

文章编号: 0253-2239(2010)07-2017-05

温度对星载相机的影响和温控指标的制定

巩 盾^{1,2} 王 红¹ 田铁印¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了克服空间环境剧烈的温度变化,利用有限元模型分析计算了星载三线阵相机在不同温度状态下的镜面面型畸变与筒长变化,并用输出的泽尼克(Zernike)系数表示畸变,将得到的 Zernike 系数与筒长变化量拟合入 CODE V 光学设计软件,进一步分析了光学系统在不同温度状态下的调制传递函数(MTF)曲线的下降;结合目标光学参数提出 2 °C 温控指标。针对轴向温差温控指标的各种温度水平制订实验工况,对星载三线阵相机分工况进行热光学实验,测得的实验室静态传递函数都达到或接近目标值 0.2,将测得的 MTF 值和理论分析结果相比较,验证了温控指标与温控手段的合理性。

关键词 热光学;三线阵相机;有限元模型;调制传递函数曲线

中图分类号 TP 732 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.2017

Temperature Effect on Imaging Performance of Three-Line CCD Satellite Camera and Temperature Indicators Affirmed

Gong Dun^{1,2} Wang Hong¹ Tian Tiejun¹

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The surface distortion and tube length changes of three-line CCD camera at different temperatures were analyzed with finite element model. the Zernike coefficients from finite element model were put into optical-design software CODE V to calculate the decline of modulation transfer function (MTF), and the 2 °C temperature indicators were made by optical parameters. Thermal optical experiment was done for a variety of temperature levels on the three-line CCD camera, and the measured static transfer function of the laboratory are at or close to target 0.2. The MTF of experiment was measured and compared with the result of theoretical analysis to affirm the temperature indicators and temperature control means were reasonable.

Key words thermal optics; three-line CCD camera; finite element model; modulation transfer function curve

1 引言

随着测绘卫星平面定位精度和高程定位精度的不断提高,对测绘相机系统的成像质量要求也越来越高。三线阵 CCD 相机是一种定位准确、对地面控制依赖性不强的对地测绘相机系统,是在一颗卫星上安置三台线阵推扫式相机,分成前视、正视和后

视,构成立体像对。它具有立体测绘、精确度高和稳定性好等诸多优点,已经由机载向星载等空间应用方向发展,利用这种星载系统可以获取立体影像、姿态、轨道位置以及其他信息,是对地对月的主流观测方案。

三线阵相机的测量方式是利用三组相机完成对

收稿日期: 2009-09-03; 收到修改稿日期: 2009-10-16

作者简介: 巩 盾(1982—),男,博士研究生,主要从事光学设计、光学系统的计算机辅助装调、温度对光学系统的影响等方面的研究。E-mail: gongdun@sina.com

导师简介: 王 红(1968—),女,研究员,主要从事航天相机及大型光电经纬仪光学系统等方面的研究与设计。
E-mail: wanghong@ciomp.ac.cn

地面的推扫成像,形成三幅具有一定视角且相互重叠的三线阵航带影像。三台相机相对独立工作,分别成像后再进行图像处理得到完整三维测绘数据。空间应用环境对三线阵相机的结构紧凑和稳定性提出了更高的要求,并加入了星敏感器。

空间环境下对系统的轻量化和坚固程度要求很高,所以三线阵相机选用质量轻、硬度高的钛合金作为镜筒材料;但钛合金的热膨胀系数较大,而太空中温差经常达到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,无论对光学系统和机械结构都会带来巨大影响,这就对主动热控、调焦和三镜筒间夹角的稳定性都提出了较高要求。为了达到主动热控与增强稳定性的目的,必须在光学设计与机械热设计阶段给相机提出严格的温控指标,同时,系统的热光学检测就变得至关重要^[1~5]。

2 三线阵相机的热光学理论分析

图 1 是典型的星载三线阵相机的系统结构图。根据相机技术参数,光学设计采用三片式物镜与 Petzval 物镜相结合的设计形式,前后视相机完全相同,不需另外设计,系统光路图如图 2 所示。

