



大面阵连续变焦面阵扫描红外光学系统设计

王美钦 潘海俊

Design of continuous zoom area array scanning infrared optical system with large area array

WANG Meiqin, PAN Haijun

引用本文:

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. DOI: 10.5768/JAO202445.0201003

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(2): 292–299. DOI: 10.5768/JAO202445.0201003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计

Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range

应用光学. 2019, 40(1): 33–38 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101006>

高变倍比中波制冷型连续变焦光学系统设计

Design of cooled MWIR continuous zooming optical system with high zoom ratio

应用光学. 2019, 40(6): 998–1003 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601011>

潜望镜连续变焦光学系统设计

Design of continuous zoom optical system for periscope

应用光学. 2018, 39(2): 192–195 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0201006>

高变倍比大相对口径长波红外变焦系统设计

Design of high zoom ratio LWIR zoom system with large relative aperture

应用光学. 2018, 39(6): 773–779 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601002>

大口径长焦距变焦光学系统设计

Design of large aperture and long focal length zoom optical system

应用光学. 2018, 39(5): 644–649 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501009>

变焦结构光成像系统的光学设计

Optical design of zoom structured light imaging system

应用光学. 2018, 39(1): 22–27 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 02-0292-08

大面阵连续变焦面阵扫描红外光学系统设计

王美钦,潘海俊

(武汉联一合立技术有限公司,湖北 武汉 430000)

摘要: 基于红外扫描图像系统理论,设计了一款采用大面阵 $1280 \times 1024 \text{ pixel}@12 \mu\text{m}/F2$ 中波制冷传感器的连续变焦面阵扫描红外光学系统。按照设计指标要求,对光学系统参数进行分析后,确定采用像方扫描方式补偿扫描平台运动产生的积分时间内的物面移动,解决面阵探测器扫描时的热成像拖尾现象,望远系统采用二次成像、负组元变倍、正组元补偿的结构形式实现连续变焦,即光学系统结构确定为三次成像的型式。在设计程序中对凸轮曲线、扫描光学系统的热冷反射做出分析调整。光学模拟结果显示:系统在扫描振镜往返情况下,全视场的 MTF 值在频率 42 lp/mm 处均大于 0.3,并且凸轮曲线在整个变焦过程中平滑,没有出现拐点,最大压力角小于 50° 。最后,对系统开展了成像实验测试,实验结果表明:该控制系统能够在 $60 \text{ mm} \sim 600 \text{ mm}$ 区域连续变焦,在变焦过程中成像周围景色清晰可见,完全没有冷反射情况发生,同时系统在旋转扫描过程中成像均清晰稳定,没有拖尾现象。该系统可用于连续变焦搜索跟踪一体的红外系统中。

关键词: 大面阵; 面阵扫描系统; 连续变焦; 冷反射; 三次成像

中图分类号:TN942.2

文献标志码:A

DOI: [10.5768/JAO202445.0201003](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201003)

Design of continuous zoom area array scanning infrared optical system with large area array

WANG Meiqin, PAN Haijun

(Wuhan Lianyi Heli Technology Co.,Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Based on the infrared scanning image system theory, a continuous zoom area array scanning infrared optical system using $1280 \times 1024 \text{ pixel}@12 \mu\text{m}/F2$ large area array medium-wave refrigeration sensor was designed. According to the requirements of the design technical indicators, the optical application parameters were analyzed, and then it was determined that the image scanning method was used to compensate the surface movement in the integral time generated by the movement of the scanning platform, so as to solve the thermal imaging tailing phenomenon during the scanning of the area array detector. The telescopic system adopted the structure forms of secondary imaging, negative component magnification and positive component compensation to realize continuous zoom, that was, the structure of the optical system was determined as the type of thrice-imaging. It was also necessary to make analytical adjustments to the cam curve and the hot/cold reflections of the scanning optical system in the design program. The optical simulation results show that the MTF value of the full field of view at the frequency of 42 lp/mm is greater than 0.3 under the condition of scanning galvanometer round trip, the cam curve is smooth without inflection point during the whole zoom process, and the maximum pressure angle is less than 50° . Finally, the imaging experiment test of the system was carried out. The test results show that the control system can complete the continuous zoom in the area of 60 mm to 600 mm , the scenery around the object is clearly visible in the zoom stage, and there is no cold

收稿日期:2023-04-14; 修回日期:2023-06-15

基金项目:军队科研资助项目 (LJ2019C050618)

作者简介:王美钦 (1984—),女,硕士,主要从事可见光、红外、激光系统等光学系统设计及杂散光分析工作。

E-mail: 854023028@qq.com

reflection. At the same time, the imaging of the system without tailing phenomenon is clear and stable during the rotation scanning process. The system can be used in infrared systems that integrate continuous zoom search and tracking.

