

〈系统与amp;设计〉

## 红外目标模拟器调焦准直光学系统设计

刘方, 胡煜, 王律, 孟合民, 袁良, 陶忠, 郑雅卫,  
王曼, 王希骋, 王松林, 许增奇  
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了满足导引头等光电探测设备在更宽工作温度范围下的目标模拟需求, 同时为了匹配不同工作距离的被测光电设备能获取清晰的模拟目标场景, 提出了一种基于二次成像的无热化设计的可调焦目标模拟器准直投影设计方案。通过对光学材料参数进行细致分析匹配, 采用3种红外光学材料组成5片透镜组, 并加入场镜以压缩光束口径, 在中继镜组中设置调焦镜组及精密机械结构。实现了0℃~40℃工作温度下, 工作波段8~12μm、出瞳距850mm、出瞳口径115mm、圆视场8°的红外目标模拟器设计, 同时被测光电设备适配工作距离为目标模拟器出瞳前方170m到无穷远及出瞳后方170m到无穷远, 系统各视场调制传递函数 (Modulation Transfer Function) 在36.5 lp/mm时优于0.33 (设计值), 畸变小于0.35%。该目标模拟器加工装调后实测结果表明各项指标达到设计要求且透过率达到75.59%。

**关键词:** 光学设计; 数字微镜阵列 (DMD); 目标模拟器; 调焦系统

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2025)11-1339-08

## Design of Focusing and Collimation Optical System for Infrared Target Simulator

LIU Fang, HU Yu, WANG Lyu, MENG Hemin, YUAN Liang, TAO Zhong, ZHENG Yawei,  
WANG Man, WANG Xicheng, WANG Songlin, XU Zengqi  
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To meet the target simulation requirements of optoelectronic detection equipment such as guidance heads at a wider working temperature range and match the clear simulated target scene of the tested optoelectronic equipment at different working distances, a focusing target simulator collimation projection design scheme based on secondary imaging and non-thermal design was proposed. By conducting a detailed analysis and matching the optical material parameters, three types of infrared optical materials were used to form a group of five lenses, and a field lens was added to compress the beam aperture. A focusing lens group and precision mechanical structure were set up in the relay lens group. We achieved the design of an infrared target simulator with a working range of 8-12 μm, exit pupil distance of 850 mm, exit pupil aperture of 115 mm, and a circular field of view of 8° at a working temperature of 0-40 °C. Furthermore, the tested optoelectronic device was adapted to work at a working distance of 170 m in front of the exit pupil to infinity and 170 m behind the exit pupil to infinity. The Modulation Transfer Function of each field of view of the system was better than 0.33 [design value] at 36.5 lp/mm, and the distortion was less than 0.35%. The actual test results of the target simulator after processing and adjustment showed that all the indicators met the design requirements, and the transmittance reached 75.59%.

**Keywords:** optical design, digital micromirror array (DMD), target simulators, focusing system

收稿日期: 2024-09-07; 修订日期: 2024-11-14.

作者简介: 刘方 (1989-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为半实物仿真及光学系统设计、光场成像。E-mail: vilily@126.com.

## 0 引言

红外目标模拟器是红外目标仿真实验的重要组成部分,当准直系统的出瞳与被测设备的入瞳重合时,可以为红外探测设备提供稳定的无穷远模拟目标<sup>[1]</sup>,用来评估红外导引头<sup>[2-3]</sup>、红外搜索与跟踪<sup>[4]</sup>系统及红外告警系统等红外探测设备的性能和精度。而随着红外探测设备性能进一步提高,对红外目标模拟器提出了更高的要求<sup>[5]</sup>。大出瞳口径、大出瞳距、大视场及高透过率成为红外目标模拟器新的要求趋势。

在满足导引头等光电探测设备在更宽工作温度范围内的目标模拟需求的同时,模拟器还要满足不同导引头等光电探测设备由于自身光学系统装调误差而导致不同工作距离状态下的目标模拟需求,这些将使得红外目标模拟器尤其是光学投影系统设计难度极大提高。想要获得优良的红外目标模拟效果,采用传统的光学材料匹配等消像差、消热差的方法已无法满足要求。

本文设计了一种红外目标模拟器,针对首片透镜有效口径超过 234 mm 所带来的像差问题,以及高透过率要求下仅能采用较少镜片数所导致的利用一般材料匹配方法难以获得良好像质的问题,采用二次成像与场镜结合的透射式光学结构。对包括新型硫系玻璃材料在内的各长波红外光学材料的阿贝数和热离焦系数进行详细分析,继而与各透镜光焦度进行精准匹配,设计了在一定工作温度范围内消热差和消色差的大口径高透过率红外目标模拟器投影光学系统。针对更大范围工作温度要求,并解决不同批次导引头等光电探测设备在不同工作距离下的目标模拟需求,提出在准直投影系统的中继物镜组加入调焦镜组的设计,通过旋钮微调调焦镜组的轴向位置达到像质良好红外目标模拟的目的。

