

子镜面内位移对中国巨型太阳望远镜主镜控制的影响

郭 泰^{1,4,5}, 戴懿纯^{1,4}, 许方宇^{1,2,4*}, 罗永芳³, 陈 骥³, 金振宇^{1,2,4}

¹中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

²云南省应用天文技术工程实验室, 云南 昆明 650216;

³云南北方驰宏光电有限公司, 云南 昆明 650217;

⁴中国科学院天文大科学研究中心, 北京 100012;

⁵中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对中国巨型太阳望远镜(CGST)的 8 m 环形太阳望远镜(8m-RST)设计方案,建立了其边缘传感器和光学传感器响应子镜面内位移量的模型,进而分析了子镜面内位移对环形拼接主镜面形保持的影响。考虑了望远镜桁架因望远镜指向和温度改变所引起的子镜面内位移量,发现该位移量会破坏 8m-RST 的面形保持效果。为解决面内位移对 8m-RST 面形保持的不利影响,提出了相应的主镜控制模型改进方案。改进方案是:通过在子镜拼缝处加装两组间隙量传感器和一组剪切量传感器,利用增加的探测量估算子镜的面内位移量,进而修正边缘传感器与光学传感器的设定值。当间隙量和剪切量的探测精度优于 23 nm 时,改进方案可以满足 CGST 的 8m-RST 方案的面形保持要求。

关键词 光学设计; 主动光学; 中国巨型太阳望远镜; 拼接镜面; 系统建模

中图分类号 TH751 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1222002

Effects of In-Plane Displacement on Primary Mirror Control of Chinese Giant Solar Telescope

Guo Tai^{1,4,5}, Dai Yichun^{1,4}, Xu Fangyu^{1,2,4}, Luo Yongfang³, Chen Ji³, Jin Zhenyu^{1,2,4}

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China;

²Yunnan Astronomical Technology Engineering Laboratory, Kunming, Yunnan 650216, China;

³Yunnan KIRO-CH Photoelectric Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650217, China;

⁴Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁵University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Against the design scheme of 8 m ring solar telescope (8m-RST) of Chinese Giant Solar Telescope (CGST), the model of the edge sensor and optical sensor response in segments displacement is established, and the influence of the segments in-plane displacement on the surface shape of ring segmented primary mirror is analyzed. Considering the segments' displacement introduced by zenith angle change and temperature change for telescope truss, it's found that the displacement will destroy the effect of surface shape keeping of 8m-RST. To avoid the adverse effect of the in-plane displacement on 8m-RST, an improvement plan of the corresponding control model for the primary mirror is proposed. Which is correcting the set value of the edge sensor reading and the optical sensor reading, by adding two groups of gap sensor and one group of shear sensor among the edge of neighbor segments and using increased detection amount to estimate the in-plane displacement. When the detection accuracy of the gap and shear is less than 23 nm, the improved plan can meet the surface shape requirement of 8m-RST scheme for CGST.

Key words optical design; active optics; Chinese Giant Solar Telescope; segmented mirror; system modeling

OCIS codes 220.1080; 110.6770; 220.1140; 220.4830

收稿日期: 2017-06-22; 收到修改稿日期: 2017-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(11573068, 11303090, U1431122)

作者简介: 郭 泰(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事拼接镜面主动光学技术、精密运动控制方面的研究。

E-mail: guotai@ynao.ac.cn

导师简介: 金振宇(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事天文技术与方法、天文高分辨观测技术等方面的研究。

E-mail: kim@ynao.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: xu_fangyu@ynao.ac.cn

1 引 言

中国巨型太阳望远镜(CGST)计划在 $1\ \mu\text{m}$ 波段实现太阳表面精细结构的观测,即要求其分辨率口径达到 $8\ \text{m}$ 。 $8\ \text{m}$ 环形太阳望远镜(8m-RST)方案以其主焦点离开主镜入射光路、光路对称、分辨率等同于 $8\ \text{m}$ 全孔径望远镜等优点,成为 CGST 最具代表性的设计方案。 8m-RST 计划使用 24 块面积约 $1\ \text{m}^2$ 的等腰梯形子镜拼接实现一个外径约 $8\ \text{m}$ 、环宽约 $1\ \text{m}$ 的环形抛物面镜作为其主镜^[1-2]。

已建成或计划建造的 Keck 望远镜、加那利大型(GTC)望远镜、欧洲极大天文望远镜(E-ELT)、三十米望远镜(TMT)等望远镜均采用近似正六边形的子镜拼接形成全孔径的望远镜主镜^[3]。工况中地基拼接镜面望远镜的指向、温度及风载改变会引起子镜位置失调。为使拼接镜面在工况中保持有效面形,前述望远镜均设有主镜控制系统(MICS)以保持主镜面形^[4-7]。每个子镜背面安装三组位移促动器,该促动器是主镜控制系统的执行机构,用于调节子镜的离面自由度,离面自由度包括两个方向的倾斜和轴向平移;拼缝处安装的成对的边缘传感器是主镜控制系统的反馈,用于检测子镜边缘的相对高度差,主镜完成共相调节后会校准所有的边缘传感器读出;子镜的侧支撑负责约束子镜的三个面内自由度,三个面内自由度包括两个方向的面内平移和面内旋转,子镜的面内位移不做主动调节;主镜控制系统认为边缘传感器读出趋向于零就保持了主镜的面形。但是,大口径拼接镜面的子镜面内位移约束并非理想。受望远镜指向和温度变化的影响,拼接主镜的子镜间产生随时间的变化相对面内位移量可达数十微米^[8-9]。首先,子镜相对面内位移导致子镜拼缝发生相对剪切运动和间隙改变。剪切运动和间隙改变会影响边缘传感器的读出及增益^[10],使传感器的读出与实际的拼缝高度差不一致,致使系统执行错误。Shelton 等^[11]提出的校准方法可以显著抑制子镜面内位移引起的边缘传感器读出漂移。另外,也可采用其他边缘传感器形式使其对剪切运动和间隙改变不敏感^[4,12-13]。其次,子镜相对面内位移导致子镜拼缝处高度差非零,其主要原因是主镜并非平面或球面。如果主镜控制系统让边缘传感器读出趋于零,即使得拼缝处镜面高度差趋于零,会让这种错误累及整个镜面。针对此问题,Macmynowski 等^[14]提出了改进的主镜控制方法,其主要思想是:利用拼缝间隙量的探测估计子镜面内位移量,进一步估计边缘传感器处应有的高度差,并将传感器的控制目标改为这个估计出的高度差。

