

基于温度场理论的望远镜主镜视宁度及“气刀”效应分析

张 俊^{1,2,3} 鲜 浩^{1,2} 张 程^{1,2} 唐金龙^{1,2} 李 程^{1,2}

(¹ 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
² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; ³ 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 综合考虑非线性气温环境和主镜视宁度表面“气刀”强制对流换热,对地基望远镜主镜瞬态温度场理论模型进行研究,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。以 4 m 主镜为例,运用温度场理论模型解析解,对主镜视宁度进行了分析计算。分析了“气刀”对主镜视宁度的改善效果;讨论了“气刀”风速与主镜视宁度的关系;分析了不同径厚比对主镜视宁度的影响。利用有限元方法分析 4 m 主镜温度场,与所推导的温度场理论结果进行比较,二者获得了较好的一致性。主镜温度场理论解在望远镜主镜设计中具有普适的应用价值。

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/AOS201333.0811005

Telescope Primary Mirror Seeing and Air Knife Effect Analysis Based on Theoretical Calculation of Temperature Field

Zhang Jun^{1,2,3} Xian Hao^{1,2} Zhang Cheng^{1,2} Tang Jinlong^{1,2} Li Cheng^{1,2}

¹ *Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

² *Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

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

Abstract The theoretical model in temperature field based on primary mirror of ground based telescope with the condition of non-linear ambient temperature and forced air flow upon the optical surface is analyzed. The analytical solution is gotten by separation of variables and Green function method. Take 4-m primary mirror as an example, the value of mirror seeing is calculated and analysed by using analytical solution of temperature field theory model. The effect of air flow upon the primary mirror seeing is discussed. The relationship between mirror seeing and air flow velocity upon the primary mirror is studied. Primary mirror seeing is analyzed with different ratios of mirror's diameter to thickness. The temperature field of primary mirror of 4-m diameter is also studied by finite element method. The analytical solution is highly consistent with the solution of finite element method. The analytical solution of temperature field model has universal application value in designing telescope primary mirror.

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

OCIS codes 110.6770; 120.6780; 220.4830

1 引 言

地基天文望远镜一般建立在大气视宁度较好的高山或者高原地区。这些地区昼夜温差通常都比较

大。在夜间观测时段,环境空气温度变化尤其明显。当环境温度快速变化的时候,主镜表面和环境之间的温度差必然导致二者之间的对流换热,在望远镜主镜

收稿日期: 2013-03-01; **收到修改稿日期**: 2013-04-01

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、光机系统传热及热结构特性等方面的研究。

E-mail: myskeyzj@163.com

导师简介: 鲜 浩(1969—),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

光学表面形成一层紊乱的空气扰动层,并导致较大的光学像差,对望远镜成像质量带来严重的影响,人们用主镜视宁度来描述这一现象。前人开展了大量的主镜视宁度研究和评估工作,提出了关于主镜视宁度估算的经验公式^[1-6]。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函数。研究望远镜主镜温度场是分析主镜视宁度的关键环节。

文献[7]基于线性的环境温度和均一的自然对流边界条件,对望远镜温度场理论模型及其在主镜视宁度分析中的应用进行了研究^[7]。在实际系统中,为了减小主镜视宁度的影响,通常在主镜前表面施加一个“气刀”,用均匀的气流层代替原来紊乱的空气湍流^[1]。“气刀”工作的时候,主镜前表面与环境空气之间发生强制对流换热,原模型的边界条件发生改变。目前,基于真实气温条件和“气刀”作用下的地基望远镜实心镜面温度场及其视宁度研究还鲜见报道。为了研究“气刀”对主镜视宁度现象的改善效果,求解非线性气温条件和非均一边界条件下的主镜温度场显得尤为重要。

本文综合考虑非线性气温环境和主镜视宁度表面“气刀”强制对流换热,对望远镜主镜温度场进行了精确的计算。通过分离变量法和格林函数法求得望远镜主镜温度场理论模型的解析解。为实际系统在真实气温条件下主镜视宁度及其改善效果的定量计算奠定了基础。以4 m望远镜主镜为例,运用所得到的温度场理论模型计算了主镜前表面“气刀”方案对主镜视宁度的改善效果;分别讨论了“气刀”风速和主镜径厚比对主镜视宁度的影响。最后将温度场理论计算的结果和有限元(FEM)仿真结果进行了对比,二者具有很好的一致性。

