

变 F 数红外光学系统的进展和关键技术

谭淞年, 于潇, 张洪伟, 李全超

(中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 根据现代战争对夜间进行目标跟踪、侦察及监视的迫切需求, 红外光学系统在国防领域获得了广泛的应用。与变焦红外光学系统相比, 基于可变冷光阑的变 F 数红外光学系统可以进行大视场搜索与极小视场监视的转换, 提高通光孔径利用率, 提高成像质量。随着对视场范围、图像质量、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。对变 F 数光学系统的原理进行了研究, 概述了国内外在变 F 数红外光学系统领域的研究进展。通过分析, 提出了系统关键结构可变冷光阑实现的技术路线。最后简要分析了可变冷光阑设计的关键技术。

关键词: 红外光学系统; 变 F 数; 可变冷光阑; 视场转换

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)05-0367-07

Progress and Key Technologies of Infrared Optical System with Variable F-number

TAN Songnian, YU Xiao, ZHANG Hongwei, LI Quanchao

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: According to the modern warfare urgent needs on target tracking, reconnaissance and surveillance at night, infrared optical system has been widely used in the national defense field. Compared with zoom infrared optical system, variable F-number infrared optical system which is based on variable cold aperture could achieve the switch of large-scale search and minimum-scale surveillance, the increase of aperture efficiency and the improvement of the image quality. With the increasing demand on the field of view, image quality and system miniaturization, the infrared optical system with variable F-number gradually highlights its advantages. The principle of infrared optical system with variable F-number is studied and the research progress in the field of which is summarized. Via analysis, the technical routes to achieve the key structure variable cold aperture are proposed. In the end, a brief analysis on the key technologies of the available cold aperture is given. It is useful for the development of infrared optical system.

Key words: infrared optical system, variable F-number, variable cold aperture, zoom

0 引言

红外相机与可见光相机相比, 可以探寻到可见目标不具备的信息, 极大地增强了对背景和干扰信息的抗干扰特性, 使观察者可以全天候对目标进行观测, 因此红外光学系统越来越广泛的应用在跟踪、侦察、监视等军事领域。随着对红外相机性能要求的不断提高, 对红外光学系统和红外探测器提出了越来越高的要求^[1-2]。变 F 数红外光学系统可以根据战场态势, 特别是观察目标的距离, 选用合适的 F

数, 灵活的进行大视场与极小视场的切换, 实现大视场范围内搜索目标, 极小视场范围内识别与跟踪目标, 满足对军事目标侦察和监视需求, 有广泛的应用前景。

本文在变焦红外光学系统的基础上, 对基于可变冷光阑的变 F 数红外光学系统的原理进行了分析, 介绍了国内外变 F 数红外光学系统的研究进展, 提出了红外光学系统可变冷光阑实现的技术路线, 并提出了可变冷光阑设计的关键技术, 对变 F 数红外光学系统的研究有借鉴意义。

收稿日期: 2015-12-15; 修订日期: 2015-12-21。

作者简介: 谭淞年(1989-), 男, 吉林省通化市人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为航空光电系统设计及分析。E-mail: tansongnian@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61405192), 中国科学院国防科技创新基金项目(CXJJ-15S158)。

1 基于可变冷光阑的变 F 数光学系统原理

在红外探测器中,冷光阑(即光学系统的视场光阑)是决定红外探测器 F 数的重要组件,其只允许需要的红外辐射进入,阻止所有其他不需要的杂光辐射。同时本身温度很低,减少自身的辐射,达到更好的成像效果^[3]。一般情况下,由于红外探测器冷光阑的大小是固定不变的,所以在光学系统设计过程中,光学系统的 F 数近似设计为红外探测器的 F 数值,即光阑匹配。

光学系统的 F 数与探测器的 F 数相匹配是获得高质量图像的必要条件。探测器的 F 数与冷光阑大小直接相关,当探测器冷光阑过大时,会有不需要的辐射进入,降低成像效果;当冷光阑过小时,会挡住成像所需要的辐射,引起渐晕现象,如图 1 所示^[4]。

