

## 基于证据推理的联合故障检测方法

牟宏磊, 程咏梅, 苟斌, 刘建新, 李松

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710068)

**摘要:** 针对卡方故障检测方法对软故障的检测性能较差, 甚至会导致滤波器发散的问题, 提出一种基于证据推理的联合故障检测方法. 将组合导航中的各子滤波器作为证据, 利用每个子滤波器的状态及协方差构造联合故障检测函数, 并利用联合故障检测函数的概率分布计算基本置信指派, 再将多个证据按 D-S 规则进行融合, 根据融合结果进行故障检测. 仿真结果表明, 所提出的方法对硬故障的检测性能与卡方故障检测性能相当, 但对软故障的检测性能要优于卡方故障检测, 可提高组合导航系统的可靠性和精度.

**关键词:** 组合导航; D-S 证据推理; 故障检测; 软故障

**中图分类号:** V249.3

**文献标志码:** A

### Method of joint fault detection based on evidential reasoning

MU Hong-lei, CHENG Yong-mei, GOU Bin, LIU Jian-xin, LI Song

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710068, China. Correspondent: CHENG Yong-mei, E-mail: chengym@nwpu.edu.cn)

**Abstract:** Aiming at the poor performance of chi-square fault detection for soft fault detection, even leading to the filter divergence problem, a joint fault detection method based on D-S evidential reasoning is proposed. Each sub filter in integrated navigation is used as the evidence. The state and the covariance of each sub filter are used for constructing the fault detection function and calculating the basic belief assignment. Then the fault detection is determined based on D-S fusion results. Simulation results show that the hard fault detection performance of this method has similar quality with the chi-square method. The soft fault detection performance is superior to the chi-square method, which can improve the reliability and accuracy of the integrated navigation system.

**Keywords:** integrated navigation; D-S evidential reasoning; fault detection; soft fault

### 0 引言

在组合导航系统中, 一般可将不同故障源引起的传感器输出故障分为: 小值软故障和大值阶跃硬故障两类<sup>[1-3]</sup>. 导航故障会严重影响组合导航系统的精度<sup>[4-5]</sup>, 因此, 组合导航系统的故障检测十分必要. 一个有效的导航故障检测系统应在某个或多个导航设备发生故障时, 快速、准确定位并隔离发生故障的子系统, 及时排解综合导航系统的安全隐患.

卡方故障检测方法在组合导航系统中得到了广泛应用<sup>[6-8]</sup>. 这种方法计算简单, 对硬故障具有良好的检测性能, 但该方法对软故障检测不灵敏且存在时间延迟, 情况严重时该方法还会失效, 导致组合导航状态估计发散<sup>[9-11]</sup>.

针对卡方故障检测方法存在的缺点, 文献 [12] 将

Chebyshev 大数定律与卡方故障检测相结合; 文献 [13] 利用速度检测模块辅助残差卡方检测, 并采用模糊逻辑和加权平均来处理检验阈值; 文献 [14] 在卡方检测的基础上, 结合检验法对系统内部故障进行定位和隔离. 虽然这些方法在一定程度上都改善了卡方故障检测的性能, 但均不能解决卡方故障检测对软故障检测不灵敏的缺陷.

本文提出一种基于 D-S 推理的联合故障检测方法, 该方法将每个导航子滤波器的输出作为证据, 利用各子滤波器状态估计值及其误差协方差建立联合故障检测函数, 利用故障检测函数计算每个导航子滤波器发生故障的基本置信指派及不确定指派, 通过融合多个证据实现对每个导航系统故障的检测. 该方法对软、硬故障均有很好的检测效果, 可综合提高组合

收稿日期: 2015-08-01; 修回日期: 2015-12-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61135001); 西安市科技计划项目(CXY1436(9)).

作者简介: 牟宏磊(1980—), 男, 博士生, 从事信息融合、组合导航的研究; 程咏梅(1960—), 女, 教授, 博士生导师, 从事信息融合、多传感器目标跟踪、组合导航等研究.

