

基于传递矩阵的宽视场离轴三反光学系统设计

王蕴琦^{1,2}, 刘伟奇^{1,2}, 张大亮¹, 孟祥翔^{1,2}, 康玉思¹, 魏忠伦¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对离轴三反光学系统初始结构求解复杂、视场宽度小的问题, 提出了利用光学传递矩阵求解三反系统初始结构的计算方法, 推导了三反系统焦距和后截距的表达式, 求解了光阑位于次镜的三反系统初始结构。采用引入高次非球面以增加系统设计自由度的技术路线, 基于 ZEMAX 光学设计软件, 通过对同轴初始结构进行离轴优化, 得到了一个矩形视场 $17^\circ \times 2^\circ$, 焦距 1 440 mm, F 数 4.8 的离轴三反光学系统。该系统三个反射面均为高次非球面, 可同时满足宽视场角和高分辨率的要求, 在空间频率 50 lp/mm 处, 调制传递函数大于 0.6, 接近衍射极限。结果表明, 该系统搭载线阵/面阵时间延迟积分电荷耦合元件(TDI-CCD)用于推扫/多通道式空间对地成像时, 可有效扩大空间对地成像系统的地面覆盖范围, 提高信息获取效率。

关键词: 光学设计; 光学传递矩阵; 高次非球面; 宽矩形视场; 离轴三反
中图分类号: TB133 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0418003

Design of off-axis three-mirror optical system with wide field of view based on transfer matrix

Wang Yunqi^{1,2}, Liu Weiqi^{1,2}, Zhang Daliang¹, Meng Xiangxiang^{1,2}, Kang Yusi¹, Wei Zhonglun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To the problem that off-axis three-mirror optical system has narrow field and complicating initial structure solving process, a method by using optical transfer matrix to solve initial structure was proposed, the focus length and rear cut-off distance of three-mirror system was deduced, then an initial structure parameter of three-mirror system with aperture stop on secondary mirror was given. High order aspheric surface was used to increase system design variance, and making off-axial optimization design to coaxial system based on optical design software ZEMAX, finally got an off-axis three-mirror optical system with wide rectangle field of view $17^\circ \times 2^\circ$, focus length of 1 440 mm, F number of 4.8. The system has three high order aspheric optical elements, it can satisfy the requirement of high resolution and large field, the MTF is more than 0.6 at 50 lp/mm, approaches to the diffraction limitation. The designed result shows that the system can be used in space of imaging system with Timed Delay and

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-03

基金项目: 国防基础科研计划(B1720132001)

作者简介: 王蕴琦(1990-), 男, 硕士生, 主要从事空间光学设计方面的研究。Email: doctorwho_wangyq@163.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方面的研究。Email: liuwq@ciomp.ac.cn

Integrated Charge-couple Device (TDI-CCD), can expand the ground coverage of system obviously, and achieves high information retrieval efficiency.

Key words: optical design; optical transfer matrix; high order aspheric surface; wide rectangle field of view; off-axis three-mirror

0 引言

空间对地成像系统的工作高度和感光元件的像素尺寸都是既定参数,因此,空间对地成像光学系统的长焦距和宽视场可以提高空间对地成像系统的分辨率和地面覆盖范围,保障信息获取的质量和效率^[1-2]。离轴三反射镜光学系统属于全反射式光学系统,没有色差和二级光谱问题,质量轻,热稳定性好,易于实现大孔径和长焦距,且无中心遮拦,被广泛应用于空间对地成像领域^[3]。

目前,国内外已经应用或见于报道的离轴三反系统普遍是利用三级像差理论求解初始结构,再进行优化得到的线视场离轴三反系统或宽视场、低分辨率离轴三反系统^[4-5]。与三反系统相比,四反系统增加了一片反射镜,有更多的自由度,但四反系统的初始结构求解过程更为复杂,并且四反系统的加工成本高、装调难度大、系统稳定性低^[6-7]。此外,现有的离轴三反系统中多采用低次非球面,子午方向视场小于 15°,弧矢方向视场不大于 1°,有提升的空间。高次非球面可以增加三反光学系统的优化自由度,提高系统的像差平衡能力和视场适应能力,在离轴三反系统中应用高次非球面是提高离轴三反系统光学性能的一种必要有效方法^[8]。

