

文章编号 1004-924X(2013)03-0631-06

空间三反相机调焦范围的确定

刘 磊

- (1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高空间相机对温度的适应能力, 改善相机成像质量, 研究了如何通过调焦放宽相机的热控指标, 降低相机热控难度的问题。推导出了纯反射离轴三反光学系统中后截距及相机受温度影响下焦面离焦的数学公式; 分析证明了相机离焦量与温度变化是线性关系, 并计算得到了常数项 K 值。计算显示, 当反射镜材料的线胀系数与相机支撑框架材料线胀系数一致时, 焦面不产生离焦; 而两种材料线胀系数差距越大, 离焦量就越大。利用离焦传递函数公式证明了当相机温度水平变化超过 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 时(对应离焦量 0.05 mm), 就必须采用机械调焦的方法对其加以补偿; 利用光机热集成仿真的方法, 得出保证相机成像质量的温度范围 Δt , 完成了从光学指标到温度指标的转换。利用离焦公式, 得出了相机的调焦范围。最后, 在热真空环境下试验验证了上述焦面离焦的数学公式及相机温度水平变化 $\pm 4\text{ }^\circ\text{C}$ 时离焦量为 $\pm 0.184\text{ mm}$ 是相机合适的调焦范围。

关键词: 空间相机; 离轴三反光学系统; 离焦; 调焦; 温度

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0631

Focusing range of space off-axial TMA optical camera

LIU Lei

- (1. College of Mechanical Electric Engineering, Changchun university of science and Technology, Changchun 130022, China;
 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- * Corresponding author, E-mail: ccliul@163.com

Abstract: To improve the adaptive capacity of a space camera to environment temperatures and to enhance its imaging quality, this paper explores how to implement the thermal control by relaxing thermal control indicators. A mathematical formula of intercept and defocus affected by temperatures is derived for a pure off-axis Three Mirror Anastigmatism(TMA) optical system. The analysis shows that camera defocus amount and temperature are a linear relationship. Then, a constant K value is calculated. Furthermore, it indicates when reflector and camera structures have the same coefficient of linear expansion, the defocus does not occur. However, the greater the difference between two material linear expansion coefficients is, the greater the amount of defocus is. With defocusing formula, it suggests that mechanical focusing methods must be used to request for compensation when the camera temperature level changes more than $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ (corresponding to the defocus amount of 0.05 mm). Using integrated photo-thermal simulation method, the temperature range Δt is obtained to ensure the

收稿日期: 2012-09-12; 修订日期: 2012-11-29.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 863-2-5-1-13B)

image quality of the camera. Finally, camera's focus range is derived by using the formula of defocus. The result of defocus test under thermal vacuum environment verifies the correctness of the defocus formula and the defocus amount of ± 0.184 mm is a proper focus range corresponding camera temperature levels changed in ± 4 °C.

Key words: space camera; off-axis Three Mirror Anastigmatism(TMA) optical system; defocus; focusing; temperature

1 引言

离轴三反光学系统由 3 块反射镜组成,其光路可折叠,便于缩短筒长使结构紧凑;各反射面可采用非球面,利于提高像质;具有视场大、分辨率高、无色差、平像场、及宽光谱等优势^[1-3],已经广泛应用于空间相机中。

空间相机所处的运载和运行环境条件(如冲击、振动、压力和温度等)非常复杂。为了在复杂的环境下保证相机的成像质量,要求相机不但要具备良好的力学性能,而且应具有良好环境适应性,尤其是对温度变化的适应性。

空间相机光机结构一般由光学系统、支撑结构、调焦机构等部分组成。光学系统是空间相机完成对地成像任务的核心,通常由光学透镜或反射镜组成,用于对地面景物成像;支撑结构是用来固定和支撑各光学元件,承受来自力学环境及温度环境变化带来的冲击和扰动,以保证镜头始终保持必要的成像精度。支撑结构可以是承力筒、夹层板、框架结构、板式构架以及杆系结构等形式。