## 1 系统组成与光学系统仿真

### 1.1 系统组成

红外目标模拟器由图像生成计算机产生包含目标/背景的长波红外特征的灰度图像视频数据,通过视频处理电路和驱动电路输入红外数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)器件<sup>[6]</sup>。采用具有辐射温度范围大,温度调节速度快的黑体作为辐射源<sup>[7]</sup>,通过全反射(Total Internal Reflection, TIR)棱镜均匀照射 DMD 器件, DMD 反射调制入射辐射所产生的红外热场景,通过准直投影光学系统投射到被测单元的入瞳处,使红外场景呈现在探测系统上的像斑大小及辐射能量空间分布能够模拟真实目标和

背景对探测系统造成的响应,以达到评价被测设备性能的目的,工作原理图如图 1。

相比电视目标模拟器,长波红外目标模拟器需要大的相对孔径、通光孔径及透过率,以获得更多的红外辐射。准直投影光学系统设计指标如表 1。

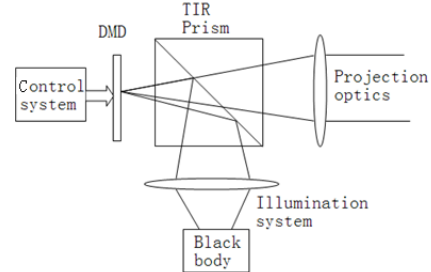


图 1 红外目标模拟器工作原理图

Fig.1 Working principle diagram of infrared target simulator

宽波段、大出瞳距、大出瞳口径、高透过率及宽温度范围的要求极大地提高了长波红外投影光学系统全视场像差校正的难度,且要求适配不同工作距离的被测设备,这些均为本系统设计的难点。

表 1 准直投影光学系统设计指标

Table 1 Design specifications of the collimating projection optics

Index	Value
Working wave-bands/ $\mu\text{m}$	8-12
Field of view/ $^\circ$	8
Exit pupil diameter/mm	115
Exit pupil distance/mm	850
Transmissivity/%	$\geq 75$
Distortion/%	$\leq 0.5$
Ambient temperature/ $^\circ\text{C}$	0~40
Work distance/m	-170~170

### 1.2 第一阶段光学系统设计

准直投影光学系统的设计,除了要满足被测系统的波段、视场、能量、测试的要求,还要考虑整个模拟系统装调的需要。准直投影光学系统一般有透射式和反射式,和反射式投射系统相比较,透射式光学系统装调校验更方便,因此在结构形式上考虑采用透射式结构。

根据指标要求的出瞳距离、出瞳直径及视场角计算出第一面透镜有效通光口径较大为 234 mm,采用二次成像光学结构,在望远镜组和中继镜之间加入场镜,有效压缩光束口径,减小系统重量,并缩小中继物镜组以实现和 DMD 及光源的配合。

如图 2 所示,按系统投影方向,中继物镜组为一个近距离成像镜组,它将 DMD 上的图像放大,在两物镜组之间产生一个放大的中间像,准直物镜组将放

大的中间像以平行光投射出去。

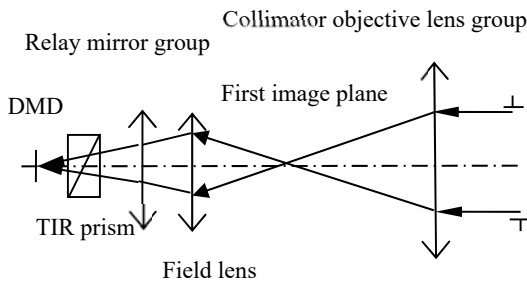


图2 光学系统结构图

Fig.2 Optical system structure diagram

投影系统口径太大会带来较大的场曲、像散和畸变, 这些轴外像差会随着视场、出瞳距及出瞳口径的增大而迅速变大。除了初级像差以及球差、慧差、像散、场曲、畸变三级像差外, 需要校正的高级像差及色差也变得很大<sup>[8]</sup>, 因此光学系统结构必然会更加复杂。

但系统指标中对透过率要求非常高, 导致光路中光学元件的数量受限, 这就必须采用非球面来校像差并简化光学系统结构。

相比于可见光材料, 红外光学材料的折射率温度变化梯度  $dn/dt$  值较大, 即红外光学系统对温度更加敏感。部分可见光材料和红外光学材料折射率温度系数对比见表 2<sup>[9-10]</sup>。

表2 可见光材料和红外光学材料折射率温度系数对比<sup>[9-10]</sup>

Table 2 Comparison of refractive index temperature coefficients between visible light materials and infrared materials<sup>[9-10]</sup>

Visible materials	$dn/dt(E-6/^\circ C, 587\text{ nm})$	Infrared materials	$dn/dt(E-6/^\circ C, 10\ \mu\text{m})$
H-ZK9A	1.8	Ge	404
BK7	3.6	ZnS	41
H-ZF2	1.4	ZnSe	60
H-ZK3	3.6	GaAs	41
H-ZK14	2.3	AMTR1	72

为了在一定工作温度内获得良好像质, 须采用基于光学材料匹配的无热化技术对光学系统进行消热差。单透镜光学系统透镜的热离焦量可以用式(1)<sup>[11]</sup>表示:

$$\begin{cases} \Delta f_L = -f \Delta T \\ T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_L \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta f_L$  为光学系统透镜焦距的变化量;  $f$  为透镜焦距;  $\Delta T$  为温度的变化量;  $T$  为热离焦系数;  $n$  为透镜的折射率;  $\alpha_L$  为透镜的热膨胀系数。

