

# 非球面长圆状反射镜支撑结构的工程分析

宋朝晖 吴清文 卢 铿

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘 要** 针对非球面长圆状反射镜的支撑结构初步设计方案,采用有限元法进行了静力学分析和计算。以镜面面型精度为评价指标,对支撑结构进行了有效的改进,并最终确定了满足要求的支撑结构方案。

**关键词** 非球面反射镜 支撑结构 有限元法

**中图分类号** TH703.3, TP391.72 **文献标识码** A

## 1 引 言

随着微电子、微机械和轻型材料等新技术的迅速发展,卫星小型化和小卫星的发展正在世界上蓬勃兴起。由于小卫星具有重量轻、体积小、研制周期短、功能密度高、成本低等特点,受到了各国的高度重视,纷纷将小卫星作为今后的发展方向。小卫星技术的实质是选用高新技术,促进卫星功能密度的不断提高,从而有效地减轻重量,降低成本。小卫星技术为发展功能各异的应用卫星开辟了新的途径,是卫星技术发展的重要趋势。

随着微小卫星技术的发展,需要研制适于小卫星的轻型高分辨率宽覆盖空间相机。轻型宽覆盖相机要求采用具有结构紧凑、体积小、重量轻,并具有大的视场、大相对孔径、对气压、温度不敏感,能较好地适应空间应用的光学系统。采用三反射镜光学系统,由于系统全为反射面,相机工作的波段范围宽;三个反射面采用三个非球面可以校正球差、慧差、像散等像差;由于无消杂光问题,提高了轴外视场的成像质量,有利于设计较大的视场,作到大的相对孔径,故有效地减少了相机的体积和重量;缺点是需采用较大尺寸非球面长圆状反射镜。

在空间微重力和工作温度载荷的作用下,反射镜及其支撑结构的结构变形将导致光学元件间的相对位置变化和光学元件的波前畸变,这会影晌或破坏光学系统的成像质量。因此如何使反射镜及相应的支撑结构具有高的静态结构刚度、良好的动态结构性能、高热稳定性,在水平和垂直方向(加工检测、空间工作状态)均满足镜面面型精度要求,长圆状反射镜支撑结构的设计面临新的挑战。

## 2 非球面长圆状反射镜的轻量化

较重的光学系统将导致支撑结构乃至整机重量的增加。航天产品的重量与发射成本密切相关。质量的增加不仅增加成本而且将导致整机的动态特性、热稳定性下降,因此为使反射镜重量轻、刚度高。应从镜坯材料的选择、轻量化结构等方面进行综合考虑。

镜坯材料的选择:

镜坯材料选择的原则是使光学元件受力及受热后结构及镜面变形尽可能的小,因此选择镜坯材料应重点考察以下材料特性:

(1) 密度:

选择密度小的镜坯材料,能有效地减轻光学元件的重量,也相应地减轻了支撑结构的重量,从而大幅度地减轻整个相机的重量。

(2) 比刚度:

材料的比刚度(弹性模量与密度之比)越大,单位载荷引起结构变形越小。选择比刚度大的镜坯材料,无疑相应地提高了反射镜的结构比刚度。

(3) 导温系数:

当环境温度变化时,材料的导温系数大,镜体内部很容易达到温度平衡,不会引起很大的热应力。材料的线膨胀系数小,镜体结构尺寸变化小,具有较好的尺寸稳定性。为使镜体在较宽的温度范围具有良好的热稳定性及尺寸稳定性,应选用导温系数大、线膨胀系数小的材料。

目前常采用融石英(Fused Silica)、微晶玻璃(Crystallizing Glass)等比刚度大、导温系数大的材料作为镜坯材料(材料各项属性见表 1)。

Table 1. Material property table

No.	material name	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	E GPa	E/ $\rho$ 10 <sup>6</sup> m	$\lambda$ W/(m·K)	$\alpha$ 10 <sup>-6</sup> /K	$C_p$ J/(kgK)	$N\rho \cdot C_p$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
1	Fused Silica	2.20	74.59	3.33	1.38	0.55	787	0.7
2	Crystallizing Glass	2.592	92	3.7	1.2	0.1	829	0.558
3	Invar	8.03	145	1.84	13.8	0.54	502	3.4
4	Composite epoxy	1.56	140	8.97	35	0.1	921	21.3

表中:  $\rho$  为密度;  $E$  为弹性模量;  $E/\rho$  为比刚度;  $\lambda$  为热传导率;  $\alpha$  为线胀系数;  $C_p$  为比热容;  $N\rho \cdot C_p$  为导温系数。

反射镜的轻量化结构:

空间相机的高分辨率要求光学元件具有高的结构比刚度及良好的热稳定性和尺寸稳定性。轻量化结构是提高结构比刚度的要求。采用自振频率作为衡量反射镜重量及变形指标。自然频率与结构刚度及结构质量关系的表达式为:

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

式中,  $F$  为整个结构的自然频率,  $K$  为结构刚度,  $M$  为结构质量。当  $K$  大,  $M$  小时, 结构的自然频率高, 则结构的比刚度高。为减少结构变形提高其力学环境适应性, 要求减少镜体的运动质量。

为改进反射镜的动力学特性, 要求反射镜采用轻量化结构减少质量。对温度的敏感性要求

在水平和垂直方向轻量化结构具有对称性。根据镜体具体结构,选择孔的形状及排列方式,对于长圆状反射镜不适于选圆孔。选用加工六角形和四边形盲孔的方案,合理地设计分布筋板和支撑点的位置,使反射镜的比刚度最优,通过有限元法计算在重力作用下的结构变形,考核面型精度,确定采用四边形布孔方案(如图1所示)。

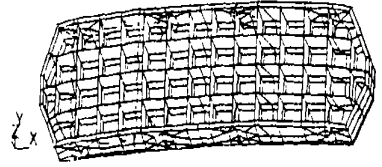


Fig. 1 The light-weight mirror scheme

### 3 支撑结构的方案设计

针对较大尺寸轻量化长圆状反射镜,如何使设计的支撑结构具有高联接刚度,良好的动态特性、对温度不敏感且体积小、重量轻。在重力和工作温度作用下,满足于光学设计对镜面变形要求。光学元件相应的支撑结构设计的原则是应尽量减少结构对镜面带来的不良影响。支撑设计中需重点考虑以下几点:

#### 结构选择:

由于桁架式结构变弯曲载荷为拉压载荷,有很好的比刚度,而且结构简捷可靠故在轻量化要求较高的空间光学系统中广泛采用。反射镜的结构形状特点决定了它较适于边缘支撑。由于承受的是基本上对称的温度载荷,要求支撑结构应基本对称,以减小由于热应力产生的非对称力载荷。较优的支撑结构在载荷作用下应使应力或应变能分布均匀。选择三点静定支撑,通过在每一个静定的支撑点处设置刚性的桁架,产生与镜体连接的弹性支撑点,由于镜体上支撑点数的增加,使镜面变形得到了改善。

#### 材料的匹配性:

考虑受力及受热后结构及镜面面型的稳定性,反射镜选用高比刚度、高稳定性熔石英。如与镜体直接接触的支撑结构的线膨胀系数能与反射镜的线膨胀系数一致,则均匀的温度升降就不会带来镜面的畸变。故选择与光学材料特性匹配的铟钢(invar),以使其反射镜力学、热性能相匹配。与镜体非直接接触的支撑结构则选用线胀系数小,适于空间环境条件的高比刚度、高尺寸稳定性的碳纤维复合材料(Composite epoxy)。

#### 设置柔性环节:

为避免支撑结构的变形对镜面变形产生的不良影响,考虑在适当的位置设置柔性结构,如反射镜与支撑结构连接处设置薄的筋板,以减小应力、应变对镜面面形精度的影响。通过柔性环节产生的较大变形达到卸载及吸收应变能的目的。值得注意的是,只允许柔性环节产生在光学元件非考核方向上的变形,应与考核方向(水平、垂直方向)垂直。

根据以上各个方面的综合考虑,支撑结构与镜体连接处选用铟钢,与镜体的非直接接触处选用碳纤维复合材料,采用桁架结构,并在适当位置设计柔性结构,从而确定了支撑结构的初步方案。

### 4 支撑结构的工程分析

轻量化技术、新型材料的应用,使设计变量的可选择范围变得越来越小。传统的经验、类比

方法已远不适用光学仪器这类高精度的航天产品。利用有限元法对复杂的结构进行应力分析, 可以为复杂结构参数预估、选择、以及优化等提供科学依据。

有限元模型建立步骤:

构造实体模型: 建立三维实体模型具有支撑结构尺寸、拓扑关系并赋予相应的材料属性。

网格划分: 将实体模型划分为有限个节点和单元。在被考察的关键部位上要细致地划分出节点和单元。以便对计算结果进行检查、分析。根据镜体结构的特点, 镜面采用体单元(六面体、楔形单元), 支撑筋板采用壳单元(三角形或四边形)。支撑结构则尽可能选用壳单元, 以方便快速修改。

约束处理: 在三个静定支撑点相应的节点处约束  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向位移及旋转自由度; 弹性支撑点将两实体结构直接相连。

