

doi: 10.3788/gzxb20144304.0422007

基于 480×6 阵列探测器的红外连续变焦光学系统设计

张良, 潘晓东

(中航工业洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471023)

摘 要:设计了一种采用长波 480×6 阵列探测器的红外连续变焦光学系统. 该系统利用机械补偿法变焦原理和非球面、衍射面进行像差平衡, 工作波长范围为长波 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$, F 数为 2.62, 变倍比达到 15:1. 通过对连续变焦光学系统的传递函数、畸变、衍射元件、变焦曲线等性能的综合分析与评价, 结果表明在变焦范围内下各个视场均可获得较好的光学性能, 光学系统光路总长 480 mm、后截距为 28 mm、传递函数大于 0.3、畸变小于 5%.

关键词: 红外; 变倍光学设计; 衍射光学元件; 480×6 阵列探测器

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0422007-6

Infrared Zoom Optical System Design Based on 480×6 Focal Plane Array

ZHANG Liang, PAN Xiao-dong

(The Electro-optical Equipments Institute of AVIC, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: The design of an infrared zoom optical system based on 480×6 focal plane array detector was introduced. The zoom theory, diffractive theory and aspheric design method were used in the aberration balance. The operating wavelength region was 7.7 to $10.3 \mu\text{m}$, F -number was 2.62, and zoom ratio was 15 to 1. The result indicates that the zoom optical system could obtain better optical performance in all zoom range, by the general analysis and evaluation of modulation transfer function, distortion curve, diffractive optical element, and zoom curve analysis. The overall length of optical system is 480 millimeter, back focal length is 28 millimeter, modulation transfer function is more than 0.3 and distortion is less than 5 percent.

Key words: Infrared; Zoom optical design; Diffractive optical element; 480×6 Focal Plane Array (FPA)

OCIS Codes: 040.3060; 080.2740; 220.2740; 090.1970

0 引言

红外搜索预警系统通过光学系统将接收到的目标和背景红外辐射成像到探测器焦平面上, 经信息处理系统实现对目标的检测和跟踪. 与传统雷达相比, 具有被动探测、定向准确度高、昼夜工作、灵敏度高等优点, 在现代防空预警、光电探测系统中的地位日渐突出^[1-3].

红外搜索预警系统要求具有宽的视场覆盖范围、高分辨率、快的扫描速度、多个光学视场, 一般是采用 4N 或 6N 红外扫描型阵列探测器 (Focal Plane Array, FPA), 通过一维扫描方式实现对目标场景的二维成

像. 当前基于二代焦平面探测器的高性能红外搜索预警系统成为各国军事技术发展和武器装备的重点, 其中 288×4 、 480×6 、 576×6 扫描型焦平面探测器技术发展和器件的产品化引人注目, 已成为国际普遍使用的扫描型焦平面探测器. 与面阵焦平面探测器相比, 扫描型焦平面探测器更适用于对空大范围快速扫描成像, 与光电转台配合使用可以实现水平 360° 周扫成像, 同时利用扫描摆镜可以实现小范围摆扫成像; 面阵焦平面探测器由于积分时间长 (几百微秒 ~ 几毫秒), 不适用于对空大范围快速扫描成像, 更适用于对地凝视成像.

现有的红外搜索预警系统通常只具备两个光学视

基金项目: 所预研基金 (No. FH701) 资助

第一作者: 张良 (1973-), 男, 研究员, 硕士, 主要研究方向为红外成像技术. Email: zhangliang.ly@163.com

收稿日期: 2013-08-15; 录用日期: 2013-11-01

<http://www.photon.ac.cn>

场^[4],大视场用于目标的搜索,小视场用于目标的捕获、跟踪.对于成像系统,采用连续变焦光学系统是解决大视场搜索观察、小视场分辨的最佳途径.

为了适应红外搜索预警系统的发展趋势,在此基于 480×6 红外阵列焦平面探测器,设计了一个扫描型红外15倍连续变焦光学系统.

1 设计原理

1.1 变焦系统设计原理

连续变焦系统实现方法一般分为:光学补偿法和机械补偿法^[5-6].变焦系统中所有运动透镜组固连在一起沿光轴方向做直线运动的系统称作光学补偿式变焦系统.由一部分运动透镜的移动补偿因另一部分运动透镜的移动产生的系统像面位移的变焦系统称作机械补偿式变焦系统.其中为完成系统焦距变化的运动透镜组叫变焦组,用来补偿因变焦组的移动产生的像面位移的运动透镜组叫补偿组.

