

基于热光阑的大F数制冷型红外光学系统

陈建发, 赵泉, 蔡猛, 任伟锋, 潘枝峰, 王合龙
(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 研制了一套基于热光阑的大F数制冷型红外光学系统,通过优化热光阑的设计参数,消除了热光阑自身辐射、外界环境杂散辐射及冷反射对系统性能的影响,很好地满足了热成像性能高、长焦距、体积紧凑等设计需求。性能测试及成像效果表明,通过合理的优化设计,反射热光阑不会给系统的性能带来明显的变化,验证了热光阑设计方法的正确性与可行性。

关键词: 红外光学系统; 热光阑; 大F数; 杂散辐射; 冷反射

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)03-0081-04

A Large F/Number Cooled Infrared Optical System Based on Warm Diaphragm

CHEN Jian-fa, ZHAO Quan, CAI Meng, REN Wei-feng, PAN Zhi-feng, WANG He-long
(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: A large F/number (F/#) cooled infrared optical system based on warm diaphragm was designed. The influences of thermal radiation of the warm diaphragm itself, the external environment stray radiation and the narcissus reflection on the system performance were eliminated by optimizing the design parameters of the warm diaphragm. The system achieved the design requirements of high thermal imaging performance, long focal length and small volume. Performance tests and imaging results show that: the reflective warm diaphragm will not bring significant change to the performance of the system through reasonable optimization design, which verifies the correctness and feasibility of the design method.

Key words: infrared optical system; warm diaphragm; large F/number; stray radiation; narcissus

0 引言

军用红外光学系统为了获得高的热成像性能,多采用制冷型探测器。制冷型探测器光阑位于光学镜头之后,为实现镜头瞳孔与探测器光阑之间的衔接避免杂散辐射,必须要求100%的冷光阑效率,即光学系统的F数要与探测器的F数匹配。在实际工程应用中,由于光学系统结构体积的严格限制或多F数设计的需求(即长焦状态时需要较大的F数以满足体积的限制,短焦状态下需要较小的F数以获得足够的能量及最大化利用光学窗口的口径),此时就需要冷光阑可变F数或引入外置光阑(也称热光阑)改变光学系统的F数。冷光阑可变F数对探测器的设计具有较高的要求,实现存在很大的难度,目前可行的方案是引入反射

热光阑进行变F数红外光学的设计。引入热光阑后,由于光阑自身辐射、外界环境杂散辐射及冷反射等因素,会对系统性能产生一定的影响^[1-2]。

本文在理论分析的基础上,通过优化反射热光阑的设计参数消除热光阑自身辐射、外界环境杂散辐射及冷反射对系统性能的影响,设计了一套变F数红外光学系统。性能测试表明,通过合理的优化设计反射热光阑,不会给系统的性能带来明显的变化,验证了热光阑设计理论的正确性与可行性,对变F数红外光学系统及大F数红外光学系统的设计具有重要的意义。

1 热光阑设计理论

热光阑通常加装在探测器与光学系统最后一块镜子之间,加装热光阑后光学系统的孔径光阑在热光阑位置,显然与探测器的冷光阑位置不匹配,此时冷光阑效率下降。因此热光阑对像面照度的影响包含热光阑自身辐射,冷光阑效率下降导致背景辐射直接入射至像面

或经热光阑反射后入射至像面三方面,如图1所示。

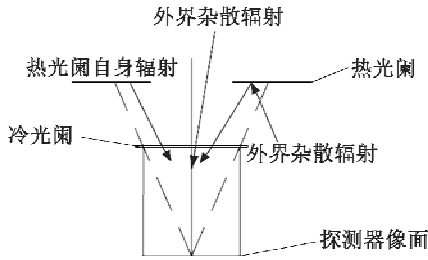


图1 热光阑对像面照度的影响

Fig. 1 Warm diaphragm influence on image plane illumination

1.1 热光阑自身的辐射^[3-4]

热光阑可等效为一个发射率为 ϵ_r 的灰体,其辐射率为

$$N_r = \epsilon_r \frac{1}{2\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_r) d\lambda \quad (1)$$

式中: λ 表示波长; T_r 为热光阑温度; $W(\lambda, T_r)$ 为黑体半球范围内的辐射; ϵ_r 为热光阑表面光谱发射率。

热光阑与探测器二者中心在一条轴上,探测器上中心点的辐照度可以计算为

$$E_0 = \pi N_r R(\lambda) (\sin^2 \theta_c - \sin^2 \theta_w) \quad (2)$$

式中: N_r 为热光阑的辐射率; $R(\lambda)$ 为探测器光谱响应率; θ_c 为冷光阑开口与探测器中心形成的半角; θ_w 为热光阑开口与探测器中心形成的半角,如图2所示。