无论光学元件还是支撑机构,其几何尺寸常常受到温度变化的影响。温度变化使光学元件表面面型、曲率半径、镜间隔等参数产生变化。光学元件表面面型的变化将导致光学系统传递函数的降低;曲率半径、镜间隔的变化直接导致焦面产生离焦,即相机的 CCD 靶面偏离焦平面,最终降低光学系统传递函数,降低成像质量。而相机调焦机构可以补偿上述原因引起的 CCD 靶面位置的变化,校正离焦的 CCD 靶面位置,从而维持相机的成像质量^[4-7]。

空间相机在轨运行环境下,对其产生离焦影响的因素主要有两个方面,一是空间微重力环境对相机的作用,二是温度场载荷对相机的作用。相机在实验室装配时处于水平放置状态,在轨运行时空间微重力沿着光轴方向作用相机。在相机

整体刚度足够大的前提下,无论是在地面重力环境还是以后在轨微重力环境,对各反射镜面型、曲率半径及镜面刚体位移影响是较小的定值。也就是说,空间微重力环境对相机离焦影响是有限,而温度对以上参数影响较大,因此,本文主要考虑温度水平变化对相机离焦的影响。

不同的光学系统的调焦方式各不相同。由于离轴三反光学系统中光学元件(如主镜、次镜)间隔受到非常严格的限制,采用光学元件调焦不可实现;如果采用调焦镜调焦,调焦镜的尺寸过大,再加上调焦机构,其庞大的体积将大幅增加相机的总质量,因此空间离轴三反光学相机最佳的调焦方式是焦面调焦。

本文通过调焦,放宽相机的热控指标,大大降低相机热控难度,从而提高了相机对温度的适应能力以及相机成像质量。

2 相机离焦理论分析

相机离焦是相机 CCD 的靶面与相机焦平面分离。离焦量微小,对成像质量影响较弱,离焦量如果超过焦深,则成像质量大大降低,直至图像模糊。

这里分析了相机离焦量与温度之间的关系以及离焦量与相机材料线胀系数之间的关系。

图 1 所示为离轴三反光学系统,其等效高斯

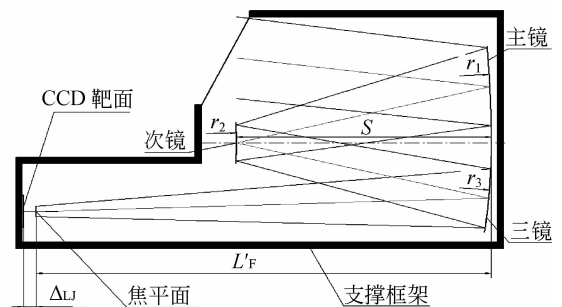


图 1 离轴三反光学系统图

Fig. 1 Configuration of off-axial TMA optical system

系统见图 2, r_1 、 r_2 和 r_3 分别为主、次镜、三镜半径, s 为主与次镜, 次镜与三镜镜间隔。 l'_F 为后截距, Δ_{LJ} 为离焦量。

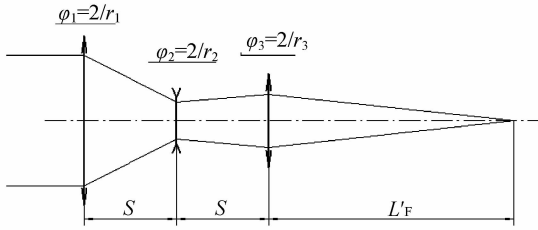


图 2 等效高斯光学系统图

Fig. 2 Configuration of equivalent off-axial TMA optical system

等效高斯光学系统矩阵^[8]：

$$S = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = R_3 T_2 R_2 T_1 R_1 =$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/r_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2/r_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/r_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

各反射镜光焦度 $\Phi = \frac{2}{r}$, 通过等效高斯光学系统计算得到后截距 l'_F 为：

$$l'_F = \frac{-a}{c} =$$

$$\frac{0.5r_3(-r_1r_2 - 2r_1s + 4r_2s + 4s^2)}{-r_1r_2 - 2r_1s + r_1r_3 + 4r_2s + 4s^2 - 2r_3s - r_2r_3} \quad (2)$$

