

文章编号 1004-924X(2007)05-0668-06

空间光学镜头可适应边界温度的 CAE 计算方法

陈长征^{1,2}, 赵贵军^{1,2}, 张星祥¹, 卢 镔¹, 任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了空间传感器温度场的描述方法,建立了某空间传感器光学镜头的热光学分析模型,计算得到了该空间光学传感器温度水平和温差要求的热控指标。在对传感器在轨运行热载荷状态进行假定描述的基础上,用有限元方法进行了温度场及热弹性变形分析,得出假定温度载荷作用下光学传感器各光学表面的变形量及刚体位移量。利用 Zernike 多项式进行波前差拟合,得到 Zernike 多项式系数,代入光学系统,利用 CODEV 光学计算软件计算热载荷作用下光学镜头的传递函数(MTF)。通过迭代,得到光学系统满足传递函数指标 >0.4 要求的各温度场临界值,完成了从光学指标到热控指标的转换,避免了热控设计的过设计或设计不足,可以在设计方案阶段作为传感器结构的热适应性设计的参考,同时为制定合理的热控设计指标提供数据依据。

关键词:空间传感器;温度适应性;热控;CAE

中图分类号:TP732;V416.4 **文献标识码:**A

A calculating method for temperature tolerance of space telescope

CHEN Chang-zheng^{1,2}, ZHAO Gui-jun^{1,2}, ZHANG Xing-xiang¹, LU E¹, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A calculating method for the permissible temperature tolerance of the space telescope is studied and the temperature fields including every temperature state that the telescope is on orbit are described. The temperature field and thermal elastics based on a coupling model of the space telescope are analyzed to obtain the displacement of optics surface and then its corresponding deformation is fitted as Zernike polynomial to use in a optical system. The MTF of telescope is calculated by transforming the coefficient of the polynomial into software CODE V. Experiment results show that when the MTF meets to the optical target, the ultimate temperature tolerance of the space telescope can be obtained, which is the aim temperature scope for the thermal design.

Key words: spacetelescope; temperature tolerance; thermal control; CAE

1 引言

空间光学遥感器在轨工作中承受严酷的空间热环境的考验,为了保证空间光学遥感器在外空间恶劣的温度环境下正常工作,提高空间光学遥感器的空间热环境适应能力,人们已经做了很多努力,也取得了一些成果,如从各个方面提高遥感器自身的成像能力^[1]、利用光学补偿的方法^[2]、选用热畸变更小的镜坯材料以及采用光学元件与支撑构件的线胀系数匹配等。这些方法在一定程度上增强了空间光学遥感器的热环境适应能力,降低了对空间遥感器热设计指标的要求,然而好的热控措施仍然是空间光学遥感器能顺利完成空间观测任务的必要保证^[3]。如何增强空间遥感器本身的温度环境适应能力,提出合理的结构设计,并在此基础上提出合理的热设计指标是做好空间光学遥感器热控设计的关键因素。在空间光学遥感器的设计阶段,设计人员往往保守地提出较高的热控指标要求,从而导致热设计难度增加,研制成本提高,可靠性降低。

本文提出了空间光学遥感器的热光学计算方法,并通过温度场描述和光机热集成的热光学计算,预示了光学遥感器对温度载荷的敏感程度,得出保证光学遥感器能够成像的合理温度范围,从而完成了遥感器从光学指标到温度指标的转换,合理地提出了光学遥感器的热设计指标,避免热设计的过设计或设计不足。

2 计算流程

利用计算机仿真手段,进行空间光学遥感器镜头可适应边界温度(将作为镜头热控设计的指标)计算,流程如图1所示。首先,对光学遥感器进行温度场载荷的设定;第二,计算在设定温度场作用下,光学遥感器热弹性变形的情况,并提取光学表面的变形参数进行波面拟合。第三,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是否能够满足光学遥感器的光学指标。通过以上3个步骤的反复迭代计算,最终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。

