

文章编号 1004-924X(2017)07-1850-07

应用于冷光学组件的透镜支撑技术研究

刘祥意¹, 张景旭¹, 乔兵¹, 范磊¹, 王文攀¹, 王富国^{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)

摘要:对于采用冷光学技术的短波红外透射式成像系统,由于光学元件及支撑结构的加工、装调温度与实际工作温度差异较大,几何形状的变化差异将导致光学元件出现位置误差,甚至受到破坏。本文根据低温红外系统对光机结构的设计要求,遵循均一性和不调整两个原则设计和加工一套短波红外成像系统的光机结构。在透镜和支撑结构件的配合面上分别加工 45°的斜面,以充分适应光学元件与其支撑结构在温度变化过程的热胀冷缩,避免了光学元件和支撑结构由于受热变形差异过大而产生的不可恢复性破坏,最后通过实验验证了该光学支撑方案在 80 K 的低温下具有良好的成像效果,本文的研究为今后大温差下的红外光机系统设计提供了较高的参考价值。

关键词:冷光学;红外探测;镜子支撑;大温差

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172507.1850

Research on supporting technology of lens applied in cold optics assembly

LIU Xiang-yi¹, ZHANG Jing-xu¹, QIAO Bing¹, FAN Lei¹, WANG Wen-pan¹, WANG Fu-guo^{1*}

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

* *Corresponding author, E-mail: wfg107@163.com*

Abstract: For shortwave infrared transmission imaging systems using cold optics, as the difference between fabrication and alignment temperature of optical components and supporting structure with operation temperature is large, variety of changes in geometry for different optical components would lead to position error for optical components, or even be destroyed. Aiming at the requirements of optical machine structural design for low-temperature infrared system, a set of shortwave infrared imaging system is designed and fabricated according to principles of uniformity and non-adjustment. In this paper, 45° slope is designed on the mating surfaces of lens and supporting structure to fully adapt thermal expansion and cold contraction of optical elements and their supporting structure in process of temperature change. At last, it is verified by experiments that this optical supporting scheme has good imaging effect in low temperature condition of 80 K, and this paper provides high reference value for infrared optical machine structural design in large temperature difference.

Key words: cold optics; infrared detection; lens supporting; large temperature difference

收稿日期:2016-11-28;修订日期:2017-01-16.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11403023)

1 引言

为了更好地满足天文星外天体和空间目标的红外探测需求,高灵敏度、低噪音是必然的发展趋势,而冷光学技术是实现这一目标的有效手段之一^[1-3]。尤其当探测目标信号十分微弱,信号距离相对较远以及温度较低时,探测仪器中光学系统与支撑结构的热辐射和杂散光将会成为影响探测性能的主要因素,冷光学技术能通过杜瓦将光学元件及其支撑结构的温度降低,以有效减少背景光子通量,发挥背景极限探测器的作用,从而提高探测器的灵敏度。所谓的冷光学技术,就是把红外光学系统所属的所有光学元件和探测器放置在杜瓦中(对于地基大口径望远镜设备上所配备的红外探测终端,杜瓦内放置的光学元件一般不包括尺寸较大的主镜、次镜和三镜),通过杜瓦将这些光学元件和探测器的温度降低到使用温度(根据红外探测的长波、中波、短波的波段不同,温度分别至少降低到 60 K、77 K、100 K),从而有效抑制了光学元件及其支撑结构的热辐射和杂散光对探测性能的影响,极大地减小了背景噪音^[4]。

目前在国外,采用冷光学技术的红外探测器设备已经广泛应用于大口径地基望远镜系统,如口径为 3.67 m 的 AEOS 望远镜上的 ARS(辐射计系统)^[5-6],杜瓦内光学元件的温度控制在 60 K。该系统提供了优质的覆盖 0.39~23 μm 测光和辐射测量数据;对于口径为 8.1 m 的 Gemini-N 望远镜的 NIRI 系统(近红外相机)^[7-8],杜瓦内冷板的工作温度为 65 K,其中 ALADDIN 探测器通过闭环的二级冷头,将温度控制在 33 K,该近红外系统可以用于观测邻近严重昏暗的恒星形成区域;对于口径为 3.5 m 的 CAT 望远镜上的 Omega2000 系统(近红外相机)^[9-10],杜瓦通过液氮将其内温度控制在 77 K。除此之外,目前国际上在轨运行的一些红外天文望远镜利用天然的空间外低温环境,其上的红外探测设备也采用冷光学技术,如众所周知的由 NASA 主持开发的目前世界上最大的红外天文望远镜 Hubble、由欧空局开发的红外空间天文台 ISO 等。在国内,中国科学院上海技术物理研究所,哈尔滨工业大学等单位从事了空间红外低温光学的研究及应用^[11-12],

