

双波段共口径消热差枪瞄物镜光学系统设计

白鑫如 蒋世磊 弓旭航 蒋大成 冯江

Design of optical system for dual-band co-aperture heatless gun objective lens

BAI Xinru, JIANG Shilei, GONG Xuhang, JIANG Dacheng, FENG Jiang

引用本文:

白鑫如, 蒋世磊, 弓旭航, 等. 双波段共口径消热差枪瞄物镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 32–40. DOI: 10.5768/JAO202546.0101001

BAI Xinru, JIANG Shilei, GONG Xuhang, et al. Design of optical system for dual-band co-aperture heatless gun objective lens[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 32–40. DOI: 10.5768/JAO202546.0101001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0101001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可见/中波双波段共口径光学系统设计

Optical design of VIS/MWIR dual-band common-aperture system

应用光学. 2020, 41(3): 435–440 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301001>

大孔径长焦距摄远物镜光学系统设计

Optical system design of large aperture and long focal length telephoto objective lens

应用光学. 2020, 41(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201007>

光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>

小口径大视场工业内窥镜光学系统设计

Optical system design of small-caliber and large-field industrial endoscope

应用光学. 2023, 44(1): 17–23 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101003>

双波段CCTV鱼眼镜头光学系统设计

Optical system design of dual band CCTV fish-eye lens

应用光学. 2021, 42(6): 1006–1010 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601009>

基于长波红外探测器的消热差轻量化光学系统设计

Design of athermal and lightweight optical system based on long-wave infrared detector

应用光学. 2021, 42(3): 429–435 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301009>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0032-09

引用格式: 白鑫如, 蒋世磊, 弓旭航, 等. 双波段共口径消热差枪瞄物镜光学系统设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 32-40.

BAI Xinru, JIANG Shilei, GONG Xuhang, et al. Design of optical system for dual-band co-aperture heatless gun objective lens[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 32-40.



在线阅读

双波段共口径消热差枪瞄物镜光学系统设计

白鑫如¹, 蒋世磊¹, 弓旭航¹, 蒋大成², 冯江³

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021; 3. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 为满足光电瞄准具昼夜合一、轻量化、稳定性优良的需求, 本文设计了一款可见光和近红外双波段、共口径, 且使用 CMOS 相机接收成像光束的共口径数码瞄准物镜。物镜光学系统设计波段为 $0.4\ \mu\text{m}\sim 0.65\ \mu\text{m}$ 和 $0.7\ \mu\text{m}\sim 0.85\ \mu\text{m}$, 焦距为 50 mm, F 数 1.4, 系统总长 90 mm, 系统在 $-40\ ^\circ\text{C}\sim +50\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内无热差影响, 各波段畸变均小于 0.04%, 可见光波段在 100 lp/mm 处 $\text{MTF}>0.55$, 近红外波段在 100 lp/mm 处 $\text{MTF}>0.3$ 。通过优化系统敏感面引起的像差, 合理分配光焦度, 降低了系统加工公差灵敏度和系统装配难度及成本。设计结果表明: 系统均采用球面镜, 结构简单、体积小、成本低、公差良好, 能够实现在全工作温度范围内成像质量良好, 具有一定的工程应用前景。

关键词: 共口径枪瞄物镜; 消热差; 公差灵敏度; 调制传递函数; 光学系统

中图分类号: TN214

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0101001

Design of optical system for dual-band co-aperture heatless gun objective lens

BAI Xinru¹, JIANG Shilei¹, GONG Xuhang¹, JIANG Dacheng², FENG Jiang³

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 3. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: To meet the requirements of integrating day and night in electro-optical sights, lightweight design, and excellent stability, a dual-band co-aperture digital aiming objective lens that was visible and near-infrared was designed, and used a CMOS camera to receive the imaging beam. The optical system was designed for the wavelength ranges of $0.4\ \mu\text{m}\sim 0.65\ \mu\text{m}$ and $0.7\ \mu\text{m}\sim 0.85\ \mu\text{m}$, with a focal length of 50 mm, an F -number of 1.4, and a total length of 90 mm. The system shows no thermal difference effects in the temperature range of $-40\ ^\circ\text{C}$ to $50\ ^\circ\text{C}$, with distortion in each band less than 0.04%. In the visible light band, the modulation transfer function (MTF) is greater than 0.55 at 100 lp/mm, and in the near-infrared band, the MTF is greater than 0.3 at 100 lp/mm. By optimizing the aberrations caused by the sensitive surface of the system and properly distributing the optical power, the sensitivity of the system to processing tolerances, assembly difficulty, and cost were reduced. The design results show that the system uses spherical mirrors, making it simple in structure, small in size, low in cost, and with good tolerances, which can achieve good imaging quality across the entire operating temperature range, and has a certain engineering application prospect.