文中依据费马原理,提出了一种简单有效的完成三反系统初始结构求解的计算方法,利用光学传递矩阵推导了三反系统焦距和后截距的表达式,采用高次非球面技术增加系统优化自由度,实现系统的高分辨率、宽视场设计。在解出的光阑位于次镜的同轴三反系统初始结构基础上,利用 ZEMAX 光学设计软件对其进行离轴优化,得到了一个视场角 17°×2°、焦距 1 440 mm、F 数 4.8、像质良好的离轴三反系统。该系统在保障分辨率的前提下,克服了离轴三反系统视场窄小、初始结构求解复杂的问题,可搭载 TDI-CCD 相机用于高效率、高质量的空间对地

成像,具有实用价值。

1 设计流程

离轴三反系统的设计是在共轴三反的基础上进行的,以往的共轴三反设计流程是,先设定系统遮拦比,后从三级像差理论出发,求解三个反射镜的曲率半径、二次曲线常数等参数,过程复杂,计算量大。文中给出了利用光学特征传递矩阵求解曲率半径和镜间间隔,依据费马原理设定二次曲线常数,完成初始结构求解的方法,过程简洁、计算量小。

1.1 初始结构求解

根据光线矢量线性变换原理^[9],光学系统中若有 k 个光学元件,将这些元件的特征传递矩阵分别表示为 $M_1, M_2, M_3, M_4, \dots, M_{k-1}$ 和 M_k ,整个光学系统的特征传递矩阵可表示如下:

$$M = M_k M_{k-1} \cdots M_i \cdots M_4 M_3 M_2 M_1 \quad (1)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_i} & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 & d_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

不同光学元件的特征传递矩阵 M_i 是不同的,反射球面系统的光学特征传递矩阵可用公式(2)表示,均匀介质的特征传递矩阵可用公式(3)表示,将公式(2)、(3)代入公式(1)得到三反系统的光学特征传递矩阵如下:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

式中: A, B, C, D 分别为 $A = 1 - d_2\varphi_2 - d_1\varphi_1 - d_2\varphi_1 + d_1d_2\varphi_1\varphi_2$
 $B = d_1 - d_1d_2\varphi_2 + d_2$; $C = -\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 + d_1\varphi_1\varphi_2 + d_1\varphi_1\varphi_3 + d_2\varphi_1\varphi_3 +$
 $d_2\varphi_2\varphi_3 - d_1d_2\varphi_1\varphi_2\varphi_3$; $D = 1 - d_1\varphi_2 - d_1\varphi_3 - d_2\varphi_3 - d_1d_2\varphi_2\varphi_3$ 。

根据 $f = \frac{1}{C}$ 和 $l = -\frac{A}{C}$ 推导出三反光学系统的焦距 f 和后截距 l 表达式如下:

$$f = \frac{1}{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - d_2\varphi_2\varphi_3 - d_1\varphi_1\varphi_2 - d_1\varphi_1\varphi_3 - d_2\varphi_1\varphi_3 + d_1d_2\varphi_1\varphi_2\varphi_3} \quad (4)$$

$$l = \frac{1 - d_2\varphi_2 - d_1\varphi_1 - d_2\varphi_1 + d_1d_2\varphi_1\varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 - d_2\varphi_2\varphi_3 - d_1\varphi_1\varphi_2 - d_1\varphi_1\varphi_3 - d_2\varphi_1\varphi_3 + d_1d_2\varphi_1\varphi_2\varphi_3} \quad (5)$$

式中： $d_i(i=1, 2)$ 表示三个反射面间的距离； $\varphi_i(i=1, 2, 3)$

表示三个反射面的光焦度； $\varphi_i = \frac{2}{r_i} (i=1, 2, 3)$ 。

将三反系统中的前两个反射面设计成一个无焦结构，可简化初始结构的求解，并可将 l 、 φ_3 和 d_1 表示如下：

$$l = f \quad (6)$$

$$\varphi_3 = \frac{1}{f} \quad (7)$$

$$d_1 = \frac{1}{2}(r_1 - r_2) \quad (8)$$

由公式(7)可知， φ_3 值可由系统的 f 求出。联立公式(4)、(5)、(8)和三反光学系统的平场条件(9)可以得到 r_1 、 r_2 的表达式(10)：

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{cases} r_1 = h(r_3, d_2) \\ r_2 = g(r_3, d_2) \end{cases} \quad (10)$$

