

文章编号 1004-924X(2014)08-1995-06

无遮拦折反射红外光学系统

史广维*, 张 新, 张建萍

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学
系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:提出了一种新型无遮拦红外折反射光学系统的设计方法以解决原系统存在的中心遮拦问题。分析了传统离轴两反望远系统由于存在线性像散而无法实现无遮拦设计的原因,给出了消线性像散的条件。基于上述条件提出了通过对接共轴透镜组实现无遮拦折反射系统设计的基本思想。最终,通过联接不同的中继镜组完成了无遮拦中波、长波红外系统的设计。设计的应用于制冷型 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中波和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 长波红外的两套无遮拦折反射光学系统的焦距为 $200\ \text{mm}$, F 数为 2,全视场为 $2.75^\circ\times 2.2^\circ$ 。各视场光学传递函数显示设计的光学系统的成像质量接近衍射极限。得到的结果表明,利用消线性像散的共焦离轴两反系统与同轴透镜组联合设计,可以得到高性能无遮拦的折反射红外光学系统。

关键词:光学设计;无遮拦设计;折反射红外系统;离轴两反光学系统

中图分类号:TN216;V248.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20142208.1995

Unobscured catadioptric infrared optical systems

SHI Guang-wei*, ZHANG Xin, ZHANG Jian-ping

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

*Corresponding author, E-mail:dqsgw@yahoo.cn

Abstract: A new design method for unobscured catadioptric infrared optical systems was presented to avoid the obstruction of traditional catadioptric systems. The linear aberration reasons of conventional off-axis two-mirror telescopes were analyzed. As the unobscured optical system is difficult to be designed because of the linear astigmatism in the off-axis two-mirror telescope, the conditions to eliminate the linear astigmatism were discussed. On the conditions, an design idea of unobscured catadioptric optical systems was proposed through associating with coaxial lenses. By combining different relay lenses, two unobscured catadioptric infrared optical systems were implemented for $3\sim 5\ \mu\text{m}$ MW IR and $8\sim 12\ \mu\text{m}$ LW IR applications. The optical design parameters of the two systems are effective focal length of $200\ \text{mm}$, $F=2$, and the full field of view of $2.75^\circ\times 2.2^\circ$. The performance of the two systems approaches to diffractive limit from Modulation Transfer Function(MTF) curves of all field of view. The design results show that the high performance unobscured catadioptric infrared optical systems will be obtained by combination of zero linear astigmatism confocal off-axis two-mirror telescopes

收稿日期:2013-06-28;修订日期:2013-08-30.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61007009)

with coaxial lenses.

Key words: optical design; unobscured design; catadioptric infrared system; off-axis two-mirror optical system

1 引言

大口径的红外光学系统很少采用全透射式,其主要原因是大口径的红外透射材料价格昂贵且难以获得,而且可用于中波和长波红外谱段的透射材料种类极为有限^[1-2]。折反射形式的光学系统可以很好地解决材料问题,通过大口径反射镜组与小口径的红外透射组相结合可以设计出高性价比的红外光学系统。此外,折反射式光学系统还具有结构紧凑、易于实现无热化等优点,因此被广泛应用于红外热成像领域中。传统的同轴折反射式红外光学系统存在中心遮拦问题^[3-6],不仅影响光学系统的光通量,而且遮拦衍射效应会降低系统的成像质量,如光学传递函数和能量集中度。另外,遮拦反射镜支撑结构的热辐射噪声会直接进入成像光路,从而降低系统信噪比。采用离轴全反射结构形式能够获得无遮拦的红外光学系统,但一般外型尺寸较大,设计结果多用于线阵的非制冷探测器^[7-8];一些文献或专利中报道了针对制冷型探测器的离轴全反射红外系统,但一般难以设计出实用的小 F 数光学系统^[9-10]。

针对上述问题,本文提出了一种新的无遮拦红外折反射光学系统设计方法。首先,从传统离轴两反光学系统的像差分析出发,介绍了能够提供轴对称像差场的离轴两反望远镜所满足的基本条件。然后,利用离轴抛物面主镜和离轴双曲面次镜构建出一个无遮拦的反射镜组,该镜组校正了球差,能够产生相对于视场中心对称的彗差、像散和场曲。最后,利用同轴透镜组补偿像差并实现焦距缩放及冷阑匹配。

