

文章编号: 1001-3806(2016)03-0441-06

大口径动态扫描反射镜背部悬浮支撑结构设计

张翼, 靳国华, 姜勇, 彭涛
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了消除自重和热应力对大口径平面反射镜面形精度的影响, 采用有限元分析方法, 对比分析了在 -20°C 环境温度下采用背部固定约束与背部浮动约束获得的反射镜面形仿真数据, 设计了动态扫描反射镜背部悬浮支撑结构以实现浮动约束, 搭建了检测平台, 并进行了大口径平面反射镜面形检测。结果表明, 安装该支撑结构后反射镜的面形峰谷值为 0.236λ , 平均值为 0.049λ 。背部悬浮支撑结构实现了浮动约束, 释放了大口径平面反射镜因自重和热应力造成的变形, 有效保证了面形精度。

关键词: 光学设计; 悬浮支撑; 仿真分析; 大口径平面反射镜

中图分类号: TN202 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.030

Design of back suspension support structures for large scale dynamic scanning mirrors

ZHANG Yi, JIN Guohua, JIANG Yong, PENG Tao
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: For eliminating the effects of weight and thermal stress on the surface accuracy of a large flat mirror, the surface accuracy was analyzed for the back fixed constraint and the back float constraint structures at -20°C by means of the finite element method. The design of support structure using finite element method was studied. By using the back fixed constraint and the float constraint at -20°C , the simulation data of mirror surface accuracy was obtained and analyzed comparatively. The back suspension support structure for dynamic scanning mirrors was designed to achieve the back float constraint. After the establishment of detection platform, the profile of the large flat mirror was measured. The results show that the values of peak-to-valley and root mean square of the flat mirror with back suspension support structure were 0.236λ and 0.049λ respectively. The back suspension support structure could achieve float constraint and release the surface shape deformation of large flat mirrors caused by weight and thermal stress and ensure the surface accuracy effectively.

Key words: optical design; suspension support; simulation analysis; large flat mirror

引言

激光应用系统及成像光学系统中对反射镜具有较高的面形精度要求^[1-3]。反射镜的面形直接影响着成像的质量^[4-5]。决定反射面形的因素有反射镜的大小、材料、加工工艺、支撑方式、安装工艺、工作环境、工作方式等^[6-9]。本文中研究的平面反射镜尺寸为 $510\text{mm} \times 330\text{mm} \times 60\text{mm}$, 工作环境温度在 $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$, 工作方式为动态扫描方式, 工作角度范围为反射镜面与水平夹角 $45^{\circ} \pm 15^{\circ}$, 反射镜安装后整面面形要求达到峰谷值 (peak-to-valley, PV) $V_{\text{PV}} < \lambda/4$, 均方根 (root mean square, RMS) $V_{\text{RMS}} < \lambda/15$, $\lambda = 632.8\text{nm}$ (可

扣除 3 个 $\varnothing 10\text{mm}$ 区域的极值点)。本文中研究的反射镜属于大口径平面反射镜, 大口径平面反射镜的加工、安装、支撑方式都不同于一般的小平面反射镜。大口径平面反射镜由于自身重、尺寸大, 因此自重变形是引起面形变化的主要因素, 而且很容易受到工作环境的影响。为了使反射镜在动态扫描情况下保证面形要求, 作者设计了反射镜能在动态扫描工况下自适应自重变形、温度变形的背部悬浮支持结构。

1 反射镜设计

1.1 反射镜外形与材料的确定

反射镜与支撑结构常用材料见表 1, 其中 ρ 为密度, E 为弹性模量, μ 为泊松比, α 为线膨胀系数。成像用大口径平面反射镜在材料选择上应满足可抛光、能镀高反射率膜、热力学性能各向同性、尺寸稳定、比刚度大、热变形小, 可以做轻质镜设计。在很多反射镜设

