

文章编号:1002-2082(2010)05-0833-05

中波红外折衍光学系统消热差设计与杂光分析

林福跳^{1,2}, 刘朝晖¹

(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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 论述了红外折衍混合消热差光学系统的设计原理与方法, 利用衍射光学元件特性进行消热差与色差, 设计出工作波段为 $3.5\ \mu\text{m}\sim 5.2\ \mu\text{m}$ 、F 数为 2、焦距为 100 mm、全视场角 7° 、具有 100% 冷屏效率的折衍混合消热差光学系统。对系统进行杂光分析, 理想成像光线的像面辐照度为 $1.5\times 10^4\ \text{W}/\text{m}^2$, 其他非成像光线的像面辐照度为 $2\ \text{W}/\text{m}^2$ 。该系统在 $-50^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ 的温度范围内成像质量接近衍射极限, 适用于像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}$ 、像元数 320×256 的致冷型红外焦平面阵列探测器。

关键词: 消热差; 衍射光学; 光学设计; 中波红外

中图分类号: TN21

文献标志码: A

MWIR refractive /diffractive hybrid athermal optical system and its stray light analysis

LIN Fu-tiao^{1,2}, LIU Zhao-hui¹

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

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The concept and design of infrared hybrid diffractive/refractive athermalized optical system are described. A diffractive optical element is used to athermalize and achromatize the optical system. A hybrid optical system operating at $3.5\ \mu\text{m}\sim 5.2\ \mu\text{m}$ wave band and the temperature range of $-50\sim 80^\circ\text{C}$ is designed. The system parameters include a focal length of 100 mm, F/# 2, and FOV of $\pm 3.5^\circ$, and it achieves 100% cold shield efficiency. The system stray light is analyzed, and the irradiances of the desired light and the stay light are $1.5\times 10^4\ \text{W}/\text{m}^2$ and $2\ \text{W}/\text{m}^2$ respectively. The image quality achieved in the temperature range of $-50^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ approaches the diffraction limitation. It is applicable to a cooled FPA detector with the format of 320×256 and the pixel pitch of $30\ \mu\text{m}$.

Key words: athermalisation; diffractive optics; optical design; MWIR

引言

现代军事和空间探测要求很多红外光学系统能够在各种复杂的环境中稳定工作,要求其光学系统在某温度范围内具有稳定的性能和良好的成像质量^[1],这需要进行光学系统的无热化设计。这要求系统具有高的探测能力,光学系统要具有大的相

对孔径且无中心遮拦^[2],因此选择了全折射式系统。为使红外光学系统对弱信号探测时具有较强的抑制杂光能力,需要有100%的冷光栏效率^[3]。衍射光学元件由于其自身的温度特性和色散特性,使其应用于红外光学系统中,进行折衍混合光系统设计,既达到消热差设计的效果,又使系统结构紧凑、

收稿日期:2010-04-01; 修回日期:2010-05-12

作者简介:林福跳(1982—),男,浙江人,硕士研究生,主要从事红外光学系统设计及杂散光分析与研究。

体积小、重量轻^[4]。

利用衍射元件的特性设计出了 $3.5\ \mu\text{m} \sim 5.2\ \mu\text{m}$ 波段的衍射混合光学系统, 焦距 $100\ \text{mm}$ 、F 数为 2、全视场角 7° 、有 100% 冷光栏效率。该系统在 $-50^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 的温度范围内成像质量接近衍射极限, 且结构紧凑、体积小、质量轻, 适用于像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}$ 、像元数 320×256 的凝视焦平面阵列探测器。基于对系统成像质量的要求, 对系统像面的杂散光进行了分析。

