

多波段冷光学红外成像终端研制

黄智国^{1,2}, 王建立¹, 殷丽梅¹, 李宏壮¹, 刘俊池¹, 刘祥意¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对目前地基空间探测红外成像系统对高灵敏度、高探测能力及信噪比的要求, 对地基冷光学红外成像技术进行了研究, 包括红外杜瓦冷却系统内部辐射抑制、系统终端快速制冷、低温红外探测器的研制、低温冷光学系统设计装调等关键技术。在各项系统技术突破的基础上, 研制出一套相对孔径 1:10、分辨率 320×256、兼容中波 3~5 μm 和长波 8~10 μm 波段的冷光学红外成像终端。系统终端实现制冷温度最低至 42 K, 真空度 10⁻⁵ Pa 量级。将终端与 1.23 m 口径地基望远镜对接, 对月亮和红外标准星观测具有良好的成像效果。该系统的研究为地基大口径冷光学红外探测技术提供参考。

关键词: 冷光学; 红外探测; 多波段; 低温杜瓦

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0904001

Development of cold optical infrared imaging terminal with multiband

Huang Zhiguo^{1,2}, Wang Jianli¹, Yin Limei¹, Li Hongzhuang¹, Liu Junchi¹, Liu Xiangyi¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In view of the requirements of high sensitivity, high detection ability and high signal-to-noise ratio of ground-based space exploration infrared imaging system, cold optical infrared imaging technique was studied. It included infrared Dewar cooling system, internal radiation suppression, rapid cooling of terminal system, development of low temperature infrared detector, room temperature adjustment, low temperature application and other key technologies. Based on the technical breakthrough of various systems, a cold optical infrared terminal with a relative aperture of 1:10, resolution of 320×256, compatible with medium wave 3–5 μm and long wave 8–10 μm band was developed. The system terminal works in 42 K temperature, 10⁻⁵ Pa vacuum environment. Docking with 1.23 m ground-based telescopes, a good observation result of moon and infrared stars was achieved. It lays an important foundation for ground-based infrared optical detection technology.

Key words: cold optics; infrared detection; multiband; cryogenic Dewar

收稿日期: 2018-04-11; 修订日期: 2018-05-24

基金项目: 国家 863 计划(2016AAXXX1009)

作者简介: 黄智国(1991-), 男, 博士生, 主要从事地基红外辐射测量方面的研究。Email: huangzhiguochina@foxmail.com

导师简介: 王建立(1971-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术等方面的研究。

Email: wangjianli@ciomp.ac.cn

0 引言

地基光电系统红外探测技术具有大气适应性强、全天时观测、对地影区目标有效成像的优势,目前已成为空间目标探测与识别领域的重要组成部分^[1]。

大部分人造空间目标温度分布在 200~300 K 之间,空间目标及空间背景温度低于地基光电系统的工作温度,因此常规红外成像系统自身光学元件及内部构建产生的热辐射噪声会直接或间接通过光路到达探测器像面^[2],特别在具有波段选取的应用中,带通滤光片镜片边缘部分产生严重的热辐射,导致地基探测系统无法实现高灵敏度的探测,严重限制了对中高轨暗弱目标的追踪^[3]。使用冷光学技术可将红外终端光学元件制冷至被探测器忽略的低辐射状态,将成像终端整体抽真空减小外部热量的传递可大大提高观测目标的信噪比^[4-6]。目前国外先进的军事地基大型光电望远镜观测基站 AEOS、Gemini

等均配备了冷光学红外成像终端,尤其在地基红外多光谱成像应用中更为普遍^[7-9]。我国由于在冷环境下红外探测器研制方面的技术限制,冷光学红外探测技术还处于起步阶段。

文中在对冷光学红外相关技术研究的基础上,解决了红外终端系统快速抽真空制冷、杂散辐射消除、低温冷光学系统设计装调等难题,联合中国电子科技集团第十一研究所研制特殊封装可覆盖红外中波长段的冷光学红外成像终端系统。对接在 1.23 m 大口径望远镜耐式平台观测成像质量良好,为我国地基冷光学红外探测技术奠定了重要基础。

