# 基于局部方法的余度惯性组件故障诊断

熊 凯 张洪钺

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

**摘 要**: 介绍了局部方法(local approach)原理及其在随机系统故障诊断中的应用问题,讨论了用于故障诊断的样本数目对检测性能的影响,指出通过增加样本数目,可以大大增加局部方法检测小故障的能力,并说明样本数为 1 时,广义似然比(GLR,Generalized Likelihood Ratio)方法和局部方法的判决函数相同. 为了验证所提出方法的有效性,将局部方法用于沿正十二面体对称侧面配置的冗余微机械惯性组件(IMU, Inertial Measurement Unit)故障检测,实验结果表明文中的理论分析是符合实际情况的.

**关 键 词**: 容错系统; 惯性导航系统; 局部方法; 广义似然比方法

**中图分类号**: V 241.6

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0783-05

# Fault detection for inertial measurement unit based on local approach

Xiong Kai Zhang Hongyue

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract**: The application of local approach for fault detection in stochastic dynamic systems was presented. It was demonstrated that the selection of samples numbers plays an important role in improving the performance of the local approach. And it was pointed out that by enlarging the number of samples, the ability of the technique to detect small fault will be enhanced significantly. It was shown that when the sample size $n = 1$, decision function of the generalized likelihood ratio (GLR) method is the same as that of the local approach. In order to illustrate the efficiency of the proposed method, the local approach was applied to detect fault of the redundancy micromechanical inertial measurement unit (IMU) with a dodecahedron configuration, and the experiment results confirm findings of the theory analysis.

**Key words**: fault tolerant systems; inertial navigation systems; local approach; GLR test

随着惯性传感器精度的提高和组合导航技术的发展,惯性器件在飞行器导航和航天器姿态测量方面发挥着越来越重要的作用. 自主导航技术的发展对系统可靠性提出了更高的要求. 硬件余度技术是提高系统可靠性的重要手段,其基本思想是使用多个传感器执行同一任务,并采用故障检测与隔离(FDI,Fault Detection and Isolation)技术对系统进行监控;这样,当其中某一传感器发生故障时,就能够及时将故障传感器检测出来,并从系统中隔离掉,使得系统恢复正常工作. 目前,对于余度惯性测量装置,一般通过建立奇偶方程产生残差,使用广义似然比(GLR, Generalized Likelihood Ratio)等统计方法进行残差评价[1-2]. 但是,应用 GLR 方法要求残差的分布是已知的,在实际应用过程中,这一要求可能得不到满足.

为了解决这一问题,Benveniste[3] 等提出采用局部方法(local approach)对服从未知分布的残差进行分析,其基本思想是将不同时刻产生的残差作为随机样本,并对大量样本求加权和,并基于加权和求得判决函数. 当样本数足够大时,该方法可以将一般的故障检测问题转化为检测高斯向量均值变化的问题;近些年来,Zhang[4] 指出,局部方法

**收稿日期**: 2005-07-20

**基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(60234010)

**作者简介**: 熊 凯(1976-), 男, 北京人, 博士生, tobelove2001@tom.com.

对于检测小故障特别有效. Xiong 等[5]讨论了残差维数为1,即残差为标量时,样本数的选择对误检率和漏检率的影响. 但是,当残差为向量时,样本数的大小对系统故障检测能力有何影响,目前还缺乏有效的分析.

本文先介绍局部方法原理,通过理论分析指出,增大样本数可以提高局部方法的故障检测能力,并说明局部方法在检测小故障时,性能优于GLR方法. 最后以6个单轴斜置式惯性器件构成的余度系统为例,讨论局部方法的实际应用问题.

## 1 局部方法原理

局部方法是一种重要的残差评价方法. 假设所要检测的向量为 $\boldsymbol{\varepsilon}\in\boldsymbol{R}^m$,故障检测问题可归结为以下假设检验问题

$$H_0:\boldsymbol{\varepsilon}=0 \qquad \text{(无故障)} \qquad (1)$$

$$H_1:\boldsymbol{\varepsilon}=\frac{1}{\sqrt{n}}\boldsymbol{\eta} \qquad \text{(有故障)} \qquad (2)$$

