

长波红外双视场快速扫描光学系统

周玲玲, 李训牛, 陈洁, 冯丽军, 余佳桐, 孙爱平, 和多林

(云南北方光电仪器有限公司, 云南, 昆明 650200)

摘要: 双视场扫描光学系统能搜索和跟踪大空域和远距离的目标, 保持良好的图像质量并实现序列图像的配准拼接, 在安全、国防等领域具有广阔的应用前景。为了满足红外系统高分辨率、低成本、小型化、轻量化的需求, 基于长波非制冷型 1024×768 大面阵焦平面探测器, 利用 CODE-V 软件设计了一种双视场快速扫描光学系统。该系统由开普勒望远镜组和聚焦镜组组成, 采用轴向变倍的方式实现双视场变焦, 通过望远光路中的扫描振镜快速、往返运动, 对目标进行运动补偿, 扩大成像视野。采用动态调制传递函数法分析空间振动对成像质量的影响, 保证运动过程中图像无变虚、拖影等问题。光学系统畸变 $<0.5\%$, 实现全视场范围内的高精度图像配准, 保持系统在扫描时成像稳定、清晰。

关键词: 非制冷红外; 大面阵; 双视场变焦; 连续扫描; 动态 MTF 分析; 图像配准

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2025)05-0563-08

Design of a Long-Wave Infrared Dual-FOV Fast Scanning Optical System

ZHOU Lingling, LI Xunniu, CHEN Jie, FENG Lijun, YU Jiatong, SUN Aiping, HE Duolin

(Yunnan North Photoelectric Instrument Co. Ltd., Kunming 650200, China)

Abstract: Dual-field scanning optical systems can search for and track targets across large airspaces and over long distances, maintain good image quality, and achieve registration and splicing of sequential images. They have broad application prospects in security, national defense, and other fields. To meet the requirements of high resolution, low cost, miniaturization, and lightweight design in infrared systems, a dual field fast scanning optical system was designed using CODE-V software based on a long wave, uncooled, large format focal plane array detector with a resolution of 1024×768 pixels. The system consists of a Kepler telescope group and a focusing lens group. It achieves dual-FOV zoom functionality through the axial movement of the zoom group. A scanning galvanometer in the telecentric optical path moves rapidly and reciprocally to compensate for target motion and expand the field-of-view angle. The influence of spatial vibration on imaging quality is analyzed by using the dynamic modulation transfer function method to ensure that there are no problems such as image blurring and trailing during the motion process. The optical system distortion is less than 0.5%, achieving high-precision image registration throughout the entire field of view and maintaining stable and clear imaging during scanning.

Key words: uncooled infrared, large-format, dual field of view zoom, continuous scan, dynamic MTF analysis, image registration

0 引言

在热成像系统中, 为了提高光学系统的作用距离, 探测器对应的瞬时视场往往很小, 导致其视场覆盖的视觉信息空间受到限制。因此, 扫描型光学系统就有了应用价值, 能同时满足大空域和远距离的需求。在选择红外波段时, 要综合考虑目标辐射特性、背景辐射特性、大气传输特性和探测器性能等多个因素的影

响, 进行需求分析^[1]。长波波段受大气散射的影响较小, 对于雾气、烟尘、沙尘暴等恶劣环境, 长波波段的穿透能力强。此外, 在白天成像时, 中波波段接收的能量有部分来自于目标反射的太阳光, 会影响目标的温度分布反演^[2-3], 因此, 长波红外系统相较中波红外系统更具有天然优势。与非制冷长波探测器相比, 制冷型探测器精度高、误差小、灵敏度高、响应速度快, 扫描型面阵探测器多选用制冷型。然而, 它需要

制冷机协同工作，引入二次成像系统减小冷反射，导致光学系统体积更大、工艺复杂、价格昂贵。随着非制冷红外技术的不断发展，非制冷探测器在分辨率、灵敏度、帧频等方面取得了长足进步。焦平面的阵列规模不断增大，像元尺寸不断减小，灵敏度不断提高，但成本却在迅速下降^[4]。非制冷扫描光学系统具有低成本、小型化、高可靠性等优势，适合批量生产。

近年来，关于双视场扫描系统已有很多报道。非制冷长波红外双视场扫描系统的设计多以 640×512 元的探测器为应用对象。从变焦方式上讲，主要分为径向切换变倍和轴向移动变倍^[5]。径向切换变倍在视场中减少了运动透镜组，透过率高、切换时间短，但视场切换时存在冲击振动，容易丢失跟踪目标。多次切入切出会影响两个视场的同轴精度。轴向移动变倍的同轴精度高，但是变倍行程长，变倍组元的口径和重量大。从扫描方式上讲，主要分为物方扫描和像方扫描。物方扫描是在平行光路中加入扫描器件，扫描器件口径较大，扫描速度受到限制，但像差容易校正。像方扫描是在聚焦光学系统和探测器之间加入扫描器件，扫描器件尺寸较小，便于实现扫描调整。但像方扫描会引起像面扫描散焦，像差修正困难，扫描角度和扫描视场受到限制^[6]。

