

文章编号 1004-924X(2004)04-0398-04

## 展开式反射镜单元镜支撑技术

高明辉<sup>1</sup>, 杨近松<sup>1</sup>, 段英宏<sup>2</sup>, 吴清文<sup>1</sup>, 任建岳<sup>1</sup>, 潘哲<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 天津科技大学, 天津 300222; 3. 海军装备部, 北京 100841)

**摘要:**基于展开镜结构工作原理,运用有限元方法分析了展开式反射镜单元的裸镜及其支撑方案。目的是确定镜子支撑点数量及排布方式,并具体分析了12-6-1、12-8-1和16-8-1型三种支撑点排布方式,分别计算了各支撑点排布方式下的镜面自重变形。计算结果表明,采用16-8-1型的排布方式较为合理。支撑结构的优化设计是在裸镜支撑点优化位置加入支撑组件综合分析镜坯与支撑组件,以镜面面形误差及结构总体刚度为目标函数,考查、修改支撑组件以保证镜面RMS值在可调节范围(30 μm)内。计算带有支撑组件的单元反射镜在自重作用下的变形,得出的镜面RMS值为16.52 nm,小于1/4波长(632.8 nm),表明将该支撑方案应用于单元镜具有可行性。并提高整个反射镜面的面形质量。

**关键词:**展开式反射镜;单元镜;面形精度;支撑结构

中图分类号:TP73 文献标识码:A

## Support technique of a deployable unit mirror

GAO Ming-hui<sup>1</sup>, YANG Jin-song<sup>1</sup>, DUAN Ying-hong<sup>2</sup>, WU Qing-wen<sup>1</sup>, REN Jian-yue<sup>1</sup>, PAN Zhe<sup>3</sup>

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

2. *Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;*

3. *Naval Department of Equipment, Beijing 100841, China)*

**Abstract:** Based on the deployable structure of a mirror and the operation principle, the finite element method was used to analyze the unit naked mirror and some different mirror support schemes. The principal aim of the naked mirror analysis is to get the numbers of the support points and the ways of the support. There are three schemes including 12-6-1, 12-8-1 and 16-8-1 models. Deformation of the deadweight is calculated under the three conditions. The way of 16-8-1 is more suitable than the designs of other two. The optimum design of the support structure is based on the surface figure error and the structure rigidity. Support subassembly is amended to meet with the mirror surface RMS in the range of 30 μm. Deformation of the mirror with support structure has been calculated. The result is 16.52 nm, lower than a quarter of the wavelength, which indicates the feasibility of the support scheme applied to unit mirror.

**Key words:** deployable mirror; unit mirror; surface figure accuracy; support structure

## 1 引言

在大型空间遥感器的光学系统中,主镜往往具有较大的直径和质量,其对光学波前质量的要求和成本造价较高。但由于受光学材料的均匀性、弹性变形、温度变形等因素的影响,大口径反射镜要获得较高的面形精度,加工、装调的难度势必增大。反射镜的展开式结构正成为解决这一难题的关键技术,展开式反射镜是由几片薄单元镜拼接而成,利用铰链结构控制单元镜的收拢与张开。在火箭发射时,反射镜收拢,到达运行轨道后,镜子张开,形成完整镜面,达到收集面积最大,这项技术体现了大型光学系统在大口径、超轻量化设计方面的较大进展。目前,国外已越来越多地在大型望远镜和航天探测系统中采用展开式结构,如美国航空航天局(NASA)研制的 2.55 m 概念展开镜,它的收集面积比非展开镜大 4 倍;戈德太空飞行中心(GSFC)正在研究 8 m 多片展开镜;路克希德马丁(Lockheed Martin)公司也在研究 6 m 超薄展开反射镜<sup>[1-5]</sup>。而国内在这方面的研究刚刚起步,相关的研究报道尚属空白。

