

文章编号:1004-4213(2010)11-2068-5

空间相机热光学分析与试验验证*

陈荣利¹,马臻¹,杨文刚¹,余雷²,贺天兵¹,李英才¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

(2 航天科技集团第五研究院,北京 100080)

摘 要:为了对空间高分辨率相机热设计提出准确的技术要求,基于光学波像差的基本理论,对某高分辨率空间相机的温度场进行热光学分析.在此基础上确定了热控指标,并在真空罐中进行热真空成像试验,验证了热光学分析的正确性和热控指标的合理性.结果表明:最佳焦面位置与相机温度水平的关系近似成线性关系,最佳焦面位置变化量约 $0.08\sim 0.1\text{ mm}\cdot\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;当温度水平在 $(20\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化时,像面处在系统焦深范围内,系统传递函数变化量在 0.02 左右;当径向温差和轴向温差会大于 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 引起最佳焦面位置发生移动,若不调焦,传函会明显下降.

关键词:空间相机;热光学分析;热真空试验

中图分类号:V445.8

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.2068

0 引言

高分辨率空间相机工作时,受空间外热流和内部热源影响,使相机光机结构产生一定的温度变化,并且可能产生较大的温度梯度,对光学系统必将造成热光学误差,使光学系统产生光波前畸变,影响成像质量^[1-3].国外几种高分辨率空间望远镜都是采用均方根(Root-Mean-Square, RMS)波像差进行总体误差分配的,通常分配给热控系统的误差在数值上占总误差的一半左右^[4].传统的温度指标法,在处理达到衍射限的大口径高分辨率空间相机热设计时遇到困难具有很大的滞后性,费时费力,甚至有可能因为热控要求导致光机结构作较大的修改.同时这种方法具有一定的盲目性,往往对热控系统提出了过高要求,加大了热控成本和实施难度,降低了热控系统的可靠性^[5].本文利用热光学分析方法对某星载高分辨率相机进行了热分析,基于热光学分析的结果确定了温度指标.利用 RZK-3 真空罐进行了热真空成像试验,验证了热光学分析的正确性和温度指标的合理性.

1 热光学分析方法

所谓热光学分析或热光学设计,就是直接采用光学指标,将波像差(Front Wave Error, FWE)总

允值在整个系统内做分配,对高分辨率空间相机或空间望远镜的热设计进行评价和优化.先利用热分析软件计算相机在某热控指标下的温度场分布,再利用有限元软件计算出该温度场分布下光机结构及光学元件的热应力及热变形,最后利用光学设计分析软件 CODE—V 计算光学系统波像差.经过反复迭代计算,最终确定出合理的热控指标.

在进行热光学分析时,假定光学系统在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下波像差为 0.光学设计本身的少量残余像差与温度场变化无关,在热光学分析中不予考虑.

2 某相机热光学分析

某空间相机采用大口径共轴三反射镜光学系统型式,主次镜间隔为 694 mm.设计中充分考虑了系统无热化设计.主镜采用微晶玻璃,并采用中心支撑方式,其芯轴采用了低膨胀的殷钢材料;主次镜联结筒采用低膨胀的碳纤维复合材料,并专门设计了轴向和径向的热膨胀系数;主箱体采用钛合金铸件,主镜座采用钛合金.焦平面箱体位于主箱体之外,与主箱体之间热隔离.选择全系统波像差 RMS 作为指标,光学设计人员分配给全系统波像差 RMS 小于等于 0.07λ .通常将热学允差分配到总波相差的一半^[7],即 0.035λ .

初步分配给各环节的波像差指标为:主镜系统 0.02λ ;次镜系统 0.02λ ,主次镜间隔变化 0.015λ ;三镜系统 0.01λ .对应图 1,离焦量公差为 $\pm 0.05\text{ mm}$.

