

文章编号: 1002-1582(2009)04-0506-04

# 有限元在大口径镜面研制中的应用<sup>\*</sup>

彭元静<sup>1,2</sup>, 袁吕军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 大口径光学反射镜面受自重影响变形较大, 研究它在磨制和检测中的支撑结构和形式是非常重要的。采用有限元软件从理论上分析了 1330mm 平面反射镜和 616mm 非球面轻量化碳化硅主镜在磨制和检测中的支撑结构和形式, 以使反射镜面变形最小, 保证其光学成像质量达到一定的技术要求。通过实际测量 616mm 非球面碳化硅主镜在不同支撑状态下的面形变化情况, 验证了理论分析结果。根据实际效果值用有限元进一步优化组合了最佳的支撑结构和形式, 为今后对更大口径反射镜面的磨制和检测提供了指导。

**关 键 词:** 大口径光学反射镜; 支撑; 有限元; 轻量化; 磨制; 检测

**中图分类号:** TH74 **文献标识码:** A

## Application on the development of large aperture reflector by finite element

PENG Yuanjing<sup>1,2</sup>, YUAN Lvjun<sup>1</sup>

(1. Nanjing Institute of Astronomic Optics and Technology, National Astronomical Observatories, Chinese academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Large-Aperture optical reflector deformation is induced by gravity, it is very important to analyze the support structure and format in grounding and testing. To get the smallest deformation and a certain quality of optical imaging, finite element analysis software is adopted to simulate 1330mm plane mirror and 616mm aspheric light weight silicon mirror, and having a theory analysis on them. The surface change of the actual silicon carbide mirror in different supports is analyzed and verified. According to the actual results, the combination of support structure and form is optimized with finite element. It provides a theory of design and guidance for the development and testing of reflection mirror in future.

**Key words:** large aperture optical reflector; support; finite element; light weight; ground; testing

## 1 引 言

为了提高分辨率, 天文望远镜、太空望远镜和光电跟踪设备等都需要大口径光学反射镜面。这些大口径光学系统元件的研制和检测涉及到与之配套的精密支撑系统。由于重量和体积的限制, 再加上材料选用的难度, 目前大都采用反射镜面作为成像光学系统元件, 特别是口径大于 500mm 的光学系统, 反射镜面的应用更为普遍。镜坯本身还可以做轻量化处理, 使得光学成像系统的重量也因此大大降低, 大口径镜面系统的刚度得到增强。但是, 反射镜面对支撑的要求更严格一些, 在一定程度下, 如果支撑形式不合适会造成反射镜的面形质量变坏, 导致成像质量严重下降, 从而不能更好地满足光学系统成像质量的要求。采用有限元方法对 1330mm 的平面反射镜和 616mm 的非球面轻量化碳化硅主镜进行了磨制支撑和检测支撑的理论分析, 并通过实验对 616mm 的支撑分析进行了验证, 进一步优化

了支撑结构和形式, 使得大口径光学反射镜面在不同状态下的支撑更加科学合理, 提高了大口径光学反射镜面在不同状态下的支撑质量和可靠性, 大大节减了磨制和检测成本, 提高了工作效率, 使得光学反射镜面的磨制和检测水平从此走上了一个新的台阶。通过研究和分析, 为今后更大口径反射镜面的磨制和检测提供了指导。

## 2 ANSYS 面形分析的基本原理

从理论上来说, 当镜子处于一个方向上时, 镜面重力变形总可以通过光学加工的方法来消除, 但是在望远镜的指向改变后镜面变形也会改变。根据镜子的几何特征, 一般镜子的支撑包括两个系列: “底支撑”用于水平放置工位; “侧支撑”用于垂直放置工

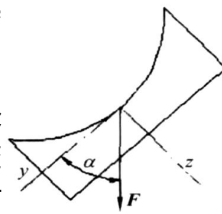


Fig. 1 Mirror deformation induced by gravity

\* 收稿日期: 2008-06-06

E-mail: yjpeng@niaot.ac.cn

作者简介: 彭元静(1983-), 女, 重庆市人, 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所硕士研究生, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。

