

# 科学级 CCD 制冷系统设计及其温度特性分析

姚萍萍<sup>1,2\*\*\*</sup>, 孙亮<sup>1,2\*</sup>, 许孙龙<sup>1,2</sup>, 于新宇<sup>1,2</sup>, 许智龙<sup>1,2</sup>, 崔珊珊<sup>1,2</sup>, 骆冬根<sup>1,2\*\*</sup>, 洪津<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>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** 为降低探测器的热噪声和暗电流, 研制了一套高精度和高稳定度科学级裸片探测器制冷系统。提出了一种基于低温循环机和薄膜电加热器组合的探测器控温方法, 减小了测试光源及环境温度变化对器件自身性能的影响。实验结果表明, 探测器制冷系统降温速率不大于  $0.6\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , 控温精度优于  $\pm 0.08\text{ }^\circ\text{C}$ , 将该制冷系统应用于多角度偏振成像仪面阵探测器的光电性能测试, 测试结果表明: 探测器工作温度升高  $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ , 暗电流增加 1 倍左右,  $20\text{ }^\circ\text{C}$  时暗电流是  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时的 6.93 倍。近红外波段的量子效率受温度影响较大,  $810\text{ nm}$  和  $900\text{ nm}$  波段在  $0\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$  工作区间内量子效率的温度变化率为  $0.2993\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  和  $0.4575\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。探测器暗电流和光谱响应度的温度特性研究为多角度偏振成像仪在轨辐射定标的温度校正提供了依据。

**关键词** 探测器; 电荷耦合器件; 温度控制; 偏振成像仪; 光电性能

中图分类号 TH386.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1704001

## Design of a Scientific-Grade CCD Refrigeration System and Analysis of Its Thermal Characteristics

Yao Pingping<sup>1,2\*\*\*</sup>, Sun Liang<sup>1,2\*</sup>, Xu Sunlong<sup>1,2</sup>, Yu Xinyu<sup>1,2</sup>,  
Xu Zhilong<sup>1,2</sup>, Cui Shanshan<sup>1,2</sup>, Luo Donggen<sup>1,2\*\*</sup>, Hong Jin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

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

**Abstract** In this work, a high-precision, high-stability refrigeration system for a scientific-grade bare CCD detector was developed to reduce the thermal noise and dark current of the detectors. A temperature control method for the detector comprising a low-temperature circulator and a thin-film electric heater was proposed, which could reduce the influence of the test light source and environmental temperature change on device performance. Experiment results reveal that the cooling rate of the refrigeration system is less than  $0.6\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  and the temperature control accuracy is better than  $\pm 0.08\text{ }^\circ\text{C}$ . The refrigeration system was applied to the electro-optical performance test of an array detector for a directional polarimetric camera (DPC). The results revealed that the working temperature increased by  $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ , the dark current increased approximately 1-fold, and the dark current at  $20\text{ }^\circ\text{C}$  was approximately 6.93 times that at  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . The quantum efficiency in the near-infrared band was considerably affected by temperature. The change rates of temperature-induced quantum efficiency in the working range of  $0\sim 15\text{ }^\circ\text{C}$  at the  $810\text{-nm}$  and  $900\text{-nm}$  bands are  $0.2993\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  and  $0.4575\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , respectively. The study of the temperature characteristics of the detector dark current and spectral responsivity provides a basis for the temperature correction of the in-orbit radiation calibration of the DPC.

**Key words** detector; charge coupled device; temperature control; directional polarimetric camera; electro-optical performance

**OCIS codes** 040.1520; 120.5410; 230.0250; 110.2970

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-05-14; 录用日期: 2020-05-29

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)

\* E-mail: sunleon@aiofm.ac.cn; \*\* E-mail: dgluo@aiofm.ac.cn; \*\*\* E-mail: ppyao@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

