

文章编号 1004-924X(2026)14-2192-12

CCD 真空低温光电快速测试系统的设计与验证

刘国华¹, 杨 森², 王 煜^{1*}, 林 方³

(1. 安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

3. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031.)

摘要: 星载科学级 CCD 成像电路需要精密调配多种参数, 以期达到最佳效果。成像电路设计过程中需要根据实测结果去优化这些参数, 其中的一些实验需在低温真空下进行。而传统测试设备体积大、热循环耗时长。本文研制了一套小型化的杜瓦装置, 以适应 CCD 电路测试的需求。首先, 搭建了“无油高真空+脉管制冷机+精密温控”的系统架构。接着, 通过抽气动力学与冷量传递实验验证了系统性能。然后, 依托该系统便捷装调的特性, 快速迭代前端电路参数。最后, 采用光子转移曲线 (PTC) 法, 对 CCD275 分别在常温 (298 K) 和在轨低温 (248 K) 下进行对比实验, 评估了不同参数在实现满阱读出时的效果。系统实现了优于 5.0×10^{-5} Pa 的极限真空及带载 215 K 的测试环境, 具备快速抽排气、无需液氮、方便装调的优势。实验测定 6 片 CCD275 在 248 K 低温 @ 2.5 MHz 读出频率下的有效满阱达到 800~900 k e⁻/pixel/s。该系统大幅提升了 CCD 真空低温测试与参数迭代的效率, 其测试结果满足卫星总体对信噪比和动态范围的要求, 为未来更多科学级 CCD 的综合调试提供了一个高效、通用的系统解决方案。

关键词: 星载 CCD; 真空低温系统; 光子转移曲线 (PTC); 满阱容量; 高效测试

中图分类号: TP74; V416.8 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20263414. 2192

CSTR: 32169. 14. OPE. 20263414. 2192

Design and verification of a fast vacuum cryogenic optoelectronic test system for CCD

LIU Guohua¹, YANG Sen², WANG Yu^{1*}, LIN Fang³

(1. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

3. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China.)

* Corresponding author, E-mail: yuwang@aiofm. ac. cn

Abstract: A spaceborne scientific CCD (Charge-Coupled Device) needs a well-adapted peripheral circuit to achieve its best performance. In the design of peripheral imaging circuits, several parameters—such as series resistors, offset voltages, the overlap of driving clocks, etc.—must be optimized according to the feedback of actual tests. Some tests must be conducted under low-temperature conditions to match the environment where the CCD is to be finally installed. Such low-temperature vacuum equipment previously used was designed for entire payloads, making it too bulky for individual CCD devices and front-end cir-

收稿日期: 2026-04-08; 修订日期: 2026-05-20.

基金项目: 安徽省青年基金项目 (No. 2108085QF283); 国家重点研发项目 (No. 2024YFC3712905)

cuits. Due to this bulky size, it took extra time and cost a huge amount of liquid nitrogen. Thus, a compact, cryocooler-based Dewar was designed in this paper. First, a system composed of an oil-free vacuum unit, a pulse tube cryocooler, and a precise temperature control unit was built. Then, the performance of the system was verified through vacuum pumping dynamics and cold-transfer experiments. Next, with the test system, the circuit parameters were modified and optimized according to the feedback of the experiments, which were rapidly repeated several times by taking advantage of the "quick-operation" feature of the test system. Finally, utilizing the photon transfer curve (PTC) method, comparative experiments were conducted on the CCD275 at both room temperature (298 K) and the on-orbit operating temperature (248 K) to evaluate the effectiveness of different parameters in achieving full-well readout. The system achieves an ultimate vacuum of better than 5.0×10^{-5} Pa and sustains a stable testing environment of 215 K under thermal load, offering rapid evacuation, low cost, convenient installation, and a dedicated design for CCD circuit tests. The tests and measurements on six CCD275 chips show that the effective full-well capacities are in the range of 800 000 to 900 000 electrons per pixel at 248 K with a readout frequency of 2.5 MHz. This system significantly enhances the efficiency of CCD testing and circuit modifications. The test results meet the application requirements for the signal-to-noise ratio and dynamic range. In conclusion, this paper discusses the design and implementation of the test system, providing a convenient and versatile testing and debugging solution for scientific-grade CCDs.

Key words: spaceborne CCD; vacuum cryogenic system; Photon Transfer Curve (PTC); full well capacity; high-efficiency testing

1 引 言

用于大气探测的星载光学遥感设备,多使用 CCD 作为探测器件。CCD 探测器接收的背景光本质上是太阳光经大气传输、地面反射后再次穿透大气到达入瞳的能量^[1]。这一光信号受多重物理因素的调制,具有很大的动态范围。首先,太阳辐射强度随波长变化,以 400~500 nm 谱段为例,其光谱辐照度的最大值与最小值之比约为 1.9 倍;其次,地表目标的双向反射分布函数(Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF)差异巨大,变化范围可达 0.1~0.8;再者,地表反射率还受太阳高度角的调制,在 0° ~ 60° 的典型观测范围内,反射率相对变化量约为 2 倍。综合考虑大气散射及仪器内部传输损耗,到达探测器的背景光信号相对动态范围往往超过 30:1,甚至更高^[2]。

与此同时,星载成像光谱仪通常采用推扫成像模式,单次曝光的视场覆盖地面跨度可达上千公里。在如此宽广的范围内,地面反射率变化很大,相机无法针对某一特定区域进行独立的曝光调节。曝光时间首先要满足一幅图像中最亮的

地点不至于饱和,光强暗的区域也能保证足够的信噪比。作为测量气体成分空间载荷,测量精度是主要设计指标。而测量精度由像元信噪比决定。大阱深 CCD 的噪声来源主要是散粒噪声,在忽略读出噪声的条件下,单点测量的信噪比为 $\sqrt{N}$, N 为单点测量的量子数。因此,在光谱测量中,追求更大的满阱容量是提升探测精度和能力的根本途径。然而,物理规律决定了满阱容量与读出速度之间存在矛盾:满阱的增大会显著增加电荷转移时间,从而限制读出帧频^[3]。如何在保证高速读出的同时维持高动态范围,是成像电路设计的核心难点。

为了解决上述矛盾,必须对 CCD 进行精细化的地面标定与电路优化。虽然 CCD 在出厂时附带了标称满阱值,但该数据通常基于低速读出测试条件。实际在轨应用的高速驱动条件下,该数据不适用。因此,研究人员必须通过大量的光子转移曲线(Photon Transfer Curve, PTC)实验来指导 CCD 电路的参数调整,获得有效满阱值^[4]。

