

## 长波红外连续变焦光学系统设计

## Design of a Long-Wave Infrared Continuous Zooming Optical System

王合龙<sup>1,2</sup>, 陈建发<sup>1</sup>, 李淑忠<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)



王合龙

王合龙, 博士, 研究员, 洛阳电光设备研究所副所长, 中国航空工业集团公司光电探测与对抗专业首席专家, 中国宇航学会光电技术专业委员会委员, 《电光与控制》编委会委员, 享受国务院政府特殊津贴。一直从事航空机载光电科研工作, 完成多项预先研究, 为新型光电产品和技术的发展奠定了基础。先后获得国防科技进步奖、部级科技进步奖 10 余项。

## 0 引言

连续变焦红外镜头对目标兼具大视场搜索和小视场跟踪的能力, 视场变化连续, 不容易丢失目标, 大大提高了红外成像系统的战场适应性, 是一种重要的军用光学系统。文献[1]针对非制冷探测器设计了折射/衍射混合长波红外连续变焦光学系统, 相比于非制冷探测器, 制冷型探测器具有较高的探测灵敏度, 被多数高质量军用红外光学系统采用。使用制冷型探测器的光学系统多采用二次成像光学构型, 优点是可保证第一块物镜体积不是很大和冷光阑效率满足 100%, 缺点是系统

针对制冷型 320 × 256 焦平面阵列探测器, 设计了一套用于机载光电探测设备的长波连续变焦红外光学系统。光学系统采用锗和硒化锌两种普通红外光学材料, 通过引入非球面和衍射面很好地校正了系统的色差和轴外像差, 使得系统整个连续变焦过程中 16 lp/mm 处 MTF 均大于 0.35。系统仅由 6 片镜子构成, 工作波段为 7.7 ~ 10.3 μm, F 数为 3, 满足 100% 冷光阑效率, 实现了 50 ~ 400 mm 的连续变焦, 变焦曲线光滑。像质评价结果表明该系统成像质量良好, 结构紧凑。

关键词: 光学设计; 红外光学; 连续变焦

中图分类号: V271.4; TN216

文章编号: 1671-637X(2014)12-0001-04

长度相对较长, 需采用平面反射镜对光路进行折叠压缩, 才能使系统更为紧凑, 设计难点主要有变倍比与 F 数之间的矛盾、大视场冷反射校正、大视场畸变校正、保证系统高透过率、保证系统结构紧凑等。

本文针对制冷型 320 × 256 焦平面阵列探测器, 综合考虑以上设计难点, 设计了一套用于机载光电探测设备的 8 × 连续变焦长波红外光学系统。

## 1 设计要求

系统主要设计指标如表 1 所示。

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

参数	数值
焦距/mm	50 ~ 400
变倍比	8 ×
F 数	3
波长/μm	7.7 ~ 10.3
视场/(°)	1.74 ~ 13.96
总长/mm	< 500

系统可实现 50 ~ 400 mm 连续变焦, 光学系统总长小于 500 mm。光学系统变倍比 8 ×, 若 F 数太小, 系统像

差难以校正, F 数太大影响系统作用距离, 综合考虑, F 数取 3 较为合适。探测器采用 320 × 256 制冷红外探测器, 像元尺寸 30 μm。

## 2 设计思想

## 2.1 光学结构形式

光学系统采用二次成像构型, 前组为变焦物镜, 承担系统主要光焦度和变焦功能; 后组为放大倍率约为 1 的目镜组, 主要用来校正系统变焦过程中的残余像差并实现光瞳衔接, 保证 100% 冷光阑效率。

变焦物镜有光学补偿和机械补偿两种补偿形式, 其中机械补偿又分为机械两组元、双组联动和全动型 3 种结构。光学补偿形式只在有限的几个位置保证系统像面稳定, 在连续变焦过程中像面会发生模糊。采用双组联动和全动型结构机械补偿形式的变焦光学系统结构非常复杂。考虑到像面稳定且兼顾系统复杂度, 选用机械两组元补偿形式<sup>[2-5]</sup>。机械两组元变焦系统分为正组补偿变焦和负组补偿两种形式: 正组补

