电、数据综合处理与传输、电路保护等多个问题。

图 1 给出了自主设计开发的大气电场综合观测设备系统结构, 由上到下依次为: 风速计、温湿度传感器、大气电场探头、太阳能电池板、数传天线、GPS 天线、电子学箱、支撑杆及底座。风速计用于实时采集风速大小, 温湿度传感器采集温度和湿度数据, 大气电场探头可以实时采集垂直方向上的大气电场强度, 太阳能电池板用于给综合观测设备供电, 数传天线和 GPS 天线分别对应数据发送和获取设备所在的经纬度信息, 电子学箱、支撑杆和底座起外部防护与支撑作用。电子学箱内包括开关、蓄电池、核心电路板、电路保护模块、4GDTU 通信模块和存储卡。开关可以控制综合观测设备的通电与断电; 蓄电池用于储存电能, 确保设备在阴雨天条件下能够连续工作 7 天以上; 核心电路板用于处理及整理数据; 电路保护模块用于在极端情况下保护电路; 4GDTU 通信模块对应的功能为对处理好的数据进行实时传输, 而存储卡用于数据本地备份, 即使特殊情况下传输中断仍然本地存有备份数据。

综合观测设备正常运转时, 太阳能板将太阳能实时转化为电能, 并将电能储存在蓄电池中, 由蓄电池给电路提供恒压 12 V 直流电源, 大气电场探头中的内部转子开始以 3000 $r{\cdot}s^{-1}$ 的速度快速旋转, 风速计和温湿度传感器也开始工作, 每秒钟采集一次数据, 包括温度、相对湿度、风速等多个气象参数和大气电场数值, 将以上参数送入电子学箱进行数据处理和整理, GPS 天线实时传输设备所在的经纬度信息, 最后由通信模块和数传天线将整理好的数据上传至服务器, 可以在云端获取实时数据并实时绘图。目前由于通信流量的限制, 只能每 5 min 接收一组数据。

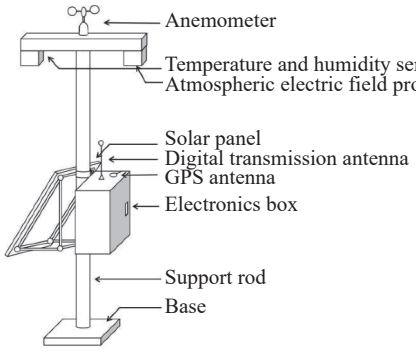


图 1　大气电场综合观测设备

Fig. 1　Comprehensive observation equipment for atmospheric electric field

2　探测原理与数据传输

对于该综合观测设备, 其中的大气电场探头采用场磨式结构。如图 2 所示, 该探头包含直流电机、电机控制电路、前置放大器、接地电刷、绝缘连接杆、定子和转子。直流电机作用是带动转杆转动; 电机控制电路可以控制直流电机、前置放大器用于放大直流电流; 接地电刷是确保在旋转部件与静止部件之间可以传导电流; 绝缘连接杆是为了确保定子不接地而转子是通过中间金属杆接地; 定子是用于产生感应电荷, 而转子是通过叶片旋转, 使定子外暴露面积周期性变化, 以产生交变电流。定子和转子为两组形状相似的扇形金属导电片, 定子被固定在支撑板上作为感应片(产生感应电荷), 转子由转机和转杆带动匀速旋转作为屏蔽片, 转子与转动金属杆连在一起接地, 定子通过绝缘连接杆与支撑板相连。

探头正常工作时, 电机带动转子匀速转动, 定子的每个扇叶叶片会周期性地交替被暴露在环境电场中, 使得定子中的每个扇叶叶片产生感应电荷, 进而产生交变的感应电流信号。由于大气静电场是一个直流分量, 在感应片上感应出来的是很微弱的电流, 需要经过信号放大后才可以进行大气电场测量, 因此前置放大器会将感应产生的微弱电流信号进行放大, 然后经过电流–电压转换、放大、滤波、信号同步和整流等环节, 输出电压信号, 最终通过数据处理运算, 得到所需的大气电场数据。