1 冷光学红外终端研制

冷光学红外成像系统由杜瓦冷却系统、低温红外探测器系统、低温光学系统、辐射定标系统、真空低温运动系统等五个子系统组成,系统总体布局如图 1 所示。

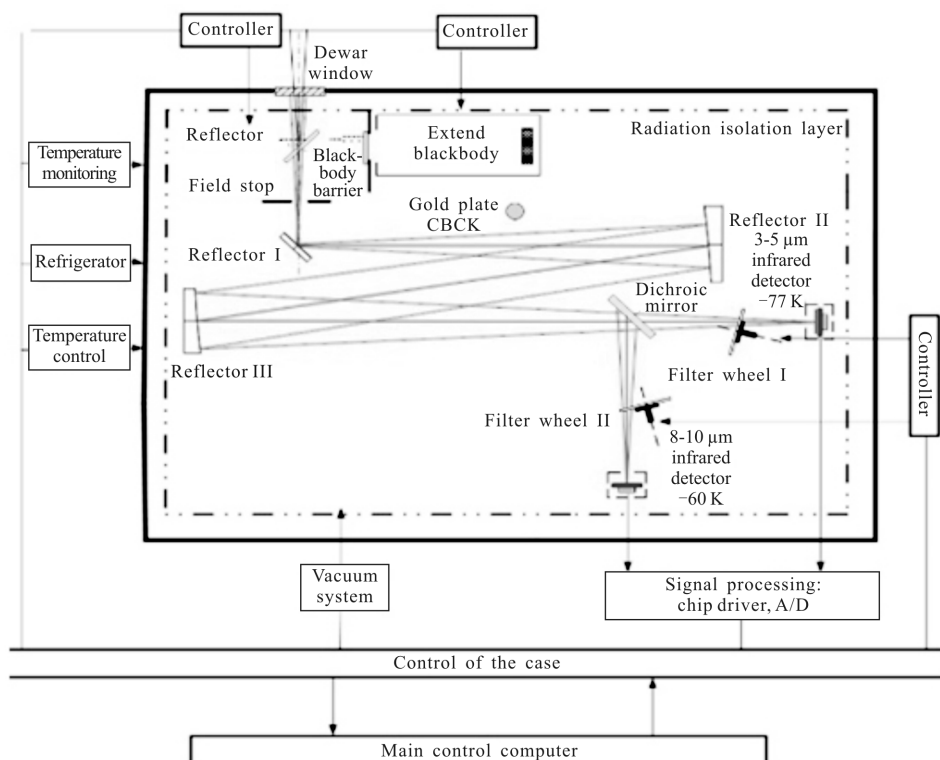


图 1 冷光学红外终端布局

Fig.1 Cold optical infrared terminal layout

1.1 红外杜瓦冷却系统

红外杜瓦冷却系统由杜瓦及外部连接的制冷机

和抽真空机组组成,保证系统内部组件持续在较低温度下稳定工作。红外杜瓦冷却系统的快速降温主

要通过减小杜瓦内部工作器件热量的产生和提高杜瓦腔体与外部热交换的效率^[10]。杜瓦内部热量主要由辐射漏热、传导漏热与对流传热三种方式产生。

1.1.1 辐射漏热

辐射漏热主要来自光学结构及器件的内部辐射,是影响目标信噪比的主要原因。背景受限的红外光学系统信噪比计算公式如下^[11]:

$$SNR_{BL} = \left[1 + \frac{1 - \tau_0}{\tau_0} \left(\exp\left(\frac{h_c}{kT_0\lambda}\right) - 1 \right) \right] \cdot \left(\exp\left(\frac{h_c}{kT_d\lambda}\right) - 1 \right)^{-1} N_c^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: τ_0 为光学系统透过率; T_d 为目标温度; T_0 为光学系统制冷温度; N_c 为探测器满阱电荷数; h 为普朗克常数; k 为玻耳兹曼常数; c 为光速。由公式可知,降低光学系统自身温度、减小内部器件辐射可大大提高目标的信噪比。

为减少探测器接收杜瓦内壁及外部热源通过杜瓦窗口产生的辐射噪声,在光学器件和探测器之外加装一层铝制的防辐射屏,并对其进行内表面发黑、外表面镀亮镍并包裹多层铝箔处理,如图 2 所示。冷光学平台放置在防辐射屏内,通过玻璃纤维等绝热材料支撑在真空杜瓦内壁,使用减振波纹管 and 具有柔性作用的传冷片与制冷机冷头相连为各光学元件提供冷量降温。

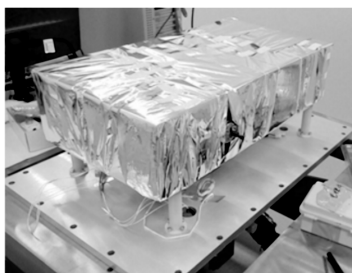


图 2 包裹铝箔的防辐射屏

Fig.2 Radiation shield for packing aluminium foil

1.1.2 传导漏热

杜瓦冷却系统的传导漏热主要由各引线及制冷铝板吊杆产生,常温时传导漏热量计算方法如下:

$$Q = -KA \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

式中: Q 为导热热量; K 为导热系数; A 为传热面积; dx 表示微元厚度; dt 表示微元厚度两面的温差。由于冷光学杜瓦系统温差变化较大,材料传热系数及横截

