

## 中国巨型太阳望远镜主动对准建模分析

付玉<sup>1,2</sup>, 袁沐<sup>1\*</sup>, 金振宇<sup>1</sup>, 刘忠<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对中国巨型太阳望远镜(CGST)主副镜的对准需求,提出了基于激光干涉测距的激光桁架主动对准方法。首先总体介绍 CGST 激光桁架测量系统的光学结构和测量原理;然后建立激光桁架运动学模型和主动对准光学模型并讨论系统的误差传播特性;接着通过大气光学模型来讨论温度场和局地大气湍流对该主动对准方法的影响。运动分析与光学建模结果表明,在可见光波段,当激光桁架的测距误差在  $5\ \mu\text{m}$  以内、环境温度梯度小于  $0.381\ \text{K/m}$  时,由对准误差引起的波前均方根优于  $\lambda/10$ 。另外,在 Kolmogorov 湍流和典型昼间近地面湍流的条件下,大气湍流并不会严重降低激光桁架测量的灵敏度。由此可知,所提方法能够满足 CGST 副镜主动对准的需求。

**关键词** 成像系统; 太阳望远镜; 主动对准; 激光测量; 系统建模; 像差分析

中图分类号 TH751

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1211002

## Active Alignment Modeling and Analysis of Chinese Giant Solar Telescope

Fu Yu<sup>1,2</sup>, Yuan Shu<sup>1\*</sup>, Jin Zhenyu<sup>1</sup>, Liu Zhong<sup>1</sup><sup>1</sup>Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, Yunnan, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to meet the alignment requirements of the primary and secondary mirrors of the Chinese giant solar telescope (CGST), an active alignment method of laser truss based on laser interferometry is proposed. First, the optical structure and measurement principle of the CGST laser truss measurement system are introduced, then the laser truss kinematics model and active alignment optical model are established, and the error propagation characteristics of the system are discussed. Then, the effects of temperature field and local atmospheric turbulence on the active alignment method are discussed through the atmospheric optical model. The results of motion analysis and optical modeling show that in the visible band, when the ranging error of the laser truss is less than  $5\ \mu\text{m}$  and the environmental temperature gradient is less than  $0.381\ \text{K/m}$ , the wavefront root-mean-square caused by alignment error is better than  $\lambda/10$ . In addition, under the conditions of Kolmogorov turbulence and typical daytime near-surface turbulence, atmospheric turbulence does not seriously reduce the sensitivity of laser truss measurement. It can be seen that the proposed method can meet the requirements of active alignment of CGST secondary mirror.

**Key words** imaging systems; solar telescope; active alignment; laser measurement; system modeling; aberration analysis

## 1 引言

8 m 中国巨型太阳望远镜(CGST)是中国下一

代大口径地基太阳望远镜的建设计划<sup>[1-3]</sup>,其核心目标是通过高精度、高分辨的偏振光谱来系统性地研究太阳低层大气中精细的磁流体动力学结构,为解

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-12-05; 录用日期: 2021-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(11773071,11202075)

通信作者: \*yuanshu@ynao.ac.cn

决当前太阳物理和空间天气研究中的关键科学问题提供基础<sup>[4-6]</sup>。CGST 的主镜采用环形设计,高空间分辨率与偏振中性是该望远镜最重要的特性。CGST 通过主动光学系统与自适应光学系统的协同工作来消除重力弯沉、结构热变形等因素对望远镜像质的影响,而精确的主动对准是 CGST 主动控制的重要任务。为了在可见光波段取得近衍射极限的像质,由主副镜的对准误差导致的波前均方根(RMS)不能超过  $\lambda/10$ ,其中  $\lambda$  为波长。

目前,大口径望远镜的主动对准普遍采用基于波前探测的光学检测方法。由于太阳望远镜的视场小,所以基于波前探测的对准检测方法存在严重的不适用性<sup>[7-8]</sup>。通过对条件数的分析,CGST 波前探测主动对准方法具有严重的误差放大作用,无法实现准确的对准重构。激光桁架为大口径太阳望远镜的主动对准提供了另一种可行的技术方案,即利用激光干涉测距的方法直接测量主副镜的相对位置,其是一种几何测量方法<sup>[9-11]</sup>。与波前探测方法不同,激光干涉测距的方法是一种内部测量方法,具有很高的灵敏度和稳定性。

