

弯月薄镜的切向侧支撑设计研究

吴小霞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 针对主动光学系统中的 $\phi 620\text{mm}$ 弯月薄镜设计了双向柔性侧支撑结构, 从理论上分析了薄镜切向侧支撑方式的工作原理和支撑力的分布情况, 并采用有限元法计算出望远镜指向水平时薄镜所受侧支撑力的大小和方向, 验证了受力分析的正确性。通过有限元计算出不同俯仰角下, 切向侧支撑方式和轴向主动支撑共同作用时薄镜校正前后的镜面面形的变化情况。当望远镜指向水平时, 薄镜镜面变形最大, 经过主动校正后的镜面面形误差 RMS 值为 14.1nm , 满足设计指标要求。

关键词: 主动光学; 弯月薄镜; 切向侧支撑; 有限元法; 主动校正

中图分类号: TH745

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870 (2011) 01-0053-04

Design Research on Tangent Lateral Support of Thin Meniscus Mirror

WU Xiaoxia

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

Abstract: A double-direction flexure lateral support system was developed for the 620mm thin meniscus mirror of an active optics telescope. (Axial tensile stiffness and two-direction flexibility of the flexure lateral support system were estimated by finite element analysis). The action principle of the tangent lateral support mode was described, and the tangent support force was analyzed in theory. With application of finite element method, the support force values and directions were calculated when the telescope pointing to horizon, and the result verified the validity of stress analysis. With tangent lateral supports and axial active supports, the thin mirror deformations at different pitch angles were calculated. The surface figure deformation reaches maximum at the 90° pitch angle, and the root-mean-square (RMS) value is 14.1nm after active correcting with axial force actuators. It satisfies the design requirement.

Key words: active optics; thin meniscus mirror; tangent lateral support; finite element method; active correction

薄镜面主动光学是地基大口径光电望远镜的一项关键技术, 国外从二十世纪六十年代就开始研究, 并成功应用于许多大口径地基望远镜中^[1-3], 我国在主动光学技术上的研究起步较晚^[4-8]。为了将薄镜面主动光学技术在大口径地基光电望远镜工程中得以应用, 国内还需进一步研究薄镜面的支撑结构, 即轴向支撑和侧向支撑。

弯月薄镜的轴向支撑通常采用各种力促动器, 侧向支撑的形式和结构则多种多样, 从弯月薄镜的

受力情况进行分类, WHT 望远镜的 $\phi 4.2\text{m}$ 主镜采用的是侧向均匀承重侧支撑方式^[2], NTT 望远镜的 $\phi 3.5\text{m}$ 主镜采用了径向等间距推-拉侧支撑^[1], ATST 望远镜的 $\phi 4.2\text{m}$ 主镜采用了外边缘等间距推-拉-剪切侧支撑^[3], VLT 望远镜的 $\phi 8.2\text{m}$ 主镜则采用了外边缘不等间距推-拉-剪切侧支撑方式^[1]。本文针对某主动光学望远镜系统中的 $\phi 620\text{mm}$ 弯月薄镜, 设计一种等间距切向推-拉侧支撑方式, 采用 6 组双向柔性侧支撑结构均布在薄镜外圆周上。在分

收稿日期: 2010-08-03

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目

作者简介: 吴小霞 (1981-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事大口径望远镜的主动光学技术及有限元分析技术方面的研究, E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com

析其切向侧支撑的原理和侧支撑力的分布情况后,采用有限元分析验证侧支撑力的大小和方向,并预算弯月薄镜在这种侧支撑方式下的镜面变形情况。

1 切向柔性侧支撑结构

该望远镜中的弯月薄镜的外径为 $\phi 620\text{mm}$,中心孔 $\phi 170\text{mm}$,镜面曲率半径为 2841mm ,径厚比为 $34.4:1$ 。镜坯为K9材料,镜重为 12.75kg 。

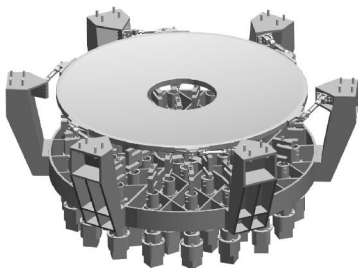


图1 薄镜轴向和侧向支撑

Fig.1 Axial and lateral supports of thin meniscus mirror

弯月薄镜支撑系统如图1所示,轴向支撑系统包括分布在3个支撑圈上的36组力促动器,侧向支撑系统则采用了6个如图2所示的柔性侧支撑结构组件。组件的侧支撑垫粘接在弯月薄镜外圆周面上,另一端通过安装座与镜室固定,通过调整调节螺母可以实现侧支撑结构轴向长度的调整,从而实现切向侧支撑力的调节。

