

文章编号 1004-924X(2022)04-0442-13

基于二维随机场的地基大型光学望远镜 风扰动时程模拟与性能预测

曹玉岩^{1,2*}, 王建立^{1,2}, 王志臣^{1,2}, 李洪文¹, 张岩^{1,2}, 初宏亮¹, 李玉霞¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:随着地基光学望远镜口径的不断增大,风扰动已成为影响望远镜成像质量最为关键的因素之一。为了深入研究风扰动对望远镜系统性能的影响规律及作用机理,从时域角度对望远镜在风扰动作用下的响应进行时程模拟以及系统性能预测。首先,简要介绍了望远镜结构组成并采用有限元方法建立了结构动力学模型,通过模态变换方法将动力学模型转换到模态坐标系下,从而降低了模型维数、提高了计算效率。然后,提出了一种基于二维随机场的风速时程模拟方法,将望远镜圆顶内的风速场表达为随时间和空间位置变化的二维随机场,通过引入波数谱,克服了谱表达方法中各个离散采样点处互功率谱矩阵 Cholesky 分解出现数值不稳定的问题,从而可以表达空间和时间频率范围内几乎连续的随机场,并且在数值计算中引入了快速傅里叶变换 FFT 算法,进一步提高了模拟效率。最后,以 2 m 口径望远镜为例,对风速环境进行了时程模拟,并对外界平均风速为 10 m/s 及 15 m/s 的风扰动作用下,望远镜的性能进行了预测。仿真分析结果表明:作用在望远镜主镜上的风扰动分别造成主镜最大接近 45 nm 和 70 nm 的面形误差;作用在次镜及桁架上,主要造成低频的主次镜相对位置和角度偏差。

关键词:地基望远镜;随机场;风扰动;时程模拟;动力学模型

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223004.0442

Wind disturbance simulation and optical performance prediction for large ground-based optical telescopes based on two-dimensional stochastic fields

CAO Yuyan^{1,2*}, WANG Jianli^{1,2}, WANG Zhichen^{1,2}, Li Hongwen¹, ZHANG Yan^{1,2},

CHU Hongliang¹, LI Yuxia¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yuyan_cao@126.com

Abstract: As the aperture of large ground-based optical telescopes increases, wind disturbance has become one of the most significant dynamic factors degrading the performance of telescopes. To investigate the influence and interaction principles of wind disturbance on the performance of telescopes, a time-history

收稿日期: 2021-06-22; 修订日期: 2021-08-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11803035, No. U2031126)

simulation of the wind disturbance response and performance prediction for telescopes were performed in the time domain. First, the structural parts of the telescope were simply introduced, and a dynamic model of the telescope was established using the finite element method. Using modal transformation, the dynamic model, expressed in nodal coordinates, was transformed into modal coordinates, thus greatly decreasing the model dimension and greatly improving the computational efficiency. Second, a time-history simulation method for wind speed was presented based on two-dimensional stochastic fields. The wind speed field in the dome was expressed as a two-dimensional stochastic field that varied according to the temporal and spatial frequencies. The numerical instability occurring in the Cholesky decomposition of the cross-power spectrum matrix in the spectral method was avoided by introducing the wave-number spectrum. The simulation efficiency was further improved by applying the fast Fourier transform (FFT) technique. Finally, using a ground-based telescope with a 2 m aperture as a case study, a time-history simulation of the wind speed, wind disturbance response, and system performance prediction for the telescope was performed. The simulation results showed that wind disturbances with a mean speed of 10 and 15 m/s would result in a maximum surface root mean square error of the primary mirror of approximately 45 and 70 nm, respectively. In addition, the wind disturbance acting on the secondary mirror and truss would mainly cause optical axis angle and position errors.

Key words: ground-based telescope; stochastic fields; wind disturbance; time-history simulation; dynamic structural model

1 引言

地基望远镜是连接人类与未知宇宙的桥梁,帮助人们观测、探索宇宙奥秘。随着对宇宙暗弱目标研究的深入,对如深空恒星的形成与演变、星系分布与结构及演变物理过程对人类的影响、暗物质与暗能量的本质等等的探索,要求未来的望远镜不但要看的清、还要看得远,这推动了地基望远镜朝大口径、高分辨力方向发展^[1]。

随着地基望远镜口径不断增大,风扰动成为影响望远镜成像质量最为关键的因素之一。首先,望远镜台址通常选在高海拔偏僻地区来避免杂光污染并提高大气视宁度,这些地区通常风速都很大(如夏威夷莫纳克亚山天文台风速高达20 m/s)。其次,望远镜结构刚度随口径的增大而下降,系统谐振频率随之降低。此外,风扰动功率谱中包含有较大的低频能量(0.1~1 Hz),在望远镜基频处风压能量集中,容易引起望远镜系统的共振,而且风载具有随机和时变特性^[2]。一些望远镜往往因为风大而难以获取有效科学数据,甚至不得不放弃观测。风扰动的分析与抑制已成为地基望远镜领域的热点和难点,受到了越来越多的科学家们的关注^[3-10]。

尽管光学望远镜外部一般有圆顶防护,能够显著降低其内部风速,但为了满足圆顶内视宁度的要求,内部要适当通风,而且光学望远镜波长较短,圆顶内的残余风仍然会对望远镜系统性能产生显著影响^[3]。针对这一问题,MacMynowski等基于Gemini望远镜镜面风速和风压测量^[5]、风道测试^[6]和计算流体动力学仿真CFD^[7]得到的数据对望远镜圆顶内部的风扰动特性进行了深入研究,并提出了参数化模型^[8,9],该参数化模型可根据望远镜、风速及圆顶等相关参数将风扰动转化为作用在望远镜主、次镜上载荷,给结构设计优化带来极大的方便。在国内,杨德华等^[11]针对LAMOST反射施密特改正镜,研究了其拼接子镜及整体在风扰动作用下的静态和动态响应,采用风速功率谱密度法分析了其对镜面面形和跟踪指向精度的影响;周超等^[12]以长春光机所研制的1.23 m自适应光学望远镜为例,研究了风扰动对主镜面形的影响及望远镜在动态风扰作用下的随机响应;潘年等^[13]采用流体动力学仿真方法CFD研究了国内某2 m望远镜风扰特性,分析了外界风速10 m/s情况下望远镜不同俯仰角时流场中截面空气速度、压力、湍流动能以及主镜面静压力的瞬态分布情况,并与Gemini望远镜实

测结果进行了比较。徐江海等^[14]采用CFD分析圆顶形式对内部风湍流的影响。以上研究从不同的角度分析了外界风扰动对望远镜性能产生的影响。

从上述文献中可以看出,望远镜口径不断增大,系统刚度和谐振频率下降,风扰动的影响应在望远镜建造阶段予以重视。风扰动包含稳态分量和非稳态分量两部分,稳态分量(静态风载荷)是恒定的,通过系统主动控制很容易得到抑制,但抑制非稳态分量(动态风扰动)引起的振动则存在一定的困难。针对此问题,已有多位学者采用计算机仿真手段深入分析了非稳态风扰动对望远镜性能的影响程度^[8-9]。非稳态风扰动分量具有较强的随机性,目前已有的大部分研究均是从频率角度考虑风扰动的影响,时域角度的研究则很少。然而,对于大型地基望远镜这样复杂结构来说,其结构中往往存在一定的非线性特性,风扰动的时程分析模拟是必不可少的,而且从时域角度分析与工作过程更为接近,这也更利于进行实验比较。

