

大口径折反射式光学系统的光机结合分析*

惠彬¹ 李景镇¹ 裴云天² 龚向东¹

(1 深圳大学工程技术学院, 深圳 510068)

(2 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 大口径折反射式光学系统在空间遥感仪器中广泛应用, 反射镜的支撑结构直接关系镜面形变化从而影响光学遥感器的成像质量. 建立了光学系统的光机结合分析方法, 使得在设计阶段就能评测光学元件支撑结构是否满足要求, 得到支撑结构对成像质量的影响的直观结果. 这一方法也可用于光学系统的光机热结合分析.

关键词 光学系统; 光机结合分析; 光学设计; 有限元

中图分类号 TP317 **文献标识码** A

0 引言

大口径折反射式光学系统在空间光学遥感仪器中得到广泛应用. 折反射式光学系统成像质量的好坏, 大口径主反射镜起着关键作用, 主反射镜的稳定性, 在光学系统制造中是一个突出的问题. 反射镜的稳定, 主要受镜坯材料性能、反射镜自重、环境温度以及气压变化等因素的影响^[1,2], 此外, 反射镜支撑形式以及支撑机构材料性能等也是影响镜面面形稳定性的重要因素^[3,4]. 通常在设计阶段, 光机系统的结构设计是依据光学设计所给出的公差进行的, 在结构设计结束后无法直接评测该设计结果对光学像质的影响. 若能将环境温度、支持结构等所造成的镜面变形热力学分析结果导入光学系统分析软件中, 得到该镜面变形对成像质量(如弥散斑、MTF等)的影响, 即直接得到环境温度、支持结构等所造成的像质改变, 这将对整个光机系统设计及装调十分有利, 为系统的结构设计提供客观、直接的评价依据.

目前, 国外十分重视在设计阶段对光学遥感仪

进行光机热一体化模拟仿真分析. 对于地球同步轨道对地遥感空间光学系统, 复杂环境变化造成的镜面变形普遍存在, 不可忽视. 美国的“天基红外系统”高轨道卫星以及 GOES (Geostationary Operational Env. Satellite) 气象卫星都投入大量精力, 力图在地面阶段进行一体化模拟分析来解决这一问题^[5]. 国内上海技术物理研究所、长春光机所等单位也已开展了相关的研究.

本文目的在于建立力学分析结果与光学设计软件之间的接口方法, 并以某一工程项目为例进行了分析计算.

1 主镜支撑结构有限元分析

以某一实际应用中的主反射镜为例进行分析计算. 该主镜口径 $\Phi 615$, 主反射镜面形变化与主反射镜的支撑方式直接相关. 由于主反射镜口径较大, 为了满足面形要求, 对支撑结构的要求较高. 为了分析支撑造成的镜面变形对光学系统像质的影响, 建立了力学分析结果与光学设计软件的接口. 具体分析流程如图 1.

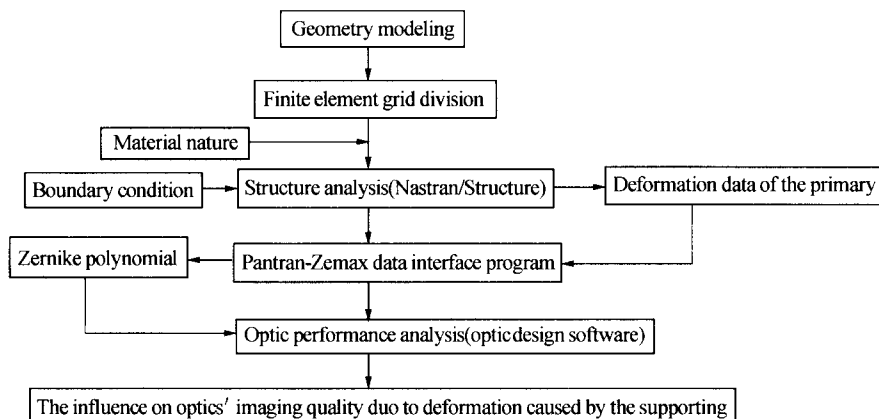


图 1 光机结合分析流程图

Fig. 1 The flow chart of the integrated analysis of optics and mechanics

* 国家自然科学基金(60477042, 60127501)资助项目
Tel: 0755-26534873 Email: huibinhui@sina.com
收稿日期: 2006-02-24

主镜的支撑, 通常采用背面的三点或多点支撑, 周边支撑等. 在分析计算中采用了周边支撑方法. 主反射镜及其支撑所涉及的材料有微晶玻璃、殷钢、

胶等. 表 1 所列为主镜垂直放置(镜面法线与重力方向垂直)时通过结构分析,得到主镜镜面变形的部分节点数据,这些数据将用于变形的拟合分析. 表 1 中 xyz 的方向如图 2, x 方向在纸面内向右; y 方向垂直纸面向内; z 方向为重力的反方向,在纸面内向上;主反射镜表面沿 z 方向.

