

文章编号 1004-924X(2014)01-0085-07

大口径光电探测设备主镜晃动的误差补偿

孙 航^{1,2*}, 张海波¹, 曹立华¹, 耿爱辉¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对大口径光电探测设备在随俯仰角变化时由于主镜支撑点的变化而产生的晃动,研究了在静态测量时如何补偿主镜晃动造成的误差以提高大口径望远镜的静态测量精度。首先给出了一个 1 m 口径望远镜的支撑结构和力学模型,在分析了传统三轴误差补偿方法和球谐误差补偿方法的基础上提出了针对大口径望远镜的误差补偿方法。在外场对光测设备进行了标校实验,选取 32 颗恒星在修正了蒙气差后对各个系统差进行求解,得出了主镜晃动误差和三轴差。与传统误差补偿方法的比较结果显示:加入主镜晃动误差补偿后,望远镜的静态测量精度从 15.4" 提高到了 2.5"。此种方法物理意义明确,各误差分量重复性好,对主镜晃动误差进行补偿修正后提高了大口径望远镜的静态测量精度。

关键词:大口径望远镜;主镜晃动;曲线拟合;误差补偿;修正模型

中图分类号:TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142201.0085

Error compensation for primary mirror shaking of large aperture optical detection equipment

SUN Hang^{1,2*}, ZHANG Hai-bo¹, CAO Li-hua¹, GENG An-hui¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: ciompsunh@163.com*

Abstract: Large aperture optical detection equipment has the shaky with its elevation angle changing when the support point of primary mirror changes. This paper studies how to compensate the measuring errors caused by the primary mirror shaking and to improve the static measuring accuracy of the large aperture optical detection equipment. Firstly, the supporting structure and mechanic model of a 1m diameter telescope were presented. Then, a new error compensation method for the large aperture telescope was proposed based on the analysis of the traditional three axis error compensation method and spherical harmonic error compensation method. The calibration experiments for the optical detection equipment was performed. By selecting 32 stars whose refractions had been revised, the error of each system was solved to obtain the primary mirror shaking error and the three axis difference. As comparison with the traditional error compensation method, it shows that the static measurement accuracy of the telescope has increased from 15.4 " to 2.5 after the shaking error of the primary mirror is

收稿日期:2013-08-09;修订日期:2013-10-11.

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工程资助项目(No. 061X20C060)

compensated. It concludes that the physical meaning of this method is clear, and each error component has good repeatability. It improves the static precision of large aperture telescope by compensating the shaking errors of primary mirror.

Key words: large-aperture telescope; primary mirror shaky; curve fitting; error compensation; correct model

1 引言

光电探测设备利用光学成像原理可以测量空间目标的大小、位置等信息,因此成为靶场的重要测量手段之一。利用多台光电探测设备交汇测量可以获取导弹、卫星的精确轨迹信息,对空间碎片进行探测和监视,在国防和航天等领域发挥着重要作用。随着现代光学技术和空间技术的发展,对光电探测设备提出了更高的要求,为了探测到更远、更暗的空间目标,要求其口径越来越大,精度越来越高。国外对地基大口径设备的研制是从 20 世纪 80 年代开始的,1994 年美国在新墨西哥州柯特兰基地研制建立了 3.5 m 口径的光电探测设备。1997 年美国在夏威夷毛依岛配备的光学望远镜其口径达到了 3.67 m。国内的地基大口径光学测量设备现在仍然处于起步阶段,目前靶场所使用的最大口径为 1 m^[1],其它更大口径的正处在研制和试验阶段。由于主镜的口径较大,受地球重力场的影响,主镜在不同姿态时各个支撑点的受力情况不同,因此主镜在不同姿态下不可避免地产生一定的晃动量。要精确地对空间目标进行测量必须将主镜产生的晃动量考虑到测量误差修正模型中,这与以往常规口径的误差修正存在着差异。

光学探测设备经典的误差修正方法采取三轴误差修正,即调平误差,水平轴误差和视轴误差^[2]。这种误差模型只考虑设备各转动轴在制造和装配时产生的系统差以及零位误差对角度测量所产生的影响。利用这种误差模型可对小型设备做简单的误差修正,但对大口径设备其修正精度不高。在车载光学探测设备和水平式光测设备的测量误差修正中,有学者提出了利用球谐函数进