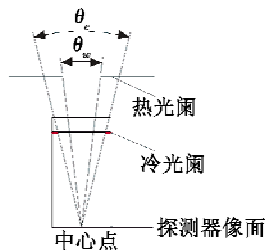


图2 热光阑自身辐射对像面照度的影响

Fig. 2 The influence of warm diaphragm radiation on image plane illumination

为简化模型,假定探测器上任意点看到的热光阑表面积相同,则探测器上其他点的辐照度可用余弦的四次方定律估算,即

$$E_i \approx E_0 \cos^4 \phi_i \quad (3)$$

式中, ϕ_i 表示探测器任意点和所看到的热光阑表面中心的连线与 Z 轴形成的夹角。

越接近探测器边缘, ϕ_i 越大, E_i 越小。设探测器边缘 $\phi_i = \phi_{\max}$, 则热光阑自身辐射引起最大温差为

$$\Delta T_r \approx \frac{E_0 (1 - \cos^4 \phi_{\max})}{\partial E_B / \partial T_B} \quad (4)$$

式中, $\partial E_B / \partial T_B$ 为背景辐射温度变化率。

1.2 直接入射的杂散辐射^[5]

在热光阑孔径面内随机取一点记为 A , 分析过 A 点以随机角度入射至探测器像面或在内壁上一次反射后入射至探测器像面的杂散辐射的情况, 对于经由 A 点需要经过二次或多次反射才能达到探测器像面上的情况, 认为能量被衰弱至很小的量值, 不予考虑。直接入射到像面的背景辐射如图3所示。

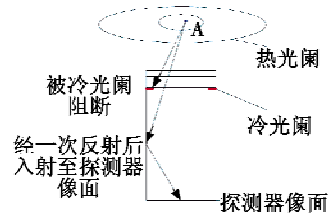


图3 直接入射到像面的背景辐射

Fig. 3 Background radiation entering directly to the image plane

具体计算过程如下: 1) 首先在热光阑孔径上随机取一点 A , 并赋予经过 A 点光线一个随机方向变量; 2) 依据反射定理及空间解析几何等有关知识, 判断该光线是否被冷光阑所阻拦; 3) 如果未被阻拦, 再判断该光线最终是否落在探测器像面区域内, 并统计落入芯片区域内的光线数。

以一个较大的循环次数执行此过程, 设光线总数为 N , 其中落在芯片上的光线数为 n , 则冷光阑效率 η 可以写为

$$\eta = 1 - \frac{n}{N} \quad (5)$$

1.3 经由热光阑反射的背景辐射

探测器上一点发出的光线经由热光阑表面反射后, 有一部分返回至探测器冷指内部; 另一部分则反射在周围外部空间, 依据光路可逆的原理, 背景辐射可沿此路径, 经由热光阑表面反射而进入探测器内部, 如图4所示。而如果探测器上所有点发出的光线全部进入冷指内部, 则可以认为外界光线无法经由热光阑表面反射到达探测器像面。

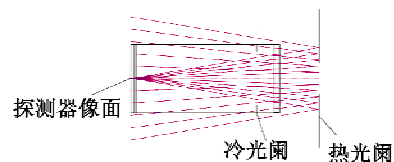


图4 经由热光阑反射的背景辐射分析

Fig. 4 Background radiation analysis by warm diaphragm reflection

2 系统设计及性能测试

光学系统设计参数见表1。

表1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

参数	数值	参数	数值
探测器阵列	320 × 256	光学系统 F 数	6
面元尺寸/μm	30	视场/(°)	1.64
波长/μm	7.7 ~ 9.5	焦距/mm	430
探测器 F 数	3	探测器 NETD/mK	45
冷光阑到探测器像面距离/mm	20		

2.1 热光阑优化设计

系统设计参数已给出了探测器参数和光学系统 F 数,因此热光阑的设计仅需确定热光阑表面曲率半径、热光阑表面到探测器像面的距离两个参数。

如 1.1 节所述为简化模型,需使得探测器像面上不同点看到的热光阑表面积相同,通过计算分析需使得热光阑到探测器的距离小于 28 mm,此时被探测器上不同点看到的热光阑表面积的归一化分布情况如图 5 所示,热光阑尺寸如图 6 所示,被探测器上不同点看到的热光阑表面积如图 7 所示。

