

基于力矩主动校正的反射镜支撑分析

范磊, 王志, 曹玉岩

(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: 基于力校正的主动支撑技术已广泛应用于光学镜面支撑, 而基于力矩校正的方法目前还鲜有研究, 为了深入探讨该课题, 在传统力促动器主动支撑的基础上引入了基于力矩校正的反射镜主动支撑。首先, 从镜面主动支撑原理出发, 介绍了镜面面形主动校正的分类, 着重对比分析了力校正和力矩校正的优缺点。进而, 根据力矩主动校正的特点, 利用在反射镜背部施加 3 组等效力矩的方法, 对一块 400 mm 口径的轻量化反射镜进行了静力学分析与优化, 拟合后镜面变形 RMS 值由原来的 331 nm 降为 9.35 nm, 优化率为 97%。分析结果表明, 基于力矩校正的主动支撑是有效的, 同时为主动支撑的智能化及多样化提供了一种新的思路。

关键词: 主动支撑; 力矩校正; 优化设计; 有限元

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1273-05

Analysis of mirror support based on active moment correction

Fan Lei, Wang Zhi, Cao Yuyan

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

Abstract: Active support based on axial force correction was widely applied to optical mirror support, while the research of moment correction was infrequency. In order to profoundly develop such study, the active support based on moment correction was introduced in the foundation of force correction. First, according to the principle of active support, the category of active correction for mirror surface was introduced. Especially, the difference between force correction and moment correction was compared in detail. Then a lightweight mirror with the aperture of 400 mm was selected to be calculated and optimized in statics, according to applying three groups equivalent moments. As a result, the mirror deformation was reduced from 331 nm to 9.35 nm, the rate of optimization was 97%. In conclusion, the active support based on moment correction was effective, and a new idea was introduced for an smart and diversified active support.

Key words: active support; moment correction; optimum design; FEM

0 引言

主动支撑技术在光学镜面支撑方面有着明显的优势,一方面可以很好地保证镜面面形;另一方面可有效降低镜面支撑系统的质量。

目前,主动支撑广泛采用力促动器结构形式,具体是通过在反射镜背部设置若干力促动器,通过合理施加轴向校正力实现波前面形校正。为了合理利用力促动器的有效校正力,提高镜面主动支撑性能,需要反射镜有较大的径厚比,即采用薄镜面主动支撑^[1]。国外,ESO(欧南台)在该领域的研究一直处于领先水平,从 1.05 m 的薄镜面主动光学实验^[2]开始,到第一台地基主动望远镜 NTT^[3](口径 3.5 m)的问世,再到 VLT(口径 8 m)望远镜^[4]的研制成功,说明薄镜面主动支撑技术已非常成熟。国内,南京天文光学技术研究所^[1,5]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[6]和苏州大学^[7]在该领域取得了很大的进步,具备了 1 m 级以下口径薄镜面主动支撑的工程研制能力。

然而,薄镜的镜面成形相对较难,具体表现为镜坯的制备和镜面的加工^[8],同时薄镜自身的结构安全系数较低,是整个支撑系统中最为脆弱的部件,设计时需考虑安全保护结构。为了发挥主动支撑优势,同时降低薄镜面反射镜的加工难度,采用径厚比较小的轻量化反射镜,背部设置力矩促动器是一种新的主动支撑形式。

国外,Celia H. Liu 研究了轻量化反射镜在力矩促动器作用下的变形分析^[9];德国 Daimler Chrysler 技术中心已研制了一款口径为 600 mm 的蜂窝型轻量化复合镜,并通过力矩主动校正达到了很好的面形精度^[10]。国内目前还鲜有该方面的研究。

反射镜采用力矩进行波前面形校正和力校正有一定的特殊性和优越性,文中首先从镜面的力矩校正原理出发,对比分析了力与力矩校正的优缺点;接着以一块 400 mm 轻量化反射镜为算例,利用力矩校正方法进行了详细的分析计算与优化设计,通过对优化结果的分析验证了文中的研究意义。

