

doi:10.3788/gzxb20174609.0912007

天文定位中倾角传感器的标定

吴量¹, 王昊京², 王建立², 周明月¹

(1 长春工业大学, 长春 130012)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:为提高天文定位系统的定位精度,减小倾角传感器安装误差对系统水平测量精度的影响,对系统中倾角传感器的安装参数标定及校正进行了研究.首先,给出基于倾角传感器的天文定位系统工作原理,分析倾角传感器安装过程中存在的误差源.然后,提出一种通过对天文定位系统进行改造,利用系统自身完成倾角传感器安装参数标定的方法,并给出了倾角测量数据的校正算法.最后,建立三视场天文定位系统仿真测试平台,对标定方法的性能进行了分析和验证.实验结果表明:该倾角传感器安装参数标定方法的标定精度与倾角传感器自身测量精度保持一致,在全量程范围内校正后的倾角测量结果最大误差为 4.315 5",基本满足天文定位系统中高精度倾角测量要求.

关键词:天文定位;倾角传感器;标定;安装参数;校正

中图分类号:P128.4; TP212.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)09-0912007-8

Calibration of Inclinometer in Celestial Positioning System

WU Liang¹, WANG Hao-jing², WANG Jian-li², ZHOU Ming-yue¹

(1 Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the precision of celestial positioning system, and decrease the influence of the inclinometer installation error on the level measurement, the calibration and correction of the installation parameters of inclinometer in celestial positioning system were studied. First, the working principle of celestial positioning system based on inclinometer was presented, and the error sources in the installation process of inclinometer were analyzed. Then, a method for calibrating the installation parameters of inclinometer was proposed by transformation of celestial positioning system, and the correction algorithm of inclination measurement was presented. Finally, the simulation platform of three fields of view celestial positioning system was established, and the performance of the calibration method was analyzed and verified. Experimental results indicate that the calibration accuracy of the installation parameters of inclinometer is consistent with the accuracy of the sensor, and the maximum error of the inclination measurement is 4.315 5" in full-range, which can satisfy the requirement of the high-precision level measurement of celestial positioning system.

Key words: Celestial positioning; Inclinometer; Calibration; Installation parameters; Correction

OCIS Codes: 120.3930; 120.4640; 230.2090; 350.1260

0 引言

天文定位是一种古老而基本的导航方式,以其自主导航、定位精度高、抗干扰能力强等优点被广泛应用于

基金项目:中科院国防科技创新基金(No. CXJJ-10-M53)和吉林省教育厅项目(No. 吉教科合字[2016]第 343 号)资助

第一作者:吴量(1987-),男,讲师,博士,主要研究方向为天文导航技术. Email:wuliang@ccut.edu.cn

通讯作者:周明月(1980-),女,讲师,博士,主要研究方向为通信与信息系统. Email:zmyjlu@ccut.edu.cn

收稿日期:2017-03-14;录用日期:2017-05-11

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

0912007-1

航海、航空等领域^[1]。天文定位利用天体敏感器(如星敏感器、经纬仪、天顶仪等)对已知准确空间位置的自然天体进行光电测量,以天体高度角作为导航基准,确定被测平台所在地理位置信息^[2-5]。天体高度角的计算需要已知精确的水平测量信息^[6],该信息可以利用倾角传感器获取,水平倾角测量误差是天文定位误差的最重要来源^[7]。

倾角传感器的水平测量精度主要受两方面因素影响:倾角传感器自身的测量精度以及倾角传感器的安装标定精度。其中倾角传感器自身的测量精度是其本质特性,在出厂时已经确定,而安装标定精度则可以通过一定的方法进行提高^[8]。因此为了提高天文定位系统的水平倾角测量精度,需对倾角传感器的安装参数进行高精度的标定。

Acko B 和 David H P 等利用正弦板进行倾角传感器的安装标定,标定效果较好,但标定过程繁琐,可用性不高^[9-10]。张起朋、贾培刚等借助三轴转台对倾角传感器进行标定^[11-12],然而天文定位系统中被测轴由光轴定义,为非实体轴,很难确定被测轴与三轴转台之间的相对位置关系,因此该方法不适用于天文定位系统的倾角传感器标定。周绍发等利用天顶仪自身特有的对称旋转特性,对天顶仪设备中使用的倾角传感器安装参数进行标定^[13-14],此方法标定精度较高,但结果受旋转角误差影响明显,仅适用于天顶仪设备中的倾角传感器标定。佟帅等对倾角传感器的外壳边沿增加机械延长设备,使用光学瞄准方法对天文定位系统中倾角传感器的安装参数进行标定^[15],该方法适用范围较广,但标定过程涉及设备和材料较多,容易引入更多的标定误差。

本文以天文定位系统中的倾角传感器安装参数标定问题为研究对象,介绍了基于倾角传感器的天文定位系统模型,以及使用倾角传感器获取水平姿态信息的方法。然后分析了倾角传感器安装过程中存在的误差源,提出一种通过对天文定位系统进行简单改造,利用系统自身完成倾角传感器安装参数标定的方法,并给出了根据标定结果对倾角测量值校正的方法。最后,根据天文定位系统的实际参数搭建软件仿真平台,对标定方法的性能进行了分析和验证。

