

引用格式: LI Jie, LUO Hui, LI Jincheng, et al. Design of Airborne Infrared Dual-band Imaging Optical System Based on Harmonic Diffraction and Free-form Surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1222004

李杰,罗辉,李金铖,等. 基于谐衍射与自由曲面的机载红外双波段成像光学系统设计[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1222004

基于谐衍射与自由曲面的机载红外双波段成像 光学系统设计

李杰, 罗辉, 李金铖, 吴晗平

(武汉工程大学 光电子系统技术研究所, 武汉 430205)

摘 要: 为实现对远距离红外辐射目标的探测、识别, 通过对谐衍射、自由曲面以及离轴三反光学系统的模型及理论进行分析, 提出一种基于谐衍射和自由曲面的离轴三反双波段红外成像光学系统。量化指标实例分析选择初始结构, 使用 Zemax 宏语言控制优化过程, 设计了一种焦距 1 200 mm, 口径 300 mm 的双波段(3~5 μm 、8~12 μm) 红外成像光学系统。系统在空间频率 10 lp/mm 处, 3~5 μm 波段调制传递函数大于 0.6, 8~12 μm 波段调制传递函数大于 0.45, 双波段全视场弥散斑半径均方根小于 25 μm 。系统在 $-60^\circ\text{C}\sim+60^\circ\text{C}$ 工作温度范围内实现非热敏化。该系统结构简单, 设计结果满足各项任务指标, 具有较高的可实现性, 对机载双波段红外成像光学系统的进一步研制具有重要意义。

关键词: 谐衍射; 自由曲面; 离轴三反; 双波段; 宏语言

中图分类号: TN21

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215012.1222004

Design of Airborne Infrared Dual-band Imaging Optical System Based on Harmonic Diffraction and Free-form Surface

LI Jie, LUO Hui, LI Jincheng, WU Hanping

(Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: In order to realize the detection, identification of long-distance infrared radiation targets. Through the research and analysis of the model and theory of harmonic diffraction, free-form surface and off-axis three-mirror optical system, we propose a design scheme of off-axis triple-mirror dual-band infrared imaging optical system based on harmonic diffraction and free-form surface. By selecting the initial structure through the analysis of quantitative indicators and using Zemax macro language to control the process of system optimization, a dual-band (3~5 μm , 8~12 μm) infrared imaging optical system with a focal length of 1 200 mm and a diameter of 300 mm was designed. When the system is at a spatial frequency of 10 lp/mm, the value of the modulation transfer function in the 3~5 μm band is greater than 0.6, and the value of the modulation transfer function in the 8~12 μm band is greater than 0.45. The root-mean-square radius of the diffuse spot of the system's dual-band full field of view is less than 25 μm . The system realizes non-thermal sensitization in the working temperature range of $-60^\circ\text{C}\sim+60^\circ\text{C}$. The designed system not only has a simple structure, meets the requirements of various technical indicators, but also has high realizability, which is of great significance to the further development of the airborne dual-band infrared imaging optical system.

Key words: Harmonic diffraction; Free-form surface; Off-axis three reflections; Dual-band; Macro language

OCIS Codes: 220.1250; 190.2620; 110.3080; 260.3090

第一作者: 李杰(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为谐衍射与自由曲面光学设计。Email: 1025198687@qq.com

通讯作者: 吴晗平(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电系统总体技术及设计。Email: wuhanping601@sina.com

收稿日期: 2021-05-21; 录用日期: 2021-09-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

常用的机载红外成像探测器的工作范围大多在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段或 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段,随着探测环境的复杂化以及伪装技术的不断发展,单一的工作波段已不能满足高端军用产品的需要^[1],因此研究多波段工作的红外成像系统是非常有必要的。与传统光学元件相比,谐衍射光学元件可将不同谐波长汇聚至同一焦点处^[2],该特性不仅能有效解决一般红外成像系统的宽波段离焦问题,实现多波段成像,且谐衍射元件与折射元件组成的混合结构具有较好的消温差特性,可进一步提高光学系统的成像质量。2011年,刘环宇等使用谐衍射元件设计了一款工作波段 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 和 $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$, F 数 2, 视场角 10° 的红外双波段光学系统^[3]。2013年,张建忠等使用谐衍射元件设计出一款工作波段 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 焦距 $203.5\ \text{mm}$, F 数 2.5, 全视场角 5° , 后工作距离 $245\ \text{mm}$ 的红外双波段投影光学系统^[4]。2020年,李升辉等使用谐衍射元件设计出一款工作波段 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 焦距 $45\ \text{mm}$, F 数 2 的红外双波段共口径光学系统^[5]。杨曼曼等使用双层谐衍射元件设计出一款工作波段 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 工作温度 $-60^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$, 焦距 $100\ \text{mm}$, F 数 1.2, 全视场 10° 的红外双波段光学系统^[6]。从以上研究来看,谐衍射元件较多应用于短焦距小口径透射式系统,较少应用于机载的长焦距大口径系统。受系统总长以及材料的限制,长焦距大口径系统多采用反射式结构实现,在反射式结构的基础上使用谐衍射元件,可设计长焦距大口径且成像质量更佳的双波段红外成像光学系统。长焦距反射式系统的视场较小,为增大系统视场、简化系统结构并进一步提高系统成像质量,将自由曲面引入系统。与一般光学面型相比,光学自由曲面具有更强的像差校正能力,其非旋转对称性能为光学设计者提供更多的设计自由度,使设计更加灵活^[7-8],光学自由曲面的使用为研究结构更简单、紧凑,成像质量更佳的多波段红外成像系统提供了更多的可能性。本文提出一种基于谐衍射和自由曲面的机载双波段红外成像光学系统。

1 系统主要技术指标

系统主要技术指标如表 1 所示。

表 1 系统主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of the system

Technical index	Index requirements
Focal length	$1\ 200\pm 5\ \text{mm}$
Effective caliber	$300\pm 5\ \text{mm}$
Working band	Medium wave/long wave
Half field of view	$\geq 2^\circ$
Root Mean Square (RMS) of the radius of the diffuse spot	$\leq 25\ \mu\text{m}$
Modulation Transfer Function (MTF)	Medium/long wave bands are both greater than 0.4(10 lp/mm)
Operating temperature	$-60^\circ\text{C}\sim +60^\circ\text{C}$
Total length of the system	$\leq 750\ \text{mm}$

2 自由曲面与谐衍射元件设计理论基础

1) 自由曲面

自由曲面包括多项式自由曲面、径向基函数自由曲面以及非均匀有理 B 样条 (Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS) 自由曲面等。在成像领域,多项式自由曲面使用较多,主要有 Zernike 多项式自由曲面和 XY 多项式自由曲面,二者均被主流光学设计软件收录,设计难度相对较低。其中,XY 多项式自由曲面具有旋转对称性,设计时可通过挑选符合要求的项,设计关于 YZ 平面对称的自由曲面或关于 XZ 平面对称的自由曲面^[9]。Zernike 多项式自由曲面在单位圆域内正交,多项式系数与赛德尔像差一一对应,添加或删除多项式时,不会影响其余像差,设计过程中可对成像质量影响较大的像差进行针对性校正,降低自由曲面光学系统设计难度^[10]。本文提出的机载红外成像系统需在长焦距大口径的基础上实现双波段成像,设计过程中需要判断对系统像质影响最大的像差,并提出针对的解决方案,选择单位圆域正交的 Zernike 多项式自由曲面更容易满足技术指标要求。

Zernike 多项式自由曲面的数学表达,如式(1)所示。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + \sum_{j=1}^N A_j p_j \quad (1)$$

式(1)分为前后两部分,前一部分表示 Conic 曲面,其中 z 为空间坐标 z 方向的矢高, c 为曲面顶点处的曲率, h 为光轴方向的半径高度, k 为二次曲面系数^[11-12];后一部分为由多项式描述的曲面,其中, N 为多项式用来描述自由曲面的项数, A_j 为对应各项的系数, p_j 为 Zernike 多项式

Zernike 多项式在极坐标系下表示为^[13]

$$P_j(\rho, \theta) = Z_n^l = R_n^l(\rho) e^{i\theta} \quad (2)$$

式中, l 与 n 奇偶性相同, $l = n - 2m$, ρ 为径向坐标, θ 为方位坐标。

主流设计软件 Zemax 中完整系统地收录了 Zernike 多项式,依靠 Zemax 软件可完成 Zernike 多项式的设计,需要注意的是在设计过程中,要不断观察系统的各项像差,判断对系统影响最大的因素,通过不断调整 Zernike 多项式参数,控制参数变化范围,完成系统的优化。