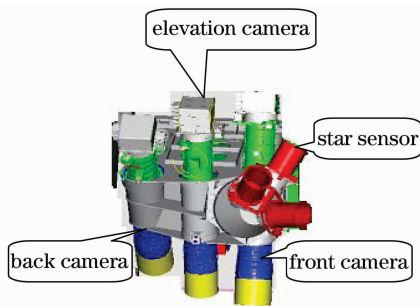


图 1 星载三线阵相机的系统结构

Fig. 1 System structure of three-line CCD satellite camera

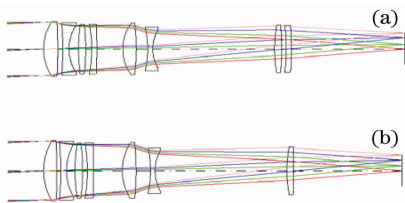


图 2 正视(a)与前视(b)系统光路图

Fig. 2 Optical path maps of elevation (a) and front (b) systems

为了在理论分析阶段准确地模拟实验环境温度对光学系统面型、机械筒长等方面的影响,采用 PATRAN 软件对三线阵光学系统进行有限元分析,正视与前、后视相机有限元模型如图 3(a),图 3(b)所示。将有限元分析得到的表征各面型畸变

的 Zernike 系数与筒长变化代入 CODE V 光学设计软件,分析焦点位置的变化与调制传递函数(MTF)曲线的降低量。

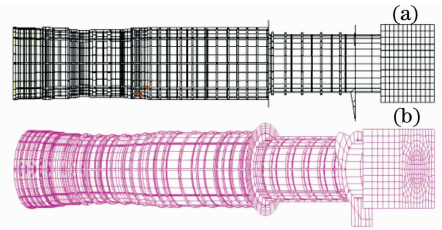


图 3 正视(a)与前、后视(b)系统有限元模型

Fig. 3 Finite element model of elevation (a) and front (b) systems

将有限元分析结果反复迭代后得到理论分析结果,由于相机口径不大,对径向与周向温差不敏感,并且对以上两方向主动热控能力较强,可以控制在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,不会对系统成像质量带来显著影响,因此热控指标与主动热控手段主要针对轴向温差。理论分析的初步结果将轴向温差温控指标定为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,并与实验结果相比较检验理论分析的结果,进一步确认温控指标的合理性^[6~9]。

3 实验平台搭建

将相机置于温度 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,直径 3 m 的热沉真空罐中,真空罐置于气压稳定台上,模拟空间真空环境,相机外表面粘贴隔热层、加热贴片与温度传感器,并将加热贴片引线与温度传感器延至真空罐外与计算机相连,由编制程序对相机进行测温 and 主动热控。

在真空罐窗口中嵌入两个由高温稳定性石英玻璃制作的小窗口作为前视和正视相机的入光口,两石英玻璃窗口外分别放置焦距为相机 6 倍、带有三维转台的平行光管,并事先刻划 MTF 测量分划板放于平行光管焦点处,以模拟无穷远处发出的有信息量的平行光使相机成像。图 4 为实验平台布局图。

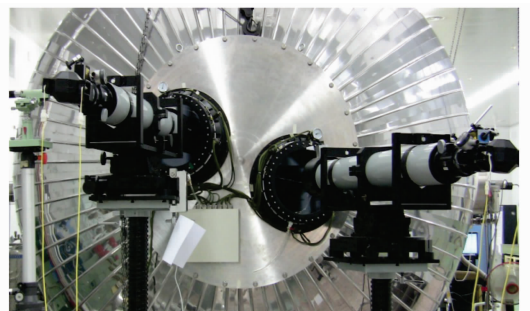


图 4 热光学试验总体布局图

Fig. 4 Layout of thermal optical experiment

4 各工况下实验与理论结果的比较

根据主动热控和系统结构,将三线阵相机的热光学试验分为常温真空、低温稳态、低温轴向拉偏和高温轴向拉偏 4 种工况分别进行。

常温水平下,相机前后表面温度均为 18 ℃,为相机光学设计的理想温度环境;低温稳态时,相机前后表面及镜筒均为 16 ℃;由于相机成像时 CCD 工作会产生热量,所以靠近 CCD 侧的温度要高于远离一侧,所以低温轴向拉偏时,相机靠近 CCD 侧仍为 18 ℃,另一侧为 16 ℃,轴向温差 2 ℃;高温轴向拉

