

折射/衍射红外光学系统的消热差设计

郭永洪 沈忙作

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

陆祖康

(浙江大学光电信息工程系, 杭州 310207)

摘 要 研究了衍射光学元件的温度效应以及混合光学系统的消热差设计方法, 给出了视场 4.2° 、冷光栏效率 100%、温度范围在 $-30\sim 70^\circ\text{C}$ 的红外折射/衍射混合消热差系统的设计结果。

关键词 光学设计, 衍射光学, 消热差设计。

1 引 言

对于用在军事和空间的现代光学仪器通常都希望在一个很宽的温度范围内有稳定的性能。因此研究在一个很大的温度范围内有稳定性能的高质量的消热差红外光学系统便成为现代红外光学系统研究的一个热点。

光学系统的消热差设计是通过一定的补偿技术, 使光学系统在一个较大的温度范围内保持成像质量不变。通常有三种方法: 机械主动式、机械被动式、光学被动式^[1]。由于光学被动式消热差系统重量轻、结构简单, 更适合现代红外光学系统的应用要求, 因此得到了光学设计工作者的广泛关注, 人们也提出了一些设计的思路和方法^[2, 3]。但是, 目前对于光学被动式消热差系统的设计大都是折射系统^[2, 3], 系统比较复杂, 需要采用三种以上的材料。本文探讨含衍射光学元件的混合光学系统消热差设计, 给出能在较大视场范围内, 其成像质量接近衍射极限、有 100% 冷光栏效率、结构简单、符合现代红外光学应用要求的折射/衍射混合消热差红外光学系统。

2 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:

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

对于折射元件, 采用薄透镜模型, $\Phi = (n - n_0)(c_1 - c_2)$, 可以得到它的光热膨胀系数^[4]:

$$x_{f,r} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \alpha_g - \frac{1}{n - n_0} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right), \quad (2)$$

其中, α_g 为光学元件的线膨胀系数, n 为光学元件的折射率, n_0 为环境介质的折射率, c_1 、 c_2 是折射元件的曲率半径。

对于衍射光学元件, 它的焦距由环带的位置决定:

$$f = \frac{nor_m^2}{2m\lambda}, \quad (3)$$

式中, r_m 是 m 个环带的径向距离, λ 为工作波长。如图 1 所示。环带半径 r_m 与温度的关系可以表示为^[4]:

$$r_m = r_m(1 + \alpha_g \Delta T). \quad (4)$$

由此可以得到衍射元件的光热膨胀系数为:

$$x_{f, d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}, \quad (5)$$

可以看到, 折射元件的温度特性是由材料的膨胀系数和材料的折射率温度系数决定, 而衍射元件的温度特性只是由材料的膨胀系数决定而与材料的折射率特性无关。

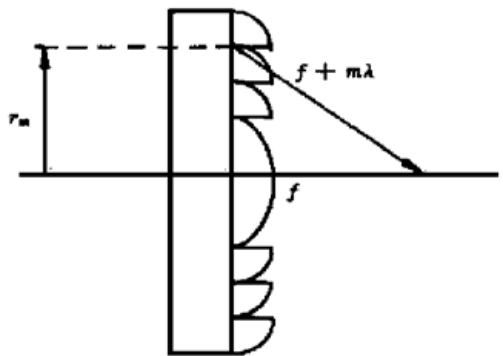


Fig. 1 Model of diffractive element

3 消热差系统的设计方法

对于一个光学系统, 由光学元件的色散所引起的离焦即轴向色差由下式给出^[5]:

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum (h_i^2 \omega \Phi_i), \quad (6)$$

式中 ω 为光学元件的色散因子, 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 V 的倒数:

$$\omega = -\frac{\Delta \Phi_i}{\Phi} = \frac{1}{V}, \quad (7)$$

这里, h_i 为近轴光线在透镜上的入射高度, Φ 为系统的光焦度, Φ_i 为透镜的光焦度。可以看到, 色散因子的定义与光热膨胀系数的定义相近, 与此类比, 便得出由光学元件的温度效应所引起的离焦^[3]:

$$df_b^T/dT = \left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum (h_i^2 x_i \Phi_i), \quad (8)$$

对于光学被动式的消热差系统, 要求光学元件产生的离焦同机械结构的离焦相补偿, 从而整个系统不产生温度离焦:

$$df_b^T/dT = \left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum (h_i^2 x_i \Phi_i) = \alpha_b L, \quad (9)$$

式中 α_b 为结构件的线膨胀系数, L 为结构件的长度。

4 设计结果

设计了一个口径为 60 mm、视场为 4.2°、波段为 7.7~10.3 μm 、焦距为 122 mm、冷光栏效率为 100%、温度范围为 -30~70°C 的红外折射衍射混合系统。如果系统透镜用锗, 而结构件材料用铝, 在 100°C 范围内, 系统的离焦量为 1330 μm , 远大于系统的焦深 165 μm 。使系统在温度变化时光学特性变差, 系统根本不能使用, 因此必须进行消热差设计。

