

冗余捷联惯组信息容错管理算法*

周维正¹, 李学锋¹, 赵赛君²

(1. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854; 2. 北京无线电测量研究所, 北京 100854)

摘要:对于单机多表斜置冗余捷联惯组的故障诊断、隔离和重构,提出无迹卡尔曼滤波结合三交叉容错融合方法。考虑各误差项,对不同的冗余配置建立统一数学模型。通过三交叉重构模型的设计可快速隔离一度故障并输出正确结果,对被隔离的故障表各误差系数采用无迹卡尔曼滤波方法标定,可辨识因误差系数改变而引起的软故障。以单机五陀螺的两种误差系数软故障为例仿真验证了冗余捷联惯组信息容错管理算法的正确性。

关键词:冗余捷联惯组;容错;重构;无迹卡尔曼滤波

中图分类号:V448.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)01-032-05

Fault-tolerant algorithm and information management for redundant strapdown inertial navigation system

ZHOU Weizheng¹, LI Xuefeng¹, ZHAO Saijun²

(1. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;
2. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: A new algorithm based on intersection fault-tolerant fusion and unscented Kalman filter was proposed for fault diagnosis, isolation and reconstruction of skew redundant strapdown inertial navigation system. Considering the error coefficients of gyros, a unified model was built for redundancy configuration. A single point of failure can be isolated rapidly with the intersection fusion model, and an unscented Kalman filter was used for the error coefficients of isolated gyros, which can determine soft failure caused by error coefficients' change. The simulation with configuration of 5 gyros shows the validity of algorithm under 2 soft failure caused by error coefficients' change.

Key words: redundant strapdown inertial navigation system; fault-tolerance; reconfiguration; unscented Kalman filter

作为飞行器控制系统的重要设备,捷联惯组通常是系统中容易发生故障的部分并易受不良环境的影响。它的精度和可靠性直接决定了飞行任务是否成功。为保证飞行器能够可靠地完成飞行任务,国内外均开展捷联惯组的冗余容错设计和冗余捷联惯组信息管理算法研究。冗余捷联惯组信息管理包括故障诊断、隔离、重构和在轨标定。

其中,文献[1]总结了基于导航性能下的冗余多表捷联惯组的最佳配置;文献[2-3]讨论了奇偶向量法在冗余配置下的故障诊断;文献[4]验证了奇异值分解法在冗余惯性组件系统故障诊断中的实用性;文献[5]提出一种斜装冗余传感器的分布式导航系统,在最优卡尔曼滤波的基础上研究最优信息融合技术;文献[6-8]分析了在轨冗余陀螺的标定方法,结合星敏感器运用扩展

卡尔曼滤波方法标定了冗余陀螺的所有误差项。

本文针对冗余捷联惯组配置方式提出一种容错管理算法。相比于现有的故障诊断—隔离—重构顺序判断方法,新算法以重构优先,事先设计三个重构模型,对三个模型的输出结果直接进行特征值判断,可直接输出性能最稳定的模型结果。应用无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)方法对隔离故障表进行误差系数的在轨标定,对由误差系数改变引起的软故障模式进行识别。相比传统的冗余惯组判断算法,本文所提算法不用设计复杂的奇偶校验方程和故障诊断算法,可快速隔离一度故障,通过UKF对故障传感器的观测标定,可判断由误差系数改变引起的软故障,提升传感器的在线生存率。

* 收稿日期:2017-02-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174120)

作者简介:周维正(1987—),男,黑龙江嫩江人,博士研究生,E-mail:zhouweizheng2005@163.com;

李学锋(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:lixuefengvip@126.com

1 多陀螺模型

飞行器领域常见的惯组冗余配置方式有双套六表捷联惯组、三套六表捷联冗余方案、单套八表捷联惯组方案(三正交一斜置)、单套十表捷联惯组方案、单套十二表捷联惯组方案,每种方案又随着所选传感器类型的不同呈现不同的性质。以陀螺为例,工程上有单敏感轴陀螺和双敏感轴陀螺。为了统一表述,以单敏感轴陀螺为基本研究单位,双敏感轴陀螺可看成由两个单敏感轴陀螺组成。

