

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314064

一种场磨式三维大气电场传感器^{*}

姜华生 行鸿彦 王水璋 施成龙 李浩琪

(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 针对市面上电场传感器只能探测一维电场垂直分量且电场测量结果存在一定的误差,为了更加精确地测量大气电场强度,提高雷暴云预警的准确率,提出一种场磨式三维大气电场传感器,传感器主要结构由屏蔽罩、感应电极、光电开关、叶片和电机组成,电路设计主要包括 I-V 转换电路、差分放大电路、峰值检测电路和滤波电路等,进行传感器实地电场测量实验并整理实验数据;实验结果表明,该传感器能够对环境电场进行水平和垂直分量测量,有效反映了环境电场特征,验证了场磨式三维大气电场传感器结构设计和电路设计的有效性。

关键词: 电场强度;雷暴云;场磨式;电场传感器

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

A field grinding three-dimensional atmospheric electric field sensor

Lou Huasheng Xing Hongyan Wang Shuizhang Shi Chenglong Li Haoqi

(School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In view of the fact that the electric field sensor in the market can only detect the vertical component of one-dimensional electric field, and there are some errors in the electric field measurement results, in order to measure the intensity of atmospheric electric field more accurately and improve the accuracy of thunderstorm cloud early warning, this paper proposes a field-grinding three-dimensional atmospheric electric field sensor. The main structure of the sensor is composed of a shield, an induction electrode, a photoelectric switch, a blade and a motor. The circuit design mainly includes an I-V conversion circuit, a differential amplifier circuit, a peak detection circuit and a filter circuit, etc., and the field electric field measurement experiment of the sensor is carried out and the experimental data are sorted. The experimental results show that the sensor can measure the horizontal and vertical components of the environmental electric field, which effectively reflects the characteristics of the environmental electric field, and verifies the effectiveness of the structural design and circuit design of the field grinding three-dimensional atmospheric electric field sensor.

Keywords: electric field intensity; thunderstorm clouds; field grinding type; electric field sensor

0 引言

大气电场的测量在雷电探测与预警中起着至关重要的作用,通过电场传感器测量出的电场数据能够反应出雷暴云不同发展阶段的电荷积累过程^[1-2]。电场传感器对大气电场的测量,通过测量地表的电场强度,并进行有效的数据整合和分析,能够反演雷暴云的电荷累计过程,从而对雷暴和降雨的产生实现及时预警。市面上的电场传感器大多分为光学式和电荷感应式。对于低频电场或静电场的电场环境,常使用电荷感应式电场传感器,该传感器不仅稳定性高,还可用于低温、潮湿等恶劣环境^[3-4]。

电荷感应式电场传感器的基本原理是金属导体在静电

场中会产生感应电荷。对大气静电场测量的研究起源于美国的 Hamwen 等,后经许多人如 Miyake 的改进,使大气电场测量仪器能测量电场大小,同时能够辨别其正负^[5]。1950年, Malan 等^[6]根据电荷感应原理提出旋转场磨式电场仪结构。2015年,张自嘉等^[7]分析不同方向和不同地形对电场的影响,通过 ARM 控制模数转换芯片和 FIFO 的读取并采用 QT 和 SQLite 搭建上位机,建立了一种同步数据采集传输平台。2016年 Yang 等^[8]采用 SOIMUMPS 工艺设计了一种低功耗、高灵敏度的 MEMS 传感器芯片,并进行传感器系统方案的设计,解决了传统传感器功耗高、误差大等问题。2017年 Zhou 等^[9]基于传统大气电场结构复

收稿日期:2023-07-09

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2021YFE0105500)、国家自然科学基金(62171228)项目资助

杂,不易移动等缺点,设计了一种微型化电场测量系统,虽简化了电场系统电路,但测量精度大大减少。2017年,周继威等^[10]采用电容和步进电机搭建传感器感知系统,并将数据传输至单片机和上位机中,虽实现了电场仪微型化设计,但忽视了电场方向,导致电场测量精度无法保证。2020年,张钰雯等^[11]针对场磨式户外电场测量存在电磁干扰大,功耗高且供电困难等问题,提出了一种微型低速的电场传感器,并搭配光伏发电和蓄电池,设计了一种功耗低,稳定性高的微型化大气电场监测装置,但装置仅仅只能测量电场的垂直分量,忽略了电场水平分量的存在。

