

利用数值风洞实验进行四种天文圆顶的风载研究

徐江海^{1,2,3} 宫雪非^{1,2,4}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042

³中国科学院大学, 北京 100049

⁴中国南极天文中心, 江苏 南京 210042

摘要 基于标准 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型和 2.5 m 光学望远镜的 4 种典型天文圆顶, 通过计算流体力学软件 Fluent 进行数值风洞模拟实验。研究了在不同方向的恒定风作用下, 圆顶打开时望远镜周围风速、湍流动能的分布状态和对天文观测的影响, 以及圆顶关闭时风场对于圆顶外壁的压力情况。结果表明, 封闭性较好的经典圆顶和球形圆顶对于不同方向风的阻隔效果明显, 望远镜处于低速风环境, 望远镜周围湍流动能较低, 但视宁度较大; 开放性更好的柱式和蚌壳折叠式圆顶所保护的望远镜则更多地处于高速风环境, 视场方向的湍流动能相对较高, 但视宁度相对较小; 圆顶关闭时, 顺风方向上, 4 种结构表面所受风压均呈现由正高压向负高压转化, 最终接近于 0 的发展趋势。根据分析结果提出了不同天文圆顶的适用条件和不利因素, 为今后不同气候环境下光学望远镜圆顶结构的设计提供了参考。

关键词 大气光学; 大气湍流; 天文圆顶; 数值风洞模拟; 结构设计; 计算流体力学

中图分类号 TH 751

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0501005

Study of Wind Load on Four Astronomical Enclosures Based on Numerical Wind Tunnel Experiments

Xu Jianghai^{1,2,3} Gong Xuefei^{1,2,4}

¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁴Chinese Center for Antarctic Astronomy, Nanjing, Jiangsu 210042, China

Abstract Based on the two-equation $k-\varepsilon$ turbulence model and four typical astronomical enclosures for the 2.5 m optical telescope, the numerical wind tunnel simulation is conducted by the computational fluid dynamics software Fluent. With the environment of different wind directions and same wind velocity, the distributions of the wind velocity and turbulence kinetic energy around the telescopes and the effects on astronomical observation when the enclosures are opened and pressure distributions on the enclosures when the enclosures are closed are obtained. The results show that when the enclosures are opened, the classical and calotte enclosures with better closure property have significant effects to prevent the telescopes from high-speed wind of different directions and cause low turbulence kinetic energy but high seeing around the telescopes, while the columnar and foldable enclosures with better openness make the wind velocity around the telescopes and the turbulence kinetic energy along the observation directions both much higher, but the

收稿日期: 2015-01-04; 收到修改稿日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(U1331119)

作者简介: 徐江海(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事南极天文望远镜圆顶部分风载动力学分析等方面的研究。

E-mail: jhxu@niaot.ac.cn

导师简介: 宫雪非(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事天文仪器结构设计与分析等方面的研究。

E-mail: xfgong@niaot.ac.cn(通信联系人)

seeing are both much lower. When the enclosures are closed, the surface pressure on the four enclosures all change from positive maximum to negative maximum and then approach zero along the wind direction. According to the analytical results, some applicable conditions and unfavorable factors of different astronomical enclosures are proposed, which provide a reference for the structural design of astronomical enclosures under different weather conditions in the future.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; astronomical enclosures; numerical wind tunnel simulation; structural design; computational fluid dynamics

OCIS codes 010.1330; 010.7060; 350.1260

1 引 言

现代光学天文望远镜观测精度的不断提高,给望远镜及其天文圆顶的设计提出了更高的要求。因此,分析风载作用对天文圆顶的影响,考察风载环境下光学天文望远镜的工作状态变得十分必要。

天文圆顶,作为光学望远镜赖以存身的场所和正常观测的保障,主要功能在于保障内部望远镜免遭光照、冰雪、风载、灰尘等的侵害,其结构的合理性将直接影响到天文观测的效率和精度。天文圆顶的一般设计要求包括:1)结构上允许内部望远镜在各个方向上转动,减少热量对望远镜观测的影响;2)提供必备的空间以容纳控制、辅助设备;3)圆顶及镜面处的视宁度尽可能小^[1]。

本文通过对不同结构形式的天文圆顶建立三维模型,利用计算流体力学(CFD)的理论和通用计算流体力学软件 Fluent 进行数值风洞实验,模拟出不同天文圆顶在一定的风载及温度条件下的工作情况,得出天文圆顶和内部望远镜周围的速度、湍流动能(TKE)和视宁度等信息,为今后圆顶形式的选择和结构的设计提供依据和参考。

2 天文圆顶的结构形式

经典形式的天文圆顶,由两个半球形组成,并在其上开设不同形式的天窗,圆顶下部设有轨道和小车,在承担整座圆顶重量的同时,使得望远镜能够随着圆顶 360°转动,配合天窗以便观察天空中任意目标,图 1(a)所示的北京天文台兴隆观测站的 2.16 m 光学天文望远镜即采用经典圆顶形式^[2]。随着技术的发展,天文望远镜观测的精度不断提高,对环境的要求也越来越高,大型天文望远镜圆顶的设计过程,更多地考虑到风载、温度、压力等环境因素和观测视场、设计建造成本等对其的影响。同时,随着各种分析工具、计算手段的成熟与发展,越来越多的新形式的圆顶被设计并投入使用,如已建成并使用数年的荷兰开放式望远镜(DOT)[图 1(b)]和瑞典 1 m 口径太阳望远镜所采用的蚌壳折叠式圆顶就是一种新的圆顶形式^[3-4]。