ω^b 是待测的三轴导航状态,则第 i 轴的陀螺角速率 ω_i^g 可由 ω^b 和第 i 轴的空间单位方向向量 \bar{w}_i 表示^[7]:

$$\omega_i^g = \bar{w}_i \cdot \omega^b = \bar{w}_i^T \omega^b \quad (1)$$

则 n 个陀螺可组成列向量 ω^g 。

$$\omega^g = \begin{bmatrix} \omega_1^g \\ \omega_2^g \\ \vdots \\ \omega_n^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \vdots \\ \bar{w}_n \end{bmatrix} \omega^b = \bar{W}^T \omega^b \quad (2)$$

向量 \bar{w}_i 代表陀螺敏感轴的真实方向,已知设计的单位方向向量 w_i ,则可表示为:

$$\bar{w}_i = w_i - \delta_{ui} u_i - \delta_{vi} v_i \quad (3)$$

式中: u_i, v_i 和 w_i 是相互正交的三轴, w_i 由设计方向确定, u_i, v_i 的确定方式是非唯一的; δ_{ui} 和 δ_{vi} 为第 i 个陀螺仪的不对准误差。

对于 n 个陀螺有:

$$\omega^g = \bar{W}^T \omega^b - C_v(\omega^b) \delta_v - C_u(\omega^b) \delta_u \quad (4)$$

式中:

$$C_v(\omega^b) = \begin{bmatrix} \omega^b \cdot v_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega^b \cdot v_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \omega^b \cdot v_n \end{bmatrix}$$

$$C_u(\omega^b) = \begin{bmatrix} \omega^b \cdot u_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega^b \cdot u_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \omega^b \cdot u_n \end{bmatrix}$$

$$\delta_u = [\delta_{u1}, \delta_{u2}, \cdots, \delta_{un}]^T$$

$$\delta_v = [\delta_{v1}, \delta_{v2}, \cdots, \delta_{vn}]^T$$

考虑标度因子偏差、陀螺漂移和白噪声,第 i 轴陀螺实际测量的角速度可以表示为:

$$\omega_i^m = (1 - \lambda_i) \omega_i^g - b_i - \eta_i \quad (5)$$

式中, b_i 是偏差, λ_i 是对称标度因子偏差, η_i 是白噪声。

定义: $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n)$

$$b = [b_1, b_2, \cdots, b_n]^T$$

$$\eta = [\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_n]^T$$

有:

$$\omega^m = (I - \Lambda) \omega^g - b - \eta \quad (6)$$

定义: $\Delta_u = \text{diag}(\delta_{u1}, \delta_{u2}, \cdots, \delta_{un})$

$$\Delta_v = \text{diag}(\delta_{v1}, \delta_{v2}, \cdots, \delta_{vn})$$

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad \cdots \quad u_n]$$

$$V = [v_1 \quad v_2 \quad \cdots \quad v_n]$$

$$W = [w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_n]$$

有:

$$\bar{G} \omega^b = (I - \Lambda)^{-1} (\omega^m + b + \eta) \quad (7)$$

式中, $\bar{G} = (W - U\Delta_u - V\Delta_v)^T$ 。

2 三交叉重构优先容错算法

三交叉重构优先容错算法的基本思想是先选定三种传感器组合,每个传感器要出现在其中的二种组合中,这样可以通过共因失效的原理来判断一度故障。以五陀螺系统为例,五个陀螺的敏感轴方向不共线,为保证每个陀螺都出现在二个输出模型中,且每个模型中应含有不少于三个陀螺表,则对于五陀螺表来说,三种输出模型中含有表的个数为 3, 3, 4, 不考虑误差的简化模型可把式(7)中的误差项设置为零,也就是 $b, \Delta_v, \Delta_u, \Lambda$ 为零矩阵,则可简化为:

$$\omega_i^m = \bar{G}_i \omega^b + \xi_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

三个模型的最小二乘估计结果为:

$$\hat{\omega}_i^b = (\bar{G}_i^T \bar{G}_i)^{-1} \bar{G}_i^T \omega_i^m \quad (9)$$

将三个模型的输出结果,两两作差取比值,定义模型切换特征值为:

$$T = \frac{\|\hat{w}_1^b - \hat{w}_2^b\|}{\|\hat{w}_1^b - \hat{w}_3^b\|} \quad (10)$$

特征值的取值主要与各种传感器的设计安装方向有关,通过事先设计,可针对每个陀螺设计出相应的故障特征值。根据故障特征值,可直接选择不包含对应故障传感器的模型输出结果。

