

# 大视场离轴四反射镜光学系统设计

刘 军<sup>1,2</sup> 刘伟奇<sup>1</sup> 康玉思<sup>1</sup> 吕 博<sup>1,2</sup> 冯 睿<sup>1</sup> 柳 华<sup>1</sup> 魏忠伦<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 从三级像差理论出发,推导出光阑设于次镜镜框的共轴四反射镜光学系统的单色像差系数的表达式,并给出了四反射镜光学系统的基本设计流程图。在此基础上,对光学系统进行视场离轴,设计出了视场角为  $20^\circ \times 0.6^\circ$ , 焦距为 1343 mm 的视场离轴四反射镜光学系统。该光学系统无中心遮拦,结构紧凑,成像质量接近衍射极限,适用于空间遥感。

**关键词** 光学设计;四反射镜光学系统;大视场;空间光学

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1022002

## Optical Design of Off-Axis Four-Mirror Optical System with Wide Field of View

Liu Jun<sup>1,2</sup> Liu Weiqi<sup>1</sup> Kang Yusi<sup>1</sup> Lü Bo<sup>1,2</sup> Feng Rui<sup>1</sup> Liu Hua<sup>1</sup> Wei Zhonglun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Based on the third order aberration expression, basic design process of four-mirror optical system with aperture stop on secondary mirror are given through aberration analysis. Then a system with effective focal length of 1343 mm and field of view of  $20^\circ \times 0.6^\circ$  is designed by making the field of  $y$ -direction off axis. The structure of this system is unobstructed and tight, with imaging qualities approaching diffraction limit. The designed system is suit for the field of space optical remote sensing.

**Key words** optical design; four-mirror optical system; wide field of view; space optics

**OCIS codes** 220.1010; 220.4830; 280.4788

## 1 引 言

空间遥感是指从大气以外的空间对地进行观测,遥感卫星的轨道高度通常在 80 km 以上。当遥感卫星的轨道高度以及遥感光学系统的 CCD 像素尺寸确定后,其探测范围与遥感光学系统视场角的正切成正比,地面像素分辨率与遥感光学系统的焦距成正比。因此,在保证足够分辨率的同时增大航天遥感光学系统的视场角可以获得更加丰富的地面信息。

反射式光学系统无色差、光路折叠的特点使得

其在高像质、小体积、轻量化的设计中具有明显的优势,越来越多地被应用于空间分辨率为米级和亚米级的航天遥感光学系统<sup>[1-4]</sup>。三反射镜光学系统在航天遥感领域已经取得了广泛的应用,国内外学者对其进行了深入研究<sup>[3,5-9]</sup>。在大视场空间光学系统中,由于三反射镜光学系统的设计自由度不足以校正所有像差,并且通常由于畸变很难校正,系统成像变形较大,影响了其应用范围。在已经取得应用以及文献发表的设计中三反射镜的视场角通常不超过  $15^\circ$ 。四反射镜光学系统是在三反射镜光学系统

收稿日期: 2013-01-29; 收到修改稿日期: 2013-04-22

作者简介: 刘 军(1987—),男,硕士研究生,主要从事空间光学系统设计方面的研究。E-mail: 382195667@qq.com

导师简介: 刘伟奇(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间成像与瞄准技术、图像显示技术以及激光显示技术等方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

的基础上再加一片反射镜,系统的自由度更大,可以在保证四片反射镜共轴紧凑排布的前提下实现大视场的设计<sup>[10-12]</sup>。美国国家航空航天局(NASA)于2000年发射的EO-1AL1卫星采用离轴四反射镜光学系统,焦距长为940 mm,入瞳直径为125 mm,视场角为 $15^\circ \times 1.256^\circ$ 。本文从共轴四反射镜光学系统结构的三级像差理论出发,采用视场离轴的方法,设计了一个视场角为 $20^\circ \times 0.6^\circ$ 的离轴四反射镜光学系统。

