

doi: 10.7690/bgzd.2023.04.010

## 磁力计/卫星组合测量标定和滤波算法

李继广<sup>1</sup>, 董彦非<sup>1</sup>, 郭建明<sup>2</sup>, 甘星星<sup>1</sup>, 王科<sup>1</sup>, 李瑶<sup>1</sup>

(1. 西安航空学院飞行器学院, 西安 710079; 2. 天津华兴通盛航空科技有限公司, 天津 300308)

**摘要:** 针对磁力计/卫星定位系统组合测量载体姿态角的现实问题, 根据影响测量精度不同因素的特性, 研究提高测量精度的方法。采用最小二阶乘算法对磁力计进行标定消除系统误差; 采用离散卡尔曼滤波算法消除测量误差带来的影响。试验结果表明: 对于标定之后的磁力计, 采用本文中所述的滤波算法使得测量绝对平均误差从 2.366 1% 减小到 0.592 6%, 证明该方法是有效的。

**关键词:** 磁力计; 最小二阶乘算法; 卡尔曼滤波; “当前”统计模型

**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

## Calibration and Filter Algorithm for Magnetometer/Satellite Integrated Measurement

Li Jiguang<sup>1</sup>, Dong Yanfei<sup>1</sup>, Guo Jianming<sup>2</sup>, Gan Xingxing<sup>1</sup>, Wang Ke<sup>1</sup>, Li Yao<sup>1</sup>

(1. School of Aircraft, Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an 710079, China;

2. Tianjin Huaxing Tongsheng Aviation Technology Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Aiming at the practical problem of magnetometer/satellite positioning system integrated measurement of vehicle attitude angle, this paper studies the method to improve the measurement accuracy according to the characteristics of different factors affecting the measurement accuracy. In this paper, the least square algorithm is used to calibrate the magnetometer to eliminate the system error, and the discrete Kalman filter algorithm is used to eliminate the influence of measurement error. The experimental results show that for the calibrated magnetometer, based on filter algorithm, the absolute mean error of the measurement is reduced from 2.366 1% to 0.592 6%, which proves that the method is effective.

**Keywords:** magnetometer; least square factorial algorithm; Kalman filter; “current” statistical model

## 0 引言

近年来, 微机电系统(MEMS)的性能、可靠性有了极大的提高, 制造和使用的成本也在大幅度降低<sup>[1-2]</sup>; 因此, 体积小、功耗低、算法简单的各类 MEMS 传感器在航海<sup>[1]</sup>、航空<sup>[3]</sup>、制导榴弹<sup>[4]</sup>以及机器人<sup>[5]</sup>等领域被广泛采用。

地磁传感器作为 MEMS 器件中的重要门类, 结合卫星定位系统进行组合测量, 具有成本低、抗过载能力强、适应性好、解算容易等优点。基于这些优点, 磁力计/卫星组合测量方法成为了无人机、迫弹、机器人、无人艇等多种装备姿态角的测量方式<sup>[6-8]</sup>。

虽然地磁传感器/卫星定位系统组合测量方式具有诸多优点, 但也存在累积误差、零点漂移、易受环境因素影响等问题, 从而导致该方案具有姿态角解算精度低、稳定性差等问题<sup>[9-10]</sup>。为克服这些

问题, 对传感器进行标定和滤波成为提高测量结果的有效方式<sup>[11-12]</sup>。

针对磁力计/卫星定位系统组合测量载体姿态角存在的问题, 笔者根据影响测量精度不同因素的特性, 研究了提高测量精度的方法。采用最小二阶乘算法对磁力计进行标定从而消除系统误差; 采用离散卡尔曼滤波算法消除测量误差带来的影响。

## 1 测量原理和误差分析

## 1.1 磁力计和卫星测量姿态角信息原理

应用磁力计和卫星数据测量载体姿态角时, 磁力计和载体捷联安装, 磁力计敏感轴方向与载体坐标系方向相同。在使用过程中, 磁力计实时测量地磁各个轴向在载体轴向分量数据。由欧拉定理可知, 磁力计测量数据(载体轴向磁场强度)、地磁数据(导航坐标系下磁场强度)和载体姿态角之间存在如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} h_{bx} \\ h_{by} \\ h_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ -\cos\gamma\sin\psi + \sin\gamma\sin\theta\cos\psi & \cos\gamma\cos\psi + \sin\gamma\sin\theta\sin\psi & \sin\gamma\cos\theta \\ \sin\gamma\sin\psi + \cos\gamma\sin\theta\cos\psi & -\sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\sin\theta\sin\psi & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{nx} \\ h_{ny} \\ h_{nz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-01-30

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2021JQ-858); 国防科技重点实验室基金(6142101200108)

作者简介: 李继广(1987—), 男, 河南人, 博士, 讲师, 从事无人机控制方法研究。E-mail: 912646963@qq.com。

式中： $h_{nx}$ 、 $h_{ny}$ 、 $h_{nz}$  为导航坐标系下的地磁分量； $h_{bx}$ 、 $h_{by}$ 、 $h_{bz}$  为地磁矢量在载体坐标系下的投影分量； $\psi$ 、 $\theta$ 、 $\gamma$  分别为导航坐标系下的偏航角、俯仰角、滚转角。

由式(1)可以解算出无数组姿态角可行解，但不能满足工程实践的测量需求，要完成姿态角的测量还需要卫星测量数据的融合。

卫星测量设备可以实时测量载体实时的经度、纬度、高度及速度信息。在速度与导航坐标系中，利用测量设备提供的速度信息即可得到弹道倾角与弹道偏角：

$$\theta_v = \arctan(v_z / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}); \quad \psi_v = \arctan(v_y / v_x)。 \quad (2)$$

式中  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  分别为北向速度、东向速度和地向速度。

对于低旋应用场景下，在偏航角、俯仰角已知时，由式(1)可唯一确定滚转角的数值：

$$\gamma = \arctan\left(\frac{nh_{by} - mh_{bz}}{mh_{by} + nh_{bz}}\right)。 \quad (3)$$

式中：

$$m = -\sin\psi h_{nx} + \cos\psi h_{ny};$$

$$n = \cos\psi \sin\theta h_{nx} + \sin\psi \sin\theta h_{ny} + \cos\theta h_{nz}。$$

在高旋应用场景下，载体整个飞行过程中滚转角速率远远大于俯仰角及偏航角速率，即  $\dot{\gamma} \gg \dot{\theta}$ 、 $\dot{\gamma} \gg \dot{\psi}$ ；因此，在卫星数据更新的时间内，可假设载体仅有滚转角发生了变化。在该假设下，式(1)可简化为：

$$h_{by} = A \sin(\gamma + \alpha); \quad h_{bz} = A \cos(\gamma + \alpha)。 \quad (4)$$

式中： $A$  和  $\alpha$  定义如下：

$$A = \sqrt{A_1^2 \cos^2(\psi + \alpha_1) + A_2^2 \sin^2(\theta + \alpha_2)};$$

$$A_1 = \sqrt{h_{nx}^2 + h_{ny}^2};$$

$$A_2 = \sqrt{A_1^2 \sin^2(\psi + \alpha_1) + h_{nz}^2};$$

$$\alpha = \arctan((A_1 \cos(\psi + \alpha_1)) / (A_2 \sin(\theta + \alpha_2)));$$

$$\alpha_1 = \arctan(h_{nx} / h_{ny});$$

$$\alpha_2 = \arctan(h_{nz} / (A_1 \sin(\psi + \alpha_1)))。$$

定义导航坐标系下的地磁输出为：

$$\begin{aligned} h_{by} &= A \sin(2\pi ft + \varphi); \\ h_{bz} &= A \cos(2\pi ft + \varphi)。 \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $A$  为磁测量值和地磁强度比例系数； $f$  为测量变化频率； $t$  为磁测量时间序列； $\varphi$  为初始偏移角度。

由式(4)和式(5)可得滚转角速率为：

$$\dot{\gamma} \approx 2\pi f。 \quad (6)$$

在卫星测量器件更新速度信息之前，可以通过对式(6)进行积分从而获得滚转角信息。

## 1.2 测量误差分析

由式(3)可知，滚转角误差取决于磁力计测量得到  $h_{by}$ 、 $h_{bz}$  误差、俯仰角  $\theta$  和偏航角  $\psi$  及其增量误差  $\delta\theta$ 、 $\delta\psi$ 。对于高频测量而言，由式(4)可知，同样取决于磁力计测量得到  $h_{by}$ 、 $h_{bz}$  误差、俯仰角  $\theta$  和偏航角  $\psi$  误差，而且与俯仰角速率  $\dot{\theta}$  和偏航角速率  $\dot{\psi}$  误差相关。

在实际应用场景下，影响这些参数测量精度的因素主要包括外部或系统干扰(外部磁场源干扰、内部电路的干扰、磁化影响等)、测量误差(高频误差、噪声干扰、跳点等)、系统误差(各轴向灵敏度不同、零点漂移等)以及算法误差等(小迎角假设引起的偏差)。

对于不同的误差特性，需要采用不同的方案针对性地提高系统的精度。系统误差可以采用数据拟合进行纠正；测量误差可以采用滤波算法进行处理；对于外部干扰、系统本身的电磁、磁化干扰等外部或系统干扰可以采用补偿算法进行补偿。经过多种方式的处理，可以使得测量精度满足工程实践的需求。

笔者主要针对系统误差和测量误差，研究消除其影响的方法。

## 2 最小二阶乘算法的磁力计标定

在某一特定区域内，地球磁场是均匀的。如果磁力计 3 个磁敏感器件沿着载体轴向 3 个相互垂直的方向进行安装，在采集各个方位上足够多的数据之后，理论上这些数据的空间分布应为一球心在坐标原点的球形。但是，由于敏感器件的零点漂移、各轴向灵敏度不同等因素的影响，采集得到的原始数据球心既不在坐标原点，也不是标准的球形。为使测量数据能够和理论模型具有相同性，需要对原始数据进行标定。一般来说，该标定过程主要包括 2 部分：椭球标定和球形标定。

### 2.1 椭球模型

对于 3 个敏感轴向安装相互垂直的磁力计来说，其采集到的原始数据是大体分布在平行于体轴系 3 个轴向的一个空间椭球。椭球标定的目的就是

采用统计方法，确定和采集到的数据平均方差最小的椭球方程。笔者采用最小二阶乘方法对磁力计进行标定。

椭球的一般方程可表示为：

$$a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7x + a_8y + a_9z = 1. \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} x - c_x & y - c_y & z - c_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - c_x \\ y - c_y \\ z - c_z \end{bmatrix} = 1 + \begin{bmatrix} c_x & c_y & c_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix}. \tag{9}$$

上式可表示为：

$$[X - C]M[X - C]^T = 1 + CMC^T; \tag{10}$$

$$XMX^T - 2CMX^T + CMC^T = 1 + CMC^T. \tag{11}$$

式中： $X=[x \ y \ z]$ 为椭球上的点； $C=[c_x \ c_y \ c_z]$ 为椭球球心坐标点，根据该椭球模型，可得如下椭球参数：

球心坐标：

$$C = 0.5[a_7 \ a_8 \ a_9]M^{-1};$$

$$x \text{ 轴长度: } x_{scale} = \sqrt{SS/\lambda_1};$$

$$y \text{ 轴长度: } y_{scale} = \sqrt{SS/\lambda_2};$$

$$z \text{ 轴长度: } z_{scale} = \sqrt{SS/\lambda_3}.$$

式中  $SS = CMC^T + 1$ 。

### 2.2 基于最小二阶乘算法的椭球拟合

若磁力计采集到的  $n$  组数据，将这些数据代入椭球方程可表示为：

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & \cdots & x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & \cdots & x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 & \cdots & x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_9 \end{bmatrix}. \tag{12}$$

令：

$$H = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & \cdots & x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & \cdots & x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 & \cdots & x_n & y_n & z_n \end{bmatrix};$$

$$k = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_9]^T.$$

椭球拟合就是依据测量原始数据和该方程，确定一组方差最小的椭球参数值  $K$ 。根据最小二阶乘

将该标准方程写成如下形式：

$$1 = (x^2 \ y^2 \ z^2 \ xy \ xz \ yz \ x \ y \ z) \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_9 \end{pmatrix}. \tag{8}$$

在该椭球上分布的点，从几何的角度可以表示成如下矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - c_x \\ y - c_y \\ z - c_z \end{bmatrix} = 1 + \begin{bmatrix} c_x & c_y & c_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix}. \tag{9}$$

算法，使得测量误差最小的椭球参数为：

$$k = (H^T H)^{-1} H^T. \tag{13}$$

### 2.3 磁力计标定

由拟合得到的椭球参数，可以对磁力计测量得到的数据进行标定。

首先进行椭球坐标原点标定：

$$h_{br} = h_b - C. \tag{14}$$

通过该校正后，测量数据是以坐标原点为球心的椭球分布，这也就消除了零点误差。

同时，为消除各轴向灵敏度不同，还需要进行球形标定。在进行球形标定时，首先需要确定一基准轴。在磁力计-卫星测姿态角方案中，比较重要的是  $Y$  轴轴向，因此可以选择  $Y$  轴作为球形校正的基准，即：

$$h_b = y_{scale} * h_{br} * [x_{scale} \ y_{scale} \ z_{scale}]. \tag{15}$$

## 3 基于卡尔曼滤波算法的测量误差补偿

### 3.1 统计运动模型

卡尔曼滤波是一种处理动态系统数据测量误差的有效手段，可以有效地改善动态测量精度。为消除磁力计和卫星定位系统的测量误差，采用卡尔曼滤波算法进行解决。

在磁力计和卫星定位组合测量姿态数据方法中，传感器的状态方程是连续的，而量测方程却是离散的。但就实际应用而言，更加关注的是量测信息的准确性，再加上离散系统模型更加简介和方便；因此，笔者从应用的角度出发采用离散型系统模型进行滤波。

根据磁力计和卫星定位组合测量姿态的实际特点，一般有如下形式的状态模型：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \varpi(t). \quad (16)$$

式中： $x$  为状态量，就卫星测量系统来说是空间位置，对于磁力计而言为当地地磁强度在各轴向的变化方程； $N$  为各状态的变化率； $\varpi$  为各状态面临的各种干扰噪声。

就式(16)而言，在实际应用中存在较大的困难。首先就载体的运动而言，并不是标准的等速或等加速运动，该模型存在一定的模型误差。另外，各轴向的磁强度模型需要依赖弹体的射向及姿态数据，这些信息很难快速、精确地获得。因此，式(16)的运动模型在工程上的实际应用存在较多限制。

为解决该问题，笔者采用“当前”统计模型对该运动模型进行优化。基于“当前”统计模型如下：

$$\dot{x}(t) = \tilde{\omega}(t) + \varpi(t); \quad (17)$$

$$\dot{\tilde{\omega}}(t) = -N\tilde{\omega}(t) + \omega(t). \quad (18)$$

式中： $\tilde{\omega}(t)$  为速率改变量的“当前”均值，在传感器同一采样周期内可认为是常数。令：

$$\varpi_1(t) = \tilde{\omega}(t) + \varpi(t) = \dot{x}(t); \quad (19)$$

$$\text{则：} \dot{\varpi}_1(t) = \dot{\tilde{\omega}}(t) + \dot{\varpi}(t). \quad (20)$$

在同一个采样周期内，可认为  $\dot{\tilde{\omega}}(t) = 0$ ，则有  $\dot{\varpi}_1(t) = \dot{\varpi}(t)$ 。由式(19)可得： $\varpi(t) = \varpi_1(t) - \tilde{\omega}(t)$ ，将此式与式(18)代入式  $\dot{\varpi}_1(t) = \dot{\varpi}(t)$  可得：

$$\dot{\varpi}_1(t) = -N\varpi_1(t) + N\tilde{\omega}(t) + \omega(t); \quad (21)$$

$$\text{即：} \ddot{x}(t) = -N\dot{x}(t) + N\tilde{\omega}(t) + \omega(t). \quad (22)$$

此为状态方程，即为机动载体的“当前”统计模型。此时，式(16)为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tilde{\omega}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\tilde{\omega}(t) + \omega(t)). \quad (23)$$

### 3.2 离散型系统卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波是一种基于最小方差的递推线性估计算法，具有以下突出的优点：

估计结果使得整体均方差最小，即：

$$E\{[X - \hat{X}(Z)][X - \hat{X}(Z)]^T\} \leq E\{[X - Y(Z)][X - Y(Z)]^T\}.$$

卡尔曼滤波结果是一种无偏估计，即：

$$E\{[X - \hat{X}(Z)]\} = 0.$$

根据式(23)，将系统方程和测量方程描述成如下形式：

$$X_k = \Phi_{k, k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1}; \quad (24)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k. \quad (25)$$

式中： $X$  为  $n$  维状态向量； $Z$  为  $m$  维量测向量； $\Phi$  为  $n \times n$  维系统矩阵； $\Gamma$  为  $n \times r$  维系统噪声矩阵； $H$  为  $m \times n$  为量测矩阵； $W$ 、 $V$  分别为  $r$ 、 $m$  维均值白噪声，并且  $X_0$ 、 $W$ 、 $V$  互相关。

$$\text{令：} E\{X_0\} = m_{x_0}, \quad E\{[X_0 - m_{x_0}][X_0 - m_{x_0}]^T\} = P_0,$$

$$E\{W_k W_i^T\} = Q_k \delta_{kj}, \quad E\{V_k V_i^T\} = R_k \delta_{kj}.$$

式中： $m_{x_0}$  为  $X$  的初始均值； $P_0$  为初始协方差阵； $R_k$ 、 $Q_k$  分别为量测噪声方差矩阵和系统噪声矩阵；

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 0 & k \neq i \\ 1 & k = i \end{cases}.$$

则离散型系统卡尔曼滤波方程如下：

$$\hat{X}_{k, k-1} = \Phi_{k, k-1} \hat{X}_{k-1};$$

$$\dot{\hat{X}}_k = \hat{X}_{k, k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k, k-1}];$$

$$K_k = P_{k, k-1} H_k^T (H_k P_{k, k-1} H_k^T + R_k)^{-1};$$

$$P_{k, k-1} = \Phi_{k, k-1} P_{k-1} \Phi_{k, k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T;$$

$$P_k = P_{k, k-1} - K_k H_k P_{k, k-1}.$$

## 4 试验验证

### 4.1 试验设备

为验证算法的有效性，选用 honeywell 公司的 HMR2300R 型 3 轴捷联式磁力计和 BN-250 定位 + 天线一体模块作为试验设备，设备如图 1 和 2 所示。



图1 HMR2300R 3轴捷联式磁力计及载板

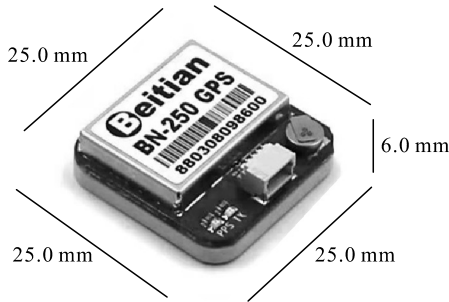


图 2 BN-250 定位+天线一体模块

### 4.2 磁力计标定

将磁力计捷联到 3 轴转台的轴向上,采集 4 250 组数据,数据初始分布如图 3—5 所示。

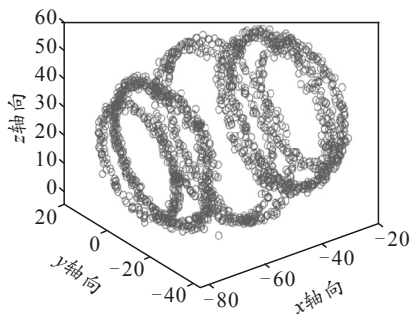


图 3 初始测量数据的空间分布

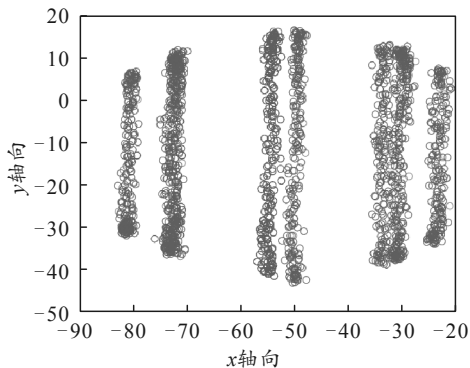


图 4 初始测量数据 x-y 平面分布

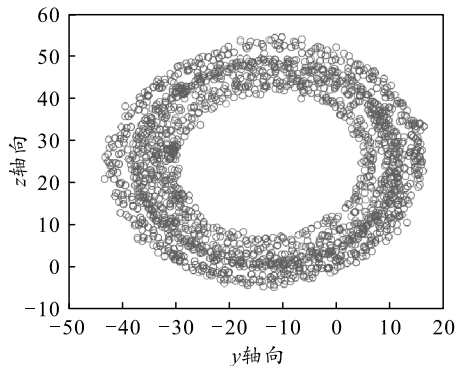


图 5 初始测量数据 y-z 平面分布

从初始测量数据的分布可知,磁力计 3 个轴向都偏离了理论值,而且 3 个轴向的测量灵敏度不一致。

采用笔者所提的最小二阶乘拟合算法,对该磁力计进行拟合和标定结果如下。对于式(7)所示的椭球方程,其拟合系数分别为:

$$a_1 = 1/2\ 565.811\ 247;$$

$$a_2 = 1.837\ 615/2\ 565.811\ 247;$$

$$a_3 = 1.877\ 370/2\ 565.811\ 247;$$

$$a_4 = a_5 = a_6 = 0;$$

$$a_7 = 101.157\ 957/2\ 565.811\ 247;$$

$$a_8 = 47.310\ 269/2\ 565.811\ 247;$$

$$a_9 = -93.622\ 268/2\ 565.811\ 247.$$

椭球球心坐标为:

$$[-50.579\ 0\ -12.872\ 7\ 24.934\ 4];$$

x 轴向半径为: 38.264 0;

y 轴向半径为: 28.226 9;

z 轴向半径为: 27.926 5;

应用前述的标定方法,对磁力计进行标定后数据分布如图 6 所示。

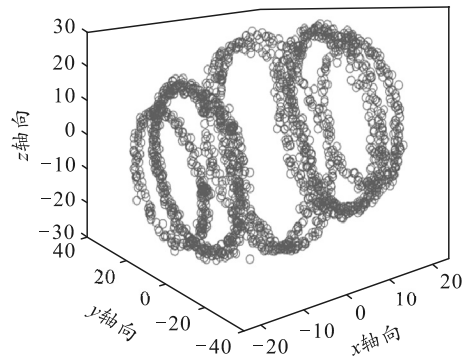


图 6 标定后数据空间分布

从上图可知,标定之后磁力计测量数据的空间分布为圆球形,和理论空间分布符合。

### 4.3 卡尔曼滤波算法

根据笔者所建立的状态模型和离散卡尔曼滤波算法,滤波前后测量结果和偏差对比如图 7 和 8 所示。

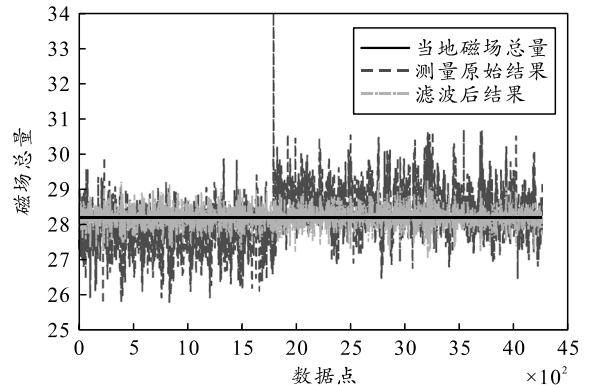


图 7 滤波前后结果

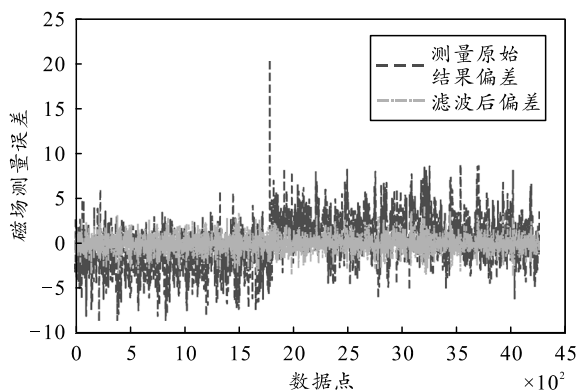


图8 滤波前后误差

从图7可知,采用笔者所述的算法滤波之后,数据的波动明显减小,而且有效地消除了明显偏离正常范围的跳点。从图8可知,滤波之后数据的测量误差明显减小。进一步分析可知,测量绝对平均误差从原始测量数据的2.366%减小到了滤波后的0.5926%。试验数据证明了滤波算法的有效性。