行误差修正^[3],这种方法基于球坐标上傅里叶级数展开的形式对误差进行分解求解,可在一定程度上提高测量精度。但是由于求解项较多,需要的测量次数就相应增多,而且各误差分量的重复性也不理想。在此基础上有学者针对水平式光测设备提出了改进的球谐函数修正法^[4],但这种方法没有考虑大口径仪器的特点因此并不适用于修正主镜晃动带来的误差。

本文给出了项目中 1 m 口径望远镜的支撑结构和力学模型,在分析了传统三轴误差补偿方法和球谐误差补偿方法的基础上提出了新的针对大口径望远镜的误差补偿方法。此种方法误差分量重复性好,对主镜晃动误差进行补偿修正后可以大大提高口径望远镜的静态测量精度。

2 传统误差模型

2.1 大气蒙气差修正

光学测量设备在靶场移动站或者固定站进行光学测量之前通常要利用恒星对设备的系统误差进行标校以修正系统误差对测量精度的影响。首先在得到站址天文坐标^[5]的前提下,对天空中仰角为 30~65°的恒星进行测量,将测量值与恒星理论真值作差得出各个恒星的测量误差,将这些恒星的测量误差代入到系统误差模型进行矩阵求解,得出测量设备的系统差。这种误差标校的方法称之为恒星标校法。恒星标校法首先要已知恒星的理论位置,而恒星光线在经过大气时受到大气折射的影响,实际位置会与理论位置存在偏差,这个偏差为蒙气差。蒙气差可由经验公式进行修正,但在 30°以下时由于大气折射受影响的因素较多因此修正精度不高,所以恒星标校法所选取的恒星应在仰角 30°以上。蒙气差的经验公

式为^[6]:

$$\rho = 60.2 * \tan z_a * \left(\frac{P}{760} - \frac{t}{273+t} \right), \quad (1)$$

其中: P 为测量瞬时大气压, t 为测量瞬时摄氏温度, z_a 为视天顶距。

2.2 经典三轴误差模型

光测设备经典误差模型由 3 条轴线定义而成,俯仰电机转动的轴线为水平轴,方位电机转动的轴线为垂直轴,指向目标的光路中心的轴线为光轴。在测量时方位编码器的实际零位与真实零位的误差定义为定向差 A_0 ,俯仰编码器的实际零位与真实零位定义为零位差 E_0 。视轴与水平轴不垂直的偏差角度定义为照准差 C ,垂直轴与水平轴不垂直的偏差角度为横轴差 b 。形体标校时恒星测量值与真实值的方位偏差 ΔA 和俯仰偏差

$$\begin{aligned} \Delta \cos E &= a_0 + a_1 \sin E + a_2 \cos A \cos E + a_3 \sin A \cos E + a_4 \sin A \cos E + a_5 \cos A \sin E \cos E + a_6 \sin A \sin E \cos E + \\ & a_7 \cos 2A \cos^2 E + a_8 \sin 2A \cos^2 E + a_9 \sin^3 E + a_{10} \cos A \sin^2 E \cos E + a_{11} \sin A \sin^2 E \cos E + a_{12} \cos 2A \cos^2 E \sin E \\ \Delta E &= b_0 + b_1 \sin E + b_2 \cos A \cos E + b_3 \sin A \cos E + b_4 \sin A \sin E + b_5 \cos A \sin E \cos E + b_6 \sin A \sin E \cos E + \\ & b_7 \cos^2 A \cos^2 E + b_8 \sin^2 A \cos^2 E + b_9 \sin^3 E + b_{10} \cos A \sin^2 E \cos E + b_{11} \sin A \sin^2 E \cos E + b_{12} \cos^2 A \cos^2 E \sin E. \end{aligned} \quad (5)$$

3 主镜晃动误差分析

3.1 主镜结构分析

项目中的主镜直径为 1 050 mm,系统结构为四光合一结构(即光学传感器包括长波、中波、短波、和可见光 4 个波段)。各波段光路公用主镜,其中可见光光路经过主镜、次镜、第一分色镜和第二分色镜 4 次反射到达可见光增强型 CCD 成像。其他波段分别经过主镜和次镜反射和分色镜透射到达各自波段传感器。光路结构如图 1 所示:

