

文章编号:1002-2082(2009)04-0683-05

3.7 μm ~4.8 μm 波段折/衍混合红外 光学系统的无热化设计

沈良吉, 冯卓祥

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 研究了混合式红外光学系统的光学无热化设计方法, 在设计中引入了热差互补的设计思想, 将无热化应满足的设计方程作为CODE V中优化的约束条件, 设计出工作于3.7 μm ~4.8 μm 波段、F/#为2、视场角为 $\pm 5^\circ$ 、焦距为70 mm的具有100%冷屏效率的折/衍混合式消热差物镜。该系统在 -40°C ~ 60°C 温度范围内成像质量接近衍射极限, 可供像元大小为15 μm 的高分辨率致冷型凝视焦平面探测器使用。

关键词: 无热化; 红外光学系统; 折/衍混合光学系统系统

中图分类号: TN216

文献标志码: A

Athermal design of refractive/diffractive hybrid infrared optical system working at 3.7 μm ~4.8 μm

SHEN Liang-ji, FENG Zhuo-xiang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: A method to design the hybrid athermal infrared optical system is studied. A design concept of the mutual compensation of the thermal dispersion and chromatic dispersion was introduced in the design, in which the equations that the athermal design should meet are acted as a constraint condition in the optimization. A refractive/diffractive hybrid athermal infrared optical system, whose cold shield efficiency is 100%, F/number is 2, field of view is $\pm 5^\circ$, effective focal length is 70 mm and working wavelength is 3.7 μm ~4.8 μm , is designed. The image quality of the system approaches the diffraction limit at the working temperature of -40°C ~ 60°C . The system can be compatible with the high-resolution cooled staring focal plane detector whose pixel size is 15 μm .

Key words: athermalization; infrared optical system; refractive/diffractive hybrid optical system

引言

通常, 军用红外光学系统要求在 -40°C ~ $+60^\circ\text{C}$ 内具有稳定的光学性能, 尤其在导引头等应用场合要求达到无热化设计, 自适应达到最佳像面稳定。而工作于3 μm ~5 μm 波段的大多数红外透射光学材料的折射率随温度变化显著。同时, 当环境

温度变化时, 光学元件的曲率、厚度和间隔也将发生变化, 这一系列的因素使得红外系统产生热离焦, 导致成像质量急剧下降。因此, 如何使红外光学系统在要求的温度范围内具有稳定的性能, 同时不增加系统的尺寸、质量及成本, 使其具有较好的可靠性与稳定性, 成为军用、空间红外光学系统设计

收稿日期: 2008-09-16; 修回日期: 2008-11-10

作者简介: 沈良吉(1984-), 男, 湖北省武汉人, 西安应用光学研究所读研究生, 主要从事红外光学仪器研究与设计工作。
E-mail: 84905341@163.com

的一个方向。

在目前实现红外光学系统无热化设计的方法中, 光学被动补偿由于其结构相对简单、尺寸小、重量轻、系统可靠性高等特点受到极大的重视^[1]。特别是采用衍射光学元件(或二元光学元件)构成的混合(hybrid)系统, 由于衍射元件独特的温度特性, 在合理分配光焦度的情形下, 可以用较为简单的结构实现整个系统像面温度的自动补偿^[2]。

实现光学被动补偿的基本出发点是合理选择光学结构参数使温度变化从而导致像面离焦与仪器壳体尺寸随温度的变化一致。依据这种设计方法, 本文用硅和锗 2 种材料设计了折/衍混合式消热差物镜。设计方案适合于像元间距为 15 μm 的高分辨率制冷型凝视焦平面探测器。

1 光学被动减热差理论

1.1 折射元件和衍射元件的热差系数

通常情况下, 光学元件的温度特性由光学材料的热膨胀系数表征^[3-4]。按线膨胀系数定义引入折射元件的热差系数 T_r , 即单位温度变化引起的焦距的相对变化:

$$T_r = \frac{df}{fdT} = -\frac{d\varphi}{\varphi dT} = \alpha_g - \frac{1}{n-1} \frac{dn}{dT} \quad (1)$$

对衍射元件, 它的焦距 f 决定于中心波长 λ_0 和环带半径 r_m , 第 m 个环带对应的焦距为

$$f_m = \frac{n_0 r_m^2}{2m\lambda_0} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

