

外场热环境作用下地基望远镜温度分布预测

李 鑫^{1,2,3}, 袁 健³, 龚小雪³, 张 雷³, 于 洋³

(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;
3. 长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130033)

摘 要:为研究外场复杂热环境对望远镜温度分布的影响,采用有限单元法,建立某全天候工作的激光通信地面站地基望远镜数值仿真模型。首先对望远镜主体进行稳态热分析,研究其在外场热环境作用下温度分布;再对主次镜进行瞬态热分析,研究其在通信时段与非通信时段温度变化。分析表明:冬夏两季望远镜最大温差为 25.839 °C,小于设计指标,证明望远镜能够在动态变化的外场环境中稳定通信;主次镜温度变化相较于舱内环境温度具有明显滞后性且幅值更低,在后续热分析中能够针对不同时刻正确设置主次镜温度边界条件,避免使用较高的舱内环境温度等效主次镜温度;通信前半小时打开舱门主次镜与环境温差不足以降低到 2 °C 以下,建议设计合理热控措施,缩小舱内环境温度与外场环境温度差距,以保障望远镜通信质量。

关键词:地基望远镜;外场热环境;温度分布;热分析

中图分类号:TH743;TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.04.017

Prediction of temperature distribution of ground-based telescopes under the influence of external thermal environment

LI Xin^{1,2,3}, YUAN Jian³, GONG Xiao-xue³, ZHANG Lei³, YU Yang³

(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;
3. Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130033, China)

Abstract: To study the influence of the complex thermal environment of the external field on the temperature distribution of the telescope, the finite element method is used to establish a numerical simulation model of a ground-based telescope for an all-weather laser communication ground station. Firstly, a steady-state thermal analysis of the main body of the telescope is carried out to study the temperature distribution under the influence of the external thermal environment. Then, a transient thermal analysis of the primary and secondary mirrors is carried out to study the temperature variation during the communication and the non-communication periods. The analysis results show that the maximum temperature difference of the telescope in winter and summer is 25.839 °C, which is lower than the design index, which proves that the telescope is able to communicate stably in the dynamically changing external field environment. The temperature changing of the primary and secondary mirrors has a significant hysteresis compared with the ambient temperature in the cabin, and has lower amplitude. Therefore, in the subsequent thermal analysis, the tempera-

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20210509052RQ)资助。

作者简介:李 鑫(1997 -),男,硕士研究生,主要从事激光通信地面站环境适应性研究。E-mail:2415132014@qq.com

通讯作者:张 雷(1982 -),男,博士,研究员,主要从事光学遥感卫星总体、空间光学遥感载荷和航天结构设计等方面的研究。E-mail:18686344285@163.com

收稿日期:2022-07-13; **修订日期:**2022-08-21

ture boundary conditions of the primary and secondary mirrors can be set correctly for different times, which can avoid using a higher cabin ambient temperature instead of primary and secondary mirror temperature. Open the cabin door half an hour before the communication and the temperature difference between the primary and secondary mirrors and the environment is not enough to reduce the temperature to below 2°C. It is recommended to design reasonable thermal control measures to narrow the gap between the ambient temperature inside the cabin and the ambient temperature in the external field, in order to ensure the communication quality of the telescope.

Keywords: ground-based telescope; external thermal environment; temperature distribution; thermal analysis

1 引言

本文所研究地基望远镜系统应用于天地激光通信组网的地面接收部分,任务是与星上激光通信设备进行通信,接收星上数据,在这过程中外场热环境将对望远镜通信质量产生巨大影响。外场热环境首先对望远镜温度分布产生直接影响,而温度分布将又将对望远镜热变形产生直接影响,望远镜主承力结构热变形会使主次镜相对位置发生变化,而主次镜热变形会使其自身面形误差增大,最终导致系统波相差增大,通信误码率提高,通信质量降低^[1,2]。所以在望远镜设计阶段要深入考虑外界热环境对望远镜温度分布的真实影响,为后续望远镜系统结构优化设计以及热控设计提供精确数据。