另外,

$$\frac{dr}{dt} = \alpha_{reflec} r$$

$$\frac{ds}{dt} = \alpha_m s \quad (3)$$

用式(1)对温度 t 微分可得常数 k' ：

$$\frac{dl'_F}{dt} = k' \quad (4)$$

后截距 l'_F 对温度变量 $\Delta l'_F$ 为：

$$\Delta l'_F = \frac{dl'_F}{dt} \Delta t = k' \Delta t \quad (5)$$

CCD 固定在相机的金属框架上, 温度变化时, 随框架同步位移, 最终离焦量为：

$$\Delta_{LJ} = \Delta l'_F - \alpha_m l'_F \Delta t = (k' - \alpha_m l'_F) \Delta t = K \Delta t \quad (6)$$

式中： r_1 为主镜半径； r_2 为次镜半径； r_3 为三镜半径； s 为镜间隔； α_{reflec} 为反射镜材料线胀系数， $\alpha = 2.5 \times 10^{-6}$ ； α_m 为相机支撑框架线胀系数为 $19 \times$

10^{-6} ； Δt 为温度变化量。

相机离焦量与温度变化是线性关系。温度变化量越大, 离焦量越大。文中 $k' = -0.0173$, 相机离焦量 $\Delta_{LJ} = -0.046 \Delta t$ 。

相机的离焦量取决于各反射镜与相机金属框架的材料的线胀系数、反射镜半径、镜间隔及温度变化量, 与反射镜二次圆锥曲面系数及高次非球面系数无关^[9]。

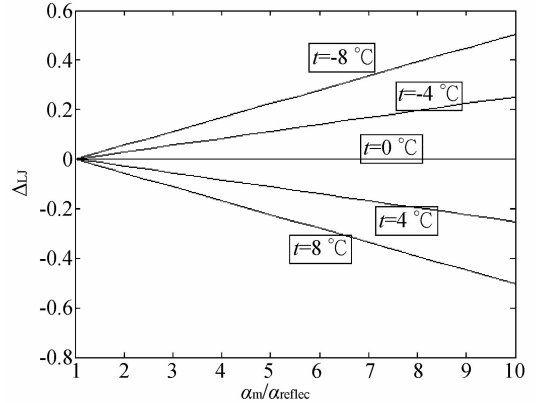


图 3 线胀系数与离焦的关系

Fig. 3 Relationship between linear expansion coefficient and defocus

图 3 所示为相机在不同温度水平下, 金属框架与反射镜材料线胀系的比值与焦面离焦量的关系图。从中可以得出, 两种材料线胀系数差距越大, 离焦量越大; 而反射镜材料的线胀 α_{reflec} 与相机金属框架材料线胀 α_m 系数一致时, 焦面不产生离焦, 即相机不用调焦。

3 调焦量的确定

3.1 热控指标确定

确定调焦量需要有相机明确的温度变化范围, 即相机的热控指标。利用光机热集成仿真的方法可以预示相机对温度载荷的敏感程度, 得出保证相机成像质量的温度范围, 完成从光学指标到温度指标的转换, 合理提出相机的热控设计指标。

利用计算机仿真的手段进行空间相机热控指标计算流程如图 4 所示。首先, 对相机进行温度场载荷的设定; 然后, 计算在设定温度场作用下, 相机热弹性变形的情况, 并提取光学表面的变形参数; 最后, 把光学表面的变形参数叠加到初始设计的理想光学系统, 计算在热弹性变形的情况下相机的光学指标是否能够达到^[10-11]。通过以上 3