Key words: large area array; area array scanning system; continuous zoom; cold reflection; thrice-imaging

引言

报警功能与自动追踪功能集于一体的红外搜索跟踪装置,具备全天候监测、成像清晰度高、多方向搜索追踪等特征。目前,红外搜索跟踪系统主要采用线列探测器,通过转动机构的扫描速度与探测器驱动时钟的精确匹配,完成搜索空间领域的连续成像。与线列探测器相比,面阵探测器的积分时间更长,热灵敏度更高,更有利于提高系统的信噪比,提升作用距离;同时面阵探测器具有较高的工作频率,可在单位时间内获得的图像帧数更多,从而提高系统的探测精度。但是,如果采用面阵探测器进行没有补偿措施的扫描成像,那么物空间场景在积分时间内存在一定的像移,即形成的全景搜索图像存在严重的拖尾现象。若以红外面阵搜索系统的方位搜索转台转速360°/s,探测器像元尺寸30 μm,焦距60 mm,积分时间5 ms为例,在积分时间内像移量高达62.9个像元,像移模糊相当严重。

面阵探测器要完成全景搜索成像,技术方案有以下3种:第一种是采用分视场凝视方式实现全景搜索成像。即每个面阵探测器覆盖一定的视场,然后将多个面阵探测器的所有视场进行拼接,实现全景搜索成像。这种实现方式优点是原理简单,但是具有系统复杂、体积大、成本高等缺点。第二种是采用步进凝视方式实现全景搜索成像。通过方位转台步进运动,带动面阵探测器实现360°全景成像,在探测器积分时间内,搜索转台保持不动,探测器在积分时间内进行成像,成像完成后,搜索转台立即运动到下一视场。由于搜索转台体积大、质量大、转动惯量大,进行这种周期性快速启动,需要系统具有精确稳定伺服控制功能,难度很大。第三种是采用反向补偿方式实现全景搜索成像。连续变焦面阵拍摄型系统在积分周期内的拍摄活动,会使焦平面与场景间发生相应移动,使图像产生像移,变得不清晰,这是扫描系统采用面阵探测器的最大问题^[1]。因此,在继续采用旋转方位搜索转台的同时,设计一种振镜回扫系统,即采用像方扫描方式补偿扫描平台运动产生的积分时间内的物面移动,解决面阵探测器扫描

时的热成像拖尾现象^[2]就显得十分必要。

目前,国内外也有基于面阵扫描的红外搜索跟踪技术的相关研发报道。法国HGH红外技术股份公司开发的SPY-NEL系列产品,以及中科院上海技术物理研究院设计的定焦面阵扫描装置,但其分辨率与焦距为定值,无法满足应用中对目标的探测、识别和确认的不同需求^[3-6]。

红外搜索跟踪系统利用大视场对广域搜索目标,然后利用长焦距对可疑目标实施识别、跟踪。所以,它应当为连续变焦系统,以实现对目标的搜索和实时追踪。丁学专设计的面阵扫描6倍连续变焦红外光学系统,系统焦距为60 mm~360 mm,变倍倍率较小,探测器为640×512 pixel@15 μm, F4中波制冷,像面较小, F数较大^[7-8]。目前,在国内外还没有见到能适配1280×1024 pixel/F2中波制冷大面阵探测器的连续变焦面阵扫描光学系统的相关报道。因此,针对应用要求,我们开发出一种大变倍比、大面阵成像技术,系统焦距60 mm~600 mm,配备1280×1024 pixel/F2中波制冷探测器的面阵探测器。该控制系统同时具有红外连续变焦系统和面阵扫描光学系统的特点,因此在光学工程设计上具有新的科技难度。

1) 望远系统的视场角设计上需考虑振镜回扫补偿无渐晕或挡光引入的视场角增量,消除平行光路中振镜回扫带来的像差,如彗差、色散等,以保证不同焦距扫描过程中均能清晰成像。

2) 减小平行光路中振镜回扫带来的畸变,保证系统在全视场范围内的图像配准,以保持图像稳定。

3) 为压缩系统体积,减小振镜尺寸,设计时需将长焦望远系统的人瞳位于前固定组位置附近,同时望远系统各个焦段的出瞳位置均位于振镜附近。

论文中根据技术指标,选择了大面阵连续变焦面阵扫描红外光学系统的结构形式,即通过正组机械补偿法实现望远系统的连续变焦,采用硅、锗两种常规红外材料,实现了焦距60 mm~600 mm的10倍连续变焦面阵扫描、3个视场的凝视与跟踪、温度范围-40 °C~+60 °C、不同远近物距均能

