

文章编号: 1002-1582(2026)04-0403-08

基于双光楔的长波像方扫描光学系统设计

姜子康, 刘鑫*, 李晓杰, 李复生, 陈青山, 吕勇

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘 要: 针对传统长波红外探测光学系统在大视场应用中存在视场范围受限、整体结构尺寸偏大以及重量较高等不足, 设计了一种基于双光楔偏转的长波像方扫描光学系统。系统通过引入双光楔旋转扫描机制, 在保证成像性能的基础上实现大范围视场获取, 并有利于系统的小型化和轻量化。整体光学结构由前置望远光学系统、双光楔扫描单元和后端成像光学系统组成。前置望远部分采用开普勒式结构, 利用其中间实像面的特点, 为系统出瞳与入瞳的匹配提供了便利, 也降低了后续扫描与成像模块的耦合难度。成像光学系统围绕长波红外工作波段进行优化设计, 实现了与前置望远系统的光瞳匹配, 并兼顾了较大的相对孔径和较好的像质表现。最终, 将前置望远系统与成像系统完成耦合, 并结合双光楔实现像方扫描后, 系统可获得 $\pm 25^\circ$ 的物方扫描范围。在 $8\sim 12\mu\text{m}$ 工作波段内, 系统在 42lp/mm 处的调制传递函数大于0.3, 弥散斑半径小于 $8\mu\text{m}$, 表明设计具有较好的成像质量, 能够满足长波红外大视场扫描成像的应用需求。

关 键 词: 像方扫描; 长波光学系统; 双光楔; 望远光学系统; 成像光学系统; 光学设计

中图分类号: TN202

文献标识码: A

Design of Long-wave image square scanning optical system based on double optical wedges

JIANG Zikang, LIU Xin*, LI Xiaojie, LI Fusheng, CHEN Qingshan, LV Yong

(School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of traditional long-wave infrared detection optical system in large field of view application, such as limited field of view, large overall structure size and high weight, a long-wave image scanning optical system based on double wedge deflection is designed. By introducing a dual-wedge rotation scanning mechanism, the system achieves a wide range of field of view acquisition on the basis of ensuring imaging performance, which is conducive to the miniaturization and lightweight of the system. The overall optical structure is composed of a front telescope optical system, a double wedge scanning unit and a back-end imaging optical system. The pre-telescope part adopts the Kepler structure, which provides convenience for the matching of the exit pupil and the entrance pupil of the system by using the characteristics of the middle real image plane, and also reduces the coupling difficulty of the subsequent scanning and imaging module. The imaging optical system is optimized around the long-wave infrared working band, which realizes the pupil matching with the front telescope system, and takes into account the larger relative aperture and better image quality performance. Finally, the front telescope system is coupled with the imaging system, and the image scanning is realized by combining the two optical wedges. The system can obtain an object scanning range of $\pm 25^\circ$. In the working band of $8\sim 12\mu\text{m}$, the modulation transfer function of the system at 42lp/mm is greater than 0.3, and the radius of the dispersion spot is less than $8\mu\text{m}$. It shows

收稿日期: 2026-04-26; 收到修改稿日期: 2026-05-19

基金项目: 北京市自然科学基金青年项目 (4224094)

作者简介: 姜子康 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事光学设计研究。jiangzikang1118@163.com

刘鑫 (1994—), 女, 副教授, 博士, 从事新型光学系统设计研究。

* 通讯作者: liuxin2020@bistu.edu.cn

that the design has good imaging quality and can meet the application requirements of long-wave infrared large field scanning imaging.

Keywords: Image-space scanning; long-wave optical system; double optical wedge; telescopic optical system; imaging optical system; optical design

0 引 言

随着非制冷红外焦平面阵列成本的下降和性能的提升,长波红外技术的应用在军事领域(如精确制导、夜视侦察、预警系统)和民用领域,涵盖安防监控、工业测温、自动驾驶夜视、医疗诊断以及气象遥感等,展现出巨大的市场潜力和研究价值^[1]。长波红外探测的核心价值在于其对常温世界的高效感知能力,尤其在夜间、恶劣环境及隐蔽目标探测方面不可替代^[2]。

在诸多应用场景中,为了实现对大范围区域的快速覆盖或对特定运动目标进行稳定跟踪,光学扫描技术成为光学设计的核心环节^[3]。根据扫描器放置位置的不同,光学扫描系统分为物方扫描和像方扫描^[4]。物方扫描技术成熟,但扫描机构体积庞大、惯性高,难以满足现代装备对高速、轻量化、高稳定性的迫切需求^[5]。因此,本文重心转向结构更紧凑、动态性能更优的像方扫描技术。

