

基于角加速率的 MEMS 陀螺仪快速标定方法

路永乐, 向磊, 刘宇, 李云梅, 吴林志

(重庆邮电大学 光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 微机电系统(MEMS)陀螺仪的非线性误差是影响陀螺仪测量精度的主要因素之一。针对角速率标定方法难以获得陀螺仪连续输出的问题。该文提出了一种角速率标定实验方案,介绍了用二次标定方法解算出陀螺仪的零位误差系数、刻度因子、交叉耦合系数及非线性误差项的具体步骤。与常规补偿模型算法比较表明,此方法可快速标定陀螺仪的误差参数,补偿后的 MEMS 陀螺仪绝对误差小于 $0.084 (^{\circ})/s$,线性度提高了 1~2 个数量级。

关键词: MEMS 陀螺仪;角速率;非线性误差;二次标定;快速

中图分类号: V241.5 **文献标识码:** A

MEMS Gyroscope Fast Calibration Method Based on the Angular Acceleration Technique

LU Yongle, XIANG Lei, LIU Yu, LI Yunmei, WU Linzhi

(Chongqing Municipal Key Lab. of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology,

Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The nonlinear error of MEMS gyro is one of the main factors influencing its measure precision. For the problem that the existing angular rate calibration method is difficult to obtain the continuous output of gyro, an implementation calibrating method based on the angular acceleration technique is proposed in this paper. The secondary calibration method is presented to calculating the zero error coefficient, the scale factor, the cross coupling coefficient and the nonlinear error term of gyroscope. Compared with conventional compensation model, the proposed method can calibrate the error parameters of the gyro quickly. The absolute error is less than $0.084 (^{\circ})/s$ and the linearity is increased by 1~2 magnitudes after compensating.

Key words: MEMS gyroscope; angular acceleration rate; nonlinear error; secondary calibration; quickly

0 引言

微机电系统(MEMS)陀螺仪具有体积小,成本低和可靠性高的优点,被广泛应用于低成本导航系统和微惯性测量单元(IMU)^[1]。受自身工作原理、结构、制造水平及器件安装过程中误差的影响, MEMS 陀螺仪存在着一系列固有误差源,包括随机误差、零位误差、非正交误差及非线性误差。其中,非线性误差是影响陀螺测量精度的主要因素之一,表现为陀螺输出与输入呈非线性关系^[2]。

陀螺仪误差参数标定方法主要有基于高精度转台的现场多位置标定法和多位置角速率标定法^[3],研究表明,这两种方法在标定 MEMS 陀螺非线性误

差方面都有其局限性。现场多位置标定法以地球自转角速率为参考基准标定陀螺仪安装误差,但一些精度较低的 MEMS 陀螺仪还不足以敏感到地球自转角速率^[4];多位置角速率标定方法则是在陀螺全量程范围内设置 n 个采样点作为分段点,在相邻段点间一次拟合或分段拟合刻度因子^[5-6],该方法在采样点的精度较高,但不能精确描述分段点间刻度因子的变化情况。因此,文中提出了一种标定校准方法,利用高精度转台的角加速率模式获得陀螺仪全量程较连续的输出值,一次拟合出刻度因子常值、交叉耦合系数和零位误差,并采用小波变换滤除一次补偿残留误差中的高频信号,最后用最小二乘法多

收稿日期:2016-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175535);MEMS 振动传感与微姿态组合测井技术国际联合研究中心科技平台与基地建设基金资助项目(cstc2014gjhz0038);重庆邮电大学自然科学基金资助项目(A2015-49)

作者简介:路永乐(1985-),男,河南南阳人,博士,主要从事惯性传感器及系统集成的研究。E-mail:luyyl@cqupt.edu.cn。向磊(1993-),男,重庆万州人,硕士生,主要从事惯性传感器及导航技术的研究。E-mail:xiangleicqupt@sina.com。

项式拟合残留误差,补偿陀螺仪的非线性误差。实验表明,此标定方法步骤简单,节约了标定时间,经过标定模型补偿后,陀螺的安装误差、非线性误差得到了改善,能够满足 MEMS 陀螺仪在工程领域的精度需求。

1 MEMS 陀螺仪误差模型与分析

理论上, MEMS 陀螺仪角速率输出值与输入值之间的比例 K 为常值。实际上,制成 MEMS 器件的硅材料易受外界环境的影响,使得 MEMS 陀螺仪输出表现出非线性特性^[7]。同时,陀螺输出特性曲线还具有非对称性,表现为陀螺在正、负段输出特性不一致。陀螺输出特性曲线如图 1 所示。

