

便携式红外目标模拟器系统设计

高宏伟¹, 杨忠明^{2*}, 刘红波³, 庄新港³, 刘兆军²

1. 山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237;
2. 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;
3. 华东电子测量仪器研究所, 山东 青岛 266555)

摘要: 为了满足光电探测设备对不同温度环境下多波段的目标模拟需求, 设计了一种便携式红外目标模拟器, 选用可切换的黑体光源来进行照明, 实现 3~5 μm 和 8~14 μm 的中波红外和长波红外的辐射特性。作为准直系统的平行光管口径为 110 mm, 考虑到中心遮挡问题, 采用离轴反射式光学结构。在装调时利用该结构对 300 mm 口径的参考平面镜进行测量, 测试结果 PV 值为 0.356λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), RMS 值为 0.047λ 。采用 MSC. Patran 进行建模, 利用有限元分析方法完成了系统的光机热分析, 在 -10~50 $^{\circ}\text{C}$ 工作环境下, 由温度变化引起的主次镜面形变化为纳米级别, 对中红外波段可实现实时稳定成像, 为光电探测设备提供宽波段的多种直接模拟目标。

关键词: 光学工程; 目标模拟器; 光学设计; 平行光管

中图分类号: TN216; TG502.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220554

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探测设备的入瞳重合时, 可以为红外探测设备提供一个稳定的无穷远处模拟目标, 模拟结果具有精确可控、可重复实验的优点, 用来评估红外探测设备的性能和精度。在雷达测试^[1-2]、红外制导^[3-4]、红外跟踪^[5]等方面都有着重要应用。

红外目标模拟器主要分为对点源进行模拟和对成像体源进行模拟两种, 其中应用更为广泛的是红外点源目标模拟器。红外点源目标模拟器在光源选择上主要有两种: 一是使用溴钨灯作为辐射源, 二是使用黑体作为辐射源, 相较于溴钨灯, 黑体具有辐射温度范围大, 温度调节速度快的优点, 在目标模拟器中的使用更为广泛^[6]。双波段探测系统和传统的探测系统相比, 具有更高的可靠性和准确性, 随着光电探测设备传感器的集成、小型化发展, 多波段传感器已经

成为大多数光电探测设备的标准, 并且由于调试环境和使用环境的变化^[7-8], 需要经常对其进行调整, 但实验室中大多数目标模拟器都只配备单波段光源且体积较大不便携带。因此, 有必要建立多波段、小体积的便携式目标模拟器以满足不同使用环境的需求。多波段目标模拟器根据工作原理主要可以分为两种: 一种是使用多波段光源直接成像, 经过准直系统投射到生成器上, 该方法设计的模拟器结构简单, 但对光源的要求较高; 另一种是使用多个光源分别成像, 经过分束整合器将多个波段的像整合, 经过准直系统成像, 对制作工艺要求不高, 但是需要考虑不同波段内的图像空间匹配和辐射能量覆盖问题^[9]。

文中设计了一种红外目标模拟器, 采用离轴反射式的准直系统, 口径 110 mm, 使用可切换黑体提供 3~5 μm 、8~14 μm 的中远红外双波段辐射源。搭载不同图案靶标提供多种目标物模拟, 利用位置可调的靶标盘对温差引起的离焦进行补偿。在 -10~50 $^{\circ}\text{C}$ 环境

收稿日期: 2022-08-05; 修订日期: 2022-10-03

基金项目: 国家自然科学基金 (62175131); 装备预研教育部联合基金 (8091B032125); 安徽省重点研究与开发计划 (202104a04020001); 山东大学基本科研业务费资助项目 (2020JCG003)

作者简介: 高宏伟, 男, 硕士生, 主要从事光学干涉检测方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 杨忠明, 男, 教授, 博士, 主要从事光学干涉检测、光学系统设计、计算光学成像等方面的研究。

下,为红外成像设备提供实时稳定的红外目标,可用于军用红外探测系统的性能测试,具有成像稳定、图像质量好、结构简单、易于装调、模拟目标丰富的优点。

1 系统组成与光学系统仿真

1.1 系统组成

便携红外目标模拟系统主要由平行光管、黑体光源、光阑、靶标、机械结构及支撑调整架构成,如图 1 所示。其中,光源系统包括中波红外 3~5 μm 和长波红外 8~14 μm 的黑体光源,由滑轨进行切换,实现不同波段目标的模拟。平行光管由主镜、次镜、基座和壳体组成,实现对目标的准直。金属靶标具有七种不同的图案,配合光阑和平行光管在无穷远处成像^[10]。在接收端由搭载在二维云台上的红外相机对模拟目标进行探测,实现不同波段、不同图案红外目标的远距离模拟功能。