本文针对大面积 1024×768 、像元尺寸 $12 \mu\text{m}$ 的非制冷型长波红外探测器，设计了一种双视场快速扫描光学系统。系统通过轴向移动变倍组来实现双视场变焦、微调变倍组实现机械补偿消热差和调焦功能。对轴向尺寸进行控制优化，缩短变倍时间，减小变倍组尺寸。综合了物方扫描和像方扫描的优点，采用平行光束扫描方式，通过无焦望远系统，压缩平行光路，扫描振镜尺寸小巧，平行光路中扫描振镜产生的附加像差少，有利于系统小型化和高速扫描。

1 设计原理

1.1 扫描光学系统模型

双视场扫描光学系统的模型如图 1 所示，主要由前置望远镜组件、扫描振镜、聚焦光学组件 3 部分组成。光线经前置望远镜准直后，压缩入射光束口径，扫描振镜以恒定角速度转动，将望远镜出射的不同方向的平行光束向着一个方向反射进入聚焦光学组件，成像在探测器的焦平面上，完成对场景的依次空间分解。通过电路处理，将一个回扫周期内采集到的相互衔接的区域信息进行拼接得到总视场图像，精准地在不同时刻对不同方位的景物进行探测^[7]。

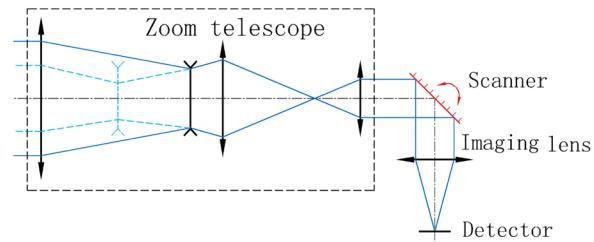


图 1 双视场扫描光学系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the dual-field scanning optical system

在平行光束扫描的光学系统中，为减小扫描振镜和聚焦光学透镜的尺寸，在扫描振镜前增加一组前置望远镜。望远系统物镜组像方焦点与目镜组物方焦点重合，且 $f_1 > f_2$ 。因为进入望远镜入瞳的光线都经过出瞳，此处汇合的平行光束最窄，所以扫描反射镜应放在前置望远镜的出瞳位置^[8]。设光学系统扫描视场角为 $\pm\theta$ ，系统焦距 f' ，光学系统入瞳为 D_1 ，望远系统出瞳为 D_2 ，前置望远镜的放大倍率为 $\Gamma = f_1/f_2 = D_1/D_2$ ，系统的视场角是由振镜的初始入射光束及振镜旋转角度决定的。平面反射镜出射角是入射角的 Γ 倍，望远镜出射角度是入射角度的 Γ 倍，所以扫描振镜的转角为 $\pm\omega = \pm\theta \times (\Gamma/2) = \pm D_1 \theta / 2D_2$ ，扫描振镜的最小尺寸为 $l = D_2 / \sin\omega$ ，由此可知望远系统的放大倍率主要影响扫描振镜尺寸及扫描振镜转角。放大倍率大，望远镜出瞳小，压缩振镜尺寸，增大振镜转角，减小转动惯量，提升扫描速率。系统扫描速率的线性度影响成像质量，振镜转动的重复性影响成像稳定性。

1.2 动态扫描 MTF 分析

由于扫描振镜的转动惯量大，在每个积分时间内像点会随着扫描振镜的转动而不断移动，光学系统的调制传递函数 (MTF) 会下降，出现拖尾和模糊现象，影响成像质量^[9]。扫描振镜与光轴成 45° 固定，将光束折转 90° ，扫描振镜的偏转轴向如图 2 所示，转轴垂直于 xy 平面， O 点为扫描振镜的质心。扫描振镜绕轴转动，扩大光学系统的成像视野。

连续扫描光学系统在每个积分时间内的图像是各个时刻移动的瞬时像点的叠加。由于瞬时像点的运动仅在一维空间，对于理想光学系统，线扩散函数 $LSF(x)$ 为狄拉克函数 $\delta(x)$ 。设像点的位移函数为 $x(t)$ ，则每一时刻的 $LSF(x)$ 为 $\delta[x - x(t)]$ ，对线扩散函数的能量进行归一化处理，即：

$$LSF(x) = \frac{1}{t_e} \int_{t_0}^{t_0+t_e} \delta[x - x(t)] dt \quad (1)$$

式中： t_e 为探测器的积分时间； t_0 为初始积分时间； t 为像点的位移时间。

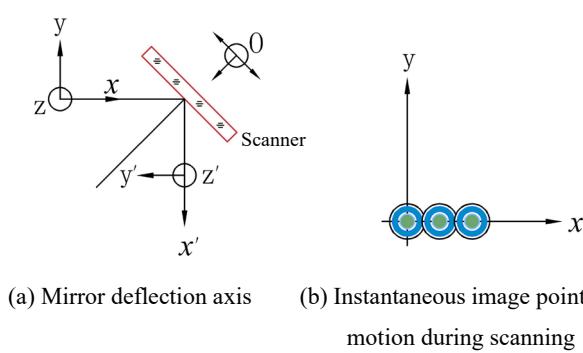


图2 光学系统扫描成像示意图

Fig.2 Schematic diagram of optical system scanning imaging

光学传递函数 OTF 可以用线扩散函数的傅里叶变换表示:

$$\text{OTF}(f_x) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{LSF}(x) \exp(-2\pi i f_x x) dx \quad (2)$$