面积会随着温度的改变发生变化,因此计算导热漏热应采用导热积分公式:

$$Q_d = \frac{1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A(x)}} \left[\int_{t_1}^{t_2} K(T) dt \right] \quad (3)$$

式中: $K(T)$ 为材料在不同温度下的导热系数; $A(x)$ 为物体的横截面积; x 表示物体的轴向位置; t_1 、 t_2 分别为物体的高温面与低温面。

为减小传导漏热,所有导线均在防辐射屏外部走线,并将传统的“八爪型”吊杆接口改造为圆柱形大面积接口,通过增大冷量的传输来抑制吊杆的传导漏热。

1.1.3 对流传热

红外终端工作时内部腔体属于“准真空”状态,杜瓦内部的残余气体产生对流传热计算式如下:

$$Q_a = k \times a \times p \times (t_3 - t_4) \times A \quad (4)$$

式中: k 为残余气体导热相关系数; a 为热适应系数; p 为腔体真空度; t_3 、 t_4 分别为热壁与冷壁的温度; A 为冷壁外表面积。

由于腔体真空度与对流传热产生的热量成正比,在杜瓦腔体与上盖板组件的衔接处内嵌丁晴橡胶圈,并涂抹真空脂对内外部空气进行隔离。在提高空气隔离能力的同时对真空机进行改造,在真空机械泵前级加装分子泵,使系统真空极限由 10^{-2} Pa 提高到 10^{-5} Pa 量级。经计算,杜瓦腔体内部三种热量产生量如表 1 所示。

表 1 杜瓦内部产热量

Tab.1 Internal heat of Dewar

Heat leak mode	Radiation	Steeve conduction	Lead wire conduction	Residual gas conduction	Motor heat	Total calorific value
Heat leak/W	0.65	2	0.04	0.234	0.5	3.424

地基红外终端在观测时需满足对目标快速对准、稳定跟踪的要求,因此红外杜瓦冷却系统制冷机采用振动小、制冷效率高的同步闭环氦循环斯特林制冷机。为减小探测器受到制冷机产生的机械振动,将探测器放在距制冷机冷头较远的位置。多次实验发现,杜瓦内部降温以制冷机冷头为中心呈梯度分布,且探测器长期工作后温度会升高,为保证探测器的快速降温,使用三条冷链将探测器与制冷机冷头

直接相连，并在制冷接口与冷板间增加导热性与成型性极好的铜片，填充接口之间的微小缝隙。

为保证探测器在合理的温度区间内工作，在探测器封装体内安装两只温度传感器进行焦平面温度的实时测量。最终杜瓦工作状态如图 3 所示。改造后的制冷接口降温速度大幅加快，并且降温效果有了明显提升，各接口由原来的平均 75 K 降低至平均 42 K。

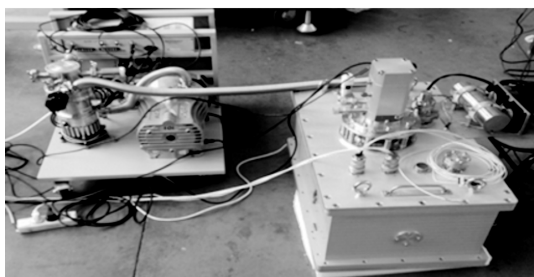


图 3 真空杜瓦冷却系统

Fig.3 Vacuum Dewar cooling system

1.2 低温红外探测器系统

低温红外探测器系统由置于杜瓦内部的探测器组件和位于杜瓦外壁的电子学器件组成。目前在常温下工作的红外探测器制造工艺已经成熟，而在冷光学环境下工作的探测器研制还处于起步阶段。常温红外探测器只需将红外焦平面制冷，而冷光学红外探测器将探测器全部元件放置在真空低温环境中，因此对探测器的密封性及耐低温性有更高的要求，该系统红外探测器参数如表 2 所示。