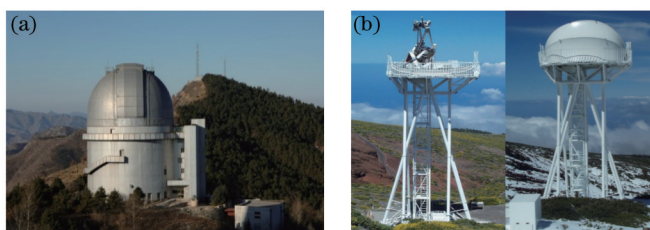


图 1 经典圆顶和折叠式圆顶方案。(a) 兴隆观测站的 2.16 m 光学天文望远镜圆顶; (b) DOT

Fig.1 Examples of classical and foldable enclosures. (a) Enclosure of the 2.16 m optical telescope at Xinglong station; (b) DOT

现代的圆顶结构按照几何形状,大致可分为球形圆顶和柱形圆顶^[1]。球形圆顶,如图 2(a)所示的 30 m 望远镜(TMT)圆顶^[5-6],体积相对较小,由于其结构的对称性,使得迎风和抗强风的能力较强,且球形表面可减少积雪和凝霜,但球形结构易使内部望远镜上方存在风流提升效应,影响视宁度。柱形圆顶虽然结构形式的效率较低,但通风性能较好,且建造成本相对较小,如图 2(b)所示由欧洲南方天文台研制的甚大望远镜(VLT)^[7]。圆顶按照使用方式,可分为旋转圆顶和随动圆顶。旋转圆顶可允许圆顶和望远镜独立旋转,以便内部起重机及升降机等设备安装在圆顶上,使望远镜周围有很大的可用空间。随动圆顶则是圆顶随望远镜转动而同步转动,这种结构总体尺寸较小,造价也低,但由于转动质量提高,使得控制复杂化。

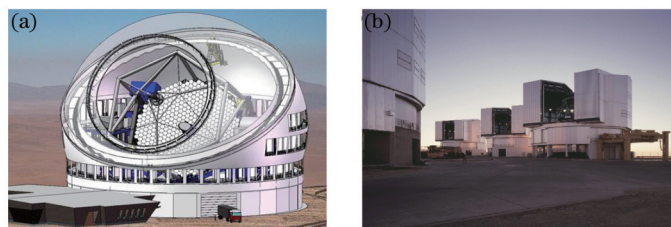


图2 球形圆顶和柱形圆顶方案。(a)TMT球形圆顶;(b)VLT

Fig.2 Examples of calotte and columnar enclosures. (a) Enclosure of TMT; (b) VLT

3 风载作用的研究方法

风载作用对于圆顶结构的选择有着重要的影响。风载一般包括顺风向力、横风向力和竖向力,主要有以下几个特点:1)风载与受载结构的空位位置有关,受地形地貌等环境因素的影响;2)风载与结构的几何外形有关,不同结构对于风的敏感程度不同;3)对具有明显非线性特征的结构,可能会产生流固耦合效应。

3.1 风载分析的一般思路

目前,风载计算的方法主要包括^[8]:

1) 根据实际风场的平均风速,采用静风载计算方法,通过有限元软件(如 ANSYS)将载荷直接施加到圆顶、望远镜受力面,最终得出结构的静态响应。这种方法计算简单,计算规模最小,但对于复杂结构,忽视了结构对于风速、风压、风向的影响,距离真实情况差别最大。

2) 根据风的随机统计特性,采取风速功率谱密度(PSD)描述的风载^[9],借助有限元分析方法,可以得出风载作用下圆顶、望远镜的动态特性。这种方法计算规模较小,允许望远镜的有限元模型具有相当的细节,但无法清楚地显示风的流动细节,对于复杂结构的风载计算尤其复杂。

3) 数值风洞技术,根据计算流体动力学理论,在计算机上模拟结构周围风场的流动和变化情况,最终求解结构表面风载。数值风洞的使用,可以降低试验成本、缩短试验周期,同时方便修改模型和工况条件等,使分析更贴近实际情况,但计算规模较大,对计算机软硬件要求较高。

CFD是研究气动光学效应的一种常用方法^[10],CFD中使用纳维-斯托克斯(N-S)方程组描述湍流运动,用于N-S方程组的计算方法主要有三种:直接数值模拟法(DNS)、大涡模拟法(LES)和雷诺平均法(RANS)^[11]。利用CFD进行风载模拟分析,主要包括以下内容:计算网格的生成,湍流模型的选取,边界条件设置,求解并监控。此外,还包括前期建模和计算结果后处理等。

3.2 湍流模型的数学描述

在结构风场的工程计算中,常温常压下的空气可以简化为不可压缩牛顿流体^[12]。基于质量和动量守恒原理,湍流瞬时控制方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i \mathbf{u}) = -\frac{\partial p_o}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

式中 \mathbf{u} 为速度矢量, ρ 为流体密度, u_i 为 i 方向的速度分量, t 为时间, x_i 和 x_j 为相互垂直的两坐标轴, p_o 为流体微团上的压力, τ_{ij} 为分子粘性作用而产生的作用在微团表面上的粘性应力 τ 的分量。

采用RANS,通过平均值与脉动值之和代替流动变量的瞬时值,有

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}', \quad u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad u_j = \bar{u}_j + u'_j, \quad u_k = \bar{u}_k + u'_k, \quad (3)$$

式中 $\bar{\mathbf{u}}$ 为平均速度, \mathbf{u}' 为速度脉动。将(3)式代入瞬时状态下的连续方程(1)式和动量方程(2)式,并对时间取平均,可得基于雷诺应力的时均N-S方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\bar{u}_i}{dt} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}), \quad (5)$$

式中 μ 为动力粘度, $\overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力, δ_{ij} 为克罗内克函数,即 $i=j$ 时,为 1, $i \neq j$ 时,为 0。

对于发展非常充分的湍流流动,标准 $k-\varepsilon$ 模型具有很好的模拟效果^[13],稳定性好,且适合初始迭代,对于预研阶段,有很好的实验参考价值。标准 $k-\varepsilon$ 模型,是求解 k 和 ε 的基本两方程模型,当流动为不可压,且无自定义的源项时,此时湍流动能 k 和湍流动能耗散率 ε 对应的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (7)$$