2 理论模型

望远镜主镜可以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。理论模型坐标系如图1所示,图中 b 为主镜半径, d 为主镜厚度。

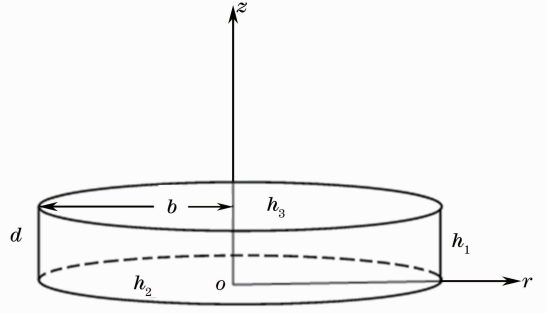


图1 理论模型坐标系

Fig.1 Coordinate system of theoretical model

在柱坐标下主镜瞬态温度场是关于三个空间轴坐标 (r, θ, 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 θ 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 。望远镜主镜前表面是经过抛光镀膜后具有非常高的反射率的镜面,主镜光学表面热辐射的发射率和吸收率都很低^[8],忽略光学表面与外界的辐射换热。考虑到主镜其他两个外表面既要向周围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热量,为了得到普适性的结论、简化理论计算,假设主镜与其周围物体之间发射和吸收的辐射热量相抵消,忽略辐射传热,只考虑热传导和对流换热这两种换热形式。主镜三个外表面与环境空气进行对流换热,对流换热系数分别为 h_1, h_2, h_3 。设主镜热导率为 λ ,密度为 ρ ,比热容为 c 。所有物理量均采用国际单位制。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、边界条件以及初始条件^[9-13]:

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

$$\begin{cases} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=b} + H_1 [T(r, z, t) - T_a(t)] \Big|_{r=b} = 0 \\ -\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} + H_2 [T(r, z, t) - T_a(t)] \Big|_{z=0} = 0, \\ \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=d} + H_3 [T(r, z, t) - T_a(t)] \Big|_{z=d} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$T(r, z, t) \Big|_{t=0} = T_0, \quad (3)$$

式中 $0 \leq r \leq b, 0 \leq z \leq d, 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ, t > 0, H_1 = h_1/\lambda, H_2 = h_2/\lambda, H_3 = h_3/\lambda, D = \lambda/(\rho c)$ 。

文献[14]提出地表大气温度可以用由两个三角函数组成的分段函数描述。为了方便计算,可以根据观测站址监测的温度数据,用两个正弦函数的和来拟合观测站址地表大气温度变化曲线,在理论计算过程中不

妨假设环境气温为

$$T_a = a_1 \sin(b_1 t + c_1) + a_2 \sin(b_2 t + c_2). \quad (4)$$

式中 $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 为待定系数。

运用分离变量法和格林函数法^[7,15-16],结合边界条件、初始条件以及地表大气温度变化规律,可以求解得到原方程的解析解为

$$T(r, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{M(\beta_m)N(\eta_p)} \left\{ \exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)t] \frac{b}{\beta_m} J_1(\beta_m b) \frac{H_2 + \eta_p \sin(\eta_p d) - H_2 \cos(\eta_p d)}{\eta_p} T_0 + \right. \\ \left. \left\{ a_1 \frac{\exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)t] [b_1 \cos c_1 - D(\beta_m^2 + \eta_p^2) \sin c_1] + D(\beta_m^2 + \eta_p^2) \sin(b_1 t + c_1) - b_1 \cos(b_1 t + c_1)}{D^2(\beta_m^2 + \eta_p^2)^2 + b_1^2} + \right. \right. \\ \left. \left. a_2 \frac{\exp[-D(\beta_m^2 + \eta_p^2)t] [b_2 \cos c_2 - D(\beta_m^2 + \eta_p^2) \sin c_2] + D(\beta_m^2 + \eta_p^2) \sin(b_2 t + c_2) - b_2 \cos(b_2 t + c_2)}{D^2(\beta_m^2 + \eta_p^2)^2 + b_2^2} \right\} \cdot \right. \\ \left. D \left\{ b H_1 J_0(\beta_m b) \frac{H_2 + \eta_p \sin(\eta_p d) - H_2 \cos(\eta_p d)}{\eta_p} + H_3 \frac{b}{\beta_m} J_1(\beta_m b) [\eta_p \cos(\eta_p d) + H_2 \sin(\eta_p d)] + \right. \right. \\ \left. \left. H_2 \frac{\eta_p b}{\beta_m} J_1(\beta_m b) \right\} \right\} J_0(\beta_m r) [\eta_p \cos(\eta_p z) + H_2 \sin(\eta_p z)], \quad (5)$$

