

文章编号 1004-924X(2011)07-1620-07

微惯性测量单元的误差整机标定和补偿

代 刚^{1,2*}, 李 枚¹, 苏 伟¹, 邵贝贝²

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要:提出了微惯性测量单元(MIMU)在高动态、高过载复杂应用条件下的误差整机标定和补偿方法。首先,建立了高动态、高过载复杂应用条件下 MIMU 的误差模型,该模型包括了结构误差,传感器安装误差和 MEMS 惯性传感器在复杂条件对精度影响较大的误差项,指零位温度漂移、互耦误差、刻度因子非线性和微陀螺加速度效应误差;根据模型提出了整机标定补偿方法,该方法可以标定 MIMU 的 63 个误差系数,并且不需要对单个传感器进行标定。然后,介绍了利用最小二乘法对模型进行误差系数标定的方法和步骤,并对自研的 MIMU 进行了标定。最后,通过飞行实验对 MIMU 进行了验证。结果表明,使用该方法使定位精度提高了一个数量级,基本满足 MIMU 在高动态、高过载条件下的精度要求。

关键词:微惯性测量单元(MIMU);微机电系统(MEMS);误差分析;整体标定;误差补偿

中图分类号:V241.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111907.1620

Error calibration and compensation of entire micro inertial measurement unit

DAI Gang^{1,2*}, LI Mei¹, SU Wei¹, SHAO Bei-bei²

(1. *Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;*

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

** Corresponding author, E-mail: dg02@mails.tsinghua.edu.cn*

Abstract: The entire calibration and compensation method of a Miniature Inertial Measurement Unit (MIMU) in high dynamic and overload complicate environments was proposed. Firstly, an error model applied to the complicate application environments was established, which consists of the structure errors, installation misalignment errors and the errors of the MEMS sensors including zero output drift, temperature drift, cross-axis error, nonlinear scale factor error and acceleration effect error of gyroscope. Based on the model, the entire calibration and compensation method was proposed to calibrate 63 error coefficients without calibration of each MEMS inertial sensor separately. Then, the generalized least square algorithm was used to calibrate and calculate the error coefficients. Finally, a MIMU was developed for a flight experiment and was calibrated with this proposed method. Experimental results indicate that the positioning accuracy is improved by 1 order of magnitude. It can satis-

fy the high dynamic and overload requirements of the MIMU.

Key words: Miniature Inertial Measurement Unit(MIMU); Micro-eleetro-mechanical System(MEMS); error analysis; entire calibration; error compensation

1 引言

小型化、低成本、低功耗、抗冲击和振动的微机电系统(MEMS)的发展使 MEMS 惯性传感器的精度随着 MEMS 工艺水平的提高而日益提高^[1],其应用领域已拓展到有更高精度要求的导航系统中。由于 MEMS 惯性传感器的工作原理和加工工艺与传统的惯性传感器不同,其主要误差项的原理和补偿方法也不相同。由 MEMS 惯性传感器组成的微惯性测量单元(MIMU)不仅继承了 MEMS 惯性传感器的误差项,包括微加速度计和微陀螺的零偏、零偏温度漂移、互耦误差、刻度因子非线性误差和高过载条件下有较大影响的微陀螺的加速度效应误差,还引入了 MIMU 集成产生的微加速度计和微陀螺的安装非正交性误差,使得 MIMU 的标定与补偿方法与传统的惯性测量单元(IMU)有较大的差异。目前研究的 MIMU 的标定补偿方法主要是针对 MIMU 在低 g 值应用条件下,采用的是多位置翻转与单轴旋转激励的方法^[2-5],可以标定出 MIMU 的交叉耦合系数,加速度表的零位和一阶标度因数和陀螺的标度因数,但是没有考虑到标定过程中 MEMS 传感器本身发热或者环境温度的变化导致的零位温度漂移对标定系数的影响,也没有考虑 MEMS 加速度表的高阶标度因数和其在 MIMU 集成后由于安装误差而产生的变化。由于 MEMS 惯性传感器是硅基传感器,其温度效应非常明显^[6-8],因此在标定和补偿过程中必须考虑温度补偿,否则会产生较大的误差,无法满足应用的要求。