单透镜镜筒热离焦量见公式(2):

$$\Delta f_s = M \Delta T \alpha_s \quad (2)$$

式中:  $M$  为镜筒长度;  $\alpha_s$  为镜筒热膨胀系数。对于铝合金材料, 热膨胀系数为  $\alpha_s = 23.6 \times 10^{-6}$ 。

假定透镜的焦距  $f$  和镜筒长度  $M$  相等, 当单透镜镜筒的热离焦量与镜片的热离焦量抵消时, 对于单透镜来说达到了消热差的目的, 见公式(3):

$$\Delta f_s - \Delta f_L = M \Delta T \alpha_s - (-f \Delta T) = f \Delta T (\alpha_s + T) \quad (3)$$

长波红外材料光学特性参数如表 3<sup>[12-14]</sup>所示。

表3 长波红外材料光学特性参数<sup>[12-14]</sup>

Table 3 The parameters of long wave infrared optical materials<sup>[12-14]</sup>

Infrared materials	Index of refraction/ $10\ \mu\text{m}$	Abbe number	Thermal defocus coefficient
ZnS	2.1983	22.9	$+2.6 \times 10^{-5}$
ZnSe	2.4067	59.3	$+3.6 \times 10^{-5}$
Ge	4.0036	1001	$+1.3 \times 10^{-5}$
IRG201	2.4977	95	$+3.9 \times 10^{-5}$

由表 3 和公式(3)可以看出, 仅采用机械材料的热膨胀系数与光学透镜热离焦系数相匹配来消除系统热差是很不容易的。对于复杂光学系统, 须对多种材料的透镜光焦度进行合理分配以达到校正色差和消热差<sup>[15]</sup>的要求。

$$\phi = \sum_{i=1}^j \phi_i \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^j (T_i \phi_i) = -\alpha_s \phi \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^j \left( \frac{\phi_i}{v_i} \right) = 0 \quad (6)$$

式中:  $\phi$  为透镜的光焦度;  $v$  为光学材料的阿贝数。

式(4)~(6)可以对光学系统透镜材料的选择提供指导。对于系统消色差, 采用阿贝数较大的长波红外材料匹配光焦度为正的透镜, 同理, 负光焦度的透镜应匹配阿贝数较小的光学材料。对于系统消热差, 热离焦系数较小的光学材料应匹配光焦度为正的透镜, 同理, 热离焦系数较大的光学材料匹配光焦度为负的透镜。

通过以上分析, 结合一些长波红外各项性能良好的光学材料如表 3, 得到硫系材料 IRG201、ZnSe 和 ZnS 在长波红外具有较小的阿贝数, 可以匹配负光焦度透镜以消色差。对于消热差, 相同正光焦度硫系材料 IRG201 透镜比 ZnSe 和 ZnS 透镜带来的热离焦影响更大, 因为 IRG201 的热离焦系数更大。

IRG201 材料还有更多优点, 其一, 在  $1 \sim 14\ \mu\text{m}$  波段 IRG201 折射率较高, 对于光焦度为负的透镜,

能有效消除高阶像差。其二，IRG201材料的制备方法一般为精密模压，可批量制备，价格便宜。

对于以DMD作为图像生成器件的红外目标模拟器，准直投影光路设计时采用像方远心光路，以保证光路中各视场的主光线平行于系统光轴，与DMD相匹配。本文中，系统视场、出瞳距及出瞳口径都较大，由图3可以看出，边缘视场主光线在透镜上的入射高度较大，为了减小光线入射高度，实现像方远心光路，继而匹配DMD尺寸，边缘视场主光线必然要发生较大程度偏折。但这对于系统畸变的校正很不利。文中采用3个偶次非球面，最终全视场畸变控制在0.35%。

如图3所示，光学系统由5片透镜构成，从首片

透镜前表面到DMD像面，系统总长550mm，前组望远镜组材料为Ge，中间场镜采用ZnSe，后组中继镜采用IRG201-Ge-Ge的3片透镜组成。从左往右，3个偶次非球面分别在透镜1前表面，透镜4后表面及透镜5后表面。

不同温度下的全视场调制传递函数如图4。

从图4看出，20℃时光学系统的全视场光学传递函数大于0.41，15℃时，MTF下降到0.36，30℃时，光学传递函数MTF下降到0.35。由图5可以看出，15~30℃时光学系统全视场畸变基本不受温度影响，保持在0.35%。分析表明当模拟器工作温度在15~30℃时，成像质量良好。

