

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.05.018

# 陀螺加速度计交叉二次项的线振动台测试方法

孙 闯,任顺清

(哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心,哈尔滨 150080)

**摘要:**为了提高陀螺加速度计的标定精度,有必要对交叉二次项进行精确的标定。提出了一种陀螺加速度计交叉二次项在精密线振动台上的测试方法,通过分析陀螺加速度计的测试原理建立了包含交叉二次项的误差模型。利用分度头将陀螺加速度计翻滚到不同的位置,测量陀螺加速度计进动整周期的相关时间参数和输出数据。通过计算加速度计模型输出与平均角速率积分之间的关系,准确辨识出陀螺加速度计误差模型中的各误差项系数。该方法可以有效抑制陀螺加速度计的输出误差,提高标定的精度。最后通过仿真分析,验证了该方法可以准确辨识出陀螺加速度计的二次项、交叉二次项等高阶误差项系数,辨识精度达到了 $10^{-7}$ ,进一步提高了陀螺加速度计在线振动台上的标定精度。

**关键词:**陀螺加速度计;精密线振动台;误差模型;交叉二次项

**中图分类号:**V241.5+31 **文献标志码:**A

**文章编号:**2095-8110(2017)05-0105-06

## Measurement Method for Cross-quadratic Coefficient of PIGA on Linear Vibration Table

SUN Chuang, REN Shun-qing

(Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to improve the calibration accuracy of PIGA (Pendulous Integrating Gyro Accelerometer), accurately calibrating the cross-quadratic coefficient is necessary. A method of measuring cross-quadratic coefficient of PIGA on precision linear vibration table is proposed. By analyzing the mechanism of PIGA, the error model is established including cross-quadratic coefficient. The PIGA is tumbled to different positions by using indexing table, the output data and the concerned time data of PIGA precession within integer periods are measured, the error coefficients of PIGA's error model are accurately identified by the relationship between model outputs and the integral of average precession angular rates of PIGA. By this measurement method, the output error of PIGA is suppressed and the calibration accuracy is improved. The simulation results show that the method can accurately identify the cross-quadratic coefficient and other higher-order coefficients of PIGA, the accuracy of identification is greatly enhanced and reaches  $10^{-7}$ .

**Key words:** Pendulous integrating gyro accelerometer (PIGA); Precision linear vibration table; Error model; Cross-quadratic coefficient

收稿日期:2017-06-12;修订日期:2017-08-04

基金项目:十二·五预研项目(51309050202)

作者简介:孙闯(1989-),男,博士研究生,主要从事惯性测试技术方面的研究。E-mail:sun489495923@163.com

## 0 引言

随着航空航天技术的不断发展,对导航与制导设备的精度要求也越来越高,陀螺加速度计(PIGA)因其具有高精度、大量程等优点而广泛地应用于高精度的惯导系统中<sup>[1-3]</sup>,陀螺加速度计的标定精度直接决定了导航与制导的精度。

目前陀螺加速度计的测试方法主要有重力场测试与高  $g$  环境测试<sup>[4-5]</sup>,重力场测试虽然对加速度计的静态模型有较高的辨识精度<sup>[6]</sup>,但由于输入的比力小,不能有效激励出误差模型的高阶误差项。因此对陀螺加速度计的高阶误差项测试,往往通过离心机、振动台与火箭橇<sup>[7-8]</sup>等动态测试设备,而线振动台因为可以精准地提供高幅值的谐波加速度,且工作环境简单,测试成本低,因此被应用于陀螺加速度计的测试中<sup>[9]</sup>。目前,对加速度计的高阶误差项标定多集中在二次项的标定上<sup>[10]</sup>,文献<sup>[11]</sup>讨论了陀螺加速度计的二次项和三次项在离心机上的标定方法;文献<sup>[12]</sup>给出了加速度计二次奇异项系数的形成机理和在离心机上的标定方法;文献<sup>[13]</sup>给出了交叉耦合项系数的重力场标定算法;文献<sup>[14]</sup>讨论了在火箭橇上的二次项系数标定的优越性。但目前国内外对交叉二次项的标定研究较少,当加速度计输入轴及其垂直轴平面内存在较大比力输入时,误差模型中的二次项和交叉二次项将被同时激励,因此为了提高仪表的标定精度,对交叉二次项进行标定十分必要。

