

文章编号:1004-4213(2010)12-2143-4

新型长波红外折衍混合消热差系统*

郜洪云,陈梦苇,杨应平,陈彻,郑盼

(武汉理工大学 理学院,武汉 430070)

摘要:为了提高大靶面高分辨率光学系统的性能,基于衍射元件独特的温度特性以及热补偿理论,设计了工作波段为 8~12 μm 、视场角为 16° 、 $F/\#$ 为 1.9、后工作距为 133 mm 的新型折衍混合消热差系统.系统采用三片式结构,使用锗和硒化锌两种常用的红外材料,仅引入一个二次非球面和一个衍射面,使系统具有结构简单、体积小、重量轻、成本低等优点.实验结果表明:系统在较大视场内成像质量接近衍射极限,且在 $-30\text{ }^\circ\text{C}\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内性能稳定,适用于像元尺寸为 35 μm 、像元数为 640×480 的现代非制冷型焦平面阵列探测器,从而实现了消热差设计.

关键词:光学设计;消热差设计;折衍混合系统;红外光学系统

中图分类号: TN243

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103912.2143

0 引言

现代光学仪器通常要求能在一个较宽的环境温度范围内具有稳定的性能,需要对系统进行消热差设计.光学系统的消热差设计是通过一定的补偿技术,使光学系统在一个较宽的温度范围内保持成像质量不变,通常有三种方法:机械主动式、机械被动式和光学被动式.光学被动式消热差系统由于其结构相对简单、尺寸小、重量轻、系统可靠性高等优点,应用较广泛. Tamagawa、Wakabayashi 和 Tajime 等提出的光学被动补偿方式,通过合理的搭配红外材料实现在一定温度范围内的消热差设计^[1].一般采用这种方式进行系统设计时需要 3 种红外材料,而红外材料价格昂贵、种类非常有限.并且在温度较高的情况下,系统像质严重下降,导致系统不能使用.另外当视场较大时,要获得较好的成像质量,必然引入更多的元件、高次非球面或者使用更多的材料,这将导致系统结构复杂. Gregory P. B 和 John P. B 在文献^[2]中系统地论述了温度对衍射元件的影响,并引出了衍射元件的光热膨胀系数.在此基础上,部分学者在传统的折射系统中引入衍射元件进行消热差系统设计^[3-4],利用衍射元件负的色散系数和独特的温度特性,可以设计出具有较好温度稳定性的高质量红外折衍混合光学系统.但是在大多数的折衍混合消热差系统中,尤其是在视场角较大的情况下,系统中引入了多个衍射面,或者是利用一个衍射面与多个高次非球面的结合,甚至引入了谐衍射元

件^[5-6],而衍射面和高次非球面加工困难,且成本较高.

鉴于此,本文设计了一个三片式长波红外折衍混合消热差系统,材料为锗和硒化锌,仅引入了一个衍射元件和一个二次非球面.该系统在 $-30\text{ }^\circ\text{C}\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内的成像质量接近衍射极限,实现了消色差和消热差,且具有较长的后工作距,适应红外系统应用的要求.

1 设计理论

1.1 折射元件的温度特性

光学元件的温度特性是由光热膨胀系数表征的,它定义为单位温度变化引起的光焦度的相对变化,即

$$\chi_f = -\Delta\Phi_t / \Phi = f^{-1} df/dT \quad (1)$$

式中, $\Delta\Phi_t$ 为温度 T 变化引起的光焦度变化量, Φ 为系统的总光焦度, f 为系统的有效焦距.

对于折射元件,采用薄透镜模型,设透镜曲率半径为 r_1 和 r_2 ,折射率为 n ,所在介质空间的折射率为 n_0 ,则其光焦度为

$$\Phi = (n - n_0)(r_1^{-1} - r_2^{-1}) \quad (2)$$

由于透镜由同种材料制成,故定义 a_g 为光学元件的线膨胀系数,且

$$dr_1/r_1 dT = dr_2/r_2 dT = a_g \quad (3)$$

将式(2)两边同时对 T 求导,然后利用式(1)和(3),得到折射元件的光热膨胀系数的表达式为

$$\chi_{f,r} = a_g - (n - n_0)^{-1} (dn/dT - dn_0/dT) \quad (4)$$

可见,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的.

