

文章编号: 1672-8785(2012)05-0032-04

红外光学系统无热化设计研究

卢意红 邓 强

(63811 部队, 四川 西昌 615000)

摘 要: 分析了温度对红外光学系统的影响。军用红外光学系统往往工作在温度变化较大的环境中, 因此必须采取有效的温度补偿措施以减少离焦。介绍了红外光学系统无热化设计的方法及原理。根据小型红外光学系统的设计参数, 提出了光学被动式无热化设计思路。试验结果表明, 光学系统在 $0 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内可保持良好的成像效果。

关键词: 红外光学系统; 无热化设计; 光学被动式补偿

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.05.005

Study of Design of Athermalizing Infrared Optical System

LU Yi-hong, DENG Qiang

(63811 Army, Xichang 615000, China)

Abstract: The influence of temperature on an infrared optical system is analyzed. The optical instruments for military use are usually used in a wide range of temperature. Therefore, to eliminate image plane defocusing, an effective temperature compensation measure must be taken. The athermal design approach and principle of an infrared optical system are presented. According to the design parameters of a small infrared optical system, an athermal design idea for passive optical compensation is proposed. The experimental result shows that the infrared optical system can achieve good imaging quality over the temperature range from $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: infrared optical system; athermal design; passive optical compensation

0 引言

军用红外光学系统一般工作在野外条件下, 环境温度的变化范围较大, 这对其使用构成了严峻的考验。随着航天事业的不断发展, 人们对红外光学系统成像质量的要求也越来越高。针对常温条件设计的光学系统在一般条件下是可行的, 但是在环境温度范围较宽的条件下, 由于光学材料和机械材料的热效应, 光学系统的一些参数会发生变化。例如, 光学元件的折射率、曲率和厚度等都会随温度的变化而变化, 使系统的最佳像面发生偏离, 导致系统成像质量较差, 图像模糊不清和对比度下降, 从而影响

红外光学经纬仪的性能。因此, 在设计红外光学系统的过程中, 需要采用一定的无热化技术来消除温度的影响, 使红外光学系统能够在一个较宽的温度范围内保持良好的成像质量。

1 温度变化对红外光学系统的影响

1.1 温度变化对光学元件折射率产生的影响

光学材料的折射率温度系数 dn/dt 是一个随温度变化的量。表 1 列出了常见红外材料的主要性能参数。

由表 1 可知, 锗 (Ge) 单晶的 dn/dt 值约为 $396 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 而 K9 玻璃的 dn/dt 值仅为 $2.8 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。由此可见, 红外光学材料的 dn/dt

收稿日期: 2012-04-11

作者简介: 卢意红 (1983-), 女, 江西高安人, 硕士, 主要从事光学测量研究。E-mail: luxiaoyi128213@163.com

表 1 常用红外材料的主要性能参数

材料	折射率 n (10 μm)	热膨胀系数 α_0 ($\times 10^{-6}$)	温度系数 dn/dt ($\times 10^{-6}$)	色散系数 V (8 ~ 12 μm)
Ge	4.0032	5.5 ~ 6.1	280 ~ 396	834.3
AMTIR	2.4976	12.8	72.0	115.2
TI_1175	2.6000	15.0 ~ 16.0	80.0	102.6
ZnS	2.1986	6.6	43.3	22.9
Irtran-2	2.1986	6.9 ~ 7.4	51.0	22.9
ZnSe	2.40652	8.54	100	58.0
rtran-4	2.40652	7.4 ~ 8.0	8 ~ 58.14	58.0
GaAs	3.0400	5.74	149.0	16.3
CdTe	2.67513	4.5 ~ 5.9	107.0	150.6

值比普通光学材料的 dn/dt 值大得多, 温度对红外光学元件折射率的影响尤为明显。当光学材料的折射率发生改变时, 光线的光程也会随之变化。

1.2 温度变化对光学元件的形态产生的影响

光学系统的温度特性可以用光热膨胀系数 α_0 来表征^[1]。其定义为系统焦距 f 对温度的导数与焦距 f 的比值, 即 $\alpha_0 = \frac{1}{f} \frac{df}{dT}$; 其意义为光学材料表面的曲率半径或厚度随温度变化的归一化值。当温度变化时, 光学材料表面会发生热胀冷缩。温度变化后, 光学材料的曲率半径和中心厚度变为

$$R' = R + R_i \alpha_{0_i} dT \quad (1)$$

$$D' = D + D_i \alpha_{0_i} dT \quad (2)$$

式中, R 、 R' 、 D 和 D' 分别为温度变化前后光学材料的曲率半径和中心厚度; dT 为温度变化量。

1.3 温度变化对透镜的焦移产生的影响

在温度变化下, 锗单透镜产生的焦移可以用式 (3) 表示:

$$\Delta f = f \alpha_0 \Delta T \quad (3)$$

式中, f 为单透镜的焦距, ΔT 为温度的变化量。

对于焦距为 400 mm 的 F2 中波红外锗单透镜, 当温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 变化到 60 $^{\circ}\text{C}$ 时, 锗单透镜产生的焦深为

$$\Delta = 2\lambda F^2 = 2 \times 0.0042 \times 2^2 = 0.034 \text{ (mm)} \quad (4)$$