CGST 的 8m-RST 方案是典型的环形干涉望远镜(RIT)^[15]形式。其主镜控制系统有别于前述全孔径拼接镜面望远镜,需要同时使用边缘传感器提供实时子镜拼缝高度差和 Hartmann-Shack(H-S)探测器提供的实时子镜相对倾斜量才能获得足够的离面自由度信息以完成面形保持闭环控制^[16-19]。基于 8m-RST 的控制模型分析发现,子镜的面内位移同样会对其面形保持造成不良影响。因此分析和解决子镜面内位移对 8m-RST 主镜控制的影响面临新的挑战。第一, 8m-RST 的子镜是等腰梯形顺序排列,子镜的拼缝处进行高度差、间隙量及剪切量的相对测量具有其自身的特点,需要针对其具体情况建立边缘传感器的响应模型。第二, 8m-RST 利用光学手段获取实时的镜面相对倾斜,子镜面内位移造成光学表面产生等效倾斜^[20],该现象会影响光学传感器的读出,其也要在 8m-RST 的主镜控制系统中进行分析讨论。第三,Macmynowski 的控制方法依赖拼缝处间隙量的探测能力,TMT 仅通过间隙量的探测基本可以满足对子镜面内位移的估计,而 8m-RST 仅加装 48 对间隙传感器无法满足其 72 个面内自由度位移量的估计。所以,需要对 8m-RST 的控制方案提出针对性的改进方法,并论证其可行性。本文围绕 8m-RST 面临的三个挑战进行研究。首先,简要介绍了 CGST 的 8m-RST 方案及其传统的主镜控制模型。然后,针对 8m-RST 的特点分析子镜面内位移引起的拼缝处高度差及光学表面等效倾斜,并结合各种传感器的特性建立其响应模型。通过分析可知子镜相对面内位移量的均方根(RMS)小于 $45\ \text{nm}$ 时,原有 8m-RST 主镜控制方法才能有效工作。最后,提出针对 8m-RST 的主镜控制模型的改进方案,即在边缘传感器处加装间隙量传感器,在子镜拼缝中段加装剪切量传感器,结合间隙量和剪切量可以实现全体子镜的面内位移量的估算,从而得到 8m-RST 面形保持的控制目标。证明了该改进方案可以满足 8m-RST 估算子镜面内位移量的要求,同时得到其对间隙量与剪切量的探测精度要求,即间隙量与剪切量探测精度应优于 $23\ \text{nm}$,故其为一种可行的改进方案。围绕讨论的主要内容不考虑其他干扰与噪声对控制的影响,仅进行模型的准静态分析。

2 CGST 的主镜控制系统

如图 1 所示,CGST 的 8m-RST 方案采用 24 块长底 1040 mm、短底 779 mm、高 1015 mm 的等腰梯形子镜顺次相邻(相邻子镜的拼缝为 3 mm)形成一个外直径 $D=8$ m、焦比 $F=1$ 、环宽约 1 m 的抛物面反射镜作为主镜。在全局直角坐标系 G 中,主镜光学表面的设计值用理想抛物面 $4DF=x^2+y^2$ 描述;该主镜的曲率半径 R 约为 16 m。CGST 期望在波长 $\lambda=1\ \mu\text{m}$ 以上实现接近衍射极限成像,则要求镜面面形误差的均方根小于 $\lambda/40=25\ \text{nm}^{[21]}$ 。

为了方便讨论,给每个子镜编号 $i(i=1,2,\dots,24)$ 并建立直角坐标系 M_i ,其坐标系原点 o_i 位于梯形的几何重心, z_i 轴为子镜的轴向(光学表面法线方向), x_i 轴为环的切向。则在 M_i 内可以定义如下变量来描述子镜的六自由度位移量: Δx_i 为子镜延 x_i 轴的平移量,切向平移; Δy_i 为子镜延 y_i 轴的平移量,径向平移; Δz_i 为子镜延 z_i 轴的平移量,轴向平移; $\Delta \theta_i$ 为子镜绕 x_i 轴的旋转量,径向倾斜; $\Delta \phi_i$ 为子镜绕 y_i 轴的旋转量,切向倾斜; $\Delta \psi_i$ 为子镜绕 z_i 轴的旋转量,面内旋转。

