

文章编号 1004-924X(1999)06-0061-05

高精度轻型长条形反射镜多点支撑方案

吴清文

(哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

陶家生 宋朝晖

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 轻型、大视场、高分辨力可见光空间遥感器的研制已成为空间光学工作者的重点研究课题。本文结合某研究项目拟探讨高精度长条形反射镜的多点支撑方案及其实施,重点论述其研究过程和方法。

关键词 长条形反射镜 支撑 面型

中图分类号 TH703.3, TP391.72 **文献标识码** A

1 引言

现代对地观测,对探测工具特别是空间光学遥感器不断地提出更新更高的要求,不仅要求其信息量大,而且要求其分辨力高,抗干扰能力强,成本还要求尽量低。这样轻型、大视场、高分辨力可见光空间遥感器的研制自然而然地成了当今空间光学工作者的重点研究课题^[1-4]。然而轻型、大视场、高分辨力等指标间存在相互矛盾相互制约的关系。为了解决这个问题,可以从光学系统设计、材料选取、结构形式优化等方面入手,本文拟从选材及结构优化两方面探讨高精度轻型长条形反射镜多点支撑方案。

2 问题论述

本文所探讨的反射镜如图1所示,根据光学系统的要求,该反射镜为非球面镜,其外形尺寸为 $800 \times 240 \times 80 \text{mm}^3$ 。其材料立足于国内的生产条件,拟采用熔石英或微晶玻璃。这两种材料及相关支撑结构的材料参数如表1所示。从表中看到熔石英和微晶玻璃的密度低,材料比刚度(E/ρ)高,线膨胀系数也较低,是良好的光学玻璃材料,在设计、分析阶段以微晶玻璃为主选光学材料,熔石英为辅。

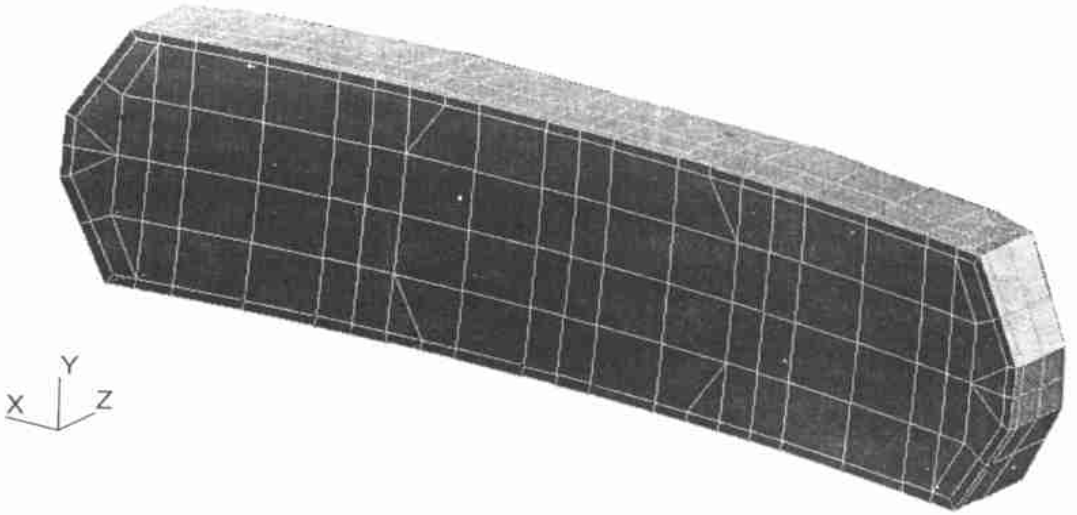


Fig. 1 Sketch of the mirror

Table 1 Physical property of the materials used for space camera

Name	Brand	ρ	E	μ	σ_b	$\sigma_{0.1}$	α	λ	
		10^{-6} kg/mm^3	kg/mm^2		kg/mm^2	kg/mm^2	$10^{-6}/$	w/mm	
1	Fused Silica	2.20	7459	0.167			0.55	0.00138	
2	Crystallizing Glass	2.50	9200	0.247			0.10	0.0164	
3	Ti Alloy	ztc4	4.40	11400	0.29	89.0	73	8.90	0.0088
4	Invar	4J32	8.18	15000	0.25	51.0		0.55	0.00147
5	Composite Epoxy		1.56	14000	0.33	138.0		0.10	0.035

