

## 折反式中波红外双视场变焦系统无热化设计

姜 凯<sup>1,2</sup>, 周泗忠<sup>1</sup>, 李 刚<sup>1</sup>, 杨晓许<sup>1</sup>, 赵 睿<sup>3</sup>, 张恒金<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 利用折/衍混合透镜实现了宽温度范围双视场变焦系统的光学被动无热设计。系统工作波段为 3~5  $\mu\text{m}$ , 使用 320×240 红外制冷探测器, 像元大小为 30  $\mu\text{m}$ ×30  $\mu\text{m}$ , 焦距为 400 mm 和 800 mm 两档, F 数分别为 2 和 4。两系统通过机械结构改变冷光阑大小分别实现 100% 冷光阑效率。在两档共用组份采用一片折衍混合透镜, 对双视场系统两焦距位置消热差, 实现了一个衍射面对两档系统的无热化设计, 结构简单。设计结果表明: 在 -40~60  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内, 空间频率 18 lp/mm 处系统 MTF 值接近衍射极限, 成像质量良好, 实现了双视场变焦系统的无热化设计。

**关键词:** 红外变焦系统; 折/衍混合; 无热化; 光学设计

**中图分类号:** TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0403-05

## Athermalization design of catadioptric middle infrared dual field zoom system

Jiang Kai<sup>1,2</sup>, Zhou Sizhong<sup>1</sup>, Li Gang<sup>1</sup>, Yang Xiaoxu<sup>1</sup>, Zhao Rui<sup>3</sup>, Zhang Hengjin<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Hybrid refractive-diffractive design offers a new approach for athermalization design in wide temperature range. In this paper, working wavelength is in 3-5  $\mu\text{m}$ . For cool 320×240 infrared detector, pixel size 30  $\mu\text{m}$ ×30  $\mu\text{m}$ , this system can realize 400 mm and 800 mm dual filed-of-view and the F-number of 2/4 respectively. Two systems both can obtain the cold shield efficiency of 100% though controlling machine structure. A diffractive surface was introduced in the shared part of two different focal length position. It achieve the athermal design using only one diffractive surface. The evolution of the system was given in the temperature range -40-60  $^{\circ}\text{C}$ . The results show that at the spatial frequency of 18 lp/mm the MTF approach to the diffractive limitation.

**Key words:** infrared zoom optical system; hybrid refractive-diffractive; athermalization; optical design

收稿日期: 2012-06-22; 修订日期: 2012-07-19

基金项目: 中国科学院西部之光博士启动基金

作者简介: 姜凯(1985-), 男, 博士生, 主要从事红外光学系统设计方面的研究工作。Email: jiangkai2008.jj@163.com

导师简介: 周泗忠(1953-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电跟踪方面的研究工作。Email: szh@opt.ac.cn

## 0 引言

当光学系统经受高温或较低温度时,透镜和机械结构膨胀或收缩,透镜材料的折射率发生改变,进而使光学系统产生离焦或其他像差,影响系统的成像质量<sup>[1]</sup>。由于红外材料的折射率温度系数很大(比通常的可见光玻璃大 1~2 个数量级),所以环境温度的变化对红外系统的性能影响很大,而在某些航空和目标跟踪捕获领域,要求红外系统能够在 -40~60℃ 的温度范围内工作,甚至更高。因此,红外系统一般都要考虑消热差设计。红外变焦系统由移动部分组元实现变焦,加大了系统无热化的难度。红外变焦系统在军事观测领域具有重要的使用价值,其无热化的研究具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。

红外光学系统消热差设计是通过一些补偿措施使得光学系统在很宽的温度范围内保持成像质量的稳定性。常见的补偿方法有:被动式机械补偿、主动式机械补偿和被动式光学补偿。通过对三种补偿方法的比较可知,光学被动式补偿的光学系统机械结构更简单,重量更轻,无运动件,稳定性好,无需人工操作,自主性调节;光学被动式无热化设计是利用光学材料热特性之间的差异,通过不同材料之间的合理组合来消除温度的影响。随着衍射光学元件(DOE)的出现,可采用衍射元件和传统的折射系统混合进行消热差,利用衍射元件的光热膨胀系数始终为正,而折射元件的光热膨胀系数有正有负且绝对值大于前者的特点,可以通过正、负光焦度的热差效应来实现消热差设计。在近几年的研究中,采用折衍混合消热差已经取得了很好的效果<sup>[4-6]</sup>。