绝对距离测量技术是激光桁架测量方法的基础,其测量精度决定了副镜的定位精度。目前,基于频率扫描干涉术(FSI)的绝对距离测量仪(ADM)能够在 0.02~30.00 m 的工作距离内实现  $0.41 \mu\text{m}/\text{m}(2\sigma)$ ,其中  $\sigma$  表示标准差的定位精度,也就是  $0.41 \times 10^{-6}$  的综合不确定性<sup>[12-13]</sup>。该设备使用中心波长为  $1.58 \mu\text{m}$  和  $1.52 \mu\text{m}$  的双频扫描红外激光器作为光源,并利用氰化氢( $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ )气体吸收盒的光谱轮廓作为长度测量参考。美国  $2 \text{ m} \times 8 \text{ m}$  尺寸的 LBT(Large Binocular Telescope)和  $25 \text{ m}$  口径的 GMT(Giant Magellan Telescope)均使用该设备构建三维的望远镜测量系统,所构建的系统可用于望远镜与仪器几何状态的监视和保持<sup>[14-15]</sup>。

作为一种干涉测量方法,激光桁架测量方法的测量精度和控制特性均会受到工作环境的影响。白天近地面大气存在显著的温度梯度,其所引起的折射率梯度会导致激光桁架方案存在系统测量误差<sup>[16]</sup>。另外,近地面大气湍流会导致干涉相位的随机起伏,这也将影响激光桁架主动对准的灵敏度和控制带宽。为了研究激光桁架测量方法在大口径太阳望远镜主动控制中应用的可行性,本文通过建模来分析、研究 CGST 激光桁架主动对准方法的几何特性、像差特性、误差传递、环境敏感性。本文主要

贡献如下:首先在第二节总体介绍 CGST 激光桁架测量系统的光学结构和测量原理;然后在第三节建立激光桁架运动学模型和主动对准光学模型并讨论系统的误差传播特性;接着在第四节通过大气光学模型来讨论温度场和局地大气湍流对该主动对准方法的影响;最后给出结论。

## 2 CGST 激光桁架方案

### 2.1 CGST 的光学结构

CGST 采用图 1 的地平式机架机构,其光学系统由主副镜系统(主光学系统)和折轴光学系统组成。主镜的外径为  $8 \text{ m}$ ,环宽为  $2 \text{ m}$ ,出射焦比  $F$  为  $1.5$ ,采用抛物面。副镜位于主镜前方  $14.25 \text{ m}$  处,直径为  $1.7 \text{ m}$ ,采用椭球面。在主镜的焦点处安装热光阑,其视场角为  $3^\circ$ <sup>[17]</sup>。由于主光学系统是对称的,故副镜的 6 个刚性自由度仅有 5 个需要主动控制,它们分别是副镜相对于主镜光轴的平移运动( $\Delta x, \Delta y$ )、倾斜运动( $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ )、沿光轴方向的运动( $\Delta z$ )。以上 5 个变量构成了副镜的运动矩阵  $\Delta \mathbf{X} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta\theta_x \ \Delta\theta_y \ \Delta z]^T$ ,其中 T 为矩阵的转置符号。

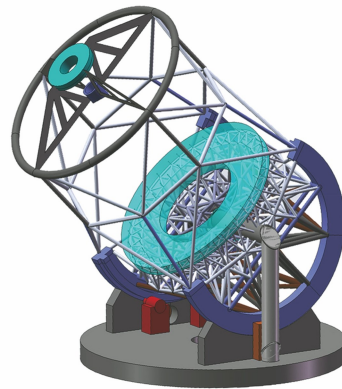


图 1 8 m CGST 的概念设计示意图

Fig. 1 Conceptual design schematic of 8 m CGST

### 2.2 激光桁架的结构

激光桁架由多通道的 ADM 和若干个角反射器组成,ADM 又可分为主机、光纤、探头(光纤准直器)三个部分。图 2 展示了多通道频率扫描 ADM 的系统框图。

从图 2 可以看出,频率扫描激光器通过光纤耦合器与多个测量探头连接,由探头与光纤共同构成一个光纤菲佐干涉仪,探头中的光纤端面是干涉仪的分光器,它定义了被测距离一端的基准点,另一端的基准点由角反射器的棱锥顶点确定。多个测量通道中均有一个参考干涉仪,其光学路径差  $L_{\text{Ref}}$  精确已知。通过频率扫描可以获得参考通道与其他测量