作者简介: 张翼 (1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为激光技术、机械设计。

E-mail: rzy209@163.com

收稿日期: 2015-03-26; 收到修改稿日期: 2015-05-06

Table 1 Typical materials of mirrors and support structures

name	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$	E / GPa	μ	$\alpha / ^\circ\text{C}^{-1}$
SiC	3.12×10^{-6}	407	0.16	2.4×10^{-6}
microcrystal	2.75×10^{-6}	90.6	0.24	0.05×10^{-6}
super invar	8.3×10^{-6}	150	0.25	0.31×10^{-6}

计中大多采用微晶或碳化硅,碳化硅的各种性能都十分优秀,但成本高、加工周期长,最终反射镜材料选取了微晶玻璃。

反射镜为平面反射镜,外形在满足使用要求前提下还要保证质量轻、方便装夹、方便检测,加工方便的要求。最终确定反射镜外形如图1所示。

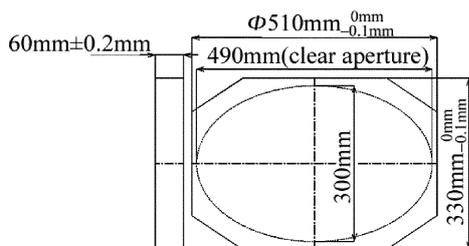


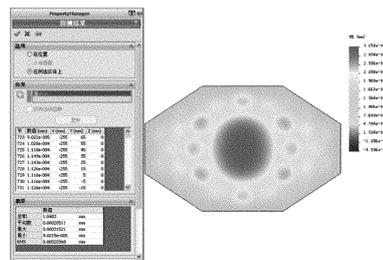
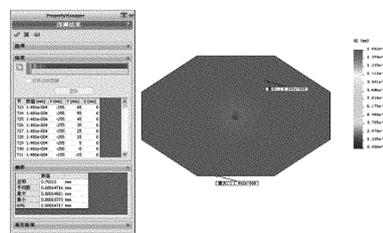
Fig. 1 Mirror shape

1.2 支撑方式的确定

反射镜的支撑方式包括边缘支撑、侧面支撑、中心支撑、背部支撑。根据反射镜的结构、主要使用区域以及对面形要求来选择适合的支撑方式。本文中的反射镜工作时与地面成 45° 夹角且反射面朝下(地平式工作),主要使用的区域为中心处 $\varnothing 300\text{mm}$ 椭圆区域,面形要求较高并且在高低温情况下都要良好的面形。综合考虑后,决定采用背部支撑的方式,背部支撑需要在反射镜的背部确定支撑点,在支撑点的位置用胶粘接支撑结构。用于粘接的金属材料要采用与反射镜线膨胀系数相近,因此采用超殷钢材料。

反射镜的面形在动态工作状态与温度改变情况下是在不断变化的。如何减小这些变素对面形的影响,就需要设计一种可以自适应这些变化的支撑结构。支撑结构的实质是约束,任何物体在空间中都有6个自由度,如果将6个自由度都约束了,物体就固定不能活动,如果释放其中一个或多个约束,物体就在一定范围内自由了。那么将反射镜的支撑结构设计成固定约束和将反射镜的支撑结构设计成自由约束会对反射镜的面形有什么影响。以反射镜在环境温度 -20°C 、只受重力、水平放置的情况为例,用软件分别仿真了对反射镜施加背部不能活动的固定约束、背部可以在平面上自由活动的浮动约束两种情况的面形变化。反射镜变形的云图如图2和图3所示。

图2为采用固定约束的变形云图,图中深色区域为最大变形的区域且最大变形位置分布在反射镜的局部,其它区域则变形较小。根据图2左侧的仿真数据

Fig. 2 Simulation figure for the back fixed constraint at -20°C Fig. 3 Simulation figure for the back float constraint at -20°C

得到反射镜的 $V_{\text{RMS}} = 209\text{nm}$, $V_{\text{PV}} = 407\text{nm}$ ($V_{\text{PV}} = \text{最大值} - \text{最小值}$)。

