

# 空间相机主反射镜的力学计算

任庆华

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 本文对空间相机主反射镜的初始设计进行了静力学分析, 分别对主反射镜为中心支撑; 边缘支撑; 水平和垂直放置; 载荷为自重  $g_0$  和  $5g_0$  的六种工况, 用 ANSYS 程序计算了各工况下各单元及节点的变形和应力。生成了主反射镜的实体模型, 算出了主镜的准确重量。计算结果表明: 现有设计满足静力学要求, 还有轻量化的余地。边缘支撑的变形及应力均小于中心支撑。上述结果对主镜改进设计有重要参考价值。

**关键词:** 主镜; 空间相机; 有限元分析

## 1 力学计算的要求

空间相机主反射镜(以下简称主镜)是整个工程设计中最重要的部件之一, 它除了要满足光学系统的各种设计要求外, 还要满足一系列力学计算上的技术要求。对现有主镜初始设计力学计算的主要要求是:

1 计算主镜的准确重量。

2 计算主镜在各给定工况下, 各自的最大变形, 最大应力的位置及大小。工况情况包括: 中心支撑, 边缘支撑; 水平放置, 垂直放置; 自重载荷  $g_0$  和  $5g_0$  重力加速度载荷。

3 根据计算结果, 做出优化评价, 提出改进设计的方向。也就是以通过计算机的程序计算校验在各种工况下主镜的最大变形及应力是否满足设计要求。整个计算的目的是决定主镜还能否再减少重量, 哪种支撑方式, 哪种放置方式为好。为最终设计一个重量轻, 刚度高、支撑, 放置合理的主镜方案提出设计改进的可靠途径。

## 2 选定的6种工况

经与设计人员讨论后, 决定对下述6种工况进行计算。图1表示了各工况的支撑, 安放, 载荷情况。

图中 1, 2……6、表示工况号。

Internal Supporting—中心支撑。

External supporting—外缘支撑。

$H_w$ —水平放置。

$V_w$ —垂直放置。

$g_0$ —重力加速度，自重载荷。

$5g_0$ —5 倍重力加速度载荷。

对各工况的计算结果做比较可得出相应结论。比如：比较工况 1, 2 的计算结果应能评价自重下哪种支撑方式变形，应力小。比较工况 1, 3 或 2, 4 的计算结果，可看出安置和支撑方式不变时，重力加速度改变对变形和应力所产生的影响。比较工况 3, 5 的计算结果，可看出中心支撑下，水平放置和垂直放置， $5g_0$  载荷时的变形和应力差别。

按目前设计要求，只需对进各工况进行静力学计算即可。

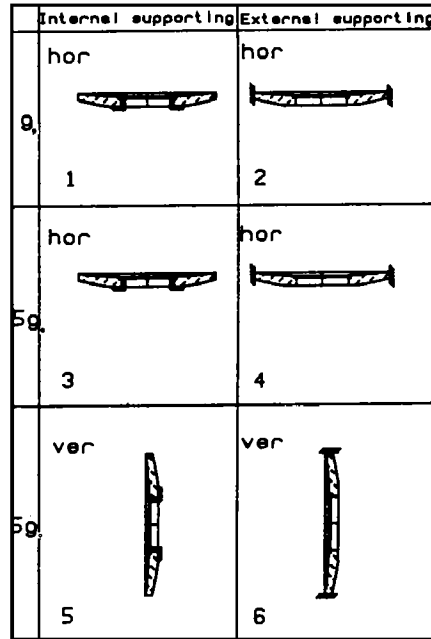


图 1 各工况简图

### 3 建立计算模型

#### 3.1 生成实体模型，计算主镜重量

用美国 Auto-trol 公司的 S7K 软件中的实体模块，生成了主镜的实体模型，并可获得记录有主镜各几何量（体积，重心，惯性积），物理量（重量，转动惯量）的文件。

