doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.003

# 基于改进新息序列的组合导航系统缓变故障检测方法

傅 军 韩洪祥 戴海发

(海军工程大学导航工程系,武汉 430033)

摘要:针对传统的残差 X<sup>2</sup> 检测法未充分考虑缓变故障渐进变化的特点,而导致对缓变故障检测失效的问题,提出 了一种改进的新息序列故障检测方法。该算法在传统新息序列检测法的基础上,通过模糊隶属函数构造检验统计 量函数,并利用加权平均算法将落在有故障和无故障概率密度曲线交迭区域的检验统计量纳入故障信息检验中, 以增加判断缓变故障的信息,从而更早地检测到缓变故障,而又不会增加虚警。仿真实验结果表明,将该方法应用 到联邦滤波组合导航系统中,能够有效提高农业机械组合导航系统对缓变故障的容错能力。

关键词:农业机械;组合导航;故障检测;新息序列;联邦滤波



中图分类号: V249.32\*8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0028-06 O

# Detection Method of Mitigating Fault of Combined Navigation System Based on Improvement of New Interest Sequence

FU Jun HAN Hongxiang DAI Haifa

(Department of Navigation, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: With the development of agricultural machinery automatic navigation technology, the precision and stability of agricultural machinery positioning are becoming more and more demanding, MIMU has a broad application prospect in the fields of intelligent agricultural equipment because of its small size, low cost and high reliability. However, due to its own working principle, structure, manufacturing level and error in the installation of the device, MIMU signal output accuracy is poor, resulting in fast dispersion of navigation information over time. It has become an important way to improve the overall performance and accuracy of MIMU-based agricultural mechanical navigation system by using combined navigation technology. However, the increase in system sensors means that the complexity and failure rate of the entire combined navigation system are also increasing. Since the traditional residual  $\chi^2$  test method hasn't fully considered the characteristic of the progressive change of the soft fault, which may cause the failure detection of the soft fault, an improved fault detection method of interest sequence was created. Based on the traditional innovation sequence fault detection method, the statistical magnitude with the fuzzy membership function was detected. By using the weighted average algorithm, it can take the detection statistics sitting in the overlapping area of the fault probability density curve and the fault-free probability density curve into the fault detection and increase information for soft fault estimation, so the soft fault could be detected early without increasing the false alarm. The simulation test result showed that the application of this method in the federated filter integrated navigation system could effectively increase the fault-tolerant ability of the integrated navigation system to soft fault.

Key words: agricultural machinery; combined navigation system; fault detection; interest sequence; federated filter

0 引言

随着农业机械自动导航技术的发展,对农业机

械定位精度和稳定性的要求越来越高。微惯性测量 单元(MIMU)因具有体积小、成本低、可靠性高等优 点<sup>[1-3]</sup>,在智能农业装备等领域具有广阔的应用前 景<sup>[4-5]</sup>。受自身工作原理、结构、制造水平及器件安 装过程中误差的影响,MIMU 信号输出精度较差,导 致导航信息随时间发散较快。利用组合导航技术提 高基于 MIMU 的农业机械导航系统整体性能和精度 已成为一种重要途径。但是,系统传感器的增加意 味着整个组合导航系统的复杂性和故障率也随之增 加。在实际导航系统中,参与组合的子系统随时可 能失效,如果不能及时将故障信息甄别并隔离,则已 失效子滤波器的故障信息会参与主滤波器的信息融 合,进而影响系统的整体性能<sup>[6]</sup>。因此,在具有良 好容错性能的联邦滤波器中,必须实时监测各子滤 波器量测信息的有效性,这就要求在各子滤波器中 设计故障检测及隔离算法<sup>[7]</sup>。