众多学者对望远镜热特性及其对成像性能的影响进行了深入研究。何晏^[3]对大口径轻质主镜建立三维模型,利用有限元分析法对其进行稳态和瞬态热特性分析,主要分析均匀温度分布,径向温差,轴向温差和外界环境温度变化对主镜面形的影响;周超等^[4]针对某地基光电望远镜,建立光学组件、跟踪架结构以及电控设备的有限元热模型,在传导、对流、辐射和热流等热环境下进行热分析,计算望远镜光机结构的时间和空间温度分布;Cho M^[5]等对 TMT 望远镜进行结构热分析,对空气对流、传导、辐射进行建模,预测了 TMT 望远镜结构热响应,并在样品热负载条件下计算光学组件系统温度分布。上述学者在温度对望远镜成像性能的具体影响方式与影响效果方面进行了深入研究,同时对外场热环境作用下望远镜温度分布进行了分析,但对包括太阳辐射在内的外场热环境因素考虑不全面,无法准确预测外场复杂热环境对望远镜温度分布的真实影响。

本文针对某全天候工作的星地激光通信地面站的地基望远镜,研究外场复杂热环境对其温度分布的真实影响。首先建立详细的热力学模型与有限元

模型,在最强太阳辐射时对外场热环境作用下的望远镜进行稳态热分析,再分别对通信时段与非通信时段主次镜进行瞬态热分析。

2 模型建立

2.1 望远镜热环境

本文研究的激光通信地面站选址在长春市。在一天中,由于太阳入射角、太阳辐射强度、环境温度以及风速风向不断变化,因此需要研究外场环境最复杂时段望远镜的热特性,以保证望远镜在任意时段内的通信稳定性^[6]。故在仿真建模研究中应以一天中太阳辐射最强时段与环境温度最高时段(分别为上午 10:30 ~ 12:30;下午 13:30 ~ 14:30)为代表性通信时段进行研究。由于夜晚没有太阳辐射作用,望远镜温度变化较为平稳,无需作为代表性通信时段进行分析。非通信时段,望远镜位于方舱内部,不受外场热环境作用;通信时段内,方舱打开,望远镜与星上设备建立通信链路,此时望远镜整体将暴露于外界环境之中,受到外场热环境直接作用。

由于长春市位于高纬度地区,四季环境温度变化较大,同时为避免热湍流对反射镜光路造成影响,因此需对望远镜提出以下指标:

- (1)通信时段内望远镜最大温差不超过 30 °C;
- (2)通信前半小时打开舱门,经半小时静置后主次镜与外界环境温差保持在 ± 2 °C 之内^[7]。

2.1 物理模型

为了便于计算,对望远镜作以下基本假设:

- (1)默认导热系数不随温度变化;
- (2)忽略望远镜转台、立柱等部分对光学系统的热辐射;
- (3)忽略地球红外辐射热流与地面反照热流对系统的影响。

望远镜复合传热模型如图 1 所示,其外部输入热流包括太阳直接辐射、地面反照辐射、天空背景辐射与大气红外辐射;换热过程包括望远镜表面与内

外部空气的对流换热、望远镜表面辐射换热、望远镜内部热传导^[8]。

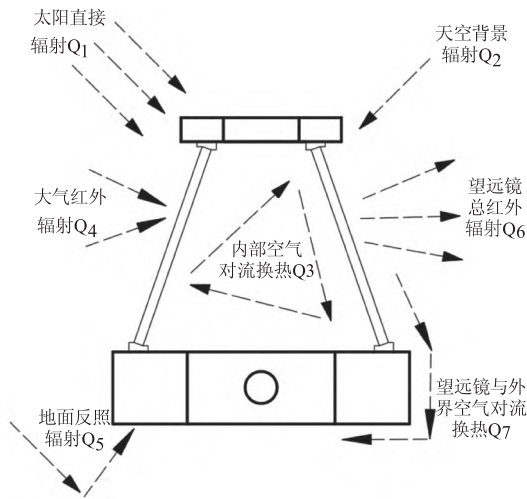


图1 望远镜复合传热示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the composite heat transfer of the telescope

2.2 热力学模型

2.2.1 热传导模型

计算模型为离散体网格模型,将望远镜离散为一系列单元,计算单元节点与外界热环境的热传递,模型内部导热及其与外界传热均发生在接触的单元节点间,单元节点 i 传热量为^[9]:

$$Q_i = \sum_j \frac{\lambda_{ij} A_{ij}}{l_{ij}} (T_j - T_i) \quad (1)$$

式中, T_i 为节点 i 处温度; λ 为导热系数; A 为接触面积; l 为两节点距离。

2.2.2 太阳辐射模型

载体吸收太阳直射热流为^[8]:

$$Q_d = \alpha I_d A \phi_1 \quad (2)$$

载体吸收大气散射热流为^[8]:

$$Q_s = \alpha I_s A_a \quad (3)$$

载体吸收地球反照热流为^[8]:

$$\begin{aligned} Q_a &= \iint dQ_a = \iint \alpha \rho_a I_d \phi_2 dA \\ &= 366.784 \pi R^2 a (\text{W}) \end{aligned} \quad (4)$$

