

紧凑型长波红外光学系统无热化设计

米士隆, 牟达, 牟蒙

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 对于工作环境温度在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的长波红外折射光学系统来说, 由于红外光学材料受温度变化影响非常大, 光学系统必须进行无热化设计。在介绍了无热化系统的种类, 分析了温度变化对红外光学系统的影响基础之上, 基于非制冷型焦平面探测器, 设计了工作在长波红外 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$, $F\#$ 为2, 视场角为 6.8° 的摄远型物镜系统。采用添加棱镜的方法, 使系统在不添加特殊面型的情况下达到无热化的目的, 同时使系统结构紧凑, 摄远比达到0.69。透镜面型均为标准球面, 利于加工、装调、检测。设计结果表明, 光学系统的调制传递函数在每个规定温度下均能接近衍射极限, 满足了设计要求。

关键词: 光学设计; 无热化; 光学被动式补偿; 非制冷型光学系统

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3032-05

Athermalization of a compact LWIR optical system

Mi Shilong, Mu Da, Mu Meng

(School of Opto-electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Athermal design is necessary to design a LWIR optical system for working under temperature range of $-40\sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$, because the infrared optical materials could transform extremely with the change of temperature. On the basis of introduction of athermal system and analysis on the effects of optical elements, an infrared telephoto objective lens was designed in the way of optical passive compensating, which working waveband was $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ long wave infrared band, $F\#$ was 2, the field of view was 6.8° , uncooled focal plane array was adopted. A prism was added in the system to achieve athermalization and compact structure without adding a special surface, the telephoto ratio of this system was 0.69. All of the surfaces were designed to be standard sphere, which was of benefit to processing, alignment and testing. The result of design indicates that the optical transfer functions are close to the diffraction limit in the required temperature range and the design requirement is met.

Key words: optical design; athermalization; optical passive compensating; uncooled optical system

收稿日期: 2015-02-04; 修订日期: 2015-03-03

基金项目: 总装备部预研局项目

作者简介: 米士隆(1988-), 男, 硕士生, 主要从事现代光学设计方面的研究。Email: mishilong@163.com

导师简介: 牟达(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事目标辐射特性分析和现代光学测试技术等方面的研究。Email: md_79@126.com

0 引言

红外光学系统在温度变化影响下,所用折射材料的折射率、各个光学元件的曲率和间隔都会随之产生变化,导致成像系统产生热离焦,成像质量下降。为了解决这一难题,20 世纪 30 年代,泊里(J. W. Perry)等研究人员提出了“无热化设计”这一概念。光学系统的无热化技术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焦距不变或变化很小,从而保证光学系统在该温度范围内都有较好的像质。

经过十几年的发展,到 80 年代中期便已经形成了几种无热化路线^[1-2]:机械被动式、机电主动式、光学被动式。其中光学被动式补偿法与另外两种相比具有可靠性高、成本低、质量轻、环境稳定性高的优势。

进入 90 年代,衍射技术逐渐兴起,成为光学系统无热化设计研究的热门^[3-4]。但是由于衍射效率和衍射面加工工艺技术的限制,折/衍射混合系统并没得到广泛的应用。

针对现阶段情况,文中提出全部采用球面面型的折射元件的结构,利用添加棱镜补偿色差的方法,使系统结构紧凑,大大降低了制造成本,并且有很好的成像质量,从制造角度考虑可以被广泛应用。

1 温度变化对光学系统的影响

在热胀冷缩效应和折射率温变效应的作用下,光学材料和镜筒以及空气的物理参数会随之改变,这种改变导致了热离焦和像质变坏。光学系统结构随温度变化的主要表现可以由公式(1)~(5)概括。

$$\text{曲率半径: } r+dr=r(r+\alpha_g)dt \quad (1)$$

$$\text{透镜厚度: } D+dD=D(1+\alpha_g)dt \quad (2)$$

$$\text{空气间隔: } L+dL=L(1+\alpha_h)dt \quad (3)$$

$$\text{透镜折射率: } n+dn=n+\frac{dn}{dt}dt \quad (4)$$

$$\text{空气折射率: } n_{\text{air}}+dn_{\text{air}}=n_{\text{air}}+\frac{dn_{\text{air}}}{dt}dt \quad (5)$$