故障按其发生、发展的过程可分为突变故障和 缓变故障。突变故障的发生往往带来幅值较大的阶 跃变化[8-9],其检测手段较多,且效果较好;缓变故 障为不易观测的缓慢变化的微小故障,这类故障最 初出现时故障征兆较小,随着时间的推移,逐渐建立 起来的故障量测信息会影响系统整体性能。基于多 传感器融合的容错导航系统,在故障检测与隔离、信 息分配方式及滤波算法结构方面已有大量的研究成 果。文献[10]提出了一种基于 LS - SVM 的联邦滤 波故障检测方法,利用 LS-SVM 对子滤波器新息进 行预测,进而构造故障检测量,对缓变故障的检测有 所改善,其难点在于机器学习模型的建立。文 献[11]利用基于残差的 $\chi^2$ 故障检测函数构造信息 分配系数和子系统量测噪声方差,根据故障程度自 适应地调节各子滤波器的量测噪声,但基于残差的  $\chi^2$  检测法对缓变故障检测能力较差,在一定程度上 限制了该算法的性能。文献[12]从全局融合的角 度,提出了一种基于序贯概率映射的组合导航自适 应容错算法,通过构造质量值对全局融合进行自适 应调节,提高了缓变故障发生情况下的导航系统性 能。文献[13]采用 $\chi^2$ 检验和灰色预测相结合的算 法,对农业机器人导航中常见的 GPS 定位数据突变 故障进行了检测和隔离,但未验证该算法对缓变故 障的检测性能。

本文从实际应用出发,分析传统的残差  $\chi^2$  检验 法应用于联邦滤波器时对缓变故障检测存在的不 足,并针对该问题提出一种改进的新息序列故障检 测法,将该方法应用于 MSINS/GNSS/磁力计的多传 感器农业机械组合导航系统中,并对组合导航系统 进行仿真实验分析,验证该方法对缓变故障的检测 性能。

# 1 残差 $\chi^2$ 检验法

 $残差\chi^2$ 检验法构造 $\chi^2$ 统计量来检测量测残差

的变化,从而判断量测信息是否故障。联邦滤波器 中每个子滤波器均为卡尔曼滤波器,其量测残差可 以表示为

$$\delta \boldsymbol{z}_{k} = \boldsymbol{Z}_{k} - \hat{\boldsymbol{Z}}_{k/k-1} = \boldsymbol{Z}_{k} - \boldsymbol{H}_{k} \hat{\boldsymbol{X}}_{k/k-1} \qquad (1)$$

式中  $Z_{k}$  ——实际量测量  $\hat{Z}_{k/k-1}$  ——系统量测预测值  $\hat{X}_{k/k-1}$  ——系统状态 k 步递推值  $H_{k}$  ——系统量测矩阵

此处的"残差"表示的实际量测向量与量测更新之前、由状态估计计算得来的量测向量之间的差值,通常也称作"新息",后文中的"新息"与该处的"残差"含义相同。

可以证明,当无故障发生时,卡尔曼滤波器的残 差 δz, 服从零均值高斯白噪声分布<sup>[14]</sup>,其方差为

$$\boldsymbol{C}_{\delta z,k} = \boldsymbol{H}_{k} \boldsymbol{P}_{k/k-1} \boldsymbol{H}_{k}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_{k}$$
(2)

式中 **P**<sub>k/k-1</sub>——状态预测协方差矩阵

**R**<sub>k</sub>——量测噪声协方差矩阵

当系统发生故障时,残差 δz<sub>k</sub>便不再服从零均 值高斯白噪声分布,通过检测残差 δz<sub>k</sub>的统计特性 即可判断系统是否故障。对残差 δz<sub>k</sub>作以下二元假 设

$$\begin{cases} E \{ \delta \boldsymbol{z}_{k} \delta \boldsymbol{z}_{k}^{\mathrm{T}} \} = \boldsymbol{C}_{\delta \boldsymbol{z}, k} & (E \{ \delta \boldsymbol{z}_{k} \} = 0) \\ E \{ (\delta \boldsymbol{z}_{k} - \boldsymbol{\mu}) (\delta \boldsymbol{z}_{k} - \boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}} \} = \boldsymbol{C}_{\delta \boldsymbol{z}, k} & (E \{ \delta \boldsymbol{z}_{k} \} = \boldsymbol{\mu}) \end{cases}$$
(3)

构造统计量

$$\boldsymbol{\lambda}_{k} = \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{z}_{k}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{z},k}^{-1} \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{z}_{k} \tag{4}$$

