

# 望远镜主镜温度场理论计算及主镜视宁度分析

张 俊<sup>1,2,3</sup> 鲜 浩<sup>1,2</sup> 贺元兴<sup>1,2,4</sup> 饶长辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup> 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; <sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049  
<sup>4</sup> 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 提出了地基望远镜主镜在环境温度变化时的温度场理论模型, 结合分离变量法和格林函数法求解出温度场的解析表达式。运用温度场理论解, 分别以熔石英和 BK7 两种常用材料为例, 在特定环境条件下, 定量分析了传统主镜和薄主镜的主镜视宁度与主镜口径之间的关系; 针对 4 m 口径的传统主镜和薄主镜定量分析了其主镜视宁度与周围空气温度下降斜率的关系。地基望远镜主镜温度场理论计算的结果在主镜设计阶段对主镜视宁度的估量具有较大的参考价值。主镜温度场理论解还可以运用于各种口径及材料的主镜热变形及热应力计算等方面, 具有普适的参考价值。

**关键词** 成像系统; 温度场分布; 主镜视宁度; 望远镜主镜; 热传导

**中图分类号** P111.21; O411.1; TK124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1022001

## Theoretical Calculation of Telescope Primary Mirror's Thermal Field and Seeing Analysis of Primary Mirror

Zhang Jun<sup>1,2,3</sup> Xian Hao<sup>1,2</sup> He Yuanxing<sup>1,2,4</sup> Rao Changhui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>4</sup> College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hu'nan 410073, China

**Abstract** A temperature field theoretical model of classical telescope primary mirror is presented. Analytical solution is gotten by separation of variables and Green's function method. It is easy to get the temperature difference between primary mirror work surface and ambient air with the analytical solution of the temperature field. A quantitative analysis of the primary mirror seeing is addressed. The relationship between primary mirror seeing and the size of primary mirror is studied in two different materials (fused silica and BK7) and two different kinds of mirror (traditional mirror and thin mirror) in two definite conditions with analytic solution. For 4 m traditional mirror and thin mirror, the relationship between primary mirror seeing and descending slope of the ambient air temperature is also presented. The quantitative analysis is helpful for estimating primary mirror seeing. The analytical solution of primary mirror is also valuable in designing telescope primary mirror for calculating thermal stress and thermal strain.

**Key words** imaging systems; temperature field distribution; primary mirror seeing; telescope primary mirror; heat transfer

**OCIS codes** 110.6770; 120.6780

**收稿日期**: 2012-03-29; **收到修改稿日期**: 2012-05-12

**作者简介**: 张 俊(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事望远镜主镜视宁度、光机系统传热与变形等方面的研究。

E-mail: myskyzj@163.com

**导师简介**: 鲜 浩(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学、光机系统设计等方面的研究。

E-mail: xianhao@ioe.ac.cn

## 1 引言

为了能够对目标进行更加精确和清晰的观测,人类开始研究天文望远镜。地基天文望远镜对自然观测条件要求很高,因此观测站址往往建立在海拔比较高、大气视宁度比较好的高原或者高山地区。这些地方的昼夜温差较大,尤其是晨昏线附近几个小时环境温度变化尤其明显。当环境温度下降较快时,主镜的温度就会高于环境温度,这样在主镜工作面附近的空气会产生温度梯度,前表面附近的空气密度也会分布不均匀。当主镜前表面温度与环境温度差达到一定量以后,在密度梯度和重力的作用下主镜前表面的空气将会发生较强烈的湍流,扰乱主镜视场,严重影响望远镜的观测效果,这一现象叫做主镜视宁度。主镜视宁度是望远镜主镜设计中必须要考虑的一个重要物理现象。前人关于主镜视宁度研究和评估的文献有很多,关于主镜视宁度估算的经验公式也不少<sup>[1~6]</sup>。所有经验公式都是关于主镜前表面温度与环境温度之差的一元函数。研究这一温度差是分析主镜视宁度的关键环节。