导航系统的可靠性和精度.

## 1 卡方检测问题描述

卡方故障检测方法简单,对突变硬故障具有良好的检测性能.在卡尔曼滤波中,根据新息理论,当量测数据无故障时,第  $i$  个滤波器的新息为

$$v_i(k) \sim N(0, S_i(k)). \quad (1)$$

令

$$\lambda_i(k) = v_i^T(k) S_i^{-1}(k) v_i(k), \quad (2)$$

则

$$\lambda_i(k) \sim \chi^2(M_i), \quad (3)$$

其中  $M_i$  为子滤波器  $i$  的量测维数.

当量测数据无故障时,  $\lambda_i(k) < T_D$ ; 当量测数据出现故障时,  $\lambda_i(k) \geq T_D$ ,  $\lambda_i(k)$  不再服从  $\chi^2$  分布. 其中:  $T_D$  与自由度和虚警率有关, 可通过查  $\chi^2$  分布表获得. 但是, 对于一个小值故障, 当故障变化十分缓慢时, 卡方故障检测很难将其检测出来. 导航系统的状态会使用故障的量测数据进行量测更新, 导致组合导航系统的状态估计值偏离真实值. 随着故障逐渐增大, 状态污染越来越严重, 导致故障检测能力变差, 卡方故障检测方法甚至会失效. 当量测数据故障消失时, 卡方故障检测会将正常的量测判断为故障, 从而导致组合导航系统变为纯惯性导航系统. 为了解决卡方故障检测的这一缺陷, 本文提出基于 D-S 推理的联合故障检测方法.

## 2 基于 D-S 推理的联合故障检测

基于 D-S 推理的联合故障检测是将 D-S 证据推理与联合故障检测相结合. 利用  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n, j \neq i$ ) 个子滤波器对子滤波器  $i$  进行故障判断, 每个子滤波器都能构造一个证据, 将这些证据利用证据推理进行融合, 得到子滤波器  $i$  的故障检测结果.

### 2.1 D-S 证据推理

辨识框架: 对某一事件或问题的所有可能结果的集合, 记为  $\Theta$ . 证据组合规则是在同一辨识框架的基础上建立的. 辨识框架  $\Theta$  通常是一个非空的有限集合,  $R$  为幂集  $2^\Theta$  中的一个集类, 即表示任何可能的命题集<sup>[15]</sup>.

基本置信指派函数: 若  $A$  为辨识框架幂集  $2^\Theta$  的任一子集, 且映射函数  $m(A)$  满足以下条件:

- 1)  $m(\phi) = 0$ ,
- 2)  $0 \leq m(A) \leq 1$ ,
- 3)  $\sum_{A \in 2^\Theta} m(A) = 1$ ,

则称  $m$  为辨识框架  $\Theta$  上的基本置信指派函数.

假设辨识框架  $\Theta$  上有性质不同且相互独立的两个证据  $A$  和  $B$ , 其证据焦元分别为  $A_i$  和  $B_j$  ( $i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, q$ ), 基本置信指派函数分别为  $m_1$  和  $m_2$ , 则将两个证据按照 Dempster 规则进行融合, 融合公式为

$$m(c) = \frac{1}{K} \sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j), \quad (4)$$

$$K = 1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j). \quad (5)$$

### 2.2 基本置信指派建立

下面以子滤波器  $i$  为例, 给出基于 D-S 推理的联合故障检测算法的融合规则. 在组合导航系统中, 第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 个子滤波器  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) 时刻的状态和协方差分别为  $X_i(k|k)$  和  $P_i(k|k)$ . 当子滤波器  $i$  的状态为  $X \sim N(X_i(k|k), P_i(k|k))$  时, 令

