

多余度大气/惯性系统高灵敏度故障检测方法

崔小丹, 程咏梅, 李振威

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要:GLT方法的故障检测函数近似与故障大小的平方成正比,当软故障较小时,其故障检测函数值低于检测门限,导致对多余度系统的软故障检测灵敏度低、漏检率高;IM-SPRT方法通过累加较小的软故障值,使故障检测函数值迅速增大到故障检测门限之上,因此,对软故障检测灵敏度高,但不能及时判断故障结束时刻,导致故障检测高虚警。针对上述问题,提出了一种基于GLT/IM-SPRT的多余度系统高灵敏度故障检测方法。该方法利用IM-SPRT方法检测弱小软故障;利用GLT故障检测结果将IM-SPRT方法故障检测函数值置零,且用GLT隔离故障;基于此,设计了多余度大气/惯性系统高灵敏度故障检测与隔离方法框架。三余度大气子系统级、惯性传感器级软、硬故障检测与隔离仿真实验结果表明:新方法能提高故障检测灵敏度、降低漏检率。

关键词:多余度大气/惯性系统;GLT方法;IM-SPRT方法;软故障;仿真;故障检测

中图分类号:V241.6

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2020)05-0971-06

现在的大型民用航空飞机一般采用多套惯性导航系统和多套大气数据系统,利用冗余信息对导航系统的完好性进行监测,提高导航系统的可靠性和安全性。现在民用导航系统常见故障可分为硬故障和软故障^[1]。目前针对多余度系统的故障检测方法有等价空间法,包括广义似然比法^[2](generalized likelihood ratio test, GLT)、最优奇偶向量法^[3](optimal parity vector test, OPT)和奇异值分解法^[4]。GLT是基于残差量的最大似然估计故障检验方法,该方法计算量小、实时性强,常用于余度系统的故障检测与隔离,但该方法对软故障的检测性能较低^[5-7]。这是由于GLT方法的故障检测函数只与当前时刻的噪声和可能的故障有关^[8-9],且当有故障发生时,其故障检测函数近似与奇偶残差中的故障量平方成正比,故当发生软故障时,由于在故障刚发生的一段时间内故障的幅值较小,导致故障检测函数值持续低于故障检测门限,这就导致该方法对软故障的检测不灵敏,存在较大的延时。

在故障检测中,残差信息经常被用来反映系统故障,序贯概率比检验(sequential probability ratio

test, SPRT)就是一种用残差信息进行故障判决的常用方法。文献[10]针对服从正态分布的残差,提出了一种改进序贯概率比(improved sequential probability ratio test, IM-SPRT)方法,该方法采用迭代递推的方法计算故障检测值,充分利用了之前时刻的故障测量值,可有效提高对软故障的检测灵敏度,但文献[11-12]中指出,IM-SPRT方法无法判断故障结束时间,会造成很大的虚警。

本文结合GLT和IM-SPRT方法各自的优势,提出了一种基于GLT/IM-SPRT的多余度系统高灵敏度故障检测方法。设计了多余度大气/惯性系统高灵敏度故障检测与隔离方法框架,实现了灵敏度高,漏检率低的故障检测与隔离。对比该方法与GLT方法的故障检测结果,验证了该方法的有效性。

1 GLT与IM-SPRT性能分析

1.1 GLT方法

有故障发生时, m 个余度传感器的量测方程为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{f} + \boldsymbol{\xi} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^n$ 是 n 个待测状态变量; $\mathbf{Z} \in \mathbf{R}^m$ 是 m 个传感器的量测值 ($m \geq n$); \mathbf{H} 是传感器安装矩阵, \mathbf{f} 是故障向量; $\boldsymbol{\xi}$ 是 m 维零均值、协方差为 σ^2 的高斯白噪声序列, 即 $E(\boldsymbol{\xi}) = 0, E(\boldsymbol{\xi}\boldsymbol{\xi}^T) = \sigma^2 \mathbf{I}_m, \mathbf{I}_m$ 为单位矩阵。