2) 谐衍射元件

谐衍射元件相邻环带间的光程差是设计波长 λ_0 的整数 p 倍 ($p \geq 2$, p 为相位深度因子),在空气中元件的最大厚度为 $p\lambda_0/(n-1)$ 。谐衍射元件的关键参数主要包括:设计波长 λ_0 、相位深度因子 p 以及衍射级次 m 。若使用波长为 λ ,则该波长的光通过谐衍射元件后的焦距为^[14-15]

$$f'_\lambda = \frac{\lambda_0}{\lambda} f'_0 \quad (3)$$

谐衍射元件环带间光程差为 $p\lambda_0$,称之为谐振波长,相当于设计波长为 $p\lambda_0$,焦距为 f'_0 的普通衍射透镜。若对波长的 m 级次成像,其焦距为

$$f'_{m,\lambda} = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f'_0 \quad (4)$$

要求 $f'_{m,\lambda}$ 与设计焦距 f'_0 重合,即应满足条件

$$\frac{p\lambda_0}{m\lambda} = 1 \quad (5)$$

由此可得

$$\lambda = \frac{p\lambda_0}{m} \quad (6)$$

谐衍射元件谐振波长与衍射级次的确定:该机载红外成像光学系统工作波段为中波和长波,红外中长波的大气窗口分别为 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 。由式(6)可知,设计波段位于红外长波范围,其谐振波长可位于红外中波,反之则不符合要求。不同设计波长产生的谐振波长如表 2 所示。

表 2 不同设计波长的谐振波长
Table 2 Resonant wavelengths of different design wavelengths

Design wavelength/ μm		8					10					12							
$p=2$	Resonance order	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7
	Resonance wavelength/ μm	8	5.3	4	3.2	2.7	2.2	10	6.7	5	4	3.3	2.9	12	8	6	5	4	3.4
$p=3$	Resonance order	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7
	Resonance wavelength/ μm	12	8	6	4.8	4	3.4	15	10	7.5	6	5	4.2	18	12	9	7.2	6	5.1

由表 2 可知:

1) $p=2$ 时,设计波长 $8 \mu\text{m}$ 的谐振波长只有一个位于红外长波范围,且位于红外长波大气窗口 ($8\sim 12 \mu\text{m}$) 边缘,像差较大且较难校正,不满足双波段要求;设计波长 $10 \mu\text{m}$ 的谐振波长位于红外中波的是 $3.3 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, 均位于红外中波大气窗口 ($3\sim 5 \mu\text{m}$) 且 $4 \mu\text{m}$ 为红外中波大气窗口中心波长,像差校正容易,位于红外长波的是 $10 \mu\text{m}$, 位于红外长波大气窗口中心,像差校正较容易,满足双波段要求;设计波长 $12 \mu\text{m}$ 的谐振波长位于红外长波大气窗口的是 $12 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$, 位于大气窗口边缘位置,不满足双波段要求。

2) $p=3$ 时,设计波长 $8\ \mu\text{m}$ 的谐振波长位于红外长波大气窗口的是 $12\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$,位于大气窗口边缘位置,不满足双波段要求;设计波长 $10\ \mu\text{m}$ 的谐振波长与 $p=2$ 的情况较为接近,但位于红外中波的谐振波长需要更高的谐振级次,而谐振衍射元件加工的台阶数与谐振级次的平方成正比,台阶数越多加工难度和成本越大;设计波长 $12\ \mu\text{m}$ 的谐振波长位于红外大气窗口的仅有 $12\ \mu\text{m}$ 且位于窗口边缘,不符合双波段要求。

综上,选择 $p=2$,设计波长 $10\ \mu\text{m}$ 作为谐振衍射元件参数,考虑到谐振级次和衍射效率的影响,该双波段系统以 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 作为主设计波段, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 作为从设计波段。

3 光学系统初始结构选型

常用的机载红外成像系统型式包括:传统反射式、折反射式以及离轴反射式^[16-17]。选取系统焦距 $f=1\ 200\ \text{mm}$ 、有效口径 $300\ \text{mm}$ 、视场 $\pm 2^\circ$ 、波长 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 四个参数作为技术指标,初步添加自由曲面进行量化实例分析。传统反射式选择 RC 光学系统,其设计实例如图 1 所示,折反射式选择施密特-卡塞格林光学系统,其设计实例如图 2 所示,离轴三反光学系统设计实例如图 3 所示。

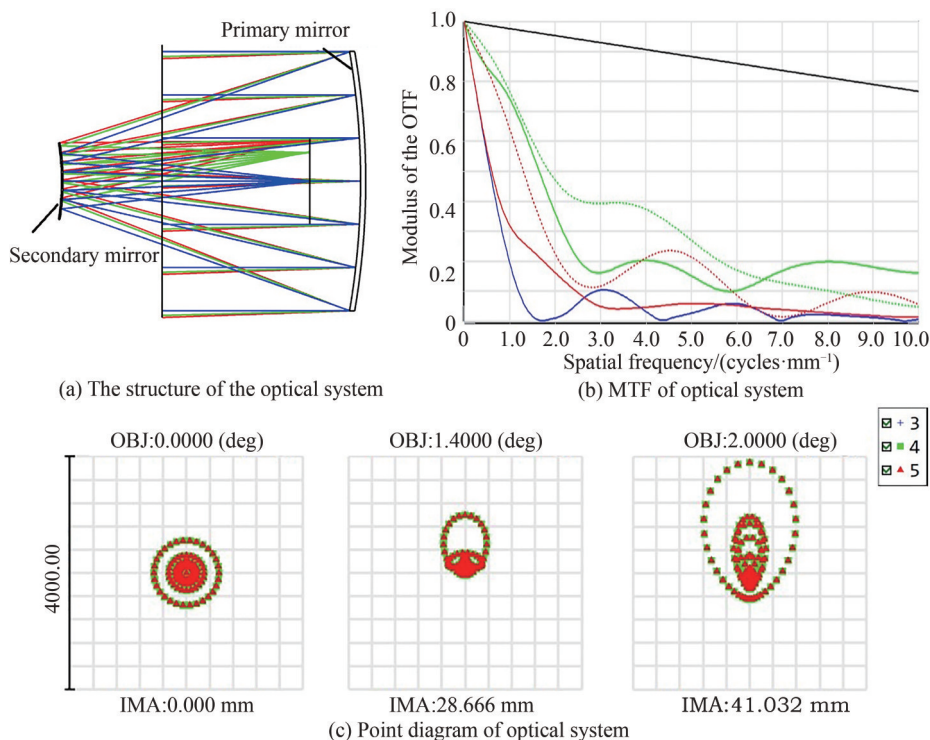
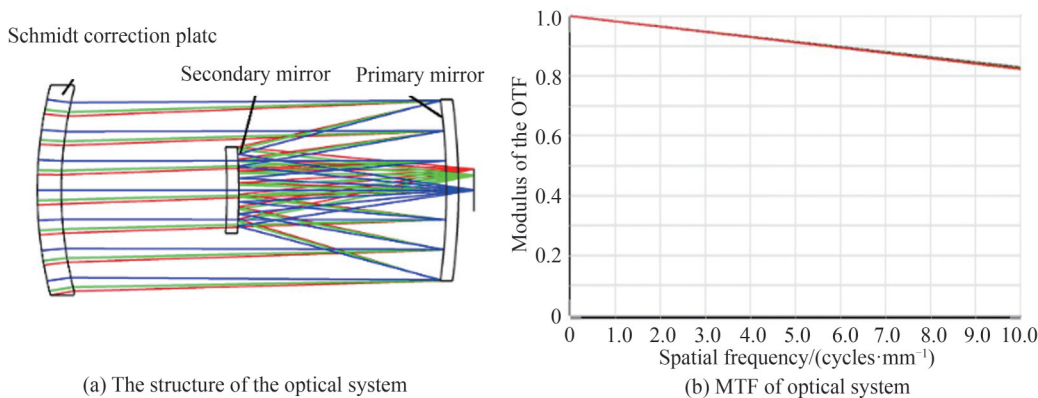


