

文章编号: 0253-2239(2005)11-1535-4

8~14 μm 波段折衍混合红外光学系统的热补偿设计

张 羽¹ 杨长城² 杨坤涛¹

(¹ 华中科技大学光电系, 武汉 430074)
(² 华中光电技术研究所, 武汉 430074)

摘要: 大多数军用和空间光学仪器的工作环境温度变化范围都较大, 温度变化时光学元件的曲率、厚度和间隔都将发生变化, 同时元件基体材料的折射率及所在介质的折射率也将发生变化。由于红外光学材料的折射率温度系数 dn/dT 较大, 环境温度对红外光学系统的影响显得尤为严重。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引起的系统性能的降低。利用衍射元件独特的温度特性实现红外光学系统热补偿设计的方法, 设计了波段为 8~14 μm 、视场为 16° 的折衍混合红外光学系统。该系统使用硒化锌和锗两种红外材料, 在 -40~60 °C 的温度范围内的成像质量接近衍射极限, 并且体积小、结构简单, 重量轻。

关键词: 光学设计; 红外光学系统; 热补偿设计; 折衍混合系统

中图分类号: TG502.33 文献标识码: A

Design on Athermal Infrared Diffractive/Refractive Hybrid Optical System in 8~14 μm

Zhang Yu¹ Yang Changcheng² Yang Kuntao¹

(¹ Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)
(² Huazhong Institute of Optoelectronic Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Most optical instruments for military and aerospace application are expected to perform over a wide temperature range. The variation of the temperature will change the lens's curvature, thickness and interval, as well as their refractive index and the refractive index of the surrounding. Because of the large temperature coefficient of the material's refractive index, infrared optical systems often suffer from the performance degradation seriously. For this reason, several active or passive compensation mechanisms have to be appended to thermal imaging systems to compensate the performance degradation with temperature changes. Thermal properties of the refractive lens and diffractive lens are studied, and a method for designing athermal diffractive-refractive hybrid system in infrared region is introduced. An infrared diffractive-refractive hybrid optical system in 8~14 μm with 16° field of view is designed. In this system, two materials of Zinc selenide and Germanium are used, and the image quality of the system achieves diffractive limit at the temperature ranging from -20 °C to 60 °C, with a compact structure and light weight.

Key words: optical design; infrared optical system; athermalization; refraction-diffraction hybrid system

1 引 言

大部分现代光学仪器, 尤其是军用和空间光学仪器, 通常都要求在一个较宽的环境温度范围内具有稳定的性能。由于温度变化时光学元件的曲率、厚度和间隔将发生变化, 同时元件基体材料的折射率及所在介质的折射率也将发生变化, 直接导致了系统性能的下降。对于红外光学系统尤其如此, 由于红外光学材料的折射率温度系数非常大, 是普通

的透可见光的光学材料的几十倍, 这就使得环境温度对红外光学系统性能的影响显得尤为严重。

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。现有的补偿方式有机械式、机电式和光学式等^[1~3]。但无论是机械被动补偿法还是机电主动补偿法都只补偿像面位移, 无法保证焦距的补偿; 而且, 不可避免地使系统复杂化, 体积变大, 重量

作者简介: 张 羽(1978~), 男, 河南淮阳人, 硕士研究生, 主要从事光学设计的研究。E-mail: hustzy@163.com

收稿日期: 2004-11-26; 收到修改稿日期: 2005-06-09

增加,可靠性会降低。而 Kanagawa、Wakabayashi 和 Tajime 等提出的光学被动补偿方式^[4],既保证了系统的焦距补偿,又具有结构相对简单、尺寸小、重量轻、系统可靠性高等特点,因而受到极大的重视。但传统的折射光学系统只能通过改变曲面的曲率或使用不同的材料来校正像差,需要至少三种以上的材料,并且系统比较复杂。由于衍射元件具有更大的设计自由度和独特的温度特性等优点,在合理分配光焦度的情形下,可以用更为简单的结构实现整个系统的热补偿设计^[5]。

