

# MEMS 惯性组件线性误差补偿方法研究

陶爽 刘仕林 赵季阳

武汉高德红外股份有限公司 湖北 武汉 430070

**【摘要】**：本文通过建立标定误差模型，设计六位置与速率匹配的试验方法，利用最小二乘法解算模型参数，实现对惯性组件标定误差的补偿。本方案较传统方法而言耗时大幅减少，与标定前相比器件精度显著提升。

**【关键词】**：快速标定；标定误差模型；最小二乘法

DOI:10.12417/3041-0630.26.06.036

## 引言

随着 MEMS 加工工艺的不断发展成熟，MEMS 体制的惯性组件具有体积小、成本低、功耗低、易于集成等优点。在精确制导弹药和战术制导武器方面得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。近程常规战术导弹其内部空间十分有限。所以 MEMS 体制的惯性器件尤其适用于小型和微型制导弹药。

惯性组件主要测量导弹飞行过程中的弹体运动信息，弹上自动驾驶仪接收到运动信息后形成导弹控制指令，控制导弹按照预定弹道飞行，最终精准命中目标。惯性组件作为惯性导航系统的核心部件，其精度的大小直接决定导航精度，对于采用纯惯性制导的导弹，惯性组件所引起的误差通常占整个制导误差的 70%以上<sup>[2-3]</sup>。为提升导弹制导精度，必须提高惯性组件的性能。通过改进设计与制造工艺提高产品性能在实际生产过程中容易遇到瓶颈，且技术革新与工艺优化也会带来大量成本负担。因此，通过建立误差数学模型，设计相关试验，经过误差标定与补偿技术来进一步提高产品性能的方法越来越具有实用价值。在此趋势之下，研究更加简易、方便、快速的标定方法也更具战略意义。

## 1 误差数学模型建立

MEMS 惯性组件的核心器件为 MEMS 加速度计和 MEMS 陀螺。惯性组件标定技术本质上是一种误差补偿技术，即建立惯性器件输出量和实际物理量之间的误差数学模型，通过一定的试验来确定误差模型系数，进而通过软件算法来消除误差<sup>[4]</sup>。

惯性组件测量误差大致可分为两类：即确定性误差和随机误差<sup>[5-6]</sup>。确定性误差主要包括零偏、标度因数误差、非正交误差以及安装误差等<sup>[7]</sup>。而随机误差由随机游走、速率斜坡、偏置不稳定性 and 量化噪声等组成<sup>[8-9]</sup>。如图 1 所示。

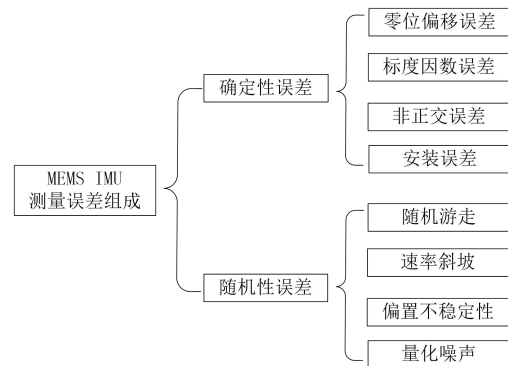


图 1 MEMS 误差组成

Fig.1 MEMS error composition

其中，标度因数误差、非正交误差和零位偏移误差为主要误差源，标度因数误差和非正交误差误差为一次项系数，零偏为零次项系数，在选择适当滤波器去除系统噪声后，二次项误差也得到了抑制，所以在标定过程中不考虑二次项或更高项误差。这样既不会影响标定结果也能大幅提高解算速度。

### 1.1 加速度计误差数学模型

以实际感受到的加速度为输入，MEMS 加速度计的实际输出测量信息为输出，仅考虑安装误差、标度因数误差和零偏误差的情况下，其误差方程为：

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_x \\ \tilde{A}_y \\ \tilde{A}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{ax} & Ma_{xy} & Ma_{xz} \\ Ma_{yx} & S_{ay} & Ma_{yz} \\ Ma_{zx} & Ma_{zy} & S_{az} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

式(1)中， $\tilde{A}_x$ 、 $\tilde{A}_y$ 、 $\tilde{A}_z$  表示为加速度计测量信息； $a_{x0}$ 、 $a_{y0}$ 、 $a_{z0}$  为加速度计的零偏； $S_{ax}$ 、 $S_{ay}$ 、 $S_{az}$  为加速度计标度因数； $Ma_{xy}$ 、 $Ma_{xz}$ 、 $Ma_{yx}$ 、 $Ma_{yz}$ 、 $Ma_{zx}$ 、 $Ma_{zy}$  为加速度计轴间非正交安装误差。

### 1.2 陀螺数据模型误差数学模型

以实际角速率为输入，MEMS 陀螺仪的输出测量信息为输出，在考虑安装误差、标度因数误差、零偏误差的情况下，其误差方程为：

$$\begin{bmatrix} \widetilde{G}_x \\ \widetilde{G}_y \\ \widetilde{G}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{x0} \\ g_{y0} \\ g_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{gx} & Mg_{xy} & Mg_{xz} \\ Mg_{yx} & S_{gy} & Mg_{yz} \\ Mg_{zx} & Mg_{zy} & S_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