本文针对这些问题,根据具体应用时复杂载体运动条件和实时补偿的需求,提出了一种 MIMU 整体标定补偿方法。该方法以 MIMU 整机为单位,考虑了 MIMU 的结构安装误差和 MEMS 惯性传感器在复杂条件下影响精度较大的误差项,包括零位温度漂移、互耦误差、刻度因子非线性和微陀螺加速度效应误差。根据模型设计了利用最小二乘法求解的整机标定补偿方法,

标定了 MIMU 的 63 个误差系数。最后通过实际的飞行实验,验证了补偿的效果。

2 MIMU 系统误差分析

2.1 MIMU 的组成

研制的 MIMU 采用的是正交 3 陀螺,3 加速度计的方案。加速度计为静电力反馈电容式叉指微加速度计,陀螺是 Z 轴电容式解耦微陀螺,两者在实验室静态恒温条件下的基本指标如表 1,其零位漂移指标满足战术级导航的需求。

表 1 MIMU 的惯性传感器性能参数

Tab. 1 Performance of inertial sensor for MIMU

| | 微加速度计 | 微陀螺 |
|----------|--------------------------|-------------------------|
| 量程 | $\geq 30g$ | $\geq 400 (^{\circ})/s$ |
| 零位漂移 | $\leq 1 \text{ mg/h}$ | $\leq 30 (^{\circ})/h$ |
| 标度因数拟合残差 | $\leq 0.05\% \text{ FS}$ | $\leq 0.2\% \text{ FS}$ |

研制的 MIMU 如图 1 所示,其中包括 MIMU 的外形、加速度计和微陀螺扫描电镜图。MIMU 内部配置了 3 个由热敏电阻搭建的温度传感器,3 个热敏电阻分别贴在 3 个微加速度计的管壳上,以获取微加速度计的温度信息;微陀螺通过检测内部结构谐振频率来间接得到陀螺内部的温度信息^[9]。

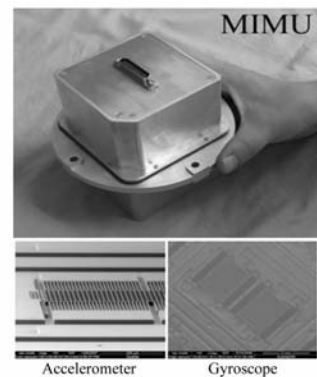


图 1 研制的 MIMU 及 MEMS 惯性传感器的扫描电镜图

Fig. 1 Pictures of MIMU and SEM micro inertial sensors

2.2 MIMU 系统误差分析

MIMU 系统误差项按照误差的耦合关系与可实现的标定过程可以分为 4 类分别处理:MEMS 惯性传感器的温度效应误差;MIMU 正交加速度计组的安装误差,互耦误差及标度因数非线性误差;

MIMU 正交陀螺组的安装误差,互耦误差及标度因数非线性误差;微陀螺的加速度效应。安装误差和互耦误差是耦合误差,无法分离,需要与标度因数一起标定与补偿^[10]。MIMU 加速度计组的误差模型如式(1):

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{0x} \\ A_{0y} \\ A_{0z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{1xx} & A_{1xy} & A_{1xz} \\ A_{1yx} & A_{1yy} & A_{1yz} \\ A_{1zx} & A_{1zy} & A_{1zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ax} \\ V_{ay} \\ V_{az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{2xx} & 0 & 0 \\ 0 & A_{2yy} & 0 \\ 0 & 0 & A_{2zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ax}^2 \\ V_{ay}^2 \\ V_{az}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{3xx} & 0 & 0 \\ 0 & A_{3yy} & 0 \\ 0 & 0 & A_{3zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ax}^3 \\ V_{ay}^3 \\ V_{az}^3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, a 是 MIMU 最终输出的载体加速度信息; A_0 , A_1 , A_2 , A_3 是零位,交叉耦合系数,安装误差与标度因数矩阵;下标 x, y, z 表示 x, y, z 轴微加速度计/陀螺的输出,以下皆同。交叉耦合系数相对于标度因数是一个小量,由于在高阶标度因数矩阵中标度因数本身也是一个小量,而高阶交叉耦合系数相对而言是一个二阶小量,在标定和补偿中可以忽略,因此高阶标度

