

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.01.020

一种基于输出误差观测的冗余 MEMS-IMU 标定技术研究

李 杨¹, 郭 磊², 葛靖宇², 程建华²

(1. 海军研究院, 北京 100161; 2. 哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要:针对传统六位置标定存在标定步骤复杂、标定时间长等问题,同时随着 MEMS 器件冗余数目增加和冗余配置结构复杂化,利用分立标定技术实现器件误差参数辨识的难度进一步增大,且不同配置结构所采用的标定方法存在通用性较差的问题。因此提出了一种基于 Kalman 滤波的冗余 MEMS-IMU 分立标定方案。该方案首先采用小角度建模法实现安装误差的精确建模;然后针对直接以转台三轴角速率为观测值,导致部分状态量不可观的问题,提出了以器件的输出误差值作为观测量、以器件误差参数作为状态量设计 Kalman 滤波器;最后设计了高精度三轴转台转位编排方式,并利用四陀螺冗余结构进行标定仿真试验。仿真结果表明:该标定方法与六位置标定方案相比,标定精度平均提高了 11.37%,可实现 MEMS 器件误差参数的快速辨识,对实际工程实践具有一定参考价值。

关键词:冗余标定;误差补偿;MEMS 惯性器件;Kalman 滤波

中图分类号:V554

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:2095-8110(2020)01-0133-06



Research on Redundant MEMS-IMU Calibration Technology Based on Output Error Observation

LI Yang¹, GUO Lei², GE Jing-yu², CHENG Jian-hua²

(1. Navy Research Academy, Beijing 100161, China; 2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: As the traditional 6-position calibration has complicated calibration steps and long calibration time, and with the increase of the number of redundant MEMS devices and the complexity of redundant configuration structure, it is more difficult to use discrete calibration technology to realize the error coefficients identification of devices. Besides, the calibration methods adopted by different configuration structures have poor generality. A redundant MEMS-IMU discrete calibration scheme based on Kalman filter is proposed in this paper. The small angle modeling method is firstly used to realize the accurate modeling of the installation errors. Then, because the triaxial angular rates of the turntable are directly used to observations, which makes part state variables unobservable, the output errors of the device are taken as the observations, and the device error coefficients are used as the state variables to design the Kalman filter. Finally, the high-precision three-axis rotary table indexing method is designed, and a four-gyro redundant structure is used

收稿日期:2019-05-15;修订日期:2019-08-06

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61633008);黑龙江省杰出青年基金(JJ2018JQ0059);中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCFP201768);国家自然科学基金(61773132)

作者简介:李杨(1987-),男,博士,主要从事船舶导航与操控技术方面的研究。E-mail: hgdh_ly@126.com

for the calibration simulation. The simulation results show that compared with the six-position calibration scheme, the calibration accuracy is improved by 11.37% on average. The fast identification of MEMS device error coefficients is realized, and the scheme has certain reference value for practical engineering practice.

Key words: Redundant calibration; Error compensation; MEMS inertial device; Kalman filter

0 引言

由于传统微机电 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 捷联惯导系统多采用三轴正交配置结构,若一个轴上的器件发生故障将导致该轴量测信息丢失,致使捷联惯导系统无法完成导航任务^[1]。提高捷联惯导系统可靠性的方式有以下三种:一是系统级冗余方式;二是改进器件内部结构;三是器件级冗余方式。综合考虑提高可靠性方法的难度、研发时间和成本等因素,目前广泛采用器件级冗余技术来提高系统的可靠性^[2-3]。

在冗余式 MEMS 捷联惯导系统中, MEMS-IMU 的确定性误差是影响系统导航精度的重要因素之一,因此开展冗余 MEMS-IMU 标定技术研究对提高惯导系统导航精度与可靠性具有重要意义^[4]。三轴转台角速率误差约为 10^{-3} ($^{\circ}$)/s,而 MEMS 陀螺精度约为 10^{-2} ($^{\circ}$)/s, MEMS 陀螺误差远大于三轴转台角速率误差^[5]。因此,以三轴转台为测试平台的标定方法可以实现 MEMS 陀螺各误差系数的精确辨识。目前,对三轴正交配置的惯性器件标定技术研究已经较为完善^[6], Pethel 等提出了一种快速六位置标定方法,可同时实现三轴正交配置陀螺仪 3 个误差参数的分离与辨识^[7]。肖龙旭等针对标定试验需要进行调平而导致标定时长增加的问题,研究了陀螺仪免调平的静态位置标定方法^[8]。随后,蔚国强等提出了一种在无定向条件下实现陀螺仪误差系数快速标定的技术,改善了标定方案,实现了全温度范围内的快速标定^[9]。