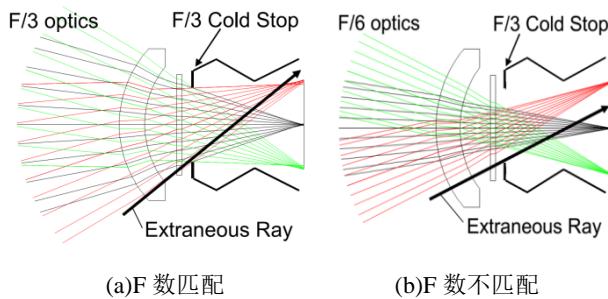


图 1 冷光阑匹配
Fig.1 Cold aperture matching

在传统红外光学系统中, F 数通常是固定的,仅通过改变焦距大小来对光学系统的通光孔径进行改变,进而对所观察的视场进行切换。但当所观察视场变化较大时,在同一 F 数下,由于最大通光孔径一定,仅通过改变焦距大小很难满足对成像质量的要求。因此,在这种情况下,变 F 数的光学系统凸显出其优势。变 F 数光学系统可以同时改变焦距和通光孔径来对远近视场进行切换,同时满足对成像质量的要求。

传统变焦红外光学系统如图 2 所示。在对红外成像系统体积有限制的时候,成像系统应最小化系统的孔径光阑,这时只有一个视场占用了整个通光孔径。如图所示,窄视场时占用了整个通光孔径,但是宽视场时仅占用了整个通光孔径的一少部分,大部分能量都损失掉了。当窄视场决定了通光孔径大小的情况下,目标宽视场只能通过改变焦距大小来获得。在此情况下,想提高通光孔径利用率,就必须改变光学系统的 F 数。

变 F 数红外光学系统如图 3 所示。在系统处于宽视场情况下,保持焦距不变,通过改变冷光阑大小,改变系统的 F 数,使系统获得在最大通过孔径

范围内的更大的通光孔径,提高通光量,提高成像质量。

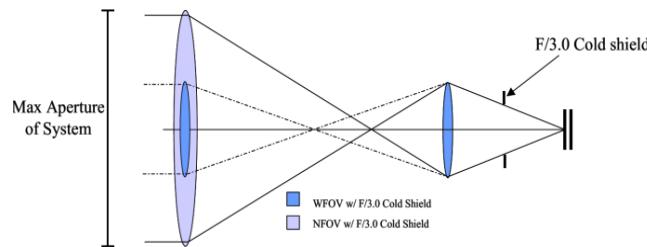


图 2 传统变焦红外光学系统
Fig.2 Traditional zoom infrared optical system

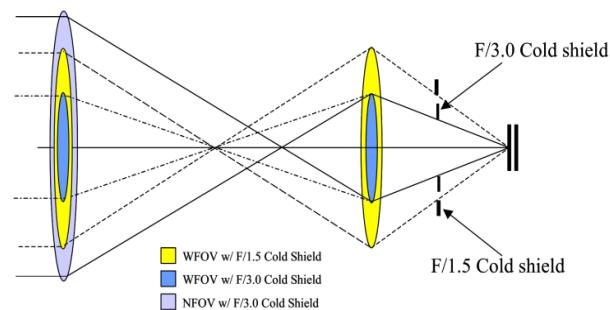


图 3 变 F 数红外光学系统
Fig.3 Infrared optical system with variable F-number

因此可以看出,变 F 数红外光学系统的实质是改变红外探测器的冷光阑大小。保证冷光阑匹配是变 F 数光学系统设计的关键,即当光学系统的 F 数变化时,通过改变探测器冷光阑大小,保证探测器的 F 数随之变化。

通过对变 F 数红外光学系统分析,有其独特的优势:

通过改变红外探测器冷光阑大小,可以做到与光学系统的 F 数匹配,提高光学系统设计的灵活性。

通过改变冷光阑大小,可以进行大视场搜索/极小视场监视的转换,提高在宽视场观察时通光口径的利用率,提高成像质量。

在极小视场观察时,通过改变 F 数与焦距大小,在一定程度上,可以解除光学通光口径对系统的限制,减小光学系统的体积,实现系统的小型化。

2 国内外可变冷光阑研究进展

2.1 国外研究进展

HALO(高空观测系统)是美国弹道导弹防御局(BMDO)的弹道导弹测试监视、数据收集与跟踪平台。该系统设计了一个大体积杜瓦,将长波与中波红外焦平面、分光镜、滤光片封装在其中,分别有制冷器对焦平面进行制冷。每个焦平面之前包括一个 6 位置的滤光片转盘,6 位置的滤光片转盘包括 5 个带通滤光片和 1 个用于背景测试的空白片。

