

文章编号 1004-924X(2012)06-1175-07

测绘相机的温度适应性

韩旭^{1*}, 马军², 黎明³, 付跃刚¹, 王加科¹

- (1. 长春理工大学光电工程学院, 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;
3. 航天东方红卫星有限公司机热工程部, 北京 100080)

摘要:分析了温度对三线阵测绘相机传递函数和交会角的影响,通过热光学计算确定了测绘相机的热控指标。首先,在设定测绘相机热载荷状态的基础上,用有限元方法分析了温度场及热弹性变形;利用 Zernike 多项式进行波面拟合,代入光学软件考察温度对光学系统传递函数的影响,得到测绘相机光学传递函数在假定温度场作用下的下降系数。然后,进行了测绘基座的热尺寸稳定性分析,并在此基础上考察了温度对测绘相机交会角的影响。实验显示,上述分析避免了热控设计的过设计或设计不足,为制定合理的热控设计指标提供了数据依据。

关键词:三线阵测绘相机;传递函数;交会角;热控指标

中图分类号: V447.3; V416.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1175

Temperature adaptation of mapping camera

HAN Xu^{1*}, MA Jun², LI Ming³, FU Yue-gang¹, WANG Jia-ke¹

- (1. College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130033, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 3. Structural and Thermal Engineering Department, Aerospace DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100080, China)
- * Corresponding author, E-mail: frequency126@126.com

Abstract: The effect of temperature on the transfer function and space intersection angles of a three-line mapping camera was analyzed and the thermal control index of the three-line mapping camera was calculated by a thermal-optical method. First, the temperature field and thermal elastic deformation were analyzed with Finite Element Method (FEM) on the basis of hypothetic thermal loads and the wave surface fitted with a Zernike polynomial was put into an optical software to explore the effect of temperature on the optical transfer function. Then, the temperature regressive data of transfer function for the mapping camera were obtained in an assumed temperature field. Furthermore, the thermal size stability of a mapping base was analyzed and the effect of temperature on the intersection angles of the three-line mapping camera was gotten. Experiments show that the over or short thermal control designs can be avoided with the proposed method and it can provide reasonable data for thermal con-

收稿日期:2011-12-11;修订日期:2012-02-15.

基金项目:国家重大工程项目

trol indexes.

Key words: three-line mapping camera; transfer function; intersection angle; thermal control index

1 引言

三线阵测绘系统由地物目标、大气环境、立体测绘相机、星敏感器、测绘平台、星船平台、姿轨控制系统、数传系统与数据处理等众多环节构成,它们还是测绘相机遥感系统的外链路^[1]。该系统的输入是地面目标的辐射特性,输出是经过图像处理后的带有高程数据的立体图像。为满足输出真实反映地面目标的几何特性的需求,要求该系统具有较高的传递函数 MTF 和测绘精度 δ 。其中,立体测绘相机是整个外链路的核心。

三线阵 CCD 立体测绘相机由具有一定交角的前视、正视和后视线阵 CCD 阵列构成的光学系统组成。该相机在轨工作时受到严酷的空间热环境的考验,由于采用折射式光学系统,温度变化会使光学元件的折射率发生变化,形成折射率梯度;光学元件的不均匀热膨胀则会导致面型变化;结构热变形导致光学元件产生刚体位移,造成离轴、离焦和相对倾斜等问题。这几种效应都会使光学系统产生视轴漂移、波前畸变,使光学系统的传递函数下降导致成像质量变坏^[2-6]。

在空间相机的初始设计阶段,热控指标设定数值往往严于实际需要的温控指标,这样就会造成热设计的过设计^[7]。而热光学试验^[8-9]只有在相机制造完成后才能实现,因此,如何根据测绘相机的特点提出合理的热设计指标是热控设计的关键。本文以测绘相机为对象,通过假定温度场描述和热光学计算,得到了测绘相机在各种温度场作用下的光学传递函数下降系数,由此计算出了测绘相机各种温度的场温度范围,合理地提出了测绘相机的设计指标,避免了热设计的过设计或设计不足^[10]。

