

仰角变化对 1.23 m 望远镜光机系统的影响

杨 飞 明 名 陈宝刚 王富国 卫沛锋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 通过对 1.23 m 口径望远镜光学结构的像质分析,结合光机结构设计,搭建了适合仰角从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围运动的光机系统,从方案设计上满足了望远镜系统的成像要求。但是在重力场中,随着望远镜俯仰角的变化,主次镜会产生相对的弯沉和倾斜,进而对系统成像质量产生影响。通过实际的成像实验,也验证了仰角变化对望远镜系统成像带来的离焦的影响,并给出了具体的系统补偿措施,满足了实际观测实验的要求。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 光学设计;光机系统;仰角变化影响;大口径望远镜;离焦误差

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.032201

Influence of Diversification of Elevation to the Opto-Mechanical System of 1.23 m Telescope

Yang Fei Ming Ming Chen Baogang Wang Fuguo Wei Peifeng

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

Abstract Considering both the opto-mechanical design and the image quality analysis of the 1.23 m aperture telescope, we build the opto-mechanical system which can fit the diversification of elevation from $0^\circ \sim 90^\circ$. The opto-mechanical system can meet the requirements of imaging of the telescope. However, there are some deformations in the tube of telescope with the diversification of elevation due to the gravity, and they result in distortion of the image. The main influencing factor of the diversification of elevation to the telescope is defocusing, and some material compensation methods are proposed to satisfy the requirements of observation. Meanwhile, some feasible opinions for the observational experiments and upgrading of telescopes with 1.23 m or more larger aperture are given.

Key words optical design; opto-mechanical system; influence of the diversification of elevation; large aperture telescope; defocusing error

OCIS codes 220.1140; 200.4880; 110.6770; 230.2090

1 引言

地基望远镜在设计和使用过程中都需要考虑重力场对光机系统的影响,尤其是在大口径望远镜系统中,重力场对光机系统的影响更是不容忽视。对于光机系统而言,重力场会给光机系统中尺寸较大的光学元件带来面形精度的影响,给光机系统中的机械结构带来重力方向的结构变形,影响到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)和卡塞格林光学系统,由于镜筒结构受重力的影响,会产生一定的结构变形,从而使光学系统中的主次镜产生相对的位置变化,给光学系统带来像差。

本文以 R-C 光学结构形式的 1.23 m 口径望远镜为研究对象,主要针对重力对望远镜镜筒造成的结构变形对光学系统成像质量的影响进行阐述。

收稿日期: 2011-08-09; **收到修改稿日期**: 2011-09-05; **网络出版日期**: 2011-22-28

基金项目: 中国科学院三期创新基金资助课题。

作者简介: 杨 飞(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事地基大口径光电望远镜光机系统方面的研究。

E-mail: yangflying@163.com

2 国内外情况介绍

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,如图 1 所示。其主镜口径为 1.23 m,主次镜间距达 1350 mm,在重力场的作用下,当望远镜指向不同的仰角时,主次镜间的相对位置关系会发生相应的变化。地基望远镜在设计之初应尽量保证光机系统的结构刚度,使光机结构的变形在光学系统误差范围内。但是随着望远镜口径的增大,光机结构的变形也随之增大^[1]。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,其主光学系统各光学元件间的误差定义如图 2 所示。在主镜筒指向水平时,其次镜相对于原光轴就产生了 $\Delta X=1.5\text{ mm}$ 的偏移;在主镜筒指向天顶时,次镜在光轴方向也产生了 $\Delta Z=1.5\text{ mm}$ 的偏移。这已经远远超出了 SUBARU 望远镜系统所提出的 $\Delta X \leq 0.01\text{ mm}$ 和 $\Delta Z \leq 0.15\text{ mm}$ 的误差要求^[2]。

