

文章编号 1004-924X(2024)20-3017-09

大型望远镜指向精度的影响因素及 综合修正模型研究

陈宝刚^{1,2}, 夏豪杰^{1*}, 张进¹, 王建立², 曹玉岩²

(1. 合肥工业大学, 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 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: 指向精度是衡量望远镜系统性能的一项重要指标。随着望远镜口径、结构尺寸及重量的不断增大, 维持和提高指向精度的难度也越来越大。因此, 需要对大型望远镜各项误差影响因素进行理论分析, 建立数学模型, 修正指向误差。本文从大口径望远镜自身结构特点出发, 分析了望远镜指向精度的各种影响因素, 提出了一种建立望远镜指向模型来修正望远镜指向精度的方法。本文提出的修正模型物理意义明确, 各参数相关性小。采用本文提出的模型对某大型望远镜指向精度进行修正, 方位指向精度均方根误差修正前为 20.6", 修正后为 4.1", 俯仰指向精度均方根误差修正前为 5.1", 修正后为 2.8", 实验结果表明采用本文提出的模型, 能够有效修正望远镜的系统误差, 提高指向精度。

关键词: 大口径望远镜; 指向精度; 恒星标校; 误差修正

中图分类号: TH703; TH706 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243220.3017

Research on factors influencing the pointing accuracy of large telescopes and the correction model

CHEN Baogang^{1,2}, XIA Haojie^{1*}, ZHANG Jin¹, WANG Jianli², CAO Yuyan²

(1. Hefei University of technology, College of Instrument Science and Optoelectronic Engineering,
Hefei 230009, China;

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

* Corresponding author, E-mail: hjxia@hfut.edu.cn

Abstract: Pointing accuracy is an important index to measure the performance of a telescope system. With the increasing of the aperture, structure size and weight of the telescope, it is more and more difficult to maintain and improve the pointing accuracy. Therefore, it is necessary to make a theoretical analysis of the factors affecting the errors of large telescopes, establish a mathematical model, and correct the pointing errors. In this paper, based on the structural characteristics of large aperture telescope, various factors affecting the pointing accuracy of the telescope were analyzed, and a method of setting up a pointing model to correct the pointing accuracy of the telescope was proposed. The modified model proposed in this paper had clear physical meaning and little correlation of parameters. The model proposed in this paper was used

收稿日期: 2024-05-06; 修订日期: 2024-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 12303084); 吉林省自然科学基金 (No. 20240101309JC)

to correct the pointing accuracy of a large telescope, and the root-mean-square error of the azimuth pointing accuracy was 20.6 " before correction and 4.1" after correction, and the root-mean-square error of the elevation pointing accuracy was 5.1 " before correction and 2.8" after correction. Experimental results show that by using the model proposed in this paper, It can effectively correct the systematic errors of the telescope and improve the pointing accuracy.

Key words: large aperture telescope; pointing accuracy; star calibration; error correction

1 引 言

随着空间科学与天文观测技术的发展,对光学望远镜口径的需求不断增大。目前世界上在建的光学望远镜口径已达 39 m(欧洲大望远镜),我国也在规划建设 10 m 量级的望远镜。随着望远镜口径的不断增大,虽然采用桁架式结构和轻质材料,各结构件重量仍越来越大。结构的有限刚度及加工装配误差对指向精度的影响也愈加明显^[1],通过提高各组件加工装配精度来保证系统精度的传统技术手段已不再是最优方案,因此需要研究保障指向精度的新方法。

