

doi:10.3788/gzxb20154408.0812002

基于数字天顶仪的双轴倾角仪研究

周召发,刘先一,张志利,刘殿剑

(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,西安 710025)

摘 要:数字天顶仪在进行天文定位的过程中存在轴系偏差.为了高准确度地进行倾角补偿,在考虑倾角仪参量的基础上精确推导了倾角的输出数据,并分析了倾角仪参量的准确度对定位结果的影响.得出当倾角仪双轴尺度系数变化值的平方和小于 10^{-6} 时,倾角仪标定参量的变化对定位结果的影响可以忽略.对数字天顶仪的倾斜角和测站点位置准确度对倾角仪参量的标定准确度的影响进行了分析,结果表明倾角在大于 $100''$ 时参量标定的准确度较高,当测站点位置误差小于 $0.23''$ 时对于标定参量的影响较小.

关键词:天文定位;数字天顶仪;双轴倾角仪;倾角补偿;标定参量;测站准确度

中图分类号:TH752

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)08-0812002-6

Research on Two-axis Tilt Sensor Based on Digital Zenith Camera

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

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

Abstract: There exist axis errors when using the digital zenith camera to orient in celestial positioning. In order to improve the precision of tilt compensation, the parameters of the tilt sensor were considered to get the exact data, and the influence of the parameters was analyzed. The result demonstrates that if the square of the two axis scale is below 10^{-6} , the influence can be ignored. The influence of tilt and the precision of station were also analyzed. The analysis of data got from experiments shows that when the tilt is above $100''$, the precision of the parameter will be high, and if the error of the station is below $0.23''$, the influence of tilt parameter can be ignored.

Key words: Celestial positioning; Digital zenith camera; Two-axis tilt sensor; Compensation of tilt; Parameter calibration; Precision of station

OCIS Codes: 120.6085; 120.3930; 120.4640

0 引言

运用数字天顶仪进行定位是一种高准确度的天文定位方法^[1-3].在 21 世纪初德国与瑞士联合研制的 TZK2-D 数字天顶仪的定位准确度可以到达 $0.05''$ ^[4].国内近期研制的 DZT-1 数字天顶仪的定位准确度也有了较大的提高^[5-6],但是相对于国外而言,国内数字天顶仪还处于一个样机的阶段,不够成熟.在运用数字天顶仪进行定位的过程中存在轴系偏差,旋转轴与垂直轴之间不完全重合,需要进行倾角值的补偿.通过双轴倾角仪测量两者之间的倾角^[7-8].倾角仪的输出数据

受到零点偏差和漂移以及随机误差的影响^[9-11].德国的 Christian Hirt 等对于倾角仪的输出数据和倾角补偿进行了研究,但缺少对于倾角仪参量的分析,并且关于倾角仪参量对定位结果的影响的研究较少^[12-13].

在进行定位的过程,倾角仪的参量会直接影响倾角仪的补偿值,因此必须高准确度地对倾角仪参量进行标定^[14].在进行标定的过程中,倾角仪的参量受到倾斜角和已知测站点位置的准确度影响.为了高准确度的进行倾角补偿,本文在考虑倾角仪参量的基础上对于倾角仪输出数据进行了精确处理,并分析了倾角仪标定参量对于定位结果的影响.最后分别对倾斜角

基金项目:国家自然科学基金(No.41174162)资助

第一作者:周召发(1973-),男,副教授,博士,主要研究方向为定位定向与基准传递技术研究. Email:15594979259@139.com

通讯作者:刘先一(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为定位定向与基准传递技术. Email:1397559188@qq.com

收稿日期:2015-01-30;录用日期:2015-04-16

<http://www.photon.ac.cn>

和测站点位置准确度对于倾角仪参量标定的影响进行了分析,并通过实验数据进行了验证.

1 数字天顶仪倾角补偿原理

在运用数字天顶仪进行定位的过程中由于旋转轴与垂直轴不一致,因此需要对旋转轴进行补偿.双轴倾角仪能够高准确度地对倾斜角进行测量.通过双轴倾角仪测量数字天顶仪的倾角,从而实现对旋转轴的补偿,实现高准确度解算测站点位置坐标的目的.倾角补偿原理图如图 1 所示.