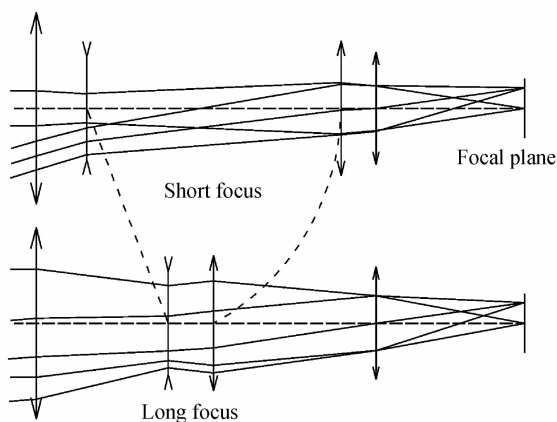


图1 连续变焦光学系统原理图

Fig. 1 Diagram of zoom optics

为了保持像面稳定,变焦组和补偿组的移动必须满足一定的函数关系,由几何光学理论可知变焦组和补偿组必须符合^[7-8]

$$f'_3 \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 - \frac{1}{\beta_{3s}} - \beta_{3s} \right) + f'_2 \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 - \frac{1}{\beta_{2s}} - \beta_{2s} \right) = 0 \quad (1)$$

式中, f'_2 为变焦组的焦距, f'_3 为补偿组的焦距, β_2 、 β_{2s} 为变焦、补偿组短焦位置的倍率, β_3 、 β_{3s} 为变倍过程中任一位置的变焦、补偿组的倍率.

无论变焦组和补偿组各自都可以是正光焦度或是负光焦度,它们之间可以相互组合使用.通常采用+、-或-、+组合方式,其变焦组的像面位移和补偿组的物面位移曲线走势刚好相同,容易满足物像交换原则及补偿组曲线换根.

连续变焦光学系统与定焦距系统的像差平衡区别在于:对于定焦距系统所有的曲率半径、光学间隔都可以作为变量,而对于连续变焦系统,必须保证系统中各透镜组的光焦度、光学间隔满足变焦系统的高斯光学

关系不变,确保变焦参量和像面位置不变,同时,变焦距系统还要保证各变焦位置的像差校正好.

1.2 折衍混合透镜成像特性

普通透镜与衍射透镜的特性^[9-12]对比见表1.由于衍射透镜和折射透镜的阿贝数符号相反,所以可以通过折射和衍射透镜的组合消除色差,而且通常可以将衍射微结构制作在折射元件的一个面上,实现折衍混合,也就是使用一片透镜就可以达到消色差的目的,与传统折射光学至少需要两种不同材料的正负光焦度组合实现消色差相比简化了光学结构.

表1 普通透镜和衍射透镜的特性比较

Table 1 The comparison of Conventional Optical Element (COE) and Diffraction Optical Element (DOE)

Character	COE	DOE
Power	$\varphi = (n-1)\Delta C$	$\varphi = k\lambda$
Abbe number	$V_r = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} > 0$	$V_d = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C} < 0$
Partial dispersion	$P = \frac{n_d - n_C}{n_F - n_C}$	$P = \frac{\lambda_d - \lambda_C}{\lambda_F - \lambda_C}$
$\lambda_C > \lambda_d > \lambda_F, k, \Delta C$ —Constant		

在光学系统设计过程中,引入衍射光学元件可以为设计者提供更多的参量自由度,既可以简化系统的结构,还可以改善光学系统性能.并且普通衍射光学元件的设计以及加工在红外波段已经十分成熟,利用其特殊的负色散以及负热差特性可以有效地进行光学系统的消色差和无热化设计.

2 设计实例

2.1 光路构型分析

由于系统采用的成像器件是FPA,所以必须通过一维扫描的方式实现对目标场景的二维成像.通常采用反射镜扫描的方式实现对物空间的一维扫描,为了有效缩小扫描反射镜的尺寸,一般需要在扫描反射镜前加入一望远光学系统用于压窄光束口径,该望远光学系统和扫描反射镜、后端会聚镜组构成扫描光学系统光路.

