

文章编号 1674-2915(2009)04-0329-05

# 傅里叶望远镜外场实验聚光镜子镜支撑模块的设计

陈宝刚, 张景旭, 杨飞, 董磊, 王富国

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**傅里叶望远镜作为一种新兴的光电探测技术,已经成为对深空目标高分辨率成像的首选技术之一。为了推进实际系统的工程化进展,提出了傅里叶望远镜外场实验系统聚光镜子镜支撑模块,串联分级设计了镜面支撑与角度调整机构。子镜底支撑采用圆周均布的3点柔性膜片,可以很好地抵消热变形对面型精度的影响;侧支撑采用中心柔性隔膜定位,6点杠杆重锤承受径向重力载荷;角度调整机构采用3点螺旋传动来实现对子镜室的3自由度调整。有限元分析表明,镜面的PV值为200 nm,RMS值为40 nm,曲率半径变化 $<1$  mm。该设计方法对薄镜面的支撑调整也具有一定的参考价值。

**关键词:**傅里叶望远镜,子镜支撑模块,薄镜支撑,拼接镜

中图分类号:TH751 文献标识码:A

## Design of segment support module of collecting light mirror in Fourier telescope for field experiment

CHEN Bao-gang, ZHANG Jing-xu, YANG Fei, DONG Lei, WANG Fu-guo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** As a new technology for opto-electronic surveying, the Fourier Telescope has become one of the first-select technologies for surveying a deep space target at high precision. To take the practical system into engineering applications, the segment support module of the collecting light mirror in a Fourier Telescope for field experiments was designed, in which the mirror support and the angle adjust framework were designed individually in series. Three-flexible-diaphragms balanced along  $120^\circ$  was used in the axial support to reduce the influence of thermal deformation on mirror surface figures. Moreover, the central flexible diaphragm was used to provide lateral position to the segment and the gravity is loaded by a six-point lever hammer. By using three screw pairs, the angle adjust framework can be adjusted in three FODs. The finite-element analysis shows that the PV and the RMS for the mirror surface are 200 nm and 40 nm, respectively, and the change of curvature

收稿日期:2009-05-15;修订日期:2009-06-17

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目

radius is less than 1 mm. These results indicate that the designed method can provide references for the support of thin mirror.

**Key words:** Fourier telescope; segment support module; thin mirror support; segmented mirror

## 1 引言

随着空间安全战略需求和科学技术的发展,各国对空间人造目标的地基高分辨率成像都提出了迫切的需求。目前带有自适应光学技术的大口径望远镜已经能够实现对 1 200 km 以下轨道高度目标的高分辨成像,但是对于更高轨道(例如地球同步轨道),则需要望远镜的口径更大,由此镜面加工制造的难度更大,自适应系统的规模也更加复杂。近年来,基于相干激光成像的新型高分辨率成像探测技术—傅里叶望远镜(Fourier Telescope),因其综合了主动成像与合成孔径等多项技术,采用了激光照明主动成像和相对简单的硬件,使其在探测深空目标方面具有较大优势,进而成为目前对地球同步轨道目标高分辨率成像的首选技术。

R. B Holmes 等人最先提出了傅里叶望远镜,并进行了分析和模拟。该技术与其它成像技术的最大不同是采用激光照明的主动成像。其发射器同时发射 3 束以上的激光,激光通过大气湍流传播、照射目标并在目标表面形成干涉条纹,然后被目标散射,利用大面积非共相接收器接收经时间调制的散射回波能量,最终经傅里叶变换重构目标图像。

美国空军实验室建立了地球同步卫星激光成像国家实验基地(Geo Light Imaging National Test-bed, GLINT)用于实施和验证傅里叶望远镜的成像概念。在国内,长春光机所董磊等已在实验室验证了傅里叶望远镜的成像原理,并取得很好的

研究成果<sup>[6]</sup>。

为推进傅里叶望远镜的实用化进程,本文设计了傅里叶望远镜外场实验聚光镜子镜的支撑模块,介绍了支撑模块的结构设计方案,对子镜镜面在重力作用下的变形做了有限元分析,分析表明支撑方式下的子镜面型可满足外场实验的要求。