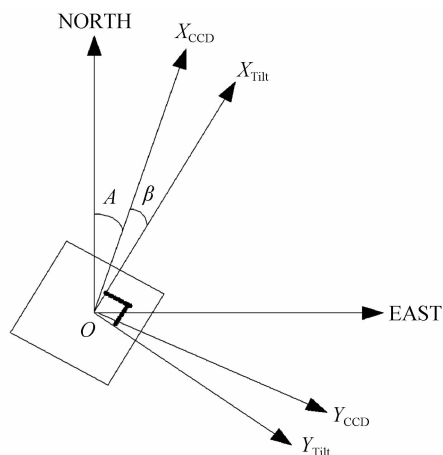


图 1 倾角补偿原理

Fig. 1 The schematic diagram of tilt compensation

对天文经纬度进行补偿可得

$$\begin{cases} \Delta\alpha = (n_1^* \cdot \sin(A + \beta) + n_2^* \cdot \cos(A + \beta)) / \cos(\delta) \\ \Delta\delta = n_1^* \cos(A + \beta) - n_2^* \sin(A + \beta) \end{cases} \quad (1)$$

式中 n_1^* 和 n_2^* 为双轴倾角仪严格正交状态下的值; A 为 CCD 星敏感器安装位置与北向之间的夹角; β 为倾角仪与 CCD 星敏感器之间的夹角; α 与 δ 表示经纬度.

2 倾角仪输出数据的处理

倾角仪的读数直接影响了最终的补偿准确度.为了得到高准确度的倾角测量数据,采取对称位置读取数据的方法.倾角仪的读数存在零点偏差和漂移以及随机产生的噪音误差.其中漂移主要来自于温度的影响,但是在一定时间内温度漂移的数值几乎可以忽略.通过对称位置可以消除零点偏差带来的影响.先在原位置读取倾角仪的数据 n_1 和 n_2 ,再将倾角仪旋转 180° 再次读取倾角仪的读数 n'_1 和 n'_2 .

安装在数字天顶仪上的双轴倾角仪之间的夹角不可能完全正交,在这里令双轴倾角仪之间的夹角为 ϵ ,倾角仪的双轴用 X 与 Y 轴表示, X 与 Y 轴的尺度系数分别为 m_1 与 m_2 ,将 X 与 Y 轴置于初始位置时的读数分别为 n_1 与 n_2 ,与北向之间的夹角为 A .因为 X 与 Y 轴之间不是绝对的正交,存在夹角 ϵ ,所以先将倾角仪读数转化为严格正交的读数 n_1^I 与 n_2^I ,此时包含零点

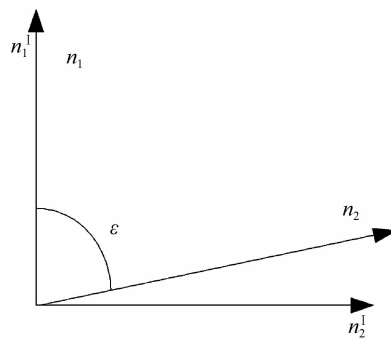


图 2 正交状态下的示意图

Fig. 2 The schematic diagram in orthogonality

偏差 Δn_1 和 Δn_2 . 则有

$$\begin{cases} n_1^I = n_1 \\ n_2^I = \frac{n_2}{\sin \epsilon} - \frac{n_1}{\tan \epsilon} \end{cases} \quad (2)$$

也可表示为 $n_1^I = n_1^* + \Delta n_1$, $n_2^I = n_2^* + \Delta n_2$,此时暂不考虑由于噪音等原因造成的随机误差,其中 n_1^* 与 n_2^* 是倾角仪严格正交状态下不含误差的准确值, Δn_1 与 Δn_2 是倾角仪严格状态下的零漂值.

