

低冷环境红外场景投影光学系统的设计

张思晨^{1,2}, 李卓^{1,2}, 高彦泽^{1,2*}, 施蕊^{1,2}, 杜渐³, 时庆峰^{1,2}, 王欣^{1,2}, 杨苏辉^{1,2}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081;³航天系统仿真重点实验室北京仿真中心, 北京 100854

摘要 空间红外探测设备的地面实验中,需要利用红外场景模拟器在实验室条件下生成模拟空间目标红外特征的红外图像,并通过投影光学系统将红外图像投影到待测设备上。因此,设计了一种可在 100~300 K 温度范围内工作的投影光学系统。该系统采用同轴卡塞格林结构,工作波段为 3.7~5.5 μm ,焦距为 638 mm,视场为 $3.4^\circ \times 3.4^\circ$,出瞳直径为 102 mm,出瞳距离为 660 mm。利用 Zenike 多项式对镜面的热致形变数据进行了拟合,利用 ZEMAX 软件对系统的成像质量进行了评价。仿真结果表明,该投影系统在不同温度下的调制传递函数均达到了设计要求,且该投影系统已成功应用于某空间红外探测设备的地面低温实验中。

关键词 光学设计; 红外探测; 投影系统; 低冷环境; 热应力

中图分类号 TN216

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1422003

Design of Optical System for Infrared Scene Projection in Cryogenic Environment

Zhang Sichen^{1,2}, Li Zhuo^{1,2}, Gao Yanze^{1,2*}, Shi Rui^{1,2}, Du Jian³,
Shi Qingfeng^{1,2}, Wang Xin^{1,2}, Yang Suhui^{1,2}¹ School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;² Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China;³ Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China

Abstract In the ground experiment of spatial infrared detection equipment, an infrared scene simulator needs to be used to generate an infrared image that simulates the infrared characteristics of a space target under laboratory conditions, and the infrared image is projected onto the device under test through a projection optical system. Therefore, this paper designs an optical projection system operating in the range of 100–300 K. The system with a coaxial Cassegrain structure has a working wavelength of 3.7–5.5 μm , a focal length of 638 mm, a field of view of $3.4^\circ \times 3.4^\circ$, an exit pupil diameter of 102 mm, and an exit pupil distance of 660 mm. The Zenike polynomial is employed to fit the thermal deformation data of the mirrors, and the ZEMAX software is applied to evaluating the imaging quality of the system. The simulation results show that the modulation transfer function of the projection system at different temperatures meets the design requirements, and the projection system has been successfully applied to the ground cryogenic experiment of a spatial infrared detection device.

Key words optical design; infrared detection; projection system; cryogenic environment; thermal stress

OCIS codes 220.3620; 260.3060; 120.6810

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-01-24; 录用日期: 2021-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(61875011)、中国博士后科学基金(2020TQ0036)

通信作者: *gao_yanze@bit.edu.cn

1 引言

红外场景模拟器可在实验室条件下生成模拟目标和背景红外辐射特性的红外图像,并通过投影光学系统将生成的红外图像投影到待测的红外探测设备上,是红外成像半实物仿真系统的关键组件^[1-2]。空间红外探测系统在发射信号前,必须在地面对其性能进行测试,通常利用真空冷舱模拟空间中的低温环境,以考核低温下红外传感器的探测性能^[3-4],测试时红外场景模拟器的图像生成器及投影光学系统都置于冷舱内。

红外场景投影光学系统需要兼顾室温条件及冷舱内低温条件下的成像质量。由于不同材料的热膨胀系数不同,若温度的变化范围过大,会使镜面与光机结构之间产生较强的热应力,进而导致镜面和光机结构的变形,引起成像质量下降^[5-8]。因此,在设计低温光学系统时需要遵循无热化原则^[9-11],通过选择热膨胀系数相近的材料并引入弹性结构,实现热应力卸载。

本文针对某空间红外探测系统的地面低温实验

需求,设计并制作了一种在较宽温度范围内具有良好成像质量的红外场景投影光学系统。首先,给出了宽温度工作范围的投影光学系统设计方法;然后,分析了温度变化导致的镜面和光机结构变形对光学系统成像质量的影响;最后,对投影系统的调制传递函数(MTF)进行了测试,并在低温条件下进行了成像实验。

2 光学系统的设计

2.1 红外图像生成原理

实验使用的红外场景投影光学系统适用于采用微机电系统(MEMS)转换薄膜作为图像生成器件的红外场景模拟器,MEMS转换薄膜的结构如图1(a)所示^[12],薄膜用Si材料作为衬底,在衬底上光刻出微结构,用聚酰亚胺(PI)作为粘结层,再将Al黑蒸镀到PI表面形成像元。薄膜上的像元通过吸收可见光迅速升温,并以近似黑体辐射的形式辐射红外线,从而将包含目标红外特征的可见光图像转换为物理意义上的红外图像,再通过红外场景投影光学系统投射给被测设备^[13-14],如图1(b)所示。

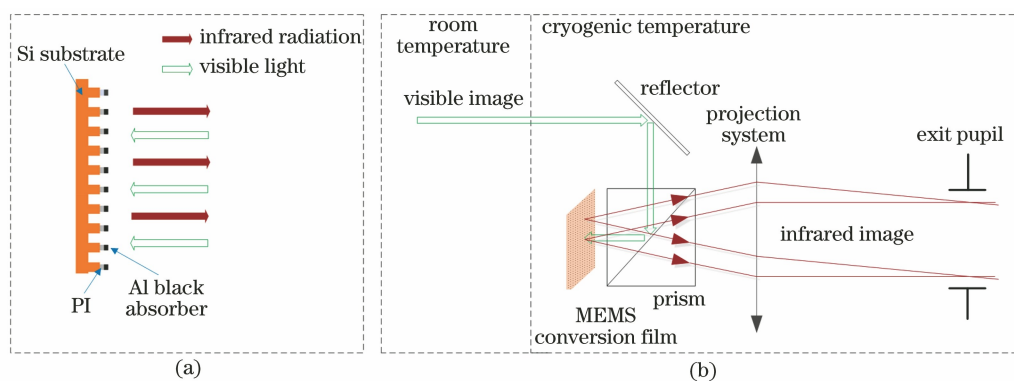


图 1 红外图像生成系统的原理。(a) MEMS 转换薄膜的结构;(b)红外图像的投影光路

Fig. 1 Principle of the infrared image generation system. (a) Structure of the MEMS conversion film; (b) projection light path of the infrared image