但尚没有采用冷光学技术的红外探测器设备作为地基大口径望远镜设备的成像终端安装在望远镜上。

本文基于冷光学技术,针对一采用冷光学技术的短波红外透射式成像系统中的光学元件及其支撑方式进行了设计研究。

2 短波红外成像系统介绍

该短波红外系统主要利用现有的 1.2 m 望远镜系统设计的成像终端,系统的组成主要由真空腔体、J-T 制冷机、温控仪、温度传感器、真空泵、真空计、真空规管、真空电连接器、加热器、真空低温环境工作短波红外面阵探测器密封组件、探测器视频电路、红外窗口、BaF₂ 等红外晶体透镜光学系统、成像波段选择滤光轮、谱段滤光片、里奥光阑转轮、各种单元控制器等组成。光学系统的主要参数如表 1 所示。短波红外成像光学系统采用透射式形式,透镜材料选择红外晶体材料,共有 6 片透镜,选择的材料有 Silica, ZnSe, CaF₂。

表 1 光学系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of optical system

主要参数	参数值
口径/mm	1 200
焦距/mm	6 000
靶面尺寸	320×256
像元尺寸/ μm	30
视场/ $^{\circ}$	0.117 8
工作波段/ μm	1.0~2.5
工作温度/K	80

3 透镜支撑结构设计

3.1 大温差所带来的问题

对于采用冷光学技术的透射红外系统,其光学元件及探测器面临着由于温度变化所带来的一系列挑战^[13]。光学元件及支撑结构的加工、装调需要在常温下进行,而光学元件及支撑结构的实际工作环境却是在 77K,温度变化达到了 200 K。通常而言,材料的性能参数,

如 CTE(热胀系数)、比热容、折射率等因材料的不同而不同,而且这些性能参数在冷却过程中呈非线性变化。几何形状变化的差异主要归因于材料的 CTE 不同。它可以引起光学元件的位置误差,变形,甚至使光学元件发生破坏。而光学变化差异则不仅受光学元件光学表面几何形状变化差异以及光学元件位置变化的影响,还受光学材料折射率变化的影响。因此,低温红外系统对光机结构设计提出了更高的要求。

3.2 设计原则

低温红外光机结构设计一般遵循均一性和不调整两个原则^[14-15]。均一性原则是指低温光学系统中光机结构的所有部分,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取得很好的效果,鉴于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,因此低温红外反射系统也采用铝 6061 作为光机结构的设计材料。对于透射式低温红外光学系统,不可避免地要使用多种材料,很难满足均一性原则。所以在光机结构设计中要充分考虑到由于材料的 CTE 不同所导致的热变形不匹配,尤其是 CTE 差异比较大的透镜光学材料和结构支撑材料铝之间的变形不匹配。不调整原则是指光学系统的准直和最终性能直接通过设计精度、误差分析和材料分析等保证。一方面因为杜瓦的每一次降温和升温都需要很长时间(20 小时左右),时间周期很长;另一方面每一次在室温下的装调结果放在低温工作条件下还会由于应力释放,热胀冷缩等原因发生变化,而在低温条件下,光学元件及其支撑结构处于密闭的真空环境,很难再对其进行调整。所以光机结构的设计应尽可能简单可靠,在常温借助补偿镜进行装调,充分考虑低温对光学材料折射率的变化及支撑结构热变形的影响。

3.3 光机结构设计

热胀冷缩是材料本身的固有属性,表 2 为该短波透射式红外系统中所使用的 3 种光学玻璃材料和支撑结构材料由常温 300 K 降到 80 K 时的相对变形量。

表 2 不同材料从 300 K 到 80 K 时的热胀冷缩相对变形量
Tab. 2 Expansion and contraction relative deformation of different materials with thermal from 300 K to 80 K (%)

材料	热胀冷缩的相对变形量
CaF ₂	-0.284
Silica	0.001
ZnSe	-0.115
6061(铝合金)	-0.4

现以光学系统的前两块透镜为研究对象,它们的通光口径分别为 $\Phi 33$ mm 和 $\Phi 35$ mm,两块透镜的材料分别为 Silica 和 CaF₂,如果按照传统的透镜安装方法,使用带螺纹的压圈进行固定,如图 1 所示。由于用于透镜支撑的结构材料铝的热胀系数远高于透镜玻璃材料的热胀系数,故由热变形不匹配所导致的透镜与镜筒和压圈、隔圈之间将产生巨大的应力,如图 2 所示。透镜与镜筒之间产生的最大应力可达 450 MPa 左右,足以对光学元件造成不可恢复性的破坏。