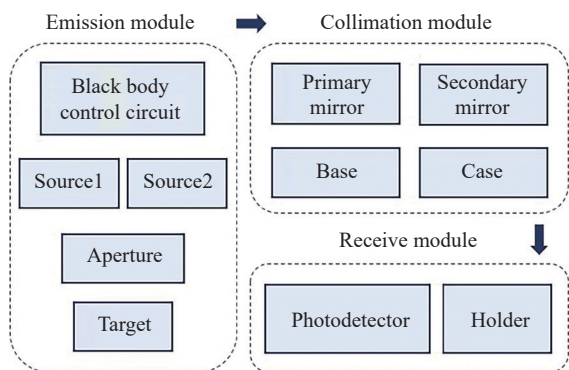


图 1 便携式红外目标模拟系统组成框图

Fig.1 Block diagram of portable infrared target simulation system

根据使用条件分析,系统的特点是焦距长、口径大以及中心视场图像质量高,透射式系统无法消除色差,且大口径透射式元件的加工和涂层难度高,不易实现;而反射式光学系统在长焦距大口径下可以保证图像质量^[11],适合模拟无限远处目标,同时,光学系统采用离轴结构,可以避免同轴结构中的中心遮挡问题^[12-13]。离轴反射式光学结构如图 2 所示,从黑体光源发出的光照射在光阑上,对光斑大小调节后均匀地照亮靶标,从靶标出射后携带图案信息,然后经过平行光管结构中的平反镜反射,最后通过离轴抛物面反射镜准直出射,经传播后被探测系统所捕捉。在发射端,通过滑轨切换选择不同光源,搭配不同图案的靶

标使用,从而实现多波段、不同图案的目标模拟功能。平行光管参数如表 1 所示。

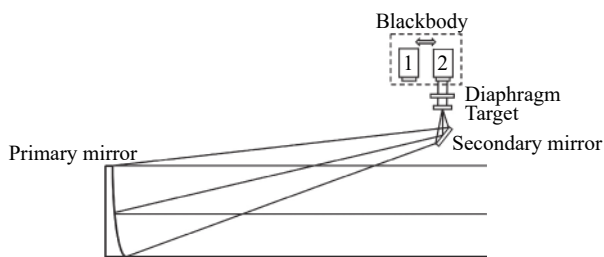


图 2 光学系统结构图

Fig.2 Layout of optical system

表 1 平行光管近轴参数

Tab.1 Paraxial parameters of collimator

Variable	Value
Primary mirror diameter/mm	106
Focal length/mm	716
Field of view/(°)	1
Off-axis volume/mm	160
Secondary mirror diameter/mm	56

对于光源强度的计算,是基于光束在空气中传播和衰减后的辐射度能否被光电探测系统捕捉。黑体的辐照度计算公式为:

$$S_b = \frac{A\tau\sigma(T^4 - T_s^4)R^2}{4ND^2} \quad (1)$$

式中: S_b 为黑体辐射通量密度,单位 W/cm^2 ; A 为光经过靶标的通过比例,根据不同的靶标图案确定; τ 为准直系统透过率; σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数,单位 $W/(cm^2 \cdot K^4)$; T 和 T_s 分别为黑体温度和环境温度,单位 K ; R 为黑体光源辐出面的直径,单位 cm ; N 为探测器捕捉到像点所占的像元个数; D 为平行光管的焦距,单位 cm 。

探测器的探测灵敏度为:

$$S = \tau_{(a,L)}J/L^2 \quad (2)$$

式中: $\tau_{(a,L)}$ 为大气损耗; J 为目标辐射强度; L 为从目标模拟器到探测器的作用距离。

在黑体光源选择上,当目标模拟器出口处的辐射度大于探测器灵敏度^[11]时,满足

$$S_b \geq S \quad (3)$$

即

$$\frac{A\tau\sigma(T^4 - T_s^4)R^2}{4ND^2} \geq \frac{\tau(\lambda, L)J}{L^2} \quad (4)$$

此时模拟目标可以被光电探测系统探测到^[14], 按照 1 km 的使用需求进行计算, 选定黑体辐射度不小于 $6.929 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ 的黑体作为光源。

1.2 光学系统仿真

根据表 1 中的光学元件参数, 使用 Zemax 对准直系统进行建模和仿真, 仿真结果如图 3 所示, 图 3(a) 和 3(b) 分别为准直系统的 2D 和 3D 结构图。

在 1 km 传输距离下, 系统边缘视场的边缘角为 0.025° , 在中远红外波段下, 利用 Zemax 对系统不同视场下的波前进行分析, 系统的中心视场和边缘视场的出瞳处波前图如图 3 所示。在 $4 \mu\text{m}$ 波段时, 0° 中心视场下, 波前的 PV (Peak to Valley) 值为 0.0132λ ($\lambda =$

