

文章编号: 0253-2239(2010)07-2084-05

折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计

刘 峰¹ 徐熙平^{1,2} 孙向阳¹ 段 洁²

(¹ 长春理工大学光电工程学院航天技术研究所, 吉林 长春 130022
² 长春理工大学吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要 根据坦克目标搜索/跟踪系统的要求,设计了工作于8~12 μm 波段折/衍射混合红外连续变焦距光学系统。该系统解决了传统系统不能同时满足长焦距、大相对孔径、高变倍比、高成像质量和系统结构简单的缺陷,使设计的系统相对孔径大, F 数为0.9,变焦倍率为11 \times ,系统在长焦距时,可识别1500 m远的坦克目标。变焦系统仅用7片锗透镜,通过引入二元面和非球面校正系统色差和轴外像差,在空间频率为17 lp/mm处,全焦距范围内调制传递函数(MTF)值均在0.64以上,接近衍射极限;系统在接收半径为17.5 μm 的探测器敏感元内,能量集中度大于82%,表明系统具有良好的成像质量,满足坦克目标搜索识别系统的总体要求。

关键词 光学设计;佩茨瓦尔(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/AOS20103007.2084

Design of Infrared (IR) Hybrid Refractive/Diffractive Lenses for Target Detecting/Tracking

Liu Feng¹ Xu Xiping^{1,2} Sun Xiangyang¹ Duan Jie²

(¹ Institute of Aerospace Technology, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Research Center of Optoelectrical Measurement and Control Instrument Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract 8~12 μm infrared (IR) hybrid refractive/diffractive continuous zoom lenses is designed for the needs of target detecting/tracking system. The defects of conventional systems, such as being insufficient for achieving long focal length, large relative aperture, big zoom ratio, high imaging quality and simple structure, are solved in this system, which has the properties of large relative aperture, $F=0.9$, zoom ratio 11 \times , discernment with long focal lengths for tanks at about 1500 m distance. The optical system composes of seven pieces of Germanium lens. To correct chromatic and off axis aberrations, the system applies diffractive optical element (DOE) and aspherical surface. The modulation transfer function (MTF) is above 0.64 in all focal lengths at the spatial frequency of 17 lp/mm, which approaches the diffraction limit. The energy concentration ratio is greater than 82% in the 17.5 μm radius of sensing pixel. It shows that the optical system has good imaging quality and meets the needs of general requirements for the target detecting/tracking system.

Key words optical design; Petzval objective; continuous-zoom; hybrid refractive/diffractive lenses

1 引 言

红外搜索/跟踪系统通常是一类功能很明确的被动军用红外系统,此类系统能够探测、定位并连续

跟踪在红外背景辐射和其它干扰下发射红外线的物体和目标^[1],作为系统重要组成部分的红外连续变焦镜头能在一定范围内改变系统的焦距,使目标在

收稿日期: 2009-08-11; 收到修改稿日期: 2009-09-17

作者简介: 刘 峰(1984—),男,硕士研究生,主要从事光学设计与红外探测技术方面的研究。

E-mail: liufenggjy@163.com

导师简介: 徐熙平(1969—),男,博士,教授,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研究。

E-mail: xxp@cust.edu.cn

像面上的大小连续可变,可以达到大视场搜索目标,小视场准确观察目标的目的,在民用和军用领域有着良好的应用前景^[2]。而目前关于此类系统的相关报道很少,且都存在一定的缺点,如加拿大 Wescam 公司 Sinclair 设计的焦距范围为 20~400 mm 的变焦镜头,虽然成像质量接近衍射极限,但使用了 11 片透镜,并且采用了两个衍射光学元件(DOE),因此结构复杂,系统透射率低;文献[3]设计的变焦系统虽然仅使用了 6 片透镜,但系统相对孔径较小、焦距短,因而探测距离受到限制,同时为了平衡像差,系统使用了吸收率较大的硫化锌玻璃,而透射率是非制冷热成像系统的关键指标。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 片以上透镜组成,导致系统质量大、体积大和成像质量差等诸多缺点,而衍射光学元件(DOE)的出现,使现行光学系统进一步革命性优化设计成为可能^[4]。

针对长波红外非制冷型 320 pixel×240 pixel 面阵探测器,设计了一款适用于搜索/跟踪远距离红外目标的变焦光学系统。克服了以往的红外变焦系统存在的高变倍比、小相对孔径或者大相对孔径、低变倍比的缺陷,做到了大相对孔径,高变倍比的特点。

2 系统参数计算

2.1 系统的主要性能指标

1) 探测器类型: 选用 Sofradir 公司生产的 320 pixel×240 pixel 的红外非制冷型焦平面探测器,单个像素尺寸为 35 μm×35 μm;

2) 工作波段为 8~12 μm;

