

doi: 10.3788/gzxb20144304.0422006

大口径望远镜结构热分析

周超

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:为了评估温度对望远镜的影响,针对某地基光电望远镜,建立了包括光学组件,跟踪架结构以及电控设备等在内的有限元热模型.在传导、对流、辐射以及热流等不同热环境下进行热分析,计算了望远镜光机结构的时间和空间温度分布.根据温度分布进行了热-弹性分析,得出了望远镜结构的热变形.分析表明:温度变化对望远镜跟踪架以及主光学系统的影响很大,对主次镜造成的相对位移达到毫米级,必须进行严格控制.最后从防护圆顶、跟踪架以及主镜等方面入手给出了热控设计方案.

关键词:结构设计;有限元分析;大口径望远镜;热分析;温度分布;热变形;温控

中图分类号:TH751

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)04-0422006-5

Thermal Analysis of Large Telescope Structure

ZHOU Chao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: In order to evaluate the temperature effect of telescopes, a precise thermal finite element model consists of telescope optical assembly systems, mount structure and electrical equipment was established. Temporal and spatial temperature distributions of the optical assembly and telescope structure were calculated under various thermal conditions including conductions, air convections, radiation and heat flux loading. Moreover, the thermo-elastic analysis was made to obtain thermal deformations of the telescope structure based on the resulting temperature distributions. The obtained results show that temperature variation has large effect on telescope mount and main optical system, and induced displacement between primary and second mirror has a magnitude of millimeter, so it must be controlled strictly. At last some thermal control ways were given in terms of protection dome, mount, primary mirror and so on.

Key words: Structure design; Finite element analysis; Large telescope; Thermal analysis; Temperature distribution; Thermal deformation; Thermal control

OCIS Codes: 220.4830; 110.6770; 120.4570; 120.4880; 120.6780

0 引言

为了评估温度对望远镜成像的影响以便采取适当的热控措施,大口径望远镜在研制过程中都应该对温度因素进行过深入的考虑和研究.通过流体力学仿真,有限元仿真等方法对望远镜所处的热环境,主镜、跟踪架等的温度分布以及由此引起的热变形等进行详细计算,并通过大量试验得到验证,从而进行进一步的热控设计^[1-5].国内的热分析和相应的热控措施已经在逐步开展,但大多数应用于航天相机、空间传感器等方面.

对于地基望远镜来说,主要还是集中在简单的主镜热变形分析上.一般只针对主镜存在温度梯度和主镜整体有一定温度变化这两种简化了的边界条件进行分析.得出相应的温度分布和镜面变形结果^[6-9].

本文针对某一地基大口径望远镜系统,建立详细的有限元模型以及望远镜与周围环境之间复杂的热交换模型,实测望远镜工作环境的温度数据,研究整个系统在各种热边界条件作用下的温度分布情况,计算由温度原因引起的系统变形,并提出相应的热措施.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新重大项目专项资金资助

第一作者:周超(1984-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为光机结构有限元仿真. Email:zhouchao@ciomp@163.com

收稿日期:2013-07-10; **录用日期:**2013-08-22

<http://www.photon.ac.cn>

1 望远镜有限元模型的建立

1.1 望远镜热环境

望远镜系统主要由主镜室组件、次镜室组件、方位和俯仰轴系、基座、转台等几大部分组成。主镜是大口径望远镜中的关键部件,采用多点主动支撑方式;次镜采用桁架结构和四叶梁结构支撑;方位和俯仰轴系保证望远镜在工作中能准确地跟踪和定位观测目标。定义沿方位轴轴向由主镜顶点到次镜顶点的方向为正 Z 向;沿俯仰轴方向由左到右为 X 轴正向;按右手定则确定 Y 轴的方向。

对望远镜系统进行热分析时,不能简单地给出一温升或者温度梯度来进行,因为望远镜系统和外界的热交换复杂,因此其温度分布也就很复杂。必须在各种不同热条件下计算光学组件系统和望远镜系统的温度随时间和空间分布情况。热边界条件主要包括空气对流、热传导、热流载荷和辐射等。望远镜所处的热环境如图 1,其最基本的热传递可由传导、对流和辐射描述。