这一优化过程是一个复杂的多变量耦合系统。在高速条件下,影响读出满阱的因素包括:各相偏置电压、各相驱动电流、各相时序分配及

时序交叠。这些参数的排列组合是一个天文数字,往往需要依赖成熟的经验并通过多次迭代实验才能找到最优组合。在精细调整时,满阱的变化无法直观看到,必须通过准确的 PTC 测量,反馈参数变化的影响,指导电路调整的方向,PTC 测量时,室温条件下与低温条件下得到的有效满阱值不一样,所以最终的测量要在与卫星载荷相同的工作温度下进行。

通常来讲,对于大气观测载荷中使用的 CCD,工作温度降至 263 K~223 K,足够忽略暗电流对满阱的影响^[5],但是为了获得这一环境温度,CCD 就必须置于真空低温罐体中。CCD 前端电路中驱动器的输出限流电阻需要精准匹配 CCD 芯片,使得整个成像电路获得速度和读出能力的最佳匹配。而前端电路紧靠 CCD 芯片,二者都置于真空罐内。每一次调节这些驱动时钟的限流电阻,都必须经历“开罐调整→抽真空→降温→测试→复温→放气→开罐”的漫长循环。

近年来,国内外针对星载光电器件的真空低温测试系统开展了大量研究,但现有系统在应对器件级电路参数高频迭代时普遍面临效率问题。大型热真空设备主要面向系统级联调,系统热质量大,导致单次真空建立与温度平衡周期长,运行复杂且时间成本高昂^[6]。而现有的小型真空杜瓦设备虽然在一定程度上缩短了测试周期,但在进行焦平面阵列探测器的低温标定实验时,仍需数小时甚至更久才能建立稳定的工作环境^[7]。更为致命的是,受限于传统的封闭式“死杜瓦”结构与狭窄的内部空间,前端驱动电路和匹配电阻的安装与更换非常困难^[8]。每一次成像电路硬件调整都受制于漫长的环境破坏与重建过程,严重制约研发进度。因此,针对成像电路的参数优化需求,急需研制一种运行效率高和装调便捷的测试系统。

为此,本文针对星载 CCD 成像电路的研制需求,提出了一种小型化的真空低温测试系统。其具备抽气快、降温快、回温快、放气快、电路装调方便的优点。

2 原理

2.1 CCD 暗电流机制

根据 CCD275 的技术手册,暗电流随温度变

化的经验公式为^[9]:

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

其中: Q_{d0} 是 293 K 时的暗电流, Q_d 是单个像元在温度 T 时产生的暗电流,单位均为 $e^-/\text{pixel/s}$, T 为开尔文单位下的温度。系数 A 是一个无量纲的经验修正因子。由于探测器的批次、材料、工艺等因素的差别,探测器实际的暗电流性能可能与手册值有所区别,需要以实际测试值为准。

像元实际累积的暗电流与累积时间有关,表示为:

$$E_d = Q_d \times t_{id}, \quad (2)$$

其中: E_d 为在一定时间内累积的暗电流电荷数,单位为 e^- , t_{id} 为暗电流的累积时间,单位为 s。

查技术手册可知, A 的取值为 122, Q_{d0} 为 $88k e^-/\text{pixel/s}$,满阱为 $800k e^-/\text{pixel/s}$ 。本文述及的大气探测载荷 CCD 最大曝光时间为 1 s,在轨工作点温度 248 K 左右。结合公式(1)、公式(2),以 $t_{id} = 1 \text{ s}$, $T = 248 \text{ K}$ 时,计算 E_d 为 $1.02k e^-/\text{pixel/s}$,占满阱值比例约 1/800;再以 $t_{id} = 1 \text{ s}$, $T = 215 \text{ K}$ 时,计算 E_d 为 $12 e^-/\text{pixel/s}$,占满阱值比例约 1.6×10^{-5} 。

由计算可知,温度越低,暗电流越小。248 K 时,暗电流已经被压制得很低了。虽然更低的温度可以使暗电流更小,但是代价就是卫星需要携带更大的“辐冷板”,平衡设备性能和工程代价,将工作温度设为 248 K。所以本文以下的 PTC 测试都是以 248 K 为默认低温条件。

2.2 冰饱和蒸气压模型

对于工作在低温的光学探测器而言,如果环境真空度不足,水分子将直接在 CCD 感光面或杜瓦窗上发生“气-固”相变。这会导致测试数据失效或器件损坏。所以对于一个真空低温系统,需要根据内部制冷温度,确定其真空度。真空环境在此起到保障制冷效率和防止试件表面水分冷凝两个作用。

水的饱和蒸气压随温度降低而急剧下降。如果真空腔内的水汽分压高于 CCD 表面温度对应的冰饱和蒸气压,水分子就会在表面驻留并结晶。反之,如果真空系统的本底压力远低于冰饱和蒸气压,即使表面存在微量冰晶,它们也会发生升华,重返气相被分子泵抽出。实际工程中,通常使用戈夫-格拉奇模型计算真空低温测试系

统的真空度:

$$\log_{10} e_i = -9.1 \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) - 3.57 \log_{10} \left(\frac{T_0}{T} \right) + 0.88 \left(1 - \frac{T}{T_0} \right) + \log_{10} (e_{i0}), \quad (3)$$

其中: e_i 为冰面饱和蒸气压(单位: hPa); T 为绝对温度(单位: K); $T_0 = 273.16$ K(水的三相点温度); $e_{i0} = 6.12$ hPa(水在三相点的蒸气压)。

2.3 真空抽气动力模型

由常见的工程操作规范可知,如果需要将某个真空罐抽至极限真空,一般分为两个过程“粗抽阶段”和“高真空阶段”。首要原因是高真空泵无法直接对大气排气,其次是大气从标准大气压到 10 Pa 以下,有一个气流状态的转变,不同的气流状态需要不同的抽气机械结构。

根据真空抽气动力公式:

$$T = 2.3 \times K_p \times \frac{V}{S_p} \times \lg \frac{P_i}{P_t}, \quad (4)$$

其中: T 为抽气时间,单位 s; P_i 开始抽气时的压力,单位 Pa; P_t 为抽气时间 t 后压力,单位 Pa; S_p 为泵的名义抽速,单位 L/s; V 为设备容积,单位 L; K_p 为修正系数;

