

一种基于双轴位置转台的 IMU 快速标定方法

童树兵, 张志利, 周召发, 孙立江, 李 政

(火箭军工程大学 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025)

摘要:为了简化标定设备,降低标定成本,该文研究了利用双轴位置转台进行光纤陀螺惯组混合标定的可行性。通过分析加速度计和陀螺的标定原理,提出了一种快速六位置标定方案。利用地球重力加速度和自转角速度对加速度计和陀螺进行误差激励,完成标定。首先建立了标定模型,其次设计了位置编排方案,最后进行了实验验证。实验结果表明,快速六位置法能实现加速度计和陀螺误差参数的快速标定,其中标度因数的标定精度与传统方法基本一致,安装误差和常值漂移的精度相对于传统标定方法有所降低,但满足低精度的光纤陀螺惯组的使用要求;同时,与传统标定方法相比,其标定时间由 4.5 h 减少至 2 h。

关键词:光纤陀螺;加速度计;惯性测量组合(IMU);标定;标度因数;安装误差

中图分类号:V249.322

文献标识码:A

A Quick Calibration Method of IMU Based on Two-axis Turntable

TONG Shubing, ZHANG Zhili, ZHOU Zhaofa, SUN Lijiang, LI Zheng

(State Key Discipline Lab. of Armament Launch Theory and Technology, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: To simplify the calibration equipment and reduce the calibration cost, the feasibility of mixed calibration about FOG strapdown inertial navigation system(SINS) by using the two-axis position turntable was investigated in this paper. By analyzing the theory of calibration of accelerometer and gyroscope, a quick six-position calibration scheme was presented. It takes advantage of earth gravity and angular velocity to stimulate the error of accelerometer and gyroscope to complete calibration. Firstly, the error model of calibration was established. Then, the position arrangement scheme was designed. Finally, the experimental verification was carried out. The results show that the fast six-position method can realize the fast calibration of accelerometer and gyroscope, and the result of scale factor is consistent with the standard degree factor of traditional calibration precision. Although the value of installation error coefficients and constant has reduced compared with the conventional calibration, it still can meet the requirement of low precision-fiber inertial measurement unit (IMU), while the calibration time was reduced from 4.5 h to 2 h.

Key words: fiber optic gyroscope(FOG); accelerometer; inertial measurement unit (IMU); calibration; scale factor; installation error

0 引言

光纤陀螺在长时间使用过程中会积累一定的误差,捷联惯导系统在使用前必须通过标定实验确定出陀螺仪和加速度计的各项误差系数,并在捷联惯导系统中进行补偿^[1-2]。通常在实验室中进行标定,加速度计通过位置转台进行标定^[3],光纤陀螺通过速率转台标定^[4-5]。激光陀螺捷联惯导系统的9位置现场标定方法^[6],实现了陀螺安装误差的标定,但不能标定出陀螺的标度因数。基于可观测性分析的标定方案^[7],针对加速度计误差参数进行标定,但未

考虑陀螺的标定。基于最优估计的现场标定方法^[8],仅能标定出陀螺的常值漂移。本文基于低成本的双轴位置转台,在传统标定方法的基础上提出了一种加速度计和陀螺的混合标定方法——六位置快速标定法。通过实验验证在满足一定精度的前提下,缩短了时间。

1 标定模型

1.1 加速度计的标定模型

将加速度计的静态输入、输出模型进行线性化处理可得加速度计的标定模型为

收稿日期:2016-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41174162)

作者简介:童树兵(1991-),男,湖北黄冈人,硕士生,主要从事惯性导航技术的研究。张志利(1966-),男,河南濮阳人,教授,主要从事定位定向与基准传递技术的研究。

$$\mathbf{f}^b = \mathbf{K}_A \mathbf{N}_A - \nabla^b \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{f}^b = [f_x^b \ f_y^b \ f_z^b]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{N}_A = [N_{Ax} \ N_{Ay} \ N_{Az}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_A = (\mathbf{K}_A (\mathbf{I} - \mathbf{E}_A))^{-1} = \begin{bmatrix} K_{Ax} & K_{Axy} & K_{Axz} \\ K_{Ayx} & K_{Ay} & K_{Ayz} \\ K_{Azx} & K_{Azy} & K_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\nabla^b = (\mathbf{K}_A (\mathbf{I} - \mathbf{E}_A))^{-1} \nabla_m = [\nabla_x^b \ \nabla_y^b \ \nabla_z^b]^T \quad (5)$$