其中,$n$ 为样本数;$\boldsymbol{\eta}\in\boldsymbol{R}^m$ 为未知向量,可视为故障幅值. $H_1$ 采用式(2)所示的表达形式,是为了适应理论分析的需要,详细说明可参见文献[6]. 故障诊断的过程中,向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的值往往不能直接得到. 假设可以获得 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的函数 $\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})$ 为未知分布的随机向量序列,并且满足以下假设

若 $H_0$ 成立:$E[\,h_k(\boldsymbol{\varepsilon})\,]=0$

若 $H_1$ 成立:$E[\,h_k(\boldsymbol{\varepsilon})\,]\neq 0$

$k$ 表示采样时刻. 在此基础上,定义加权和

$$\boldsymbol{D}_n=\frac{1}{\sqrt{n}}\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})$$

将向量 $\boldsymbol{D}_n$ 称为标准残差,可以证明,当样本数 $n$ 趋于无穷时,残差 $\boldsymbol{D}_n$ 依分布收敛于高斯随机向量[3]. 这样,原来的故障检测问题式(1)、式(2)就转化为检测高斯随机变量均值变化的问题,而这一问题可以用基于 $\chi^2$ 检验的方法来解决. 定义判决函数

$$S_n=\boldsymbol{D}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{h}}^{-1}\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}(\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{h}}^{-1}\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}})^{-1}\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{h}}^{-1}\boldsymbol{D}_n \qquad (3)$$

若 $\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为可逆阵,则 $S_n$ 可简化为

$$S_n=\boldsymbol{D}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{h}}^{-1}\boldsymbol{D}_n \qquad (4)$$

通过检查判决函数 $S_n$ 是否超过检测门限 $\lambda$,即可确定系统是否发生故障. $S_n$ 的统计特性可归纳为

若 $H_0$ 成立:$S_n\xrightarrow[n\to\infty]{L}\chi^2(m)$

若 $H_1$ 成立:$S_n\xrightarrow[n\to\infty]{L}\chi^2(m,\gamma)$

其中,符号 $\xrightarrow{L}$ 表示依分布收敛,$m$ 为随机向量 $\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})$ 的维数,非中心参数

$$\gamma^2=\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{h}}^{-1}\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}\boldsymbol{\eta}$$

$\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{h}}$ 可采用 $N$ 个样本,根据下列公式计算[7]

$$\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}\approx\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{\varepsilon}}\left[\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})\right]$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{h}}\approx\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\varepsilon})+\sum_{i=1}^{J}\frac{1}{N-i}\cdot\sum_{k=1}^{N-i}\left[\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})\boldsymbol{h}_{k+i}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\varepsilon})+\boldsymbol{h}_{k+i}(\boldsymbol{\varepsilon})\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\varepsilon})\right]$$

其中,$J$ 根据信号相关性确定.

假定已得到向量函数 $\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})$,基于局部方法的实时故障诊断方案如下所示:

1) 计算梯度矩阵 $\boldsymbol{H}_{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 和样本方差阵 $\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{h}}$;

2) 计算残差

根据最近的 $l$ 个样本求加权和,抛掉 $n-l+1$ 时刻以前的旧数据

$$\boldsymbol{D}_n\approx\frac{1}{\sqrt{l}}\sum_{k=n-l+1}^{n}\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon}) \qquad (5)$$

3) 采用式(3)或式(4)计算检验函数 $S_n$;

4) 根据给定的误检率确定门限 $\lambda$

设给定误检率 $P_{\mathrm{F}}$,鉴于 $S_n$ 近似服从 $\chi^2$ 分布

$$P_{\mathrm{F}}=\int_{\lambda}^{\infty}k(S_n;m)\,\mathrm{d}S_n$$

其中,$k(S_n;m)$ 表示自由度为 $m$ 的中心 $\chi^2$ 分布的概率密度函数. 可以通过查表确定门限 $\lambda$;

5) 判断 $S_n$ 是否超过门限,得到故障检测结果

$S_n\leqslant\lambda$ 无故障

$S_n>\lambda$ 有故障

## 2 局部方法性能分析

$H_1$ 为真时,判断 $H_0$ 为真,这称为漏检,其概率记为 $P_{\mathrm{M}}$. 漏检率的大小反映了算法检测故障的能力,本文将重点分析局部方法漏检率和样本数 $n$ 的关系. 为了清楚起见,先给出如下引理.

