

8 m 能动薄主镜侧支撑设计

戴晓霖^{1,2,3} 鲜浩^{1,2} 唐金龙^{1,2} 张雨东^{1,2}

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

²中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 薄主镜支撑系统分为轴向和侧向支撑两部分,侧向支撑承担主镜垂直于光轴方向的重力分量。介绍了 push-pull-shear 侧支撑及能动校正原理,并针对一块 8 m 口径薄主镜进行了侧支撑设计。设计了 5 种备选侧支撑方案,并考虑到主镜对面形的能动校正能力,借助有限元计算对它们进行了分析和比较,选出了一种最佳方案作为 8 m 薄主镜的侧支撑方案。该侧支撑方案共有 64 个侧支撑点,每个侧支撑点仅施加沿主镜切向的支撑力。当主镜竖直放置时,主镜能动校正后的镜面均方根值为 19.2 nm,校正力范围为-318.9~301.4 N。相比传统 push-pull-shear 侧支撑方式,该侧支撑方案结构简单,易于实现,同时支撑效果良好。

关键词 光学设计; 能动光学; 侧支撑设计; 有限元方法; 薄型主镜

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0622004

Designing of Lateral Support System for an 8 m Active Thin Mirror

Dai Xiaolin^{1,2,3} Xian Hao^{1,2} Tang Jinlong^{1,2} Zhang Yudong^{1,2}

¹*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences,*

Chengdu, Sichuan 610209, China

²*The Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

³*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract The support system of an thin primary mirror consists of axial supports and lateral supports. Lateral supports mainly support the component force of the mirror's gravity normal to the optical axis of the mirror. The push-pull-shear lateral support and the principle of active correction are introduced, and 5 alternative lateral supports are designed for an 8 m active thin mirror. Taking account of the active correction of the primary mirror and comparing the 5 alternatives via the finite element method, the best lateral support of the 8 m mirror is determined. The best lateral support consists of 64 lateral support points, and each point only applies an tangential force. The root mean square of the surface of the 8 m mirror after active correction is 19.2 nm when the mirror is mounted vertically and the range of the correction forces is -318.9~301.4 N. Compared with regular push-pull-shear lateral support, this lateral support is simpler in structure, easier to implement and has good supporting performance.

Key words optical design; active optics; lateral support design; finite element method; thin primary mirror

OCIS codes 220.1080; 080.4035; 350.4600

1 引言

制造并使用薄型主镜是大口径主镜轻量化的一个重要方法,薄型主镜径厚比很大,较传统主镜能够大大减小主镜质量,但同时也容易弯曲变形^[1],必须设计合适的支撑系统保证薄型主镜的面形。薄主镜支撑系

收稿日期: 2014-12-17; 收到修改稿日期: 2015-01-21

基金项目: 国家 863 计划(G138803)

作者简介: 戴晓霖(1991—),男,博士研究生,主要从事能动薄主镜控制技术方面的研究。E-mail: daixl08@outlook.com

导师简介: 张雨东(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学技术方面的研究。

E-mail: ydzhang@ioe.ac.cn(通信联系人)

统分为轴向和侧向支撑两部分,侧向支撑承担主镜垂直于光轴方向的重力分量。常见的侧支撑方式有径向余弦力支撑、水银带支撑、竖直推拉支撑^[1]及由Schwesinger^[2]提出的push-pull-shear支撑等。目前,口径较大的薄型主镜大多采用后两种侧支撑方式,如3.5 m欧洲新技术望远镜(NTT)^[3-6]采用竖直推拉侧支撑方式,8 m级的欧洲甚大望远镜(VLT)^[7]、Gemini^[8]、Subaru^[9]采用push-pull-shear侧支撑方式。但当薄主镜口径进一步增大时,采用竖直推拉侧支撑的主镜面形将会急剧下降,难以满足设计要求,而采用传统push-pull-shear侧支撑方式虽然能够获得极好的面形,但支撑结构复杂,不易实现。

本文针对一台8 m口径薄型主镜,借助有限元方法,运用push-pull-shear侧支撑原理,设计了5种待选侧支撑方案:1)最优侧支撑(即传统push-pull-shear侧支撑);2)纯切向力侧支撑;3)竖直推拉力+轴向力侧支撑;4)纯竖直推拉力支撑;5)纯侧定位点支撑。然后结合薄主镜对面形的能动校正效果,对5种方案进行了对比,选择纯切向力侧支撑方案作为8 m薄主镜的最佳侧支撑方案,该侧支撑方案结构简单,易于实现,同时支撑效果良好。本文的设计过程也为大口径薄型主镜侧支撑提供了一种设计思路及参考例。