2 折衍混合系统热补偿设计的原理

2.1 折射元件与温度的关系

假设折射率为 n 的光学材料构成的前后曲率半径分别为 r_1 和 r_2 的薄透镜,所在介质空间的折射率为 n_0 ,则其光焦度可表示为

$$\phi = (n - n_0)(1/r_1 - 1/r_2), \quad (1)$$

当环境温度均匀变化 ΔT 时, n, b_0, r_1 和 r_2 都将发生变化,因此光焦度 ϕ 也将随之发生变化,对(1)式两边求导,可以得到

$$\frac{d\phi}{dT} = \left(\frac{dn}{dT} - \frac{\delta n_0}{dT} \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (n - n_0) \left(-\frac{1}{r_1^2} \frac{dr_1}{dT} + \frac{1}{r_2^2} \frac{dr_2}{dT} \right), \quad (2)$$

由于透镜由同一材料制成,故有

$$\frac{dr_1}{r_1 dT} = \frac{dr_2}{r_2 dT} = \alpha_g, \quad (3)$$

将(3)式带入(2)式可得到折射元件的热差系数 T_r 为

$$T_r = \alpha_g - \frac{1}{n_0(n - n_0)} \left(n_0 \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right), \quad (4)$$

一般情况下透镜位于空气中,其常温折射率 $n_0 \approx 1$,则 T_r 可简化为

$$T_r = \alpha_g - \frac{1}{n-1} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right). \quad (5)$$

2.2 衍射元件与温度的关系

对于衍射元件,它的焦距 f 决定于中心波长 λ_0 和环带半径 r_m ,对第 m 个环带有

$$f_m = \frac{n_0 r_m^2}{2m\lambda_0}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

当温度发生变化时,环带半径 r_m 和空间介质折射率都将发生变化,他们的关系分别为

$$r_m(T) = r_m(1 + \alpha_g \Delta T), \quad (7)$$

$$n_0(T) = n_0 + \frac{dn_0}{dT} \Delta T, \quad (8)$$

将(7)式和(8)式代入到(6)式可得到衍射元件的焦距与温度的关系为^[8]

$$f(T) = f \left[1 + 2\alpha_g \Delta T + \alpha_g^2 (\Delta T)^2 + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \Delta T + 2 \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \alpha_g (\Delta T)^2 + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \alpha_g^2 (\Delta T)^3 \right], \quad (9)$$

对大多数材料, ΔT 二次方和三次方的系数都在 $10^{-16} \sim 10^{-11}$ 数量级,远小于 ΔT 的系数,可以忽略不计。由此参照折射元件的热差系数定义,可以得到衍射元件的热差系数为 T_d :

$$T_d = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}. \quad (10)$$

由上面的讨论可以看出热差系数表示了折射或衍射光学系统在温度均匀变化时其焦距的变化率,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。折射元件的热差系数是折射率和膨胀系数的函数,而衍射元件的热差系数与材料折射率无关,仅是材料线膨胀系数的函数。并且可以看出,由于红外材料的折射率温度系数 dn/dT 非常大,所以折射元件热差系数 T_r 始终为负值,而衍射元件的热差系数 T_d 始终为正值。

2.3 热补偿设计的基本原理

光学系统的一般热补偿过程类似于变焦距光学系统的变焦过程。变焦过程通过改变镜组间的间隔来改变系统的焦距并补偿像面的移动,以保持像面的稳定。光学热补偿则是利用各镜组的焦距随温度的不同变化规律,使系统的像面保持稳定。

要实现热补偿设计,系统必须满足总光焦度,消轴上色差,热补偿方程,可分别用(11)式、(12)式和(13)表示^[9,10]:

$$\sum_{i=1}^4 h_i \phi_i = \phi, \quad (11)$$

其中 ϕ_i 为第 i 个透镜的光焦度, h_i 为近轴光线在第 i 面上的入射高度, ϕ 为系统的总光焦度。

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^4 (h_i^2 \omega_i \phi_i) = 0, \quad (12)$$

其中 ω_i 为第 i 个透镜的色散因子,也就是色散引起的光焦度的相对变化, h_1 为近轴光线在系统第一面的入射高度。因为色散因子的定义与光热膨胀系数的定义相近,所以可参照(12)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的热补偿系统,要求当温度变化时,光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互抵消,从而使整个系统性能保持稳定,这样可得到

$$\left(\frac{1}{h_1\phi}\right)^2 \sum_{i=1}^4 (h_i^2 T_i \phi_i) = \alpha_L L, \quad (13)$$

