



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目：冗余配置双轴旋转惯导故障自主在线检测与诊断方法
作者：梁钟泓，罗晖，廖志坤，王元涵，牟鹏程，王林
收稿日期：2024-11-04
网络首发日期：2025-03-14
引用格式：梁钟泓，罗晖，廖志坤，王元涵，牟鹏程，王林. 冗余配置双轴旋转惯导故障自主在线检测与诊断方法[J/OL]. 国防科技大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20250314.0936.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

冗余配置双轴旋转惯导故障自主在线检测与诊断方法

梁钟泓^{1,2}, 罗 晖^{1,2}, 廖志坤^{1,2}, 王元涵^{1,2}, 牟鹏程^{1,2}, 王 林^{1,2*}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对水下等全球导航卫星系统拒止环境中长航时海军舰艇惯导系统故障诊断困难的问题, 提出一种冗余配置双轴旋转惯导系统 (dual-axis rotational inertial navigation systems, DRINSs) 故障在线自主故障检测与诊断方法。以两套 DRINSs 各自误差状态为系统状态构建联合状态方程, 并以二者之间的几何约束为观测建立基于残差归一化的强跟踪滤波器。进一步提出了两套双轴旋转惯导系统的异步旋转策略, 使两套系统各自的陀螺仪漂移和加速度计零偏均可观, 并能实现分离估计。根据误差状态的估计结果构建了基于修正 Bayes 的故障检测与诊断算法, 并设计了故障确认阶段以提高算法的鲁棒性。实验结果表明, 所提出的方法能够实现惯性器件故障的在线自主诊断, 诊断的正确率高于 99%, 能够有效保障长航时舰艇惯导系统导航信息的可靠性。

关键词: 故障检测与诊断; 双轴旋转惯导系统; 几何约束观测; 冗余配置

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

Autonomous online fault detection and diagnosis method for DRINSs in redundant configuration

LIANG Zhonghong^{1,2}, LUO Hui^{1,2}, LIAO Zhikun^{1,2}, WANG Yuanhan^{1,2}, MU Pengcheng^{1,2},
WANG Lin^{1,2*}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To address the fault diagnosis challenges faced by inertial navigation systems on long-endurance naval vessels in underwater or other global navigation satellite system-denied environments, an autonomous online FDD(fault detection and diagnosis) algorithm for DRINSs(dual-axis rotational inertial navigation systems) in redundant configuration was proposed. The joint state equation was constructed based on the error states of two sets of DRINSs as the system state, and the residual-normalized strong tracking filter could be established based on geometric constraint observation between the two. Furthermore, the asynchronous rotation strategy for two sets of inertial navigation systems was designed. The gyro drifts and accelerometer biases of both systems were proved to be observable and they could be estimated separately. The modified Bayes FDD algorithm was constructed based on the estimation results of the error states. The fault confirmation stage was designed to improve the robustness of the algorithm. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm can achieve the autonomous online diagnosis of inertial sensor faults, and the correct diagnosis rate is greater than 99%, which can effectively guarantee the reliability of navigation information for inertial navigation systems on long-endurance naval vessels.

Keywords: fault detection and diagnosis; dual-axis rotational inertial navigation systems ; geometric constraint observation; redundant configuration.

旋转调制惯导系统通过周期性旋转惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)来调制惯导系统的确定性误差从而实现导航定位精度的提升^[1]。合理的双轴旋转调制方法能抵消三轴陀螺漂移和三轴加速度计零偏对导航精度的影响, 以较

低的成本大幅提高导航精度, 因此双轴旋转惯导系统(dual-axis rotational inertial navigation systems, DRINSs)被广泛应用于各类长航时自主导航领域, 特别是航海导航^[2-3]。

舰艇长航时航行对导航系统的可靠性要求极

收稿日期: 2024-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62003360), 国防科技大学自主创新科学基金资助项目 (23-ZZCX-JDZ-18)

第一作者: 梁钟泓 (1998—), 男, 山西大同人, 博士研究生, E-mail: liangzhonghong@nudt.edu.cn

*** 通信作者:** 王林 (1987—), 男, 山东淄博人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, E-mail: wanglin11@nudt.edu.cn

高, 因此需要对导航系统进行容错设计。在传统的导航系统容错框架中, 通常是基于多传感器融合实现传感器故障的检测与隔离^[4-7]。然而, 在水下或其他全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)拒止环境下, 舰艇安全航行高度依赖于惯导系统的导航信息。在长达数天甚至数十天的连续工作下, 惯导系统的可靠性面临严峻挑战。因此, 对于安全性要求极高的大型舰艇通常冗余配置两套或以上旋转惯导系统, 以提高系统整体可靠性, 保证长航时自主航行能力^[8]。

近些年来的一些研究表明, 利用多套惯导系统的冗余导航信息, 系统之间进行信息协同, 能够实现惯性器件误差状态的分离估计^[9-11]。文献[9]提出一种基于双惯导系统协同的全参数在线标定算法, 利用主/子惯导的协同实现了对子惯导系统的在线标定。文献[10]基于激光/光纤陀螺惯导冗余的配置对激光陀螺漂移、光纤陀螺的标度因数进行在线估计, 提高了定位精度。文献[11]基于主/子惯导的相对姿态估计子惯导的陀螺漂移从而提高子惯导的精度。这些方案的优势在于不需要外界参考信息, 仅依托惯导组网融合实现系统整体性能的提升。

当惯性器件发生故障时其输出误差特性会发生改变, 通过上述方法对惯性器件的误差状态的在线估计, 实时监控器件健康状态能够对冗余惯导系统进行故障检测与诊断(fault detection and diagnose, FDD)^[12-13]。这种方案可以有效克服传统基于多数表决原则的故障诊断方法至少需要配置三套惯导的限制^[14]。Hunter 通过实时监测两套旋转轴正交的平台式惯导系统之间相对姿态的等效旋转矢量实现故障陀螺的检测与识别^[12], 但由于成本和可靠性等因素, 平台式惯导系统逐步被旋转惯导取代。文献[13]基于两套 DRINSs, 采用两套系统旋转轴正交的方案实现陀螺漂移和加速度计零偏的在线监测, 以此实现故障惯性器件的隔离, 然而该方案中的 DRINSs 仅围绕单一轴进行旋转, 未充分利用 DRINSs 本身的优势与特性。

