

一种变 F 数切换机构设计和装调工艺研究

贺媛, 张晓亮, 彭晴晴, 温庆荣, 李红
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 本文研究了光学系统的变 F 数切换机构设计和装调工艺。通过两组光学透镜组交替切换进入红外成像系统, 实现了系统的变 F 数设计。装调阶段, 基准光学透镜组通过机械工装定位, 变 F 数透镜组以基准透镜组的视场为基准, 分别调节焦面和光轴, 从而实现整个系统的焦面一致性和光轴一致性。所设计的变 F 数切换机构结构紧凑, 切换行程短、速度快, 装调便捷, 满足较高的光轴一致性和焦面一致性, 同时满足较高的光轴稳定性。

关键词: 变 F 数; 切换机构; 装调工艺; 焦面一致性; 光轴一致性

中图分类号: TN216; TH162 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.05.018

Research on the design of variable F-number switching mechanism and assembly process

HE Yuan, ZHANG Xiao-liang, PENG Qing-qing, WEN Qing-rong, LI Hong
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, the structural design and assembly process of optical system with variable F-number switching mechanism are studied. The variable F-number design of the infrared optical system is achieved by alternately switching between two sets of optical lens groups. In assembly process, the reference optical lens group is positioned through mechanical frock, while the variable F-number lens assembly is adjusted based on the field of view (FOV) of the reference assembly. Both focal plane and optical axis alignments are achieved through respective adjustments, ensuring system-wide consistency in focal plane alignment and optical axis collinearity. The proposed switching mechanism features a compact structure, short switching stroke, rapid switching speed, and convenient assembly-alignment processes. It satisfies stringent requirements for optical axis stability and focal plane consistency.

Keywords: variable F-number; switching mechanism; assembly process; focal plane consistency; optical axis consistency

1 引言

随着国产红外探测器水平的快速提高, 红外探测技术已被广泛应用于军事国防、安防监控、医疗检测等各个领域^[1-2]。红外探测器分为制冷型和非制冷型两种, 主要区别就是有无冷光阑。通常将制冷型红外探测器的 F 数定义为冷光阑到探测器的距离与冷光阑口径的比值。将制冷型探测器用于红外成像系统时, 为了达到优秀的成像效果, 需要光学系统的 F 数与探测器的 F 数匹配, 对于变焦光学系统而言, 减小焦距则必然意味着要减小通光孔径, 进而导致系统的光收集能力下降, 影响系统的探测灵敏度。光学系统的 F 数决定着视场, 变 F 数红外系统

可以实现大视场和小视场之间切换的同时保证通光孔径不变, 大视场范围内搜索目标, 小视场范围内进行目标识别与跟踪, 进而提高通光孔径利用率, 提高成像质量^[3-6]。因此, 随着对视场范围和系统小型化等需求的不断提高, 变 F 数红外光学系统逐渐凸显其优势, 成为变焦红外系统设计的理想选择。

本文针对某型变焦红外系统的变 F 数切换机构和该机构的装调工艺进行了分析与研究。

2 变 F 数切换机构设计

2.1 光学系统方案

变 F 数光学设计整体光路示意图如图 1 所示, 通过光学系统的设计和变换, 实现同样有效口径情

况下,焦距和 F 数的切换。具体通光口径设计为 270 mm,所选探测器为制冷型 F/2 红外探测器,变 F 数切换机构通过大、小视场切换镜组的设计实现。具体的视场切换镜组设计有基准透镜组,包含一片透镜 1,如图 2 大视场光路图所示,该透镜组切入为大视场成像,匹配原有 F/2 红外探测器,焦距为 540 mm;视场切换镜组设计有另一组透镜组,包含透镜 2 和透镜 3 两片透镜,如图 3 小视场光路图所示,该透镜组切入为大视场成像,匹配设计有球面反射温阑,如图 4 所示,将系统的红外探测器 F 数改变为 F/3,焦距为 810 mm。其中球面反射温阑采用镀金反射膜工艺处理,平均反射率 $\geq 99\%$,两组切换镜组及球面反射温阑组合实现变 F 数红外系统设计。