个步骤的反复迭代计算,得到可以满足光学成像指标要求的临界温度值,也就是理论上的热控指标。

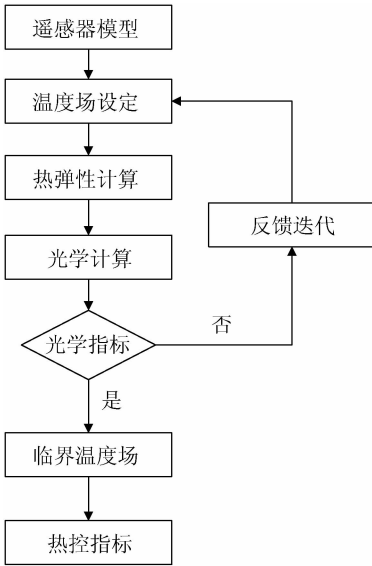


图 4 空间相机热控指标计算流程图

Fig. 4 Flow chart of calculating temperature tolerance of space telescope

相机反射镜采用碳化硅材料,碳化硅材料的密度为 $3.05 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$,弹性模量为 400 GPa,泊松比为 0.16,线胀系数为 2.5×10^{-6} ;支撑框架采用铝基低体份碳化硅复合材料,材料的密度为 $2.85 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$,弹性模量为 95 GPa,泊松比为 0.28,线胀系数为 19×10^{-6} 。按照上述流程对相机镜头进行热控指标计算,得到本文所研究的相机光机镜头热控指标为 $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 5 和图 6 分别为相机温度水平升高 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和降低 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 工况下系统主镜、次镜和三镜的有限元变形云图。根据仿真得到的结果进行了各反射镜面拟合,得到各反射镜的面形变化如表 1 所示。在温度变化为 $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下,各反射镜镜面面形已经满足成像指标的临界状态,所以,以 $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ 为温度指标是较为合理的。

表 1 温度水平变化 $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ 反射镜镜面变化量

Tab. 1 Mirror surface shape change with temperature change of $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$

	指标要求	主镜	三镜	次镜
PV/nm	63	56	66	60
RMS/nm	13	17	18	16
$\Delta r/\text{mm}$		± 0.036	± 0.02	± 0.013
$\Delta s/\text{mm}$		± 0.06		

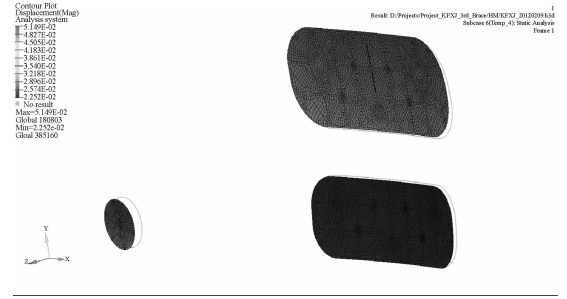


图 5 温度水平变化 $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的光学元件有限元变形图
Fig. 5 Displacement and deformation of mirror with temperature change of $+4 \text{ }^\circ\text{C}$

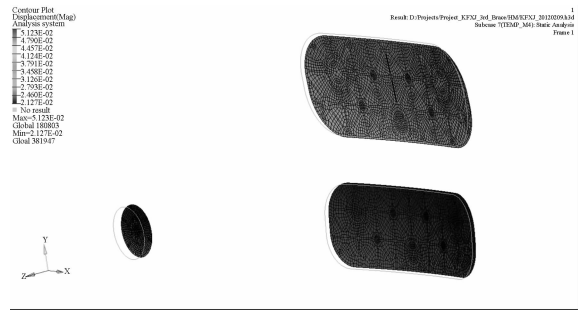


图 6 温度水平变化 $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的光学元件有限元变形图
Fig. 6 Displacement and deformation of mirror with temperature change of $-4 \text{ }^\circ\text{C}$

3.2 调焦量确定

为了验证温度变化 $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ 对整体光学系统的影响,以温度变化 $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ 为例将光机热集成仿真得到的各反射镜位置变化和镜面面形返回光学设计进行计算,得到系统的 MTF 如图 7 所示。图中温度水平变化 $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时光学系统传函急剧下

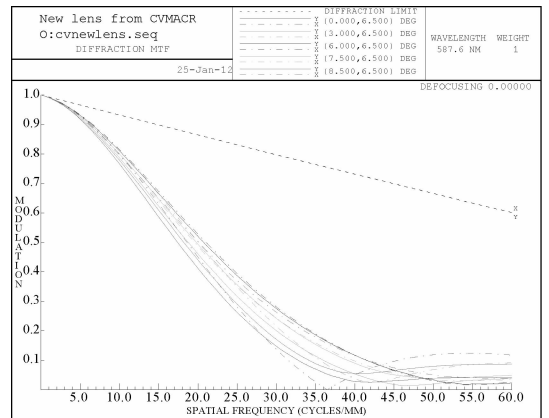


图 7 温度水平变化 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 调焦前光学传递函数
Fig. 7 MTF of camera before focusing when temperature changes $4 \text{ }^\circ\text{C}$