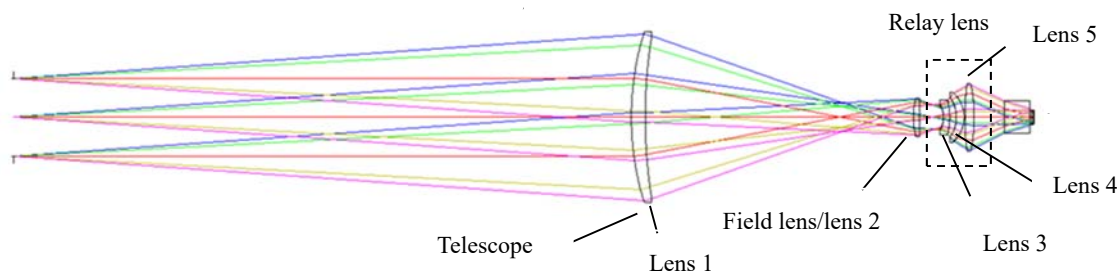


图3 第一阶段光学系统结构图

Fig.3 Structural diagram of the first stage optical system

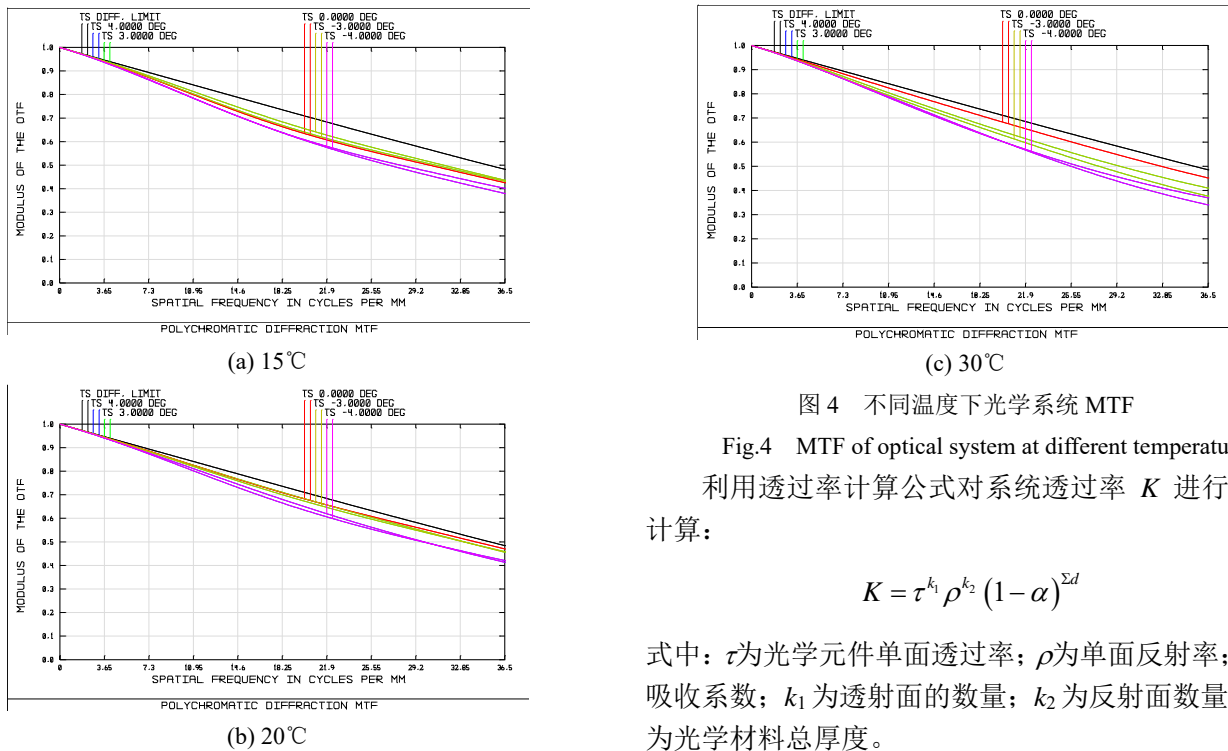


图4 不同温度下光学系统MTF

Fig.4 MTF of optical system at different temperatures

利用透过率计算公式对系统透过率  $K$  进行理论计算：

$$K = \tau^{k_1} \rho^{k_2} (1 - \alpha)^{\sum d} \quad (7)$$

式中： $\tau$ 为光学元件单面透过率； $\rho$ 为单面反射率； $\alpha$ 为吸收系数； $k_1$ 为透射面的数量； $k_2$ 为反射面数量； $\sum d$ 为光学材料总厚度。