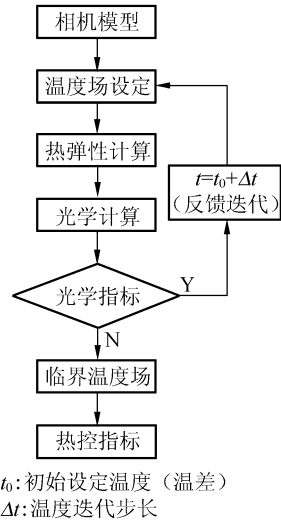


图1 空间光学遥感器热设计指标计算流程图

Fig. 1 Flow chart of calculating the temperature tolerance of space telescope

3 温度场描述

温度场的描述方法是空间光学遥感器热控指标计算的关键问题。针对空间光学遥感器自身特点,对光学遥感器在轨工作可能存在的温度场状态进行描述,使计算分析设定的温度载荷工况能够全面覆盖在轨可能出现的温度场状态。根据轨道类型的不同,空间光学遥感器所受的温度载荷也不同,对热设计提出不同的要求。各种不同的温度载荷在仿真设计阶段要求都能给以充分的模拟,这就要求对空间光学遥感器可能经受的温度场情况进行充分的描述。

对于空间光学遥感器的温度场描述主要可从均匀温度水平和光学遥感器内部的温差两个方面进行。对于各种不同的光学系统,可以有不同的温度场描述方法,根据所取坐标参考的不同来进行。例如,对于轴对称的同轴系统,可以采用柱坐标。温差的描述主要从轴向、径向、周向三个方向进行,对于离轴的非圆周对称系统可以采用笛卡儿坐标,主要对三个坐标方向的温差描述。

确定光学遥感器的温度场描述方法后,就可以人为的进行温度场假定,进而探讨光学遥感器在各种温度载荷作用下的温度载荷适应能力。

本文探讨的光学遥感器的轨道采用太阳同步轨道,经受的空间温度载荷相对稳定;光学系统为

如图 2 所示的卡塞格林光学系统,外形结构为圆柱形,反射镜位置及光路如图 3 所示。本文采用圆柱坐标系对可能存在的温度场进行描述,分别为均匀温度水平和沿轴向、周向、径向三个方向的温差,温度场描述设定如表 1 所示。

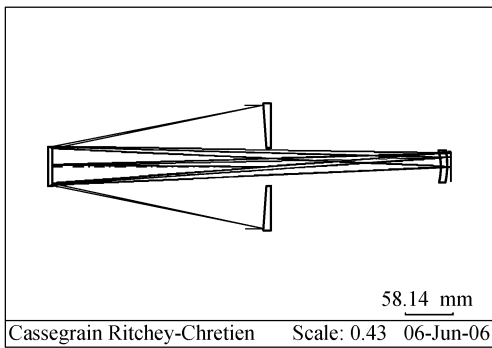


图 2 空间光学遥感器光学系统光路图

Fig. 2 Light rays of the optical system in space telescope

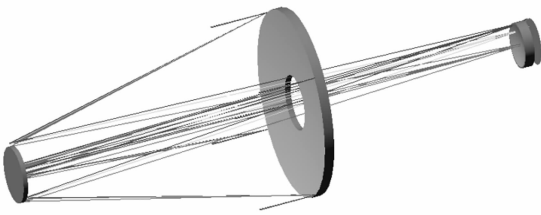


图 3 光学遥感器结构示意图

Fig. 3 Mirrors of telescope

表 1 设定光学遥感器初始温度载荷
Tab. 1 Assumed initial temperature load for iteration calculation

类别	t_0 (°C)	Δt (°C)
温度水平	1.0	1.0
轴向温差	1.0	1.0
周向温差	1.0	1.0
径向温差	1.0	1.0

4 热光学计算

根据光学遥感器温度场的描述及设定的温度条件进行热光学计算。热光学计算是计算在给定的温度载荷作用下,由于结构的热弹性变形引起的光学表面的面形变化、几何位置变化及透镜折射率梯度的变化所引起的光学系统光程差的变化

情况。对于反射系统,主要关心光学反射面的面形变化和几何位置变化。空间光学遥感器的热光学计算包括温度场计算、热弹性计算和光学计算 3 个主要步骤,光学系统成像优劣的一个重要指标是系统的光学传递函数 MTF。本文光学遥感器镜头传函指标为 $MTF(@60 \text{ lp/mm}) \geq 0.4$ 。

4.1 温度场计算

热光学计算的第一步是利用给定的温度边界条件,计算整个光学遥感器的温度场分布,在热的传递路径中考虑连接构件间的接触热阻、热辐射耦合等因素。以设定的温度载荷作为边界,计算整个光学遥感器的整机温度场分布。本文采用 TMG 软件作为温度场分布的计算工具。

