

doi: 10.3788/gzxb20144306.0622004

# 大口径离轴中波红外连续变焦系统设计

汪大宝<sup>1</sup>, 姜凯<sup>2</sup>, 赵士民<sup>3</sup>, 郝伟<sup>2</sup>, 江波<sup>2</sup>, 周泗忠<sup>2</sup>

(1 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 光电跟踪与测量技术研究室, 西安 710119)

(3 中国太原卫星发射中心 030027)

**摘要:** 基于制冷型  $320 \times 240$  凝视焦平面阵列探测器, 采用离轴折反射式结构设计了一种大口径长焦距红外连续变焦光学系统。系统分离轴无光焦度和透射式连续变焦两部分, 通过光瞳匹配和冷屏匹配将两部分组合起来进行优化, 解决了透射式连续变焦系统因材料限制不能实现大口径、共轴连续变焦系统短焦遮拦比大和离轴三反变焦系统像面移动的缺陷。系统工作波段为  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ , 焦距范围  $250 \sim 2000 \text{ mm}$ , 变倍比为  $8 \times$ ,  $F$  数为 4, 满足 100% 冷光阑效率。在空间频率  $16 \text{ lp/mm}$  处系统的 MTF 值大于 0.5, 具有像质好, 分辨率高等特点, 满足设计要求。

**关键词:** 光学设计; 中波红外; 连续变焦; 成像光学系统; 离轴; 大口径; 无遮拦

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0622004-6

## Design of Large Aperture Off-axis Middle Infrared Continuous Zoom Lens

WANG Da-bao<sup>1</sup>, JIANG Kai<sup>2</sup>, ZHAO Shi-min<sup>3</sup>, HAO Wei<sup>2</sup>, JIANG Bo<sup>2</sup>, ZHOU Si-zhong<sup>2</sup>

(1 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

(2 The Photoelectric Track and Measurement Technology Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China)

(3 Taiyuan Satellite Launching Center, Taiyuan 030027, China)

**Abstract:** On the basics of a cool  $320 \times 240$  detector with staring focal plane array, a off-axis catadioptric middle infrared continuous zoom system with large aperture and long focal length is designed. The optical system was divided into two segments. First an off-axis aspheric non-power system as the front system was designed, then the continuous zoom lens which matched with the non-power system as the back system was designed. Because of the material constraint, the refractive zoom system can't realize large aperture. Coaxial catadioptric zoom system has great block ratio. And three mirrors zoom system can't achieve cold shield efficiency 100%. The off-axis catadioptric zoom system can account for forenamed limitation. The system worked at  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$  has achieved the zoom of 250 mm to 2000 mm and  $F$  number of 4. This system can offer a high resolution and excellent images, and its cold shield efficiency is 100%. The system satisfies the design requirements.

**Key words:** Optical design; Middle infrared; Continuous zoom; Imaging system; off-axis; large aperture; Unobstructed

**OCIS Codes:** 220.0220; 110.0110; 080.3620; 110.2970; 110.2960

## 0 引言

为了实现对远距离目标的搜索、跟踪和记录, 必须使用大口径、长焦距、高空间分辨率的望远成像光学系统。目前, 主要有折射式、离轴反射式和共轴折反式三种结构形式<sup>[1-2]</sup>。对于折射式连续变焦系统而言, 大口

径的光学材料难以获得, 而且必须需要较大口径并且非常昂贵的非正常色散的材料(如氟化钙、氟冕玻璃或特种火石玻璃)来校正二级光谱<sup>[3]</sup>。而离轴三反连续变焦系统由于没有后固定组, 导致其变焦过程中像面移动, 且多片离轴反射镜的加工成本高并具有较强的装配难度, 且难以做到 100% 冷光阑效率。共轴折反式系

第一作者: 汪大宝(1982-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为卫星遥感和数据传输技术。Email: xdu\_wdb@gmail.com

通讯作者: 姜凯(1985-), 男, 博士, 主要研究方向为光学系统设计。Email: jiangkai2008.jj@163.com

收稿日期: 2013-08-02; 录用日期: 2014-01-24

统因为具有较大的中心遮拦(尤其在变焦系统的短焦端),导致入射光能量不足,目标在靶面成像的照度较低<sup>[4-5]</sup>.因此提出了离轴折反式变焦系统的设计思路,将整个系统分为离轴两镜系统和折射式变焦组分两部分设计,既解决了折射式系统很难做到大口径的缺陷,又避免了反射式连续变焦系统像面位置随焦距变化而变化的缺点,并避免了中心遮拦的存在.

