

文章编号: 0253-2239(2010)04-1144-04

一种新型无遮拦三反射光学系统研究

郭永祥^{1,2} 李英才¹ 吕保斌^{1,2} 白瑜^{1,2} 孙启兵^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 从系统焦点不引出主镜背后的格里高利系统出发, 偏瞳后在其一次像面处加球面反射场镜来校正畸变等像差, 并采纳了折轴三反射系统的结构优点, 设计出一种新型无遮拦三反射光学系统。分析了该种系统的设计步骤, 设计了一个焦距为 900 mm, 视场为 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$, F 数为 9 的光学系统, 总长为 330 mm, 成像质量接近衍射极限, 具有较小尺寸、较好的杂散光抑制能力等特点。该系统与其他三反射光学系统相比, 最大的优点是非球面反射镜只用了两块, 降低了成本和加工装调难度。

关键词 光学设计; 反射系统; 离轴三反; 折轴三反

中图分类号 TB133 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1144

Design of New-Style Unobscured Three-Mirror Optical System

Guo Yongxiang^{1,2} Li Yingcai¹ Lü Baobin^{1,2} Bai Yu^{1,2} Sun Qibing^{1,2}

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract One new-style unobscured three-mirror optical system was designed, which was based on the Gregorian system. The design step of this special three-mirror optical system was analyzed, and then a system with effective focal length of 900 mm, field of view of $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ and F -number of 9 was designed. Its total length is 330 mm. The image qualities of the example are near diffraction limit. The system has advantages of shorter physical size and better ability in restraining stray lights. Compare with other three-mirror optical systems, the most prominent advantage of this special three-mirror optical system is that it just uses two aspheric mirrors and one spherical, thus reducing the cost and the manufacturing difficulties a lot.

Key words optical design; reflective system; off-axis three-mirror; folded-axis three-mirror

1 引言

空间技术已经成为科学研究的热点。从空间技术的起步开始, 遥感就是它的一个重要应用领域。随着探测器器件的迅速发展以及技术的逐渐成熟与应用, 空间遥感技术也迅速发展起来。在诸多空间遥感器中, 空间相机以其高分辨率、高可靠性的特点得到了广泛的应用。这就决定了作为一种探测及观测手段的空间相机光学系统越来越重要的地位。

遥感光学系统由折射系统、反射系统和折反系统。与传统的折射式光学系统相比, 反射系统具有

以下 3 个优点: 1) 反射系统无色差, 因而也就不存在二级光谱的问题^[1~5]; 2) 反射式光学系统容易实现轻量化设计^[6], 满足空间应用对光学系统重量的要求; 3) 在红外应用中, 透红外的光学材料不多, 特别是大口径的材料很难找到^[7~8], 因而反射系统在航天光学遥感相机中应用越来越广泛^[9]。其中使用较多的有双反射镜系统和三反射镜系统, 最早的双反射镜系统是卡塞格林系统和格里高利系统, 但两者都因轴外像差没有得到较好的校正而使它们的使用受到某些限制^[10]。后来人们对卡塞格林系统做了

收稿日期: 2009-05-31; 收到修改稿日期: 2009-06-24

作者简介: 郭永祥(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计、望远光学和红外光学等方面的研究。

E-mail: gyxllr605@163.com

导师简介: 李英才(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学与观测技术等方面的研究。

E-mail: lyc@opt.ac.cn

相应的改进^[11]，而格里高利系统由于主次镜间距离较长等缺点使得其应用空间较小。

本文将介绍一种新型的三反射系统的设计方法，该系统就是从格里高利系统出发，对其进行一系列的改进而得出。并给出了具体的实例设计，成像质量基本接近衍射极限。

2 设计过程

设计这种新型无遮拦三反射光学系统的主要步骤为

- 1) 根据具体要求先设计初始格里高利型系统；
- 2) 设置适当的偏瞳量，优化设计成偏瞳两镜系统；
- 3) 根据平像场条件，在主镜与次镜间的一次像面处加入合适光焦度的球面反射场镜，优化后得到初步的离轴三反射光学系统，如图 1 所示。

