

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205268

# 面向双相机标靶的倾斜仪安装误差补偿方法<sup>\*</sup>

黄 喆<sup>1</sup> 沈小玲<sup>1</sup> 张 历<sup>2</sup> 徐叶倩<sup>1</sup> 燕庆德<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院 天津 300222; 2. 贵州电网有限责任公司 贵阳 550002)

**摘 要:**针对双轴倾斜仪在和其他位姿测量传感器组合应用时,由于自身坐标轴真实指向无法通过机械外壳准确映射,造成其难以实现安装位置误差精确标定,进而导致引入测量误差的问题。以面向直线顶管掘进机导向的双相机标靶为研究对象,利用三点位姿转换算法求取姿态角理论值,再结合双轴倾斜仪角度测量值建立误差补偿矩阵,对姿态参数进行校正。通过仿真分析和实测实验,提出的方法可以实现双轴倾斜仪测量角度信息的精确补偿,姿态角绝对测量精度优于 0.02°,满足直线顶管导向行业精度要求,并可以在其他基于双轴倾斜仪的组合测量系统中广泛应用。

**关键词:**姿态测量;倾斜仪;安装误差;误差补偿

**中图分类号:** TN2      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Compensation method for installation error of inclinometer with dual-camera target

Huang Zhe<sup>1</sup> Shen Xiaoling<sup>1</sup> Zhang Li<sup>2</sup> Xu Ye-qian<sup>1</sup> Yan Qingde<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;  
2. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

**Abstract:** When the dual-axis inclinometer is used in combination with other position and orientation measurement sensors, since the true direction of its own coordinate axis cannot be accurately mapped by the mechanical enclosure, it is difficult to achieve accurate calibration of the installation position error, which leads to the problem of measurement error. The object of the study is the dual-camera target of the linear pipe jacking machine guidance. The theoretical value of the attitude angle is obtained by three points pose transformation algorithm, and then combined with the angle measurement value of the dual-axis inclinometer to establish an error compensation matrix, which is used to correct the pose parameters. Through simulation analysis and actual measurement experiments, the proposed method can realize the accurate compensation of the measurement angle information of the dual-axis inclinometer, and the absolute measurement accuracy of the attitude angle is better than 0.02°, which meets the accuracy requirements of the linear pipe jacking guidance. It can be widely used in other combined measurement systems based on dual-axis inclinometer.

**Keywords:** pose measurement; inclinometer; installation error; error compensation

## 0 引 言

随着我国城市化进程的不断推进,工业测量技术在施工建设中发挥着越来越重要的作用。在测量场景中,光电测量设备经常和倾斜仪同步组合使用,如盾构机导向系统激光标靶、直线顶管机导向系统双相机标靶、双护盾 TBM 前盾/支撑盾相对位姿测量系统、wMPS 分布式坐

标测量系统等。在测量系统中,倾斜仪能够提供相对于水平面的两个倾角的精确测量,具有独立自主和高精度的特点。但是,由于倾斜仪不同于惯性导航系统,其只能测量双轴倾角,“航向”角度测量功能的缺失使使用者无法获取倾斜仪 x 或 y 轴的准确指向,造成了安装误差,导致倾斜仪两个敏感轴很难和定义在基座上的载体坐标系重合,进而造成系统测量的角度和真值之间产生固有的偏差<sup>[1-5]</sup>。另外,缺乏航向角约束导致倾斜仪无法提供三

收稿日期: 2022-03-15      Received Date: 2022-03-15

<sup>\*</sup> 基金项目: 天津市自然科学基金(18JCYBJC88600)、天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室开放课题(pilab1905)项目资助

轴姿态信息,也就无法通过类似机器人手标定的“ $AX = XB$ ”原理实施外参数标定。常路宾等<sup>[6]</sup>针对惯性测量组件坐标系和载体坐标系不正交的问题,通过双轴转位方案能够使正交安装误差分量进行调制提高系统精度,且不会因转体运动引入较大额外误差。然而在调制过程中,按次序对轴进行转动到达指定位置,需要停止时间 $t$ 进行下一个轴的转动,导致本方案的标定时间较长。邓川<sup>[7]</sup>研究了倾角传感器的双轴与轨道测量仪的横向、纵向均不平行时造成的安装误差对超高测量的影响。当倾角测量轴与设备测量轴只存在单轴不平行的情况时,通过在倾斜的平台上旋转传感器 $z$ 轴使 $x$ 轴输出最小值,并对其输出值进行修正,实现 $x$ 轴与标定平台的旋转轴平行。而当双轴均不平行时,超高测量的影响随轨道几何状态的变化而变化,无法通过标定修正误差。因此,研究针对双轴倾斜仪安装误差的校准和标定问题,具有很强的应用价值。

上述安装误差补偿方法的标定效率和精度较低,对于工程适用性缺少必要的研究和说明。基于直线顶管机导向系统的双相机标靶倾斜仪安装误差,提出了一种安装位置误差模型及补偿方法,利用三点位姿转换算法求取姿态角理论值,再结合倾斜仪的角度测量值建立误差补偿矩阵,对姿态参数进行校正。该方法需要的辅助仪器少,操作简便,能够提高位姿测量的精度,有效地解决实际工程应用问题。

