一种改进余度捷联惯导系统最优 奇偶矢量故障容错算法



李群生1,2,*,岳亚洲3,寇磊3

1.中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009

2.北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,北京 100083

3. 航空工业自控所飞行器控制一体化技术重点实验室,陕西西安710065

摘 要:针对余度捷联惯导系统故障检测方法对小故障和渐变型故障检测率低的问题,提出了利用对特定传感器敏感的最 优奇偶矢量来构造最小二乘加权矩阵的算法。该算法利用最优奇偶矢量产生奇偶残差来反映特定传感器对待测状态量测 的准确程度,通过该残差确定最小二乘加权阵,进而再辅助最优奇偶矢量进行故障检测,达到对小故障和渐变型故障的容 错。仿真结果表明本方法能够有效提高待测状态的估计精度,具有一定的工程参考价值。

关键词:奇偶矢量;渐变;容错;余度捷联惯导系统;故障检测

中图分类号:V249.3 文献标识码:A

随着现代社会和科技的发展,人们对系统的可靠性要 求越来越高。而对于导航系统来说,高精度和高可靠性一 直是人们努力追求的目标。针对捷联惯导系统,这一目标 可以通过在元器件级采用余度技术,即采用多于三个惯性 测量器件的斜置配置来实现^[1]。这就需要有效地进行传感 器的故障诊断与隔离并采用有效的容错技术以达到高精 度、高可靠性的要求。

目前,对余度捷联惯导系统的故障诊断常用的方法 有广义似然比法^[2]和最佳奇偶矢量法。这两种方法都是 基于假设检验的方法,因此都存在漏检的情况。参考文 献[3]对 Potter 等的广义似然比方法加以改进,以"总误差 矢量"的新概念来研究所有误差对检测准确性的影响。 参考文献[4]改进了广义似然比的方法,使其能检测一个 以上的软故障,但是并没有减少漏检率。参考文献[5]提 出无迹卡尔曼滤波结合三交叉容错融合方法,对不同的 冗余配置建立统一数学模型。参考文献[6]提出利用正 交试验法安排试验,对广义似然比故障检测算法进行性 能检测。参考文献[7]提出一种对余度故障100%实现检

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.011

测的故障诊断方法,给出了故障诊断关键门限的设计方 法。参考文献[8]给出了基于采用主从冗余设计的激光/ 光纤双捷联控制系统的组成,以及故障诊断与决策,全方 位发射、组合导航、方位瞄准及参数测量、三CPU冗余计 算机等关键技术。参考文献[9]针对三种冗余配置的捷 联惯组,研究了广义似然比法在三种配置下的误警率并 进行比较分析。参考文献[10]采用数据窗均值法和统计 法相结合的方法进行三捷联惯组动态阈值设计。参考文 献[11] 将测量方程的协方差矩阵对角线元素作为加权因 子,进而得到基于加权最小二乘法的卫星故障检测算法。 参考文献[12]采用广义特征值法推导出次优解耦矢量的 构造方法,得到了奇异值分解法获取最优解耦矢量的构 造方法,以及广义特征值法获取次优解耦矢量的构造方 法。参考文献[13]验证了最优奇偶矢量法在三套正交安 装的捷联惯组下故障检测的可行性及其检测效果,证明 最优奇偶矢量法对硬故障检测的灵敏度很高,但对于缓 变故障,检测存在一定的延迟。参考文献[14]提出的方法 对突变型故障能够有效检测,但是对于渐变型故障,一

收稿日期:2019-02-19; 退修日期:2019-04-18; 录用日期:2019-04-25 基金项目: 航空科学基金(20160812004,20160112002,2016ZA12002) *通信作者.Tel.: 0379-63387695 E-mail: 570658391@qq.com

引用格式: Li Qunsheng, Yue Yazhou, Kou Lei. An improved optimal parity vector fault tolerant algorithm for redundant strap-down inertial system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(05): 59-64. 李群生, 岳亚洲, 寇磊. 一种改进余度捷联惯导系统最优奇偶矢 量故障容错算法[J]. 航空科学技术, 2019, 30(05): 59-64.

