

一种紧凑型红外双波段导引头光学系统研究

姚立伟, 逯力红

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年6月6日; 发布日期: 2025年6月16日

摘要

文章聚焦于中、长波红外导引头光学系统研究。通过设计增强全天候工作以及红外双波段协同工作等关键能力, 并实现光学系统的紧凑化设计。采用碲镉汞双色红外探测器, 有效解决了传统导引头光学系统因多光路、多探测器配置而导致的尺寸过大与质量过重的难题。建立中、长波红外协同工作模式, 提升导引头光学系统的目标识别能力。系统总长度控制在67 mm左右, 布局紧凑以实现小型化设计目标, 能够更好地适应各类装备平台的安装需求。设计结果表明, 该系统增强了全天候工作能力。中波红外的调制传递函数(MTF)在截止频率处可达0.5, 长波红外的MTF在截止频率处大于0.25, 中、长波系统的点列图均接近衍射极限, 并且在-45℃~60℃温度范围均能够实现较好的成像质量。该设计为复杂环境下的精确制导提供了有力支撑。

关键词

光学系统, 导引头, 红外双波段

Research on a Compact Infrared Dual-Band Seeker Optical System

Liwei Yao, Lihong Lu

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Jun. 6th, 2025; published: Jun. 16th, 2025

Abstract

This study focuses on the development of a mid-wave infrared (MWIR) and long-wave infrared (LWIR) seeker optical system. The design enhances critical capabilities, including all-weather operation and dual-band infrared collaboration, while achieving a compact optical system architecture. By employing a mercury cadmium telluride (MCT) dual-color infrared detector, the system effectively addresses

the challenges of excessive size and heavy weight associated with multi-optical-path and multi-detector configurations in the traditional seeker optical system. A collaborative working mode between MWIR and LWIR is established to improve target recognition capabilities of seeker optical system. The total system length is optimized to approximately 67 mm, with a compact layout to meet miniaturization objectives, ensuring compatibility with various equipment platforms. Experimental results demonstrate that the system significantly enhances all-weather operational performance. The modulation transfer function (MTF) of the MWIR system reaches 0.5 at the cutoff frequency, while the MTF of the LWIR system exceeds 0.25 at the cutoff frequency. Spot diagrams for both MWIR and LWIR systems approach the diffraction limit, and the system maintains high imaging quality across a temperature range of -45°C to 60°C . This design provides robust support for precision guidance in complex environments.

Keywords

Optical System, Seeker, Infrared Dual-Band

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自第二次世界大战以来, 导弹所发挥的战略战术价值日益显著。光学系统是导弹导引头系统中关键的信息获取单元, 在目标探测、识别以及追踪之中发挥着至关重要的作用。常见的光学制导方式包括红外光学制导、电视制导以及多光谱成像技术等。其中, 红外光学制导属于被动制导, 通过接受目标红外辐射识别目标, 无需主动发射信号, 因此具备良好的隐蔽性, 在现代军事应用场景中具备显著优势[1], 且能够实现全天工作, 并具备产投烟雾等障碍的能力。因此, 能够综合利用不同波段的红外辐射特性, 有效提升目标探测准确性与可靠性的红外双波段技术被逐步开发。其中, 中波红外($3\text{ }\mu\text{m}\sim 5\text{ }\mu\text{m}$)对高温目标具备较为可观的灵敏度, 具备探测发动机尾焰等强红外辐射源的能力; 长波红外($8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)能够捕捉目标轮廓与背景的温度差异, 在复杂背景下能够获得较好的识别效果。相比于单一模式或波段的探测, 中、长波融合探测, 可使光学系统获得更加丰富的目标信息, 有效增强导引头探测与识别目标的能力, 提高识别效率。

然而, 传统的红外双波段导引头光学系统存在尺寸较大、结构复杂以及质量大等问题。这些问题加大了导引头在导弹的设计与部署的难度, 极大降低了导弹在实战中的机动性与隐蔽性。因此, 在追求导引头轻量化、紧凑化的趋势下, 结构更加紧凑的双波段红外导引头光学系统的研究具有重要意义。

国外对多模式红外制导光学系统已有一定研究, 2018 年, Sakarya [2]设计了一种工作于中波、长波的双波段红外制导光学系统, 但该光学系统采用的探测器像元尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$, 分辨率为 320×256 , 分辨水平较低, 无法满足高精度制导要求, 并且长度较长, 约为 110 mm 。2019 年, Sakarya 和 Bayram 设计的短、中波红外导引头光学系统中, 适用高分辨率下的物体识别, 但不具备长波红外探测能力, 并在极端温度适应方面有所欠缺, 并且尺寸较大, 导引头直径为 180 mm [3]。

国内学者同样对该领域进行了深入研究。2015 年, 殷笑尘等在红外光学系统的研究中实现了较为紧凑的红外系统设计, 但分辨率较低, 响应波段较窄, 为 $3.7\text{ }\mu\text{m}\sim 4.8\text{ }\mu\text{m}$, 无法实现较宽波段下的目标识别

