

六倍连续变焦面阵扫描红外光学系统设计

丁学专^{1,2}, 黄姜卿^{1,2}, 李争^{1,2}, 于洋^{1,2}, 李范鸣^{1,2}

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:提出了一种三次成像红外连续变焦面阵扫描光学系统,在传统红外二次成像光学的基础上,增加了连续变焦的望远系统。通过正组元变焦,负组元补偿的方式,可实现连续变焦。在中间平行光路中,引入扫描振镜,可补偿由于扫描平台转动带来的曝光时间内的物面的移动,保持系统在旋转扫描时成像清晰与稳定,没有拖影。设计了60~360mm连续变焦面阵扫描中波光学系统,变焦全过程畸变小于0.5%,通过测试,光学系统各焦距的性能良好,可实用于连续变焦搜索与跟踪一体的红外系统中。

关键词:红外搜索跟踪;面阵扫描;三次成像;连续变焦

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A

Optic design of 6× continuous zoom scanning infrared system with array detector

DING Xue-Zhuan^{1,2}, HUANG Jiang-Qing^{1,2}, LI Zheng^{1,2}, YU Yang^{1,2}, LI Fan-Ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detecting and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technological Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A triple imaging infrared continuous zoom array detector scanning optical system is proposed. On the basis of traditional infrared secondary imaging optics, a continuous zoom telescope system is added. Continuous zoom is realized by moving the zooming group and the compensating group along the optical axis. In the middle parallel light path, a galvanometer is introduced, and the galvanometer is used to scan back in the corresponding angle range at a specific frequency, which can compensate for the object movement during the exposure time caused by the rotation of the scanning platform, and keep the image clear and stable during the rotation scanning without any shadow. A 60~360 mm continuous zoom optic system is designed. Optic distortion is smaller than 0.5% at all effective focal length. The system achieved good performance after testing, and can be widely used in the infrared search and tracking system.

Key words: infrared search and tracking, array detector scanning, triple imaging, infrared zoom optic

PACS: 42.12.Eq, 07.57.-c

引言

红外搜索跟踪系统是一种被动探测系统,可在方位360°范围内周扫搜索,在发现目标后,提供目标的方位俯仰位置信息,并对其进行持续高帧频的

跟踪,具有全天时工作、灵敏度高、探测距离远的特点,在国防、安全等领域得到了广泛的应用。

传统的红外搜索跟踪系统由线列周扫搜索红外模块与面阵跟踪红外模块组合而成,系统体积大、结构复杂。随着红外技术的发展,出现了基于

收稿日期:2019-12-28,修回日期:2020-07-17

Received date:2019-12-28, Revised date:2020-07-17

基金项目:国家十三五国防预研项目(JZX2016-0404/Y72-2)

Foundation items: Supported by the National 13th Five year Defense Preresearch Foundation(JZX2016-0404/Y72-2)

作者简介(Biography): 丁学专(1984—),男,湖北英山人,副研究员,博士,主要研究领域为红外及光谱探测技术, E-mail: dingxuezhuan@163.com

面阵探测器的扫描型成像系统,通过回摆补偿技术,实现扫描过程中的物面稳定,使得扫描云台与单台面阵红外成像仪组合,即可具备周扫搜索与凝视跟踪一体化的功能,大幅简化了系统结构组成,减小了搜跟系统的重量、体积,降低了成本,具有较大的优势。

目前国内外开展了基于面阵探测器的扫描型红外搜索跟踪系统的相关应用研究。法国HGH红外系统股份公司研制了红外搜跟一体传感器SPY-NEL系列产品,各型号均为定焦距红外面阵扫描系统,其中焦距最长的Spynel-X 6000系统垂直视场为 5° ,瞬时视场为 0.15mrad ,每2秒钟旋转一周。中国科学院上海技术物理研究所设计了面阵探测器连续扫描成像光学系统,系统焦距 73mm , $F/2$,搭配 320×256 的探测器,实现了固定焦距下的凝视跟踪与周扫搜索。目前报道的红外搜跟一体化系统均为定焦距系统,其分辨率和视场是固定的,不能满足应用中,对目标的探测、发现与识别不同空间分辨率与视场的需求,在应用上存在一定局限性^[1-5]。

