

小型辐射定标光学系统的光机热集成分析

肖庆生, 杨林华, 许杰

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 卫星遥感辐射定标光机系统在模拟空间环境下的热学光学特性会影响辐射定标试验的精度。文章针对离轴抛物镜和辅助平面反射镜组成的小型定标光学系统, 利用光机热集成分析技术建立其有限元模型, 在模拟空间环境下进行热变形分析; 选用在单位圆内正交的 Zernike 多项式作为基底函数, 采用最小二乘法完成了离轴抛物镜面形的拟合; 将相关数据读入光学软件, 分析了该系统在模拟空间环境下的像质变化。结果表明: 温度梯度对定标光机系统的影响主要表现在光学平台的刚性位移, 对抛物镜面形影响非常小, 光学系统像质变化量约为 $\lambda/37$ 。最后, 通过与刀口仪法的像质原位测量结果对比, 证明了光机热集成分析结果的准确性。

关键词: 辐射定标; 光机系统; 有限元方法; 集成分析

中图分类号: V416.8; TB115

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2013)05-0534-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.05.015

0 引言

模拟空间环境下的辐射定标试验主要用于对卫星光学遥感器的响应特性进行辐射定标, 为用户提供定标曲线^[1]。试验中, 定标光学系统处于真空低温环境, 因温度变化所引起的热变形使反射镜的同心度 (LOS) 发生变化并产生波前畸变 (WFE), 从而影响其像质。为了掌握真空低温环境对系统像质的影响, 并给遥感器定标精度分析提供依据, 有必要对定标光学系统及其支撑进行光机热集成分析。

1981年, 美国 Honeywell 公司的 Miller 等人^[2]率先提出了光机热集成分析方法。该技术近些年得到了飞速发展, 国外航天机构在空间望远镜等型号研制中广泛应用了光机热集成分析方法^[3-6]。

本文针对由通光孔径 $\phi 120\text{mm}$ 、焦距 956mm 、离轴角 10° 的离轴抛物镜和辅助平面反射镜组成的小型辐射定标光学系统, 利用光机热集成分析方法研究其在模拟空间环境下热学、光学特性的变化, 并与刀口仪法的像质原位测量结果对比, 以验证仿真分析结果的准确性。

1 光机热集成分析

光机热集成分析方法是综合考虑机械结构、热变形和光学成像之间关系的一种系统分析方法, 实

现了在力学载荷、热载荷综合作用下对光学系统性能的快速评估。以往, 对该类光学系统的性能评价是通过机械结构进行有限元分析, 将变形结果与光学系统设计提出的对结构变形的要求进行比较, 来衡量机械和热载荷作用下光学性能是否满足技术要求。这样的验证往往存在片面性, 而采用光机热集成分析方法则能更准确、综合地评价光学系统的性能变化。

光机热集成分析流程简称 STOP (Structure-Thermal-Optical) 分析流程, 如图 1 所示。

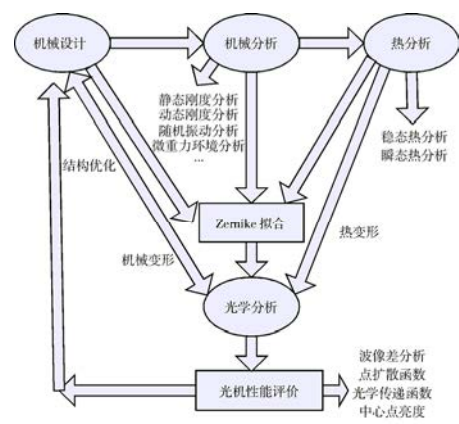


图 1 光机热集成分析流程

Fig. 1 Analysis flow chart of STOP

首先, 根据设计的光学系统在建模软件中建立三维结构模型。然后将模型导入 ANSYS 有限元仿

收稿日期: 2013-05-24; 修回日期: 2013-08-26

基金项目: 中国空间技术研究院自主研发课题

作者简介: 肖庆生 (1987-), 男, 硕士学位, 主要研究方向为空间光学工程 CAD/CAE 技术。E-mail: xqs.hit@163.com。

真分析软件,建立结构分析有限元模型。热分析既可在有限元分析软件中建立模型并将结果耦合到结构分析有限元模型中,也可由专业的热分析软件完成热计算后将结果导入有限元模型中从而完成结构的热弹性分析;而热弹性分析将得到反射镜面的变形量和光学平台上其他元件的位置变化等参数;通过提取镜面位移量,采用 Zernike 多项式等接口程序可完成变形后镜面面形的拟合,将多项式系数代入 ZEMAX、Code V 等光学设计软件,可完成光机系统性能的快速评价。最后,依据性能仿真结果,可进行光学系统及其结构的优化设计,最终使光学系统满足要求。

