

基于双轴位置转台的光纤陀螺惯组标定方法

李 政, 张志利, 周召发

(火箭军工程大学 二系, 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标定的可行性,分析了转台位置误差对光纤陀螺惯组标定结果的影响。分别建立加速度计和陀螺的标定模型,推导出利用双轴位置转台进行标定的相关算法及设计了新的标定方案,且进行了相关实验,对实验数据分析结果表明,利用双轴位置转台进行光纤陀螺惯组的标定,标定值与真值基本一致,方案可行。此外,经实验分析,转台测角误差所引起的标定误差最大为 2.42×10^{-6} ,数值较小,在实际应用中可忽略。

关键词:光纤陀螺;加速度计;惯性测量组合;标定

中图分类号:U666.1 **文献标识码:**A

Calibration Based on Two-axis Turntable for FOG-IMU

LI Zheng, ZHANG Zhili, ZHOU Zhaofa

(The Second Dept., The Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: To simplify the calibration equipment and lower the cost, the feasibility of calibrating FOG strapdown inertial navigation system(SINS) through the two-axis position turntable has studied in this paper. And the effect of the turntable position error on the calibrating results of FOG inertial measurement unit(IMU) has been analyzed. Secondly, the FOG unit error model and accelerometer unit error model have been established, and the relevant arithmetic of calibration has been derived. A new method of calibration is performed and experiments are carried out. The results of experiments show that the precision of calibration is consistent with the true-value and the proposed method is feasible. Moreover, the maximal calibration error brought by the turntable measurement is 2.42×10^{-6} , which is so little that can be ignored in practical application.

Key words: fiber optic gyroscope(FOG); accelerometer; IMU; calibration

0 引言

光纤陀螺捷联惯导系统在使用前必须通过标定试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,加速度计和光纤陀螺分别通过位置转台和速率转台进行标定^[3-5]。文献[6]对激光陀螺惯组的标定进行了分析,通过实验验证了位置转台对激光陀螺进行标定的可行性,但标定方案中位置变换角度仅为 90° ,且为单向转动,不能消除由轴不正交所引起的标定误差,精度较低。文献[7]提出利用6位置正反转旋转法消除不对北误差和地球自转角速率水平分量影响,但转动过程会对重力加速度引入干扰,直接影响加速度计的标定精度。文献[8]提出了一种激光陀螺捷联惯导系统的9位置现场标定方

法,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。文献[9]提出一种基于可观性分析的标定方案,针对加速度计误差参数进行标定,但未考虑陀螺的标定。文献[10]提出了一种基于最优估计的现场标定法,但仅能标定出陀螺的常值漂移,实际意义不大。

本文基于低成本的双轴位置转台,在传统静态标定法的基础上提出了一种新的12位置法和角位置法分别用来标定加速度计和陀螺的误差参数,并进行了相关的试验验证,最后对试验结果进行分析处理,比较了新方法与传统方法的标定精度。

1 光纤捷联惯组的标定模型

加速度计的标定模型为

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

收稿日期:2015-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41174162)

作者简介:李政(1992-),男,河南南阳人,硕士生,主要从事定位定向与基准传递技术研究。E-mail:377102710@qq.com。张志利(1965-),男,河南濮阳人,博士,教授,主要从事定位定向与基准传递技术研究。E-mail:377102710@qq.com。

其中

$$\mathbf{K}_A = \begin{bmatrix} K_{AX} & K_{AXY} & K_{AXZ} \\ K_{AYX} & K_{AY} & K_{AYZ} \\ K_{AZX} & K_{AZY} & K_{AZ} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： N_{Ai} 为加速度计的输出脉冲； K_{Ai} 为加速度计的标定因数； K_{Aij} 为安装误差系数； ∇_i^b 为*b*系下的加速度计等效常值漂移； f_i^b 为*b*系下的输入比力。

光纤陀螺的为标定模型：

$$\omega^b = \mathbf{K}_G N_G + \varepsilon^b \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{K}_G = \begin{bmatrix} K_{GX} & K_{GXY} & K_{GXZ} \\ K_{GYX} & K_{GY} & K_{GYZ} \\ K_{GZX} & K_{GZY} & K_{GZ} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： ω_i^b 为*b*系下的陀螺输入； ε_i^b 为*b*系下的等效陀螺常值漂移； K_{Gi} 为陀螺的标度因数； K_{Gij} 为陀螺的安装误差系数； N_{Gi} 为陀螺的输出脉冲。