如果该望远光学系统的压窄倍率是连续可变的,那么其与扫描反射镜、后端会聚镜组将构成扫描型连续变焦光学系统.如图2.

扫描型连续变焦光学系统由前置望远光学系统、扫描反射镜和后端会聚镜组构成,前置望远光学系统由连续变焦望远物镜组和目镜组构成.因此,扫描型连续变焦光学系统的设计可以分成连续变焦望远物镜组、目镜组和会聚镜组设计三部分,这三部分可以分别进行优化设计.然后,望远光学系统的连续变焦望远物镜组和目镜组要进行组合优化设计,望远光学系统和后端会聚镜组也要进行全系统的优化设计,使望远光学系统的出瞳和后端会聚镜组的入瞳在扫描反射镜处很好的匹配.

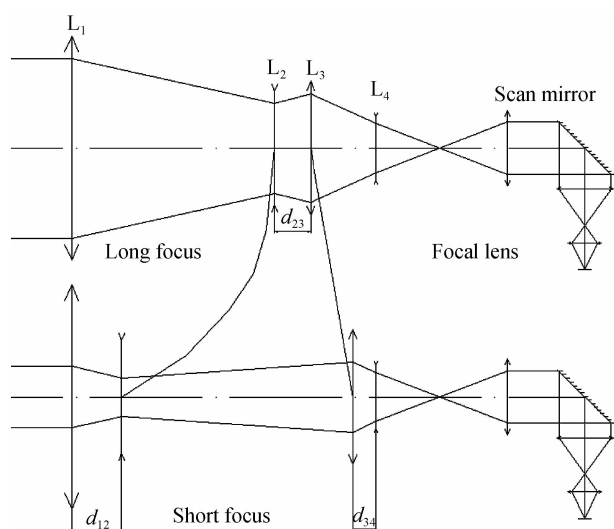


图2 扫描型连续变焦光学系统原理

Fig. 2 Diagram of scanning zoom optical system

2.2 设计指标

在光学系统的设计中所采用的是480×6红外长波焦平面FPA,像元尺寸28 μm×38 μm,光学系统设计指标如表2.

表2 设计指标

Table 2 Design requirements

Spectral range	7.7~10.3 μm
Field of View(FOV)	1.55°×1.16°~24°×18°
F-number	f/2.62
Focal length range	300 mm~20 mm
Zoom ratio	15 [×]

2.3 高斯光学计算

由光路构型分析可知,该系统设计的难点在于连续变焦望远物镜的设计、光瞳匹配优化以及全系统像差平衡设计.其中,望远光学系统采用开普勒望远光学系统构型,并采用机械补偿法进行连续变焦望远物镜的设计,目镜组和会聚镜组的设计较为简单,这里不再赘述.

在进行高斯光学计算前,须对光学系统的参量作一些假定,假设后端会聚镜组的焦距为70 mm,则望远光学系统的倍率为0.28[×]~4.3[×]连续可变;假设目镜组焦距为40 mm,则连续变焦望远物镜组焦距11.2~172 mm连续可变.设前固定组L₁焦距为260 mm,d₁₂、d₂₃、d₃₄均为15 mm,根据变焦距系统设计

表3 初始结构参量

Table 3 Optical initial structure parameters

Lens group	Focal length/mm	d ₁₂ /mm	d ₂₃ /mm
L ₁	260	—	—
L ₂	-37.5	15	170
L ₃	40	140	15
L ₄	-1 900	—	—

原理可以求解出连续变焦望远物镜组的初始结构参量,如表3.

薄透镜是光学系统初始结构设计的起点,根据表3的光焦度分配,利用薄透镜高斯光学的原理进行设计,通过初级像差平衡解算分配各透镜P、W值,在此基础上对全系统像差作进一步优化设计.在优化过程中加入衍射面和非球面进行像差平衡,以获得最优的光路配置参量.

