

# 一种基于有限元分析的柔性支撑结构设计

杨利伟<sup>1,2</sup>, 李志来<sup>1</sup>

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了满足反射镜较高的面形精度要求, 提出了一种基于有限元分析的柔性支撑结构。首先根据反射镜的设计要求确定柔性支撑的结构形式, 然后利用有限元分析软件对反射镜组件进行网格划分并提交运算。分析结果表明, 当柔性支撑中镶嵌件膜片厚度为 1.5mm、柔性杆十字槽厚度为 4mm 时, 反射镜组件的一阶谐振频率达到 206Hz, 在 1g 重力作用下镜面综合面形误差 RMS 值分别达到 2.5nm、4.4nm、25.3nm, 在 1g 重力和 4℃ 温升共同作用下镜面综合面形误差 RMS 值分别达到 15.2nm、17.7nm、28.5nm, 各项指标均满足设计要求。动力学响应分析表明, 柔性支撑具有较强的抗振能力。

**关键词:** 反射镜; 柔性支撑; 有限元

中图分类号: TH745

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2008)01-0049-04

## Design of a Flexible Supporting Structure based on Finite Element Analysis

YANG Liwei<sup>1,2</sup>, LI Zhilai<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** In order to meet the increasingly high accuracy of the mirror, a flexible support structure was proposed by the finite element analysis. According to the design requirements of the mirror, the flexible supporting structure was designed, then the finite element analysis software was used to mesh and submit the operator. The results showed that the one order resonant frequency could reach 205 Hz; RMS of the integrated surface error of the mirror in the effects of gravity may get to 2.5 nm, 4.4nm, 25.3nm, and RMS of the integrated surface error of the mirror in the effects of gravity and temperature may get to 15.2nm, 17.7nm, 28.5nm, respectively; when the membrane thickness of the inlaid pieces was 1.5 mm, the thickness of crusaders groove was 4 mm, and all targets were met the design requirements. What's more, the vibration experiments conclude that this flexible support has a strong capability of anti-vibration.

**Key words:** mirror; flexible supporting; finite element

反射镜是反射式光学系统的关键部件, 反射镜支撑技术是反射镜工程应用中最关键的技术之一。反射镜的支撑在对反射镜进行有效定位的同时卸载它的自重, 并且减小热应力对反射镜的影响以达到减小反射镜镜面变形的目的。如何使反射镜及其支撑结构具有高的静态结构刚度、良好的动态结构性能和高的热稳定性, 并在水平和垂直方向上(加工检测、空间工作状态)均满足镜面面形精度要求,

这是空间反射镜支撑结构设计所面临的新的挑战。过去几十年里, 人们提出了很多反射镜的支撑方法, 其中最常用的方法就是在适当的位置设置柔性结构, 通过柔性环节产生的较大变形来达到卸荷和及吸收应变能的目的。

本文论述的反射镜外形为长圆形, 尺寸为 540mm×420mm, 镜面为离轴非球面, 反射镜组件的一阶谐振频率要求达到 200Hz, 在重力作用下,

收稿日期: 2007-10-12

作者简介: 杨利伟(1980-), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要从事空间光学传感器结构技术的研究, E-mail: yanglw2006@yahoo.com.cn。

通讯作者: 李志来(1965-), 男, 研究员, 主要从事空间光学传感器结构技术的研究, E-mail: lizl2004@sohu.com。

检测状态下镜面 RMS 值不大于  $1/60\lambda$ ，在重力及热弹性综合作用下，检测状态下镜面 RMS 值不大于  $1/40\lambda$ ，其中  $\lambda=632.8\text{nm}$ 。欲实现设计要求，除对反射镜自身结构进行优化外，还须对支撑背板及柔性支撑进行合理设计，而柔性支撑设计是其中的关键技术之一。因此，寻求满足设计要求的柔性支撑结构已成为比较重要的课题<sup>[1-3]</sup>。

## 1 柔性支撑设计

### 1.1 柔性支撑对反射镜变形的影响

反射镜组件由反射镜、柔性支撑、背板三部分组成，柔性支撑是反射镜组件中的一个重要环节，它不但能够隔震，而且还能隔离大部分装配应力，更主要的是当温度变化时，光学元件及其支撑结构之间热特性的不匹配可以通过柔性支撑的变形给予补偿<sup>[4]</sup>，即当反射镜组件受热时，反射镜组件将产生热膨胀，由于背板材料的线胀系数与反射镜材料的线胀系数有一定差别，这将引起支撑两端产生相对运动，背板对支撑做功。柔性支撑将通过自身变形，吸收大部分能量，从而保证镜面的面形质量。

