

doi: 10.3788/gzxb20124101.0026

温度变化对 1.23 m 望远镜光机系统的影响

杨飞, 明名, 王富国, 张丽敏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 为了实现 1.23 m 望远镜在环境温度从 $-35^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 变化范围内, 光机系统的成像质量的指标要求, 本文从原理上分析了温度变化对光机系统中光学元件面形准确度及相对位置关系的影响, 推导出了主次镜间光学间隔变化与像面离焦量的比例关系. 通过对 1.23 m 望远镜光学结构的像质分析, 结合光机结构设计, 搭建了适合环境温度变化的光机系统, 从方案设计上满足了望远镜系统的成像要求. 通过实际的成像实验, 验证了温度变化导致的主次镜光学间隔变化对望远镜系统成像带来的离焦的影响, 并给出了具体的温度补偿措施, 即采取次镜调焦的方式, 可满足具体观测实验的要求. 同时, 为今后 1.23 m 望远镜以及类似的大口径望远镜系统的实验和技术改造提出了切实可行的意见.

关键词: 光机系统; 温度影响; 大口径望远镜; 离焦误差

中图分类号: P111.21

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0026-5

0 引言

地基望远镜在设计和使用过程中都需要考虑环境温度对光机系统的影响, 尤其是在大口径望远镜系统中, 环境温度对光机系统的影响更是不容忽视. 对于光机系统而言, 环境温度会对光机系统中的光学元件带来面形准确度的影响, 引起光机系统中机械结构的变形, 从而影响与之相关的光学元件间的相对位置关系, 进而对光学系统成像质量带来影响. 比如在天文望远镜中常用的 Ritchey-Chretien (R-C) 和 Cassegrain 光学系统, 由于光机系统光学元件和镜筒结构受环境温度的影响, 会产生一定的镜面变形和镜筒结构变形, 给光学系统带来像差.

本文以 R-C 光学结构形式的 1.23 m 望远镜为研究对象, 主要针对温度变化对望远镜光学系统成像质量的影响进行阐述, 根据高斯公式推导出了主次镜间光学间隔变化与像面离焦量的比例关系, 并提出了通过调整次镜来补偿温度变化以保证望远镜系统成像质量的技术建议.

1.23 m 望远镜为地平式地基望远镜, 其主光学系统采用 R-C 形式, 系统焦距为 11 m, 主镜口径为 1.23 m, 主次镜间距为 1 350 mm, 环境温度变化范围 $-35^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$. 在环境温度变化时, 主次镜间的相对位置关系会发生相应的变化. 由于望远镜为同轴光学系统, 光机结构也为相对于光轴方向对称

式结构, 因此温度变化给光机系统带来的主要影响为光学元件的面形准确度和光学元件相对位置关系的变化. 根据热胀冷缩的普遍规律, 1.23 m 望远镜主次镜间隔受环境温度变化而引起的变化量可达将近 1 mm, 这已经远远超出望远镜系统的焦深 ± 0.12 mm 要求.

随着望远镜口径的增大, 光机系统整体结构尺寸也随之增大, 温度变化给光机系统引入的误差量也随之增大. 比如国外 SUBARU 望远镜, 其主镜口径为 8.2 m, 次镜端到水平轴的距离达 12 m, 其误差要求次镜在光轴方向的离焦误差为 $\Delta Z \leq 150 \mu\text{m}^{[1]}$. 按照热膨胀规律, 在不考虑望远镜镜筒结构刚度的前提下, 如果不采取次镜调焦补偿措施, 望远镜环境温度应控制在 $\Delta T \leq 1^{\circ}\text{C}$, 这对于一台 8.2 m 口径的大型望远镜来说是很苛刻的要求, 可见温度变化对大口径望远镜系统的影响是不可忽视的.

1 原理分析

环境温度的变化会带来光机系统光学元件面形准确度的变化和光学元件相对位置的变化, 从而影响到望远镜光学系统的成像质量.

1.1 温度变化对 1.23 m 望远镜光学元件面形准确度的影响

当望远镜中的光学元件的温度随环境温度整体发生变化时, 光学元件的曲率半径会发生变化, 变化

基金项目: 中国科学院三期创新基金资助

第一作者: 杨飞(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为地基大口径光电望远镜光机系统. Email: yangflying@163.com

收稿日期: 2011-07-29; 修回日期: 2011-10-10

量如式(1)^[2]

$$\Delta R = R\alpha\Delta T \quad (1)$$

式中 α 是线胀系数.