偿系统细而长,适用于大视场或焦距较长的系统;负组补偿短而粗,适用于小视场系统。因此本系统选用正组补偿。

采用二次成像整体构型可以减少短焦时主镜径向尺寸,光学系统初始结构如图1所示。

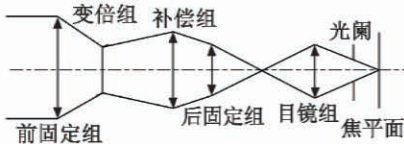


图1 光学系统结构示意图

Fig.1 Sketch map of the optical system

## 2.2 衍射元件

传统折射元件的光焦度、阿贝数表达式为

$$\Phi = (n - 1)\Delta C \quad (1)$$

$$v_D^{\text{DOE}} = \frac{n_D}{n_F - n_C} > 0 \quad (2)$$

式中: $n$ 为折射元件的折射率; $\Delta C$ 为折射元件前后表面曲率差; $n_F$ 为较短波长对应的折射率; $n_C$ 为较长波长对应的折射率; $n_D$ 为参考波长对应的折射率。

衍射光学元件的光焦度、阿贝数表达式为

$$\Phi_D = -2A_1 m \lambda \quad (3)$$

$$v_D^{\text{DOE}} = -\frac{\lambda_D}{\lambda_C - \lambda_F} < 0 \quad (4)$$

式中: $A_1$ 为衍射元件的一次位相系数; $m$ 为衍射级次; $\lambda$ 为设计波长; $\lambda_F$ 为短波长; $\lambda_C$ 为长波长; $\lambda_D$ 为参考波长。

在传统折射光学元件中,常利用色散系数相差较大的两种材料制成双胶合或密接薄透镜来消除色差。但它们的阿贝系数均为正数,必须采用正、负透镜的组合方式,单块透镜光焦度绝对值大,不利于单色像差的校正。特别在红外区域可选材料少,消色差更困难。折衍射混合的元件阿贝系数为一个很小的负值,其等效折射元件光焦度略小于元件整体光焦度,等效衍射元件光焦度非常小,这样单色像差校正就

很容易。衍射元件在设计波长处衍射效率为100%,随着偏离设计波长衍射效率会逐步下降,为了使得在整个波段上达到最大的衍射效率,需设计最佳中心波长,以保证整个波段有较高的衍射效率<sup>[6-7]</sup>。本文中设计波长7.7~10.3 μm,为了保证最大衍射效率,衍射元件中心设计波长取8.875 μm,衍射级 $m=1$ ,经计算各个波长的衍射效率如图2所示,整个波段的平均衍射效率为97.7%。

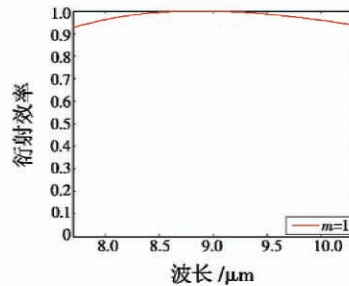


图2 衍射元件衍射效率分布

Fig.2 Diffractive efficiency distribution of the diffractive element

轴对称衍射光学元件的位相分布表达式为

$$\phi(r) = 2\pi(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots) \quad (5)$$

式中: $A_1, A_2, A_3, \dots$ 为衍射元件的位相系数; $r$ 为径向坐标。在衍射光学元件的位相表达式中, $A_1$ 可用于校正光学系统的色差, $A_2$ 可以用来校正光学系统的三级单色像差, $A_3 \dots$ 能够用来校正光学系统的高级像差。本文中仅采用 $A_1$ 优化,用于校正光学系统的色差,最终优化后的衍射元件位相分布如图3所示。