本文提出了一种陀螺加速度计交叉二次项的线振动台测试方法,通过分析陀螺加速度计的测试原理,建立包含交叉二次项的误差模型。通过线振动台提供高  $g$  的输入,对陀螺加速度计的二次项、交叉二次项与三次项进行充分的激励,利用陀螺加速度计进动整周的测试方法,抑制测试系统中的输出误差,提高陀螺加速度计的标定精度。本方法不仅可以准确地标定出陀螺加速度计的交叉二次项和其他高阶误差项系数,相比其他高  $g$  环境的测试方法又缩短了测试周期,提高了标定效率。

## 1 测试系统

测试系统如图1所示,主要由线振动台、测位系统、计数计时系统、分度头和陀螺加速度计组成。

其中,线振动台主要由工作台、曲柄盘、端部轴承和测量振动台工作姿态的测头组成,用来提供高

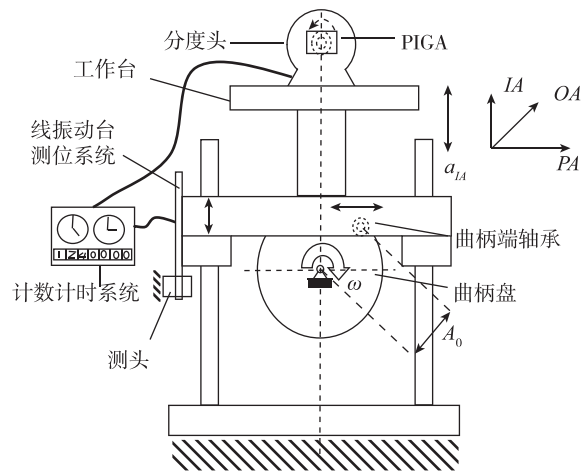


图1 测试系统图

Fig. 1 The measurement system

精度的正弦加速度。当线振动台的振幅为  $A_0$  m, 工作角速度为  $\omega$  时,  $t$  时刻产生的加速度输出为  $A = A_0 \omega^2 \sin \omega t$  m/s<sup>2</sup>。计数计时系统主要采集陀螺加速度计的脉冲信号与工作时间,要求其计时精度达到  $10^{-3}$  ms。假设本文所用陀螺加速度计进动一周的脉冲数为 16384,则计数系统的精度要求每进动整周计数误差小于 1 脉冲。将分度头安装固定在工作台上,通过分度头调整陀螺加速度计输入轴方向与水平方向的夹角,其角位置定位精度为  $0.001^\circ$ 。

## 2 误差模型

当陀螺加速度计以如图1所示的理想姿态安装在分度头上时,其输出轴  $OA$  应与摆轴  $PA$  正交且始终处于水平位置,即  $a_{OA} = 0$ 。当仅存在输入轴方向的比力输入时,陀螺加速度计的瞬时进动角速率误差模型一般可以表示为

$$\dot{\alpha} = k_0 + k_1 a_{IA} + k_2 a_{IA}^2 + k_3 a_{IA}^3 + \epsilon \quad (1)$$

式中,  $\dot{\alpha}$  为进动角速率,单位为 rad/s;  $a_{IA}$  为输入轴比力;  $k_0$  为陀螺加速度计的零偏,  $k_1$  为陀螺加速度计的标度因子,  $k_2$  为二次误差项系数,  $k_3$  为三次误差项系数;  $\epsilon$  为随机误差。