2 8 m 能动薄主镜参数介绍

8 m 能动薄主镜模型如图 1 所示,主镜口径为 8000 mm,中心孔直径 1250 mm,厚度为 205 mm,径厚比为 39,镜面顶点处曲率半径为 24600 mm。主镜材料为 ZERODUR 玻璃,其性能如表 1 所示。

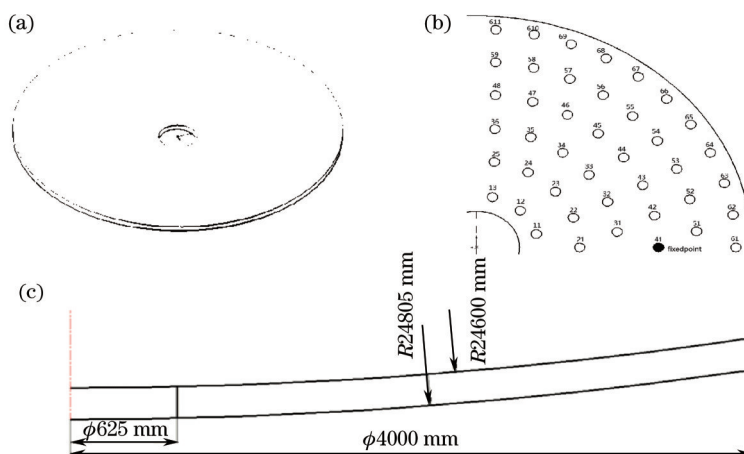


图 1 8 m 能动薄主镜模型。(a) 主镜模型;(b) 主镜(第一象限内)轴向支撑点排布;(c) 薄主镜尺寸图
Fig.1 Model of the 8 m active thin primary mirror. (a) Model of mirror; (b) axial support points of the mirror (in the first quadrant); (c) size of the mirror

表 1 主镜材料性能

Table 1 Material properties of primary mirror

Material	Density /(kg/m ³)	Poisson's ratio	Young's modulus /GPa
ZERODUR	2530	0.243	90.3

8 m 薄主镜轴向支撑共包含 159 个能动支撑点,均匀分布在主镜背面的 6 个支撑环上,各环半径依次为 900, 1499, 2062, 2645, 3210, 3770 mm,支撑点数目由内到外(1~6 环)依次为 12, 18, 24, 27, 36, 42 个(第 3 环上除 27 个能动支撑点外,还有 3 个轴向定位点,用于主镜定位,如图 1 所示),支撑点的半径为 75 mm。

3 push-pull-shear 侧支撑及主镜能动校正原理

3.1 push-pull-shear 侧支撑介绍

常见的薄型主镜侧支撑方式如图 2 所示。push-pull-shear 侧支撑方式是现代大口径薄主镜最常用的侧支撑方式,下面对这种侧支撑方式做简要介绍。

薄型主镜竖直放置时,在重力作用下的弹性变形展开为傅里叶级数形式为^[2]

$$w(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(r) \cos n\theta, \quad (1)$$