降,通过调节焦面位置进行补偿(模拟焦面机械调焦补偿),得到系统的 MTF 如图 8 所示,从图中可以得到空间频率 $\rho=60$ lp/mm 处 $MTF_{\text{lens}} \geq 0.4$,能够满足光学设计指标要求。同理,对温度变化 -4 °C 的情况进行计算,计算结果基本与温度变化 $+4$ °C 结果相似。因此,可以把温度水平变化 ± 4 °C 时的离焦量 $\Delta_{LJ} = -0.046 \times \pm 4 = \mp 0.184$ mm 作为调焦范围。

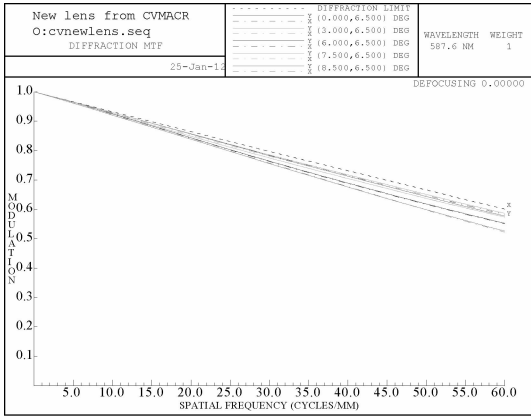


图 8 温度水平变化 4 °C 调焦后光学传递函数

TF of camera after focusing when temperature changes 4 °C

4 需要调焦的条件

对于 F 数为 9 的相机,焦深仅为 ± 0.1 mm,其对应的相机温度水平变化量为 ± 2 °C。

0.1, 0.05 mm 离焦处的传递函数可由下式计算:

$$MTF(\rho) = \frac{2J_1(\pi\rho D)}{\pi\rho D}, \quad (7)$$

式中: ρ 为空间频率; D 为离焦引起的弥散圆直径。

由 $\rho = 60$ lp/mm, 则 $D_{0.1}$, $D_{0.05} = 0.0055$ mm, J_1 为一阶贝塞尔函数,得离焦传递函数 $MTF(60)_{0.1} = 65\%$; $MTF(60)_{0.05} = 88\%$ 。

从以上计算可知,0.05 mm 离焦处传递函数已降至 88%,0.1 mm 离焦处传递函数更降至 65%。根据焦面离焦传递函数不低于 85% 的设计指标要求,当相机温度水平变化超过 ± 1 °C 时(对应离焦量 0.05 mm),就必须采用机械调焦的方法加以补偿,即调焦机构推动带有 CCD 感光器件的焦面组件沿着焦面入射光线方向前后移动,使 CCD 的靶面与相机焦平面重合。

5 热真空环境下相机离焦量测试实验

在热真空成像试验中(见图 9),相机温度水平升高 4 °C 时,相机调焦 -0.18 mm 后获得了最佳成像质量,即获得最高传递函数;相机温度水平降低 4 °C 时,相机调焦 $+0.19$ mm 后获得最佳成像质量,均与计算值 $\Delta_{LJ} = -0.046 \times \pm 4 = \mp 0.184$ mm 符合得很好。计算结果与试验结果基本吻合。相机温度水平变化 ± 4 °C 时,经过调焦后测得相机静态传递函数 $MTF_{\text{static}} = MTF_{\text{lens}} \times MTF_{\text{CCD}} \geq 0.2$,满足设计要求。