基于上述原因,本文以长春光机所研制的2 m口径地基光学望远镜为例,从时域角度研究风扰动对望远镜的影响,并进行性能预测。首先,详细介绍了望远镜结构组成,基于有限元方法建立结构动力学模型,并通过模态变换方法将动力学模型转换到模态坐标系下,从而降低了模型维数,提高了计算效率。然后,考虑到大型地基望远镜结构尺度相对较大,将望远镜圆顶内的风速场表达为随时间和空间位置变化的二维随机场,通过引入互相关函数或互功率谱矩阵来刻画随机场的统计特征。基于互功率谱矩阵,采用谱表达方法实现时程模拟。为了克服在离散采样点数提高时,谱表达方法中各个离散采样点处互功率谱矩阵Cholesky分解出现数值不稳定的问题,引入了文献[15-17]所述波数谱方法,从而可以表达空间和时间频率范围内几乎连续的随机场。最后,对2 m望远镜进行风速场模拟并在此风速场下进行性能分析。

2 望远镜结构动力学建模

2 m级地基光学望远镜结构简图如图1所示,总体高度为6.4 m,宽度为3.7 m,总质量

接近30吨。从望远镜结构角度考虑,主要包括地平式机架、主镜和次镜三部分,其余附属结构对本文所研究内容影响较小,在此不予考虑。

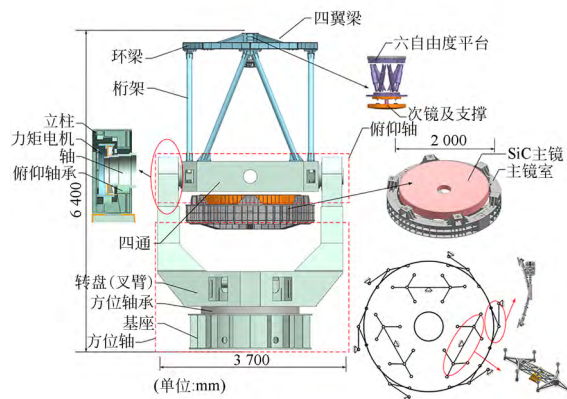


图1 2 m望远镜结构简图

Fig. 1 Simplified structure of 2 m telescope

自无穷远目标发出的光束经过主镜和次镜反射后,被像面位置处的高灵敏度探测器接收,实现光信号到电信号的转换,从而获得清晰的目标图像。地平式机架是主、次镜及其他附件的载体,通过俯仰轴和方位轴的高精度回转运动实现望远镜对任意天区的精确指向和对目标的稳定跟踪测量。

望远镜主镜材料为SiC,具有比刚度大、质量轻、热稳定性好等优点,采用A-Frame型柔性侧支撑方式,并结合18点机械式whiffletree轴向支撑方式,支撑结构原理如图1所示。同样,次镜采用具有热变形匹配的bipod型结构来消除热膨胀系数差异性对次镜面形精度的影响。此外,次镜结构整体通过Hexapod并联机构实现位置调整与补偿。

针对上述2 m望远镜简化结构,采用有限元方法建立望远镜结构动力学模型如图2所示。在全局坐标系下,望远镜结构动力学模型可以表达为二阶微分方程,即:

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = F, \quad (1)$$

$$y = C_o q, \quad (2)$$

其中: M 、 D 、 K 分别为质量矩阵,阻尼矩阵和刚度矩阵; F 为载荷向量; y 为输出位移向量; $\ddot{q}$ 、 $\dot{q}$ 、 q 分

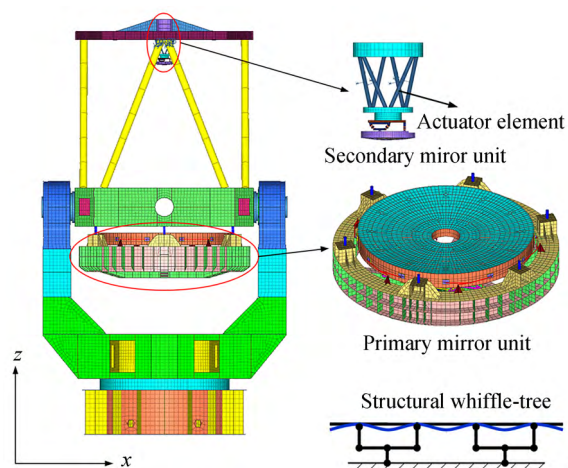


图2 2 m望远镜结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of 2 m telescope structure

别为节点加速度,速度和位移向量; C_o 为输出矩阵,在风扰动分析中,主要关注的是主、次镜节点的位移,因此输出矩阵为与主、次镜节点位置相关的矩阵。

由于望远镜结构非常大,有限元模型节点数量非常多,上述以节点变量来表达的结构动力学模型将非常大。为了提高计算效率,降低后续风扰动模拟的计算难度,对结构动力学模型进行模态变换,即

$$q = \Phi q_m, \quad (3)$$

其中, Φ 为振型矩阵,其表达式为:

$$\Phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \cdots \quad \phi_n] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n_d1} & \phi_{n_d2} & \cdots & \phi_{n_dn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: ϕ_{ij} 表示第*i*个节点自由度上的第*j*阶振型; n_d 为模型阶数,即节点的全部自由度总和; n 为提取的模态阶数。

将式(3)带入式(1)和式(2),并在式(1)左乘 Φ^T 得:

$$M_m \ddot{q}_m + D_m \dot{q}_m + K_m q_m = \Phi^T F, \quad (5)$$

$$y = C_o \Phi q_m, \quad (6)$$

其中: $M_m = \Phi^T M \Phi$, $D_m = \Phi^T D \Phi$, $K_m = \Phi^T K \Phi$ 。

对以模态变量表达的结构动力学方程(5)和(6)进一步简化可得:

$$\ddot{q}_m + 2Z\Omega\dot{q}_m + \Omega^2 q_m = M_m^{-1} \Phi^T F, \quad (7)$$

$$y = C_m q_m, \quad (8)$$

其中: $Z = \text{diag}(\zeta_1, \zeta_2, \cdots, \zeta_n)$ 为阻尼系数矩阵, $\Omega = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)$ 为模态频率矩阵, $C_m = C_o \Phi$ 。

为了应用线性系统相关理论,将式(7)和(8)表达的结构动力学模型转化为状态空间表达形式。定义状态变量为:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega q_m \\ \dot{q}_m \end{bmatrix}. \quad (9)$$

将式(9)带入式(7)和(8)可得:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (10)$$

$$y = Cx, \quad (11)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} 0 & \Omega \\ -\Omega & -2Z\Omega \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_m \end{bmatrix}$, $C = [C_m \Omega^{-1} \quad 0]$ 。

