

# 基于 MEMS 的海洋漂流浮标运动姿态测量系统设计

余博嵩<sup>1</sup> 何 姣<sup>1</sup> 曹晓钟<sup>2</sup>

(1.江西省大气探测技术中心 南昌 330096; 2.中国气象局气象探测中心 北京 100081)

**摘要:** 针对海洋漂流浮标运行时运动轨迹姿态多变影响传感器观测要素可靠性的特点,设计了基于三轴 MEMS 陀螺仪、加速度计、磁阻传感器的漂流浮标姿态测量系统。介绍了系统硬件组成结构及软件算法流程,采用四元数方法和 PI 调节算法进行姿态解算以及数据融合,并采用椭圆拟合和阈值滤波方法修正补偿系统误差。实验测试表明,系统姿态测量效果良好,静态误差小、动态抗干扰性能较好,满足海洋漂流浮标姿态测量基本需求。

**关键词:** 漂流浮标; MEMS; 姿态解算; 数据融合; 误差补偿

**中图分类号:** TP212.6; TP29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

## Measurement system of ocean drifting buoy motion attitude based on MEMS

Yu Bosong<sup>1</sup> He Jiao<sup>1</sup> Cao Xiaozhong<sup>2</sup>

(1 Jiangxi Atmospheric Observation Technology Center, Nanchang 330096, China;

2 Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to the characteristics of the variable motion trajectory and postures during the floating buoy operation that affect the reliability of the sensor, the floating buoy attitude measurement system based on three-axis MEMS gyroscope, accelerometer and magnetoresistive sensor is designed. This paper presents the hardware structure and software algorithm flow of the design system. It use, quaternary method and PI regulation algorithm to perform attitude algorithm and data fusion. The systematic error is corrected by ellipsoid fitting and threshold filtering for error compensation method. Experimental results show that the proposed design is more effective in the measurement of motion attitude which has small static error and good dynamic anti-interference performance to meet the basic needs of attitude measurement of ocean drift buoys.

**Keywords:** drift buoy; MEMS; attitude algorithm; data fusion; error compensation

## 0 引言

海洋观测是认识海洋、研究海洋、开发利用海洋的基础,海洋漂流浮标作为远海观测的重要工具和手段之一,具有体积小、重量轻、便于投放、不易遭破坏、不受人为限制等特点,可在海洋中连续工作几个月至1年。然而,浮标体长期工作在海面上,易受外部环境影响,运动轨迹和姿态是多变的,可能发生旋转、上下波动、摇摆、随风漂流等运动。当浮标体姿态剧烈变化时,将影响传感器的海面要素观测,导致数据准确度和可靠性降低。所以,掌握浮标运动姿态信息作为海面要素观测数据的质控、校准、补偿依据具有十分重要的意义。

测姿技术在许多领域已经有较为成熟的应用,但在浮

标测姿方面的应用尚不多见。有论文提出针对基于锚系浮标固定缆绳静力分析的姿态测量方法,也有采用电子罗盘或加速度传感器应用于小倾角变化的潜标姿态测量技术的研究。然而,漂流浮标姿态测量方面还未有明显进展<sup>[1-2]</sup>。

随着微机电(micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术的发展,基于 MEMS 器件搭建低成本、低功耗、体积小的姿态测量系统已成为测姿领域的发展趋势<sup>[3-5]</sup>。由于 MEMS 传感器自身测量存在一定误差和漂移,利用多传感器数据融合策略可提高测姿系统的精度和稳定性。

基于以上问题并结合漂流浮标运行需求,本文设计了一种采用三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁阻传感器等

MEMS 器件组合构成的海洋漂流浮标运动姿态测量系统。

### 1 姿态测量原理

#### 1.1 姿态的定义

通常将陀螺仪、加速度计、磁力计定义到一个坐标系,即载体坐标系  $ox_b y_b z_b$ , 与之对应的地理坐标系,即导航坐标系  $ox_n y_n z_n$ 。载体姿态为载体坐标系和导航坐标系的角位置关系,可由载体坐标轴三个有序旋转复合表示(如图 1 所示),本文采用 Z-X-Y 旋转顺序的“航空次序欧拉角(aerospace sequence euler angles)”。旋转正方向服从右手定则,  $\phi$ 、 $\theta$  和  $\gamma$  分别为航向角、俯仰角和横滚角<sup>[6-8]</sup>。

