

红外中波连续变焦光学系统的设计

薛慧¹, 李常伟²

(1. 南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039;
2. 南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: 设计了红外连续变焦光学系统, 该系统具有镜片少、透过率高、连续变焦倍率大、波段广、相对孔径大等突出特点。二元面和非球面的引入, 使系统在不同变焦结构时 14 lp/mm 处的 MTF 均大于 0.6, 很好地校正了系统的色差和轴外像差。该系统在仅使用 4 片镜片的情况下, 实现了 8 倍连续变焦, 系统透过率高于 80%。结果表明该变焦系统具有良好的成像质量。

关键词: 光学设计; 变焦系统; 连续变焦; 红外; 衍射光学元件; 无热化
中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Optical design of infrared continuous-zoom lenses

XUE Hui¹, LI Chang-Wei²

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China;
2. Nanjing Institute of Optics & Technology, Nanjing 210042, China)

Abstract: An infrared continuous zoom system is designed. The simple system has a large relative aperture with high transmittance, large continuous zoom ratio, and wide wave band. By introducing a diffractive surface and an aspheric surface, the modulation transfer function (MTF) of the system is above 0.6 for all continuous zoom ratios at the spatial frequency of 14lp/mm. As the system only contains 4 lenses, the transmittance is higher than 80%, and the zoom ratio of the system could also reach 8 continuously. As the color and the off-axis aberration are well corrected, the experiment indicates that the image quality of the continuous zoom system is pretty well.

Key words: optical design; zoom lenses; continuous-zoom; infrared; diffractive optical element; athermalization
PACS: 42.15.Eq, 07.57.Kp

引言

红外变焦系统近些年发展迅速, 使用广泛, 在军事、安全、国计民生等方面都有重要应用, 主要包括前视侦查、瞄准系统、搜索与跟踪系统、民用安防系统等。大视场用于大范围搜索目标, 小视场分辨率高, 用于跟踪、识别目标。目前常见的变焦系统主要有两档或多档变焦, 虽然结构简单, 易于实现, 但在切换过程中有可能致使目标模糊或丢失, 影响探测跟踪的连续性^[1-2]。另外, 部分连续变焦系统虽然可以实现变焦的连续性, 但是系统往往包含镜片较多, 严重降低了系统的透过率, 不利于目标的探测。

基于上述现状, 作者设计了一个镜片少、结构简单、变焦曲线短而平滑, 用于中波红外非制冷探测器的连续变焦系统。该系统通过引入二元面和非球面, 改善了系统的成像质量, 同时精简了系统结构, 显著提高了连续变焦系统的透过率。连续变焦系统通过焦距的连续变化, 对不同视场目标成像, 实现探测跟踪的连续性。

1 技术参数

为了提高系统透过率, 整个系统仅采用 4 个镜片, 焦距范围 34.375 ~ 275 mm, 探测器尺寸为 6 mm × 8 mm, 具体设计参数如表 1 所示。系统总长要求

收稿日期: 2011-10-15, 修回日期: 2012-06-17

基金项目: 南京电子技术研究所控课题预研基金

Foundation items: Supported by Advanced Foundation of Nanjing Research Institute of Electronics Technology

作者简介 (Biography): 薛慧 (1984-), 女, 内蒙古巴盟人, 工程师, 硕士, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: xuehui_2001@163.com.

Received date: 2011-10-15, revised date: 2012-06-17

小于 500 mm,同时要求系统成像质量在常温下全变焦过程中传函曲线 MTF 在 14 lp/mm 处大于 0.6,在 -20 ~ 40℃ 范围内,MTF 均大于等于 0.4.