因数矩阵是一个对角矩阵。其中 V_a 是经过温度补偿后的加速度计输出的电压信息,满足式(2):

$$V_a = U_a - (ct_{0a} + ct_{1a}T + ct_{2a}T^2), \quad (2)$$

其中, U_a 是加速度计输出的原始电压信息; ct_0 , ct_1 , ct_2 是温度系数; T 是测得的温度。微加速度计组一共具有 27 个参数。

MIMU 陀螺组的误差模型为:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_{0x} \\ \Omega_{0y} \\ \Omega_{0z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_{1xx} & \Omega_{1xy} & \Omega_{1xz} \\ \Omega_{1yx} & \Omega_{1yy} & \Omega_{1yz} \\ \Omega_{1zx} & \Omega_{1zy} & \Omega_{1zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\omega x} \\ V_{\omega y} \\ V_{\omega z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_{2xx} & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_{2yy} & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_{2zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\omega x}^2 \\ V_{\omega y}^2 \\ V_{\omega z}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_{3xx} & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_{3yy} & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_{3zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\omega x}^3 \\ V_{\omega y}^3 \\ V_{\omega z}^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, ω 是 MIMU 最终输出的载体加速度信息; $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ 是零位,交叉耦合系数,安装误差与标度因数矩阵; C 是陀螺加速度效应矩阵; V_ω 是经过温度补偿后的陀螺仪输出的电压信息,满足:

$$V_\omega = U_\omega - (c\omega_{0\omega} + c\omega_{1\omega}f + c\omega_{2\omega}f^2), \quad (4)$$

其中 U_ω 是陀螺仪输出的原始电压信息; $c\omega_0$, $c\omega_1$, $c\omega_2$ 是零位系数; f 是检测到的陀螺的谐振频率。微陀螺组一共具有 36 个参数,因此 MIMU 总共有 63 个需要标定的参数。

标定,标定出 MIMU 在使用温度范围内的温度系数 ct 和 $c\omega$,然后使用得到的温度系数进行剩下参数的标定;在单轴转台上标定微陀螺组的标度因数,互耦误差和安装误差系数;在离心机上标定

3 MIMU 整机标定和补偿方法

3.1 MIMU 整机标定方法

MIMU 整机标定需要一个具有较高加工精度的六方夹具提供各个方向的基准平面,MIMU 安装在夹具上进行标定。整机标定方法流程如图 2 所示,分为 3 个步骤。首先在温箱中进行温度

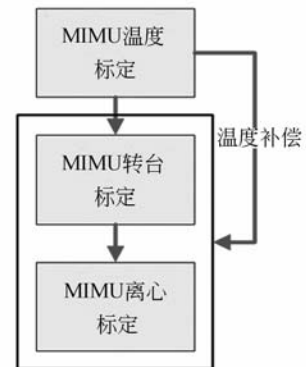


图 2 MIMU 整机标定流程

Fig. 2 Flow diagram of entire MIMU calibration

微加速度计组的标度因数,互耦误差,安装误差系数和微陀螺组的加速度效应系数。使用 MIMU 整机标定原则上不需要对单个的传感器进行标定,只需要对使用的惯性传感器进行筛选。温度标定在温箱中进行,温度为 0~70 ℃,每 5 ℃ 一个温度点,一个温度点需要半小时的稳定时间,采集稳定后 MIMU 的输出,然后根据式(2)和(4)进行最小二乘拟合即可得到 18 个温度系数。在进行转台标定和离心标定时,都需要先将 MIMU 的输出按照式(2)和(4)进行温度补偿。

