

多角度偏振成像仪面阵探测器筛选及测试方法

姚萍萍^{1,2}, 许孙龙^{1,2}, 涂碧海^{1,2**}, 崔珊珊^{1,2}, 金洁^{1,2}, 骆冬根^{1,2*}, 洪津^{1,2***}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 为了从科学级面阵探测器中筛选出满足空间应用要求的具有高可靠性和稳定性的器件, 针对星载面阵电荷耦合器件(CCD), 开展了温度循环、随机振动及高温老炼等环境应力试验。设计了一套筛选专用的面阵 CCD 图像采集系统, 并基于分段式均匀照明光源和连续可调谐均匀单色照明光源, 对筛选前后面阵 CCD 的光电性能参数进行测试。通过对比筛选试验前后面阵 CCD 的暗电流、像元响应非一致性、量子效率及非线性误差等参数, 分析面阵 CCD 的环境适应性, 剔除早期失效或性能变化较大的探测器, 从中筛选出性能最优的探测器, 并将其应用于星载多角度偏振成像仪以进行大气遥感观测。试验结果表明, 最终优选的探测器在筛选试验前后的量子效率最大变化为 -2.56% , 像元响应非一致性均小于 3% , 非线性误差均小于 1% , 筛选后暗电流为 $889.22 \text{ electron} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 。研究结果为低等级面阵 CCD 筛选方法及 CCD 性能评估技术提供了重要参考。

关键词 测量; 多角度偏振成像仪; 面阵电荷耦合器件; 筛选; 光电性能; 高稳定性与可靠性

中图分类号 TH386.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1112002

Screening and Testing Method of Area Detectors for Directional Polarimetric Camera

Yao Pingping^{1,2}, Xu Sunlong^{1,2}, Tu Bihai^{1,2**}, Cui Shanshan^{1,2},
Jin Jie^{1,2}, Luo Donggen^{1,2*}, Hong Jin^{1,2***}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract To screen the high reliability and stability devices from the scientific grade area detectors for the aerospace application, the environmental stress screening tests such as temperature cycling, random vibration, and burn-in are performed on the space-borne area charge coupled device (CCD). A system for area CCD image acquisition is designed, and the electro-optical parameters of a CCD are tested before and after screening based on the segmented illumination light source and the continuous tunable monochromatic light source. The differences of dark currents, photo response non-uniformity, quantum efficiencies, linearity errors, and other parameters of the area CCD before and after the environmental reliability tests are compared, the environmental adaptability of the area CCD is analyzed, and thus the quality defects and the early failures are eliminated. Subsequently, the detectors with an optimal performance are extracted from the participating area CCD and used in the space-borne directional polarimetric camera for atmospheric remote sensing observation. The experimental results show that the maximum change of quantum efficiency between pre- and post-screening for the ultimate optimal detector is -2.56% , the photo response non-uniformity is smaller than 3% , the linearity error is smaller than 1% , and the dark current is $889.22 \text{ electron} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ after screening. These research results provide significant reference data for the standardization establishment of low-level CCD screening methods and performance assessment techniques in aerospace field.

Key words measurement; directional polarimetric camera; area CCD; screening; electro-optical performance; high reliability and stability

OCIS codes 120.5410; 040.1520; 250.3140; 120.4640

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-02-27; 录用日期: 2020-03-13

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(30-Y20A19-9007-15/17)、高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)卫星应用共性关键技术项目(50-Y20A38-0509-15/16)

* E-mail: dgluo@aiofm.ac.cn; ** E-mail: tubihai@aiofm.ac.cn; *** E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

1 引 言

星载多角度偏振成像仪(DPC)是一种超广角、画幅式、低畸变成像的偏振传感器^[1],其主要任务与功能是获取多角度多光谱偏振辐射数据,并结合基于偏振信息的大气特性反演模型,提供全球大气气溶胶和云的光学及物理参数遥感数据,同时为卫星其他载荷提供大气校正数据^[2-3]。

星载偏振相机一般采用体积小、质量轻、功耗低、分辨率高、光谱响应宽、动态范围大以及机械强度高、面阵 CCD 作为其对地观测的图像传感器^[4-5]。由于宇航级光电转换器件的进货渠道受到越来越严格的限制^[6],因此在无法采购到合适的探测器时,根据载荷任务研制要求,针对低等级面阵 CCD 开展鉴定试验,揭示面阵 CCD 的质量缺陷及其他潜在缺陷^[7-8],并剔除早期失效的 CCD,确保低等级器件在高可靠性领域满足空间应用要求^[9]。国内外对 CCD 相机的性能参数测试方法作了大量的研究,但关于面阵 CCD 的筛选研究鲜有报道。在国外,欧洲南部天文台开发了 ESO CCD Test bench 摄像机测试系统,美国劳伦斯伯克利国家实验室研制了针对科学级 CCD 的量子效率测量设备,美国萨诺夫公司开发了一套全面评估 CCD/CMOS 相机参数的测试系统^[10-12]。在国内,李宪圣等^[13]针对大视场空间相机拼接要求,提出筛选出饱和辐照度一致性最好的 CCD 筛选方法,但其适用范围有限。余达等^[14]提出了面阵 CCD 板级筛选测试方法,通过测试 CCD 相机指标来间接评估 CCD 的性能。金伟等^[15]为了筛选出性能最优的探测器,针对空间外差光谱仪,对近红外波段备选面阵探测器开展了暗电流响应、盲元率、像元响应非一致性以及特定入射光能量下的响应度等指标测试。朱双双等^[16]从大量低等级二元 InGaAs 红外探测器中筛选出满足航天高可靠性要求的探测器。