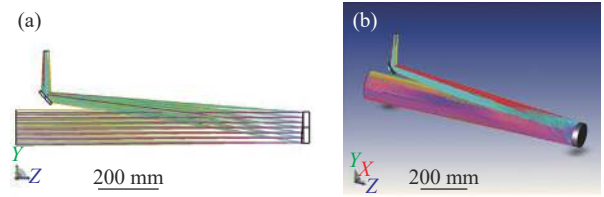


图 3 准直系统 2D (a) 及 3D (b) 结构图

Fig.3 (a) 2D and (b) 3D layout of collimator system

632.8 nm), RMS (Root Mean Square) 值为 0.0038λ , 如图 4(a) 所示。 0.025° 边缘视场下, 波前的 PV 值为 0.0488λ , RMS 值为 0.0097λ , 如图 4(b) 所示。在 $12 \mu\text{m}$ 波段时, 0° 中心视场下, 波前的 PV 值为 0.0044λ , RMS 值为 0.0013λ , 如图 4(c) 所示。 0.025° 边缘视场下, 波前的 PV 值为 0.0163λ , RMS 值为 0.0032λ , 如图 4(d) 所示, 波前记录结果汇总在表 2 中。

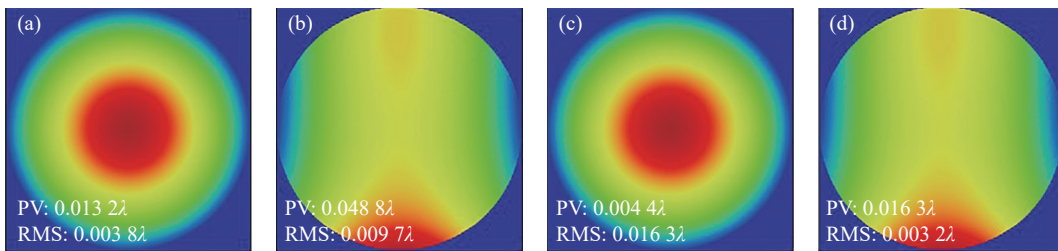


图 4 系统出瞳处波前图

Fig.4 Wavefront diagram at the exit of the system pupil

表 2 波前分析结果

Tab.2 Results of wavefront analysis

Wavelength/ μm	Field of view	PV/ λ	RMS/ λ
4	0°	0.0132	0.0038
4	0°	0.0488	0.0097
12	$0.025^\circ/1'30''$	0.0044	0.0013
12	$0.025^\circ/1'30''$	0.0163	0.0032

2 机械设计与光机热集成分析

红外目标模拟系统的机械结构如图 5 所示, 由离轴抛物面镜、平面反射镜、镜筒组件、底座支撑组件和附件等组成。结构整体采用圆筒型结构, 由冷轧钢板制作, 刚度满足设计要求, 拆装简单方便。系统内部均匀喷涂哑光黑漆, 可以有效减少杂散光量。抛物面主镜直径为 106 mm , 通过螺圈固定在系统主体上, 平面次镜直径为 56 mm , 通过粘胶固定在支撑部件

上, 易于安装的同时确保结构压力不会直接影响反射面, 使镜面不发生形变。底部采用万向底脚支撑, 可以利用水平尺对整个系统进行置平, 整套系统具有较高的稳定性。系统总体质量小于 30 kg , 双光源安装在同一底座上, 由滑轨控制移动, 控制器独立安装在

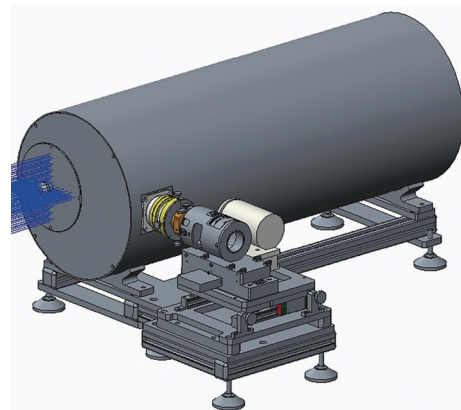


图 5 机械机构设计

Fig.5 Design of mechanical structure

有滑轮的立柜中,方便不同使用环境中的调节和移动。

当温度变化时,机械结构和系统中的主次镜组件可能发生形变^[15],引起反射面位置的变化,使焦点位置偏离靶标中心。为满足系统在不同温度环境下的使用需求,需要测试当温度变化时机械结构和主次镜的形变量。对温差引起的变形前后的光学性能的分析,通过光机热集成分析的方法来实现。

光机热集成分析的流程如图 6 所示,首先对光机系统进行热力学分析,求得热载荷作用下系统的温度分布。再将热分析结果作为载荷,通过多物理场耦合的方法进行热变形分析,得到光学元件和机械结构的变形数据。最后将光学元件面形变化和机械结构的形变整合成系统中光学元件的偏移,代回到光学设计软件中计算,评估变形后的光学性能。