3.1.1 MIMU 转台标定

由式(3)可知,在对微陀螺进行转台标定的时候,也需要考虑重力加速度的影响,但是由于重力加速度相对于实际使用过程中的加速度较小,因此不能使用简单的静态翻转的方向外推得到微陀螺的加速度效应参数。为了消除重力加速度对微陀螺其它参数标定的影响,使用了 6 位置正反转标定的方法标定微陀螺组。6 个位置分为 3 组,如图 3 所示。每个位置都按照一定的速率分布进

行正反转,转速为 0~400 (°)/s,每 20 (°)/s 一个转速点,然后测出每个位置每个转速点的 3 个陀螺的输出,再将同一组位置的相同陀螺相同转速点的输出求均值,这样得到的数据不仅消除了重力加速度对微陀螺的影响,还消除了地球自转的影响。

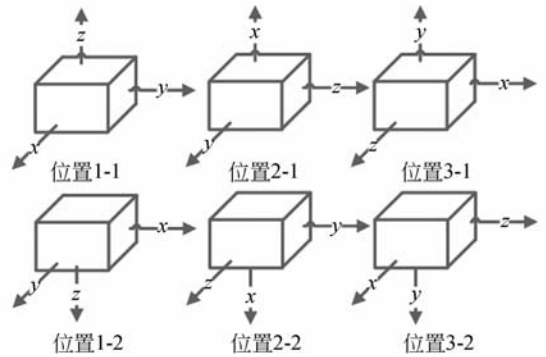


图 3 MIMU 标定 6 位置图

Fig. 3 Six position diagram for MIMU calibration

式(3)可以改写成式(5)

$$\begin{bmatrix}
 1 & V_{\omega_1 x} & V_{\omega_1 y} & V_{\omega_1 z} & V_{\omega_1 x}^2 & V_{\omega_1 x}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & V_{\omega_1 x} & V_{\omega_1 y} & V_{\omega_1 z} & V_{\omega_1 x}^2 & V_{\omega_1 x}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & V_{\omega_1 x} & V_{\omega_1 y} & V_{\omega_1 z} & V_{\omega_1 x}^2 & V_{\omega_1 x}^3 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 1 & V_{\omega_1 x} & V_{\omega_1 y} & V_{\omega_1 z} & V_{\omega_1 x}^2 & V_{\omega_1 x}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & V_{\omega_1 x} & V_{\omega_1 y} & V_{\omega_1 z} & V_{\omega_1 x}^2 & V_{\omega_1 x}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & V_{\omega_1 x} & V_{\omega_1 y} & V_{\omega_1 z} & V_{\omega_1 x}^2
 \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix}
 \Omega_{0x}, \Omega_{1xx}, \Omega_{1xy}, \Omega_{1xz}, \Omega_{2xx}, \Omega_{3xx}, \Omega_{0y}, \Omega_{1yx}, \Omega_{1yy}, \Omega_{1yz}, \Omega_{2yy}, \Omega_{3yy}, \Omega_{0z}, \Omega_{1zx}, \Omega_{1zy}, \Omega_{1zz}, \Omega_{2zz}, \Omega_{3zz}
 \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix}
 \omega_{1x}, \omega_{1y}, \omega_{1z}, \dots, \omega_{ix}, \omega_{iy}, \omega_{iz}
 \end{bmatrix}^T, \tag{5}$$