## 1 基本原理

### 1.1 双相机标靶测量模型

顶管施工是一种少开挖或者不开挖的地下管道铺设技术,其原理是借助于主顶油缸及管道中继等推力把直线顶管掘进机<sup>[8-9]</sup>从工作井内穿过土层一直推进到接收井内,同时将管道埋设在两井之间。在掘进过程中,刀盘持续旋转切削土层,由于土壤硬度和推力不均匀,导致直线顶管掘进机机身偏离隧道设计轴线。因此需要实时测量掘进机相对于隧道设计轴线的水平偏差和垂直偏差,从而保证隧道的正确掘进和顺利贯通。

双相机标靶作为直线顶管掘进机导向系统<sup>[10]</sup>的核心组件,安装在铰接油缸后端面。利用激光器发射一道已知空间方位信息的指示激光指向双相机标靶<sup>[11]</sup>,再通过光斑图像高性能处理、标靶网格标定检索以及空间矩阵变换的方法,计算出掘进机的位姿参数。双相机标靶主要由两个工业相机、两块感光成像屏和倾斜仪构成,如图1所示。其中,双轴倾角仪安装在双相机标靶底端,用于测量标靶的俯仰角和滚转角。

### 1.2 位姿测量原理

为实现直线顶管掘进机的导向功能,需要对坐标系

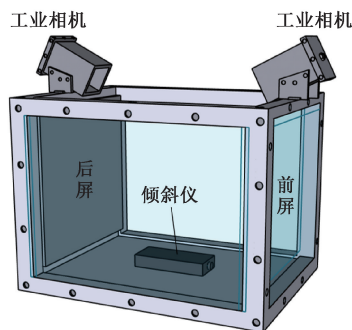


图1 双相机标靶的结构

Fig. 1 The structure of the dual-camera target

进行定义。如图2所示,该系统中的坐标系有:工程坐标系 $O_n - X_n Y_n Z_n$ 、双相机标靶坐标系 $O_s - X_s Y_s Z_s$ 。

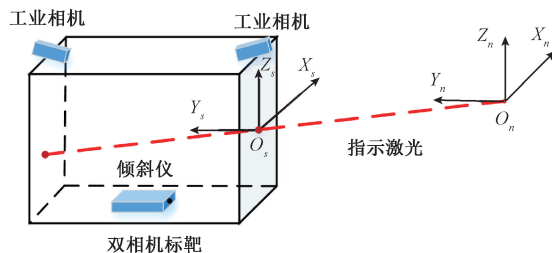


图2 坐标系定义

Fig. 2 Definition of coordinate frames

一道已知空间方位信息的指示激光指向双相机标靶,同时在标靶的前后屏呈现光斑。根据同一矢量在不同坐标系下进行转换,解算得到工程坐标系到双相机标靶坐标系的姿态角,可以表示为:

$$\vec{L}_s = \mathbf{R}_n^s \cdot \vec{L}_n \quad (1)$$

指示激光用于复刻隧道设计轴线,即指示激光与隧道设计轴线平行。直线顶管机掘进线路为直线,指示激光的水平角和垂直角与设计线路一致,因此指示激光的空间方位信息为已知量,从而获得工程坐标系下的方向矢量 $\vec{L}_n$ 。两个工业相机获取指示激光在前后屏呈现的光斑位置信息,由光斑坐标获得双相机标靶坐标系下的方向矢量 $\vec{L}_s$ 。工程坐标系到标靶坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}_n^s$ 为标靶绕 $Y$ 、 $X$ 、 $Z$ 轴旋转得到的矩阵:

$$\mathbf{R}_n^s = \mathbf{R}_y^s \cdot \mathbf{R}_x^s \cdot \mathbf{R}_z^s \quad (2)$$

$\mathbf{R}_y^s$ 、 $\mathbf{R}_x^s$ 、 $\mathbf{R}_z^s$ 分别由标靶俯仰角 $\beta$ 、滚转角 $\alpha$ 、方位角 $\gamma$ 构成。在理想状态下,倾斜仪测量的滚转角和俯仰角就是双相机标靶的滚转角和俯仰角。倾斜仪的测量输出值是其敏感轴与水平面之间的夹角,俯仰角 $\beta$ 由倾斜仪的测量输出直接获得,滚转角 $\alpha$ 不仅取决于倾斜仪的测量输出 $\phi$ 还与俯仰角 $\beta$ 有关,如图3所示。