### 1.2 材料的选择

材料间的热匹配是解决光学组件适应环境条件，尤其是温度环境的关键。光学元件通过金属结构件支撑、固定，为保证光学元件在较复杂的工况下能正常工作，与光学元件直接接触的支撑结构件的线胀系数应与光学元件的线胀系数匹配。

综合考虑光学元件的机械性能、对工作环境的适应性、加工工艺性等因素，本文中反射镜材料选择碳化硅(SiC)，柔性支撑材料选择铟钢(4J32)，背板材料选用铸钛合金(ZTC4)。材料属性如表 1 所示。

表 1 材料力学特性表

Tab.1 The table of properties of the Material mechanics

材料名称	密度 $\rho$ ( $10^{-6}\text{kg/mm}^3$ )	弹性模量 E (GPa)	泊松比 $\mu$	热膨胀系数 $\alpha$ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )
SiC	3.07	350	0.17	2.5
ZTC4	4.40	112	0.29	8.9
4J32	8.10	138	0.25	2.5

### 1.3 反射镜结构设计

为了减小自重变形，降低主镜在厚度方向的热阻，必须对反射镜进行轻量化设计。轻量化反射镜结构设计参数主要包括：轻量化孔的形状、镜体的厚度、反射面板厚度等。综合考虑加工难度及面形精度要求，确定采用背部半封闭式结构，三角形轻量化孔，轻量化率约为 70%；支撑点数可以是 3 点、6 点、9 点，考虑到镜面尺寸和装配难度，确定采用背部 3 点支撑。反射镜几何模型如图 1 所示，几何物理参数如表 2 所示<sup>[5]</sup>。

表 2 反射镜的几何、物理属性(单位：mm；kg)

Tab.2 Geometrical and physical properties of the mirror

长	宽	厚度	镜面厚	镜背厚	筋厚	支撑孔直径	重量
540	420	58	8	6	6	60	13.2

### 1.4 柔性支撑结构设计

反射镜组件在地面进行装调检测时的工作温度是  $18 \pm 4$ 。在此温度范围内，为了保证反射镜的镜面面形，柔性支撑必须要有一定的柔度，否则反射镜与背板的热特性的不匹配会导致反射镜镜面局部的严重变形，导致成像质量恶化。反射镜背部有三个支撑孔，柔性支撑的一部分通过胶合的方式和镶嵌在支撑孔里面（镶嵌件），另一部分通过螺钉和背板连接在一起（柔性件）。由于反射镜和镶嵌件热特性的不匹配，当温度变化时，镶嵌件沿其半径方向的变形应和支撑孔壁一致。同样，由于反射

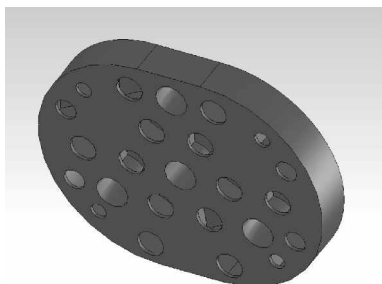


图 1 反射镜三维模型示意图  
Fig.1 3D model of the mirror

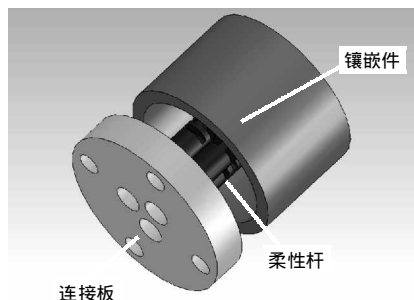


图 2 柔性支撑三维模型示意图  
Fig.2 3D model of the flexible supporting

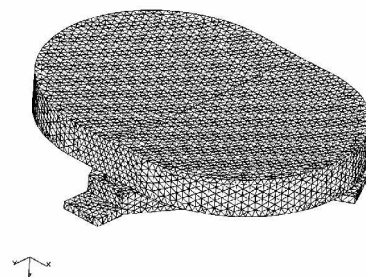


图 3 反射镜组件有限元模型  
Fig.3 The finite element model of the mirror

镜和支撑背板热弹性的不匹配，当温度变化时，柔性件应有较大的弯曲变形。

根据以上分析，设计的柔性支撑如图 2 所示，它由镶嵌件、柔性杆、连接板三部分组成，其中 3 个柔性杆通过螺钉和镶嵌件中部的膜片相连。镶嵌件沿半径方向刻出一系列弧形沟槽，当温度变化时，这些沟槽会产生弯曲，镶嵌件随着支撑孔一起膨胀、收缩，避免了因局部应力集中而导致局部镜面严重变形。柔性杆的中部刻出一系列的十字花槽，当温度变化时，柔性杆产生弯曲，从而大部分地吸收支撑背板的变形能，保证镜面的面形精度。

柔性支撑结构几何参数如下：

（一）镶嵌件

- （1）外径： $\phi$  60mm；
- （2）内径： $\phi$  50mm；
- （3）高度：40mm；
- （4）弧形槽宽：1 ~ 2mm；
- （5）膜片厚度：1.5 ~ 2.5mm.

