中国光学（中英文）
Chinese Optics
核心期刊

短波中波红外折反射式共口径光学系统设计

马洪涛 韩冰 许洪刚 李旭 张明亮

Design of SWIR/MWIR catadioptric common-aperture optical system

MA Hong-tao, HAN Bing, XU Hong-gang, LI Xu, ZHANG Ming-liang

引用本文:
马洪涛, 韩冰, 许洪刚, 李旭, 张明亮. 短波中波红外折反射式共口径光学系统设计[J]. 中国光学, 2025, 18(2): 359–367. doi: 10.37188/CO.2024–0154
MA Hong-tao, HAN Bing, XU Hong-gang, LI Xu, ZHANG Ming-liang. Design of SWIR/MWIR catadioptric common-aperture optical system[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 359-367. doi: 10.37188/CO.2024-0154

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024–0154

文章编号　2097-1842(2025)02-0359-09

短波中波红外折反射式共口径光学系统设计

马洪涛[1], 韩　冰[1,2*], 许洪刚[1], 李　旭[1], 张明亮[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；
2. 长春理工大学, 吉林 长春 130022）

摘要: 为了实现高精度、高可靠性的动态场景模拟, 设计了一套短波中波多波段折反射式共口径光学系统。该系统结合了反射、折射和共口径光路的优势, 该系统分为主光学系统、短波光学系统和中波光学系统, 3 个系统分别独立设计。通过理论计算得到光学系统的初始结构, 再利用光学设计软件对光学参数作进一步细化, 最后, 按照光瞳匹配原则将各分系统组合在一起, 并对系统的成像质量作进一步优化设计。利用调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)和畸变等定量评价指标, 仿真验证了系统设计的合理性。结果显示: 所设计的短波光学系统视场角为±0.107°、焦距为 2500 mm、入瞳尺寸为 300 mm, MTF 达到衍射极限, 畸变小于 0.3%; 中波光学系统的视场角为±0.65°、焦距为 750 mm、入瞳尺寸为 300 mm, MTF 接近衍射极限, 畸变小于 1%。该系统成像质量好、体积小、实用性强, 在光电跟瞄和空间探测等领域具有较大应用潜力。

关　键　词: 景物模拟器; 光学设计; 短波中波红外成像; 共口径光学系统
中图分类号: O435　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2024-0154　　**CSTR:** 32171.14.CO.2024-0154

Design of SWIR/MWIR catadioptric common-aperture optical system

MA Hong-tao[1], HAN Bing[1,2*], XU Hong-gang[1], LI Xu[1], ZHANG Ming-liang[1]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: hanbing@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to simulate dynamic scenes with high accuracy and high reliability, a short-wave infrared (SWIR) and mid-wave infrared (MWIR) multiband catadioptric common-aperture optical system is designed. The system combines the advantages of reflection, refraction, and common-aperture optical paths. The system includes a main optical system, a short-wave optical system and a mid-wave optical system, all designed independently. The initial structure of the optical system is obtained according to theoretical calculation, and the optical parameters are further detailed by optical design software. Finally, the sub-systems are combined according to the principle of pupil matching. The system's image quality is further optimized, and the system

收稿日期: 2024-08-29; **修订日期:** 2024-09-18
基金项目: 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目(No. 2023SYHZ0047); 2024 年度长春市卫星及应用产业重大科技专项(No. 2024WX03)
Supported by Jilin Province and Chinese Academy of Sciences Science and Technology Cooperation High-Tech Industrialization Special Fund Project (No. 2023SYHZ0047); Major Science and Technology Project of Satellite and Application Industry of Changchun in 2024 (No. 2024WX03)

design's rationality is verified by the simulation of the modulation transfer function (MTF) and distortion. The designed short-wave optical system has a field angle of ±0.107°, a focal length of 2500 mm, an entry pupil size of 300 mm, an MTF that reaches the diffraction limit, and less than 0.3% distortion. The mid-wave optical system has a field angle of ±0.65°, a focal length of 750 mm, an entry pupil size of 300 mm, an MTF closes to the diffraction limit, and less than 1% distortion. The system has good image quality, small size and strong practicability. It has great application potential in the field of photoelectric tracking and space detection.