与精确制导[4]。2021年, 张宇飞等采用透射式结构进行中波红外光学系统导引头设计, 达到较为紧凑的结构, 但焦距仅为 33 mm, 令导引头的探测距离受到影响[5]。2023年, 谢亚峰等设计的系统中长波红外波段的焦距为 70 mm、等效 F 数为 1.3、空间频率为 41.7 lp/mm 时, 各视场 MTF 值均大于 0.136 [6]。2024年, 王琛等在其设计系统中采用了 8 μm ~12 μm 长波红外波段, 并为多模式制导功能预留了扩展空间。然而, 该系统长度为 86 mm, 占据了导引头内部较大空间, 限制了其在小尺寸平台上的应用潜力[7]。同年, 吕阳等在中红外与可见光导引头光学系统的设计中进行了探索, 但其系统结构几何尺寸为 230 mm $\times$ 110 mm $\times$ 150 mm, 对导引头的紧凑化设计需求构成了显著挑战[8]。

本文研究了一种紧凑型红外双波段导引头光学系统。红外双波段导引头光学系统采用的探测器像元尺寸为 17 μm , 分辨率为 640 $\times$ 512。在保障成像质量的同时, 通过创新光学结构与选用先进的光学材料, 显著减小系统体积与重量, 将系统长度控制在 67 mm 左右, 小于当前较长焦距导引头系统的 80 mm~100 mm。通过紧凑化布局设计, 系统能实现小型化目标, 显著提升其在多种装备平台上的适配性和部署灵活性, 为提升精确制导武器的综合性能提供切实可行的解决方案。

2. 系统设计

2.1. 设计要求

双波段红外光学导引头具备全时段工作能力。中波红外与长波红外共同工作, 使导引头在复杂的辐射背景中, 接收各个波段显著的光谱差异, 同时拥有强大的抗干扰性, 以便精准识别目标, 排除干扰, 保障系统在不同环境下稳定运行, 对地面坦克、车辆等目标的打击具有良好效果。红外双波段导引头光学系统设计需要考虑诸多因素: 首先, 工作波长要在大气窗口内; 其次, 探测器在工作波段应具备较高响应灵敏度; 最后, 目标与背景差异大, 确保系统工作稳定性[9]。

2.2. 光学系统的指标

根据红外双波段导引头光学系统的作战距离以及探测器实际情况, 对该光学系统的设计参数要求如表 1 所示。

Table 1. Optical system design parameters

表 1. 光学系统设计参数

Parameter	Objective value
Wavelength range	3~5 μm , 8~12 μm
Field of view angle	$\pm 1.726^\circ$
F number	1.3
Focal length	110 mm

2.3. 总体结构

本文设计了一种中波/长波红外双波段协同工作的卡塞格林光学系统。中、长波红外共同工作, 整流罩采用金刚石材料, 无穷远处的平行光经过金刚石材料的整流罩进入光学系统。入射光线依次经主镜、次镜的两次反射进入红外双波段光学系统, 最终采用中波/长波碲镉汞双色红外探测器接收[10]。系统的总体结构如图 1 所示。

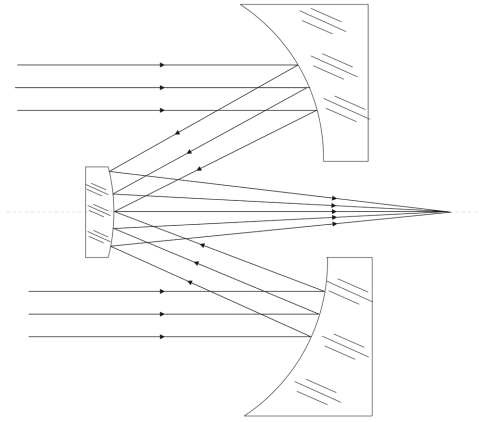


Figure 1. Overall configuration of the optical system of the infrared dual-band seeker
图 1. 红外双波段导引头光学系统总体构型

3. 光学系统设计

3.1. 焦距计算

根据作战要求以及实际指标, 导引头采取其需具备识别 5 km~10 km 目标的能力。目标坦克或车辆的线尺寸为 8 m × 3.6 m。结合以上数据, 对光学系统的总焦距进行计算:

$$f' = \frac{h}{H} L \quad (1)$$

其中, f' 为光学系统总焦距, h 为像尺寸大小, H 为目标尺寸大小, L 为作用距离。将以上数据代入公式(1), 得到光学系统的总焦距约为 110 mm。此焦距为初步计算所得到的结果, 具体数值将在后续设计中进行小幅度优化。

3.2. 性能参数计算

根据设计指标中的系统通光口径 90 mm 以及焦距 110 mm, 卡塞格林光学系统中的主镜与次镜曲率半径、主镜与次镜间隔等参数需要进行进一步计算确定。其中, 次镜遮光比 α 与次镜放大倍数 β 由主镜与次镜参数确定[11]:

$$\alpha = \frac{l_2}{f'_1} = \frac{2L_2}{R_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{2f'}{R_1} = \frac{f'}{f'_1} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, D_1 与 D_2 为主镜与次镜的口径, R_1 与 R_2 为主镜与次镜的曲率半径, f' 与 f'_1 为系统总焦距与主镜焦距, l_2 与 l'_2 为物体对次镜成像的物距与物体对次镜成像后的像距。由近轴光学公式以及各个参数相对位置关系得:

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta} R_1 \quad (4)$$

根据系统指标要求, 系统焦距为 110 mm、口径为 90 mm, 通过以上公式求解光学系统初始结构。结合对光学系统总长度、主次镜相对口径等几个方面因素, 取主镜焦距 $f'_1 = 95$ mm。

则次镜的放大倍数 β 为:

$$\beta = \frac{f'}{f'_1} = -1.22 \quad (5)$$

根据设计指标和系统要求的设计方案, 焦点伸出量 $\Delta = 10 \text{ mm}$ 。计算可得:

$$l_2 = \frac{-f'_1 + \Delta}{\beta - 1} = -47.3 \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{l_2}{f'_1} = 0.43 \quad (7)$$

由已求得的参数这里给出具体参数值求解主镜与次镜的曲率半径:

$$R_1 = 2 \times \frac{l_2}{\alpha} = -220 \text{ mm} \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta} \times R_1 = -500 \text{ mm} \quad (9)$$

主镜与次镜的间隔为:

$$d = f'_1 - l_2 = -47.7 \text{ mm} \quad (10)$$

将上述参数输入光学系统设计软件, 将曲率半径、厚度等参数设为变量, 在后续操作中通过操作数进一步优化。在材料选择方面, 由于锗与硫系材料在中波与长波红外具有较好的透过率与较低的色散, 因此后续透镜采用锗与硫系材料。同时, 为保证光学系统在极端环境下的成像质量, 避免温差导致成像质量下降, 光学系统需具备极端温度稳定成像的能力, 依据《军用装备实验室环境试验方法》第 3 部分与第 4 部分的相关规定, 红外光学系统需在 -45°C 至 55°C 的温度区间内, 确保其成像质量符合既定标准。利用光学系统设计软件进行优化后, 红外双波段导引头光学系统如图 2 所示。

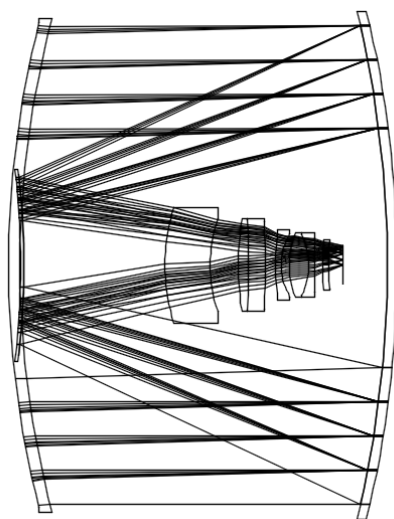


Figure 2. Optical path diagram of optical system of the infrared dual-band seeker
图 2. 红外双波段导引头光学系统光路图

在光学系统设计软件的优化过程中, 使用多种操作数对光学系统进行优化, 将光学镜片的曲率半径、间隔等参数设置为变量进行全局优化, 采用的材料库为成都光明与 INFRARED。在优化过程中, 对初始结构计算所得的参数进行了优化, 进一步提升系统的成像质量。最终得到优化后的镜头数据如图 3 所示。

表面	类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	半直径	延伸区	机械半直径	圆锥系数	TCE x 1E-6	2阶项	4阶项	6阶项	8阶项	10阶项	12阶项
0	物面	标准面	无限	无限			无限 U	0.0...	无限 U	0.000	0.000						
1	(孔径)	标准面	172.868	1.994	CSBR		43.945 U	0.0...	43.702 U	0.000	-						
2	(孔径)	标准面	170.675	65.018			43.702 U	0.0...	43.702 U	0.000	0.000						
3	光阑 (孔径)	偶次非球面	-189.052	-64.2...	MIRROR		42.391 U	0.0...	45.000 U	0.000	0.000	0.000	1.932E-08	-7.149E-12	7.629E-15	-3.612E-18	6.566E-22
4	(孔径)	标准面	-139.509	24.973	MIRROR		15.060 U	0.0...	17.000 U	0.000	0.000						
5	(孔径)	标准面	34.754	7.994	GERMANIU...		10.255 U	0.0...	10.255 U	0.000	-						
6	(孔径)	标准面	26.272	4.980			8.177 U	0.0...	10.255 U	0.000	0.000						
7	(孔径)	标准面	53.817	1.824	HWS1		8.157 U	0.0...	8.157 U	0.000	-						
8	(孔径)	标准面	-158.882	2.972	HWS7		8.029 U	0.0...	8.157 U	0.000	-						
9	(孔径)	标准面	-109.503	1.785			7.766 U	0.0...	8.157 U	0.000	0.000						
10	(孔径)	标准面	46.862	1.000	ZNSE		6.253 U	0.0...	6.253 U	0.000	-						
11	(孔径)	标准面	11.018	1.400			5.599 U	0.0...	6.253 U	0.000	0.000						
12	(孔径)	标准面	14.799	3.480	HWS1		5.671 U	0.0...	5.671 U	0.000	-						
13	(孔径)	标准面	-11.963	1.000	HWS7		5.372 U	0.0...	5.671 U	0.000	-						
14	(孔径)	标准面	108.994	1.471			4.846 U	0.0...	5.671 U	0.000	0.000						
15	(孔径)	标准面	56.974	1.000	ZNSE		4.439 U	0.0...	4.439 U	0.000	-						
16	(孔径)	标准面	50.191	2.538			4.189 U	0.0...	4.439 U	0.000	0.000						
17	像面	标准面	无限	-			3.412 U	0.0...	3.412 U	0.000	0.000						