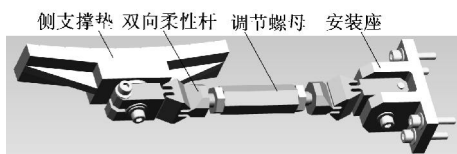


图2 柔性侧支撑组件

Fig.2 Structure of flexure lateral support

2 切向侧支撑的原理

侧支撑组件分布的原理如图3所示,X轴为望远镜水平轴方向,Z轴为光轴方向,Y轴根据右手定则确定。切向柔性侧支撑组件L1~L6在薄镜外圆周上呈逆时针方向均匀排布,L1和L4对薄镜的切向支撑点在Y轴上,是用于保持稳定性和抵御地震等外界振动载荷,不承担薄镜重量。这6个侧支撑组件形成两组交叉的动力学3点支撑系统,每个系统包含三个等间距排布的切向柔性支撑结构组件,如图中的等边三角形ABC所包含的L1、L3和L5三组柔性侧支撑组件在薄镜外圆周上等间距排布,形成一组三点支撑系统。

望远镜指向任意俯仰角,轴向支撑和侧支撑共

同作用。结合图2中侧支撑组件的结构可见,柔性侧支撑组件在薄镜的光轴方向上是柔性的,薄镜所受中光轴方向(Z向)上的重力分量会使薄镜具有Z向上的运动趋势,但轴向支撑力促动器的存在阻止了这一趋势的发生;柔性侧支撑组件在薄镜的径向上也是柔性的,则重力在镜面内的分量会使每一个柔性侧支撑结构组件具有图3中双键头线所示的径向运动趋势。

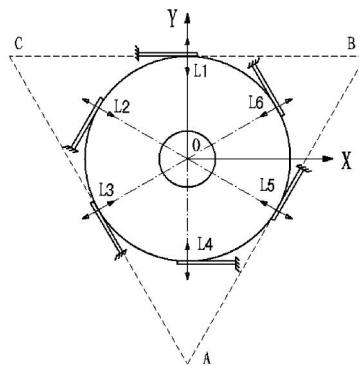


图3 切向侧支撑工作原理

Fig.3 Action principle of tangent lateral support system

等边三角形ABC所包含的L1、L3和L5三组柔性侧支撑组件在薄镜外圆周上等间距排布,3个柔性侧支撑组件各自的径向运动方向应交于一点,并且这个交点刚好是薄镜的中心点O。若只有柔性侧支撑结构组件L3和L5作用,薄镜的运动趋势方向可看作为绕着A点转动。此时薄镜在与L1连接处的运动方向刚好与L1的轴线方向相同,由于L1在轴线方向上是刚性的,所以,L1的存在阻止了薄镜绕A点转动趋势的发生。依此类推,可以证明薄镜在这种切向柔性侧支撑方式下在该平面内不会发生平移和转动,即解释了该薄镜支撑系统无需采用3个硬点定位。这就是该侧支撑方式的工作原理。

当温度发生变化的时候,薄镜将会沿着光轴和半径方向膨胀或者收缩,由于镜室及支撑结构组件中各零件的热膨胀系数与薄镜不同,则镜室和支撑结构在光轴和半径方向上的膨胀或缩小量与薄镜不等。光轴方向上的热变形量不匹配问题可以通过轴向主动支撑力促动器的调节得以解决,半径方向上的热变形不匹配导致的侧向支撑结构对薄镜产生热应力作用则可通过侧向支撑结构上柔性环节的弹性变形来明显削弱。

薄镜除了沿光轴和半径方向上膨胀或者收缩外,还会围绕光轴产生一个微小的转动,这是由于温度变化引起侧向支撑结构长度方向上的变形而产生的。其转角大小为:

$$\theta = \frac{\sum L_i \alpha_i \Delta T}{R} \quad (1)$$

其中 L_i 和 α_i 分别为侧支撑组件中各个零件的轴向长度和热膨胀系数, ΔT 为温度变化范围, R 为薄镜的外圆半径。由于薄镜的 6 组侧向支撑结构呈逆时针方向排布, 侧支撑长度变化的方向一致, 因此不会因为 6 个侧支撑点的变形方向不同而使得薄镜产生像散, 只会产生微小的转动。由于薄镜是轴对称的, 所以这种转动并不影响光学系统的成像质量, 且转动对轴向支撑结构的影响也可以由力促动器中的柔性环节来实现补偿。