式中  $\lambda_k$  — 服从自由度为 m 的  $\chi^2$  分布, 即  $\lambda_k \sim \chi^2(m)$ 

m——量测量  $\mathbf{Z}_k$  的维数

故障判定准则为:①若 $\lambda_k > \chi_{\alpha}^2$ ,判定系统故障。 ②若 $\lambda_k \leq \chi_{\alpha}^2$ ,判定系统正常。 $\chi_{\alpha}^2$ 为检测门限, $\alpha$ 为虚 警率。

利用残差 $\chi^2$ 检验法可以完成对突变故障的检测,但是该方法对缓变故障的检测会失效,这是因为 缓变故障开始很小,不容易被检测出来,有故障的量 测信息将影响系统状态 k 步递推值  $\hat{X}_{k/k-1}$ ,使其"跟踪"故障量测信息,残差  $\delta z_k$  一直保持较小导致缓变 故障难以检测。

#### 2 新息序列故障检测法

#### 2.1 传统的新息序列故障检测法

量测信息和系统状态估计之间更小的和缓变故障导致的偏差,可以通过最新的 N 个量测统计量构成检验统计量来进行辨识<sup>[15]</sup>

$$\boldsymbol{\mu}_{kj} = \frac{1}{N} \sum_{i=k+1-N}^{k} \overline{\mathbf{y}}_{i,j}$$
(5)

(9)

其中 
$$\overline{y}_{i,j} = \frac{\delta z_{i,j}}{\sqrt{C_{\delta z_i,j,j}}}$$
 (6)

式中 **y**<sub>i,j</sub>——归一化后的新息

零均值方差符合高斯分布的 N 个独立采样,其 均值的标准差应为 1/√N。因此,当满足下列条件 时,可以辨识测量新息中的偏差

$$|\boldsymbol{\mu}_{kj}| > \frac{T_{b\mu}}{\sqrt{N}} \tag{7}$$

式中 T<sub>bu</sub>——门限阈值

构造新息序列的检验统计量为

$$s_{\delta z,k}^{2} = \delta \boldsymbol{z}_{u}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C}_{u}^{-1} \delta \boldsymbol{z}_{u}$$
(8)

$$\delta \boldsymbol{z}_{u} = \boldsymbol{C}_{u}^{-1} \sum_{i=k+1-N}^{K} \boldsymbol{C}_{\delta \boldsymbol{z}_{i},i}^{-1} \delta \boldsymbol{z}_{i}$$
(10)

式中 C<sub>u</sub><sup>-1</sup>—新息序列协方差逆矩阵之和

δz<sub>u</sub>——新息序列的加权平均值

新息序列故障检测法可以有效检测缓变故障, 滑动窗口尺寸 N 的选择,是对响应时间和敏感性的 折中,简单来说,对故障信息越敏感,响应时间越慢, 虚警率也会随之提高。而阈值 T<sub>bu</sub>是对敏感性和误 警率的折中,一般情况下该方法门限阈值的选择也 是固定的。因此,在滑动窗口尺寸 N 和门限阈值 T<sub>bu</sub>折中选择固定后的情况下,为了进一步提高对缓 变故障检测的响应速度,提出了一种改进的新息序 列故障检测法。

# 2.2 改进的新息序列故障检测法

χ<sup>2</sup>检验法是设定一个门限阈值作为故障与否 的判断标准,就检测过程来看,影响检测正确性的原 因是检测量无故障时的条件概率密度曲线与有故障 时的条件概率密度曲线有交迭<sup>[16]</sup>,当检测统计量落 在交迭部分时,存在有、无故障两种情况,这也正是 采用传统的新息序列故障检测法面临的一种情况, 即当缓变故障较小时,检测统计量会增大但又没有 超过设置门限阈值的情况,这也符合模糊逻辑的概 念。