当真空罐容积一定,选定合适的抽气泵,可以计算出从标准大气压 10^5 Pa 抽到低压 10 Pa 所需的时间。

再根据极限真空度计算公式:

$$P_j = P_o + \frac{Q_o}{S}, \quad (5)$$

其中: P_j 为极限真空度,单位 Pa; P_o 为高真空泵极限真空度,单位 Pa; S 为高真空泵对真空罐的有效抽速,单位 L/s; Q_o 为气体总负载,单位 Pa·L/s。

可以计算出从低压 10 Pa 抽到 10^{-1} Pa 以下极限真空所需的时间。

3 测试需求分析

本系统最初的目标是实现 CCD275 电路调试和测试环境。CCD275 是一款大靶面、背照式(Back-Illuminated)帧转移面阵 CCD。根据 CCD275 技术文档和电路测试需求,结合器件特性及测试场景,形成以下核心需求分析,为系统设计指标提供依据:

3.1 低温需求

为精确测量读出噪声和系统增益,必须将环境温度降至暗电流可忽略不计的水平,使得曝光时间内的积分电荷远小于满阱电荷,实现对本底噪声的“纯净”测量,不影响 PTC 测量结果^[7]。根据 2.1 节的理论分析,该系统初始服务的项目中,CCD 的工作温度设置为 248 K,考虑未来同类载荷工作温度可能更低,为覆盖更多同类产品的研制需求,系统的设计温区定为 203~303 K,且在 223 K 时须具备带载(350 mW 热负载)能力。

3.2 真空需求

根据 2.2 节的冰饱和蒸气压模型可知,在 203 K 低温下,冰的饱和蒸气压约为 3.7×10^{-3} Pa,只有将极限真空度抽至该数值以下,才能从热力学上根除水汽在 CCD 光敏面凝华结冰的风险,防止光学污染及冰晶膨胀损坏键合线。同时,在此真空度和温度下,气体分子的平均自由程约为 1.22 m,气流进入分子流状态,能彻底消除气体对流传热^[10],降低制冷负载,确保制冷机冷量的有效利用和芯片表面的高精度温控。最后是电气安全屏障,根据帕邢定律,100~1 000 Pa 是气体击穿电压最低的危险区。设计在 10^{-3} Pa 量级不仅远离了该危险区,还因为气体分子极度稀薄,电子在飞过电极间隙时难以发生碰撞电离,从而消除 CCD 高压驱动信号(如 30 V)引发电晕或飞弧放电的风险,确保昂贵航天器件的安全。

3.3 便捷调试与紧凑结构需求

考虑到 CCD 探测器在测试中需频繁拆装、校准与调试,真空罐体的设计必须在操作便捷性与结构紧凑性之间取得平衡。内部空间既要保证调试流程的可实施性,又要通过最小化容积来减轻制冷系统的热负载。为提高实验效率,罐体前后端需采用铰链式快开结构(活柱瓦)。前舱门集成视窗与遮光罩,便于实时观察 CCD 状态并调整光路及布线;后舱门则承载前端电路与控温单元,方便实验人员快速拆装电路及布局温控点。这种双向开门的紧凑设计,可有效缩短实验准备与故障排查的周期。根据实际测试需求和经验,期望每次抽气排气时间应少于 1 小时。根据 2.3 节公式(4)和公式(5),抽气时间由目标真

空度和真空泵的抽气效率决定。后续真空抽气单元的设计将以此为依据。

3.4 光学测试适配需求

与大型的真空测试设备不同,该系统前舱门需要设计一块高强度 K9 玻璃,导入平行光管或积分球产生的光线,以完成量子效率、响应均匀性、PTC 等测试。同时,测试过程中杂散光会干扰测量精度,需同步设计遮光结构,最大限度消除环境光及反射光的影响,确保光学测试数据的准确性。

3.5 制冷机设计需求

小型化设计,使得制冷机的使用成为可能,与液氮制冷相比,制冷机降低了使用成本。但制冷机工作时会产生振动,若直接传递至 CCD 芯片,会引发像移问题,影响成像质量及测试数据的稳定性。因此,需通过结构优化实现制冷机冷头与 CCD 芯片的柔性连接,有效缓冲振动传递,避免振动对测试过程及器件性能造成不利影响。

基于上述分析,测试系统应具备:

(1)带载温控范围:350 mW 功率的 CCD 温控范围(223~303 K)。

(2)真空度:优于 3.7×10^{-3} Pa。

(3)真空罐: $\varnothing < 1.22$ m,前后舱门可快速开合。

(4)光学接口:大口径光学窗口,遮光设计以消除杂散光。

(5)制冷机:制冷机冷头与 CCD 芯片之间柔性连接,减少振动带来的像移影响。

根据理论与需求分析,本系统采用如下流程进行整体架构设计与实验验证,如图 1 所示。

4 系统方案设计

本系统基于模块化架构设计,通过集成真空容器、抽气单元、低温制冷单元与测控单元,构建了结构紧凑、响应迅速的 CCD 低温测试平台。如图 2 所示。

4.1 真空容器单元

真空容器(杜瓦)作为系统的物理边界,需综合考虑力学强度、真空密封性能及光路系统的稳定性。本设计方案采用卧式圆柱形构型,

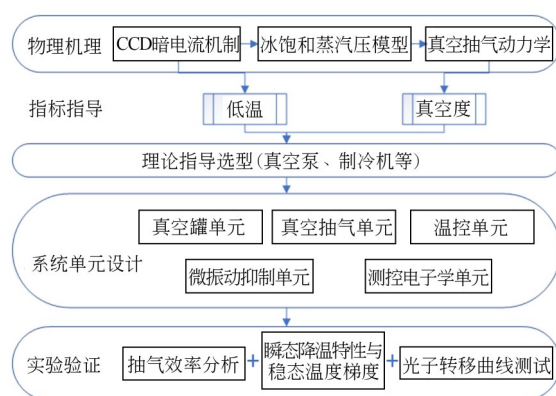


图 1 系统整体架构设计与验证流程

Fig. 1 System architecture design and verification process

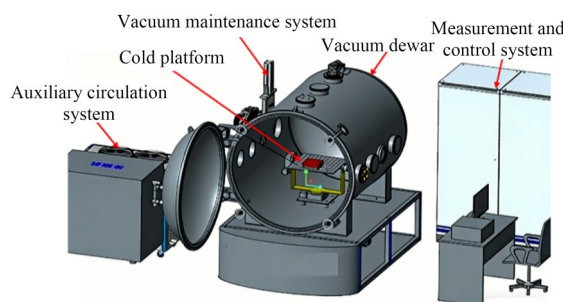


图 2 低温真空系统方案设计

Fig. 2 Design of cryogenic vacuum system scheme

相比矩形腔体,该结构能显著优化应力分布,且更易于精密加工与真空清洁(见图 3)。容器主体尺寸定为 $\varnothing 450 \times 400$ mm,在满足 $\varnothing < 1.22$ m 空间约束的同时,为内部电路的灵活组装与维护预留了充足空间。材料选用 304L 超低碳不锈钢,旨在利用其优异的焊接工艺性能及极低的真空出气率。在前舱门中心位置开设直径为 $\varnothing 350$ mm 的大口径通光孔作为

