

文章编号: 1672-8785(2019)06-0001-06

低温红外光学透镜支撑结构研究

仇善昌^{1,2} 饶 鹏^{1,2} 曾 瑾^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 在低温红外光学系统中, 光学元件及其支撑结构的加工和装配温度与其实际工作环境温度之间存在较大差异。根据低温红外光学系统对光机结构设计的要求, 设计和加工了一套适用于低温光学透镜的柔性支撑结构。透镜的径向定位与支撑采用一组周向均布的悬臂柔性支撑结构来实现; 轴向则采用压圈定位和波形垫圈来为透镜提供轴向预紧, 以避免由于温差以及材料的物理性能差异与变化而造成透镜面型无法满足指标要求。试验结果表明, 这种透镜支撑结构在 133 K 低温下具有良好的成像效果。

关键词: 低温光学; 大温差; 透镜支撑

中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.06.001

Research on Supporting Structure of Cryogenic Infrared Optical Lens

QIU Shan-chang^{1,2}, Rao Peng^{1,2}, Zeng Jin^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In a cryogenic infrared optical system, the temperature of processing and assembly of optics and its supporting structure is difference from the actual working environment. According to the requirements of cryogenic infrared optical system for optical machine structure design, a flexible supporting structure for cryogenic optical lens is designed and fabricated in this paper. The supporting structure of the optical lens is circumferentially equipped with a group of flexible and cantilevered supporting feet, which provide radial support for the optics. The waveform washer is used to provide axial support for the optics in the axial direction. Both schemes are important to avoid lens surface type not meeting indicator requirements due to temperature difference, physical property differences and changes in materials. The experimental result shows that the lens supporting structure has good imaging effect in the low temperature condition of 133 K.

Key words: cryogenic optics; large temperature difference; lens supporting

收稿日期: 2019-05-04

作者简介: 仇善昌(1977-), 男, 上海人, 高级工程师, 硕士, 主要从事航天光学遥感仪器的结构研究与设计。E-mail: qiushanchang@126.com

0 引言

随着科学发展和宇宙探索的深入,采用可获得丰富信息的红外波段来进行天文观测和空间目标探测已成为普遍手段^[1-4]。许多红外探测仪器为了获得更高的信噪比,或者是在对远距离微弱目标进行探测的过程中,需要抑制背景辐射。通过对探测仪器中的光学元件与支撑结构进行热控处理,并采用制冷技术使其工作在低温状态下,可以大幅减小光学元件及支撑结构的热辐射,有效抑制其对探测性能的影响,从而实现探测仪器的高灵敏度和低噪声性能。

鉴于低温光学在红外探测中的重要作用,国际上对此领域的研究十分活跃。例如,美国国家航空航天局(NASA)、欧洲航天局(ESA)和加拿大航空航天局(CSA)联合研制的詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)由直径约为 6.6 m 的望远镜以及近红外相机(NIRCam)、近红外光谱仪(NIRSpec)、近红外可调滤波成像仪(TFI)和中红外仪(MIRI)等四台仪器组成。为避免仪器的背景辐射,利用可展开式大遮阳板使 JWST 的望远镜系统及成像仪器一直位于遮阳板的背阳面。望远镜与成像仪器工作在 35 K 左右。日本 ASTRO-F 红外天文卫星的探测波段覆盖从近红外到远红外(2~200 μm)的范围,其望远镜为 F/6 的 R-C 系统,主镜口径为 710 mm。为抑制背景热辐射,基于超流氦与机械制冷机,ASTRO-F 卫星的望远镜系统工作在 5.8 K。国内也有诸多科研院所及高校在对低温光学进行探索与研究,比如中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院长春光学精

密机械与物理研究所等^[4-5]。本文则对用于低温工况的长波红外成像系统的透镜支撑方式进行了设计研究。

1 红外光学系统介绍

图 1 为长波红外成像验证系统的光路图。长波探测器组件经 4 片透镜对带孔靶标板和黑体进行成像。为了降低系统的红外背景噪声和提高探测灵敏度,透镜组要求工作在 130 K 左右的温度环境中。图 1 中,各透镜的直径为 36 mm 和 42 mm,所用材料为锗(Ge)与硒化锌(ZnSe)。装调时,各透镜的间距公差不大于 ± 0.03 mm, X/Y 轴离心公差为 ± 0.02 mm, X/Y 轴倾斜公差为 $\pm 1.5'$ 。