清晰成像。

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

为解决面阵探测器因扫描过程产生的成像模糊问题,同时考虑扫描振镜尺寸的小型化设计,连续变焦面阵扫描光学系统将扫描振镜放置在前组望远系统的平行光路中,进行回摆补偿。为满足连续变焦、空间尺寸小的应用要求,前组望远系统采用二次成像、负组元变倍、正组元补偿的结构形式实现连续变焦,如图 1 所示。光学系统主要包括前组望远系统、扫描振镜、三次成像组等。经过前组望远系统压缩后的扫描反振镜尺寸较小,在与转台旋转匹配的区域内扫描时,仍可使系统具有良好的成像质量。

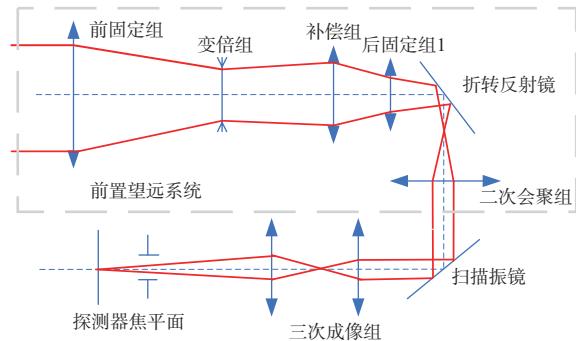


图 1 连续变焦面阵扫描红外光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous zoom area array scanning infrared optical system

1.2 光学系统初始参数设计

连续变焦面阵扫描光学系统既要实现系统连续变焦,又要考虑振镜补偿的边界条件,因此对前组望远系统和三次成像组分别进行独立化设计。其中前组望远系统具有连续变焦,将光束压缩至扫描振镜尺寸,扫描振镜具有反向补偿的作用,通过二次会聚组与三次成像组组合达到出瞳和冷光阑 100% 重合。当变焦单元的参数设置后,为简化过程,用一个正透镜来等效替代扫描振镜、二次会聚组、折转反射镜、三次成像组组合的部件,如图 2 所示。前置望远系统由前固定组、变倍组、补偿组、后固定组组成,其中变焦系统由前固定组、变倍组、补偿组组成,准直系统为后固定组。控制长焦系统入射光束直径 D_1 、短焦系统入射光束直径 D_2 ,经过前置望远系统压缩后出射光束直径均为 D_3 ,通过高斯光学几何型法合理确定系统各群组

的焦段与各运动群组的位移。

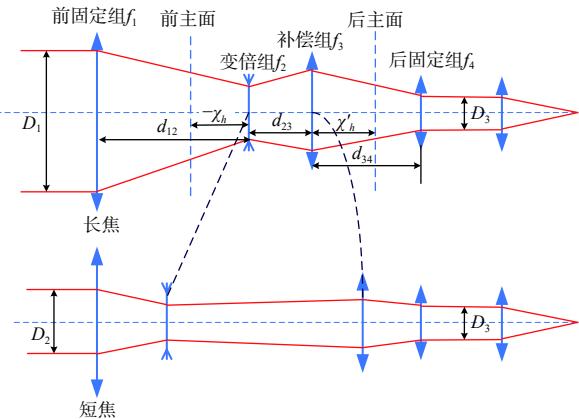


图 2 连续变焦面阵扫描光学系统简化模型

Fig. 2 Simplified model of continuous zoom area array scanning optical system

如图 2 所示, f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 为前固定组、变倍组、补偿组和后固定组的焦距。 m_{2s} 、 m_{3s} 分别为短焦系统的变倍组倍率和补偿组倍率, m_{2l} 、 m_{3l} 分别为长焦系统的变倍组倍率和补偿组倍率。变倍组的共轭距变化量与补偿组的共轭距变化量大小相等,方向相反,即变焦过程满足机械正组补偿微分方程^[9-11]:

$$f'_3 \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} - \frac{1}{m_{3s}} + m_{3s} \right) + f'_2 \left(\frac{1}{m_{2l}} + m_{2l} - \frac{1}{m_{2s}} + m_{2s} \right) = 0 \quad (1)$$