科学级电荷耦合器件(CCD)具有超高的量子效率(QE)、超低的读出噪声、高分辨率以及宽光谱响应范围等优点被广泛地应用于对地观测的遥感成像领域<sup>[1-2]</sup>。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<sup>[3-4]</sup>,主要由大视场角的光学系统、载有偏振片和光谱滤光片的旋转轮和面阵 CCD 探测器及电子学单机构成。面阵 CCD 作为 DPC 完成光电转换的核心部件,用于实现多角度多光谱偏振辐射信息的获取,探测器装机之前需要对其光电性能进行全面测量<sup>[5-6]</sup>。探测器厂商给出的出厂测试报告一般是一20 °C时探测器的光电参数,DPC 所处的空间环境极端复杂,其工作温度通常与厂家标定 CCD 芯片性能参数时的温度不同。由于不同温度下 CCD 芯片的某些性能参数如暗电流和近红外波段的光谱响应不一样<sup>[7]</sup>,故厂家给出的性能指标不完全适用于当前的应用环境,其原始的参数信息在实际应用时常没有指导意义。为了减小由热生载流子而产生的暗电流,提高系统的信噪比和动态范围,探测器光电性能测试时需对其进行制冷。

长期以来国内外对于 CCD 芯片性能参数测试方法作了大量的研究<sup>[8-12]</sup>。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 CCD/CMOS 相机参数测试系统。国内李晓杰等<sup>[12]</sup>设计了一套通用的 CCD 光电参数测试系统,对某星敏感器核心成像器件面阵 CCD 的非均匀性、相对光谱响应和读出噪声等进行了测量。上述系统是在常温环境下有针对性地测量了 CCD 芯片的部分参数,没有对 CCD 芯片进行制冷,也没有对探测器性能与温度的相关性进行检测。

针对上述问题,考虑 DPC 在轨飞行时探测器组件工作在 0~9 °C 范围内,本文研制了一套通用性强、高精度和高稳定度的裸片探测器制冷系统,提出了基于低温循环机和薄膜电加热器组合的探测器控温方法,该系统能灵活设置探测器的工作温度,可使探测器稳定地工作在-10~25 °C 温度范围内,采用该制冷系统测量了 DPC 面阵 CCD 探测器的量子效率和暗电流与温度变化的关系,实验结果验证了 CCD 暗噪声和近红外波段光谱响应的温度相关性。

## 2 偏振测量原理与探测器温度的影响

多角度偏振成像仪采用超广角光学系统结合面阵 CCD 探测器实现成像,并根据卫星沿轨飞行时的

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,通过装有偏振片和滤光片的转轮匀速转动的方式分时成像,以实现偏振及多光谱谱段的调谐,在偏振探测通道的成像光路中引入光楔实现像移补偿,以保证卫星飞行时同一波段的三幅偏振图像来自同一目标。在轨运行时 DPC 进入观测模式,温控单元用于热控补偿,光辐射聚焦于面阵探测器,探测器图像信号转换为数字灰度值(DN),由星地通道进入地面应用系统,之后反演探测辐亮度输出数据产品。

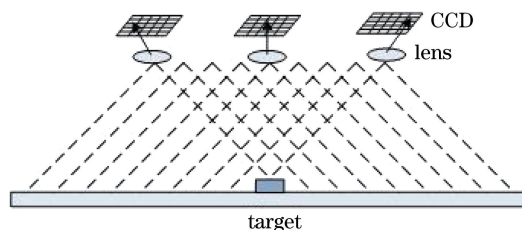


图 1 DPC 成像系统示意图

Fig. 1 Structure diagram of DPC imaging system

DPC 光学探测单元中探测器组件的多个指标和温度相关,仪器热平衡实验的数据表明,高温工况下探测器工作温度稳定在 4.8~6.6 °C,低温工况下探测器工作温度稳定在 3.31~4.7 °C,低温存储工况下探测器温度稳定在 1.57~2.28 °C,应急工况下探测器组件温度稳定在 0.2~1.8 °C,一轨波动小于 3 °C。综合以上工况,需对探测器进行温度响应实验,获取温度补偿系数,以满足在轨工作要求。

偏振成像仪光学探测单元具有温度敏感性,不同工作温度环境下探测器的光谱响应度、暗电流及暗电流噪声会发生变化,温度校正通过暗背景和辐射定标系数两方面来减小温度的影响。温度对辐射定标系数的影响直接反映于信号输出。图 2 为探测器生产厂家提供的三种温度下的光谱响应曲线,