图 3 给出的是大气电场综合观测设备功能模

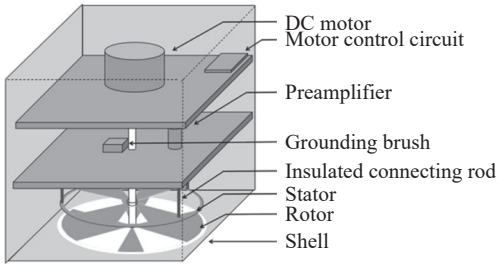


图 2　场磨式电场探头构造

Fig. 2　Field mill type electric field detector structure

块。大气电场综合观测设备包含电场传感器、温度传感器、湿度传感器、风速传感器、GPS、CPU、4GDTU 数传和数据存储等模块。CPU 主要用于处理、整理和输出数据，4GDTU 数传主要功能是数据发送。电场、温度、湿度和风速传感器，以及 GPS 模块分别将每秒采集到的数据实时发送到 CPU，由 CPU 进行数据收集整理并分别输出到数据存储模块和 4GDTU 模块。4GDTU 数传模块将 CPU 输出来的数据每秒一组上传到服务器上。数据存储模块是将数据实时写入存储卡里，每天自动生成一个文件，存满一个月后，自动打开原有的第一个文件进行覆盖写入。因此综合观测设备中的存储卡中会一直循环保留最近一个月的数据，在特殊极端情况造成断电或者通信故障的情况下仍然可以利用钥匙打开综合观测设备的电子学箱，从本地存储卡里拷贝数据，解决了因特殊极端情况导致的数据中断和丢失。

3 电场数据标定

为了确保综合设备中大气电场探头的有效性和可靠性，2021 年 7 月 12 日在中国科学院国家空间科学中心对该综合观测设备的电场探头进行了数据标定。电场数据标定系统如图 4 所示。标定系统主要包括电场屏蔽罩、直流可调电源、计算机和 RS485 通信模块。电场屏蔽罩的内部包含上下两个电极，用于产生恒稳的直流电场，直流可调电源用以产生周期性变化的直流电压，计算机实时接收数据并绘图，RS485 通信模块用于电场数据传输。

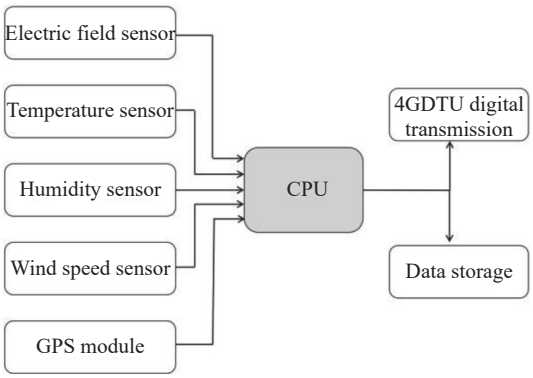


图 3 大气电场综合观测设备功能模块

Fig. 3 Functional modules of the comprehensive observation equipment for atmospheric electric field

将电场屏蔽罩的上下两个电极分别接直流电源的正负极以产生电场，电场探头通电，RS485 通信模块分别与电场探头与计算机连接，检查计算机是否可以接收数据。调节加在两个电极的电源电压参数，让其电源输出的是±100 V 的锯齿波直流电压，周期设为 3000 s。利用标尺测得电场屏蔽罩中两个电极之间的距离 $d = 19.23$ cm，计算得到理想情况产生的电场极值为 $E_{\max} = \pm U_{\max}/d = \pm 0.52\ \mathrm{kV{\cdot}m^{-1}}$。将电场探头测量值与理论值进行比较，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，实验测得的电场曲线与理论曲线相差 0～0.1 $\mathrm{kV{\cdot}m^{-1}}$，测量数据拟合得到的斜率与理论数据斜率的比值为 96.9%，实验得到的大气电场强度值与理论值相比较斜率相近但整体上比理论值低 0～0.1 $\mathrm{kV{\cdot}m^{-1}}$。造成这一误差的主要原因可能是实验室大气环境的实验误差所导致。虽然标定实验过程已经采取了一些屏蔽措施，例如利用屏蔽罩将整个系统罩住，但实验室环境中的真实电场值与计算得到的理论值可能存在残留误差。此外，电场探头的量程是±50 $\mathrm{kV{\cdot}m^{-1}}$，标定实验所造成的实验误差占总量程的 0.1%，未超过仪器自身的测量精度误差范围。