式(2)中,  $\widetilde{G}_x$ 、 $\widetilde{G}_y$ 、 $\widetilde{G}_z$  表示为陀螺输出测量信息;  $g_{x0}$ 、 $g_{y0}$ 、 $g_{z0}$  为陀螺的零偏;  $S_{gx}$ 、 $S_{gy}$ 、 $S_{gz}$  为陀螺标度因数;  $Mg_{xy}$ 、 $Mg_{xz}$ 、 $Mg_{yx}$ 、 $Mg_{yz}$ 、 $Mg_{zx}$ 、 $Mg_{zy}$  为陀螺轴间非正交安装误差。

### 2 试验设计

#### 2.1 六位位置法的加速度计标定

参考 GJB1037-90 《单轴摆式伺服线加速度计实验方法》将 MEMS imu 通过在工装夹具安装在位置转台上, 标定轴与转台轴平行。通过控制状态模拟静止位置, 采集加速度计输出。

基于六位置法, 设置采样间隔为 2ms, 共计采集样本 50000 组数据。分别求得三个加速度计在该位置状态下, 加速度计输出的平均值, 作为该加速度在此位置下测试结果。

#### 2.2 速率匹配法的陀螺标定

将 MEMS imu 通过在工装夹具安装在速率转台上, 标定轴与转台轴平行。通过控制转台转动, 得到陀螺输出值。由于应用在低转速环境下, 且转速低转台精度更高, 所以此次试验中转台速率值按表 2 所示选取。原理上 1 组敏感轴正反转即可完成标定, 本次采取正负 30° 内步进 5° 进行测试。

设置采样间隔为 2ms, 共计采集样本 50000 组数据。分别求得三个陀螺仪在转台输入的角速率状态下, 陀螺仪输出的平均值, 作为该陀螺仪这个输入角速率下的输出值。

### 3 试验过程

#### 3.1 试验设备

实验设备为一款高精度速率转台, 其位置精度俯仰、滚转、偏航方向均为 ±3°; 速率精度 ≤ 5 × 10<sup>-3</sup> °/s, 系统级标定对转台要求不大, 此性能可以满足试验要求。转台实物如图 2 所示:



图 2 速率转台  
Fig.2 Rate turntable

在完成产品与转台的电气连接后, 经系统上电稳定, 待转台初始化完成后既可以开始测试。

#### 3.2 测试上位机

经软件集成化操作后, 通过上位机控制转台, 标定测试软件界面如图 3 所示:

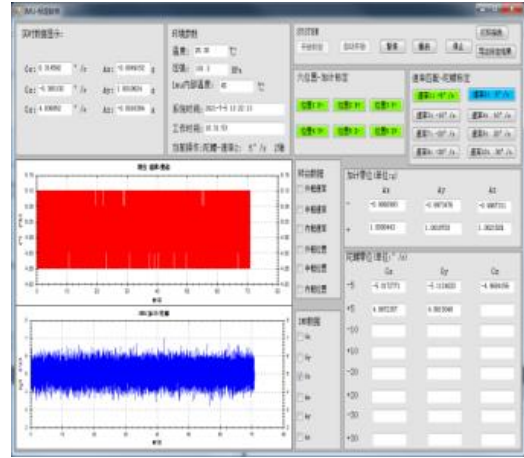


图 3 上位机软件界面

Fig.3 Upeper computer interface

自动化测试过程中, 按键变为绿色表示该试验已完成, 蓝色表示该试验正在进行中。当该部分试验完成后, 系统将记录平均数填入界面右下角表格中。

### 4 数据解算

#### 4.1 加计标定解算

将六位置标定结果带入上述方程组, 带入公式 1 解得:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{A}_x \\ \widetilde{A}_y \\ \widetilde{A}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.000512700 \\ 0.001669205 \\ 0.002843476 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.999671855 & -0.00290119 & 0.02003517 \\ 0.00216529 & 0.999608999 & 0.00487857 \\ -0.01971228 & -0.004892538 & 0.999442030 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}$$

#### 4.2 陀螺标定解算

以转动 X 轴角速率为自变量, X、Y 和 Z 方向的陀螺输出的值为结果。通过最小二乘法进行一次项拟合可以得到三条直线方程。

同理, 解算 Y 轴、Z 轴数据, 综合三轴可以求得原陀螺模型参数, 得到方程:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{G}_x \\ \widetilde{G}_y \\ \widetilde{G}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0213950529 \\ -0.1082361364 \\ 0.0351682762 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.0008271812 & 0.0209058816 & -0.0022536240 \\ -0.0207328997 & 1.0012800976 & -0.0046644092 \\ 0.0028068427 & 0.0050185469 & 1.0020832057 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}$$

### 5 结果分析

将获得的参数代入方程, 分别对试验中六次标定试验中的加速度计零位数据进行补偿, 标定前后曲线如图 4、图 5 所示。通过统计对比均值和方差, 数据如表 4 所示。发现标定补偿中

