

文章编号 1004-924X(2015)11-3090-07

转台误差对数字天顶仪轴系误差的影响

张志利,刘先一,周召发,刘殿剑,朱文勇

(第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室,陕西西安710025)

摘要:针对数字天顶仪在定位过程中存在的轴系偏差,研究了如何对光轴与旋转轴、旋转轴与垂直轴之间的角度偏差进行补偿的方法。为了高精度地解算出测站点位置垂直轴的天文坐标,采用对称位置的两幅星图直接解算旋转轴的坐标,从而避免了光轴与旋转轴之间的补偿。采用双轴倾角仪测量倾角,并对旋转轴进行倾角补偿得出垂直轴的位置坐标。考虑进行轴系补偿时,转台误差会对旋转轴坐标和倾角补偿造成影响,分别研究了转台误差对于旋转轴以及倾角补偿的影响,并得出了转台误差的范围。实验结果表明:当测站点纬度的绝对值小于或等于 88.3° 时,转台误差必须小于或等于 $35''$;当测站点纬度的绝对值大于 88.3° 时,转台误差值要小于 $|1\ 166.8\cos\delta|''$ 。在对称位置解算测站点位置坐标时,必须提高转台的精度,以减小转台误差对于定位精度的影响。

关键词:数字天顶仪;轴系偏差;转台误差;双轴倾角仪

中图分类号:TH752 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152311.3090

Influence of turntable error on axis error in digital zenith camera

ZHANG Zhi-li, LIU Xian-yi, ZHOU Zhao-fa, LIU Dian-jian, ZHU Wen-yong

(State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology,
the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

* Corresponding author, E-mail:1397559188@qq.com

Abstract: There are axis errors in orientation processing of a digital zenith camera. This paper focuses on how to compensate the axis errors among optical axis, rotation axis and vertical axis. To calculate the astronomical coordinate of the vertical axis in a measuring station position, two star images in an opposite direction were used to calculate the coordinate of the rotation axis. Thus, the compensation between optical axis and rotation axis was avoided. A two-axis tilt sensor was used to measure the inclination between rotation axis and vertical axis and the position coordinate of the vertical axis could be obtained by compensating the angle error of the rotation axis. As the turntable error could impact on the coordinate of rotation axis and tilt compensation, the influences of turntable error on the calculation of rotation axis and tilt compensation were analyzed, respectively and the range of turntable error was gained. The experimental data demonstrate that when the absolute value of the latitude of the measuring station is below 88.3° , the turntable should be below $35''$. Otherwise, the turntable error should be below $|1\ 166.8\cos\delta|''$. The precision of rotation angle should be improved to eliminate the influence of turntable error when the coordinate of the measuring station is calculated in the opposite direction.

Key words: digital zenith camera; axis error; turntable error; two-axis tilt sensor

收稿日期:2015-02-05;修订日期:2015-03-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41174162)

1 引言

运用数字天顶仪进行定位是一种高精度的天文定位方法^[1-2]。国外开展这项研究相对较早^[3-4],21 世纪初德国与瑞士联合研制的 TZK2-D 数字天顶仪的定位精度已经达到 $0.05''$ ^[5-6]。国内对数字天顶仪的研究正在起步,目前还处于样机的研制阶段^[7-8]。数字天顶仪在定位的过程中存在光轴、旋转轴和垂直轴之间的轴系偏差^[9],需要进行光轴与旋转轴、旋转轴与垂直轴之间的补偿,最终解算出测站点位置垂直轴的天文经纬度坐标。

数字天顶仪的安装误差等因素会造成光轴与旋转轴之间的不一致,德国的 Hirt 采用初始值迭代的方法解算旋转轴的值^[10],但解算过程较为复杂。曾志雄等人证明了将对称位置光轴的天文坐标均值后可解算出旋转轴的天文坐标值^[11],但解算的结果只是旋转轴的近似值。张华伟等人就旋转轴的解算问题进行了相关研究,但主要体现在理论上,并未结合具体模型进行具体的推导和研究^[12]。为了提高旋转轴解算的精度,在四参数模型的基础上采用对称位置的 2 幅星图直接解算出旋转轴的位置坐标,避免了直接进行光轴与旋转轴之间的补偿。在旋转拍摄星图时存在着转台误差,转台误差的存在会影响旋转轴的解算。旋转轴与垂直轴之间的补偿需要通过双轴倾角仪进行倾角的测量^[13-16],在倾角测量的过程中转台误差的存在会导致倾角仪输出数据的变化,从而对定位精度造成影响。本文研究了轴系补偿方法,并对转台误差对于旋转轴以及倾角补偿的影响进行了分析,最后通过实验对转台的误差进行了分析。

