

文章编号: 0253-2239(2004)12-1595-4

可见光折/衍射混合光学系统消热差设计

王 茜 许士文

(哈尔滨工业大学航天电子科学与技术系, 哈尔滨 150001)

摘要: 由于一些可见光折衍射混合光学系统结构复杂, 光学材料种类繁多且光热性能差异大, 不能像红外系统那样通过解消色差、消热差方程组得到初始结构。通过分析衍射光学元件的温度特性, 采取使用衍射光学元件先消色差再消热差的方法, 完成了可见光波段遥感物镜的消热差设计。系统在 20 °C ~ 100 °C 范围内成像质量均保持良好, 调制传递函数下降范围在 6% 之内。设计结果表明利用衍射光学元件的混合光学设计使系统结构简单化, 并在要求的温度范围内性能稳定。

关键词: 应用光学; 消热差设计; 衍射光学元件; 混合光学系统; 可见光波段

中图分类号: O439 文献标识码: A

Athermal Design for Visible Diffractive-Refractive Hybrid Optical System

Wang Qian Xu Shiwen

(Department of Electronic Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 26 May 2003; revised 5 March 2004)

Abstract: Because some visible hybrid diffractive-refractive optical systems were complicated, the optical and thermal properties of glass materials in visible band were various. The initial system configurations of the visible hybrid optics could not be reliably gained by achromatic and athermal equations like those of the infrared hybrid optics. The thermal property of diffractive optical elements was analyzed, and achromatic design and athermal design were separately carried through in the optical system design, prompting the completion of designing visible-band, athermal camera lens for space applications. The image quality with the systems was uniform and the shifting range of MTF was confined within 6%, at 20~100 °C. Design result showed that hybrid optical system had compact structure and reliable performance within required temperature range.

Key words: applied optics; athermal design; diffractive lens; hybrid optical system; visible band

1 引 言

空间光学系统大都工作在变化的环境温度范围内。系统由于光学材料和结构材料的热不稳定性, 将引起系统焦距变化、像面位移(离焦)、成像质量恶化等。可见光材料的折射率温度系数虽不及红外材料的大, 但是由于工作的环境温度差大, 对系统的性能也有着不可忽略的影响。随着空间技术的发展, 太空探测和遥感的需要, 空间光学系统的消热差即无热化技术得到重视和发展。消热差的方式有机械、

机电和光学三种补偿方式^[1~6]。其中光学补偿由于其机构相对简单、尺寸小、重量轻、系统可靠性高等特点, 特别受到青睐。

另外, 最近对衍射光学元件热性质、材料性质和它们对衍射光学系统性能影响的研究工作促进了衍射光学元件温度补偿设计技术的发展。折射透镜和衍射透镜的热性能有根本的区别。例如, 衍射透镜焦距的变化仅仅是透镜材料热膨胀系数 a_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。利用折射和衍射透镜的独特热特性, 选择合适的透镜和镜筒材料, 使系统的光热膨胀系数和镜筒的光热膨胀系数相匹配。以便于使像的位置随温度的变化恰好对应于焦面位置随温度的变化。

E-mail: qianwang1007@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-05-26; 收到修改稿日期: 2004-03-05

本文在航天摄像折/衍射消色差物镜设计的基础上,通过分析系统的热特性,选择合适的光学元件材料实现在 20 °C~100 °C 范围内消除热差对系统焦距的影响。

2 衍射光学元件的温度特性

折射光学系统的温度特性^[1,7~9]用光热膨胀系数 $x_{i,r}$ 来表征,它的定义为由于透镜温度的变化而引起焦距的归一化变化:

$$x_{i,r} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = a_g - \frac{1}{n-1} \left(\frac{dn}{dT} \right), \quad (1)$$

焦距的变化是

$$\Delta f = f x_{i,r} \Delta T, \quad (2)$$

式中 n 是透镜的折射率, 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。 a_g 是透镜材料的热膨胀系数。

对于衍射光学元件^[1,3~5,8],它的焦距 f_0 决定于入射波长 λ_0 和环带宽度 r_m 如图 1(面浮雕衍射透镜的截面图)所示,波带半径 r_m 的确定要使从任一波带 m 的边缘到焦点 f_0 的距离等于设计波长 λ_0 的整数倍。在近轴区,有 $r_m \leq (f_0/m)^2$, 对于一个给定的 m 值,焦距 f_0 是

$$f_0 = \frac{n_i r_m^2}{2m\lambda_0}, \quad (3)$$

温度改变时 r 和像空间介质的折射率都将发生变化

$$r(T) = r(1 + a_g \Delta T), \quad (4)$$

$$n_i(T) = n_i + \left(\frac{dn_i}{dT} \right) \Delta T, \quad (5)$$

参照折射系统光热膨胀系数的定义,衍射元件的光热膨胀系数 $x_{i,d}$ 为

$$x_{i,d} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = 2a_g + \frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dT}. \quad (6)$$

