

文章编号 1674-2915(2011)04-0374-06

大相对孔径红外消热差物镜设计

张鑫, 贾宏光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:研究了大相对孔径光学系统的设计方法,讨论了光学设计初始的光焦度分配计算,设计了 F 数为0.9的大相对孔径红外消热差物镜。建立了由多个光组构成的组合光学系统的消热差模型,结合光学系统的结构型式和所选择的光学材料组合,获得了初始的光焦度分配,利用计算机辅助优化设计完成了像差校正。环境温度分析表明,在 $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$,该物镜成像质量稳定,调制传递函数(MTF)接近衍射极限。实际设计结果与理论计算结果相符合。

关键词:光学设计;红外光学系统;消热差设计;大相对孔径

中图分类号:TN216 文献标识码:A

Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture

ZHANG Xin, JIA Hong-guang

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: A design method for the optical system with a large relative aperture was researched and the initial optical power distribution of optical lenses was discussed. A $F/0.9$ infrared athermalized objective with a large relative aperture was proposed. Firstly, an athermal design model for the multiple-lens composed optical system was established. Then, by considering the systematic structure form and the selected optical materials, the initial optical power distribution among the lenses was accomplished. Finally, the aberration of the design was corrected by computer aid optimization design. The analysis of environment temperature shows that the image quality of the objective is stable in the change of temperature from $40 \text{ }^\circ\text{C}$ to $60 \text{ }^\circ\text{C}$ and its Modulation Transfer Function(MTF) approximates to the diffraction limit. The result of the implemented design agrees well with that of the theoretic computation.

Key words: optical design; infrared optical system; athermalized design; large relative aperture

收稿日期:2011-04-16;修订日期:2011-07-17

基金项目:国防科技创新重要方向项目(No. YYYJ-1122)

1 引言

近年来,随着红外探测器技术的飞速发展,红外热成像系统在工业、国防以及反恐等领域发挥着越来越大的作用^[1,2]。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,目前很多红外应用都要求红外系统实现无热化。无热化方法分为主动式和被动式,主动式的基本原理是移动探测器或镜头的某一片透镜来补偿温度离焦,但是这种方式需要反馈系统和执行机构,增大了系统的体积并降低了系统的可靠性。被动式又分为光学无热化、机械无热化以及光学机械结合无热化,后两者对机械结构提出了较高要求,通常会使得系统复杂性增加、体积和重量增大,而光学无热化没有上述缺点,目前已成为该领域的研究热点。常规的光学无热化方法包括利用无热图实现多透镜系统的无热化设计^[3,4],利用不同材料热性能互补完成无热化光学设计^[5],选择材料三维消热差图^[6]进行设计,以及用材料特性图解法完成光焦度分配等^[7],这些方法采用简化近似模型来指导光学设计,已经在中波红外和长波红外领域取得了一些成果。最新的折射与衍射混合消热差方法也已经有大量的报道^[8-12]。不过消热差设计往往限制了物镜相对孔径的增大,而非制冷探测器要求大的相对孔径才能达到高的灵敏度,实际应用中通常要求 F 数等于或者小于1,所以大相对孔径无热化设计仍然是光学设计的难点。

本文研究了多组组合光学系统模型,在温度变化时始终保持物镜像面与探测器靶面重合,建立了消热差模型,并给出了大相对孔径消热差物镜设计方法,设计了 F 数达到0.9的长波红外消热差物镜。

2 消热模型

由于透镜的光焦度随温度变化,材料的折射率和透镜的形状都随温度变化,定义透镜的归一化光焦度温度系数为 T ,有:

$$T = \frac{d\varphi}{\varphi \cdot dt}, \quad (1)$$

其中, φ 为光焦度, t 为温度。

为简化模型,采用薄透镜近似,根据薄透镜光焦度公式可推导出薄透镜的归一化光焦度温度系数为:

$$T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_L, \quad (2)$$

其中, n 为折射率, α_L 为透镜材料的热膨胀系数。

由于光焦度为焦距的倒数,容易证明:

$$\frac{df}{f \cdot dt} = -\frac{d\varphi}{\varphi \cdot dt} = -T, \quad (3)$$

其中, f 为焦距。上式说明归一化焦距温度系数是归一化光焦度温度系数的相反数。

对于密接薄透镜组,其光焦度为各个薄透镜光焦度之和,定义薄透镜组的归一化光焦度温度系数为:

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^k \varphi_i \cdot T_i}{\sum_{i=1}^k \varphi_i}. \quad (4)$$