图3为采用浮动约束的变形云图,这个反射镜面都是最大变形的区域。图中左侧显示的仿真数据可以看出,整个镜面变形很大,而且数据都很接近。这说明反射镜在 -20°C 下受温度影响很大,但整个平面的变形是均匀的,这种整个平面均匀的变形不影响面形。浮动约束在仿真软件计算中采用了大位移计算,也就是整个反射镜因为采用了浮动约束,所以在变形时反射镜可以通过整体位移的方式将平行于反射镜面的应力释放掉,而垂直于反射镜面的应力由于约束不能释放才出现了整体垂直于镜面的变形,但并不影响面形,将反射镜垂直于镜面的整体位移 148nm 减去后得到 $V_{\text{RMS}} = 0.01\text{nm}$, $V_{\text{PV}} = 0.1\text{nm}$ 才是反射镜的面形结果。

可以看出,浮动约束是一种有效保证反射镜面形的约束形式,而完全的自由约束是不可能达到的,本文中采用的是一种悬浮支撑结构。悬浮支撑是通过设计反射镜的支撑组件,减少对反射镜的固定约束,采用柔性的、弹性的约束,让反射镜在不同姿态下能够释放变形,不增加反射镜所受外力,减少干扰,保持动态情况下反射的面形的结构形式。

2 支撑组件的设计

2.1 支撑点的确定

反射镜的支撑,按其力学特性,可分为静定支撑和超静定支撑。反射镜相互独立的支撑点数目等于反射镜的刚体自由度数目时,称为静定支撑。当反射镜的支撑点数目大于反射镜刚体自由度数目时,称为超静定支撑。

一般对于小口径的反射镜常采用背部3点静定支撑方式。大口径平面反射镜则在3点支撑的基础上,在每一个静定的支撑点上通过一个刚性的浮动支架,即把一个静定支撑点扩大为2个、3个和6个支撑点,这样就把总支撑点数扩大为6点、9点、18点支撑,如图4所示。

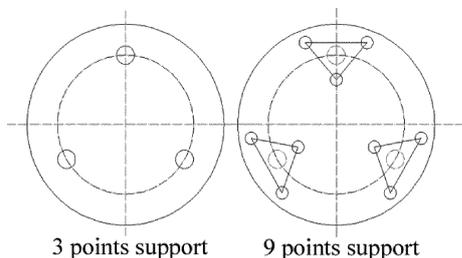


Fig. 4 Diagram of 3 points support and 9 points support

图4左侧为3点支撑,右侧为9点支撑结构。9点支撑就属于超静定支撑,这种支撑结构是把固定支撑和浮动支撑相结合,固定支撑起定位作用,浮动支撑起释放载荷的作用。

本文中背部支撑结构则采用另外的结构形式。根据理论初步计算,结合仿真结果,反射镜确定采用6点支撑,并在反射镜中心开孔做定位孔,保证反射镜在支撑结构上的位置不变。

由大口径平面反射镜的3点支撑理论与Hindle支撑理论公式^[10],可以初步计算出中心开孔的直径与6个支撑螺钉的位置。3点支持理论与Hindle支撑理论都是以圆形反射镜为模型进行的计算。因此在初步计算出参量后进行模型仿真,再修正参量。

Hindle中心孔直径公式为:

$$D_1 = 2 \times \sqrt{3} / 12 \times D_g = 0.288 D_g \quad (1)$$

式中, D_1 为中心孔直径, D_g 为反射镜最大直径。

Hindle 6点支持孔位公式为:

$$D_s = 2R_s = 0.608 D_g \quad (2)$$

式中, D_s 为6点支持孔位直径, R_s 为6点支持孔位半径。

3点支撑孔位经验公式为:

$$D = 2 \times 0.645R \quad (3)$$

式中, D 为3点支持孔位直径, R 为3点支持孔位半径。

本文中的反射镜是椭圆形结构,分别以反射最大与最小尺寸为 D_g 来计算出支撑点的参量范围。以反射镜最大直径 $D_g = 510\text{mm}$,计算得到中心孔直径 $D_1 = 146\text{mm}$,6点支持孔位 $D_s = 310\text{mm}$,3点支持孔位 $D = 328\text{mm}$ 。以反射镜小径 $D_g = 330\text{mm}$,确定中心孔直径 $D_1 = 95\text{mm}$ 、六点支持孔位 $D_s = 200\text{mm}$ 、3点支持孔位 $D = 212\text{mm}$ 。因此中心孔尺寸范围为 $D_1 = 95\text{mm} \sim$