2 温度对相机传递函数的影响分析

利用计算机仿真手段进行测绘相机热光学特性计算,传统方法的具体步骤如图 1 所示。在小

变形条件下,传递函数是温度的单值函数,可以近似为线性计算,因此本文仅仅计算设定温度场热弹性变形一次,得到光学传递函数下降系数,即 $MTF/^\circ C$,通过计算就可以得到最大允许的 MTF (0.2) 时的温度极限值(热控指标)。

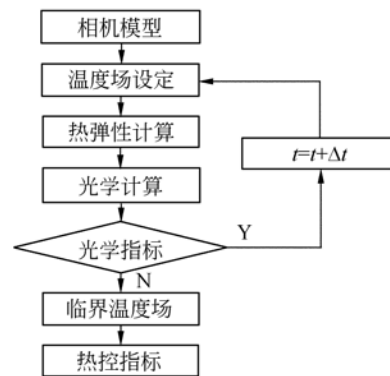


图 1 测绘相机热设计指标计算流程

Fig. 1 Calculation flowchart of thermal control index for three-line mapping camera

2.1 原始光学系统

本文研究的测绘相机采用图 2 和图 3 所示的折射式光学系统,原始的光学传递函数曲线如图 4 和图 5 所示。

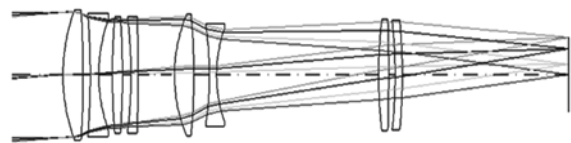


图 2 正视相机光学系统结构图

Fig. 2 Optical system of elevation camera

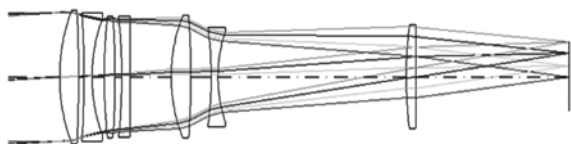


图 3 后视相机光学系统结构图

Fig. 3 Optical system of back camera

从原始设计的光学传递函数可以看出,正视和后视相机都满足传递函数大于设计值 0.5 的要求。

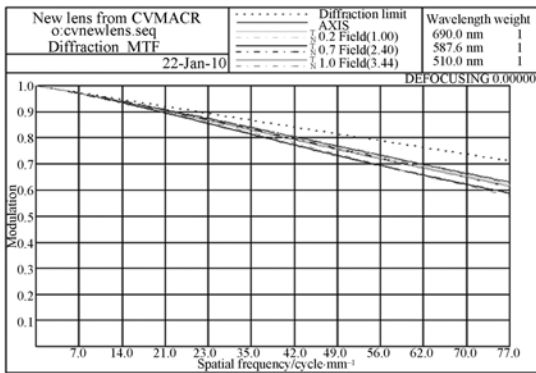


图 4 正视相机光学传递函数曲线

Fig. 4 Transfer function curve of elevation camera

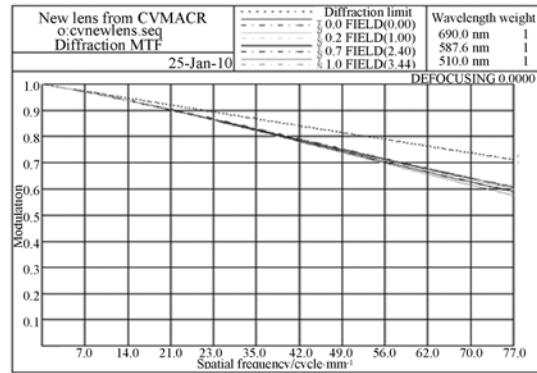


图 6 正视相机 6 °C 轴向温差传递函数曲线

Fig. 6 Transfer function curve of elevation camera under 6 °C axial temperature difference

