

文章编号:1002-2082(2018)06-0803-06

# 大口径红外离轴三反光学系统设计及公差分析

孙永雪,夏振涛,韩海波,王 珂,陈刚义

(上海卫星装备研究所,上海 200240)

**摘 要:**在空间光学领域中,光学系统的发展趋势为长焦距、大视场、轻量化、大相对孔径、高成像质量等。为适应该发展趋势,对大口径反射式光学系统进行研究,在共轴三反系统的成像理论基础,为避免中心遮拦,提高成像质量,采用视场离轴方式,设计了一款大口径离轴三反式光学系统。该光学系统在奈奎斯特空间频率 17 lp/mm 处,光学传递函数 MTF 大于 0.75,成像质量接近衍射极限。此外,光学系统公差的合理分配是影响相机总体性能的主要因素,运用公差灵敏度分析和反转灵敏度分析,计算各公差对光学系统成像质量的影响,给出了合适的公差分配,经过模拟分析,按照给定的公差加工装调,系统光学传递函数大于 0.55。

**关键词:**红外系统;光学设计;公差分析;离轴三反系统;红外光学材料

**中图分类号:**TN216

**文献标志码:**A

**DOI:**10.5768/JAO201839.0601007

## Design and tolerance analysis of infrared off-axis three-mirror optical system with large aperture

Sun Yongxue, Xia Zhentao, Han Haibo, Wang Ke, Chen Gangyi

(Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In the field of space optics, the development trend of optical systems is long focal length, large field of view, light weight, large relative aperture, high imaging quality, and so on. In order to adapt to this development trend, the large-caliber reflective optical system is studied. An off-axis three-mirror optical system with large aperture was designed based on the imaging theory of coaxial three-mirror optical system and the way of field off-axis was used to avoid central shielding problem and improve the image quality. The modulation transform function (MTF) of the optical system is more than 0.75 at the Nyquist frequency of 17 lp/mm and the image quality is close to the diffraction limits. In addition, since the tolerance reasonable distribution of optical system is the main factor that affects the performance of camera, the sensitivity analysis and the inverse sensitivity analysis were used to compute the effect of each tolerance parameter on the optical system image quality and the proper tolerance distribution was determined. Through simulation analysis, the optical system can has high image quality with fabricated and assembled on the basis of tolerance given, and the MTF can be more than 0.55.

**Key words:** infrared system; optical design; tolerance analysis; off-axis three-mirror system; infrared optical material

## 引言

在航天遥感领域中,长焦距、高分辨率的红外

相机发挥着越来越重要的作用。相机的地面分辨率与光学系统的角分辨率有关,由于衍射极限限

收稿日期:2018-06-26; 修回日期:2018-08-02

作者简介:孙永雪(1988—),女,上海人,硕士,工程师,主要从事太阳模拟器技术和光学设计等方面的研究工作。

E-mail:983042171@qq.com

制,要实现高分辨率就要求光学系统具有大的口径。在光学系统设计中,由于材料、重量和价格等的限制,长焦距、大口径的光学系统多采用反射式结构。反射式光学系统以其无色差,光路可折叠,便于缩短筒长,结构紧凑,易于轻量化,口径和焦距都可以做的很大,以及对温度变化不敏感等优点,在航天遥感领域备受关注<sup>[1-2]</sup>。

反射系统一般分为双反射镜系统和三反射镜系统,其中双反射镜系统由于优化变量少,不能满足大视场、大相对孔径要求;三反射镜系统有3个半径、2个间隔、3个非球面系数共8个参数,在满足焦距和主要像差后有充分的变量来满足外形尺寸的要求,也可降低系统高级像差。一个光学系统经过优化完成之后,虽然达到了指标的要求,但是在生产加工过程中,由于加工、装调等各种误差会导致最后成品的成像质量下降,例如曲率半径误差、厚度误差、元件偏心和倾斜误差、以及材料折射率误差等<sup>[3]</sup>,所以系统设计完成后对其进行公差分析是十分必要的。

