

文章编号 1004-924X(2010)07-1595-10

水平式光电望远镜目标定位误差的预测

韩雪冰^{1,2}, 张景旭¹, 赵金宇¹, 王志¹,
宋云夺¹, 王志臣¹, 赵勇志^{1,2}, 吴小霞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: 为了确定水平式光电望远镜的各主要误差对观测精度的影响, 提高望远镜的指向精度, 对它的目标定位误差进行了分析。针对水平式望远镜的结构特点, 通过分析从被测目标到望远镜相面产生目标定位误差的光、机、电等各种误差因素, 建立了水平式望远镜目标定位测量方程。应用蒙特卡罗法进行误差仿真, 预测出水平式望远镜的目标定位误差, 并对各误差的敏感性进行了分析。选取敏感性高的误差项建立误差补偿模型, 对实拍星体误差进行补偿实验, 结果表明: 补偿后经轴转角误差标准差从 66.4" 降低到 3.3", 下降了 95%; 纬轴转角误差标准差从 49.4" 降低到 5.6", 下降了 89%。所用方法和模型能够对主要误差进行分析和预测, 可为水平式光电望远镜的总体设计提供参考。

关键词: 光电望远镜; 定位误差; 蒙特卡罗法; 误差合成

中图分类号: TH743; V556 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1595

Forecast for orientation errors of alt-alt photoelectric telescope

HAN Xue-bing^{1,2}, ZHANG Jing-xu¹, ZHAO Jin-yu¹, WANG Zhi¹,
SONG Yun-duo¹, WANG Zhi-chen¹, ZHAO Yong-zhi^{1,2}, WU Xiao-xia¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: The orientation errors of an alt-alt photoelectric telescope are analyzed to determine the effects of the main errors of telescope on measuring accuracy and to improve the pointing precision. By analyzing optical, mechanical and electrical errors from a measured target to the telescope picture, the measuring equations of alt-alt telescope are established. Then, by using Monte Carlo method, the orientation errors are forecasted and the sensitivity of errors to pointings is analyzed. Furthermore, an error correction model is built based on the high sensitivity errors. The result of correction test indicates that the standard error of the longitude axis rotation angle has reduced by 95% from 66.4" to 3.3", and that of the latitude axis rotation angle has reduced by 89% from 49.4" to 5.6". These results show that the model and the method not only can analyze and synthesize the main errors, but also can provide a reference for the whole design.

Key words: photoelectric telescope; orientation error; Monte Carlo method; error synthesis

收稿日期: 2009-04-22; 修订日期: 2009-11-18.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA703104)

1 引言

水平式望远镜对高仰角目标的观测具有突出的优势^[1-2],这使它越来越受到人们的关注。与常见的由一根垂直轴和一根水平轴组成的地平式望远镜跟踪架结构形式不同,水平式望远镜是由一根平行于大地水平面的经轴和一根垂直于经轴的纬轴组成^[3-6]。这种结构造成三轴(经轴、纬轴和视轴)对目标测量位置的影响与地平式跟踪架结构不同,因此地平式跟踪架的误差合成与分配方案对水平式结构不再适用。所以,针对水平式望远镜的结构特点,做好误差分析、误差分配和误差综合,并进行目标定位误差的预测,对保证技术指标要求,提高望远镜的指向精度十分重要。

建立目标观测的坐标系,应用齐次坐标变换法推导测量方程,利用蒙特卡罗法进行误差合成的方法,在目标测量设备的误差分析中已得到广泛应用,并取得了很好的效果。该方法具有概念直观,易于编程,仿真程度高等特点。王家骐院士,金光,颜昌翔通过建立从被测目标到地面中心测量站的坐标系,并对其进行线性变换,建立了统一的机载光电跟踪测量设备定位误差测量方程,最后用蒙特卡罗法分析和计算系统系统的目标定位误差^[7-8]。赵金宇针对地平式结构望远镜建立了从空间坐标系到像面坐标系的随机误差测量方程,给出了各项随机误差的分布规律,并通过 MATLAB 对测量方程进行解算,得出了随机误差对测量数据影响的规律^[9]。王晶,高利民,姚俊峰为了提高机载测量平台的定位精度和引导精度,利用齐次坐标转换法推导了从大地坐标系到望远镜坐标系的转换方程,并建立了误差分析的数学模型,运用蒙特卡罗法的思想,综合分析了机载测量系统中各参数对结果的影响^[10]。

本文针对水平式望远镜的结构特点,通过分析被测目标到望远镜相面影响目标定位误差的光、机、电等各种误差因素,建立了地心质心坐标系、水平坐标系、望远镜基座坐标系等 7 个坐标系。从地心质心坐标系到目标坐标系进行 21 次坐标变换,构造出具有 26 个变量的望远镜目标定位测量方程。然后,应用蒙特卡罗法进行误差的仿真合成,计算出水平式望远镜的目标定位误差,并分析了各误差的敏感度。最后,根据分析结果

建立误差补偿模型,补偿实验结果证明,所用方法和模型可以对大部分单项误差进行分析,能够有效地预测望远镜的目标定位误差,有助于提高望远镜的静态指向精度。

2 水平式光电望远镜的测量方程

2.1 水平式光电望远镜的坐标系

(1) 地心质心坐标系 $G(G_1, G_2, G_3)$

如图 1 所示,地心质心坐标系的原点在地球质心, G_1 轴为本初子午面与赤道面的交线, G_3 轴为地球自转轴并指向平北极, G_2 轴与 G_1 和 G_3 形成右手坐标系。

