

基于卡塞格林系统的红外制冷型 长焦分档变倍光学系统的设计

李刚*, 杨晓许, 张恒金, 孙东岩
(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119)

摘要: 本文基于卡塞格林系统设计了红外制冷型长焦分档变倍光学系统, 计算、推导了光学初始参数及组元的光焦度分配。采用了二次成像结构形式, 主物镜组采用 R-C 光学结构用于缩短筒长, 使用投影镜组解决冷屏匹配问题, 利用调焦镜实现调焦, 通过切换投影镜组后组实现变倍, 然后对光学系统像差进行了优化设计, 分别给出了长焦系统和短焦系统不同视场的成像质量优化结果, 0.8 视场内光学传递函数在空间频率 17 lp/mm 时均大于 0.4。最后对主要结构进行了相应的精度分析, 结果表明该设计能够很好地满足工程实际需要。

关键词: 红外分档变倍; 卡塞格林系统; 红外传函; 成像质量

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140702.0293

Design of cooled infrared switch-zoom optical system with long effective focal length based on R-C system

LI Gang*, YANG Xiao-xu, ZHANG Heng-jin, SUN Dong-yan
(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)
* Corresponding author, E-mail: lg.lee@163.com

Abstract: Based on the R-C system a cooled infrared switch-zoom optical system with long effective focal length is designed. The initial parameters are calculated and the components' focal power is deduced. Secondary imaging structure is adopted, and relay lens is used to match the cold stop. Zoom is realized by switching the relay lens of the short focal length system and the long focal length system. The optimized design of optical system aberration is made. The optimized imaging results of the long effective focal length optical system and the short effective focal length optical system at different field of view are presented, and the modulation transfer functions within 0.8 field of view at 17 lp/mm of spatial frequency are greater than 0.4. Finally, corresponding precision analysis of the main structure is made and the results show that the structure is rational and the imaging quality is good. The optical system can meet actual requirement.

Key words: infrared switch-zoom lens; R-C system; infrared MTF; imaging quality

1 引言

红外分档变倍光学系统由于具有较好的成像质量和经济性,在国民经济多个领域有着广泛的应用。随着相关技术的发展,对其性能有着更高的需求,要求对目标的观测更远更精确。

目前国内红外变倍光学系统研制开展的比较广泛^[1-11],但都以中、短焦为主,光学口径较小。这些系统的视场大,有利于对目标的快速发现,但其存在的问题是,观测距离较近,成像占像元数少,不利于对细节进行分辨。

相对于连续变焦,分档变倍具有光学结构简单,冷屏匹配容易,装调难度低,光学系统透过率高、成像品质好,维护方便等优点;其缺点是变倍不连续,使用过程中切换变倍会丢失部分信息。

本文设计了一种基于卡塞格林系统的制冷型两档变倍光学系统,选取系统的焦距为 800 和 400 mm,兼顾了观察和测量的需要,采用二次成像结构实现冷屏匹配和调焦功能,主物镜则为了缩短筒长减轻重量,采用了工艺成熟的卡塞格林系统,避免了对大口径红外材料的使用,有利于提高光学性能和经济性,最后利用光学设计软件进行了优化,给出了设计结果及精度分析。

2 设计总体考虑

结构紧凑、冷屏匹配、变倍实现容易及调焦方便快捷是红外制冷型长焦距两档变倍光学系统选型和设计主要考虑的因素。

2.1 结构选型

对于长焦距光学系统,可以采用的结构一般有折反式和透射式两种。折反式结构具有外形尺寸小、重量轻、色差小的优点。在红外领域,反射镜比透镜材料的获取、制造以及成本上都具有很大的优势。其缺点是:有中心遮拦,机械结构和装调复杂,折反式结构中 R-C 系统由于成熟的工艺性和良好的光学性能^[12-13]常被采用。

R-C 系统初始参数由下面公式算出^[12]。

$$r_{01} = -2DF, \quad (1)$$

$$r_{01} = 2\frac{f'}{\beta}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2f'}{r_{01}}, \quad (3)$$

$$r_{02} = \frac{2(-f' + \beta b)}{\beta^2 - 1}, \quad (4)$$

$$d = \frac{f' - b}{\beta - 1}, \quad (5)$$

$$k = \frac{\beta b - f'}{(\beta - 1)f'}. \quad (6)$$

当 $S_I = 0, S_{II} = 0$ 时,

$$e_1^2 = 1 - \frac{2(1 - \beta\frac{b}{f'})}{\beta^3(1 - \frac{b}{f'})}, \quad (7)$$

$$e_2^2 = \frac{(\beta - 1)[\beta^2(1 - \frac{b}{f'}) + (1 + \frac{b}{f'})]}{(\beta + 1)^3(1 - \frac{b}{f'})}. \quad (8)$$