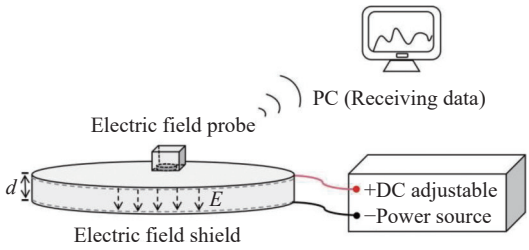


图 4 电场标定系统

Fig. 4 Electric field calibration system

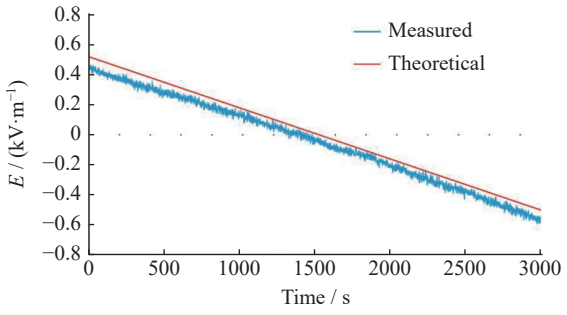


图 5 综合设备中电场探头的标定曲线

Fig. 5 Calibration curve of the electric field detector in the integrated device

4　数据分析对比

大气电场综合观测设备接收到的数据格式如表 1 所示。信号强度以 dB 为单位，大气电场是指垂直方向上的大气电场强度，以垂直指向地面为正，温度、湿度和风速是传感器所在高度处的气象参数值，日期和时刻均表示当地时间(UTC+8)。观测时间分辨率为 1 s，目前由于通信流量的限制，只能实现 5 min 接收一组数据。

为验证仪器的实用性与可靠性，在北京市昌平区十三陵观测站(116.24°E, 40.26°N)安装了一台大气电场综合观测设备，进行长期观测。利用 2021 年 8 月 14－18 日观测得到的温度、湿度、风速与大气电场如图 6 所示。图 6(a)为温度变化情况，5 天的温度变化趋势相近，均为单峰、单谷模式，中午左右温度最高，早上和晚上温度较低。8 月 17 日和 8 月 18 日的温度最高，5 天中最高温度为 35℃，最低为 18℃。图 6(b)为相对湿度变化情况，5 天的相对湿度变化趋势相近，也均为单峰、单谷的模式，但与温度曲线的变化趋势相反，温度较高时对应的相对湿度较低。8 月 17 日和 8 月 18 日的相对湿度最低，最低值为 30%，而最大值对应 100%。图 6(c)为风速变化曲线，5 天的风速都很小，最大值为 4 $m\cdot s^{-1}$，最小值为 0 $m\cdot s^{-1}$，5 天的风速变化趋势相对平稳。

图 6(d)为大气电场综合观测设备测得的大气电场。由图 6(d)可以明显看出，8 月 14－16 日出现多次大气电场的大幅度正负波动，这是典型的雷电信号特征[26–27]，表明带电雷雨云对大气电场信号进行了调制，同时雷电活动发生的时间点对应于当天相对湿度的最大值。除了上述时间段，其余大部分时间段内大气电场强度在 0 $kV\cdot m^{-1}$ 附近波动。

为验证气象观测结果的可靠性，利用由中国气象数据网*得到的 2021 年 8 月 14－18 日昌平十三陵观测站的逐小时气象数据，分别将对应的温度、相对湿度、风速与综合观测设备测量结果相比较，得到的曲线如图 7 所示。图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)分别对应温度、相对湿度与风速的对比曲线，黄色曲线为实测结果，绿色曲线对应由气象数据网得到的参考数据。