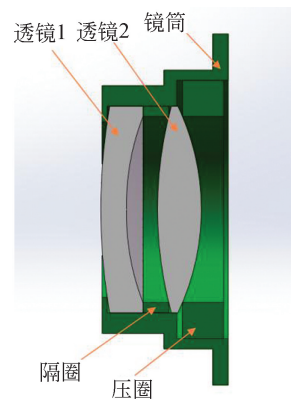


图 1 传统透镜定位简图

Fig. 1 Positioning diagram of traditional lens

为了适应材料这种固有的变形量,应保证安装定位后的透镜在轴向和径向上具有一定的自由度,以适应 220 K 温度变化所导致的热变形。为了使安装定位后的透镜在轴向和径向上具有一定的自由度,在所有透镜和支撑结构件的配合面上分别加工 45° 的斜面,通过 45° 的斜边放开透镜在轴向和径向的自由度。图 3(彩图见期刊电子版)为采用这种透镜固定方式时,透镜组件由常温降到低温时的变形过程。

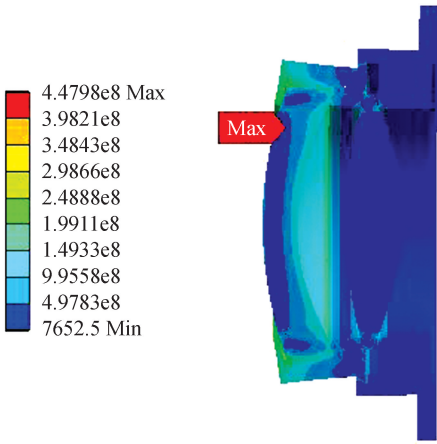


图 2 传统形式下透镜由常温到低温状态下的应变云图

Fig. 2 Strain cloud of lens from room temperature to low temperature

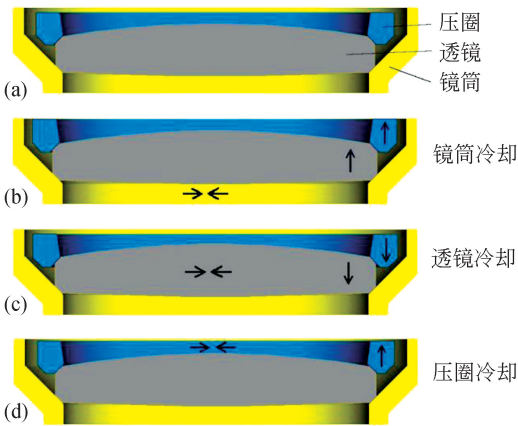


图 3 透镜组件由常温降到低温时的变形过程

Fig. 3 Deformation process of lens assembly from room temperature to low temperature

由图 3 可知,透镜在镜筒的径向上留有足够的间隙以抵消径向上的热变形。而透镜在轴向上的自由度是通过一定预载的弹簧进行轴向固定,而不是采用传统的螺纹连接,且为了保证透镜定位可靠,轴向弹簧的预载力应不低于透镜的 5 倍重力。由于透镜与镜筒,透镜与压圈的接触面均为 45° 斜面,故透镜在冷却降温 and 升温的过程中,可以实现自我准直。图 4(彩图见期刊电子版)为低温红外透镜的安装定位简图,图 5(彩图见期刊电子版)为由常温到低温状态下的应变云图。从图中可以看出透镜与镜筒之间产生的最大应力仅为 0.11 MPa 左右,这说明该种透镜固定方式完全可以将由于热变形所导致的应力释放

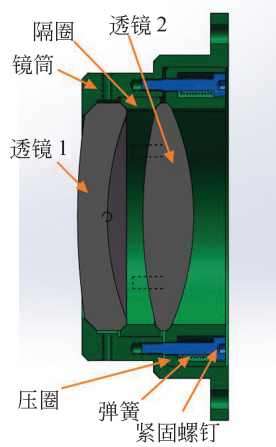


图 4 低温透镜定位简图

Fig. 4 Schematic diagram of cryogenic lens positioning

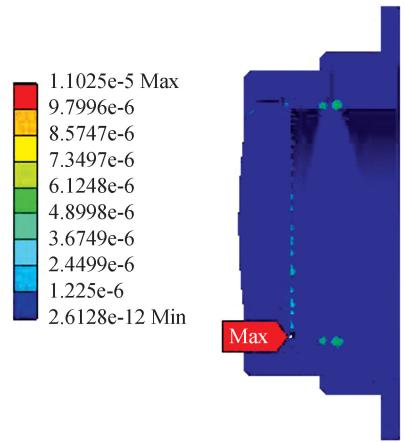


图 5 采用本文支撑方案的透镜由常温到低温状态下的应变云图

Fig. 5 Strain cloud of lens assembled in proposed method from room temperature to low temperature