针对目前常见的两套独立工作的 DRINSs 冗余配置, 提出了一种自主在线故障检测与诊断方法, 将两套系统输出的导航信息传递至综合导航系统后进行故障检测与诊断。基于两套惯导系统的导航信息, 构建联合误差状态模型, 利用两套惯导系统之间的几何约束关系作为观测, 采用基

于残差归一化的强跟踪滤波器对两套系统的陀螺漂移、加速度计零偏进行在线跟踪估计。进一步基于修正的 Bayes 算法对惯性器件的故障进行检测和诊断, 设计了故障确认阶段以提高诊断的准确性。提出的方法采用开环滤波方案, 不影响系统的正常工作模式, 便于现有系统的优化升级。

1 冗余惯导系统状态空间模型

1.1 联合状态方程

以当地水平地理坐标系(东-北-天)为导航坐标系(n 系), 将两套 DRINSs 各自的误差状态联立构成联合状态方程, 具体写为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_1(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1(t) & \mathbf{0}_{15 \times 15} \\ \mathbf{0}_{15 \times 15} & \mathbf{F}_2(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1(t) \\ \mathbf{x}_2(t) \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1(t) & \mathbf{0}_{15 \times 6} \\ \mathbf{0}_{15 \times 6} & \mathbf{G}_2(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1(t) \\ \mathbf{w}_2(t) \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{F}(t)$ 为系统状态转移矩阵, $\mathbf{F}_1(t)$ 和 $\mathbf{F}_2(t)$ 为两套系统各自的状态转移矩阵, 其具体定义参考文献[15], $\mathbf{G}(t)$ 为噪声分配矩阵, $\mathbf{w}(t)$ 为两套系统的联合噪声, $\mathbf{x}(t)$ 由两套系统的姿态误差、速度误差、位置误差以及两套系统的陀螺漂移、加速度计零偏联合构建, 共计 30 维, 表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= [\phi_{E1}^n \ \phi_{N1}^n \ \phi_{U1}^n \ \delta v_{E1}^n \ \delta v_{N1}^n \ \delta v_{U1}^n \ \delta L_1 \ \delta \lambda_1 \ \delta h_1 \\ &\quad \varepsilon_{x1} \ \varepsilon_{y1} \ \varepsilon_{z1} \ \nabla_{x1} \ \nabla_{y1} \ \nabla_{z1} \ \phi_{E2}^n \ \phi_{N2}^n \ \phi_{U2}^n \\ &\quad \delta v_{E2}^n \ \delta v_{N2}^n \ \delta v_{U2}^n \ \delta L_2 \ \delta \lambda_2 \ \delta h_2 \ \varepsilon_{x2} \ \varepsilon_{y2} \ \varepsilon_{z2} \\ &\quad \nabla_{x2} \ \nabla_{y2} \ \nabla_{z2}]^T \end{aligned} \quad (2)$$

其中, ϕ_{Ek}^n 、 ϕ_{Nk}^n 、 ϕ_{Uk}^n 表示 DRINSs k ($k=1,2$) 东向、北向和天向的姿态误差, δv_{Ek}^n 、 δv_{Nk}^n 、 δv_{Uk}^n 表示 DRINSs k 的东向、北向和天向的速度误差, δL_k 、 $\delta \lambda_k$ 、 δh_k 表示 DRINSs k 纬度、经度和高度误差, ε_{xk} 、 ε_{yk} 、 ε_{zk} 表示 DRINSs k 的各轴陀螺漂移, ∇_{xk} 、 ∇_{yk} 、 ∇_{zk} 表示 DRINSs k 的各轴加速度计零偏。

1.2 基于几何约束的观测方程

两套 DRINSs 测量的是同一载体的运动状态, 安装完毕后两套 DRINSs 之间的相对几何关系是固定的, 根据这一约束可以构建系统观测方程。

DRINSs 一般工作于旋转调制状态, 这会导致 IMU 测量的姿态信息与转位机构旋转角相耦

合。将两套 DRINSs 转位机构处于零位时的 IMU 坐标系定义为 s_{10} 系和 s_{20} 系，旋转时的 IMU 坐标系定义为 s_{1t} 系和 s_{2t} 系，载体坐标系以 s_{10} 系为基准，即载体坐标系与 s_{10} 系重合。两套 DRINSs 输出的姿态矩阵可以表示为：

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{C}}_{s_{1t}}^n = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - [\boldsymbol{\phi}_1^n \times]) \mathbf{C}_{s_{10}}^n \mathbf{C}_{s_{1t}}^{s_{10}} \\ \tilde{\mathbf{C}}_{s_{2t}}^n = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - [\boldsymbol{\phi}_2^n \times]) \mathbf{C}_{s_{10}}^n \mathbf{C}_{s_{20}}^{s_{10}} \mathbf{C}_{s_{2t}}^{s_{20}} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{C}_{s_{1t}}^{s_{10}}$ 和 $\mathbf{C}_{s_{2t}}^{s_{20}}$ 分别表示转位机构 t 时刻相对其零位的姿态矩阵。事实上，转位机构的旋转路径是预先设计的，因此 $\mathbf{C}_{s_{1t}}^{s_{10}}$ 和 $\mathbf{C}_{s_{2t}}^{s_{20}}$ 可以根据转位机构的转动次序由编码器输出确定， s_{10} 系和 s_{20} 系之间的姿态矩阵 $\mathbf{C}_{s_{20}}^{s_{10}}$ 在安装完成后也可以精确标定得到。基于上述分析，两套 DRINSs 输出的姿态存在以下关系：

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{C}}_{s_{1t}}^n \mathbf{C}_{s_{10}}^{s_{10}} \mathbf{C}_n^{s_{10}} (\tilde{\mathbf{C}}_{s_{2t}}^n \mathbf{C}_{s_{20}}^{s_{20}} \mathbf{C}_{s_{10}}^{s_{20}} \mathbf{C}_n^{s_{10}})^{-1} \\ = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - [\boldsymbol{\phi}_1^n \times]) (\mathbf{I}_{3 \times 3} - [\boldsymbol{\phi}_2^n \times])^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

