

文章编号: 1672-3392(2008)04-0056-04

大型光学镜面的多点支撑方案分析

杨若曦 张蓉竹

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 在大型光学系统中使用薄型镜面以减轻大口径光学镜面的重量,但由于薄镜面在重力作用下形变严重,需要选择适当的支撑方式来维持光学镜面的面形。通过对支撑方式的分析,采用有限元仿真,讨论了支撑点分布方式、支撑分布位置和支撑点数三方面对镜面形变的影响,从而得出支撑点均匀分布优于非均匀分布;支撑点数一定时,镜面形变主要由支撑点位置决定;10个支撑点以上镜面形变相对较小,继续增加支撑点并不能使镜面最大形变得到显著改善同时会引起镜面波纹起伏增加。

关键词 大型光学镜面; 能动支撑; 支撑点分布

中图分类号 TN202 **文献标识码** A

1 引言

在天文光学系统和高功率激光系统中,随着对元件口径增大的需要,大型镜面的重量和成本在整个系统中占有相当比重^[1-2]。为了减轻大口径光学镜面的重量,使用薄型镜面成为一种有效的方案。使用能动薄镜不但可以有效地减轻主镜的重量,同时又可通过驱动器校正主镜表面误差,改善光学面型;另外,使用能动技术还可以降低对镜面的加工精度的要求,从而大大地降低了制造成本^[3-4]。

但由于薄镜面在重力作用下形变严重,需要采取离散多点支撑方式。本文讨论了在镜面只受自身重力作用下的形变情况,并从支撑点是否分布均匀,一定支撑点数量情况下支撑点分布对镜面形变的影响,研究了支撑点数量与镜面形变之间的关系,其中着重比较了支撑点的各种分布方案。并得出在各种不同条件下,支撑点变化对镜面形变的影响情况。

2 基本理论与分析模型

以镜面边缘固定支撑为例,镜面模型采用直径 $D = 8\ 000\ \text{mm}$, 厚为 $250\ \text{mm}$ 的圆形薄镜,密度 $2\ 190\ \text{kg/m}^3$,泊松比 0.17 ,弹性模量 $72\ \text{GPa}$,镜面

周围边界固定,假设镜片自重 q 。这时镜面可以等效为圆形薄板,考虑圆板边缘支撑情况,采用极坐标系计算,板的边界条件对称于经过圆心垂直于中面的轴线。位移场,应变场,应力场轴对称分布,各分量不随坐标角度变化,而只是轴向半径 r 的函数,从而得到应力 $r = z = 0$, 扭矩 $M_r = 0$, 剪力 $Q = 0$, 应变 $\mu = 0$, 位移 $w = w(r)$ 。与 θ 无关,采用极坐标变换公式得

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) = \frac{d^2}{dr^2} \cos^2 + \frac{d}{dr} \times \frac{\sin^2}{r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial}{\partial y} \right) = \frac{d^2}{dr^2} \sin^2 + \frac{d}{dr} \times \frac{\cos^2}{r} \quad (2)$$

式中, w 为位移,将式(1)、(2)代入薄板挠曲面的微分方程可以得到

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) w = \frac{q}{D} \quad (3)$$

式中, q 为重力载荷, D 为抗弯刚度。由于式(3)为四阶常微分方程,可直接求解。当圆板上只受自身重力载荷时,即 q 等于常数,其特解 w_1 为

$$w_1 = Cr^4 \quad (4)$$

其中, $C = \frac{q_0}{64D}$, q_0 为镜面只受重力时的载荷, D 为抗弯刚度。从而得到通解:

$$w = C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 + \frac{q_0 r^4}{64D} \quad (5)$$

式中, C_1, C_2, C_3, C_4 是取决于圆板的边界条件的常

收稿日期 2007-10-10; 收到修改稿日期 2007-12-23

作者简介 杨若曦(1983-),男,硕士研究生,主要从事光学器件制造方面的研究。E-mail: qianfu1983@sina.com

数,对于完整中心并无圆孔削弱的圆板,常数 C_1 , C_2 必须为零,否则在板中心 ($r=0$) 处,挠度和内力将无穷大,这与实际情况不符。常数 C_3, C_4 可由边界条件确定。在固定边界时,半径为 a 周围边界固定的圆板其边界条件为

$$() |_{r=a} = 0 \quad \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) |_{r=a} = 0$$

由边界条件得: $a^2 C_3 + C_4 + \frac{\varphi a^4}{64D} = 0$

$$2aC_3 + \frac{\varphi a^3}{16D} = 0$$

其中, a 为边界半径。

从而计算出: $C_3 = -\frac{\varphi a^2}{32D}, C_4 = \frac{\varphi a^4}{64D}$ 并代入式

(5) 得

$$= \frac{\varphi a^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2 \quad (6)$$

所以在薄板中心处,即 $r=0$ 时,挠度最大,其值为:

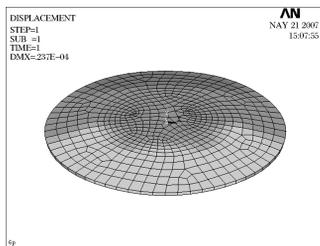
$$\max = \frac{\varphi a^4}{64D} \quad (7)$$