2 小型辐射定标光学系统的仿真分析

本节采用光机热集成分析方法对小型定标光学系统进行结构有限元分析和在模拟空间环境下的热变形分析,并利用 Zernike 多项式对系统中的离轴抛物镜的面形进行拟合,通过 ZEMAX 光学软件分析该光学系统在模拟空间环境下的像质变化。

2.1 结构的有限元分析

2.1.1 系统结构简介

小型定标光学系统在空间环境模拟设备内的安装如图 2 所示。

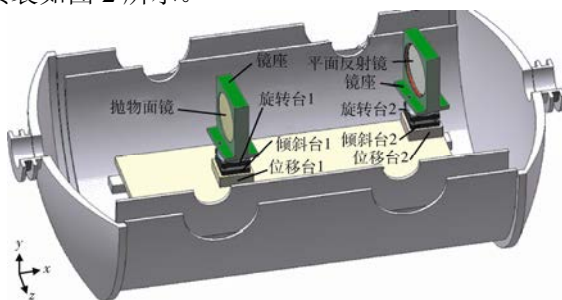


图 2 定标光学系统的安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the calibration optical-structure system

离轴抛物镜和平面反射镜均采用微晶玻璃材料,衬垫和垫片为聚四氟乙烯材料,位移调节台采用 LY12 材料,其余结构均为 LF6 材料。所承载荷为自重,试验环境温度为 -123°C 。试验时,定标光学系统被定位在真空容器导轨上,依据在导轨上的约束状态,将滑板底部左右两个定位孔的 x 、 y 、 z 三个方向约束固定,另外滑板在导轨的支撑面垂直方向 (x 向) 约束固定。

2.1.2 有限元分析模型

利用 ANSYS Workbench 软件工具建立定标光学系统的有限元分析模型。在建模中,需要作如下必要的简化:

1) 由于螺纹孔相对光学平台尺寸太小,对有限元结果不会造成影响,可忽略光学平台上 20 个安装螺纹孔;另外,忽略后对划分网格有利,避免应力集中。

2) 对抛物镜和平面反射镜的镜座调节台进行简化,将它们的安装螺钉简化为固定约束,并去除不受力的调节杆,简化的原则是不影响计算的精度。

对抛物镜和平面反射镜均应按实际支撑和安装方式建模,各元件的支撑按接触问题处理。采用六面体实体单元进行网格划分,其有限元分析模型如图 3 所示,总单元数为 16 192 个,总节点数为 31 474 个。

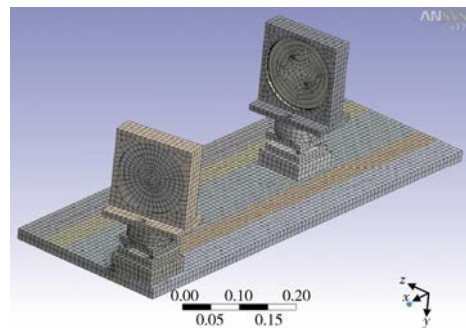


图 3 定标光学系统的有限元分析模型

Fig. 3 Finite element model of the calibration optical-structure system

2.2 热变形分析结果

对定标光学系统进行热变形分析,结果为:系统的最大位移发生在滑板的最右侧处,为 2.492 6 mm;离轴抛物镜的最大合成位移出现在抛物镜的最上缘,为 1.734 2 mm,合成位移分布云图如图 4 和图 5 所示,图中位移量为绝对位移,单位为 m。