表 1 光学系统设计参数
Table 1 Design parameters of zoom system

探测器尺寸	6 mm × 8 mm	变焦范围	34.375 ~ 275 mm
工作波段	3.7 ~ 5.3 μm	最小视场角	±0.63° × ±0.83°
F/#	1.83	最大视场角	±5° × ±6.5°
变倍比	8 ×	工作温度范围	-20 ~ 40℃

2 设计原理

连续变焦光学系统是通过机械补偿实现变焦的,其中根据补偿组的焦距正负分为正组、负组两种补偿方式.通常,变倍组焦距相同时,两种补偿方式相比较,正组补偿的连续变焦光学系统结构细而长,而负组补偿的系统结构短而粗,且负组补偿二级色差和球差均比正组补偿大.对小视场系统,且对球差、二级色差要求低的情况,负组补偿可以达到要求;但对大视场变焦系统,或大倍率变焦系统,要求二级色差小,则必须采用正组补偿.本文中设计的变焦系统要求最大视场 ±8.2°,入瞳直径 150 mm,属视场和孔径较大的系统,其色差和高级像差较难校正,因此本系统采用正组补偿方式实现连续变焦.

由于系统要求视场角比较大,反射式结构难以满足要求,所以系统结构拟采用透射式.红外波段常用的光学材料较少,且价格贵,光学系统要消色差就必须采用多种玻璃,因此本文采用具有独特消色差和消热差特性的二元元件.

二元光学元件在系统中主要用于校正色差,同时可以校正其它像差,有利于简化系统结构、缩小体积和减轻系统重量,具体原理简述如下^[3-5].

一般光学镜片的色差是由光学玻璃的材料色散特性引起的,而二元光学元件(DOE)的色差是微结构衍射的波长依赖性引起的,对 DOE,由其色散特性推导出来的等效阿贝常数 V^D 和部分色散系数 p^D 为:

$$V^D = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, p^D = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad (1)$$

式中 λ_2 为光学设计中心波长, λ_1, λ_3 为选定消色差的两个波长.

在中红外波段设计中, $\lambda_1 = 3.7 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 4.5 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 5.3 \mu\text{m}$, 则 $V^D = -2.8$, $p^D = 0.5$, 可见 DOE 的等效阿贝常数和一般光学材料的阿贝常数是相反的.

和传统的消色差透镜组相比,由于 DOE 具有负的阿贝常数,所以 DOE 在光学应用中有许多不同的特点.传统的消色差透镜组采用的是正负透镜组合的形式,为了达到消色差的目的,每块透镜的光焦度绝对值都较大,而这又会带来更大的系统单色像差,最终使整个光学系统镜片多而复杂.而在红外波段,由于可供选择的玻璃材料有限,消色差更为困难.在折/衍射混合系统中,衍射元件的等效阿贝常数为一个很小的负值,且 DOE 的光焦度非常小,这就使得单色像差容易校正.在折/衍系统中,衍射元件附在折射元件的某一面上,这样折/衍混合透镜的体积、重量相当于单透镜,所以利用衍射元件可以简化光学系统,减少镜片数量,减轻光学系统重量,增加整个系统的透过率.

众所周知,红外系统无热化设计的重要性,这是由于红外材料折射率温度系数较大,如单晶锗的折射率温度系数 dn/dt 为 $3.96 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,而可见光玻璃 K9 的折射率温度系数为 $2.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,前者是后者的将近 200 倍,这意味着大范围温度变化必然导致光学系统曲率、厚度、折射率等的变化,这严重影响了系统的成像质量^[3].由于本系统是变焦系统,所以在无热化设计方面不可能再采用传统的机械或机电被动方式,而是在设计过程中通过合理选择材料和各镜片焦距,再通过调整镜片间隔达到消热差的目的.除此之外,衍射元件具有负热差特性,也抵消了一部分热差.

设计的另一重要方面就是杂光抑制,红外图像表征景物的温度分布,是灰度图像,分辨率低,所以在设计光学系统时,一定要尽量提高信噪比,抑制噪声,采取杂散光抑制措施.由于本文是透射式系统,所以在杂光抑制方面略优于反射系统,通过筒壁加工合适高度、形状和间隔的螺纹,可以有效达到抑制杂光的效果.

