

低公差敏感度的大变倍比极短总长中波红外变焦光学系统设计

李雨哲 胡源 霍家琦 张又予 高天元

Design of a medium-wave infrared zoom optical system with low tolerance sensitivity, large zoom ratio, and extremely short total length

LI Yu-zhe, HU Yuan, HUO Jia-qi, ZHANG You-yu, GAO Tian-yuan

引用本文:

李雨哲, 胡源, 霍家琦, 张又予, 高天元. 低公差敏感度的大变倍比极短总长中波红外变焦光学系统设计[J]. *中国光学*, 2025, 18(1): 1-8. doi: 10.37188/CO.2024-0095

LI Yu-zhe, HU Yuan, HUO Jia-qi, ZHANG You-yu, GAO Tian-yuan. Design of a medium-wave infrared zoom optical system with low tolerance sensitivity, large zoom ratio, and extremely short total length[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 1-8. doi: 10.37188/CO.2024-0095

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0095>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计

Design of optical system for low-sensitivity space gravitational wave telescope

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1384 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0006>

光学系统降敏设计方法综述

Review of optical systems' desensitization design methods

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 863 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0096>

制冷型被动式消热差红外光学系统设计

Passive athermalization design of a cooled infrared optical system

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 853 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0205>

制冷型长波红外光学系统设计

Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system

中国光学 (中英文). 2022, 15(1): 72 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0116>

天基平台宽波段成像光学系统设计

Optical design of visual and infrared imaging system based on space-based platform

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1495 <https://doi.org/10.37188/CO.2019-0255>

矩形大口径激光光束质量评价光学系统设计

Design of optical system for quality evaluation of a large rectangular aperture laser beam

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 306 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0130>

文章编号 2097-1842(2025)01-0001-08

低公差敏感度的大变倍比极短总长中波红外 变焦光学系统设计

李雨哲, 胡源*, 霍家琦, 张又予, 高天元

(长春理工大学光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 目前中波红外变焦系统在大变倍比, 长焦距变焦条件下, 难以在极短总长的条件下具备较低敏感度。针对这一问题, 本文通过合理分配非球面和衍射面, 采用独立组元低敏感度设计方法, 设计出一套无需折叠光路, 总长仅有 337 mm 的低敏感度中波红外变焦光学系统。通过降低各个组元的像差从而降低系统公差敏感度。该系统具有 30 倍大变倍比, 可实现 30 ~ 900 mm 的长焦距连续变焦。该系统具有变倍比大、长焦距变焦、极短总长以及低敏感度并且全焦距范围内像质良好等优点, 对在狭小空间内进行目标识别、跟踪、探测等方面, 具有较大的应用优势。

关键词: 红外系统; 长焦距变焦; 大变倍比; 极短总长; 低敏感度

中图分类号: TH216

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0095

CSTR: 32171.14.CO.2024-0095

Design of a medium-wave infrared zoom optical system with low tolerance sensitivity, large zoom ratio, and extremely short total length

LI Yu-zhe, HU Yuan*, HUO Jia-qi, ZHANG You-yu, GAO Tian-yuan

(Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: huy@cust.edu.cn

Abstract: In response to the current problem of difficulty in achieving extremely short total length and low sensitivity in medium wave infrared zoom systems under conditions of large zoom ratio and long focal length, we design a low-sensitivity medium wave infrared zoom optical system with a total length of only 337 mm and no need for folding optical paths, through the rational allocation of aspherical and diffractive surfaces, as well as adopting a low sensitivity design method for independent components. By reducing the aberration of each component, the system tolerance sensitivity is achieved. The system achieves a 30x zoom ratio and continuous zoom with a long focal length of 30-900 mm. The system has advantages such as a large zoom ratio, long focal length zoom, extremely short total length, low sensitivity, and good image quality within the entire focal length range. It has significant application advantages for military applications such as target recognition, tracking, and detection in narrow spaces.

