

变 F 数红外光学设计方法

王嘉晨, 李江勇

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:随着科技的发展,红外相关的技术也日渐成熟,许多新技术新理论得到广泛的运用。现在单一 F 数的变焦红外光学系统已经往多 F 数方向发展。对定 F 数光学系统而言,因为改变焦距的同时需要改变通光口径,在大视场时候通光口径会减小,能量利用率较低。变 F 数光学设计可以解决这一问题,使光学系统在保持孔径的情况下可以进行大视场和小视场的切换,充分利用系统的最大通光口径,提升能量利用率,本文介绍了当前变 F 数的相关设计,并进行了一些设计思路的拓展和对未来的展望。

关键词:红外光学;变 F 数;二次成像

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.019

Infrared optical design method of variable F number

WANG Jia-chen, LI Jiang-yong

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: With the development of science and technology over time, infrared related technologies are becoming increasingly mature, and many new technologies and theories have been widely used. Now the single f-number zoom infrared optical system has been developed to the direction of multi-F-number. For the optical system with fixed F number, the aperture of through-light needs to be changed when the focal length is changed, so the aperture of through-light will be reduced when the field of view is large and the energy utilization rate is low. Variable F can solve this problem, several optical design in the case of keeping the aperture optical system can be wide field and inspects a switch, make full use of the system of the chase light aperture, improve energy utilization efficiency, this article introduces the F number of related design, and puts forward some design ideas.

Keywords: infrared optics; variable F number; re-imaging

1 引言

光学系统中的 F 数可以粗略的描述为焦距和入瞳直径的比值,对于制冷型探测器而言可以看作是冷光阑到焦平面的距离和冷光阑直径的比值。

红外探测器可以分为制冷型和非制冷型,主要区别就是是否有冷光阑。冷光阑在起到阻拦杂光辐射,只允许需要的红外辐射进入系统作用的同时,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。

对于一个双 F 数系统, F 数的选择有一定的考究,在性能和设计方面有几个需要考虑的问题。由于 F 数会影响到光学系统的设计,一般选择能使系统性能得到提升的 F 数。我们可以从信号以及探测器的分辨率,也就衍射极限光斑直径的方面讨论有关 F 数选取问题。

传统的制冷型红外光学系统的 F 数不能改变。但是在同一个 F 数的情况下,如果减小系统焦距那么通光口径也会跟着减小,系统的收集的辐射减小,

则系统的探测灵敏度也会受影响降低。由于冷光阑的尺寸是固定不变的,所以光学系统的 F 数可以近似看成红外探测器的 F 数即冷光阑匹配。

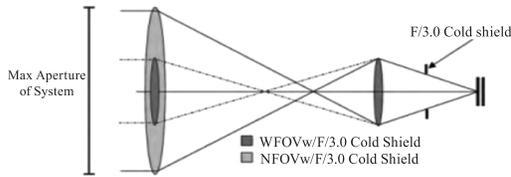


图1 定F数光学系统

Fig. 1 Fixed f-number optical system

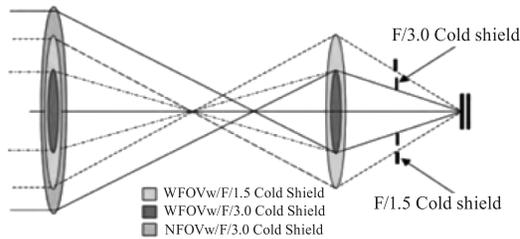


图2 变F数光学系统

Fig. 2 Variable f-number optical system

对于传统的定F数红外光学系统来说,虽然系统可以有多个视场但是每一个视场都会受限于F数,每个视场都需要在分辨率和灵敏度之间做出选择,这限制了光学设计者可以对不同视场设计出理想的光学系统。所以变F数的光学设计应运而生。

2 设计方法

根据F数的定义可以知道改变焦距和通光口径的比例就可以改变系统的F数,改变系统F数的前提保证系统的性能良好,简而言之就是获得非常高的冷光阑匹配效率。否则,噪声、杂散光等图像伪影会降低系统的性能和成像质量。通过冷光阑的工作原理和作用分析,如果不改变冷光阑直径的情况下改变F数,那么将会产生大量系统不需要的辐射。所以就一定需要通过改变冷光阑直径的方法。目前有两种可能的实现方法:一个可移动的温阑,一个可变冷光阑。

从光学系统视场切换的角度来考虑变F数是一个合理的方式。根据光学系统的视场角公式和F数的计算公式,当光学系统处于长焦状态的时候系统为小视场,在通光口径不变的情况下匹配的是较大的F数。当光学系统处于短焦距的时候又会产生一个大视场。这时大视场匹配较小的F数,但是有一个前提条件,那就是大视场的前光圈等于或小于小视场的前光圈,否则无法通过变F数来提升通光口径的利用率。同样可以通过改变视场光阑的大