**引理1** 设 $\gamma_1>\gamma_2$,若随机变量 $y_1\sim\chi^2(m,\gamma_1)$,$y_2\sim\chi^2(m,\gamma_2)$,则对于一切 $y\in\mathbf{R}$ 有

$$P(y_1>y)\geqslant P(y_2>y)$$

**证明** 先考虑自由度 $m=1$ 的情况,设一维随机变量 $x\sim N(\mu,\sigma^2)$,$\mu>0$,再定义随机变量

$$z=x^2/\sigma^2$$

由非中心 $\chi^2$ 分布的性质可得,$z\sim\chi^2(1,\gamma)$,非中心参数 $\gamma=\mu/\sigma$,其分布函数可写为

$$K(y;1,\gamma)=P(z>y)=1-\int_{-\sqrt{y}-\gamma}^{\sqrt{y}-\gamma}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2}}\mathrm{d}x \qquad (6)$$

将上式对 $\gamma$ 求导数

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\gamma}K(y;1,\gamma)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left[\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\sqrt{y}+\gamma\right)^2}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\sqrt{y}-\gamma\right)^2}\right]>0$$

因此,分布函数 $K(y;1,\gamma)$ 是 $\gamma$ 的增函数.

从直观上解释,式(6)中积分区域如图 1 中阴影部分所示,容易看出,阴影部分随 $\gamma$ 的增大而减小,因而,$K(y;1,\gamma)$ 的值随 $\gamma$ 的增大而增大.

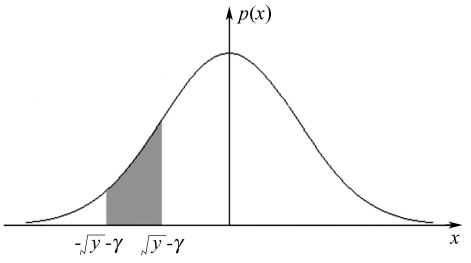



图 1　分布函数大小与非中心参数取值的关系

下面将这一结论推广到 $m>1$ 的情况. 引入等式

$$K(y;m,\gamma)=\int_{-\infty}^{\infty}K(y-\delta;1,\gamma)k(\delta;m-1)\mathrm{d}\delta \tag{7}$$

其中,$k(\delta;m-1)$ 表示服从中心 $\chi^2$ 分布的随机变量的概率密度函数. 将 $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 分别代入式(7),并由 $K(y-\delta;1,\gamma_1)\geqslant K(y-\delta;1,\gamma_2)$,易知 $\gamma_1>\gamma_2$ 时

$$K(y;m,\gamma_1)\geqslant K(y;m,\gamma_2)$$

因此,引理 1 结论成立.　　**证毕**

在后面的分析中,假定对于有限的 $n$,$S_n$ 服从 $\chi^2$ 分布. 考虑到残差大都近似服从高斯分布,这一假设是合理的. 下面引出本文的主要结论.

**定理 1**　采用局部方法解决故障诊断问题

$$H_0:\boldsymbol{\varepsilon}=0 \quad (\text{无故障}) \tag{8}$$

$$H_1:\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{b}_\mathrm{f} \quad (\text{有故障}) \tag{9}$$

假设

$H_0$ 成立:$S_n\sim\chi^2(m)$

$H_1$ 成立:$S_n\sim\chi^2(m,\gamma)$

其中,$S_n$ 由式(6)给出,而 $\gamma^2=\boldsymbol{\eta}^\mathrm{T}\boldsymbol{H}_\varepsilon^\mathrm{T}\boldsymbol{\Sigma}_h^{-1}\boldsymbol{H}_\varepsilon\boldsymbol{\eta}$. 如果样本数 $n_1>n_2$,那么漏检率

$$P_\mathrm{M}(n_1)\leqslant P_\mathrm{M}(n_2)$$

**证明**　由式(1)、(2)可知,式(8)、(9)所示的故障诊断问题,相当于 $\boldsymbol{\eta}=\sqrt{n}\boldsymbol{b}_\mathrm{f}$ 的情况. 发生故障时,

$$S_{ni}\sim\chi^2(m,\gamma_i)$$
$$i=1,2$$

其中,$\gamma_i^2=n_i\boldsymbol{b}_\mathrm{f}^\mathrm{T}\boldsymbol{H}_\varepsilon^\mathrm{T}\boldsymbol{\Sigma}_h^{-1}\boldsymbol{H}_\varepsilon\boldsymbol{b}_\mathrm{f}$. 由已知 $n_1>n_2$ 可得 $\gamma_1>\gamma_2$,再利用引理 1 中的结论,得到