在新息序列故障检测法的基础上,设置  $T_{D1}$ 、 $T_{D2}$ 两个门限阈值,其中  $T_{D2}$ 为传统  $\chi^2$  检验中由误警率确定的门限阈值, $T_{D1}$ 可设置为  $T_{D2}/2$  附近的值,当 检验统计量  $s^2_{\delta\varepsilon,k}$ 大于  $T_{D2}$ 时,判断系统故障;当  $s^2_{\delta\varepsilon,k}$ 介 于门限阈值  $T_{D1}$ 和  $T_{D2}$ 之间时,即检验统计量落在交 迭部分时,启动故障警戒过程,并设置  $s^2_{\delta\varepsilon,k}$ 等于  $T_{D1}$ 时的 概率为 0.5;当  $s^2_{\delta\varepsilon,k}$ 小于  $T_{D1}$ 时,判断系统无故障。根据 以上分析,引入 k 次偏大型模糊隶属函数<sup>[17]</sup>

$$A(x) = \begin{cases} 0 & (x < a) \\ \left(\frac{x - a}{b - a}\right)^{k} & (a \le x < b) \\ 1 & (x \ge b) \end{cases}$$
(11)

调节参数 a、b 和 k,构造全新检验统计量函数

$$f_{k}(s_{\delta z,k}^{2}) = \begin{cases} 0 & (s_{\delta z,k}^{2} < T_{D1}) \\ \frac{\sqrt{s_{\delta z,k}^{2} - T_{D1}}}{\sqrt{T_{D2} - T_{D1}}} + 0.5 & (T_{D1} \leq s_{\delta z,k}^{2} < T_{D2}) \\ 1 & (s_{\delta z,k}^{2} \geq T_{D2}) \end{cases}$$

$$(12)$$

该函数能够将检验统计量  $s_{\delta\varepsilon,k}^2$  归一化处理,将  $s_{\delta\varepsilon,k}^2$ 映射到区间[0,1],落到交迭部分的  $s_{\delta\varepsilon,k}^2$ 将其映 射到开区间(0.5,1)。为了加强当前检验统计量的 作用,提高对故障信息的响应时间,将得到的  $f_k(s_{\delta\varepsilon,k}^2)$ 进行加权平均

$$X_{\delta z,k}^{2} = 0.5X_{\delta z,k-1}^{2} + \beta f_{k}(s_{\delta z,k}^{2})$$
(13)

式中, $\beta$ 为加权因子,取值近似等于1,它决定了当前 检验统计量在加权统计量 $X^2_{\delta z,k}$ 中所占的比重。当检 验统计量 $s^2_{\delta z,k}$ 连续若干次落在交迭部分时,一定满 足 $X^2_{\delta z,k} \ge 1$ ,且 $X^2_{\delta z,k}$ 大于等于1的速度取决于加权因 子 $\beta$ 和 $f_k(s^2_{\delta z,k})$ 的乘积。当检验统计量 $s^2_{\delta z,k}$ 连续若 干次小于 $T_{D1}$ 时,一定满足 $X^2_{\delta z,k} < 1$ 。根据以上分析, 设计如下故障判定准则:若 $X^2_{\delta z,k} \ge 1$ ,判定子系统故 障,隔离后重置为1;若 $X^2_{\delta z,k} < 1$ ,判定子系统正常。

在传统新息序列故障检测法的基础上,设置  $T_{D1}$ 、 $T_{D2}$ 两个门限阈值,利用模糊逻辑函数构造检验 统计量函数 $f_k(s^2_{\delta z,k})$ ,结合加权平均算法,构造改进 的新息序列故障检测法。

# 3 多传感器农业机械组合导航系统

该多传感器农业机械组合导航系统包括微捷联 惯性导航系统(MSINS)、全球卫星导航系统(GNSS) 和磁力计(Mag)。MSINS 自主性强,能够高频率输 出姿态、速度、位置等多种信息,但误差随时间累积; GNSS 定位和测速精度高,误差不累积,但是输出信 息不连续且易受干扰;磁力计具有体积小、功耗低、 适合近地磁场测量等特点<sup>[18-19]</sup>,在该系统中加入磁 力计,可以增加该组合导航系统状态的可观测性,从 而进一步降低姿态误差。为提高系统容错能力,信 息融合采用无重置的联邦滤波结构<sup>[20]</sup>,将 MSINS 作为主参考系统,组成 MSINS/GNSS 和 MSINS/Mag 两个子系统。在进行主滤波器信息融合前,对 2 个 子系统进行故障检测与隔离,保证组合导航系统不 受故障量测信息的污染。该组合导航系统结构如 图1所示。

$$\boldsymbol{C}_{u}^{-1} = \sum_{\substack{i=k+1-N\\K}}^{K} \boldsymbol{C}_{\delta z,i}^{-1}$$