每个焦平面有单独的冷屏来减小背景辐射,同时在杜瓦内设置一个温度为155 K的内挡板来降低背景辐射。红外系统结构如图4所示^[5]。

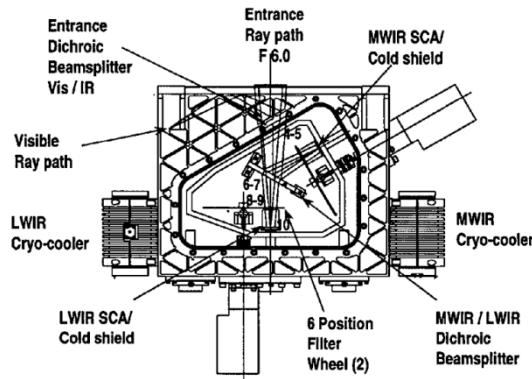


图4 双波段红外系统

Fig.4 Double-wave band Infrared system

Mitchell 等人设计了焦距为0.5 m (F/2.8) 以及1.5 m (F/8.4) 的红外望远镜,两个视场分别是0.9°×0.9°和0.3°×0.3°。两视场的切换是通过次镜互换的方法实现的。窄视场的次镜永久地固定在光学平台,宽视场的次镜安装在一副导轨上,能够允许通过机电杠杆系统将次镜移出光路。插入宽视场次镜时,杠杆系统驱动镜片重新回到光路上。如图5所示为红外检测系统的光路图^[6]。其将焦平面、冷光阑及分光镜封装在杜瓦内。短波与中波红外焦平面封装在液氦制冷的杜瓦中,长波红外焦平面封装在液氮制冷的杜瓦中。短波红外和中波红外公用一个光阑,被放置在分光器之前,温度保持在65 K。长波红外的Lyot光阑保持在4.2 K。

2007年,Nahum 等人通过设计外置式的可变冷光阑机构^[7],实现了F数为10.5的光学系统与F数为4.1的红外探测器的连接。机构设计的难点是在设计了低温可变冷光阑的同时,进行比例为1.25:1的缩小,满足了成像要求。如图6所示,透镜组1和透镜组2用于放置可变冷光阑,透镜组3实现1.25:1的比例缩小。

可变冷光阑置于透镜3与4之间,空间密封无窗口,两侧使用两个透镜在两侧进行真空密封,透

镜的形状被设计成可以用于O型圈真空密封。冷光阑使用1 W的斯特林制冷机进行制冷,冷光阑的大小通过数字千分表显示调节的蜗轮蜗杆来进行手动调节。可变冷光阑如图7所示。

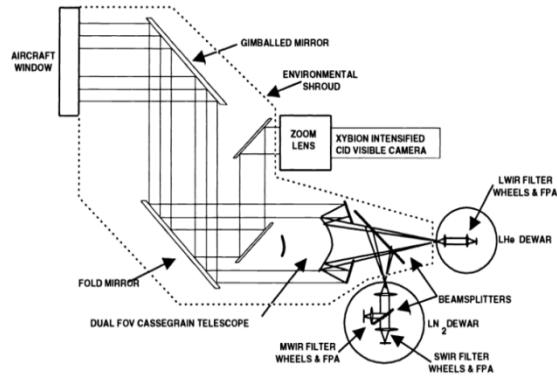


图5 红外检测系统光路图

Fig.5 Light path diagram of infrared detection system

2013年,Nahum 等人发表了一篇名为基于调整刀片虹膜的前式红外相机的连续可变冷光阑的专利,提出了一种内置式的可变冷光阑结构。可变冷光阑结构整体很小,集成在红外探测器杜瓦当中。可变冷光阑结构为刀片虹膜调整式,冷光阑由4个刀片虹膜组成,刀片放置在驱动板与基板之间,通过旋转驱动板即可以对光阑的大小进行调整。如图8所示。刀片虹膜的厚度很薄,表面镀聚四氟乙烯,保证刀片在滑动过程中摩擦力很小,可以自由移动,同时刀片虹膜表面附着一层材料,具有低反射性^[8]。

2014年,雷神公司Eric 等人在Nahum 的设计基础上,设计了适用于低温环境的可变冷光阑机构^[9]。Eric 同样采用了刀片虹膜式调整机构,但在控制上使用了双稳态螺线管电机,保证了控制的精度^[10]。同时考虑了在调整光阑过程中的热传导问题,设计了光阑仅在调整过程中与外界接触,在探测器工作过程中冷光阑与调整机构分离的结构,保证了冷光阑在工作过程中自身没有温差,提高了成像效果^[11]。在材料的选择上,刀片虹膜材料为铍铜合金,表面镀金,进一步减小刀片虹膜调整过程中的摩擦。