式中 β_m 为(6)式的第 m 个正根, η_p 为(7)式第 p 个正根; $M(\beta_m)$ 和 $N(\eta_p)$ 的数学表达式见(8)式和(9)式; $J_0(\cdot)$ 和 $J_1(\cdot)$ 分别为 0 阶和 1 阶贝塞尔函数。

$$H_1 J_0(\beta b) - \beta J_1(\beta b) = 0, \quad (6)$$

$$\tan(\eta d) = \frac{\eta H_2 + \eta H_3}{\eta^2 - H_2 H_3}, \quad (7)$$

$$M(\beta_m) = \frac{J_0^2(\beta_m b) b^2 (H_1^2 + \beta_m^2)}{2\beta_m^2}, \quad (8)$$

$$N(\eta_p) = \frac{(\eta_p^2 + H_2^2) \left(d + \frac{H_3}{\eta_p^2 + H_3^2} \right) + H_2}{2}. \quad (9)$$

3 计算结果与分析

根据 Zago 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,点扩散函数半峰全宽 θ_m 为

$$\theta_m = 0.38 \Delta T^{6/5}, \quad (10)$$

式中 ΔT 为主镜前表面与环境空气温度差^[4-5]。

环境气温的快速下降是导致主镜视宁度形成的直接原因,气温下降越快主镜与环境的温差越大,主镜视宁度也就越严重。对高美古天文观测站 2009 年全年地表气温监测数据进行筛选,在夜间气温下降速度最快的冬季,选择 12 月 22 日夜间气温作为典型的冬季气温条件,其气温变化情况如图 2 所示。该气温变化曲线将作为后续计算中主镜的温度边界条件。采用(4)式进行拟合,可以得到表达式

$$T_a = 9.605 \sin(5.826 \times 10^{-5} t + 1.943) + 5.352 \sin(7.8 \times 10^{-5} t - 1.857). \quad (11)$$

利用理论模型解析求解温度场,先通过数值

方法求解超越方程(6)式和(7)式,再代入边界温度条件(11)式和各项物理参数,利用(5)式进行数值迭代就能够得到所求模型的温度场分布。

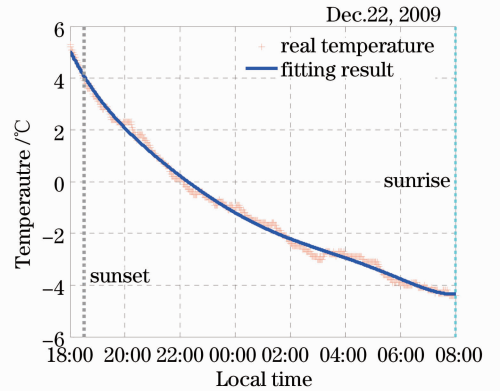


图 2 高美古观测站冬季夜间气温

Fig. 2 Winter night's temperature curves of Gaomeigu observatory site

以直径为 4 m 的熔石英主镜为例运用理论模型解析求解主镜温度场。熔石英的热物理属性如表 1 所示^[17]。熔石英与外流场空气的自然对流传热系数近似地取为 $6.693 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ^[18]。

表 1 熔石英的常用热物理属性

Table 1 Common thermal properties of fused silica

Density / (kg/m^3)	Heat conductivity / [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})$]	Specific heat capacity / [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$]
2200	1.4	750

传统主镜径厚比 k (直径与厚度之比) 一般为 6~8 左右^[19], 这里取 4 m 主镜径厚比 $k=8$ 。假设零时刻主镜与环境具有相同的初始温度, 三个外表面均加载自然对流边界条件, 自然对流换热系数设为