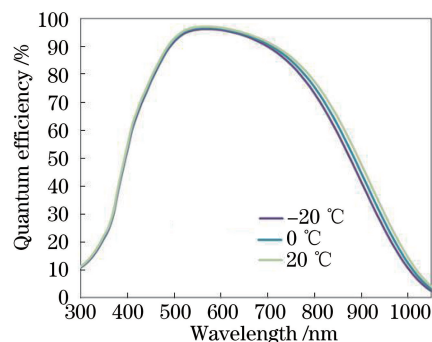


图 2 不同测试温度下探测器典型的光谱响应曲线

Fig. 2 Typical spectral response curves for CCD at different temperatures

可见近红外谱段光谱响应度有较大波动,需要通过实验分析,建立温度与光谱响应之间的变化关系。

### 3 制冷控制方案

#### 3.1 CCD 光谱响应度测试系统

采用实验室研制的探测器专用光谱响应度测试装置<sup>[13]</sup>对 DPC 选用的面阵 CCD 的量子效率和暗

电流进行测量,研究不同工作温度下 CCD 量子效率及暗电流与温度的变化规律。测试过程中对探测器的工作温度进行控制,保证测试过程中温度稳定性优于  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测量系统如图 3 所示,主要包含 1) 连续可调谐的均匀单色照明光源; 2) CCD 图像采集系统; 3) 制冷系统; 4) 暗室; 5) 光源、温度监测仪; 6) 六自由度调整机构。

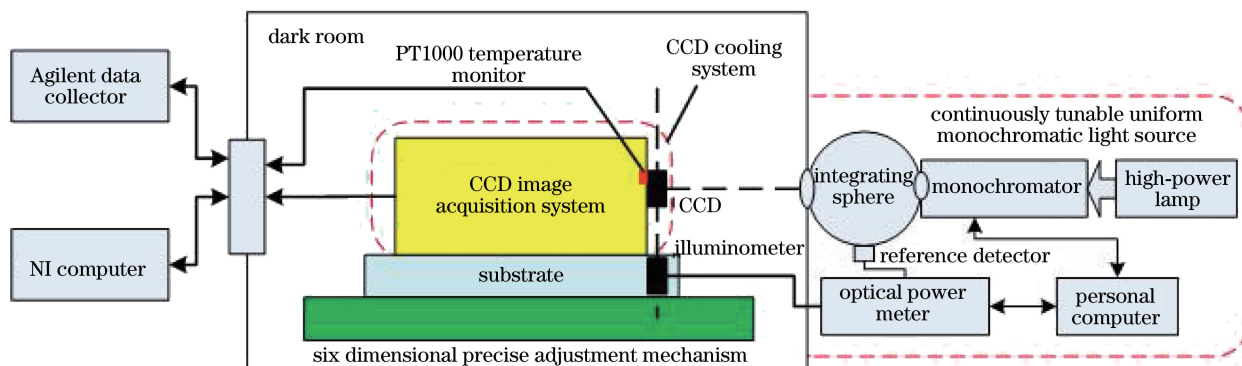


图 3 探测器光谱响应度测试系统

Fig. 3 Spectral response test equipment of detector

连续可调谐均匀单色照明光源由光谱范围为  $300\sim 1100\text{ nm}$ 、功率为  $1000\text{ W}$  的氙灯光源和光谱分辨率为  $1\text{ nm}$  的单色仪组成,大功率氙灯发出的光经单色仪分光后入射至积分球内,经积分球均匀光后出射,由待测探测器接收。图像采集控制系统用于实现面阵探测器的驱动与视频信号的采集,完成光电转换后输出的数字信号由工控机进行实时采集。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,作为探测器光谱响应测试的能量传递基准。照度计与待测探测器同平面放置,通过水平导轨切换光路,测量探测器接收到的照度值。