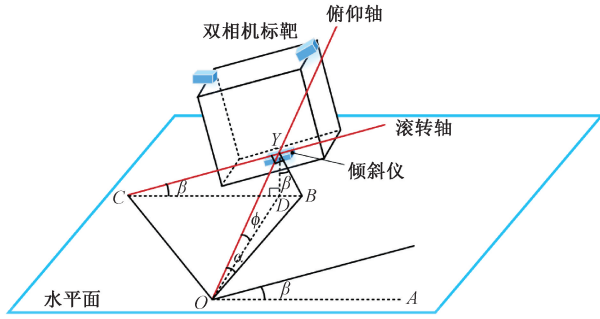


图3 解算滚转角原理

Fig. 3 Schematic diagram of calculating roll angle

$$\sin\phi = \frac{YD}{YO} \quad (3)$$

$$\cos\beta = \frac{YD}{YB} \quad (4)$$

$$\sin\alpha = \frac{YB}{YO} \quad (5)$$

因此滚转角  $\alpha$  可以表示为:

$$\alpha = \arcsin \frac{\sin\phi}{\cos\beta} \quad (6)$$

$\vec{L}_n$  和  $\vec{L}_s$  为已知量,将俯仰角  $\beta$  和滚转角  $\alpha$  代入式(1)获得双相机标靶的方位角,从而实现顶管掘进机的角度测量。然而在实际测角过程中,标靶的倾斜仪在组合安装时存在一定的偏差,导致双轴倾斜仪测量的角度仅仅是自身的滚转角和俯仰角,而不是标靶的滚转角和俯仰角<sup>[12-14]</sup>。为确保双相机标靶的初始校准和精度,需要对安装误差参数进行补偿。

### 1.3 安装误差补偿

在位姿测量系统中,倾斜仪作为双相机标靶的核心组件能够获取标靶的滚转角和俯仰角,为补偿倾斜仪安装误差而造成的角度测量误差,因此对存在安装误差的情况进行分析。坐标系定义如图4所示,建立工程坐标系  $O_n - X_n Y_n Z_n$ , 双相机标靶坐标系  $O_s - X_s Y_s Z_s$ , 倾斜仪坐标系为  $O_q - X_q Y_q Z_q$ , 标靶坐标系平移至与倾斜仪坐标系同一原点处记为坐标系  $O'_s - X'_s Y'_s Z'_s$ 。

在补偿坐标系非正交引起的角度测量误差中,需要

$$\begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\beta\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ -\cos\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma \\ \sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\cos\beta\sin\gamma & \sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix}$$

双相机标靶的倾斜仪在组合安装时存在的偏差是由于方位角的安装误差而导致滚转角和俯仰角的测量误差,不考虑  $Z$  轴的运动<sup>[16]</sup>。因此双相机标靶坐标系和倾斜仪坐标系下的滚转角、俯仰角关系可以表示为:

$$\mathbf{R}_y^s \cdot \mathbf{R}_x^s = \delta \cdot \mathbf{R}_y^q \cdot \mathbf{R}_x^q \quad (9)$$

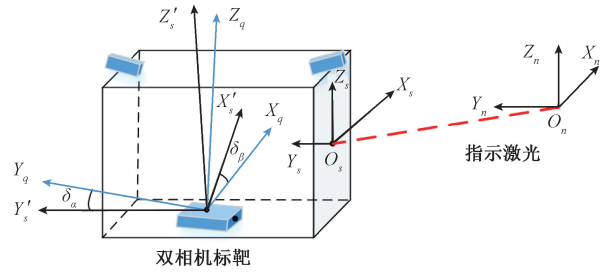


图4 存在安装误差时的坐标系定义

Fig. 4 Definition of the coordinate frames at installation error

通过双相机标靶角度的理论值和测量值求取补偿矩阵对误差参数进行修正。工程坐标系到双相机标靶坐标系的旋转矩阵理论值表示为:

$$\mathbf{R}_n^s = [\mathbf{X}_s^T, \mathbf{Y}_s^T, \mathbf{Z}_s^T] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

全站仪测量双相机标靶前屏处的4个反射片  $a, b, c, d$  的坐标,再通过三点位姿变换算法<sup>[15]</sup>建立标靶坐标系,从而获得  $X_s, Y_s$  和  $Z_s$  轴的方向向量理论值,如图5所示。

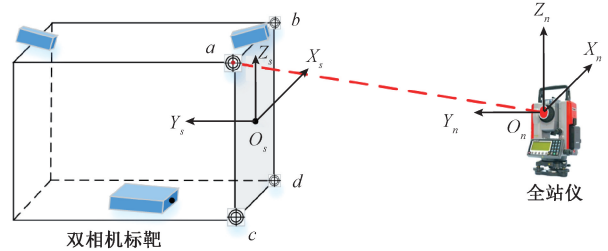


图5 三点位姿变换算法原理

Fig. 5 The principle of the three points pose transformation algorithm

由  $a, b$  两点来构造向量  $\vec{ab}$  作为的  $X_s$  轴。矢量  $\vec{ac}$  和  $\vec{ab}$  在该点处相交  $a$  点,  $Y_s$  轴表示为  $\vec{y} = \vec{ac} \times \vec{ab}$ ,  $Z_s$  轴表示为  $\vec{z} = \vec{x} \times \vec{y}$ 。将求得的  $r_{11} \sim r_{33}$  值代入式(2),计算出双相机标靶俯仰角  $\beta$ 、滚转角  $\alpha$ 、方位角  $\gamma$  真实值作为误差补偿过程中的理论值。

$$\begin{bmatrix} -\cos\alpha\sin\beta \\ \sin\alpha \\ \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\mathbf{R}_y^s, \mathbf{R}_x^s$  是由双相机标靶俯仰角和滚转角理论值构成的矩阵,  $\mathbf{R}_y^q, \mathbf{R}_x^q$  是由倾斜仪俯仰角和滚转角测量值构成的矩阵。误差矩阵  $\delta$  是通过  $X_q$  轴与  $X'_s$  轴的夹角  $\delta_\beta$  以及  $Y_q$  轴与  $Y'_s$  轴的夹角  $\delta_\alpha$  计算得到。

