

地基望远镜风载数值分析

潘年^{1,2}, 马文礼¹, 黄金龙¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 风载是影响地基望远镜性能的主要因素之一, 为了研究风载荷的作用以及对望远镜性能的影响程度, 首先建立了望远镜、圆顶和流场的几何模型。然后利用 CFD(Computational Fluid Dynamics) 分析了在外界风速为 10 m/s 的情况下, 3 种不同高角(30°、60°、120°)流场中截面空气速度、压力、湍流动能以及主镜面的静压力的瞬态分布, 最后通过有限元方法获得了主镜去除刚体位移后的面形。仿真结果表明, 望远镜以不同高角观测时主镜面静压力功率谱密度与 Gemini 望远镜的实测结果接近, 真实模拟了风载荷的作用。由风载引起的镜面变形 RMS 值分别为 3.74E-1 nm, 2.5E-2 nm, 1.71E-1 nm, 满足面形精度要求。

关键词: 望远镜; 风载; CFD; 面形精度

中图分类号: TH751; P111.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0134-07

Numerical analysis of wind load on ground-based telescope

Pan Nian^{1,2}, Ma Wenli¹, Huang Jinlong¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

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

Abstract: Wind load is one of the main factors that affects the performance of ground-based telescopes, in order to investigate the function of wind load and the influence degree on the telescope, firstly, the telescope, dome, and exterior flow field geometry were established. Secondly, Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to analyze the instantaneous distribution of the air's velocity, pressure and static pressure on primary mirror, at three different altitude angular(30°, 60°, 120°), when the wind at the speed of 10 m/s. Finally, the primary mirror surface accuracy was gotten after removed the rigid body displacement through the finite element method. The simulation results show that static pressure power spectral density of the primary mirror is close to the measured data of Gemini telescope, better simulate the practical effect of the wind load. The RMS values of the mirror surface deformation caused by wind load are 3.74E-1 nm, 2.5E-2 nm, 1.71E-1 nm meet the surface accuracy requirement.

Key words: telescope; wind load; CFD; surface accuracy

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(60978050); 中国科学院光电技术研究所研究生创新基金(C12K011)

作者简介: 潘年(1987-), 男, 博士生, 主要从事光机结构有限元仿真方面的研究。Email: wopannian@163.com

导师简介: 马文礼(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大口径望远镜总体结构设计方面的研究。Email: mawenli@ioe.ac.cn

0 引言

为了获得好的成像质量,地基望远镜往往选择视宁度较好的山顶^[1],而山顶的风通常都较大。在风的作用下,主镜的镜面会产生变形^[2],影响成像质量。因此,研究风载荷的作用,对指导望远镜的设计有非常重要的意义。

国外望远镜项目在研究风载时主要采用风洞和水洞实验,如 7.5 mJ NLT 望远镜^[3]、10 m Keck 望远镜^[4];随机振动分析,如 8 m VLT 望远镜^[5];CFD 数值仿真,如 100 m OWL 望远镜^[5]、4 m WFCAM 望远镜^[6]、8 m Gemini 望远镜^[7-8]。风洞和水洞实验是评估风载最直接的方法,但风洞和水洞实验往往存在准备周期长、费用贵、无法提供与实际情况一致的雷诺数的缺点;随机振动分析首先假定风载的功率谱密度函数,然后对望远镜结构进行随机振动分析,获得风载对望远镜性能的影响。随机振动分析得到了响应和频率之间的关系,对望远镜的控制带来了极大的方便,但为了获得风载的功率谱密度函数,需要一些流场以及与流场相关的结构参数,这些结构参数的确定往往基于工程经验,普适性差,且随机振动分析不能应用于流场与结构场之间有相互作用的回流以及高湍流强度区域;CFD 数值仿真因不受物理模型和实验模型的限制、省时省钱、能提供在不同的雷诺数,不同初始条件和边界条件下详细的流场信息等特点广泛的应用在望远镜风载作用以及圆顶结构形式的研究中,随着计算机硬件的不断升级以及先进的湍流模型、非结构网格划分、墙函数的引入,CFD 计算结果变得越来越可靠。然而,国内在风载研究方面只有 4 m LOMOST 望远镜^[9]、长春光机所 1.23 m 望远镜^[10]采用随机振动分析进行了部分研究,尽管也获得了很多有价值的结论,但是与国外差距仍较大。

