

宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计

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 为了满足宽视场成像光谱仪发展的需求,研究了远心、宽视场和大相对孔径的离轴三反系统的光学设计问题,推导出平像场远心三反系统初始结构尺寸参数和三级像差表达式。针对光谱范围 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 、 F 数为 4、有效焦距 720 mm 和视场 10° 的设计要求,采用视场角离轴的方法,设计出次镜为凸球面镜、主镜和三镜共面且都为凹二次曲面镜以及三个反射镜共轴的平像场远心离轴三反成像系统。设计结果表明,该系统在整个波段和全视场内像质接近衍射极限。

关键词 光学设计;离轴三反系统;远心;宽视场;成像光谱仪

中图分类号 TB133 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0622004

Design of Telecentric Off-Axis Three-Mirror System of Imaging Spectrometer with Wide Field-of-View

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 In order to meet the needs of the wide field-of-view (FOV) imaging spectrometer development, the problem about optical design of telecentric, wide FOV, large relative aperture, off-axis three-mirror system is studied, and the expressions of initial configuration parameters and the third-order aberrations for flat field, telecentric, three-mirror system are deduced. With the specific requirements of $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ spectral range, F number is 4, 720 mm focal length, 10° FOV, a flat field, telecentric, off-axis three-mirror imaging system is designed, in which the secondary mirror is convex spheric mirror, the primary mirror and the third mirror are concave conicoid and coplanar, and all the three mirrors are coaxial. The design result indicates that the imaging quality of the designed system approaches the diffraction limit at full FOV in the required wave band.

Key words optical design; off-axis three-mirror system; telecentric; wide field of view; imaging spectrometer

OCIS codes 220.4830; 220.3620; 120.6200

1 引 言

成像光谱仪^[1]将光学成像系统和光谱分光系统有机结合在一起,能够同时获取目标的空间特征和光谱特征,在环境、气候、资源和地质等军民科学研究和应用领域都展现出广阔的应用前景。未来空间成像光谱仪^[2]需要大线视场、宽光谱范围、大相对口

径以及像质接近衍射极限的成像系统。离轴三反系统能够满足这些要求,成为人们研究的热点^[3~7]。

欧洲太空局资助的 HRIS^[8]、美国 TRW 公司研制 Hyperion^[9] 和美国海军 NEMO 卫星上的 COIS^[10],其前置光学成像系统采用的就是离轴三反系统,其线视场角 (IFOV) 不超过 3° 。此外,国内

收稿日期: 2010-11-17; 收到修改稿日期: 2011-02-25

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

外其他单位也开展了远心离轴三反系统的研究设计,如:Jun-ichi等^[11]设计的远心离轴三反系统焦距为700 mm、 F 数为4、IFOV为 6° ,主镜为双曲面镜、次镜为球面镜、三镜为扁椭球面镜;李欢等^[12]设计的远心离轴三反系统焦距为720 mm、 F 数为4、视场角为 10° ,主镜为6次非球面镜、次镜和三镜为椭球面镜。

宽视场高分辨率成像光谱仪能够获得比现有窄视场成像光谱仪多几倍的地物信息量,是成像光谱技术发展的重要方向之一。宽视场成像光谱仪要求前置光学成像系统为远心、宽视场(IFOV不小于 10°)、低 F 数(约为4)。目前设计出的宽视场远心离轴三反系统,存在非球面次数高、反射镜相对系统参考轴有偏心和倾斜、系统研制难等问题。为了改善这种情况,本文对宽视场远心离轴三反系统进行了理论研究和系统设计。

2 理论研究

以共轴三反系统成像理论^[13]为基础,选择一次成像结构对远心三反成像系统进行研究。

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中的 l'_3 。

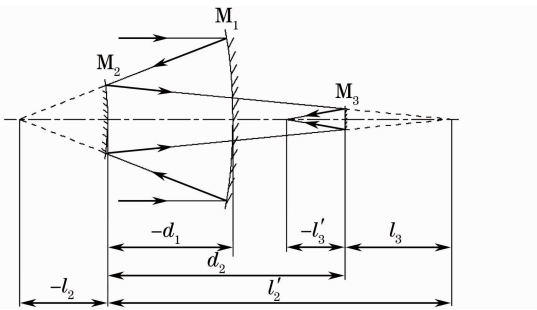


图1 共轴三反系统

Fig.1 Coaxial three-mirror system

为了使共轴三反系统成为像方远心光学系统,将孔径光阑置于次镜 M_2 边缘,光阑面与次镜 M_2 顶点重合,并使孔径光阑到三镜 M_3 的距离 d_2 为三镜 M_3 顶点曲率半径 R_3 的一半,即孔径光阑位于三镜 M_3 物方焦点处,该系统出瞳(孔径光阑经三镜成像)在无穷远,入瞳(孔径光阑经主镜成像)与系统物方焦点重合,由几何光学成像理论可知,此时三反系统为像方远心光学系统,即系统远心条件式为

$$d_2 = -\frac{R_3}{2}. \quad (1)$$

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。三反系统平像场条件为^[13]

$$S_{IV} = \beta_1\beta_2 - \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} = 0. \quad (2)$$