为了研究主镜视宁度对望远镜观测的影响,应当先研究环境温度随时间变化时主镜表面温度与环境温度之差的变化规律。尽管主镜材料各不相同,但是随着主镜口径的逐渐增大,主镜温度滞后环境温度越发明显。对不同口径的主镜进行实验研究既费时又费力,还需要巨大的经费开支,且实验实施难度较大,尤其是在主镜设计阶段根本不具备实验测量的条件。为了对主镜视宁度进行定量计算,开展主镜温度场的理论研究工作便显得尤为重要。本文对主镜温度场理论模型进行求解,得到温度场解析表达式,并分别以熔石英和BK7材料为例对传统主镜和薄主镜的主镜视宁度进行了定量分析。

## 2 理论模型

为了简化理论模型,将望远镜主镜近似为一个扁的圆柱体,采用柱坐标进行理论计算。以底面圆心为坐标原点,以主镜中心对称轴为坐标系的 $z$ 轴。如图1所示,图中 $b$ 为主镜半径, $d$ 为主镜厚度。

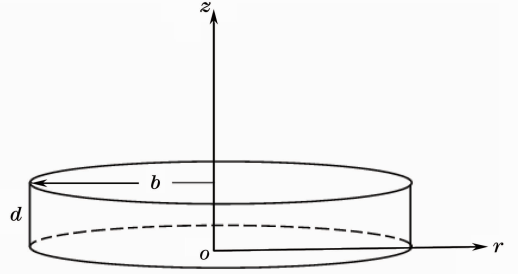


图1 理论模型坐标系

Fig.1 Coordinate system of theoretical model

在柱坐标下主镜瞬态温度场是关于3个空间轴坐标 $(r, \theta, z)$ 和一个时间轴坐标 $t$ 的函数,由于主镜几何上关于 $z$ 轴对称,计算结果是一个与 $\theta$ 坐标无关的表达式,故设温度场为 $T(r, z, t)$ 。设主镜周围空气的温度为 $T_a(t)$ ,主镜初始温度场分布均匀,初始温度为 $T_0$ 。当主镜周围没有空气流动的时候,3个外表面与空气发生自然对流,近似认为具有相同的对流传热系数 $h$ 。设主镜热导率为 $\lambda$ ,密度为 $\rho$ ,比热容为 $c$ 。所有物理量均采用国际单位制。考虑到主镜既要向相对其为低温物体的零部件辐射热量又要接受来自相对其为高温物体的零部件的辐射能,为了得到普适性结论、简化理论计算,假设主镜对外的辐射能和自身接受的辐射能相互抵消,忽略辐射传热,只考虑热传导和对流换热这两种情况。根据传热学相关知识,可以得到主镜温度场满足偏微分方程(1)式和边界条件(2)式以及初始条件(3)式<sup>[7~12]</sup>:

$$\frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial T(r, z, t)}{r \partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} - \frac{\partial T(r, z, t)}{D \partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right|_{r=b} + H[T(r, z, t) - T_a(t)] \Big|_{r=b} = 0 \\ - \left. \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} + H[T(r, z, t) - T_a(t)] \Big|_{z=0} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=d} + H[T(r, z, t) - T_a(t)] \Big|_{z=d} = 0 \\ T(r, z, t) \Big|_{t=0} = T_0, \end{cases} \quad (3)$$

式中 $0 \leq r \leq b, 0 \leq z \leq d, t \geq 0, H = h/\lambda, D = \frac{\lambda}{\rho c}$ 。

