

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2109052

# 磁传感器偏航角诊断滤波方法研究\*

陈佳威,陶杰,陈汉泉,姚敏

(广东工业大学自动化学院 广州 510006)

**摘要:**在磁干扰环境中,磁传感器解算的飞行器偏航角会出现偏差。针对磁干扰导致的估计误差问题,面向模型不确定性飞行器系统,提出了基于非线性扩张状态观测器的磁传感器偏航角诊断滤波方法。该方法首先设计了一种双参数型非线性扩张状态观测器,降低了参数复杂性;然后基于该观测器设计改进型观测器残差法,对磁干扰数据进行诊断过滤;最后,设计了基于误差预测的改进型互补滤波器,通过融合滤波进一步抑制磁干扰。静态仿真实验结果表明,本文所设计的诊断过滤方法数据匹配率超过94%,融合滤波结果相位超前且更为平滑;动态飞行实验结果表明,该诊断滤波方法有效抑制了磁干扰对四旋翼飞行器偏航角估计的影响,增强了飞行器的稳定性和抗磁扰能力。

**关键词:**磁传感器;磁干扰;偏航角估计;数据诊断;融合滤波

中图分类号: TH762 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.30

## Research on yaw angle diagnosis and filtering method of magnetic sensor

Chen Jiawei, Tao Jie, Chen Hanquan, Yao Min

(College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In the magnetic interference environment, the yaw angle of the aircraft calculated by the magnetic sensor will deviate. Aiming at the estimation error caused by the magnetic interference, a magnetic sensor yaw angle diagnostic filtering method based on nonlinear extended state observer is proposed for the aircraft system with model uncertainty. Firstly, a two-parameter nonlinear extended state observer is designed to reduce the complexity of parameters. Then, based on the observer, an improved observer residual method is designed to diagnose and filter the magnetic interference data. Finally, an improved complementary filter based on error prediction is designed to further suppress the magnetic interference through fusion filtering. The static simulation results show that the data matching rate of the diagnosis method designed in this paper is more than 94%, and the fusion filtering result is phase ahead and smoother. The dynamic flight experiment results show that the diagnostic filtering method effectively suppresses the influence of the magnetic interference on the yaw angle estimation of the four-rotor aircraft, and enhances the stability and anti-magnetic interference ability of the aircraft.

**Keywords:** magnetic sensor; magnetic interference; yaw angle estimation; data diagnosis; fusion filtering

## 0 引言

飞行器偏航角的解算精度决定了飞行器航向控制的准确度,影响飞行器系统的安全性和可靠性。磁传感器常应用于各类飞行器的姿态角尤其是偏航角的估计,其原理是通过测量三轴地磁场,经过机体坐标系和导航坐标系之间的旋转矩阵解算出原始偏航角,再利用多传感

器数据融合的方法实现最优估计<sup>[1-2]</sup>。然而电子仪器工作时产生的感应磁场、设备运转时的涡流磁场、铁磁性物质形成的恒定磁场等也会作用在磁传感器的输出数据中<sup>[3]</sup>,导致原始偏航角出现误差甚至错误数据,影响系统偏航角的估算精度。

针对上述问题,国内外学者提出了多种磁干扰抑制方法。文献[3]对基于模糊自适应卡尔曼滤波的矢量补偿方法进行改进,有效地提高了地磁测量误差的补偿精

收稿日期:2021-12-20 Received Date: 2021-12-20

\* 基金项目:广东省自然科学基金(2022A1515010271,2019A1515011061)、国家自然科学基金(61903093)项目资助

度;文献[4]研究了一种磁传感器数据修正方法,利用重力加速度的测量值修正磁传感器的输出向量;文献[5]设计了一种自适应卡尔曼滤波融合算法,根据磁干扰强度自适应调整磁传感器的解算权重,减小了磁干扰造成的测量误差;文献[6]根据磁场强度和磁场与重力之间的夹角,设计了基于扩展卡尔曼滤波的噪声方差自适应调整方法;文献[7]利用磁传感器的信息熵评估磁干扰噪声大小,动态调整磁传感器在互补滤波中的权值。上述前两种方法基于补偿和修正思想,直接对磁传感器数据进行处理,后3种方法基于自适应和动态调整的思想,抑制磁干扰在融合滤波过程中对偏航角估计的影响。然而实际情况中,磁干扰引起的测量误差往往具有复杂性和多样性,修正和补偿难度较大,且滤波器的滤波能力有限。因此本文将会基于数据诊断思想,对磁传感器的原始偏航角进行诊断过滤,从根源上限制磁干扰的污染程度,再通过融合滤波方法进一步抑制磁干扰。

传感器数据诊断技术可分为基于解析模型的方法和基于数据驱动的方法<sup>[8-9]</sup>。解析模型法利用状态估计、等价空间、参数估计等方法<sup>[10]</sup>,根据残差等信息进行数据诊断,诊断效果好,但是对系统模型的依赖程度较高;而数据驱动方法基于信号进行处理,通过研究历史信息和当前信息来进行数据诊断<sup>[11-13]</sup>,计算量较小,但是诊断能力有限。