Fig. 1 Structure diagram of MSINS/GNSS/Mag composite navigation system

该系统中各子滤波器和主滤波器的系统状态变 量相同,状态方程为

 $X_{k} = \mathbf{\Phi}_{k/k-1} X_{k-1} + W_{k-1}$ (14)式中 X<sub>k</sub>——k 时刻状态估计

 $\Phi_{k/k-1}$ ——系统 k-1 时刻到 k 时刻的状态转 移矩阵

 $W_{k-1}$ ——k-1 时刻的系统噪声协方差矩阵

选择惯导系统的失准角误差  $\boldsymbol{\phi}$ 、速度误差  $\delta v^{n}$ 、 位置误差  $\delta p^{i}$ 、陀螺仪漂移  $\varepsilon_{\epsilon}^{b}$ 、加速度计偏值  $\nabla_{\epsilon}^{b}$ 作为 状态向量(共15维)

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}} & (\delta \boldsymbol{v}^{n})^{\mathrm{T}} & (\delta \boldsymbol{p}^{n})^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{\varepsilon}_{r}^{b})^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{\nabla}_{r}^{b})^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$
(15)

 $Z_2 = H_2 X + V_2$ 

子滤波器1的量测方程为

$$\boldsymbol{Z}_1 = \boldsymbol{H}_1 \boldsymbol{X} + \boldsymbol{V}_1 \tag{16}$$

其中  $\boldsymbol{H}_{1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{O}_{6\times3} & \boldsymbol{I}_{6\times6} & \boldsymbol{O}_{6\times11} \end{bmatrix}$ 

式中 V,——GNSS 位置量测误差

0-----零矩阵

子滤波器2的量测方程为

)

其中

 $\boldsymbol{H}_{2} = \left[ \left( \boldsymbol{h}^{n} \times \right) \quad \boldsymbol{O}_{3 \times 12} \right]$ 

V.——磁力计量测误差

 $h^n \times - h^n$ 的反对称矩阵

### 仿真与分析

### 4.1 仿真条件

为了验证改进的新息序列故障检测法的效果, 将其与传统的新息序列故障检测法进行仿真实验对 比。仿真实验模拟农业机械车辆作业环境,仿真时 间设置为600s,考虑到车辆启动、转弯、直行、停车 等运动状态,设置车辆运动轨迹中包含直线加速行 驶、直线匀速行驶、车辆转弯、直线减速停止等运动 状态的切换。初始位置为北纬 34°,东经 108°,高度 0 m:初始航向误差为1°;初始速度误差0.1 m/s;初 始位置误差5m。系统中参照真实传感器测量精度 进行设置:陀螺仪偏差为  $10(\circ)/h(1\sigma)$ , 陀螺随机 游走为 0.15(°)/ $\sqrt{h}$ ;加速度计偏差为 100 mg(1 $\sigma$ ), 加速度随机游走为50 µg/ √Hz;磁强计测量精度为 50 nT(1σ), 地磁场模型误差为 100 nT; GNSS 接收 机定位精度为10m。

由于 MSINS 所用传感器器件精度较低,故障时 间设置过长,即便检测出故障并成功进行隔离,仍然 会造成导航系统输出精度严重下降。因此在该系统 中,故障时间不宜设置过长。为模拟真实使用环境, 现设置故障条件如下:

(1)200~220 s,对 GNSS 定位结果中加入小幅 斜坡的缓变故障,故障函数为

$$m(t) = \frac{(t - 200) d_{avp}}{15} \quad (200 \text{ s} < t < 220 \text{ s})$$