1 基于倾角传感器的天文定位模型

1.1 天文定位原理

天文定位利用天体敏感器对已知准确空间位置的自然天体进行光电测量,并通过对天体位置信息解算,确定设备所在的地理位置,即 WGS-84 坐标系内的经纬度(λ, φ)信息。天文定位系统工作原理如图 1。

首先,利用光学系统对自然天体进行拍摄,对星图图像进行预处理以及质心提取,根据光学系统以及机械结构参数可以得到天体质心在载体坐标系(C_B)中的矢量位置,即星观测量。然后,利用导航星表中已知天体在天球坐标系中的精确矢量位置对星观测量进行星图识别,识别出导航星表中与星观测量相匹配的导航星,称为星参考量。根据时间子系统提供的精确时间信息,通过一系列坐标变换获取星参考量在国际地球参考系(C_{ITRS})中的矢量,具体变换过程可参考国际天文学联合会提供的相关公式^[16]。同时星观测量根据水平姿态信息可以获得其在地平坐标系(C_{ENU})中的矢量。由于星观测量与星参考量实际为同一颗星在不同坐标系中的矢量位置,而国际地球参考系和地平坐标系的转换关系可以通过测者所在的地理位置和航向角构成^[17]。因此已知天体在国际地球参考系和地平坐标系中的矢量位置即可解算设备所在地理位置。

1.2 使用倾角传感器获取水平姿态信息的方法

获取载体平台的水平姿态需要两个水平倾角的测量值,可以采用双轴倾角传感器进行测量,双轴倾角传感器具有两个正交的测量敏感轴,可以同时完成两个敏感轴相对于水平面的倾角测量,如图 2。

图中坐标系 C_B 表示天文定位系统的载体坐标系,该坐标系的定义与光学系统相关,如本文使用的三视场天文定位系统(图 3),载体的质心 O_B 作为坐标系原点,坐标轴 Z_B 垂直于载体平面,采用第一个光学系统

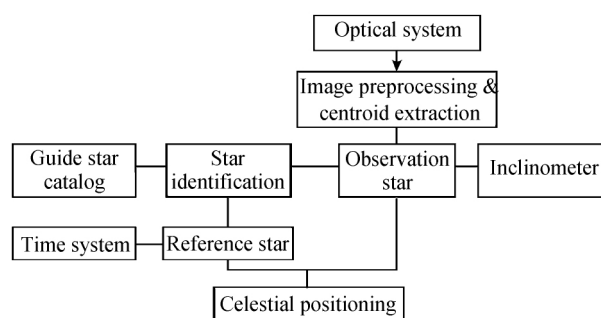


图 1 天文定位原理框图

Fig. 1 Functional block diagram of celestial positioning

的光轴 Z_{O1} 在载体平面的投影作为载体坐标系的 X_B 轴, Y_B 轴则以右手法则确定. 而双轴倾角传感器的两个敏感轴的理论安装位置应与天文定位系统载体平台 X_B 轴、 Y_B 轴平行, 则图中坐标轴 X_B 、 Y_B 与地平坐标系 (C_{ENU}) 平面 EON 的夹角 (ρ 、 τ) 即为倾角传感器测得的载体平台倾角.

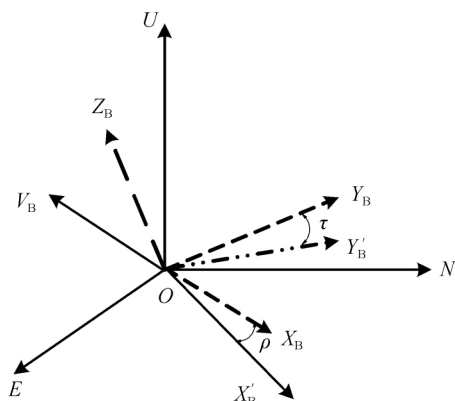


图2 倾角传感器水平测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal measurement by inclinometer

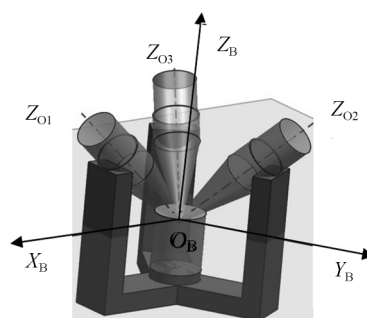


图3 三视场定位设备结构

Fig. 3 Structure of three field of views celestial navigation

选取载体坐标系 X_B 轴和 Y_B 轴的单位矢量 V_B^x 、 V_B^y , 这两个矢量在载体坐标系中表示为 $V_B^x = (1, 0, 0)^T$, $V_B^y = (0, 1, 0)^T$. 以载体坐标系 X_B 轴和 Y_B 轴在地平坐标系 EON 平面的水平投影 X'_B 和 Y'_B 为 X 轴和 Y 轴建立水平坐标系 (C_H), 则根据载体坐标系和水平坐标系的几何关系以及已经通过测量得到的载体平台倾角 (ρ 、 τ), 可以获得矢量 V_B^x 、 V_B^y 在水平坐标系中的表示 V_H^x 、 V_H^y .