6.693 W/(m²·°C)。按照(11)式加载温度边界条件。其他热物理属性如表 1 所示。运用理论模型解析解得到的径厚比 $k=8$ 的 4 m 主镜光学表面温度曲线和环境温度曲线如图 3 所示。

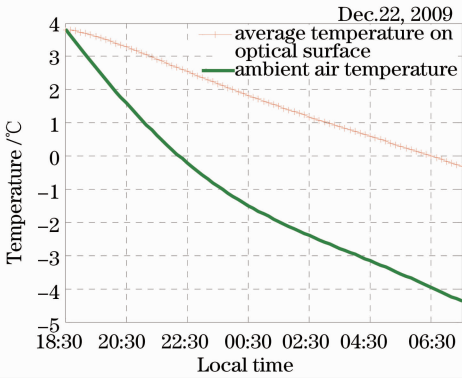


图 3 自然对流条件下径厚比 $k=8$ 的 4-m 主镜光学表面平均温度曲线和环境温度曲线

Fig. 3 Average temperature on optical surface of 4 m primary mirror ($k=8$) with natural convection and ambient air temperature curves

将上述径厚比 $k=8$ 的 4 m 主镜光学表面与环境温度差代入(10)式,得到整个夜间观测时段主镜视宁度如图 4 所示。

3.1 “气刀”风速对主镜视宁度的影响

从图 4 可以看出主镜视宁度现象非常严重,需要在主镜前表面设置“气刀”抚平主镜视宁度,同时加速主镜前表面与环境的对流换热使主镜光学表面温度与环境空气温度尽可能地接近。在“气刀”的作用下,主镜视宁度带来的影响为^[4-5]

$$\theta'_m \approx 0.18 \left(\frac{g}{T_{ref}} \right)^{0.3} L^{0.3} \Delta T^{1.3} u^{-0.6}, \quad (12)$$

式中 g 为重力加速度; T_{ref} 为空气开尔文温度; L 为主镜直径; ΔT 为主镜光学表面与环境温度差; u 为

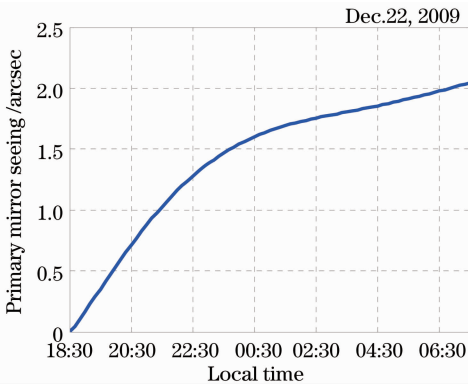


图 4 自然对流条件下径厚比 $k=8$ 的 4 m 主镜视宁度
Fig. 4 Primary mirror seeing of 4-m mirror ($k=8$) with natural convection

在“气刀”的作用下,主镜光学表面与环境之间不再是自然对流换热,而是强制对流换热。根据对流传热相关知识,对于流体外掠平板传热现象,当雷诺数 $Re = \frac{uL}{\nu}$ 大于 5×10^5 时,将会大大加速流体与平板之间的对流传热,其中 ν 是流体的运动粘度。根据雷诺数的定义,针对 4 m 主镜,“气刀”风速大于 2 m/s 时 Re 将大于 5×10^5 。这时主镜光学表面与环境空气对流换热系数为^[9]

$$h_3 = 0.037 \frac{\lambda_a}{L} \left[\left(\frac{uL}{\nu} \right)^{4/5} - 871 \right] \left(\frac{\rho_a c_a}{\lambda_a} \right)^{1/3}, \quad (13)$$

式中 λ_a, ν, ρ_a 和 c_a 分别为空气的热导率,运动粘度,密度和比热容。由于环境气温在 0 °C 左右变化,近似地用 0 °C 空气的相关物理属性(表 2 所示)进行计算。

表 2 0 °C 空气的相关物理属性

Table 2 Relevant physical properties of air at 0 °C

Density / (kg/m ³)	Heat conductivity / [W/(m·°C)]	Specific heat capacity / [J/(kg·°C)]	Kenematic viscosity / (10 ⁵ m ² /s)
1.293	0.0244	1005	1.328