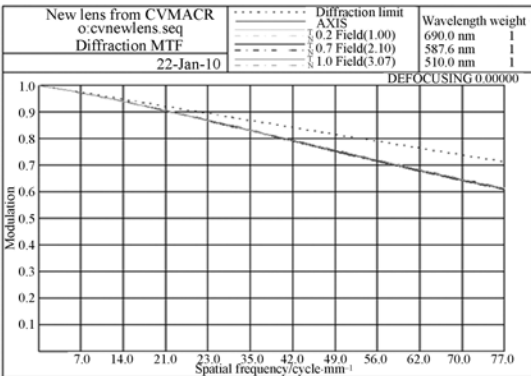


图 5 后视相机光学传递函数曲线

Fig. 5 Transfer function curve of back camera

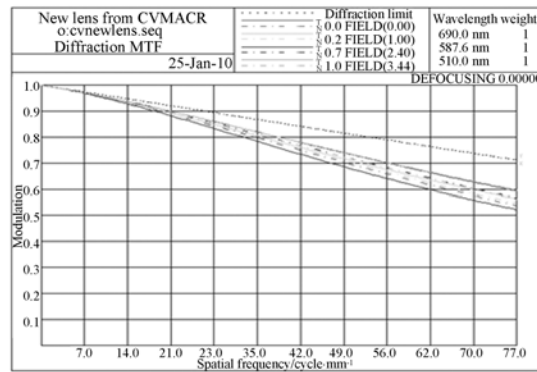


图 7 后视相机 6 °C 轴向温差传递函数曲线

Fig. 7 Transfer function curve of back camera under 6 °C axial temperature difference

2.2 温度对光学系统影响

2.2.1 轴向温差对光学系统的影响

对正视和后视相机(原始温度假设为 18 °C)两端(相机的入光口和电箱)都加载 15~21 °C 的边界条件,进行温度场计算,并将温度作为载荷施加到结构模型上,约束测绘基座与舱体相连位置进行热弹性计算。经数据后处理得到所有光学元件的面形变化,在 CODEV 中将面形数据加给原始光学系统,调焦后温差 6 °C 对光学系统影响变化的传递函数曲线如图 6,7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出,正视相机各视场的平均传递函数下降 3.3%,温度下降系数为 0.003/°C;后视相机各视场平均传递函数下降 6.9%,温度下降系数为 0.007/°C,正视相机的各视场平均传递函数变化比后视相机要小得多,说明后视相机对轴向温差的敏感性较强。

2.2.2 径向温差对光学系统影响

在 CODEV 原始光学系统中,以半径 1 mm 分割光学元件,在半径 1 mm 处

加载 0.5 °C,在通光口径加载 1 °C,人为设定 1 °C 径向温差考核相机传递函数。径向温差主要影响光学元件折射率的变化。调焦后 1 °C 径向温差对光学系统传递函数影响变化的传递函数曲线如图 8,9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出,正视相机各视场平均传递函数下降 21.9%,温度下降系数为 0.134/°C;后视相机各视场平均传递函数下降 30.8%,温度下降系数为 0.188/°C。正视相机的各视场平均传递函数变化比起后视相机要小得多,说明后视相机对径向温差敏感性较强。

2.2.3 温度水平对光学系统的影响

将正视相机和后视相机及测绘基座整体拉升到 21 °C,计算热弹性变形,提出所有的光学元件的面形,在 CODEV 中将面形数据加给原始光学系统。调焦后 3 °C 整体水平温升对光学系统传递函数影响变化的传递函数曲线如图 10,11 所示。