在像方扫描技术中,双光楔扫描系统作为一种无惯性、高精度的光束控制方案,近年来受到广泛关注。其通过独立控制两个具有微小楔角的光学楔镜的旋转,即可在像方实现复杂而精确的二维扫描轨迹。与传统机械扫描相比,双光楔系统摒弃了笨重的摆动或旋转反射镜,具有体积小、重量轻、扫描速度快、控制灵活等显著优点^[6]。早期研究多集中于激光通信、可见光成像等领域,但将其应用于对像差、材料敏感的长波红外成像系统,仍是一项充满挑战的前沿课题^[7]。

在双光楔扫描研究方面,双光楔扫描技术正从原理探索走向工程化应用。杨毅团队针对激光三维成像雷达中的应用,肯定了双光楔扫描在减小系统体积、降低能耗和提高精度方面的价值,并深入分析了其扫描轨迹冗余问题,提出了通过优化转速比来降低冗余、提升成像帧频的方案。在激光通信领域,邢振冲团队利用双光楔取代传统的机械伺服转台,建立了非近轴光线追迹模型,为轻小型激光通信光端机的设计提供了重要参考^[8]。此外,该技术在车载扫描系统的像移补偿和机载光电探测设备的快速定位控制中也展现了其应用潜力。英国 Covision 公司将双光楔结构与 Sagnac 干涉仪结合,提出了一种用于测量高层大气风场的横向剪切干涉仪。该设计通过移动一个光

楔即可实现光程差(OPD)的精确调控,省去了半波片,实现了大视场工作,凸显了双光楔在精密测量中的灵活性^[9]。此外,该技术在对地观测、环境监测和资源勘探等领域也被认为具有重要价值^[10]。可以看出双光楔扫描器件在各个领域都有着非常重要的作用,因此将双光楔扫描引入长波探测系统中是十分有前景的,该技术可以减小系统体积、降低能耗、使系统获得更大的视场进而获得更丰富的信息^[7]。

为此,本文提出一种基于双光楔的长波像方扫描系统设计方案,由于双光楔扫描会引入随扫描角变化的光束偏转和像差变化,同时长波红外系统受材料选择、色差校正和大相对孔径像质控制等因素限制,因此该类系统的设计难点在于如何在大视场扫描、光瞳匹配和成像质量之间取得平衡。本文通过对望远系统、双光楔扫描器件和成像系统优化耦合,在保证成像质量的前提下,实现小型化大视场扫描。

1 光学系统理论

1.1 光学系统参数分析

为满足长波红外大视场扫描成像需求,首先依据探测器参数与系统任务指标确定总体光学参数。本文选用面阵规模为 1280×1024 、像元尺寸为 $12\mu\text{m}$ 的长波红外探测器,并将系统初始焦距和入瞳口径均设定为 15mm ,对应系统 F 数为 1。在此基础上,对前置望远系统、双光楔扫描单元及后端成像系统的焦距与视场参数进行协同分配^[10]。系统总焦距、前置望远系统角放大率以及后端成像系统焦距之间满足几何光学关系^[11]。设 f' 为系统焦距, f'_{IM} 为成像光学镜组焦距, γ 为前置大视场望远镜组的角放大率, θ_{IM} 为像方视场角, θ_{OB} 为物方视场角。

$$f' = \gamma f'_{IM} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\tan \theta_{IM}}{\tan \theta_{OB}} \quad (2)$$

式中,式(1)用于建立系统总焦距与后端成像系统焦距之间的对应关系,式(2)反映前置望远系统对物像空间视场压缩的作用。根据像方扫描结构特点,前置望远系统需在扩展物方覆盖范围的同时,减小进入扫描单元的光束倾角,以降低双光楔楔角设计和后续色差校正的难度。

综合系统视场需求、光楔偏转能力及像差控制要求, 本文将前置望远系统的角放大率取为0.14。该参数的选取是系统设计中的关键环节: 若角放大率过大, 双光楔所需偏转角增大, 会加重光楔引入的像差和色差; 若角放大率过小, 则前置望远系统结构尺寸增大, 不利于系统小型化。由此可将前级出射光束角压缩至 4.3° , 对应双光楔扫描器所需扫描范围约为 $\pm 3.5^\circ$ 。进一步依据式(1)和式(2)计算得到后端成像光学系统焦距为106mm。该参数分配结果兼顾了系统紧凑性、扫描可实现性以及后续成像质量优化需求, 可作为后续各分系统设计的基础^[10]。

1.2 前置望远光学系统选型原理

前置望远光学系统位于整体前端, 其作用不仅在于对大视场目标光束进行初步汇聚与准直, 还承担着为后续双光楔扫描单元和成像光学系统建立合理光瞳关系的任务。因此, 该部分结构形式的选择将直接影响系统后续模块的耦合方式、像差校正难度以及整体紧凑性。从望远系统的典型构型来看, 常用方案主要包括伽利略式和开普勒式两类。伽利略式望远系统具有结构长度较短、布局较为紧凑等特点, 但其内部不形成中间实像, 且瞳的位置关系不利于扫描单元与后续成像系统之间的匹配设计。当系统需要在中继过程中引入扫描器件, 并同时兼顾出瞳位置控制时, 伽利略式结构在工程实现上受到一定限制^[11]。相比之下, 开普勒式望远系统虽然轴向尺寸相对较长, 但能够在系统内部形成中间实像面, 从而为出瞳与入瞳的匹配提供更大的设计自由度。这一特点尤其适用于像方扫描系统: 一方面, 可为双光楔单元预留更明确的光束传输条件; 另一方面, 也便于后端成像系统围绕中继像面和瞳位置开展联合优化, 以减小整体耦合难度。基于上述考虑, 本文前置望远部分采用开普勒式结构^[11]。