表 2 红外焦平面阵列性能参数

Tab.2 Performance parameters of infrared focal plane array

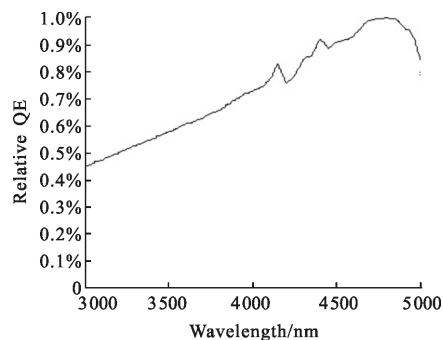
Parameter	Mid-wave	Long-wave
Bandpass/ μm	3-5	8-10
Resolution	320×256	320×256
Pixel size/ μm	30	30
Detection rate	$\geq 4.0\text{e}+11$	$\geq 1.2\text{e}+11$
Quantum efficiency	$\geq 70.4\%$	$\geq 45\%$
Blind pixel rate	$\leq 1\%$	$\leq 2\%$
Dark current/pA	≤ 10	≤ 1
Working temperature/K	<80	<77

冷光学红外探测器系统主要由封装结构、探测

器芯片、读出电路芯片、视频驱动电路组成。探测器封装结构主要有金属基板、陶瓷引线环、直接安装在冷屏内部的锗红外窗片。使用焊接和粘接方法使金属外壳为封闭的整体。为保证探测器光学定位的精度，封装结构使用安装基板作为光学定位的基准。探测器芯片直接安装在基板上，针对不同组件的粘接特点和精度要求，使用工具显微镜和自制的工装夹具，通过衬底片的修磨来补偿粘接厚度和基板加工带来的偏差，使探测器芯片中心线与安装基准中心线对准精度 $\leq \pm 0.05\text{ mm}$ ，基板基准面与探测器芯片焦面平行度 $\leq \pm 0.01\text{ mm}$ 。

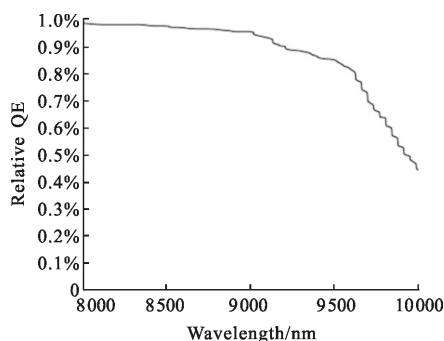
由于红外杜瓦系统工作时腔体内气压远小于探测器制造时的环境气压，为避免封装体内气压过大导致探测器发生涨裂，同时避免残余水汽在低温环境下窗片表面结霜，对探测器密封体采取排气处理。首先不断向封装体内注充干燥氮气，然后对封装体进行抽真空，当真空度达到 10^{-4} Pa 量级时使用焊钳将排气管钳断冷焊。封装结构除保证探测器芯片在真空干燥环境下工作，还具有限制视场、抑制背景干扰的光阑作用。

探测器芯片以碲镉汞作为制作材料，芯片电学输出通过陶瓷引线环和柔性电缆实现与外驱动电路的连接，读出电路芯片为混合型集成电路。探测器芯片与读出电路芯片使用金丝焊接，采用钢柱倒装焊接结构互连，通过特制的陶瓷引线由密封结构内部引出至密封结构外部。由于探测器长期工作在低温环境，为避免低温下机械热应力释放造成陶瓷开裂影响探测器气密性，对探测器进行多次液氮冲击试验，结果表明探测器漏率没有变化，测试得到探测器响应率如图 4 所示。



(a) 中波探测器响应率

(a) Response rate of mid-wave detector



(b) 长波探测器响应率

(b) Response rate of long-wave detector

图 4 中长波红外探测器响应率

Fig.4 Response rate of mid and long wave infrared detector

上述探测器组件均位于红外杜瓦腔体内部,视频电路位于红外杜瓦腔体外部,即在常温下工作。视频电路通过柔性电缆穿过红外杜瓦外壁实现引线环与视频驱动电路的连接,同时具有模拟与数字两种信号模式。冷光学探测器结构设计相对普通红外探测器更加紧密,导线由内向外引出距离较长,为防止各导线之间相互串扰导致输出图像含有大量电磁噪声,在导线与封装体接口及视频电路与电路主板导线密集区域装套电磁环抑制各导线之间的电磁串扰,如图 5 所示。