本文根据设备指标要求,设计了一套焦距 250~2 000 mm,  $F$  数为 4 的大口径离轴折反射式中波红外连续变焦系统,实现了大口径、高变倍比、无遮拦、像面稳定以及满足 100%冷屏效率的连红外续变焦系统的设计.

## 1 光学系统设计原理

设计的离轴折反射式连续变焦系统结构见图 1,系统分前组离轴反射式系统和后组折射式连续变焦系统两部分.根据光瞳匹配和冷屏匹配将两部分组合,统一进行优化设计.为了实现系统的光瞳匹配和冷屏匹配,要求做到两点<sup>[6]</sup>:

1) 反射系统入瞳  $D_1$  经过次镜及折射透镜成像在冷屏的位置;

2) 反射系统入瞳的尺寸经过次镜及折射透镜成像后等于冷屏的尺寸  $D_3$ .

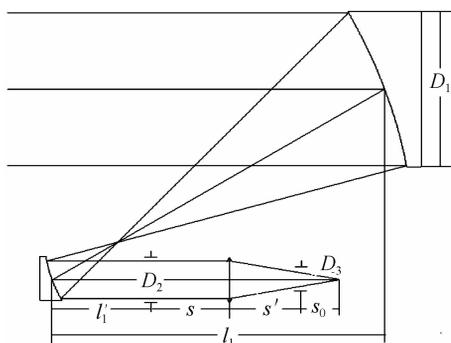


图 1 离轴折反式红外系统光路

Fig. 1 Diagram of off-axis catadioptric system

折反式红外成像光学系统光路如图 1.其中,  $D_1$  为主镜口径(反射系统入瞳),  $r_1$  为主镜曲率半径,  $r_2$  为次镜曲率半径,  $s$  为折射透镜到折射系统入瞳的距离,  $s'$  为折射透镜到折射系统出瞳的位置,  $s_0$  为折射系统出瞳到像面的距离,  $l_1$  为入瞳到次镜的距离,  $l_1'$  为次镜到反射系统出瞳的距离,  $D_2$  为(反射系统出瞳尺寸)折射系统入瞳尺寸,  $D_3$  为折射系统的出瞳尺寸,  $f_{Ge}$  为折射系统的焦距.

为满足光阑匹配和冷屏匹配的要求,如图 1,可以得到

$$f' = \frac{-r_1}{r_2} f_{Ge} \quad (1)$$

$$\frac{1}{s' + s_0} = \frac{1}{f'} \quad (2)$$

式中,  $f'$  为全系统焦距,  $s_0$  为折射系统出瞳到像面的距离.

由反射部分可以得到

$$\frac{1}{l_1'} - \frac{1}{l_1} = -\frac{2}{r_2} \quad (3)$$

$$D_2 = D_1 \frac{l_1'}{l_1} \quad (4)$$

式中,  $l_1'$  等于主次镜间距  $d$ , 由式(3)~(4)有

$$l_1 = \frac{dr_2}{r_2 + 2d} \quad (5)$$

$$D_2 = D_1 \frac{r_2 + 2d}{r_2} \quad (6)$$

由折射部分可以得到

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f_{Ge}} \quad (7)$$

$$D_3 = D_2 \frac{s'}{s} \quad (8)$$

将式(6)代入上式,得到

$$D_3 = D_2 \frac{s'}{s} = D_1 \frac{r_2 + 2d}{r_2} \cdot \frac{s'}{s} \quad (9)$$

由式(1)、(2)和(7)联立,可求得  $s'$ 、 $s$  的值,从而求得  $D_3$ . 满足式(9)即可达到光瞳匹配,同时满足系统的冷屏匹配.

## 2 光学系统设计

### 2.1 光学系统设计指标

本文采用的探测器为  $320 \times 240$  制冷红外探测器,探测器像元尺寸为  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ . 根据实际需要,红外连续变焦光学系统的具体参量见表 1.