* 中央高校基本科研业务费专项资金(2010-Ia-028)资助

Tel: 027-63966146

Email: ccyun@126.com

收稿日期: 2010-08-10

修回日期: 2010-10-13

1.2 衍射元件的温度特性

对于衍射元件,它的焦距 f 决定于中心波长 λ_0 和环带半径 r_m ,对应于第 m 个环带,其焦距 f_m 为

$$f_m = n_0 r_m^2 / 2m\lambda_0 \quad m=1,2,3\cdots \quad (5)$$

当环境温度改变的时候,环带半径和空间折射率都会随着温度的变化而变化.环带半径 r_m 与温度的关系可表示为

$$r_m(T) = r_m(1 + a_g \Delta T) \quad (6)$$

环境介质的折射率与温度的关系为^[2]

$$n_0(T) = n_0 + (dn_0/dT)\Delta T \quad (7)$$

结合式(1)、(5)~(7),可得到衍射元件的光热膨胀系数为

$$\chi_{f,a} = f^{-1} \cdot df/dT = 2a_g + n_0^{-1} \cdot dn_0/dT \quad (8)$$

可见,衍射元件的温度特性只是由基底材料的热膨胀系数决定的,与材料的折射率无关.

1.3 消热差设计原理

光学热补偿原理是利用各透镜组的焦距随温度变化而变化的规律,使系统的像面保持稳定,同时保证系统焦距的补偿.要使光学系统能在一定的温度范围内具有良好的性能,系统必须同时满足总光焦度、消轴向色差和热补偿方程,即^[7]

$$\sum_1^i h_i \Phi_i = \Phi \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum_1^i (h_i^2 \omega_i \Phi_i) = 0 \quad (10)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum_1^i (h_i^2 \chi_i \Phi_i) = a_H L \quad (11)$$

式中: Φ_i 为第 i 个透镜的光焦度; h_i 为近轴光线在第 i 面上的入射高度; Φ 为系统的总光焦度; ω_i 为第 i 个透镜的色散因子,即为色散引起的光焦度的相对变化,数值上等于材料的阿贝常量的倒数; χ_i 为光热膨胀系数; a_H 为光学系统外部结构的线膨胀系数; L 为结构的总长度.式(10)为消色差方程,式子左边表示光学元件的色散所引起的离焦,即轴向色差;式(11)为消热差方程,表示当温度变化时,光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互抵消,从而使整个系统不产生温度离焦.

在折射式系统中引入衍射元件,不仅增大设计的自由度,降低系统无热化设计难度,同时衍射元件独特的色散特性,即阿贝数恒为负值,有利于实现系统的消色差设计.并且合理分配光焦度,利用非球面和衍射元件相互配合,可以实现消热差设计.

2 设计实例

系统的设计参量为:工作波段为 $8\sim 2\ \mu\text{m}$,有效

焦距 $f' = 100\ \text{mm}$, $F/\# = 1.9$,全视场角 $2\omega = 16^\circ$,工作温度范围为 $-30\ ^\circ\text{C} \sim 70\ ^\circ\text{C}$,镜筒采用铸铝(线膨胀系数 $\alpha_H = 23.6 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$).

2.1 光学材料的选取

在系统工作波段 ($8\sim 12\ \mu\text{m}$) 常用的红外材料有 Ge、ZnS、ZnSe 等.由于 Ge 的折射率和阿贝系数都较大,且有较好的机械加工性能,所以 Ge 是首选的红外材料.此外,为了实现消色差,一般选用 dn/dt 较小的材料与 dn/dt 较大的材料相搭配,同时 ZnSe 较 ZnS 的透过率高,因此选用 Ge 和 ZnSe 材料.

2.2 探测器的拟定

选用非制冷型焦平面阵列探测器,像元尺寸为 $35\ \mu\text{m}$,像素数为 640×480 .由此可以算出该探测器适用于像面为 $28\ \text{mm}$ 左右的光学系统.而系统的焦距是 $100\ \text{mm}$,视场为 $2\omega = 16^\circ$,像面为 $28.1\ \text{mm}$,所以该系统适合于此探测器.

2.3 设计结果

通过求解方程(9)~(11),得到系统的初始结构.然后利用光学设计软件 CODE V 对该初始结构进行优化;接着分析系统的像差,在适当的地方加入二元面或者非球面,进行像差平衡.在系统第 4 面上加入一个二次非球面,第 6 面引入衍射面,此旋转对称二元面的相位分布函数为^[8-9]

$$\phi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \cdots \quad (12)$$

式中: r 为归一化的半径坐标; A_1 为二次相位系数,用于消色差; A_2 、 A_3 等为非球面相位系数,用于校正高级像差.本次设计中取了前三个系数.将 A_1 设为变量,在优化函数中加入消色差函数进行优化;然后利用二次非球面的系数 k 和 A_2 、 A_3 相互配合,实现系统的像差校正.反复对系统进行优化,达到系统最佳成像质量,同时实现消热差和消色差.最终得到系统的结构如图 1,结构参量如表 1,其中衍射面的参量为: $A_1 = -4.842e-5$, $A_2 = 7.924e-10$, $A_3 = 2.0136e-13$.