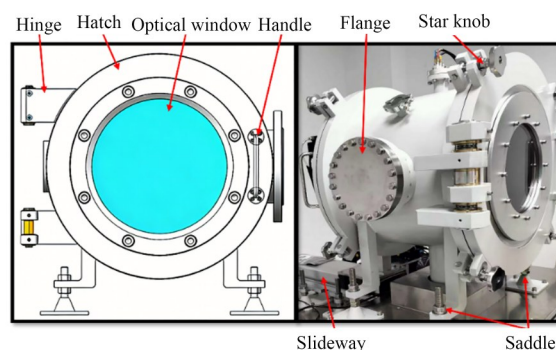


图 3 真空容器单元

Fig. 3 Vacuum container unit

光学窗口,并嵌入 K9 光学玻璃。该材料在紫外(UV)至近红外(NIR)波段具有高透过率,且凭借其极低的热膨胀系数,能够有效抵御真空环境引起的温差应力。

前舱门采用铰链式悬臂结构,通过 4 个不锈钢星形旋钮(梅花螺杆)及配套把手实现快速锁紧与开启(见图 4)。舱门支持水平扇形开启,最大摆角可达 180° 。舱门与罐体接合面嵌入氟橡胶 O 型密封圈以确保真空完整性。为抑制系统背景杂散光,窗口内侧配置了经发黑工艺处理的遮光罩,通过多次反射吸收非视场入射光。此外,该遮光罩具备多自由度微调功能,允许在水平与垂直方向上进行位置补偿,从而精确界定有效通光口径。

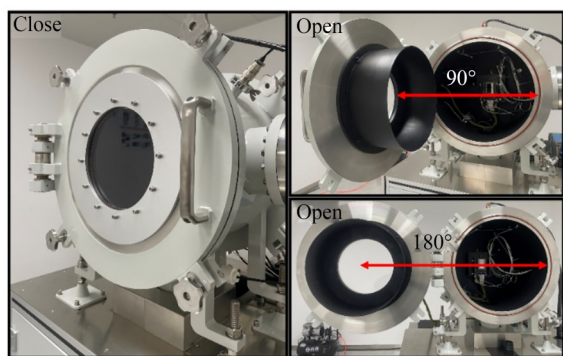


图 4 前舱门结构

Fig. 4 Front hatch structure

为提升系统的操作便利性与可维护性,后舱门采用抽屉式滑轨机构,最大行程为 31 cm。该机构通过手轮联动丝杠驱动,配合锁定装置,可在行程范围内实现任意位置的可靠固定(见图 5)。探测器电路板、制冷冷指及热沉组件整体集成于后法兰。后法兰与罐体同样采用圆形密封

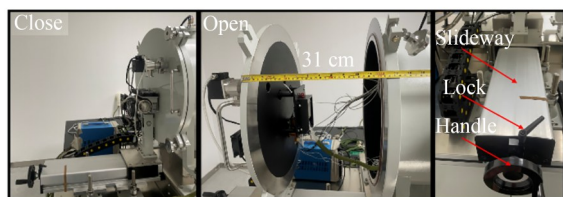


图 5 后舱门结构

Fig. 5 Rear hatch structure

圈密封,并由 4 个对称布置的不锈钢螺杆紧固。这种整体抽屉式设计将复杂的探测器装配与引线焊接工序移至腔体外部操作,有效规避了在狭窄空间内作业带来的机械损伤风险,显著提升了装配精度与效率。

4.2 真空抽气单元的动力学计算与选型

真空抽气单元的核心任务是在合理时间内达到 10^{-4} Pa 量级,并维持动态平衡。

基于 2.3 节的理论分析,真空抽气分两段进行:

- (1) 从 10^5 Pa 抽至 10 Pa 用粗抽泵进行抽气;
- (2) 10 Pa 以下抽至技术要求规定的工作真空度和极限真空度,由分子泵来完成。

假设配置的抽气单元有效抽速为 100 L/s,气体总负载按常温、空载 10 小时的气体负载计算,根据公式(4)可知从标准大气压抽至 10 Pa 大约需要 7 min,当 $Q_0 = 0.081 \text{ Pa}\cdot\text{L/s}$,代入公式(5),得: $P_j = 1.2 \times 10^{-4} \text{ Pa} < 3.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,满足技术要求。

结合工程实践经验,最终选择了抽速为 700 L/s 的莱宝 TURBOVAC 350i/ix 分子泵作为主泵,选择抽速为 8 L/s 爱德华 nXDS10i 涡旋式干泵作为粗抽泵,真空阀门均选用高真空气动插板阀及挡板阀。为了减少前级粗抽泵的振动影响,粗抽泵与真空容器之间采用波纹管连接。如图 6 所示。

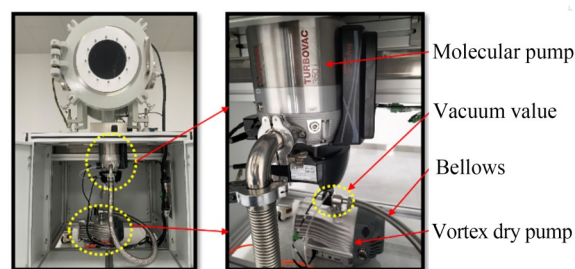


图 6 真空抽气单元

Fig. 6 Vacuum pumping unit

真空度的测量是由 1 套 ZDF-5214 电阻+电离复合真空计完成。真空规采用 KF 快卸接口,分别安装于容器顶部和底部,真空计安装于设备控制柜面板。如图 7 所示。