已知载体坐标系中两个不平行的单位矢量 V_B^x 、 V_B^y , 以及它们在水平坐标系中的表示 V_H^x 、 V_H^y , 即可使用 TRIAD 算法^[13] 计算天文定位设备的水平姿态矩阵 $C_H^B(\rho, \tau)$, 完成水平信息的获取.

2 天文定位系统中倾角传感器的标定方法

倾角传感器的使用说明中都会提及产品的安装注意事项, 并说明“不正确的安装会导致测量误差”, 可见虽然倾角传感器自身具有较高的倾角测量精度, 然而安装不当将会严重影响测量结果, 这在对于倾角测量精度要求较高的天文定位系统中是不能接受的.

2.1 倾角传感器的安装误差

倾角传感器的安装误差主要包括横轴误差和输入轴不对准误差两种. 横轴误差主要指当传感器在垂直于其敏感轴方向倾斜一定角度时耦合到传感器输出信号上所产生的误差, 如图 4. 此误差通常可以通过将传感器的安装面与被测面紧密、平整、稳定地固定, 或者通过设置相对零点的方式减小或消除.

输入轴不对准误差是指在实际安装过程中, 传感器的水平方向安装偏差, 此角度称之为输入轴不对准角, 如图 5 中的 ω . 一般地, 倾角传感器在安装时要求被测轴的倾斜方向与传感器外壳的指定边沿保持平行或者重合. 当倾角传感器自身的敏感轴与实际被测轴方向不重合时, 随倾斜的角度增大, 产生的额外误差将呈正弦变化. 在天文定位系统应用中, 如 1.2 节所述, 系统载体平台 X_B 轴、 Y_B 轴为被测轴, 理论上将双轴倾

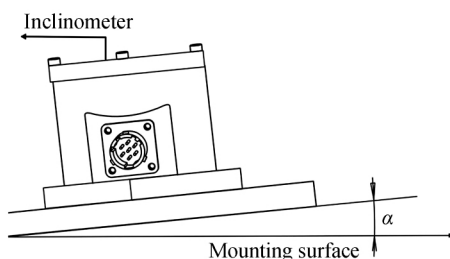


图4 横轴误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of horizontal axis error

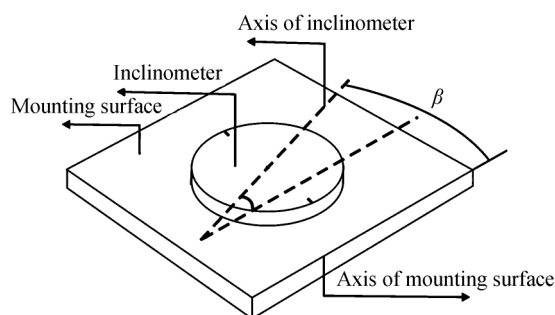


图5 输入轴不对准误差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of input shaft misalignment error

角传感器的外壳边沿分别与载体平台 X_B 轴、 Y_B 轴保持平行或重合,即可消除输入轴不对准误差。然而,载体平台 X_B 轴、 Y_B 轴是由光学系统的光轴定义的,光轴不可见,则由光轴定义的 X_B 轴、 Y_B 轴也是非实体轴,因此在实际安装过程中,无法利用传统的机械加工方式来消除输入轴不对准误差。

因此,倾角传感器在天文定位系统的安装过程中,横轴误差是可以被消除的;而输入轴不对准误差是无法避免的。为此,本文对于倾角传感器在天文定位系统中存在输入轴不对准误差的问题,通过标定的方法得到安装过程中的输入轴不对准角 ω ,并使用校正算法对倾角传感器的测量结果进行修正,从而获取天文定位系统高精度的姿态信息。

2.2 倾角传感器输入轴不对准角标定方法

为了标定输入轴不对准角,需要已知天文定位系统准确的水平姿态信息。而天文姿态测量系统与天文定位系统同属于天文导航系统,二者构成非常相似,不同之处仅在于天文姿态测量系统中不需要倾角传感器提供水平测量信息,而是利用 GPS 设备提供精确的经纬度信息完成高精度的姿态测量工作。因此,在天文定位系统中增加 GPS 设备,即可获取其自身准确的水平姿态,将测量结果与倾角传感器的测量值建立联系,从而对倾角传感器的输入轴不对准角参数进行标定。

具体标定方法如图 6。

首先,将倾角传感器安装面紧密、平整、稳定地安装于天文定位系统的被测面,使倾角传感器的轴线方向尽量与天文定位系统载体坐标系的被测轴(光学系统的光轴在载体坐标系中的投影)保持一致。为天文定位系统增加 GPS 定位模块,完成测者经纬度信息的实时测量。将天文定位系统的平台随机倾斜,倾斜范围不能超出倾角传感器的量程。