运用理论模型解析解,对径厚比 $k=8$ 的 4 m 主镜不同风速的“气刀”方案进行计算,得到主镜光学表面温度如图 5 所示,主镜视宁度的变化曲线如图 6 所示。

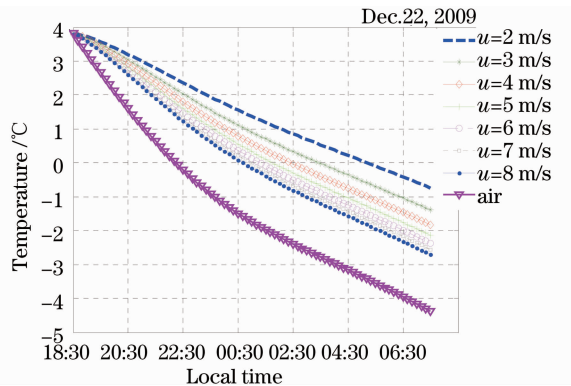


图 5 径厚比 $k=8$ 的 4 m 主镜在不同“气刀”风速下的光学表面平均温度

Fig. 5 Average temperature curves on optical surface of 4-m primary mirror ($k=8$) with different “air knife” velocities

对比加载“气刀”前后主镜光学表面平均温度和主镜视宁度,可以发现“气刀”方案能够大大改善主镜视宁度。从图 5 和图 6 可以看出,随着“气刀”风速的不断增大,主镜光学表面平均温度与环境空气

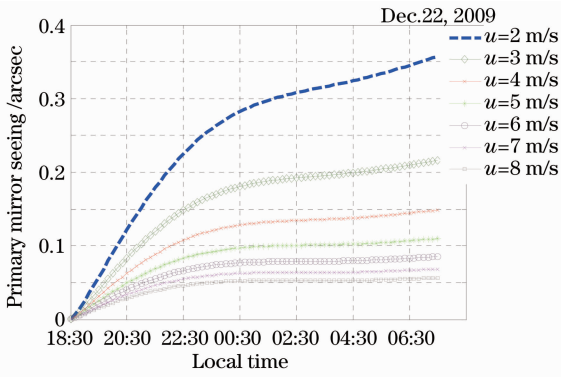


图6 径厚比 $k=8$ 的 4 m 主镜在不同“气刀”风速下的视宁度

Fig. 6 Primary mirror seeing curves of 4-m mirror ($k=8$) with different “air knife” velocities

温度差不断减小,主镜视宁度不断得到改善。当风速为 4 m/s 时,主镜视宁度已经小于 0.15 arcsec。

3.2 径厚比对主镜视宁度的影响

为了考察主镜径厚比 k 对主镜视宁度的影响,给定“气刀”风速 $u=4$ m/s,针对不同的径厚比 k ,运用理论模型解析解对 4 m 主镜光学表面温度和主镜视宁度进行计算。得到主镜光学表面温度曲线如图 7 所示,主镜视宁度曲线如图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以看出,随着 4 m 主镜径厚比的不断增大,主镜光学表面平均温度进一步与环境温度接近,主镜视宁度继续减小。对于径厚比 $k=40$ 的薄主镜,在 $u=4$ m/s 的“气刀”作用下,主镜视宁度已经小于 0.08 arcsec。

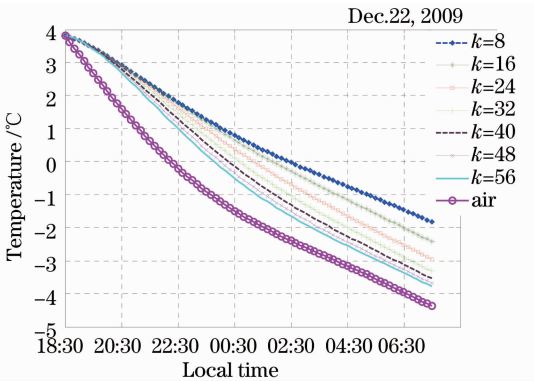


图7 “气刀”风速 $u=4$ m/s,不同径厚比的 4 m 主镜光学表面平均温度

Fig. 7 Average temperature curves on optical surface of 4-m primary mirror with “air knife” velocity $u=4$ m/s