（二）柔性杆

- （1）长度：41mm；
- （2）直径： $\phi$  10mm；

- （3）十字槽宽：1 ~ 2mm；
  - （4）十字槽厚：2 ~ 4mm.
- （三）连接板
- （1）直径： $\phi$  64mm；
  - （2）厚度：12mm；

2 有限元分析

反射镜组件的有限元模型如图 3 所示，分析时，对支撑背板的三个连接面进行 6 个自由度全约束，分别将重力的作用方向设置为X、Y、Z三个方向（其中X方向是检测状态下的重力方向），对反射镜组件进行线性静力学计算。分析结果表明，镶嵌件膜片的厚度以及柔性杆十字槽的厚度对支撑的柔性影响最大。膜片厚度及十字槽厚度取不同数值、其余几何参数取固定数值时，反射镜组件的一阶谐振频率、组件最大变形、镜面综合面形误差 RMS 值见表 3。柔性支撑设计的重点在于柔度，柔度过大，反射镜组件的谐振频率和最大变形不能满足设计要求，柔度过小，镜面综合面形误差 RMS 值不能满足设计要求。

表 3 在 1g 重力作用下柔性支撑取不同参数时反射镜组件一阶谐振频率、变形和 RMS 值  
Tab.3 Natural frequency, deflection and RMS when the flexible supporting structure with different parameters in the effects of gravity

十字槽厚度( mm )	膜片厚度( mm )	一阶谐振频率( Hz )	最大变形( $\mu$ m )			RMS( nm )		
			X	Y	Z	X	Y	Z
4	2.5	258	3.26	2.95	2.70	6.3	7.8	27.8
	2	242	3.69	3.35	3.76	5.1	5.7	26.5
	1.5	206	4.30	3.73	6.48	2.5	4.4	25.3
3	2.5	237	3.94	3.55	3.22	8.9	9.5	28.5
	2	215	4.78	4.35	4.4	6.3	7.8	27.8
	1.5	194	5.74	5.15	6.88	3.8	5.7	26.5
2	2.5	224	4.42	3.98	3.81	10.2	10.8	29.1
	2	199	7.96	7.88	5.95	7.6	8.9	28.5
	1.5	177	8.15	8.05	5.69	5.1	7.0	27.8

由表 3 可知，柔性支撑取不同参数时水平方向上 RMS 值均满足设计要求，当十字槽厚度取 3mm、膜片厚度取 1.5mm 以及十字槽厚度取 2mm、膜片厚度取 2mm 和 1.5mm 时，反射镜组件的一阶谐振频率分别为 194Hz、199Hz、177Hz，均不能满足设计要求，故应舍弃。

反射镜组件在地面进行加工检测时不仅有重力变形，更主要的还有热弹性变形，实际的变形结果是两者的迭加，因此进行有限元分析时重力载荷与热载

荷应同时作用于反射镜组件上。设定参考温度为 18℃，工况为 4℃温升加 1g 重力，反射镜组件在重力及温度水平共同作用下的分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知，当十字槽厚度取 4mm、膜片厚度取 1.5mm 时，反射镜组件的一阶谐振频率为 205Hz，组件最大变形为 9.20mm、7.42mm、12.4mm，镜面综合面形误差均方差 RMS 值为 15.2mm、17.5mm、28.9mm，各项指标均满足设计要求。

表4 在重力及温度水平共同作用下反射镜组件一阶谐振频率、变形和 RMS 值

Tab.4 Natural frequency, deflection and RMS in the effects of gravity and temperature

十字槽厚度(mm)	膜片厚度(mm)	最大变形( $\mu\text{m}$ )			RMS(nm)		
		X	Y	Z	X	Y	Z
4	2.5	8.56	7.25	9.28	19.0	23.4	31.0
	2	8.80	6.92	9.76	16.5	20.2	29.7
	1.5	9.20	7.42	12.4	15.2	17.7	28.5
3	2.5	8.80	7.48	9.84	18.4	23.4	31.0
	2	9.28	7.10	10.3	16.5	19.6	29.7
2	2.5	9.04	6.98	9.92	17.1	23.4	31.6