2.4 光路布局

图3为最终的光路布局,光路总长480 mm,后截距为28 mm.入射光线经前固定组、变焦组、补偿组、后固定组、固定反射镜、目镜组形成平行光出射,经扫描反射镜、会聚镜组后在FPA焦平面上聚焦.其中,前置望远物镜光学系统光焦度分配为+、-、+、-,前固定组承担了主要的光焦度,采用球面设计,变焦组和补偿组采用单面非球面设计,主要校正球差和轴向色差;目镜组采用衍射面和非球面设计,主要校正色差等像差;扫描反射镜完成对物空间的一维扫描,扫描范围为±3.3°;会聚镜组完成最终的聚焦成像.

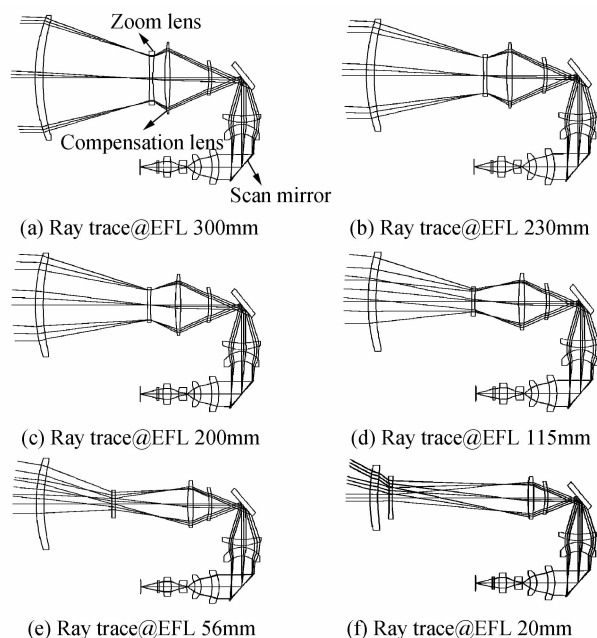


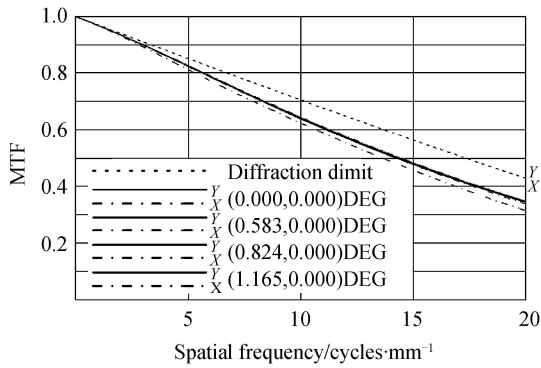
图3 光路追迹图

Fig. 3 Layout of ray trace in different focal length

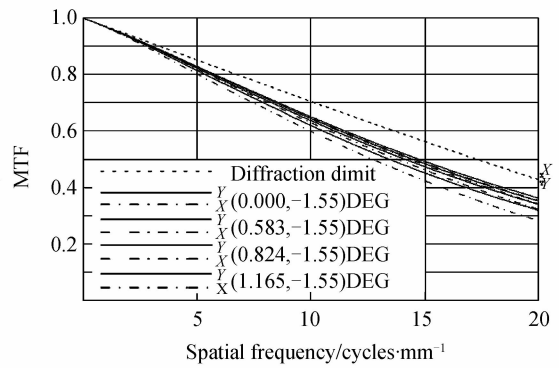
2.5 像质评价

2.5.1 传递函数

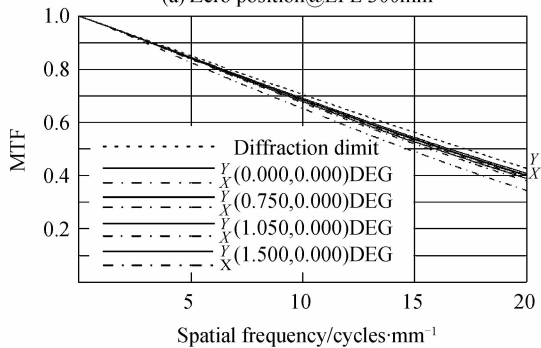
传递函数是评价红外光学系统像质的主要方法之一,图4分别列出了扫描型连续变焦光学系统在探测器焦平面位置处进行评价的不同焦距位置的光学传递函数图,在空间频率20 lp/mm处,各视场的传函值均接近衍射极限.