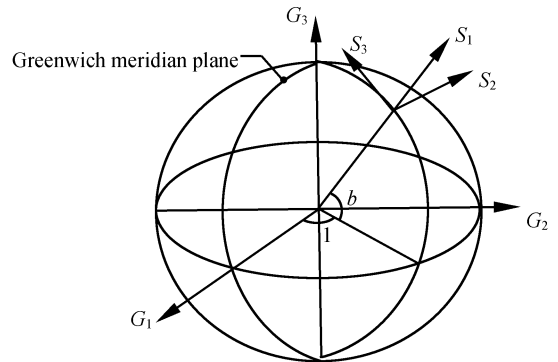


图 1 地心质心坐标系和测站点水平坐标系

Fig. 1 Earth's core and alt-alt coordinate

(2) 测量站点水平坐标系 $S(S_1, S_2, S_3)$

站点地平坐标系固联在测量站点预先制作好的地基上,通过大地测量确定地理位置坐标(经度、纬度和高程,如图 1 所示),测量基准点即站点地平坐标系的原点, S_1 指向天顶; S_2 和 S_3 位于水平面内; S_3 指向正北, S_2 与 S_1 和 S_3 分别正交,组成右手坐标系。当光电跟踪测量仪安置在站点上时,与基准点的偏离会产生经度、纬度的高程误差。

(3) 基座坐标系 $F(F_1, F_2, F_3)$

如图 2 所示,经轴轴系的固定部分固联在基座上,基座的下部与跟踪架的调平机构相联。基座坐标系 F 固联在基座上,表征了基座的空间位置,其原点位于经轴两轴承中心连线的中点上。 F_3 轴固联在经轴两轴承中心连线上(北为正), F_2 和 F_3 在水平面内正交; F_1 指向天顶, F_2 轴分别与 F_3 、 F_1 轴正交,并构成右手正交坐标系。

(4) 照准部坐标系 $L(L_1, L_2, L_3)$

照准部包括经轴的转动部分和与纬轴连接的部分,照准部坐标系表征了跟踪架经轴的空间位置。如图2所示,照准部坐标系原点在纬轴沿垂直方向向下平移与经轴的交点上。零位时 L_2 轴和 L_3 轴在水面内且互相正交, L_3 轴在经轴主轴回转中心(北为正)。 L_1 轴零位时指向天顶,与 L_2 轴和 L_3 轴组成右手坐标系。

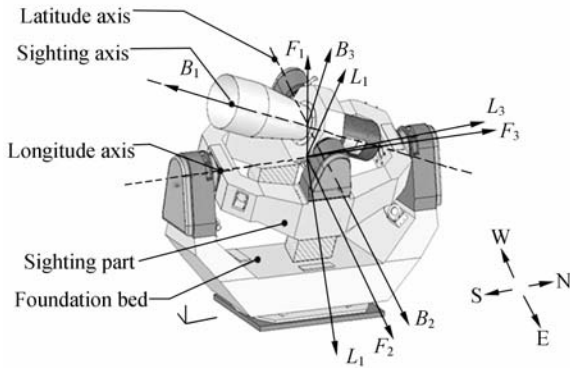


图2 基座、照准部和纬轴坐标系

Fig. 2 Foundation, sighting and latitude coordinates

(5) 纬轴坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$

纬轴坐标系固联在纬轴上,纬轴坐标系表征了跟踪架纬轴的空间位置。如图2所示,其原点在纬轴与望远镜光轴的交点上。零位时 B_2 轴和 B_3 轴在水平面内且互相正交, B_2 轴在纬轴回转中心(东为正)。零位时 B_1 轴指向天顶,与 B_2 轴和 B_3 轴组成右手坐标系。

(6) 望远镜坐标系 $T(T_1, T_2, T_3)$

望远镜坐标系表征了望远镜的空间位置,其原点在望远镜视轴与跟踪架纬轴的交点上, T_1 轴为望远镜视轴,零位时指向天顶; T_3 轴与 T_1 和 T_2 轴正交,零位时指向正北; T_2 轴分别与 T_3 和 T_1 轴正交,并与 T_3 和 T_1 轴组成右手坐标系。

(7) 目标坐标系 $P(P_1, P_2, P_3)$

目标坐标系附着在被测目标上,原点在目标几何中心。 P_1 轴与视轴重合, P_2 与 P_3 轴与 T_2 和 T_3 轴方向相同。

2.2 水平式光电望远镜的坐标变换

2.2.1 地心质心坐标系到水平坐标系

地心质心坐标系绕 G_3 轴逆时针转过 $(l + \Delta l)$,再绕 G_2 轴顺时针转过 $(b + \Delta b)$,再根据测站点在地心质心坐标系中的位置进行平移变换,与测站水平坐标系重合。

绕 G_3 轴逆时针旋转 l 和误差 Δl

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \cos(l + \Delta l) & \sin(l + \Delta l) & 0 & 0 \\ -\sin(l + \Delta l) & \cos(l + \Delta l) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

绕 G_2 轴顺时针旋转 b 和 Δb

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \cos(b + \Delta b) & 0 & \sin(b + \Delta b) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(b + \Delta b) & 0 & \cos(b + \Delta b) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

沿 G_1 轴平移测站到地心质心坐标系中心的距离

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -(h + \Delta h) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