Key words: scene simulator; optical design; SWIR/MWIR imaging; common-aperture optical system

1 引　言

在光电跟瞄和空间探测等领域，动态景物模拟和测试是一个至关重要的环节[1-2]。针对传统动态场景模拟中存在模拟场景单一、实时性差、精度低等问题，本文提出了一套五路合束的景物模拟方案。该方案可实现动态场景的高精度、高可靠性模拟。

使用地面景物模拟器的目的是产生一个无穷远的理想虚拟目标用于设备检测和测试，其中光学系统的成像质量直接决定了系统的性能。对于中短波红外光学成像系统，传统的折射式光学结构由于使用的透射镜过多、镜筒过长，导致光学系统体积重量大，并由此引发装配复杂、制作成本高等问题。传统的全反射式光学结构由于光在反射过程中可能发生多次反射，容易产生影响像质清晰度的重影和鬼影，且通常需要复杂的光路设计来达到高质量成像，其同样存在体积重量大的问题。为此，研究人员更多采用折反射式光路设计。2021 年，李卓等人为满足小、远空间目标的光学特性测量需求，以卡塞格林结构为基础，通过理论计算和软件优化的方式设计了中波红外二次成像折反射式光学系统，该系统结构简单紧凑[3]。2023 年，王超等人针对基因测序、半导体检测和工业显微镜需求，设计了一款高数值孔径、宽谱段和消色差特性的折反射式物镜系统[4]。2023 年，Raad 等人通过 OSLO(Optics Software for Layout and Optimization) 软件仿真，基于对光通量、MTF、点扩散函数和斯特列尔率等指标的判断，确定了卡塞格林望远镜系统的最佳次镜遮光比，为折反射光学系统的设计提供了一定参考[5]。

在光电跟瞄、空间探测等领域，共口径光学系统具有结构紧凑、成本低、便于维护等特点，同时，共口径光学系统还具有宽视场、高分辨率、低杂散光等良好的光学成像性能，因此，逐渐成为光学设计领域的研究热点[6-8]。折反射式共口径光学系统巧妙地结合了折射、反射和共口径光学设计的优势，实现了短波中波红外多波段的小型化、轻量化设计和高性能成像[3, 9]。本模拟器的光路设计采用了一种短波中波折反射式共口径光路。首先介绍了五路合束景物模拟器的设计原理和关键技术，光路设计采用分段设计和组合优化的方法，最后，进行仿真实验，并利用 MTF 和畸变等成像指标进行定量评价，验证了设计方法的有效性和模拟器的实用性。

2 景物模拟器光学设计及系统参数

该光学系统采用 1280×1024 DMD(Digital Micromirror Device)阵列探测器，探测器像元尺寸为 10.8 μm×10.8 μm，红外光学系统的主要设计参数如表 1 所示。

表 1　折反射式共口径光学系统的主要参数

Tab. 1　Main parameters of the catadioptric common-aperture optical system

Num.	Specification	Short-wave system	Mid-wave system
1	Wave band/ μm	1.0-1.7	3.7-4.8
2	Channels	1	3.7-4.0, 4.1-4.35, 4.35-4.6, 4.55-4.8
3	FOV/ω	±0.107°	±0.65°
4	Focus/mm	2500	750
5	Entrance PD/mm	300	300
6	Exit PD/mm	1300	1300
7	Image size	/	The same size/4
8	Distortion	⩽0.3%	⩽1%

注: Entrance PD= Entrance Pupil Diameter, 入瞳尺寸; Exit PD=Exit Pupil diameter, 出瞳距离。

本文采用折反射式结构作为光学系统的结构

形式。其中: 反射系统作为共光路部分, 从反射系统出射的光经过分光镜后分别按相应的工作波段进入不同的折射系统[10]。在设计过程中, 将光学系统分为主光学系统、短波光学系统和中波光学系统分别独立设计。然后, 按照光瞳匹配的原则, 将各分系统组合成一个完整的光学系统, 再作进一步优化设计。最后, 通过分析 5 路(1.0 μm~1.7 μm、3.7 μm~4.0 μm、4.1 μm~4.35 μm、4.35 μm~4.6 μm、4.55 μm~4.80 μm)光束的成像质量, 得到所需要的光学系统[11]。

3 折反射式光学系统设计

3.1 设计原理

光学设计的原则是获得高质量成像, 设计过程主要围绕消像差展开。在主光学系统设计中, 离轴反射结构是一种常用的设计形式, 特别是在天文望远镜和空间光学系统中, 要计算离轴两镜系统的初始结构参数, 需要使用几何光学和光学设计的基本原理。

以下是离轴两镜反射系统初始结构的一般步骤和相关公式[12-13]:

(1) 主镜参数: 主镜半径为 R; 焦距为 f; 离轴量为 x_0; 次镜半径为 R_2; 次镜到主镜的距离为 d; 次镜的离轴量为 x_{02}。

首先, 确定系统的焦比 F:

$$F = \frac{f}{D} \quad , \tag{1}$$

其中 D 为主镜的直径 $D = 2R$。

计算主镜的焦距 f:

$$f = \frac{R}{2}\cdot\left(1 - \sqrt{1-(4F^2)}\right)^{-1} \quad . \tag{2}$$

对于离轴系统, 主镜的交点不在其中心, 而是在偏心位置。

离轴量 x_0 通常由系统的设计要求决定, 一般常用以下近似公式计算:

$$x_0 = \frac{D^2}{16f} \quad . \tag{3}$$

(2) 次镜参数的计算: 次镜的尺寸和位置需要根据主镜的参数以及系统的整体要求来确定, 次镜半径 R_2:

$$R_2 = R\cdot O \quad , \tag{4}$$

其中 O 为次镜相对于主镜的遮拦比。

次镜到主镜的距离 d 可以通过光学路径和系统设计要求来计算, 通常使用以下公式计算,

$$d = f\cdot\left(1 - \frac{R_2}{R}\right) \quad . \tag{5}$$

次镜的离轴量 x_{02} 通常与主镜的离轴量相关, 其满足以下关系,

$$x_{02} = x_0 - d\cdot\frac{R-R_2}{R} \quad . \tag{6}$$

在得到主光学系统的基本参数后, 使用光学设计软件对系统的结构参数作进一步优化。为了满足成像视场和消像差要求, 需要在中波后端光学系统和短波后端光学系统匹配 4~5 片透镜[14], 然后基于主光学系统参数和以上公式确定各分系统光学参数。图 1 为光学系统设计流程图。

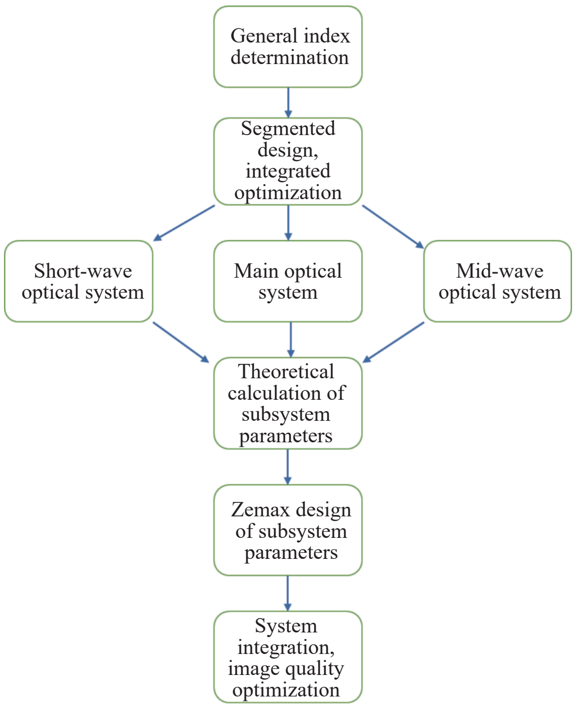


图 1　光学系统设计流程图

Fig. 1　Flow chart of the optical system design

3.2 主光学系统

本文中的反射系统为离轴两镜反射系统, 离轴反射系统不仅可以增加系统的视场, 还可以提高光学系统的成像质量[15-17], 它的主镜和次镜均为抛物面。由反射系统的设计理论可知, 在这种结构下, 反射系统只有场曲、彗差、像散和畸变, 没有球差、轴向色差及倍率色差的存在[18]。在设计的离轴两镜反射系统中, 入瞳位于主镜前

2 200 mm 处，离轴方式为光阑离轴。根据给出的主镜半径，利用 3.1 节中的相关公式可计算出离轴量及其它参数，从而得到离轴两镜反射系统的初始结构，如图 2 所示，设计数据如表 2 所示。

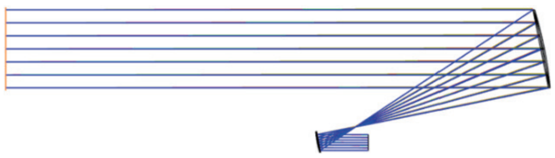


图 2　主系统离轴两镜光学设计图

Fig. 2　Optical design diagram of the off-axis two-mirror main system

表 2　主系统光学设计参数

Tab. 2　Optical design parameters of the main system

Mirror Num.	Curve radius /mm	Distance /mm	Semi-diameter /mm	Off-axis /mm
1	−1 500	−900	170	300
2	300		40	−58

对于离轴两镜反射系统的初始结构，入瞳尺寸为 300 mm，位于主反射镜前 2 200 mm 处，系统的光束压缩比选为 5，主镜的半径为 1 500 mm，二次曲面系数为−1，次镜的半径为 300 mm，二次曲面系数同样为−1，主次镜之间的距离为 900 mm。为了保证光学系统在最大视场角时也不存在光线被遮挡问题，主镜的离轴量取为 300 mm，此时出瞳位于次镜后 183 mm 位置处，孔径大小为 60 mm，出射光束直径为 60 mm。此时主光学系统能够满足短波视场角为±0.107°的要求，主光学系统的 MTF 曲线如图 3（彩图见期刊电子版）所示。