收稿日期: 2024-05-24; 修订日期: 2024-07-05

基金项目: 吉林省自然科学基金 (No. 20240101360JC)

Supported by Jilin Provincial Natural Science Foundation (No. 20240101360JC)

Key words: infrared system; long focal length zoom; large zoom ratio; extremely short total length; low sensitivity

1 引言

近年来,随着红外成像技术的飞速发展,国内外陆续开展了大变倍比红外变焦系统的研究,各式各样的红外变焦系统相继问世,广泛应用于军事和民用等领域^[1]。

随着研究的发展和深入,大变倍比红外变焦光学系统已有诸多研究成果。例如:2012年,姜凯等研发了一款30倍中波红外变焦镜头^[2],采用9片透镜,虽然实现了变焦范围为30~900mm的长焦距变焦,但系统总长高达750mm;2019年,顾宪松等设计了30倍中波红外连续变焦光学系统^[3],系统采用10片透镜,光学总长仅为350mm,实现了系统的小型化,但变焦范围较短,只有18~540mm;2020年,陈虹达等设计了20倍中波红外变焦镜头^[4],采用10片透镜,实现了15~300mm焦距范围内的连续变焦,系统总长为160mm。上述两个光学系统虽然确保了大变倍比下系统的总长极短,但都导致变焦范围变小。为了实现系统的小型化,有的研究人员通过折叠光路来缩短总长,但这又会导致系统变得更为复杂。例如:2023年,张洪博等利用12片透镜设计了48倍中波红外连续变焦光学系统^[5],焦距为25~1200mm,总长约为650mm,通过光路折转后,使系统长度仅有350mm。

根据现有的研究,目前变倍比为30倍或以上的中波红外变焦系统,在不通过光路折转的情况下,为实现长焦距变焦,总长通常会达到650~750mm,无法满足在狭小空间内作业的需求。

由此可见,对于中波红外变焦系统,大变倍比、长焦距变焦、极短总长这三者之间彼此矛盾,难以兼得,而且只要系统涉及到这3种要素其公差敏感度必然较高,从而导致难以实现工程应用。

为解决以上问题,本文在前人研究的基础上,采用二次成像、负组变倍、正组补偿、合理的衍射面和非球面分配、独立组元低敏感度设计等方法,设计了一套变倍比为30倍,焦距范围为30~900mm,总长为337mm的中波红外变焦光学系

统。系统结构简单、成像质量良好、公差敏感度较低,满足在狭小空间内进行高速目标搜索、探测等军事需求,具有广泛的发展前景。

2 设计指标及初始结构计算

2.1 光学设计指标

本文使用的中波制冷型红外探测器靶面为640×512,像元尺寸为15μm×15μm。红外连续变焦光学系统的具体参数如表1所示。

表1 光学设计参数
Tab. 1 Optical design parameters

Parameter	Value
Spectral range/μm	3~4.8
Focal length range/mm	30~900
System magnification	30×continuous
Subsystem F#	4
Total system length/mm	337

2.2 光学系统初始结构分析

传统的机械补偿变焦系统具备结构紧凑、成像质量稳定等优点,通常由4部分组成:前固定组、变倍组、补偿组以及后固定组。各组分别负组变倍,正组补偿的结构形式^[2]。在系统变焦过程中前固定组和后固定组都属于非运动组元,因此只需分析变倍组和补偿组^[6]。

变焦过程中,当变倍组移动dq后,整个系统的像面也会随之移动,移动量为 $m_3^2(1-m_2^2)dq$ 。补偿组移动dε后,整个系统的像面移动 $(1-m_3^2)dε$,为确保系统的像面恒定,需要使两个像面移动量之和为零,即^[7]:

$$m_3^2(1-m_2^2)dq + (1-m_3^2)dε = 0 \quad (1)$$

式中 m_2 代表变倍组倍率, m_3 代表补偿组倍率。

将式(1)中的dq和dε用各组分的倍率m表示,再用变倍组的物距 l_2 表示 m_2 ,对其进行微分^[8]。因为 $dl_2 = -dq$,所以有:

$$dm_2 = \frac{m_2^2}{f_2'} dq, \quad (2)$$

则

$$dq = \frac{f_2'}{m_2^2} dm_2.$$

同理可得:

$$d\varepsilon = f_3' dm_3. \quad (3)$$

将式(2)~式(3)带入式(1)并同时除以 m_3^2 可以得到:

$$\frac{1-m_2^2}{m_2^2} f_2' dm_2 + \frac{1-m_3^2}{m_3^2} f_3' dm_3 = 0. \quad (4)$$