($m = x, y, z$)

式中: \mathbf{K}_A 、 \mathbf{E}_A 分别为加速度计标度因数矩阵和安装误差矩阵; ∇_m 为加速度计零偏; K_{Ax} 、 K_{Ay} 、 K_{Az} 为加速度计的等效标定因数; K_{Axy} 、 K_{Axz} 、 K_{Ayx} 、 K_{Ayz} 、 K_{Azx} 、 K_{Azy} 为安装误差; ∇_x^b 、 ∇_y^b 、 ∇_z^b 为 b 系下加速度计零偏; f_x^b 、 f_y^b 、 f_z^b 为 b 系下的输入比力; N_{Ax} 、 N_{Ay} 、 N_{Az} 为加速度计的输

1.2 陀螺的标定模型

假设陀螺的静态输入、输出模型为

$$\mathbf{N}_{Gm} = \mathbf{K}_g [(\mathbf{I} - \mathbf{E}_g) \boldsymbol{\omega}_b + \boldsymbol{\varepsilon}_m] \quad (m = x, y, z) \quad (6)$$

式中: \mathbf{N}_{Gm} 为陀螺的采样输出脉冲; \mathbf{K}_g 为陀螺的标度因数; \mathbf{E}_g 为陀螺的安装误差系数; $\boldsymbol{\omega}_b$ 为陀螺的角速率输入; $\boldsymbol{\varepsilon}_m$ 为陀螺的常值漂移。陀螺的标定模型为

$$\boldsymbol{\omega}_b = \mathbf{K}_G \mathbf{N}_{Gm} + \boldsymbol{\varepsilon}^b \quad (7)$$

其中:

$$\boldsymbol{\omega}_b = [\omega_{bx} \ \omega_{by} \ \omega_{bz}]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_G = \begin{bmatrix} K_{Gx} & K_{Gxy} & K_{Gxz} \\ K_{Gyx} & K_{Gy} & K_{Gyz} \\ K_{Gzx} & K_{Gzy} & K_{Gz} \end{bmatrix} = [\mathbf{K}_g (\mathbf{I} - \mathbf{E}_g)]^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{N}_{Gm} = [N_{Gx} \ N_{Gy} \ N_{Gz}]^T \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^b = [\varepsilon_x^b \ \varepsilon_y^b \ \varepsilon_z^b]^T = [\mathbf{K}_g (\mathbf{I} - \mathbf{E}_g)]^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}_m \quad (11)$$

式中: ω_x^b 、 ω_y^b 、 ω_z^b 为 b 系下的陀螺输入; ε_x^b 、 ε_y^b 、 ε_z^b 为 b 系下的等效陀螺常值漂移; K_{Gx} 、 K_{Gy} 、 K_{Gz} 为陀螺标度因数; K_{Gxy} 、 K_{Gxz} 、 K_{Gyx} 、 K_{Gyz} 、 K_{Gzx} 、 K_{Gzy} 为陀螺的安装误差系数; N_{Gx} 、 N_{Gy} 、 N_{Gz} 为陀螺输出脉冲。

2 加速度计和陀螺的混合标定

在实验室中进行捷联惯性测量组件(SIMU)的标定,主要利用测试转台和水平仪等实验仪器进行标定,通过实验得到加速度计的标定模型参数 \mathbf{K}_A 、 ∇^b 和陀螺仪的标定模型参数 \mathbf{K}_G 、 $\boldsymbol{\varepsilon}^b$ 等。传统实验方案将加速度计和陀螺分开标定不仅耗时长(至少

需要 4.5 h),且易引入新的误差因素。基于实验室现有的双轴位置转台,提出了一种加速度计和陀螺的混合标定方法——六位置快速标定法。实验方案如表 1 所示,图 1 为六位置示意图。

表 1 六位置方位表

位置	IMU 姿态(xyz)
位置 1	天东北
位置 2	地南西
位置 3	东天南
位置 4	南地东
位置 5	北西天
位置 6	西北地

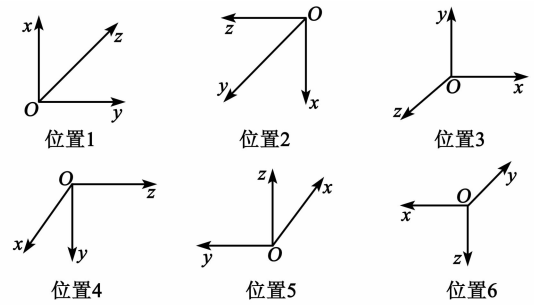


图 1 六位置示意图

相对于十二位置编排方案,六位置编排方案中未设对径位置,需要考虑未调平误差和寻北误差对惯性器件标定精度的影响。设转台的北向误差为 γ ,调平误差为 θ ,则惯组坐标系与导航坐标系之间的调平误差角为 θ_1 和 θ_2 ,其转换矩阵为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ -\cos \theta_1 \sin \theta_2 & -\sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