然后,使用天文定位系统观测自然天体,获取一幅星图,通过星图预处理、质心提取、星图识别过程,分别获取星观测量在天文定位系统载体坐标系(C_B)中的矢量位置,以及星参考量在国际地球参考系(C_{ITRS})中的矢量位置。根据 GPS 定位模块提供的测者经纬度信息,利用式(1)可以获得星参考量在地平坐标系(C_{ENU})中的矢量位置。

$$\mathbf{V}_{\text{Ref}}^{\text{ENU}} = R_z(90^\circ)R_y(90^\circ - \varphi)R_z(\lambda)\mathbf{V}_{\text{Ref}}^{\text{ITRS}} \quad (1)$$

式中, λ, φ 分别表示测者所在位置的经度和纬度, $\mathbf{V}_{\text{Ref}}^{\text{ITRS}}$ 表示星参考量在 C_{ITRS} 坐标系中的矢量位置, $\mathbf{V}_{\text{Ref}}^{\text{ENU}}$ 表示星参考量在 C_{ENU} 坐标系中的矢量位置。

获取 3 颗以上星观测量在载体坐标系中的矢量位置及其对应的星参考量在地平坐标系中的矢量位置,利用四元数估计方法(Quaternion Estimation, QUEST),可以得到载体坐标系与地平坐标系之间的过渡矩阵,即

$$\mathbf{C}_B^{\text{ENU}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

最后,利用几何关系完成倾角传感器的输入轴不对准角标定。如图 7,已知倾角传感器敏感轴 X_T 倾角测量值为 ρ ,待标定的输入轴不对准角为 ω 。由于倾角传感器紧密贴合于天文定位系统的待测平面安装,其敏感轴矢量方向与天文定位系统载体坐标

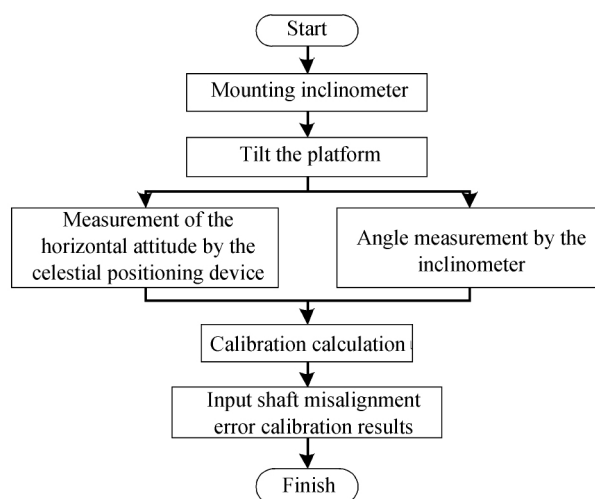


图 6 标定方法流程

Fig. 6 Flow chart of calibration method

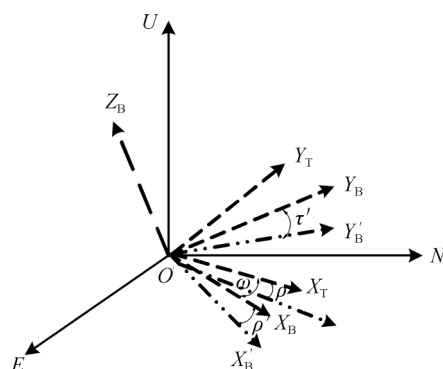


图 7 输入轴不对准误差标定几何关系

Fig. 7 Geometry relationship of input shaft misalignment error calibration

系的 $X_B OY_B$ 平面重合或平行,倾角传感器的敏感轴 X_T 在载体坐标系(C_B)中的单位矢量表示为

$$\mathbf{V}^B = [\cos \omega, \sin \omega, 0]^T \quad (3)$$

根据坐标变换关系可得,倾角传感器的敏感轴在地平坐标系(C_{ENU})中的单位矢量为

$$\mathbf{V}^{ENU} = \mathbf{C}_B^{ENU} \mathbf{V}^B = [a_{11} \cdot \cos \omega + a_{12} \cdot \sin \omega, a_{21} \cdot \cos \omega + a_{22} \cdot \sin \omega, a_{31} \cdot \cos \omega + a_{32} \cdot \sin \omega]^T \quad (4)$$

由于 $\mathbf{V}^{ENU}$ 与地平坐标系 $X_B OY_B$ 平面的夹角理论上与倾角传感器的敏感轴水平测量角 ρ 一致,因此可通过解非线性方程得到倾角传感器敏感轴的输入轴不对准角 ω ,即

$$\arctan \left(\frac{a_{31} \cdot \cos \omega + a_{32} \cdot \sin \omega}{\sqrt{(a_{11} \cdot \cos \omega + a_{12} \cdot \sin \omega)^2 + (a_{21} \cdot \cos \omega + a_{22} \cdot \sin \omega)^2}} \right) = \rho \quad (5)$$

同理,使用倾角传感器敏感轴 Y_T 也可以计算输入轴不对准角 ω . 为避免双轴倾角传感器两个正交敏感轴测量精度不一致的问题,同时提高输入轴不对准角 ω 的测量精度,每组标定分别使用倾角传感器的两个敏感轴的倾角测量值 ρ, τ ,分别对输入轴不对准角 ω 进行标定,取两次标定的平均值作为该组实验的标定结果.