1 折、衍光学元件的温度特性及色散特性

1.1 折、衍光学元件的温度特性

温度变化对光学材料几何尺寸的影响可以表示为

$$\frac{\partial r}{r \partial T} = \alpha \quad (1)$$

式中 α 为材料的热膨胀系数。

对于折射光学元件, 采用薄透镜模型, 其光焦度可以表示为

$$\varphi_r = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

式中 n 为材料的折射率。光焦度对温度的变化量为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_r}{\partial T} &= \frac{\partial n}{\partial T} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (n-1) \left(\frac{1}{r_2^2} \frac{\partial r_2}{\partial T} - \frac{1}{r_1^2} \frac{\partial r_1}{\partial T} \right) = \\ &= \frac{\partial n}{\partial T} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + (n-1) \left(\frac{\alpha}{r_2} - \frac{\alpha}{r_1} \right) = \\ &= \left(\frac{\partial n}{\partial T} \frac{1}{n-1} - \alpha \right) \varphi_r = \gamma_r \varphi_r \end{aligned} \quad (3)$$

式中 γ_r 为折射元件的热差系数。由上式 $\gamma_r > 0$ 可知, 折射光学元件具有正热差效应。

衍射光学元件的光焦度表达式 $\varphi_m = 2m\lambda/r_m^2$, 因此光焦度随温度的变化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_m}{\partial T} &= -\frac{2m\lambda}{r_m^3} \frac{\partial r_m}{\partial T} = -\frac{4m\lambda}{r_m^2} \alpha = \\ &= -2\varphi_m \alpha = \gamma_m \varphi_m \end{aligned} \quad (4)$$

式中: r_m 为第 m 个环带的径向距离; λ 为工作波长; γ_m 为衍射元件的热差系数。由式 $\gamma_m < 0$ 可知, 衍射光学元件具有负消热差的效用。折射元件的温度特性是由材料的膨胀系数和材料的折射率温度系数决定, 衍射元件的温度特性只由材料的膨胀系数决定, 和材料的折射率温度系数无关。可以利用折射元件正的热差效应与衍射元件负的热差效应的结合来进行消色差设计。

1.2 折、衍射元件的色散特性

材料的折射率随着波长的变化而变化称为材料的色散, 按照光学材料色散的定义, 折射元件的阿贝常数

$$v_d = \frac{n_m - 1}{n_n - n_l} \quad (5)$$

式中 n_n 、 n_m 、 n_l 分别为短波、中波、长波时介质的折射率。可知折射元件的阿贝常数大于零。衍射元件的等效阿贝常数 v_d 的表达式^[4]为

$$v_d^{\lambda_n, \lambda_l} = \frac{\lambda_m}{\lambda_n - \lambda_l} \quad (6)$$

式中 λ_n 、 λ_m 、 λ_l 分别为设计波段的短波端波长、中心波长与长波端波长。由此可见, 衍射元件的等效阿贝常数为负值且值很小, 具有很大的色散, 其色散特性仅与波长有关, 因此混合系统可以用衍射元件承担主要的消色差功能。

2 系统设计

2.1 系统消色差设计原理

光学系统的消色差设计要求外界环境温度变化时, 光学元件温度随之变化而带来的像面离焦与系统机械结构温度变化产生的像面离焦能够相互抵消^[5], 使整个系统的热离焦量在允许的范围内。因此系统光焦度分配满足总光焦度、消轴向色差、消热差设计 3 个方程^[6]。

光焦度方程:

$$\sum_{i=1}^n h_i \varphi_i = \varphi \quad (7)$$

消轴向色差方程:

$$\left(\frac{1}{h_1 \varphi} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i^2 \varphi_i}{v_{di}} \right) = 0 \quad (8)$$

消热差方程:

$$\left(\frac{1}{h_1 \varphi} \right)^2 \sum_{i=1}^n (-h_i \gamma_i \varphi_i) = \alpha_h L \quad (9)$$

式中: h_i 为第一近轴光线在各透镜组的高度; φ 为系统的光焦度; φ_i 为各个透镜的光焦度; v_{di} 为材料的阿贝数; γ_i 为材料的热差系数; α_h 为外部机械结构的线膨胀系数; L 为机械结构件的长度。

2.2 设计方法

根据系统设计指标要求, 选用像元尺寸为 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 、像元数 320×256 的致冷型凝视焦平面阵列探测器; 工作波段 $3.5\ \mu\text{m} \sim 5.2\ \mu\text{m}$, 系统焦距为 $100\ \text{mm}$, F 数为 2, 全视场角为 7° , 后工作距

