

文章编号 1004-924X(2022)23-3031-08

地基大口径望远镜圆顶设计

刘祥意¹, 王志臣^{1,2*}, 王 志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:圆顶视宁度是影响地基大口径望远镜成像质量重要的影响因素之一。视宁度产生的原因主要是由于空气折射率的不均匀变化导致, 首先通过理论分析确定影响空气折射率的主要因素为空气的温度、速度和压力, 然后借助 CFD 流体仿真软件, 得到望远镜圆顶周围附近空气的温度场、速度场和压力场的变化, 进而推算出望远镜成像光路中圆顶及望远镜附近周围空气折射率的变化情况, 以评估不同结构形式圆顶所产生的圆顶视宁度对望远镜成像的影响。通过仿真分析可知, 升降式圆顶更利于望远镜周围空气的温度、速度和压力的快速变化及稳定, 能够减少圆顶视宁度的影响, 为 4 m 级及更大口径望远镜的圆顶方案选择及设计提供指导。

关 键 词:望远镜; 地基大口径; 视宁度; 圆顶

中图分类号: TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/OPE. 20223023. 3031

Dome design of large ground-based telescope

LIU Xiangyi¹, WANG Zhichen^{1,2*}, WANG Zhi¹

(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: zcwang911@163. com*

Abstract: The dome seeing is an important influencing factor for imaging quality of ground-based large-aperture telescopes. Seeing is mainly due to the uneven change in the refractive index of air. First, theoretical analysis shows that the main factors affecting the refractive index of air are the temperature, velocity, and pressure of the air. Then, with the help of CFD fluid simulation software, the temperature field, velocity field, and pressure field changes of the air near the telescope dome are obtained, and the change of the refractive index of the air around the dome and telescope is calculated. Thus, the effect of dome seeing produced by domes of different structural forms on telescopic imaging can be evaluated. The simulation analysis shows that the lifting dome is more conducive to the rapid change and stability of the temperature, speed, and pressure of the air around the telescope to reduce the impact of dome seeing. From the perspective of dome seeing, this paper provides a guide for the scheme selection and design of a dome at the 4-meter level and larger telescopes.

Key words: telescope; large aperture; seeing; dome

收稿日期: 2022-11-08; 修订日期: 2022-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U2031126)

1 引言

地基大口径望远镜作为造价不菲精密的天文观测与空间探测仪器,其安装及工作环境的要求很高。首先体现在对望远镜站址选择上,站址一般选择在全年气候干燥少雨的高海拔地区,这样既能增加望远镜的全年工作时长,也能减少地表大气对流层对望远镜观测的影响,获得较好的大气相干长度。一般而言,优良望远镜站址的大气相干长度为10~30 cm。其次体现在望远镜对站址内塔台等人为建筑的建设上,不仅要求具有较高的抗地质灾害、抗暴风、暴雨和暴雪等气象灾害的能力,而且随着人们对视宁度认识的提高,还要求尽量较少望远镜的塔台所导致视宁度对望远镜观测的影响。塔台圆顶作为直接储存望远镜的建筑部分,不仅需要在强风、强雨雪等恶劣气象条件下对望远镜起到保护作用,而且需要在望远镜工作状态下尽量不影响观测^[1-2]。

国外的大口径望远镜在设计建设初期,除了要对望远镜的备选观测站址的气象条件、大气视宁度等进行长时间的统计研究,还要综合考虑望远镜工作条件、资金和自然环境等因素,因此对望远镜塔台及圆顶的结构形式要进行深入的分析。例如,口径为3.5 m的GREGOR望远镜的圆顶为半球对开式升降圆顶^[3],口径为3.67 m的AEOS望远镜的圆顶为多段升降旋开式圆顶^[4],口径为3.5 m的WIYN望远镜的圆顶为多边形敞开式随动圆顶^[5],为口径为4.2 m的SOAR望远镜的圆顶为5/8球形结构的敞开式随动圆顶^[6]。

我国的大口径望远镜研究起步较晚,技术相对落后,目前国内已建成的单镜主镜口径最大口径为4 m级^[7-9],相对于国外的单镜口径8 m级望远镜^[10]还有一定的技术差距。国内1 m级望远镜的圆顶形式主要有两种,兴隆基地1 m望远镜采用的是随动圆顶,云南天文台NVST望远镜采用敞开式圆顶,而4 m望远镜的圆顶形式还需要进一步的探索研究。本文针对4 m口径的大口径望远镜圆顶的设计,分别分析了升降式圆顶与敞开式随动圆顶两种结构形式下视宁度的影响,为4 m望远镜的圆顶设计提供指导。