由于大气电场不仅有垂直分量,还存在着水平分量,且大气电场易受环境、仪器本身等各种因素的影响,目前市面上的电场传感器仅能检测一维电场分量,忽略了水平分量的测量^[12]。针对大气电场中同时存在垂直分量和水平分量,本文提出一种场磨式三维大气电场传感器,传感器结构主要由屏蔽罩、感应电极、光电开关、叶片和电机组成,电路设计主要包括 I-V 转换电路、差分放大电路、峰值检测电路和滤波电路等,再利用电场传感器进行实地电场测量实验,最后分析和整理实验数据,验证传感器是否能够有效反映电场特征,提高雷电探测的准确率。

1 传感器工作原理和基本结构

1.1 传感器的工作原理

场磨式电场传感器自 1950 年提出,根据应用场景分为静电场测量和交变电场测量,其工作原理是金属导体置于空间电场中,金属导体表面便会产生感应电荷。当空间电场发生变化时,导体表面的感应电荷也会随之发生相应的变化。若将导体连接着测量电路,就会形成感应电流,感应电流的大小则表现电场强度的强弱。由于大气静电场具有不变或缓变的特征,只有通过改变静电场中导体的感应面积,才能测量静电场的电场强度。因此,可以对导体进行周期性屏蔽,使导体产生的感应电流也随之发生变化,然后测量感应电流的数值大小,来反推静电场的强度^[13]。

由于低频电场或静电场的能量十分微弱,所以利用传感器间接测量获得与电场成线性关系的电流或电压信号。场磨式原理图如图 1 所示,该传感器由一个金属感应片和一个屏蔽片组成,当屏蔽片匀速旋转时,感应片则被周期性屏蔽和暴露,感应片的表面就会感应电荷,若利用感应片与电阻相连接地,便产生交变电流流经电阻,通过测量电流或电压值便可计算出电场值。

在转子转动一周里,周期为 T ,感应片暴露在电场下的面积与时间 t 的关系如下:

$$S(t) = \begin{cases} 2S_{\max} \frac{t}{T}, & t \in [0, \frac{T}{2}] \\ 2S_{\max} (1 - \frac{t}{T}), & t \in [\frac{T}{2}, T] \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_{\max} 为感应片的总面积的一半,其在周期时间内感应

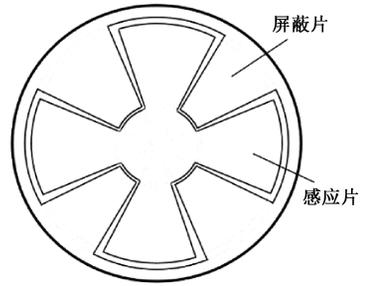


图 1 场磨式原理图

面积的变化图如图 2 所示。

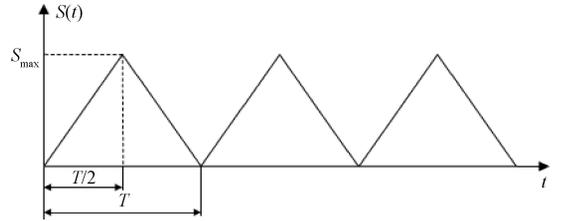


图 2 感应面积的周期变化图

空气的介电常数为真空介电常数 ϵ_0 , 电场为 E , 感应电荷 $Q(t)$ 可以表示为:

$$Q(t) = \epsilon_0 ES(t) =$$

$$\begin{cases} 2\epsilon_0 ES_{\max} \frac{t}{T}, & t \in [0, \frac{T}{2}] \\ 2\epsilon_0 ES_{\max} (1 - \frac{t}{T}), & t \in [\frac{T}{2}, T] \end{cases} \quad (2)$$

因此,感应电荷经过微分得出感应电流 $i(t)$:

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{2\epsilon_0 ES_{\max}}{T}, & t \in [0, \frac{T}{2}] \\ -\frac{2\epsilon_0 ES_{\max}}{T}, & t \in [\frac{T}{2}, T] \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可得,感应片产生得感应电流与面积和被测电场成正比,与感应周期成反比,感应周期则与感应片的结构和电机转速有关,可以表示为:

$$T = \frac{1}{kf_m} = \frac{60}{kn_0} \quad (4)$$

式中: n_0 为电机转速,单位为 r/min; k 为感应片对数。

同时,在相邻的两个 $T/2$ 内,感应片所产生的感应电流具有幅值相等,方向相反的特性,其感应电流的周期变化如图 3 所示。

1.2 传感器的基本结构

为了测量大气电场强度并计算电场方向,在传统一维大气电场仪的基础上,设计一种新型三维大气电场传感器,其结构图如图 4 所示。传感器主要由屏蔽罩、感应电极、光电开关、叶片和电机组成,感应电极包括水平电极 X 、水平电极 Y 和垂直电极 Z ,感应电极之间相互垂直;其中,水平电极 X 和水平电极 Y 是由两块大小形状相同的矩形金属片构成,均匀分布在圆柱体的内侧;垂直电极 Z 由 8 块相

