

8 倍非制冷型红外折/衍射连续变焦系统设计

徐 亮¹ 张国玉¹ 高玉军² 杨 菲³ 樊 帆⁴

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
³ 中国一航西安飞机工业(集团)有限责任公司, 陕西 西安 710089
⁴ 镇江船舶学院, 江苏 镇江 212003

摘要 针对长波用 320×240 元非制冷焦平面阵列探测器, 设计了 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段折射/衍射混合红外连续变焦光学系统, 其相对孔径大, F 数为 1.3, 系统变焦倍率为 8。变焦系统采用锗和硫化锌两种材料, 通过引入二元面和非球面校正系统色差和轴外像差, 在空间频率 18 lp/mm 处, 全焦距范围内调制传递函数(MTF)均在 0.5 以上, 接近衍射极限; 系统在接收半径为 $17.5 \mu\text{m}$ 的探测器敏感元内, 能量透过率大于 78%, 表明该变焦系统具有良好的成像质量。

关键词 光学设计; Petzval 型物镜; 连续变焦; 折/衍射混合系统

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0478

Design of $8 \times$ Uncooled Thermal Infrared Hybrid Refractive-Diffractive Continuous-Zoom Lenses

Xu Liang¹ Zhang Guoyu¹ Gao Yujun² Yang Fei³ Fan Fan⁴

¹ College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
³ AVICI Xian Aircraft Industry (Group) Company Limited, Xi'an, Shaanxi 710089, China
⁴ Zhenjiang Ships and Boats College, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

Abstract A set of $8 \sim 12 \mu\text{m}$ infrared (IR) hybrid refractive-diffractive continuous zoom lenses is designed, based on long-wave 320×240 element uncooled thermal IR focal plane arrays (FPA) detector. The continuous zoom system has a large relative aperture, the $F\#$ is 1.3, and the zoom ratio is 8. Ge and ZnS are used in the continuous zoom system. A diffractive surface and an aspheric surface are used for correcting the system color aberration and off axis aberration. The modulation transfer function (MTF) is above 0.5 in all focal distance at the spatial frequency of 18 lp/mm , and the MTF approaches the diffraction limit. The energy permeance ratio is greater than 78% when the system receiving radius in the detection sensor is smaller than $17.5 \mu\text{m}$, which shows that the imaging quality of the continuous zoom system is very good.

Key words optical design; Petzval objective; zoom camera; hybrid refractive-diffractive system

1 引 言

随着红外非制冷探测器技术的成熟, 非制冷热像仪在各领域得到广泛的应用, 红外定焦镜头已不能满足一些特殊场合的使用, 所以设计一些红外变焦镜头, 以满足实际的应用, 具有一定的现实意义。

红外连续变焦镜头能在一定范围内改变系统焦距, 像面景物的大小连续可变, 产生定焦镜头无法达到的良好视觉效果, 可以达到大视场搜索目标, 小视场仔细观察目标的目的, 在民用与军用领域有着良好的应用前景^[1]。而目前关于此类系统的相关报道很

收稿日期: 2008-05-23; 收到修改稿日期: 2008-07-03

作者简介: 徐 亮(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计与红外探测技术研究。E-mail: xuliang757@163.com

导师简介: 张国玉(1962—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的教学与研究。E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn

少,且都存在一定的缺点。加拿大 Wescam 公司的 Sinclair 设计的焦距范围为 20~400 mm 的变焦镜头,虽然其成像质量接近于衍射极限,但是使用了 11 片透镜,并且采用了两个衍射光学元件(DOE),因此结构复杂,系统透过率低。由于红外材料的限制及非制冷红外探测器对大相对孔径、高光通量红外光学系统的匹配要求,传统的高倍率折射式红外变焦系统往往由 7 片以上的透镜单元构成,导致系统质量大、体积大、成像质量差等诸多缺点,因此研制轻、小、巧的红外成像系统成为当务之急。衍射光学元件的出现,使现行光学系统进一步革命性优化设计成为可能^[2]。

本文针对长波红外非制冷式 320×240 面阵列探测器,设计了一个 8×连续变焦光学系统。为了在实现高性能、高像质的同时,尽可能减小体积、质量,系统设计引入了非球面光学和衍射光学设计技术,仅用 6 片透镜获得大变倍比、高像质长波红外成像光学系统的设计结果。由于以往的红外变焦系统都存在高变倍比、小相对孔径,或者大相对孔径、低变倍比的缺陷,而这种红外变焦系统克服了这些局限,做到了大相对孔径、高变倍比的特点。

2 光学参数指标的确定

利用 DOE 独有的特性,将二元衍射面引入红外变焦光学系统中,从变焦光学系统理论及衍射元件消色差理论出发,设计了 6 片透镜。应用于热红外波段的折/衍射混合变焦光学系统,并拟以 Sofradir 公司生产的 320 pixel×240 pixel,敏感元尺寸为 35 μm×35 μm 非制冷探测器为接收器,设计一种具有大相对孔径的镜头,主要设计参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system