如果光学元件材料本身的线胀系数不一致,那么曲率半径的变化将会是线胀系数几何分布函数.当线胀系数的变化在光学元件厚度方向上是线性变化时,曲率半径随着温度的变化如式(2)

$$\Delta R = \frac{R^2 \Delta\alpha \Delta T}{h} \quad (2)$$

式中 $\Delta\alpha$ 是线胀系数沿光学元件厚度 h 方向的变化量.

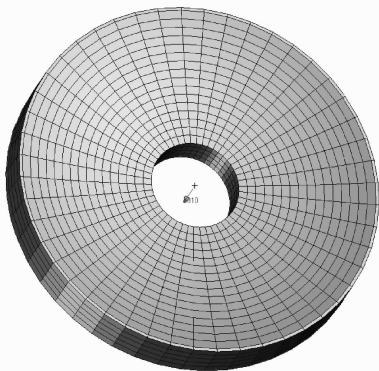
温度梯度对光学元件的影响是比较复杂的,最好是通过有限元分析方法对光学元件进行热分析.对于简单的情况,如在光学元件前后表面存在线性变化的温度梯度时,曲率半径的变化可按式(3)进行估算

$$\Delta R = \frac{R^2 \alpha \Delta T'}{h} \quad (3)$$

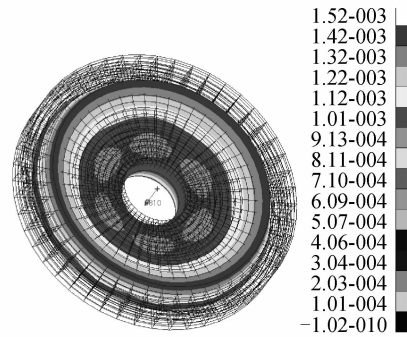
式中, $\Delta T'$ 是光学元件前后表面的温差.

为了减少光学元件曲率半径的变化,在环境温度不可控时,应尽量选用线胀系数较低的光学材料来制备光学系统的光学元件.在 1.23 m 望远镜中,本文采用了 Schott 公司的 Zerodur,即号称零膨胀系数的微晶玻璃材料,作为望远镜主次镜的材料,它的线胀系数为 $0.05 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

光学系统对主镜曲率半径的误差要求是在 $\Delta R = \pm 1 \text{ mm}$, $R = 3\ 600 \text{ mm}$ ^[3],由式(1)可知 $\Delta R = R\alpha\Delta T = 3\ 600 \times 0.05 \times 10^{-6} \times \Delta T$,在环境温度波动范围为 $-35\ ^\circ\text{C} \sim +55\ ^\circ\text{C}$ 时, $\Delta R = 9.9 \ \mu\text{m}$,在误差要求的范围以内,基本可忽略不计.但是其面形准确度随温度的变化经过有限元分析却是不容忽视的,如图 1 所示为 1.23 m 望远镜主镜模型和在温度为 $-25\ ^\circ\text{C}$ 时的变形云图.主镜面形准确度随温度的变化趋势如图 2 所示,最大为 $\text{RMS} = 30 \text{ nm}$.温度变化引起的主镜面形变化带来的波前误差可由后续光路中的变形镜自适应光学系统进行校正.



(a) The primary mirror model



(b) Deformation at $-25\ ^\circ\text{C}$

图 1 温度 $-25\ ^\circ\text{C}$ 时的变形云图

Fig. 1 The primary mirror model and deformation at $-25\ ^\circ\text{C}$

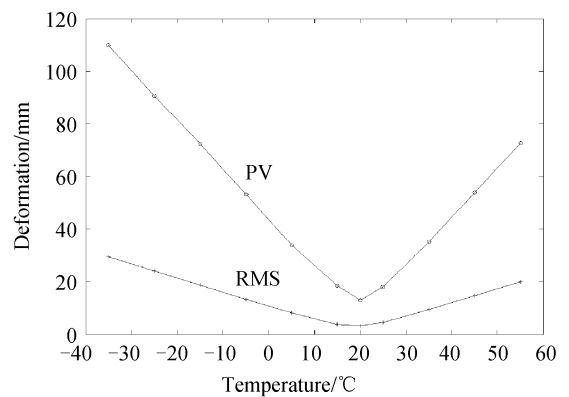


图 2 主镜在温度 $-35\ ^\circ\text{C} \sim +55\ ^\circ\text{C}$ 的面形变化

Fig. 2 Primary mirror deformation during $-35\ ^\circ\text{C}$ to $+55\ ^\circ\text{C}$