同实验室的崔珊珊等<sup>[14]</sup>对 CCD 光谱响应度测试系统的测量不确定度进行了详细分析,在实验室条件下使用低压汞灯对单色仪进行波长定标,得到单色仪的波长准确性优于  $0.25\text{ nm}$ ,并从单色仪引入的波长准确性及二级杂散光、参考探测器自身不确定度、测量非同步性及待测探测器自身噪声等方面分析光谱响应的测量误差,得出采用同步采样的方法测得的光谱定标不确定度优于  $1.03\%$ 。

#### 3.2 探测器制冷系统

DPC 在轨道运行期间所处的空间环境恶劣复杂,面阵探测器的热控设计在满足载荷总体功耗要求的前提下力求简单、可靠,尽可能采用成熟的热控技术和实施工艺<sup>[15]</sup>,采用被动热控和主动热控相结

合的方式。为了维持 CCD 的温度水平和稳定度,在整机右侧开设独立辐射散热面,散热面与 CCD 之间采用铜索连接并与整机之间隔热安装,同时在铜索上设置加热器通过功率补偿方法来保证探测器的在轨工作温度。虽然探测器在低温时的暗电流特性更优越,但需要综合考虑整星功耗等条件,最终确定在轨飞行时探测器组件工作在  $0\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,一个轨道周期内运行时探测器温度波动优于  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

探测器用于光电性能测量时要与在轨工作温度相匹配。DPC 选用普通陶瓷封装的面阵 CCD,内部不再封装半导体制冷器,因航天探测器价格昂贵且容易损坏,故 DPC 的控温装置要尽量减少与探测器的应力接触,在满足控温整体要求的前提下,力求可靠、简单。基于上述要求设计了一种低温循环机为主,薄膜电加热器为辅的组合制冷系统,对探测器进行温度控制。制冷系统由低温循环机、薄膜电加热器、导热铜板和热敏电阻等构成,如图 4 所示。

低温循环机采用模糊比例积分微分(PID)控制算法进行控制,恒温范围为  $-40\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,恒温波动精度为  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。低温循环机通过压缩机进行制冷,再与液体进行热交换,使液体的温度降低,随后通过循环泵送出,同时使用温度控制器进行温度控制,具备恒温、冷却、循环三种功能。循环机产生的冷水与待控温的铝块换热器形成封闭的循环水路。面阵 CCD 与导热铜条之间导热安装,以提高热传导