本文首次创新地提出了红外连续变焦面阵扫描光学系统的结构型式。该结构形式实现了连续变焦搜索跟踪一体化的功能。在对目标进行探测时,采用大视场搜索发现。在探测到疑似目标时,采用长焦距进行识别。由于系统具备连续变焦功能,可保证在不同视场的切换过程中目标不丢失。

六倍连续变焦面阵扫描红外光学系统融合了连续红外变焦与面阵扫描光学系统的功能,因此在光学设计上带来了新的技术难点:一是各档焦距状态下,消除中间光路振镜回摆带来的像差,保证扫描过程中成像清晰;二是解决各档焦距状态下,减小振镜回摆带来的畸变,保证图像在回摆过程中,全视场范围内的配准,使图像保持稳定;三是光学系统前固定组透镜以及振镜尺寸的控制。本文通过对六倍连续变焦面阵扫描红外光学系统进行了理论分析,在传统变焦理论的基础上,加上了面阵扫描、光阑匹配等约束条件,推导了初始结构的参数设计。通过两组光学元件的移动,可实现六倍连续变焦、面阵扫描、多档凝视跟踪、 $-30^\circ\text{C}\sim +60^\circ\text{C}$ 工作温度补偿、不同距离成像的调焦。

1 连续变焦面阵扫描光学系统原理

1.1 光学系统结构组成

连续变焦面阵扫描光学系统需在光路中引入回摆补偿振镜,以补偿平台旋转扫描带来的曝光时

间内的物面移动,消除面阵探测器扫描过程的成像模糊。为实现连续变焦与面阵回扫补偿的功能,通过结合中间光路扫描、三次成像、连续变焦的结构形式,创新地提出了一种三次成像红外连续变焦中间光路扫描型光学系统结构形式。如图1所示,光学系统由前置望远组件、扫描振镜、二次会聚组、转折反射镜、三次成像组等组成。通过在前置望远组件和后置会聚组件中间的平行光路中,引入扫描振镜,实现回摆扫描补偿。该结构形式扫描反射镜尺寸较小,且在一定范围内扫描时,可保证良好的成像质量。

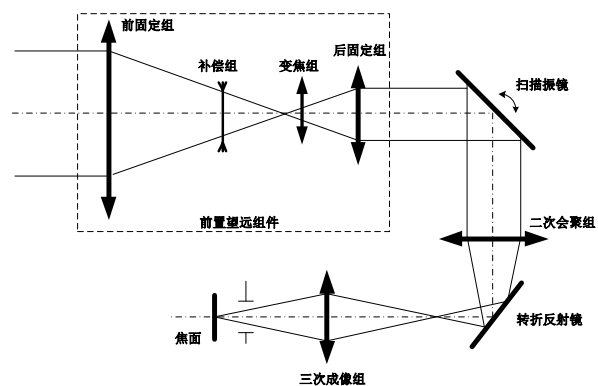


图1 扫描型变焦红外光学系统示意图

Fig. 1 Scanning zoom infrared system structure layout

连续变焦面阵扫描红外系统在光学设计时除了对连续变焦中各焦距状态以进行像差校正外,还需满足以下条件:

一、系统采用制冷型红外探测器,为减小背景辐射杂光,要求光学系统连续变焦时出瞳位置与探测器冷光阑重合,系统达到100%冷光阑效率。

二、为了各档焦距面阵扫描补偿过程中,光学系统在全视场范围内的图像配准,要求设计满足连续变焦过程中,畸变 $<0.5\%$ 。

三、为减小系统的体积,减小第一片透镜的口径,因此要求光学系统设计时保证长焦状态时入瞳位于前固定组位置附近;当望远组件采用伽利略结构型式时,其长度可大幅减小,但由于光瞳的不匹配,造成第一片透镜尺寸较大^[6-8]。因此前置望远镜采用开普勒望远镜的结构型式。