本文根据红外遥感相机的指标要求,采用离轴三反式结构形式,设计了一个大口径离轴非球面三反式光学系统,采用灵敏度分析法和反转灵敏度分析法对该系统的公差进行了分析研究。另外,对光学元件进行了公差分配,采用蒙特卡罗法对公差分配的综合影响进行模拟分析,结果表明,系统光学传递函数在奈奎斯特空间频率 17 lp/mm 处大于 0.55。

## 1 光学系统设计

### 1.1 光学系统设计指标

光学系统设计指标为

- 1) 轨道高度 36 000 km;
- 2) 角分辨率  $30\ \mu\text{rad} \times 30\ \mu\text{rad}$
- 3) 口径  $\Phi 500\ \text{mm}$ ;
- 4) 焦距 1 000 mm;
- 5) 视场角  $1.1^\circ \times 0.88^\circ$ ;
- 6) 波段  $3.0\ \mu\text{m} \sim 4.8\ \mu\text{m}$ ;
- 7) 像元尺寸  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$

8) 像质要求:在  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  范围内能量集中度大于 80%,加工装调后在空间特征频率 17 lp/mm 处 MTF 大于 0.4

### 1.2 光学系统设计优化思想

现代空间光学的发展,需要光学系统长焦距、

大口径、接近衍射极限的成像质量、无中心遮拦,能满足这些要求的只有离轴三反系统。常用的离轴三反光学系统有两种结构型式:一种是将光阑置于次镜上,没有中间成像面,即 Cook-TMA,如图 1(a)所示;另一种是将光阑置于主镜上,即 Rug-TMA,如图 1(b)所示,系统有中间成像面。这两种系统对于系统轮廓参数的要求不同,分别为

1) 无中间像面的系统,需要满足  $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \beta_1 < 0, \beta_2 < 0$ ,且系统总焦距  $f < 0$ 。

2) 有中间像面的系统,需要满足  $\alpha_1 > 0, \alpha_2 < 0, \beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ ,且系统总焦距  $f > 0$ 。

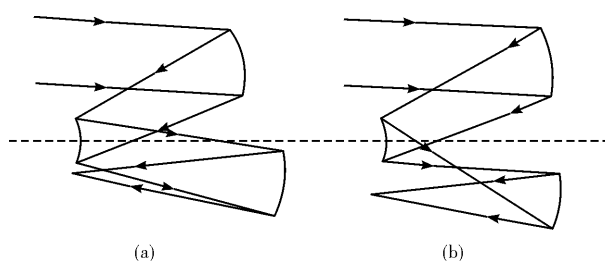


图 1 无中间成像面(a)和有中间成像面(b)的离轴三反系统

Fig. 1 Off-axis three-mirror system with intermediate image surface (a) and without intermediate image surface (b)

无中间像面的 Cook-TMA 系统,光阑位于次镜附近,有较好的对称性,有利于实现大视场(线视场),适用于大视场目标捕获的扫描成像系统。有中间像面的 Rug-TMA 系统,光阑位于主镜附近,有利于结构紧凑,可以在中间像面附近加消杂光光阑,能够有效抑制杂散光,适用于小视场(面视场)大范围目标跟踪的光学系统。本设计用于空间遥感扫描成像,故采用无中间像面系统结构形式,即图 1(a)的 Cook-TMA。

离轴三反光学系统的设计是以共轴三反光学系统初始结构为基础,取其离轴部分并进行优化得到,因此,首先要确定共轴三反系统的初始结构。共轴三反系统的结构图如图 2 所示。系统有 8 个变量,分别为 3 个反射镜的半径  $r_1, r_2, r_3$ ,镜子之间的间隔  $d_1, d_2$ , 3 个反射镜的非球面系数  $e_1, e_2, e_3$ 。为了减小离轴三反系统的装调难度,一般使主镜与三镜在同一平面,取  $|d_1| \approx |d_2|$ ,共轴三反系统初始结构的具体计算步骤诸多文献都有详细介绍<sup>[4-5]</sup>,本文不再赘述。