在公式(10)中，给出 d_2 的值，就可以解得 r_1 和 r_2 的值。

1.2 设定二次曲线常数

对于二次曲线常数($e_i^2 (i=1, 2, 3)$)的设定，传统的方法是从像差理论出发，计算量大，求解过程复杂，本文依据费马原理给出了设定方法，简化了计算过程，提高了求解效率。费马原理指出，光线总是沿光程为极值的那条路径传播，实际光路对应的光程，或是所有可能光程值中的极小值，或是极大值，或是某一稳定值^[9]。对于抛物面反射光学系统，光程为一个稳定值，平行光入射时，完美的汇聚在抛物反射镜焦点处，像点的弥散斑 RMS 半径等于 0。

为了在光轴上获得一个无像差像点，将三反系统的主镜、次镜和三镜设计为抛物面反射镜，即 $-e_i^2 = -1, (i=1, 2, 3)$ 。确定同轴初始结构合理后，在 ZEMAX 光学设计软件中选择合适的像质评价函数对其进行优化设计，得到符合要求的同轴三反光学系统，加入视场离轴继续优化，得到最终的离轴三反光学系统，具体的设计流程如图 1 所示。

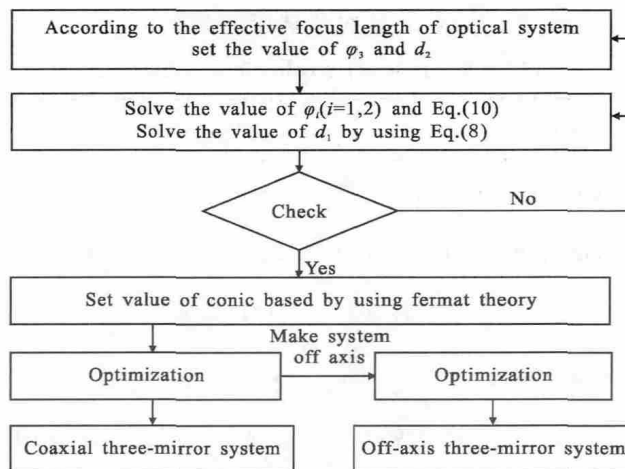


图 1 设计流程
Fig.1 Design process

2 设计实例

设计了一个具有 $17^\circ \times 2^\circ$ 宽矩形视场的离轴三反系统，该系统焦距 1 440 mm， F 数 4.8，在保证了解分辨率前提下实现了宽矩形视场，无色差和中心遮拦，结构紧凑，搭载像元尺寸 $8 \mu\text{m}$ 的线阵/面阵时间延迟积分电荷耦合元件(TDI-CCD)用于空间对地成像系统，可提高系统的信息获取效率。

根据图 1 所示的设计流程，确定 $r_3 = -2 880 \text{ mm}$ ，选取次镜与三镜的间隔 $d_2 = 1 300 \text{ mm}$ 。将 d_2 和 r_3 代入到公式(10)中解得主镜和次镜的曲率半径 r_1 和 r_2 ，将 r_1 和 r_2 代入公式(8)求解 d_1 ，得到初始结构参数。初始结构的主镜、次镜和三镜均为抛物面，主镜和次镜的焦点相衔接构成无焦系统，利用三镜控制系统的焦距和后截距，在系统的像面中心(0° 视场)得到理想像点，弥散斑的 RMS 半径和几何半径均为零。

确定初始结构后对其进行优化，加入 Y 方向的视场离轴，引入高次非球面系数增加系统优化自由度，继续优化得到最后的离轴三反光学系统，其结构参数如表 1 所示，其面型参数如表 2 所示。

表 1 最终结构参数

Tab.1 Final structural parameter

Surf	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
1	-3 668.636	-887.279	-2.221
STO	-1 161.851	1 015.002	9.350
2	-1 666.671	-1 245.625	0.311

