

基于球面反射温阑的红外探测器变 f 数设计

常松涛^{1)†} 田棋杰¹⁾²⁾ 何锋赞¹⁾ 余毅¹⁾ 李周¹⁾²⁾

1) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

2) (中国科学院大学, 北京 100039)

(2017年3月13日收到; 2017年4月10日收到修改稿)

制冷型红外探测器 f 数由冷阑尺寸和位置决定, 在冷阑附近加温阑可以改变探测器 f 数, 但是会引入大量杂散辐射. 为解决这一问题, 提出一种基于球面反射温阑的红外探测器变 f 数设计方法. 建立了温阑红外辐射模型, 分析普通平面温阑引入的杂散辐射及其对探测器性能的影响. 在此基础上提出球面反射温阑的设计方法, 通过改变表面形状和发射特性, 降低温阑引入的杂散辐射, 以保证探测器变 f 数后的性能. 为验证本文方法, 设计球面反射温阑和普通平面温阑改变某制冷型探测器 f 数, 在高低温试验箱内进行辐射定标实验测量两种温阑引入的杂散辐射, 比较二者对探测器的影响. 分析和实验结果表明, 球面反射温阑引入的杂散辐射远小于普通平面温阑, 引入的噪声等效温差也较小, 能够更好地保证红外系统的成像性能.

关键词: 制冷型红外探测器, f 数, 球面反射温阑, 杂散辐射

PACS: 07.57.-c, 42.15.Eq, 07.57.Kp, 07.60.-j

DOI: 10.7498/aps.66.150701

1 引言

高性能的红外成像系统和高精度的红外测温系统通常采用制冷型红外焦平面阵列探测器, 该系统主要应用于需要定量获得目标温度或者辐射特性信息的科研、军事领域. 斯特林制冷是一种常见的探测器制冷方式, 探测器安装在隔热杜瓦瓶内, 外部的红外辐射透过杜瓦窗口到达探测器. 杜瓦窗口可以认为是一种冷光阑或冷阑, 通常将制冷型红外探测器的 f 数定义为冷阑到探测器的距离与冷阑口径的比值. 当探测器和杜瓦瓶组装完成后, 探测器的 f 数就已经确定, 标准制冷型红外探测器产品的 f 数通常为2或4. 将制冷型探测器用于红外成像系统时, 如果探测器 f 数小于光学系统, 则会有外部杂散辐射(红外波段的杂散光)进入探测器; 当探测器 f 数过大时, 冷阑会遮挡一部分成像光线, 引起渐晕现象^[1,2]. 因此通常要求光学系统与探测器具有相同的 f 数, 称为 f 数匹配或光阑匹配. 制冷型红外焦平面阵列探测器是红外成像系

统中较为昂贵的组件, 为使其得到充分利用, 可以设计一种两档、多档或连续变焦红外成像系统. 若探测器 f 数恒定, 为保证光学系统与探测器 f 数匹配, 此时减小焦距则必然意味着要减小通光孔径, 导致系统的光收集能力下降, 影响系统的探测灵敏度. 另外, 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, 利于军事目标侦查和监视, 应用前景广泛^[3]. 综上所述, 对变焦红外系统而言, 固定通光孔径、改变 f 数是一种更为理想的选择, 而这种系统首先就要解决改变探测器 f 数问题.

设计可变冷光阑是一种较为有效的改变探测器 f 数的方法, 国内外学者进行了大量研究. 2007年, Gat等^[4]通过设计外置式的可变冷光阑机构实现了 $f/10.5$ 光学系统与 $f/4.1$ 红外探测器的匹配. 2014年, 雷神公司设计了适用于低温环境的刀片虹膜式可变冷光阑结构^[5,6]. 美国军方设计的第三

† 通信作者. E-mail: stchang2010@sina.com

代前视红外探测系统是变 f 数红外光学系统应用的典型, 同样采用刀片虹膜式可调冷光阑结构, 调整机构集成在红外杜瓦瓶内, 实现 $f/6$ 和 $f/3$ 双 f 数^[7-9]. 上述方式的优势在于改变 f 数后能较好地保证探测器性能, 但是改造冷光阑的方式需要考虑制冷、探测器改造、封装等各方面的问題, 对冷阑通光孔径调节结构的要求也较高, 会导致结构复杂、成本高、系统可靠性降低, 不利于杜瓦结构的小型化和轻量化. 另一种改变探测器 f 数的方法是在探测器前加入光阑, 可以限制入射孔径角, 从而改变探测器的 f 数. 通常这类光阑不进行制冷处理, 其温度与光学系统所处的环境相同, 这时光阑相对于制冷后的探测器(77 K)是高温辐射源. 通常将红外系统中所有不制冷的光阑称为温阑, 以便与冷阑区分. 普通的温阑为环形薄片(称为普通平面温阑), 中心圆孔透光, 其余部分遮光. 若将普通平面温阑用于改变制冷型红外探测器 f 数, 温阑自身辐射和对环境辐射的反射能量都会直接到达探测器, 从而引入大量的杂散辐射, 直接导致红外探测器动态范围和图像对比度下降^[10-12]. 另外, 这种普通平面温阑引入的杂散辐射量受环境温度波动影响较大, 引起探测器接收到的辐射能变化, 导致探测器输出图像中产生大量随时间变化的噪声.

为简便、低成本地改变制冷型红外探测器 f 数, 本文提出一种基于球面反射温阑的探测器变 f 数设计方法. 通过对温阑的表面形状和发射特性进行特殊设计, 能够在改变探测器 f 数的同时尽量少地引入杂散辐射, 保持制冷型红外探测器性能. 首先介绍了制冷型红外探测器的杜瓦、冷阑结构及探测器变 f 数原理; 建立普通平面温阑对探测器的影响模型, 阐述了普通温阑改变 f 数的缺陷, 并分析了常用的几种改进方法; 在上述模型的基础上提出球面反射温阑设计方法, 并用于改变探测器 f 数, 理论分析可知得到的变 f 数系统引入杂散辐射和噪声都远小于普通平面温阑; 根据现有的一个 $f/2$ 制冷型红外探测器参数, 分别设计平面温阑和球面反射温阑改变探测器 f 数, 并将加工完成的平面温阑和球面反射温阑分别安装于冷阑前, 进行辐射定标实验测量温阑引入的杂散辐射, 分析了两种温阑对探测器噪声等效温差(NETD)和动态范围的影响. 分析和实验结果表明本文的设计能够有效改变探测器 f 数, 引入的杂散辐射远小于普通平面温阑, 且受环境温度变化的影响小, 能够很好地保持探测

器性能. 本文提出的探测器变 f 数方法比可变冷光阑法的成本低、灵活性强, 并且球面反射温阑对探测器性能的影响远小于平面温阑, 因此在红外变焦变视场系统的设计、红外系统装调和杂散光抑制等方面具有一定的理论和应用价值.