式中 d<sub>avp</sub>——初始位置误差

(2)500~520 s,对磁力计量测值加入 10 倍量 测误差的突变故障。

缓变故障是随机发生的,故障函数 m(t)对缓变 故障量的表述符合缓变故障的定义,可用来验证缓 变故障检测算法。

#### 4.2 仿真结果分析

按照仿真条件对2种算法进行仿真实验验证。 设置传统的新息序列故障检测法的误警率为0.01,  ${}^{4}$   $\chi^{2}$  分布临界值表得对应的门限值为 30.58;改进 的新息序列故障检测法 T<sub>D2</sub>同样设置为 30.58, T<sub>D1</sub>设 置为20。

传统的新息序列故障检测法对缓变故障的检测 效果如图2所示,从图中可以看出,该方法可以检测 到缓变故障,故障发生时间为200~220s,该方法在 211~220 s 检出故障, 延迟 11 s。



基于模糊逻辑的新息序列故障检测法的检验统 计量如图 3 所示,加权统计量 X<sup>2</sup><sub>8\*</sub> 取值如图 4 所示。

从图 3 可以看出,检验统计量在 211~220 s 超 出门限阈值  $T_{D2}$ ,在 203~220 s 超出门限阈值  $T_{D1}$ , 统计量函数值在 203 s 取值不为 0,在 205~220 s 取







值为1,因此,改进的新息序列故障检测法在205~ 220 s 检出故障,延迟5 s。此外,从图2、4 可以看出, 2 种方法均会对量测量造成偶发的误警,但从图4可看出,本文提出的改进的新息序列故障检测法,尽管设 置了2 个门限阈值,但并没有增加虚警率。

为进一步分析 2 种故障检测方式面对缓变故 障时对组合导航系统性能带来的影响,以位置误 差为例进行分析。图 5 为进行了故障检测及隔离 与未进行故障检测及隔离的组合导航系统位置误 差曲线。

从图 5 可以看出,在缓变故障发生期间,传统的 新息序列故障检测法由于故障检测时间延迟较长, 北向位置误差在 220 s 时达到最大,为 8.072 m,东 向位置误差在 220 s 时达到最大,7.508 m;改进的新 息序列故障检测法由于较早检测出缓变故障,在 205 s 检测出故障并对故障子系统 1 进行隔离,在 205 s 之后位置误差发散得到抑制,北向位置误差在 220 s 时达到最大,1.630 m,东向位置误差在 220 s 时达到最大,1.447 m;未进行故障检测及隔离的组 合导航系统北向位置误差在 220 s 时达到最大, 11.090 m,东向位置误差在 220 s 时达到最大, 10.710 m。结合 2 种故障检测方法的组合导航系统 速度误差曲线如图 6 所示。

表1列出了结合2种故障检测方法的联邦滤波 导航系统,在相同仿真实验条件下得到的速度与位 置误差的标准差对比结果。从表1也可以看出,本 文提出的故障检测方法,相比传统的新息序列故障 检测法,能够较早地检测到缓变故障并进行隔离,使



Fig. 6 Speed error curves

整个组合导航系统受到故障量测量的影响更小,证 明了该算法在检测缓变故障时的优越性。

表1 速度、位置误差标准差对比

 
 Tab. 1 Comparison of standard differences in speed and position error

统计量	传统方法	本文方法
东向速度误差/(m·s <sup>-1</sup> )	0. 089	0.083
北向速度误差/(m·s <sup>-1</sup> )	0.128	0.099
东向位置误差/m	1.379	0.753
北向位置误差/m	1.739	1.170

此外,在磁力计发生突变故障时,2种故障检测 方法均能有效检测故障并进行隔离。传统的新息序 列故障检测法对突变故障的检测效果如图7所示, 改进的新息序列故障检测法加权统计量 X<sup>2</sup><sub>δs,k</sub>取值如 图8所示。







Fig. 8 Mutation fault weighted statistics  $X_{\delta = k}^2$  value

已知磁力计故障设置在 500~520 s,从图 7、8 可以看出,2种故障检测方法均在 500~520 s 检测 出磁力计突变故障。

为进一步分析2种故障检测方式面对突变故障 时对组合导航系统性能带来的影响,以航向角误差 进行说明。图9为进行故障检测及隔离与未进行故 障检测及隔离的组合导航系统航向角误差曲线。