六位置标定法对转台北向基准和调平精度有一定的要求,一般来说,转台北向基准误差小于 $15'$,调平误差小于 $5'$ 。在实验室中,采用长水准器对转台进行调平,其调平精度可达 $5'$ 。

当 $\theta = 5'$ 时, $\sin(5'/60) \approx 1.4 \times 10^{-3}$, $1 - \cos(5'/60) \approx 1.06 \times 10^{-6}$,实验中用到的光纤陀螺精度为 0.5 ($^\circ$)/h,加速度计的精度为 $0.6 \times 10^{-3} g$,其中 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。这些误差对其精度造成的影响基本可忽略,可认为 $\sin \theta_1 \approx 0$, $\sin \theta_2 \approx 0$, $\cos \theta_1 \approx 1$, $\cos \theta_2 \approx 1$,即 $\mathbf{C} \approx \mathbf{I}_{3 \times 3}$, $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ 为三阶单位矩阵。

在设备不调平、不对北的基础上,重力加速度和地球自转角速度的测量值与理论值之间的关系为

$$[\hat{\omega}_{ie} \ \hat{\omega}_{ie} \ \hat{\omega}_{ie}] = \mathbf{C} [\omega_{ie} \ \omega_{ie} \ \omega_{ie}] \approx [\omega_{ie} \ \omega_{ie} \ \omega_{ie}] \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_x & \hat{f}_y & \hat{f}_z \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

在各个位置上,加速度计的输入为

$$\begin{bmatrix} f_x^b & f_y^b & f_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g & 0 & 0 \\ g & 0 & 0 \\ 0 & -g & 0 \\ 0 & g & 0 \\ 0 & 0 & -g \\ 0 & 0 & g \end{bmatrix} \quad (15)$$

加速度计的 outputs 为

$$\begin{bmatrix} N_{Ax}^i \\ N_{Ay}^i \\ N_{Az}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{Ax} & K_{Axy} & K_{Ayz} \\ K_{Ayx} & K_{Ay} & K_{Ayz} \\ K_{Azx} & K_{Azy} & K_{Az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^i \\ f_y^i \\ f_z^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nabla_x \\ \nabla_y \\ \nabla_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

则加速度计的标度因数为

$$\begin{cases} K_{Ax} = \frac{N_{Ax}^1 - N_{Ax}^2}{2} \\ K_{Ay} = \frac{N_{Ay}^3 - N_{Ay}^4}{2} \\ K_{Az} = \frac{N_{Az}^5 - N_{Az}^6}{2} \end{cases} \quad (17)$$

加速度计的安装误差为

$$\begin{cases} K_{Axy} = \frac{N_{Ax}^5 - N_{Ax}^6}{2} \\ K_{Ayz} = \frac{N_{Ay}^3 - N_{Ay}^4}{2} \\ K_{Ayx} = \frac{N_{Ax}^1 - N_{Ax}^2}{2} \\ K_{Azy} = \frac{N_{Ay}^5 - N_{Ay}^6}{2} \\ K_{Azx} = \frac{N_{Az}^1 - N_{Az}^2}{2} \\ K_{Azy} = \frac{N_{Az}^3 - N_{Az}^4}{2} \end{cases} \quad (18)$$

加速度计的零偏为

$$\begin{cases} \nabla_x = \frac{(N_{Ax}^1 + N_{Ax}^2 + N_{Ax}^3 + N_{Ax}^4 + N_{Ax}^5 + N_{Ax}^6)}{6} \\ \nabla_y = \frac{(N_{Ay}^1 + N_{Ay}^2 + N_{Ay}^3 + N_{Ay}^4 + N_{Ay}^5 + N_{Ay}^6)}{6} \\ \nabla_z = \frac{(N_{Az}^1 + N_{Az}^2 + N_{Az}^3 + N_{Az}^4 + N_{Az}^5 + N_{Az}^6)}{6} \end{cases} \quad (19)$$