对于有成像质量要求的空间光学系统,不仅需要主动控制调节,而且要求反射镜面应具有更高的面形质量。由于单镜结构是展开式反射镜的基本组成单元,其面形的好坏直接影响整个反射镜的波前质量,因此有必要对单镜进行计算机仿真研究,在理论上分析其物理参数如驱动器排布方式、各作用点受力状况、镜面厚度等,以确保镜面 RMS 值在可调节范围内。本文运用有限元方法对展开式单元镜的多个支撑方案进行分析计算,其中包括单元镜支撑点数量及排布方式的合理选择、支撑结构的优化设计,为单元镜最佳支撑方式的确定提供了具体的理论值。

## 2 展开镜结构

研究的展开镜由 7 块单元镜片拼接而成,口径为 3 m,每块单元镜口径为 1 m,厚 10 mm,材料为复合材料,其拼接形状如图 1 所示。反射镜展开与收拢动作是由单元镜体的转动实现的,3 个往里转动(1、3、5),3 个往外翻转(2、4、6),镜体从收拢状态旋转到展开位置。单元镜体通过背部

的支撑结构与铰链机构连接,并利用铰链机构完成旋转动作,支撑结构中的促动器用来调节单元镜面形。

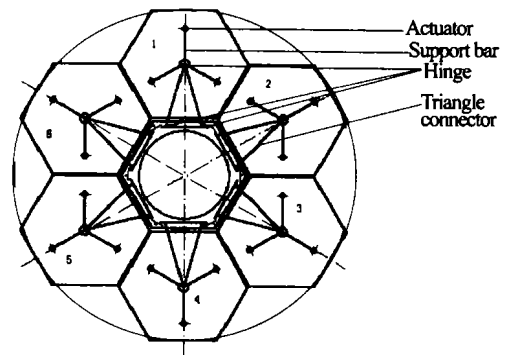


图 1 展开镜工作状态与支撑结构图

Fig. 1 Structure of support for deployable mirror working

## 3 单镜计算机仿真

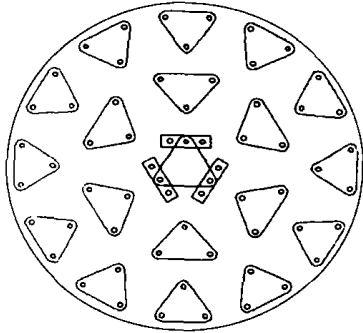
单镜支撑点位置、个数的确定以及支撑组件的优化设计是支撑方案工程分析的关键,分析的步骤分为三步:

- (1) 单镜裸镜的自重变形的计算分析。
- (2) 支撑组件优化设计。
- (3) 计算在促动器调节下的镜面变形。

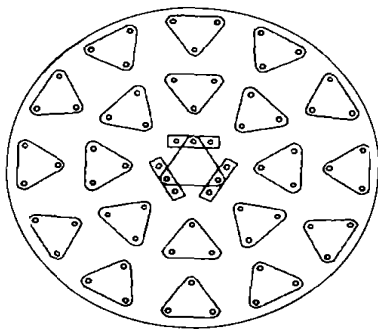
### 3.1 支撑点位置、数量的初步确定

由薄板的变形理论可知,随着支撑点数目的增大,镜体自重产生的变形随之减小。镜面的保持主要取决于驱动器的数量,但过多的驱动器会给镜面带来较大的波纹起伏,同时增加成本和工作难度,因此,合理给出驱动器数量是优化系统的重点。一般来说,驱动器在镜面上的位置有:径向排布、三角形排布和正方形排布三种方式。三角排布时,大多数像差模式的镜面应力和镜面的反作用力都要小于正方形排布和径向排布,而考虑应力时三角排布是能动薄镜面较好的排布方式,而正方形排布时应力较大;径向排布时,镜面拟合各种像差模式的 RMS 值都要小于正方形排布和三角排布时的 RMS 值,而正方形排布和三角排布的 RMS 值都基本上相等,因而考虑镜面拟合能力时能动薄镜面的最佳排布方式是径向排布。综合考虑,最佳的驱动器排布方式应是在保证镜面遵守弹性理论的应力范围内,选择拟合能力较