温度变化时会引起衍射光学元件像差的变化^[2,8]。像差取决于衍射相位系数。衍射相位分布式为

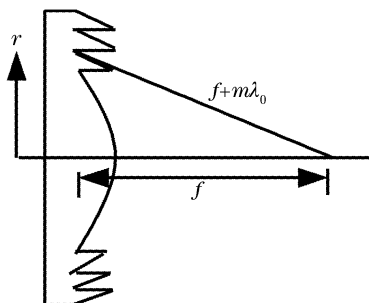


Fig. 1 Surface-relief diffractive lens

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \sum A_i r^{2i}, \quad (7)$$

式中 A_i 为衍射相位分布式的第 i 项系数,将(3)式代入(7)式。对于大多数材料 a_g 的 2 次方以上项为高阶小量($< 10^{-10}$),可以忽略不计。由此可得

$$\Delta A_i = -A_i 2i a_g \Delta T. \quad (8)$$

此外温度变化还将引起衍射效率的变化^[2,8],理论计算表明,对大多数基体材料由于温度变化而导致的衍射效率变化可以忽略不计。

假设整个光学系统^[1]由 m 个光学元件组成,则全系统的光热膨胀系数 x_i 为

$$x_i = f \sum_{k=1}^m \phi_k x_{i,k}, \quad (9)$$

式中 f 为全系统的焦距, ϕ_k 和 $x_{i,k}$ 分别为第 k 个光学元件的光焦度和光热膨胀系数。当 x_i 与镜筒材料的线膨胀系数一致时即可实现像面温度补偿。

3 系统设计

本文所设计的可见光折衍射混合摄像物镜,系统参量如下:焦距 400 mm,相对孔径 1/5,视场 8.6°,工作温度范围 20 °C~100 °C(受材料温度系数测量范围的影响)。由于此物镜采用像素大小为 10 μm 的 CCD 作为接受器件,系统的设计要求如下:20 °C~100 °C 温度范围内多色光调制传递函数(MTF)变化范围在 10% 之内,并且在 50 lp/mm 大于 0.5。

可见光系统的消热差设计原理和红外系统基本一致,即选择合适的玻璃材料使整个光学系统的光热膨胀系数与镜筒材料的线膨胀系数一致实现像面温度补偿。但是由于可见光系统自身的特点使得消热差设计又有其自身的特点。

首先,材料的选择范围不同。红外系统主要使用的材料只有几种,它们的热性能参量相差不大。可见光玻璃材料种类繁多,光热膨胀系数有一个宽的范围,包括正值和负值。这种特性是由于 dn/dT 可以是正或负引起的,取决于透镜的材料。在同时消色差、消热差设计时很难预先选取合适的玻璃材料。

并且可见光系统大都比较复杂,在设计过程中,并不能像红外系统,首先确定光学材料再求解消色差和消热差方程组求得初始结构。

另外由(6)式可见,衍射元件的光热膨胀系数 $x_{i,d}$ 受控于 a_g ,全是正值,变化范围较小,其大小和折射元件的光热膨胀系数有相同的数量级。在可见光混合系统消热差设计中起到重要的作用。对于红

外光学系统,衍射元件虽然有着与红外材料符号相反的光热膨胀系数,由于之间相差几个数量级,衍射元件的消热差功能不明显。

通过以上分析,我们确定在设计光学系统时首先完成消色差设计。由于系统中使用了衍射光学元件,可以实现高的成像质量。在此基础上保证各组元光焦度不变改换玻璃组合,使整个光学系统的光热膨胀系数与镜筒材料的线膨胀系数一致,从而完成消热差设计。

消色差光学系统结构如图 2 所示。



Fig. 2 Optical layout of the achromatic system

其中光学系统第二个面为衍射光学元件。系统在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内离焦(由光学设计软件模拟)可达到 $100\text{ }\mu\text{m}$, 远远大于系统的焦深 $14\text{ }\mu\text{m}$, 因此必须进行消热差设计。分析光学系统的结构形式: 折射元件光焦度依次为: $\varphi_1 = 0.00625$, $\varphi_2 = -0.00485$, $\varphi_3 = -0.00596$, $\varphi_4 = 0.00511$, 衍射光学元件光焦度 $\varphi_{\text{DOE}} = 0.002$ 。镜筒材料选取膨胀系数为 1.13×10^{-5} 的 15CrA。接下来的工作是改换适合的玻璃达到消色差的目的。

