

大口径红外成像系统的光学设计

潘君骅

(苏州大学现代光学技术研究所, 苏州 215006)

摘要: 推导了以反射式两镜系统为主体的红外成像系统中满足光瞳匹配要求的转像透镜的高斯光学参量与两镜系统参量的关系式。当选定红外焦平面的冷屏直径及到焦面的距离后, 转像透镜与两镜系统的高斯光学参量之间必须满足这个关系式, 才能做到光瞳匹配, 这就是冷屏为系统的出瞳, 而入瞳是主反射镜的口径。消像差由主镜、副镜的非球面及转像透镜上的一个非球面承担。用实例计算验证了所推导出的公式的可靠性, 红外系统的口径取为 250 mm, 红外接收器的冷屏直径为 5 mm, 冷屏到红外像面的距离为 20 mm。两镜系统主镜的曲率半径选定为 -1000 mm 及 -800 mm 两个值, 两镜系统焦距为 2000 mm, 1500 mm 及 1000 mm 三个。共计算了六种结构参量不同的系统。

关键词: 红外成像; 光学设计; 光瞳; 匹配; 冷屏; 高斯参量

中图分类号: O435 文献标识码: A

1 引言

由于红外 CCD 焦平面技术已经成熟, 大口径红外成像系统的应用愈来愈广, 特别在军事方面。口径超过 250 mm, 基本上不可能用纯透镜系统, 反射式两镜系统^[1]是最合理的选择。为了最大限度地限制背景辐射的影响, 红外焦平面的冷屏必须是整个系统的出瞳。所以在两镜系统第一次成像之后应有一个转像透镜(组)以达到位于主镜的入瞳成像到冷屏上。以后我们将看到, 两镜系统结构可以有一定的选择自由, 但一旦选定, 则转像系统的共轭成像

位置就定了。从仪器的总体结构考虑, 主镜顶点到红外焦平面的长度不能太短, 也不宜太长。合理地选择这个长度, 是选择两镜系统结构的主要考虑。当然, 主镜的相对口径不要太大, 副镜的遮拦比尽可能小, 照例也是要考虑到。

2 光瞳匹配要求

以反射式两镜系统为主体的红外成像系统光路见图 1。其中 D_1 为主镜口径(正值), r_1 为主镜曲率半径(负值), r_2 为副镜曲率半径(负值), l_0 为副

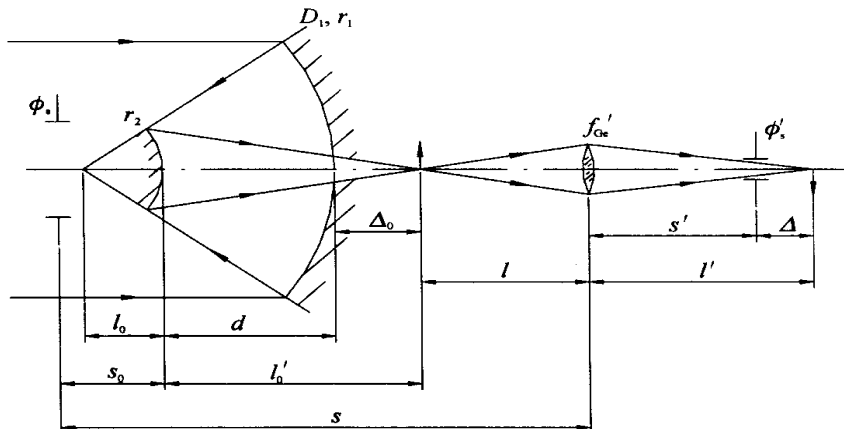


Fig. 1 Optical layout of the two-mirror system with relay lens

镜顶点到主镜焦点的距离(负值), d 为主镜顶点到副镜顶点的距离(负值), l_0 为副镜顶点到两镜系统焦点的距离(正值), s_0 为入瞳(D_1)经副镜成像的位

置(负值), ϕ_s 为入瞳 (D_1) 经副镜成像的大小(负值), l_0 为主镜顶点到两镜系统焦点的距离(希望是正值), f_{Ge} 为转像透镜的焦距(正值), l 为转像透镜到两镜系统焦点的距离(负值), l 为转像透镜到系统焦面的距离(正值), s 为转像透镜到入瞳第一次像的距离(负值), s 为转像透镜到出瞳的距离, 即出瞳位置(正值), ϕ_s 为出瞳尺寸, 即红外焦平面的冷屏尺寸(正值), l 为冷屏到系统焦面的距离(正值)。

光瞳匹配, 实际上是两点要求:

- 1) 入瞳 D_1 经副镜及转像透镜成像在冷屏的位置;
- 2) 入瞳尺寸 (D_1) 经成像后其大小等于冷屏的尺寸 ϕ_s 。

满足光瞳匹配的同时, 当然必须满足整个系统的成像关系, 即最后像面离冷屏距离等于 l_0 。

3 关系式推导

根据上述要求, 我们可以写出以下基本式子:

$$\frac{1}{s} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f_{Ge}}, \quad (1)$$

$$\phi_s = \phi_s \frac{s}{s} = D_1 \frac{S_0}{-d} \frac{s}{s}. \quad (2)$$

设整个系统的焦距为 f_s (是负值), 焦比为 F , 则

$$f_s = \frac{r_1}{2} \frac{l_0}{l} = D_1 (-F),$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{l} = -\frac{2D_1 F}{r_1} \frac{l_0}{l_0}. \quad (3)$$