在特定时刻 t , 地球上恒星位置 φ 是已知的, 因此特定时刻的精确恒星位置可以作为测量望远镜指向精度的真值。星体标校法就是以恒星位置作为真值, 测量指向误差, 并建立模型进行修正的方法。指向误差模型主要有三种。一种是球谐函数模型^[2], 根据指向误差测量数据样本进行纯数值分析, 再根据地球上测量误差进行拟合, 从而获得模型。该方法较为直观, 模型内符合精度较高, 但参数相关性较大, 模型稳定性差, 各参数没有明确的物理意义。第二种是机架模型^[3], 系澳大利亚 Stromlo 人造卫星激光观测站通过对各项误差源及望远镜指向的基本参数进行回归分析, 同时增加经验项对未考虑到的误差进行误差补偿, 得到的指向误差修正模型。该模型相关性稍次, 稳定性较好。第三种是单项差修正模型^[4], 其建立在分析指向误差的各项误差源以及影响关系的基础上。该模型各参数具有明确的物理意义, 稳定性最好, 求解过程收敛快, 但是对各类误差源的准确判断、识别和分析有较高的要求。

中国科学院长春光机所、光电所、西安光机所等靶场光学设备研制单位对经纬仪利用恒星

标校技术提高测量精度^[5-6], 紫金山天文台、云南天文台及上海天文台等单位对激光测距望远镜利用各种模型进行指向精度修正研究^[7-8], 取得很好的效果, 但对大口径望远镜指向精度模型各误差源影响规律及误差修正效果的研究较少。

本文针对大口径望远镜系统结构特点, 对指向精度误差来源及影响规律进行详细分析, 建立综合修正模型, 对误差进行修正。对编码器测角误差提前进行检测并修正, 其他未知参数可通过观测自然星体标校法获取。使用该综合修正模型对某大型望远镜进行标校试验, 该方法能够有效提高大型望远镜的指向精度。

2 指向精度影响因素分析

自望远镜被发明至 20 世纪中叶的三百多年中, 天文望远镜普遍采用赤道式结构, 能够简单而有效地对天体进行跟踪观测。随着计算机控制技术的不断发展, 同时综合考虑重量、体积和成本等因素, 20 世纪 70 年代以后建造的大型望远镜几乎无一例外地都采用地平式结构, 如图 1 所示。望远镜镜筒在跟踪架的带动下可以指向空间任意位置。镜筒包括主镜室组件、次镜组件、环梁、桁架结构及四通等^[9], 组成望远镜的视轴。跟踪架包括方位轴系和俯仰轴系。理论上, 方位轴垂直于大地水平面; 俯仰轴安装在垂直轴上且与之正交, 可以在垂直于方位轴的平面内全向旋转。望远镜视轴安装在俯仰轴上且与之正交, 可在垂直于俯仰轴的平面内上下转动。通过精确控制方位轴及俯仰轴的旋转角度, 即可使视轴精确指向空天目标, 从而对目标进行高分辨率观测或轨道测量。指向精度是衡量上述望远镜系统性能的一项重要指标^[10]。

对一台望远镜而言, 既存在加工装调造成的

系统误差,又存在各种因素影响造成的随机误差。这些误差导致望远镜输出的指向位置与空间目标的理论位置之间存在偏差,表现为目标不能成像在视场中央,即指向误差^[11-12]。

影响地平式望远镜指向精度的主要因素有:

(1)方位轴误差:方位轴与水平面不垂直,包括调平造成的系统误差和轴系晃动造成的随机误差;

(2)俯仰轴误差:俯仰轴与方位轴不垂直,包括加工装调造成的系统误差和轴系晃动造成的随机误差;

(3)视轴误差:视轴与俯仰轴不垂直,包括加工装调造成的系统误差和其他因素造成的随机误差;

(4)方位轴角度测量误差:方位轴编码器码盘刻划误差、安装偏心、轴系晃动及其他因素造成的绝对测角误差;

(5)俯仰轴角度测量误差:俯仰轴编码器码盘刻划误差、安装偏心、轴系晃动及其他因素造成的绝对测角误差;

(6)镜筒弯沉误差:镜筒在重力作用下产生形变导致光轴随俯仰角变化而产生的误差;

(7)零点误差:包括方位零点误差及俯仰零点误差;

(8)大气折射误差:大气折射修正不准确造成的误差;

