

文章编号 1004-924X(2015)03-0776-08

## 环境对大口径 SiC 轻量化主镜视宁度的影响

刘祥意<sup>1,2\*</sup>, 张景旭<sup>1</sup>, 吴小霞<sup>1</sup>, 李剑锋<sup>1</sup>, 孙敬伟<sup>1</sup>

- (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 100039)

**摘要:** 由于地基大口径望远镜主镜视宁度与望远镜系统成像质量相关, 本文研究了环境对主镜视宁度的影响。理论分析了影响主镜视宁度大小的因素, 得出主镜视宁度会随主镜表面和环境之间温差的增大而增大的结论。利用有限元法分析了自然对流和吹风条件下主镜的温度变化和温度分布; 最后通过相应工况条件下 2 m SiC 轻量化主镜的温度测试实验对仿真分析结果进行了验证。实验结果显示: 在初始温差为 6℃ 的无风自然对流情况下, 主镜与环境达到温度平衡约需 4 h; 而在初始温差为 8℃ 的吹风情况下, 主镜与环境达到热平衡仅需 1.5 h。分析和实验结果表明: 采用强迫对流热控措施可快速而有效地将主镜视宁度控制在合理的范围内, 可获得更多的望远镜观测时间, 同时保证大口径望远镜系统的成像质量。

**关键词:** 大口径望远镜; SiC 轻量化主镜; 视宁度; 温度梯度

**中图分类号:** TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0776

## Affect of environment on mirror seeing of large-aperture SiC lightweight primary mirror

LIU Xiang-yi<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Jing-xu<sup>1</sup>, WU Xiao-xia<sup>1</sup>, LI Jian-feng<sup>1</sup>, SUN Jing-wei<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)
- \* Corresponding author, E-mail: liuxiangyi107@163.com

**Abstract:** As the primary mirror seeing of a ground based large aperture telescope is directly related to its image quality, this paper researches the effect of environments on the primary mirror seeing. Through theoretical analysis, it points out that the size of the primary mirror seeing will increase with the temperature change between the primary mirror surface and the environments. Then using thermal analysis software Radtherm, the temperature changes and temperature distributions of a 2 m SiC lightweight primary mirror were analyzed under two different conditions of natural convection and natural flowing. Finally, the some temperature experiments on the 2 m SiC lightweight primary mirror under the working conditions mentioned above were performed to verify simulation results. The experiment results indicate that it takes about 4 hours to reach temperature equilibrium with the environment for the primary mirror in case of natural convection with initial 6 °C temperature

收稿日期: 2014-07-08; 修订日期: 2014-08-20.

基金项目: 中科院三期创新工程专项基金资助项目 (No. O65X32C060)

difference; however, it takes only about 1.5 hours in case of natural flowing with initial 8 °C temperature difference. It shows the greater temperature difference but much less consumed time. These means that when the thermal control system and control method are forced to the large-aperture telescope system to perform the convective heat control, the mirror seeing will be controlled in a reasonable range more quickly and more effectively, and more telescope observation time can be obtained meanwhile maintaining much better image quality.

**Key words:** large aperture telescope; lightweight SiC primary mirror; mirror seeing; temperature gradient

## 1 引言

随着地基大口径望远镜的制造及其相关技术的发展,国内已经逐渐具备了制造采用 SiC 轻量化镜作为主镜的 4 m 级地基望远镜的能力<sup>[1-2]</sup>。而随着望远镜口径增大,热问题对望远镜的成像质量的影响愈加明显<sup>[3-5]</sup>,其中视宁度是影响地基大口径望远镜成像质量的关键因素之一<sup>[6]</sup>。导致视宁度较差的原因是大气中的热紊流。本质上,视宁度对地基大口径望远镜的光学成像质量的影响是由光路中的热紊流导致空气折射率混乱无序的波动变化引起的。根据不同因素导致的视宁度对地基大口径望远镜的影响,可以将视宁度分为大气视宁度,圆顶视宁度和主镜视宁度<sup>[7-8]</sup>。主镜视宁度主要是由于主镜的温度与主镜表面的温度不同造成的。主镜表面与其上方的空气层直接进行热交换,在自然对流和混合对流的影响下,主镜表面会形成一层厚度仅为几毫米的紊流空气层,使空气的折射率发生紊流无序的波动变化,导致波前扭曲及图像质量的严重下降。