3 设计结果

如图 1 所示,为连续变焦光学系统的光路示意图,系统总长 445.4 mm,其长焦(275 mm)、2×变焦(137.5 mm)、4×变焦(68.75 mm)、8×变焦(34.375 mm)情况下的系统光路图分别如图(a)、(b)、(c)、(d)所示.图中,1、2、3、4 分别表示变焦系统的前固定组、变倍组、补偿组和后固定组四个部分.前固定组是整个系统的窗口,通常选用透过率高、硬度较大的材料,本系统采用了较为常用的硅,同时,为了避免引入较难校正的二级光谱,前固定组焦距采用了

短焦;变倍组是系统实现连续变焦的核心部件,通常选用高折射率、低色散的光学材料,本系统采用了锗,面型为双凹的负透镜;补偿组用于焦平面位置的补偿,通常采用正光焦度透镜;后固定组则采用了 ZnSe 材料,并且,其前表面是二元面,可以进一步消色差和高级像差,改善整个光学系统的成像质量.系统在连续变焦过程中,前固定组和后固定组位置不变,焦平面位置固定,保证了整个系统的总长度不变.由图 1 可知,整个系统包含 4 片透镜,比通常的连续变焦系统减少了 30% 的镜片.镜片的减少,减少了整个系统的反射损耗,提高了系统的透过率,该系统的透过率高达 80%,系统径向口径最大 160 mm,系统具体设计参数如表 2 所示.

表 2 变焦系统参数

Table 2 Parameters of zoom system

面序号	面型	半径 (mm)	玻璃	口径 (mm)
1	球面	317.45	硅	160
2	球面	1506.74		160
3	非球面	-426.64	锗	50
4	球面	204.40		50
5	球面	269.21	锗	70
6	球面	689.44		72
7	二元面	59.81	硒化锌	45
8	球面	85.86		40

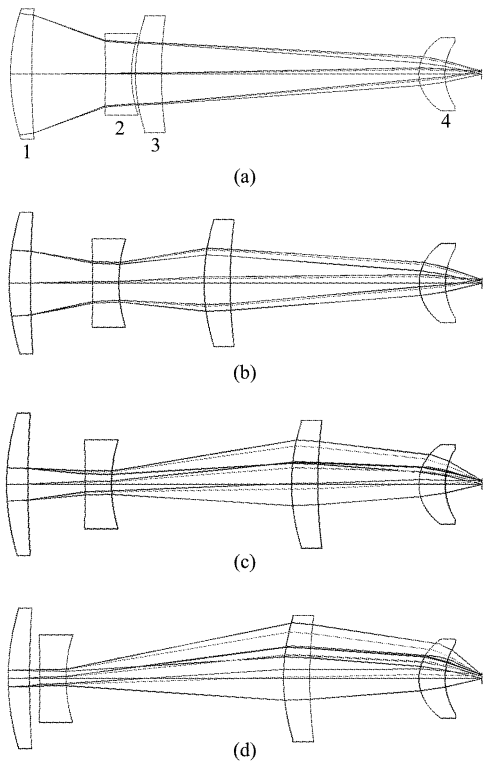


图 1 系统光路图(a)长焦,(b)2^x变焦,(c)4^x变焦,(d)8^x变焦
Fig. 1 Optical-path of the zoom system(a) The system with long focus,(b) The system with 2^x zoom ratio,(c) The system with 4^x zoom ratio,(d) The system with 8^x zoom ratio

如图 2 所示为连续变焦系统的传递函数 (MTF),空间频率在 14 lp/mm 时系统在各变焦情况下,MTF 均高于 0.6,图 3 为变焦系统的点列图 SPOT,弥散斑尺寸都很小,这说明该系统在全焦距范围内都具有较好的成像质量,满足使用要求.