(9)其他随机误差:包括风扰动对视轴产生的误差,环境温度及振动影响产生的误差,白天望远镜光照受热不均匀产生的误差,结构受重力变形产生的误差等。

在上述误差项中,三轴误差(方位轴误差、俯仰轴误差及视轴误差)及两轴角度测量误差是影响大型望远镜指向精度的主要因素^[13]。这些误差与加工装配制造工艺密切相关。对于小型望远镜而言,通过严格的检测及质量控制,可将精度控制到角秒量级,但大型望远镜的精度难以完全依靠制造工艺保证,必须额外地进行误差修正。

中小型望远镜零点误差可以通过光管进行检测标定,大型望远镜的两轴零点则一般采用观测北极星等恒星来粗略得到。然而,对星的粗略观测不能消除所有误差,要想获得精确的零点误

差还要采用恒星标定的方法^[14-16]。

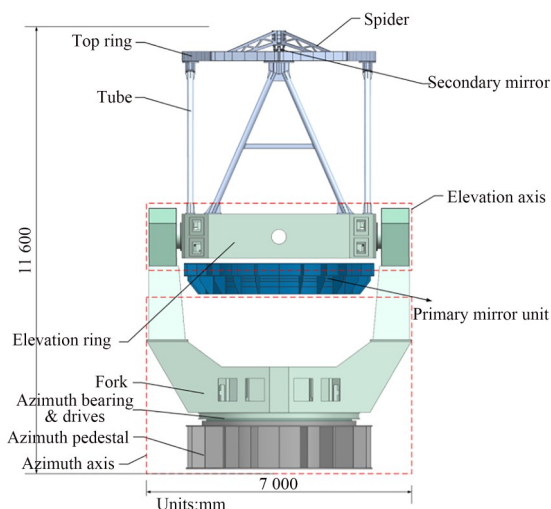


图1 大型望远镜结构形式

Fig. 1 Structural configuration of large telescopes

3 指向精度修正模型

地平式望远镜理想的三轴是方位轴 OZ 垂直于大地水平面,俯仰轴 QQ' 垂直于方位轴,视轴 OA 垂直于俯仰轴。假设实际的三轴方位轴 OZ' 与铅垂线夹角偏差为 I ,俯仰轴 Q_1Q_1' 与 QQ' 夹角偏差为 b ,视轴 OA' 与 OA 夹角偏差为 c ,如图2所示。

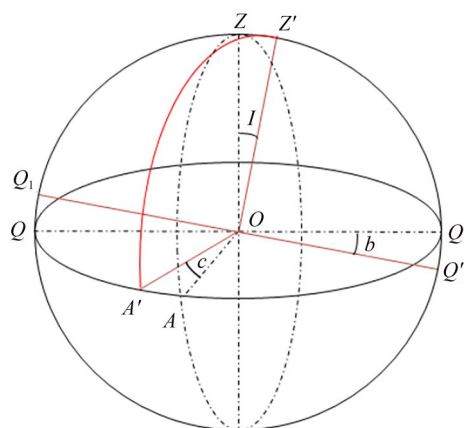


图2 三轴误差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-axis error

3.1 视轴误差对指向的影响

如图3所示,假设望远镜的视轴不垂直于俯

仰轴的夹角为 c 。当没有视轴误差时,随着俯仰角的增大,视轴 OA 所画的大圆为弧 AZ ;有视轴误差 c 时,视轴变为 OA' ,俯仰角增大时,视轴 OA' 所画的大圆为弧 $A'N$ 。

当观测 M 点时,俯仰角为 $E(\angle AOM)$,指向位置为 N ,方位轴还需转过 $\angle NZM$ 角才能指向点 M ,故 $\angle NZM$ 即为视轴误差 c 引起的方位角误差,记为 $\Delta A_c(\angle AOF)$,为 ZA 所在大圆面和 ZN 所在大圆面之间的夹角。