文中针对主镜口径为 2 m 的望远镜系统,在建立望远镜、圆顶以及外部流场的模型之后,借用 CFD 分析了望远镜处于 3 种不同高角时,在外界给定风速下,流场中截面空气速度、压力、湍流动能以及主镜面的静压力分布,最后将压力分布导入有限元软件得到主镜的面形变化,旨在用数值方法评价风载的实际作用以及风载对望远镜性能的影响程度。

1 模型假设

望远镜研制需要经历概念设计、详细设计、加工

与检测、外场建设、集成和调试等阶段,对于方案制定的概念设计阶段,望远镜站址以及周边环境情况尚未确定,鉴于这些不确定性,在研究风载对望远镜的影响时,对望远镜、圆顶结构模型以及外部环境作出了适当的简化。望远镜以及圆顶模型如图 1 所示,望远镜模型包括了主镜室、桁架、俯仰轴系、方位轴系等,圆顶初步设计为直径 15 m、高度 12 m、壁厚 0.8 m 的圆柱形敞开式结构,空气假定为不可压缩、粘性、绝热、常物性。

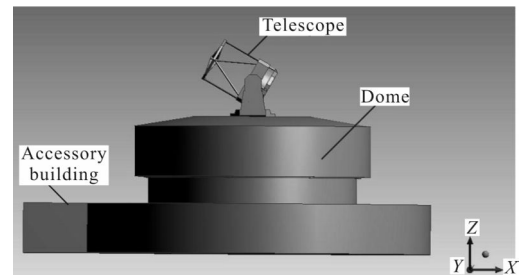


图 1 圆顶和望远镜简化模型

Fig.1 Simplified model of the dome and telescope

2 仿真分析

风载的作用是通过风压传递的^[11],而风压可以表示为:

$$P = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1)$$

风载作用力为:

$$F = PA = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \quad (2)$$

式中: C_D 为风阻系数; ρ 为空气的密度; A 为结构迎风面的面积; U 为风速大小; P 为风的压力; F 为风载作用力。因此,为评价风载的作用以及风载对望远镜性能的影响,首先要求解望远镜周围的流场分布。

2.1 外部流场

为了减小由于边界条件的不确定性引起的计算误差,建立了如图 2 所示 255 m×150 m×100 m 的外

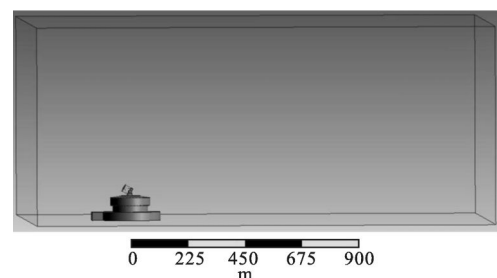


图 2 望远镜外部流场

Fig.2 Telescope external flow field

部流场,流场的入口位于圆顶前 42 m 处,流场的出口位于圆顶下游 213 m 处。

2.2 网格划分

在权衡分析结果收敛稳定性、计算速度和计算精度后,文中采用了非结构网格划分方法^[12],平均网格尺寸为 0.1 m,在镜面以及望远镜光学支撑等流场参数梯度变化较大的区域对网格进行了加密,平均网格尺寸为 0.05 m,整个计算区域有 56 375 169 个单元,望远镜以及流场部分网格如图 3 所示。

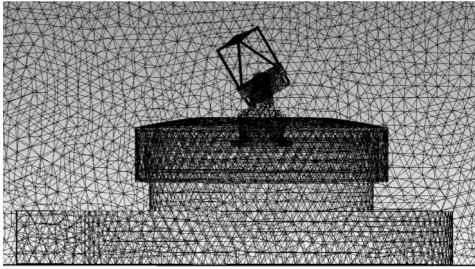


图 3 望远镜与外部流场网格划分

Fig.3 Meshing of telescope and external flow field

2.3 湍流模型

湍流模型是为了模拟湍流流动而引入的求解模型,近年来随着 CFD 理论不断发展,已经出现了很多的湍流模型,例如 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 双方程模型、SST (Shear Stress Transport)^[12],双方程模型能将速度和长度分开求解,在数学方程和求解精度之间找到了一个最好的平衡点,而 SST 是一种新的湍流模型,它联合了 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型的优势,在近壁面区域自动转换为 $k-\omega$ 模型,在远离壁面区域自动转换为 $k-\varepsilon$ 模型,可以精确的预测流动的开始和负压力梯度条件下的流体的分离量,由于考虑了湍流剪切应力,从而不会对涡流黏度造成过度预测,因此文中采用了 SST 湍流模型。