由单个密接透镜组构成的光学系统,其后工作距与光学长度相等,透镜焦距变化引起的像移为:

$$\Delta I_1 = T_s \cdot f \cdot \Delta t. \quad (5)$$

镜筒与光学长度相等,镜筒长度变化引起的探测器位移为:

$$\Delta I_2 = f \cdot \alpha_H \cdot \Delta t, \quad (6)$$

其中, α_H 为镜筒材料的热膨胀系数。

光学系统无热化应满足:

$$\Delta I_1 = \Delta I_2, \quad (7)$$

带入式,化简为:

$$\frac{\sum_{i=1}^k \varphi_i \cdot T_i}{\sum_{i=1}^k \varphi_i} + \alpha_H = 0. \quad (8)$$

式(8)为单个密接透镜组的消热差方程。

但是,多个光组组合光学系统的情况要复杂一些,下面建立物理模型来进行研究。图1为 n 组密接薄透镜组合光学系统在温度 t 和温度 $(t + \Delta t)$ 下的示意图。

图1中,各个光组为简化的密接薄透镜模型,

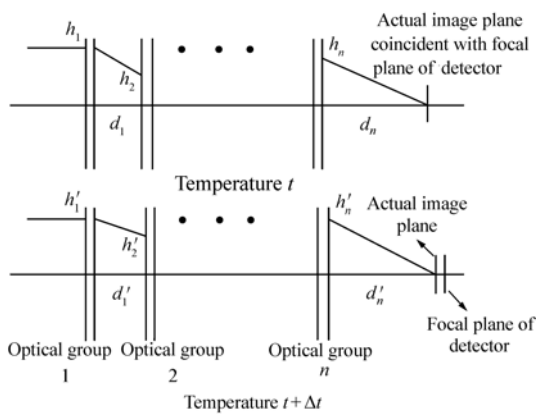


图1 组合光学系统在温度 t 和温度 $t + \Delta t$ 下的示意图

Fig. 1 Sketch of multiple-component optical system at temperature of t and $t + \Delta t$

$h(h')$ 为归一化入射光线高度, $h_1 = h'_1 = 1$, $d(d')$ 为各个密接透镜组之间的间隔, 其中 $d_n(d'_n)$ 为后工作距。 $h(h')$ 与 $d(d')$ 可由正切算法求得。光焦度和后工作距分别为:

$$\phi = \sum_{i=1}^n h_i \cdot \varphi_i, \quad (9)$$

$$d_n = \frac{h_n}{\phi}. \quad (10)$$

将该模型分为两部分: 第一部分包括所有光组、光组之间的连接镜筒以及光学镜头的实际像面; 第二部分包括探测器靶面和连接探测器与最后一个光组之间的镜筒。实现无热化设计即是在温

度变化时, 始终保持实际像面与探测器靶面重合。

由温度变化引起第一部分的实际像面的位置变为:

$$d'_{n1} = \frac{h'_n}{\phi}. \quad (11)$$

由温度变化引起第二部分的探测器靶面的位置变为:

$$d'_{n2} = d_n \cdot (1 + \alpha_H) \cdot \Delta t. \quad (12)$$

光学系统无热化, 应满足:

$$d'_{n1} = d'_{n2}. \quad (13)$$

但是, 由于方程中含有自变量 Δt , 等式不能在任意 Δt 下都成立, 所以应修改为:

$$d'_{n1} \approx d'_{n2}. \quad (14)$$

即只要方程左右两边满足在一定温度变化范围内近似相等。本文定义式(14)为多个光组组合消热差方程。

无热化光学系统除了满足消热差方程, 还要满足消色差方程和光焦度方程, 下面将结合一个具体设计实例来说明该消热差模型的应用。

3 光学设计

系统采用非制冷长波红外焦平面阵列, 像元数 320×240 , 像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$, 光学系统的指标如表1所示。

表1 红外光学系统指标

Tab. 1 Specifications of mid-wave infrared optical system

F/number	Focal length	Field angle	Spectral range	Temperature
$F/0.9$	72 mm	8°	$8 \sim 12 \mu\text{m}$	$-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$

采用一组密接透镜的光学系统, 至少需要3种材料满足消热差、消色差和光焦度, 每种材料的透镜的光焦度也是确定的, 所以自由变量很少, 难以满足 F 数达到0.9的光学系统设计的要求, 这里选择采用两个分离密接透镜组的组合光学系统。光学设计的原则之一是要尽量消除像差, 所以前组由3片透镜组成, 以提供更多变量用来校正像差, 前组要实现组内消色差, 但是要留有一定热差来减少对变量的限制, 方便设计优化; 后组由