温度变化的容许范围为

$$\Delta T = \frac{2\lambda F^2}{f \alpha_0} = \frac{0.034}{400 \times 147.37 \times 10^{-6}} = 0.6 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (5)$$

只有把 ΔT 控制在 ± 0.6 $^{\circ}\text{C}$ 以内, 才能使由温度产生的离焦量处在焦深范围以内。由此可见, 红外光学系统对温度比较敏感。因此, 对于在较宽温度范围内工作的红外光学系统, 需要采取热离焦补偿措施。

2 红外光学系统无热化设计方法

无热化是指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焦距不变或者变化很小^[2-3]。目前所采用的无热化技术主要包括机械被动式无热技术、机电主动式无热技术和光学被动式无热技术。

2.1 机械被动式无热技术

机械被动式无热技术是依靠某种机构轴向移动一片或几片透镜组来补偿像面漂移的 (见图 1)。这种轴向位移可以通过形状记忆合金获得, 也可以通过热敏材料的热胀冷缩获得。首先要计算出不同温度下的最佳像面的位置, 进而得出最佳像面的位移, 然后利用金属的伸缩量来

补偿最佳像面的位移。这种方法不能矫正由热效应引起的像差失衡,而且需要增加机械补偿器件,使得系统的体积变大,重量增加。张运强等人^[4]提出了一种在空空导弹光学系统中引入双金属补偿式无热化设计的新方法。

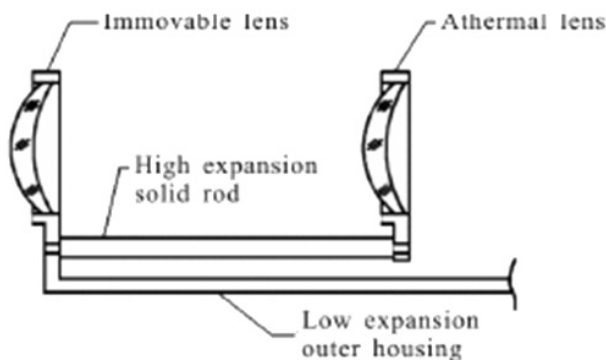


图 1 机械被动补偿的原理图

2.2 机电主动式无热技术

机电主动式无热技术是在光学系统内部放置若干个温度传感器,根据事先计算的位移数值,通过用电子控制微位驱动电机驱动补偿镜片轴向位移来补偿像面位移的。它需要用精密的机械驱动结构来提高调节灵敏度和保持光轴稳定。机电主动式无热技术原理简单、易于实现,但其需要添置电源和驱动电机等电子设备,增加了系统的体积和重量(系统光轴亦容易走动),降低了系统的可靠性。

2.3 光学被动式无热技术

光学被动式无热技术是利用光学材料在温度特性上的差异,通过对具有不同折射率温度系数的光学材料进行适当组合,使光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互补偿,从而将系统的离焦量控制在允许范围内的。这种方法具有结构简单、尺寸较小、重量较轻、系统可靠性好以及不需要供电等优点,其综合效率最高,因此受到了人们极大的重视。

3 设计思路

由于体积较小,小型光学系统没有足够的空间来实现电子主动式和机械被动式无热化设计。因此,本文采用光学被动式无热化技术。该

技术可以补偿由焦距变化引起的图像模糊,又可以直接对像质下降进行补偿,因而正在成为研究的热点。

3.1 光学被动式补偿设计原理

若要实现光学无热化设计,则组成的光学系统应该同时满足系统的光焦度、消色差和消色差要求。

由光学元件的色散引起的色差度为

$$\Delta f_b = \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 \omega_i \phi_i) \quad (6)$$

$$\omega_i = \frac{\phi_{\lambda_i}}{\phi} = \frac{1}{v} \quad (7)$$

由光学元件的温度变化引起的热差度为

$$df/dT = \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 x_i \phi_i) \quad (8)$$

式中, h_i 为第一近轴光线在第 i 个透镜上的入射高度, ϕ 为系统的光焦度, ϕ_i 为光学元件的光焦度, ω_i 为光学元件的色散因子, x_i 为透镜的光热膨胀系数。