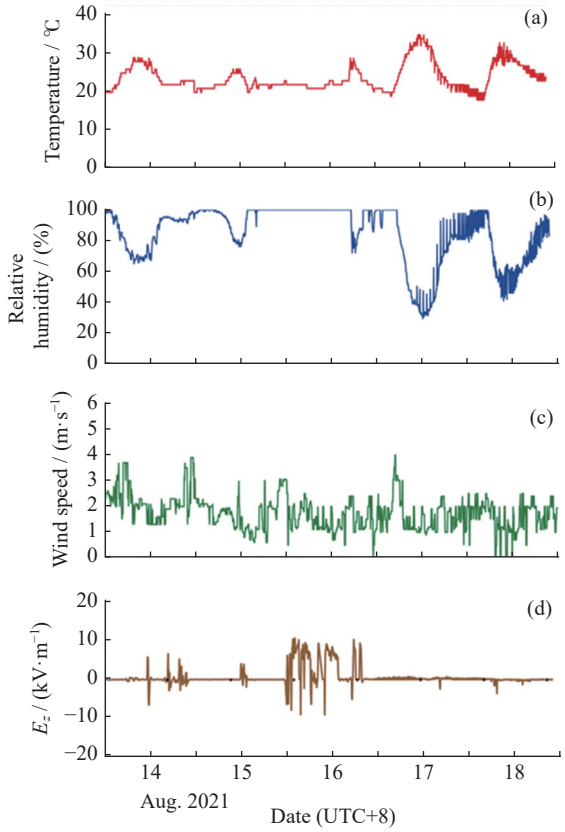


图 6　2021 年 8 月 14－18 日大气电场综合观测设备在昌平区十三陵台站的观测曲线

Fig. 6　Observation curve of the atmospheric electric field comprehensive observation equipment at Shisanling Station in Changping District from 14 to 18 in August 2021

表 1　综合探测仪接收到的数据格式

Table 1　Format of the data received by the integrated instrument

设备编号		设备型号		通信序列号	物联网卡序列号		信号强度	版本号
BA900000000		常规款		868704045216833	460042382907574		20	Ver1.0
通信用时/s	采集状态	温度/℃	湿度/(%)	电场/($kV\cdot m^{-1}$)	风速/($m\cdot s^{-1}$)	风级	日期	时刻(LT)
1	正常	20	99	0.05	0	0	2021-08-14	00:00:01

*http://data.cma.cn/

由图 7 可以看出，实测参数值比气象数据网对应的参考值变化频率高，且存在一定的差异。变化频率不同的原因主要是综合观测设备接收到的气象数据为 5 min 一组，但气象数据网发布的气象数据为 60 min 一组，这使得综合观测设备观测结果更易表现为高频率波动。经过实测数据与气象数据网发布的气象数据对比，温度的差异不超过±12.84%，平均误差为±1.43%，超过 99% 的时刻在±10% 以内；对相对湿度而言，其差异不超过±10.75%，平均误差为±2.88%，超过 99% 的时刻也在±10% 以内；风速差异明显小于温湿度的对比结果，其差异不超过±5.38%。对于温度、湿度和风速这三个气象参数综合比较，两者之间 99% 的时刻对应误差不超过 10%，平均误差为±0.5%。各气象参数总的平均误差不超过±3%。两者观测参数曲线对比后的差异原因主要是由于气象站与观测设备的位置相距 3.6 km，气象观测环境存在差异。

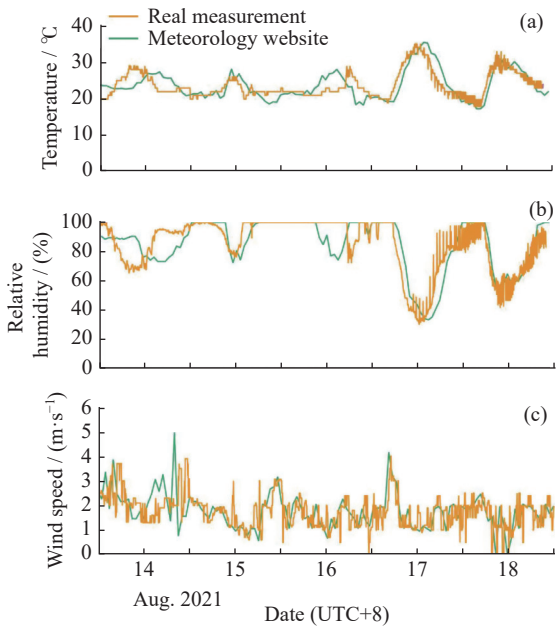


图 7 2021 年 8 月 14—18 日昌平区十三陵台站的大气电场综合观测设备与中国气象数据网的观测对比曲线

Fig. 7 Comparison curves of observations from 14 to 18 August 2021 at the Shisanling Station in Changping District for the integrated atmospheric electric field observation equipment and the Chinese meteorological data network