表 1 光学系统设计具体参量

Table 1 The parameters of system	
Parameter	Value
Focal range/mm	250~2 000
Field of view/ $^\circ$	1.374 8~0.171 9
Wavelength/ $\mu\text{m}$	3.7~4.8
$F\#$	4
Zoom ratio	8

### 2.2 系统初始结构设计

设计系统的前组反射式无焦系统由主次镜两片抛物面反射镜组成,主镜为入瞳所在位置.两镜系统为共轴系统离轴使用(光阑离轴),以达到整体离轴折反变焦系统无遮拦的目的<sup>[7]</sup>,如图 2.

由于反射式无焦系统与透射式后组连续变焦系统的长焦端进行光瞳匹配,所以无焦系统视场角为全系统长焦时的视场角  $0.171 9^\circ$ . 设计初始结构压缩比为 5 倍,由此可以计算得出反射式无焦系统的入瞳应为 500 mm;为保证全视场时系统无遮拦,且留有一定余量,主镜的离轴量设为 500 mm. 具体初始结构参量见表 2,此时无焦系统出瞳位于次镜后 240 mm 处,出瞳孔径为 100 mm.

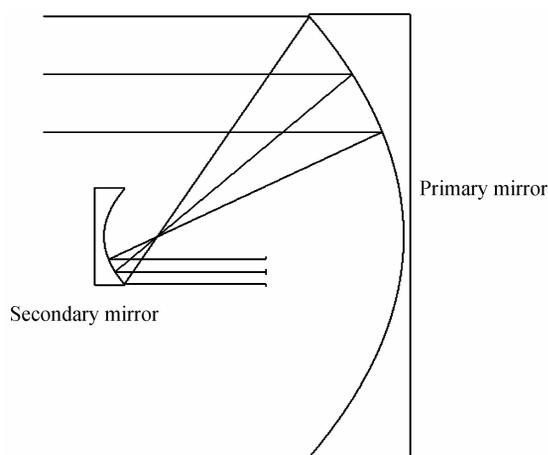


图2 反射式无焦系统的初始结构

Fig. 2 Initial structure of reflective non-power system

表2 离轴无焦系统初始结构参量

Table 2 Parameters of off-axis non-power system

	Surface	R/mm	D/mm	Off-axis/mm
Primary	paraboloid	-2 000	-1 200	-500
Second	paraboloid	400	240	-150

设计连续变焦光学系统,首先要确定其补偿方式.正组补偿可以实现凸轮曲线的单调性,但是整个系统

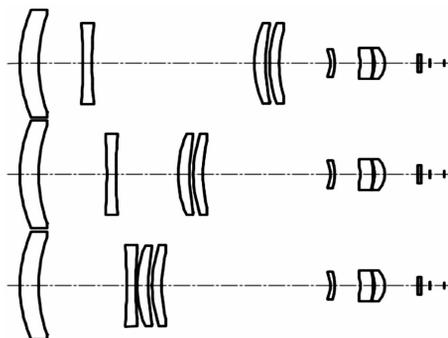


图3 正组补偿变焦系统的初始结构

Fig. 3 Structure diagram of positive compensating zoom lens

长度较长,像差校正相对于负组补偿形式的系统比较容易.由于本系统采用折反式结构设计,可以压缩整个光学系统的长度,所以对后组透射式变焦系统长度要求不是很严格,所以采用正组补偿的结构形式<sup>[8-11]</sup>.

根据光学系统设计参量要求,由于反射式无焦系统放大倍数为5倍,所以后组透射式连续变焦系统的焦距应为50~400 mm, F数和变倍比与整体系统的相

应参量一致,其具体设计参量如表3.

表3 后组连续变焦光学系统设计具体参量

Table 3 The parameters of the back zoom system

Parameter	Value
Focal range/mm	50~400
Field of view/°	6.874 0~0.859 5
Wavelength/ $\mu\text{m}$	3.7~4.8
F#	4
Zoom ratio	8

此时,通过上述求得的初始结构,变焦系统长焦端的入瞳位置和入瞳直径已知,入瞳位置为第一片透镜前850 mm处,入瞳孔径为100 mm.与离轴反射无焦系统出瞳匹配后,得到全系统初始结构,如图4.