误差得到有效的抑制，精度显著提高。

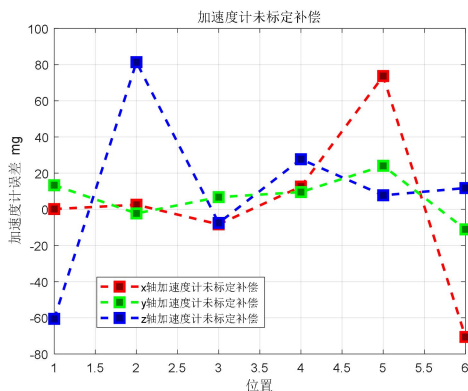


图4 加速度计标定前

Fig.4 Accelerometer calibration before

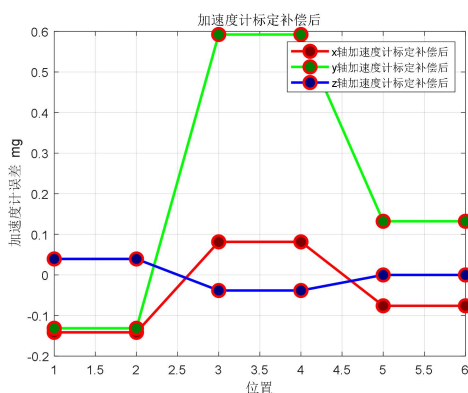


图5 加速度计补偿后

Fig.5 After accelerometer compensate

将陀螺仪测试数据代入后算得陀螺仪标定前后精度误差如表5所示，对陀螺仪的标定中很大意义上的补偿了标度因数及零偏，可以看到陀螺仪精度提升了1~2个数量级，效果显著。

陀螺仪标定前后输出角速率对比如图6、图7所示：

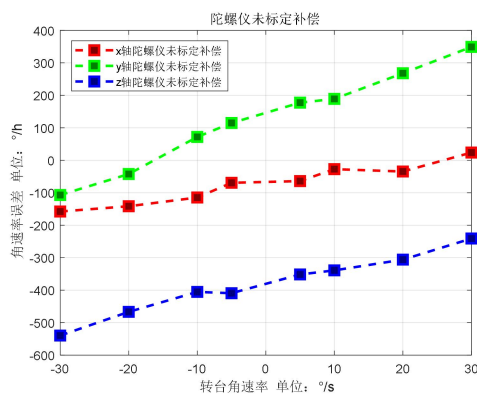


图6 陀螺仪标定补偿前

Fig.6 gyroscope calibration before

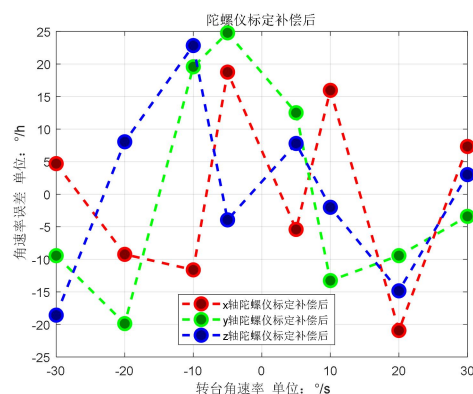


图7 陀螺仪标定补偿后

Fig.7 After gyroscope calibration

## 6 结论

本文针对标定方法展开研究，通过建立误差模型，设计了标定试验，通过集成上位机及试验设计大幅提高标定速度，较传统分立式标定方法提速约300%。借助最小二乘法推导出基于误差模型的参数方程组。并将解算结果与试验数据进行对比，标定后的输出值较未标定精度提升了1~2个数量级，验证了本文方法实用可行。

## 参考文献：

- [1] 刘危.基于 MEMS 的低成本 MIMU 的应用研究[D].国防科学技术大学,2004.
- [2] 杨金显,袁赣南,徐良臣.微机械陀螺测试与标定技术研究[J].传感技术学报,2006(05):2264-2267.
- [3] 鲜勇,张毅.制导工具误差对导弹射击精度的影响分析[J].飞行力学,1999(02):84-88.
- [4] 肖龙旭,魏诗卉,孙文胜.惯测组合快速高精度标定方法研究[J].宇航学报,2008(01):172-177.
- [5] 兰晓明.基于微惯性导航系统的 MEMS 陀螺误差补偿方法研究[D].哈尔滨工程大学,2015.
- [6] 宋海滨,杨平,徐立波 MEMS 传感器误差补偿方法研究[J].传感器学报,2013(12):1719-1723.
- [7] 吉训生,王寿荣.MEMS 陀螺仪随机漂移误差研究[J].宇航学报,2006(04):640-642.
- [8] 彭文辉,姚奕,潘爽.一种快速辨识 MEMS 陀螺仪确定性误差项的方法[J].新型工业化,2014,4(02):51-56.
- [9] 吴纾婕.MIMU 器件参数辨识及误差补偿技术研究[D].北京理工大学,2015.