开始故障比较小,漏检现象十分严重。为了在故障未检测出来之前,对小故障有较好的容错性能。本文在参考文献[14]等提出的对特定传感器故障敏感的最优奇偶矢量的故障检测法的基础上,提出对特定传感器故障和噪声都敏感的最优奇偶矢量构造最小二乘加权矩阵, 来减小在故障未检测出来时对待测状态估计的影响。

1 最优奇偶矢量故障检测方法

假定余度捷联惯导配置有*m*个传感器,假设其量测方 程为:

$$Y = HX + \varepsilon \tag{1}$$

式中: $X \in \mathbb{R}^n$ 为待测状态矢量(加速度或角速率); $Y \in \mathbb{R}^m$ 为m维传感器的量测值,且m > n;H为传感器配置的量测矩阵; $\varepsilon \in m$ 维零均值、协方差为 $\sigma^2 I_m$ 的高斯白噪声, I_m 为m阶单位矩阵。

为了推导最优奇偶矢量故障检测法,考虑更一般的量 测方程为:

$$Y = HX + Db + E\varepsilon \tag{2}$$

式中:b为m维传感器故障矢量;D、E分别是故障和噪声影 响矩阵。对于捷联惯导的量测方程来说都是m阶单位阵。

依据式(2),若v是奇偶矢量,即满足条件:

 $\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}=\boldsymbol{0} \tag{3}$

式中:上标T表示矩阵的转置。

则奇偶方程可以写成:

$$\rho = \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{b} + \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{\varepsilon}$$
(4)

可见奇偶矢量不仅与噪声有关,而且与故障有关。正 是由于奇偶矢量在有故障和无故障时会表现出不一致性, 这就为故障检测提供了条件^[3]。

为了设计对特定传感器故障敏感而对其他传感器和噪 声输入不敏感的奇偶矢量,不失一般性,假设最优奇偶矢量 v最敏感第*i*个传感器,建立如下的性能指标函数^[5]:

$$\max J_{i}(\boldsymbol{v}) = \max \frac{(\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D} \boldsymbol{e}_{i})^{2}}{\left\|\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{E}\right\|^{2} + \sum_{j \neq i} (\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D} \boldsymbol{e}_{j})^{2}} =$$

$$\max \frac{(\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D} \boldsymbol{e}_{i})^{2}}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} (\boldsymbol{E} \boldsymbol{E}^{\mathrm{T}} + \sum_{j \neq i} \boldsymbol{D} \boldsymbol{e}_{j} \boldsymbol{e}_{j}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}) \boldsymbol{v}} \quad \text{s.t. } \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{H} = 0$$
(5)

式中: e_i 为m阶单位矩阵的第i列; $v^{T}De_i$ 和 $v^{T}De_j$ 分别为残差 ρ 对第i个和第j个传感器故障的敏感程度; $||v^{T}E||$ 为残差 ρ 对噪声的敏感程度。

设S(V)为奇偶空间,即由满足 $V^{\mathsf{T}}H = 0$ 的矩阵V的列 矢量扩张的空间,则 $v \in S(V)$,因此,奇偶矢量v可写成:

$$v = Vc \tag{6}$$

式中:c为*m-n*维非零矢量。 将式(6)代入到式(5),并注意到,

$$\sum_{j \neq i} De_j e_j^{\mathrm{T}} D^{\mathrm{T}} = DD^{\mathrm{T}} - De_i e_i^{\mathrm{T}} D^{\mathrm{T}}$$
(7)
可得:

$$\max[j_i(v)] = \max\left[\frac{c^{\mathrm{T}}V^{\mathrm{T}}De_ie_i^{\mathrm{T}}D^{\mathrm{T}}Vc}{c^{\mathrm{T}}V^{\mathrm{T}}(EE^{\mathrm{T}} + DD^{\mathrm{T}} - De_ie_i^{\mathrm{T}}D^{\mathrm{T}})Vc}\right] = \max\left[\frac{c^{\mathrm{T}}Ac}{c^{\mathrm{T}}Bc}\right]$$
(8)