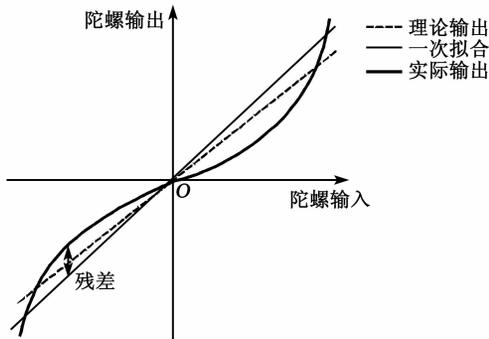


图 1 MEMS 陀螺输出特性曲线

一次拟合的结果与实际输出之间存在较大误差,把刻度因子 K 设为常值会影响陀螺仪的测量精度。考虑非线性误差和非对称误差影响, MEMS 陀螺仪的输出模型^[8]可写为

$$W = (k + \Delta k) \times \omega + b + \epsilon \quad (1)$$

式中: W 为陀螺实际输出值; ω 为陀螺输入值; k 为刻度因子常值; Δk 为刻度因子非线性误差; b 为零位误差; ϵ 为高频噪声引起的随机误差。

传统的陀螺仪非线性误差补偿方法以刻度因子 $K(K = k + \Delta k)$ 为研究对象。在实际应用中,刻度因子误差最终会转换为一次拟合残差,即

$$\xi = \Delta k \times \omega \quad (2)$$

由式(2)可知,一次拟合残差可表示为刻度因子非线性误差系数与陀螺角速率输入值的乘积。载体角速率运动较强烈时,刻度因子微小的偏差会增大拟合误差。因此,直接以一次拟合残差为研究对象能提高拟合精度。此外,由于硅 MEMS 器件的个性差异,即使同种型号 MEMS 陀螺仪的输出特性也并非完全一致,分段点的选取原则是在线性度不好的区间多设分段点,角速率标定法无法确定全量程任

一转速下陀螺仪的刻度因数。基于以上考虑,文中以一次拟合残差为研究对象,提出了一种角速率标定方案。

2 传感器模型

2.1 改进的模型

文中以陀螺一次拟合残差为研究对象补偿陀螺非线性误差,将式(1)分离,一次拟合的残差值可表示为

$$\xi = \Delta k \times \omega = W - k \times \omega - b - \epsilon \quad (3)$$

引入非线性误差和非对称误差因素的影响,陀螺一次拟合残差可用角速率和角速率绝对值的多次项表达^[9],即

$$\xi = \sum_{p=0}^n s_p \omega^p + \sum_{q=0}^m l_q |\omega^q| + \epsilon \quad (4)$$

式中: s_p 为非线性误差与角速率 p 次项成比例的系数; l_q 为非对称误差与角速率绝对值的 q 次项成比例的系数。式(4)较复杂,增加了拟合难度。采用小波变换理论滤除信号中的高频噪声能减小随机误差 ϵ 的影响;同时,以零输入点为分段点,对陀螺输出曲线进行分段拟合补偿非对称误差。因此,式(4)可简化为

$$\xi = f(x) = \sum_{p=0}^n s_i \omega^i \quad (5)$$

将式(5)代入传统的三轴陀螺误差模型,得到改进的误差模型:

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & \delta_{yx} & \delta_{zx} \\ \delta_{xy} & k_y & \delta_{zy} \\ \delta_{xz} & \delta_{yz} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_x(\omega_x) \\ f_y(\omega_y) \\ f_z(\omega_z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: k_i 为 i 轴刻度因子一次拟合常值; δ_{ij} 为陀螺 i 轴输出在 j 轴分量,即 i 轴交叉耦合系数($i = x, y, z; j = x, y, z$); b_i 为 i 轴零位误差; $f_i(\omega_i)$ 为 i 轴一次拟合残差的分段函数。不同轴向正、负段的输出特性曲线不同,这需要用不同的多项式去逼近。

2.2 残差的小波变换原理

MEMS 传感器输出中存在野值和较大漂移,小波变换理论为陀螺输出中突变信号的分析 and 处理提供了有效的方法,利用小波信号处理能够提高 MEMS 惯性传感器的精度和性能^[10]。设能量有限信号 $f(t) \in L^2(R)$,其连续小波变换表示为

$$WT_f(a, b) = (1/\sqrt{a}) \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi((t-b)/a) dt \quad (7)$$