与式(1)和(2)相比,状态空间方程(10)和(11)表达的结构动力学模型的维数大大降低,从而可以显著提高计算效率。

3 随机风扰动建模

对于地基大型光学望远镜而言,风扰动的直接影响是造成望远镜视轴抖动及光学元件(主要是主镜和次镜)的振动和变形,进而导致焦面处图像抖动和模糊。风扰动具有随机性,作用在望远镜结构上产生的变形非常复杂,即使采用计算流体动力学分析方法CFD也很难准确模拟^[7]。为了简化计算模拟过程,本文将风扰动对望远镜的作用简化为如图3所示的三种方式:(1)载荷作用在次镜及其支撑桁架上,引起次镜抖动;(2)载荷作用在主镜及其支撑结构上引起主镜变形和位置的变化;(3)载荷作用在次镜及支撑桁架上,造成俯仰轴的扰动,进而引起视轴抖动。风扰动的综合作用效果是引起主、次镜光轴相对位置出现偏差,镜面出现面形误差以及视轴抖动,进而造成光学系统性能下降。

3.1 基于二维随机场的风速时程模拟

从图1已知望远镜的横向和纵向最大跨度相对较大,分别为6.4 m和3.7 m,对风速进行时程

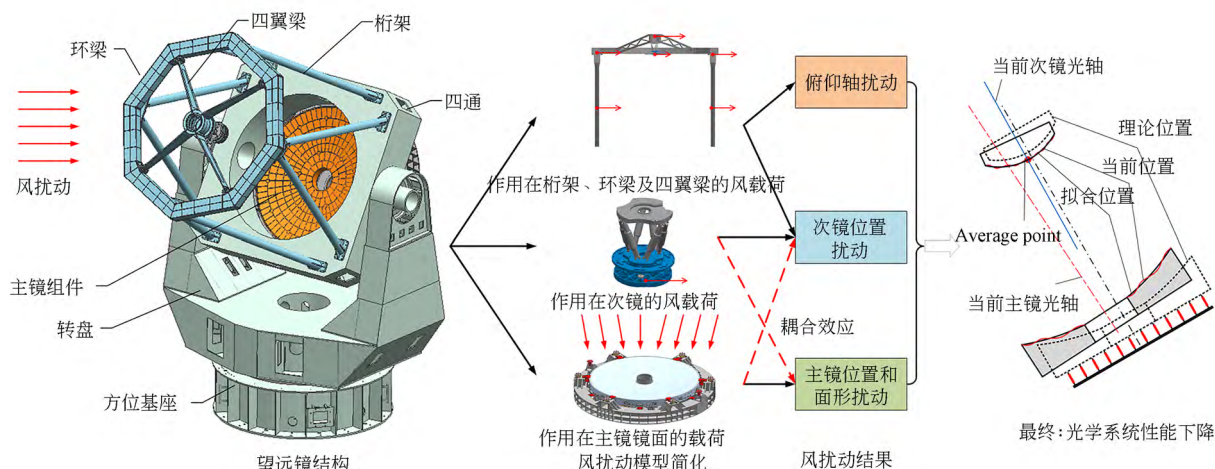


图 3 风扰动作用简化模型

Fig. 3 Simplified model of wind disturbance

模拟需要同时考虑时间频率和空间频率,且空间频率需要考虑多个维度。这里提出了以平面内的二维随机场来模拟作用在望远镜结构上的风速,风速在空间上任何一点的时间历程上既具有随机性又符合统计规律,其功率谱与预先已知的功率谱密度一致。首先推导一维随机场,然后再将其拓展至二维情况。

定义 $X(t)$ 为离散且相互独立的随机过程向量,即:

$$X(t) = [X_1(t), \dots, X_j(t), \dots, X_n(t)]^T, \quad (12)$$

其中, $X_j(t)$ 为第 j 个单变量随机过程。

随机过程向量中的各元素均为相互独立的单变量随机过程,但作为一个整体,不同元素之间存在一定的相关关系,可以用互相关函数矩阵或互功率谱密度矩阵来表示,即:

$$S_{jk}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{jk}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (13)$$

$$R_{jk}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{jk}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega. \quad (14)$$

为了从时程角度模拟随机过程,首先需要对其互功率谱密度矩阵进行分解,即:

$$S(\omega) = H(\omega) H^T(\omega), \quad (15)$$

其中: $H(\omega)$ 为下三角矩阵, T^* 表示复共轭转置,上述分解可以通过 Cholesky 方法实现。

根据式(15),随机过程向量 $X(t)$ 的时间历程可以表达为:

$$X_j(t) = 2 \sum_{m=1}^j \sum_{l=0}^{N-1} |H_{jm}(\omega_l)| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_l t + \theta_{jm}(\omega_l) + \phi_{ml}], \quad j=1, 2, \dots, n \quad (16)$$

其中: $\omega_l = l\Delta\omega, l=0, 1, \dots, N-1; \Delta\omega = \frac{\omega_u}{N}$;

$$\theta_{jm}(\omega_l) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[H_{jm}(\omega_l)]}{\text{Re}[H_{jm}(\omega_l)]} \right\}; \phi_{ml} \text{ 为相互独立}$$

的随机相位角,在 $[0, 2\pi]$ 区间内服从均匀分布。

尽管式(16)给出了随机过程向量的时间历程显式表达式,但当采样点数 $N \rightarrow \infty$ 时,功率谱密度矩阵接近奇异,无法应用 Cholesky 方法对其进行分解。为了解决该问题,本文引入波数谱,建立在空间和时间上几乎连续的风速模型,这可以在规定空间范围内得到无穷采样点的风速,从而避免了互功率谱矩阵的 Cholesky 分解。波数谱的表达式可以由自功率谱和相干函数积分得到,即:

$$S(\omega, \kappa) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot \gamma(\xi, \omega) e^{i\kappa\xi} d\xi, \quad (17)$$

其中, $S(\omega)$ 为自谱, ξ 为空间距离, κ 为波数, $\gamma(\xi, \omega)$ 为相干函数,通常选择 Davenport 相干函数模型。

基于波数谱(17),可以得到随机过程向量 $X(t)$ 的时间历程表达式为:

$$X(x, t) = \sum_{l=1}^{N_\kappa} \sum_{m=1}^{N_\omega} \sqrt{4S(\kappa_l, \omega_m) \Delta \kappa \Delta \omega} \cdot [\cos(\kappa_l x + \omega_m t + \phi_{ml}^{(1)}) + \cos(\kappa_l x - \omega_m t + \phi_{ml}^{(2)})], \quad (18)$$

其中: $\omega_m = m\Delta\omega$, $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$, T 为模拟时长; $\Delta\kappa = \frac{2\pi}{L}$, L 为空间尺度。

式(18)仅给出了考虑一维空间频率和时间频率的表达式。然而,对于望远镜来说,尤其是对于大口径主镜来说,风速模拟时考虑平面内二维空间频率更合理。为此,需要将式(18)拓展至

$$S(\kappa_x, \kappa_y, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_0(\omega) \cdot \gamma(\xi_x, \xi_y, \omega) e^{i(\kappa_x \xi_x + \kappa_y \xi_y)} d\xi_x d\xi_y = \frac{1}{2\pi \lambda_x \lambda_y} \frac{1}{\left(\frac{1}{2\pi v_{10}} \omega\right)^2} \times \frac{1}{\left(1 + \left[\left(\frac{\kappa_x}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{\kappa_y}{\lambda_y}\right)^2\right] \left/\left(\frac{1}{2\pi v_{10}} \omega\right)^2\right.\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot S_0(\omega). \quad (20)$$

通常描述风扰动的功率谱选择 Davenport 功率谱,其表达式为:

$$S_D(\omega) = 4v_m^2 \left(\frac{k}{\ln(z/z_0)} \right)^2 \frac{\left(\frac{1200\omega}{2\pi v_{10}} \right)^2}{\frac{\omega}{2\pi} \left[1 + \left(\frac{1200\omega}{2\pi v_{10}} \right)^2 \right]^{4/3}}, \quad (21)$$