系统的 4 个波段焦距和光学结构不同,由主镜晃动带来的误差也不同,在天文标校时可选取不同波段的星库对各个波段的测量误差分别标校。本文只讨论可见波段的误差校正,其他红外波段的误差标校与可见波段方法相同。

在主镜支撑结构的设计上为了尽量减少其自重对镜面变形的影响,应用有限元模型确定主镜

ΔE 由经典三轴差模型可分解为:

$$\begin{cases} \Delta A = A_0 + b \tan E + C(\sec E - 1) \\ \Delta E = E_0 \end{cases} \quad (2)$$

2.3 球谐函数修正模型

利用球谐坐标可建立系统指向误差的修正模型,定义系统的测量坐标系为一球面($0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$)函数 $f(\theta, \varphi)$ 对 φ 展开为傅里叶级数:

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} [A_m(\theta) \cos m\varphi + B_m(\theta) \sin m\varphi]. \quad (3)$$

把式中 $A_m(\theta)$ 和 $B_m(\theta)$ 展开:

$$\begin{cases} A_m(\theta) = \sum_{i=m}^{\infty} A_i^m P_i^m(\cos \theta) \\ B_m(\theta) = \sum_{i=m}^{\infty} A_i^m P_i^m(\cos \theta) \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中截取 4 阶多项式形式展开得到球谐函数的误差修正模型为:

支撑的结构如图 2 所示。

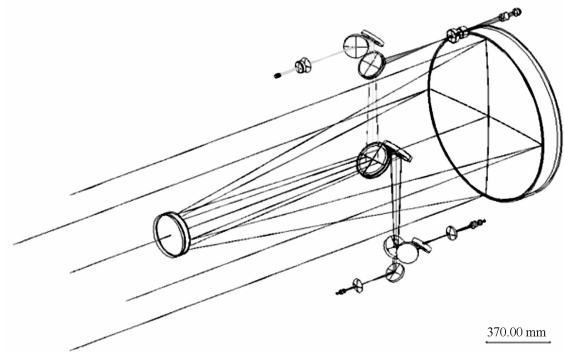


图 1 系统光学结构布局图

Fig. 1 Layout of system optics structure

主镜底支撑采用 3 点定位 18 点浮动的支撑方案,在设备仰角为 90° 即光轴处于铅垂状态时主镜的重量完全由这 18 个浮动点支撑。主镜的侧支撑采用上下半圆各 3 个柔性支撑点的方式,当设备的仰角为 0° 时即光轴处于水平状态时主镜

的重量完全集中在下半圆的 3 个柔性支撑点上, 经过有限元分析计算, 当 3 个柔性支撑点与主镜圆心的夹角为 45° 时镜面的变形量最小^[1]。光测设备正常工作状态下主镜仰角处于 $0\sim 90^\circ$ 之间, 其受力情况如图 3 所示。设主镜的重量为 W , 则当光轴中心与水平线夹角为 α 时, 底部支撑的受力为:

$$F = W * \cos \alpha. \quad (6)$$

底部 3 个支撑点为柔性支撑, 因此底支撑受主镜重力影响存在弹性位移, 其位移量与主镜仰角的余弦成正比。

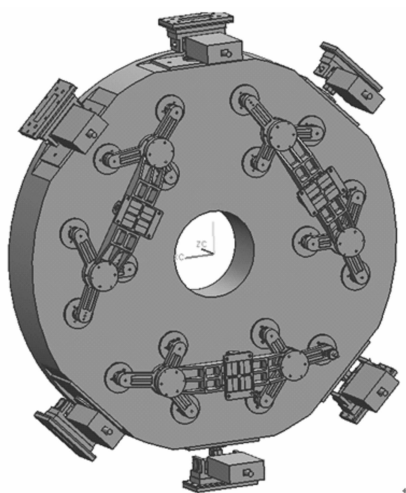


图 2 主镜支撑机构图

Fig. 2 Support structure of primary mirror

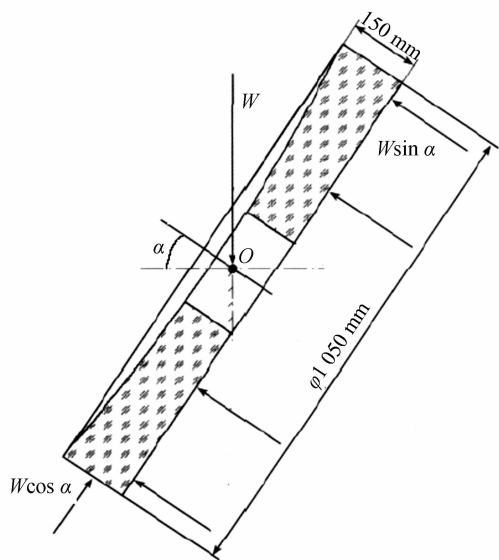


图 3 主镜受力示意图

Fig. 3 Sketch of stressed primary mirror

3.2 主镜晃动误差模型

基于主镜的力学模型分析, 主镜的晃动量应与其底部支撑的弹性变形有线性关系。因此假设系统映射在方位测量轴上的主镜晃动量最大值为 Q_A , 在俯仰上的最大值为 Q_E , 综合系统三轴误差和主镜晃动误差提出基于大口径的主镜晃动误差模型为:

$$\begin{cases} \Delta A = A_0 + b \tan E + C(\sec E - 1) + Q_A \cos E \\ \Delta E = E_0 + Q_E \cos E \end{cases} \quad (7)$$

4 3 种模型的误差对比实验

在国内某靶场观测点于 2013 年 1 月 20 日进行标星解算, 当地气压为 860 kPa, 温度为摄氏 -16°C 。在测星标校前用电子水平仪对设备进行调平, 调平精度为 $0.4''$ 。选取俯仰角度在 $30\sim 60^\circ$, 方位角度在 $0\sim 360^\circ$ 之间均匀分布的 32 颗恒星, 恒星时间采用系统终端接收的 GPS 时间。恒星位置通过主控计算机根据 FK4 星表给出, 主控计算机通过自动化气象站实时采集温度和气压修正蒙气差。记录经过修正的理论真值和对应的实测方位角和俯仰角如表 1 所示。

用所提出的主镜晃动误差模型分别对方位误差和俯仰误差进行修正, 其修正曲线与测量误差的关系分别如图 4 和图 5 所示。

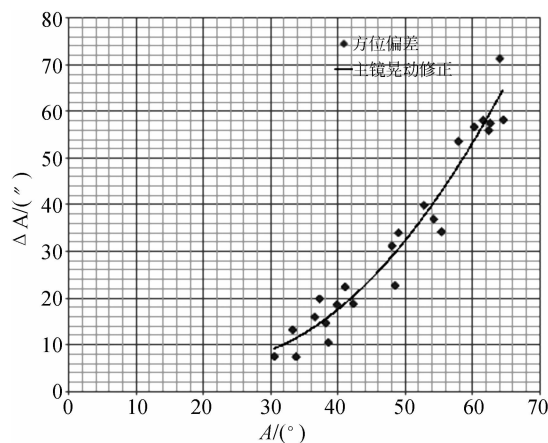


图 4 方位偏差与修正曲线

Fig. 4 Azimuth and modified line

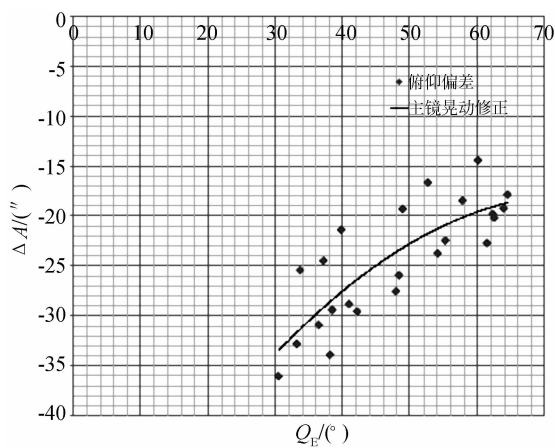


图 5 俯仰偏差与修正曲线
Fig. 5 Elevation and modified line

由图中的曲线可以看出,主镜晃动修正曲线与误差随俯仰的角度变化趋势一致,基本消除了系统误差,其剩余残差基本为无法修正的随机误差,其修正后精度达到了 3"以内。之后用经典三轴误差模型、球谐函数模型和本文提出的主镜晃动修正模型利用最小二乘法对方位和俯仰误差矩阵求解,得出各模型的方位误差模型参数如表 2 所示,俯仰误差模型参数如表 3 所示。