$$e_j^i(k) = X_i(k|k) - X_j(k|k), \quad (6)$$

则有

$$e_j^i(k) \sim N(0, P(k)), \quad (7)$$

联合故障检测函数为

$$\lambda_j^i = e_j^{iT}(k) P^{-1}(k) e_j^i(k). \quad (8)$$

由于各子滤波器的状态方程相同, 子滤波器  $i$  的状态  $X_i(k|k)$  和子滤波器  $j$  的状态  $X_j(k|k)$  并不是相互独立的, 故方差阵  $P(k)$  的计算公式为

$$P(k) = P_i(k|k) + P_j(k|k) - P_{i,j}(k|k) - P_{j,i}(k|k). \quad (9)$$

在式 (9) 中, 矩阵  $P_{i,j}(k|k)$  和  $P_{j,i}(k|k)$  为  $X_i(k|k)$  和  $X_j(k|k)$  的互协方差矩阵, 且  $P_{i,j} = P_{j,i}^T$ ,  $P_{i,j}$  的递推计算公式为<sup>[16]</sup>

$$P_{i,j}(k|k) = [I - K_i(k)H_i(k)] \times [\Phi(k-1) \times P_{i,j}(k-1|k-1) \Phi^T(k-1) + Q(k-1)] \times [I - K_j(k)H_j(k)]^T. \quad (10)$$

由式 (10) 可以看出, 互协方差由系统噪声  $Q(k-1)$  和前一时刻的互协方差进行递推计算得到. 由于系统噪声  $Q(k-1)$  很小, 接近于 0, 当互协方差的初始值  $P_{i,j}(0|0)$  取 0 时, 互协方差矩阵  $P_{i,j}(k|k) \approx 0$ . 因此, 式 (9) 可近似为

$$P(k) = P_i(k|k) + P_j(k|k). \quad (11)$$

根据新息理论有  $\lambda_j^i \sim \chi^2(d)$ ,  $d$  为状态  $X$  的维数, 当导航状态  $X_i(k|k)$  发生故障时,  $\lambda_j^i$  的值将增大, 则利用子滤波器  $j$  对子滤波器  $i$  进行联合故障检测的基本置信指派为

$$M_j^i(F) = \int_0^{\lambda_j^i} f(x) dx, \quad j = 1, 2, \dots, n, j \neq i. \quad (12)$$

其中:  $f(x)$  为  $\chi^2(N)$  的概率密度函数, 其表达式为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{n/2}\Gamma(n/2)}x^{n/2-1}e^{-x/2}, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (13)$$

$M_j^i(F)$  是不可积的, 但在 Matlab 中提供了一种数值计算方法, 可由函数  $\text{chi2cdf}(\lambda_j^i, N)$  完成计算。

从上述公式可以看出, 故障的基本置信指派与故障检测函数有关, 故障检测函数越大, 基本置信指派越大。当  $\lambda_j^i = 0$  时, 基本置信指派函数为 0; 当  $\lambda_j^i$  无穷大时, 基本置信指派趋近于 1。

利用子滤波器  $j$  对子滤波器  $i$  进行可靠故障检测的前提是: 子滤波器  $j$  是无故障或可靠的, 或至少比子滤波器  $i$  更可靠。但这一点并不总是成立的, 子滤波器  $j$  对子滤波器  $i$  进行故障检测具有一定的不确定性, 不确定指派定义为

$$M_j^i(U) = \frac{\lambda_j}{\lambda_i + \lambda_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad j \neq i. \quad (14)$$

由式 (14) 可以看出, 不确定指派  $M_j^i(U)$  由两个子滤波器的故障检测函数  $\lambda$  决定。当  $\lambda_j \gg \lambda_i$  时, 子滤波器  $j$  的状态不可靠, 子滤波器  $i$  的故障检测不确定性接近于 1; 当  $\lambda_j \ll \lambda_i$  时, 子滤波器  $j$  的状态可靠, 子滤波器  $i$  的故障检测的不确定性接近于 0。

