

一种紧凑型红外光学系统设计

刘瑞奇, 陈星明, 赵家琪

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要:介绍了制冷型红外成像光学系统设计初始结构的选择方法, 采用折反射光学系统结构, 设计了一种紧凑型红外光学系统, 实现总长/焦距比为 0.59, 在 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围内, 具有良好的消热差作用, 成像质量接近衍射限, 具有结构紧凑、体积小等优点, 可满足红外成像导引头的使用要求。

关键词:折反射红外系统; 消热差设计; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标识码:** B

Design of a Compact Infrared Optical System

LIU Rui-qi, CHEN Xing-ming, ZHAO Jia-qi

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In this paper, the way to choose configurations for infrared optical system design was discussed. A compact catadioptric infrared optical system was designed. The ratio of total length and focus length was 0.59. The results show that the system possesses better athermal performances in the temperature range $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$. The image quality of the system almost reaches diffractive limit. In addition, the optical system has many advantages, such as compact structure, small volume and so on. It can be applied to imaging infrared seeker.

Key words: infrared catadioptric systems; athermalization design; optical design

1 引言

红外光学系统是红外系统的重要组成部分, 一般要求结构紧凑, 故折反射光学系统在红外光学系统中应用较多。红外光学系统需要工作于恶劣的环境条件下, 其中环境温度的变化是对红外光学仪器的严峻考验之一。由于红外光学材料的折射率温度系数 dn/dt 比较大, 如常用的红外光学单晶锗为 $3.96 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 是可见光玻璃的近 200 倍, 因此环境温度对红外系统的影响尤为严重。当环境温度变化时, 光学元件的曲率、厚度和间隔将发生变化, 同时元件材料的折射率也发生改变, 从而引起系统焦距变化, 像面发生位移, 导致系统性能急剧下降, 图像质量恶化。因此, 在红外光学系统的设计过程中进行无热化设计是相当必要的。

2 光学系统结构选择

红外光学系统比较常见的结构形式有折射一次成像、折射二次成像、折反射等结构形式。不同制冷型红外光学系统结构形式的优缺点比较如表 1 所示。紧凑型红外光学系统常用的结构形式主要有折射一次成像和折反射两种形式。

典型的折射一次成像光学系统如图 1 所示^[1]。折射一次成像光学系统结构简单, 质量轻, 易于装调, 通光口径饱满, 无中心遮蔽, 但材料品种有限, 对热敏感, 由于需要 100% 的冷光阑的效率, 孔径光阑放在镜头的后面, 造成镜头口径比入瞳大得多, 使进入镜头的杂散光比较多。如果把孔径光阑放在镜头

作者简介: 刘瑞奇 (1984 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外成像光学系统设计。E-mail: ruiqi513@163.com

收稿日期: 2008-09-21

前面和中间,会降低冷光阑效率,影响红外成像^[2]。三片式红外光学系统镜头长度比焦距长得多,如果缩短镜头长度,除非引入非球面^[3],或者增加透镜片数^[4]。若使用镜片较多,红外光线不断经过空气和镜头面,造成系统透过率降低。红外折射一次成像的远摄比可以做到0.8左右,再缩短长度就很难达到了^[5]。因此选用一次成像系统很难满足红外导引头光学系统空间结构的要求。

表1 不同制冷型红外光学系统结构形式优缺点的比较

性能比较	红外折射一次成像光学系统	红外折射二次成像光学系统	红外折反射光学系统
焦距	短	可以做的很长	可以做的很长
总长/焦距比	大于1,可以做到小于1	远大于1,很少做到小于1	可以做到远小于1
片数	少	多	多
镜片口径	第一片口径很大,焦距不易太长,否则口径大到难于接受的程度	第一片口径可以做到与入瞳大小相当	主镜口径可以做到与入瞳大小相当
杂光	进入系统的杂散光很多	进入系统的杂散光很少	进入系统的杂散光较多,可以通过加遮光罩等方式消除
视场	大	大	小
有无中心遮拦	无	无	有
装配难易	简单	比较复杂	复杂
成本	低	高	高
主要用途	导引头、热像仪	吊舱、火控、前视红外	导引头、枪瞄、光电观瞄

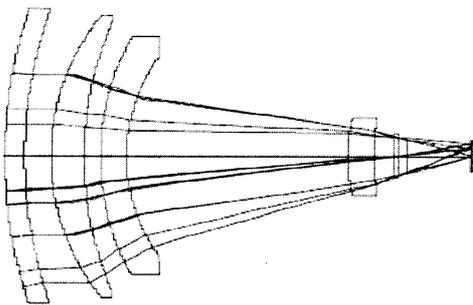


图1 红外折射一次成像系统

典型的红外折反射光学系统如图2所示^[6]。折反射系统中反射系统的卡塞格林形式最为常用。在

经典卡塞格林系统中,只消除球差,主镜使用抛物面,次镜使用凸的双曲面;若同时也消除彗差,将主镜改成双曲面,称为R-C系统,即卡塞格林的等晕系统^[7]。主次镜后的透镜组的一个重要作用是将出瞳位置尽可能靠近主镜,从而减小系统的口径,同时使场曲变平和校正剩余的轴外像差。折反射光学系统由于主次镜分担大部分光焦度,因此有利于无热化设计;利用反射镜折叠光路,缩小了镜头的体积和减轻了质量,长度可以做到比焦距短。综上所述,本设计采用折反式二次成像光学系统结构形式。

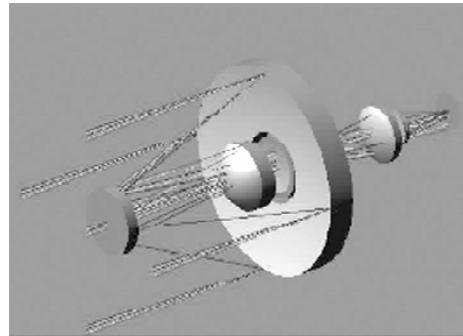


图2 红外折反射光学系统

3 光学系统设计

3.1 设计原理

设计折反射光学系统主次镜最好选用双曲面,以便于装配、检验。主次镜成的一次像面至少保证轴上像质优良,然后与后面的中继透镜组一起优化。主次镜安装结构可以加上遮光罩,同时在一次像面处放置视场光阑,以减小杂散光对系统的影响。

红外系统波段较宽,因此色差一般很难严格校正,本系统采用折反二次成像系统,主次镜不产生色差,后组折射部分采用折衍混合光学系统,通过衍射透镜校正色差。若衍射光学透镜的设计波长为 λ_d ,焦距为 f_d ,则对应于波长 λ_C 和 λ_F 的阿贝数为^[8]:

$$V_d^B = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} \quad (1)$$

衍射光学元件的色散与玻璃材料无关,仅与波长有关,这是区别于传统透镜的一大特点。衍射光学元件的色散特性与材料的无关性和负向性就非常有利于消色差,用于构成综合性能更好的混合消色差系统,这也是衍射光学元件在成像领域受到青睐的最主要原因。

折射透镜的光热膨胀系数为^[9]:

$$x_{f,r} = \alpha_g - \frac{1}{(n-1)} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (2)$$

衍射透镜的光热膨胀系数为^[8]：

$$x_{f,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \quad (3)$$

式中, n 是透镜的折射率; n_0 是所在介质空间的折射率; α_g 是透镜材料的热膨胀系数; dn/dT 是透镜材料折射率的变化相对于像空间折射率的变化。比较上面两个方程就会发现, 折射透镜和衍射透镜的热特性有根本的区别。例如, 衍射透镜焦距的变化仅仅是 α_g 的函数, 它不是透镜材料因热而引起的折射率变化的函数。利用衍射透镜独特的热特性, 有可能设计出消热差混合透镜, 使得温度变化时透镜热常量导致的离焦正好和镜筒材料热膨胀系数导致的像面移动相一致, 从而达到很好的消热差效果, 同时可以减小体积, 并减少质量。

3.2 技术指标要求

- 1) 光谱范围: $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 中心波长 $4.2 \mu\text{m}$
- 2) 焦距: 137.5mm
- 3) 视场: $4^\circ \times 3^\circ$
- 4) $F/\#$: 1.875
- 5) 红外探测器: 320×256 , 单个探测器像元面积: $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$
- 6) 外形总长 85mm 之内
- 7) 系统必须做到无热化, 在 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 以内不用进行温度调焦。

3.3 设计结果分析

本系统主次镜采用二次曲面, 材料为铝, 焦距为 60mm , 相对孔径约为 1.25, 系统选用制冷型中波红外探测器, 主次镜成的像保证轴上像质优良, 以便于顺利装配。中继透镜组为三片结构, 材料分别为锗、硒化锌和硅, 第 6 面为衍射面, 第 8 面为非球面。光学镜头的主次镜的镜筒和中继透镜组的镜筒材料都采用低膨胀的金属合金。系统结构如图 3 所示。

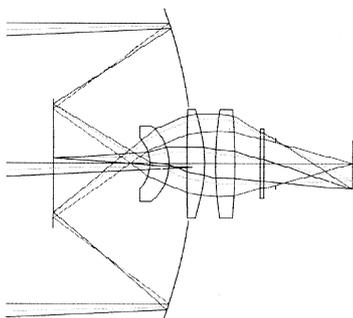


图3 光学系统结构图

表 2 列出了该系统在 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 的离焦量, 从表中可以看出系统在 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围时的最大离焦量都小于焦深 $60 \mu\text{m}$, 达到了消热差设计。

表 2 系统在不同温度下的离焦量

温度/ $^\circ\text{C}$	镜头焦距 f'/mm	像面漂移量/ mm
+60	-138.3927	0.0347
+40	-137.9424	0.0178
+20	-137.5000	0
0	-137.0651	-0.0113
-20	-136.6334	-0.0249
-40	-136.2108	-0.0365

选用的探测器像元大小为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 系统的特征频率为 $17 \text{lp}/\text{mm}$ 。图 4、图 5 和图 6 分别为系统在 -40°C , 20°C 和 60°C 温度状态时的调制传递函数, 从图中可以看出, 系统在不同温度环境下所有视场的 MTF 都接近衍射限。

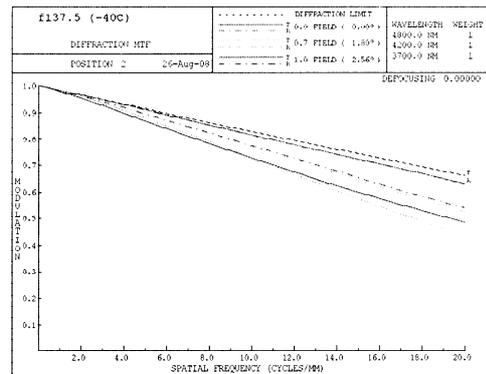


图4 -40°C 的调制传递函数曲线图

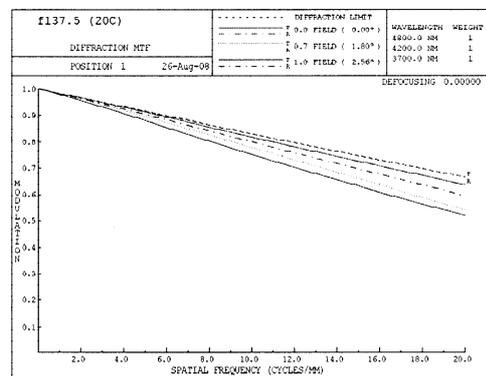


图5 20°C 的调制传递函数曲线图

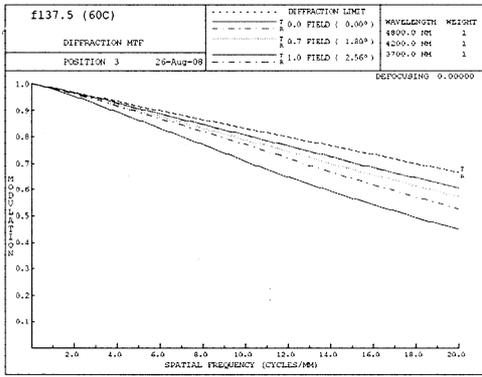


图6 60°C的调制传递函数曲线图

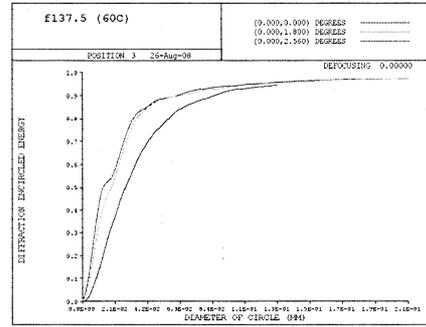


图9 60°C能量集中度曲线图

图7、图8和图9分别为系统在-40°C, 20°C和60°C温度状态时的能量集中图,从图上可以看出80%的能量集中在1个像元内。

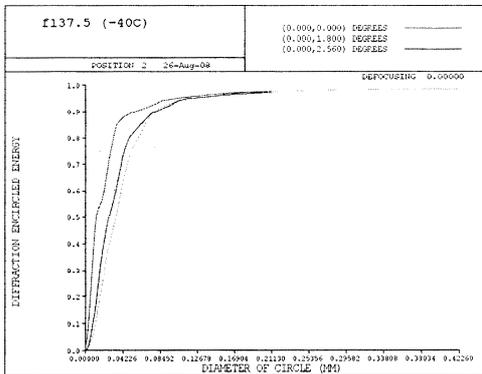


图7 -40°C能量集中度曲线图

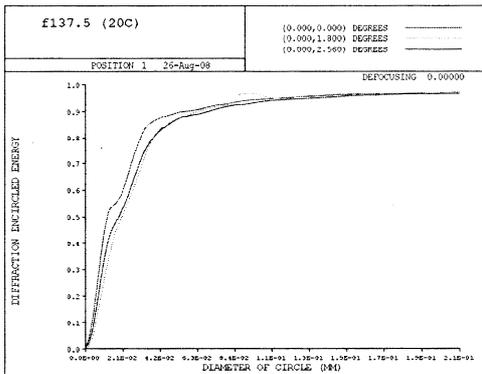


图8 20°C能量集中度曲线图

4 结论

为了满足红外导引头光学系统的需要,设计了一种紧凑的红外折反射光学系统,远摄比不大于0.6,遮拦比小于0.40,通过无热化分析,系统做到了无热化设计,具有很强的实用价值。

参考文献:

- [1] 李婕,张志明,冯生荣. 弹载红外光学系统被动消热技术[J]. 红外技术,2005,27(3),196-201.
- [2] Bruce A Cameron, Gino R Sturiale, Woodland Hills. Solid catadioptric lens[P]. U. S. Patent, 5793538, 1998, 11.
- [3] 陈吕吉,冯生荣. 一种紧凑的红外消热差光学系统[J]. 红外技术,2007,29(4):203-205.
- [4] 项建胜,潘国庆. 一种紧凑型大相对孔径红外光学系统的设计[J]. 红外技术,2008,30(4):208-224.
- [5] 王灵杰,张新,杨皓明,等. 超紧凑型红外折反式光学系统设计[J]. 应用光学,2007,28(3):288-291.
- [6] Ren Tao, Chang Jun, Weng Zhi-cheng, et al. Compressed infrared mirror-lens system design[J]. SPIE, 2008, 6624: 66241T. 1-66241T. 5.
- [7] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004, 12.
- [8] Thomas Stone, Nicholas George. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. Appl. Opt., 27(14): 2960-2971.
- [9] H P 赫尔齐克. 微光学元件系统和应用[M]. 周海宪, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2002, 8: 312-315.