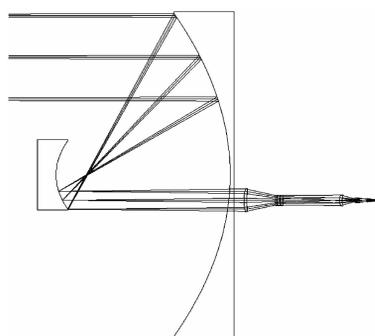


图4 离轴折反式变焦系统全系统初始结构

Fig. 4 Initial structure diagram of off-axis zoom system

### 2.3 光学系统匹配优化

在已设计完成的光学系统初始结构的基础上,将两组份通过光瞳匹配组合在一起继续优化.在此过程中,发现在系统的长焦端时存在较严重的色差;并且短焦大视场时轴外像差比较严重,传递函数较低.因此,在系统承担像差较大的表面引入非球面<sup>[12]</sup>(非球面四次系数为 $-4.06\text{e-}006$ ,六次系数为 $-2.67\text{e-}009$ )和衍射面(衍射面系数 $C_1=8.69\text{e-}006$ , $C_2=-4.72\text{e-}009$ , $C_3=5.90\text{e-}012$ ),来消除色差和轴外像差.在变焦组第一个表面引入衍射面,在后固定组的第五个表面引入非球面<sup>[13-15]</sup>.利用Code V光学设计软件进行多次优化设计,得到的光学系统总长为1 540 mm,主镜口径为520 mm,光学系统各焦距位置的光路图如图5.

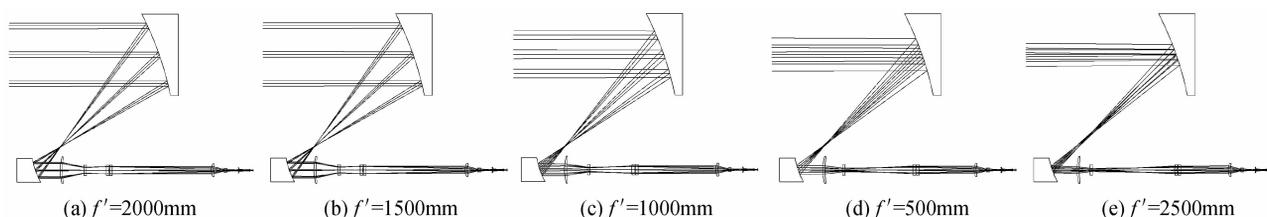


图5 离轴折反式变焦系统光路图

Fig. 5 Structure diagram of off-axis zoom optical system

## 2.4 设计结果与像质评价

### 2.4.1 变焦曲线

利用 Code V 软件对系统进行优化时,只选取五个焦距位置进行优化,因此仅在这五个位置,连续变焦系统具有良好的成像质量.但是,这不能表明变焦系统在全焦距范围内都具有良好的成像质量,因此要给出全焦距范围内实际的变焦曲线.利用 Code V 光学设计软件的宏语言,给出各焦距位置时变倍组和补偿组的位置,以变倍组移动距离线性递增进入下一位置优化,得到实际的变焦曲线.如图 6 所示,其中  $x$  轴为移动组元的移动距离, $y$  轴为采样点个数,以长焦端为起点,在向短焦端变焦时,变倍组和补偿组分别向两侧移动.

### 2.4.2 调制传递函数 MTF

调制传递函数 MTF 是较为全面的评价光学系统成像质量的一种手段.根据设计要求,考虑各焦距位置在空间频率 16 lp/mm 内的 MTF.由图 7 可知,各个焦

距位置,系统的 MTF 值在 16 lp/mm 内均大于 0.6,达到或接近衍射极限,各焦距位置的成像质量良好,满足设计指标的要求.