通过式(17)~(19)可解出加速度计的 12 个误差参数。下面对陀螺误差参数的求解进行分析。

理想条件下,陀螺输入为

$$\begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \sin L & 0 & \omega_{ie} \cos L \\ -\omega_{ie} \sin L & -\omega_{ie} \cos L & 0 \\ 0 & \omega_{ie} \sin L & -\omega_{ie} \cos L \\ -\omega_{ie} \cos L & -\omega_{ie} \sin L & 0 \\ \omega_{ie} \cos L & 0 & \omega_{ie} \sin L \\ 0 & \omega_{ie} \cos L & -\omega_{ie} \sin L \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中 L 为所在点的纬度。

在实际标定过程中,通常存在 γ ,则陀螺实际输入为

$$\begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \sin L & -\omega_{ie} \cos L \sin \gamma & \omega_{ie} \cos L \cos \gamma \\ -\omega_{ie} \sin L & -\omega_{ie} \cos L \cos \gamma & \omega_{ie} \cos L \sin \gamma \\ -\omega_{ie} \cos L \sin \gamma & \omega_{ie} \sin L & -\omega_{ie} \cos L \cos \gamma \\ -\omega_{ie} \cos L \cos \gamma & -\omega_{ie} \sin L & -\omega_{ie} \cos L \sin \gamma \\ \omega_{ie} \cos L \cos \gamma & \omega_{ie} \cos L \sin \gamma & \omega_{ie} \sin L \\ \omega_{ie} \cos L \sin \gamma & \omega_{ie} \cos L \cos \gamma & -\omega_{ie} \sin L \end{bmatrix} \quad (21)$$

陀螺输出为

$$\begin{bmatrix} N_{Gx}^{(i)} \\ N_{Gy}^{(i)} \\ N_{Gz}^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{Gx} & K_{Gxy} & K_{Gxz} \\ K_{Gyx} & K_{Gy} & K_{Gyz} \\ K_{Gzx} & K_{Gzy} & K_{Gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^{(i)} \\ \omega_y^{(i)} \\ \omega_z^{(i)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (22)$$

陀螺的误差参数有 12 个,在 6 个位置上共可列出 18 个方程,采用最小二乘法对陀螺误差参数进行求解。

3 实验验证与结果分析

由于陀螺的输入激励为地球自转角速度,量级较小,需要采集长时间的数据才能辨识出陀螺的误差参数,在每个位置上采集 20 min 的数据。采用传统二十四位置法和快速六位置法的标定结果如表 2 所示。

表 2 加速度计标定模型误差参数真值及标定值

加速度计误差参数	传统二十四位置	快速六位置法	
	法标定结果	标定结果	相对误差
K_{Ax}	1.003 61	1.004 52	9.07×10^{-4}
K_{Axy}	$7.933 52 \times 10^{-6}$	$8.521 33 \times 10^{-6}$	0.074 1
K_{Ayz}	$-2.800 01 \times 10^{-4}$	$-2.679 00 \times 10^{-4}$	0.043 2
K_{Ay}	1.092 45	1.098 31	5.36×10^{-3}
K_{Ayx}	$1.108 03 \times 10^{-4}$	$1.105 14 \times 10^{-4}$	2.52×10^{-3}
K_{Ayz}	$2.784 57 \times 10^{-4}$	$2.851 12 \times 10^{-4}$	0.023 9
K_{Az}	1.069 95	1.071 23	1.20×10^{-3}

续表

加速度计误差参数	传统二十四位置法标定结果	快速六位置法	
		标定结果	相对误差
K_{Axz}	$-1.113\ 58 \times 10^{-4}$	$-1.115\ 31 \times 10^{-4}$	1.55×10^{-3}
K_{Azy}	$-1.023\ 09 \times 10^{-5}$	$-1.055\ 91 \times 10^{-5}$	0.032 1
∇_x^b	0.200	0.206	0.030 5
∇_y^b	0.160	0.168	0.050 6
∇_z^b	0.415	0.422	0.016 9

对六位置快速标定实验结果进行分析可知,六位置法的标定精度相对于传统二十四位置法有所降低,加速度计标度因数的标定结果与二十四位置法标定结果的相对误差均达到了 10^{-3} 量级;安装误差的标定误差达到了 10^{-2} 量级;零偏的标定精度为 10^{-2} 量级,满足低精度使用条件下的要求。此外,二十四位置法所需标定时间为 3 h,而六位置法缩短至 2 h。