针对诊断过程中飞行器系统模型难以确定,而数据驱动方法诊断效果欠佳的问题,本文面向模型不确定对象设计非线性扩张状态观测器<sup>[14]</sup>,利用观测结果改进观测器残差法,实现磁传感器数据的诊断过滤;同时针对残余磁干扰和磁传感器数据滞后等问题,在改进型互补滤波器<sup>[15-16]</sup>的基础上进行误差预测,改善磁传感器和陀螺仪的融合滤波效果。基于上述分析,本文研究了一种新的磁干扰抑制方法,该方法将会通过先诊断过滤、后融合滤波的方式最大限度的抑制磁干扰的作用,从而实现飞行器偏航角的准确估计。

## 1 建模与分析

### 1.1 飞行器模型

建立四旋翼飞行器导航坐标系和机体坐标系如图1所示。

令飞行器的偏航角通道为存在未知外扰作用的非线性不确定对象,则有:

$$\ddot{\psi}(t) = f(\psi, \dot{\psi}, t) + u(t) + w(t) \quad (1)$$

式中:  $\psi(t)$  为飞行器偏航角,  $f(\psi, \dot{\psi}, t)$  为偏航通道未知模型函数,  $u(t)$  为控制输入,  $w(t)$  为未知外扰。式(1)表征了飞行器偏航角的变化分别受系统未知模型、控制输入以及未知外扰的作用。

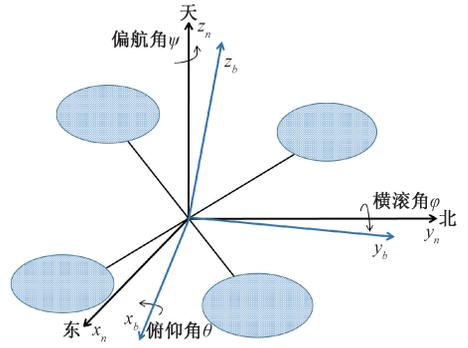


图1 坐标系

Fig. 1 Coordinate system

将上述模型构造为如下非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1(t) = \psi_2(t) \\ \dot{\psi}_2(t) = f(\psi, \dot{\psi}, t) + u(t) + w(t) \\ \dot{\psi}_3(t) = f(\psi, \dot{\psi}, t) + w(t) \\ \psi_1(t) = \psi(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\psi_3(t)$  是系统扩张阶状态,包含了系统的未知模型和未知外扰两部分。

### 1.2 传感器输出模型

令机体坐标系到导航坐标系之间的旋转矩阵为  $C_b^n$ , 定义旋转顺序为偏航-俯仰-横滚,则有:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} c\varphi c\psi - s\theta s\varphi s\psi & -c\theta s\psi & s\varphi c\psi + s\theta c\varphi s\psi \\ c\varphi s\psi + s\theta s\varphi c\psi & c\theta c\psi & s\varphi s\psi - s\theta c\varphi c\psi \\ -c\theta s\varphi & s\theta & c\theta c\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $c$  和  $s$  分别为三角函数  $\cos$  和  $\sin$  的缩写,  $\theta$  为俯仰角,  $\varphi$  为横滚角。

令三轴磁传感器测得的数据为  $[m_x^b \ m_y^b \ m_z^b]^T$ , 而导航坐标系下为  $[m_x^n \ 0 \ m_z^n]^T$ , 代入式(3)可得:

$$\psi_m(t) = \arctan \frac{m_x^b c\varphi + m_z^b s\varphi}{m_x^b s\theta s\varphi + m_y^b c\theta - m_z^b s\theta c\varphi} \quad (4)$$

式中:  $\psi_m(t)$  为磁传感器解算的偏航角原始值。再定义陀螺仪输出的偏航角速度为  $\omega_z(t)$ , 两传感器均存在测量噪声,分别为  $d_1(t)$ 、 $d_2(t)$ , 磁传感器可能存在磁干扰导致的测量误差  $m(t)$ , 则有:

$$\begin{cases} \psi_m(t) = \psi(t) + d_1(t) + m(t) \\ \omega_z(t) = \dot{\psi}(t) + d_2(t) \end{cases} \quad (5)$$

对于测量误差  $m(t)$ , 本文将其分为幅值明显大于传感器本身测量噪声部分的  $m_a(t)$  和与传感器测量噪声相近部分的  $m_b(t)$ , 并且分别使用诊断过滤和融合滤波的方法进行处理。

$$m(t) = m_a(t) + m_b(t), \quad |m_a(t)| \gg |d_1(t)| \quad (6)$$

## 2 磁传感器诊断滤波方法设计

### 2.1 双参数型非线性扩张状态观测器

针对式(2)所示形式的一类非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) = f(x_1, \dots, x_n, t) + u(t) + w(t) \\ \dot{x}_{n+1}(t) = f(x_1, \dots, x_n, t) + w(t) \end{cases} \quad (7)$$

设计如下双参数型非线性扩张状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = z_1(t) - x_1(t) \\ \dot{z}_1(t) = z_2(t) - \beta g_1(t) \\ \dot{z}_2(t) = z_3(t) - \beta^{1+\lambda} g_2(t) \\ \vdots \\ \dot{z}_n(t) = z_{n+1} - \beta^{1+(n-1)\lambda} g_n(t) + u(t) \\ \dot{z}_{n+1}(t) = -\beta^{1+n\lambda} g_{n+1}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\beta$  和  $\lambda$  都是大于0的参数,  $g_i(t)$  为非线性函数,  $z_i(t)$  为该状态观测器的第  $i$  阶输出。