图 1 RC 光学系统设计实例
Fig. 1 Design example of RC optical system



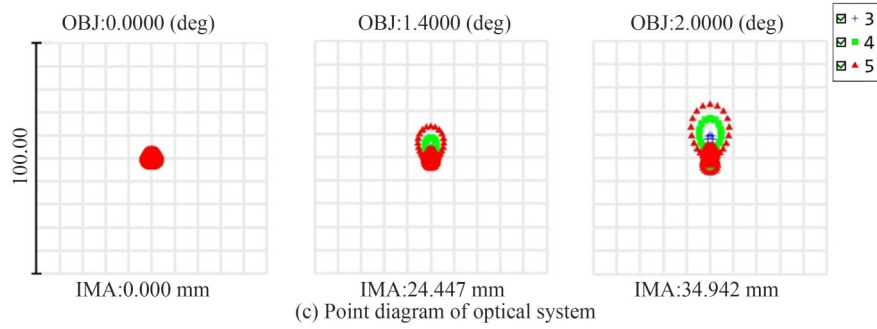


图2 施密特-卡塞格林光学系统设计实例
Fig. 2 Design example of Schmidt- Cassegrain optical system

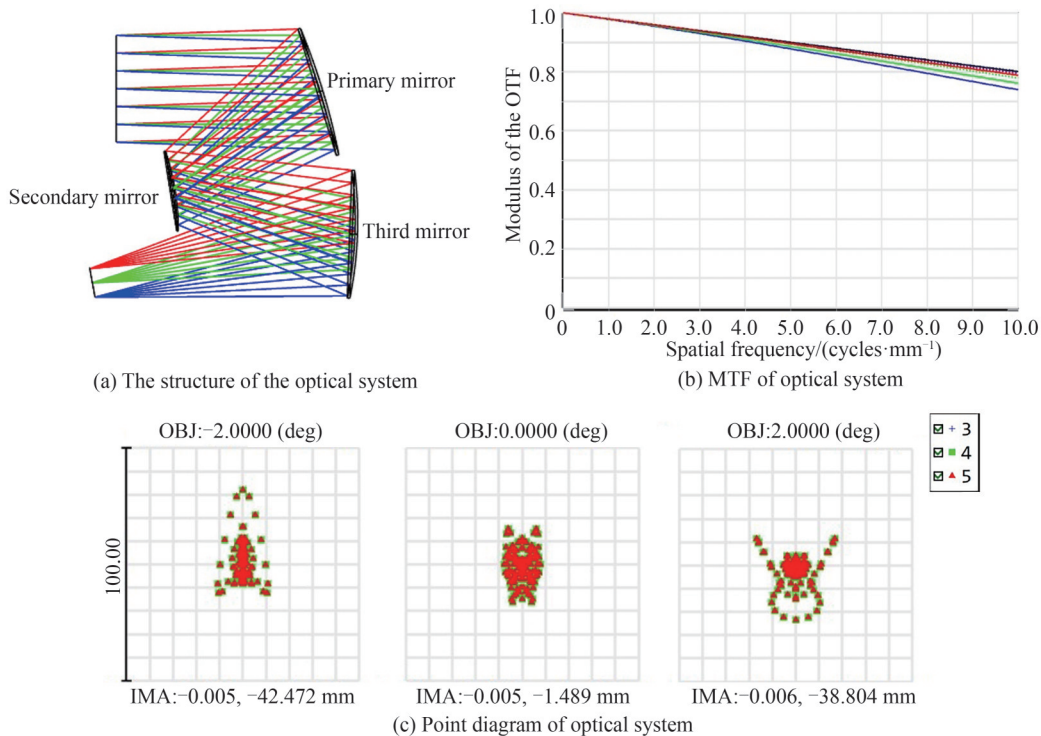


图3 离轴三反光学系统设计实例
Fig. 3 Design example of off-axis three-mirror optical system

从图1~3的设计结果来看:1)在该技术指标下,RC光学系统成像质量最差,原因在于在长焦距大口径条件下,为保证光学系统成像质量,RC光学系统视场难以做到很大(通常在 1°),若要提高系统大视场的成像质量则需牺牲系统遮拦比;2)施密特-卡塞格林光学系统与离轴三反光学系统成像质量均良好,接近衍射极限,但是施密特-卡塞格林系统仍存在两个问题,一是系统仍存在次镜遮拦,进入系统的有效能量降低,二是大口径的施密特校正板制备和加工难度较大;3)离轴三反系统结构简单,成像质量好,不存在中心遮拦,综合性能更符合要求。

在有限的技术指标内,离轴三反光学系统的设计已经取得了较为不错的结果,但是这一结果未将双波段以及工作温度纳入考虑范围。该初始结构受温度影响较大,在系统中引入具有消色差性能的折谐衍射混合元件,既能实现系统的无热化,又能克服宽波段条件下普通折衍混合元件引入的色差和系统离焦,进一步提高成像质量,实现机载大口径长焦距双波段红外成像。

4 光学系统材料选择

光学系统的材料主要包括反射镜基底材料和折谐衍射透镜材料。反射镜基底材料需选择热膨胀系数

小、材料导热大、比弹性模量高、机械强度高、无毒安全的材料,折谐衍射透镜应选择在红外中波具有较好的透射透过率、热稳定性良好,导热率大,热膨胀系数小、努氏硬度较小、断裂强度大的材料。

4.1 反射镜基底材料选择

可供选择的反射镜基底材料性能见表3。

表3 可供选择的反射镜基底材料的性能
Table 3 Performance of optional mirror substrate materials

Material	Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Elastic modulus/ GPa	Specific modulus of elasticity/ ($\times 10^9 \text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{g}^{-1}$)	Thermal conductivity/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal expansion coefficient/ ($\times 10^{16} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal deformation coefficient/ ($\times 10^8 \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$)
SiC	3.05	400	12.6	185	2.5	1.4
Be	1.85	280	15.1	160	11.4	7.2
Low-expansion glass-ceramic	2.5	92	3.7	1.46	0.05	3
Low expansion fused silica	2.2	67	3.1	1.3	0.03	2.3

低膨胀熔石英和低膨胀微晶玻璃具有极低的热膨胀系数,目前国内3 m直径的低膨胀熔石英反射镜相关技术研究已相对成熟,可达到工程应用要求,低膨胀微晶玻璃实现600 mm口径微晶玻璃小批量生产,性能达到国际领先水平,打破国外垄断,两种材料在航天相机中已有较多应用,但对于性能和口径与航天相机具有较大差距的机载红外相机,两种材料过于昂贵,且其机械性能较差,刚度低,弹性模量较低,发射成本极高,因而在有其他选择的情况下不适宜作为反射镜的基底材料。Be在所有光学材料中密度最低,热膨胀系数也较低,同时也和大多数光学设备上的镀层材料的热膨胀系数接近,但是其具有毒性,加工困难,不适宜选用。SiC热膨胀系数低、弹性模量高、热变形系数低、导热率高、轻量化处理工艺成熟、制备工艺成熟,综合性能更适合作为反射镜的基底材料。

4.2 折谐衍射透镜材料选择

可供选择的折谐衍射透镜材料性能见表4。

表4 可供选择的折谐衍射透镜材料性能分析
Table 4 Performance analysis of optional refractive/refractive diffractive lens materials

Material	Transmission band/ μm	Theoretical transmittance/%	Refractive index n	Elastic modulus/ GPa	Thermal conductivity/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal expansion coefficient/ ($\times 10^{16} \cdot \text{K}^{-1}$)	Knoop hardness/ ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$)	Breaking strength/ MPa
Si	1.1~9	53.9	3.426	130.91	596 (125 K) 163 (313 K)	-0.5 (75 K) 2.5 (293 K)	1 150	70~340
Ge	1.8~23	47.1	4.003 2	103	105.1 (400 K) 165.8 (125K) 59 (293 K) 43.95 (400 K)	4.6 (1400 K) 2.4 (100 K) 6.1 (298 K) 8.0 (1 200 K)	780	90~100
Standard ZnS	1-13	75	2.20	74.5	17 (296 K)	4.6 (173 K) 6.6 (273 K) 7.7 (473 K)	230~250	97.95
Standard ZnSe	0.5~20	71	2.40	70.3	18 (300 K)	5.6 (173 K) 7.1 (273 K) 8.3 (293 K) 0.9 (75 K)	105	52.55
GaAs	0.9~15	55.85	3.276	82.68	55 (300 K)	5.7 (300 K) 7.3 (1 000 K)	-	130
CaF ₂	0.13~12	94	1.43	75.79	8.4	18.7	158	37