2 视宁度的影响

视宁度对望远镜成像质量的影响主要是光程上空气折射率的波动引起的^[11-12]。根据Gladstone-Dale公式可知^[13-14],空气的折射率可以由空气密度 ρ 表示,即:

$$N = 1 + K_{GD}\rho, \quad (1)$$

其中 K_{GD} 为Gladstone-Dale常数,其大小取决于望远镜的观测波长 $\lambda(\mu\text{m})$,表达式如下:

$$K_{GD} = 2.33 \times 10^{-4} \left(1 + \frac{7.52 \times 10^{-3}}{\lambda^2} \right). \quad (2)$$

通常而言,望远镜的观测波段为0.1~4 μm ,则 K_{GD} 约为 2.23×10^{-4} 。

一般而言,望远镜及其圆顶周围的风速不会超过20 m/s,小于0.3 Ma,空气可以视为不可压缩的气体,所以空气的压强为动压与静压之和:

$$p_0 = p + 0.5\rho_0 V^2, \quad (3)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}, \quad (4)$$

其中: ρ_0 为标准状态下的空气密度, u, v, w 分为风速三个正交矢量方向的速度。

根据静态方程 $p \cong \rho RT_0$ 和式(3),空气的密度可以表示为:

$$\rho \cong \frac{p_0}{RT_0} - \frac{\rho_0}{2RT_0} V^2, \quad (5)$$

其中: T_0 为空气的温度, R 为空气常数。

根据式(1)~式(5),空气折射率的计算公式为:

$$N \cong 1 + K_{GD} \left(\frac{p_0}{RT_0} - \frac{\rho_0}{2RT_0} V^2 \right) = 1 + \Delta N. \quad (6)$$

由式(6)可知,相对于真空条件下的折射率,光在空气中的折射率取决于 ΔN ,而 ΔN 主要与空气的速度、温度和压力有关。因此,光程上空气折射率的变化率的一致性由空气的速度、温度和压力的变化率决定,即:

$$dn = \frac{K_{GD}}{RT_0} \left[dp_0 - \rho_0 V dV - \frac{1}{T_0} \left(p_0 - \frac{\rho_0}{2} V^2 \right) dT_0 \right]. \quad (7)$$

随着CFD流体仿真技术的发展,借助常用的CFD流体仿真软件CFX,计算得到望远镜圆顶周围附近空气的温度、速度和压力变化,再通过式(7)计算望远镜在圆顶附近周围空气折射率

的变化情况,以评估圆顶视宁度对望远镜成像的影响。

3 CFD 仿真分析

3.1 有限元模型的建立

本文的塔台圆顶设计用于即将建设的国内大口径望远镜,其主镜口径为 4 m,次镜口径为 0.36 m,望远镜的总高约为 11.5 m。塔台圆顶的设计参考了国外大口径望远镜的塔台圆顶设计。国外 4 m 级望远镜的塔台高度如表 1 所示,综合考虑望远镜拟定站址的当地气象条件,拟定望远镜的塔台高度为 15 m,圆顶的内径为 $\Phi 23$ m,圆顶内中心高为 15 m。根据参数分别建立敞开式随动圆顶和升降式圆顶的三维模型,如图 1 和图 2 所示。

为了研究望远镜及圆顶周围空气在有风条件下的空气参数,需要在望远镜及圆顶周围建立空气流域场。为了减少边界条件不确定性对 CFD 仿真计算所造成的误差,根据望远镜及塔台的外形轮廓尺寸长 L 、宽 W 和高 H ,以塔台的底面为中心,分别向前后、左右和高度方向建立长度分别为 $5L$, $5W$ 和 $5H$ 的空气流域场,建立的模型如图 3 和图 4 所示。

表 1 国外 4 m 级望远镜的塔台高度^[15-19]
Tab.1 Tower height of foreign large aperture telescopes^[15-19]

望远镜	国家	位置	口径/m	塔台高度/m
DCT	美国	Arizona	4.2	15
Soar	智利	Chile	4.1	15
ARIES	印度	India	3.6	13
EST	西班牙	Canary Islands	4.0	40
ATST	西班牙	La Palma	4.0	28