式中:函数 $\psi_{a,b}(t) = (1/\sqrt{a}) \psi^*((t-b)/a)$, 由母小波 $\psi^*(t)$ 通过尺度伸缩和平移得到; a 为频率因素的尺度因子; b 为时间因素的时变因子。对参数 a 和 b 进行离散化, 可得到小波变换的离散形式。一维 MEMS 陀螺仪模型中含有噪声信号, 其离散形式表示为

$$s(k) = R(k) + \delta W(k) \quad (8)$$

$(k = 0, 1, \dots, n-1)$

式中: $s(k)$ 为陀螺仪的实际测量值; $R(k)$ 为实际输出值; $W(k)$ 为系统测量时所受的噪声。在实际工程中, 需要滤除高频信号 $W(k)$, 保留低频有用信号 $R(k)$ 。在对 MEMS 陀螺仪一次拟合残差进行滤波时, 通常将系统中的突变信号考虑成高斯白噪声。通过对 MEMS 陀螺仪一次拟合后的残差值进行小波滤波, 可以有效抑制信号中的高频噪声, 进而得到接近于实际残差值 $R(k)$ 。

3 实验方法与系数解算

3.1 实验仪器

3.1.1 MEMS-IMU

文中以自主研制的姿态仪为标定对象, 数据采集硬件电路由 3 轴 MEMS 加速度计、3 轴 MEMS 陀螺仪、3 轴磁力计及 1 个气压计组合而成, 如图 2 所示。其中, 微处理器通过 SPI 并行总线接口访问读取 MEMS 陀螺仪内存数据, 并通过 RS232 通信接口与电脑连接, 最后在上位机上实时显示保存 MEMS 陀螺仪数据。



图 2 自制姿态仪

3.1.2 高精度双轴转台

实验采用北京航空精密机械研究所生产的 902E-1 双轴电动转台, 如图 3 所示。其中, 角速率分辨率为 $0.001 (^{\circ})/s$, 角加速度分辨率为 $0.5 (^{\circ})/s^2$, 角速率精度及平稳性为 1×10^{-4} (360° 平均)。在

实验中, 以主轴固定的角加速率驱动姿态仪旋转, 使姿态仪获得匀速递增的角速率输入。



图 3 902E-1 型双轴电动转台

3.2 3 轴 MEMS 陀螺仪标定实验

现选取双轴转台的主轴作为标准输入轴, 分别对陀螺仪 3 个敏感轴向上采取正反转实验和静止实验。正反转实验时, 设置转台为加速率模式, 单次加速时间 $t = \omega_r/a$ (其中, a 为角加速率; ω_r 为陀螺全量程转速, 加速过程中采集数据数 $n = t \times f$ (其中, f 为采样频率))。设计实验步骤如下:

1) 将陀螺仪载体 z 轴向上固定安装于转台, 使陀螺仪 3 个敏感轴分别与转台的转动轴平行, 设置处理器的波特率为 9 600, 发送频率 50 Hz。

2) 连接数据线, 通电预热 2 min 直至温度稳定, 转台上电、闭合后进行归零。检查无误后, 上位机上实时显示陀螺 3 轴的静态数据, 同时采集 20 s 陀螺仪静止数据。

3) 主轴上电, 设置转台的加速率为 $1 (^{\circ})/s^2$, 停止速率为 $100 (^{\circ})/s$; 主轴运行, 同时开始保存 3 轴陀螺数据, 当转台角速率达到满量程 ω_r 后匀速转动, 确保数据中包含陀螺加速过程中的全部数据; 转台归零, 在反方向重复上述步骤。

4) 数据采集完毕后, 调整陀螺仪载体其余两轴分别与转台 z 轴平行, 重复步骤 2)、3)。

3.3 标定实验数据处理

3.3.1 一次标定系数解算

通过以上标定实验, 得到 9 组实验数据, 分别是 3 组对应轴向上的 3 轴的零位数据、正向加速和反向加速数据, 下面以 z 轴向上为例求解各项系数。

整合正反向加速数据 3 轴陀螺原始输出值, 并对 3 轴原始输出值分别进行一次拟合得到刻度因子 k_z 、交叉耦合项 δ_{zx} 、 δ_{zy} ; 同时, 由静止实验 3 轴的输出数据得到零偏均值 b_{zx} 、 b_{zy} 、 b_{zz} 。

同理, 由 x 、 y 轴分别向上得到零偏均值 b_{xx} 、 b_{xy} 、 b_{xz} 、 b_{yx} 、 b_{yy} 、 b_{yz} , 刻度因子 k_x 、 k_y 和交叉耦合系数 δ_{xy} 、 δ_{xz} 、 δ_{yx} 、 δ_{yz} 。陀螺 3 轴零位误差系数为

$$\begin{cases} b_x = \frac{b_{xx} + b_{yx} + b_{zx}}{3} \\ b_y = \frac{b_{xy} + b_{yy} + b_{zy}}{3} \\ b_z = \frac{b_{xz} + b_{yz} + b_{zz}}{3} \end{cases} \quad (9)$$