当判断未发生故障时,系统可输出三种模型的加权融合结果。

$$\hat{W} = \sum_{i=1}^3 p_i \hat{\omega}_i \quad (11)$$

式中, $\sum_{i=1}^3 p_i = 1, 0 \leq p_i \leq 1$ 。

三交叉重构优先信息管理算法利用了共因失效的机理,与以往先故障判定、后重构模型的算法相比。这种算法忽略了对故障表失效机理的讨论,不用设计奇偶校验方程,直接根据特征值切换输出结果。

3 软陀螺故障 UKF 标定

在一度故障时,三交叉重构算法输出的是不包含故障传感器的组合。在无故障时,可任意选定三个组合中的一个或对三个组合的结果进行加权。对于在轨时间较长的飞行器,对隔离的故障陀螺进行在线判定,判定是否是因为误差系数的改变而引起的故障。根据三交叉方法,五传感器可分成 3-3-4 结构,六传感器可分成 4-4-4 结构,不失一般性,这里对冗余四陀螺结构进行分析。

经过基础模型的分析,可以得出每个单敏感轴陀螺对应四个标定参数,分别是陀螺漂移 b 、标度因子偏差 λ 、不垂直度误差 δ_u 和 δ_v 。定义标定参数向量^[9]为:

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} b \\ \lambda \\ \delta_u \\ \delta_v \end{bmatrix} \quad (12)$$

定义 $\boldsymbol{G} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})\bar{\boldsymbol{G}}$, 引入左零空间正交基 \boldsymbol{N}^T , 满足:

$$\begin{cases} \boldsymbol{N}^T \cdot \boldsymbol{G} = \mathbf{0} \\ \boldsymbol{N}^T \cdot \boldsymbol{N} = \boldsymbol{I} \end{cases} \quad (13)$$

由于标定的基础对象为冗余四陀螺结构,则 \boldsymbol{G} 为 4×3 矩阵,根据 Potter 算法, \boldsymbol{N}^T 为 1×4 矩阵。

状态方程和量测方程为:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{\varepsilon}_p \\ \boldsymbol{z} = \boldsymbol{N}^T(\boldsymbol{\omega}_m + \boldsymbol{b}) + \boldsymbol{\xi}' \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\boldsymbol{\varepsilon}_p, \boldsymbol{\xi}'$ 为过程白噪声和量测白噪声; $\boldsymbol{\omega}_m$ 为性能稳定的陀螺组合与被隔离的故障陀螺组成的量测向量,用来标定发生软故障的陀螺。

量测方程是非线性的,应用 UKF 算法^[10]。

1) 选定滤波初值:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_0 = E[\boldsymbol{x}_0] \\ \boldsymbol{P}_0 = E[(\boldsymbol{x}_0 - \hat{\boldsymbol{x}}_0)(\boldsymbol{x}_0 - \hat{\boldsymbol{x}}_0)^T] \end{cases} \quad (15)$$

2) 计算 $2n+1$ 个 sigma 采样点及相应权值:

$$\begin{cases} \chi_{k-1}^{(0)} = \boldsymbol{x}_{k-1} \\ \chi_{k-1}^{(i)} = \boldsymbol{x}_{k-1} + \sqrt{n+\lambda}(\sqrt{\boldsymbol{P}_{k-1}})_{(i)} \\ \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \chi_{k-1}^{(i)} = \boldsymbol{x}_{k-1} - \sqrt{n+\lambda}(\sqrt{\boldsymbol{P}_{k-1}})_{(i)} \\ \quad i = n+1, n+2, \dots, 2n \end{cases} \quad (16)$$

其中: $\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n$ 为采样的尺度因子; α 为很小的正数,一般取 $10^{-4} \leq \alpha \leq 1$; κ 为常数,设置

为 0 或 $3-n$; $(\sqrt{\boldsymbol{P}_{k-1}})_{(i)}$ 为协方差矩阵的均方根矩阵(奇异值分解)的第 i 列。

权值计算为:

$$\begin{cases} W_0^{\text{mean}} = \lambda / (n + \lambda) \\ W_i^{\text{mean}} = 1 / [2(n + \lambda)] \\ W_0^{\text{cov}} = \lambda / (n + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_i^{\text{cov}} = 1 / [2(n + \lambda)] \\ \quad i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (17)$$

