

可变冷光阑红外探测器研究进展和关键技术分析

孙鸿生, 陈晓屏, 夏明, 陈军, 黄一彬, 甘游宇, 李淑芬

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 为了进一步提高红外变焦光学系统的性能, 兼顾其空间分辨率和灵敏度的要求, 基于可变冷光阑技术的制冷型变 F 数红外探测器需求迫切。相较于传统的红外变焦光学系统, 变 F 数红外变焦光学系统可在大视场和小视场切换时保持分辨率和灵敏度的平衡, 提高光学系统的孔径利用率, 进而缩小光学系统的径向尺寸, 有利于红外光学系统成像质量的提升和小型化设计。本文对变 F 数与变焦之间的关系进行研究, 概述了国内外在可变冷光阑红外探测器技术领域的研究进展, 并对主流技术路线的关键技术难点进行了分析。

关键词: 红外探测器; 可变冷光阑; 变 F 数; 变焦

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2024)04-0376-08

Research Progress and Key Technology Analysis of Variable Cold Aperture Infrared Detector

SUN Hongsheng, CHEN Xiaoping, XIA Ming, CHEN Jun, HUANG Yibin, GAN Youyu, LI Shufen

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Variable F/number-cooled infrared detectors, which are based on variable cold aperture technology, are urgently needed because they can improve the performance of zoom infrared optical systems and consider both spatial resolution and sensitivity. Compared with the traditional zoom infrared optical system, the variable F/number zoom infrared optical system can balance the resolution and sensitivity when the system switches between large and minimum scales. Furthermore, the variable F/number zoom infrared optical system can improve the aperture utilization rate of the optical system and reduce its radial dimensions, which is beneficial for improving the imaging quality and miniaturization design of the infrared optical system. In this paper, we discuss the relationship between the variable F/number and zoom and summarize the research progress in the field of variable cold-aperture infrared detectors. Finally, we analyze the key technical challenges of the mainstream technology approach.

Key words: infrared detector, variable cold aperture, variable F/ number, zoom

0 引言

红外探测是战场信息获取的一种有效和可靠的途径, 其抗干扰能力强, 可全天候对目标进行探测; 属于被动探测, 不易暴露自身。与雷达、激光等探测手段相同, 看得更远、更全面、更清晰是红外探测技术发展永恒的追求。为了解决定焦光学系统大视场和高分辨率的矛盾, 人们引入了变焦光学系统, 可通过改变焦距实现大小视场的切换^[1-2]。但是由于探测器的 F 数固定不变, 因此光学系统变焦时, 要么无法利用整个通光孔径, 要么会引入大量杂散辐射, 无法达

到最佳的状态。而具有变 F 数功能的红外探测器, 则可配合变焦光学系统, 根据任务场景需求, 灵活地选用合适的 F 数, 兼顾大视场目标搜索和小视场目标识别与跟踪两个功能^[3], 在地面防空、机载光电吊舱等领域具有较大的应用潜力。

本文将从变焦和变 F 数的关系出发, 分析二者的区别和联系, 在此基础上介绍国内外变 F 数红外探测器的相关研究进展, 最后对变 F 数红外探测器的技术路线进行分析, 并针对目前国外成熟的技术路线的关键技术进行总结, 对于变 F 数红外探测器的研究具有借鉴意义。

收稿日期: 2023-02-22; 修订日期: 2023-04-10.

作者简介: 孙鸿生 (1990-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事红外探测器杜瓦研究工作。E-mail:1565014246@qq.com.

通信作者: 夏明 (1977-), 男, 博士, 研究员, 主要从事斯特林制冷机研究。E-mail:15969586435@163.com.

1 变焦和变F数的关系

1.1 变焦光学系统的理论依据

光学系统的焦距是一项重要的设计指标,其关系到系统的视场角、空间分辨率等关键性能。就视场角大小来说,有^[2]:

$$\theta_x = \frac{d_x}{f}, \quad \theta_y = \frac{d_y}{f} \quad (1)$$

式中: θ_x 和 θ_y 分别为 x 和 y 方向的视场角; d_x 和 d_y 分别为焦平面在 x 和 y 方向的尺寸; f 为光学系统的焦距。可以看出,当芯片焦面尺寸固定不变时,焦距越小,视场角越大,有利于大范围地对目标区域进行观察,因此,在进行目标搜索时,多采用短焦距的大视场模式。