4.2 热弹性计算

热光学计算的第二步是热弹性计算,第一步计算得到的温度场分布作为本步的边界条件,作为温度载荷施加到遥感器,计算在该温度场作用下遥感器的热弹性变形情况,得到光学表面面形以及光学元件间相对位置变化,进而转换为光学计算的输入条件,进行光学性能评价计算。本文利用有限元分析软件(MSC. PATRAN/NASTRAN)建立有限元模型如图 4 所示,把 TMG 所计算的光学遥感器的温度场载荷转换为结构分析的温度载荷,利用分析软件 NASTRAN 进行遥感器光学镜头的热弹性变形计算,计算完成后处理得到光学遥感器光学系统各个光学表面节点的位移 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 。各光学元件在温度载荷作用下的变形如图 5 所示。

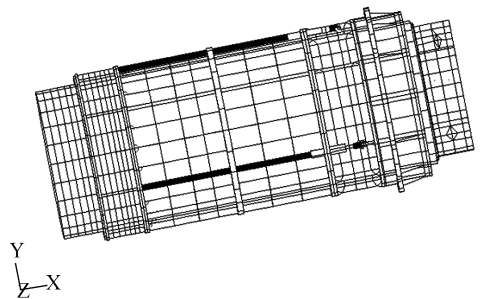


图 4 光学遥感器有限元模型

Fig. 4 FEA model of telescope

4.3 波面拟合

对热弹性变形结果进行光学表面提取,并进行波面拟合,利用 n 阶 Zernike 多项式(1)进行波

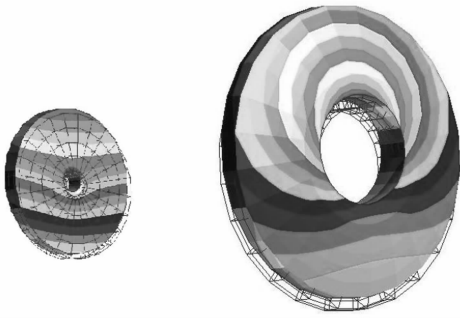


图 5 温度水平变化 10°C 时的光学元件变形图
 Fig. 5 Displacement and deformation of the mirror when temperature changed 10°C

面拟合,

$$\omega(x, y) = q_1 Z_1(x, y) + q_2 Z_2(x, y) + \dots + q_n Z_n(x, y) = q^T Z, \quad (1)$$

人们对 Zernike 多项式的拟合方法做了很多研究^[4-11],比较常用的方法有 Gram-Schmidt 正交化方法、协方差矩阵法、Householder 变换法等。本文利用 Householder 变换法进行计算,各个光学表面处理的拟合精度均小于 10 nm。

对热弹性变形的结果进行处理是基于对原有节点位置和热弹性变形的变形量的和,是系统发生热弹性变形后的新的光学表面的几何位置,波前差计算方法参照文献^[12]。

4.4 光学计算

利用有限元计算,得到镜面的变形值后,计算光学系统各个镜面的波前差值,并通过拟合得到 Zernike 多项式系数,写成 CODEV 软件可以接收的接口文件(*.INT)格式,代入 CODEV 软件中,

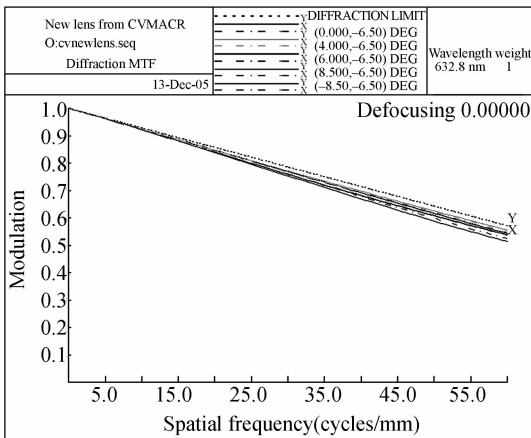


图 6 光学系统设计传函
 Fig. 6 MTF of optical system

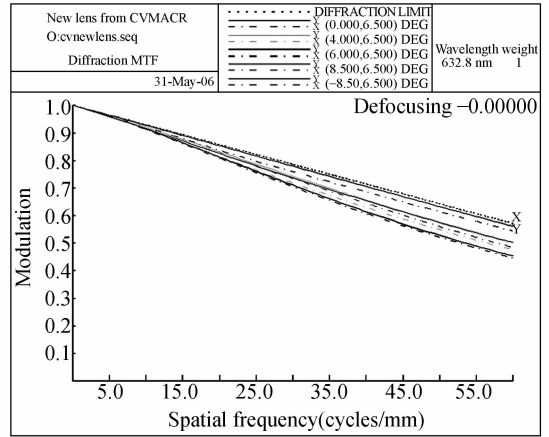


图 7 光学系统在温度水平变化 10°C 时的传函
 Fig. 7 MTF of the telescope when temperature changed 10°C