式中 μ_t 为湍流粘度, σ_k 和 σ_ε 分别为湍流动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数, G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数。(4)~(7)式构成封闭的方程组,利用数学方法描述风场和风的流动规律,进而求解出风场中的未知量 u_i 、 u_j 、 u_k 、 ρ 及 ε 。

3.3 湍流对光学望远镜观测的影响

湍流是自然界和工程领域中最常见、最重要的一类流动,湍流的存在,将严重影响大气视宁度,降低成像质量,同时湍流对光学望远镜光电导行精度的影响也不容忽视^[14]。因此,研究光学望远镜视场方向湍动状态十分必要。

湍流中任一位置上的流体质点,除了在主流方向上的运动以外,还有各方向上附加的极不规则的脉动,其基本表现为速度起伏不定。湍流动能作为湍流速度脉动的度量,其大小直接关系到流体内部动量、热量和水汽的输运。湍流动能定义如下:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_i^2} + \overline{u_j^2} + \overline{u_k^2}), \quad (8)$$

式中 $\overline{u_i^2}$ 、 $\overline{u_j^2}$ 、 $\overline{u_k^2}$ 分别表示速度脉动时均值。

3.3.1 折射率脉动

湍流动能从大尺度涡旋向小尺度涡旋传递,部分湍流动能在各级涡旋转换为流体热能,进而导致大气温度起伏。

计算空气折射率的高斯-劳伦斯公式为^[15]

$$N = 1 + \frac{77.6 \times 10^{-6}}{T} (1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) (P + 4810 \frac{v}{T}), \quad (9)$$

式中 N 为空气折射率, P 为干燥的大气压强,单位为 hPa, v 为水汽的压强,单位为 hPa, T 为温度,单位为 K, λ 为光波长,单位为 μm 。

光波通过湍流介质的光程公式为

$$S(L, y, z) = \int_0^L N(x, y, z) dx. \quad (10)$$

由(9)、(10)式可知,湍流动能带来的温度变化是影响大气折射率的主要因素,即影响与光路垂直方向折射率的变化梯度,进而影响光线的偏折量。光线偏折量的增大导致光束的光程差异变大,使得来自天体的光线波前发生畸变,光强产生闪烁,严重影响天文望远镜的成像质量。

3.3.2 视宁度问题

圆顶内的视宁度可分为镜面视宁度和圆顶视宁度。当环境温度下降较快而低于镜面温度时,镜面附近的空气会产生温度梯度,且表面附近的空气密度也会分布不均匀,当表面温度与环境温度差达到一定量值后,在密度梯度和重力作用下镜面空气发生较强烈的湍流,干扰主镜视场,产生镜面视宁度^[16-17]。由圆顶内光路中存在的温度分布不均匀的空气而引起的视宁度成为圆顶视宁度。视宁度问题体现为光传播过程中能量分散,光波出现振幅和相位的变化,致使聚焦而成的像斑的强度、锐度、位置度都有响应的变化,因此,视宁度的好坏严重影响着望远镜的成像质量。

在流动空气中,视宁度与温度有如下近似关系式^[18]:

$$\theta_{\text{dome}} = 0.1 \cdot \Delta T_{c-a}^{1.2}, \quad (11)$$

$$\theta_{\text{mirror}} = 0.18 \cdot \Delta T_{c-m} / F_r^{0.3}, \quad (12)$$

式中 θ_{dome} 为圆顶视宁度, θ_{mirror} 为镜面视宁度, ΔT_{c-a} 为圆顶内外的温度差, $F_r = T_c \cdot U^2 / (\Delta T_{c-m} \cdot g \cdot D)$, T_c 为圆顶内的平均气温, g 为重力加速度, D 为主镜直径, ΔT_{c-m} 为圆顶内平均气温与镜面温度差, U 为平均风速。

通过(11)、(12)式可将视宁度进行量化,进而研究圆顶结构对于视宁度问题的影响。

4 不同结构形式圆顶的风载分析

本文以 2.5 m 级光学望远镜为尺度参照,针对几种典型的天文圆顶的结构形式,分别进行 CFD 风载研究,以便在后期的设计中针对特定的环境选取最合适的圆顶结构。

4.1 数值计算模型

现代光学望远镜多采用地平式机架,根据内部 2.5 m 级光学望远镜的尺度参照,选取天文圆顶所占空间尺度约为 $15\text{ m} \times 15\text{ m} \times 15\text{ m}$,按照 1:1 的比例建立不同结构形式的天文圆顶的几何模型,如图 3 所示,结构形式分别为经典形式、球形、柱式圆顶及蚌壳折叠式圆顶。

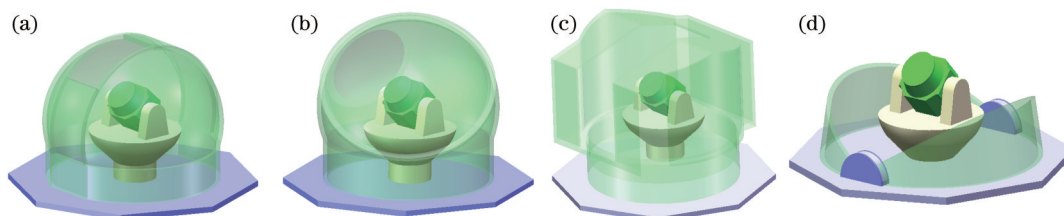


图 3 4 种不同结构形式的天文圆顶模型图。(a)经典形式;(b)球形;(c)柱式;(d)蚌壳折叠式

Fig.3 Models of four astronomical enclosures. (a) Classical enclosure; (b) calotte enclosure; (c) columnar enclosure; (d) foldable enclosure