这种柔性侧支撑结构相当于一种被动隔离装置, 主要隔离支撑系统对光学元件的机械和热作用, 以此来减小这些作用对光学元件的影响。

3 切向侧支撑力的计算

如图 4 所示, 望远镜系统指向水平时, 弯月薄镜所受重力为 $-Y$ 向, 侧支撑结构对薄镜的切向支撑力如图中所示。L1 和 L4 两侧支撑组件不承担薄镜重量, 因此 F_4 和 F_1 应为零。根据力平衡方程有:

$$\begin{cases} (F_2 + F_6 + F_3 + F_5) \times \sin 60^\circ = G \\ (F_2 - F_6 + F_3 - F_5) \times \sin 30^\circ = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 G 为薄镜重量, 当望远镜俯仰角为 θ 时, 侧支撑在 Y 向的合力即为 $G \sin \theta$ 。假设所有的侧支撑组件刚度一致, 则由结构和边界条件的对称性可知侧支撑力 F_2 、 F_3 、 F_5 和 F_6 在数值上是相等的。可以得出望远镜指向水平时这四组侧支撑组件所提供的切向侧支撑力的大小均为 36.107N。

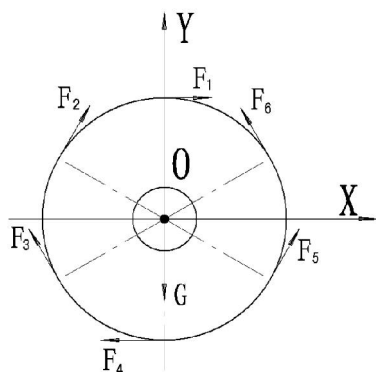


图 4 薄镜竖直状态下的受力分析

Fig.4 Stress analysis of thin meniscus mirror when telescope pointing to horizon

为验证以上受力分析, 建立了如图 5 所示的有限元模型, 其轴向主动支撑 36 组力促动器采用等刚度的弹簧单元代替, 柔性侧支撑变截面梁单元,

约束轴向和侧向支撑与主镜室相连位置的自由度, 计算出当望远镜指向水平时 6 个侧支撑力的大小和方向如表 1 中所列。有限元计算结果验证了上述的受力分析的正确性。

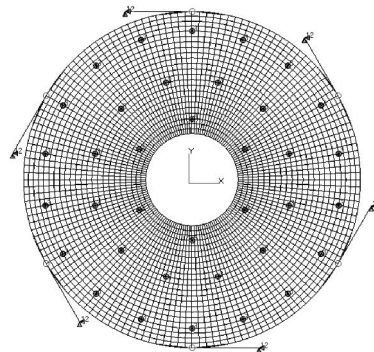


图 5 薄镜及其支撑系统的有限元模型

Fig.5 Thin meniscus mirror FE model with axial and lateral supports

表 1 切向侧支撑力的有限元计算结果

Tab. Finite element computed result of the tangential lateral strength

侧支撑	支撑力(N)	与+X 轴的夹角(°)
L1	0.00002	90.00015
L2	36.11115	60.00002
L3	36.11115	120
L4	0.00002	90.00018
L5	36.11115	59.99999
L6	36.11115	120

4 侧支撑作用下的镜面变形

对于弯月薄镜而言, 其侧支撑对薄镜的作用与

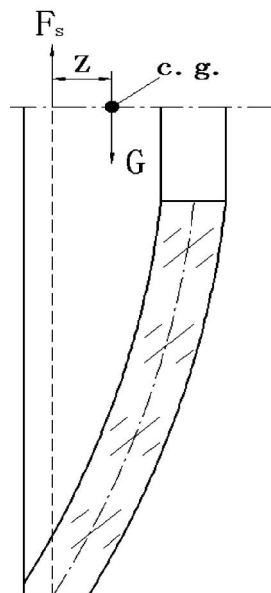


图 6 弯月薄镜的重心位置

Fig.6 Gravity center of thin meniscus mirror

传统被动支撑主镜不同。如图 6 所示,由于弯月形薄镜的重心(c.g.)往往不在薄镜镜体上,安装在薄镜外边圆上的侧支撑装置对薄镜的侧支撑合力 F_s 难以通过镜面的重心,此时薄镜就会承受附加的弯矩,从而产生较大的镜面倾斜变形,如图 7 中的镜面变形云图所示,该倾斜分量会影响望远镜的指向精度。为了尽可能减少薄镜的弹性变形校正量(主动校正量),一般情况下凡是可以次镜的刚体位移改正的,最好由次镜来进行改正,例如主镜的平移、倾斜、轴向离焦等。因此该侧支撑方式引起的薄镜倾斜分量无需轴向主动支撑系统的主动校正,可通过调整望远镜系统中的次镜来进行改正。