$$\delta = R_y' \cdot R_x' = \begin{bmatrix} \cos(\delta_\beta) & 0 & -\sin(\delta_\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\delta_\beta) & 0 & \cos(\delta_\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta_\alpha) & \sin(\delta_\alpha) \\ 0 & -\sin(\delta_\alpha) & \cos(\delta_\alpha) \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于在安装误差中的 $\delta_\alpha$ 和 $\delta_\beta$ 均为小角度,忽略小角度间的高阶小量,因此 $\cos(\delta_\alpha) \approx 1, \cos(\delta_\beta) \approx 1, \sin(\delta_\alpha) \approx \delta_\alpha, \sin(\delta_\beta) \approx \delta_\beta$ ,由式(10)化简可得:

$$\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\delta_\beta \\ 0 & 1 & \delta_\alpha \\ \delta_\beta & -\delta_\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过误差矩阵建立双相机标靶俯仰角、滚转角的理论值 $\beta, \alpha$ 和倾斜仪俯仰角、滚转角的测量值 $\beta', \alpha'$ 的关系。

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 1 \end{bmatrix} = \delta \cdot \begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ 1 \end{bmatrix} + E \quad (12)$$

其中, $\delta$ 为 $3 \times 3$ 的误差补偿矩阵, $E$ 为残差。由于双相机标靶中倾斜仪的安装位置误差不会随时间变化而变化,属于系统误差<sup>[17-20]</sup>。因此,利用误差修正量,从测量数据中消除误差分量。安装位置误差补偿方程可以表示为:

$$\begin{cases} \alpha = k_1 \cdot \alpha' + b_1 \\ \beta = k_2 \cdot \beta' + b_2 \end{cases} \quad (13)$$

当倾斜仪在双相机标靶的安装位置固定之后, $k_1, k_2, b_1$ 和 $b_2$ 的值可以计算出来,从而利用误差修正模型补偿倾斜仪的方位角安装误差而引起的滚转角和俯仰角测量误差。

## 2 实验验证

### 2.1 仿真实验

为了验证理论推导的可行性,进行仿真实验。采用SolidWorks软件中的3D草图绘制功能,不选取面作为载体,直接在图形区域绘制草图空间,建立倾斜仪与双相机标靶坐标系的几何关系,并设计两者轴线不平行的安装位置模型进行约束。SolidWorks软件能够准确获取仿真中倾斜仪坐标系和双相机标靶坐标系下对应的滚转角和俯仰角理论值。

仿真过程中设计了双相机标靶和倾斜仪的坐标系不平行的情况模拟倾斜仪的安装位置误差,如图6所示。将水平面绕双相机标靶的轴线旋转 $\pm 10^\circ$ ,分别测量在倾斜仪坐标系和双相机标靶坐标系下的滚转角和俯仰角。由图7可知,倾斜仪滚转角和俯仰角的测量误差分别为 $0.09^\circ$ 和 $0.15^\circ$ 。

当双相机标靶的滚转角和俯仰角变化范围为 $\pm 10^\circ$ 时,倾斜仪与标靶之间的滚转角和俯仰角呈线性关系,如

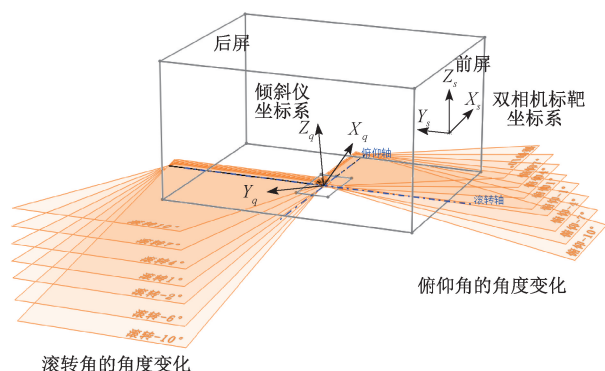


图6 仿真实验

Fig. 6 Simulation experiment

图8和9所示。

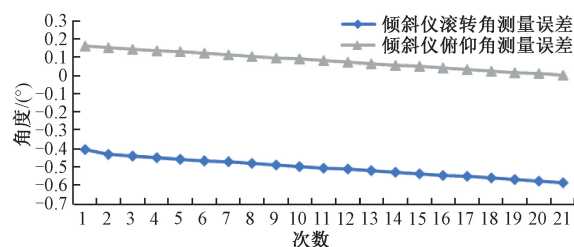


图7 滚转角和俯仰角的仿真数据

Fig. 7 Simulation data for roll and pitch angles

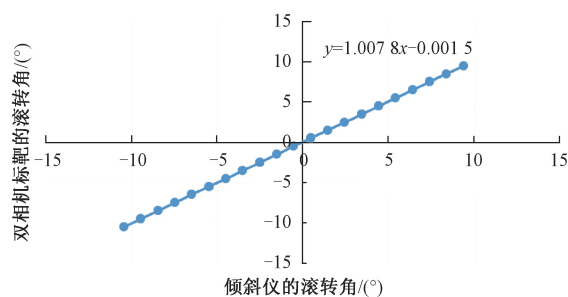


图8 仿真的滚转角误差补偿模型

Fig. 8 Compensation model of roll angle error based on Simulation

通过上述仿真数据分析,双相机标靶的倾斜仪安装位置误差对滚转角和俯仰角的测量精度具有较大影响。安装误差不会随时间的变化而变化,因此属于系统误差<sup>[21-23]</sup>。为了验证线性模型能否有效补偿滚转角和俯仰角的测量误差,实测实验设计如下。