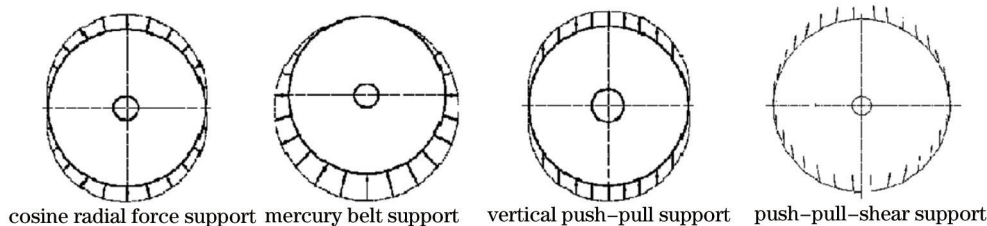


图2 常见薄型主镜侧支撑方式

Fig.2 Some common lateral supports of thin primary mirror

式中 w 表示镜面变形, r 和 θ 为极坐标 ($\theta=0^\circ$ 即 x 正半轴, 逆时针旋转为正, 如图 3 所示), w_n 为不同傅里叶级数下随半径 r 变化的镜面面形。根据 Schwesinger^[2] 的研究, 假设主镜侧支撑由均匀排布在主镜外侧边缘面的 N 个支撑点组成, 则一个设计良好的侧支撑能够很好的抑制(1)式中的 $n=2,3,\dots,N-1$ 项变形, 由于高阶变形项的幅值很小, 所以此时主镜弹性变形的主要成分为(1)式中的 $n=1$ 项。传统的余弦推拉式侧支撑对 $n=1$ 项变形抑制效果很差, 故随着主镜口径增大, 这种侧支撑方式的效果往往不够理想。为此, Schwesinger 提出了一种沿主镜边缘的切向添加侧支撑力的方案(即 push-pull-shear 方式), 这种方式对 $n=1$ 项变形具有更好的抑制效果, 能够更加有效地降低薄主镜的弹性变形。

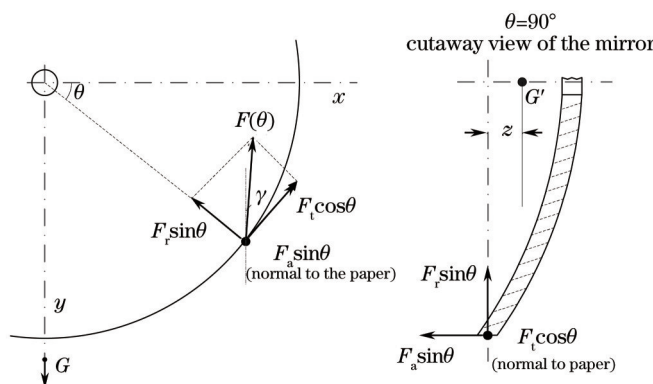


图3 push-pull-shear侧支撑方式示意图

Fig.3 Schematic of push-pull-shear lateral support

图 3 所示为 push-pull-shear 侧支撑方式的一个侧支撑点的支撑力分布情况, 主镜竖直放置, 侧支撑点位于主镜外侧边缘面上, 每个侧支撑点上的支撑力由 3 个分力合成: 沿径向的分力 $F_r \sin \theta$, 沿切向的分力 $F_t \cos \theta$ 和沿光轴方向的分力 $F_a \sin \theta$ 。 F_t, F_r, F_a 均为待定常数, 它们的取值决定了支撑的效果。 $F(\theta)$ 为 $F_r \sin \theta$ 和 $F_t \cos \theta$ 的合力, $F(\theta)$ 与竖直方向的夹角为 γ 。 G 为主镜重力, z 为 $F(\theta)$ 所在的平面与薄主镜的重心 G' 在光轴方向上的距离。侧支撑的设计过程即确定 F_t, F_r, F_a 值的过程。

引入参数 β , 令

$$\beta = \frac{F_t}{F_t + F_r} (0 \leq \beta \leq 1), \quad (2)$$

则根据主镜力平衡及力矩平衡条件, 有

$$\sum_{i=1}^N (F_t \sin^2 \theta_i + F_r \cos^2 \theta_i) = G, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N (F_a \times R \sin^2 \theta_i) = Gz, \quad (4)$$

式中 θ_i 为不同侧支撑点到圆心的连线与主镜水平轴 (x 轴) 的夹角, R 为主镜的半径。此时, 侧支撑待定参数为 F_t, F_r, F_a, β 4 个, 又因为它们满足(2)、(3)、(4)式, 故此时独立的变量仅剩一个, 为方便, 独立变量取为 β 。由图 3 可知, $F(\theta)$ 满足

$$|F(\theta)| = \frac{F_r}{1-\beta} \sqrt{(1-2\beta)\sin^2\theta + \beta^2},$$

$$\tan \gamma = \frac{2\beta - 1}{(1-\beta)\tan\theta + \beta \cot\theta}. \quad (5)$$

若 $\beta=0$, 则有 $|F(\theta)|=F_r|\sin\theta|$, $\gamma=-(90^\circ+\theta)$, 这时侧支撑即余弦推拉式支撑; 若 $\beta=0.5$, 则有 $|F(\theta)|=F_r$, $\gamma=0^\circ$, 这时侧支撑即垂直推拉支撑。