1.2 温度变化对 1.23 m 望远镜光学元件相对位置关系的影响

1.23 m 望远镜为同轴光学系统,光机结构也为相对于光轴方向对称式结构,因此重点研究温度变化给光学元件相对位置关系带来的变化主要为主次镜的光学间隔变化,而主次镜相对倾斜误差、相对偏心误差均可在光机系统装调阶段控制到光机系统要求的误差范围以内.光机系统中主光学系统各光学元件间的误差定义如图 3.望远镜主次镜间距为 $1\ 350 \text{ mm}$,根据公式 $\Delta L = L\alpha\Delta T$ 可知主次镜光学间隔变化量与温度变化成线性关系.

在 1.23 m 望远镜光学系统中,设主镜焦距为 f_1 ,次镜焦距为 f_2 ,系统焦距为 f ,系统后截距为 b ,主镜焦点与次镜顶点距离为 l ,根据高斯公式可推算得到

$$\frac{db}{dl} = \frac{1}{\left(1 + \frac{l}{f_2}\right)^2} = \left(\frac{f}{f_1}\right)^2 \quad (4)$$

即当光学系统的主镜焦距和系统焦距确定之后,次镜相对于主镜的偏移量引起的像面偏移量即离焦量的关系也就确定了.

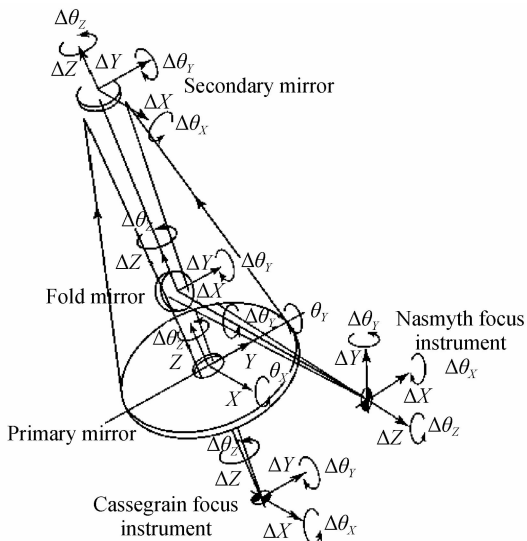


图3 望远镜主光学系统误差定义
Fig. 3 Definition of the various deformations relevant to a Cassegrain/Nasmyth optical system

1.23 m 望远镜主光学系统布局如图4所示,其中,主镜焦距为1 800 mm,主系统焦距11 000 mm,二次成像系统焦距为36 000 mm.因此根据式(4),当次镜相对主镜间隔变化 ΔZ 时,主光学系统第一像面就会产生 $37 \times \Delta Z$ 的离焦量,而第二像面会产生 $400 \times \Delta Z$ 的离焦量.

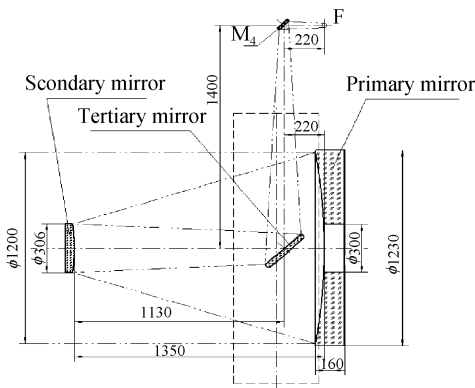


图4 1.23 m 望远镜主光学系统布局图
Fig. 4 Main optical system layout of 1.23 m telescope

主光学系统的焦深为 ± 0.12 mm,二次成像光学系统的焦深为 ± 2.24 mm.所以当次镜相对于主镜间隔 $\Delta Z \geq 0.12/37 = 0.00315$ mm时,系统成像质量将受到影响.由此也可看出,次镜相对于主镜的间距变化量对系统像质是一个十分敏感的因素.主光学系统温度发生 1°C 的变化时,主次镜间隔变化 $\Delta Z = 1350 \times 12 \times 10^{-6} \times 1 = 0.0162$ mm,将给一次成像系统带来5倍焦深的离焦量,如果不采取相应补偿措施,望远镜成像质量将得不到保证.