另一方面,红外系统的空间分辨率由光学系统、红外探测器以及图像重构系统等共同决定。对于红外探测器来说,决定其空间分辨率的截止频率为^[4]:

$$f_{0,\text{det}} = \frac{1}{\alpha} = \frac{f}{d} \quad (2)$$

式中: $f_{0,\text{det}}$ 为红外探测器截止频率; α 为瞬时视场角; d 为探测器像元尺寸。可以看出,当限制系统空间分辨率的因素为红外探测器时,较大的焦距可以提升红外探测器的截止频率,从而提高系统的空间分辨率。因此,在进行目标识别时,多采用长焦距的模式。

由上述分析可知,定焦光学系统不能同时满足大视场和高空间分辨率的要求,因此目前的搜索跟踪系统大都使用变焦光学系统,其可根据需求在大视场和高空间分辨率之间进行切换,以达到最佳的成像效果。

1.2 变F数与变焦的关系

F数是光学系统的重要指标,是相对孔径值的倒数,其公式为^[5]:

$$F/\# = \frac{f}{D} \quad (3)$$

式中: $F/\#$ 为F数。对于光学系统而言, D 为入瞳直径(入瞳是孔径光阑对方光学系统所成的像,其大小与孔径光阑位置、孔径光阑尺寸、焦距等相关),入瞳直径不大于物镜的尺寸, f 为焦距;对于红外探测器而言, D 为冷屏开口直径, f 为冷屏开口距焦平面的距离。

为了理清变焦与变F数的关系,首先对传统的红外变焦系统进行分析。传统变焦系统中,探测器的F数是固定不变的,而光学系统(为方便讨论,将冷屏作为光学系统的一部分)的F数则分以下几种情况:

①假设系统在最长焦距时入瞳尺寸与物镜尺寸相等:该种情况下,光学系统的F数由最长焦距和物镜尺寸的比值决定,此时冷屏开口即为系统的孔径光阑。在系统由最长焦距切换到短焦状态时,孔径光阑及其尺寸均保持不变,入瞳由原来占满整个物镜逐步等比例缩小^[5]。由F数的公式可知,此时光学系统的F数保持不变。

但是,系统从长焦状态切换到短焦状态时,通光孔径利用率将会大幅降低。假设变倍比为10的系统,短焦状态时的通光孔径面积仅为长焦状态时的1%,造成系统在短焦大视场状态下能量很大的浪费。如图1所示^[6],探测器的F数固定不变,为F/3,在长焦窄视场时,通光孔径被完全利用,见图中浅蓝色部分;当系统切换至短焦大视场状态时,通光孔径大幅减小,见图1中深蓝色部分。

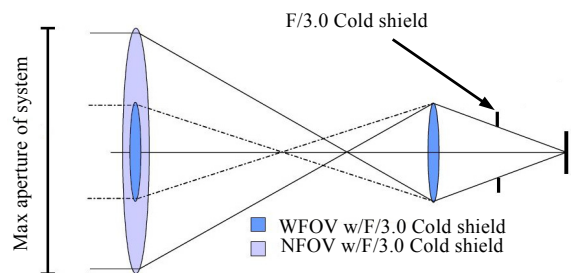


图1 传统变焦红外光学系统的孔径利用率示意图^[6]

Fig.1 Utilization rate of aperture of traditional zoom infrared optical system^[6]

②假设系统在最短焦距时入瞳尺寸与物镜尺寸相等:该种情况下,系统的F数由最短焦距和物镜尺寸的比值决定。在系统由短焦向长焦切换时,由于物镜尺寸固定,孔径光阑不再是冷屏开口,物镜边框成为了新的孔径光阑,也就是说此时虽然焦距在变大,但是入瞳直径保持不变,使得光学系统的F数逐步增加,并大于探测器的F数,造成冷屏效率的下降。

如图2所示^[6],光学系统的F数为F/6,探测器的F数为F/3,光学系统的F数大于探测器,光学系统自身产生的红外辐射大量的进入焦平面,大幅增加系统的NETD,干扰成像。

实际的变焦光学系统设计时,往往是上述两种情况的平衡,通常不会只考虑某一个状态的性能。

而对于变F数光学系统来说,在设计时保证系统在各个焦距下的孔径光阑均为探测器冷光阑,则当系统由长焦变换到短焦时,通过等比例增大冷光阑尺寸,可保证入瞳尺寸保持不变,通光孔径被充分利用,如图3所示^[6]。