146mm ,6点支撑孔位尺寸范围为 $D_s = 200\text{mm} \sim 328\text{mm}$ 。根据计算得到的尺寸范围通过软件仿真得到的面形来修正参量。

2.2 支撑组件的结构组成

支撑组件的结构主要包括支撑反射镜的镜室、固定反射镜于镜室上的粘接螺钉部件以及反射镜定位的中心定位环,如图5所示。

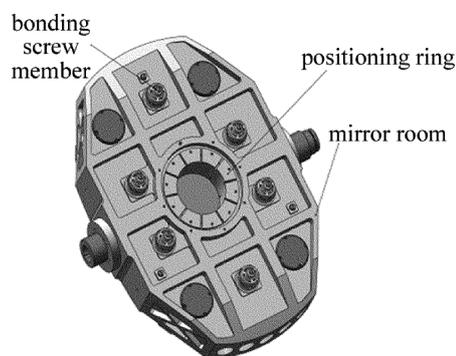


Fig. 5 Diagram of mirror supporting elements

图5中6个粘接螺钉部件就是6个支撑点,螺钉为殷钢材料并与反射镜粘接;中心定位环不与反射镜直接接触,而是与粘接在反射镜中心处的殷钢圈接触;镜室为铸铝件,为反射镜提供支撑平台、保护,并与外结构连接。

2.3 粘接螺钉部件设计

粘接螺钉部件不仅将反射镜固定于镜室上,而且可以根据面形情况来微调反射镜,在反射镜姿态发生变化或反射镜在高低温情况下可以自适应地释放干扰力,保持面形,如图6所示。

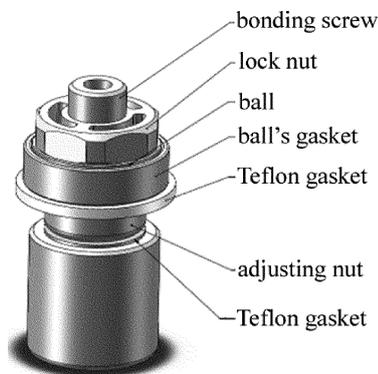


Fig. 6 Diagram of the bonding screw

图6中的粘接螺钉将固定支撑作用与浮动支撑作用集成在单个支撑点处。这种结构可以根据实际情况选取合适的3点来做固定支撑,其余点则用来调整面形,且每个支撑都有微动量,可以用来卸载,保持高低温变化与受外力干扰下的面形。

粘接螺钉与反射镜利用环氧树脂胶粘接,粘接螺钉为超殷钢材质。超殷钢与微晶玻璃的膨胀系数仍有细微差异,如果粘接螺钉与反射镜上紧配合安装,当高

低温状态下,粘接螺钉的热胀冷缩会使得放射镜面型变化。因此,在实际加工粘接螺钉时,刻意与反射镜安装槽之间保留一定厚度的环氧树脂胶层空间作弹性缓冲,给反射镜与粘接螺钉以变形空间,从而增大两个零件弹性接触,粘接用胶采用光学环氧树脂胶,根据经验,胶层的厚度大多在 0.025mm ~ 0.2mm 内^[11]。

粘接螺钉部件中有两个聚四氟乙烯垫片,并且垫片采用了球形垫片的结构。球形结构形式有自调心的功能,当反射镜安装后不将调节螺钉锁死,使反射镜自适应地将姿态调整好,保证反射镜在小范围、小角度内倾斜时能够无约束地活动;聚四氟乙烯垫片具有自润滑性,因此可以实现反射镜在动态扫描和高低温情况下将变形通过自由滑移释放;调节螺母的作用是调节反射镜与镜室之间的间距,并且在锁紧螺母锁紧后根据面形好坏进行调节,调节螺母的调节结构如图 7 所示。