从图中可以看出,在磁力计突变故障发生时两种故 障检测方法均能有效抑制航向角误差发散。

# 5 结束语

传统的残差 χ<sup>2</sup> 检测法未充分考虑到缓变故障 渐进变化的特点,导致对缓变故障的检测失效。而 传统的新息序列故障检测法对缓变故障的检测有一 定的效果,但故障检测效果受到门限阈值以及序列 长度的限制。本文在传统新息序列检测法的基础 上,提出了一种改进的新息序列故障检测法,通过模 糊隶属函数构造检验统计量函数,并利用加权平均 法将落在有故障和无故障概率密度曲线交迭区域的 检验统计量纳入故障信息检验中,增加了判断缓变 故障的信息,能更早地检测到缓变故障,而又不会增 加虚警。仿真实验结果表明,该方法对突变故障的 检测依旧有效,而且能够有效提高新息序列检测法 对缓变故障的检测能力,对增强多传感器信息融合 的农业机械组合导航系统的容错性具有一定的应用 参考价值。

- 参考文献
- DIAO Zhanlin, QUAN Haiyang, LAN Lidong, et al. Analysis and compensation of MEMS gyroscope drift [C] // International Conference on Sensing Technology. IEEE, 2014.
- [2] XING Haifeng, HOU Bo, LIN Zhihui, et al. Modeling and compensation of random drift of MEMS gyroscopes based on least squares support vector machine optimized by chaotic particleswarm optimization [J]. Sensors, 2017, 17(10):2335-2336.
- [3] TIAN Jing, YANG Wenshu, PENG Zhenming, et al. Application of MEMS accelerometers and gyroscopes in fast steering mirror control systems [J]. Sensors, 2016, 16(4):440-441.
- [4] 刘进一,杜岳峰,张硕,等. 基于 GNSS/MIMU/DR 的农业机械组合导航定位方法[J/OL]农业机械学报,2016,47(增刊): 1-7.
  - LIU Jinyi, DU Yuefeng, ZHANG Shuo, et al. Automatic navigation method for agricultural machinery based on GNSS/MIMU/DR information fusion [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47 (Supp.):1 7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag = 1&file\_no = 2016s001&journal\_id = jcsam. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298.2016. S0.001. (in Chinese)
- [5] HUANG J Y, TSAI C H. Improve GPS positioning accuracy with context awareness [C] // IEEE International Conference on Ubi-Media Computing, 2008: 154 - 159.
- [6] 刘建业,李丹,熊智.一种改进的残差χ<sup>2</sup>检验方法在联邦 UKF 滤波器中的应用[J]. 仪器仪表学报,2009,30(12):2568-2573.

LIU Jianye, LI Dan, XIONG Zhi. Research on an improved residual Chi-square fault detection method for federated unscented Kalman filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(12):2568 - 2573. (in Chinese)

[7] VOLZHIN A S, VIAZMIKIN A A, ZEENICH V S, et al. Integrated system able to measure errors of satellite navigation system receivers [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005,20(8):13-15.

013. (in Chinese)

- [18] 臧英,何新刚,周志艳,等. 电动多旋翼植保无人机升力特性综合测评方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 69-77.
   ZANG Ying, HE Xingang, ZHOU Zhiyan, et al. Comprehensive evaluation method for lifting characteristics of electric multi-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 69-77. (in Chinese)
- [19] 张宏鸣,王斌,韩文霆,等. 基于全卷积神经网络的灌区无人机正射影像渠系提取[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6):241-248.

ZHANG Hongming, WANG Bin, HAN Wenting, et al. Extraction of irrigation networks in irrigation area of UAV orthophotos based on fully convolutional networks [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 241 - 248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag = 1&file\_no = 20190627&journal\_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.027. (in Chinese)

[20] 李盛辉,田光兆,姬长英,等. 自主导航农业车辆的全景视觉多运动目标识别跟踪[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1):1-7.