载体对大气红外辐射热流为^[8]:

$$Q_{r,\text{out}} = \varepsilon_f \sigma (T_a^4 - T_o^4) A_a \quad (5)$$

式中, α 为表面太阳辐射吸收率; I_d 、 I_s 分别为太阳直射辐射强度和太阳散射辐射强度; A 、 A_a 分别为接收辐射面积和外表面积; ϕ_1 、 ϕ_2 分别为太阳辐射角系数和地面反射角系数; ρ_a 为载体内部空气密度; ε_f 为望远镜表面辐射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常

数; T_a 、 T_o 、 T_i 分别为表面温度、大气温度、内部气体温度。

2.2.3 对流换热模型

方舱外部对流换热公式为^[10]:

$$Q_{c,\text{out}} = h_o A_a (T_a - T_o) \quad (6)$$

方舱内部对流换热公式为^[10]:

$$Q_{c,\text{inner}} = h_o A_a (T_a - T_i) \quad (7)$$

h_o 为表面换热系数,与流体流动状态、流体物理性质和换热表面几何形状有关。

3 数值模拟

3.1 望远镜有限元模型

本文所研究望远镜系统如图2所示,采用RC光学系统,口径500 mm,主次间距565 mm,主要由主镜组件、次镜组件、桁架以及四通组成。在实际工作中,桁架外圈会铺设可拆卸式遮光罩,其作用是在遮挡杂散光的同时使反射镜免受太阳辐射直接作用。

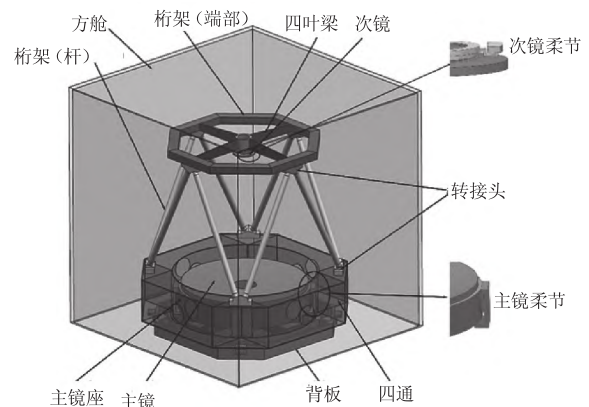


图2 望远镜结构图

Fig. 2 Telescope structure diagram

望远镜主次镜使用微晶玻璃制造,主镜座、主次镜柔节使用钛合金制造,四通、桁架端部与方舱使用Q235钢制造,桁架杆使用碳纤维制造,转接头使用铝合金制造,主镜和主镜座之间使用硅橡胶层填充,具体材料参数如表1所示。忽略对传热影响不大的小孔、倒角等特征,对望远镜进行网格划分,整体采用六面体网格,局部使用四面体网格,采用节点拟合法对各部件网格进行连接,单元尺寸为7 mm,数量20万个。建立望远镜有限元模型,如图3所示。

在研究物体与太阳辐射相互作用时不能把物体看做灰体,这时物体对太阳辐射吸收比不等于自身发射率,本文接收太阳辐射区域均为涂白漆的金属表面,太阳辐射吸收比为0.21^[10]。望远镜使用材料