将基本置信指派归一化后, 有

$$\begin{cases} m_j^i(F) = \frac{M_j^i(F)}{M_j^i(F) + M_j^i(U)}, \\ m_j^i(U) = \frac{M_j^i(U)}{M_j^i(F) + M_j^i(U)}. \end{cases} \quad (15)$$

### 2.3 联合故障诊断

由  $j(j = 1, 2, \dots, n, j \neq i)$  个子滤波器共构造  $n - 1$  组证据, 按 Dempster 规则融合可得

$$\begin{cases} m^i(F) = 1 - m^i(U), \\ m^i(U) = \prod_{j=1, j \neq i}^n m_j^i(U). \end{cases} \quad (16)$$

利用  $m^i(F)$  进行故障检测逻辑为

$$\begin{cases} m^i(F) \geq p_m, & \text{子滤波器故障;} \\ m^i(F) < p_m, & \text{子滤波器无故障.} \end{cases}$$

其中:  $p_m$  为联合故障检测阈值, 该值是通过大量仿真实验确定的。

本文方法的判定规则是: 利用多子滤波器之间的余度信息, 对于单一子滤波器的故障检测无能为力; 对于两个子滤波器只能判断是否存在故障; 对于  $n(n \geq 3)$  个子滤波器的情况, 当故障子滤波器数量小于无故障子滤波器数量时, 本文的方法是有效的, 且故障子滤波器数量越少, 故障检测性能越好。

## 3 仿真实验及结果分析

### 3.1 仿真条件

本文的仿真流程如图 1 所示: 首先, 完成惯导系统及 3 种辅助导航方式数据的仿真, 并分别在 3 种辅助导航方式的量测中注入故障, 将惯导和各辅助导航方式分别构成子滤波器; 然后, 利用各子滤波器输出的状态及协方差, 结合 D-S 证据推理进行联合故障检测; 最后, 将无故障子滤波器的状态进行融合, 并利用融合结果对故障子滤波器进行状态重置。

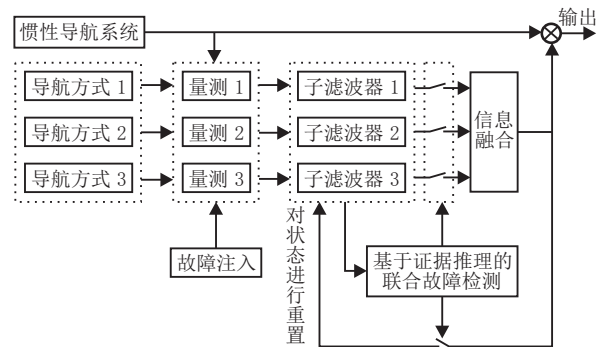


图 1 仿真流程

为了验证基于 D-S 推理的联合故障检测方法的有效性, 本文分别仿真验证了该方法在硬故障和软故障情况下的性能。

3 种导航方式均提供水平位置信息(经度和纬度), 量测误差的标准差均为 [30 m, 30 m]。导航数据的故障注入情况如表 1 所示。

表 1 导航数据故障注入

| 导航方式   | 故障时间/s            | 硬故障/m          | 软故障/m                    |
|--------|-------------------|----------------|--------------------------|
| 导航方式 1 | (5 000 - 6 000)   | [3 000, 3 000] | $(t - 5 000)[2, 2]$      |
| 导航方式 2 | (15 000 - 16 000) | [3 000, 3 000] | $(t - 15 000)[2.4, 2.4]$ |
| 导航方式 3 | (25 000 - 26 000) | [3 000, 3 000] | $(t - 25 000)[3, 3]$     |