3) 焦距(连续变焦): 19~210 mm(长焦时可识别 1500 m 远处的坦克目标,短焦时水平搜索范围大于 32°);

4) 相对孔径: $F=0.9$ 。

2.2 系统参数计算

根据约翰孙准则,要发现、识别和看清目标,目标应在接收器上至少占 2 个像素、4 个像素和 8 个像素^[5]。设坦克高度为 $H=2$ m,可计算出长焦时系统的焦距:

$$f_l = \frac{h}{H}L = \frac{2 \times 4 \times 35 \times 10^{-3}}{2 \times 10^3} \times 1500 \times 10^3 = 210 \text{ mm}, \quad (1)$$

由系统在短焦时水平搜索范围大于 32°,可计算出短焦时系统的焦距:

$$f_s = \frac{320 \times 35}{2 \times 1000 \tan(32^\circ/2)} = 19.53 \text{ mm}, \quad (2)$$

所以,拟定系统变焦范围为 19~210 mm(11 倍连续变焦),考虑到探测器为长方形,设计的系统像高应为探测器对角线之半 7 mm。

3 光学系统设计

3.1 衍射元件消色差理论

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,只与所使用的波段有关,即

$$\nu_{\lambda_1, \lambda_2} = \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_3), \quad (3)$$

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 $\nu_{\lambda_1, \lambda_2} = -2.5$ ^[4,6]。衍射光学元件具有大的负向色散特性,对光学系统消色差非常有效,而且衍射光学元件是直接制作在折射透镜上的浮雕结构,可以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,对于第一级衍射级的衍射效率

$$\eta = \left\{ \frac{\sin \left[\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) \right]}{\pi \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)} \right\}^2. \quad (4)$$

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

$$\lambda_0 = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (5)$$

对于 8~12 μm 波段,由(5)式可知,设计波长应为 9.6 μm。

3.2 变焦镜头的设计

3.2.1 系统结构的选择

设计的红外变焦距光学系统使用机械补偿方法,系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成。由于红外探测器的接收面积较小,一般红外光学系统的视场不大,轴外象差可以少考虑^[7],所以,设计的系统由佩茨瓦尔(Petzal)型物镜改型而成。

3.2.2 像差的校正

系统采用“+ - + +”型机械补偿方法,负组元变倍,正组元补偿。由于前固定组对长焦距的球差和正弦差影响最大,同时在长焦距时,前固定组对像散的影响也较大,所以,前固定组采用正负透镜组合的结构,并引入一个偶次非球面校正系统在长焦距时的球差和正弦差。变倍组在长焦距位置时,轴上

光线高度比其它焦距高,在短焦距位置时轴外光线高度最高,且其高度变化速度比其它组元都快,所以,利用变倍组校正短焦距的轴外细光束像差,变倍组与前固定组配合校正长焦距的轴外宽光束像差。补偿组从短焦距移动到长焦距时,逐渐离开光阑,但由于补偿量远小于变倍组的移动量,光线在补偿组上的高度变化不大,故利用补偿组校正长焦距的轴上点光线像差使之与长焦距和短焦距的像差拉平,为了进一步校正各种高级像差,在后固定组中引入两个偶次非球面。由于本系统材料均为锗玻璃,而同一种玻璃不能消色差,所以,在系统第7面引入一个二元面(DOE),通过应用衍射元件独特的负向色散特性实现系统的消色差设计。

ZEMAX 光学设计软件的旋转对称 DOE 的相位分布函数为

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

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距,实现光学系统的消色差; A_2 , A_3 等为非球面相位系数,用于校正系统的单色像差^[8]。图1给出了此衍射面的位相及周期同径向距离的关系,衍射面的线频率最大 0.516 Periods/mm,对应最小周期线宽为 1.938 mm,若每周期刻蚀 16 个

台阶,对应的最小特征尺寸为 121.13 μm ,这样的尺寸完全可以用“金刚石切削工艺”加工次衍射面,系统的一级衍射效率由下式计算得到

$$\eta(\lambda) = \frac{\sin[\pi(1 - \lambda_0/\lambda)]}{N^2 \sin^2[\pi(1 - \lambda_0/\lambda)/N]} \text{sinc}^2(m/N), \quad (7)$$

式中 N 为二元光学元件的台阶数, $\eta(\lambda)$ 为台阶数为 N 的二元光学元件对设计波长的衍射效率。当 $N=16$ 时,可计算出此衍射元件对设计波长的理论值可达 98.7%,非设计级次的衍射杂散光能量甚小,对系统的像质影响可忽略。设计的系统总长为 543.69 mm,后工作距离为 10.8 mm,图2给出了设计的变焦系统长焦、中焦和短焦的结构图。