3.2 网格划分

综合考虑仿真计算的收敛稳定性,计算的精度和准确性,网格划分采用非结构网格划分。为了在不降低运算精度的情况下尽可能减少网格

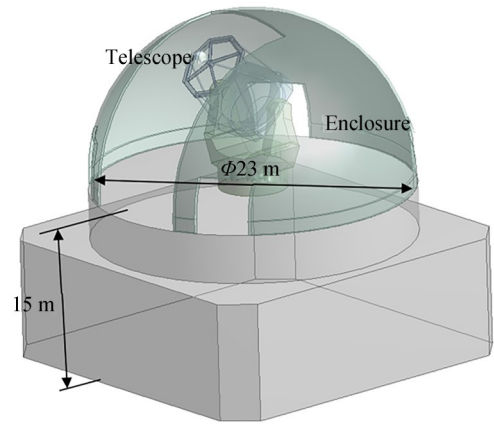


图 1 敞开式随动圆顶
Fig. 1 Open tracking dome

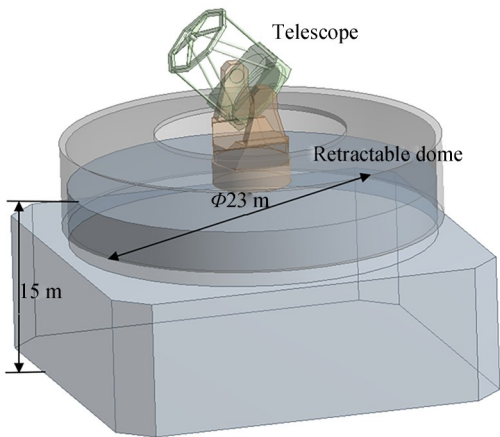


图 2 升降式圆顶
Fig. 2 Lifting dome

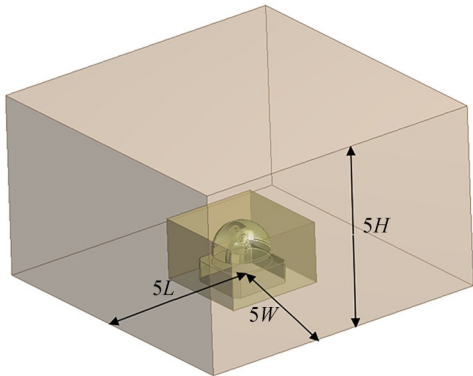


图 3 敞开式随动圆顶的 CFD 仿真模型
Fig. 3 CFD model of open tracking dome

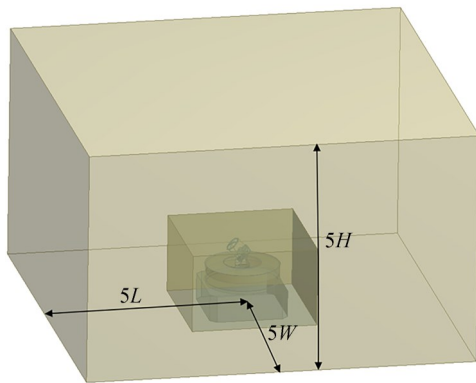


图4 升降式圆顶的CFD仿真模型

Fig. 4 CFD model of lifting dome

的数量,提高计算效率,对结构复杂尺寸相对较小的望远镜及塔台采用较小的网格尺寸进行划分,而对于外围的较大的空气流域场则采用较大的网格尺寸进行划分。故先在望远镜周围建一个较小的空气流域,然后在较小的空气流域外建一个大的空气流域,以便对网格尺寸进行控制,如图3和图4所示。望远镜及塔台周围的平均网格尺寸为0.1 m,外围较大空气流域的平均网格尺寸为0.5 m,两种圆顶的有限元网格分别如图5和图6所示。其中,敞开式随动圆顶的有限元网格总数为2 754 484个,升降式圆顶的有限元网格总数为2 746 021个。