小位置来改变系统的视场,但是无论用什么方法改变视场,在前端光学系统的F数改变的情况下,最终都会改变探测器冷光阑的大小或者位置来保证冷光阑匹配。

2.1 可变冷光阑

如果从理论上分析,能够保证最好系统性能的解决方案应该是可变冷光阑。这种方法可以保证系统在对不同F数的时候能够拥有100%冷光阑。实现这种方法可以有两种思路一个是在杜瓦瓶空间体积内提供多个孔径,第二种就是安装一个孔径可变的冷光阑。

多孔径法是指在杜瓦瓶的冷空间中使用两个或多个预先定义好的孔径,并通过某种机械或其他方法将其移动到合适的位置。这种多孔径方法的一个独特特点是可以为每个位置使用不同形状的孔径。比如长春光机所在2014年的时候申请的一项专利,这项专利设计的设备能够改变红外相机冷阑与成像波段。这项专利将红外探测器、孔径光阑盘与滤光片盘全部都放置于杜瓦中,通过孔径光阑盘的转动来切换冷光阑的孔径。

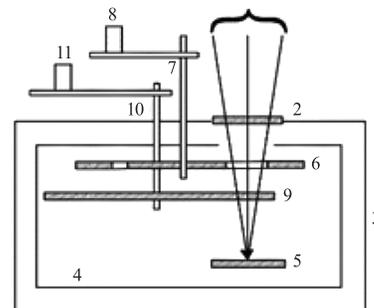


图3 可以改变红外相机冷阑与成像波段装置

Fig. 3 Can change the infrared camera cold diaphragm and imaging band device

另一种可变冷光阑的方法就是直接改变冷光阑的大小。目前使用较多的结构是虹膜或类似虹膜的组件,它位于冷光阑内,同样也需要制冷并维持与探测器相同的温度。

美国设计的第三代前视红外探测器系统使用的就是这种方式,直接通过改装红外探测器,加入一个刀片虹膜结构来改变冷光阑的直径,从而改变探测器的F数。

第三代前视光学系统拥有四个视场和两个F数,两个F数分别为F/3和F/6。在此系统中,刀片虹膜式的调整结构存在于红外杜瓦内,具有小尺寸,

高集成度等特点。

这种结构可以保持 100% 的冷光阑效率,而且小视场中没有加入移动组件,直接通过改变冷光阑的直径来改变 F 数。其次在虹膜组件有精密的机械结构的条件下,系统可选择的 F 数范围也更大。考虑到虹膜组件对系统杂散辐射的影响对构成虹膜组件的材料和表面镀膜也有要求。

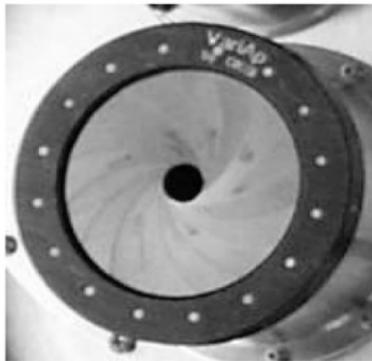


图 4 可变冷光阑

Fig. 4 Variable cold diaphragm

2.2 温 阑

除了直接对探测器的冷光阑进行改装,还可以使用另外一种减少杂散辐射的温阑去代替冷光阑,温阑的位置是在杜瓦瓶窗口的附近。想要使用温阑必须要增强温阑减少系统杂散辐射的效果,设计一种反射温阑可以把杜瓦瓶内部的冷辐射反射回自身,同时阻止任何其他高温的背景辐射到达探测器。它使探测器处于一种虚拟的低温环境中。在消除杂散光效果上,温阑相比冷光阑有一定的差距。为了缩短这种差距,可以对温阑的形状做出一定的改变,采用球面温阑可以一定程度上解决这样的问题。

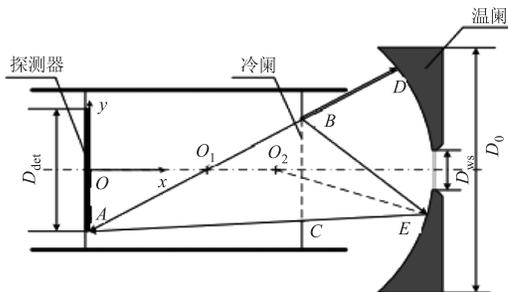


图 5 球面反射温阑设计原理图

Fig. 5 Design principle diagram of spherical reflective warm diaphragm

2.3 二次成像

二次成像很早就应用于美国第三代红外系统,现在也广泛应用于制冷型红外光学设计,因为探测器冷光阑存在于制冷型红外光学系统中,前置的红外

外光学系统需要保持和探测器的 F 数一致。一般探测器的冷光阑离探测器的焦平面都很近,所以对于一些长焦距系统来说如果不使用二次成像的方式,会使得系统的整体径向尺寸过大。这会造成系统的重量和体积增加,给最终系统的装调和加工以及后续的使用也带来不便。