根据高等传热学相关知识,利用格林函数法求解上述非齐次边界条件偏微分方程之前,需要先求解其齐次方程<sup>[13]</sup>。把齐次方程表示成(4)~(6)式的形式:

$$\frac{\partial^2 \Psi(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial \Psi(r, z, t)}{r \partial r} + \frac{\partial^2 \Psi(r, z, t)}{\partial z^2} - \frac{\partial \Psi(r, z, t)}{D \partial t} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial \Psi(r, z, t)}{\partial r} \right|_{r=b} + H \Psi(r, z, t) \Big|_{r=b} = 0 \\ - \left. \frac{\partial \Psi(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} + H \Psi(r, z, t) \Big|_{z=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial \Psi(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=d} + H \Psi(r, z, t) \Big|_{z=d} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\Psi(r, z, t) \Big|_{t=0} = T_0. \quad (6)$$

采用分离变量法可以得到齐次方程的解为

$$\begin{aligned} \Psi(r, z, t) = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{M(\beta_m) N(\eta_p)} \exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)t] J_0(\beta_m r) [\eta_p \cos(\eta_p z) + H \sin(\eta_p z)] \times \\ & \int_{r'=0}^b \int_{z'=0}^d r' J_0(\beta_m r') [\eta_p \cos(\eta_p z') + H \sin(\eta_p z')] T_0 dr' dz', \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $M(\beta_m) = \frac{J_0^2(\beta_m b) b^2 (H^2 + \beta_m^2)}{2\beta_m^2}$ ,  $N(\eta_p) = \frac{d(\eta_p^2 + H^2) + 2H}{2}$ ,  $\beta_m$  为方程  $HJ_0(\beta b) - \beta J_1(\beta b) = 0$  的第  $m$  个正根,  $\eta_p$  为方程  $\tan(\eta d) = \frac{2\eta H}{\eta^2 - H^2}$  的第  $p$  个正根。

齐次方程的解  $\Psi(r, z, t)$  又可以表示成格林函数的形式<sup>[13]</sup>:

$$\Psi(r, z, t) = \int_{r'=0}^b \int_{z'=0}^d G(r, z, t | r', z', \tau) \Big|_{\tau=0} T_0 2\pi r' dr' dz'. \quad (8)$$

对比(7)式和(8)式,可得<sup>[13]</sup>

$$\begin{aligned} G(r, z, t | r', z', \tau) \Big|_{\tau=0} = & \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{M(\beta_m) N(\eta_p)} \exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)t] J_0(\beta_m r) [\eta_p \cos(\eta_p z) + H \sin(\eta_p z)] \times \\ & J_0(\beta_m r') [\eta_p \cos(\eta_p z') + H \sin(\eta_p z')], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} G(r, z, t | r', z', \tau) = & \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{M(\beta_m) N(\eta_p)} \exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)(t - \tau)] J_0(\beta_m r) [\eta_p \cos(\eta_p z) + H \sin(\eta_p z)] \times \\ & J_0(\beta_m r') [\eta_p \cos(\eta_p z') + H \sin(\eta_p z')]. \end{aligned} \quad (10)$$

(1)式的解可以表示为

$$T(r, z, t) = \int_R G(r, z, t | r', z', \tau) \Big|_{\tau=0} T_0 dv' + D \int_{\tau=0}^t d\tau \sum_{i=1}^s \int_{S'_i} G(r, z, t | r', z', \tau) \Big|_{r'=r_i, z'=z_i} H T_a(\tau) dS'_i, \quad (11)$$

其中  $dv'$  和  $dS'_i$  分别为相应变量的体积元和面积元<sup>[13]</sup>。为了计算方便,假设在一定时间段内环境温度是均匀变化的,不妨令  $T_a(t) = T_{a0} + kt$ , 这样通过积分计算不难得到原理模型解为