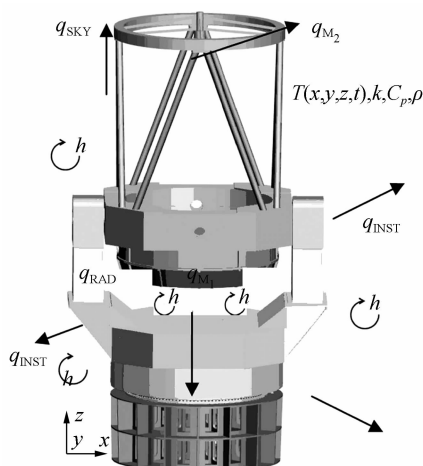


图 1 望远镜系统热环境

Fig. 1 Thermal environment of the telescope

图 1 中: $h(x, y, z, t)$ 为对流换热系数(时间和位置函数); q_{INST} 为结构热扩散; q_{M_1} 为主镜热扩散; q_{M_2} 为次镜热扩散; q_{RAD} 为望远镜表面之间的辐射换热系数; q_{SKY} 为望远镜往周围环境的辐射系数; $T(x, y, z, t)_{AIR}$ 为周围空气温度; $T(x, y, z, t)$ 为望远镜表面温度。而且,在望远镜结构内部每一个单元中均满足傅里叶方程,即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中 T 为温度, t 是时间, α 为热扩散率。

1.2 望远镜有限元模型

望远镜的有限元模型中主镜采用 SiC 材料,由扇形轻量化孔形式熔铸而成,采用壳单元进行建模,所有支撑主镜的促动器简化为弹簧单元。次镜尺寸小,不考

虑其内部热传导以及由此引起的变形,简化为质量点。基座、转台等选用 HT300 材料,其余大部分组件为板材焊接结构,选用 16Mn 材料,在模型中使用壳单元进行建模。桁架结构选用梁单元模拟。对于结构中的大型轴承等复杂结构进行特殊简化处理。忽略对整体刚度以及热传导性能影响不大的小孔、倒角等特征以及非重要的小零件,建立了望远镜系统的有限元模型,如图 2。

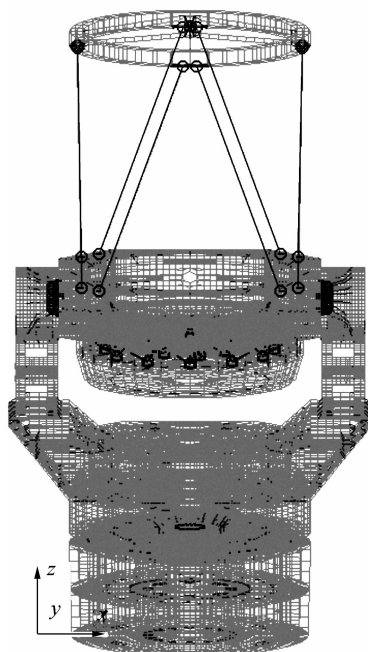


图 2 望远镜系统的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of telescope

对于望远镜系统的热分析,其复杂的热边界条件是有限元模型的关键问题。对整个热交换过程中的每一因素,都进行详细考虑。

首先是望远镜所处观测位置的环境温度。这涉及到望远镜与外界的对流换热系数以及辐射换热系数的确定。因为望远镜是在夜间进行工作,因此对当地夜间的环境温度变化进行测试。在望远镜工作时段内,每隔 5 min 记录一次环境温度。某一代表性的测试结果如图 3。

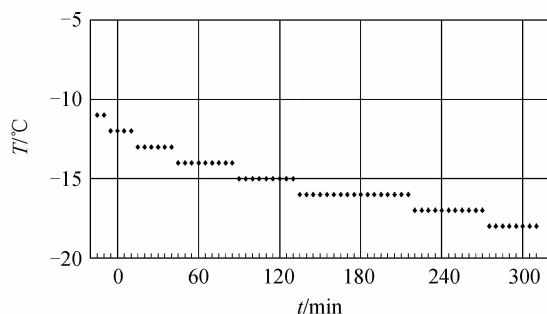


图 3 观测期间环境温度变化

Fig. 3 Environment temperature during telescope operation

从图 3 中可以看出,随着时间的推移夜间环境温度的变化趋势是逐渐降低,最终降到零下 18°C 左右,

即在观测状态下望远镜的环境温度为零下 12 °C 到零下 18 °C.

对流换热是一个复杂的过程,与流体性质、方向、速度和面壁的形状及大小等因素有关.假设风掠过望远镜的某一平板,则平板与空气进行对流换热的公式为

$$N_u = \frac{hl}{\lambda} = 0.664R_e^{1/2}P_r^{1/3} \quad (2)$$

式中 N_u 称为平板长度 l 上的平均努塞尔数, h 为平板表面换热系数, λ 为空气导热系数, $R_e = \frac{ul}{\nu}$ 称为雷诺数,其中 u 为风速, ν 为空气的运动粘度. P_r 是与流体比热容,动力粘度和导热率相关的量,对于空气来说 P_r 约为 0.7.