2 透镜支撑结构设计

2.1 低温光学的挑战

一般情况下,光学元件的加工和装调均在常温环境中进行。而在低温下,光学元件的光学表面半径、透镜厚度、光学材料的折射率以及支撑结构的实际尺寸都会发生相应变化,而且这些性能参数随温度降低呈非线性变化。对于低温光学透镜支撑结构来说,设计过程中最关注的是透镜材料与支撑结构材料的线胀系数的差异。透镜支撑结构既要保证透镜在低温工况下的精确位置,又需确保对透镜面型的影响能满足指标要求^[5]。若设计不当,则可能会在透镜内部形成过大的内应力,造成透镜面型差,严重者甚至造成透镜损坏。

在低温光学系统中,消热设计支撑结构、弹簧预紧支撑结构和柔性支撑结构是几种常用的支撑方式^[6-7]。

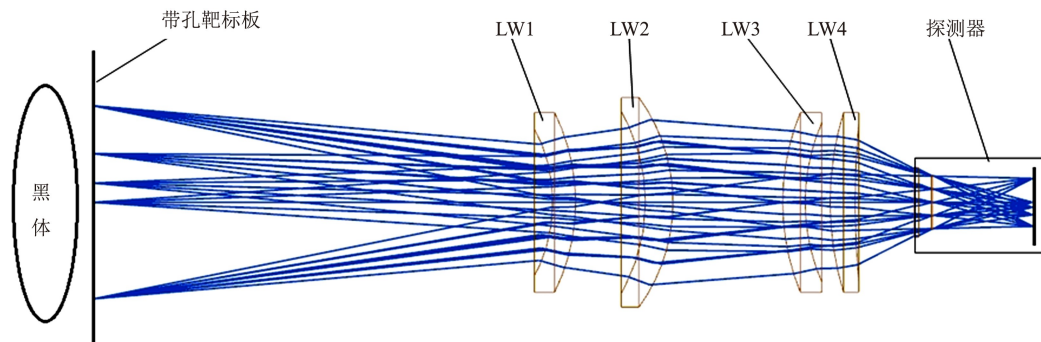


图 1 长波红外成像验证系统的光路图

2.2 透镜座结构设计

长波红外成像验证系统的透镜座结构采用柔性支撑方式。参考透镜材料(锗和硒化锌)在常温及低温下的热胀系数, 采用线胀系数相近的 TC4 钛合金材料作为透镜支撑结构的材料。TC4 钛合金为($\alpha+\beta$)型合金, 材料比强度很高, 在高温与低温下性能良好, 从室温到 100 K 的平均热胀系数约为 $7.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

图 2 为透镜安装座径向支撑结构的示意图。安装座沿圆周平均布有多个柔性支撑脚, 其数量可根据透镜的直径大小来设置。柔性支撑脚为悬臂结构, 支撑脚内侧的圆弧半径尺寸略小于透镜半径, 且与透镜采用过盈配合。安装时, 将透镜压入安装座内, 各支撑脚由于过盈配合产生的弹性变形而为透镜提供径向向心定位支撑。各安装脚均与透镜紧密接触, 无间隙。假设每个支撑脚提供的向心力为 F_n , 每个支撑脚的预载变形量可参考悬臂梁的挠度估算:

$$\epsilon = C \frac{F_n L^3}{3EI} = C \frac{F_n L^3}{3E} \cdot \frac{12}{a^3 b} \quad (1)$$

式中, ϵ 为每个支撑脚的预载变形量; F_n 为每个支撑脚提供的向心力; L 为柔性支撑脚悬臂结构的有效长度; a 和 b 分别为悬臂结构截面的厚度和宽度; I 为截面惯性矩, $I = \frac{a^3 b}{12}$; C 为修正系数, $C \approx 0.3$, 可通过有限元仿真获得。