2 旋转轴的解算方法

在运用数字天顶仪进行定位的过程中,光轴与旋转轴之间不完全重合,存在不一致性。因此需要消除由于光轴与旋转轴不一致性造成的误差。轴示意如图 1 所示,由于安装误差等原因会导致 CCD 倾斜,使光轴与旋转轴偏离。在拍摄星图的过程中,光轴围绕着旋转轴转动。

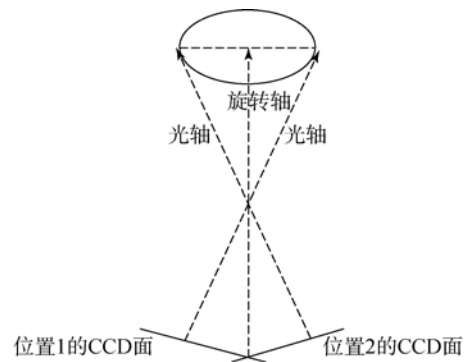


图 1 轴示意图

Fig. 1 Schematic diagram of axis

进行定位解算时,通过星表对拍摄的恒星进行识别,建立识别恒星的天球切平面坐标系和 CCD 图像坐标系,常采用四参数转换模型进行 2 个坐标系之间的转换^[10,16]:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: (u, v) 为识别恒星的天球切平面坐标,切平面坐标通过识别恒星的天文经纬度解算得到; (x, y) 为识别恒星的 CCD 图像坐标; (c_1, c_2, a, b) 为坐标转换参数。令:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -x_n & y_n \\ 0 & 1 & y_1 & x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & y_n & x_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{b} = [u_1 \ \cdots \ u_n \ v_1 \ \cdots \ v_n]^T. \quad (3)$$

当识别星点的数目较多时,可将式(1)表示为:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x}. \quad (4)$$

式中: \mathbf{A} 为由识别恒星的 CCD 图像坐标组成的系数矩阵, \mathbf{b} 为由恒星星点的切平面坐标组成的矩阵。 \mathbf{x} 为待求参数 $[c_1, c_2, a, b]^T$ 。

在对称的 2 个位置上运用最小二乘法分别解算出初始位置的参数 a, b, c_1, c_2 的值和对称位置的参数 a', b', c_1', c_2' 。如图 1 所示,旋转轴是位置 1 和位置 2 处的公共轴,在位置 1 和位置 2 中旋转轴的图像坐标和天球切平面坐标是相同的。设旋转轴中心的图像坐标值为 (x_r, y_r) ,天球切平

面坐标值为 (u_z, v_z) 。将位置 1 和位置 2 联立可得:

$$\begin{aligned} -(a-a')x_r + (b-b')y_r + (c_1 - c'_1) &= 0, \\ (b-b')x_r + (a-a')y_r + (c_2 - c'_2) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

令 $m = a - a'$, $n = b - b'$, $c = c_1 - c'_1$, $d = c_2 - c'_2$ 可以解算得出旋转轴中心的图像坐标值为:

$$\begin{aligned} x_r &= (mc - nd) / (m^2 + n^2), \\ y_r &= -(md + nc) / (m^2 + n^2). \end{aligned} \quad (6)$$

通过旋转轴中心的图像坐标解算出旋转轴对应的天文坐标。反复进行上述计算,直到得到旋转轴的精确天文经纬度。

2.1 转台误差对于旋转轴的影响分析

在解算旋转轴中心的图像坐标时需要在对称位置拍摄星图,但在转台旋转的过程中存在转角误差,会导致旋转轴中心的图像坐标值发生变化。

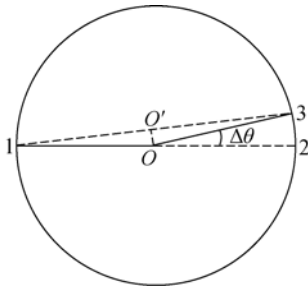


图 2 旋转示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotation

如图 2 所示,位置 1 为初始位置,位置 2 为旋转 180° 后的理想位置。位置 3 为对称旋转后的实际位置。理想状态下旋转轴应位于 O 点位置,但是由于在旋转的过程中存在角度误差,导致实际旋转角度未达到完全对称的状态, O' 为实际的旋转轴中心的位置坐标。