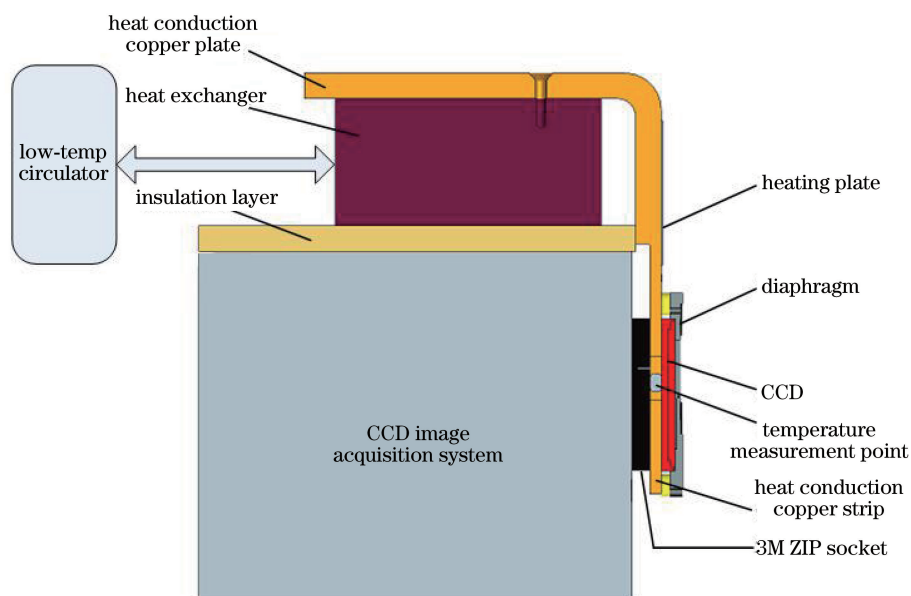


图 4 面阵探测器制冷系统示意图

Fig. 4 Structure of array CCD cooling system

效果。探测器工作产生的热量通过导热铜条传递到导热铜板即热沉上,再传递至铝块换热器,热量最后由冷却液体带走,从而保障探测器工作在设定的温度范围内。低温循环机持续对热沉进行制冷。在图像采集系统外表面和 CCD 焦平面基板等部位喷涂高发射率的消杂光黑漆,利于内部温度均匀化。CCD 通过无应力插座与图像采集系统进行连接,换热器与图像采集系统表面进行隔热安装,从而隔离了由于工作时 CCD 成像电路的温度升高对 CCD 焦平面的影响。为了防止探测器待机时温度降低,由薄膜电加热器、温度继电器和直流电源串联,构成简单的探测器组件自动控制加热系统。在导热铜板上增加主动热控功耗,进行温度补偿,当探测器温度低于设定温度时对其加热,高于设定温度时则停止加热,形成闭环控制,从而保证探测器工作温度稳定。面阵 CCD 陶瓷背面粘贴 PT1000 热敏电阻,通过数

据采集器实时精确测量探测器工作时的温度变化。

针对其他类型的面阵 CCD,将制冷系统中的导热铜条尺寸进行相应的改动,使其适用于不同尺寸的 CCD,并根据不同类型 CCD 的热耗更换相应的薄膜电加热器,则该制冷系统可应用于多种 CCD 光电性能测试时的精确温度控制。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 制冷系统的标定

将探测器制冷系统应用于多角度偏振成像仪面阵 CCD 的光电性能测试,环境温度为  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时,设置 CCD 制冷目标从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降至  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,连续采集 CCD 实际温度,如图 5 所示,CCD 温度从  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  需要  $36\text{ min}$ ,平均降温速率约  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,最大降温速率达  $0.713\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。在 CCD 温度达到稳定后,温度波动范围为  $\pm 0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,稳定后温度数

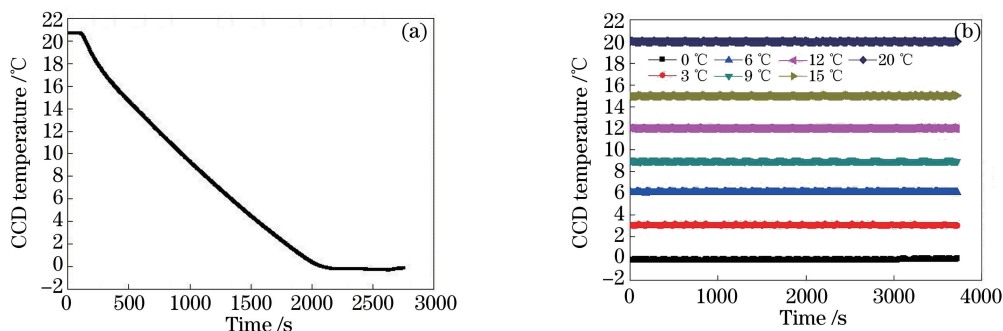


图 5 制冷控制实验结果。(a) 温度控制曲线;(b) CCD 工作温度的波动曲线

Fig. 5 Temperature control results. (a) Temperature stability curve; (b) fluctuation curves of CCD operating temperature

据标准差(SD)优于 0.038,这说明在室温环境下探测器制冷温度不受外界环境温度变化的影响,制冷电路温度的稳定性和可靠性良好,可应用于裸片探测器制冷。

#### 4.2 暗电流温度影响分析

CCD 图像传感器噪声在时间域上主要包括光子散粒噪声、读出噪声和暗电流噪声,空间域上包括暗场条件下固定图形噪声和光照条件下图形噪声。由于空间域上分布的图像噪声通过预先测量后可进行图像补偿<sup>[16]</sup>,在计算 CCD 成像系统信噪比时,通常只考虑 CCD 时间域上的随机噪声。光子散粒噪声可通过对多帧图像平均耦合来降低,读出噪声可通过采用相关双采样技术来减小。暗电流噪声属于热生电子噪声,CCD 正常曝光过程中,暗电流和光生电流同时累积于位阱,暗电流同样存在起伏,增加了 CCD 总噪声,同时暗电流占用了位阱的部分容量,导致用于存放有用光信号的空间变小。CCD 的动态范围上限取决于探测器满阱电荷能力,下限受到各种噪声的限制。暗电流噪声受 CCD 工作温度影响较大,对 CCD 制冷可使热生电荷生成速率降低,从而降低了 CCD 的信噪比和动态范围。