MEMS转换薄膜吸收可见光图像的能量,在薄膜表面产生温度场分布,进而形成红外辐射场。其中,可见光图像的写入光路位于冷舱外的室温环境,转换薄膜及投影光学系统位于冷舱内部,即低温环境。由于MEMS转换薄膜是一种被动无源器件,无需保温,可被制冷到接近冷舱内部温度,从而产生背景温度极低的红外场景。而有源主动型红外场景生成装置使用需要保温的热辐射器件,因此无法生成背景温度极低的红外场景。

2.2 设计要求分析

低温红外场景投影光学系统的作用是将冷舱内

产生的红外图像投影至被测红外探测系统的入瞳处,根据冷舱环境及被测系统的实际情况,投影光学系统需要满足以下要求:

- 1) 工作温度范围为 100~300 K;
- 2) 工作波段为 3.7~5.5 μm ;
- 3) 出瞳距离为 600~700 mm,出瞳直径大于 100 mm;
- 4) 视场大于 $3^\circ \times 3^\circ$;
- 5) 角分辨率小于 0.25 mrad。

MEMS转换薄膜的图像分辨率为 1024×1024,工作区的尺寸为 37.89 mm×37.89 mm,投影系统

的物面尺寸为 $37.89 \text{ mm} \times 37.89 \text{ mm}$ 。为方便投影系统与被测红外探测系统的对接,将投影视场设计为 $3.4^\circ \times 3.4^\circ$,根据半物高 y 和半视场角 ω 计算出的系统焦距 $f = y / \tan \omega \approx 638 \text{ mm}$ 。

为匹配被测红外探测系统的角分辨率,投影角分辨率 τ 应小于 0.25 mrad ,实验设计为 0.23 mrad 。根据投影角分辨率和投影系统焦距,得到投影系统的线分辨率 $\Delta = f \times \tan \tau \approx 147 \mu\text{m}$,投影系统的奈奎斯特频率 $F = 1/(2\Delta) \approx 3.4 \text{ lp/mm}$ 。

2.3 光学设计

2.3.1 初始结构的计算

投影系统的光学设计一般采用反向设计原则,即将物面置于无穷远,将像面放置在 MEMS 转换薄膜处。为了减少环境杂散光并尽量多地利用 MEMS 转换薄膜产生的红外辐射,投影系统的出瞳直径与位置应与被测红外探测系统的入瞳直径与位置相匹配^[15]。

投影系统采用同轴卡塞格林(卡式)结构,如图 2 所示。卡式结构为反射式光学系统,相比透射式光学系统,避免了透镜材料折射率随温度的变化而变化。此外,同轴系统具备回转对称性,镜面因温度变化产生的热应力也具有回转对称性,便于光机结构实现热应力卸载的设计^[16]。

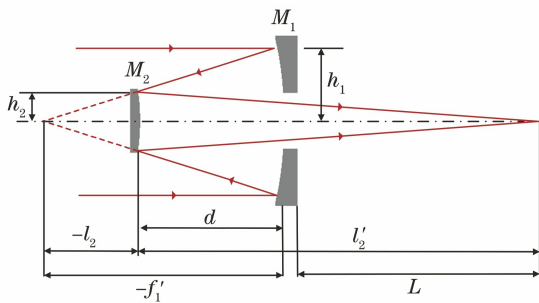


图 2 同轴卡塞格林系统的结构

Fig. 2 Structure of the coaxial Cassegrain system

投影系统主镜 M_1 和次镜 M_2 的初始面型均为二次曲面,可表示为^[14]

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}}, \quad (1)$$

式中, z 为镜面的矢高, r 为径向坐标, K 为二次曲面系数, c 为镜面顶点处的曲率,可表示为

$$c = 1/R, \quad (2)$$

式中, R 为镜面顶点的曲率半径。定义系统的遮拦比为

$$\alpha = h_2/h_1, \quad (3)$$

式中, h_1 、 h_2 分别为轴上视场边缘光线在主镜和次

镜处的入射高度。定义次镜的垂轴放大率为

$$\beta = l'_2/l_2, \quad (4)$$

式中, $-l_2$ 、 l'_2 分别为次镜的物距和像距。

计算系统初始结构的目的是根据系统的焦距 f' 、后截距 L 、遮拦比 α 和次镜的垂轴放大率 β 确定主镜与次镜的顶点曲率半径 R_1 、 R_2 ,二次曲面系数 K_1 、 K_2 以及主镜和次镜的间距 d 。各参数的计算公式可表示为^[17]

$$\alpha = (f' + L\beta) \cdot (1 - 1/\beta), \quad (5)$$

$$R_1 = 2f'/\beta, \quad (6)$$

$$R_2 = (\alpha\beta \times R_1)/(\beta + 1), \quad (7)$$

$$K_1 = - \left[1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2} \right], \quad (8)$$

$$K_2 = - \left[\frac{2\beta}{1-\alpha} + \frac{(1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3} \right], \quad (9)$$

$$d = f' \times (1-\alpha)/\beta. \quad (10)$$

实际的投影系统结构 $f = 638 \text{ mm}$,令遮拦比 $\alpha < 0.4$,后截距 $L > 120 \text{ mm}$,计算得到系统的初始结构如图 3 示。主镜和次镜的顶点曲率半径 $R_1 = -366 \text{ mm}$ 、 $R_2 = -205 \text{ mm}$,二次曲面系数 $K_1 = -0.6$ 、 $K_2 = -3.97$,主次镜的间距 $d = 109 \text{ mm}$,后截距 $L = 146 \text{ mm}$ 。