在望远镜的实际工作中,为了得到更佳的望远镜成像质量,尤其是对于 4 m 级及以上的地基大口径望远镜,望远镜主镜的温度常常通过主镜的热控系统进行控制,以保证在周围环境空气温度变化过程中镜面与周围的空气温度在合理范围内,如 3.5 m 的 Borosilicate 轻量化 WIYN 要求其控制在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  以内<sup>[9]</sup>,8.4 m 的 Borosilicate 轻量化 LSST 则要求控制在  $-1.6\sim 0.8^\circ\text{C}$ <sup>[10-11]</sup>,而 8.1 m 的 ULE 弯月镜 Gemini 和 8.2 m 的 Zerodur 弯月镜 VLT 要求其控制在  $\pm 0.6^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>和  $0.7^\circ\text{C}$  以内<sup>[12]</sup>。

然而国内还没有掌握相关地基大口径望远镜

的主镜热控的相关关键技术及热控技术经验。考虑 SiC 材料具有比刚度高,热稳定好等优点<sup>[13-14]</sup>,我国学者对研究环境温度对大口径 SiC 轻量化主镜温度分布的影响投入了更多的热情,期望以此来推动我国自主研发的 SiC 大口径望远镜技术的发展。本文首先通过理论计算分析了影响主镜视宁度的因素,然后通过热分析软件 Radtherm 分别分析了自然对流条件和吹风条件下<sup>[15-16]</sup>,环境对 2 m SiC 轻量化主镜的温度分布的影响;最后通过进行 2 m SiC 轻量化主镜温度实验分析,对有限元仿真分析结果进行验证,从而得到环境对 SiC 轻量化主镜的温度变化及温度分布的量化影响。实验结果为望远镜系统调节参数设定和热控参数的确定提供了一定的理论依据及数据参考。

## 2 主镜视宁度

视宁度的大小通常用 FWHM(Full Width Half Maximum)来衡量<sup>[17]</sup>,由于视宁度与波长  $\lambda$ ,折射率结构系数  $C_N^2$  有关,也受观测时天顶角  $\gamma$  的影响,FWHM 可以表示为:

$$\theta = 2.591 \times 10^{-5} \lambda^{-1/5} [(\cos \gamma)^{-1} \int_H C_N^2(z) dz]^{3/5}, \quad (1)$$

其中: $z$ 为距离镜面的垂直高度。

忽略空气湿度的微小影响,温度结构系数  $C_T^2$  和折射率结构系数  $C_N^2$  之间的关系可以表示为: $C_N^2 = C_T^2 [77.6 \times 10^{-6} (1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) P/T^2]^2$ 。所以在天顶角  $\gamma=0$ ,波长  $\lambda=500 \text{ nm}$  时,视宁度在典型的望远镜站址的条件下(大气压力 770 mb,温度为  $10^\circ\text{C}$ )可以表示为:

$$\theta = 0.98 \left[ \int_H C_T^2(z) dz \right]^{3/5}. \quad (2)$$

与湍流的速度场理论相似,温度结构系数可以由大气层的平均速度和温度场得到。经验公式由 Wyngaard<sup>[18]</sup> 提出:

$$C_T^2 = f(Ri) \left( \frac{dT}{dz} \right)^2 z^{4/3}, \quad (3)$$

其中:  $Ri$  是理查森数:  $Ri = \frac{g}{T} \cdot \frac{dT}{dz} \left( \frac{dU}{dz} \right)^{-2}$ 。

函数  $f(Ri)$  由 Wyngaard 实验数据测量得到。在自然对流的情况下,当  $Ri \ll 0$  时,  $f(Ri)$  的大小约为 3.6, 所以  $C_T^2$  可以简化为:

$$C_T^2 \simeq f(Ri) \left( \frac{dT}{dz} \right)^2 z^{4/3}. \quad (4)$$

对于望远镜,影响主镜视宁度大小的主镜表面的空气紊流层仅为几毫米,假设主镜表面紊流热边界层的厚度为 5 mm,边界层内的厚度变化为线性变化,主镜表面与空气的温度差为 1°C,则主镜视宁度约为 0.1"。对于一个设计波长为 2.2 μm 的 4 m 级的地基望远镜的衍射极限为 0.1", 显然为了保证主镜视宁度对图像的成像质量不造成影响,应该将主镜视宁度控制在 0.1" 以内。从式(1)和(4)可以看出主镜视宁度主要受主镜表面紊流热边界层的厚度和边界层内温度梯度的影响。在紊流热边界层的厚度不变的情况下,主镜视宁度与主镜表面和周围空气的温度差  $\Delta T^{6/5}$  成正比,所以对于相对静止的空气,主镜视宁度基本与主镜的尺寸无关,故主镜视宁度可以由经验公式表示为  $\theta_m = 0.38 \Delta T_m^{5/6}$ <sup>[19]</sup>。而对于通风的主镜而言,主镜表面紊流热边界层的厚度和边界层内温度梯度会随着主镜的口径的增大呈现复杂变化,主镜视宁度则主要受 Froude 数的影响,可以表示为  $\theta_m = 0.18 Fr^{-0.3} \Delta T$ , 其中 Froude 数  $Fr = TU^2 / (\Delta T g D)$ ,  $U$  为风速,  $T$  为主镜温度,  $g$  为重力加速度,  $D$  为主镜的直径。

综上,主镜视宁度主要受主镜表面与周围空气温度差和主镜的光学口径的影响,温度差越大或者主镜的光学口径越大,主镜的视宁度越大。

### 3 仿真分析

#### 3.1 传热理论基础

通过以上对主镜视宁度的分析可知,地基大口径望远镜的主镜视宁度主要取决于主镜表面与

表面空气的温度差。传热问题一般包括 3 种热传递的形式,即热传导,热对流和热辐射<sup>[20]</sup>。主镜的热量一部分通过热传导将热量传递给周围部件,一部分通过辐射换热和与空气的对流换热散去。当存在太阳辐射情况下,主镜吸收太阳辐射的热量高于主镜与周围环境的散热能力时,主镜的温度会上升。一般的主镜的传热问题可以通过偏微分形式表示:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \rho c_p u \nabla \cdot T = Q, \quad (5)$$

其中:  $\rho$ ,  $T$ ,  $k$  和  $c_p$  分别为主镜的密度,温度,热导率和比热容,  $u$  和  $Q$  分别代表速度场和温度场。大部分主镜材料的性能参数与温度无关,故对于主镜表面的温度热流边界条件可写成以下形式:

$$n \cdot (k \cdot \nabla T) = q_0 + h(T_{amb} - T) + \epsilon \sigma (T_s^4 - T^4), \quad (6)$$

其中:  $q_0$  代表主镜吸收的热流密度,  $T_{amb}$  表示周围环境的温度,  $T_s$  是周围有效的辐射换热温度,  $\epsilon$  为表面的发射率,  $\sigma$  为波尔兹曼常数,  $h$  为主镜表面与周围环境的对流传热表面传热系数。在不考虑太阳的辐射的情况下,  $q_0$  可近似为 0。

#### 3.2 有限元仿真

为了研究环境对 SiC 轻量化主镜的温度变化及温度分布的影响,建立如图 1 所示为 FEM 模型,然后将 FEM 导入 Radtherm,进行传热仿真分析。

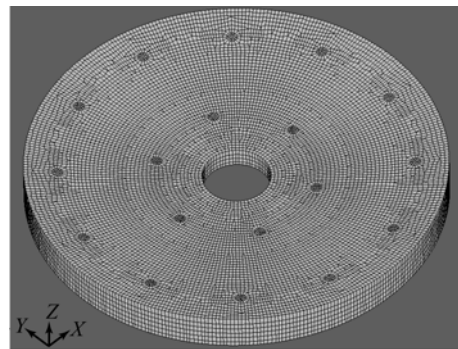


图 1 2 m SiC 轻量化主镜有限元模型

Fig. 1 FEM of 2 m SiC lightweight primary mirror

##### 3.2.1 自然对流对主镜的温度变化的影响

将实验边界条件设置为有限元仿真的热边界条件:初始温度为 12.5°C,外界空气温度为

18.3℃,空气与主镜的对流传热表面传热系数通过列表输入。对流传热表面传热系数  $h$ ,由  $h=Nu\lambda/l$  可知, $h$  可以由努赛尔数  $Nu$  确定。工程计算上,大空间的自然对流试验关系式为  $Nu=C(GrPr)^n$ ,其中常数  $C$  和  $n$  可以查表得到, $Pr$  为普朗特数,常温下空气的普朗特常数为 0.7 左右,格拉晓夫数  $Gr$  可由  $Gr=g\alpha\Delta t l^3/\nu^2$  计算得到, $g$  为重力加速度, $\alpha$  为体积膨胀系数, $\Delta t$  为空气与主镜的温差, $l$  为特征长度, $\nu$  为运动黏度。图 2 所示为主镜的温度变化曲线,主镜的温度随时间的变化基本呈对数变化,主镜的温度约需经过 210 min 达到平衡。图 3 为 4 h 后主镜的温度分布云图,可以看出主镜的温度分布非常均匀,其主镜的温度梯度在 0.1℃ 以内。