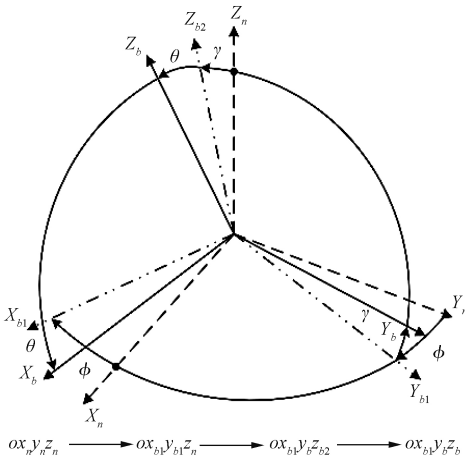


图 1 姿态角定义

#### 1.2 基于四元数的姿态解算方法

常见的姿态解算方法有:欧拉角法、方向余弦法、四元数法等。其中四元数法计算量较小,实际中多被采用。本系统中,载体坐标系相对于地理坐标系的转动可以用四元数  $Q$  来表示:

$$Q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k = \cos \left[ \frac{\theta}{2} \right] + n \cdot \sin \left[ \frac{\theta}{2} \right] \quad (1)$$

式中:  $n$  表示等效转轴方向,利用空间向量  $n$  和角度标量  $\theta$  构造一个四元数表示载体坐标方位,即姿态四元数“轴角”表达式<sup>[5]</sup>。然而,“轴角”表达式中的  $n$  和  $\theta$  参考基不同,无法进行归一化处理,不利于后期算法运算,于是化简为姿态四元数最简形式,  $i$ 、 $j$ 、 $k$  为 3 维单位虚坐标。对  $Q$  求导可得姿态四元数微分方程<sup>[9]</sup>:

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} Q \otimes \omega_{nb}^b \quad (2)$$

式中:  $\omega_{nb}^b = 0 + \omega_{bx} i + \omega_{by} j + \omega_{bz} k$ , 为载体坐标系相对于地理坐标系的角速度,在载体坐标系中分量的四元数,利用一阶龙格库塔方法更新微分方程得到姿态四元数随时间的递推关系并写为矩阵形式有:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_t + \frac{\Delta t}{2} \begin{bmatrix} -\omega_{bx} q_1 - \omega_{by} q_2 - \omega_{bz} q_3 \\ +\omega_{bx} q_1 - \omega_{by} q_2 + \omega_{bz} q_3 \\ +\omega_{bx} q_1 + \omega_{by} q_2 - \omega_{bz} q_3 \\ -\omega_{bx} q_1 + \omega_{by} q_2 + \omega_{bz} q_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\Delta t$  为取样周期。更新的姿态四元数可通过式(4)~(6)转化为姿态角 Roll( $\gamma$ )、Pitch( $\theta$ )、Yaw( $\phi$ ):

$$\gamma = \arctan \frac{2(q_2 q_3 + q_0 q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \quad (4)$$

$$\theta = -\arcsin 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \quad (5)$$

$$\phi = \arctan \frac{2(q_1 q_2 + q_0 q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \quad (6)$$

通过重力加速度矢量和磁北矢量理论与实际测量值因姿态变化产生的差异,建立载体坐标系和导航坐标系之间的关系式,联合得出初始姿态角并可转化为初始姿态四元数,将三轴陀螺仪的输出代入式(3),进行递推累加便得到当前载体的姿态四元数,通过式(4)~(6)即可转化为姿态欧拉角显式表达。

#### 1.3 漂流浮标姿态传感器数据融合

在初始姿态确定的情况下,速率陀螺能够实时测量载体的角速率,通过积分变换完成载体姿态解算。然而,由于陀螺仪自身特点导致其误差会随时间累计,测量值会发生漂移,只能在短时间内保证精度。因此,考虑到算法简洁易于浮标姿态嵌入式系统实现的需求,为抑制陀螺的漂移,采用基于 PI 控制的互补滤波方法,结合加速度计、磁力传感器输出进行数据融合,获取可靠的姿态角信息,如图 2 所示。

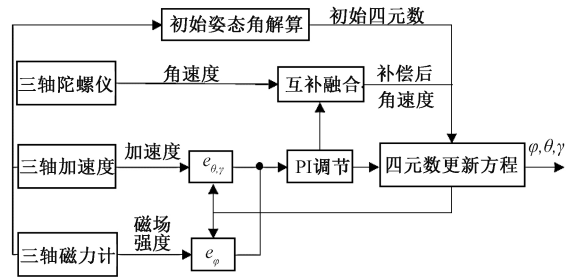


图 2 姿态传感器数据融合

理想状态下,载体坐标系中的重力加速度和磁北磁场强度测量值,经陀螺仪解算所得姿态角反演至地理坐标系后,应与理论重力矢量和磁北矢量重合。然而,实际中存在偏差,其主要来源于陀螺仪漂移产生的积分累计误差。因此,在误差角较小的情况下,可以通过两向量叉积的模值近似估计偏差角度,构造误差函数分别为  $e_{\theta, \gamma}$ 、 $e_{\phi}$ 。

在自动控制系统中,常用 PI 调节来减小系统误差。将给定值和实际输出值之间的偏差作为输入,偏差的比例和积分环节通过线性组合构成修正量,对被控对象进行修正<sup>[10-13]</sup>。PI 调节模型为:

$$u_0(k) = K_p e(k) + K_i t_s \sum_{j=0}^k e(j) \quad (7)$$

式中:  $t_s$  为采样间隔时间;  $e(k)$  为  $k$  时刻姿态角误差, 即  $e_{\theta_x}$  与  $e_{\theta_y}$  的和;  $u_0(k)$  为  $k$  时刻 PI 调节器的输出。利用 PI 调节对角速度进行修正补偿代入四元数更新方程求得姿态角。通过测试调节  $K_p$  和  $K_i$  2 个参数就可以获得较好的误差估计量,  $K_p$ 、 $K_i$  的取值分别为 0.5 和 0.03。

## 2 测姿系统设计

### 2.1 硬件结构设计

本文设计的姿态测量系统主要应用于海洋漂流浮标的姿态测量与识别, 漂流浮标属于一次性投放的海洋探测设备, 且长期离线不受人为因素控制, 因此对其姿态测量系统的体积、重量、功耗等性能都具有较高要求。为保证漂流浮标姿态测量稳定准确, 主控单元选择低功耗、主频较高、体积小且片上资源较多的微处理器 MSP430F5342, 结合外围电路, 构成测姿系统的硬件电路结构, 如图 3 所示。

该系统的姿态测量模块由三轴陀螺仪、加速度计、磁阻传感器组成, MCU 通过 SPI 总线方式读取传感器数据, 经过处理解算得到姿态角, 并提供 Flash 可存储姿态信息, 通过 UART 串口输出姿态数据, 方便上位机数据获取和系统调试。

三轴陀螺仪和加速度计选用应美盛公司的 MPU6000

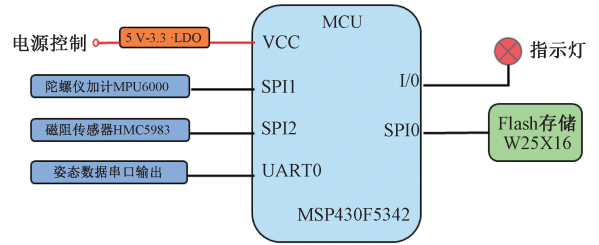


图 3 测姿系统硬件结构

芯片, 陀螺仪和加速度计分别拥有  $\pm 250$ 、 $\pm 500$ 、 $\pm 1\ 000$ 、 $\pm 2\ 000^\circ/\text{s}$  和  $\pm 2$ 、 $\pm 4$ 、 $\pm 8\ \text{g}$  多档可变测量范围, 具有较高的分辨率和灵敏度, 输出端集成低通滤波电路, 功耗较低, 完全满足海面上浮标姿态测量需求。三轴磁阻传感器选择霍尼韦尔公司的 HMC5983 芯片, 量程为  $\pm 8\ \text{gauss}$ , 最高分辨率  $0.73\ \text{mgauss}$ , 最高采样率可达  $200\ \text{Hz}$ 。

### 2.2 系统程序设计

测姿系统软件设计采用循环查询的控制方式, 遵循低功耗原则, 以“事件驱动”的触发模式, 即把各种操作处理定义为事件, 在需要执行时设置相关事件标志位。在程序主循环查询中, 查询需要处理的标志位存在, 如果有, 执行相关操作, 执行完返回主循环查询处理, 未有事件发生则进入低功耗模式。主程序流程如图 4 所示。

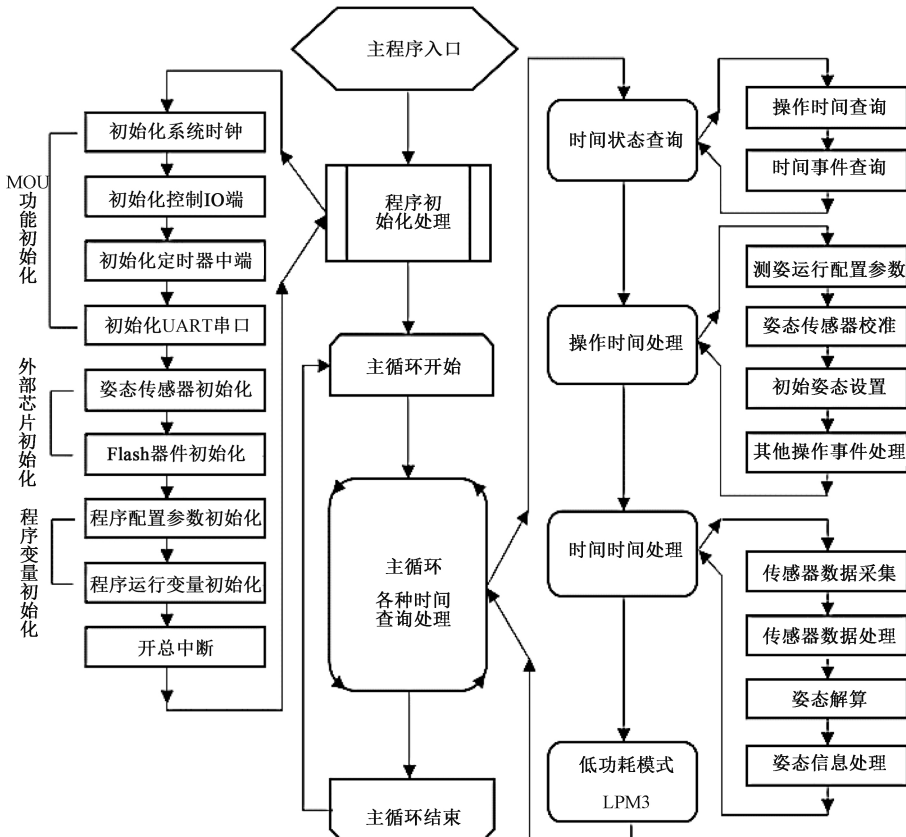


图 4 系统主程序流程

程序使用 MCU 的内部定时器,配置一个 1 ms 的主定时器。以该 1 ms 的定时器作为程序运行的时序控制时钟。通过 1 ms 的中断计时处理,分别产生 3、10、50 ms 时间事件。通过对时间事件的处理,控制产生相关的对数据采样处理,数据融合解算、数据存储及发送处理等时序控制处理操作。姿态解算速率为 100 Hz,姿态信息串口输出速率为 20 Hz。

### 3 系统误差与修正方法

#### 3.1 椭球拟合校准补偿

漂流浮标测姿系统在浮标投放使用前,在缺少外部辅助设备的情况下,现场很难有条件进行精确校准补偿,进而只能使用一些简单的线性标定补偿手段。这些方法应用于加速度传感器零偏标定,寻找 2 个完全对称位置例如利用正六面体方法得到 3 个轴向上重力测量的 3 组极值点,对于浮标体来说可以实现,标定补偿效果较好。但对于自身受外界磁场干扰的磁阻传感器来说,直接寻求磁南北方向却很难做到。针对以上问题,本文提出了一种适用于浮标测姿系统,不依赖外部辅助设备提供方向基准和水平基准,可操作且快速简单的传感器现场校准补偿方法。

理想无磁场干扰状态下,磁阻传感器 3 轴所测磁强在空间呈球面分布。磁场干扰会使磁阻传感器测出的地磁场强度在 3 个轴向上发生不同程度的偏移形变,影响磁航角的计算<sup>[14-15]</sup>。

令椭球曲面的一般方程为:

$$(x - x_0)^2 + E^2 (y - y_0)^2 + F^2 (z - z_0)^2 = R^2 \quad (8)$$

采用闭合形式解的方法,通过公式整理,可直接采用最小二乘法解出唯一的椭球参数式进一步整理可得:

$$x^2 = -E^2 y^2 - F^2 z^2 + 2xx_0 + 2E^2 yy_0 + 2F^2 zz_0 + R^2 - E^2 y_0^2 - F^2 z_0^2 - x_0^2 \quad (9)$$

将多个测得值  $(x_i, y_i, z_i)$  代入式(9),联立线性方程式,可写为矩阵形式:

$$Dw = c \quad (10)$$

其中,

$$w = [E^2 \quad F^2 \quad x_0 \quad E^2 y_0 \quad F^2 z_0 \quad R^2 - E^2 y_0^2 - F^2 z_0^2 - x_0^2]^T$$

$$c = [x_1^2 \quad x_2^2 \quad x_3^2 \quad \cdots \quad x_n^2]^T \quad (11)$$

$$D = \begin{bmatrix} -y_1^2 & -z_1^2 & 2x_1 & 2y_1 & 2z_1 & 1 \\ -y_2^2 & -z_2^2 & 2x_2 & 2y_2 & 2z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_n^2 & -z_n^2 & 2x_n & 2y_n & 2z_n & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(10)有最小二乘解:

$$w = (D^T D)^{-1} D^T c \quad (13)$$

至少选取 6 组不同姿态方位下磁力计测量值  $\hat{m}_i =$

$[\hat{m}_{xi} \quad \hat{m}_{yi} \quad \hat{m}_{zi}]$  替代  $(x_i, y_i, z_i)$  代入式(13),可得  $w$ 。

进一步算得椭球参数  $(x_0, y_0, z_0, E, F, R)$ 。于是,椭球修正并进行规范化处理后的磁阻测量值为:

$$\frac{m}{\|m\|} = \begin{bmatrix} \hat{m}_x - x_0 \\ E(\hat{m}_y - y_0)/R \\ F(\hat{m}_z - z_0)/R \end{bmatrix} \quad (14)$$

加速度计校准过程与磁阻传感器相似,本文以磁阻传感器为例对椭球拟合校准的步骤进行说明。首先,为避免因样本测量点的几何分布过于集中导致拟合得到的椭球方程误差较大,磁阻传感器在进行定点转动时,使测量的数值尽可能均匀的分布在椭球面的各个区域。当系统估测姿态角度达到某一区域范围时,进行磁感强度采集,同一区域不进行重复采集,如此覆盖 18 个区域后,将 18 组测量值输入拟合方程进行计算,得到拟合后的椭球参数,并根据式(14)得到补偿并规范化后的磁强测量值。如图 5 所示,(a)为椭球拟合前磁强测量值分布,图中  $x、y、z$  表示磁阻传感器 3 个轴向,刻度为磁阻传感器分辨率 0.73 mguass;(b)为椭球拟合且规范化后磁强测量值。经过椭球校准磁阻测量值存在明显改善,分布趋于球面。

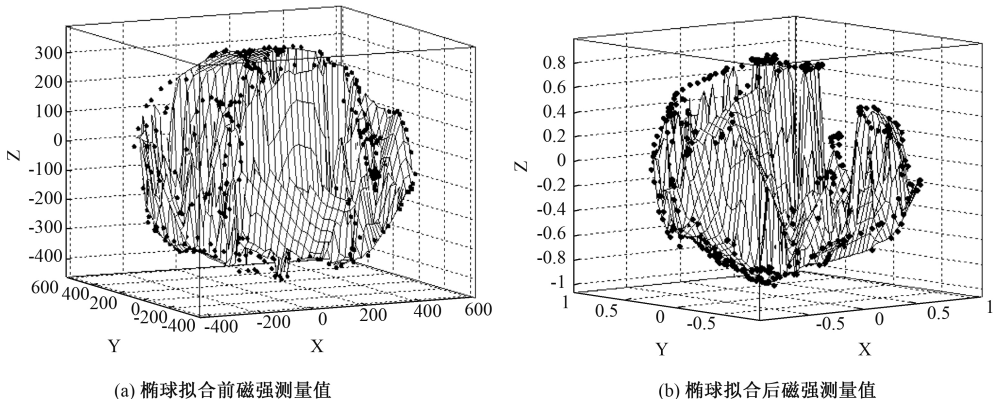


图 5 磁阻传感器校准前后对比



### 3.2 阈值滤波补偿

加速度计仅测量轴向上的线加速度值,在姿态不定的情况下,无法区分重力和外力加速度。因此,需要加入一些约束条件来筛选出外力加速影响较小的加速度计测量值参与姿态计算。于是,按式(15)设立条件:

$$\left| \sqrt{a_{tx}^2 + a_{ty}^2 + a_{tz}^2} - g \right| < \epsilon \quad (15)$$