Figure 3. Lens data

图 3. 镜头数据

4. 成像质量评价

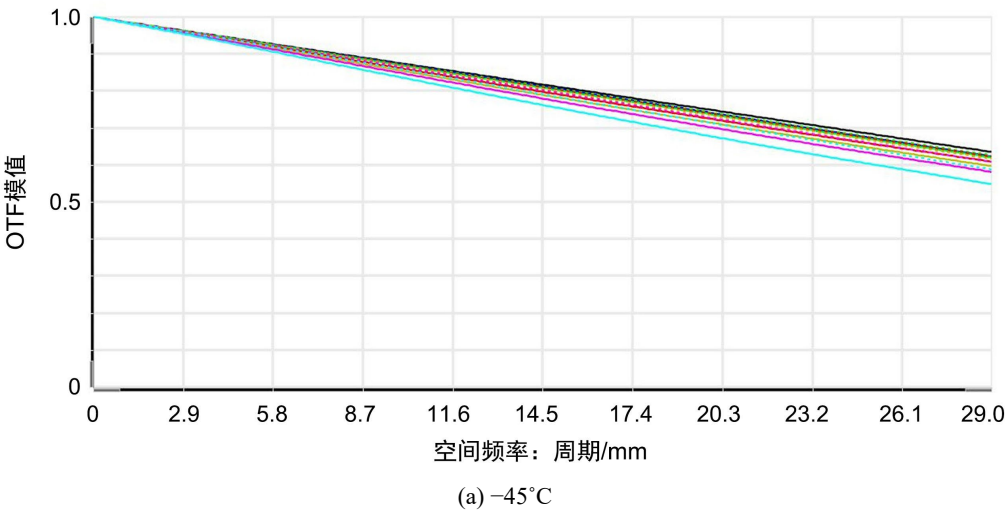
4.1. 光学传递函数

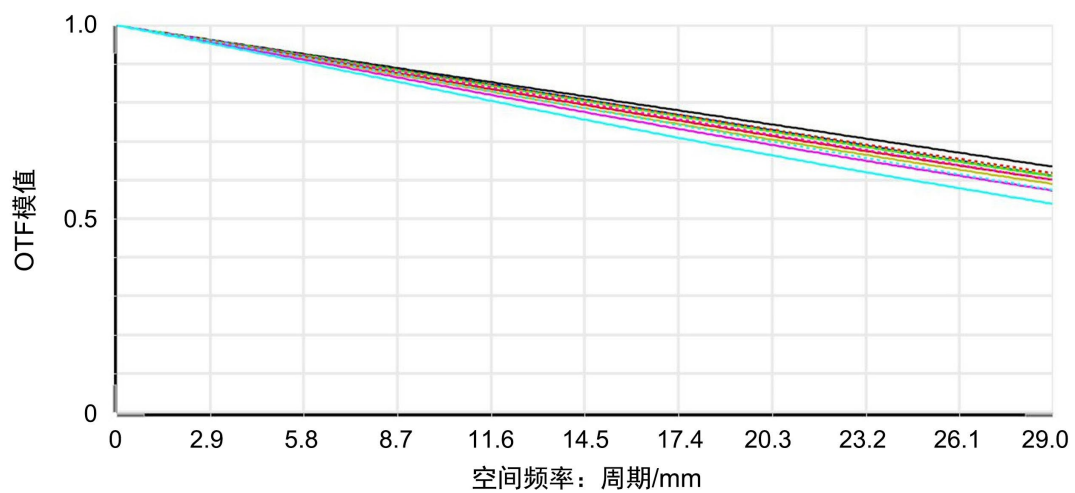
光学传递函数基于傅里叶分析，将物平面的光场分布看作由一系列不同空间频率的正弦光栅组成，进而反映光学系统对这些不同空间频率成分的传递特性。光学传递函数也是物函数的傅里叶变换与像函数的傅里叶变换之比，其反映光学系统对不同空间频率的正弦信号的调制能力和相位移动情况。根据奈奎斯特定理，在最高采样频率为系统采样频率的二分之一时，原始信号可以被数字信号完整保留。因此，探测器采样的特征频率为[12]：

$$f_r = \frac{1}{2d}$$
(11)