位。当镜子处于其它工位时,这两个系统处于同时工作的状态。

如图 1 所示,设  $z$  轴为光轴方向, $x$  轴始终垂直于纸面,镜子有限元模型的刚度阵为  $[k]$ ,重力节点载荷为  $F_1, F_2, \dots, F_n$  ( $n$  为节点总数),相应的轴向位移为  $1, 2, \dots, n$ 。 $F^T$  为  $F$  的转置:

$$F^T = \{0 \ F_1 \cos \ F_1 \sin \ 0 \ F_2 \cos \ F_2 \sin \ \dots\} \tag{1}$$

当  $\theta = 0$  时,镜体处于水平状态,此时的合力为

$$F_0^T = \{0 \ F_1 \ 0 \ 0 \ F_2 \ 0 \ \dots\} \tag{2}$$

当  $\theta = 90$  时,镜体处于垂直状态,此时的合力为

$$F_{90}^T = \{0 \ 0 \ F_1 \ 0 \ 0 \ F_2 \ \dots\} \tag{3}$$

比较以上各式显然有

$$\begin{aligned} \{F\} &= \{F\}_0 \cos \theta + \{F\}_{90} \sin \theta \\ \{ \} &= [k]^{-1} \{F\} \\ &= [k]^{-1} \{F\}_0 \cos \theta + [k]^{-1} \{F\}_{90} \sin \theta \\ &= \{ \}_0 \cos \theta + \{ \}_{90} \sin \theta \end{aligned} \tag{4} \tag{5}$$

式中的  $\{ \}_0 = [k]^{-1} \{F\}_0, \{ \}_{90} = [k]^{-1} \{F\}_{90}$  分别为镜体的垂直状态和水平状态下的变形。

3 反射镜材料的选择

用大口径微晶玻璃和碳化硅反射镜材料作为分析研究的载体,微晶玻璃和碳化硅材料的参数如表 1 所示。

Tab. 1 Material performance

材料	弹性模量/MPa	密度/(g/cm³)	泊松比
微晶玻璃	$8.987 \times 10^4$	2.58	0.247
碳化硅	$5.1 \times 10^5$	3.12	0.18

4 大口径反射镜面磨制支撑方案

大型反射镜面的支撑方式对反射镜面的应力分布和镜面变形起着决定性的作用,其结果直接影响反射镜面的光学成像性能。本文对 1330mm 磨制选取的支撑方式为水平支撑。一般的水平支撑方式根据反射镜口径的大小主要分背部 3 点, 9 点, 18 点和辅助面的支撑等方式。磨制时传统的支撑结构是机械浮动支撑,各浮动支撑板的受力状态是静定的,因此支撑力的比例关系完全取决于几何尺寸。各圈支撑位置(圈半径)与圈间支撑力比例要通过结构分析来优化。

4.1 有限元模型的建立

通过 ansys 软件建立口径为 1330mm、中孔直径为 105mm、厚度为 170mm 的平面反射镜模型。根据有限元的单位计算精度,采用 solid45 的单位类型

划分网格。

在水平支撑情况下,考虑到反射镜面的口径比较大,根据磨制的要求采用了 18 点后背支撑。首先通过建模采用 6 点成 60 的对称支撑,如图 2 所示。设 6 点到反射镜面中心的距离为  $R$ ,定义所要

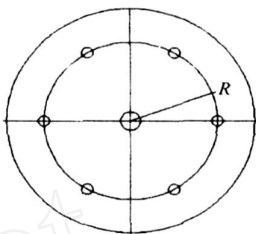


Fig. 2 6 points support

求的镜面变形量的 RMS 为目标函数  $wy$ ,通过对  $R$  的优化 (opvar, r, dv, 52.5, 665) 找到使镜面变形  $wy$  (opvar, wy, obj, 1e-6) 最小的  $R$  值。

文中得到的  $R = 455.32\text{mm}$  (取  $R = 455\text{mm}$ )。根据优化好的 6 点位置设计 18 个支撑点的分布,如图 3 所示。

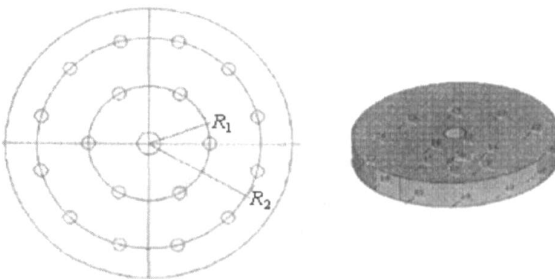


Fig. 3 18 points support

通过得到的  $R$  值对  $R_1$  ( $R = 52.5\text{mm}$ ) 和  $R_2$  ( $R = R_2$ ) 进行优化,优化结果为  $r_1 = 241.31 \text{ mm}$  (取  $r_1 = 241 \text{ mm}$ ),  $r_2 = 549.58 \text{ mm}$  (取  $r_2 = 550 \text{ mm}$ ),  $wy =$