式中: α_g 为材料的线膨胀系数; α_h 为镜筒的材料线膨胀系数; dn/dt 为介质的温度系数。

公式(6)、(7)表示单透镜焦距与温度变化关系,可以看出温度系数、线膨胀系数、折射率、甚至焦距本身都是热离焦的影响因素。由于温度系数、线膨胀

系数、折射率属于材料固有的属性,可以用 T (热差系数)来表示。

$$\frac{df}{dt}=-f\left(\frac{dn/dt}{n-n_0}-\alpha_g\right) \quad (6)$$

$$T=\frac{dn/dt}{n-n_0}-\alpha_g \quad (7)$$

2 光学被动式无热化设计方法

光学被动式无热化设计是利用不同光学材料之间热特性的差异,通过选择合理的材料组合来消除温度对光学系统影响,从而使系统在规定温度下有良好的成像效果。基本原理是通过选择光学材料并合理地分配光焦度,使光学系统产生的像面离焦与仪器壳体热胀冷缩产生的像面离焦相抵消,从而保证光学系统成像位置的稳定。

表 1 中列举了 4 种常用的长波红外光学材料的相关特性,就温度系数而言,常用红外材料锗的温度系数便是普通的可见光的 20 余倍,这意味着红外材料受温度影响非常大,无热化设计存在难度。

表 1 常用的长波红外材料相关参数

Tab.1 Related parameters of common LWIR materials

Materials	n	dn/dt	α_g	T	C
Germanium	4.0032	396×10^{-6}	5.7×10^{-6}	128.82×10^{-6}	0.932×10^{-3}
ZnSe	2.4065	60×10^{-6}	7.1×10^{-6}	35.56×10^{-6}	17.24×10^{-3}
ZnS	2.1986	41×10^{-6}	6.6×10^{-6}	27.61×10^{-6}	43.67×10^{-3}
Amtir1	2.4301	72×10^{-6}	12×10^{-6}	38.35×10^{-6}	8.68×10^{-3}

为了保证光学系统的在一定范围温度内,成像质量不会有太大变化,在折射光学系统的无热化设计中,为了使无热化方程组有解(公式(8)~(10)),一般使用 3 种以上的材料,选择材料的原则是,在热差系数和色差系数建立的坐标系中,选择间隔比较大的 3 个点所代表的材料作为光学系统的拟定材料^[5-6]。图 1 是 4 个常用的长波红外光学材料在热差/色差坐标系中的位置。

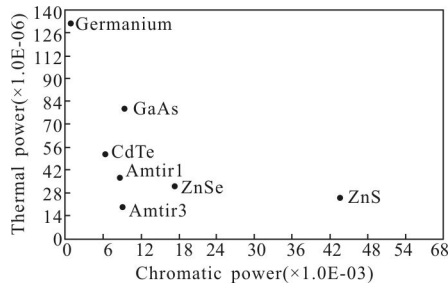


图 1 光学玻璃消热差图

Fig.1 Athermal glass map

选定材料后,根据公式(8)~(10)建立消热差方程组,求出光焦度^[7],再根据光焦度算出初始结构进行优化。

$$\text{光焦度要求: } \sum_{i=1}^k h_i \varphi_i = \varphi \quad (8)$$

$$\text{消色差要求: } \sum_{i=1}^k h_i^2 C_i \varphi_i / \varphi = C = 0 \quad (9)$$

$$\text{热稳定要求: } \sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \varphi_i / \varphi = T = \alpha_n L \quad (10)$$

式中: h_i 为第*i*片光学透镜的近轴光线归一化入射高度; φ_i 为第*i*片光学透镜的光焦度; C_i 为第*i*片光学透镜的色差系数; T_i 为第*i*片光学透镜热差系数; α_n 为镜筒的线膨胀系数。

由于光学被动式的设计难度很大,通常的设计方法是在优化过程中引入非球面和衍射面,这种方法虽然可以达到效果,但是使工艺成本大大增加。

3 添加棱镜法

笔者知道在汇聚的光路中,棱镜产生正色差,一般在望远镜的设计中棱镜也有着色差补偿的功能。无热化的设计中,可以通过采用添加棱镜的方式达到与添加非球面或者衍射面同样的效果,并且使光学系统结构更加紧凑,也使生产加工难度和设计难度降低。添加棱镜法的基本原理与方法如下。

在有棱镜的系统中,公式(9)可以改变为:

$$\sum_{i=1}^k h_i^2 C_i \varphi_i / \varphi + C_{\text{棱}} = 0 \quad (11)$$

式中: $C_{\text{棱}}$ 为正值,表示棱镜的色差系数。 $C_{\text{棱}}$ 的值与像方视场角、材料折射率、等效平行平板的长度有关。在视场角和材料确定的情况下,等效平行平板的长度决定了 $C_{\text{棱}}$ 的值,如公式(12)中, $C_{\text{棱}}$ 可以用比例