式中:

$$\mathbf{A} = \mathbf{V}^{\mathrm{T}} \mathbf{D} \mathbf{e}_{i} \mathbf{e}_{i}^{\mathrm{T}} \mathbf{D}^{\mathrm{T}} \mathbf{V}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{V}^{\mathrm{T}} (\mathbf{E} \mathbf{E}^{\mathrm{T}} + \mathbf{D} \mathbf{D}^{\mathrm{T}} - \mathbf{D} \mathbf{e}_{i} \mathbf{e}_{i}^{\mathrm{T}} \mathbf{D}^{\mathrm{T}}) \mathbf{V}$$

根据矩阵广义特征值理论可得式(8)的最大值是矩阵 *A*相对于*B*的最大特征值,且在*c*为对应特征值时取得。

于是所求得的最优奇偶矢量为v = Vc,不失一般性,将 v单位化,得 $v^* = \frac{v}{\|v\|}$ 。为了表示方便将 v^* 也记为v。

将v代入式(4)得到最优奇偶残差 $\rho^* = v^T Y$,若无故障 发生时,则最优奇偶残差 ρ^* 服从均值为零,方差为 $\sigma^2 ||v^T E||$ 的正态分布。若故障发生时,均值将不再为零。可将 ρ^* 化 为标准正态分布,为了表述方便,将标准化后的 ρ^* 也记为 ρ^* 。根据设定误检率,并查标准正态分布分位表,可得故障 检测门限,用T来表示。

最优奇偶矢量故障检测步骤为:

(1)计算m个最优奇偶矢量 v_i ($i = 1, 2, \dots, m$);

(2)计算*m*个最优残差标准 ρ_i^* (*i* = 1,2,…,*m*);

(3)确定所有最优标准残差 $|\rho_i^*|$ 的最大值,即 $|\rho_k^*|$ = max $|\rho_i^*|$;

(4)若 $|\rho_k| > T$ 则认为有故障发生,且发生故障的是第 k个传感器。

2 利用最优奇偶矢量确定加权阵

依据式(4)可得,奇偶残差独立于待测状态,而只与噪 声和可能存在的故障有关,因此奇偶矢量包含了传感器对 待测状态测量的好坏程度,从而为利用奇偶矢量构造加权 矩阵奠定了基础。

上一节构造的是对指定的传感器故障敏感的最优奇偶 矢量,而利用奇偶矢量构造加权阵时,需要奇偶矢量对指定 的传感器噪声和故障都有较大的敏感性,而对其他的传感 器噪声和故障不敏感,因此仿照式(5)建立如下性能指标函 数,使其对指定的传感器噪声和故障都敏感,而对其他的传 感器的噪声和故障不敏感。

$$\max J_{i}(v) = \max \frac{(v^{\mathrm{T}} D e_{i})^{2} + (v^{\mathrm{T}} E e_{i})^{2}}{\sum_{j \neq i} (v^{\mathrm{T}} E e_{j})^{2} + \sum_{j \neq i} (v^{\mathrm{T}} D e_{j})^{2}} =$$

$$\max \frac{(v^{\mathrm{T}} D e_{i})^{2} + (v^{\mathrm{T}} E e_{i})^{2}}{v^{\mathrm{T}} (\sum_{j \neq i} E e_{j} e_{j}^{\mathrm{T}} E^{\mathrm{T}} + \sum_{j \neq i} D e_{j} e_{j}^{\mathrm{T}} D^{\mathrm{T}}) v} =$$

$$\max \frac{v^{\mathrm{T}} (D e_{i} e_{i}^{\mathrm{T}} D^{\mathrm{T}} + E e_{i} e_{i}^{\mathrm{T}} E^{\mathrm{T}}) v}{v^{\mathrm{T}} (\sum_{j \neq i} E e_{j} e_{j}^{\mathrm{T}} E^{\mathrm{T}} + \sum_{j \neq i} D e_{j} e_{j}^{\mathrm{T}} D^{\mathrm{T}}) v} =$$