3.3 温度场理论计算结果与 FEM 仿真结果对比

分别采用理论解析解和 FEM 方法计算径厚比 $k=8$ 的 4 m 主镜温度场。建立 FEM 模型,FEM 网格如图 9 所示。

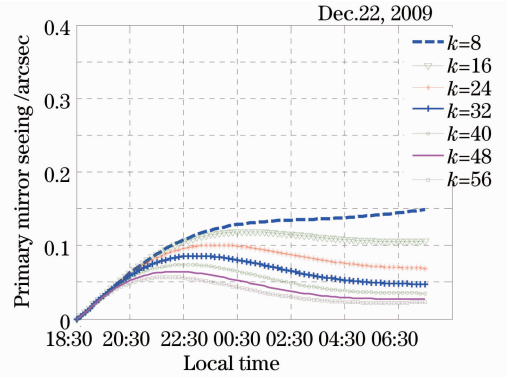


图8 “气刀”风速 $u=4$ m/s,不同径厚比的 4 m 主镜视宁度

Fig. 8 Primary mirror seeing curves of 4-m mirror with “air knife” velocity $u=4$ m/s

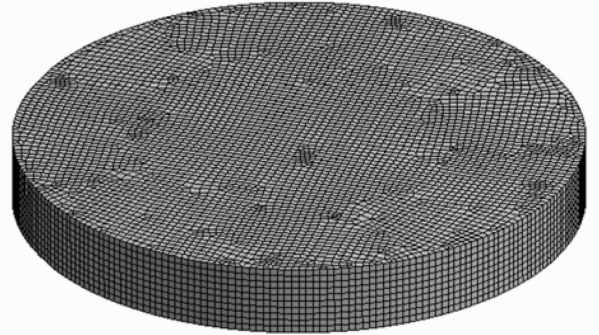


图9 FEM 计算模型的网格

Fig. 9 Mesh of FEM simulation

假设主镜光学表面“气刀”风速 $u=4$ m/s,在主镜光学表面加载强制对流换热边界条件,由(14)式计算得到对流换热系数 $h_3=14.552$ W/($m^2 \cdot ^\circ C$);其他两个外表面加载自然对流换热边界条件,自然对流换热系数 $h_1=h_2=6.693$ W/($m^2 \cdot ^\circ C$)。按照

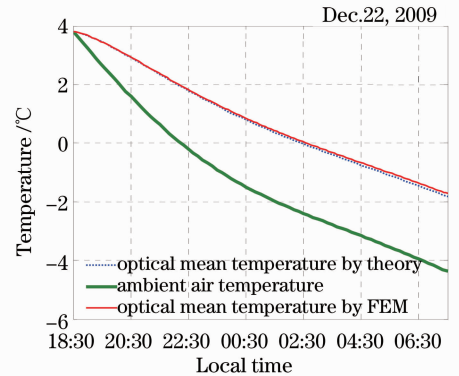


图10 理论模型解析解和 FEM 求解 4 m 主镜光学表面平均温度对比

Fig. 10 Contrast between analytical solution and FEM simulation result of average temperature upon primary mirror optical surface

(12)式加载温度边界条件。其他热物理属性如表 1 所示,将经过前处理的 FEM 模型导入商业 FEM 软件求解器进行 FEM 计算。

运用 FEM 和理论模型解析解得到的径厚比 $k=8$ 的 4 m 主镜光学表面平均温度曲线对比如图 10 所示。从图 10 可以看出二者一致性非常好。

4 结 论

综合考虑非线性气温条件和主镜光学表面“气刀”强制对流换热,通过数学求解得到主镜温度场的理论模型。运用该理论模型解析解,以 4 m 熔石英主镜为例,对主镜视宁度进行了分析。对比加载“气刀”前后,“气刀”对主镜视宁度有明显改善。对于径厚比 $k=8$ 的传统主镜,当“气刀”风速达到 4 m/s 的时候,主镜视宁度已经小于 0.15 arcsec。如果还需要进一步减小主镜视宁度的影响,可以通过改变主镜的几何尺寸增大主镜径厚比来实现。当主镜径厚比 $k=40$,“气刀”风速仍然保持 $u=4$ m/s,主镜视宁度已经小于 0.08 arcsec。针对不同系统的具体要求,可以根据上述方法进行计算选择所需要的主镜径厚比和光学表面“气刀”风速的大小。为地基望远镜主镜温度场分析和主镜视宁度控制方案设计提供了一种理论计算方法。主镜温度场理论模型解析解在望远镜主镜设计中具有普适的应用价值。