在可供选择的材料中:Si在 $9\ \mu\text{m}$ 处有极强的吸收率,在 $9\sim 11\ \mu\text{m}$ 波段,透过率下降,不符合双波段要求;ZnS和ZnSe是重要的长波红外材料,但是其弹性模量较低、材料刚度不足,不能适应复杂的机载平台环境,其在 $-60^\circ\text{C}\sim +60^\circ\text{C}$ 的温度范围内导热率低,材料内部存在明显温度梯度,较高的热膨胀系数材料会因温度变化产生较大的形变,不符合系统要求;GaAs大部分指标接近Ge,但该材料弹性模量和导热率较低;CaF材料各项性能较为普通,不适合用作复杂的机载红外成像光学系统。综合分析来看,Ge虽然理论透过率较低,但是弹性模量高、导热率高、热膨胀系数低、断裂强度高,其综合性能更加符合该项目要求。综合考虑透镜材料选择Ge较为理想。

5 光学系统优化和像质评价

在初始结构设计的基础上使用折衍射透镜组,通过宏语言对系统进一步优化,以实现光学系统的无热化和双波段成像并完成对系统的像质评价。

5.1 宏语言优化控制

离轴三反光学系统在优化过程中,需要使用Zemax软件的宏语言功能,自编离轴控制优化函数,对结构加以限制。优化过程中需要限制的结构有两处,一是通过孔径光阑下边缘的光线与次反射镜上边缘之间的距离,二是通过孔径光阑上边缘经三反射镜反射后的光线与次反射镜下边缘之间的距离。构建的结构控制数学模型如图4所示。

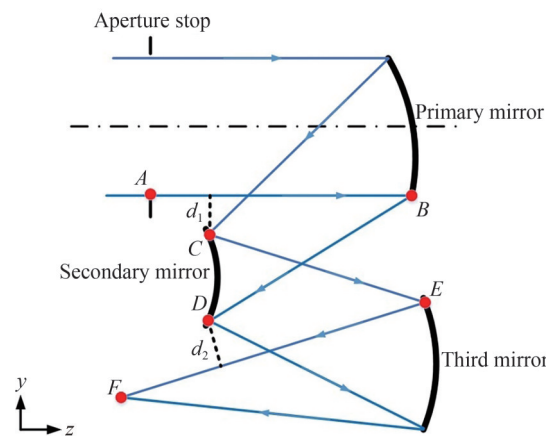


图4 结构控制数学模型

Fig. 4 Mathematical model of structure control

图4中,直线AB是通过孔径光阑下边缘的光线,点A和点B坐标分别为 (y_A, z_A) 和 (y_B, z_B) ;直线EF是通过孔径光阑上边缘经三反射镜反射后的光线,点E和点F坐标分别为 (y_E, z_E) 和 (y_F, z_F) ;点C为次反射镜上边缘点,坐标为 (y_C, z_C) ;点D为次反射镜下边缘点,坐标为 (y_D, z_D) ; d_1 为点C到直线AB的距离, d_2 为点D到直线EF的距离。在优化过程中,将以上数学模型使用Zemax的宏语言进行编程,依据系统优化状态控制 d_1 和 d_2 大于某一值。

优化过程中,各点的坐标可以通过光线追迹得到,在Zemax宏语言命令中,光线追迹的函数名为Raytrace,在使用Raytrace进行光线追迹时,需要指定光线的视场和孔径光阑位置,一般的格式为Raytrace H_x, H_y, P_x, P_y, 其中, (H_x, H_y) 为归一化视场坐标, (P_x, P_y) 为归一化孔径光阑坐标,编写过程中所关注的是在YOZ平面内的点线位置,因此有X下标的坐标都设定为零,有Y下标的坐标根据实际情况进行设定。除此以外,配合Raytrace使用的函数还有RAGY和RAGZ,分别是求取光线与表面的交点的Y坐标与Z坐标,使用方法是RAGY(n)、RAGZ(n), n表示该表面在Zemax中的编号。依据结构控制数学模型和编写的宏语言程序如下所示。

```
! surface definition:   surface   element
!                       3         mirror 1
```

```
!           6      mirror 2 & aperture stop
!           9      mirror 3
!          11      image
! -----clearance between 2nd mirror and rays between surface 2 and 3
RAYTRACE 0,1,0,-1
Z1=RAGZ(1)
Y1=RAGY(1)
Z2=RAGZ(3)
Y2=RAGY(3)
RAYTRACE 0,1,0,1
Z3=RAGZ(6)
Y3=RAGY(6)
A1=Y2-Y1
A2=Z2-Z1
M1=A1/A2
B1=Y1-M1*Z1
Y32=M1*Z3+B1
X0=Y3-Y32
PRINT "X0=",X0
OPTRETURN 1= X0
! -----clearance between 2nd mirror and rays between surface 7 and 8
RAYTRACE 0,1,0,1
Z4=RAGZ(9)
Y4=RAGY(9)
Z5=RAGZ(11)
Y5=RAGY(11)
RAYTRACE 0,-1,0,-1
Z6=RAGZ(6)
Y6=RAGY(6)
A3=Y5-Y4
A4=Z5-Z4
M2=A3/A4
B2=Y4-M2*Z4
Y62=M2*Z6+B2
X1=Y6-Y62
PRINT "X1=",X1
OPTRETURN 2= X1
! -----clearance between 2nd mirror and rays between surface 7 and 8
RAYTRACE 0,1,0,-1
Z1=RAGZ(1)
Y1=RAGY(1)
Z2=RAGZ(3)
Y2=RAGY(3)
RAYTRACE 0,1,0,1
```



```

Z9=RAGZ(9)
Y9=RAGY(9)
A1=Y2-Y1
A2=Z2-Z1
M1=A1/A2
B1=Y1-M1*Z1
Y92=M1*Z9+B1
X2=Y9-Y92
PRINT "X2=",X2
OPTRETURN 3= X2
    
```

5.2 优化结果与像质评价

在优化评价函数中添加ZPLM操作数调用该宏语言程序,在三反射镜后添加三块平行平板,在最后一面上设置谐衍射面(相位深度因子 $p=2$,设计波长 $10\ \mu\text{m}$)添加多重结构设置不同衍射级次,以及双波段($3\sim 5\ \mu\text{m}$, $8\sim 12\ \mu\text{m}$)条件,将自由曲面系数、谐衍射系数、反射镜倾斜角、平行平板半径及厚度设置为变量,对系统进行优化,依据优化结果对优化操作数进行调整,反复优化,逐渐逼近,最终得到符合要求的设计结果。