2 光纤捷联惯组的标定

2.1 加速度计的标定

加速度计的标定通常采用静态多位置法,传统标定法有 24 位置法和 16 位置法。经分析可知,位置数太多会导致标定时间过长,降低标定效率,而位置数太少又会导致系统的可观测度不足,无法分离出各个误差系数。综合考虑标定时间和标定效果,本文采用 12 位置法(见图 1)进行加速度计误差参数的标定。

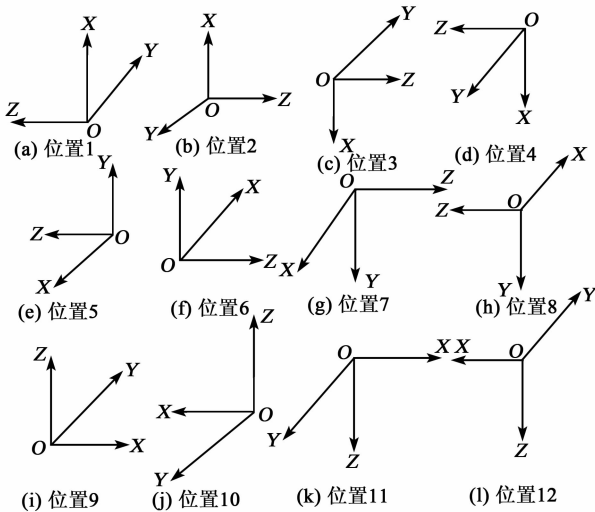


图 1 12 位置示意图

图 1 中,位置 1 和 2、位置 3 和 4、位置 5 和 6、位置 7 和 8、位置 9 和 10、位置 11 和 12 均为对径位置,对径位置能消除由轴不正交和未调平所引起的标定误差。在每个位置上转台静止 2 min 后开始进

行数据采集。

由式(1)可知：

$$\begin{bmatrix} f_X^b \\ f_Y^b \\ f_Z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{AX} & K_{AXY} & K_{AXZ} \\ K_{AYX} & K_{AY} & K_{AYZ} \\ K_{AZX} & K_{AZY} & K_{AZ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_{AX} \\ N_{AY} \\ N_{AZ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \nabla_X^b \\ \nabla_Y^b \\ \nabla_Z^b \end{bmatrix} \quad (5)$$

对以上 12 个位置的加速度计输出进行分析整理可得加速度计零漂为

$$\begin{cases} \nabla_X^b = \frac{K_{AX}(\sum_{i=5}^8 N_{AX}^{(i)} + \sum_{i=9}^{12} N_{AX}^{(i)})}{8} \\ \nabla_Y^b = \frac{K_{AY}(\sum_{i=1}^4 N_{AY}^{(i)} + \sum_{i=9}^{12} N_{AY}^{(i)})}{8} \\ \nabla_Z^b = \frac{K_{AZ}(\sum_{i=1}^4 N_{AZ}^{(i)} + \sum_{i=5}^8 N_{AZ}^{(i)})}{8} \end{cases} \quad (6)$$

加速度计标度因数为

$$\begin{cases} K_{AX} = \left[\frac{(N_{AX}^{(1)} + N_{AX}^{(2)} - N_{AX}^{(3)} - N_{AX}^{(4)})}{4} \right]^{-1} \\ K_{AY} = \left[\frac{(N_{AY}^{(5)} + N_{AY}^{(6)} - N_{AY}^{(7)} - N_{AY}^{(8)})}{4} \right]^{-1} \\ K_{AZ} = \left[\frac{(N_{AZ}^{(9)} + N_{AZ}^{(10)} - N_{AZ}^{(11)} - N_{AZ}^{(12)})}{4} \right]^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