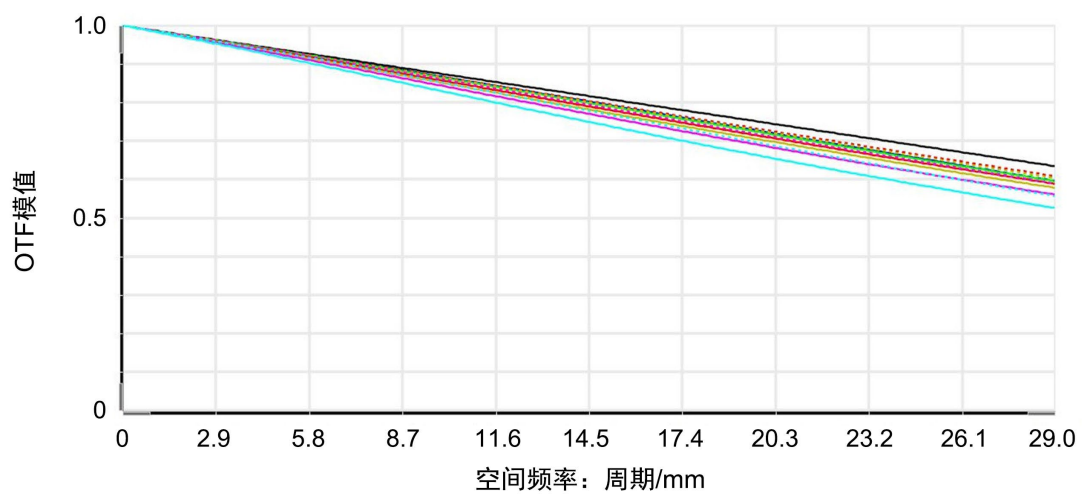
其中， d 为探测器的像元尺寸。将红外探测器像元尺寸 $17\text{ }\mu\text{m}$ 代入计算，得到红外双波段导引头光学系统的特征频率约为 29 lp/mm 。如图 4 所示为该光学系统于红外中波段在 -45°C 、 20°C 以及 55°C 下的传递函数曲线。在截止频率 29 lp/mm 处，调制函数都能够大于 0.5 ，接近衍射极限，满足成像要求。

图 5 为该光学系统于红外长波段在 -45°C 、 20°C 以及 55°C 下的传递函数曲线。在截止频率 29 lp/mm 处，调制函数都能够大于 0.25 ，接近衍射极限，满足成像要求。