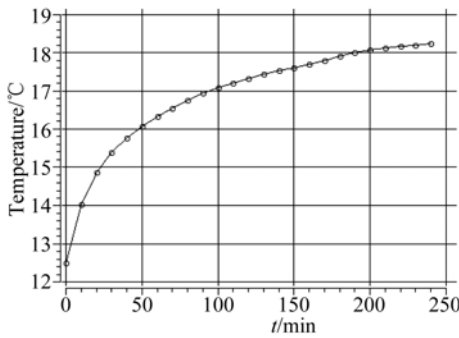


图 2 主镜的温度随时间的变化

Fig. 2 Temperature of primary mirror with the change of time

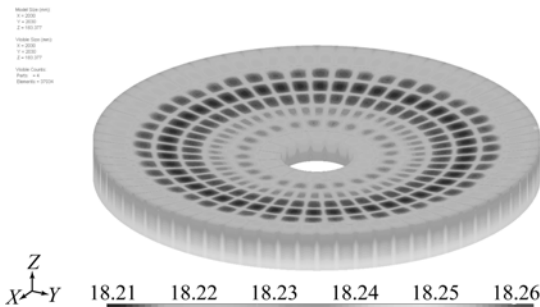


图 3 210 min 后主镜的温度分布云图

Fig. 3 Temperature contour of primary mirror after 210 min

### 3.2.2 吹风对主镜的温度变化的影响

设置热边界条件:主镜初始温度为 12.5℃,外界空气温度为 4.5℃;假设吹风条件下空气的流动处于稳态,速度为 2 m/s。工程上对于空气

对流传热表面传热系数,可以表示为  $h=a+bu$ ,其中  $a,b$  为实验拟合数据,一般采用  $a=5.8,b=4.0$ 。图 4 所示为主镜温度随时间的变化曲线,可以明显地看出主镜的温度在 80 min 时基本与环境温度达到平衡,图 5 所示为 80 min 时主镜的温度分布云图。

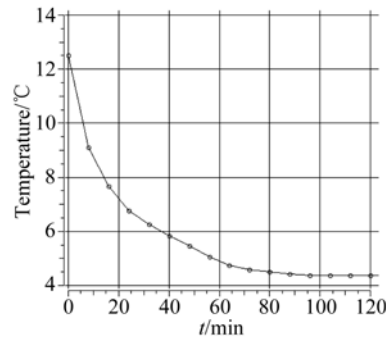


图 4 主镜温度随时间的变化

Fig. 4 Temperature of primary mirror with the change of time

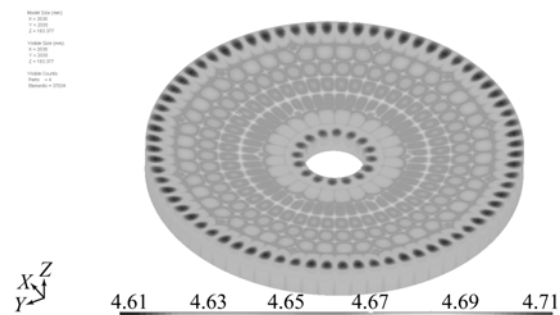


图 5 80 min 后主镜的温度分布云图

Fig. 5 Temperature contour of primary mirror after 80 min

假设当主镜与环境的温度差小于 0.1℃ 时,可以认为主镜与环境温度达成一致。根据有限元仿真结果,从图 2 和图 4 可以看出,在吹风条件下主镜的温度与环境温度达成一致所需时间更短,虽然达到平衡后,自然对流情况下主镜自身的温度梯度更小,仅为 0.05℃,吹风条件下的主镜自身的温度为 0.1℃ 也可以满足要求。但对于望远镜,观测时间很重要,为了充分利用望远镜观测时间,应尽量控制在 40 min 以内,所以为了增加观测时间,应增加热控措施。