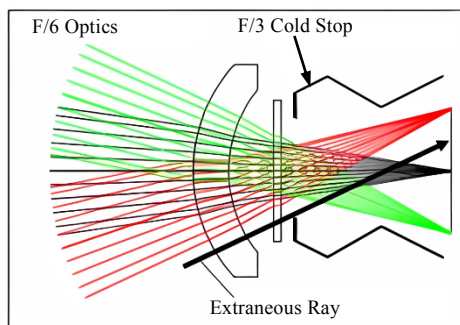


图2 25%冷屏效率系统的辐射示意图^[6]

Fig.2 Diagrams showing the ray paths for a 25% cold shielded system^[6]

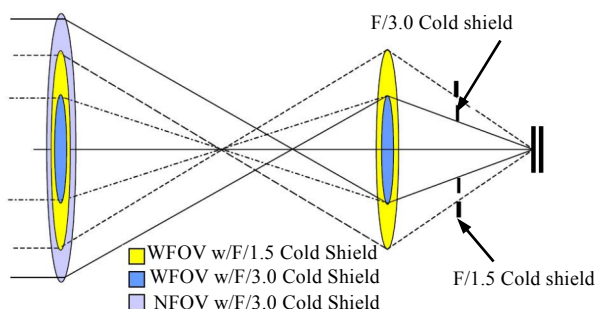


图3 变F数红外光学系统的孔径利用率示意图^[6]

Fig.3 Utilization rate of aperture of zoom infrared optical system with variable F-number^[6]

当系统由短焦变为长焦时,变F数光学系统可以通过等比例减小探测器冷光阑开口尺寸,使得探测器的F数变大,从而保持100%的冷屏效率,避免系统自身的杂散辐射进入焦平面,如图4所示^[6]。

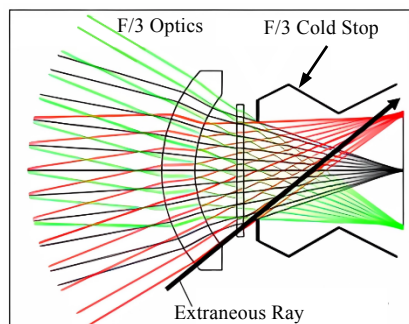


图4 100%冷屏效率系统的辐射示意图^[6]

Fig.4 Diagrams showing the ray paths for a 100% cold shielded system^[6]

由上述分析可知,变焦光学系统可兼顾大视场搜索目标和极小视场识别目标的需求,但是由于探测器的F数固定不变,因此要么不能充分利用通光孔径,要么引入大量杂散辐射,不能达到最佳的成像质量。而变F数光学系统则可以很好地解决上述问题。因此理论上,凡是红外变焦光学系统应用的场合,变F数光学系统均可应用,具有广泛的应用前景。

2 可变冷光阑红外探测器的研究进展

2.1 可变冷光阑的优势

可变冷光阑红外探测器技术是目前实现变F数红外系统的重要技术路线。相对于温阑来说,它具有以下几个优势:

F数调节范围大且可连续调节。为了解决温阑自身及反射的杂散辐射对成像的影响问题,通常做成球面温阑,这使得F数调节范围小,通常只有两个F数可以选择^[7-8],或者只能在某两个接近的F数之间进行调节^[9],而可变冷光阑红外探测器可实现系统F数的连续可调,且调节范围较大。

可降低系统的复杂度。在传统变焦光学系统中增加温阑设计,将大幅增加光学系统的复杂度和成本。而采用可变冷光阑红外探测器,只需针对探测器杜瓦封装结构进行设计和装配,可大幅降低系统的复杂度。

可提升系统的灵敏度。长春光机所的常松涛等人^[9]研究了球面温阑对中波 $640 \times 512 (15 \mu\text{m})$ 红外探测器的NETD的影响,假设球面温阑的温度为 20°C ,球面温阑的发射率为0.01,当温阑发生 0.5°C 的温度变化时,温阑引入的NETD达到3.6 mK,虽然引入的NETD很小,但也接近目前探测器本身的NETD。而采用可变冷光阑探测器的方法,引入的NETD可进一步降低。

2.2 可变冷光阑红外探测器的研究进展

美国弹道导弹防御局(BMDO)在2000年为高空观测系统(high altitude observatory, HALO)进行更新时设计了一个双波段红外分光系统^[10]。如图5所示,该系统在中波和长波的焦平面前端分别设置滤光片转盘,每个转盘上可放置5片不同带通的滤光片以及一片用于背景测试的空白片。通过转动滤光片转盘,可以切换不同的滤光片进入光路中。理论上,使5片滤光片的通光孔径各不相同,则该系统可在实现不同波段探测的同时,对中波和长波分别进行5个不同F数的切换。但是通过滤光片转盘来实现F数的改变会带来系统体积庞大、运动机构复杂等问题,对于系统的小型化和可靠性不利。