式中 f_2' 和 f_3' 分别代表变倍组焦距和补偿组焦距。

公式(4)为机械补偿变焦系统的微分方程^[9]。由公式(4)可知, 无需考虑变倍组和补偿组在变焦过程中的位置以及变焦系统形式, 各运动组分均是以 $\frac{1-m^2}{m^2} f' dm$ 的形式出现在方程中。通过对 $l' = f'(1-m)$ 进行微分可以得到^[10]:

$$dL = -d\left[f'\left(\frac{1}{m} + m\right)\right] = \frac{1-m^2}{m^2} f' dm. \quad (5)$$

再将其带入公式(4)得到^[11]:

$$\sum_i dL_i = 0. \quad (6)$$

式(6)说明无论变焦处于何种时刻、何种状态, 由各运动组元移动所导致的共轭距的改变量之和均为零。

设 $U(m_2, m_3) = 0$ 为全微分方程的原函数, 可得: $dU(m_2, m_3) = 0$ 。那么方程的通解为:

$$U(m_2, m_3) = f_2' \left(\frac{1}{m_2} + m_2\right) + f_3' \left(\frac{1}{m_3} + m_3\right) = C(\text{常量}) \quad (7)$$

首先将系统的初始位置选定为长焦, 取归一化值, $f_2' = -1$, $d_{23} = 0.8$, $m_2 = 1$, 最后求得理想光学系统中的各个理想高斯参数值^[12], 包括前固定组焦距 f_1' 、变倍组焦距 f_2' 、补偿组焦距 f_3' 、后固定组焦距 f_4' 、前固定组与变倍组之间的距离 d_{12} 、变倍组与补偿组之间的距离 d_{23} 、补偿组与后固定组之间的距离 d_{34} 。具体数值如表2和表3所示。将上述参数输入到Zemax中得到系统理想透镜结构, 如图1所示。

表2 各组元的焦距

Tab. 2 Focal length of each component

f_1'/mm	f_2'/mm	f_3'/mm	f_4'/mm
428.6735	-67.4089	94.3725	-317.6971

表3 各组元之间的距离

Tab. 3 Distance between components

	长焦(900 mm)	中焦(550 mm)	短焦(30 mm)
d_{12}/mm	305.0904	293.8556	13.4818
d_{23}/mm	26.9860	53.9271	405.9571
d_{34}/mm	98.5523	82.8460	11.1899

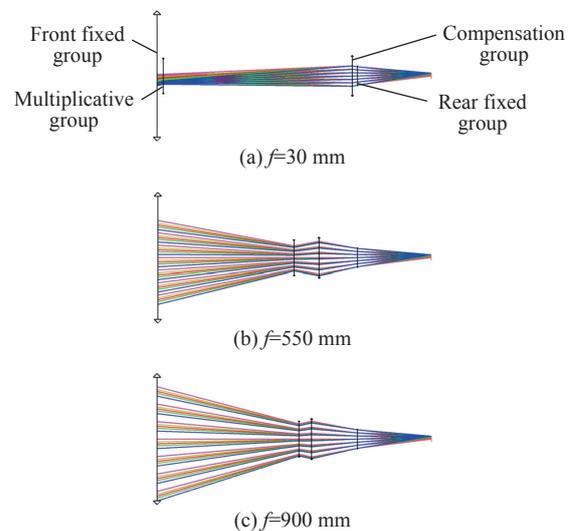


图1 不同焦距下系统理想透镜结构图

Fig. 1 Structural diagram of ideal lens in the system at different focal lengths

根据得到的理想透镜结构可知, 通过正常透镜搭建的变焦系统并不符合本文极短总长的要求, 当系统处于短焦状态时, 变倍组与补偿组之间的距离为405.9571 mm已经超过了最初预想的系统总长。因此, 通过添加合理的非球面和衍射面来缩短镜片之间的间距, 对于实现系统的简洁化和小型化显得尤为重要。

根据表2、表3的数据, 合理约束镜片的焦距和形状, 构建出系统处于长焦状态的初始结构, 如图2所示。

为了使光线可以迅速汇聚, 将前固定组设置为两片。通常这类系统会将衍射面添加在其中, 用以校正系统长焦时的色差, 但本文系统设计时, 考虑到若使前固定组具备如此大的口径, 那么就要面临加工难度以及高昂的成本。