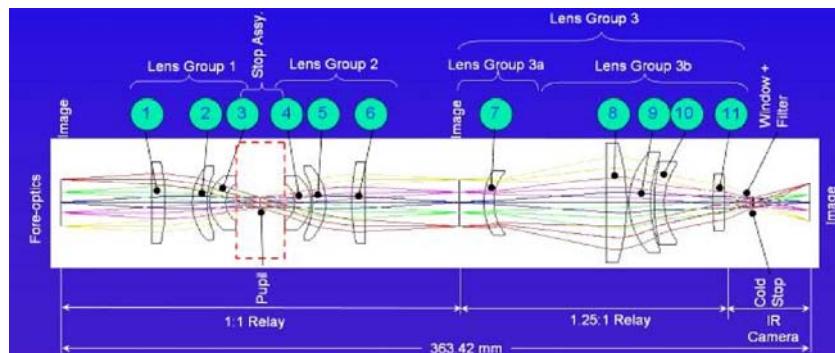


图6 光学系统设计

Fig.6 Optical system design



图 7 可变冷光阑结构

Fig.7 Variable cold aperture structure

美国军方设计的第三代前视红外探测器系统是变 F 数光学系统应用的典型^[12-15]，其主要特点是光学系统拥有 4 个视场、双 F 数和可变冷光阑。第三代前视红外探测器设计了 F/3 和 F/6 的光学系统，实现了 11.5 的放大倍数，最大焦距达 609.6 mm。系统同样采用刀片虹膜式调整机构，调整机构集成在红外杜瓦内，整体尺寸小，集成度高。集成可变冷光阑的红外探测器如图 9 所示。

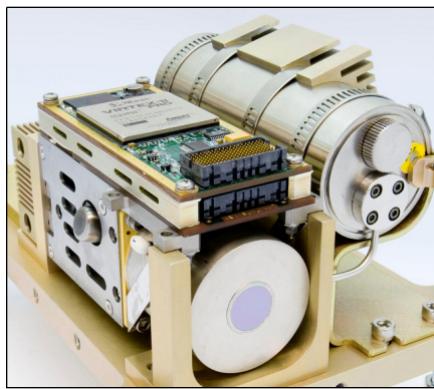


图 9 第三代前视红外探测器系统

Fig.9 3rd generation FLIR Sensor Engine

第三代前视红外探测器系统在极窄视场下采用 F/6 的光学系统，在其他视场下采用 F/3 的光学系统。通过改变焦距与 F 数，保证了光学系统在极窄视场与窄视场有近似相同的通光孔径，减小了光学系统的体积。如图 10 为光学系统在各个视场下拍摄的 MWIR 图像^[16]。

2.2 国内研究进展

2014 年长春光机所提出了一种可以改变红外相机冷光阑与成像波段的装置专利^[17]，专利中将红外探测器、孔径光阑盘与滤光片盘集成在红外相机杜瓦中，孔径光阑盘与滤光片盘的转动通孔径光阑盘转动轴和滤光片盘转动轴来实现，孔径光阑盘装有不同孔径大小的光阑，滤光片盘装有不同波段的滤光片，如图 11 所示。本设计的特点是通过可变式的固定光阑来对红外光阑大小进行调节。



图 8 刀片虹膜式可变冷光阑

Fig.8 Iris blades variable cold aperture



图 10 中波红外图像

Fig.10 MWIR infrared images

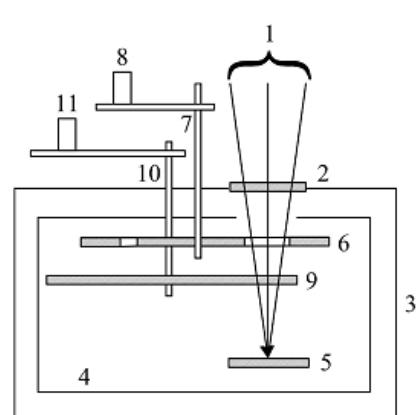


图 11 可变式的固定光阑

Fig.11 Variable fixed aperture

昆明物理研究所贾星蕊等人设计了一个大变倍比长波红外连续变焦系统，变倍比为 25:1，系统使用 8 片透镜实现连续变焦^[18]。洛阳光电设备研究所研究出了长波红外连续变焦光学系统，全焦距范围内传递函数在 0.35 以上^[19]。长春理工大学设计了可以同时在白天与夜间工作的可见光与红外光波段的