* 国家高技术研究发展计划重大专项资助

Tel:029-88887673

Email:crl@opt.ac.cn

收稿日期:2010-04-06

修回日期:2010-07-02

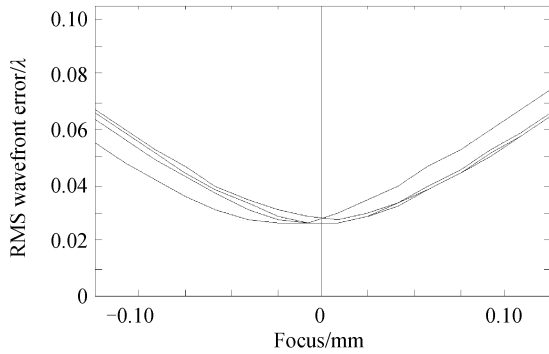


图1 系统离焦量与波像差 RMS 间的关系
Fig. 1 WFE versus system defocus

2.1 相机整体温度水平变化的影响分析

因为光学系统采用了基于卡塞格林型式的共轴三反射系统,主次镜的光焦度较大.利用高斯成像公式容易导出由于温度变化导致的光学系统的像面位移

$$\Delta x_j = \frac{(\varphi_j - 1)^2 r_j^2 \alpha_j \Delta T}{2(\varphi_j - 2)(\varphi_j - \alpha_j \Delta T - 2)} \quad (1)$$

式中, $\varphi_j = 1/f_j$. α_j 为反射镜的热膨胀系数; r_j 为反射镜的顶点曲率半径.整个系统的像面位移量为

$$\Delta P_0 = \sum_{j=1}^n \frac{(\varphi_j - 1)^2 r_j^2 \alpha_j \Delta T \beta_{j+1,n}^2}{j 2(\varphi_j - 2)(\varphi_j - \alpha_j \Delta T - 2)} \quad (2)$$

式中, $\beta_{j+1,n}$ 为 L_j 透镜后各组透镜的垂轴放大率的乘积.

针对本相机而言,主镜的曲率半径和主镜的膨胀系数,对整个系统焦面位移起了主要的作用.粗略计算当温度变化 1°C ,由光学系统本身变化引起的像面位移约 0.041 mm .

相机光机结构变形包括结构热变形导致的光学元件刚性位移以及光学元件在热环境改变时的参量变化,包括镜间距、离轴、倾斜、半径和非球面系数等的变化.

主次镜间隔影响系统后截距因子关系为 40 倍,为产生后截距温度漂移的主要因素,因此若对主镜与次镜联结的碳纤维镜筒结构进行更加严格的热控措施,可以进一步放宽对整个系统的热控温度水平的要求.

主镜整体温度变化 1°C ,带来的波像差增量(RMS)为^[7]

$$\text{WFE}_{\text{sonk}} = \frac{\text{OPD}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{1}{\lambda_u} \quad (3)$$

式中 OPD 为光程差, λ_u 为系统工作波长,取 $\lambda_u = 0.6\ \mu\text{m}$,代入数值得

$$\frac{\text{OPD}}{\sqrt{12}} \cdot \frac{1}{\lambda_u} = 1.879 \cdot 3e-4 \lambda \approx 0.0002 \lambda$$

可见主镜整体温度水平变化造成的波像差增量极小.同理可知,次镜和三镜整体温度水平变化造成的波像差增量也是极小量,在后面的计算中都可忽略.

2.2 轴向温度梯度对成像的影响分析

设主镜在光轴方向上两表面上存在温度梯度 ΔT_A ,由于轴向温差造成的波前差为

$$\text{WFE}_{\text{TAM}} = \frac{\cos(\theta)}{4.9} \cdot \frac{y^2 \cdot \alpha \cdot \Delta T_A}{t} \cdot \frac{1}{\lambda_u} \quad (4)$$

式中 y 为主镜通光半径; t 为主镜厚度; θ 为镜子的倾斜角.

代入数值计算主镜的波前差得: $\text{WFE}_{\text{TAM}} = 0.0047 \lambda$.

由于轴向温差引起的焦距变化为

$$\Delta f = \frac{2f^2 \alpha \Delta T_A}{t} = 0.284\ \mu\text{m}$$

$$\Delta R = 2 \times \Delta f = 0.5689\ \mu\text{m}$$

像面位移量

$$\Delta \text{BFL} = \beta^2 (\frac{1}{2} \Delta R + \Delta t) \quad (5)$$

式中 β 为主镜以后系统的横向放大率.

代入数据计算得: $\Delta \text{BFL} = 83.2\ \mu\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.可见当轴向温差在 1°C 以下,光学系统的焦面位置的移动处在焦深范围以内,系统不需要调焦.