根据各地区城市气象资料的统计规律,取望远镜所在地的平均风速为 4.3 m/s,相关的空气热物理属性如表 1. 根据表 1,可以求得空气掠过望远镜平板表面的换热系数.对于望远镜的混凝土基底,只要外表面与周围空气存在温差,也会有对流换热产生,外表面的换热系数主要取决于风速.

表 1 空气的热物理性质参量

Table 1 Thermal property parameters of air

t	ρ	c_p	λ	ν	P_r
-20	1.395	1.009	2.279	1.16	0.716
-10	1.342	1.009	2.360	1.24	0.712

表 1 中, t 为空气温度,单位 °C; ρ 为密度,单位 kg/m³; c_p 为比热容,单位 kJ/kg · °C; λ 为导热系数,单位 10⁻² W/m · °C; ν 为运动粘度,单位 10⁻⁵ m²/s.

辐射换热是所有温度高于绝对零度的物体都有的,一种热传递方式.望远镜主镜以及跟踪架时刻都会与外部空间以及内部结构之间产生辐射换热.根据文献[3],取发射率 $\epsilon=0.8$.

内部热源也是影响望远镜温度分布的一个重要因素.望远镜的内部主动热源主要是望远镜的方位俯仰电机产热,另外还有电子器件散热以及主动支撑促动器运动产热等.根据文献[10]以及本望远镜系统拟选择的电机型号,方位电机和俯仰电机的散热量分别为 150 W 和 60 W.位于机上的电源以及电控设备散热量初步定于 30 W.其他热量暂且忽略不计.

2 望远镜热分析计算

2.1 望远镜系统的热分析

白天时望远镜处于休息状态,圆顶关闭.但也间接地起到了使望远镜保温作用,在夜晚打开圆顶之后开始工作,望远镜表面温度会逐步与外界环境温度相平衡,但同时由于其内部电机等开始工作,会使得望远镜

局部升温.将图 3 所示温度作为外界环境温度,加载对流,辐射以及内部热源等热边界条件,对望远镜进行分析计算,望远镜工作在一小时后和三小时后的内部温度分布如图 4 所示.可以看出,在望远镜工作过程中表面温度逐步降低,三小时后,降至外界环境温度零下 16 °C.但在有热源的地方温度明显高于表面温度,最高达到 9 °C.

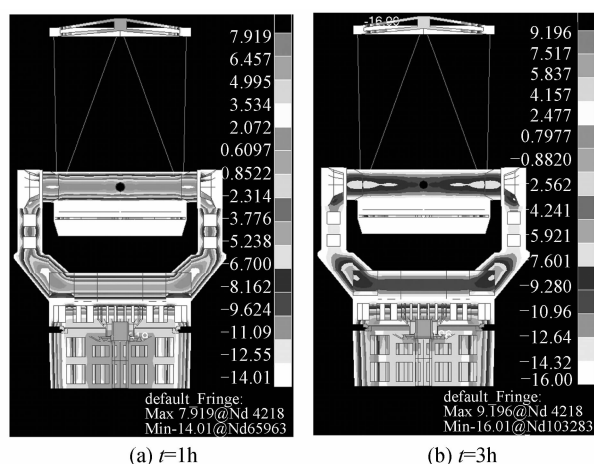


图 4 望远镜工作 1 h 和 3 h 时温度分布

Fig. 4 Telescope temperature distribution at $t=1$ h and $t=3$ h

2.2 望远镜系统的热—弹性分析

随着望远镜温度的不断变化以及温度梯度的出现,望远镜光机结构会产生热变形.根据工作期间任意时刻任意节点温度分布,计算了望远镜在 1 h 和 3 h 下的热变形,变形云图如图 5.