由上述数据处理方法得到第一次标定的全部误差项如表 1 所示,其中,LSB 为最低有效位。

表 1 3 轴 MEMS 陀螺仪的一次拟合标定系数

敏感轴	零偏误差/ LSB	比例系数/ [LSB/((°)/s)]
		$k_x = 49.7052$
x	$b_x = 17.9256$	$\delta_{xy} = -0.2073$ $\delta_{xz} = 0.4387$
		$\delta_{yx} = -0.4854$
y	$b_y = -12.8843$	$k_y = 49.8534$ $\delta_{yz} = 0.5713$ $\delta_{zx} = 0.4858$
		$\delta_{zy} = 0.5713$ $k_z = 49.1821$

3.3.2 二次标定系数解算

把零位误差系数 b_z 、比例系数 k_z 代入式(3)得到 z 轴一次拟合残差值。在拟合之前,对其进行小波变换处理以滤除数据中的高频信号。滤波前、后陀螺 z 轴输出残差对比如图 4 所示。

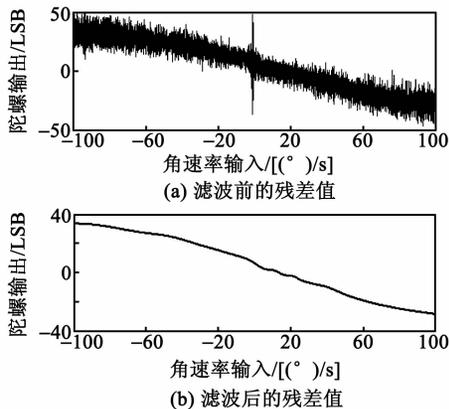


图 4 z 轴残差滤波前、后对比图

由图 4 可看出,陀螺一次补偿残差值在全量程范围内存在非线性特性和不对称特性,且在零速率附近有较大的突变信号,文中分析是由陀螺启动噪声造成的。滤波后的残差输出较平稳,滤波效果较明显。对滤波后残差值的正、负段分别进行多项式

拟合得到分段多项式函数 f_z (由 Matlab 仿真分析可知,3 次多项式可满足精度要求)。同理, x 、 y 轴向上通过此方法得到分段函数 f_x 、 f_y 。一般表达式为 $f_i = b_0 + b_1\omega_i + b_2\omega_i^2 + b_3\omega_i^3$, ($i=x, y, z$), 具体参数如表 2 所示。

表 2 3 轴 MEMS 陀螺仪残差标定参数

敏感轴	输入速率范围	零次项系数	一次项系数	二次项系数	三次项系数/ 10^{-5}
x	$\omega_x > 0$	-0.2378	-0.1521	-0.0108	6.560
	$\omega_x < 0$	0.2474	1.3221	0.0360	18.800
y	$\omega_y > 0$	-0.3385	0.4917	-0.0040	0.426
	$\omega_y < 0$	-0.1447	0.6314	0.0103	4.970
z	$\omega_z > 0$	0.1586	-0.1329	-0.0028	0.329
	$\omega_z < 0$	-0.3014	-0.0311	0.0053	2.510

由表 2 可知,各轴正、负段拟合函数在零点处不连续,其差值是一个微小量,文中忽略此方面的影响。把表 1、2 中的值代入式(6)即得到具体的误差模型。

4 实验验证与分析

为了验证实验效果,将陀螺仪载体 z 轴向上安装于转台进行标定实验。角速率模式下陀螺仪安装误差补偿前、后对比如图 5 所示。

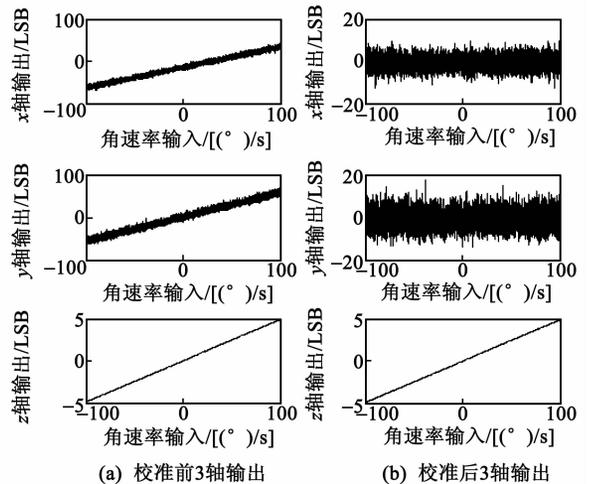


图 5 陀螺仪安装误差补偿前、后对比

由图 5 可知, z 轴以固定角加速度旋转时, x 、 y 轴都感应到偏离零点附近的分量,且速率越大,分量越大。校正后,陀螺 x 、 y 轴各速率点对应输出值向零点靠拢,MEMS 陀螺的安装误差得到了有效补偿。