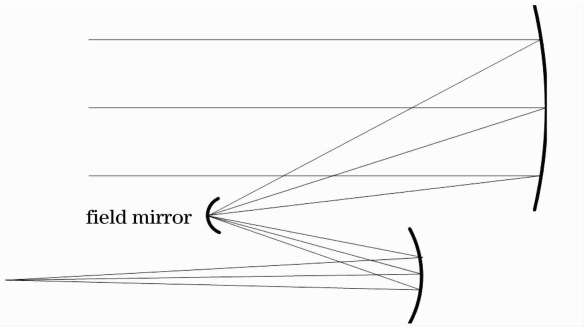


图 1 加球面反射场镜后的三反射光学系统

Fig. 1 Three-mirror optical system adding a folded mirror

4) 由第 3 步得到的三反射光学系统中次镜到像面的距离占用了系统的纵向长度，使得系统尺寸显得不够短小，采用图 2 所示标准折轴三反射光学系统中三镜的处理方法^[12]（并做相应的改进以消除遮拦），对本系统的场镜和次镜设置适当的离轴倾斜量进行优化设计，得到最终的设计方案，如图 3 所示。

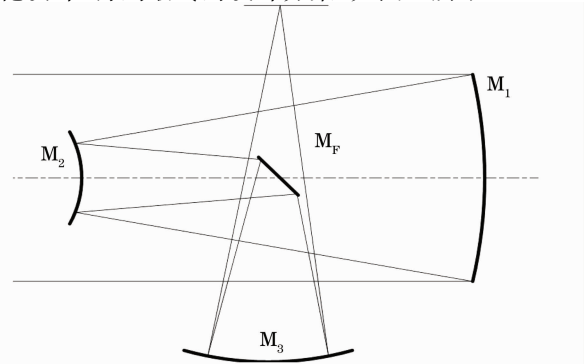


图 2 标准折轴三反射光学系统示意图

Fig. 2 Standard three-mirror optical system with a folded mirror

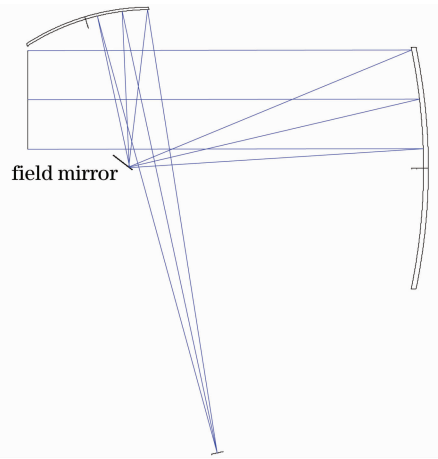


图 3 新型三反射光学系统示意图

Fig. 3 New-style unobscured three-mirror optical system

原则上格里高利系统和卡塞格林系统的设计是一样的，故根据具体要求可以先按卡塞格林系统设计步骤来确定出副镜对主镜的遮拦比 α 和副镜放大率 β ，然后可分以下三种情况来设计不同的格里高利系统：1) 保持副镜遮拦比及放大率相同（即 α, β 分别取相反数，因为格里高利系统与卡塞格林系统的 α 和 β 互为相反数）；2) 保持相同的副镜遮光及焦点引出量；3) 保持副镜放大率和焦点引出量。本文取第一种情况，因为保持副镜遮光及放大率后，系统焦点不能引出到主镜背后，这样使得次镜到像面的距离较小，有益于减小系统的体积。已知系统焦距为 f' ，系统相对口径为 D/f' ，则对应的格里高利系统初始结构各参数可以按如下步骤依次得出^[13,14]：

1) 按卡塞格林系统进行计算，选择主镜的相对口径，一般取 $1/3$ ，也可以取得稍微大些，这样 D/f_1' 已知，因而 $\beta = f'/f_1'$ 也是可求的；

2) 确定合适的焦点伸出量 Δ （不可太大），而后根据

$$l_2 = \frac{-f_1' + \Delta}{\beta - 1}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{l_2}{f_1'}, \quad (2)$$

可求得副镜对主镜的遮拦比 α ，式中 l_2 为次镜的物距；

3) 将 α, β 分别取相反数，然后代入公式

$$\begin{cases} r_1 = 2f_1', \\ r_2 = \frac{\alpha\beta}{\beta+1}r_1, \\ d = f_1'(1-\alpha); \end{cases} \quad (3)$$