主镜材料为 K<sub>9</sub> 玻璃，比重量取  $2.7\text{g}/\text{cm}^3$  计算得主镜准确重量为

$$W = 14.4661\text{kg}$$

#### 3.2 建立主镜的线框和面模型

FEM(有限元法)计算的基础是面模型。常规做法是在面模型上生成 FEM 的单元和节点。由于主镜是一个对称的几何体。可采用先生成主镜截面迹线的线框模型、之后使该迹线绕 Y 轴旋转  $360^\circ$  而获得主镜面模型。此过程是在 S7K 软件的图形生成模块中完成。

#### 3.3 建立主镜的有限元模型

在面模型的基础上，用 S7K 的 FEA(有限元分析前处理模块生成主镜有限元模型的节点和单元。节点和单元的数目可依据面模型的复杂程度，所期望的计算精度，特殊计算要求，计算机能力等决定。所选单元类型则由载荷，构件受力情况，结构特性等因素决定。为节省篇幅，对各过程的具体作法和选择不做详述。

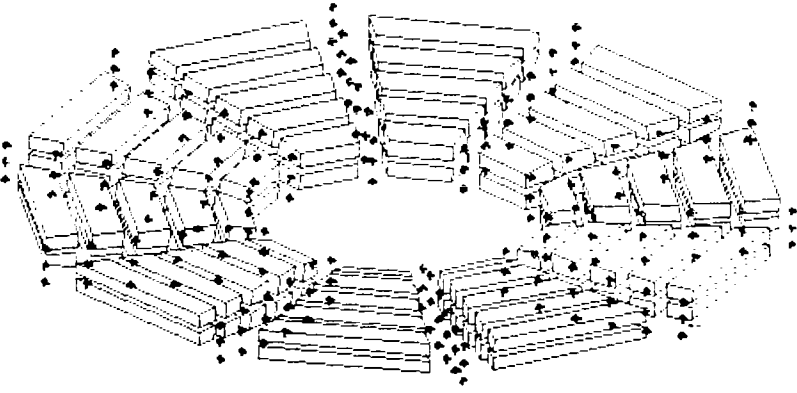


图 2 主镜有限元模型

由图 2 可知,有限元划分时,主镜圆周方向分为 10 等分,径向方向为 5 等分,厚度方向分为 2 等分数

$$\text{单元总数} = 10 \times 5 \times 2 = 100$$

$$\text{节点总数} = 10 \times 6 \times 3 = 180$$

### 3.4 输入各种计算所需已知量和条件

有限元模型是主镜有限元计算的基础,在此基础上,要准确地完成计算,还必须给定各种计算条件。它们是:

- 物理属性
- 材料属性
- 载荷条件
- 约束条件
- 单元类型

上述各条件的确定比较复杂,制约因素也很多,它与计算人员的经验,结构简化,软件情况有关,在此不便评述。需特别指出的是计算结果是否准确,在很大程度上,也由此而定。

本计算中无物理属性,材料属性中密度取  $D = 0.27/9810 \times 10^{-5} \text{kg/mm}^3$ ,泊松比  $\mu = 0.25$ ,弹性模量  $E = 7000 \text{kg/mm}^2$ ,重力载荷,节点内部或外部全约束,单元类型为 STIF45。

```

/PREP7
/TITLE, Main mirror in 1g horizontal!
*****
*          analysis options          *
*****
*** specify a linear static analysis
/AN, 0
/INL, 0
*** specify the reference temperature
/TEMP, 0.0000
*****
*          element types            *
*****
*** fea type 1, name = j4tyb
*** ansys element stif45
EL, 1, 45, , , , , ,
*****
*          material property tables *
*****
**** material property table 1, name = j4mab
**** element types associated with this table:
*      stif45, name = j4tyb
DENS, 1, 0.27502940E-09
NUXX, 1, 0.2500
NUYZ, 1, 0.2500
NUXZ, 1, 0.2500
GXY, 1, 11238000.0000
GYZ, 1, 11238000.0000
GXZ, 1, 11238000.0000
ALPX, 1, 0.60000010E-06
ALPY, 1, 0.60000010E-06
ALPZ, 1, 0.60000010E-06
EX, 1, 7000.0000
EY, 1, 7000.0000
EZ, 1, 7000.0000
*****
*          real constant tables     *
*****

*****
*          load set options         *
*****
*** specify the use of elemental and nodal temperature loads
/TEMP, -1
*** specify a gravity load
/ACEL, , 9810.0000
*****
*          nodes, nodal constraints, nodal loads *
*****