同时还要考虑前组望远系统出瞳与三次成像组入瞳匹配,以及三次成像组入瞳与探测器冷光阑 100% 匹配。前组望远系统采用二次成像结构形式,将光阑置于扫描振镜位置上,控制其入瞳位于前固定组附近。由于经过后固定组的光线平行进入扫描振镜,且后固定组与振镜彼此相邻,所以在系统初始结构设计中,将前固定组的成像位置设置在后固定组位置,见图 2 所示。当系统处于长焦时,变倍组和补偿组组合的光焦度满足公式^[9-10]:

$$\Phi_{23} = \Phi_2 + \Phi_3 - d_{23} \Phi_2 \Phi_3 \quad (2)$$

变倍组和补偿组组合的主平面位置满足以下公式:

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

$$x'_h = f_{23} \frac{d_{23}}{f'_2} \quad (4)$$

物距和像距满足光阑匹配原则,公式如下:

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

$$s' = d_{34} + x'_h \quad (6)$$

光学系统处于长焦情况时, 物像满足公式:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'_{23}} \quad (7)$$

将公式(3)~公式(6)带入公式(7)中, 则:

$$\frac{1}{d_{34}\Phi_{23} - d_{23}\Phi_2} - \frac{1}{d_{12}\Phi_{23} - d_{23}\Phi_3} = 1 \quad (8)$$

连续变焦面阵扫描系统长焦系统的光阑匹配条件见公式(8), 长焦系统的第一透镜与扫描振镜尺寸均可达到最小化。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的距离为 $d=250$ mm, 对各组元的焦距进行分配和迭代优化。最终选择的初始参数为: 前固定组焦距 $f_1=201.8$ mm; 补偿组焦距 $f_2=-26.6$ mm; 变焦组焦距 $f_3=50.3$ mm; 后固定组焦距 $f_4=26.8$ mm。光学系统在最长焦距状态时, 各组元之间的间隔为: $d_{12}=65.08$ mm; $d_{23}=118.6$ mm; $d_{34}=60$ mm。

热成像系统具有比可见光系统更明显的冷反射^[11-12]、鬼像、杂散光等, 图像具有不同的亮度, 或者具有明显的亮斑或暗斑。虽然产生的原因不太相同, 但都因为在视场范围内或扫描过程中, 区别于外景的其他辐射能量被探测器接收到了。因此系统必须采取一系列措施, 减小系统的冷反射效应, 从而有效提高系统的探测精度。

1) 前置望远系统、三次成像组均采用二次成像结构形式, 并且前置望远系统的出瞳与三次成像组的入瞳重合, 三次成像组的出瞳与探测器冷光阑重合, 实现 100% 冷光阑匹配, 从而降低系统杂散光的影响。

2) 改进增透膜系的工艺水平, 提高膜系的透过率, 降低系统的冷反射、鬼像等效应。

3) 在设计过程中, 对可能产生冷反射的面, 优化其曲率半径, 调节镜片组之间间隔, 增大光线在该面上的入射角, 从而减小冷反射效应。

4) 将镜筒内壁进行涂黑处理, 增加消光纹, 同时在一次像面位置增加视场光阑, 有效地减少最终到达像面的杂光以及冷反射效应。

2 设计指标及设计过程

2.1 主要技术指标

连续变焦面阵扫描光学系统的主要技术指标包括:

- 焦距/mm: 60~600;
- F 数: 2;
- 波长/ μm : 3.7~4.8;

- 探测器/pixel: 1 280×1 024@12 μm ;
- 面阵扫描焦距/mm: 60、200、600。

2.2 光学系统设计思路

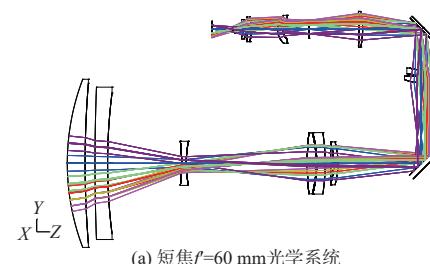
扫描振镜的参数选择与系统的图像质量、性能密切相关。考虑光学设计优化所需及振镜的运动惯性与控制精度, 可以设定振镜的最大直线扫描角为 $\pm 0.6^\circ$ 。