引入 β 后, 侧支撑的待定参数从 F_i, F_r, F_a 转化为 β , push-pull-shear 侧支撑的设计过程也转化为寻找最优 β 值的过程, 简化了侧支撑的设计过程。

3.2 主镜能动校正原理

能动光学技术是建造现代大口径天文望远镜的重要技术之一^[10], 通过对畸变波前的探测和对主镜背面驱动器阵列的控制, 能动光学技术能够有效校正主镜的面形误差, 提高望远镜系统的成像能力, 这一过程也即主镜能动校正。3.5 m 望远镜 NTT 首次使用了能动光学技术^[3-6], 此后, 几乎所有的现代大型望远镜均采用了能动光学技术, 如 4 m 级的南方天体物理望远镜(SOAR)^[11]、可见光及红外波段天文望远镜(VISTA)^[12]和先进太阳望远镜(ATST)^[13], 8 m 级的 VLT^[14]、Gemini^[8]和 Subaru^[9]等。

本文借助有限元分析, 通过以下方法分析 8 m 薄主镜的能动校正效果:

1) 向各个能动支撑点施加单位作用力, 利用有限元计算相应的主镜面形, 从而得到每个能动支撑点(驱动器)的影响函数 $w_i(x,y)(i=1,2,\dots,159)$;

2) 利用有限元分析, 得出各项面形误差数据 $W(x,y)$ (主要为重力变形);

3) 设校正力为 F_i , 使用最小二乘法拟合方程 $W(x,y) = \sum_{i=1}^{159} F_i w_i(x,y)$, 得到校正力 F_i 后, 利用有限元方法计算主镜在 F_i 作用下的残余面形误差 $W'(x,y)$, 分析能动校正效果。

4 8 m 薄主镜侧支撑设计

4.1 侧支撑点的数量与排布设计

8 m 薄主镜侧支撑的设计参考了 2.6 m VLT 的测量望远镜(VST, 24 个侧支撑)^[15]和 8.2 m 望远镜 VLT(64 个侧支撑)^[7]的侧支撑方式, 共有 64 个侧支撑点, 均匀分布在主镜外侧边缘面上, 如图 4 所示。支撑点与主镜接触面的中心位于主镜侧边缘面的中分线上。薄主镜的定位由 3 个轴向定位点(均匀分布在第 3 支撑环上, 限制光轴方向自由度)和 4 个侧定位点(分布于主镜上下左右 4 个顶点处, 其中上下两个定位点限制主镜水平方向位移, 左右两个定位点限制垂直方向位移)共同完成。当薄主镜竖直放置时, 要求镜面均方根(RMS)值小于 21 nm ($\lambda/30$, $\lambda=632.8$ nm)。

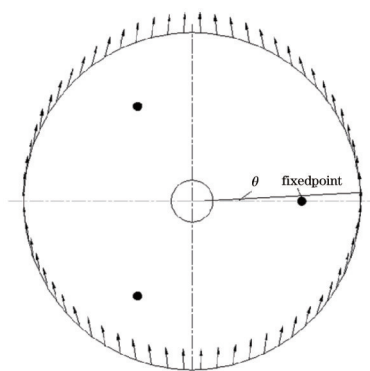


图 4 8 m 薄主镜侧支撑示意图

Fig.4 Schematic of the lateral support for the 8 m thin primary mirror

4.2 最优侧支撑方案(即传统 push-pull-shear 侧支撑)

8 m 薄主镜采用 push-pull-shear 侧支撑方式, 在确定了侧支撑点的数量与排布方式之后, 侧支撑设计过

程即寻找最优 β 值的过程。故设 β 为待优化变量,主镜竖直放置时的镜面RMS值为目标函数,借助有限元方法,计算出二者之间的关系如图5所示。

由图5可知,最优解出现在 $\beta=0.75$ 左右,计算出的最优侧支撑的支撑效果及主镜面形分别如表2和图6所示(X、Y、Z、WX、WY、WZ为ANSYS软件在建模中自动生成的坐标轴符号,MN和MX为镜面变形量最小值和最大值的位置)。