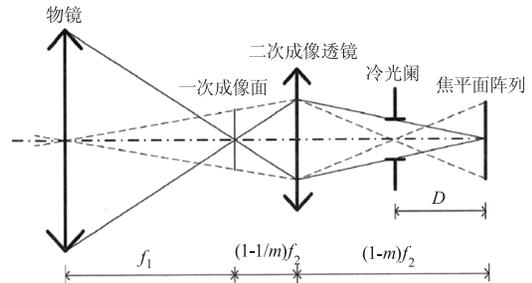


图 6 二次成像图

Fig. 6 Secondary image

2.4 视场的切换

光学设计中视场的切换通过改变系统焦距来实现。为了保证变焦的时候像面不会随着焦距的改变而发生变化,我们可以把系统分为变倍组和补偿组。变倍组是有变倍的效果的,与此同时,补偿组能够补偿像面漂移。通过物象交换位置来保证像面的稳定。

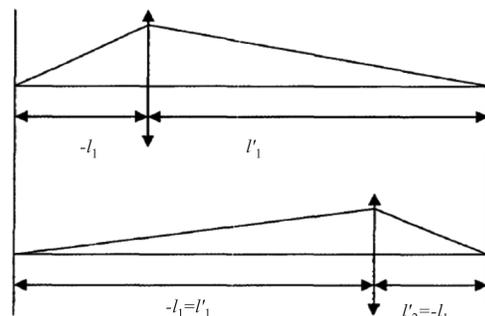


图 7 物象交换位置

Fig. 7 Objects switch places

当透镜处于两个位置的时候物像共轭距保持不变,其中出于两个位置时的透镜的垂轴放大率分别为 β_1 和 β_2 ,因此透镜的变倍比即为:

$$\Gamma = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{l_2}{l_1} \frac{l'_1}{l'_2} = \beta_1^2 \quad (1)$$

通过将二次成像组和变焦组结合起来,在保持冷光阑 100% 匹配的条件下改变系统 F 数就可以实现双视场变 F 数光学系统的设计。比如 2019 年中国电子科技集团第十一研究所提出的一种变 F 数红外热像仪的发明专利。其在大视场和小视场下光

学系统具有两种 F 数,短焦距对应小 F 数具有大视场,而与此同时长焦距对应大 F 数具有小视场。

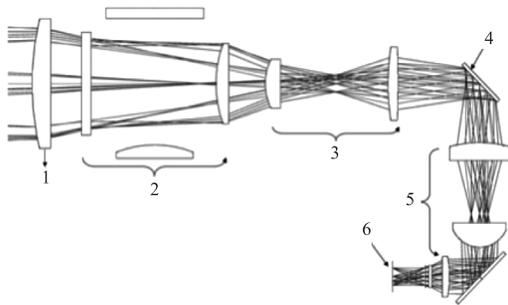


图 8 大视场光路图

Fig. 8 Large field of view optical path diagram

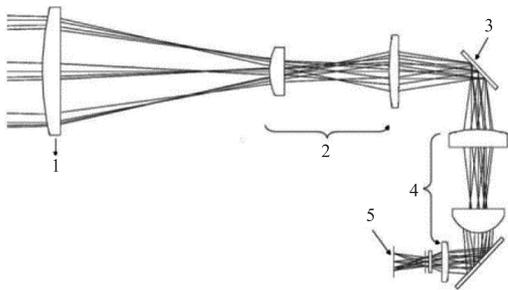


图 9 小视场光路图

Fig. 9 Small field of view optical path diagram

该设计通过切入和切出视场镜组来改变系统焦距,视场镜组切出系统为长焦出现小视场,视场镜组切入系统为短焦出现大视场。系统冷光阑为可变冷光阑,在前端光学系统因视场镜组切入而改变 F 数时,改变冷光阑大小使得系统保持冷光阑 100% 匹配。

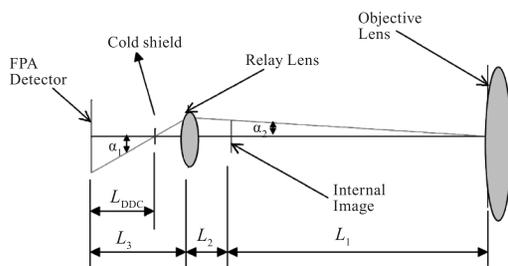


图 10 二次成像光学系统

Fig. 10 Secondary imaging optical system

3 思路扩展

不同于一些设计中变倍组负责改变焦距,二次成像负责将一次成像的像面成像到探测器的焦平面上。基于变焦距原理,我们可以赋予二次成像组变倍的功能,使其既能将前端物镜组的像成像于焦平面,又可以通过改变二次像组的结构或者位置来改变系统的焦距。