**假设 1** 存在  $M > 0$ , 使得  $\dot{x}_{n+1}(t)$  有界, 且满足

$$|\dot{x}_{n+1}(t)| \leq M_0.$$

**假设 2** 存在正常数  $\xi_i (i = 1, 2, 3, 4)$ ,  $\mu$  以及连续的正定函数  $V, W$ , 使得:

$$1) \xi_1 \|y\|^2 \leq V(y) \leq \xi_2 \|y\|^2,$$

$$\xi_3 \|y\|^2 \leq W(y) \leq \xi_4 \|y\|^2;$$

$$2) \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial y_i} \left( y_{i+1} - g_i \left( \frac{t}{\beta^\lambda} \right) \right) - \frac{\partial V}{\partial y_{n+1}} g_{n+1} \left( \frac{t}{\beta^\lambda} \right) \leq$$

$$-W(y);$$

$$3) \left| \frac{\partial V}{\partial y_{n+1}} \right| \leq \mu \|y\|.$$

**定理 1** 若假设 1 与 2 均成立, 那么:

1) 对于任意给定的正常数  $a$ , 当  $t \in [a, +\infty)$  一致成立:

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} |z_i(t) - x_i(t)| = 0$$

2) 观测误差  $e_i(t)$  会渐进收敛到邻域内, 且该邻域受  $M$  影响。

证明如下:

$$\text{令 } e_i(t) = z_i(t) - x_i(t), \sigma_i(t) = \frac{e_i \left( \frac{t}{\beta^\lambda} \right)}{\beta^{1+(i-2)\lambda}}, i = 1, 2, \dots,$$

$n + 1$ , 则  $V(\sigma(t))$  沿着  $\sigma_i(t)$  关于  $t$  的导数为:

$$\frac{d}{dt} V(\sigma(t)) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial \sigma_i(t)} \left[ \sigma_{i+1}(t) - g_i \left( \frac{t}{\beta^\lambda} \right) \right] +$$

$$\frac{\partial V}{\partial \sigma_{i+1}(t)} \left[ -g_{n+1} \left( \frac{t}{\beta^\lambda} \right) + \frac{-\dot{x}_{n+1} \left( \frac{t}{\beta^\lambda} \right)}{\beta^{1+n\lambda}} \right] \leq$$

$$-W(\sigma(t)) + \frac{M\mu \|\sigma(t)\|}{\beta^{1+n\lambda}} \leq$$

$$-\frac{\xi_3}{\xi_2} V(\sigma(t)) + \frac{M\mu \sqrt{V(\sigma(t))}}{\beta^{1+n\lambda} \sqrt{\xi_1}}$$

因此:

$$\frac{d}{dt} \sqrt{V(\sigma(t))} \leq -\frac{\xi_3}{2\xi_2} \sqrt{V(\sigma(t))} + \frac{M\mu}{2\beta^{1+n\lambda} \sqrt{\xi_1}}$$

可得:

$$\sqrt{V(\sigma(t))} \leq \sqrt{V(\sigma(0))} e^{-\frac{\xi_3}{2\xi_2} t} +$$

$$\frac{M\mu\xi_2}{\beta^{1+n\lambda} \xi_3 \sqrt{\xi_1}} (1 - e^{-\frac{\xi_3}{2\xi_2} t})$$

就有:

$$\|\sigma(t)\| \leq \sqrt{\frac{V(\sigma(0))}{\xi_1}} e^{-\frac{\xi_3}{2\xi_2} t} +$$

$$\frac{M\mu\xi_2}{\beta^{1+n\lambda} \xi_3 \xi_1} (1 - e^{-\frac{\xi_3}{2\xi_2} t})$$

即:

$$|e_i(t)| = \beta^{1+(i-2)\lambda} |\sigma_i(\beta^\lambda t)| \leq \beta^{1+(i-2)\lambda} \|\sigma(\beta^\lambda t)\| \leq$$

$$\beta^{1+(i-2)\lambda} \left[ \sqrt{\frac{V(\sigma(0))}{\xi_1}} e^{-\frac{\xi_3 \beta^\lambda t}{2\xi_2}} + \beta^{-1+n\lambda} \frac{M\mu\xi_2}{\xi_3 \xi_1} (1 - e^{-\frac{\xi_3 \beta^\lambda t}{2\xi_2}}) \right]$$

故:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |e_i(t)| \leq \beta^{-(n+2-i)\lambda} \frac{M\mu\xi_2}{\xi_3 \xi_1}$$

当  $t$  为大于0的常数时, 有:

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} |e_i(t)| = 0$$

定理 1 证毕。

### 2.2 改进型观测器残差法

由式(2)所示的非线性系统及式(5), 可得如下磁传感器偏航角输出系统:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{m1}(t) = \psi_{m2}(t) \\ \dot{\psi}_{m2}(t) = f(\psi, \dot{\psi}, t) + u(t) + w(t) + \ddot{d}_1(t) + \ddot{m}(t) \\ \psi_{m1}(t) = \psi_m(t) \end{cases} \quad (9)$$

其扩张阶为:

$$\psi_{m3}(t) = f(\psi, \dot{\psi}, t) + w(t) + \ddot{d}_1(t) + \ddot{m}(t) \quad (10)$$