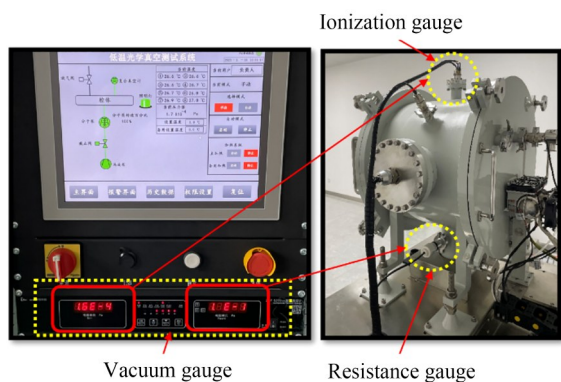


图 7 真空度测量单元

Fig. 7 Vacuum measurement unit

4.3 温控单元与微振动抑制

CCD275在高频读出状态下的功耗约为350 mW,叠加真空罐体内部的辐射漏热以及紧靠焦平面的前端放大电路产生的寄生热负荷,系统对冷源的制冷量与传热效率提出了较高要求。同时,星载成像对相机的视轴稳定性极其敏感,任何微米级的机械振动都会导致点扩散函数(PSF)的展宽,从而严重影响光子转移曲线(PTC)等测试数据的有效性^[11-12]。为此,本系统设计了“脉管制冷机冷指—柔性无氧铜带—CCD次级热沉”的三级热传导与微振动解耦架构。

4.3.1 一级冷源:基于相位调制的低振动冷指

常见的小型化机械制冷机多采用Gifford-McMahon循环,其冷头内部存在往复运动的机械排出器,会产生较强的周期性冲击振动。本系统综合评估后,选用中科力涵TC3380脉管制冷机(PTR)作为一级冷源(提供3 W@77 K的额定制冷量)。脉管制冷机的优势在于取消了极低温区的运动部件,仅依靠脉管内氦气压力波的连续相位调节机制实现交变流动制冷。这种物理机制从源头上削减了基频及高次谐波的振动激励,为后级的动力学隔离奠定了基础。

4.3.2 二级柔性冷链:热流体传输与机械解耦

为彻底隔绝由制冷机压缩机传递至冷指的残余微振动,系统在冷指(动端)与CCD焦平面热沉(静端)之间介入了柔性传热介质。该柔性冷链由多股线径极细的高纯度无氧铜(OFHC)编织带并联构成(如图8所示)。

柔性铜带由于自身刚度极低,在机械传递函数中充当了一个“低通滤波器”。冷头产生的高

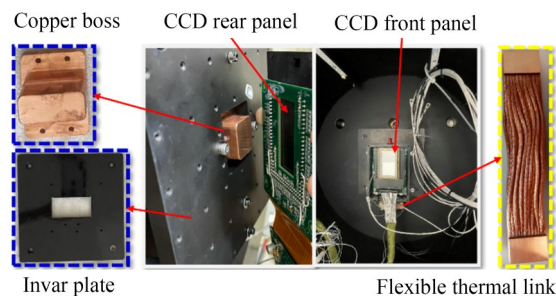


图 8 微振动抑制单元

Fig. 8 Micro-vibration suppression unit

频微小位移在多股铜丝的形变与股间摩擦中被转化为内能耗散,使得传递至末端热沉的振幅衰减至亚微米量级,实现了物理动力学解耦。

依据傅里叶导热定律,柔性多股编织结构虽然增加了界面接触热阻和体热阻,但通过增加铜带的总截面积并缩短热传输路径长度,有效控制了沿程的传导温度梯度。另外,这种柔性连接还增加了系统的装配冗余度。在进行高频次的电路参数迭代时,操作人员通过抽屉式后舱门即可整体拖出测试工装,柔性冷链能够自适应结构形变,提升了系统的装调效率。

4.3.3 三级靶面热沉与高效热循环机制

三级热沉(CCD载板)不仅作为吸热端,还起着均温和机械支撑的作用。为了克服低温下材料收缩引起的应力形变,CCD直接贴合面的材质选用了与芯片陶瓷基底热膨胀系数(CTE)相匹配的殷钢(Invar)和无氧铜基座(如图8所示),确保了靶面的温度场均匀性。

此外,尽管制冷机提供了较强的低温环境,但在 10^{-3} Pa量级的高真空环境中,自然复温仅能依靠极其微弱的辐射传热,耗时漫长,这严重制约了研发测试进度。为了提高系统的“快速热循环”效率,在三级热沉背面耦合了双路薄膜加热器进行主动回温(Active Warm-up)。该闭环控温系统通过PLC逻辑实现安全互锁:只有当焦平面靶面温度被主动加热至环境露点温度(通常略高于298 K)以上时,系统才允许执行放气与开门动作。该设计在保证核心器件免受冰晶凝结与光学污染的同时,将原本需要数小时的回温周期压缩至数十分钟内,真正实现了“快速降温—高效测试—安全快速复温”的闭环迭代能力。整个控温单元如图9所示。

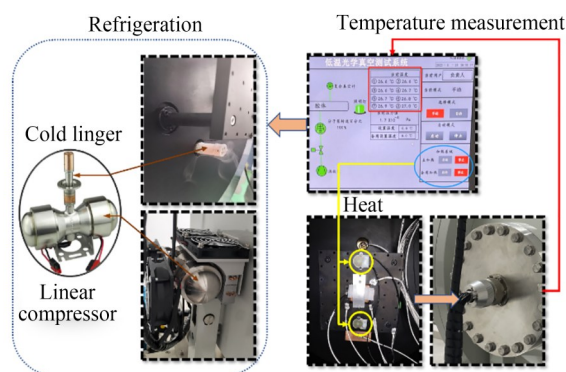


图 9 温控单元

Fig. 9 Temperature control unit

4.4 测控电子学架构

系统采用“真空内-真空外”分离的电子学布局。CCD 及极少量的无源元件位于真空室内(如图 10(a)所示),通过柔性 PCB 板连接至法兰处的 CX55 气密接插件(如图 10(b)所示)。成像电路板放置在真空室外(如图 10(c)(d)所示)。这种布局既减少了真空内的热源,又便于电路调试,但也对线缆的屏蔽和抗干扰能力提出了更高要求。