收稿日期: 2024-02-26; 修回日期: 2024-03-20

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划 (18JS053)

作者简介: 白鑫如 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计研究。E-mail: 13152117189@163.com

通信作者: 蒋世磊 (1963—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光学装调工艺技术及现代光电仪器设计研究。

E-mail: jiangshilei8@163.com

Key words: co-aperture gun objective lens; heat dissipation difference; tolerance sensitivity; modulation transfer function; optical system

引言

单一的可见或近红外谱段已不能完全满足探测现场形式感知和环境监测等军事及民用领域的应用需求,因此,双光谱/多光谱共口径光学系统成为瞄准光学系统的发展趋势。现有的双波段瞄准物镜大多由2个独立波段的系统组成^[1],对同一目标连续跟踪能力较差。部分可见/近红外双波段光学系统采用共光路设计方案,例如,王保华^[2]等人设计的多光谱模块化光学系统,全视场为2.2°,其中可见光全色/多光谱模块工作光谱包括0.45 μm~0.9 μm全光谱段以及在此区间内的4个多光谱谱段共口径;马健^[3]等人将可见至长波红外划分为四谱段,其中可见/近红外波段共口径。上述系统为了校正宽光谱光学系统的色差和二级光谱,使用了离轴反射结构形式,对系统装调测试工作提出了很高的要求^[4]。张勇^[5]等人设计了一款 F 数为1.2,大相对孔径的可见光/近红外波段的短焦复消色差物镜;常宇梅^[6]等人设计了可见光波段和近红外波段共口径、共焦面的变焦物镜光学系统,系统光学总长为199 mm,最大通光孔径为58.1 mm。这些设计并未对系统进行消热差处理,应用环境局限性较大,温度变化范围较大时,无法保证光学系统的稳定性。

综上所述,本文基于可见/近红外双波段探测器,设计出一款0.4 μm~0.65 μm和0.7 μm~0.85 μm双波段共光路消热差光学系统。采用透射式结构形式,通过合理选择材料,实现-40 ℃~+50 ℃宽温度范围消热差,系统均采用球面镜,结构简单,公差灵敏度和装配难度较低,在CMOS前设置红外滤光片,仅在白天使用时携带滤光片工作。该系统既解决了独立波段复合系统频繁更换瞄具的问题,又避免了双波段系统结构复杂成本高的缺点。经仿真验证,该系统能实现良好的成像效果。

1 设计原理

1.1 结构选型

为解决本系统双波段消色差及复消色差问题,采用正-负光焦度组合消色差,使用反常玻璃材料复消色差^[7]。玻璃材料色散公式为

$$n^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8} \quad (1)$$

式中: $A_0 \sim A_5$ 为计算常数,随玻璃牌号不同而变化; λ 为波长; n 为玻璃折射率。

大部分光学材料在短波波段内折射率逐渐增高,光束经正透镜后,短波光在靠近透镜的一侧,长波光在远离透镜的一侧;反之,光束经负透镜后,短波长比长波长更发散,如图1所示。因此,采用如图2所示正-负光焦度组合可以消除系统波长差异引起的色散。确定好初始结构,再将结构复杂化,使用大阿贝数玻璃复消色差,通过引入胶合镜校正纵向色差^[7],改变透镜的厚度和间隔来校正球差和像散。

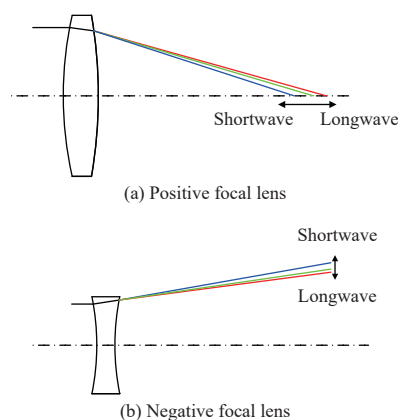


图1 光束经透镜发生色散示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dispersion of beam through lens

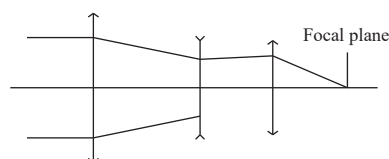


图2 系统光学结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical structure of proposed system

1.2 光学消热差原理

枪瞄系统需要在极端温度下仍能进行工作,因此保证枪瞄系统在不同温度下的光学稳定性是设计阶段必须考虑的。考虑到光学被动式消热差可避免机械补偿或光学变焦补偿,易实现轻量化的设计目标,本系统采用光学被动式无热化设计方法^[8]。下面将结合温度引起的折射率及元件参数变化,对被动式消热差原理进行分析。

光学系统材料的折射率温度系数可表示为

$$B_g = \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

光学材料的热膨胀系数可表示为

$$\theta_i = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dt} \quad (3)$$

式中: L 为材料的长度或体积。热膨胀系数表示在一定压强下,单位温度变化引起的材料长度或者体积的变化,单位为 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。空气中单透镜光焦度为

$$\phi = (n-1)(\rho_1 - \rho_2) \quad (4)$$

式中: ρ_1 和 ρ_2 分别为透镜前后表面曲率; n 为材料折射率。联立式(2)和式(3),根据式(4)对单位温度 t 微分求导可得:

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi \left(\frac{dn}{dt} \frac{1}{n-1} - \theta_i \right) = -\phi^2 \frac{df}{dt} \quad (5)$$