Working wave range / μm	8~12
Zoom magnification	8×
Focal length range / mm	14~112
Height of image (Diagonal) / mm	14
F #	1.3
Field range / (°)	43.6×33.4 (short EFL) 5.7×4.3 (long EFL)
Permeance ratio / %	>78

3 光学系统设计

3.1 衍射原件消色差理论

衍射元件与传统的折射元件不同,其等效阿贝数 $\nu_{\lambda_1, \lambda_2}$, 与所用基底材料无关,而只与所使用的波段

有关,即

$$\nu_{\lambda_1, \lambda_2} = \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_3), \quad (1)$$

式中 λ_2 为所用波段的中心波长, λ_1 和 λ_3 为波段两端波长,通常有 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ 。在热红外波段,衍射元件的阿贝数为 $\nu_{\lambda_1, \lambda_2} = -2.5^{[2,3]}$ 。衍射光学元件这种具有大的负向色散特性,对于变焦光学系统消色差很有好处,而且衍射光学元件是直接制作在折射透镜上的浮雕结构,可有效地简化系统结构,从消色差角度看,衍射元件的引入为光学设计增添了一种特殊的像差优化参量。通常,衍射元件是对第一衍射级进行设计的,标量理论认为,对于第一衍射级的衍射效率

$$\eta = \left\{ \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) \right]}{\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)} \right\}^2, \quad (2)$$

为了平衡所选用的波段内的衍射效率,设计波长即中心波长应选

$$\lambda_0 = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (3)$$

对于 8~12 μm 波段,设计波长为 9.6 μm。

3.2 变焦镜头的设计

本文设计的变焦距镜头使用机械补偿方法,系统由前固定组、变焦组、补偿组和后固定组组成^[4]。

由于非制冷焦平面探测器和最小可分辨温差同制冷型的性能相比相差近两个数量级,这就需要用光学系统来补偿以使其探测性能提高,在应用单元探测器时,由于红外探测器的接收面积较小,所以一般红外光学系统的视场不太大,轴外像差通常可以少考虑^[5]。因此,该变焦系统采用大相对孔径,即小 F 数的光学系统。该变焦系统是由 Petzval 型物镜改型而成,这样可以大大提高镜头的相对孔径;采用“+ - - +”型负组机械补偿法,负组变倍,负组补偿;变倍组和补偿组采用高折射率、大色散系数的负透镜,实现消色差系统设计,同时也有利于实现控制 Petzval 值,校正场曲和像散;后固定组加入不同色散系数的透镜组,进一步校正场曲、色差,采用锗和硫化锌的混合透镜组,大大减小系统轴向尺寸;为了进一步校正各种高级像差,考虑到加工和装调的方便,变倍组采用一个非球面,后固定组采用一个二元面来校正彗差、球差、色球差和畸变^[6]。用 ZEMAX 光学设计软件的 Binary2 面形,将系统的第 9 面设为二元面,在优化函数中加入垂轴色差函数,以二元面的第一项作为变量优化。ZEMAX 光学设计软件的旋转对称二元面的相位分布函数为

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

式中 r 为归一化半径坐标; A_1 为二次相位系数, 决定二元面的傍轴光焦度, 实现光学系统的消色差; A_2, A_3 等为非球面相位系数, 用于校正系统的高级像差。根据需要和二元面制作的要求, 在优化设计中只取其前两项^[7]。在图 1 中给出了此衍射面的位相及周期同径向距离的关系, 当台阶数为 8 时, 最小特征尺寸为 $52.5 \mu\text{m}$, 完全可以用“金刚石切削工艺”加工此衍射面。该系统总长为 170 mm, 后工作距为 7.8 mm。图 2 中给出了设计的变焦系统长焦、中焦和短焦的结构图。

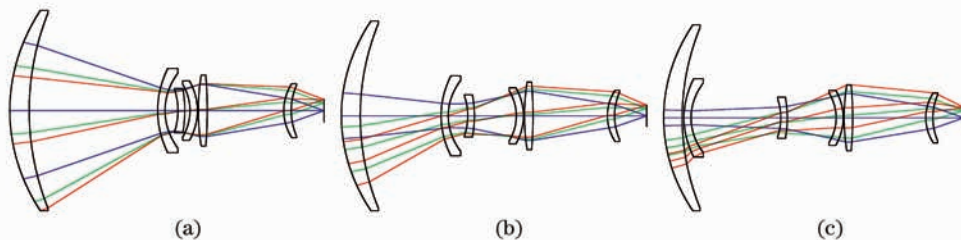


图 2 连续变焦系统图。(a) 长焦; (b) 中焦; (c) 短焦

Fig. 2 Concept of continuous zoom optics. (a) long effective focal length (EFL); (b) middle EFL; (c) short EFL