2 设计思想

折反射红外光学系统通常为二次成像^[11],包括反射镜组和中继镜组。反射镜组的作用是实现一次成像;中继镜组一般为轴对称透镜组,其作用是补偿反射镜组的像差、焦距缩放及冷阑匹配。折反射红外光学系统要实现无遮拦设计,首先要

解决前端反射镜组在离轴条件下的像差问题。为了能够通过共轴中继镜组补偿反射镜组的像差,要求离轴反射镜组能够提供对称的像差场。本文从传统的离轴两反望远镜系统的像差分析出发,介绍了能够提供轴对称像差场的离轴两反望远镜系统所满足的基本条件。

2.1 传统的离轴两反望远镜系统像差

如图 1 所示,传统的离轴两反望远镜系统由离轴抛物面主镜和离轴双曲面(或椭球面)次镜组成。该系统通过共轴系统光阑偏置的方式来避免遮拦问题。主镜焦点与次镜双曲面(或椭球面)一个焦点重合,无穷远轴上点就会在次镜另一个焦点上成理想像,而轴外像点将受到彗差和像散的影响。利用 CODEV 对系统的彗差和像散进行全视场显示,如图 2 所示。

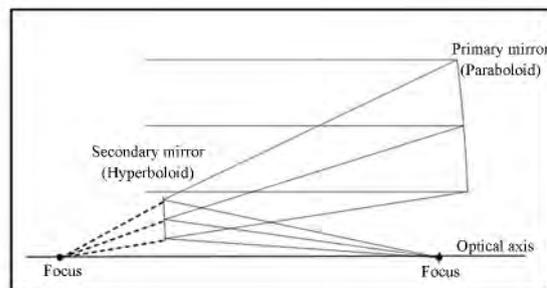
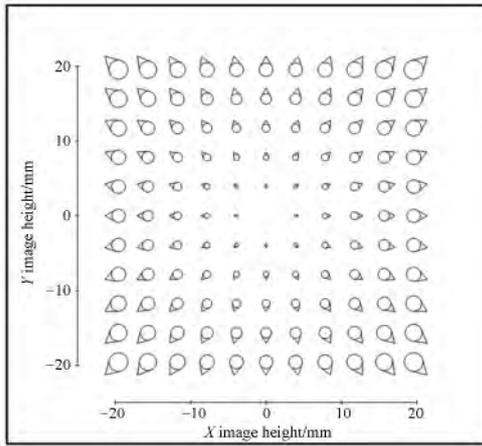


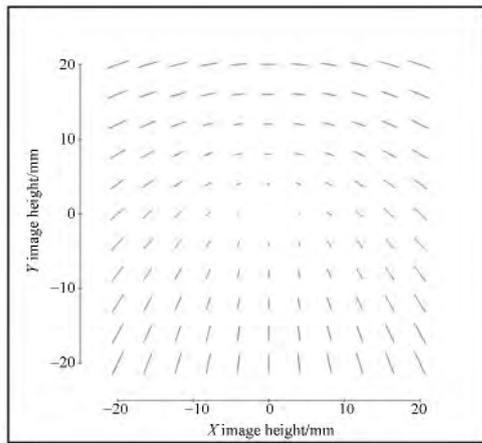
图 1 传统的离轴两反望远镜系统的光路图

Fig. 1 Layout of conventional off-axis two-mirror telescope

由图 2 可以看出,彗差在视场中仍然保持对称性,而像散表现出线性^[12]。线性像散在离轴反射系统中较为常见,通常远大于彗差值,从而成为限制离轴两反望远镜性能的主要因素。线性像散表现为像散与视场呈线性关系,而像散方向具有非对称性。众所周知,共轴光学系统的初级像散是与视场呈平方关系的轴对称像差。因此,传统的离轴两反望远镜系统无法通过轴对称的透射镜组补偿线性像散。尽管可以利用非对称的透射镜组校正线性像散,但其设计、加工和装调的难度都比较大,并且会破坏主次镜的共轴特性^[13]。