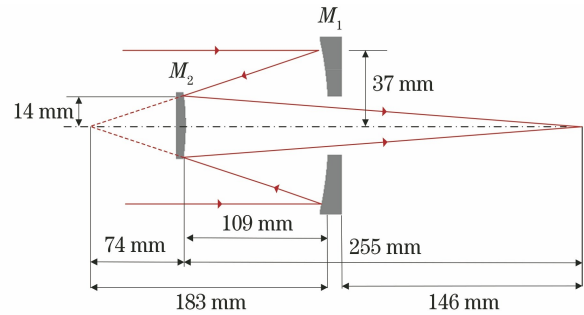


图 3 投影系统的初始结构

Fig. 3 Initial structure of the projection system

2.3.2 参数优化

利用 ZEMAX 软件对初始结构进行优化,优化的目标是使投影系统在空间频率 3.4 lp/mm 处的 MTF 大于 0.5(实际使用的红外投影系统在奈奎斯特频率处的 MTF 大于 0.2 即可,实验考虑到低温会造成成像质量的退化,留有一定的设计余量)。在优化过程中,将主镜、次镜的面形设置为偶次非球面,优化的变量包括主镜和次镜的顶点曲率半径 R_1 、 R_2 ,二次曲面系数 K_1 、 K_2 ,主次镜的间距 d 以及后截距 L 。优化的约束条件:系统的遮拦比 $\alpha < 0.4$,后截距 $L > 120 \text{ mm}$ 。此外,随着视场的增加,

系统会引入高阶彗差、像散及其他与视场相关的轴外像差,因此,引入高次多项式校正主镜和次镜的高阶像差,多项式阶数取为 8。主镜和次镜的面型表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K + 1)c^2r^2}} +$$

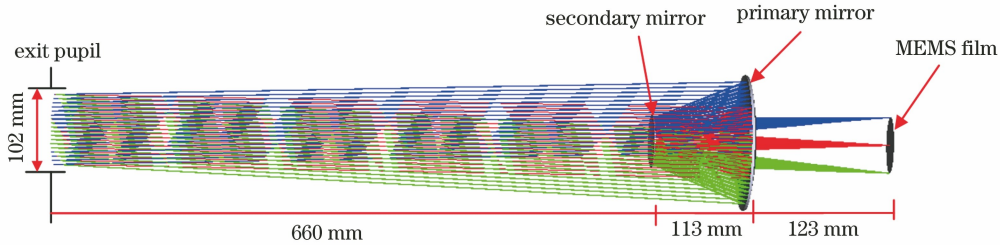


图 4 优化后的投影系统结构

Fig. 4 Optimized structure of the projection system

表 1 投影系统主镜和次镜的面型系数

Table 1 Surface coefficients of the primary and secondary mirrors of the projection system

Surface coefficient	Primary mirror	Secondary mirror
K	-10.20	-1.36
α_1	0	0
α_2	-2.625×10^{-8}	-9.427×10^{-9}
α_3	9.262×10^{-13}	2.353×10^{-11}
α_4	-2.97×10^{-17}	-1.039×10^{-14}

优化后投影系统的焦距为 638 mm,出瞳距离为 660 mm,出瞳直径为 102 mm,均满足设计要求。MTF 可衡量光学系统的成像质量,优化后投影系统的 MTF 曲线如图 5 所示。可以发现,投影系统各视场的 MTF 在 3.4 lp/mm 处均优于 0.5。投影系统的衍射包围圆能量图(可反映系统光斑能量的集中程度)如图 6 所示,可以发现,对于大部分视场,本系统 80% 的能量对应的包围圆宽度约为 130 μm ,优于投影系统的最小线分辨率 Δ 。

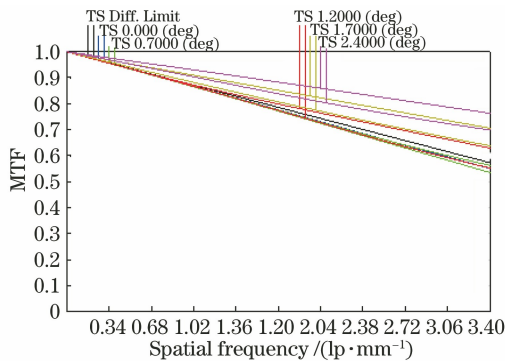


图 5 投影系统的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of the projection system

$$\alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8. \quad (11)$$

优化后的系统结构如图 4 所示,此时,系统的主镜直径为 164 mm,次镜直径为 74 mm,主镜和次镜的顶点曲率半径 $R_1 = -356 \text{ mm}$, $R_2 = -181 \text{ mm}$,主次镜的间距 $d = 113 \text{ mm}$,后截距 $L = 123 \text{ mm}$,主镜和次镜的面型系数如表 1 所示。

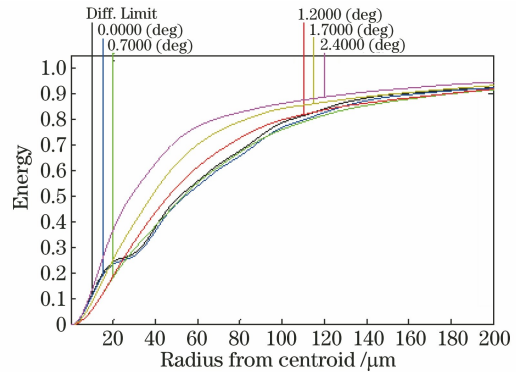


图 6 投影系统的衍射包围圆能量图

Fig. 6 Energy diagram of the diffraction encircling circle of the projection system