4.2 模拟环境条件

计算流域尺度为 $200\text{ m} \times 160\text{ m} \times 160\text{ m}$,模型位于距离入口 100 m,距离数值风洞出口约 100 m,以保证湍流充分发展,且无其他建筑对气流产生干扰。

入口边界条件:1) 速度边界条件,根据笔者调研,国家天文台兴隆观测站 2.16 m 望远镜的工作风速上限为 5 级风,即 10.7 m/s,云南天文台丽江观测站的 2.4 m 望远镜工作风速上限为迎风状态 12 m/s,背风状态 15 m/s,当风速达到工作上限,圆顶关闭,因此,采用 10 m/s 的极限工作风速进行模拟,以期得到在极限情况下望远镜周围风速、湍流动能的响应及其对天文观测的影响;2) 温度边界条件,以平均温度 275 K 模拟来流温度。

出口边界条件:湍流充分发展,流场任意物理量在出口法向梯度均为 0。

热源:为模拟望远镜驱动、控制等设备散热对于大气视宁度和折射率的影响,在望远镜尾部添加热流量密度为 200 W/m^2 的热源。

壁面条件:计算域上、下、左、右表面均为无滑移壁面条件。

为了更全面地描述不同方向的风载对于内部望远镜的影响,本文分别模拟 4 种结构形式在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 风向时的内部流场、压力等情形^[9],风向如图 4 所示。

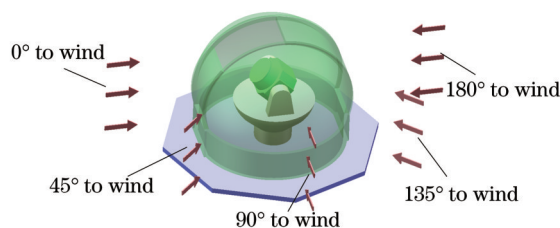


图 4 5 种不同风向示意图

Fig.4 Schematic diagram of five different wind directions

4.3 网格划分

以经典天文圆顶为例,采用自动体网格划分,总共包括约 10^7 个网格单元,同时为了更好地模拟流场在圆顶和望远镜壁面附近的细节,在近壁面采用边界层网格单元,网格划分的细节如图 5 所示。

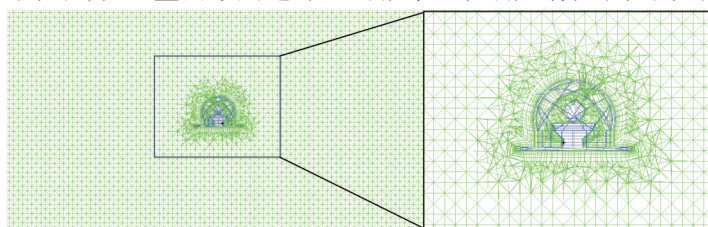


图 5 计算域网格划分和局部细化

Fig.5 Meshing of entire computational domain and partial refinement

4.4 计算结果

4.4.1 风速分析

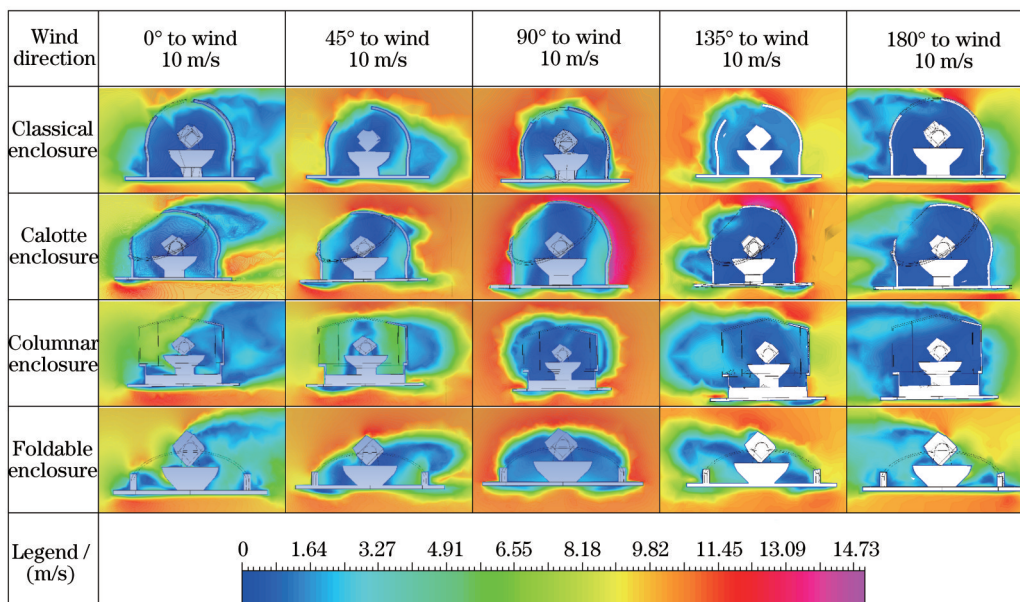
恒定风作用于望远镜,相当于作用于望远镜上的静力载荷。望远镜周围风速越大,对于仪器的作用力越大,从而易产生振动和变形,影响观测结果的精确性。表1中列出了当10 m/s的恒定风分别以0°、45°、90°、135°和180°风向作用于4种典型结构形式的圆顶时,圆顶内外的风速云图。

纵向对比,封闭性较好的经典形式圆顶和球形圆顶内的望远镜部分可以有效地远离高速风的直接作用,减少镜筒、镜面等受力,避免产生较大振动和结构变形,而柱式和蚌壳折叠式,由于进风口面积较大,尤其是完全打开的蚌壳折叠式圆顶,对于高速风的阻隔较小,镜面附近的风速较高。