2.3 倾角传感器输入轴不对准角校正方法

用 2.2 节标定的倾角传感器的输入轴不对准角 ω ,推导倾角传感器输入轴不对准误差的校正函数. 在双轴倾角传感器实际使用时,可以得到其敏感轴 X_T 和 Y_T 的倾角测量值 ρ, τ ,而输入轴不对准误差的校正函数就是根据 ρ, τ, ω 求取天文定位系统的载体坐标系 X_B 轴、 Y_B 轴矢量与水平面之间的真实倾角 ρ', τ' .

令 $\mathbf{X}_B^H = (1, 0, 0)^T$ 为水平坐标系(C_H)的 X 轴单位矢量,设 $\mathbf{X}_B'$ 与 $\mathbf{Y}_B'$ 的夹角为 θ ,则得天文定位系统的载体坐标系 X_B 轴、 Y_B 轴在水平坐标系中的单位矢量,即

$$\mathbf{X}_B^H = (\cos \rho', 0, \sin \rho')^T \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}_B^H = (\cos \tau' \cos \theta, \cos \tau' \sin \theta, \sin \tau')^T \quad (7)$$

根据图 7 中单位矢量 $\mathbf{X}_T^H$ 与 $\mathbf{X}_B^H, \mathbf{Y}_B^H$ 之间的几何关系可得

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_T^H &= \cos(\omega) \mathbf{X}_B^H + \sin(\omega) \mathbf{Y}_B^H = \cos \omega \cos \rho' + \sin \omega \cos \tau' \cos \theta, \sin \omega \cos \tau' \sin \theta, \\ &\quad \cos \omega \sin \rho' + \sin \omega \sin \tau' \end{aligned} \quad (8)$$

由于矢量 $\mathbf{X}_T^H$ 和水平面的夹角与倾角传感器敏感轴 X_T 轴测得倾角 ρ 相同,可得

$$\sin \rho = \cos \omega \sin \rho' + \sin \omega \sin \tau' \quad (9)$$

同理,根据倾角传感器 Y_T 轴倾角测量值 τ 可得

$$\sin \tau = \cos \omega \sin \tau' - \sin \omega \sin \rho' \quad (10)$$

式(9)、(10)可构成二元一次方程组,解方程组可得天文定位系统的载体坐标系 X_B 轴、 Y_B 轴矢量所对应的真实水平倾角 ρ', τ' 为

$$\begin{cases} \rho' = \arcsin \left(\frac{\cos \omega \sin \rho - \sin \omega \sin \tau}{\cos^2 \omega + \sin^2 \omega} \right) \\ \tau' = \arcsin \left(\frac{\sin \omega \sin \rho + \cos \omega \sin \tau}{\cos^2 \omega + \sin^2 \omega} \right) \end{cases} \quad (11)$$

3 实验与结果

3.1 仿真实验系统模型

如 2.1 节所述,天文定位系统的被测轴是非实体轴,因此很难通过物理实验的方法验证天文定位系统中倾角传感器输入轴不对准误差标定结果的准确性. 为了充分分析双轴倾角传感器输入轴不对准角标定算法的性能,根据实际使用的三视场天文定位系统构建仿真实验平台,其参数为:3 个视场视轴在水平面的投影夹角为 120° ,高度角为 45° ,CCD 分辨率为 1024×768 ,像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$;光学系统在可见光波段的探测能力为 7 等星,采用可见光波段的 Tycho2 星表作为基本星表;仿真时间设置为 2017-2-17 0:0:0,地理位置设置为东经 $125^\circ 24' 16''$,北纬 $43^\circ 50' 45''$,方位角为 330° . 图 8 为仿真实验流程.

1) 实验默认倾角传感器已经在被测面上紧密、平整、稳定地固定,安装过程中只存在输入轴不对准误差,设定固定的输入轴不对准角,作为仿真参数. 由于实际安装过程中,可以根据被测轴的视场大致方向安装倾角传感器,因此实际情况中输入轴不对准角通常不会很大,本实验中输入轴不对准角设为 4.5° .

2) 设定倾角传感器两个敏感轴的倾角真值, 并利用倾角真值结合输入轴不对准角, 计算天文定位系统的载体平台姿态信息。

3) 根据地理位置、姿态信息以及其他设置条件, 通过坐标变换可以得到每个光轴在国际天球坐标系内的单位矢量, 并根据视场大小从星表中提取每个视场内的恒星集合。在仿真实验中忽略星图识别的过程, 直接由光学系统的参数, 根据时间信息及相关坐标变换关系, 获得星参考量在国际地球参考系(C_{ITRS})中的矢量位置; 利用地理位置、姿态信息以及光学系统参数, 通过设定仿真的星点测量误差, 获得星观测量在载体坐标系(C_B)中的矢量位置。