式中: r_{01} 为主镜半径, r_{02} 为次镜半径, F 为主镜 F 数, D 为通光口径, f' 为 R-C 系统焦距, d 为主镜和次镜之间的距离, b 为主镜和一次像面的距离, β 为次镜放大率, k 为遮拦比, e_1 为主镜非球面系数, e_2 为次镜非球面系数。

2.2 冷屏匹配

由于制冷型探测器中有一冷屏,因而光学系统必须考虑出瞳与冷屏的匹配问题,尽可能做到两者在位置和口径上完全一致,这样就可以有效减少镜筒杂散光到达光敏面及对目标造成干扰,提高信噪比。实现冷屏与出瞳的匹配一般有两种方法:(a)直接将光栏后置到冷屏位置;(b)通过投影镜组来实现。在焦距比较长的情况下,光栏后置比较困难,因而这里采用投影镜组来实现。

2.3 调焦

调焦功能是长焦系统保证正常观测的必要条件之一。调焦实现可以通过调焦镜或者是探测器的移动来实现。由于红外制冷型探测器外形和重量较大,调焦机构复杂,通常采用前者,并将调焦镜和其后组之间设计为平行光(如图 1 所示),保证调焦过程中像差变化最小。

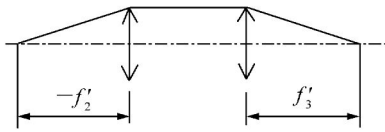


图1 调焦原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of focusing lens

2.4 变倍

变倍的实现可以通过切换镜组,或是改变镜组之间的间隔。前者工作原理依据非物像交互原则,可以实现多档、大倍率变倍。长焦距折返式结构通常采用前者,即通过切换投影镜组后组,有利于保证结构简洁、紧凑,实现容易。

如果整个系统要求倍率改变 β ,则投影镜组的垂轴放大率改变 $-\beta$,当系统焦距 f' ,主物镜组焦距 f'_1 ,调焦镜(投影镜组前组)焦距 f'_2 ,长焦物镜组(长焦投影镜组后组)焦距 f'_{3long} ,短焦物镜组(短焦投影镜组后组)焦距 f'_{3short} ,长焦时投影镜组的垂轴放大率 β 长,短焦时投影镜组的垂轴放大率 β 短,长焦后截距 L_{long} ,短焦后截距 L_{short} ,对于薄透镜则:

$$f'_{3short} = L_{short}, \tag{9}$$

$$f'_{3long} = L_{long}, \tag{10}$$

$$\beta = \beta_{long}/\beta_{short}, \tag{11}$$

$$f'_2 = f'_{3long}/\beta_{long} = f'_{3short}/\beta_{short}, \tag{12}$$

$$f' = f'_1 \times \beta. \tag{13}$$

2.5 系统结构

综合上面4个方面的分析和考虑,系统总体结构如图2所示。系统采用二次成像结构,由主物镜组、调焦镜和物镜组(长焦物镜组或短焦物镜组)组成。其中主物镜组和调焦镜构成具有一定倍率的开普勒望远镜系统,物镜组用来将调焦

镜出射的平行光束聚焦到探测器靶面上。调焦镜和物镜组构成投影镜组匹配冷屏,通过轴向移动调焦镜实现调焦,切换物镜组实现变倍功能。

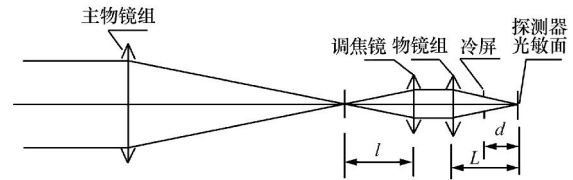


图2 光学系统结构原理图

Fig. 2 Structure diagram of the optical system

3 设计举例

光学系统主要技术指标:

- (1) 工作波段: 3 ~ 5 μm ;
- (2) 焦距: $f' = 800 \text{ mm}, 400 \text{ mm}$,两档变倍;
- (3) 口径: $D \geq 200 \text{ mm}$;
- (4) 探测器为红外中波制冷型热像仪,像元数 320×240 ,像元尺寸: $30 \mu\text{m}$;
- (5) 调焦范围: $\infty \sim 500 \text{ m}$;
- (6) 冷屏到像面的光学间隔: 20 mm ;
- (7) 工作温度: $-20 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.1 初始参数确定