将求出的初始结构参数输入到光学设计软件中,建立共轴三反系统,孔径光阑置于次镜前面,以保持焦距不变,优化函数对光学系统相关参数进行

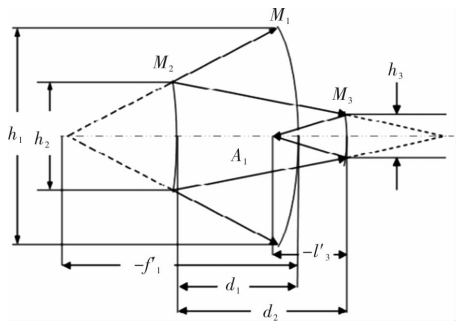


图 2 共轴三反系统结构

Fig. 2 Configuration of coaxial three-mirror system

视场离轴优化,设置一个视场离轴量,反复对系统进行优化,直到系统达到无遮拦并且成像质量满足要求。优化过程中视场的离轴量不要作为优化变量,最好手动调节控制,否则 Zemax 光学软件会默认减小离轴量,即趋向共轴系统,达到提高像质的目的。设置优化函数时,有时需要对系统总长设置一个合理的限制,否则为了提高系统的像差校正能力,系统总长可能会自动变得很大。

需要注意的是离轴光学系统设计中,当元件存在倾斜、偏心等情况时,并不影响三级像差和五级像差系数,没有新类型的像差产生,但是会影响平面的像差场。各元件像差迭加在一起,会使得像差对视场的依赖关系更加复杂,所以不能采用观察各像差特性曲线来判断像差的校正情况。在不同参量设计过程中发现,视场离轴过程中还需关

注像面与次镜之间的垂轴距离,以免间隔太小影响系统支撑结构设计,视场离轴量越大,像面与次镜之间的垂轴距离越大。设计视场不变的情况下,增大系统结构或者使用高次非球面,可以使系统具有较大的像差校正能力<sup>[6-9]</sup>。

1.3 光学系统设计结果

经过反复优化,最终得到系统结构参数如表 1 所示,系统结构如图 3 所示。从表 1 中可以看出,主镜为椭球面,次镜和三镜为扁球面。光学系统的性能评价采用光学传递函数(MTF)(见图 4)、包围圆能量(见图 5)和点列图(见图 6)等。由图 4 可以看出,系统各个视场内的成像质量都很好,传递函数曲线接近衍射极限,在奈奎斯特频率 17 lp/mm 处达到 0.75 以上。由图 5 可以看出,在 30 μm×30 μm 范围内能量集中度大于 90%。由图 6 可以看出,弥散斑均方根半径小于艾里斑半径 10.24 μm,系统结构合理,无中心遮拦,设计结果满足要求。

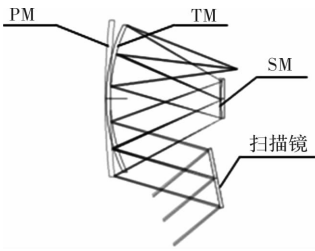


图 3 光学系统结构图

Fig. 3 Optical system configuration

表 1 系统离轴优化后结构参数

Table 1 Structure parameters after off-axial optimization of system

名称	半径/mm	厚度/mm	非球面系数	2 次项	4 次项
PM	1918.400	1035.400	-0.644	-1.866E-004	-9.072E-012
SM	1799.100	-1045.100	4		
TM	1676.000	1198.100	0.388	1.252E-005	