最终优化后系统的结构如图5所示,双波段MTF如图6所示,双波段点列图如图7所示。

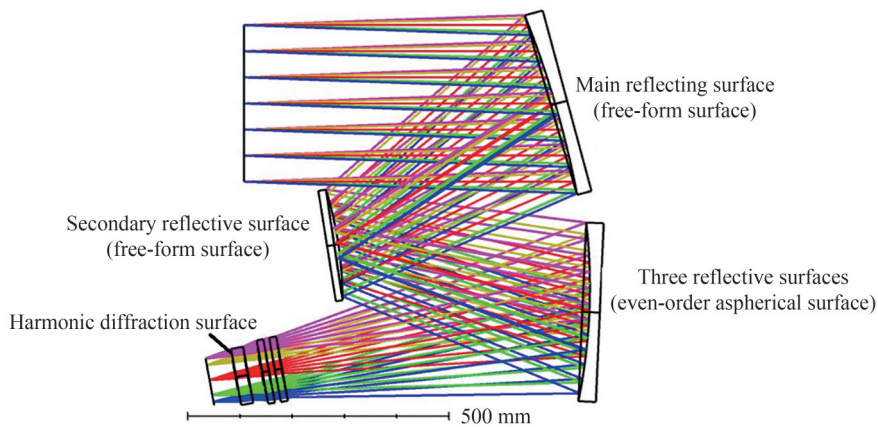


图5 优化后系统的结构

Fig. 5 The structure of the optimized system

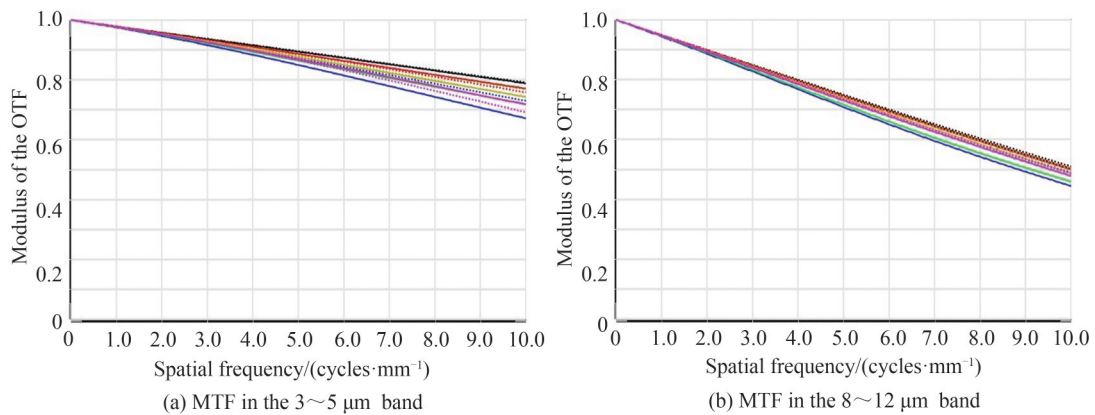


图6 优化后系统的MTF

Fig. 6 The MTF of the optimized system

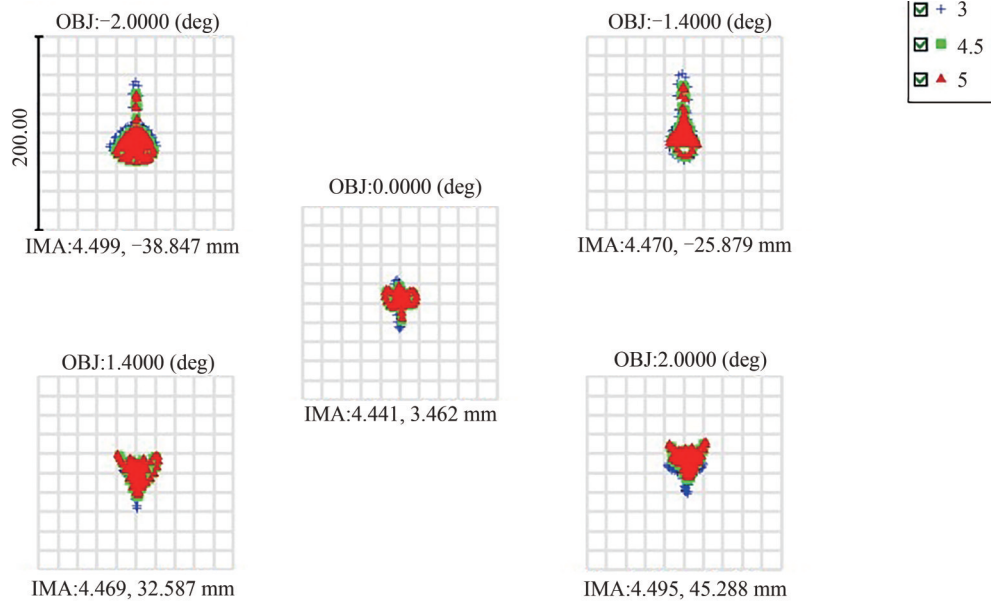
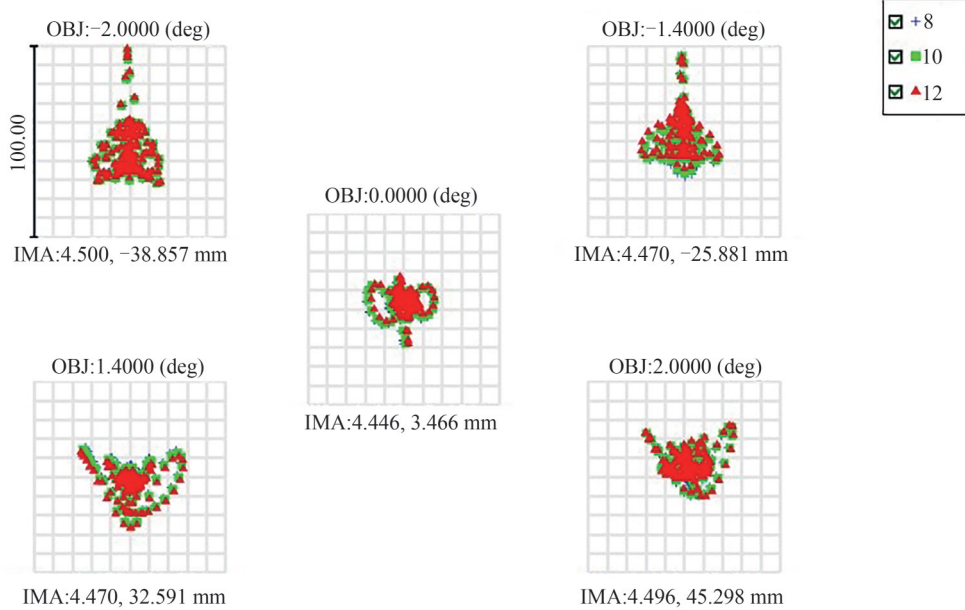
(a) Point diagram in the 3~5 μm band(b) Point diagram in the 8~12 μm band

图7 优化后系统的点列图

Fig. 7 Point diagram of the optimized system

由图6和图7可知:1) 3~5 μm 波段中, $\text{MTF} > 0.6 @ 10 \text{ lp/mm}$, 接近衍射极限, -2° 、 -1.4° 、 0° 、 1.4° 、 2° 五个视场弥散斑半径(RMS)分别为 18.335 μm 、14.272 μm 、9.171 μm 、11.999 μm 、16.807 μm , 均小于 25 μm , 系统的 MTF 以及弥散斑半径(RMS)均符合技术指标要求;2) 8~12 μm 波段中, $\text{MTF} > 0.45 @ 10 \text{ lp/mm}$, 接近衍射极限, -2° 、 -1.4° 、 0° 、 1.4° 、 2° 五个视场弥散斑半径(RMS)分别为 15.811 μm 、13.572 μm 、8.625 μm 、12.547 μm 、13.825 μm , 均小于 25 μm , 系统的 MTF 以及弥散斑半径(RMS)均符合技术指标要求。

优化后的光学系统, 圈内能量如图8所示, 场曲和畸变如图9所示, 赛德尔像差图如图10所示。

由图8-9可知, 该系统在 3~5 μm 和 8~12 μm 双波段, 圈内能量均接近衍射极限, 场曲均小于 0.5 mm, 畸变均小于 1%, 由图10可知, 该系统在两个波段的像差都得到了较好的校正, 在两个波段均获得较好的成像质量。