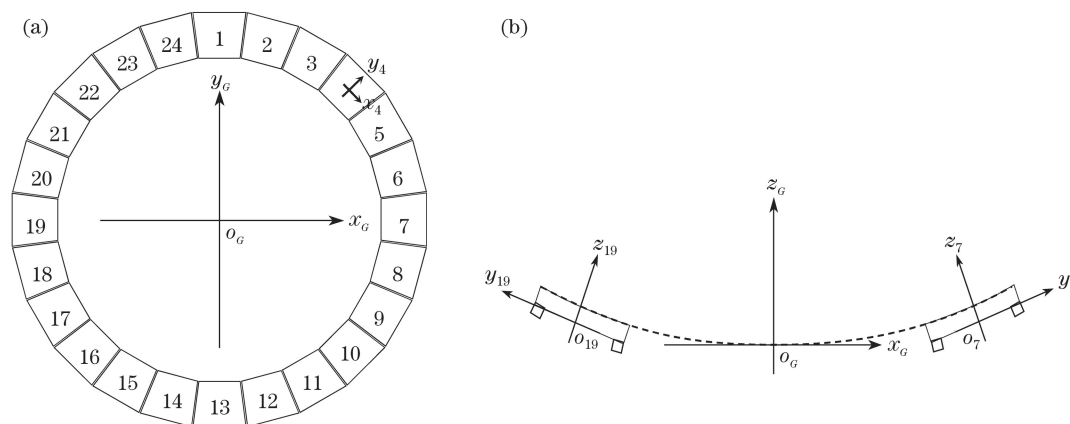


图 1 8m-RST 主镜及坐标系示意图。(a)顶视图;(b)前视图

Fig. 1 Schematic of the primary mirror of 8m-RST and coordinate system. (a) Top view; (b) front view

如图 2 所示,促动器(图中虚线圆)安装在子镜背部,呈等腰三角形排布,每个子镜的促动器安装方式是一致的;为各促动器编号 $k(k=1,2,3)$,总计 72 组促动器;促动器 1 和促动器 2 的连线平行于 x_i 轴,构成等腰三角形的底边,该等腰三角形底长 600 mm,高 600 mm;促动器执行量是自身长度的增量,通过三组促动器长度增量的组合,调节子镜的离面位移量。边缘传感器位于相邻子镜拼缝处的顶角背部(图中虚线矩形);每组边缘传感器由驱动端(图中灰色矩形)和接收端(图中白色矩形)组成,传感器的读出即反映驱动端与接收端之间的光学表面高度差,所以其方向是所装位置相对应的光学表面法向;分别为边缘传感器的驱动端和接收端做统一编号 $j(j=1,2,3,4)$,总计 48 组边缘传感器。8m-RST 的光学传感器(如 H-S 探测器)用于实时探测镜面的相对倾斜,光学传感器所探测的等效光学表面在图中用斜线阴影示意;光学传感器可以分别探测两个方向的镜面倾斜,所以 24 个区域即可以探测 48 个倾斜量;其测量值是以 1 号子镜为标准的相对倾斜量。

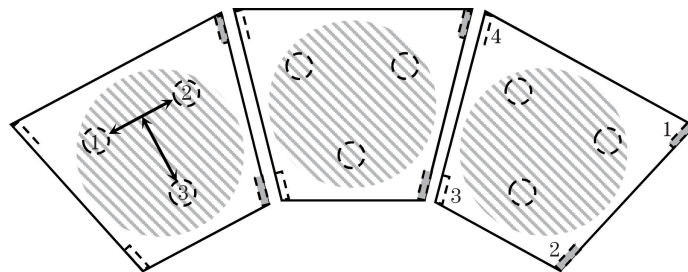


图 2 传感器与促动器的排布示意图(顶视图)

Fig. 2 Layout schematic of actuators and sensors (top view)

传统的 8m-RST 的主镜控制模型^[19]如图 3 所示。其中, \mathbf{a} 为 72 个促动器的执行量; \mathbf{r} 为理想的传感器的读出值, 由 48 对边缘传感器的读出 \mathbf{e} 和光学传感器探测的 48 个倾斜量 \mathbf{o} 两部分组成; \mathbf{A}_{ra} 是传递矩阵, 表示促动器执行量与传感器读出之间的线性关系; $\boldsymbol{\eta}$ 是系统的干扰与噪声; $\hat{\mathbf{r}}$ 为实际的传感器读出; \mathbf{A}_{ar} 是 \mathbf{A}_{ra} 的伪逆; $\hat{\mathbf{a}}$ 是对促动器执行量的估计; \mathbf{K} 是反馈系数或系统的控制器; 控制目标是 $\hat{\mathbf{r}}$ 的均方根最小。各变量的定义为

$$\begin{cases} \mathbf{a} = [a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \cdots & a_{i,k} & \cdots & a_{24,1} & a_{24,2} & a_{24,3}]^T \\ \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{o} \end{bmatrix} \\ \mathbf{e} = [h_{1,1} - h_{2,4} & h_{1,2} - h_{2,3} & h_{2,1} - h_{3,4} & h_{2,2} - h_{3,3} & \cdots & h_{24,1} - h_{1,4} & h_{24,2} - h_{1,3}]^T \\ \mathbf{o} = [t_{t1} - t_{p1} & t_{p1} - t_{t1} & t_{t2} - t_{p1} & t_{p2} - t_{p1} & \cdots & t_{t24} - t_{t1} & t_{p24} - t_{p1}]^T \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $a_{i,k}$ 为相应促动器的执行量; $h_{i,j}$ 为相应驱动端或接收端的高度, 因为是相对测量, 所以 \mathbf{e} 中的每一项均为高度的差值; t_{ti} 和 t_{pi} 分别是光学传感器读出的径向倾斜量和切向倾斜量, 该倾斜量不同于 $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\phi_i$, 其隐含了令光学传感器和边缘传感器精度相匹配的换算系数 p_0 。8m-RST 的光学传感器探测精度为 $0.02''$, 该角度使得拼缝处产生大约 50 nm 的相对高度差, 同边缘传感器的探测精度可以达到 5 nm^[16], 光学传感器的精度比边缘传感器低大约一个数量级, 即 $p_0 = 0.1$, 其关系为

$$\begin{cases} t_{ti} = p_0 \Delta\theta_i \\ t_{pi} = p_0 \Delta\phi_i \end{cases} \quad (2)$$