设

$$k = \frac{Ea^3 b}{4L^3 C} \quad (2)$$

则 k 为柔性支撑结构每个支撑脚的刚度。

在透镜装调测试过程中, 光轴一般为水平状态。在重力的影响下, 透镜发生偏心下移 δ , 如图 3 所示。此时, 透镜安装座每个支撑脚的向心力为

$$F_n = k[\epsilon + \delta \cos(n * \vartheta)] \quad (3)$$

对于质量为 m 的透镜, 采用 N 个均布的柔性支撑脚径向支撑, 分析透镜受力状态。在

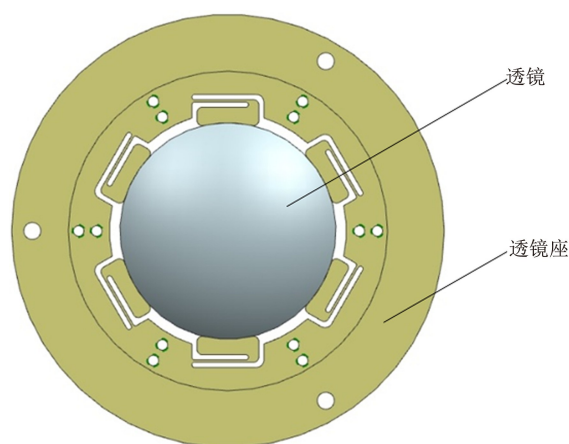


图 2 透镜安装座径向柔性结构

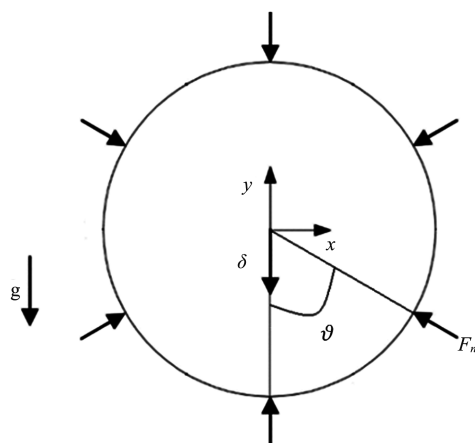


图 3 透镜径向受力状态的示意图

不考虑柔性支撑脚与透镜的摩擦力时, Y 方向的径向支撑力合力与透镜重力处于平衡状态, 即

$$\sum_{n=1}^N F_n \cos(n * \vartheta) = mg \quad (4)$$

对式(4)进行展开和求解, 可得:

$$k = \frac{mg}{\sum_{n=1}^N \delta \cos^2(n * \vartheta)} \quad (5)$$

δ 值应根据透镜安装公差选取。根据 δ 可算得柔性支撑结构的刚度 k , 从而确定结构各参数值。在实际结构中, 由于透镜与安装座之间存在摩擦力, 透镜在重力作用下的偏心量比 δ 小。

图 4 为透镜支撑整体结构设计的示意图。透镜的径向由沿安装座圆周分布的多个柔性支撑脚来支撑定位。安装座的两侧均有透镜压圈。压圈 1 与安装座固定连接, 其安装接触面

为透镜提供沿轴向的安装定位基准。波形垫圈作用于压圈 2，为透镜提供沿轴向的预紧。在装配过程中，可根据实测尺寸对压圈 2 的厚度或波形垫圈的压紧螺钉进行修正，以保证波形垫圈的变形处在要求范围之内。

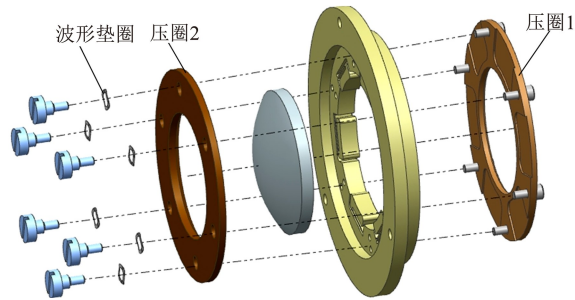


图 4 透镜支撑结构的示意图

图 5 所示为长波红外成像验证系统的 LW2 透镜及支撑结构图。LW2 透镜采用锗材料，其直径为 42 mm，质量为 0.039 kg。LW2 透镜安装座采用 6 个周向平均分布的支撑脚来实现径向支撑定位， δ 值取为 0.004 mm。最终柔性支撑脚的设计参数如下： $L=11$ mm， $a=0.45$ mm， $b=5$ mm， $\epsilon=0.039$ mm；每个柔性支撑脚提供约 1.2 N 的向心力，以保证径向在 10 倍的重力作用下透镜与镜座支撑脚始终保持接触。轴向采用 6 组波形垫片来提供轴向预紧力，共 4 N 左右，约为 10 倍重力。由于安装座 TC4 的线胀系数比透镜材料锗的线胀系数大，在从常温到 130 K 的温度范围内，