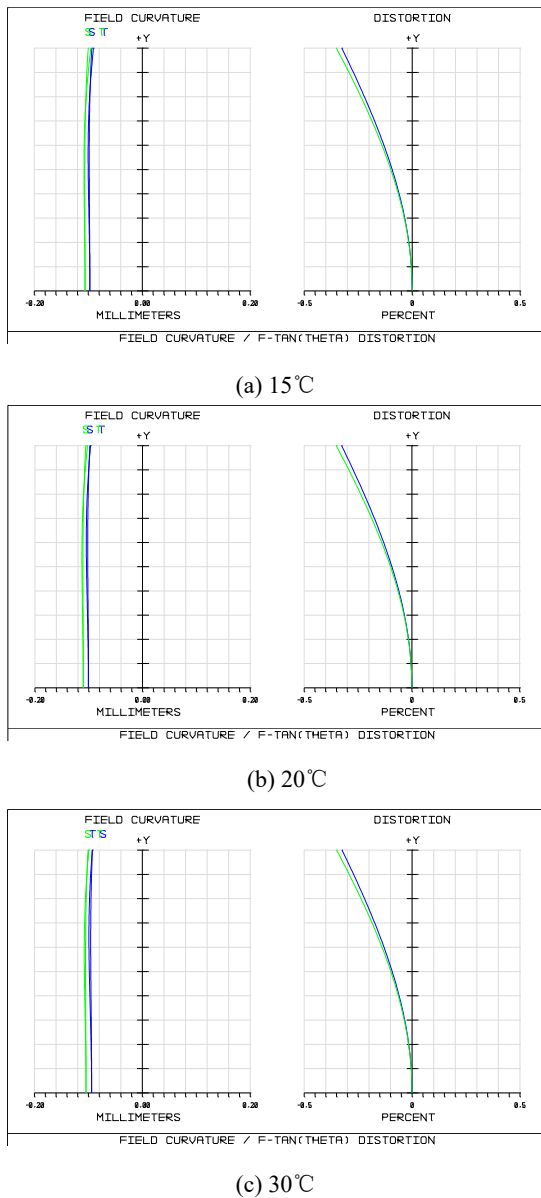


图5 不同温度下光学系统畸变

Fig.5 Optical system distortion at different temperatures

由以上分析计算可知, 该阶段完成了出瞳距 850 mm、出瞳口径 115 mm、8°视场、透过率 76.06%且在 15~30°C 消热差的长波红外目标模拟器设计。

但从工程化的角度分析, 该方案还存在 3 个问题。

### 1) 硫系材料 IRG201 加工问题

投影光路中采用的硫系玻璃 IRG201, 虽然在光路中起到了良好的消热差作用, 但是该材料的明显缺陷是材料质地非常软。实际试制加工时, IRG201 光学冷加工所采用的工艺流程是: 先用金刚石车床车, 再在抛光台上进行细抛, 由于材料很软, 细抛过程中很难抛到理想面型, 而检测时同样由于材料太软, 样板压上去无法准确测量面型精度, 导致面型精度无法保证。因此, 严重影响系统成像质量。尤其针对口径大

中心厚度小的 IRG201 系列硫系玻璃透镜, 工程上不建议采用。

### 2) 温度范围扩展问题

由图 4 分析可知, 当工作温度低于 15°C 及高于 30°C 时系统 MTF 逐渐下降, 不适合外场等温差较大环境下工作。

### 3) 与不同光电被测设备匹配问题

目标模拟器在转台上进行装调时, 一般采用单个光电探测设备作为被测样品进行校准, 以获得清晰像质等良好目标模拟状态。工程实际中, 当更换不同的被试件后会出现模拟图像质量变差的问题。究其原因不同被测光电探测设备光学系统在进行出厂调校时, 由于焦距之间的微小差异带来系统误差, 使得入射光束并不是严格的平行光, 也即工作距离并不是无穷远, 如图 6 所示。

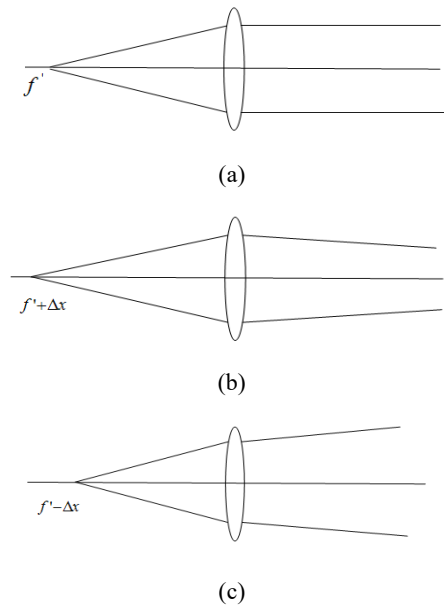


图6 被测光电设备的不同装调状态 (a)标准装调,

(a) 焦距大于标准值, (c) 焦距小于标准值

Fig.6 Different installation and adjustment states of the tested optoelectronic device (a) standard installation, (b) focal length greater than the standard value, (c) focal length less than the standard value

图 6 中(a)为标准装调状态, 工作距离为无穷远, 平行光入射。(b)为工作距离在被测设备光学系统主平面右侧, 会聚光入射。(c)为工作距离(目标的虚像)在被测设备光学系统主平面左侧, 会聚光入射。

工程中常出现一些与焦距标称值差异略大的光电探测设备, 被测试时会出现图像模糊等问题, 影响红外目标仿真效果。这就要求目标模拟器可以同步配合不同状态的光电被测设备。

这就要求目标模拟器能够微调焦距, 适应不同状

态的被测设备。

### 1.3 第二阶段光学设计-光学设计的改进

对照以上分析的3个问题，提出相应解决方法。

对于问题1，在一阶段方案中，硫系材料 IRG201 透镜口径为 33.6 mm，厚度为 8.1 mm。对于此类小口径透镜，可通过在光学设计阶段提高透镜中心厚度与口径比值，以在光学冷加工的细抛工艺阶段中获得稳定良好面型。

对于上述问题2和问题3。提出在中继物镜组中设计调焦镜组，通过微调调焦镜组的轴向位置，以补偿温度变化带来的系统误差。同时还能调节投射光学系统投射图像的距离，以适应不同状态的光电被测设备，达到不同批次光电被测设备仿真精准对焦的目的。

的。

图7光学系统整体结构与图3相似。透镜材料顺序、数量和非球面位置不变，硫系材料 IRG201 透镜厚度从 8.1 mm 增大到 15.8 mm，口径降为 33 mm，光学冷加工时可保证透镜面型精度。光学系统设计结果如图7所示。

调焦镜组选用的调焦方式为凸轮调焦<sup>[16]</sup>，如图8。其优点在于结构紧凑、可靠性高，满足系统空间限制以及轻量化要求，可实现焦距快速可调。凸轮机构利用调焦滑柱与调焦直线筒的固联关系，通过手轮，将力矩经齿轮副啮合传递到外套筒使其转动，从而带动镜组进行轴向的往复滑动运动，实现系统调焦目的。