物理性能如表 1 所示。

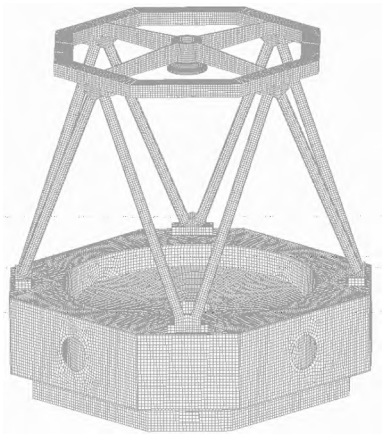


图 3 望远镜有限元模型

Fig. 3 The finite element model of the telescope

表 1 材料特性

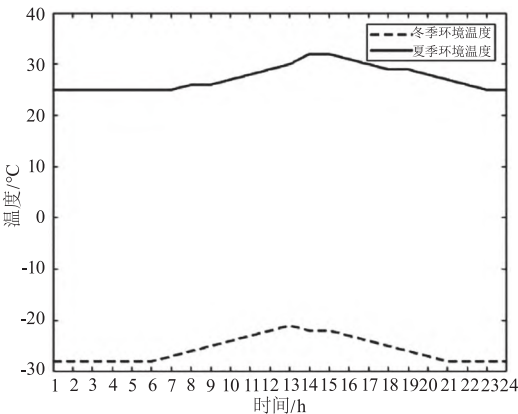
Tab. 1 Material properties

	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
铝合金	204	880	2.7×10^3
碳纤维	9.38	712	1.7×10^3
硅橡胶	1	2.7	1.07×10^3
钛合金	8	620	4.51×10^3
微晶玻璃	1.6	800	2.6×10^3
Q235	50	460	7.8×10^3

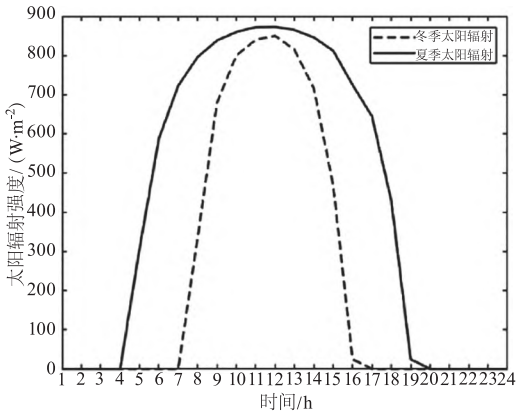
3.2 边界条件

通过中国天气网查询 2021 年长春最高气温与最低气温。结果表明,长春市在夏季 7 月 31 日达到最高温度,在冬季 12 月 24 日达到最低温度。其当天 24 h 温度变化如图 4(a)所示。

将太阳辐射等效为热流密度,使用太阳辐射计算器分别计算长春地区夏季 7 月 31 日与冬季 12 月 24 日的太阳辐射强度,如图 4(b)所示。



(a)24 h 环境温度变化



(b)24 h 太阳辐射强度变化

图 4 冬夏两季环境温度与太阳辐射变化

Fig. 4 Changes of ambient temperature and solar radiation in winter and summer

用对流传热系数来等效对流换热效率,自然对流与强迫对流效率不同,为了预测望远镜在极端环境下的温度分布,我们主要考虑换热效率较低的自然对流换热,取自然对流换热系数 $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [11]。

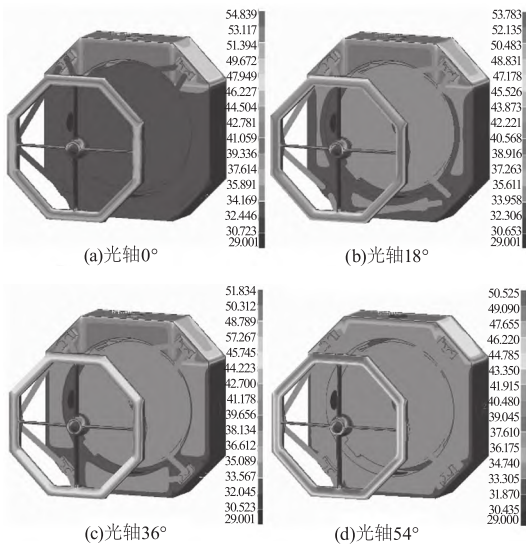
4 结果分析

4.1 稳态热分析

由于要保证通信时段内望远镜最大温差不超过 30°C ,通过太阳辐射计算器进行计算,12:00 时刻太阳辐射强度最大,故首先在此时刻对望远镜整体进行稳态热分析,验证望远镜最大温差是否满足指标要求。