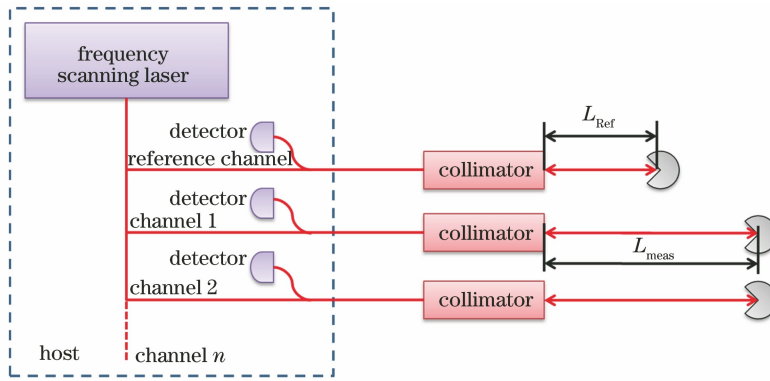


图 2 多通道频率扫描 ADM 的原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of multi-channel frequency scanning ADM

通道的光学路径差之比,该比值与参考长度的乘积即为相应测量通道的光学路径差  $L_{meas}$ 。实时的温度、湿度、压强监测可用于计算测量环境的平均折射率,进而将光学路径差转化为绝对距离。

CGST 的激光桁架由 6 个测量通道搭建而成,如图 3 所示。该测量系统具有类似于 Stewart 平台的几何结构和运动特性,因此也被称为光学六杆。

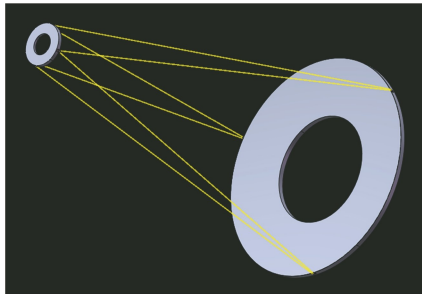


图 3 CGST 激光桁架的几何结构图

Fig. 3 Geometry of CGST laser trusses

光学六杆中的 6 个准直器两两一组,将它们安装在主镜侧面方向角为  $90^\circ$ 、 $210^\circ$  和  $330^\circ$  的三个位置上。同样地,光学六杆中的 6 个角反射器也两两一组,将它们安装在副镜侧面方向角为  $60^\circ$ 、 $150^\circ$  和  $270^\circ$  的三个位置上。此时,6 条测量光束的长度(工作距离)均为 15.4 m。图 4 展示了一组测量探头在主镜边缘上的安装位置,其中准直器被安装在一个稳定的二维倾斜调整架上,用于对准相应的角反射器。将两个调整架固定在主镜侧面的侧支撑钢垫上,钢垫与主镜由环氧胶粘接,该固定方式能够保证钢垫与主镜几何关系的稳定。图 5 展示了一组角反射器在副镜边缘上的安装位置,由于角反射器具有很大的接收角( $\pm 15^\circ$ ),因此它不需要对准调整机构。CGST 的主副镜选用小热膨胀系数的微晶玻璃,在观测时主镜不会出现显著的轮廓变化,这一点可保证激光桁架的基准点与镜面的相对位置不受环

境变化和太阳辐照的影响。

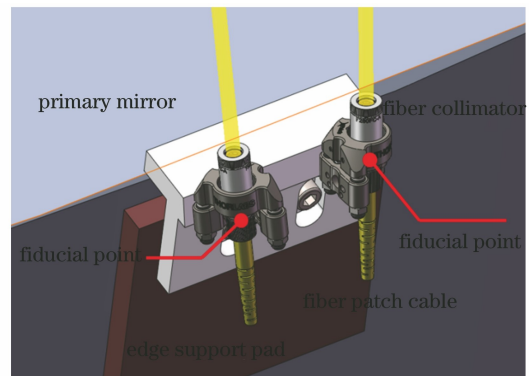


图 4 激光桁架主镜的基准点和干涉仪探头

Fig. 4 Fiducial point of primary mirror and interferometer probe of laser truss

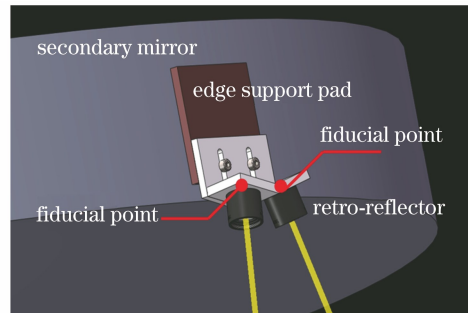


图 5 激光桁架副镜的基准点和角反射器

Fig. 5 Fiducial points of secondary mirror and retro-reflector of laser truss

### 2.3 测量方程

副镜的运动会导致各干涉仪的光程发生变化,激光桁架的测量矩阵  $\Delta L = [\Delta l_i]_{6 \times 1}$ ,其中  $i = 1, 2, \dots, 6$ 。在一阶近似下该矩阵与副镜的运动矩阵满足线性关系,表达式为

$$\Delta L = H \Delta X, \quad (1)$$

式中:  $H$  为激光桁架的系数矩阵,  $H$  的最小二乘伪逆矩阵  $H^\#$  为 CGST 主动对准的重构矩阵,即

$$\mathbf{H}^\# = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T. \quad (2)$$