偏时,相机靠近 CCD 侧为 20 ℃,另一侧为 18 ℃,轴向温差仍为 2 ℃。

将有限元分析结果输入 CODE V 软件进行理论分析,所得各工况在空间频率为 77 lp/mm 的 MTF 曲线如图 5~图 8 所示。

在实验室环境温度 18℃,空气抖动较小,稳定台无振动的情况下,真空罐内相机由主动热控调节至常温真空、低温稳态、低温拉偏、高温拉偏四个工况分别成像,测得频率为 77 lp/mm 的实验检测 MTF 值如表 2 所示

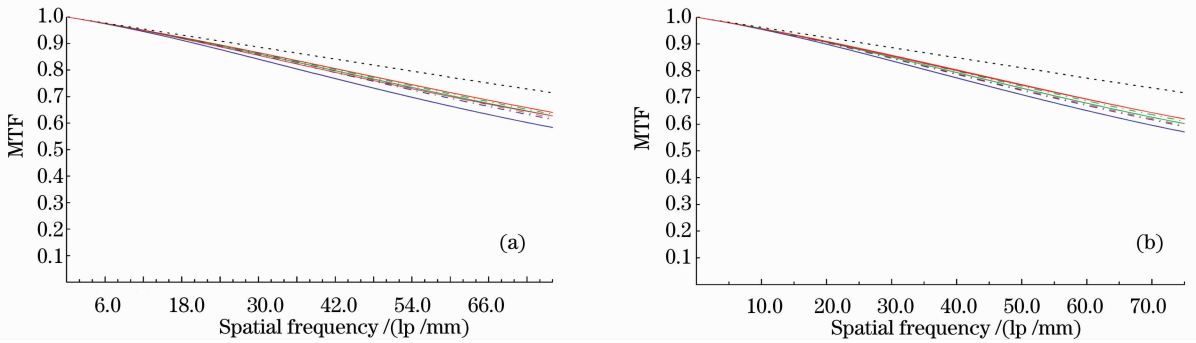


图 5 常温真空 MTF 曲线。(a)正规系统,(b)前视系统

Fig. 5 MTF curves at room temperature vacuum. (a) Elevation system, (b) front system

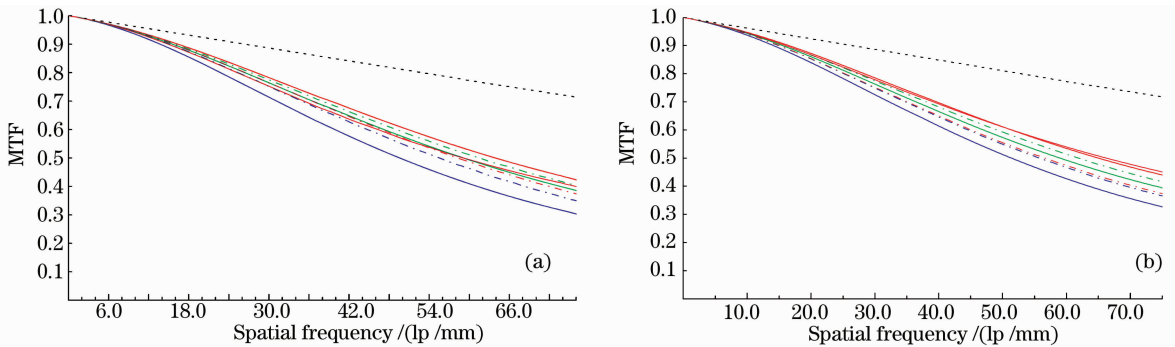


图 6 低温稳态 MTF 曲线。(a)正规系统,(b)前视系统

Fig. 6 MTF curves at steady low temperature. (a) Elevation system, (b) front system