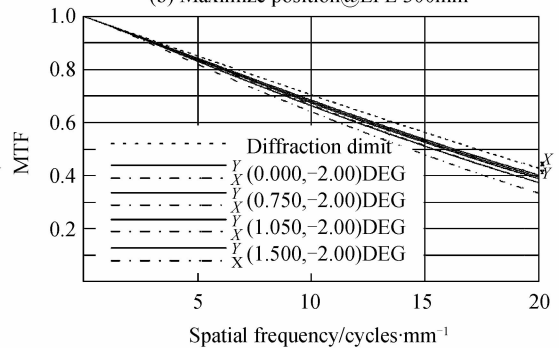
(a) Zero position @ EFL 300mm



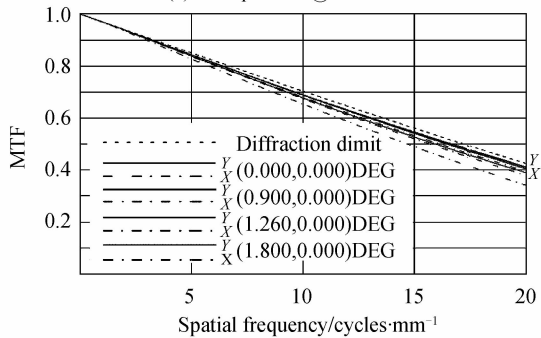
(b) Maximize position @ EFL 300mm



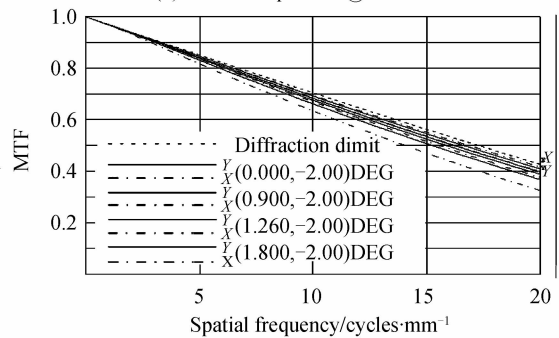
(c) Zero position @ EFL 230mm



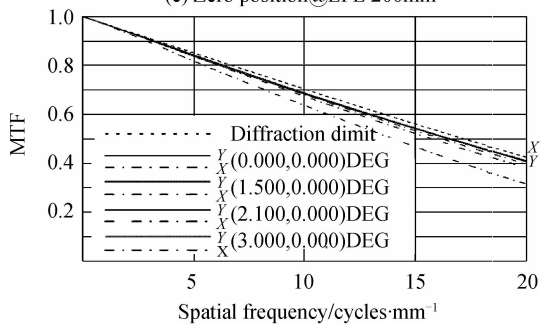
(d) Maximize position @ EFL 230mm



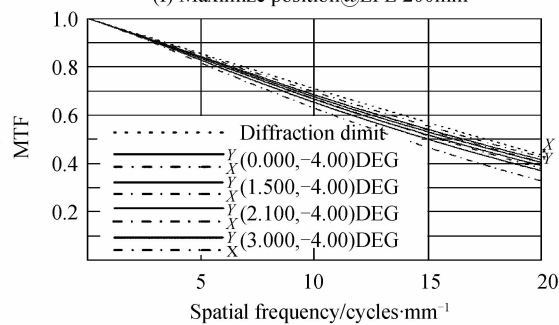
(e) Zero position @ EFL 200mm



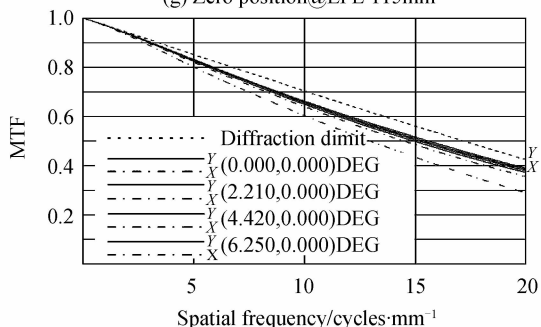
(f) Maximize position @ EFL 200mm



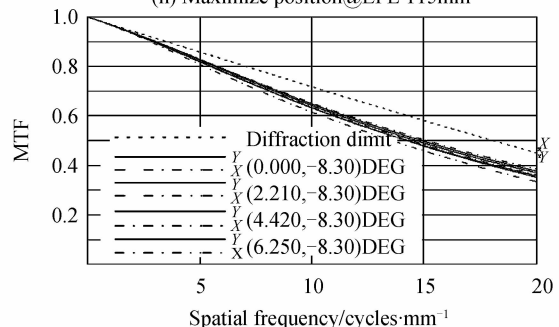