然而,随着惯性器件冗余数目的增加以及惯性器件空间结构配置的复杂化,对惯性器件的误差参数进行分离的难度也随之增大。华冰等针对冗余惯性器件,提出了六位置静态标定方法,该方法以地球自转角速度以及重力加速度作为标准输入,对光纤陀螺等高精度惯性器件的标定具有一定的参考价值,但并不适用于 MEMS 惯性器件的标定与补偿^[10]。黄薇等针对六传感器正十二面体结构进行分析,提出的方法仅实现了 MEMS 陀螺的常值误差以及安装误差的标

定,并没有完成刻度因数误差的标定,同时建立的模型仅适用于六传感器正十二面体结构^[11]。随后,为实现标定步骤的简化和标定时长的缩减,梁海波等采用 Kalman 滤波方法实现参数估计,为提高各误差参数的可观测性,对转台输出进行了零状态扩增,但该方法求解繁琐、建模复杂^[12]。

因此,本文在捷联惯性导航系统器件级冗余的基础上,为满足器件误差参数辨识的快速性与标定精度要求,提出了基于 Kalman 滤波的冗余 MEMS 惯性器件标定方案。通过建立冗余 MEMS 惯性器件误差模型,设计标定算法,实现了惯性器件常值误差、刻度因数误差和安装误差的快速辨识与补偿,从而达到提高捷联惯导系统可靠性和导航精度的目的。

1 冗余 MEMS-IMU 误差模型建立

采用小角度旋转向量法将每个陀螺的安装误差表示为在陀螺坐标系两轴的旋转向量。通过陀螺坐标系与载体坐标系的转换关系即可得安装误差模型,与安装误差直接表示为航向角误差和俯仰角误差相比,该方法建模结果更加精确。

安装误差的小角度旋转向量建模法示意图如图 1 所示,具体推导过程如下所示。

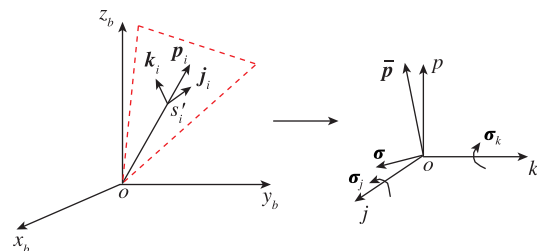


图 1 小角度旋转向量误差建模示意图

Fig. 1 Schematic diagram of small angle rotation vector error modeling

假设第 i 个器件在安装过程中存在误差,实际的指向为 \bar{p}_i ,理想情况下的指向为 p_i ,两者之间的偏差以 σ_i 来表示,实际空间指向 \bar{p}_i 和理想空间指向 p_i 的关系简化如式(1)所示

$$\bar{p}_i = p_i - \sigma_{ki}j_i + \sigma_{ji}k_i \quad (1)$$

式中, \mathbf{j}_i 和 \mathbf{k}_i 分别为陀螺自转轴和输出轴在转台坐标系的设计指向, \mathbf{p}_i , \mathbf{j}_i 和 \mathbf{k}_i 为两两正交的向量, σ_{j_i} 和 σ_{k_i} 为安装误差对应的小角度。

由于 MEMS 器件精度较低, 在误差建模的过程中可以忽略三轴转台自身误差。假设三轴转台的实际角速率为 $\boldsymbol{\omega}^z$, 经过配置矩阵转换后的器件输入角速率为 $\boldsymbol{\omega}_{mi}$, 如式(2)所示

$$\boldsymbol{\omega}_{mi} = \bar{\mathbf{p}}_i \cdot \boldsymbol{\omega}^z \quad (2)$$

