

文章编号 1004-924X(2001)04-0377-05

# 空间光仪光机热集成分析方法

单宝忠<sup>1</sup>, 陈恩涛<sup>2</sup>, 卢 锴<sup>2</sup>, 武克用<sup>2</sup>

(1. 深圳大学光电子学研究所, 广东 深圳 518060;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 本文重点阐述了结构、热响应及光学的集成分析方法和过程, 应用 Zernike 多项式光机热各分析模块间数据接口的工具, 进行各分析模块间数据的转换。以某空间相机为例进行了系统的集成分析。

**关键词:** 光机热集成分析; 空间相机; 有限元法

**中图分类号:** TH74 **文献标识码:** A

## 1 引言

对空间相机光机系统进行整机综合特性分析, 能为总体方案设计、相机整机构型选择、结构与机构优化、系统设计与仿真等工作提供指导, 还能对设计、研制、试验、发射飞行过程的故障诊断与处理对策提供依据, 确保整机动态特性优化的合理性、热尺寸稳定性和高指向精度等指标要求。同时, 对提高航天器总体设计水平、缩短研制周期、提高全星安全性与可靠性、降低成本和扩大应用效益以及加强国际合作竞争能力等多方面起到极为重要的作用。

空间相机涉及到光、机、热、电和计算机等多方面的技术, 是一个典型的跨学科的综合技术应用过程。通常, 对航天遥感相机系统进行光学性能验证, 是通过空间相机进行了有限元分析研究, 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, 来衡量光学系统在机械/热环境载荷作用下光学性能是否满足指标, 而这样的指标往往是片面的, 它只是单方向的要求, 没有形成一个完备的评价体系。采用光机热(TSO)集成分析方法将更合理、更有效、更准确地解决空间相机的工程技术的综合应用问题, 评估其光机系统的性能。

各分析模块之间的数据传输是集成分析的关键。本文应用 Zernike 多项式作为接口工具进行

光机热分析软件的集成, 进行软件间数据的传输, 综合应用光学、机械和热分析软件集成为一个软件系统来实现对空间相机的分析评价, 进行了光机热综合分析的实践。

### 1.1 光机热集成分析的机理

集成分析方法是目前国际上解决跨学科问题普遍采用的方法。为了在工程中相互合作、进行跨学科评估, 各学科分别应用多种软件分析解释问题, 并在各种分析软件间进行自动的数据传送, 使一个学科分析处理的结果成为另一个计算过程或程序的源数据, 通过这些自动传送数据的界面程序将若干独立的分析软件集成为一体。

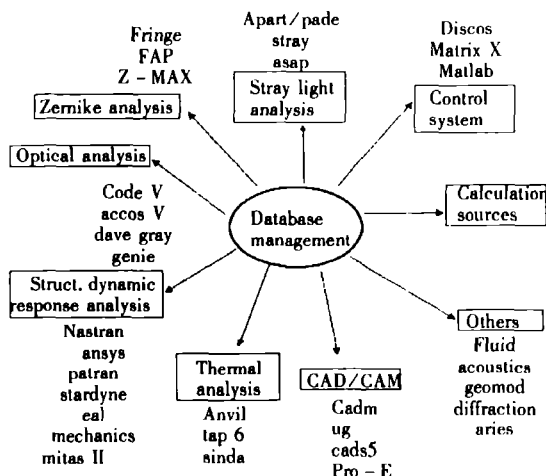


Fig. 1 Interface of integration analysis of multi-disciplines

为全面解决不同学科的问题,可以通过软件之间的相互支撑和辅助,从而综合地分析整个系统。在光学工程领域,解决多学科问题的集成化分析软件界面如图1所示。图1显示了集成分析系统的构成关系,其核心是称为“数据库管理器(DBM)”。在核心数据库下,一种软件代码可以输送到另一种代码中,产生文件代码,并对数据库提供一定的原始数据输入,使分析顺序自动地进行<sup>[1]</sup>。

本文应用的TSO集成分析方法包括热(Thermal)、结构(Structural)和光(Optical)分析。虽然热、结构和光分析在当前并不是新的内容,但这些软件的集成在光学工程领域里却是新的内容。TSO过程通过自动数据转换将热、结构和光分析程序集成为一体,实现对光学系统(受热/机械载荷)的快速性能评估。