## 2 设计原理

离轴四反射镜光学系统是在共轴四反射镜光学系统的基础上进行离轴优化得到的。因此,首先从三级像差理论出发求解共轴四反射镜光学系统的初始结构参数。

单色像差共有5种:球差、彗差、像散、场曲和畸变。对于反射式光学系统,其三级像差理论给出单色像差系数分别为<sup>[13-14]</sup>  $S_I$ 、 $S_{II}$ 、 $S_{III}$ 、 $S_{IV}$ 、 $S_V$ 。

$$\begin{cases} S_I = \sum hP + \sum h^4 K, \\ S_{II} = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 yK, \\ S_{III} = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \phi + \sum h^2 y^2 K, \\ S_{IV} = \sum \frac{\Pi}{h}, \\ S_V = \sum \frac{y^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{y}{h} \left( 3\phi + \frac{\Pi}{h} \right) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} + \sum h y^3 K, \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P$ 、 $W$ 、 $\Pi$ 、 $\phi$ 、 $K$ 、 $J$  分别表示为

$$\begin{cases} P = \left( \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \frac{u}{n}, \\ W = \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{u}{n}, \\ \Pi = \frac{\Delta(um)}{m'}, \\ \phi = \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n}, \\ K = -\frac{e^2}{r^3} \Delta n, \\ J = 1. \end{cases} \quad (2)$$

式中  $h$  为第一近轴光线在各面上的投射高度,  $y$  为第二近轴光线在各镜面上的投射高度,  $n$  为各面后的折射率,  $u$  为各面入射光线与光轴的夹角,  $e^2$  为各面的二次非球面系数,  $r$  为各面顶点处的曲率半径。由(1)式和(2)式可知,只要能确定参量  $y$ 、 $h$ 、 $n$ 、 $u$ 、 $e^2$ 、 $r$  就可以得出反射式光学系统的像差系数。因此从共轴四反射镜光学系统的基本结构出发来推导光阑设置在次镜镜框时镜片的面型参数、系统结构参数与单色像差系数之间的关系。

共轴四反射镜光学系统的光路结构和参数定义如图1所示,图中长度值均为带符号的数据,其符号约定为自左向右为正,反之为负。图1中,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  和  $M_4$  分别为主镜、次镜、三镜和四镜,孔径光阑

位于次镜的镜框;  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  和  $d_4$  ( $l'_4$ ) 分别为次镜到主镜的距离,三镜到次镜的距离,四镜到三镜的距离,四镜到像面的距离;  $l_2$  和  $l'_2$ 、 $l_3$  和  $l'_3$ 、 $l_4$  和  $l'_4$  分别为次镜、三镜、四镜的物距和像距;  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  和  $h_4$  分别为第一近轴光线在主镜、次镜、三镜和四镜的投射高度;  $f_1$  为主镜的焦距,  $F$  为四反射镜光学系统的焦点。设主镜、次镜、三镜和四镜顶点处的曲率半径分别为  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  和  $r_4$ ; 二次非球面系数分别为  $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 、 $e_3^2$  和  $e_4^2$ 。

为了将三级像差系数与四反射镜光学系统的外形结构参数直观的联系起来,引入遮拦比  $\alpha_i$  以及每片镜子的放大率  $\beta_i$ ,  $\alpha_i$  反应了镜片  $M_{i+1}$  对前一镜片  $M_i$  的挡光程度,  $\beta_i$  反应了镜片  $M_{i+1}$  的放大能力,则

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1}, \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2}, \\ \alpha_3 = \frac{l_4}{l'_3} \approx \frac{h_4}{h_3}, \\ \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u_1}, \\ \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} = \frac{u_3}{u_2}, \\ \beta_3 = \frac{l'_4}{l_4} = \frac{u_4}{u_3}, \end{cases} \quad (3)$$