在望远镜系统口径越来越大时,环境温度、重力场对光机系统的影响也越来越大,除了离焦误差外,慧差、像散、球差等像差也逐渐凸显.因此除了采取次镜调焦措施外,还应对大口径望远镜系统次镜相

对于主镜的倾斜误差、偏心误差等位置误差,甚至面形误差,采取稳定可靠的机构进行相应的修正^[4-8].如果采用如图5所示SUBARU望远镜次镜所采用的六自由度调整平台,这也是保证望远镜更高成像质量的一种行之有效的措施.

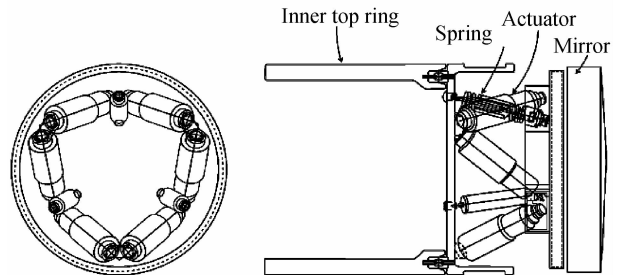


图5 SUBARU望远镜次镜多自由度调整平台
Fig. 5 The hexapod mount used to align and focus the secondary mirror of the Subaru telescope

2 实验验证

由前面的分析可知,1.23 m 望远镜为同轴光学系统,光机结构也为相对于光轴方向对称式结构,因此温度变化给光机系统带来的主要影响为光学元件的面形准确度和光学元件相对位置关系的变化.1.23 m 望远镜在环境温度时光学元件的面形准确度损失带来的波前误差可由后续光路中的变形镜进行波前校正,主次镜的相对倾斜误差 $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 和相对偏心误差 ΔX 、 ΔY 可在装调阶段控制在系统要求的误差范围内.因此在1.23 m 望远镜的光机结构设计中,只设置了次镜调焦机构,对引起系统离焦误差的 ΔZ 进行随温度变化的调整.

根据1.23 m 望远镜所处环境温度要求和重力场导致的结构变形,以及系统装调的要求,次镜调焦范围设置为 ± 2.5 mm,调焦准确度优于 0.003 mm.次镜调焦机构所选用准确度达 ± 0.001 mm的光栅尺作为位移检测反馈元件,可满足次镜调焦准确度的要求.

1.23 m 望远镜系统如图6所示,分别在夏冬两季使望远镜以 49° 仰角对同一颗恒星进行观测.观

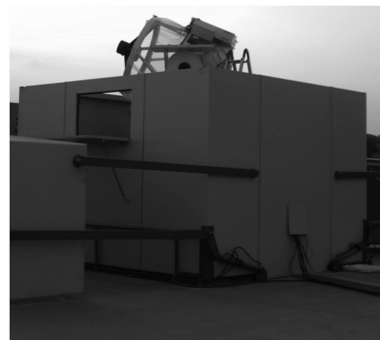


图6 1.23 m 望远镜外场实验
Fig. 6 The 1.23 m telescope in the outfield

测在焦状态如图 7;由于温度的变化导致的像面离焦效果如图 8 所示,次镜离焦量为 0.02 mm.可以看出,温度变化引入的光学系统离焦误差已经严重影响成像质量.因此,在实际观测实验过程中,必须设置相应的次镜调焦机构,以补偿由温度变化引入的系统离焦误差.

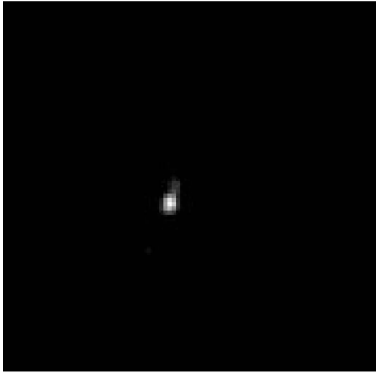


图 7 1.23 m 望远镜观测在焦状态
Fig. 7 The state of on focus during the 1.23 m telescope observation

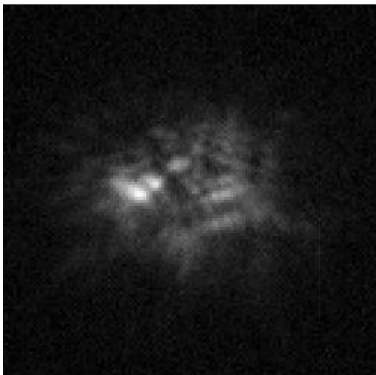


图 8 1.23 m 望远镜观测离焦状态
Fig. 8 The state of defocus during the 1.23 m telescope observation

观测实验表明,1.23 m 望远镜的温度调焦功能是必不可少的,次镜调焦的范围在东北地区冬夏温差较大的情况下,仍然满足了系统的要求,对后续开展相关天文观测实验提供了良好的基础.