2.2.2 水平坐标系到基座坐标系

经轴南北指向误差及残差:绕 S_1 轴旋转 $(\theta + \Delta\theta)$

$$\mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta + \Delta\theta) & \sin(\theta + \Delta\theta) & 0 \\ 0 & -\sin(\theta + \Delta\theta) & \cos(\theta + \Delta\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

经轴水平指向误差及残差:绕 S_2 轴旋转 $(\epsilon + \Delta\epsilon)$

$$\mathbf{M}_5 = \begin{bmatrix} \cos(\epsilon + \Delta\epsilon) & 0 & -\sin(\epsilon + \Delta\epsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\epsilon + \Delta\epsilon) & 0 & \cos(\epsilon + \Delta\epsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

2.2.3 基座坐标系到照准部坐标系

经轴晃动误差:绕 F_1 轴旋转 $\Delta\phi_1$,绕 F_2 轴旋转 $\Delta\eta_1$

$$\mathbf{M}_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Delta\phi_1 & \sin\Delta\phi_1 & 0 \\ 0 & -\sin\Delta\phi_1 & \cos\Delta\phi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_7 = \begin{bmatrix} \cos\Delta\eta_1 & 0 & -\sin\Delta\eta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\Delta\eta_1 & 0 & \cos\Delta\eta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

经轴编码器误差:绕 F_3 轴旋转 $(\mu + \Delta\mu)$

$$\mathbf{M}_8 = \begin{bmatrix} \cos(\mu + \Delta\mu) & \sin(\mu + \Delta\mu) & 0 & 0 \\ -\sin(\mu + \Delta\mu) & \cos(\mu + \Delta\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中, μ 为经轴编码器读出值, 编码器误差 $\Delta\mu$ 包括光电编码器测量误差 $\Delta\mu_1$, 零位差 $\Delta\mu_2$ 和联轴节误差 $\Delta\mu_3$, 即:

$$\Delta\mu = \Delta\mu_1 + \Delta\mu_2 + \Delta\mu_3.$$

2.2.4 照准部坐标系到纬轴坐标系

经纬轴垂直方向距离偏差: 沿 L_1 轴的平移 ($d + \Delta d$)

$$\mathbf{M}_9 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -(d + \Delta d) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

经纬轴垂直度误差及残差: 绕 L_1 轴旋转 ($\phi + \Delta\phi$)

$$\mathbf{M}_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi + \Delta\phi) & \sin(\phi + \Delta\phi) & 0 \\ 0 & -\sin(\phi + \Delta\phi) & \cos(\phi + \Delta\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

纬轴晃动误差: 绕 L_1 轴旋转 $\Delta\phi_2$, 绕 L_3 轴旋转 $\Delta\eta_2$

$$\mathbf{M}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta\phi_2 & \sin \Delta\phi_2 & 0 \\ 0 & -\sin \Delta\phi_2 & \cos \Delta\phi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{M}_{12} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\eta_2 & \sin \Delta\eta_2 & 0 & 0 \\ -\sin \Delta\eta_2 & \cos \Delta\eta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

纬轴编码器误差: 绕 L_2 轴旋转 ($\mu + \Delta\mu$)

$$\mathbf{M}_{13} = \begin{bmatrix} \cos(u + \Delta u) & 0 & -\sin(u + \Delta u) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(u + \Delta u) & 0 & \cos(u + \Delta u) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中, u 为经轴编码器读出值, 编码器误差 Δu 包括光电编码器测量误差 Δu_1 , 零位差 Δu_2 和联轴

节误差 Δu_3 , 即:

$$\Delta u = \Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3$$

2.2.5 纬轴坐标系到望远镜坐标系

主点前后平移误差及残差: 沿 B_1 轴平移 ($d_1 + \Delta d_1$)

$$\mathbf{M}_{14} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -(d_1 + \Delta d_1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

视差误差及残差: 沿 B_2 轴平移 ($d_2 + \Delta d_2$)

$$\mathbf{M}_{15} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -(d_2 + \Delta d_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

望远镜安置误差: 沿 B_3 轴平移 ($d_3 + \Delta d_3$)

$$\mathbf{M}_{16} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(d_3 + \Delta d_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

视轴高低角晃动误差: 绕 B_2 轴旋转 $\Delta\beta$

$$\mathbf{M}_{17} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\beta & 0 & -\sin \Delta\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \Delta\beta & 0 & \cos \Delta\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

照准差: 绕 B_3 轴旋转 ($C + \Delta C$)

$$\mathbf{M}_{18} = \begin{bmatrix} \cos(C + \Delta C) & \sin(C + \Delta C) & 0 & 0 \\ -\sin(C + \Delta C) & \cos(C + \Delta C) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

2.2.6 望远镜坐标系到目标坐标系

目标脱靶量和脱靶量误差: 绕 T_3 轴旋转 ($x + \Delta x$), 绕 T_2 轴旋转 ($y + \Delta y$)

$$\mathbf{M}_{19} = \begin{bmatrix} \cos\left(\arctan\left(\frac{x + \Delta x}{f + \Delta f}\right)\right) & \sin\left(\arctan\left(\frac{x + \Delta x}{f + \Delta f}\right)\right) & 0 & 0 \\ -\sin\left(\arctan\left(\frac{x + \Delta x}{f + \Delta f}\right)\right) & \cos\left(\arctan\left(\frac{x + \Delta x}{f + \Delta f}\right)\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\mathbf{M}_{20} = \begin{bmatrix} \cos\left(\arctan\left(\frac{y+\Delta y}{f+\Delta f}\right)\right) & 0 & -\sin\left(\arctan\left(\frac{y+\Delta y}{f+\Delta f}\right)\right) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\left(\arctan\left(\frac{y+\Delta y}{f+\Delta f}\right)\right) & 0 & \cos\left(\arctan\left(\frac{y+\Delta y}{f+\Delta f}\right)\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

