

大视场像方远心离轴三反射镜光学系统设计

刘 军^{1,2} 黄 玮¹ 许伟才¹ 徐明飞^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于三反射镜的三级相差理论,通过自定义优化函数,并使用遗传算法寻找合适的三反射镜光学系统的初始结构参数,利用光学设计软件ZEMAX对初始结构进一步离轴优化,设计出了视场角为 $18^\circ \times 0.6^\circ$,焦距为1700 mm,入瞳直径为200 mm的像方远心离轴三反射镜光学系统。该光学系统无中心遮拦,成像质量接近衍射极限,适用于空间遥感领域。

关键词 光学设计;三反射镜光学系统;大视场;空间光学

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.122203

Optical Design of the Off-Axis Three-Mirror Reflective Telecentric System with Wide Field of View

Liu Jun^{1,2} Huang Wei¹ Xu Weicai¹ Xu Mingfei^{1,2}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the third order aberration theory, a merit function is established, genetic algorithm is employed to find the initial structure parameters with minimum merit function then the initial structure is loaded to ZEMAX for further optimization. A telecentric three-mirror reflective system with effective focal length of 1700 mm, entrance pupil diameter of 200 mm and field of view of $18^\circ \times 0.6^\circ$ is designed by making the y -field off axis. The performance of the system is close to the diffraction limit and it is unobstructed and suit for the field of space optical remote.

Key words optical design; three-mirror reflective system; wide field of view; space optics

OCIS codes 220.1010; 220.4830; 280.4788

1 引言

空间遥感是指遥感卫星从大气以外的空间对地球进行观测,无论在军事还是民用领域都扮演非常重要的角色,遥感卫星的轨道高度通常在80 km以上。目前遥感的主要方式仍是通过光学相机对地观测,由于投射式和折反式光学系统都需要采用特殊材料或者特殊结构来消除二级光谱,使其在空间遥感领域受到很大限制。反射式光学系统无色差、光路折叠的特点使得其具有高像质、小体积、轻量化的设计中具有明显的优势,愈来愈多地应用于空间分辨率为米级和亚米级的航天遥感光学系统^[1-5]。三反射镜光学系统是航天遥感领域中使用最多的反射式光学系统,国内外学者对其进行了深入研究^[6-10]。在已经取得应用以及文献发表的设计中三反射镜光学系统的视场通常不超过 15° ,在这些光学系统中很少有光学系统做到像方远心。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所刘晓梅等设计了一个视场角为 5° ,焦距为360 mm,入瞳直径为90 mm,像方远心的离轴三反射镜光学系统^[6]。

收稿日期: 2014-06-16; 收到修改稿日期: 2014-07-16; 网络出版日期: 2014-11-12

作者简介: 刘 军(1987—),男,博士研究生,主要从事空间光学系统以及浸没式光刻物镜设计等方面的研究。

E-mail: ciompliujs@sina.cn

导师简介: 黄 玮(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学系统设计方面的研究。

E-mail: huangw@ciomp.ac.cn(通信联系人)

本文在研究了三反射镜光学系统三级像差的基础上,通过自定义优化函数,并引用遗传算法(GA)来寻找初始结构参数,将初始结构导入光学设计软 ZEMAX 进行进一步离轴优化,设计了一个视场为 $18^\circ \times 0.6^\circ$, 焦距为 1700 mm, 入瞳直径为 200 mm, 像方远心的离轴三反射镜光学系统。该光学系统采用视场离轴的方式避免了中心遮拦,成像质量接近衍射极限,适用于空间遥感领域。

2 设计原理

2.1 优化函数的构建

离轴反射式光学系统是在共轴反射式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反射镜光学系统的初始结构参数。共轴三反射镜光学系统的光路结构如图 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。