参数*k*和等效平行平板长度*L*表示。

$$C_{\text{棱}} = f(\omega', n, L) = kL \quad (12)$$

很明显,以公式(8)、(10)、(11)建立的消热差方程组,其解的范围远远大于未加棱镜的情况。在利用ZEMAX软件进行仿真设计时,先将初始结构确定,在系统距离像面适当位置处加入等效平行平板,将*L*视作变量优化,再根据 $D_{\text{棱}}/L$ 的值与设计结构需要,选择合适的棱镜,再进一步优化。

4 设计实例

4.1 设计参数

设计一个长波红外摄远物镜,探测器选用阵列规模为384×288、像元尺寸为25 μm的非制冷型焦平面探测器。根据探测器规格,制定的设计参数见表2。

表 2 光学系统设计参数

Tab.2 Parameters of optical design

Spectral range/μm	Focal length/mm	F#	Field of view	Temperature range/°C
8-12	100	2	2ω=6.8°	-40~+60

4.2 设计结果

设计选用4片透镜,摄远物镜系统的前、后透镜组均由1片正透镜和1片负透镜组成,所有透镜的面型均为标准球面。根据图1,透镜材料选择组成三角形面积较大的锗、硫化锌、AMTIR1。由于锗的热差系数是3种材料中最大的,应使锗透镜承担较小的负光焦度,它产生的热离焦容易进行补偿。所以由热差系数较小的AMTIR1和硫化锌作为前组两片透镜的材料,将锗作为后组两片透镜的材料。

前组的两片透镜中,硫化锌色差系数很大,如果选择硫化锌作为正透镜,那么产生的正色差将很难被补偿。所以选择AMTIR1作为正透镜的材料,负透镜材料选择硫化锌。

经过充分优化后,光学系统结构及空间频率为20 lp/mm处时MTF曲线情况如图2所示,可以看出在常温状态下,成像效果良好,但当温度为-40℃和60℃时,MTF曲线下降明显。在此结构下,如果不采取其他的优化方式(添加特殊面型、添加棱镜等),难以保证在规定温度范围内各个温度情况均有良好的成像质量。

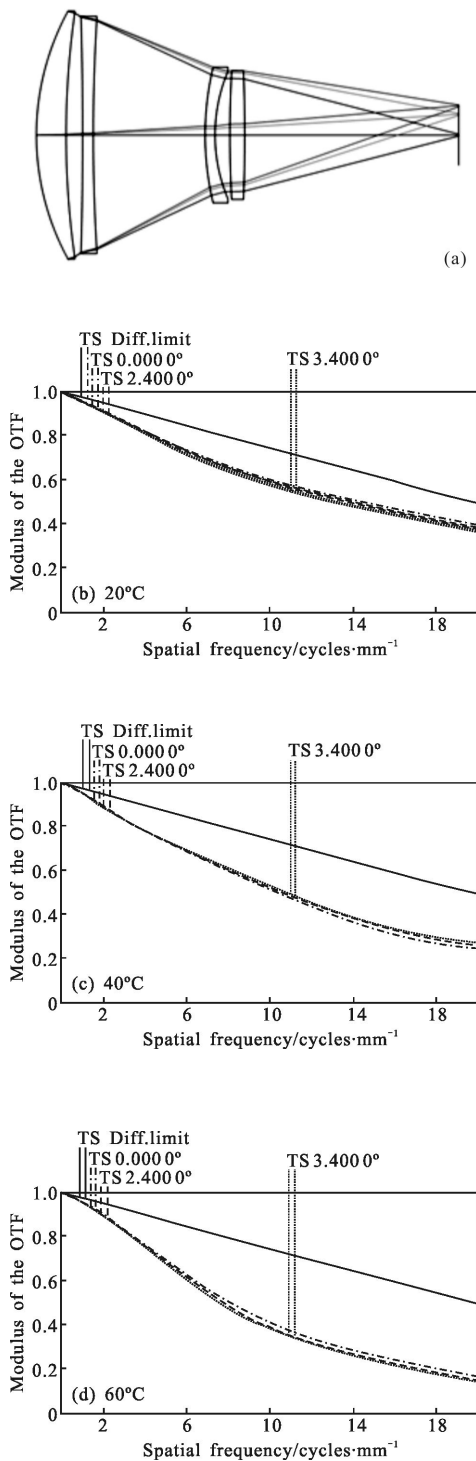


图 2 光学系统结构及系统的 MTF 曲线
Fig.2 Structure of optical system and MTF of system

根据上文的叙述,采用添加棱镜的方法,再利用 Zemax 软件对系统进行局部优化,可以使光学系统在各个温度下均有良好的成像效果。棱镜选择施密特棱镜 $D_{\text{棱}}/L=3.06$,由于棱镜具有折转光路的作用,使

光学系统结构紧凑,摄远比为 0.69。设计中,镜筒材料设定为铝合金,其热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。图 3 为设计的光学系统结构图。