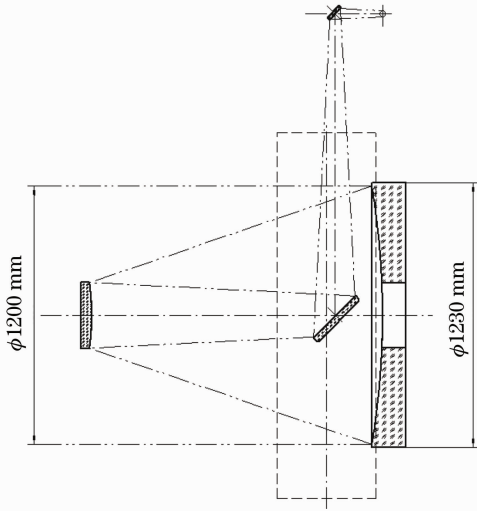


图 1 1.23 m 望远镜主光学系统布局图

Fig. 1 Main optical system layout of 1.23 m telescope

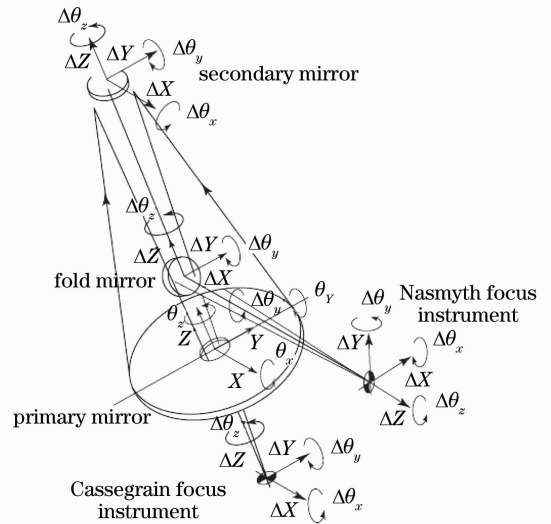


图 2 望远镜主光学系统误差定义

Fig. 2 Definition of various deformations in the main optical system of a telescope

为了保证各光学元件间相对位置在设计误差范围以内,就必须采取必要的技术手段。SUBARU 望远镜在镜筒的设计上就采取了 Serrurier 桁架结构,使主次镜产生几乎相同的下沉量^[2],以减小主次镜间的相对位置误差。在 1.23 m 望远镜的设计中,对次镜筒也采用了桁架结构,通过计算分析得到在主光轴指向水平时,次镜相对于主光轴的最大偏移为 $25\text{ }\mu\text{m}$,如图 3 所示。在 1.23 m 望远镜主光轴指向天顶时,次镜在光轴

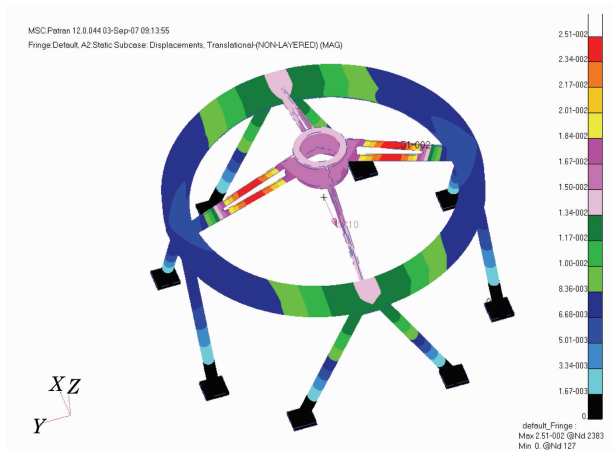


图 3 1.23 m 望远镜指向水平时的桁架结构变形

Fig. 3 Deformation of the tube of the 1.23 m aperture telescope when pointing to horizon

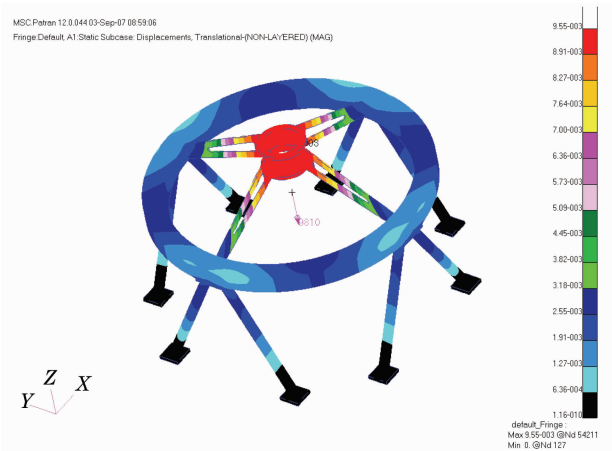


图 4 1.23 m 望远镜指向天顶时次镜筒的结构变形

Fig. 4 Deformation of the tube of 1.23 m aperture telescope when pointing to zenith

方向的偏移量为 $9.55 \mu\text{m}$, 如图 4 所示。

在 1.23 m 望远镜主光轴指向不同的俯仰角时, 次镜相对于主光轴将产生倾斜误差 $\Delta\theta_y$ 和偏移误差 ΔX 、 ΔZ , 这些误差将会对光机系统的成像质量产生影响。

3 原理分析

1.23 m 望远镜的主光学系统由非球面主、次镜和平面反射镜组成 R-C 反射式系统^[3], 如图 5 所示。望远镜指向不同仰角时, 主次镜间相对位置的变化会引起系统的指向误差和成像点的彗差, 光轴方向的相对偏移误差 ΔZ 会导致主光学系统的离焦。