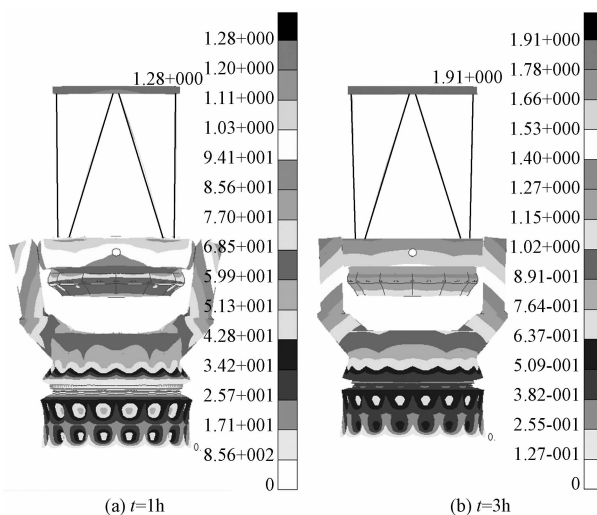


图 5 望远镜工作 1 h 和 3 h 时热变形

Fig. 5 Telescope thermal deformation at $t=1$ h and $t=3$ h

将质量点的变形量作为次镜的位移,取主镜反射面上所有节点变形量的平均值作为主镜的位移,在 $t=1$ h 和 $t=3$ h 时刻主次镜位移及其相对位移量见表 2.

表 2 主次镜在不同时刻的位移/mm

Table 2 Displacement of primary and second mirrors at different time/mm

t/h		Displacements			Relative displacement		
		UX	UY	UZ	UX	UY	UZ
1 h	M_1	-0.012	0.002	-1.034	-0.001	-0.004	-1.505
	M_2	-0.011	0.006	0.471			
3 h	M_1	-0.003	0	-0.6	0.001	-0.002	-1.734
	M_2	-0.004	0.002	1.134			

由表中可以看出,在工作状态下,望远镜主次镜的相对位移在光轴方向上达到毫米量级,比望远镜在重力作用下的相对位移大得多,会引起严重的焦面漂移,引起像质变差.因此在望远镜的设计过程中,除了次镜要有调焦功能外,必须要考虑对望远镜进行热控环节的设计,以保证望远镜在工作过程中各部分温度均匀,减小由热带来的影响.

3 望远镜的热控设计

望远镜热控不仅要使得望远镜系统温度一致性好不产生热变形,还要保证望远镜温度与环境温度相一致,从而减小光通路内的大气湍流,提高成像质量.

白天望远镜处于圆顶防护之下,夜晚圆顶打开,望远镜开始工作.若昼夜温差过大,会使得望远镜的主光学系统有较大的变化,不利于高质量的成像.因此首先需要对望远镜的保护圆顶进行热控设计.一般通过预测系统提前预测夜间温度,通过制冷系统对圆顶内温度进行调节,使得圆顶内白天温度接近于夜间温度.在望远镜开始工作前一段时间内制冷系统关闭,以防止造成望远镜周围空气扰动.

跟踪架是望远镜的基础部分,必须严格控制其温度恒定以减小热变形.因此在设计时要考虑通风系统.在转台、主镜室以及次镜支承环等部件上预留通风口.通风机位于望远镜底部隔离的基墩上,通过望远镜基墩的空腔与跟踪架相通.望远镜休息时,通风机通过预留的通风口将冷却空气吸入到跟踪架内部进行循环,在适当地方放置热敏电阻检测跟踪架温度.在望远镜工作时通风机关闭,为了保证跟踪架温度稳定性,需对跟踪架外表面设置绝缘层以减小降温速率.

同时对主镜要有更严格的温控系统,对电机等热源器件,单独依靠通风系统也不能完全冷却,因此需要有一套液体冷却系统来完成,如图 6.

由望远镜控制室内专门的冷却液系统制造冷却液泵给望远镜系统进行温度控制.一部分进入到主镜室内对主镜进行温控.整个主镜的热控由两个冷却循环链连续工作完成.第一个循环为空气在镜室和主镜内部的循环,用以将主镜的热量传递到下一循环.图 6 主镜冷却系统部分下空腔为主镜支撑结构空间,是焊接而成的密闭箱体结构,同时作为高压腔为所有喷嘴储

存冷却空气.冷却空气通过主镜背板轻量化孔处的喷嘴吹向主镜内部.空气吸收主镜热量后,通过喷嘴周围的环形通路流出到主镜和镜室之间的空间内,然后流回主镜室侧面设置的数个风扇处,通过热交换器重新冷却,进入高压腔重新循环.