## 1.2 光机热集成分析方法

通过对空间相机进行的详细工程分析,揭示了空间环境对相机结构与光学元件位移及镜面变形的规律,从光机热系统集成入手进行多角度的分析研究。

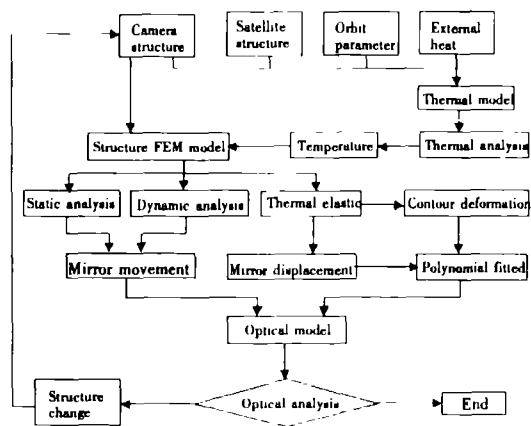


Fig.2 Flow chart of TSO process

图2是本文所采用的技术手段的基本框图<sup>[2]</sup>。首先建立研究对象:空间相机主体结构的几何模型,充分了解其功能及其敏感因素之后,确定所使用的软、硬件平台以及大致成本等,决定所能分析的模型规模,建立有限元模型及光学系统分析模型。其次,分析计算并对结果进行数据处理,得出整机的振型及在力学和热环境作用下主要结构参数的变形量,如果满足光机系统的结构要求以及光学系统的性能要求,则进一步进行结构优化,否则修改模型,重新计算,直到满足要求

为止。最后,采用试验方法或成型程序进行验证。

集成分析首先进行模块软件的各自分析,再进行数据传输、交换,再进行集成分析。

## 2 空间相机的工程分析

空间相机的工程分析主要包括力学和热响应分析,均采用有限元法进行。通常先采用CAD手段建立三维实体模型,并在三维实体模型的基础上建立有限元模型。由于相机载体的内部运行及外部热环境等因素的影响,相机承受的载荷主要有:热载荷、动力学载荷和微重力环境等。

### 2.1 力学分析

对于小孔径相机,力学载荷对光学系统的影响主要有:a.光学元件的垂直光轴方向产生的离轴(decenter);b.镜面的倾斜(tilt);c.光学元件沿光轴方向变形产生的离焦(despace)。这些都使光学系统像质下降,产生像散、球差和彗差,并使光轴(LOS)产生漂移,对面形影响较小。在分析以力学载荷为主的光学系统时,主要研究光学元件的离轴、离焦和倾斜对光学系统性能的影响。

### 2.2 热力学分析

相机与空间环境的热量交换方式主要为:相机与外界环境之间进行辐射和传导换热、相机镜头与空间冷黑环境进行辐射换热、相机内部热源与相机其它部分进行传导换热。空间相机的热环境会使相机内部产生温度梯度,进而产生热应力及热变形,导致光学系统产生热畸变而影响成像质量。相机工作的热环境除了通过使整体结构的变形影响光学元件的离轴、离焦、倾斜等变形外,还使光学元件的面形发生变化。所有这些变化都引起光学系统的同心度(LOS)变化及波前畸变(WFE),从而影响光学系统的特性。为了保证相机达到光学性能的要求,必须进行严格的热光学分析,以便改进相机的设计,提高相机热光学性能。

对于精密成像光学系统,其中的温度梯度必将造成光学系统波前误差,主要由下列因素引起:

1. 光学元件的折射率发生变化,形成折射率梯度;
2. 光学元件因不均匀热膨胀而导致面形变化;
3. 由于结构热变形导致的光学元件刚体位移即离轴、相对轴向位移(镜间距变化)即离焦和相对倾斜<sup>[3]</sup>。这三种因素都使光学系统产生前畸变,引