式中: f_x 为空间频率。将式(2)进行泰勒级数展开:

$$\text{OTF}(f_x) = \sum_{k=0}^n \frac{f_x^n}{k!} \cdot \frac{\partial^k \text{OTF}(f_x)}{\partial f_x^k} \quad (3)$$

式(3)在 $f_x=0$ 处的泰勒展开式为:

$$\frac{\partial^k \text{OTF}(f_x)}{\partial f_x^k} = (-2\pi i)^n \int_{-\infty}^{\infty} x^n \cdot \text{LSF}(x) dx \quad (4)$$

将式(1)代入式(2)得到:

$$\text{OTF}(f_x) = \frac{1}{t_e} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{t_0}^{t_0+t_e} \delta[x - x(t)] \exp(-2\pi i f_x x) dt dx \quad (5)$$

再根据狄拉克函数的性质 (式(6)所示), 由式(5)得到式(7):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta[x - x_0] f(x) dx = f(x_0) \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^n \cdot \text{LSF}(x) dx = (-2\pi i)^n \int_{t_0}^{t_0+t_e} \frac{x^n(t)}{f \cdot \tan(2\omega) \cdot t_e} dt \quad (7)$$

式中: ω 为扫描镜的旋转角度。

因此, 式(3)可以用式(4)和式(7)表示, 得到:

$$\text{OTF}(f_x) = \sum_{k=0}^n \left[\frac{1}{k!} \cdot \frac{(-2\pi i f_x)^n}{f \cdot \tan(2\omega) \cdot t_e} \cdot \int_0^{t_e} x^n(t) dt \right] \quad (8)$$

动态扫描 MTF 可表示为:

$$\begin{aligned} \text{MTF}(f_x) &= |\text{OTF}(f_x)| \\ &= \left| \sum_{k=0}^n \left[\frac{1}{k!} \cdot \frac{(-2\pi i f_x)^n}{f \cdot \tan(2\omega) \cdot t_e} \cdot \int_0^{t_e} x^n(t) dt \right] \right| \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)反映了连续扫描系统的动态 MTF, 基于该动态 MTF 分析振镜旋转角度和积分时间对成像质量的影响。

图 3(a)显示了在一定的积分时间内, MTF 曲线与扫描振镜不同旋转角度的关系。随着扫描振镜旋转角度的增加, MTF 曲线在逐渐下降。图 3(b)显示了在扫描振镜旋转角度相同的情况下, 当积分时间增加, MTF 曲线也会下降。

1.3 全视场图像配准分析

一般的光学系统, 像高 H 与视场角 θ 呈非线性正切关系。相等的时间间隔和相同的角度间隔, 将会产生不同的空间间隔, 这样会使扫描信息失真。对扫描系统而言, 为得到一定的扫描速度, 其像高必须为:

$$H = f' \times \tan \theta \quad (10)$$

将(10)式对时间 t 求导, 则:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{f' d\theta}{dt} = 2f' \omega \quad (11)$$

式中: ω 是扫描振镜的恒定角速度, 当扫描角度 θ 增大时, 实际像高比理想高斯像高要小。

为保证系统的像高 H 与扫描视场角 θ 成线性关系, 使 $H = f \times \tan \theta$ 变为 $H = f \times \theta$, 就必须使光学系统本身产生一定的桶形畸变:

$$\Delta H = f \times \tan \theta - f \times \theta = f(\tan \theta - \theta) \quad (12)$$

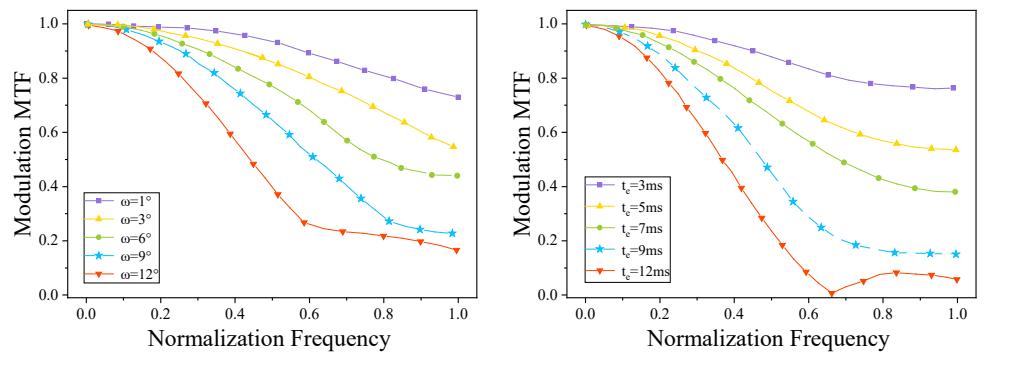


图3 动态 MTF 曲线

Fig.3 Dynamic MTF curves

将实际像高 H 与 $f - \theta$ 线性关系的偏离程度定义为与 $f - \theta$ 线性关系的相对畸变, 相对畸变量 $\Delta\xi$ 为:

$$\Delta\xi = \frac{H - f\theta}{f\theta} = \frac{\Delta H}{H} = \frac{\tan\theta - \theta}{\tan\theta} \times 100\% < 5\% \quad (13)$$