出来。

镜组由常温 300 K 冷却到 80 K 时的变形云图如图 6(彩图见期刊电子版)所示,两个透镜的 4 个透射面的镜面面形依次为 77, 64, 58, 62 nm, 均满足光学的使用要求。

由于温度变化范围过大,材料热胀冷缩导致的光学元件的相对位置变化已经不能忽视,所以在光学设计阶段要充分考虑到温度变化的影响,同时对由透镜支撑形式所导致的相对位置变化进行反复迭代,以得到最佳成像效果。对于采用 45° 斜面定位方式的透镜,透镜在其支撑结构内相对于其支撑结构有一相对稳定点不随温度的变化而变化,如图 7 所示。通过推算透镜温度变化的不

动点,为光学参数的最终确定以及装调方案提供数据参考依据。

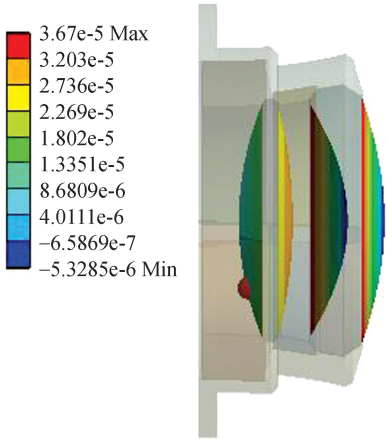


图 6 80 K 下镜组变形云图

Fig. 6 Deformation cloud for lens assembly at 80 K

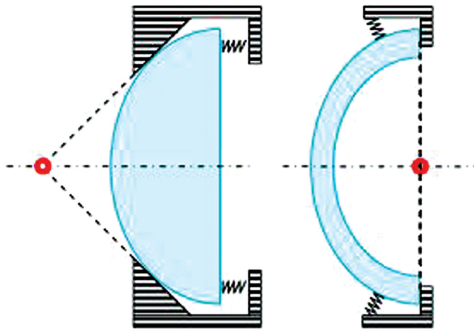


图 7 镜子随温度变化的不动点

Fig. 7 Isolated point of mirror doesn't change with temperature changing

4 试验验证

根据光机结构的设计原则,加工了相应的光学元件及其支撑结构件,最后搭建的短波试验系统如图 8 所示,在杜瓦内的光学平台上,主要组成元件有探测器座,探测器,电连接器,透镜组件 1,透镜组件 2,滤光轮等。其中透镜组件 1 与透镜组件 2 中的所有透射光学元件均采用 45°斜面的安装固定方式。

装调完光学平台上的光学元件,支撑结构,探测器等后,将它们封装杜瓦进行抽真空制冷,将杜瓦内光学平台的温度降到 80 K。在降温过程中,先用真空泵进行抽真空,待真空度降低到 10 Pa 以下时,打开制冷机,边抽真空边制冷,直至温度降低到 80 K,然后关闭真空泵,保持制冷机工作,