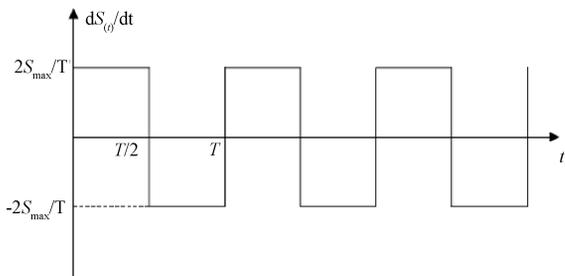


图 3 感应电流的周期变化图

同的扇形金属片组成,分为上下层两部分;当电机驱动时,叶片与屏蔽罩的旋转同步,使光电开关产生同频率、同相位的脉冲信号,以+便于判断感应电压的极性。

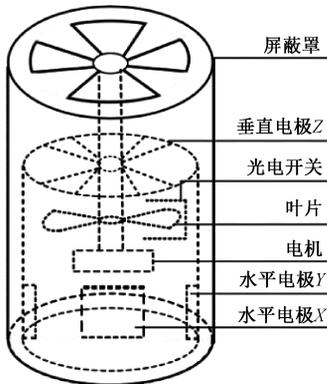


图 4 传感器结构图

三维大气电场传感器测量原理与单维大气电场传感器一致,当电机驱动屏蔽罩匀速转动时,在垂直方向上有垂直电极 Z,而在水平方向上有水平电极 X 和 Y,当电极驱动屏蔽罩匀速转动时,3 个感应电极周期性暴露在电场中,3 个感应电极便产生大小不同,但相对稳定的感应电流。感应电流的大小与外电场呈正比关系,通过感应电流的大小便可推测出外电场的强度,实现水平 X、Y 方向和垂直方向 3 个方向的电场强度测量。

2 传感器电路设计

2.1 测量系统设计

为准确观测大气电场的电场强度和方向,以传感器为核心设计电场测量系统,主要包含单片机、I-V 转换电路、差分放大电路、峰值检测电路和滤波电路等,如图 5 电场测量系统所示,传感器将电场信号经 I-V 转换成稳定的电压信号,后送至差分放大电路降低噪声,再送至峰值检测电路和滤波电路测量峰值输出直流电压信号。

2.2 I-V 转换电路

为了采集到稳定的感应电流信号,I-V 转换电路的输出信号截止频率要低于感应电流信号的频率,输出信号的截止频率越小越好^[14]。输出信号截止频率由反馈电阻和反馈电容决定,反馈电阻越大时,电路中的噪声也会随之增

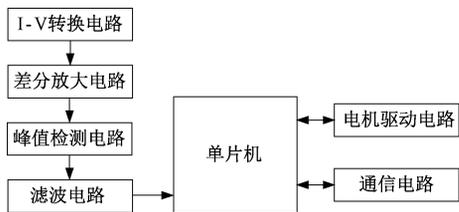


图 5 电场测量系统所示

加,输入偏置电流在经过反馈电阻后便会输出较大的失调电压,一旦反馈电阻过大,便会导致运放电路中噪声变大,从而影响测量精度。

I-V 转换电路如图 6 所示,也是信号调理电路的第一级运放。以第一级电路为例,反馈电阻 R1,反馈电容 C1 并联后接在 OP07 芯片的负向输入端 2 脚和输出端 6 脚之间,起到了对感应电流信号的放大作用。反馈电容 C1 决定了运放的中频段增益,电阻 R1 决定了运放电路输出信号的下限截止频率。