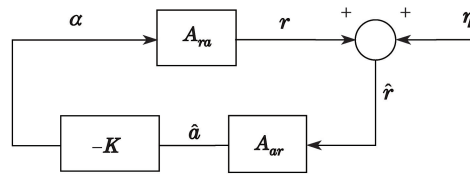


图 3 传统的 8m-RST 主镜控制模型框图

Fig. 3 Block diagram of traditional 8m-RST primary mirror control model

图 3 框图的数学模型可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{A}_{ra} \mathbf{a} \\ \hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r} + \boldsymbol{\eta} \\ \hat{\mathbf{a}} = \mathbf{A}_{ar} \hat{\mathbf{r}} \end{cases} \quad (3)$$

从图 1 和图 2 所示的子镜间关系及(1)式中的 \mathbf{a} 和 \mathbf{r} 的定义中可以看出 \mathbf{A}_{ra} 是具有规律的分块矩阵:

$$\mathbf{A}_{ra} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ea+} & -\mathbf{A}_{ea-} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{ea+} & -\mathbf{A}_{ea-} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_{ea+} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{A}_{ea-} & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_{ea+} \\ \mathbf{A}_{oa} - \mathbf{A}_{oa} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -\mathbf{A}_{oa} & \mathbf{A}_{oa} & 0 & \cdots & 0 \\ -\mathbf{A}_{oa} & 0 & \mathbf{A}_{oa} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{A}_{oa} & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_{oa} \end{bmatrix} \quad (4)$$

\mathbf{A}_{ra} 的上半部分是边缘传感器读出与促动器执行量之间的关系, 因为只在相邻子镜的拼缝处测量相对高度差, 对角线的非零子矩阵 \mathbf{A}_{ea+} 表示子镜 i 的传感器驱动端高度受促动器执行量的影响; 对角线上行和左

下角的非零子矩阵- \mathbf{A}_{ea-} 表示子镜 $i+1$ 的传感器接收端高度受促动器执行量的影响。 \mathbf{A}_{ra} 的下半部分是光学传感器读出与促动器执行量之间的关系,因为光学传感器读出均是以子镜 1 为标准的相对倾斜量,第一列的非零子矩阵- \mathbf{A}_{oa} 表示子镜 1 的倾斜量受促动器执行量的影响;其对角线的非零子矩阵 \mathbf{A}_{oa} 表示子镜 i 的倾斜量受促动器执行量的影响。利用已有的子镜尺寸与促动器安装尺寸,通过几何关系推导,可以计算得到 8m-RST 的 \mathbf{A}_{ea+} 、 \mathbf{A}_{ea-} 和 \mathbf{A}_{oa} 的具体数值为

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{ea+} = \begin{bmatrix} -0.184 & 1.51 & -0.331 \\ -0.707 & 0.630 & 1.08 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{ea-} = \begin{bmatrix} 1.51 & -0.184 & -0.331 \\ 0.630 & 0.707 & 1.08 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{oa} = \begin{bmatrix} 0.0833 & 0.0833 & -0.167 \\ 0.167 & 0.167 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

通过求取 \mathbf{A}_{ra} 的特征值和特征向量可知 \mathbf{A}_{ra} 的秩为 70,即存在两个特殊的模式无法被系统探测到,分别是:主镜轴向平移和焦点模式。如图 4 所示,主镜轴向平移即所有子镜相对位置不变,主镜整体出现延光轴的平移量;焦点模式即所有子镜具有一致的径向倾斜,导致主镜的等效焦距偏离子镜的设计加工值。主镜轴向平移会引起望远镜系统离焦,利用焦点探测与修正的方法可以解决该问题;焦点模式引起整镜焦距发生变化,通过光学传感器的输出估算全局的曲率半径变化可以实现抑制焦点模式。

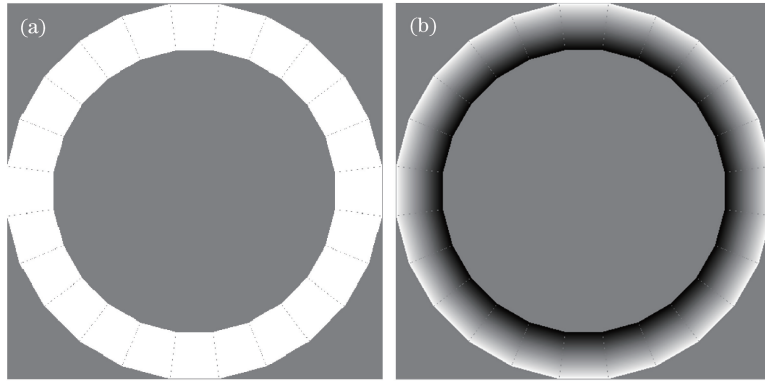


图 4 两种无法探测的模式。(a)主镜轴向平移;(b)焦点模式

Fig. 4 Two undetectable modes. (a) Axial shift of primary mirror; (b) focus mode

\mathbf{A}_{ra} 进行伪逆运算得到 \mathbf{A}_{ar} 。设 \mathbf{A}_{ar} 的误差因子为 α_{ar} ;而传感器读出误差的均方根与促动器执行量的均方根之间存在线性关系,表现为^[22]:

$$\alpha_{ar}^2 = \sum_{m=1}^{n_r} \frac{\omega_m^2}{n_r} \quad (6)$$

$$\delta \hat{a} = \alpha_{ar} \delta \hat{r} = \alpha_{ar} \delta \eta, \quad (7)$$