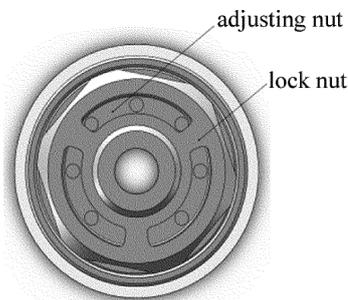


Fig. 7 Diagram of the adjusting nut

当锁紧螺母锁紧后,可以将工装从锁紧螺母的圆弧过孔穿过,插入调节螺母上的一圈调节孔中的任意 3 个就可以实现调节。因此粘接螺钉部件既能在保证反射镜的固定情况下,又能使反射镜具有自由释放变形的能力。

2.4 殷钢圈与中心定位环设计

中心定位环的作用是保证反射镜在运动中不会偏离调好、固定后的位置,从而保证反射镜的面形稳定。因此中心定位环也采用热稳定性好的超殷钢材料。中心定位环与殷钢圈的间隙必须保证在单边 0.01mm。因为间隙较小,中心定位环受热变形后会将热应力通过殷钢圈传导给反射镜,引起反射镜面形的变化。为

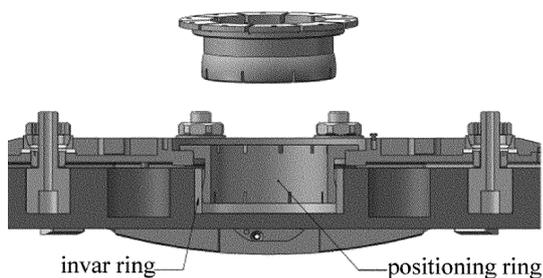


Fig. 8 Sectional view of the positioning ring and mirror elements

了使释放热应力,中心定位环设计成了上下开槽的挠性结构,如图 8 所示。

殷钢圈与中心定位环配合,将中心定位的力由压力分散成大面积压力,不致中心定位环与反射镜直接接触造成破坏。殷钢圈与反射镜采用硅橡胶粘接而成。粘接的方法,胶层的厚度、殷钢圈的结构必须设计好,否则反射镜中心面形会出现凸起。因此殷钢圈采用对称开点胶孔,如图 9 所示。

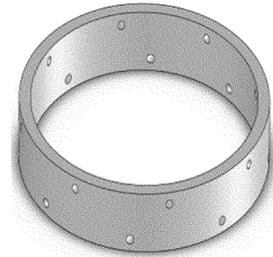


Fig. 9 Structure of the invar ring

3 试验及结果分析

根据设计指标要求,安装完成后反射镜的面形要达到 $V_{PV} < \lambda/4$, $V_{RMS} < \lambda/15$ 。反射镜完成了轻量化、镀膜、支持结构粘接后,在室温 20℃ 下用干涉仪进行了面形的检测,如图 10 所示。

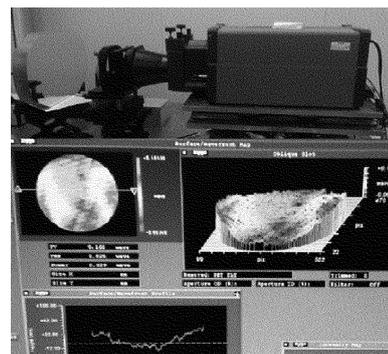


Fig. 10 Detecting form and results of the mirror

反射镜裸镜检测得到面形的 PV 值为 0.169λ , RMS 值为 0.026λ ,均达到了指标要求。

反射镜装入镜室后侧放,并利用 4-D 干涉仪及球面镜搭建装调测试光路。一边利用背部悬浮支撑结构的固定、锁紧、调节功能调节反射镜位置,一边用干涉仪观察检测反射镜面形。调节到位后锁紧支撑结构,在支撑结构上点硅橡胶,等待 2d ~ 3d 释放安装应力后,翻动反射镜组件,再次在室温 20℃ 下用干涉仪检测最终反射镜面形,检测方法如图 11 所示。初始安装反射镜支撑结构后,用 4-D 干涉仪检测反射镜面形结果如图 12 所示。安装反射镜支撑结构后采用支撑结构的调节功能反复进行调节,面形经过了一系列变化,最终得到一个良好的面形,如图 13 所示。