对光纤陀螺进行快速六位置标定。在静止状态下,陀螺输入角速度为地球自转角速度,由于地球自转角速度量级较小(约为 $15\ (^{\circ})/h$),陀螺常值漂移与其量级接近,因此,短时间内难以将其有效分离,需进行较长时间的数据采集。在每个位置上采集约 20 min,然后将 6 个位置上的陀螺输出数据代入式(22),即可计算出陀螺的各项误差系数。

采用快速六位置法对光纤陀螺进行标定,如表 3 所示。由表可看出,光纤陀螺标定因数标定精度较高,与速率法标定结果的相对误差仅为 10^{-5} 量级,安装误差标定结果与速率法标定结果的相对误差为 10^{-2} 量级。陀螺常值漂移的标定精度虽低于传统速率法,但考虑到实验中所用的光纤陀螺精度较低,一般认为其能满足使用要求。

表 3 光纤陀螺标定模型误差参数真值及标定值

光纤陀螺误差参数	传统速率法	快速六位置法	
		标定结果	相对误差
K_{Gx}	0.999 8	0.999 8	8.15×10^{-5}
K_{Gxy}	$6.720\ 5 \times 10^{-4}$	$6.245\ 6 \times 10^{-4}$	0.070 7
K_{Gxz}	$6.100\ 2 \times 10^{-4}$	$6.558\ 7 \times 10^{-4}$	0.075 2
K_{Gy}	0.999 9	0.999 9	4.00×10^{-5}
K_{Gyx}	$-6.422\ 2 \times 10^{-4}$	$-6.756\ 2 \times 10^{-4}$	0.520
K_{Gyz}	$3.234\ 3 \times 10^{-3}$	$2.956\ 1 \times 10^{-3}$	8.60×10^{-2}
K_{Gz}	1.000 1	1.000 1	3.02×10^{-5}
K_{Gzx}	$-6.437\ 2 \times 10^{-4}$	$-7.036\ 5 \times 10^{-4}$	0.093 1
K_{Gzy}	$-3.232\ 4 \times 10^{-3}$	$-3.624\ 5 \times 10^{-3}$	0.121
$\epsilon_x^b / [(^{\circ})/h]$	-0.107 0	-0.082	0.231

续表

光纤陀螺误差参数	传统速率法	快速六位置法	
		标定结果	相对误差
$\epsilon_y^b / [(^{\circ})/h]$	-0.727 8	-0.662	0.090 3
$\epsilon_z^b / [(^{\circ})/h]$	0.078 2	0.085	0.083 1

4 结束语

本文提出了一种加速度计和陀螺的混合标定方法——快速六位置标定法,实现了加速度计和陀螺的全参数标定,并将标定时间由传统方案的 4.5 h 缩短为 2 h,提高了标定效率。通过本文的分析研究,验证了利用双轴位置转台实现 SIMU 全参数标定的可行性,简化了标定设备,降低了标定成本,缩短了标定时间,具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] LO P H, SIEBERT D, CALIFANO H T. Low cost fiber optic rate sensor inertial measurement unit [C]// CA, USA: IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1998.
- [2] CUREY R K, ASH M E, THIELMAN L O, et al. Proposed IEEE inertial systems terminology standard and other inertial sensor standards [C]// Monterey, CA: IEEE Position Location and Navigation Symposium, 2004.
- [3] 严恭敏, 李四海, 秦永元. 捷联仪器测试与数据分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [4] LEE D Y, LEE S, PARK S, et al. Test and error parameter estimation for MEMS-based low cost IMU calibration [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(4): 597-603.
- [5] 严恭敏. 惯性仪器测试与数据分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [6] 贾继超, 秦永元, 张波, 等. 激光陀螺捷联惯导系统外场快速标定新方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1): 23-25.
JIA Jichao, QIN Yongyuan, ZHANG Bo, et al. New fast systematic calibration method for RLG-SINS [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 23-25.
- [7] 贾继超, 秦永元, 张波, 等. 激光捷联惯导系统的射前快速标定技术 [J]. 压电与声光, 2015, 37(1): 24-26.
JIA Jichao, QIN Yongyuan, ZHANG Bo, et al. Fast calibration technique of before launch RLG-SINS [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(1): 24-26.
- [8] 尚捷, 顾启泰. 捷联惯导现场最优标定方法研 [J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(4): 18-21.
SHANG Jie, GU Qitai. Field optimal calibration for strapdown inertial navigation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(4): 18-21.