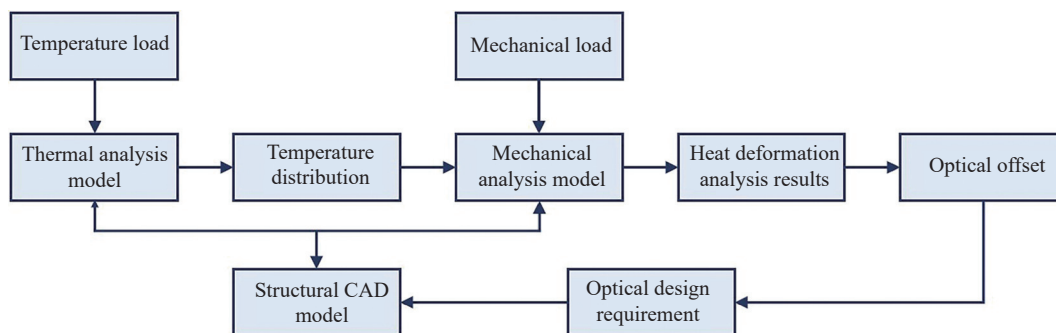


图 6 光机热集成分析流程

Fig.6 Optical machine thermal integrated analysis process

基于系统使用条件及使用要求,需满足在室外环境使用的性能要求,考虑到装调环境一般为 20 °C 左右,取 30 °C 温变为输入条件,对系统进行热力学分析。在温差 30 °C 变化时,主次镜面形发生形变,并且系统光机胶组件也会产生不同程度的弹性形变,导致主镜、次镜会产生刚体位移及转角,影响系统波前精度。采用 MSC. Patran 进行建模,对系统进行网格划分,分为节点数 1018517,单元数 592052。图 7 所示为系统有限元分析模型。

应抛物面主镜和平面反射镜次镜的有限元分析结果。

提取得到温度变化引起的主次镜形变量如表 3 所示,在温差 30 °C 情况下,主镜形变量的 RMS 值为 0.0014 λ ,PV 值为 0.0076 λ ,次镜形变量的 RMS 值为 0.0006 λ ,PV 值为 0.0037 λ 。机械结构形变引起主次镜偏移的刚体变化值如表 4 所示,在三维位置上的偏移为微米量级。对比表 3 和表 4 的结果可以看出,由温度引起的面形变化仅为纳米量级,远小于机械结构形变引起的位置偏移,相较之下可以忽略不计。

将温差 30 °C 情况下主次镜的形变量代回到 Zemax 中,对准直系统进行像差分析,结果如图 9 所示。波前的 PV 值为 15.3884 λ ,RMS 值为 2.6961 λ ,在

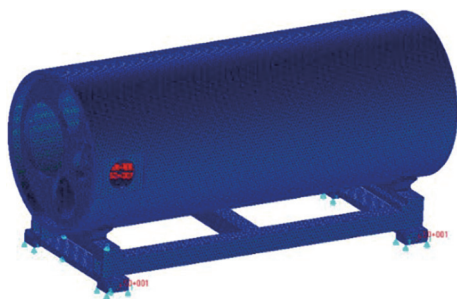


图 7 有限元分析模型

Fig.7 Model of finite element analysis

考虑到系统的实际使用场景,在室温 20 °C、温差 ± 30 °C 的情况下进行有限元分析。提取主次镜节点进行分析,结果如图 8 所示,图 8(a)和 8(b)分别对

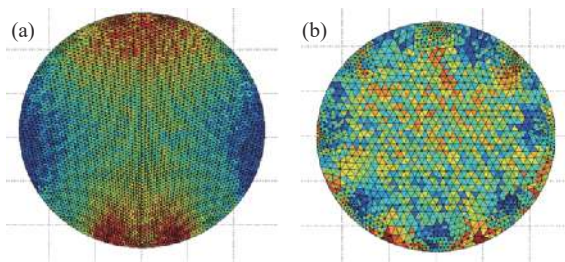


图 8 主镜 (a) 及次镜 (b) 有限元分析结果

Fig.8 Result of finite element analysis of the primary mirror (a) and the secondary mirror (b)

表 3 主次镜温差 30 °C 形变量

Tab.3 Shape variable of primary and second mirrors with a temperature difference of 30 °C

	RMS/ λ	PV/ λ
Primary mirror	0.0014	0.0076
Second mirror	0.0006	0.0037

表 4 主次镜温差 30 °C 刚体变化值

Tab.4 Rigid body change value of primary and second mirrors with a temperature difference of 30 °C

	X/mm	Y/mm	Z/mm	Rz/($''$)	Ry/($''$)
Primary mirror	0.0712	-0.2157	-0.0185	-0.0376	1.1893
Second mirror	0.0714	-0.0043	0.0275	0.2911	-1.5359

温度变化的情况下, 需要根据使用环境对波像差进行校正。

由温度变化引入的像差主要是主次镜偏移引起的散焦, 可以通过调节靶标的位置重新对焦, 三维位置可调的靶标盘如图 10(a) 所示, 通过两对旋钮的机械力对靶标的上下左右进行调节, 轴向位置调整结束后由螺圈锁紧, 补偿离焦引入的像差。靶标采用金属