### 3.2 检验结果及分析

在仿真实验中, 本文利用虚警率和漏检率对两种方法进行性能评估。虚警率的定义为无故障数据被判断为有故障的概率, 记为  $P_F$ , 即

$$P_F = \frac{\text{无故障数据被判为故障的数量}}{\text{无故障数据总数}}. \quad (17)$$

漏检率的定义为有故障数据被判断为无故障的概率, 记为  $P_U$ , 即

$$P_U = 1 - \frac{\text{检测出故障数据的数量}}{\text{故障数据总数}}. \quad (18)$$

对硬故障的检测结果以及信息融合结果对比如图 2 和图 3 所示。

从图 2 和图 3 中可以看出: 本文方法与卡方故障检测方法的虚警率和漏检率性能相当, 两种方法的纬度和经度的误差基本一致。

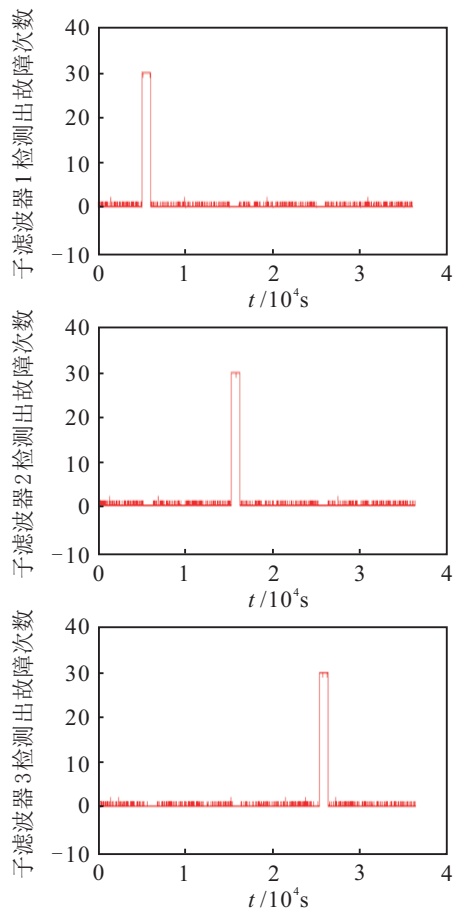


图 2 硬故障检测结果

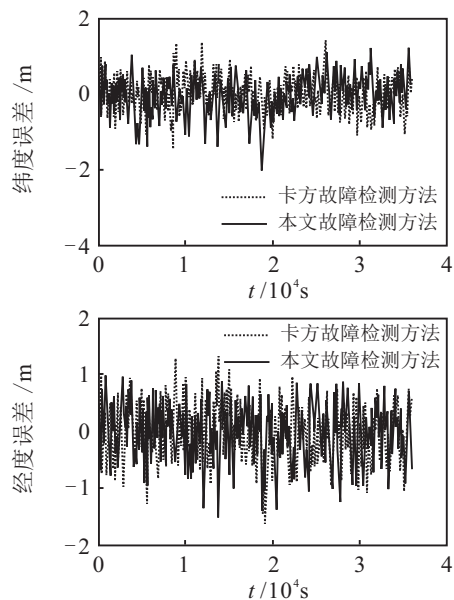


图 3 硬故障信息融合结果对比

卡方故障检测对软故障的检测结果如图 4 所示. 当故障的斜率较大时, 卡方故障检测具有一定的效果, 但漏检率较大; 故障的斜率越小, 故障检测的性能越低. 由于卡方故障检测方法长时间无法检测出故障, 会导致状态估计值逐渐偏离正常值, 而正确的量测数据会被误认为是故障数据, 导致故障子滤波器一直处于虚警, 直至子滤波器发散. 考虑到上述问题, 本文实验会对故障子滤波器进行重置.