1 镜面的力矩主动校正原理

1.1 主动支撑基本原理

主动支撑的目的是通过光学元件表面形状的主

动控制来完善光学系统的传递特性,补偿传递到该系统光波的自身缺陷。主动支撑包括三个关键技术,分别为波前探测、主动校正算法(面形误差拟合及校正力求解)和促动器。图 1 所示为主动支撑基本原理。

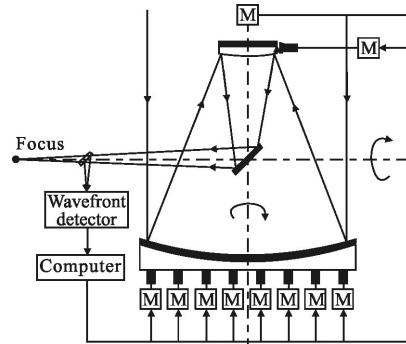
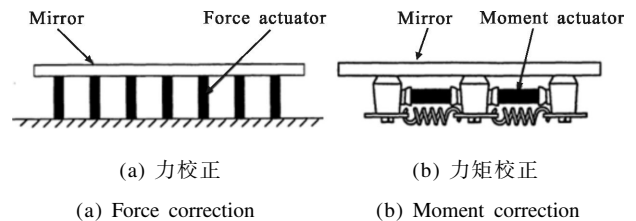


图 1 主动支撑原理

Fig.1 Principle of active support

从图中可以看出,对于系统结构而言,采用有效的促动器是非常必要的。目前常用的是力促动器结构形式,通过轴向施加校正力校正镜面变形^[11]。但理论上也可以通过在反射镜背部施加横向拉压力,即对反射镜施加等效弯矩,从而起到校正镜面面形的目的。图 2 所示为上述两种镜面主动校正的理论模型。



(a) 力校正

(b) 力矩校正

(a) Force correction

(b) Moment correction

图 2 反射镜面形主动校正示意图

Fig.2 Sketch map of surface active correction

图 3 所示为上述两种镜面校正方式简化后的平面受力分析简图,图 3(a)为重力作用下浮动力 F 校正镜面变形受力分析图,图 3(b)为重力作用下力矩校正镜面变形受力分析图。计算两种情况下镜面变形 w_f 和 w_m 如公式(1)和(2)所示,图 4 所示为两种情况下利用有限元方法计算的镜面变形云图。

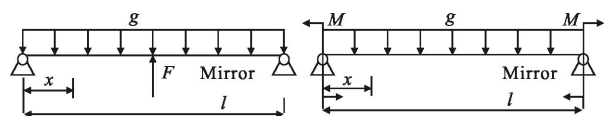


图 3 平面受力分析图

Fig.3 Load distribution of two correction methods

$$w_f = -\frac{gx}{24EI}(l^3 - 2lx^2 + x^3) + \frac{Fx}{48EI}(3l^2 - 4x^2) - \frac{1}{48EI}[2gx^4 + 4(F - gl)x^3 + (2gl^3 - 3FP)x] \quad (1)$$

$$w_m = -\frac{gx}{24EI}(l^3 - 2lx^2 + x^3) + \frac{Mx}{6EI}(l - x)(2l - x) + \frac{Ml}{6EI}(l^2 - x^2) - \frac{1}{48EI}[2gx^4 + 4\left(gl - \frac{2M}{l}\right)x^3 + 32Mx^2 + (2gl^3 - 16l)x + 8l^2] \quad (2)$$