根据定理 1 的结论(2), 在观测器参数确定的情况下, 本文所设计的双参数型非线性扩张状态观测器在系统的扩张阶状态始终为常值即  $M = 0$  时, 其观测误差可以渐进收敛到0。而当系统的扩张阶状态是时变且有界时,

其观测误差将会受总扰变化率的上界即  $M$  影响。

基于上述分析,若飞行器在运行过程受到磁干扰作用,磁传感器的原始偏航角会出现测量误差  $m(t)$ ,从而导致  $\psi_{m_3}(t)$  发生变化,进而引起观测误差的改变。且当  $m_a(t)$  出现时,  $\psi_{m_3}(t)$  将发生突变,导致其观测误差明显偏离正常值,根据这一原理就可以将受磁干扰严重污染的数据诊断出来。

构造磁传感器偏航角输出系统的三阶双参数型非线性扩张状态观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = z_1(t) - \dot{\psi}_m(t) \\ \dot{z}_1(t) = z_2(t) - \beta g_1(t) \\ \dot{z}_2(t) = z_3(t) - \beta^{1+\lambda} g_2(t) + u(t) \\ \dot{z}_3(t) = -\beta^{1+2\lambda} g_3(t) \end{cases} \quad (11)$$

令式(11)中的  $e(t)$  为观测器残差。本文利用  $e(t)$  设计事件触发机制,通过其数据更新的时间序列对磁传感器数据进行诊断过滤。

根据上述分析,只有当  $e(t)$  小于某阈值时才对磁传感器数据进行更新,因此设计如下事件触发条件:

$$e(t)^2 \leq \delta_1 \quad (12)$$

式中:  $\delta_1$  为大于0的参数。

令磁传感器偏航角的数据仅在  $t_k$  时刻更新,即:

$$\psi_m(t) = \psi_m(t_k), t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (13)$$

定义观测器残差法的事件触发机制时间序列  $t_k$  为:

$$t_{k+1} = \underset{t > t_k}{\operatorname{argmin}} \{ t \mid e(t)^2 \leq \delta_1 \} \quad (14)$$

上述事件触发机制可以较为准确的对  $m_a(t)$  进行诊断过滤。但是根据式(10),系统在运行时,  $\psi_{m_3}(t)$  不仅受磁干扰影响,系统不确定模型、外扰及测量噪声的作用同样无法忽略,这些不确定性因素会一定程度的影响诊断过滤效果。

根据事件触发机制的时间序列,磁传感器偏航角在数据更新时会将  $m_a(t)$  剔除掉,即事件触发机制下的观测结果  $z_3(t)$  中不包含对  $m_a(t)$  的估计。因此本文在上述观测器残差法的基础上引入  $z_3(t)$  来抑制其他扰动的作用,进一步加强对磁干扰的诊断过滤效果。设计改进型观测器残差法的事件触发机制时间序列  $t_k$  为:

$$t_{k+1} = \underset{t > t_k}{\operatorname{argmin}} \{ t \mid e(t)^2 - \delta_2 z_3^2 \leq \delta_3 \} \quad (15)$$

式中:  $\delta_2, \delta_3$  为大于0的参数。

### 2.3 基于误差预测的改进型互补滤波

在经过上一步的诊断过滤之后,被磁干扰严重污染的信号会被基本过滤掉。而对于  $m_b(t)$ ,由于与传感器测量噪声相近,虽然无法利用数据诊断的方法进行处理,但是其幅值相对较小,可以利用多传感器融合滤波的方式,进一步的对  $m_b(t)$  和测量噪声进行滤波。本文使用互补滤波器融合磁传感器和陀螺仪数据。

互补滤波法利用通频段互补的低通和高通滤波器消除磁传感器偏航角  $\psi_m(t)$  的高频噪声和陀螺仪偏航角  $\psi_g(t)$  的累积误差,能够有效抑制两种传感器的噪声干扰。但是滤波器的截止频率通常是在某一实验环境下经过多次调试得来,当系统受磁干扰作用时,磁传感器的噪声频段往往会发生改变,且低通滤波器的阶次较低导致阻带衰减慢,因此固定参数的普通型互补滤波器难以较好的滤除磁干扰噪声。

因此,在普通型互补滤波器的基础上,计算出磁传感器偏航角与最终解算结果之间的误差,引入PI控制器构成改进型互补滤波器。通过误差反馈的方式,利用系数  $K_p, K_i$  进行动态补偿,自动调整滤波器的截止频率,使其在磁干扰作用下,也能较为准确地估计出偏航角。

同时在实际测试中也发现,陀螺仪数据相对磁传感器数据更为灵敏,能够更快地跟踪系统状态,即磁传感器解算的偏航角存在一定程度的相位滞后。该滞后现象会直接影响互补滤波器的输出,从而降低飞行器偏航角状态估计的准确性。