4) 根据倾角传感器的设备精度, 对倾角传感器真值添加测量误差, 模拟倾角传感器的测量值。利用 2.2 节的方法, 对倾角传感器的输入轴不对准角进行标定。

5) 通过对标定结果的分析, 讨论算法的性能。

3.2 标定精度的影响因素分析

3.2.1 倾斜角度对标定精度的影响

为了分析不同倾斜角度对标定结果的影响, 实验设定天文定位系统的星观测量测量误差符合高斯分布, 标准差为 $5''$; 倾角传感器的倾角测量误差符合高斯分布, 标准差为 $10''$; 倾角传感器量程为 $\pm 5^\circ$, 在此范围内, 两个敏感轴方向分别以 0.1° 为步进设置不同的测量角, 进行仿真实验, 输入轴不对准角的标定结果误差如图 9。

从图 9 可以看出, 当倾角传感器的测量角较小时, 输入轴不对准角的标定结果出现粗大误差, 主要原因是在相同的测量误差情况下, 倾角传感器的测量角越小, 则倾角测量值受测量误差影响越显著, 从而导致输入轴不对准角标定结果精度下降。为了避免此问题, 在后续实验中将选取两个敏感轴的测量角 ρ 和 τ 绝对值均大于 2° 的情况进行实验。

3.2.2 星点测量误差及倾角传感器测量误差对标定精度的影响

在天文定位系统中, 倾角传感器的输入轴不对准角是利用天文姿态测量结果与倾角传感器的倾角测量结果进行标定的, 因此, 输入轴不对准角的标定结果精度主要由天文姿态测量精度和倾角传感器倾角测量精度决定, 而对于天文姿态测量精度影响最大的是观测星的测量误差。对输入轴不对准角标定影响最大的两个因素——星点测量误差和倾角传感器测量误差, 对标定结果的影响进行实验分析。

实验使用的基本参数与 3.2.1 节相同, 采用两个敏感轴的倾角测量值 ρ 和 τ 绝对值在 $2^\circ \sim 5^\circ$ 之间, 以 0.1° 为步进进行标定, 所有标定结果取均值得到最终输入轴不对准角标定结果, 视为一次实验。在分析星点测量误差影响时, 设定倾角传感器测量结果无误差, 天文定位系统的星观测量测量误差范围从 $0''$ 到 $20''$, 以 $1''$ 为步进分别进行实验; 在分析倾角传感器测量误差影响时, 设定天文定位系统的星观测量无误差, 倾角传感器的测量误差范围从 $0''$ 到 $20''$, 以 $1''$ 为步进分别进行实验。实验结果如图 10。

从图 10 中可以看出, 在同样的测量误差情况下, 倾角传感器自身的倾角测量误差对于标定结果的影响远大于星点测量误差, 而且在实际标定过程中, 天文定位系统中星点测量误差相对较小^[18], 则天文定位系统

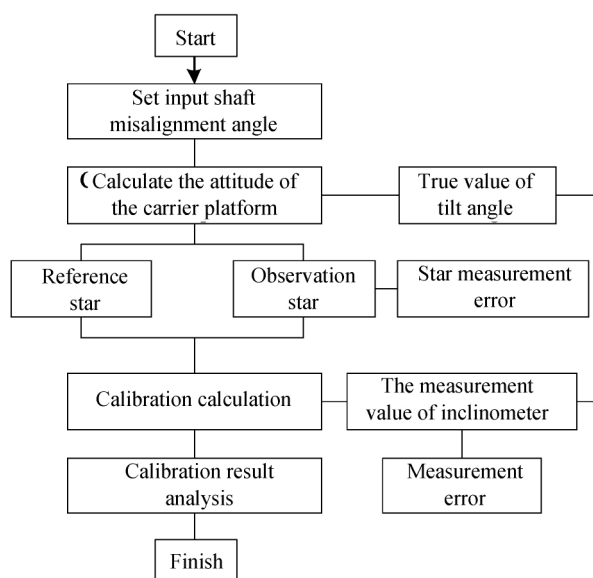


图 8 仿真实验流程

Fig. 8 Flow chart of the simulation experiment

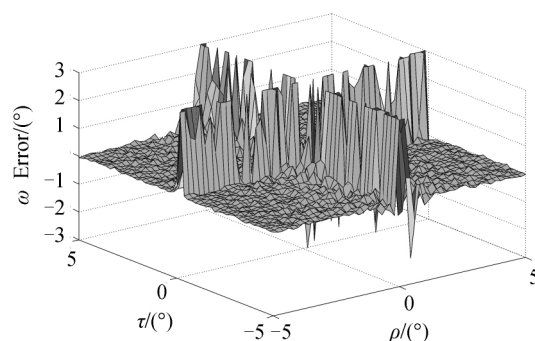


图 9 倾斜角度对标定结果的影响

Fig. 9 Influence of tilt angle on the calibration result

中倾角传感器的输入轴不对准角标定精度主要取决于倾角传感器自身的测量精度。造成此现象的原因在于,天文定位系统利用多颗星点完成姿态测量工作,因此星点测量误差在姿态解算过程中部分相互抵消,而倾角传感器的测量误差则直接在标定过程中对结果产生影响。因此在对倾角测量精度要求较高时,通常选用高精度的倾角传感器,此时输入轴不对准角的标定结果也具有较高精度,最终可以获得高精度的倾角测量结果。可见利用本文算法进行倾角传感器的标定,最终的倾角测量精度与倾角传感器自身的测量精度能够保持一致。