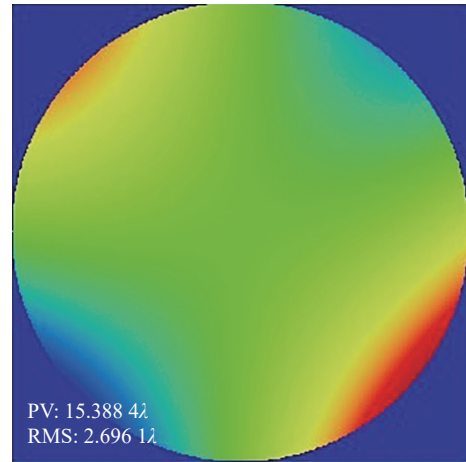


图 9 温差 30 °C 波前图

Fig.9 Wavefront plot with a temperature difference of 30 °C

靶标设计, 图案设计如图 10(b) 所示, 共包括圆形、三角、十字叉丝等七种不同图案, 直径 25 mm, 厚度 0.12 mm, 靶标成像表面镀有高发射率的黑色涂层, 保持与环境相同的温度, 在靶标背面镀有高反射率图层, 减少黑体辐射对靶标温度的影响, 靶标实体温度为环境温度, 透光部分温度为目标温度, 通过控制光阑的通光孔径来匹配光斑与靶标大小。

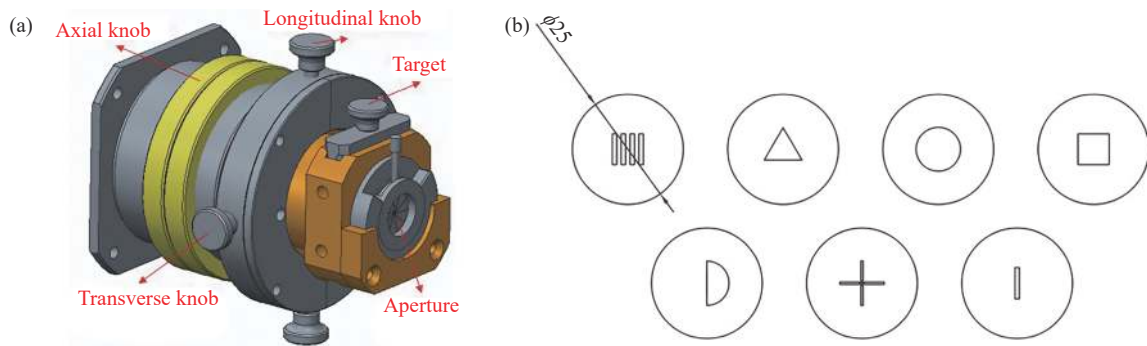


图 10 (a) 靶标盘结构图; (b) 靶标图案示意图

Fig.10 (a) Structure of target holder; (b) Target patterns

3 系统测试

3.1 系统装调与测试

利用 Zygo 干涉仪对红外目标模拟系统进行装调^[6], 如图 11 所示, 从 Zygo 干涉仪发出的平面波经球面镜整形为球面波, 依次经过平行光管次镜、主镜之后照射到参考平面镜上, 再沿原路返回产生干涉, 干涉结果显示在计算机上, 根据干涉条纹和干涉结果对主次镜位置进行装调。

系统装调步骤如图 12 所示。首先对次镜位置进

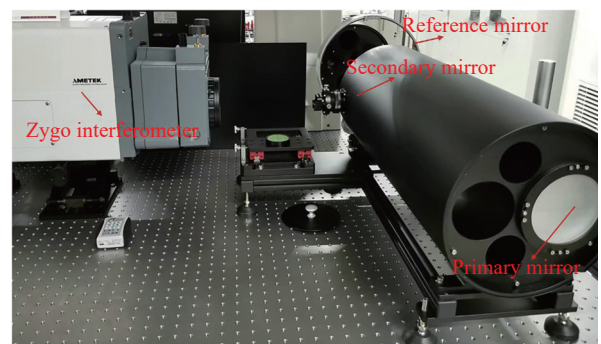


图 11 红外目标模拟系统装调

Fig.11 Fabricating of infrared target simulation system

行校准,从 Zygo 干涉仪发出的标准平面波经球面镜会聚在平行光管的靶标位置上,均匀照亮次镜,经过次镜反射后从平行光管的主镜位置出射,调整次镜俯仰对出射光斑的中心高度进行调整,使得 Zygo 干涉仪出射光束、次镜中心、主镜位置出射光束的光斑中心位于同一高度上,锁定次镜上下两侧调节螺丝,再对次镜偏摆进行调节,使得光斑位于主镜的中心,安装主镜后,观察到光斑从平行光管的出口处出射。在平行光管出口放置 300 mm 孔径的参考平面镜,反射光沿原路返回,在 Zygo 干涉仪内部干涉,调整主镜位置直至计算机上可以观察到干涉条纹。

