

新型离轴三反射光学系统设计

郭永祥, 李永强, 廖志波, 王静怡

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘要: 对比反射系统中双反射系统和三反射系统各自的优缺点, 提出一种新型的无遮拦两镜三反射光学系统。与现在常用的离轴三反射光学系统相比, 该系统最大的优势是只用了两片非球面反射镜, 减小了加工成本, 降低了加工难度。分析了该种系统的具体设计步骤, 设计了一个焦距为 500mm、视场为 $1 \times 0.1^\circ$ 、相对口径为 $F/5$ 、系统筒长为 125mm 的光学系统, 像元尺寸选取 10。由系统 MTF 曲线和点列图可以看出, 成像质量接近衍射极限, 可以为目前航天相机光学系统设计提供参考。

关键词: 光学设计; 反射系统; 三反射; 离轴三反

中图分类号: TB133 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)02-0546-05

Novel design of off-axis three reflective optical system

Guo Yongxiang, Li Yongqiang, Liao Zhibo, Wang Jingyi

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China)

Abstract: By comparing the advantages and disadvantages of two-mirror and three-mirror reflective systems, a novel unobscured two-mirror three reflective optical system was presented. In contrast with other off-axe three- reflective optical systems, the greatest advantage of this system was that it only utilized two aspherical reflectors, which saved the cost, reduced the difficulty of process. The design steps of this system were analyzed in detail. And a optical system was designed with its focus length, field of view, relative aperture, and system length are 500 mm, $1 \times 0.1^\circ$, $F/5$, 125 mm respectively. Pixel size of the system was 10. Its MTF curve and spot diagram show the imaging quality approximates its diffraction limit. This approach can provide reference for the optical system design of present aerospace cameras.

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

0 引言

航天光学系统置于卫星之上,平台高度一般在80 km以上,随着科学的发展对空间分辨率的应用需求越来越高。如果摄影高度一定,光学系统的角分辨率与其入瞳口径成反比。如果同时光学系统焦距一定时,相对口径越大,其角分辨率越高。系统的体积和质量是航天光学系统中非常重要的两个指标,因为它们直接关系着航天器的发射难度和成本。

反射系统以其独特的优势在遥感领域得到了越来越广泛的应用^[1]。反射系统本身不存在色差,因而也就不存在二级光谱的问题^[2-5];其结构简单、紧凑,相机体积小,光学系统孔径可以做得较大,比较容易实现轻量化^[6];反射式光学系统对材料要求相对较低,设计型式非常灵活。目前常用的反射式光学系统包括两反射式光学系统和三反射镜系统两大类。其中两反射式望远光学系统由主次镜构成,优化变量比较少,如若要同时校正多种像差则需使用折射元件。人们又引入了三反射镜系统,三反射镜系统又包括共轴三反射式和离轴三反射式两类,共轴三反射镜系统具有三个半径、两个间隔和三个二次非球面系数共8个参数,可以同时满足焦距、球差、彗差、像散及场曲的要求。但是共轴反射式光学系统本身存在中心遮拦,降低了进入光学系统的能量,进而导致该类系统的分辨率有所降低。离轴三反射式光学系统无中心遮拦,因而离轴三反射系统更具有应用前景。

目前常见的离轴三反射光学系统均由主镜、次镜和三镜组成,三面反射镜的参数互不相同,在加工的时候需要先加工三块不同的母镜,然后从中挖取所需的三块离轴反射镜。文中提出了一种特殊的离轴三反射光学系统,其主镜和三镜共用一面反射镜,在加工时只需加工两块母镜然后进行挖取,减小了加工成本和难度;由于主镜和三镜共用一块反射镜,该系统装调要比普通离轴三反射系统装调难度低,因为少了一块反射镜的装调。反射镜基底材料可以使用热膨胀系数非常小的SiC材料,该材料制备工艺不同会导致密度不同,最大密度约为 $3.20 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,反射镜径厚比取7,按照该系统反射镜尺寸可得光学系统总质量约为0.606 kg。文

中对该类离轴三反射系统的设计步骤进行了分析和总结,并在此基础上给出了一个设计实例,成像质量基本接近衍射极限。

1 设计过程

1.1 初始结构分析

该类光学系统所使用的初始结构是共轴两镜三反射式光学系统,整个光路结构及其各项参数定义如图1所示。图中所示的长度值均带符号(正负),文中规定沿着光轴方向从左向右为正,反之则为负。