采用探测器制冷系统设置不同的制冷温度,测试多角度偏振成像仪面阵 CCD 的暗电流,得到 CCD 暗电流与温度的变化关系。将制冷温度分别设置在 0,3,6,9,15,20 °C,无光照条件下,通过改变探测器的积分时间,在 0~300 ms 内以 20 ms 的间隔选择 16 个点进行测试,然后以积分时间为横坐标,输出信号为纵坐标,由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,单位为  $(\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,除以系统增益  $K$ ,得到暗电流电子数,单位为  $\text{electrons} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 。探测器暗电流与温度的变化关系如图 6 所示。

从图 6 中可看出 CCD 温度较高时暗电流随温度的变化非常明显,温度升高约 6.5 °C,暗电流增加 1 倍左右,20 °C 下的暗电流是 0 °C 时的 6.93 倍左右,工作温度在 3~9 °C 之间,积分时间为 1 s 时,暗电流温度影响变化率约为  $28 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,这说明暗电流对

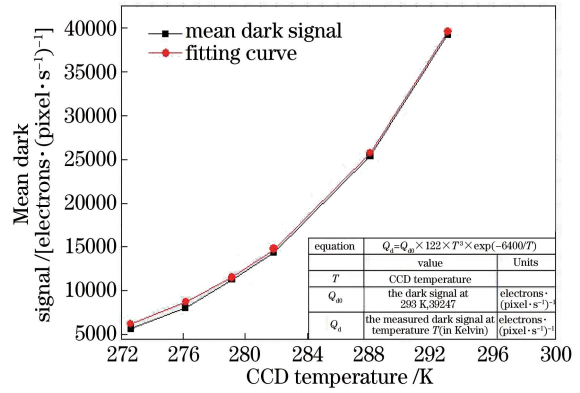


图 6 探测器暗电流与温度的变化关系

Fig. 6 Effect of temperature on CCD dark signal

工作温度有很强的依赖性。暗电流与温度之间的关系表达式为

$$Q_d = Q_{d0} \times 122 \times T^3 \times \exp(-6400/T), \quad (1)$$

式中: $Q_{d0}$  为 20 °C 下测量的暗电流; $Q_d$  为工作温度为  $T$  (单位 K) 时测量的探测器暗电流。

暗电流存在起伏,无光照条件下探测器成像时各像元响应的差异被称为暗信号响应的非均匀性,用单位积分时间内 CCD 光敏区各个有效像元产生的输出信号的标准差  $V_{\text{DEV}}$  来表征,计算公式为

$$V_{\text{DEV}} = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (y_{\text{dark},mn} - \mu_{y_{\text{dark}}})^2}, \quad (2)$$

式中: $M, N$  为面阵 CCD 光敏面像元的行数和列数; $y_{\text{dark},mn}$  为第  $m$  行第  $n$  列像元的响应值; $\mu_{y_{\text{dark}}}$  为无光照下图像有效像元的均值。计算不同温度下暗信号响应的非均匀性,结果如表 1 所示,CCD 工作在较高温度时由于热噪声的随机性,整个像面的暗信号响应非均匀性将不能忽略,对 CCD 降温可有效降低暗信号非均匀性。CCD 温度为 20 °C 时,暗电流电子数为  $39247.79 \text{ electrons} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,暗信号非均匀性为 81.6,随着温度的降低暗信号非均匀性呈指数下降,当工作温度降低到 0 °C 时,暗电流电子数降为  $5665.86 \text{ electrons} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,暗信号非均匀性降为 11.3。