本文 DPC 选用的是帧转移型面阵 CCD 探测器,其具有低噪声、高灵敏度、大动态范围和高量子效率等优良性能,质量等级为科学级。对面阵 CCD 依次进行温度循环、随机振动、高温老炼等环境应力筛选试验考核,并通过对比筛选试验前后的暗电流、缺陷像元、像元响应非一致性及量子效率等参数,分析面阵 CCD 的环境适应性,并从参试面阵 CCD 中筛选出性能优良的探测器,确保优选后的面阵 CCD 具有高可靠性和稳定性,以提高 DPC 获取的多角度、多光谱偏振信息的质量。由于光电传感器较为特殊,在美军

标、欧洲航天局及国内相关集成电路质量等级中,没有针对低等级面阵 CCD 的规范和标准,本文的研究工作可为应用于航天领域的低等级面阵 CCD 的筛选方法及 CCD 性能评估技术提供重要参考。

2 偏振成像仪探测器的图像采集系统设计

多角度偏振成像仪采用超广角光学系统并结合面阵 CCD,在卫星沿轨飞行过程中实现多次成像,获得同一谱段的多角度信息,其成像示意图如图 1 所示。装有偏振片和滤光片的转轮匀速转动,DPC 通过转轮切换的方式,基于分时成像实现偏振及多光谱谱段的调谐,并在偏振探测通道的成像光路中引入光楔来实现像移补偿,保证卫星飞行时同一波段的三幅偏振图像来自同一目标。仪器共有 15 个通道,其中 9 个为偏振通道(490, 670, 865 nm 三个波段,每个波段具有 0°, 60°, 120° 三个偏振解析角度),5 个为非偏测量通道(443, 565, 763, 765, 910 nm 五个波段),1 个是采集暗电流的暗电流通道。CCD 传感器沿飞行方向进行连续拍摄成像时,在目标上方某一角度下,通过滤光片及偏振片的转动来获取 14 个通道的辐射测量信号及 1 个通道的暗电流测量信号^[17-18]。



图 1 DPC 成像系统示意图

Fig. 1 Structural diagram of DPC imaging system

为了获得高质量的图像信号输出^[19],设计了一套筛选专用的面阵 CCD 图像采集系统,如图 2 所示,其以可编程逻辑器件(FPGA)为数字图像处理器,包含水平/垂直时序驱动单元、模拟前端处理单元、CCD 偏置电压产生单元、图像数据传输单元、内部通信接口及内部遥测信号产生单元。DPC 选用的面阵 CCD 探测器的管脚较软,多次插拔后容易变形,影响器件管脚的力学性能,故采用无应力插座来连接面阵 CCD 与图像采集系统。该插座具有耐高温、高可靠性、无应力等特点,完全满足环境应力筛选试验要求。

图像采集系统以美国国家仪器公司(NI)的工控机为总控制器,通过串口通讯(RS422 接口)向 FPGA 发送积分时间修改、模拟前端增益、偏置修改及成像周期修改等工作参数;时序驱动单元将 FPGA 产生的帧转移时钟、垂直转移时钟、行转移时钟以及复位等逻辑时序信号转换成符合 CCD 工作幅值和上升沿时间要求的驱动时钟;偏置电压单元

产生适用于 CCD 的各路偏置电压;面阵 CCD 输出的图像模拟信号经预放大器后被送入模拟前端芯片进行信号调理与转化,之后将其送进 FPGA 内部,按照科学数据包格式进行组织打包,并通过低压差分信号(LVDS)数据总线将打包后的图像数据传送至 NI 工控机内的 PXIe 图像采集卡进行图像实时存储与显示。