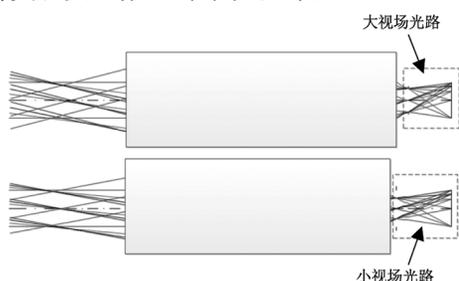


图 1 变 F 数光学设计光路示意图

Fig. 1 Optical design of variable F-number path diagram

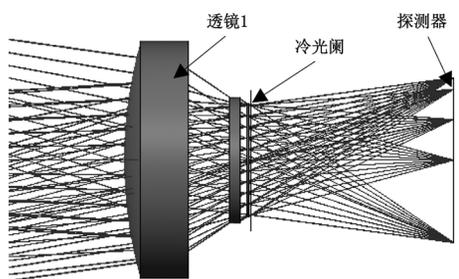


图 2 大视场光路图

Fig. 2 Wide field of view optical path diagram

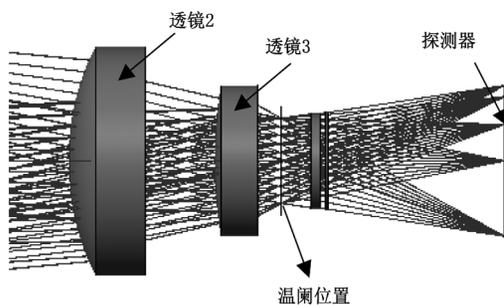


图 3 小视场光路图

Fig. 3 Narrow field of view optical path diagram

2.2 机械结构设计

视场切换机构设计首先需要考虑整体空间布局,现有的一种视场切换机构采用齿轮、齿条传动和伺服电机控制实现两个镜组切换^[7],该方案的两个镜组结构独立设计,因此占用横向空间大。本文采

用钟摆式切换框架设计,切换机构的主要部件有:主支架、电机、主动齿轮、从动齿轮、转轴、轴承、切换框架、透镜 1 组件、透镜 2 组件、透镜 3 组件、光电限位开关组件、机械限位组件和配重块等组成。



图 4 球面反射温阑结构

Fig. 4 Structure of spherical reflecting warm shield

变 F 数切换机构 3D 模型图如图 5 所示,电机安装于主支架上,直接驱动主动齿轮旋转,主动齿轮与从动齿轮啮合,带动从动齿轮和转轴旋转,转轴与主支架之间采用一对深沟球轴承支撑,理论设计转轴平行于系统光轴。转轴与切换框架同轴固定安装,进而带动切换框架旋转。透镜 1 组件、透镜 2 组件和透镜 3 组件安装于切换框架上,透镜 1 组件切入光路为大视场,透镜 2 组件和透镜 3 组件切入光路为小视场。光电限位开关组件用于电限位,机械限位组件采用磁铁自锁限位,用于调节和定位双视场的切换位置,保证双视场的光轴稳定性和结构稳定性。配重块用于配平透镜组件,使切换框架绕转轴旋转时转动惯量尽可能小,利于机构的稳定性。



图 5 变 F 数切换机构 3D 模型图

Fig. 5 3D model of variable F-number switching mechanism

充分考虑设计空间和切换机构旋转工作的稳定性,调节转轴与光路的平行偏距尺寸设计,使得两个视场镜组切入、切出光路仅需切换框架旋转 65° 角,即实现较短的双视场切换行程,再配合调节电机速

度、电限位和机械限位位置,可以实现快速精准的双视场切换,有效的减少双视场切换机构在整个光学系统中所占体积空间,使整个系统的结构设计更加紧凑,更有效地实现体积小、重量轻的设计。