其中: v_m 为平均风速, k 为风阻系数。

根据二维空间的波数谱表达式(20),可得二维空间随机场的时程表达式为:

$$X(x, t) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{m=1}^{N_\omega} \sqrt{4S(\kappa_x^{(i)}, \kappa_y^{(j)}, \omega_m) \Delta \kappa_x \Delta \kappa_y \Delta \omega} \cdot [\cos(\kappa_x^{(i)} x + \kappa_y^{(j)} y + \omega_m t + \phi_{ijm}^{(1)}) + \cos(\kappa_x^{(i)} x + \kappa_y^{(j)} y - \omega_m t + \phi_{ijm}^{(2)}) + \cos(\kappa_x^{(i)} x - \kappa_y^{(j)} y + \omega_m t + \phi_{ijm}^{(3)}) + \cos(\kappa_x^{(i)} x - \kappa_y^{(j)} y - \omega_m t + \phi_{ijm}^{(4)})], \quad (22)$$

其中: $\kappa_x^{(i)} = i\Delta\kappa_x$, $i = 1, 2, \dots, N_x$, $\Delta\kappa_x = \frac{2\pi}{L_x}$;

$\kappa_y^{(j)} = j\Delta\kappa_y$, $j = 1, 2, \dots, N_y$, $\Delta\kappa_y = \frac{2\pi}{L_y}$;

二维空间频率范围。

对于二维空间上的两个不同位置 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) , 其 Davenport 相干函数模型可以表达为:

$$\gamma(\xi_x, \xi_y, \omega) = \exp\left(-\frac{\omega}{2\pi v_{10}} \sqrt{\lambda_x^2 \xi_x^2 + \lambda_y^2 \xi_y^2}\right), \quad (19)$$

其中: $\xi_x = |x_i - x_j|$ 和 $\xi_y = |y_i - y_j|$ 为空间两个维度上的空间距离; λ_x 和 λ_y 为指数衰减系数; v_{10} 为距离地面高度 10 m 处的平均风速。

二维空间的波数谱可以由式(19)积分得到,即:

$\omega_m = m\Delta\omega$, $m = 1, 2, \dots, N_\omega$, $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$; $\phi_{ijm}^{(1,2,3,4)}$ 为 4 组相互独立的相位角,同样在 $[0, 2\pi]$ 区间内服从均匀分布。

3.2 FFT 算法

式(18)和式(22)分别给出了一维空间和二维空间情况下的风速时程表达式,具有相同的表达形式,分别为二重和三重求和表达式。随着采样点数量的增大,计算效率将会显著下降。为了改善计算效率,这里引入快速傅里叶算法 FFT。

为了利用 FFT,将式(18)改写为:

$$X(x, t) = \text{Re} \left\{ \sum_{l=0}^{N_\kappa-1} \sum_{m=0}^{N_\omega-1} [B_{lm}^{(1)} e^{i(\kappa_l x + \omega_m t)} + B_{lm}^{(2)} e^{i(\kappa_l x - \omega_m t)}] \right\}, \quad (23)$$

其中, $B_{lm}^{(n)} = \sqrt{4S(\kappa_l, \omega_m) \Delta \kappa \Delta \omega} \exp(i\phi_{lm}^{(n)})$ 。

根据 FFT 理论,式(23)可以进一步改写为:

$$X(x, t) = \text{Re} \{ \text{IFFT}_\kappa [\text{IFFT}_\omega (B_{lm}^{(1)})] + \text{IFFT}_\kappa [\text{IFFT}_\omega (B_{lm}^{(2)})] \}, \quad (24)$$

其中, $\text{FFT}(\cdot)$ 和 $\text{IFFT}(\cdot)$ 分别表示快速傅里叶变换和逆变换。

同样,式(22)可以变换为:

$$X(p_1\Delta x, p_2\Delta y, p_3\Delta t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n_1=0}^{M_1-1} \sum_{n_2=0}^{M_2-1} \sum_{n_3=0}^{M_3-1} \sqrt{4S(\kappa_x^{(n_1)}, \kappa_y^{(n_2)}, \omega_{n_3})} \Delta\kappa_x \Delta\kappa_y \Delta\omega \cdot \right. \\ \left. [B_{n_1 n_2 n_3}^{(1)} \exp\left(i \frac{2\pi n_1 p_1}{M_1} + i \frac{2\pi n_2 p_2}{M_2} + i \frac{2\pi n_3 p_3}{M_3}\right) + B_{n_1 n_2 n_3}^{(2)} \exp\left(i \frac{2\pi n_1 p_1}{M_1} + i \frac{2\pi n_2 p_2}{M_2} - i \frac{2\pi n_3 p_3}{M_3}\right) + \right. \\ \left. B_{n_1 n_2 n_3}^{(3)} \exp\left(i \frac{2\pi n_1 p_1}{M_1} - i \frac{2\pi n_2 p_2}{M_2} + i \frac{2\pi n_3 p_3}{M_3}\right) + B_{n_1 n_2 n_3}^{(4)} \exp\left(i \frac{2\pi n_1 p_1}{M_1} - i \frac{2\pi n_2 p_2}{M_2} - i \frac{2\pi n_3 p_3}{M_3}\right)] \right\} \quad (25)$$

其中, $B_{n_1 n_2 n_3}^{(k)} = \exp(i\phi_{n_1 n_2 n_3}^{(k)})$, $k=1, 2, 3, 4$ 。

同样由FFT理论,式(25)可以进一步改写为:

$$X(p_1\Delta x, p_2\Delta y, p_3\Delta t) = \text{Re} \left\{ \text{IFFT}_x \left\{ \text{IFFT}_y \left[\text{IFFT}_\omega \left(B_{n_1 n_2 n_3}^{(1)} \right) \right] \right\} + \text{IFFT}_x \left\{ \text{IFFT}_y \left[\text{FFT}_\omega \left(B_{n_1 n_2 n_3}^{(2)} \right) \right] \right\} + \right. \\ \left. \text{IFFT}_x \left\{ \text{FFT}_y \left[\text{IFFT}_\omega \left(B_{n_1 n_2 n_3}^{(3)} \right) \right] \right\} + \text{IFFT}_x \left\{ \text{FFT}_y \left[\text{FFT}_\omega \left(B_{n_1 n_2 n_3}^{(4)} \right) \right] \right\} \right\} \quad (26)$$

对比式(26)和(22)可以发现,通过引入FFT算法,空间频率和时间频率的多重求和被FFT算法代替,从而显著改善了风速模拟的计算效率。

3.3 风载荷计算方法

从前面推导已知风速具有随机变化的特征,风速的幅值 v 可以表达为常量或平均风速 v_m 和大气湍流引起的时变量 Δv 之和,即:

$$v = v_m + \Delta v. \quad (27)$$

风载荷的表达式为:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2, \quad (28)$$

其中: ρ 为空气密度, C_D 为风阻系数, A 为迎风面积。

同样,风载荷也可以分解为稳态量和非稳态量的和,即:

$$F = F_m + F_w. \quad (29)$$

非稳态风载荷 F_w 与 Δv 有关,通过对(28)Taylor展开可得:

$$F_w = \frac{\partial F}{\partial v} \bigg|_{v=v_m} \Delta v = \rho C_D A v_m \Delta v. \quad (30)$$