此时,  $\Delta \mathbf{X}$  可表示为

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{H}^\# \Delta \mathbf{L}. \quad (3)$$

### 3 激光桁架建模分析

#### 3.1 运动学分析

激光桁架干涉仪的光程变化等于副镜的基准点位移在激光传播方向上的投影,因此测量矩阵  $\Delta \mathbf{L}$  可以表示为

$$\Delta \mathbf{L} = \mathbf{O}_{\text{LT}} (\Delta \mathbf{r}_{\text{tilt-}x} + \Delta \mathbf{r}_{\text{tilt-}y} + \Delta \mathbf{r}_{\text{shift}}), \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{O}_{\text{LT}}$  为全局坐标系下由各激光束方向余弦  $(o_x, o_y, o_z)$  构成的投影矩阵;  $\Delta \mathbf{r}_{\text{shift}}$  为副镜的平移向量;  $\Delta \mathbf{r}_{\text{tilt-}x}$  和  $\Delta \mathbf{r}_{\text{tilt-}y}$  分别为副镜沿  $x$  轴与  $y$  轴旋转引起的基准点位移。上述参数的表达式分别为

$$\mathbf{O}_{\text{LT}} = \begin{bmatrix} o_{1,x} & o_{1,y} & o_{1,z} \\ o_{2,x} & o_{2,y} & o_{2,z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ o_{6,x} & o_{6,y} & o_{6,z} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{r}_{\text{shift}} = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{r}_{\text{tilt-}x} = \mathbf{R}_x(\Delta \theta_x)(\mathbf{p} - \mathbf{c}_x) + \mathbf{c}_x \\ \Delta \mathbf{r}_{\text{tilt-}y} = \mathbf{R}_y(\Delta \theta_y)(\mathbf{p} - \mathbf{c}_y) + \mathbf{c}_y \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{R}_x$ 、 $\mathbf{R}_y$  为旋转矩阵;  $\Delta \theta_x$ 、 $\Delta \theta_y$  为旋转角;  $\mathbf{p}$  为基准点的全局坐标;  $\mathbf{c}_x$ 、 $\mathbf{c}_y$  为旋转轴的空间坐标。根据式(4)的一阶近似可得到  $\mathbf{H}$  的数值矩阵,即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.0436 & -0.2339 & 1.8294 & -3.1687 & 0.9713 \\ -0.1807 & 0.1547 & 1.8294 & -3.1687 & 0.9713 \\ -0.2243 & 0.0792 & -3.6589 & 0 & 0.9713 \\ 0.2243 & 0.0792 & -3.6589 & 0 & 0.9713 \\ 0.1807 & 0.1547 & 1.8294 & 3.1687 & 0.9713 \\ -0.0436 & -0.2339 & 1.8294 & 3.1687 & 0.9713 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

通过奇异值的分解可以得到数值矩阵的二范数条件数为 16.32,由此表明 CGST 激光桁架具有理想的数值稳定性。根据误差传播理论,当各通道的测距误差不相关且有相同的标准差时,  $\Delta \mathbf{X}$  的各项标准差  $\sigma_{\Delta X, j}$  ( $j=1, 2, \dots, 5$ ) 可以表示为

$$\sigma_{\Delta X, j} = h_j \sigma_L, \quad (9)$$

式中:  $\sigma_L$  为干涉测距的标准差;  $h_j$  为各副镜刚性自由度的误差传播因子 (EPF), 可表示为

$$h_j = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (H_{ij}^\#)^2}, \quad (10)$$