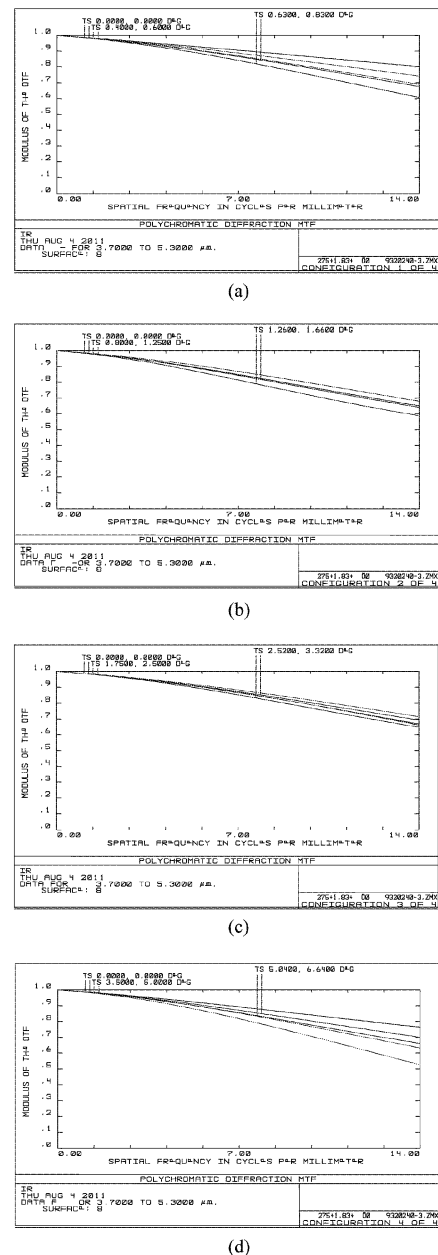
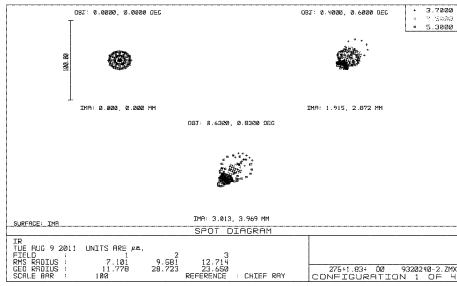
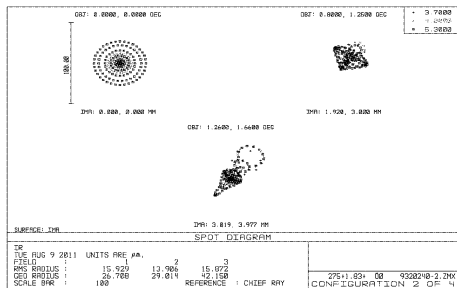


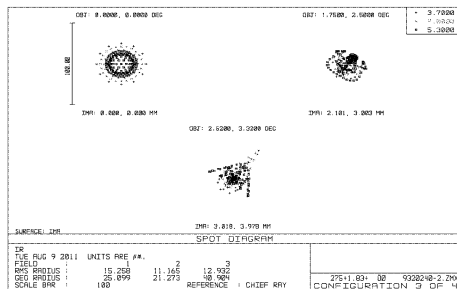
图 2 变焦系统 MTF(a)长焦,(b)2^x变焦,(c)4^x变焦,(d)8^x变焦
Fig. 2 MTF of the zoom system.(a) The system with long focus,(b) the system with 2^x zoom ratio,(c) the system with 4^x zoom ratio, and(d) the system with 8^x zoom ratio



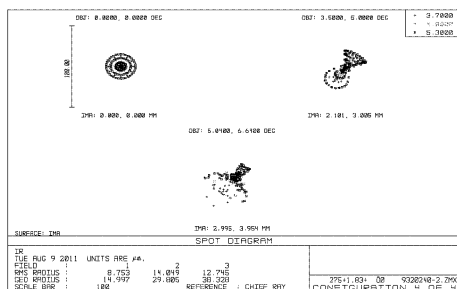
(a)



(b)



(c)



(d)

图3 变焦系统点列图 (a) 长焦 ,(b) 2[×]变焦 ,(c) 4[×]变焦 ,(d) 8[×]变焦

Fig.3 Spot of the zoom system: (a) The system with long focus, (b) the system with 2[×] room ratio, (c) the system with 4[×] room ratio, and (d) the system with 8[×] room ratio