表 1 垂直放置自重载荷作用下主镜镜面节点位移量

节点数	ΔX (单位:m)	ΔY (单位:m)	ΔZ (单位:m)
.....
88310	9.167985E-09	1.677092E-08	-4.312302E-09
88311	6.091261E-09	2.104709E-08	-1.194550E-08
88312	5.558127E-09	2.181582E-08	-1.315474E-08
88313	-2.651551E-10	2.542027E-08	-1.973561E-08
88314	-2.440335E-09	2.444687E-08	-1.821164E-08
88315	-3.709213E-09	2.343664E-08	-1.649198E-08
.....

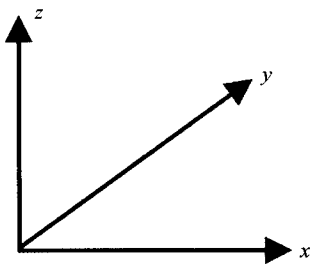


图 2 表 1 中的方向
Fig. 2 Direction in table. 1

2 有限元分析结果转化

有限元分析得到主镜面型变形后的离散节点数据. 对有限元分析结果的转化也就是进行曲面拟合,即选择一个线性无关的基底函数系的组合来拟合离散函数,用连续的函数表征变形后的光学表面. 在众多类似的研究中,人们曾选择过许多不同类型的基底函数拟和面形^[6],然而在光学问题中最终都选择了 Zernike 多项式作为光学面形拟合的基底函数系. 原因是 Zernike 多项式对光学面形的拟合准确度最高^[7].

在 Zemax 光学设计软件中,变形后的面形表示为

$$Z(\rho, \phi) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N q_i Z_i(\rho, \phi) \quad (1)$$

式(1)中,第一部分为变形前的标准面形,第二部分 Zernike 多项式组合部分,即为变形所产生的数值. 其中, N 是多项式的最大项数, q_i 是多项式第 i 项系数, ρ 是径向长度除以径向最大值, ϕ 是角度,这里是用极坐标来表示一个曲面. $Z_i(\rho, \phi)$ 是多项式的极坐标表示式.

拟合过程就是针对该模型利用 Nastran 报告数据将变形后镜面上节点位置归一化为单位圆上位置并作为自变量,以光轴方向的变形作为函数因变量进行 Zernike 多项式拟合. 即由 ρ, ϕ 求得 $Z_i(\rho, \phi)$,再根据 $Z(\rho, \phi)$ 由行列式组解出系数 q_i . 具体做法如下:

求解系数 q_i 即求解下列矛盾方程组(2).

$$\begin{cases} q_1 Z_1(\rho_1, \phi_1) + q_2 Z_2(\rho_1, \phi_1) + \dots + q_n Z_n(\rho_1, \phi_1) = \Delta Z_1 \\ q_1 Z_1(\rho_2, \phi_2) + q_2 Z_2(\rho_2, \phi_2) + \dots + q_n Z_n(\rho_2, \phi_2) = \Delta Z_2 \\ \dots \dots \dots \\ q_1 Z_1(\rho_m, \phi_m) + q_2 Z_2(\rho_m, \phi_m) + \dots + q_n Z_n(\rho_m, \phi_m) = \Delta Z_m \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, m 是镜面上第 m 个节点. $\rho_m, \phi_m, \Delta Z_m$ 根据有限元结构分析可得出. $Z_n(\rho_m, \phi_m)$ 可根据 Zernike 多项式定义求出. 则未知量只有 $q_1 \sim q_n$. 由于 $m > n$,所以矛盾方程组(2)一般不存在通常意义下的解. 此时常用最小二乘准则来求解参量 $q_1 \sim q_n$. 直接利用法方程组求解最小二乘问题是经典的常用方法,但在实际应用中,构造法方程组往往会引入很大的计算误差. 考虑直接从矛盾方程组入手,用 Householder 变换对矛盾方程组的广义增广矩阵进行正交三角化,直接求解拟合系数. 从而避免了因构造的法方程组出现严重病态而引入的计算误差. Householder 算法推导较复杂,但计算结果却较简单,是一种较理想的进行 Zernike 多项式拟合的算法^[8]. 用 Matlab 软件编程实现 Householder 算法. 表 2 是拟合后的 Zernike 多项式系数.