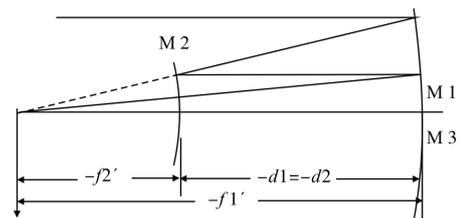


图1 系统初始结构示意图

Fig.1 Scheme of the initial structure

该类光学系统由两面反射镜构成,入射光线在主镜发生两次反射,即主镜和三镜重合,该系统的入射光束的前两次反射相当于光束直接经过一个无焦系统(即两面反射镜的焦点重合)。整个光学系统结构参量包含两个曲率半径参量(两面反射镜各自的曲率半径 r_1 和 r_2)、一个镜间距($d_1=-d_2$)以及两个二次非球面系数($k_1=-e_1^2, k_2=-e_2^2$)。

首先,根据三反射式系统的平像场条件:

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = 0, r_1 = r_3$$

可知:

$$r_1 = r_3 = 2r_2 \quad (1)$$

其次,该系统初始结构中两面反射镜的焦点重合,则根据球面反射镜曲率半径与其焦距的关系以及图1中所示系统各参量几何关系可知:

$$r_1 = 2r_2 = f' \quad (2)$$

$$d_1 = -d_2 = \frac{f'}{4} \quad (3)$$

系统焦距已知,最后可以根据光学系统焦距计算出其他各初始结构参数,将其输入到光学设计软件中,把两面反射镜的二次非球面系数设为变量,进行反复优化,便可以得到所需的共轴系统初始结构。

1.2 设计步骤

文中所述新型离轴三反射式光学系统的整个设计过程可以分为以下三步。

(1) 根据具体设计输入,由公式(1)~(3)计算初始结构的各项参数。

(2) 把得到的各项参数输入光学设计软件,将两面反射镜的二次非球面系数设为变量进行反复多次优化,进而得到初始的两镜三反射式光学系统。

(3) 根据该初始系统的次镜口径和入瞳口径确定所需的偏瞳量,通过光阑离轴和视场离轴相结合的方式,对系统反复进行优化设计,最终得到无遮拦的两镜三反射式系统结构。系统结构示意图如图 2 所示。

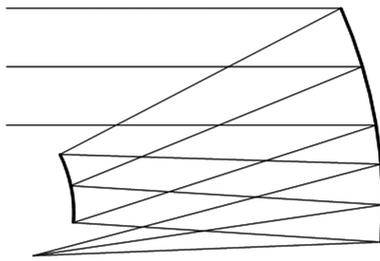


图 2 最终结构示意图

Fig.2 Scheme of final structure

在上述第三步中,为了进一步改善成像质量,在优化过程中可以把两面反射镜的曲率半径及两镜的间隔作为变量进行适当调整。在整个优化设计过程中,难点在于系统的优化变量少,必要时可以适当使用高次非球面系数来进一步提高像质。

2 设计实例

依据前面介绍的理论,给出了一个设计实例,该实例中要求系统设计焦距为 500 mm,视场角为 $1 \times 0.1^\circ$,工作波段为 $0.45 \sim 0.9 \mu\text{m}$,CCD 像元尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。

系统相对口径的选取需要考虑两个约束因素:一方面,受衍射斑大小和入射光能量的限制,相对口径不能太小;另一方面,受光学系统设计难度和系统质量尺寸要求的限制,相对口径不能太大。综合考虑上述两个方面,最终确定系统相对口径取 1/5。由 CCD 像元尺寸可以得出系统 Nyquist 频率 $f_N = 1/2a = 50 \text{ lp/mm}$ 。

根据“初始结构分析”部分中的公式,计算得到初始结构的两个曲率半径和一个间隔。而后输入光

学设计软件中,将两面反射镜的二次非球面系数设为变量进行优化进而得到初始两镜三反射式光学系统,初始结构参数见表 1,系统结构、调制传递函数 MTF、点列图以及畸变曲线分别如图 3~图 6 所示,各视场点列图弥散斑最大直径见表 2。

表 1 初始结构参数

Tab.1 Original structural parameters

	Radius /mm	Thickness /mm	Conic
Primary mirror (Three mirror)	-500.0	-125.0	-1.598 9
Second mirror	-250.0	125.0	-2.262 8