根据定理1,式(11)中观测器的观测结果  $z_2(t)$  的跟踪目标为磁传感器偏航角的导数阶,因此针对磁传感器实际输出数据的时滞问题,本文在改进型互补滤波器的基础上引入  $z_2(t)$  对磁传感器数据与融合结果之间的误差进行预测。即令:

$$e_1(t) = \psi_m(t) + \eta z_2(t) - \psi(t) \quad (16)$$

式中:  $\eta$  为大于0的参数,受数据采样周期影响。

其原理框图如图2所示。

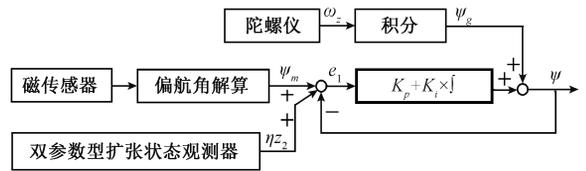


图2 基于误差预测的改进型互补滤波器

Fig. 2 Improved complementary filter based on error prediction

通过误差预测的方式,可以一定程度加快误差收敛速度,改善滤波效果,使融合后的数据具有超前性。

## 3 实验验证

### 3.1 静态仿真实验

#### 1) 观测器对比实验

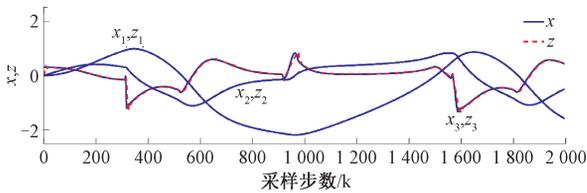
以二阶和三阶非线性系统为例,对比传统非线性扩张状态观测器和双参数型非线性扩张状态观测器的状态观测结果。

根据非线性反馈,两种非线性扩张状态观测器中的非线性函数均使用下述函数:

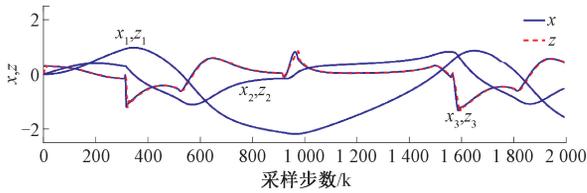
$$g_i(t) = |e(t)|^\alpha \text{sign}(e(t)) \quad (17)$$

式中:  $\alpha$  根据工程经验取  $\frac{1}{2}^{(i-1)}$ ,  $\text{sign}(x)$  为符号函数。

二阶、三阶系统分别使用文献[14]中例1、例4的非线性系统。图3、4观测结果表明,本文所提出的双参数型非线性扩张状态观测器对系统状态的跟踪效果是令人满意的。且在观测效果与传统非线性扩张状态观测器相近的情况下,该观测器对任意阶系统均只需整定两个关键参数  $\beta$  和  $\lambda$ , 而传统非线性扩张状态观测器需要整定的关键参数随系统阶数增加而增加,同时参数之间的耦合性也增大了整定难度。



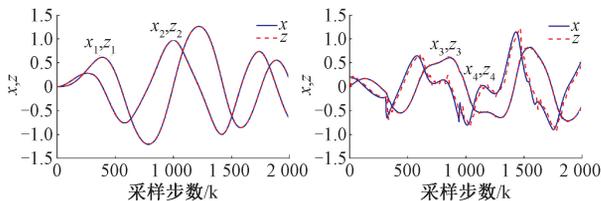
(a) 传统非线性扩张状态观测器  
(a) Traditional nonlinear extended state observer



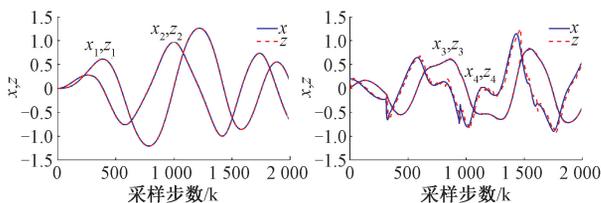
(b) 双参数型非线性扩张状态观测器  
(b) Two-parameter nonlinear extended state observer

图3 二阶非线性系统观测结果

Fig. 3 Observation results of the second-order nonlinear system



(a) 传统非线性扩张状态观测器  
(a) Traditional nonlinear extended state observer



(b) 双参数型非线性扩张状态观测器  
(b) Two-parameter nonlinear extended state observer

图4 三阶非线性系统观测结果

Fig. 4 Observation results of the third-order nonlinear system

## 2) 诊断过滤算法实验

为了模拟飞行器运动时的实际状态,设计仿真算例中磁传感器输出的偏航角原始数据如图5所示,该数据中由幅值较小的高斯白噪声模拟测量噪声  $d_1(t)$ ,随机时间段连续出现的幅值较大的高斯白噪声模拟磁干扰导致的测量误差  $m(t)$ ,且相位相对滞后。

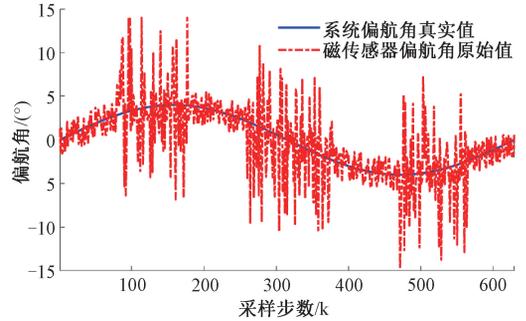


图5 磁传感器偏航角仿真数据

Fig. 5 Simulation data of yaw angle of magnetic sensor

定义如下评价数据诊断算法性能的指标。

数据匹配率 (data matching rate, DMR):