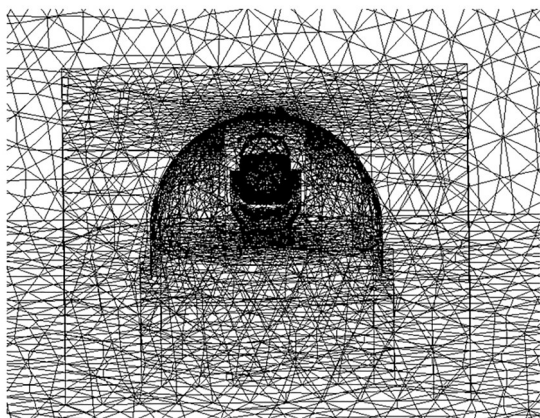


图5 敞开式随动圆顶的有限元网格划分

Fig. 5 Finite element mesh of open tracking dome

3.3 边界条件设置

望远镜的拟定站址为青海省海拔为3 000 m左右的某山,大气压强为67.2 kPa,空气密度为

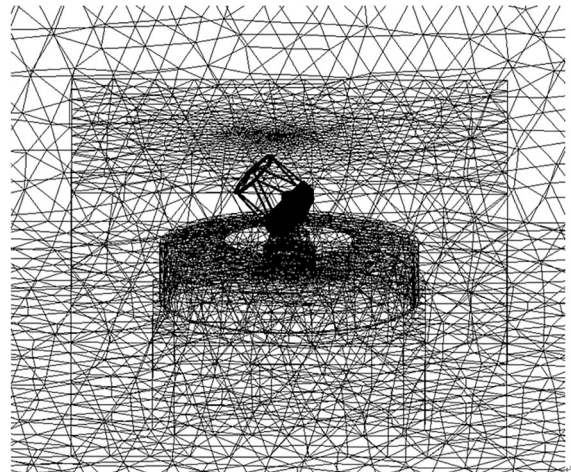


图6 升降式圆顶的有限元网格划分

Fig. 6 Finite element mesh of lifting dome

0.902 kg/m^3 ,平均风速最大为10 m/s,所以设置入口风速为10 m/s,空气流域的上边界和左右边界设置为freely slip walls,下边界设置为no-slip walls。由于望远镜自身的热惯性远远大于空气的热惯性,在工作过程中,当外部环境温度下降时,望远镜的温度变化很难跟上环境温度的变化。为了模拟这一现象,以外部环境温度变化速率 $\pm 1^\circ\text{C/h}$ (20%~90%的温度变化情况)为参考,假设望远镜、塔台、圆顶以及地面的初始温度高于环境温度 1°C ,环境的初始参考温度为 20°C 。

流体的实际运动状态大多为湍流。常用的湍流数值模拟方法主要3种,分别为直接数值模拟方法、大涡流模拟和雷诺时均模拟法,其中雷诺时均模拟法在实际工程中应用最为广泛。综合考虑各方面因素,如实际条件、计算消耗和计算精度等问题,根据常用的3种雷诺时均模拟法湍流模型的特点(见表2),最终确定选择SST模型,湍流强度设置为3.5%。

3.4 CFD仿真结果

经过瞬态分析得到敞开式随动圆顶和升降式圆顶望远镜中心剖面的流体仿真结果,如图7和图8所示。对比图7和图8可知,敞开式随动圆顶由于圆顶的作用,望远镜周围空气的速度、温度和相对压力的变化更大,且更加复杂,根据式(7)可知,由此导致的空气折射率变化的一致性

表 2 三种常用雷诺时均模拟法湍流模型的特点

Tab. 2 Characteristics of three commonly used reynolds averaged navior-stokes model

模 型	特 点
标准 $k-\omega$ 模型	考虑低雷诺数、可压缩性和剪切流,在层流、平板和圆柱绕流较为理想
标准 $k-\omega$ 模型	适用范围广,精度合理,属于半经验公式,但遇到强流线弯曲、漩涡、旋转流时,精度较低
SST 模型	使 $k-\omega$ 模型在广泛的流动领域中有了更高的精度和可行性

更差,圆顶视宁度的影响更大。而升降式圆顶则可以让周围的空气顺畅流通,望远镜周围空气的温度、速度和压力的变化相对较快,从而在一定程度上降低了空气折射率的不均匀变化,降低了圆顶视宁度的影响。