角速率模式各转速下陀螺 z 轴绝对误差补偿前后对比如表 3 所示。

表3 z 轴校正前、后的输出误差对比

输入角速率/ [$^{\circ}$]/s]	校正前误差/ LSB	一次拟合 误差/LSB	二次补偿 误差/LSB
-100	-88.202 6	42.664 8	-4.218 6
-80	-73.933 0	38.734 4	-2.658 2
-60	-65.301 4	33.637 8	-3.574 8
-40	-44.592 4	25.489 2	2.527 2
-20	-25.456 6	16.050 8	-2.728 6
20	17.770 6	-8.131 6	-2.041 9
40	32.128 6	-17.608 7	-4.135 3
60	43.486 6	-25.709 2	-3.792 8
80	68.844 6	-32.163 3	4.137 2
100	75.348 2	-36.241 4	3.437 2

由表3可知,补偿前,MEMS陀螺误差高达6 350.6 ($^{\circ}$)/h,二次补偿后陀螺输出值误差减小为303.7 ($^{\circ}$)/h,补偿精度与一次拟合相比有了明显提高。线性度误差由1.764%减小为0.084%,提高了1~2个数量级。

5 结束语

文中在传统模型中加入了非线性误差项,提出了角加速度标定实验方案,方案步骤简单,易实现,有效补偿了MEMS陀螺仪的安装误差和非线性误差,对陀螺仪标定方法和非线性特性的研究具有一定的参考价值。本文只考虑了恒温状态下的情况,温度对陀螺非线性误差又是另外一大影响因素,可在今后的试验中进行研究。

参考文献:

[1] DIAO Zhanlin, QUAN Haiyang, LAN Lidong, et al. Analysis and compensation of MEMS gyroscope drift [C]//Wellington, New Zealand: Seventh International Conference on Sensing Technology, 2013:592-596.

[2] VACCARO R J, ZAKI A S. Statistical modeling of rate gyros and accelerometers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(61): 673-684.

[3] 龙达峰,刘俊,张晓明,等.基于椭球拟合的三轴陀螺仪快速标定方法[J].仪器仪表学报,2013,34(6):1299-1305.

LONG Dafeng, LIU Jun, ZHANG Xiaoming, et al. Triaxial gyroscope fast calibration method based on ellipsoid fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instru-

ment, 2013, 34(6):1299-1305.

[4] 李荣冰,刘建业,孙永荣. MEMS-IMU 构型设计及惯性器件安装误差标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(5):526-529.

LI Rongbing, LIU Jianye, SUN Yongrong. MEMS-IMU configuration and its inertial sensors' calibration for installation errors[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(5):526-529.

[5] 李建利,房建成,盛蔚. MEMS陀螺标度因数误差分析及分段插值补偿[J]. 北京航空航天大学学报,2007, 33(9):1064-1067.

LI Jianli, FANG Jiancheng, SHENG Wei. Error analysis and integrated compensation of scale factor for MEMS gyroscope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(9): 1064-1067.

[6] TANG Q, WANG X, YANG Q, et al. An improved scalefactor calibration model of MEMS gyroscopes [C]//Montevideo, Uruguay: Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE, 2014: 752-755.

[7] 龚大伟,刘宇,钟懿,等. MEMS陀螺混合误差标定方法研究[J]. 压电与声光,2016,38(2):298-303.

GONG Dawei, LIU Yu, ZHONG Yi, et al. Research on the mixing error calibration method of MEMS gyro [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(2): 298-303.

[8] SHEN S C, CHEN C J, HUANG H J. A new calibration method for MEMS inertial sensor module[J]. Advanced Motion Control, 2010 11th IEEE International Workshop on, 2010, 18(6):106-111.

[9] 何昆鹏,孙华,高延滨,等. 动调陀螺标度因数非线性误差补偿研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2008, 29(10): 1060-1066.

HE Kunpeng, SUN Hua, GAO Yanbin, et al. Compensation of nonlinear errors of scale factors in dynamically tuned gyro system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(10):1060-1066.

[10] XUE H J, GUO X S, ZHOU Z F, et al. Gyro Signal De-noising Based on a New Wavelet Threshold Function[C]//Nanjing, China: International Conference on Computer Science & Service System, 2012:270-274.