表 2 主镜垂直放置拟合的 Zernike 系数

q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
0.006948E-04	-0.135732E-04	0.000724E-04	0.021748E-04	0.021774E-04	0.010497E-04
q_7	q_8	q_9	q_{10}	q_{11}	q_{12}
0.000351E-04	0.208528E-04	0.0009399E-04	-0.000024E-04	-0.004075E-04	0.002783E-04
q_{13}	q_{14}	q_{15}	q_{16}	q_{17}	q_{18}
-0.001559E-04	0.003539E-04	0.000151E-04	0.0002499E-04	-0.000621E-04	-0.005101E-04
q_{19}	q_{20}	q_{21}
-0.000598E-04	-0.001099E-04	-0.000075E-04

3 主镜支撑对光学系统像质影响

将表 2 所得的 Zernike 多项式系数带入 Zemax 光学设计软件,对原主镜面型进行修改得到变形后的主镜面型,进行光学追迹得到主镜变形后光学系

统光学质量变化. 从而比较直观的得出主镜支撑使主镜变形后对光学系统成像质量的影响.

图 3 是所设计的理想光学系统(主镜未变形)像质图,图 4 是主镜垂直放置方式下(镜面法线与重力方向垂直)的变形数据带入后光学系统像质的变化.

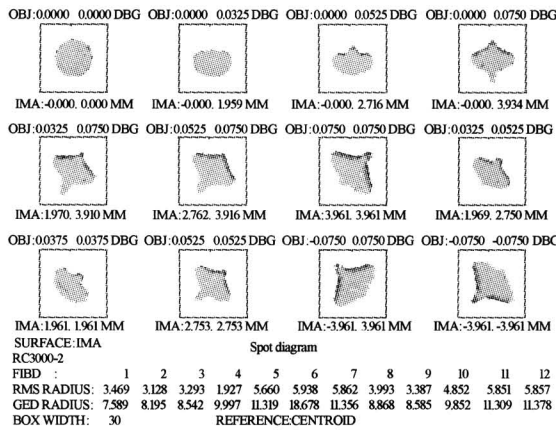


图 3 主镜变形前光学系统弥散斑和 MTF

Fig. 3 Spot diagram and MTF of the optics with the undeformed primary

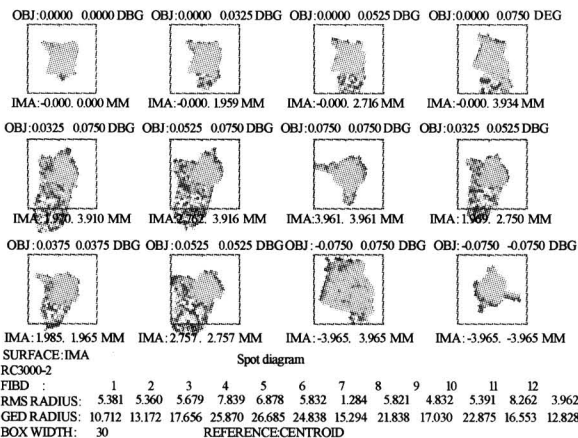


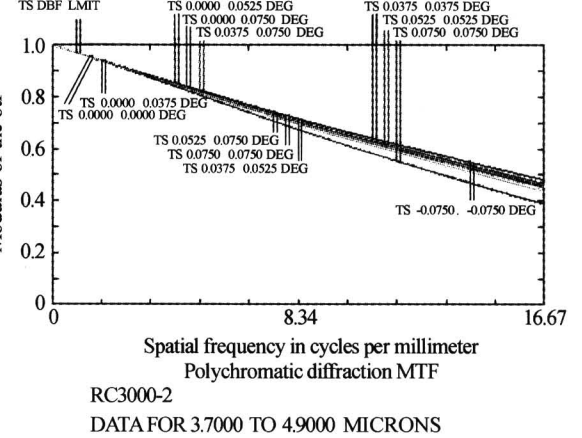
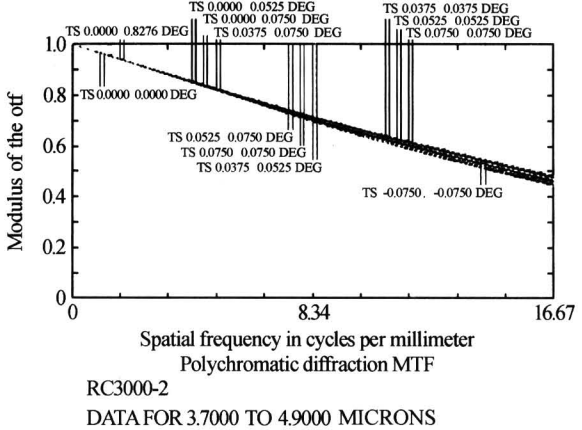
图 4 主镜变形后光学系统弥散斑 MTF 图

Fig. 4 Spot diagram and MTF of the optics with the deformed primary

可看出由于主镜支撑造成镜面变形对光学系统最终像质的影响满足使用要求. 特征频率处 MTF 的衍射限为 0.484,主镜垂直放置各视场 MTF 最低值为 0.4,两种情况下弥散斑有所增大,但一个探测元内各视场几何能量集中度仍可达 98%以上.

4 结论

建立了光机系统的结构分析与光学像质分析之间的接口方法,该方法有助于得到光机系统的结构设计对光学系统像质的直接影响. 能够在设计阶段对系统的结构设计合理性从光学系统像质角度进行评价,并且在光机系统的装调过程中对于区分结构支撑造成的像质变化和装调误差造成的像质变化有其指导作用. 此外,这一方法也可用于进行光机系统热变形与光学像质间的结合分析,这对工作于复



杂空间环境中的空间光学遥感器是十分必要的.

参考文献

- 1 Jamieson T H. Thermal effects in optical system. *Opt Engineering*, 1981, **20**(2):156~160
- 2 Musikant S, Malloy W J. Environments stressful to optical materials in low earth orbit. *Proc of SPIE*, 1990, **1330**:119~130
- 3 Giancarlo Parodi, Cerra C C, John M Hill, et al. LBT primary mirrors: the final design of the supporting system. *Proc of SPIE*, 1997, **2871**:352~359
- 4 丁福建,李英才. 反射镜浮动支撑应力与变形分析及支撑参量的优化. *光子学报*, 1998, **27**(11):1041~1045
Ding F J, Li Y C. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(11): 1041~1045
- 5 Hursen K A, Ross R. GOES Imager: overview and evolutionary development. *Proc of SPIE*, 1996, **2812**:160~173