根据模块化设计原则, 分别独立设计前组望远系统与三次成像组, 其中前组望远系统采用具有二次成像的开普勒望远镜模式, 同时控制系统的入瞳位于前固定组物镜附近。按照系统长焦焦距为 600 mm, 系统 F 数为 2, 计算得到前组望远系统的入瞳尺寸为 300 mm。结构形式采用负透镜组变倍、正透镜组补偿, 即 10 倍连续变焦通过负透镜组的直线运动实现, 像面位置通过正透镜组的轴向运动进行补偿。为保证扫描振镜有足够的运动范围, 准直目镜组需要有一定的出瞳距, 并且考虑到设计难度, 准直目镜组焦距 ≥ 30 mm, 经过系列优化设计后, 其出瞳距为 35 mm, 焦距为 42.5 mm。在系统方案设计中还必须实现 100% 冷光阑匹配, 如前置望远系统的出射光瞳和三次成像组的入瞳与探测器冷屏重合, 因此系统中三次成像组件必须采取二次成像的方式, 同时为了保证其入瞳位置与望远系统的出瞳位置重合, 并考虑到扫描振镜的运动空间, 设计其入瞳距为 55 mm, 成像组焦距为 44.5 mm。前置望远系统和三次成像组设计完成后, 将其组合到整体系统中。

为了降低成本, 系统只使用硅和锗两种材质, 为降低镜片数量, 提高系统透过率, 系统使用非球面来优化像差, 改善成像质量。

2.3 设计结果

设计完成的光学系统如图 3(a)、3(b)、3(c) 所示。图 3 中, 由 12 片透镜、90°折转反射镜及扫描振镜构成折转光路; 前组望远系统由 8 个透镜组成, 分别为 5 片硅透镜、3 片锗透镜; 为了更好地消像差, 提高像质, 系统采用 4 个非球面; 三次成像镜组由硅、锗透镜组成。



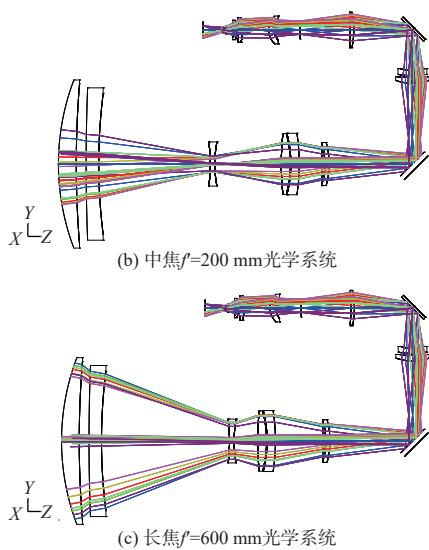
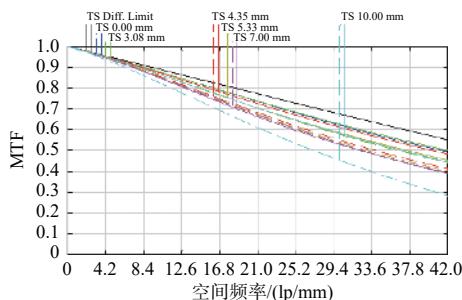
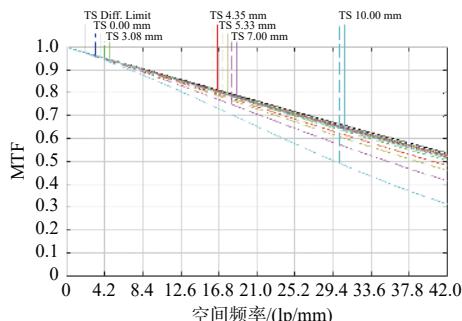
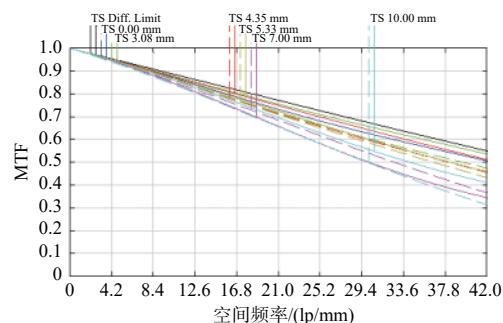


图 3 连续变焦光学系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of continuous zoom optical system

2.4 像差校正及像质评价

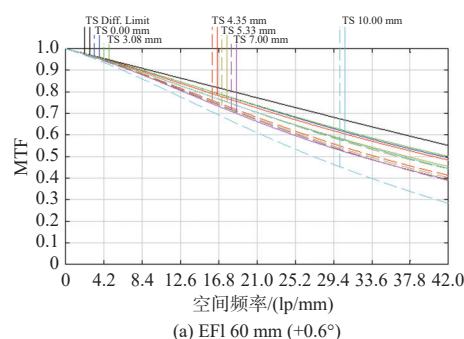
按照耐奎斯特理论,探测器像元尺寸为 $12 \mu\text{m}$,对应的特征频率为 42 lp/mm 。图 4、图 5 和图 6 分别是短焦 $f'=60 \text{ mm}$ 、中焦 $f'=200 \text{ mm}$ 和长焦 $f'=600 \text{ mm}$ 条件下所有视场的 MTF 曲线。由图 4~图 6 可以看出,对应特征频率 42 lp/mm 处全视场 MTF 值均大于 0.3,完全符合应用条件。