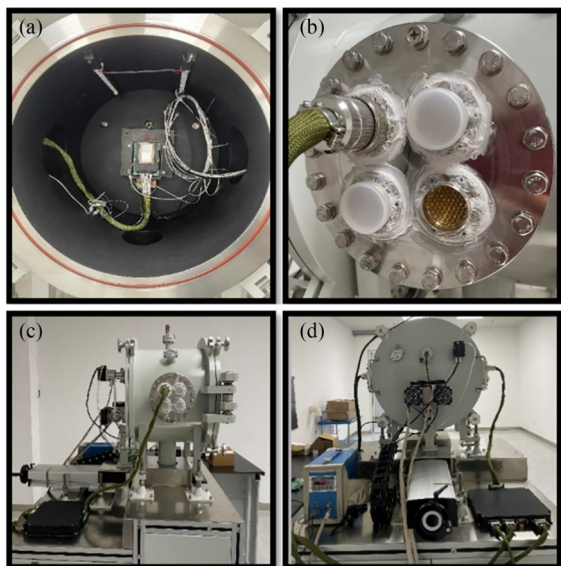


图 10 测控电子学布局

Fig. 10 Layout of measurement and control electronics

法兰上设计了 4 个 CX55 气密接插件,实际使用 2 个,另外 2 个备份,以满足不同 CCD 电路的调试需求,同时法兰也可替换。

5 实验验证

为了验证系统的各项指标并完成 CCD 的性能标定,本文设计了以下实验流程。

5.1 真空抽气效率分析

实验记录了真空度随时间的下降曲线。结果显示:

5.1.1 粗抽阶段

从大气压抽至 10 Pa 耗时约 8 min,与设计估算的 7 min 吻合度较高。如图 11 所示。在仅开启涡旋式干泵的粗抽阶段(压力 ≥ 10 Pa),真空系统压力随时间呈对数衰减趋势:抽气初期(0~2 min)压力从约 10^5 Pa 快速降至 10^{-3} Pa,排气效率较高;中期(2~6 min)抽速放缓,压力缓慢降至约 10^{-2} Pa;后期(6~8 min)接近涡旋式干泵极限抽气能力,压力缓慢降至 10 Pa 左右,为后续启动分子泵进入高真空阶段奠定了基础。

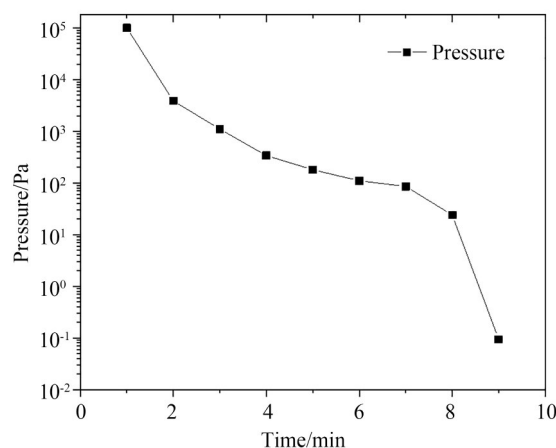


图 11 粗抽阶段真空度变化趋势

Fig. 11 Vacuum degree variation trend during the rough pumping stage

5.1.2 精抽阶段

在涡旋式干泵与分子泵联合抽气阶段,系统压力呈现“快速陡降-平稳过渡-缓慢衰减”的特征:初期压力从粗抽末期水平急速降至 10^{-2} Pa 量级,体现分子泵启动后的高效抽气性能;中期压力缓慢下降,约 50 min 降至 10^{-3} Pa 以下;随后持续下降并趋于收敛,最终稳定在 5.0×10^{-5} Pa 量级,表明联泵抽气系统可有效突破粗抽极限,实现中高真空环境的稳定建立,满足测试需求。如图 12 所示。

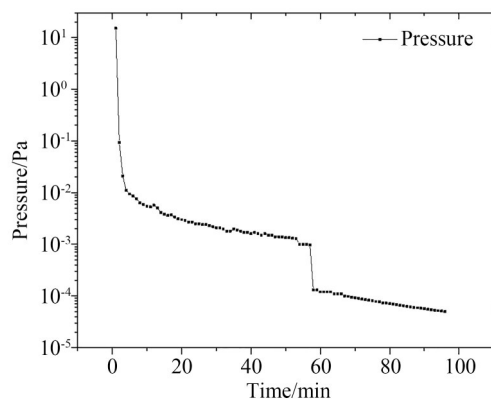


图 12 精抽阶段真空度变化趋势

Fig. 12 Vacuum degree variation trend during the fine pumping stage

5.2 瞬态降温特性与稳态温度梯度

在 10^{-3} Pa 真空条件下的降温实验中,制冷机冷头(黑色曲线)、柔性铜带末端(红色曲线)及 CCD 探测器(蓝色曲线)的温度均随时间呈单调下降趋势(彩图见期刊电子版),并形成稳定的温度梯度。当制冷机工作点设定为 193 K 时,冷头在约 55 min 内从室温附近降至约 193 K,柔性铜带末端稳定在约 203 K,功耗约 350 mW 的 CCD 探测器最终稳定在约 215 K。该结果表明,低温系统在高真空环境下具备良好的瞬态降温能力与热传导特性,可通过柔性铜带实现从冷头到探测器的有效热沉传递并形成预期的稳态温度梯度;同时,当前温度并非制冷单元的极限,若进一步降低制冷机工作点,CCD 探测器可达到更低的工作温度。如图 13 所示。

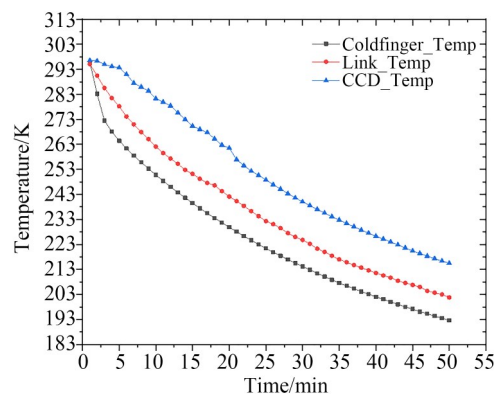


图 13 三个特征点的温度变化对比

Fig. 13 Comparison of temperature variations at three characteristic points

5.3 光子转移曲线(PTC)测试

PTC 是标定 CCD 性能最权威的方法,它建立起了信号、噪声与增益之间的关系^[13]。通过下面的步骤对 6 片 CCD275 进行常温(298 K)和低温(248 K)下的 PTC 实验。