可见,在圆形镜面固定边缘支撑情况下,最大形变出现在镜面中心处。如果要减小镜面形变或改变镜面最大形变出现的位置,应采取离散多点支撑方法。对离散多点支撑情况下镜面的形变情况,可以采用有限单元法计算,和计算机仿真模拟。

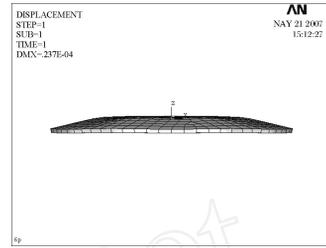
3 计算结果

3.1 支撑点分布是否均匀

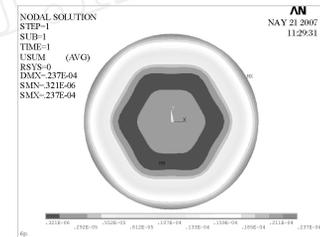
图 1 所示为六点均匀支撑下镜面形变图。从图 1 可以看出在支撑点分布均匀的情况下,镜面变形也相对均匀。镜面最大变形出现在镜子的边缘部分,其值为 0.0273 mm ; 镜面最小形变出现在支撑点附近,其值为 $0.321 \mu\text{m}$ 。镜面 RMS 值为 $1.01 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。从图 1 中可以看到镜面在以上六点均匀支撑情况下,其最大形变值为 0.0273 mm ; 采用均匀支撑点支撑可以得到相对均匀的镜面形变,并且容易控制镜面形变值的大小。



(a) 均匀支撑下镜面形变斜视图



(b) 均匀支撑下镜面形变水平视图

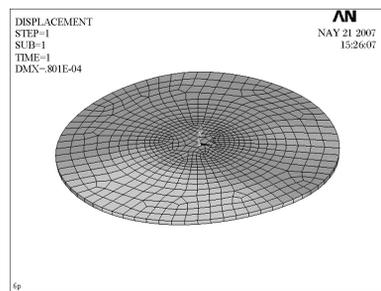


(c) 均匀支撑下形变分布

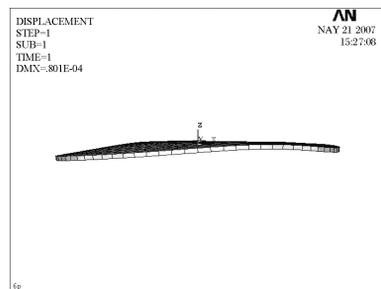
图 1 六点均匀支撑下镜面形变

Fig. 1 Mirror distortion on 6 uniform support points

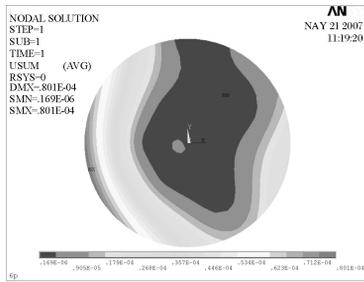
图 2 所示为六点非均匀支撑下镜面形变图。从图 2 可以看到,在六个支撑点分布不均匀的情况下,镜面的形变也出现相应的不均匀变化。镜面形变最大点出现在镜面左侧边缘处,其镜面相对位置处也出现明显的下陷。镜面形变最大值为 0.0801 mm , 镜面 RMS 值 $2.13 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。所以在这种情况下支撑点非均匀分布使得透镜的形变大于支撑点均匀分布时的镜面最大形变,同时采用均匀支撑更容易实现对镜面形变的精确控制。



(a) 非均匀支撑下镜面形变斜视图



(b) 非均匀支撑下镜面形变水平视图



(c) 非均匀支撑下形变分布

图2 六点非均匀支撑下镜面形变

Fig.2 Mirror distortion on 6 non-uniform support points

3.2 支撑点位置分布

在支撑点数目一定的情况下,如何选择支撑点的位置分布,成为一个影响镜面的形状的重要问题。以九个支撑点均匀分布在两个环带上为例,其中在直径为 D_1 的环带上均匀分布三个支撑点,在直径为 D_2 的环带上均匀分布六个支撑点。合理的选定 D_1 、 D_2 的值,可以在九点均匀支撑结构下使镜面形变达到最小。表1所示为固定 D_2 为7 m, D_1 从6 m变化到1 m时镜面形变和 RMS 值变化数据。

表1 支撑点分布位置与镜面最大,最小形变和镜面 RMS 值

Table 1 Distribution of the support points and the maximal, minimum deformation of mirror and the RMS

分布位置	最大形变	最小形变	RMS
	/ μm	/ nm	/ $\times 10^{-5} \text{ m}$
6	27.4	369	1.31
5	15.4	204	7.79
4	6.56	7	3.97
3	5.94	21.9	2.09
2	5.42	39.9	2.92
1	5.16	120	3.43