### 2.2 补偿结果及分析

为验证所提出方法的正确性和可行性,设计了如下

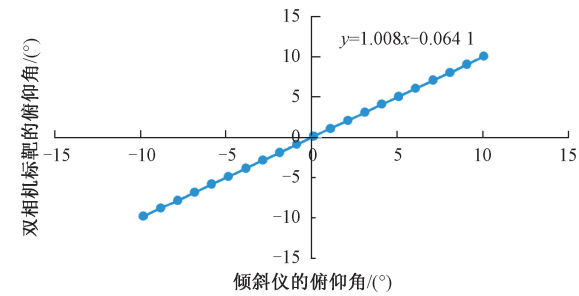


图 9 仿真的俯仰角误差补偿模型

Fig. 9 Compensation model of pitch angle error based on simulation

实验。在实验过程中,搭建一个 1.3 m×0.8 m×1.3 m 的铝型材框架作为测试工装,将双相机标靶与测试工装稳定连接,全站仪与测试工装的距离约为 12 m,实验环境如图 10 所示。

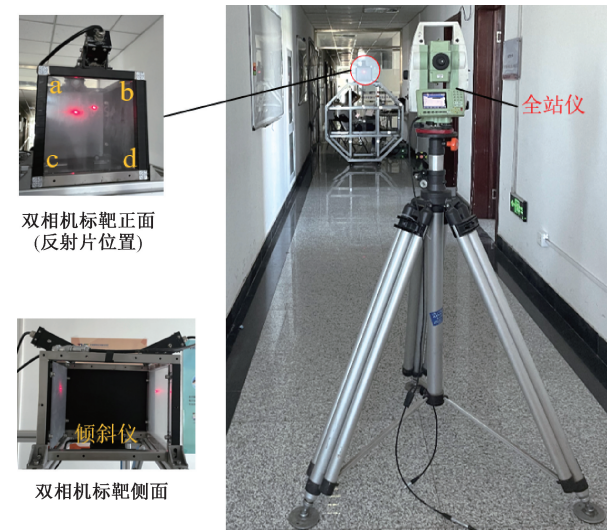


图 10 实验环境

Fig. 10 Experimental environment

通过在测试工装的底部依次垫入不同高度的垫块,模拟直线顶管掘进机的角度变化,测量在不同角度下双相机标靶的倾斜仪安装误差,再利用高精度全站仪测量标靶的姿态角作为参考值,实验设备及硬件参数如表 1 所示。

表 1 硬件参数

Table 1 Hardware parameters

| 设备  | 技术参数           |
|-----|----------------|
| 全站仪 | 型号: Leica TS12 |
|     | 角度测量精度: 2"     |
|     | 角度测量分辨率: 0.1"  |
|     | 测量时间: 1.5 s    |
| 倾斜仪 | 型号: SST-460-30 |
|     | 角度测量精度: 0.01°  |

当倾斜仪在双相机标靶的安装位置固定之后,为了获取滚转角和俯仰角的测量误差,利用全站仪测量双相机标靶前屏反射片的坐标求取姿态角,同时记录倾斜仪在每个姿态下滚转角和俯仰角的测量值,实验数据如图 11 所示。

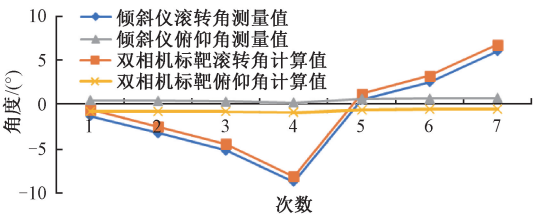


图 11 滚转角和俯仰角的实验数据

Fig. 11 Experimental data for roll and pitch angles

由图 11 可知,双相机标靶的倾斜仪组合安装后,滚转角和俯仰角的测量误差分别为 2.616 2° 和 2.616 4°。通过双相机标靶与倾斜仪测量值拟合出滚转角和俯仰角误差补偿模型如图 12 和 13 示。