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(1): 95—96.
- 4 Zago Lorenzo. The Effects of the Local Atmospheric Environment on Astronomical Observations [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1995.
- 5 Zago Lorenzo. An engineering handbook for local and dome seeing [C]. SPIE, 1997, 2871: 726.
- 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 Zhang Jun, Xian Hao, He Yuanxing, *et al.*. Theoretical calculation of telescope primary mirror's thermal field and primary mirror seeing analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): p1022001.
- 8 Hao Yunxiang, Chen Peisheng, Zhou Keping. *Infrared Astronomy Introduction* [M]. Beijing: Peking University Press, 1993. 66.
- 9 Yang Shiming, Tao Wenquan. *Heat Transfer*. [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 41—45.
- 10 Wei Zaifu, Cha Hongkui, Wang Runwen. Physical analysis of the laser-induced temperature field [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(4): 355—359.
- 11 Zhao Qiang, Fan Zhengxiu. Interface absorption effect on temperature field of optical coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(6): 777—782.
- 12 Wang Xiang, Cui Rui, Yang Hao. Theoretical and experimental studies on three dimensional temperature field of selective laser sintering of engineering plastics powder [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 01030005.
- 13 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.
- 14 F M Göttische, F S Olesen. Modelling of diurnal cycles of brightness temperature extracted from METEOSAT data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2001): 337—348.
- 15 Jia Li, Fang Zhaohong. *Advanced Heat Transfer* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. 74—78.
- 16 Lian Tianhong, Wang Shiyu, Guo Zhen, *et al.*. Temperature field analysis of laser medium with rough surface heat conduction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0614001.
- 17 Yang Li, Fang Jinzhong, *et al.*. *Advanced Optical Manufacture Technique* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 196—197.
- 18 Wang Yanru. Study on Optical Testing Methods for Weak Absorbance and Thermal Deformation of Optical Components [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- 19 Cheng Jingquan. *Theory and Design of Astronomical Telescope* [M]. Beijing: Chinese Science and Technol 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.
- 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): p1022001.
- Hao Yunxiang, Chen Peisheng, Zhou Keping. *Infrared Astronomy Introduction* [M]. Beijing: Peking University Press, 1993. 66.
- 郝允祥, 陈培生, 周克平. *红外天文学导论* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1993. 66.
- 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.
- Wei Zaifu, Cha 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.
- 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.
- Wang Xiang, Cui Rui, Yang Hao. Theoretical and experimental studies on three dimensional temperature field of selective laser sintering of engineering plastics powder [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 01030005.
- 王翔, 崔瑞, 杨浩. *工程塑料粉末激光烧结三维温度场的理论和实验研究* [J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 01030005.
- 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.
- F M Göttische, F S Olesen. Modelling of diurnal cycles of brightness temperature extracted from METEOSAT data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2001): 337—348.
- Jia Li, Fang Zhaohong. *Advanced Heat Transfer* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. 74—78.
- Jia Li, Fang Zhaohong. *Advanced Heat Transfer* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. 74—78.
- Lian Tianhong, Wang Shiyu, Guo Zhen, *et al.*. Temperature field analysis of laser medium with rough surface heat conduction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0614001.
- 连天虹, 王石语, 过振, 等. *粗糙热传导表面下激光介质温度场的计算分析* [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0614001.
- Yang Li, Fang Jinzhong, *et al.*. *Advanced Optical Manufacture Technique* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 196—197.
- 杨力, 方敬忠, 等. *先进光学制造技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 196—197.
- Wang Yanru. Study on Optical Testing Methods for Weak Absorbance 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.
- Cheng Jingquan. *Theory and Design of Astronomical Telescope* [M]. Beijing: Chinese Science and Technol 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.