由式(5)可知,温度引起的焦移变化 df/dt 与透镜元件的形状无关,只与玻璃材料的光学特性有关。因此,光学被动式消热差是通过优化材料的搭配,使其与温度变化引起的焦移与机械结构材料热胀冷缩引起的像面移动相匹配,使光学系统能够适应较宽温度范围,且在温度变化过程中不需要通过移动光学元件或移动像面位置,就可保证光学系统的成像性能。光学被动消热差需要同时满足总光焦度、消色差和消热差方程^[9],即:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i = \phi \\ \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k h_i^2 \gamma_i \phi_i = 0 \\ \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k h_i^2 \theta_i \phi_i = \alpha_L m = \frac{df}{dt} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: h_i 为平行于光轴入射的边缘光线在透镜 i 上的透射高度; ϕ 为光学系统总光焦度; ϕ_i 为各透镜组的光焦度; γ_i 为色散系数; θ_i 为材料光热膨胀系数; m 为机械构件长度; α_L 为各部分镜筒材料的线膨胀系数。

1.3 降低灵敏度原理及方法

在光学设计阶段,公差分配直接影响镜头加工的成本及实际成像效果,因此,控制镜头的公差灵敏度是设计过程中的重要环节。光学系统的公差主要分为两类:一种是面型加工公差,另一种是元件位置公差,前者对镜片加工工艺提出很高的要求,后者对装调难度和成本影响很大。

实际优化镜头过程是对初级像差进行校正,初级像差的变化关系可以由 Seidel 系数表示。实际像差和 Seidel 系数对应项不一致,往往是因为高级像差残留所造成^[10]。光学系统形成的波面与原始物体之间存在差异,这种差异称为波前误差。在一定程度上镜头加工工艺上的敏感程度取决于波前误差^[11],通过控制并减小波前误差,可以提高镜头的成像质量,降低系统公差灵敏度。总波前误差表达式为

$$W = \sum_{ijk=0} W_{ijk} \bar{H}^i \rho^j \cos^k \phi \quad (7)$$

式中: W_{ijk} 为波像差系数;因子 $\bar{H}$ 为像高比,取值在 $0 \sim 1$ 之间; ρ 为瞳孔半径比,取值在 $0 \sim 1$ 之间。Seidel 系数与像差对应关系^[12]如表1所示。

表1 Seidel 系数与像差、波像差系数对应关系

Table 1 Correspondence between Seidel coefficients, aberration and wave aberration coefficients

Primary aberration type	Wave aberration coefficients	Relationship with Seidel coefficient	Seidel coefficient	Thin lenses and mirrors
Spherical aberration	W_{040}	$\frac{1}{8} S_I$	$S_I = -\sum A^2 y \Delta \left\{ \frac{u}{n} \right\}$	$S_I = \frac{1}{4} y^4 \phi^3 \sigma_I$
Coma aberration	W_{131}	$\frac{1}{2} S_{II}$	$S_{II} = -\sum A B y \Delta \left\{ \frac{u}{n} \right\}$	$S_{II} = \frac{1}{2} L y^2 \phi^2 \sigma_{II}$
Astigmatism	W_{222}	$\frac{1}{2} S_{III}$	$S_{III} = -\sum B^2 y \Delta \left\{ \frac{u}{n} \right\}$	$S_{III} = L^2 \phi \sigma_{III}$
Field curvature	W_{220}	$\frac{1}{4} S_{IV}$	$S_{IV} = -L^2 \sum C \Delta \left\{ \frac{u}{n} \right\}$	$S_{IV} = L^2 \phi \sigma_{IV}$
Distortion	W_{311}	$\frac{1}{2} S_V$	$S_V = -\sum \frac{B}{A} \left[C L^2 \Delta \left\{ \frac{1}{n} \right\} - B^2 y \Delta \left\{ \frac{u}{n} \right\} \right]$	$S_V = \sigma_V$

表1中, $S_I \sim S_V$ 为赛德尔系数; $\sigma_I \sim \sigma_V$ 为结构像差系数, A 、 B 、 L 为拉格朗日系数, i 为入射角, n 为物空间折射率, n' 为像空间折射率, u 为入射光线与光轴夹角, u' 为出射光线与光轴夹角, C 为透镜曲率, y 为物体高度, ϕ 为光焦度。结合 Seidel 多项式和波前误差的关系可以发现, Seidel 系数各项与波前误差对应,减小 Seidel 系数对应的像差可达

到减小波前误差,降低系统面型加工误差的目的。因此,本文在光学系统设计过程中,通过对系统进行公差分析,找到影响系统性能的最坏偏离面,对敏感面上 Seidel 系数对应的像差进行优化,有效且快速减小总波前误差,降低镜头在加工工艺上的敏感程度。