美国OKSI公司的Nahum Gat^[11]等人先后开发了两套中继光学系统,均采用外置可变冷光阑的方式解决光学系统和红外探测器F数不匹配的问题。外置的可变冷光阑通过单独的制冷机进行制冷,并通过蜗轮蜗杆或电机进行驱动。该方式虽然可以实现光学系统和红外探测器之间F数的匹配,但是光学系统复杂且体积较大(其中一套中继光学系统长度为

363.42 mm, 共 11 片透镜), 此外, 还需单独为可变冷光阑结构配备大冷量的制冷机, 这进一步增加了系统的体积和重量。两套中继光学系统的外置冷光阑分别如图 6、图 7 所示。

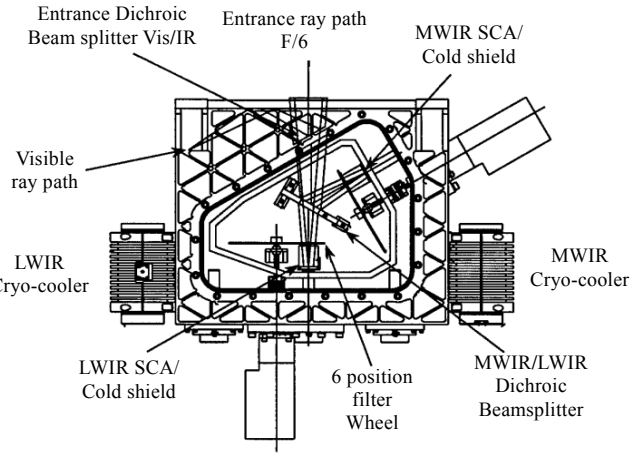


图 5 HALO 的双色红外系统^[10]
Fig.5 Double-wave band infrared system of HALO^[10]

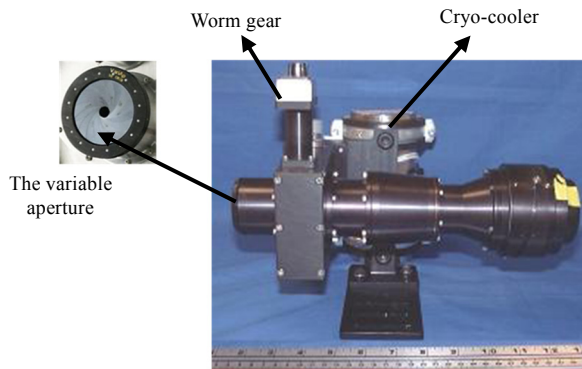


图 6 带可变冷光阑的真空密封结构^[11]
Fig.6 The vacuum enclosure with the variable aperture inside^[11]



图 7 外置可变光阑与滤光片转盘的集成结构^[11]
Fig.7 The integrated structure of variable-aperture mechanism (VAM) and cold filter wheel^[11]

2013 年 Nahum Gat 等人提出了与杜瓦集成封装的内置式可变冷光阑结构, 可变冷光阑采用与可见光相机光圈相同的刀片虹膜式结构, 通过光阑片的旋转运动改变冷光阑的孔径大小, 光阑片厚度很薄, 材料为摩擦力较小的聚四氟乙烯, 且在表面镀制了减小辐射率的润滑膜^[12]。该结构相较于外置可变冷光阑结构来说, 结构紧凑, 如图 8 所示^[12]。



图 8 刀片虹膜式可变冷光阑^[12]
Fig.8 Iris blades variable cold aperture^[12]

2014 年, 雷神公司的 Jeffrey 和 Eric 等人在 Nahum Gat 的基础上改进了刀片虹膜式的可变冷光阑结构。其采用双稳态螺线管电机进行控制, 光阑片材料为铍铜合金, 并在表面镀金以减小摩擦力。此外, 还考虑了可变冷光阑的温度均匀性问题^[13-15]。但是该结构的体积太大, 结构复杂, 不利于正式产品使用。其结构示意图如图 9 所示^[13]。