图 4 短焦 $f'=60 \text{ mm}$ 对应的 MTF 曲线Fig. 4 MTF curves corresponding to short focal length when f' is 60 mm 图 5 中焦 $f'=200 \text{ mm}$ 对应的 MTF 曲线Fig. 5 MTF curves corresponding to middle focal length when f' is 200 mm 图 6 长焦 $f'=600 \text{ mm}$ 对应的 MTF 曲线Fig. 6 MTF curves corresponding to long focal length when f' is 600 mm

扫描振镜位于前组望远系统平行光路中,系统的工作模式有两种:凝视跟踪和周扫搜索。

系统为凝视跟踪模式时,扫描振镜保持稳定状态,且与光轴呈 45° ,对光路旋转 90° ,可实现 10 倍变焦。系统为周扫搜索模式时,扫描振镜处于回摆补偿工作状态,并通过扫描速度与转台转速的匹配来确保所成的像始终清晰。并且在不同焦距下,振镜的扫描速度与不同的转台转速匹配。在焦距为 60 mm 时,转台速度约为 $360^\circ/\text{s}$;焦距为 200 mm 时,转台速度为 $109^\circ/\text{s}$;焦距为 600 mm 时,转台速度为 $36^\circ/\text{s}$ 。假如红外探测器的积分时间为 10 ms ,则对应的振镜扫描角度为 $\pm 0.6^\circ$ 。

考虑到振镜扫描时会带来一定的像差,造成系统成像不清晰,因此需要对扫描振镜处于边缘角度时的轴外像差进行优化设计。下面分析扫描振镜扫描角度为 $\pm 0.6^\circ$ 时,3 个焦距对应的 MTF 曲线,如图 7 所示。图 7(a)和 7(b)为振镜处于边缘角度 $\pm 0.6^\circ$ 时,系统焦距 60 mm 对应的系统 MTF 曲线;图 7(c)和 7(d)为振镜处于边缘角度 $\pm 0.6^\circ$ 时,系统焦距 200 mm 对应的 MTF 曲线;图 7(e)和 7(f)为振镜处于边缘角度 $\pm 0.6^\circ$ 时,系统焦距 600 mm 对应的 MTF 曲线。由图 7 可以看出,振镜扫描补偿时,图像边缘视场的 MTF 值基本保持不变,在频率 42 lp/mm 处全视场的 MTF 值均大于 0.3。

(a) EFL 60 mm ($\pm 0.6^\circ$)