四、扫描振镜在系统周扫工作状态时,工作频率达到 $50\sim 100\text{Hz}$,因此要求振镜尺寸小,重量轻。为减小振镜的尺寸,要求前置望远镜在各焦距状态下出瞳位置位于扫描振镜附近。

1.2 光学系统初始参数设计

连续变焦面阵扫描光学系统的功能与需要满足的边界条件较多,因此对系统进行了模块化的设计。其中变焦功能由前置望远镜完成,回摆补偿功能由扫描振镜实现,出瞳与冷光阑匹配功能由二次会聚组、三次成像组实现。在变焦系统初始参数设计时,为简化系统,将振镜、二次会聚组、转折反射镜、三次成像组等效为一正透镜组,如图2所示:

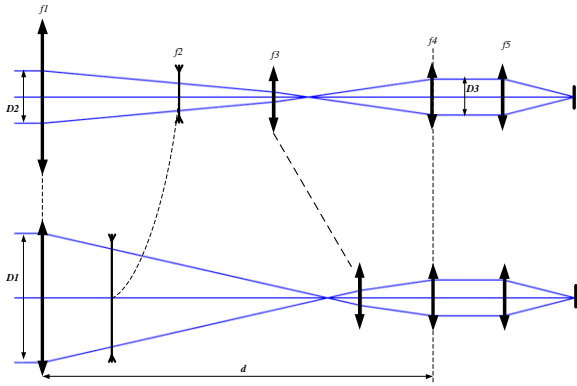


图2 变焦扫描光学系统简化模型

Fig. 2 Scanning zoom optic system simplified model

如图2所示,前固定组焦距为 f_1 ,补偿组焦距为 f_2 ,变焦组焦距为 f_3 ,后固定组焦距为 f_4 。前固定组与后固定组之间距离为 d ,变焦组移动量为 Δ 。为了统一符号约定,运动组份向右的移动量为正,反之为负。补偿组倍率为 m_2 ,变倍组的倍率为 m_3 ,根据经典四组元机械补偿的变焦过程微分方程如下^[9-11]:

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

该式相当于: $\sum_1 dL_i = 0$, 即所有运动组份共轭距的变化量之和为零。

在满足传统四组元机械变焦系统设计条件的同时,需满足光学出瞳入瞳以及光阑匹配的要求。在长焦状态下,系统入瞳位于前固定组,前置望远镜的出瞳位于扫描振镜附近。考虑到后固定组与扫描振镜位置相邻,中间为平行光路,因此在初始结构计算时,近似等效为前固定组经过补偿组和变焦组之后的成像,应位于后固定组位置。如图3所示,在系统最长焦距状态下,补偿组和变焦组组合的光焦度计算如下^[9-11]:

$$\phi_{23} = \phi_2 + \phi_3 - d_{23}\phi_2\phi_3, \quad (2)$$

补偿组和变焦组组合主平面位置计算如下^[9-11]:

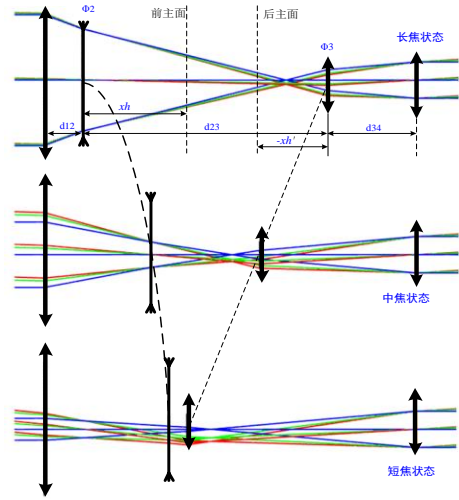


图3 连续变焦望远镜系统设计

Fig. 3 Continuous zoom telescope design

$$x_h = f_{23} \cdot \frac{d_{23}}{f_3}, \quad (3)$$

$$x_h' = -f_{23}' \frac{d_{23}}{f_2}, \quad (4)$$

根据光阑匹配的原则,物距和像距如下式:

$$s = d_{12} + x_h, \quad (5)$$

$$s' = d_{34} - x_h', \quad (6)$$

光学系统长焦状态下,需满足以下公式^[9-11]:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f_{23}'}, \quad (7)$$