28 mm, 100%的冷光栏效率。

对于致冷型的红外光学系统,光学系统比较常见的结构形式有折射一次成像、折射二次成像、折反射等结构形式。折射二次成像光学系统结构虽然第一片镜口径可以做得与入瞳口径相当,但其总长与焦距的比远大于1,因此系统结构复杂、折反式系统结构复杂且有中心遮拦。折射一次成像光学系统结构简单,质量轻,易于装调,通光口径全部充满,所以选折射一次成像的型式^[7]。

红外材料选用硅、锗,镜筒材料为铝,铝的线性热胀系数为 $2.36 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,系统采用三片式结构,第一、三片为硅,第二片为锗,系统结构如图1所示。

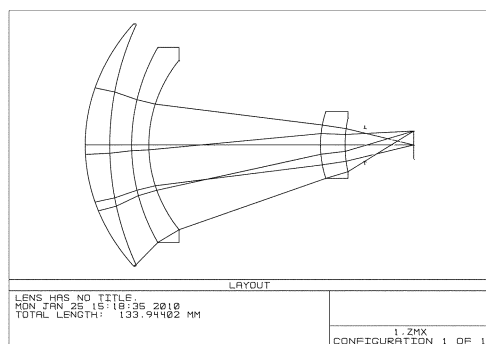


图1 系统外形结构图

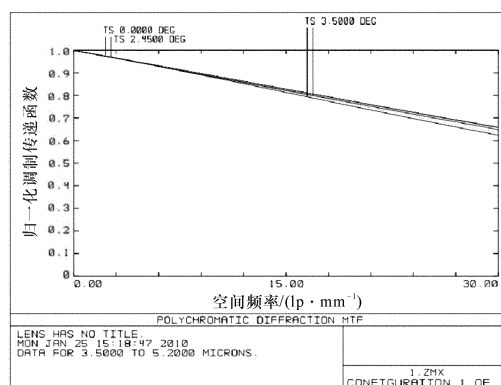
Fig. 1 Schematic of the optical system structure

对(6)、(7)、(8)式进行求解,得到系统光焦度在每个镜片上的分配,三片镜系统第一片硅的第一面为高次非球面,高次项取到第四项,第三片硅的第一面引入衍射面,衍射相位分布函数最高项取到第四项。在ZEAXM中,设定边界条件与初始值,先以透镜的厚度、曲率、透镜间间距为变量,在保持系统光焦度不变的前提下,进行系统初始优化设计,但得到系统成像质量差,像差、无热化设计都没有达到要求。之后使第一面为非球面,在变量中加入非球面系数,再次进行优化设计,可以看到系统的初级像差得到很好地消除,但是色差仍然很大,且在 $-50 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内系统的MTF、RMS半径与几何弥散斑半径随温度的变化浮动超出了允许的范围。为此再在第5个表面引入衍射面,在变量中加入衍射相位分布系数进行优化,利用衍射元件的负色散特性,系统色差得到很好地消除,结合折射元件与衍射元件的热差特性,使得在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,系统的成像质量得到很好地改善,调制传递函数几乎达到系统衍射极限水平。