两片透镜组成, 也要实现组内消色差, 热差与前组以及镜筒三者之间满足消热差关系。

上述系统的前组和后组分别组内消色差, 消色差方程为:

$$\frac{\varphi_1}{V_1} + \frac{\varphi_2}{V_2} + \frac{\varphi_3}{V_3} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\varphi_4}{V_4} + \frac{\varphi_5}{V_5} = 0, \quad (16)$$

其中, V 为材料阿贝常数。

后组的归一化入射光线高度为 h , 光焦度方程为:

$$(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) + h(\varphi_4 + \varphi_5) = \phi. \quad (17)$$

根据前面的模型, 光学系统由两部分组成, 第一部分包括两个光组、两个光组之间的连接镜筒以及光学镜头的实际像面; 第二部分包括探测器靶面和连接探测器与最后一个光组之间的镜筒。

由温度变化引起第一部分的实际像面的位置变化为:

$$d'_{b1} = \frac{h'}{\phi'}, \quad (18)$$

$$\frac{1 - \left[\frac{1-h}{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3} \cdot (1 + \alpha_H) \cdot \Delta t \right] \cdot \left[\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \sum_{i=1}^3 T_i \varphi_i \right]}{\phi + \sum_{i=1}^3 T_i \varphi_i + h \cdot \sum_{i=4}^5 T_i \varphi_i} \approx \frac{h}{\phi} \cdot (1 + \alpha_H) \cdot \Delta t. \quad (20)$$

温度变化较小时, 近似认为等式成立, 令 $\Delta t = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 时等式成立。再令

$$\sum_{i=1}^3 T_i \varphi_i = A, \quad (21)$$

$$\sum_{i=4}^5 T_i \varphi_i = B. \quad (22)$$

材料的热膨胀系数 α_H 在式(20)中是小量, 可忽略。式(20)化简为:

$$\phi - \phi \cdot (1-h) \cdot \left[1 + \frac{A}{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3} \right] = (h \cdot \phi) + (h \cdot A) + (h^2 \cdot B). \quad (23)$$

由式(15), (16), (17), (21), (22), 解得:

$$\varphi_1 = -0.007178 + 0.011982A + 0.003923hB$$

$$\varphi_2 = 0.034637 - 0.019398A - 0.018931hB$$

$$\varphi_3 = -0.01357 + 0.007416A + 0.007417hB$$

$$\varphi_4 = 0.008058B$$

$$\varphi_5 = -0.000467B$$

此时, 系统光焦度分配的全部变量为 h, A, B , 且 h, A, B 满足式(23), 所以其中任意两个为自由变量, 意味着初始结构有无数种光焦度分配方案, 这也体现了光学设计的多样性和灵活性。光焦度分配方案的选取原则为: 一是保证每片透镜的光焦度都不大; 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。

本设计选取的长波红外材料为最常用的锗(Ge)、硒化锌(ZnSe)和硫化锌(ZnS)。这些材料

其中, $h' = 1 - d'_a \cdot \varphi'_a = 1 - \left[\frac{1-h}{\varphi_a} \cdot (1 + \alpha_H) \right]$

$\cdot \Delta t] \cdot \left[\varphi_a + \sum_{i=1}^3 T_i \varphi_i \right], \phi' = \phi + \sum_{i=1}^3 T_i \varphi_i + h \cdot$

$$\sum_{i=4}^5 T_i \varphi_i, \varphi_a = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3.$$

由温度变化引起第二部分的探测器靶面的位置变化为:

$$d'_{b2} = d_b \cdot (1 + \alpha_H) \cdot \Delta t, \quad (19)$$

其中, $d_b = \frac{h}{\phi}$.