式中:  $(a_{tx}, a_{ty}, a_{tz})$  为  $t$  时刻,加速度计在 3 个轴向上的测量值;  $g$  为重力加速度;  $\epsilon$  为大于 0 的常数。阈值  $\epsilon$  设定的越小,筛选出的加速度测量值越接近重力加速度,受外力加速度影响越小。本系统中  $\epsilon$  设定为 0.08。

## 4 实验测试和对比分析

### 4.1 测试平台

硬件测试平台选择可随意转动且各方位转动角较大手动转台。将设计完成的姿态测量模块与转台同轴安装。通过转动转台改变模块姿态,利用串口输出的姿态数据发送至上位机。软件测试平台包括姿态信息上位机显示以及上位机接收姿态数据的后期处理分析。姿态上位机采用 C# 在 VS 软件平台环境下编写显示界面,完成数据包接收和姿态角信息的显示,并利用 SharpGL 插件构建姿态 3D 模型,模拟姿态实时变化。按实验需求接收存储姿态

信息,将数据导入 Matlab 中进行进一步处理分析。系统的硬件测试平台和显式界面如图 6 所示。

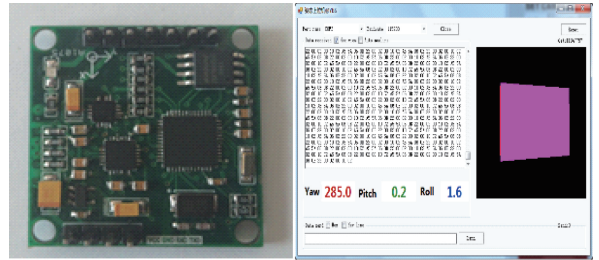


图 6 系统硬件电路和上位机界面

### 4.2 静态测试

将本文设计的姿态测量模块与瑞芬公司生产的 DCM260B 高精度三维电子罗盘同轴安装。三维电子罗盘虽然动态姿态变化响应速度较慢,但是在静止状态下,姿态角测量精度较高(航向精度  $0.8^\circ$ , 横滚和俯仰角精度  $0.2^\circ$ ),可作为本文中姿态静态测试的参考。安装好后使转台倾斜一定角度,顺时针旋转一周,根据罗盘航向角值为基准,每隔  $10^\circ$  静止并取一组姿测量值,分析加速度值和磁阻测量值椭球拟合前后姿态实测值与罗盘参考值的偏差,俯仰角、横滚角以及航向角的测量偏差,如图 7 所示。

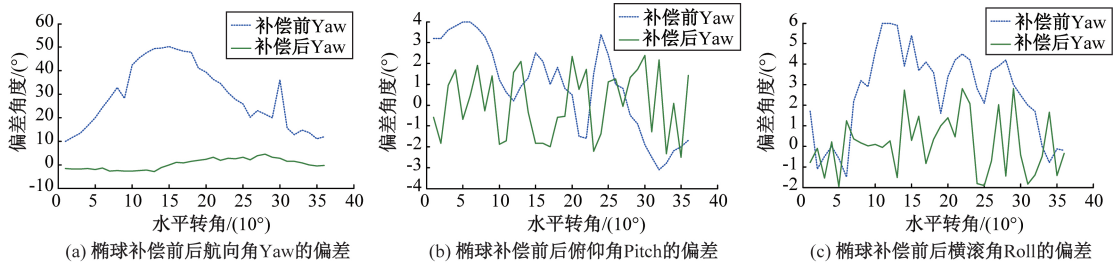


图 7 静态误差对比测试

经过椭球补偿后,航向角测量偏差有明显的减小,横滚角和俯仰角方面也有小幅度改善,偏差范围都在  $5^\circ$  以内。俯仰和横滚角的静态测量精度主要受加速度测量值影响,一般情况下,加速度传感器自身测量误差相比于外界磁场干扰对磁阻传感器地磁测量造成的误差要小的多。因此,磁阻传感器的补偿校准对于整个测姿系统测量精度的提升有着十分重要的意义。

### 4.3 动态测试

将本文设计的测姿模块放置于水平桌面上并作快速滑动。理想情况下,横滚角和俯仰角的值均应保持不变且接近于  $0^\circ$ 。加速度值未经阈值滤波处理直接融入姿态解算所得的横滚和俯仰角误差最大,分别达到了  $9.6^\circ$  和  $6.1^\circ$ ,如图 8 所示。加速度值经过阈值滤波处理后融入姿态解算得到的误差则被缩小到  $3.3^\circ$  和  $2.7^\circ$ 。所以,加速度计的阈值滤波对外力加速度干扰有较好的滤除作用。

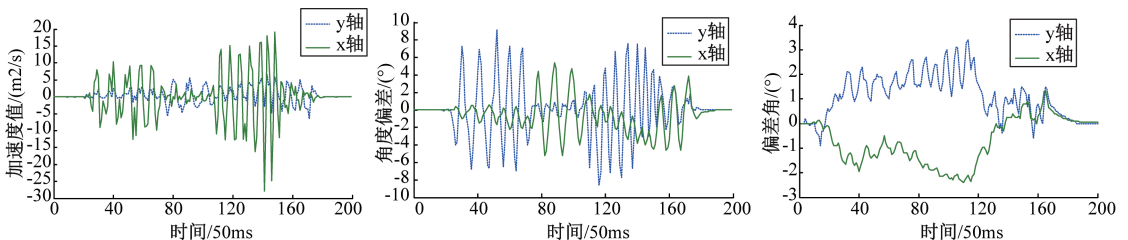


图 8 外力加速度干扰测试

## 5 结 论

本文设计了一种基于 MEMS 三轴陀螺仪、加速度计、磁阻传感器的浮标姿态测量系统,分析了系统误差的主要来源和补偿方法,并验证了阈值滤波、椭球拟合等误差补偿方法的可行性。对系统进行动态和静态测试,测试结果表明,本文设计的测姿系统姿态测量精度经过误差补偿后可达到漂流浮标测量姿态角误差 $\pm 5^\circ$ 的要求,基本满足浮标运行设计需求。

## 参考文献

- [1] 侯广利,张颖,孙继昌,等.一种潜标的水下姿态变化规律分析[J].海洋技术,2010,29(3):38-43.
- [2] 陈忠梅,龚德俊,李思忍,等.一种新型海洋环境监测系统的静力分析和姿态计算[J].海洋科学,2009,33(2):50-54.
- [3] 郑威,张殿伦,孙大军.姿态传感器在坐底式 ADCP 波阵列中的应用[J].传感器与微系统,2011,30(6):119-122,125.
- [4] 蔡春龙,刘翼,刘一薇. MEMS 仪表惯性技术组合导航系统发展现状与趋势[J].中国惯性技术学报,2009,17(5):562-567.
- [5] 刘娜娜.基于 MEMS 的小型姿态检测系统设计[J].中国科技信息,2013(10):174-175.
- [6] 刘国海,李沁雪,施维,等.动态卡尔曼滤波在导航实验状态估计中的应用[J].仪器仪表学报,2009,30(2):396-400.
- [7] 李磊,鲍其莲.基于 MARG 的两种实时姿态测量算法的分析与比较[J].电子测量技术,2009,32(2):79-82.
- [8] 夏琳琳,赵琳,刘繁明,等.基于对偶四元数的航姿系统姿态更新算法[J].系统仿真学报,2008,20(2):276-280.
- [9] SEBASTIAN M, ANDREW H, Ravi V. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm [C]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2011, 1: 1-7.
- [10] 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):1963-1970.
- [11] 朱建良,王兴全,吴盘龙,等.基于椭球曲面拟合的三维磁罗盘误差补偿算法[J].中国惯性技术学报,2012,20(5):562-566.
- [12] 吴建军,钱峰.多信息融合的定向测姿方法的研究[J].电子测量技术,2012,35(2):41-45,68.
- [13] 薛亮,李天志,李晓莹,等.基于 MEMS 传感器的微型姿态确定系统研究[J].传感技术学报,2008,21(3):457-460.
- [14] 傅建国,王孝通,金良安,等.一种基于地球重力场和磁场的姿态估计新算法[J].电子学报,2005,33(3):567-570.
- [15] 朱文杰,王广龙,高凤岐,等.基于 MIMU 和磁强计的在线实时定姿方法[J].传感技术学报,2013,26(4):536-540.

## 作者简介

余博嵩,工学硕士,助理工程师,主要研究方向为气象探测技术及应用等。

E-mail:1207058794@qq.com