

文章编号 1004-924X(2011)07-1524-07

水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术

薛向尧^{1,2}, 高云国^{1*}, 韩光宇¹, 邵帅¹, 乔健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 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为修正水平式经纬仪的指向误差, 提出了一种针对视轴指向的统一补偿模型。根据水平式经纬仪的光机结构, 建立了照准坐标系和地平坐标系; 通过两坐标系的几何关系得到目标在地平坐标系下的坐标方程, 并对该方程进行全微分, 得到地平坐标误差与指向误差的关系式。针对设备主要误差源之一(3轴误差)进行5次线性变换, 推导出目标在地平坐标系中关于3轴误差的统一地平坐标误差方程; 结合全微分所得关系式, 求出指向误差关于3轴误差的统一补偿模型, 将该模型与编码器误差模型线性叠加后获得水平式经纬仪指向误差的统一补偿模型。最后, 对全天分布较为均匀的46颗恒星进行观测, 得到了观测误差的实验数据, 利用最小二乘法对该模型进行拟合, 得到模型中各待定系数。实验结果表明, 采用该模型进行修正后, 设备总指向精度由修正前的40.1提高到3.4, 满足系统总体提出的精度要求。

关键词: 水平式经纬仪; 坐标变换; 指向误差

中图分类号: V556 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20111907.1524

Total correction method of pointing error for level mounting theodolite

XUE Xiang-yao^{1,2}, GAO Yun-guo^{1*}, HAN Guang-yu¹, SHAO Shuai¹, QIAO Jian¹

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

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

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

Abstract: A total pointing error correction model was built to correct the pointing errors of a level mounting theodolite. Based on the opto-mechanical structure of the level mounting theodolite, a geodetic coordinate system and a pointing coordinate system were built. Then, according to the location relationship between the two coordinate systems, the target coordinate in the geodetic coordinate system was expressed. After a total differential for the target coordinate, an equation was obtained to describe the relation between target coordinate error and longitude & latitude errors of the level mounting theodolite. By considering the three shafting errors to be the major ones of the system, 5 linear coordinate transformations were performed to deduce a total coordinate error equation for three shafting errors. Combined with the total differential equation, a unitive compensation model of pointing error on

收稿日期: 2010-08-16; 修订日期: 2010-09-13.

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)

the three shafting errors was obtained. By linear superposition with the pointing error caused by encoder errors, the total pointing error of the level mounting theodolite was gained. Finally, 46 stars scattered in sky space uniformly were selected to be measured, and the discrete values of the 46 stars pointing errors were gained in longitude and latitude dimensions, respectively. After least square fitting, the undetermined coefficients in the total pointing error model were obtained. Experimental results indicate that the total pointing accuracy can rise from 40.1 to 3.4 after correction, which meets the accuracy request in a general design.

Key words: level mounting theodolite; coordinate transformation; pointing error

1 引言

水平式经纬仪由于对高仰角的运动目标具有很好的跟踪测量性能而被广泛地用于测量人造地球卫星的飞行轨迹,其测量目标与设备的距离一般在数百公里以上,因此,要求水平式经纬仪具有非常高的指向精度。

目前修正经纬仪指向误差的方法主要有基本参数法、球谐函数法和坐标变换法。其中基本参数法模型是基于设备轴系误差、编码器误差的物理意义而建立的,因此模型比较稳定,但基本参数模型为一阶模型,其修正精度不高。球谐函数法是从数学的角度来描述经纬仪的指向误差,该方法精度高,但模型参数较多且不具物理意义,模型稳定性差^[1-2]。坐标变换法可得到经纬仪完整的误差模型,由于该模型过于复杂,目前普遍采用蒙特卡洛法来对各误差因素进行分析、分配和综合,而不能得到经纬仪指向误差的补偿模型^[3-5]。

本文在建立水平式经纬仪照准坐标系和地平坐标系的基础上,根据设备的光机结构及工作特性,将3轴误差统一起来考虑,从照准坐标系到地平坐标系依次进行5次线性变换,经整理最终得视轴指向关于3轴误差的统一误差模型。将该模型与编码器误差模型线性叠加后最终得到水平式经纬仪指向误差的统一补偿模型,观星试验表明,该模型能够有效修正水平式经纬仪指向误差。

2 坐标变换理论概述

分析经纬仪测量误差通常采用直角坐标系,一般通过指定原点和 x, y, z 轴的方向来定义一个直角坐标系。为此,定义3个单位矢量以指明

相互垂直的3个轴的方向,任意一个矢量都可以用3个单位矢量的线性组合来表示。3个单位矢量的集合称为坐标基。经坐标变换后矢量的大小和方向均保持不变,仍表示同一物理量。