$$P(S_{n1}>\lambda\mid H_1)\geqslant P(S_{n2}>\lambda\mid H_1)$$

其中 $\lambda$ 为检测门限. 即

$$1-P(S_{n1}>\lambda\mid H_1)\leqslant 1-P(S_{n2}>\lambda\mid H_1)$$

因此,定理 1 的结论成立.　　**证毕**

该定理说明,$P_\mathrm{M}$ 的值随着 $n$ 的增大而减小,增大样本数可以提高局部方法的故障检测能力. 这样,即使相对于测量噪声,故障的幅值 $\boldsymbol{b}_\mathrm{f}$ 很小,也可以得到正确的检测结果. 这一结果将在后面的实验中得到验证.

## 3　局部方法与广义似然比方法

下面将局部方法与 GLR 方法进行对比. 假设所要检测的器件测量方程如下:

$$\boldsymbol{Y}_k=\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_k+\boldsymbol{e}_k+\boldsymbol{w}_k \tag{10}$$

$\boldsymbol{w}_k$ 为未知分布的随机噪声,满足条件

$$E(\boldsymbol{w}_k)=0,E(\boldsymbol{w}_k\boldsymbol{w}_k^\mathrm{T})=\sigma^2\boldsymbol{I} \tag{11}$$

$\boldsymbol{e}_k\in\boldsymbol{R}^m$ 为要检测的向量,满足条件

传感器无故障:$\boldsymbol{e}_k=0$

传感器发生故障:$\boldsymbol{e}_k=\boldsymbol{b}_\mathrm{f}$

其中,$\boldsymbol{b}_\mathrm{f}\in\boldsymbol{R}^m$ 为故障向量. 为了使判决函数独立于待测状态而仅与噪声及可能的故障有关,设计 $\boldsymbol{V}$ 阵,使得

$$\boldsymbol{V}\boldsymbol{H}=0$$

令 $\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{V}\boldsymbol{e}_k$,用于故障检测的函数 $\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})$ 可写为

$$\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})=\boldsymbol{V}\boldsymbol{Y}_k=\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{V}\boldsymbol{w}_k$$

GLR 方法的判决函数为

$$DF_\mathrm{D}=[\boldsymbol{p}^\mathrm{T}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^\mathrm{T})^{-1}\boldsymbol{p}]/\sigma^2 \tag{12}$$

其中,$\boldsymbol{p}=\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})=\boldsymbol{\varepsilon}+\boldsymbol{V}\boldsymbol{w}_k$. 为了简化判决函数,一般对 $\boldsymbol{V}$ 阵作以下约束

$$\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^\mathrm{T}=\boldsymbol{I} \tag{13}$$

将式(13)代入式(12),判决函数可写为

$$DF_\mathrm{D}=(\boldsymbol{p}^\mathrm{T}\boldsymbol{p})/\sigma^2 \tag{14}$$

将其与样本数 $l=1$ 时局部方法的判决函数进行对比,考虑到梯度矩阵 $\boldsymbol{H}_\varepsilon$ 为单位阵及条件式(11),将式(5)代入式(4)

$$S_k=\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})^\mathrm{T}(\sigma^2\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\varepsilon})=(\boldsymbol{p}^\mathrm{T}\boldsymbol{p})/\sigma^2 \tag{15}$$

对比式(14)(15)可知,GLR 方法和样本数为 1 的局部方法判决函数相同. 但是,采用 GLR 方法要假定残差的分布已知,具有一定局限性. 而局部方法适用于测量噪声为非高斯的情况. 另外,样本数较大时,局部方法对于检测小故障特别有效.

## 4　余度惯性组件故障诊断

采用了余度技术的捷联惯导系统,由 6 个 CRS03 型微机械陀螺和 6 个 A01652-1 型石英加速度计构成,采用 SCM/SuperDX 型 PC104 模块处

理传感器的输出信息. 6 个陀螺沿正十二面体侧面配置,其结构和相应实物如图 2、图 3 所示. 陀螺敏感轴与正交轴间的夹角均为 $\alpha$,其大小为

$$2\alpha = 63°26'5.8''$$

余度惯性测量组件的优点在于:

1) 适应故障诊断和系统重构的需要,可以在个别器件故障的情况下正常工作,具有较高可靠性;

2) 可以采用信息融合技术提高系统的测量精度.