通过构造满足条件 $\mathbf{V}'\mathbf{H} = 0$ 与条件 $\mathbf{V}'\mathbf{V} = \mathbf{I}_{m-n}$ (\mathbf{V}' 为 \mathbf{V} 的转置) 的奇偶矩阵 \mathbf{V} 使得

$$\mathbf{P} = \mathbf{V}\mathbf{Z} = \mathbf{V}\mathbf{f} + \mathbf{V}\boldsymbol{\xi} \quad (2)$$

式中: \mathbf{P} 是对状态 \mathbf{X} 解耦的奇偶残差, 仅与噪声或可能的故障有关, 当传感器无故障时; \mathbf{P} 仅是噪声的函数, 即

$$\mathbf{P} = \mathbf{V}\boldsymbol{\xi} \quad (3)$$

1) 故障检测

GLT 方法故障检测决策的假设检验:

无故障状态 $H_0: E(\mathbf{P}) = 0, E(\mathbf{P}\mathbf{P}') = \sigma^2 \mathbf{V}'\mathbf{V}$;

有故障状态 H_1 :

$$E(\mathbf{P}) = \boldsymbol{\mu} \neq 0, E((\mathbf{P} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{P} - \boldsymbol{\mu})') = \sigma^2 \mathbf{V}'\mathbf{V};$$

其中 $\boldsymbol{\mu} = \mathbf{V}'\mathbf{f}$ 。

利用奇偶残差 \mathbf{P} 构造故障检测判决函数

$$\mathbf{F}_{D, GLT} = \frac{\mathbf{P}'\mathbf{P}}{\sigma^2} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{F}_{D, GLT} \sim \chi^2(m - n)$ 。

则故障检测过程可描述为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{D, GLT} > T_d, \text{ 有故障} \\ \mathbf{F}_{D, GLT} < T_d, \text{ 无故障} \end{cases}$$

T_d 是先验故障检测门限。在已知故障检测虚警率及 $m - n$ 下, 通过 χ^2 分布表获得。当故障检测门限 T_d 增大时, 故障漏检率会增大, 软故障检测平均延迟时间会增加; 反之, 故障虚警率增大, 软故障检测平均延迟时间会减小。

2) 故障隔离

H_i 表示假设第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 个传感器故障, 对第 i 个传感器构造故障隔离判决函数

$$\mathbf{F}_{I, GLT}(i) = \frac{1}{\sigma^2} \frac{(\mathbf{P}'\mathbf{V}_i^*)^2}{\mathbf{V}_i^*{}' \mathbf{V}_i^*} \quad (5)$$

\mathbf{V}_i^* 为 \mathbf{V} 的第 i 列。故障传感器的隔离函数值是所有传感器隔离函数值中的最大者。

由公式(2)和(4)可知, GLT 方法故障检测函数只和当前时刻的噪声和可能发生的故障有关, 当有故障发生时, 其故障检测函数值近似与奇偶残差中的故障信息的平方成正比。如图 1 所示, 假设在时

刻 200~400 有硬故障发生, 故障幅值会在时刻 200 迅速增大到较大值, 对应 GLT 方法故障检测函数值在时刻 200 处也迅速增大而超过故障检测门限, 对硬故障的检测灵敏度高; 假设在时刻 200~300 有软故障发生, 在故障刚发生的一段时间内, 奇偶残差中的故障特征不明显, 导致故障检测函数值很小, 不能检测出故障, 随故障幅值的持续增大, 故障检测函数值也增大, 直到增大到一定程度, 才可检测出故障, 这就导致 GLT 方法对软故障的检测灵敏度低。

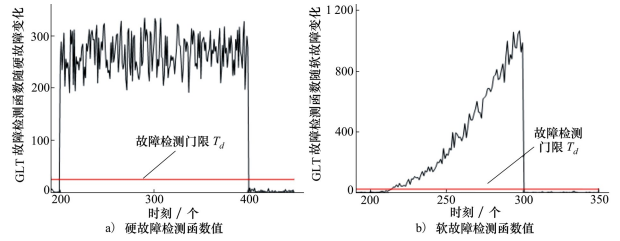


图 1 GLT 方法故障检测函数值随故障幅值的变化曲线

1.2 IM-SPRT 方法

设 p 为奇偶残差 \mathbf{P} 的任意一维分量, 它的 k 次序贯独立样本为 $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, 由概率论与数理统计原理近似可得 $p \sim N(\bar{p}_k, \sigma_k^2)$, \bar{p}_k 为样本均值, σ_k^2 为样本方差, 对无故障和有故障 2 种状态下的概率密度函数有似然比

$$L(k) = e^{\sum_{i=0}^k \frac{(p_i - p_0)^2 - (p_i - \bar{p}_k)^2}{\sigma_k^2}} \quad (6)$$