就可得出格里高利系统初始结构中的两镜间距 d 以及主、次镜曲率半径 r_1, r_2 。

4) 上机优化。将上述数据输入自动优化程序,并把主次镜的非球面系数设为变量进行优化,就得到初始的格里高利系统。

3 设计实例

根据第 2 节理论给出了具体的设计实例,要求系统焦距为 900 mm,视场角为 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$, F 数为 9,工作波段为可见光波段,CCD 像素尺寸大小为 $10 \mu\text{m}$ 。

根据总体指标要求取主镜相对孔径为 $1/3$,焦点引出量为 60 mm,而后计算并优化得到的初始格里高利系统结构和调制传递函数(MTF)分别如图 4 和图 5 所示。

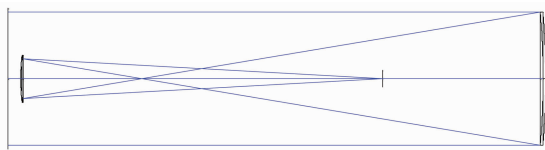


图 4 初始格里高利结构图

Fig. 4 Structure of the initial Gregorian system

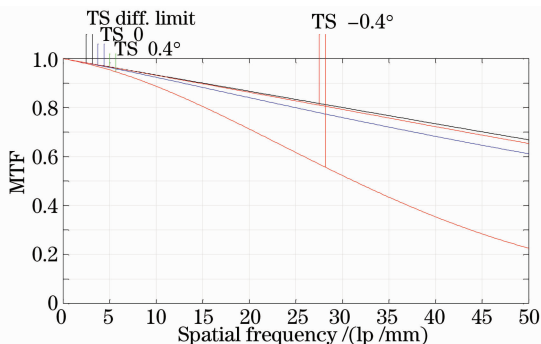


图 5 初始格里高利系统 MTF 曲线

Fig. 5 Modulation transfer function curve of the initial Gregorian system

由初始系统进行偏瞳得到偏瞳双反射系统,依据平像场条件在中间像面处加入球面反射场镜,然后通过设置适当的离轴和倾斜量后,利用美国

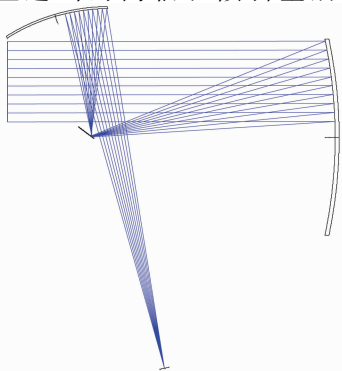


图 6 最终系统结构图

Fig. 6 Layout of the final system

Focus 研制的 Zemax 光学设计软件进行反复优化^[15],最终优化得到的新型无遮拦三反射光学系统总长为 330 mm,系统结构图如图 6 所示,MTF 曲线如图 7 所示,点列图如图 8 所示。由图 7 可以看出系统在 50 lp/mm 处边缘视场的 MTF 大于 0.55,而且由图 8 可知各视场像斑均方根值均小于 $2.6 \mu\text{m}$,像质接近衍射极限。