至此建立了反射镜及其支撑结构的有限元模型, 在此基础上, 施加载荷计算结构变形, 进行有限元分析。

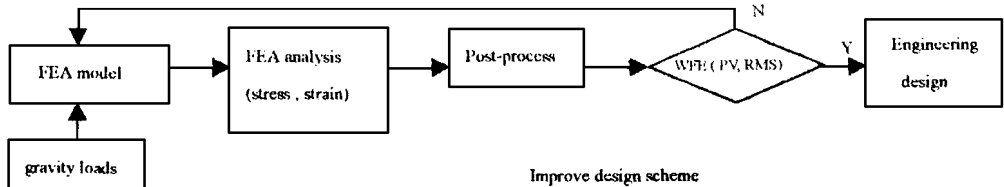


Fig. 2 The process of finite-element analysis of mirror & its support structure

有限元分析:

考虑地面加工检测时的重力环境, 在水平和垂直方向施加重力载荷, 计算由重力引起结构变形。结构的变形最终将影响光学性能的变化, 对于空间光学中的小像差系统, 适于用结构变形引起的波面误差的方法来评价面型质量。对镜面上节点的变形结果进行处理, 得到相应的波前误差参数(PV、RMS 值)。以镜面变形为目标函数, 支撑结构尺寸、结构形式为设计变量组成简单的闭环(如图 2 所示)。根据重力变形的结果分析, 为修改结构方案提供依据, 有针对性地修改设计变量, 再经分析计算及时反馈修改效果, 从而使设计方案及结构参数得到改进, 完成结构的细化过程。

具体分析时分两步:

第一步: 确定镜体与支撑结构连接处支撑点位置:

暂不考虑支撑结构对镜面面型变化的影响, 约束直接定义到镜体上。约束支撑点处的节点位移的六个自由度。适当调整支撑点位置使镜面变形尽可能小。从而确定镜体和支撑结构的连接处支撑点的几何分布位置。

第二步: 对反射镜及其支撑结构进行工程分析:

为使反射镜及其支撑结构能在载荷作用下满足水平和铅垂方向的镜面变形要求, 使用波前法进行光学性能评估。根据重力作用下结构变形的计算结果, 发现变形明显或应力、应变集中的地方, 推断出系统的薄弱环节, 提出改进方案: 在薄弱位置给予加强, 如加大壳单元的厚度; 在应变较大的非关键部位设计柔性环节吸收应变能; 根据应力、应变分布选择合适的结构形式。通过对加工检测、空间工作状态下的性能预测, 有针对性的从预测结果指导设计方案的改进。具有主动性, 保证了结构设计质量。

## 有限元分析结果的误差控制

有限元法是根据变分原理求解数学物理问题的数值计算方法。在实际工程应用中,通过对连续体进行结构离散和数学离散,从而使分析计算大为简化。虽然是近似解,但适当的控制模型误差,可使近似解满足工程精度要求。如不计输入参数误差,忽略有限元理论及计算机数据处理误差,误差主要来源有限元模型误差。有限元模型误差主要来自以下三个环节:单元选取、网格划分、边界处理。其中网格划分的疏密程度将直接影响计算的收敛误差,收敛误差曲线为一条渐近线,收敛误差越小越趋近精确解。网格的密度以收敛误差小于 5% 满足工程精度要求为准。网格划分过密,不仅浪费宝贵的机时对计算精度提高效果也不明显。

## 5 结 束 语

针对长圆状反射镜支撑结构的初步设计方案性,通过对载荷作用下的结构变形分析,推测满足性能要求的结构形式,有利于快速修正设计,及时反馈验证设计思想,完成结构的细化设计。根据工程分析结果有针对性的修改结构,消除盲目性。实现了在系统设计初期,运用工程分析结果指导结构设计。

### 参 考 文 献

- 1 Michael Anapol. Ultralightweight silicon carbide infrared cryogenic telescope. Proc SPIE ,1995 , 2543: 219~228.
- 2 卢锷等.用有限元法(FEA)进行工程分析的误差评价与控制.光学 精密工程,1995,3(6):34~39.
- 3 吴清文.空间相机中主镜的轻量化技术及其应用.光学 精密工程,1997,5(6):69~79
- 4 卢锷.产品研制开发 CAD/CAE/CAM 技术路线与应用.光学 精密工程,1996,4(6):1~6
- 5 吴清文.镜面面型误差的曲面方程处理方法.光学 精密工程,1998,6(6):56~60

## Analysis of Support Structure for the Length and Round Mirror

SONG Zhao-Hui, WU Qing-Wen, LU E  
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

The scheme of length and round mirror & its basic support structure is introduced . The static analysis of mirror with support structure was made by means of FEM , The mirror is improved & its structure is selected to meet the WFE specification.

**Key Words:** Aspherical mirror, Support structure, Finite Element Method (FEM)

宋朝晖 女,1969年生,中国科学院长春光机所博士研究生,主要从事光学仪器的工程分析研究。