当望远镜暴露在外场环境中时,正午的太阳辐射直射在四通、遮光罩以及桁架端部与四叶梁等部位,这些区域温升较大。

在夏季时,不同相位状态下望远镜温度分布如图 5 所示。



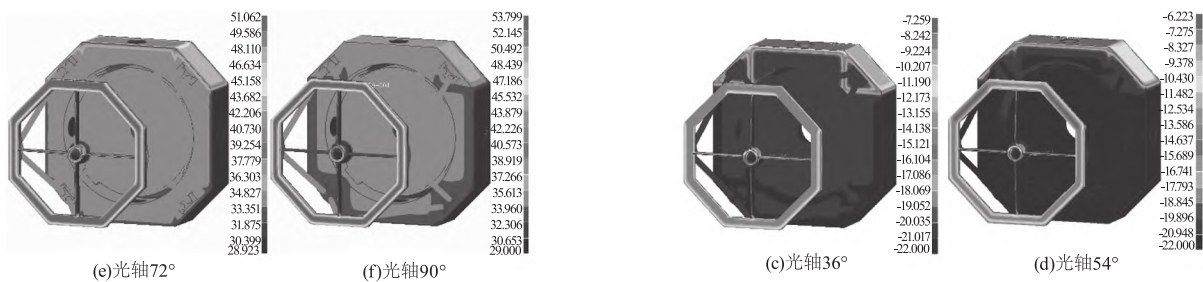


图5 夏季不同相位状态下望远镜稳态温度分布

Fig. 5 Steady-state temperature distribution of telescopes in different phase states in summer

四通蒙皮温度、桁架端部温度以及望远镜整体温差如表2所示。由于太阳高度角以及太阳时角的不
变,望远镜光轴相位由0°逐渐变为90°过程中,四通
蒙皮温度逐渐降低,桁架端部温度逐渐升高。光轴为
0°时望远镜温度最高区域为四通蒙皮(4.839℃),整
体温差为25.839℃;光轴90°时望远镜温度最高区域
为桁架端部(53.799℃),整体温差为24.799℃。

表2 夏季不同相位状态下望远镜
最高温度与最大温差

Tab.2 The maximum temperature and maximum
temperature difference of the telescope under
different phases in summer

光轴相位	四通蒙皮 温度/℃	桁架端部 温度/℃	望远镜最大 温差/℃
0°	54.8	53.1	25.8
18°	53.8	50.5	24.8
36°	51.8	50.3	22.8
54°	50.5	49.1	21.5
72°	48.1	51.1	22.1
90°	37.3	53.8	24.8

在冬季时,望远镜温度变化规律与夏季相同,不
同相位状态下望远镜稳态温度分布如图6所示,四
通蒙皮温度、桁架端部温度以及望远镜整体温差如
表3所示。光轴为0°时望远镜温度最高区域为四
通蒙皮(-5.162℃),整体温差为16.838℃;光轴
90°时望远镜温度最高区域为桁架端部(-4.512
℃),整体温差为17.488℃。

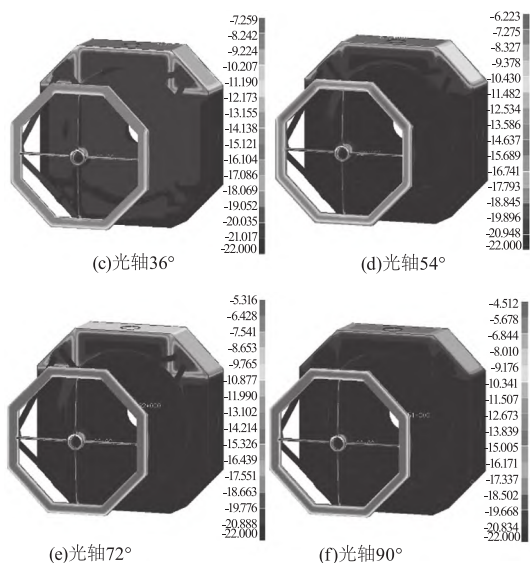
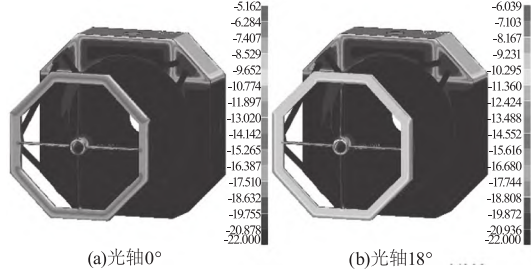


图6 冬季不同相位状态下望远镜稳态温度分布

Fig. 6 Steady-state temperature distribution of telescopes
in different phase states in winter

表3 冬季不同相位状态下望远镜最高
温度与最大温差

Tab.3 The maximum temperature and maximum
temperature difference of the telescope in different
phase states in winter

光轴相位	四通蒙皮 温度/℃	桁架端部 温度/℃	望远镜最大 温差/℃
0°	-5.16	-9.65	16.838
18°	-6.04	-9.23	15.962
36°	-7.26	-9.22	14.741
54°	-8.17	-7.18	15.777
72°	-9.77	-5.32	16.684
90°	-13.8	-4.51	17.488