光学系统不可能完全校正所有像差, 扫描系统也不可能完全满足线性关系。设计一个负畸变(桶形畸变)的扫描光学系统, 形成线性的扫描速率, 尽可能在像平面内获得高质量的平场像点, 提高扫描过程中图像配准的精确度。误差范围在 0.5% 以内, 可实现全视场范围内的图像配准^[10]。

1.4 初始参数的确定

使用非制冷探测器, 对光学系统的能量要求很高, 为兼顾小型化和大 F# 的设计原则, 设定系统 F# 为 1.1。变倍组小视场的入瞳为 $f_1^*/F\#$, 其中 f_1^* 为小视场时的系统焦距。变倍组中的负透镜在长焦和短焦位置满足物像交换原则, 其长、短焦的纵向放大率分别为 β_1 和 β_2 , 它们互为倒数。根据物像关系, 可求出变倍时负透镜的移动量:

$$\Delta = \left(\frac{1}{\beta_s} - \frac{1}{\beta_l} \right) f_n = \left(\frac{1 - \beta_s^2}{\beta_s} \right) f_n \quad (14)$$

式中: f_n 为负透镜的焦距。由上式可得: 变倍组的移动距离与其焦距成正比, 压缩变倍行程可减少大小视场的切换时间并减小系统尺寸, 所以要尽可能控制负透镜的焦距。

2 设计实例及结果分析

2.1 设计参数

文中系统采用长波 1024×768 像元非制冷型探测器, 像元尺寸 $12 \mu\text{m}$ 。利用锗和硒化锌不同材料间的折射率热膨胀系数的差异实现消热差, 这两种材料的阿贝系数差值大, 能达到消色差的目的。根据实际的应用需要, 双视场扫描光学系统的主要设计参数如表 1 所示。

2.2 设计结果

前置望远镜组和聚焦镜组先独立设计, 加入扫描振镜使两个分系统光瞳匹配, 再进行整体的优化设计。望远镜采用开普勒望远镜的结构型式, 根据光学系统的 F 数及焦距确定长焦时望远镜的入瞳直径为 145 mm。在望远光路中移动一片负透镜实现轴向双视场变焦, 变倍组沿光轴方向微调可实现 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 工作温度的补偿和不同物距成像的调焦。望远系统的变倍比增大, 可减小振镜的镜面尺寸, 提高扫描速率和扫描线性度, 且要兼顾扫描振镜的工作空间, 留出一定的出瞳距离, 所以设定目镜焦距为 28.8 mm。聚焦镜组焦距为 32.25 mm。

表 1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

Wavelength range/ μm	8~12
Wide field of view	$9.75^\circ \times 7.32^\circ$
Narrow field of view	$4.45^\circ \times 3.34^\circ$
Focal length range/mm	72 & 158
F number	1.1
Operational temperature range/ $^\circ\text{C}$	$-40 \sim +60$
Image size (diagonal)/mm	15.36

扫描振镜影响整个光学系统的成像质量和稳定性。有效焦距 (effective focal length 简写 EFL) 为 158 mm 时, 转台转速为 5 s/圈。为了匹配探测器的输出帧频, 选定扫描周期为 20 ms, 其中 16 ms 用于凝视补偿, 4 ms 作回扫归零。扫描振镜进行往返运动时为变速运动, 它从正方向补偿开始往逆方向回扫过程为减速运动以及达到最大旋转角后开始往正方向补偿时为加速运动, 无法匹配转台速度, 所以两个变速时间段内探测器不应该积分成像。根据图 3 可知, 在 3~7 ms 的区间内, 系统的扫描线性度达到一个回扫周期内的最优。在 16 ms 的凝视补偿时间内, 保证 3~7 ms 为探测器对一幅图像的凝视积分时间, 扫描振镜做匀速运动。振镜旋转角小于 10° 时, 扫描光束的线性度能有效地保证积分时间内成像清晰, 将拖尾与模糊现象降至最低^[11]。根据振镜的扫描速度、转动惯量、控制精度, 确定振镜的旋转角为 $\pm 3.15^\circ$ 。将系统的光阑设置于扫描振镜的位置附近, 振镜尺寸 40 mm, 有利于电机的高精度控制。

系统选用的锗和硒化锌材料, 适用于 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的长波红外谱段。在一片锗透镜上采用衍射面来校正色差, 引入非球面来减小高级像差, 优化像质, 且减少镜片数量, 提高光学透过率。控制变倍负透镜的焦距, 变倍行程达到 31.4 mm。光学系统的外形结构如图 4、图 5 所示。系统外形尺寸为 255 mm \times 160 mm \times 145 mm。