$$\begin{aligned} T(r, z, t) = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{M(\beta_m) N(\eta_p)} \left\{ \exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)t] \frac{b}{\beta_m} J_1(\beta_m b) \frac{H + \eta_p \sin(\eta_p d) - H \cos(\eta_p d)}{\eta_p} T_0 + \right. \\ & \left. \left\{ T_{a0} H \frac{1 - \exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)t]}{\beta_m^2 + \eta_p^2} + kH \left[ \frac{t}{\beta_m^2 + \eta_p^2} - \frac{1 - \exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)t]}{D(\beta_m^2 + \eta_p^2)^2} \right] \right\} \times \right. \\ & \left. \left\{ \frac{H + \eta_p \sin(\eta_p d) - H \cos(\eta_p d)}{\eta_p} b J_0(\beta_m b) + \frac{b}{\beta_m} J_1(\beta_m b) [\eta_p \cos(\eta_p d) + H \sin(\eta_p d)] + \frac{\eta_p b}{\beta_m} J_1(\beta_m b) \right\} \right\} \times \\ & J_0(\beta_m r) [\eta_p \cos(\eta_p z) + H \sin(\eta_p z)], \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $0 \leq r \leq b, 0 \leq z \leq d, H = h/\lambda, t \geq 0, D = \frac{\lambda}{\rho c}$ 。

### 3 主镜视宁度分析

目前国外对主镜视宁度的定量计算均基于主镜工作表面温度与环境空气温度之差<sup>[1~6]</sup>。根据Lorenzo<sup>[4,5]</sup>得出的主镜视宁度估算方法,当只考虑视宁度对成像质量的影响的时候,点扩展函数半峰全宽 $\theta_m$ 可以由(13)式得到,其中 $\Delta T$ 为主镜前表面与环境温度差:

$$\theta_m = 0.38\Delta T^{6/5}. \quad (13)$$

表1 熔石英和BK7的常用热物理属性

Table 1 Common thermal constant of fused silica and BK7

Material	Density / (kg/m <sup>3</sup> )	Heat conductivity / [W/(m · °C)]	Specific heat capacity / [J/(kg · °C)]
Fused silica	2200	1.4	750
BK7	2510	1.1	858

得到温度场解析表达式(12)式以后,通过数值迭代的方法可以方便地求得主镜中每一个点任意时刻的温度值,也就能够方便地得到主镜前表面与环境温度差的大小,从而对主镜视宁度现象进行定量计算分析。

#### 3.1 传统主镜视宁度分析

传统主镜径厚比(直径与厚度之比)一般为6~8左右<sup>[16]</sup>。假设传统主镜径厚比为8,环境温度均匀下降,初始时刻主镜和环境具有相同的温度5.8 °C。分别将熔石英和BK7两种材料的物理属性代入(12)式

熔石英和BK7是两种常用的光学器件材料。它们的常用热物理属性如表1所示<sup>[14]</sup>。在自然对流的情况下,熔石英与空气的对流传热系数为6.693 W/(m<sup>2</sup> · °C);BK7与空气的对流传热系数为6.743 W/(m<sup>2</sup> · °C)<sup>[15]</sup>。以熔石英和BK7两种材料为例,利用前面理论推导的温度场解析结果,对主镜视宁度进行定量分析。

中,通过数值方法求解 $\beta_m$ 和 $\eta_p$ 。当环境温度 $T_a(t) = 5.8 - 2.5 \times 10^{-4}t$ 时,分别得到两种材料第3600 s末主镜前表面平均温度与环境温度差随着主镜直径变化的规律,并通过经验公式得到主镜视宁度随主镜直径变化规律;当环境温度 $T_a(t) = 5.8 - 5 \times 10^{-4}t$ ,分别得到两种材料第3600 s末主镜前表面平均温度与环境温度差随着主镜直径变化的规律,并通过经验公式得到主镜视宁度随主镜直径变化规律,如图2所示。