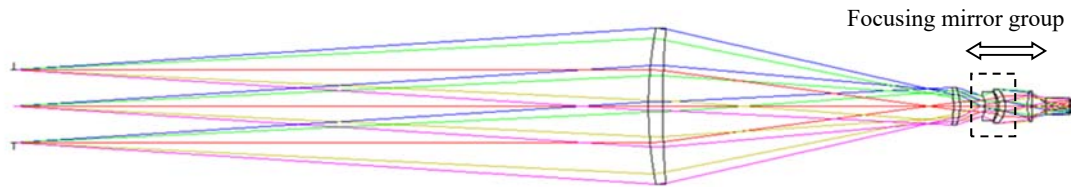


图7 第二阶段光学系统结构图

Fig.7 Structural diagram of the second stage optical system

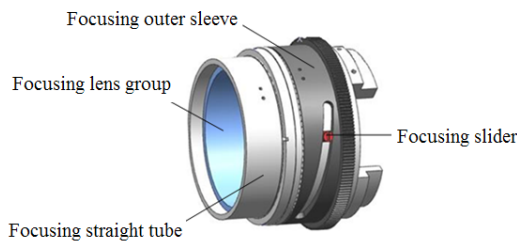


图8 调焦机构原理图

Fig.8 Principle diagram of focusing mechanism

#### 1.3.1 调焦以扩展工作温度范围

通过调节目标模拟器投影光学系统调焦组可补偿温度变化带来的系统误差。工作温度 0℃ 时，调焦镜组对应调节量 2.18 mm，靠近 DMD 一侧为正，系统 MTF 如图9。

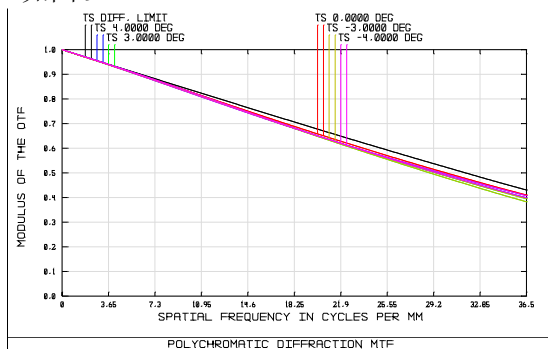


图9 调焦后 0℃ 工作温度下系统 MTF

Fig.9 MTF of the system at 0℃ working temperature after focusing

工作温度 40℃ 时，调焦镜组对应调节量为 -1.95 mm，系统 MTF 如图 10。

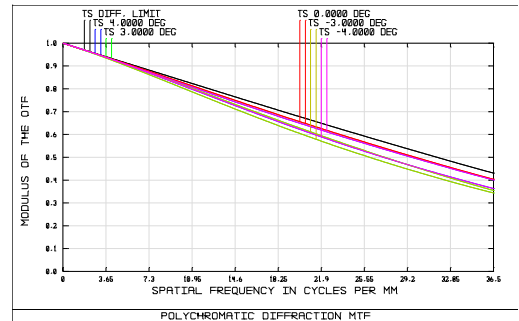


图10 调焦后 40℃ 工作温度下系统 MTF

Fig.10 MTF of the system at a working temperature of 40℃ after focusing

通过调节模拟器投影光学系统调焦镜组使得目标模拟器在 0~40℃ 工作温度变化范围下系统 MTF 均大于 0.35，获得良好模拟状态。

#### 1.3.2 调焦以匹配不同工作距离光电被测设备

##### 1) 正调节量

通过调整目标模拟器投影光学系统调焦组以微调系统焦距，使得被测光电系统工作距离从无穷远到距离入瞳 -170 m 范围内清晰成像，调节量 0.36 mm，靠近 DMD 一侧为正。

从图 11~图 12 可以看出光学系统调焦后达到了较好的像质，在 36.5 lp/mm 全视场调制传递函数大于

0.39, 全视场畸变 0.33%, 像质满足模拟器光学性能要求。

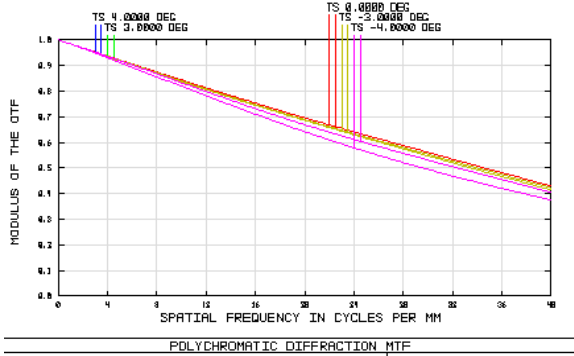


图 11 正向调焦光学系统调制传递函数

Fig.11 Modulation transfer function of forward focusing optical system

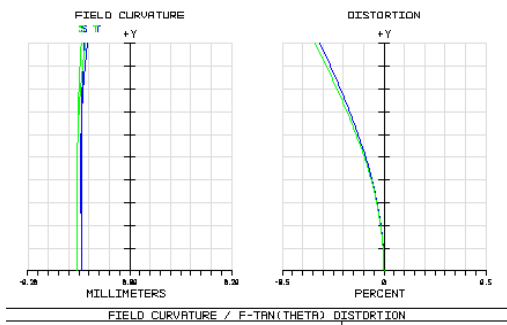


图 12 正向调焦光学系统畸变

Fig.12 Distortion of forward focusing optical system

## 2) 负调节量

通过调整目标模拟器投影光学系统调焦组以微调系统焦距,使得被测光电系统在工作距离无穷远到距离入瞳+170 m 范围清晰成像,调节量-1.28 mm。

从图 13~图 14 可以看出光学系统调焦后达到了较好的像质,在 36.5 lp/mm 处全视场调制传递函数大于 0.33,全视场畸变 0.36%,像质满足模拟器光学性能要求。