起光学系统的像差,最终影响成像质量,使相机的分辨率降低。

从热分析的温度场到结构分析之间要进行温度场插值(T/S 接口),然后进行热变形分析。在结构分析到光学分析之间要进行 Zernike 多项式拟合位移场数据,输入到光学分析程序进行光学性能分析。

### 3 光学性能分析与评价

光学系统性能的好坏,不仅要考虑光学系统在地面静态状态下的性能,同时还要考虑在光学系统工作期间,外界环境所导致的性能下降,预示空间相机在各种机械载荷、热载荷作用下,光学系统性能的变化。

Code V 是具有代表性的光学设计分析程序,对光学系统进行光学性能分析是其基本应用之一。建立光学模型就是要建立一个流程控制文件(.seq 文件)。文件主要定义了光学元件的材料属性、位置、尺寸和面型等。在 Code V 中,对光学系统模型进行分析,可得到光学系统焦距、后焦距、前焦距、F 数、像距、视场角、入瞳直径、出瞳直径等性能参数。

Code V 可以直接读取 .INT 文件数据的功能,将变形结果拟合数据转化为变化的面形,分别对原始光学元件面形进行修正,使修正后的面形与热变形后的面形相符。对修正后的模型进行光学分析,可以得到评价光学性质的诸参数如 OTF、OPD、PSF、EE(中心能量)等指标,这里以 MTF 做为评价光学系统性能的指标。

Table 1 Original parameters of optical system

system parameters	
EFL	400.169
BFL	317.879
FEL	-236.560
FNO	5.000
IMG DIS	318.837
ANG	5.500
ENTRANCE PUPIL DIA	80.030
EXIT PUPIL DIA	89.193

### 4 Zernike 多项式转换接口

将光机结构变形结果数据转换到 Code V 中

模型的工作是整个集成分析过程(TSO)的关键。数据传输主要有以下几种途径:

(1)将单个光学元件看作刚体,从表面变形数据抽象出元件的离轴、离焦和倾斜变形值;

2. NASTRAN 节点变形以直角坐标形式(IGES)工业标准文件格式)直接输出到 .INT 文件,作为接口;

3. 用 Zernike 多项式拟合各光学元件变形后的面形;

Zernike 多项式是描述波前像差的常用方法。本文采用 Zernike 多项式作为结构、热分析与光学分析程序之间的数据接口工具,将结构、热载荷有限元分析结果实现到 Code V 模型的转换。用最小二乘法,以 Zernike 多项式为基底函数,通过专有程序进行 Zernike 数据拟合和转换,将变形后的面形数据转换成光学程序 Code V 可以接收的形式。用 INT 命令将生成的 Zernike 多项式系数加到每一个镜面上。

Zernike 多项式的极坐标形式为  $r^n \cos(m\theta)$  和  $r^n \sin(m\theta)$ ,系数可以通过对数据进行最小二乘法拟合得到。从理论上讲,项数越多拟合误差变越小。Zernike 多项式是互为正交、线性无关,而且是唯一的,归一化描述系统圆形孔径的波前畸变表达式。Zernike 多项式可以精确描述畸变光学表面,并且其每一项都对应很明确的物理含义,分别对应于各种像差的某些项,和光学设计者惯用的 Seidel 像差系数很容易建立起联系,如表 2 所列,比样条函数容易且方便使用。这就为有选择地单独处理各像差系数,优化系统性能提供了有效的方法<sup>[4-6]</sup>。

Code V 中使用的 Zernike 多项式是直角坐标  $(X, Y)$  或极坐标  $(R, \theta)$  的函数。极坐标形式的 Zernike 多项式的基底函数系为:

$$U_n^l(\rho, \theta) = R_n^l(\rho) \cdot \Theta_n^l(\theta) \quad (1)$$

上式中  $n$  为多项式的阶数,取值为  $0, 1, 2, \dots$ 。 $l = n - 2m$  为与阶数  $n$  有关的序号,其值恒与  $n$  同奇偶性,且绝对值小于或等于阶数。

$$R_n^{n-2m} = \begin{cases} \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s!(m-s)!(n-m-s)!} \rho^{n-2s}, & (n-2m \geq 0) \\ R_n^{l(n-2m)}, & (n-2m < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\Theta_n^{n-2m} = \begin{cases} \cos(n-2m)\theta & (n-2m \geq 0) \\ -\sin(n-2m)\theta & (n-2m < 0) \end{cases} \quad (3)$$