3 变 F 数切换机构的装调工艺

3.1 零件装配

首先组装透镜 1 组件、透镜 2 组件和透镜 3 组件,然后将各透镜组和配重块安装于切换框架相应位置;将切换框架利用转轴和轴承等零件与主支架固定安装,调节消除转轴和轴承的径向和轴向间隙,使得切换框架与主支架相对旋转运动时没有多余的晃动和位移;将主动齿轮与电机固定安装,从动齿轮与转轴固定安装,然后将电机固定安装于主支架上,调节主动齿轮与从动齿轮位置,保证啮合旋转顺畅;最后将光电限位开关组件和机械限位组件按照设计位置安装于主支架上。

3.2 变 F 数切换机构装调

如图 6 所示,首先将穿轴工装装入主支架的基准孔与透镜 1 组件的镜筒内孔进行定位,确保穿轴工装安装到位,然后固定安装透镜 1 组件,使得透镜 1 的光轴与光学系统主光路重合。调节该侧机械限位支架的具体安装位置,使得此时磁铁吸附切换框架,保证在振动时不会移位。然后将变 F 切换机构装入整机系统相应接口位置,如图 7 所示。在 F/2 大视场成像位置状态下给系统上电,调节系统光轴,完成后通过上位机软件驱动变 F 数切换机构电机,使透镜 2 组件和透镜 3 组件处于系统光路位置,即到 F/3 小视场成像位置状态,如图 8 所示。

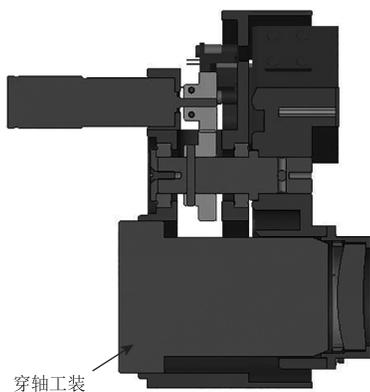


图 6 透镜 1 光轴定位

Fig. 6 Optical axis positioning of lens 1

透镜 2 的镜筒设计采用螺纹配合与切换框架连接,镜筒外壁设计有手轮式花纹可实现手动旋转,首先手动旋转透镜 2 的镜筒,即移动透镜 2 的前后位

置,观察四杆靶,将焦面调节至最清晰位置,然后在透镜 2 镜筒的侧面安装 M2.5 的螺钉或顶丝固定透镜 2 组件的位置;焦面清晰以后,再调节透镜 3 组件的上下、左右位置,通过透镜 3 镜筒与安装孔间隙调整,使得光轴位置与 F/2 大视场成像的基准光轴重合,完成光轴一致性的调节,若仅通过调节透镜 3 镜筒与安装孔间隙无法达到与基准光轴重合,则松开该侧机械限位支架安装螺钉,结合调节机械限位支架的位置使得光轴位置与 F/2 大视场成像的基准光轴重合,完成 F/3 小视场成像的光轴调节,如图 9 所示。

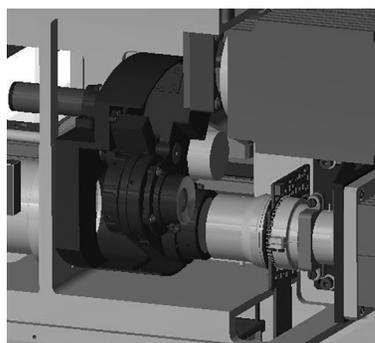


图 7 F/2 大视场成像位置

Fig. 7 F/2 Wide field of view imaging position

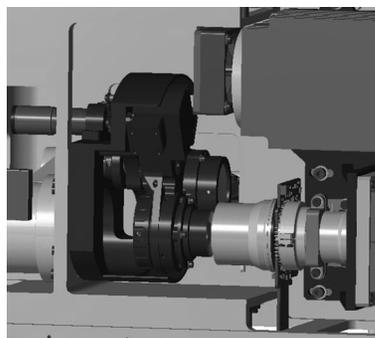


图 8 F/3 小视场成像位置

Fig. 8 F/3 Narrow field of view imaging position



图 9 F/3 小视场光轴调节

Fig. 9 Adjust the optical axis for the F/3 narrow field of view

4 现实应用情况

本文设计的变 F 数切换机构应用于光电搜跟一体设备中的搜跟一体红外热像仪中,如图 10 所

示。该光电搜跟一体设备主要针对空中战斗机、导弹和无人机等目标威胁,自主实现预警探测、跟踪定位、精确识别等功能。在大气能见度 15 km,湿度 $\leq 60\%$ 条件下,对微小型无人机的最大探测距离 ≥ 4 km,如图 11 所示,为该设备红外热像仪对微小型无人机的探测图像。