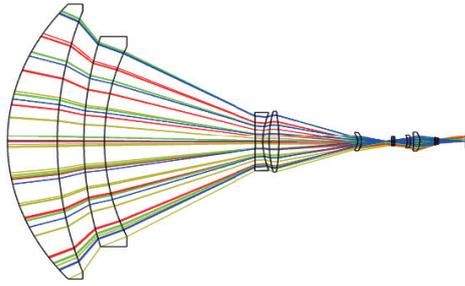


图 2 系统 900 mm 焦距下初始结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the system's initial structure at a focal length of 900 mm

系统的总长度主要是由连续变焦过程中组元之间的距离决定的,本系统为实现极短总长,将侧重点放在运动组元上。首先为实现系统的简洁化,分别将变倍组和补偿组仅设置为一片透镜,同时为缩短两个组元在连续变焦过程中移动的距离并校正像差,将两个衍射面和一个非球面穿插在其中。最后对于二次成像部分,因其对系统总长的影响不大,便添加多片透镜,用来对系统残余的像差进行校正。

系统采用伺服电机分别控制运动组元即变倍组与补偿组单独运动,这样可在不改变前固定组光学口径的情况下,实现更大的连续变焦。

3 光学系统设计

3.1 设计结果

系统由两部分组成,分别是变焦系统和二次成像系统。将上文计算得到的初始结构数据,输入到 Zemax 光学设计软件中,并进行优化处理,最终设计结构如图 3 所示。系统采用锗和硅作为透镜材料,共由 11 片透镜组成,前 2 片镜子为前固定组,第 3 片为变倍组,第 4 片为补偿组,第 5 片为后固定组,第 6~9 片为二次成像系统,最后 2 片透镜分别为窗口和冷屏。

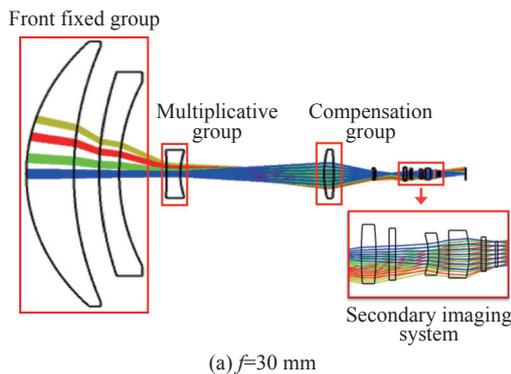
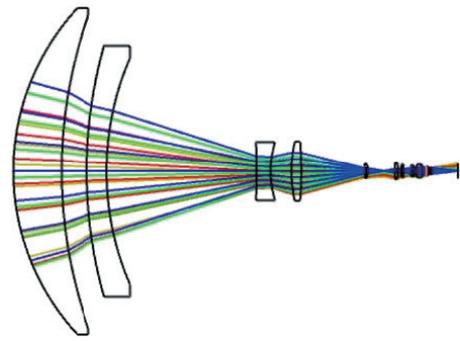
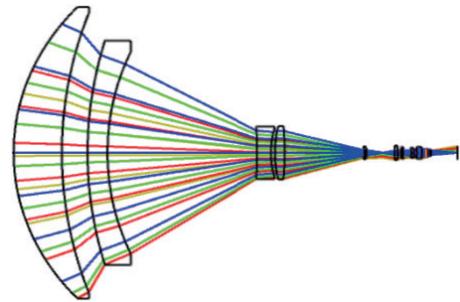
(a) $f=30$ mm(b) $f=550$ mm(c) $f=900$ mm

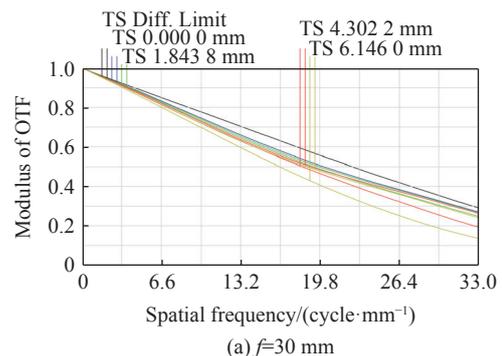
图 3 不同焦距下系统结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of the designed system at different focal lengths