## 5 结束语

针对磁力计/卫星定位系统组合测量载体姿态的方案,笔者分析了测量误差的来源。针对误差不同来源的特性,设计了不同方法进行消除。对于系统误差采用最小二阶乘算法对磁力计进行了标定;对于测量误差,采用离散卡尔曼滤波算法进行了消除。试验结果表明:对于标定之后的磁力计,采用笔者所述的滤波算法使得测量绝对平均误差从2.366%减小到了0.5926%,证明了滤波算法的有效性。

## 参考文献:

[1] 孙永林,姜鑫.基于MEMS/地磁的无人机航姿自适应

(上接第47页)

- [4] 刘晓琳,马丽霞.基于永磁同步电机的飞机舵机电动负载模拟器设计[J].组合机床与自动化加工技术,2021(9):6-10,15.
- [5] 商显赫,林幕义,陈勇,等.基于BP神经网络EPS系统控制策略研究[J/OL].机械设计与制造:1-5[2022-02-19].DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.20211114.005.
- [6] 王晓辉,邱映,杨亚龙.基于GSA-BP神经网络的室内环境热舒适度预测[J].上海节能,2021(10):

估计算法[J].传感器与微系统,2020,39(11):122-125.

- [2] 吉寒冬,姜文刚.基于多MEMS传感器组合姿态解算仿真研究[J].仪表技术与传感器,2020,451(8):85-89.
- [3] 刘旭航,刘小雄.基于加速度修正模型的无人机姿态解算算法[J].西北工业大学学报,2021,39(1):175-181.
- [4] 许甜甜,赵宝旭,骆云志.基于互补-粒子滤波的MEMS传感组件姿态数据融合算法[J].兵工自动化,2021,40(3):29-32.
- [5] 余晨雨,章政,黄卫华,等.基于互补滤波和粒子滤波融合的球形机器人姿态解算[J].机器人,2021,43(3):340-349.
- [6] 安亮亮,王良明,钟阳,等.单轴磁传感器测量转速及滚转角的低成本方法[J].兵器装备工程学报,2020(7):1-4.
- [7] 邵伟平,孙林,张嘉易,等.基于地磁传感器解算旋转体姿态的方法[J].四川兵工学报,2020,41(3):62-66.
- [8] 苗劲松,翟英存,苟秋雄,等.基于卫星/地磁组合的弹箭滚转姿态解算方法[J].弹箭与制导学报,2014,34(5):63-66.
- [9] WU Y, ZOU D, LIU P, et al. Dynamic Magnetometer Calibration and Alignment to Inertial Sensors by Kalman Filtering[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(2): 716-723.
- [10] WU Y, ZHU M, YU W. An Efficient Method for Gyroscope-aided Full Magnetometer Calibration[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(15): 6355-6361.
- [11] 高丽珍,张莺莺,张晓明,等.地磁矢量信息测量安装角的快速标定算法[J].兵器装备工程学报,2020,41(12):220-224.
- [12] 曹鹏,于纪言,王晓鸣,等.基于地磁与卫星组合的高旋弹丸滚转角高频测量及系统误差计算研究[J].兵工学报,2014,35(6):795-800.
- 1084-1091.
- [7] 宫海涛,徐驰,郑如霞,等.基于新型趋近律的永磁直线同步电动机全局滑模控制[J].微特电机,2021,49(11):47-52.
- [8] 林凡涌,符文星,杭娟.基于PMSM的电动负载模拟器建模与控制[J].科学技术与工程,2012,12(19):4681-4685.
- [9] 蒋美云.基于模拟退火算法优化的BP神经网络预测模型[J].软件工程,2018,21(7):36-38.