(a) 彗差
(a) Coma



(b) 像散
(b) Astigmatism

图 2 传统离轴两反望远镜系统像差情况

Fig. 2 Aberrations of conventional off-axis two-mirror telescope

2.2 消除线性像散的基本条件

为了消除线性像散,可将主镜离轴量和次镜倾斜引入离轴两反望远镜系统中,如图 3 所示。次镜绕着次镜与主镜的重合焦点倾斜,从而保证系统彗差场的对称性。根据 S. Chang 对满足共焦条件的离轴两反望远镜系统几何像差的研究结论^[14]:离轴两反望远镜系统的彗差场与相同焦比的同轴抛物面彗差场相同;像散场以非对称的线性像散为主,线性像散为:

$$\frac{1}{s'_{t2}} - \frac{1}{s'_{s2}} = 2\omega \frac{l_1}{l_2^2} \left(\frac{l_1}{R_1} \sin 2i_1 - \frac{l_2}{R_2} \sin 2i_2 \right) + O(\omega^2), \quad (1)$$

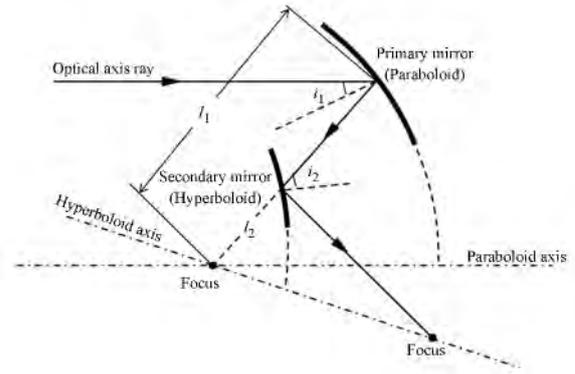


图 3 次镜存在倾斜时的离轴两反望远镜

Fig. 3 Off-axis two-mirror telescope with tilted secondary mirror

式中: s'_{t2} 和 s'_{s2} 分别为子午焦点和弧矢焦点到次镜口径中心的距离, l_1 和 l_2 分别为主镜和次镜的口径中心与重合焦点的距离, R_1 和 R_2 分别为主镜和次镜顶点的曲率半径, i_1 和 i_2 分别为类轴光线在主镜和次镜表面的入射角, ω 为视场角, $O(\omega^2)$ 为高级像散。由式(1)可以得出离轴两反望远镜系统消除线性像散的基本条件,即:

$$\frac{l_1}{R_1} \sin 2i_1 = \frac{l_2}{R_2} \sin 2i_2. \quad (2)$$

满足式(2)的离轴两反系统没有线性像散,但仍然存在轴对称的初级像散。此类系统的初级彗差和像散均表现出对称性,说明无线性像散的离轴两反望远镜系统的像差分布与共轴系统的像差分布相同。因此,利用共轴的中继镜组可以同时补偿轴对称的彗差和像散,最终实现无遮拦折反射红外光学系统设计。

3 设计实例

基于以上分析,可构建出多种消线性像散的离轴两反望远镜系统^[15],其中一种如图 4 所示。该系统由离轴抛物面主镜和离轴双曲面次镜组成,光阑与主镜重合,主、次镜均为正光焦度,次镜引入了较大的倾斜。系统将入射类轴光线经过两次反射折转 90° ,像面与出射的类轴光线垂直。具体参数如表 1 所示,数据满足式(2)。