为实现极短总长,整个变焦光学系统通过合理安排 4 片非球面以及 3 片衍射面来校正系统轴外像差。当系统处于长焦位置时,可以减少补偿组和后固定组的二级光谱负担,最后使得系统总长为 337 mm,冷光阑效率达到 100%,最大畸变小于 5%。

3.2 像质分析

红外变焦光学系统在不同焦距下的 MTF 曲线如图 4 (彩图见期刊电子版) 所示。在空间频率 33 lp/mm 处,对传递函数进行评价,可知:系统不同焦距的传递函数均达到 0.14 以上,且趋近衍射极限,证明全焦距范围内像质良好。该系统不同焦距下的畸变如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。可见,短焦畸变小于 4.7%,中焦畸变小于 3.6%,长焦畸变小于 4%。

(a) $f=30$ mm

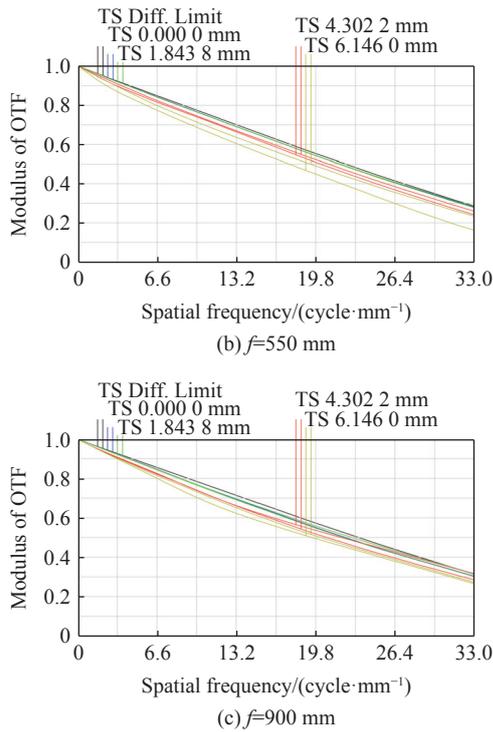


图 4 降敏前不同焦距下 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves at different focal lengths before desensitization

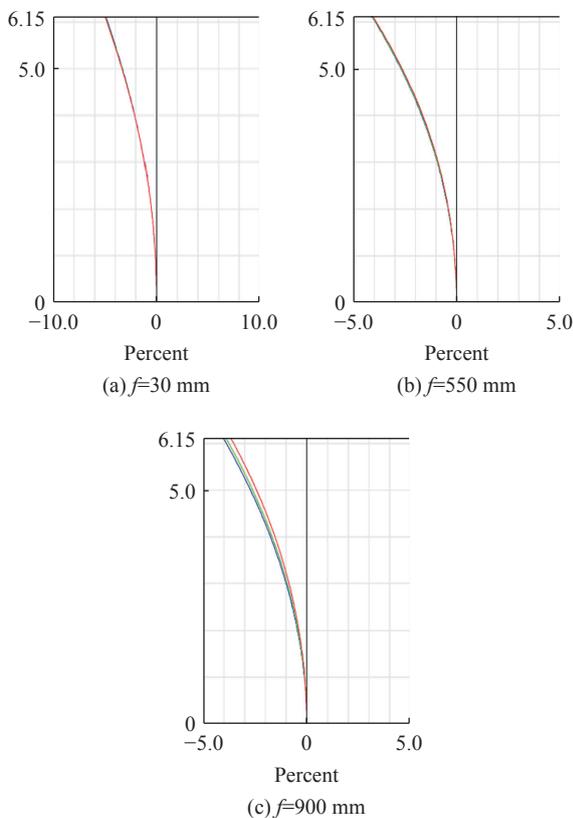


图 5 降敏前不同焦距下的畸变曲线

Fig. 5 Distortion curves at different focal lengths before desensitization

4 独立组元低敏感度设计

目前在大变倍比、长焦距变焦的前提下,为实现系统设计要求的极短总长,往往会导致系统中的透镜过于敏感,从而增加工程成本,因此需要对系统进行低敏感度设计^[13]。

常见的低敏感度设计方法是限制单个透镜的初级像差,从而达到小像差平衡^[14]。而本文则提出在光学设计过程中以组元为单位,根据变焦系统的特点,将固定组、变倍组、补偿组视作一个个独立的组元,通过限制单个组元的初级像差来降低系统的公差灵敏度。该方法可以在降低灵敏度的同时进行像差校正,极大地缩短了实现这两个条件所需的时间,还可以避免因该系统设计要求的极短总长导致的系统非球面数目的再度增加。这种方法还可以使公差分配更为宽松,从而降低成本^[15]。