由于转台误差的存在,使旋转轴中心产生了一定的偏差,用 $\Delta\phi$ 表示,则有:

$$\Delta\phi = \Delta l \sin \left[\frac{\Delta\theta}{2} \right], \quad (7)$$

式中: Δl 为光轴中心与旋转轴中心之间的距离, $\Delta\theta$ 为转台旋转角度误差值。

数字天顶仪的 CCD 的图像分辨率 A 为 Fov/N , Fov 为视场角, N 表示 CCD 一系列的像素值。为保证转台旋转误差对于解算结果的影响可

以忽略不计。则有:

$$A \Delta l \sin \left[\frac{\Delta\theta}{2} \right] \leq 0.01''. \quad (8)$$

2.2 光轴与旋转轴之间夹角的影响分析

数字天顶仪在定位过程中会发生轻微的晃动,会带来光轴与旋转轴之间夹角的变化,同时,数字天顶仪在安装的过程中也会使光轴与旋转轴之间存在安装误差,如图 3 所示。为了减小上述因素对于光轴与旋转轴之间夹角造成的影响,必须对夹角的变化范围进行研究。

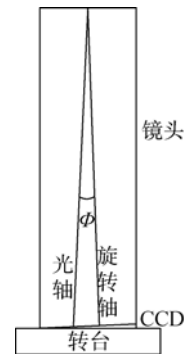


图 3 光轴与旋转轴夹角示意图

Fig. 3 Angle between optical axis and rotation axis

在 CCD 上由于光轴与旋转轴之间的夹角造成的像素偏差值为 Δl ,光轴与旋转轴之间的夹角一般较小,则有:

$$\Delta l = r\phi/d, \quad (9)$$

式中: r 为光轴与旋转轴的交点至 CCD 平面的距离, d 为单个 CCD 像元的边的长度,一般采用焦距值取代距离 r 。将式(8)、(9)联立可得:

$$\Delta\theta \leq \frac{0.02d}{Ar\phi}. \quad (10)$$

当光轴与旋转轴的夹角和转台误差之间满足式(10)时,由光轴与旋转轴的夹角和转台误差造成的影响可忽略。

3 转台误差对倾角补偿的影响分析

在进行定位的过程中旋转轴与垂直轴不一致,需要对旋转轴进行倾角补偿。通过双轴倾角仪能够高精度的测量旋转轴与垂直轴之间的倾角值,从而对旋转轴进行补偿,如图 4 所示。

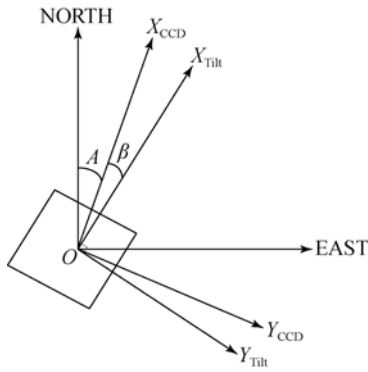


图 4 36.8 mm 倾角补偿原理图

Fig. 4 Schematic diagram of tilt compensation

可得天文经纬度补偿值分别为:

$$\Delta\alpha = (m\sin(A+\beta) + n\cos(A+\beta)) / \cos(\delta),$$

$$\Delta\delta = m\cos(A+\beta) - n\sin(A+\beta), \quad (11)$$

式中: m 和 n 为双轴倾角仪测量倾角的准确值; A 为 CCD 星传感器安装位置与北向之间的夹角; β 为倾角仪与 CCD 星传感器之间的夹角; α 与 δ 为测站点的天文经纬度。

倾角仪的读数存在零点偏差和漂移,在进行恒星的拍摄过程中数字天顶仪的晃动也会带来倾角仪输出数据的变化。其中漂移主要来自于温度的影响,在一定时间内漂移的数值可忽略。倾角仪的测量示意如图 5 所示,先在原位置读取倾角仪的数据 m_1 和 n_1 ,再将倾角仪旋转至对称位置,读取倾角仪的读数 m_2 和 n_2 。