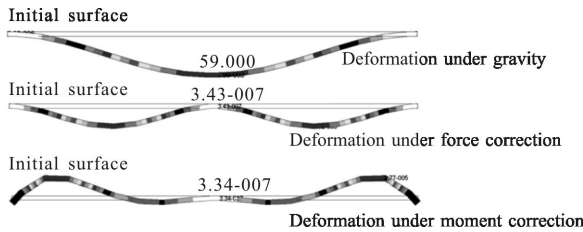


图 4 镜面面形云图比较

Fig.4 Deformation comparison of mirror under different correction

由公式(1)、(2)和图4可以看出:两种方式都可以达到校正镜面变形的目的,且镜面变形同校正力和力矩成线性关系。

1.2 力矩校正与力校正的区别

设系统的波前误差为 W ,为校正该误差量,校正力 F 或校正力矩 M 应产生 $-W$ 的波前,即 F 和 M 应分别满足:

$$CF = -W \quad (3)$$

$$TM = -W \quad (4)$$

式中: C 和 T 分别为校正力刚度矩阵和校正力矩刚度矩阵。

尽管两者都可以起到校正镜面面形的目的,但两种方式仍各有优缺点。

(1) 镜室刚度方面:力校正中,反射镜、力促动器和镜室是三个相互独立的组成部分,校正力需借助镜室的反作用力传递到镜面,因此需要镜室有较大的刚度;力矩校正中,反射镜同力矩促动器构成一个整体,施加的弯矩某种程度上相当于增加了镜体自身的结构刚度,形成了一块刚度增强的反射镜,因此对安装镜室的刚度没有要求。

(2) 反射镜轴向刚度方面:对于力校正而言,根据公式(1)可知,当波前校正误差一定时,为了最大限度地减小校正力,需要减小反射镜的轴向刚度,这就增大了反射镜加工与支撑的危险性;对于力矩校正而言,相同的波前校正误差可以通过增加反射镜

厚度(增加力的力臂)从而减小横向拉压力的大小,相应地,镜厚的增加增强了反射镜的刚度。

(3) 智能化程度:相对于被动支撑而言,无论是力校正还是力矩校正都属于主动支撑,智能化程度较高,但两者相比较而言,力矩校正相当于在原有自身基础上通过布置若干力矩促动器而人为地创造了一块刚度更好的反射镜,可以安装在各种镜座中,因此更具集成化和智能化,很多学者都称这种反射镜为智能镜^[12]。

2 力矩校正的静力学分析

为了深入探讨和验证上述理论分析,选用一块直径为 400 mm 的轻量化平面镜作为分析对象,在镜面背部设置横向拉压力作为等效校正力矩,进行了详细的静力学分析与优化。

反射镜材料选用微晶玻璃,其弹性模量 $E = 91\ 000\ \text{MPa}$,密度 $\rho = 2.53\ \text{g/cm}^3$,泊松比 $\nu = 0.24$ 。如图5所示,主镜采用背部开放扇形轻量化孔结构形式。反射镜的结构参数如表 1 所示。

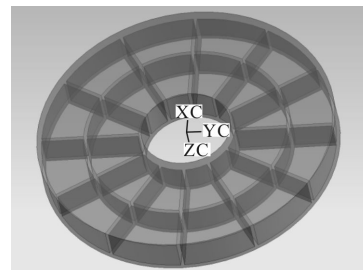


图 5 轻量化反射镜三维模型

Fig.5 3D model of lightweight mirror

表 1 反射镜基本参数表

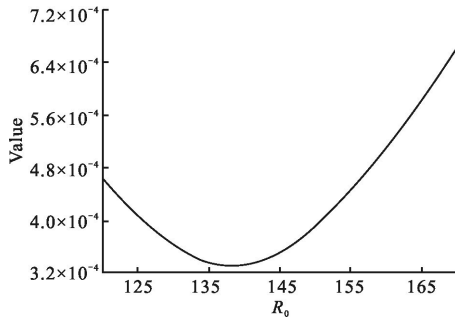
Tab.1 Parameters for the lightweight mirror

Parameters	Value
Aperture/mm	400
Diameter of hole/mm	120
Thickness of reinforcing rib/mm	5
Thickness of mirror plane/mm	8
Radius of support points	R_0