```

图 3 主镜 FEA 前处理文件

### 3.5 生成 FEA 前处理文件

上述过程完成后, 计算机自动生成 FEA 前处理文件。图 3 是第 1 种工况该文件的开始页, 它给出了。

- 所计算问题的标题。
- $KAN=0$ , 线性静力学分析
- 无参考温度
- 单元类型表名
- 材料属性表名
- 无实常数表
- 重力负荷
- 约束情况

6 种工况应有 6 个不同的文件。

图 4 是总结建立计算模型的计算机程序框图, 它概括了各建模过程。

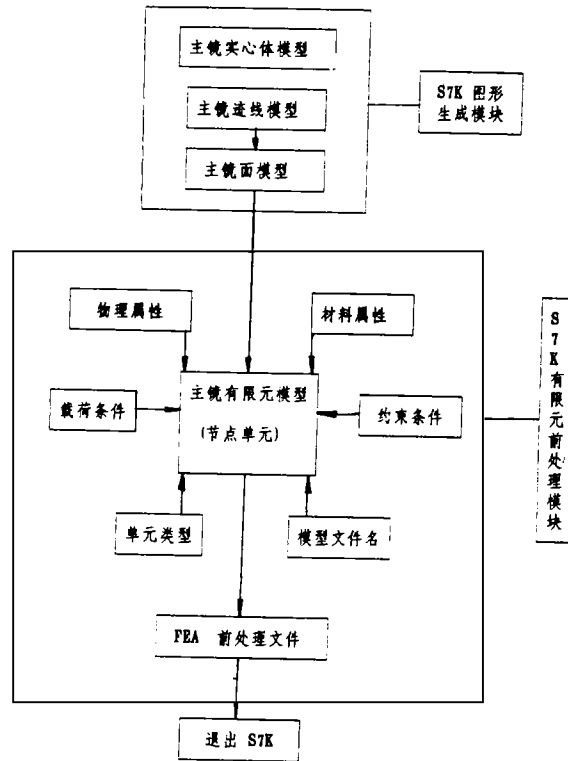


图 4 主镜建模的程序框图

## 4 FEA 计算程序及计算结果

### 4.1 程序计算

主镜 FEA 计算是用美国 Swanson 公司所开发的 ANSYS 软件进行的。软件版本 Rev. 4.3A, 1987 年推出。ANSYS 程序是世界公认的著名有限元分析程序之一, 目前该公司已推出了 Rev. 5.0 的新版本。程序计算的基本过程是进入 ANSYS → 初始化 ANSYS → 送入要计算的 FEA 模型文件 → 进入 PREP7 模块 → 生成计算文件 File27 → 进入求解模块 → 输入 File27 → 求解运算 → 生成结果文件 File12。