综上所述,在通信时段内,不同相位状态下望远
镜最大温差均能满足指标要求。对望远镜进行稳态
热分析验证了望远镜在极端状态下的温度分布,得
出了不同相位状态下望远镜最大温差,从结构本身
出发证明了望远镜能够在动态变化的热环境中保证
通信稳定性。

4.2 瞬态热分析

4.2.1 非通信时段主次镜温度变化

主次镜是望远镜系统接收通信光的结构,主次
镜热变形以及其表面热湍流将降低望远镜通信质
量,实时预测主次镜温度变化至关重要^[12]。非通信
时段,望远镜位于方舱之内,此时太阳辐射直接作用
于方舱之上,太阳辐射的热量通过方舱壳体向内部

空气传递,使内部空气温度逐渐升高,内部空气通过对流换热方式将方舱热量传递至望远镜系统^[13]。

通过数值仿真分析模拟对流换热过程,得出在外场复杂热环境作用下 24 h 舱内环境温度变化以及主次镜温度变化。如图 7 所示,夏季舱内最高环境温度为 48 ℃,次镜最高温度为 46.9 ℃;主镜最高温度为 43.1 ℃;冬季舱内最高环境温度为 -8.11 ℃,次镜最高温度为 -9.75 ℃,主镜最高温度为 -13.1 ℃。结果发现,主次镜温度变化相较于舱内环境温度变化存在滞后性,且变化幅值低于环境温度变化幅值,而由于主镜口径 500 mm,平均厚度为 86 mm,次镜口径为 90 mm 平均厚度 13.5 mm,主镜温度滞后性比次镜大,温度变化幅值比次镜小。

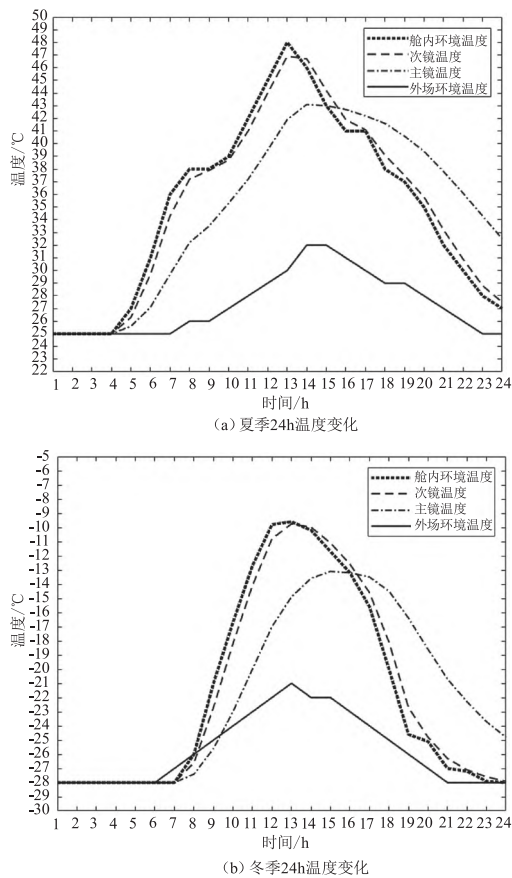


图 7 夏两季外场环境温度与舱内环境温度变化

Fig. 7 Changes of ambient temperature outside the cabin and ambient temperature in the cabin in summer and winter

4.2.2 通信时段主次镜温度变化预测

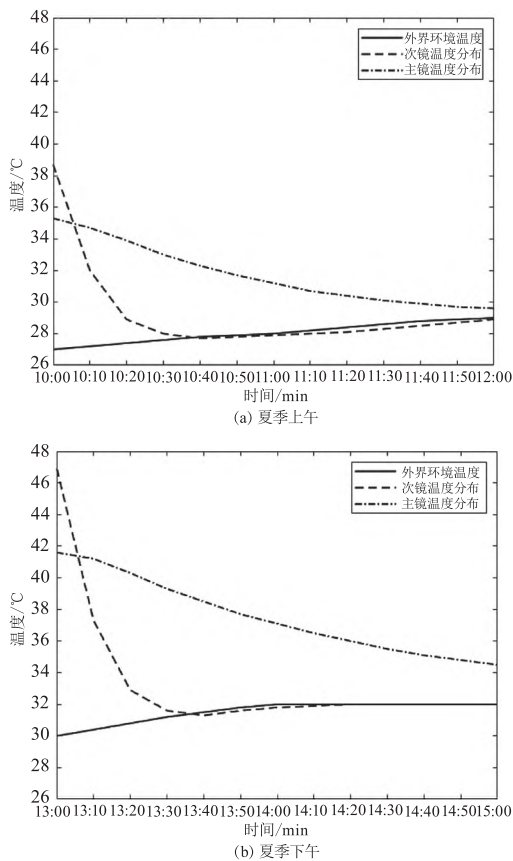
由于此时段主次镜与外界环境直接接触,主次镜对流换热的对象就由舱内空气变为外界空气,主次镜温度虽低于舱内环境温度,但仍高于外界环境温度,故主次镜表面空气层会产生较严重热湍流,会