横向对比,随着迎风角度的增大,圆顶对于内部望远镜的隔风效果逐渐增强,望远镜逐渐被低速风包围,但由于完全暴露风中,折叠式圆顶望远镜周围风速明显高于其他情形。

表1 恒定风以不同风向作用于4种形式的圆顶时的速度云图

Table 1 Velocity contours of four enclosures faced of winds from different directions



为了定量分析望远镜镜面附近的风速,在上述情况的镜面前方的一条2.5 m长的直线上分别选取100个取样点,设沿线方向为x正向,绘制出镜面附近各点的速度曲线图,如图6所示。

由图6可知,0°风作用时,经典形式和球形圆顶保护下的望远镜镜面风速最低,趋近于0,而蚌壳折叠式圆顶镜面附近各点处的风速均为最高,且在2 m位置处的风速达到最大值,为9.37 m/s

45°、90°、135°和180°风向作用时,经典形式、球形和柱式圆顶对于风速的阻隔效果明显,镜面风速均趋于或小于2 m/s,而蚌壳折叠式镜面附近的风速随着迎风角度的增大虽有所减弱,但风速依旧相对较高。

4.4.2 湍流动能分析

湍流动能是衡量湍流强度的重要尺度,湍流动能k越大,表征湍流运动越剧烈,进而造成望远镜导行误差,给望远镜光电导行的精度带来较大影响。因此,对于天文望远镜,为了保证观测结果的精确性,就要求视场方向的大气流动尽可能平缓,湍流动能极值尽可能远离望远镜视场,以减少湍流带来的温度变化对于大气折射率的影响。表2中列出了当10 m/s的恒定风分别以0°、45°、90°风向作用于4种典型结构形式的圆顶时,圆顶内外的湍流动能云图。

纵向对比,经典形式和球形圆顶内部湍流强度最弱,即速度波动相对较小,对于温度的扰动微弱,致使大气折射率波动小,有利于观测数据的精确性。柱式和蚌壳折叠式圆顶内部湍流动能相对较高。

横向对比,经典、球形、柱式圆顶在0°~90°风向时,随着迎风角度的增大,望远镜周围湍流动能呈减小趋势,湍流动能极值出现在背风方向,对天文观测的精确性影响较小。90°~180°风向时,视场方向的湍流动能有所增大;对于折叠式圆顶,由于其工作状态下,望远镜完全暴露在空气中,视场方向上的湍流动能随着迎风角度的增大而增大,对天文光学观测的影响较大。

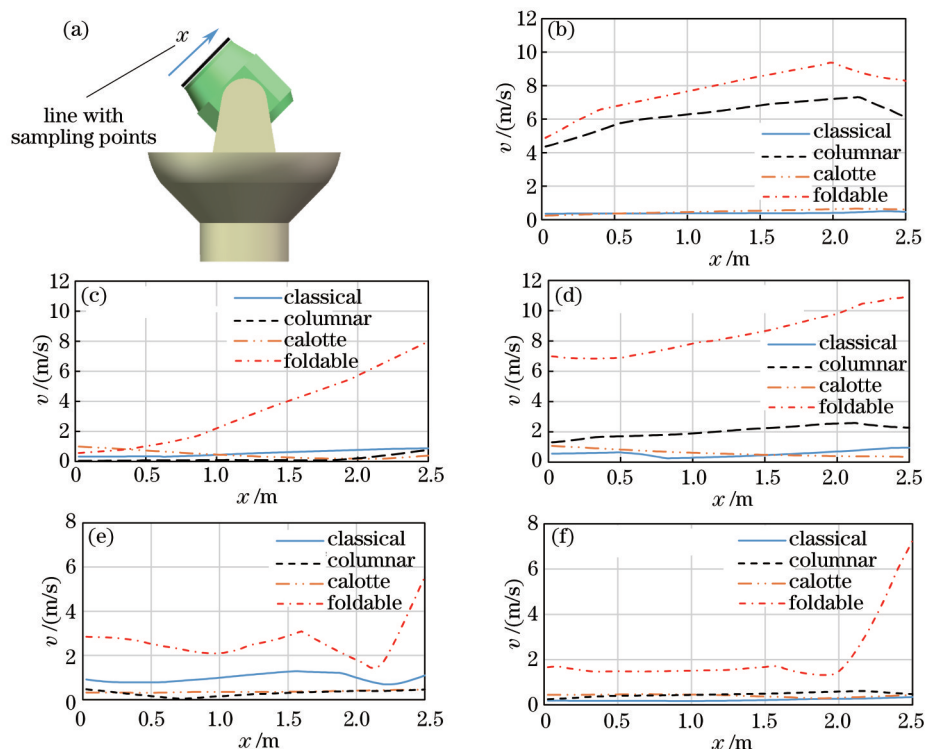


图6 镜面附近风速曲线图。(a) 望远镜简化模型;(b) 0°风作用时取样点处风速曲线;(c) 45°风作用时取样点处风速曲线;(d) 90°风作用时取样点处风速曲线;(e) 135°风作用时取样点处风速曲线;(f) 180°风作用时取样点处风速曲线

Fig.6 Velocity charts of wind before the mirrors. (a) Simplified model of the telescope; (b) velocity curves of 0° to wind; (c) velocity curves of 45° to wind; (d) velocity curves of 90° to wind; (e) velocity curves of 135° to wind; (f) velocity curves of 180° to wind

表2 恒定风以不同风向作用于4种形式的圆顶时的湍流动能云图

Table 2 Turbulence kinetic energy contours of four enclosures faced of winds from different directions

| Wind direction | 0° to wind 10 m/s | 45° to wind 10 m/s | 90° to wind 10 m/s | 135° to wind 10 m/s | 180° to wind 10 m/s |
|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Classical enclosure | | | | | |
| Calotte enclosure | | | | | |
| Columnar enclosure | | | | | |
| Foldable enclosure | | | | | |
| Legend (J/kg) | | | | | |