$k-\varepsilon$ 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \varepsilon) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] \\ &+ \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: k 为湍流动能; ε 为湍流动能耗散; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 、 σ_ε 为常数; μ 为粘度; ρ 为流体的密度; μ_t 为湍流粘度; P_k 为粘性力和浮力的湍流产物,其方程为:

$$P_k = \mu_t \nabla \vec{U} \cdot (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{U} (3\mu_t \nabla \cdot \vec{U} + \rho k) \quad (4)$$

$k-\omega$ 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - 0.09 \rho k \omega \\ \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] \\ &+ \frac{5}{9} \frac{\omega}{k} P_k - 0.075 \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ω 为湍流频率。

2.4 边界条件的设置

为了真实的模型实际环境,将望远镜和圆顶外表面设定为粗糙度 0.5、无滑移的墙壁;流场的顶部和两侧设定为可自由滑移的墙壁,流场的入口为均匀的 10 m/s、湍流强度 I 为 3.5%、湍流长度尺寸 l 为 1.05 m;流场的出口为标准的压力出口,流场参考压力设定为 780 mb (1mb=100Pa)。

$$I = 0.16 \left(\frac{UD}{\nu} \right)^{-1/8} \quad (6)$$

$$l = 0.07D \quad (7)$$

式中: D 为圆顶直径; ν 为空气运动粘度。

2.5 求解器的设置

求解器的设置关键是瞬态时间步长的设定,在瞬态模拟中,时间步长是一个很重要的参数,如果时间步较大,求解点通常不能反映真实的现象,如果时间步较小,尽管能真实反映现象,但求解负担很大。通常根据 Courant 数在 2~10 之间^[13]来设定瞬态时间步长,其定义式为:

$$\text{courant} = \frac{U \Delta t}{\text{elementsize}} \quad (8)$$

式中: Δt 为时间步长;elementsize 为网格的最小尺寸。当 Courant=2 时,在速度为 10 m/s,单元最小尺寸为 0.005 m 的情况下,时间步长 Δt 设定为 0.01 s。

2.6 仿真结果

如图 4、5、6 所示 3 种不同高角 211 s 后中间截面速度分布所示,在分析模型迎风面上,由于空气受到模型表面的阻滞速度降低,而在圆顶前缘及望远镜上方存在小范围的加速过程,速度增量为来流速度的 20%~30% 左右;图中速度较低的区域是典型的回流区,它不但影响通风效率,还会恶化望远镜的观测视宁度,降低成像质量。回流以及涡流区如图 7、8、9 中所示的 3 种高角 211 s 后中间截面速度矢量分布所示。随着望远镜高角的增加,主镜面附近的流场变得不稳定,这种不稳定性可以从图 10、11、12 中所示的 3 种不同高角 211 s 后中间截面湍流动能分布中得知,当望远镜处于低高

角的时候,湍流区域主要来自于主镜以及次镜组边缘,并没有严重干扰望远镜的主光路,对望远镜观测的影响较小。然而当望远镜背风观测(120°)时,如图 9 所示,由于在主镜面附近出现了涡流,空气的速度波动很大,从图 12 中发现望远镜主光路的大部分区域都受到了不同程度的扰动,如果空气中存在温度梯度,将严重影响望远镜的成像质量。