式中: $(x+\Delta x)$ 为 CCD 横向读值和误差(经轴); $(y+\Delta y)$ 为 CCD 纵向读值和误差(纬轴); $(f+\Delta f)$ 为望远镜焦距和误差。

目标距离:沿 T_1 轴平移 R

$$\mathbf{M}_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

2.3 水平式光电望远镜测量方程

设考虑误差项时目标在地心质心坐标系为 $[G_{K_1}, G_{K_2}, G_{K_3}, 1]$, 通过坐标变换到目标坐标系 $[P_{K_1}, P_{K_2}, P_{K_3}, 1]$ 。其变换矩阵为 $[\mathbf{M}]$, 又因 $\mathbf{P}_K = [0, 0, 0, 1]^T$, 则可得测量方程为:

$$\mathbf{P}_K = \begin{bmatrix} P_{K_1} \\ P_{K_2} \\ P_{K_3} \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=0}^{21-i} [\mathbf{M}_i] \cdot \begin{bmatrix} G_{K_1} \\ G_{K_2} \\ G_{K_3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

其中: $\mathbf{P}_K = [P_{K_1}, P_{K_2}, P_{K_3}, 1]^T$ 为被测目标在目标坐标系中的位置; $[G_{K_1}, G_{K_2}, G_{K_3}, 1]^T$ 为被测目标在地心质心坐标系中的位置。

3 水平式光电望远镜的误差合成

3.1 蒙特卡罗法概述^[6]

蒙特卡罗法是通过随机变量的统计试验或随

机模拟,求解数学、物理和工程技术问题近似解的数值方法,因此,也称为统计试验法或随机模拟法。

蒙特卡罗法的理论基础来自概率论的二个基本定理:

大数定理:设 x_1, x_2, \dots, x_n 是 n 个独立的随机变量,若它们来自统一母体,有相同的分布,且具有相同的有限的均值和方差,分别用 μ 和 σ^2 表示,则对于任意 $\epsilon > 0$ 有:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \mu\right| \geq \epsilon\right) = 0.$$

伯努利定理:若随机事件 A 发生的概率为 $P(A)$, 在 n 次独立试验中,事件 A 发生的频数为 m , 频率为 $W(A) = m/n$, 则对于任意 $\epsilon > 0$ 有:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{m}{n} - P(A)\right| < \epsilon\right) = 1.$$

蒙特卡罗法从同一母体中抽出简单子样来做抽样试验,由上述二个定理可知,当 n 足够大时,前式以概率 1 收敛于 μ ; 频率 m/n 以概率 1 收敛于 $P(A)$ 。因此从理论上讲,这种方法的应用几乎没什么限制。

3.2 基本数据的准备

对应式(22)中的 26 个随机变量产生 26 个伪随机序列 $J_{i,j}, i=1, 2, \dots, n$ (n 为计算采样数,一个比较大的数); $j=1, 2, \dots, m$ ($m=26$, 即 26 个伪随机数), 如下表所示。26 个随机变量中有 6 个变量是均匀分布, 因此产生均匀分布随机数矩阵 $J_{i,j}$; 其余的 20 个随机变量为正态分布, 因此产生归一化正态分布随机数 $T_{i,j}$ 。各参数的误差项定义和计算使用值见表 1。