3) 计算 k 时刻的一步预测模型值:

$$\begin{cases} \chi_{k,k-1} = f(\chi_{k-1}) \\ \boldsymbol{x}_{k,k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{\text{mean}} \chi_{k,k-1}(i) \end{cases} \quad (18)$$

$$\boldsymbol{P}_{k,k-1}^{\text{xx}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{\text{cov}} [\chi_{k,k-1}(i) - \boldsymbol{x}_{k,k-1}] [\chi_{k,k-1}(i) - \boldsymbol{x}_{k,k-1}]^T \quad (19)$$

通过量测方程对各个 Sigma 点进行非线性变换:

$$\hat{\boldsymbol{y}}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{\text{mean}} h[\chi_{k,k-1}(i)] \quad (20)$$

4) 测量更新:

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_k^{\text{xy}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{\text{cov}} [\chi_{k,k-1}(i) - \hat{\boldsymbol{x}}_k] \cdot \{h[\chi_{k,k-1}(i)] - \hat{\boldsymbol{y}}_k\}^T \\ \boldsymbol{P}_k^{\text{yy}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{\text{cov}} \{h[\chi_{k,k-1}(i)] - \hat{\boldsymbol{y}}_k\} \cdot \{h[\chi_{k,k-1}(i)] - \hat{\boldsymbol{y}}_k\}^T \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{k}_k = \boldsymbol{P}_k^{\text{xy}} (\boldsymbol{P}_k^{\text{xy}} + \boldsymbol{R}_k)^{-1} \\ \boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{P}_{k,k-1} - \boldsymbol{k}_k \boldsymbol{P}_k^{\text{yy}} \boldsymbol{k}_k^T + \boldsymbol{Q} \end{cases} \quad (22)$$

5) 估计方程:

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k = \hat{\boldsymbol{x}}_{k,k-1} + \boldsymbol{k}_k (\hat{\boldsymbol{y}}_k - \boldsymbol{y}_k) \quad (23)$$

4 仿真算例

五陀螺的配置可定位一度故障,判定二度故障,在型号中得到越来越多的应用。常见配置是传统的三正交配置加上另外两斜置表,以此结构为仿真算例,结构配置方式如图 1 所示。根据三交叉算法的模型特征值判定要求,设计 X, Y, Z 轴分别为沿箭体坐标系的三轴,斜轴 S 的配置角度为 $\alpha_1 = 55^\circ, \beta_1 = 45^\circ$,斜轴 T 的配置角度为 $\alpha_2 = 55^\circ, \beta_2 = 75^\circ$ 。

基本仿真参数设置为:

$$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -\cos\alpha_1 \sin\beta_1 & -\cos\alpha_2 \sin\beta_2 \\ 1 & 0 & 0 & \sin\alpha_1 & \sin\alpha_2 \\ 0 & 1 & 0 & -\cos\alpha_1 \cos\beta_1 & -\cos\alpha_2 \cos\beta_2 \end{bmatrix}$$

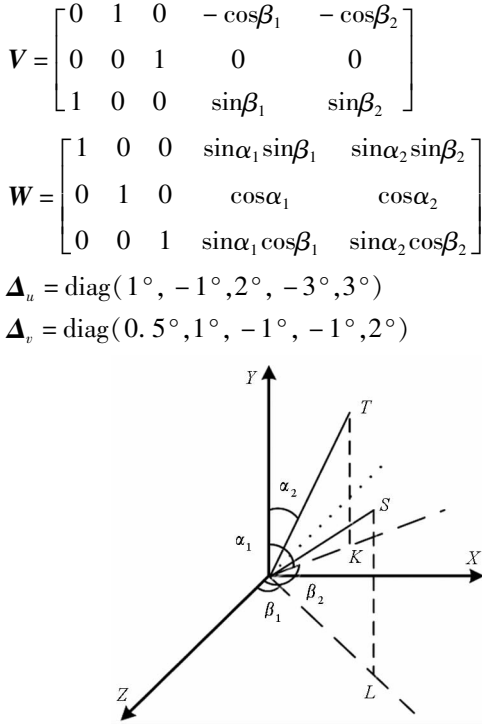


图 1 三正交两斜置结构配置示意图

Fig. 1 Schematic of configuration

陀螺零偏为:

$$b = [0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01]^T$$

标度因子偏差为:

$$A = \text{diag}(0.002, 0.002, 0.002, 0.002, 0.002)$$

根据基本仿真参数,选择三模型为 XYZ、XST、YZST,表 1 给出了分别采用误差模型和简易模型下的五表特征值,可以看出引入误差后,各表的特征值均有一定变化。在实际应用中可根据注入故障得到实测值,来反验证标定误差是否准确。