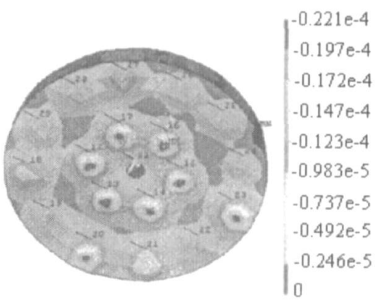


Fig. 4 Displacement deformation in optical axis direction

14.569 nm。图 4 所示是在光轴方向的位移变形图。

4.2 像差的检验

经瑞利判断认为,当光学系统的最大波像差小于  $1/4$  波长时,其成像是完善的。自重变形主要是指光学反射镜面在重力作用下的变形,以及在镜室中受到卡夹或者压紧的变形,通常表面变形是用许多表面点相对于某一最佳拟合面的轴向偏差的均方根值来表示的。对反射镜来说,通常取理想反射面为最佳拟合面,只需计算实际反射面相对于最佳拟合面的光程差即可。波像差与几何像差的关系为

$W(x,y) = (n - 1) d(x,y) \tag{6}$

式中： $d$ 为镜面的轴向几何变形量； $W$ 为由镜面轴向变形引起的波像差； $n$ 为镜子材料的折射率。对于文中的反射镜  $n = -1$  来说，考虑的只是波像差  $W$  值的大小。

对镜面变形数据的多项式进行拟合，此拟合方法以理想平面作为参考平面，以面形的矢高作为拟合数据，项数根据需要而定，本文定为 15 项。

$$z = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3 + a_{11}x^4 + a_{12}x^3y + a_{13}x^2y^2 + a_{14}xy^3 + a_{15}y^4 \tag{7}$$

通过 Matlab 编写拟合程序，可得到各个系数  $a_1 \sim a_{15}$  的值，并将其输入进 Zemax。在 Zemax 的 Lens data editor 中输入扩展多项式，因为是平面反射镜，在进行光路的追迹时加入了辅助的理想镜面 Paraxial，图 5 所示为参考波前。此时波前图 RMS = 31.16992nm，约为 ansys 中算出的面形位移均方根值 (14.569nm) 的 2 倍，满足式 (6)。

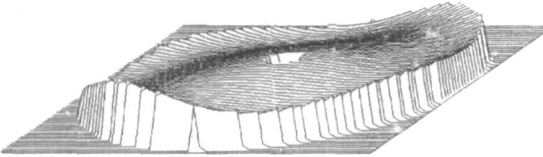


Fig. 5 Wavefront map

5 大口径轻量化碳化硅非球面反射镜面的检测支撑方案

5.1 轻量化设计

轻量化反射镜的结构形式包括孔的形状、大小和分布形式，反射镜面的面板厚度、肋板厚度等都会对反射镜面的磨制和检测精度造成影响。常见的轻量化孔的形状有扇形、三角形、六边形、圆形和不规则形状等。利用有限元进行理论分析，合理的优化和设计轻型的轻量化反射镜是非常必要的。本文考虑到工艺等各方面的影响，设计采用的是背部开口的扇形孔的轻量化结构形式。

5.2 镜体结构设计

镜体直径为 616mm、中孔直径为 170mm、肋板厚度  $t = 4\text{mm}$ ，反射镜面结构如图 6 所示。

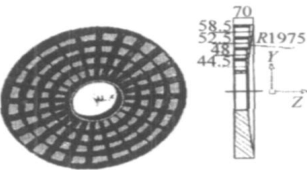


Fig. 6 Structure drawing

图中  $Z$  为光轴方向。轻量化前 Mass = 50.52 kg，轻量化后 Mass =

11.5988 kg，质心  $z_c = 40.631\text{ mm}$ ，轻量化率 =  $(W_0 - W)/W_0 \times 100\%$ ，其中  $W$  为轻量化后的重量， $W_0$  为轻量化前的重量，本文中的 = 77.04 %。