式中:  $H_{ij}^\#$  为重构矩阵的元素。

由式(10)可以计算得到副镜刚性自由度 (RBDOF) 的误差传播因子,如表 1 所示。

表 1 RBDOF 的误差传播因子

Table 1 Error propagation factors of RBDOF

| EPF   | Description               | Value  | Unit                       |
|-------|---------------------------|--------|----------------------------|
| $h_1$ | Decenter of $x$ direction | 2.5739 |                            |
| $h_2$ | Decenter of $y$ direction | 2.5739 |                            |
| $h_3$ | Tilt of $x$ direction     | 0.1673 | " $\cdot \mu\text{m}^{-1}$ |
| $h_4$ | Tilt of $y$ direction     | 0.1673 | " $\cdot \mu\text{m}^{-1}$ |
| $h_5$ | Position of $z$ direction | 0.4203 |                            |

根据  $0.41 \times 10^{-6}$  的绝对距离测量相对不确定度,在 15.4 m 的工作距离下绝对距离的标准差为  $3.157 \mu\text{m}$ 。根据式(9),CGST 激光桁架的平移、倾斜、距离标准差分别为  $8.125 \mu\text{m}$ 、 $0.528''$  和  $1.326 \mu\text{m}$ 。

#### 3.2 像差分析

通过对 CGST 光学模型对准误差的扰动分析,可得运动矩阵与主光学系统对准误差的 Zernike 系数满足

$$\Delta \mathbf{W} = \mathbf{G}(h_x, h_y) \Delta \mathbf{X}, \quad (11)$$

式中:  $\Delta \mathbf{W}$  为由 Zernike 多项式中离焦、像散、慧差、三叶草像差系数组成的 Zernike 系数矩阵<sup>[18]</sup>;  $\mathbf{G}$  为对准误差波像差的系数矩阵,简称像差系数矩阵,它是关于归一化视场坐标  $(h_x, h_y)$  的函数。利用 Zemax 程序中的语言 ZPL 计算  $\mathbf{G}$  矩阵,在  $0.5 \mu\text{m}$  的观测波长下中心视场的像差系数矩阵为

$$\mathbf{G}(0,0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0288 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0018 & -0.0210 & 0 & 0 \\ 0.0018 & 0 & 0 & 0.0210 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

观察式(12)可以发现:矩阵元素  $G_{4,2}$  与  $G_{4,3}$  是非零的,由此表明  $\Delta y$  与  $\Delta \theta_x$  仅引起  $x$  方向的慧差;矩阵元素  $G_{5,1}$  与  $G_{5,4}$  是非零的,由此表明  $\Delta x$  与  $\Delta \theta_y$  仅引起  $y$  方向的慧差;矩阵元素  $G_{1,5}$  非零表明  $\Delta z$  仅引起离焦。在视场  $x$  方向  $3''$  的边缘视场上,像差系数矩阵为

$$G(1,0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0.0002 & -0.0288 \\ 0 & 0.0001 & -0.0018 & 0 & 0 \\ 0.0001 & 0 & 0 & 0.0018 & 0 \\ 0 & 0.0018 & -0.0210 & 0 & 0 \\ 0.0018 & 0 & 0 & 0.0210 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

相比式(12),式(13)中增加的非零元素说明  $x$  方向的像散对  $\Delta y$  与  $\Delta\theta_x$  均有响应,而  $45^\circ$  方向的像散对  $\Delta x$  与  $\Delta\theta_y$  均有响应。

将式(11)代入式(3),建立了测量矩阵与像差系数矩阵的传递关系,即

$$\Delta W = GH^\# \Delta L = K \Delta L, \quad (14)$$

式中: $K$  为激光桁架的像差系数矩阵。同样地,根据误差传播理论,像差系数的误差传播方程可表示为

$$\sigma_{z,i'} = k_{i'} \sigma_L, \quad (15)$$

式中: $\sigma_{z,i'}$  为第  $i'$  项 Zernike 系数的标准差; $k_{i'}$  为第  $i'$  项 Zernike 系数误差传播因子(ZEPFs),其表达式为

$$k_{i'} = \sqrt{\sum_{j=1}^6 K_{i'j}^2}, \quad (16)$$

式中: $K_{i'j}$  为像差系数矩阵的元素。

表 2 展示了由式(16)计算得到的中心视场与  $x$  方向边缘视场上的像差系数误差传播因子。

表 2 像差系数的误差传播因子

Table 2 Error propagation factor of aberration coefficient

| ZEPF  | Description               | ( $h_x=0,$<br>$h_y=0$ ) | ( $h_x=1,$<br>$h_y=0$ ) |
|-------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $k_1$ | Defocus                   | 0.0171                  | 0.0171                  |
| $k_2$ | Astigmatism of $0^\circ$  | 0                       | 0.0004                  |
| $k_3$ | Astigmatism of $45^\circ$ | 0                       | 0.0004                  |
| $k_4$ | Coma of $y$ direction     | 0.0083                  | 0.0083                  |
| $k_5$ | Coma of $x$ direction     | 0.0051                  | 0.0051                  |
| $k_6$ | Trefoil of $x$ direction  | 0                       | 0                       |
| $k_7$ | Trefoil of $y$ direction  | 0                       | 0                       |