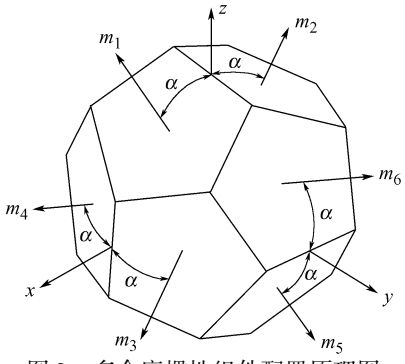



图 2 多余度惯性组件配置原理图

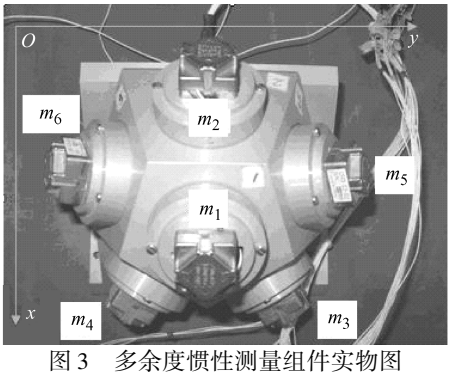



图 3 多余度惯性测量组件实物图

系统测量方程如式(10),其中,$\boldsymbol{Y}_k \in \boldsymbol{R}^6$ 表示陀螺的测量值,$\boldsymbol{X}_k \in \boldsymbol{R}^3$ 为由电压表示的 3 轴角速率,测量矩阵

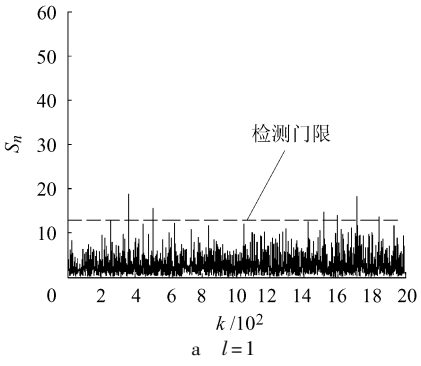
$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \sin\alpha & -\sin\alpha & \cos\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin\alpha & -\sin\alpha & \cos\alpha & \cos\alpha \\ \cos\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 & \sin\alpha & \sin\alpha \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

下面通过实验说明 GLR 方法和局部方法的性能差异,以及样本数对局部方法性能的影响. 从第 1 000 个周期开始,人为设置故障向量(单位为伏)

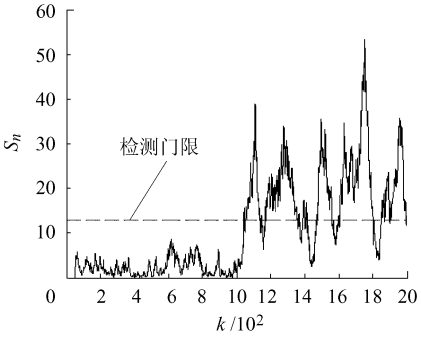
$$\boldsymbol{b}_{\mathrm{f}} = [0 \quad 0 \quad 0.01 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

故障诊断按第 1 节所述步骤进行. 给定虚警率 $P_{\mathrm{F}} = 0.5\%$,查 $\chi^2$ 分布表可得检测门限 $\lambda = 12.838$.

当选择 $l=1$ 时,所得的故障诊断结果如图 4a 所示. 图中横坐标表示采样周期,间隔为10 ms.




a $l=1$




b $l=50$

图 4 样本数不同时的故障检测结果

由于微机械陀螺故障幅值较小,淹没在测量噪声中,很难判断判决函数 $S_n$ 是否发生了变化;$l=1$ 时的局部方法相当于 GLR 方法,这种情况下,采用 GLR 方法不易检测出传感器故障. 增大样本数,并观察故障征兆的变化;由图 4b,选择$l=50$ 时,可以很容易地将故障和噪声区分开,并成功地检测出故障. 实验结果与第 3 部分“增大样本数可提高局部方法故障检测能力”的结论是一致的. 在判断有故障的情况下,可以对故障传感器进行隔离,具体方法可参见文献[1,8].