本文设计属于长焦距系统,根据前面分析选用主物镜组为 R-C 系统和投影镜组组合的二次像结构形式,初始参数确定如下。

(1) R-C 系统初始参数确定

当 R-C 系统焦距取 $800 \text{ mm}, D = 200 \text{ mm}$ 、主反射镜和一次像面的距离 $b = 30 \text{ mm}$ 以及主镜相对口径为 $1/1.5, 1/2$ 和 $1/2.5$ 时,系统结构参数计算结果见表1。

表1 R-C 系统初始结构参数

Tab. 1 Optical parameters of the R-C system

D/f'	r_1	e_1	r_2	e_2	d	k	β
1/1.5	-600	1.058 6	-288	2.546 7	210	0.3	-2.66
1/2	-800	1.131	-573.33	3.903	256.67	0.358	-2
1/2.5	-1 000	1.24	-1 087.18	6.617	296.15	0.41	-1.6

为了方便一次像的装调和检测,需要一次成像面有一定成像质量,但由于短焦时视场接近 2° ,R-C系统不能很好地校正由此带来的轴外像差,因此需要适当降低主反射镜相对孔径,综合考虑一次像面像质、加工难度以及系统长度,相对孔径取 $1/2$ 。

(2) 投影镜组初始参数确定

由于系统倍率 $\beta = 2$,通常根据物像交换原则,选取长焦时投影镜组 $\beta_{\text{long}} = \sqrt{2}$ 、短焦时投影镜组 $\beta_{\text{short}} = -1/\sqrt{2}$,这样结构比较紧凑,光焦度分配

比较合理,长、短焦系统像差校正难度相当。但考虑到长焦系统使用频率最多,要优先保证长焦系统像质,这里采用减小长焦放大率、降低像差校正难度的方法来实现,这样会造成结构变长、短焦设计难度加大,所以变化要适量。这里选取 $\beta_{\text{long}} = -1$,则 $\beta_{\text{short}} = -1/2$;制冷型探测器窗口到像面光程约为 25 mm ,即短焦 L_{short} 为 25 mm ;当系统倍率 $\beta = 2$ 时,将相关数据带入式(9)~(11)求得投影物镜光学参数,如表2。

表2 投影物镜光学参数

Tab.2 Gauss optical parameters of the system

$f'_{3\text{long}}$	$f'_{3\text{short}}$	L_{long}	L_{short}	f'_2	β_{short}	f'_{long}	f'_{short}
50 mm	25 mm	50 mm	25 mm	50 mm	$-0.5 \times$	800 mm	400 mm

4 设计结果

使用美国 Focus 公司研制的 ZEMAX 光学辅助设计软件进行象差平衡并分别对长焦时的 0° 、 0.43° 、 0.61° 、 0.75° 和 0.86° 视场以及短焦时 0° 、 0.86° 、 1.22° 、 1.5° 和 1.72° 的视场的成像进行了

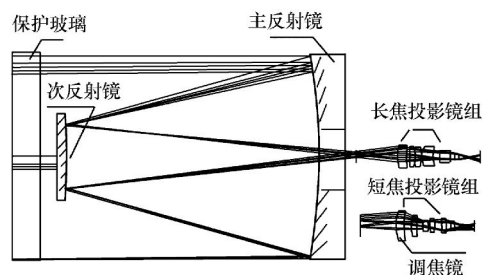


图3 长、短焦光学系统结构图

Fig.3 MTF curve of long EFL

分析,长、短焦光学系统结构见图3。

主、次反射镜基底材料采用K9玻璃,中心遮拦比为0.38。

调焦镜采用Si材料,成像物镜组采用单晶硅和单晶锗材料组合消除色差,其他镜片材料依次为Si(正透镜)、Ge(负透镜)、Si(正透镜)、Si(正透镜),像差设计情况如图4~图9所示。