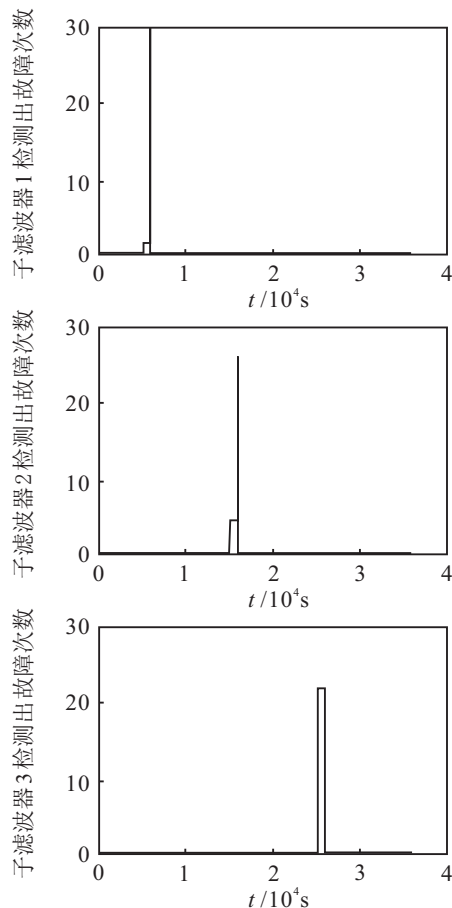


图 4 软故障卡方故障检测结果

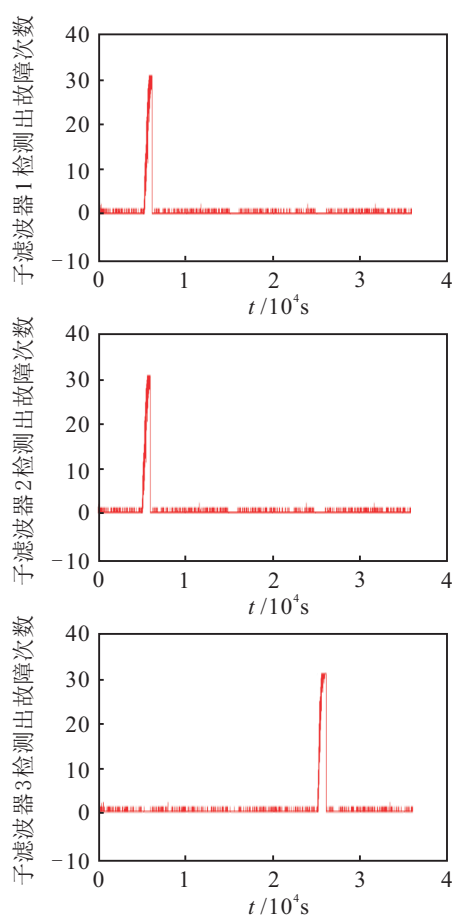


图 5 软故障本文方法故障检测结果

由图5可以看出, 本文的检测方法可通过其他无故障子滤波器灵敏地检测出软故障. 本文方法和卡方故障检测方法分别在硬故障、软故障情况下的30次仿真对比结果如表2和表3所示.

表2 故障检测性能对比 %

| 故障  | 卡方故障检测方法 |        | 本文故障检测方法 |          |
|-----|----------|--------|----------|----------|
|     | 虚警率      | 漏检率    | 虚警率      | 漏检率      |
| 硬故障 | 0        | 0      | 0.000437 | 0.000067 |
| 软故障 | 0.00002  | 0.7331 | 0.00045  | 0.3335   |

表3 组合导航RMSE对比 m

| 故障  | 卡方故障检测方法 |         | 本文故障检测方法 |        |
|-----|----------|---------|----------|--------|
|     | 经度       | 纬度      | 经度       | 纬度     |
| 硬故障 | 0.3884   | 0.4090  | 0.4410   | 0.4187 |
| 软故障 | 95.4895  | 95.5848 | 1.1900   | 1.2812 |

本文的方法比卡方故障检测方法的漏检率降低了39.96%, 同时使信息融合的纬度和经度均方根误差分别降低了94.2995 m 和94.3036 m, 大大提高了组合导航系统对软故障的检测能力和导航精度.