## 2 聚光镜系统和子镜支撑模块的设计

聚光镜系统是用来接收汇聚目标散射回波能量的主要系统,也是傅里叶望远镜中的关键组成部分。为了在外场实验验证傅里叶望远镜的成像原理,本文设计了如图 1 所示的聚光镜系统。该系统由 61 块对边长 610 mm 的正六边形子镜拼

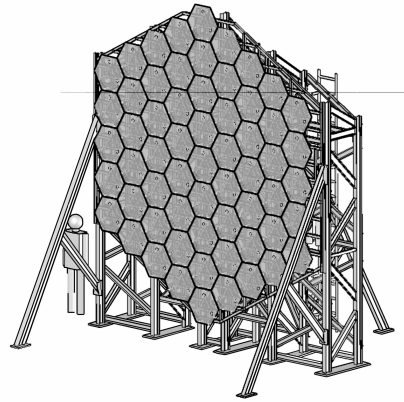


图 1 聚光镜效果图

Fig. 1 Sketch of collecting light mirror

接而成,使用时聚光镜工作状态固定不动,光轴基本平行于水平面,正六边形子镜参数如表 1 所示。

表 1 子镜属性参数表

Tab. 1 Property parameters of segment

对边长	曲率半径	材料	边缘厚度	密度	泊松比
610 mm	100 m	浮法玻璃	19 mm	$2.46 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	0.23

傅里叶望远镜外场实验系统对子镜支撑模块的技术要求是:

调整自由度:2 自由度(tip-tilt)

角度调整范围:  $\pm 3^\circ$

角度调整精度:  $\pm 0.5$  mrad

子镜曲率中心可调范围:  $\pm 5.2$  m

镜面曲率半径:  $(100 \pm 5)$  m

子镜之间边缘间距: 20 mm

使用温度:  $-20^\circ \sim +30^\circ$

储藏温度:  $-30^\circ \sim +40^\circ$

### 3 子镜支撑模块结构方案

子镜支撑模块整体结构如图 2 所示。由于在外场实验中要求子镜调整角度较大( $\pm 3^\circ$ ),为了保证调节过程中子镜受力稳定,本文通过子镜室把镜面支撑机构和镜面调节机构分成串联的两部分。子镜底支撑采用 3 点柔性膜片结构,可以很好地消除由于子镜与支撑结构的热变形不一致而引起的热应力,补偿热变形的影响;侧支撑采用柔性膜片中心定位,6 点杠杆重锤机构承受径向重力载荷;角度调整机构采用 3 点螺旋传动手动调节。

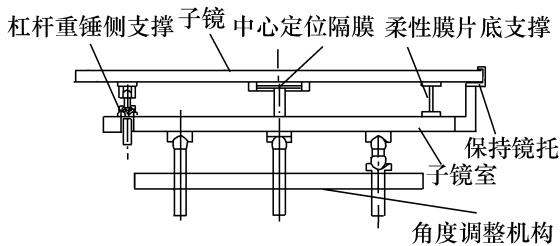


图 2 子镜支撑模块结构组成

Fig. 2 Structure of segment support module

#### 3.1 底部支撑点数的确定与分布

傅里叶望远镜外场实验聚光镜系统在使用时光轴基本平行于水平面,底支撑基本不受力,处于辅助状态,故采用 3 点柔性膜片支撑方式,膜片与镜面之间采用环氧树脂粘接,膜片与镜室使用螺栓刚性联结。膜片在子镜轴向刚度较大,而在径向方向刚度较小,故可以消除子镜与镜室之间由于材料热膨胀系数不同引起的热应力对镜面面型