整个光学系统的波差要求较高, 对该反射镜的微重力作用下面型误差要求 $[PV] = \lambda/10$, $[RMS] = \lambda/50$, 其中 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。其组件的动态刚度也须达到一定指标。本文综合应用 CAD/CAE 技术, 将 CAD 构造的结构模型, 离散为有限的单元和节点, 建立有限元模型, 加入相应的边界条件和载荷后利用 CAE 软件进行分析计算, 完成方案拟定、验证、修改、再设计的设计-分析迭代工作, 进而得到轻量化、高刚度、高面型精度的光学元件组件。

3 支撑方案探讨

在反射镜镜坯材料确定以后, 探索合理的支撑方案工作基本上分为两步: (1) 镜坯的轻量化方案的确定。这时需结合支撑方案综合考虑, 但支撑结构不必十分详细, 可以省略支撑结构将约束直接加在镜坯上进行分析计算, 以快速寻求合理的轻量化方案及其支撑方式。(2) 支撑方案的最后确定及其详细结构的确定。

如图 1 所示略带弯月形的镜坯, 最容易想到的轻量化方案为如图 2 所示的背部开放型蜂窝孔方案。该结构的综合性能较好, 抗弯曲和抗扭转能力较强, 且近几年来这种结构在俄罗斯、美国的空间光学工程中均有应用, 如著名的 Hubble 望远镜中多个圆形镜均采用了蜂窝夹层结构。

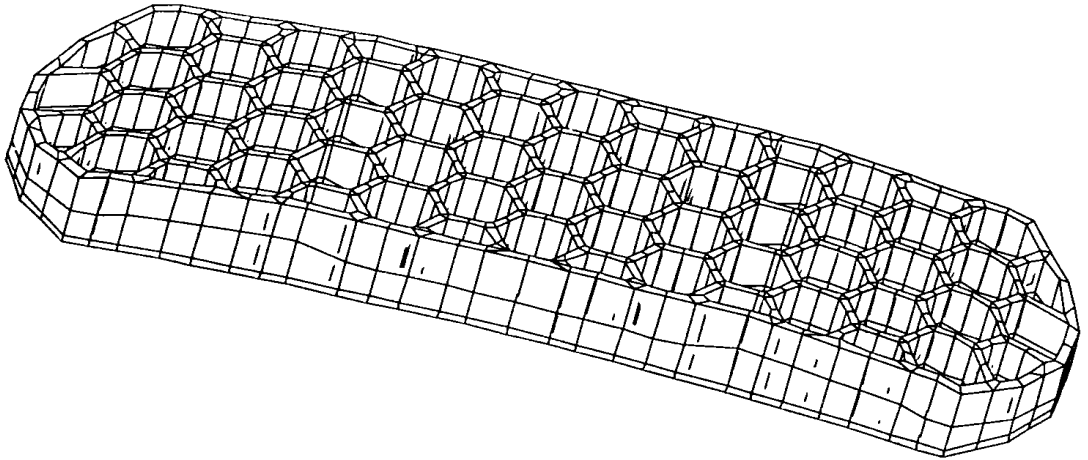


Fig.2 Sketch of the back-open hexagonal light weight mirror

本文的中小型镜坯,很显然它不适合于中心支撑,其支撑方案只能在背部支撑和边缘支撑中考虑。如果采用背部支撑,不论是采用三点支撑,还是采用多点支撑,其支撑点的布置和自由度解耦都很难实现,所以直接考虑周边支撑方案。

对于长条形反射镜,如果采用三点周边支撑,其支撑点的布置难度不亚于背部支撑,且镜面的面型指标难以保证,所以只能采用多点支撑方案。四点支撑、六点支撑均较易实现,对六点支撑方案进行了详细分析,结果发现当六点布置比较合适时可以保证镜面面型质量要求。将约束直接加在镜坯上进行分析计算,蜂窝形轻量化反射镜在 $1g$ 重力作用下的面型误差如表 2 所示,于是决定选用六点支撑蜂窝形孔轻量化反射镜方案。

Table 2 Surface figure error of the hexagonal-hole mirror under $1g$ gravity

PV (nm)	RMS (nm)	δ_{\max} (mm)
55.1	16.4	$8.23E-5$

Notice: $1g$ gravity stands for the gravity difference of the instrument from the Earth to space. The gravity is at optical axis.