2.3 径向温度梯度对相机像质的影响

就中心支撑的主镜而言,均匀的径向温差将引起曲率半径变化,从而导致离焦等像差.如果各个方向温差不一致,或主镜及其支撑结构不均匀,势必引入像散、彗差等像差,对于背部有支撑约束的主镜,这种情况导致的变形较为严重.

径向温度梯度指标初步定为 0.3°C ,温度中心低,周边高.建立起数学模型后,通过有限元分析软件计算每个径向位置处的厚度,将反射镜各点进行拟合,得到一高次非球面面形.应用光学设计软件来分析面形变化后的光学系统成像质量.

分析热变形分析结果可以得到镜面变形的 PV 值 0.025λ ,调焦后(去掉变形数据中的离焦分量)的面形变化 RMS 小于 0.005λ .经计算,次镜本身径向温差引起的波像差增量极小,可忽略.在最恶劣情况下,次镜及其附属组件由于温度变化引起的光轴倾斜量为 $0.38''$.

2.4 结构热变形分析

采用 ANSYS 软件分析了不同温度工况下主次镜框的热变形,及其对镜面产生的应力.经过有限元分析,当径向温度梯度达到 0.3°C 时胶斑产生的力使主镜面形发生变化 0.002λ ,满足系统要求;另一

方面,由于结构径向温差导致各非球面光轴倾斜,镜框边缘两端温差 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时波像差为 0.0015λ .

2.5 波前差的综合

各组件内部变形具有相关性,保守的计算,各种因素引起的不可补偿的波像差采用线性相加的方法.各组件之间的波像差不相关,具有随机性,因此总和按照均方根的方法计算.经计算全系统总的波前差为 0.0328λ .

由于热引起的光学系统 MTF 的下降量 ATF

$$\text{ATF}(\nu) = \{1 - [(\frac{\omega_{\text{RMS}}}{0.18})^2][1 - 4(\nu - 0.5)^2]\} \quad (6)$$

式中, ω_{RMS} 为波前差, ν 为归一化频率.计算的 $\text{ATF} = 0.974$,可见在给定温度常下系统的 MTF 基本不变.热光学分析表明本相机光、机结构设计和材料的选择具有良好的热稳定性.

在实际工作中,仍然存在一些不确定的因素,如

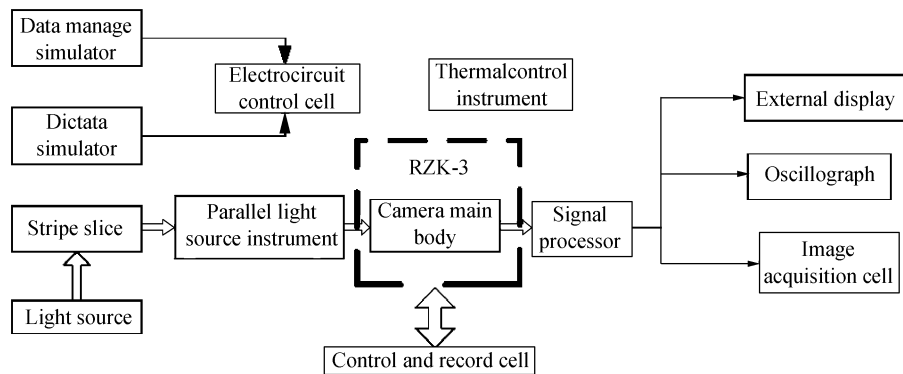


图2 相机热真空成像试验原理
Fig.2 Sketch of thermo vacuum imaging test

4 试验结果分析

4.1 温度水平对像质的影响

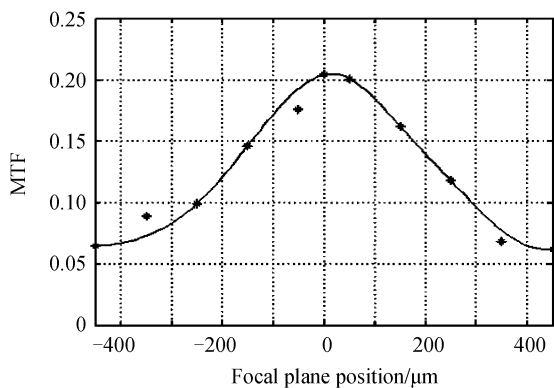
试验中,分别进行了温度水平为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的相机像质测试.结果表明,在热控指标范围内,相机的温度水平对像质影响不大,但会改变最佳焦面位置.最佳焦面位置与相机温度水平的关系近

对一些参量的选取存在偏差,会对分析结果产生影响,还需要进行试验来进一步验证.