- 6 Bruning H, Herriott D R, Gallagher J E, *et al.* Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses. *Appl Opt*, 1974, **13**(11):2693~2703
- 7 鄢静舟, 孙厚环. 用 zernike 多项式进行波面拟合的一种新算法. *数学物理学报*, 2000, **20**(3):378~382
Yan J Z, Sun H H. *Acta Mathematica Scientia*, 2000, **20**(3):378~382
- 8 李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究. *光子学报*, 2005, **34**(2):272~275
Li F, Ruan P, Zhao B C. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):272~275

Integrated Analysis of Optics and Mechanics in Larger Aperture Catadioptric Optical System

Hui Bin¹, Li Jingzhen¹, Pei Yuntian², Gong Xiangdong¹

¹ *Engineering Technology School of Shenzhen University, Shenzhen 518060*

² *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083*

Received date: 2006-02-24

Abstract The reflection optics with large aperture is widely used in spatial remote instruments. The imaging quality of the optics is closely related to the mirror surface deformation which caused by the mirror's supporting structure. An interface program between the mechanical finite element analysis and the optic design software is presented. In this way, it can directly study the deterioration of the optics imaging quality which caused by the supporting structure. During the design of the optical system, this method can also be used in integrated analysis of optics, mechanics and thermodynamics.

Keywords Optical system; Integrated analysis of optics and mechanics; Optical design; Finite element



Hui Bin was born in 1977. She received her B. S. degree from the Physics Department of Changchun College of Optics and Precision Mechanics in 1998. In 2001, she received her Master degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics (XIOPM), Chinese Academy of Sciences. She received her Doctor degree in Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences in 2005. Now she is an instructor in Shenzhen University.