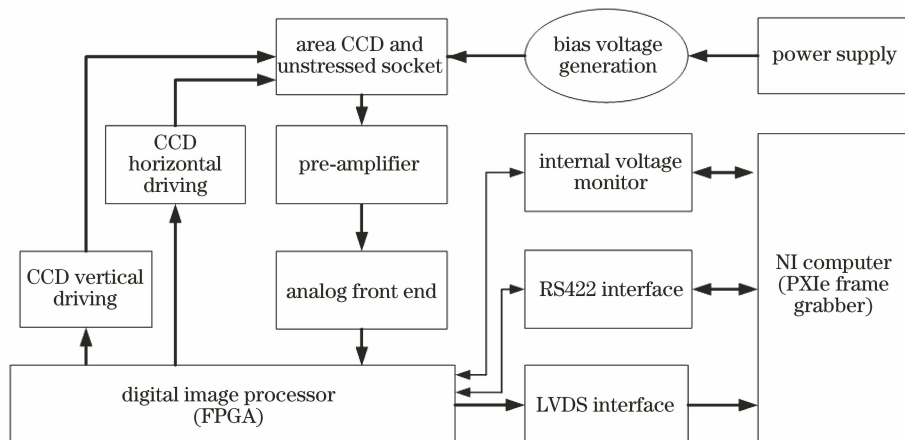


图 2 面阵 CCD 的图像采集系统框图

Fig. 2 Schematic of area CCD image acquisition system

3 面阵 CCD 的环境应力筛选试验

DPC 项目采购的面阵 CCD 在出厂时已进行常规的可靠性测试,为了保证所选用的探测器满足严酷的航天环境要求,对该 CCD 进行环境适应性分析,从而实现二次深筛和性能优选,从中筛选出性能最优的探测器。

面阵 CCD 的环境应力筛选试验具体流程如图 3 所示。对探测器依次进行温度循环、随机振动、高温老炼等环境应力筛选试验考核,筛选前后在相同的温度、湿度等外部环境下对面阵 CCD 均进行暗电流、缺陷像元、像元响应不一致性、非线性误差及量子效率等光电性能参数(EO)测试,只有通过全部测试的探测器才被判定为合格的探测器。

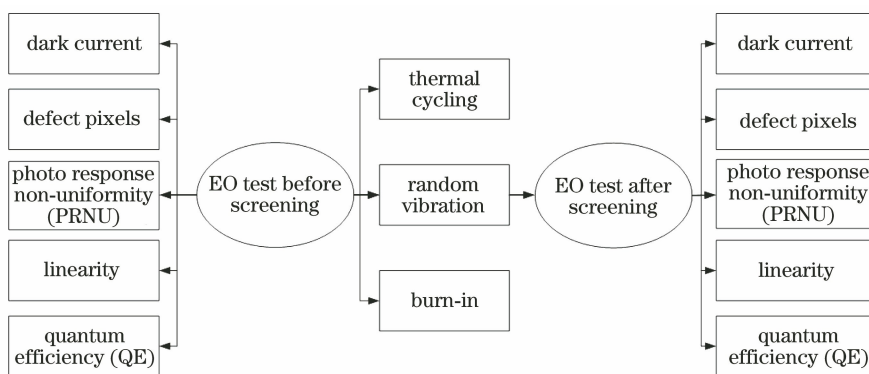


图 3 面阵 CCD 的环境应力筛选试验流程

Fig. 3 Flow chart of environmental stress screening test for area CCD

3.1 温度循环

面阵 CCD 的温度循环试验是在高低温箱内完成的。通过导热垫将探测器安装在温度循环试验专用工装上,对工装进行密封抽真空后将其放置在高低温箱内的基板上。在探测器周围贴装 PT1000 热

敏电阻用于监测其温度变化。温度循环试验温度为 $-40\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$;高温端保持 1 h;低温保持留 1 h;高温允许误差为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温允许误差为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$;温变速率为 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$;试验次数为 18.5。首次循环从高温开始;末次循环从低温开始,高温结束;高低

温箱在高温端自然回温。在整个试验过程中高低温箱内充氮气,避免试验过程中在探测器表面上产生凝露。探测器安装图如图 4 所示,温度循环试验现场图如图 5 所示。试验结束后测试探测器的暗电流和感光功能。

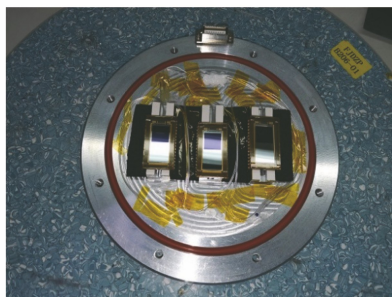


图 4 温度循环中探测器的安装图

Fig. 4 Installation image of CCD for temperature cycling

3.2 随机振动

为了模拟面阵 CCD 在多角度偏振成像仪上的实际安装状态,通过改变振动台方向,在电动振动台上开展 CCD 沿 X、Y、Z 三个轴向的随机振动试验。工装的振动底板安装在振动测试平台上,工装顶部设有透明观察窗,可在试验过程中观察探测器的振动情况。随机振动试验条件参考国军标 GJB1032-90《电子产品环境应力筛选方法》中电子元器件筛选