(g) Zero position @ EFL 115mm



(h) Maximize position @ EFL 115mm



(i) Zero position @ EFL 56mm



(j) Maximize position @ EFL 56mm

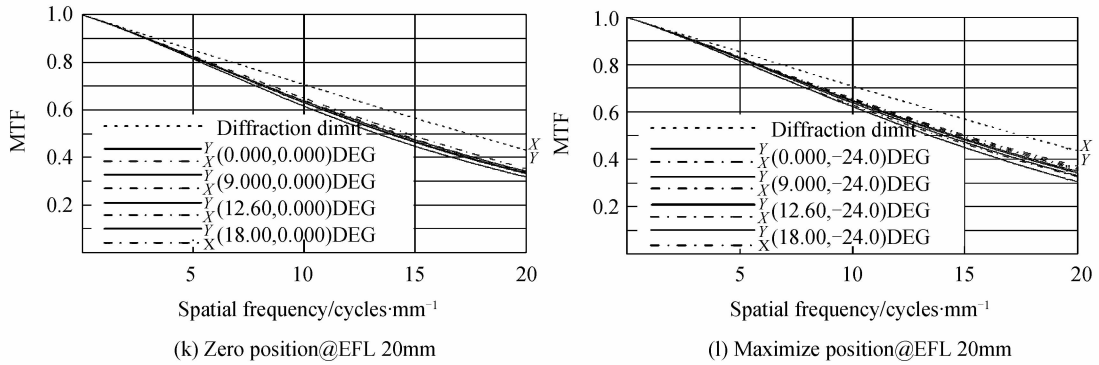


图 4 不同变焦位置的 MTF 评价

Fig. 4 MTF curve of different focal position

2.5.2 畸变

扫描型连续变焦光学系统在不同焦距位置的畸变如图 5,从图中可以看出,在整个变焦过程中图像畸变小于 4.6%。

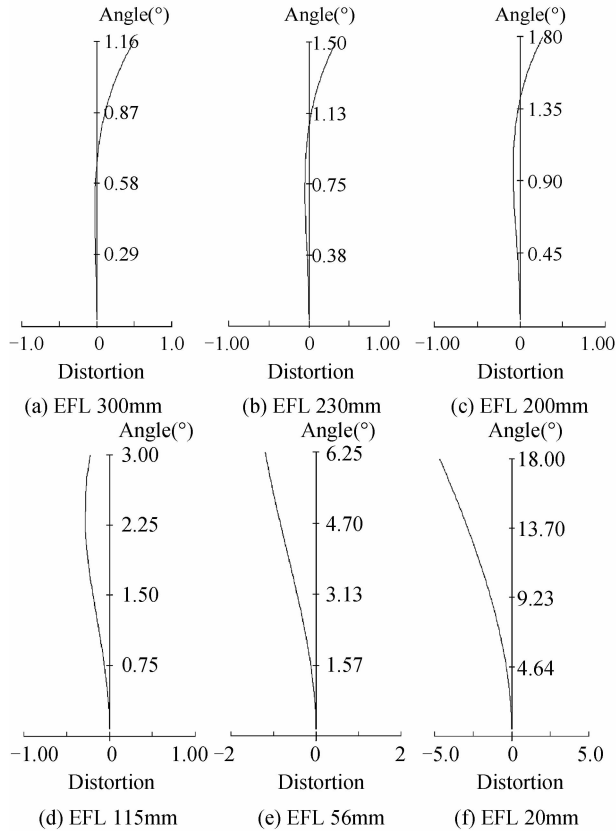


图 5 不同变焦位置的图像畸变

Fig. 5 Distortion of different focal position

2.5.3 衍射元件分析

在前置望远光学系统目镜组的设计中,在一个非球面面型的基础上加入了一衍射面参与全系统的像差校正,该衍射元件基底材料选用单晶锗、采用+1级衍射、7个环带.该非球面衍射面表面轮廓如图 6 所示。