式中 α_L 为镜筒材料的线膨胀系数, L 为镜筒结构的总长度。

由 2.1 节和 2.2 节的讨论可知, 对于红外光学系统, 当温度升高时, 折射元件热差系数 T_r 始终为负值, 如果只有折射元件, (13) 式的左边始终为负值; 而镜筒材料的线膨胀系数大于零, 等式右边始终为正值。所以必须要引入热差系数为正值的衍射元件, 才能使温度变化时, 光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互抵消。

3 系统设计和评价

设计系统的参量为: 焦距 $\phi' = 63$ mm, 相对孔径 $D/\phi' = 1/2.1$, 视场 $2\omega = 16^\circ$, 工作波段 $\lambda = 8 \sim 14$ μm, 工作温度范围 $-20 \sim 60$ °C 镜筒采用铸铝(线

膨胀系数 $\alpha_L = 23.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)。

根据常用红外光学材料的 T-C (Thermalization-Chromatized) 图, 综合考虑工作波段为 $8 \sim 14$ μm, 决定选择硒化锌和锗两种材料。采用三片式结构, 其中第三片为衍射面加工在锗基底第二面的折/衍混合元件。这样在设计时, 系统将被看作是四片式结构来进行设计。

通过求解(11)式~(13)式, 可得到系统的初始结构, 将初始结构数据输入 CODE V 软件进行优化, 为了更有效地消除球差和彗差, 将第 5 面设计为非球面, 第 6 面设计为二元光学衍射面, 如图 1 所示。为使系统实现热补偿, 应根据(12)式和(13)式编制 CODE V 软件的用户自定义约束函数, 对系统进行全局优化和局部优化, 最终得到所需要的热补偿系统, 系统的具体结构参量如表 1 所示。

表 1 折衍混合系统的结构参量

Table 1 The configuration parameters of system

| Surface | Surface type | Radius /mm | Thickness /mm | Glass | Mode |
|------------------------|--|------------|---------------|-------|----------|
| 1 (stop) | Sphere | -35.32 | 5 | Ge | Refract |
| 2 | Sphere | -41.69 | 31.6 | Air | Refract |
| 3 | Sphere | 130.32 | 7 | Znse | Refract |
| 4 | Sphere | -139 | 1 | Air | Refract |
| 5 | Asphere | -580.8 | 6 | Ge | Refract |
| 6 | Diffraction | Infinity | 76.06 | Air | Diffract |
| Diffraction properties | Diffraction order: 1; Construction wavelength: 10 μm, diffraction phase parameter: $C_1 = -0.00047919, C_2 = -5.6942 \times 10^{-8}$ | | | | |

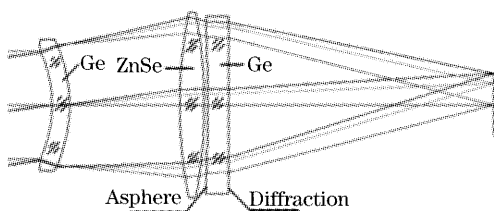


图 1 折衍混合系统的结构示意图

Fig. 1 The sketch map of hybrid optical system

利用 CODE V 的环境温度分析模块(ENV), 可得到系统在各不同温度下的像质情况和离焦情况。图 2(a)~图 2(c) 分别表示优化后的热补偿系统在 -20 °C、 20 °C 和 60 °C 时的调制传递函数(MTF)的变化情况。可以看到系统在 $-20 \sim 60$ °C 的温度范围内, 0 视场的调制传递函数值基本保持不变, 0.7 视场和全视场的调制传递函数值略有下降, 但仍在可接受的范围之内。因为系统在 $-20 \sim 60$ °C 的温