将式(3)、(4)、(5)、(6)代入式(7)中,则有:

$$\frac{1}{d_{34}\phi_{23} + d_{23}\phi_2} - \frac{1}{d_{12}\phi_{23} + d_{23}\phi_3} = 1, \quad (8)$$

式(8)即为变焦光学系统长焦状态光阑匹配条件,满足该式时,所设计的变焦光学系统第一片透镜、扫描振镜具有最优化的尺寸。

2 光学系统设计

2.1 光学系统参数

在上述理论模型的基础上,设计了一款红外搜索与跟踪一体化连续变焦光学系统,光学系统工作波段 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,变焦倍率为6倍,F数为F/4。系统具备60mm、180mm、360mm三档面阵扫描补偿成像的功能,同时具备60~360mm凝视连续变焦的功能;红外探测器像元数为 640×512 元,像元大小为 $15 \mu\text{m}$,使用中可以选择进行 2×2 的像元合并,使合并后像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$;光学系统不同焦距的视场如表1所示:

表 1 光学系统技术要求

Table 1 Optic system specifications requirement

| EFFL | Aperture | Field of view |
|-------|----------|------------------------------|
| 60mm | 15mm | $9.2^\circ \times 7.3^\circ$ |
| 120mm | 30mm | $4.6^\circ \times 3.7^\circ$ |
| 180mm | 45mm | $3.1^\circ \times 2.4^\circ$ |
| 240mm | 60mm | $2.3^\circ \times 1.8^\circ$ |
| 360mm | 90mm | $1.5^\circ \times 1.2^\circ$ |

2.2 光学系统设计

根据四组元变焦距理论以及系统光阑匹配公式,令前固定组与后固定组之间距离为 $d=250\text{mm}$,对各组元的焦距进行了分配和迭代优化。最终选择的初始参数为:前固定组焦距 $f_1=117.4\text{mm}$;补偿组焦距 $f_2=-279\text{mm}$;变焦组焦距 $f_3=42.7\text{mm}$;后固定组焦距 $f_4=138\text{mm}$ 。光学系统最长焦距状态时,各组元之间的间隔为: $d_{12}=25.38\text{mm}$; $d_{23}=165\text{mm}$; $d_{34}=60\text{mm}$ 。

根据上述高斯光学参数,设计时将各组元替换为单透镜、双分离透镜组等,经过迭代优化,光学设计结果如图4所示。望远镜出瞳位置位于扫描振镜位置,扫描振镜的有效口径为 $\Phi 25\text{mm}$;为了进一步平衡像面处的像差和光阑像差的存在,入瞳位于前固定组附近,第一片透镜的有效口径为 $\Phi 96\text{mm}$ 。光学系统采用折衍混合的透射式三次成像的结构形式,具有100%冷光阑效率。光路由5组10片透镜组成。前固定组由1片硅透镜和1片非球面锗透镜组成。补偿组为1片非球面锗透镜。变倍组为1片非球面硒化锌透镜。后固定组由1片球面锗透镜和1片非球面衍射锗透镜组成。二次会聚组由1片氟化钙透镜和1片非球面AMTIR1透镜组成。三次成像组由2片硅透镜组成。光学系统体积包络尺寸为 $260\text{mm} \times 200\text{mm} \times 115\text{mm}$ 。

光学系统焦距为60~360mm,下面选取60mm、180mm、360mm等三档焦距,来评估光学系统变焦过程中的成像质量。由图5可知,光学系统在变焦过程中,MTF在 17lp/mm 频率(像元合并后为 $30\mu\text{m}$ 对应的奈奎斯特频率)处均大于0.4。焦距60mm、180mm、360mm的光学系统畸变控制在0.5%以内。