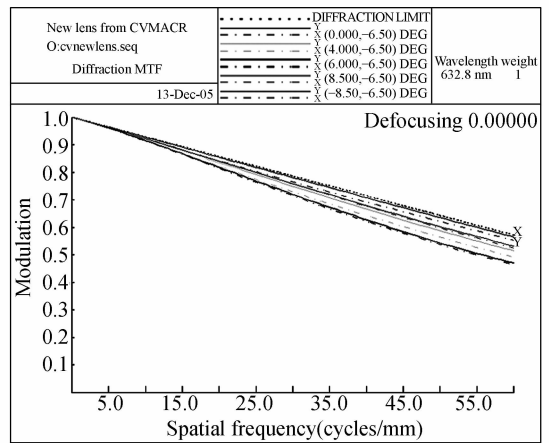


图 8 光学系统在轴向 16°C 温差作用下的传函
 Fig. 8 MTF of the telescope when temperature difference is 16°C on axis direction

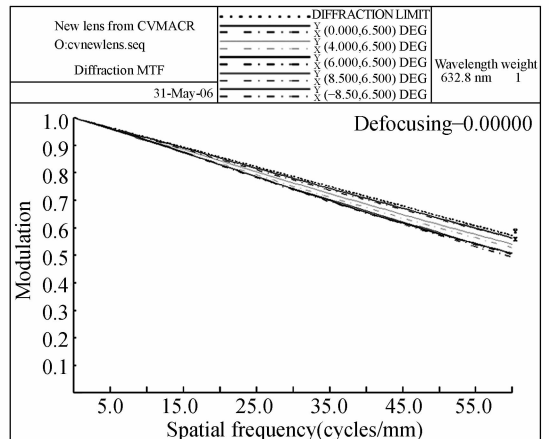


图 9 光学系统在周向 8°C 温差作用下的传函
 Fig. 9 MTF of the telescope when temperature difference is 8°C on radius direction

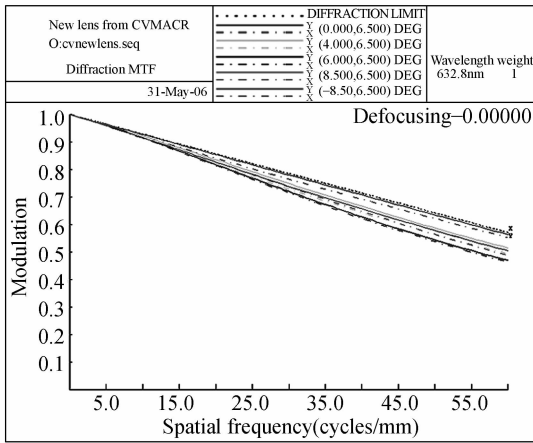


图 10 光学系统在径向 5℃温差作用下的传函

Fig. 10 MTF of the telescope when temperature difference is 5℃ on circle direction

得到光学系统在发生热弹性变形条件下光学系统的调制传函(MTF)曲线。该光学系统设计传函如图 6 所示。通过迭代计算,最终得到满足光学指标要求的临界温度范围为水平变化 10℃、轴向温差 16℃、周向温差 8℃及径向温差 5℃,所对应的光学系统传函分别如图 7、8、9、10 所示。

5 热控指标

通过光机热集成的分析方法计算,得到的示例光学遥感器在临界温度的传函(60 lp/mm)如表 2 所示,可以看出,整个光学遥感器温度适应范围为温度水平变化 10℃时,达到了光学指标要求的临界值;而对于光学遥感器温度分布的适应范围为径向温差 5℃、轴向温差 16℃、以及周向温差 8℃。可见本光学遥感器对径向温差最为敏感,对轴向温差不甚敏感。

根据热光学计算结果,得到整个光学遥感器的热控指标,由于地面光学装调温度为 20℃,整

个光学遥感器温度水平为 10~30℃,X 向温差 不大于 5℃,Y 向温差 不大于 16℃,Z 向温差 不大于 8℃。

表 2 各工况条件下的光学遥感器传函
Tab. 2 MTF(60 lp/mm) of the telescope
at different temperature loads