加速度计安装误差为

$$\begin{cases} K_{AZX} = \left[\frac{(N_{AX}^{(5)} + N_{AX}^{(6)} - N_{AX}^{(7)} - N_{AX}^{(8)})}{4} \right]^{-1} \\ K_{AYX} = \left[\frac{(N_{AX}^{(9)} + N_{AX}^{(10)} - N_{AX}^{(11)} - N_{AX}^{(12)})}{4} \right]^{-1} \\ K_{AXY} = \left[\frac{(N_{AY}^{(9)} + N_{AY}^{(10)} - N_{AY}^{(11)} - N_{AY}^{(12)})}{4} \right]^{-1} \\ K_{AZY} = \left[\frac{(N_{AY}^{(1)} + N_{AY}^{(2)} - N_{AY}^{(3)} - N_{AY}^{(4)})}{4} \right]^{-1} \\ K_{AXZ} = \left[\frac{(N_{AZ}^{(5)} + N_{AZ}^{(6)} - N_{AZ}^{(7)} - N_{AZ}^{(8)})}{4} \right]^{-1} \\ K_{AYZ} = \left[\frac{(N_{AZ}^{(1)} + N_{AZ}^{(2)} - N_{AZ}^{(3)} - N_{AZ}^{(4)})}{4} \right]^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $N_{Ai}^{(j)}$ ($i = X, Y, Z; j = 1 \sim 12$, 即测量位置)为加速度计在 12 个位置上的输出值。比较加速度计的输入、输出,利用最小二乘法进行求解可得加速度计的 12 个误差参数。

2.2 光纤陀螺的标定

对陀螺进行标定,利用转台给予陀螺一定的激

励,即角速度输入。

首先标定光纤陀螺的标度因数和安装误差,由转台为陀螺提供角速度激励,位置转台转动时给出转台台面相对于静止地面的角速度或转角。在0位置时, p 系与 **b** 系坐标轴平行,则 **b** 系相对于 **i** 系的角速度 ω_{ib}^b (即陀螺的实际角速度激励)可分解为

$$\omega_{ib}^b = \omega_{ie}^b + \omega_{ep}^b + \omega_{pb}^b = C_p^b C_n^b \omega_{ie}^n + \omega_{pb}^b \quad (9)$$

式中: ω_{ie}^b 为地球自转角速度; ω_{ep}^b 为转台基座相对于地面的转动角速度,一般为0; ω_{pb}^b 为转台台面相对于基座的角速度; C_p^b 为转台基座至台面的变换矩阵; C_n^b 为 **n** 系至基座的变换矩阵。

将光纤陀螺惯组固定在转台上,此时记为位置0, **b** 系与 **p** 系平行,为“东-北-天”坐标系,陀螺在 $T_0 \sim T_1$ 时刻绕 **Z** 轴逆时针转动 180° ,转至位置1。转台转动过程中要平稳,不能有较大的加、减速,要保证严格的角位置精度,对式(9)左右两端进行积分,得

$$\int_{T_0}^{T_1} \omega_{ib}^b dt = \int_{T_0}^{T_1} C_p^b C_n^b \omega_{ie}^n dt + \int_{T_0}^{T_1} \omega_{pb}^b dt \quad (10)$$

在 $T_2 \sim T_3$ 时刻绕 **Z** 轴顺时针转动,回到位置0,其中 $T_1 - T_0 \approx T_3 - T_2$,再对式(9)两端进行积分得

$$\int_{T_2}^{T_3} \omega_{ib}^b dt = \int_{T_2}^{T_3} C_p^b C_n^b \omega_{ie}^n dt + \int_{T_2}^{T_3} \omega_{pb}^b dt \quad (11)$$

式中: $\int_{T_0}^{T_1} \omega_{pb}^b dt = 180^\circ$, $\int_{T_2}^{T_3} \omega_{pb}^b dt = 180^\circ$,

$\int_{T_0}^{T_1} C_p^b C_n^b \omega_{ie}^n dt + \int_{T_2}^{T_3} C_p^b C_n^b \omega_{ie}^n dt = 0$,对 $\omega_{ib}^b = \mathbf{K}_G N_G - \epsilon^b$ 两边积分得

$$\int_{T_0}^{T_1} \omega_{ib}^b dt = \sum_{T_0}^{T_1} \mathbf{K}_G N_G + \int_{T_0}^{T_1} \epsilon^b dt \quad (12)$$

$$\int_{T_2}^{T_3} \omega_{ib}^b dt = \sum_{T_2}^{T_3} \mathbf{K}_G N_G + \int_{T_2}^{T_3} \epsilon^b dt \quad (13)$$

式(12)、(13)相加得

$$[0 \quad 0 \quad 360]^\top = \sum_{T_0}^{T_1} \mathbf{K}_G N_G + \sum_{T_2}^{T_3} \mathbf{K}_G N_G + \int_{T_0}^{T_1} \epsilon^b dt + \int_{T_2}^{T_3} \epsilon^b dt \quad (14)$$