对于综合观测设备，除了气象观测数据，大气电场数据更加重要。为验证大气电场综合观测设备中大气电场数据的可靠性与科学性，在十三陵观测站综合观测设备的旁边相距 10 m 的地方也放置了一台 FAMEMS-DF02 大气电场仪，该型号大气电场仪基于感应电荷的探测原理，采用磨式结构，可以单独或局地组网使用，主要用于该处、或该地区各处遭雷击危险性大小的监测和预警。FAMEMS-DF02 大气电场仪主要技术参数如下：测量的大气电场量程为 ±50 kV·m^{-1}，测量准确度<5%，响应时间<1 s，线性度<1%，分辨力为 10 V·m^{-1}，可以采用市电（175～275 V）、UPS 或太阳能电源三种供电方式。为了方便比较，将两者 2021 年 8 月 14—18 日的数据进行比较验证，5 天中 2 台设备的实验观测对比结果如图 8 所示。

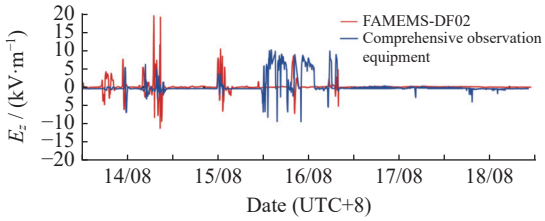


图 8 大气电场综合观测设备与 FAMEMS-DF02 电场仪观测数据对比

Fig. 8 Comparison curve between the atmospheric electric field comprehensive observation equipment and FAMEMS-DF02 electric field meter

由图 8 对比可知，8 月 14—18 日期间除 8 月 16 日的明显差异外，两台设备的大气电场观测曲线波动趋势一致。FAMEMS-DF02 大气电场仪波动幅度比大气电场综合观测设备更大，造成这一差异的主要原因可能是由于 FAMEMS-DF02 大气电场仪接收到的数据是 1 s 一组，而大气电场综合观测设备接收到的则为 5 min 一组，两者均能体现出雷暴云信号特征且两条曲线对应的雷暴云时刻能够重合。8 月 16 日两者的观测曲线具有较为明显的差异，与其他时间段相反，综合观测设备比 FAMEMS-DF02 大气电场仪波动更明显，持续时间更久，对比 FAMEMS-DF02 大气电场仪在综合观测设备波动出现所对应时间段所观测到的大气电场值，之间的平均绝对误差为 ±0.166 kV·m^{-1}，占总量程±50 kV·m^{-1} 的 0.33%，其中 95.1% 的时刻两者之间的绝对误差不超过 ±0.5 kV·m，84.1% 对应的时段绝对误差不超过

±0.1 kV·m^{-1}。造成差异的原因可能是由于两台设备虽然放置在同一屋顶,但两者之间有约 10 m 的距离,这可能使两台仪器对雷电云的感知结果不同;两台设备之间存在系统误差,这是造成大气电场结果出现明显差异的主要原因。

通过分析 2021 年 8 月 14－18 日在昌平区十三陵台站观测到的 5 天气象数据与电场数据,并将其分别与中国气象网站发布的逐小时气象数据和 FAMEMS-DF02 大气电场仪的电场数据进行对比,验证了大气电场综合观测设备的可靠性,该综合性观测设备对于研究大气电场具有一定实用价值。

大气电场的测量存在一些不可避免的误差,首先是在标定系统中实验室室内环境对标定实验结果的误差,这个误差占总量程的比值不超过 1%。电场仪所在的实验场地周围环境,例如草、树木、尖端物体和遮挡物等,都会对大气电场的测量结果产生影响,这是主要的误差来源。另外,由于磨式大气电场仪定子产生的感应电荷进而所产生的交变电流非常微弱,容易受到外界干扰产生误差。电路设计也可能引入一定的测量误差。