三维坐标变换的变换矩阵可表示为:

$$M = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

该矩阵可产生比例、错切和旋转变换,在分析经纬仪指向误差中,主要是用到该矩阵的旋转变换,其中3种主要的旋转变换为:

(1) 图形绕 x 轴旋转

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos & -\sin \\ 0 & \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \cos y - \sin z \\ \sin y + \cos z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

此时,也可认为是坐标系相对图形绕 x 轴旋转之后的结果。

(2) 图形绕 y 轴旋转

$$\begin{bmatrix} \cos & 0 & \sin \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin & 0 & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos x + \sin z \\ y \\ -\sin x + \cos z \end{bmatrix},$$

此时,也可认为是坐标系相对图形绕 y 轴旋转之后的结果。

(3) 图形绕 z 轴旋转

$$\begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos x - \sin y \\ \sin x + \cos y \\ z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

此时,也可认为是坐标系相对图形绕 z 轴旋转之后的结果。

更一般的情况,图形绕任意轴(方向余弦为 $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$) 旋转,其变换矩阵为^[6]:

$$M(\) = \begin{bmatrix} \cos + ^2(1- \cos) & (1- \cos)- v\sin & v(1- \cos)+ \sin \\ (1- \cos)+ v\sin & \cos + ^2(1- \cos) & v(1- \cos)- \sin \\ v(1- \cos)- \sin & v(1- \cos)+ \sin & \cos + v^2(1- \cos) \end{bmatrix} . \quad (5)$$

上述坐标变换矩阵均为正交矩阵, 因此给坐标变换带来很大的方便, 不论变换多么复杂, 只要掌握上面的变换规则就可以进行任何所需要的变换。

3 指向误差模型的建立

3.1 坐标系的建立

根据水平式经纬仪的光机结构, 建立地平坐标系和照准坐标系。地平坐标系 (x, y, z) 原点在经轴与纬轴交点上, z 轴与水平面垂直并指向天顶; x 轴指向正北; y 轴与 x 轴、 z 轴形成右手坐标系。照准坐标系 (x', y', z') 与地平坐标系共原点, z' 轴沿视轴轴线, 以视轴指向目标的方向为正向; y' 轴沿纬轴回转轴线, 并在 z' 轴指向天顶时(设备的零位)以 y' 轴指向为正向; x' 轴与 y' 轴、 z' 轴形成右手坐标系, 如图 1 所示。

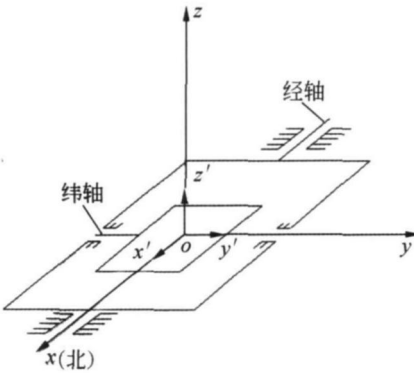


图 1 坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate systems

设备跟踪目标时, 目标、照准坐标系、地平坐标系的位置关系如图 2 所示, 其中 L 表示经角、 B 表示纬角。

3.2 经纬仪三轴误差

当经纬仪跟踪目标时, 设目标与设备的距离为 R , 则目标在照准坐标系 (x', y', z') 中的坐标为

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ R \end{Bmatrix} . \quad (6)$$

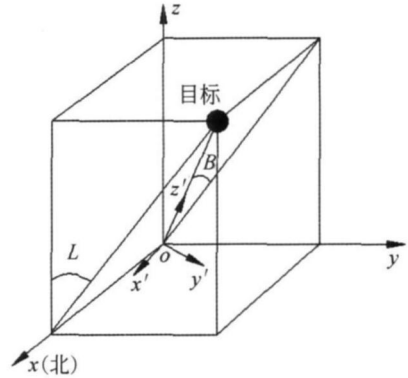


图 2 跟踪状态坐标系示意图

Fig. 2 Coordinate systems when theodolite is on work

由照准坐标系与地平坐标系的几何关系(如图 2 所示)可得目标在地平坐标系 (x, y, z) 下的坐标为

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = R \begin{Bmatrix} \sin B \\ \sin L \cos B \\ \cos L \cos B \end{Bmatrix} , \quad (7)$$