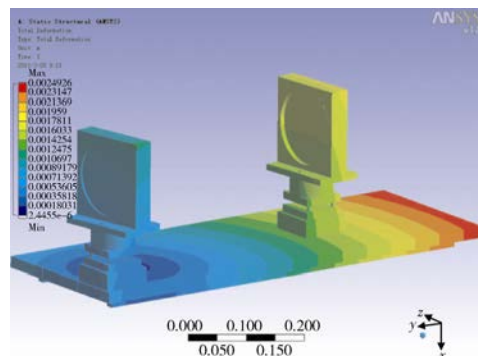


图 4 定标光学系统在 -123°C 下合成位移分布云图

Fig. 4 Contour of integrated displacement distribution for the calibration optical-structure system under -123°C

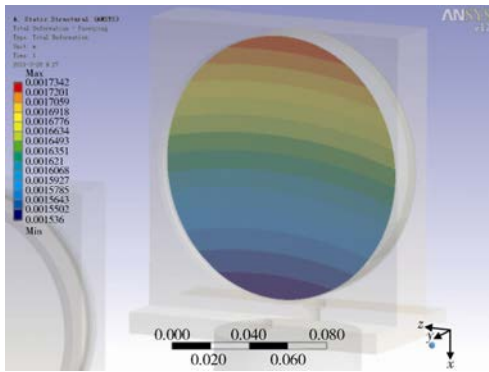


图5 离轴抛物镜在-123℃下合成位移分布云图

Fig. 5 Contour of integrated displacement distribution for the off-axis paraboloidal mirror under -123 °C

2.3 离轴抛物镜的面形拟合

2.3.1 拟合方法

光学元件表面面形的拟合方法有很多,如 Gram-Schmidt 方法、协方差法、SVD 法和最小二乘法等^[7-9]。由于 Zernike 多项式在单位圆上互为正交,且容易与 Seidel 像差项对应,并可以唯一地归一化表述圆形孔径波前畸变^[10],因此,其非常适合于圆形口径的光学元件面形的拟合,且拟合精度最高。文献[11]给出了用 Zernike 多项式完成特殊形状光学表面面形拟合的方法,且获得了较高的拟

合精度。因此,本文采用 Zernike 多项式方法完成离轴抛物镜面形的拟合。

从离轴抛物镜在-123℃下的热变形分析结果,可以得到镜面上各节点变形前的坐标 (x_i, y_i, z_i) 及-123℃下各节点变形量 Δx_i 、 Δy_i 、 Δz_i ,其中 $i=1,2,\dots,m$, m 为镜面节点个数。首先进行坐标变换,将离轴抛物镜表面坐标转换为完整抛物面坐标,并进行单位圆的归一化处理。将处理后结果 $(X_i, Y_i, \Delta Z_i)$ 带入 N 项 Zernike 多项式中得到矛盾方程组为

$$\begin{cases} q_1 Z_1(X_1, Y_1) + q_2 Z_2(X_1, Y_1) + \dots + q_n Z_n(X_1, Y_1) = \Delta Z_1 \\ q_1 Z_1(X_2, Y_2) + q_2 Z_2(X_2, Y_2) + \dots + q_n Z_n(X_2, Y_2) = \Delta Z_2 \\ \dots \\ q_1 Z_1(X_m, Y_m) + q_2 Z_2(X_m, Y_m) + \dots + q_n Z_n(X_m, Y_m) = \Delta Z_m \end{cases} \quad (1)$$

由于 $m \gg n$,故矛盾方程组(1)一般不存在通常意义下的解。下文利用 Zernike 多项式和文献[11]中的拟合方法,在 MatLab 软件中编程完成了变形后离轴抛物镜面形的拟合。