由此可见控制探测器工作温度的稳定性相当重要,探测器工作温度给 DPC 仪器选择合适的工作温度提供了依据。

表 1 CCD 暗信号响应非均匀性随温度变化情况

Table 1 Dark signal non-uniformity of CCD varies with temperature

Temperature / °C	0	3	6	9	15	20
$V_{\text{DEV}}$	11.26	16.09	23.26	28.91	50.29	81.65
Number of dark current electrons / $[\text{electrons} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}]$	5665.86	8025.70	11242.97	14373.90	25388.76	39247.79

### 4.3 量子效率温度影响分析

量子效率定义为在特定波长光照下,入射光子在器件像元中产生并被收集的光电子数与入射光子数的比值,它表征了面阵 CCD 对不同波长入射光的敏感程度,通常用  $\eta$  表示<sup>[17]</sup>。量子效率导出公式为

$$\eta(\lambda) = \frac{S_{out}}{g} \times \frac{hc}{I \cdot A \cdot T_{exp} \cdot \lambda}, \quad (3)$$

式中: $S_{out}$  为光照下探测器有效像元输出的灰度值; $g$  为图像采集系统增益; $h$  为普朗克常数,为  $6.6261 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ; $c$  为光在真空中的传播速度,为  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ; $\lambda$  为入射光波长,单位为  $\text{nm}$ ; $A$  为单像元面积,单位为  $\text{m}^2$ ; $I$  为探测器光敏面接收到的绝对辐照度,单位为  $\text{W/m}^2$ ; $T_{exp}$  为曝光时间,单位为  $\text{s}$ 。

量子效率也是温度的函数,温度降低引起硅的能隙变宽,使光生电荷跃过能隙的概率变小,量子效率相应降低,这种温度的影响具有波长依赖性,近红外波段尤其明显。采用探测器制冷系统在  $400 \sim 940 \text{ nm}$  波长范围对 CCD 量子效率在不同温度下进行测试,测得的量子效率曲线如图 7 所示。测试数据表明  $0 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内光谱响应数据变化趋势和探测器厂家数据趋势基本一致。

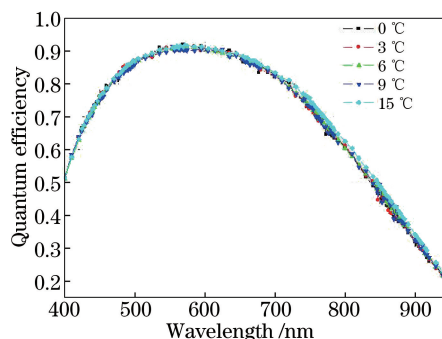


图 7 不同工作温度下的探测器量子效率曲线变化图

Fig. 7 Quantum efficiency of CCD at different temperatures

对探测器在不同波长下的量子效率的温度变化率进行统计,如图 8 所示,探测器的工作温度从  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  增加到  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $400 \sim 700 \text{ nm}$  的量子效率相差  $1\%$  左右,考虑到连续可调谐单色照明光源系统自身定标不确定度约  $1.03\%$ ,可知可见波段的量子效率基本不受温度的影响。而  $810 \text{ nm}$  波长的温度影响变化率为  $0.2993\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内总的光谱响应度波动为  $4.49\%$ ;  $900 \text{ nm}$  波长的温度影响变化率为  $0.4575\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内总的光谱响应度波动为  $6.86\%$ ;  $940 \text{ nm}$  波长的温度影响变化率为  $0.4586\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内总的光谱响应度波动为  $6.878\%$ :这说明近红外波段的量子效率受温度