根据式(14), 写出两个光组组合消热差方程的具体表达式:

的 T, V 值如表 2 所示。

表 2 常用长波红外材料的 V, T 值

Tab.2 V and T data of conventional mid-wave infrared materials

	Ge	ZnS	ZnSe
V	1 000	23	58
$T/(10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$	126.2	25.9	36.8

前组采用 Ge、ZnSe 和 ZnS 的组合, 后组采用 Ge 和 ZnSe 组合。

根据前面所述光焦度分配原则, 并经过不同取值分析, 得到合理的结果。选取 $h = 0.4, B = 2$, 由式求得 $A = -0.22$, 然后可求得各个光焦度, 结果如表 3 所示。

表 3 初始的光焦度分配

Tab.3 Initial optical power distribution

φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
-0.0067	0.0238	-0.0093	0.0161	-0.0009

根据多个光组组合消热差模型, 并结合具体指标要求, 经过以上步骤, 确定了系统初始的光焦度分配, 再根据初级像差理论计算出各个透镜的结构参数, 将系统的初始结构输入光学设计软件, 进行优化设计。

镜筒材料选择铝,热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,利用光学软件 ZEMAX 进行优化设计,设计结果如图 2 所示。第一面作为孔径光阑以最小化系统的口径,系统在结构上由前后两个透镜组构成,每组内透镜的间隔很小,具有密接特性。由于光学系统的相对孔径很大,引入了较多的高级像差,因此,需要利用非球面来提高系统成像质量。在第一组引入两个标准二次曲面,分别为第一个透镜前表面(光阑位置)和第三个透镜的前表面,这些曲面既能校正大相对孔径带来的高级球差,也能校正除场曲外的其它像差。图 3 所示为室温 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下的 MTF 曲线,像元尺寸对应的乃奎斯特频率处,即 20 lp/mm ,全视场的 MTF 值都大于 0.65,接近衍射极限。

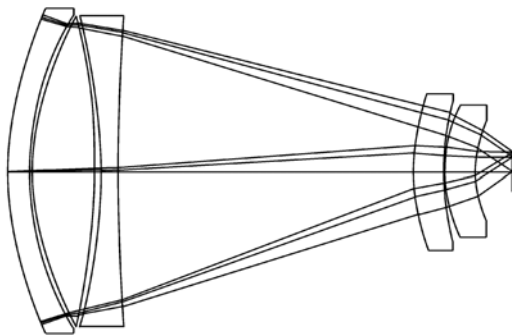


图 2 消热差光学系统布局图

Fig. 2 Layout of athermalized optical system

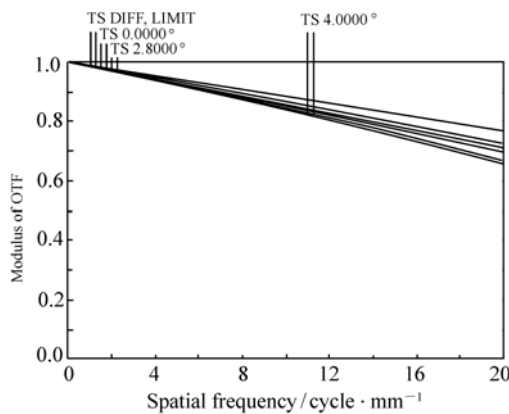


图 3 $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时的 MTF

Fig. 3 MTF curves at $20 \text{ } ^\circ\text{C}$

利用 ZEMAX 软件分析进行热环境分析。

图 3 所示为 20 lp/mm 处的各个视场的 MTF 随温度变化情况,在 $-40 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$,轴上视场的 MTF > 0.71 , 0.7 视场子午和弧矢方向的 MTF 都大于 0.68 , 1.0 视场子午和弧矢方向的 MTF 都大于 0.62 。MTF 在 $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的温宽范围内波动很小,轴上视场的 MTF 波动最小,小于 0.02 ; 1.0 视场弧矢方向的 MTF 波动最大,小于 0.06 。这些数据说明该物镜具有很好的热环境适应性,满足 $-40 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的被动消热差要求,像质保持稳定。

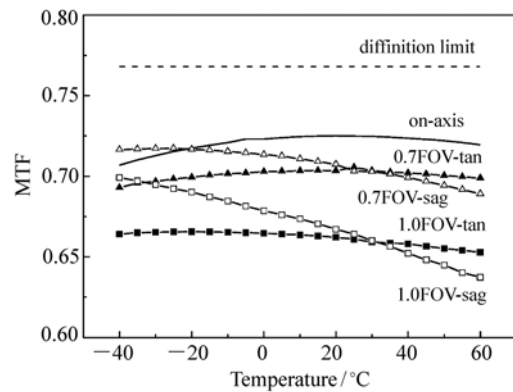


图 4 20 lp/mm 处 MTF 随温度的变化

Fig. 4 Relationship between MTF and temperature at 20 lp/mm

设计的光焦度分配如表 4 所示。与初始分配的大小趋势一致,数值有一定差别,其中,最后一组相差较大,其余 4 组相差较小。造成数值差距有两个主要原因,其一是计算机自动优化色差时光焦度会随之变化,其二是薄透镜模型被实际厚透镜取代。但是,初始值与最终值总体上是相近的,设计结果验证了上述方法的指导作用。