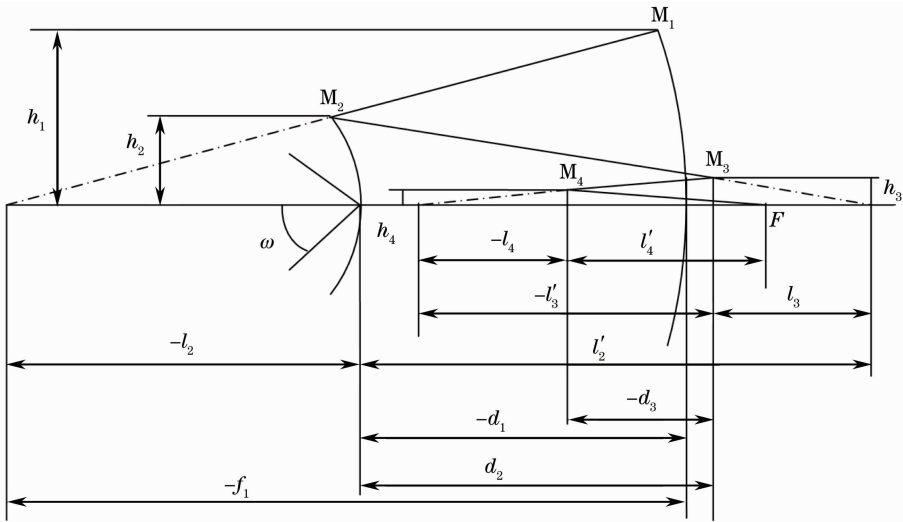


图 1 共轴四反射镜光学系统初始结构

Fig. 1 Initial configuration of coaxial four-mirror optical system

以下以  $\alpha_i, \beta_i$  为中间参量来联系三级像差系数和四反射镜光学系统的结构参数。首先对系统进行归一化,令  $h_1=1$ ,系统焦距  $f'=1$  以及第二近轴光线在孔径光阑处的入射角  $\omega=-1$ ,对于四反射镜光学系统:

$$\begin{cases} n_1 = n_3 = n'_2 = n'_4 = 1, \\ n_2 = n_4 = n'_1 = n'_3 = -1. \end{cases} \quad (4)$$

然后对第一近轴光线和第二近轴光线进行追迹。第一近轴光线的初始条件为  $l_1 = \infty, u_1 = 0$ ,且  $u_i = u'_{i-1}$ 。对第一近轴光线进行追迹得出:

$$\begin{cases} u_1 = 0, \\ u_2 = \beta_3 \beta_2 \beta_1, \\ u'_2 = \beta_3 \beta_2, \\ u_4 = \beta_3, \\ u'_1 = \beta_3 \beta_2 \beta_1, \\ u'_2 = \beta_3 \beta_2, \\ u'_3 = \beta_3, \\ u'_4 = 1, \\ h_1 = 1, \\ h_2 = \alpha_1, \\ h_3 = \alpha_1 \alpha_2, \\ h_4 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} r_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, \\ r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1 + \beta_1) \beta_2 \beta_3}, \\ r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(1 + \beta_2) \beta_3}, \\ r_4 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3}{1 + \beta_3}. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} d_1 = \frac{1 - \alpha_1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, \\ d_2 = \frac{\alpha_1 (1 - \alpha_2)}{\beta_2 \beta_3}, \\ d_3 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1 - \alpha_3)}{\beta_3}. \end{cases} \quad (7)$$

第二近轴光线又被称为主光线,由于光阑设置在次镜的镜框上,对第二近轴光线进行追迹可以得出:

$$\begin{cases} y_1 = \frac{\alpha_1 - 1}{\alpha_1 \beta_1 \beta_2 \beta_3}, \\ y_2 = 0, \\ y_3 = \frac{\alpha_2 - 1}{\beta_2 \beta_3}, \\ y_4 = \frac{(\alpha_3 - 1) \beta_2 + \alpha_2 - 1}{\beta_2 \beta_3}. \end{cases} \quad (8)$$

至此,第一和第二近轴光线在四反射镜光学系统各镜面的投射高度  $h_i, y_i$  以及  $u_i, u'_i$  都由中间变量  $\alpha_i, \beta_i$  表示,将(4)式、(5)式和(8)式代入到(2)式和(1)式就可以得到只含  $\alpha_i, \beta_i$  和二次非球面系数的三级像差系数表达式,这个过程使用 Matlab 软件编程实现。

$$\begin{cases} S_I = S_I(\alpha_i, \beta_i, e_i^2), \\ S_{II} = S_{II}(\alpha_i, \beta_i, e_i^2), \\ S_{III} = S_{III}(\alpha_i, \beta_i, e_i^2), \\ S_{IV} = S_{IV}(\alpha_i, \beta_i, e_i^2), \\ S_V = S_V(\alpha_i, \beta_i, e_i^2). \end{cases} \quad (9)$$