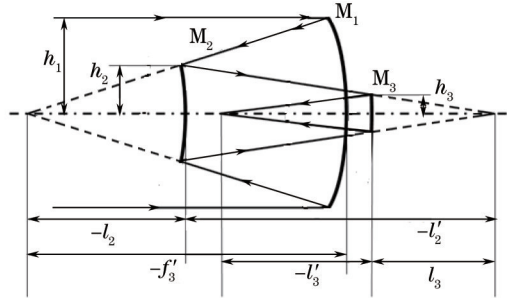


图 1 三反射镜光学系统初始结构

Fig.1 Initial structure of three mirror reflective system

三反射镜光学系统由三片非球面镜组成:主镜(M_1)、次镜(M_2)、三镜(M_3),设光阑位于主镜镜框; d_1 、 d_2 和 d_3 分别为次镜到主镜的距离、三镜到次镜的距离和像面到三镜的距离; l_2 和 l'_2 、 l_3 和 l'_3 分别为次镜、三镜的物距和像距; h_1 、 h_2 和 h_3 分别为第一近轴光线在主镜、次镜和三镜的投射高度; f_1 为主镜的焦距。设主镜、次镜和三镜顶点处的曲率半径分别为 r_1 、 r_2 和 r_3 ;二次非球面系数分别为 e_1^2 、 e_2^2 和 e_3^2 。

单色像差共有五种: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 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 和 S_V 分别为^[11-12]。

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

式中 P 、 Π 、 ϕ 、 K 、 J 分别为:

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

式中 h 为第一近轴光线在各镜面上的投射高度, y 为第二近轴光线在各镜面上的投射高度, n 为各镜面的折射率, u 为各镜面入射光线与光轴的夹角, e^2 为各镜面的二次非球面系数, r 为各镜面顶点处的曲率半径。

设遮拦比为 α_i 以及每片镜子的放大率为 β_i , α_i 反映了镜片 M_{i+1} 对前一镜片 M_i 的挡光程度, β_i 反映了镜片 M_{i+1} 的放大能力:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1}, & \beta_1 = \frac{l_2}{l_1} = \frac{u_2}{u_1}, \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l_2} \approx \frac{h_3}{h_2}, & \beta_2 = \frac{l_3}{l_2} = \frac{u_3}{u_2}. \end{cases} \quad (3)$$

通过对第一近轴光线和第二近轴光线的追迹可以得出 α_i 、 β_i 与初始结构参数 r_i 、 d_i 之间的关系:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, \\ r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2 \beta_3}, \\ r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(1+\beta_2)\beta_3}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, \\ d_2 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2 \beta_3}, \\ d_3 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (1-\alpha_3)}{\beta_3}, \end{cases} \quad (5)$$

α_i 、 β_i 与三级相差系数 S_i 之间的关系为:

$$S_I = \frac{1}{4}[(e_1^2 - 1)\beta_1^3 \beta_2^3 - e_2^2 \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3 + e_3^2 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3 + \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2], \quad (6a)$$

$$S_{II} = -\frac{e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)^3}{4\beta_1 \beta_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\beta_1 \beta_2} + \frac{e_3^2[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)^3}{4\beta_1 \beta_2} + \frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\beta_1 \beta_2} - \frac{1}{2}, \quad (6b)$$

$$S_{III} = -e_2^2 \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 - \beta_1^3)}{4\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + (1 - \alpha_2)\beta_1]^2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 - \beta_2)(1 + \beta_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2} + \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} - \beta_1 \beta_2 + e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} + \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1 \beta_1}, \quad (6c)$$

$$S_{IV} = \beta_1 \beta_2 - \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2}, \quad (6d)$$

$$S_V = \frac{2(\alpha_1 - 1)(\beta_1 + 1)}{\alpha_1^2 \beta_1} + \frac{1}{4} \frac{(\beta_1 + 1)(\alpha_1 - 1)^3(\beta_1 - 1)^2}{\alpha_1^2 \beta_1^3} + \frac{3(\alpha_1 - 1)^2(\beta_1 - 1)(\beta_1 + 1)}{2\alpha_1^2 \beta_1^2} + \frac{2(\beta_2 + 1)(\alpha_2 - \beta_1 - \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \beta_1)}{\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1 \beta_2} + \frac{3(\beta_2 - 1)(\beta_2 + 1)(\alpha_2 - \beta_1 - \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \beta_1)^2}{2\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \frac{e_2^2(\alpha_1 - 1)^3(\beta_1 + 1)^3}{4\alpha_1^2 \beta_1^3} + \frac{(\beta_2 + 1)[(\beta_2 - 1)^2 - e_3^2(\beta_2 + 1)^2](\alpha_2 - \beta_1 - \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \beta_1)^3}{4\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1^3 \beta_2^3}. \quad (6e)$$

初始结构要求三级像差尽量小,并且能够满足像方远心,据此要求构造优化函数 f 为:

$$f = w_1 |S_I| + w_2 |S_{II}| + w_3 |S_{III}| + w_4 |S_{IV}| + w_5 |S_V| + w_6 \left| d_2 - \frac{1}{2} r_3 \right|, \quad (7)$$

式中 w_i 为权重,权重越大说明对相应的相差系数或约束条件控制越强, w_i 被设置为正数,因此优化函数 f 为正数。约束条件 $\left| d_2 - \frac{1}{2} r_3 \right|$ 用来方便在后续优化过程中保证像方远心。从(7)式看出优化函数 f 是 α_i, β_i, e_i^2 的函数,可以通过设置不同的 w_i 来获取不同的初始结构参数。

2.2 遗传算法的应用

遗传算法是一种模拟生物进化过程的智能算法^[3],是经典算法之一。它适用于多维变量空间的优化过程,具有良好的全局搜索能力,因此用来构建的优化函数以期获得合适的三反射镜光学系统初始结构。遗传算法主要分为编码、交配、变异、解码四个基本过程。首先对解空间进行无缝编码,通常采用二进制编码,每个二进制编码串代表解空间的一个潜在解,被称为染色体,染色体上的每个二进制数称为基因,特定范围内的连续基因片段代表构建解空间的一个变量。编码以后,通过优化函数来评估每条染色体,通过转盘法(优化函数越接近目标值被选取概率越大)选取染色体,被选取的染色体按交配概率进行交配,接着按变异概率进行变异,从而产生子代染色体,子代被接受为新的父代按相同的方式产生下一代,直至满足进化目标并找出最佳染色体。最后将最佳染色体解码成十进制数,即为 α_i, β_i, e_i^2 ,根据(4)、(5)式可以计算出初始结构参数 r_i, d_i, e_i^2 。整个设计流程如图2所示。

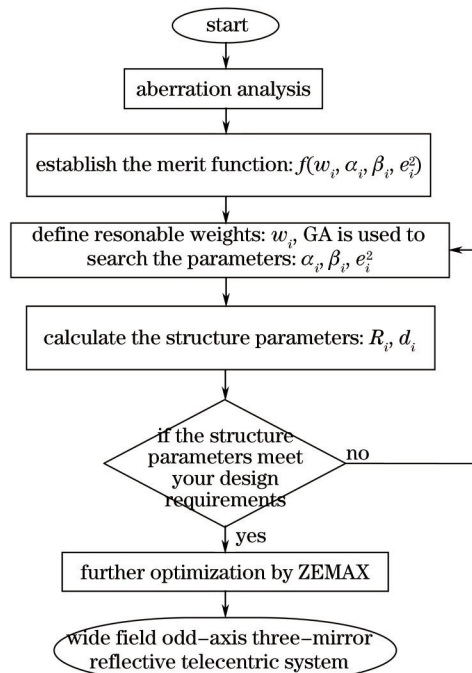


图2 设计流程图

Fig.2 Flow chart of the design process

3 设计实例与性能分析

根据上述的理论推导,设计了一个视场为 $18^\circ \times 6^\circ$,焦距为1700 mm,入瞳直径为200 mm,像方远心的离轴三反射镜光学系统。工作波段 $\lambda = 0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$,探测器像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 。

优化函数的权重设置为: $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 1$, $w_6 = 5$,通过加大权重 w_6 来保证三反射镜光学系统的像方远心。设三反射镜光学系统的焦距为1700 mm,通过遗传算法求得初始结构参数,如表1所示。

表1 初始结构参数

Table 1 Initial system parameters

Mirror	α_1	α_2	β_1	β_2	Conic	r / mm	d / mm
Primary					-7.566	-2540.303	-620.592
Secondary	0.5136	1.3327	3.9518	0.3387	-2.426	-1046.327	869.252
Tertiary					6.202	-1738.704	-1150.559

在三反射镜光学系统中,光阑放置于主镜有利于获得大口径,放置于次镜有利于获取大视场。为了增大光学系统的视场,将光阑设置在次镜镜框,并采用视场离轴的设计来避免中心遮拦,子午方向的视场范围为 $7.4^\circ \sim 8.0^\circ$ 。将初始结构参数导入光学设计软件ZEMAX进行离轴优化,其最终优化参数如表2所示。

表2 ZEMAX优化后参数

Table 2 Parameters after optimizing by ZEMAX

Mirror	r/mm	d/mm	Conic	Fourth order coefficient	Sixth order coefficient
Primary	-2540.185	-620.609	-7.603	-4.392×10^{-11}	1.945×10^{-17}
Secondary	-1046.454	869.323	-0.949		
Tertiary	-1738.646	-1150.721	-1.040	2.543×10^{-11}	-3.920×10^{-18}

对比表1和表2可以看出,ZEMAX的优化过程基本保持了初始结构的特点,Conic系数有了稍微的改变,并在主镜和三镜引入了二阶和六阶非球面系数来矫正大视场引起的轴外像差。离轴优化后,该三反射镜光学系统弧矢方向的视场范围为 $-9^\circ \sim 9^\circ$,且满足像方远心的特点。其结构侧视图如图3所示。

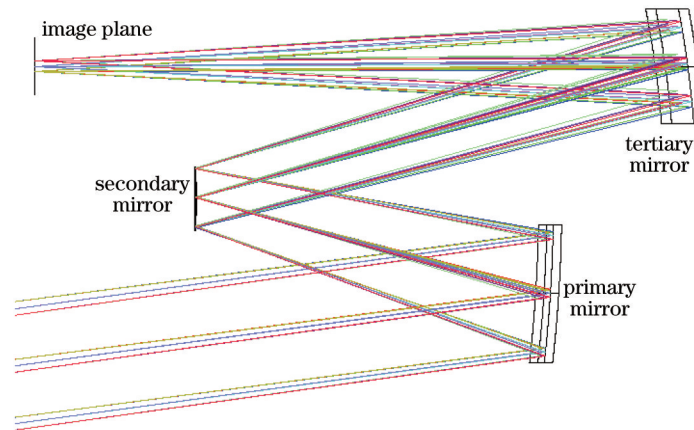


图3 离轴三反射镜光学系统结构

Fig.3 Structure of off-axis three-mirror reflective system

选取主镜和三镜作为偶次非球面来矫正大视场带来的像差,取得了很好的像质;大通光口径的凸面镜的检测是光学检测的难点之一,在本设计中,通光口径较大的主镜和三镜为长条状凹反射镜,通光口径最小的次镜为圆形凸反射镜,降低了镜片检测的难度;主镜、次镜和三镜具有相同的旋转对称轴,减少了装调自由度,有利于装调。

该光学系统像差特性良好,优化后的调制传递函数曲线接近衍射极限。其像质特性如图4~6所示。

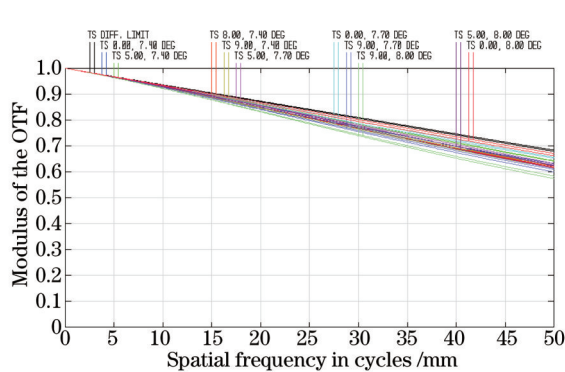


图4 调制传递函数曲线

Fig.4 Modulation transfer function curve

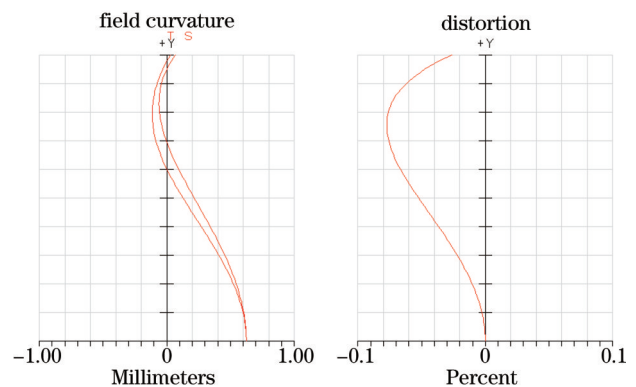


图5 场曲和畸变曲线

Fig.5 Curve of field curvature and distortion

从图4可以看出,在奈奎斯特频率范围内其调制传递函数曲线接近衍射极限,在50 lp/mm处全视场范围内调制传递函数值接近0.6,且各个视场调制传递函数值的差小于0.1,像质得到了很好的平衡;从图5可以看出,全视场范围内畸变小于0.1%,场曲小于1 mm,像散小于0.05 mm。

衍射能量分布如图6所示,从图中可以看出,衍射能量的85%以上分布在的10 μm 范围内,满足像元尺寸为10 μm TDI-CCD探测器的使用要求。

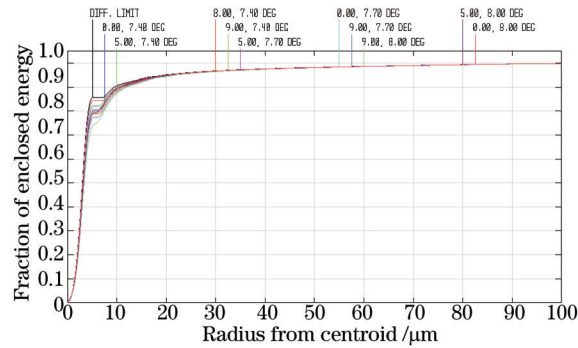


图6 衍射能量分布

Fig.6 Plot of diffraction encircled energy

地面像元分辨率 s 与探测器像元尺寸 δ 和卫星的轨道高度 H 成正比,与光学系统的焦距成反比:

$$s = \frac{\delta H}{f'} \quad (8)$$

地面覆盖宽度 Q 与半视场角 ω 的正切以及卫星轨道高度 H 成正比:

$$Q = 2H \tan \omega \quad (9)$$

由(8)、(9)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 1.18 m,覆盖宽度为 64 km。

4 结 论

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、轻量化的空间光学系统中得到广泛应用。在三反射镜光学系统的三级像差理论的基础上构建了合理的优化函数,通过遗传算法来寻取满足像方远心的初始结构,并设计出一个大视场像方远心的视场离轴三反射镜光学系统,该系统视场达到 $18^\circ \times 0.6^\circ$,焦距为 1700 mm,入瞳直径为 200 mm。其像质接近衍射极限,在空间遥感、空间摄影等领域具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Stokes G H, von Braun C, sridharan R, *et al.*. The space-based visible program[J]. Lincoln Laboratory Journal, 1999, 11 (2): 205-238.
- 2 Lencioni D E, Digenis C J, Bicknell W E, *et al.*. Design and performance of the EO-1 advanced land imager[C]. SPIE, 1999, 3870: 269-280.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 Liu Jun, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Optical design of off-axis four-mirror system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1022002.
刘 军, 刘伟奇, 康玉思, 等. 大视场离轴四反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1022002.
- 6 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Design of 10° FOV telecentric off-axis three-mirror anastigmatic telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122002.
刘晓梅, 向阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122002.
- 7 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.
- 8 Zhang Xuemin, Han Juan, 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.
- 潘君骅. 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 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.
- 13 Haupt R L, Haupt S E. Practical Genetic Algorithm[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.