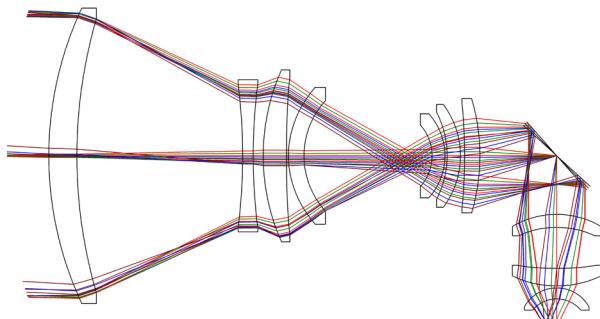


图 4 长焦光路

Fig.4 Optical layout of long effective focal length 158 mm

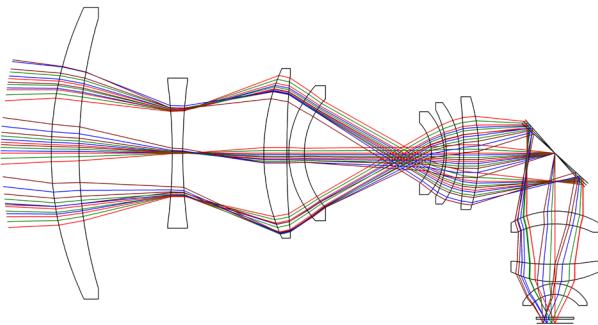


图 5 短焦光路

Fig.5 Optical layout of short effective focal length 72 mm

2.3 结果分析

2.3.1 像质分析

扫描振镜与光轴成 45° 固定, 光学系统处于跟踪模式。图 6(a)、(b) 分别显示了常温 (22°C) 系统有效焦距为 72 mm 和 158 mm 时跟踪模式下 0 视场、0.3 视场、0.5 视场、0.7 视场、全视场的子午方向和弧矢的 MTF 曲线。图 6(c)、(d) 分别显示了常温 (22°C) 系统焦距为 72 mm 和 158 mm 时跟踪模式下 0 视场、0.5 视场、0.7 视场、全视场的弥散斑大小。

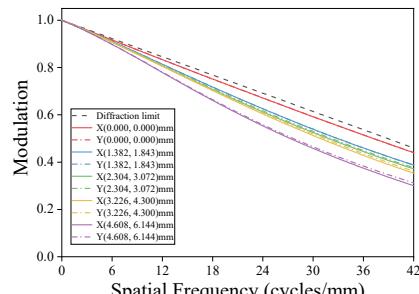
由 MTF 图和表 2 可以看出, 在奈奎斯特频率 42 lp/mm 处, 系统焦距为 72 mm 和 158 mm 的轴上 0 视场 MTF 均大于 0.42, 约达到衍射极限的 92%。由点列图和表 2 可以看出, 在两个焦距位置所有视场内的弥散斑直径均方根值 (RMS) 都在 $15\text{ }\mu\text{m}$ 以内, 弥散

斑大小在两个像元内。所以, 系统在跟踪状态下像质良好, 满足使用要求。

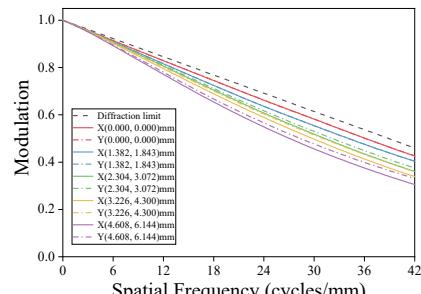
2.3.2 扫描运动补偿

受振动的影响, 光学扫描系统成像是一个动态过程, 导致探测器积分时间内目标在焦平面成像位置会发生相对运动而造成图像变虚、拖影。对于动态成像, 常采用动态调制传递函数 (MTF) 作为评价空间振动对成像质量影响的工具^[12]。扫描振镜往复运动时, 系统处于周扫搜索模式, 通过振镜的往返摆动以补偿扫描过程中引起的成像系统方位视场变化, 保证探测器与物面始终处于相对静止的状态, 保持光学系统在运动过程中成像清晰。

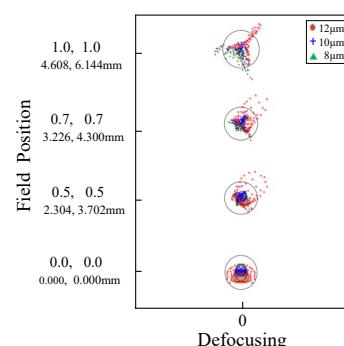
振镜扫描时, 随着旋转角度的增加, MTF 曲线在逐渐下降。因此, 在设计时需要对扫描振镜处于边缘状态下的像差进行优化。图 7(a)、(b) 分别显示了系统焦距为 72 mm, 振镜位于最大旋转角度 $+3.15^\circ$ 和 -3.15° 在 0 视场、0.3 视场、0.5 视场、0.7 视场、全视场的子午方向和弧矢的 MTF 曲线, (c)、(d) 分别显示了系统焦距为 158 mm, 振镜位于最大旋转角度 $+3.15^\circ$ 和 -3.15° 在 0 视场、0.3 视场、0.5 视场、0.7 视场、全视场的子午方向和弧矢方向的 MTF 曲线。相较于跟踪模式下的 MTF 曲线, 振镜处于边缘状态下轴上 0 视场 MTF 在 42 lp/mm 特征频率处均大于 0.41, 轴外视场 (0.3 视场、0.7 视场、全视场) 有所降低,



