

具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计

刘晓梅^{1,2} 向阳¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 采用远心离轴三反成像系统的空间遥感仪器前有光束限制装置时,要求系统具有实入瞳与之匹配。为了满足这一需要,研究了孔径光阑位于主镜前与系统物方焦平面重合的离轴三反系统的设计问题,推导了主镜和三镜共面时离轴三反系统结构参数计算式及物方焦点与主镜间隔表达式,确定了实现系统物方焦点为实焦点的条件及其解法。据此,针对光谱范围为 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 、 F 数为 4、有效焦距为 360 mm、视场为 5° 的设计要求,设计出整个波段全视场像质接近衍射极限的具有实入瞳的远心离轴三反系统,系统非球面最高次数为 4 次。设计结果表明,这种设计方法可用于实入瞳远心离轴三反成像系统的设计。

关键词 光学设计;离轴三反系统;远心;实入瞳

中图分类号 TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1122002

Research and Design of Telecentric Off-Axis Three-Mirror System with Real Entrance Pupil

Liu Xiaomei^{1,2} Xiang Yang¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract If in the telecentric off-axis three-mirror imaging system there is a beam-limited device in front of space remote instrument, a real entrance pupil to match is required. To meet this need, optical design of off-axis three-mirror system whose aperture stop coincides with the object focal plane in front of the primary mirror is studied. The expressions of configuration parameters and the interval between the object focus and the primary mirror of off-axis three-mirror system are deduced in case that the primary mirror and the tertiary mirror are coplanar. The condition and solution of achieving real object focus are defined. Based on the method, with the specific requirements of $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ spectral range, F -number 4, 360 mm focal length, 5° field of view (FOV), a telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil is designed. And the imaging quality of system approaches the diffraction limit at full FOV in the required wave band. The highest aspheric order is four. The result indicates that this method can be used in design of telecentric off-axis three-mirror imaging system with real entrance pupil.

Key words optical design; off-axis three-mirror system; telecentric; real entrance pupil

OCIS codes 220.4830; 120.6200

1 引言

离轴三反系统^[1~5]具有无遮拦、像质好、结构紧凑、可实现高分辨率和高能量利用率等特点,近年来

在空间相机^[6~8]、成像光谱仪^[9]等空间对地成像观测领域,得到了快速的发展。

目前,国内外已报道的关于远心离轴三反成像

收稿日期: 2011-03-24; **收到修改稿日期**: 2011-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(60538020)资助课题。

作者简介: 刘晓梅(1981—),女,博士研究生,主要从事成像光谱仪光学系统设计方面的研究。

E-mail: twodays999@sohu.com

导师简介: 向阳(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事成像光谱技术和光学检测等方面的研究

E-mail: xiangy@sklao.ac.cn

系统的设计^[10~12],其缺点是系统物方焦点为虚焦点,即系统入瞳位于主镜后,为虚像,无法满足要求成像系统有实入瞳的特殊应用。成像系统前有光学窗口^[13](太空观景窗)时的应用,扫描型成像仪器具有指向反射镜^[14]时的应用等,都要求系统的实入瞳与其前的窗口或反射镜位置和尺寸一致,来满足成像系统的视场和能量需要。孔径光阑位于主镜前的远心离轴三反系统,其孔径光阑即为系统入瞳,满足上述应用要求,但系统设计难度大。本文重点研究了此类远心离轴三反系统的设计问题。

2 理论研究

以共轴三反系统成像理论^[15]为基础,研究孔径光阑位于主镜前的像方远心离轴3反系统。如图1所示, f' 为共轴三反系统的焦距,三个反射镜 M_1 、 M_2 和 M_3 的顶点曲率半径分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 ,主镜 M_1 与次镜 M_2 间隔为 d_1 ,次镜 M_2 与三镜 M_3 间隔为 d_2 ,三镜 M_3 与像面的间隔为 d_3 ,即图1中 l_3' ,物方焦点与主镜 M_1 的间隔为 l_f 。