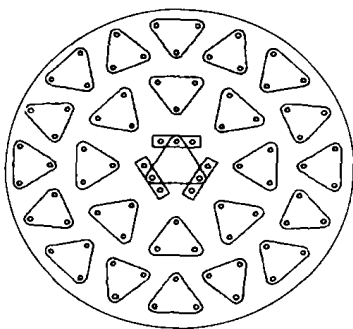
强的径向排布方式。本研究镜面支撑点采用径向排布方式,支撑点数目分别为 60、66、78 个(如图 2),将约束直接加在镜体的支撑点上,计算裸镜在自重作用下的镜面变形,所得结果见表 1。



(a) 12-6-1 排布  
(a) 12-6-1 array



(b) 12-8-1 排布  
(b) 12-8-1 array



(c) 16-8-1 排布  
(c) 16-8-1 array

图 2 镜面支撑点排布方式

Fig. 2 Array of surface support points

由表 1 可以看出采用第 3 种镜面支撑点的排布方式获得的镜面面形误差最小,本文决定采用该种排布方式来确定支撑组件的位置。应当指出,

表 1 不同支撑点排布方式的镜面变形

Tab. 1 Surface deformation of mirror by several types of support points

	12-6-1 排布	12-8-1 排布	16-8-1 排布
PV (nm)	181.38	203.05	79.63
RMS (nm)	42.71	49.18	16.52

对裸镜支撑点的计算分析,主要目的是确定支撑点的数量和基本排布方式,所以计算出的结果不一定最好。还须加上支撑组件综合考虑,包括支撑组件的优化设计、支撑点位置的反复调节,直至面形精度达到最佳值。

### 3.2 背部支撑组件优化设计

支撑组件设计的合理与否直接关系到反射镜在自重作用下面形精度的好坏,为了保证反射镜在重力释放等条件下仍具有较好的面形精度,要求支撑组件整体具有一定的刚度。同时由于反射镜与支撑组件材料不同,为了保证在温度场变化环境下的热变形尽量均匀,不仅材料选择匹配,还要求连接结构具有一定的柔性,防止支撑组件的热变形直接传递到镜子上。

在裸镜支撑点优化位置加入支撑组件综合分析镜坯与支撑组件,以镜面面形误差及结构总体刚度为目标函数,考查、修改支撑组件,最终确定支撑组件。本文支撑组件采用三角柔性支撑结构(如图 3 所示),3 根斜筋增加了支撑组件的刚度,在直接与镜子连接的触头上开槽使其具有柔性缓解作用。这种结构的好处是:(1)可以减少促动器的个数,不仅可以降低成本,而且有利于电结构调节。(2)利用支撑结构的弹性变形,可以减少在发射时由于接触点产生的应力集中。(3)减小促动器对光学面形的影响。

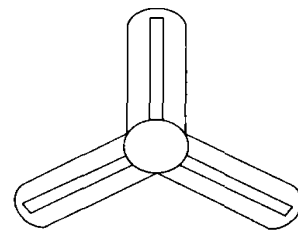


图 3 支撑组件图

Fig. 3 Structure of support sub-assembly

### 3.3 多点调节下的镜面变形

多点调节下的面形分析是模拟促动器的工作状态,以考察促动器形成的位移载荷对面形精度的影响。载荷形式是在支撑组件与促动器接触处施加平行于光轴方向、经初步计算过的位移载荷,在所受重力方向施加 1 g 惯性载荷,在有限元处理软件 Patran、Nastran 中建立模型如图 4 所示,经计算得主镜面形变化见表 2。由表中的数据看出,镜子在竖直方向自重下的精度满足要求,而水平方向自重下的面形精度有待调节。由此可得出以下结论:该超薄镜在支撑组件设计合理的前提下,竖直方向的自重面形通过多点调节能够达到理想精度,且由于其良好的可调性,水平方向的自重面形通过调节促动器力的大小也能够得到进一步的改善。