### 4 2 m SiC 轻量化主镜温度实验

利用实验室 2 m SiC 轻量化主镜搭建实验平台,研究了环境对主镜表面温度及镜子自身的温度梯度的影响。为了跟踪主镜各部分的温度变化趋势,温度传感器的采集点布局方式如图 6,图 7 所示,采用的温度传感器为数字型温度传感器,在其 0~40℃内平均测量误差小于 0.2℃。

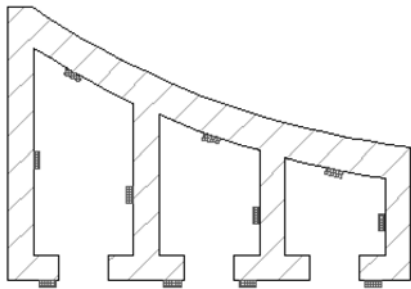


图 6 温度传感器纵向布置示意图

Fig. 6 Vertical schematic of temperature sensor layout

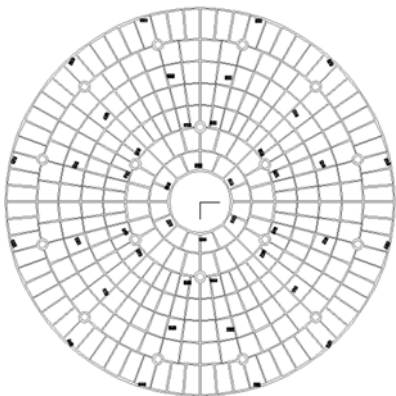


图 7 温度传感器横向布置示意图

Fig. 7 Radial schematic of temperature sensor layout

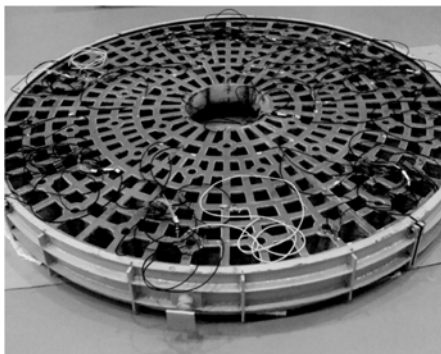


图 8 传感器位置实物图

Fig. 8 Schematic of temperature sensor locations

在主镜的各个温度采集点通过导热硅胶将温度传感器贴到主镜上,图 8 所示为传感器位置实物图。设计温度采集卡处理温度传感器的输出信号,并通过 R232 接口将各温度采用点的温度数据传入电脑进行后续处理。图 9 所示为 2 m SiC 轻量化主镜温度实验平台。

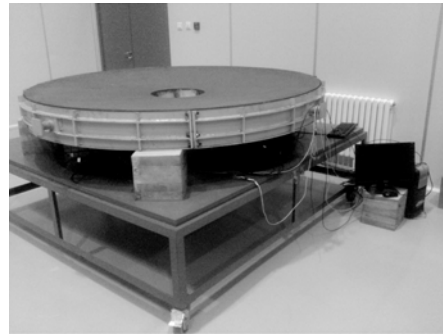


图 9 2 m SiC 轻量化主镜温度实验平台

Fig. 9 Temperature experiment platform of 2 m SiC lightweight primary mirror

#### 4.1 实验 1:自然对流对主镜温度的影响

傍晚,将在室外温度冷却至 12℃左右的主镜推进实验室大厅,搭建温度采集设备,进行温度数据采集,此时主镜的平均温度约为 12.5℃,大厅内的温度基本稳定在 18.3℃。图 10 所示为主镜温度与主镜周围的空气的温度随时间的变化曲线。经过 3 h,主镜的温度尚未与环境温度达成一致;图 11 所示为主镜上、中、下面的温度随时间变化曲线。利用传感器采集的有效的 80 个温度点的温度数据,通过 Matlab 用插值的方法画出的主镜表面的温度云图及等温线图,如图 12 所示。

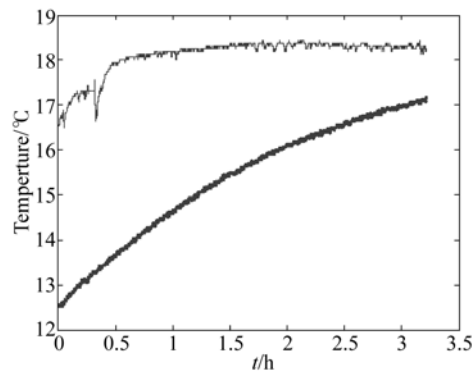


图 10 主镜及其周围空气的温度随时间变化曲线

Fig. 10 Curves of primary mirror temperature and its surrounding ambient temperature with the change of time