波前误差实际上也受光学系统中透镜光焦度

和光线传播方向的影响, 透镜光焦度越大, 对波像差系数的贡献也越大, 所以减小敏感面的光焦度同样有利于减小该面引起的波前误差。总光焦度可表示为

$$\phi = \sum_i \phi_i \tag{8}$$

将敏感面所在光组的光焦度合理分配到其他承担光焦度小的光组上, 使整体系统光线走势平滑, 有利于减小系统装调的灵敏度。

2 设计实例

2.1 系统优化设计

设计实例采用 1/1.8" 面阵可见/近红外双波段探测器, 像元尺寸为 5 μm, 光学系统技术指标如表 2 所示。

表 2 光学系统技术指标
Table 2 Optical system specifications

Parameter	Value
Spectrum range/μm	0.4~0.65; 0.7~0.85
Focal length/mm	50
F/#	1.4
Full FOV/(°)	10
Working temperature/°C	-40~+50
Total length/mm	90
Diameter/mm	36

光学系统结构示意图如图 3 所示。由图 3 可知, 光学系统由 8 片透镜组成, 可见光波段与近红外波段共口径, 滤光片在白天使用, 滤除红外光; 为限制系统口径, 将孔径光阑设置在系统第一面。根据结构选型原理, 系统使用正-负光焦度组合的 Fraunhofer 型胶合镜^[13], 第一片透镜采用具有较低折射率和较大阿贝数的氟冕玻璃校正二级光谱, 这类玻璃还有较高的透过率和耐腐蚀性能。第二片透镜使用高折射率的镧冕玻璃配合第一片透镜的氟冕玻璃, 这种低色散凸透镜胶合高色散凹透镜的组合, 可以很好地校正系统的球差和纵向色差。第二组胶合镜采用高透玻璃, 偏折光线减小后组玻璃的口径。

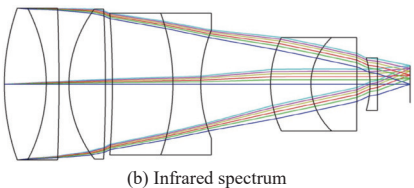
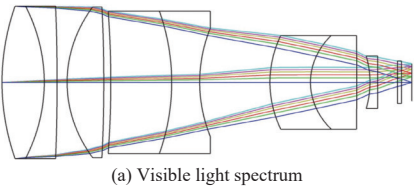


图 3 系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of system structure

根据消热差原理, 同时考虑系统成本, 选择的光学系统材料经无热化处理后, 常温下材料属性如表 3 所示。镜筒及隔圈材料设置为铝 5052, 相应热膨胀系数为 23.6 ppm/°C; 第 3~第 8 片透镜选择耐高温的重钡火石玻璃和重火石玻璃, 以平衡系统的热差^[14]。这几种玻璃主要由重钡氧化物 (BaO)、硼酸硅酸盐镧氧化物和氧化铝 (Al₂O₃) 等组成, 具有较高的熔点和热稳定性, 且热膨胀系数较低, 在温度变化时, 玻璃的体积变化相对较小, 不容易出现热应力和热裂纹。在系统无热化处理过程中, 可以通过限制材料热膨胀系数的范围, 对优化方向进行精准控制。

表 3 系统材料属性表
Table 3 Material properties of optical system

Material	Reference temperature/(°C)	<i>N_d</i>	<i>V_d</i>	Thermal expansion coefficient(ppm/°C)
H-FK61B	20	1.497	81.605	12.7
H-LAK4L		1.640	60.203	6.0
H-ZBAF1		1.622	53.171	6.0
H-ZF73GT		1.959	17.472	5.8
H-ZF7LAGT		1.805	25.456	9.0
H-ZF12		1.761	26.608	8.4
H-ZLAF68C		1.883	40.847	7.0

根据降低系统灵敏度的原理, 对系统进行公差分析, 发现第 5 面和第 6 面的面型加工误差对系统性能影响较大, 第 10 面的装调偏心误差对系统性能影响较大, 具体分配的公差参数如表 4 所示。表 4 中 TIRX、TIRY、TTHI、TEDX、TEDY 分别对应 *x* 方向面总偏转公差、*y* 方向面总偏转公差、厚度公差、*x* 方向元件偏心公差、*y* 方向元件偏心公差。

表 4 敏感面对应公差分配表
Table 4 Allocation of tolerances to sensitive surfaces

Source of tolerances	Types of tolerances	Surfaces	Values of tolerance/mm
Manufacturing tolerances	TIRX	S5、S6	0.02
	TIRY	S5、S6	0.02
	TTHI	S5	0.02
Mounting tolerances	TEDX	S10	0.03
	TEDY	S10	0.03

参考表4,对敏感面最大波像差系数代表的像差进行优化。根据系统的 Seidel 系数数据, S5 和 S6 的球差和彗差对总波前误差贡献较大, 对应公差分析结果中第5面和第6面较高的面型加工敏感度, 将具体数值返回评价函数编辑器进行波像差优化。查看系统各表面光焦度, 发现 S10 表面光焦度贡献很大, 影响了该面所在元件的装调偏心误差, 对应公差分析结果中第10面较高的装调灵敏度, 将该面的光焦度分配给其他光焦度小的表面, 重新对敏感面进行优化。优化前后各面波像差数值如图4和图5所示。