2 红外探测器冷阑结构及变 f 数原理

2.1 红外探测器冷阑结构

制冷型红外焦平面阵列探测器结构如图1所示, 以斯特林制冷为例. 制冷机通过冷指(cold finger)接触探测器(detector)进行制冷. 制冷后的探测器温度远低于外部环境, 为保持探测器温度稳定, 通常将其置于杜瓦瓶内. 杜瓦瓶起保温作用, 腔内温度与探测器表面制冷温度接近, 腔外温度与外部环境近似相等^[13]. 入射红外光线(红外辐射)可以透过杜瓦瓶窗口到达探测器, 该窗口可作为光阑. 杜瓦瓶内壁有多个挡光环(van), 可阻挡入射光线经杜瓦瓶内一次散射后直接到达探测器的路径, 从而抑制外部杂散光^[14]. 冷阑外部有两个玻璃窗口, 材料分别为锗和硅, 镀红外增透膜.

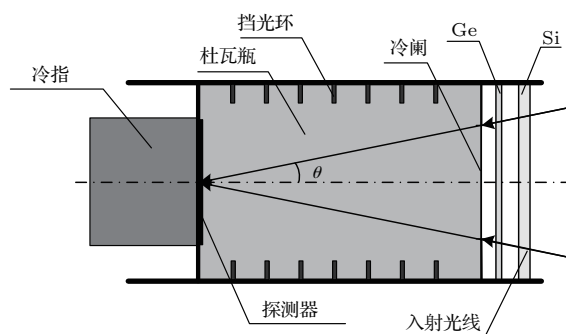


图1 制冷型红外探测器冷阑位置示意图

Fig. 1. Position of cold shield in a cooled infrared detector.

如图1所示, 冷阑限制了入射光的孔径角 θ , 进而决定探测器 f 数. 在红外成像领域, 通常将制冷型红外探测器的 f 数定义为

$$f_{\text{detector}} = \frac{S_{\text{cs}}}{D_{\text{cs}}}, \quad (1)$$

其中 S_{cs} 为冷阑到红外探测器表面的距离, D_{cs} 为冷阑通光口径(直径). f 数与入射光孔径角 θ 的关系为

$$f_{\text{detector}} = \frac{1}{2 \tan \theta}. \quad (2)$$

由此可见, 制冷型红外探测器的 f 数由杜瓦瓶结构和冷阑直接决定. 在进行制冷型红外成像系统光学设计时, 通常认为探测器 f 数不变, 要求光学系统具有 100% 的冷阑效率 (也称为 f 数匹配), 即光学系统的 f 数与探测器 f 数相等. 现有的制冷型红外探测器产品的 f 数一般为 2 或 4, 对于焦距较长系统而言, f 数过小意味着通光孔径较大, 会导致系统的体积和重量也较大. 对多档或连续变焦的红外系统而言, 焦距变化后必须通过更改通光孔径才能保证 f 数的恒定, 这就使得只有在长焦时能够充分利用光学系统通光孔径, 短焦时通光孔径较小, 导致红外成像系统探测灵敏度的下降. 另外, f 数决定着光学系统的视场, f 数可变的红外光学系统可以实现大视场、小视场的切换, 利于军事目标的跟踪和安防.

2.2 普通平面温阑改变探测器 f 数

对制冷型红外探测器而言, 目前主要有两种方式改变 f 数: 一是改变杜瓦瓶或冷阑结构; 二是在探测器前加光阑限制通光孔径角 θ . 根据 (1) 式, 探测器 f 数由冷阑通光孔径和冷阑到探测器的距离决定. 因此改变制冷型红外探测器 f 数最直接的方式是将现有探测器的杜瓦瓶替换为更长的或者冷阑出口更小的杜瓦瓶. 这种方式耗费时间长、成本高, 无法实现多 f 数, 不适用于变焦红外系统. 第二种方式是在探测器前合适位置加温阑限制通光孔径角, 可以增大红外探测器 f 数. 温阑安装于冷阑窗口前, 如图 2 所示, 温阑到探测器的距离 S_{ws} 是考虑图 1 中的 Si 和 Ge 窗口折射率后的光程, D_{det} 为探测器对角线长度.

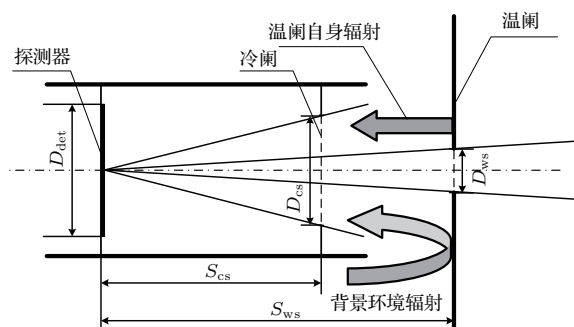


图2 温阑改变探测器 f 数原理

Fig. 2. Principle of changing f number of a detector by using a warm shield.

红外光学系统中的光阑 (温阑) 通常为环形薄片, 如图 2 所示. 温阑中心孔通光, 孔径为 D_{ws} , 本

文将这类温阑统称为普通平面温阑. 加入图 2 所示的温阑后, 探测器的 f 数由 S_{cs}/D_{cs} 变为

$$f_{\text{detector}}^{(1)} = \frac{S_{ws}}{D_{ws}}, \quad (3)$$

其中 S_{ws} 为温阑到红外探测器表面的距离, D_{ws} 为温阑通光口径. 由 (3) 式可见, 调节温阑与探测器的距离或者更换不同口径的温阑即可改变探测器的 f 数.

如图 2 所示, 用温阑改变探测器 f 数时, 由于其中心孔对应的入射光线孔径角小于冷阑对应的孔径角, 因此探测器能够接收到来自通光孔附近温阑面的辐射能. 温阑引入的杂散辐射包括两部分: 一是温阑自身辐射; 二是温阑对外部环境辐射的反射. 温阑自身辐射可以经冷阑窗口直接到达探测器. 温阑对周围的环境辐射有一定的反射, 该部分能量同样会直接到达探测器.

为计算温阑引入的杂散辐射和 NETD, 建立如图 3 所示的模型. 由温阑、冷阑与探测器探测元之间的位置关系和表面辐射特性计算温阑对探测器的影响. 若不对温阑制冷, 则可认为其表面温度 T_{ws} 与环境温度 T_{amb} 相等. 普通平面温阑面向探测器的一侧为平面环形, 外径 D_0 , 内孔直径 D_{ws} . 采用普通平面温阑改变探测器 f 数时, 温阑对探测器的直接辐射会被冷阑阻挡一部分. 去除冷阑遮挡部分, 计算温阑对探测器的辐射能, 即可得到温阑自身辐射对探测器引入杂散辐射. A_1 为探测器观测到的温阑区域, 探测器阵列 A_0 与温阑面 A_1 距离为 S_{ws} , 与冷阑面 A_2 距离为 S_{cs} . 设红外探测器单个探测元面积 $dA_0 = a^2$.