由图1几何关系,(1),(2)式和三反系统各反射面的几何光学高斯公式,导出平像场远心三反系统的结构尺寸参数计算公式如下:

$$R_1 = 2f', \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1 f'}{1+\alpha_1}, \quad (4)$$

$$R_3 = 2\alpha_1 f', \quad (5)$$

$$d_1 = (1-\alpha_1)f', \quad (6)$$

$$d_2 = -\alpha_1 f', \quad (7)$$

$$d_3 = (1+\alpha_1)\alpha_1 f'. \quad (8)$$

由(3)~(8)式可以看出,孔径光阑位于次镜的远心三反系统的结构尺寸参数只由系统焦距 f' 和次镜对主镜的遮拦比 α_1 决定。对于一次成像结构系统,焦距 f' 为负值,次镜对主镜的遮拦比 α_1 为小于1的正数。取 $R_1 < 0, R_2 < 0, R_3 < 0$,即三反系统的主镜和三镜为凹面镜、次镜为凸面镜,这样的面形排列具有体积小、结构紧凑的特点。

根据三级像差理论,推导出平像场远心三反系统的三级球差 S_I 、彗差 S_{II} 和像散 S_{III} 的系数表达式分别为

$$S_I = \frac{1}{4} [(e_1^2 - 1) - e_2^2\alpha_1(1+\alpha_1)^3 + e_3^2\alpha_1(1+\alpha_1)^4 - \alpha_1^2(1+\alpha_1)(1-\alpha_1)^2], \quad (9)$$

$$S_{II} = \frac{1}{4} [e_2^2(1-\alpha_1)(1+\alpha_1)^3 + e_3^2(\alpha_1^2 - 2)(1+\alpha_1)^3 - \alpha_1^5 + 2\alpha_1^4 + \alpha_1^3 - 3\alpha_1^2 - 1], \quad (10)$$

$$S_{III} = \frac{1}{4\alpha_1} [e_2^2(1-\alpha_1)^5 + e_3^2(\alpha_1^2 - 2)^2(1+\alpha_1)^2 - \alpha_1^6 + 3\alpha_1^5 - 6\alpha_1^3 + 2\alpha_1^2 + \alpha_1 + 1], \quad (11)$$

式中 e_1^2 、 e_2^2 和 e_3^2 分别为主镜、次镜和三镜的二次曲面系数。

(9)~(11)式中,自由变量共有4个,即 e_1^2 、 e_2^2 、 e_3^2 及 α_1 。令 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 等于零,将得到一个不定方程组。为了使系统结构紧凑、体积小,取 $|d_1| = |d_2|$,得 $\alpha_1 = 0.5$,此时主镜和三镜共面,结构最紧凑。为了降低制造难度和成本^[14,15],选择次镜为凸球面镜(即 $e_2^2 = 0$)。

3 系统设计

根据宽视场成像光谱仪的性能指标,确定其前置光学系统设计如下:光谱范围 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 、 F 数为 4、 $f'=720\ \text{mm}$ 、IFOV 为 10° 、探测器像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ 。

在优化过程中, $|d_1|$ 增大, 所以要通过适当增大 α_1 的值, 使得 $|d_1|=|d_2|$ 。设计分析表明, α_1 在 $0.55\sim 0.6$ 范围内取值时, 主次镜口径和相对位置都比较接近, 结构规整, 系统总长接近系统焦距的一半, 同时系统具有较好的成像质量。表 1 为 $\alpha_1=0.57$ 时, 优化得到的主镜和三镜共面、远心离轴三反系统的结构参数, 系统光路如图 2 所示。表 1 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 telecentrics three-mirror system

s	R/mm	d/mm	$-e^2$	Tilt	Decenter
Primary	-1929.8443	-412.33	-3.3717	0	0
Secondary	-578.9515	412.33	0	0	0
Tertiary	-824.66	-691.8433	0.1796	0	0

由表 1 和图 2 可见, 所设计的宽视场远心离轴三反系统的主镜为凹双曲面镜, 次镜为凸球面镜, 三镜为凹扁球面镜, 三个反射镜和孔径光阑都共轴, 均无偏心和倾斜, 无遮拦。这种对称式排列结构有利于校正系统像差。

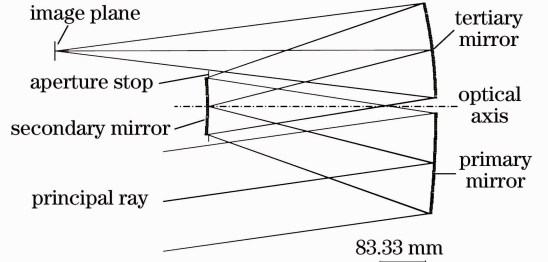
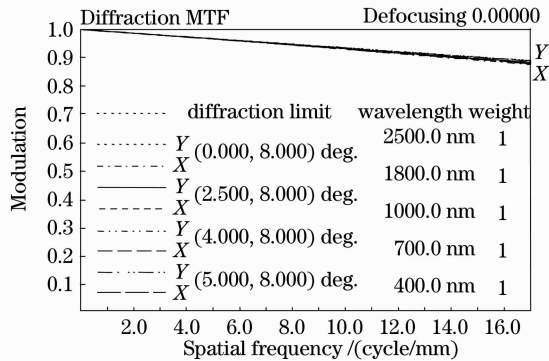