通过公差分析,将 MTF 作为指标,分别找到各组元对像质影响最大的表面,降低对应表面的初级像差值。在成像质量变化不大的情况下,缓慢降低对应表面的初级像差值,防止像质发生太大的变化,出现优化错误。对比降敏前后像质,使其即大幅降低了各组元公差最敏感参数,又能确保成像质量。经过多次平衡优化,得到如图 6(彩图见期刊电子版)所示的蒙特卡罗公差分析结果。

根据图 6 可知,不同焦距降敏后公差分析结果均有着显著提高:当焦距为 900 mm 时,曲线平均幅度增长最大,为 19.5%;当焦距为 550 mm 时,曲线平均增长幅度为 16.8%;焦距为 30 mm 时,曲线平均增长幅度为 8.3%。

各组元公差最敏感参数变化情况如图 7 所示。其中,前固定组在 x、y 方向倾斜公差变化幅度较小,分别为 13.7% 和 6.8%,而变倍组元和补偿组元在曲率半径公差变化幅度较为显著,分别为 58% 和 49%。

降敏后变焦光学系统的 MTF 曲线如图 8(彩图见期刊电子版)所示。可见,相较于降敏前,不同焦距下的 MTF 曲线变化不大。在空间频率 33 lp/mm 处对 MTF 平均数进行评价:当焦距为 30 mm 时,平均数降低 1.13%;当焦距为 550 mm 时,平均数降低 1.44%;焦距为 900 mm 时,平均

数降低 4.96%。证明降敏对系统成像无明显影响。降敏后系统的畸变如图 9(彩图见期刊电子

版)所示,不同焦距下对应的最大畸变依旧小于 5%,满足设计要求。

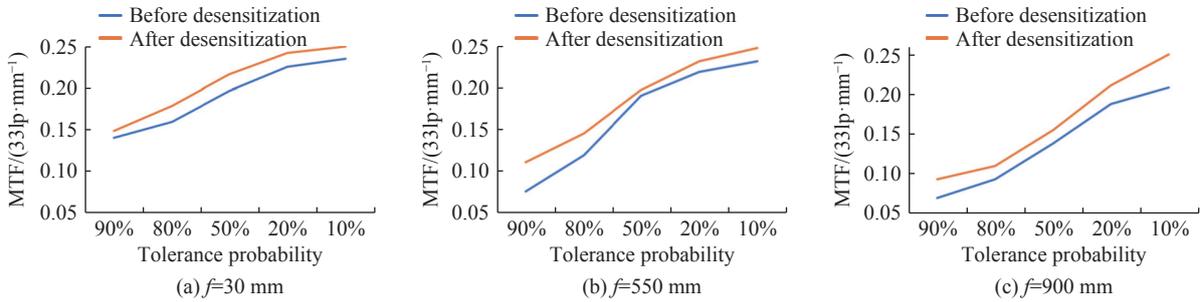


图 6 不同焦距下降敏前后公差分析结果

Fig. 6 Tolerance analysis results before and after desensitization at different focal lengths

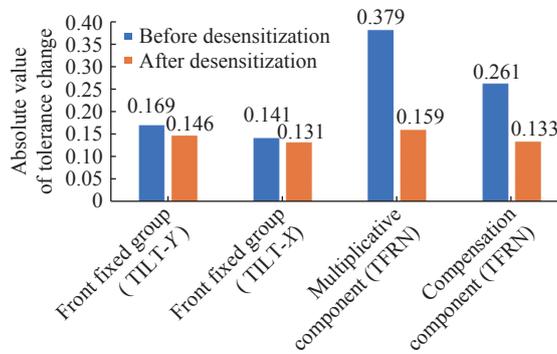


图 7 各组元公差最敏感参数变化图

Fig. 7 Diagram of the most sensitive parameter changes in each component's tolerances