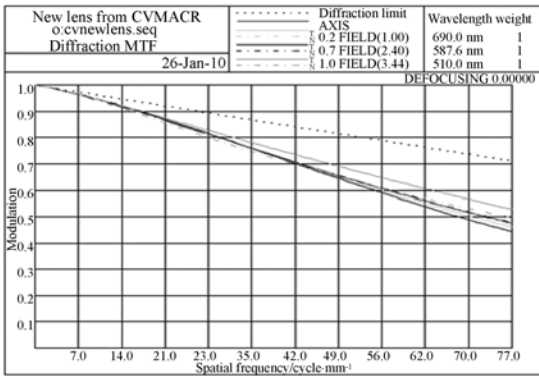


图 8 正视相机 1 °C 径向温差传递函数曲线

Fig. 8 Transfer function curve of elevation camera under 1 °C radial temperature difference

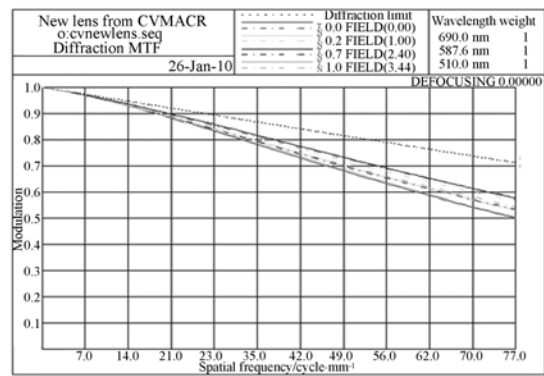


图 11 后视相机 3 °C 均匀温升传递函数曲线

Fig. 11 Transfer function curve of back camera under 3 °C temperature rising

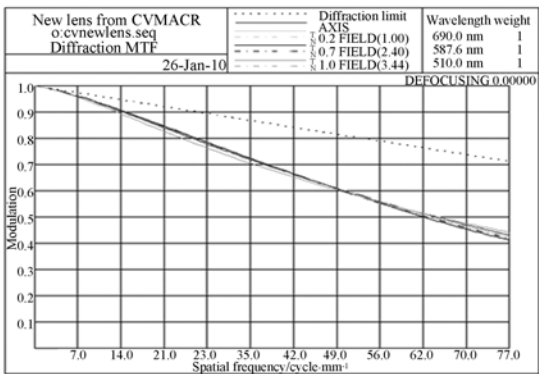


图 9 后视相机 1 °C 径向温差传递函数曲线

Fig. 9 Transfer function curve of back camera under 1 °C radial temperature difference

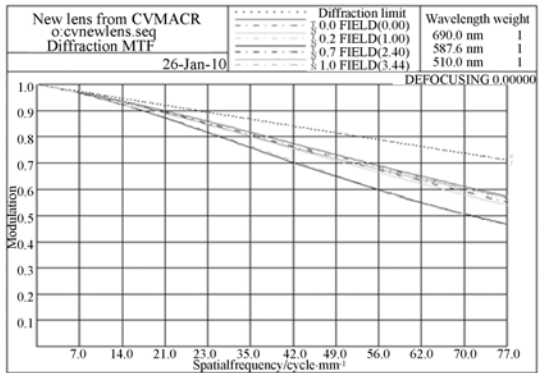


图 10 正视相机 3 °C 均匀温升传递函数曲线

Fig. 10 Transfer function curve of elevation camera under 3 °C temperature rising

从图 10 和图 11 可以看出,正视相机各视场平均传递函数下降 12.1%,温度下降系数为 0.025/°C;后视相机各视场平均传递函数下降 13.3%,温度下降系数为 0.027/°C。正视相机的

各视场平均传递函数变化与后视相机相差不多,说明两台相机对整体温升的敏感性一致。

2.2.4 轴向温差与径向温差共同作用对光学系统的影响

对正视和后视相机同时作用 6 °C 轴向温差和 1 °C 径向温差,以考察径向温差与轴向温差共同作用对测绘相机光学系统的影响。调焦后 6 °C 轴向温差和 1 °C 径向温差对光学系统传递函数影响变化的传递函数曲线如图 12,13 所示。