通过计算误差传播因子的均方和,可以得到关于激光桁架波前像差的标准差  $\sigma_w$  与测距标准差  $\sigma_L$  的误差传播方程,即

$$\sigma_w = \sigma_L \left( \sum_{i^*=1}^7 k_{i^*}^2 \right)^{1/2} = 0.0197 \sigma_L. \quad (17)$$

根据式(17),若在可见光波段实现  $\lambda/10$  的对准误差波前 RMS,则测距误差的标准差需达到  $5 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$  的标准差在 15.4 m 的工作距离下的相对不确

定度为  $0.64 \times 10^{-6} (2\sigma)$ ,其低于目前商业设备在实验室环境下的精度水平。

## 4 环境影响分析

CGST 采用通风圆顶,主镜的回转中心距离地面 50 m。白天太阳对地面和建筑物的加热会使望远镜周围的工作环境存在温度梯度,从而产生了折射率梯度。由于各干涉仪的空气折射率不同,故温度梯度会引入一个与高度角有关的系统测量误差。另外,局地大气湍流会引起干涉相位的随机起伏,这也会降低主动对准的灵敏度。下面对以上两种环境效应展开建模分析。

### 4.1 温度梯度

由于望远镜尺度远小于温度梯度变化的特征尺度,因此设定其周围的温度梯度为常数。以望远镜高度轴所在的水平面为折射率参考面,空间中任意一点的折射率变化可表示为

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dz} \Delta z, \quad (18)$$

式中: $\Delta z$  为空间上某点与参考面的高度差; $n$  为折射率; $T$  为温度。对式(18)进行路径积分可以得到由温度梯度引起的测距误差,表达式为

$$\Delta l = \int_L \Delta n dl = \frac{dn/dT}{2 \cos \varphi} \left( \frac{dT}{dz} \right) (z_2^2 - z_1^2), \quad (19)$$

式中: $l$  为积分变量; $L$  为积分路径; $\varphi$  为该激光束与高度方向的夹角; $z_1$  与  $z_2$  分别为积分路径起点与终点处相对参考面的高度。折射率  $n$  与温度  $T$ 、气压  $P$ 、波长  $\lambda$  的关系<sup>[19]</sup>为

$$n = 1 + 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T} \times 10^{-6}. \quad (20)$$

$P$  的单位为 mbar,  $T$  的单位为 K,  $\lambda$  的单位为  $\mu\text{m}$ 。当  $\lambda$  为  $1.5 \mu\text{m}$ 、 $P$  为 1013.25 mbar (1 mbar = 100 Pa)、 $T$  为 298 K 时,折射率的温度变化率  $dn/dT = -9.111 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。当望远镜高度角为  $45^\circ$ 、温度梯度为 0.1 K/m 时,激光桁架的测量误差以及由此引起的对准误差和望远镜波前像差如图 6 所示。

从图 6 可以看出,位于镜筒上方的激光束光程增加量比位于镜筒下方多,导致激光桁架对副镜位置的测量结果比实际位置偏低。该效应在望远镜指向水平时达到最大。此时,若使该对准误差的波前像差小于  $\lambda/10$ ,则温度梯度不能超过 0.381 K/m,当温度梯度超过该值时,则需要根据式(19)对测距

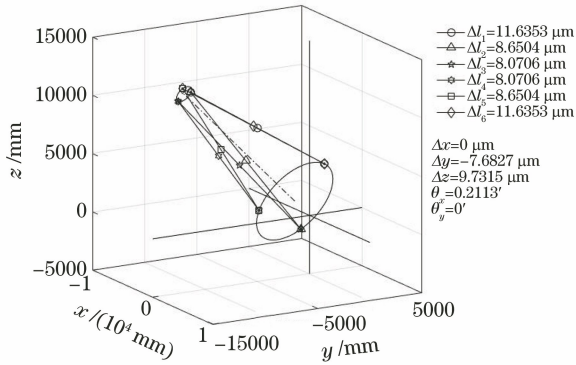


图 6 温度梯度所引起的距离测量误差与对准误差  
Fig. 6 Range measurement error and alignment error caused by temperature gradient