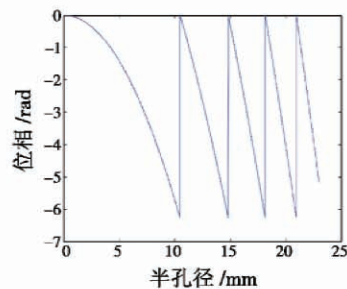


图3 衍射元件位相分布

Fig.3 Phase distribution of the diffractive element

## 2.3 消热差

红外光学系统进行无热化设计是非常必要的,一方面是由于红外材料折射率温度系数(DN/DT)较大,如单晶锗 DN/DT 为  $3.96 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ ,而用于可见光波段的 K9 玻璃 DN/DT 为  $2.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ;另一方面,军用红外光学系统使用环境温度变化范围也较大,典型变化温度  $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ ,达到了  $100^\circ\text{C}$  的温差。这意味着如果不进行无热化设计,将严重影响系统的成像质量。由于本系统是连续变焦系统,所以在无热化设计方面不能采用传统的机械被动式或光学被动式,而是在设计过程中通过合理选择调焦镜组达到消热差的目的。

## 3 设计实例

### 3.1 优化设计

最终优化得到的光学系统结构如图4所示,由于篇幅所限,仅给出连续变焦光学系统在短焦、中焦、长焦时的光学构型图。通过在镜筒壁上加工合适高度、形状和间隔的螺纹,抑制杂散光;引入非球面和衍射面减少镜子个数,降低系统复杂性,提高系统透过率。非球面分别在第2个元件的后表面、第4个元件的前表面和第6个元件的后表面,元件材料均为锗;衍射面在第5个元件的后表面,元件材料为锗。目前以锗材料为基底的非球面和衍射面,工艺成熟,已经有成功设计的先例。系统具体设计参数如表2所示。

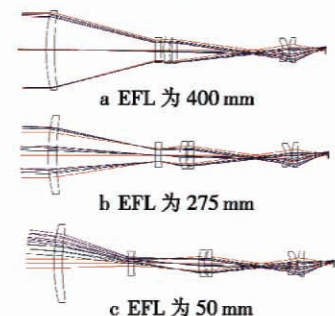


图4 光学结构图

Fig.4 Optical construction

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	289.75	锗	138
2	球面	439.90		
3	球面	-304.95	锗	44
4	非球面	201.74		
5	球面	78.14	硒化锌	48
6	球面	63.05		
7	非球面	133.70	锗	48
8	球面	1513.15		
9	球面	-25.73	锗	32
10	衍射面	-34.00		
11	球面	64.63	锗	44
12	非球面	162.65		

3.2 设计结果

光学系统由短焦端至长焦端变焦过程中,变倍组最大移动范围 60 mm,补偿组最大移动范围 -48 mm (移动组运动方向由左向右为正,由右向左为负),变焦曲线如图 5 所示,变焦曲线光滑,全程无拐点。

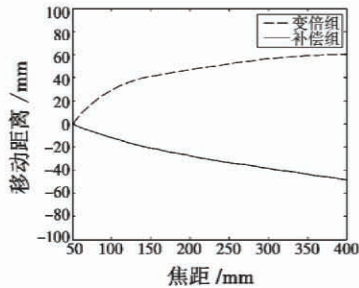


图 5 变焦组和补偿组的运动曲线  
Fig. 5 Movement curve of zoom group and compensating group

光学系统连续变焦过程中,轴上视场波像差 (RMS) 和边缘视场波像差变化曲线如图 6 所示,变焦过程中轴上及边缘视场最大 RMS 值小于  $0.04\lambda$  ( $\lambda = 8.4914 \mu\text{m}$ ),这表明整个变焦过程中像质良好,满足设计需求。

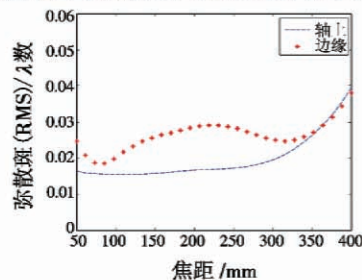


图 6 不同焦距下的波像差  
Fig. 6 The RMS at different EFL

光学系统连续变焦过程中,在空间频率 16 lp/mm 处,短焦、中焦、长焦边缘视场 MTF 约为 0.4,接近衍射极限,表明整个变焦过程中,光学系统像质良好,见图 7。