在旋转 a 角度后, X 与 Y 轴的读数分别为 n_1^I 与 n_2^I ,将倾角仪读数转化为正交读数 n_1^{II} 与 n_2^{II} . 可得

$$\begin{cases} n_1^{II} = n_1^I \\ n_2^{II} = \frac{n_2^I}{\sin \epsilon} - \frac{n_1^I}{\tan \epsilon} \end{cases} \quad (3)$$

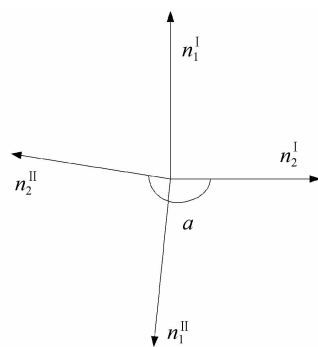


图 3 旋转前后的倾角仪状态

Fig. 3 The condition of tilt sensor

又因为

$$\begin{bmatrix} n_1^{II} \\ n_2^{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a & \sin a \\ -\sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1^* \\ n_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta n_1 \\ \Delta n_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

联立式(2)、(3)、(4)可得

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_1' \\ n_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ \cos \epsilon & \sin \epsilon & 0 & 1 \\ \cos a & \sin a & 1 & 0 \\ \cos(a + \epsilon) & \sin(a + \epsilon) & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1^* \\ n_2^* \\ \Delta n_1 \\ \Delta n_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

考虑倾角仪尺度系数 m_1 与 m_2 、旋转角度 a 和倾角仪双轴夹角 ϵ 后最终可求得倾角仪双轴严格正交状态下的 n_1^* 和 n_2^* .

$$\begin{cases} n_1^* = m_1 n_x - \frac{\sin a}{1 - \cos a} \left(\frac{m_2 n_y}{\sin \epsilon} - \frac{m_1 n_x}{\tan \epsilon} \right) \\ n_2^* = \frac{m_2 n_y}{\sin \epsilon} - \frac{m_1 n_x}{\tan \epsilon} + \frac{\sin a}{1 - \cos a} m_1 n_x \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中 } n_x = \frac{n_1 - n_1'}{2}, n_y = \frac{n_2 - n_2'}{2}.$$

3 标定参量对定位结果的影响

在进行定位时需要对标定参量进行标定. 倾角仪标定的参量会直接影响严格正交状态下倾角仪的输出数据值,使倾角仪正交输出数据产生 Δn_1^* 和 Δn_2^* 的变化量,从而带来倾角仪经纬度补偿值的变化. 因为旋转角度 a 接近 180° , 双轴倾角仪安装角 ϵ 接近 90° . 则有

$$\begin{cases} \frac{\sin a}{1 - \cos a} = \frac{\sin(\Delta a + \pi)}{1 - \cos(\Delta a + \pi)} = -\frac{\Delta a}{2} \\ \frac{m_2 n_y}{\sin \epsilon} - \frac{m_1 n_x}{\tan \epsilon} = \frac{m_2 n_y}{\sin(\Delta \epsilon + \pi/2)} - \\ \frac{m_1 n_x}{\tan(\Delta \epsilon + \pi/2)} = m_2 n_y + m_1 n_x \Delta \epsilon \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可以将式(6)中的倾角仪正交输出数据简化为

$$\begin{cases} n_1^* = m_1 n_x + \frac{\Delta a}{2} (m_2 n_y + m_1 n_x \Delta \epsilon) \\ n_2^* = m_2 n_y + (\Delta \epsilon - \frac{\Delta a}{2}) m_1 n_x \end{cases} \quad (8)$$

由于倾角仪参量变化带来的倾角仪正交状态下输出数据的变化值为

$$\begin{cases} \Delta n_1^* = \Delta m_1 n_x + \frac{\Delta a}{2} \Delta m_2 n_y \\ \Delta n_2^* = \Delta m_2 n_y + (\delta_\epsilon - \frac{\Delta a}{2}) \Delta m_1 n_x \end{cases} \quad (9)$$

式中 Δm_1 与 Δm_2 分别表示标定的 X 与 Y 轴尺度系数的变化值, δ_ϵ 表示标定的双轴倾角仪 X 与 Y 轴之间的夹角误差的变化值.

为了使倾角补偿值的变化对定位结果的准确度影响较小,必须提高倾角参量标定的准确度. 因此研究标定参量对于定位结果的影响十分必要. 由式(1)可得出倾角的补偿值,为了减小倾角补偿对定位准确度的影响,必须保证倾角补偿值的变化量小于 $0.01''$,则有

$$\begin{cases} |(\Delta n_1^* \sin(A + \beta) + \Delta n_2^* \cos(A + \beta)) / \\ \cos(\delta)| \leq 0.01'' \\ |\Delta n_1^* \cos(A + \beta) - \Delta n_2^* \sin(A + \beta)| \leq 0.01'' \end{cases} \quad (10)$$

化简后可得

$$\sqrt{(\Delta n_1^*)^2 + (\Delta n_2^*)^2} \leq 0.01'' \quad (11)$$

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. 表明 n_x 和 n_y 的值均小于 $10''$. 将式

(9)、(10)、(11)联立可得

$$\sqrt{(10\Delta m_1)^2 + (10\Delta m_2 + 10\Delta m_1 \Delta \epsilon)^2} \leq 0.01'' \quad (12)$$

绘制出如图 4 所示的曲线图.