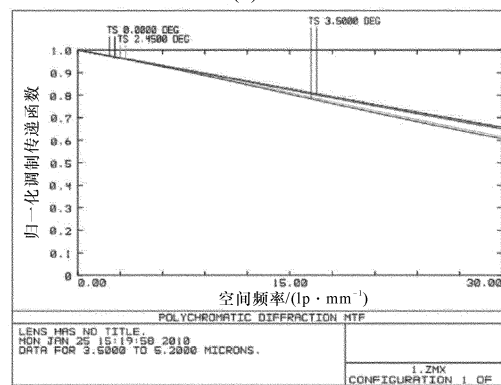
2.3 结果分析

根据上面的设计和优化,得到满足要求的系统

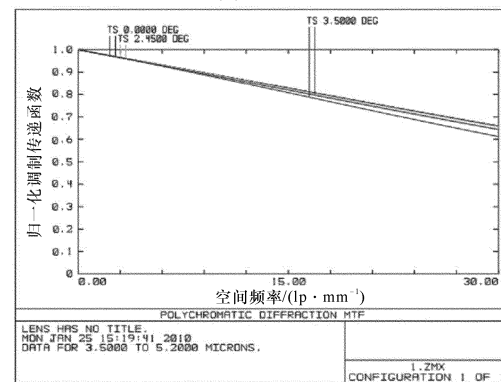
结构,系统总长133.94 mm,出瞳位于探测器冷光栏处,达到100%的冷光栏效率。在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内系统最大离焦量为 $19.12 \mu\text{m}$,系统的焦深 $A = \pm 2\lambda \times (F/\#)^2 = 34.4 \mu\text{m}$,系统的离焦量小于系统焦深,达到要求的效果。在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,系统的调制传递函数如图2所示,点列图最大RMS直径如表1所示,能量集中度如表2所示。可见,在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 内,系统MTF变化不大,基本接近衍射极限,点列图最大RMS直径小于一个探测器像元尺寸且变化不大,能量集中度变化很小,达到消热差的要求。



(a) 20°C



(b) -50°C



(c) 80°C

图2 不同温度下的调制传递函数

Fig. 2 The MTF of the system at different temperatures

表1 最大RMS直径在不同温度下的值

Table 1 The greatest rms diameter in different temperature

温度/℃	20	—50	80
最大RMS半径/μm	10.6	11.4	11.6

表2 30 μm 内能量集中度

Table 2 Energy concentration in 30 μm

归一化 视场角	不同温度下探测器一个像素内能量集中度/%		
	80℃	20℃	—50℃
0	87.8	86.5	86.1
0.7	86.5	85.7	85.1
1	85.3	84.9	84.3

3 杂光分析

有些光线通过红外衍射光学系统透镜硅、锗表面时会发生散射及镜筒内壁的反射等现象最后会到达像面,对成像质量造成严重的影响。为了减少这种影响,控制其在允许的范围之内,可以在透镜表面镀高透过率的薄膜及合理设置镜头内壁的反射率,衍射元件由其极高的衍射效率加上高透过率薄膜,可使散射等非成像光线造成的影响降低到最小。利用光学软件TRACEPRO 分析系统这种杂散光情况,如图3所示,镜筒内壁反射率为0.1。

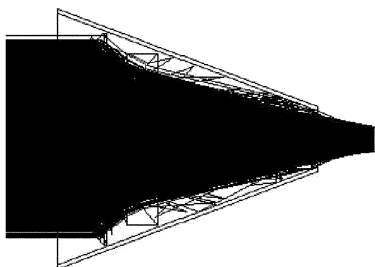


图3 系统光线追迹结果

Fig. 3 Ray trace of the system

设计衍射光学元件时,利用的是1级衍射,由衍射理论可知,除了占大部分能量比例的1级衍射外,在其他级次也存在能量分布,并沿轴向前后分布。对1级衍射、2级衍射进行模拟分析后得知,1级衍射的像面辐照度为 $1.5\times 10^4\text{ W/m}^2$,1级、2级衍射的像面辐照度为 $1.54\times 10^4\text{ W/m}^2$,因此2级衍射造成的杂光并未对1级衍射造成大的影响,其他级次衍射光与2级衍射光类似,因此衍射元件不同级次的杂散光对系统的影响较小。

图4列出在不同温度下中心视场像面辐照度分布,其中X、Y表示像面坐标,高高突起的竖线表示理想成像光线在像面的辐照度,其余大量低圆盘

竖线表示非成像光线在像面的辐照度。在 $-50^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内,温度变化对像面辐照度的影响不超出要求的范围,成像光线在像面的辐照度约为 $1.5\times 10^4\text{ W/m}^2$,非成像光线在像面的辐照度约为 2 W/m^2 ,温度变化对像面辐照度的影响在 $\pm 0.1\%$ 的范围内,非成像光线主要是透镜表面的反射造成的。