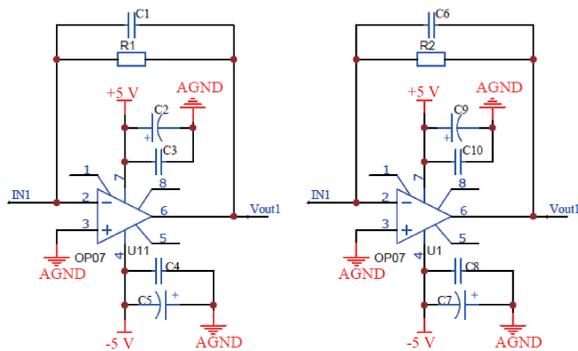


图 6 I-V 转换电路

2.3 差分放大电路

电场仪探头在设计时,定片被分割为 8 块相等的扇形区域,每 4 片为一组,分为 A、B 两组。当动片周期性屏蔽定片时,在定片上产生了两组感应信号,信号频率和幅值大小相同,并且相位相反。在第一级 I-V 转换电路的两路输出信号中,都含有交流感应电压信号和噪声,为了降低噪声对目标信号的干扰,在第二级运放中采用差分电路滤除共模噪声,由于差分信号具有幅度相等、相位相反的特性,差分后的输出信号则是稳定地感应电压信号^[15]。

差分放大电路如图 7 所示,AD620 通过外围电路与电位器配合,可以对小信号进行手动放大。通过改变外部电阻 RP1 便可以改变电路增益 G,放大倍数可调,约 2~10 000 之间。电阻 R4、R5、R6 构成直流偏移电路。该电路一方面能对输入信号进行偏移校准,另一方面能便于后端电路对偏移信号进行采集应用。R7 是电位器,通过调节旋钮可改变电路的直流偏移电压值,电位器 R7 的电压极限是电源电压正负 5 V。

2.4 峰值检测电路

峰值检测电路如图 8 所示,感应电流信号在经过 I-V

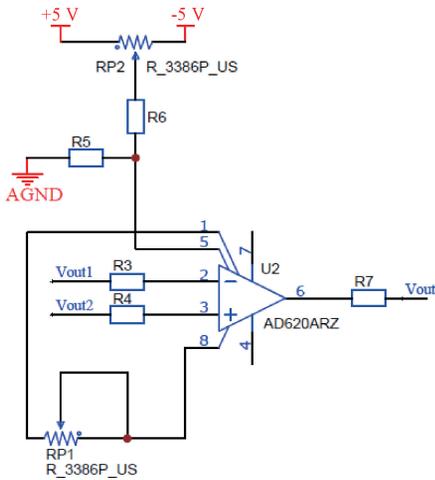


图7 差分放大电路

转换电路和差分放大电路后，得到的交流信号与地面大气电场成线性关系，交流信号通过峰值检测电路可以测出信号的峰值，得出于近地面大气电场成比例的直流电压信号。传统峰值检测电路存在信号频率与峰值不同步，无法检测到每一个峰值并准确计数，为了提高峰值检测电路的准确度，将初始电路中的复位电阻R1用1M的电阻取代，自动充放电，无需固定频率复位信号。改进后的峰值检测电路如图所示，峰值检测电路中用到的芯片是TL082。

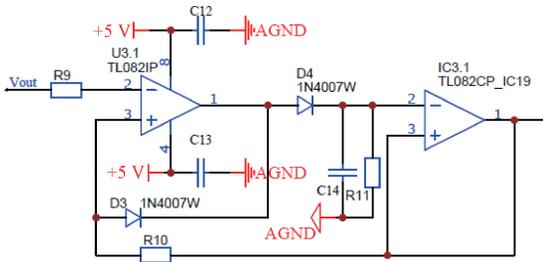


图8 峰值检测电路

2.5 滤波电路

滤波电路可以将电路中输出信号中不需要的频率分量滤除或者保留需要得到的频率分量。为了将信号调理电路中与大气电场成比例的直流电压信号保留，滤除峰值检测电路输出信号中可能存在的其它频率成份的交流信号，在峰值检测电路后面设置一路滤波电路。差分放大电路的输出信号经过峰值检测与滤波电路后得到的信号为直流电压信号，直流信号与待测大气电场数值之间存在线性关系。

为了使滤波电路输出信号中干扰信号较少，采用有源二阶的低通滤波器，电路如图9所示。滤波电路的芯片选择OP07，它是一款通用型运放，能够满足多种电路设计要求，通过查阅芯片手册可知OP07增益带宽为0.6MHz远大于截止频率，偏置电流1.8nA，不会对电路产生较大噪声和失调电压。OP07与电容C15、C18和电阻R12、R13组成二阶低通滤波器，滤波器的截止频率 f_c 约为10Hz。