变焦光电瞄准镜光学系统,满足了红外系统的小型化应用需求^[20]。长春光机所设计了双视场红外光学系统,可以以60 ms的变倍速率实现视场的高速切换,结构紧凑^[21]。

综上所示,国外对于变F数红外光学系统的研究比较成熟,已经成功研发第三代前视红外成像系统,并应用于军事领域。国内实现红外视场切换主要是通过变焦技术来实现,对变焦红外光学系统的研究进展较快,已经具备连续平滑变焦、高变倍比、小型化等特点,并且具有高分辨率,但是对于变F数红外光学系统的研究较少,还处于理论阶段。

3 可变冷光阑实现的技术路线

通过对国内外变F数红外光学系统研究进展分析发现,可变冷光阑是实现变F数红外光学系统的关键结构。总结得出有以下3点实现可变冷光阑的技术路线。

1) 对红外探测器进行改装,将可变冷光阑机构放置于红外探测器内部,实现内置式的可变冷光阑。这种内置式可变冷光阑实现难度大,需要考虑制冷、探测器改造封装等各方面的问题,但是集成度最高,是可变冷光阑未来发展的方向。

2) 将红外探测器(或焦平面)、可变冷光阑及部分光学系统封装在一个杜瓦中,对杜瓦进行密封与制冷,实现可变冷光阑的调节,例如国外HALO中设计的杜瓦装置,可以在焦平面加装可变冷光阑,实现探测器变F数的设计。该技术路线是实现可变冷光阑的一个有效方法,其本质是设计一个大的红外探测器,该方法会增大整个系统的体积与功耗,同时涉及到对杜瓦的封装与制冷,实现难度相对较高。但是随着杜瓦及内部结构设计的小型化与轻量化,可以制造出高集成度的可变冷光阑红外探测器。

3) 通过光学设计,将红外探测器冷光阑的位置前置,在光路中通过对冷光阑局部制冷的方式实现可变冷光阑的设计。该技术路线增加了光学系统设计的难度,整个系统的体积与功耗也有一定程度的增加,但是不涉及对红外探测器部分的改造,可行性高。

以美国军方设计的第三代前视红外探测器系统为例,介绍变F数红外光学系统的实现方案。第三代前视红外探测器系统是通过第一条技术路线实现的。其具体实施方案是设计了双F数的光学系统,研制了内置式可变冷光阑组件,在通过改变冷光阑实现探测器F数变换时,保证了光学系统的冷阑匹配。同时实现了控制和图像处理电路和冷光阑调整组件的小型化,实现了整个红外探测器系统的高度

集成化。红外探测器组成如图12所示。

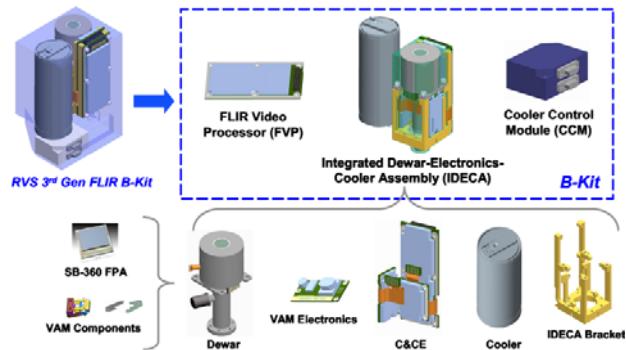


图12 红外探测器系统组成
Fig.12 Composition of infrared detector system

4 可变冷光阑设计的关键技术

变F数红外光学系统的研发关键是基于国内现有变焦红外光学系统的成熟技术,确定可变冷光阑实现的技术路线,完成可变冷光阑的结构设计,同时完成可变冷光阑工作环境的搭建。需要突破4项关键技术。