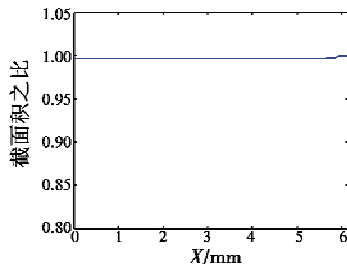


图5 被探测器上不同点看到的热光阑表面积的归一化分布

Fig. 5 The normalized distribution of warm diaphragm surface area

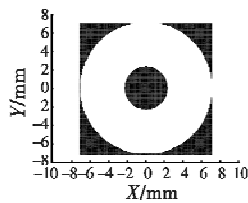


图6 热光阑尺寸

Fig. 6 The warm diaphragm size

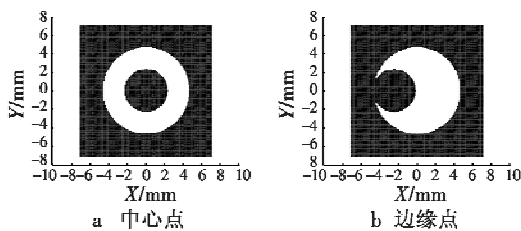


图7 被探测器上不同点看到的热光阑表面积
Fig. 7 Warm diaphragm surface area detected by different points of the detector

热光阑材料选用铝合金,对表面进行抛光并镀反射膜,其反射率大于 0.97,自身发射率约为 0.02 ~ 0.03,热光阑自身辐射在探测器像面上的照度分布如图 8 所示。经计算其引起的等效温差约为 17 mK,小于系统的噪声等效温差(NETD),故加装热光阑后可能引起的杂散辐射主要是来自外界环境的热辐射。

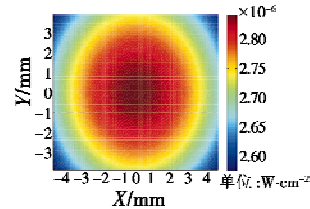


图8 热光阑自身辐射引起的像面照度分布

Fig. 8 The illumination distribution on image plane caused by warm diaphragm radiation

对于直接入射到探测器像面的杂散辐射可以通过优化热光阑的 F 数及热光阑到探测器的距离进行消除,而系统设计参数已经给出了探测器的参数及光学系统的 F 数,因此只能通过优化热光阑到探测器的距离实现。外界直接杂散辐射的消除效果可以用其冷光阑效率表征。

表 2 计算了热光阑与探测器之间不同距离时,外界直接杂散辐射对应的冷光阑效率,其中随机追迹光线数 100 000。由表中数据可知,随着距探测器的距离越来越远,冷光阑效率也越来越高,为使得探测器上每一点看到的热光阑表面积一致,光阑到探测器的距离需小于 28 mm,因此选定距探测器的距离为 28 mm,此时对应冷光阑效率为 0.998 8,满足使用要求。

表2 冷光阑效率计算结果

Table 2 The calculation results of cold diaphragm efficiency

距探测器的距离/mm	落入像面的光线数	冷光阑效率 η
20	1660	0.9834
24	969	0.9903
28	113	0.9988
32	16	0.9998
36	1	0.9999

对于经由热光阑表面反射后入射到探测器像面上的杂散辐射,可以通过优化热光阑到探测器的距离或热光阑的曲率半径进行优化,热光阑到探测器的距离选定后,热光阑的曲率半径成为唯一可以优化的变量,优化的最终结果要保证由探测器上发出的光线百分之百回到冷光阑,探测器发出的光线追迹如图 9 所示,优化结果表明当曲率半径在 10.5 ~ 18.2 mm 这个范围时,探测器发出的光线全部返回至冷光阑。

当探测器像面发出的光线百分之百被探测器接收时,外界杂散辐射反射引起的冷光阑效率下降完全被消

除,此时带来了一个新的问题——探测器接收到自己发出的冷能量经由热光阑表面反射后在探测器像面上分布不均匀形成一个黑斑,也即热光阑带来的冷反射。

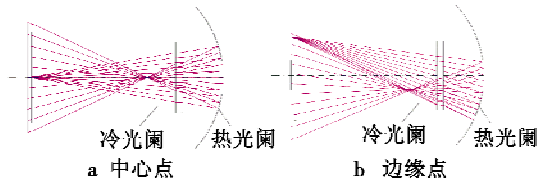


图9 光路追迹

Fig.9 Inverse ray tracing

为了消除热光阑的冷反射,需保证返回光线尽量覆盖整个探测器。通过进一步优化表明热光阑曲率半径为 16.8 mm 时,返回后的能量在像面上分布最均匀,探测器中心与探测器边缘接收到的冷能量相对差值小于 5%,此时不会引起严重的冷反射。