式中: $T_1 - T_0 = T_3 - T_2 \approx 18$ s; $\int_{T_0}^{T_1} \epsilon^b dt + \int_{T_2}^{T_3} \epsilon^b dt$ 很小,可忽略。式(14)可简化为

$$[0 \quad 0 \quad 360]^\top = \mathbf{K}_G \sum_{T_0}^{T_1} N_G + \mathbf{K}_G \sum_{T_2}^{T_3} N_G \quad (15)$$

对陀螺输出脉冲进行累加求和可得到一组关于 \mathbf{K}_G 的方程,同样,绕 **X** 、 **Y** 轴进行角位置实验,共可得到9个方程(3个方程组)。联立这9个方程可解

算出 \mathbf{K}_G ,也就标定出陀螺安装误差和标度因数。

接下来对陀螺的常值漂移进行标定,将角速率输入和陀螺输出数据代入陀螺漂移标定模型,得到 $\omega_0^b = \mathbf{K}_G \bar{N}_{G0} - \epsilon^b$ 。采用4位置法(见图2)进行标定,假设0位置下捷联惯性测量组合(SIMU)的方位角为 ϕ_0 ,则地球自转角速度 ω_{ie}^n 在SIMU坐标轴上的投影为

$$\omega_0^b = C_{\phi_0} \omega_{ie}^n = \begin{bmatrix} \cos 0 & \sin 0 & 0 \\ -\sin 0 & \cos 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos L \\ \omega_{ie} \sin L \end{bmatrix} = \omega_{ie} \begin{bmatrix} 0 \\ \cos L \\ \sin L \end{bmatrix} \quad (16)$$

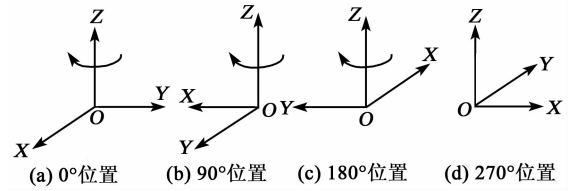


图2 4位置示意图

转台绕 **Z** 轴(转台主轴)顺时针转动3次,每次转动 90° ,此时, ω_{ie}^n 在SIMU坐标轴上的投影分别为

$$\omega_{90}^b = C_{\psi_{90}} \omega_{ie}^n = \omega_{ie} [\cos L \quad 0 \quad \sin L]^\top \quad (17)$$

$$\omega_{180}^b = C_{\psi_{180}} \omega_{ie}^n = \omega_{ie} [0 \quad -\cos L \quad \sin L]^\top \quad (18)$$

$$\omega_{270}^b = C_{\psi_{270}} \omega_{ie}^n = \omega_{ie} [-\cos L \quad 0 \quad \sin L]^\top \quad (19)$$

式中 \bar{N}_{G0} 、 \bar{N}_{G90} 、 \bar{N}_{G180} 、 \bar{N}_{G270} 分别是 0° 、 90° 、 180° 、 270° 位置时陀螺采样输出的平均值,即为陀螺平均输出脉冲,可得

$$\epsilon^b = \frac{1}{4} \mathbf{K}_G (\bar{N}_{G0} + \bar{N}_{G90} + \bar{N}_{G180} + \bar{N}_{G270}) - [0 \quad 0 \quad \omega_{ie} \sin L]^\top \quad (20)$$

完成陀螺漂移标定后,若常值漂移仍较大,则需在补偿漂移后重新标定 \mathbf{K}_G 。

3 实验数据的处理与分析

表1为SIMU标定模型误差参数真值及标定值。由表可知,加速度计的标定值与真值相比存在一定的误差,加速度计的各项误差参数中,标度因数 K_{AZ} 的标定值与真值的相对误差最大,为 $|(\tilde{K}_{AZ} - K_{AZ})/K_{AZ}| = 9.42 \times 10^{-3}$;安装误差 K_{AZX} 的标定值与真值误差最大,其相对误差为 $|(\tilde{K}_{AZX} - K_{AZX})/K_{AZX}| = 2.695 \times 10^{-4}$;Y轴加速度计零漂误差值最大,为 0.003 mg($g = 9.8$ m/s²),均满足使用要求。光纤陀螺的标定值与真值相比,标度因数较稳定,相对误差最大为 $|(\tilde{K}_{GZ} - K_{GZ})/K_{GZ}| = 1.1908 \times 10^{-5}$;

安装误差最大为 $K_{GYZ} = -3.2356 \times 10^{-3}$, 其相对误差最大为 $|(\tilde{K}_{GYZ} - K_{GYZ})/K_{GYZ}| = 7.7697 \times 10^{-2}$; 陀螺常值漂移分别为 $-0.1070 [(\circ)/h]$ 、 $-0.7278 [(\circ)/h]$ 、 $0.0782 [(\circ)/h]$, 均满足使用要求。