在球面直角三角形 ZMN 中,根据球面三角余切定理^[17]:

$$\sin(ZM) = \tan(NM) \times \cot \angle NZM, \quad (1)$$

其中, $ZM = 90^\circ - E$ 。

则有:

$$\sin(90^\circ - E) = \tan(c) \times \cot \Delta A_c, \quad (2)$$

$$\tan \Delta A_c = \tan(c) \times \sec E. \quad (3)$$

由于 ΔA_c 和 c 都很小,故有 $\tan \Delta A_c \approx \Delta A_c$ 和 $\tan(c) \approx c$ 。

因此,上式可近似为:

$$\Delta A_c = c \times \sec E. \quad (4)$$

这就是单独考虑视轴误差 c 引起的方位角误差,而 c 引起的俯仰角误差可忽略不计。

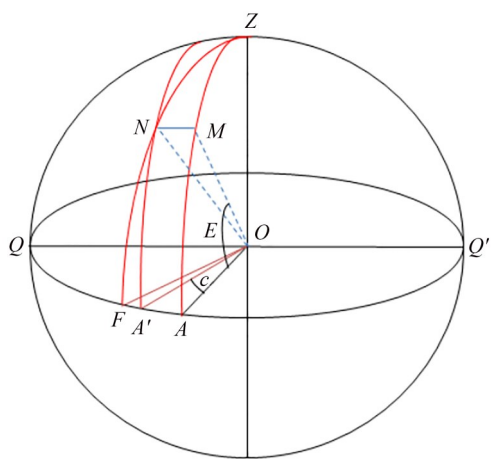


图3 视轴误差引起的指向误差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pointing error caused by parallax error

3.2 俯仰轴误差对指向的影响

如图4所示,假设望远镜的俯仰轴不垂直于方位轴的夹角为 b 。当没有俯仰轴误差时,随着俯仰角的增大,视轴 OA 所画的大圆为弧 AZ ,有

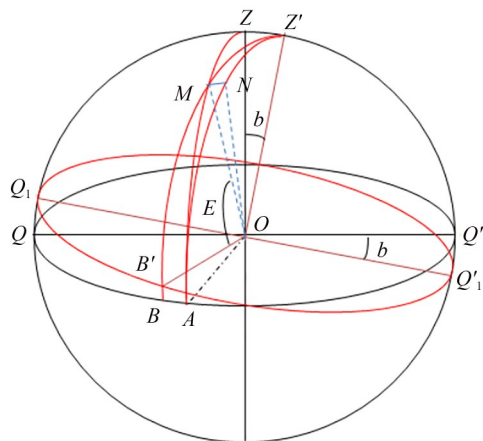


图4 俯仰轴误差引起的指向误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pointing error caused by elevation axis error

俯仰轴误差 b 时,俯仰轴变为 Q_1Q_1' ,而垂直轴变为 OZ' 。视轴 OA 随俯仰角变化所画的大圆在弧 AZ' 上。

当观测 M 点时,俯仰角为 $E = \angle AOM$,如果俯仰轴倾斜误差为 b 时,视轴随俯仰角变化所画的大圆为 AA' ,俯仰角为 E 时,指向点为 N ,方位轴还需转动 $\angle AZ'M$ 才能指向点 M ,故 $\angle AZ'M$ 即为俯仰轴误差 b 造成的方位角误差,记为 $\Delta A_b(\angle AOB')$,为 $Z'A$ 所在大圆面和 $Z'B'$ 所在大圆面之间的夹角。

在球面三角形 MZZ' 中,根据球面三角余切定理:

$$\sin(ZZ') = \tan(ZM) \times \cot \angle ZZ'M. \quad (5)$$

由于 $\angle MZZ' = 90^\circ$, $\angle AZ'Z = 90^\circ$,而 $\angle AZ'B' = \Delta A_b$,则 $\angle ZZ'M = 90^\circ - \Delta A_b$,由于 $\widehat{ZZ'} = \angle ZOZ' = b$, $\widehat{ZM} = 90^\circ - E$ 。