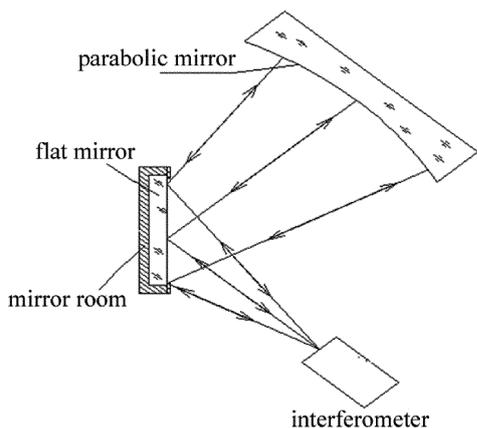


Fig. 11 Detecting schematic of the support structure with the mirror installed

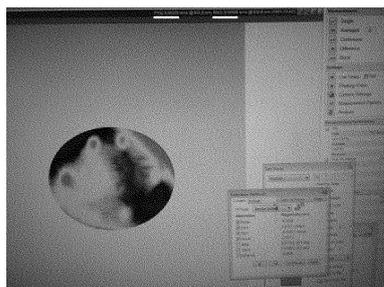


Fig. 12 Software interface of the detecting results of the support structure after installation

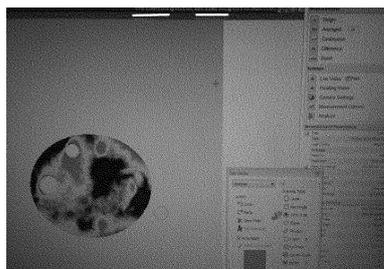


Fig. 13 Software interface and the final detecting results of the mirror after adjusting the support structure

装调完成后,经过时效,锁紧后反复搬运最终检测结果如图 14 所示。

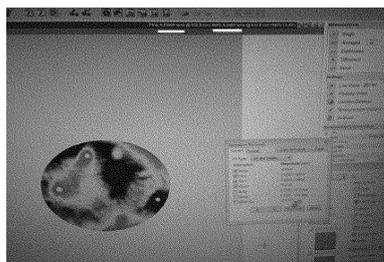


Fig. 14 Software interface of the final detecting results of the support structure with the mirror installed

由图 12 可知,初始安装支撑结构后,反射镜面形的 PV 值为 0.5622λ ,RMS 值为 0.10108λ ;调节过程不是一蹴而就的,经过漫长耐心地调节,图 13 中挑取了代表性的面形变化来反映调节的过程,其 PV 值为 0.249λ ,RMS 值为 0.046λ ;图 14 是经过反复调节后最

终面形的变化,其 PV 值为 0.24986λ ,RMS 值为 0.0498λ 。图 14 所示为扣除 3 个 $\varnothing 10\text{mm}$ 区域极值后得到 PV 值为 0.2359λ ,RMS 值为 0.0487λ 。对比反射镜安装支撑结构前后面形的变化结果,如表 2 所示。

Table 2 Detecting results of the mirror before and after installation

	status	PV	RMS
1	before the mirror is mounted	0.169λ	0.026λ
2	after the initial installation	0.5622λ	0.10108λ
3	changes of surface conditioning process	0.50888λ	0.0857λ
4	changes of surface conditioning process	0.33748λ	0.0712λ
5	changes of surface conditioning process	0.26589λ	0.0564λ
6	changes of surface conditioning process	0.24918λ	0.0466λ
7	after the mirror is mounted	0.24986λ	0.0498λ
8	after the mirror is mounted (deduction of three extreme point)	0.2359λ	0.0487λ

根据表 2 中的数据,分别做出 PV 值与 RMS 值在安装前、安装调节过程中、最终反射镜的面形状态的变化曲线,如图 15、图 16 所示,其中横坐标为序号,无单位,纵坐标为 PV 值或 RMS 值,单位为 λ 。