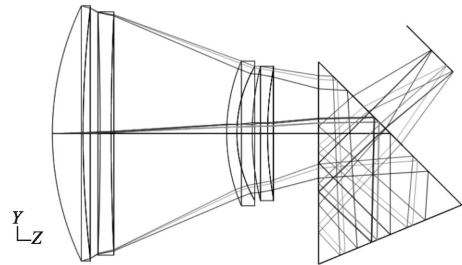


图 3 光学系统结构

Fig.3 Structure of optical system

图 4 是常温下光学系统的调制传递函数,图 5、图 6 分别是 -40°C 和 60°C 的调制传递函数,从图中可以看出,在空间频率为 20 lp/mm 处,三幅图的 MTF 子午曲线和 MTF 弧矢曲线均接近衍射极限。

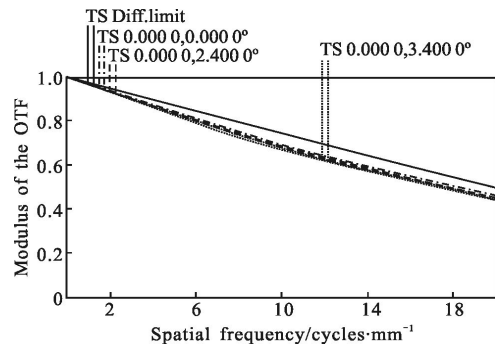


图 4 光学系统在 20°C 时的 MTF 曲线

Fig.4 MTF of system at 20°C

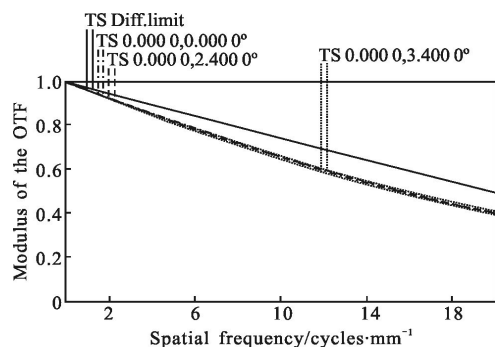


图 5 光学系统在 -40°C 时的 MTF 曲线

Fig.5 MTF of system at -40°C

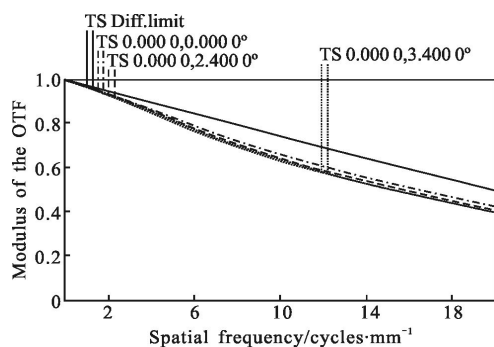


图6 光学系统在60℃时的MTF曲线

Fig.6 MTF of system at 60℃

5 结论

目前光学系统无热化的设计多采用折/衍混合式结构,但衍射元件的加工技术和检测技术还有待完善,文中利用添加棱镜的方式,补偿光学系统色差,扩大了消热差方程组解的范围,从而在设计上避免使用衍射系统,同时使系统结构更加紧凑。在设计实例中,加入棱镜的全球面镜光学系统展现了良好的像质。文中对不添加特殊面型的光学系统无热化设计有借鉴意义。

参考文献:

- [1] Wu Xiaojing, Meng Junhe. Approach of athermalizing infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 572-576. (in Chinese)
吴晓晴, 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.
- [2] Wu Xiaojing, Meng Junhe. Athermalizing infrared optical systems by using simple mechanical framework [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 391-393. (in Chinese)
吴晓晴, 孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 391-393.
- [3] Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou, et al. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in 3.2-4.5 μm [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2002, 10(2): 121-125. (in Chinese)
孙强, 王肇圻, 李凤友, 等. 红外 3.2~4.5 μm 波段折射/衍射光学系统的减热差设计 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 121-125. (in Chinese)
- [4] Sun Jinxia, Liu Jianzhuo, Sun Qiang, et al. Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, 18(4): 792-797. (in Chinese)
孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 折/衍混合消热差共形光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 792-797.
- [5] Wang Xuexin, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(1): 129-133. (in Chinese)
王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究 [J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129-133.
- [6] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Li Hua, et al. Application of the chalcogenide glass in modern infrared thermal imaging systems [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 449-455. (in Chinese)
白瑜, 廖志远, 李华, 等. 硫系玻璃在现代红外热成像系统中的应用 [J]. 中国光学, 2014, 7(3): 449-455.
- [7] Chang Hong. Research on key techniques of thermo-optical stability for refractive infrared system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
常虹. 投射式红外系统热光学稳定性关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.