还有

$$\frac{\phi_s}{F} = \frac{1}{F},$$

$$\text{即} \quad \phi_s = \frac{1}{F}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{l} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f_{Ge}}. \quad (5)$$

令(3)式右端等于 A , 即

$$l = Al, \quad (6)$$

$$\text{其中} \quad A = -\frac{2D_1 F}{r_1} \frac{l_0}{l_0}.$$

从(2)式, 令 $D_1/\phi_s = M$, $B = -d/M s_0$, 则

$$s = Bs. \quad (7)$$

从(1)式、(5)式中消去 f_{Ge} , 得

$$1 - \frac{1}{l} = l \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s} \right].$$

将之代入(6)式及(7)式, 并根据图 1, 有 $s = s_0 - l_0 + l$, 整理后得

$$l = \frac{B(1-A)(s_0 - l_0)}{(A-B)}. \quad (8)$$

(8)式中 D_1 及 F 是具体方案选定的, 红外热像仪选定后, ϕ_s 就确定了, 从而 M 就一定。其余的量: s_0 、 l_0 、 d 、 l_0 , 当两镜系统确定后都可以算出。所以, 只要选定两镜系统, 则转像系统的共轭成像位置及其焦距即可算出, 于是自动优化程序所要求的初始数据均可得到。

4 实例计算

以 $D_1 = 250$ mm, $\phi_s = 5$ mm, $F = 4$, $l_0 = 20$ mm 为基本数据, 计算不同主镜焦比(即不同的 r_1), 不同主系统焦距 (f_1) 解出的结果及优化后的结果。视场大小, 按红外接收器对角线尺寸为 12.6 mm 计算。为了说明导出公式的可靠性, 转像透镜先用单片锗透镜, 波长取 $\lambda = 4$ μ m。如果为了在 3~5 μ m 波段消色差, 可以进一步将转像透镜复杂化, 例如加入硅透镜。主系统焦点的引出量 l_0 , 从实际装调方便出发, 应为正值, 即伸出主镜顶点之后, 现暂取 $l_0 = 60$ mm。

我们计算了 $r_1 = -1000$ mm 及 -800 mm, $f_1 = 2000$ mm, 1500 mm 及 1000 mm 共 6 种不同情况的系统。主镜、副镜及锗透镜的第一面为非球面(暂取二次非球面), 优化开始时, K 值均设为零。锗透镜的初始形状, 按解出的焦距 (f_{Ge}) 以等曲率半径双凸单透镜输入。

Zemax 程序有入瞳位置 (ENPP) 及入瞳尺寸 (EPDI) 约束功能, 可以利用。

自动优化时的变量为: 锗透镜两个面的曲率半径, 副镜顶点到锗透镜第一面的距离 (与 l 有关), 锗透镜第二面到红外接收器密封窗口的距离 (与 l 有关) 及三个非球面系数。公式推导时转像透镜按薄透镜考虑, 即不计其厚度, 实算时应给适当值, 今取 4 mm。

自动优化所需初始数据符号及意义见图 2。其中 d_1 为 $l_0 - l$ (变量), d_2 为锗透镜厚度, d_3 为 $l - d_5 - d_4$ (变量), d_4 为密封窗厚度, d_5 为密封窗到冷屏距离。

优化结果, 所有系统的像斑尺寸均在艾里斑之内, 差别不大。系统光学总长度, 当主镜焦距为 500 mm, 主系统焦距为 1000 mm 时为最短。现将解出的数据与优化后的数据列于表 1, 可见解出的 d_1 和 d_3 精度足够好。

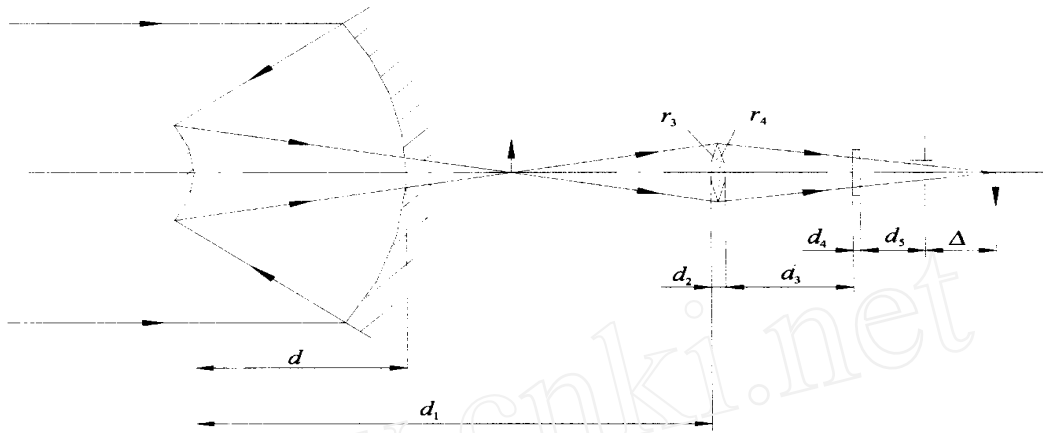


Fig. 2 Some symbols of data needed for optimisation of the IR system

Table 1 Comparison of the constructional data solved by formulae with those after optimization