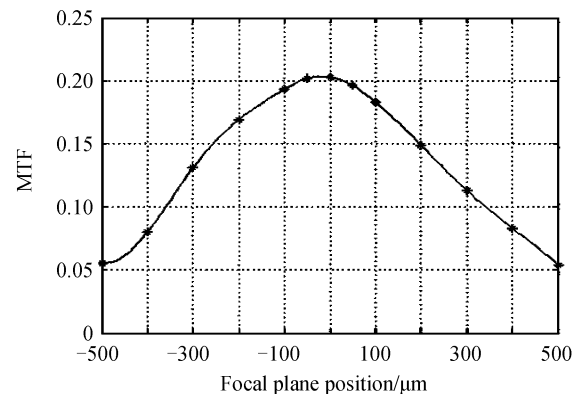
3 热真空成像试验

试验采用某单位的 RZK-3 真空罐及其平行光管.相机水平摆放在控温套内,在相机主体和控温套上设计有加热回路,通过控温使相机温度满足各试验工况的要求.在各工况试验时,待工况稳定后相机通过装于真空罐外的平行光管,使 CCD 器件接收到装在平行光管内的调制度测量专用条纹板的图像,经过真空罐外的图像采集、视频处理及记录设备观察输出图像的调制度来判断相机成像质量,确定最佳焦面位置.图 2 为相机热真空试验原理图.试验共设计了 11 个工况分别检测温度水平和温度梯度对相机 MTF 的影响.

似成线性关系,最佳焦面位置变化量约 $0.08 \sim 0.1\text{ mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.温度升高时,最佳焦面位置向前移动,温度降低时最佳焦面位置向后移动.当温度水平在 $(20 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化时像面处在系统焦深范围内,MTF 变化量在 0.02 左右,可以不调焦.与理论分析基本吻合.本文给出了部分试验结果.图 3 是不同温度水平下的过焦曲线.



(a) MTF vs focal plane position at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) MTF vs focal plane position at $19\text{ }^{\circ}\text{C}$

图3 不同温度水平下的过焦曲线

Fig.3 MTF vs focal plane position in different temperature level

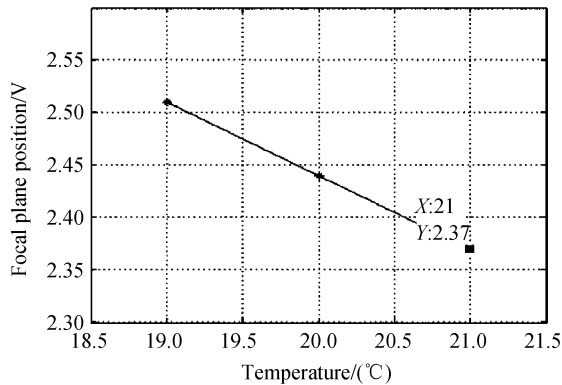


图4 最佳焦面位置与温度的关系

Fig. 4 Ideal focal plane position vs temperature

图4给出了最佳焦面位置随温度水平变化的情况。

4.2 温度梯度对像质的影响

温度梯度试验中,进行了径向 0.3/0.5/1.0/1.5/2 °C 和轴向 1.5/2.3 °C 几种组合工况下像质检测及最佳焦面测试(相机整体温度水平为 20 °C,次镜组温度稍低于主镜组温度)。从几组温度梯度拉偏试验结果来看(表 1),温度梯度会引起最佳焦面位置发生移动,若不调焦,MTF 会下降。但在最佳焦面处 MTF 未见明显变坏。

表 1 同一焦面位置下温度梯度对 MTF 的影响

Table 1 MTF vs temperature grads at same focal plane persition

Temperature level/(°C)	Main-second mirror mount temperature difference in axis direction/(°C)	Second mirror mount outer flange max temperature difference in perimeter direction/(°C)	Second mirror mount max temperature difference in perimeter direction/(°C)	Main mirror mount max temperature difference in radial direction/(°C)	Focal plane position/V	MTF	Remark
20±1	0.61	1.70	1.41	0.50	2.44	0.207	Focused
	0.42	3.52	2.16	0.47	2.44	0.173	Unfocus
	2.03	1.52	0.35	0.43	2.44	0.197	Unfocus