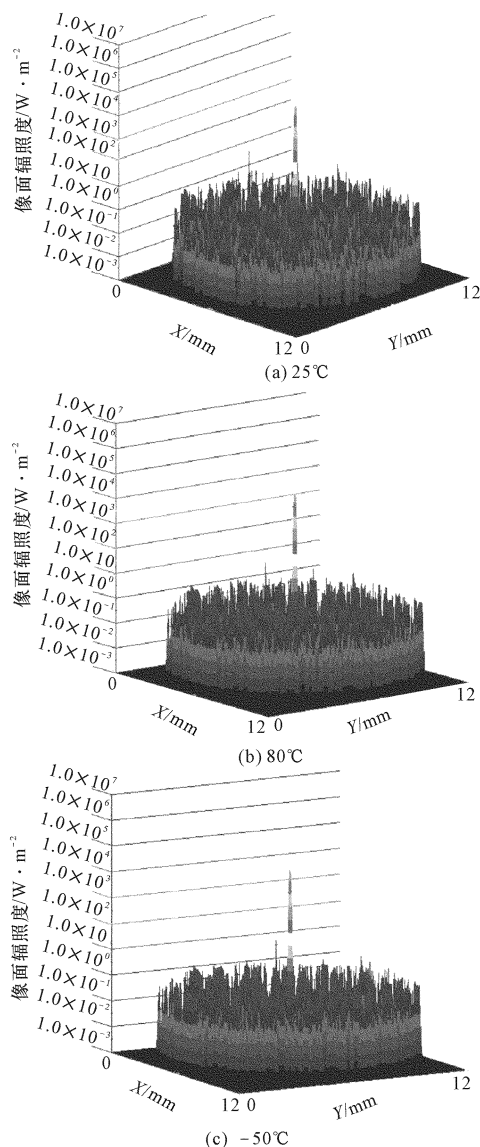


图4 不同温度下中心视场像面辐照度分布图

Fig. 4 Image irradiance of in central field of view at different temperatures

3 结论

设计了红外衍折混合光学系统,采用衍射光学元件可以很好地消色差与热差,在 $-50^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内,系统MTF变化不超出允许的范围,基本接近衍射极限,系统点列图最大RMS直径为 $11.6\text{ }\mu\text{m}$,

小于一个探测器像元大小 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。对 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以内能量集中度及系统像面杂光进行了分析,该系统具有很好的成像质量与消热差效果。

参考文献:

- [1] 郭永洪,沈忙作,陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1392-1395.
GUO Yong-hong, SHEN Mang-zuo, LU Zu-kang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1392-1395. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 赵秀丽. 红外光学系统设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1986.
ZHAO Xiu-li. Design of infrared optical system[M]. Beijing: China Machine Press, 1986. (in Chinese)
- [3] FISCHER R E. Lens design for the infrared[J]. Critical Reviews, 1991, CR38: 20-21.
- [4] WOOD A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lens[J]. Appl. Opt., 1992, 31(13), 2253-2258.
- [5] 沈良吉,冯卓祥. $3.7\text{ }\mu\text{m}\sim 4.8\text{ }\mu\text{m}$ 波段折/衍混合红外光学系统的无热化设计[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 683-688.
SHEN Liang-ji, FENG Zhuo-xiang. Athermal design of refractive/diffractive hybrid infrared optical system working at $3.7\text{ }\mu\text{m}\sim 4.8\text{ }\mu\text{m}$ [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(4): 683-688. (in Chinese with an English abstract)
- [6] KANAGAWA Y, WAKABAYASHI S, TAJIME T, et al. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart[J]. Opt. Eng., 1996, 35(10): 3001-3006.
- [7] 刘奇瑞,陈星明,赵家琪. 一种紧凑型红外光学系统设计[J]. 激光与红外, 2009, 30(4): 419-422.
LIU Rui-qi, CHEN Xing-ming, ZHAO Jia-qi. Design of a compact infrared optical system[J]. Laser & Infrared, 2009, 30(4): 419-422. (in Chinese with an English abstract)