式中 $\{\omega_m\}$ 是 \mathbf{A}_{ar} 的非零特征值, n_r 为 \mathbf{A}_{ar} 的秩数; $\delta \hat{a}$ 为促动器执行量的均方根; $\delta \hat{r}$ 为传感器读出误差的均方根; $\delta \eta$ 为传感器读出的干扰与噪声的均方根;求得 $\alpha_{ar} = 12$ 。通过简单近似,认为促动器所安装的位置也是镜面误差的采样点位置,则 $\delta \hat{a}$ 可描述镜面的面形误差。根据 CGST 面形误差的要求即 $\delta \hat{a} \leq 25$ nm,结合(7)式可得:

$$\delta \eta = \frac{\delta \hat{a}}{\alpha_{ar}} \leq 2 \text{ nm}, \quad (8)$$

即传感器读出误差的均方根应小于 2 nm。

3 子镜面内位移对 CGST 主镜控制的影响

8m-RST 的边缘传感器安装于子镜的背面,特点是随镜面一起运动。光学传感器如 H-S 探测器,等效

为对子镜光学表面法线方向的倾斜量进行探测,是一种非接触式测量,特点是不跟随镜面运动。本节先针对边缘传感器和光学传感器分别讨论子镜相对面内位移对它们的影响,然后分析所有子镜面内位移对8m-RST主镜控制效果的影响。

为方便讨论,定义矢量 \mathbf{v} 表示子镜面内位移:

$$\mathbf{v} = [\Delta x_1 \quad \Delta y_1 \quad L \Delta \phi_1 \quad \cdots \quad \Delta x_{24} \quad \Delta y_{24} \quad L \Delta \phi_{24}]^T, \quad (9)$$

式中 L 为子镜面的线尺度,对于8m-RST采用 $L=1$ m。

3.1 子镜相对面内位移引起的边缘传感器高度差

如图5所示, X_j 是传感器 j 安装位置在 x_i 轴上投影的坐标; $h_{i,j}$ 是传感器平移量在高差方向上的投影量。利用相似三角形性质,得到子镜的切向平移量 Δx_i 与传感器位置 $h_{i,j}$ 的关系:

$$h_{i,j} = -\frac{X_j \Delta x_i}{\sqrt{R^2 + X_j^2}}. \quad (10)$$

同理,定义 Y_j 是传感器 j 安装位置在 y_i 轴上投影的坐标,可以求得径向平移量 Δy_i 与传感器位置 $h_{i,j}$ 的关系:

$$h_{i,j} = -\frac{Y_j \Delta y_i}{\sqrt{R^2 + Y_j^2}}. \quad (11)$$

面内旋转会在传感器的安装位置造成等效的平移量 $\Delta x'_{i,j}$ 和 $\Delta y'_{i,j}$:

$$\begin{cases} \Delta x'_{i,j} = -Y_j \Delta \phi_i \\ \Delta y'_{i,j} = X_j \Delta \phi_i \end{cases}. \quad (12)$$

将等效平移量同时代入(10)和(11)式得到面内旋转量 $\Delta \phi_i$ 与传感器位置 $h_{i,j}$ 的关系:

$$h_{i,j} = -\frac{X_j Y_j \Delta \phi_i}{\sqrt{R^2 + X_j^2}} + \frac{X_j Y_j \Delta \phi_{ij}}{\sqrt{R^2 + Y_j^2}}. \quad (13)$$

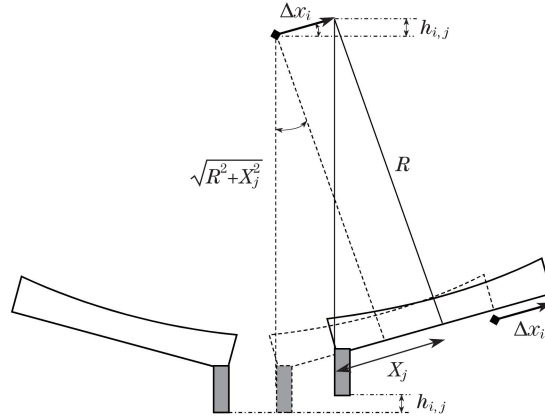


图5 子镜面内位移引起边缘传感器相对高度差的影响示意图(前视图)

Fig. 5 Effect of in-plane displacement on relative height difference of edge sensors (front view)

3.2 子镜面内位移的等效倾斜

子镜的面内平移可以造成光学表面局部发生等效的倾斜,该等效倾斜会被光学传感器检测到。如图6所示,平移量 Δx_i 导致子镜的光学表面发生等效的倾斜 $\Delta \phi'_i = \Delta x_i / R$ 。同理可知,平移量 Δy_i 导致子镜的光学表面发生等效的倾斜 $\Delta \theta'_i = -\Delta y_i / R$ 。则光学传感器的读出对子镜面内位移的响应为

$$\begin{cases} t_{vi} = p_0 \Delta \theta'_i = -p_0 \frac{\Delta y_i}{R} \\ t_{pi} = p_0 \Delta \phi'_i = p_0 \frac{\Delta x_i}{R} \end{cases}. \quad (14)$$

而子镜的面内旋转对于8m-RST不会造成等效的光学表面倾斜。

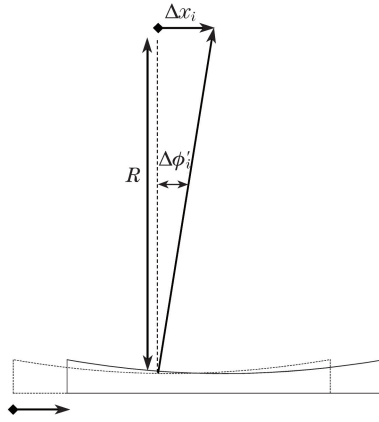


图 6 子镜面内位移对光学传感器读出的影响示意图(前视图)