但是在实际测试时,陀螺加速度计也会绕  $PA$  轴旋转  $\beta$  角度,如图2所示。

如果在输入轴垂直的方向,  $PA$  轴或  $OA$  轴上存在较大的比力输入,就会产生相应的干扰力矩  $M(\beta)$

$$M(\beta) = ml (a_{PA} \sin \alpha + a_{OA} \cos \alpha) \sin \beta \quad (2)$$

式中,  $ml$  为绕内框架轴的摆性,单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}$ 。

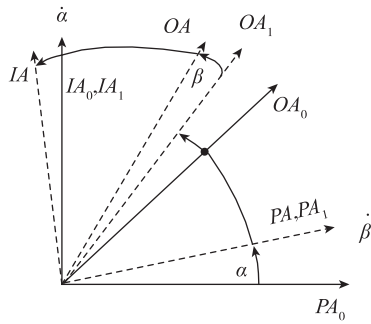


图 2 PIGA 内部坐标

Fig. 2 Internal coordinate system of PIGA

显然陀螺加速度计的标度因子  $k_1 = ml/H$ 。将  $\beta$  角关于  $\alpha$  进行 Fourier 展开得到一次谐波成分为：

$$\beta = \beta_0 + \beta_s \sin \alpha + \beta_c \cos \alpha \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中,在仅考虑 PA 轴有输入加速度  $a_{PA}$  的情况下,采用陀螺加速度计进动  $N_i$  整周积分的方法来计算平均角速率,由于  $\beta$  一般较小,可设  $\sin \beta \approx \beta$ 。干扰力矩对角速率的干扰项可通过计算得到: $k_1 \beta_s a_{PA} / 2$ 。根据文献[15]的测试数据可知,  $\beta_s$  与 PA 轴输入的比力呈线性关系,随着输入加速度的增大而增大,因此可设  $\beta_s = k_2' a_{PA}$ 。在误差模型中,由于存在地球自转角速率,对陀螺加速度计的进动角速率输出产生影响,因此误差模型中也要予以考虑,误差模型可写为

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} + \omega_{ie} \sin L \cos \theta = & k_0 + k_1 a_{IA} + \frac{k_1 k_2'}{2} a_{PA}^2 + \\ & k_2 a_{IA}^2 + k_3 a_{IA} a_{PA} + k_4 a_{IA}^3 + \epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $k_2'$  即为交叉二次项,与比力呈平方关系;  $k_3$  为耦合二次项;  $\omega_{ie}$  为地球自转角速度,单位为 rad/s;  $L$  为测试所在地纬度;  $\theta$  为 PA 轴与水平方向夹角。对比式(1)与式(4)可以发现,如果标定时不考虑交叉二次项误差,则会对二次项的标定精度产生较大影响。

### 3 测试方法

本文采用陀螺加速度计进动整周的方法进行测试,首先将分度头固定在振动台工作面上,调整振动台与分度头保证水平。将加速度计如图 1 所示安装在分度头上,保证 OA 轴与分度头回转轴平行,调整分度头的零位使加速度计的输入轴与水平面垂直,即  $\theta = 0^\circ$ 。启动振动台与加速度计,当工作状态稳定后启动测位与计数计时系统,设定陀螺加

速度计进动的 0 时刻,设振动台第一次过零点时间为  $t_1$ 。当陀螺加速度计脉冲数达到  $16384N_i$ ,即进动  $N_i$  周后,记录时间  $T_m$ 。再测量至下一次线振动过零点的时间间隔为  $t_2$ ,此时可通过测位系统得知振动台的振动周期数为  $N_p$ ,因此有  $2\pi N_p / \omega = t_2 + T_m - t_1$ 。显然  $t$  时刻振动台的输出加速度为  $A \sin \omega(t - t_1) \text{ m/s}^2$ 。完成一组测试后,旋转分度头,使陀螺加速度计的 PA 轴与水平面夹角为  $\theta_i = \pi i / 3 (i = 0, 1, \dots, 5)$ 。则可以得到陀螺加速度计在  $T_{mi}$  时间内的瞬时进动角速率为