2.4 无热化设计

由图 5 可知,投影系统在空间频率为 3.4 lp/mm 处的 MTF 大于 0.5,这表明投影系统在室温(300 K)下的成像质量满足设计要求。但投影系统还需在 100~300 K 温度范围实现较好的成像效果,因此,必须对其进行无热化设计,以保证投影系统的温度适应性。

2.4.1 材料的无热化设计

由文献[18]可知,若反射镜为弹性各向同性平板,则

$$\epsilon_z(z) = \gamma \times \delta T(z) + (1 + E)[\sigma_z - \nu(\sigma_\rho - \sigma_\theta)], \quad (12)$$

式中, $\epsilon_z(z)$ 为差分应变, γ 为反射镜材料的热膨胀系数, $\delta T(z)$ 为温度梯度, E 为反射镜材料的弹性模量, σ 为应力分量, ρ, θ 为对应位置的坐标, ν 为反射镜材料的泊松比。可以发现,若想减弱温度变化对反射镜面型的影响,反射镜材料需要具有热膨胀系

数小、弹性模量小、热导率大、比重小、刚度高、可进行光滑表面抛光和真空沉积镀膜等特点。在低温光学系统中,常用的反射镜材料有微晶玻璃(Zerodur)、超低膨胀玻璃(ULE)、铍(Be)、碳化硅(SiC)等。实验采用微晶玻璃作为反射镜材料,原因是微晶玻璃的热膨胀系数很小,约为 $7 \times 10^{-7} \sim 11 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$,可显著降低反射镜的热敏感性。

2.4.2 结构的无热化设计

在温度变化时反射镜及反射镜支架都会发生径向方向的热胀冷缩,由于结构件材料与反射镜材料的热膨胀性能不匹配,会产生径向热应力,从

而严重影响镜面面型。根据光学系统的无热化原则^[9-11],反射镜支架选用与微晶玻璃热膨胀系数相近的殷钢材料,以减弱径向热应力,殷钢的热膨胀系数约为 $9 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 。此外,分析了 2 种固定方式对反射镜面型变化的影响。第 1 种固定方式利用带螺纹的压圈通过旋转方式将反射镜压在安装座内;第 2 种固定方式在反射镜安装座上沿圆周方向均布弹性压片,利用压片的弹性形变为反射镜提供轴向定位支撑,将反射镜紧压在安装座内。主镜和次镜在 2 种固定方式下的结构如图 7 和图 8 所示。

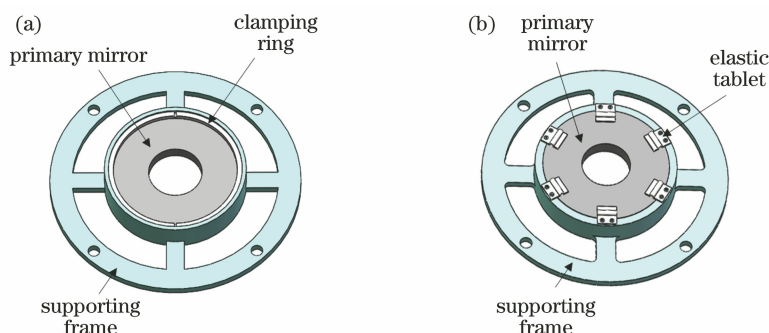


图 7 主镜的固定方式。(a)压圈固定;(b)压片固定

Fig. 7 Installation of the primary mirror. (a) Clamping ring installation; (b) tablet installation

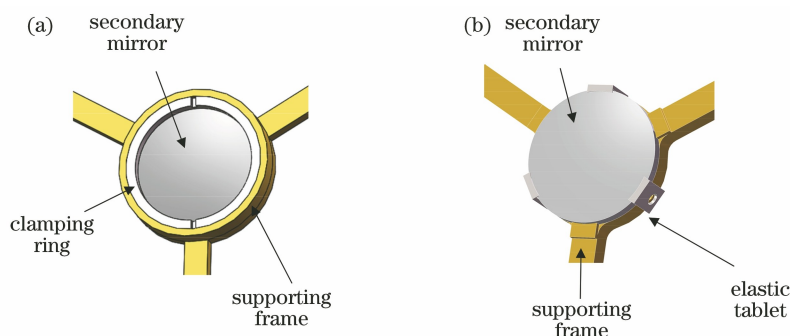


图 8 次镜的固定方式。(a)压圈固定;(b)压片固定

Fig. 8 Installation of the secondary mirror. (a) Clamping ring installation; (b) tablet installation

将 2 种反射镜安装结构导入有限元分析软件中,以分析温度变化对反射镜面型的影响,解算出主镜和次镜在 100 K 时的面型变化云图分别如图 9、

图 10 所示。可以发现,相比压圈固定方式,压片固定方式对面型的影响更小。原因是多压片支撑结构能使光学元件均匀受力,同时减小压片与透镜的接

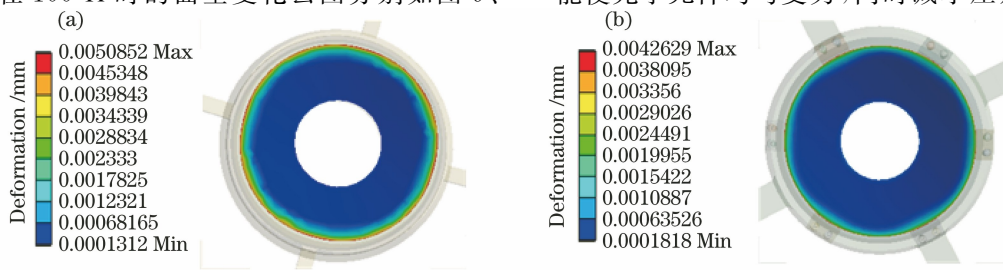


图 9 主镜的形变分析结果。(a)压圈固定;(b)压片固定

Fig. 9 Deformation analysis results of the primary mirror. (a) Clamping ring installation; (b) tablet installation