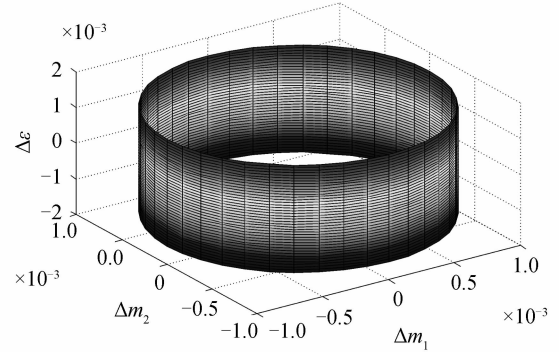


图 4 标定参量值的变化示意图

Fig. 4 The schematic diagram of parameter calibration

因为 Δm_1 、 Δm_2 、 $\Delta \epsilon$ 均是小数,那么 $\Delta m_1 \Delta \epsilon$ 相对而言可以忽略,也就是 $\Delta \epsilon$ 的变化值对于倾角补偿的变化值影响可以忽略,这与图 4 中显示的相一致. 即应满足

$$\Delta m_1^2 + \Delta m_2^2 \leq 10^{-6} \quad (13)$$

式(13)表明倾角补偿值的变化主要受倾角仪双轴的尺度系数变化量 Δm_1 与 Δm_2 的影响(见图 5). 为了减小参量对于补偿结果的影响,必须保证 m_1 与 m_2 的准确度.

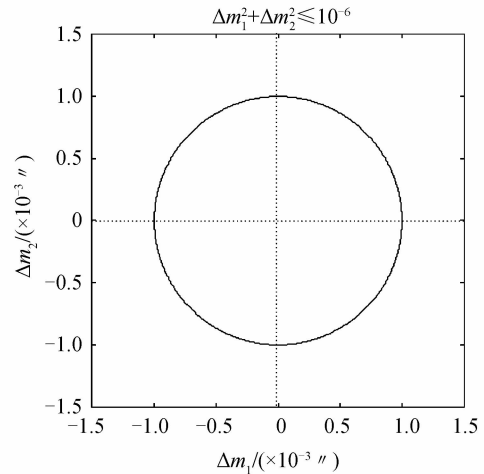


图 5 尺度系数变化的范围

Fig. 5 Range of scale factor

4 影响参量标定的因素分析

在进行倾角仪参量标定时,需要已知测站点的位置坐标信息,并且要使数字天顶仪发生一定的倾斜. 在倾斜状态下拍摄星图,并通过拍摄的星图解算出数字天顶仪的旋转轴对应的天文坐标,将解算的天文坐标值与测站点的真实坐标值之间进行差值,运用最小二乘法反复进行倾角仪的参量标定,直到得到稳定的参量值. 在进行参量标定的过程中,倾角仪参量的标

定结果受到数字天顶仪的倾斜状态以及已知测站点位置准确度的影响,因此研究数字天顶仪的倾斜角度和已知测站点的位置准确度对于倾角仪参量的标定十分必要.

4.1 数字天顶仪倾角对于参量标定的影响

在进行标定的过程中,要使数字天顶仪发生一定的倾斜.倾角仪的数值含有零点偏差,并且倾角仪的数值受到漂移和随机误差的影响.零点偏差可以通过对称位置读数进行消除,在一定的范围漂移的数值也可以忽略.因此倾角仪输出数据主要会受到噪音等随机误差的影响.在运用数字天顶仪进行定位的过程中采集的倾角仪数据的量较小,因此无法采用有效的手段对倾角仪输出的数据进行滤波处理,必须减小随机误差在倾角仪输出数据中的影响.当数字天顶仪倾斜角较小时会导致倾角仪输出数据受噪音等误差影响较大,导致倾角仪数据失真,所以必须在倾角值较大的情况下进行倾角仪参量的标定,根据实验经验可知一般倾角值在 100" 时即可高准确度地进行倾角仪参量的标定.