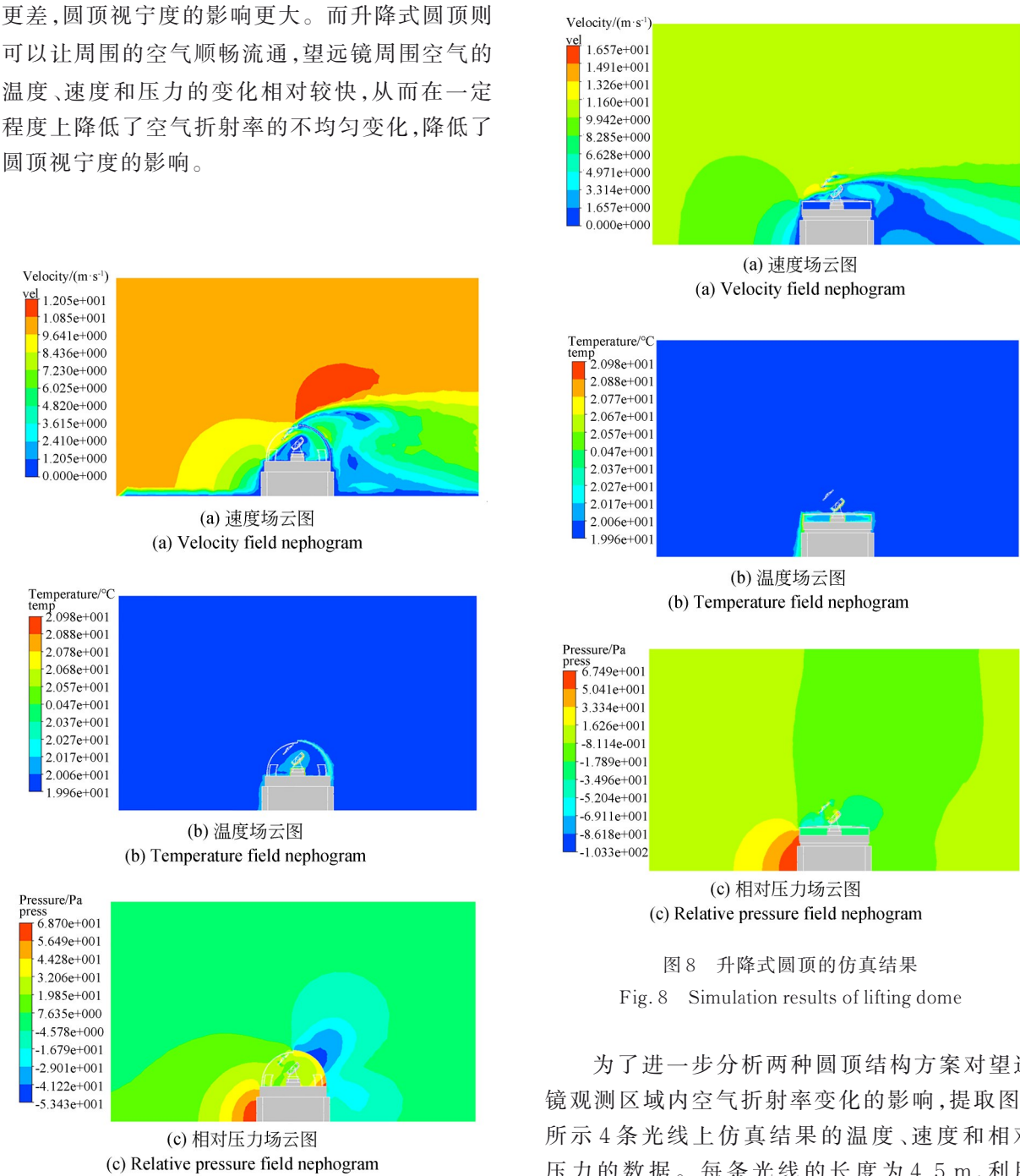


图 7 敞开式随动圆顶的仿真结果
Fig. 7 Simulation results of open tracking dome

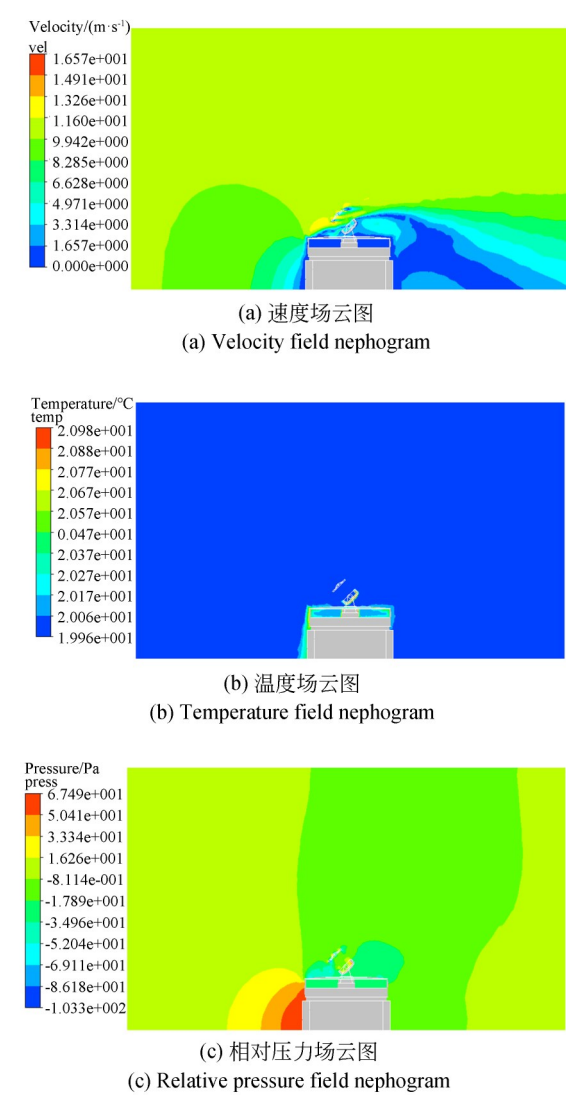


图 8 升降式圆顶的仿真结果
Fig. 8 Simulation results of lifting dome

为了进一步分析两种圆顶结构方案对望远镜观测区域内空气折射率变化的影响,提取图 9 所示 4 条光线上仿真结果的温度、速度和相对压力的数据。每条光线的长度为 4.5 m,利用 matlab 绘制相应的变化曲线,如图 10 和图 11 所示。

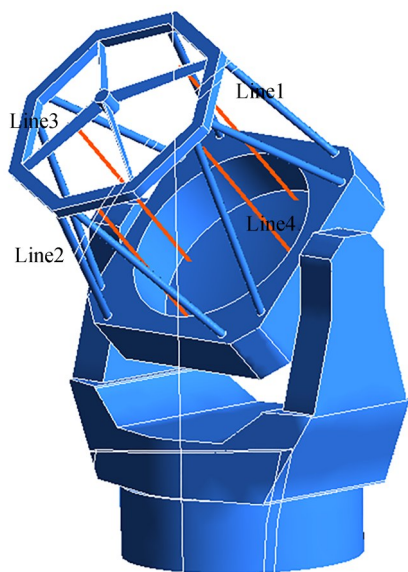


图9 光路中空气参数提取示意图

Fig. 9 Schematic diagram of air parameter extraction in optical path

由图10和图11可知,敞开式随动圆顶的变化范围更大,相应的速度、温度和相对压力变化为 $0\sim 10\text{ m/s}$, $19.8\sim 20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-28\sim 51\text{ Pa}$,而升降式圆顶的变化为 $2\sim 12\text{ m/s}$, $19.96\sim 20.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $17\sim 25\text{ Pa}$ 。根据所得速度、温度和相对压力数据,计算得到空气折射率相对于真空的折射率 ΔN 的变化曲线如图12和图13所示。由图可知,敞开式随动圆顶折射率变化 ΔN 的最大值与最小值之差为 4.6×10^{-7} ,而升降式圆顶的折射率变化为 1.2×10^{-7} 。根据仿真结构可知,敞开式随动圆顶由于圆顶的作用,望远镜周围的空气会产生不稳定的涡流,导致空气的温度、速度和压力急剧变化。敞开式随动圆顶内光路中空气折射率的变化约为升降式圆顶内光路中空气中折射率变化的4倍。