使光路发生折射而降低通信质量,所以必须在通信前半小时打开舱门,使主次镜与外界环境进行热交换而达到热平衡。开舱时刻主次镜初始温度与外场环境温度如表 4 所示。

表 4 夏冬季开舱时刻主次镜温度与环境温度

Tab. 4 Primary and secondary mirror temperature and ambient temperature at the time of opening the cabin in summer and winter			
开舱时刻/ min	外场环境 温度/℃	次镜初始 温度/℃	主镜初始 温度/℃
夏季 10:00	27	38.7	35.3
夏季 13:00	30	46.9	41.6
冬季 10:00	-21	-9.75	-14.9
冬季 13:00	-24	-18.2	-23

开舱后主次镜降温曲线如图 8 所示,半小时后主次镜温度及其与环境温差如表 5 所示。结果表明,当不在方舱内部采取热控措施时,在开舱半小时后主镜与环境温差基本大于指标要求的 2 ℃,而由于外场热环境复杂多变的特点,故在实际工作中主次镜与环境温差可能均无法满足指标要求。



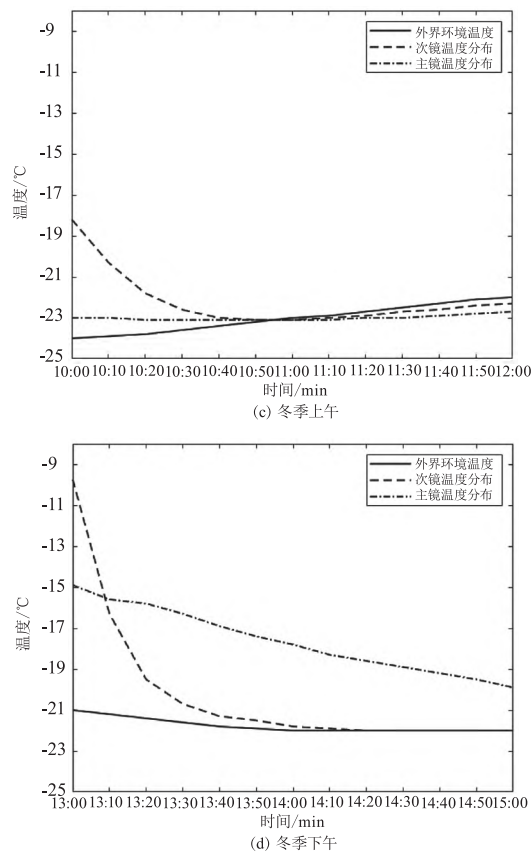


图8 开舱后主次镜降温曲线
Fig. 8 Cooling curve of primary and secondary mirrors after opening the cabin

表5 开舱后主次镜温度及其与环境温差

Tab. 5 The temperature of the primary and secondary mirrors and their difference with the ambient temperature after the cabin is opened

开舱时刻/ min	环境温度 /℃	次镜温度 /℃	主镜温度 /℃	次镜与环境 温差/℃	主镜与环境 温差/℃
夏季 10:30	27.6	31.2	33	3.6	5.4
夏季 13:30	31.2	31.6	39.3	0.4	8.1
冬季 10:30	-23.6	-22.6	-23.1	1	0.5
冬季 13:30	-21.6	-20.7	-16.4	0.9	5.2

5 结 论

本文针对外场复杂热环境对地基望远镜温度分布影响的问题,建立望远镜系统数值仿真模型,对外场热环境作用下的望远镜进行稳态热分析得出其稳态温度分布;对外场热环境作用下的方舱以及舱内热环境作用下的主次镜进行瞬态热分析,得出非通信时段舱内环境温度与主次镜温度变化曲线;对暴露在外场热环境中的主次镜进行瞬态热分析,得出通信时段主次镜温度变化曲线。结论如下:不同相