4.2 测站点位置对于标定参量的影响

在进行倾角仪参量值的标定过程中需要已知测站点位置的信息.对倾角仪参量分别赋初值 $\beta_0, m_{10}, m_{20}, \epsilon_0$. 通过拍摄的星图对测站点位置坐标进行解算,将解算值与已知测站点位置真值进行差值,并运用最小二乘迭代算法分别解算出 $\Delta\beta, \Delta m_1, \Delta m_2, \Delta\epsilon$. 则

$$\begin{cases} \beta = \beta_0 + \Delta\beta \\ m_1 = m_{10} + \Delta m_1 \\ m_2 = m_{20} + \Delta m_2 \\ \epsilon = \epsilon_0 + \Delta\epsilon \end{cases} \quad (14)$$

运用新的倾角仪参量重新进行解算,直到得到稳定的倾角仪参量值.当测站点位置含有误差值时,会带来最终解算的倾角仪参量发生变化.为保证倾角仪参量的变化值对于最终的定位准确度影响较小,必须满足式(13)中的关系式 $\Delta m_1^2 + \Delta m_2^2 \leq 10^{-6}$.

5 实验数据处理与分析

在运用数字天顶仪进行定位的过程中,数字天顶仪的视场角大小为 $3^\circ \times 3^\circ$. CCD 传感器安装在镜筒下方,通过调焦装置与镜筒连接在一起,可随镜筒一起转动. CCD 采用 KAF-16803 全画幅图像传感器,分辨率为 4096×4096 ,像素大小 $9 \mu\text{m}$,有效面积 $36.8 \text{ mm} \times 36.8 \text{ mm}$. 双轴倾角仪为徕卡 Nivel210,工作温度在 $-20 \sim 50^\circ\text{C}$,分辨率 $0.2''$. 进行倾角仪参量的标定时,有小倾角和大倾角两种不同的状态.一般取倾角值输出数据低于 $50''$ 时为小倾角,大于 $50''$ 为大倾角.

5.1 实验条件下的倾角仪数据分析

在倾角值较小时可得如表1所示的一组实验数据.

表 1 小倾角状态下的读数

| $n_1 / (")$ | $n_2 / (")$ | $n'_1 / (")$ | $n'_2 / (")$ |
|-------------|-------------|--------------|--------------|
| -7.013 | 31.971 | -11.757 | 39.396 |
| -12.994 | 32.796 | -7.631 | 38.984 |
| -11.550 | 37.746 | -7.219 | 34.446 |
| -10.932 | 37.127 | -7.838 | 35.890 |
| -7.631 | 36.096 | -10.106 | 37.127 |
| -6.394 | 36.921 | -9.075 | 38.777 |
| -7.631 | 41.046 | -10.725 | 35.890 |
| -12.582 | 39.809 | -5.775 | 36.096 |

在大倾角状态时可以得到如表 2 中所示的一组实验数据.

表 2 大倾角状态下的读数

| $n_1 / (")$ | $n_2 / (")$ | $n'_1 / (")$ | $n'_2 / (")$ |
|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 73.636 | -74.667 | -99.007 | 74.049 |
| -6.806 | -111.382 | -18.151 | 113.858 |
| -84.774 | -81.062 | 64.973 | 81.474 |
| -122.315 | -8.869 | 100.450 | 5.362 |
| 100.244 | 5.362 | -121.902 | -9.075 |
| 64.973 | 81.680 | -83.743 | -80.855 |
| -18.151 | 114.270 | -5.362 | -110.145 |
| -99.213 | 74.049 | 74.874 | -72.811 |

通过对小倾角和大倾角状态下的倾角仪数据分别进行处理可得出如图 6、7 所示的曲线图.