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}(A, \theta_i) = & k_0 + k_1 \cos \theta_i (g + A \sin \omega t) + \\ & \frac{k_1 k_2'}{2} \sin^2 \theta_i (g + A \sin \omega t)^2 + \\ & k_2 \cos^2 \theta_i (g + A \sin \omega t)^2 + \\ & \frac{k_3}{2} \sin 2\theta_i (g + A \sin \omega t)^2 + \\ & k_4 \cos^3 \theta_i (g + A \sin \omega t)^3 - \\ & \omega_{ie} \sin L \cos \theta_i + \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

则可以根据式(5)对进动角速率进行积分平均得到平均进动角速率

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{mi}} \int_0^{T_{mi}} \dot{\alpha}(A, \theta_i) dt = & \frac{1}{T_{mi}} \int_0^{t_1^i} \dot{\alpha}(A, \theta_i) dt + \\ & \frac{1}{T_{mi}} \int_{t_1^i}^{t_1^i + \frac{2\pi N_{pi}}{\omega}} \dot{\alpha}(A, \theta_i) dt - \\ & \frac{1}{T_{mi}} \int_{T_{mi}}^{T_{mi} + t_2^i} \dot{\alpha}(A, \theta_i) dt \end{aligned} \quad (6)$$

最终计算得到平均进动角速率为

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{mi}} \int_0^{T_{mi}} \dot{\alpha}(A, \theta_i) dt = & \frac{2\pi N_i}{T_{mi}} \\ = & k_0 + k_1 L_1^i \cos \theta_i + \\ & k_1 k_2' \frac{L_2^i \sin^2 \theta_i}{2} + k_2 L_2^i \cos^2 \theta_i + \\ & k_3 \frac{L_2^i \sin 2\theta_i}{2} + k_4 L_3^i - \\ & \omega_{ie} \sin L \cos \theta_i + \epsilon_i \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $L_j^i (j=1, 2, 3)$  为含有相关测试参数的函数,重复之前测试。为了提高最终误差项系数的标定精度,在完成 6 组测试后,将加速度计正倒置安装,分别再测试加速度计在振动台静态时的平均进动角速率,得到:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{m6}} \int_0^{T_{m6}} \dot{\alpha}(0, \frac{\pi}{2}) dt = & k_0 + k_1 g + k_2 g^2 + \\ & k_4 g^3 - \omega_{ie} \sin L \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{1}{T_{m7}} \int_0^{T_{m7}} \dot{\alpha}(0, \pi) dt = k_0 - k_1 g + k_2 g^2 - k_4 g^3 + \omega_{ie} \sin L \quad (9)$$

联立式(7)~式(9),将测试结果写成矩阵形式有

$$\begin{bmatrix} \frac{2\pi N_t}{T_{m0}} + \omega_{ie} \sin L \\ \frac{2\pi N_t}{T_{m1}} + \frac{1}{2} \omega_{ie} \sin L \\ -\frac{2\pi N_t}{T_{m2}} - \frac{1}{2} \omega_{ie} \sin L \\ -\frac{2\pi N_t}{T_{m3}} - \omega_{ie} \sin L \\ -\frac{2\pi N_t}{T_{m4}} - \frac{1}{2} \omega_{ie} \sin L \\ \frac{2\pi N_t}{T_{m5}} + \frac{1}{2} \omega_{ie} \sin L \\ \frac{2\pi N_t}{T_{m6}} + \omega_{ie} \sin L \\ -\frac{2\pi N_t}{T_{m7}} - \omega_{ie} \sin L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1^0 & 0 & L_2^0 & 0 & L_3^0 \\ 1 & \frac{1}{2}L_1^1 & \frac{3}{8}L_2^1 & \frac{1}{4}L_2^1 & \frac{\sqrt{3}}{4}L_2^1 & \frac{1}{8}L_3^1 \\ 1 & -\frac{1}{2}L_1^2 & \frac{3}{8}L_2^2 & \frac{1}{4}L_2^2 & -\frac{\sqrt{3}}{4}L_2^2 & -\frac{1}{8}L_3^2 \\ 1 & -L_1^3 & 0 & L_2^3 & 0 & -L_3^3 \\ 1 & -\frac{1}{2}L_1^4 & \frac{3}{8}L_2^4 & \frac{1}{4}L_2^4 & \frac{\sqrt{3}}{4}L_2^4 & -\frac{1}{8}L_3^4 \\ 1 & \frac{1}{2}L_1^5 & \frac{3}{8}L_2^5 & \frac{1}{4}L_2^5 & -\frac{\sqrt{3}}{4}L_2^5 & \frac{1}{8}L_3^5 \\ 1 & g & 0 & g^2 & 0 & g^3 \\ 1 & -g & 0 & g^2 & 0 & -g^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_1 k_2' \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (10)$$