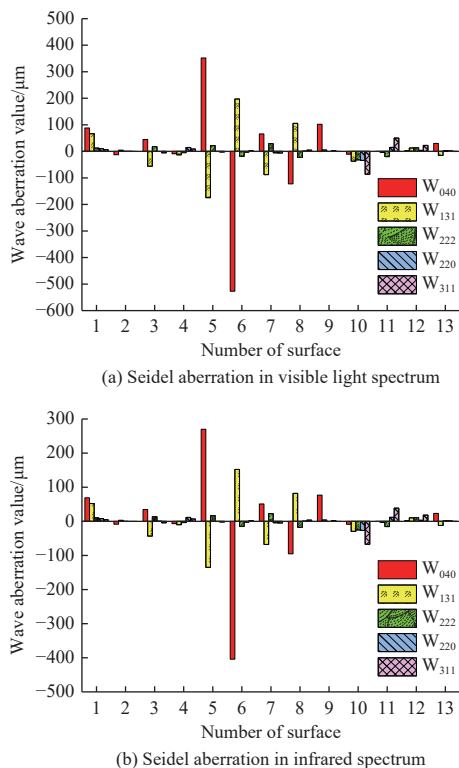


图4 降灵敏度前系统的 Seidel 像差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of Seidel aberration of system before sensitivity reduction

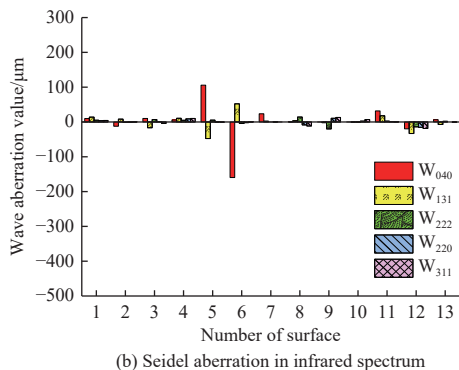
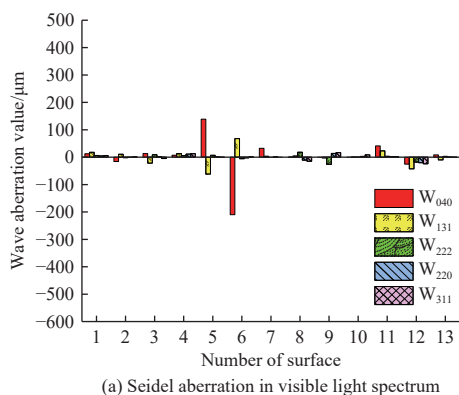


图5 降灵敏度后系统的 Seidel 像差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Seidel aberration of system after sensitivity reduction

从图4和图5可以看出,各表面各项波像差系数都明显减小。优化前后各表面光焦度对比图如图6所示。将敏感面 S10 的光焦度平均分配到相邻表面, 优化后的光路光线走势平缓 (见图3所示)。优化前后各公差灵敏度对比图如图7所示。从图7可以看出, 各项公差灵敏度均有下降, 最高下降 97%, 最低下降 37%。

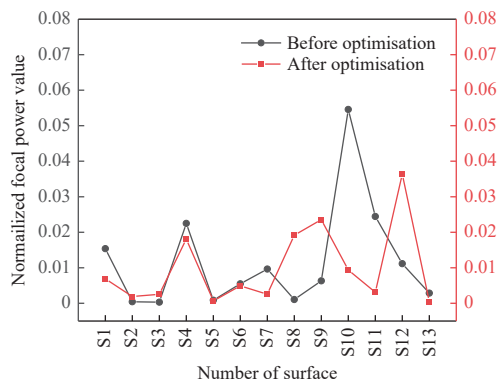
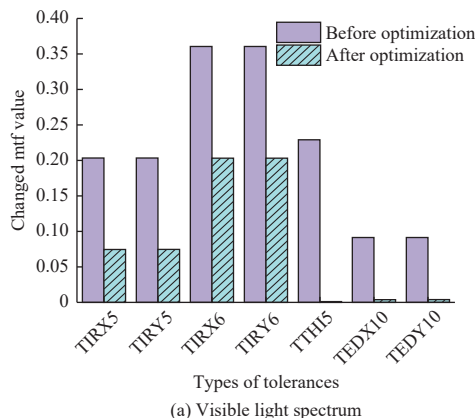


图6 降灵敏度前后各表面光焦度数值

Fig. 6 Values of focal power for each surface before and after sensitivity reduction