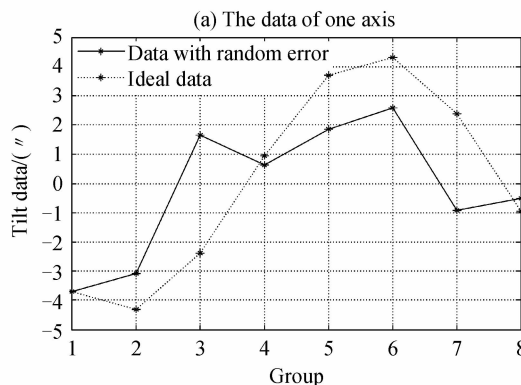
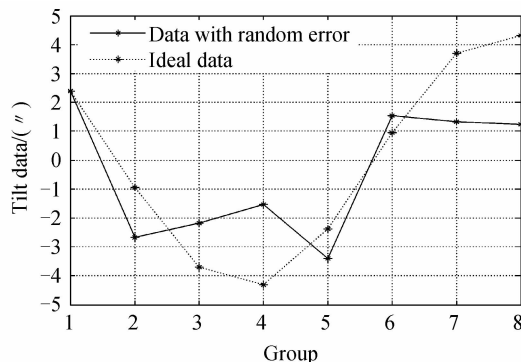


图 6 小倾角下的数据

Fig. 6 The data in small inclination

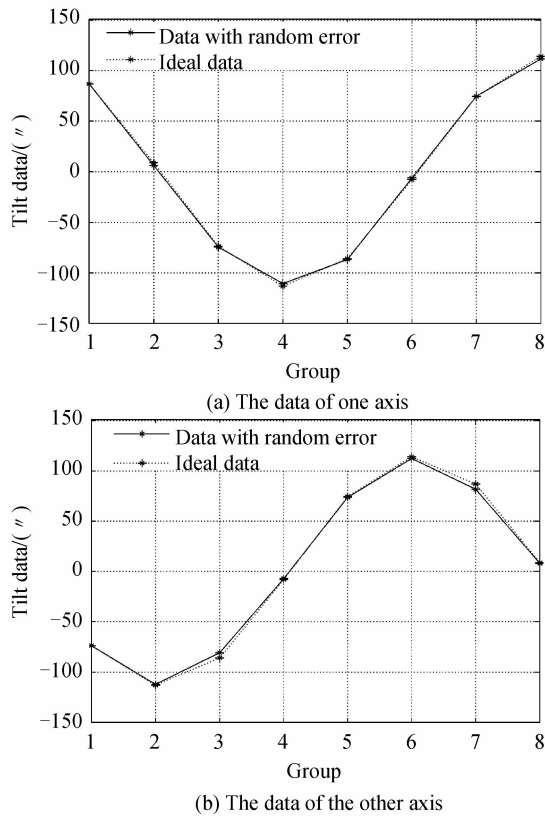


图7 大倾角下的数据
Fig. 7 The data in big inclination

从实验数据处理的结果可以明显地看出,在小倾角状态下,随机误差对倾角仪数据的影响较大,会导致倾角仪的数据失真,因此在小倾角状态下进行倾角仪参数的标定是不合适的.在大倾角状态下,随机误差对于倾角仪数据的影响较小,处理后的倾角仪数据与理想状态下倾角仪的数据几乎一致.表明在大倾角状态下进行倾角仪参数的标定是可行的.通过大量的实验可以知道当倾角仪的数值在 $100''$ 左右时倾角仪的标定参数准确度较高.

5.2 测站点位置变化条件下的实验数据分析

在大倾角状态下对倾角仪参数进行标定,已知测站点位置的坐标为 $(109.121228^{\circ}, 34.316016^{\circ})$,不断改变已知测站点位置的误差值,并分别对倾角仪参数进行标定,可以得出表3所示的标定参数的值.

表3 倾角仪参数的值

Table 3 Result of tilt parameter

| Station error/($''$) | m_1 | m_2 |
|------------------------|-----------|------------|
| -0.25 | -1.047191 | -1.031501 |
| -0.2 | -1.047395 | -1.0317264 |
| -0.1 | -1.047804 | -1.032175 |
| 0 | -1.048214 | -1.032626 |
| 0.1 | -1.048625 | -1.033078 |
| 0.2 | -1.049038 | -1.033532 |
| 0.25 | -1.049246 | -1.033761 |

分别绘制参数 m_1 和 m_2 的变化曲线,可得如图8

所示的变化趋势.