表 1 各随机误差的分布表

Tab. 1 Distributions of random errors

序号 i, j	变量名称	均匀分布	正态分布	各参数的随机误差	误差量
1	经度误差 Δl		$T_{i,1}$	$\Delta l = \text{Sign}() T_{i,1} \sigma_{\Delta l}$	$\sigma_{\Delta l} = 0.8 \exp(-7)^\circ$
2	纬度误差 Δb		$T_{i,2}$	$\Delta b = \text{Sign}() T_{i,2} \sigma_{\Delta b}$	$\sigma_{\Delta b} = 0.8 \exp(-7)^\circ$
3	高程误差 Δh		$T_{i,3}$	$\Delta h = \text{Sign}() T_{i,3} \sigma_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h} = 0.01 \text{ m}$
4	经轴南北指向误差的残差 $\Delta \theta$		$T_{i,4}$	$\Delta \theta = \text{Sign}() T_{i,4} \sigma_{\Delta \theta}$	$\sigma_{\Delta \theta} = 0.001^\circ$
5	经轴水平倾斜误差的残差 $\Delta \varepsilon$		$T_{i,5}$	$\Delta \varepsilon = \text{Sign}() T_{i,5} \sigma_{\Delta \varepsilon}$	$\sigma_{\Delta \varepsilon} = 0.0008^\circ$
6	经轴晃动误差 $\Delta \phi_1$	$J_{i,6}$		$\Delta \phi_1 = 2(J_{i,6} - 0.5) \Delta \phi_{1\text{max}}$	$\Delta \phi_{1\text{max}} = 0.002^\circ$
7	经轴晃动误差 $\Delta \eta_1$	$J_{i,7}$		$\Delta \eta_1 = 2(J_{i,7} - 0.5) \Delta \eta_{1\text{max}}$	$\Delta \eta_{1\text{max}} = 0.002^\circ$
8	经轴光电编码器测量误差 $\Delta \mu_1$	$J_{i,8}$		$\Delta \mu_1 = 2(J_{i,8} - 0.5) \Delta \mu_{1\text{max}}$	$\Delta \mu_{1\text{max}} = 0.0015^\circ$
9	经轴光电编码器零位误差 $\Delta \mu_2$		$T_{i,9}$	$\Delta \mu_2 = \text{Sign}() T_{i,9} \sigma_{\Delta \mu_2}$	$\sigma_{\Delta \mu_2} = 0.0008^\circ$
10	经轴光电编码器联轴节误差 $\Delta \mu_3$		$T_{i,10}$	$\Delta \mu_3 = \text{Sign}() T_{i,10} \sigma_{\Delta \mu_3}$	$\sigma_{\Delta \mu_3} = 0.0008^\circ$
11	经纬轴垂直方向距离偏差的误差 Δd		$T_{i,11}$	$\Delta d = \text{Sign}() T_{i,11} \sigma_{\Delta d}$	$\sigma_{\Delta d} = 0.001 \text{ m}$
12	经纬轴垂直度误差的残差 $\Delta \phi$		$T_{i,12}$	$\Delta \phi = \text{Sign}() T_{i,12} \sigma_{\Delta \phi}$	$\sigma_{\Delta \phi} = 0.0017^\circ$
13	纬轴晃动误差 $\Delta \phi_2$	$J_{i,13}$		$\Delta \phi_2 = 2(J_{i,13} - 0.5) \Delta \phi_{2\text{max}}$	$\Delta \phi_{2\text{max}} = 0.0006^\circ$
14	纬轴晃动误差 $\Delta \eta_2$	$J_{i,14}$		$\Delta \eta_2 = 2(J_{i,14} - 0.5) \Delta \eta_{2\text{max}}$	$\Delta \eta_{2\text{max}} = 0.0006^\circ$
15	纬轴光电编码器测量误差 Δu_1	$J_{i,15}$		$\Delta u_1 = 2(J_{i,15} - 0.5) \Delta u_{1\text{max}}$	$\Delta u_{1\text{max}} = 0.0015^\circ$
16	纬轴光电编码器零位误差 Δu_2		$T_{i,16}$	$\Delta u_2 = \text{Sign}() T_{i,16} \sigma_{\Delta u_2}$	$\sigma_{\Delta u_2} = 0.0008^\circ$
17	纬轴光电编码器联轴节误差 Δu_3		$T_{i,17}$	$\Delta u_3 = \text{Sign}() T_{i,17} \sigma_{\Delta u_3}$	$\sigma_{\Delta u_3} = 0.0008^\circ$
18	望远镜前后平移偏差的残差 Δd_1		$T_{i,18}$	$\Delta d_1 = \text{Sign}() T_{i,18} \sigma_{\Delta d_1}$	$\sigma_{\Delta d_1} = 0.001 \text{ m}$
19	望远镜视差误差 Δd_2		$T_{i,19}$	$\Delta d_2 = \text{Sign}() T_{i,19} \sigma_{\Delta d_2}$	$\sigma_{\Delta d_2} = 0.001 \text{ m}$
20	视轴安置误差 Δd_3		$T_{i,20}$	$\Delta d_3 = \text{Sign}() T_{i,20} \sigma_{\Delta d_3}$	$\sigma_{\Delta d_3} = 0.001 \text{ m}$
21	照准差的误差 ΔC		$T_{i,21}$	$\Delta C = \text{Sign}() T_{i,21} \sigma_{\Delta C}$	$\sigma_{\Delta C} = 0.00017^\circ$
22	视轴高低晃动误差 $\Delta \beta$		$T_{i,22}$	$\Delta \beta = \text{Sign}() T_{i,22} \sigma_{\Delta \beta}$	$\sigma_{\Delta \beta} = 0.00017^\circ$
23	望远镜焦距偏差 Δf		$T_{i,23}$	$\Delta f = \text{Sign}() T_{i,23} \sigma_{\Delta f}$	$\sigma_{\Delta f} = 0.0005 \text{ m}$
24	像面像点测量误差 Δx		$T_{i,24}$	$\Delta x = \text{Sign}() T_{i,24} \sigma_{\Delta x}$	$\sigma_{\Delta x} = 0.000006 \text{ m}$
25	像面像点测量误差 Δy		$T_{i,25}$	$\Delta y = \text{Sign}() T_{i,25} \sigma_{\Delta y}$	$\sigma_{\Delta y} = 0.000006 \text{ m}$
26	激光测距误差 ΔR		$T_{i,26}$	$\Delta R = \text{Sign}() T_{i,26} \sigma_{\Delta R}$	$\sigma_{\Delta R} = 1 \text{ m}$

3.2 误差合成

假设测站点经纬度和在地心质心坐标系中的位置是东经 $120^\circ, 40^\circ$ 和 $6\,379\,137 \text{ m}$, 目标的距离是 $1\,000 \text{ km}$ 。为了计算水平式望远镜在不同经纬轴转角位置上的误差, 经、纬两轴编码器读数分别为 $L = -80^\circ, -70^\circ, \dots, 80^\circ, B = -80^\circ, -70^\circ, \dots, 80^\circ$, 为了方便计算, 其它没有在表 1 中列出的变量均设为 0。测量方程中目标在地心质心坐标系中的位置由下式计算:

$$G_{m,n} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ 1 \end{bmatrix}_{m,n} = M_3' \cdot M_2' \cdot M_1' \cdot S_{m,n} =$$

$$M_3' \cdot M_2' \cdot M_1' \begin{bmatrix} \cos L \cos B \\ \sin L \cos B \\ \sin B \\ 1 \end{bmatrix}_{m,n}, m, n = 1 \dots 17, (23)$$