维持杜瓦内温度。整机的短波红外成像系统的杜瓦设备如图 9 所示。

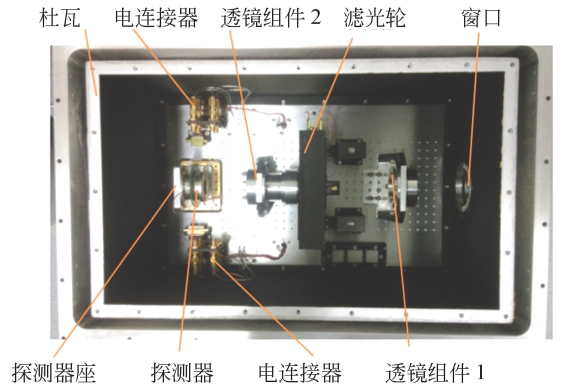


图 8 光学平台光学元件组成

Fig. 8 Optical components on optical platform



图 9 短波红外成像系统杜瓦

Fig. 9 Short-wave infrared imaging system Dewar

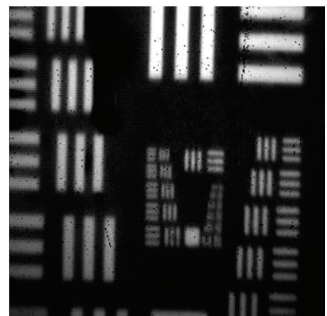


图 10 光学分辨率检验板成像

Fig. 10 Image in optical resolution test board

杜瓦内光学平台的温度降低到 80 K 时,进行成像实验,首先利用光学分辨率检验板进行光学系统的检验。系统短波相机的像元大小为 30 μm,根据理论计算知光学分辨率检验板只要达到 17lp/mm 就能达到奈奎斯特(Nyquist)采样极限。实验得到的光学分辨率检验板图像如图 10 所示,满足系统要求。最后利用 1.2 m 望远镜进行观星实验,图 11 为观测

到的北极星,可见具有较好的成像效果。

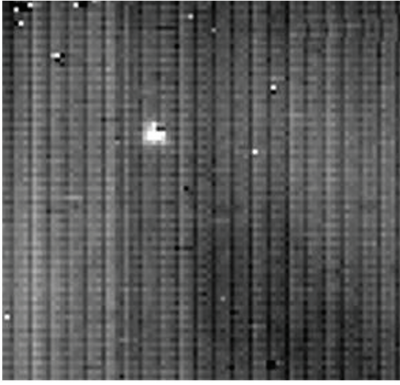


图 11 北极星

Fig. 11 Polaris

参考文献:

- [1] STRANIERO O, DOLCI M, VALENTINI A, *et al.*. AMICA: the first camera for near- and mid-infrared astronomical imaging at Dome C [J]. *EAS Publications Series*, 2007, 25: 215-220.
- [2] 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. YIN L M, LIU Y Q, LI H W. Cold optics technology to achieve high-accuracy infrared detection [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 535-540. (in Chinese)
- [3] 刘莹奇, 刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 115-121. LIU Y Q, LIU X Y. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 115-121. (in Chinese)
- [4] RAYNER J T, TOOMEY D W, ONAKA P M, *et al.*. SpeX: A Medium-Resolution 0.8-5.5 micron spectrograph and imager for the NASA infrared telescope facility [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2003, 115(805): 362-382.
- [5] PRITCHETT D G, HENDRICK JR R W, MOORE D K, *et al.*. AEOS radiometer system: a multichannel imaging radiometer [C]. *AeroSense'99, International Society for Optics and Photonics*, 1999: 206-213.
- [6] 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]. *Conference on Imaging Spectrometry II*, 1996.
- [7] HODAPP K W, JENSEN J B, IRWIN E M, *et al.*. The Gemini near-infrared imager (NIRD) [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2003, 115(814): 1388.
- [8] MCGREGOR P J, HART J, CONROY P G, *et al.*. Gemini near-infrared integral field spectrograph (NIFS) [C]. *Conference on Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based telescopes*, 2002.
- [9] BAUMEISTER H, BIZENBERGER P, BAYLER-JONES C A L, *et al.*. Cryogenic engineering for OMEGA2000: design and performance [C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation, International Society for Optics and Photonics*, 2003: 343-354.
- [10] KOVACS Z, MALL U, BIZENBERGER P, *et al.*. Characterization, testing, and operation of Omega2000 wide-field infrared camera [C]. *Conference on Optical and Infrared Detectors for Astronomy*, 2004.
- [11] 李春来, 吴刚, 刘银年, 等. 低温光学系统辐射特性研究 [J]. *激光与红外*, 2006, 36(12): 1146-1148. LI CH L, WU G, LIU Y N, *et al.*. Study of cryogenic optics system's radiation characteristic [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(12): 1146-1148. (in Chinese)
- [12] 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. WANG SH T, ZHANG W, WANG Q. Measure-

ment for detectivity of infrared detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):484-491. (in Chinese)

- [13] PROBST R G, MONTANE A, WARNER M, *et al.*. ISPI: the infared side port imager for the CI-TO 4-m telescope [C]. *Conference on Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescope*, 2002.
- [14] ICHIKAWA T, SUZUKI R, TOKOKU C, *et al.*.

Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph (MOIRCS) for the Subaru [J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2008, 60(6): 1347-1362.

- [15] 吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(6): 572-576.
- WU X J, MENG J H. Approach of athermalizing infrared optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 572-576. (in Chinese)

作者简介:



刘祥意(1987-),男,吉林敦化人,博士,助理研究员,主要研究方向为大口径望远镜的主镜支撑设计和仿真分析。E-mail: liuxiangyi107@163.com