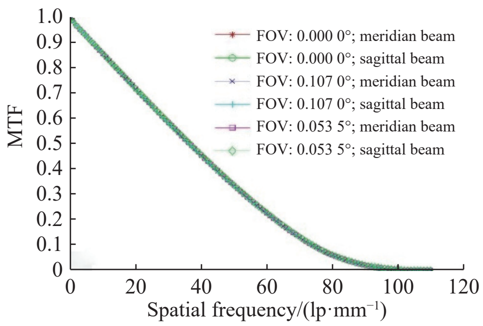


图 3　主光学系统 MTF 曲线

Fig. 3　MTF curves of the main optical system

中波视场角为±0.65°，在这种条件下，轴外视场像质不能达到使用要求。为了使其达到使用要求，在此主光学系统出瞳的位置上放置短波及中波分光镜，反射部分为短波支路，透射部分为中波支路，中波支路为保证主光学系统像质能够满足要求，在主光学系统后采取扩视场的透射式场镜。透射式场镜采取 4 片式结构，其中第一片及第三片采用溴化钾材料，正光焦度，第二片采用石英材料，负光焦度，第四片采用砷化镓材料，负光焦度。选取以上 3 种材料完成单色像差及色差的校正，应用双胶合透镜缩短了系统尺寸，采用球面透镜提高了系统的可加工性，中波主系统及场镜设计结果如图 4（彩图见期刊电子版）所示，设计数据如表 3 所示。

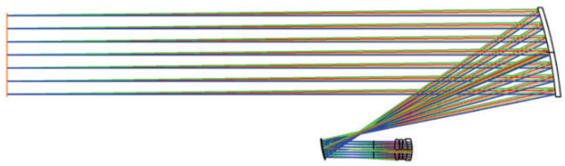


图 4　中波主系统的光路形式

Fig. 4　Optical path configuration of the mid-wave main system

表 3　中波主系统光学设计参数

Tab. 3　Optical design parameters of the mid-wave main system

Mirror Num.	Curve radius /mm	Distance /mm	Semi-diameter /mm	Off-axis /mm
1	−1 500.00	−900	170.00	300
2	300.00		40.00	−58
3	207.93	19	33.33	KBR
4	−128.33	0.50	33.10	
5	−754.76	10	32.36	SILICON
6	776.51	0.50	32.13	
7	234.00	20	32.19	KBR
8	−89.34	0	31.84	
9	−89.34	17.20	31.84	GAAS
10	−148.50	200	35.36	

中波主系统的 MTF 曲线如图 5（彩图见期刊电子版）所示。可见，轴上视场能够达到衍射极限，边缘视场略低于衍射极限，但能满足使用要求。

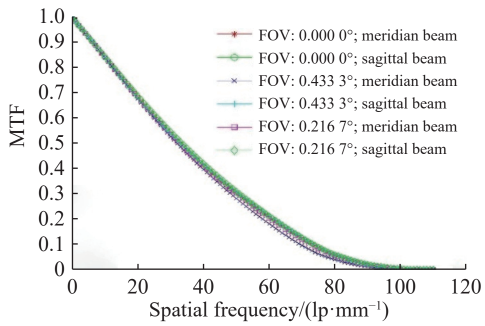


图 5　中波主光学系统 MTF 曲线

Fig. 5　MTF curves of the mid-wave main optical system

3.3　短波光学系统

根据指标要求及主系统的光学参数可计算得到短波后端光学系统的参数, 如表 4 所示。

表 4　短波后端系统的光学参数

Tab. 4　Optical parameters of the short-wave back-end system

Num.	Specification	Short-wave system
1	Wave band/ μm	1.0-1.7
2	FOV/ω(°)	±0.54
3	Focus/mm	500
4	Entrance PD/mm	60
5	Image size	/
6	Distortion	⩽0.3%

短波后端光学系统与主光学系统相匹配, 共同组成短波支路。

常用的光学玻璃在短波段透过率会有明显下降, 而本文选用 LAF 及 ZF 中的 3 种玻璃进行 7 种像差矫正的同时也保证了每片玻璃的透过率在 99% 以上。短波后端光学系统由 4 片透镜组成, 从左到右依次为透镜 1, 透镜 2, 透镜 3, 透镜 4。透镜 1、透镜 4 材料为镧系玻璃 LAF55, 正光焦度; 透镜 2 的材料为 LAF50, 负光焦度; 透镜 3 的材料为 H-ZF88GT, 负光焦度。镜组镜片之间的间隔都很小, 用于缩短光学系统的轴向尺寸。为了减小元件的加工难度, 降低加工成本, 透镜元件的所有表面均为球面, 光学系统轴向尺寸为 536.7 mm。短波后端光学系统设计图如图 6(彩图见期刊电子版)所示。设计参数如表 5 所示。