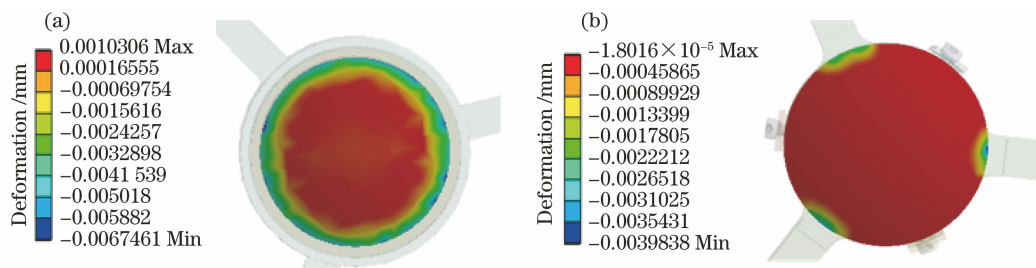


图 10 次镜的形变分析结果。(a)压圈固定;(b)压片固定

Fig. 10 Deformation analysis results of the secondary mirror. (a) Clamping ring installation; (b) tablet installation

触应力。此外,压片安装方式是通过压片的弹性变形力产生径向夹持力,而压圈固定方式则是将反射镜压在安装座内,低温时安装座结构的收缩会对镜片产生径向的刚性应力,严重时甚至会压碎镜片。

将形变数据整理后进行 Zernike 多项式拟合,并传递给光学设计软件,分别得到压圈安装结构和压片安装结构在 100 K 温度下光学系统的 MTF,如图 11 所示。可以发现,在各个视场下,压片安装方式的 MTF 均高于压圈安装方式。因此,实验选择压片结构作为主镜和次镜的固定结构,最终得到投影系统的光机结构如图 12 所示。

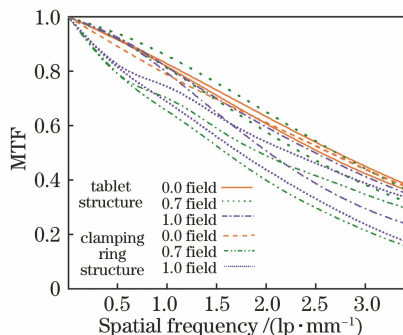


图 11 2 种固定方式下系统的 MTF

Fig. 11 MTF of the system in 2 fixed modes

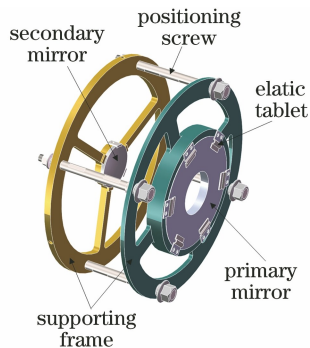


图 12 投影系统的光机结构

Fig. 12 Opto-mechanical structure of the projection system

为了进一步分析光机结构件材料对系统低温下成像效果的影响,给出了结构件材料热膨胀系数在 $5 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 范围内的变化情况。图 13

为 100 K 温度下投影系统边缘视场在空间频率 3.4 lp/mm 处的 MTF 变化情况,可以发现,若边缘视场的 MTF 在 3.4 lp/mm 处大于 0.3,则结构件材料的热膨胀系数需小于 $1.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,而殷钢的热膨胀系数约为 $9 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$,满足要求。

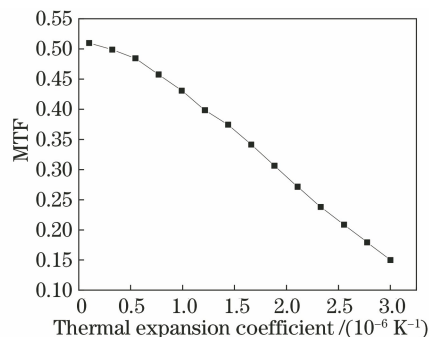


图 13 不同热膨胀系数下系统的 MTF

Fig. 13 MTF of the system under different thermal expansion coefficients

3 温度对系统的影响

3.1 分析方法

将投影光学系统的主镜和次镜在 300 K 温度下的面型作为初始面型数据,首先,通过设置环境温度、材料、光机结构模型,利用有限元分析软件分析主镜和次镜在不同温度下的面型变化情况;然后,将面型变化的有限元数据转换成 Zernike 多项式形式,以评价光学系统的像质;最后,根据像质评价结果决定是否继续优化光机结构,最终得到满足设计要求的投影光学系统,具体分析流程如图 14 所示。

3.2 热致形变分析

热致形变后的镜面面型可表示为^[19]

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K + 1)c^2 r^2}} + \sum_{i=1}^4 \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N a_i Z_i(\varphi, \theta), \quad (13)$$

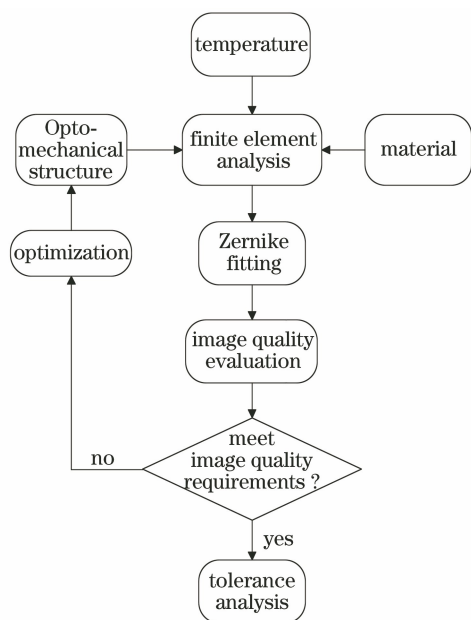


图 14 投影系统的优化分析流程图

Fig. 14 Optimization analysis flow chart of the projection system

式中, a_i 为 Zernike 系数, (φ, θ) 为极坐标, $\sum_{i=1}^N a_i Z_i(\varphi, \theta)$ 为面型的变化情况。等号右侧的前两项为(11)式中的非球面面型, 第三项为 Zernike 项, 表示由热致形变导致的无规律变形。表 2 和表 3 分别为主镜和次镜在 100 K 温度下面型的前 37 项 Zernike 系数。