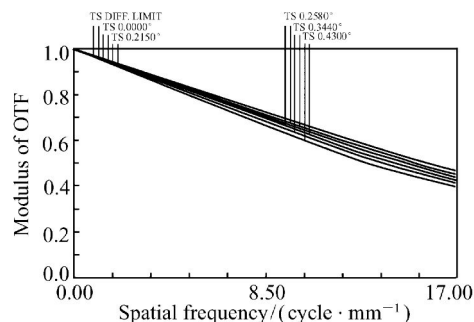


图4 长焦调制传递函数曲线图

Fig.4 MTF curves of long EFL

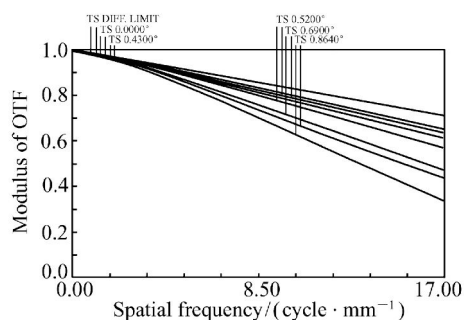


图5 短焦调制传递函数曲线图

Fig.5 MTF curves of short EFL

(1) 传递函数(MTF)

图4、5为系统分别处在长焦和短焦状态时的调制传递函数曲线图,从图中可以看出,系统在长

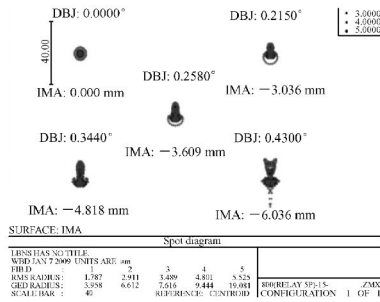


图 6 长焦点列图

Fig. 6 Spot diagram of long EFL

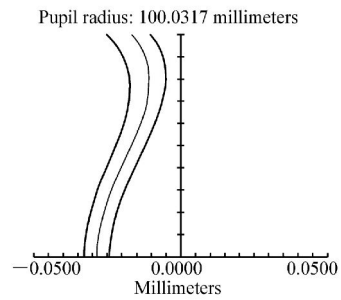


图 8 长焦球差曲线图

Fig. 8 Longitudinal aberration diagram of long EFL

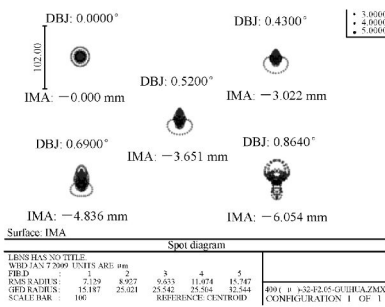


图 7 短焦点列图

Fig. 7 Spot diagram of short EFL

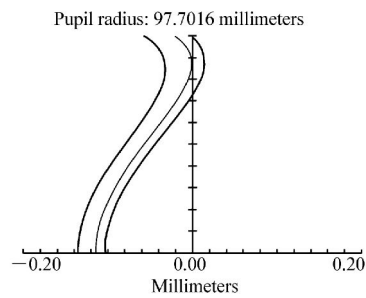


图 9 短焦球差曲线图

Fig. 9 Longitudinal aberration diagram of short EFL

焦和短焦状态时所有视场子午和弧矢的 MTF, 接近衍射极限, 在空间频率 17 lp/mm 处全视场平均 MTF 都大于 0.4, 表明长、短焦系统均具有较好的成像质量。

(2) 点列图 (SPOT)

图 6、7 分别为系统为长、短焦时的点列图, 各个视场的 RMS 弥散斑直径都小于或接近一个像元尺寸 30 μm, 满足设计要求。

(3) 球差和畸变

图 8、9 分别为系统为长、短焦时的球差曲线图, 从图中可以看出, 虽然系统色差没有被完全校正, 但剩余色差较小, 小于一倍焦深, 所以能够满足使用要求。

4.1 温度分析

由于温度的影响, 在室温下装配调整的系统会由于环境温度的改变而产生像面偏移。当这种偏移量超过光学系统的焦深 (长焦焦深为 0.256 mm, 短焦焦深为 0.064 mm) 后, 会造成光学系统的 MTF 下降及弥散斑的扩大。

像面偏移的分析计算考虑 Si、Ge 材料的折射率温度系数 (锗的温度系数 $dn/dt = 4 \times 10^{-4}$, 硅的温度系数 $dn/dt = 1.62 \times 10^{-4}$) 及线膨胀系数 (锗的线膨胀系数 5.7×10^{-6} , 硅的线膨胀系数 2.62×10^{-6}) 及镜片的安装材料的线膨胀系数 (主、次镜采用殷钢杆连接的桁架结构线膨胀系数 1.5×10^{-6} , 如图 10 所示, 投影镜组采用 45# 钢