2.3 变焦曲线设计

连续变焦面阵扫描光学系统的变焦组为正组变焦,补偿组往返运动进行补偿。不同焦距下,补偿组和变焦组的间隔如表2所示, d_{12} 为补偿组与前

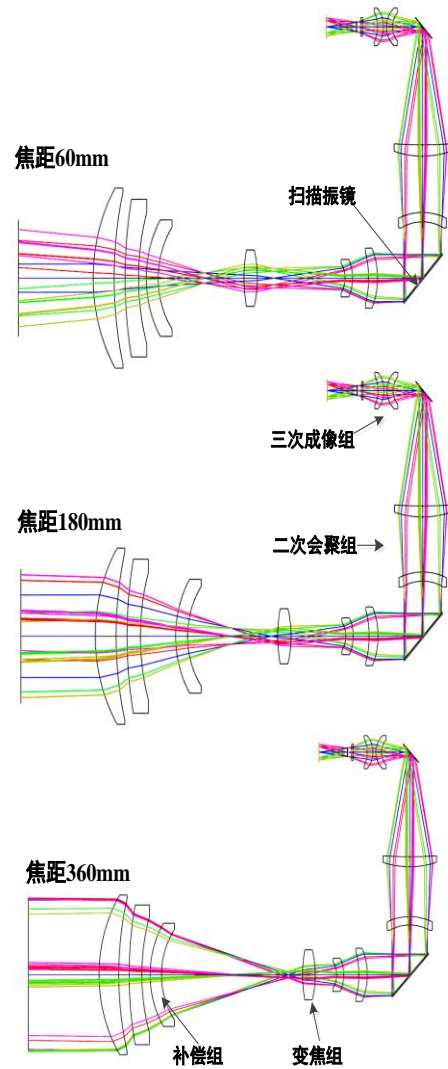


图4 六倍变焦光学系统图

Fig. 4 6× zoom optic system layout

固定组距离; d_{23} 为补偿组与变焦组之间距离; d_{34} 为变焦组与后固定组之间的距离。

连续变焦面阵扫描光学系统的变焦曲线如图6所示,横坐标为系统焦距,纵坐标为 d_{12} 、 d_{34} 的距离值。

为更全面的评价光学系统在连续变焦过程中的成像质量,给出了60mm~360mm焦距范围内的评价函数曲线,如图7所示,图中纵坐标为光学系统各个视场的弥散斑半径数值组成的评价函数。由此可见光学系统全焦段成像质量良好,但由于对长焦、短焦成像质量的控制较严格,在焦距300mm状态时评价函数相对略大。

2.4 回摆补偿分析

扫描振镜位于中间平行光路中,具有两种工作

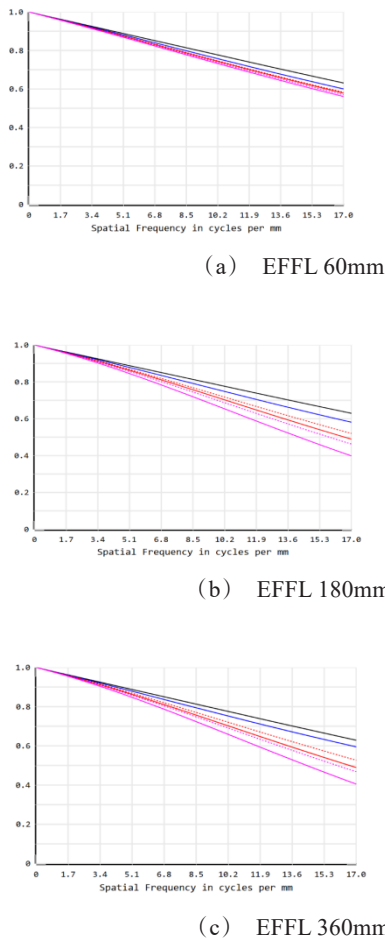


图5 光学系统 MTF 与畸变图
Fig.5 Optic system MTF and distortion layout

表2 不同焦距时补偿组和变焦组的间隔

| EFFL(mm) | d_{12} (mm) | d_{23} (mm) | d_{34} (mm) |
|----------|---------------|---------------|---------------|
| 60 | 4.776 | 57.552 | 58.642 |
| 120 | 28.799 | 46.082 | 46.089 |
| 180 | 23.669 | 60.542 | 36.760 |
| 240 | 16.768 | 75.172 | 29.030 |
| 300 | 11.049 | 87.720 | 22.202 |
| 360 | 5.979 | 99.667 | 15.324 |