参照折射系统光学材料热膨胀系数的定义, 忽略介质折射率随温度的变化, 对于基体材料线膨胀系数为 α_g 的衍射元件, 其热差系数表示为

$$T_d = 2\alpha_g \quad (3)$$

在薄透镜模型下它与组成透镜的形状无关, 仅与材料的特性有关。这是折射元件和衍射元件的热差系数最显著的区别。

1.2 折射元件和衍射元件的色差系数

除温度变化可导致透镜焦距发生变化外, 入射波长的改变也会引起焦距的变化。定义色差系数为波长改变引起的焦距相对变化率^[2]。对于传统折射元件, 假设工作波长为 $\lambda_f \sim \lambda_c$, λ_0 为中心波长, 则 $\lambda_f \sim \lambda_c$ 内折射薄透镜焦距的变化为

$$\Delta f = \frac{\frac{1}{n^{\lambda_c} - 1} - \frac{1}{n^{\lambda_f} - 1}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad (4)$$

式中 n^λ 表示透镜材料在入射光波长为 λ 时的相对

折射率。

传统折射元件的色散系数定义为

$$C_r = \frac{\Delta f}{f} = \frac{n^{\lambda_f} - n^{\lambda_c}}{n^{\lambda_0} - 1} = \frac{1}{V_{ref}} \quad (5)$$

该值恰好为阿贝常数的倒数。

类似于折射元件的阿贝数定义, 衍射元件阿贝数为

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c} = \frac{\lambda_0}{\lambda_f - \lambda_c} \quad (6)$$

则衍射元件色散系数为

$$C_d = \frac{\lambda_f - \lambda_c}{\lambda_0} \quad (7)$$

可见, 衍射光学元件色散阿贝数为负值, 不同于折射光学元件的正色散阿贝数, 二者具有不同的性质: 一是 C_{diff} 只和波长有关, 与材料的特性无关。即不管构成衍射元件材料的折射率如何, 只要在同一波段内, 就具有相同的色散能力; 二是 C_{diff} 的绝对值较传统玻璃或晶体组成的折射元件的色散 C_{ref} 系数大, 表明衍射元件具有较强的色散, 同时其色散与折射元件的色散相反, 这为折衍混合系统消除色差提供了可能。

1.3 折/衍系统无热化设计方程

要实现光学被动补偿, 系统光焦度分配须满足总光焦度、消轴向色差、消热差设计 3 个方程。对于由 k 个光学元件组成的非密接的分离式多透镜情形, 所需满足的关系可分别用 (8)~(10) 式表示。

总光焦度分配要求:

$$\sum_{i=1}^k h_i \varphi_i = \varphi \quad (8)$$

式中: φ 为系统的光焦度; h_i 为第一近轴光线在第 i 个透镜入射面上的径向高度; φ_i 为第 i 个透镜的光焦度。

总色差系数要求:

$$C_{total} = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 C_i \varphi_i) = 0 \quad (9)$$

式中: C_i 为第 i 个透镜的色差系数; h_i 为近轴光线在系统第一面的入射高度。

由于色差系数的定义与光热膨胀系数的定义相近, 所以可参照 (9) 式得出由温度变化引起的光焦度的相对变化。对于光学被动补偿式热补偿系统, 要温度变化时, 光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互抵消, 从而使整个系统不产生温度离焦, 这样可得到:

$$\chi_{total} = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_i \varphi_i) = \alpha_L L \quad (10)$$

式中: T_i 为第 i 个透镜的热差系数; α_L 为镜筒材料的线膨胀系数; L 为镜筒结构的总长度。

根据(8)~(10)式,通过求解方程组即可以得到系统的光焦度分配情况,再利用光学设计软件作进一步的优化。考虑到衍射面仅消除了热差及色差,而制冷型凝视焦平面探测器物镜要求冷屏效率为100%,即系统的孔径光阑要与探测器的冷屏面重合,故无法通过调整孔径光阑位置来减小其他像差,设计时主要通过引入非球面来消除。

依据以上理论计算出 3.7 μm~4.8 μm 波段内,硅(Si)、锗(Ge)、硒化锌(ZnSe)3种红外光学材料的折射和衍射光热膨胀系数,数据如表1所示。其中 dn/dT 、 α_g 、 T_r 和 T_d 的单位为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, C_r 单位为 10^{-4} 。