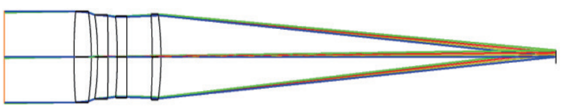


图 6　短波后端光学系统设计图

Fig. 6　Design diagram of short-wave back-end optical system

表 5　短波后端光学系统设计参数

Tab. 5　Design parameters of the short-wave back-end optical system

Mirror Num.	Curve radius /mm	Distance /mm	Semi-diameter /mm	Materials
1	229.09	20	50.61	H-LAF55
2	−192.78	4.31	49.90	
3	−177.10	12	48.22	H-LAF50B
4	−1950.66	6.70	46.73	
5	−533.78	11	45.87	H-ZF88GT
6	476.42	35.99	45.19	
7	−4768.94	10	45.16	H-LAF55
8	−329.67	436.70	45.19	

短波后端光学系统优化后的 MTF 曲线和畸变曲线如图 7、图 8(彩图见期刊电子版)所示。由 MTF 曲线可以看出此系统设计的 MTF 接近衍射极限。通过畸变曲线可知该系统的设计畸变为−0.000107%。

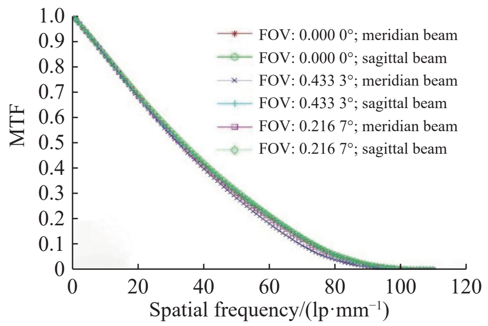


图 7　短波后端光学系统 MTF 曲线

Fig. 7　MTF curves of the short-wave back-end optical system

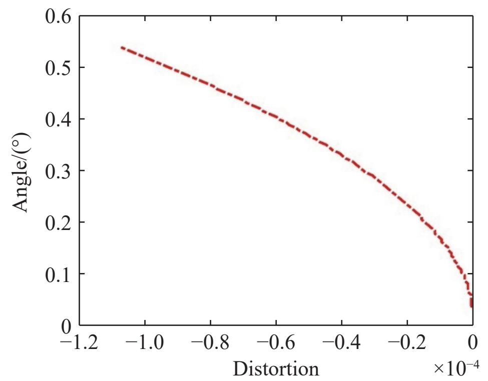


图 8　短波后端光学系统畸变曲线

Fig. 8　Distortion curve of the short-wave back-end optical system

3.4　中波光学系统

根据指标要求及主系统的光学参数可计算出中波后端光学系统的参数, 如表 6 所示。

表 6　中波后端系统的光学参数

Tab. 6　Design parameters of the mid-wave back-end optical system

Num.	Specification	Mid-wave system
1	Wave band/ μm	3.7-4.8
2	FOV/ω	±3.23°

续表 6

Num.	Specification	Mid-wave system
3	Focus/mm	150
4	Entrance PD	60
5	Image size	The same size/4
6	Distortion	≤1%

中波后端光学系统与主光学系统匹配，共同组成中波支路。其由 5 片透镜组成，从左到右依次为透镜 1，透镜 2，透镜 3，透镜 4，透镜 5。透镜 1、透镜 3、透镜 5 材料为石英玻璃，正光焦度；透镜 2、透镜 4 材料为锗，透镜 2 正光焦度，透镜 4 负光焦度。通过 Si 和 Ge 两种材料与 5 片镜头的正负光焦度组合，完成了 5 种单色像差和 2 种色差校正。系统各片镜的高级像差小，从而降低了各片球面透镜的加工难度，光学系统轴向尺寸为 230.8 mm。中波后端系统的光学设计图如图 9(彩图见期刊电子版)所示，设计参数如表 7 所示。

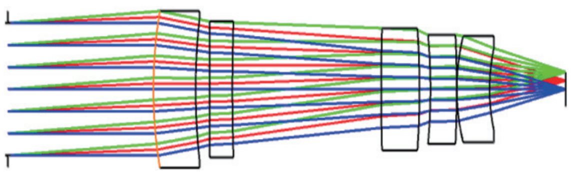


图 9　中波后端系统光学设计图

Fig. 9　Optical design diagram of the mid-wave back-end system

表 7　中波后端光学系统设计参数

Tab. 7　Design parameters of the mid-wave back-end optical system

Mirror Num.	Curve radius /mm	Distance /mm	Semi-diameter /mm	Materials
1	168.31	29.02	47.50	SILICON
2	229.17	9.64	42.54	
3	6736.72	15.00	41.43	GERMANIUM
4	773.91	102.20	40.61	
5	820.84	26.25	35.63	SILICON
6	−330.43	7.58	34.56	
7	−214.63	18.00	31.30	GERMANIUM
8	−446.58	0.10	31.49	
9	79.49	22.50	30.22	SILICON
10	69.43	230.28	23.24	

