

余度惯性传感器系统的故障管理方案

程慧俐 以光衢 张洪钺

(自动控制系统)

摘 要: 本文阐述两种余度惯性传感器系统的故障管理方案:引入动态解析余度的逻辑比较法和采用方差补偿的极大似然检验法。前者通过引入动态解析余度,能够在逻辑比较法的基础上,最大限度地识别与隔离故障仪表,提高余度系统的容错能力;后者考虑了仪表误差对故障检测的影响,因而提高了系统检测软故障的能力。最后,对两种方案的优缺点作了分析比较。

关键词: 可靠性,故障检测与识别(隔离),余度系统,捷联惯导系统。

提高捷联惯性导航系统的可靠性,多采用余度技术。针对惯性传感器是捷联惯导系统中可靠性较低的部件这一特点,对惯性传感器冗余配置,构成余度惯性传感器系统。余度系统故障管理方案是余度技术的关键,它采用故障自检测技术,对系统实行监控,自动实现故障的检测与隔离功能。本文将阐述两种故障管理方案,并对其各自的优缺点作分析比较。

1 引入动态解析余度的逻辑比较法

1.1 问题的提出

逻辑比较法^[1,2]能够检测余度惯性传感器系统的 $n-3$ 个故障(n 是惯性传感器测量轴总数目),但仅能识别其中的 $n-4$ 个。这样,系统在剩有 3 个正常测量轴的情况下,即被宣布失效。事实上,对于捷联惯导系统,只要余度惯性传感器系统有 3 个不共面的测量轴工作正常,就能得到必要的测量信息。例如,6 个单自由度陀螺仪正十二面体对称配置的余度系统($n=6$),利用逻辑比较法检测到第 3 个故障时,宣布系统失效。此时还有 3 个陀螺仪正常。只要识别出第 3 个故障,并将其隔离,系统可继续工作。

下面通过引入动态解析余度——线性估计来识别第 $n-3$ 个故障。

1.2 线性估计法

余度惯性传感器系统的测量方程:

$$\underset{n \times 1}{M} = \underset{n \times 3}{H} \underset{3 \times 1}{X} + \underset{n \times 1}{E} \quad (1)$$

本文于 1990 年 10 月 25 日收到

其中, M 是惯性传感器测量值向量, $M = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n]^T$;

H 是测量轴分布矩阵, $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & \dots & h_{n1} \\ h_{12} & h_{22} & \dots & h_{n2} \\ h_{13} & h_{23} & \dots & h_{n3} \end{bmatrix}^T = [H_1 \ H_2 \ \dots \ H_n]^T$;

X 是被测量向量(代表角速度或角加速度), $X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$;

E 是测量噪声向量, 假设它为高斯零均白噪, $E = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]^T$ 。

飞行器的运动是连续的, 故惯性传感器测量值的变化也是连续的。在一个很小的时间间隔内, 可把 X 当作线性变化, 对其作线性估计。假设余度系统在时刻 t 之前已有 $n-4$ 个故障被隔离, 时刻 t 第 $n-3$ 个故障被检测到。在 $t-2, t-1$ 时刻($t-2, t-1$ 分别代表 t 之前 2 次及 t 之前 1 次计算时刻)被测量的最小二乘估值为:

$$\hat{X}(t-2) = (H^T W H)^{-1} H^T W M(t-2) \quad (2)$$

$$\hat{X}(t-1) = (H^T W H)^{-1} H^T W M(t-1) \quad (3)$$

其中 $\hat{X}(t-2), \hat{X}(t-1)$ 为 $t-2, t-1$ 时刻被测量的最小二乘估值向量; $M(t-2), M(t-1)$ 为 $t-2, t-1$ 时刻的测量值向量; W 是故障仪表分布矩阵。无故障仪表时, W 是 $n \times n$ 的单位阵, 若第 j 号仪表被隔离, 则 W 中第 j 行全部为零。