## 4 结 论

本文针对卡方故障检测对软故障检测性能较差的问题提出了一种基于D-S证据推理的组合导航系统联合故障检测方法. 为了检验该方法的有效性, 分别针对硬故障和软故障对该方法和卡方故障检测方法进行了仿真对比分析. 仿真结果表明, 所提出的方法对硬故障的检测性能与卡方故障检测相当, 对软故障的检测性能远优于卡方故障检测方法, 可综合提高组合导航系统的精度和可靠性.

## 参考文献(References)

- [1] 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 R, Liu J Y, Xiong Z, et al. Adaptive fault-tolerant algorithm based on sequential probability mapping for integrated navigation[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1861-1865.)
- [2] He K P, Shao Y P, Zhang L, et al. A study on fault detection method of redundant inertial navigation system on micro AUV[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 7(9): 473-479.
- [3] Nikiforov I. Sequential optimal fault detection and isolation in multisensor navigation systems[J]. Aiaa J, 2000, 15(6): 223-230.
- [4] 程建华, 李明月. 基于小波分析的容错组合导航系统故障检测算法研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(4): 419-425.  
(Cheng J H, Li M Y. Research of fault detection algorithm based on wavelet analysis in integrated navigation system[J]. J of Astronautics, 2012, 33(4): 419-425.)
- [5] Sewook P, Jonghee B, Youdan K, et al. Fault tolerant flight control system for the tilt-rotor UAV[J]. J of the Franklin Institute, 2013, 15(2): 1-25.
- [6] Rife J H. The effect of uncertain covariance on a chi-square integrity monitor[J]. Navigation, 2013, 60(4): 291-303.
- [7] Ushaq M, Fang J. A robust data fusion scheme for integrated navigation systems employing fault detection methodology augmented with fuzzy adaptive filtering[J]. Proc of Spie, 2013, 29(16): 182-185.
- [8] Zhang H Y, Chan C W, Cheung K C, et al. Fuzzy artmap neural network and its application to fault diagnosis of navigation systems[J]. Automatica, 2001, 37(7): 1065-1070.
- [9] Liu L S, Fu J. Improved state fault detection of navigation systems based on neural[C]. Chinese Control and Decision Conf. Xuzhou: IEEE Press, 2010: 3932-3937.
- [10] Kim H S, Kim Y, Seah C E. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration method[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2010, 18(3): 636-653.
- [11] Zhao X, Wang S, Zhang J, et al. Real-time fault detection method based on belief rule base for aircraft navigation system[J]. Chinese J of Aeronautics, 2013, 26(3): 717-729.
- [12] 赵琳, 班镜超. 组合导航联邦滤波故障检测技术研究[J]. 遥测遥控, 2014, 35(2): 9-13.  
(Zhao L, Ban J C. Federated filter fault detection technology research for integrated navigation[J]. J of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(2): 9-13.)
- [13] 阮雯, 秦红磊, 丛丽, 等. 改进残差检验法在组合导航故障检测中应用[J]. 电子测量技术, 2012, 35(11): 124-128.  
(Ruan W, Qin H L, Cong L, et al. Improved residual inspection in navigation fault detection of application[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(11): 124-128.)
- [14] 吴有龙, 王晓鸣, 杨玲, 等. 两级故障检测与隔离方法在组合导航中的应用分析[J]. 弹道学报, 2013, 25(4): 53-58.  
(Wu Y L, Wang X M, Yang L, et al. Dual-stages fault detection and isolation method for integrated navigation system[J]. J of Ballistics, 2013, 25(4): 53-58.)
- [15] 王文庆, 杨远玲, 杨春杰. 一种基于证据理论的数据融合算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(9): 1427-1430.  
(Wang W Q, Yang Y L, Yang C J. A novel data fusion algorithm based on evidence theory[J]. Control and Decision, 2013, 28(9): 1427-1430.)
- [16] Bar-Shalom. On the track-to-track correlation problem[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1981, 26(2): 571-572.