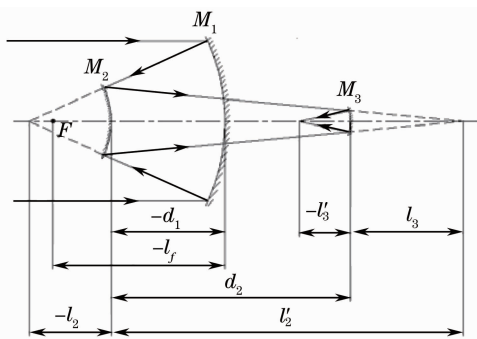


图1 共轴三反系统

Fig. 1 Coaxial three-mirror system

为了使系统结构紧凑,令 $|d_1| = |d_2|$ 。设 α_1 和 β_1 为次镜 M_2 对主镜 M_1 的遮拦比和放大率, α_2 和 β_2 为三镜 M_3 对次镜 M_2 的遮拦比和放大率,结合平像场条件^[15], β_1 和 β_2 可用 α_1 和 α_2 表示,推得三反系统各结构尺寸参数计算式为

$$R_1 = \frac{2[\alpha_1(1-\alpha_2)^2 + \alpha_2(1-\alpha_1)^2]f'}{1-\alpha_1}, \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1[\alpha_1(1-\alpha_2)^2 + \alpha_2(1-\alpha_1)^2]f'}{\alpha_1(\alpha_2-2)+1}, \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1[\alpha_1(1-\alpha_2)^2 + \alpha_2(1-\alpha_1)^2]f'}{\alpha_1(\alpha_1+\alpha_2-3)+1}, \quad (3)$$

$$d_1 = [\alpha_1(1-\alpha_2)^2 + \alpha_2(1-\alpha_1)^2]f', \quad (4)$$

$$d_2 = -[\alpha_1(1-\alpha_2)^2 + \alpha_2(1-\alpha_1)^2]f', \quad (5)$$

$$d_3 = \alpha_1\alpha_2 f'. \quad (6)$$

由系统各反射面几何光学高斯公式得到 l_f 的表达式为

$$l_f = \frac{\alpha_1 - (1 + \alpha_1\alpha_2)[\alpha_1(1-\alpha_2)^2 + \alpha_2(1-\alpha_1)^2]f'}{\alpha_1^2\alpha_2}. \quad (7)$$

由式(1)~(7)式可知,三反系统各结构尺寸参数及 l_f 只与系统焦距 f' 和遮拦比 α_1 、 α_2 有关。共轴三反系统为像方远心光学系统时,由几何光学成像理论可知,孔径光阑与系统物方焦平面重合,三反系统物方焦点必须为实焦点,即 $l_f < 0$ 。三反系统分为一次成像和二次成像两种情况:一次成像结构的 f' 为负值, α_1 、 α_2 为正值;二次成像结构的 f' 和 α_1 为正值, α_2 为负值。分析式(7)可知,两种结构具有实物方焦点时, α_1 、 α_2 必须满足

$$\alpha_1 > (1 + \alpha_1\alpha_2)[\alpha_1(1-\alpha_2)^2 + \alpha_2(1-\alpha_1)^2]. \quad (8)$$

可用逐点数值试验的办法求解(8)式,结合给定的系统焦距 f' ,找到既能使系统结构合理,又满足远心系统 $|l_f|$ 应用距离要求的 α_1 和 α_2 值。每确定一组 α_1 和 α_2 值,就能得到一组满足设计要求的具有实入瞳的远心离轴三反系统初始结构尺寸参数。

由确定的 α_1 和 α_2 值求得 β_1 和 β_2 的值,将其全部代入三级球差 S_I 、三级彗差 S_{II} 和三级像散 S_{III} 的系数表达式^[15],进行消像差求解,可得到三反系统各反射面的二次曲面系数。

对上述方法确定的远心离轴三反系统初始结构进行优化设计时,可采用孔径离轴或孔径离轴和视场离轴相结合的方法,来避免次镜挡光。综合考虑系统结构合理性和非球面加工难易程度等因素,进一步优化系统,改善和平衡系统高级像差,便可得到满足成像质量要求的具有实入瞳的远心离轴三反系统。

3 系统设计

远心离轴三反系统设计要求:光谱范围 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$, F 数为4,有效焦距为360 mm,线视场宽度为 5° ,探测器像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}$, $100\ \text{mm} < |l_f| < 150\ \text{mm}$ 。