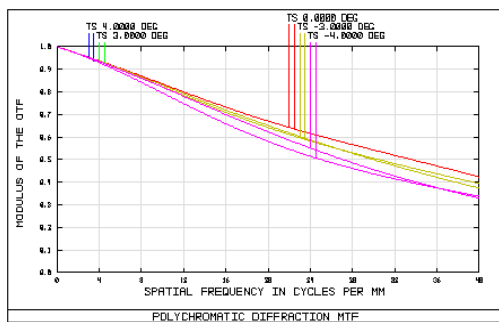


图 13 负向调焦光学系统调制传递函数

Fig.13 Modulation transfer function of negative focusing optical system

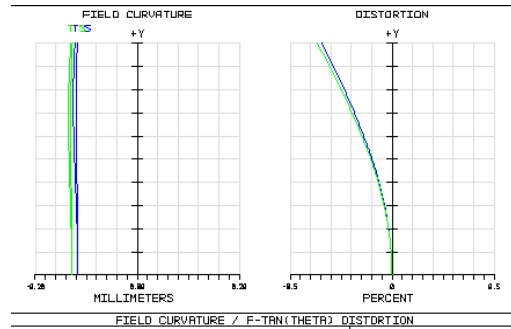


图 14 负向调焦光学系统畸变

Fig.14 Negative focusing optical system distortion

由以上分析可以看出,被测光电系统工作距离从无穷远到距离入瞳-170 m 以及从无穷远到距离入瞳+170 m 范围内清晰成像。第二阶段光学系统设计结果满足表 1 中包括工作距离调节范围在内的所有指标要求。

## 2 系统测试结果

图 15 为红外目标模拟器实物图。利用标定好的红外热像仪对目标模拟器进行系统性能测试验证。

利用 FLIR 公司的长波热像仪对目标模拟器进行测试。图 16(a)为计算机输入静态源图像,图 16(b)为热像仪得到的测试图像,像质优良,图像逼真。

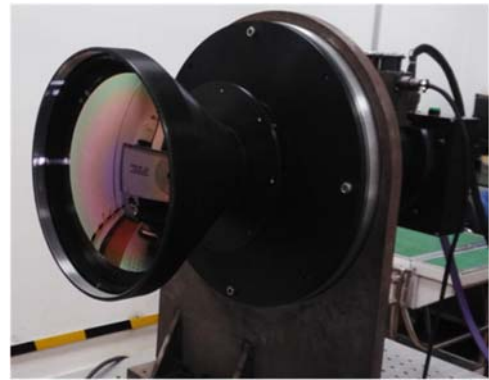


图 15 红外目标模拟器实物

Fig.15 Photo of infrared target simulator

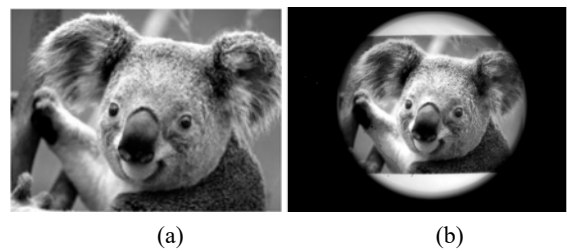


图 16 图像测试结果(a)源图像(b)投影测试图像

Fig.16 Image test results (a)Source image(b)Projection test images

图 17 为投影光学系统透过率实测曲线图,其中黑体温度 100℃,黑体在 8~12 μm 辐射亮度分布为红

色曲线,经过投影光学系统后,系统在8~12 μm 辐射亮度分布为蓝色曲线,根据对应数据计算得到系统透过率为75.59%,高于指标要求。

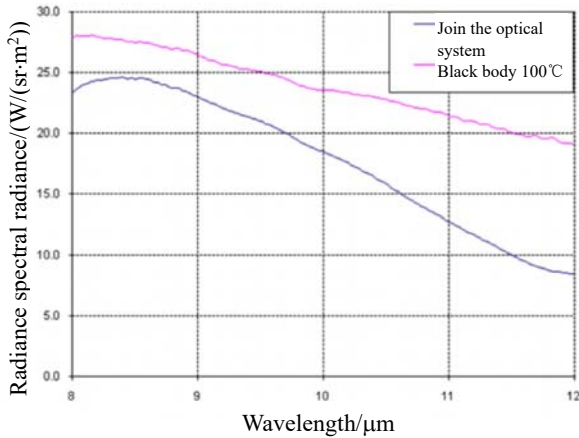


图 17 透过率实测数据曲线

Fig.17 Transmittance measured data curves

### 3 结论

针对大出瞳距、大出瞳口径、大视场、高透过率及消热差要求的长波红外目标模拟器投影光学系统设计难度大的问题,利用正负光焦度与阿贝数和热离焦系数相匹配的方式,通过采用在二次成像光路中加入场镜并引入非球面和硫系玻璃 IRG201,仅使用 5 片透镜,在保证高透过率的同时实现消色差和消热差。