对式(4)等号进行化简并忽略二阶小量可以得到两套 DRINSs 姿态误差的差值表达式：

$$[\boldsymbol{\phi}_{12}^n \times] \approx \mathbf{I}_{3 \times 3} - \tilde{\mathbf{C}}_{s_{1t}}^n \mathbf{C}_{s_{10}}^{s_{10}} \mathbf{C}_{s_{20}}^{s_{10}} \mathbf{C}_{s_{2t}}^{s_{20}} \tilde{\mathbf{C}}_n^{s_{10}} \quad (5)$$

式中， $\boldsymbol{\phi}_{12}^n = \boldsymbol{\phi}_1^n - \boldsymbol{\phi}_2^n = [\phi_{E12}^n \ \phi_{N12}^n \ \phi_{U12}^n]^T$ 表示两套 DRINSs 姿态误差的差值。

由于安装空间制约，两套 DRINSs 之间存在相对位置关系，即外杆臂，其引起的 DRINSs 2 相对 DRINSs 1 的速度差值和位置差值表示为：

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{l12}^n = \mathbf{C}_{s_{10}}^n (\boldsymbol{\omega}_{e s_{10}}^{s_{10}} \times \mathbf{l}_{12}^{s_{10}}) \\ \mathbf{l}_{p12} = \mathbf{C}_{s_{10}}^n \mathbf{l}_{12}^{s_{10}} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $\mathbf{v}_{l12}^n$ 表示外杆臂引起的两套 DRINSs 之间的速度差值， $\mathbf{l}_{p12}$ 表示两套 DRINSs 之间的外杆臂矢量， $\boldsymbol{\omega}_{e s_{10}}^{s_{10}}$ 为 s_{10} 系相对于地球坐标系 e 系的角速度， $\mathbf{l}_{12}^{s_{10}}$ 为外杆臂在 s_{10} 系的投影， $\mathbf{C}_{s_{10}}^n$ 表示 s_{10} 系与 n 系间的姿态矩阵。因此，两套 DRINSs 输出的速度 $\tilde{\mathbf{v}}_k^n$ 和位置 $\tilde{\mathbf{p}}_k$ 包含载体真实速度位置 $\mathbf{v}^n$ 和 $\mathbf{p}$ 、惯导解算的误差 $\delta \mathbf{v}_k^n$ 和 $\delta \mathbf{p}_k$ 以及外杆臂引起的两套系统之间的速度位置差值 $\mathbf{v}_{l12}^n$ 和 $\mathbf{l}_{p12}$ ，具体表示为：

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{v}}_1^n = \mathbf{v}^n + \delta \mathbf{v}_1^n, \tilde{\mathbf{v}}_2^n = \mathbf{v}^n + \delta \mathbf{v}_2^n + \mathbf{v}_{l12}^n \\ \tilde{\mathbf{p}}_1 = \mathbf{p} + \delta \mathbf{p}_1, \tilde{\mathbf{p}}_2 = \mathbf{p} + \delta \mathbf{p}_2 + \mathbf{l}_{p12} \end{cases} \quad (7)$$

基于上述分析，可以由系统间的几何关系得到两套 DRINSs 速度误差、位置误差之间的约束关系：

$$\begin{cases} \delta \mathbf{v}_{12}^n = \delta \mathbf{v}_1^n - \delta \mathbf{v}_2^n = \tilde{\mathbf{v}}_1^n - (\tilde{\mathbf{v}}_2^n - \mathbf{v}_{l12}^n) \\ \delta \mathbf{p}_{12} = \delta \mathbf{p}_1 - \delta \mathbf{p}_2 = \tilde{\mathbf{p}}_1 - (\tilde{\mathbf{p}}_2 - \mathbf{l}_{p12}) \end{cases} \quad (8)$$

式中， $\delta \mathbf{v}_{12}^n = [\delta v_{E12}^n \ \delta v_{N12}^n \ \delta v_{U12}^n]^T$ 表示速度误差的差值， $\delta \mathbf{p}_{12} = [\delta L_{12} \ \delta \lambda_{12} \ \delta h_{12}]^T$ 表示位置误差的差值。

对于航海惯导系统而言，高度通道一般具有独立观测，例如深度计等。因此观测向量包括两套 DRINSs 之间的姿态误差差值 $\boldsymbol{\phi}_{12}^n$ 、东向速度误差差值 δv_{E12}^n 和北向速度误差差值 δv_{N12}^n 、纬度误差差值 δL_{12} 和经度误差差值 $\delta \lambda_{12}$ ，以及高度通道独立观测，系统观测方程表示为：

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(t) &= \mathbf{H}(t) \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \\ &= [\phi_{E12}^n \ \phi_{N12}^n \ \phi_{U12}^n \ \delta v_{E12}^n \ \delta v_{N12}^n \ \delta v_{U12}^n \ \delta L_{12} \ \delta \lambda_{12} \ \delta h_1 \ \delta h_2]^T \end{aligned} \quad (9)$$

其中， $\mathbf{H}(t)$ 为观测矩阵， $\mathbf{v}(t)$ 为观测噪声。

1.3 联合旋转策略及可观测度分析

根据文献[16]中的分析，若要实现基于几何约束观测下两套 DRINSs 各自陀螺漂移、加速度计零偏的分离估计，两套 DRINSs 之间的相对姿态 $\mathbf{C}_{s_{2t}}^{s_{1t}}$ 需要存在变化。在实际应用中，冗余配置的两套系统通常采用同样的旋转调制方案，其中 16 次序最为常用。因此以两套 DRINSs 工作时均采用 16 次序旋转方案为前提，通过异步启动实现两套系统同旋转方案异步转动的联合旋转策略。此时由于旋转方案时序错位，两套 DRINSs 相对姿态随着惯性测量单元的旋转而改变，因而两套 DRINSs 各自的惯性器件漂移可实现分离估计。基于协方差分析的方法分析该联合旋转策略下各误差量的可观测度，定义基于卡尔曼滤波协方差阵的误差可观测度为^[17]：

$$\sigma_{k(i)} = \sqrt{\frac{P_{0(i,i)}}{P_{k(i,i)}}} \quad (10)$$

其中， $\sigma_{k(i)}$ 表示 k 时刻第 i 个误差状态的可观测度， $P_{0(i,i)}$ 表示第 i 个误差状态初始时刻的方差， $P_{k(i,i)}$ 表示第 i 个误差状态 k 时刻的方差。一般来说，可观测度大于 10 则认为该误差状态可观测性强^[17]。需要注意的是，可观测度代表了误差状态可以被估计的水平，但不能直接用于衡量估计结果的绝对准确度。利用仿真数据对陀螺漂移和加速度计零偏的可观测度进行分析，实验结果如