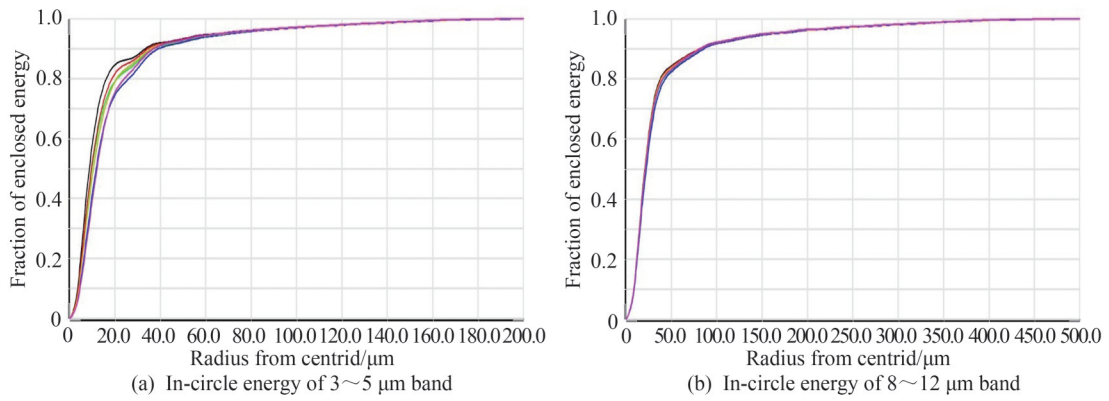


图8 优化后系统的圈内能量
Fig. 8 The in-circle energy of the optimized system

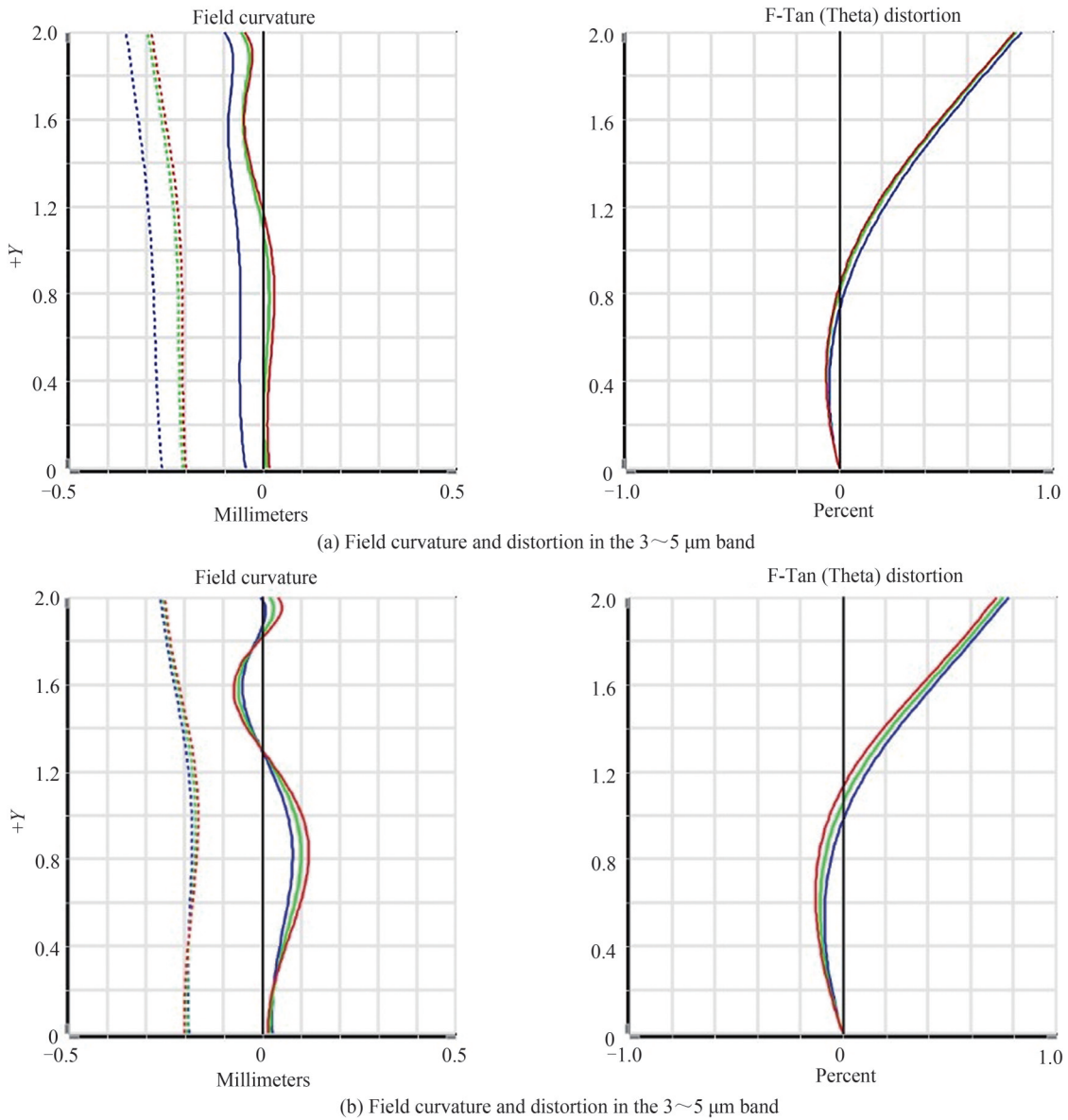
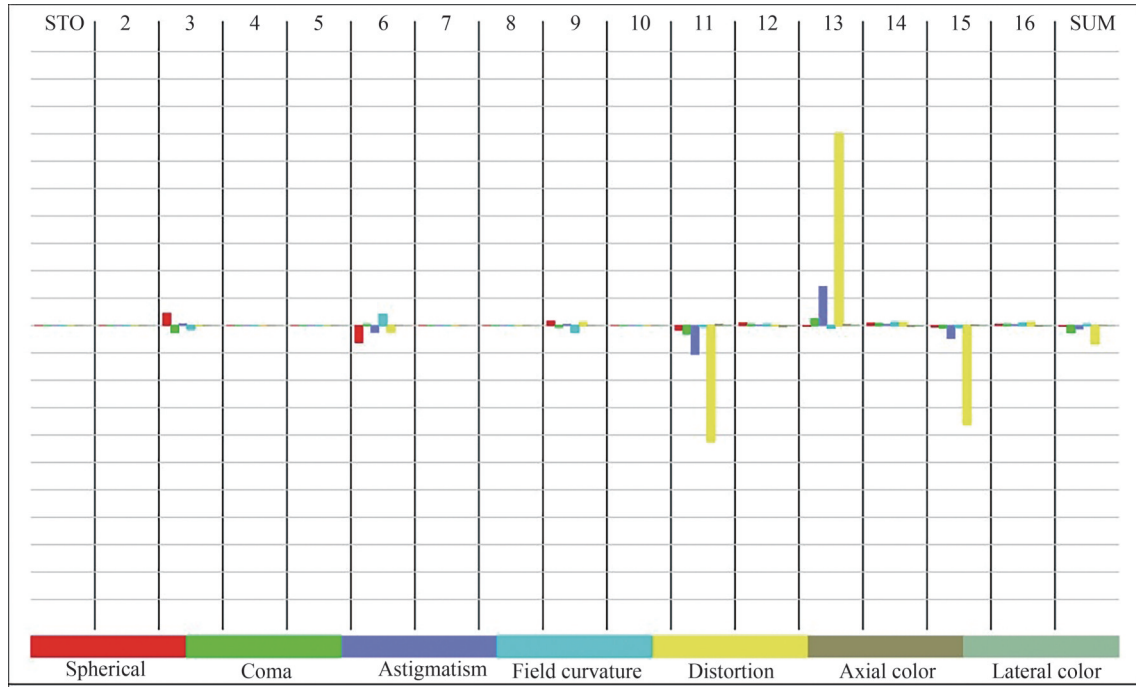
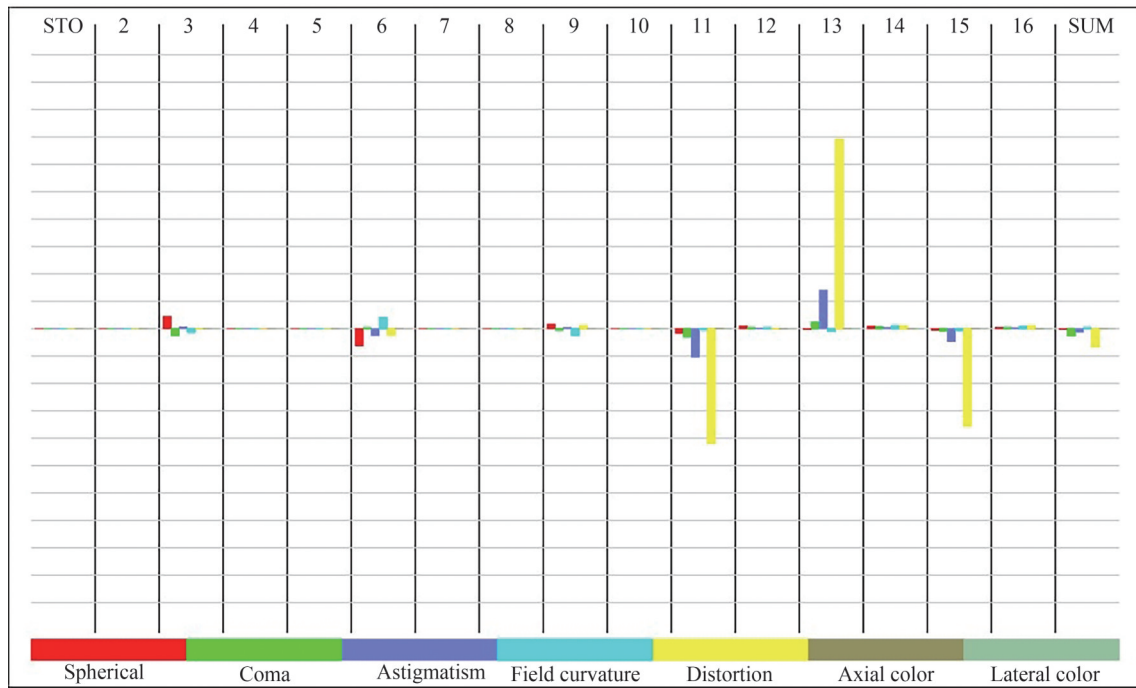