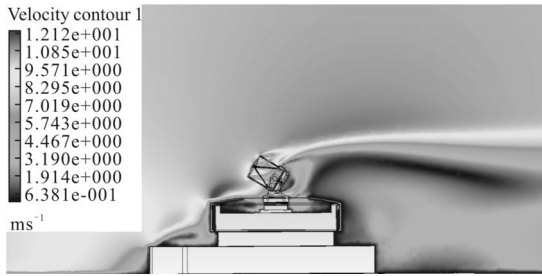


图 4 30°高角中截面速度分布

Fig.4 30 altitude angular velocity distribution in the cross section

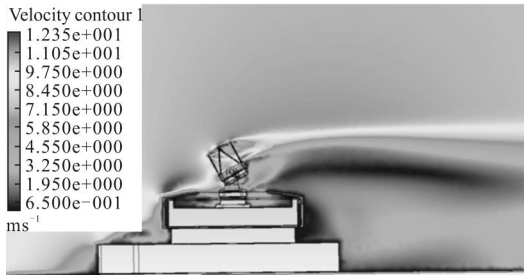


图 5 60°高角中截面速度分布

Fig.5 60 altitude angular velocity distribution in the cross section

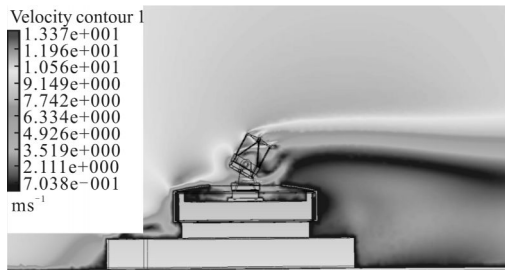


图 6 120°高角中截面速度分布

Fig.6 120 altitude angular velocity distribution in the cross section

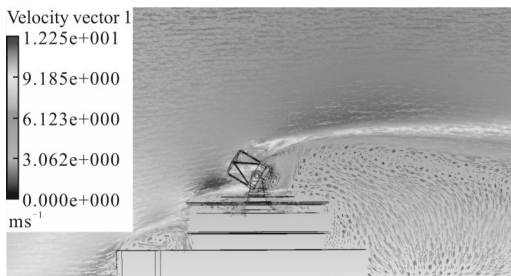


图 7 30°高角中截面速度矢量分布

Fig.7 30 altitude angular velocity vector distribution in the cross section

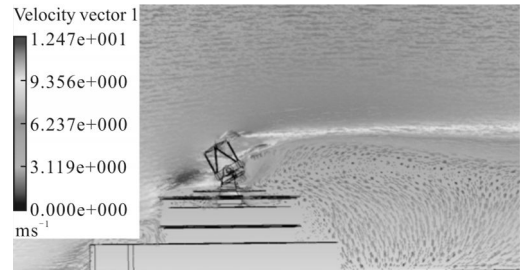


图 8 60°高角中截面速度矢量分布

Fig.8 60 altitude angular velocity vector distribution in the cross section

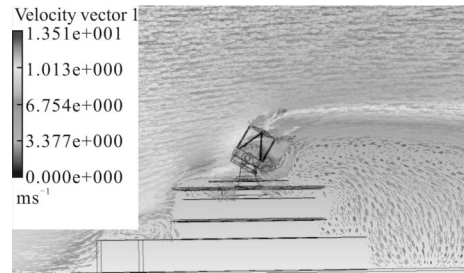


图 9 120°高角中截面速度分布

Fig.9 120 altitude angular velocity distribution in the cross section

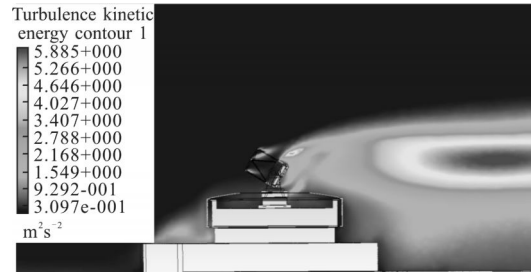


图 10 30°高角中截面湍流动能

Fig.10 30 altitude angular turbulent kinetic energy in the cross section



图 11 60°高角中截面湍流动能

Fig.11 60 altitude angular turbulent kinetic energy in the cross section

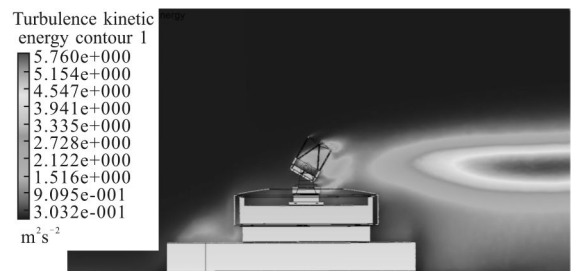


图 12 120°高角中截面湍流动能