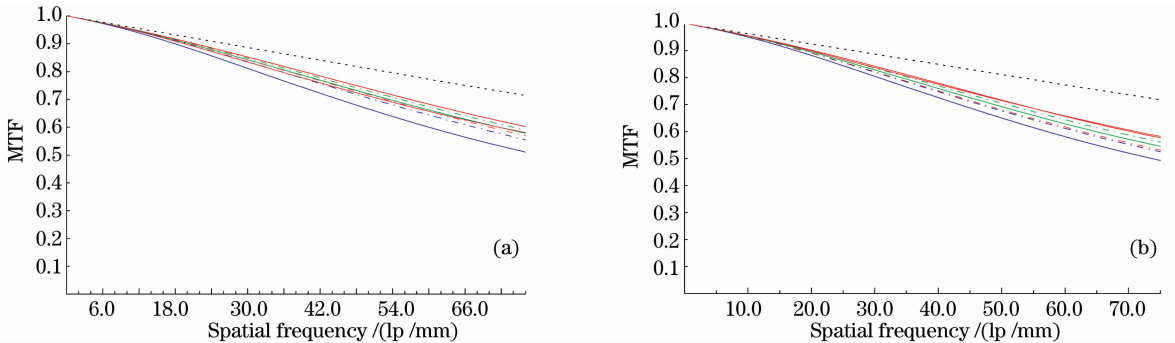


图 7 低温拉偏 MTF 曲线。(a)正视系统,(b)前视系统

Fig. 7 MTF curves at low temperature with axial temperature difference. (a) Elevation system, (b) front system

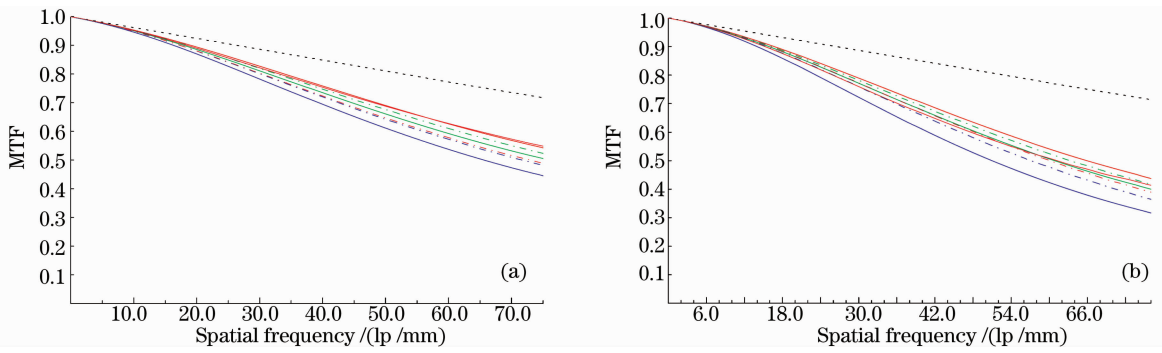


图 8 高温拉偏 MTF 曲线。(a)正视系统, (b)前视系统

Fig. 8 MTF curves of high temperature with axial temperature difference. (a) Elevation system, (b) front system

表 1 正视与前视相机实验检测 MTF 值

Table 1 MTF values of elevation and front system in thermal optical experiment

MTF	Elevation	Front
States of experiment	camera	camera
Room temperature vacuum	0.214	0.207
Steady low temperature	0.183	0.168
Low temperature with axial temperature difference	0.199	0.187
High temperature with axial temperature difference	0.188	0.177

各工况实验结果均都达到或接近光学参数目标值 0.2, 满足空间热环境下稳定成像的要求。实验检测 MTF 值为实验室静态传递函数, 与光学设计传递函数有一定的换算关系, 见(1)~(3)式^[10]。

$$f_{MT_static} = f_{MT_optics} \cdot f_{MT_CCD}, \quad (1)$$

$$f_{MT_optics} = f_{MT_design} \cdot f_{MT_process}, \quad (2)$$

$$f_{MT_CCD} = f_{MT_geo} \cdot f_{MT_electro}, \quad (3)$$

工程经验总结得

$$f_{MT_process} = 0.8, f_{MT_geo} = 0.637, f_{MT_electro} = 0.9,$$

则计算得光学系统 MTF 如表 2 所示。

表 2 实验结果换算光学 MTF

Table 2 Optical MTF calculated from experimental results

MTF	Elevation	Front
States of experiment	camera	camera
Room temperature vacuum	0.467	0.451
Steady low temperature	0.399	0.366
Low temperature with axial temperature difference	0.434	0.408
High temperature with axial temperature difference	0.410	0.386