图 1 所示。

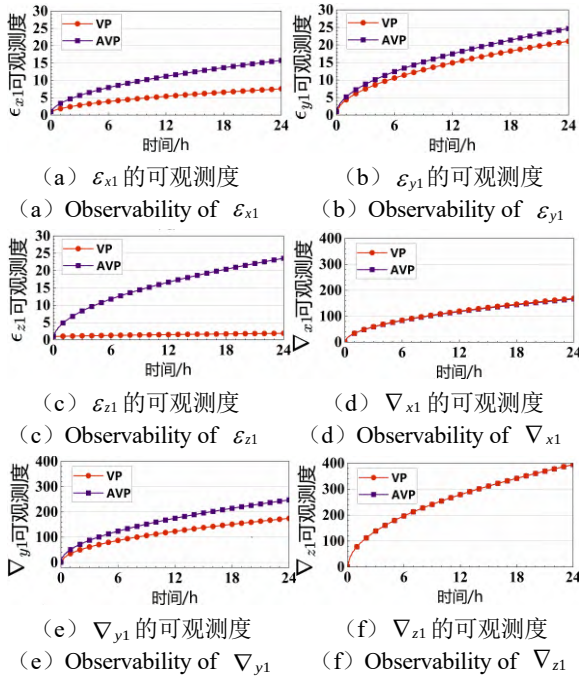


图 1 误差状态可观测度

Fig.1 Observability of the error states

图 1 对比了以相对速度位置作为观测以及增加相对姿态观测后各惯性器件误差状态的可观测度，同时对滤波时间对于可观测度的影响。两套 DRINSs 系统各轴陀螺漂移初始时刻的均方差设置为 0.005 ($^{\circ}$)/h，加速度计零偏初始时刻的均方差设置为 $20 \mu\text{g}$ 。由于两套 DRINSs 对应的陀螺漂移和加速度计零偏的可观测度基本一致，仅给出了 DRINSs 1 误差状态的可观测度。图中速度-位置 (velocity-position, VP) 表示以两套 DRINSs 之间的相对速度、位置作为观测，姿态-速度-位置 (attitude-velocity-position, AVP) 代表采用增加相对姿态后的观测。可以发现，引入两套 DRINSs 的相对姿态误差作为观测后，陀螺漂移的可观测度明显增大，尤其是 z 轴陀螺。这是因为方位陀螺漂移与速度误差、位置误差之间耦合关系弱，因此 VP 观测下 z 轴陀螺漂移可观测度很低。此外，随着滤波时间的增长，误差状态的可观测度也随之增大，证明所提旋转策略下陀螺漂移与加速度计零偏可以被滤波器很好的估计。

2 误差状态估计及故障检测与诊断算法

2.1 误差状态跟踪估计滤波算法

对系统进行离散化处理，系统状态方程和观测方程表示为：

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \Phi_{k/k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (11)$$

其中， $\Phi_{k/k-1} \approx \mathbf{I} + \mathbf{F}_{k-1} \Delta T$ ， ΔT 为离散间隔，系统噪声与观测噪声不相关且 $\mathbf{w}_k \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_k)$ ， $\mathbf{v}_k \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$ 。在卡尔曼滤波的假设下，系统的残差 γ_k 在不同时刻保持正交，即：

$$E[\gamma_{k+l} \gamma_k^T] = \mathbf{0}, \quad k = 1, 2, \dots; l \geq 1 \quad (12)$$

式中

$$\gamma_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}$$

然而当惯性器件发生故障时，误差状态值发生突变，此时不准确的线性模型会引发残差之间的非正交性，滤波器无法快速准确估计误差状态，因此选用基于残差归一化的强跟踪滤波器对误差状态进行跟踪估计。

强跟踪滤波的核心在于引入渐消因子实时调整预测误差协方差阵，使滤波残差保持相互正交，在模型不准确以及误差状态突变时具有更强的鲁棒性，此时协方差阵的一步预测 $\mathbf{P}_{k/k-1}$ 表示为：

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \lambda_k \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{G}_{k-1}^T \quad (13)$$

其中， $\mathbf{P}_{k-1}$ 表示 $k-1$ 时刻的协方差矩阵。为保证算法的实时性，采用次优算法计算渐消因子：

$$\lambda_k = \begin{cases} \lambda_{0,k}, & \lambda_{0,k} \geq 1 \\ 1, & \lambda_{0,k} < 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中

$$\lambda_{0,k} = \frac{\text{tr}(\mathbf{N}_k)}{\text{tr}(\mathbf{M}_k)}$$

并且有

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_k &= \hat{\mathbf{C}}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{G}_{k-1}^T \mathbf{H}_k^T - \mathbf{l}_k \mathbf{R}_k \\ \mathbf{M}_k &= \mathbf{H}_k \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T \mathbf{H}_k^T \\ \hat{\mathbf{C}}_k &= \begin{cases} \eta^{-1} \gamma_k \gamma_k^T \eta^{-1}, & k = 0 \\ \frac{\rho \hat{\mathbf{C}}_{k-1} + \eta^{-1} \gamma_k \gamma_k^T \eta^{-1}}{1 + \rho}, & k \geq 1 \end{cases} \end{aligned}$$