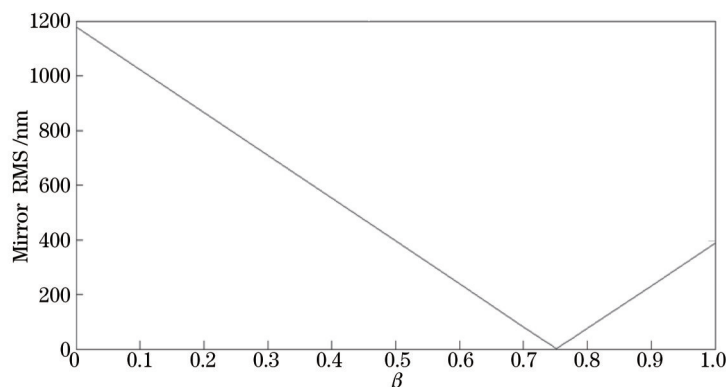


图5 β 对镜面RMS值的影响

Fig.5 Effectiveness of β to the RMS of the mirror surface

表2 最优侧支撑的支撑效果

Table 2 Effectiveness of the optimum lateral support

Lateral support	β	Component of support forces	RMS of mirror surface /nm
Optimum support	0.752	Radial, tangential and axial	22.6

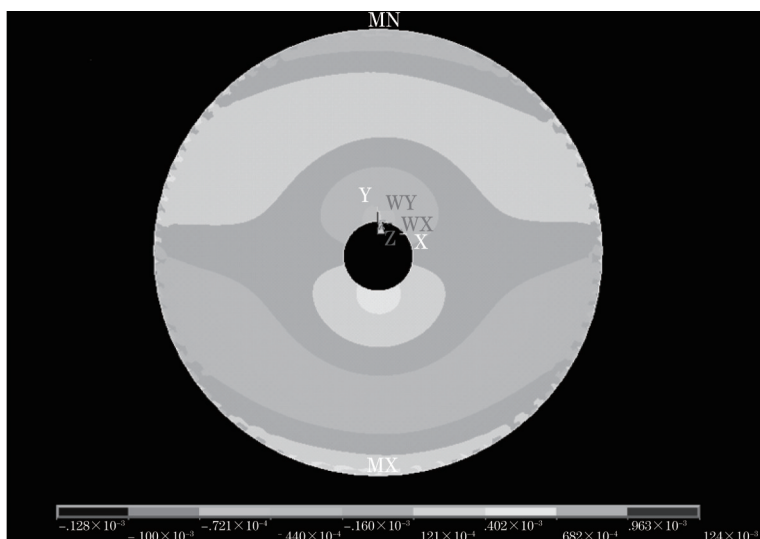


图6 最优侧支撑下的主镜面形(单位: mm)

Fig.6 Primary mirror surface of optimum lateral support (unit: mm)

4.3 纯切向力侧支撑方案

最佳侧支撑方案应当满足两个条件:1)良好的支撑效果;2)便于实现。最优侧支撑方案能够达到很好的主镜支撑效果,但一方面,这种支撑方式在每个侧支撑点处的支撑力都由径向、切向和轴向3个方向上的分力组成,这使得支撑结构非常复杂,实现起来比较困难;另一方面,在4.2节的设计过程中并没有考虑到薄主镜的能动校正能力,若考虑这一因素,可能会有其他较为简单的支撑方式同样也能达到较好的侧支撑效果。因此,为寻求最佳侧支撑方案,根据最优侧支撑方案进行简化,提出了另一种可能的侧支撑方案。

方案A:纯切向力侧支撑方案

由于轴向侧支撑力施加较为困难,故假设侧支撑不包含轴向分力,即 $F_a = 0$,此时寻找最优 β ,结果如

图 7 所示。可以看到,当 $\beta = 1$ 时,主镜面形 RMS 值最小,故方案 A 为 64 个侧支撑力均为纯切向支撑力,没有径向和轴向分力,如图 8(a)所示。