根据求解出的参数对各个恒星的测量值进行修正,则修正后的角度值与理论真值的差值为拟合后的修正残差。

表 1 标星实验中恒星理论值和测量位置

Tab. 1 Theory value and measure value of star

恒星索引	理论 A 值	理论 E 值	实测 A 值	实测 E 值
287	10.576 875 7	57.788 417 3	10.591 367 66	57.783 627 16
799	79.364 364 2	33.208 804 7	79.368 167 98	33.199 961 37
713	78.536 415 8	40.955 527 5	78.542 704 49	40.947 789 58
410	110.352 946 2	61.447 594 61	10.369 070 2	61.441 699 04
...
443	132.353 937 3	42.170 580 61	32.359 351 7	42.162 474 21
170	173.946 825 8	38.107 271 51	73.950 898 1	38.097 691 22
281	152.289 790 6	47.939 326	152.298 448 5	47.931 588 08
3190	231.789 038	48.387 795 4	231.795 479 6	48.380 794 43

表 2 3 种模型的方位误差拟合参数

Tab. 2 Azimuth resolution parameters of three models (")

模型	数值
经典三轴误差	$A_0 = -1.25, b = 53.14, C = -19.14$
球谐函数模型	$a_1 = -2.38, a_2 = 33.67, a_3 = 23.15,$ $a_4 = 5.16, a_5 = 0.3, a_6 = 0.1,$ $a_7 = 0.03, a_8 = 0.01, a_9 = 0.03,$ $a_{10} = 0.01, a_{11} = 0.005, a_{12} = 0.007$
主镜晃动模型	$A_0 = -2.27, b = 25.1,$ $C = -15.74, Q_A = 15.36$

表 3 3 种模型的俯仰误差拟合参数

Tab. 3 Elevation resolution parameters of three models (")

模型	数值
经典三轴误差	$E_0 = -1.25$
球谐函数模型	$b_1 = 3.38, b_2 = 23.69, b_3 = 28.15,$ $b_4 = -7.36, b_5 = 0.03, b_6 = 0.2,$ $b_7 = 0.01, b_8 = -0.1, b_9 = 0.01$ $b_{10} = 0.02, b_{11} = 0.01, b_{12} = 0.01$
主镜晃动模型	$E_0 = -3.46, Q_E = 32.02$

由于单个测量误差易受不确定因素干扰,因此采取均方根的形式,定义测量的修正精度为:

$$\begin{cases} \sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (A'_i - A_i)^2}{n-1}} \\ \sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (E'_i - E_i)^2}{n-1}} \\ \sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_E^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: n 为样本恒星数,本实验中 $n=32$ 。 (A'_i, E'_i) 为经模型修正的恒星测量位置, (A_i, E_i) 为经过蒙气差修正的恒星理论位置, σ_A 为该模型的方位测量残差, σ_E 为该模型的俯仰测量残差, σ 为模型的最终测量残差。利用传统三轴误差模型、球谐函数模型、主镜晃动模型分别对测量值进行计算,计算后3种误差模型的参数分别用式(8)计算各模型的修正后残差如表4所示。

表 4 3种模型修正后残差对比

Tab. 4 Contrast of amended errors of three models (")

	方位残差	俯仰残差	修正误差
	σ_A	σ_E	σ
经典三轴误差	7.4	20.6	21.9
球谐函数模型	2.4	2.9	3.8
主镜晃动模型	1.9	2.3	2.9

从表4中可以看出,利用主镜晃动模型进行指向误差修正大幅度提高了俯仰的测量精度,一定程度提高了方位的测量精度。主要是因为主镜晃动随不同仰角重力支撑点的变化而产生晃动量,因此体现在俯仰误差量的增大。传统的三轴误差模型没有俯仰测量误差随俯仰角度变化的修正项,因此拟合出的修正曲线无法对其进行修正。

参考文献:

- [1] 韩光宇,曹立华,高云国,等. 1 m 望远镜主反射镜的支撑和装配[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1922-1928.
HAN G Y, CAO L H, GAO Y G. Supporting and assembling for primary mirrors of 1m aperture telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1922-1928. (in Chinese)
- [2] 金光,王家骥,倪伟. 利用坐标变换推导经纬仪三轴