表 3 环境温度变化对光学系统的影响

Tab. 3 Thermal affection on optical system

温度/°C	-20	0	20	40	50
长焦离焦量/mm	0.067	0.032	0	-0.035	-0.052
短焦离焦量/mm	0.046	0.023	0	-0.024	-0.035

材料线膨胀系数 12×10^{-6}) 的影响。现以室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的设计像面为参考像面,环境温度变化对光学系统的影响列于表 3。

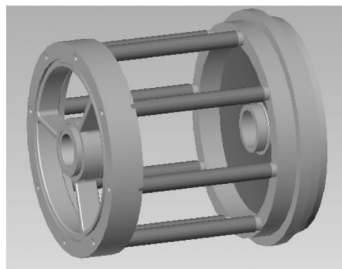


图 10 R-C 系统结构框架图

Fig. 10 Diagram of R-C system structure

从表中可以看出:当环境温度由 $-20 \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化,像面移动量:长焦为 $-0.052 \sim +0.067\text{ mm}$;短焦为 $-0.035 \sim +0.046\text{ mm}$,都小于焦深,所以不用温度调焦。

4.2 视轴晃动误差分析

视轴晃动是影响测量精度主要因素之一,因此需要对其控制,视轴晃动的来源主要是调焦和变倍机构(如图 11 所示),一般要求其晃动量为一个像元左右,下面对本设计的视轴晃动误差进行分析。

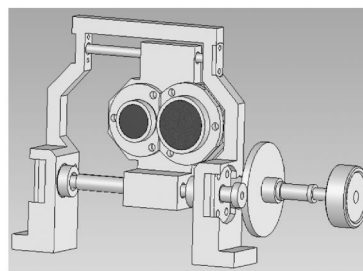


图 11 两档变倍机构外形图

Fig. 11 Diagram of switch-zoom structure

(1) 调焦视轴晃动误差分析

调焦视轴晃动根据精度需要控制在一个像元内(即 0.03 mm 内),长焦镜组的放大率为 -1 ,因此要求调焦镜组的径向晃动精度不大于 0.03 mm 。

调焦过程中径向晃动主要由调焦镜组外圆的椭圆度、导向钢球的形位公差引起。调焦距离为 $\pm 2.5\text{ mm}$,取调焦镜组外圆的母线不直度小于 0.015 mm ,调焦镜组固定套内孔母线的不直度小于 0.015 mm 。钢球精度选择 G16 级,直径为 $\phi 3\text{ mm}$,椭圆度为 0.0004 mm ,直径互差为 0.0008 mm 。

上述各项误差均方根为:

$$\sigma_{\text{FA}} = \sqrt{0.015^2 + 0.015^2 + 0.0008^2 + 0.0004^2} = 0.021\text{ mm} .$$

(2) 变倍机构重复精度

变倍机构重复精度同样也需要控制在一个像元(即 0.03 mm 内)。垂直于导向杆方向的丝杆、导向杆和镜组之间的间隙,是影响变倍时镜组位置重复性的主要因素。设计导向杆和镜组上的导向孔之间的间隙为 0.04 mm ,丝杆和镜组螺纹孔间隙为 0.1 mm ,则变倍时位置重复精度为:

$$\sigma_{\text{SW}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{0.04^2} + \frac{1}{0.04^2} + \frac{1}{0.1^2}}} = 0.027\text{ mm} .$$

两项综合产生的视轴晃动误差为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{FA}}^2 + \sigma_{\text{SW}}^2} = 0.034\text{ mm}$$

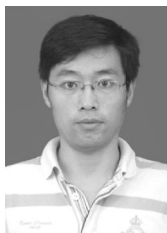
5 结 论

本文针对远距离、小目标的观察和测量需求,讨论了制冷型长焦距红外分档变倍光学系统特性,并推导了系统各个组元焦距 f 、口径 D 、 F 数等初始参数,并在此基础上对工作波段为 $3 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 、焦距 400 和 800 mm 、口径 200 mm 的基于 R-C 结构形式的 2 倍制冷型长焦距光学系统进行了实例验证,其原理同样适用长波红外系统。优化设计结果表明 0.8 视场内 MTF 在空间频率 17 lp/mm 时均大于 0.4 。对主要结构的精度分析表明该设计能很好地满足实际工程需要。

参考文献:

- [1] 贾永丹,付跃刚,刘智颖,等. 双视场/双色红外消色差光学系统设计[J]. 光子学报,2012,41(6):638-641.
JIA Y D,FU Y G,LIU ZH Y,*et al.*. Design of dual-fov athermal optical system for infrared dual-color[J]. *Acta Photonica Sinica*,2012,41(6):638-641. (in Chinese)
- [2] 韩莹,王肇圻,吴环宝,等. 紧凑型8~12 μm 波段折/衍混合双位置两档变倍光学系统设计[J]. 光子学报,2007,36(5):886-889.
HAN Y,WANG Z Q,WU H B,*et al.*. Diffractive/refractive two-position system in 8~12 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,36(5):886-889. (in Chinese)
- [3] 孟剑奇. 双视场6倍变焦红外热成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2008,37(1):89-92.
MENG J Q. Dual-field zoom(6x) infrared imaging optical system[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2008,37(1):89-92. (in Chinese)
- [4] 赵新亮,王海霞,崔丽,等. 长波双视场扫描型红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2011,40(8):1517-1520.
ZHAO X L,WANG H X,CUI L,*et al.*. Design of dual-field scanning LWIR optical system[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2011,40(8):1517-1520. (in Chinese)
- [5] 陈吕吉,李萍,冯生荣,等. 中波红外消色差双视场光学系统设计[J]. 红外技术,2011,33(1):1-3.
CHEN L J,LI P,FENG SH R,*et al.*. Athermal design for MW Infrared dual-field-view optical system[J]. *Infrared Technology*,2011,33(1):1-3. (in Chinese)
- [6] 晏蕾,贾平,洪永丰. 红外双视场光学系统的初始结构求解[J]. 红外,2011,32(1):23-26.
YAN L,JIA P,HONG Y F. Design of initial structure of infrared dual field-of-view optical system[J]. *Infrared*,2011,32(1):23-26. (in Chinese)
- [7] 吴海清,王海霞,赵新亮. 双波段/双视场红外光学系统设计[J]. 红外技术,2010,32(11):640-644.
WU H Q,WANG H X,ZHAO X L. Design of dual-band/dual-field IR optical system[J]. *Infrared Technology*,2010,32(11):640-644. (in Chinese)
- [8] 董科研,王健,孙强,等. 机载双视场中波红外光学系统优化设计[J]. 中国光学,2012,5(6):596-601.
DONG K Y,WANG J,SUN Q,*et al.*. Design of an airborne dual field-of-view middle wave infrared optical system[J]. *Chinese Optics*,2012,5(6):596-601. (in Chinese)
- [9] 杨为锦,孙强. 中波红外连续变焦系统设计[J]. 中国光学,2010,1(2):164-169.
YANG W J,SUN Q. Design of middle infrared continuous zoom system[J]. *Chinese Optics*,2010,1(2):164-169. (in Chinese)
- [10] 骆守俊,何伍斌,李文虎,等. 大面阵中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学精密工程,2012,20(10):2117-2122.
LUO SH J,HE W B,LI W H,*et al.*. Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(10):2117-2122. (in Chinese)
- [11] 李荣刚,杨栋梁,刘琳. 中波红外双视场光学系统设计[J]. 激光与红外,2009,39(6):640-642.
LI R G,YANG D L,LIU L. Design of dual-field-of-view optical system for mid-wave infrared focal-plane arrays[J]. *Laser Infrared*,2009,39(6):640-642. (in Chinese)
- [12] 潘君骅. 关于大望远镜卡焦R-C系统视场改正镜设计[J]. 光学精密工程,2002,10(3):231-234.
PAN J H. Research on the field corrector design for R-C system of the large telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(3):231-234. (in Chinese)
- [13] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:科学出版社,1985.
YUAN X C. *Optical Design*[M]. Beijing:Science Press,1985. (in Chinese)

作者简介:



李刚,男(1975—),吉林通化人,硕士,高级工程师,1998年、2002年于西安工业学院获得学士、硕士学位,主要从事光学成像与光电探测技术等方面的研究。
E-mail:lg.lee@163.com



张恒金(1940—),男,辽宁沈阳人,研究员,1962年于北京理工大学获得学士学位,主要从事光学成像、光学仪器与光电探测技术等方面的研究。E-mail:lg.lee@163.com



杨晓许(1972—),男,河南长葛人,博士,研究员,1996年于河南师范大学获得学士学位,2006年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事光学仪器、靶场光学等方面的研究。E-mail:yxx@opt.ac.cn



孙东岩(1944—),女,吉林长春人,高级工程师,1966年于长春光机学院获得学士学位,主要从事光学仪器、靶场光学等方面的研究。E-mail:lg.lee@163.com

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路3888号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:<http://www.eope.net>

定价:50.00元/册