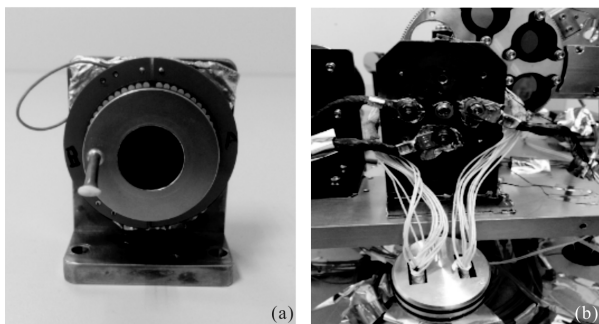


图 5 冷光学红外探测器

Fig.5 Cold optical infrared detector

1.3 低温光学系统

低温光学系统采用离轴三反结构形式,如图 6 所示,各光学元器件通过支撑机构固定在红外杜瓦冷却系统的铝制冷光学平台上。传统的红外光学系统按照结构形式可分为折射式和反射式^[12],折射式光学系统具有通光口径饱满且无中心遮蔽的优点,但红外光学材料热膨胀系数较高,折射率温度系数随温度变化较大^[13],因此温度变化极易导致折射式

系统成像质量下降。反射式光学系统具有无色差、对热灵敏度低且结构紧凑的优点,但在低温环境下反射镜组及支撑结构易发生轴向位移。因此冷光学反射式光学系统应在常温装调时对各光学元件进行位移补偿。

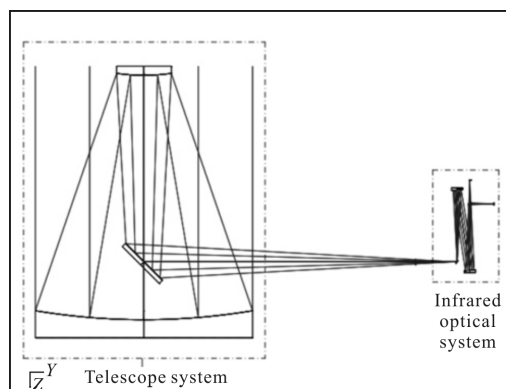


图 6 系统光学设计示意图

Fig.6 Schematic diagram of system optics design

低温红外光机结构设计遵循均一性原则^[14-15]。均一性原则是指低温光学系统中的光机结构所有部分,包括光学元件和结构件均采用统一材料,这样可以实现无热化设计,尽管随着温度变化,光学元件的几何尺寸会发生变化,但整个系统的变化具有一致性,不会影响最终的成像质量。均一性原则对于低温反射式红外系统可以很好地实现,因为铝既具有较好的光学性能和较高的比刚度,又具有良好的低温性能和真空适应性,所以低温红外反射系统也采用铝作为光机结构的设计材料。

红外终端采用离轴三反射光学系统,光学系统指标如表 3 所示。光学元件主要由离轴反射镜、折转反射镜、黑体切换反射镜、分色镜、滤光片组成。以长

表 3 光学系统指标

Tab.3 Parameters of optical system

Parameter	Mid-wave	Long-wave
Primary mirror/mm	1 200	1 200
Bandpass/ μm	3-5	8-10
Pixel size/ μm	30	30
F number	10	10
Focal length/mm	12 000	12 000
System form	Total reflection	Total reflection
Pixel size/ μm	30	30
Pixel number	320×256	320×256

波红外系统为例,由上述光学元件组成的系统 MTF 曲线如图 7 所示,0 视场的 MTF 值均大于 0.7,接近衍射极限;系统点列图如图 8 所示,艾里斑直径 111.3 μm ,轴上点的弥散斑 RMS 直径 7.5 μm ,GEO 直径 14.6 μm ;最大视场边缘的弥散斑 RMS 直径 43.8 μm ,远小于艾里斑物理直径,各视场波像差 PV 值小于 1/2 波长。