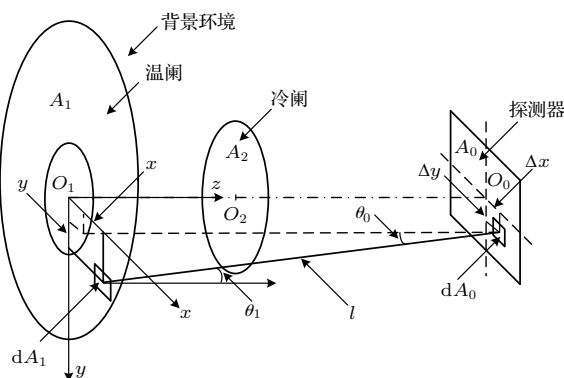


图3 制冷型红外焦平面探测器与温阑位置

Fig. 3. Location of the warm shield and the cooled infrared focal plane array.

以温阑中心 O_1 为原点建立直角坐标系 O_1xyz , 那么冷阑中心 O_2 坐标为 $(0, 0, S_{ws} - S_{cs})$, 探测元

dA_0 坐标为 $(\Delta x, \Delta y, S_{ws})$. 根据相似三角形原理, 得到探测元观测到的温阑面 A_1 外圆圆心坐标为 $(\Delta x, \Delta y, 0)$, 直径 $D_{ws} = S_{ws}/S_{cs} \cdot D_{cs}$. 温阑面上位于 $(x, y, 0)$ 的微元面 dA_1 与探测元 dA_0 之间的距离为 l , 由几何关系

$$l = \sqrt{S_{ws}^2 + (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2}. \quad (4)$$

θ_0 和 θ_1 分别为 l 与两平面法线的夹角, $\cos \theta_0 = \cos \theta_1 = S_{ws}/l$. 问题转换为有限面对微元面的辐射换热, A_1 对 dA_0 的角系数为 $dF_{A_1-dA_0}$, 则根据定义有

$$dF_{A_1-dA_0} = \frac{\Phi_{A_1-dA_0}(\Delta x, \Delta y)}{\Phi_{A_1}}. \quad (5)$$

(5) 式中 Φ_{A_1} 为温阑向半球空间发射的总辐射通量, $\Phi_{A_1-dA_0}$ 为 dA_0 接收到的辐射通量. Φ_{A_1} 为温阑自身辐射能 $\Phi_{A_1,e}$ 与对环境辐射反射 $\Phi_{A_1,r}$ 的总和, 即

$$\begin{aligned} \Phi_{A_1} &= \Phi_{A_1,e} + \Phi_{A_1,r} \\ &= \pi L_{ws} \cdot A_1 + \pi(1 - \varepsilon) \cdot L_{amb} \cdot A_1. \end{aligned} \quad (6)$$

式中 L_{ws} 为温阑的辐射亮度:

$$L_{ws} = \varepsilon \cdot L(T_{ws}) = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_{ws}) d\lambda, \quad (7)$$

其中, T_{ws} 为温阑温度, $L(T_{ws})$ 是温度为 T_{ws} 的理想黑体辐射亮度; $\lambda_1 - \lambda_2$ 为探测器工作波段, 单位为 μm ; $W(\lambda, T_{ws})$ 为由普朗克公式得到的光谱辐射力, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; 温阑表面的发射率为 ε . 同样方法可计算环境辐射亮度.

设 $F_{dA_0-A_1}$ 为 dA_0 对 A_1 的角系数, 由角系数的相对性得到 [15,16]

$$\begin{aligned} dF_{A_0-dA_0} &= \frac{dA_0}{A_1} \cdot F_{dA_0-A_1} \\ &= \frac{dA_0}{A_1} \cdot \int_{A_1} \frac{\cos \theta_0 \cdot \cos \theta_1}{\pi l^2} dA_1 \\ &= \frac{dA_0}{A_1} \cdot \iint_{A_1} \frac{S_{ws}^2}{\pi \cdot [S_{ws}^2 + (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2]^2} \\ &\quad \times dx dy, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 积分区域 A_1 为探测器能够观测到的温阑面范围, 可表示为

$$\begin{cases} x^2 + y^2 \geq \frac{D_{ws}^2}{4}, \\ \left(x + \frac{S_{ws} - S_{cs}}{S_{cs}} \Delta x \right)^2 \\ + \left(y + \frac{S_{ws} - S_{cs}}{S_{cs}} \Delta y \right)^2 \leq \left(\frac{S_{ws}}{S_{cs}} \right)^2 \frac{D_{cs}^2}{4}. \end{cases} \quad (9)$$

联立 (5) — (9) 式, 得到 dA_0 接收到来自温阑面 A_1 的辐射通量为

$$\begin{aligned} \Phi_{A_1-dA_0}(\Delta x, \Delta y) &= \Phi_{A_1} \cdot dF_{A_1-dA_0} \\ &= [\varepsilon \cdot L(T_{ws}) + (1 - \varepsilon) \cdot L(T_{amb})] \cdot a^2 \\ &\quad \times \iint_{A_1} \frac{S_{ws}^2}{[S_{ws}^2 + (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2]^2} dx dy. \end{aligned} \quad (10)$$

为直观地表述温阑对探测器的影响, 将上述杂散辐射量转换为等效温度. 等效温度 T 对应着探测器冷阑出口直接面对温度为 T 的黑体时受到的辐射能量, 通过对探测器直接进行辐射定标可以得到不同辐射能对应的等效温度. 由 (10) 式计算温阑引入的杂散辐射通量, 再由辐射定标得到探测器对辐射通量的响应率, 从而可计算温阑引入杂散辐射的等效温度. 以某制冷型红外探测器为例, f 数为 2, 探测器尺寸 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 冷阑口径 10 mm, 冷阑距离探测器 20 mm. 温阑口径 10 mm, 距离探测器 40 mm, 则探测器的 f 数由 2 变为 4. 通过 (10) 式计算 20°C 黑体覆盖杜瓦瓶窗口时, 探测器中心像元接收到的辐射通量为 $4.05 \times 10^{-11} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$. 而采用温阑变 f 数后, 探测器中心像元接收的温阑辐射通量为 $2.99 \times 10^{-11} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 约为上述情况的 74%, 温阑引入的杂散辐射等效温度为 12.2°C , 可见温阑引入了大量的杂散辐射. 当环境温度变化 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 时, 引入的 NETD 为 0.36°C , 即为 360 mK , 可见温阑引入了较大的 NETD, 远大于制冷型红外探测器自身的 25 mK . 理论分析和实验结果表明, 采用普通平面温阑进行探测器变 f 数设计时, 引入的大量杂散辐射会大大降低红外系统的动态范围并引入大量的噪声. 因此要想得到较为理想的红外探测器变 f 数方案, 需要对普通温阑进行改造, 大幅降低其引入的杂散辐射.