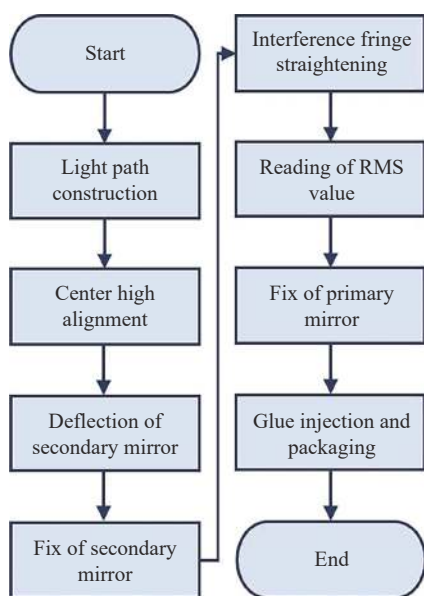


图 12 系统装调步骤

Fig.12 System installation and commissioning steps

根据干涉条纹对主镜进行调整,初始干涉图中的条纹为圆弧状,调整主镜的俯仰倾斜,直至出现直条纹,再根据测量结果的 PV 值和 RMS 值对主镜进行微调,直至找到 RMS 值最小位置,固定主镜,对螺孔进行注胶,封装平行光管两侧的外壳,平行光管的主次镜校准完成。

平行光管的主次镜调节结果如图 13 所示,其中图 13(a) 为检测结果的干涉图样,根据图 13(b) 的干涉结果, PV 值为 0.356λ, RMS 值为 0.047λ, 优于 λ/20, 结果良好, 满足使用需求^[17]。Zeinike 系数分析结果如表 5 所示, 根据结果得知系统的像差主要是 ZFR4、ZFR5、ZFR7 和 ZFR9 项, 即离焦、倾斜和 5 级以上的高阶像差, 在成像时可以通过对靶标位置的调节来进

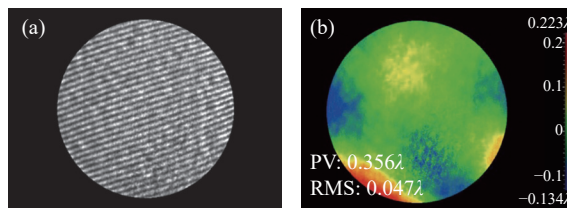


图 13 平行光管调节结果

Fig.13 Adjustment result of collimator system

表 5 平行光管 Zernike 系数

Tab.5 Zernike coefficients of collimator

Coefficient	Value/λ	n	m	Representation
ZFR 0	0.000	0	0	1
ZFR 1	-0.001	1	1	$\rho\cos(\theta)$
ZFR 2	-0.001	1	-1	$\rho\sin(\theta)$
ZFR 3	0.001	2	0	$-1+2\rho^2$
ZFR 4	-0.057	2	2	$\rho^2\cos(2\theta)$
ZFR 5	0.064	2	-2	$\rho^2\sin(2\theta)$
ZFR 6	-0.016	3	1	$(-2\rho+3\rho^3)\cos(\theta)$
ZFR 7	-0.093	3	-1	$(-2\rho+3\rho^3)\sin(\theta)$
ZFR 8	0.025	4	0	$1-6\rho^2+6\rho^4$
ZFR 9	0.097	3	3	$\rho^3\cos(3\theta)$
ZFR 10	-0.055	3	-3	$\rho^3\sin(3\theta)$
ZFR 11	-0.009	4	2	$(-3\rho^2+4\rho^4)\cos(2\theta)$
ZFR 12	0.035	4	-2	$(-3\rho^2+4\rho^4)\sin(2\theta)$

一步补偿。

3.2 目标模拟功能测试

在实验室中搭建便携式红外目标模拟系统测试光路,首先验证系统的成像功能。在系统 10 m 远处放置红外相机及云台,启动相机并等待相机自检完成后,打开光源开关,设定温度 125 ℃,通过控制二维云台对相机接收面的位置进行调整,直到相机可以拍摄到圆形亮斑,对曝光进行调节,防止过曝影响靶标图案的识别。在靶标盘上插入靶标后继续调节,在接收端观察成像效果,通过光圈调整和变倍调节后,当图案形状能够完全捕捉且边缘锐利后,对相机进行对焦操作,拍摄结果如图 14 所示,对不同形状靶标均可以清晰识别,系统的成像功能具备完全,满足模拟无穷远处目标的需求。在长距离的使用条件下,首先用激光测距仪对发射端的目标模拟器和接收端相机位置进行标定,当发射端与接收端之间无阻挡时,调整二维云台位置使相机接收面对准目标模拟器出口,对模拟目标进行拍摄。