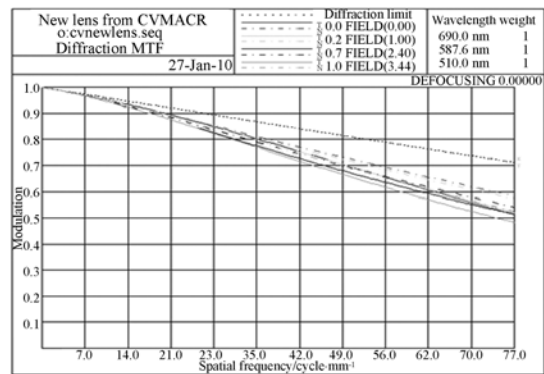


图 12 正视相机 6 °C 轴向温差和 1 °C 径向温差共同作用传递函数曲线

Fig. 12 Transfer function curve of elevation camera under 6 °C axial and 1 °C radial temperature differences

从图 12 和图 13 可以看出,正视相机各视场平均传递函数下降 16.8%,后视相机各视场平均传递函数下降 12.7%。正视相机的各视场平均传递函数变化大于后视相机,这说明在轴向温差和径向温差共同作用时正视相机的温度敏感性较强。与单独加载轴向温差或径向温差比较看来,

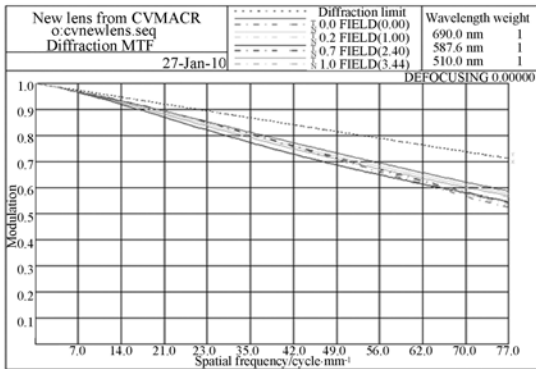


图 13 后视相机 6 °C 轴向温差和 1 °C 径向温差共同作用传递函数曲线

Fig. 13 Transfer function curve of back camera under 6 °C axial and 1 °C radial temperature differences

轴向和径向温差共同作用下会减少对光学系统传递函数的影响。

表 1 各温度场分布下光学系统传递函数下降系数数据
Tab.1 Transfer function degressive data for temperature fields

温度场	正视相机		后视相机	
	下降率(%)	下降系数	下降率(%)	下降系数
$\Delta T_{axial} = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	3.3	0.003/°C	6.9	0.007/°C
$\Delta T_{radial} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	21.9	0.134/°C	30.8	0.188/°C
$T_{level} = \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$	12.1	0.025/°C	13.3	0.027/°C
$\Delta T_{axial} = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	16.8		12.7	
$\Delta T_{radial} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$				

分析结果可知(见表 1),径向温差对光学系统的影响最大,整体温升次之,轴向温差最小。同时加载径向温差和轴向温差,它们对光学系统的影响不是一种线性相加的关系,而是一种矢量相加的关系,呈现比单独径向温差影响要小的结果。

3 温度对相机交会角的影响

测绘基座作为整个测绘相机系统的安装平台,其热尺寸稳定性是保证各台相机之间位置精度的关键。根据热弹性理论,当测绘基座在无约束状态下受到均匀温升或者均匀温降时,测绘基座会均匀膨胀或收缩。由于测绘基座的约束点远离相机安装段,对测绘相机交会的影响可以忽略,因此,只考虑当测绘基座受到不均匀温差载荷,对交会角变化的影响。

