

基于ICMOS的机载紫外告警传感器设计

王夫康*, 岳政军, 窦 亮, 张 伟, 张峻乾

(中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

摘 要: 为提升机载紫外告警传感器性能,设计了一款基于ICMOS构架的紫外告警传感器。该型传感器工作波长覆盖250~270 nm,可通过RS422接口上传告警目标信息,具有超广角、高角分辨率、灵敏度高、重量轻、功耗低等优点。对传感器的技术指标、工作原理和设计构架等方面进行了介绍。完成了传感器的基本功能、性能测试,经环境试验验证,满足机载使用要求。

关键词: 紫外;互补金属氧化物半导体;传感器;机载

中图分类号: TN366 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)01-0080-05

Design of Airborne UV Alarm Sensor Based on the ICMOS

WANG Fukang, YUE Zhengjun, DOU Liang, ZHANG Wei, ZHANG Junqian

(The 55th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN)

Abstract: In order to improve the performance of the airborne UV alarm sensor and match the localization requirements, a UV alarm sensor based on the ICMOS architecture was designed. The working wavelength of this type of sensor covered 250~270 nm, and the alarm target information could be uploaded through the RS422 interface. It had the advantages of ultra-wide angle, high-angle resolution, high sensitivity, light weight, and low power consumption. The technical indicators, working principle and design framework of the sensor were introduced. The basic function and performance test of the sensor were completed, and it was verified by the environmental test to meet the requirements of airborne use.

Key words: UV; CMOS; sensor; airborne

引 言

紫外告警设备是机载告警常用设备,依托日盲特性的优势,在极其微弱的背景下探测紫外辐射源,以达到预警的目的。紫外告警设备对预警系统有着重要意义,目前成为机载告警中装备最大的系

统之一^[1-2]。国内在紫外告警系统的研制及装备方面公开资料不多,目前,国内紫外告警系统采用成像型探测器,角分辨率、探测及识别能力都达到一定水平,但其与国外先进水平仍存在一定差距^[3]。传统紫外告警系统多采用CCD构架设计,随着CMOS工艺水平不断提升,CMOS图像传感器具有

收稿日期:2022-12-02

作者简介:王夫康(1991—),男,硕士,工程师,主要从事显示、光电探测技术研究;(E-mail:wangfukang@163.com)

岳政军(1993—),男,硕士,工程师,主要从事平板显示、光电探测技术研究;

窦 亮(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事平板显示、光电探测技术研究。

* 通讯作者

图像采集和处理速度快、芯片集成度高、功耗成本低等特点^[4]。因此,文章以紫外像增强管和国产CMOS器件为核心,研制了一款基于ICMOS构架的机载紫外告警传感器。

1 工作原理

目前,机载紫外告警系统多工作在 200~300 nm 的日盲紫外区间,利用大气层近地区在这一波段的“日盲”特性,降低环境干扰,提升对紫外目标的告警概率和探测距离^[5-7]。完整的紫外告警系统包括紫外探测告警和告警决策两个部分,传感器为前端探测告警模块,实现对紫外目标的探测和告警。

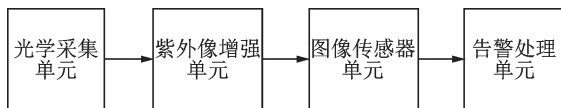


图1 紫外告警传感器系统框图

Fig.1 System block diagram of the UV alarm sensor

紫外告警传感器系统在功能上主要包括以下几个部分:光学采集单元、紫外像增强单元、图像传感器(CCD/CMOS)单元以及告警处理单元,其基本组成框图如图1所示。光学采集单元包括紫外光学镜头和紫外滤光片,完成对特定波段的光学目标的信息采集,紫外像增强单元包括像增强管和配套电源,用于实现采集到的紫外光信号的放大;图像传感器单元一般以CMOS或CCD传感器为主体,经光锥耦合,形成耦合组件,实现光信号到电信号的转换并输出数字图像;告警处理单元包括了电源系统和信号处理电路,负责完成图像分析与目标告警。目标发射的特定波段的能量辐射到传感器系

统,光学采集单元采集目标辐射能量,汇聚到紫外像增强管,经光电倍增后传递给图像传感器组件,图像传感器将采集到的图像信号数字化并输出给下级的告警处理电路,由告警处理电路完成最终的识别与告警。