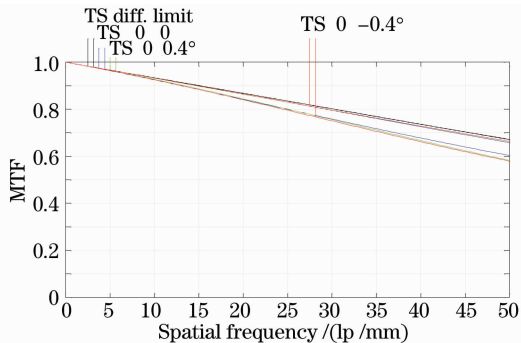


图 7 最终系统 MTF 曲线

Fig. 7 Modulation transfer function curve of the final system

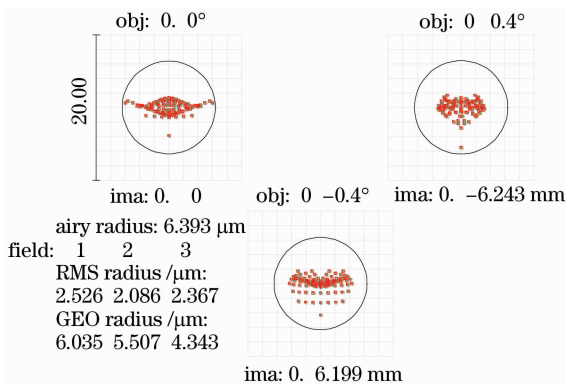


图 8 最终系统点列图

Fig. 8 Spot diagram of the final system

4 结 论

研究了一种新型无遮拦三反射镜光学系统的设计方法,并给出了具体的设计实例,从点列图和 50 lp/mm 处调制传递函数曲线对应的值可以看出成像质量良好,基本接近衍射极限,可以满足系统的性能要求。在原始格里高利系统的基础上通过一系列改进后得到的本系统性能有了很大的改善,成像质量大大提高,该类系统可以满足空间遥感中部分工作的需要。如果要求系统体积更小,可以加平面反射镜来对次镜后的光路进一步折转。本系统与目前其他离轴三反射光学系统相比,最大的优势是只用了两块非球面反射镜,在加工费用和难度上减小了很多。

参 考 文 献

- 1 Chen Haofeng, Li Yingcai, Fan Chao *et al.*. Design of off-axial three-mirror reflective optical system with large field-of-view and long focal length[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S1): 142~145
陈浩锋, 李英才, 樊超等. 宽视场长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(S1): 142~145
- 2 Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 706~709
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(4): 706~709
- 3 Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 278~280
张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 278~280
- 4 Zhang Xiangxiang, Fu Yutian, Han Changpei *et al.*. Design and adjustment of the coaxial three-mirror optical system used in field bias[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(12): 118~123
张祥翔, 傅雨田, 韩昌佩等. 一种离轴使用的同轴三反射系统的设计和装调[J]. *光电工程*, 2007, **34**(12): 118~123
- 5 Liu Lin, Xue Mingqiu, Shen Weiming. Approach to increase the image performance of the uncoaxial three-mirror reflective system[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 181~184
刘琳, 薛鸣球, 沈为民. 提高离轴三反射镜系统成像质量的途径[J]. *光学技术*, 2002, **28**(2): 181~184
- 6 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huiling *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 Shi Lili, Zuo Baojun, Zhen Guoxian *et al.*. Optical design of space remote sensing camera[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **28**(6): 724~727
史黎丽, 左保军, 郑国宪等. 航空遥感相机光学系统设计[J]. *应用光学*, 2007, **28**(6): 724~727
- 8 Liu Hui, Li Xinglong, Pei Yuntian *et al.*. Design of off-axis three-mirror optical system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12): 59~63
刘辉, 李兴隆, 裴云天等. 离轴三反射式光学系统的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(12): 59~63
- 9 Zheng Zhenrong, Sun Xutao, Gu Peifu *et al.*. Design of objective lens with reflective spherical fresnel zone plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1483~1487
郑臻荣, 孙旭涛, 顾培夫等. 应用反射型球面菲涅耳波带片的成像物镜设计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1483~1487
- 10 Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei *et al.*. Optical design of a flat field unobstructed two-mirror system with wide field of view [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1351~1354
刘剑锋, 龙夫年, 张伟等. 平像场无遮拦大视场两镜系统光学设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1351~1354
- 11 Pan Junhua. New pan-Cassegrain telescope system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(5): 438~441
潘君骅. 一个新的泛卡塞格林望远镜系统[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(5): 438~441
- 12 Liu Xiping, Yang Jianfeng Three-mirror system with a folded mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(1): 73~76
刘新平, 杨建峰. 折轴三反射镜成像光学系统结构研究[J]. *光子学报*, 1998, **27**(1): 73~76
- 13 Pan Junhua, Li Xinnan. Design of a tilted two-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 867~871
潘君骅, 李新南. 偏轴两镜系统的设计[J]. *光学学报*, 1994, **14**(8): 867~871
- 14 Pan Junhua. Fabrication and Testing of Optical Asphere[M]. Beijing: Science Press, 1994. 19~37
潘君骅. 光学非球面的加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 19~37
- 15 Liang Minyong, Liao Ningfang, Feng Jie *et al.*. Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1359~1363
梁敏勇, 廖宁放, 冯洁等. 三反射式柱面光学系统设计及优化[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1359~1363