5.3 检测时的支撑方式对比分析

考虑到支撑的安全性、方便性、经济性，常用的有钢带支撑、侧支撑、中孔支撑和周边支撑。垂直支撑还要结合

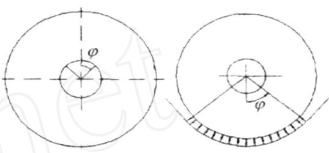


Fig. 7 Support programme

反射镜坯的形状作具体的优化选用。

通过理论分析选定了两种方案：中孔支撑和柔性钢带支撑，如图 7 所示。每种方式采用不同的约束角度  $\phi$  进行对比。

中孔支撑时采用两线夹角成  $60^\circ, 90^\circ$  和  $120^\circ$  的对比分析，可得到当  $2 = 120^\circ$  时此支撑方式对反射镜面的变形影响最小。在光轴  $Z$  方向的位移变形图如图 8 所示；均方根值如表 2 所示。

Tab. 2 Face value of hole support

角度(2 )/(°)	反射镜面 RMS/ nm
60	19.15620500
90	17.23559467
120	14.75027932

在实验中若单独采用中孔支撑，则反射镜面的变形较大，满足不了镜面检测的要求。所以采用外圆的钢带吊装支撑来分析反射镜面的变形情况，图 9 所示为柔性钢带支撑，在  $2 = 180^\circ$  下光轴  $Z$  方向的位移变形。从表 3 中可以看出，在  $2 = 180^\circ$  的支撑方式下对面型的变形影响最小。

Tab. 3 Face value of steel belt support

角度(2 )/(°)	反射镜面 RMS/ nm
180	5.699953093
90	7.000993840
120	6.684061331

由表 2 和表 3 可知，柔性钢带支撑对反射镜面的影响比采用中孔支撑小，但是实验中不管单独采用中孔支撑还是单独采用外圆的钢带吊装支撑，反射镜面的变形都较大，同样满足不了镜面检测的要求。所以考虑采用中孔支撑和外圆的钢带吊装支撑合在一起分析反射镜面的变形情况。图 10 是中孔成  $120^\circ$  与钢带成  $180^\circ$  时镜面在  $z$  方向上的位移变形，如表 4 所示。

通过上述两种支撑合二为一的分析可知，采用中孔支撑与外圆的钢带吊装支撑合在一起可以使反射镜面的变形最小，从而达到实际检测的要求。

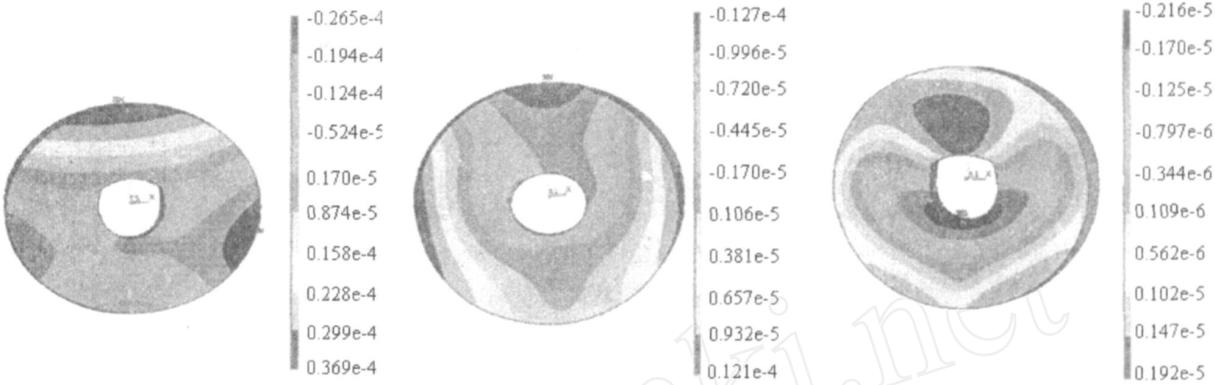


Fig. 8 Displacement deformation of hole support in optical axis direction      Fig. 9 Displacement deformation of steel belt support in optical axis direction      Fig. 10 Displacement deformation of integrated support in optical axis direction