如图4所示,是二元光学表面面形图,该面形图利用ZEMAX宏扩展编写,其最小环带宽度为0.25mm.衍射元件的环带深度为3.14μm,当刻蚀台阶数为8时,单一台阶深度为0.39μm,即衍射元件加工时的台阶深度为0.39μm,环带宽度由ZEMAX设计中宏扩展程序计算所得,衍射元件的台阶状和二

元光学表面的表面面型可以在图4中很直观地表现出来,根据精度要求,可以采用光刻法和激光直写法等实现二元面的加工与制作.

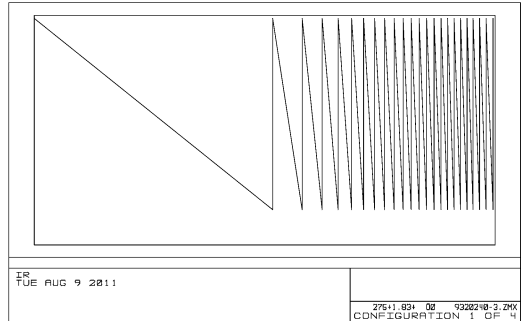


图4 二元光学的表面面形
Fig.4 Shape of binary optical surface

4 消热差

如图5~8所示,分别举例列出了系统在长焦和短焦时-20℃、+40℃的MTF曲线图,在14lp/mm处均大于等于0.4,基本满足使用要求.

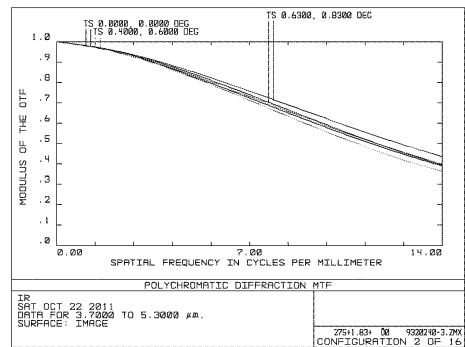


图5 -20℃时系统MTF(275mm焦距)
Fig.5 MTF of the system at -20℃ when the focal length is 275mm

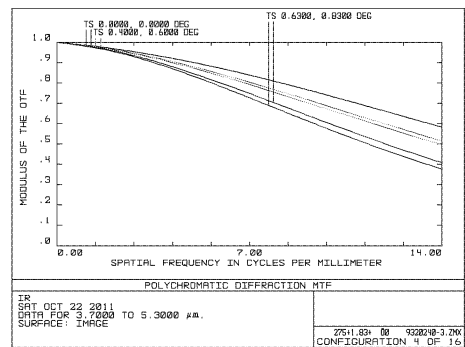


图6 +40℃时系统MTF(275mm焦距)
Fig.6 MTF of the system at +40℃ when the focal length is 275mm

(下转第436页)

- 2561.
- [2] ROMANNI D, KACHANOV A A, SADEGHI N, *et al.* CW cavity ring down spectroscopy [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **264**:316–322.
- [3] DEBECKER I, MOHAMED A K, ROMANINI D. High-speed cavity ringdown spectroscopy with increased spectral resolution by simultaneous laser and cavity tuning[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8):2906–2915.
- [4] SCHOCKER A, HOINGHAUS K K, BROCKHINKE A. Quantitative determination of combustion intermediates with cavity ring-down spectroscopy: systematic study in propene flames near the soot-formation limit[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(31):6660–6672.
- [5] RICHMAN B A, KACHANOV A A, PALDUS B A. Novel detection of aerosols: combined cavity ring-down and fluorescence spectroscopy [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9):3376–3387.
- [6] WANG Chu-Ji, SAHAY P. Breath Analysis Using Laser Spectroscopic Technique: Breath Biomarkers, Spectral Fingerprints, and Detection Limits[J]. *Sensors*, 2009, **9**:8230–8262.
- [7] NARASIMHAN L R, GOODMAN W, PATEL C K N. Correlation of breath ammonia with blood urea nitrogen and creatinine during hemodialysis[J]. *PANS*. 2001, **98**(8):4617–4621.
- [8] ROTHMAN S, JACQUEMART D, BARBE A, *et al.* The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2005, **96**:139–204.
- [9] ZHU Fang-Qiang, JIANG Kai-Li, HE Qiu-Hong, *et al.* A Study of the Laser Linewidth Effects in Cavity Ring-down Absorption Measurements[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics* (朱方强, 姜开利, 何秋荣等. 腔衰荡吸收测量中光源线宽影响研究. *化学物理学报*), 1998, **11**(1):26–30.
- [10] ZALICKI P, ZARE R N. Cavity ring-down spectroscopy for quantitative absorption measurements [J]. *J. Chem. Phys.*, 1995, **102**(7):2708–2717.
- [11] PUSHKARSKY M B, WEBBER M E, PATEL C K N. Ultra-sensitive ambient ammonia detection using CO₂-laser-based photoacoustic Spectroscopy [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**:381–385