其中， $\text{tr}(\bullet)$ 为矩阵求迹算子， $\hat{\mathbf{C}}_k$ 为残差协方差阵， η 为归一化参数， $\mathbf{l}_k$ 表示弱化因子， ρ 表示遗忘因子，通常 $0.95 \leq \rho \leq 0.995$ 。对角矩阵 η 的引入旨在消除由于残差本身数值的差异引起的信息不对称，导致误差状态估计的响应速度降低的问题^[18]。归一化参数 η 表示为：

$$\eta = \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m) \quad (15)$$

归一化后的残差表示为：

$$\gamma'_k = \eta^{-1} \gamma_k = \left[\frac{\gamma_1}{\eta_1}, \frac{\gamma_2}{\eta_2}, \dots, \frac{\gamma_m}{\eta_m} \right] \quad (16)$$

为保证残差的理论方差与滤波器实时估计的方差近似相互匹配，且归一化后各分量的残差值几乎相等，归一化参数需要满足：

$$\begin{cases} \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \dots + \gamma_m^2 = \left(\frac{\gamma_1}{\eta_1} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_2}{\eta_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\gamma_m}{\eta_m} \right)^2 \\ \left(\frac{\gamma_1}{\eta_1} \right)^2 \approx \left(\frac{\gamma_2}{\eta_2} \right)^2 \approx \dots \approx \left(\frac{\gamma_m}{\eta_m} \right)^2 \end{cases} \quad (17)$$

以一组无故障时滤波器得到的残差作为先验信息 $z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0m}$ 以确定比例关系的值，得到

$$\eta_i = z_{0i} \sqrt{\frac{m}{z_{01}^2 + \dots + z_{0m}^2}} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (18)$$

基于上述公式在每次滤波更新中计算 λ_k 的值并代入式(13)中进行滤波更新能够在线估计两套 DRINSs 的陀螺漂移和加速度计零偏。由于强跟踪滤波在误差状态突变时具有更强的鲁棒性，因此在惯性器件发生故障时也能对突变的误差状态进行快速估计。

2.2 基于修正 Bayes 的故障检测与诊断算法

DRINSs 在精对准阶段会对陀螺漂移和加速度计零偏进行估计和补偿。在导航阶段假设系统正常工作时陀螺漂移和加速度计零偏满足：

$$\theta \sim N(\theta^0, \sigma_{\theta^0}^2) \quad (19)$$

式中

$$\theta = \begin{bmatrix} \varepsilon_{x1} & \varepsilon_{y1} & \varepsilon_{z1} & \varepsilon_{x2} & \varepsilon_{y2} & \varepsilon_{z2} \\ \nabla_{x1} & \nabla_{y1} & \nabla_{z1} & \nabla_{x2} & \nabla_{y2} & \nabla_{z2} \end{bmatrix}^T$$

其中， θ 为滤波器在线估计的陀螺漂移和加速度零偏的集合。当某一器件发生故障时，器件误差状态可建模为阶跃型偏差，此类故障可用下式描述：

$$\theta_k(i) = \theta_{k-1}(i) + D \cdot \delta_\tau \quad (20)$$

式中， $\theta_k(i)$ 表示在 k 时刻 θ 中的第 i 个变量， δ_τ 表示单位脉冲函数，当且仅当 $k = \tau$ 时 $\delta_\tau = 1$ ，其余时刻 $\delta_\tau = 0$ ； D 表示故障幅值。

基于修正 Bayes 的方法构建诊断函数对故障进行检测与诊断^[19]，具体步骤如下：

根据滤波器输出的误差状态估计值可实时计算该误差状态的均值，表示为：

$$\mu_k(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{\theta}_{k-j}(i) \quad (21)$$

式中， N 为数据窗口长度。基于精对准补偿后的陀螺漂移和加速度计零偏大小设置无故障时的均值 θ^0 ，则无故障时理论方差表示为：

$$\sigma_{k_i}^2(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [\hat{\theta}_{k-j}(i) - \theta^0(i)]^2 \quad (22)$$

而误差状态估计值的方差表示为：

$$\sigma_{k_{ii}}^2(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [\hat{\theta}_{k-j}(i) - \mu_k(i)]^2 \quad (23)$$

构建故障诊断函数：

$$d_k(i) = \frac{\sigma_{k_i}^2(i)}{\sigma_{\theta^0}^2(i)} - \ln \frac{\sigma_{k_{ii}}^2(i)}{\sigma_{\theta^0}^2(i)} - 1 \quad (24)$$

当故障发生时， $\mu_k(i)$ 将显著偏离 $\theta^0(i)$ ，而 $\sigma_{k_{ii}}^2(i)$ 变化不明显，因此诊断函数对故障较为敏感。通过对故障函数设置阈值 $\beta(i)$ 判断器件是否存在故障：

$$d_k(i) \underset{H_1}{\overset{H_0}{\leq}} \beta(i) \quad (25)$$

其中， H_0 表示系统无故障假设， H_1 表示系统出现故障假设。

仅依靠阈值对故障进行诊断可能会导致不必要的虚警以及故障定位错误等问题，增大阈值虽然能够在一定程度上避免该问题，但是会延长诊断时间。因此设置了故障确认阶段来平衡诊断时间与故障诊断结果可信度之间的冲突。当某一器件对应的诊断函数在 $\hat{\tau}$ 时刻超过阈值后，在故障确认的时间阶段 M 内，若故障出现低于阈值的情况，则跳出诊断认为无故障；若诊断函数恒大于阈值，认为出现故障，故障器件 i_f 与故障时刻 t_f 由以下两个公式得到：

$$i_f = \arg \max_{1 \leq i \leq 12} \left(\sum_{k=\hat{\tau}}^{\hat{\tau}+M} d_k(i) \right) \quad (26)$$

$$t_f = \hat{\tau} + M \quad (27)$$

综上，整个方案的技术路线图如图 2 所示。

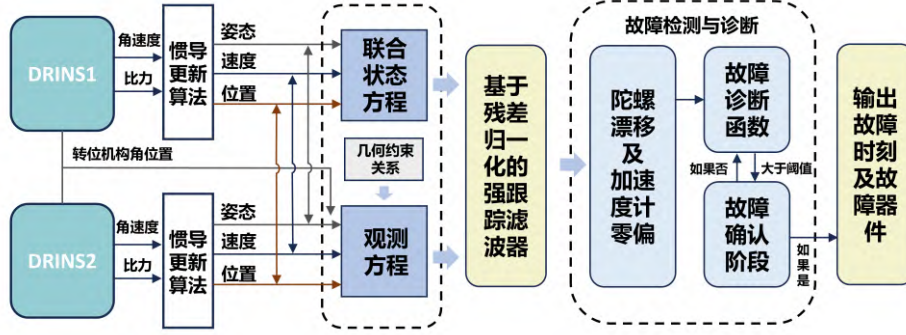


图2 技术路线图

Fig.2 Algorithm flow chart

3 实验验证

为验证所提方法的有效性, 利用两套激光陀螺 IMU 与转台开展实验, 每套 IMU 主要由三轴激光陀螺与三只石英挠性加速度计构成, 器件的性能指标在表 1 中给出。