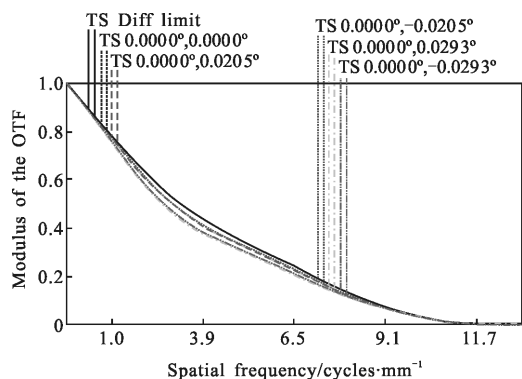


图 7 成像系统传递函数曲线
Fig.7 MTF curves of imaging system

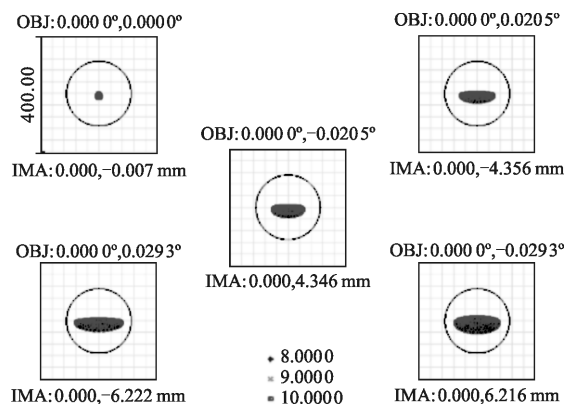


图 8 系统点列图
Fig.8 System spot diagram

所有光学元件采取倒置形式悬挂在制冷铝板上,因此光学系统工作时主要受到重力、机械间结构预紧力、各组件不同膨胀系数产生的内应力作用。在考虑这三种外力产生最小误差的同时还要考虑光学材料是否具备优良的加工性能,在低温环境下是否保持高度光滑。因此冷光学红外终端平面反射镜及中继离轴镜采用重量轻、热膨胀小、真空适应性好的铝合金材料^[16]。

应用光学设计软件的公差分析模块,采用蒙特

卡洛法分析得出冷光学红外成像系统光学系统光轴偏心量为 $\pm 1\text{ mm}$;光轴方向变动量为 $\pm 1\text{ mm}$;倾角误差小于 $5'$;绕光轴回转角度误差在 $5'$ 以内。

铝镜的支撑采用后单肋板形式以提高整体结构的紧凑性,为避免不同零件之间的装配间隙增加热阻影响铝镜冷却效率,铝镜和支撑件采用一体加工的形式。为确保支撑结构的稳定性及可靠性,在对光学系统装调前使用有限元进行仿真分析。分别分析在常温和低温 40 K 时重力作用和支撑结构对平面铝镜和离轴铝镜的影响,铝镜形变如图 9 所示,分析结果如表 4、表 5 所示。

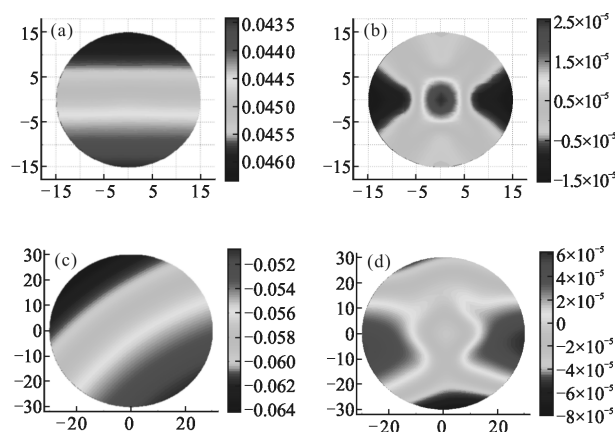


图 9 低温铝镜形变((a)、(b)平面铝镜;(c)、(d)离轴铝镜)

Fig.9 Aluminum mirror deformation at low temperature ((a), (b) plane mirror; (c), (d) off-axis mirror)

表 4 重力作用下平面镜和离轴镜的离焦量

Tab.4 Defocus amount of plane mirror and off-axis mirror under the action of gravity

Mirror type	Normal temperature		Low temperature	
	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm	PV/nm
Plane mirror	0.016	0.072	7.315	41.074
Off-axis mirror	0.089	0.508	26.555	141.646

铝镜仅在重力作用下沿支撑方向和沿光轴方向位移变化量均在纳米量级,支撑对铝镜镜面的影响非常小,可以忽略不记。在温度为 70 K 时镜面型较常温时变化较大,其中离轴铝镜面形 RMS 值降为 26.555 nm。红外成像系统工作波段较长,远小于 150 nm 的设计要求,因此采用背部支撑形式可以满足设计要求。

表 5 支撑作用对平面镜和离轴镜的影响

Tab.5 Effect of supporting function on plane mirror and off-axis mirror

Mirror type	Normal temperature			Low temperature		
	Supporting/nm	Optical axis/nm	Mirror change/(°)	Supporting/nm	Optical axis/nm	Mirror change/(°)
Plane mirror	-6.965	-5.72	0.055	-0.106	-0.045	20.171
Off-axis mirror	-20.128	-15.88	-229.4	-1.539	-0.055	1.408

1.4 辐射定标系统

地基大口径望远镜在外场实验时环境复杂,且冷光学红外终端观测的空间目标表面温度分布在 200~300 K 之间,为保证冷光学辐射定标系统工作温度可以覆盖空间目标的温度区间,辐射定标系统采用特制的内置低温黑体。通过控制平台上的黑体切换反射镜实现对探测器的标定。黑体腔体与制冷机冷头直接相连,工作时通过加热片加热至目标温度区间范围内。