表5 反射镜组件的最大频率响应点

Tab.5 The maximum frequency responses points of the mirror

采样点	X方向激励		Y方向激励		Z方向激励	
	共振频率(Hz)	放大倍率	共振频率(Hz)	放大倍率	共振频率(Hz)	放大倍率
近轴点	518	10.5	518	10.9	788	4.7
最高点	518	11.3	518	11.8	788	11.0

### 3 动力学响应分析

为了检验反射镜组件的抗振能力,须对其进行动力学响应分析校核。采用大质量法对反射镜组件进行频率响应分析计算,取结构阻尼为 3%(估计值)。安装螺钉所在位置的 15 个节点与大质量节点间建立一个 RBE2 单元,在大质量节点上分别施加 X、Y、Z 向的单位加速度载荷。在 4Hz ~ 2000Hz

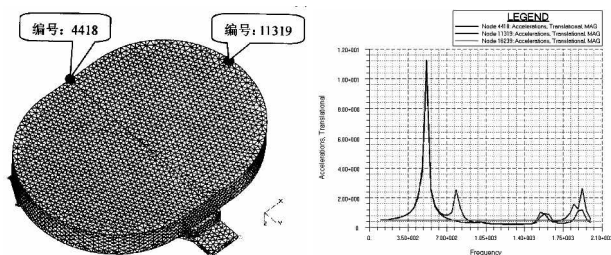


图4 选取采样点的位置

Fig.4 Location of the sampling point

图5 X向激励频率响应曲线

Fig.5 Excitation frequency response curve of X direction

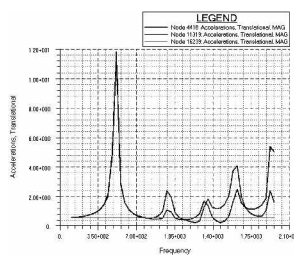


图6 Y向激励频率响应曲线

Fig.6 Excitation frequency response curve of Y direction

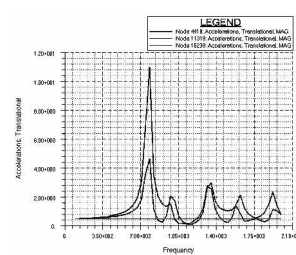


图7 Z向激励频率响应曲线

Fig.7 Excitation frequency response curve of Z direction

范围内均匀插入 100 个数据点,同时在共振点附近再插入 3 个计算点。图 4 所示为选取采样点位置,图 5 ~ 7 所示为反射镜组件在加速度载荷作用下的频率响应曲线,其中浅蓝色水平线表示基础输入节点 16239 的响应(等于输入值),红色线是反射镜镜面离光轴最近点(节点 4118,以下简称近轴点)的响应,蓝色线是反射镜镜面最高点(节点 11319,以下简称最高点)的响应。近轴点和最高点的最大响应点如表 5 所示。

从图 5 ~ 7 可以看出,反射镜组件在 4Hz ~ 2000Hz 范围内仅有 1 个大于 10 倍放大倍率的共振点,且放大倍率小于 20 倍;以上结果表明,反射镜组件柔性支撑结构具有较强的抗振能力。

### 4 结束语

目前 CAD/CAE 技术已经成为研制轻型、大视场、高分辨力空间光学遥感器必不可少的技术手

段,它可以节约成本,提高功效,缩短周期。本文根据一定尺寸反射镜的设计要求和工作环境,提出了一种反射镜柔性支撑系统的设计方案,并通过有限元分析软件对反射镜组件进行分析,分析结果表明该系统完全满足设计要求。

### 参考文献

- [1] 曾勇强,傅丹鹰,孙纪文,等.空间传感器大口径反射镜支撑结构型式综述[J].航天返回与遥感,2006,27(2):18-22.
- [2] 邵君.空间反射镜支撑结构研究概述[J].红外,2006,27(4):36-41.
- [3] 宋朝辉,卢铿,吴清文.长条形非球面反射镜轻量化及支撑结构优化研究[J].高技术通讯,2001,2:89-91.
- [4] 吴清文,牛晓明.空间光学仪器温度指标的确定[J].光学精密工程,1998,8(增):211-21.
- [5] 韩媛媛,张宇民,韩杰才,等.碳化硅反射镜轻量化结构优化设计[J].光电工程,2006,33(8):123-135.