针对拓宽工作温度范围以及匹配不同状态的被测光电系统的要求,提出设计调焦镜组和高精度机械结构相结合的方法。通过两个阶段的光学系统迭代优化设计,最终实现了 850mm 出瞳距,8°视场,115mm 出瞳口径,75.59%透过率的长波红外目标模拟器在 0~40℃工作温度范围良好工作,并实现被测光电设备工作距离在模拟器出瞳前方 170m 到无穷远及出瞳后方 170m 到无穷远范围内成像清晰,解决了不同被测设备差异化问题。对硫系玻璃材料较软,工程中难以冷加工的问题,根据工程实践经验提出了有效解决方案。本文的设计方法对于红外目标模拟器设计及工程化应用都具有重要意义。

### 参考文献:

[1] 高宏伟, 杨忠明, 刘红波, 等. 便携式红外目标模拟器设计[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 20220554.  
GAO Hongwei, YANG Zhongming, LIU Hongbo, et al. Design of portable infrared target simulator system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220554.

[2] 杨睿, 周唯. 红外模拟靶现状与发展趋势研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 6(2): 116-118.  
YANG Rui, ZHOU Wei. Present situation and development trend of infrared simulation target[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine*

*Instruments*, 2021, 6(2): 116-118.

[3] 高辉, 赵松庆. 红外成像目标模拟器的应用探索[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 409-414.  
GAO Hui, ZHAO Qingsong. Exploration of applications of IR image simulator[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(5): 409-414.

[4] 李刚, 闫宗群, 何永强, 等. 全向凝视红外跟踪系统半实物仿真研究[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 348-352.  
LI Gang, YAN Zongqun, HE Yongqiang, et al. Hardware-in-the-loop simulation of panoramic multi-target infrared staring tracker[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(2): 348-352.

[5] 郑雅卫, 胡煜, 郭云强, 等. 基于双 DMD 的红外场景投影仪光学系统设计[J]. 激光与红外, 2021, 51(10): 1330-1335.  
ZHENG Yawei, HU Yu, GUO Yunqiang, et al. Design of optical systems for infrared scene projector based on dual-DMD[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(10): 1330-1335.

[6] 王宏杰, 钱丽勋, 李卓, 等. 8-12 μm 红外图像生成装置[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(4): 467-470.  
WANG Hongjie, QIAN Lixun, LI Zhuo, et al. An infrared image projector covering 8-12μm radiation range[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(4): 467-470.

[7] 邹营营, 邱丽荣, 王雅, 等. 便携式红外目标模拟器的研制[J]. 光学技术, 2015, 41(2): 152-155.  
ZOU Yingying, QIU Lirong, WANG Ya, et al. Development of portable infrared target simulator[J]. *Optical Technique*, 2015, 41(2): 152-155.

[8] Warren J Smith. *Modern Optical Engineering*[M]. Forth Edition, United States of America: The McGraw-Hill Companies, 2008.

[9] 成都光明光电股份有限公司. 成都光明光学玻璃数据表[EB/OL]. [2024-09-21]. <http://cdgmgd.cnpowder.com.cn>.  
CDGM GLASS CO., LTD. CDGM Optical Glass Data Sheet[EB/OL]. [2024-09-21]. <http://cdgmgd.cnpowder.com.cn>.

[10] 白瑜, 邢廷文, 林妮媚, 等. 中波红外成像无热化光学系统设计[J]. 应用光学, 2012, 33(1):182-183.  
BAI Yu, XING Tingwen, LIN Nimei, et al. Athermalization of middle infrared optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1):182-183.

[11] Jr Yoder PR. *Opto-mechanical Systems Design*[M]. New York: Marcel Dekker, 2006: 673 -675.

[12] 湖北新华光信息材料有限公司. 光学玻璃[EB/OL]. [2025-01-13]. <http://www.hbnhg.com>.  
Hubei New Huaguang Information Materials Co., Ltd. Optical glass[EB/OL]. [2025-01-13]. <http://www.hbnhg.com>.

[13] 乔杨, 徐熙平, 辜义文, 等. 消热差的红外目标模拟器设计[J]. 兵工学报, 2013, 34(4): 432-433.  
QIAO Yang, XU Xiping, GU Yiwen, et al. Design of an athermalized projection optical system for infrared target simulator[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(4): 432-433.

[14] Moriaki Wakaki, Keiei kudo, Takechisa Shibuya, et al. *Physical properties and data of optical materials*[M]. Oxford: CRC Press, part of The Taylor & Francis Group, LLC. 2008.

[15] Riedl M J. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems*[M]. Washington: The International Society for Optical Engineering, 2001: 135-137.

[16] 王律. 一种可抗载荷冲击的光学调焦锁紧机构: CN114935807B[P]. 中国, 2023-11-2.  
WANG Lv. Optical focusing locking mechanism capable of resisting load impact: CN114935807B[P]. China, 2023-11-2.