表 2 主镜的 Zernike 系数

Table 2 Zernike coefficient of the primary mirror

No.	Coefficient	No.	Coefficient	No.	Coefficient
1	1.69×10^{-3}	14	-3.86×10^{-6}	27	-2.97×10^{-6}
2	-6.84×10^{-7}	15	-5.34×10^{-6}	28	-2.18×10^{-5}
3	-1.33×10^{-6}	16	6.49×10^{-4}	29	-6.02×10^{-6}
4	9.60×10^{-4}	17	-1.48×10^{-5}	30	1.01×10^{-6}
5	-6.76×10^{-6}	18	-5.26×10^{-6}	31	-1.55×10^{-6}
6	-3.22×10^{-6}	19	2.44×10^{-6}	32	4.42×10^{-6}
7	-7.47×10^{-7}	20	1.86×10^{-6}	33	-4.72×10^{-7}
8	1.01×10^{-6}	21	-3.20×10^{-6}	34	-3.07×10^{-6}
9	-1.06×10^{-3}	22	-1.92×10^{-6}	35	-1.03×10^{-5}
10	1.94×10^{-6}	23	1.07×10^{-6}	36	2.91×10^{-4}
11	1.95×10^{-6}	24	6.86×10^{-6}	37	-3.88×10^{-5}
12	-3.15×10^{-6}	25	-3.66×10^{-4}		
13	-2.98×10^{-6}	26	-8.19×10^{-7}		

除反射镜的面型变化外, 殷钢定位螺杆热胀冷缩导致的主次镜间距变化也会对投影系统的像质造成较大影响, 因此, 分析了主次镜间距在温度为 100~300 K 时的变化量, 结果如图 15 所示。

表 3 次镜的 Zernike 多项式系数

Table 3 Zernike polynomial coefficients of the secondary mirror

No.	Coefficient	No.	Coefficient	No.	Coefficient
1	-8.73×10^{-5}	14	2.42×10^{-6}	27	6.01×10^{-6}
2	-2.65×10^{-7}	15	-6.81×10^{-7}	28	1.89×10^{-6}
3	9.28×10^{-7}	16	-3.21×10^{-6}	29	-7.42×10^{-7}
4	1.98×10^{-5}	17	1.15×10^{-6}	30	-1.21×10^{-5}
5	7.55×10^{-7}	18	5.89×10^{-7}	31	-3.01×10^{-6}
6	1.56×10^{-6}	19	-3.39×10^{-5}	32	-3.70×10^{-7}
7	2.51×10^{-6}	20	-8.01×10^{-6}	33	8.70×10^{-7}
8	-6.07×10^{-7}	21	2.34×10^{-6}	34	2.08×10^{-7}
9	-8.27×10^{-6}	22	2.18×10^{-6}	35	-3.61×10^{-7}
10	-4.26×10^{-5}	23	3.07×10^{-7}	36	1.9×10^{-6}
11	-9.98×10^{-6}	24	1.30×10^{-8}	37	2.05×10^{-6}
12	4.74×10^{-6}	25	1.48×10^{-6}		
13	3.67×10^{-6}	26	2.67×10^{-6}		

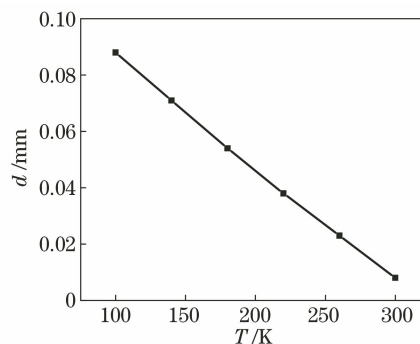


图 15 d 随温度的变化曲线

Fig. 15 Change curve of the d with temperature

3.3 成像质量的分析

考虑到镜片面型变化及主次镜的间距变化, 利用 ZEMAX 软件分析投影系统在温度为 100~300 K 时的 MTF 变化情况, 结果如图 16 所示。可以发现, 系统的成像质量随温度的下降而减小, 在 100 K 时系统边缘视场的 MTF 约为 0.25。

4 实验结果及分析

4.1 MTF 的测试

在室温条件下搭建了 MTF 测试光路, 如图 17 所示。在投影系统的焦平面放置具有锐利刀口边缘的物体, 并用黑体照明刀口, 刀口通过投影系统被成像到无穷远处, 利用装有无穷远镜头的热像仪采集投影系统投射出的刀口图像。热像仪采集的刀口热图像如图 18(a) 所示, 从刀口热图像计算得到的投影系统 MTF^[20] 如图 18(b) 所示。可以发现, 投影系统在 3.4 lp/mm 处的实测 MTF 约为 0.56, 与设计结果相符。