在基底函数系选定后,干涉条纹的级数分布函数  $F$  即有如下的形式

$$F(\rho, \theta) = Q^T \cdot U \quad (4)$$

式(4)  $Q^T$  为常数  $Q_k$  组成的列向量的转置,  $U$  为 Zernike 多项式项  $U_k$  组成的列向量。

$$Q = C^T \cdot B \quad (5)$$

确定了系数向量  $Q$ , 即可将镜面的面形表示成 Zernike 多项式系的线性组合。

### 5 应用实例

本文 TSO 过程应用的软件主要包括: Advanced FEA 和 PATRAN FEA (PATRAN 结构分析模块)、Thermal Analysis (PATRAN 热分析模块)、Code V (光学分析程序)。

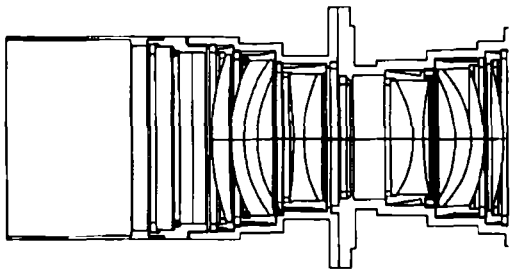


Fig. 3 Structure of the optical camera

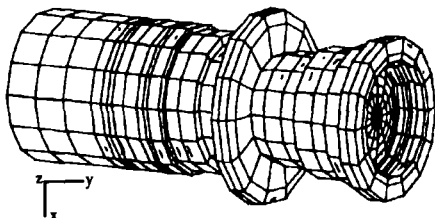


Fig. 4 FEM model of the optical camera

以某空间相机热响应为例,进行集成分析的实践。镜筒部分的光学系统结构图、有限元模型如图 3、4 所示。有限元模型规模为:节点数 9542、单元数 7355。

空间相机光学镜筒的光学线路图如图 5 所示,图示为对称视场的光路图。

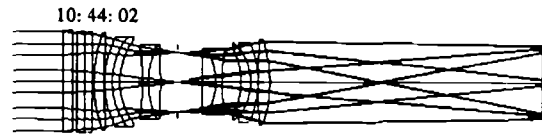


Fig. 5 Model of optical analysis

在 Code V 中,对光学系统的原始设计模型进行分析,可得到光学系统焦距、后焦距、前焦距、F 数、像距、视场角、入瞳直径、出瞳直径等性能参数,如下表所示,图 6 所示为正视镜筒光学系统光学传递函数。

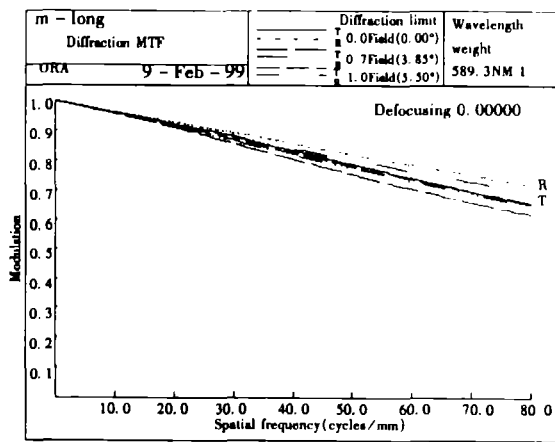


Fig. 6 Optical transmission function of optical system's original design

Table 2 Relation of Zernike polynomial and Seidel aberration and coefficients

No.	Rank	Expression	Coefficients	Meanings
1	0	1	0.00663216	Constants
2	1	$\rho \cos \theta$	-0.00000453	X Lateral shift
3	1	$\rho \sin \theta$	-0.00114514	Y Lateral shift
4	2	$2\rho^2 - 1$	0.00001044	Defocus
5	2	$\rho^2 \cos 2\theta$	0.00000282	0° or 90° Astigma
6	2	$\rho^2 \sin 2\theta$	0.00000013	45° Astigma
7	3	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	0.00000036	X Axis third order coma
8	3	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	-0.00000175	Y Axis third order coma
9	4	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	-0.00000750	Third spherical aberration