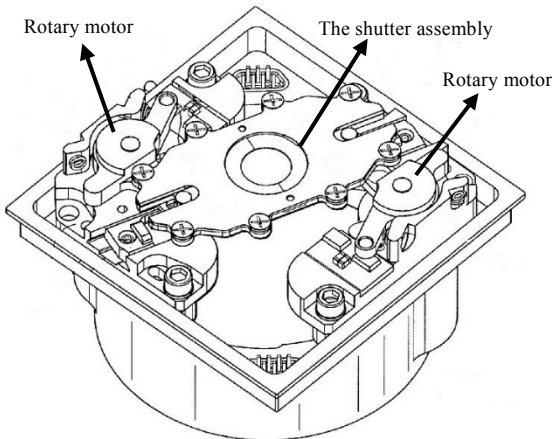


图 9 双稳态螺线管驱动的可变冷光阑示意图^[13]
Fig.9 Diagram of a variable cold aperture driven by a bi-stable actuators^[13]

雷神公司的第三代前视红外系统是可变冷光阑探测器技术的集大成者。其可变冷光阑采用的同样为刀片虹膜式的结构, 并将具有断电自锁、大功率体积比特性的压电电机作为可变冷光阑的驱动结构。冷光

阑结构如图 10 所示^[16]。



图 10 雷神公司可变冷光阑杜瓦俯视图^[16]
Fig.10 View of top of variable aperture cold shield installed in sealed tactical dewar from Raytheon^[16]

此外，雷神公司将中长双波段探测器芯片、双 F 数可变冷光阑、制冷机、制冷机驱动电路、成像控制电路、冷光阑控制电路等均集成为一个前视红外系统，该系统的体积和重量相对于第二代长波标准先进杜瓦组件（SADA II）来说反而更小。典型的指标如表 1 所示^[16-17]。

包含中长双波段探测器芯片、双 F 数可变冷光阑、制冷机、成像控制电路、冷光控制电路等均在内的第三代前视红外系统的组成以及实物如图 11 所示。

表 1 雷神公司第三代前视红外系统的部分指标^[16-17]
Table 1 Part of technical index of the third generation forward-looking infrared system from Raytheon^[16-17]

Parameter	Value
Formats	640×480
Pixel pitch	20 μm
Band	MW/LW
F/number	F/3 and F/6
Actuation cycles	100000(room temperature)
	10000(cryogenic temperatures)
The F/# change-time	meet the requirement
Cooling capacity	>1.5 W@23℃; >1 W@71℃(the
	temperature of FPA is 77 K)
Cooling time	≤10 min@23℃; ≤15 min@71℃
Maximum input power	≤75 W@28 V DC
Weight	Approximately 4.0 pound(1814 g)
The size of dewar	Approximately 4.75 inches×2.25
	inches×1.75 inches

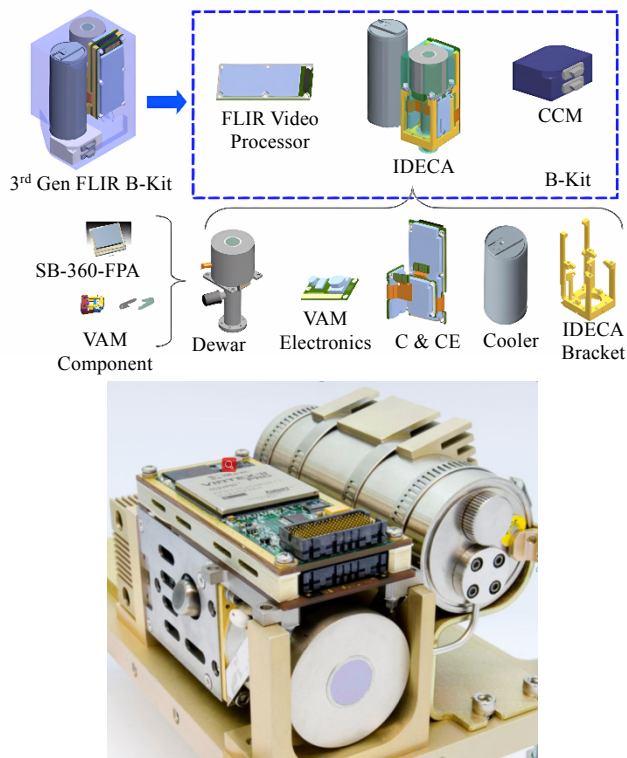


图 11 第三代前视红外系统的主要组成部件及系统的实物图^[17]
Fig.11 Key sub-assemblies and components and the photo of fully-integrated 3rd-Generation FLIR Sensor Engine^[17]