状态:锁紧状态与往返回摆补偿状态。扫描振镜处于锁紧状态时,与光轴程 45° 固定,将光路转折 90° ,此时系统应用于凝视跟踪模式,可进行六倍连续变焦。扫描振镜处于往返回摆补偿状态时,系统应用于周扫搜索模式,通过振镜往返扫描来补偿平台旋转带来的曝光时间内的物面移动,保证图像清晰。

系统处于周扫搜索模式时,不同的焦距对应不同的周扫时间。焦距60mm状态下,转台转速为1s/

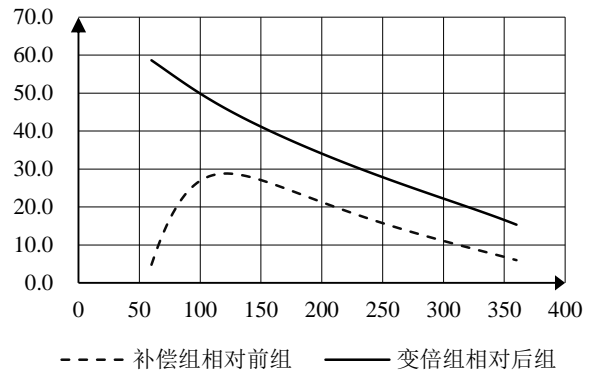


图6 光学变焦曲线
Fig.6 Optic system zoom curve

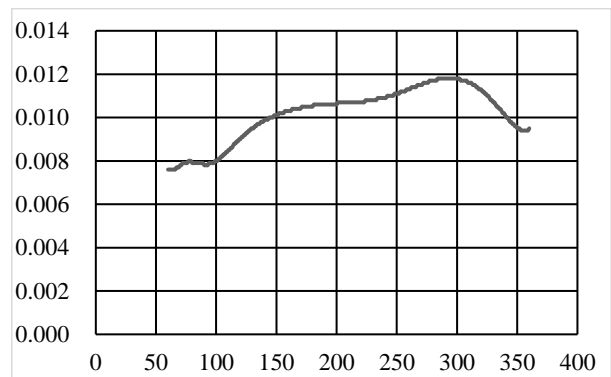


图7 不同焦距评价函数曲线
Fig.7 Merit function curve at different EFFL

圈;焦距180mm状态下,转台转速为3s/圈;焦距360mm状态下,转台转速为6s/圈。红外探测器积分时间取12ms,则振镜补偿角度为 $\pm 0.65^\circ$ 。

由于振镜扫描时,扫描角度的增加会引起系统成像质量的下降,因此在设计时需要扫描振镜处于边缘状态下的像差进行优化。下面分析了三种焦距状态下,扫描振镜处于边缘角度时的成像质量。短焦60mm状态在振镜处于边缘角度 $\pm 0.65^\circ$ 的MTF如图8(a)所示;焦距180mm状态,振镜处于边缘角度 $\pm 0.65^\circ$ 的MTF如图8(b)所示;焦距360mm状态振镜处于边缘角度 $\pm 0.65^\circ$ 的MTF如图8(c)所示,由此可见回摆补偿时,图像边缘MTF有所下降,但全视场的MTF在17.0lp/mm频率处仍大于0.3。

2.5 工作温度分析

红外光学系统材料折射率以及透镜间隔受温度影响较大。为了实现变焦距红外面阵扫描系统 $-30^\circ\text{C}\sim+60^\circ\text{C}$ 的工作温度,在各焦距状态下,可通过微调补偿组的位置来补偿工作温度带来的影响。由于长焦受温度影响最大,下面分析了360mm焦距状