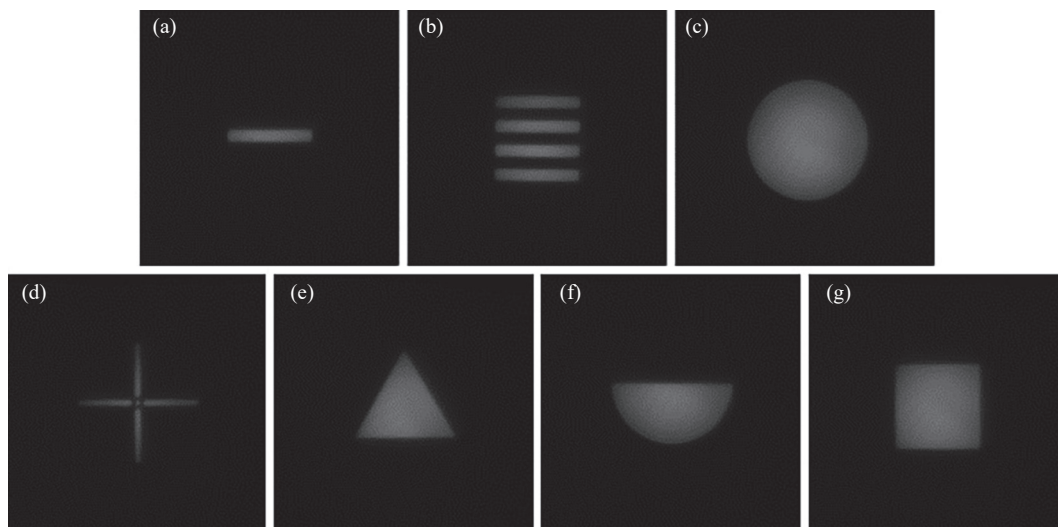


图 14 10 m 距离下成像结果

Fig.14 Imaging results at 10 m distance

4 结 论

设计了一个工作波段为 3~5 μm 、8~14 μm 的便携式红外目标模拟系统。系统具有结构简单、波长可调、目标丰富以及成像清晰稳定的特点。使用 Zemax 软件对系统的波前质量进行分析,在 4 μm 波段,中心视场的 PV 值为 0.0132 λ ,RMS 值为 0.0038 λ ,在 12 μm 波段,中心视场的 PV 值为 0.0044 λ ,RMS 值为 0.0013 λ 。对准直系统进行了光机热分析,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 温差下,由机械结构的形变引起的光学元件位移远大于主次镜自身形变量,达到 10 μm 量级,成像结果有明显的离焦误差,通过三维位置可调的靶标盘重新对焦,能够补偿因温度变化引入的离焦误差。对系统的成像功能进行了测试,对于不同形状的靶标,系统能够成清晰可识别的像,为红外探测设备提供一个稳定的模拟目标。

参考文献:

[1] Hao Yanyun, Zhao Sunqing. Overview of hardware-in-the-loop infrared multi-band target simulation technologies abroad [J]. *Infrared*, 2022, 43(2): 7-14. (in Chinese)

[2] Wu Peng. Research on rader flight target simulation and evaluation method based on DRFM technology [D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)

[3] Yang Rui, Zhou Wei. Present situation and development trend of

infrared simulation target [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2021, 6(2): 116-118. (in Chinese)

[4] Gao Hui, Zhao Qingsong. Exploration of applications of IR image simulator [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(5): 409-414. (in Chinese)

[5] 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. (in Chinese)

[6] Zou Yingying, Qiu Lirong, Wang Ya, et al. Development of portable infrared target simulator [J]. *Optical Technique*, 2015, 41(2): 152-155. (in Chinese)

[7] Du Xiaoyu, Yang Jiqiang, Peng Qingqing, et al. An optical design of a novel multifunctional target simulator [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(7): 891-895. (in Chinese)

[8] Cai Wenlin, Zhu Zihui, Li Jianhua, et al. Design of infrared target simulator of military testing [C]//Proceedings of SPIE, 2021, 12061: 120610X.

[9] Qian Yulong, Wang Zhile, Zhang Chengbiao. Domestic and international developing status of the dual-band IR target simulator [J]. *Aero Weaponry*, 2014(5): 23-27. (in Chinese)

[10] Zheng Hanqing, Cun Qingfeng, Hu Yang, et al. Method for expanding field-of-view of Cassegrain system with computational imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1522001. (in Chinese)

[11] Luo Hui, Li Jie, Li Jincheng, et al. Research on integrated optical system technology of receiving and transmitting for near ground ultraviolet communication [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2021(6): 10-23. (in Chinese)