紫外像增强管是传感器的核心器件,其基本原理如图2所示,是一种能把不可见或微弱的紫外光图像转换为增强了的可见光图像的成像器件。

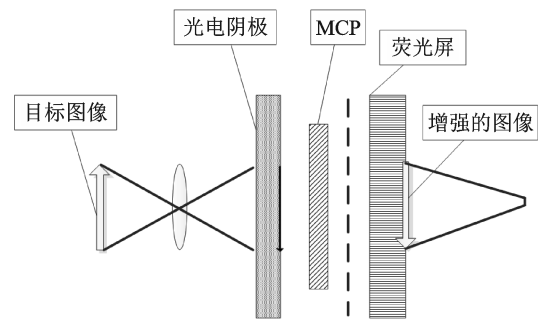


图2 像增强管原理

Fig.2 Schematic of image intensifier tube

目标图像的光信息经光学汇聚后照射在光电阴极上,经微通道板(MCP)的电子倍增,实现信号放大,最终电子轰击荧光屏,形成增强后的图像。

2 系统设计

图3为传感器系统的总体构架框图,其由外部28V供电,通过RS422进行通讯,内部由紫外光学成像组件、像增强管组件、光锥耦合成像组件、信号处理电路和电源模块组成。图4为传感器的结构分解示意,下文将从光学设计、电路设计和结构设计三个角度分别进行详细设计介绍。

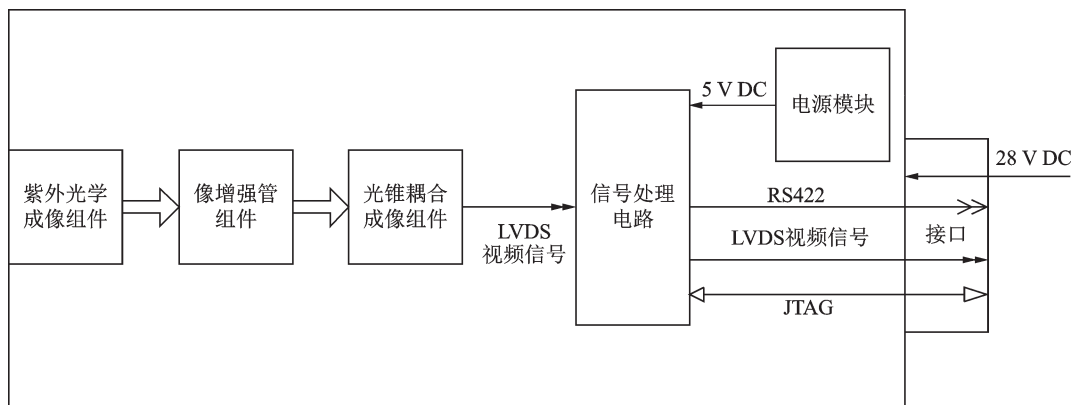


图3 传感器系统总体构架框图

Fig.3 The overall framework of sensor system

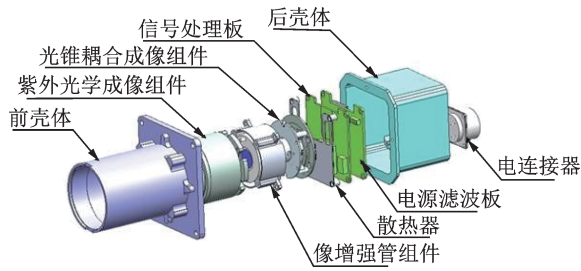


图 4 结构设计分解示意

Fig.4 Structural design decomposition

2.1 光学设计

传感器光学设计包括紫外光学成像组件(含紫外镜头设计和日盲滤光片设计)和光锥耦合传像组件两部分的光学设计。对于紫外光学成像组件,其在光学设计方面,最先考虑的是选择一个合理的初始结构及透镜所用的材料,系统的工作波长是决定选择材料的主要因素。大多数材料的工作波长、透过率与光学材料的种类和纯度有关。在通常的 180 ~ 400 nm 紫外光谱范围,只有少量的光学材料可以使用,如石英玻璃、氟化物(氟化钡、氟化镁和氟化锂等)、UBK7 玻璃及蓝宝石、硼硅玻璃和透紫玻璃等。