而球谐误差模型虽然修正精度较高,但是参数项太多,各项不存在其明确的物理意义,在多次标校试验中其各参数项的重复性不好。为验证所提出的主镜晃动修正模型的重复性,在设备调平状态未改变条件下,分别于1月20日、23日、24日随机选取32颗恒星进行拍星,计算系统的各误差项,结果如表5所示。

表 5 主镜晃动模型 3 次标星解算结果

Tab. 5 Results of star calibration using main mirror shaky models (")

	定向差	横轴差	照准差	零位差	主镜晃 动 Q_A	主镜晃 动 Q_E
	20 日	2.27	25.1	15.74	-3.46	15.36
23 日	3.14	23.7	13.77	-5.30	18.63	30.55
24 日	2.78	26.2	12.76	-1.78	17.55	30.98

5 结 论

在大口径光测设备进行指向误差修正时,由于主镜的晃动的存在其误差模型与以往的光测设备存在差别,因此经典的三轴误差修正精度并不高,本文在分析了主镜的支撑方式和力学模型后,提出了基于主镜晃动的修正算法。在外场利用恒星在修正蒙气差的基础上对光测设备进行标校实验,分别应用传统三轴误差模型,球谐函数模型和本文提出的模型进行了误差修正,并对修正精度进行了对比。结果显示:主镜晃动修正算法将设备指向精度从 $15.4''$ 提高到了 $2.5''$,且各误差分量物理意义明确、重复性好,对大口径设备的误差修正具有普遍的指导意义。

误差[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 89-94.

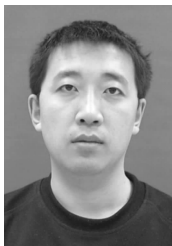
JIN G, WANG J Q, NI W. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 89-94. (in Chinese)

[3] 张文豹. 球谐函数法修正水平式经纬仪指向误差[J]. 光机电信息, 2010, 27(9): 48-51.

ZHANG W B. Correction of the pointing error for the level mounting theodolite by the spherical function method [J]. *OME Ifomation*, 2010, 27(9):

- 48-51. (in Chinese)
- [4] 刘廷霞,王伟国,李博,等. 水平式经纬仪静态指向修正模型的比较与改进[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1374-1380.
LIU T X, WANG W G, LI B, *et al.*. Comparison and improvement of correction models for static pointing of level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1374-1380. (in Chinese)
- [5] 张捍卫,许厚泽,王爱生. 天文经纬度和天文方位角测定的基本原理[J]. 测绘科学, 2006, 31(4): 157-160.
ZHANG H W, XU H Z, WANG A S. The measurement principle of astronomical long latitude and azimuth [J]. *Science of Surveying and Mapping.*, 2006, 31(4): 157-160. (in Chinese)
- [6] 王海涌,林浩宁,周文睿. 星光观测蒙气差补偿技术[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 157-160.
WANG H Y, LIN H N, ZHOU W R. Technology of atmospheric refraction compensation in starlight observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101002. (in Chinese)
- [7] 高策,乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 846-851.
GAO C, QIAO Y F. Real time error correction method for photoelectrical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 846-851. (in Chinese)
- [8] 李慧,沈湘衡. 光电经纬仪轴系误差仿真计算的新方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 334-337.
LI H, SHEN X H. New shafting error simulating method of photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 334-337. (in Chinese)
- [9] 王涛,唐杰,宋立维. 车载光电经纬仪的测量误差修正[J]. 红外与激光工程, 2012, 42(5): 1335-1338.
WANG T, TANG J, SONG L W. Correction of the measuring error of vehicular photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 42(5): 1335-1338. (in Chinese)
- [10] 杜俊峰,张林波,任戈. 1.3 m 主镜的支承设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1483-1488.
DU J F, ZHANG L B, REN G. Mounting system design for 1.3 m primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1483-1488. (in Chinese)
- [11] 薛向尧,高云国,韩光宇,等. 水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1524-1530.
XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1524-1530. (in Chinese)

作者简介:



孙航(1979—),男,吉林长春人,副研究员,2002年、2005年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电图像处理、伺服控制以及经纬仪电子学总体设计等方面的研究。E-mail: ci-ompsunh@163.com