4.4 其他侧支撑方案

本文结合现有望远镜实例,还考虑了另外 3 种可能的侧支撑方式。

方案 B: $\beta = 0.5$, 64 个侧支撑点的径向和切向支撑力的合力方向竖直向上,侧支撑点处有轴向分力,如图 8(b)所示。

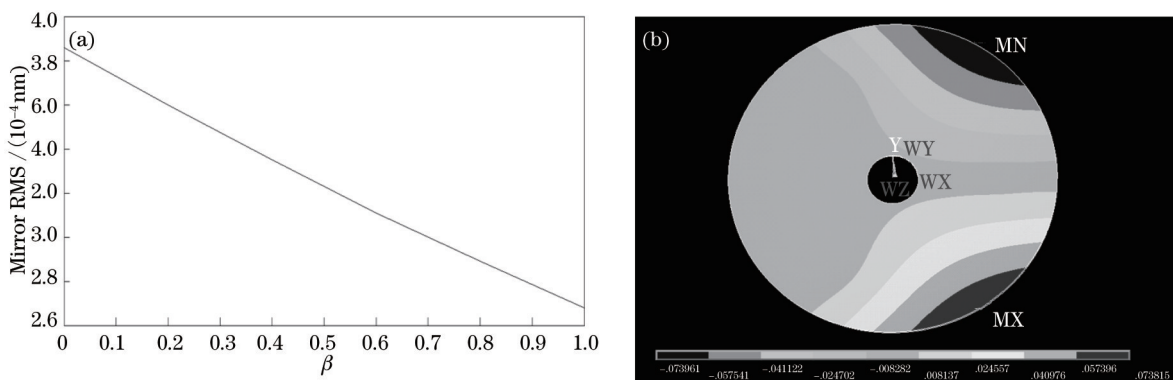


图 7 A 侧支撑方案优化过程。(a) β 优化过程; (b) $\beta = 1$ 时主镜面形(单位:mm)

Fig.7 Optimization of lateral support A. (a) Optimization of β ; (b) primary mirror surface when $\beta = 1$ (unit: mm)

方案 C: $\beta = 0.5$, 64 个侧支撑点的径向和切向支撑力的合力方向竖直向上,侧支撑点处没有轴向分力,如图 8(c)所示。

方案 D: 仅由 4 个侧定位点支撑。

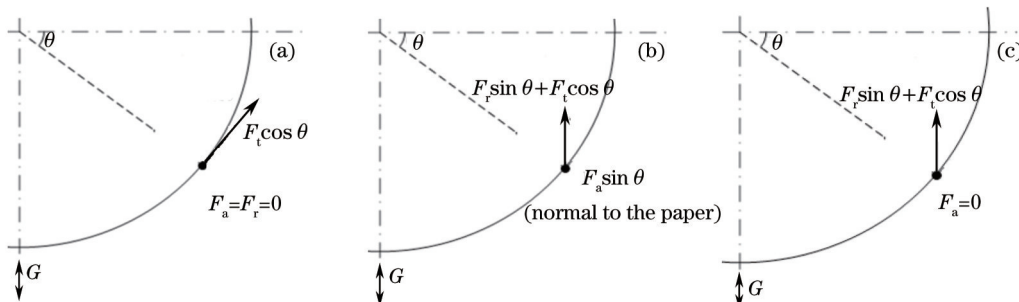


图 8 部分备选侧支撑方案示意图。(a) 方案 A; (b) 方案 B; (c) 方案 C

Fig.8 Schematic of partial alternative lateral supports. (a) Alternative A; (b) alternative B; (c) alternative C

下面将对上述所有方案进行对比,选出 8m 薄主镜的最佳侧支撑方案。

4.5 侧支撑方案的比较与选择

首先利用有限元方法,并考虑主镜的能动校正效果,计算出各方案的支撑效果如表 3 所示。

表 3 5 种侧支撑方案的支撑效果

Table 3 Effectivenesses of 5 alternative lateral supports

Lateral support	β	Component of support forces	Mirror RMS /nm (before active correction)	Mirror RMS /nm (after active correction)	Correction force [MIN,MAX] /N
Optimum support	0.752	Radial, axial and tangential	22.6	5.6	[-16.1,16.4]
A	1	Tangential	27070	19.2	[-318.9,301.4]
B	0.5	Vertical and axial	4012	36.3	[-721.1,739.4]
C	0.5	Vertical	32642	75.1	[-1685.3,1915.7]
D	None	None	27487	58.5	[-1089.0,1140.4]

为选出最佳 8 m 薄主镜侧支撑方案,对上述 5 种备选方案主要从以下 3 个方面进行对比: 1) 支撑结构的复杂程度; 2) 能动校正后的镜面 RMS 值大小; 3) 能动校正所需校正力的范围大小。比较结果如表 4 所示。

表 4 5 种备选侧支撑方案比较

Table 4 Comparison of the 5 alternative lateral supports

Lateral support	Structure complexity	Mirror RMS (after active correction)	Correction force
Optimum Support	Complex	Smallest	Smallest
A	Simple	Small	Small
B	Medium	Large	Large
C	Simple	Largest	Largest
D	Simplest	Large	Large