表1 常用红外材料热特性及光学特性

Table 1 Thermal properties and optical characters of common infrared material

材料	n_{λ_0}	dn/dT	α_g	T_r	T_d	C_r	C_d
Si	3.424	160	2.6	-63.40	5.2	19.8	-0.26
Ge	4.022	400	6.1	-126.27	12.2	54.93	-0.26
ZnSe	2.252	60	7.6	-35.06	15.2	22.20	-0.26

2 设计方法及结果

对于像元间距为 15 μm 的致冷型凝视焦平面探测器物镜,要求在 30 lp/mm 空间频率处光学传递函数接近衍射极限,弥散斑小于 15 μm。系统采用四片式佩茨瓦尔物镜作为初始结构,焦距为 70 mm, $F/\#$ 为 2。镜筒材料选用铝合金,线膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。考虑到目前的加工能力,衍射结构选择在锗平面基体上,设计中采用旋转对称的衍射结构,衍射级次为 1,其位相系数选择 2 项,即位相表达式中的最高次幂为 4。在设计软件 Code V 中,衍射基面面型的描述为

$$\varphi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (C_1 r^2 + C_2 r^4) \quad (12)$$

式中: λ_0 为中心波长; C_1 和 C_2 为位相系数。

首先通过求解上述消热差满足的 3 个方程得到系统光焦度的分配。利用 CODE V 进行优化时,将热补偿条件(10)式用 CODE V 函数表示出来作为优化的一项约束。

按逐步逼近的原则,在控制色差、热差约束的条件下,释放各个透镜的优化变量,同时引入非球面,反复分析与优化中间结果,直到获得令人满意的、满足设计指标和性能要求的系统。

需要指出的是,以上的热补偿条件是针对薄透镜模型而建立的,使用时应给予一定的修正。若严格按以上 2 个约束条件作优化,一般得不到收敛的解。设计时,适当地放大色差约束条件,使得系统总色差系数略小于 0,引入的微小色差可利用非球面来消除。优化后,结构图如图 1 所示,结构参数如表 2 所示。其中,面 10 和面 12 为探测器的窗口及滤光片。面 10 到像面的尺寸由探测器厂商提供。

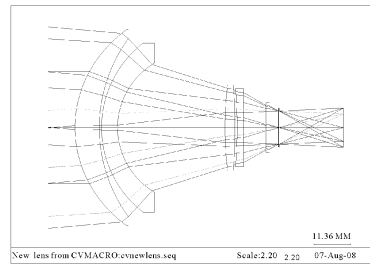


图1 消热差光学系统结构图

Fig. 1 Structure of athermal optical system

表2 消热差光学系统结构参数

Table 2 Structural parameters of athermal optical system

面序号	面型	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃材质	特性
1	非球面	36.117	7.588	硅	折射
2	球面	47.131	0.700		折射
3	球面	33.356	5.000	锗	折射
4	非球面	23.431	33.545		折射
5	球面	112.836	3.100	硅	折射
6	球面	-175.619	0.700		折射
7	球面	-144.574	2.000	锗	折射
8	球面	无穷大	0.000		折射
9	球面	无穷大	7.000		衍射
10	球面	无穷大	1.00	硅	折射
11	球面	无穷大	2.75		折射
12	球面	无穷大	0.30	锗	折射
13	球面	无穷大	0.12		折射
光阑	球面	无穷大	20.00		折射
像面	球面	无穷大			折射

面 1 面型方程:

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + Ar^4 + Br^6,$$

($c = 2.76878 \times 10^{-2}$, $k = -0.15$, $A = -0.223900 \times 10^{-6}$, $B = -0.502986 \times 10^{-10}$).

面 4 面型方程:

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + Ar^4, (c = 4.26785 \times$$

10^{-2} , $k = -0.026$, $A = 0.719086 \times 10^{-6}$).

衍射面(面 9)特性参数:衍射级次为 1,中心波长 4.25 μm,位相系数分别为 $C_1 = 1.4 \times 10^{-4}$, $C_2 = -1.822 \times 10^{-7}$ 。

3 成像质量评价

对中心视场(0°)、带视场(3.5°)、边缘视场(5°) 3个视场进行光路追迹, 主要对成像质量恶化程度最大的一40℃和60℃2个工作环境作分析。图2、图3和图4分别为该系统在一40℃和20℃和60℃时的MTF情况。可以看出, 系统在一40℃~60℃温度范围内, 30 lp/mm空间频率处, 3个视场光学传递函数值基本接近衍射极限值。一40℃、20℃和60℃时3个视场点列图直径RMS最大值分别为6.55 μm、4.82 μm和8.00 μm, 均小于一个像元间距的尺寸, 满足设计要求。