中波后端光学系统优化后的 MTF 曲线和畸变曲线如图 10、图 11(彩图见期刊电子版)所示。

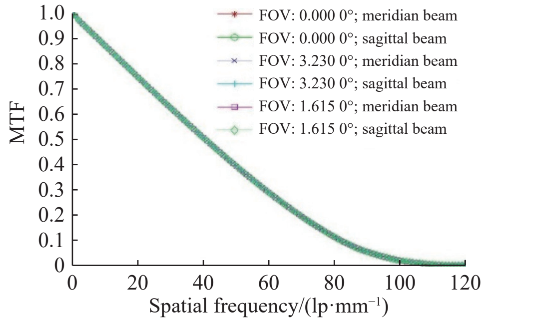


图 10　中波后端光学系统 MTF 曲线

Fig. 10　MTF curves of the mid-wave back-end optical system

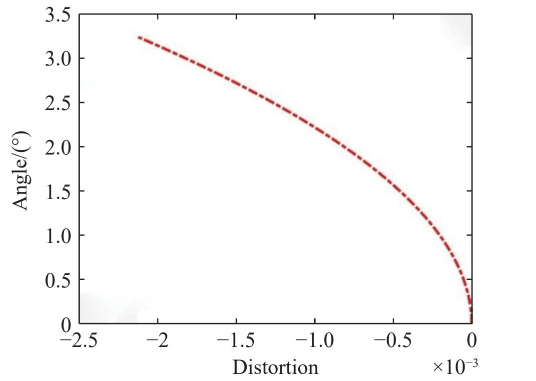


图 11　中波后端系统畸变曲线

Fig. 11　Distortion curve of the mid-wave back-end optical system

由 MTF 曲线可以看出，该系统设计 MTF 接近衍射极限。通过畸变曲线可知此系统设计畸变为−0.212%。中波支路通过滤光片的方式可以分为 4 个支路。4 个中波支路波段分别为 3.7 μm~4.0 μm、4.1 μm~4.35 μm、4.35 μm~4.6 μm、4.55 μm~4.80 μm。

4　系统集成及像质评价

4.1　成像质量分析与评价

主光学系统、短波光学系统和中波光学系统完成单独设计后，再将各系统组合完成目标与背景模拟光学系统设计，如图 12 所示。五光束合一系统的 MTF 曲线如图 13 所示。系统的畸变曲线如图 14 所示。通过 MTF 及畸变曲线可知，本系统能够满足使用要求。