其中 V_{ω_i} 表示第 i 个速率点陀螺进行温度补偿后的输出, ω_i 表示第 i 个速率点转台实际的输入角速度。由于测试点数目大于要求的 24 个参数,因此可用最小二乘法求式(5)的最优解,式(5)写作 $V\Omega = \omega$, 于是有式(6)

$$\Omega = (V^T V)^{-1} V^T \omega, \tag{6}$$

即可求得微陀螺组的 18 个标定参数。

3.1.2 MIMU 离心标定

离心标定的目的是标出微加速度计组的误差参数和微陀螺组的加速度效应参数。将 MIMU 按照图 3 的安装方式安装到离心机上进行离心,离心加速度为 0~30g,每 5g 一个加速度点,记录在不同加速度条件下 MIMU 的输出,按照式(2)和式(4)进行温度补偿后,将所得到的数据代入到由式(1)改写而成的式(7)中,可以使用最小二乘法求出参数的最优解。

$$\begin{bmatrix}
 1 & V_{a_1x} & V_{a_1y} & V_{a_1z} & V_{a_1x}^2 & V_{a_1x}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & V_{a_1x} & V_{a_1y} & V_{a_1z} & V_{a_1x}^2 & V_{a_1x}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & V_{a_1x} & V_{a_1y} & V_{a_1z} & V_{a_1x}^2 & V_{a_1x}^3 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 1 & V_{a_1x} & V_{a_1y} & V_{a_1z} & V_{a_1x}^2 & V_{a_1x}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & V_{a_1x} & V_{a_1y} & V_{a_1z} & V_{a_1x}^2 & V_{a_1x}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & V_{a_1x} & V_{a_1y} & V_{a_1z} & V_{a_1x}^2 & V_{a_1x}^3
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 A_{0x}, A_{1xr}, A_{1xy}, A_{1xz}, A_{2xr}, A_{3xr}, A_{0y}, A_{1yr}, A_{1yy}, A_{1yz}, A_{2yy}, A_{3yy}, A_{0z}, A_{1zr}, A_{1zy}, A_{1zz}, A_{2zz}, A_{3zz}
 \end{bmatrix}^T =
 \begin{bmatrix}
 a_{1x}, a_{1y}, a_{1z}, \dots, a_{ix}, a_{iy}, a_{iz}
 \end{bmatrix}^T.$$

(7)

需要注意的是输入的激励加速度中除了离心机和向心加速度外还有重力加速度,这样就可以求得微加速度计组的 18 个误差参数。

离心标定还需求出微陀螺组的加速度效应参数矩阵 C 。在离心标定中微陀螺的输出满足式(3),其中 a_x, a_y, a_z 满足式(8)

$$\begin{aligned}
 a_x &= r_x \omega_x^2 \\
 a_y &= r_y \omega_y^2, \\
 a_z &= r_z \omega_z^2
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

其中 r_x, r_y, r_z 是 x, y, z 轴陀螺敏感表芯到离心

机转轴的距离,可以直接测量得到。将 3.1.1 得到的标定参数代入到式(3)中,并根据式(8)计算出每个转速点对应的加速度,可以得到式(9)

$$\begin{bmatrix}
 C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\
 C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\
 C_{zx} & C_{zy} & C_{zz}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 a_{1x} & \dots & a_{ix} \\
 a_{1y} & \dots & a_{iy} \\
 a_{1z} & \dots & a_{iz}
 \end{bmatrix} =
 \begin{bmatrix}
 R_{1x} & \dots & R_{ix} \\
 R_{1y} & \dots & R_{iy} \\
 R_{1z} & \dots & R_{iz}
 \end{bmatrix},$$

(9)

其中下标 i 表示第 i 个速率点, R 是 3.1.1 的标定参数和离心标定的数据代入式(3)后的残差,得到:

$$\begin{bmatrix}
 R_x \\
 R_y \\
 R_z
 \end{bmatrix} =
 \begin{bmatrix}
 \omega_x \\
 \omega_y \\
 \omega_z
 \end{bmatrix} =
 \begin{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \Omega_{0x} \\ \Omega_{0y} \\ \Omega_{0z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_{1xr} & \Omega_{1xy} & \Omega_{1xz} \\ \Omega_{1yr} & \Omega_{1yy} & \Omega_{1yz} \\ \Omega_{1zr} & \Omega_{1zy} & \Omega_{1zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\omega x} \\ V_{\omega y} \\ V_{\omega z} \end{bmatrix} + \\
 \begin{bmatrix} \Omega_{2xx} & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_{2yy} & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_{2zz} \end{bmatrix} V_{\omega x}^2 + \begin{bmatrix} \Omega_{3xx} & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_{3yy} & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_{3zz} \end{bmatrix} V_{\omega x}^3
 \end{bmatrix},
 \tag{10}$$