表 4 最终光焦度分配

Tab. 4 Final optical power distribution

φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
-0.006 3	0.024 0	-0.011 0	0.018 3	-0.004 3

4 结 论

本文研究了多个光组组合光学系统与消热差设计之间的关系,给出了大相对孔径光学系统设计方法,并用于光学设计初始的光焦度分配计算。利用该方法设计了 F 数达到 0.9 的长波红外消热

差物镜,在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内满足消热差设计要求。该方法具有消热差设计的普遍指导意义,可根据系统不同的指标要求,选择不同的材料组合,计算出不同初始的光焦度分配结果,最终实现满足指

标要求的设计结果。下一步工作将应用此方法设计出结构更加简单的大相对孔径消热差光学系统。

参考文献:

- [1] 杨为锦,孙强. 中波红外连续变焦系统设计[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(2):164-169.
YANG W J,SUN Q. Design of middle infrared continuous zoom system[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*,2010,3(2):164-169. (in Chinese)
- [2] 张红鑫,卢振武,孙强,等. 折/衍混合长波红外凝视成像系统的杂散光分析[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(5):402-407.
ZHANG H X,LU ZH W,SUN Q,*et al.*. Stray light analysis of diffractive/refractive LWIR string imaging system[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*,2009,2(5):402-407. (in Chinese)
- [3] TAMAGAWA Y,WAKABAYASHI S,TAJIME T,*et al.*. Multilens system design with an athermal chart[J]. *Appl. Opt.*,1994,33(34):8009-8013.
- [4] TAMAGAWA Y,TAJIME T. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lens spaced apart[J]. *Opt. Eng.*,1996,35(10):3001-3006.
- [5] 胡玉禧,周绍祥,相里斌,等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报,2000,20(10):1386-1391.
HU Y X,ZHOU SH X, XIANG L B,*et al.*. Design of athermal optical system[J]. *Acta Opt. Sinica*,2000,20(10):1386-1391. (in Chinese)
- [6] 杨新军,王肇圻,母国光,等. 红外双波段消热差系统设计[J]. 光电子·激光,2004,15(4):385-389.
YANG X J,WANG ZH Q,MU G G,*et al.*. Design of infrared dual-band athermal optical system[J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2004,15(4):385-389. (in Chinese)
- [7] 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.
WANG X X ,JIAO M Y. Athermalization design for infrared optical systems[J]. *J. Appl. Opt.*,2009,30(1):129-133. (in Chinese)
- [8] 张铁楠,王肇圻,孙强. 折/衍混合红外物镜的超宽温消热差设计[J]. 中国激光,2005,32(3):311-314.
ZHANG T N,WANG ZH Q,SUN Q. Athermalized design of extensive temperature range for infrared hybrid refractive-diffractive objective[J]. *Chinese J. Lasers*,2005,32(3):311-314. (in Chinese)
- [9] 陈杰,白剑,杨国光,等. 基于谐衍射特性的双波段红外系统消热差设计[J]. 光学仪器,2006,28(3):61-65.
CHEN J,BAI J,YANG G G,*et al.*. Design of athermalization for dual-band infrared optical system based on harmonic diffraction[J]. *Opt. Instruments*,2006,28(3):61-65. (in Chinese)
- [10] 宋岩峰,邵晓鹏,徐军. 实现复消色差的超常温混合红外光学系统[J]. 物理学报,2008,57(10):6298-6303.
SONG Y F,SHAO X P,XU J. Design of a hybrid infrared apochromatic optical system beyond normal temperature[J]. *Acta Phys. Sinica*,2008,57(10):6298-6303. (in Chinese)
- [11] 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.
SUN J X,LIU J ZH,SUN Q,*et al.*. Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(4):792-797. (in Chinese)
- [12] 陈潇,杨建峰,马小龙,等. $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 折/衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. 光学学报,2010,30(7):2090-2092.
CHEN X,YANG J F,MA X L,*et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ [J]. *Acta Opt. Sinica*,2010,30(7):2090-2092. (in Chinese)

作者简介:张鑫(1985—),男,吉林德惠人,研究实习员,硕士,主要从事红外技术、激光技术方面的研究。

E-mail:zhangxin@tju.edu.cn