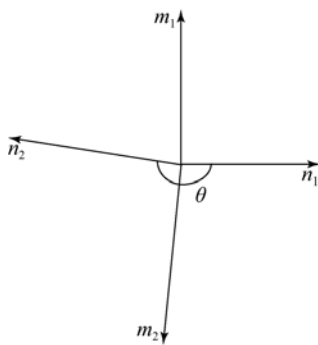


图 5 倾角仪的测量示意图

Fig. 5 Condition of tilt sensor

在原始位置时,双轴倾角仪的数据为:

$$m_1 = m + \Delta m_0 + \delta_{m1} + \Delta m_1,$$

$$n_1 = n + \Delta n_0 + \delta_{n1} + \Delta n_1, \quad (12)$$

式中: Δm_0 、 Δn_0 为零点偏差, δ_{m1} 、 δ_{n1} 表示漂移值, Δm_1 、 Δn_1 为转台晃动值造成的影响。

旋转 θ 角度至对称位置后倾角仪的输出为:

$$m_2 = m\cos\theta + n\sin\theta + \Delta m_0 + \delta_{m2} + \Delta m_2,$$

$$n_2 = n\cos\theta - m\sin\theta + \Delta n_0 + \delta_{n2} + \Delta n_2, \quad (13)$$

式中: $\theta = \pi + \Delta\theta$, 运用数字天顶仪进行实验的时间较短,所以由于漂移造成的误差值 δ_{m1} 、 δ_{n1} 、 δ_{m2} 和 δ_{n2} 可忽略。

联立式(12)、(13),可得:

$$2m + n\Delta\theta = m_1 - m_2 - (\Delta m_1 - \Delta m_2),$$

$$2n - m\Delta\theta = n_1 - n_2 - (\Delta n_1 - \Delta n_2). \quad (14)$$

可以解得双轴倾角仪测量的倾角准确值为:

$$m = \frac{2a_0 - b_0\Delta\theta}{4 + \Delta^2\theta},$$

$$n = \frac{a_0\Delta\theta + 2b_0}{4 + \Delta^2\theta}. \quad (15)$$

可得式中 $a_0 = m_1 - m_2 - (\Delta m_1 - \Delta m_2)$, $b_0 = n_1 - n_2 - (\Delta n_1 - \Delta n_2)$ 。

由转台转角误差造成的倾角仪输出数据的变化值为:

$$\Delta m = \frac{-2b_0\Delta\theta - a_0\Delta^2\theta}{2(4 + \Delta^2\theta)} \approx -\frac{b_0}{4}\Delta\theta,$$

$$\Delta n = \frac{2a_0\Delta\theta - b_0\Delta^2\theta}{2(4 + \Delta^2\theta)} \approx \frac{a_0}{4}\Delta\theta. \quad (16)$$

为了减小倾角补偿对于定位精度的影响,必须保证倾角补偿值的变化值小于 $0.01''$,则有:

$$|(\Delta m\sin(A+\beta) + \Delta n\cos(A+\beta)) / \cos(\delta)| < 0.01'',$$

$$|\Delta m\cos(A+\beta) - \Delta n\sin(A+\beta)| < 0.01''. \quad (17)$$

对式(17)可得必须要保证:

$$\sqrt{(\Delta m)^2 + (\Delta n)^2} < |0.01''\cos\delta|, \quad (18)$$

则有:

$$\Delta\theta < \frac{2|\cos\delta|}{25\sqrt{a_0^2 + b_0^2}}. \quad (19)$$

表明了转台误差值的大小与测站点所处的纬度坐标值相关。

4 实验数据分析

实验过程中采用的数字天顶仪的视场角大小为 $3^\circ \times 3^\circ$, 焦距值为 (600 ± 4) mm。CCD 传感器安装在镜筒下方,通过调焦装置与镜筒连接,可随镜筒一起转动。CCD 采用 KAF-16803 全幅图像传感器,分辨率为 $4\,096 \text{ pixel} \times 4\,096 \text{ pixel}$, 像素大小 $9 \mu\text{m}$, 有效面积为 $36.8 \text{ mm} \times 36.8 \text{ mm}$ 。双轴倾角仪为徕卡 Nivel210, 工作温度在 $-20 \sim$

50℃,分辨率为 0.2"。

运用数字天顶仪进行实验,在一个循环条件下数字天顶仪拍摄的恒星星图为 16 幅。处于对称位置上的恒星星图为一组解算单元。得到如表 1 所示的部分实验数据。

表 1 部分实验数据

Tab. 1 Part of experiment data

恒星 CCD x 坐标/pixel	恒星 CCD y 坐标/pixel	恒星天文 经度/(°)	恒星天文 纬度/(°)
2 004.696 791	3 772.154 55	107.636 13	33.430 22
3 013.803 313	3 784.945 37	107.030 98	34.137 42
2 615.436 066	3 576.527 21	107.444 31	33.958 14
1 389.633 333	3 262.980 95	108.425 82	33.240 05
3 444.000 000	2 393.887 93	107.971 86	35.121 71
2 816.903 846	3 670.307 69	107.245 32	34.054 68
3 808.628 866	566.680 41	109.361 09	36.259 88
320.031 746	2 334.666 66	109.827 79	32.917 89
623.065 574	930.803 27	110.869 96	33.794 31
1 012.418 182	609.072 72	110.932 36	34.225 41