式中,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为随机误差矩阵。式(10)可简写成

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\Phi} [k_0 \quad k_1 \quad k_1 k_2' \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4]^T + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

通过式(11)即可对陀螺加速度计的各个误差项进行最小二乘估计。

#### 4 仿真与误差分析

下面通过一组仿真对本文提出的方法进行验证。设本文所用的线振动台的振幅为 0.03m, 振动频率为 10Hz, 即  $\omega = 20\pi$ 。地球自转的角速度为  $\omega_{ie}$

$= 7.2921158 \times 10^{-5}$  rad/s, 纬度为  $L = 39.9^\circ$ , 地球重力加速度  $g = 9.8016093 \text{m/s}^2$ 。设陀螺加速度计进动周期为  $N_t = 50$ , 零偏、标度因子、二次项等误差系数分别为:  $k_0 = 10^{-4}$  rad/s,  $k_1 = 0.55$  (rad/s)/g,  $k_2 = 1.5 \times 10^{-5}$  (rad/s)/g<sup>2</sup>,  $k_2' = 1.8 \times 10^{-5}$ /g,  $k_3 = 1.0 \times 10^{-6}$  (rad/s)/g<sup>2</sup>,  $k_4 = 5 \times 10^{-7}$  (rad/s)/g<sup>3</sup>。

平均进动角速率  $\bar{\alpha}(A, \theta)$  的不确定度可根据如下公式计算

$$\sigma_{\bar{\alpha}(A, \theta_i)} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{T_{mi}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{\alpha}(A, \theta_i)}{\partial T_{mi}} \sigma_{T_{mi}}\right)^2} \quad (12)$$

由于陀螺加速度计是根据计数脉冲数来计算进动周期, 当计数系统误差为 1 个脉冲时:  $\sigma_a = 2\pi/16384$  rad/s。

设当  $T_{m1} = 569$ s 时, 计时系统的精度为  $10^{-6}$  s 时, 有:  $\frac{\partial \bar{\alpha}(A, \theta)}{\partial T_{m1}} \sigma_{T_{m1}} = -\frac{2\pi \times 50}{T_{m1}^2} \times 10^{-6} \approx -1.0 \times 10^{-9}$  rad/s, 因此在计算平均进动角速率的不确定度时, 可以不考虑时间不确定度的影响。如果要陀螺加速度计的平均进动角速率不确定度达到  $10^{-6}$  rad/s, 在设计测试时, 则必须要考虑测试时间参数的选取条件:

$$\begin{cases} t_2 = 0.1N_p + t_1 - T_m \\ 0 < t_1, t_2 < 0.1\text{s} \\ T_m > 384\text{s} \end{cases} \quad (13)$$

最终仿真设定的相应时间参数如表 1 所示。

表 1 相关时间参数  
Tab. 1 Concerned integral time data

参数 (i)	$t_1^i$	$t_2^i$	$T_{mi}$	$N_{pi}$
0	0.058550s	0.070291s	569.988259s	5700
1	0.058750s	0.084612s	1139.874137s	11399
2	0.060800s	0.058271s	1145.002528s	11451
3	0.059900s	0.070056s	572.489843s	5725
4	0.057700s	0.059460s	1145.298239s	11453
5	0.058200s	0.071108s	1139.987091s	11400
6	—	—	571.127299s	—
7	—	—	571.366204s	—

根据式(12)计算出的不同位置的平均进动角速率不确定度分别为:  $6.7 \times 10^{-7}$  rad/s,  $3.4 \times 10^{-7}$  rad/s,  $3.3 \times 10^{-7}$  rad/s,  $6.7 \times 10^{-7}$  rad/s,  $3.3 \times 10^{-7}$  rad/s,  $3.4 \times 10^{-7}$  rad/s,  $6.7 \times 10^{-7}$  rad/s,  $6.7 \times 10^{-7}$  rad/s。不确定度均达到了  $10^{-7}$  rad/s, 符合测试要求。

设  $\mathbf{Q} = (\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi})^{-1}$ , 则矩阵  $\mathbf{Q}$  中元素为  $q_{nm}$  ( $n, m$

=1,2,⋯,6),当每次测试均为等精度测量时,可知公式(11)中的各个误差项系数的不确定度为:

$$\begin{aligned} \sigma_{k_0} &= \sigma \sqrt{q_{11}}, \sigma_{k_1} = \sigma \sqrt{q_{22}}, \sigma_{k_1 k_2'} = \sigma \sqrt{q_{33}}, \\ \sigma_{k_2} &= \sigma \sqrt{q_{44}}, \sigma_{k_3} = \sigma \sqrt{q_{55}}, \sigma_{k_4} = \sigma \sqrt{q_{66}} \end{aligned} \quad (14)$$

计算得到陀螺加速度计各个误差项的不确定度为: $\sigma_{k_0} = 1.7 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ,  $\sigma_{k_1} = 1.5 \times 10^{-5} (\text{rad/s})/g$ ,  $\sigma_{k_1 k_2'} = 6.4 \times 10^{-7} (\text{rad/s})/g^2$ ,  $\sigma_{k_2} = 3.3 \times 10^{-7} (\text{rad/s})/g^2$ ,  $\sigma_{k_3} = 3.7 \times 10^{-7} (\text{rad/s})/g^2$ ,  $\sigma_{k_4} = 1.0 \times 10^{-7} (\text{rad/s})/g^3$ . 对于交叉二次项的不确定度,可通过如下公式得到

$$\sigma_{k_2'} = \sqrt{(\sigma_{k_1 k_2'})^2 - \left(\frac{\partial(k_1 k_2')}{\partial k_1} \sigma_{k_1}\right)^2} / \frac{\partial(k_1 k_2')}{\partial k_2'} \quad (15)$$

式(15)计算结果为: $\sigma_{k_2'} = 1.2 \times 10^{-6} (\text{rad/s})/g$ . 可以看出,本方法在对陀螺加速度计零偏与标度因子的标定上,不确定度较大,但对其他高阶项的辨识上不确定度均达到  $10^{-6}$  以上,有较高的辨识精度。

将式(11)中的待辨识误差项系数进行最小二乘估计

$$\begin{bmatrix} \hat{k}_0 & \hat{k}_1 & \hat{k}_1 \hat{k}_2' & \hat{k}_2 & \hat{k}_3 & \hat{k}_4 \end{bmatrix}^T = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (16)$$

表 2 所示为加入  $10^{-7}$  的随机误差后的辨识结果,可以看出,本文提出的在线振动台上通过陀螺加速度计进动整周期的测试方法可以达到对各个误差项进行准确辨识。和式(14)理论计算的不确定度结果相同,在对陀螺加速度计的标度因子的辨识上,存在相对较大的误差,但由于陀螺加速度计的零偏与标度因子在重力场上已经可以达到精确辨识,因此在线振动台上的标定的误差项主要以二次项和三次项为主。从表 2 中可以看出,通过本方法可以精确将交叉二次项分离并辨识出来,同时可以准确地标定陀螺加速度计的二次项、交叉耦合项与三次项误差系数,辨识的绝对误差量级达到了  $10^{-7}$ 。

表 2 误差系数辨识结果

Tab. 2 Identification result of error coefficient s

误差系数	设定值	辨识结果	绝对误差
$\hat{k}_0$	$10^{-4}$	$9.9399658 \times 10^{-5}$	$6.0034216 \times 10^{-7}$
$\hat{k}_1$	$5.5 \times 10^{-1}$	$5.4995752 \times 10^{-1}$	$4.2488421 \times 10^{-5}$
$\hat{k}_2$	$1.5 \times 10^{-5}$	$1.5600294 \times 10^{-5}$	$6.0029391 \times 10^{-7}$
$\hat{k}_2'$	$1.8 \times 10^{-5}$	$1.8371349 \times 10^{-5}$	$3.7134973 \times 10^{-7}$
$\hat{k}_3$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.8359745 \times 10^{-6}$	$8.3597441 \times 10^{-7}$
$\hat{k}_4$	$5 \times 10^{-7}$	$9.8751471 \times 10^{-8}$	$4.0124852 \times 10^{-7}$

## 5 结论

本文建立了陀螺加速度计在振动台上的测试系统,通过分析其在振动台上的测试原理,根据输入比力与进动角速率间的关系,建立了含有交叉二次项的陀螺加速度计误差模型。设计了在振动台上的六位置标定方法,通过测量陀螺加速度计进动整周的输出数据,可以减小输出误差对标定精度的影响。通过仿真对该方法进行验证与误差分析,结果表明该方法通过陀螺加速度计进动整周减小了平均进动角速率的误差,不确定度均达到了  $10^{-7} \text{ rad/s}$ ,对陀螺加速度计的高阶误差项的辨识精度均达到了  $10^{-7}$ 。

同时,该方法对其他线性/摆式加速度计的高阶项、陀螺与比力相关的误差项在线振动台上的标定测试也具备一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] Li S S, Zhong M Y, Zhao Y. Accelerometer error estimation and compensation for three-axis gyro-stabilized camera mount based on proportional multiple-integral observer[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57 (12): 2387-2395.
- [2] Kau S P, Boutelle J, Lawdermilt L. Accelerometer input axis angular acceleration sensitivity [C]// Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000. IEEE, 2000: 449-456.
- [3] Zhou Y, Zhang J, Yan L, et al. Directional multi-position calibration of PIGA of inertial platform system[C]// 22<sup>nd</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, 2015: 292-297.
- [4] 董雪明,何懿才,关伟. 加速度计校准技术综述[J]. 计测技术, 2014, 34(4): 5-9.
- [5] 中国人民解放军总装备部. 单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S]. 中华人民共和国国家军用标准, FL. 6615, 2004.
- [6] Pan J, Zhang C, Cai Q. An accurate calibration method for accelerometer nonlinear scale factor on a low-cost three-axis turntable [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(2): 1-7.
- [7] 徐冠华,何闻,傅建中,等. 用于加速度计静态标定的精密倾斜平台[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2452-2458.
- [8] Gao Y, Qin R, Guan C Q, et al. Development of data acquisition system for micro-accelerometers' dynamic

- centrifuge test[J]. Key Engineering Materials, 2013, 565(3):214-221.
- [9] 孙闯,任顺清,师少龙,等. 陀螺加速度计线振动台进动整周测试方法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(5):672-676.
- [10] 乔永辉,刘雨,苏宝库. 陀螺加速度计二次项系数 K2 的离心机测试方法研究[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1):120-122.
- [11] 王世明,任顺清. 离心机误差对陀螺加速度计 K2 和 K3 项标定精度的影响[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 11(2):140-145.
- [12] 邢海峰,任顺清,祁家毅,等. 加速度计二次奇异项系数的形成机理与标定方法[J]. 航天控制, 2009, 27(2):91-95.
- [13] 徐仕会. 加速度计交叉耦合系数高精度标定[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(3):136-139.
- [14] 刘建波,魏宗康,陈东生. 石英加速度计二次项误差系数显著性分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2013, 324(1):45-48.
- [15] 王世明. 基于离心机的惯性仪表测试方法研究与误差分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2014:78-82.