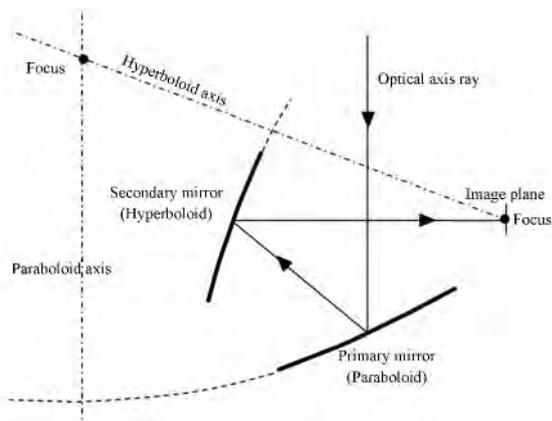


图 4 消线性像散的离轴两反望远镜

Fig. 4 Off-axis two-mirror telescope without linear astigmatism

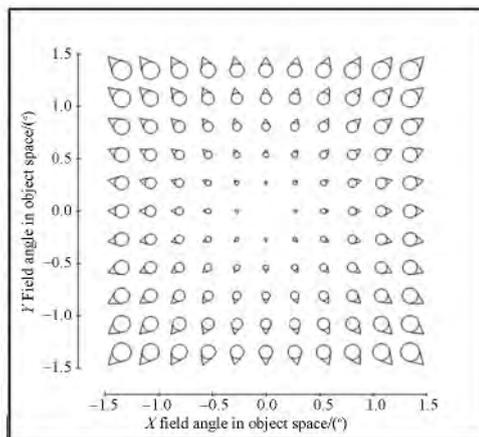
表 1 离轴两反望远镜参数

Tab. 1 Parameters of off-axis two-mirror telescope

参数	数值
入瞳直径 D	100 mm
焦距 f	200 mm
主镜二次曲面常数 K_1	-1
R_1	749.5 mm
l_1	456.234 mm
i_1	25°
次镜二次曲面常数 K_2	-5.909
R_2	491.055 mm
l_2	356.234 mm
i_2	20°

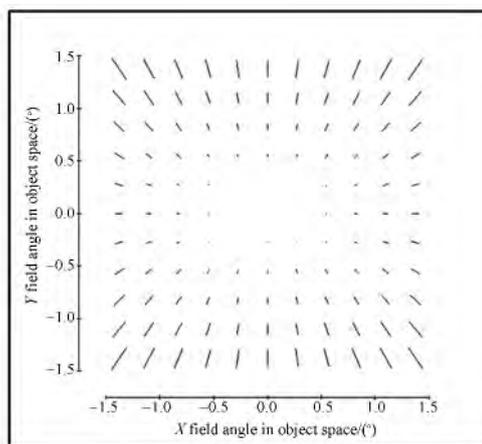
分析其像差分布情况,结果如图 5 所示。由于消除了线性像散,系统像差表现出轴对称的彗差和像散,满足共焦条件中心视场无球差。从像差分布上看,该系统与经典 Cassegrain 系统的像差分布特点相同。因此,可利用该反射镜组对接中继透镜组来实现无遮拦中、长波红外折反射系统的设计。中继镜组以反射镜组出射的类轴光线为光轴,其它要求与同轴折反系统相同,即中继镜组需要校正自身的球差和色差,并产生与反射镜组符号相反的彗差、像散和场曲,从而补偿反射镜组的像差。

本文针对制冷型红外面阵探测器进行了实例设计。探测器阵列规格为 640×512 ,像元间距为 $15 \mu\text{m}$ 。设计指标为:焦距 200 mm, F 数 2,全视场 $2.75^\circ \times 2.2^\circ$ 。设计出的中波和长波红外光学



(a) 彗差

(a) Coma



(b) 像散

(b) Astigmatism

图 5 消线性像散的离轴两反望远镜系统像差

Fig. 5 Aberrations of off-axis two-mirror telescope without linear astigmatism

系统如图 6 所示。中波红外系统的中继镜组包括 4 片透镜,材料为硅和锗,透镜表面均采用球面;长波红外系统的中继镜组包括 3 片透镜,材料为锗和硒化锌,其中第二片透镜的前表面为非球面,其余表面均为球面。两个系统的光学传递函数如图 7 所示,可以看出系统设计接近衍射极限。

红外透射材料的折射率温度系数 (dn/dT) 较大,光学系统成像质量对温度的改变较为敏感,利用光学设计软件分析以上两个系统随温度变化的离焦情况,反射镜材料和结构材料均为铝合金,线胀系数为 $23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,分析结果如表 2 所示。