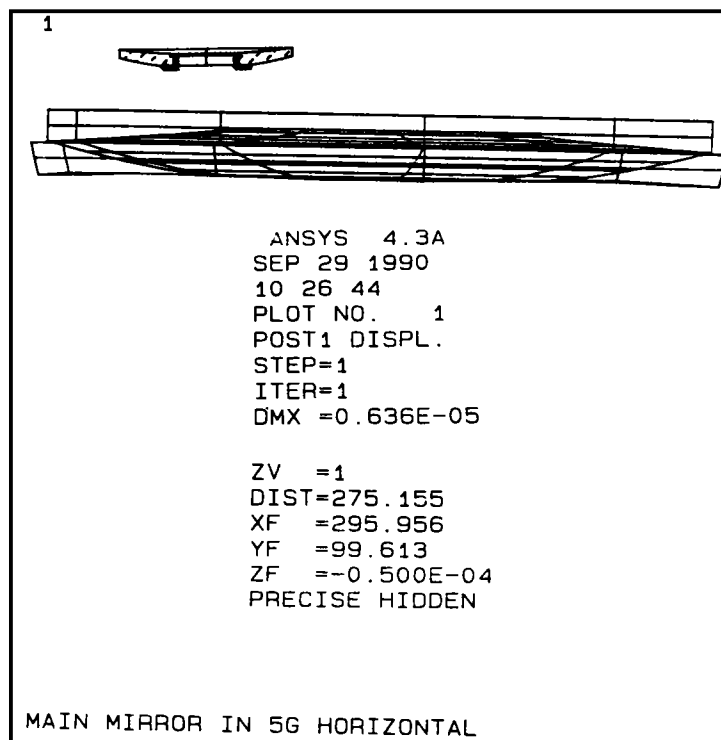


图 5 工况 3 主镜变形前后形状

### 4.2 处理计算结果

除了打印 12 号文件获得详细计算结果外, 还可进入 ANSYS 的后处理模块 POST1。运用该模块下的各种命令, 可获得计算结果的着色或线框图。可绘制各工况下的, 从各种角度观察的主镜变形图、主应力图, 主应力矢量图, 并可以等高线形式显示主镜各处应力分布以及最大, 最小主应力所在位置的着色图。能直观生动地展示计算结果。图 5 表示了工况 3 主镜变形前后的情况, 图中黄线代表了主镜变形前的情况, 黑线则为变形后的形状。图 6 表示了工况 3 的应力分布情况。

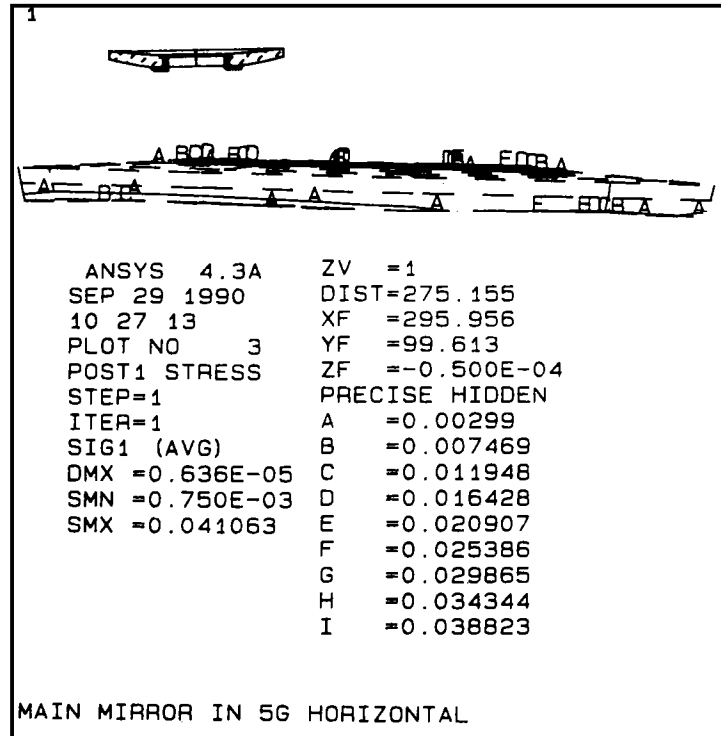


图 6 工况 3 主镜应力分布情况

### 4.3 结果比较

为便于比较, 现把 6 种工况的计算结果归纳于一个表中, 图 7 表示了各工况下, 最大应力, 最大变形的计算结果。图中

Dn. max—最大变形值, n 为工况数;

Sn. max—最大应力值, n 为工况数;

Condition—工况情况简图;

Dn. max 量纲为 nm ( $10^{-9}m$ );

Sn. max 量纲为  $kg/mm^2$ 。

1g<sub>0</sub>、5g<sub>0</sub> 分别表示各工况下重力载荷的重力加速度值  $g_0=9810kg \cdot mm/sec^2$







	Con	Dn max (nm)	Sn max (kg/mm <sup>2</sup> )
1	1g <sub>0</sub> 	D1=1.27	S1=0.008
2	1g <sub>0</sub> 	D2=0.39	S2=0.004
3	5g <sub>0</sub> 	D3=6.36	S3=0.041
4	5g <sub>0</sub> 	D4=1.95	S4=0.021
5	5g <sub>0</sub> 	D5=14.82	S5=0.018
6	5g <sub>0</sub> 	D6=2.39	S6=0.003