3.3 变焦组与补偿组的运动轨迹关系方程

二组元变焦光学系统变焦组做线形运动, 而补偿组做曲线运动, 因此, 设计二组元变焦系统的关键技术是如何求得补偿组的运动曲线。二组元变焦系统的变焦组和补偿组有相临和相隔两种情况, 相临就是变焦组和补偿组之间没有其他光学组件, 相隔就是变焦组和补偿组之间有光学组件。相邻的情况运用动态光学原理, 相隔则采用高斯算法, 充分考虑了符号规则, 由于该系统采用的是相邻的情况, 所以运用动态光学原理可以求解。由动态光学理论可知, 对于一个二组元的稳像系统, 考虑到变焦镜头变焦组和补偿组均为沿光轴的一维运动, 同时变焦组为线性运动, 可以得到关系

$$AY_2^2 + BY_2 + C = 0, \quad (5)$$

其中

$$A = (f'_1 - \beta_1 X)\beta_2, \quad (6)$$

$$B = \beta_1 \beta_2 X^2 + [f'_2(1 - \beta_2^2)\beta_1 - f'_1(1 - \beta_1^2)\beta_2]X - f'_1 f'_2 (1 - \beta_2^2), \quad (7)$$

$$C = \beta_2^2 f'_2 [\beta_1 X - f'_1(1 - \beta_1^2)]X, \quad (8)$$

即^[8]

$$Y = \frac{-\beta \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (9)$$

式中 X 为变焦组沿光轴移动量, Y 为补偿组沿光轴移动量, β_1 为变焦组的放大率, β_2 为补偿组的放大率, f'_1 为变焦组的焦距, f'_2 为补偿组的焦距。由

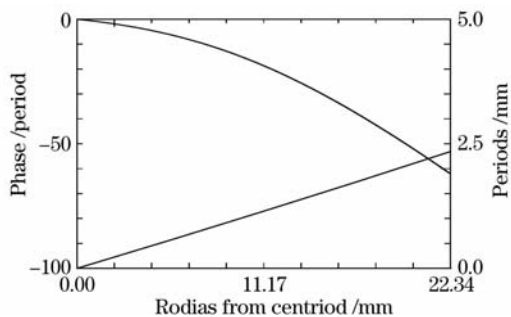


图 1 DOE 的位相及周期和径向的距离关系

Fig. 1 Relationship of phase and periods with radial distances of the diffractive optical element (DOE)

此即可计算出补偿组的运动轨迹。应用 MATLAB 语言编程可以求出 $\beta_1 = \beta_2 = -1$ 时, 变焦组与补偿组的运动轨迹曲线, 如图 3 所示。

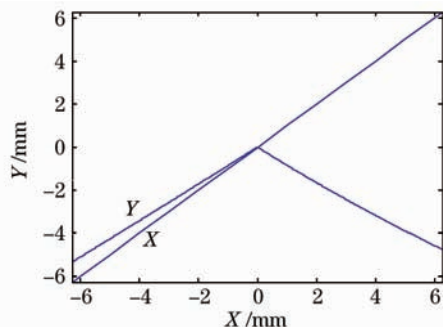


图 3 变焦组与补偿组的变化关系曲线

Fig. 3 Curves of zoom group versus compensation group

4 设计结果与分析

从以上的光学系统设计可以得到以下的设计结果。

4.1 传递函数分析

图 4 分别给出了光学系统在长焦、中焦和短焦时的传递函数(MTF)曲线, 三种曲线均表明该系统的调制传递函数在 18 lp/mm 处都在 0.5 以上, 并且均接近衍射极限; 而探测器的最小像敏单元尺寸为 $35 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$, 其极限分辨率为 14 lp/mm, 说明设计的镜头设计分辨率大于探测器的极限分辨率, 因此, 该系统在全焦距范围内有很好的成像质量。

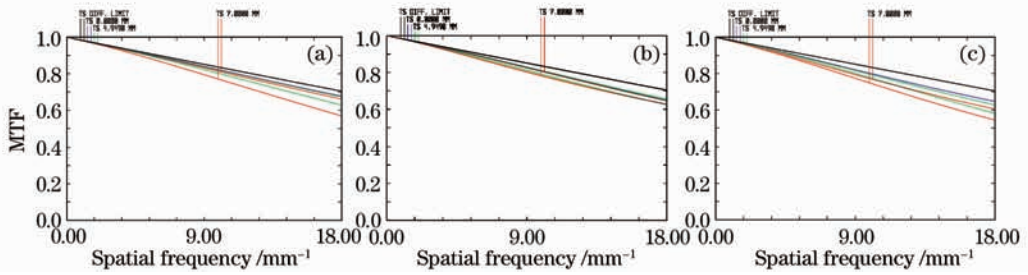


图 4 光学系统传递函数曲线。(a) 长焦;(b) 中焦;(c) 短焦

Fig. 4 Curves of optical transfer function. (a) long EFL; (b) middle EFL; (c) short EFL