从 Matlab 软件的符号计算结果中发现,  $S_I, S_{II}, S_{III}$  和  $S_V$  都是关于  $\alpha_i, \beta_i$  和  $e_i^2$  的比较繁琐的函数,而  $S_{IV}$  通过化简后变得简单,令  $S_{IV} = 0$  得

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} = 0. \quad (10)$$

此即为平场条件。

通常,在进行光学系统设计时,其体积和形状是大体确定的,加上平场条件就可以初步确定  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ , 在  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  确定的情况下,共轴四反射镜光学系统的三级像差系数只是  $e_i^2$  的函数,通过控制  $S_I$ 、 $S_{II}$ 、 $S_{III}$  和  $S_V$  的值就可以求解出  $e_i^2$  的值。至此,整个光学系统的结构参数和面型参数的初始值通过控制三级像差

系数完全确定,即初始结构确定。通过进一步优化可以得到符合设计要求的共轴四反射镜光学系统。

为了避免中心遮拦,获取大视场,需在共轴四反射镜光学系统的基础上进行适量的离轴。通常光阑设置在主镜镜框时有利于光学系统获得大口径;光阑设置在次镜镜框便于视场离轴,能够获得大的视场。整个设计流程如图 2 所示。

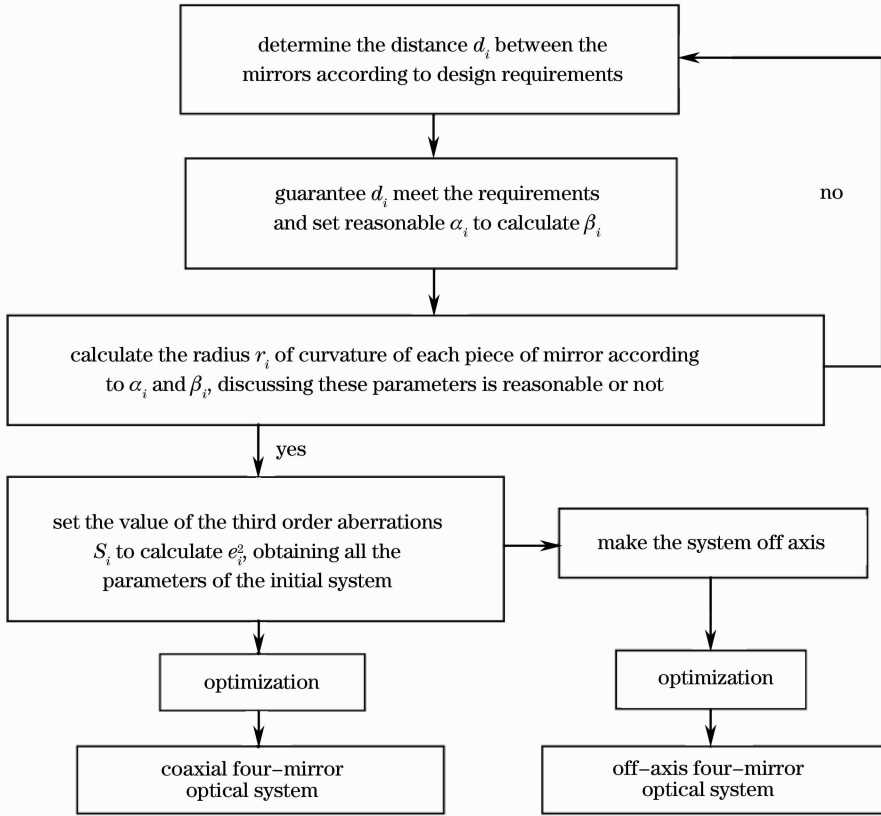


图 2 设计流程图

Fig. 2 Flow chart of design process

### 3 设计实例与性能分析

根据前文的公式推导和设计流程,在一个共轴四反射镜光学系统的基础上设计一个大视场的视场离轴的四反射镜光学系统。其焦距  $f' = 1343$  mm, 入瞳直径为 180 mm, 视场角(矩形视场)为  $20^\circ \times 0.6^\circ$ , 工作波段为  $\lambda$  为  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ , 探测器采用像元尺寸为  $10 \mu\text{m}$  的时间延迟积分电荷耦合元件(TDI-CCD)。