根据上面对所建 Code V 光学模型分析所得的系统光学性能参数与原始设计数据相吻合,验证了原始设计,说明建立的 Code V 光学系统模型符合原始设计,可以用来进行下一步的分析计算。

工程分析,首先分析温度场分布,之后以温度场分析所得的温度分布结果作为结构分析的载荷,与机械载荷一起加载,进行结构响应求解,可以得到结构的位移场分布,最后输出到变形结果文件,进行 Zernike 多项式拟合,前几项系数如表 2。

用变形结果对光学系统 Code V 模型进行修正,得到变形后的光学系统,进行光学性能分析,得到变形工作状态的光学传递函数如图 7 所示。0.7 视场 50 线对频率的光学传递函数,对比如表 3 所示。

Table 3 Optical transmission function of 0.7 view field in 50 lp/mm

Barrel	Original	After load
Meridian	0.803	0.770
Sagittal	0.754	0.735

明,光机热集成分析方法是行之有效的。通过系统地分析,还可以达到指导改进相机设计,提高相机热光学性能和对空间环境的适应能力,具有极大的实用价值。同时,集成分析可以节省经费开支,缩短研制周期,提高研制效率,具有极大的经济效益。

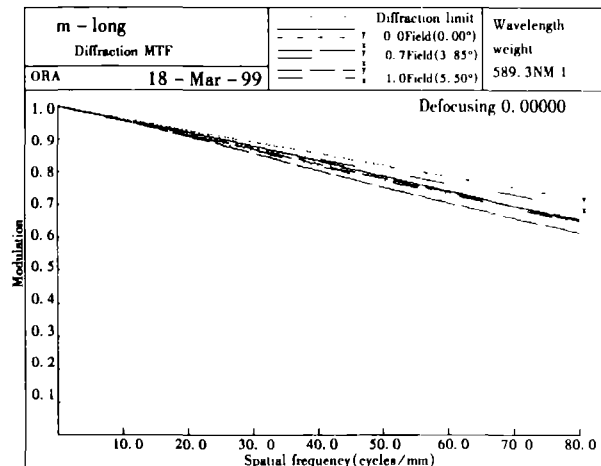


Fig. 7 Optical transmission function of optical system undergoing loads

对空间相机进行光机热集成分析的实践证

#### 参考文献:

- [1] Jacod Miller, Marcus Hatch, Kenneth Green. Predicting performance of optical systems undergoing thermal/mechanical loadings using integrated thermal/structural. Optical Numerical Methods[J]. SPIE, 1981,20(2).
- [2] 单宝忠.空间相机光机系统光机热集成分析及优化设计[D].长春:中国科学院长春光学精密机械研究所,1999.
- [3] 傅丹鹰.空间光学传感器热光学分析与应用的发展[J].航天返回和遥感,1999,3.
- [4] 余景池.干涉图的计算机处理[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,1981.
- [5] 李积慧,韩双丽,卢钙,等.空间遥感相机热控设计中的热分析与热试验技术的探讨[J].光学精密工程,1999,7(2):116-120.
- [6] 郝静舟,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(5):119-128.

### Thermal/structural/optical integrated analysis of space cameras

SHAN Bao-zhong<sup>1</sup>, CHEN En-tao<sup>2</sup>, LU E<sup>2</sup>, WU Ke-yong<sup>2</sup>

(1. Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Thermal/structural/optical(TSO) integrated process is outlined. Using Zernike polynomial as a tool, the interface problem of data transmission in optical, mechanical and thermal program is solved, and analysis on certain camera system is carried out using the TSO process.

**Key words:** thermal/structural/optical(TSO) process; space camera; finite element methods

**作者简介:**单宝忠(1970-),男,辽宁省人,1993年考入吉林工业大学研究生部,1996年在中科院长春光机所攻读博士,主要从事空间光学仪器 CAD/CAE 等方向的研究工作,现为华南师范大学流动站、深圳市企业工作站博士后,从事光电子学应用领域研究工作。