应当注意,样本数 $l$ 选的过大将造成较大延迟. 事实上,可以事先给定检测门限和故障幅值,然后将一定数目的样本代入式(3)进行试算,然后逐步增大样本数,直到满足故障检测的要求为止.

## 5 结束语

本文介绍了局部方法原理及其在冗余惯性组件故障诊断中的应用,分析了样本数大小对局部方法漏检率的影响,为提高系统可靠性,增强多传感器冗余系统故障检测能力提供了一种新的方法. 理论分析和实验结果表明,局部方法的故障检测能力强于一般的广义似然比方法,而增大样本数可以提高局部方法检测小故障的能力.

## 参考文献（References）


[1] 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)

[2] 魏春岭,张洪钺. 多传感器斜置系统故障检测的奇偶向量补偿方法[J]. 北京航空航天大学学报,2001, 27(6): 698-701
Wei Chunling, Zhang Hongyue. Parity vector compensation for multi-sensor fault detection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(6): 698-701(in Chinese)

[3] Benveniste A, Basseville M, Georges V M. The asymptotic local approach to change detection and model validation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987, AC-32(7): 583-592

[4] Zhang Q, Basseville M, Benveniste A. Fault detection and isolation in nonlinear dynamic systems: a combined input-output and local approach[J]. Automatica, 1998, 34(11): 1359-1373

[5] Xiong K, Chan C W, Zhang H Y. Unscented kalman filter for fault detection[C]// 16th IFAC World Congress. Prague: [s. n.], 2005

[6] Zhang Q, Basseville M, Benveniste A. Early warning of slight changes in system[J]. Automatic, 1994, 30(1): 95-113

[7] Huang B. Detection of abrupt changes of total least squares models and application in fault detection[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(2): 357-367

[8] 李钦. 基于模型的故障诊断与容错控制系统研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2005
Li Qin. Study on model-based fault diagnosis and fault tolerant systems[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University of Aeronautics and Astronautics, 2005


(责任编辑:娄　嘉)

(上接第 759 页)


[3] Cozman F, Krotkov E. Robot localization using a computer vision sextant[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan: [s. n.], 1995:106-111

[4] Kuroda Y, Kurosawa T, Tsuchiya A, et al. Accurate localization in combination with planet observation and dead reckoning for lunar rover[C]// Proc of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), New Orleans, USA: [s. n.], 2004: 2092-2097

[5] Trautner R, Bello Mora M, Hechler M, et al. A new celestial navigation method for mars landers[EB/ON]. http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/1106.pdf, 2004[2005-6-28]

[6] Volpe R. Mars rover navigation results using sun sensor heading determination[C]// Proc of 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, Kyongju, Korea: [s. n.], 1999:460-467

[7] Furuki S, Yuta S. Pose estimation of a vehicle on rough terrain by using the Sun direction[C]// 2003 IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Tokyo, Japan: [s. n.], 2003:58-63

[8] 董绪荣,张守信,华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1998:43
Dong Xurong, Zhang Shouxin, Hua Zhongchun. GPS/INS integrated navigation and application[M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 1998:43(in Chinese)

[9] 郗晓宁,曾国强,任萱,等. 月球探测器轨道设计[M]. 北京:国防工业出版社,2001:103-108
Xi Xiaoning, Zeng Guoqiang, Ren Xuan, et al. Orbit design of lunar probe[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001:103-108(in Chinese)

[10] 万德钧,房建成,王庆. GPS 动态滤波的理论、方法及其应用[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2000:69-70
Wan Dejun, Fang Jiancheng, Wang Qing. Theory and method of GPS dynamic filter and its application[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2000:69-70(in Chinese)

[11] 肖业伦. 航空航天器运动的建模——飞行动力学的理论基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003:28-30
Xiao Yelun. The modeling of aerostat and spacecraft——theories foundation of flight dynamics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003:28-30(in Chinese)

[12] 张瑜,房建成. 航天器天文导航模糊自适应卡尔曼滤波研究[J]. 北京航空航天大学学报,2004, 30(8):735-738
Zhang Yu, Fang Jiancheng. Fuzzy adaptive Kalman filtering for spacecraft cele stial navigation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(8):735-738 (in Chinese)


(责任编辑:娄　嘉)