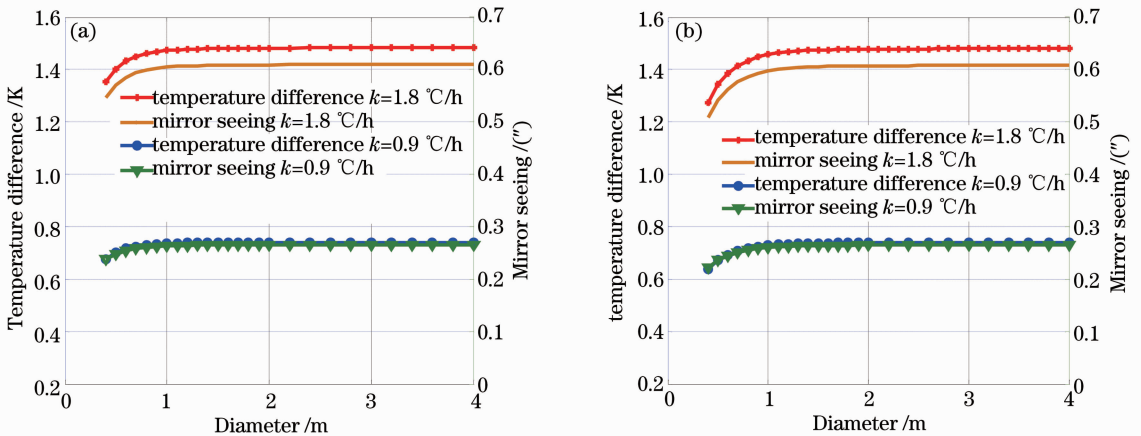


图2 第3600 s末传统主镜前表面平均温度与环境温度差以及由其引起的主镜视宁度与主镜口径关系图。(a) BK7; (b)熔石英

Fig. 2 Curves of the temperature difference and mirror seeing versus the diameter of traditional mirror at the end of an hour. (a) BK7; (b) fused silica

假定系统可以接受的主镜视宁度为0.3"。由图2可以看出,对于传统主镜,当环境温度1 h下降0.9 K的时候,第3600 s末,主镜视宁度仍然在可以接受的范围内;但是当环境温度1 h下降1.8 K的时候,第3600 s末的主镜视宁度已经远远超过系统

可以接受的范围,为了不影响望远镜观测质量,应该对主镜视宁度加以控制。同时1 m以下口径的传统主镜,随着口径增大,主镜视宁度迅速增大。但是口径大于1 m的传统主镜,主镜视宁度随口径增大而发生的改变并不大。

### 3.2 薄主镜视宁度分析

目前投入使用的薄主镜径厚比已经远远大于 $20^{[16]}$ 。同样假设薄主镜径厚比为40,环境温度均匀下降,初始时刻主镜和环境具有相同的温度 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用同样的方法进行计算。当环境温度 $T_a(t) = 5.8 - 2.5 \times 10^{-4}t$ 时,分别得到两种材料第3600 s末主镜前表面平均温度与环境温度差随着主镜直径

变化的规律,并通过经验公式得到主镜视宁度随主镜直径变化规律;当环境温度 $T_a(t) = 5.8 - 5 \times 10^{-4}t$ ,分别得到两种材料第3600 s末主镜前表面平均温度与环境温度差随着主镜直径变化的规律,并通过经验公式得到主镜视宁度随主镜直径变化规律,如图3所示。