两边同时取对数, 得对数似然比为

$$\lambda(k) = \frac{k(\bar{p}_k - p_0)^2}{2\sigma_k^2} \quad (7)$$

式中, p_0 表示无故障时的真实值。

当系统正常时, 由切比雪夫大数定理可知, 样本均值 \bar{p}_k 依概率收敛于真值 p_0 , 此时, $\lambda(k)$ 会趋向零, 即 $\lambda(k) \rightarrow 0$; 当系统发生故障时, 随着 k 的增加, 样本均值 \bar{p}_k 会逼近故障时的真值, 该值与 p_0 不同, 可得 $\lambda(k)$ 的递推计算公式, 见(8)式。

$$\begin{cases} \lambda(k) = \frac{k(\bar{p}_k - p_0)^2}{2\sigma_k^2} \\ \bar{p}_k = \frac{(k-1)\bar{p}_{k-1} + p_k}{k} \\ \sigma_k^2 = \sigma_{k-1}^2 + \frac{k-1}{k}(\bar{p}_{k-1} - p_k)^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: 若变量 p 的先验方差 σ^2 已知, 可直接代替 σ_k^2 ; 若变量 p 的先验方差 σ^2 未知, 可实时计算样本方差代替 σ_k^2 。

文献[10] 对该方法设定一个故障检测门限 T_{sprt} , 该门限由虚警率 P_F 和漏检率 P_M 唯一确定, 为

$$T_{sprt} = \ln\left(\frac{1 - P_M}{P_F}\right) \quad (9)$$

IM-SPRT 方法故障检测门限 T_{sprt} 的变化对故障检测性能的影响分析与 GLT 方法相同。

则故障检测过程可描述为

$$\begin{cases} \lambda(k) > T_{sprt}, & \text{有故障} \\ \lambda(k) < T_{sprt}, & \text{无故障} \end{cases}$$

由公式(8)可知, IM-SPRT 方法采用迭代递推的方法来计算故障检验函数, 充分利用之前时刻的检测值, 如图 2 所示, 假设在时刻 200~400 有硬故障发生, 故障的幅值在时刻 200 达到较大值, 对应 IM-SPRT 方法的故障检测函数值也会迅速增大到故障检测门限之上, 对硬故障的检测灵敏度高; 假设在时刻 200~300 有软故障发生, 该方法的故障检测函数值也是累加增大, 这样可以提高软故障的检测灵敏度。当故障结束时, 该方法的故障检测函数仍会在故障检测门限之上, 会造成很大的虚警。

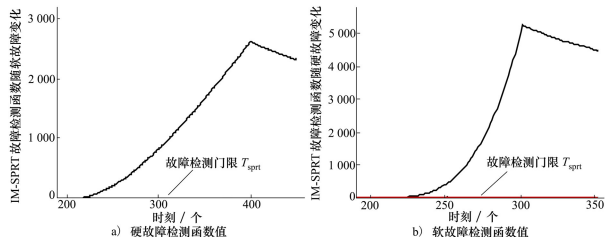


图 2 IM-SPRT 方法故障检测值随故障幅值的变化曲线

此外, 对 IM-SPRT 方法, 将其故障检测函数 $\lambda(k)$ 展开, 有

$$\lambda(k) \propto k\bar{x}^2 \quad (10)$$

进一步可得

$$\lambda(k) \propto \frac{1}{k} \quad (11)$$

即当 k 值减小时, $\lambda(k)$ 的值会增大, 这样通过设置重置周期 T 周期性将 k 值重置为 1, 可提高 $\lambda(k)$ 值的累加速度, 进而进一步提高 IM-SPRT 方法对软故障的检测灵敏度。