(1) 平场照明:利用积分球提供极其均匀、稳定的光源照射 CCD。

(2) 数据采集:在不同的光强下,使用 2.5 MHz 的读出速度,采集两帧完全相同的图像(Frame A 和 Frame B),光强范围需覆盖从暗场到满阱饱和。

(3) 差分计算:计算差分图像 $\Delta = A - B$ 。差分操作可以去除固定模式噪声(FPN),仅保留随机的时间噪声(读出噪声+散粒噪声)。

(4) 统计分析:计算平均信号量 $\bar{S}$ (图像 A 和 B 的均值相加除以 2,单位:ADU);计算差分图像 Δ 的方差 σ_{diff}^2 ,则单帧图像的噪声方差为 $\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{diff}}^2/2$,这里的 σ_{total} 包括了读出噪声和散粒噪声。在实际的测试中,会以相同温度下的暗场均值表示成像系统本底,暗场噪声代替读出噪声(成像系统本底噪声),暗场噪声在暗场条件下同样以上述两幅图像相减的差分计算的方法获得,这种条件下光生电子趋近于零,但常温下会有一部分暗电流噪声影响测试结果^[14]。

根据 2.1 节 CCD 暗电流模型,可以得到暗电流的理论变化曲线。248 K 温度下,理论暗电流约为 $1.02 \text{ k e}^-/\text{pixel/s}$,实测暗电流为 $581 \text{ e}^-/\text{pixel/s}$;215 K 温度下,理论暗电流值约为 $12 \text{ e}^-/\text{pixel/s}$,该温度下暗电流过小无法实测得出,只能通过将较高温度测试结果进行拟合的方式获取,结果大约为 $5 \text{ e}^-/\text{pixel/s}$ 。理论暗电流和实测暗电流的对比曲线如图 14 所示。可见,随着温度的降低,理论计算暗电流和实测暗电流都快速变小,低于 215 K 之后,暗电流几乎接近 0。

常温下和低温下拍摄的光子转移曲线,如图 15 所示,图中横坐标表示光强的像元值(DN),纵坐标表示由光生电子产生的散粒噪声(DN^2),图中虚线为光子转移曲线线性部分的拟合结果。需要注意的是图中的横坐标光强扣除了暗场均值,纵坐标散粒噪声为总噪声扣除了读出噪声的

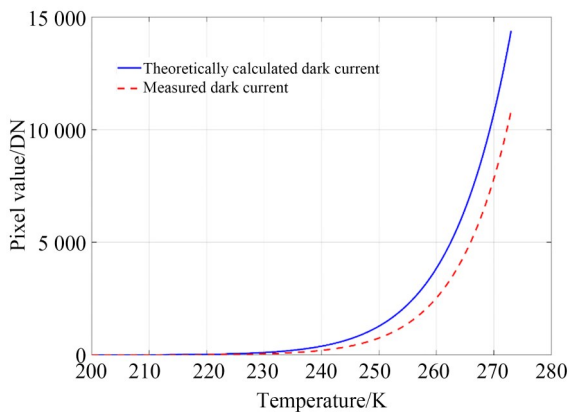


图 14 理论计算暗电流和实测暗电流对比

Fig. 14 Comparison between theoretically calculated dark current and measured dark current

结果。

随着信号增加,散粒噪声增加,二者呈现线性关系,曲线斜率即为成像系统电荷数到像元值的对应关系,对线性部分进行拟合,可以计算出系统增益(单位: e^-/ADU)。随着信号的继续

增加,在高信号端,当像元势阱填满时,电荷溢出导致噪声急剧下降,曲线出现转折,该转折点对应的信号量即为有效满阱容量(e^-),使用最大像元值除以系统增益,能够得到成像系统的满阱容量^[15]。图 15 中两次测试的结果如表 1 所示。

在表 1 中,可以看出来二者拟合斜率接近,低温 PTC 的拟合优度要好于常温 PTC,这是由于常温 PTC 的线性区叠加了暗电流的散粒噪声。低温 PTC 的方差更大,对应的像元满阱值也更大,这是因为在常温测试时,暗电流无法忽略,占据了一部分的满阱值,常温下本底均值和标准差分别为(1640DN,7.84),低温下本底均值和方差分别为(560DN,6.32)。

综上,所设计的 CCD 低温光学真空测试系统,其关键指标验证结果如表 2 所示。

另外,为系统阐明本系统在不同设计与测试阶段的真空度演变关系,各关键节点的真空度数归纳如表 3 所示。

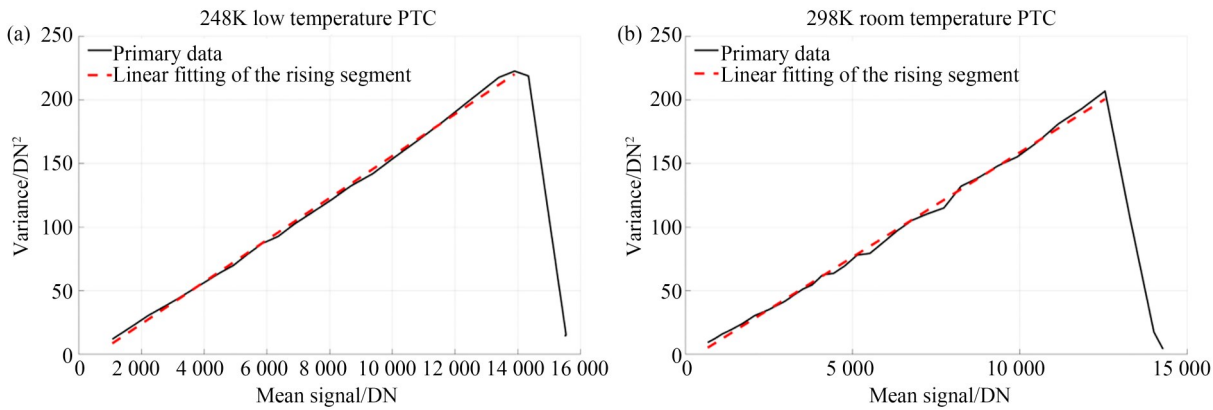


图 15 低温和常温下的光子转移曲线

Fig. 15 Photon Transfer Curves (PTC) at cryogenic and room temperatures

表 1 低温和常温下的 PTC 性能对比						
Tab. 1 Comparison of PTC performance at cryogenic and room temperatures						
	温度	拟合斜率	拟合优度(R-Square)	方差最大值	满阱像元值	有效满阱
(a)低温 PTC	248 K	0.016 5	0.998 44	222.637	13 900	842 424.2
(b)常温 PTC	298 K	0.016 46	0.997 27	206.907	12 543	762 029.2