表 2 高次非球面系数

Tab.2 High level aspheric coefficients

Surf	1	STO	2
4th order term	-6.474E-013	7.983E-010	2.927E-012
6th order term	-1.255E-018	-2.817E-014	5.727E-019
8th order term	-1.496E-023	6.034E-018	-1.880E-023
10th order term	4.041E-028	-6.840E-022	1.777E-028
12th order term	-3.509E-033	4.569E-026	-7.119E-034
14th order term	1.357E-038	-1.649E-030	1.382E-039
16th order term	-1.975E-044	2.472E-035	-1.058E-045

系统的主镜、次镜和三镜均为高次非球面,最大厚度小于焦距,结构紧凑,光阑安放在次镜,易于实现宽视场。系统采用了 Y 方向的视场离轴设计,无中心遮拦, Y 方向(子午方向)视场范围 3.5°~5.5°, X 方向(弧矢方向)视场范围-8.5°~+8.5°,具有 17°×2°(X 方向×Y 方向)的离轴、宽矩形视场,结构的侧视图如图 2 所示。

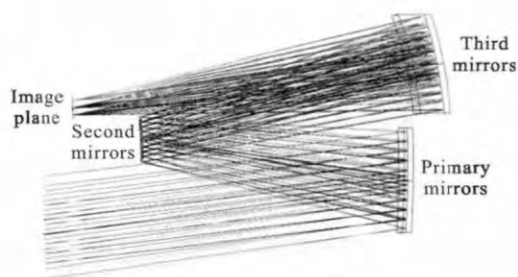


图 2 系统结构侧视图

Fig.2 End view of system structure

系统中的高次非球面偏离量不大,回避了利用高次非球面提升性能的同时提升加工难度的问题,具有可加工性。主镜和三镜为凹面镜,口径较大,设计为长条形的通光口径,减轻了系统重量,可以有效避免在加工非球面是像散的引入。

在面型检测方面,系统中主镜和三镜为凹面镜,并且面型中没有拐点,利用 Offer 形式的补偿镜就可以完成面型的检测。次镜是凸面镜,同样可以用补偿法进行检测,其口径最小,避免了大口径的凸面型非球面检测困难的问题。

系统具有良好的成像质量,根据传递函数曲线(图 3)可知,系统在空间频率 50 lp/mm 处调制传递函数大于 0.6,接近衍射极限;根据场曲和畸变曲线(图 4)可知,系统的场曲小于 0.5%,畸变小于 0.5%,像散小于 0.08 mm;根据网格畸变图(图 5)可知系统的网格畸变小于 0.6%;根据点列图(图 6)可知,系统弥散斑的均方根半径(RMS)小于 11 μm;由衍射能量分布曲线(图 7)可以看出能量集中 90% 以上的弥散斑半径都在 7 μm 以内。