在具体设计过程中, 前置望远系统还需兼顾大视场压缩、出射光束角控制以及后续扫描空间预留等要求。因此, 选用开普勒式方案不仅有利于实现光瞳匹配, 而且能够为双光楔扫描单元和后端成像系统提供更稳定的前端输入条件, 为整体小型化设计与系统级优化奠定基础^[10]。

1.3 成像光学系统参数分析

由于成像光学系统需要与前置望远系统进行光瞳匹配, 保证成像光学系统的入瞳与望远系统的出瞳匹配, 结合长波红外波段的光学特性、双光楔扫描的光束偏转特性以及系统轻量化、高成像质量的设计需求, 成像光学系统采用大相对孔

径、低畸变的折射式结构设计。

本文采用Zemax软件对成像光学系统进行设计、优化与像质评价。探测器分辨率为 1280×1024 , 像元尺寸 $12\mu\text{m}$ 。焦距和 F 数可表示为

$$f = \frac{h}{\tan \omega} \quad (3)$$

$$F = \frac{f}{D} \quad (4)$$

算出焦距为106mm, F 数为1。式中 f 为焦距, h 为像高, ω 为视场角, D 为孔径。由奈奎斯特定律

$$\gamma_{\text{奈奎斯特}} = \frac{1}{2 \times 12\mu\text{m}} \quad (5)$$

得到, 应在调制传递函数为42lp/mm处对光学系统进行像质评价。

由此得到的系统参数如表1所示

表1 成像光学系统设计指标

参数	值
视场/ $^\circ$	± 5
F	1
焦距/mm	106
MTF/(lp/mm)	42
波段/ μm	8~12

1.4 双光楔扫描器件参数分析

双光楔系统通常由两个完全相同的光楔平行置于光轴组成。当它们分别或共同绕轴旋转时, 出射光束可偏折到有限锥形区域内的任意方向。通过选用不同折射率与楔角的光楔组合, 既能实现大范围圆锥扫描, 也可调节光束偏折角度^[12]。

图1中两光楔的主截面均是重合的, 假设前后光楔分别按照 θ_1 、 θ_2 的旋转角度绕光轴相对运动, 此时两光楔的主截面不再重合, 利用一级近轴近似方法推导两光楔产生的光线总偏折角为

$$\delta = 2(n-1)\alpha \cos((\theta_1 - \theta_2)/2) \quad (6)$$

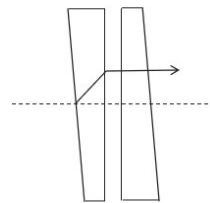


图1 双光楔演示图

当两光楔绕光轴相对旋转同一角度 ω 时, 两光楔产生的总偏向角随角 ω 变化, 即

$$\delta = 2(n-1)\alpha \sin \omega \quad (7)$$

式中 ω 为光楔绕光轴转动角; δ 为光线偏折角; n 为光楔材料折射率; α 为光楔顶角。

由式(6)和式(7)可知, 双光楔扫描范围主要由材料折射率、光楔顶角及两光楔相对转角

决定。增大光楔顶角可以提高偏折能力，但同时会加重色差和离轴像差；减小光楔顶角有利于控制像质，但会限制扫描范围。因此，本文根据前置望远系统压缩后的出射光束角度和 $\pm 25^\circ$ 物方扫描指标，对双光楔所需偏折角进行参数分配，并结合长波红外材料折射率完成光楔参数初步确定。

2 光学系统设计

2.1 前置望远光学系统设计

前置望远部分采用开普勒式望远结构。该结构由前、后两组正光焦度透镜组构成，通过调节两组透镜的焦距比例，可实现所需角放大率，同时便于协调窗口位置、系统入瞳以及扫描器前后光束传输关系。对于本系统而言，前置望远组件既要满足较大的物方覆盖范围，又要为后续双光楔扫描与成像镜组提供合适的中继条件，因此采用具有中间实像面的开普勒式方案更为合理^[13]。前置望远系统的视场范围决定了整机可获取目标信息的空间覆盖能力。随着设计视场增大，离轴像差迅速加重，系统优化自由度和校正难度也随之增加；同时，该部分的成像质量还会进一步影响后端成像镜组的匹配设计和整机像质表现。因此，前置望远系统的设计需要在视场范围、像差校正能力、结构复杂度和工程可实现性之间进行综合权衡。另一方面，若前端能够有效减小出射光束夹角，则有助于减轻双光楔偏转角设计压力，并为后续成像系统优化提供更宽松的边界条件^[14]。