$$R_{DM} = \frac{n_{DM}}{n_N} \times 100\% \quad (18)$$

式中:  $n_{DM}$  为一次实验中数据诊断结果与实际结果一致的历元数;  $n_N$  为一次实验中采样的总历元数。

磁干扰检出率 (magnetic interference detection rate, MIDR):

$$R_{MID} = \frac{n_{MID}}{n_F} \times 100\% \quad (19)$$

式中:  $n_{MID}$  为一次实验中数据被磁干扰严重污染并且被正确识别的历元数,  $n_F$  为一次实验中数据被磁干扰严重污染的总历元数。

虚警率 (false alarm rate, FAR):

$$R_{FA} = \frac{n_{FA}}{n_N} \times 100\% \quad (20)$$

式中:  $n_{FA}$  为一次实验中数据未被磁干扰严重污染但被判断为污染的历元数。

对比传输误差法<sup>[13]</sup>、观测器残差法及改进型观测器残差法对磁干扰数据的诊断效果。图6将传输误差、观测器残差及改进型观测器残差与实际误差进行对比,图7对比了3种算法诊断过滤后的数据,可见3种方法中,改进型观测器残差法的误差变化情况与实际误差更为接近,利用其设计的事件触发机制的诊断过滤效果也最好。表1通过大量随机仿真算例计算得来,数据表明普通型观测器残差法的诊断效果较大程度的优于传输误差法,而改进型观测器残差法通过抑制其他扰动对观测器残差的影响,一定程度的降低了虚警率,提高了磁干扰检出率,因此其磁干扰诊断效果更好。

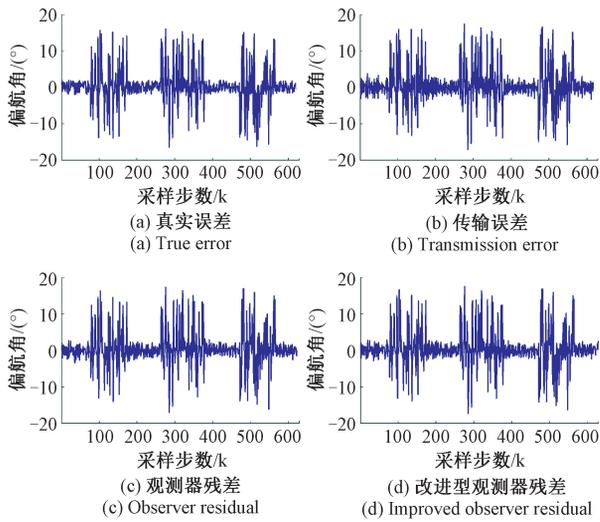


图6 残差对比

Fig. 6 Comparison of residuals

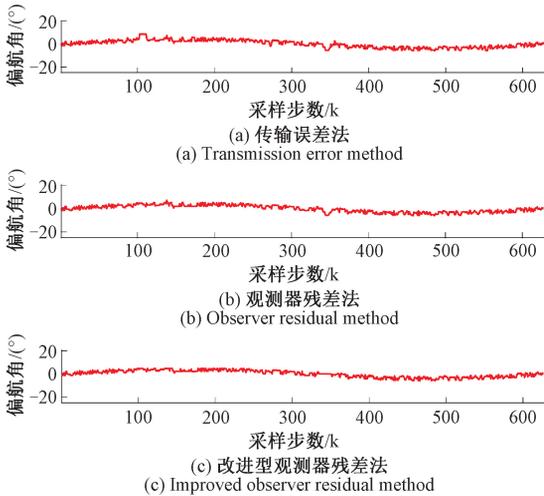


图7 诊断结果对比

Fig. 7 Comparison of diagnostic results

表1 诊断性能对比

Table 1 Comparison of diagnostic performance %

| 方法        | DMR   | MIDR  | FAR   |
|-----------|-------|-------|-------|
| 传输误差法     | 84.50 | 86.86 | 12.89 |
| 观测器残差法    | 91.60 | 93.08 | 7.04  |
| 改进型观测器残差法 | 94.18 | 93.99 | 4.62  |

### 3) 融合滤波算法实验

设计仿真算例中陀螺仪偏航角速度原始值如图8所示,该数据中含有随机测量噪声 $d_2(t)$ 与零偏。

经诊断过滤步骤后,普通互补滤波法,改进型互补滤波法及本文基于误差预测的改进型互补滤波法的融合滤

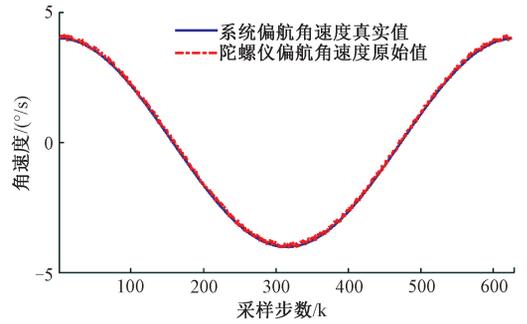


图8 陀螺仪偏航角速度仿真数据

Fig. 8 Simulation data of yaw angular velocity of gyroscope

波结果的对比如图9所示。可以看出改进型互补滤波器的滤波效果和误差收敛速度要优于普通互补滤波器,而本文所提出的基于误差预测的改进型互补滤波器在相位的超前性和滤波效果上比改进型互补滤波器更佳。对比图5的磁传感器偏航角原始数据,本文所提出的诊断滤波方法在磁干扰作用下仍然能够准确的估计系统状态,其磁干扰抑制效果是令人满意的。