上式中, M_1', M_2', M_3' 是 M_1, M_2, M_3 的逆矩阵。当在测量的过程中没有误差时, 被测目标在目标坐标系中的位置应该为 $P_{m,n} = [0, 0, 0, 1]_{m,n}^T$, 有误差时, 目标在坐标系中会产生偏差, $P_{K_{m,n}} = [P_{K_1}, P_{K_2}, P_{K_3}]_{m,n}^T$, 则望远镜的测量误差为:

$$\Delta P_{m,n} = P_{K_{m,n}} - P_{m,n}, (24)$$

或

$$\begin{cases} \Delta B_{m,n} = \arctan(P_{K_{2m,n}} / P_{K_{3m,n}} + R) \\ \Delta L_{m,n} = \arctan(P_{K_{1m,n}} / P_{K_{3m,n}} + R) / \cos(B_n + \Delta B_{m,n}) \end{cases}, (25)$$

4 水平式光电望远镜的误差分析

4.1 测量误差

把所有数据代入测量方程式(23), 再应用式(25)可算出 17×17 组望远镜在不同经纬轴转角位置处的测量误差, ΔL 和 ΔB , 且每组数据均服

从正态分布。应用参数估计方法,可分别对 ΔL 和 ΔB 计算出 17×17 个标准差。如图 3 所示,当经纬轴转角为 $\pm 80^\circ$ 时,误差达到最大值,而当两轴转角都为零时,总误差的标准差接近于最小值。这表明,水平式光电望远镜在天顶区域不仅没有跟踪盲区,而且具有很好的观测精度。

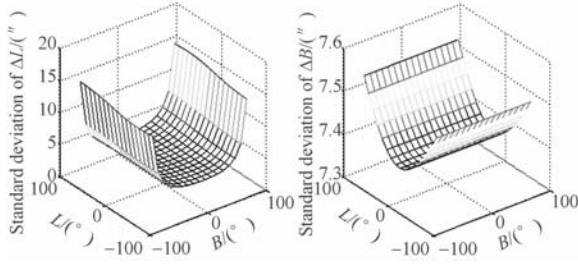


图 3 目标在各经纬轴转角位置时测量误差的标准差
Fig. 3 Synthesis errors standard deviations

4.2 平移误差对总误差的影响

在这里将 2.2 中平移变换的误差变量称为平移变量。除测站位置误差(测站点经度、纬度和测站点在地心质心坐标系中的位置)外的其他误差均设为 0,用上述误差合成的方法计算测量误差,则测站点位置误差对测量误差的影响如图 4 所示。目标距离为 1 000 m 时(图 4(a)),两轴转角测量误差标准差的最大值接近 $10''$,最小值为 $6''$ 。目标距离为 1×10^5 m 时(图 4(b)),两轴转角测量误差的标准差 $< 0.01''$ 。可见测站点误差对测

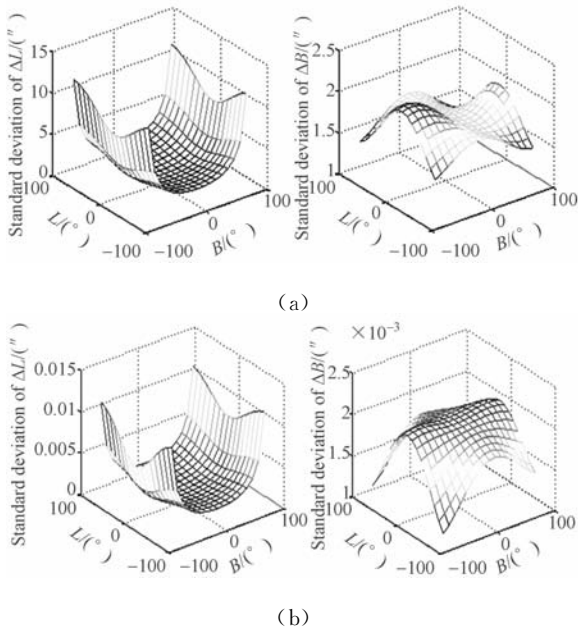


图 4 测站点位置误差对测量误差的影响

Fig. 4 Positions of foundation bed effect on measuring errors

量误差的影响与目标距离有关,目标距离越远影响就越小。

应用相同的方法,本文又对经纬轴距离偏差、望远镜前后平移偏差等平移误差进行了计算,结果都是随着目标距离的增大,对测量误差的影响按比例减小。图 5 是所有平移误差在目标距离为 100 km 时对测量误差的影响。