红外衍射光学元件通常采用单点金刚石车削方法制作,理论上,金刚石切削可在任意形状基体上加工任意回转对称的衍射结构,只要控制刀具按下列方程运

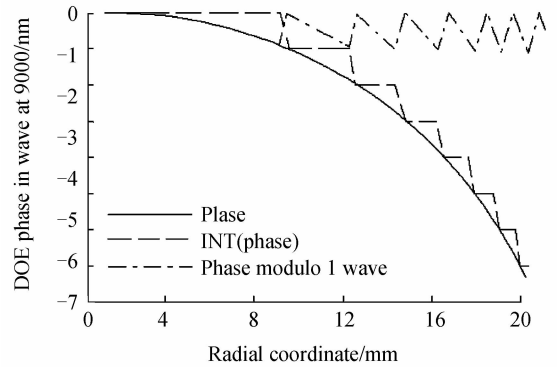


图 6 衍射透镜表面轮廓

Fig. 6 Surface profile of DOE

动即可加工出所需的衍射结构。

$$z(x) = \frac{C_{\text{base}}}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C_{\text{base}}^2 \cdot x^2}} + Ax^4 + Bx^6 + \dots + \text{HOR} \cdot \left[\frac{c_1 x^2 + c_2 x^4 + \dots}{n - n_0} - \frac{\lambda_0}{n - n_0} \cdot \text{INT} \left(\frac{c_1 x^2 + c_2 x^4 + \dots}{\lambda_0} \right) \right] \quad (2)$$

式中 C_{base} 是衍射面基底底曲率, k 是基体的二次曲面系数, A, B, C, D, \dots 分别是基体的 4 次、6 次、8 次、10 次、 \dots 项非球面系数, 分别为 $1.828\text{e-}6, 8.433\text{e-}10, -6.354\text{e-}14, 4.367\text{e-}16$. HOR 是衍射级次, 一般情况下为 1 或 -1, n 和 n_0 分别是衍射结构基体和其所在介质的折射率, λ_0 为衍射面的工作波长, c_1, c_2 分别为 2 次、4 次项系数, 分别为 $-1.005\text{e-}4, -7.886\text{e-}9$.

衍射光学元件的位相分布为

$$\varphi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (c_1 r^2 + c_2 r^4 + \dots + c_{10} r^{20}) \quad (3)$$

设计中,只选取 c_1, c_2 作为变量,其余多次项系数均为零,在加工时,需要知道位相转换处的径向半径 r ,即位相由 0 到 2π 的 r 值,当 $\varphi(r) = 2m\pi$ 时 (m 为整数),可得到位相转换处的径向半径应该为

$$r_m^2 = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 + 4c_2 m \lambda}}{2c_2} \quad (4)$$

位相转换处的环带台阶深度 d 为

$$d = \lambda_0 / (n - 1) \quad (5)$$

式中 λ_0 为设计波段的中心波长, n 为衍射光学元件所在基体材料的折射率。

3 变焦曲线

对于机械补偿式连续变焦光学系统, 变焦组和补偿组分别以不同规律运动, 以保证在间隔改变达到连续变焦的同时实现像面位移误差的自动补偿。通常变焦组以线性规律移动, 而补偿组则以非线性规律运动。变焦组、补偿组的运动实现方式一般有两种: a) 采用电机驱动凸轮机构实现; b) 采用两个电机分别驱动变焦、补偿运动机构实现。

对于采用驱动凸轮机构的方式, 该方式主要是通过机械结构来保证变焦组和补偿组的相对位置关系。凸轮曲线的斜率直接影响着运动的平滑度, 斜率超过一定程度时会使机构运动“卡死”。凸轮曲线的斜率一方面和曲线套筒的直径以及曲线套筒的转动总角度有关, 另一方面还和曲线的方程以及移动组总移动量有关。一般来讲, 凸轮曲线的压力角应小于 45° 。图 7 是扫描型连续变焦光学系统的变焦补偿曲线。