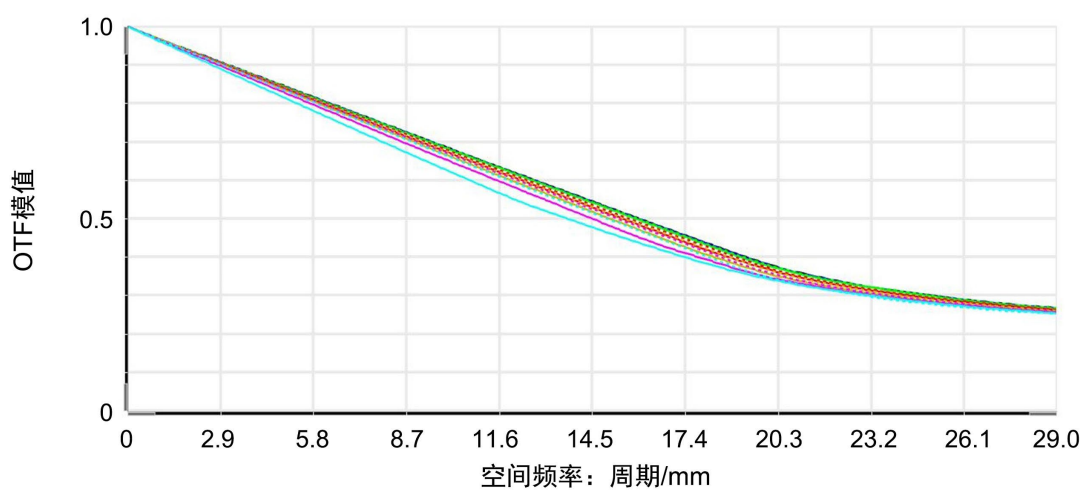




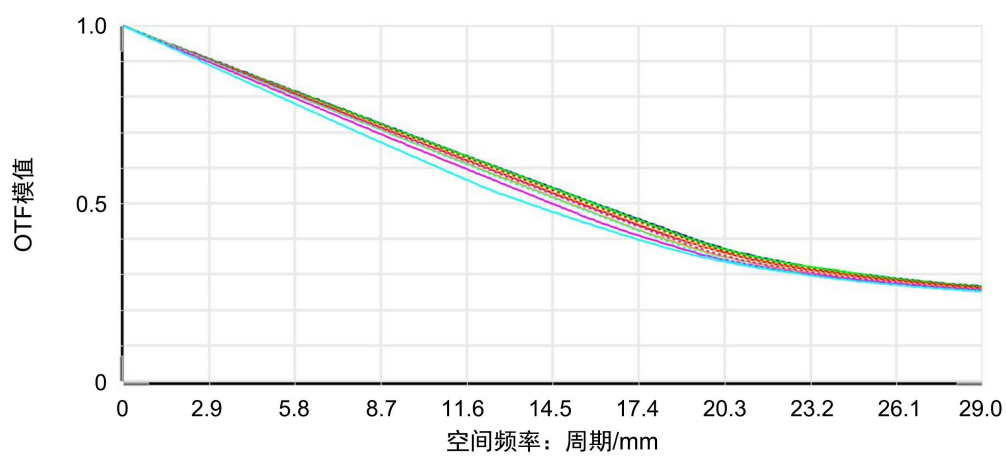
(b) 5°C



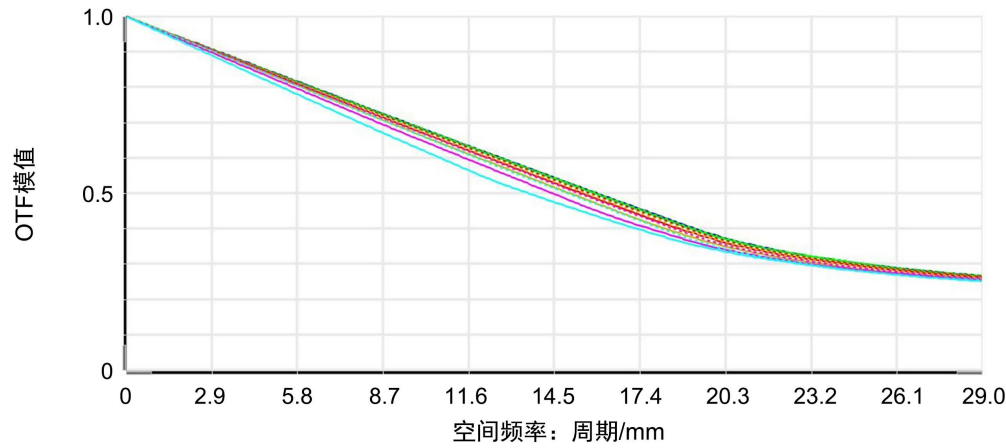
(c) 55°C

Figure 4. Transfer function of the optical system at various temperatures in the mid-wave infrared range**图 4.** 光学系统中波红外下各温度的传递函数

(a) -45°C



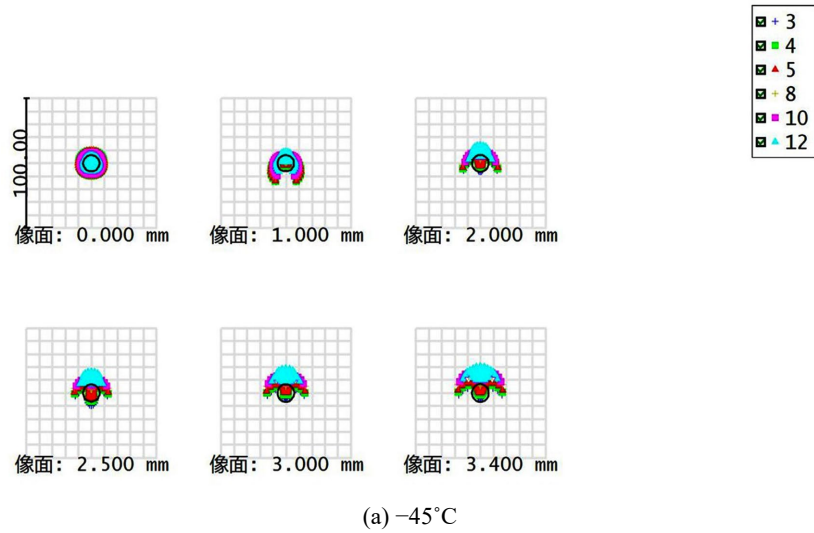
(b) 5°C



(c) 55°C

Figure 5. Transfer function of the optical system at various temperatures in the long-wave infrared range
图 5. 光学系统在长波红外下各温度的传递函数