2.1 反射镜三点被动支撑分析

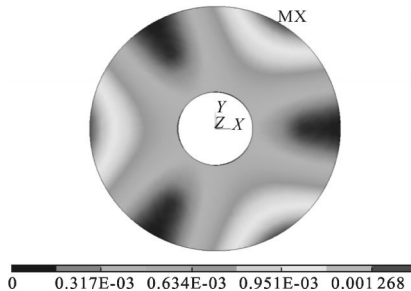
轻量化反射镜的结构设计与支撑是密切相关的^[13]。由于该反射镜及校正机构最终作为一个整体通过轴向三点安装，首先需要优化确定三点的支撑半径。利用有限元分析软件 ANSYS，根据图 3 和表 1 所示的结构参数对反射镜进行参数化建模，有限元模型采用 shell 63 单元。载荷和边界约束如下：轴向施加 1 g 的重力；对于轴向的三个支撑点，约束轴向自由度 UZ；模型呈 120° 对称，因此在对称面上施加对称约束。

选用支撑点半径 R_0 作为优化变量，以镜面 RMS 值作为目标函数，借助 ANSYS 的 OPT 优化模块，采用多种优化方法，经多次迭代，优化后的的支撑半径为 $R_0=136.5\text{ mm}$ 。图 6(a)所示为 R_0 优化曲线，图 6(b)所示为镜面变形云图，镜面 RMS 值为 331 nm，约 $\lambda/1.9$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。由此看出单纯的三点支撑面形很差，很难达到可见光成像要求。



(a) 支撑半径优化曲线

(a) Optimization of supporting radius



(b) 镜面变形云图

(b) Mirror deformation

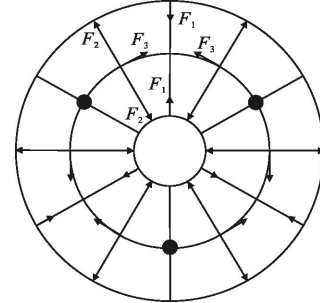
图 6 支撑半径的优化

Fig.6 Optimization of support radius

2.2 反射镜主动力矩校正分析及优化

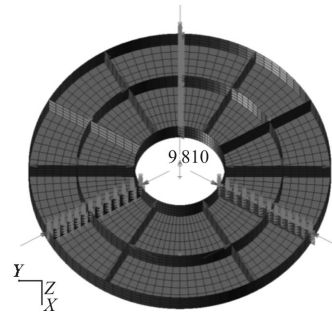
采用力矩校正镜面面形的核心思想是通过施加校正力矩，增强反射镜的局部刚度，从而减小镜面的

重力变形，结合该反射镜的轻量化结构形式及三点支撑下的变形云图，在反射镜背部施加如图 7(a)所示的等效校正力矩，有限元模型如图 7(b)所示。



(a) 等效校正力矩分布图

(a) Equivalent moment layout



(b) 有限元模型

(b) FE model

图 7 等效力矩校正模型

Fig.7 Model of equivalent moment

由图 7(b)可知，模型的边界约束条件为：约束三支撑点的轴向自由度 UZ；三个对称面采用对称约束；底部按照图 7(a)施加成对的横向拉压力来模拟施加校正力矩。因此可以通过优化这三个力的大小优化反射镜支撑面形。

分别以三个拉压力 F_1 、 F_2 和 F_3 为优化变量，以镜面 RMS 值为目标函数，利用有限元分析软件 ANSYS 的 OPT 优化模块，采用多种优化方法，经多次优化迭代，优化后镜面面形 RMS 为 9.35 nm，约 $\lambda/67$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。镜面面形在原来的基础上提高了 97%。图 8 所示为镜面校正后的变形云图，表 2 所示为对应拉压力的数值及等效力矩值。

为了对比该反射镜在不同厚度下的力矩校正差异，在校正力矩排布及大小基本不变的前提下，利用有限元方法分析优化了不同镜厚下反射镜力矩校正后的镜面 RMS 值，如图 9 所示。

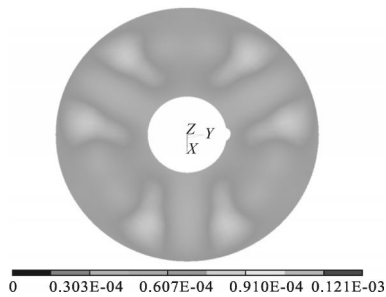


图8 等效力矩校正下的镜面变形云图

Fig.8 Mirror deformation under equivalent moment correction

表2 等效校正力矩优化结果

Tab.2 Optimization of equivalent moment correction

Force	Group number	Value/N	Equivalent moment/N·mm
F_1	3	10.646	425.84
F_2	6	3.434 6	137.384
F_3	3	1.598 9	63.956