对式(7)前两项进行全微分得

$$\begin{cases} \frac{dx}{R} = \cos B \quad dB \\ \frac{dy}{R} = \cos L \cos B \quad dL - \sin L \sin B \quad dB \end{cases} \quad (8)$$

由此可得

$$\begin{cases} L = (\frac{y}{R} + \sin L \sin B \quad \frac{x}{R \cos B}) / \cos L \cos B \\ B = \frac{x}{R} / \cos B \end{cases} . \quad (9)$$

因此, 求出目标在地平坐标系 (x, y, z) 下的坐标误差 x, y 即可得水平式经纬仪指向误差 L, B 。实际上, 由于存在三轴误差, 当经纬仪指向目标时, 从照准坐标系到地平坐标系的变换过程包括了三轴误差的影响, 必然使目标在地平坐标系下 (x, y, z) 的坐标值产生一定的偏差。根据水平式经纬仪的光机结构可知由照准坐标系到地平坐标系的变换步骤如下:

- (1) 照准坐标系绕 x 轴旋转 c (照准差);
- (2) 照准坐标系绕 y 轴旋转 B ;
- (3) 照准坐标系绕轴 z' 旋转 b (纬轴与经轴不

垂直度);

- (4) 照准坐标系绕轴 x 旋转 L ;
- (5) 照准坐标系绕 oa 轴旋转 v (经轴南北指

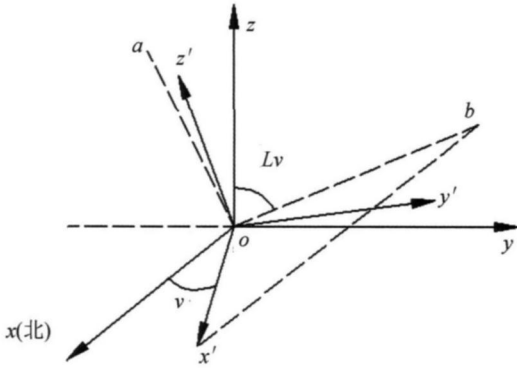


图 3 经轴误差示意图

Fig.3 Sketch map of longitude shaft pointing error

向误差), 如图 3 所示, 其中 ob 为 x 在 yz 面内的投影, oa 垂直于 ob ;
变换矩阵分别为:

$$M_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos c & -\sin c \\ 0 & \sin c & \cos c \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$M_B = \begin{bmatrix} \cos B & 0 & \sin B \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$M_b = \begin{bmatrix} \cos b & -\sin b & 0 \\ \sin b & \cos b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$M_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos L & \sin L \\ 0 & -\sin L & \cos L \end{bmatrix}. \quad (13)$$

$$M_v = \begin{bmatrix} \cos v & \sin L_v \sin v & \cos L_v \sin v \\ -\sin L_v \sin v & \cos^2 L_v (1 - \cos v) + \cos v & \cos L_v \sin L_v (-1 + \cos v) \\ -\cos L_v \sin v & \cos L_v \sin L_v (-1 + \cos v) & 1 - \cos^2 L_v (1 - \cos v) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

则

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = M_v M_L M_b M_B M_c \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

经整理取 x, y 项得

$$\begin{aligned} \frac{x}{R} = & \sin B \cos v \sin b \sin c - \sin L_v \sin v \cos b \sin c \cos L + \cos L_v \sin v \cos b \sin c \sin L + \\ & (\sin L_v \sin v \sin b \cos c - \cos L_v \sin v \sin b \sin c) \\ & \sin L \sin B + \sin L_v \sin v \sin c \sin L \cos B + \\ & \cos L_v \sin v \sin c \cos L \cos B, \end{aligned} \quad (16)$$

即

$$\begin{aligned} \frac{y}{R} = & \sin L \cos B - \sin L_v \sin v \sin b \sin c - (\cos^2 L_v + \cos v - \cos^2 L_v \cos v) \cos b \sin c \cos L + \\ & \sin L_v \cos L_v (\cos v - 1) \cos b \sin c \sin L - \\ & \sin L_v \sin v \cos b \cos c \sin B + \sin b \cos c (\cos^2 L_v + \cos v - \cos^2 L_v \cos v) \cos L \sin B - \\ & \sin b \sin L_v \cos L_v \cos c (\cos v - 1) \sin L \sin B + \\ & \cos c \sin L_v \cos L_v (\cos v - 1) \cos L \cos B \end{aligned} \quad (17)$$