则有:

$$\sin(b) = \tan(90^\circ - E) \times \cot(90^\circ - \Delta A_b), \quad (6)$$

$$\tan(\Delta A_b) = \sin(b) \times \tan(E). \quad (7)$$

由于 ΔA_b 和 b 都很小,上式可近似为:

$$\Delta A_b = b \times \tan(E), \quad (8)$$

其中: ΔA_b 表示单独考虑俯仰轴误差 b 引起的方位角误差,而 b 引起的俯仰角误差可忽略不计。

3.3 方位轴误差对指向的影响

如图5所示, OZ 为铅垂线, OH 为实际垂直轴,则 $\angle HOZ = I$, OB 为垂直轴倾斜方向,其方

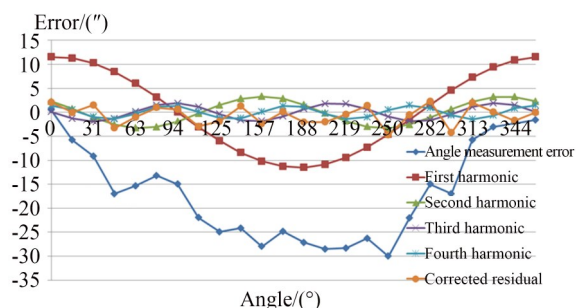


图 6 方位测角误差各级谐波及修正后对比

Fig. 6 Comparison of harmonics at all levels of azimuth angle measurement error and correction

3.5 镜筒弯沉对指向的影响

大型望远镜镜筒光学元件及支撑件结构尺寸大、重量重,由于结构的刚度有限及受重力场影响,望远镜光轴会随着俯仰角变化,使目标不能成像在视场光轴上,产生一个偏差;该偏差随着俯仰角降低迅速增大。对于中小型望远镜,可以在室内检测标校镜筒弯沉带来的偏差,但对于大型望远镜,只能通过外场测量恒星来进行标校。镜筒受径向力而产生光轴偏转,因此偏转误差与俯仰角余弦成正比。

$$\Delta E_d = d \times \cos E, \quad (20)$$

其中: ΔE_d 是镜筒弯沉误差对俯仰指向的误差, d 是镜筒弯沉误差, E 是俯仰角。

镜筒是回转对称结构,理论上,其弯沉只对俯仰指向产生影响;实际上,结构加工装配误差也会产生方位指向偏转。在工程中的外场恒星标校时,镜筒弯沉对方位指向的影响看作视轴误差的一部分,即视轴误差中已包含了这一分量。

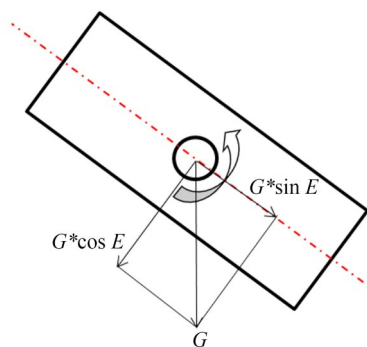


图 7 镜筒弯沉受重力场影响示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the influence of gravity field on the deflection of the mirror tube

3.6 大气折射对指向的影响

大气密度及折射率随海拔增加而非均匀变化,造成光线在大气中非直线传播,导致观测目标位置比实际位置偏高,如图 8 所示,这种偏差叫蒙气差^[19]。蒙气差受高度、温湿度及气压等因素影响。在观测目标仰角较高时,通过实测近地面的温度、湿度、压强等参数可较高精度校正大气蒙气差的影响。仰角较低时,近地面大气影响较为复杂,校正精度较差。因此,选择地平高度角在 20°以上的恒星作为标校目标。

大气折射引起俯仰指向误差的经验公式为:

$$\Delta E_r = \frac{60.2 \left(\frac{P}{760} - \frac{T}{273 + T} \right)}{\tan E}, \quad (21)$$