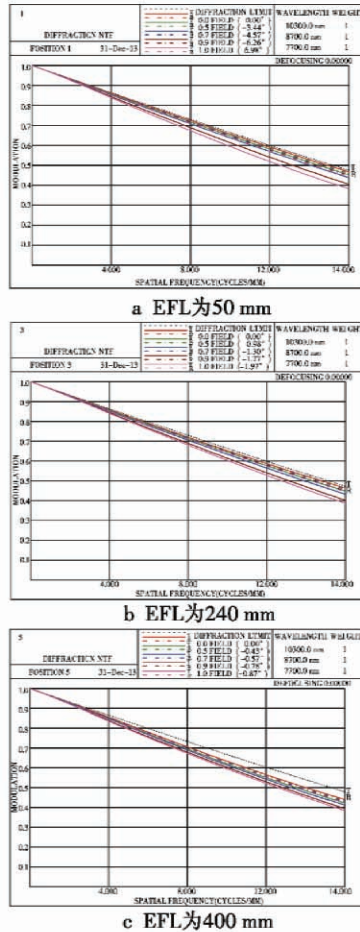


图 7 变焦系统 MTF

Fig. 7 MTF of the zoom system

表 3 举例给出了无热化设计后系统短焦端和长焦端在  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  和  $+60\text{ }^\circ\text{C}$  时的中心和边缘视场,在 16 lp/mm 处的 MTF 值均大于等于 0.3,基本满足使用要求。

表 3 不同温度条件下的 MTF

Table 3 Diffractive MTF at different temperatures

焦距/mm		MTF@16 lp/mm @ -40 °C	MTF@16 lp/mm @ 60 °C
50	轴上	0.45	0.46
	边缘	0.38	0.40
400	轴上	0.4	0.4
	边缘	0.34	0.37

系统畸变如图 8 所示,大视场 (EFL 为 50 mm) 最大畸变小于 3%,

中视场 (EFL 为 275 mm) 最大畸变小于 2%,小视场 (EFL 为 400 mm) 最大畸变小于 1%,可以满足红外视场拼接的需求。

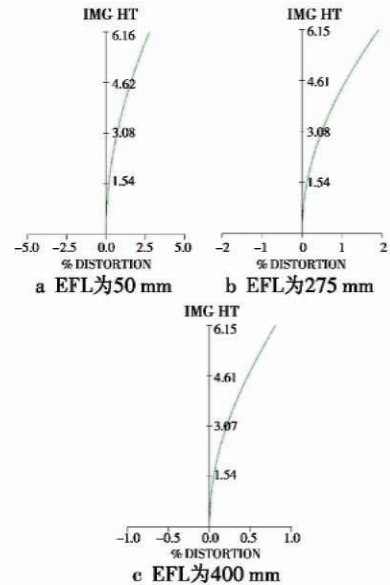


图 8 变焦系统畸变图

Fig. 8 Distortion of the zoom system

冷反射分析是采用制冷型探测器红外光学系统必须考虑的问题,非变焦红外光学系统可采用非均匀校正的方法校正系统冷反射。本文对冷反射的处理方法为,设计过程中采用逆向光线追迹,控制每个表面入射光线的高度和角度、尽量使得 YNI 绝对值大于 1 或  $1/IBAR$  大于 1,此时系统的冷反射就可以接受。经分析,变焦系统大视场冷反射最为严重,逆向光线追迹结果如图 9 所示。

IN "E:\lens\env\_fct\nsfx15.seq" 1 15 1 6  
ODE V > ver n

Sur	2*height	cir	VUX	VLX	VUY	VLY	Distance
1	12.00	3.77	0.39	0.39	0.39	0.39	25.36
2	12.00	2.29	0.57	0.57	0.57	0.57	11.65
3	12.00	2.83	0.44	0.44	0.44	0.44	14.39
4	12.00	9.40	0.21	0.21	0.21	0.21	28.81
5	12.00	12.61	0.81	0.81	0.81	0.81	14.11
6	12.00	12.61	0.85	0.85	0.85	0.85	14.12
7	12.00	12.45	0.79	0.79	0.79	0.79	13.52
8	12.00	12.49	0.64	0.64	0.64	0.64	18.33
9	12.00	7.02	0.71	0.71	0.71	0.71	440.22
10	12.00	7.97	0.78	0.78	0.78	0.78	125.57
11	12.00	12.25	0.81	0.81	0.81	0.81	43.54
12	12.00	7.40	0.70	0.70	0.70	0.70	212.99