为了使光学系统在较宽的温度范围内具有良好的成像质量,总光焦度必须满足:

$$\phi = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i \quad (9)$$

消色差度必须满足:

$$\Delta f_b = 0 \quad (10)$$

消热差度必须满足:

$$df/dT = \alpha_m L \quad (11)$$

式中, L 为结构件的长度, α_m 为结构件的线膨胀系数。

3.2 设计方案

本文设计的某型光学系统要求在 $0 \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内正常工作。这里采用光学被动式无热化设计方法。我们只采用具有不同光热系数的材料和球面面型进行设计,最终实现无热化设计。

表 2 列出了小型光学系统红外镜头的无热化设计参数。光学系统本身的无热化设计思路如下:

表 2 光学设计参数

光谱范围	3 ~ 5 μm
F 数	2
红外探测器	320×256 元凝视红外焦平面阵列 像元尺寸: 30×30 μm
无热化温度范围	-10 ~ 60 $^{\circ}\text{C}$

(1) 根据光学被动式无热化需满足光焦度、消热差和消色差的要求, 先通过求解式 (10) ~ 式 (12) 得到系统的初始结构。若只采用两种材料, 则方程组找不到合适的解, 此时需要采用三种材料。透镜材料选用常用的硅 (Si)、锗 (Ge) 和硒化锌 (ZnSe)。

(2) 用光学设计软件对其进行优化设计。通过软件模拟得到像面离焦量, 并求解出各材料的光焦度分配方案。

(3) 利用优化函数进行优化, 使透镜的光焦度处在一个合理范围内, 直到获得较好像质, 最后选取几个温度点进行全局优化。

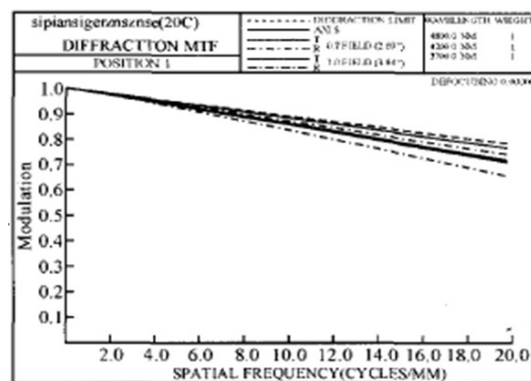
(4) 在结构设计中, 根据每片的外形尺寸和间隔计算出所需要的补偿量, 并通过在镜片的径向上采用灌注特种胶层和在轴向上采用热膨胀系数较高的材料进行补偿, 以避免镜片发生变形和减小镜片之间间隔的变化, 从而得到一个自身无热化的光学系统。

图 2 为系统处在 60 $^{\circ}\text{C}$ 温度状态下的调制函数曲线图。从图 2 中可以看出, 系统在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下的调制函数值基本接近衍射极限值。

4 结束语

红外折射光学系统中使用过多的光学元件, 会降低系统透射率, 弱化光学系统的性能,

导致实现完全的无热化比较困难。由于衍射元件的温度特性仅由材料的膨胀系数决定, 与材料的折射率特性无关, 且衍射元件的光热膨胀系数始终为正值, 而折射元件的光热膨胀系数有正有负, 因此采用配有衍射光学元件的折 / 衍混合系统, 可以减小色差并具有成像质量高、体积小、质量轻等优点, 而且在要求的温度范围内可保持性能稳定。在合理分配光焦度的情况下, 可以用简单的结构来实现整个系统的无热化。折 / 衍混合系统将会是红外光学系统无热化设计的优先发展方向。

图 2 60 $^{\circ}\text{C}$ 下的调制函数曲线图

参考文献

- [1] 李健, 张志明, 冯生荣. 弹载红外光学系统被动消热技术 [J]. 红外技术, 2005, 27(3): 196-201.
- [2] 胡玉禧, 周绍祥, 杨建峰, 等. 红外系统的光机热一体化设计 [J]. 红外技术, 2000, 22(2): 32-35.
- [3] 张良. 无热化双视场红外光学系统的设计 [J]. 光学技术, 2009, 35(4): 566-568.
- [4] 张运强. 光学系统无热化设计在空空导弹上的应用研究 [J]. 航空兵器, 2006, 30(3): 27-29.

新闻动态 News

美国洛克希德·马丁公司已经完成 GeoEye-2 卫星总装工作

据 www.spacedaily.com 网站报道, 美国洛克希德·马丁公司已经成功完成下一代高分辨率成像卫星 (GeoEye-2 卫星) 的星体与成像有效载荷的配对工作。GeoEye-2 卫星预计将于 2013 年发射升空。

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>



□ 岳桢千

INFRARED (MONTHLY)/VOL.33, NO.5, MAY 2012