对实验数据进行解算,利用旋转轴的解算方法可得表 2 所示的以光轴中心为原点的旋转轴中心的图像坐标值。

表 2 旋转轴中心的图像坐标

Tab. 2 Coordinates of rotation axis

组数	旋转轴中心 x 坐标/pixel	旋转轴中心 y 坐标/pixel
1	40.972 67	3.908 21
2	40.961 22	3.638 56
3	41.260 20	3.862 31
4	41.294 81	4.032 42
5	40.884 12	4.126 47
6	41.219 94	4.584 15
7	41.136 60	4.171 73
8	41.021 43	4.084 80

由旋转轴中心的图像坐标值可以得出旋转轴到光轴中心的距离值 Δl 的值要小于 45 pixel。数字天顶仪的图像分辨率为 2.637"。为减小转台误差对旋转轴解算的影响,将上述条件代入式

(8),可得 $\Delta\theta \leq 35''$ 。

解算光轴与旋转轴之间的夹角,可得在 8 组不同解算单元下,夹角 φ 的变化值如图 6 所示。

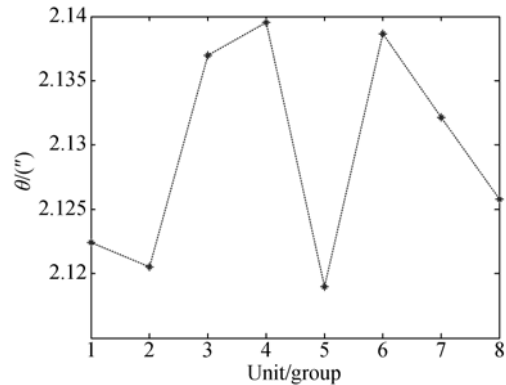


图 6 光轴与旋转轴夹角的值

Fig. 6 Angle between optical axis and rotation axis

可以得出在运用数字天顶仪进行拍摄的过程中,光轴与旋转轴之间的夹角在 2.12~2.14' 变化。表明在拍摄的过程中光轴与旋转轴之间受晃动的影响较小,这也验证了在处理倾角仪输出数据时晃动误差值是可以忽略的。

在运用数字天顶仪进行定位时,先用长水准器进行调平,保证气泡处于水准器中央,不超过水准器中的 1/2 格(10");然后运用倾角仪再次进行精调平;之后进行星图的拍摄。也就是倾角仪输出的准确值 $a_0 \leq 10''$, $b_0 \leq 10''$,将其代入式(19),可得 $\Delta\theta < |1\ 166.8 \cos\delta|''$ 。将其与上文得到的 $\Delta\theta \leq 35''$ 进行比较,可以得出当测站点纬度值 $|\delta| \leq 88.3^\circ$ 时,要保证转角误差 $\Delta\theta \leq 35''$,当测站点的纬度值 $|\delta| \leq 88.3^\circ$,转角误差要小于 $|1\ 166.8 \cos\delta|''$ 。

5 结 论

数字天顶仪存在轴系偏差,轴系偏差会对最终的定位结果造成一定的影响,需要对光轴与旋转轴、旋转轴与垂直轴之间进行补偿。通过对称位置的恒星星图直接解算旋转轴位置坐标,避免了光轴与旋转轴之间的补偿,对旋转轴进行倾角补偿得到垂直轴的位置坐标。

在进行轴系补偿的过程中,转台误差会对轴系补偿造成影响。为了提高轴系补偿的准确性进而提高数字天顶仪的定位精度,必须保证在对称

解算测站点地理位置坐标时,使转台转角具有较高的精度。在一般的情况下,测站点位置的纬度

的绝对值都要小于 88.3° ,此时必须保证转台转角误差值在 $35''$ 以内。

参考文献:

- [1] 田立丽,郭金运,韩延本,等. 我国的数字化天顶望远镜样机 [J]. 科学通报,2014, 59(12):1094-1099. TIAN L L, GUO J Y, HAN Y B, *et al.*. Digital zenith telescope prototype of China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2014,59(12):1094-1099. (in Chinese)
- [2] 曾志雄,胡晓东,谷林,等. 数字天顶摄影仪的图像处理 [J]. 光子学报,2004,33(2):248-251. ZENG ZH X, HU X D, GU L, *et al.*. The image processing in the digital zenith camera [J]. *Acta Photonica Sinica*,2004,33(2):248-251. (in Chinese)
- [3] 宋来勇. 基于 CCD/GPS 垂线偏差测量理论算法研究[D]. 山东:山东科技大学,2012. SONG L Y. *Research on theory and algorithm for measuring of vertical deflections based on CCD and GPS*[D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] 郭敏,张红英. CCD 数字摄影在天文定位测量中的运用探讨 [J]. 测绘技术装备,2005,7(1): 28-29. GUO M, ZHANG H Y. The application of CCD in the astronomy orientation [J]. *Measurement Technology Equipment*, 2005,7(1): 28-29. (in Chinese)
- [5] HIRT C, SEEBER G. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the Hannover Digital Zenith Camera System TZK2-D [J]. *Springer*, 2008,8(2):347-356.
- [6] KEREM H, RASIM D, HALUK O. Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in Turkey [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation*,2012, 1(2):115-120.
- [7] 王博,田立丽,王政,等. 数字化天顶望远镜观测图像及数据处理 [J]. 科学通报,2014, 59(12): 1100-1107. WANG B, TIAN L L, WANG ZH, *et al.*. The image and data processing in digital zenith camera [J]. *Chin. Sci. Bull.*,2014, 59(12):1100-1107. (in Chinese)
- [8] 翟广卿,艾贵斌. 数字天顶摄影天文定位测量的工程实现 [J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(3):232-235. ZHAI G Q, AI G B. Digital zenith camera astronomical positioning measurement of project implementation [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*,2014,31(3): 232-235. (in Chinese)
- [9] 郭金运,宋来勇,常晓涛,等. 数字天顶摄影仪确定垂线偏差及其精度分析 [J]. 武汉大学学报信息科学版,2011,36(9):1085-1088. GUO J J, SONG L Y, CHANG X T, *et al.*. Vertical deflection measure with digital zenith camera and accuracy analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1085-1088. (in Chinese)
- [10] HIRT C, BEAT B, SOMIESKI A, *et al.*. Modern determination of vertical deflections using digital zenith camera [J]. *Journal of Surveying Engineering*,2010,9(2):1-12.
- [11] 曾志雄,胡晓东,高立民. 天顶摄影仪轴系误差对垂线偏差测量精度的影响及其修正方法 [J]. 光学精密工程,2004,12(1):6-11. ZENG ZH X, HU X D, GAO L M. Effect of digital zenith camera axis error on measurement precision of vertical deflection and its correction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1):6-11. (in Chinese)
- [12] 张华伟,艾贵斌,魏代勇,等. 数字天顶仪旋转轴解算方法[P]. 中国:2011110406263.9,2012. ZHANG H W, AI G B, WEI D Y. *et al.*. *The method to solve the rotate axis in digital zenith camera*[P]. China:2011110406263.9, 2012. (in Chinese)
- [13] HIRT C, TIMO K. Hochprazise Neigungsmessung mit dem elektronischen pendelneigungssensor HRTM [J]. *Zeitschrift fur Vermessungswesen*, 2004,129(4):266-276.
- [14] 樊锐,史磊. 数字倾角仪的非线性补偿及抗干扰技术 [J]. 仪表技术与传感器,2013,4(5):36-38. FAN R, SHI L. Nonlinear error compensation and anti-jamming technique of digital clinometer [J]. *Instrument Technique and sensor*, 2013, (5): 36-38. (in Chinese)
- [15] HIRT C, GABOR P, ANDRAS, *et al.*. Expected accuracy of tilt measurements on a novel hexapod-based digital zenith camera system: a Monte-Carlo simulation study [J]. *Measurement Science and Technology*,2014(25):1-9.
- [16] SCHOEBEL R, HEIN G, EISSFELLER B, Re-

naissance of astrogeodetic levelling using GPS/
CCD zenith camera [C]. *Proceedings of the IAIN*

*World Congress in association with the U. S. ION
Annual Meeting, San Diego, 2000: 26-28.*

作者简介:



张志利(1966—),男,河南濮阳人,博士,教授,1988年、1991年、2001年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事定位定向、基准传递技术以及仿真技术的研究。
E-mail: effortyao@163.com

通讯简介:



刘先一(1991—),男,河南信阳人,硕士,2013年于第二炮兵工程大学获得学士学位,主要从事定位技术研究。
E-mail: 1397559188@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)