其中: P 为测量瞬时大气压, T 为测量瞬时摄氏温度, E 为俯仰角。

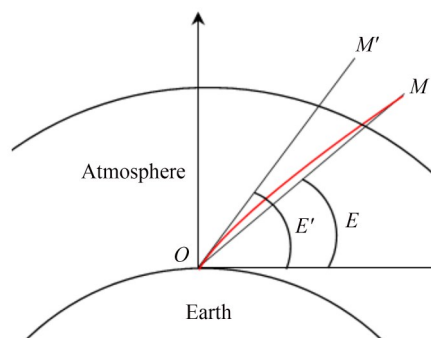


图 8 大气折射引起的指向误差示意图

Fig. 8 Schematic diagram of pointing error caused by atmospheric refraction

3.7 误差的综合影响

从上面分析中,看出轴系误差的系统分量 c , b , I 中,仅有方位轴倾斜误差 I 影响俯仰指向,而所有项均影响方位指向;编码器误差对方位俯仰都产生影响,考虑到俯仰转动范围较小,本文只对方位轴的编码器误差进行修正;镜筒弯沉以及大气折射只对俯仰指向产生影响。设 ΔE 为各项误差对俯仰角的影响, ΔA 为对方位角的影响。综合以上分析,可得出:

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_0 + b \tan E + c \sec E + \\ &I \sin A_H \cos A \tan E - \\ &I \cos A_H \sin A \tan E + f(\theta), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\Delta E = E_0 + I \cos A_H \cos A + I \sin A_H \sin A + d \cos E + \Delta E_r \quad (23)$$

其中: A_0 为方位零点误差, E_0 为俯仰零点误差。

应当指出:望远镜的上述各项误差实际上是紧密相关的。然而,在逐项分析各项误差影响时,忽略了其他误差项与之可能存在的耦合。因此,各项误差量级控制越小,分析结果越接近真实情况,误差修正的精度也越高。

4 实验与结果

对于指向修正模型,某些参数如果能提前检测得到,即可直接使用。如编码器测角误差,未知参数可以通过观测自然星体标校的方法来获得。星体标校法利用恒星理论位置的确定性,通过已知星体的赤经、赤纬、测站经纬度、绝对时间、以及大气折射差的情况下,精确计算获得星体的理论方位角和俯仰角(A_L, E_L),控制望远镜指向并实时跟踪恒星。待望远镜稳定跟踪后,读取方位及俯仰轴的编码器数据(A_1, E_1),计算恒星中心与视场中光轴的偏移量(δ_A, δ_E),则方位及俯仰指向误差为(θ_A, θ_E)。其中:

$$\theta_A = \delta_A + (A_1 - A_L) \times \cos(E_1), \quad (24)$$

$$\theta_E = \delta_E + E_1 - E_L. \quad (25)$$

本文使用某大型望远镜进行实验,在仰角大于 20° 的天球上选取均匀分布的30颗恒星进行标校。通过观测30颗恒星即可得到60个非线性方程组,采用最小二乘回归分析的方法即可得到修正模型的各个未知参数^[20],各模型系数的计算结果见表1。

望远镜再对空间目标进行观测时加入修正模型计算修正量 $\Delta A, \Delta E$,即可以改善望远镜的

表1 模型系数

Tab. 1 Model coefficients

系数	值/(")
A_0	-67
E_0	12
b	60.5
c	13.8
$I \sin A_H$	-20.4
$I \cos A_H$	2.5
d	-28

指向精度。方位指向精度均方根误差修正前为 $20.6''$,修正后为 $4.1''$,如图9所示;俯仰指向精度均方根误差修正前为 $5.1''$,修正后为 $2.8''$,如图10所示。