5　讨论与结论

根据大气电场综合观测设备的原理与设计、数据传输存储和大气电场综合观测设备的电场标定原理,分析了 2021 年 8 月 14－18 日的气象参数和大气电场观测结果。通过分别与中国气象数据网的气象数据以及 FAMEMS-DF02 大气电场仪的同时间观测数据进行比较分析,气象参数之间在 99% 的时刻对应误差不超过±10%。其中温度的平均误差为±1.43%,相对湿度的平均误差为±2.88%,风速的平均误差为±0.5%。各气象参数总的平均误差不超过±3%,造成差异的原因主要是由于气象站与观测设备的位置相距 3.6 km,气象观测环境存在差异。两者电场观测结果也存在一定差异,在同一时刻,其间的平均绝对误差为±0.166 kV·m^{-1},其中 95.1% 的时刻两者之间的误差不超过±0.5 kV·m^{-1}。通过观测研究分析,造成这一差异的主要原因为:使用的电场仪与综合观测设备接收数据的频率分别为每 1 s 一组数据和每 5 min 一组数据;两者之间的距离约为 10 m,这使得两者对雷电的感知结果不同;两台设备存在的系统误差。

大气电场综合观测设备是集气象参数和大气电场观测于一体的综合性观测设备,可以同时获得大气电场强度和气象参数,有利于进行气象活动与大气电场的关联性及排除性研究,为大气电学相关研究提供便利,可以用于研究空间天气活动、地质灾害活动以及气象活动对大气电场信号的调制作用。未来在该综合观测设备的基础上,可以进一步设计增加正负离子浓度仪、气体浓度观测和全天空相机等观测设备,结合地方地震观测台的氡气浓度等观测数据,为研究地震等地质灾害活动提供参考依据。

致谢　中国科学院地震预测研究所张学民、熊攀、杜晓辉提供了实验支持,北京市昌平区十三陵观测站提供了实验场地,中国气象数据网提供气象数据。

参考文献

[1] HUANG Yu, WU Ankun, ZHANG Shuxia. Influence of environmental features on the atmospheric electric field and correction[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, **41**(1): 35-38 (黄钰, 吴安坤, 张淑霞. 场地环境对大气电场测量的影响及修正[J]. 电子测量技术, 2018, **41**(1): 35-38)

[2] GURMANI S F, AHMAD N, TACZA J, *et al*. First seasonal and annual variations of atmospheric electric field at a subtropical station in Islamabad, Pakistan[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **179**: 441-449

[3] ZHOU Yunjun, CHEN Chengpin, LIU Liping, *et al*. The characteristics of electric field of hailstorm weather in Nagqu area of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2000, **19**(3): 339-347 (周筠珺, 陈成品, 刘黎平, 等. 青藏高原那曲地区冰雹天气系统中的大气电场[J]. 高原气象, 2000, **19**(3): 339-347)

[4] ZHANG Yijun, GE Zhengmo, CHEN Chengpin, *et al*. Electrical characteristics of atmosphere in east area of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 1998, **17**(2): 135-141 (张义军, 葛正谟, 陈成品, 等. 青藏高原东部地区的大气电特征[J]. 高原气象, 1998, **17**(2): 135-141)

[5] YAN Muhong, XIAO Qingfu, SHEN Qiaonan. Characteristics of atmospheric electric field at the west pacific region in Sep.-Nov., 1988[J]. *Plateau Meteorology*, 1990, **9**(4): 395-404 (言穆弘, 肖庆复, 申巧南. 1988年9—11月西太平洋海区大气电场特征分析[J]. 高原气象, 1990, **9**(4): 395-404)

[6] LU Bingyuan. The Research on the Application of the Data of Atmospheric Electric Field in Lightning Warning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012 (卢炳源. 大气电场数据在雷电预警中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012)

[7] ZHANG Huaming, ZHANG Yijun, YANG Shigang, *et al.* Characteristics of atmospheric electric field in Taiyuan and its relationship with atmospheric pollutants[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **36**(9): 66-69 (张华明, 张义军, 杨世刚, 等. 太原地区大气电场及其与大气污染物关系[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(9): 66-69)

[8] MA Qiming. Principle and Technology of Lightning Monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2015: 3-5 (马启明. 雷电监测原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 3-5)

[9] WU Mingjiang, DU Liping, CHEN Yongbin, *et al.* Study on the characteristics of atmospheric electric field and lightning warning[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2010, **27**(1): 10-14 (吴明江, 杜莉萍, 陈勇斌, 等. 大气电场的特征及雷电预警技术研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2010, **27**(1): 10-14)

[10] WU Han, CHEN Tao, LI Renkang, *et al.* Characteristics of the near-surface atmospheric electric field over the top of a flat mountain in Xilin Hot Volcano Geopark[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(3): 357-363 (吴晗, 陈涛, 李仁康, 等. 锡林浩特市火山地质公园平台山顶近地面大气电场变化特征[J]. 空间科学学报, 2020, **40**(3): 357-363)

[11] IAROSSI S, POSCOLIERI M, RAFANELLI C, *et al.* The measure of atmospheric electric field[M]//NERI G, DONATO N, D'AMICO A, *et al.* Sensors and Microsystems. Dordrecht: Springer, 2011: 175-179.