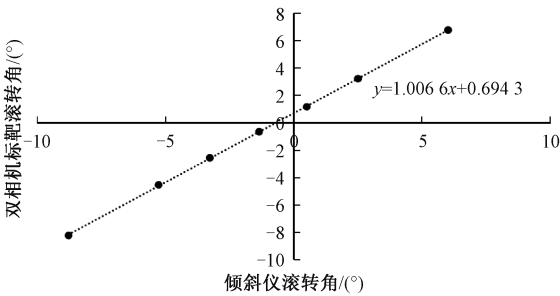


图 12 实测的滚转角误差补偿模型

Fig. 12 Compensation model of roll angle error in actual measurement

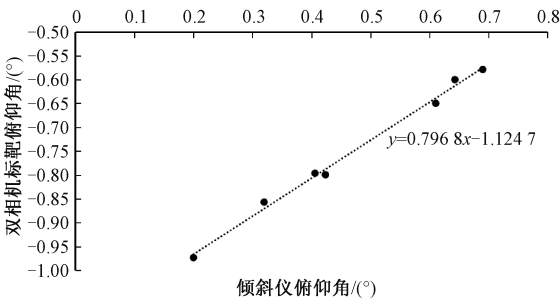


图 13 实测的俯仰角误差补偿模型

Fig. 13 Compensation model of pitch angle error in actual measurement

为验证倾斜仪安装误差补偿后的角度测量精度,设计了绝对测量精度评定和现有误差标定方法的补偿效果对比实验。在测试工装的底部垫入不同高度的垫块,任意选取 10 组数据,记录倾斜仪的测量值,利用误差补偿

模型对倾斜仪的角度测量值进行修正。全站仪测量反射片坐标计算出双相机标靶的角度作为参考值,最后以高精度全站仪测量值为基准验证所提出方法的角度测量精度,将姿态角修正值与标靶测量值进行对比,两者的差值作为绝对精度评定的依据,实验数据如表 2 所示。将现有方法与提出方法的补偿结果进行对比,如图 14 和 15 所示。

表 2 绝对测量精度评定的实验数据

| Table 2 Experimental data for the evaluation of absolute measurement accuracy (°) |     |            |          |              |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|------------|----------|--------------|----------|
| 序号                                                                                | 名称  | 倾斜仪<br>测量值 | 修正值      | 双相机标<br>靶角度值 | 差值       |
| 1                                                                                 | 滚转角 | -1.432 9   | -0.730 3 | -0.748 6     | -0.018 3 |
|                                                                                   | 俯仰角 | -0.873 4   | -2.092 8 | -2.107 3     | -0.014 5 |
| 2                                                                                 | 滚转角 | -4.713 8   | -4.038 6 | -4.051 1     | -0.012 5 |
|                                                                                   | 俯仰角 | 0.334 8    | -0.909 8 | -0.898 1     | 0.011 7  |
| 3                                                                                 | 滚转角 | -4.715 7   | -4.036 2 | -4.053 1     | -0.016 9 |
|                                                                                   | 俯仰角 | 0.273 6    | -0.942 1 | -0.959 4     | -0.017 3 |
| 4                                                                                 | 滚转角 | -1.222 7   | -0.536 4 | -0.548 9     | -0.012 5 |
|                                                                                   | 俯仰角 | 0.425 0    | -0.786 0 | -0.804 5     | -0.018 5 |
| 5                                                                                 | 滚转角 | -4.715 5   | -4.052 3 | -4.034 1     | 0.018 1  |
|                                                                                   | 俯仰角 | 0.383 6    | -0.819 0 | -0.837 7     | -0.018 6 |
| 6                                                                                 | 滚转角 | -9.090 9   | -8.456 6 | -8.470 0     | -0.013 4 |
|                                                                                   | 俯仰角 | 0.167 5    | -0.991 2 | -1.007 9     | -0.016 7 |
| 7                                                                                 | 滚转角 | 2.541 0    | 3.252 0  | 3.240 4      | -0.011 5 |
|                                                                                   | 俯仰角 | 0.612 0    | -0.637 0 | -0.619 6     | 0.017 4  |
| 8                                                                                 | 滚转角 | 7.026 5    | 7.767 1  | 7.756 3      | -0.010 8 |
|                                                                                   | 俯仰角 | 0.947 1    | -0.370 0 | -0.354 5     | 0.015 4  |
| 9                                                                                 | 滚转角 | -1.210 2   | -0.523 8 | -0.511 6     | 0.012 2  |
|                                                                                   | 俯仰角 | 3.276 0    | 1.485 6  | 1.504 9      | 0.019 3  |
| 10                                                                                | 滚转角 | -1.210 4   | -0.524 0 | -0.542 3     | -0.018 2 |
|                                                                                   | 俯仰角 | 5.789 3    | 3.488 2  | 3.502 7      | 0.014 5  |

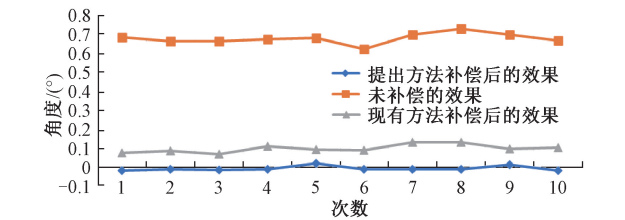


图 14 滚转角补偿效果对比

Fig. 14 Comparison chart of roll angle compensation effect

实验结果表明,提出方法的滚转角和俯仰角补偿后的绝对测量精度优于 $0.02^{\circ}$ ,现有方法的绝对测量精度优于 $0.12^{\circ}$ 。相比于现有方法多次获取标靶误差角,通过求取误差角的均值补偿倾斜仪的角度测量值,提出的补偿方法能够有效修正倾斜仪的安装误差,提高了双相机标靶的标定效率和角度测量精度。