从表 3 和表 4 可以看到,最优侧支撑无论是能动校正后的镜面 RMS 值(残余 RMS 值)还是校正力范围都是最小的,在所有方案中支撑效果最佳,但其支撑结构过于复杂,难以实现,不适合选为最佳方案;方案 B 支撑结构较最优支撑简单,但残余 RMS 值过大,因此也不适合选为最佳侧支撑方案;方案 C 和 D 支撑结构简单,但残余 RMS 值和能动校正所需校正力均太大,因此也被弃选。

综合考虑,由于方案 A 具备支撑结构简单(仅需施加切向的支撑力),残余 RMS 值小(仅 19.2 nm),校正力范围也较小(-318.9~301.4 N)等诸多优点,8 m 薄主镜侧支撑方案选定为方案 A,即 $\beta = 1$,侧支撑力仅为切向支撑力。

8 m 薄主镜的最终侧支撑方式如图 9 所示,共有 64 个侧支撑点,均匀分布在主镜外侧边缘面上,每个侧支撑点仅施加切向的支撑力。

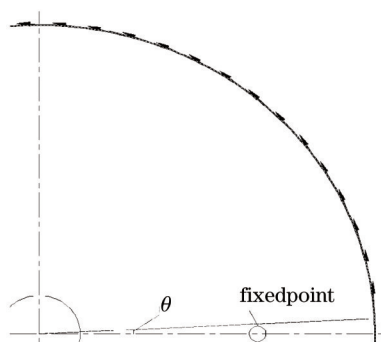


图 9 8 m 薄主镜的侧支撑示意图(第一象限)

Fig.9 Schematic of the lateral support for the 8 m thin primary mirror (in the first quadrant)

4.6 纯切向力侧支撑与传统 push-pull-shear 侧支撑的对比

表 5 对 8 m 薄主镜采用纯剪切力侧支撑与传统 push-pull-shear 侧支撑(即最优侧支撑)两种侧支撑方式的效果进行了对比。从表 5 可以看出:一方面,虽然相比传统 push-pull-shear 侧支撑,采用纯切向力侧支撑的薄主镜经能动校正后的面形 RMS 值更高,所需要的校正力也更大,但实际上这两个参数的值仍然处在一个比较低的水平(RMS 值小于 $\lambda/30$, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,校正力范围仅约为 -300~300 N),满足设计要求;另一方面,传统 push-pull-shear 侧支撑每个侧支撑点处的支撑力都包含径向、切向和轴向三个方向的分力,必须采用非常复杂的支撑结构,实现起来较为困难,而纯切向力侧支撑方式每个侧支撑点处仅需要施加一个切向的支撑力,极大简化了支撑结构,更便于工程实现。综合考虑,纯切向力侧支撑方案是更好的选择。

表 5 纯切向力侧支撑与最优侧支撑比较

Table 5 Comparison of tangential lateral support and optimum support

Lateral Support	Component of support forces	Mirror RMS /nm (after active correction)	Correction force [MIN,MAX] /N
Tangential lateral support	Radial, axial and tangential	5.6	[-16.1,16.4]
Optimum support	Tangential	19.2	[-318.9,301.4]

图 10 给出了 8 m 薄主镜采用上述两种侧支撑方式时,经能动校正后的主镜面形(主镜竖直放置)。从图中可以看出,采用两种侧支撑方式的薄主镜经过能动校正之后均具有较佳的面形,校正后的镜面 RMS 小于 $\lambda/30$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),镜面变形的峰值主要集中于主镜外侧边缘附近。

5 结 论

对薄主镜的 push-pull-shear 侧支撑及能动校正原理进行了介绍,随后运用 push-pull-shear 原理,针对一块 8 m 口径薄主镜,设计了 5 种备选侧支撑方案,同时考虑主镜的能动校正能力,借助有限元计算对它们进行了分析和比较,选出了一种最佳方案。该方案共包含 64 个仅施加纯切向支撑力的侧支撑点,均匀分布于薄主镜侧边缘面上。当薄主镜竖直放置时,主镜能动校正后的镜面 RMS 值为 19.2 nm,校正力范围为 -318.9~301.4 N。与传统 push-pull-shear 侧支撑方式相比,该侧支撑方案结构简单,易于实现,同时支撑效果良好。设计过程对不同口径的薄主镜侧支撑设计均具有一定的普适性,对大口径薄主镜侧支撑设计工作具有一定的参考价值。