4.2. 点列图



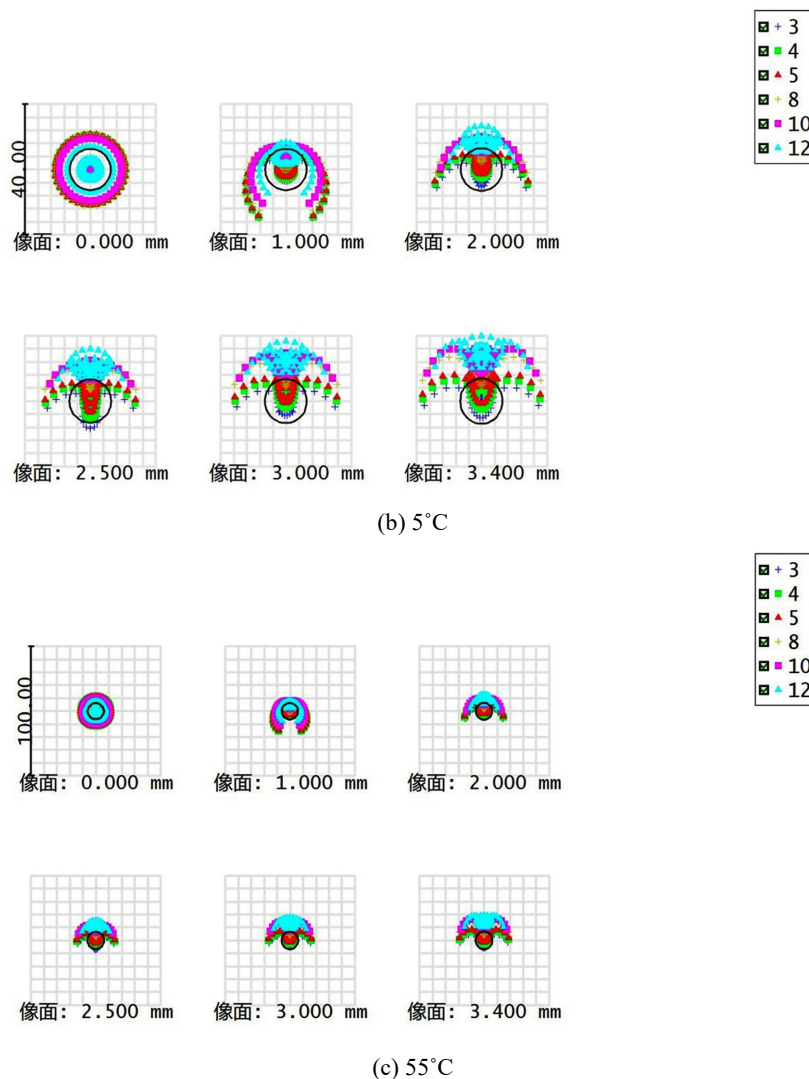


Figure 6. Spot diagrams of the optical system at various temperatures in the mid-wave and long-wave infrared bands
图 6. 光学系统在中、长波红外下各温度的点列图

点列图是根据光点的分布情况绘制出来所得到的图形。光线在一个分布范围内形成光点集合，这是由于物点发出的光线经过光学系统成像后，受到像差等因素的影响，使得光线不再汇聚于一点。点列图可以直观地展示光学系统对物点成像的弥散程度。当点列图中的光点分布较为集中时，说明光学系统的成像质量较好；反之，如果光点分布很分散，形成一个较大的弥散斑，则表明光学系统存在较大的像差，成像质量较差。图 6 为该光学系统于红外中、长波段在-45°C、5°C以及 55°C下的点列图。可以看到，在各个温度下，点列图尺寸接近衍射极限，且都小于探测器像元尺寸，满足成像要求。

4.3. 畸变与场曲

畸变指光学系统成像时，物像的形状相对于物的形状发生了变形，主要表现为物平面上的直线在像平面上变成了曲线。畸变对成像质量的影响主要体现在对物体形状的还原上。图 7 为光学系统的畸变曲线。

由图 7 可以看出，畸变曲线没有出现明显的剧烈波动或异常弯曲，表明畸变情况良好，同时畸变百

分比数值为 2.8127%，小于 5%，说明畸变满足成像要求。

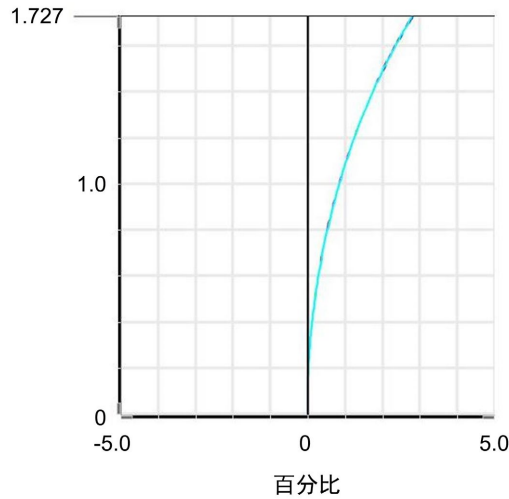


Figure 7. Distortion curve of optical system
图 7. 光学系统畸变曲线

场曲的存在令不同位置物点的像分布在一个弯曲的表面上。其影响是使整个视场范围内的图像不能同时清晰成像，当对焦在图像的中心部分时，边缘部分可能会变得模糊；而当对焦在边缘部分时，中心部分又可能不清晰。**图 8** 为光学系统的场曲分析图，从场曲图可见，子午场曲与弧矢场曲的曲线较为平坦，没有明显的弯曲趋势，说明场曲较小。同时，场曲数值中的子午场曲与弧矢场曲分别为 0.0190 mm 与 0.0136 mm，在 ± 0.05 以内，说明其场曲较小。