然后,根据最小二乘法求出 C 矩阵的最优解。至此, MIMU 整机的全部 63 个参数就标定完成。

3.2 MIMU 补偿方法

MIMU 补偿根据式(1), (2), (3), (4) 进行, 首先需要进行野值滤波, 然后根据式(2)和(4)进行温度补偿, 最后由式(1)进行微加速度计组的补偿, 将补偿后的载体加速度值连同陀螺输出代入式(3)得到微陀螺组的补偿值。至此整个 MIMU 的补偿完成。

4 实 验

4.1 MIMU 标定实验

按照第 3 部分的方法对 MIMU 进行标定, 得

到的各项误差的参数范围如表 2。

表 2 MIMU 各项误差参数范围

Tab. 2 Range of error parameters of MIMU

| 误差项目 | 微陀螺组 | 微加速度计组 |
|-----------|---|--|
| 安装误差和互耦误差 | (0.1%~0.5%)(°)/s | (0.1%~2%)g |
| 标度因子 2 阶项 | (1.5×10 ⁻⁴ ~2.5×10 ⁻⁴)/((°)/s) | (2×10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴)/g |
| 标度因子 3 阶项 | (4×10 ⁻¹⁰ ~1×10 ⁻⁹)/((°)/s) ² | (5×10 ⁻⁶ ~2×10 ⁻⁵)/g ² |
| 加速度效应 | (0.01~0.04) [°] /(s·g) | — |

由表中数据可知,微陀螺组的二阶项系数与微加速度计组的三阶项系数对标度因数非线性的贡献较大,这与MEMS传感器本身的结构和检测原理有关。微陀螺组的加速度效应在较大加速度时会产生较大的误差。

4.2 飞行实验

在飞行实验中,研制的MIMU同时经历了高过载和高动态的复杂条件,为了验证整体标定和补偿方法的效果,使用一个中等精度光纤陀螺IMU作为对比,计算终点的定位误差如表3,其中的数据以中等精度光纤陀螺IMU的误差为1进行比较,使用同一个基于四元数的定位解算算法^[11]。

表3 MIMU定位误差比较

Tab.3 Comparison of positioning errors of MIMU

| 项目(MIMU) | 东向误差 | 北向误差 | 天向误差 |
|----------|--------|------|------|
| 传统补偿技术 | 3.6 | 24.1 | 9.07 |
| 2.78 | 整体补偿技术 | 0.3 | 6.69 |
| 光纤IMU | 1 | 1 | 1 |

作为对比的光纤IMU的精度指标如表4。

表4 光纤IMU精度指标

Tab.4 Performance of optic fiber gyroscope IMU

| | 石英加速度计 | 光纤陀螺 |
|----------|--------------------|--------------------------|
| 量程 | $\geq 30 g$ | $\geq 1000 (^{\circ})/s$ |
| 零位漂移 | $\leq 100 \mu g/h$ | $\leq 1 (^{\circ})/h$ |
| 标度因数拟合残差 | $\leq 0.05\% FS$ | $\leq 0.05\% FS$ |

其中传统的补偿技术指的是文[2-5]中提到的补偿技术,可见本文的整体补偿技术在定位解算误差方面都有着较大的提高。

5 结论

本文提出了一种适于高动态和高过载的应用条件并易于工程实现的MIMU整机标定和补偿的方法。该方法可以准确标出MIMU整机共63个误差参数,包括18个温度系数,18个微加速度计组系数和27个微陀螺组系数,并且不需要对单个传感器进行标定。与传统的补偿技术比较,使用该方法标定的MIMU在高过载和高动态条件和变温环境下的精度有着较大的提高,定位精度较传统的标定补偿方法提高了近1个数量级,达到与中等精度光纤陀螺IMU相近的量级。