Tab. 4 Face value of integrated support

中孔(2 ) + 钢带(180 )	反射镜面 RMS/ nm
2 = 60°	1.5450284562
2 = 90°	1.1787770192
2 = 120°	1.026684253

6 实 验

对加工完成的 616mm 的非球面轻量化碳化硅主镜进行了实际检测。用 WYKO 干涉仪对实际面形进行了数据采集。由于干涉仪得到的数据包括镜面自身加工的镜面误差、支撑引起的误差、气流的影响、温度的影响、检测时人为因素等。对镜面的精度要求是根据客户的要求来进行加工的。本实验采用了上述的中孔和外圆钢带支撑的方式,得到了较好的面形图,如图 11 所示,此时的面形均方根值  $RMS = 0.0199\text{wv}(\text{wv} = 632.8\text{nm})$ 。

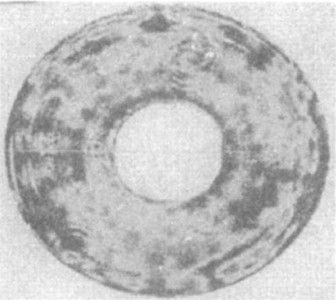


Fig. 11 Surface figure

7 结 论

本文对大型反射镜面的支撑方式做了理论上的模拟,为实际的应用提供了理论依据。在水平支撑下,首先对 6 点支撑进行了优化,找到了最佳的 18 点的支撑位置。在垂直支撑下,通过理论和实践,找到了最佳的检测方式。支撑方式是多种多样的,在实际的研制和检测中也有各式各样的影响因素,要尽量地把这些客观和主观因素对镜面的影响减到最低,这是在设施和检测方式中需待改进的。通过有限元的分析和计算,对口径为 850mm 的微晶玻璃材料非球面主镜和口径为 900mm 平面镜作了 18 点底支撑的分析计算,并给出了点的数据。对口径为 900mm 的平面镜在垂直状态下的支撑也作了有限元分析和计算。

参考文献：

[1] 虚荣伟,等. 大型干涉仪反射镜面的支承分析与温度变形分析[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 809—815.  
[2] 韩杰才,等. 光学系统主镜组件的轻量化设计及结构—热分析[J]. 光电子·激光, 2007, 18(2): 187—189.  
[3] 张德江,等. 透镜自重变形引起波像差的有限元分析[J]. 光学学报, 2005, 25(4): 538—541.  
[4] 齐亚范,等. 轻型反射镜研究与发展[J]. 光学技术, 1998, (3): 49—52.  
[5] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713—720.  
[6] Igor V Lyuboshenko, Henri Matre, Alain Maruani. Least-Mean-Squares Phase Unwrapping by Use of an Incomplete Set of Residue Branch Cuts [J]. Applied Optics, 2002, 41(11): 2129—2148.  
[7] Bernd Gutmann, Herbert Weber. Phase Unwrapping with the BranchCut Method: Role of Phase-Field Direction [J]. Applied Optics, 2000, 39(26): 4802—4816.  
[8] 马扬飏,钟约先,戴小林. 基于编码标志点的数码相机三维测量与重构[J]. 光学技术, 2006, 32(6): 865—868.  
[9] 罗先波,钟约先,李仁举,等. 基于标志点的多视角三维测量数据配准技术的研究[J]. 计量技术, 2004, 5: 20—22.  
[10] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. 数字图像处理(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.  
[11] Qian kemao. A simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform: The phase near edges[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39: 1364—1369.  
[12] 颜树华,戴一帆,吕海宝,等. 利用光束整形器件阵列消除电寻址空间光调制器的“黑栅”效应[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 194—196.

(上接第 505 页)

实验证明,八方向梯度估算法是一种运算速度快、插补效果好的相位插补方法,而且无需在计算过程中人工改变参量。可以将其用于截断线、非编码标志点甚至是更大面积编码标志点的插补。但由于这种方法是基于局部特征的插补,插补结果将受梯度估算时邻域选取大小的影响,如果在选取的相邻范围内相位不可靠,则使用该方法插补的结果也会不可靠。

参考文献：

[1] Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35: 263—284.  
[2] 李健兵,雷志辉. 位相测量轮廓术中的相位修正及系统标定的新方法[J]. 光学技术, 2006, 32(3): 422—424.