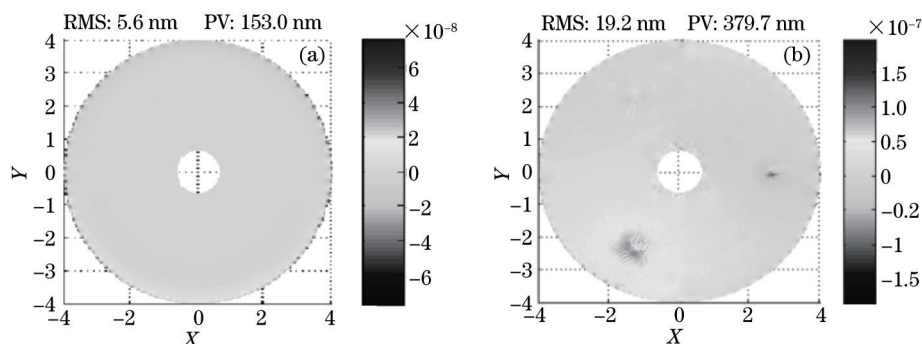


图 10 8 m 薄主镜分别采用最优侧支撑与纯切向力侧支撑时,能动校正后的面形。(a) 最优侧支撑;(b) 纯切向力侧支撑。

Fig.10 8 m thin primary mirror's surfaces after active correction when adopting optimum support and tangential lateral support respectively. (a) Optimum support; (b) tangential lateral support

参 考 文 献

- 1 Cheng Jingquan. Principles of Astronomical Telescope Design[M]. Beijing: Chinese Science & Technology Press, 2003: 65-71.
- 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: 65-71
- 2 G Schwesinger. Lateral support of very large telescope mirrors by edge forces only[J]. Journal of Modern Optics, 1991, 38(8): 1507-1516.
- 3 R N Wilson, F Frauza, L Noethe, *et al.*. Active optics I-A system for optimizing the optical quality and reducing the costs of large telescopes[J]. Journal of Modern Optics, 1987, 34(4): 485-509.
- 4 Noethe L, Franza F, Giordano P, *et al.*. Active optics II-Results of an experiment with a thin 1 m test mirror[J]. Journal of Modern Optics, 35(9): 1427-1457.
- 5 Noethe L, Franza F, Giordano P, *et al.*. Active optics III-Final results 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.
- 6 R N Wilson, F Frauza, L Noethe, *et al.*. Active optics IV-Set-up and performance of the optics of the ESO new technology telescope (NTT) in the observatory[J]. Journal of Modern Optics, 1991, 38(2): 219-243.
- 7 E D Knohi. VLT primary support system[C]. SPIE, 1994, 2199: 271-283.
- 8 Larry M Stepp, Eugene Huang, Myury K Cho. Gemini primary mirror support system[C]. SPIE, 1994, 2199: 223-238.
- 9 M Iye, K Kodaira. Primary mirror support system for the SUBARU telescope[C]. SPIE, 1994, 2199: 762-772.
- 10 Li Hongzhuang, Zhang Zhenduo, Wang Jianli, *et al.*. Active surface-profile correction of 620 mm thin-mirror based on flotation support[J]. Acta Optica Sinica, 2013,33(5): 0511001.
- 李宏壮, 张振铎, 王建立, 等. 基于浮动支撑的 620 mm 薄反射镜面形主动校正[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0511001.
- 11 C Neufeld, V Bennett, A Sarnik, *et al.*. Development of an active optical system for the SOAR telescope[C]. SPIE, 2004, 5489: 1052-1060.
- 12 A McPherson, A J Born, W J Sucherland, *et al.*. The VISTA project, a review of its progress and lessons learned developing the current programme[C]. SPIE, 2004, 5489: 638-649.
- 13 M K Cho, R S Prica, I K Moon. Optimization of the ATST primary mirror support system[C]. SPIE, 2006, 6273: 62731E.
- 14 S Stanghellini, P Legrand, S Baty, *et al.*. Design and construction of the VLT primary mirror cell: support of the large, thin primary mirror[C]. SPIE, 1997, 2871: 314-325.
- 15 P Schipani, S Dorsi, L Ferragina, *et al.*. Active optics primary mirror support system for the 2.6 m VST telescope[J]. Applied Optics, 2010, 49(8): 1234-1241.