由表1知,在这六种组合中透镜最大形变值随 D_1 环带的减小而减小。在 $D_2 = 7 \text{ m}$ 、 $D_1 = 1 \text{ m}$ 时镜面最大形变达到最小。此时的最大形变值为 $5.16 \mu\text{m}$ 。但镜面 RMS 最小值出现在 $D_1 = 3 \text{ m}$ 、 $D_2 = 7 \text{ m}$ 时。从而在支撑点数量一定的情况下,其分布位置是决定镜面形变大小的关键。应综合考虑镜面形变最大值和镜面 RMS 值,合理选择支撑点位置才能得到最佳镜面形变。

3.3 支撑点数量

支撑点个数越多镜面的最大形变越小,但相应的镜面起伏越多。为了具体给出支撑点数与镜面形变的关系,计算了17种不同支撑点数情况下镜面的形变情况,图3、4所示分别为支撑点个数与透

镜最大形变,支撑点个数与镜面 RMS 值之间的关系曲线。

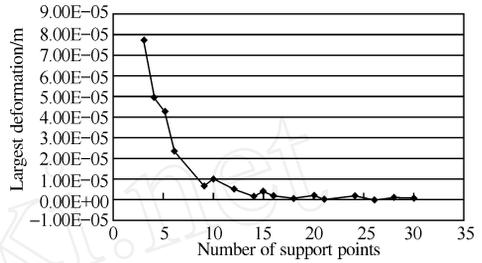


图3 支撑点数量与镜面最大形变关系曲线

Fig.3 Relationship between the number of support points and the maximal distortion

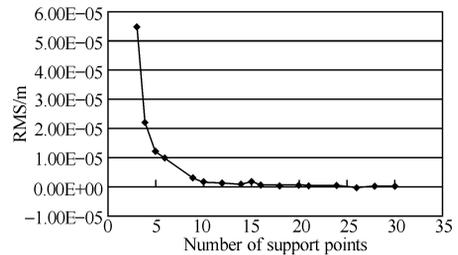


图4 支撑点数量与镜面 RMS 值关系曲线

Fig.4 Relationship between the number of support points and RMS

从图3中曲线的分布趋势我们可以看到当支撑点越多时镜面的形变相应减少,RMS 值也相应减少。支撑点数在10个点以下时镜面变形较大。最大镜面形变出现在三支撑点时。随着支撑点数的增加,形变逐渐减小。在10个支撑点以上时,曲线变得相对平稳。从而可见再增加支撑点数量对镜面改善镜面形变效果并不明显。图4可以看出在三支撑点时镜面微粗糙度最大。随着支撑点数的增加,RMS 值逐渐减小。当支撑点增加到20个以上时,镜面微粗糙度几乎不随支撑点的增加而减少,可见在20个支撑点以上时,增加支撑点数量对镜面形变的影响不大。在增加支撑点的过程中,镜面 RMS 值并非在支撑点最多时达到最小,随着支撑点的增加,镜面起伏可能引起微粗糙度值增大,从而影响成像质量。

4 结论

支撑点均匀分布比非均匀分布更适合用于大型镜面的能动支撑技术。在支撑点个数一定的情况下,支撑点的位置分布在一定程度上影响镜面形变。支撑点在10个以上时,镜面形变相对较小,继续增加支撑点并不能使镜面最大形变得显著改

善。虽然增加支撑点数量可以使透镜自重产生的形变随之减小,但过多的支撑点会给镜面带来较大的波纹起伏,同时增加成本和加工难度。所以选择支撑点数量时,应充分考虑到技术要求和加工成本等方面,寻找最佳组合以达到设计要求。

参考文献

- [1] 冯友君,张蓉竹. 大口径薄型光学镜面支撑方案的优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20 (2): 239-243.
- [2] 杨福兴. 大口径平面光学元件超精密加工技术的研究[J]. 光学技术, 2004, 29 (1): 27-29.
- [3] 张权,张璞扬,郝沛明,等. 大型非球面镜的加工和检测[J]. 光学技术, 2001, 26 (3): 204-208.
- [4] 王富国,杨洪波,杨飞,等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (6): 877-880.
- [5] 刘国庆,马文礼. 大口径轻质镜支撑的有限元分析[J]. 光电工程, 2001, 28 (5): 14-17.
- [6] 张磊,郑建平. 大口径反射光学系统的支撑结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (8): 461-463.

Analysis of the Multi-Point Supporting Scheme for Large Aperture Optical Mirror

YANG Ruo-xi ZHANG Rong-zhu

(College of Electronics and Information Engineering , Sichuan University , Chengdu 610064 , China)

Abstract Employing the ultra-thin mirrors in optical system is an effective method to reduce the mirrors' weight. However, the shape of ultra-thin mirror distorts severely based on the normal gravity, so the proper supporting scheme should be used to maintain the mirror's optical surface. In this paper, the mirror distortion effected by the distribution of the support points, the position of support points and the number of support points were discussed by using finite-element simulation. We can draw the conclusion that the uniform distribution of support points is better than non-uniform distribution, mirror distortion mainly dependents on the support location with certain points, mirror distortion relatively small when support points are over ten and adding support points will cause an increasing of corrugation rather than improve the shape of mirror surface.

Key words large aperture optical mirror; active support; distribution of the support points