光线追迹渐晕分析结果如图 15(彩图见期刊电子版)所示。通过光线追迹结果可知，光线在各

镜片上没有遮挡与损失, 系统不存在渐晕, 出瞳位置上照度均匀一致。

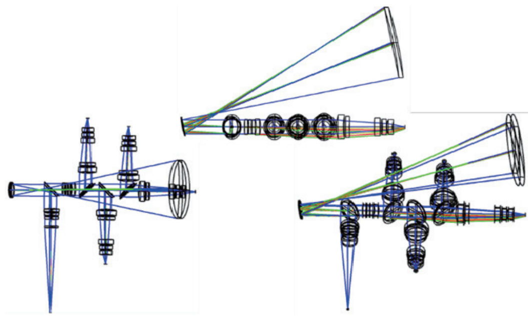


图 12　目标与背景模拟光学系统设计图

Fig. 12　Design diagram for target and background simulation optical system

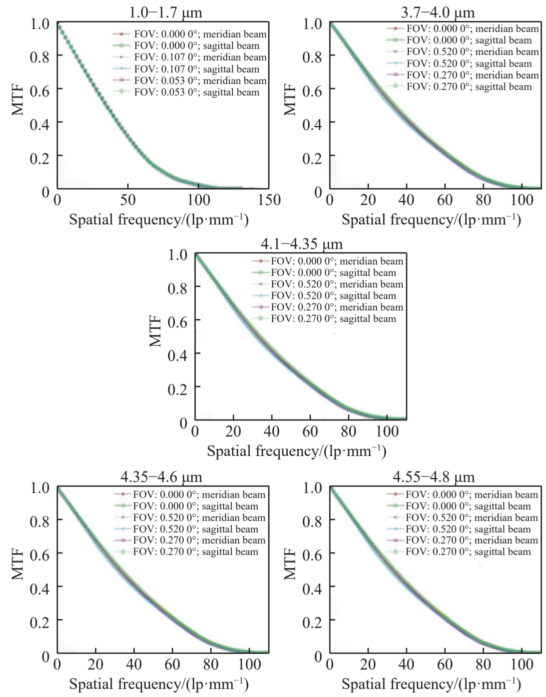
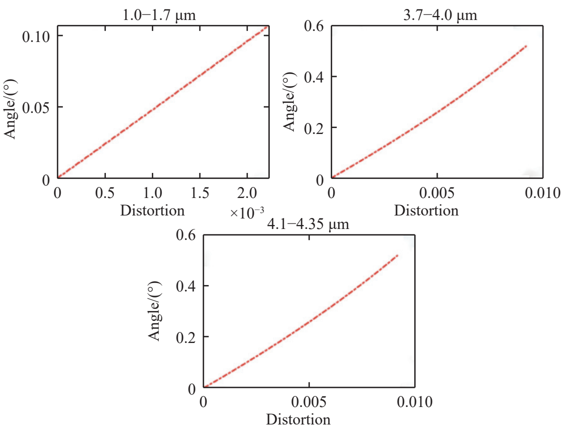


图 13　五路系统的 MTF 曲线

Fig. 13　MTF curves of a five-way system



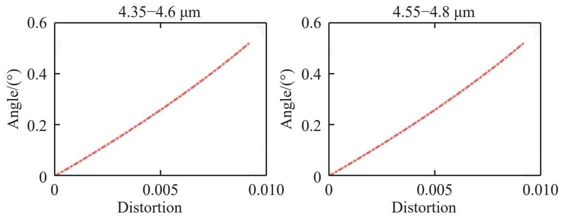


图 14　五路系统的畸变曲线

Fig. 14　Distortion curves of a five-way system

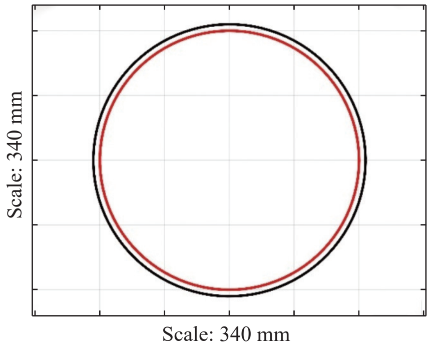


图 15　光线追迹渐晕分析

Fig. 15　Ray tracing vignetting analysis

4.2　公差分配与讨论

考虑实际应用, 需分析系统的设计公差容限, 对反射镜面形、透镜厚度、材料折射率、镜片间隔等进行公差分析。根据目前的实际加工能力及材料特性, 初步确定如表 8 所示的系统加工与装调公差。

表 8　加工与装调公差

Tab. 8　Machining and fitting tolerances

Num.	Tolerance classification	Tolerance value
1	Aperture	2
2	Thickness (spacing)/mm	0.02
3	Refractive index	0.0003
4	Dispersion coefficient	0.005
5	Local aperture	0.2
6	Single-mirror tilt/(′)	1

加入公差对光学系统的最终成像质量进行分析, 采取蒙特卡洛法对像质进行估算, 其结果用传递函数的变化情况表征。红外短波段 MTF 值下降 5%, 红外中波光程最远波段的支路下降最严重, MTF 值下降 8%, 其它支路下降小于 8%。结果表明此系统在现有工艺及材料的情况下, 能够满足实际的使用要求。

5 结　论

本文提出了一套分段设计、组合优化的光学设计方法。基于此设计了一套短波中波红外折反射式共口径光学成像系统。该系统由 1 路短波+4 路中波光路组成,可实现高精度、高稳定性的动态场景模拟。文中详细介绍了短波中波红外折反射式共口径光学系统的设计原理、设计过程及方法。最后,通过 MTF 和畸变指标验证了五路模拟器光学系统设计方法的有效性。结果表明:所设计的短波光学系统视场角为±0.107°、焦距为 2 500 mm、入瞳尺寸为 300 mm, MTF 值达到衍射极限,畸变小于 0.3%; 中波光学系统的视场角为±0.65°、焦距为 750 mm、入瞳尺寸为 300 mm, MTF 值接近衍射极限,畸变小于 1%。该系统成像质量好、体积小、实用性强。所设计的光学系统通过 DMD 生成的图像,利用光线追迹方法可为捕获跟踪系统做设备检测。此外,若将该系统 DMD 换为成像探测器可同时实现短波中波对目标成像和捕获跟踪。该方法为光电跟瞄、空间探测设备检测提供了一个新参考。

参考文献:

[1] 顾航硕, 王凌云, 李光茜. 红外双波段景象模拟器光学系统设计[J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2022, 45(3): 41-47.
GU H SH, WANG L Y, LI G X. Optical design of MW/LW infrared dual-bands scene simulation system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 45(3): 41-47. (in Chinese).