针对红外系统对消热差的高要求,文中实现了利用一片折衍混合透镜将中波红外两档变焦系统在 -40~60℃ 温度范围内无热化设计。

## 1 设计原理

### 1.1 折/衍射元件消热差原理

对于折射元件,采用薄透镜模型,光焦度可表示为  $\varphi=(n-n_{\text{air}})(c_1-c_2)$ ,则有

$$\frac{d\varphi}{dt} = \left( \frac{dn}{dt} - n \cdot \frac{dn_{\text{air}}}{dt} \right) (c_1 - c_2) + (n - n_{\text{air}})$$

$$\left( \frac{-1}{r_1^2} \cdot \frac{dr_1}{dt} + \frac{1}{r_2^2} \cdot \frac{dr_2}{dt} \right) \quad (1)$$

式中: $c_1$ 和 $c_2$ 为透镜的表面曲率; $r_1$ 和 $r_2$ 为透镜的表面曲率半径。且

$$\frac{1}{r_1} \cdot \frac{dr_1}{dt} = \frac{1}{r_2} \cdot \frac{dr_2}{dt} = \alpha_0 \quad (2)$$

那么有

$$\frac{d\varphi}{dt} = \varphi \left[ \frac{1}{n - n_{\text{air}}} \left( \frac{dn}{dt} - n \cdot \frac{dn_{\text{air}}}{dt} \right) - \alpha_0 \right] \quad (3)$$

定义温度焦距位移系数  $T$  为:单位光焦度透镜在单位温升后的光焦度改变量,则有

$$T = \frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{n - n_{\text{air}}} \left( \frac{dn}{dt} - n \cdot \frac{dn_{\text{air}}}{dt} \right) - \alpha_0 \quad (4)$$

如果光学系统不考虑空气折射率的变化,即

$\frac{dn_{\text{air}}}{dt} \approx 0, n_{\text{air}} \approx 1$ ,则公式(4)变为:

$$T = \frac{\beta}{n - 1} - \alpha_0 \quad (5)$$

由于折射光学元件  $dn/dt > 0$ ,且远远大于热膨胀系数  $\alpha_0$ ,因而折射光学元件一般具有正热差性,即温度增加,焦距变长;温度降低,焦距变短<sup>[7]</sup>。

对于衍射元件,采用薄透镜模型,如图 1 所示。

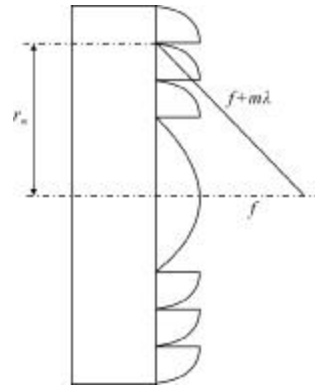


图 1 衍射元件

Fig.1 Diffractive element

用全周期  $2\pi = \lambda$  来设计,则有:

$$r_m^2 + f^2 = (f + m\lambda)^2 \quad (6)$$

式中: $r_m$ 为第  $m$  个环带的位置; $m$ 为环带数。

考虑近轴光区,即  $f \gg m\lambda$ ,此时衍射元件第  $m$  个环带的  $r_m$  为:

$$r_m^2 = (2m\lambda f)^{1/2} \quad (7)$$

此时,衍射透镜的光焦距为:

$$\varphi(r) = \frac{1}{f} = \frac{2m\lambda}{r_m^2} \quad (8)$$

对光焦距随温度变化取微分,则有:

$$\frac{d\varphi}{dt} = 2m\lambda r_m^{-3} (-2) \frac{dr_m}{dt} = \varphi(-2\alpha_g) \quad (9)$$