LW2 透镜柔性支撑脚的预载变形量将增加 0.015 mm 左右，每个柔性支撑脚的向心力将增至 1.7 N 左右。

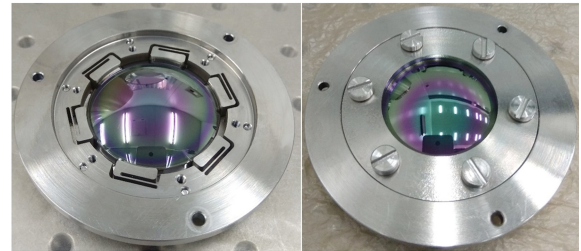


图 5 长波红外成像验证系统的 LW2 透镜及支撑结构

图 6 为 LW2 透镜裸镜的面型检测图以及 LW2 透镜装配后的面型检测图。LW2 透镜的 RMS 值分别为 0.46 λ 和 0.55 λ ，满足使用要求。通过对透镜光轴水平与竖直状态进行测量可以发现，在光轴水平状态下，重力影响并未导致透镜下移。

3 试验验证

图 7 所示为按以上方法设计加工的长波红外成像验证系统的透镜组件。透镜座支撑脚采用慢走丝线切割加工。图 8 所示为我们搭建的整套试验系统。它由黑体及带孔靶标板、透镜组、长波探测器和调焦系统等组成。在对该系统进行热实施后，整体推进真空罐内进行成像试验。