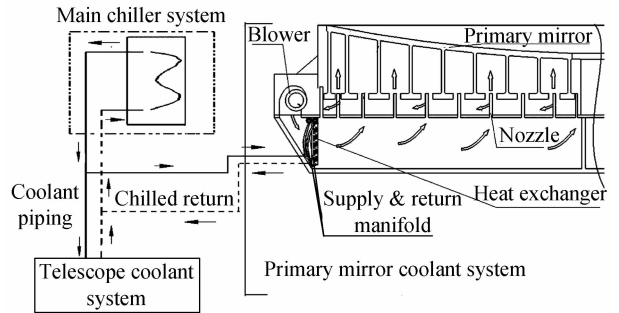


图 6 热控系统

Fig. 6 Illustration of thermal control system

第二循环为冷却液循环系统,将空气带出的热量传递到望远镜之外.风扇下部设置由铜管和铜叶片组成的热交换器,通过两根进出水胶皮管与冷却液装置相连.吸收了主镜热量的空气经通风机泵出后会进一步升温,通过热交换器将多余热量传递到进入铜管的冷却液中.冷却液将热量通过出水管带到望远镜之外进行释放.另一部分冷却液进入到跟踪架冷却系统,对跟踪架上的热源进行冷却.同样是通过冷却液将多余热量带出到望远镜之外^[11-16].

4 结论

借助于有限元法,对某地基大口径望远镜进行了有限元热分析,结果表明:1)通过实测望远镜工作期间的环境温度,并考虑了望远镜与环境之间的各种热交换,进行了热分析计算,得出了望远镜在工作期间不同时刻的温度分布情况.2)通过计算望远镜的温度分布,进一步分析了望远镜在各个时刻的热变形.结果表明,热相比于重力来说对望远镜影响更大,需要严格控制.3)针对上述情况,从望远镜防护圆顶、跟踪架以及主镜方面对望远镜的热控环节进行了方案设计.有利于减小温度对望远镜的影响,提高成像质量.随着望远镜口径的增大,温度对望远镜的影响越来越大,因此热控环节的设计也显得尤为重要.本文对某大口径望远镜进行了温度分析和温控设计,对大口径望远镜的设计有重要意义.

参考文献

- [1] CHO M, COREDON A, VOGIATZIS K, *et al.* Thermal performance prediction of TMT telescope structure [C]. SPIE, 2009, **7427**: 7427E01-15.
- [2] VOGIATZIS K. Thermal modeling environment for TMT[C]. SPIE, 2010, **7738**: 77380B1-10.
- [3] CHO M, COREDON A, VOGIATZIS K, *et al.* Thermal analysis of the TMT telescope structure [C]. SPIE, 2010, **7738**: 77380C1-12.

- [4] EMDE P, KUHN J, WEIS U *et al.* Thermal design features of the solar telescope GREGOR[C]. SPIE, 2004, **5495**: 238-246.
- [5] CHO M, DEVRIES J, HANSEN E. Thermal performance of the ATST secondary Mirror[C]. SPIE, 2007, **6721**: 1-12.
- [6] WANG Fu-guo. 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.
王富国. 温度和支撑方式对 1.2m SiC 主镜面型的影响分析 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 933-936.
- [7] YANG Fei, MING Ming, WANG Fu-guo, *et al.* Influences of thermal diversification to opto-mechanical system of 1.23m telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 26-30.
杨飞, 明名, 王富国, 等. 温度变化对 1.23m 望远镜光机系统的影响 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 26-30.
- [8] LI Guo-qiang, JIA Hong, CHEN En-tao, *et al.* Introduction for precise thermal control of space solar telescope main mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 239-243.
李国强, 贾宏, 陈恩涛, 等. 空间太阳望远镜主镜精密温度控制方案介绍 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 239-243.
- [9] WU Xiao-xia, WANG Ming-hao, MING Ming, *et al.* Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(6): 1243-1249.
吴小霞, 王明浩, 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.
- [10] FUGATE R Q, RUANE R E, ELLERBROEK B L, *et al.* First observations with the starfire optical range 3.5-meter telescope[C]. SPIE, 1994, **2199**: 481-493.
- [11] DAN B, MATT J. Thermal design of the WIYN 3.5 meter telescope enclosure[C]. SPIE, 1994, **2199**: 743-753.
- [12] MARIANA D E K, SAREL V. Designing the SALT facility to minimize dome seeing effects[C]. SPIE, 2003, **4837**: 206-216.
- [13] LEWIS C R, PETER D F. Thermal conditioning of the AEOS telescope[C]. SPIE, 2003, **4837**: 264-271.
- [14] KERSTAN G H, DAVID F. High performance mount for the SOAR telescope project [C]. SPIE, 2000, **4004**: 127-134.
- [15] LARRY W G. Temperature control of the 3.5-meter WIYN telescope primary mirror[C]. SPIE, 1991, **1532**: 161-169.
- [16] NEILL D R. LSST Primary/Tertiary mirror thermal control system[C]. SPIE, 2010, **7733**: 77331E1-12.