3.3 综合标定实验

根据实际倾角传感器和天文定位系统的参数进行综合标定实验,其中双轴倾角传感器采用商用的全温补高准确度数字倾角测量设备,其量程为 $\pm 5^\circ$,标称的单轴测量精度标准差为 0.003° ;天文定位系统使用图3所示的三视场天文定位设备,在标定实验中其误差源包括地理位置误差、时间误差、光学系统标定误差等,而其中对姿态测量影响最大的误差为观测星位置测量误差,根据实验数据分析,该误差符合高斯分布,标准差为 $5.82''$ 。随机选取100组绝对值范围在 $2^\circ \sim 5^\circ$ 的倾角测量值 ρ 和 τ 进行标定实验,实验结果如图11。

图11中,100组标定结果的均值为 4.4863° ,设定的输入轴不对准角真值为 4.5° ,结果显示,输入轴不对准角的标定误差为 -0.0137° 。利用此标定结果,根据2.3节的方法对量程范围内的倾角测量数据进行校正,可以得到校正后的倾角测量结果误差如图12。

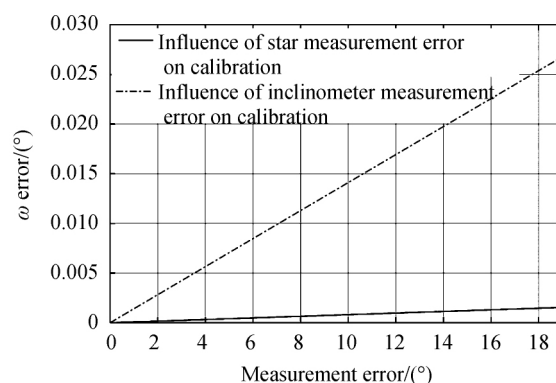


图10 不同测量误差对标定结果的影响

Fig. 10 Influence of different measurement errors on the calibration result

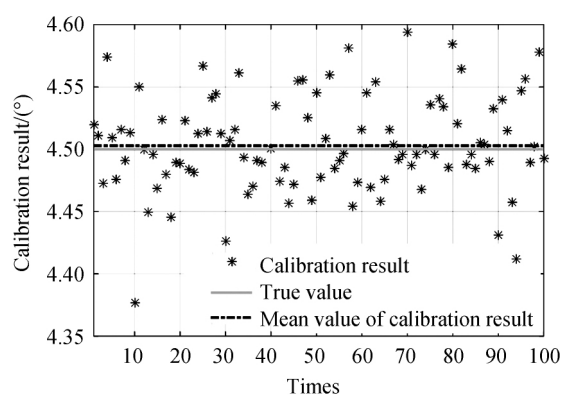
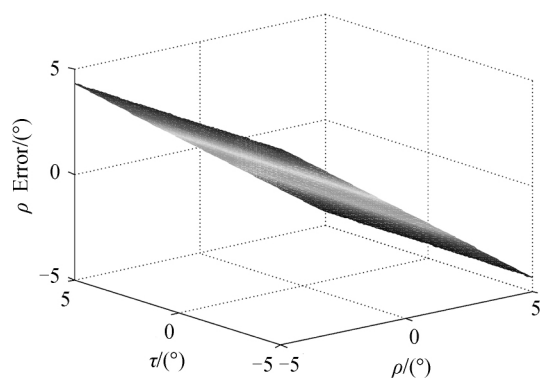
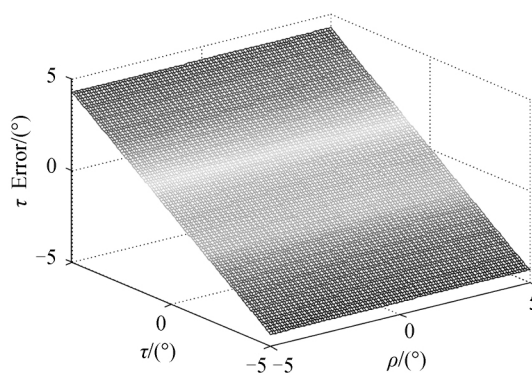


图11 综合标定实验结果

Fig. 11 Comprehensive calibration experimental results



(a) Corrected error of τ



(b) Corrected error of ρ

图12 校正后的倾角测量结果误差

Fig. 12 Corrected error of the tilt angle measurement

图12(a)和(b)分别表示天文定位系统中双轴倾角传感器两个敏感轴,经过标校后的倾角测量值与真实的倾角值之间的误差。结果显示,全量程范围内校正后的倾角测量结果最大误差为 $4.3155''$,可以满足高精度倾角测量要求。

4 结论

本文针对倾角传感器安装过程中,输入轴不对准误差无法利用机械加工等方式消除的问题,提出一种通

过对天文定位系统进行简单改造,利用系统自身完成输入轴不对准误差标定的方法,并给出了倾角测量值的校正方法.根据三视场天文定位系统的实际参数搭建软件仿真平台,对标定方法的性能进行测试.结果表明:倾角传感器任意敏感轴较小的测量值将导致粗大的标定误差,因此应选用较大的倾斜角度进行标定;除此之外,倾角传感器自身的倾角测量误差是影响标定结果精度的最主要因素,经标校后的倾角测量精度与倾角传感器自身的测量精度保持一致.使用量程为 $\pm 5^\circ$,标称精度为 0.003° 的双轴倾角传感器进行综合标定实验,结果显示:输入轴不对准角的标定误差为 -0.0137° ,在全量程范围内校正后的倾角测量结果最大误差为 $4.3155''$,标校精度可以满足高精度倾角测量要求.