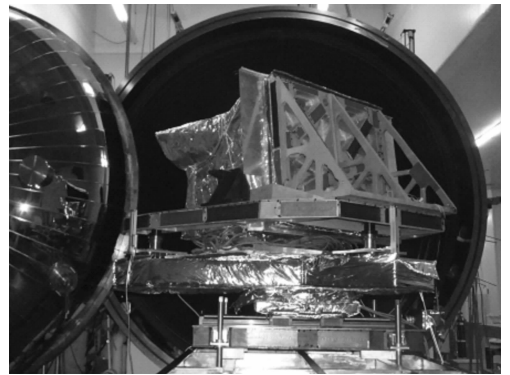


图 9 热真空成像试验

Fig. 9 Thermal vacuum imaging test

6 结论

相机离焦量与温度变化是线性关系,温度变化越大,离焦量越大。当反射镜材料的线胀系数与相机支撑框架材料线胀系数一致时,焦面不产生离焦,当两种材料线胀系数有差距时,即可产生离焦,且差距越大时,离焦量越大。利用光机热集成仿真的方法计算空间相机镜头的可适应边界温度,确定相机温度水平变化 ± 4 °C 时的离焦量 ± 0.184 mm 作为相机调焦范围,超出此范围后的反射镜面型即超出光学设计指标,通过调焦后的相机传递函数不能够满足设计指标要求;通过离焦传递函数的计算,得到相机温度水平变化超出 ± 1 °C 时就需要调焦的结论。通过调焦,可将相机的热控指标从 ± 1 °C 放宽至 ± 4 °C,大大降低了相机热控难度,提高了相机对温度的适应能力和相机的成像质量。热真空环境下的相机离焦

量测试实验验证了焦面离焦的数学公式及相机温度水平变化 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的离焦量 $\pm 0.184\text{ mm}$ 作为相机调焦范围及相机温度水平变化 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为热控指标的正确性。文中焦面离焦的

数学公式可以对同类的三反光学系统离焦量进行定量分析,在相机热控指标确定后,可以确定相机的调焦范围,为调焦机构设计提供准确的调焦范围参数。

参考文献:

- [1] 常军,翁志成.宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2003,11(1):55-57.
CHANG J, WENG ZH CH. Design of optical system in wide cover, off-axial space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(1):55-57. (in Chinese)
- [2] 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.
ZHAO W C. Design of improved off-axial TMA optical systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2837-2843. (in Chinese)
- [3] JURANEK H J, SAND R, SCHWEIZER J, *et al.*. Off axis telescope-the future generation of earth observation telescopes [J]. *SPIE*, 1998, 3439: 104-115.
- [4] 张洪文.空间相机调焦技术的研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2003.
ZHANG H W. *Research on the Auto Focusing Technology for Space Camera* [D]. Changchun: Chang chun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)
- [5] 丁亚林,田海英,王家骥.空间遥感相机调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2001,9(1): 35-38.
DING Y L, TIAN H Y, WANG J Q. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 35-38. (in Chinese)
- [6] 王智,张立平,李朝辉,等.传输型立体测绘相机的调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2009,17(5): 1051-1056.
WANG ZH, ZHANG L P, LI ZH H, *et al.*. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1051-1056. (in Chinese)
- [7] VERHOEFF P, MIERLO H A, BRAAM B C, *et al.*. Development of an in-orbit refocusing mechanism for the meteosat second generation weather satellites [J]. *SPIE*, 1998, 3439: 92-103.
- [8] 迪特恩.现代几何光学[M].长沙:湖南大学出版社,2004.
RICHARD D. *Modern Geometrical Optics* [M]. Changsha: Hunan University Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 许求真.经典卡塞格林系统热差分析[J]. 激光与红外, 2011, 4:435-441.
XU Q ZH. Analysis on thermal difference of classical Cassegrain system [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 4:435-441. (in Chinese)
- [10] JUERGENS R C, CORONATO P A. Improved method for transfer of FEA results to optical codes [J]. *SPIE*, 2003, 5174: 105-115.
- [11] 陈长征,赵贵军,等.空间光学镜头可适应边界温度的CAE计算方法[J]. 光学精密工程, 2007,15(5): 668-673.
CHANG CH ZH, ZHAO G J, *et al.*. A calculating method for temperature tolerance of space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 668-673. (in Chinese)

作者简介:



刘 磊(1972-),男,吉林长春人,副研究员,1994年于大连理工大学获得学士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事空间相机结构设计,E-mail:cc-liul@163.com