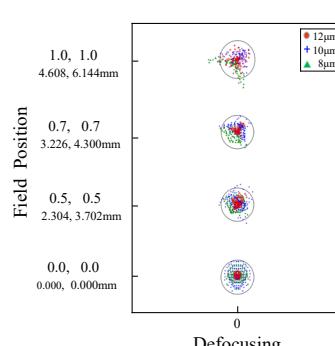
(a) Short EFL 72 mm MTF



(b) Long EFL 158 mm MTF



(c) Short EFL 72 mm RMS



(d) Long EFL 158 mm RMS

图 6 常温 (22°C) 跟踪状态下系统像差

Fig.6 System aberration under tracking state at 22°C

但平均 MTF 数值约达到衍射极限的 75%，成像质量良好。

表 2 MTF 值 (42 lp/mm)

Table 2 Values of MTF(42 lp/mm)

Effective focal length /mm	Field of view	MTF	FMS value of the diffuse spot / μm
72	0 ω	0.44	9.1
	0.7 ω	0.36	9.5
	1 ω	0.32	14.2
158	0 ω	0.42	8.0
	0.7 ω	0.35	11.3
	1 ω	0.31	14.7

2.3.3 线性扫描分析

光学系统设计很小的负畸变，形成线性扫描，校正因畸变而产生的线性失真，保证图像在回扫补偿过程中，全视场范围内的配准，保持图像稳定、清晰。线性扫描的评判基准为 F-Theta 像面，而不是高斯像面。由图 8 可知，系统焦距 72 mm 时，畸变 -0.15% ；系统焦距 158 mm 时，畸变 -0.4% 。两种焦距状态下，相对畸变都小于 0.5% (F- θ 像面)，满足设计要求。系统焦距 72 mm，子午最大场曲 0.021 mm，弧矢最大

场曲 0.008 mm，最大像散 0.013 mm，小于焦深 0.048 mm，在像差的容限范围内满足平场条件。系统焦距 158 mm，子午最大场曲 0.018 mm，弧矢最大场曲 0.016 mm，最大像散 0.002 mm，小于焦深 0.048 mm，在像差的容限范围内满足平场条件。

2.3.4 工作温度分析

红外系统的透镜折射率、面形、厚度及空气间隔在 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 的工作温度范围内均会发生不同程度的变化，使像面发生漂移，产生离焦现象，成像质量下降。通过轴向微调望远镜组的变倍透镜来补偿温度变化引起的像面漂移，保证全温度范围内清晰成像。图 9(a)、(b) 显示了焦距 72 mm 时在跟踪模式下 -40°C 和 60°C 的 MTF 图，轴上 (0 视场) MTF 在 42 lp/mm 特征频率处均大于 0.42。图 9(c)、(d) 显示了焦距 158 mm 时在跟踪模式下 -40°C 和 60°C 的 MTF 图，轴上 (0 视场) MTF 在 42 lp/mm 特征频率处均大于 0.35。平均 MTF 数值约达到衍射极限的 65%，成像质量良好。