3.1 仰角变化引入的指向误差和彗差

望远镜指向不同仰角时, 主次镜的相对转角、相对偏移会给系统带来指向误差, 表示为^[4]

$$\delta = u_1/f - (m-1)(u_2 + r_2\theta)/f, \quad (1)$$

式中 u_1, u_2 为主镜和次镜相对于望远镜焦点的位移, θ 为主镜和次镜的相对转角, f 为系统焦距, m 为次镜的放大率, r_2 为次镜的顶点曲率半径。

望远镜由重力场引起的指向误差有一定的规律, 可以利用计算机进行校正, 或者用导星装置加以抵消。但是主次镜的相对倾斜误差 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 和相对偏心误差 ΔX 带来主光学系统的彗差, 这个影响不容易克服, 所以在系统装调过程中要特别注意保证望远镜中光学元件的相对位置关系, 在光机结构设计上应保证镜筒结构的充足刚度。在 1.23 m 望远镜的设计中就是本着这种思想, 通过光机结构和系统装调保证光学系统的误差在允许范围以内, 以减少系统彗差的引入。主次镜的位置误差所引起的彗差的大小是

$$l_c = \frac{3(m-1)^2}{32F^2 f} \{ [e_2^2(m-1) + m+1]u + (m^2+1)r_2\theta \}, \quad (2)$$

式中 u 为主镜和次镜的相对位移, F 为系统焦比, e_2^2 为次镜的偏心率。

3.2 仰角变化引入的离焦误差

在该光学系统中, 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

$$\frac{db}{dl} = \frac{1}{\left(1 + \frac{l}{f_2}\right)^2} = \left(\frac{f}{f_1}\right)^2, \quad (3)$$

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也就确定了。在 1.23 m 望远镜的主光学系统中, 主镜焦距为 1800 mm , 主系统焦距 11000 mm , 二次成像系统焦距为 36000 mm 。因此根据(3)式, 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。

主光学系统的焦深为 $\pm 0.12 \text{ mm}$, 二次成像的焦深为 $\pm 2.24 \text{ mm}$ 。所以当次镜相对于主镜间隔 $\Delta Z \geq 0.12 \text{ mm}/37 = 0.00315 \text{ mm}$ 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而言是一个十分敏感的因素。

4 实验验证

由分析可知, 1.23 m 望远镜在指向不同仰角时主次镜的相对倾斜误差 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 和相对偏心误差 ΔX 均已在方案设计上予以考虑, 并使其误差量在设计允许的范围内。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 进行随仰角的调整。

根据重力场导致的结构变形和 1.23 m 望远镜所处环境温度要求, 以及系统装调的要求, 次镜调焦范围

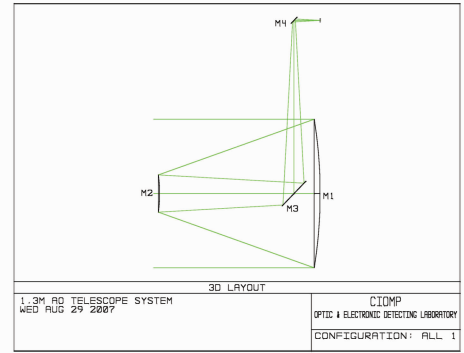


图 5 1.23 m 望远镜主光学系统光学设计
Fig. 5 Main optical system design of 1.23 m aperture telescope

设置为 ± 2.5 mm,调焦精度优于 0.003 mm。次镜调焦机构选用精度达 ± 0.001 mm的光栅尺作为位移检测反馈元件,可满足次镜调焦精度的要求。

当 1.23 m望远镜指向不同仰角对天文恒星进行观测时,用哈特曼传感器对系统成像效果进行检测分析,可以得到系统波前的泽尼克多项式中的离焦项值随仰角的变化而变化,如图6所示。随着仰角的增大,系统的离焦像差也随之增大。因此,在望远镜指向不同仰角时,有必要对次镜采取实时调焦,以保证系统像质。

为了保证系统像质,将系统离焦量控制在焦深以内,对次镜采取不同仰角的调焦实验,调焦量大小随望远镜俯仰角度变化的规律如图7所示,可以看出两者的关系基本呈余弦规律分布,给次镜调焦的开环控制提供了实验依据。

由于 1.23 m望远镜光学系统采用二次像面成像,而且次镜调焦导致第一像面的位置不便进行定量检测,在系统第二像面处设置调焦平移台,并通过电机进行定量驱动,在实验过程中可获得第二像面的移动范围,如图8所示。可以看出,第二像面的移动量与次镜调焦量的对应关系符合3.2节的 $400\times\Delta Z$ 关系。同时根据实验结果也可得出结论:在光机系统设计中给第二像面调焦平移台设置的 ± 50 mm移动范围满足望远镜系统指向不同俯仰角时的调焦要求。