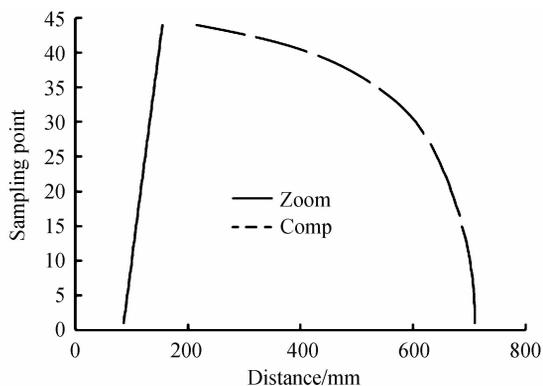


图 6 变焦系统凸轮曲线

Fig. 6 Cam curves of designed zoom lens

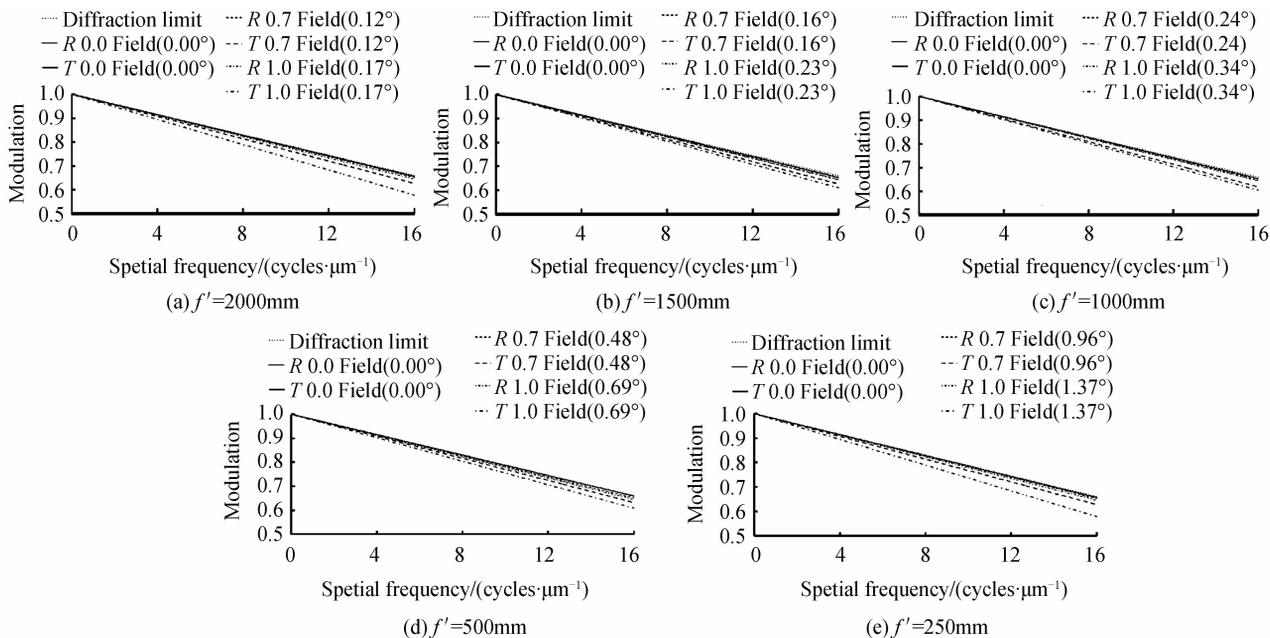


图 7 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of the optical system

### 2.4.3 点列图

设计的光学系统点列图如图 8,在所有的焦距位置,全视场内弥散斑的均方根值(RMS 值)都  $< 30 \mu\text{m}$ ,即小于一个像元尺寸大小,满足系统使用的要求.各焦距位置弥散斑 RMS 值见表 4.

### 2.4.4 包围圆能量

系统的包围圆能量曲线可以直观地反映系统的能量聚集程度.如图 9 所示,在任一变焦位置,均有超过 80% 的能量集中于一个像元之内,能量聚集程度良好.

表 4 各焦距位置的弥散斑 RMS 值

Table 4 RMS of each focal-length

Field	Spot rms/ $\mu\text{m}$		
	0	1	-1
Long	5.02	5.44	5.44
Mid-long	7.73	4.07	4.07
Middle	5.84	4.58	4.58
Mid-short	3.14	4.67	4.67
Short	3.49	8.46	8.46