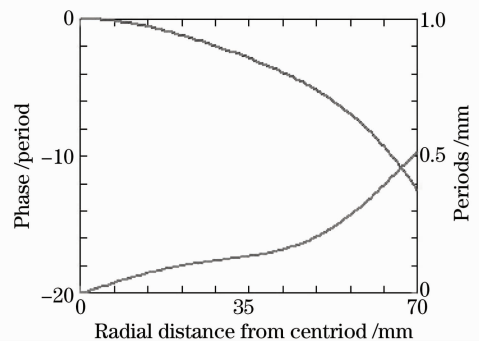


图1 DOE的位相及周期和径向的距离关系
Fig.1 Relationship of phase and periods with radial distances of the diffractive optical element (DOE)

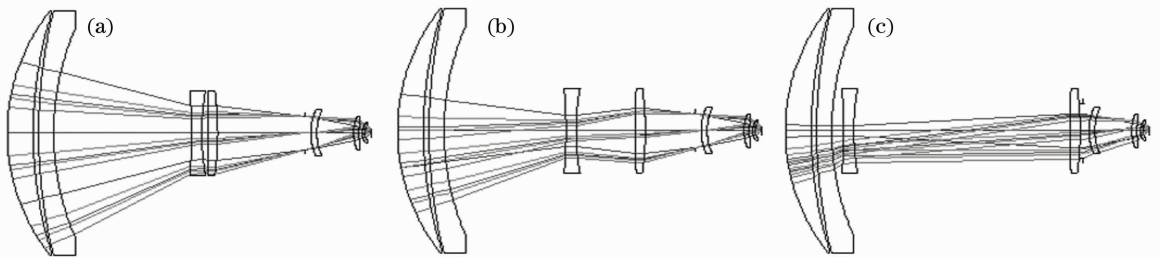


图2 连续变焦系统图。(a)长焦;(b)中焦;(c)短焦

Fig.2 Four-component zoom, (a) long effective focal length; (b) middle effective focal length; (c) short effective focal length

3.3 变焦组与补偿组的运动轨迹关系方程

根据动态光学理论,对于一个二组元稳像光学系统,考虑到变倍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,可得到变倍组与补偿组的运动关系为

$$Aq_2^2 + Bq_2 + C = 0, \quad (8)$$

即

$$q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

式中 $A = (f'_2 - \beta q_1)\beta_2$, $B = \beta_1 \beta_2 q_1^2 + [f'_3(1 - \beta_2^2)\beta_1 - f'_2(1 - \beta_1^2)\beta_2]q_1 - f'_2 f'_3(1 - \beta_2^2)$, $C = \beta_2^2 f'_3 [\beta_1 q_1 - f'_2(1 - \beta_1^2)]q_1$ 。 β_1 表示变倍组初始位置的垂轴放大

率; β_2 表示补偿组初始位置的垂轴放大率; q_1 表示变倍组沿光轴位移量; q_2 表示补偿组沿光轴位移量; f'_2 为变倍组的焦距; f'_3 为补偿组的焦距。由(8)式可计算出补偿组的运动轨迹^[9]。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。

4 设计结果分析

4.1 传递函数分析

图4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

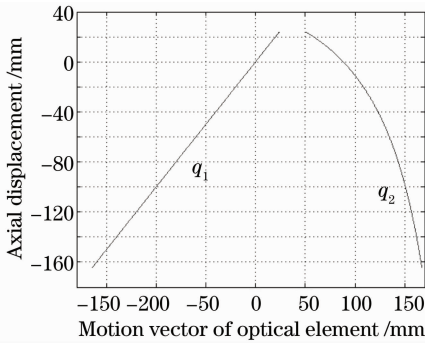


图 3 变倍组与补偿组的变化关系曲线

Fig.3 Curves of variator versus compensator

MTF 在空间频率为 17 lp/mm 处都在 0.64 以上，而探测器的像敏单元尺寸为 $35 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ ，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良好的成像质量。

4.2 衍射能量分析

图 5 为变焦系统在长焦、中焦和短焦时的几何能量分布曲线。三种曲线图表明该系统在探测器敏感元尺寸 $35 \mu\text{m}$ 内时，能量集中度均大于 82%，满足红外非制冷型探测器的使用要求^[10]。