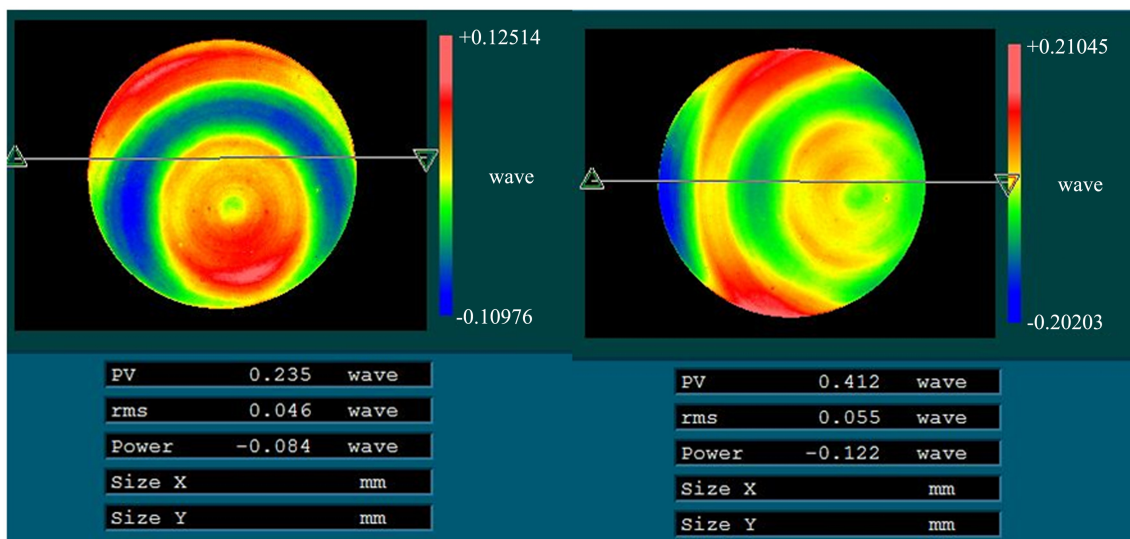


图 6 LW2 裸镜(左)以及 LW2 透镜装配后(右)的面型测试结果

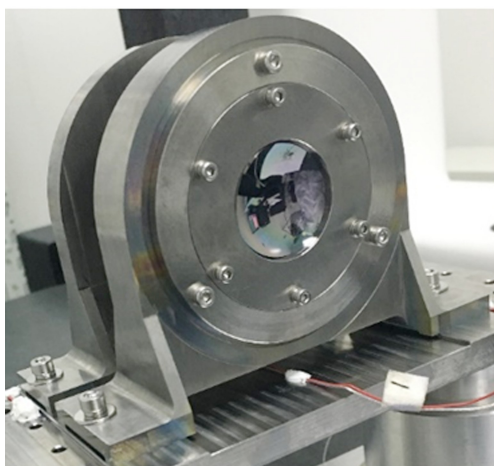


图 7 长波红外成像验证透镜组件

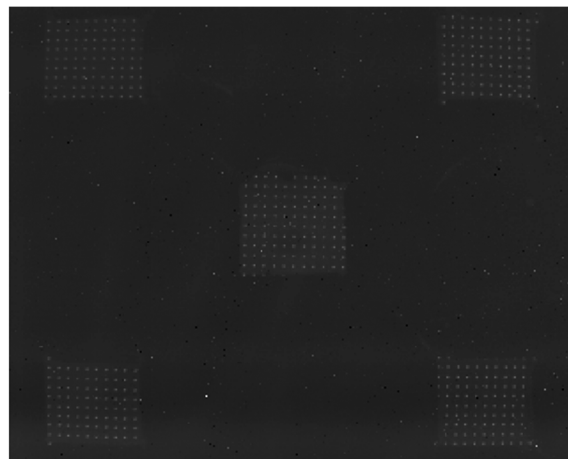


图 9 带孔靶标板的成像图

完成常温检查及测试后, 真空罐关罐, 抽真空至 1×10^{-3} Pa。透镜组降温到 133 K, 探测器对靶标板和黑体进行成像。利用带孔靶标板进行光学系统成像验证。实验成像结果如图 9 所示, 满足系统要求。

4 结束语

在低温红外探测系统中, 光学元件及支撑结构由于温差与材料物理性能的差异, 对常温

装调、低温使用的透镜支撑结构提出了更高的要求。本文利用柔性支撑与波形垫圈实现了对光学元件的定位和支撑, 以确保在环境温度变化后, 支撑结构对光学元件的影响可控, 且光学元件的镜面面形能够满足使用要求。柔性支撑结构采用慢走丝线切割加工, 要求加工形位公差能满足定位精度需求, 加工要求较高。试验结果表明, 该支撑结构可在 133 K 低温状态下获得良好的成像效果, 满足系统要求。

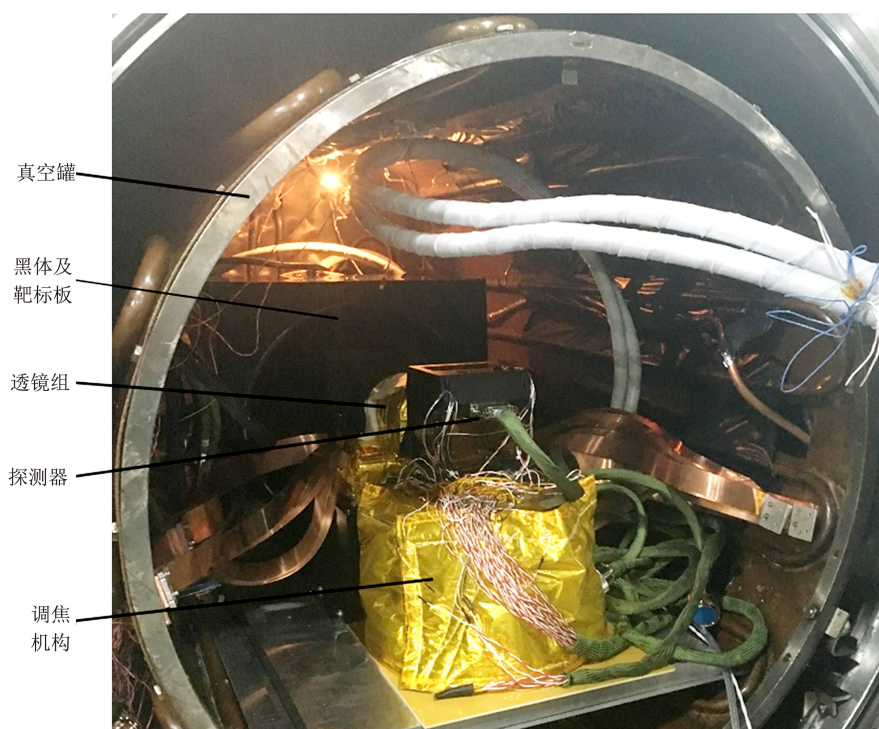


图 8 长波红外成像验证试验系统

参考文献

- [1] Kvamme E T, Jacoby M, Osborne L. Opto-mechanical Design for Transmission Optics in Cryogenic IR Instrumentation [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 70100Z.
- [2] Kvamme E T, Trevas D, Simonson R. A Low Stress Cryogenic Mount for Space-borne Lithium Fluoride Optics [C]. *SPIE*, 2005, **5877**: 58770T.
- [3] Kvamme E T, Jacoby M, Osborne L. Opto-mechanical Test Results for the Near Infra-red Camera on the James Webb Space Telescope [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 701010.
- [4] 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.
- [5] 丁学专. 星载长波红外低温光学系统研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2010.
- [6] Stephen A S. A Precision Lens Mount for Large Temperature Excursions [C]. *SPIE*, 2010, **7739**: 77393O.
- [7] Yoder P R. 光机系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.