设 j 为 t 时刻之前(至少前二步)已隔离的故障仪表序号, 则 $t-2, t-1$ 时刻 j 号仪表的测量估计值为:

$$\hat{m}_j(t-2) = H_j \hat{X}(t-2) \quad (4)$$

$$\hat{m}_j(t-1) = H_j \hat{X}(t-1) \quad (5)$$

从 $t-2 \rightarrow t-1$ 时刻, 估计测量值的趋势项: $\Delta \hat{m}_j(t-1) = \hat{m}_j(t-1) - \hat{m}_j(t-2)$ (6)

由(5)式和(6)式得 t 时刻已隔离仪表的估计测量值:

$$\hat{m}_j(t) = \hat{m}_j(t-1) + \Delta \hat{m}_j(t-1) \quad (7)$$

用所有已隔离仪表的 $\hat{m}_j(t)$ 代替 t 时刻的 $m_j(t)$, 其余测量值不变, 组成一组新的测量值向量 \hat{M} , 对 \hat{M} 调用逻辑比较法, 即能识别出 t 时刻发生第 $n-3$ 个故障的仪表。

线性估计法的示意图见图 1。

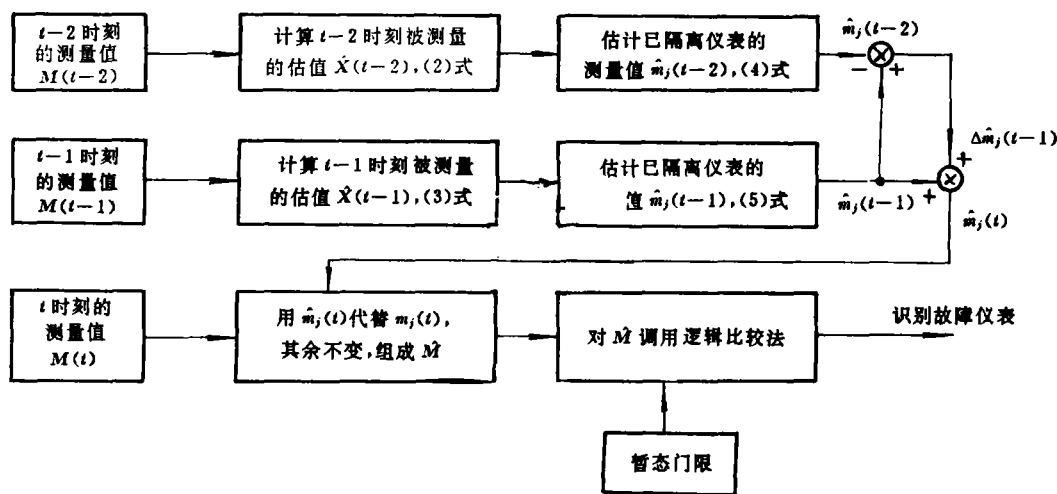


图 1 线性估计法示意图

1.3 门限的选择

逻辑比较法检测前 $n-4$ 个故障时,利用无故障时奇偶方程的余值确定检测常值门限 T ;引入线性估计识别第 $n-3$ 个故障时,由于存在估计误差,宜采用暂态门限 T_e ,以减小估计误差对该算法的影响。

暂态门限由常值门限 T 和正常仪表估计误差组成。设 i 为 t 时刻正常仪表序号,其线性估计误差 \hat{e}_i 为:

$$\hat{e}_i = m_i(t) - \hat{m}_i(t) = m_i(t) - (\hat{m}_i(t-1) + \Delta \hat{m}_i(t-1)) \quad (8)$$