$$\max \frac{v^{\mathrm{T}} (D e_{i} e_{i}^{\mathrm{T}} D^{\mathrm{T}} + E e_{i} e_{i}^{\mathrm{T}} E^{\mathrm{T}}) v}{v^{\mathrm{T}} (E E^{\mathrm{T}} + D D^{\mathrm{T}} - E e_{i} e_{i}^{\mathrm{T}} E^{\mathrm{T}}) v}$$

$$(9)$$

$$\operatorname{s.t.} v^{\mathrm{T}} H = 0$$

同样根据矩阵广义特征值理论可得单位化的最优奇偶 矢量 $v_i(i = 1, 2, ..., m)$ 。因此,在对特定传感器误差敏感的 最优的奇偶残差 $\rho_i^* = v_i^T Y(i = 1, 2, ..., m)$ 反映了指定传感 器量测的准确性。 $|\rho_i^*|$ 越大说明量测越不准确,在利用最 小二乘原理估计角速度或加速度时所占的权重越小。令 λ_i 为加权因子,且定义:

$$\lambda_i = \exp(-d|\rho_i^*|) \tag{10}$$

式中:d为常数,为了达到较好的效果可以选择较大的值。

按式(10)所定义的加权因子是 $|\rho_i^*|$ 的单调递减函数, 若 $|\rho_i^*|$ 越大则相对于其他的传感器来说所占的权重要小, $|\rho_i^*|$ 越小则相对于其他传感器来说所占的权重要大。令最 小二乘的加权矩阵 $\mathbf{W} = \text{diag}(\lambda_i)$,则对于余度捷联惯导系 统待测状态*X*的加权最小二乘估计为:

$$\hat{\boldsymbol{X}} = (\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{Y}$$
(11)

)

采用式(11)进行待测状态估计,当传感器误差较大时 或者发生故障时残差都会较大,而由式(10)可知,残差越大 则相对权值越小,因而通过式(11)可以减小对估计值的贡 献,而加大其他传感器对估计值的贡献,从而达到容错的 目的。

3 渐变型故障容错算法

由参考文献[12]可知,当故障较小时故障的成功检测 概率较小,故障较大时成功检测概率较大。但是即使故障 较大时,也不是全部能检测。因此在发生故障时,为了不使 故障传感器影响待测状态或者影响较小,则使用基于最优 奇偶矢量确定的最小二乘加权方法可以有效地降低故障传 感器对待测状态的影响。特别是对于渐变型故障,一开始 时故障很小,很难检测出来,当故障变大时已经经过了一段 故障时间,这段故障时间将会影响对待测状态的估计,从而 降低了捷联惯导的精度。因此,使用最优奇偶矢量确定的 最小二乘加权方法可以辅助最优奇偶矢量故障检测法,从 而达到对渐变型故障容错的方法。

根据以上分析可得渐变型故障容错方法的计算流程如 图1所示。



tolerance method

具体算法步骤如下:(1)按照最优奇偶矢量的方法检测 是否发生故障;(2)若发生故障,则进行故障隔离和系统重 构,否则转入(3);(3)计算对特定传感器误差敏感的最优奇 偶残差;(4)计算确定最小二乘估计的加权阵,按照式(11) 对待测状态进行估计。

4 仿真及结果分析

(1) 仿真条件

以沿正十二面体配置的六单轴陀螺仪为例,则其测量

矩阵[1] 用为:

H	=	0.5257	0	0.8507	
		-0.5257	0	0.8507	
		0.8507	0.5257	0	
		0.8507	-0.5257	0	
		0	0.8507	0.5257	
		0	0.8507	-0.5257	

且 E 和 D 都是六阶单位阵, V 的计算可以采用 Potter 算 法^[1]。假设陀螺的测量噪声均方差 $\sigma = 0.001(^{\circ})$ /s, 陀螺的 采样频率为1Hz。仿真时间为180s, 载体在180s内同时进 行航向、俯仰和滚转三轴机动, 机动角速度都为0.1($^{\circ}$) /s。3 号陀螺在10s 加入渐变故障, 故障的斜率为0.00025($^{\circ}$) /s², 即在3号陀螺叠加上故障量 $b_f = 0.00025(t - 10)(^{\circ})$ /s。