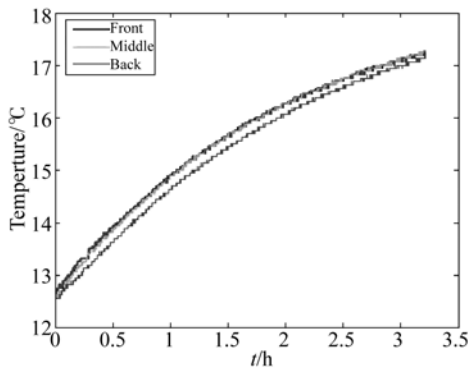
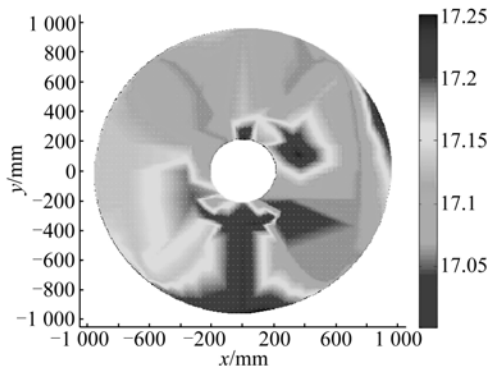


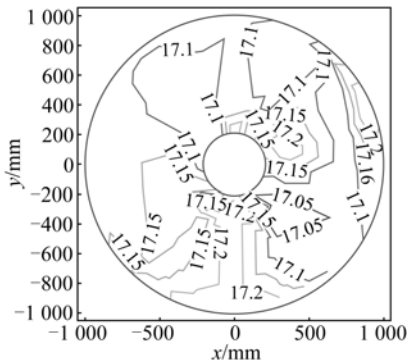
图 11 主镜纵向温度梯度

Fig. 11 Vertical temperature gradients of primary mirror



(a) 温度云图

(a) Temperature contours



(b) 等温线图

(b) Temperature isotherm

图 12 3 h 后主镜表面的温度分布

Fig. 12 Temperature distribution on surface of primary mirror after 3 hours

### 4.2 实验 2: 吹风对主镜温度的影响

模拟主镜打开圆顶后,主镜在自然吹风环境下的温度变化情况。早上将主镜从实验室大厅推至户外阴暗有风处,调节实验设备,在主镜温度为

12.5°C 左右时,开始温度数据的采集。图 13 所示为环境温度与镜子温度随时间的变化,主镜与环境温度存在约 8°C 的温差,经过 90 min,主镜温度与环境温度基本达到一致。图 14 所示为主镜纵向温度梯度随时间的变化。通过 Matlab 将温度传感器采集的各温度点的温度数据绘制成主镜表面的温度云图及等温线图,如图 15 所示。

### 4.3 实验结果分析

根据实验数据,从图 10 可以看出,实验室大厅内环境温度稳定在 18.3°C 左右,主镜与环境温度初始温差为 6°C 时,历经 3 h 后主镜与环境温度仍未达到一致,这与仿真结果图 2 所示主镜温度与环境在 3.5 h 左右到达温度一致的结果基本一致,但从图 10 中主镜的温度变化趋势上看,主镜温度与环境温度达到一致的时间应不小于 4 h。

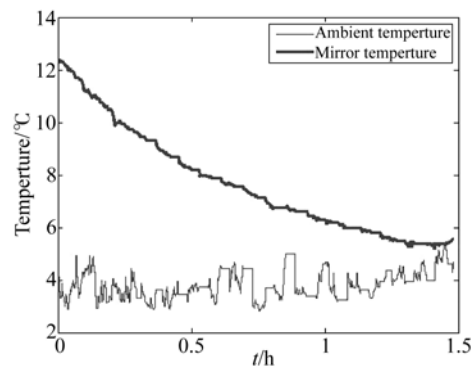


图 13 环境温度与镜子温度随时间变化曲线

Fig. 13 Curves of primary mirror temperature and its surrounding ambient temperature with the change of time