紫外光学材料的特性如下:1)高紫外透过率;2)高光学均匀性;3)良好的机械加工性能;4)稳定的物理、化学性能。经综合评估,本传感器的光学材料选用了石英玻璃和氟化物。日盲滤光片选用了截止深度优异的高可靠性滤光片,以保证系统的日盲特性。在镜头设计过程中,考虑整机系统的体积,将滤光片集成到了光学镜头内部,进行一体化紫外光学成像组件设计。

目标所产生尾焰的紫外辐射十分微弱,这就要求传感器对微弱的紫外辐射信号具有较强的接收能力,因此紫外镜头的 $F\#$ 尽可能小。为满足整个告警系统的空间视场要求,紫外镜头的视场为 $2\omega = 90^\circ$ 。根据成像尺寸和系统视场角公式 $\omega = y'/f'$,可以计算出焦距为 8.19 mm。在不影响光学性能的前提下,设计完成的光学系统的体积、径向尺寸,重量应尽量小。因此,基于对系统的机械要求的考虑,将系统的入瞳直径设置为 9 mm。这样系统的像方 F 数为 $F' = \frac{f'}{D} = 0.91$ 。

紫外镜头采用摄远物镜结构,通过优化设计,成像质量好、能量接收效率高,其示意图如图 5 所示。其中日盲滤光片置于镜头内部,使得镜头整体结构紧凑,密封充氮处理之后,日盲滤光片不受环境湿度影响,其性能和使用寿命得到保证。

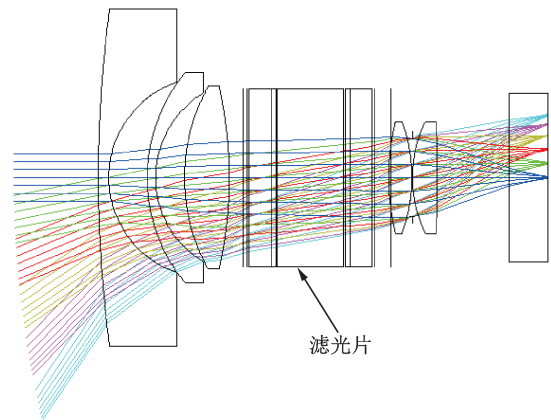


图 5 镜头结构示意图

Fig.5 Schematic of the partial structure of lens

紫外光学成像组件将目标物成像在像增强管的光阴极上,像增强管将紫外图像放大为荧光屏上可见光图像。由于像增强管的荧光信号无方向性,若采用光学透镜将荧光信号成像在 CMOS 相机上,会导致光能利用率低,对系统的高灵敏度探测不利。光锥能够高效率、低损耗地将紫外像增强器荧光屏图像信号传输至 CMOS 传感器的光敏面,有利于告警系统实现高灵敏度探测。因此,采用光锥耦合 CMOS 的方案完成像增强管荧光屏上的图像采集。光锥的设计主要包括丝径的大小、光纤的纤芯比、传输的放大率、传输的透过率、两传输面大小、空间分辨率等参数设计。

2.2 电路设计

电路设计主要包括光锥耦合成像组件电路设计、信号处理板电路设计和电源板电路设计。基本设计框图如图 6 所示。

2.2.1 光锥耦合成像组件电路设计

光锥耦合成像组件涉及 CMOS 相机和接口电路两部分,前端经光锥采集的光信号由 CMOS 相机完成光电转换、图像增强和编解码处理,接口电路完成增益控制和组件接口设计。

CMOS 相机设计中,选用了某国内厂商的低照度相机,为降低整机功耗和体积,在其硬件平台的基础上,进行了定制化 IP 开发和数据处理功能的集成。根据实际需求,对 CMOS 进行了驱动开发,输出高帧率视频流。内部的图像增强模块对原始视频流进行了降噪算法和数据增强处理,转换为所需视频流,有效提升了原始低照度图像的信噪比和有效数据幅值占比,有利于整机灵敏度指标的提升。此外,为保证数据流板间传输的稳定性,进行了