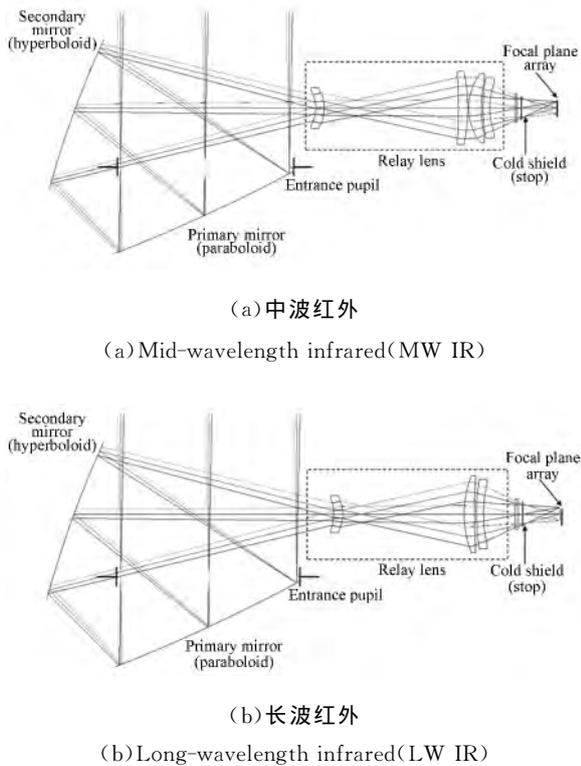


图 6 无遮拦红外折反射系统光路图

Fig. 6 Layouts of unobscured catadioptric infrared optical systems

由表 2 可以看出,假设系统的装配温度为 20 °C,中波红外系统在 10 °C 和 30 °C 的离焦量达到焦深,而长波红外在 15 °C 和 25 °C 的离焦量接近焦深。因此,若相机工作在更宽的温度范围,则需要采用内部调焦法来补偿热环境变化引起的离焦,或者实现红外系统的无热化设计。而此类系统的被动无热化设计将是我们未来的主要研究方向。

尽管传统的离轴三反或四反系统同样能够实现无遮拦红外系统,它们在同轴系统设计的基础上通过光阑偏置或视场偏置的方式实现无遮拦成像;反射镜不会引入较大的倾斜,镜面离轴量的引入仅是为了避免遮拦,不涉及像差校正问题;设计中不需要考虑线性像散的校正;系统能够校正各种单色像差,且可以直接在像面放置探测器。从设计结果上看,传统的离轴三反或四反形式能够实现大线视场设计,而且具有低辐射、无色差、环境适应性强等优点,但难以设计出可匹配面阵制冷型探测器的小 F 数光学系统,与本文的设计结果相比各有优缺点。

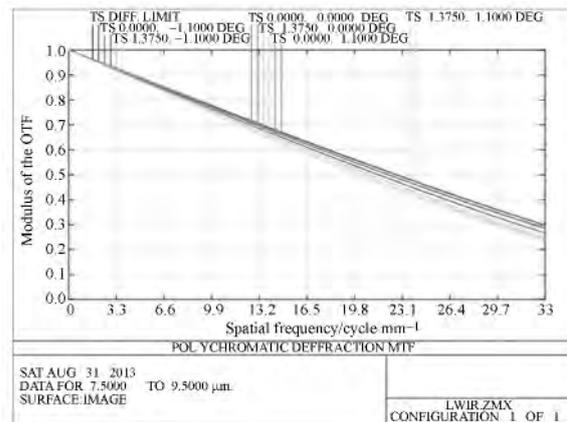
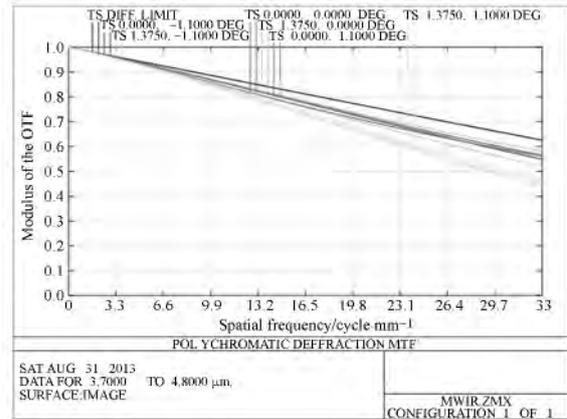