Fig. 6 Effect of in-plane displacement on reading of optical sensors (front view)

3.3 子镜面内位移对 CGST 主镜控制系统的影响

由 3.1 节和 3.2 节的讨论可知传感器读出对子镜面内位移做出响应。在不考虑其他干扰与误差的情况下,该响应即为 η 的主要成分。如图 7 所示,其线性关系为 $\mathbf{A}_{\eta v}$,则有:

$$\eta = \mathbf{A}_{\eta v} v \quad (15)$$

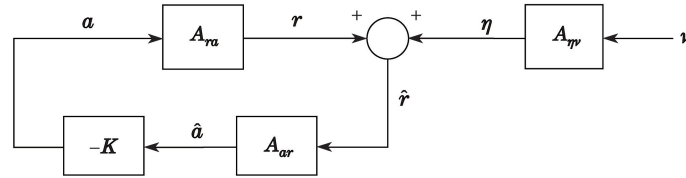


图 7 考虑子镜面内位移的控制模型框图

Fig. 7 Model graph with consideration of in-plane displacement

通过(1)式和(9)式的定义可知 $\mathbf{A}_{\eta v}$ 有类似 \mathbf{A}_{ra} 的规律:

$$\mathbf{A}_{\eta v} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ev+} & -\mathbf{A}_{ev-} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{ev+} & -\mathbf{A}_{ev-} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_{ev+} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{A}_{ev-} & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_{ev+} \\ \mathbf{A}_{ov} & -\mathbf{A}_{ov} & 0 & \cdots & 0 \\ -\mathbf{A}_{ov} & \mathbf{A}_{ov} & 0 & \cdots & 0 \\ -\mathbf{A}_{ov} & 0 & \mathbf{A}_{ov} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{A}_{ov} & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_{ov} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$\mathbf{A}_{\eta v}$ 的上半部分,对角线的非零子矩阵 \mathbf{A}_{ev+} 表示子镜 i 的传感器驱动端高度受子镜面内位移量的影响;对角线上行和左下角的非零子矩阵 $-\mathbf{A}_{ev-}$ 表示子镜 $i+1$ 的传感器接收端高度受子镜面内位移量的影响。 $\mathbf{A}_{\eta v}$ 的下半部分,第一列的非零子矩阵 $-\mathbf{A}_{ov}$ 表示子镜 1 的倾斜量受子镜面内位移量的影响;对角线的非零子矩阵 \mathbf{A}_{ov} 表示子镜 i 的倾斜量受子镜面内位移量的影响。利用(10)~(14)式,代入 8m-RST 的设计值可求出 \mathbf{A}_{ev+} 、 \mathbf{A}_{ev-} 和 \mathbf{A}_{ov} 的具体值:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{ev+} = \begin{bmatrix} -0.0310 & -0.0207 & 0.00170 \\ -0.0247 & 0.0280 & 0.000310 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{ev-} = \begin{bmatrix} 0.0310 & -0.0207 & -0.00170 \\ 0.0247 & 0.0280 & -0.000310 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{ov} = \begin{bmatrix} 0 & -0.00625 & 0 \\ 0.00625 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

于是可以求得 \mathbf{A}_{η} 的误差因子 $\alpha_{\eta} = 0.044$, 并存在关系:

$$\delta \hat{r} = \delta \eta = \alpha_{\eta} \delta v, \quad (18)$$

式中 δv 是子镜面内位移量的均方根。代入(8)式可以计算得到:

$$\delta v = \frac{\delta \eta}{\alpha_{\eta}} \leq 45 \text{ nm}. \quad (19)$$

如果控制方法不进行改进, 考虑到子镜面内位移对控制的影响, 则子镜面内位移量的均方根超过 45 nm 时, 控制系统将失效。而根据 TMT 的分析结果: 不同天顶角下子镜面内位移最大值可达约 $\pm 200 \mu\text{m}$, 而子镜面内位移量的均方根约为 $30 \mu\text{m}$ ^[9]。另外, 温度造成的子镜面内位移与桁架结构的热膨胀系数和温度起伏密切相关。以钢材为例, 其热膨胀系数大约为 $11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 如果温度起伏量为中心工作温度的 $\pm 5 \text{ K}$, 则 8m-RST 的子镜面内位移量也可能达到 $\pm 200 \mu\text{m}$ 。

因此, 子镜面内位移引起的传感器读出变化会显著影响面形保持的效果。为实现有效的 8m-RST 主镜控制, 需要对原有的控制模型进行改进。

4 考虑子镜面内位移的 CGST 主镜控制模型

如图 8 所示, 边缘传感器拟采用与 TMT 的电容式传感器相同的形式^[10], 相当于加装了间隙量传感器, 间隙量用 $g_{i,1}$ 和 $g_{i,2}$ 表示。但是, 8m-RST 的 48 对边缘传感器提供的间隙量, 不能实现对 72 个自由度的子镜面内位移量进行估计, 即使再在拼缝处加装间隙量传感器也无法帮助系统估计子镜的径向平移量。于是, 考虑在镜面背面的拼缝中段安装成对的剪切量传感器(图 8 中灰色块), 该传感器可以是原有边缘传感器的转置安装, 专用于响应拼缝剪切量, 其读出用 s_i 表示。定义矢量 \mathbf{t} 表示这些加装的传感器的读出:

$$\mathbf{t} = [g_{1,1} - g_0 \quad g_{1,2} - g_0 \quad s_1 \quad \cdots \quad g_{24,1} - g_0 \quad g_{24,2} - g_0 \quad s_{24}]^T, \quad (20)$$