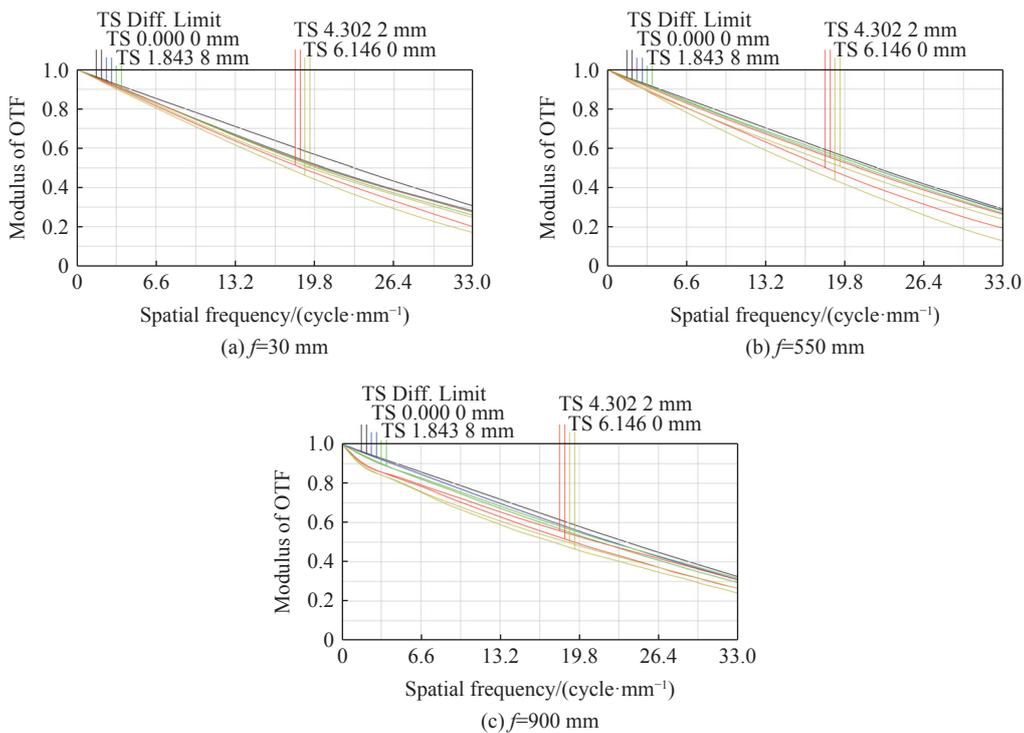


图 8 降敏后不同焦距下 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves at different focal lengths after desensitization

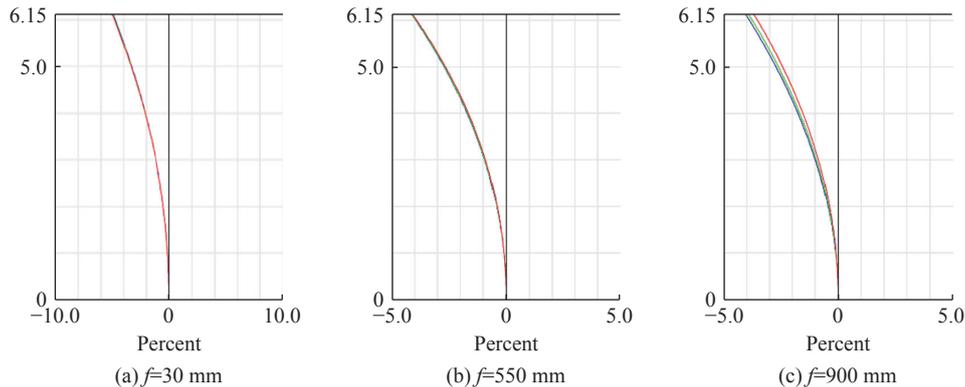


图 9 降敏后不同焦距下畸变曲线

Fig. 9 Distortion curves at different focal lengths after desensitization

5 结 论

本文设计了一种低敏感度大变倍比极短总长中波红外变焦光学系统,以机械正组补偿的变焦结构为基础,通过合理分配非球面和衍射面,来校正系统轴外像差,再利用二次成像系统实现冷光阑的匹配,减少系统的冷反射,最后通过独立组元低敏感度设计,降低系统的公差敏感度,极大地提