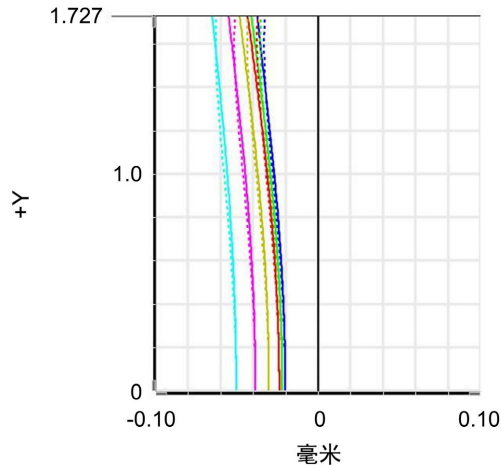


Figure 8. Field curvature of optical system
图 8. 光学系统场曲

5. 公差分析

公差分析作为光学设计和制造过程中的重要环节，用于评估光学系统在各种元件公差和装配误差影响下的性能变化。其目的在于降低各种因素导致的公差变化对系统成像质量、光传输效率等性能指标的影响程度，确保系统在允许的公差范围内仍能满足设计要求。同时，为光学元件的加工精度、装配精度

等提供合理的公差范围, 使制造商能够在保证系统性能的前提下, 采用经济可行的加工和装配工艺, 降低生产成本。

本文采用灵敏度法进行公差分析。公差设置如表 2 所示, 截止频率设置为 29 lp/mm。在进行 20 次蒙特卡洛采样计算分析后, 公差分析结果如表 3 所示。

Table 2. Optical system tolerance setting

表 2. 光学系统公差设置

Tolerance type	tolerance value
Index of refraction	0.001
Radius of curvature/mm	0.02
Thickness/mm	0.05
Abbe number/%	1
Element decentering/mm	0.05
Surface decentration/mm	0.05

Table 3. Tolerance analysis results

表 3. 公差分析结果

Yield rate	MWIR>	LWIR>
90%	0.39134742	0.26042989
80%	0.39450418	0.26163841
50%	0.41055931	0.26421063
20%	0.41665391	0.26525975
10%	0.41853197	0.26643921

由表 3 可知, 该光学系统在中波红外波段, 截止频率为 29 lp/mm 时, 90%调制传递函数(MTF)大于 0.39; 在长波红外波段, 截止频率为 29 lp/mm 时, 90%调制传递函数(MTF)大于 0.26。该结果符合预期成像指标, 且加工与装调难度低, 具备较高的工程可实现性。

6. 结论

本文设计了一种结构紧凑的中、长波段红外导引头光学系统, 该系统能够满足成像要求。该双模式导引头采用碲镉汞双色红外探测器, 节约导引头空间, 并增强全天候工作能力与目标识别能力, 提升了系统对不同红外波段信号的捕捉与处理能力, 为实现精准探测与成像提供保障。导引头光学系统结构紧凑, 在确保成像质量的条件下, 其光学系统长度小于 67 mm。文中分别针对两个波段展开温度分析, 结果表明, 红外模式在特定极端温度下均可实现满足成像需求的性能。同时, 该系统采用常用锗、硅等红外光学材料, 公差合理, 便于装调, 具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 刘箴, 吴馨远, 陈士超, 等. 典型红外精确制导武器发展分析[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(1): 19-27.
- [2] Sakarya, D.U. (2018) Optical Design of Dual-Mode Seeker for Long-Wave Infrared and Mid-Wave Infrared Seeker in Missile Application. *Optical Modeling and Performance Predictions X*, Vol. 10743, 107430I. <https://doi.org/10.1117/12.2320982>

- [3] Sakarya, D.U. and Bayram, A. (2019) Optical Design of Dual Mode Seeker for Short-Wave Infrared and Four Quadrant Detectors in Missile Application. *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXVII*, Vol. 10912, 109121K. <https://doi.org/10.1117/12.2510295>
- [4] 殷笑尘, 付彦辉. 红外/激光共孔径双模导引头光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 428-431.
- [5] 张宇飞, 李文豪, 王东振. 某型红外光学导引系统改进设计研究[J]. 航空维修与工程, 2021(12): 68-71.
- [6] 谢亚峰, 朴明旭, 唐金力, 等. 激光/红外双模环形孔径导引头光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 400-407.
- [7] 王琛, 胡小波, 曹尔聪, 等. 激光红外复合制导光学系统小型化共孔径设计[J]. 弹箭与制导学报, 2024, 44(3): 74-80.
- [8] 吕阳, 辛宏伟, 康玉思, 等. 红外与可见光双模导引头光学系统设计[J]. 红外技术, 2024, 46(1): 27-30.
- [9] 毛延凯, 赵振宇, 张国华, 等. 红外双波段/双视场导引头的 optics 设计[J]. 红外与激光工程, 2020(7): 222-226.
- [10] 叶振华, 何力, 李杨, 等. 同时模式的中波/长波碲镉汞双色红外探测器[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(6): 497-500.
- [11] 邹营营. 基于卡塞格林光学系统的红外目标模拟器技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [12] 吴海清, 李同海, 谈大伟. 小型折反式短波红外光学系统设计[J]. 红外, 2024, 45(2): 1-8.