式中 g_0 是间隙量的设计值, 针对 8m-RST 固定为 3 mm。

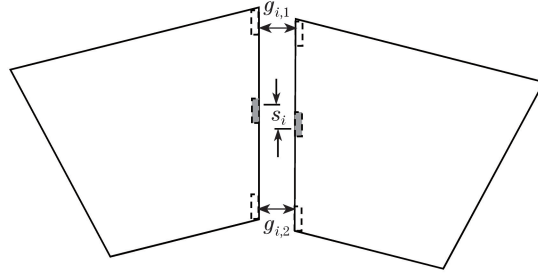


图 8 间隙量传感器和剪切量传感器示意图(顶视图)

Fig. 8 Schematic of gap sensor and shear sensor (top view)

如图 9 所示, 对 8m-RST 的控制方法进行了改进。其中 \mathbf{A}_{tv} 表示附加传感器读出 \mathbf{t} 与子镜面内位移量 \mathbf{v} 的线性关系, $\boldsymbol{\tau}$ 是附加传感器的干扰与误差, $\hat{\mathbf{t}}$ 是实际的附加传感器读出, \mathbf{A}_w 是 \mathbf{A}_{tv} 的伪逆, $\hat{\mathbf{v}}$ 是通过 $\hat{\mathbf{t}}$ 对子镜面内位移量的估计, $\hat{\boldsymbol{\eta}}$ 是估算出的子镜面内位移引起的边缘传感器高度差, 控制的目标改为使 $\hat{\mathbf{r}}$ 趋向于 $\hat{\boldsymbol{\eta}}$, 以此消除面内位移对控制系统的影响。数学模型如下所示:

$$\begin{cases} \mathbf{t} = \mathbf{A}_{tv} \mathbf{v} \\ \hat{\mathbf{t}} = \mathbf{t} + \boldsymbol{\tau} \\ \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}_w \hat{\mathbf{t}} \\ \hat{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{A}_{\eta} \hat{\mathbf{v}} \end{cases} \quad (21)$$

结合(20)式定义和图 8 可知 \mathbf{A}_{tv} 具有规律, 可以写成:

$$\mathbf{A}_{tv} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{tv+} & -\mathbf{A}_{tv-} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{tv+} & -\mathbf{A}_{tv-} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_{tv+} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{A}_{tv-} & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_{tv+} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

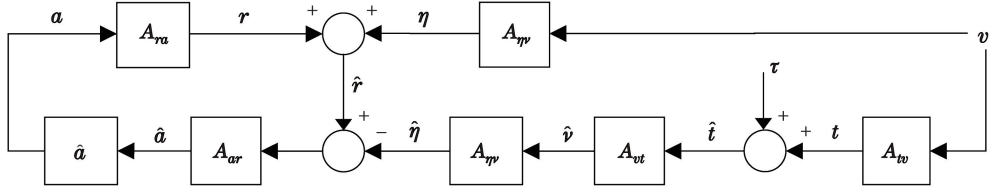


图 9 改进的 8m-RST 主镜控制系统模型

Fig. 9 Improved model of 8m-RST primary control system

式中对角线的非零子矩阵 \mathbf{A}_{iv+} 表示子镜 i 的右侧拼缝传感器对子镜面内位移的响应; 对角线上行和左下角的非零子矩阵 $-\mathbf{A}_{iv-}$ 表示子镜 $i+1$ 的左侧拼缝传感器对子镜面内位移量的响应。代入 8m-RST 的设计值可得:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{iv+} = \begin{bmatrix} -0.991 & 0.127 & 0.460 \\ -0.991 & 0.127 & -0.391 \\ 0.128 & 0.992 & 0.459 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{iv-} = \begin{bmatrix} 0.991 & 0.127 & -0.460 \\ 0.991 & 0.127 & 0.391 \\ 0.128 & -0.992 & 0.459 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (23)$$

通过求取 \mathbf{A}_{iv} 的特征值和特征向量可知 \mathbf{A}_{iv} 的秩为 69, 即有三个特殊的模式无法被系统探测到。这三个模式分别是: 主镜整体的 x_G 方向的平移、主镜整体 y_G 方向的平移和主镜整体绕光轴 z_G 旋转。这三个模式并不改变镜面的面形, 故不必再进行额外探测。 \mathbf{A}_{iv} 经过伪逆运算得到 \mathbf{A}_v , 求 \mathbf{A}_v 的误差因子得到 $\alpha_v = 2.0$, 并存在关系:

$$\delta\hat{v} = \alpha_v \delta\hat{t}, \quad (24)$$

式中 $\delta\hat{t}$ 是附加传感器读出误差的均方根, $\delta\hat{v}$ 是子镜面内位移估计值误差的均方根。不考虑其他的误差与干扰, 仅分析附加间隙量和剪切量的误差时, 得到:

$$\delta\hat{t}_{\text{rms}} = \frac{\delta\hat{a}}{\alpha_v \alpha_{\eta} \alpha_{ar}} \leq 23 \text{ nm}, \quad (25)$$

即要求间隙量和剪切量的探测精度应优于 23 nm。电容式位移传感器能够实现优于 23 nm 探测精度的要求^[23], 因此该方案可行并有助于在工况中保持 8m-RST 的主镜面形。