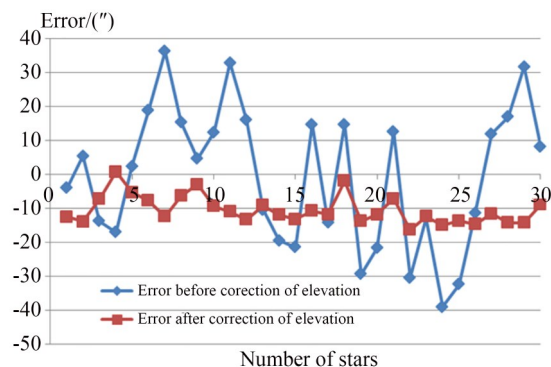


图9 方位指向误差修正前后对比

Fig. 9 Comparison of azimuth pointing error before and after correction

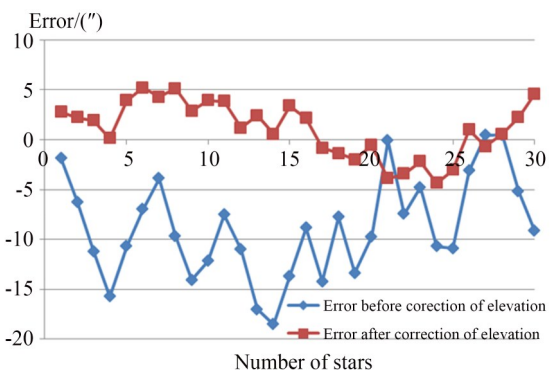


图10 俯仰指向误差修正前后对比

Fig. 10 Comparison of elevation pointing error before and after correction

通过实测结果可以看出,方位指向误差修正效果明显,而俯仰指向误差修正效果略显逊色,主要原因是方位是 360° 全方位拍星标校,而俯仰是在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 范围内拍星标校,范围较小,且俯仰轴系本身精度也较高,故修正效果不如方位明显。

5 结 论

本文从大型望远镜自身的结构特点出发,详细分析了影响指向精度的各种因素,充分考虑三轴误差、编码器测角精度、镜筒光轴弯沉以及大

气折射影响,建立指向误差修正模型。模型各参数相关性小,物理意义明确,能够明确反映大型望远镜本身的系统误差。

通过某大口径望远镜观测恒星进行标校,得到修正模型的各个参数,方位指向精度均方根误差由修正前的 20.6" 提高到 4.1", 俯仰指向精度均方根误差由修正前的 5.1" 提高到 2.8", 验证了

指向误差模型的可行性,通过软件修正的方法能够大幅提高大型望远镜的指向精度。

指向精度能够通过软件进行有效修正的前提是系统随机误差要小,因此保证系统精度不能完全依靠误差修正技术,还需要严格控制望远镜各环节的加工装调误差,尽量减小各误差量级,抑制各随机误差。

参考文献:

- [1] BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. New York, NY: Springer New York, 2003.
- [2] 李振伟, 杨文波, 张楠. 水平式光电望远镜静态指向误差的修正 [J]. 中国光学, 2015, 8(2): 263-269.
LI Z W, YANG W B, ZHANG N. Static pointing error of level mounting optoelectronic telescope [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 263-269. (in Chinese)
- [3] LUCK M J. Mount model stability [C]. In: *Proceedings of 14th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, Spain, 2004.
- [4] 张晓祥, 吴连大. 望远镜静态指向模型的基本参数 [J]. 天文学报, 2001, 42(2): 198-205.
ZHANG X X, WU L D. The basic parameters of telescope static point model [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2001, 42(2): 198-205. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 翟术然, 张忠萍, 张海峰, 等. 白天卫星激光测距望远镜指向误差修正方法研究 [J]. 激光与红外, 2016, 46(7): 781-785.
ZHAI SH R, ZHANG Z P, ZHANG H F, et al. Research on telescope pointing error correction of SLR in the daytime [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 781-785. (in Chinese)
- [8] 朱庆生, 陈伟民, 吴金虎. 卫星激光测距望远镜的指向改正 [J]. 天文研究与技术, 2011, 8(3): 268-271.
ZHU Q S, CHEN W M, WU J H. The correction of pointing of a 1m SLR telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2011, 8(3): 268-271. (in Chinese)
- [9] 曹玉岩, 王建立, 陈涛, 等. 基于 Hexapod 平台的地基大型光学望远镜失调误差主动补偿 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2452-2465.
CAO Y Y, WANG J L, CHEN T, et al. Active compensation of aberration for large ground-based telescope based on Hexapod platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(11): 2452-2465. (in Chinese)
- [10] 张楨君, 王建成, 程向明, 等. 多功能天文经纬仪光轴指向变化实测与修正 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(11): 2321-2329.
ZHANG Z J, WANG J C, CHENG X M, et al. Measurement and calibration of optical axis changes for multi-function astronomical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(11): 2321-2329. (in Chinese)
- [11] 徐爱明, 黄根旺. 舰载天文经纬仪轴系误差分析及星校技术研究 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37(1): 98-101, 111.
XU A M, HUANG G W. Research on axial error and calibration with star for ship-borne celestial theodolite [J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(1): 98-101, 111. (in Chinese)
- [12] 谢彦民, 赵永丽. 卫星激光测距望远镜系统指向误差分析及修正方法研究 [J]. 光学与光电技术, 2010, 8(3): 89-92.
XIE Y M, ZHAO Y L. Telescope pointing error analysis and correction method research of satellite laser ranging [J]. *Optics & Optoelectronic Technol-*