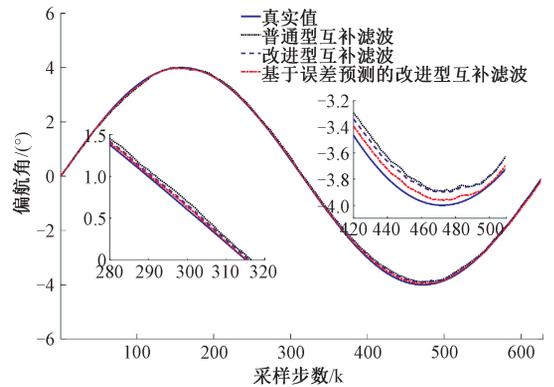


图9 滤波效果对比

Fig. 9 Comparison of filtering effect

### 3.2 动态飞行实验

选取电梯为磁干扰源,分别在远离干扰源的空旷区域和靠近干扰源的区域进行测试。实验设备为自主研发的四旋翼飞行器系统,磁传感器型号为QMC5883L,惯性测量单元型号为BMI088。实验设备及环境如图10所示。

图11(a)和(b)分别为远离和靠近磁干扰源时所解算的磁传感器偏航角原始值,可以看出,在靠近磁干扰源时,原始值噪声信号的幅值和频率均发生了明显变化,由磁干扰导致的测量误差与传感器测量噪声的混合使原始信号极具复杂性。图11(c)为经过改进型观测器残差法诊断过滤后的偏航角,可见该数据的噪声情况与远离磁干扰源时的噪声情况相近,诊断过滤步骤对磁干扰的抑制效果明显。

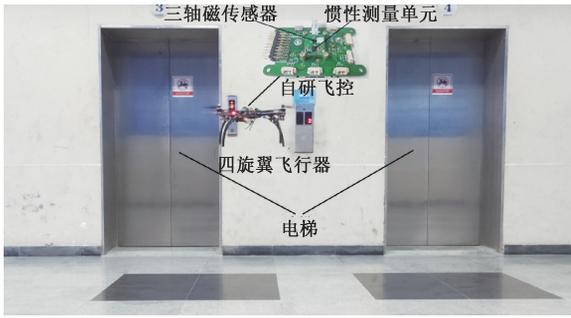


图10 实验设备及环境

Fig. 10 Experimental equipment and environment

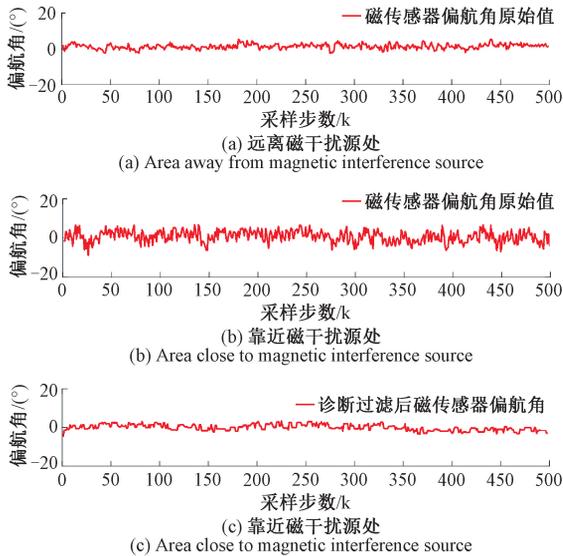
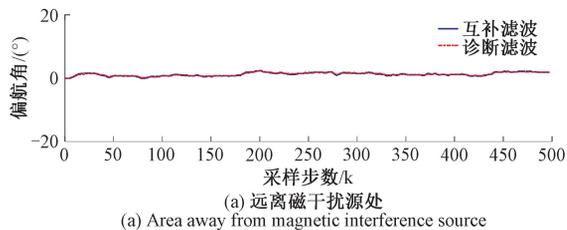


图11 偏航角数据

Fig. 11 Yaw angle data

分别使用互补滤波法与本文的诊断滤波方法对上述两个偏航角原始值进行处理。由图12的实验结果可以看出,在远离磁干扰源的测试环境下,互补滤波法和诊断滤波法的最终估计值相近,诊断滤波方法中的事件触发机制几乎不会被触发,仅融合滤波的滤波效果略优于互补滤波法。而在靠近磁干扰源的环境下,两种方法的估计值出现了明显的差别:互补滤波法受限于滤波器的滤波能力,在面对复杂噪声信号时滤波效果不佳,磁干扰较大程度的影响了偏航角估计效果;而诊断滤波法分别在诊断和融合两个步骤上对磁干扰进行抑制,偏航角最终估计值波动较小,滤波效果明显优于互补滤波法。



(a) 远离磁干扰源处

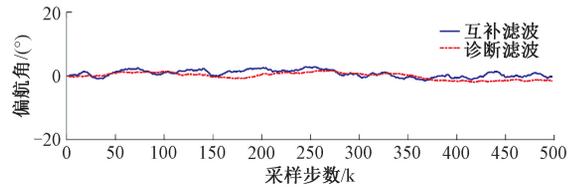
(b) 靠近磁干扰源处  
(b) Area close to magnetic interference source