5 结论

通过热光学分析较好地预估了相机的像质与温度场之间的关系,证明了相机光机结构设计和材料选择的合理性,并据此确定了相机热控分系统的技术指标。在此指标下不需要进行在轨调焦,极大地提高了系统的可靠性。通过热真空成像试验验证理论分析的正确性。其后的在轨测试数据表明相机成像质量良好,没有因为热控原因引起焦面变动。

参考文献

- [1] ZHAO Li-xin, SHAO Ying. Summary of thermal control and thermal optical analysis for space optical syatem [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, **22**(2): 13-19.
- [2] WANG Hong, HAN Chang-yuan. Study on the thermal effects of the optical system in a aerospace camera[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(4):452-457.
- [3] CHEN Rong-li, GENG Li-yin, MA Zhen, *et al.* Thermal analysis and design for high resolution space telescope[J]. *Acta Potonica Sinica*, 2006, **35**(1): 154-156.
- [4] Orbiting Solar Laboratory(OSL)[R]. Perkin Elmer, 1991: 3-17, 3-21.
- [5] YANG Wen-gang, YU Lei, CHEN Rong-li, *et al.* Precise thermal control design and validation for high resolution space camera[J]. *Acta Potonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2363-2367.
- [6] ZHAO Li-xin. Thermal design and thermal-optical analysis of space solar telescope, a dissertation submitted to center for space science and applied research[R]. Chinese Academy of Sciences for the report of Post Doctor of Philosophy, 2000.
- [7] WALLACE N W, KAHAN M A. First-order thermo-optical and optomechanical wavefront error analysis [C]. *SPIE*, **3130**: 109-120.

技术,2003,**29**(4): 452-457.

[3] CHEN Rong-li, GENG Li-yin, MA Zhen, *et al.* Thermal analysis and design for high resolution space telescope[J]. *Acta Potonica Sinica*, 2006, **35**(1): 154-156.

陈荣利,耿利寅,马臻,等.空间相机的热分析和热设计[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 154-156.

[4] Orbiting Solar Laboratory(OSL)[R]. Perkin Elmer, 1991: 3-17, 3-21.

[5] YANG Wen-gang, YU Lei, CHEN Rong-li, *et al.* Precise thermal control design and validation for high resolution space camera[J]. *Acta Potonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2363-2367.

杨文刚,余雷,陈荣利,等.高分辨率空间相机精密热控设计及验证[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2363-2367.

[6] ZHAO Li-xin. Thermal design and thermal-optical analysis of space solar telescope, a dissertation submitted to center for space science and applied research[R]. Chinese Academy of Sciences for the report of Post Doctor of Philosophy, 2000.

赵立新.空间太阳望远镜的热设计与热光学分析[R].中国科学院空间科学与应用研究中心博士后出站报告, 2000.

[7] WALLACE N W, KAHAN M A. First-order thermo-optical and optomechanical wavefront error analysis [C]. *SPIE*, **3130**: 109-120.

王红,韩昌元.温度对航天相机光学系统影响的研究[J]. *光学*

Thermal-optical Analysis and Tests for High Resolution Space Camera

CHEN Rong-li¹, MA Zhen¹, YANG Wen-gang¹, YU Lei², HE Tian-bing¹, LI Ying-cai¹

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *The No. 5 Academy of Aerospace Science and Technology Groupe of China, Beijing 100080, China*)

Abstract: Temperature field distributing of a high resolution space telescope is analyzed by thermal-optical method based on optical front-wave-error theory, and thermal control target is ascertained. The thermal tests in the vacuum are carried out to validate the analysis. Test results indicate that the ideal focal plane position vs temperature level are linearity, and changes scope approximately $0.08\sim 0.1\text{ mm}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. As the macrocosmic temperature changing within $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$, system MTF change about 0.02. When the temperature grads are more than 2°C in axis direction and diameter direction, the ideal focal plane position departure happens and the MTF decline obviously if unfocus.

Key words: Space camera; Thermal-optical analysis; Thermal-vacuum test



CHEN Rong-li was born in 1973. He received the Ph. D. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, in 2006. Now he works as a researcher and his research interests focus on space optical remote.