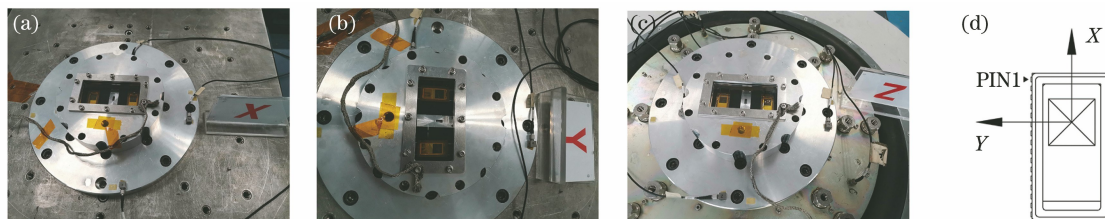


图 6 随机振动试验测点布置图。(a) X 向;(b) Y 向;(c) Z 向;(d)探测器坐标系

Fig. 6 Measuring point layout of random vibration. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction; (d) detector coordinate

3.3 高温老练

面阵 CCD 的高温老练试验在高低温箱内进行,试验过程中 CCD 需要加电成像,为了降低探测器的使用风险,设计了一种板级筛选测试系统,如图 7 所示。探测器通过无应力插座与图像采集系统连接,图像采集系统被固定在高低温箱内的基板上,探测器陶瓷背面粘贴 PT1000 热敏电阻以监测其温度变化,图像采集系统通过穿箱电缆与线性电源和工控机相连,并进行供电、图像数据存储与接收及内部电压监测。高低温箱以不高于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率将温度从室温升至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持 100 h。在整个高温保持过程中,探测器采用驱动偏置设置并始终处于成



图 5 温度循环试验现场图

Fig. 5 Site map for thermal cycling test

标准,频率 f 在 $20\text{ Hz}\leq f\leq 80\text{ Hz}$, $80\text{ Hz}< f\leq 350\text{ Hz}$ 和 $350\text{ Hz}< f\leq 2000\text{ Hz}$ 范围内的功率谱密度 p 分别为每倍频程 $+3\text{ dB}$ 、 $0.04\text{ g}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$ 和每倍频程 -3 dB ,总均方根加速度为 6.06 g ,每个轴向上的试验时间是 5 min,其中 g 为重力加速度。

探测器安装坐标系以整星本体坐标系为参考,遵守右手法则,X 向指卫星发射方向,即 CCD 光敏面的垂直方向,Y 向指 CCD 光敏面的平行方向,Z 向指与力学试验工装表面垂直方向。随机振动方向如图 6 所示,其中 PIN1 是探测器 1 的脚位置。在试验过程中,面阵 CCD 不通电,力学试验结束后,通过显微镜观察探测器光敏面是否有裂痕,并测试探测器的暗电流和感光功能。

像状态,实时监测和记录测试系统的工作电压、工作电流,以及试验产品各测温点数据。高温老练过程中每 12 h 检测一次 CCD 感光情况,并将其作为工作是否正常的依据。

3.4 光电性能测试

面阵 CCD 的光电性能测试系统基于分段式均匀照明光源,连续可调谐均匀单色照明光源和筛选专用的面阵 CCD 图像采集系统,系统示意图如图 8 所示。分段式均匀照明光源用于测量面阵 CCD 的像元响应不一致性、暗电流及非线性误差,采用积分球内置卤钨灯作为照明光源,选用与 DPC 载荷同批次的滤光片为分光元件,保证测试照明光谱波段与