表 1 给定配置下的各轴故障特征值

Tab. 1 Comparison of two model results with and without considering the error

	T_x	T_y	T_z	T_s	T_t
不考虑误差	1.69	1.27	2.21	6.06	3.92
考虑各项误差	1.95	1.32	2.54	5.68	3.39

模拟两种一度软故障下的容错标定算法性能,一种为正交轴 Y 轴发生变化;一种为斜置轴 S 轴的零偏增大。

1) Y 轴发生偏转,偏转后的角度 $\Delta_{uy} = -10^\circ$ 、 $\Delta_{vy} = 15^\circ$,则根据式(11)计算的特征值变化如图 2 所示。注入故障后落入 1.32 ± 0.2 区间的特征值明显增多,表明 Y 轴值偏离正确值,输出模型为基于 XST 的解算模型。基于 UKF 对 Y 轴的误差项系数进行估计,估计结果如图 3 所示。从图 3

中可以看出 Δ_{uy} 和 Δ_{vy} 分别在 400 步左右收敛到注入偏转角度 -10° 和 15° 。

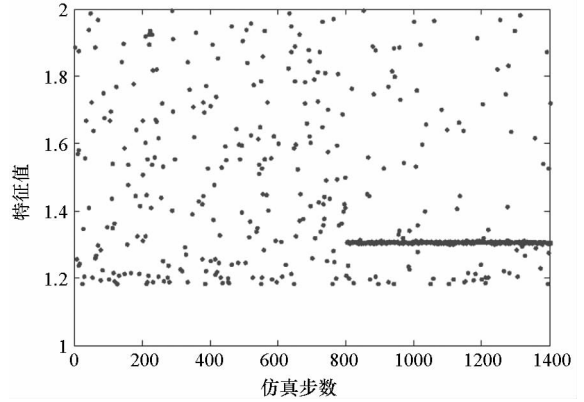


图 2 Y 轴注入故障后特征值观测图

Fig. 2 Monitor curve of Y orientation change

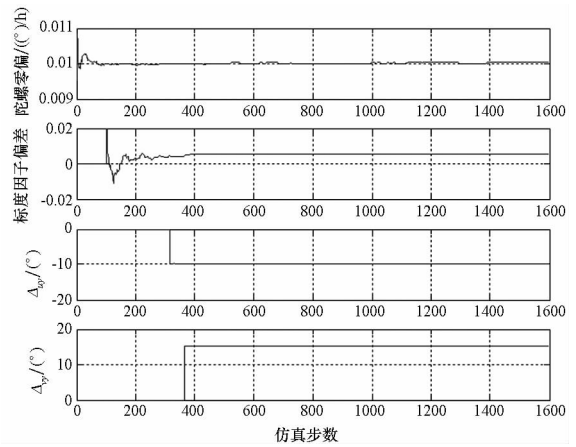


图 3 Y 轴误差系数 UKF 估计

Fig. 3 UKF estimation of Y error

2) S 轴零偏增大,增大后 S 轴的零偏 $b_s = 0.1$,则根据式(11)计算的特征值变化如图 4 所示。注入故障后落入 5.68 ± 0.2 区间的特征值明显增多,表明 S 轴值偏离正确值,输出模型为基于 XYZ 的解算模型。基于 UKF 对 S 轴的误差项系

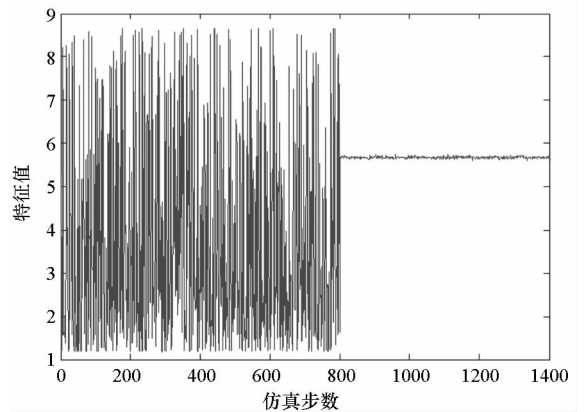


图 4 S 轴注入偏移故障后特征值观测图

Fig. 4 Monitor curve of S bias change

数进行估计,估计结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,零偏值收敛到 0.1,其余各参数也都收敛到仿真参数值上。