前置望远光学镜组应满足平行光入射、平行光出射的工作特性。考虑窗口尺寸约束以及与后端成像系统的入瞳耦合关系，系统入瞳和出瞳均布置在透镜组外侧，同时预留满足装调需求的瞳距，以保证后续扫描单元能够顺利嵌入整体光路^[15]。如图2所示。

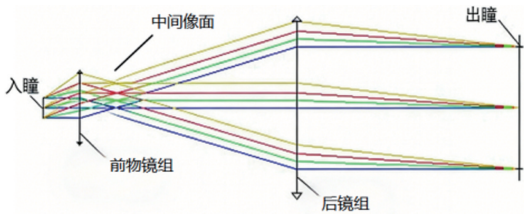


图2 前置望远光学系统示意图

采用Zemax对前置望远系统进行初始结构建立与优化。优化后的前置望远镜组由6片透镜组成，材料选取硒化锌、锗及硫系红外材料，以兼顾长波红外波段的透过特性与像差校正需求。系统中引入4个高次非球面 and 1个衍射面，以提高大视场条件下的综合色差和球差校正能力；同时在

末端设置理想像面用于评价该部分的成像性能。望远系统透镜参数如表2所示。

表2 望远系统透镜参数表

表面序号	表面类型	曲率半径	厚度/间隔	材料
1	球面	-24.004	2.232	ZNSE
2	偶次非球面	-31.402	0.203	
3	球面	-180.998	7.386	GE
4	球面	-63.247	28.964	
5	球面	47.193	22.722	GE
6	偶次非球面	45.258	84.932	
7	偶次非球面	-94.826	21.287	ZNSE
8	球面	-232.136	6.774	
9	Binary 2	-457.154	16.223	IRG207
10	球面	-106.054	127.545	
11	球面	-352.096	26.000	IRG204
12	偶次非球面	-280.367	10.000	

优化后结构如图3所示，其调制传递函数与点列图分别见图4和图5。

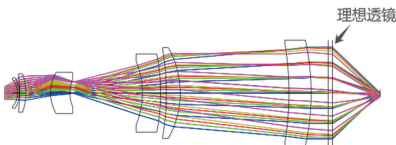


图3 前置望远光学系统结构图

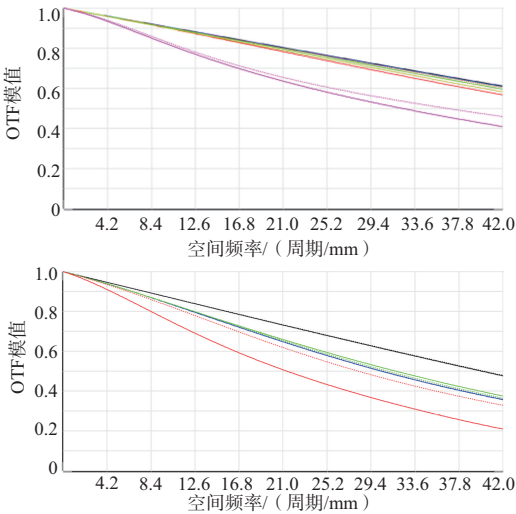


图4 调制传递函数

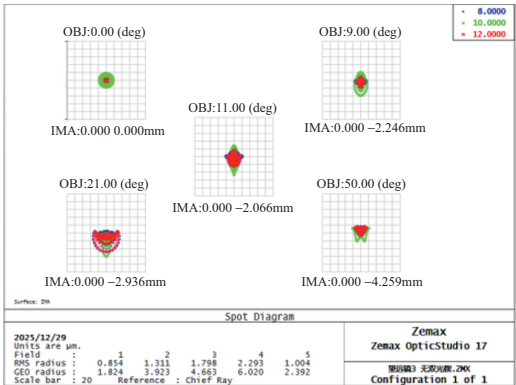


图5 点列图

2.2 成像光学系统设计

成像光学系统作为双光楔像方扫描红外成像系统的核心成像单元，其核心功能是将经过双光楔扫描偏转后的平行红外光束聚焦于红外焦平面阵列（FPA）靶面，形成高分辨率、低畸变的目标像^[16]。结合长波红外波段的光学特性、双光楔扫描的光束偏转特性以及系统轻量化、高成像质量的设计需求，成像光学系统采用大相对孔径、低畸变的折射式设计。