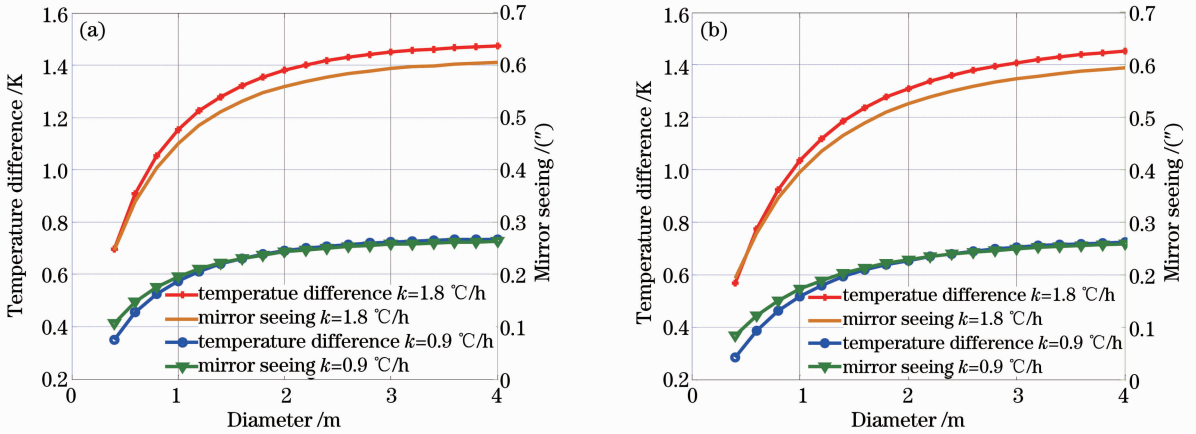


图3 第3600 s末薄主镜前表面平均温度与环境温度差以及由其引起的主镜视宁度与主镜口径关系图。(a) BK7; (b) 熔石英

Fig. 3 Curves of the temperature difference and mirror seeing versus the diameter of thin mirror at the end of an hour. (a) BK7; (b) fused silica

假定系统可以接受的主镜视宁度为 $0.3''$ 。由图3可以看出,当环境温度1 h下降 $0.9\text{ K}$ 的时候,即使主镜口径增大到 $4\text{ m}$ ,第3600 s末主镜视宁度仍然是可以接受的;当环境温度1 h下降 $1.8\text{ K}$ 的时候,在这种恶劣环境下,BK7材料的主镜口径超过 $0.5\text{ m}$ 就不能满足系统对视宁度的要求,熔石英材料的主镜口径超过 $0.65\text{ m}$ 就不能满足系统对视宁度的要求,应该对主镜视宁度加以控制。同时发现,2 m以下口径的薄主镜主镜视宁度随着口径增大而快速增大,2 m以上口径的薄主镜主镜视宁度随着口径增大而缓慢增大,这一点与传统主镜不同。

### 3.3 4 m 主镜视宁度分析

针对直径为 $4\text{ m}$ 的传统主镜和薄主镜,利用主镜温度场理论解和视宁度定量计算经验公式,在不同的环境温度条件下计算了主镜前表面与环境温度差及由其引起的主镜视宁度。第3600 s末 $4\text{ m}$ 传统主镜前表面与环境温度差及由其引起的主镜视宁度随环境温度下降斜率 $k$ 变化规律如图4所示,图4(a)为熔石英传统主镜规律,图4(b)为BK7材料传统主镜规律。第3600 s末 $4\text{ m}$ 薄主镜前表面与环境温度差及由其引起的主镜视宁度随环境温度

下降斜率 $k$ 变化规律如图5所示,其中图5(a)为熔石英薄主镜规律,图4(b)为BK7材料薄主镜规律。

同样假设系统可以接受的主镜视宁度为 $0.3''$ 。由图6、图7可以看出,当环境温度下降斜率在 $0.3 \times 10^{-3}$ 左右的时候,第3600 s末的主镜视宁度就基本超出了 $0.3''$ 。这个时候便需要对主镜视宁度进行控制。同时发现,当环境空气温度下降斜率相同时, $4\text{ m}$ 口径的薄主镜和传统主镜的主镜视宁度相差并不大。

各望远镜系统可以根据自己的系统精度分配原则来判断是否应该对主镜视宁度采取相应措施加以控制。目前对主镜视宁度控制的常用方法主要有两种,一种方法是对主镜自身进行温度控制,包括将传统主镜替换为蜂窝型轻质镜并在其背后通风,对薄主镜可以在其背后做通风处理,以使主镜温度能够最大程度地紧跟环境温度变化而变化,从而减小二者的温度差异,降低对主镜视宁度的影响;另外一种方法就是在平行于主镜前表面的方向吹风,相当于一个风刀把原本扰动不宁的空气均匀化,即使原空气扰动层密度基本趋于一致,从而达到降低主镜视宁度的效果。