CODE V > ver n

图 9 逆向光线追迹冷反射分析数据  
Fig. 9 The data of narcissus analysis with inverse raytracing

由图9中数据可知第2面最为严重,光线追迹如图10所示,后向反射的光线中约有57%被拦掉,其最终聚焦的像点在像面约11 mm处,经分析第3面的冷反射信噪比为0.85,小于1,不会对系统带来严重的影响。

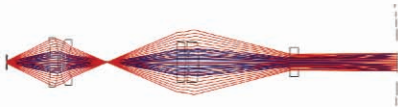


图10 面2的逆向光线追迹冷反射分析  
Fig. 10 Narcissus analysis on surface 2 with inverse raytracing

#### 4 结论

针对制冷型 $320 \times 256$ 凝视焦平面阵列探测器,利用衍射元件的负色散特性,设计了一套用于机载光电探测设备的 $8 \times$ 连续变焦长波红外光学系统,该系统具有结构简单紧凑、成像质量好、系统透过率高、变倍比高、变焦曲线平滑、无冷反射等优点,突破了传统纯折射式光学设计中的诸多局限。非球面和衍射面的使用,为实现高变倍红外变焦系

统的小型化、轻量化提供了较好的技术途径,将在军、民用方面,特别是在机载光电探测设备中得到广泛应用。

#### 参考文献

- [1] 王保华,刘英,孙强,等. 折射/衍射混合长波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1):148-153.  
WANG B H, LIU Y, SUN Q, et al. Optical design for refractive/diffractive long wavelength infrared continuous zoom system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1):148-153.
- [2] MANN A. *Infrared optics and zoom lenses*[M]. Bellingham:SPIE Press, 2009.
- [3] 张以漠. 应用光学[M]. 北京:机械工业出版社,1982:148-168.  
ZHANG Y M. *Applied optics*[M]. Beijing:China Machine Press, 1982:148-168.
- [4] 张良,刘红霞. 长波红外连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与激光

- 工程,2011,40(7):1279-1281.  
ZHANG L, LIU H X. Optical system design of long wave infrared zoom lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7):1279-1281.
- [5] 薛慧,李常伟. 红外中波连续变焦光学系统的设计[J]. 红外与毫米波学报,2012,31(5):421-424.  
XUE H, LI C W. Optical design of infrared continuous-zoom lenses[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2012, 31(5):421-424.
- [6] 冷家开,崔庆丰,裴雪丹,等. 折衍射混合复消色差望远镜中的色球差[J]. 光学学报,2008,28(5):981-987.  
LENG J K, CUI Q F, PEI X D, et al. Spherochromatism of hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5):981-987.
- [7] BURALLI D A, MORRIS G M. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(22):4389-4396.

**Abstract:** A set of long-wave infrared continuous zooming optical system was designed for airborne photoelectric detection equipment, based on long wavelength  $320 \times 256$  element cooled thermal IR Focal Plane Array (FPA) detector. The optical system is made of two kinds of common infrared materials, Ge and ZnSe. By introducing a diffractive surface and three aspheric surfaces, the chromatic aberration and the off-axis aberration are well corrected, and the Modulation Transfer Function (MTF) of the system is kept above 0.35 for all continuous zooming ratios at the spatial frequency of 16 lp/mm. The system is consisted of 6 lenses, has a F/number of 3, working wave band of  $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$ , and cold shield efficiency of 100%. Continuous zooming from 50 mm to 400 mm is realized with smooth zoom paths. The results show that the compact structured continuous zooming system has pretty good imaging quality.

**Key words:** optical design; infrared optics; continuous zooming



请扫描二维码  
关注我刊