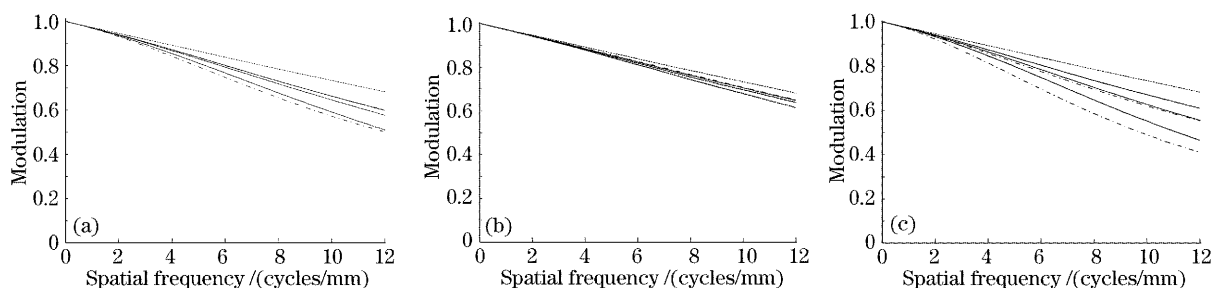


图 2 折衍混合系统不同温度时的调制传递函数

Fig. 2 Modified transfer function (MTF) diagram of hybrid optical system at different temperature

度范围内的最大离焦量为 $42.3 \mu\text{m}$, 小于系统焦距 ($88.2 \mu\text{m}$)。

与未进行热补偿设计的一般折射系统相比, 该系统的热不敏特性有了明显的改善。如图 3 所示实线表示折衍混合系统在 0° 视场、 12 lp/mm 时的调制传递函数值随温度变化的情况, 虚线表示折射系统的情况, 可以明显看出热补偿系统在 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内成像质量始终保持良好。

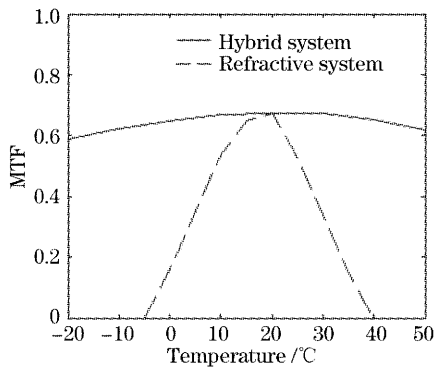


图 3 热补偿系统和折射系统在 0° 视场和 12 lp/mm 时调制传递函数值随温度变化情况的对比

Fig. 3 Comparison of temperature influence on MTF between hybrid system and refractive system in 12 lp/mm with 0° field of view

4 结 论

采用三片式结构和两种常用的红外材料锗和硒化锌设计了工作波段为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 、中视场、较大相对孔径的红外热补偿系统。讨论了衍射光学元件的热差系数与材料的折射率温度系数无关, 仅与材料的线膨胀系数有关, 并与折射元件的热差系数符号相反。所以采用折衍混合热补偿红外系统可以实现

在较宽的温度工作范围内以及较大的视场下得到接近衍射极限的成像质量; 而且具有体积小、结构简单等特点, 符合现代光学仪器的应用要求。

参 考 文 献

- Margaret B. Binary optics: A VLSI-based microoptics technology [J]. *Microelectronic Engineering*, 1996, **32**: 369~388
- Chris Bigwood. New infrared optical systems using diffractive optics[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4767**: 1~12
- A. P. Wood, P. J. Rogers, P. B. Conway *et al.*. Hybrid optics in dual-waveband infrared systems [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3482**: 602~613
- Kanagawa Y, Tajime T. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart[J]. *Opt Engng.*, 1996, **35**(10): 3001~3006
- Robert Brunner, Reinhard Steiner, Klaus Rudolf *et al.*. Diffractive-refractive hybrid microscope objective for 193 nm inspection systems[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5117**: 9~15
- Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized and achromatized refractive/diffractive infrared hybrid optical system [J]. *Optoelectronics Laser*, 2001, **12**(12): 1226~1229 (in Chinese)
- 焦明印, 冯卓祥. 实现消热差和消色差的折衍混合红外光学系统 [J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(12): 1226~1229
- Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Lu Zhenwu. Hybrid diffractive-refractive optical system design of head-mounted display for lightweight night vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1393~1396 (in Chinese)
- 张慧娟, 王肇圻, 卢振武. 折/衍混合微光夜视头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1393~1396
- Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. The study of the hybrid refractive 2 diffractive singlet in the eyepiece[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 236~239 (in Chinese)
- 张慧娟, 王肇圻, 李凤友等. 折/衍混合单透镜在目镜中的应用研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 236~239
- Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1392~1395 (in Chinese)
- 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
- Bai Jian, Sun Ting, Shen Yibin *et al.*. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 997~1002 (in Chinese)
- 白剑, 孙婷, 沈亦兵等. 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