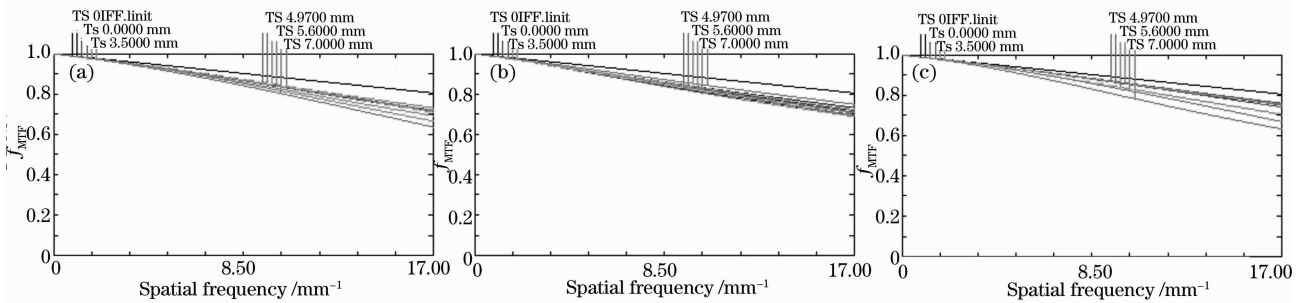


图 4 光学系统传递函数曲线。(a)长焦；(b)中焦；(c)短焦

Fig.4 Curves of MTF. (a) long effective focal length; (b) middle effective focal length; (c) short effective focal length

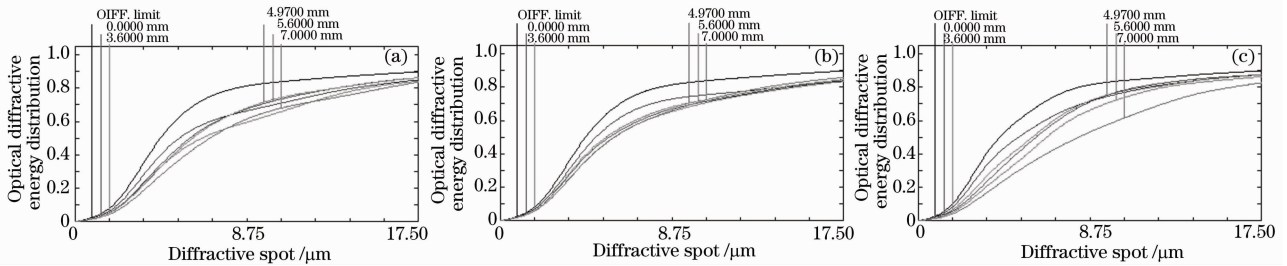


图 5 光学系统几何能量曲线。(a)长焦；(b)中焦；(c)短焦

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

5 结 论

设计的坦克目标搜索/跟踪红外变焦距光学系统，采用平滑换根技术，快速提高系统变焦倍率，在变倍组做一维线性运动过程中，补偿组始终沿同一方向运动，降低了凸轮曲线加工的难度；全系统仅用 7 片锗透镜，系统通过引入二元面和非球面校正系统色差和高级像差，使得结构简单紧凑、变倍比高、孔径大、焦距长和分辨率高，全焦距各视场均能获得接近衍射极限的成像质量，突破了传统光学系统不能同时满足长焦距，大相对孔径，高变倍比，高成像质量和系统结构简单的缺陷，设计的系统满足坦克目标跟踪/识别光学系统的使用要求。

参 考 文 献

- Chen Jinjin, Zhao Jinsong. A compact MWIR objective for infrared search/tracking system[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(5): 279~282
陈津津, 赵劲松. 一种紧凑型折射式红外搜索/跟踪光学系统设计[J]. *红外技术*, 2008, **30**(5): 279~282
- Han Ying, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao et al.. Diffractive/refractive two-position step-zoom optical system in 8~12 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 886~889
韩莹, 王肇圻, 吴环宝等. 紧凑型 8~12 μm 波段折/衍射混合双位置两档变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 886~889
- Xu Liang, Zhang Guoyu, Gao Yujun et al.. Design of 8 \times uncooled thermal infrared hybrid refractive-diffractive continuous-zoom lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 478~481
徐亮, 张国玉, 高玉军等. 8 倍非制冷型红外折/衍射连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 478~481

- 4 Cui Qingfeng. Realization of three-color achromats with binary optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 877~881
崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差[J]. *光学学报*, 1994, **14**(8): 877~881
- 5 Zou Yongxing, Zhou Renkui, Yang Songling. Study of night vision instrument at low light level based on gen II + image intensifier[J]. *Infrared Technology*, 2005, **27**(6): 446~448
邹永星, 周仁魁, 杨松龄. 基于超二代像增强器的微光夜视仪设计[J]. *红外技术*, 2005, **27**(6): 446~448
- 6 Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1364~1367
焦明印, 冯卓祥. 采用衍射元件实现消热差的混合红外光学系统[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1364~1367
- 7 R. E. Fischer, B. Tadic Galeb. *Optical System Design*[M]. New York: Mc Graw Hill, 2000. 128~198
- 8 Zhao Shunlong, Wang Zhaoqi. Design of an ultralight and compact hybrid refractive-diffractive projection lens of head-mounted projective displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 249~253
赵顺龙, 王肇圻. 超轻小型投影式头盔显示系统折/衍混合物镜设计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 249~253
- 9 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轮曲线[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 891~894
- 10 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