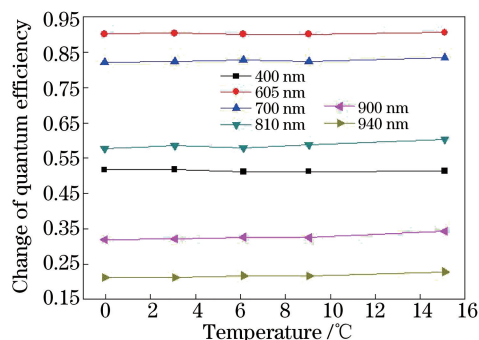


图 8 不同波长下量子效率的温度变化率

Fig. 8 Change of quantum efficiency with temperature at different wavelengths

影响较大。由此可见控制探测器工作温度的稳定性相当重要,后续在 DPC 定标测试数据预处理流程中需增加温度补偿系数校正以消除温度变化影响。

## 5 结 论

根据多角度偏振成像仪热控指标的要求,研制了一套通用性强、高精度和高稳定度的普通封装裸片探测器的制冷系统。为了尽量减少控温装置与探测器的应力接触,避免损坏昂贵的航天探测器,提出了一种基于低温循环机和薄膜电加热器组合的探测器控温方法,减小了测试光源及环境温度变化对器件自身性能的影响。实验结果表明,探测器制冷系统降温速率不大于  $0.6 \text{ }^\circ\text{C/min}$ ,温控精度优于  $\pm 0.08 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用该系统对多角度偏振成像仪中的面阵探测器的暗电流和量子效率进行温度测试,测试结果表明暗电流的双倍温度常数为  $6.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,制冷温度降低到  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  时,探测器暗电流电子数为  $5665.86 \text{ electrons} \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ ,暗信号非均匀性下降到  $11.3$ 。温度变化主要对近红外波段光谱响应度影响较大,  $940 \text{ nm}$  和  $810 \text{ nm}$  波段在  $0 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$  工作区间内最大范围波动达到  $6.88\%$  和  $4.49\%$ ,后续 DPC 地面应用系统数据处理流程中将增加温度系数的校正环节以消除温度变化影响。探测器暗电流和光谱响应度的温度特性研究为多角度偏振成像仪在轨辐射定标的温度校正提供了依据。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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.  
张苗苗, 孟炳寰, 骆冬根, 等. 星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0812004.
- [4] Tu B H , Hong J, Yao P P, et al. Temperature correction method for directional polarimetric camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 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.
- [5] 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.
- [6] Wang Y. The design of measurement system and methods of CCD chip's key performance parameters [D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 7-12.  
王杨. CCD 芯片关键性能参数的测量系统及其测量方法设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 7-12.
- [7] Wang C J, Ye B X. Astronomical visible light detector[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2013: 134-137.  
王传晋, 叶彬浔. 天文可见光探测器[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2013: 134-137.
- [8] Groom D. Quantum efficiency characterization of LBNL CCD's part1: the quantum efficiency machine [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6068: 60680F.
- [9] 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.
- [10] Shao X P, Wang Y, Gao P, et al. Measurement method and setup of the quantum efficiency for charge coupled devices [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 103-106.  
邵晓鹏, 王杨, 高鹏, 等. CCD 芯片量子效率的测量装置及其测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 103-106.
- [11] Liu H Y, Wang H F, Wang H C, et al. Research on measuring quantum efficiency of CCD based on the method of uniform optical radiation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s223001.  
刘红元, 王恒飞, 王洪超, 等. 基于均匀光辐射法测量 CCD 器件量子效率[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s223001.
- [12] Li X J. Method research and system design for testing photoelectric parameters of CCD [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 47-64.  
李晓杰. CCD 光电参数测试方法研究及系统设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014: 47-64.
- [13] Yao P P, Xu S L, Tu B H, et al. Screening and testing method of space-borne area detectors for directional polarimetric camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1112002.  
姚萍萍, 许孙龙, 涂碧海, 等. 多角度偏振成像仪面阵探测器筛选及测试方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1112002.
- [14] 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.
- [15] Zi K M, Wu Q W, Guo J, et al. Thermal design of CCD focal plane assembly of space optical remote-sensor[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 401-403, 407.  
訾克明, 吴清文, 郭疆, 等. 空间光学遥感器 CCD 焦面组件热设计[J]. *光学技术*, 2008, 34(3): 401-403, 407.
- [16] Cheng W S, Zhao J, Cai H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 314-318.  
程万胜, 赵杰, 蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 314-318.
- [17] Janesick J, Klaasen K, Elliott T. CCD charge collection efficiency and the photon transfer technique [J]. *Proceedings of SPIE*, 1985, 570: 7-19.