望远镜结构非常复杂,作用在望远镜上的风载荷也同样非常复杂。从望远镜结构的角度,主要考虑图3所示的三方面作用,即主镜、桁架以及环梁和次镜上的风扰动作用。为了简化分析计算难度,将望远镜划分为三层,如图4所示,以这三层的位置来离散采样点,然后根据式(30)来计算风载荷,并根据结构状态方程(10)和(11)来计算风扰动响应。

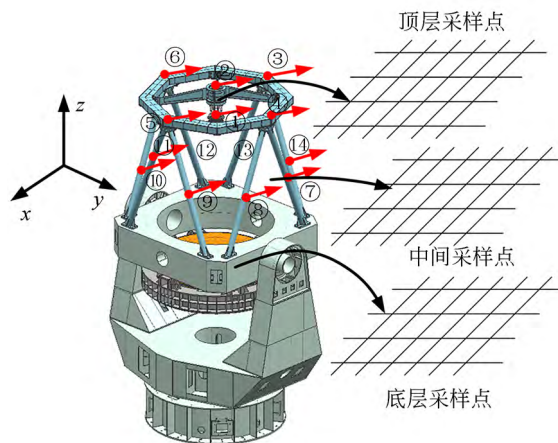


图4 望远镜上的风载荷

Fig. 4 Wind load acting on telescopes

4 数值算例

以图1所示的2 m口径地基望远镜为例,采用本文提出的基于二维随机场的风扰动建模方法模拟望远镜的风扰动环境,并与已有文献进行对比,其中与望远镜结构相关的参数如表1所示。此外,对随机风扰动对望远镜的影响进行了详细的仿真分析并对光学性能进行预测。

4.1 随机风扰动的模拟与验证

根据3.2节所述二维随机场的理论,按图4所示将作用在望远镜的随机风速场简化为三层离散网格并在这些网格点生成随机风速数据,随机风速场离散参数如表2所示。以主镜为例,在主镜镜面位置按图5所示随机采样6个位置,外界平均风速10 m/s情况下,风速的时程变化过程以及相应的功率谱如图6所示。

表 1 风载荷计算参数

Tab. 1 Parameters of wind load

Parameters	Meaning	Value
v_m	External wind speed	10 m/s and 15 m/s
ρ	Air density	1.293 kg/m ³
A_{sm}	Area for SM and baffle	227 500 mm ²
A_{truss}	Area for truss	1 025 088 mm ²
A_{spider}	Area for spider	809 600 mm ²
A_{ring}	Area for top ring	392 370 mm ²
$C_{D,sm}$	Drag coefficient for SM	1.2
$C_{D,truss}$	Drag coefficient for truss	1.2
$C_{D,spider}$	Drag coefficient for spiders	1.2
$C_{D,pm}$	Drag coefficient for PM	1.05
L_x	Spatial length in x direction	2 500 mm
L_y	Spatial length in y direction	2 500 mm
H	Height	6 400 mm

表 2 风速场离散参数

Tab. 2 Discretized parameters of wind speed fields

Parameters	Meaning	Value
z	Height above ground	10 m
z_0	Ground roughness coefficient	0.01
λ_x	Decay coefficient in x direction	7
λ_y	Decay coefficient in y dir	7
N_x	Wave-number in x dir	128
N_y	Wave-number in y dir	128
N_ω	Frequencies	1 024
M_1	Sample numbers in x dir	256
M_2	Sample numbers in y dir	256
M_3	Samplenumbersintimedomain	2048
T	Simulation time length	100s
$\Delta\kappa_x$	Wave-number space in x dir	0.002 5 mm ⁻¹
$\Delta\kappa_y$	Wave-number space in y dir	0.002 5 mm ⁻¹
$\Delta\omega$	Frequency space	0.062 8 s ⁻¹
Δx	Spatial step in x dir	9.766 mm
Δy	Spatial step in y dir	9.766 mm
Δt	Time step	0.048 8 s

从图 6 所示的主镜上 6 个采样点位置的风速时程变化曲线以及功率谱曲线可以得出以下结论:

- (1)从时间历程上看,各个采样点的风速均随时间随机变化;
- (2)在模拟时长范围内,各个采样点风速时

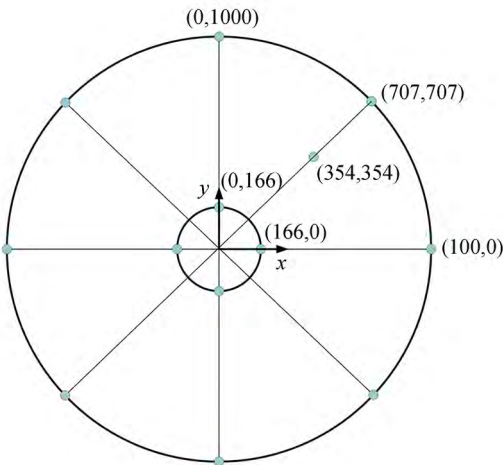
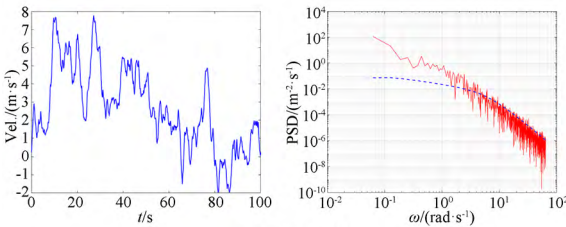


图 5 主镜采样位置

Fig. 5 Sampling points of the primary mirror

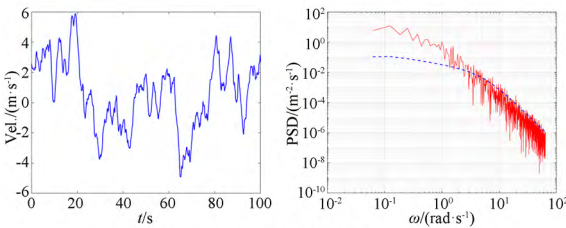
程的功率谱与初始给定的 Davenport 功率变化趋势基本一致,且与文献[18]给出的结论相符。