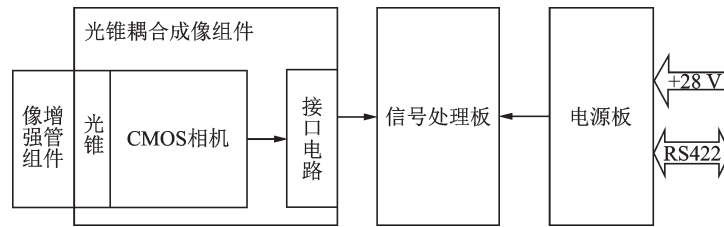


图6 系统电路设计框图

Fig.6 Schematic of system circuit

LVDS数据编解码设计,采用SDR模式2通道传输,串行数据比率为1:7,内部设置同步字节和校验字节。接口电路设计主要为像增强管组件的增益控制设计和驱动电源与接口配置。增益控制设计方面,选用高精度DA芯片,通过SPI串行接口配置增益电压,可根据需求调节,保证了像增强管组件的增益可

调。驱动电源与接口配置主要是对CMOS相机的二次电源转换和外部信号处理板的接口匹配。

2.2.2 电源板电路设计

电源板电路由防反接保护电路、滤波电路、电压转换电路和离散量处理电路组成。电源电路原理框图如图7所示。

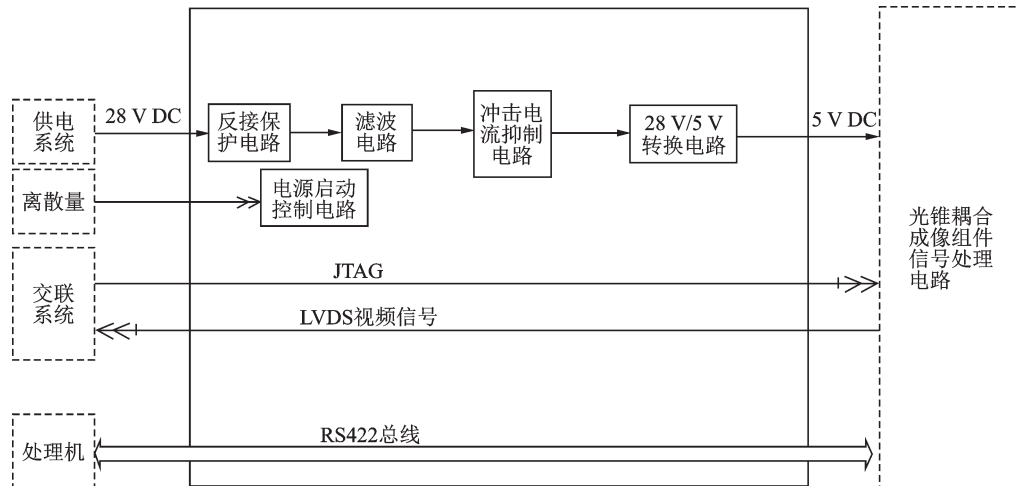


图7 电源板电路原理框图

Fig.7 Schematic of power circuit

反接保护电路利用二极管的单向导通性,保护输入电源正负接反时产品不发生故障。滤波电路对从电源输入端引入的高频干扰信号进行抑制,同时可有效抑制产品内部产生的噪声,将噪声经电源线传导出去,提高产品抗干扰能力及系统可靠性。电压转换电路将输入的28V DC转换为5V DC稳压电源,提供给光锥耦合成像组件以及信号处理电路。电源模块同时还具有信号转接功能,实现外部交联系统与信号处理电路之间的信号交联。各部件功耗详见表1。

2.2.3 信号处理板电路设计

信号处理板选用了某公司的紫外告警板,采用FPGA方案,可实现对输入图像信号的紫外目标识

别和告警。信号处理板接收前端组件输出的LVDS图像信号,对LVDS信号进行解码,随后完成数据分析、坐标校正、目标告警等功能。信号处理板设计中,预留了测试接口和调试接口,方便后期维护与调试。告警信息通过RS422接口输出,供告警决策系统分析处理。

表1 综合功耗统计

| Tab.1 Comprehensive power consumption statistics | | | |
|--|----------|--------|------|
| 序号 | 部件名称 | 工作电压/V | 功耗/W |
| 1 | 光锥耦合成像组件 | 5 | 1.5 |
| 2 | 信号处理电路 | 5 | 2.5 |
| 3 | 电源模块 | 12~28 | 0.88 |
| 4 | 合计 | | 4.88 |

2.3 结构设计

传感器采用整体密封的方式,留缝少,外表光滑,与外界接触面包括金属机壳、窗口玻璃和航插,与外界环境接口主要有:电路出线口、结构件间隙以及玻璃与结构件间隙。电路出线口选用密封航插,保证密封性。结构件之间、玻璃与结构件间均在设计上增加了硅橡胶圈,保证模块密封性。