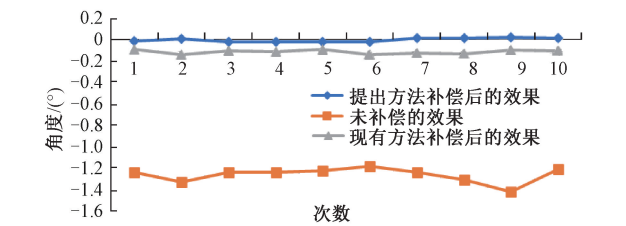


图 15 俯仰角补偿效果对比

Fig. 15 Comparison chart of pitch angle compensation effect

3 结 论

本文提出了一种安装位置误差模型及补偿方法,利用三点位姿转换算法求取姿态角理论值,再结合双轴倾斜仪的角度测量值建立误差补偿矩阵,对姿态参数进行校正,并通过仿真和实验验证了误差补偿模型的正确性。该方法能够补偿双相机标靶中倾斜仪两个敏感轴与载体坐标系不平行引起的测角误差,具有标定方法简单和精度高的优点,同时也可以应用在其他基于双轴倾斜仪的组合测量系统。在现场应用中,顶管掘进机向前掘进时产生的振动会降低双相机标靶的角度测量准确度,因此在未来的工作中,将进一步研究振动环境下倾斜仪的输出特性和振动误差。

参考文献

[ 1 ] 王艺飞,秦刚,陈忠孝,等. 双轴姿态传感器测试平台设计[J]. 国外电子测量技术,2020,39(10):99-103.  
WANG Y F, QIN G, CHEN ZH X, et al. Design of test platform for dual-axis attitude sensor [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39 ( 10 ): 99-103.

[ 2 ] 朱朔凌,毛建旭,王耀南,等. 基于惯性导航角度补偿的室内激光 SLAM 方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(3):1-7.  
ZHU SH L, MAO J X, WANG Y N, et al. Indoor laser SLAM method based on inertial navigation angle compensation [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33 ( 3 ): 1-7.

[ 3 ] 潘萌,程为彬,贾宏亮,等. 一种测斜仪安装位置误差补偿方法[J]. 测试技术学报,2014,28(3):219-224.  
PAN M, CHENG W B, JIA H L, et al. An inclinometer installation position error compensation method [ J ]. Journal of Testing Technology, 2014,28(3):219-224.

[ 4 ] 翁浚,刘健宁,邢俊红,等. 变维数滤波器在捷联惯导系统级标定中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5):31-37.  
WENG J, LIU J N, XING J H, et al. Application of

- variable dimension filter in systematic calibration of strapdown inertial navigation systems [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5):31-37.
- [5] 邹娜蓉,李杰,车晓蕊. MEMS 惯性测量系统安装误差分析与补偿[J]. 电子器件,2017,40(4):1000-1004.  
ZOU SH R, LI J, CHE X R. MEMS inertial measurement system installation error analysis and compensation [J]. Electronic Devices, 2017, 40(4): 1000-1004.
- [6] 常路宾,李安,覃方君. 双轴转位式捷联惯导系统安装误差分析[J]. 计算机仿真,2011,28(3):1-4,10.  
CHANG L B, LI AN, QIN F J. Analysis on installation error of dual-axis rotation-dwell strapdown inertial navigation system [J]. Computer Simulation, 2011, 28(3):1-4,10.
- [7] 邓川. 倾角传感器安装误差对轨道测量仪超高测量的影响[J]. 铁道建筑,2019,59(3):128-130.  
DENG CH. Influence of inclinometer installation error on super-elevation measurement of track measuring instrument [J]. Railway Engineering, 2019, 59(3):128-130.
- [8] 余世祥,林键,安刚建,等. 一种大直径长距离直线顶管顶进方法:CN112576812A[P]. 2021.  
YU SH X, LIN J, AN G J, et al. A large diameter and long distance linear pipe jacking method: CN112576812A[P]. 2021.
- [9] 翟华,闫梦飞,吕庆洲,等. 组合FPGA光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(7):50-57.  
ZHAI H, YAN M F, LYU Q ZH, et al. Laser attitude measurement system of pipe jacking machine based on fpga photoelectric sensor array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7):50-57.
- [10] WIJETHUNGA P, CHANDRAWANSA I A, RATHNAYAKE B, et al. Control of a 6DOF mobile manipulator with object detection and tracking using stereo vision[J]. Instrumentation, 2021,8(1):1-13.
- [11] 尹英杰,徐德,张正涛,等. 基于单目视觉的平面测量[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(4):347-352.  
YIN Y J, XU D, ZHANG ZH T, et al. Plane measurement based on monocular vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(4): 347-352.
- [12] 朱岳辉,徐贵力,谈冬兴,等. 测斜仪校准装置的研制与误差补偿研究[J]. 计量技术,2014(9):49-52.  
ZHU Y H, XU G L, TAN D X, et al. Development and error compensation of inclinometer calibration device [J]. Metrology Technology, 2014 (9): 49-52.
- [13] 蒲鹏程,郭晓松,周召发. 经纬仪水平度传感器安装误差补偿方法[J]. 计算机测量与控制,2012,20(2):562-563.  
PU P CH, GUO X S, ZHOU ZH F. The installation error compensation method of theodolite level sensor[J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20 (2): 562-563.
- [14] 颜骥,王昌金,周立军. 基于C8051F021的双通道轴角测量实验装置的设计[J]. 国外电子测量技术,2009,28(10):60-63,68.  
YAN J, WANG CH J, ZHOU L J. Design of dual-channel axial angle measurement experimental device based on C8051F021 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(10):60-63,68.
- [15] 王唯,唐志华. 基于三点坐标测量的靶道空间基准标定方法:CN106595700A[P]. 2017.  
WANG W, TANG ZH H. Target track spatial datum calibration method based on three-point coordinate measurement:CN106595700A[P]. 2017.
- [16] DE SILVA W. Concepts for sensor matching in mechatronic systems [J]. Instrumentation, 2020, 7(3):1-14.
- [17] 张樾,李杰,侯利朋,等. 半捷联惯导系统轴向角度安装误差分析与补偿[J]. 兵工学报,2015,36(7):1222-1227.  
ZHANG X, LI J, HOU L P, et al. Analysis and compensation of axial angle installation error of semi-strapdown inertial navigation system [J]. Journal of Military Engineering, 2015, 36(7): 1222-1227.
- [18] 李魁,高鹏宇. 混合式惯导系统自标定技术研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(4):9-17.  
LI K, GAO P Y. Research on self-calibration technique for hybrid inertial navigation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4):9-17.
- [19] 李笑宇,林虎,薛梓,等. 激光跟踪多边测量自标定优化方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(2):10-17.  
LI X Y, LIN H, XUE Z, et al. Self-calibration optimization method for laser tracking multilateral measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 10-17.
- [20] 朱国力,文香稳,潘明华. 三维姿态测量系统的安装误差[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(5):1-5.  
ZHU G L, WEN X W, PAN M H. Installation error of three-dimension pose measurement systems [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(5):1-5.
- [21] 钟志贤,祁雁英,蔡忠侯,等. 磁轴承用位移传感器差