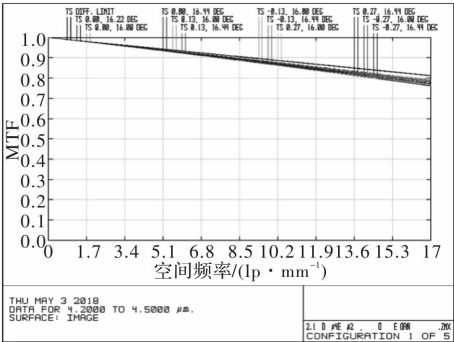


图 4 光学传递函数曲线

Fig. 4 Modulation transfer function

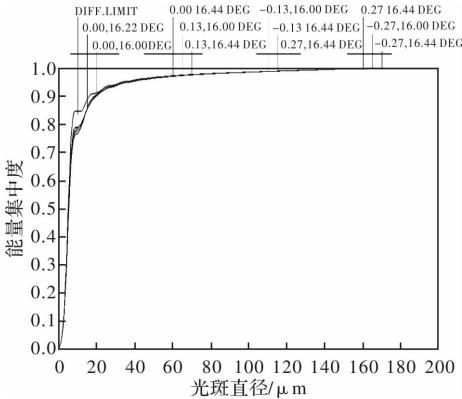


图 5 衍射能量分布图

Fig. 5 Plot of diffraction encircled energy

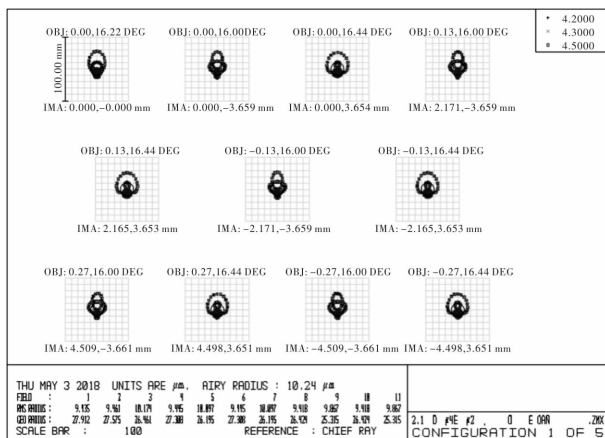


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

### 1.4 材料选择

对于空间离轴三反结构系统的材料选择主要考虑材料的膨胀率、稳定性和材料的重量以及材料镀膜以后膜层的稳定性和镜子表面处理等许多因

素。一般可选用的材料有超低膨胀(ULE)玻璃、金属铝、铍、微晶玻璃和碳化硅等。表 2 为几种常用材料的性能比较。从表 2 可以看出,铍与碳化硅的比刚度最高,热传导率也最高,比刚度高则其机械性能好,热传导率高则有利于散热,而且碳化硅的热膨胀系数远小于铍。另外铍有毒,加工成本很高。虽然像微晶玻璃和 ULE 玻璃陶瓷材料的热膨胀系数接近于零,并且有抗热变形能力强的优点,但其比刚度仅相当于 SiC 的 1/5,而且抗断裂韧度低于 SiC。但是碳化硅价格昂贵,加工工期较长,工艺技术要求比较高,所以还要根据具体使用要求选择最佳的反射镜材料。空间温度变化会使相机系统结构稳定性发生变化,因此需要选择合适的结构材料与镜片材料进行匹配,若镜片材料选择 SiC,结构材料可以采用钛合金,该材料强度高、韧性好、质量轻、抗热冲击性强且与 SiC 热膨胀系数相近<sup>[10]</sup>。

表 2 几种材料的性能比较(25℃)

Table 2 Performance comparisons of several commonly used materials(25℃)

材料	弹性模量 /GPa	泊松比/ $\nu$	热膨胀系数/ $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	密度 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	热传导率 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	比热 / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
最优值	大	小	小	小	大	大
铝	68~75	0.34	22~44	2.7~2.8	165~220	0.9~1.0
铍	280~305	0.027	11~11.5	1.85	190~220	1.8~2.0
SiC	445~470	0.16	2.2~2.7	2.33~3.21	100~330	0.64~0.73
石英	72	0.17	0.51	2.2	1.38	0.772
ULE	66	0.17	0.03±0.06	2.2	1.31	0.770
ZERODUR	91	0.24	-0.03±0.05	2.53	1.64	0.821