根据设计要求选择合理的初始结构，成像系统透镜参数如表 3 所示。

表 3 成像系统透镜参数表

表面序号	表面类型	曲率半径	厚度/间隔	材料
1	偶次非球面	107.742	21.090	GE_LONG
2	偶次非球面	103.583	160.001	
3	偶次非球面	43.027	21.090	IRG24
4	偶次非球面	34.033	73.981	
5	球面	∞	9.186	
6	球面	∞	30.000	CDTE
7	偶次非球面	-139.382	76.552	
8	偶次非球面	39.823	8.871	GE_LONG
9	球面	55.830	0.100	
10	球面	51.483	7.107	AGCL
11	偶次非球面	29.872	18.000	
12	球面	∞	14.000	
13	球面	∞	1.000	GE_LONG
14	球面	∞	2.696	

对初始结构进行优化设计，优化后的系统结构图如图 6 所示。

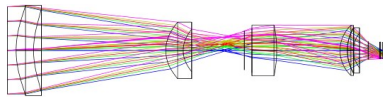


图 6 成像光学系统结构图

依据设计要求，光学系统需要在奈奎斯特频率为 42lp/mm 时，要求 MTF 值≥0.3，MTF 结果如图 7 所示，可以看出当前光学系统基本满足设计要求，低于 0.3 的后续可以通过双光楔进行补偿，满足设计需求^[17]。

图 8 为全光谱范围、全视场的弥散斑图。由分析结果可知，弥散斑半径小，能量集中度高，成像质量优良。

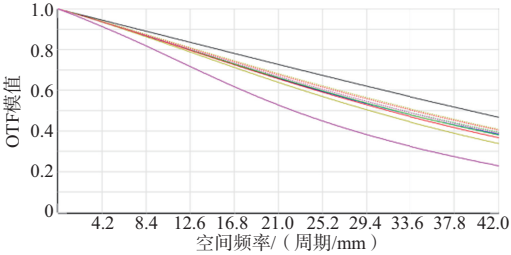


图 7 MTF 曲线

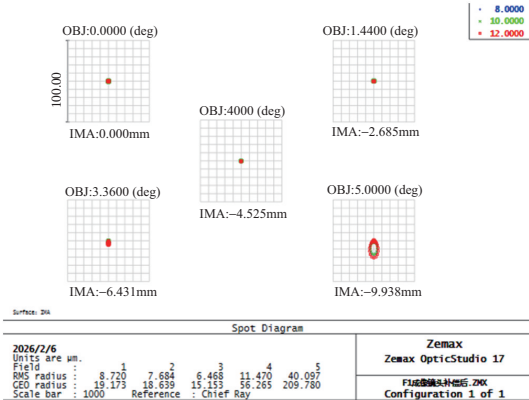


图 8 点列图

2.3 双光楔设计

旋转双光楔系统通常由两个完全相同的光楔平行置于光轴组成。当它们分别或共同绕轴旋转时，出射光束可偏折到有限锥形区域内的任意方向。对于长波红外像方扫描系统而言，双光楔设计的难点在于楔角既要满足扫描范围要求，又要尽量减小由光束偏折引入的像差和色差；同时，不同红外材料在 8~12μm 波段内折射率存在差异，容易造成不同波长光线偏折角不一致。因此，本文在确定光楔参数时，综合考虑扫描角度、材料折射率以及系统整体成像质量。通过选用不同折射率与楔角的光楔组合，既能实现大范围圆锥扫描，也可调节光束偏折角度^[18]。

光线经光楔偏折，根据下式可计算光楔楔角角度

sin 1/2(α + δ) = n · sin α/2 (8)

式中 α 为光楔顶角；δ 为光线偏折角；n 为光楔材料折射率。由于红外材料对不同波长光线的折射率不同，不同波长光线在经过光楔后所产生的偏折角度也不同，两种材料光楔偏折角的对应关系^[19]表示为

δ = δ₁ + δ₂ (9)

δ₁/ν₁ + δ₂/ν₂ = 0 (10)

根据计算得出光楔参数如表 4 所示，本文采用 IRG23 与 IRG206 组合光楔，主要是基于长波红外 8~12μm 工作波段内的材料透过性能、折射率及色

散特性进行选择。双光楔偏折角与材料折射率和光楔顶角有关，同时也受材料色散影响。若仅采用单一材料，不同波长光线经过光楔后的偏折角会存在差异，容易在宽波段扫描中引入色差。采用 IRG23 与 IRG206 组合后，可利用两种材料色散特性的差异对偏折色差进行一定补偿，从而在满足扫描偏折能力的同时减小双光楔对系统像质的影响。

表 4 光楔参数表

表面序号	材料	面倾角/(°)
1	IRG23	-0.093
2		0.093
3	IRG206	0.093
4		-0.08
5	IRG23	-0.093
6		0.093
7	IRG206	0.093
8		-0.08