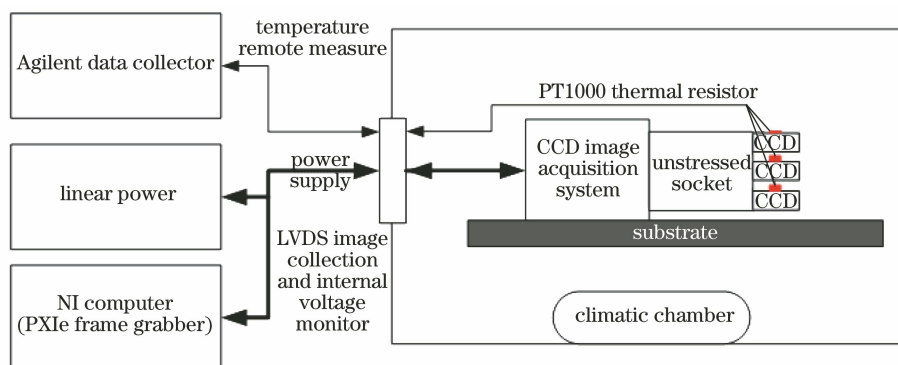


图 7 面阵 CCD 的高温老练测试系统装置

Fig. 7 Equipment of burn-in test of array CCD

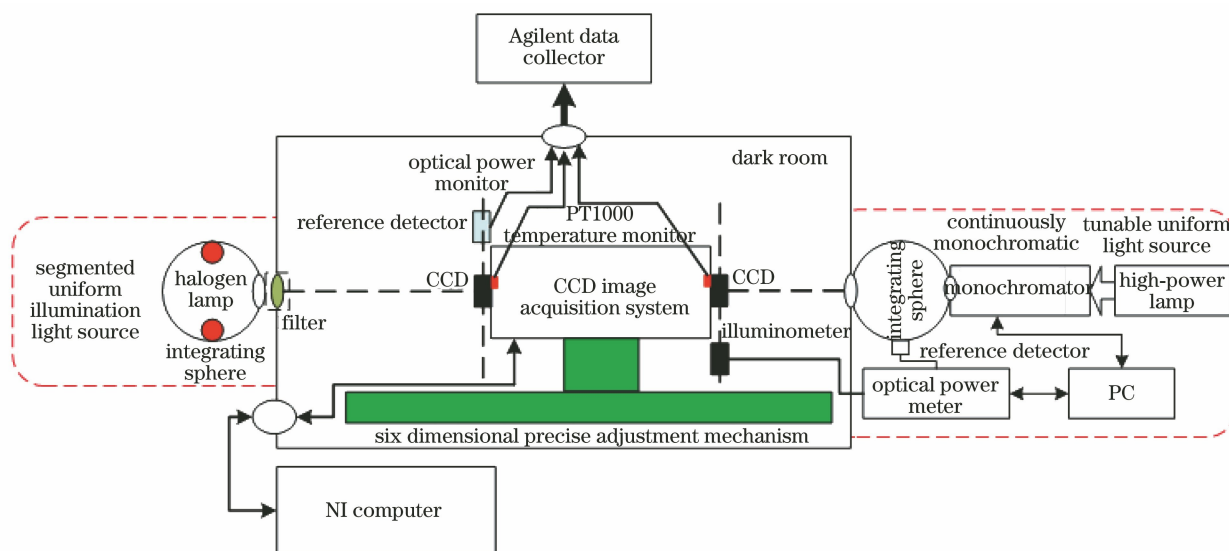


图 8 面阵 CCD 的光电性能测试系统示意图

Fig. 8 Schematic of electro-optical test system of array CCD

DPC 工作波段一致。光能量监测探测器与待测探测器共面放置,确保筛选前后用于光电性能测试的积分球辐射照度变化小于 1%。

连续可调谐均匀单色照明光源用于测量待面阵 CCD 的量子效率^[20],采用大功率氙灯作为照明光源,以单色仪作为分光器件,大功率氙灯发出的光经单色仪分光后入射至积分球内,经积分球匀光后出射,被待测探测器接收,探测器在图像采集系统中完成光电转换,输出的图像信号由 NI 工控机进行实时采集。探测器背面粘贴热敏电阻,通过安捷伦数据采集器监测其工作温度。监视探测器放置于积分球侧壁,用于监测待测探测器接收的相对光谱能量,并将该相对光谱能量作为探测器相对光谱响应测试的能量传递基准。照度计与待测探测器共面放置,通过水平导轨切换光路,并测量探测器接收到的照度值。

图像采集系统通过六自由度自动调整机构进行六个方位的调整。先调整 z 向,确保待测探测器光敏面中心与积分球光源开口中心对齐;再调整 y 向,使探测器光敏面与光源出光口平面平行;最后调整 x 向,确保积分球漫反射光均匀照射在被测探测器上。为了避免周围杂散光的影响,图像采集系统被放置在暗室内,暗室内壁涂有黑色涂层,具有良好的不透光性。

通过对比筛选试验前后的面阵 CCD 的暗电流,坏点,像元响应不一致性 (PRNU),非线性误差和量子效率,研究面阵 CCD 的光电性能变化。DPC 共有 8 个波段,工作光谱范围为 443~910 nm,从短波、中波、长波中各选一个波段 (490, 670, 865 nm) 进行像元响应不一致性和非线性误差的测量。量子效率测量扫描的波长范围为 400~940 nm,覆盖 DPC 所有工作谱段,光谱分辨率为 3 nm, DPC 工作

波段内的扫描间隔为 3 nm, DPC 工作波段外的扫描间隔为 10 nm。

筛选试验前后光电性能测试的合格判据如表 1 所示, 其中 V_a 为量子效率的变化量。

表 1 筛选试验前后面阵 CCD 光电性能合格要求

Table 1 Criteria of electro-optical tests of array CCD before and after screening

Parameter	Criterion
Dark current	$\leq 5516 \text{ electron} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1} @ 5.5 \text{ }^\circ\text{C}$
Number of white spots	$\leq 50 @ 5.5 \text{ }^\circ\text{C}$
Number of black spots	$\leq 50 @ 5.5 \text{ }^\circ\text{C}$
PRNU	$\leq 3\% @ 490, 670, 865 \text{ nm}$
Non-linear error	$\leq 1\% @ 490, 670, 865 \text{ nm}$
Quantum efficiency	$V_a \leq \pm 5\% \text{ before and after screening when spectral response range is } 400\text{-}940 \text{ nm with resolution of } 3 \text{ nm}$