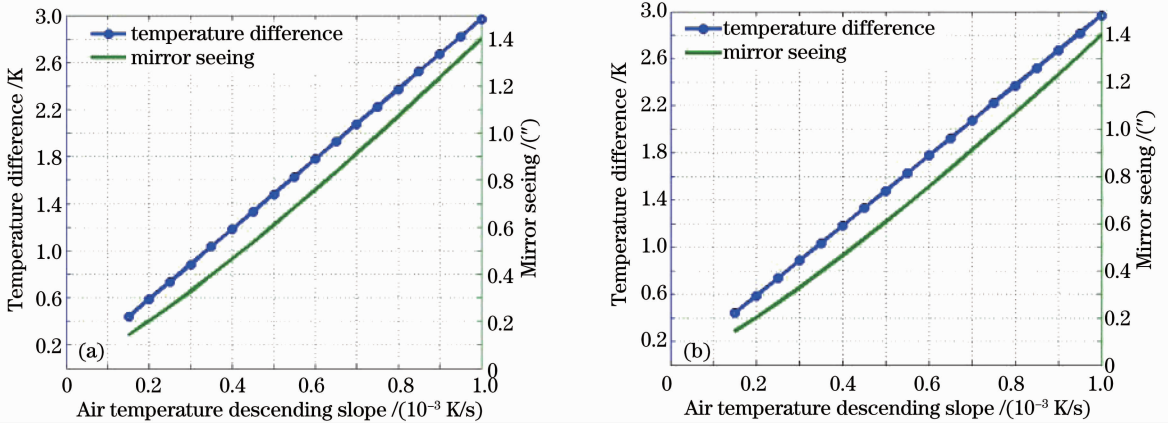


图 4 第 3600 s 末, 4 m 口径传统主镜前表面平均温度与环境温度差以及由其引起的主镜视宁度与环境空气温度下降斜率的关系图。(a) BK7; (b) 熔石英

Fig. 4 Curves of the temperature difference and mirror seeing of traditional mirror versus the ambient air temperature descending slope at the end of an hour. (a) BK7; (b) fused silica

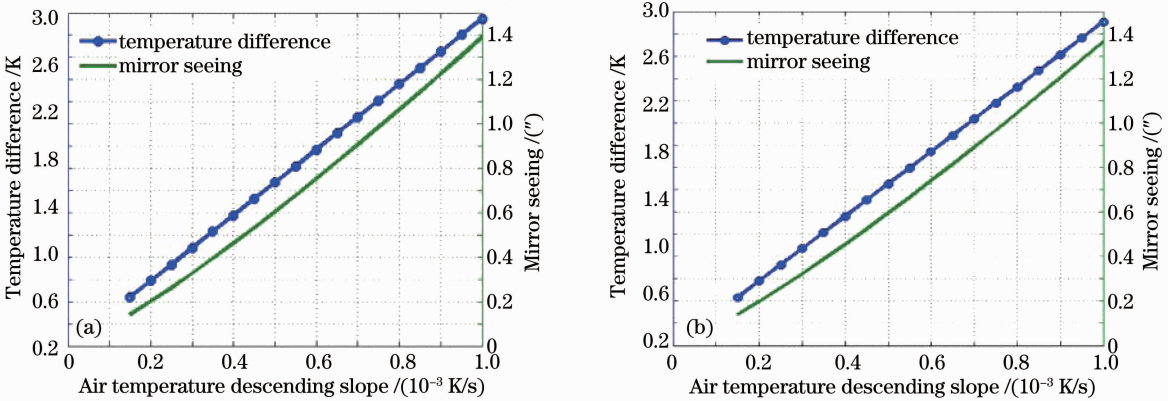


图 5 第 3600 s 末, 4 m 口径薄主镜前表面平均温度与环境温度差以及由其引起的主镜视宁度与环境空气温度下降斜率的关系图。(a) BK7; (b) 熔石英