即

$$\frac{x}{R} = \cos v \sin b \sin c - \sin L_v \sin v \cos b \sin c \cos L +$$

$$\begin{aligned} & \cos L_v \sin v \cos b \sin c \sin L + \\ & (\sin L_v \sin v \sin b \cos c - \cos L_v \sin v \sin b \sin c) \\ & \sin L \sin B + \sin L_v \sin v \sin c \sin L \cos B + \\ & \cos L_v \sin v \sin c \cos L \cos B \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{y}{R} = & -\sin L_v \sin v \sin b \sin c - (\cos^2 L_v + \cos v - \cos^2 L_v \cos v) \cos b \sin c \cos L + \sin L_v \cos L_v \\ & (\cos v - 1) \cos b \sin c \sin L - \\ & \sin L_v \sin v \cos b \cos c \sin B + \\ & \sin b \cos c (\cos^2 L_v + \cos v - \cos^2 L_v \cos v) \\ & \cos L \sin B - \sin b \sin L_v \cos L_v \cos c (\cos v - 1) \sin L \sin B + \\ & \cos c \sin L_v \cos L_v (\cos v - 1) \cos L \cos B \end{aligned} \quad (19)$$

将式(18)、(19)代入式(9)得

$$\begin{aligned} L \cos L \cos B = & -\sin L_v \sin v \sin b \sin c - (\cos^2 L_v + \cos v - \cos^2 L_v \cos v) \cos b \sin c \cos L + \\ & \sin L_v \cos L_v (\cos v - 1) \cos b \sin c \sin L - \\ & \sin L_v \sin v \cos b \cos c \sin B + \\ & \sin b \cos c (\cos^2 L_v + \cos v - \cos^2 L_v \cos v) \\ & \cos L \sin B - \sin b \sin L_v \cos L_v \cos c (\cos v - 1) \sin L \sin B + \\ & \cos c \sin L_v \cos L_v (\cos v - 1) \cos L \cos B + \cos v \sin b \sin c \sin L \tan B - \\ & \sin L_v \sin v \cos b \sin c \sin L \cos L \tan B + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cos L_v \sin v \cos b \sin c \sin^2 L \tan B + \\ & (\sin L_v \sin v \sin b \cos c - \cos L_v \sin v \sin b \sin c) \\ & \sin^2 L \sin B \tan B + \sin L_v \sin v \sin c \sin^2 L \sin B + \\ & \cos L_v \sin v \sin c \sin L \cos L \sin B \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B \cos B = & \cos v \sin b \sin c - \sin L_v \sin v \cos b \sin c \\ & \cos L + \cos L_v \sin v \cos b \sin c \sin L + \\ & (\sin L_v \sin v \sin b \cos c - \\ & \cos L_v \sin v \sin b \sin c) \sin L \sin B + \\ & \sin L_v \sin v \sin c \sin L \cos B + \\ & \cos L_v \sin v \sin c \cos L \cos B, \quad (21) \end{aligned}$$

3.3 编码器误差

编码器误差与三轴误差既有区别又有联系, 编码器作为独立的经角、纬角测量和输出单元, 其误差并未与三轴误差相互耦合, 因此可分别求三轴误差、编码器误差, 再将其线性叠加。

参考水平式经纬仪基本参数模型^[1,7], 编码器误差为:

$$L = \frac{1}{r} \sin(L - L_0), \quad (22)$$

$$B = \frac{2}{r} \sin(B - B_0), \quad (23)$$

3.4 指向误差统一补偿模型

将三轴误差与编码器误差线性差叠加后, 经过整理得水平式经纬仪指向误差统一补偿模型:

$$\begin{aligned} L \cos L \cos B = & x_1 + x_2 \cos L + x_3 \sin L + x_4 \sin B + \\ & x_5 \cos L \sin B + x_6 \sin L \sin B + x_7 \cos L \cos B + \\ & x_8 \sin L \tan B + x_9 \sin L \cos L \tan B + \\ & x_{10} \sin^2 L \tan B + x_{11} \sin^2 L \sin B \tan B + \\ & x_{12} \sin^2 L \sin B + x_{13} \sin L \cos L \sin B + \\ & x_{13} \sin L \cos L \cos B + x_{15} \cos^2 L \cos B, \quad (24) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} x_1 = & -\sin L_v \sin v \sin b \sin c \\ x_2 = & -(\cos^2 L_v + \cos v - \cos^2 L_v \cos v) \cos b \sin c \\ x_3 = & \sin L_v \cos L_v (\cos v - 1) \cos b \sin c \\ x_4 = & -\sin L_v \sin v \cos b \cos c \\ x_5 = & \sin b \cos c (\cos^2 L_v + \cos v - \cos^2 L_v \cos v) \\ x_6 = & -\sin b \sin L_v \cos L_v \cos c (\cos v - 1) \\ x_7 = & \cos c \sin L_v \cos L_v (\cos v - 1) \\ x_8 = & \cos v \sin b \sin c \\ x_9 = & -\sin L_v \sin v \cos b \sin c \\ x_{10} = & \cos L_v \sin v \cos b \sin c \\ x_{11} = & (\sin L_v \sin v \sin b \cos c - \cos L_v \sin v \sin b \sin c) \\ x_{12} = & \sin L_v \sin v \sin c \end{aligned}$$