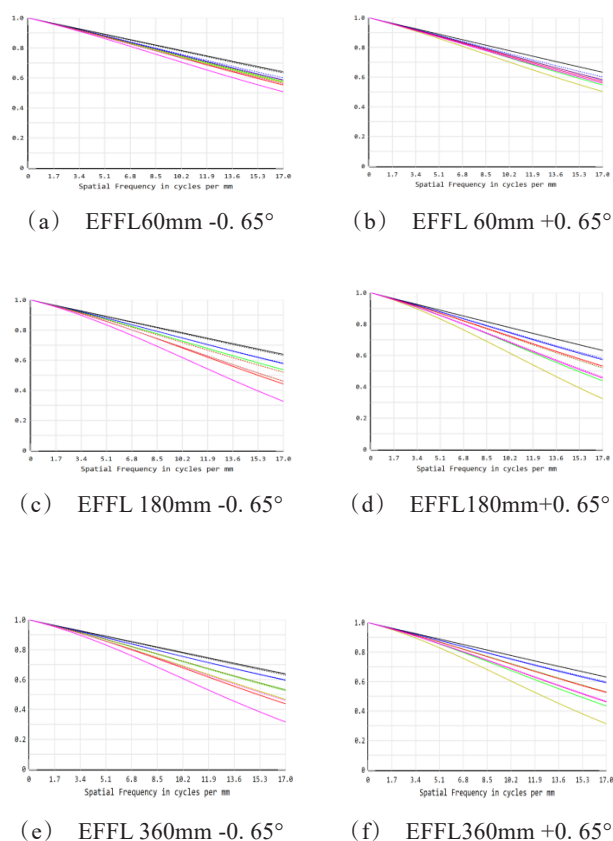


图8 扫描边缘MTF和弥散斑图
Fig.8 Scanning edge MTF and spot radius layout

态时受工作温度变化带的影响。在 -30°C 工作温度时,补偿组后移 0.41mm ;工作温度 $+60^{\circ}\text{C}$ 时,补偿组前移 0.31mm ,补偿组移动后的光学MTF如图7所示,全视场MTF在 17.0lp/mm 频率处大于 0.3 。

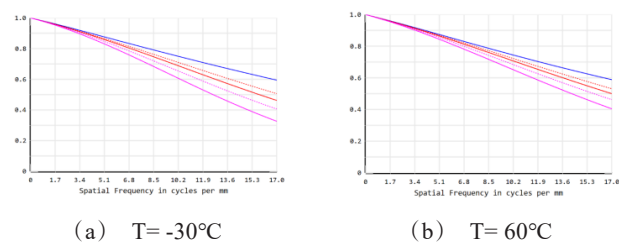


图9 不同工作温度MTF图
Fig.9 MTF at different working temperature

3 实验结果

六倍连续变焦面阵扫描光学系统研制完成后,进行了实验室测试,实验室测试结果如图10所示,在凝视状态与周扫状态下,红外光学系统对十字靶

标的成像清晰,无可见冷反射现象。

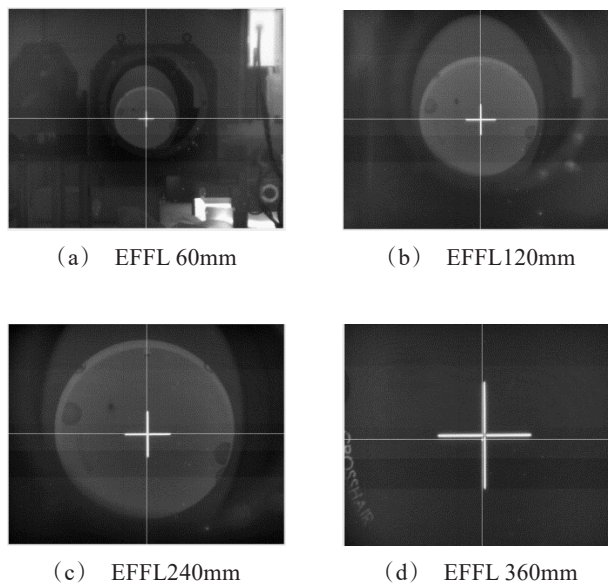


图10 系统实验室凝视测试结果
Fig.10 System staring test at laboratory

在实验室将红外面阵扫描系统放置与方位扫描转台上,进行了周扫成像测试。焦距 60mm 状态下,转台转速为 1s/圈 ;焦距 360mm 状态下,转台转速为 6s/圈 ,红外探测器积分时间为 12ms 。周扫的红外图像如图11所示,可见系统在扫描状态下,面阵扫描的成像效果良好。