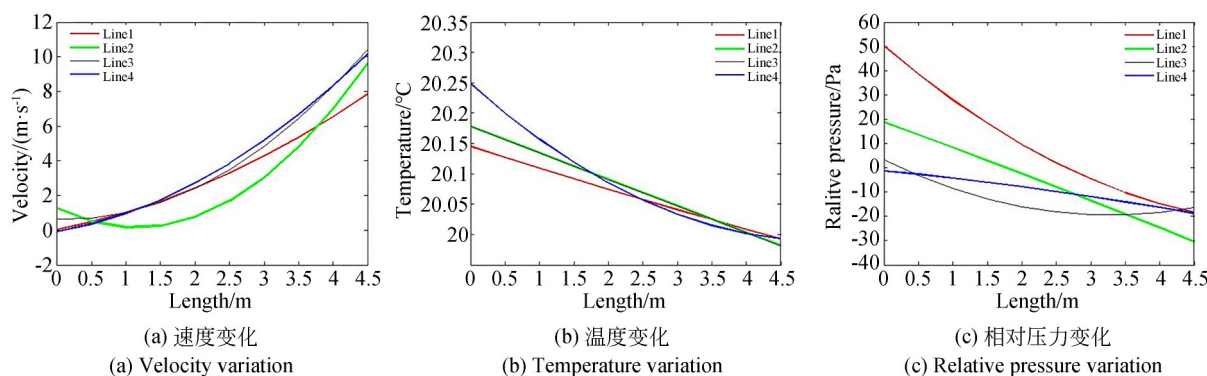


图10 敞开式随动圆顶望远镜光路中空气参数的变化曲线

Fig. 10 Variation of air parameters in optical path of open tracking dome

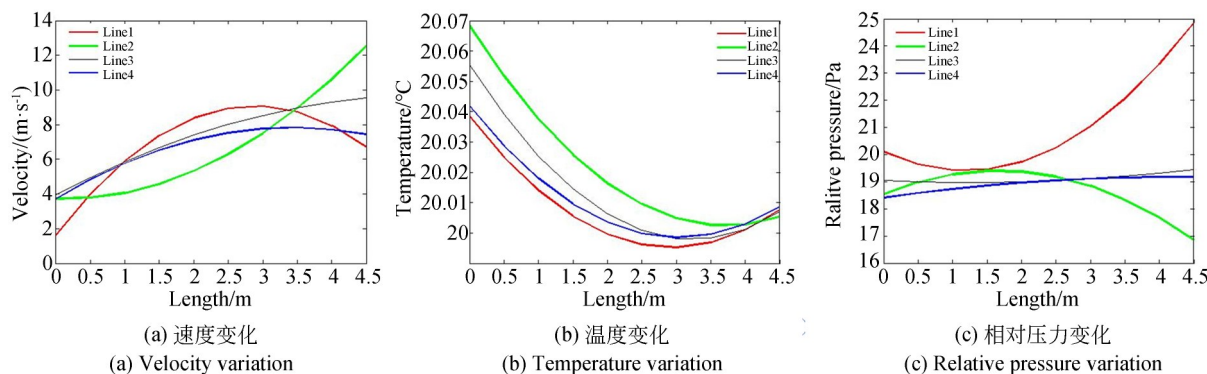


图11 升降式随动圆顶望远镜光路中空气参数的变化曲线

Fig. 11 Variation of air parameters in optical path of lifting dome

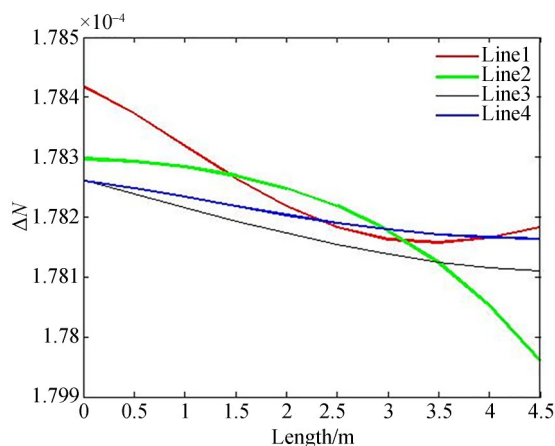


图 12 敞开式随动圆顶光路中折射率变化

Fig. 12 Air refractive index change in optical path of open tracking dome

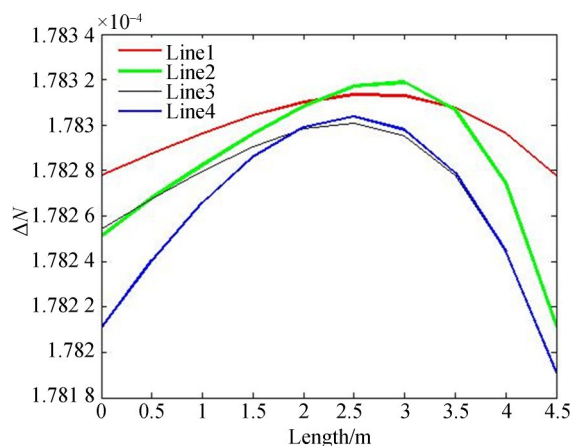


图 13 升降式圆顶光路中空气折射率变化

Fig. 13 Air refractive index change in optical path of lifting dome

4 结 论

本文以 4 m 级望远镜为研究对象,主要从圆顶视宁度的角度对望远镜的塔台圆顶结构进行了分析。视宁度产生的原因主要是由于空气折射率的不均匀变化,通过理论分析确定影响空气折射率的主要因素为空气的温度、速度和压力,

然后建立敞开式随动圆顶和升降式圆顶的有限元分析模型,利用 CFD 流体仿真分析软件 CFX 进行分析,根据仿真结构可知,升降式圆顶内光路中空气中折射率变化约为敞开式随动圆顶内光路中空气折射率的变化 1/4,可以减少圆顶视宁度的影响,更适合作为 4 m 级及更大口径望远镜的圆顶结构形式。

参考文献:

- [1] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [2] 程景全. 天文望远镜原理和设计射电、红外、光学、X 射线和 γ 射线望远镜[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design*[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [3] DENKER C, LAGG A, PUSCHMANN K G, *et al.* The GREGOR Solar Telescope[J]. *IAU Special Session*, 2012, 6: E2. 03.
- [4] ROBERTS L C Jr, FIGGIS P D. Thermal conditioning of the AEOS telescope[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4837*, Large Ground-Based Telescopes, Waikoloa, Hawaii, USA. 2003, 4837: 264-271.
- [5] BLANCO D R, JOHNS M W. Thermal design of

- the WIYN 3.5-meter telescope enclosure[C]. 1994 *Symposium on Astronomical Telescopes and Instrumentation for the 21st Century. Proc SPIE 2199*, Advanced Technology Optical Telescopes V, Kailua, Kona, HI, USA. 1994, 2199: 743-753.
- [6] TERAN J, PORTER D S, HILEMAN E A, *et al.* Unique dome design for the SOAR telescope project[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4004*, Telescope Structures, Enclosures, Controls, Assembly/Integration/Validation, and Commissioning, Munich, Germany. 2000, 4004: 155-163.
- [7] 胡海飞, 赵宏伟, 刘振宇, 等. 4 m 口径 SiC 反射镜原位检测用静压支撑系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2607-2613.
HU H F, ZHAO H W, LIU ZH Y, *et al.* Hydrostatic support system for *in situ* optical testing of a 4 m aperture SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2607-2613. (in Chinese)
- [8] 吴小霞, 李剑锋, 宋淑梅, 等. 4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22

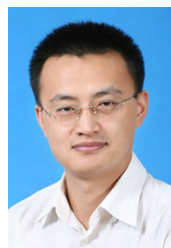
- (9): 2451-2457.
WU X X, LI J F, SONG S M, *et al.* Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (9): 2451-2457. (in Chinese)
- [9] 吴小霞, 王鸣浩, 明名, 等. 大口径 SiC 轻量化主镜热变形的定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20 (6): 1243-1249.
WU X X, WANG M H, MING M, *et al.* Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1243-1249. (in Chinese)
- [10] BOCCAS M. Protected-silver coatings for the 8-m Gemini telescope mirrors [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 502(1/2): 275-280.
- [11] SEBAG J, VOGIATZIS K. Estimating dome seeing for LSST [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 9150, Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VI, Montréal, Quebec, Canada*. 2014, 9150: 268-277.
- [12] LAI O, WITHINGTON J K, LAUGIER R, *et al.* Direct measure of dome seeing with a localized optical turbulence sensor [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 484 (4): 5568-5577.
- [13] ZAGO L. Engineering handbook for local and dome seeing [C]. *Proc SPIE 2871, Optical Telescopes of Today and Tomorrow*, 1997, 2871: 726-736.
- [14] WYNGAARD J C, IZUMI Y, COLLINS S A. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground [J]. *JOSA*, 1971, 61 (12): 1646-1650.
- [15] BIDA T A, DUNHAM E W, BRIGHT L P, *et al.* Site testing for the discovery channel telescope [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 5489, Ground-Based Telescopes, Glasgow, United Kingdom*. 2004, 5489: 196-206.
- [16] KRABBENDAM V L, RUTHVEN G P, BENNETT V P, *et al.* Active optical system design for the 4.2-m SOAR telescope [C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4003, Optical Design, Materials, Fabrication, and Maintenance, Munich, Germany*. 2000, 4003: 122-135.
- [17] SAGAR R, NAJA M, MAHESWAR G, *et al.* Science at high-altitude sites of ARIES - astrophysics and atmospheric sciences [J]. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 2014, 80 (4): 759.
- [18] COZAR-CASTELLANO J, CAGIGAL M N, VEGA N, *et al.* Overview of telescope structure, enclosure, and pier preliminary design of the European Solar Telescope [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 12187, Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy X, Montréal, Québec, Canada*. 2022, 12187: 693-703.
- [19] DALRYMPLE N E, OSCHMANN J M Jr, HUBBARD R P. ATST enclosure: seeing performance, thermal modeling, and error budgets [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE 5497, Modeling and Systems Engineering for Astronomy, Glasgow, United Kingdom*. 2004, 5497: 497-507.

作者简介:



刘祥意(1987—),男,吉林敦化人,博士,副研究员,2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2015年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事地基大口径望远镜结构设计及热控方面的研究。E-mail: liuxiangyi107@163.com

通讯作者:



王志国(1980—),男,黑龙江大兴安岭人,副研究员,2003年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士和硕士学位,主要从事地基大口径望远镜光机结构方面的研究。E-mail: zc-wang911@163.com