实验结果与理论分析结果比较, MTF 值与理论结果较相近, 趋势完全相同, 数值的差距应为真空罐与平行光管的试验平台误差和空气抖动所造成。离焦量由于镜筒材料的热胀系数与机械调焦精度误差的影响和

理论结果存在一定偏差, 但方向基本一致, 很好的验证了理论分析的正确性与 2℃轴向温差温控指标的合理性, 完全达到了热光学实验的实验目的。

5 结 论

通过理论分析与模拟太空环境热成像实验相结合, 理论分析指导热成像实验, 实验结果又同时验证了理论分析的正确性。得到了合理的温控指标与手段, 进一步完善了温度对三线阵测绘相机等空间透射式相机成像质量影响的理论, 提出了一整套从计算机模拟到热成像实验的热光学分析手段, 可以应用于多种空间相机的热光学研究。

参 考 文 献

- Jin Guang, Nan Shousong. Payload of stereo mapping small satellite — three-line CCD stereo mapping camera [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, **14**(3): 34~37
金光, 南寿松. 立体测绘小卫星有效载荷——传输型三线阵 CCD 摄影测量相机 [J]. *遥感技术与应用*, 1999, **14**(3): 34~37
- Miao Jianyu, Zhang Liping, Wu Qingwen *et al.*. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1648~1653
苗健宇, 张立平, 吴清文等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1648~1653
- Hu Xin, Cao Xibin. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD image [J]. *Journal Harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(5): 695~699
胡 莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, **40**(5): 695~699
- Zhou Shengli. Analysis of three-linear TDICCD array application in cartography satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2007, **16**(4): 19~22
周胜利. 三线阵 TDICCD 在测图卫星中的应用分析 [J]. *航天器工程*, 2007, **16**(4): 19~22
- Wang Jintang, Wu Congde. Introduction of some foreign spaceborne optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, **23**(2): 15~20
王金堂, 乌崇德. 国外几种星载光学遥感器的发展情况简介 [J]. *航天返回与遥感*, 2002, **23**(2): 15~20
- Wang Hong, Tian Tiejun. Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system [J].

Optics and Precision Engineering, 2007, **15**(10): 1489~1494
 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
 7 Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS [M]. New York: Springer, 2005
 8 CODE V. Optical Design Software User's Guide [M]. VERSION 9.5, 2001

9 Gerhard Stoeckel, David Crompton, Gerard Perron. Advancements in integrated structural/thermal/optical (STOP) analysis of optical systems [J]. *SPIE*, 2007, 6675, 66750D
 10 Han Changyuan. Textbook of space [M]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2007
 韩昌元. 空间光学讲义 [M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2007

实验室推介及人才招聘

还在为实验室招不到合适的学生与员工发愁?
 还在为继续深造和就业寻找出路?
 中国激光杂志社推出“实验室推介和人才招聘”服务
 五千名专家数据库, 三万名作者数据库
 为您搭建沟通的桥梁

为满足广大光学专家和学生的交流和沟通的需求,帮助专家招收优秀的学生、招聘合适的研究人员,也给光学研究生提供更好的深造和就业机会,中国激光杂志社将在每次“光学前沿”会议上现场推出“实验室推介及人才招聘”服务,该服务自“光学前沿——第三届全国信息光学与光子器件学术会议”开始向所有参会代表免费提供。

参与推介的单位可以向中国激光杂志社提交 15 分钟 ppt 材料(视频资料)、实验室简介及人员招收、招聘材料,中国激光杂志社将提供单独时段与场地供代表交流。有意求职或深造的代表可将个人简历提交给中国激光杂志社,中国激光杂志社将把您的信息推荐给相关单位。

联系人:段家喜 编辑

电 话: 02169918426

E-mail: duanjiaxi@siom. ac. cn

《中国激光》杂志社有限公司

2010-05-11