结构进行修正。

### 4.2 局地大气湍流

与温度梯度不同,局地大气湍流会引起主动对准存在随机误差。单个干涉仪的湍流误差模型可表示为

$$\sigma_L = \frac{\lambda_{LT}}{2\pi} \sigma_\varphi g(t_0, T, f), \quad (21)$$

式中: $\lambda_{LT}$  为激光波长; $\sigma_\varphi$  为大气冻结情况下干涉相位  $\varphi$  的标准差; $g$  为平均效应的时间积分因子,它是关于测量频率  $f$ 、积分时间  $T$ 、大气相干时间  $t_0$  的函数。根据 Winker<sup>[20]</sup> 的推导,有限外尺度 Kolmogorov 湍流的相位均方差为

$$\sigma_\varphi^2 = 0.0863 L_0^{5/3} \frac{2.91}{6.88} \kappa^2 L C_n^2, \quad (22)$$

式中: $L_0$  为湍流外尺度; $\kappa$  为波数; $L$  为光束传播距离; $C_n^2$  为大气结构常数。时间积分因子  $g$  的表达式<sup>[21]</sup>为

$$g = \left\{ \frac{1}{N} + \frac{2}{N^2} \sum_{n=1}^{N-1} n B[(N-n)\Delta t] \right\}^{1/2}, \quad (23)$$

式中: $N = Tf$  为参与积分平均的随机样本数; $B(t) = \exp[-(t/t_0)^{5/3}]$  为归一化大气时间  $t$  的自相关函数; $\Delta t = 1/f$  为测量的时间间隔。当测量频率为 1 kHz 时,积分因子  $g$  随积分时间和大气相干时间的变化情况如图 7 所示。从图 7 可以看出, $g$  因子会在最初的 10 s 内快速下降,后趋于平缓。设激光桁架的积分测量频率(IMF) $\omega_c = 1/T$ ,距离测量结果为积分时间内测量数据的平均值。当不考虑干涉仪间统计误差的相关性时,可利用式(17)直接计算大气湍流对准误差的波前 RMS。表 3 展示了不同积分测量频率和湍流强度下,主动对准的波前 RMS,其中湍流外尺度为望远镜离地高度的 1/2,即 25 m,大气相干时间为 200 ms。

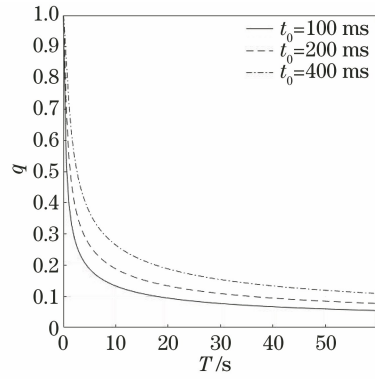


图 7 时间积分因子  $g$  随积分时间的变化曲线  
Fig. 7 Variation curves of time integration factor  $g$  with integration time

从表 3 可以看出,在一般的昼间近地面大气湍流强度( $C_n^2$  约为  $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ )、10 Hz 的积分测量频率下,波前 RMS 为  $0.0211\lambda$ ,约为  $\lambda/45$ 。在极端的湍流强度下( $C_n^2$  约为  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ )、相同的积分测量频率下,主动对准波前 RMS 为  $0.0662\lambda$ ,约为  $\lambda/15$ 。

表 3 局地大气湍流所引起的对准误差波前 RMS  
Table 3 Wavefront RMS of alignment error caused by local atmospheric turbulence unit:  $\lambda$

| IMF / Hz | $C_n^2 =$                   | $C_n^2 =$                   | $C_n^2 =$                   |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|          | $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ | $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ | $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ |
| 10.0     | 0.0065                      | 0.0211                      | 0.0662                      |
| 1.0      | 0.0038                      | 0.0122                      | 0.0382                      |
| 0.1      | 0.0012                      | 0.0041                      | 0.0128                      |

## 5 结 论

在各种环境的干扰下,保证主副镜的精确对准是 8 m CGST 主动控制的重要目标,为此提出使用激光桁架测量副镜刚性自由度的主动对准方法。在可见光波段,若对准误差的波像差控制在  $\lambda/10$  以内,则激光桁架的测距误差小于  $5 \mu\text{m}$ 。在 15.4 m 的工作距离下,该误差所对应的测量相对不确定度为  $0.64 \times 10^{-6} (2\sigma)$ 。在实际的望远镜工作环境中,激光桁架的对准精度会受到温度梯度和局地大气湍流的影响。当望远镜指向水平时,温度梯度所引起的对准误差最大。当望远镜周围的温度梯度超过  $0.381 \text{ K/m}$  时,对准误差波前像差将超过  $\lambda/10$ ,所以激光桁架的温度场校正就必须被考虑。另一方面,局地大气湍流会引起主动对准存在随机误差,该误差是关于湍流强度、湍流外尺度、大气相干时间、积分时间的函数。当湍流外尺度在 20 m 量级、大气相干时间为 200 ms、近地面湍流强度  $C_n^2$  约为  $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  时,激光桁架能够在 10 Hz 的积分测量