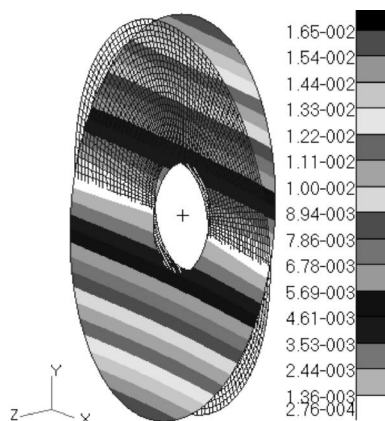


图 7 侧支撑引起的薄镜倾斜变形

Fig.7 Mirror deformation due to the lateral supports

当望远镜俯仰角 θ 变化时,侧支撑系统承担的镜重不同,侧支撑带来的附加弯矩

$$M = F_s z = G \sin \theta \cdot z \quad (2)$$

引起的薄镜倾斜分量也会不断变化。当望远镜指向水平 ($\theta=90^\circ$) 时,通过分析计算出侧支撑引起的主镜倾斜分量为 $0.14''$,去除变形中的倾斜分量,计算出此时镜面面形误差 RMS 值为 25.4nm 。

去除倾斜分量后,利用轴向主动支撑的主动校正能力将其他像差分量进行主动校正。当望远镜指向水平,计算出力促动器第一次主动校正后薄镜镜面面形误差 RMS 值为 17.1nm ,二次校正后镜面面形误差 RMS 值降为 14.1nm 。其它俯仰角下,轴向和侧向支撑共同作用的镜面面形 RMS 值及主动校正后的镜面面形 RMS 值的变化情况见图 8 所示。

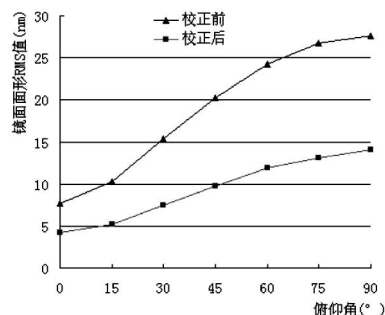


图 8 俯仰角不同时薄镜面形的变化曲线

Fig.8 Mirror deformations before and after active correction at different pitch angles

5 结论

本文针对主动光学系统中的 $\phi 620\text{mm}$ 薄镜设计一种切向侧支撑方式,6 组柔性侧支撑结构均匀分布在薄镜外圆周上,该侧支撑方式下的薄镜无需芯轴或轴向硬点定位。该侧支撑结构能够补偿机械和热作用对薄镜带来的影响。

望远镜指向水平时,切向侧支撑和轴向主动支撑共同作用时,薄镜变形最大,经过力促动器校正后的薄镜面形误差 RMS 值为 14.1nm ,小于 $\lambda/40$ ($\lambda=632.8\text{nm}$),满足设计指标要求,预示该侧向支撑方案合理可行。

参考文献

- [1] Noethe L, Andreoni G, Franza F et al. Latest developments of active optics of the ESO NTT and the implication for the ESO VLT[J]. SPIE, 1991, 1542: 293-296.
- [2] Bokserberg A. The William Herscher telescope[J]. Vistas in Astronomy, 1985, 28:531-553.
- [3] Myung K C, Ronald S P. Optimization of the ATST primary mirror support system[J]. SPIE, 1998, 3352: 400-411.
- [4] Su Ding-qiang, Jiang shengtao, Zou weiyao et al. Experiment system of thin-mirror active optics[J]. SPIE, 6273: 62731E.
- [5] 崔向群, 李新南, 张振超, 等. 大口径天文薄镜面磨制试验[J]. 光学学报, 2005, 25(7): 965-969.
- [6] 于洋, 曹根瑞. 主动光学反射镜面形的校正能力及其优化设计[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(2): 229-233.
- [7] 李宏壮, 林旭东, 刘欣悦, 等. 400mm 薄镜面主动光学实验系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2076-2083.
- [8] 陈育伟, 何志平, 胡以华, 等. 主动光学系统的计算机辅助光校方法研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(1): 54-57.