$$x_{13} = \cos L_v \sin v \sin c$$

$$x_{14} = \frac{1}{r} \cos L_0$$

$$x_{15} = -\frac{1}{r} \sin L_0$$

$$y_1 = \cos v \sin b \sin c$$

$$y_2 = -\sin L_v \sin v \cos b \sin c$$

$$y_3 = \cos L_v \sin v \cos b \sin c$$

$$y_4 = (\sin L_v \sin v \sin b \cos c - \cos L_v \sin v \sin b \sin c)$$

$$y_5 = \sin L_v \sin v \sin c$$

$$y_6 = \cos L_v \sin v \sin c$$

$$y_7 = \frac{2}{r} \cos B_0$$

$$y_8 = -\frac{2}{r} \sin B_0$$

4 实验分析

在星表中选取全天分布较为均匀的 46 颗恒星进行观测, 得到恒星的理论位置 L_0, B_0 和观测值 L_{obs}, B_{obs} , 则水平式经纬仪观测 46 颗恒星的测量误差为

$$L = L_0 - L_{obs}, \quad (26)$$

$$B = B_0 - B_{obs}, \quad (27)$$

由观星所得 L, B 对式(24), (25) 进行最小二乘法拟合, 得模型中各待定系数, 见表 1。

表 1 误差修正模型待定系数值

Tab. 1 Results of undetermined coefficients in pointing model

Coefficient of $L \cos L \cos B$	Result/()	Coefficient of $B \cos B$	Result/()
x_1	9.84	y_1	-11.06
x_2	-34.20	y_2	-1.46
x_3	-23.72	y_3	-7.30
x_4	-5.82	y_4	-6.68
x_5	48.23	y_5	-14.29
x_6	-10.93	y_6	15.78
x_7	-38.17	y_7	-12.31
x_8	5.16	y_8	-22.62
x_9	-3.06		
x_{10}	3.28		
x_{11}	-3.52		
x_{12}	-5.64		
x_{13}	30.92		
x_{14}	83.04		
x_{15}	38.52		

在经纬仪的星体观测实验中, 通常以残差(测量值与拟合值之差)的标准差来表示经纬仪的指向精度, 则经纬仪在经角、纬角方向的指向精度与总指向精度的关系为^[8-9]:

$$L = \sqrt{\frac{L_i^2}{n-1}} \quad i = 1, 2, 3 \quad n, \quad (28)$$

$$B = \sqrt{\frac{B_i^2}{n-1}} \quad i = 1, 2, 3 \quad n, \quad (29)$$

$$= \sqrt{L + \frac{2}{B}}. \quad (30)$$

由式(28)~(30)计算得到拟和前后水平式经纬仪在经角、纬角方向的指向精度与总指向精度见表 2。

表 2 修正前后经纬仪指向精度

Tab. 2 Pointing accuracies before/ after corrections

	before correction/()	after correction/()
L	29. 8	2. 5
B	26. 9	2. 3
	40. 1	3. 4

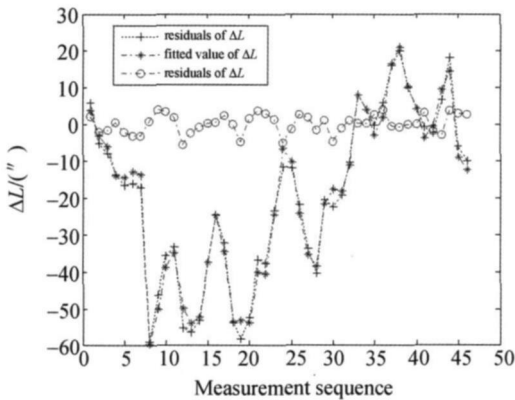


图 4 经角方向指向误差曲线

Fig. 4 Pointing errors in longitude dimension

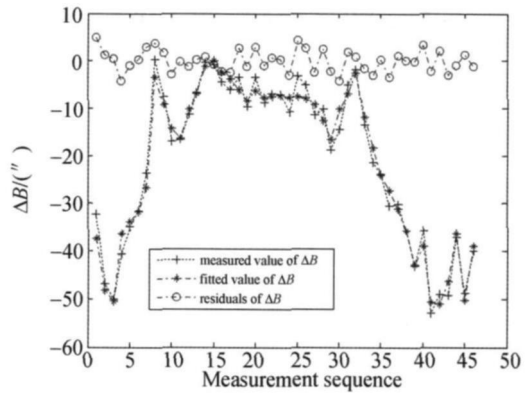


图 5 纬角方向指向误差曲线

Fig. 5 Pointing errors in latitude dimension

图 4、5 直观地表达了修正前后经纬仪指向误差的大小, 由图可看出, 经纬仪指向误差的拟合曲线与观测曲线吻合的较为理想, 说明本文所建误差统一补偿模型能够基本剔除设备的系统误差, 较好地修正了水平式经纬仪指向误差。

5 结 论

针对水平式经纬仪, 本文建立了指向误差的统一补偿模型。相对于基本参数法与球谐函数法, 该模型主要有两个特点: 首先该模型是基于设备轴系误差、编码器误差的物理意义而建立的, 因此该模型稳定性好。其次该模型考虑到了轴系误差的相互耦合作用, 所建模型相对较为完整, 精度相对较高。实验表明, 采用该模型进行修正后, 设备总指向精度可由 40.1 提高到 3.4, 满足系统总体提出的精度要求。

ZHAO J Y, WANG D X, LI W J, et al. . New method of dynamic correction for the system errors of telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 244-247. (in Chinese)

[3] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 105-108.

WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne optoelectric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 105-108. (in Chinese)

参考文献:

[1] 平| 鼎, 张晓祥, 鲁春林. 65 cm 水平式望远镜静态指向模型[J]. *天文学报*, 2006, 47(2): 224-230.

PING Y D, ZHANG X X, LU CH L. Static pointing model of 65 cm level mounting telescope[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2006, 47(2): 224-230. (in Chinese)

[2] 赵金宇, 王德兴, 李文军, 等. 望远镜系统误差动态修正的一种新方法[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(2): 244-247.

- [4] 王晶,高利民,姚俊峰. 机载测量平台中的坐标变换误差分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 389-392.
WANG J, GAO L M, YAO J F. Analysis on coordinate conversion error of airborne measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 389-392. (in Chinese)
- [5] 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): 104-107.
MING M, WANG J L, ZHANG J X, et al. Error budget and analysis for optical system in large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 104-107. (in Chinese)
- [6] 陆震. 高等机械原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
LU ZH. *Senior Mechanical Theory* [M]. Beijing: Publishing House of BUAA, 2001. (in Chinese)
- [7] 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): 199-200.
ZHANG X X, WU L D. The basic parameters of telescope static point model [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2001, 42(2): 199-200. (in Chinese)
- [8] 张世箕. 测量误差及数据处理[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
ZHANG SH J. *Measurement Deviation and Data Analysis* [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [9] 巩岩. 利用恒星标校卫星激光测距经纬仪指向精度[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3): 259-260.
GONG Y. Calibrating the pointing precision of satellite laser ranging theodolite by observing stars [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 259-260. (in Chinese)

作者简介:



薛向尧(1981-), 男, 河北唐山人, 博士研究生, 2005 年于桂林电子科技大学获得硕士学位, 2008 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事光学精密机械结构设计与误差分析方面的研究。
E-mail: xuexiangyao@126.com



韩光宇(1972-), 男, 吉林梨树人, 副研究员, 2004 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事光电仪器设备、精密机械设计的研究。E-mail: hanlamost@163.com

邵 帅(1978-), 女, 吉林长春人, 副研究员, 2009 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光电仪器设备的研究。E-mail: ShaoS192@163.com



乔 健(1980-), 男, 山西忻州人, 副研究员, 2008 年于吉林大学获得博士学位, 主要从事光电仪器设备的设计与研究。E-mail: qiaojj99065@163.com

通讯作者:



高云国(1955-), 男, 山东乳山人, 研究员, 博士生导师, 1982 年于哈尔滨科技大学获得学士学位, 1991 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事光电仪器设备总体设计的研究。E-mail: gaoyg_gjs@163.com.cn