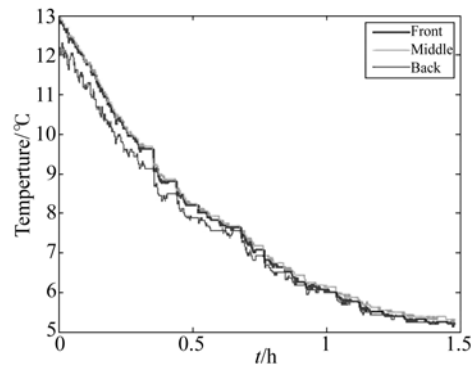
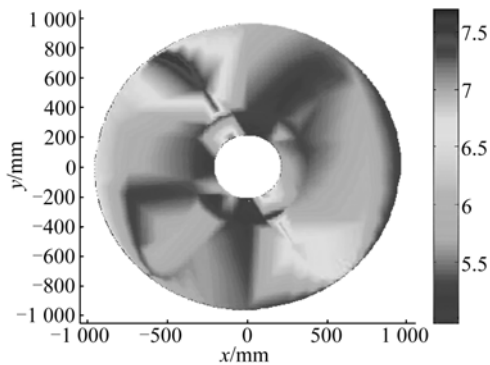


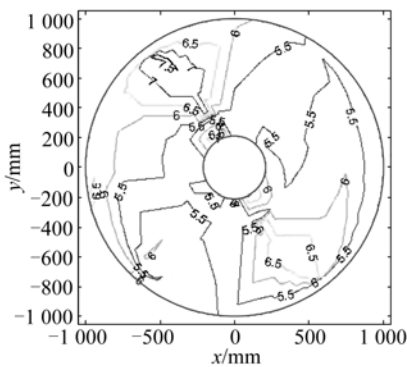
图 14 主镜纵向温度梯度

Fig. 14 Vertical temperature gradients of primary mirror



(a) 温度云图

(a) Temperature contours



(b) 等温线图

(b) Temperature isotherm

图 15 90 min 后主镜表面的温度分布

Fig. 15 Temperature distribution on surface of primary mirror after 90 min

相比之下,在自然吹风条件下,主镜与环境温度达成一致所需时间明显缩短。如图 13 所示,主镜与环境温度初始温差为  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,主镜温度由初始的  $12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  达到环境温度  $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  仅需 90 min,这与图 2 所示仿真结果中主镜温度与环境在 80 min 左右到达温度一致的结果基本一致。可见如采用强迫对流热控措施,会明显缩短主镜与环境温度达到热平衡的耗时。所以为了获得更多的望远镜观测时间,应尽可能让望远镜快速进入工作状态,缩短主镜温度与环境温度达成一致的时间,最好将时间控制在 40 min 以内。所以对于大口径望远镜而言,主镜热控十分必要。

#### 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, 4(5): 327-328.  
ZHANG J X. Overview of structure technologies of

从图 3、图 5 所示有限元仿真结果可以看出,两种情况下主镜自身的梯度分别为  $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这与实验结果有一定差距。原因在于有限元的仿真的热边界条件过于理想,且相对于实际模型有一定简化,造成结果有一定程度的偏差。从图 12 和图 15 的实验结果中可以看出,两种情况下的温度梯度分别为  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。主镜自身温度梯度表明,虽然 SiC 材料具有良好的热传导率,但在实际条件下,主镜镜体自身还存在较大的温度梯度,尤其在自然吹风条件下。而镜体自身较大的温差带来较大的镜面面形误差,会严重影响望远镜的成像质量。由于实验中没有对主镜进行主动热控,但结合自然对流条件下主镜温度分布相对均匀和自然吹风条件下主镜温度变化的快速响应可以看出,对主镜进行合理的热控可以在减小主镜自身温度梯度的同时快速有效地减小主镜视宁度,在获得更多的望远镜观测时间的同时,得到更佳的成像质量。

## 5 结 论

本文分析了环境对大口径 SiC 轻量化主镜视宁度的影响,首先通过理论计算分析得到,主镜视宁度主要受主镜表面与周围空气温度差和主镜的光学口径的影响。然后通过热分析软件分析了自然对流条件和吹风条件下,环境对 2 m SiC 轻量化主镜的温度分布的影响;最后通过 2 m SiC 轻量化主镜温度实验,对有限元仿真分析结果进行验证。通过仿真和实验结果可知,在初始温差  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  的无风自然对流情况下,主镜与环境达到温度平衡约需要 4 h,而在初始温差为  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  吹风情况下,主镜与环境达到热平衡仅需 1.5 h。由此可见,采用强迫对流热控措施会明显缩短主镜与环境温度达到热平衡的耗时,在较短的时间内将主镜视宁度控制在合理的范围内,为望远镜争取更多的观测时间,并得到更佳的成像质量。

本文结果为今后 4 m 及以上 SiC 轻量化主镜望远镜系统调节的参数设定和热控参数的确定提供了一定的理论依据及数据参考。

large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 4(5): 327-328.