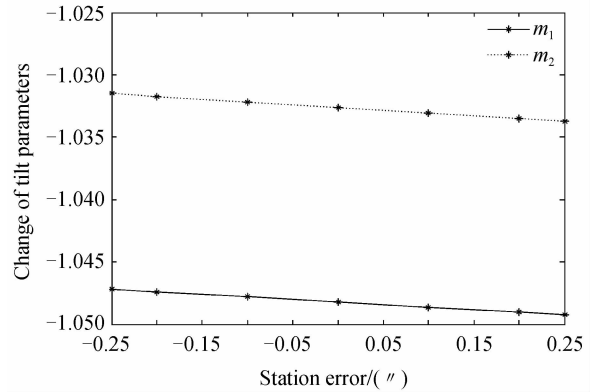


图8 m_1 和 m_2 的变化示意图

Fig. 8 The schematic diagram about the change of m_1 and m_2

可以看出在不考虑其他因素的情况下,参量随着测站点位置基本成线性变化.为保证倾角仪参数的变化值对于定位准确度的影响较小,必须满足式(13),解算后可得当测站点的经纬度误差值分别在 $0.23''$ 以内时,能够保证标定的倾角仪参量值对于最终的定位结果影响较小.

6 结论

倾角仪参数直接影响最终的定位准确度,为了高准确度的进行倾角仪参数的标定,必须对倾角仪的输出数据进行精确处理.为了减小倾角仪的参数对于定位结果的影响,必须提高倾角仪标定参数的准确度.当数字天顶仪倾斜角大于 $100''$ 时,倾角仪的标定参数准确度较高.当测站点位置坐标的经纬度误差值在 $0.23''$ 时,能够保证倾角仪标定的参量满足定位准确度的要求.

参考文献

- [1] TIAN Li-li, GUO Jin-yun, HAN Yan-ben, et al. Digital zenith telescope prototype of China [J]. *China Science Bulletin*, 2014, **59**(12): 1094-1099.
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.
- [2] 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.
- [3] GUO Min, ZHANG Hong-yin. The application of CCD in the astronomy orientation [J]. *Measurement Technology Equipment*, 2005, **7**(1): 28-29.
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.
- [4] HIRT C, SEEGER G. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the hannover digital zenith camera system TZK2-D[J]. *Springer*, 2008, **8**(2): 347-356.
- [5] WANG Bo, TIAN Li-li, WANG Zheng, et al. The image and data processing in digital zenith camera [J]. *China Science Bulletin*, 2014, **59**(12): 1100-1107.
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.
- [6] ZHAI Guang-qin, AI Gui-bin. Digital zenith camera astronomical positioning measurement of project implementation [J]. *Journal of Geomatics Science and*

- Technology, 2014, **31**(3): 232-235.
- 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.
- [7] ZENG Zhi-xiong, HU Xiao-dong, GAO Li-min. Effect of digital zenith camera axis error on measurement precision of vertical deflection and its correction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(1): 6-11.
- 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准确度的影响及其修正方法[J]. 光学精密工程, 2004, **12**(1): 6-11.
- [8] GUO Jin-yun, SONG Lai-yong, CHANG Xiao-tao, *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.
- 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准确度分析[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2011, **36**(9): 1085-1088.
- [9] WEN Xiang-wen, PAN Ming-hua, ZHU Guo-li. Research on characteristic of the inclinometer and compensation for its measurement error [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, **30**(3): 84-86.
- 文香稳, 潘明华, 朱国力. 倾角仪特性研究及其测量误差补偿[J]. 传感器与微系统, 2011, **30**(3): 84-86.
- [10] YU Na, LIU Zhi-yuan, ZHAO Jia-long. Research of temperature compensation of inclination sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, **33**(10): 14-16.
- 于娜, 刘志远, 赵佳龙. 倾角传感器的温度补偿研究[J]. 传感器与微系统, 2014, **33**(10): 14-16.
- [11] FAN Rui, SHI Lei. Nonlinear error compensation and anti-jamming technique of digital clinometer [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013, **12**(5): 36-38.
- 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, **12**(5): 36-38.
- [12] HIRT C, TIMO K. Hochprazise neigungsmessung mit dem elektronischen pendelneigungssensor HRTM[J]. *Zeitschrift fur Vermessungswesen*, 2004, **129**(4): 266-276.
- [13] HIRT C, GABOR P, ANDRAS P, *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, **5**(25): 1-9.
- [14] HIRT C, BURKI B, SOMISEKI A, *et al.* Modern determination of vertical deflection using digital zenith cameras[J]. *Surveying Engineering*, 2010, **2**(1): 1-12.
- [15] 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.