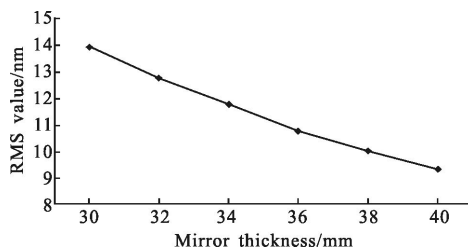


图9 不同镜厚下的力矩校正面形 RMS 值

Fig.9 Surface RMS value under different mirror thickness

由图9可以看出,随着镜面厚度的增加,通过力矩校正后的镜面变形下降,并基本符合线性关系。

3 结论

文中从镜面主动支撑原理出发,在传统力校正的基础上介绍了镜面的力矩校正。从原理上分析了力矩校正的可行性以及与力校正的区别与特点。

以一块400 mm口径的轻量化反射镜作为优化分析对象,优化了等效校正力矩的大小,对应的镜面变形RMS值由原来的331 nm降为9.35 nm,优化率为97%,证明了镜面力矩校正方法的有效性。

文中的研究分析对于大口径反射镜以及智能反射镜支撑研究提供了新的思路:对于大口径反射镜的主动支撑,可以采用力促动器和力矩促动器相结合的支撑方式,从而更好地提高镜面面形;对于小口

径反射镜的主动支撑,可以独立采用力矩校正的支撑方式,发展智能镜面支撑技术。

参考文献:

- [1] Su Dingqiang, Cui Xiangqun. Active Optics-Key technology of the new generation telescopes[J]. *Progress in Astronomy*, 1999, 17(1): 1-14. (in Chinese)
- [2] Noethe L, Franaz F, Giordano P, et al. Active optics II. Results of an experiment with a thin 1m test mirror [J]. *Journal of Modern Optics*, 1988, 35(9): 1427-1457.
- [3] Wilson R N, Franaz F, Giordano P, et al. Active optics III. Final result with the 1 m test mirror and NTT 3.58 m primary in the workshop [J]. *Journal of Modern Optics*, 1989, 36(11): 1415-1425.
- [4] Dierickx P, Enard D, Merkle F, et al. The 8.2 metre primary mirror of the VLT[C]//SPIE, 1990, 1271: 266-274.
- [5] Su Dingqiang, Jiang Shengtao, Zou Weiyao, et al. Experiment system of the thin-mirror active optics [C]// SPIE, 1994, 2199: 609-621.
- [6] Li Hongzhuang, Zhang Jingxu, Zhang Zhenduo, et al. Correction experiment of 620 mm thin mirror active optics telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 166-172. (in Chinese)
- [7] Ni Ying, Huang Qitai, Yu Jingchi. Optimized design of active support of ultra thin mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(9): 22-26. (in Chinese)
- [8] Cui Xiangqun, Li Xinnan, Zhang Zhenchao, et al. Tentative fabrication test for large aperture thin astronomical mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(7): 965-969. (in Chinese)
- [9] Liu C H. Structural analysis and design of adaptive lightweight mirrors [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [10] Dürr J K, Honke R, Alberti M, et al. Development and manufacture of an adaptive lightweight mirror for space application [J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, 12: 1005-1016.
- [11] Zhang Yufang, Li Guoping. Design of voice coil force actuator in thin mirror active optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2836-2843. (in Chinese)
- [12] Sun D, Tong L. Design optimization of piezoelectric actuator patterns for static shape control of smart plates [J]. *Smart Materials & Structures*, 2005, 14: 1353-1362.
- [13] Fan Lei, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia, et al. Optimum design of edge-lateral support for Large-aperture lightweight primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2207-2213. (in Chinese)