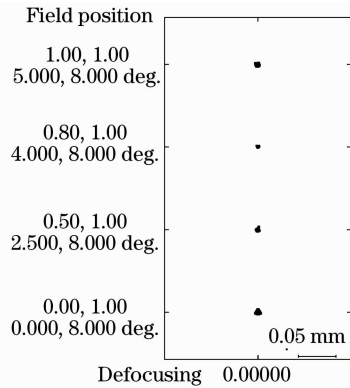
图 2 10° 远心三反系统光路图

Fig. 2 Optical layout of the 10° telecentric three-mirror system

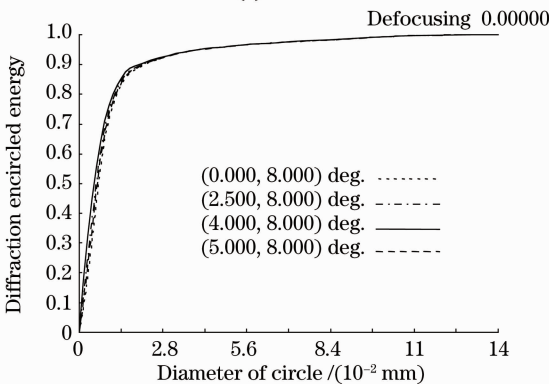
系统成像质量如图 3 所示。由系统的调制传递函数(MTF)曲线, 可以看出系统在整个波段和全视场内像质接近衍射极限, 在空间特征频率 $17\ \text{lp}/\text{mm}$ 处, MTF 值大于 0.87; 系统点列图表明系统像元光斑的均方根尺寸均小于 $5\ \mu\text{m}$, 完全满足 $30\ \mu\text{m}$ 的探测器像元尺寸要求; 系统衍射能量分布图表明, 超过



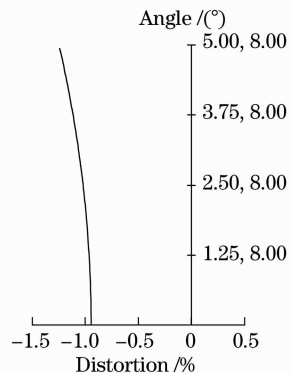
(a) MTF curves



(b) spot diagram



(c) encircled energy



(d) distortion

图 3 10° 远心三反系统成像质量

Fig. 3 Imaging quality of the telecentric three-mirror system with 10° IFOV

92%的能量集中在探测器像元内;由系统畸变曲线可见,最大畸变值小于1.28%。因此,所设计的远心离轴三反成像系统具有优良的成像质量。

4 结 论

研究了宽视场远心三反系统的光学设计问题,研究表明:将孔径光阑置于次镜,采用子午面内视场离轴的方法,容易实现宽视场、大相对孔径、远心成像。优化设计出 F 数为4、有效焦距720 mm、整个波段全视场接近衍射极限的 10° 视场远心离轴三反系统,次镜为凸球面镜,主镜和三镜为凹二次曲面镜、具有加工和装调容易的特点;系统为主镜和三镜共面的共轴系统,具有体积小、结构规整的特点。这种由球面镜和二次曲面镜组成的共轴结构的离轴三反系统,可以广泛地应用于成像光谱仪、多光谱成像仪等有宽视场、远心要求的先进成像系统。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Wan Yuqing, Tan Kelong, Zhou Riping. Research in Application of Hyperspectral Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2006. 31~41
万余庆, 谭克龙, 周日平. 高光谱遥感应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 31~41
- 3 Roland GEYL. Design and fabrication of a three mirror flat field anastigmat for high resolution earth observation [C]. *SPIE*, 1994, **2210**: 739~746
- 4 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
- 5 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
- 6 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
- 7 Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2009, **17**(11): 2629~2637
郑玉权, 王 慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(11): 2629~2637
- 8 F. Blechinger, D. E. Charlton, R. Davancens *et al.*. High resolution imaging spectrometer "HRIS" optics, focal plane and calibration[C]. *SPIE*, 1993, **1937**: 207~224
- 9 Mark A. F., Jay P., Lushalan B. L. *et al.*. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration[C]. *SPIE*, 2001, **4151**: 40~51
- 10 Thomas Wilson, Curtiss Davis. Naval EarthMap Observer (NEMO) satellite[C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 2~11
- 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 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Soochow: Suzhou 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
- 14 Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011202
朱勇建, 潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011202
- 15 Wu Gaofeng, Chen Qiang, Hou Xi *et al.*. Interferometric testing the vertex radius and conic constant of a conic surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2804~2807
吴高峰, 陈 强, 侯 溪等. 干涉法测量非球面顶点半径和二次常数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2804~2807