Fig.12 120 altitude angular turbulent kinetic energy in the cross section

由于模型迎风面上空气速度的降低,根据低速不可压缩流动总压、静压以及动压的伯努利公式,当流体速度降低的时候静压必然升高,3种不同高角主镜 211 s 后静压(表压)分布如图 13、14、15 所示,不同高角主镜静压峰值主要分布在镜面的迎风面上,并沿中截面对称分布,不同高角静压力峰值分别为 66.54 Pa、49.68 Pa、-57.03 Pa,表明随着望远镜高角的增加主镜面静压力减小。

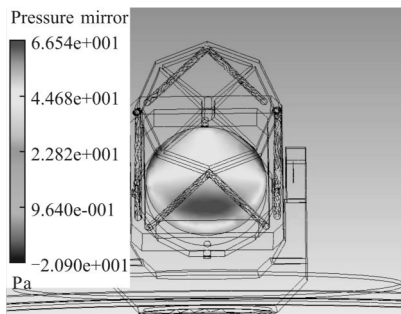


图 13 30°高角镜面静压力分布

Fig.13 30 altitude angle static pressure distribution on mirror

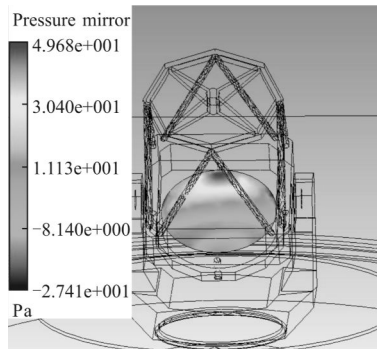


图 14 60°高角中截面静压力分布

Fig.14 60 altitude angle static pressure distribution on mirror

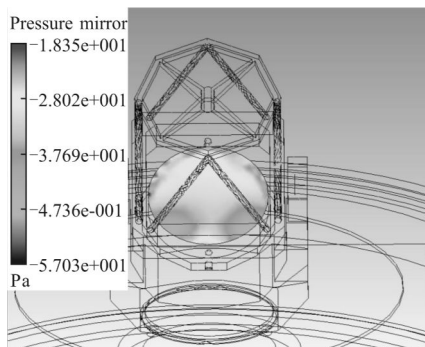


图 15 望远镜 120°角中截面静压力分布

Fig.15 120 altitude angle static pressure distribution on mirror

主镜面静压力功率谱密度与 Gemini 实测结果^[14-15]对比如图 16、17、18 所示,其中 f 表示归一化频率,当望远镜迎风观测时(30°,60°)仿真结果与实测结果比较接

近,较好地模拟了实际情况。当望远镜背风观测时(120°),由于主镜面湍流的出现,导致仿真结果与实测结果之间存在一定的偏差,但仍较好的捕捉了镜面的静压力变化趋势,因此分析结果可以用于评价望远镜外部风载。频率 f_0 与外部湍流有关,其定义式为:

$$f_0 = \frac{U}{\pi l} \quad (7)$$

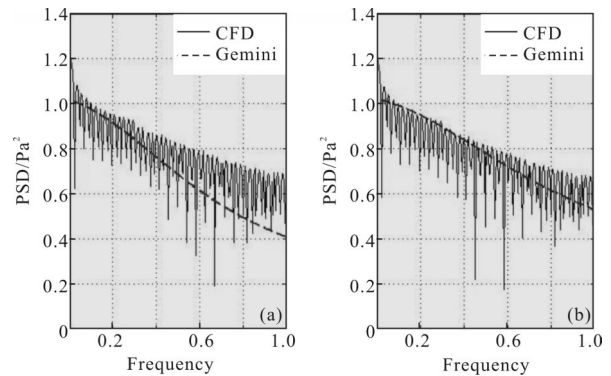


图 16 30°高角镜面探测点静压力功率谱密度与 Gemini 对比

Fig.16 30 altitude angle mirror static pressure power spectral density compared with Gemini