考虑该系统由三个元件组成, 其光焦度分配满足总光焦度、消轴向色差、消热差设计三

个方程:

$$\sum_{i=1}^3 h_i \Phi = \Phi, \quad (10)$$

$$\Delta f_b^\lambda = \left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum (h_i^2 \omega \Phi) = 0, \quad (11)$$

$$df_b^T/dT = \left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum (h_i^2 x_i \Phi) = \alpha_b L, \quad (12)$$

对于整个系统,通过求解上述方程得到初始结构,由于采用了衍射光学元件,整个系统只用 Ge 和 KRS5。然后用光学设计软件 ZEMAX 优化,得到系统的结构,结构参数如表 1 所示,结构图如图 2 所示。其中第四面是衍射光学面,第二面和第六面为高次非球面,引入非球面的目的主要是简化结构,以适应空间光学轻小型化的需求。第四片透镜为探测器窗口。

Table 1. Constructional parameters of athermal system

surface	radius/mm	thickness/mm	glass
1	56.334	7.08	GE
2	70.115	8.89	AIR
3	52.256	5.12	KRS5
4	-102.43	0.04	AIR
5	13.673	9.98	KRS5
6	9.492	5.00	AIR
7	Infinity	1.50	GE
8	Infinity	2.00	AIR
STO	Infinity	20	AIR

图 3 中的实线表示消热差光学系统的 0° 视场、20 对线时的传递函数值在整个 $-30 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度范围内的变化情况,点线则表示全锗系统的情况,可以看到,消热差系统在整个温度变化范围内的成像质量均保持良好。

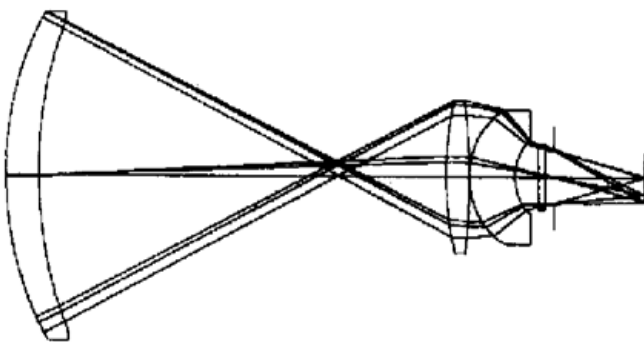


Fig. 2 Optical layout of athermal system

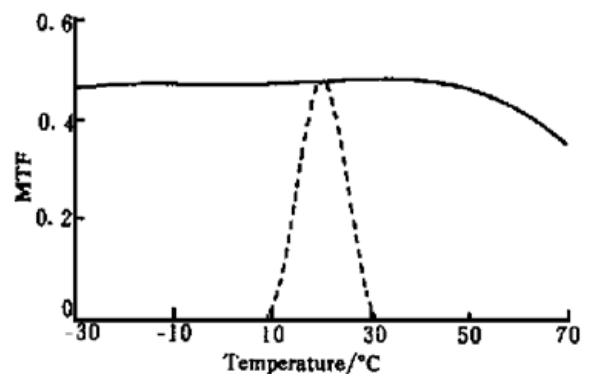


Fig. 3 Diffraction MTF of 0° field, 20lp, comparison between athermal system and all Ge system. — Athermal system, - - All Ge system

结 论 衍射光学元件具有同材料折射率温度系数无关的光热膨胀系数,与大多数红外材料的光热膨胀系数相反。采用含用衍射光学元件的折射/衍射混合消热差光学系统,不仅能在

较大视场范围内得到接近衍射极限的成像质量、有 100% 冷光栏效率、较宽的温度工作范围, 而且还有体积小, 结构简单等特点, 符合现代红外光学的应用要求。

参 考 文 献

- [1] 李 林, 王 焯. 环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望. *光学技术*, 1997, **23** (5) : 26~ 29
- [2] Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T *et al.*. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(10) : 3001~ 3006
- [3] Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T *et al.*. Multilens system design with an athermal chart. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(34) : 8009~ 8013
- [4] Behrmann G P, Bown J P. Influence of temperature on diffractive lens performance. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14) : 2483~ 2489
- [5] 王之江. 光学设计理论基础, 北京: 科学出版社, 1985. 142~ 144

Athermal Design for Infrared Diffractive/Refractive Optical System

Guo Yonghong Shen Mangzuo

(*Institute Of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Shuangliu, Chengdu 610209*)

Lu Zukang

(*Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310207*)

(Received 24 March 1999; revised 31 May 1999)

Abstract Thermal properties of the diffractive lens are studied, a method for designing athermal diffractive-refractive optical system in infrared region is introduced. An optical system with 100% cold shield efficiency, 4 degrees of field of view is designed, associated with high optical quality in large working temperature range - 30~ 70°C.

Key words optical design, diffractive optics, athermalization.