一旦反射镜的结构形式和支撑方式确定以后,确定裸镜上支撑点的位置成为初步设计的重点,因为在此之前支撑点布置方案,或是按照经验试定某位置,或是按照某种约束条件而初定某位置,无论如何确定,它们都可能不是最佳位置,所以需要进一步分析计算,或设定有关参数后直接用分析软件的优化功能进行优化分析,从而确定最佳的支撑位置。对裸镜进行分析计算,约束直接放在镜坯上,如果各点对镜坯受力变形的贡献基本相同,那么两侧各点的分布基本趋于均匀。由于它们彼此间存在过约束问题,这种状态下的支撑点分布方案仅供参考。所以对镜坯上的约束点的自由度应分别处理,单独给定其被约束自由度,以便更好地模拟实际支撑结构对镜坯的作用。

4 支撑方案实施

支撑方案实施是在初步计算的基础上探寻实用化的支撑结构,旨在抛弃初步计算时模拟

计算引入的误差。通常按两步实施: 1. 根据前期工作初步设计一套已经实现自由度解耦的结构, 支撑在镜坯上进行分析计算。根据结果进行结构再设计, 主要是通过修改支撑结构的结构形式和有关参数, 必要时可以移动约束点, 以调整支撑结构在某个方向上的刚度, 使反射镜的

Table 3 Surface figure error of the mirror under 1g gravity

Gravity direction	PV (nm)	RMS (nm)	δ_{\max} (mm)
Z	61.9	16.9	1.20E-3
Y	45.2	9.1	2.10E-3

Notice: 1g gravity stands for the gravity difference of the instrument from the Earth to space. The directions of the gravity are as the same as the ones in Fig 1.