图12 滤波效果对比

Fig. 12 Comparison of filtering effect

## 4 结 论

本文基于诊断思想提出了一种磁干扰环境下的飞行器偏航角诊断滤波方法。该方法通过对磁传感器进行诊断过滤,将磁干扰导致的测量误差限制在一定范围内,然后再与陀螺仪融合滤波,最大限度的抑制了磁干扰对飞行器偏航角估计的影响。理论分析和实验结果表明,该方法可以有效过滤磁干扰数据,改善融合滤波效果,提高飞行器的抗磁扰能力,为磁干扰抑制方法的研究提供了良好的思路。

## 参考文献

- [1] 王勇军, 李智, 李翔. 无人机磁惯导系统中航向校正的双内积算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 87-94.  
WANG Y J, LI ZH, LI X. Dual inner product algorithm for heading calibration in magneto-inertial navigation system of UAV [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 87-94.
- [2] 李瑞涵, 王耀南, 谭建豪. Nesterov 加速梯度无人机姿态融合算法[J]. 机器人, 2018, 40(6): 852-859.  
LI R H, WANG Y N, TAN J H. Attitude fusion algorithm of UAV based on Nesterov accelerated gradient[J]. Robot, 2018, 40(6): 852-859.
- [3] 李婷, 张金生, 王仕成, 等. 地磁测量误差矢量补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2682-2690.  
LI T, ZHANG J SH, WANG SH CH, et al. Component compensation method for distortion magnetic field measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2682-2690.
- [4] 石岗, 李希胜, 王哲, 等. 磁传感器输出姿态信息修正方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 47-53.  
SHI G, LI X SH, WANG ZH, et al. Research on correcting output attitude information of magnetic sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

- 2019, 40(3): 47-53.
- [5] 石岗, 李希胜, 白艳茹, 等. 基于车辆状态的航向估计量测方程研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 176-183.  
SHI G, LI X SH, BAI Y R, et al. Research on a vehicle status based measurement equation for yaw estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 176-183.
- [6] 卢艳军, 陈雨荻, 张晓东, 等. 基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 281-288.  
LU Y J, CHEN Y D, ZHANG X D, et al. Attitude information fusion method based on extended Kalman filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 281-288.
- [7] 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.  
YU CH Y, ZHANG ZH, HUANG W H, et al. Attitude calculation based on the fusion of complementary filter and particle filter for spherical robot[J]. Robot, 2021, 43(3): 340-349.
- [8] GAO Z, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3757-3767.
- [9] 向刚, 韩峰, 周虎, 等. 数据驱动的航天器故障诊断研究现状及挑战[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 1-16.  
XIANG G, HAN F, ZHOU H, et al. Data-driven method for spacecraft fault diagnosis: State of art and challenge [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 1-16.
- [10] WHITE A, KARIMODDINI A. Event-based diagnosis of flight maneuvers of a fixed-wing aircraft[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193 (Jan.): 106609. 1-106609. 11.
- [11] ZHUO S, XU L, GAILLARD A, et al. Robust open-circuit fault diagnosis of multi-phase floating interleaved DC-DC boost converter based on sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(3): 638-649.
- [12] WANG Y L, LIM C C, PENG S. Adaptively adjusted event-triggering mechanism on fault detection for networked control systems [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(99): 2299-2311.
- [13] 邱爱兵, 胡贤, 邱卫东, 等. 基于事件触发的故障诊断与动态调节集成设计[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(8): 1159-1166.  
QIU AI B, HU X, QIU W D, et al. An integrated design of event-triggered fault diagnosis and dynamic fault accommodation[J]. Control Theory and Applications, 2018, 35(8): 1159-1166.
- [14] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995(1): 85-88.  
HAN J Q. Extended state observer for a class of uncertain objects[J]. Control and Decision, 1995(1): 85-88.
- [15] MARANTOS P, KOVEOS Y, KYRIAKOPOULOS K J. UAV state estimation using adaptive complementary filters[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(4): 1214-1226.
- [16] 陈孟元, 谢义建, 陈跃东. 基于四元数改进型互补滤波的 MEMS 姿态解算[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1391-1397.  
CHEN M Y, XIE Y J, CHEN Y D. Attitude estimation of MEMS based on improved quaternion complementary filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1391-1397.

## 作者简介



**陈佳威**, 2020 年于南华大学获得学士学位, 现为广东工业大学硕士研究生, 主要研究方向为多传感器数据融合技术、传感器数据诊断技术、飞行器系统。

E-mail: cjlw\_stu@163.com

**Chen Jiawei** received his B.Sc. degree from the University of South China in 2020. He is currently a master student at Guangdong University of Technology. His main research interests include multi-sensor data fusion technology, sensor data diagnosis technology, and aircraft system.



**陶杰** (通信作者), 2013 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2018 年于浙江大学获得博士学位, 现为广东工业大学副教授, 主要研究方向为传感器信号处理、飞行器系统、事件触发控制。

E-mail: taojiedyx@163.com

**Tao Jie** (Corresponding author) received his B.Sc. degree and Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology and Zhejiang University in 2013 and 2018, respectively. He is currently an associate professor at Guangdong University of Technology. His main research interests include sensor signal processing, aircraft system, and event-based control.