1) 可变冷光阑结构设计

选择合理的结构形式对可变冷光阑的实现起着至关重要的作用。对国内外实现可变冷光阑的结构进行分析,主要分为刀片虹膜调整式和可变式固定冷光阑两种。刀片虹膜调整式优点是结构紧凑,体积空间小,缺点是结构复杂,实现起来难度较大。可变式固定冷光阑优点是结构简单,缺点是体积空间占用大。冷光阑的传动方式有齿轮传动和蜗轮蜗杆传动等^[22]。传动方式的选择对结构设计有很大的影响,可以根据具体的应用环境选择设计不同的结构形式。

在可变冷光阑的设计过程中,不同材料的选择对红外成像有很大的影响。在刀片虹膜调整式的内置可变冷光阑结构中,关键件刀片虹膜的材料及其表面镀膜材料的选择对整个结构的设计起着至关重要的作用。通过研究,刀片虹膜材料可以选择镀铜合金,刀片表面镀金,可以保证冷光阑的自由调整,不需要依靠油脂及其他会散发气体的润滑剂,同时具有低反射性。

2) 高精度稳定驱动技术

可变冷光阑的驱动方式有多种选择,一般分为手动驱动、磁驱动和电机驱动。手动调节精度较低,同时应用有很大的局限性,仅可应用在测试阶段。磁驱动相比于电机驱动,控制难度高,且需要考虑屏蔽问题,所以应用范围较窄。电机驱动有在真空状态稳定工作、大功率输出等优点,可以作为驱动方式的首选。不同的电机驱动对光阑的调整有很大

影响,可以选用压电陶瓷电机或双稳态螺线管电机来对冷光阑进行驱动,可以提供大功率输出的同时不会产生外物损伤,保证真空环境无杂质。

3) 红外探测器及冷光阑的温控技术

在确定具体可变冷光阑结构方案之后,如何搭建可变冷光阑的工作环境是保证设计成功的另一关键因素。

红外探测器工作时要求严格的低温环境。常温光阑会给红外成像带来较强的热背景噪声,降低红外探测系统的灵敏度,影响成像质量,在远距离弱目标的红外探测等领域上应用是不适宜的。红外探测器工作温度越低,光谱截止波长越长,背景噪声越小,其分辨率和信噪比也越高。冷光阑与探测器温度在77 K左右,光阑与其驱动部件有至少200 K的温差,要求光阑的温度变化范围在10 K以内。所以在冷光阑大小调整之后,要保证冷光阑制冷的速度与效率,保证在红外成像过程中,冷光阑与探测器温度相差不大且自身无温差。温控是影响红外成像效果最直接的因素,所以合理的温控方案对可变冷光阑的设计至关重要。通常选用闭式机械循环制冷系统,斯特林制冷机就可以满足可变冷光阑的制冷要求。

4) 动密封技术

在可变冷光阑设计过程中,另一个重要问题是整个红外系统的真空密封问题。将可变冷光阑的驱动电机封装在杜瓦内,会造成整个杜瓦空间变大。为了实现杜瓦结构的小型化与轻量化,可以应用直线导入器等动密封装置解决真空状态下杜瓦与外界的连接问题^[23]。

5 结论

本文对基于可变冷光阑的变F数红外光学系统的原理进行了分析,与变焦红外光学系统相比,变F数红外光学系统有着大视场搜索与极小视场监视转换,提高通光孔径利用率,提高成像质量等优势。通过研究国内外变F数红外光学系统的进展发现,国内对于变F数红外光学系统的研究较少,尚处于理论阶段。为了实现变F数红外光学系统,提出了关键结构可变冷光阑实现的技术路线,最后提出了可变冷光阑设计的关键技术,对变F数红外光学系统的研究和应用起到很好的指导作用。

参考文献:

- [1] 杜玉楠,牟达,刘莹莹,等. 20[×]长波红外变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2013, 35(10): 607-611.
DU Yu-nan, MOU Da, LIU Ying-ying, et al. Design of 20[×]long wavelength infrared zoom optical system[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(10): 607-611.
- [2] 付跃刚,黄蕴涵. 红外双视场枪瞄光学系统设计[J]. 红外技术, 2014, 36 (6): 451-456.
FU Yue-gang, HUANG Yun-han. Design of infrared aiming optical system[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36 (6): 451-456.
- [3] 张燕. 杜瓦中冷光阑的杂散光抑制研究[J]. 红外, 2010, 31(7): 1-8.
ZHANG Yan. Study of stray light suppression by cold shield in dewar[J]. *Infrared*, 2010, 31(7): 1-8.
- [4] VIZGAIKIS J N. Dual f-number optics for 3(rd) generation FLIR systems[C]//*Proceedings of SPIE on The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5783: 875-886.
- [5] MOSKAL R, BOOKER G, WILLIAMSON M, et al. High altitude observatory (HALO) upgrade e[Z/OL]. High Altitude Observatory Upgrade[2000-08-14].[http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD A380997 & Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD A380997&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf).
- [6] MITCHELL C D, ELLIS J T, HOWARD H W, et al. Design and performance of the infrared instrumentation system (IRIS)[C]//*Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing. International Society for Optics and Photonics*, 1993, 1970: 109-117.
- [7] GAT N, ZHANG J, LI M D, et al. Variable cold stop for matching IR cameras to multiple f-number optics[C]//*Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics*, 2007: 65420Y-65420Y-10.
- [8] NAHUM Gat, ZHANG Jingyi. Continuous variable aperture for forward looking infrared cameras based on adjustable blades: USA, 8462418 B1[P]. 2013-06-11.
- [9] Jeffrey P Yanevich, Eric J Griffin, Michael L Brest, et al. Variable aperture mechanism for cryogenic environment, and method: USA, 2014/0363149 A1[P]. 2014-12-11.
- [10] Eric J Griffin, Jerry Hershberg. Method for embedded feedback control for bi-stable actuators: USA, 2014/0363150A1[P]. 2014-12-11.
- [11] Jeffrey P Yanevich, Michael L Brest, Kenneth L McAllister, et al. Thermal control in variable aperture mechanism for cryogenic environment: USA, 2014/0363151A1[P]. 2014-12-11.
- [12] KING D F, GRAHAM J S, KENNEDY A M, et al. 3rd generation MW/LWIR sensor engine for advanced tactical systems[C]//*SPIE*, 2008, 6940: 69402R-1-12.
- [13] VIZGAIKIS J N. Third generation infrared optics[C]//*SPIE*, 2008, 6940: 69400S-1-10.
- [14] RADFORD W A, PATTEN E A, KING D F, et al. Third generation FPA development status at Raytheon vision systems[C]//*SPIE*, 2005, 5783 (1): 331-339.
- [15] 范永杰,金伟其,刘崇亮. 前视红外成像系统的新进展[J]. 红外

- 与激光工程, 2010, **39**(2): 189-194.
- FAN Yong-jie, JIN Wei-Qi, LIU Chong-liang. New progress on FLIR imaging system[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 189-194.
- [16] VI ZGAIKIS, J N MILLER, JHALL J, et al. 3rd generation FLIR demonstrator[C]//SPIE, 2008, **6940**: 69400U-1-10.
- [17] 刘莹奇, 王建立, 曾蔚, 等. 可以改变红外相机冷光阑与成像波段的装置: 中国, 103792761 A[P]. 2014-05-14.
LIU Ying-qi, WANG Jian-li, ZENG Wei, et al. The infrared camera device with variable cold shield and imaging band: China, CN103792761 A[P]. 2014-05-14.
- [18] 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.
JIA Xing-rui, LI Xun-niu, WANG Hai-yang, et al. Design of a LWIR continuous zooming optic system with large zooming range[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(8): 463-466.
- [19] 张良, 刘红霞. 长波红外连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(7): 1279-1281.
ZHANG Liang, LIU Hong-xia. Optical system design of long wave infrared zoom lens[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, **40**(7): 1279-1281.
- [20] 胡红伟, 李秀飞, 高龙岳, 等. 棱镜合束昼夜合一瞄准镜光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2015, **13**(5): 75-81.
HU Hong-wei, LI Xiu-fei, GAO Long-yue, et al. Design of prism combined beam aiming optical system for day and night[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, **13**(5):75-81.
- [21] 曲贺盟, 张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2014 (4): 622-630.
QU He-meng, ZHANG Xin. Design of athermalized infrared optical system with high-speed switching and compact dual-FOV[J]. *Chinese Optics*, 2014 (4): 622-630.
- [22] 孙振, 巩岩. 光刻投影物镜可变光阑的结构设计与分析[J]. 中国光学, 2012(4): 401-406.
SUN Zhen, GONG Yan. Design and analysis of iris diaphragm structure in lithographic projection objective[J]. *Chinese Optics*, 2012(4): 401-406.
- [23] Nahum Gat, John Dwight Garman. Cryogenically cooled adjustable apertures for infrared cameras: USA, 7157706 B2 [P]. 2007-01-02.