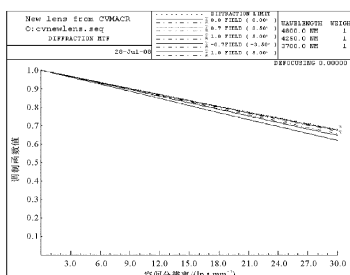


图2 20℃的调制函数曲线图

Fig. 2 Curves of modulation transfer function at 20℃

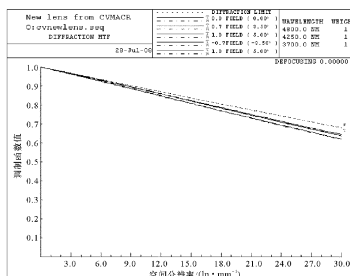


图3 -40℃的调制函数曲线图

Fig. 3 Curves of modulation transfer function at -40℃

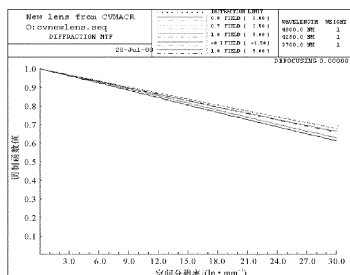


图4 60℃的调制函数曲线图

Fig. 4 Curves of modulation transfer function at 60℃

对系统作波前分析, 图5显示了中心波长4.25

μm处的波像差PV值在3个视场内随温度的变化情况。可见在一40℃~60℃温度范围内, 波像差PV值最大为0.217λ(一40℃时边缘视场处), 小于“瑞利判据”标准: 即当实际波面与理想波面的最大波像差小于0.25λ时, 此波面可看作无缺陷情形。一40℃~60℃温度范围内系统的最大热离焦量为13.6 μm(一40℃), 小于系统焦深34 μm(±2λ₀(F/#)²)。

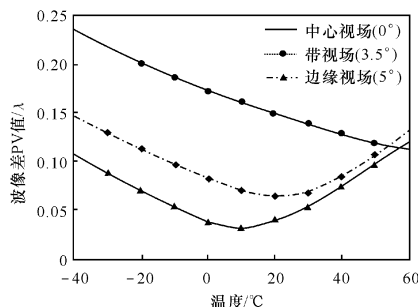


图5 不同视场下环境温度和波像差关系图

Fig. 5 Environment temperature versus wavefront aberration at different field of view

4 结束语

为提高光学系统对温度的自适应能力, 本文给出了中波红外物镜光学无热化设计的原理, 设计结果及像质评价。在原有折射系统基础上引入衍射元件, 采用热差互补的设计思想, 同时将无热化满足的方程成功地引入到设计中作为约束条件完成了优化设计。设计的物镜在一40℃~60℃工作温度范围内系统MTF均接近衍射极限, 完全满足设计需求。可应用于要求体积小、重量轻、成本低、可靠性高而工作温度范围大的军用或空间红外光学系统中。

参考文献:

[1] TAMAGAWA Y. Multilens system with design with an athermal chart[J]. Appl. Opt., 1994, 33(34): 8009-8013.
 [2] BEHRMANN G P, BOWEN J P. Influence of temperature on diffractive lens performance[J]. Appl. Opt., 1993, 32(14): 2483-2489.
 [3] 焦明印, 冯卓祥. 采用衍射元件实现消热差的混合红外光学系统[J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1364-1367.
 JIAO Ming-yin, FENG Zhuo-xiang. Athermalized

infrared hybrid optical system by employing diffractive element[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(11): 1364-1367. (in Chinese with an English abstract)

- [4] 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.

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. (in Chinese with an English abstract)

- [5] LAIKIN M. Lens design[M]. 3rd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.

(上接第 668 页)

transmission and 3 μm ~15 μm high reflection[J]. Laser & Infrared, 1979(10):1-11. (in Chinese with an English abstract)

- [4] 林炳,于天燕,刘定权,等. 红外/可见光宽带分色片设计与制备[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(5):

393-396.

LIN Bing, YU Tian-yan, LIU Ding-quan, et al. Design and deposition of infrared/visible wide-band color separation filters[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23(5): 393-396. (in Chinese with an English abstract)