暗电流指无光照条件下, 由内部热生电子所形成的电流, 是 CCD 的主要噪声源之一。暗电流会随着曝光时间的增加而线性增长。在无光照时, 通过改变探测器的积分时间, 测试对应积分时间下的输出信号, 然后以积分时间为横坐标, 输出信号为纵坐标, 基于测试数据给出散点图, 并按最小二乘法, 拟合出一条直线, 该直线的斜率即为探测器的单位时间暗信号。

CCD 的坏点包含亮点和暗点, 在无光照条件下, 像元暗电流大于该温度下 10 倍最大暗电流的像元称为亮点(white spot)。在均匀光照条件下, 器件呈半饱和输出时, 响应低于 80% 平均响应的像元称为暗点(black spot)。

像元响应不一致性指在均匀光照条件下, 器件输出信号呈半饱和时, 每个像元之间的响应差异引起的有效像元之间的响应偏差。在特定亮度光照条件下, 通过调节积分时间, 使器件的输出信号约为饱和输出信号的 1/2, 此时采集 150 frame 图像; 关闭光源, 在相同积分时间下采集 150 frame 图像, 对上述图像分别扣除坏点后再求取平均, 然后通过亮场图像减暗场图像来扣除暗电流, 以进行帧转移校正。校正后图像有效像元的方差和均值及探测器整个感光面的 PRNU 计算公式为

$$\begin{cases} \overline{\mu_y} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \mu_{y,m,n} \\ s_y^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\mu_{y,m,n} - \overline{\mu_y})^2, \\ P_{\text{PRNU}} = \frac{\sqrt{s_y^2}}{\overline{\mu_y}} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{PRNU} 为探测器整个感光面的 PRNU 值; M , N 为面阵 CCD 光敏面像元的行数和列数; $\mu_{y,m,n}$ 为第 m 行, 第 n 列像元的响应值; s_y^2 为校正后图像有效像元的方差; $\overline{\mu_y}$ 为校正后图像有效像元的均值。

非线性误差(LE)指在均匀光照条件下, 当曝光量变化时, CCD 输出信号和理想输出信号之间的偏差。探测器光响应输出信号是曝光量和曝光时间的线性函数, 在一定的辐照强度下, 通过调节积分时间来改变入射曝光量, 从而测量探测器的响应非线性。以积分时间为横坐标, 光响应输出信号为纵坐标, 基于测试数据给出散点图, 采用最小二乘法对所得数据进行线性回归运算, 每个积分时间下的相对偏差 $\delta_{y,i}$ 和总的非线性误差 E_{LE} 为

$$\begin{cases} \delta_{y,i} = \frac{\mu_{y,i} - (kt + b)}{\mu_y [i_{\text{max}}] - \mu_y [i_{\text{min}}]} \times 100\% \\ E_{\text{LE}} = \frac{\max(\delta_y) - \min(\delta_y)}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为积分时间; k , b 分别为线性回归直线的斜率、截距; $\mu_{y,i}$ 分别为积分时间 i 下的光响应均值; i_{max} 为最大测量积分时间; i_{min} 为最小测量积分时间; $\mu_y [i_{\text{max}}]$ 为最大积分时间下的光响应均值; $\mu_y [i_{\text{min}}]$ 为最小积分时间下的光响应均值。

量子效率是在规定波长光照下, 入射光子在器件像元中产生并被收集的电子数与入射光子数的比值^[21-22], 它表征了面阵 CCD 对不同波长入射光的敏感程度, 通常用 η 表示。量子效率的公式为

$$\eta(\lambda) = \frac{\mu_y - \mu_{y,\text{dark}}}{K \cdot \mu_p(\lambda)} \quad (3)$$

式中: μ_y 为有光照情况下探测器有效像元的平均灰度值; $\mu_{y,\text{dark}}$ 为无光照情况下探测器有效像元的平均灰度值; K 为图像采集系统的增益, 单位为 $\text{DN} \cdot \text{electron}^{-1}$; h 为普朗克常数, 大小为 $6.6261 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光在真空中的传播速度, 大小为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$; λ 为入射光波长, 单位为 nm ; A 为单像元面积, 单位为 m^2 ; J 为探测器光敏面接收到的绝对辐照度, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; T_{exp} 为曝光时间, 单位为

$s; \mu_p(\lambda)$ 为在曝光时间 T_{exp} 内, λ 波长的光入射到面积为 A 的像元上的平均光子数, 表达式为 $\mu_p(\lambda) = \frac{J \cdot A \cdot T_{exp}}{hc/\lambda}$ 。

4 试验结果与分析

采用上述环境应力筛选试验装置和光电性能测试方法, 对 DPC 项目采购的五片面阵 CCD 分两批进行温度循环、随机振动和高温老练试验考核, 并在筛选前后进行光电性能测试, 其中环境试验前后 CCD 的量子效率允许变化范围为 $\pm 5\%$, 即 CCD 的量子效率变化范围超过 $\pm 5\%$ 时, 则认为该探测器失效。试验结果表明, 五片 CCD 均通过全部测试, 被