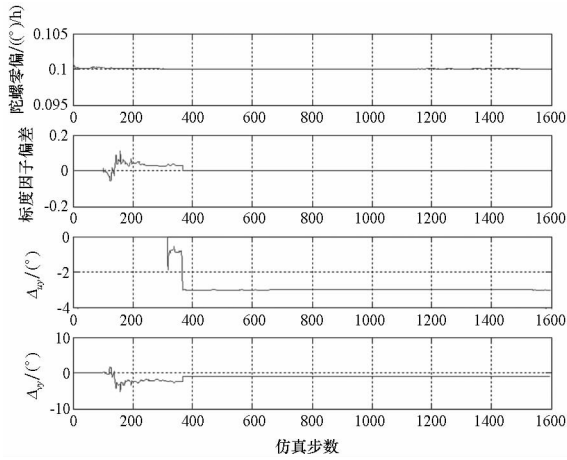


图 5 S 轴误差系数 UKF 估计

Fig. 5 UKF estimation of S error

5 结论

本文针对冗余配置捷联惯组提出一种容错管理方法,包括冗余配置设计、重构优先算法和 UKF 软故障诊断。考虑陀螺常见误差项,对冗余配置展开统一建模,不同于常见的故障诊断方法,三交叉重构优先以特征值为指标评估最优输出,能快速隔离故障陀螺,并应用 UKF 对故障陀螺进行误差系数再估计,识别因误差系数改变而引起的软故障,可有效提高冗余陀螺的在轨利用率。

参考文献 (References)

- [1] Shim D S, Yang C K. Optimal configuration of redundant inertial sensors for navigation and FDI performance [J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 6497–6512.
- [2] Yang C K, Shim D S. FDI using multiple parity vectors for redundant inertial sensors [J]. *European Journal of Control*, 2006, 12(4): 437–449.
- [3] Yang C K, Shim D S. Double faults isolation based on the reduced-order parity vectors in redundant sensor configuration [J]. *International Journal of Control Automation & Systems*, 2007, 5(2): 155–160.
- [4] 贾鹏, 张洪钺. 基于奇异值分解的冗余惯导系统故障诊断 [J]. *宇航学报*, 2006, 27(5): 1076–1080.
JIA Peng, ZHANG Hongyue. Fault detection for redundant inertial navigation system based on SVD method [J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(5): 1076–1080. (in Chinese)
- [5] 吴风喜, 刘海颖, 华冰. 斜装冗余传感器的分布式导航系统研究 [J]. *宇航学报*, 2015, 36(2): 173–178.
WU Fengxi, LIU Haiying, HUA Bing. Research on distributed navigation system based on skew redundant sensors [J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(2): 173–178. (in Chinese)
- [6] Pittelkau M E. Kalman filtering for spacecraft system alignment calibration [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2001, 24(6): 1187–1195.
- [7] Pittelkau M E. Calibration and attitude determination with redundant inertial measurement units [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2005, 28(4): 743–752.
- [8] 杨华波, 张士峰, 蔡洪. 空间冗余陀螺仪在轨标定方法 [J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 104–110.
YANG Huabo, ZHANG Shifeng, CAI Hong. An in-flight calibration for redundant inertial measurement gyroscope [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(1): 104–110. (in Chinese)
- [9] 李骥, 张洪华, 赵宇, 等. 嫦娥三号着陆器的陀螺在轨标定 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(6): 582–588.
LI Ji, ZHANG Honghua, ZHAO Yu, et al. In-flight calibration of the gyros of the Chang'E-3 lunar lander [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44(6): 582–588. (in Chinese)
- [10] 田露, 董云峰. 基于 UKF 的陀螺故障预报方法 [J]. *航天控制*, 2014, 32(3): 76–80.
TIAN Lu, DONG Yunfeng. Gyro fault prediction algorithm based on UKF [J]. *Aerospace Control*, 2014, 32(3): 76–80. (in Chinese)