取 $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 1$ 时,系统为三镜共焦的特殊结构,满足物方焦点为实焦点的要求,采用孔径离轴的方法对系统离轴,优化后得到远心离轴三反系统结构参数如表1所示。其中, R 为反射面的顶点曲率半径, d 为反射镜间隔, e^2 为反射镜的二次曲面系数。

表 1 远心三反系统结构参数

Table 1 Configuration parameter of the telecentric three-mirror system

Surface	R / mm	d / mm	e^2	Tilt / ($^\circ$)	Decenter / mm
Primary	-360	-90	1.3765	-10	0
Secondary	-146.0449	90	1.9204	-5.8	21.4
Tertiary	-302.8673	-193.9353	3.8546	-3.7	31.7

远心系统入瞳与主镜的距离 $|l_f| = 112 \text{ mm}$ ，次镜采用二次曲面，主镜和三镜采用四次曲面，系统光路如图 2 所示。系统结构合理，无遮拦，视场宽度方向垂直于纸面。

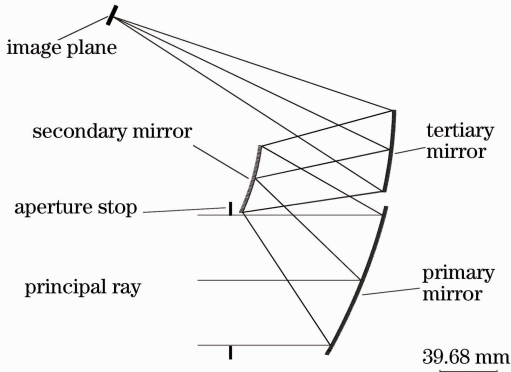


图 2 远心三反系统光路图

Fig. 2 Optical layout of the telecentric three-mirror system

用系统调制传递函数(MTF)曲线、点列图和衍射能量分布图来评价该光学系统的成像质量。由于三反系统沿轴两侧的视场是对称的，所以像质评价时只选择其中一侧的 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ 和 2.5° 这 4 个视场进行分析就能说明整个视场的成像质量。

图 3 是系统点列图，表明系统像元光斑的均方根(RMS)尺寸均小于 $6 \mu\text{m}$ ，完全满足 $30 \mu\text{m}$ 的探测器像元尺寸要求；图 4 是 MTF 曲线，可以看出系

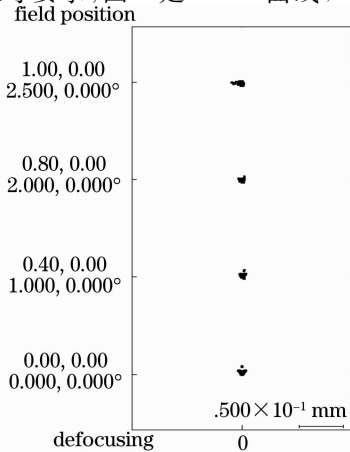


图 3 远心三反系统点列图

Fig. 3 Spot diagram of the telecentric three-mirror system

统在整个波段和全视场内像质接近衍射极限，在空间特征频率 17 lp/mm 处，MTF 值大于 0.82；图 5 是系统衍射能量分布图，从图中可知，超过 90% 的能量集中在探测器像元内。由此表明，该远心离轴三反成像系统像质优良。