表 1 惯性器件性能指标

Tab.1 Performance index of inertial device

误差参数	指标
陀螺零偏稳定性	$\leq 0.003^{\circ}/h$
陀螺角随机游走	$\leq 0.0005^{\circ}/\sqrt{h}$
加速度计零偏稳定性	$\leq 20 \mu g$
加速度计噪声功率谱密度	$\leq 10 \mu g/\sqrt{Hz}$

实验中的初始纬度、经度分别为 $28.222^{\circ}N$ 、 $112.993^{\circ}E$, 两套 DRINSs 系统均采用 16 次序双轴调制转位方案, 旋转角速率设置为 $10 (^{\circ})/s$, 转停时间为 60 s。两套 IMU 在不同时刻开展实验, 但两套 DRINSs 系统的启动时间相差 120 s, 采集原始数据后离线进行处理。在实验过程中, 两套 IMU 在转台上不同时刻开展实验, 旋转方案均采用 16 次序双轴调制转位方案, 采集原始数据后离线进行处理。

在两套 IMU 各自的实验过程中, 利用准确的位置速度参考信息进行六小时的精对准以得到 IMU 的初始姿态并估计补偿陀螺漂移和加速度计零偏, 随后进入 16 次序旋转调制导航状态, 导航时长为 72h。在导航阶段利用所提误差状态跟踪估计滤波算法方法对两套 IMU 的陀螺漂移和加速度计零偏进行在线估计, 估计结果如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出, 虽然在精对准结束后扣除了估计的误差值, 但仍存在残余误差以及

在工作时受外界影响产生的漂移误差 (如温度敏感误差等), 但其误差状态的估计值满足器件性能特性。因此, 依据器件性能指标设置阈值, 能够实时监控惯性器件的健康状态, 进而实现故障诊断。

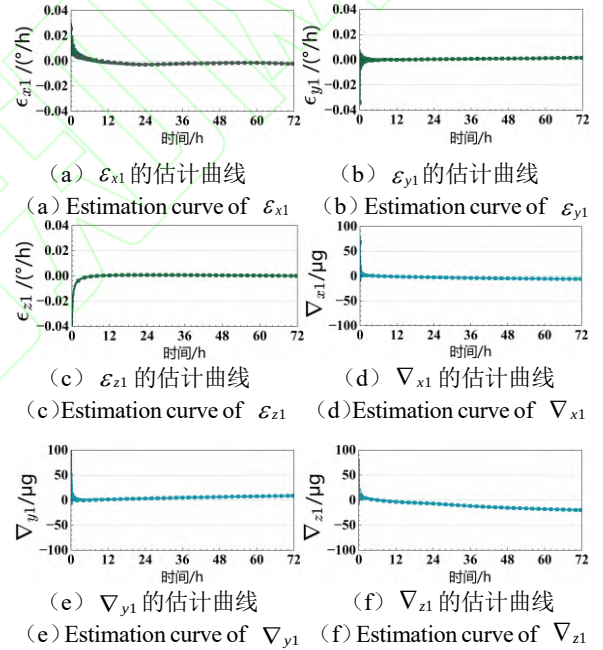
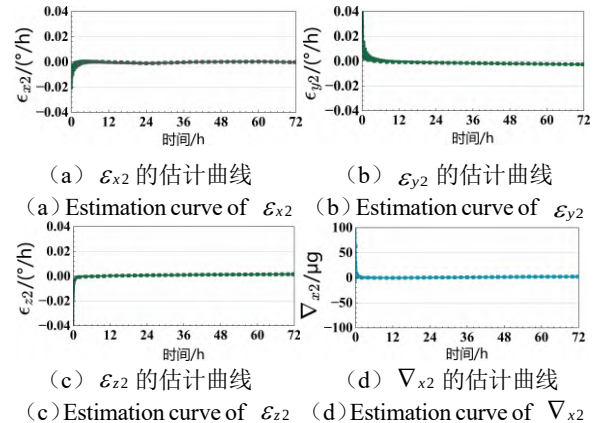


图3 DRINSs 1 误差状态估计曲线

Fig.3 Estimation curves of error state of DRINSs 1



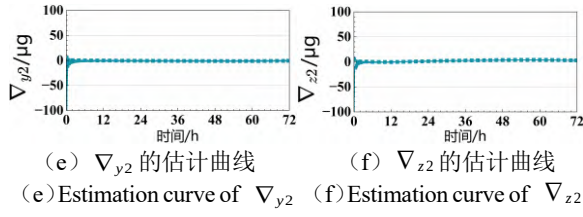


图4 DRINSs 2 误差状态估计曲线

Fig.4 Estimation curves of error state of DRINSs 2

考虑仅有一个惯性器件发生故障的情况，在原始数据中添加故障验证故障诊断算法的有效性。故障添加依据式(21)，故障发生时刻 $\tau=24\text{ h}$ ，陀螺故障幅值设定为 $0.2\text{ }(^{\circ})/\text{h}$ ，加速度计故障幅值设定为 $2000\text{ }\mu\text{g}$ 。根据在线估计的误差状态构建故障诊断函数进行故障诊断，各器件故障诊断的阈值 $\beta(i)$ 均设定为100。图5中给出了六种故障下的故障诊断函数，分别是DRINSs 1的 x 轴陀螺、 z 轴陀螺、 x 轴加速度计故障，DRINSs 2的 y 轴陀螺、 y 轴加速度计、 z 轴加速度计故障。从图中可以看出，在惯性器件故障后，故障器件对应的故障函数值出现跳变而其余故障函数值在一