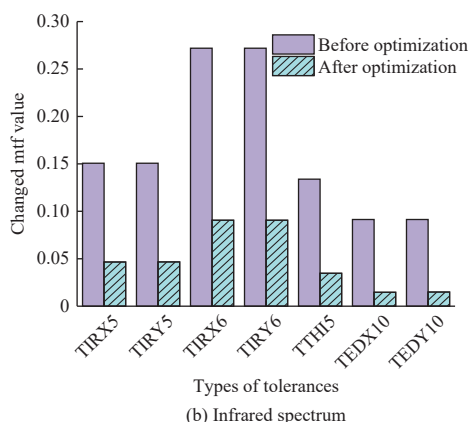


图7 降灵敏度前后公差灵敏度对比

Fig. 7 Tolerance sensitivity comparison before and after sensitivity reduction

2.2 设计结果

最终系统成像质量如图8所示。从图8可以看出,在空间频率 100 lp/mm 处,可见光波段 MTF>0.6,其中 0.707 视场 MTF>0.7;近红外波段 MTF>0.3,其中 0.707 视场 MTF>0.4。MTF 曲线平滑,具有良好的像质。系统点列图如图9所示。从图9可知,可见光波段弥散斑半径均方根值最大为 2.83 μm ,近红外波段弥散斑半径均方根值为 6.40 μm 。系统场区畸变如图10所示。从图10可以看出,可见光波段畸变小于 0.04%,各视场场曲控制在 20 μm 以内;近红外波段畸变小于 0.04%,各视场场曲控制在 0.05 mm。

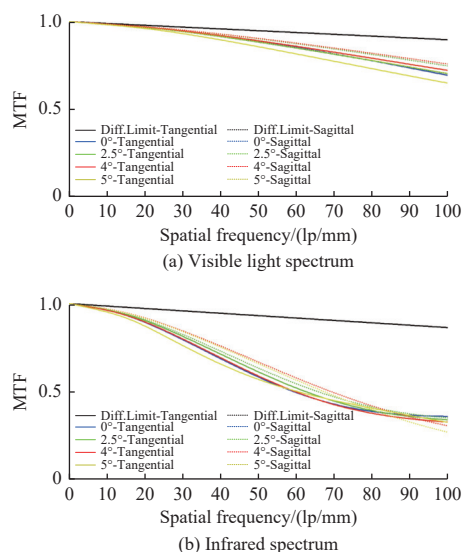


图8 光学系统 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves of optical system

3 系统分析

3.1 消热差分析

考虑到枪瞄物镜使用场景的多样性,增强系统

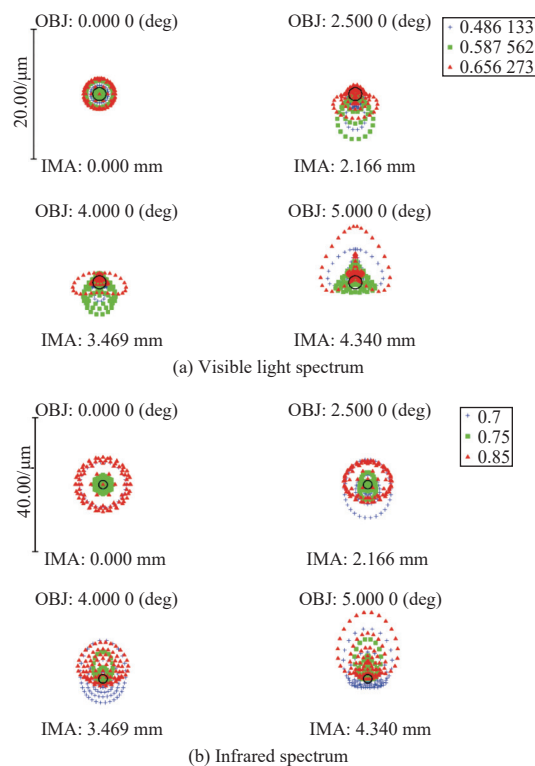


图9 光学系统点列图

Fig. 9 Spot diagrams of optical system

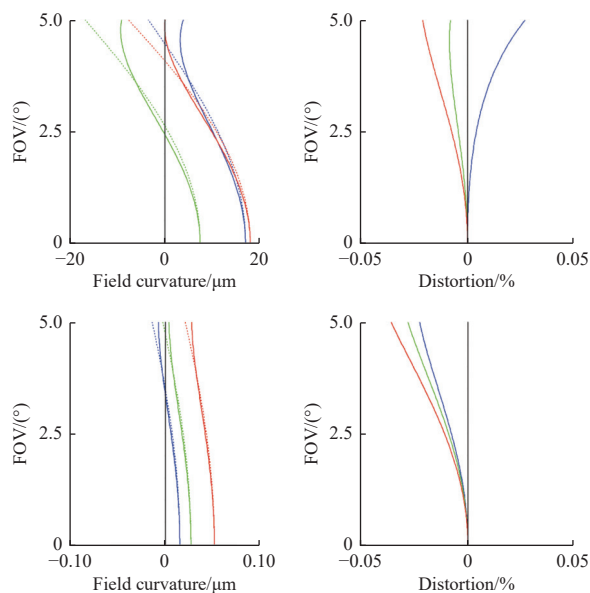


图10 光学系统场曲和畸变图

Fig. 10 Field curvature and distortion diagrams of optical system

的普适性,需要克服温度对光学系统成像质量的影响,因此对光学系统在-40 $^{\circ}\text{C}$ ~+50 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内进行光学被动消热差处理。根据消热差原理,利用不同光学材料之间的热特性差异合理搭配组合,消除温度变化对系统性能产生的影响。