## 2 公差分析

对于一个设计完成的光学系统来说,公差情况如何是评价这个系统可行性的重要因素,公差过严会增加加工装调的要求,导致成本提高,还可能使成像质量不稳定,公差过松可能会使成像质量变的很坏。总之,如果公差分配不合理会导致系统的性能缺陷,所以合理分配公差对于一个光学系统来说非常重要<sup>[11]</sup>。

一般系统公差主要包括设计残余误差、加工误差和装调误差。对于红外三反系统来说,保证设计时光学传递函数接近衍射极限,一般残余误差不会很大。就目前国内的装调水平,三反系统的装调误差不大,其最主要误差是加工误差。目前国内非球面的加工水平,一般 RMS 值可以达到  $\lambda/40$  ( $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$ ),有特殊要求的也可以做到  $\lambda/60$  ( $\lambda=0.$

632 8  $\mu\text{m}$ ),但是价格非常昂贵。对于红外非球面加工,面型精度可以低一点,一方面考虑非球面度越高,加工难度越大,另一方面红外系统可能不需要那么高的面型精度。例如,一个中波( $\lambda=4.2\ \mu\text{m}$ )红外三反系统,若非球面面型精度 RMS 要求  $\lambda/20$  ( $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$ ),波像差 RMS 就是  $\lambda/10$  ( $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$ ),整个系统的加工波像差 RMS 值就是  $\sqrt{(1/10)^2 \times 3}=0.173\lambda$  ( $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$ ),换算到中波大约是  $\lambda/38$  ( $\lambda=4.2\ \mu\text{m}$ )。根据瑞利判据,波像差 RMS 值达到  $\lambda/14 \sim \lambda/16$  ( $\lambda$  为使用波长)时,就可认为系统成完善像,即达到衍射极限。若设计和装调误差很小,面型精度达到  $\lambda/20$  ( $\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$ ),系统成像质量可以达到衍射极限。大口径三反系统一般不对面型精度 PV 值做强硬要求,因为大面积上的较小面积缺陷对系统成像没有影响。

目前的光学设计软件都有强大的公差分析能

力,光学系统在公差分析过程中公差被分配成若干个公差,这些公差随机组合作用于光学系统,使用 Zemax 进行公差分析。步骤如下:

1) 设置一个合理的公差分析起始点(根据系统具体使用要求、目前加工水平和装调水平给定关心的公差种类及具体要求),Zemax 中默认公差生成特性是一个好的起始点。

2) 根据光学系统的具体要求,对 Zemax 中默认公差生成项进行适当的添加与删减。

3) 添加补偿器,设置允许范围,一般默认的补偿器是系统后截距,用以补偿光学系统在加工与装配过程中产生的偏差。

4) 选择公差评判标准(本设计采用衍射传递函数),并选取分析模式。

5) 进行公差分析运算。

6) 分析公差分配结果,根据实际情况对公差

进行修正,然后重复第 5)步过程,直到满足要求为止。

分析公差分配结果时,考虑衍射传递函数对所有公差的敏感度,对于敏感度高的公差要严格控制,敏感度不高的采用较为宽松的公差。公差分配的原则就是满足系统指标要求情况下,最大程度地放松系统的加工和装调公差要求,以降低成本和装调难度<sup>[12]</sup>。

最后分析得到该光学系统的合理公差分配,如表 3 所示。评价这些公差是否合适的方法就是进行蒙特卡罗分析,计算分析 200 个蒙特卡罗样本,每个样本就是一个实际加工、装调后的光学系统的模拟,得到 MTF 的统计结果如表 4 所示。分析结果表明,按照表 3 的公差分配加工、装调后,90% 以上的光学系统的 MTF 大于 0.55,公差分配合理,像质满足系统指标要求。

表 3 光学系统公差分配

Table 3 Tolerance distribution of optical system

	面形/ $\lambda$ ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )	曲率半径 /mm	CONIC	TILT X/( $''$ )	TILT Y/( $''$ )	DEC X/mm	DEC Y/mm	间距/mm
PM	1/20	$\pm 0.2$	$\pm 0.001$	30	30	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$
SM	1/20	$\pm 0.2$	$\pm 0.005$	30	30	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$
TM	1/20	$\pm 0.1$	$\pm 0.000\ 5$	30	30	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$	—