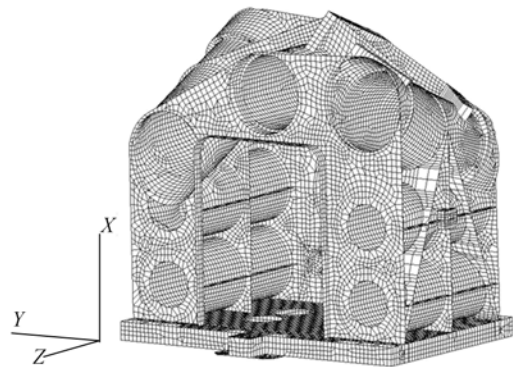


图 14 测绘基座的有限元模型

Fig. 14 Finite Element Mode(FEM) of mapping base

本文采用 MSC/Patran 建立测绘基座的有限元模型(如图 14),采用 matlab 编写了夹角计算程序,设定温度场,对测绘基座的热尺寸稳定性进行了分析,结果如图 15 和图 16 所示。经迭代计算,得到了测绘基座在各向温差作用下,三台相机交

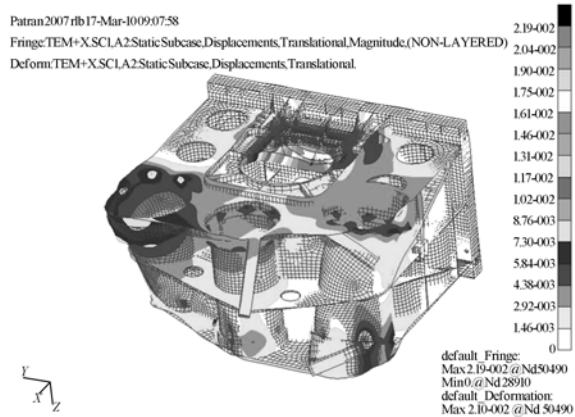


图 15 X 方向 1 °C 温差变形示意图

Fig. 15 Thermal deformation in X direction under 1 °C temperature difference

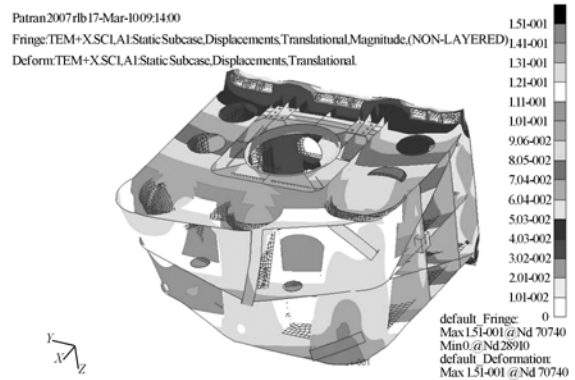


图 16 Y 方向 1 °C 温差变形示意图

Fig. 16 Thermal deformation in Y direction 1 °C temperature difference

会角变化满足要求时的临界温差,其结果见表 2。

表 2 测绘基座各向温差下测绘相机的交会角数据

Tab. 2 Intersection angles of mapping camera under different temperature differences on mapping base (")

	$\Delta T_X = 10\text{ }^\circ\text{C}$		$\Delta T_Y = 4\text{ }^\circ\text{C}$		$\Delta T_Z = 10\text{ }^\circ\text{C}$	
	+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z
$\theta_{\text{front}} - \theta_{\text{elevation}}$	2.5	-2.3	-2.3	2.6	2.8	-2.3
$\theta_{\text{back}} - \theta_{\text{elevation}}$	2.7	2.2	-2.6	2.3	-2.4	2.9

注:+X 的含义为+X 侧温度比-X 侧温度高;-X 的含义为-X 侧温度比+X 侧温度高,其他类似。

从计算结果可以看出,X 向的温差对相机夹角的影响较小,Y 向与 Z 向温差对相机夹角的影响较大。因此在热设计时,应注重 Y 向和 Z 向的温度均匀性。

参考文献:

- [1] 吴国栋. 一种三线阵测绘相机 CCD 像面的装调方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2395-2398.
WU G D. Alignment method of CCD image plane for three-line array mapping camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(11): 2395-2398. (in Chinese)
- [2] 王红, 田铁印. 轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1489-1494.
WANG H, TIAN T Y. Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1489-1494. (in Chinese)
- [3] 杨烽, 张伟, 陈时锦. 空间望远镜主镜的热光学特性分析[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 144-147.
YANG Y, ZHANG W, CHEN SH J. Study on the thermal optics property of primary mirror applied on a space telescope [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(1): 144-147. (in Chinese)
- [4] 赵鹏, 吴清文, 卢镔等. 航天相机主镜热特性研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(6): 64-68.
ZHAO P, WU Q W, LU E, *et al.*. A study of the thermal response of a primary mirror in spatial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(6): 64-68. (in Chinese)

4 结 论

本文通过热光学分析计算,为测绘相机热控指标制定提供了数据支持。结果表明,整个测绘相机光机系统在各种温度载荷作用下,透镜折射率梯度、镜面变形和光学元件位移等热效应对光学系统产生的影响之间具有一定的补偿作用,简单用光学误差分配的标准作为热控指标或盲目地提出过高的热控指标都是不科学的。通过热光学计算,对测绘相机不同方向、不同部位的温度控制要求进行详细分析,避免指标的不合理造成热控设计的过设计或设计不足,可提高设计效率,降低设计风险。

- [5] 傅丹鹰, 殷纯永, 乌崇德. 空间遥感器的热/结构/光学分析研究[J]. 宇航学报, 2001, 22(3): 105-110.
FU D Y, YIN CH Y, WU CH D. A study of thermal/structural/optical analysis of a space remote sensor [J]. *Journal of Astronautics*, 2001, 22(3): 105-110. (in Chinese)
- [6] 陶家生, 王世涛. 大型航天三线阵立体测绘相机精度敏感因素的分析[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 89-91.
TAO J SH, WANG SH T. Analysis on the large-scale space three-linear array camera precision sensitive factors [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(1): 89-91. (in Chinese)
- [7] 陈长征, 赵贵军, 张星祥, 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.
CHEN CH ZH, ZHAO G J, ZHANG X X, *et al.*. A calculation method for temperature tolerance of space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 668-673. (in Chinese)
- [8] 韩旭, 马军, 局波, 等. 三线阵测绘相机热光学试验交会角测试系统[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(12): 2959-2964.
HAN X, MA J, JU B, *et al.*. Measuring system of space intersection angle for three-line mapping camera in thermal-optical test [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2959-2964. (in Chinese)

- [9] 蒋山平,杨林华. 空间太阳望远镜热光学环境试验技术[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(2): 173-176.

JIANG SH P, YANG L H. Review on thermal-optical test for space solar telescopes [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25 (2): 173-176. (in Chinese)

- [10] 黎明,吴清文,江帆,等. 三线阵立体测绘相机热控

系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1367-1373.

LI M, WU Q W, JIANG F, *et al.*. Design of thermal control system for three linear array mapping cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (6): 1367-1373. (in Chinese)

作者简介:



韩旭(1974—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,1997年于长春工业大学获得学士学位,2000年于吉林大学获得硕士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事空间遥控器热光学的研究及家用电器振动和噪声故障诊断的研究。E-mail: frequency126@126.com



付跃刚(1972—),男,吉林东丰人,教授,博士,1995年于长春光学精密机械学院(现长春理工大学)获得学士学位,2004年、2008年于长春理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光学系统设计及测试方面的工作。E-mail: fuyg@cust.edu.cn



马军(1960—),男,吉林长春人,研究员,1983年于长春光学精密机械学院(现长春理工大学)获得学士学位,主要从事光学检测及检测设备的研制。E-mail: mj-4856@163.com



王加科(1983—),男,江苏沭阳人,助教,博士研究生,2007年,2010年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光机结构设计及装调测试方面的工作。E-mail: wangjk@cust.edu.cn



黎明(1983—),男,山东临沂人,博士,2005年于青岛大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事小卫星总体热控设计方面的工作。E-mail: dawn75918@126.com