的影响。底部支撑位置分布如图 3 所示,在半径 203 mm 的圆周上 3 点均匀分布,膜片的安装方向相互成  $120^\circ$  夹角。

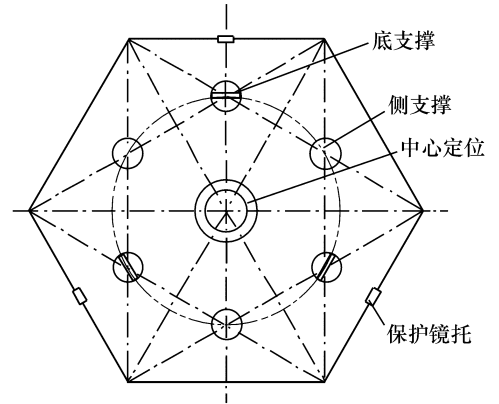


图 3 子镜支撑位置分布

Fig. 3 Distribution of segment support position

#### 3.2 侧支撑方案

子镜光轴与水平面基本平行,故侧支撑在抵消子镜重力载荷方面起主要作用。子镜径厚比约为 33:1,而且子镜反射面曲率半径为 100 m,故可以把子镜近似看作平板;侧支撑位置分布在子镜均分成 6 等份的重心位置(如图 3 所示),各个侧支撑承受相同的子镜重力载荷(子镜重力的  $1/6$ );子镜中心采用柔性隔膜定位,柔性隔膜在径向方向刚性较大,轴向方向刚性较弱,故隔膜只约束子镜两个自由度,起到轴向定位作用,由于 6 点杠杆重锤侧支撑的作用,隔膜在理想情况下不承受重力载荷。考虑到子镜厚度很薄,在背后转孔会影响子镜刚度,故采用如图 3 所示的方式在子镜背后粘接一个与子镜相同材料的圆环,使用环氧树脂把定位隔膜粘接在圆环的内孔。

6 点侧支撑的位置在半径 203 mm 的圆周上均匀分布,其中 3 点的位置与底支撑重合,其结构如图 4(a) 所示,另外 3 点结构如图 4(b) 所示。采用关节轴承作为配重杠杆的支点,一端铅块配重,一端球头与粘接在子镜背后的圆孔小间隙接触配合,这样能保证施力方向与重力方向平行。把杠杆球头设计成如图 4(b) 所示的半球头,可以使施力点尽量靠近子镜重心,减小镜面的扭曲变形。

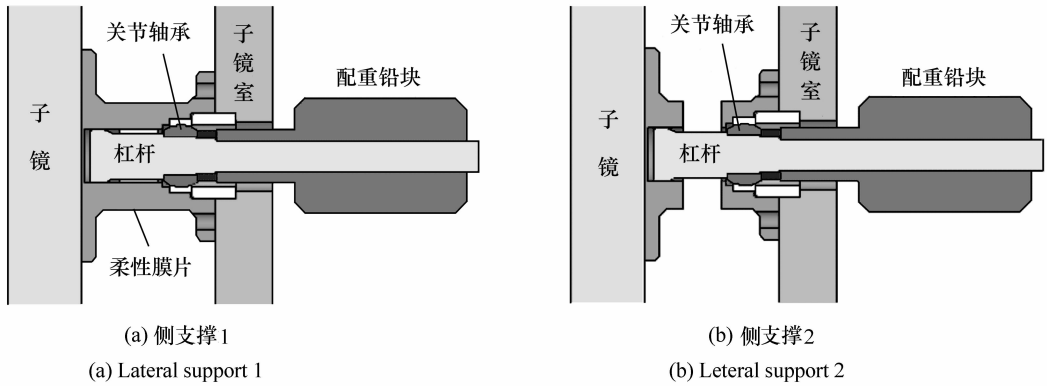


图4 杠杆重锤侧支撑结构示意图

Fig. 4 Structure of lever hammer lateral support

### 3.3 子镜模块的调整机构

子镜的2自由度(tip-tilt)调整采用3点螺旋传动手动调节方式,其结构如图5所示,考虑到实际装调方便,本文子镜支撑模块可以做到3个自由度(position-tip-tilt)的调整,螺纹螺距1 mm。其中A点与镜室采用球头连接,主要承受子镜室的重力载荷,B点采用滑动加球头与镜室连接,约束子镜室绕光轴方向旋转的自由度,C点采用2个球头串联与镜室连接。

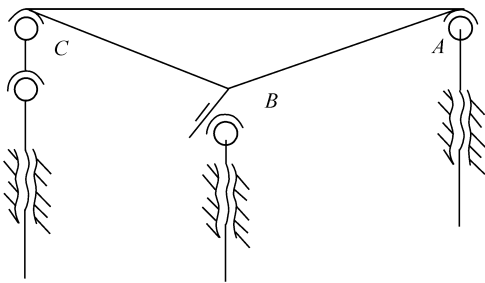


图5 三自由度调整机构原理图

Fig. 5 Principle of 3 FOD adjust framework

外场试验系统要求子镜模块的调整精度为 $\pm 0.5$  mrad,3点螺旋传动角度机构的调整臂长约为305 mm,这样要求3点螺旋传动机构的直线位移精度约为 $\pm 0.15$  mm,而这种精度的螺旋传动不难实现。