图 7 各工况计算结果

计算的目的是想通过计算机程序的精确,快速计算来判断各工况下,主镜的最大变形和最大应力是否在允许范围内。根据参考材料介绍,K<sub>9</sub>玻璃的许用应力为 $0.35\text{kg/mm}^2$ 。主镜面型光学上允许的最大改变为 $1/20$ 波长,即 $1/10$ 光圈、相当于 $25\text{nm}$ 。图8表示了各工况最大应力与许用值的容余量。

由于比例的关系。图中纵坐标应力值只给出了 $0.05\text{kg/mm}^2$ 的位置。未表示 $0.35\text{kg/mm}^2$ 。由图可看出最大应力还有很大的容余量。

图9为各工况最大变形的比较。图中纵坐标也只给出了 $15\text{nm}$ 的位置。由图可知各工况的最大变形也有一定的容余量。

## 5 结 论

由上述分析及计算结果可得如下结论:

1 现有主镜初始设计满足静力学计算所有要求,还有再减少重量或采取其它轻量化措施的余地。

2 边缘支撑或中心支撑:水平放置或垂直放置;对主镜产生的影响不同,但都在允许范围内。设计时可根据其它条件的合理性任选其一种而不会导致主镜工作失败。

3 上述计算均按理想状况考虑,因而主镜有限元模型的刚度比实际情况要偏高计算结果会比实际值好,因而分析判断时、对计算结果适当考虑一安全系数是必要的。

## 参 考 文 献

- [1] Allen J. Bronowicki, SPIE, 1987, 748: 68-80.
- [2] S7K User's reference manual, 1987
- [3] ANSYS Command reference guide, 1987
- [4] 任庆华, 遥感相机的概念设计. 光学机械, 1989, (4): 7-15
- [5] 任庆华, CAD面造型技术. 光学机械, 1992, (4): 47-53
- [6] 任庆华, CAD实体造型技术. 光学机械, 1992, (4): 59-66

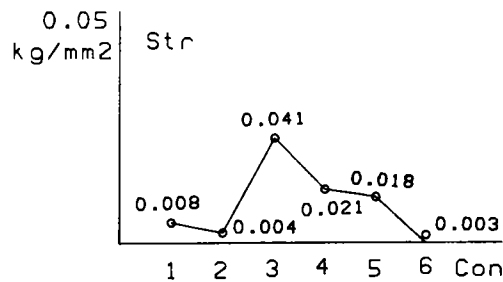


图8 各工况最大应力比较

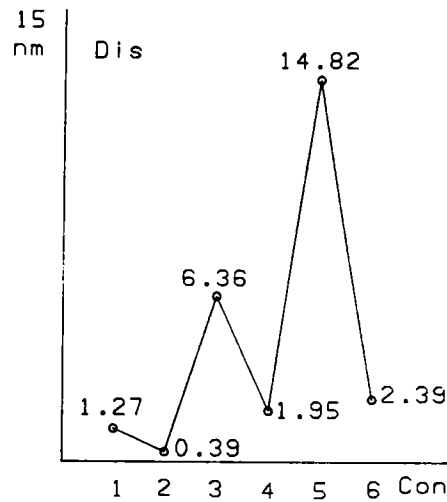


图9 各工况最大变形比较

## A Kind of Mechanical Calculation for a Space Camera Main Mirror

Ren Qinghua

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

### Abstract

The statical analysis for the primary design of a space camera main mirror is stated. The analysis is aimed at six conditions which consist of internal supporting, external supporting, horizontal set, vertical set and load conditions that are separately of  $g_0$  and  $5g_0$  gravity acceleration. The displacements and strains for every element and node are calculated by means of ANSYS program. Because the solid model of the main mirror is created, the exact weight of the main mirror is gained automatically. The results show that the present design is satisfied with the requirements and still has some tolerance to reduce the weight. The displacement and strains of external supporting are less than the ones of internal supporting. The analysis results have important value for improving the main mirror design.

**Key Words:** Main mirror, Space camera, FEA