根据上述设计方法按照图 2 所示的流程,首先确定外形尺寸,设定镜片之间的距离为 420 mm 并允许有稍微的调整;设遮拦比  $\alpha_1 = 0.6$ , 通常情况下为了获

得长焦距次镜为凸反射镜,因此次镜遮拦比可以大于 1, 设  $\alpha_2 = 1.2$ ,  $\alpha_3 = 0.4$ ; 算得各反射镜面的曲率半径分别为  $r_1 = -2315.3$  mm,  $r_2 = -1066.4$  mm,  $r_3 = -1050.8$  mm,  $r_4 = -2243$  mm; 非球面系数  $e_1^2 = -3.42$ ,  $e_2^2 = -1.93$ ,  $e_3^2 = 0.51$ ,  $e_4^2 = -24.4$ ,  $e_4^2$  比较大, 为了降低加工难度在后续的优化过程中尽量使  $e_4^2$  减小; 确定初始结构以后对其进行视场离轴, 为了平衡大视场产生的像差, 三镜和四镜在优化过程中引入高阶非球面系数。优化后得出其结构和面型参数如表 1 所示。

表 1 结构参数

Table 1 Structural parameters

Mirror	Radius /mm	Thickness /mm	Conic /mm	Second order coefficient	Sixth order coefficient
Primary	-2263.496	-418.645	-5.407		
Secondary	-1053.517	420.000	-3.661		
Third	-1060.361	-419.000	-0.578	$4.692 \times 10^{-5}$	$1.935 \times 10^{-16}$
Fourth	-802.615	470.000	-0.943	$4.544 \times 10^{-4}$	$6.072 \times 10^{-16}$

由表 1 可知,主镜和次镜均为双曲面,三镜和四镜为只含二阶和六阶系数的偶次非球面;系统的最大间隔约为系统焦距的 1/3,结构紧凑。在保证镜片之间距离约为 420 mm 并且 4 片反射镜的旋转对称轴一致的基础上,为了获得大视场,避免中心遮挡,将光阑设置在次镜上。采用视场离轴设计,y 子午方向的视场范围为  $8^{\circ} \sim 8.6^{\circ}$ ,弧矢方向的视场范围为  $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。其最终结构的侧视图如图 3 所示。

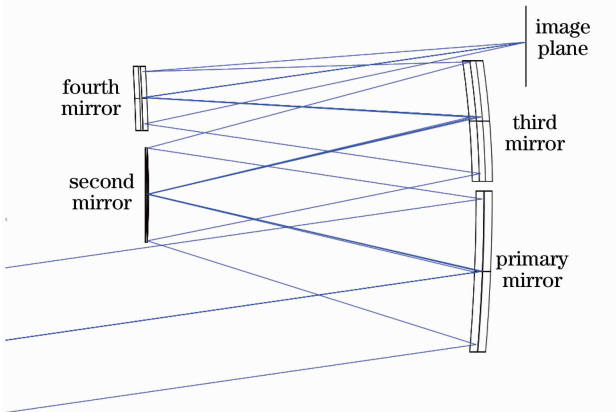


图 3 离轴四反射镜光学系统结构

Fig. 3 Optical structure of off-axis four-mirror optical system

主镜和三镜为长条状凹反射镜,次镜为圆形凸反射镜,四镜为长条状凸反射镜。选取通光口径较小三镜和四镜作为偶次非球面来平衡大视场产生的像差。通光口径较大的主镜采用一般的双曲面,有效降低了镜片的加工难度;大口径凸面镜的检测是光学检测的难点,设计实例中通光口径最小的次镜和四镜为凸面镜使系统能获取较长焦距,同时降低了检测的难度;四片反射镜具有相同的旋转对称轴,有效减少了装调的自由度。