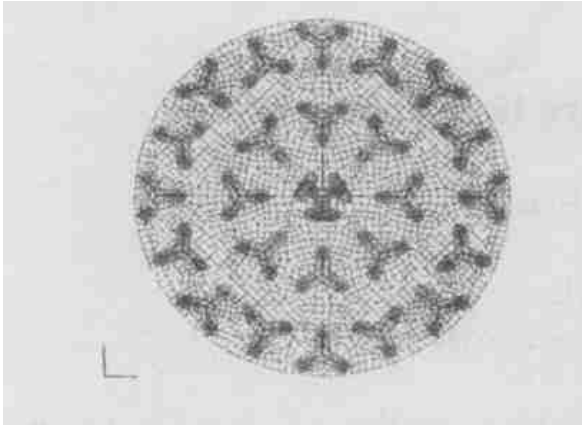


图 4 单镜组件有限元模型示意图

Fig. 4 A finite element model of single mirror sub-assembly

表 2 不同状态下带支撑组件的镜面面形精度

Tab. 2 Surface accuracy of mirror with support sub-assembly on different gravity direction

状态	最大刚体位移 (nm)	PV (nm)	RMS (nm)
光轴竖直	47.3	35	8
光轴水平	128.5	86	17

## 4 单元镜的调节结构

单元镜的面形调节通过一套机械结构来进行。它分为粗调机构和微调机构,粗调机构是应用在预载时需要调整很大的位移量,才能使调节范围在微调机构可以调节的范围内。粗调结构的调节是通过精密螺纹带动螺母来实现的;微调是通过压电陶瓷来实现的,压电陶瓷的调节范围是 30  $\mu\text{m}$ ,分辨率达到 3 nm。但通过实验来看,压电陶瓷也有线性区域和非线性区域,工作尽量调节在线性范围内,这可以采取一些方法实现,反馈是通过面形的 PV 或 RMS 的值作为比较值,通过不断的调节,使面形达到要求的精度。

## 5 结束语

本文运用有限元法对展开镜单元镜在多种支撑方案下的自重变形进行计算,以考查其面形误差是否在可调范围内,计算结果表明将最终优化的支撑方案应用于单元镜具有可行性,并为展开式反射镜支撑技术的研究提供了数值依据。当然达到实际应用还须做大量的工作,特别是工艺和检测都要有实用的设备和方法,但现在毕竟迈出了探索性的一步,因而是很有价值的。

### 参考文献:

- [1] LAKE M S. A deployable primary mirror for space telescopes[J]. *SPIE*, 1999, 3785:14-25.
- [2] YODER P. *JR Optomechanical systems design* [M]. Optical Group Perkin-Elmer Corporation Danbury, Connecticut Marcel Dekker, INC. New York and Basel, 1993:489-502.
- [3] MAST T S. Nelson segmented mirror control system hardware for CEL T[J]. *SPIE*, 2000, 4003:226-240.
- [4] 杨李成,凌宁. 发展中的能动薄镜技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, 39(2):10-14.  
YANGL CH, LING N. Development of an active thin mirror[J]. *Evolve of Laser and Optoelectronics*, 2002, 39(2):10-14. (in Chinese)
- [5] 吴清文,陶家生,宋朝晖. 高精度轻型长条形反射镜多点支撑方案[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(6):61-65.  
WU Q W, TAO J SH, SONG ZH H. Multi-point support pattern of high precision, lightweight rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(6):61-65. (in Chinese)

作者简介:高明辉(1971-),男,吉林榆树人,2001年获吉林工学院工学硕士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向为 CAD/CAE/CAM 的研究。E-mail:ccgaomh@21cn.com