2.3.2 拟合结果

拟合得到的多项式的前 37 项拟合系数如表 1 所示。

表1 Zernike 多项式各项拟合系数
Table 1 Fitting coefficients of Zernike polynomial

序号	1	2	3	4	5	6	7
数值	1.466×10^{-3}	-2.132×10^{-6}	1.416×10^{-6}	1.101×10^{-6}	-1.291×10^{-7}	1.764×10^{-5}	-2.747×10^{-7}
序号	8	9	10	11	12	13	14
数值	-1.089×10^{-7}	1.144×10^{-7}	-6.337×10^{-7}	6.979×10^{-8}	-2.592×10^{-7}	2.466×10^{-7}	-4.834×10^{-8}
序号	15	16	17	18	19	20	21
数值	-2.704×10^{-8}	1.174×10^{-8}	3.960×10^{-7}	-5.174×10^{-7}	1.516×10^{-7}	-3.501×10^{-8}	-5.748×10^{-9}
序号	22	23	24	25	26	27	28
数值	2.01×10^{-8}	-7.845×10^{-9}	-4.662×10^{-9}	2.004×10^{-9}	-1.901×10^{-7}	-1.110×10^{-7}	-6.267×10^{-8}
序号	29	30	31	32	33	34	35
数值	3.042×10^{-8}	1.110×10^{-8}	-1.389×10^{-9}	-7.069×10^{-9}	1.693×10^{-9}	-5.909×10^{-10}	-5.155×10^{-10}
序号	36	37					
数值	-2.116×10^{-10}	2.620×10^{-11}					

2.4 像质评价

将拟合得到的 Zernike 多项式系数输入用 ZEMAX 软件所建立的光学系统模型中,通过仿真得到定标光学系统像质的变化。

图6是理想抛物镜面的系统波前图,而理想

抛物镜面的波像差 PV 值为 0。图7是 Zernike 拟合后的抛物镜面的系统波前图,可以看出, Zernike 拟合后定标系统 PV 值为 0.0269λ (约为 $\lambda/37$, $\lambda=632.8 \text{ nm}$)。因此,在-123℃下定标光学系统中抛物镜的面形变化非常小。

- SPIE, 2007, 6666: 1-8
- [5] Johnston J D, Howard J M. Integrated modeling activities for the James Webb Space Telescope: structural-thermal-optical analysis[C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5487: 600-610
- [6] Cuerdena B, Seabag J. LSST mirror thermal performance[C]//Proceedings of SPIE, 2000, 5495: 189-203
- [7] Swantner W, Chow W. Gram-Schmidt orthonormalization of Zernike polynomials for general aperture shapes[J]. Applied Optics, 1994, 33: 1832-1937
- [8] Coronato P A, Juergens R C. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: a review of techniques[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5176: 128-136
- [9] 杨恽, 陈时锦, 张伟. 空间光学遥感器光机热集成分析技术综述[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 913-917
Yang Yi, Chen Shijin, Zhang Wei. Review of thermal-structure-optical integrated analysis of space remote sensor[J]. Optical Technique, 2005, 31(6): 913-917
- [10] Focus Software Inc. ZEMAX optical design program user's guide[G]. Version 7.1, 1998: 115-119
- [11] 肖庆生, 许杰, 杨林华. 离轴抛物面反射镜模拟空间环境镜面变形分析[J]. 光学技术, 2011, 37(2):153-157
Xiao Qingsheng, Xu Jie, Yang Linhua. Surface deformation analysis of off-axial paraboloidal mirror under space simulation conditions[J]. Optical Technique, 2011, 37(2): 153-157

Optical structural and thermal integrated analysis of a small radiometric calibration optical structural system

Xiao Qingsheng, Yang Linhua, Xu Jie

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Thermal and optical performance of the radiometric calibration optical structural system under space simulation conditions can affect the precision of the radiometric calibration test for satellite IR remote sensor. In this paper, a finite element model of radiometric calibration optical structural system is built, which consists of an off-axis paraboloid mirror and a secondary mirror. It is convenient to use the orthogonal Zernike annular polynomials as the data transmission tool. Firstly, the least squares method is used for the polynomial fitting. Secondly, the Zernike coefficients are input into the ZEMAX software and the imaging quality of the optical system under space simulation conditions is analyzed. The results show that the thermal gradient of the optical structural system has an important effect on the rigid displacement of the optical bracket, but not so much on the off-axis paraboloid shape. The imaging quality error is about $\lambda/37$. By comparing with the results of accurate in-situ measurements of imaging quality parameters by Foucault tester, the results of the thermal structural optical integrated analysis in this paper are validated.

Key words: radiometric calibration; optical-structure system; finite element method; integrated analysis

(编辑: 肖福根)