综上可推导得带安装误差的 n 个器件输出表达式如式(3)所示

$$\boldsymbol{\omega}_c = \begin{bmatrix} \omega_{c1} \\ \omega_{c2} \\ \vdots \\ \omega_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{p}}_1^T \\ \bar{\mathbf{p}}_2^T \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{p}}_n^T \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega}^z + \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{k}_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{k}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{j1} \\ \sigma_{j2} \\ \vdots \\ \sigma_{jn} \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega}^z - \begin{bmatrix} \mathbf{j}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{j}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{j}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{k1} \\ \sigma_{k2} \\ \vdots \\ \sigma_{kn} \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega}^z \quad (3)$$

将式(3)写成矩阵的形式得

$$\boldsymbol{\omega}_c = \mathbf{P}^T \boldsymbol{\omega}^z + \mathbf{R}_k \boldsymbol{\sigma}_j - \mathbf{R}_j \boldsymbol{\sigma}_k \quad (4)$$

式中, $\mathbf{R}_j = \text{diag}(k_1 \ k_2 \ \cdots \ k_n) \boldsymbol{\omega}^z$, $\mathbf{R}_k = \text{diag}(j_1 \ \cdots \ j_n) \boldsymbol{\omega}^z$, \mathbf{P}^T 为理想配置矩阵, \mathbf{k}_i 和 \mathbf{j}_i 分别为第 i 个器件输出轴与自转轴在载体坐标系的指向。

刻度因数误差 \mathbf{K} 和常值误差 \mathbf{B} 与 4.2 节定义相同, 则 n 个器件实际输出表示为

$$\boldsymbol{\omega}_m = (\mathbf{I} - \mathbf{K}) \boldsymbol{\omega}_c - \mathbf{B} - \boldsymbol{\eta} \quad (5)$$

式中, $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2 \ \cdots \ \eta_n]^T$, $\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_n]^T$, 刻度因数误差 $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1 \ k_2 \ \cdots \ k_n)$, $\boldsymbol{\eta}$ 为服从正态分布的高斯白噪声。

将安装误差对应的量测值代入式(5)得

$$\boldsymbol{\omega}_m = (\mathbf{I} - \mathbf{K})(\mathbf{P}^T \boldsymbol{\omega}^z + \mathbf{R}_k \boldsymbol{\sigma}_j - \mathbf{R}_j \boldsymbol{\sigma}_k) - \mathbf{B} - \boldsymbol{\eta} \quad (6)$$

将式(6)展开, 由于惯性测量单元各误差系数量级均比较小, 忽略二阶小量, 器件的标定误差模型整理得

$$\boldsymbol{\omega}_m = \mathbf{P}^T \boldsymbol{\omega}^z + \mathbf{R}_k \boldsymbol{\sigma}_j - \mathbf{R}_j \boldsymbol{\sigma}_k - \mathbf{K} \mathbf{P}^T \boldsymbol{\omega}^z - \mathbf{B} - \boldsymbol{\eta} \quad (7)$$

2 以输出误差为观测量的 Kalman 滤波器设计

本节将在第 1 节推导的误差标定模型的基础上, 以器件输出误差为观测量设计 Kalman 滤波器, 从而实现器件各误差系数的快速精确标定。

2.1 状态方程设计

以常值误差 \mathbf{B} 、刻度因数误差 \mathbf{K} 和安装误差

$\boldsymbol{\sigma}_j$ 、 $\boldsymbol{\sigma}_k$ 作为 Kalman 滤波器的状态量, 在标定中上述误差系数均为常数。忽略随机噪声的影响, 状态方程如式(8)所示

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{K}} \\ \dot{\mathbf{B}} \\ \dot{\boldsymbol{\sigma}}_j \\ \dot{\boldsymbol{\sigma}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{K} \\ \mathbf{B} \\ \boldsymbol{\sigma}_j \\ \boldsymbol{\sigma}_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

在采样周期为 T 时的离散化状态方程为

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k-1} \quad (9)$$

将式(9)中的连续状态转移矩阵离散化得

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{I} + \mathbf{H}T + \cdots = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