$\alpha_g$  为基底的热膨胀系数。由公式(9)可以得出衍射元件热差系数:

$$T_d = \frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = -2\alpha_g \quad (10)$$

式中,说明衍射元件热差系数为负,具有负热差性。

将折射光学系统的正热差与衍射元件的负热差性结合,理论上就可以消热差<sup>[8]</sup>。

### 1.2 消热模型

多个光组组合光学系统的情况要复杂一些,以某折反式中波红外双视场变焦系统为例,如图 2。将由温度变化所产生的离焦分为卡塞格林系统镜筒随温度变化所产生的像面变化、二次成像系统镜筒随温度变化产生的像面变化和光学系统随温度变化所产生的焦面变化三部分,通过使卡塞格林系统和二次成像系统镜筒随温度变化所产生的像面变化之和等于光学系统随温度变化所产生的焦面变化,以达到温度变化后探测器像面和整体光学系统焦面重合,进而实现消热差的目的,并以此方法建立物理模型来进行无热化研究。将折反式两档变倍系统分为卡塞格林系统和二次成像系统两个部分。两部分满足光焦距分配方程,分别消色差,由于第一部分反射系统无色差,可得到以下方程:

$$\varphi_a + h\varphi_b = \varphi \quad (11)$$

$$C_a = 0 \quad (12)$$

$$C_b = \sum_{i=1}^5 C_i \varphi_i / \varphi \quad (13)$$

式中: $\varphi_a$  和  $C_a$  为卡式系统的光焦距和总色差系数; $\varphi_b$  和  $C_b$  为二次成像系统的光焦距和色差系数; $h$  为归一化后二次成像系统的入射光线高度; $\varphi_i$  为二次成像系统每片透镜光焦距。

两个部分联合消热差,反射系统热差为其镜筒随温度变化而产生的一次像面位置的变化  $d_a$ ; 二次成像系统的热差由镜筒随温度变化导致的像面变化  $d_b$  和光学系统随温度变化导致的焦面变化  $T_b$  构成。

$$d_a = \frac{1}{\varphi_a} (1 + \alpha_m) \Delta t \quad (14)$$

$$d_b = \alpha_m L \quad (15)$$

$$T_b = \sum_{i=1}^5 T_i \varphi_i / \varphi \quad (16)$$

式中: $\alpha_m$  为镜筒材料热膨胀系数。

两部分镜筒随温度变化导致的像面变化,与光学系统随温度变化导致的像面变化相等,即可实现光机系统的无热化。即

$$T_b = d_a + d_b \quad (17)$$

图 2 为中波红外材料的 T-C 图,根据 T-C 图选择有利于消热差和校正其他像差的材料组合,文中中五片透镜选择 Si、Ge、ZnS 三种材料组合,结合公式(11)~(17),根据选定材料的热差系数 T 和色差系数 C 进行光焦距分配。由于求解五片透镜光焦距,未知量多于方程数,意味着初始结构有无数多光焦距分配方案,这也体现了光学设计的多样性和灵活性。光焦距分配方案的选取原则为:一是保证每片透镜的光焦距都不大;二是保证前组和后组各自的热差都不大;三是保证系统结构的合理性<sup>[9]</sup>。

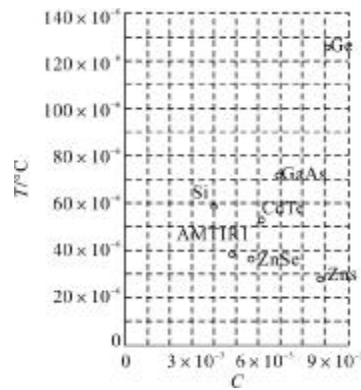


图 2 中波红外波段无热 T-C 图

Fig.2 T-C map of middle infrared material

## 2 光学系统设计及结果

在以上理论分析基础上建立了一个设计模型,主要针对双视场中波红外 3~5  $\mu\text{m}$  的二次成像系统,采用 320x240 红外制冷型探测器,像元尺寸 30  $\mu\text{m}$  x 30  $\mu\text{m}$ ,焦距 400 mm 和 800 mm,变倍比约为 2x, F 数为 2(f=400 mm) 和 4(f=800 mm),通过机械结构控制冷光阑大小,使冷屏效率在两个视场都达到