国内对基于可变冷光阑的变 F 数红外探测器研究较少。上海技物所^[18]于 2001 年发明了一种带可变冷光阑功能的用于红外探测器芯片中测的杜瓦(如图 12 所示)。在中测杜瓦的冷屏顶端集成了一个可变光阑机构，采用齿轮和拨杆对光阑动圈进行驱动，从而带动光阑片运动。通过该机构，可以对同一个芯片在不更换中测杜瓦的前提下，实现不同 F 数下芯片性能的测试和筛选。

上海技物所的可变冷光阑结构用于芯片的中测筛选，对结构的小型化以及制冷时间、制冷量的要求不高，因此不适合正式的红外探测器。

2014 年长春光机所^[19]发明了一种与滤光片转盘相似的可变光阑机构(如图 13 所示)。该机构将红外探测器、孔径光阑盘与滤光片盘集成在红外相机杜瓦中，孔径光阑盘上有不同孔径大小的圆孔，滤光片盘上有不同透过波段的滤光片，二者均通过与之相连的转动轴进行转动，从而实现不同孔径光阑和不同滤光片的切换。该结构利用不同固定孔径的光阑之间的转换来实现 F 数改变，机构复杂，体积庞大，且 F 数的选择比较受限。

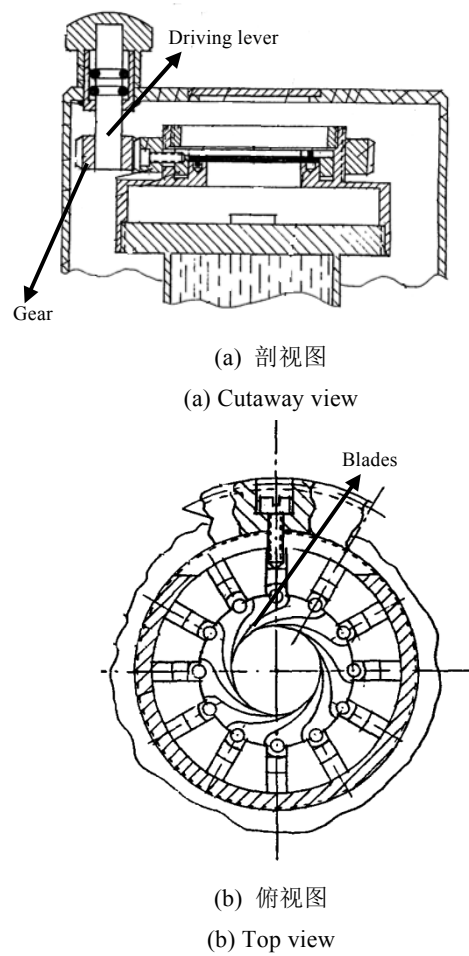


图 12 用于中测杜瓦的可变冷光阑^[18]

Fig.12 Variable cold stop for the test dewar^[18]

在光学系统设计方面, 613 所于 2017 年设计了可以匹配不同 F 数探测器的中波大视场光学系统^[20]; 中电科 11 所于 2022 年设计了 F/2 和 F/4 可调的变 F 数光学系统, 使用具有可变冷光阑功能的中波 640×512 探测器组件, 但是未见探测器的详细报道^[21]。

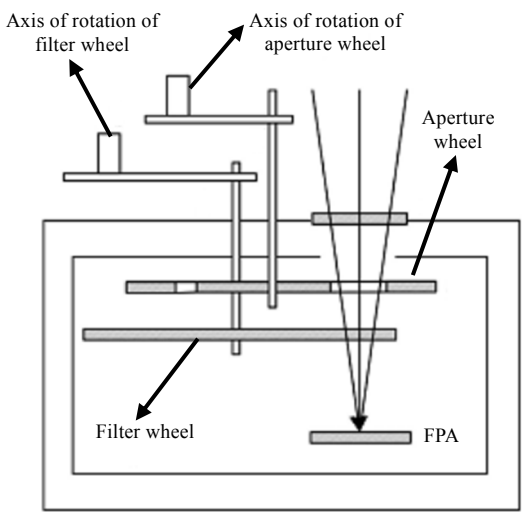


图 13 可变式的固定光阑^[19]

Fig.13 Variable fixed aperture^[19]

可以看出, 目前国内对于可变冷光阑红外探测器的研究较少, 相关产品不够成熟; 国外也只有美国雷神公司对该技术进行深入研究, 目前产品已进行小批量试制。

通过对国内外研究现状的对比, 可以发现雷神公司采用的与杜瓦集成封装的内置式可变冷光阑是实现变 F 数红外探测器的可行的技术路线。该技术路线有如下几点优势:

- 1) 集成度高: 针对 640×480 (20 μm) 的芯片封装, 雷神公司的探测器体积和重量甚至还略小于 SADA II 探测器;
- 2) 可靠性高: 可变冷光阑在制冷状态下可进行 1 万次的开合运动, 在非制冷状态下可进行 10 万次的开合运动;
- 3) 功耗低: 由于可变冷光阑机构与杜瓦进行集成封装, 无需单独为其再配备制冷机, 因此功耗不大于 75 W, 且常温降温时间小于 10 min;
- 4) 响应时间快: 虽然雷神的报道中没有明确说明 F 数的切换时间, 但是根据其使用的压电电机的特性, F 数的切换时间可满足光学系统视场切换时间的要求。

3 可变冷光阑红外探测器的关键技术

采用刀片虹膜式的可变冷光阑结构, 并将其与杜瓦进行集成封装, 存在以下关键技术:

- 1) 可变冷光阑杜瓦的整体设计技术
可变冷光阑杜瓦与传统的固定光阑杜瓦在设计上有很大的不同, 需从整体设计上来保证功能的实现。主要需考虑整体结构设计、光阑片的设计、驱动方式的选择、结构的温度控制、整体装配集成、小型化以及可靠性等多方面的技术。
- 2) 可变冷光阑精密装配技术
可变冷光阑涉及到光阑片的精密装调、驱动电机的隔热装配以及整体结构的精密封装等装配步骤, 由于其结构比传统冷屏结构复杂得多, 且存在运动部件, 其装配更加困难。而光阑片的装配精度关系到运动机构的长期可靠性以及运动过程中的摩擦力, 同时影响驱动功率的大小; 而驱动电机的装配精度关系到光阑片的受力均匀性以及温控效果; 整体结构的装配精度关系到成像的质量。因此需从设计和工艺等多方面进行综合考虑, 保证其装配精度及长期可靠性。

- 3) 微型电机设计和制造技术
对于可变冷光阑来说, 压电陶瓷电机是一种比较适合驱动方式。压电陶瓷电机单位体积下的力矩较大, 没有电磁干扰, 具有断电自锁功能。一方面, 为

了缩小可变冷光阑红外探测器的体积,压电陶瓷电机的体积必须很小,另一方面,光阑片的运动阻力要求压电电机的力矩不能过小。因此需通过电机结构设计优化、高性能压电陶瓷的制造、电机制造工艺的改进等多个方面实现小型化大力矩电机的研制,将杜瓦的体积控制在可接受的范围内。

4) 杜瓦热固耦合设计技术

可变冷光阑由于引入了复杂的运动机构,冷头热质量大幅增加,因此,需从结构设计以及材料选择等多方面进行研究和考虑,减小杜瓦热质量,解决快速制冷的问题。此外,可变冷光阑通过电机与杜瓦外壳热连接,需通过结构设计减小杜瓦的漏热。最后,光阑片之间通过叠加的方式互相贴合,热阻很大,需减小光阑片之间以及光阑片与冷屏之间的热阻,从而使光阑片温度降低至不影响焦平面成像的水平。

5) 可变冷光阑运动控制技术

探测器的 F 数由冷光阑的开口尺寸决定,因此需精确控制冷光阑的运动,从而精确控制探测器的 F 数。压电陶瓷电机具有断电自锁的功能,即电机断电后可变冷光阑将立即停止运动,停在断电瞬间的位置,因此在控制方面只需要考虑可变冷光阑运动的反馈问题即可,这关键在于选择合适的小型化位置传感器,并结合可变冷光阑的结构设计,将传感器安装固定在合适的位置。

6) 光阑片表面镀膜技术

光阑片表面需进行镀膜处理,膜层需满足摩擦系数小、耐磨以及反射率低 3 个条件。摩擦系数小可以减小光阑片之间的摩擦力,减小压电电机的力矩需求,有利于电机的小型化;耐磨性高则有利于可变冷光阑机构的可靠性,防止出现膜层脱落干扰成像的现象;反射率低则可以防止芯片的冷反射。

4 结论

本文从变焦和变 F 数的关系出发,阐述了变 F 数光学系统的优势。与传统的变焦光学系统相比,具有可变 F 数功能的变焦光学系统可兼顾系统的空间分辨率和灵敏度需求,提高系统的孔径利用率,有利于成像质量的提升和系统的小型化。