LI Shenghui, TIAN Guangzhao, JI Changying, et al. Multiple moving objects tracking based on panoramic vision for autonomous navigation of agricultural vehicle [ J/OL ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):1 - 7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag = 1&file\_no = 20150101&journal\_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.001. (in Chinese)

[21] 方旭,刘金琨.四旋翼无人机动态面控制[J].北京航空航天大学学报,2016,42(8):1777-1784.
 FANG Xu, LIU Jinkui. Dynamic surface control for quadrotor unmanned air vehicle [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(8): 1777-1784. (in Chinese)

(上接第 33 页)

- [8] 赵珍,王福利,贾明兴,等.缓变故障的概率故障预测方法研究[J].控制与决策,2010,25(4):572-576.
   ZHAO Zhen,WANG Fuli, JIA Mingxing, et al. Research on probabilistic fault prediction of incipient fault[J]. Control and Decision,2010,25(4):572-576. (in Chinese)
- [9] 谷善茂,张妮,刘云龙.基于累积和等距映射的缓变故障检测方法[J].计算机应用与软件,2016,33(6):251-254,305.
   GU Shanmao,ZHANG Ni,LIU Yunlong. Ramp fault detection method based on CASUM ISOMAP[J]. Computer Applications and Software,2016,33(6):251-254,305. (in Chinese)
- [10] 高运广,王仕成,刘志国,等.一种基于 LS-SVM 的联邦滤波故障检测方法[J]. 控制与决策,2011,26(9):1433-1435, 1440.

GAO Yunguang, WANG Shicheng, LIU Zhiguo, et al. Fault detection method based on LS – SVM for federated Kalman filter [J]. Control and Decision, 2011,26(9):1433 – 1435,1440. (in Chinese)

- [11] 熊智,邵慧,华冰,等.改进故障隔离的容错联邦滤波[J]. 航空学报,2015,36(3):929-938.
   XIONG Zhi,SHAO Hui,HUA Bing, et al. An improved fault tolerant federated filter with fault isolation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2015,36(3):929-938. (in Chinese)
- [12] 王融,刘建业,熊智,等.基于序贯概率映射的组合导航自适应容错算法[J]. 控制与决策,2014,29(10):1861-1865.
   WANG Rong,LIU Jianye,XIONG Zhi, et al. Adaptive fault-tolerant algorithm based on sequential probability mapping for integrated navigation[J]. Control and Decision,2014,29(10):1861-1865. (in Chinese)
- [13] 周俊,张鹏. 基于灰色预测的农业机器人 GPS 导航系统硬故障隔离[J]. 农业机械学报,2010,41(12):165-168,177.
   ZHOU Jun,ZHANG Peng. Hard fault isolation of GPS navigation system based on gray prediction for agricultural robot[J].
   Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(12):165-168,177. (in Chinese)
- [14] 秦永元,张洪钺,王叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2012:259-260.
- [15] GROVES P D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems [M]. Norwood: Artech House Publishers, 2011;641-642.
- [16] 徐力平,赵忠华,张炎华. 导航传感器故障检测策略[J]. 上海交通大学学报,2002,36(7):966-969.
   XU Liping,ZHAO Zhonghua,ZHANG Yanhua. Navigation sensor failure detecting tactic [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002,36(7):966-969. (in Chinese)
- [17] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2005:22-24.
- [18] 全伟,刘百奇,宫晓琳,等.惯性/天文/卫星组合导航技术[M].北京:国防工业出版社,2011:150-151.
- [19] 韩辅君,徐静,宋世忠.基于低成本多传感器的自适应组合滤波[J].光学精密工程,2011,19(12):3007 3015.
   HAN Fujun,XU Jing, SONG Shizhong. Adaptive attitude estimation filtering with low-cost multi-sensors for MAHRS[J].
   Optics and Precision Engineering,2011,19(12):3007 3015. (in Chinese)
- [20] 马传焱,熊智,许建新,等.一种联邦滤波信息共享分配算法[J].中国惯性技术学报,2013,21(3):347-353.
   MA Chuanyan,XIONG Zhi,XU Jianxin, et al. Federated filter information sharing allocation algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2013,21(3):347-353. (in Chinese)