系统原始像面照度分布和加入热光阑冷反射后的像面照度分布的对比如图 10 所示,由图可知,热光阑的冷反射量值较小,可以接受。

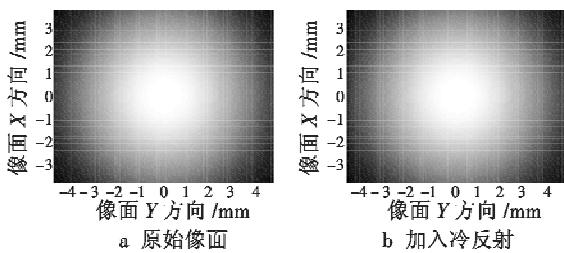


图 10 冷反射引起的像面照度分布

Fig.10 The illumination distribution on image plane caused by narcissus

最终确定热光阑到像面距离 28 mm,中心开孔直径 4.67 mm,表面曲率半径 16.8 mm,光学表面外孔径直径 20 mm。

2.2 光学系统设计

研制一套长波红外光学系统,该光学系统 F 数为 3,通过加装热光阑使得光学系统的 F 数增大为 6。光学系统布局如图 11 所示。

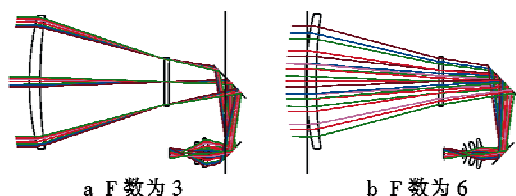


图 11 光学系统布局图

Fig.11 Optical system layout

2.3 性能测试

对红外光学系统的成像性能进行测试,以评价引入热光阑对系统性能的影响。NETD 指标描述了对面目标的温度灵敏性,NETD 的变化可表征热光阑对系

统性能的影响。对于同一探测器,NETD 与 F 数平方成正比,与探测器的积分时间成反比。通过调整探测器积分时间,可以消除系统 F 数变化导致 NETD 的变化。为了使测试数据具有对比性,通过改变探测器的积分时间,以补偿由于系统 F 数的改变导致系统接收能量下降。测试设备采用 CI 红外性能测试设备,NETD 采用方靶测试,测试数据如表 3 所示。

表 3 NETD 测试数据

Table 3 The test data of NETD

热光阑	加装前	加装后
F 数	3	6
积分时间/ μ s	500	2000
NETD/mK	40	43

由表 3 中数据可知,加装热光阑后系统的性能改变量很小。忽略实验及测试误差,认为引入优化后的热光阑不会对系统的性能产生可以感知的影响。

3 结论

目前制冷型探测器的 F 数均较小,为保证 100% 冷光阑效率,长焦红外光学系统的体积就会很庞大,基于热光阑的大 F 数红外光学系统,很好地满足了长焦状态下系统体积的限制;而对于多视场红外光学系统,通过切换热光阑可兼顾长焦状态系统体积小与短焦状态相对孔径大这两方面的设计需求。设计了一套变 F 数红外光学系统,通过优化热光阑的设计参数,消除了热光阑自身辐射、外界环境杂散辐射及冷反射对系统性能的影响。性能测试表明,热光阑通过合理的优化设计,不会给系统的性能带来明显的变化,验证了热光阑设计理论的正确性与可行性,对大 F 数红外光学系统及变 F 数红外光学系统的设计具有重要的意义。

参考文献

- [1] VIZGAITIS J N. Dual f/number optics for 3rd generation FLIR systems[J]. Proceedings of the SPIE, 2005(5783): 875-886.
- [2] DESLIS A. Optical design of a warm shield for the 8-12 micron wavelength region [J]. Proceedings of the SPIE, 2006(6288): 668-682.
- [3] WARREN J S. Modern optical engineering[M]. New York: Mac Graw-hill Companies, 2000.
- [4] 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.
- [5] 王忆锋,范乃华,毛京湘. 用蒙特卡罗方法和 Matlab 计算冷光阑效率[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1): 26-32.