2.4 公差分析

光学系统的公差主要考虑技术指标以及加工、装调能力，在 42 lp/mm 特征频率处，以容许下降量为准则设定光学系统的公差，公差分析结果如图 10 所示。

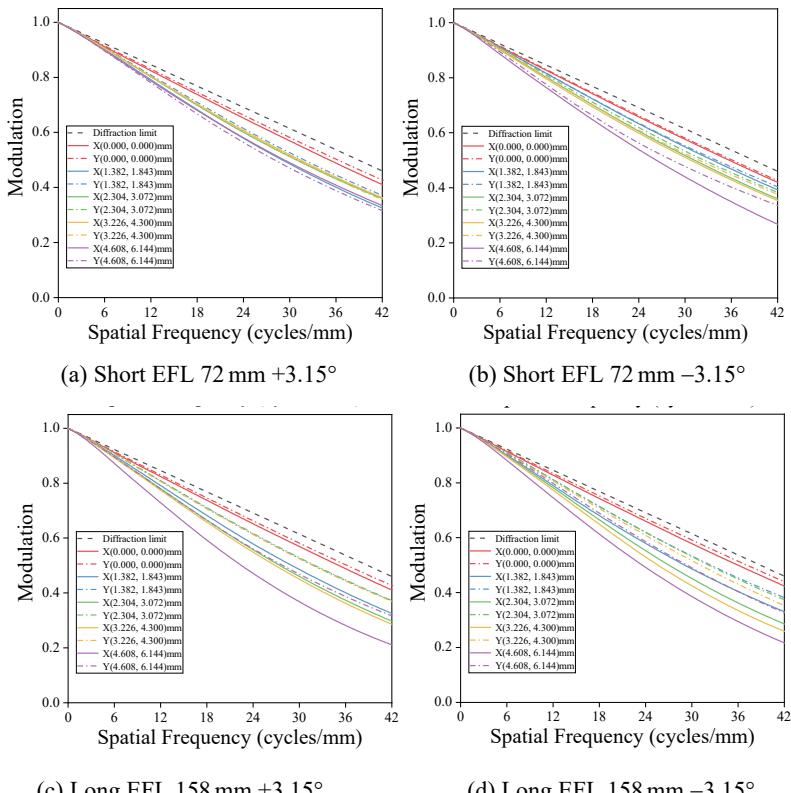


图 7 扫描边缘 MTF

Fig.7 Scanning edge MTF

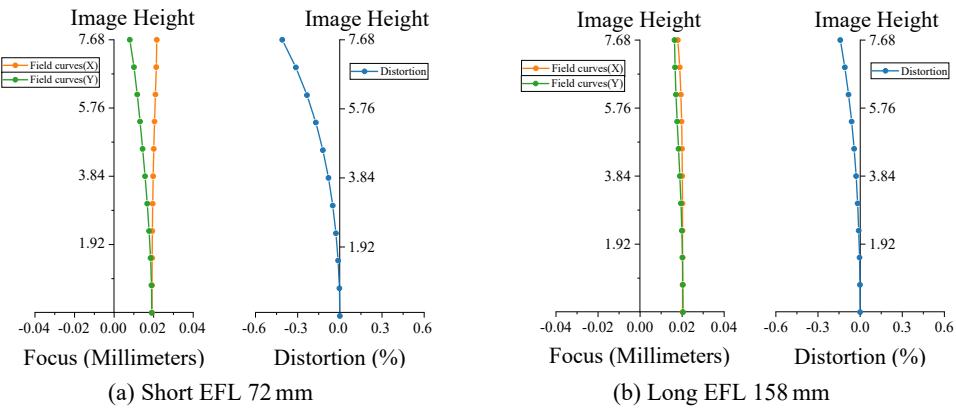


图8 场曲和畸变

Fig.8 Field curvature and distortion

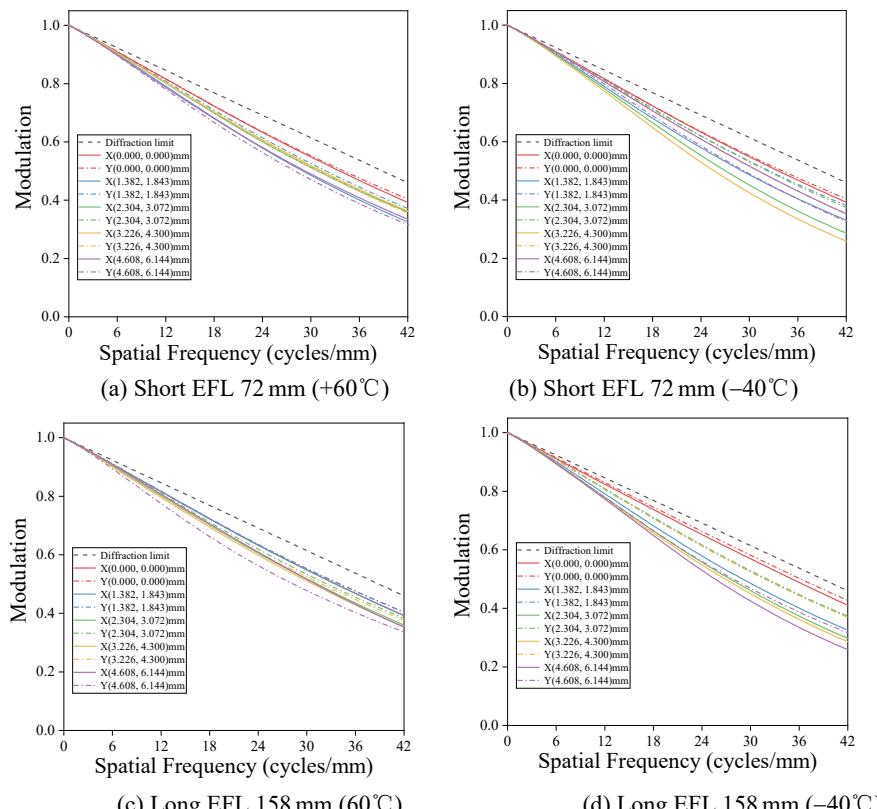


图9 工作温度内的MTF

Fig.9 MTF of $-40^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$

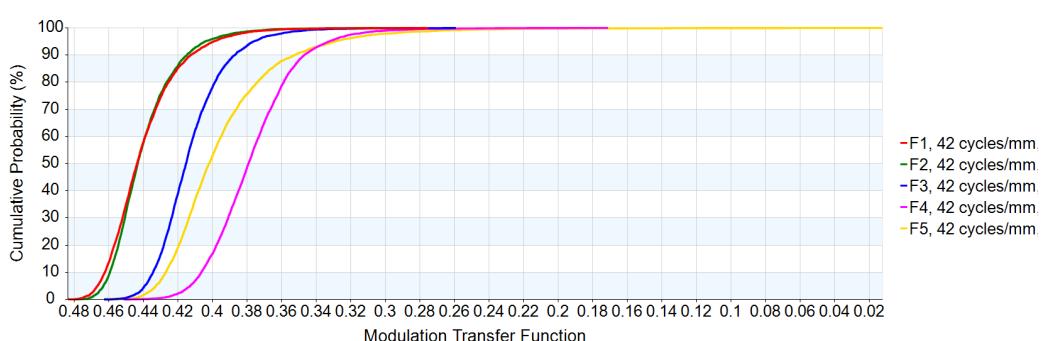


图10 公差分析图

Fig.10 Tolerance analysis diagram

分析结果表明，在特征频率处，有超过 90% 的概率 MTF 大于 0.34，满足生产加工的需求。

3 结论

随着非制冷红外探测器技术的积累与成熟，其性能不断接近制冷型红外探测器。根据市场及技术的发展方向，非制冷探测器因其功耗低、寿命长、重量轻、体积小、可靠性高、价格低廉等特性，将在红外成像领域中推广开来。

本文设计的非制冷长波红外双视场快速扫描光学系统在两种焦距状态下，优化扫描振镜在不同转角时的像差，保证扫描过程中系统清晰成像；系统相对畸变 $<0.5\%$ ，形成线性扫描关系，提高扫描过程中图像配准的精确度^[13]。在保证大相对孔径和高成像质量的前提下，减小了系统的尺寸和重量，有效地控制整机成本，具有较好的实用性。

该光学系统分辨率高、成像质量好、扫描速度快、扫描过程中具有良好的动态性和稳定性，体积小、质量轻，增强了系统的适装性。未来可与偏振红外探测器集成设计，可对复杂环境下的动态目标实现同时同地同源的探测与识别，能够很好地应用于搜索、跟踪、预警、侦察等方面^[14]。

参考文献：

- [1] 徐振亚, 白晓东, 李丽娟. 基于作用距离的红外探测系统工作波段选择方法[J]. 红外, 2011, 32(3): 23-28.
XU Zhenya, BAI Xiaodong, LI Lijuan. Selection of operation waveband for infrared detection system based on working distance[J]. *Infrared*, 2011, 32(3): 23-28.
- [2] 丁利伟, 甘宇红, 王宗俐, 等. 中波红外和长波红外探测系统性能的比较与选择[J]. 红外, 2014, 35(5): 1-6.
DING Liwei, GAN Yuhong, WANG Zongli. Performance comparison and selection of mid-wave and long-wave infrared detection systems[J]. *Infrared*, 2014, 35(5): 1-6.
- [3] 马文坡. 中波红外与长波红外推扫成像性能分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3861-3865.
MA Wenpo. Performance analysis on MWIR and LWIR pushbroom imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3861-3865.
- [4] 吴海清, 王朋. 小型化大面阵非制冷红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外, 2020, 41(2): 1-6.
WU Haiqing, WANG Peng. Design of miniaturized large-format uncooled infrared continuous zoom optical system[J]. *Infrared*, 2020, 41(2): 1-6.
- [5] Inventores Jan Rusman, Kia Silverbrook, Paul Lapstun. Scanner for scanning items marked with near-infrared tags: US:0032599 A1 [P]. 2009.