设置合适的次镜调焦机构在望远镜装调阶段也便于引入计算机辅助装调技术,可大大缩短装调周期^[9].除了采取次镜调焦和二次像面调焦这两种温控措施外,对望远镜系统采取相对严格的无热化光机结构设计^[10],也是保证望远镜成像质量的一种行之有效的措施.

3 结论

对于类似 1.23 m 望远镜的较大口径望远镜光机系统,尤其是系统焦比大的光机系统,系统所处的环境温度的变化对光机系统的影响是不容忽视的.在光机系统设计中,要对光机结构所面临的环境温度做充足的考虑,设置相应的温度调焦补偿环节,以保证望远镜系统在不同环境温度下的成像质量,发挥其成像探测性能.1.23 m 望远镜中设置次镜调焦机构作为温度调焦补偿环节,其调焦范围与调焦准确度均满足了环境温度变化的离焦误差补偿要求,从而保证了望远镜光学系统的成像质量.

参考文献

- [1] MIYAWAKI K, ITOH N, SUGIYAMA R, *et al.* Mechanical structure for the SUBARU telescope[C]. *SPIE*, 1994, **2199**: 754-761.
- [2] BELY P Y. The design and construction of large optical telescope[M]. New York: Springer-Verlag, 2003.
- [3] MING Ming, WANG Jian-li, ZHANG Jing-xu, *et al.* Error budget and analysis for optical system in large telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 104-108. 明名, 王建立, 张景旭, 等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(1): 104-108.
- [4] SCHIPANI P, FERRAGINA L, MARTY L, *et al.* Parallel robots in a ground-based telescope active optics system: theory and experiments[C]. *SPIE*, 2007, **6715**: 671503-1-671503-9.
- [5] CASALTA J M, ARINO J, CANCHADO M, *et al.* The performances of the GTC secondary mirror drive unit[C]. *SPIE*, 2004, **5495**: 507-517.
- [6] PERNECHELE C, BORTOLETTO F, REIF K. Position-control for active secondary mirror a two-mirror telescope[C]. *SPIE*, 1997, **3112**: 172-180.
- [7] ZAGO L, GENEQUAND P, MOERSHELL J. Extremely compact secondary mirror unit for the SOFIA telescope capable of 6-degree-of-freedom alignment plus chopping[C]. *SPIE*, 1997, **3352**: 666-674.
- [8] RICCARDI A, SALINARI P, BRUSA G, *et al.* Adaptive secondary mirrors for the large binocular telescope[C]. *SPIE*, 2003, **4839**: 159-168.
- [9] SUN Jing-wei, CHEN Tao, WANG Jian-li, *et al.* Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(10): 2156-2163. 孙敬伟, 陈涛, 王建立, 等. 主次镜系统的计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(10): 2156-2163.
- [10] SHEN Hong-hai, WANG Guo-hua, DING Jin-wei, *et al.* Application of active-athermal compensation to airborne IR optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 593-601. 沈宏海, 王国华, 丁金伟, 等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 593-601.

Influences of Thermal Diversification to Opto-mechanical System of 1.23 m Telescope

YANG Fei, MING Ming, WANG Fu-guo, ZHANG Li-min

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

Abstract: Influences of the thermal diversification to the accuracy of optical element and relatively position of the opto-mechanical system are analyzed. The scale ratio of the optical distance diversification and the defocus error of optical system is derived. Through integrated opto-mechanical design and analysis of image quality of the 1.23 m aperture telescope, an opto-mechanical system (fitting the thermal diversification of $-35\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+55\text{ }^{\circ}\text{C}$) is built that meets the requirements of imaging of the telescope. It is also validated that the main influence of the thermal diversification to the telescope is defocus error, and some practical compensation methods such as focus mechanism on secondary mirror to satisfy the requirements of observation of the telescope are presented. Meanwhile, some feasible opinions for the observational experiments and upgrading of 1.23 m aperture telescope or larger aperture telescope analogously are proposed.

Key words: Opto-mechanical system; Influence of the thermal diversification; Large aperture of telescope; Defocus error