5 结 论

针对 CGST 的 8m-RST 方案的特点, 建立了子镜面内位移影响边缘传感器高度差和子镜面内位移影响光学传感器读出的模型。进一步分析子镜面内位移对传统的 8m-RST 主镜控制系统的影响时发现, 如果子镜面内位移量的均方根大于 45 nm, 则传统的 8m-RST 主镜控制方法无法保持有效的主镜面形。通过分析 8m-RST 的设计尺寸、工作温度及桁架材料等因素, 证明子镜的相对面内位移量远大于 45 nm, 必须改进 8m-RST 的主镜控制系统的控制方法才能满足 8m-RST 的设计要求。结合国内外全孔径拼接望远镜的设计经验和 8m-RST 的环形拼接主镜特点, 提出了切实可行的 8m-RST 主镜控制改进方案。改进方案要求原有边缘传感器附加间隙量探测能力并在拼缝中段加装剪切量传感器, 通过实时探测的间隙量和剪切量估算出传感器读出需跟随的设定值, 可以解决面内位移对 8m-RST 主镜面型保持的影响。最后, 分析得出改进方案所需的间隙量及剪切量的探测精度应优于 23 nm。

参 考 文 献

- [1] Liu Z, Deng Y Y, Jin Z Y, *et al.* Introduction to the Chinese giant solar telescope[C]. SPIE, 2011, 8444: 844405.
- [2] Liu Z, Jin Z Y, Shu Y, *et al.* The progress of Chinese giant solar telescope[C]. SPIE, 2014, 9145: 914526.
- [3] Lei Cundong, Zheng Liehua, Che Ying. Segmented telescope optical system and its maladjustment error analysis of aspheric sector-shaped sub-mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112203.

- 雷存栋, 郑列华, 车英. 拼接式望远镜光学系统及其子镜失调误差仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112203.
- [4] Cohen R W, Andreae S, Biocca A K, *et al.* W. M. Keck telescope segmented primary mirror active control system[C]. SPIE, 1990, 1236: 1038-1051.
- [5] Lefort B, Castro J. The GTC primary mirror control system[C]. SPIE, 2008, 7019: 70190I.
- [6] Dimmler M, Erm T, Bauvir B, *et al.* E-ELT primary mirror control system[C]. SPIE, 2008, 7012: 70121O.
- [7] Macmynowski D G, Thompson P M, Shelton J C, *et al.* Control system modeling for the thirty meter telescope primary mirror[C]. SPIE, 2011, 8336: 86360R.
- [8] Roberts S, Dan K. Optical performance analysis and optimization of large telescope structural designs[C]. SPIE, 2005, 5867: 586700.
- [9] Shelton C, Mast T, Chanan G, *et al.* Advances in edge sensors for the thirty meter telescope primary mirror[C]. SPIE, 2008, 7012: 701210.
- [10] Mast T, Chanan G, Nelson J, *et al.* An edge sensor design for the Thirty Meter Telescope[J/OL]. http://www.tmt.org/additional_documents/An-Edge-Sensor-Design-for-the-TMT.pdf.
- [11] Shelton C, Roberts L C. How to calibrate edge sensors on segmented mirror telescopes[C]. SPIE, 2012, 8444: 844460.
- [12] Buckley D A H, Buous S, Gajjar H, *et al.* A novel optical sensor for mirror edge sensing[C]. SPIE, 2010, 7739: 773912.
- [13] Rozière D, Luong B, Fuchs B. Inductive edge sensors: an innovative solution for ELT segmented mirror alignment monitoring[J]. SPIE, 2008, 7012: 701217.
- [14] Macmynowski D G, Jr R L, Shelton J C, *et al.* In-plane effects on segmented-mirror control[J]. Applied Optics, 2012, 51(12): 1929-1938.
- [15] Liu Z, Dai Y C, Jin Z Y, *et al.* The conceptual design and simulation of 30 m RIT[C]. SPIE, 2008, 7012: 70120E.
- [16] Dai Y C, Liu Z, Jin Z Y. Importance of tip sensing for active control system of 30-m RIT primary mirror[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(9): 791-794.
- [17] Yuan Shu, Jin Zhenyu, Li Yinzh, *et al.* Effect of atmospheric turbulence on optical tip measurement of active control of ring segmented telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1201005.
袁沐, 金振宇, 李银柱, 等. 大气湍流对环形拼接望远镜主动控制中光学倾斜测量的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1201005.
- [18] Dai Y C, Liu Z, Jin Z Y, *et al.* Active control of a 30 m ring interferometric telescope primary mirror[J]. Applied Optics, 2009, 48(4): 664-671.
- [19] Dai Y C, Lin J. Modeling and analysis of ring telescope[C]. SPIE, 2011, 8336: 833607.
- [20] Deng Jian, Zhang Wei, Zuo Baojun, *et al.* Misadjustment tolerance study of the sub-mirror's for segmented mirror synthetic aperture optics[J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 130-133.
邓键, 张伟, 左保军, 等. 拼接式合成孔径光学系统的失调误差分析研究[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 130-133.
- [21] Liao Zhou, Qiu Qi, Zhang Yudong. Numerical simulation of segmented telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722002.
廖周, 邱琪, 张雨东. 分块拼接望远镜的数值仿真[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722002.
- [22] Chanan G, Macmartin D G, Nelson J, *et al.* Control and alignment of segmented-mirror telescopes: matrices, modes, and error propagation[J]. Applied Optics A, 2004, 43(6): 1223-1232.
- [23] Shi Shuheng, Wang Bin, Zhu Jianqiang. Research of key technology for high precision capacitive displacement sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(7): 1-2, 80.
师树恒, 王斌, 朱健强. 高精度电容式位移传感器关键技术的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2007(7): 1-2, 80.