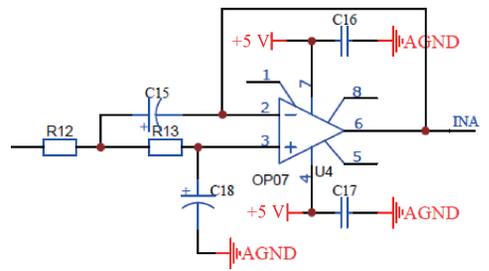


图9 滤波电路

3 测量实验

整体传感器设计完成后，在雷雨天气对大气电场进行测量实验，实验采用自主研发的大气电场传感器，传感器的测量距离为10~20km，最小电场分辨率为10V/m，数据采集率为250次/s，能够保证每分钟输出一次三维电场分量数据。实验场地为南京多基观测技术研究院院内，时间为2023年3月11日，天气：小雨转阴，环境温度：10℃~23℃，东北风2级，空气湿度：49%，周围环境空旷，无高大建筑物影响电场分布。

如图10所示，为了避免周围环境对电场传感器的测量结果造成误差，将电场传感器放置于建筑物楼顶，支架将电场仪探头架起，并固定在一块基座上，使之高于建筑物顶端的围墙；同时为了避免电路板、电源等被雨水浸入引起短路，造成设备损坏，将电路板、电源等放进实验机箱保护；传感器采用有线数据传输，RS-485接口协议，64进制的电场数据通过接口传输到上位机中，后对数据进行转换和处理。



图10 电场传感器室外测量图

三维大气电场变化曲线图如图11(a)~(c)所示，在00:00~03:00之间，这段时期是雷暴云形成阶段，3个方向的电场变化较为缓慢；在03:00~07:00之间，雷暴云快速累积，云中电荷急剧增加，并且正负电荷快速地上下分离，所以不仅导致垂直电场变大，同时水平电场也显著变大，此时环境干扰对水平电场的影响变小，可以忽略不计；在

07:00~24:00 之间,电场变化较缓,大气中电荷量较少,没有雷暴云形成。实验发现,该传感器所测电场数据与环境天气变化具有一致性,能够有效反映大气电场的特征,说明本文提出的电场传感器具有一定的实际和应用价值。

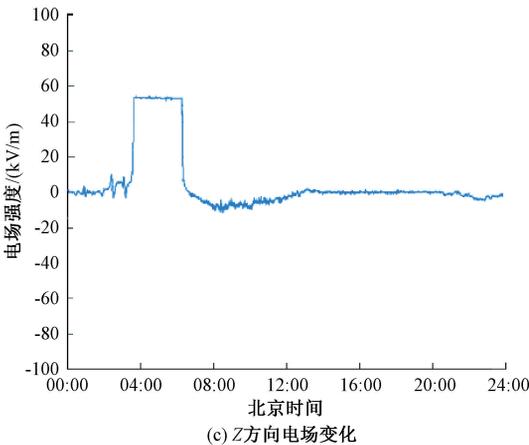
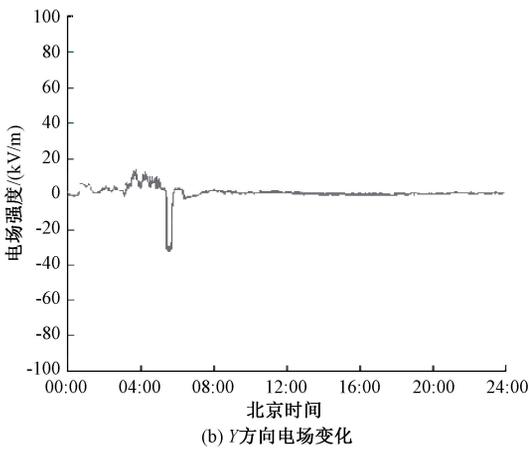
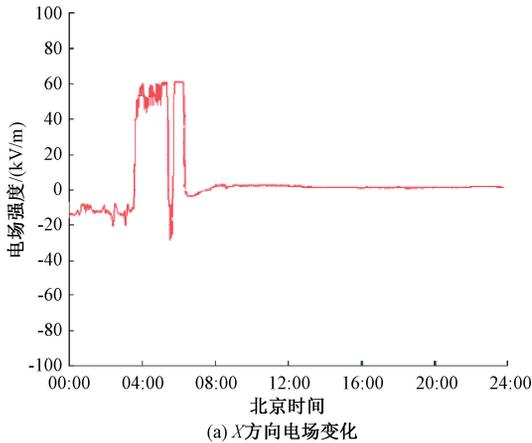