此光学系统具有良好的像差特性,其优化后的调制传递函数曲线图接近衍射极限,如图 4 所示。由图 4、图 5、图 6 可知:在奈奎斯特频率范围内,光学系统的调制传递函数曲线接近衍射极限;在奈奎斯特频率 50 lp/mm 处各视场的调制传递函数值均大于 0.6;畸变小于 0.1%,场曲小于 0.1 mm,像散小于 0.05 mm;均方根(RMS)半径小于  $10 \mu\text{m}$ 。由

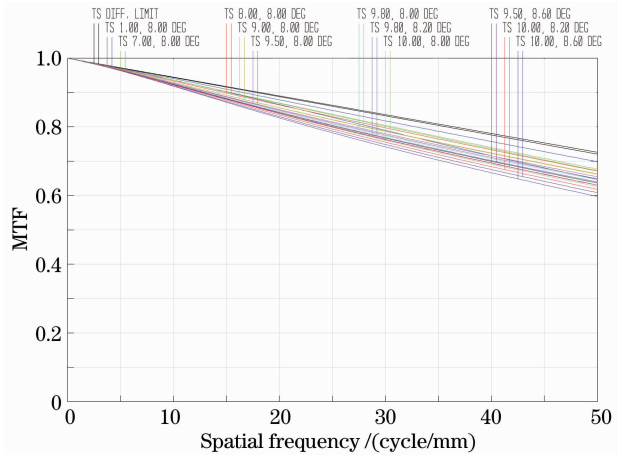


图 4 调制传递函数曲线

Fig. 4 Modulation transfer function curves

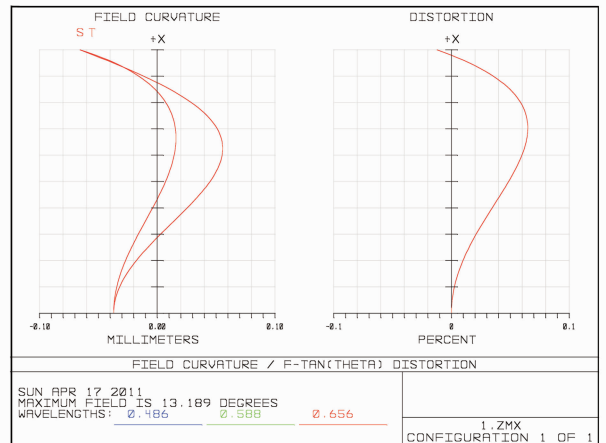


图 5 场曲和畸变曲线

Fig. 5 Curves of field curvature and distortion

图 7 可知,弥散圆 85% 以上的能量集中在半径为  $10 \mu\text{m}$  的范围内,适用于 TDI-CCD。

地面像元分辨率  $s$  与探测器像元  $\delta$  之间的关系为

$$s = \frac{\delta H}{f'}, \quad (11)$$

式中  $H$  为卫星轨道高度。

地面覆盖宽度  $Q$  与视场角之间的关系为

$$Q = 2H \tan \omega, \quad (12)$$

式中  $\omega$  为半视场角。

由(11)式、(12)式可知,当卫星轨道高度为

200 km时,该光学系统的地面像元分辨率为1.5 m,覆盖宽度为70 km。

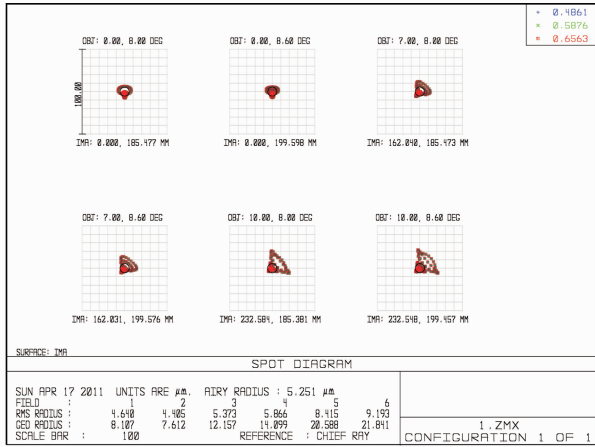


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

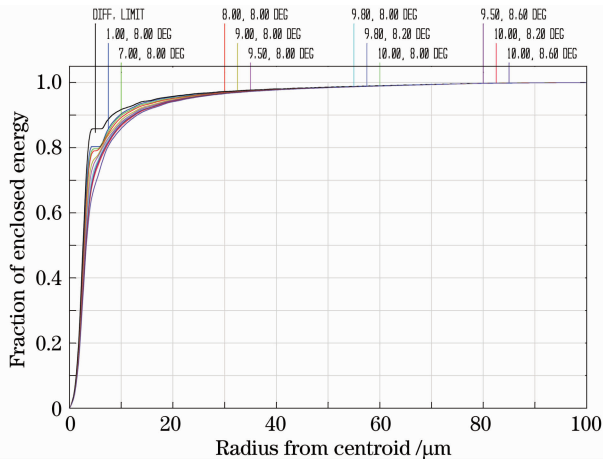


图 7 衍射能量分布

Fig. 7 Distribution diffraction of energy

## 4 结 论

从三级像差理论出发,给出了四反射镜光学系统的设计方法,并设计了一个弧矢方向视场角为 $20^\circ$ ,子午方向视场角为 $0.6^\circ$ 的条形大视场四反射镜光学系统。该光学系统在保证四片反射镜旋转对称轴一致的前提下,将光阑设置在次镜上,采用视场离轴的设计方法来获得大视场和避免中心遮拦。其像差特性优良,适用于线阵的 TDI-CCD 接收器,调制传递函数接近衍射极限,各视场传递函数值在截止频率 50 lp/mm 处达到或超过 0.6,弥散圆 85% 以上的能量集中在半径为  $10 \mu\text{m}$  的范围内。镜片的排布合理,结构紧凑,筒长约为系统焦距的  $1/3$ 。此光学系统为空间遥感、空间摄影等提供了一定的参考。

## 参 考 文 献

- 1 G H Stokes, C Von Braun, R Sridharan, *et al.*. The space-based visible program [J]. Lincoln Laboratory Journal, 1999, 11(2): 205-238.
- 2 D E Lencioni, C J Digenis, W E Bicknell, *et al.*. Design and performance of the EO-1 advanced land imager [C]. SPIE, 1999, 3870: 269-280.
- 3 Zhang Keke, Ruan Ningjuan, Fu Danying. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29(3): 63-70.
- 张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 63-70.
- 4 Han Changyuan. Recent earth imaging commercial satellites with high resolutions [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(3): 201-208.