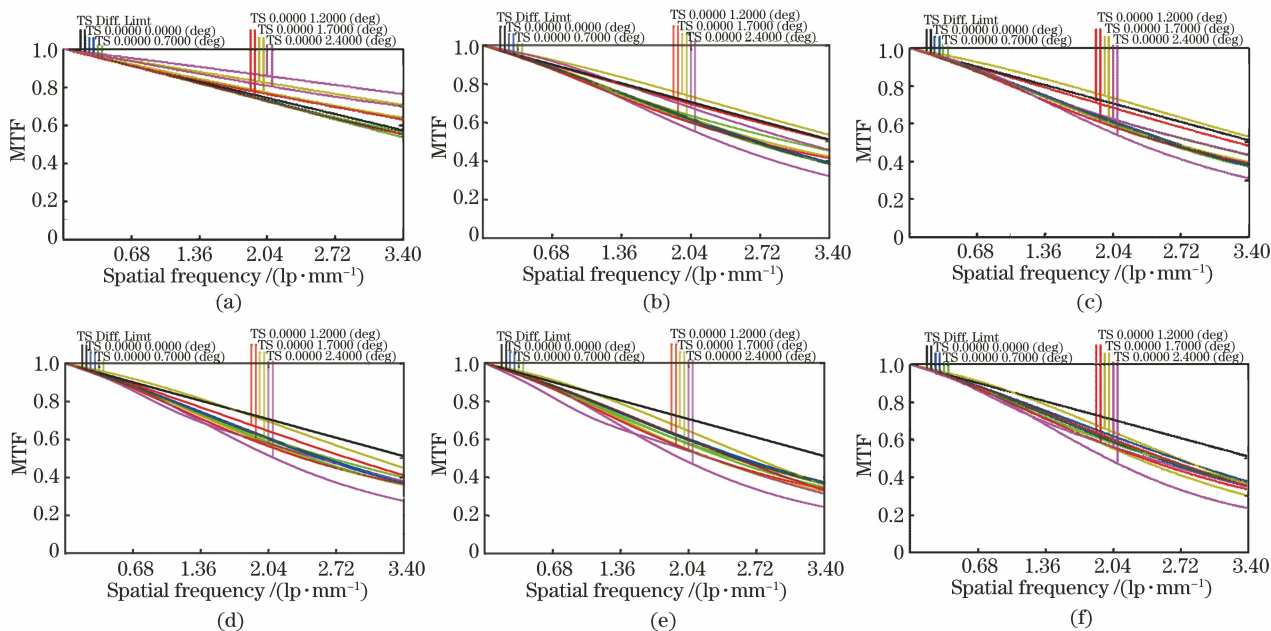


图 16 不同温度下系统的 MTF 曲线。(a) 300 K; (b) 260 K; (c) 220 K; (d) 180 K; (e) 140 K; (f) 100 K
 Fig. 16 MTF curves of the system at different temperatures. (a) 300 K; (b) 260 K; (c) 220 K; (d) 180 K; (e) 140 K; (f) 100 K

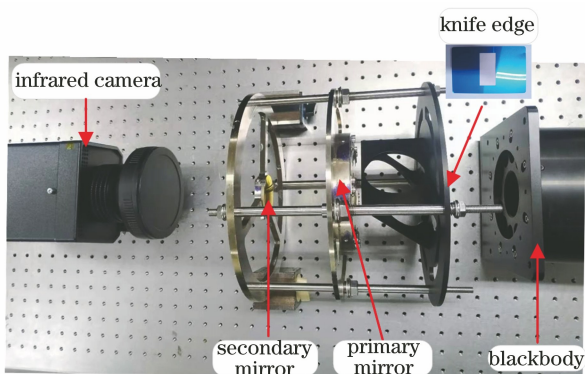


图 17 投影系统的 MTF 测试装置
 Fig. 17 MTF test device of the projection system

4.2 投影实验

在室温(300 K)环境下的投影实验装置如图 19 (a)所示,利用可见光投影仪将可见光图像投射到 MEMS 转换薄膜上,转换薄膜向外辐射红外图像,通过投影光学系统将红外图像投影给热像仪,图 19 (b)为热像仪采集到的红外图像。

在冷舱内低温(100 K)环境下的投影实验装置如图 20(a)所示,将投影光学系统和 MEMS 转换薄膜置于冷舱内部,可见光投影仪放置于冷舱外部。可见光图像通过可见光窗口进入冷舱,再经过反射镜反射后投射到 MEMS 转换薄膜上,投影光学系统将薄膜产生的红外图像投影到冷舱外部的热像仪,采集到的红外图像如图 20(b)所示。

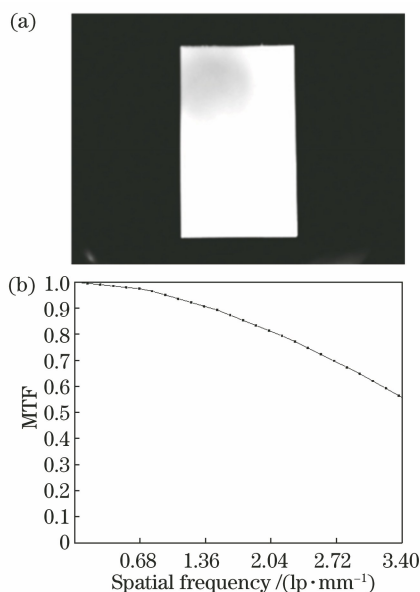


图 18 投影系统的实验结果。(a) 刀口的热图像; (b) MTF 曲线

Fig. 18 Experimental results of the projection system. (a) Thermal image of the knife edge; (b) MTF curve

5 结 论

针对空间红外探测设备的地面低温实验需求,设计并制作了工作温度范围在 100~300 K 的红外场景投影光学系统。该系统的焦距为 638 mm,视场为 $3.4^\circ \times 3.4^\circ$,出瞳距离为 660 mm,出瞳口径为

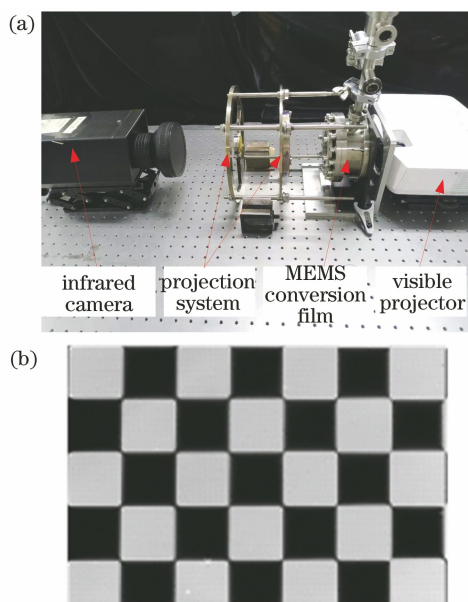


图 19 室温下的投影实验装置。(a)实验装置图；
(b)红外图像

Fig. 19 Projection experimental setup at room temperature.