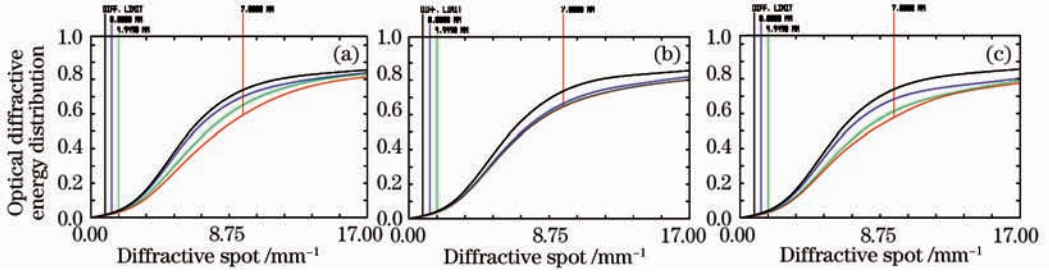


图 5 光学系统衍射能量曲线。(a) 长焦;(b) 中焦;(c) 短焦

Fig. 5 Curves of optical energy distribution. (a) long EFL; (b) middle EFL; (c) short EFL

4.2 衍射能量分析

图 5 分别给出了光学系统在长焦、中焦和短焦时的衍射能量曲线。由于探测器的最小像元尺寸为 $35 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$, 所以在设计时应考虑衍射斑范围在 $17.5 \mu\text{m}$ 以内的能量透过率; 三种曲线图表明该系统在衍射斑范围 $17.5 \mu\text{m}$ 内时, 能量透过率均大于 78%, 满足红外非制冷探测器能量分辨率的基本需求, 因此该变焦系统具有很好的能量透过性能^[9]。

5 结 论

针对红外非制冷系统大相对孔径、小 F 数的实际要求, 利用 DOE 独特的负色散特性, 设计了一种应用于热红外波段的折/衍射混合型光学系统。该系统与以往变焦系统相比, 具有结构简单紧凑、体积小、光学传递函数接近衍射极限、系统透过率高、变倍比高、相对孔径大及变焦曲线平滑等优点, 突破了传统纯折射式光学设计中的诸多局限。可以预见, 衍射光学元件的使用, 为实现高变倍、大相对孔径的红外变焦系统小型化、轻量化提供了较好的技术途径, 其将在军用、民用方面, 特别是在目标跟踪和识别系统中得到广泛应用。

参 考 文 献

1 Li Ronggang, Liu Lin, Zhang Xingde *et al.*. Infrared continuous zoom lenses for 160×120 pixels uncooled thermal imager [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(4):275~277

李荣刚, 刘琳, 张兴德等. 用于 160×120 元非制冷热像仪的红外连续变焦镜头[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(4):275~277

2 Dong Keyan, Sun Qiang, Li Yongda *et al.*. Design of a refractive/diffractive hybrid infrared bifocal optical system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9):4602~4607

董科研, 孙强, 李永大等. 折射/衍射混合红外双焦光学系统设计[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9):4602~4607

3 Thomas Stone, Nicholas George. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromatic [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14):2960~2971

4 Bai Yuzhuo, Zhang Qie, Li Maozhong. The design of infrared zoom optical system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2007, **30**(1):24~26

白玉琢, 张秋鄂, 李茂忠. 红外变焦距光学系统的设计[J]. *长春理工大学学报*, 2007, **30**(1):24~26

5 R. E. Fischer, B. Tadic Galeb. *Optical System Design* [M]. New York: Mc Graw Hill, 2000. 128~198

6 Wang Zhaoqi, Zhang Yanan, Fu Rulian *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive petzval objective in visible band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(1):1~4

王肇圻, 张铁楠, 傅汝廉等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(1):1~4

7 Gao Hongyun, Xiong Tao, Yang Changcheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(7):1038~1043

郭洪云, 熊涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(7):1038~1043

8 Wang Chunyan, Wang Zhijian, Zhou Qingcai. Solving the cam curve of the compensating group about zoom lens using dynamic optical theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):891~894

王春艳, 王志坚, 周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸透镜曲线[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6):891~894

9 Wang Haitao, Guo Liangxian. Cooled thermal imaging mid-wavelength infrared zoom camera [J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(1):8~11

王海涛, 郭良贤. 制冷型中波红外变焦镜头[J]. *红外技术*, 2007, **29**(1):8~11