在焦面固定情况下,对系统进行消热差处理。可见光波段系统在极端温度下的 MTF 曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,100 lp/mm 处全视场 MTF >0.55 ,在 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下,100 lp/mm 处全视场 MTF >0.6 。近红外波段系统在极端温度下的 MTF 曲线如图 12 所示。从图 12 可以看出,在 100 lp/mm 处双波段全视场 MTF >0.3 。由此可见,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内焦面始终保持稳定,系统在对应的 2 个波段均呈现良好的像质。

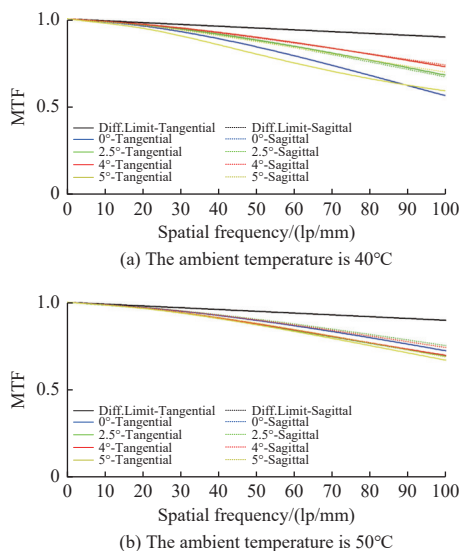


图 11 可见光波段系统在极端温度下 MTF 曲线
Fig. 11 MTF curves of visible light spectrum at extreme temperatures

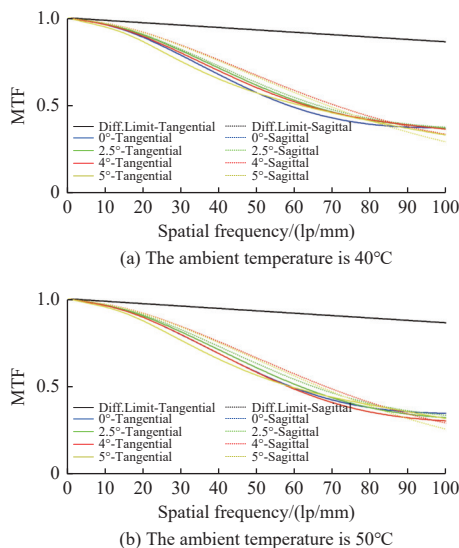


图 12 近红外波段系统在极端温度下 MTF 曲线
Fig. 12 MTF curves of near-infrared spectrum at extreme temperatures

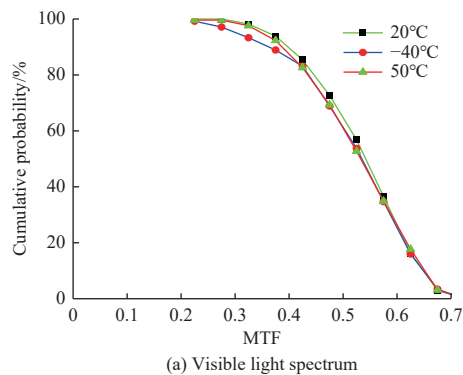
3.2 公差分析

实际生产加工中光学系统受到加工、装调的影响会产生一定的误差,像质会发生一定程度的变化^[15],因此需要进行公差分析,衡量光学系统是否可靠。利用 Zemax 公差计算功能对系统进行模拟公差余量计算,使用蒙特卡洛模拟分析 1 000 组镜头数据,选择衍射 MTF 均值作为衡量系统性能变化的标准,截至频率设置为 100 lp/mm,各项公差分配如表 5 所示。

表 5 系统公差分配表

Table 5 System tolerance allocation		
Tolerance type	Tolerance name	Value
Manufacturing tolerances	Radius of curvature tolerance	3
	Thickness tolerance/mm	0.02
	Local tolerance	0.2
	Surface eccentricity/mm	0.02
	Surface inclination tolerance/mm	0.02
Mounting tolerances	Component eccentricity tolerance/mm	0.03
	Component inclination tolerance/mm	0.03
Material tolerances	Refractive index tolerance	0.000 5
	Abbe number tolerance/%	0.5

分别对系统 2 个波段在不同温度状态下进行公差分析,得到各视场 MTF 概率累计分布曲线,如图 13 所示。从图 13 可以看出,在公差分配合理且宽松条件下,实际加工生产的系统,有 90% 的概率在常温下性能可以达到使用要求。对系统可见光波段在 2 个极端温度下进行公差仿真,MTF 概率累计分布曲线与常温情况相比几乎不下降;对系统近红外波段在环境温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时进行公差仿真,MTF 概率累计分布曲线与常温情况相比几乎不下降,环境温度为 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,MTF 概率累计分布曲线与常温情况相比下降 0.02。因此,装配后系统可以满足成像质量要求。