为确保低温黑体在工作时具有较高有效发射率,对低温黑体外部腔体进行改造。常规低温黑体空腔多为导热较好的纯铜,考虑到纯铜的质量较重,对制冷机的需求热负载较大,将低温黑体腔体改造为加工及吊装方便的 LY12-CZ 硬铝材料,并将腔体由方形改造为圆柱形保证黑体具有较大的腔径比。改造后低温黑体有效辐射面直径为 30 mm,有效发射率大于 0.99,温度稳定性为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ min}$,热均匀性为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

低温黑体通过外部控制器单独控温,控制器通过红外杜瓦冷却系统上盖板电路连接器的温控引线与黑体单独相连。

1.5 低温运动系统

低温运动系统由真空低温滤光轮与真空低温位移平台组成,实现低温环境下各光学部件的切换。真空低温滤光轮具有六个通光孔用于实现红外成像波段的快速细分采样。滤光轮采用定制的具有散热小、振动小和无需润滑油工作的低温电机驱动,组装后滤光轮最大转速为 150($^\circ$)/s,通过机械定位的方式最大位移为 52 mm,最大移动速度为 3 mm/s。

低温滤光轮与低温位移平台均通过杜瓦冷却系统上盖板电路与外部主控计算机相连实现实时切换与移动。

1.6 冷光学主控系统

为实现中波红外成像系统各单元组件的联调与有效控制,开发了中波红外成像系统主控软件,实现对真空低温运动系统、真空低温黑体、杜瓦温度控制系统以及真空度监测系统的数据通讯、监测及实时控制。

2 观测实验

在超净间将各光学元件、支撑结构、探测器等进行装调,并将其封装在杜瓦内开启真空泵及制冷机制冷。降温过程中,首先使用真空泵对杜瓦内部进行抽真空,待真空度降低到 10 Pa 以内时打开制冷机,边抽真空边制冷,直至温度降低至探测器工作温度,关闭真空泵,保持制冷机工作。

在实验室内使用分辨率靶标进行机下成像测试,拍摄图像如图 10 所示,中长波探测器均可对分辨率靶标最小模块清晰成像。

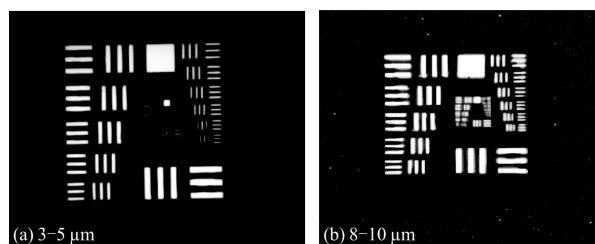


图 10 探测器测试图像

Fig.10 Test images of detector

在晴朗夜晚将冷光学红外终端与 1.23 m 望远镜对接,由于操作塔台没有可全部覆盖望远镜入瞳的大面积光源,使用月球表面作为远端光源将冷光学红外终端与望远镜光路对准,对耐式平台的高度及水平方向进行调节。红外相机开机后存在漂移现象,因此在相机开机半小时稳定输出后以晴朗无云处的天空背景作为模版对相机进行单点校正后对星体进

行观测。



图 11 冷光学终端与大口径望远镜对接

Fig.11 Docking cold optical terminal and large aperture telescope

使用长波探测器对月球表面观测进行成像验证,图 12 为观测到的月球图像,可以清晰地看到月球表面陨石坑的分布。使用中波探测器对红外标准星进行观测,图 13 为观测的红外标准星,图像上标准星分布在 5×5 个像素内,视场内能量分布一致且能量集中度很高^[17]。

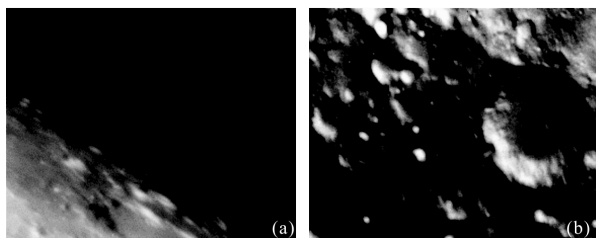


图 12 长波探测器观测的月球图像

Fig.12 Lunar images observed by long wave detectors

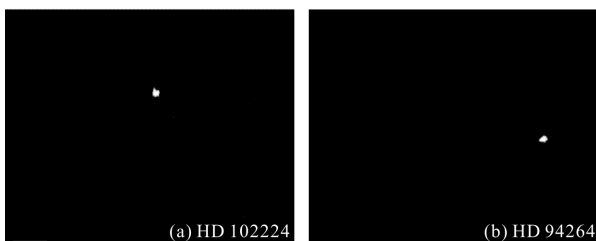


图 13 中波探测器观测的红外标准星图像

Fig.13 Infrared standard star images observed by mid-wave detector

3 结 论

使用冷光学技术设计了一台相对口径 1:10、兼容红外中波与长波、工作在大口径望远镜上的多波段红外成像终端,对红外杜瓦冷却系统内部辐射抑制、终端系统快速制冷、低温红外探测器的研制、常温装调低温应用等关键技术进行了研究。终端在机下工作稳定,对分辨率靶标成像十分清晰,对接在大口径望远