对温阑及其附近环境降温是降低其杂散辐射较为直接的手段. 假设环境温度为 20°C , 对应的中波 ($3.7 - 4.8 \mu\text{m}$) 辐射亮度为 $0.97 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$. 那么温阑降温到 0°C 时, 对应的辐射亮度为 $0.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 此时温阑杂散辐射降低到原来的 44%. 经计算, 要想将杂散辐射降低到 10% 左右, 需将温阑和其附近环境降低到 -30°C 左右. 由此可见, 这种降温方式的杂散辐射抑制效果并不明显, 而且温度越低制冷成本越高, 温度稳定性也就

越难以保证,可能会引入较大的NETD.另一种方式是只对温阑自身降温,可在温阑背离探测器的面上贴制冷片,该方法可以降低温阑的自身辐射,但是温阑对外部热背景的反射会引入大量杂散辐射,而且温阑与环境之间不断换热会导致温度的非均匀性,引起较大的噪声.因此,采用普通平面温阑改变探测器 f 数时会引入大量杂散辐射,并且通过降温的方式抑制杂散辐射效果不明显、成本高、非均匀性噪声大.本文研究通过改变温阑结构和发射特性的方法,以得到一种杂散辐射小、受环境温度变化影响小、低成本、易实现的探测器变 f 数方法.

3 基于球面反射温阑的探测器变 f 数设计

采用温阑实现制冷型红外焦平面阵列探测器变 f 数设计,要求在改变探测器 f 数的同时尽可能保持其性能,关键在于大幅减小温阑引入的杂散辐射(包括温阑的自身辐射和对环境辐射的反射).本文设计一种球面反射温阑,旨在抑制这两部分能量,将其用于制冷型探测器的变 f 数设计.

3.1 球面反射温阑设计原理

温阑引入的杂散辐射包括自身辐射和对环境的反射两部分,需要同时抑制.由(7)式可知,减小温阑自身辐射有两种方式:一是降低温阑表面温度 T_{ws} ,这种方式的效果不明显、成本高,并且可能引入较大的噪声;二是降低温阑表面发射率 ϵ ,是一种成本较低的方式,可以通过合理选择温阑材质、对温阑表面抛光或镀高反膜等方法实现.然而提高温阑表面发射率必然导致(6)式中温阑对环境辐射反射量的增大.由2.2节的分析可知,温阑与环境温度相等时,只减小温阑表面发射率并不会改变温阑引入的总杂散辐射量.如果能够在降低发射率的同时使得环境辐射能无法通过温阑反射到达探测器,就可以实现降低温阑引入的杂散辐射的目的.这就意味着一方面要降低温阑面向探测器一侧的表面发射率,使得温阑自身辐射极小;另一方面,要对温阑表面结构进行特殊设计,使得外部辐射能无法通过温阑面的反射到达探测器.

温阑对环境辐射的反射无法到达探测器,也就是说探测器无法通过温阑反射看到外部的热背

景,而只能看到冷阑内的低温环境(77 K).77 K温度的黑体对应中波(3.7—4.8 μm)红外辐射亮度为 $7.73 \times 10^{-14} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,而20 $^{\circ}\text{C}$ 黑体的辐射亮度 $0.97 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,因此冷阑窗口以内的辐射能可忽略.如图4所示,设计一种球面反射温阑,要求表面光洁度好,近似为镜面反射,通过合理设计其曲率半径、反射面球心位置和温阑外形尺寸,使得探测器无法由温阑反射接收到冷阑窗口以外的环境辐射.

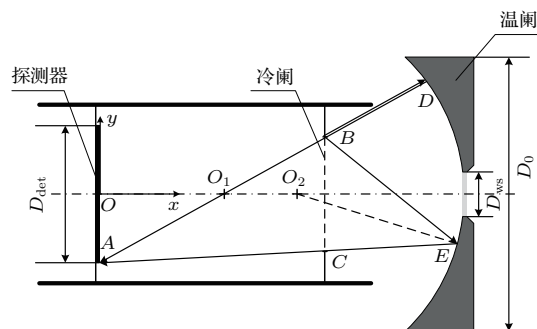


图4 球面反射温阑设计原理

Fig. 4. Principle of spherical reflecting warm shield design.

球面反射温阑内表面经抛光、镀反射膜后,反射率一般大于90%,那么表面发射率小于0.1,从而使得温阑自身辐射引入的杂散辐射降低到普通平面温阑的10%以下.提高表面反射率可以进一步降低自身辐射的影响,例如将反射率提高到99%以上,温阑自身辐射的影响会降低到1%以下,对探测器性能的影响更小.在工程应用中通常根据系统性能需求、工艺难度和表面膜系稳定性综合考虑,多数情况下并不一味追求过高的表面反射率.球面反射温阑的外形结构主要由两个参数决定,即反射球面曲率半径 R 和外部轮廓直径 D_0 ,如图4所示.温阑通光孔在球冠中心处,距离探测器 S_{ws} ,由通光孔中心位置来定义温阑安装位置.以探测器中心位置为原点建立直角坐标系 oxy , x 轴方向由探测器指向温阑.那么温阑反射面球心位置 $(x_c, 0)$ 和曲率半径 R 的关系可以表示为

$$R = \sqrt{(S_{ws} - x_c)^2 + D_{ws}^2/4}. \quad (11)$$

球面反射温阑在 oxy 的截面为中心开口的圆弧面,对应圆的方程可以表示为

$$[x - (S_{ws} - \sqrt{R^2 - D_{ws}^2/4})]^2 + y^2 = R^2. \quad (12)$$

球面半径 R 在一定范围内才能保证外部辐射无法通过温阑反射到达探测器,选取临界光线进行

分析以确定该范围. 根据光路可逆原理, 外部热背景能量到达探测器, 就意味着探测器可以“看到”冷阑以外的环境背景. 采用逆向追迹方法, 假设光线从探测器的各像元出发, 透过冷阑窗口后, 经球面温阑反射到达冷阑以外的环境背景. 探测器为矩形, 只要保证四个顶点发出的光线无法到达热环境背景即可. 光学系统旋转对称、探测器具有轴对称性, 因此只需要对探测器其中一个顶点 A 进行分析. 图 4 中 D_{det} 为探测器对角线长度. 由球面反射原理以及各部分几何关系分析可知, AB 方向光线经 D 反射到达边缘点 B 对应反射球面的最大曲率半径 R_{max} , AC 方向光线经 E 反射到达边缘点 B 的光路则对应最小曲率半径 R_{min} .