[12] BENNETT A J, HARRISON R G. Variability in surface atmospheric electric field measurements[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2008, **142**(1): 012046

[13] TACZA J, RAULIN J P, MARUN A, *et al.* Variability of ground-based high altitude atmospheric electric field measurements[C]//Proceedings of the XVI International Conference on Atmospheric Electricity. Nara, 2018

[14] SIDIK M A B, SHAHROOM H, BUNTAT Z, *et al.* Wireless online atmospheric electric field measurement system based on rotating-vane electric field mill[J]. *Proceeding of the Electrical Engineering, Computer Science and Informatics*, Yogyakarta, Indonesia, 20-21 August 2014, **1**

[15] ZHOU H L, DIENDORFER G, THOTTAPPILLIL R, *et al.* Fair-weather atmospheric electric field measurements at the Gaisberg mountain in Austria[C]//Piers Marrakesh Progress in Electromagnetics Research Symposium. Marrakesh, Morocco, Mar. 20–23, 2011: 1303-1307

[16] LUO Fushan, HE Yuhui, ZHANG Jian, *et al.* The new inverted electric field mill[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, **24**(6): 470-474 (罗福山, 何渝晖, 张健, 等. 新型倒装式旋转电场仪[J]. 空间科学学报, 2004, **24**(6): 470-474)

[17] LI Zhongfu. Design of digital atmospheric electric field instrument based on FPGA[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2018(22): 136-137 (李中富. 基于FPGA数字式大气电场仪的设计[J]. 科技与创新, 2018(22): 136-137)

[18] LIN Chu, CHEN Xiaoning, ZHANG Haitao, *et al.* Design of the air three-dimensional atmospheric electric field directional detection system[J/OL]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021: 1-5(2017-11-23). http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1430.N.20171123.1546.002.html (林楚, 陈晓宁, 张海涛, 等. 空中三维大气电场定向测量系统设计[J/OL]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2021: 1-5(2017-11-23). http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1430.N.20171123.1546.002.html)

[19] ADZHIEV A H, KOROVIN E A, CHERNYSHEV S V, *et al.* An atmospheric electric field meter[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, **60**(5): 733-736

[20] CHOUDHURY A, GUHA A, DE B K, *et al.* A statistical study on precursory effects of earthquakes observed through the atmospheric vertical electric field in northeast India[J]. *Annals of Geophysics*, 2013, **56**(3): R0331

[21] SMIRNOV S. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, **8**(4): 745-749

[22] HAO Janguo, ZHANG Yunfu. Earthquake Static Electricity for the Prediction[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2001 (郝建国, 张云福. 地震静电预测学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001)

[23] CHEN Tao, ZHANG Xiaoxin, ZHANG Xuemin, *et al.* Imminent estimation of earthquake hazard by regional network monitoring the near surface vertical atmospheric electrostatic field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(4): 1145-1154 (陈涛, 张效信, 张学民, 等. 利用区域大气静电场监测网临震预估地震灾害[J]. 地球物理学报, 2021, **64**(4): 1145-1154)

[24] JIN X B, ZHANG L, BU J W, *et al.* Discussion on anomaly of atmospheric electrostatic field in Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. *Journal of Electrostatics*, 2020, **104**: 103423

[25] CHEN T, LI L, ZHANG X X, *et al.* Near-epicenter weather conditions several hours before strong earthquakes (Ms $\geqslant$ 6)[J]. *Natural Hazards*, 2022, **110**(1): 57-68

[26] TROSHICHEV O A, FRANK-KAMENetSKY A, BURNS G, *et al.* The relationship between variations of the atmospheric electric field in the southern polar region and thunderstorm activity[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **34**(8): 1801-1805

[27] LIU C T, WILLIAMS E R, ZIPSER E J, *et al.* Diurnal variations of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electrical circuit[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, **67**(2): 309-323