从以上结论可以看出,基于二维随机场理论而生成的风速场具有空间和时间随机性的特征,



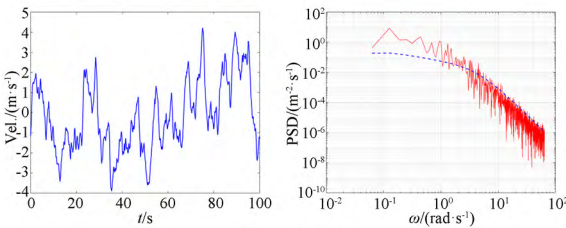
(a) 采样点#1

(a) Sample point #1



(b) 采样点#2

(b) Sample point #2



(c) 采样点#3

(c) Sample point #3

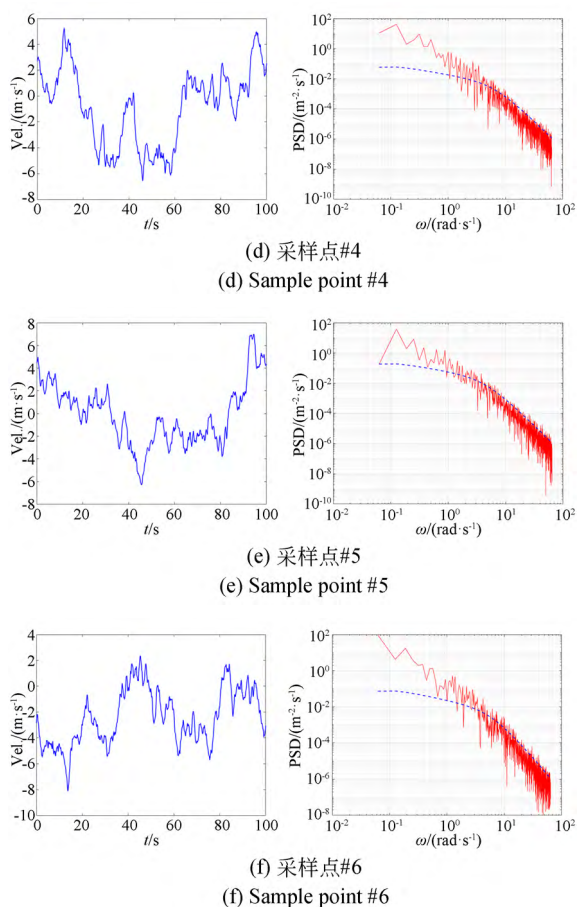


图 6 主镜各个采样位置的风速

Fig. 6 Wind speed for each sample point of the primary mirror

这与实际望远镜使用环境中风速的湍流特性是基本一致的,以此来模拟实际中的风速环境是合理可行的。

4.2 风扰动分析及光学性能预测

利用 4.1 节给出的随机风速场,按 3.3 节所述的计算方法得到平均风速 10 m/s 和 15 m/s 情况下风载荷时间历程数据,并加载到望远镜结构动力学模型中,即可模拟出望远镜上各个位置的风扰动响应。由于望远镜工作中主要关注光学系统性能,而光学系统主要受主、次镜的镜面面形以及相对位置影响,因此在性能模拟与预测时主要考虑主、次镜镜面节点位置的动态变化情况。根据离散节点位置变化,采用非线性最佳拟合的方法计算主、次镜镜面面形精度以及相对空间位置,具体计算方法可参考文献[19],并以此来评估风扰动对望远镜的影响。

在风扰动模拟时,将主镜与次镜及桁架分开考虑,这样有利于详细分析主镜与次镜及桁架之间的相互耦合关系。在主镜单独作用风载荷情况下,主、次镜镜面面形精度变化如图 7 所示,光轴角度变化如图 8 所示,主、次镜相对位置偏差如图 9 所示。

在主镜单独作用 10 m/s 和 15 m/s 风扰动载荷情况下,主镜的面形精度影响很大,最差面形精度分别达到了 45 nm 和 70 nm,而次镜面形精度基本不受影响;主、次镜光轴角度偏差最差时分别达到 0.15" 和 0.25",对相对位置偏差几乎没有影响。

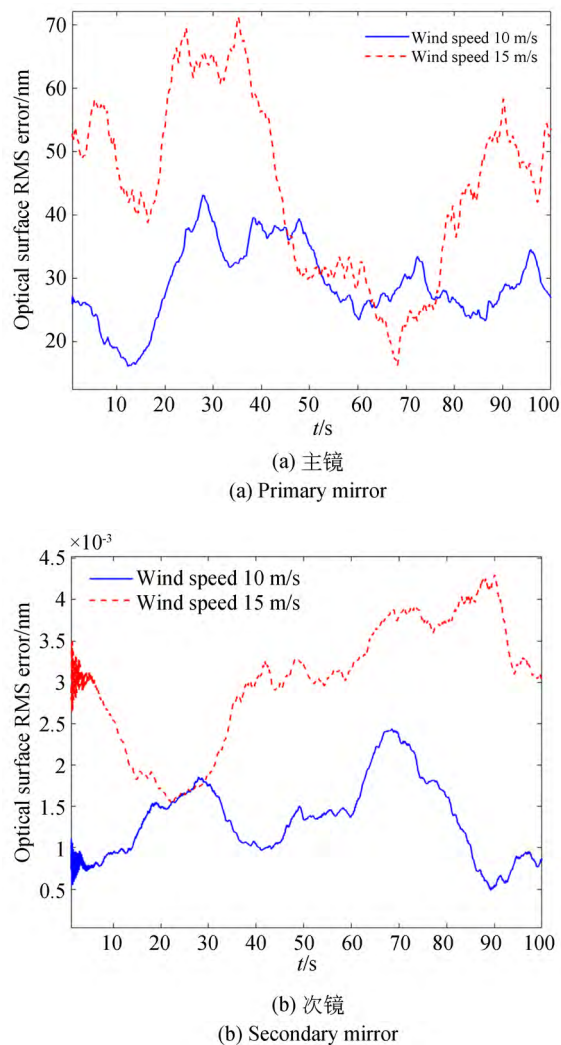


图 7 主镜和次镜镜面面形精度-主镜单独加载

Fig. 7 Surface precision of the primary and secondary mirror-primary mirror loaded separately

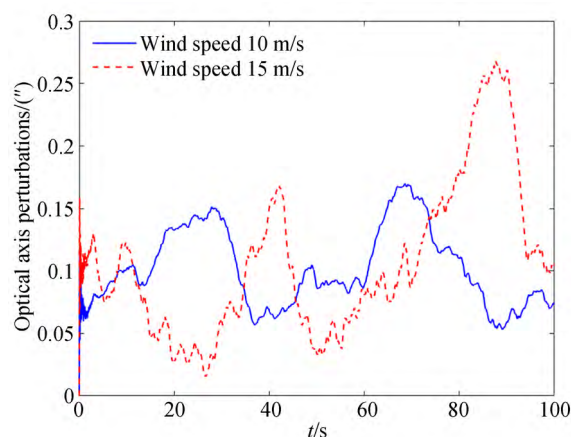


图8 主镜和次镜光轴角度-主镜单独加载

Fig. 8 Optical axis perturbation of the primary and secondary mirror-primary mirror loaded separately

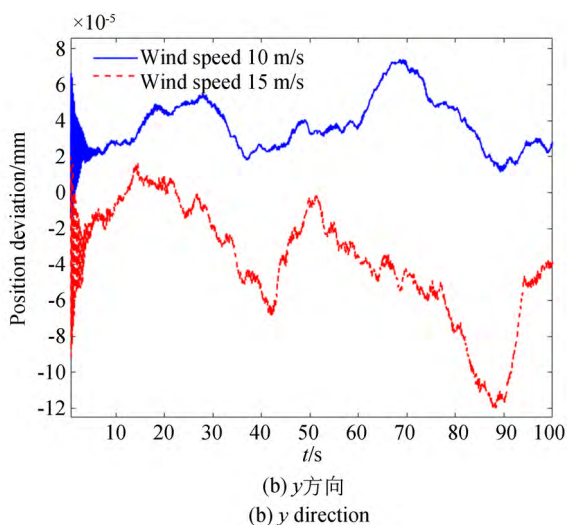
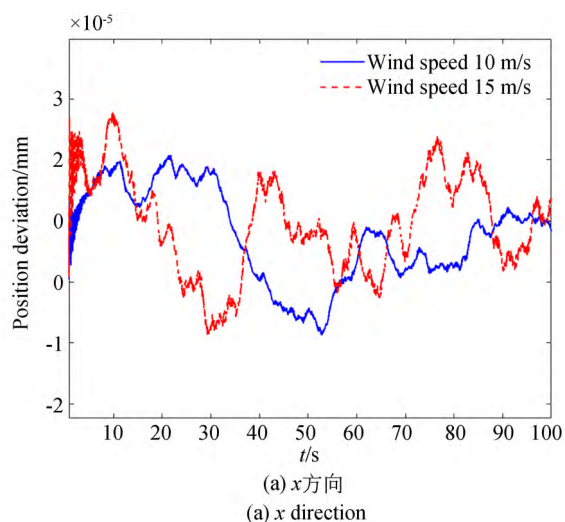