定时间的振荡后逐步收敛小于阈值。在子图中具体给出了故障诊断函数值的变化趋势。在故障注入后经过一段时间的延迟，诊断函数出现振荡，诊断函数值超过设定的阈值进入确认阶段，确认阶段结束后判定发生故障输出此刻的时间为检测到故障的时间并定位故障位置。在这六次实验中，所提算法均实现了对两套系统惯性器件的故障准确快速的诊断，三次陀螺故障的诊断时长分别为603 s、569 s、572 s，三次加速度计故障的诊断时间分别为236 s、240 s和277 s。事实上，诊断时间与误差状态的可观测度存在一定的关系，由于加速度计零偏的可观测性较强，因此其诊断时间相对陀螺故障的诊断时间最短。在图5(d)和图5(e)中发现，上述两次实验中虽然故障器件对应的故障函数出现跳变超过了阈值，但由于滤波器的振荡其它误差状态的故障诊断函数也同时超过了阈值，然而得益故障确认阶段，算法仍然准确定位到了故障器件，证明了故障确认阶段的有效性与鲁棒性。

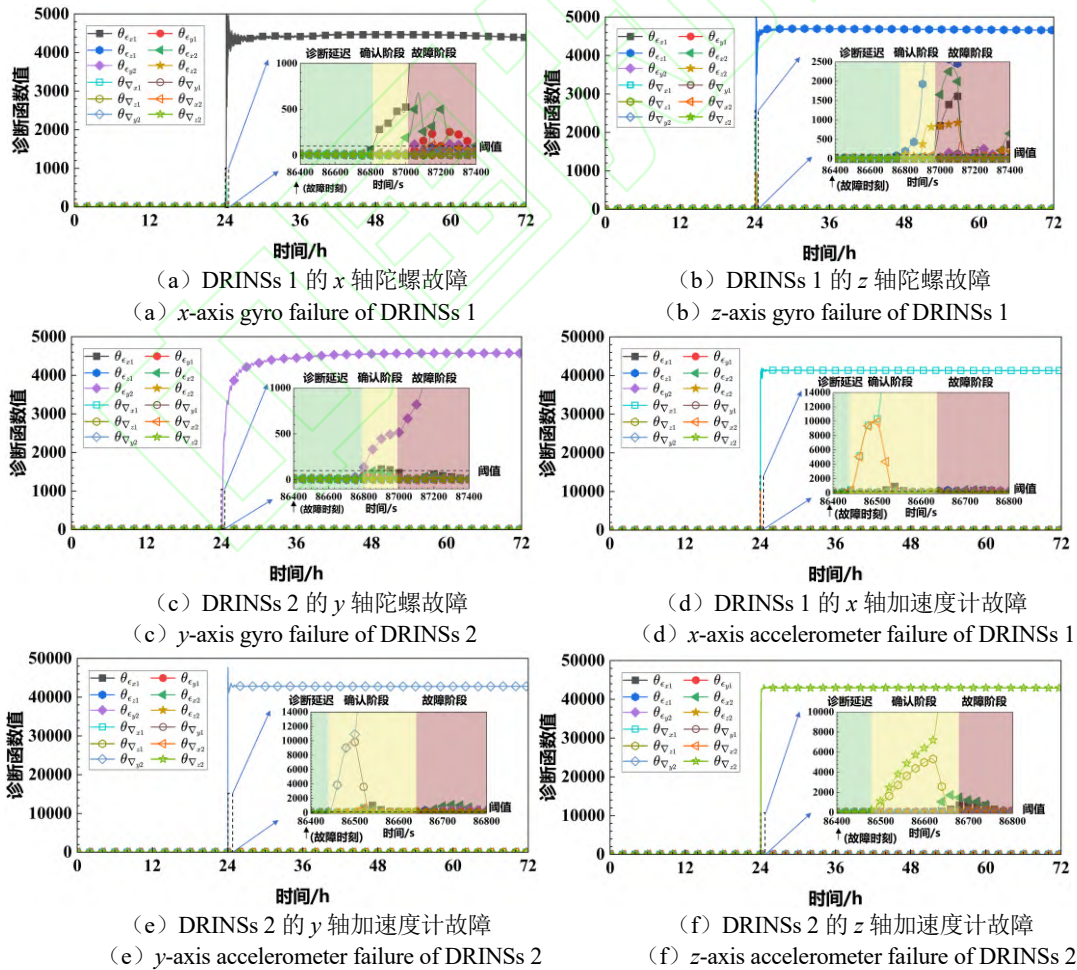


图5 不同故障时的诊断函数

Fig.5 Diagnosis function in case of different failures

为进一步验证算法的性能,开展了蒙特卡罗实验。故障发生时刻设定为自主导航开始后 24 h 至 48 h 之间的任一时刻,注入的故障的幅值分为三类,分别为:故障 1 陀螺故障幅值为 0.1 (°)/h 或加速度计故障幅值为 1000 μg ;故障 2 陀螺故障幅值为 0.2 °/h 或加速度计故障幅值为 2000 μg ;故障 3 陀螺故障幅值为 0.3 (°)/h 或加速度计故障幅值为 3000 μg 。每个惯性器件每种故障进行十次重复实验,共计 360 次。重复实验的平均诊断时间与正确诊断的次数在表 2 中给出。从表中可以看出,在 360 次的重复实验中共出现 3 次错检,诊断的整体正确率为 99.17%。进一步对比三类故障的诊断时间,在三类故障条件下,陀螺故障的平均诊断时间为 1348.2 s、643.8 s 和 449.3 s,加速度计故障的平均诊断时间为 360.0 s、252.7 s 和 233.9 s。可以明显看出,故障的幅值越大,相应的诊断时间越短。这一现象是因为故障幅值的增大导致了滤波残差的增大,从而缩短了故障诊断时间。因此,蒙特卡罗实验说明所提算法能够在 GNSS 拒止的环境下实现器件级故障诊断。