判定为筛选合格的探测器。考虑 DPC 载荷实际在轨工作温度为 $0\sim 8\text{ }^\circ\text{C}$, 探测器所有光电性能参数均是在 $5.5\text{ }^\circ\text{C}$ 工作温度下测试的。其中一个探测器的光电性能参数如表 2 所示。暗电流筛选前为 $1041.38\text{ electron} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$, 筛选后为 $889.22\text{ electron} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$, 筛选试验前后均小于 $5516\text{ electron} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$, 探测器没有坏点。像元响应不一致性筛选试验前后为 $2.1\% \sim 2.5\%$, 均小于 3% 。非线性误差 LE 筛选试验前后为 $0.1\% \sim 0.6\%$, 均小于 1% 。筛选前后量子效率曲线如图 9 所示, QE 最大变化量为 -2.5% , 说明经过环境试验考核后, 面阵 CCD 具有较好的稳定性和可靠性, 满足航天产品应用要求。

表 2 CCD 探测器筛选前后的光电性能参数

Table 2 Photoelectric performance parameters of CCD detector before and after screening

Parameter	Wavelength /nm	Before screening	After screening	Delta value	Pass or Fail
Dark current		1041.38 / [electron · (pixel · s ⁻¹) ⁻¹]	889.22 / [electron · (pixel · s ⁻¹) ⁻¹]	—	Pass
Number of white spots and black spots		0	0	—	Pass
PRNU	490	2.35 %	2.23 %	—	Pass
	670	2.13 %	2.12 %	—	Pass
	865	2.51 %	2.34 %	—	Pass
Linearity error	490	0.58 %	0.28 %	—	Pass
	670	0.35 %	0.24 %	—	Pass
	865	0.43 %	0.12 %	—	Pass
QE	400	57.3 %	55.87 %	-2.56 %	Pass
	443	77.98 %	78.03 %	0.06 %	Pass
	490	89.32 %	89.58 %	0.29 %	Pass
	500	90.7 %	90.99 %	0.32 %	Pass
	566	94.04 %	94.5 %	0.49 %	Pass
	670	87.69 %	88.5 %	0.92 %	Pass
	764	67.81 %	67.91 %	0.15 %	Pass
	865	39.08 %	39.25 %	0.43 %	Pass
	910	25.94 %	25.82 %	-0.46 %	Pass

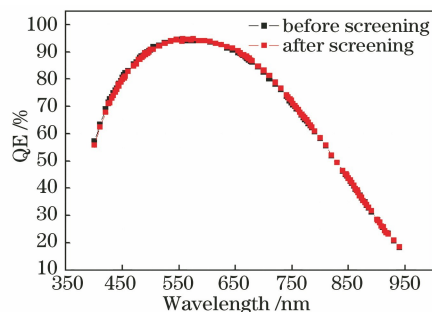


图 9 筛选前后的量子效率曲线变化图

Fig. 9 QE before and after screening

表 3 为五片备选探测器的性能优选结果, 五片 CCD 的像元响应不一致性和非线性误差比较接近。由于探测器暗电流对 DPC 辐射定标精度及动态范围的影响显著, 首先剔除暗电流超过 $1000\text{ electron} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 的器件, 然后依据筛选前后量子效率变化越小越好的原则, 在剩余备选探测器中挑出量子效率变化量最小的器件, 即以序列号 55 探测器作为最终应用于多角度偏振成像仪上的探测器。

表 3 探测器性能优选结果

Table 3 Performance optimization results of detectors

Serial No.	Dark current / [electron · (pixel · s ⁻¹) ⁻¹]	Max PRNU / %	Max linearity error / %	Max delta value of QE / %
11	983.87	2.62	0.30	3.34
33	1147.06	2.55	0.69	-4.15
55	889.22	2.34	0.28	-2.56
77	1163.2	2.33	0.29	3.54
99	1498.2	2.75	0.54	3.81

5 结 论

为了从科学级面阵探测器中筛选出满足空间应用要求并具有高可靠性和高稳定性的器件,提出了一种面阵 CCD 筛选测试方法,结合其应用特点设计了一套专用的图像采集系统,通过评估筛选前后 CCD 裸片的光电参数变化,对器件的性能进行判定。对星载多角度偏振成像仪选用的 CCD 实施了温度循环、随机振动和高温老练等环境应力考核,通过对比分析多片面阵 CCD 筛选试验前后的暗电流、非线性误差、像元响应非一致性及量子效率等参数,筛选出性能最优的探测器。试验结果表明,DPC 项目采购的五片面阵 CCD 全部通过筛选试验考核,筛选出综合性能最优的探测器,筛选试验前后量子效率的最大变化量为-2.56%,筛选后 5.5 °C 工作温度下的暗电流为 889.22 electron · (pixel · s⁻¹)⁻¹,最大像元响应不一致性为 2.34%,最大非线性误差为 0.28%,且没有坏像元,说明经过环境试验考核后的面阵 CCD 具有较好的稳定性与可靠性,满足航天产品应用要求。