频率下实现优于  $\lambda/45$  的灵敏度。在强湍流 ( $C_n^2$  约为  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ ) 下, 激光桁架能够在 10 Hz 的积分测量频率下达到  $\lambda/15$  的灵敏度。综上, 本文从理论上论证了激光桁架的可行性, 为该技术的实施提供了基础, 为将来的工程应用打下了基础。

### 参 考 文 献

- [1] Deng Y Y. Introduction to the Chinese giant solar telescope [EB/OL]. (2011-01-01) [2021-10-28]. [https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article\\_query?2011ASInC...2...31D&defaultprint=YES&filetype=.pdf](https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?2011ASInC...2...31D&defaultprint=YES&filetype=.pdf).
- [2] Liu Z, Jin Z Y. Simulation of Chinese giant solar telescope [J]. *Proceeding of SPIE*, 2011, 8336: 833609.
- [3] Liu Z, Deng Y Y, Jin Z Y, et al. Introduce to the Chinese giant solar telescope [J]. *Proceeding of SPIE*, 2012, 8444: 844405.
- [4] Liu Z, Deng Y Y, Ji H S. The Chinese giant solar telescope [J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2013, 8(S300): 349-354.
- [5] Liu Z, Jin Z Y, Yuan S, et al. The progress of Chinese giant solar telescope [J]. *Proceeding of SPIE*, 2014, 9145: 914526.
- [6] Liu Z, Ji H S, Jin Z Y, et al. Science cases in the integrated modeling of Chinese giant solar telescope [J]. *Proceeding of SPIE*, 2016, 10012: 1001304.
- [7] Upton R. Optical control of the advanced technology solar telescope [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(23): 5881-5896.
- [8] Robert U, Thomas R, Robert H. Active optical alignment of the advanced technology solar telescope [J]. *Proceeding of SPIE*, 2006, 6271: 62710R.
- [9] Redding D C, Breckenridge W G, Lau K H, et al. Segmented mirror figure control for a space-based far-IR astronomical telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1489: 201-215.
- [10] Lau K H, Breckenridge W G, Nerheim N M, et al. Active figure maintenance control using an optical truss laser metrology system for a space-based far-IR segmented telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1696: 60-82.
- [11] Postman M, Brown T, Koekemoer A, et al. Science with an 8-meter to 16-meter optical/UV space telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7010: 701021.
- [12] Dale J, Hughes B, Lancaster A J, et al. Multi-channel absolute distance measurement system with sub ppm-accuracy and 20 m range using frequency scanning interferometry and gas absorption cells [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24869-24893.
- [13] Thurner K, Quacquarelli F P, Braun P F, et al. Fiber-based distance sensing interferometry [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 3051-3063.
- [14] Rakich A, Dettmann L, Leveque S, et al. A 3D metrology system for the GMT [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9906: 990614.
- [15] Rodriguez S. Implementation of a laser-truss based telescope metrology system at the large binocular telescope [D]. Tucson: University of Arizona, 2020.
- [16] Innocenti C, Consortini A. Refractive index gradient of the atmosphere at near ground levels [J]. *Journal of Modern Optics*, 2005, 52(5): 671-689.
- [17] 刘忠, 邓元勇, 季海生, 等. 中国地基大太阳望远镜 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42(12): 1282-1291.
- Liu Z, Deng Y Y, Ji H S, et al. Ground-based giant solar telescope of China [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2012, 42(12): 1282-1291.
- [18] Noll R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(3): 207-211.
- [19] Clifford S F. The classical theory of wave propagation in a turbulent medium [M] // Strohbehn J. *Laser beam propagation in the atmosphere. Topics in applied physics*. Heidelberg: Springer, 1978, 25: 9-43.
- [20] Winker D M. Effect of a finite outer scale on the Zernike decomposition of atmospheric optical turbulence [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(10): 1568-1573.
- [21] 袁沫, 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.
- Yuan S, Jin Z Y, Li Y Z, 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.