4.4.3 光程差对比

为了进一步研究垂直于光轴方向上的气流的运动对于望远镜观测的影响,在镜面附近并沿着光轴方向10 m光程上均匀选取1000个垂直于光路的采样圆面,圆面直径为2.5 m,每个面都在对应位置上选取21个采样点,连成21条光束,采样点标记如图7所示。

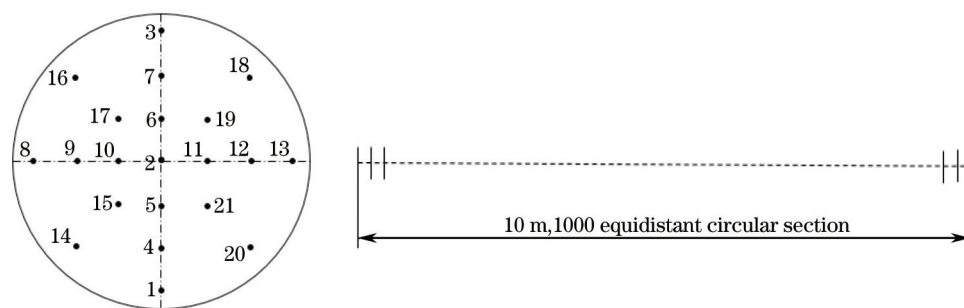


图7 每个圆面上的采样点分布和沿光路的采样圆面分布。(a) 采样点分布;(b) 采样圆面分布

Fig.7 Distributions of sampling points on each circular section and sampling sections along the optical path.

(a) Distribution of sampling points; (b) distribution of sampling sections

由(9)、(10)式可得不同结构形式圆顶、不同风向作用时各条光束所经过的实际光程 $\{S_1, S_2, \dots, S_{21}\}$,进而求出最大光程差 $P_v = S_{\max} - S_{\min}$ 。图8给出了4种结构形式的天文圆顶在不同迎风角度时的最大光程差。

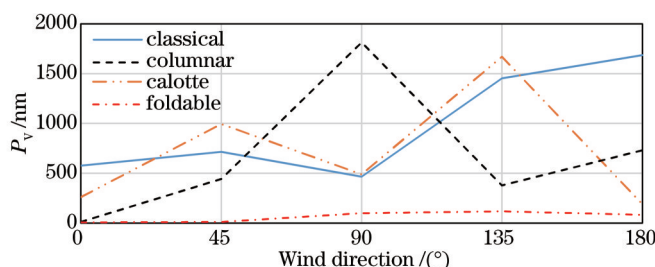


图8 最大光程差与迎风角度的关系曲线

Fig.8 Relations between optical path difference and wind directions

由图8可见:经典形式的天文圆顶,最大光程差随着迎风角度的增大整体呈现增长趋势;球形和柱形圆顶对迎风角度较敏感,最大光程差呈现不同程度的波动;迎风角度的增大对于折叠式的圆顶虽有影响但非常小,且最大光程差值很小,上限为116.2 nm。

4.4.4 视宁度分析

视宁度是由于温度不同的湍流团引发的折射率的不同分布而产生的。近年来,随着望远镜口径的增大,对像质精度的要求更高,圆顶内的视宁度成了影响望远镜分辨率的主要问题。根据(11)、(12)式,得出了4种圆顶结构下的视宁度半峰全宽(FWHM)与迎风角度的关系曲线,如图9所示。

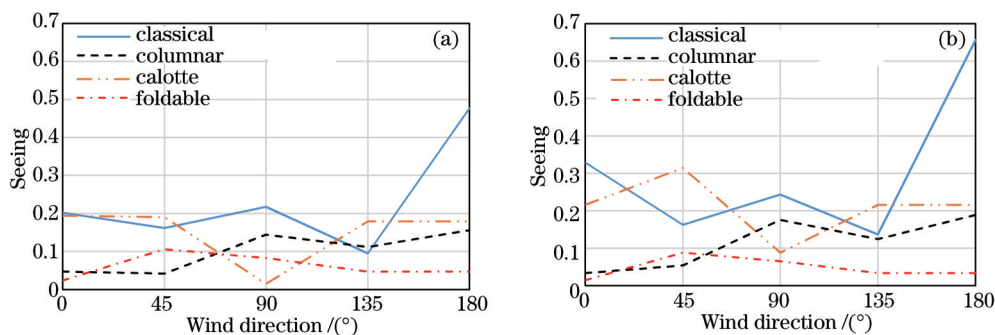


图9 视宁度与迎风角度的关系曲线。(a) 镜面视宁度;(b) 圆顶视宁度

Fig.9 Relations between seeing and wind directions. (a) Mirror seeing; (b) dome seeing

由图9可见:由于圆顶封闭性较高,通风散热能力差,经典形式和球形圆顶的视宁度均较大,且对于迎风角度的变化较敏感,视宁度曲线呈现明显波动;经典形式180°风向作用时视宁度达到最大值,镜面视宁度为0.48",圆顶视宁度为0.66";柱式圆顶的视宁度随着迎风角度的增大而呈现增大趋势,180°风向时达到最大0.16"(镜面视宁度)和0.19"(圆顶视宁度);折叠式圆顶,虽然工作状态下望远镜附近湍动能相对较高,但圆顶完全打开,空气可以完全流通,散热效果最好,在不考虑风振影响、结构形变的情况下,镜面和圆顶视宁度均最好,且对风向不敏感。需要指出的是,此处视宁度值为仅考虑温度因素影响下的结果,用以比较风载作

用下4种圆顶结构对于视宁度的影响,并非视宁度的绝对值。

4.4.5 圆顶风压比较

风载是圆顶所承受的最主要的载荷之一。作为内部设施的保护伞,圆顶的承载能力至关重要。图10中显示了4种形式的圆顶,在完全关闭状态下,截面轮廓上所受到的风压云图。从图10可见:以标准气压值为基准,迎风面气压最大,对于圆顶的作用力最强;圆顶上部区域气压为负,大气对于圆顶的作用力最小;背风方向气压值趋近于0。