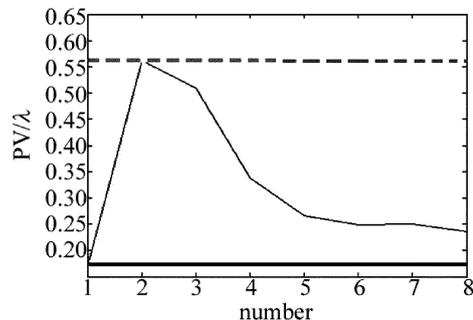


Fig. 15 Change curve of PV value of the mirror

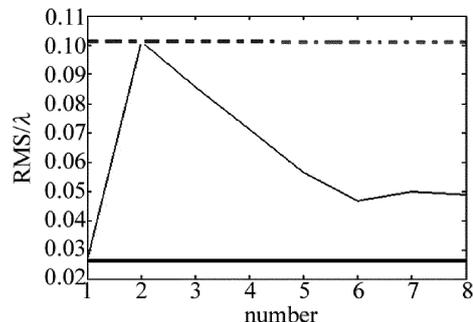


Fig. 16 Change curve of RMS value of the mirror

如图 15、图 16 所示,粗实线为反射镜安装前的 PV 值与 RMS 值,粗虚线是初始反射镜安装支撑结构后的 PV 值与 RMS 值,可以看出安装支撑结构前后 PV 值、RMS 值的变化非常大,这是由于反射镜的自重变形和安装应力造成的,经过支撑结构的调节 PV 值、RMS 值逐渐变小,接近安装前的面形状态,说明调节机构的作用是显著的,但始终无法达到安装支撑结构前的面形状态,这也是合理的。同时可以看出,PV 值与 RMS 值的变化趋势是相同的,但 RMS 值的变化曲

线在下降阶段斜率更大,RMS值对面形变化的反映更明显。

通过检测结果看,安装结构在全锁紧状态下会使得反射镜局部应力增加,面型变差,但仍可以满足指标要求。

4 结 论

根据设计指标要求,仿真分析了影响反射镜面形的因素,并根据仿真结果得到了相应的解决方法。针对重力变形、温度变形两大影响因素,选择了合理的支撑方式、合理的零件材料,设计了合理的零件结构。在抵抗重力与温度变形方面也做了相关实验,验证得到了良好的效果,也证实了这种支撑结构是合理的、可靠的。

参 考 文 献

- [1] YE L, WANG Zh X. Supporting and adjusting for collimator primary mirror with large aperture and long focal-length[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(5):462-465 (in Chinese).
- [2] LI F, RUAN P, ZHAO B Ch. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(2):272-275 (in Chinese).
- [3] FENG Sh L, ZHANG X, WENG Zh Ch, *et al.* Study on support way of large aperture mirror with flat rear surface[J]. Optical Technique, 2004, 30(6):679-681 (in Chinese).
- [4] DING F J, LI Y C. The stress and strain analysis of main reflector with uniform pressure support and support angle optimization [J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(11):1041-1045 (in Chinese).
- [5] LIU M, HU Q Q. A study on support structure of the one meter primary mirror of the space solar telescope [J]. Astronomical Research and Technology—Publications of National Astronomical Observatories of China, 2004, 1(2):99-106 (in Chinese).
- [6] DING Y W, YOU Zh, LU H, *et al.* A thermo-optical analysis method for a space optical remote sensor optostructural system [J]. Optical Engineering, 2004, 43(11):2730-2735 (in Chinese).
- [7] WU Q W, YANG H B, YANG J S. Design and analysis for primary mirror and its support of space camera [J]. Optical Technology, 2004, 30(2):153-156 (in Chinese).
- [8] ZHANG W G, FENG Zh X, TAO Zh. Modal analysis and dynamic identification of scanning mirror [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(1):58-61 (in Chinese).
- [9] YANG L W, LI Zh L, XUE D L. Analysis and test for effect of structural adhesive shrinkage during curing on mirror surface [J]. Optical Technique, 2014, 40(4):307-312 (in Chinese).
- [10] YODER P R. Opto-mechanical systems design [M]. Beijing: China Machine Press, 2008:125-127 (in Chinese).
- [11] LIU Q, HE X, ZHANG F, *et al.* Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10):2229-2236.