图9 主次镜位置偏差-主镜单独加载

Fig. 9 Position deviation of the primary and secondary mirror-primary mirror loaded separately

在次镜及桁架单独作用风载荷情况下,主、次镜镜面面形精度变化如图10所示,光轴角度变化如图11所示,主、次镜相对位置偏差如图12所示。

在次镜及桁架单独作用风载荷情况下,主镜面形精度受影响相对较小,在整个仿真时段均在5 nm左右;而次镜面形精度变化同样很小,原因在于次镜口径较小;主次镜光轴角度较前一种工况增加幅度很大,初始阶段最大偏差接近8"~10",剩余阶段在4.5"以内,但波动频率明显提高;同样主、次镜y向相对位置偏差增加幅度很大,分别达到了0.1 mm和0.2 mm。对图11和图12(b)

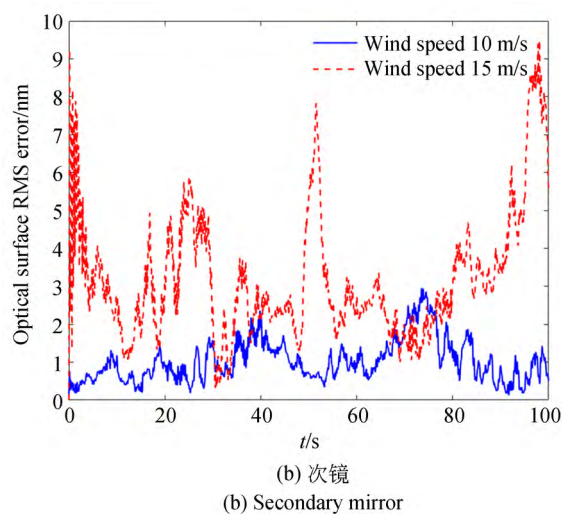
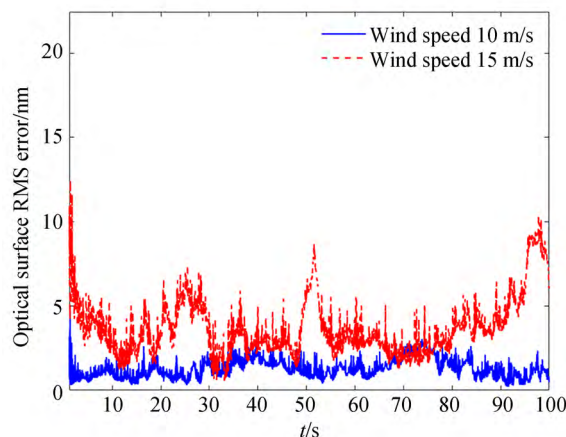


图10 主镜和次镜镜面面形精度-次镜及桁架单独加载
Fig. 10 Surface precision of the primary and secondary mirror-secondary mirror and truss loaded separately

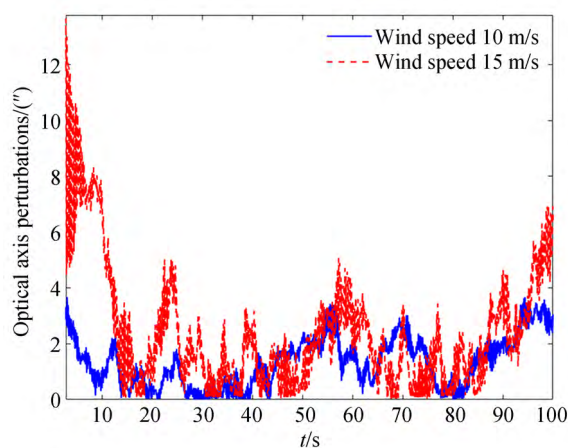


图 11 主镜和次镜光轴角度-次镜及桁架单独加载

Fig. 11 Optical axis perturbation of the primary and secondary mirror-secondary mirror and truss loaded separately

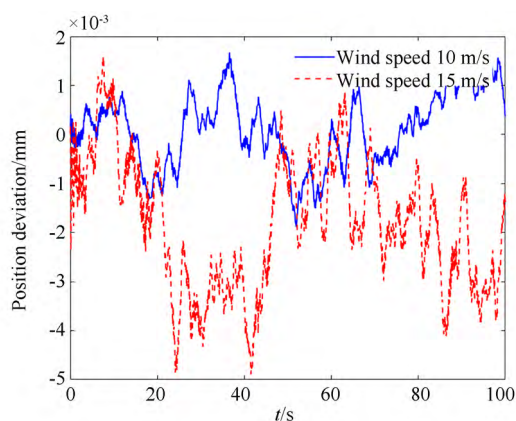
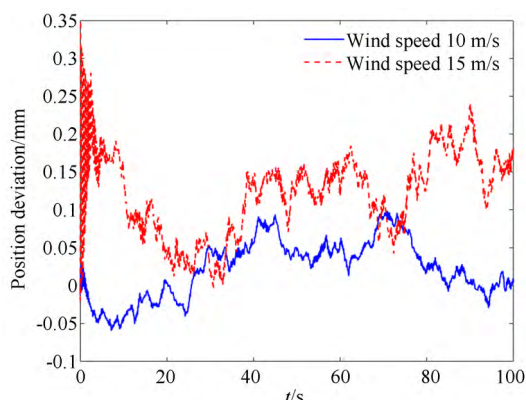
(a) x方向
(a) x direction(b) y方向
(b) y direction

图 12 主镜和次镜位置偏差-次镜及桁架单独加载

Fig. 12 Position deviation of the primary and secondary mirror-secondary mirror and truss loaded separately