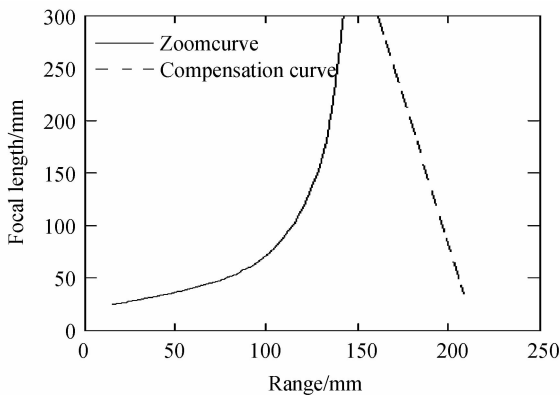


图 7 变焦补偿曲线

Fig. 7 Zoom and compensation curve

对于采用两个电机分别驱动变焦、补偿运动机构实现的方式, 该方式主要是通过控制系统来保证变焦组和补偿组的相对位置关系, 对变焦、补偿曲线没有特别的约束, 更容易获得优良像质。

4 结论

根据机械补偿法连续变焦设计原理、折衍混合射透镜的特点以及光学系统的求解方法, 合理地确定了扫描型连续变焦光学系统的初始结构参量, 成功地设计了基于 480×6 阵列焦平面探测器的连续变焦光学系统, 获得了良好成像质量。该系统在变焦过程中 MTF 值均接近衍射极限, 畸变也得到很好的控制, 并对衍射光学元件的加工、变焦机构的实现方式进行了探讨。该光学系统具有结构紧凑、体积小、成像质量好等优点。在目标探测与识别、军事侦察、红外预警等领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] FAN Hong-bo. A performanceIRST system based o 1152×6 LWIR detectors[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(1): 20-24.
范宏波. 基于 1152×6 长波线列探测器的高性能红外搜索预警系统[J]. 红外技术, 2010, **32**(1): 20-24.
- [2] HU Yong-sheng, CHEN Qian, GU Guo-hua, et al. IRST system based on scanning area FPA and its target detectability analysis[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(2): 71-74.
胡永生, 陈钱, 顾国华, 等. 基于扫描面阵的红外预警系统及其探测性能分析[J]. 红外技术, 2008, **30**(2): 71-74.
- [3] JIA Jun-tao, TANG Yue-feng, MAO Xin, et al. Design and implement of infrared panoramic scanning and tracking imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, **34**(3): 407-412.
贾俊涛, 唐跃峰, 毛鑫, 张良, 潘晓东, 刘玉. 红外全景扫描跟踪成像系统设计及实现[J]. 应用光学, 2013, **34**(3): 407-412.
- [4] QIAO Ming-xia, ZENG Wei. A long-wave infrared dual-FOV scanning optical system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, **20**(3): 77-80.
乔明霞, 曾威. 长波红外双视场扫描型光学系统[J]. 电光与控制, 2013, **20**(3): 77-80.
- [5] LAN Ning. Optical design of optically compensated long wavelength infrared zoom system[J]. *Optical Instruments*, 2011, **33**(3): 53-56.
蓝宁. 光学补偿式长波红外变焦系统设计[J]. 光学仪器, 2011, **33**(3): 53-56.
- [6] ZHANG Liang, LIU Hong-xia. Optical design of uncooled high zoom ratio continuous-zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(2): 250-254.
张良, 刘红霞. 非制冷高变倍比连续变焦光学系统的设计[J]. 应用光学, 2012, **33**(2): 250-254.
- [7] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [9] XU Liang, ZHANG Guo-yu, GAO Yu-jun, 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.
- [10] YANG Le, SUN Qiang, WANG Jian, et al. Athermalization for mid-wave infrared scene projector optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1521-1525.
杨乐, 孙强, 王健, 等. 中波红外景象投影光学系统消热差设计[J]. 光子学报, 2011, **40**(10): 1521-1525.
- [11] GAO Hong-yun, CHEN Meng-wei, YANG Ying-ping, et al. Novel long wavelength infrared diffractive/refractive athermal optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **39**(12): 2143-2146.
郜洪云, 陈梦苇, 杨应平, 等. 新型长波红外折衍混合消热差系统[J]. 光子学报, 2011, **39**(12): 2143-2146.
- [12] QIAN Yi-xian, JIA Yuan-lin, LIANG Wei, et al. Athermal design for visible optical system on aerial CCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2279-2282.
钱义先, 贾远林, 梁伟, 等. 航空 CCD 相机可见光光学系统消热差设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2279-2282.