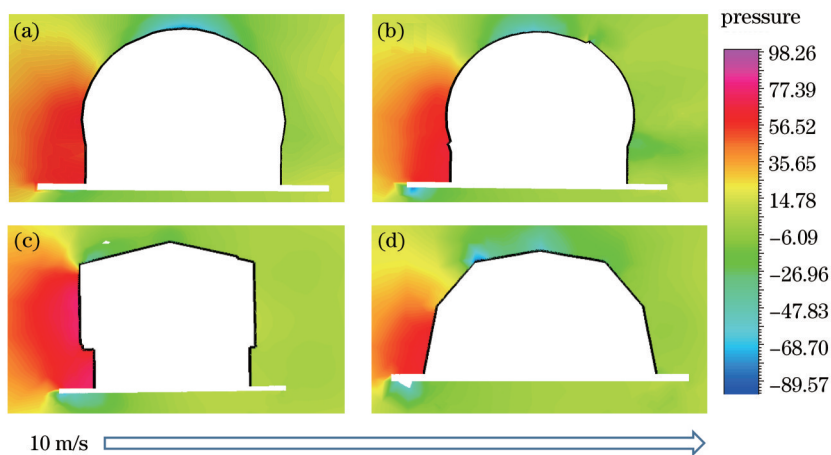


图10 圆顶关闭状态下截面气压云图。(a)经典圆顶内外气压分布;(b)球形圆顶内外气压分布;
(c)柱式圆顶内外气压分布;(d)折叠式圆顶内外气压分布

Fig.10 Air pressure contours with the enclosures closed. (a) Pressure distributions around the classical enclosure;
(b) pressure distributions around the calotte enclosure; (c) pressure distributions around the columnar enclosure;
(d) pressure distributions around the foldable enclosure

图11显示了截面轮廓上的风压随着位置的变化关系曲线。由图11可见:1)4种结构形式的圆顶表面受力均呈现沿着轮廓位置由正高压向负高压,最终接近于0的发展趋势;2)经典形式和球形圆顶,由于其球状结构的特点,压力曲线波动较小,而柱形和蚌壳折叠式圆顶,曲线在负压区域趋向于0的过程中呈现多次波动;3)柱形圆顶迎风面所受正压值最高,为77.5 Pa,而蚌壳折叠式圆顶迎风面所受负压值最高,为-78.8 Pa。

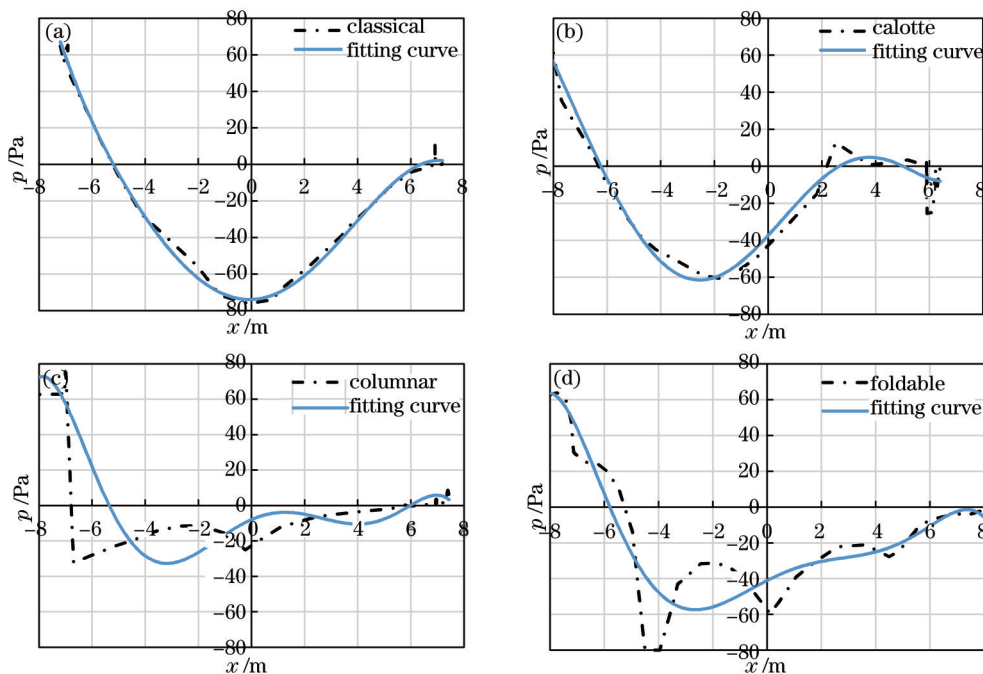


图11 4种圆顶截面轮廓线上压强曲线

Fig.11 Pressure curves of the lines on the profiles of four enclosures

4.4.4 结果讨论

通过上述分析可见,不同结构形式的天文圆顶,在特定的工作环境中各有利弊。

经典形式圆顶封闭性较好,可以有效保护望远镜免受风载直接作用,但尺寸较大,起吊安装复杂,同时温控较差,内外温差不易调节,导致折射率脉动明显,圆顶内视宁度较大,影响光学望远镜的天文观测。

球形圆顶,最小化入风口尺寸,封闭性最好,隔风效果最佳,有效降低了望远镜表面风振和镜面附近的湍流动能,但通风散热性能较差,视宁度较大,同时结构对风向敏感,不同的风向视宁度差异较大。

柱式圆顶,较大的入风口使其具有良好的散热性能,镜面视宁度和圆顶视宁度均较好,但由于结构形式所限,圆顶关闭状态下迎风面所受风压相对较高,对材质要求较高,且圆顶上表面易出现积雪或凝霜。