了 100%。卡塞格林一次成像系统和投影镜组的第一片透镜为系统两档共用的组份，通过切换投影镜组第 2~5 片透镜实现两档变焦。在两焦距共用组份(即投影镜组的第一片透镜)的第一面上加工衍射面(面型系数  $-5.32 \times 10^{-5}$ ,  $-1.74 \times 10^{-7}$ ), 仅用一个衍射面补偿了镜筒随温度变化产生的像面变化和光学系统随温度变化所产生的焦面变化之差, 实现了对双视场变焦系统的无热化设计。通过 CODE V 光学设计软件优化设计, 得到折反式两档变倍消热差系统, 如图 3 所示, 图(a)中  $f=400\text{ mm}$ , 图(b)中  $f=800\text{ mm}$ 。

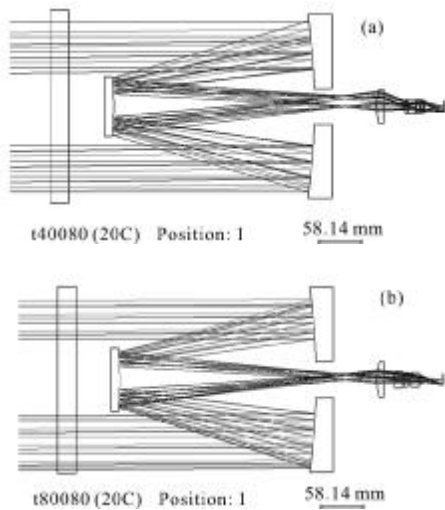


图 3 光学系统  
Fig.3 Optical system

### 3 像质评价

图 4 和图 5 分别为短焦和长焦光学系统在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的传递函数曲线, 由图可知, 在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内, 空间频率  $18\text{ lp/mm}$  处长焦和短焦系统的 MTF 值均接近衍射极限, 具有良好的成像质量。

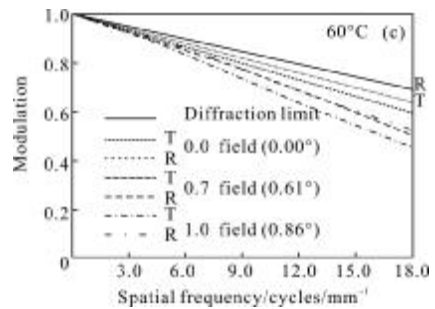
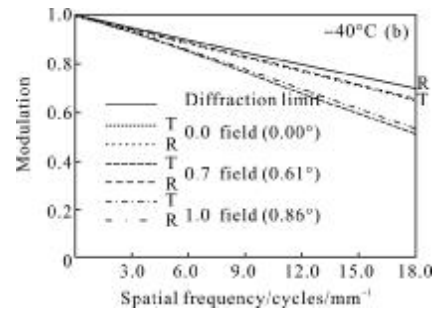
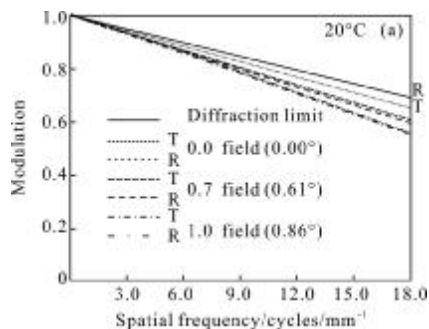


图 4 不同温度下  $f=400\text{ mm}$  系统的 MTF 曲线  
Fig.4 MTF curves of  $f=400\text{ mm}$  system at three temperature