高了工程应用的可行性。在低敏感度要求下,实现了 30~900 mm 的长焦距连续变化,以及极短总长 337 mm 的 30 倍变倍比中波红外变焦系统。特别是用于狭小空间作业,对系统小型化有着严格要求的场合,该系统敏感度低、总长极短、长焦距变焦以及 30 倍的变倍比,优势明显。降敏后的系统设计均符合参数需求,且结构简单、成像像质良好,满足新一代光电吊舱对轻小型低敏感度长焦距中波红外变焦系统的迫切需求。

参考文献:

- [1] 张坤, 曲正, 钟兴, 等. 30 倍轻小型变焦光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(11): 1263-1271.
ZHANG K, QU ZH, ZHONG X, *et al.*. Design of 30× zoom optical system with light weight and compact size[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(11): 1263-1271. (in Chinese).
- [2] 姜凯, 周泗忠, 王艳彬, 等. 30×中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2162-2166.
JIANG K, ZHOU S ZH, WANG Y B, *et al.*. Design of 30× middle infrared continuous zoom system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2162-2166. (in Chinese).
- [3] 顾宪松. 紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(1): 33-38.
GU X S. Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 33-38. (in Chinese).
- [4] 陈虹达, 薛常喜. 大变倍比小型化的中波红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0222001.
CHEN H D, XUE CH X. Design of mid-wave infrared optical system with high variable ratio miniaturization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0222001. (in Chinese).
- [5] 张洪博, 闫阿奇, 何双亮, 等. 大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *光学学报*, 2023, 43(12): 1222002.
ZHANG H B, YAN A Q, HE SH L, *et al.*. Optical system design of MWIR continuous zoom lens with high zoom ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 1222002. (in Chinese).
- [6] LIU Y P, YANG B, GU P X, *et al.*. 50x five-group inner-focus zoom lens design with focus tunable lens using Gaussian brackets and lens modules[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29098-29111.
- [7] 李岩, 张葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦系统的小型化设计[J]. *应用光学*, 2013, 34(2): 215-219.
LI Y, ZHANG B, HONG Y F. Miniaturization design of large zoom ratio MWIR zoom optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(2): 215-219. (in Chinese).
- [8] 刘智颖, 高柳絮, 黄蕴涵. Offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(7): 0718003.
LIU ZH Y, GAO L X, HUANG Y H. Design of continuous zoom medium-wave infrared spectral imaging system based

- on Offner scheme[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0718003. (in Chinese).
- [9] 单秋莎, 谢梅林, 刘朝晖, 等. 制冷型长波红外光学系统设计[J]. *中国光学*, 2022, 15(1): 72-78.
SHAN Q SH, XIE M L, LIU ZH H, *et al.*. Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 72-78. (in Chinese).
- [10] KIM H S, KIM C W, HONG S M. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20: 1 zoom range and automatic athermalization[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(7): 1661-1667.
- [11] 唐晗, 夏丽昆, 刘炼, 等. 大变倍比制冷型长波红外变焦光学系统设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(1): 69-78.
TANG H, XIA L K, LIU L, *et al.*. Design of cooled long-wave infrared optical system with large zooming range[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 69-78. (in Chinese).
- [12] 闫晶. 高变倍比红外连续变焦光学系统设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
YAN J. *Design & research of high ratio IR continuous zoom system* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese).
- [13] 白瑜, 邢廷文, 蒋亚东. 国外红外光谱连续变焦成像系统的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(12): 3419-3423.
BAI Y, XING T W, JIANG Y D. Advances in infrared spectrum zoom imaging system research[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(12): 3419-3423. (in Chinese).
- [14] 张远健, 唐勇, 王鹏, 等. 光学系统设计中降低公差灵敏度的方法[J]. *光电工程*, 2011, 38(10): 127-133.
ZHANG Y J, TANG Y, WANG P, *et al.*. Method of tolerance sensitivity reduction of optical system design[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 127-133. (in Chinese).
- [15] 孟超, 郭俊, 付芸. 利用非球面简化红外连续变焦光学系统的研究[J]. *红外*, 2010, 31(4): 6-11.
MENG CH, GUO J, FU Y. Design of far-infrared zoom optical system based on aspheric surface[J]. *Infrared*, 2010, 31(4): 6-11. (in Chinese).

作者简介:



胡 源(1981—), 女, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事光学设计与检测方面的研究。
E-mail: huy@cust.edu.cn