[2] 李卓, 高彦泽, 张金英. 多谱段复杂红外场景模拟技术[J]. 光学学报, 2023, 43(15): 1511002.
LI ZH, GAO Y Z, ZHANG J Y. Multi-spectral complex infrared scene projection technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15): 1511002. (in Chinese).

[3] 李卓, 叶宗民, 孙保杰, 等. 3.7~4.8 μm 红外二次成像折反射式光学系统设计[J]. 红外技术, 2021, 43(12): 1193-1196.
LI ZH, YE Z M, SUN B J, *et al*.. Design of a 3.7~4.8 μm catadioptric secondary imaging MWIR optical system[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(12): 1193-1196. (in Chinese).

[4] 王超, 曲贺盟, 管海军, 等. 高数值孔径宽谱段折反射式物镜设计[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 1922002.
WANG CH, QU H M, GUAN H J, *et al*.. Design of catadioptric objective lens with hyper numerical aperture and wide spectral band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(19): 1922002. (in Chinese).

[5] FOADI R F, AHMED A K. Designing Cassegrain telescope system with best obscuration ratio of secondary mirror[J]. *Iraqi Journal of Science*, 2023, 64(12): 6638-6647.

[6] 李艳杰, 金光, 钟兴, 等. 将成像光学系统用于激光发射的设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3373-3378.
LI Y J, JIN G, ZHONG X, *et al*.. Design and analysis of using imaging optical system as laser transmitting antenna[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3373-3378. (in Chinese).

[7] 杨曼曼. 可见/红外多波段共口径变焦光学系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
YANG M M. *Visible/infrared multi-band co-aperture zoom system design*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021. (in Chinese).

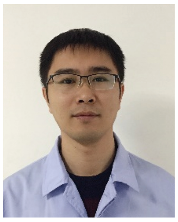
[8] 金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(8): 2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al*.. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese).

[9] 秦子长, 任成明, 戚允升, 等. 小型高分辨率空间相机光学系统低误差敏感度设计[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 20220365.
QIN Z CH, REN CH M, QI Y SH, *et al*.. Low error-sensitive design of small-sized high-resolution space camera optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 20220365. (in Chinese).

[10] 郭占利. 可见/红外共口径变焦光学系统的研究[D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
GUO ZH L. *Study of visible/infrared common aperture zoom optical system*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese).

[11] 魏锦洋, 李旭阳, 谭龙玉, 等. 基于连续变焦的大口径长焦距的探测成像一体化光学系统设计[J]. 光子学报, 2024, 53(1): 0122001.
WEI J Y, LI X Y, TAN L Y, *et al*.. Design of an integrated optical system for detection and imaging of large aperture and long focal length based on continuous zoom[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(1): 0122001. (in Chinese).
[12] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics*[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016. (in Chinese).
[13] 赵珮淞, 王春艳, 孙昊, 等. 折反式超短焦投影镜头设计[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 24-29.
ZHAO P S, WANG CH Y, SUN H, *et al*.. Design of catadioptric ultra-short focal projection lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1): 24-29. (in Chinese).
[14] 吕博, 冯睿, 寇伟, 等. 折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 822-831.
LÜ B, FENG R, KOU W, *et al*.. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 822-831. (in Chinese).
[15] 于亚琼, 王灵杰, 赵尚男, 等. 二维大视场离轴反射式光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2023, 31(14): 2019-2030.
YU Y Q, WANG l J, ZHAO S N, *et al*.. Optical design of the off-axis reflective system with wide fov[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(14): 2019-2030. (in Chinese).
[16] 王健. 基于矢量像差理论的离轴反射式宽波段红外目标模拟器研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
WANG J. *Study on off-axis reflective broadband IR simulator based on the theory of vector aberrations*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese).
[17] FUERSCHBACH K, ROLLAND J P, THOMPSON K P. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26585-26606.
[18] 梁士通, 杨建峰, 薛彬, 等. 四反射镜光学系统像差分析与设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3300-3305.
LIANG SH T, YANG J F, XUE B, *et al*.. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3300-3305. (in Chinese).

作者简介:



马洪涛(1980—), 男, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 硕士生导师, 2006 年于哈尔滨工业大学航天学院获得工学硕士学位, 主要从事航天光机系统设计、检测、装调方面的研究。E-mail: mhtgjs@163.com

韩　冰(1981—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 正高级工程师, 2004 年于吉林大学物理学院获得理学学士学位, 2024 年于长春理工大学光电工程学院攻读博士学位, 主要从事光学检测技术研究与检测设备研发工作。E-mail: hanbing@ciomp.ac.cn