2 基于 GLT/IM-SPRT 的高灵敏度故障检测方法

由第 1 节的分析可知, GLT 方法虚警率低, 能准确的判断故障结束时间, 但对软故障的检测灵敏度

低。IM-SPRT 方法能快速检测出软故障, 但无法准确判断故障结束时间, 会造成很大的虚警。本文针对这些问题, 提出结合这 2 种方法优势的软、硬故障检测与隔离方法, 该方法用 IM-SPRT 方法检测故障, 通过 GLT 方法判断故障结束时刻来重置 IM-SPRT 方法的检测值, 并用 GLT 方法隔离故障, 方法框架见图 3。

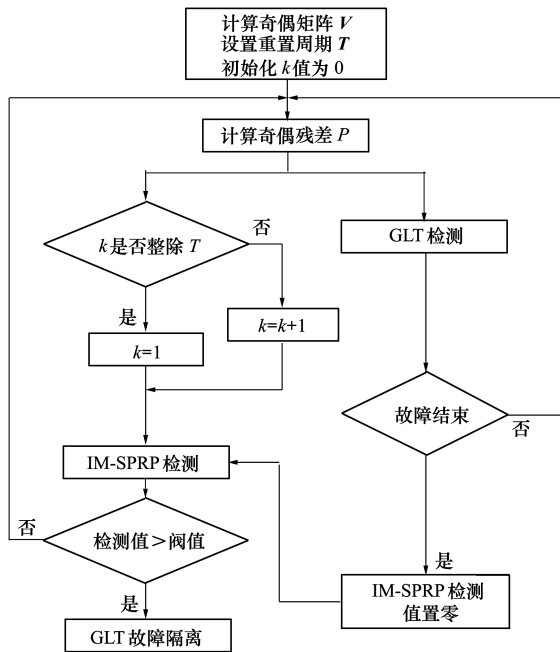


图 3 基于 GLT/IM-SPRT 的故障检测与隔离方法框架

在对奇偶残差 P 的每一维都用 IM-SPRT 方法进行故障检测的同时也用 GLT 方法进行故障检测。当奇偶残差 P 的每一维的 IM-SPRT 方法的检测值都没有超过给定阈值, 则系统正常; 当奇偶残差 P 的 IM-SPRT 方法检测值中有超过给定阈值的值, 则系统故障。在检测出系统故障时, 用 GLT 故障隔离方法隔离故障, 在 GLT 方法判断出故障结束时, 将 IM-SPRT 方法的检测值置为零, 这样当故障消失时, IM-SPRT 的故障检测值可以迅速减小到检测门限以下, 并以当前时刻为起始时刻开始重新迭代递推, 这样当非第一次发生的故障出现时, 还可以继续检测故障。设计的故障检测与隔离算法流程如下:

- 1) 计算奇偶矩阵 V , 设置重置周期 T , 将 k 值置为零;
- 2) 计算奇偶残差 P ;
- 3) 判断 k 值是否超过重置周期 T , 若超过, 则重置为 1, 若未超过则继续累加, 并对奇偶残差用 2 种方法进行故障检测;

4) 若有检测值超出了 IM-SPRT 方法的故障检测门限,则同时用 GLT 方法的故障隔离策略隔离故障,并返回到步骤 2);

5) 若 GLT 方法判断出此次故障结束,则将 IM-SPRT 的故障检测值置为零,并返回到步骤 2) 进行下一个故障的检测与隔离。

3 仿真分析

为了验证本文提出算法的有效性,首先完成惯性导航系统和大气数据系统的导航解算,在此基础上,给获得的大气或惯性数据加均值为零特定方差大小的高斯白噪声,产生 3 套带有随机误差的传感器数据,假设其中仅有 1 套数据出现故障,在实验数据中添加一定大小的硬故障或软故障信号,分别用本文方法和 GLT 方法进行 1 000 次蒙特卡洛仿真,计算故障检测平均延迟时间与漏检率。

本次仿真以三余度大气数据系统子系统级气压高度数据、三余度惯性导航系统传感器级东向加速度数据的故障检测与隔离为例,给定虚警率为 0.001,本文所给方法的故障检测阈值为 3, GLT 方法