Fig. 5 Curves of the temperature difference and mirror seeing of thin mirror versus the ambient air temperature descending slope at the end of an hour. (a) BK7; (b) fused silica

## 4 结 论

通过建立望远镜主镜温度场分布方程, 求解得出主镜温度场解析表达式。以熔石英和 BK7 两种材料为例, 利用主镜温度场理论解对薄主镜和传统主镜的主镜视宁度均做了定量分析。如果以 0.3" 为界限, 当环境温度 1 h 下降 0.9 K 时, 无论传统主镜还是薄主镜, 即使口径达到 4 m, 第 3600 s 末的主镜视宁度也不超过 0.3"。但是当环境温度 1 h 下降 1.8 K 的时候, 无论传统主镜还是薄主镜, 当口径达到 0.5 以上, 第 3600 s 末的主镜视宁度就远远超过 0.3"。针对 4 m 主镜, 分析了不同环境条件下主镜视宁度的大小。主镜温度场理论解还可以应用于主镜温度梯度分析、温度梯度引起的热变形分析和热应力分析, 这些是下一步需要研究的内容。主镜温

度场理论解在望远镜主镜设计中具有普适的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 P. Y. Bely. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. New York: Springer Press, 2002. 356~358
- 2 R. Racine, D. Salmon, D. Cowley *et al.*. Mirror, dome, and natural seeing at CFHT [J]. *Astronomical Society of the Pacific*, 1991, **103**(667): 1020~1032
- 3 P. R. Wood, S. G. Ryan. 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
- 4 Z. Lorenzo. The Effects of the Local Atmospheric Environment on Astronomical Observations[D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1995
- 5 Z. Lorenzo. An engineering handbook for local and dome seeing [C]. *SPIE*, 1997, **2871**: 726~736
- 6 M. T. Bridgeland, C. R. Jenkins. Measurement of mirror

- seeing in the laboratory and at the telescope[J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1997, **287**(1): 87~109
- 7 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 41~45  
杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 41~45
- 8 Zhou Guiyao, Hou Zhiyun, Pan Pufeng *et al.*. Temperature distribution of micro structure fiber perform during fiber drawing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1271~1275  
周桂耀, 侯峙云, 潘普丰等. 微结构光纤预制棒拉制过程的温度场分布[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1271~1275
- 9 Wei Zaifu, Zha Hongkui, Wang Runwen. Physical analysis of the laser-induced temperature field[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4): 355~359  
魏在福, 查鸿逵, 王润文. 激光加热温度场物理分析[J]. *光学学报*, 1994, **14**(4): 355~359
- 10 Zhao Qiang, Fan Zhengxiu. Interface absorption effect on temperature field of optical coatings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6): 777~782  
赵 强, 范正修. 光学薄膜界面吸收对温度场的影响[J]. *光学学报*, 1996, **16**(6): 777~782
- 11 Zhao Qiang, Fan Zhengxiu, Wang Zhijiang. Digital analysis of laser induced thermal process in optical coatings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1019~1023  
赵 强, 范正修, 王之江. 激光对光学薄膜加热过程的数值分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(8): 1019~1023
- 12 Lu Peihua, Wang Runwen. Three-dimensional temperature distribution analysis and thermal lens effect calculation for high power laser windows[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 965~969  
陆培华, 王润文. 高功率激光器窗口三维温度场分析及其热透镜研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 965~969
- 13 Jia Li. Advanced Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. 74~78  
贾 力. 高等传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. 74~78
- 14 Yang Li. Advanced Optical Manufacture Technique [M]. Beijing: Science Press, 2001. 196~197  
杨 力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 196~197
- 15 Wang Yanru. Study on Optical Testing Methods for Weak Absorptance and Thermal Deformation of Optical Components [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011  
王艳茹. 光学元件吸收损耗和热变形检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011
- 16 Cheng Jingquan. Theory and Design of Astronomical Telescope [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2003. 61~70  
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. 61~70

栏目编辑: 韩 峰