动安装的误差补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(10):17-23.

ZHONG ZH X, QI Y Y, CAI ZH H, et al. Research on the error compensation method for differential installation of displacement sensor for magnetic bearing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(10):17-23.

[22] FENG S, QIAN S, YUEYANG B, et al. A new method of initial alignment and self-calibration based on dual-axis rotating strapdown inertial navigation system [C]. Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. IEEE, 2012: 808-813.

[23] BAI Z Q, ZHANG X M, LIU J. Error modeling and analysis of inclinometer based on digital accelerometer[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2013(4):321-324.

作者简介



**黄喆**, 2011 年于东北大学获得学士学位, 2016 年于天津大学获得博士学位, 现为天津科技大学讲师, 主要研究方向为地下掘进装备导航与监测和大尺度几何量精密测量。

E-mail: huangzhe@tust.edu.cn

**Huang Zhe** received his B. Sc. degree in 2011 from Northeastern University, received his Ph. D. degree in 2016 from Tianjin University. Now he is a lecturer in Tianjin University of Science and Technology. His main research interests include navigation and monitoring of underground excavation equipment and precision measurement of large-scale geometric quantities.



**沈小玲**, 2020 年于燕山大学里仁学院获得学士学位, 现为天津科技大学硕士研究生, 主要研究方向为地下掘进装备导航与监测和大尺度几何量精密测量。

E-mail: 1738291018@qq.com

**Shen Xiaoling** received her B. Sc. degree from Liren College of Yanshan University in 2020. Now she is a M. Sc. candidate of Tianjin University of Science and

Technology. Her main research interests include navigation and monitoring of underground excavation equipment and precision measurement of large-scale geometric quantities.



**张历**(通信作者), 2011 年于天津大学获得学士学位, 2014 年于天津大学获得硕士学位, 现为贵州电网有限责任公司电力科学工程师, 主要研究方向为电网自动化与视觉测量。

E-mail: 360869685@qq.com

**Zhang Li**(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2011, M. Sc. degree from Tianjin University in 2014. Now he is a power science engineer of Guizhou Power Grid Co., Ltd. His main research interests include power grid automation and visual measurement.



**徐叶倩**, 2019 年于天津科技大学获得学士学位, 现为天津科技大学硕士研究生, 主要研究方向为地下掘进装备导航与监测和大尺度几何量精密测量。

E-mail: 956065130@qq.com

**Xu Yeqian** received her B. Sc. degree from Tianjin University of Science and Technology in 2019. Now she is a M. Sc. candidate of Tianjin University of Science and Technology. Her main research interests include navigation and monitoring of underground excavation equipment and precision measurement of large-scale geometric quantities.



**燕庆德**, 2019 年于陇东学院获得学士学位, 现为天津科技大学硕士研究生, 主要研究方向为地下掘进装备导航与监测和大尺度几何量精密测量。

E-mail: 17793478731@163.com

**Yan Qingde** received his B. Sc. degree from Longdong University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate of Tianjin University of Science and Technology. His main research interests include navigation and monitoring of underground excavation equipment and precision measurement of large-scale geometric quantities.