- 韩昌元. 近代高分辨地球成像商业卫星[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 201-208.
- 5 Li Huan, Xiang Yang. Design of  $10^\circ$  FOV telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2256-2259.
- 李欢, 向阳.  $10^\circ$ 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.
- 6 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.
- 7 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416002.
- 韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002.
- 8 Zhong Xing, Zhang Yuan, Jin Guang. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322004.
- 钟兴, 张元, 金光. 大视场光学系统像面照度均匀性优化[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322004.
- 9 Zhang Xuemin, Han Jun, Duan Jiayou, *et al.*. Alignment method of coaxial eccentric-pupil three-mirror system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416003.
- 张学敏, 韩娟, 段嘉友, 等. 共轴偏光瞳折轴三反射光学系统装调方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416003.
- 10 Ding Xuezhan, Wang Xin, Lan Weihua, *et al.*. Design of four-mirror reflective anastigmatic optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 319-321.
- 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.
- 11 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin, *et al.*. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3300-3305.
- 梁士通, 杨建峰, 薛彬, 等. 四反射镜光学系统像差分析与设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3300-3305.
- 12 A B Meinel, M P Meiel, D Q Su, *et al.*. Four-mirror spherical-primary submillimeter telescope design [J]. Appl Opt, 1984, 23(17): 3020-3023.
- 13 Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 12-13.
- 潘军华. 光学非球面的设计加工与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 12-13.
- 14 Wang Zhijiang. Theory Elements of Optical Design [M]. Beijing: Science Press, 1985. 321-345.
- 王之江. 光学设计理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 321-345.

栏目编辑: 张 腾