应用光学设计软件 Zemax 将光楔组与望远透镜组合，并加入理想透镜，评价其对成像质量的影响，建模如图 9 所示^[20]。

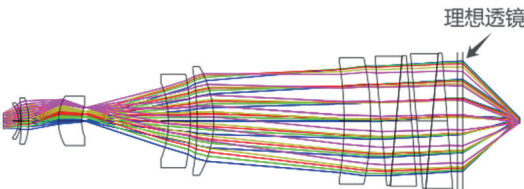


图 9 加入光楔后的望远镜组

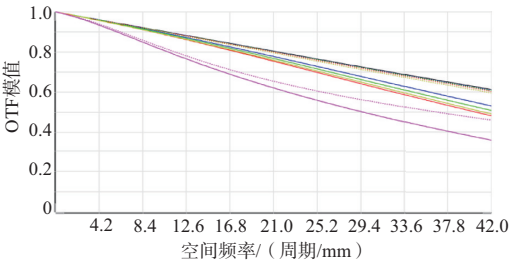


图 10 MTF 曲线

图 10 为加入光楔后的望远镜组 MTF 图，由图可知光学系统在奈奎斯特频率为 42lp/mm 时，MTF 值 ≥ 0.3 ，成像质量良好，符合设计需求。

3 整体光学系统设计结果

在分别完成前置望远光学系统、双光楔扫描单元以及后端成像光学系统的结构设计并单独优化后，进一步按照系统光瞳匹配关系对三部分进行一体化集成，并在 Zemax 中开展联合优化与像质分析。最终形成的长波像方扫描光学系统总体结构如图 11 所示^[11]。该系统总体上由前置望远组、双光楔扫描器和成像镜组构成。前置望远部分用于接收较大物方范围内的入射辐射，并完成

前级会聚与准直处理，以改善后续扫描通道中的光束传输条件；成像镜组则负责将经偏转后的光束重新聚焦至探测器靶面，实现目标信息的高质量成像。设置在两者之间的双光楔扫描单元通过两片光楔绕各自轴线的相对转动实现光束偏折，从而完成系统的像方扫描^[10]。

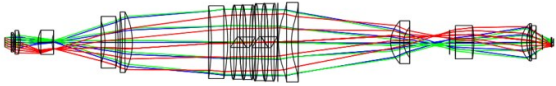


图 11 光学系统整体结构图

利用 Zemax 的多重组态功能设置双光楔在不同工况下的转角参数，并据此考察系统在多个扫描位置处的成像性能。结合物方扫描角与光楔偏转关系，可进一步得到代表性扫描位置下的转角配置，结果列于表 5。不同扫描角度对应的光路形式及像质评价结果见图 12^[10]。

表 5 光楔转角与物方扫描角度对照表

物方扫描角度/(°)	光楔一转角/(°)	光楔二转角/(°)
18	24.8	-24.8
22	30.8	-30.8
25	35.6	-35.6
-18	-155.2	155.2
-22	-149.2	149.2
-25	-144.4	144.4

进一步对不同扫描位置处的调制传递函数进行分析可见，系统在全部所考察扫描工况下的 MTF 均高于 0.3，能够满足设计指标要求。系统扫描范围主要受光楔楔角、红外材料色散、通光口径、光瞳匹配及边缘视场像差控制能力限制。进一步增大扫描范围虽可通过提高光楔偏转能力或调整前置望远系统角放大率实现，但会增加色差、遮拦、像差校正和结构小型化难度。这表明，经过整体耦合与系统级优化后，所提出的基于双光楔的长波像方扫描光学系统不仅具备较大的扫描覆盖范围，而且在全扫描区间内均能维持较好的成像质量^[10]。

为进一步评价系统在极限扫描状态下的能量传递能力，对 +25° 极限扫描位置处的像面相对照度进行了分析，结果如图 13 所示。由图可知，在极限扫描位置下，像面相对照度较中心扫描状态会出现一定下降，这主要与大角度扫描时光束倾斜增大、边缘视场渐晕增加以及有效通光口径利用率变化有关。但从图 13 可以看出，+25° 位置处未出现严重照度衰减或明显遮拦现象，说明系统在极限扫描状态下仍具有有效的能量传递能力。