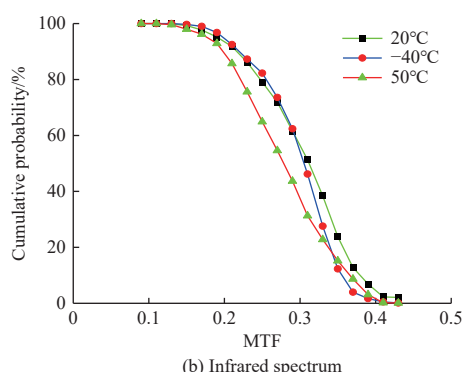


图 13 不同温度下系统 MTF 累计概率分布曲线

Fig. 13 MTF cumulative probability distribution curves at different temperatures

4 结论

该可见/近红外双波段共口径消热差枪瞄物镜, 基于结构选型原理及消色差条件设计的系统结构, 在消热差条件下可保证系统在极端温度下具有稳定的光学性能。通过降低敏感面像差及合理分配光焦度, 解决了系统公差灵敏度高的问题。仿真结果表明: 设计的共口径光学系统在可见光波段 MTF 值在空间频率 100 lp/mm 处大于 0.55, 在近红外波段 MTF 值在空间频率 100 lp/mm 处大于 0.3; 双波段畸变均不超过 0.04 %, 其中可见光波段各视场的场曲控制在 20 μm 以内, 近红外波段各视场的场曲控制在 0.05 mm 以内; 系统在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内无热差影响, 成像质量良好; 对系统进行降灵敏度操作后, 各项公差灵敏度最高下降 97, 最低下降 37 %。最后, 对系统进行无热化分析及公差分析, 全面评价了系统的成像性能。分析结果表面, 系统能满足成像质量要求, 具有结构简单、功能丰富、温度变化适应能力强、公差灵敏度低等特点, 工程应用前景良好。

参考文献:

- [1] 白鹏飞, 张佳丽. 一种应用于自动步枪的红外枪瞄镜的设计与实现[J]. 光电技术应用, 2020, 35(2): 32-40.
BAI Pengfei, ZHANG Jiali. Design and implementation of an infrared gun sight applied to automatic rifles[J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35(2): 32-40.
- [2] 王保华, 张绪国, 封宇航, 等. 可见光/红外共口径模块化光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 328-334.
WANG Baohua, ZHANG Xuguo, FENG Yuhang, et al. Design of visible/infrared common aperture modular optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 328-334.
- [3] 马健, 张军强, 吴从均, 等. 全谱段高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(23): 173-181.
MA Jian, ZHANG Junqiang, WU Congjun, et al. Optical system design of full-spectrum hyperspectral imager[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(23): 173-181.
- [4] 贾永丹, 孙建, 聂云松. 高光学效率可见红外共口径/视场离轴系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(1): 126-134.
JIA Yongdan, SUN Jian, NIE Yunsong. Design of high optical efficiency visible infrared common aperture/field of view off-axis system[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(1): 126-134.
- [5] 张勇, 马飒飒, 李志伟, 等. 低照度固体成像夜视头戴系统物镜设计[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(6): 16-22.
ZHANG Yong, MA Sasa, LI Zhiwei, et al. Design of objective lens for low-illumination solid imaging night vision head-mounted system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20(6): 16-22.
- [6] 常宇梅, 王劲松. 轻小型宽波段变焦物镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 418-426.
CHANG Yumei, WANG Jinsong. Design of optical system for light and small wide-band zoom objective[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 418-426.
- [7] 栗洋洋, 杨加强, 彭晴晴, 等. 制冷型红外双波段广角无热化光学系统设计[J]. 激光与红外, 2023, 53(5): 712-715.
LI Yangyang, YANG Jiaqiang, PENG Qingqing, et al. Design of cooled infrared dual-band wide-angle athermalized optical system[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(5): 712-715.
- [8] 李杰, 罗辉, 李金铨, 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): 140-155.
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): 140-155.
- [9] 党更明, 高明, 范晨, 等. 红外双波段共焦复合孔径光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 321-334.
DANG Gengming, GAO Ming, FAN Chen, et al. Design of infrared dual-band confocal compound aperture optical

- system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 321-334.
- [10] 赵阳, 巩岩, 胡宜宁. 变焦距光学系统降低公差灵敏度的方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(7): 121-125.
- ZHAO Yang, GONG Yan, HU Yining. Methods for reducing tolerance sensitivity of zoom optical systems[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 121-125.
- [11] 邓桦湖, 林峰. 光学设计中降低公差灵敏度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 182-189.
- DENG Pinghu, LIN Feng. Methods to reduce tolerance sensitivity in optical design[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 182-189.
- [12] JOSEPH M G. Introduction to lens design [M]. New York: Willmann-Bell, 2002.
- [13] ENGLISH N. The classical achromat: Choosing and using a refracting telescope[M]. New York: Springer, 2011: 21-37.
- [14] JIA B, ZHAO Y, YUAN X. Design of dual band common aperture continuous zoom optical system[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1601(6): 062028.
- [15] 栗孟娟, 廖志波, 王春雨. 小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制[J]. *应用光学*, 2015, 36(2): 277-281.
- LI Mengjuan, LIAO Zhibo, WANG Chunyu. Analysis and control of assembly and adjustment tolerances of small-aperture high-precision refractive optical systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(2): 277-281.