表 4 蒙特卡罗分析结果

Table 4 Monte Carlo analysis results

百分比/%	MTF 值
90	$>0.574$
80	$>0.627$
50	$>0.680$
20	$>0.713$
10	$>0.725$

### 3 结论

离轴三反光学系统的特殊优点,使得其在遥感领域的应用越来越广泛,为了适应工程中长焦距、大口径、轻量化、高分辨率、高成像质量等发展趋势,本文在共轴三反系统的基础上,通过视场离轴的方式,设计了一个大口径离轴非球面红外三反光学系统。该系统采用无中间像面结构,孔径光阑放在次镜上,系统有很好的对称性,易于装调,系统结构较为紧凑。由调制传递函数曲线可以看出,奈奎斯特频率 17 lp/mm 处 MTF 设计值达到 0.75,成像质量良好,接近衍射极限。对常用的离轴三反系统结构形式和常用的反射镜材料进

行了对比分析,考虑实际加工装调,对系统进行了公差分析。根据设计经验给出了离轴三反系统设计、材料选择和公差分析时需要特别注意的事项。通过蒙特卡罗模拟分析,验证了公差分配的合理性,满足系统的性能要求。

### 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, 2014, 43(2):547-550.  
郭永祥,李永强,廖志波,等.新型离轴三反射光学系统设计[J].红外与激光工程,2014,43(2):547-550.
- [2] ZHANG Wenying, ZHANG Guoyu, ZHANG Lei. Optical system design of large-diameter off-axis reflection-type star simulation[J]. Journal of Applied Optics, 2014,35(6):950-954.  
张文颖,张国玉,张雷.大口径离轴反射式星模拟器光学系统设计[J].应用光学,2014,35(6):950-954.
- [3] ZHAO Wencai. Design of improved off-axial TMA optical systems[J]. Optical Precision Engineering,

- 2011,19(12):2837-2843.
- 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.
- [4] PAN Junhua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004:130-138.
- 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: 130-138.
- [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.
- 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] MENG Qingyu, WANG Hongyuan, WANG Yan, et al. Off-axis three-mirror freeform optical system with large linear field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10):1018002-1-1018002-8.
- 孟庆宇,汪洪源,王严,等. 大线视场自由曲面离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2016, 45(10):1018002-1-1018002-8.
- [7] MENG Qingyu, WANG Wei, JI Zhenhua, et al. Design of off-axis three-mirror system based on integration of primary and tertiary mirrors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2):578-582.
- 孟庆宇,王维,纪振华,等. 主三镜一体化离轴三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2015, 44(2): 578-582.
- [8] YANG Le, SUN Qiang, GUO Banghui. Optical design of off-axis three-mirror system for infrared dual-band scene simulation[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6): 1212-1216.
- 杨乐, 孙强, 郭邦辉. 离轴三反红外双波段景象模拟器光学系统设计[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1212-1216.
- [9] 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.
- [10] LIANG Baowen, WU Hanping, WANG Huaze. Design of off-axial TMA infrared optical system for space camera[J]. Infrared Technology, 2013,35(4): 217-222.
- 梁宝雯,吴晗平,王华泽. 空间相机离轴三反红外光学系统设计[J]. 红外技术,2013,35(4): 217-222.
- [11] WANG Hong, TIAN Tiejun. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1444-1449.
- 王红,田铁印. 三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析[J]. 光学·精密工程, 2011, 19(7): 1444-1449.
- [12] LI Mengjuan, LIAO Zhibo, WANG Chunyu. Analysis and control on assemblage tolerance in small-aperture high-precision refractive optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2):277-281.
- 栗孟娟,廖志波,王春雨. 小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制[J]. 应用光学,2015, 36(2):277-281.