(2) 仿真结果及分析

图2、图3分别给出了不进行故障检测时采用参考文献 [11]与采用本文提出方法的仿真图。



Fig.2 Comparison diagram of error estimation without fault detection

从图2可以看出来使用加权最小二乘法时即使不进行 故障检测与隔离,故障传感器对待测状态的影响也很小,也 就是说估计误差很小。图3中的跳变表示在第120s时检测 到故障,对故障隔离后两者的估计误差基本上一致。图中 对Z轴方向的估计误差基本上一致,是因为3号陀螺对Z轴 的量测为零,因此3号陀螺故障不会影响到Z轴的估计,同



时两种估计在该方向估计误差基本一致也说明了在没有发 生故障时本文提出的方法不会降低估计精度。比较而言, 本文提出的方法具有更好的精度。

5 结论

本文所提出的方法采用了对特定的传感器噪声和故障 敏感的最优奇偶矢量,通过该矢量产生奇偶残差,该残差反 映了特定的传感器对待测状态量测的准确程度,并通过该 残差确定最小二乘加权阵,去辅助最优奇偶矢量故障检测 法,从而实现了高的容错性。从仿真结果图可以看出,本文 所提出的方法在不管有没有故障检测时都能够有效提高待 测状态的估计精度,对渐变型故障具有较高的容错效果。 另外,由于本文所采用的方法包含了最优奇偶矢量故障检 测方法,所以对突变故障也具有较好的容错效果。仿真结 果验证了本文提出的方法的有效性和实用性。

参考文献

卢佳振,张春熹,祝露峰.余度捷联惯导系统连续自动标定技术[J].北京航空航天大学学报,2009,35(3):366-370.
 Lu Jiazhen, Zhang Chunxi, Zhu Lufeng. Technique of continuous auto-calibration of redundant strapdown inertial system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and

63

Astronautics, 2009, 35(3): 366-370.(in Chinese)

- [2] 王社伟,张洪钺. 冗余配置捷联惯导系统故障检测门限的确 定[J]. 航空学报,2000,21(4):303-307.
 Wang Shewei, Zhang Hongyue. Fault detection threshold determination in a redundant strapdown inertial navigation system[J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2000,21(4): 303-307.(in Chinese)
- [3] 魏伟,陆志东,秦永元.余度传感器捷联惯导软故障检测[J].
 中国惯性技术学报,2009,17(1):111-116.
 Wei Wei, Lu Zhidong, Qin Yongyuan. Soft fault detection of redundant sensor SINS[J]. Journal of Chinese Inertial

Technology, 2009,17(1):111-116.(in Chinese)

- [4] 程建华,孙湘钰, 牟宏杰,等. 冗余式捷联惯导系统多故障的检测与隔离[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2):358-364.
 Cheng Jianhua, Sun Xiangyu, Mu Hongjie, et al. Multi-fault detection and isolation for redundancy strapdown inertial navigation system[J].Journal of Harbin Engineering University, 2018,39(2):358-364. (in Chinese)
- [5] 周维正,李学锋,赵赛君. 冗余捷联惯组信息容错管理算法[J].国防科技大学学报, 2018, 40(1):32-36.

Zhou Weizheng, Li Xuefeng, Zhao Saijun. Fault-tolerant algorithm and information management for redundant strapdown inertial navigation system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(1): 32-36. (in Chinese)

 [6] 王易南,罗洋,尚妮妮,等.基于正交试验法的冗余捷联惯组 故障诊断实验方法研究[J].指挥控制与仿真,2015(1): 124-127.