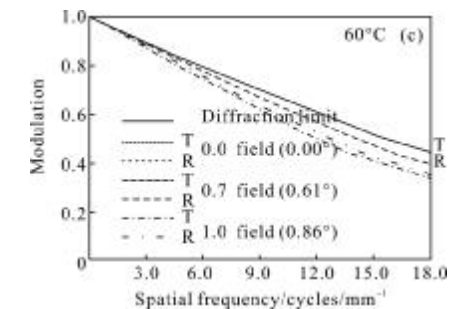
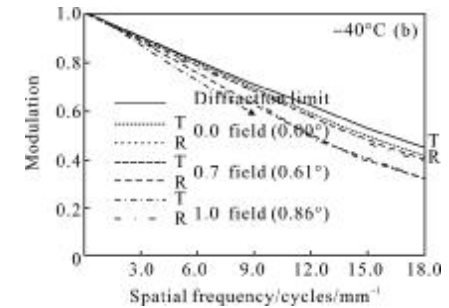
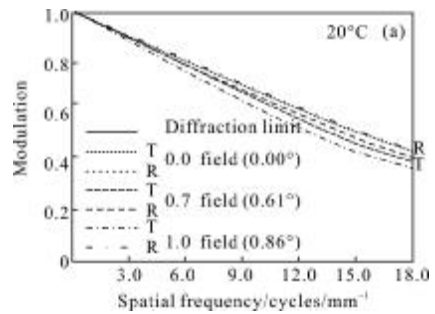


图 5 不同温度下  $f=800\text{ mm}$  系统的 MTF 曲线  
Fig.5 MTF curves of  $f=800\text{ mm}$  system at three temperature

从表1可知,系统在-40~60℃温度范围内,最大弥散斑直径小于25 μm,小于探测器像元尺寸(30),各个视场的弥散斑半径在不同温度下像差小于5 μm,满足像差设计的要求。

表1 消热差后弥散斑RMS随温度的变化情况  
Tab.1 Variation of blur spot with temperature after being athermalized

Focus/mm	Temperature/℃	Blur spot/μm		
		0 filed	0.7 filed	1 filed
400	20	10.5	15.9	17.8
	-40	12.0	18.8	20.9
	60	14.5	19.1	24.2
800	20	8.77	13.4	9.97
	-40	9.14	18.5	12.9
	60	11.0	20.9	19.7

## 4 结论

文中通过分析折/衍射光学系统的消热差原理,建立了一个能平衡初级像差和热差的中波双视场变焦模型,通过对理想透镜光焦度分配、光学材料的匹配和衍射面的引入,实现了变焦系统-40~60℃的消热差设计。最后,通过一系列设计实例表明该设计方法获得的双视场变焦光学系统在要求温度内实现消热差,且成像质量良好。该系统结构简单,工作温度范围宽,成像质量良好,适宜于无人擅守的航空、航天等红外热成像领域,在红外热成像系统中具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Zhang Yimo. Optical Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008:554-555. (in Chinese)  
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 554-555.
- [2] Wu Xiaojing, Meng Junhe. Approach of athermalizing infrared optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(6), 572-576. (in Chinese)  
吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6), 572-576.
- [3] Gao Hongyun, Xiong Tao. Mid-wavelength infrared dual field-of-view optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(10), 1891-1894. (in Chinese)  
郝洪云, 熊涛. 中波红外两档变焦光学系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10), 1891-1894.
- [4] Jamieson T H. Thermal effects in optical systems [J]. Opt Soc Am, 1998, 38(2): 542-546.
- [5] Roberts M. Athermalization of infrared optics [C]//SPIE, 1989, 1049: 72-81.
- [6] Xing Suxia, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(5): 441-444. (in Chinese)  
邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 441-444.
- [7] Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive/diffractive infrared objective[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1), 79-82. (in Chinese)  
陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 折/衍混合红外物镜超宽温度消热差设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1):79-82.
- [8] Yang Guoguang. Micro-optical and System [M]. Hangzhou: Zhejiang University Publishing House, 2008: 104-116. (in Chinese)  
杨国光. 微光学与系统[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008: 104-116.
- [9] Deng Jian, Tong Weihong, An Xiaoqiang, et al. Athermalization of infrared zoom system [J]. Journal of Applied Optic, 2011, 32(1):133-137. (in Chinese)  
邓键, 童卫红, 安晓强, 等. 双视场红外变焦镜头的无热化研究[J]. 应用光学, 2011, 32(1):133-137.