双轴位置转台的角度测量误差为 $5''$, 由试验结

果可得, 当转台测角误差为 $5''$ 时, 引起的陀螺标度因数的相对误差为 2.6×10^{-7} , 安装误差的偏差为 $0.61''$; 加速度计标定因数的相对误差为 2.42×10^{-6} , 安装误差的偏差为 $2.66''$, 与双轴位置转台的标定精度相比量级较小, 在实际使用中可忽略。

表1 SIMU 标定模型误差参数真值及标定值

	K_A			∇^b/mg	K_G			$\epsilon^b/[(\circ)/h]$	
	X	Y	Z		X	Y	Z		
真值	X	1.003 61	$7.933 5 \times 10^{-6}$	$-2.800 0 \times 10^{-4}$	0.2	0.999 8	$6.720 5 \times 10^{-4}$	$6.100 2 \times 10^{-4}$	$-0.107 0$
	Y	$1.108 0 \times 10^{-4}$	1.092 45	$2.784 5 \times 10^{-4}$	0.160	$-6.422 2 \times 10^{-4}$	0.999 9	$3.234 3 \times 10^{-3}$	$-0.727 8$
	Z	$-1.113 5 \times 10^{-4}$	$-1.023 0 \times 10^{-5}$	1.069 95	0.415	$-6.437 2 \times 10^{-4}$	$-3.232 4 \times 10^{-3}$	1.000 1	0.078 2
标定值	X	1.007 69	$7.933 3 \times 10^{-6}$	$-2.800 2 \times 10^{-4}$	0.201	0.999 8	$6.198 3 \times 10^{-4}$	$6.520 4 \times 10^{-4}$	$-0.097 1$
	Y	$1.107 9 \times 10^{-4}$	1.087 59	$2.784 6 \times 10^{-4}$	0.163	$-6.836 9 \times 10^{-4}$	0.999 9	$3.230 9 \times 10^{-3}$	$-0.672 4$
	Z	$-1.113 2 \times 10^{-4}$	$-1.023 2 \times 10^{-5}$	1.080 04	0.417	$-6.747 6 \times 10^{-4}$	$-3.235 6 \times 10^{-3}$	1.000 1	0.078 1
误差	X	4.06×10^{-3}	2.52×10^{-5}	7.14×10^{-5}	5.00×10^{-3}	$9.475 1 \times 10^{-6}$	$7.769 7 \times 10^{-2}$	$6.888 0 \times 10^{-2}$	9.23×10^{-2}
	Y	9.02×10^{-5}	4.44×10^{-3}	3.59×10^{-5}	1.87×10^{-2}	$6.457 5 \times 10^{-2}$	$2.009 9 \times 10^{-6}$	$1.060 4 \times 10^{-3}$	7.59×10^{-2}
	Z	2.69×10^{-4}	1.95×10^{-4}	9.42×10^{-3}	4.82×10^{-3}	$4.822 3 \times 10^{-2}$	$1.023 5 \times 10^{-3}$	$1.190 8 \times 10^{-5}$	1.23×10^{-3}

4 结束语

本文基于双轴位置转台, 提出了一种新的光纤陀螺惯组标定方法, 能够标定出加速度计和陀螺的标度因数、安装误差和常值漂移共 24 个参数。通过多次试验验证了利用位置转台进行光纤陀螺惯组标定的可行性和稳定性, 与传统实验室标定方法相比, 需要同时用到位置转台和速率转台, 该方法的实现将简化实验设备, 仅需一双轴位置转台就可实现 IMU 的全参数标定, 降低了标定成本, 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]// Palm Springs, CA, USA: IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1998:256-263.
- [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, 2004:83-90.
- [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 Y, 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] 严恭敏, 秦永元. 激光捷联惯组的双轴位置转台标定仿真[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 123-127. YAN Gongmin, QIN Yongyuan. Calibration simulation for laser strapdown IMU with two-axis turntable[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 123-127.
- [7] 蔚国强, 杨建业, 张合新. 激光陀螺捷联惯导系统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, YANG Jianye, ZHANG Hexin. Rapid calibration of laser gyro strapdown IMUs without north-seeking[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 21-27.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 尚捷, 顾启泰. 捷联惯导现场最优标定方法研究[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 Inertial Technology of China, 2005, 13(4): 18-21.