对可变冷光阑的研究进展进行了分析,发现雷神公司的内置刀片虹膜式可变冷光阑是可行性高、性能优异的技术路线,并对该技术路线的关键技术进行了详细分析。对可变冷光阑红外探测器的研究和应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 白瑜,邢延文,李华,等.国外高变焦比中波红外镜头的研究进展[J].红外与激光工程,2015,44(3):795-802.
BAI Yu, XING Tingwen, LI Hua, et al. Advances in foreign MWIR lens with high ratio[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 795-802.
- [2] 王忆锋.论红外光学系统的视场[J].红外,2016,37(7):1-9.
WANG Yifeng. On the field of view of infrared optical system[J]. *Infrared*, 2016, 37(7): 1-9.
- [3] 谭淦年,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.
TAN Songnian, YU Xiao, ZHANG Hongwei, et al. Progress and key technologies of infrared optical system with variable F-number[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(5): 367-373.
- [4] 陈伯良,李向阳.航天红外成像探测器[M].北京:科学出版社,2016.
CHEN Boliang, LI Xiangyang. *Infrared Imaging Detectors for Space Applications*[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [5] 郁道银,谈恒英.工程光学基础教程[M].北京:机械工业出版社,2007.
YU Daoyin, TAN Hengying. *Engineering Optics Basics Tutorial*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007.
- [6] Vizgaitis J N. Dual f/number optics for third generation FLIR systems [C]//*Infrared Technology & Applications XXXI*, 2005, 5783: 875-886.
- [7] Deslis A. Optical design of a warm shield for the 8 to 12 micron wavelength region[C]//*Proceedings of SPIE*, 2006, 6288: 628803.
- [8] 刘洋,安晓强,邓键.制冷型红外光学系统温栏杂散辐射分析及消除方法[J].应用光学,2012,33(1):186-190.
LIU Yang, AN Xiaoqiang, DENG Jian. Removal of stray radiation from warm shields in cooled infrared optical systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 186-190.
- [9] 常松涛,田棋杰,何锋赞,等.基于球面反射温栏的红外探测器变 F 数设计[J].物理学报,2017,66(15):52-63.
CHANG Songtao, TIAN Qijie, HE Fengyun, et al. Design of varying f /number of cooled infrared detectors based on spherical reflecting warm shield[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(15): 52-63.
- [10] Moskal R, Booker G, Williamson M, et al. High Altitude Observatory (HALO) Upgrade[R]. AEROMET INC TULSA OK, 2000.
- [11] NAHUM Gat, ZHANG J, MING D L, et al. Variable cold stop for matching IR cameras to multiple f-number optics[C]//*Proceedings of SPIE*, 2007, 6542: 65420Y.
- [12] NAHUM Gat, ZHANG Jingyi. Continuous variable aperture for forward looking infrared cameras based on adjustable blades: USA, 8462418 B1[P]. 2013-06-11.
- [13] 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.

[14] Eric J Griffin, Jerry Hershberg. Method for embedded feedback control for bi-stable actuators: USA, 2014/0363150A1[P]. 2014-12-11.

[15] 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.

[16] King D F, Radford W A, Patten E A , et al. 3(rd)-generation 1280×720 FPA development status at Raytheon Vision Systems - art. no. 62060W[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6206**: 62060W.

[17] King D F, Graham J S, Kennedy A M, et al. 3rd-generation MW/LWIR sensor engine for advanced tactical systems[C]//*Proceedings of SPIE*, 2008, **6940**: 903-914.

[18] 王正官, 李言谨. 杜瓦瓶冷屏可调光栏: CN2456147[P]. 2001-10-24. WANG Zhengguan, LI Yanjin. Adjustable light column for cold screen of Dewar bottle: CN2456147[P]. 2001-10-24.

[19] 刘莹奇, 王建立, 曾蔚, 等. 可以改变红外相机冷阑与成像波段的装置: CN103792761A [P]. 2014-05-14. LIU Yingqi, WANG Jianli, ZENG Wei, et al. Device capable of changing cold diaphragm and imaging wave band of infrared camera: CN103792761A [P]. 2014-05-14.

[20] DU B, LIU C, HU L. Design of imaging lens of large field of view of medium wave[C]// *International Conference on Optical Instruments and Technology* 2018, **10616**: 446-452.

[21] DU Xiaoyu, PENG Qingqing, LI Jiangyong. Design of cooled mid-infrared optical system with variable F-number[R]. The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corp. (China), 2022.