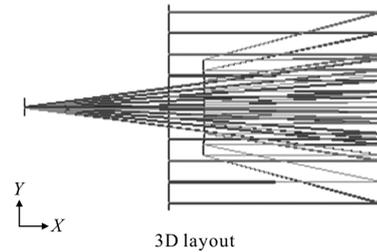


图 3 系统初始结构图

Fig.3 Initial structure

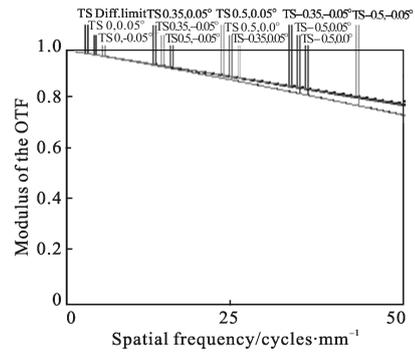


图 4 系统初始结构调制传递函数

Fig.4 MTF curve of initial system

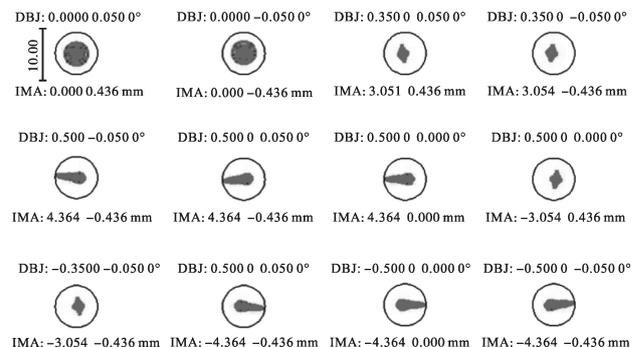


图 5 系统初始结构点列图

Fig.5 Spot diagram of initial system

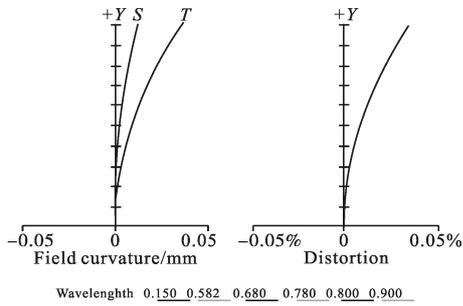


图 6 系统初始结构畸变曲线

Fig.6 Distortion curve of the initial system

表 2 点列图最大直径

Tab.2 Max diameter of spot diagram

Field	Max GEO diameter/ μm	Field	Max GEO diameter/ μm
1	3.35	7	5.754
2	3.35	8	2.268
3	2.268	9	2.268
4	2.268	10	5.816
5	5.816	11	5.754
6	5.816	12	5.816

由图 3~图 6 及表 2 可以看出：初始结构成像质量接近衍射极限，点列图的艾里斑直径为 $6.1 \mu\text{m}$ ，而各视场弥散斑直径最大值为 $5.82 \mu\text{m}$ ，均小于艾里斑直径，且远小于一个像元尺寸。但是存在的问题是次镜对主镜的遮拦比较大，会严重影响进入系统的能量。鉴于该缺陷依照“设计步骤”中的方法对光瞳设置 190 mm 的偏瞳量，对系统进行长期反复优化，对次镜使用高次非球面系数(使用前三项)，最终得到的系统结构总长为 125 mm (约为系统焦距长的 0.25)，最终优化后的系统参数见表 3，系统结构如图 7 所示，调制传递函数曲线如图 8 所示，系统各视场点列图如图 9 所示，各视场点列图弥散斑最大直径见表 4。由于离轴反射式系统畸变分布在 X 视场方向对称，在 Y 方向分布不对称，因此分别给出 $+X$ 、 $+Y$ 、 $-Y$ 视场方向畸变分布曲线图，分别如图 10~12 所示。

表 3 最终结构参数

Tab.3 Final structural parameters

	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
Primary mirror	-500.0	-125.0	-1.761 3
Second mirror	-250.0	125.0	-2.745 6