参 考 文 献

- [1] Gu X F, Qiao Y L, Wang J N, et al. High-resolution directional polarimetric camera (DPC) used in the remote sensing of aerosol properties[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7807: 78070W.
- [2] Qian H H, Meng B H, Yuan Y L, et al. Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 100701.
钱鸿鹤, 孟炳寰, 袁银麟, 等. 星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析[J]. 物理学报, 2017, 66(10): 100701.
- [3] Zhang M M, Meng B H, Luo D G, et al. Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0812004.
- [4] Tu B H, Hong J, Yao P P, et al. Polarization detection performance and measurement of directional polarimetric camera [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0712003.
涂碧海, 洪津, 姚萍萍等. 多角度偏振成像仪探测性能与检测[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0712003.
- [5] Weng J W, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Correction method for frame-transfer blurring effect of spaceborne polarization camera [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1228005.
翁建文, 袁银麟, 郑小兵, 等. 星载偏振相机帧转移模糊效应校正方法研究[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1228005.
- [6] Hu S W, Lei W X, Liu Z, et al. Military research on industrial plastic packaging components [J]. Electronic Component & Device Applications, 2009, 11(10): 93-95.
胡善伟, 雷婉星, 刘喆, 等. 工业档塑封元器件的军用研究[J]. 电子元器件应用, 2009, 11(10): 93-95.
- [7] Zhu H J. Board-level testing for advanced PEMs in space applications [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(1): 87-90, 4.
朱恒静. 航天器用高性能塑封器件的板级鉴定方法[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 87-90, 4.
- [8] Jiang X J, Sun H X, Wang Z H, et al. Technical overview of the electronic components selection for spacecraft[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2005, 28(1): 38-43.
姜秀杰, 孙辉先, 王志华, 等. 航天电子系统中电子元器件选用的途径分析[J]. 电子器件, 2005, 28(1): 38-43.
- [9] Ding J S. Domestic semiconductor device reliability screening technique[J]. Semiconductor Technology, 1999, 24(3): 55-57.
丁继善. 国内半导体器件的可靠性筛选技术[J]. 半导体技术, 1999, 24(3): 55-57.
- [10] Amico P L, Böhm T. ESO's new CCD test bench[J]. Experimental Astronomy, 1998, 8(1): 1-8.
- [11] Donald E, Bebek C J, Fabricius M, et al. Quantum

- efficiency characterization of LBNL CCD's: Part I. The quantum efficiency machine [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6068: 60680F.
- [12] Steckert J. Design, implementation and setup of an automated quantum efficiency measurement system for charge-coupled devices [D]. Berkeley: University of California, 2005: 20-28.
- [13] Li X S, Wan Z, Liu Z X, et al. Method of CCD test and screening for space camera with wide field of view [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2245-2250.
李宪圣, 万志, 刘则洵, 等. 大视场空间相机 CCD 性能测试及筛选方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2245-2250.
- [14] Yu D, Zhou H D, Long K H, et al. Screening and testing method for area CCD [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 0708001.
余达, 周怀得, 龙科慧, 等. 一种面阵 CCD 的筛选测试方法 [J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708001.
- [15] Jin W, Chen D H, Li Z W, et al. Screening and testing method of detectors for spatial heterodyne spectrometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904004.
金伟, 陈迪虎, 李志伟, 等. 星载空间外差光谱仪探测器筛选测试方法 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904004.
- [16] Zhu S S, Wu Y, Zou P, et al. Environmental adaptability analysis and performance optimization of space-borne infrared detector assembly [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(2): 193-200.
朱双双, 吴洋, 邹鹏, 等. 星载红外探测器组件环境适应性分析与性能优选 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(2): 193-200.
- [17] Yang W F, Hong J, Qiao Y L, et al. Optical design of space borne directional polarization camera [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822005.
杨伟锋, 洪津, 乔延利, 等. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822005.
- [18] Tu B H, Hong J, Yao P P, et al. Temperature correction method for directional polarimetric camera [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1010002.
涂碧海, 洪津, 姚萍萍, 等. 多角度偏振成像仪温度校正方法 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1010002.
- [19] Luo D G. Design and research of photoelectric detection system for directional polarization camera [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 77-86.
骆冬根. 多角度偏振成像仪光电探测系统设计与研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 77-86.
- [20] Cui S S, Meng B H, Qiu Z W, et al. Study of synchronous sampling method for the relative spectral response of CCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(11): 3397-3401.
崔珊珊, 孟炳寰, 裘桢炜, 等. CCD 相对光谱响应同步采样方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3397-3401.
- [21] James J, Klaasen K, Tom E. CCD charge collection efficiency and the photon transfer technique [J]. Proceedings of SPIE, 1985, 0570: 7-19.
- [22] EMVA standard compliant. Standard for characterization of image sensors and cameras [S]. Barcelona: European Machine Vision Association, 2016.