- [2] 胡君,王栋,孙天宇. 现代航天光学成像传感器的应用和发展 [J]. 中国光学, 2010, 6(3): 519-520.  
HU J, WANG D, SUN T Y. Application and development of recent space optical imaging remote

- sensors [J]. *Chinese Optics*, 2010, 6(3):519-520. (in Chinese)
- [3] 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.  
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 王红, 田铁印. 轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1489-1494.  
WANG H, TIAN T Y. Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1489-1494. (in Chinese)
- [5] 吴清文, 卢锴, 王家骥, 等. 主镜稳定温度场特性分析 [J]. *光学精密工程*, 1996, 4(6): 47-53.  
WU Q W, LU E, WANG J Q, *et al.*. A study on static thermal properties of primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(6): 47-53. (in Chinese)
- [6] STEPP L, HANSEN E. The Gemini primary mirror thermal management [J]. *SPIE*, 1994, 2911: 911-913.
- [7] RACINE R, SALMON D, COWLEY D, *et al.*. Mirror, dome and natural seeing at CFHT [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1991, 103: 1020-1032.
- [8] WOOD P Y, RYAN S G. Effects on seeing at the Anglo-Australian telescope of temperature differences between outside air, dome air and mirror [J]. *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*, 1995, 12: 95-96.
- [9] LARRY W GOBLE. Temperature control of the 3.5-Meter WIYN telescope primary mirror [J]. *SPIE*, 1991, 1532: 161-163.
- [10] BRIAN CUERDENA. Jacques sebag and etc. LSST mirror thermal performance [J]. *SPIE*, 2004, 5495: 189-191.
- [11] DOUGLAS R. Neill. LSST primary/tertiary mirror thermal control system [J]. *SPIE*, 2010, 7733: 77331E-2.
- [12] VOLKER BÄUMER, PHILIPPE SACRÉ. Operational model for VLT temperature and flow control [J]. *SPIE*, 1997, 2871: 657-659.
- [13] 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): 1244.  
WU X X, WANG M H, MING M, *et al.*. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1244. (in Chinese)
- [14] 董吉洪, 王克军, 李延春, 等. 空间遥感器中大口径 SiC 主镜的轻量化设计 [J]. *中国光学*, 2011, 2(4): 118-119.  
DONG J H, WANG K J, LI Y C, *et al.*. Lightweight design of large-aperture SiC primary mirrors for space remote sensors [J]. *Chinese Optics*, 2011, 2(4): 118-119. (in Chinese)
- [15] 杨献伟, 吴清文, 李书胜, 等. 空间光学遥感器热设计 [J]. *中国光学*, 2011, 2(4): 139-140.  
YANG X W, WU Q W, LI SH SH, *et al.*. Thermal design of space optical remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2011, 2(4): 139-140. (in Chinese)
- [16] 郭亮, 吴清文, 曹启鹏, 等. 空间相机电控机箱的热设计及仿真分析 [J]. *中国光学*, 2011, 2(4): 129-131.  
GUO L, WU Q W, CAO Q P, *et al.*. Thermal design and simulation analysis of electronic controlling cabinet in space camera [J]. *Chinese Optics*, 2011, 2(4): 129-131. (in Chinese)
- [17] LORENZO Z. An engineering handbook for local and dome seeing [J]. *SPIE*, 1997, 2871: 726-736.
- [18] WYNGAARD J C. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1971, 61: 1646-1650.
- [19] LORENZO Z. *The Effects of the Local Atmosphere Environment on Astronomical Observations* [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1995.
- [20] 贾力. 高等传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.  
JIA L. *Advanced Heat Transfer* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)

## 作者简介:



刘祥意(1987—),男,吉林敦化人,博士研究生,2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要研究方向为大口径望远镜的主镜支撑设计和仿真分析。E-mail: liuxiangyi107@163.com



张景旭(1965—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为大型光电经纬仪结构设计。E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn.

(版权所有 未经许可 不得转载)