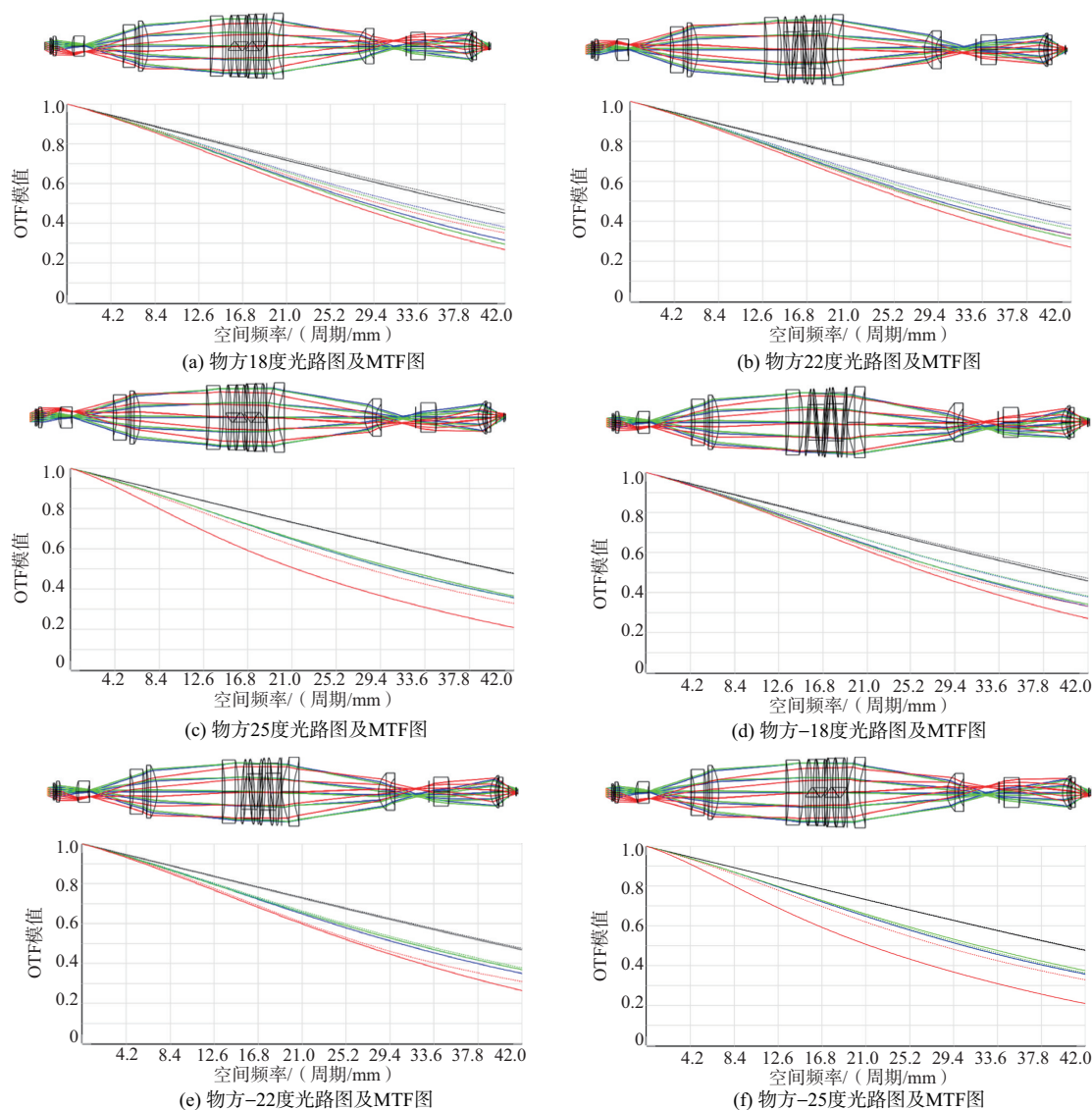


图12 各个扫描角度下的光路图及成像质量

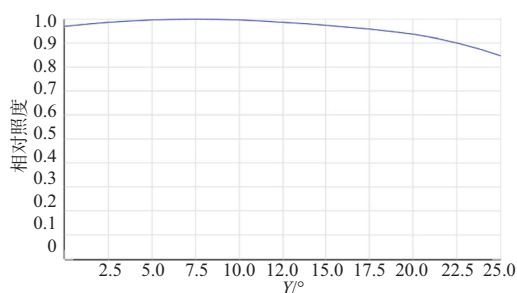


图13 +25°极限扫描位置下的相对照度分布

4 结论

本文设计了一种基于双光楔的长波像方扫描光学系统。该系统通过将前置开普勒望远系统、双光楔扫描器与成像系统进行光瞳匹配,成功实现了小型化与大视场扫描的目标。前置望远系统采用开普勒结构,提供了实像面,便于实现出瞳与入瞳的耦合设计,有效缩小了出射光线角度,为后续扫描和成像降低了难度。成像系统在8~12 μm 波

段内,奈奎斯特频率42lp/mm处的调制传递函数(MTF)大于0.3,弥散斑半径小,能量集中,成像质量良好。引入的双光楔通过差速旋转,实现了光束的二维偏转,从而获得了 $\pm 25^\circ$ 的大视场扫描范围。最终的整体系统分析表明,在不同扫描角度下(如 $\pm 18^\circ$, $\pm 22^\circ$, $\pm 25^\circ$),系统的MTF均能满足设计要求(≥ 0.3),证明了该方案在保证成像质量的前提下,能够有效实现长波红外波段的大范围、小型化扫描成像。

参考文献:

- [1] 唐博.非致冷中波红外变焦光学系统设计[D].长春:长春理工大学,2014.
Tang Bo. Design of an uncooled mwir zoom optical system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [2] 赵志刚,王鑫,彭廷海,等.国外中长波双波段红外成像技术的发展及应用[J].红外技术,2020,42(4):312—319
Zhao Zhigang, Wang Xin, Peng Yanhai, et al. Status quo and

- application of middle and long wave dual-band infrared imaging technologies in occult[J]. Infrared Technology. 2020 , 42 (04): 312—319.
- [3] 王淦泉, 陈桂林. 地球同步轨道二维扫描红外成像技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(02): 429—433
Wang Ganquan, Chen Guilin. Two-dimensional scanning infrared imaging technology on geosynchronous orbit[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(02): 429—433.
- [4] 林森, 蔡伟, 魏小林, 等. 带摆镜的制冷型中波红外像方扫描光学系统设计[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(04): 16—19+65
Lin Sen, Cai Wei, Wei Xiaolin, et al. Design of image space scanning system with tilt mirror for cooled medium wave infrared optical system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017 , 37 (04): 16—19+65.
- [5] 李刚, 樊学武, 邹刚毅, 等. 基于像方摆扫的空间红外双波段光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(03): 861—866
Li Gang , Fan Xuewu, Zou Gangyi, et al. Design of space optical system with double infrared waveband based on image space scanning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014 , 43 (03): 861—866.
- [6] 王美钦, 潘海俊. 大面阵连续变焦面阵扫描红外光学系统设计[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 292—299
Wang Meiqin, Pan Haijun. Design of continuous zoom area array scanning infrared optical system with large area array[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(02): 292—299.
- [7] 田宇. 像方扫描机制的红外成像光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019
Tian Yu. Research of infrared imaging optical system with image scanning mechanism[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [8] 刑振冲, 王伟. 基于双光楔棱镜的激光通信光端机设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 420—427
Xing ZhenChong, Wang Wei. Design of laser communication optical transceiver based on double wedge prisms[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59 (11): 420—427.
- [9] 许敏达, 田雪, 姚睿, 等. 带摆镜的二维扫描制冷红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(03): 291—296
Xu Minda, Tian Xue, Yao Rui, et al. Design of Two-dimensional image space scanning cooled infrared optical system with tilt mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022 , 51 (03): 291—296.
- [10] 杨正, 屈恩世, 曹剑中, 等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外, 2008(01): 35—38
Yang Zheng, Qu Enshi, Cao Jianzhong, et al. The narcissus study in the optical system for theinfrared staring arrays[J]. Laser & Infrared, 2008 (01): 35—38.
- [11] 杨克君, 杨振, 张勇, 等. 基于旋转双光楔的像方扫描大视场成像光学系统设计[J]. 飞控与探测, 2020, 3(06): 43—56
Yang Kejun, Yang Zhen, Zhang Yong, et al. Design of optical system for wide field-of-view imaging with image side scanning technology based on rotary dual-wedge[J]. Flight Control & Detection, 2020 , 3 (06): 43—56.
- [12] 杨克君. 基于像方扫描技术的大视场红外成像方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022
Yang Kejun. Research on wide-field imaging methods based on image-space scanning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [13] 杨柠宇. 消色差旋转双光楔系统光学设计与研究[D]. 内蒙古大学, 2024
Yang Ningyu. Optical design and study of achromatic rotating dual-wedge prism system[D]. Inner Mongolia University, 2024.
- [14] 李英杰, 张俊举, 常本康, 等. 远距离多波段红外图像融合系统及配准方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(05): 284—290
Li Yingjie, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Remote multi-band infrared image fusion system and registration method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(05): 284—290.
- [15] 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 Hangshuo, Wang Linyun, Li Guangxi. 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.
- [16] 郭松, 贺应红, 陈飞, 等. 空间激光通信望远系统设计与光机热集成仿真[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(12): 175—185
Guo Song, He Yinghong, Chen Fei, et al. Design and opto-mechanical-thermal integrated simulation of telescope system for space laser communication terminal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(12): 175—185.
- [17] 胡喻阁, 王晓伟, 陆卫国. 全铝合金同轴四反长波红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(11): 267—279
Hu Yuge, Wang Xiaowei, Luweiguo. All-aluminium coaxial four-inverse long-wave infrared optical system design[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(11): 267—279.
- [18] 焦明印, 康文莉, 周晓斌. 采用凝视器件的搜索跟踪系统中的扫描补偿光学技术[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 495—502
Jiao Mingyin, Kang Wenli, Zhou Xiaobin. Optical de-scanning technique in search and track systems using focal plane array detectors[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38 (04): 521—525.
- [19] 王强. 基于双光楔装置激光通信小型化系统的智能控制策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2025.
Wang Qiang. Research on intelligent control strategy of Laser Communication miniaturization system based on Risley Prism [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2025.
- [20] 申卫江. 常用红外光学材料及其加工技术[J]. 科技视界, 2019 (15): 147—149
Shen Weijiang. IR Optical materials and processing techniques [J]. Science & Technology Vision, 2019(15): 147—149.