Focal length of primary mirror / mm	Focal length of two mirror system / mm	d_1 / mm		d_3 / mm		r_3, r_4 / cm		Value of K	
		Solved value	After optimization	Solved value	After optimization	Input value	After Optimization	Input value	After optimization
500	2000	588.18	589.198	35.09	35.1057	± 285.06	130.337 1518.70	0	- 0.764336
								0	- 0.4564305
								0	- 3.977668
	1500	501.65	502.287	19.43	19.3085	± 197.6	89.3349 851.393	0	- 0.7276974
								0	- 0.8688208
								0	- 3.518959
	1000	414.86	415.324	6.53	6.29173	± 125.62	54.7513 384.824	0	- 0.8316983
								0	- 5.258335
								0	- 2.774292
400	2000	528.78	530.175	37.72	37.8818	± 293.30	134.491 1445.75	0	- 0.8802997
								0	- 1.111745
								0	- 3.809993
	1500	446.39	447.165	20.49	20.4171	± 201.40	90.4590 804.757	0	- 0.8623665
								0	- 1.605391
								0	- 3.389783
	1000	370.44	370.956	6.86	6.64625	± 126.63	54.9437 373.139	0	- 0.9188759
								0	- 4.251273
								0	- 2.717879

结论 红外成像系统光学设计的特殊性在于它有光瞳匹配要求,如果没有一个比较准确的初始结构输入给自动优化程序,有时根本无法启动程序。如果放弃光瞳位置及大小的约束条件,则往往不能达到入瞳在主镜上的要求,从而有轴外光的渐晕发生。

现在,我们可以把重点放在两镜系统的选择上,包括主镜的焦比,系统的焦距,焦点位置的选定及加锩透镜后的光学总长度。这几个量是仪器总体设计者十分关心的,可以用分析的方法事先解出,对仪器设计无疑是很重要的。

参 考 文 献

1 Pan Junhua, Hao Peiming. A general study of the two-mirror

system with second order aspheric surface. *Acta Astronomica Sinica* (天文学报), 1965, 13(1):46~56 (in Chinese)

The Methodic Design of the IR Imaging System with Large Aperture

Pan Junhua

(*Institute of Modern Optical Technology, Suzhou University, Suzhou 215006*)

(Received 14 October 2002; revised 4 December 2002)

Abstract: The formulae of Gaussian parameters between the relay lens and the two-mirror system are derived. They satisfy the condition of exit pupil of the IR system matching the cold stop of the IR sensor. Once the diameter of the cold stop and its distance to the image plane are confirmed, the Gaussian parameters of the relay lens and the two-mirror system must satisfy these formulae, then the exit pupil will coincide with the cold stop. The elimination of aberrations may be done by aspherization of the primary and secondary mirrors and one surface of the relay lens. In order to prove the efficiency of the derived formulae, 6 real systems are solved. The diameter of the IR system is taken as 250 mm, the diameter of the cold stop is 5 mm, and the distance between the cold stop and the IR image plane is 20 mm. The radius of curvature of the primary mirror has two values: -1000 mm and -800 mm, the focal length of the two-mirror system: 2000 mm, 1500 mm and 1000 mm. So, there are 6 systems with different constructive data are calculated.

Key words: IR imaging; optical design; pupil; match; cold stop; Gaussian parameter

《光学学报》重要通告

为了加快稿件的处理速度,促进期刊的电子化、网络化,本刊从2003年5月1日起一律采用电子邮件(E-mail)方式投稿。单位证明原件通过传统邮件方式寄过来。

未曾给《光学学报》编辑部留过电子邮件地址的《光学学报》审稿专家,请尽快把你们的电子邮件地址发给本刊编辑部,以便实行电子邮件方式审稿。

本刊的主网站是 <http://gxxb.chinajournal.net.cn>。网站上的“本刊动态”栏有以下内容,敬请广大作者、读者、审稿专家等各方面人士留意:

本刊最新的征稿简则——《光学学报》征稿简则(2003年6月1日版);

《光学学报》清样发送预告(每月刊登一次);

《光学学报》2002年22卷第6~12期,2003年23卷第1期~近期的目录(这对查找、阅读、引用《光学学报》近期的文章时是很方便的);

科技论文写作方面的信息;

以及其他紧急信息都可从本刊动态及时获得。

电 话:021-69918011, 69918428

E-mail: gxxb@mail.shenc.ac.cn

传 真:021-69918011

《光学学报》编辑部

2003年11月12日