(上接 424 页)

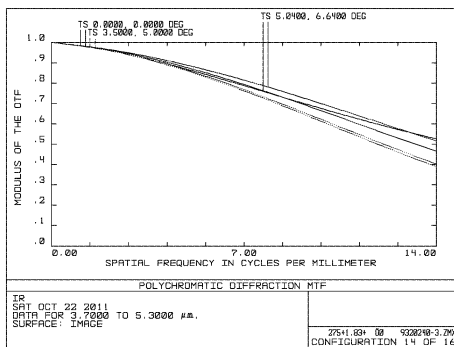


图7 -20°C 时系统 MTF(34.375 mm 焦距)
Fig. 7 MTF of the system at -20°C when the focal length is 34.375mm

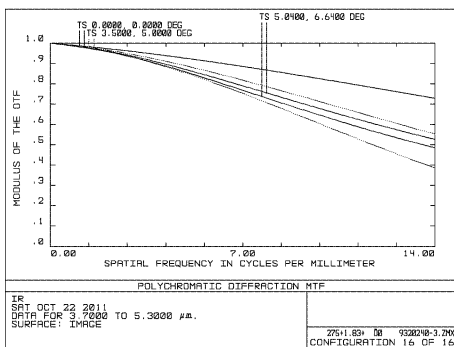


图8 $+40^{\circ}\text{C}$ 时系统 MTF(34.375 mm 焦距)
Fig. 8 MTF of the system at $+40^{\circ}\text{C}$ when the focal length is 34.375mm

5 结论

光路设计、热平衡分析、杂光抑制是红外系统设计必不可少的过程,本文设计的 $8\times$ 连续变焦光学系统,适用于中波红外波段,具有镜片少、透过率高的特点. 在热平衡设计中,系统在 $-20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 环境温度下各变焦结构性能良好. 结果表明,系统工作状态良好.

REFERENCES

- [1] GAO Hong-yun, XIONG Tao. Mid-wavelength infrared dual field-of-view optical system [J]. *Optics and Precision Engineering* (郭洪云,熊涛. 中波红外两档变焦光学系统. *光学精密工程*), 2008, **16**(10):1891–1894.
- [2] Muhammad Nadeem Akram. Design of a multiple-field-of-view optical system for 3- to 5- μm infrared focal-plane arrays[J]. *Opt. Eng.* 2003, **42**(6):1704–1714.
- [3] XUE Hui. Optical Design of Infrared Search and Trace System[J]. *Acta Optica Sinica* (薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计. *光学学报*), 2010, **30**(8):2383–2386.
- [4] GUO Yong-hong, SHEN Mang-zuo. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica* (郭永洪,沈忙作. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计. *光学学报*), 2000, **20**(10):1392–1395.
- [5] BAI Jian, Sun Ting. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive- diffractive optical systems [J]. *Acta Optica Sinica* (白剑,孙婷. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析. *光学学报*), 1999, **19**(7):997–1002.