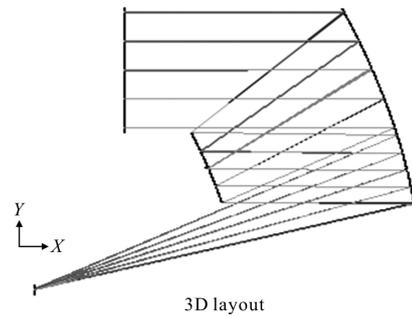


图 7 最终系统结构图

Fig.7 Layout of final system

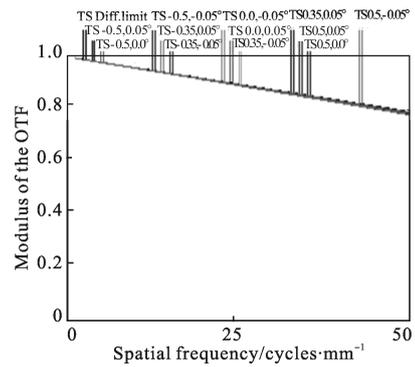


图 8 最终系统调制传递函数曲线

Fig.8 MTF curve of the final system

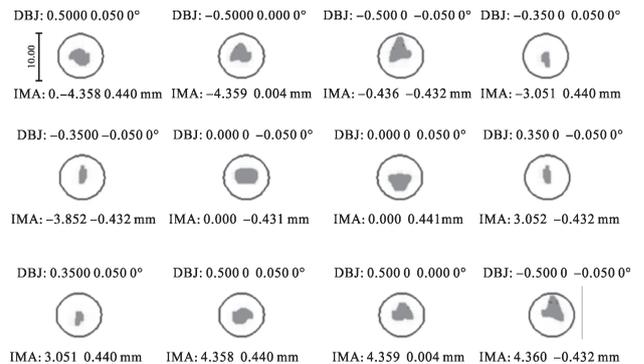


图 9 最终系统点列图

Fig.9 Spot diagram of final system

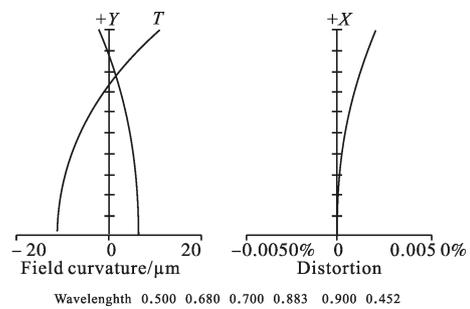


图 10 最终系统 +X 畸变曲线

Fig.10 +X distortion curve of final system

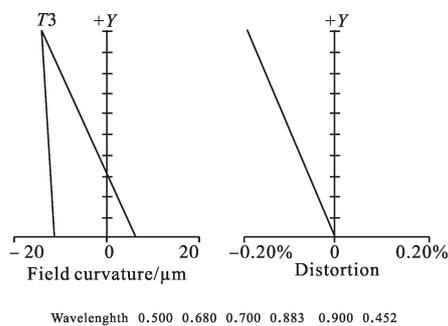


图 11 最终系统+Y 畸变曲线

Fig.11 +Y distortion curve of final system

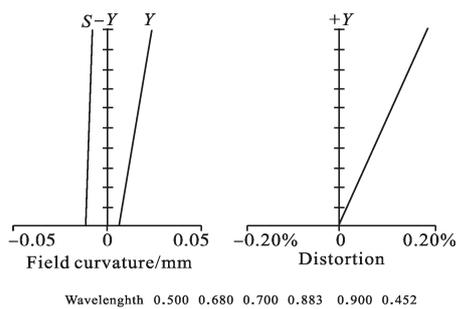


图 12 最终系统-Y 畸变曲线

Fig.12 -Y distortion curve of final system

表 4 点列图最大直径

Tab.4 Max diameter of spot diagram

Field	Max GEO diameter/ μm	Field	Max GEO diameter/ μm
1	2.546	7	3.028
2	2.782	8	2.562
3	4.502	9	2.358
4	2.358	10	2.546
5	2.562	11	2.782
6	2.67	12	4.502

由图 7 可知该系统边缘视场在 50 lp/mm 处的调制传递函数值大于 0.75, 而且根据图 8 和表 4 的具体数值可知, 该系统各视场的像斑均方根值^[7-8]都小于 1, 系统艾里斑直径为 5.85 μm , 各视场弥散斑最大直径为 4.5 μm , 均小于艾里斑, 远小于一个像元的尺寸, 由图 10~12 可知, 最终系统各方向畸变最大值小于 2/1 000, 系统成像质量接近衍射极限。

3 结论

研究和分析了一种新型无遮拦两镜三反射式光

学系统的具体设计方法, 依据该设计方法对一个具体事例进行了设计, 由奈奎斯特频率处调制传递函数值和点列图可以得出该系统具有良好的成像质量, 成像质量基本接近系统衍射极限, 能够满足设计指标要求。该类新型离轴三反射式光学系统可以满足空间遥感中部分领域的需求。与现在常用的离轴三反射光学系统相比, 该类新型离轴三反射光学系统最大的优势是只用了两面非球面反射镜, 减小了加工成本, 降低了加工难度; 其次, 该系统在整个设计过程中未使用镜面倾斜量 (即两面反射镜共轴), 大大降低了系统装调的难度。该类新型无遮拦两镜三反射光学系统在航天相机光学系统中的优势会越来越明显。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [4] Liu Lin, Xue Mingqiu, Shen Weimin. Approach to increase the image performance of the uncoaxial three-mirror reflective system[J]. *Optical Technique*, 2002, 28(2): 181-184. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [7] Li Huan, Xiang Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope systems of imaging spectrometers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 500-504. (in Chinese)
- [8] Huang Lei, Hu Wenwen, Yang Zhiwen. Optical design of wide bands and long focal length collimating lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 125-127. (in Chinese)