蚌壳折叠式圆顶完全开启,结构简单,同等观测条件下视宁度最好,但由于完全暴露在气流中,风速较高时,易产生风振,对望远镜本身的承压性能要求较高,同时完全开启的结构形式,决定其望远镜周围的湍流动能相对较高。

5 结 论

采用通用CFD软件Fluent,以2.5 m光学红外望远镜为尺度依据,在考虑环境温度和部分热源的情况下,分别对经典形式、球形、柱式和蚌壳折叠式天文圆顶进行了数值风洞模拟实验,分析出不同方向10 m/s风速作用下4种典型结构圆顶的响应,可以清晰地观察到圆顶内外的气流流速、湍流强度、气压等的变化情况,及其对光学望远镜观测精度的影响,主要是对折射率、光程差、镜面视宁度和圆顶视宁度等的影响,同时得出风载作用下的圆顶外的受力状况。结果显示:1)封闭性较好的经典形式和球形圆顶可以有效地减小望远镜附近风速和湍流动能,降低风载振动给天文观测带来的不利影响;2)柱式和蚌壳折叠式圆顶由于通风性更好,有利于圆顶内部温度平衡,圆顶内的视宁度相对较好;3)柱式圆顶由于迎风面与风速垂直,导致所受峰值风压最大,对圆顶结构强度要求较高。为今后的光学天文望远镜圆顶形式的选择和结构的设计优化提供了一定的参考。

参 考 文 献

- Zhang Jingxu. Structure types and design principles of ground-based telescope enclosures [J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 126-132.
张景旭. 地基望远镜塔台圆顶结构形式及设计原则[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 126-132.
- Yao Zhengqiu, Zhou Fang. Progress in modern enclosure[J]. Progress in Astronomy, 2003, 21(3): 206-218.
姚正秋, 周 放. 近代天文圆顶发展概况[J]. 天文学进展, 2003, 21(3): 206-218.
- Hammerschlag R H, Kommers J N M, Leverink S J, *et al.*. Mechanical design of a completely open-foldable dome for EST[C]. SPIE, 2010, 7733: 77330J.
- M Riva. A partially foldable light weighted dome for fast pointing 3 m-class telescopes[C]. SPIE, 2010, 7733: 77333W.
- MacMartin D G, Konstantinos Vogiatzis. Unsteady wind loads for TMT: replacing parametric models with CFD[C]. SPIE, 2014, 9150: 91500Q.
- Loewen N, Breckenridge C, Vasiljevic A. Enclosure design for Thirty Meter Telescope[C]. SPIE, 2008, 7012: 70121D.
- Schneermann M, G Marchiori, F Dimichino. The VLT enclosures: design and construction[C]. SPIE, 1997, 2781: 650-656.
- Shu Xinling, Zhou Dai, Wang Yongfang. Review and prospect on measurement and simulation techniques of wind load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(3): 6-10, 25.
舒新玲, 周 岱, 王泳芳. 风荷载测试与模拟技术的回顾及展望[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 6-10, 25.
- Yang Dehua, Xu Lingzhe, Xu Xinqi. Wind disturbance study on large astronomical telescopes[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 342-346.
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.
- Wu Lin, Fang Jiancheng, Yang Zhaohua. Study on aero-optical distortion simulation of high refraction index gradient regions in hypersonic turbulent flow[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 2952-2957.
吴 淋, 房建成, 杨照华. 高超声速湍流场高折射率梯度区域气动光学畸变仿真研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 2952-2957.
- Zhang Shijie, Li Junshan, Sun Lihui, *et al.*. Aero-optical imaging deviation under the small-incidence-angle condition[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1001002.

- 张士杰, 李俊山, 孙李辉, 等. 小入射角条件下气动光学成像偏移[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1001002.
- 12 Du Qiang, Tan San, Liu Ning. Comparison for computational methods to structures of wind loads in atmospheric boundary layer[J]. Computer and Modernization, 2012, 9: 137-139, 142.
- 杜 强, 谭 三, 刘 宁. 大气边界层中结构风载的计算方法比较[J]. 计算机与现代化, 2012, 9: 137-139, 142.
- 13 Li Huafeng, Ma Jun, Zhou Dai, *et al.*. The numerical simulation for the wind fields and wind loads around spatial structures[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(12): 2112-2117.
- 李华锋, 马 骏, 周 岱, 等. 空间结构风场风载的数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2112-2117.
- 14 Liu Guangqian, Yang Lei, Deng Linhua, *et al.*. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of astronomical telescope auto-guiding system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0101002.
- 柳光乾, 杨 磊, 邓林华, 等. 大气湍流对天文望远镜光电导行精度的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0101002.
- 15 Hao Weina. Experiment Research and Computation Analysis of LAMOST Dome Seeing[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, 2004: 5.
- 郝伟娜. 改善LAMOST望远镜圆顶视宁度的试验与分析计算[D]. 南京: 中国科学院南京天文光学技术研究所, 2004: 5.
- 16 Zhang Jun, Xian Hao, He Yuanxing, *et al.*. Theoretical calculation of telescope primary mirror's thermal field and seeing analysis of primary mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022001.
- 张 俊, 鲜 浩, 贺元兴, 等. 望远镜主镜温度场理论计算及主镜视宁度分析[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022001.
- 17 Zhang Jun, Xian Hao, Zhang Cheng, *et al.*. Telescope primary mirror seeing and air knife effect analysis based on theoretical calculation of temperature field[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0811005.
- 张 俊, 鲜 浩, 张 程, 等. 基于温度场理论的望远镜主镜视宁度及“气刀”效应分析[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0811005.
- 18 Ban Blanco. Estimating local seeing at the DCT facility[C]. SPIE, 2008, 7012: 70123V.
- 19 South B J, Soukup I M, Worthington M S, *et al.*. Wind loading analysis and strategy for deflection reduction on HET wide field upgrade[C]. SPIE, 2010, 7733: 77333Z.

栏目编辑: 史 敏