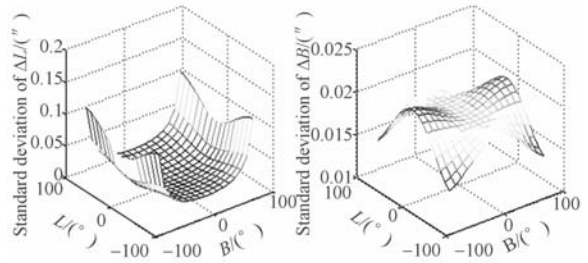


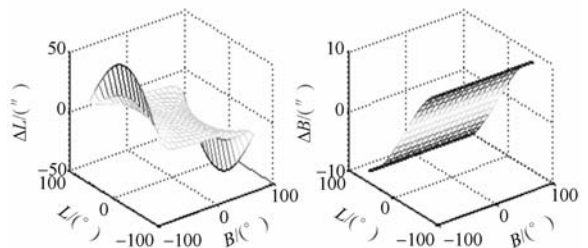
图 5 平移误差对测量误差的影响

Fig. 5 Translation errors effect on measuring errors

因此,水平式望远镜观测远距离目标,如对于中高轨目标,尤其是对于恒星的观测,测站点位置的误差可以忽略。

4.3 旋转误差对总误差的敏感性分析

把 2.2 中旋转变换的误差变量称为旋转误差。为了比较各误差对观测误差的影响程度,规定所有的旋转误差的值都为 $10''$ 。图 6 是分别计算只有一种旋转误差存在时的观测误差值,从图中可以看出,经轴编码器误差、经纬轴垂直度误差和纬轴晃动误差对纬轴的转角几乎不产生影响;纬轴编码器误差、视轴高低晃动误差和 CCD 像面像点测量误差 Δx 的误差值全部等量作用于纬轴的误差;而经轴编码器误差,纬轴绕 B_3 轴晃动误差则等量反向作用于经轴的误差。



(a1)经轴南北指向误差 (b1)经轴绕 L_1 轴晃动误差

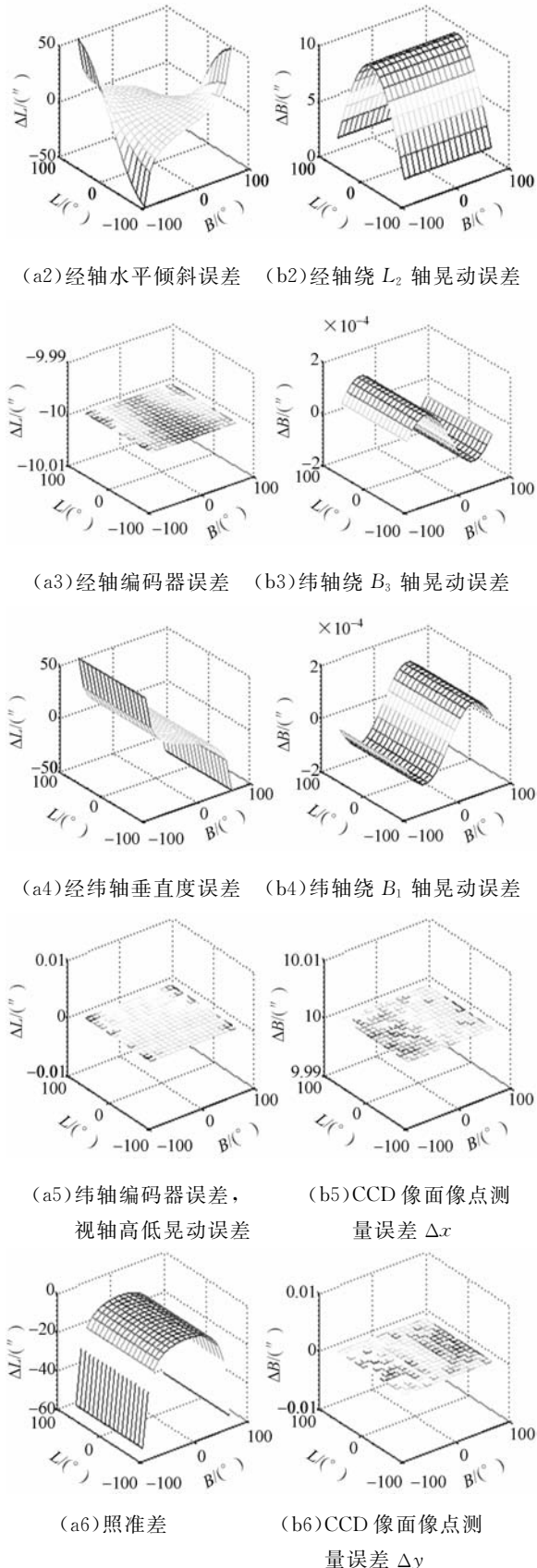


图 6 旋转误差的敏感性

Fig. 6 Sensitivity of rotating errors

5 误差补偿实验

本文在 2008 年 12 月 4 日用水平式望远镜对全天区的 72 颗恒星进行了观测,将测量均值与天文年历所载星体位置比较,经轴误差标准差为 66.4",纬轴为 49.4"。基于以上分析,选用对总误差影响较大的误差项建立水平式望远镜误差补偿模型,补偿后(如图 7 所示)经轴误差标准差为 3.3",纬轴为 5.6",分别下降了 95%和 89%。由于各残差的估计值比较保守,使误差补偿的效果低于误差合成的预测值。