图 7 无遮拦红外系统的光学传递函数

Fig. 7 MTFs of unobscured catadioptric infrared optical systems

表 2 光学系统随温度变化的离焦情况

Tab. 2 Defocus of optical system with temperature

温度/°C	中波红外离焦量/ μm	长波红外离焦量/ μm
10	36	146
15	18	72
20	0	0
25	-18	-74
30	-36	-147

4 结 论

本文探讨了共焦离轴两反望远系统的像差情况,介绍了消除线性像散的基本条件。基于该条

件构建出消线性像散的离轴两反镜组,通过联接不同的中继镜组,分别针对制冷型 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中波和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 长波红外探测器,完成了无遮拦中波、长波两种红外系统的设计,设计指标为:焦距 $200\ \text{mm}$, F 数为 2,视场为 $2.75^\circ\times 2.2^\circ$ 。两种系统的成像质量良好,从各视场的光学传递函数上

看,系统设计接近衍射极限。该光学系统无中心遮拦,具有成像质量高、结构简单且布局紧凑等优点。实验结果表明:消除线性像散的共焦离轴两反望远系统的像差场仍然保持中心对称性,将这一特点与同轴的中继镜组相结合可以设计出高性能的无遮拦折反射红外光学系统。

参考文献:

- [1] FISCHER R E. *Optical System Design* [M]. Second Edition. New York: McGraw-Hill, 2008: 213-258.
- [2] 赵秀丽. 红外光学系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 178-187.
ZHAO X L. *Design of Infrared Optical System* [M]. Beijing: China Machine Press, 1986: 178-187. (in Chinese)
- [3] PALMER T A. Infrared catadioptric lens design considerations [J]. *SPIE*, 2005, 5783: 835-840.
- [4] 曲贺盟, 张新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322003-1-8.
QU H M, ZHANG X, WANG L J, *et al.*. Design of a low F -number compact athermalizing infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322003-1-8. (in Chinese)
- [5] 虞林瑶, 魏群, 张鑫, 等. 一体式紧凑型折反光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 561-566.
YU L Y, WEI Q, ZHANG X, *et al.*. Design of compact integral structure of two-mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 561-566. (in Chinese)
- [6] 薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计 [J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2383-2386.
XUE H. Optical design of infrared search and trace system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2383-2386. (in Chinese)
- [7] 潘君骅. 大相对口径大线视场光学系统的设计 [J]. *中国工程科学*, 2000, 2(8): 89-91.
PAN J H. Design of the optical system with large relative aperture and large linear field of view [J]. *Engineering Science*, 2000, 2(8): 89-91. (in Chinese)
- [8] 王立辉, 郁蕴健, 陆段军. 大线视场大相对口径红外成像系统的光学设计 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(1): 39-41.
WANG L H, YU Y J, LU D J. Optical design of IR imaging system with large linear field of view and large relative aperture [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2008, 27(1): 39-41. (in Chinese)
- [9] 丁学专, 王欣, 兰卫华, 等. 离轴四反射镜光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 319-321.
DING X ZH, WANG X, LAN W H, *et al.*. Design of four-mirror reflective anastigmat optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 319-321. (in Chinese)
- [10] COOK L G. Off-axis three-mirror anastigmat having corrector mirror: US patent, 5550672 [P]. 1995.
- [11] 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.
PAN J H. The methodic design of the IR imaging system with large aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1475-1478. (in Chinese)
- [12] KEVIN P. *Thompson. Aberration Fields in Tilted and Decentered Optical Systems* [D]. Tucson: University of Arizona, 1980: 43-56.
- [13] GILBERTO M, KUHN J R. Off-axis systems for 4-m class telescopes [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(16): 3539-3546.
- [14] CHANG S H, PRATA A. Geometrical theory of aberrations near the axis in classical off-axis reflecting telescopes [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, 22(11): 2454-2464.
- [15] CHANG S H. *Geometrical Theory of Aberrations for Classical Offset Reflector Antennas and Telescopes* [D]. Los Angeles: University of Southern California, 2003: 48-61.

作者简介:



史广维(1983—),男,黑龙江大庆人,博士,助理研究员,2006年于哈尔滨师范大学获得学士学位,2011年于长春光机所获得博士学位,主要从事光学系统设计和像差理论的研究。E-mail: dqsgw@yahoo.cn



张新(1968—),男,吉林省吉林市人,博士,研究员,博士生导师,1991年于清华大学获得学士学位,1994年、2005年于中科院长春光机所分别获得硕士、博士学位,现为中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室副主任,主要从事成像、非成像光学系统的总体设计。E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)