

红外光学系统中的场镜设计

徐尧洲

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——讨论了红外光学系统中场镜的作用。用能量的观点提出了一种用以确定场镜参数和探测器光学面(光敏面)的方法。

一、引言

场镜、浸没透镜和光锥是红外光学系统中经常使用的场光学元件。它们不仅单独被使用,往往还组合起来构成一个光学组件,被用在红外光学系统中。场镜在场光学中的地位是极为重要的。广泛使用场光学是红外光学系统的显著特点之一^[1]。不少作者论述过浸没透镜和光锥,这里不再赘述。本文就场镜的问题作一讨论。

归纳起来说,场镜的作用主要有两个:其一是扩大光学系统的视场,其二是使探测器光学面处的光照强度均匀化^[2]。

1. 扩大视场

红外探测器的光学面尺寸受到探测器材料的限制,大光学面的探测器比较难做,有些材料甚至不可能做。但是从红外整机总体设计出发,又常常需要较大的视场。于是扩大红外光学系统的视场便成为迫切需要解决的问题之一。这种情况下必然要用到场光学手段。

再从浸没透镜和光锥的情况讨论场光学。由于有些光子探测器工作在 77 K 的低温,如要做成浸没元件,必须首先解决低温浸没胶才可考虑。如要做成光锥,则此尺寸又太小,工艺是难以实现的。一般说来,在这样的情况下,只有采用场镜才是解决扩大视场的途径。否则不是受材料的限制,就是受工艺条件的限制而不可实现。

2. 光照均匀化

任何红外扫描成像的光学系统总具有象差,象差以较为复杂的形式影响着成像关系。也就是说,若物面处瞬时视场对应的物面发光强度是均匀的,当辐照到达象面处,在瞬时视场内光的照度分布因象差而不均匀。一般地说,此不均匀是不能忽视的。另一方面,探测器光学面上各点的响应率是不一致的。这样的情况下,对全部扫描视场中的物作扫描成像的过程中,探测器的输出信号强弱的变化与原来物面的光强度变化(扫过不同瞬时视场引起的变化)不能一一对应,有时甚至严重失真。对此使用场镜具有比较大的好处。

本文 1981 年 8 月 4 日收到。

由于在一般的红外望远物镜的光学系统中,物与入瞳的距离较远,从而入瞳处的红外辐照是均匀的。如忽略光阑象差(一般是可忽略的),那末出瞳处的光照也是均匀的。场镜是将光学系统的出瞳成象到探测器的光学面上,由此探测器光学面上的光照强度也被均匀化了。这可使上面所说的失真大为减小,甚至消失。

二、场镜设计的几点考虑

1. 场镜的结构型式

由于红外探测器的光学面往往工作在较低的温度,如 77 K 或 38 K 乃至更低。微型致冷器的致冷量有一定的限制,故场镜的空间限制较大,不可能配上复杂的装架和调节的机械结构。所以,兼顾了装调的可能性,场镜的可设计的型式实际上也受到限制。如果单纯地从消光学象差的要求出发,则场镜设计得复杂些为好。但实际上,经装配得到的光学增益不好。如果兼顾到实际装调和取基准等问题之后,则应使场镜尽可能地简单和可靠。常常可以采用平凸透镜,让凸面对着出瞳,让平面作为基准面。

2. 红外望远系统中的出瞳

一般反射式望远镜(红外)采用卡塞格林或格里高利两种类型为多数。可以推导出,这两种型式的望远镜的出瞳位置为(见图 1):

$$l_p = \frac{mb - f'}{mf' - b} f', \quad (1)$$

这里 l_p 是焦平面之左出瞳到焦平面的距离, f' 是物镜系统的总焦距, b 是物镜的主镜顶点到焦平面的距离, m 是物镜的副镜的横向放大率。

出瞳的横向尺寸大小 D' 由下式给出:

$$D' = \frac{mb - f'}{mf' - b} D, \quad (2)$$

D 在这里是主镜口径的大小,它也是被用作物镜系统的孔径光阑的。

3. 场镜的初步安排

一般地说,如图 1 所示,场镜的位置放在物镜的焦平面附近,视场光阑位于场镜的前表面处。

场镜的作用是将物镜的出瞳 D' 成象到探测器光学面之上,那末设计场镜时将 D' 看作物。

假定场镜采取简单透镜型式,则从单透镜的焦距和结构的估算很快可确定结构参数。

$$\frac{D}{f'} = \frac{D'}{l_p} = \frac{d}{l'}, \quad (3)$$

这里 l' 是探测器光学面到场镜主平面的距离, d 是探测器光学面的直径。(注意这里探测器光学面的形状应与出瞳形状耦合,如出瞳为方形,则探测器光学面也应是方形,现在出瞳作为圆形处理。)

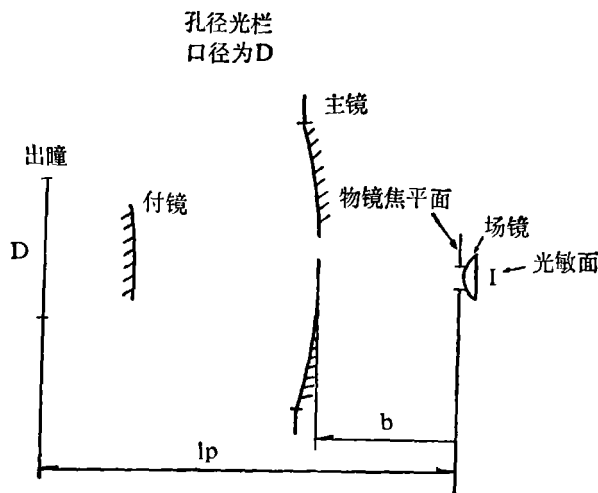


图 1 卡塞格林物镜与场镜的位置

按成象关系有:

$$\frac{1}{f'_{\text{场}}} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l_p}, \quad (4)$$

据此式, 可以从 l' 和 l_p 求得场镜的焦距 $f'_{\text{场}}$ 。

对于一定型式的单透镜, 可以由 $f'_{\text{场}}$ 求其结构参数。

在简单的情况中, 取平凸透镜为场镜的型式, 其凸面的曲率半径由下式给出:

$$r_{\text{场}} = (n-1)f'_{\text{场}}, \quad (5)$$

这里 n 是场镜材料的折射率。此场镜的主面位于后平面之前的距离由下式给出(如图 2 所示):

$$S_{H'} = d'_0/n, \quad (6)$$

这里 d'_0 是平凸场镜顶点的厚度。

至此, 仅初步安排了场镜结构。

因为场镜结构取了简单型式, 基准面简单易找并且可靠, 这极大地有利于装配入杜瓦瓶或微型致冷机之中, 但使其象差较大。

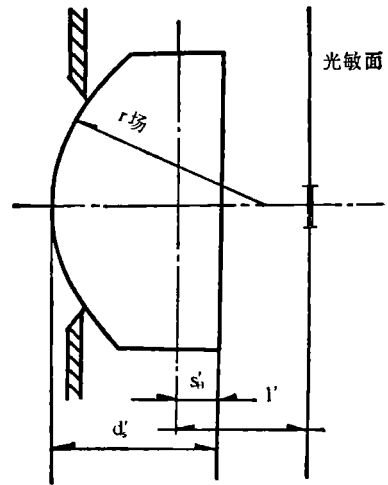


图 2 场镜与探测器光学面的位置

三、场镜结构和探测器光学面的确定

对于红外整机, 光能量的传递是光学系统的中心问题之一。从总的能量的角度来决定场镜的效用, 并与系统的总体指标相联接, 应该比较恰当的^[2]。下面的计算方法正是从这种考虑出发的。

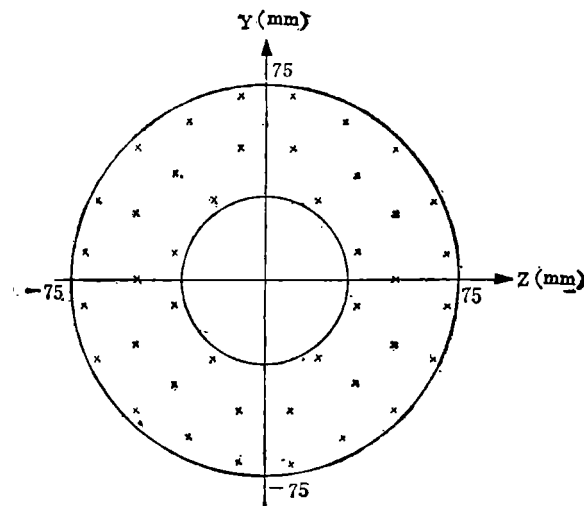


图 3 入瞳取点图

1. 探测器光学面的位置和横向大小

我们用空间光线追迹的方法来确定出探测器光学面。初始光线是这样选取的:

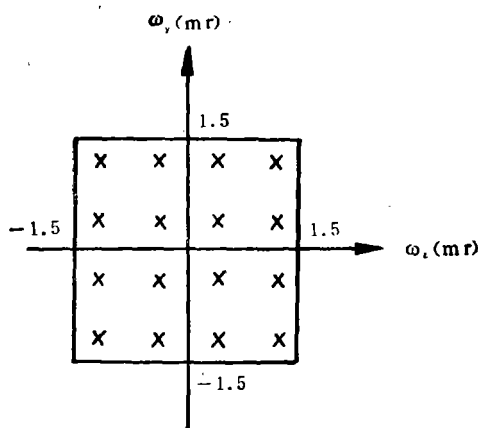


图4 视场取点图

在入瞳面上选定 n 个点，它们大致在入瞳面上按面积均匀分布，也兼顾到对象差的贡献（在图3中给出了设计实例，取 $n=42$ ）。在物面（全瞬时视场内的景物）上按面积均匀地取 m 个点（在图4中给出了设计实例，取 $m=16$ ）。然后将物面上 m 个物点与入瞳上 n 个瞳点连成初始光线，共有 $m \times n$ 条（图示的实例为 $m \times n = 16 \times 42 = 672$ ）。从这些初始光线出发，进行空间光线追迹。光线经过主光学系统（物镜）后，追迹到视场光阑处（一般由场镜的边框作为视场光阑），由于场光阑的阻挡，将有一部分光线落到场光阑之外。假如 $m \times n$ 条光线中有 k 条

光线落到场光阑之外，令 $Q = m \times n - k$ ，将 Q 条光线继续向下追迹，直到场镜的最后一个面追迹完为止。从追迹完的 Q 条光线可以确定出探测器光学面的位置。

探测器光学面的位置被确定在 Q 条光线的最密集位置。这一点在数学上是这样描述的：在 $x = x_0$ 的平面上，每条光线与该平面有一个交点 $[y_i, z_i]$ ；在 $x = x_0$ 平面上诸光线的重心 $[\bar{y}, \bar{z}]$ 可用下式求得：

$$\bar{y} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q y_i; \quad \bar{z} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q z_i, \quad (7)$$

平均弥散圆半径定为

$$\bar{R} = \left\{ \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q (y_i - \bar{y})^2 + \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q (z_i - \bar{z})^2 \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

注意到式(8)右边的 \bar{y} 、 \bar{z} 、 y_i 、 z_i 都是 x 的函数，可以由 $\frac{d\bar{R}}{dx} = 0$ 的方程解得 x ，如其值为 x'_0 ，则 $x = x'_0$ 的平面为 \bar{R} 取极小值的平面，这即是探测器光学面应在的平面。

2. 场镜的结构参数的确定

用公式(3)、(4)、(5)、(6)初步定出了场镜的结构参数，将此初步参数作起始的数据，应用电子计算机的空间光线追迹程序（据需要自己编出计算程序），作参数的变化，从中可以找得比较合理的场镜结构参数。在这种参数下，探测器光学面位置定得比较准确合理（这里与初步定出的 V 值差别可能较大）。

选定场镜的最后参数的方法如下：在探测器光学面处作出追迹光线的点列图，然后权衡两个因素，选择适中的探测器光学面大小，以获得最大的信噪比。这两个因素是：探测器光学面大小给噪声等效功率的影响，即光学面愈大，NEP 愈大，信噪比愈小；光能量对信噪比的影响，即光能量损失愈多，信号愈小，信噪比也愈小。一般在点列图作出后，在图上反复比较各组场镜结构参数的追迹结果，最后选定一组场镜数据。由此，最后的场镜结构和探测器光学面的位置及大小是同时被确定的。

3. 关于装校的简要说明

由于光学装校直接影响到光能量的取舍，而这里探测器光学面的光照是与出瞳光照直接对应的，故场镜与探测器光学面之间的配合比较精确，同时场镜光轴与物镜的光轴之间的夹角精度也比较高。与一般的无场镜系统中探测器的装校相比较，这里的装校精度高很多。

如不注意这一点,可能因装校有误而使场镜的光学增益消失。

四、设计实例

主光学系统(物镜)焦距 $f' = 600 \text{ mm}$, 口径 $D = 150 \text{ mm}$, 视场 $\omega = 3 \text{ mrad}$, 后截距 $b = 100 \text{ mm}$, 副镜的横向放大率 $m = -3.077$ 。用公式(1)、(2)可计算得到:

$$l_p = 279.84 \text{ mm}, D' = 69.96 \text{ mm}。$$

设探测器光学面 $d = 0.45 \text{ mm}$, 由公式(3)可计算得出 $l' = 1.8 \text{ mm}$, 由公式(4)可计算得出 $f'_z = 1.79 \text{ mm}$, 由公式(5)可计算得出 $r_z = 5.37 \text{ mm}$, 这里用平凸场透镜型式。

视场光阑取边长为 $f'\omega = 1.8 \text{ mm}$ 的正方形。场镜厚度取 $d'_s = 2.5 \text{ mm}$, 由公式(6)计算得 $S'_H = 0.63 \text{ mm}$ 。

以此为初步的场镜结构安排,用 719 电子计算机进行空间光线追迹,按第三节第 2 点所说的原则选定最后的场镜结构参数。为节省画点列图时间(对应于一个 x 值的一张点列图有六百多个点),利用 719 电子计算机作点列图的比较。

为了能有一些直观的图示,这里仅对图 4 中 16 个物点中边角上的两个不同的代表性点,与入瞳面上 42 个点连成 84 条初始光线,从这些初始光线追迹,一直追到最后所确定的探测器光学面上,得到这光学面上的 84 条光线的点列图,如图 5 所示。图上的圆圈表示直

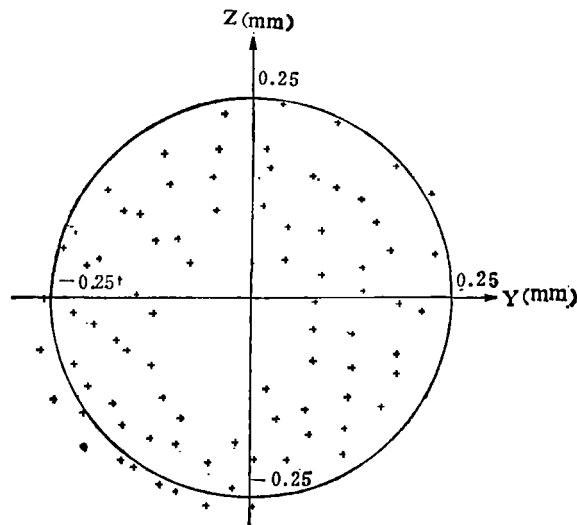


图 5 探测器光学面处光线的点列图

径为 0.5 mm 的圆形探测器光学面。点列图的分布趋势是清楚的。图 4 中其余十个外边沿物点的 400 多条光线的点列图可以由系统的旋转对称性推得。对于图 4 中内层的四个物点,追迹结果的情况比外边沿物点更好些。

$$\begin{aligned} \text{最后选定的结果是: } r_z &= 5.96 \text{ mm}, d_s = 2.5 \text{ mm}, \\ d &= 0.50 \text{ mm}, l' = 1.72 \text{ mm}, \end{aligned}$$

探测器光学面到场镜后平面距离为 1.09 mm (见图 2 所示的 $l' - S'_H$)。

该场镜设计后,经加工总装调试和最后用此场镜的红外整机在外场测试,已验证该场镜是可行的,确实将视场扩大约 $1.8/0.5 = 3.6$ 倍。从整机灵敏度的计算和实验测试中,可以

说明得到了预期的光学增益。

五、结 束 语

本文从红外光学系统的特点出发,在微型致冷器的条件之下,讨论了红外探测器之前采用场镜的特点,既运用了场镜的一般设计概念求得初步的结构,又运用光能量传递的计算方法和信噪比判据来选择最后的场镜结构参数,并同时确定了探测器光学面的合理大小。这里讨论的设计思路可适用于一般的红外系统中的场镜。

场镜的使用有一个限制条件^[1],当物镜系统的 F 数较小时,场镜的光学增益不可能提高,大致可以用 F 数(f/n_0)为 1 作为限制条件的判据。若物镜系统的 F 数接近 1,则场镜作用不大,若 F 数小于 1,则不大好加场镜,若物镜 F 数远比 1 大,则场镜的光学增益将可以得到较大的效果。

装在微型致冷器中的红外探测器之前,若再加上场透镜,其设计的可能型式是比较少的,一般只可在单透镜中考虑场镜的型式。所以单透镜的各种类型的计算可以在考虑之列。但是考虑到装校基准面的方便,往往取成平凸透镜为宜,故前面专门讨论了此型式的场镜。如光学冷加工工艺水平提高,装校水平提高,则各种型式的透镜以及透镜的组合件作为场镜的型式也是可以的。

假定不从红外物镜系统的实际条件出发,套用可见光的一般方法,从等效物镜出发来套公式设计场镜,可能会算错探测器光学面的位置,实践证明,这样做,红外场镜的光学增益不易得到。经分析,原因在两个方面:一是设计时探测器光学面位置及大小定得不准确,二是装校的要求不易明确,因而实际装校出的位置精度达不到应有的要求。

本文讨论的方法适用于一般红外场镜的设计。

致谢——关于场镜设计中,场镜如何与探测器光学面配合的问题,曾与方家熊同志讨论多次,得益不少,仅此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Jomn. A. Jamieson, et al., *Infrared physics and engineering*, New York: McGRAW-Hill Book Company, 1963, 226.
- [2] 徐尧洲, *光学学报*, 1 (1981), 3, 229.

DESIGN OF FIELD LENS IN INFRARED OPTICAL SYSTEMS

XU YAOZHOU

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The effect of field lens in infrared optical systems is discussed. A method to determine the parameters of a field lens and the optical surface of a detector is presented from the viewpoint of energy.