图9 优化后系统的场曲和畸变
Fig. 9 Field curvature and distortion of the optimized system



(a) Seidel aberration diagram in 3~5 μm band



(b) Seidel aberration diagram in 8~12 μm band

图 10 优化后系统的赛德尔像差图

Fig. 10 Seidel aberration diagram of the optimized system

5.3 光学系统热分析

该系统要求在 $-60^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内正常工作,在该温度范围内用ZEMAX分别对 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段采样分析,分别取 -60°C 、 -20°C 、 20°C 、 60°C ,得到双波段分别在不同温度下的MTF。 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 不同温度MTF如图11所示, $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 不同温度MTF如图12所示,由图12和图13可知,双波段在不同温度条件下的MTF基本不发生变化,说明该系统在不同温度下均成像质量良好,符合系统无热化的技术要求。

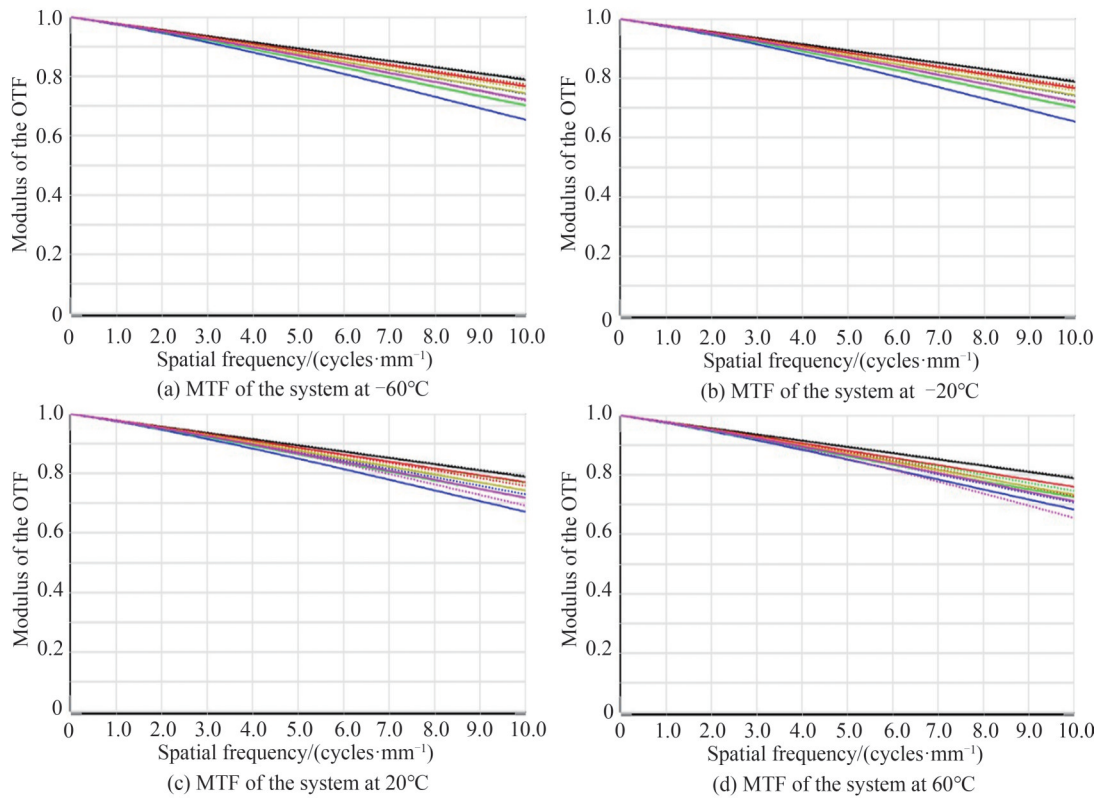


图 11 3~5 μm 波段不同温度下系统的 MTF
Fig. 11 The MTF of the system at different temperatures in the 3~5 μm band

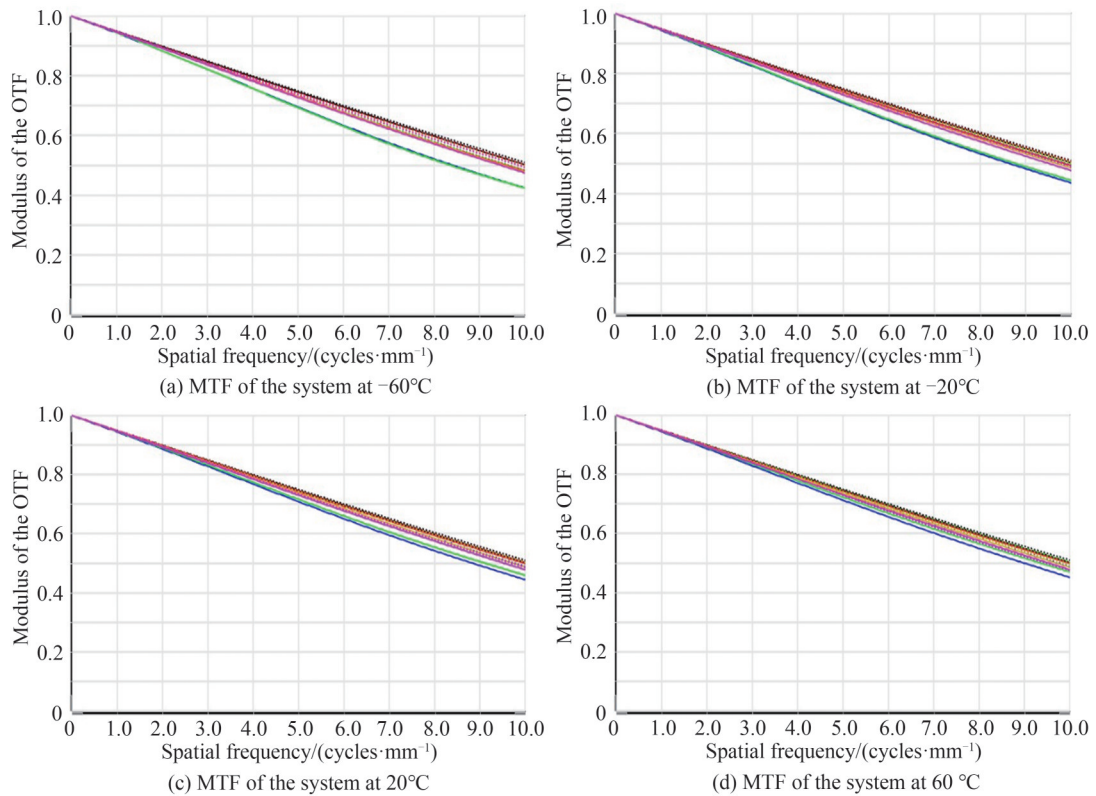


图 12 8~12 μm 波段不同温度下系统的 MTF
Fig. 12 The MTF of the system at different temperatures in the 8~12 μm band

6 公差分析

为便于加工与装配,提高系统的可实现性,需对设计结果进行公差分析。该系统在光学方面的误差主要包括:反射镜曲率半径误差、反射镜间距误差以及 x 轴倾斜误差;透镜组曲率半径误差、透镜厚度误差,这些偏差在元件加工完成后不可更改。经过分析,该系统主镜、次镜以及三镜的 x 轴倾斜误差和曲率半径误差约束较为严格,其余误差约束较为宽松。经多次分析-调整-分析-调整后,最终公差分配如表5所示。