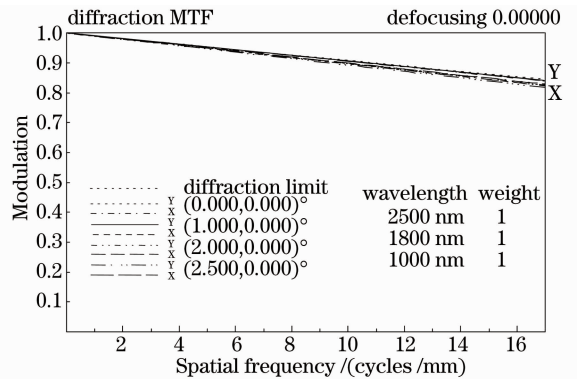


图 4 远心三反系统 MTF 曲线

Fig. 4 MTF of the telecentric three-mirror system

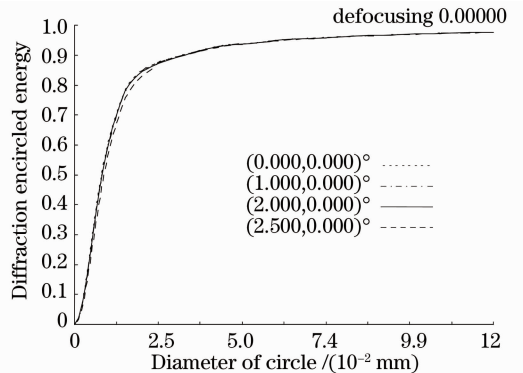


图 5 远心三反系统衍射能量分布图

Fig. 5 Encircled energy of the telecentric three-mirror system

4 结 论

通过将三反成像系统孔径光阑与物方实焦点重合来实现实入瞳像方远心成像。根据系统应用的特殊要求，推导了 $|d_1| = |d_2|$ 条件下的三反系统结构参数计算式，给定系统焦距 f' ，再确定一组满足结构和物方焦距要求的遮拦比 α_1, α_2 值，就可以得到一个具有实入瞳的远心离轴三反系统初始结构。运用此方法，优化设计出 F 数为 4、焦距 360 mm 以及

整个波段全视场接近衍射极限的 5° 视场实入瞳远心离轴三反系统,次镜为凸二次曲面镜,主镜和三镜共面且为凹四次曲面镜,系统总长略大于焦长的四分之一,结构紧凑,入瞳距满足设计要求。此类离轴三反系统,符合成像光谱仪和采用光纤传像的空间遥感仪器在仪器前置有光学窗口或其它入射光束限制装置时的应用需要,满足系统具有实入瞳和远心的特殊要求。

参 考 文 献

- 1 Roland GEYL. Design and fabrication of a three mirror flat field anastigmat for high resolution earth observation [C]. *SPIE*, 1994, **2210**: 739~746
- 2 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219
常 军, 翁志成, 姜会林 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 216~219
- 3 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
郭永祥, 李英才, 梁天梅 等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 4 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lü Baobin *et al.*. Design of new-style unobscured three-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1144~1146
郭永祥, 李英才, 吕保斌 等. 一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1144~1146
- 5 Takayuki Nakano, Yasuhisa Tamagawa. Configuration of an off-axis three-mirror system focused on compactness and brightness [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(5): 776~783
- 6 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2093~2097
李旭阳, 李英才, 马 臻 等. 大 F 数长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2093~2097
- 7 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2657~2661
李旭阳, 李英才, 马 臻 等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2657~2661
- 8 Zhao Xiaoxia, Xie Yongjun, Zhao Wei. Broadband and wide field of view foveated imaging system in space [J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(10): 103202
- 9 Alexander F. H. Goetz, Gregg Vane Jerry E. Solomon, Barrett N. Rock. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, **228**(4704): 1147~1153
- 10 Kunihiro Tanikawa, Toshihiro Okamura, Jun-ichi Kudo. Multi-spectral sensor using off-axis three-mirror reflective optics for airborne surveillance [C]. *SPIE*, 1998, **3498**: 390~399
- 11 Jun-ichi Ishigaki, Toshihiro Okamura, Kunihiro Tanikawa *et al.*. Designing and testing of off-axis three-mirror optical system for multispectral sensor [C]. *SPIE*, 1997, **3061**: 356~369
- 12 Li Huan, Xiang Yang. Design of 10° FOV telecentric off-Axis three-mirror anastigmatic telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2256~2259
李 欢, 向 阳. 10° 远心离轴三反消像散望远系统的光学设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2256~2259
- 13 Li Ming, Wu Qingwen, Yu Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 210~213
黎 明, 吴清文, 余 飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 210~213
- 14 Li Huan, Xiang Yang, Feng Yutao. Ground resolution for imaging spectrometer with motion compensation [J]. *Opt. Precision Engng.*, 2009, **17**(4): 745~749
李 欢, 向 阳, 冯玉涛. 运动补偿成像光谱仪的地面分辨率[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(4): 745~749
- 15 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 130~141
潘君骅. 光学非球面的设计加工和检验 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 130~141

栏目编辑: 谢 婧