图 11 三维大气电场变化曲线图

4 结 论

针对市面上电场传感器只能探测一维电场垂直分量且电场测量结果存在一定的误差,提出一种三维大气电场传感器,传感器主要结构由屏蔽罩、感应电极、光电开关、叶片和电机组成,电路设计主要包括 I-V 转换电路、差分放大电

路、峰值检测电路和滤波电路等,后进行环境电场测量实验,整理并分析实验数据结果,所测数据能够有效反映大气电场的特征,验证了场磨式三维大气电场传感器结构设计和电路设计的有效性。

在本文中,该传感器利用电机转动接地屏蔽片对金属感应片体进行周期性屏蔽,从而产生感应电流,并将电流信号通过 I-V 转换电路转换为电压信息,后通过差分放大电路、峰值检测电路和滤波电路,最后输出与环境电场强度线性对应的电压信号并上传数据至上位机中。从水平电场 X、Y 和垂直电场 Z 三个方向维度进行电场测量,在一定程度上提高电场测量的精确度,但由于大气电场易受到环境、仪器本身等各种因素的影响,下一步工作需对传感器进行校准实验,从而进一步提高传感器的测量精度和雷暴云预警的准确率。

参考文献

- [1] 柴瑞,王振会,肖稳安,等. 大气电场资料在雷电预警中应用[J]. 气象科技, 2009, 37(6):724-728.
- [2] 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.
- [3] 张星,白强,夏善红,等. 小型三维电场传感器设计与测试[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4):3, DOI:CNKI: SUN;DZYX. 0. 2007-04-057.
- [4] 林楚,陈晓宁,张海涛,等. 大气电场传感器信号放大电路的噪声分析与优化设计[J]. 微型机与应用, 2017, 36(23):31-34.
- [5] KIRKPATRICK P, MIYAKE I. A generating voltmeter for the measurement of high potentials[J]. Review of Scientific Instruments, 1932, 3(1):1-8.
- [6] MALAN D J, SCHONLAND B F J. The electrical processes in the intervals between the strokes of a lightning discharge[J]. Proceedings A, 1951, 206(1085): 145-163.
- [7] 张自嘉,张丽萍,花晓蕾. 基于 ARM 的雷电三维电场数据采集系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(3):47-49,103.
- [8] YANG P, BO C, WEN X, et al. A novel MEMS chip-based atmospheric electric field sensor for lightning hazard warning applications[C]. 2015 IEEE Sensors, IEEE, 2016.
- [9] ZHOU J, TANG H, BAI X, et al. Design of miniaturized atmospheric electric field detector[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(5): 825-828.
- [10] 周继威,唐慧强,白雪美,等. 微型化大气电场检测仪的设计[J]. 气象科技, 2017, 45(5):825-828.
- [11] 张钰雯,朱武,王世萱,等. 微型大气电场监测装置的

- 设计与实现[J]. 中国测试, 2021, 47(4):130-135.
- [12] 崔勇,袁海文,赵录兴,等. 基于有限元方法的场磨式电场传感器标定装置优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2015,DOI:JournalArticle/5b40261bc095d71674870773.
- [13] 张建鑫,张家洪,陈福深. 集成光波导直流电场传感器设计与实现[J]. 光子学报, 2021, 50(5):67-75.
- [14] 郭显鑫,卢旭,部英男,等. 原子钟钛泵高压电源及小电流检测电路设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1606-1615.
- [15] 菊卫东,汪蕾,王宇明,等. 星用 S 频段 20 W 高增益线性化功率放大器的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(8),850-856,DOI:10.13382/j.jemi.2014.08.007.

作者简介

姜华生, 硕士, 主要研究方向为信号检测与处理、仪器仪表技术。

E-mail:2653701223@qq.com

行鸿彦, 博士, 主要研究方向为气象仪器设计与计量, 信号检测与处理等。

王水璋, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为低空安全与无人机应用系统、信号与信息处理等。

施成龙, 硕士, 主要研究方向为微弱信号检测、仪器仪表技术。

李浩琪, 硕士, 主要研究方向为自动气象站, 气象信息检测与处理。