的故障检测阈值为 13.8155。本文中给定 k 值重置周期为 100 s。

1) 气压高度

给获得的气压高度数据添加零均值,标准差为 $\sigma = 1$ m 的高斯白噪声,并取其中 1 000 个时刻数据。

情况一 给生成的第一套数据在第 200~400 时间段内添加幅值 10 的硬故障,在第 600~700 时间段内添加斜率为 0.4 的软故障。

本文方法和 GLT 方法在一次仿真中的结果如下所示,仿真结果中故障检测标志“1”表示有故障发生,“0”表示无故障发生。

对比图 4a) 至 4b) 和图 5a) 至 5b) 可知,本文方法和 GLT 方法均在时刻 200~400 检测出了故障,对所设置的硬故障检测均无延迟,而对于软故障的检测,从图 4b) 可以看出,本文给出的方法在第 607 个时刻时检测出故障,存在 7 个周期的延时,从图 5b) 可以看出, GLT 方法在第 612 个时刻时检测出故障,存在 12 个周期的延时,相比之下,本文所给方法的灵敏度更高。对比图 4c) 和图 5c), 因为 2 种方法都采用 GLT 方法的隔离策略,故在故障隔离上没有明显差异。

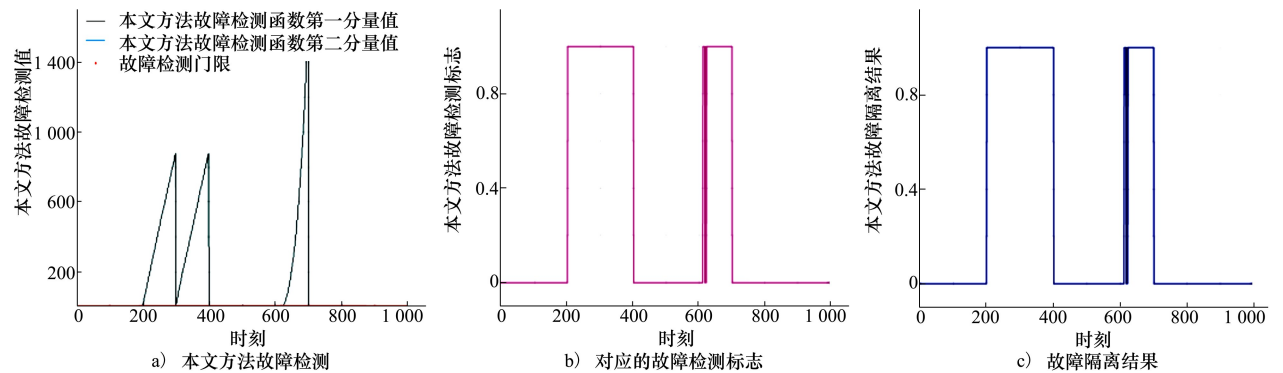


图 4 本文方法故障检测与隔离结果

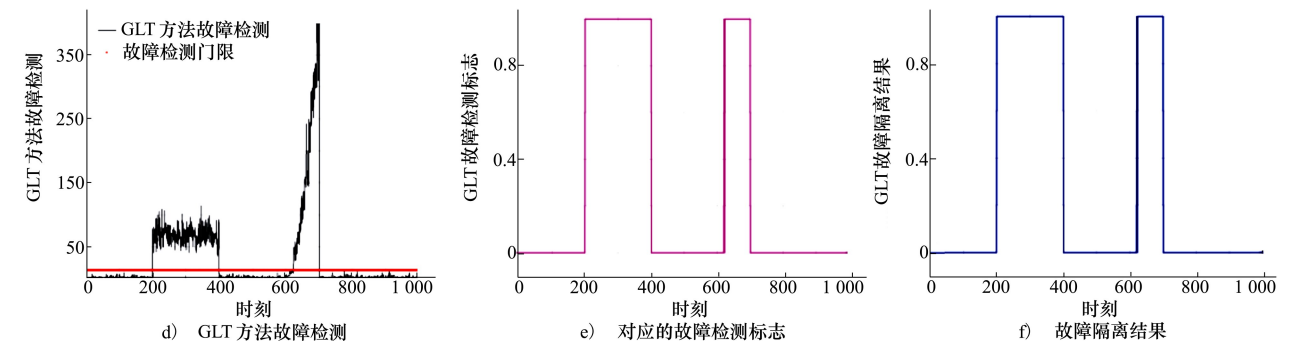


图 5 GLT 方法故障检测与隔离结果

进一步给出 2 种方法 1 000 次蒙特卡洛仿真后

计算出的漏检率和平均延迟时间,见表 1,从表中可

可以看出,对于硬故障检测2种方法无明显差异,而对于软故障,GLT方法漏检率约为本文方法的2.5倍,平均延迟时间比本文多出5个周期,可见本文方法对软故障的检测灵敏度更高。