- [12] Sun Yongxue, Xia Zhentao, Wang Ke, et al. Research on off-axis reflective collimator design and inspection scheme of secondary mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(2): 334-338. (in Chinese)
- [13] Zhu Peng, Xiao Lei, Sun Tai, et al. Research progress of micro-nano structures enhanced infrared detectors (*Invited*) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210826. (in Chinese)
- [14] Du Baolin, Zhang Yuansheng, Li Yanxiao. Algorithm for selecting blackbody radiation source of infrared target simulator [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(3): 71-73. (in Chinese)
- [15] Wang Zengwei, Zhao Zhicheng, Yang Yi, et al. Thermal-structural-optical integrated analysis method based on the complete equations of rigid body motion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210617. (in Chinese)
- [16] Zhang Xiangming, Jiang Feng, Kong Longyang, et al. Research on optical alignment technology for Cassegrain system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 526-530. (in Chinese)
- [17] Yang Yifeng, Zhao Yan. Opto-mechanical system design of rotating virtual objective for autocollimate dynamic target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2312003. (in Chinese)

Design of portable infrared target simulator system

Gao Hongwei¹, Yang Zhongming^{2*}, Liu Hongbo³, Zhuang Xingang³, Liu Zhaojun²

(1. Key Laboratory of Laser & Infrared System, Ministry of Education, Shandong University, Qingdao 266237, China;

2. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China;

3. East China Institute of Electronic Measurement Instrument, Qingdao 266555, China)

Abstract:

Objective Infrared target simulator is an important part of infrared target simulation experiment. When the outgoing pupil of the collimation system coincides with the incident pupil of the detection equipment, it can provide a stable infinitely far simulated target for infrared detection equipment, and the simulation results have the advantages of being accurate, controllable and repeatable experiments, which are used to evaluate the performance and accuracy of infrared detection equipment. It has important applications in radar testing, infrared guidance, infrared tracking, etc. With the development of photoelectric detection equipment sensor integration and miniaturization, multi-band sensors have become the standard configuration of most photoelectric detection equipment. Due to the changes in the debugging environment and the use of the environment, it is necessary to adjust it frequently, but most of the target simulators in the laboratory are only equipped with a single-band light source, large size is not convenient to carry. Therefore, it is necessary to establish multi-band and small-sized portable target simulators to meet the needs of different usage environments. For this purpose, an off-axis reflective infrared target simulator system is designed in this paper.

Methods A portable infrared target simulator system is built in this paper. A 110 mm aperture parallel light tube of reflective structure was chosen as the collimation system (Fig.2). The optical-mechanical thermal integration analysis of the system was performed to determine the deformation variation of the primary and secondary mirrors and mechanical structure caused by temperature difference (Fig.8). The self-collimating interferometric detection method was mounted using a Zygo interferometer (Fig.11), and the mounting results were judged by the PV and RMS value results of the face shape measurement of the standard plane mirror (Fig.13).

Results and Discussions The portable infrared target simulation system was mounted using self-collimating interferometry, with PV value of 0.356λ ($\lambda=632.8$ nm) and RMS value of 0.047λ (Fig.13), which is better than $\lambda/20$, and the results are excellent and meet the usage requirements. The results of Zernike coefficient analysis

shows that the system aberrations are mainly out-of-focus, tilt and higher order aberrations of more than 5 levels (Tab.5), and the adjustable target disc is designed to compensate and improve the imaging quality. A portable infrared target simulator system is built in the laboratory to test the optical path and verify the imaging function of the system. The infrared camera and head were placed at a distance of 10 m from the system, and the imaging results are shown (Fig.14). The targets of different shapes can be clearly identified, and the imaging function of the system has completely satisfies the demand of simulating targets at infinity.

Conclusions A portable infrared target simulatot system with working wavelengths of 3-5 μm and 8-14 μm is designed. The system is characterized by simple structure, adjustable wavelength, rich target and clear and stable imaging. The wavefront quality of the system was analyzed using Zemax software, and the PV value of the central field of view was 0.013 2λ and the RMS value was 0.003 8λ in the 4 μm band, and the PV value of the central field of view was 0.004 4λ and the RMS value was 0.001 3λ in the 12 μm band. An optical-mechanical thermal analysis of the collimation system was performed, and at a temperature difference of 30 $^{\circ}\text{C}$, the deformation caused by the mechanical structure of the displacement of the optical element is much larger than the deformation of the primary and secondary mirrors themselves, reaching the order of 10 μm , and the imaging results have obvious out-of-focus errors, which can be compensated for the out-of-focus errors introduced by the temperature change by refocusing the target disc with adjustable three-dimensional position. The imaging function of the system was tested, for different shapes of targets, the system can become a clear and identifiable image, providing a stable simulated target for infrared detection equipment.

Key words: optical engineering; target simulator; optical design; collimator

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62175131); Joint Fund Project of the Ministry of Education for Equipment Pre-research (8091B032125); Anhui Provincial Key Research and Development Project (202104a04020001); The Fundamental Research Funds of Shandong University (2020JCG003)