位状态下望远镜整体温差小于 30℃,从结构本身证明了望远镜能够在动态变化的热环境中保证通信稳定性;主次镜温度变化相对环境温度存在滞后性,其实际温度幅值也低于环境温度幅值,因此在后续热分析中能够针对不同时刻正确设置主次镜温度边界条件,避免使用较高的舱内环境温度来等效主次镜温度,而造成仿真结果不准确;通信时段主次镜温度变化结果显示,开舱半小时后主次镜与环境温差在大多数情况下大于 2℃,这将使主次镜表面空气层产生较大热湍流,降低通信质量,建议设计合理热控措施,缩小舱内环境温度与外场环境温度差距,以保障望远镜通信质量。本文对外界复杂热环境作用下的地基望远镜进行温度分布预测,弥补了以往望远镜热分析工作中对外场热环境因素考虑不足的问题,为相关地面光学仪器设备的仿真建模研究提供参考。

参考文献:

[1] Wang Fuguo. Study on the influence of temperature and support style to the 1.2m SiC primary mirror surface figure[J]. Acta Photonica Sinica,2011,40(6):933-936. (in Chinese)
王富国. 温度和支撑方式对 1.2m SiC 主镜面形的影响分析[J]. 光子学报,2011,40(6):933-936.
[2] Chen Entao, Jia Hong, Li Jindong, et al. Study on the method of thermal/structure/optical integrated analysis of space remote sensor[J]. Journal of Astronautics, 2005, (1):66-70. (in Chinese)
陈恩涛,贾宏,李劲东,等. 空间光学遥感器光-机-热集成分析方法研究[J]. 宇航学报,2005,(1):66-70.
[3] He Yan, Wang Jihong, Peng Qi. Thermal property of large aperture light primary mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(6):63-69. (in Chinese)
何宴,王继红,彭起. 大口径轻质主镜热特性分析[J]. 光电工程,2014,41(6):63-69.
[4] Zhou Chao. Thermal analysis of large telescope structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4):118-122. (in Chinese)
周超. 大口径望远镜结构热分析[J]. 光子学报,2014,43(4):118-122.
[5] Cho M, Corredor A, Vogiatzis K, et al. Thermal analysis of the TMT telescope structure[J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2010, 7738.
[6] Yi Letian, Xu Qian, Wang Na. Study on the structural

- temperature field of XAO 25m Nanshan radio telescope under solar radiation[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2022, 63(2): 43 – 51. (in Chinese)
- 易乐天, 许谦, 王娜. 新疆天文台 25 m 南山射电望远镜日照温度场研究[J]. *天文学报*, 2022, 63(2): 43 – 51.
- [7] Volkmer R, Manni F, Giannuzzi M, et al. EST Telescope: primary mirror, support, and cooling system[J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2010, 7739(2): 327 – 330.
- [8] Cheng Qianqian, Lv Jiangang, Gao Fei, et al. Temperature field simulate analysis on solar balloon carrier of battle reconnaissance viewer-sight platform[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 33(6): 1 – 4, 31. (in Chinese)
- 程茜茜, 吕建刚, 高飞, 等. 太阳能气球战场观瞄台载体温度场仿真分析[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(6): 1 – 4, 31.
- [9] Chen Jiqing, Li Lifen, Lan Fengchong, et al. Numerical simulation and experimental study on the thermal load of vehicle dashboard under solar radiation[J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(12): 1459 – 1466. (in Chinese)
- 陈吉清, 李丽芬, 兰凤崇, 等. 太阳辐射下汽车仪表板热负荷的数值模拟与实验研究[J]. *汽车工程*, 2015, 37(12): 1459 – 1466.
- [10] Yang Shiming. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [11] Wang Yufeng, Jihong, et al. Thermal control analysis of a primary mirror for large-aperture telescope[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2017, 71(1): 28 – 36.
- [12] Liu Xiangyi, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia, et al. Design and principle of the primary mirror thermal control system for large ground-based telescope[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(8): 841 – 845. (in Chinese)
- 刘祥意, 张景旭, 吴小霞, 等. 地基大口径望远镜主镜热控的设计原则及方式[J]. *激光与红外*, 2014, 44(8): 841 – 845.
- [13] Roberts L C, Figgis P. Thermal conditioning of the AEOS telescope[J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2003, 4837: 264 – 271.