表1 气压高度故障检测2种方法对比结果(情况一)

方法	软故障		硬故障	
	漏检率	平均延迟时间	漏检率	平均延迟时间
本文方法	0.015 3	8	0	0
GLT	0.0391	13	0	0

情况2 给生成的第一套数据在第200~400时间段内添加幅值11的硬故障,在第600~700时间段内添加斜率为0.3的软故障。

由于篇幅有限,仅给出1 000次蒙特卡洛仿真后2种方法计算出的漏检率和平均延迟时间,结果如表2所示,可见本文对软故障的检测灵敏度更高。

表2 气压高度故障检测2种方法对比结果(情况二)

方法	软故障		硬故障	
	漏检率	平均延迟时间	漏检率	平均延迟时间
本文方法	0.021 8	10	0	0
GLT	0.044 8	17	0	0

2) 东向加速度

给获得的东向加速度数据添加零均值,标准差为 $\sigma=0.02 \text{ m/s}^2$ 的高斯白噪声,取其中1 000个时刻数据。

情况一 给生成的第一套数据在第200~400时间段内添加幅值0.2的硬故障,在第600~700时间段内添加斜率为0.005的软故障。

进一步给出2种方法1 000次蒙特卡洛仿真后计算出的漏检率和平均延迟时间,见表3。

表3 东向加速度故障检测2种方法对比结果(情况一)

方法	软故障		硬故障	
	漏检率	平均延迟时间	漏检率	平均延迟时间
本文方法	0.037 5	13	0	0
GLT	0.059 6	22	0	0

从表中可以看出,对于硬故障检测2种方法无明显差异,而对于软故障,GLT方法漏检率约为本文方法的1.6倍,平均延迟时间比本文多出9个周期,

可见本文方法对软故障的检测灵敏度更高。

情况2 给生成的第一套数据在第200~400时间段内添加幅值0.22的硬故障,在第600~700时间段内添加斜率为0.004的软故障。

同样仅给出1 000次蒙特卡洛仿真之后2种方法计算的故障检测漏检率和平均延迟时间,结果见表4。可知,在此仿真条件下,对于硬故障的检测量中方法无明显差异,而对于软故障,GLT方法漏检率约为本文方法的1.7倍,平均延迟时间比本文多出11个周期,可见本文对软故障的检测灵敏度更高。

表4 东向加速度故障检测2种方法对比结果(情况二)

方法	软故障		硬故障	
	漏检率	平均延迟时间	漏检率	平均延迟时间
本文方法	0.039 7	14	0	0
GLT	0.066 9	25	0	0

由对气压高度数据和东向加速度数据的故障检测与隔离的仿真分析结果可知,在假设同一时刻只有一个故障发生的情况下,本文所给的方法能有效检测软、硬故障情况,且相比于GLT方法,本文所给方法对软故障的检测灵敏度更高。

4 结 论

为了提高GLT方法对软故障的检测灵敏度,本文提出了一种基于GLT/IM-SPRT的多余度大气/惯性高灵敏度故障检测方法,结合GLT方法与IM-SPRT各自的优势,将2种方法结合使用,用IM-SPRT方法检测故障,用GLT方法隔离故障,并通过GLT方法判断故障结束时刻来重置IM-SPRT方法检测值;设计了多余度大气/惯性系统高灵敏度故障检测与隔离框架,仿真通过对比本文所提方法与GLT方法的检测性能,验证了本文所提算法的有效性,结果表明,本文所提出的算法相比于GLT方法对软故障的检测灵敏度更高,能有效提高对民机多余度大气/惯性系统的故障检测能力。噪声对该方法性能的影响还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 刘莎红. 捷联惯性导航系统多传感器冗余技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012