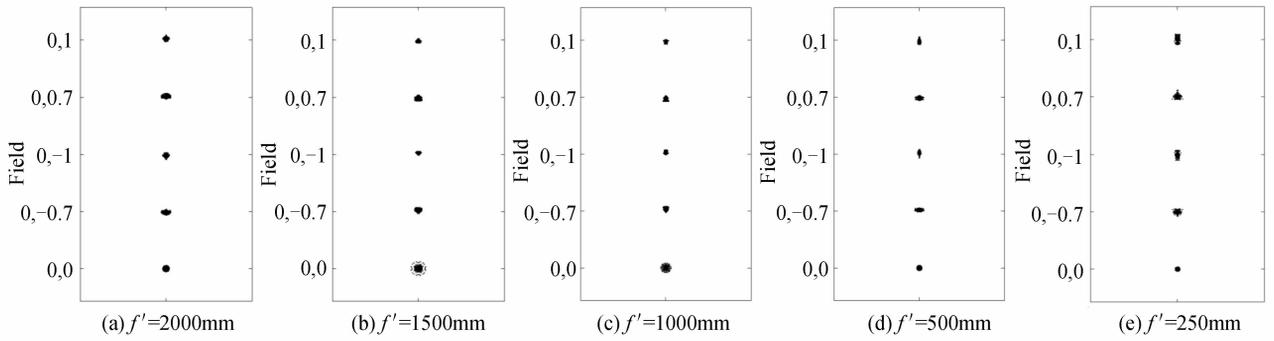


图8 点列图  
Fig. 8 Spot diagram

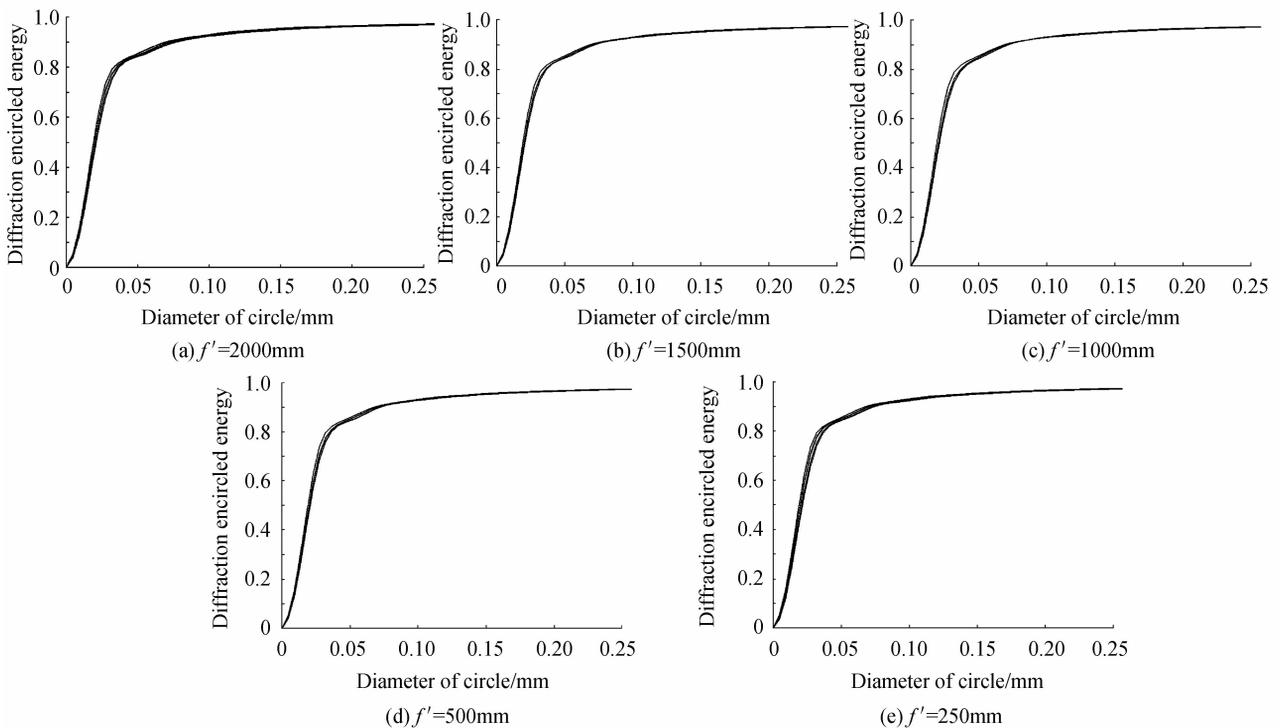


图9 包围圆能量  
Fig. 9 Radial energy

### 3 结论

本文基于制冷型  $320 \times 240$  凝视焦平面阵列探测器,设计了大口径离轴折反式中波红外连续变焦光学系统,并介绍了离轴系统的初始结构计算和系统分两部分设计匹配对接的设计方法.系统工作波段  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ ,焦距  $250 \sim 2000 \text{ mm}$ ,变倍比为  $8 \times$ , $F$  数为 4,满足  $100\%$ 冷光阑效率.该系统具有大口径的优点,且解决了透射式连续变焦系统因材料限制不能做到大口径、共轴折反式连续变焦系统短焦遮拦比大和离轴三反变焦系统不能  $100\%$ 冷光阑的缺陷,光学传递函数接近衍射极限,凸轮曲线平滑,结构紧凑,满足实际需求.大口径是红外连续变焦镜头发展的必然趋势,将在军用、民用,特别是高速目标跟踪和识别上得到广泛应用.

### 参考文献

- [1] ALLEN M. Developments and trends in infrared zoom lenses from 2000 to 2010[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(1): 013001,1-6.
  - [2] JIANG Kai, ZHOU Si-zhong, DUAN Jing, *et al.* Design of catadioptric middle infrared continuous zoom lens for uncooled infrared detector[C]. SPIE, 2011, **8193**: 1u1-8.
  - [3] HUANG Kuang-lung, JONATHAN M. Application of catadioptric mirrors in zoom optical systems[C]. SPIE, 1996, **2774**: 320-328.
  - [4] JUNGWIRTH M E L, WICK D V, DERENIAK E L. Theory and tradespace analysis of a reflective axial adaptive optical zoom system[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(8): 083001.
  - [5] LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-feng, CAO Jing-tai, *et al.* Design of zoom optical system with long focal length and super-high zoom ratio[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 358-363.
- 李宏壮,张振铎,曹景太,等.长焦距超高倍率变焦距光学系统设计[J].光子学报,2012,41(3):358-363.

- [6] PAN Jun-hua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. *Acta Optical Sinica*, 2003, **23**(12): 1475-1478.  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2003, **23**(12):1475-1478.
- [7] CHE Chi-cheng, LI Ying-cai, FAN Xue-wu. Optical design of off-axis two mirrors collimator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1793-1796.  