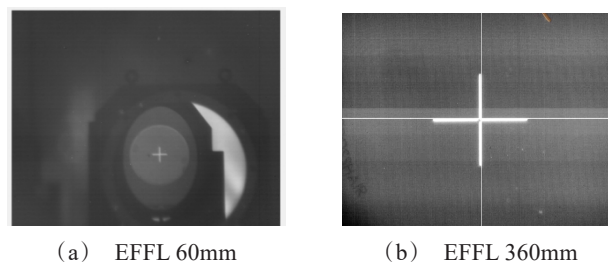


图11 系统实验室周扫成像结果
Fig.11 System scanning test at laboratory

4 结论

针对连续变焦红外搜索与跟踪一体化系统的应用需求,提出了连续变焦中间光路扫描红外光学系统的结构型式,推导了长焦状态下光阑匹配的条件。进行了六倍连续变焦面阵扫描光学系统的设计与分析。研制完成的系统经过实验室测试,光学系统在凝视状态与快速周扫状态下,均可获取良好

的面阵图像。该系统结构型式简洁紧凑,可广泛应用于红外搜索与跟踪一体化系统中。

References

- [1] Yu Yang, Wang Shiyong, Jian Yi, *et al.* Realization of an optical system based on continuous-scan focal plane array [J], *Infrared and Laser Engineering*, (于洋,王世勇,蹇毅,等. 面阵探测器连续扫描成像光学系统, *红外与激光工程*), 2016, **45**(01):122-126
- [2] FU Yan-Peng, JIN Ning, LI Xun-Niu, *et al.* Airborne novel design for MWIR continuous zoom optical system[J], *J. Infrared Millim. Waves*, (付艳鹏,金宁,李训牛,等. 机载新颖连续变焦中波红外光学系统设计, *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(04): 309-312+324.
- [3] ZHANG Liang, MAO Xin, WANG He-Long. The design of MWIR / LWIR multiple FOV optical system[J], *J. Infrared Millim. Waves*, (张良,毛鑫,王合龙. 中波/长波双色多视场光学系统设计. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(03): 254-258
- [4] LIU Zhong-ling, YU Zhen-hong, LI Li-ren, *et al.* Status and Development Trend of Infrared Search and Track System [J], *MODERN DEFENCE TECHNOLOGY*, (刘忠领,于振红,李立仁,等. 红外搜索跟踪系统的研究现状与发展趋势, *现代防御技术*), 2014, **42**(02):95-101
- [5] 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* (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, *应用光学*), 2017, **38**(04):521-525
- [6] A Qi Yan, Deng Shan Wu, Hao Wang, *et al.* Design of Compact Infrared Zoom Lens System [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **1991**: 324-327
- [7] Dan Dan Hu, Jian Ke Zhao, Xun Xue, *et al.* Design of a Refractive/Diffractive Hybrid Middle Infrared Continuous Zoom Optical System [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, **2383**:33-37
- [8] Zhang Bo, Cui Qingfeng, Piao Mingxu, *et al.* Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements. [J]. *Applied optics*, 2019, **58**(8).
- [9] Su Zhang, Jin Duan, Qiang Fu, *et al.* Infrared zoom lens design based on target correlation recognition and tracking [P]. *Applied Optics and Photonics China*, 2015.
- [10] Yu Dao-yin, Tan Heng-ying. *Optics Engineering* [M]. Beijing: China Machine Press, (郁道银,谈恒英. 工程光学,北京:机械工业出版社), 2006.
- [11] TAO Chun-kan. Design of zoom optic system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, (陶纯勘. 变焦距光学系统设计,北京:国防工业出版社), 1988.