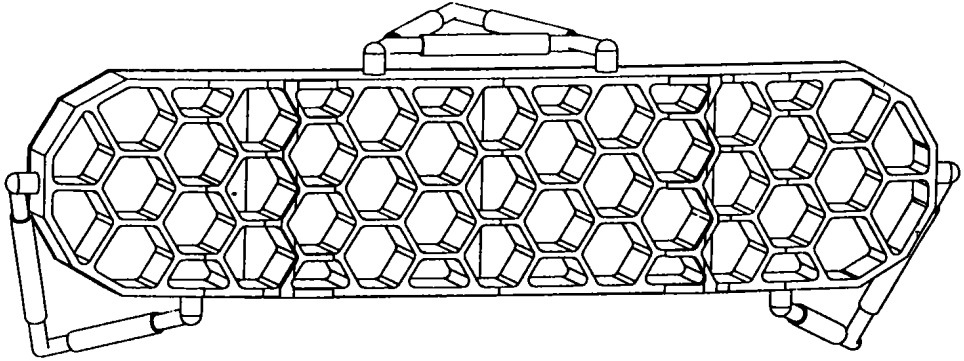


Fig. 3 Back-open hexagonal mirror set supported by 6-point pattern

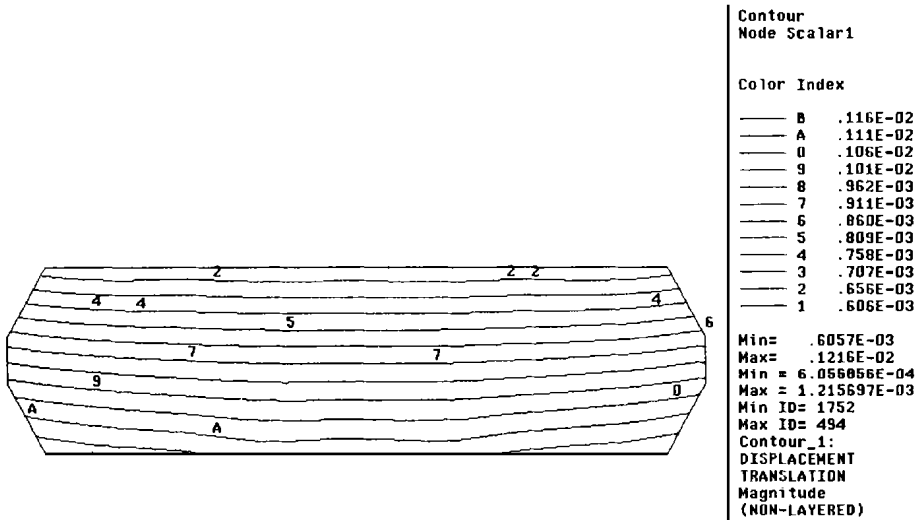


Fig. 4 Contour figure of the mirror under 1g gravity at Y direction (Fig. 1)

面型误差小于其相应允差, 从而得到满足要求的支撑方案。2. 结合加工工艺性等因素详细设计支撑结构后, 再分析计算, 验证支撑结构的合理性和可行性。有时这两步可能需要经过多次迭代, 才能达到较满意的结果。图 3 是最终设计的反射镜组件, 图 4 为受到光轴方向重力作用时反射镜镜面上单元的变形等高线, 说明这时反射镜已经变形比较均匀。经面型数据处理知, 反射镜已经满足其面型误差指标, 其面型误差如表 3 所示。

5 结 束 语

信息化时代的到来不断地为现代空间光学工程提出了更多更新的要求, 轻型、大视场、高分辨力的空间光学遥感器已经被列入各国空间光学工作者的重点研究课题。CAD/CAE 技术已成为必不可少的研制手段。利用 CAD/CAE 技术进行高精度空间光学遥感器的研制, 可有效地提高一次成功率, 节约设计、制造成本, 提高功效。

在研究光学遥感器中光学元件的支撑方案时, 要同时考虑镜坯材料、结构形式、支撑方案及支撑结构。设计-分析的迭代, 应分步实施。先以裸镜为分析对象, 寻求合理的镜坯结构形式及支撑方案, 然后加入具有解耦能力的支撑结构综合分析镜坯与支撑结构, 以镜面面型误差及结构总体刚度为目标函数, 考查、修正支撑结构, 直到各项指标均达标为止。

参 考 文 献

- 1 Parodi G, et al. LBT primary mirrors: the final design of the supporting system. Proc SPIE, 1997, 2871: 352~359
- 2 Robichaud Joseph, et al. Ultralightweight off-axis three mirror anastigmatic SiC visible telescope. Proc SPIE, 1995, 2543: 180~184
- 3 Popov Genadi M. Optical systems for far-infrared space sensing. Proc SPIE, 2478, 1995: 305~314
- 4 Anapol Michael, et al. Ultralightweight silicon carbide infrared cryogenic telescope. Proc SPIE, 1995, 2543: 219~228

Multi-point Support Pattern of a High Precision, Lightweight Rectangular Mirror

WU Qing-Wen

(School of Mechatronics, Harbin Inst. of Tech., Harbin 150001)

TAO Jia-Sheng, SONG Zhao-Hui

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

Abstract

The development of lightweight, high resolution, visible light space remoter with wide view field has been treated as a key project to the space optics researchers. The multi-point support technique of a high precision, rectangular mirror is investigated. The research method is stated emphatically.

Key Words: Rectangular mirror, Support, Surface figure

吴清文 男,工学博士,1987年考入哈尔滨工业大学精密仪器系,学习精密仪器制造技术及塑料挤出模具CAD,先后于1991年、1994年获得工学学士、硕士学位。1997年毕业于长春光学精密机械研究所,获得工学博士学位,同年留所从事光学工程CAD/CAE工作。现在哈尔滨工业大学做博士后工作。