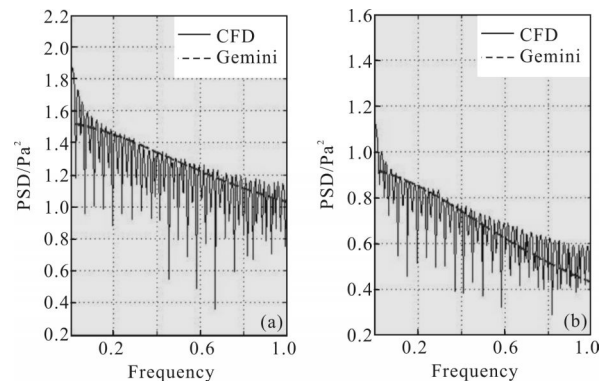


图 17 60°高角镜面探测点静压力功率谱密度与 Gemini 对比

Fig.17 60 altitude angle mirror static pressure power spectral density compared with Gemini

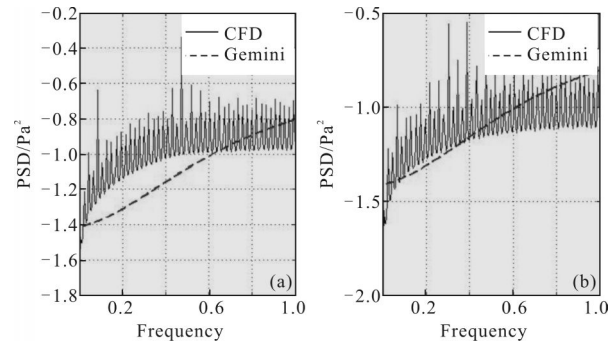


图 18 120°角镜面探测点静压力功率谱密度与 Gemini 对比

Fig.18 120 altitude angle mirror static pressure power spectral density compared with Gemini

将 CFD 分析得到的镜面压力导入有限元软件中得到镜面的变形, 镜面材料参数见表 1, 然后通过 Zernike 拟合提取镜面面形, 不同高角主镜去除刚体位移后镜面面形如图 19、20、21 所示, 镜面变形集中在镜子的迎风边缘, 变形的峰值数量级在 0.1~1 nm

表 1 主镜材料结构参数

Tab.1 Structural parameters of primary mirror

Material	Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Young modulus /GPa	Poisson ratio	Specific heat / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}$
ULE	2210	67.6	0.17	766