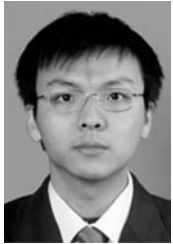
参考文献:

- [1] CHOI B D, PARK S, KO H, *et al.*. The first sub-deg/HR bias stability, silicon-microfabricated gyroscope[C]. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCER*, 2005:180-183.
- [2] SYED Z F, AGGARWAL P, GOODALL C, *et al.*. A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems[J]. *Meas. Sci. Technol.* 2007,18:1897-1907.
- [3] FONG W T, KONG S, NEE A Y C. Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment[J]. *Meas. Sci. Technol.* 2008,19:085202 (11pp).
- [4] 孙宏伟, 房建成, 盛蔚. 一种基于MEMS的微惯性测量单元标定补偿方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008,34(4):439-442.

- SUN H W, FANG J CH, SHENG W. Calibration-compensation method for micro inertial measurement unit based on MEMS[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautic*, 2008, 34(4):439-442. (in Chinese)
- [5] 李杰, 洪惠惠, 张文栋. MEMS微惯性测量组标补偿技术研究[J]. *传感技术学报*, 2008,21(7):85-89.
- LI J, HONG H H, ZHANG W D. Research on calibration techniques for MEMS micro inertial measurement unit[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008,21(7):85-89. (in Chinese)
- [6] LEE K I, TAKAO H, SAWADA K, *et al.*. Analysis and experimental verification of thermal drift in a constant temperature control type three-axis accelerometer for high temperatures with a novel composition of Wheatstone bridge[C]. *Micro Electro Mechanical Systems, MEMS* 2004:241-244.

- [7] FANG J CH, LI J L. Integrated model and compensation of thermal errors of silicon microelectromechanical gyroscope [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58 (9): 2923-2930.
- [8] FERGUSON M I, KEYMEULEN D, PEAY C, *et al.*. Effect of temperature on MEMS vibratory rate gyroscope [C]. *Aerospace, IEEE Conference*, 2005:1-6.
- [9] 周斌. 微机械陀螺数字化技术研究[D]. 北京:清华大学, 2003.
ZHOU B. *Study on digital technique of micromachined gyroscope*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese)
- [10] DAI G, YU HM, SU W, *et al.*. Systematic error analysis and modeling of MEMS close-loop capacitive accelerometer [C]. *5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2010:92-96.
- [11] 张荣辉, 贾宏光, 陈涛, 等. 基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):1963-970.
ZHANG R H, JIA H G, CHEN T, *et al.*. Attitude solution for strapdown inertial navigation system based on quaternion algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (10): 1963-1970. (in Chinese)

作者简介:



代 刚(1984—),男,四川绵阳人,博士研究生,2006年于清华大学获学士学位,主要从事基于MEMS的惯性器件与惯性引信和制导方面的研究。E-mail: dg02@mails. tsinghua. edu. cn



李 枚(1971—),女,甘肃兰州人,硕士,副研究员,主要从事微小型传感器与执行器的研究。E-mail: leem@xle-da. com



苏 伟(1964—),男,四川射洪人,博士,研究员,博士生导师,主要从事无线电物理和MEMS传感器的研究。E-mail: weisu@caep. ac. cn

导师简介:



邵贝贝(1946—),男,教授,博士生导师,1970年毕业于清华大学工程物理系,主要从事辐射监测仪器、核电子学、高能加速器及其它核装置的数据采集与控制系统、计算机嵌入式应用系统等方面的研究。E-mail: bbshao@tsinghua. edu. cn

(本栏目编辑:曹 金)