### 3.4 子镜保护装置

子镜背面与子镜室支撑机构采用环氧树脂粘接,虽然环氧树脂的寿命很长,但是从长时间使用

和装配调试的安全性考虑,子镜的保护装置是必要的,不可缺少。考虑到子镜之间间隙(20 mm)较大,本文采用如图6所示的镜托作为子镜的保护机构,3个镜托分布位置如图3所示,其中下面两个镜托与子镜之间通过粘接一层聚四氟乙烯垫无应力接触,一旦子镜背后支撑粘接点失效脱落,镜托可以承受全部子镜重力载荷,上面一个镜托起防止子镜向前倾覆脱落的作用。

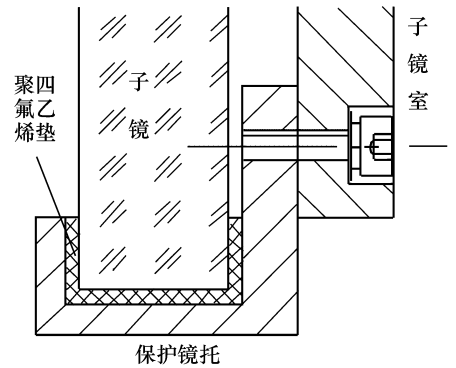


图6 子镜保护装置结构图

Fig. 6 Structure of segment protector

## 4 支撑面型分析

本文对子镜支撑模块处于工作状态(光轴平行于水平面)时,子镜镜面在重力作用下的变形情况进行了有限元分析,镜面的变形云图如图8

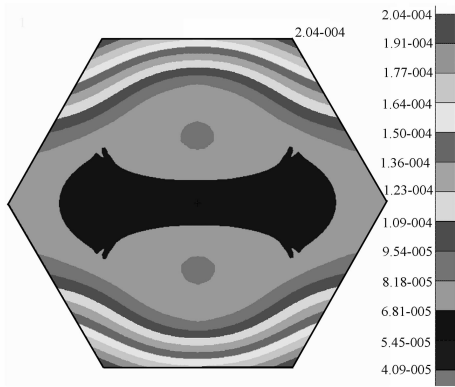


图7 镜面变形云图

Fig.7 Deformation nephogram of mirror surface

为 40 nm,曲率半径变化小于毫米级。因此,在本文设计的支撑方式下,子镜面型完全可以满足外场实验的精度要求。

## 5 结 论

根据傅里叶望远镜外场试验聚光镜的使用要求,本文设计了拼接子镜支撑模块。该模块采用3点柔性底部支撑,可以很好地减轻由材料热变形引起的热应力对镜面面型的影响。其侧支撑采用中心膜片定位并由六点杠杆重锤结构承受经向重力载荷,镜面支撑与角度调整部分采用串联分级设计,便于调整时很好地保持镜面面型。该设计对主动光学薄镜面支撑结构的设计也具有重要的参考价值。

所示,经计算得出镜面的PV值为200 nm,RMS值

## 参考文献:

- [1] RIDER C D, JINGLE C, NIELSON E. Deep space imaging study[C]. Fourteenth Annual Space Surveillance Workgroup. Massachusetts, USA, 1996, 147-159.
- [2] MACDONALDA K R, BOGER J K, FETROW M P, *et al.*. An experimental demonstration of Fourier telescope[J]. *SPIE*, 1999, 3815: 23-29.
- [3] LOUIS C E, JAMES S, JUSTIN C. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system [C]. Unconventional Imaging Conference, San Diego, USA, 2005.
- [4] 庞振基, 黄其圣. 精密机械设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
PANG ZH J, HUANG Q SH. *Precision Mechanics Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [5] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.  
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [6] 董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 999-1002.  
DONG L, LIU X Y, WANG J L. Realization of Fourier telescope technology in laboratory[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 999-1002.

作者简介:陈宝刚(1982—),男,河北人,研究实习员,主要从事大型光学仪器结构设计方面的研究。

E-mail: cbg0813@163.com