LIU Shahong. Research on Strapdown Inertial Navigation System Multi-Sensor Redundancy Technology[D]. Harbin: Harbin En-

gineering University, 2012 (in Chinese)

- [2] KEVIN C Daly, ELIEZER Gai, JAMES V Harrison. Generalized Likelihood Test for FDI in Redundant Sensor Configurations [J]. *Guidance and Control*, 1978, 2(1): 9-17
- [3] JIN Hong, ZHANG Hongyue. Optimal Parity Vector Sensitive to Designated Sensor Fault [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(4): 1122-1128
- [4] SHIM Duksun, YANG Cheolkwan. Geometric FDI Based on SVD for Redundant Inertial Sensor Systems [C] // 2004 5th Asian Control Conference, 2004: 1094-1100
- [5] 黄帅, 刘海颖, 华冰. 五传感器配置的 MW-GLRT 故障检测算法 [J]. *传感器与微系统*, 2013(10): 127-131
HUANG Shuai, LIU Haiyin, HUA Bing. MW-GLRT Fault Detection Algorithm for Five Sensor Configurations [J]. *Sensors & Microsystems*, 2013(10): 127-131 (in Chinese)
- [6] FEN W F, ZHANG T, FU W X. An Improved Principal Component Analysis Algorithm on FDI of Redundant Inertial Measurement Unit [C] // 37th Chinese Control Conference, 2018: 6082-6086
- [7] BESSON O, COLUCCIA A, CHAUMETTE E, et al. Generalized Likelihood Ratio Test for Detection of Gaussian Rank-One Signals in Gaussian Noise with Unknown Statistics [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2017, 65(4): 1082-1092
- [8] MANSOURI M, HAJJI M, TRABELSI M, et al. Enhanced Generalized Likelihood Ratio Test for Failure Detection in Photovoltaic Systems [J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2018, 28(12): 2640
- [9] MANSOURI M, HAJJI M, TRABELSI M, et al. An Effective Statistical Fault Detection Technique for Grid Connected Photovoltaic Systems Based on an Improved Generalized Likelihood Ratio Test [J]. *Energy*, 2018, 159: 842-856
- [10] GOVINDARAJULU Z. *The Sequential Probability Ratio Test* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2004
- [11] 张闯, 赵修斌, 庞春雷, 等. 基于 SPRT 的组合导航故障检测与隔离互辅算法 [J]. *火力与指挥控制*, 2017, 42(5): 68-71
ZHANG Chuang, ZHAO Xiubin, PANG Chunlei, et al. Fault Detection and Isolation Mutual Assistance Algorithm of Integrated Navigation Based on SPRT [J]. *Fire and Command Control*, 2017, 42(5): 68-71 (in Chinese)
- [12] WANG R, XIONG Z, LIU J, et al. Chi-Square and SPRT Combined Fault Detection for Multisensor Navigation [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(3): 1352-1365

Redundant ADS and INS High Sensitivity Fault Detection Method

CUI Xiaodan, CHENG Yongmei, LI Zhenwei

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The fault detection function of GLT method is approximately proportional to the square of fault value, the value of the fault detection function is lower than the detection threshold when the soft fault is small, which leads to the low sensitivity of soft fault detection and the high rate of missing detection. The IM-SPRT method rapidly increases the value of fault detection function above the threshold of fault detection by accumulating small soft fault values, so it has high sensitivity for soft fault detection, however, the end time of the fault cannot be judged timely, resulting in a high false alarm for fault detection. In view of the above problems, this paper proposes a high-sensitivity fault detection method for redundant systems based on GLT/IM-SPRT. This method uses the IM-SPRT method to detect weak and soft faults and sets the IM-SPRT method fault detection function value to zero by the GLT fault detection result, and isolates the fault with GLT. On this basis, a framework of high-sensitivity fault detection and isolation methods for redundant ADS and INS systems is designed. The simulation results of soft and hard fault detection and isolation of three-redundancy ADS subsystem level and INS sensor level show that the method in this paper can improve the sensitivity of fault detection and reduce the rate of missed detection.

Keywords: redundant ADS and INS; GLT method; IM-SPRT method; soft fault; simulation; fault detection