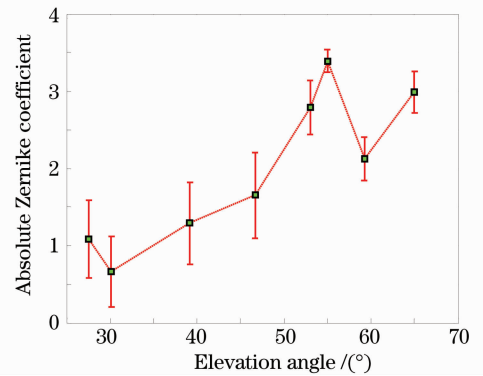


图6 主光学系统波前 Zernike 多项式中离焦项值与仰角关系

Fig. 6 Relation between defocusing of wavefront in Zernike polynomial and elevation of telescope

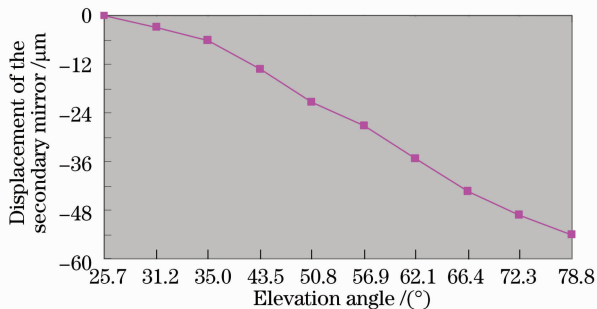


图7 次镜调焦量与望远镜仰角关系

Fig. 7 Relation between focusing of the secondary mirror and elevation of telescope

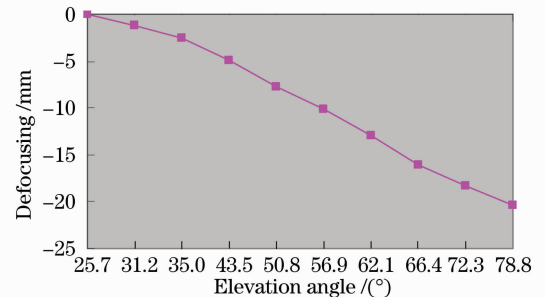


图8 第二像面移动量与望远镜仰角关系

Fig. 8 Relation between displacement of the secondary image plane and elevation of telescope

5 结 论

对于类似 1.23 m望远镜的较大口径望远镜光机系统,尤其是采取二次成像的系统,系统俯仰角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,要对光机结构的刚度做充足的分析,设置相应的次镜调焦、像面调焦等补偿环节,以保证望远镜系统在不同仰角下的成像质量,发挥其成像探测能力。在望远镜系统口径越来越大时,重力场对光机系统的影响除了离焦外,彗差、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、偏心误差等采取稳定可靠的机构进行相应的修正^[5~9],这也是保证望远镜更高成像质量的一种行之有效的措施。同时也便于在望远镜装调阶段引入计算机辅助装调技术,可大大缩短装调周期^[10]。

参 考 文 献

- 1 Pierre Y. Bely. The Design and Constructon of Large Optical Telescope[M]. New York: Springer, 2003. 224~233
- 2 Keizo Miyawaki, Noboru Itoh, Ryuichi Sugiyama *et al.*. Mechanical structure for the SUBARU telescope[C]. SPIE, 1994, 2199: 754~761

- 3 Ming Ming, Wang Jianli, Zhang Jingxu *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 Cheng Jingquan. Principles of Astronomical Telescope Design[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. 102~110
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. 102~110
- 5 P. Schipani, L. Ferragina, L. Marty *et al.*. Parallel robots in a ground-based telescope active optics system: theory and experiments[C]. *SPIE*, 2007, **6715**: 671503
- 6 Joan Manel Casalta, Joan Arino, Manuel Canchado *et al.*. The performances of GTC secondary mirror drive unit[C]. *SPIE*, 2004, **5495**: 507~517
- 7 Claudio Pernechele, Favio Bortoletto, Klaus Reif. Position-control for active secondary mirror a two-mirror telescope[C]. *SPIE*, 1997, **3112**: 172~180
- 8 Lorenzo Zago, Pierre Genequand, Joseph Moerschell. Extremely compact secondary mirror unit for the SOFIA telescope capable of 6-degree-of-freedom alignment plus chopping[C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 666~674
- 9 A. Riccardi, G. Brusa, Piero Salinari *et al.*. Adaptive secondary mirrors for the large binocular telescope[C]. *SPIE*, 2003, **5169**: 159~168
- 10 Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli *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