车驰骋, 李英才, 樊学武. 离轴两镜平行光管的光学设计[J]. 光子学报, 2008, **37**(9): 1793-1796.
- [8] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [9] JIANG Kai, ZHOU Si-zhong, WANG Yan-bin, *et al.* Design of  $30\times$  middle infrared continuous zoom system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(8): 2162-2166.  
姜凯, 周泗忠, 王艳彬, 等.  $30\times$ 中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(8):2162-2166.
- [10] CHENG Ke, ZHOU Si-zhong, ZHANG Heng-jin. Design of a short focal-length zoom system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1825-1828.  
程珂, 周泗忠, 张恒金. 短焦距变焦物镜设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(12):1825-1828.
- [11] TIAN Hai-xia, YANG Jian-feng, MA Xiao-long. Design for visible video zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1797-1799.  
田海霞, 杨建峰, 马小龙. 可见光变焦距电视光学系统设计[J]. 光子学报, 2008, **37**(9): 1797-1799.
- [12] ZHANG Liang, PAN Xiao-dong. Infrared zoom optical system design based on  $480\times 6$  focal plane array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 1-6.  
张良, 潘晓东. 基于  $480\times 6$  阵列探测器的红外连续变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2013, **42**(1):1-6.
- [13] JIANG Kai, ZHOU Si-zhong, WANG Yan-bin, *et al.* Design of large aperture off-axis catadioptric middle infrared continuous zoom system [ J ]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(9): 2467-2471.  
姜凯, 周泗忠, 王艳彬, 等. 大口径离轴折反射式中波红外连续变焦系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(9): 2467-2471.
- [14] JIA Yong-dan, FU Yue-gang, LIU Zhi-ying, *et al.* Design of Cua-FOV athermal optical system for infrared dual-color[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 638-641.  
贾永丹, 付跃刚, 刘智颖, 等. 双视场/双色红外消热差光学系统设计[J]. 光子学报, 2012, **41**(6): 638-641.
- [15] 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.