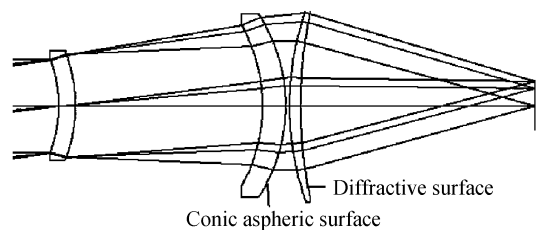


图 1 消热差系统的外形结构图

Fig. 1 The sketch map of the athermal infrared hybrid optical system

表 1 系统的结构参量

Table 1 Constructional parameters of the athermal system					
Surface type	Radius	Thickness	Glass	K	
STO	Sphere	-75.344 7	9.49	Ge	
2	Sphere	-85.953 9	106.6	Air	
3	Sphere	-94.52	13.23	ZnSe	
4	Asphere	-94.37	2.2	Air	-0.124 4
5	Sphere	161.415 8	6.28	Ge	
6	DOE	253.188	133.86	Air	

利用 CODE V 中的环境温度分析模块(ENV),可以得到系统在各个不同温度下的调制转换函数(Modulation Transfer Function, MTF)图和离焦情况.图 2(a)~(c)分别是该系统在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 MTF 曲线.可以看出系统在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内各个视场的 MTF 曲线基本接近于衍射极限,且在空间频率为 15 lp/mm 时,MTF 值均大于 0.6.此外,在空间频率为 25 lp/mm , $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,各个视场的 MTF 值均大于 0.4.因此该系统还适用于更高分辨率的探测器.

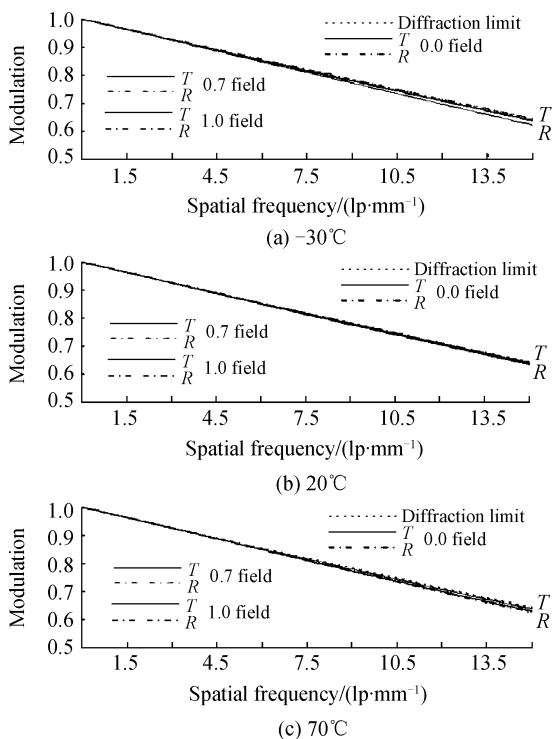


图 2 系统不同温度下的传递函数

Fig. 2 The MTF of the system at different temperatures

图 3 中给出了系统在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的波像差的变化情况.最大值为 0.24λ ($\lambda = 10\text{ }\mu\text{m}$),小于像质评价“瑞利判据”的标准,即当实际波面与理想波面的最大差别不超过 $\lambda/4$ 时,此波面可看作无缺陷的.由此可见该系统较好地实现了消热差设计.同时系统在该温度范围内轴向色差最大为 $2\text{ }\mu\text{m}$,表明系统也较好地校正了色差.