参考文献

- [1] WANG An-guo. Modern celestial navigation and the key techniques[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(12): 2347-2353.
王安国. 现代天文导航及其关键技术[J]. *电子学报*, 2007, **35**(12): 2347-2353.
- [2] BELENKII M, BRUNS D, RYE V, *et al.* Daytime stellar imager for attitude determination [P]. USA, US 7, 349, 803 B2. Mar. 25, 2008.
- [3] TSOU M C. Genetic algorithm for solving celestial navigation fix problems[J]. *Polish Maritime Research*, 2012, **19**(3): 53-59.
- [4] LI Zeng. Autonomous position and orientation technology for trailer-mounted theodolite[D]. Chinese Academy of Sciences, 2010.
李增. 车载经纬仪自主定位定向技术的研究 [D]. 中国科学院研究生院, 2010.
- [5] HALICIO GLU K, DENIZ R ÖZENER H. Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in Turkey[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 2013, **1**(2): 115-120.
- [6] KAPLAN G, HUGHES J, SEIDELMANN P, *et al.* Mean and apparent place computations in the new IAU system. III- Apparent, topocentric, and astrometric places of planets and stars[J]. *Astronomical Journal*, 1989, **97**(4): 1197-1210.
- [7] WANG Hao-jing, WANG Jan-li, WU Liang, *et al.* Error analysis of three FOVs celestial positioning and orientation with minimum loss function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0923002.
王昊京, 王建立, 吴量, 等. 基于最小损失函数法进行三视场天文定位定向的误差分析[J]. *光子学报*, 2015, **44**(9): 0923002.
- [8] LE M, LUSVEN A, BONGIOVANNI E, *et al.* Current profilers and current meters: compass and tilt sensors errors and calibration[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, **25**(8): 1409-1424.
- [9] ACKOB. Calibration of electronic levels using a special sine bar[J]. *Precision Engineering*, 2005, **29**(1): 48-55.
- [10] PARKER D H, SCHWAB F R, SHELTON J W, *et al.* Calibration and modeling of a dual-axis inclinometer[J]. *Precision Engineering*, 2005, **29**(3): 381-385.
- [11] ZHANG Qi-peng, LI Xing-fei, TAN Wen-bin, *et al.* Modeling and calibration of dual-axis tilt sensor for measuring attitude angles[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2016, **35**(07): 1096-1101.
张起朋, 李醒飞, 谭文斌, 等. 双轴倾角传感器姿态角测量的建模与标定[J]. *机械科学与技术*, 2016, **35**(07): 1096-1101.
- [12] JIA Pei-gang, ZHANG Ming. Calibration of a dual axis inclinometer for hull attitude [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2012, **32**(12): 1000-1003.
贾培刚, 张铭. 车体双轴倾角传感器的标定[J]. *西安工业大学学报*, 2012, **32**(12): 1000-1003.
- [13] ZHOU Shao-fa, LIU Xian-yi, ZHANG Zhi-li, *et al.* Research on two-axis tilt sensor based on digital zenith camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(8): 0812002.
周召发, 刘先一, 张志利, 等. 基于数字天顶仪的双轴倾角仪研究[J]. *光子学报*, 2015, **44**(8): 0812002.
- [14] LIU Xian-yi, ZHOU Shao-fa, ZHANG Zhi-li, *et al.* Calibration of inclinometer parameters in digital zenith camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(09): 2325-2331.
刘先一, 周召发, 张志利, 等. 数字天顶仪中倾角仪参数的标定[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(09): 2325-2331.
- [15] TONG Shuai, LI Hui, WANG An-guo. Calibration method of multi-channel shipboard star sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(2): 21-27.
佟帅, 李辉, 王安国. 多通道舰载星敏感器标定方法[J]. *光电工程*, 2015, **42**(2): 21-27.
- [16] BARKER L, DORSEY A, STAMATAKOS N. Validation of IAU2000A/IAU2006 frame transformation implementations[C]. 33rd Annual AAS Rocky Mountain Guidance and Control Conference, Breckenridge, CO, United states, 2010, 137: 399-418.
- [17] WU Liang, WANG Jiang-li, WANG Hao-jing. Three FOVs celestial positioning and orientation with minimum loss function[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(03): 904-912.
吴量, 王建立, 王昊京. 基于最小损失函数的三视场天文定位定向[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(03): 904-912.
- [18] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers - a tutorial[J]. *Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 587-599.

Foundation item: The National Defense Science and Technology Innovation Fund of Chinese Academy of Sciences (No. CXJJ-10-M53), the Project of Jilin Province Department of Education