3.1.1 温阑反射球面最大和最小曲率半径

外部热背景红外辐射光线沿 $BDBA$ 路径到达探测器, 由此路径确定温阑反射球面的最大曲率半径 R_{max} . A 点坐标为 $(0, -D_{\text{det}}/2)$, B 点坐标为 $(S_{\text{cs}}, D_{\text{cs}}/2)$, 那么直线 AB 的方程为

$$y = \frac{D_{\text{cs}} + D_{\text{det}}}{2S_{\text{cs}}} \cdot x - \frac{D_{\text{det}}}{2}. \quad (13)$$

为方便后续表述, 将 (13) 式简写为 $y = k_1 \cdot x + b_1$. 由球面反射原理, 线段 AB 与 ox 轴的交点即为球心, 那么球心 $O_1(x_1, 0)$ 坐标为 $(S_{\text{cs}} \cdot D_{\text{det}} / (D_{\text{cs}} - D_{\text{det}}), 0)$, 代入 (12) 式得到温阑反射球面的最大曲率半径为

$$R_{\text{max}} = \sqrt{\left(S_{\text{ws}} - \frac{D_{\text{det}}}{D_{\text{cs}} + D_{\text{det}}} \cdot S_{\text{cs}}\right)^2 + D_{\text{ws}}^2/4}. \quad (14)$$

外部热背景红外辐射光线沿 $BECA$ 路径到达探测器, 由此路径确定温阑反射球面的最小曲率半径 R_{min} . C 点坐标为 $(S_{\text{cs}}, -D_{\text{cs}}/2)$, 那么 AC 方程为

$$y = \frac{-D_{\text{cs}} + D_{\text{det}}}{2S_{\text{cs}}} \cdot x - \frac{D_{\text{det}}}{2}. \quad (15)$$

为方便后续表述, (15) 式简写为 $y = k_2 \cdot x + b_2$. AC 与反射面的交点为 E , 联立 (12) 和 (15) 式即可得到 E 点坐标 $(x_E(R_{\text{min}}), y_E(R_{\text{min}}))$, 坐标与反射面的曲率半径有关. 那么直线 BE 的方程为

$$y = \frac{y_E(R_{\text{min}}) - D_{\text{cs}}/2}{x_E(R_{\text{min}}) - S_{\text{cs}}} \cdot (x - S_{\text{cs}}) + D_{\text{cs}}/2. \quad (16)$$

为方便后续表述, (16) 式简写为 $y = k_3 \cdot x + b_3$. 由对称性原理, 球心在 ox 轴上. 设球心坐标 $O_2(x_c, 0)$, 那么由球面的反射原理可知 O_2E 是 $\angle AEB$ 的平分线. 由角平分线的性质可知, 点 O_2 到直线 AC 和直线 BE 的距离相等, 即

$$\frac{|k_2 \cdot x_c + b_2|}{\sqrt{k_2^2 + 1}} = \frac{|k_3 \cdot x_c + b_3|}{\sqrt{k_3^2 + 1}}. \quad (17)$$

联立 (15)—(17) 式求解得到 E 点坐标 $(x_E(R_{\text{min}}), y_E(R_{\text{min}}))$, 然后代入 (11) 式, 即可解出 R_{min} . 在针对实际探测器进行温阑设计时, 可以根据现有探测器参数和想要实现的 f 数变化范围, 结合 (15)—(17) 式采用数值解法获得 R_{min} . 那么球面温阑的曲率半径 R 取值范围为 $R \in [R_{\text{min}}, R_{\text{max}}]$. 温阑反射面曲率半径在上述取值范围内, 可以保证探测器无法通过球面温阑反射接收到外部热背景能量.

3.1.2 球面反射温阑外部轮廓直径

制冷型红外探测器每个探测元的视场由其位置和冷阑口径决定, 为防止外部热背景辐射直接到达探测器, 首先要求温阑的反射球面覆盖所有探测元的视场. 由图 4 中的几何关系可知, 温阑的反射面必须包含 $D(x_D, y_D)$ 点, 即在 oy 轴方向的半径需要大于或等于 y_D . 联立 (12) 式和 (13) 式解方程组即可得到 y_D , 进而得到温阑外边缘的最小直径 $D_{0,\text{min}} = 2y_D$. 而反射球面的半径为 R , 直径 $2R$, 温阑外边缘最大直径小于反射球面直径, 因此得到温阑外边缘直径范围为 $D_0 \in [2y_D, 2R]$.

根据现有制冷型探测器尺寸、冷阑参数以及需要实现的 f 数, 即可确定温阑反射面的曲率半径可选范围, 再根据所选择的曲率半径确定温阑外形尺寸即可完成本文球面反射温阑的设计. 按照以上方法设计的温阑可以有效避免外部杂散辐射通过温阑面的反射到达探测器. 由于温阑反射面的发射率较低, 球面反射温阑自身辐射量相对于普通温阑而言大大减小. 由 2.2 节温阑引入杂散辐射的计算方法可知, 温阑面引入的杂散辐射与温阑到探测器的距离无关. 根据这一原理, 采用微积分方法将温阑面划分为环形微元区域计算温阑自身辐射, 得到温阑自身引起的杂散辐射为

$$\Phi_e(\Delta x, \Delta y) = \varepsilon \cdot L(T_{\text{ws}}) \cdot a^2 \times \iint_{A_1} \frac{S_{\text{ws}}^2}{[S_{\text{ws}}^2 + (x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2]^2} dx dy. \quad (18)$$

因此,若球面反射温阑表面反射率90%、发射率约为10%,则能够将温阑引入的杂散辐射降低到普通平面温阑的10%,其效果相当于将温阑降低到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.若将反射率提高到99%以下,温阑引入的杂散辐射降低到1%,效果更为明显.球面反射温阑对制冷型红外探测器引入的杂散辐射只与温阑表面发射率有关,表面发射率越低温阑的效果越理想.另外,对于合理设计的球面反射温阑,外部热背景辐射无法直接到达探测器、也无法通过温阑面的反射到达探测器,因此环境温度对温阑的影响仅限于温阑自身辐射的变化.对于表面发射率较低的球面反射温阑,自身辐射小,因而这类温阑受环境温度影响小,也能够有效地抑制环境变化引起的噪声量.

与普通平面温阑相比,采用本文方法设计的球面反射温阑引入的杂散辐射大幅减小,因此不会导致红外探测器动态范围的大幅降低以及图像对比度的严重劣化.当环境温度变化或温阑表面温度不均匀时,引入的非均匀性噪声较小,有利于保持探测器输出图像的均匀性和成像系统整体的NETD.该方法实现简单、效果明显、不需要降温处理,是一种较为理想的探测器变 f 数方案.

3.2 制冷型红外探测器变 f 数设计

为验证本文球面反射温阑设计方法及其在制冷型红外探测器变 f 数设计中的应用效果,针对现有某 $f\#2$ 制冷型红外探测器进行变 f 数设计.探测器参数如表1所列.

表1 制冷型红外探测器参数
Table 1. Parameters of a cooled infrared detector.