表 2 蒙特卡罗实验统计结果

Tab.2 Statistical results of Monte Carlo experiments

故障器件 对应参数	平均诊断时间/s			诊断正确/ 实验次数
	故障 1	故障 2	故障 3	
$\theta_{\varepsilon_{x1}}$	1460.9	672.0	468.1	30/30
$\theta_{\varepsilon_{y1}}$	1721.7	631.8	491.4	29/30
$\theta_{\varepsilon_{z1}}$	1106.6	659.5	436.4	30/30
$\theta_{\varepsilon_{x2}}$	1499.9	750.6	432.3	30/30
$\theta_{\varepsilon_{y2}}$	1034.2	696.9	467.8	30/30
$\theta_{\varepsilon_{z2}}$	1265.6	451.7	399.7	28/30
$\theta_{\nabla_{x1}}$	283.4	240.4	227.3	30/30
$\theta_{\nabla_{y1}}$	277.1	239.5	228.1	30/30
$\theta_{\nabla_{z1}}$	537.5	272.4	247.9	30/30
$\theta_{\nabla_{x2}}$	280.2	242.3	227.0	30/30
$\theta_{\nabla_{y2}}$	274.6	239.8	227.7	30/30
$\theta_{\nabla_{z2}}$	513.3	281.6	245.4	30/30

4 结论

针对水下 GNSS 拒止环境中的长航时舰艇导航需求,提出一种冗余 DRINSs 故障自主在线检测与诊断方法。利用两套 DRINSs 的导航信息以及几何约束观测信息建立了基于残差归一化的强跟踪滤波器,对惯性器件的误差状态进行在线估

计。基于滤波器估计的误差状态构建诊断函数实现惯性器件的故障检测与诊断,同时设计了故障确认阶段以提高算法的可靠性与鲁棒性。基于激光陀螺 IMU 与转台开展实验,实验结果表明,所提方法能够有效实现惯性器件误差状态的在线估计,当惯性器件发生故障时,所提出的故障诊断方法能够准确的识别并定位故障。不同故障幅值、故障发生时刻随机的多次的重复实验表明,诊断的成功率高于 99%。本方法采用开环滤波方案,无需对现有系统内部算法进行改动,有利于现有系统的升级,为舰艇在 GNSS 拒止环境下的安全航行提供有力保障。

参考文献 (References)

- [1] LI D, LOU Q X, XIAO Y Q, et al. A dual-axis rotation scheme for high-precision RLG inertial navigation systems considering the G-sensitive misalignment[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 8502415.
- [2] LI Q H, LI K, LIANG W W. A dual-axis rotation scheme for long-endurance inertial navigation systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 8503510.
- [3] ZHA F, CHANG L B, HE H Y. Comprehensive error compensation for dual-axis rotational inertial navigation system[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7): 3788-3802.
- [4] LYU X, HU B Q, WANG Z, et al. A SINS/GNSS/VDM integrated navigation fault-tolerant mechanism based on adaptive information sharing factor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 9506913.
- [5] 高广乐, 高社生, 彭旭, 等. 渐消 SPRT 在 SINS/CNS/SRS 导航系统软故障诊断中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(6): 834-840.
GAO G L, GAO S S, PENG X, et al. Fading SPRT method for soft fault diagnosis in SINS/CNS/SRS integrated navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(6): 834-840. (in Chinese)
- [6] XIONG H L, BIAN R C, LI Y J, et al. Fault-tolerant GNSS/SINS/DVL/CNS integrated navigation and positioning mechanism based on adaptive information sharing factors[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 3744-3754.
- [7] GUO M Z, GUO C, ZHANG C. H/H_{∞} -optimised fault detection for a surface vessel integrated navigation system[J]. Journal of Navigation, 2022, 75(3): 554-571.
- [8] 周海渊, 房新兵, 舒东亮, 等. 单/双轴旋转惯导融合技术在航天测量船的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2023,

- 31(11): 1061-1066.
- ZHOU H Y, FANG X B, SHU D L, et al. Application of single/double axis inertial navigation fusion technology in space survey ship[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(11): 1061-1066. (in Chinese)
- [9] 梁钟泓, 罗晖, 李鼎, 等. 基于双惯导系统协同的全参数在线标定算法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(4): 319-326, 334.
- LIANG Z H, LUO H, LI D, et al. All-parameter online calibration algorithm based on the collaboration between dual INSs[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(4): 319-326, 334. (in Chinese)
- [10] CUI J R, WU W Q, MA T F, et al. A novel co-calibration method for a dual heterogeneous redundant marine INS[J]. NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 2023, 70(4): navi.620.
- [11] PANG Y, SONG N F, CAI Q Z. A novel method for gyro bias estimation of on-board inertial navigation system prior to launch of autonomous drone[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(4): 5459-5468.
- [12] HUNTER J H. Gyro drift detection and isolation for a two-IMU configuration[J]. Navigation, 1972, 19(4): 327-337.
- [13] WU Q, LI K. An inertial device biases on-line monitoring method in the applications of two rotational inertial navigation systems redundant configuration[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120: 133-149.
- [14] WU X Z, LAI J Z, LIU M, et al. Homologous fault monitoring technology of redundant INS in airborne avionics systems[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(6): 1038-1044.
- [15] WEN Z Y, YANG G L, CAI Q Z, et al. Modeling and calibration of the gyro-accelerometer asynchronous time in dual-axis RINS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 3503117.
- [16] WANG L, WU W Q, WEI G, et al. Navigation information fusion in a redundant marine rotational inertial navigation system configuration[J]. Journal of Navigation, 2018, 71(6): 1531-1552.
- [17] YAN G M, YANG X K, SU X J, et al. Error distribution method and analysis of observability degree based on the covariances in Kalman filter[C]//Proceedings of the 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018: 4900-4905.
- [18] 刘铭, 周东华. 残差归一化的强跟踪滤波器及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 71-75.
- LIU M, ZHOU D H. Normalized residuals based strong tracking filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 71-75. (in Chinese)
- [19] 周东华, 孙优贤, 席裕庚, 等. 一类非线性系统参数偏差型故障的实时检测与诊断[J]. 自动化学报, 1993, 19(2): 184-189.
- ZHOU D H, SUN Y X, XI Y G, et al. Real-time detection and diagnosis of "parameter bias" faults for nonlinear systems[J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19(2): 184-189. (in Chinese)