- [6] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [7] ZHANG Jingxian, LI Yudang, JIN Weiqi. *Gleam and Infrared Imaging Technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [8] 于洋, 王世勇, 蹇毅, 等. 面阵探测器连续扫描成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 122-126.
YU Yang, WANG Shiyong, JIANG Yi. Realization of an optical system based on continuous-scan focal plane array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 122-126.
- [9] YAN Aqi, WU Dengshan, WANG Hao, et al. Design of compact infrared zoom lens system[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1991: 324-327.
- [10] 孙国斌, 弥谦. 光学振镜转角与扫描角度变化关系的研究[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(5): 421-424.
SUN Guobin, MI Qian. Determination of the relation between the deflection angle and the scanning angle of an optical scanner[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2010, 30(5): 421-424.
- [11] 刘金荣. f-θ 扫描物镜设计与研究[J]. 电子工业专用设备, 2015(6): 45-50.
LIU Jinrong. Research and design for f-θ scan lens[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2015(6): 45-50.
- [12] 丁学专, 黄姜卿, 李争, 等. 六倍连续变焦面阵扫描红外光学系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(1): 89-95.
DING Xuezhan, HUANG Jiangqing, LI Zheng, et al. Optic design of 6× continuous- zoom scanning infrared system with array detector[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2021, 40(1): 89-95.
- [13] Alexander H Slocum, Stephen E Jones, Rajiv Gupta. Design of a calibration phantom for measuring the temporal resolution of a tomographic imaging device[J]. *Journal of Medical Devices- transactions of The Asme.*, 2007, 1(3): 225-232. doi:10.1115/1.2785189
- [14] Ali Z, Zakian C, LI Q, et al. 360° optoacoustic capsule endoscopy at 50 Hz for esophageal imaging[J]. *Photoacoustics*, 2022, 25: 100333. doi:10.1016/j.pacs.2022.100333
- [15] 周建, 周易, 倪歆玥, 等. 偏振集成红外光电探测器研究进展与应用[J]. 光电工程, 2023, 50(5): 66-84.
ZHOU Jian, ZHOU Yi, NI Xinyue. Research progress and applications of polarization-integrated infrared photodetector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(5): 66-84.