设计过程中特别考虑了衍射光学元件的性能参量。(8)式显示了温度变化对衍射光学元件衍射效率的影响。系统设计中,衍射元件的相位系数 A_i 在 10^{-5} 数量级以下,可见光学材料的 a_g 在 10^{-7} 数量级上,因此 ΔA_i 为高阶小量($< 10^{-10}$),可以忽略不计。在本文的混合光学系统中温度变化引起衍射光学元件像差的变化是微不足道的,在改变温度时不需要对衍射光学元件进行相位系数修正。

4 设计结果

在保证光焦度不变的基础上改换玻璃组合使系统达到消热差的目的。设计结果图 2 中的四片光学元件材料分别是 LaK4, ZF1, BaF1 和 ZK11。系统调制传递函数(多色光调制传递函数)值如下表 1。(W: 视场角; T: 子午面; R: 弧矢面)。

图 3 表示消热差系统 0° 视场、50 lp 的传递函数(多色光调制传递函数)在整个 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的变化情况。可见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,调制传递函数下

降范围在 6% 之内,满足设计要求。

Table 1 MTF of the athermal system

MTF	35 lp		50 lp		70 lp	
	R	T	R	T	R	T
$W=0^{\circ}$	0.855	0.855	0.790	0.790	0.710	0.710
$W=2.8^{\circ}$	0.855	0.836	0.789	0.760	0.706	0.667
$W=4.3^{\circ}$	0.851	0.799	0.789	0.716	0.701	0.610

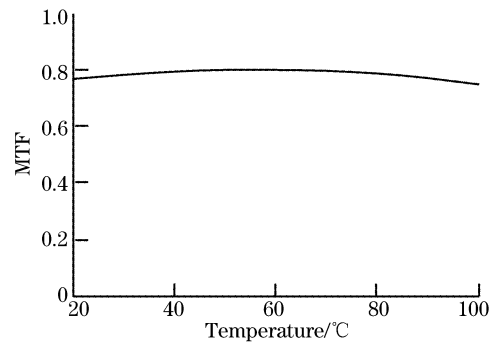


Fig. 3 Relationship between environment temperature and MTF

图 4(a)~图 4(c)分别为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时系统的多色光点列图。图中从上到下依次是全视场、0.7 视场和 0 视场(消色差谱段为 c, e, F' , 权重 $1:1:1$)弥散斑大小,均在 $9\text{ }\mu\text{m}$ 之内。弥散斑的大小同样说明图 1 所示的光学系统在 $20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的成像质量较好。

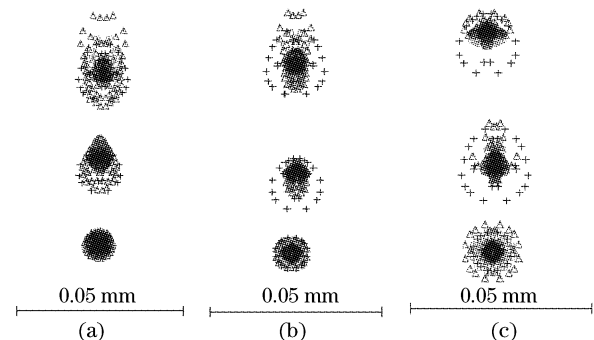


Fig. 4 Spot diagram of system. (a) $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

结论 可见光系统一般结构复杂,无法通过选玻璃、解消色差、消热差方程组来求得系统初始结构,因此采用先设计消色差光学系统,再通过换玻璃组合来消热差的设计方法。系统中使用了衍射光学元件,其光热膨胀系数由基底的膨胀系数决定,变化范围小,但是由于其特殊的色散特性可以使整个光学系统达到好的消色差效果,也间接起到了系统消热差的作用。因此在系统中加入衍射光学元件有利于实现消热差体积小、重量轻、像质要求高而温度范围大

的可见光系统设计。

参 考 文 献

- 1 Herzig H P. *Micro-Optics*. London: Taylor & Francis Ltd. , 1997. 259~281
- 2 Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11): 1364~1368 (in Chinese)
- 3 Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(10): 1392~1395 (in Chinese)
- 4 Bai Jian, Sun Ting. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(7): 997~1002 (in Chinese)
- 5 Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized and athermalized refractive/diffractive infrared hybrid optical system. *J. Optoelectronics Laser* (光电子·激光), 2001, **12**(12): 1226~1229 (in Chinese)
- 6 Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang. Design of athermal optical system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(10): 1386~1391 (in Chinese)
- 7 Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14): 2960~2971
- 8 Behrmann G P, Bown J P. Influence of temperature on diffractive lens performance. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2483~2489
- 9 Philip J Rogers. Use of hybrid optics in 3 ~ 5 μm minfrared band. *Proc. SPIE*, 1995, **2540**: 13~20