Wang Yinan,Luo Yang,Shang Nini,et al.Orthogonal experiment of RIMU fault detection[J] Command Control & Simulation, 2015(1):124-127.(in Chinese)

- [7] 王鹏,周如好,裴忠海,等.双"八表"捷联惯组冗余故障诊断 技术[J].上海航天,2016, 33(S1):97-101.
 Wang Peng, Zhou Ruhao, Pei Zhonghai, et al. Technology of fault diagnosis for dual 8-meter-configuration strap-down IMU [J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(S1):97-101.(in Chinese)
- [8] 谈学军,洪刚,李建强,等.双捷联冗余技术在长征二号丁运载火箭上的研发与实践[J].上海航天,2016(4):1-9.
 Tan Xuejun, Hong Gang, Li Jianqiang, et al. Development and implementation of dual-strapdown inertial redundant technology

in CZ-2D launch vehicle[J]. Aerospace Shanghai, 2016(4): 1-9. (in Chinese)

- [9] 武唯强, 闫杰, 温琦. 基于广义似然比的冗余惯组故障检测方 法研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(5):64-66.
 Wu Weiqiang, Yan Jie, Wen Qi. Research on fault detection for redundant inertial measuring unit based on the generalized likelihood ratio[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(5): 64-66. (in Chinese)
- [10] 王易南, 陈康, 闫杰. 三捷联惯组冗余系统故障检测阈值设计 方法[J]. 固体火箭技术, 2014(4):458-462.
 Wang Yinan, Chen Kang, Yan Jie. Dynamic threshold design for fault detection of the redundant strap-down inertial navigation system[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014(4):458-462.(in Chinese)
- [11] 王尔申,杨福霞,贾超颖,等.基于加权最小二乘法的RAIM 算法研究[J]. 电光与控制, 2017(11):11-14.
 Wang Ershen, Yang Fuxia, Jia Chaoying, et al. Research on RAIM algorithm based on weighted least-square method[J]. Electronics Optics & Control, 2017(11):11-14. (in Chinese)
- [12] 王征,高炜欣,陈义,等.控制系统中故障检测向量的解耦及次优设计[J].南京理工大学学报:自然科学版,2017,41(4):472-478.

Wang Zheng, Gao Weixin, Chen Yi, et al. Decoupling and suboptimal design of fault detection vector for control system [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(4):472-478.(in Chinese)

[13] 李超兵,张志良.最优奇偶矢量法在冗余捷联惯组故障检测 中的应用研究[J].航天控制,2016,34(2):86-90.

Li Chaobing, Zhang Zhiliang. Optimal parity vector technology applied to fault detection of redundant inertial measurement unit [J]. Aerospace Control, 2016, 34(2): 86-90. (in Chinese)

[14] Jin Hong, Zhang Hongyue. Optimal parity vector sensitive to designated sensor fault[J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,1999,35(4):1122-1128. (责任编辑 皮卫东)

作者简介

李群生(1977-)男,博士,高级工程师。主要研究方向:惯 性导航、制导与控制。 Tel:0379-63387695 E-mail:570658391@qq.com 岳亚洲(1971-)男,博士,研究员。主要研究方向:高精度 惯导与组合导航。 寇磊(1971-)女,高级工程师。主要研究方向:卫星导航 技术。

An Improved Optimal Parity Vector Fault Tolerant Algorithmfor Redundant Strapdown Inertial System

Li Qunsheng^{1,2,*}, Yue Yazhou³, Kou Lei³

1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

3. Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, FACRI, Xi'an 710065, China

Abstract: Focusing on the problem that current fault detection methods of redundant strap-down inertial navigation system show low detecting rate to small fault and gradual changing fault, an algorithm using optimal parity vector sensitive to certain sensor to establish the least square weighting matrix is put forward. By adopting errors generated by optimal parity vector to reflect the accuracy of the estimated state and establish the least square weighting matrix, fault detection is performed with the aided optimal parity vector, which is efficient to small and gradual changing fault tolerance. Simulation results show the algorithm is efficient in improving the estimating accuracy of system state, which is also of great engineering reference value.

Key Words: parity vector; gradual change; fault tolerance; redundant strapdown inertial system; fault detection

 Received:
 2019-02-19;
 Revised:
 2019-04-18;
 Accepted:
 2019-04-25

 Foundation item:
 Aeronautical Science Foundation of China (20160812004, 20160112002, 2016ZA12002)
 *Corresponding author.Tel.:
 0379-63387695
 E-mail:
 570658391@qq.com