表5 最终公差分配
Table 5 Final tolerance distribution

Operand	Surface1	Surface2	Value	Minimum	Maximum
COMP	16	—	-50	-50	50
TWAV	—	—	—	4(10)	—
TRAD	3	—	-1999.900	-0.02	0.02
TRAD	6	—	-666.652	-0.02	0.02
TRAD	9	—	-999.950	-0.02	0.02
TRAD	11	—	2728.675	-0.2	0.2
TRAD	12	—	2406.081	-0.2	0.2
TRAD	13	—	1054.373	-0.2	0.2
TRAD	14	—	916.156	-0.2	0.2
TRAD	15	—	1439.644	-0.2	0.2
TRAD	16	—	1112.167	-0.2	0.2
TETX	3	3	—	-0.018	0.018
TETX	6	6	—	-0.018	0.018
TETX	9	9	—	-0.018	0.018
TTHI	1	2	600.000	-0.2	0.2
TTHI	4	5	-499.975	-0.2	0.2
TTHI	7	8	499.975	-0.2	0.2
TTHI	10	12	-600.000	-0.2	0.2
TTHI	11	12	-13.166	-0.2	0.2
TTHI	12	14	-11.801	-0.2	0.2
TTHI	13	14	-13.855	-0.2	0.2
TTHI	14	16	-27.165	-0.2	0.2
TTHI	15	16	-23.399	-0.2	0.2

公差分配表中,COMP为后焦补偿、TWAV为测试波长、TRAD为半径公差、TETX为 x 轴倾斜公差、TTHI为厚度公差。该系统为双波段红外成像光学系统,分别使用 $4\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 作为测试波长,公差分析结果如表6所示。

表6 公差分析结果
Table 6 Tolerance analysis results

Test wavelength/ μm	Nomimol/ μm	Best/ μm	The surface for the best results	Worst/ μm	The surface of the worst results	90%>/ μm	80%>/ μm	50%>/ μm	20%>/ μm	10%>/ μm
4	9.932	9.966	11	28.964	19	24.032	22.089	15.796	11.907	11.544
10	9.076	9.839	3	31.187	14	22.770	19.863	14.095	11.403	11.012

公差分析结果显示,在该公差条件下,测试波长为 $4\ \mu\text{m}$ 时,弥散斑半径90%概率小于 $24.032\ \mu\text{m}$;测试波长为 $10\ \mu\text{m}$ 时,弥散斑半径90%概率小于 $22.770\ \mu\text{m}$,二者均小于 $25\ \mu\text{m}$,系统在双波段均符合术指标要求。

7 设计结果

系统设计结果与相应的技术指标要求比较如表7所示。由表7可知,该系统的主要参数满足技术指标要求。此外,该系统在给定公差条件下弥散斑直径90%概率小于 $25\ \mu\text{m}$,且其在 $-60^\circ\text{C}\sim+60^\circ\text{C}$ 温度范围内均成像良好,同时对于温度、振动和气压等环境具有良好的适应性,符合机载红外光学系统设计技术指标。

表7 设计结果与相应技术指标对照
Table 7 Comparison of design results and corresponding technical indicators

The main parameters	Technical index	Design result
System focal length/mm	$1\ 200\pm 5$	1 200
Effective caliber/mm	300 ± 5	300
Half field of view/ $^\circ$	$\geq\pm 2$	± 2
Working band/ μm	Medium wave/long wave	$3\sim 5\ \mu\text{m}/8\sim 12\ \mu\text{m}$
MTF@10 lp/mm	≥ 0.4	$\geq 0.6(3\sim 5\ \mu\text{m})$ $\geq 0.45(8\sim 12\ \mu\text{m})$
Diffuse spot radius(RMS)/ μm	≤ 25	$18.335(3\sim 5\ \mu\text{m})$ $15.811(8\sim 12\ \mu\text{m})$

8 结论

本文提出了一种基于谐衍射的机载双波段红外成像光学系统,在离轴三反的基础上使用谐衍射面与自由曲面,不仅扩大了机载红外成像光学系统的视场,解决了传统反射式结构的中心遮拦问题,而且实现了红外中波与长波同时成像,并且克服了宽温度变化范围的环境对系统的影响。较为合理的公差分析和机械结构设计使该系统的加工和装调具有较高可实现性,为该产品的成功研制奠定了理论基础。本文提出的基于谐衍射的机载双波段红外成像光学系统的设计思路与设计结果,对多波段机载红外成像光学系统的进一步研究和发展具有重要意义。

参考文献

- [1] WU Hanping. Optoelectronic systems design foundation [M]. Tsinghua University Press, 2021.
吴晗平. 光电系统设计基础 [M]. 清华大学出版社, 2021.
- [2] LIU Lin, HE Yiliang, ZHANG Xingde, et al. Design of infrared dual-band optical system based on harmonic diffraction characteristics [J]. Laser and Infrared, 2012, 42(1):85-88.
刘琳,贺谊亮,张兴德,等. 基于谐衍射特性的红外双波段光学系统设计[J]. 激光与红外, 2012, 42(1):85-88.
- [3] LIU Huanyu, ZHANG Liang, LIU Yu, et al. Optical design of a dual-band Infrared system based on harmonic diffractive [J]. Electro-optical and control, 2011, 18(5):50-53.
刘环宇,张良,刘玉,等. 红外双波段谐衍射光学系统设计[J]. 电光与控制, 2011, 18(5):50-53.
- [4] ZHANG Jianzhong, YANG Le, GUO Bang-hui, et al. Optical design of MWIR/LWIR scene projector with harmonic diffractive [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7):1758-1764.
张建忠,杨乐,郭帮辉,等. 基于谐衍射的红外中波/长波双波段视景仿真光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7):1758-1764.
- [5] LI Shenghui, LI Xin, LI Hongjing. Design of infrared dual-band common-aperture athermalized optical system based on harmonic diffraction [J]. Infrared Technology, 2020, 42(1):19-24.
李升辉,李欣,李虹静. 基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统设计[J]. 红外技术, 2020, 42(1):19-24.
- [6] YANG Manman, FENG Bin, SHI Yuanyuan, et al. Design of double-layer harmonic diffraction infrared athermal optical system [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2020, 40(2):153-159+193.
杨曼曼,冯斌,史元元,等. 双层谐衍射红外消热差光学系统设计[J]. 西安工业大学学报, 2020, 40(2):153-159+193.
- [7] LI Zhantao, FENG Yutao, HAN Bin, et al. Design of optical system for multi-band all-sky airglow imager [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5):0522003
李战涛,冯玉涛,韩斌,等. 多波段全天空空气辉成像仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2019, 48(5):0522003.
- [8] ZHANG Yangliu, SU Zhoupin, PAN Hongxiang, et al. Optical design and tolerance analysis of freeform automotive head-up display [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9):0922002.
张杨柳,苏宙平,潘红响,陈兴涛,张文裕. 自由曲面车载抬头显示器的光学设计及公差分析[J]. 光子学报, 2020, 49(9):0922002.

- [9] LIU Jun. Application of freeform surface in imaging optical Systems[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Science(Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Science), 2016
刘军. 自由曲面在成像光学系统中的研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- [10] PLUMMER W T, FISCHER R E. Free-form optical components in some early commercial products[J]. International Society for Optics and Photonics, 2005, 5865:586509.
- [11] KIM H S. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization [J]. Optical Engineering, 2002, 41(7):1661-1667.
- [12] VIZGAITIS J N, HASTINGS A. Dual band infrared picture-in-picture systems[J]. Optical Engineering, 2013, 52(6): 061306.
- [13] XIONG Zhongxiu. Design of the airborne freeform-surface conformal optical system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017
熊钟秀. 机载自由曲面共形光学系统设计[D]. 天津:天津大学, 2017.
- [14] SUN Qiang, YU Bin, WANG Zhaofeng, et al. Study on hyperspectral detection system with the harmonic diffractive element in infrared dual-band[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(3):756-761.
孙强, 于斌, 王肇圻, 等. 谐衍射双波段红外超光谱探测系统研究[J]. 物理学报, 2004, 53(3):756-761.
- [15] LOU Di. Harmonic diffraction optics design theory and application research[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
娄迪. 谐衍射光学设计理论和应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [16] LIU Qunlong WU Hanping ZHANG Yan, et al. Structural features and technical analysis of new infrared optical system [J]. Electro-optic Technology Application, 2010, (2):29-34
刘群龙, 吴晗平, 张焱, 等. 新型红外光学系统的结构特点与技术分析[J]. 光电技术应用, 2010, (2):29-34.
- [17] LI Jie, LUO Xiao, WU Hanping. Design of airborne infrared optical system based on refraction/diffraction hybrid [J]. Laser and Infrared, 2020, 50(2):215-223.
李杰, 罗箫, 吴晗平. 基于折/衍混合的机载红外光学系统设计[J]. 激光与红外, 2020, 50(2):215-223.