表 2 系统关键指标验证结果

Tab. 2 Verification results of key specifications for the system

指标项目	设计要求	实验实测值	结论
极限真空度	$\leq 3.7 \times 10^{-3}$ Pa	5.0×10^{-5} Pa	满足且优于指标
制冷温度范围(带 350 mW 载荷)	223 K~303 K	215 K~303 K	满足且优于指标
暗电流	接近理论计算值	<理论计算值	满足且优于理论计算值

表 3 系统真空度的数值描述

Tab. 3 Numerical description of system vacuum degree

真空度数值	描述与物理意义
10^5 Pa	抽气前的初始压力状态
10 Pa	粗抽与精抽的分界压力临界值
10^{-1} Pa	进入极限真空阶段的参考量级
10^{-2} Pa~ 10^{-3} Pa	抽气过程与降温实验中的过渡态
3.7×10^{-3} Pa	系统设计指标(203 K 下冰的饱和蒸气压)
1.2×10^{-4} Pa	根据动力学公式与泵抽速计算出的理论极限真空度
5.0×10^{-5} Pa	最终实测稳定极限真空度

6 结 论

本文阐述了针对航天级 CCD 传感器研制的低温光学真空测试系统,并通过工程验证。该系统依托一体化物理架构,克服了传统地面模拟设备体积大、热惯性高的缺陷,具备快速启停、高热循环效率及柔性微振动抑制等优势。通过构建真空内外分离的测控电子学布局与双向快开舱门结构,降低了实验准备与故障排查周期,提升了前端成像电路参数的迭代效率。PTC 实验结果表明,该系统能够

准确评估 CCD 器件在轨低温环境下的光电特性,为成像电路的优化设计提供可靠的依据,对未来空间科学级探测器的地面定标与调试工作具有一定的工程参考价值与通用推广意义。

作者贡献声明:

刘国华:实验设计,论文构思和撰写;
杨森:机械结构设计;
王煜:系统整体设计,论文指导;
林方:实验数据分析。

参考文献:

[1] ZHANG L, LI B, LI H S, *et al.* Signal-to-noise ratio analysis based on different space remote sensing instruments[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(2): 7800609.

[2] 王煜, 陆亦怀, 周海金, 等. 星载高动态范围差分吸收成像光谱仪成像电路设计及实现[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(13): 2017-2028.

WANG Y, LU Y H, ZHOU H J, *et al.* Design and implementation of imaging circuit for satellite-borne high dynamic range differential optical absorption spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(13): 2017-2028. (in Chinese)

[3] WOCIAL T, STEFANOV K D, MARTIN W E,

et al. A method to achieve high dynamic range in a CMOS image sensor using interleaved row readout [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(22): 21619-21627.

[4] STARKEY D A, FOSSUM E R. Determining conversion gain and read noise using a photon-counting histogram method for deep sub-electron read noise image sensors[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2016, 4(3): 129-135.

[5] PAN Y, FAN X W, ZHAO H, *et al.* Fast dark signal measurements of SVOM VT CCDs using the vertical gradient of dark field images[J]. *Photonics*, 2021, 8(4): 132.

[6] ARTOLA L, YOUSSEF AAL, DUCRET S, *et*

- al.* Update of single event effects radiation hardness assurance of readout integrated circuit of infrared image sensors at cryogenic temperature [J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2338.
- [7] SHEN C, MA C W, GAO W. Design of a ultra-stable low-noise space camera based on a large target CMOS detector and image data analysis [J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9991.
- [8] ZHANG Y H, ZHANG H F, ZHANG J, *et al.* High-precision flatness measurement for cryogenic mosaic focal plane arrays[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 5021512.
- [9] HOENK M E, JEWELL A D, KYNE G, *et al.* Surface passivation by quantum exclusion: on the quantum efficiency and stability of delta-doped CCDs and CMOS image sensors in space [J]. *Sensors*, 2023, 23(24): 9857.
- [10] BONILLA E, SALONE J, LANTZ B, *et al.* Improving the cooldown times for next-generation cryocooled gravitational-wave interferometers [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(11): 114102.
- [11] BALEGA Y, BOLSHAKOV O, CHERNIKOV A, *et al.* Development of cryogenic systems for astronomical research [J]. *Photonics*, 2024, 11(3): 257.
- [12] 于登云, 练敏隆, 周峰, 等. 微振动对高轨(GEO)遥感卫星图像质量的影响[J]. *中国科学(信息科学)*, 2019, 49(1): 74-86.
- YU D Y, LIAN M L, ZHOU F, *et al.* Influence of micro-vibration on the image quality of a GEO remote sensor [J]. *Scientia Sinica (Information)*, 2019, 49(1): 74-86. (in Chinese)
- [13] PAN Y, FAN X W, WANG H, *et al.* Accurate determination of conversion gains of SVOM VT CCDs based on a signal-dependent charge-sharing mechanism[J]. *Electronics*, 2021, 10(8): 931.
- [14] 张晏铭, 文新荣, 范文龙, 等. 国产自主研发红外探测器的天文应用测试与分析[J]. *天文学进展*, 2025, 43(2): 320-337.
- ZHANG Y M, WEN X R, FAN W L, *et al.* Testing and analysis of astronomical applications for self-reliant domestic infrared detectors [J]. *Progress in Astronomy*, 2025, 43(2): 320-337. (in Chinese)
- [15] 林方, 刘文清, 王煜, 等. CCD 满阱自动化检测系统及其在相机研制中的应用[J]. *光子学报*, 2023, 52(11): 192-203.
- LIN F, LIU W Q, WANG Y, *et al.* Automatic CCD full-well test system and its application in camera development [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(11): 192-203. (in Chinese)

作者简介:



刘国华(1987—),男,湖南衡阳人,博士,讲师,2013年于安徽大学获得硕士学位,2018年于中国科学技术大学获得博士学位,现为安徽大学教职工,主要从事航天电子、智能检测方面的研究。E-mail: ghliu@ahu.edu.cn

通讯作者:



王煜(1970—),男,北京人,博士,研究员,1993年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2005年于英国斯特莱斯科莱德大学获得博士学位,现为安徽大学物质科学与信息技术研究院环境物理所副所长,主要从事航空、航天遥感设备研发等工作。E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn