

8~12 μm 波段折/衍混合反摄远系统消热差设计*

韩 莹 王肇圻 杨新军 吴环宝

(南开大学现代光学研究所,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

摘 要 设计了工作于 8~12 μm 波段的折/衍混合消热差红外反摄远系统. 该系统全视场为 14°, 有效焦距为 100 mm, 后工作距为 113 mm, F/# 2.0. 系统采用锗和硒化锌两种材料, 为三片镜结构. 引入二元面和高次非球面, 使结构简化, 重量减轻, 提高了成像质量. 系统在 -40℃~100℃ 的温度范围内性能稳定, 适用于像元尺寸 40 μm, 像元数 640×480 的现代非致冷式面阵探测器. 大视场、长后工作距以及超宽工作温度范围, 决定了系统可满足军用和民用领域的多种需求.

关键词 反摄远; 消热差设计; 折衍混合系统

中图分类号 TH74

文献标识码 A

文章编号 1004-4213(2007)01-0077-4

0 引言

红外光学元件在民用和军事领域都有着广泛的应用, 其中红外反摄远系统具有后工作距长的显著特点, 可以满足多种特定需求. 对于用在军事和空间的现代光学仪器, 通常都要求其在宽的温度范围内具有稳定的性能^[1]. 特别在高分辨率遥感和军事侦察方面, 有些红外系统要求在一 40~100℃ 的温度范围内工作, 甚至更高^[2]. 空间光学系统由于光学材料与结构材料的热不稳定性, 当环境温度变化时将引起焦距变化, 像面位移, 成像质量恶化^[3]. 特别是对于红外系统而言, 由于红外光学材料的折射率温度系数 dn/dT 较大, 因而环境温度对红外光学系统的成像质量有着极其重要的影响.

因此, 在红外成像系统中不得不加入主动或被动补偿机构, 以补偿温度变化造成像面移动所产生的性能降低^[4]. 其中光学补偿方式由于其机构相对简单、尺寸小重量轻、系统可靠性高等特点, 受到极大的重视, 并发展了多种分析和设计方法^[5-7]. 在传统折射系统中引入二元面, 利用衍射元件负的色散系数和独特的温度特性, 可突破传统光学的限制, 设计出具有较好温度稳定性的高质量红外折/衍混合光学系统.

以往对折/衍混合红外系统的研究多集中在小视场光学系统(5°). 视场的增大虽然会给设计增加难度, 但大视场系统在民用和军事领域均有很好的应用前景, 如: 舰载红外警戒系统要求光学系统可进行大视场搜索及成像^[8].

本文设计了具有大视场的折/衍混合红外反摄远系统, 该系统工作于 8~12 μm 波段, 视场角为

14°, F/# 为 2.0, 有效焦距为 100 mm, 后工作距为 113 mm. 系统采用被动式光学补偿方法实现消热差设计, 达到在一 40℃~100℃ 的温度范围内性能稳定. 系统可适用于像元尺寸 40 μm, 像素数 640×480 的现代非致冷式面阵探测器.

1 折衍混合红外光学系统消热差设计原理

1.1 折射、衍射光学元件的温度特性

光学元件的温度特性由光热膨胀系数表示, 定义为单位温度变化引起的光焦度的相对变化

$$x_f = -\frac{\Delta\Phi_T}{\Phi} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} \quad (1)$$

式中 $\Delta\Phi_T$ 为温度 T 变化引起的光焦度变化量, Φ 为系统的总光焦度, f 为系统有效焦距. 对于折射元件, 采用薄透镜模型. 假设该透镜的折射率为 n , 所在介质空间的折射率为 n_0 , 透镜前后表面的曲率半径为 r_1 和 r_2 , 则其光焦度为

$$\Phi = (n - n_0) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

由于折射率 n, n_0 及曲率半径 r_1, r_2 均随温度变化而变化, 因此光焦度 Φ 也将随温度 T 的变化而改变. 将式(2)两边对温度求导, 则有

$$\frac{d\Phi}{dT} = \left[\frac{dn}{dT} - \frac{dn_0}{dT} \right] \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (n - n_0) \left[-\frac{1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dT} + \frac{1}{r_2^2} \frac{dr_2}{dT} \right] \quad (3)$$

式(3)中 $\frac{dr_1}{r_1 dT} = \frac{dr_2}{r_2 dT} = \alpha_g$ (α_g 为光学元件的线膨胀系数), 因而折射元件的光热膨胀系数 $x_{f,r}$ 可表示为

$$x_{f,r} = \frac{d\Phi}{dT} = \alpha_g - \frac{1}{n_0(n - n_0)} \left(n_0 \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (4)$$

对于衍射元件, 其焦距由环带的位置决定

$$f = n_0 r_m^2 / 2m\lambda \quad (5)$$

* 国家自然科学基金(60277021)资助

Tel: 022-23508332 Email: hanying@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2005-07-06

式中, r_m 是第 m 个环带的径向距离, λ 是工作波长. 当环境温度改变时, 环带半径和空间折射率都会随温度的改变而发生变化. 如图1, 环带半径 r_m 与温

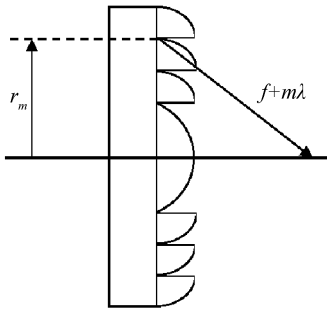


图1 衍射元件模型

Fig. 1 Model of diffractive element

度的关系可表示为^[9]

$$r_m(T) = r_m(1 + \alpha_g \Delta T) \quad (6)$$

由此可以得到衍射元件的光热膨胀系数 $x_{t,d}$ 为

$$x_{t,d} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \quad (7)$$

可见, 衍射元件的温度特性只是由基底材料的热膨胀系数决定的, 与材料的折射率无关.

1.2 折衍混合消热差系统设计原理

为使光学系统在一定的温度范围内具有良好的性能, 设计时必须同时满足光焦度、校正色差和消热差的要求, 也就是必须满足以下三个方程^[10]

$$\sum_{i=1}^i h_i \Phi_i = \Phi \quad (8)$$

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_{i=1}^i (h_i^2 \omega_i \Phi_i) \quad (9)$$

$$df_b^T/dT = \left(\frac{1}{h_1 \Phi} \right)^2 \sum_{i=1}^i (h_i^2 x_i \Phi_i) = \alpha_H L \quad (10)$$

式中 h_i 为第一近轴光线在各透镜上的入射高, Φ_i 为各透镜的光焦度, Φ 为系统总的光焦度, ω_i 为各透镜的色散因子, 它定义为色散引起的光焦度的相对变化, 数值上等于材料的阿贝数的倒数. x_i 为光热膨胀系数, Δf_b^T 是光学元件的色散所引起的离焦, 即轴向色差. df_b^T/dT 是由光学元件的温度效应所引起的离焦. 式中的 α_H 为光学系统外部结构的线膨胀系数, L 为结构的总长度.

传统的折射系统中只能通过改变曲面的曲率或使用不同的材料来校正像差, 这就大大增加了系统的设计难度. 并且需要至少三种以上材料, 才能使系统同时满足上述三个方程, 因而系统结构复杂. 在折衍混合光学系统中, 则可通过波带片的位置、槽宽和槽深以及槽形结构的改变产生任意的波面, 大大增加了设计的自由度, 降低了设计难度. 此外, 由于衍射元件的阿贝数恒为负值^[11], 我们可利用其特殊的色散特性来达到消色差的目的.

2 系统设计方法及结果

本文设计了一个适用于 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的折衍混合反摄远系统, 系统参量为: 有效焦距为 100 mm, $F/\#$ 为 2.0, 视场为 $\pm 7^\circ$, 后工作距为 113 mm, 工作温度范围为 $-40 \sim 100^\circ\text{C}$. 镜筒采用铸铝(线膨胀系数 $\alpha_H = 23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$). 系统仅采用锗和硒化锌两种材料, 为三片式结构, 其中第三片后表面为加工在锗基底上的二元面, 第四表面为高次非球面. 设计的主要步骤:

第一步: 反摄远系统为前组凹后组凸的结构. 首先设计仅由两片透镜组成的系统: 凹透镜在前, 材料为锗; 凸透镜在后, 材料为硒化锌. 根据系统有效焦距、后工作距及系统总长度的要求, 计算出两片透镜的光焦度. 在保证每片透镜光焦度不变的情况下, 以两片透镜的曲率半径为变量, 利用 Focus Software 公司的 ZEMAX-EE 光学设计软件对系统进行优化.

第二步: 保持前组凹透镜光焦度不变, 在后组中加入第三片透镜. 为满足消热差条件, 第三片透镜须为光热膨胀系数较小的负透镜, 这里选用材料为硒化锌的负透镜. 经计算方程(10)得到第三片透镜的光焦度. 调整步骤1中所述凸透镜的光焦度, 使系统仍满足总光焦度的要求, 即满足方程(8). 保证前组凹透镜光焦度和系统有效焦距不变, 以曲率半径和透镜后组中两片透镜的间距为变量对系统进行优化.

第三步: 将系统中的最后一面改为二元面(即 ZEMAX-EE 中的 Binary 2 面型), 此旋转对称二元面的相位分布函数为

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots \quad (11)$$

r 为归一化的半径坐标. A_1 为二次相位系数, 决定二元面的傍轴光焦度, 实现光学系统的消色差. A_2 、 A_3 等为非球面相位系数, 用于校正高级像差. 考虑到二元面的加工工艺和系统的要求, 这里只取前三项. 在优化函数中加入轴向色差函数, 以二元面中第一个参量 A_1 为变量, 对系统进行消色差优化, 得到系统的初始结构.

第四步: 为提高成像质量, 将系统中的第四表面改为高次非球面, 其表达式为^[12]

$$z = cr^2 / (1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}) + \beta_1 r^1 + \beta_2 r^2 + \beta_3 r^3 + \beta_4 r^4 + \beta_5 r^5 + \dots \quad (12)$$

式中 c 为曲率(半径所对应的), k 为圆锥系数, r 仍为归一化的半径坐标, β_1 、 β_2 、 β_3 等为非球面系数. 实践证明, 二元面和高次非球面相互配合, 是提高系统成像质量, 减小像差的有效方法. 根据系统的实际需要, 这里只取表达式(12)中的第一项及 r^2 、 r^3 、 r^4 项. 本文以高次非球面表达式中的圆锥曲面系数 k 和

$\beta_2, \beta_3, \beta_4$ 作为变量对系统进行优化.

第五步:为减小像差,提高成像质量,分别以二元面相位表达式中的系数 A_2, A_3 以及高次非球面表达式中的系数 $k, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 为变量,反复对系统进行优化.通过二元面和高次非球面间的配合,达到提高系统成像质量的目的.最终得到的折衍混合消热差红外反摄远系统的结构如图 2,系统具体的结构参量如表 1.

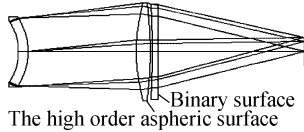


图 2 折衍混合反摄远系统结构

Fig. 2 The structure of the athermal infrared diffractive-refractive hybrid reversed telephoto

表 1 系统的结构参量

表面	表面类型	半径/mm	厚度/mm	Glass
1	标准	-49.35	7.50	锗
2	标准	-56.05	84.18	空气
3	标准	166.03	10.45	硒化锌
4	单球型	-1797.76	1.74	空气
5	标准	-745.27	4.96	锗
6	二元面	Infinity	112.91	空气

图 3~图 5 分别为折衍混合系统在 -40℃、20℃ 和 100℃ 时的 MTF 值.在空间频率 12.5pl/mm 处, -40℃~100℃ 温度范围内 0 视场、0.7 视场和全视场弧矢面 MTF 值均大于 0.4,全视场子午面 MTF

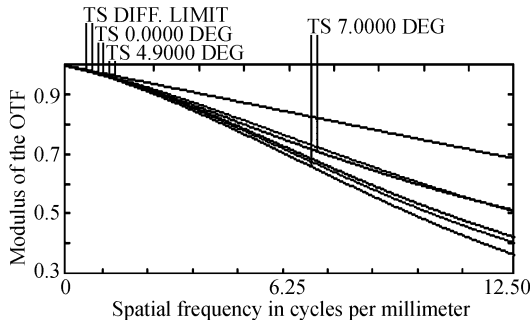


图 3 系统在 -40℃ 时的 MTF 值

Fig. 3 The MTF of the system at -40℃

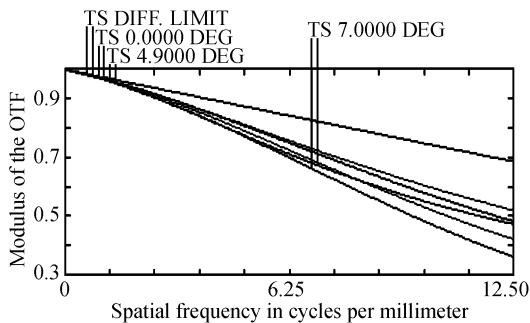


图 4 系统在 20℃ 时的 MTF 值

Fig. 4 The MTF of the system at 20℃

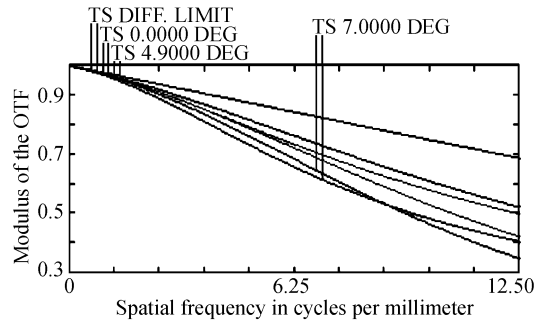


图 5 系统在 100℃ 时的 MTF 值

Fig. 5 The MTF of the system at 100℃

值接近 0.4. -40℃ 时系统有效焦距为 100.02 mm, 100℃ 时系统有效焦距为 99.98 mm,系统在此温度范围内的最大离焦量为 20.0μm. 光学系统焦深的表达式为

$$\Delta = \pm \frac{\lambda}{2u'^2} \tag{13}$$

式中 Δ 为焦深, λ 为入射波长, u' 为像方孔径角. 通过式(13)可得该系统焦深为 77.4μm. 因而,该系统在此温度范围内的最大离焦量小于系统焦深. 图 6

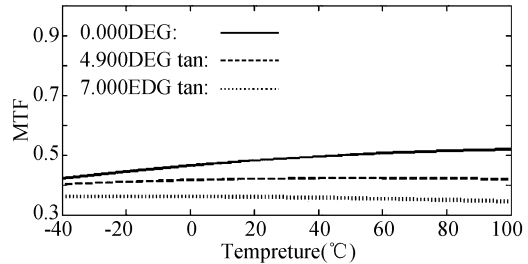


图 6 消热差光学系统在 12.5pl/mm 处 MTF 值(tan:子午面)

Fig. 6 The MTF of the athermal optical system at 12.5pl/mm 为系统在 12.5pl/mm 处, 0 视场、0.7 视场子午面和全视场子午面 MTF 值随温度变化的示意图. 可见, 在该温度范围内, 系统各视场 MTF 值随温度变化很小: 0 视场 MTF 值变化 0.098, 0.7 视场子午面 MTF 值变化 0.017, 全视场子午面 MTF 值变化 0.0165.

3 结论

本文研究了工作于 8~12μm 波段的折/衍混合消热差红外反摄远系统. 该系统全视场为 14°, 属于视场角较大的红外光学系统. 系统的有效焦距为 100 mm, 后工作距为 113 mm. 系统中引入二元面和高次非球面, 二者相互配合, 不仅简化了系统结构, 更大大提高了成像质量. 同时, 采用光学被动补偿法实现在 -40℃~100℃ 范围内的消热差设计. 此温度范围内, 系统在空间频率 12.5pl/mm 处, 各视场 MTF 值均大于或接近 0.4, 因此系统适用于像元尺寸 40μm, 像素数 640×480 的非致冷式面阵探测器. 大视场、长后工作距以及在超宽温度范围内具有良好成像质量, 这些特点决定了系统可满足军事、民用领域的多种特定需求.

参考文献

- [1] GUO Yong-hong, SHEN Mang-zuo, LU Zu-kang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1392-1395.
郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10):1392-1395.
- [2] SUN Qiang, LIU Hong-bo, WANG Zhao-qi, et al. An Infrared diffractive/ refractive optical system beyond normal temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):466-469.
孙强, 刘宏波, 王肇圻等. 红外折射/衍射超常温光学系统[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4):466-469.
- [3] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, SUN Qiang. Optical system design for a dual-band space imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1):50-54.
杨新军, 王肇圻, 孙强. 空间双波段成像光谱仪红外光学系统的设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1):50-54.
- [4] ROGERS P J. Athermalized FLIR optics [C]. *Proc SPIE*, 1990, **1354**:742-751.
- [5] GIBBONS R C. Compact high cold shield efficiency optical systems [P]. US Patent, 250/332,4431917, 1984 02 14.
- [6] TAMAGAWA Y. Multilens system design with an athermal chart [J]. *Appl Opt*, 1994, **33**(34):8009-8013.
- [7] HU Yu-xi, ZHOU Shao-xiang, XIANG li-Bin, et al. Design of athermal optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1386-1391.
胡玉禧, 周绍祥, 相里斌等. 消热差光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(10):1386-1391.
- [8] CHANG Jun, JIANG Hui-lin, WENG Zhi-cheng. Design of wide angle space optical systems of long focal length [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, **24**(1):42-44.
常军, 姜会林, 翁志成. 大视场、长焦距空间光学系统的设计 [J]. *兵工学报*, 2003, **24**(1):42-44.
- [9] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jian-jun. Long wave infrared fast objective with wide field of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):460-463.
沈为民, 薛鸣球, 余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(4):460-463.
- [10] BAI Jian, SUN Ting, SHEN Yi-bing. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7):997-1002.
白剑, 孙婷, 沈义兵. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(7):997-1002.
- [11] STONE T, GEORGE N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. *Appl Opt*, 1988, **27**(14):2960-2971.
- [12] FOCUS SOFTWARE ZEMAX. Optical design program user's guide version 8.0 [M]. Tucson, AZ 85731-8228 USA: Focus Software incorporated, 1999, 155-156.

Design on Athermal Infrared Diffractive-Refractive Hybrid Inversed Telephoto System in 8 ~ 12 μm

HAN Ying, WANG Zhao-qi, YANG Xin-jun, WU Huan-bao

(Institute of Modern Optics, Nankai University, The Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, MOE, Tianjin 300071)

Received date: 2005-07-06

Abstract An infrared diffractive-refractive hybrid inversed telephoto system in 8~12 μm with 14° field of view is designed. The effective focal length and back working distance of the system are respectively 100 mm and 113 mm, while the F number is 2.0. The system which has only three lenses contains two negative germanium lenses and one positive zinc selenide lens. The binary surface and high order aspheric surface are used to simplify the configuration, lighten the weight and improve the image quality. The working temperature range is from -40°C to 100°C. The system is applicable to the uncooled staring focal plane array (FPA) detector which has a format of 640×480 and pixel pitch of 40 μm . Particularly, the wide field of view, the long back working distance and the high image quality in -40°C~100°C, all of which make the system satisfy the necessary specifications both in martial and civil applications.

Key words Inversed telephoto; Athermal design; Diffractive-refractive hybrid system



HAN Ying was born in 1981 and received her B. S. degree from Dalian University of Technology in 1999. At present, she is a M. S. candidate in the Institute of Modern Optics, Nankai University. Her research interests include binary optics and optical design.