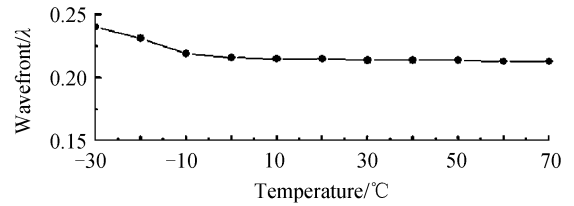
图 3 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的波像差

Fig. 3 Relationship curve of wavefront error and temperature ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$)

在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,系统的有效焦距为 100.01 mm . $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时系统的有效焦距为 99.99 mm ,故系统在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这个温度范围内的最大离焦量为 $10\text{ }\mu\text{m}$.光学系统的焦深表达式为^[9]

$$\delta = \pm 2\lambda (f/\#)^2 \quad (13)$$

式中 λ 为中心波长.将 $\lambda = 10\text{ }\mu\text{m}$, $f/\# = 1.9$ 代入式(13)中,得到系统的焦深为 $72.2\text{ }\mu\text{m}$.因而,该系统在此温度范围内的最大离焦量小于系统焦深.

3 结论

基于消热差理论,设计了一个工作在 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段的简单实用的折衍混合消热差系统.该系统全视场为 16° ,属于视场角较大的红外系统.系统仅用了三片元件,其中引入了一个二次非球面和一个衍射元件,元件材料使用常见的红外材料锗和硒化锌,整个系统的结构设计和材料选择使该系统具有结构简单、体积小、重量轻、成本低等优点,且大大提高了系统的成像质量,并实现了在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的消热差设计,也较好的校正了色差.在此温度范围内,系统在空间频率 15 lp/mm 和 25 lp/mm 处 MTF 值分别大于 0.6 和 0.4,说明该系统适用于像元尺寸 $35\text{ }\mu\text{m}$,像元数 640×480 的现代非制冷型焦平面阵列探测器,同时还适用于更高分辨率的探测器.

参考文献

- [1] TAMAGAWA Y, WAKABAYASHI S, TAJIME T, et al. Multilens system design with an athermal chart[J]. *Appl Opt*, 1994, **33**(34): 8009-8013.
 - [2] BEHRMANN G P, BOWEN J P. Influence of temperature on diffractive lens performance[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(14): 2483-2489.
 - [3] LI Sheng-hui, YANG Chang-cheng, ZHENG Jia, et al. Optical passive athermalization for infrared zoom system[C]. *SPIE*, 2007, **6722**: 67224E.
 - [4] RIEDL M J. The design of an IR petzval objective using an aspheric and diffractive element: an exercise with MOE for beginner[C]. *SPIE*, 2005, **5865**: 586501.1-586501.7.
 - [5] HAN Ying, WANG Zhao-qi, YANG Xin-jun, et al. Design on athermal infrared diffractive-refractive hybrid inverted telephoto system in $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 77-80.
- 韩莹,王肇圻,杨新军,等. $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段折/衍混合反摄远系统消热差设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 77-80.

- [6] LIU Lin, SHEN Wei-ming, ZHOU Jian-kang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679.
刘琳,沈为民,周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 675~679.
- [7] TAMAGAWA Y, TAJIME T. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt Eng*, 1996, **35**(10): 3001-3006.
- [8] BIGWOOD C R. New infrared optical systems using diffractive optics[C]. *SPIE*, 2002, **4767**: 1-12.
- [9] FISCHER R E, TADIC-GALEB B, YODER P R. Optical system design[M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 118-121.

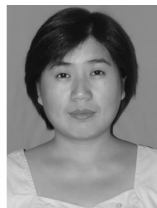
Novel Long Wavelength Infrared Diffractive/Refractive Athermal Optical System

GAO Hong-yun, CHEN Meng-wei, YANG Ying-ping, CHEN Che, ZHENG Pan

(School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To improve performance of a large area high resolution optical system, a novel infrared diffractive-refractive hybrid system in $8\sim 12\ \mu\text{m}$ with 16° FOV is designed based on the thermal properties of the diffractive lens and the theory of athermalization. The effective focal length and back working distance of the system are respectively 100 mm and 133 mm, while the F number is 1.9. The system is composed of three lenses, which used only two materials of Ge and ZnSe, including a conic surface and a diffractive surface. The results show that the hybrid system possesses better athermal performances and high image quality in $-30\ ^\circ\text{C}\sim 70\ ^\circ\text{C}$. Additionally, the system has a compact structure, lightweight, which make the system can satisfy the necessary specifications of modern optical instruments.

Key words: Optical design; Athermalization; Diffractive/refractive hybrid system; Infrared optical system



GAO Hong-yun was born in 1978 and received her Ph. D. degree from Nankai University in 2006. Now, she works as an associate professor, and her main research interests focus on optical design, infrared optics, and laser beam shaping.