(a) Experimental setup; (b) infrared image

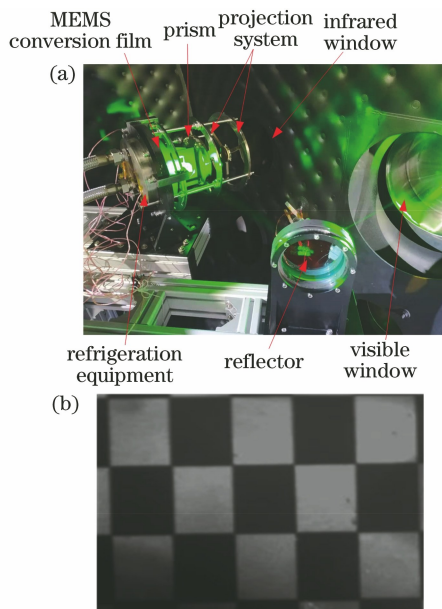


图 20 低温下的投影实验装置。(a)实验装置图；
(b)红外图像

Fig. 20 Projection experimental setup at low temperature.

(a) Experimental setup; (b) infrared image

102 mm。实验结果表明,在工作温度范围内该投影系统在空间频率为 3.4 lp/mm 处的最小 MTF 为 0.3,且该投影光学系统已成功应用于某空间红外探测系统的地面低温实验中。对低冷环境投影光学系统的设计过程进行了完整介绍,并总结了反射镜面热致形变的分析方法,对低温光学系统的设计工作

具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Xu C, Liu D, Zhou L, et al. Thermodynamics characteristics of MEMS infrared thin film [J]. Optics Express, 2019, 27(22): 32779-32788.
- [2] Wang X, Li D F, Li Z, et al. Performance improvement of an infrared scene generation chip by in-plane microstructures [J]. Optics Express, 2020, 28(18): 26807-26822.
- [3] Young J A, Howard S D, Augason G C, et al. Cryogenic surface distortion and hysteresis of a 50-cm diameter fused-silica mirror cooled to 77 K [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1340: 111-121.
- [4] Harned N, Harned R, Melugin R. Alignment and evaluation of the cryogenic corrected infrared astronomical satellite (IRAS) telescope [J]. Proceedings of SPIE, 1980, 0251: 163-170.
- [5] Li C L, Ding Y L, Lin C, et al. Optomechanical design and simulation of a cryogenic infrared spectrometer [J]. Applied Optics, 2020, 59(15): 4642-4649.
- [6] Kroes G, Ii J K, Navarro R, et al. Opto-mechanical design for transmission optics in cryogenic IR instrumentation [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7018: 70182D.
- [7] Gao X D, Cui Q F, Zheng H Q, et al. Athermalization design of deep ultraviolet optical system with wide temperature range [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1722001.
高旭东, 崔庆丰, 郑汉青, 等. 宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计 [J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1722001.
- [8] Qu H M, Zhang X, Zhang J Z, et al. Design of compact athermalizing uncooled infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0522003.
曲贺盟, 张新, 张继真, 等. 紧凑型无热化非制冷红外光学系统设计 [J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0522003.
- [9] Yuan L Y, He Z P, Lü G, et al. Optical design, laboratory test, and calibration of airborne long wave infrared imaging spectrometer [J]. Optics Express, 2017, 25(19): 22440-22454.
- [10] Froud T R, Tosh I A J, Edeson R L, et al. Cryogenic mounts for large fused silica lenses [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6273: 62732I.
- [11] Hu Y, Li J, Jia X Z. Optimal design of lightweight off-axis mirror and flexible support [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1923002.
胡洋, 李季, 贾学志. 超轻离轴反射镜及柔性支撑优

- 化设计[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1923002.
- [12] Wang X, Zhao Q, Li Z, et al. Measurement of the thermophysical properties of self-suspended thin films based on steady-state thermography [J]. Optics Express, 2020, 28(10): 14560-14572.
- [13] Zhao Q, Li Z, Wang X, et al. Spatial resolution of infrared scene projector chip with periodical microstructure[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1031001.
赵乾, 李卓, 王欣, 等. 周期性微结构对红外场景生成芯片空间分辨率的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1031001.
- [14] Liu D, Zhou L, Wang X, et al. The thermodynamic properties of the MEMS infrared transducer [J]. Optical Technique, 2019, 45(4): 502-508.
刘丹, 周朗, 王欣, 等. MEMS 红外图像转换芯片热力学性质研究[J]. 光学技术, 2019, 45(4): 502-508.
- [15] Song Y S, Yang J F, Zhao Y Y, et al. Optical system design for infrared target simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0422007.
宋延松, 杨建峰, 赵意意, 等. 红外目标模拟器光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0422007.
- [16] Chen Y H. Research on space cryogenic optical system for SWIR/MWIR astronomical observation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 42-49.
陈永和. 应用于中短波红外天文观测的空间低温光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 42-49.
- [17] Li L, Hang Y F, Wang Y T. Modern optical design [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 2015: 355-356.
李林, 黄一帆, 王涌天. 现代光学设计方法[M]. 2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 355-356.
- [18] Klein C A. Materials for high-power laser optics: figures of merit for thermally induced beam distortions[J]. Optical Engineering, 1997, 36(6): 1586-1595.
- [19] Zhang A X. The thermal environment analysis of space optical system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2013: 18-20.
张阿香. 空间光学系统的热环境分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2013: 18-20.
- [20] Li X D, Xi W S, Hu T L, et al. Research on MTF measurement for thermal imaging systems [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(4): 323-326.
李旭东, 惠渭生, 胡铁力, 等. 红外热成像系统调制传递函数(MTF)测试研究[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 323-326.