L_2 、 L_3 分别为一次成像面和探测器焦平面到二次成像镜的距离; M 为二次成像组放大倍率; f_R 为二次成像组的焦距。

$$L_2 = f_R \div M + f_R \quad (2)$$

$$L_3 = (M + 1) \cdot f_R \quad (3)$$

因为前端物镜镜片没有移动,一次成像面的位置保持不变,并且一次成像面的位置到二次成像面的距离需要保持不变。根据这些前提条件以及公式(2)、(3)可以有两种思路来对二次成像组进行改动。

第一种是移动二次成像组的位置,不改变二次成像组的结构。因为保持了结构不变所以二次成像组的焦距不会改变,同时要保持 L_2 与 L_3 的和不变,所以二次成像组只能在其物象交换位置的两点移动。根据公式 3 得知 L_2 和 L_3 的相差的越多变倍比越大,因为二次成像组都很靠近探测器,难以满足过大的变倍比需求。

此外这种方式同样可以使用温阑来代替可变冷光阑。系统的总焦距为前端物镜组的焦距和二次成像组放大倍率的乘积。当 L_3 大于 L_2 时,放大倍率大于 1 系统为长焦距,此时温阑离焦平面应该较远,系统和探测器的处于大 F 数状态。当 L_2 大于 L_3 时,系统为短焦距,温阑离焦平面较近,系统和探测器处于小 F 数状态。需要注意的是变焦过程中镜片和温阑不要相撞。

第二种是改变二次成像组的结构,从而改变二次成像组的焦距。改变结构的方式可以减少或者增加二次成像组的镜片数,或者镜组中镜片之间的距离。使得不同结构的二次成像组的放大倍率不同。这种方式相比第一种可选择的变倍比较大,因为在变倍比和焦距都改变的同时要保持一次和二次成像面距离,需要的计算较多。

4 结 语

红外技术已经广泛应用于日常生活以及军事装备当中,随着人们的需求增加,以及应用环境的复杂化,人们对红外设备的要求也越来越高。

光学设计的发展过程中定焦距逐渐升级为变焦距,而多档变焦最终也会升级为连续变焦,单波段也会变成多波段。当前的连续变焦红外光学系统的技术得到广泛的研究和应用,在此基础上这对光学设计上做出进一步的改进。光学系统的 F 数是一个

很重要的系统参数,它会影响到系统的分辨率和灵敏度。不同波段的红外光较合适的 F 数也会不同,在变 F 数的基础上结合多波段光学技术,最大化利用变 F 数的优点。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese)
谭淞年,于潇,张洪伟,李全超. 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.
- [2] Chang Songtao, Tian Qijie, He Fengyun, et al. Design of infrared detector with variable F-number based on spherical reflective temperature diaphragm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(15): 150701. (in Chinese)
常松涛,田棋杰,何锋贇,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.
- [3] VIZGAITIS J N. Dual f/number optics for 3(rd) generation FLIR systems[C]//*Proceedings of SPIE on The International Society for Optical Engineering*, 2005: 875-886.
- [4] 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: 109-117.
- [5] NAHUM Gat, ZHANG Jingyi. Continuous variable aperture for forward looking infrared cameras based on adjustable blades: USA, 8462418 B1 [P]. 2013-06-11.
- [6] Cheng Qiao. Study on infrared zoom system [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2005. (in Chinese)
程巧. 红外变焦系统的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院西安光学精密机械研究所, 2005.
- [7] 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.
- [8] VI ZGAITIS, J N MILLER, JHALL J, et al. 3rd generation FLIR demonstrator [C]//*SPIE*, 2008, 6940: 69400U-1-10.
- [9] Du Xiaoyu, Peng Qingqing, Li Jiangyong, et al. An optical system of variable F-number infrared thermal imager: China, CN110780420A [P]. 2020-02. (in Chinese)
杜晓宇,彭晴晴,李江勇,等. 一种变 F 数红外热像仪光学系统: 中国, CN110780420A [P]. 2020-02.
- [10] Nahum Gat, John Dwight Garman. Cryogenically cooled adjustable apertures for infrared cameras: USA, 7157706 B2 [P]. 2007-01-02.
- [11] Li Wenqiang, Meng Qingbin. A compact medium-wave infrared f-number telephoto optical system: China, CN214586202U [P]. 2020-11. (in Chinese)
李文强,孟庆斌. 一种紧凑型中波红外变 F 数长焦光学系统: 中国, CN214586202U [P]. 2020-11.