状态方程如式(11)所示

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_{k-1} \quad (11)$$

2.2 量测方程设计

文献[12]指出以三轴角速率输出值直接作为观测量将导致部分状态量不可观, 影响标定精度。因此提出了零空间状态扩增法, 改善各状态量的观测性, 但该方法计算较繁琐。本节提出了以器件的输出误差值作为观测量, 保障各 MEMS 器件状态量的可观测性, 减少计算量。

n 个器件的量测方程如式(12)所示

$$\mathbf{Z}_k = \Delta \boldsymbol{\omega}_m = \boldsymbol{\omega}_m - \mathbf{P}^T \boldsymbol{\omega}^z = \mathbf{R}_k \boldsymbol{\sigma}_j - \mathbf{R}_j \boldsymbol{\sigma}_k - \mathbf{K} \mathbf{P}^T \boldsymbol{\omega}^z - \mathbf{B} - \boldsymbol{\eta} \quad (12)$$

将上述量测方程写成矩阵的形式

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^T \boldsymbol{\omega}^z & -\mathbf{I} & \mathbf{R}_k & -\mathbf{R}_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{K} \\ \mathbf{B} \\ \boldsymbol{\sigma}_j \\ \boldsymbol{\sigma}_k \end{bmatrix} - \boldsymbol{\eta} \quad (13)$$

3 转台转位编排设计

基于 Kalman 滤波的标定方案不同于传统多位置多速率标定法, 转台转位方式的设计不仅需要满足误差参数准确激励, 还需要保障 Kalman 滤波过程中不能有奇异值的出现。文献[13]到文献[15]

分析了转台编排方式与滤波效果的关系,将正弦角速率变化方式推广到均匀角速率变化方式,本节将基于上述理论设计转位方案如图2所示。

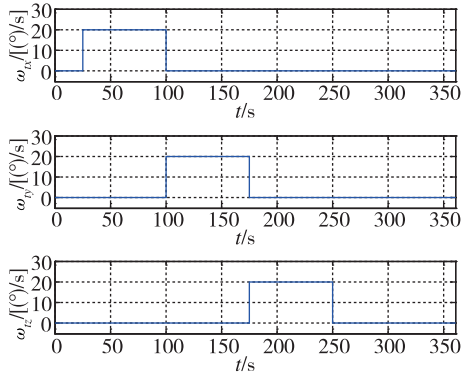


图2 转台转位设计

Fig. 2 Turntable transposition design

首先转台静止一段时间, x 轴匀速率旋转 75s, 然后 y 轴匀速率旋转 75s, z 轴匀速率旋转 75s, 最后静止一段时间, 总标定时间为 360s。

4 标定仿真试验与分析

4.1 标定试验对象与仿真条件

以冗余数目为 4 的惯性测量单元为研究对象进行冗余 MEMS-IMU 标定方案的仿真验证与分析, 配置方案如图 3 所示。

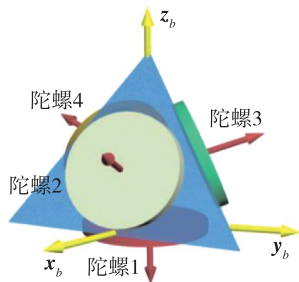


图3 四面体配置结构

Fig. 3 Tetrahedral configuration

图3所示为四陀螺冗余配置方案, 器件2、器件3和器件4的测量轴和 oz_b 轴的夹角为 $\alpha = 70.53^\circ$, 其中器件2的测量轴与 $x_b oz_b$ 平面重合, 器件3和器件4的测量轴在 $x_b oy_b$ 平面的投影与 ox_b 轴的夹角分别为 $\beta_3 = 120^\circ$ 和 $\beta_4 = 240^\circ$, 陀螺仪1安放在 $x_b oy_b$ 平面内, 测量轴与 oz_b 轴负半轴重合。

该惯导系统的冗余配置矩阵为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0.9428 & -0.4714 & -0.4714 \\ 0 & 0 & 0.8165 & -0.8165 \\ -1 & 0.3333 & 0.3333 & 0.3333 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

仿真条件: 假设当地地理纬度为北纬 45° , 转台旋转角速率为 $20^\circ/\text{s}$, 输出频率为 100Hz , MEMS-IMU 误差参数设定如表1所示。

表1 MEMS 陀螺标定仿真系数

Tab. 1 Calibration simulation coefficient of MEMS gyroscope

参数	陀螺1	陀螺2	陀螺3	陀螺4
$b/[(^\circ)/\text{s}]$	0.1	0.1	0.1	0.1
$k/10^{-6}$	5000	5000	5000	5000
$\sigma_j/(\text{^\circ})$	0.1	0.1	0.1	0.1
$\sigma_k/(\text{^\circ})$	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1

基于 Kalman 滤波的标定方案仿真时长 6min, 量测噪声均值为 0, 量测噪声标准差为 $10^{-3}(\text{^\circ})/\text{h}$, 该冗余配置方案下 \mathbf{J} 阵和 \mathbf{K} 阵如式(15)和式(16)所示

$$\mathbf{J} = [\mathbf{j}_1 \quad \mathbf{j}_2 \quad \mathbf{j}_3 \quad \mathbf{j}_4]$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -0.3333 & -0.1667 & -0.1667 \\ 0 & 0 & 0.2887 & -0.2887 \\ 0 & 0.9428 & 0.9428 & 0.9428 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{K} = [\mathbf{k}_1 \quad \mathbf{k}_2 \quad \mathbf{k}_3 \quad \mathbf{k}_4]$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.8660 & -0.8660 \\ 1 & 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Kalman 滤波仿真参数设置如下: 均方误差阵 $\mathbf{P} = \text{diag}(\mathbf{I}_{16 \times 16})^2$; 量测噪声方差阵 $\mathbf{R} = 10^{-3} \text{diag}(\mathbf{I}_{4 \times 4})$ 。

4.2 仿真结果

各 MEMS 陀螺的常值误差、刻度因数误差和安装误差标定结果如图 4~图 7 所示。

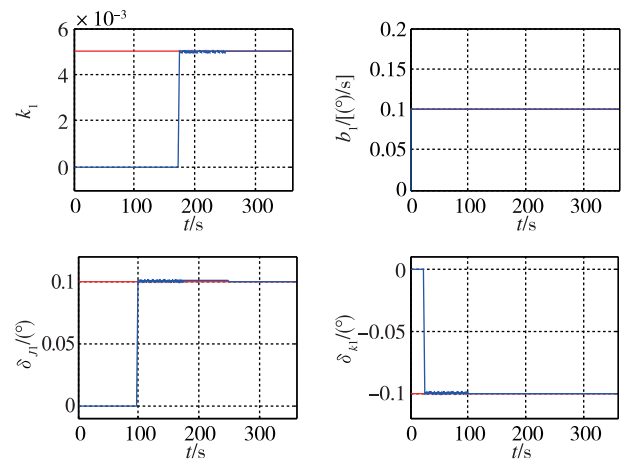


图4 陀螺1误差系数标定图

Fig. 4 Error coefficients calibration results of gyro 1

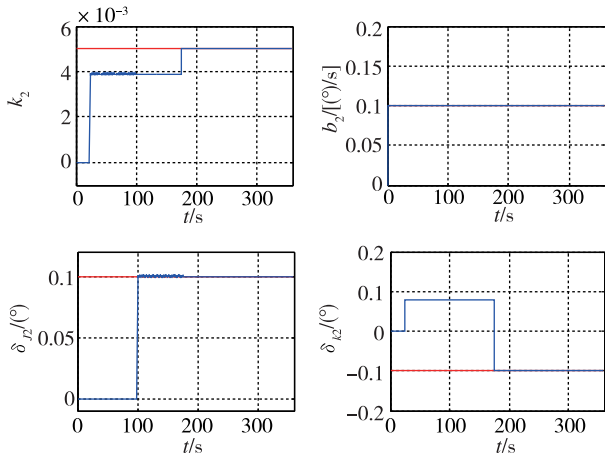


图 5 陀螺 2 误差系数标定图

Fig. 5 Error coefficients calibration chart of gyro 2

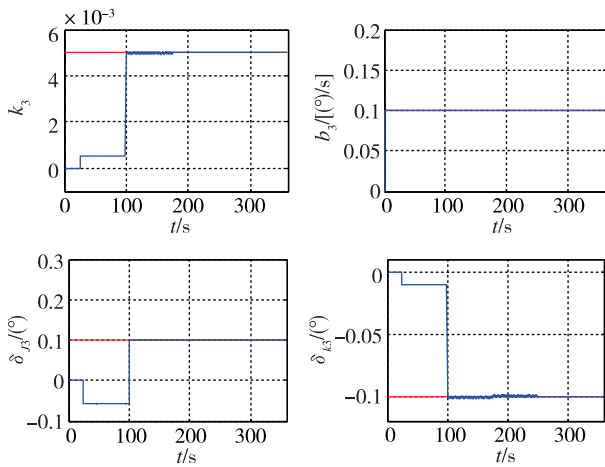


图 6 陀螺 3 误差系数标定图

Fig. 6 Error coefficients calibration chart of gyro 3

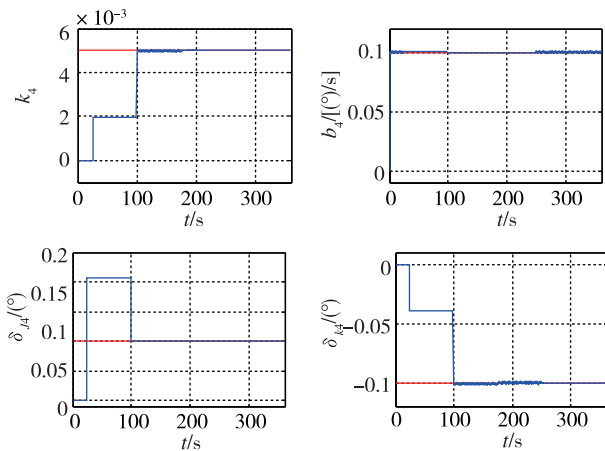


图 7 陀螺 4 误差系数标定图

Fig. 7 Error coefficients calibration chart of gyro 4

由图 4~图 7 可知,红线表示设定参数值,蓝线表示参数估计曲线,1、2、3、4 号陀螺的各误差系数

均在 250s 以后收敛至设定值,在标定试验结束前均可实现各陀螺误差系数的辨识。

冗余陀螺各误差系数的估计误差值见表 2,陀螺常值误差系数的估计误差小于 $0.0025(^{\circ})/s$,2 个安装误差系数的平均估计误差均小于 0.0025° ,刻度因数误差系数的估计误差值小于 1.5×10^{-5} ,说明该标定方案具有较高的标定精度。

表 2 各系数标定误差值

Tab. 2 Calibration error value of each coefficients

项目	陀螺 1	陀螺 2	陀螺 3	陀螺 4
$b/[(^{\circ})/s]$	0.0021	0.0014	0.0023	0.0016
$k/10^{-6}$	5	6	9	11
$\sigma_j/(^{\circ})$	0.0012	0.0150	0.0024	0.0170
$\sigma_k/(^{\circ})$	0.0009	0.0018	0.0013	0.0020

根据平均相对误差评价指标,基于 Kalman 滤波的标定方案标定结果的平均相对误差值见表 3。

表 3 MEMS 陀螺仪标定评价指标

Tab. 3 Calibration evaluation index of MEMS gyroscope

评价指标	C_b	C_k	C_{Rj}	C_{Rk}
数值/%	0.87	0.42	0.64	0.73

六位置标定方案的标定评价指标如表 4 所示^[11]。

表 4 MEMS 陀螺仪标定评价指标

Tab. 4 Calibration evaluation index of MEMS gyroscope

评价指标	C_b	C_k	C_{Rj}	C_{Rk}
数值/%	14.61	13.57	10.25	9.33

由表 3 可知,该标定方案中各误差系数标定的平均相对误差均小于 0.9%,MEMS 测量单元误差系数的标定结果具有较高的标定精度。

由表 3 和表 4 可知,基于 Kalman 滤波的冗余标定方案与六位置标定方案相比,冗余 MEMS 器件的标定精度平均提高了 11.37%,标定步骤得到简化,同时标定时间大大缩短。

5 结论

本文基于导航设备小型化、高可靠性和高精度发展的需求,以捷联惯导系统为研究背景,开展冗余 MEMS-IMU 标定技术研究,提出了一种基于 Kalman 滤波的冗余惯性器件误差参数标定方法,解决了随器件冗余数目增加和冗余配置结构复杂化带来各惯性器件误差系数分离难的问题。仿真试验表明:该方法可实现冗余 MEMS 器件误差参

数的快速精确标定,同时具有操作简单、易实现的优点。此次试验忽略了 MEMS 陀螺随机误差的影响,后续将开展 MEMS 陀螺随机误差补偿与标定技术综合研究。

参考文献

- [1] 陈哲. 捷联惯导系统原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1986: 165-193.
Chen Zhe. Strapdown inertial navigation system[M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 1986: 165-193(in Chinese).
- [2] 王京献, 张明辉. 一种高可靠捷联惯性测量单元布局[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(3): 363-367.
Wang Jingxian, Zhang Minghui. A strapdown IMU configuration with high reliability[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(3): 363-367(in Chinese).
- [3] 富力, 王新玲, 岳亚洲. 基于可靠性分析的最优冗余配置数量确定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(9): 1030-1033.
Fu Li, Wang Xinling, Yue Yazhou. Method for investigation of the optimal redundant gyros number based on reliability analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(9): 1030-1033(in Chinese).
- [4] 张瑞民. 捷联惯测组合标定及误差补偿技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 23-42.
Zhang Ruimin. Strapdown inertial measurement combination calibration and error compensation technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2017: 23-42(in Chinese).
- [5] 栾金择, 郭益德. 基于 Matlab 的三轴惯导测试转台的结构分析[J]. 科技资讯, 2015, 13(22): 12-13.
Luan Jinze, Guo Yide. Structural analysis of three-axis inertial navigation test turntable based on Matlab [J]. Technology Information, 2015, 13(22): 12-13(in Chinese).
- [6] 魏莉莉, 黄军, 傅长松. 带斜置元件的光纤陀螺捷联惯组标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2015(1): 14-19.
Wei Lili, Huang Jun, Fu Changsong. Calibration method of FOG strapdown IMU with skewed sensor axes [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015(1): 14-19(in Chinese).
- [7] Pethel S J. Test and evaluation of high performance micro electro-mechanical system based inertial measurement units[C]// Proceedings of IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium. IEEE, 2006: 167-173.
- [8] 肖龙旭. 惯测组合快速高精度标定方法研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 178-183.
Xiao Longxu. Research on fast and high precision calibration method of inertial measurement[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 178-183(in Chinese).
- [9] 蔚国强. 激光陀螺捷联惯组的无定向快速标定技术研究[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 21-27.
Wei Guoqiang. Rapid calibration of laser gyro strapdown IMUs without north-seeking [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 21-27(in Chinese).
- [10] 华冰. 捷联惯性传感器多余度配置的误差标定技术研究[J]. 传感器与微系统, 2005, 24(5): 31-33.
Hua Bing. Study of error calibration techniques for configuration with strap-down inertial sensor redundant[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2005, 24(5): 31-33(in Chinese).
- [11] 黄徽. 六余度配置 MEMS-IMU 误差标定[J]. 应用科学学报, 2009, 27(1): 106-110.
Huang Hui. Error calibration for redundancy collocation of six MEMS-IMU[J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 27(1): 106-110(in Chinese).
- [12] 梁海波. 冗余陀螺测量单元的实验室标定方法设计[J]. 航天控制, 2016, 34(1): 9-14.
Liang Haibo. Method of laboratory calibration for redundant gyroscope unit[J]. Space Control, 2016, 34(1): 9-14(in Chinese).
- [13] Sun S, Liu R. Error calibration and FDI technology of gyros in redundant IMU[C]// Proceedings of 1st International Workshop on Database Technology & Applications. IEEE, 2009: 22-27.
- [14] Nieminen T, Kangas J, Suuriniemi S. An enhanced multi-position calibration method for consumer-grade inertial measurement units applied and tested [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(10): 105-114.
- [15] Bekkeng J. Calibration of a novel MEMS inertial reference unit [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(6): 1967-1974.