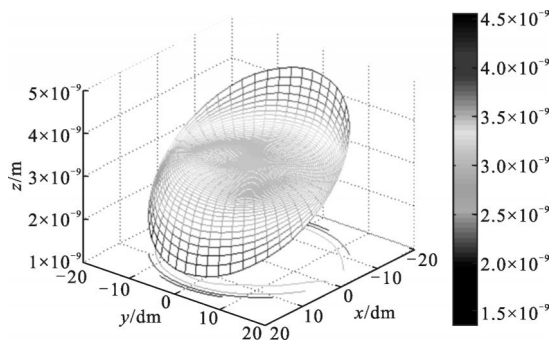


图 19 30°高角主镜面型提取结果

Fig.19 30 altitude angle telescope primary mirror shape

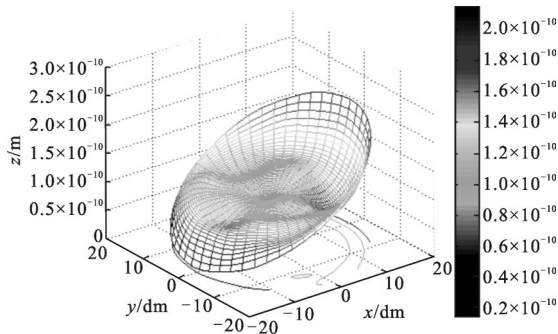


图 20 60°高角主镜面型提取结果

Fig.20 60 altitude angle telescope primary mirror shape

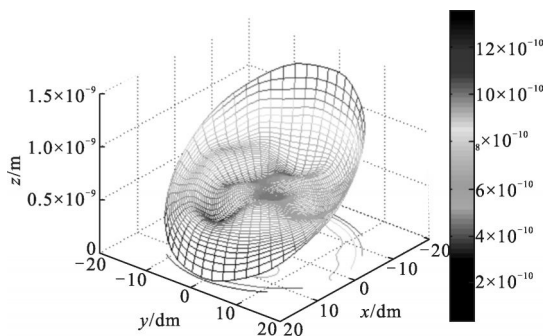


图 21 120°角主镜面型提取结果

Fig.21 120 altitude angle telescope primary mirror shape

之间。当望远镜迎风(30°, 60°)观测时, 随着高角的增加, 主镜空气动力学结构将减少, 由风载引起的主镜变形也减小。60°高角观测相比 30°高角观测, 镜面变形降低了 1 个数量级; 当望远镜背风(120°)观测时, 由于主镜面附近涡流的出现, 引起镜面附近流场、压力场不稳定的变化, 导致镜面变形出现了波动, 相比 60°高角观测时, 镜面变形增大; 镜面面形变化的 PV 值与 RMS 值如表 2 所示, 从表 2 可知, 不同高角下镜面变形 RMS 值在 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ nm 之间, 满足由风载引起的镜面变形小于 60 nm^[14]的面形要求。因此, 采用敞开式圆顶, 在外界风速为 10 m/s 的情况下, 由风载荷引起的面形变化在精度允许的范围内, 风载对望远镜性能的影响较小。

表 2 不同高角主镜变形 PV 值与 RMS 值

Tab.2 PV and RMS value of primary mirror deformation at different altitude angle

Pointing gesture	30°	60°	120°
PV/nm	3.192	2.008E-1	1.301
RMS/nm	3.74E-1	2.5E-2	1.71E-1

3 结论

文中借助 CFD 和有限元技术, 分析了在给定风速情况下, 3 种高角流场中截面空气速度、压力、湍流动能、主镜面的静压力分布以及风载引起的主镜面形变化, 有效地评价了风载的实际作用以及对望远镜性能的影响程度。对后续大口径地基望远镜的风载作用分析、望远镜圆顶结构形式的选择、主镜和支撑设计有一定的指导意义和借鉴作用, 但对如何减小望远镜背风观测时主镜面附近出现的涡流, 还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] Pierre Y B. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. New York: Springer, 2003.
- [2] Neill D R, Sebag J, Warner M, et al. Wind induced image degradation of the LSST telescope [C]//SPIE, 2005, 5877: 1-11.
- [3] Ando H. Some airflow properties of telescope enclosures estimated from water-tunnel tests [J]. *Publications of the*

- Astronomical Society of the Pacific*, 1991, 103: 597–605.
- [4] Kiceniuk T, Potter K. Internal air flow patterns for the Keck 10 meter telescope observatory dome [R]. US: Keck Observatory Report #166, 1986.
- [5] Quattri M, Koch F, Noethe L, et al. OWL wind loading characterization: a preliminary study [C]//SPIE, 2003, 4840: 459–470.
- [6] Chylek T, Timothy C C, Shutt D J, et al. A numerical investigation of three dimensional turbulent air flow around WFCAM at the UK infrared telescope[C]//SPIE, 2004, 5497: 161–173.
- [7] Quattri M R, Haase R M, Barreto C M, et al. Wind turbulence structure inside telescopes enclosures [C]//SPIE, 2008, 7017: 1–13.
- [8] Young D S. Numerical simulations of airflow in telescope enclosures[J]. *Astron J*, 1996, 112: 2896–2908.
- [9] Yang Dehua, Xu Lingzhe, Xu Xinqi. Wind disturbance study on large astronomical telescopes [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3): 342–346. (in Chinese)
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.
- [10] Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, et al. Influence of wind loading on the 1.2 m telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 889–893. (in Chinese)
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.
- [11] Cheng Jingquan. Principle and Design of Astronomical Telescope [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)
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.
- [12] Xie Longhan, Zhao Xinyu, Zhang Jiongming. ANSYS CFX Fluid Analysis and Simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012. (in Chinese)
谢龙汉, 赵新宇, 张炯明. ANSYS CFX 流体分析及仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [13] Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis—CFD Software Principles and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] Cho M K, Warner M, Lee J P. Wind buffeting effects on the Gemini 8m primary mirrors[C]//SPIE, 2001, 4444: 302–314.
- [15] Douglas G, Mac Mynowski, Konstantinos Vogiatzis. Wind loads on ground-based telescopes [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(30): 7912–7923.