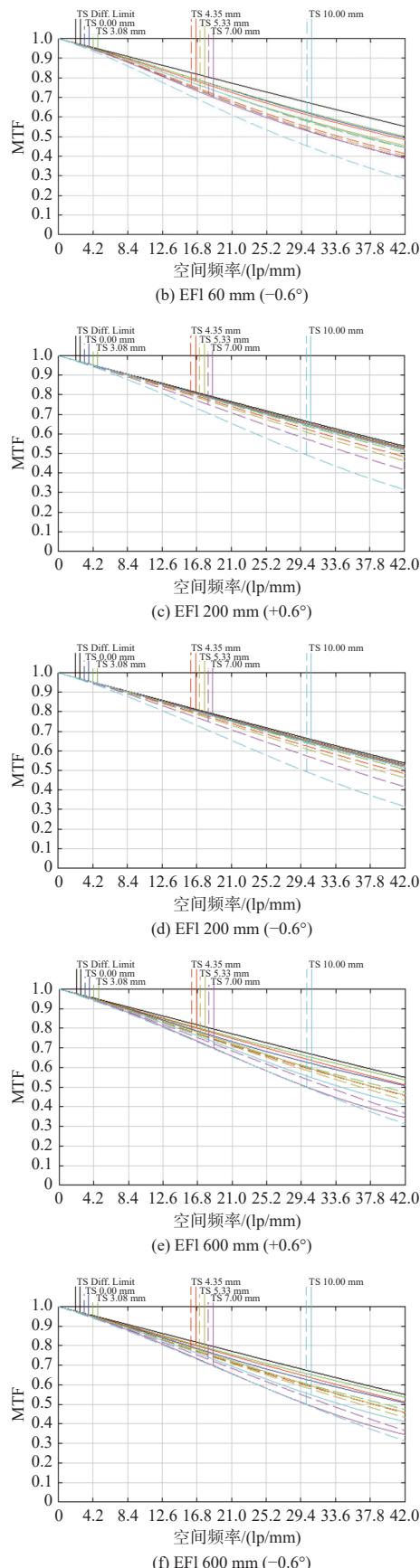


图 7 扫描边缘 MTF 曲线图

Fig. 7 MTF curves of scanning edge

2.5 工作温度分析

由于红外光学系统材料折射率受温度影响很大,为了实现连续变焦面阵扫描红外系统在工作温度-40 °C~+60 °C 范围内均可清晰成像,可通过微调补偿组的位置补偿工作温度带来的影响。因为长焦时系统受温度影响最大,因此分析焦距 600 mm 时系统在工作温度 40 °C~+60 °C 范围内的成像质量,如图 8 所示。由图 8 可以看出,在频率 42 lp/mm 处全视场的 MTF 值均大于 0.3。

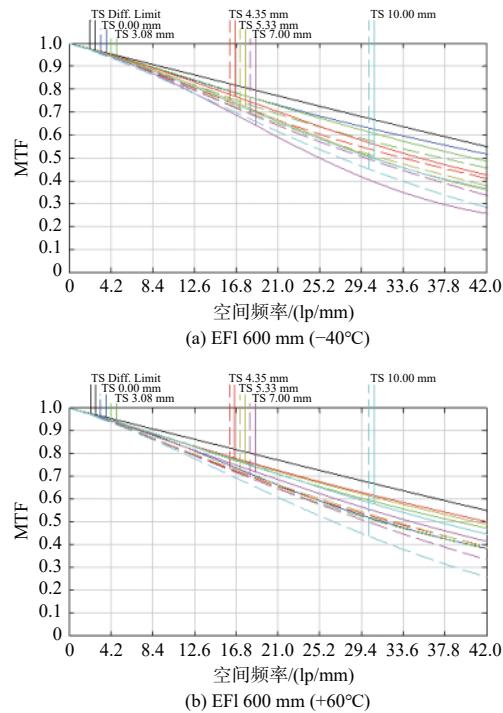


图 8 在系统焦距 $f'=600$ mm 时不同温度下对应的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves corresponding to different temperatures when long focal length f' is 600 mm

2.6 凸轮曲线设计

以最短焦距 ($f'=60$ mm) 时前固定组透镜最后表面所在位置作为基准面, y_1 、 y 分别为变倍组和补偿组所在位置到基准面的距离, 均为自变量, 变量为焦距 f' , 从而得到变倍组 y_1 与补偿组 y 随焦距 f' 变化的曲线, 即变焦系统的凸轮曲线。在 codev 软件上取 500 个数据点, 以保证拟合曲线的精度。根据这些数据点, 运用 excel 程序拟合变倍、补偿两条曲线, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 凸轮曲线在整个变焦过程中平滑, 没有出现拐点, 最大压力角小于 50°, 在工程设计上实现难度较小。

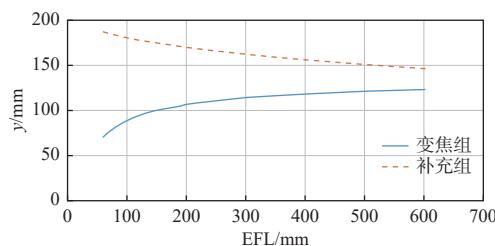


图 9 变倍组与补偿组位移曲线

Fig. 9 Displacement curves of zoom groups and compensation groups

2.7 冷反射分析

冷反射效应是指探测器可以接收到由光学系统对其微弱反射而形成的自身反光图像, 反光图像越接近中心区域, 冷反射效应就越突出, 从而在显示画面中产生一个或亮或暗的小圆圈。就扫描系统而言, 反射的能量会随着视场扫描的变化而变化, 相应的输出变化被称为冷像噪声, 对成像造成严重干扰^[13]。所以在优化过程中必须格外小心, 针对产生冷反射较严重的表面, 采用改变曲率来提高入射角或改变间隔增大入射光高度, 减小冷反射量值, 同时提高近轴边缘光线的入射角与近轴主光线的入射角比值, 以防止冷反射随着视场扫描的改变而改变。另外, 也可以通过改进镀膜工艺来提高增透膜的透过率, 从而减弱冷反射的影响。系统短焦部分的冷反射最为明显, 因此, 这里主要分析短焦系统与视场扫描的关系。表 1 为系统短焦系统随视场扫描的冷反射分析结果。根据表 1 可知, 该系统不会随着视场扫描产生严重的冷反射, 满足系统要求。

表 1 短焦系统对应的冷反射分析结果

Table 1 Results of cold reflection analysis corresponding to short focal system

镜片 表面/个	视场扫描角度/(°)						
	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
1	0.018	0.018	0.018	0.018	0.017	0.017	0.017
2	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
5	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
6	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
7	0.002	0.003	0.003	0.047	0.003	0.003	0.003
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
11	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
12	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
13	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
14	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
15	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
16	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
17	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
18	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
19	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
20	0.034	0.034	0.034	0.033	0.033	0.033	0.033
21	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
22	0.002	0.002	0.002	0.010	0.002	0.002	0.002
23	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
24	0.002	0.002	0.002	0.010	0.002	0.002	0.002
25	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
26	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
27	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
28	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031
29	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
30	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034

3 实验结果

在转台上放置该系统, 让振镜随着转台方位扫描反向运动, 并对外景进行周扫成像, 周扫的成像效果如图 10 所示。由图 10 可见, 系统连续扫描情况下, 面阵扫描的成像效果始终保持清晰, 符合技术指标要求。

(a) 短焦系统 $f=60$ mm(b) 中焦系统 $f=200$ mm(c) 长焦系统 $f=600$ mm

图 10 连续变焦系统的外景成像结果

Fig. 10 Exterior imaging effect of continuous zoom system

4 结论

针对 1280×1024 pixel@ $12 \mu\text{m}/F2$ 大面阵中波制冷探测器, 基于红外扫描成像系统原理, 开发了一种 $60 \text{ mm} \sim 600 \text{ mm}$ 连续变焦的面阵扫描型系统。该系统采取三次成像结构和 U 型光路设计, 结构紧凑, 空间尺寸小, 较好地满足了严格的空间尺寸要求。该系统具有 100% 的冷光阑效率, 凸轮曲线平滑, 分辨率高等优点, 能够应用在红外搜索与跟踪一体化系统中。

参考文献:

[1] 于洋, 王世勇, 塞毅, 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): 110-114.
- YU Yang, WANG Shiyong, JIAN Yi, et al. Area array detector continuous scanning imaging optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 110-114.
- [2] GROLLET C, KLEIN Y, MEGAIDES V. ARTEMIS: staring IRST for the FREMM frigate[J]. Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 2007, 6542: 654233-1-12.
- [3] 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[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(4): 309-312.
- FU Yanpeng, JIN Ning, LI Xunniu, et al. Airborne novel design for MWIR continuous zoom optical system[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(4): 309-312.
- [4] 张良, 毛鑫, 王合龙. 中波/长波双色多视场光学系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(3): 254-258.
- ZHANG Liang, MAO Xin, WANG Helong. The design of MWIR/LWIR multiple FOV optical system[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(3): 254-258.
- [5] 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[J]. 现代防御技术, 2014, 42(2): 95-101.
- LIU Zhongling, YU Zhenhong, LI Liren, et al. Status and development trend of infrared search and track system[J]. Modern Defence Technology, 2014, 42(2): 95-101.
- [6] 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): 521-525.
- 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(4): 521-525.
- [7] 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]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(1): 89-95.
- [8] ZHANG S, DUAN J, FU Q, et al. Infrared zoom lens design based on target correlation recognition and tracking[C]//Applied Optics and Photonics China. NewYork: SPIE, 2015.
- [9] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- YU Daoyin, TAN Hengying. Optics engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [10] 陶纯勘. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- TAO Chunkan. Design of zoom optic system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.
- [11] FISCHER R E. 光学系统设计[M]. 吴晓靖, 张振, 译. 天津: 《红外与激光工程》编辑部, 2004.
- FISCHER R E. Design of optical system[M]. Translated by WU Xiaojing and ZHANG Zhen. Tianjin: Editorial Office of Infrared and Laser Engineering, 2004.
- [12] 王涌天, 崔桂华. 红外扫描成像系统中冷像的分析与控制[J]. 光学学报, 1994, 14(6): 650-655.
- WANG Yongtian, CUI Guihua. Analysis and control of cold images in infrared scanning imaging systems[J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(6): 650-655.
- [13] 金宇. 对红外热成像系统中冷反射现象的分析[J]. 红外技术, 1998, 20(3): 10-14.
- JIN Yu. Analysis of cold reflection phenomena in infrared thermography[J]. Infrared Technology, 1998, 20(3): 10-14.