所示数据进行 FFT 变换得到频谱如图 13 所示。从频谱曲线中可以看出,风扰动载荷对望远镜的影响集中在低频部分,约 0~5 Hz 区域,高频分量的影响较小。

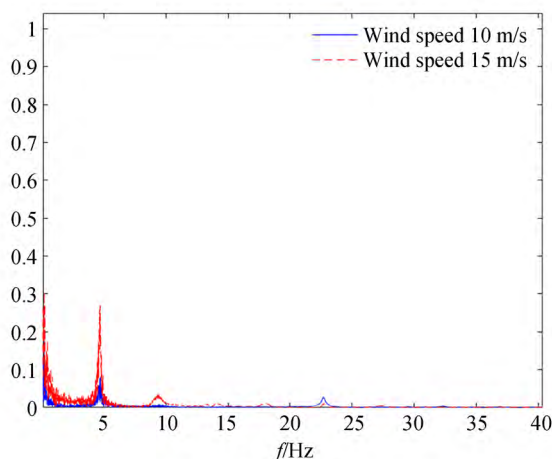
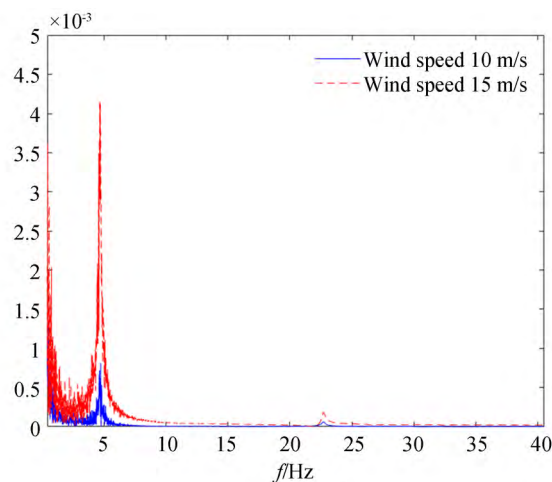
(a) 光轴扰动
(a) Optical axis perturbation(b) 位置偏移
(b) Position deviation

图 13 主次镜偏差频谱-次镜及桁架单独加载

Fig. 13 Frequency spectrum of position deviation between primary and secondary mirror-secondary mirror and truss loaded separately

从以上两种情况下的分析结果对比中可以得出以下结论:

(1) 由于次镜口径较小,相对刚度较大,风扰动对次镜面形精度影响较小;

(2) 主镜面形精度变化主要来源于作用在主镜镜面的风载荷,受次镜及桁架的影响较小,即

主、次镜相互耦合较小;从望远镜结构特征角度看,主镜连同主镜室以及桁架分别连接在四通下表面和上表面,而四通本身刚度很大,因此相互耦合不明显的结果是合理的;

(3)次镜及桁架单元作用风载荷时,主、次镜光轴角度偏差以及相对位置偏差明显增大,将会导致望远镜光学系统成像抖动和模糊。

5 结 论

本文针对大型地基光学望远镜系统性能受风扰动影响显著的问题,研究了风扰动的时程模

拟方法并对望远镜在风扰动下的性能进行预测。利用有限元方法及模态变换,建立了望远镜结构动力学模型。基于二维空间随机场,提出望远镜圆顶内风速的时程模拟方法,此方法可以表达空间和时间频率范围内几乎连续的随机场。对2 m口径望远镜的仿真分析结果表明:在外界平均风速10 m/s和15 m/s情况下,随机风扰动作用在望远镜主镜上会造成主镜面形变差,分别造成最大接近45 nm和70 nm的面形误差;作用在次镜及桁架上的风扰动主要造成低频0~5 Hz光轴角度误差及主、次镜相对位置偏差;主、次镜之间相互耦合效应较小。

参考文献:

- [1] BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. New York: Springer, 2003.
- [2] ANDERSEN T, ENMARK A. *Integrated Modeling of Telescopes* [M]. New York, NY: Springer New York, 2011.
- [3] MACMYNOWSKI D G, BLAUROCK C, ANGELI G Z, et al. Modeling wind-buffeting of the thirty meter telescope [C]. *SPIE Proceedings*, "Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy II. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2006: 6271(01):M2710-M2710.
- [4] KAN F W, EGGERS D W. Wind vibration analyses of Giant Magellan Telescope [C]. *SPIE Proceedings*, "Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy II. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2006.
- [5] ERM T M, ANGELI G Z. TMT wind model validation with measurements on Keck and Gemini [C]. *SPIE Proceedings*, "Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy II. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2006.
- [6] POTTEBAUM T, MACMYNOWSKI D G. Buffeting of large telescopes: wind-tunnel measurements of the flow inside a generic enclosure [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22 (1): 3-19.
- [7] VOGIATZIS K, SEGURSON A, ANGELI G Z. Estimating the effect of wind loading on extremely large telescope performance using computational fluid dynamics [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 5497, Modeling and Systems Engineering for Astronomy, Glasgow, United Kingdom*, 2004, 5497: 311-320.
- [8] MACMYNOWSKI D G, ANDERSEN T. Wind buffeting of large telescopes [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(4): 625.
- [9] MACMYNOWSKI D G, VOGIATZIS K, ANGELI G Z, et al. Wind loads on ground-based telescopes [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(30): 7912-7923.
- [10] GLAESE R M, SHEEHAN M. Vibration mitigation for wind-induced jitter for the giant Magellan telescope [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 8444, Ground-Based and Airborne Telescopes IV, Amsterdam, Netherlands*, 2012, 8444: 300-314.
- [11] 杨德华, 徐灵哲, 徐欣圻. 大型光学天文望远镜风载作用分析 [J]. *光学技术*, 2009, 35 (3): 342-346.
YANG D H, XU L Z, XU X Q. Wind disturbance study on large astronomical telescopes [J]. *Optical Technique*, 2009, 35 (3): 342-346. (in Chinese)
- [12] 周超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 1.2 m望远镜风载作用分析 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40 (5): 889-893.
ZHOU C, YANG H B, WU X X, et al. Influence of wind loading on the 1.2 m telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (5): 889-893. (in Chinese)
- [13] 潘年, 马文礼, 黄金龙. 地基望远镜风载数值分

- 析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 134-140.
- PAN N, MA W L, HUANG J L. Numerical analysis of wind load on ground-based telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 134-140. (in Chinese)
- [14] 徐江海, 宫雪非. 利用数值风洞实验进行四种天文圆顶的风载研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501005.
- XU J H, GONG X F. Study of wind load on four astronomical enclosures based on numerical wind tunnel experiments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501005. (in Chinese)
- [15] 宋玉鹏, 陈建兵, 彭勇波. 二维空间脉动风场波数-频率联合功率谱表达的FFT模拟[J]. 振动工程学报, 2020, 33(4): 660-666.
- SONG Y P, CHEN J B, PENG Y B. Simulation of fluctuating wind field in two-spatial dimensions by FFT implementation of wavenumber-frequency joint power spectrum[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(4): 660-666. (in Chinese)
- [16] 刘章军, 叶永友, 刘增辉. 脉动风速连续随机场的降维模拟[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 8-16.
- LIU Z J, YE Y Y, LIU Z H. Simulation of fluctuating wind velocity continuous stochastic field by dimension reduction approach[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(11): 8-16. (in Chinese)
- [17] BENOWITZ B A, DEODATIS G. Simulation of wind velocities on long span structures: a novel stochastic wave based model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147: 154-163.
- [18] MACMYNOWSKI D G, ANGELI G Z, VOGIATZIS K, *et al.* Parametric modeling and control of telescope wind-induced vibration[C]. *SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation. Proc SPIE 5497, Modeling and Systems Engineering for Astronomy, Glasgow, United Kingdom*, 2004, 5497: 266-277.
- [19] 曹玉岩, 王建立, 陈涛, 等. 基于Hexapod平台的地基大型光学望远镜失调误差主动补偿[J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2452-2465.
- CAO Y Y, WANG J L, CHEN T, *et al.* Active compensation of aberration for large ground-based telescope based on Hexapod platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(11): 2452-2465. (in Chinese)

作者简介:



曹玉岩(1986—),男,吉林大安人,博士研究生,副研究员,2012年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事地基大型光学望远镜系统集成仿真模拟方面的研究。E-mail: yuyan_cao@126.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn