

一种基于 Kalman 滤波的陀螺误差标定方法

许吉金, 刘宇, 陈国弘, 向高林, 龚大伟

(重庆天箭惯性科技股份有限公司, 重庆 400200)

摘要:针对微惯性连续测斜装置中陀螺测量精度受噪声干扰、安装误差和零漂的影响,提出了一种基于 Kalman 滤波的陀螺误差标定方法。以微型石英振动陀螺仪为研究对象,运用 Kalman 滤波对陀螺的原始测量值进行滤波,分析陀螺零漂随温度的变化关系,结合已有的误差标定模型,得到了一种改进的全温范围内的陀螺误差标定模型。通过实验验证,与传统标定方法相比,提出的陀螺标定方法的测量精度提高了 1~2 个数量级,验证了该标定方法的可行性,对工程应用具有重要意义。

关键词:石英振动陀螺; Kalman 滤波; 安装误差; 零偏补偿; 温度补偿

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

An Error Calibration Method of Gyro Based on Kalman Filter

XU Jijin, LIU Yu, CHEN Guohong, XIANG Gaolin, GONG Dawei

(Chongqing Tianjian Inertial Science and Technology Co., Ltd, Chongqing 400200, China)

Abstract: Aiming at the problem that the accuracy of gyro measurement in micro-inertia continuous inclinometer is affected by the noise interference, installation error and zero drift, a calibration method of gyro error based on Kalman filter is put forward in this paper. Taking the micro quartz vibratory gyroscope as the research object, the original measurement value of the gyroscope is filtered by Kalman filter. The relationship between the zero drift and the temperature variation of the gyro is analyzed. Combining with the existing error calibration model, an improved gyro error calibration model in the full temperature range is obtained. The experimental results show that the accuracy of the proposed gyro calibration model is increased by about 1 to 2 orders of magnitude compared with the conventional calibration model. The feasibility of the calibration method is verified, and it is of great significance for engineering applications.

Key words: micro-quartz vibratory gyroscope; Kalman filter; installation error; zero offset compensation; temperature compensation

0 引言

陀螺仪能测量物体的运动角速率,被广泛应用于汽车电子、导弹、测井及航海航空等领域。陀螺仪作为微惯性连续测斜装置中的核心部件,由于井下复杂的高温环境、噪声干扰及陀螺安装误差的影响,使陀螺仪的测量精度降低,进而决定着微惯性连续测斜装置的性能。因此,对陀螺仪的安装误差、噪声干扰及零偏随温度的变化进行补偿才能提高其精度,有助于扩大其应用范围^[1-3]。

由于陀螺数据受井下复杂环境温度的影响及长时间连续工作,表现出较强的非线性漂移特性,且受测量噪声的影响。因此,很难用精确的数学模型对陀螺误差进行描述^[4]。传统针对陀螺仪漂移所建立

的模型有 ARMA 时间序列模型、BP 神经网络及模糊控制等^[5-7],但在这种强非线性特性条件下补偿精度不高。同时,陀螺仪的测量精度还受安装误差的影响,通常,关于安装误差的标定主要方法有:

1) 在每个温度段范围内建立单独的陀螺仪安装误差标定模型。

2) 在全温范围内建立一个统一的陀螺仪安装误差标定模型。

因此,从工程应用角度出发,提出了一种全温范围内基于 Kalman 滤波的陀螺误差标定方法^[8]。该标定方法以微型石英振动陀螺仪为研究对象,通过 Kalman 滤波算法对陀螺的原始测量数据进行滤波降低随机噪声的影响,并取平均值作为对应输入的

陀螺原始测量值;在某一固定温度下,对陀螺仪进行安装误差标定,得到对应温度下的陀螺安装误差标定模型。此时的安装误差标定模型中,包含了陀螺仪的固定零偏、耦合误差系数及标度因子。然而,陀螺周围的工作温度不断发生变化引起零偏值不固定,通过最小二乘法获得陀螺零偏随温度的变化关系,最终得到了基于 Kalman 滤波的陀螺误差标定方法。该标定方法精度高,计算量小,易操作,能抑制微惯性连续测斜装置因长时间工作发生陀螺数据漂移,对提高微惯性连续测斜装置的测量精度具有重要的工程应用价值。

1 陀螺误差标定的基本原理

1.1 Kalman 滤波基本原理

Kalman 滤波是一个在误差协方差最小准则下的最优估计方法,计算量小,实时性高,能利用陀螺测量值的方差参数不断修正未来陀螺的估计值,提高估计精度,兼顾实时性和稳定性^[9-10]。

Kalman 滤波器的状态方程和测量方程为

$$X_i = BX_{i-1} + W_i \quad (1)$$

$$Z_i = HX_i + V_i \quad (2)$$

式中: $B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为三轴陀螺仪的状态转移矩阵;

$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为测量矩阵; X_i 为 i 时刻三轴陀螺零偏值; W_i 和 V_i 分别为状态方程和测量方程的噪声矩阵,它们是互不相关的白噪声,方差分别为 Q, R, R 值由三轴陀螺原始零偏稳定性的平方得到, Q 值通过三轴陀螺零偏值的噪声得到。

预测方程为

$$\hat{X}_{i|i-1} = B\hat{X}_{i-1|i-1} \quad (3)$$

协方差矩阵预测为

$$P_{i|i-1} = BP_{i-1|i-1}B^T + Q \quad (4)$$

更新方程为

$$\hat{X}_{i|i} = \hat{X}_{i|i-1} + G_i(Z_i - H\hat{X}_{i|i-1}) \quad (5)$$

协方差更新方程为

$$P_{i|i} = (I - G_iH)P_{i|i-1} \quad (6)$$

Kalman 增益矩阵为

$$G_i = P_{i|i-1}H^T(H P_{i|i-1}H^T + R)^{-1} \quad (7)$$

式中: $\hat{X}_{i-1|i-1}$ 为上一时刻三轴陀螺仪的最优估计值; $\hat{X}_{i|i-1}$ 为三轴陀螺仪的预测状态; $\hat{X}_{i|i}$ 为第 i 时刻三轴陀螺仪的状态估计; $P_{i|i-1}$ 为相对于状态 $\hat{X}_{i|i-1}$

的预测误差协方差; $P_{i|i}$ 为估计误差协方差; G_i 为卡尔曼滤波增益。

为了减小滤波稳定时间,卡尔曼滤波选择三轴陀螺第一组测量值(-28.7, 100.4, -0.76)作为三轴陀螺仪零偏的初始值,协方差矩阵初始值取

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

滤波前、后的数据对比如图 1 所示。

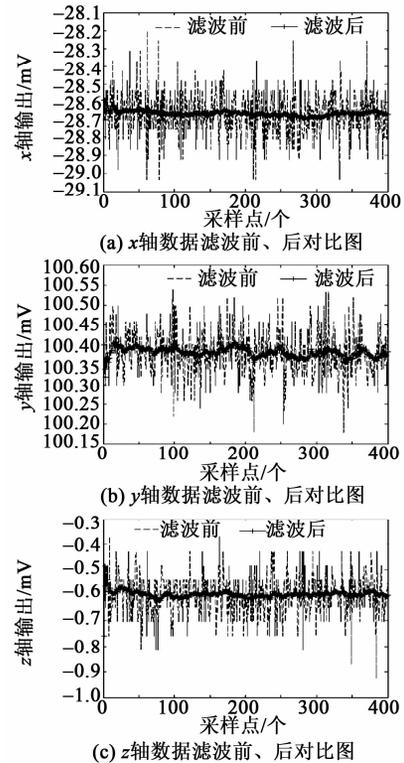


图 1 三轴陀螺仪原始数据滤波前、后对比图

由图 1 可知,滤波后陀螺输出的原始数据的幅值减小,变得平滑,且陀螺仪原始数据的标准偏差由滤波前的 0.141 9 变成 0.011 0。

1.2 改进的陀螺安装误差标定

理想情况下,无安装误差存在,三轴陀螺仪的坐标系和载体坐标系重合。实际情况中它们存在一定夹角,如图 2 所示, $Ox_gy_gz_g$ 为三轴陀螺坐标系, $Ox_by_bz_b$ 为载体坐标系。安装误差存在于微惯性连续测斜装置和三轴陀螺仪间。 $Ox_by_bz_b$ 可通过分别围绕 x_b 轴旋转角度 ξ 变换到坐标系 $Ox_b'y'_bz'_b$,围绕 y'_b 轴旋转角度 θ 变换到坐标系 $Ox''_by''_bz''_b$,围绕 z''_b 轴旋转角度 ϕ 变换到坐标系 $Ox_gy_gz_g$ 后,与三轴陀螺仪的坐标系重合^[10],和载体坐标系与导航坐标系的关系一致,即其关系可用坐标变换矩阵表示为

$$C_b^g = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \sin \xi \cos \psi + \sin \psi \cos \xi & -\cos \psi \sin \theta \cos \xi + \sin \psi \sin \xi \\ -\cos \theta \sin \psi & \cos \xi \cos \psi - \sin \xi \sin \psi \sin \theta & \cos \psi \sin \xi + \sin \psi \sin \theta \cos \xi \\ \sin \theta & -\sin \xi \cos \theta & \cos \theta \cos \xi \end{pmatrix} \quad (8)$$

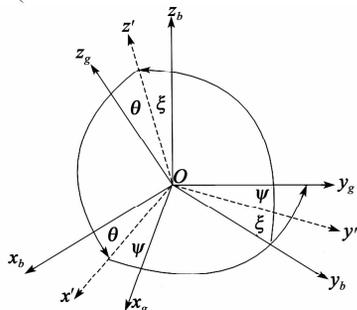


图2 三轴陀螺仪安装误差示意图

当微惯性连续测斜装置的输入角速率为 ω_b^g , 三轴陀螺的输出 ω_{ig}^g 为

$$\omega_{ig}^g = C_b^g \omega_b^g \quad (9)$$

对变换矩阵进行简化得

$$C_b^g = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} & K_{zx} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{zy} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (10)$$

那么,三轴陀螺的输出可写为

$$\begin{pmatrix} \omega_{xg} - \omega_{x0} \\ \omega_{yg} - \omega_{y0} \\ \omega_{zg} - \omega_{z0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} & K_{zx} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{zy} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{xb} \\ \omega_{yb} \\ \omega_{zb} \end{pmatrix} \quad (11)$$

三轴陀螺仪安装误差的标定模型变为

$$\begin{pmatrix} \omega_{xb} \\ \omega_{yb} \\ \omega_{zb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{yx} & K_{zx} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{zy} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \omega_{xg} - \omega_{x0} \\ \omega_{yg} - \omega_{y0} \\ \omega_{zg} - \omega_{z0} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: $\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}$ 分别为三轴陀螺仪测量值; $\omega_{xb}, \omega_{yb}, \omega_{zb}$ 分别为输入角速率。微惯性连续测斜装置的 x, y, z 轴分别有输入角速率时,陀螺仪的 3 个轴均能够检测到角速率,用 9 个系数表示。可用 K_{ij} ($i = x, y, z; j = x, y, z$) 进行表示,理解为当 i 轴有输入角速率时, j 轴检测到的角速率与输入角速率的比值; $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}$ 分别为三轴陀螺仪的零偏。在温度固定的情况下,可视零偏为固定值。因此,对安装误差标定,只需求出 9 个比例系数和固定零偏。目前,绝大多数对于陀螺仪的安装误差标定是以实际角速率为标定对象,即除以刻度因子后的实际值,但实际工程应用中,由于外界环境变化,会引起刻度因子不是一个定值,若采用传统标定方法对陀螺仪实际值进行标定,会造成较大误差。本文提出改进的标定方法对陀螺仪原始值进行标定,能克服刻度因子不

固定引起的误差。

1.2.1 三轴陀螺标定方案

为了保证安装误差的标定效果,本文使用高精度的单轴电动转台对陀螺仪进行标定。选用单轴电动转台的主轴作为陀螺的输入轴,因此,每次实验需对陀螺仪进行重新安装,并保证陀螺仪的敏感轴垂直于转台主轴平面。标定过程:

1) 将微惯性连续测斜装置按要求装载在工装上,并放进保温筒,保证陀螺仪工作温度为 25°C ,并使用稳压电源 12 V 给微惯性连续测斜装置供电,进行预热。

2) 将微惯性连续测斜装置安装在转台平面上,保证其 x 轴垂直于转台平面,与上位机通过数据接口 RS232 连接。

3) 对单轴电动转台上电并闭合,检查连接确认无误。

4) 设置单轴电动转台为速率运行方式,陀螺载体的 x 轴有输入角速率,输入角速率从 -100 ($^\circ$)/s 递增到 100 ($^\circ$)/s,间隔为 10 ($^\circ$)/s,每个速率在稳定后采集若干三轴陀螺原始值。

5) 分别保证微惯性连续测斜装置的 y, z 轴垂直于转台的主轴面,重新按照步骤 4) 进行标定。

1.2.2 标定系数计算

经过标定实验后,分别对陀螺仪的实验数据分析处理得到标定系数。分离陀螺仪的原始值,得到输入角速率下三轴陀螺仪检测到的原始值。分别对陀螺仪的原始值进行滤波,再对滤波后的陀螺各轴数据取平均值,作为对应输入角速率条件下的三轴陀螺数据。并以高精度单轴电动转台的输入角速率为理论值,陀螺仪的原始数据为测量值,通过最小二乘法拟合可得三轴陀螺仪的零偏和 9 个比例系数。

图 3~5 分别为三轴陀螺仪测量值及拟合曲线。通过拟合可得 $K_{xx}, K_{xy}, K_{xz}, K_{yx}, K_{yy}, K_{yz}, K_{zx}, K_{zy}, K_{zz}$ 的值,且可得三轴陀螺仪 3 次实验 3 个轴的零偏分别为 $B_{xx}, B_{xy}, B_{xz}, B_{yx}, B_{yy}, B_{yz}, B_{zx}, B_{zy}, B_{zz}$,则三轴陀螺仪的零偏为

$$\begin{cases} \omega_{x0} = (B_{xx} + B_{yx} + B_{zx})/3 \\ \omega_{y0} = (B_{xy} + B_{yy} + B_{zy})/3 \\ \omega_{z0} = (B_{xz} + B_{yz} + B_{zz})/3 \end{cases} \quad (13)$$

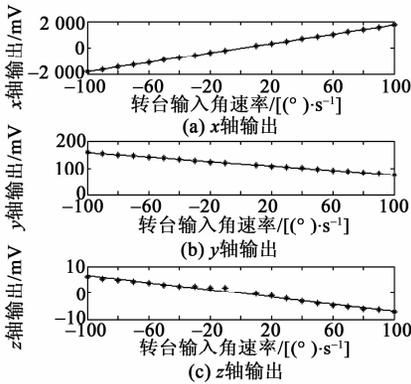


图 3 x 轴测量值及拟合曲线

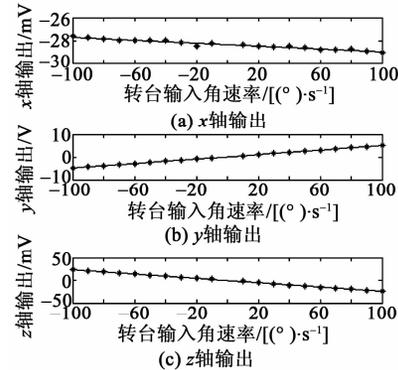


图 4 y 轴测量值及拟合曲线

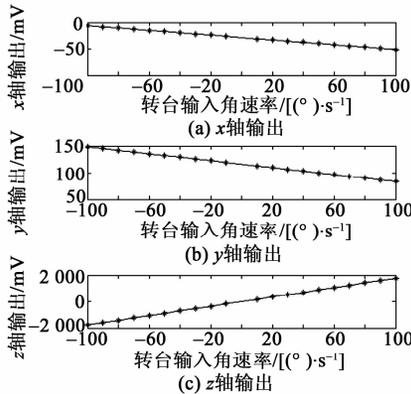


图 5 z 轴测量值及拟合曲线

通过对 3 次实验的三轴陀螺仪在 $-100 \sim +100$ ($^{\circ}$)/s 范围内的数据作最小二乘法拟合, 可得三轴陀螺仪的零偏与比例系数, 如表 1 所示。

表 1 三轴陀螺仪标定系数

轴向	零偏/mV	比例系数
x	-28.674 541 66	$K_{xx} = 17.768\ 991\ 5$
		$K_{xy} = -0.410\ 377\ 9$
		$K_{xz} = -0.068\ 088\ 6$
y	100.377 000 00	$K_{yx} = -0.006\ 430\ 8$
		$K_{yy} = 49.369\ 892\ 8$
		$K_{yz} = -0.240\ 188\ 9$

续表

轴向	零偏/mV	比例系数
z	-0.600 416 66	$K_{zx} = -0.225\ 389\ 2$
		$K_{zy} = -0.327\ 249\ 6$
		$K_{zz} = 17.826\ 161\ 3$

1.3 陀螺零偏与温度的关系

在实际工程应用中, 陀螺仪零偏随温度变化会发生漂移, 引起陀螺零偏不是一个固定值^[12], 从而导致安装误差标定模型因陀螺零偏变化产生偏差, 可通过最小二乘法获得零偏随温度的变化关系。

将陀螺放在高低温箱内, 设置温度范围 $-40 \sim +60$ $^{\circ}\text{C}$, 温变系数为 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 采样频率 100 Hz, 且分别在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 和 60 $^{\circ}\text{C}$ 保温 30 min, 应保证进行 2 次完整温度循环试验, 实验结果如图 6 所示。

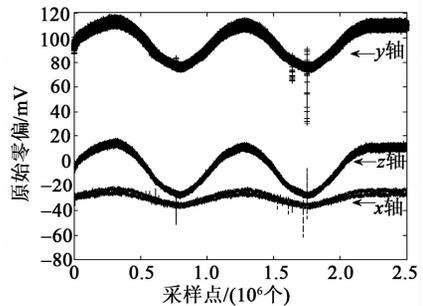


图 6 陀螺仪各轴温循实验结果

通过 MATLAB 软件绘制陀螺仪零偏随温度的变化关系, 如图 7 所示。

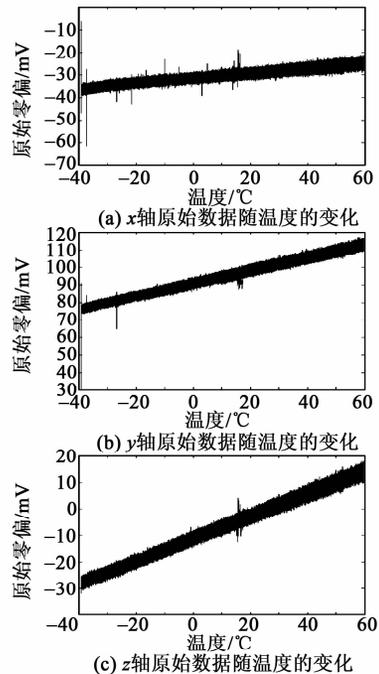


图 7 各轴原始零偏随温度的变化

由图7可看出,陀螺仪各轴静态数据随温度有规律变化,根据微惯性连续测斜装置的特性,选择二次残差模型,通过最小二乘法拟合,得到陀螺仪各轴零偏随温度的变化关系:

$$\begin{cases} \omega_{x0}(T) = -9.6344 \times 10^{-5} T^2 + 0.11187T - 31.489 \\ \omega_{y0}(T) = 8.763 \times 10^{-5} T^2 + 0.36662T + 90.69 \\ \omega_{z0}(T) = -2.9648 \times 10^{-5} T^2 + 0.42226T - 11.336 \end{cases} \quad (14)$$

式中: T 为陀螺仪敏感温度; $\omega_{x0}(T)$, $\omega_{y0}(T)$ 和 $\omega_{z0}(T)$ 为温度 T 时的零偏。

2 实验验证

将标定得到的比例系数、温度随零偏的变化关系代入式(12),得到陀螺全温范围内的误差标定模型为

$$\begin{pmatrix} \omega_{xb} \\ \omega_{yb} \\ \omega_{zb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.05628079 & 0.0000108 & 0.00071179 \\ 0.00046929 & 0.02025715 & 0.00037781 \\ 0.00022129 & 0.00027298 & 0.05610513 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_{xg} - (-9.6344 \times 10^{-5} T^2 + 0.11187T - 31.489) \\ \omega_{yg} - (8.763 \times 10^{-5} T^2 + 0.36662T + 90.69) \\ \omega_{zg} - (-2.9648 \times 10^{-5} T^2 + 0.42226T - 11.336) \end{pmatrix} \quad (15)$$

由式(15)可知,只要得到陀螺仪测量值和温度,即可求出误差标定后的值。假设 z 轴有输入角速率,将标定前陀螺仪 z 轴 $-100 \sim +100$ ($^{\circ}$ /s) 范围内的测量数据分别代入式(15)得到标定后的值。标定与未标定的陀螺仪 z 轴数据如表2所示。

表2 陀螺仪 z 轴数据标定前、后对比

输入角速率/ [($^{\circ}$)/s]	未标定值/ [($^{\circ}$)/s]	标定值/ [($^{\circ}$)/s]	未标定的误差/ [($^{\circ}$)/s]	标定后的误差/ [($^{\circ}$)/s]
-100	-99.1279	-100.061	0.8721	-0.0610
-90	-89.2244	-90.0608	0.7756	-0.0608
-80	-79.2965	-80.0360	0.7035	-0.0360
-70	-69.3963	-70.0392	0.6037	-0.0392
-60	-59.4981	-60.0445	0.5019	-0.0445
-50	-49.5831	-50.0328	0.4169	-0.0328
-40	-39.6638	-40.0168	0.3362	-0.0168
-30	-29.7419	-29.9983	0.2581	0.0017
-20	-19.8331	-19.9926	0.1669	0.0074
-10	-9.95125	-10.0146	0.04875	-0.0146

续表

输入角速率/ [($^{\circ}$)/s]	未标定值/ [($^{\circ}$)/s]	标定值/ [($^{\circ}$)/s]	未标定的误差/ [($^{\circ}$)/s]	标定后的误差/ [($^{\circ}$)/s]
10	9.88194	10.0119	-0.1180	0.01199
20	19.7851	20.0118	-0.2148	0.01185
30	29.6887	30.0119	-0.3112	0.01199
40	39.5636	39.9832	-0.4363	-0.0167
50	49.4619	49.9780	-0.5380	-0.0219
60	59.3548	59.9674	-0.6451	-0.0325
70	69.2656	69.9749	-0.7343	-0.0250
80	79.1555	79.9611	-0.8444	-0.0388
90	89.0176	89.9195	-0.9823	-0.0805
100	98.93139	99.9300	-1.0686	-0.0699

由表2可看出,角速率为 $-100 \sim +100$ ($^{\circ}$ /s) 时,陀螺仪 z 轴数据误差绝对值随着角速率增大越来越大,且在角速率为 ± 100 ($^{\circ}$ /s) 时安装误差最大。未标定的陀螺仪 z 轴数据最大误差的绝对值为 1.0686 ($^{\circ}$ /s), 标定后最大误差的绝对值小于 0.0699 ($^{\circ}$ /s), 提高 $1 \sim 2$ 个数量级。

图8是陀螺 z 轴输入角速率为 90 ($^{\circ}$ /s) 时各轴误差标定前、后对比图。表3是 z 轴输入角速率为 90 ($^{\circ}$ /s) 时各轴误差标定前、后角速率对比。

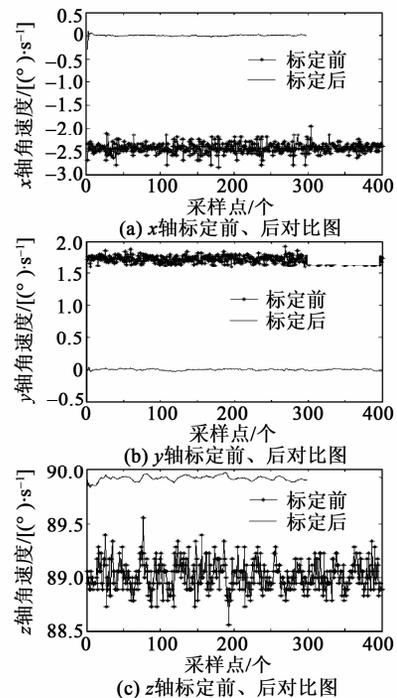


图8 各轴标定前、后对比

表3 z 轴输入角速率为 $90^\circ/\text{s}$ 时安装误差标定前、后角速率对比

轴向	标定前输出角速率/ [$^\circ/\text{s}$]	标定后输出角速率/ [$^\circ/\text{s}$]
x	-2.476 8	0.012 3
y	1.728 8	0.003 2
z	89.017 6	89.919 5

由图表3可知,当 z 轴输入角速率为 $90^\circ/\text{s}$ 时,标定后 x 、 y 轴输出角速率在零点附近作小范围的波动, z 轴输出角速率更接近理论输入值。通过以上分析可知,对三轴陀螺仪进行误差标定后,测量精度提高了1~2个数量级。

3 结束语

噪声干扰、安装误差和零漂是影响微惯性连续测斜装置中陀螺测量精度的重要因素。因此,提出了一种基于 Kalman 滤波的陀螺误差标定方法。运用 Kalman 滤波对陀螺的原始测量数据进行滤波并取平均值,作为对应输入的陀螺原始测量值;在某一固定温度下,对陀螺仪进行安装误差标定,得到对应温度下的陀螺安装误差标定模型;安装误差的标定模型中,陀螺仪的零偏由于周围的工作温度影响,其零偏是一个变化值,通过二次残差模型获得陀螺零偏随温度的变化关系,最终得到了全温范围内基于 Kalman 滤波的陀螺误差标定方法。通过对比实验验证,与传统误差标定方法相比,本方案的测量精度提高了1~2个数量级。该标定方法精度高,计算量小,易于操作,能够抑制陀螺因长时间工作发生漂移,对提高微惯性连续测斜装置的测量精度具有重要的工程应用价值。

参考文献:

[1] PRIKHODKO I, TRUSOV A, SHKEL A. Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature self-sensing[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 201: 517-524.

[2] 宋丽君, 秦永元. MEMS 陀螺仪的一种实用标定法[J]. *压电与声光*, 2010, 32(3): 372-375.

SONG Lijun, QIN Yongyuan. A practical calibration method on MEMS gyroscope[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2010, 32(3): 372-375.

[3] SHIAU J K, HUANG Chenxuan, CHANG Mingyu. Noise characteristics of MEMS gyro's null drift and temperature compensation[J]. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2012, 15(3): 239-246.

[4] 杨亮, 苏岩, 袁安萍, 等. 高品质因数微机械陀螺的温度自补偿[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2870-2876.

YANG Liang, SU Yan, QIU Anping, et al. Self-temperature compensation for high quality factor micro machined gyroscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2870-2876.

[5] LI Teng, YANG Shiliang, PAN Hongliang. Simulation of temperature compensation of pressure sensor based on PCA and improved BP neural network[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 846: 513-516.

[6] 夏敦柱, 王寿荣, 周百令. 硅微陀螺仪零偏温度性能补偿方法设计[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(2): 290-294.

XIA Dunzhu, WANG Shourong, ZHOU Bailing. Zero temperature dependency compensating-control design of micro-gyro[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2012, 42(2): 290-294.

[7] WANG Xu, WU Wenqi, FANG Zhen, et al. Temperature drift compensation for hemispherical resonator gyro based on natural frequency[J]. *Sensors*, 2012, 12(5): 6434-6446.

[8] 罗霄. 基于卡尔曼滤波的 DMC 算法在 CSTR 中的应用[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2012(7): 55-60.

LUO Xiao. Kalman filter based dynamic matrix control and its application in CSTR[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2012(7): 55-60.

[9] 刘南南, 徐抒岩, 曹小涛, 等. Kalman 滤波算法在高精度星点定位中的应用[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1-6.

LIU Nannan, XU Shuyan, CAO Xiaotao, et al. Application of adaptive Kalman filter algorithm in high accuracy star spot location[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1-6.

[10] 曹慧亮, 李宏生, 王寿荣, 等. 硅微机械陀螺仪测控电路的温度补偿[J]. *光学精密工程*, 2013(12): 3118-3125.

CAO Huiliang, LI Hongsheng, WANG Shourong, et al. Temperature compensation of monitoring circuit for silicon MEMS gyroscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013(12): 3118-3125.

[11] 李星海, 陈述奇, 蔡体菁, 等. 火箭弹 MEMS 陀螺捷联惯导系统[J]. *压电与声光*, 2012, 34(5): 703-707.

LI Xinghai, CHEN Shuqi, CAI Tijing, et al. MEMS gyro strapdown inertial navigation system (SINS) for rockets[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2012, 34(5): 703-707.