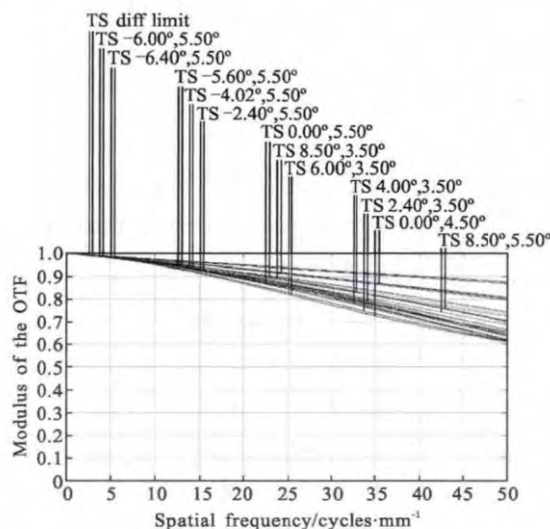


图 3 调制传递函数曲线图

Fig.3 Modulation transfer function curves

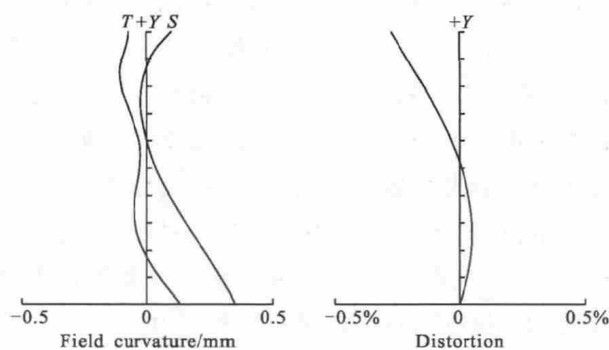


图 4 场曲和畸变曲线图

Fig.4 Curves of field curvature and distortion

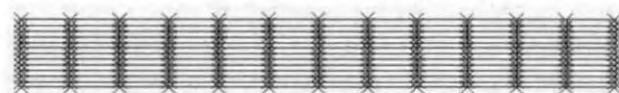


图 5 网格畸变图

Fig.5 Grid distortion

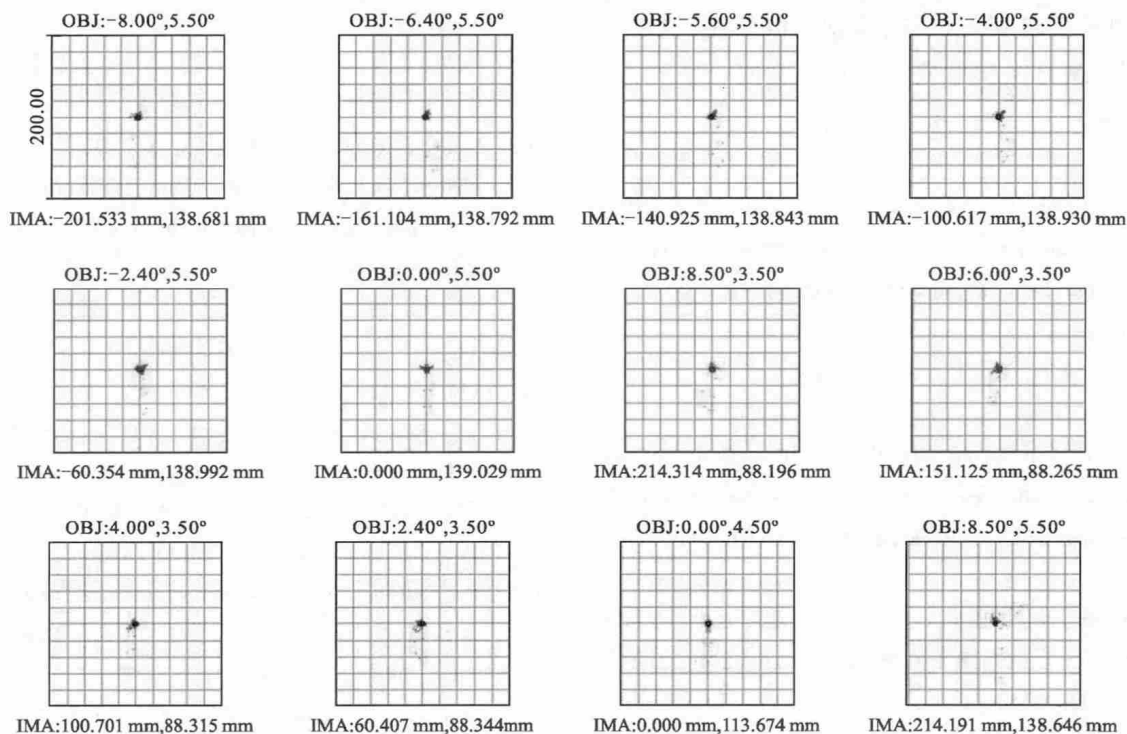


图 6 点列图

Fig.6 Spot diagram

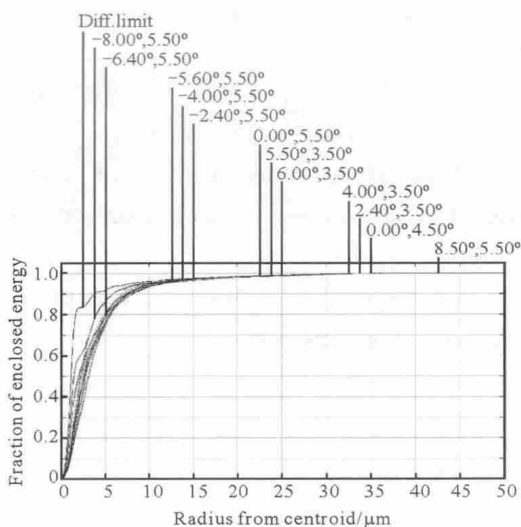


图 7 衍射能量分布图

Fig.7 Distribution diffraction of energy

离轴三反系统广泛应用于空间对地成像系统，在空间对地成像系统中，分辨率 R_{GSD} 与探测器像元 δ ，轨道高度 H 之间存在如下关系：

$$R_{GSD} = \frac{\delta \cdot H}{f} \quad (11)$$

式中： f 为光学系统的焦距。

地面覆盖范围 Q 与光学系统半视场角 ω 之间

存在如下关系：

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

该设计实例视场角 $17^\circ \times 2^\circ$ ，焦距 1 440 mm，可搭载 TDI-CCD(像元尺寸 $8 \mu\text{m}$)相机做空间对地成像使用，当在轨高度 500 km 时，系统的地面像元分辨率为 2.8 m，地面覆盖范围为 X 方向 150 km、 Y 方向 17 km 的矩形区域，地面像元分辨率高，地面覆盖范围广，在保证分辨率和成像质量的前提下，提高了信息获取效率。

3 结论

文中解决了现有三反系统初始结构求解复杂、视场狭小的问题，提出了利用特征传递矩阵计算三反系统初始结构的方法，给出了设计流程图，采用高次非球面技术实现了 $17^\circ \times 2^\circ$ 宽矩形视场、焦距 1 400 mm、 F 数 4.8 的离轴三反光学系统，系统在空间频率 50 lp/mm 处，调制传递函数大于 0.6，接近衍射极限，畸变和场曲小于 0.5%，能量集中度 90% 以上的弥散斑均方根半径(RMS)小于 $7 \mu\text{m}$ 。该系统无中心遮拦，无色差，工作于全波段，可搭载线阵/面阵 TDI-CCD，用于推扫/多通道式空间相机等空间对地

的目标探测或信息获取设备,实现了高质量、高效率的信息获取,具有实用价值和实用意义。

参考文献:

- [1] Guo Yongxiang, Li Yongqiang, Liao Zhibo, et al. Novel design of off-axis three reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 43(9): 2680–2683. (in Chinese)
郭永祥, 李永强, 廖志波, 等. 新型离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 43(9): 2680–2683.
- [2] Pang Zhihai, Fan Xuewu, Zou Gangyi, et al. Design of new wide-angle unobscured three mirror optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2449–2452. (in Chinese)
庞志海, 樊学武, 邹刚毅, 等. 新型大视场无遮拦三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2449–2452.
- [3] Xue Qingsheng. Design of wide field of view off-axis three-mirror system for hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 2449–2452. (in Chinese)
薛庆生. 用于高光谱成像仪的大视场离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 2449–2452.
- [4] Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-Bias three-mirror optical system with high resolution[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 1–6. (in Chinese)
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): 1–6.
- [5] Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Compact and multispectral off-axial three-mirror reflective optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 391–394. (in Chinese)
李岩, 张葆, 洪永丰. 灵巧型离轴三反光学系统设计[J]. 应用光学, 2014, 35(3): 391–394.
- [6] 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): 3301–3305. (in Chinese)
梁士通, 杨建峰, 薛琳, 等. 四反射镜光学系统像差分析与设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3301–3305.
- [7] Liu Jun, Liu Weiqi, Kang Yusi, et al. Optical design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1–6. (in Chinese)
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): 1–6.
- [8] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surface [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 10–71. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 10–71.
- [9] Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jingsong. Application Optics and Physical Optics [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronics and Technology Press, 2008: 318–395. (in Chinese)
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 318–395.
- [10] Zhao Wencai. Design of improved off-axial TMA optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2837–2843. (in Chinese)
赵文才. 改进的离轴三反光学系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2837–2843.