耐机械应力要求是结构设计的关键点之一,结构件选用高强度铝合金,在传感器模块内部,加强关键部位和受力件的刚度和强度,包括后壳体和前壳体;内部选用的满足强度的螺钉等紧固件,涂以螺纹胶加固;对传感器内部的光锥耦合成像组件和机芯组件采用同轴绑定设计,实现振动能量的逐级递减;传感器金属件及其内部各组件的安装在设计时形成紧固的一体化结构,避免过载的发生。

以机载条件对传感器进行仿真分析,应力分析结果如图 8 所示,模块中最大应力为 11.247 Mpa,远远小于所选用铝合金的屈服极限 110 Mpa 和有有机玻璃的屈服极限 1.6 Gpa,设计强度余量满足要求。变形分析结果如图 9 所示。其最大变形约为 0.001 2 mm,变形量很小,不影响性能,可忽略,设计强度符合要求。

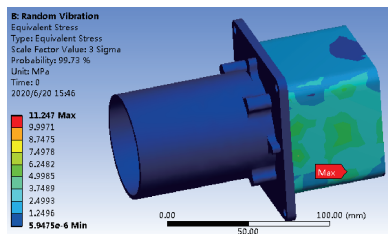


图 8 应力分析结果

Fig.8 Stress analysis results

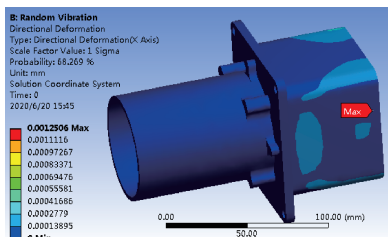


图 9 模块变形分析结果

Fig.9 Deformation analysis results

传感器整机示意图如图 10 所示。经试验验证,传感器可在宽温下稳定工作,环境适应性强,满足使用要求。

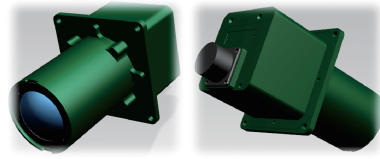


图 10 紫外告警传感器示意图

Fig.10 Photos of the UV alarm sensor

3 测试与试验

基于上述设计和分析过程,对设计并完成的机载紫外告警传感器进行测试和试验,以确认传感器的技术指标和环境适应性情况。对研制样机进行了全面的系统测试。

经测试,研制的传感器外形尺寸、功耗、重量等指标,均满足研制目标要求。

对传感器的主要性能指标进行了测试,包括:工作波长、灵敏度、视场角、分辨率等,各项性能指标均达到设计目标,满足实际使用需求。其中,灵敏度和分辨率指标性能突出,有效提升了整机的探测灵敏度。

对研制的传感器进行机载环境试验测试,测试各种环境下传感器工作的稳定性和可靠性,随系统完成所规定试验项目,结果均合格。

4 结 论

本方案在机载紫外告警领域首次采用 ICMOS 构架,成功实现了基于 ICMOS 的机载紫外告警传感器的设计与研制,产品的功能、性能满足要求,部分性能指标表现优异,具备较强的市场竞争力。

参 考 文 献

- [1] 国爱燕,白廷柱,胡海鹤,等.固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析[J].光学学报,2012,10:176-183.
- [2] Ovrén H Holm. Missile approach warning using multi-spectral imagery[D]. Sweden: Linköping, Linköpings University Institute for System Technic Department of Electrical Engineering, 2010.
- [3] 郑海晶,白廷柱.紫外告警技术现状及发展分析[J].红外技术,2017,9:773-778.
- [4] 王旭东,叶玉堂.CMOS 与 CCD 图像传感器的比较研究和展趋势[J].电子设计工程,2010,11:178-181.
- [5] 鲜勇,赖水清.日盲紫外探测技术的军事应用[J].直升机技术,2016,2:67-72.
- [6] 刘火平,尹达一,张荣杰,等.地面紫外探测高空高速再入目标分析与验证[J].光学学报,2017,37(12):185-192.
- [7] 倪进园.紫外像增强器和紫外 ICMOS 调制传递函数测试技术研究[D].南京:南京理工大学,2019.