- ogy, 2010, 8(3): 89-92. (in Chinese)
- [13] 王志臣, 王志, 赵勇志. 赤道式望远镜指向精度分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(1): 9-11.
WANG Z C, WANG Z, ZHAO Y Z. Analysis of pointing precision for equatorial telescope[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 34(1): 9-11. (in Chinese)
- [14] 刘荣辉, 刘辉, 穆恒宇, 等. 地平式太阳望远镜库德焦面指向跟踪误差建模研究[J]. 天文研究与技术, 2022, 19(6): 588-595.
LIU R H, LIU H, MU H Y, *et al.* Study on pointing and tracking model of coude focal plane of altazimuth solar telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2022, 19(6): 588-595. (in Chinese)
- [15] 贾建援, 柴伟, 于大林, 等. 方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1500-1508.
JIA J Y, CHAI W, YU D L, *et al.* Error parameters identification and pointing accuracy analysis of an azimuth-elevation turntable[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(7): 1500-1508. (in Chinese)
- [16] 张玉碟, 柳万胜, 罗一涵, 等. 一种三轴光电跟踪系统指向误差修正的方法[J]. 光电工程, 2014, 41(6): 51-55, 74.
ZHANG Y D, LIU W S, LUO Y H, *et al.* Pointing error modification method for three-axis optoelectronic tracking system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(6): 51-55, 74. (in Chinese)
- [17] 张楚宾. 球面三角学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1959.
ZHANG C B. *Spherics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1959. (in Chinese)
- [18] 苏燕芹, 张景旭, 陈宝刚, 等. 谐波分析方法在提高精密转台回转精度中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 274-278.
SU Y Q, ZHANG J X, CHEN B G, *et al.* Harmonic analysis application in accuracy improvement of precise turntable[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 274-278. (in Chinese)
- [19] 茅永兴, 张同双, 朱伟康, 等. 船载星敏感器测星数据蒙气差实时修正方法[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(3): 50-53.
MAO Y X, ZHANG T S, ZHU W K, *et al.* A real-time atmospheric refraction correction method for measurement data of ship-borne star sensors [J]. *Journal of Spacecraft TT& C Technology*, 2012, 31(3): 50-53. (in Chinese)
- [20] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 7版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. 7th ed. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)

作者简介:



陈宝刚(1982—),男,河北衡水人,副研究员,硕士生导师,博士研究生,分别于2005年、2008年于合肥工业大学获得学士、硕士学位,主要从事大口径光学望远镜装调检测与精度保证等方面的研究工作。E-mail: cbg0813@163.com

通讯作者:



夏豪杰(1979—),男,安徽萧县人,博士,教授,博士生导师。2006年博士毕业任教于合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,主要从事光电精密测量技术、微纳测控系统、仪器精度理论、精密仪器设计等领域的研究工作。E-mail: hjxia@hfut.edu.cn



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,2002年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。主要从事的研究领域包括空间目标光电探测技术、地基大口径望远镜总体技术等。科技部中青年创新领军人才、国家“万人计划”科技创新人才。Email: wangjianli@ciomp.ac.cn