参数	取值
探测器 f 数	2
响应波段范围/ μm	3.7—4.8
动态范围/bit	14
探测器像元数	640×512
像元大小/ μm	15×15
探测器尺寸/mm	9.60×7.68
冷阑直径/mm	10
冷阑到探测器距离/mm	20
探测器温度/K	77
NETD/mK	$25@20\text{ }^{\circ}\text{C}$

要求设计球面反射温阑,使探测器的 f 数变为4.考虑到实际光学系统的后工作距(即光学系

统镜组到探测器的最小距离)有限,我们取温阑中心孔口径为8 mm,与探测器焦平面阵列的距离(光程)为32 mm.考虑图1中的Ge和Si窗口,折射率分别为4.0216和3.4244,厚度0.3 mm和1 mm,可计算温阑与探测器的实际距离应该为28.67 mm.实际安装时,可以探测器窗口作为基准面,安装球面反射温阑,使得其通光孔距离探测器窗口约为8.67 mm,调节温阑位置实现所需的 f 数.

为减小温阑自身辐射,可对其表面抛光并镀高反射率的铝膜或金膜,反射率可达到90%以上,发射率小于0.1.根据本文的球面反射温阑设计方法,为使外部背景辐射无法通过温阑反射直接到达探测器,可将探测器参数代入(13)—(17)式,计算得到温阑反射面曲率半径范围为 $R \in [14.45\text{ mm}, 21.35\text{ mm}]$.也就是说当曲率半径在上述范围内时才能满足球面反射温阑的设计要求.为留出加工、装调余量,使探测器 f 数有一定的可用变化范围,不妨取曲率半径为18 mm.进一步可由(12)和(13)式得到温阑外边缘尺寸限制范围为 $D_0 \in [20.36\text{ mm}, 36.00\text{ mm}]$,因此可以选取 $D_0 = 28\text{ mm}$.最终设计的球面反射温阑参数为:中心孔直径8 mm,反射球面曲率半径18 mm,温阑外边缘直径28 mm.同样的计算方法可知,该曲率半径 R 、中心孔径 D_{ws} 能满足 f 数为3.6—4.5的变 f 数设计.另外,当满足 f 数为3.6—4.5时,计算得到 D_0 取值范围为23.48—36 mm,因此设计的28 mm外径也能满足要求.综上,设计的球面反射温阑可以满足 f 数3.6—4.5内的变 f 数设计.

4 实 验

以制冷型红外探测器的参数为输入量,根据本文提出的球面反射温阑设计原理,设计并加工了温阑.为对比本文设计的球面反射温阑与普通平面温阑改变探测器 f 数的效果,加工了普通平面温阑,具体参数如表2所列.

考虑到成本和工程实用性,球面反射温阑表面镀较为稳定的铝反射膜,检测后得到其反射率为0.90,发射率约为0.10.平面温阑表面进行染黑处理,其表面发射率约为0.95.加工后的两种温阑如图5所示.

为定量测量两种温阑对探测器引入的杂散辐射,设计了可控环境温度的辐射定标实验.将整个

定标实验设备置于温度可调的高低温试验箱内, 控温范围为 $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控温精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 实验装置如图6所示. 通过辐射定标建立辐射能与探测器响应灰度之间的关系, 测量温阑引入的探测器灰度变化, 代入辐射定标方程后得到温阑引入的杂散辐射. 温阑对某个探测元的杂散辐射即为到达探测元的辐射通量, 也可直接由温阑导致的探测元输出灰度表示杂散辐射量.

表2 温阑参数
Table 2. Parameters of warm shields.

类型	参数	取值
球面反射温阑	中心孔直径/mm	8
	外径/mm	28
	反射面曲率半径/mm	18
	可实现 f 数	3.6—4.5
	表面反射率	0.9
普通平面温阑	中心孔直径/mm	8
	外径/mm	28
	表面发射率	≈ 0.95

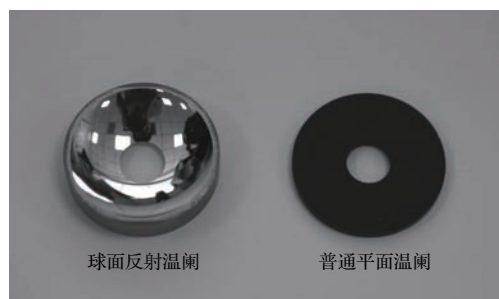


图5 球面反射温阑与普通平面温阑

Fig. 5. The spherical reflecting warm shield and an ordinary planar warm shield.

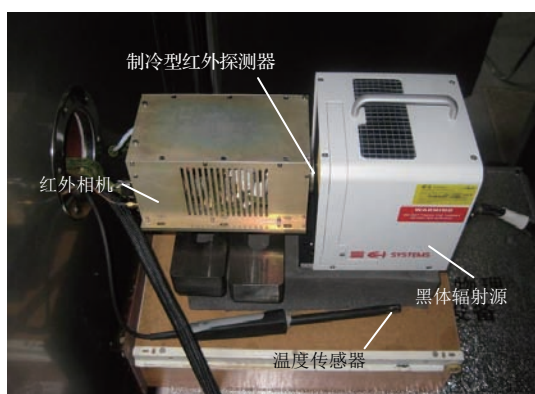


图6 高低温试验箱内的辐射定标装置

Fig. 6. Radiometric calibration in a temperature test chamber.

在高低温试验箱内进行辐射定标实验, 定标辐射源为CI公司的SR-800R-4A高精度面源黑体, 辐

射面尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 工作温度范围为 $0\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度精度 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$, 发射率 0.97 . 通过调节试验箱内的温度来改变红外相机所处的环境温度, 实验时箱内温度分别设置为 $10, 20, 30, 40$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测量不同环境温度下两种温阑引入的杂散辐射. 两种温阑引入杂散辐射的测量过程如下:

1) 将黑体定标源和制冷型红外探测器置于可控温的高低温试验箱内 (控温精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 设置箱内温度为 $T_{\text{amb},0}$;

2) 黑体辐射面充满探测器冷阑视场角, 分别设置定标黑体温度为 $T_1, T_2, \dots, T_n$, 采集红外图像, 进行辐射定标, 得到探测器的响应灰度值与探测元接收到的辐射通量的定量关系;

3) 分别将两种温阑安装于探测器窗口前的合适位置, 重复步骤2进行辐射定标, 该温阑位置决定加入温阑以后的探测器 f 数, 要求温阑的安装位置确定的探测器 f 数在 $3.6\sim 4.5$ 范围内, 以保证设计的球面温阑达到预期效果;

4) 由带温阑和不带温阑的定标结果可直接得到环境温度 $T_{\text{amb},0}$ 下两种温阑对探测器引入的杂散辐射;

5) 改变高低温试验箱内的环境温度为 T_{amb} , 重复以上过程, 得到不同环境温度下不同温阑引入的杂散辐射, 并计算温度变化对温阑及探测器性能的影响.

高低温试验箱内温度分别设置为 $10, 20, 30, 40$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在各温度下分别进行辐射定标实验. 带温阑定标时选取的定标黑体温度为 $30, 40$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不带温阑定标时, 由于探测器 f 数较大、响应率高, 为防止像元灰度饱和, 选择相对较低的温度 $20, 30$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行辐射定标. 该制冷型红外探测器响应为线性, 定标方程为

$$DN = G \cdot L(T_{\text{bb}}) + B, \quad (19)$$

其中 DN 为探测器输出灰度值, T_{bb} 为黑体温度, $L(T_{\text{bb}})$ 为辐射亮度, G 为探测器对辐射亮度的响应率, B 为偏置, 即红外探测器的本底灰度.

4.1 两种温阑引入杂散辐射对比

定标实验包括三种: 不带温阑的定标、带球面反射温阑的定标和带普通平面温阑的定标. 根据辐射定标原理^[17], 直接对没安装温阑的探测器进行定标, 获得增益和偏置. 然后在探测器前的合适

位置安装温阑后进行辐射定标, 同样得到增益和偏置. 由(10)式积分结果分析可知, 探测器中心像元带温阑与不带温阑定标增益比约为两者 f 数平方比的倒数. 当环境温度稳定时进行辐射定标, 温阑引入的杂散辐射是固定量, 直接叠加在偏置 B 上, 与定标源无关. 因此加温阑和不加温阑辐射定标得到的偏置之差即为温阑引入的杂散辐射, 单位为灰度值(digital level, DL), 也可根据探测器的响应方程(19)将杂散辐射转化为辐射亮度、辐射通量表述. 根据定标实验结果得到温阑位置的实际 f 数约为4.2, 在3.6—4.5以内, 说明本文设计的球面反射温阑在该安装位置是有效的. 对不同环境温度下的辐射定标结果处理后得到两种温阑引入的杂散辐射随环境温度的变化如图7所示.

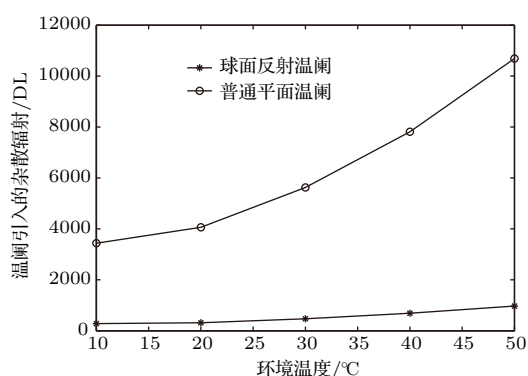


图7 不同环境温度下两种温阑引入的杂散辐射
Fig. 7. Stray radiation introduces by two warm shields at different ambient temperatures.

由图7可知, 球面反射温阑引入的杂散辐射量远小于普通平面温阑, 并且当环境温度升高时球面反射温阑引入的杂散辐射上升不明显. 根据图7中不同环境温度下的测量结果统计, 得到球面反射温阑引入的杂散辐射为普通平面温阑的9.5%. 球面反射温阑的发射率约为10%, 那么由理论分析可知其引入的杂散辐射约为普通平面温阑的10%. 考虑到高低温试验箱内的控温误差, 可认为本文实验测得的杂散辐射与理论计算值较为符合. 在环境温度为20 °C时, 本文的球面反射温阑(发射率约为0.1)引入的杂散辐射相当于普通温阑降低到-31 °C左右. 综合看来, 实验结果与设计理论符合, 即本文设计的球面反射温阑引入的杂散辐射主要为温阑自身辐射, 外界热背景辐射无法通过温阑的反射到达探测器, 说明温阑反射球面结构的设计合理. 由图7可见当环境温度由10 °C上升到50 °C时, 普

通平面温阑引入的杂散辐射增大7246 DL, 而球面反射温阑引入的杂散辐射仅上升694 DL, 说明本文球面反射温阑受环境影响程度仅有平面环形温阑的1/10左右. 因此本文设计的球面反射温阑对环境的适应性更好, 即环境温度变化对温阑引入的杂散辐射量的影响较小.

4.2 两种温阑对探测器性能的影响

在探测器前增加温阑改变 f 数的同时也会导致探测器NETD的增大. NETD测量步骤为: 1) 计算温阑温度变化引入的探测器灰度噪声标准差; 2) 代入定标方程(19)计算该噪声量对应的辐射能; 3) 计算该辐射能对应的以20 °C为基准的黑体温差, 即可得到20 °C下的NETD. 对于普通平面温阑而言, 当环境温度为20 °C时, 如果环境温度变化导致温阑表面温度浮动为 ± 0.5 °C, 由(10)和(19)式得到引入的NETD约为360 mK. 而在同一工况下, 本文设计的球面反射温阑引入的NETD仅为34 mK. 若球面反射温阑表面发射率进一步降低到0.01, 理论上引入的NETD仅为3.6 mK, 小于探测器的NETD (25 mK), 对探测器NETD的影响极小. 可见采用合理设计的球面反射温阑进行变 f 数设计, 环境温度变化对探测器NETD性能的影响大幅降低, 有利于保持探测器的性能. 综上, 球面反射温阑大大减小了温阑引起的杂散辐射量, 对环境变化的适应性更好, 有利于温度不稳定工况下的噪声抑制.

由表1可知, 该制冷型红外探测器的动态范围为14 bit, 即理想的饱和灰度为16383 DL. 定标方程(19)中, B 为探测器本底灰度, 根据实验结果, 探测器灰度值大于13000 DL时往往会呈现较大的非线性. 因此用于成像的探测器有效灰度范围为13000 - B , 这就是实际的探测器成像动态范围. 温阑杂散辐射引起探测器灰度响应会叠加到探测器的本底灰度上, 这就导致实际的探测器成像动态范围有所降低. 调节高低温试验箱温度, 不同环境温度下分别在探测器前安装球面反射温阑和平面温阑, 计算探测器的实际成像动态范围, 结果如图8所示.

由不加温阑的探测器辐射定标数据可知, 环境温度为10 °C时, 红外探测器自身的动态范围为11741 DL, 而加入球面温阑和平面温阑时动态范围分别衰减为11483 DL和8504 DL, 下降比例分别

为2.2%和29.3%,可见球面反射温阑对于保持红外探测器动态范围具有明显的优势.如图7所示,环境温度上升后加普通平面温阑的探测器动态范围急剧下降,在50 °C时动态范围下降93.6%,灰度动态范围仅有756 DL.此时探测器的可探测温度范围小,用于观测时极易饱和,不利于对目标和背景成像.

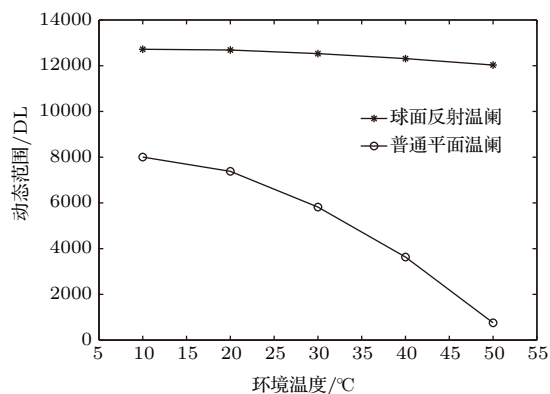


图8 安装不同温阑后红外探测器的动态范围

Fig. 8. Dynamic ranges of an infrared detector with different warm shields.

上述分析和实验结果表明,本文设计的球面反射温阑引入的杂散辐射远小于普通平面温阑,引入的NETD小,对探测器动态范围的衰减小、能够更好地保证红外系统成像性能.球面反射温阑设计时还要考虑红外成像系统及探测器性能要求,光学系统的后工作距对温阑的尺寸有所限制,在设计时需要考虑.如果对探测器性能要求较为严格(一般为制冷型红外探测器的NETD约为25 mK),设计温阑时就需要考虑提高温阑表面的反射率和洁净度,以充分抑制温阑引入的杂散辐射和NETD;对于一般的非制冷型红外探测器而言,NETD可能达到100 mK以上,温阑引入少量杂散辐射及NETD是允许的,可以在温阑反射面镀成本较低的铝膜,对表面反射率、面形精度及洁净度的要求略低.

5 结 论

制冷型红外探测器的变 f 数设计对红外成像系统的杂散辐射抑制、光学设计、加工装调具有重要的实用价值.本文通过建模和实验提出球面反射温阑的设计方法,并将球面反射温阑用于探测器变 f 数设计.在制冷型探测器前加入球面反射温阑和普通平面温阑分别进行辐射定标实验,测量不同环

境温度下不同温阑引入的杂散辐射,比较两者对探测器性能的影响.结果表明本文设计的球面反射温阑引入的杂散辐射只有平面温阑的10%左右,引入的NETD大大降低,且当环境温度升高时仍能保证探测器具有较高的动态范围,因此能够提高系统的环境适应性.球面反射温阑具有引入的杂散辐射小、对环境温度以及变化不敏感等优点,明显优于普通的平面温阑,因此更适用于改变红外探测器 f 数.

基于球面反射温阑的探测器变 f 数方法有利于设计连续变焦系统或两档变焦系统,可在光学系统通光口径不变的情况下改变焦距,有利于保证变焦系统的探测灵敏度.通过改变 f 数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.而且,通过移动温阑位置可以进行一定范围内的连续变 f 数,使得光学系统的 f 数匹配更为简便,能够提高光学系统设计的灵活性,也有利于光学系统的装调.进一步提高球面反射温阑表面的反射率可以得到性能更好的变探测器 f 数效果,例如温阑表面反射率0.99会使得杂散辐射降低到1%,实际使用时要考虑成本和性能要求的平衡.

参考文献

- [1] Vizgaitis J N 2005 *Proc. SPIE* **5783** 875
- [2] Feng C, Chang J, Yang H B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034201 (in Chinese) [冯驰, 常军, 杨海波 2015 物理学报 **64** 034201]
- [3] Qian N C, Zhang C M, Mu T K 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 080703 (in Chinese) [权乃承, 张淳民, 穆廷魁 2016 物理学报 **65** 080703]
- [4] Gat N, Zhang J Y, Li M D, Chen L, Hector G 2007 *Proc. SPIE* **6542** 65420Y
- [5] Yanevich J P, Geiffin E J, Brest M L, Mcallister K L 2014 *US Patent* 8 911 163
- [6] Griffin E J, Hershberg J 2014 *US Patent* 9 488 254
- [7] King D F, Graham J S, Kennedy A M, Radford W A, Wootan J J 2008 *Proc. SPIE* **6940** 69402R
- [8] Vizgaitis J 2008 *Proc. SPIE* **6940** 69400S
- [9] Gat N, Garman J D 2007 *US Patent* 7 157 706
- [10] Pravdivtsev A V, Akram M N 2013 *Infrared Phys. Technol.* **60** 306
- [11] Liu Y, An X Q, Wang Q 2013 *Appl. Opt.* **52** B1
- [12] Xia X L, Shuai Y, Tan H P 2005 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **95** 101
- [13] Howard J W, Abel I R 1982 *Appl. Opt.* **21** 3393
- [14] Akram M N 2010 *Appl. Opt.* **49** 964

- [15] Siegel R, Howell J R 1972 *Thermal Radiation Heat Transfer* (Washington: Hemisphere)
 [16] Fest E C 2013 *Stray Light Analysis and Control* (Bellingham: SPIE Press)
 [17] Chang S T, Sun Z Y, Zhang Y Y, Zhu W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 050702 (in Chinese) [常松涛, 孙志远, 张尧禹, 朱玮 2015 物理学报 **64** 050702]

Design of varying f /number of cooled infrared detectors based on spherical reflecting warm shield

Chang Song-Tao^{1)†} Tian Qi-Jie¹⁾²⁾ He Feng-Yun¹⁾ Yu Yi¹⁾ Li Zhou¹⁾²⁾

1) (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 13 March 2017; revised manuscript received 10 April 2017)

Abstract

As is well known, the f /number of a cooled infrared detector is determined by the aperture and position of the internal cold shield. Moreover, the f /number can be changed by inserting a warm shield in front of the detector. In order to reduce the stray radiation introduced by an ordinary planar warm shield, we propose a method of varying f /number of the infrared detector based on a well-designed spherical reflecting warm shield in this paper. First, an infrared radiation model is established in order to analyze the influence of the stray radiation introduced by the ordinary planar warm shield. Then the design principle of the spherical reflecting warm shield is put forward. By changing the surface shape and emission characteristics, the stray radiation introduced by the ordinary planar warm shield can be obviously reduced. Hence it is beneficial to maintain the performance of the detector effectively while the f /number is changed. To validate the proposed method, a spherical reflecting warm shield and an ordinary planar warm shield are designed to vary the f /number of a cooled infrared detector respectively. To compare the influences of the two warm shields on the cooled infrared detector, radiometric calibration experiments are conducted in a high-low-temperature test chamber. The analyses and experimental results show that the stray radiation of spherical reflecting warm shield is far less than that of the ordinary planar warm shield. Moreover, the noise equivalent temperature difference introduced by the designed spherical reflecting warm shield is lower. Therefore it is indeed better than an ordinary planar warm shield in ensuring the performance of an infrared imaging system.

Keywords: cooled infrared detector, f /number, spherical reflecting warm shield, stray radiation

PACS: 07.57.-c, 42.15.Eq, 07.57.Kp, 07.60.-j

DOI: 10.7498/aps.66.150701

† Corresponding author. E-mail: stchang2010@sina.com