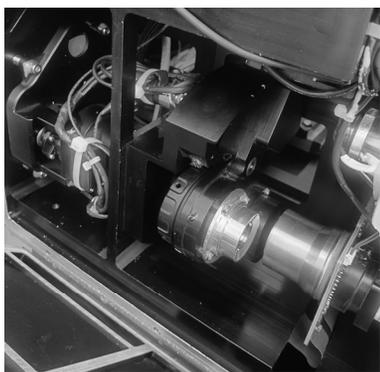


图 10 红外热像仪变 F 数切换机构

Fig. 10 Variable F-number switching mechanism of the thermal imager



图 11 目标探测图像示例图

Fig. 11 Example image of the target detection

5 结 论

本文设计的变 F 切换机构已经装入变焦红外系统中,完成了整个设备的联调,并成功应用于设备样机中。上述变 F 切换机构具有以下优点:

1) 采用钟摆式结构布局,可以有效的减少切换机构在整个光学系统中所占体积空间,使整个系统的结构设计更加紧凑,更有效的实现体积小、重量轻的设计。

2) 采用的转轴与主光路的平行偏距设计,使变 F 数切换行程短、切换框架旋转角度小,仅为 65° 。配合调节电机速度、电限位和机械限位,可以实现快速精准的视场切换。

3) 采用的结构设计和装调方法,可以实现独立的调节两个视场的光轴一致性和焦面一致性,两者互相解耦,更易于装调,可以满足较高的光轴一致性

和焦面一致性。

4) 采用的磁铁自锁机械限位设计,可以在两个视场位置固定切换框架,从而保证两个视场的光轴稳定性和结构稳定性。

参考文献:

- [1] Cai Y, Wang L X. Nine issues associated with infrared imaging technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(11): 671-682. (in Chinese)
蔡毅,王岭雪. 红外成像技术中的 9 个问题[J]. 红外技术, 2013, 35(11): 671-682.
- [2] Wang Y F. The infrared technology of China in 2013[J]. Infrared Technology, 2014, 36(1): 10-21. (in Chinese)
王忆锋. 2013 年的中国红外技术(上)[J]. 红外技术, 2014, 36(1): 10-21.
- [3] Chang S T, Tian Q J, He F Y, et al. Design of varying F/number of cooled infrared detectors based on spherical reflecting warm shield[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(15): 150701. (in Chinese)
常松涛,田棋杰,何锋赞,等. 基于球面反射温阑的红外探测器变 f 数设计[J]. 物理学报, 2017, 66(15): 150701.
- [4] Wang J C, Li J Y. Infrared optical design method of variable F number[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(6): 909-913. (in Chinese)
王嘉晨,李江勇. 变 F 数红外光学设计方法[J]. 激光与红外, 2022, 52(6): 909-913.
- [5] Jia X R, Li X N, Wang H Y, et al. Design of a LWIR continuous zooming optic system with large zooming range[J]. Infrared Technology, 2012, 34(8): 463-466. (in Chinese)
贾星蕊,李训牛,王海洋,等. 大变倍比长波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2012, 34(8): 463-466.
- [6] Tan S N, Yu X, Zhang H W, et al. Progress and key technologies of infrared optical system with variable F-number[J]. Infrared Technology, 2016, 38(5): 367-373. (in Chinese)
谭淞年,于潇,张洪伟,等. 变 F 数红外光学系统的进展和关键技术[J]. 红外技术, 2016, 38(5): 367-373.
- [7] Geng G. Design of infrared FOV switching mechanism[J]. Mechanical Engineer, 2016(5): 174-176. (in Chinese)
耿国. 一种视场切换机构的设计[J]. 机械工程师, 2016(5): 174-176.