镜耐式平台对月亮及恒星进行观测成像质量良好,为今后开展空间目标的多波段观测实验及基于冷光学技术的地基红外探测技术奠定了重要基础。

参 考 文 献 :

- [1] Yin Limei, Liu Yingqi, Li Hongwen. Cold optics technology to achieve high-accuracy infrared detection [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 535-540. (in Chinese)
殷丽梅, 刘莹奇, 李洪文. 实现高精度红外探测的冷光学技术[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 535-540.
- [2] Wang Shitao, Zhang Wei, Wang Qiang. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 484-491. (in Chinese)
王世涛, 张伟, 王强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 484-491.
- [3] Rayner J T, Shure M A, Toomey D W, et al. Design of a new 1-5.5- μm infrared camera for the NASA Infrared Telescope Facility[C]//SPIE, 1993, 2198: 614-622.
- [4] Qu Jinxiang, Lu Yan. Design of small vacuum experiment equipment of cryogenic optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 464-467. (in Chinese)
屈金祥, 陆燕. 小型低温真空光学实验装置设计 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(4): 464-467.
- [5] Li Chunlai, Lin Chun, Chen Xiaowen, et al. Space-borne LWIR FPA imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2253-2260. (in Chinese)
李春来, 林春, 陈小文, 等. 星载长波红外焦平面成像系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2253-2260.
- [6] Chen Xiaoping. Status and trends of the cryocooler in IRFPA detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 45-49. (in Chinese)
陈晓屏. 微型低温制冷技术的现状和发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 45-49.
- [7] Hodapp K W, Jensen J B, Irwin E M, et al. The Gemini Near-Infrared Imager (NIRI) [C]//SPIE, 2000, 115 (814): 1388-1406.
- [8] Briscoe D E, Vigil M L. AEOS radiometer system: a multichannel imaging radiometer [C]//SPIE, 1999, 3701: 206-213.
- [9] Vigil M L, Witte D J, Levan P D, et al. Sensor suite for the Advanced Electro-Optical System (AEOS) 3.6-m telescope[C]//SPIE, 1996, 2819: 151-169.
- [10] Shen Honghai, Wang Guohua, Ding Jinwei, et al. Application

- of active-athermal compensation to airborne IR optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 593–601. (in Chinese)
- 沈宏海, 王国华, 丁金伟, 等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 593–601.
- [11] Liu Yingqi, Yang Qingyun, Liu Junchi, et al. MWIR imaging experiments with large F -number optics on LEO spacecraft[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67(67): 315–317.
- [12] Wang Yuanpeng. Design of a MWIR and LWIR dual-band/dual-filed optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- 王元鹏. 中长波双色双视场红外光学系统设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [13] Wen Yanbo, Bai Jian, Hou Xiyun, et al. Design of infrared hybrid athermal optical system [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(5): 82–86. (in Chinese)
- 温彦博, 白剑, 侯西云, 等. 红外无热化混合光学系统设计 [J]. *光学仪器*, 2005, 27(5): 82–86.
- [14] Zhou Chao. Opto-mechanical design for a cryogenic IR system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2092–2096. (in Chinese)
- 周超. 低温红外系统光机结构设计 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2092–2096
- [15] Liu Xiangyi, Zhang Jingxu, Qiao Bing, et al. Research on supporting technology of lens applied in cold optics assembly [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25 (7): 1850–1856. (in Chinese)
- 刘祥意, 张景旭, 乔兵, 等. 应用于冷光学组件的透镜支撑技术研究[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1850–1856.
- [16] Zhi Xiyang, Wang Weida, Tan Fanjiao, et al. Analytical method of temperature effects on space infrared optical system performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 1–7. (in Chinese)
- 智喜洋, 王达伟, 谭凡教, 等. 温度对空间红外光学系统性能的影响分析方法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S1): 1–7.
- [17] Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, et al. Development and performance testing of optical system for star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522005. (in Chinese)
- 李璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏传感器光学系统的研制与性能测试[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522005.