工况	视场		
	0	0.7	1
设计值	0.546	0.554	0.538
$T_{\text{水平}}(10)$	0.411	0.405	0.420
$\Delta T_{\text{径向}}(5)$	0.419	0.402	0.424
$\Delta T_{\text{轴向}}(16)$	0.429	0.403	0.422
$\Delta T_{\text{周向}}(8)$	0.429	0.403	0.423

6 结 论

通过光、机、热集成热光学计算,为光学遥感器的热控指标的拟订提供了科学依据,解决了过去在方案设计阶段无法合理拟订热控指标的难题,避免了制定热控指标的盲目性。整个光机系统在温度载荷作用下,各个反射镜变形和位移具有相互补偿的可能性,简单地用光学误差分配的标准作为单个反射镜的热控指标,或为了安全起见,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,可以得出光学遥感器系统在热环境条件下的适应能力,并可以对光学遥感器在不同温度条件下的光学性能进行预示,从而可以对遥感器不同方向,不同部位的温度控制要求有一个详细的数据分析,能够有的放矢地提出对热控设计的要求,避免了指标的不合理造成热控设计的过设计或设计不足。在遥感器的方案设计阶段提出合理的热控设计指标,提高了设计效率,降低了设计风险,并可以为以后热光学试验提供数据参考。

参考文献:

- [1] 赵贵军,陈长征,万志,等. 推扫型 TDICCD 光学遥感器动态成像研究[J]. 光学 精密工程,2006,14(2):291-296.
ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 291-296. (in Chinese)
- [2] ZHANG ZH W, YU X. Correcting of thermal and gravitational distortion of primary mirror on space camera by using adaptive optics[J]. *SPIE*, 2000, 4007: 200-209.
- [3] 胡金刚. 中国航天器热控技术进展[J]. 航天器工程, 2001, 10(3): 14-29.

- HU J G. Development of the spacecraft technology in China[J]. *Spacecraft Engineering*, 2001,10(3):14-29. (in Chinese)
- [4] 鄢静舟,雷凡,周必方,等.用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J].光学精密工程,1999,7(10):119-128.
YAN J ZH, LEI F, ZHOU B F, *et al.*. Algorithms for wavefront fitting using zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(10):119-128. (in Chinese)
- [5] 鄢静舟,孙厚环,高志强,等.用 Zernike 多项式进行波面拟合的一种新算法[J].数学物理学报,2000,20(3):378-385.
YAN J ZH, SUN H H, GAO ZH Q, *et al.*. A new algorithm for wavefront fitting using zernike polynomial[J]. *Acta Mathematica Scientia*, 2000,20(3):378-385. (in Chinese)
- [6] 莫卫东. Zernike 多项式拟合干涉波面方法研究[J].高速摄影与光子学,1991,20(12):389-396.
MO W D. The reserch into the method to fit interferogram with zernike polynomials[J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1991,20(12):389-396. (in Chinese)
- [7] MALACARA D, CARPIO-VALADEZ J M, SANCHEZ-MONDRAGON J J, *et al.*. Wavefront fitting with discrete orthogonal polynomials in a unit radius circle[J]. *Opt. Eng.*, 1990,29(6):672-675.
- [8] 单宝中,王淑岩,牛憨笨,等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J].光学精密工程,2002,10(6):318-323.
SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B, *et al.*. Zernike polynomial fitting method and its application[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(6):318-323. (in Chinses)
- [9] QI B, CHEN H, DONG N. Wavefront fitting of interferograms with Zernike polynomials[J]. *Opt. Eng.*, 2002,41(7),1565-1569.
- [10] 曹正林,廖文和,沈建新. Zernike 多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J].光学精密工程,2006,14(2):308-314.
CAO ZH L, LIAO W H, SHEN J X. A new algorithm for human eye's wave—front aberration fitting with Zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):308-314. (in Chinses)
- [11] 李锐钢,郑立功,薛栋林,等.大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J].光学精密工程,2006,14(4):534-538.
LI R G, ZHENG L G, XUE D L, *et al.*. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):534-538. (in Chinses)
- [12] JUERGENS R C, CORONATO P A. Improved method for transfer of FEA results to optical codes[J]. *SPIE*, 2003,5174:105-115.

作者简介:陈长征(1976—),男,山东人,博士研究生,研究方向为光学成像系统的光机热集成仿真 E-mail:may328@163.com