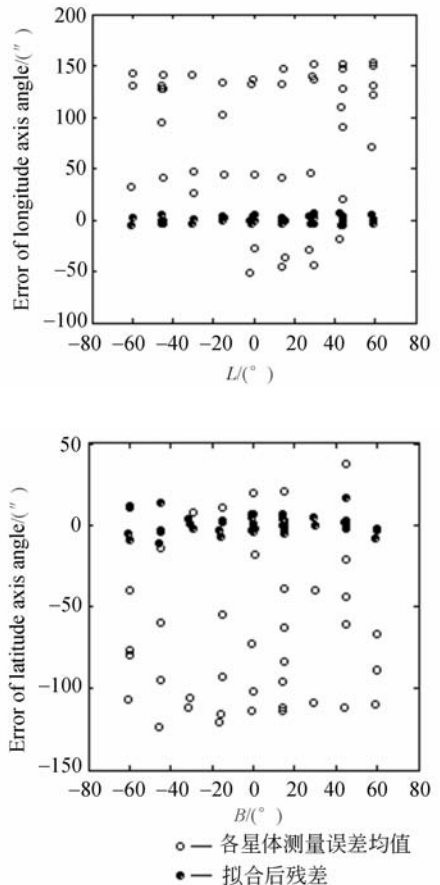


图 7 误差补偿结果

Fig. 7 Results of correction

6 结论

本文针对水平式光电望远镜的结构特点,推导了测量方程,建立了误差模型,并应用蒙特卡罗法进行误差仿真,分析了各误差对目标定位的影

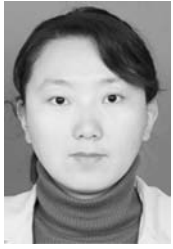
响,通过误差的合成,计算出水平式望远镜的目标定位误差。结果表明:水平式望远镜在天顶处的测量误差标准差最小,随着两轴转角的增大测量误差的标准差也随着增大,当经纬轴转角为 $\pm 80^\circ$ 时,误差达到最大值;而当两轴转角都为零时,总误差的标准差接近于最小值。平移误差在望远镜观测远距离目标时对精度影响较小,尤其对于地

球中高轨目标和星体的观测,可以忽略。两轴转角误差与经轴南北指向误差、水平倾斜误差以及经轴晃动误差为函数关系,纬轴晃动误差对纬轴转角影响很小,视轴的高低晃动误差直接作用于纬轴转角,对经轴转角没有影响。本文还根据分析结果进行了误差补偿实验,通过补偿,经轴、纬轴的误差标准差分别下降了95%和89%。

参考文献:

- [1] RICHARDSON E H, GRUNDMANN W A, ODGERS G J. Altitude-altitude (alt-alt) mounting for an 8-metre telescope [J]. *SPIE*, 1990, 1236: 897-904.
- [2] STEFAN S, RODRIGO A, PHILIPPE D, et al. VLT astronomical site monitor: control, automation, and data flow [J]. *SPIE*, 2000, 4009: 338-349.
- [3] 韩雪冰, 张景旭, 赵金宇, 等. 水平式经纬仪与其它目标测量系统引导数据融合算法 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(专辑): 30-35.
HAN X B, ZHANG J X, ZHAO J Y, et al. Guide data fusion arithmetic between the alt-alt theodolite and other target surveying systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(Special): 30-35. (in Chinese)
- [4] 张景旭. 大口径地基光电望远镜结构总体研究 [D]. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2008: 26-31.
ZHANG J X. *Study on macro-structure of large ground-based electro-optical telescope* [D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 26-31. (in Chinese)
- [5] 宋云夺, 陈宁. 水平式光电经纬仪跟踪架结构浅析 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(专辑): 67-69.
SONG Y D, CHEN N. Analysis of aclinic mount theodolite tracking structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(Special): 67-69. (in Chinese)
- [6] 宋云夺, 王志, 陈宁. 水平式光电经纬仪机械精度分析 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(专辑): 70-72.
SONG Y D, WANG ZH, CHEN N. mechanical precision analysis for the aclinic mount theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(Special): 70-72. (in Chinese)
- [7] 王家骥. 光学仪器总体设计 [M]. 长春光学精密机械与物理研究所研究生部教材, 1998: 129-169.
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998: 129-169. (in Chinese)
- [8] 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, 14(3): 105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 14(3): 105-116. (in Chinese)
- [9] 赵金宇. 光电望远镜误差分析及补偿技术 [D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005: 51-60.
ZHAO J Y. *Error analysis and correction technology for photoelectricity telescope* [D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 51-60. (in Chinese)
- [10] 王晶, 高利民, 姚俊峰. 机载测量平台中的坐标转换误差分析 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 388-394.
WANG J, GAO L M, YAO J F. Analysis on coordinate conversion error of airborne measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 388-394. (in Chinese)

作者简介:



韩雪冰(1976—),女,吉林长春人,助理研究员,博士研究生,主要从事机械制造及其自动化、光电经纬仪精度分析等方面的研究。E-mail: hanxb2000@sina.com



张景旭(1965—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事地基大口径光电望远镜光机结构设计的研究。E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn.



赵金宇(1976—),男,内蒙通辽人,副研究员,主要从事空间目标成像探测的研究。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn.



王 志(1963—),男,吉林长春人,副研究员,主要从事精密光学仪器结构设计的研究。



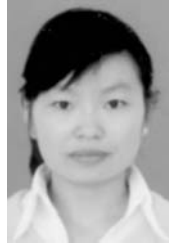
宋云夺(1978—),男,黑龙江林甸人,工程师,主要从事机械设计、激光、微电子设备制造等方面的研究。E-mail: Songyunduo@yahoo.com.cn



王志臣(1980—),男,黑龙江大兴安岭人,研究实习员,主要从事望远镜大型跟踪架结构设计的研究。E-mail: zc-wang911@163.com



赵勇志(1979—),男,山东泰安人,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为大型光电经纬仪结构的设计。E-mail: zyz0715@sohu.com.



吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,助理研究员,主要从事大口径薄镜面主动支撑系统设计及计算机辅助设计方面的研究。E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com