其中 $m_i(t)$ 为 t 时刻正常仪表测量值; $\hat{m}_i(t)$ 为 t 时刻正常仪表按线性估计法算出的测量估值。选出 \hat{e}_i 中绝对值最大者,

$$ee = \max |\hat{e}_i| \quad (9)$$

则暂态门限 T_e 为:

$$T_e = T + l \cdot ee \quad (10)$$

(10)式中 l 为加权系数,其数值的选取视具体情况而定(取决于估计误差的大小,测量值偏离正常值多大被视为故障等因素)。

暂态门限示意图如图 2。

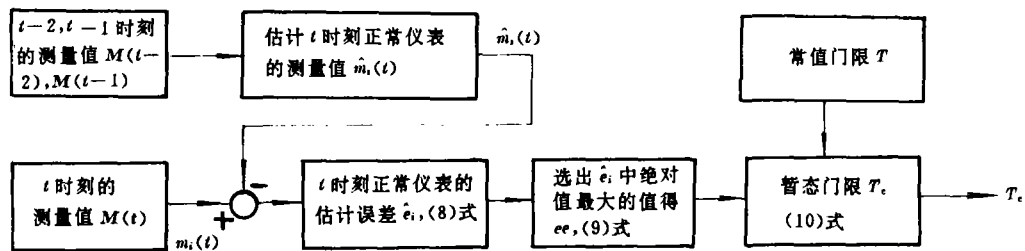


图 2 暂态门限示意图

1.4 仿真结果

选用 6 个单自由度陀螺仪正十二面体对称配置的余度结构,其测量轴分布矩阵 H ,奇偶检测方程及故障识别真值表,详见文献[2]。

利用惯导仿真器程序^[3],产生惯性传感器的测量值。仿真时间为 0.0~50.0s,计算间隔 $\Delta t = 0.5s$,并假定在 $t=10.0, 20.0, 30.0, 40.0s$ 时,余度系统的 1*, 3*, 4*, 6* 陀螺相继发生常值阶跃突变型故障。故障幅值 $b_1=1.0 \times 10^{-5} \text{rad/s}$, $b_2=1.0 \times 10^{-4} \text{rad/s}$, $b_3=1.0 \times 10^{-3} \text{rad/s}$, $b_4=1.0 \times 10^{-2} \text{rad/s}$ 。测量噪声 E ,其均值为零,方差阵为 $1.0 \times 10^{-11} \cdot \mathbf{I}_{6 \times 6} (\text{rad/s})^2$ (\mathbf{I} 为 6×6 的单位阵)。暂态门限的加权系数 $l=10$ 。

故障检测与识别结果见表 1。表 1 中, df 表示逻辑比较法中所用奇偶方程余值; T 为常值门限, K 为奇偶方程检测结果,若 $|df(i)| \leq T$, 则 $K(i)=0$, 否则 $K(i)=1$; dfe 表示作线性估计后的奇偶方程余值; T_e 为暂态门限, K_e 为奇偶方程检测结果,若 $|dfe(i)| \leq T_e$, 则 $K_e(i)=0$, 否则, $K_e(i)=1$ 。表中 $(e-*)$ 代表 (10^{-*}) , 例如, $3.362e-11$ 代表 3.362×10^{-11} , 其余可类推。

表 1 故障检测与识别结果

时间(s)	奇偶方程余值(rad/s)	门限(rad/s)	结 果
$t=8.0$	$\max df(i) = 3.362e-11,$ ($i=1, \dots, 15$) $\max e(j) = 1.975e-7,$ ($j=1, \dots, 6$)	$T=1.0e-10$ $T_e=1.9e-6$	$K(i)=0, (i=1, \dots, 15)$ 仪表无故障 重构元 P_0 [详见文献[2]中的真值表]
$t=10.0$	$\min df(i) = 5.257e-6,$ ($i=1, \dots, 10$) $\max df(j) = 1.830e-11,$ ($j=11, \dots, 15$)	$T=1.0e-10$	$K(i)=1, (i=1, \dots, 10)$ $K(j)=0, (j=11, \dots, 15)$ 1# 仪表有故障 重构元 P_1
$t=20.0$	检测剩余奇偶方程: $\min df(i) = 5.257e-5,$ ($i=11, 12, 13, 15$) $\max df(j) = 3.227e-11, (j=14)$	$T=1.0e-10$	$K(i)=1, (i=1, \dots, 13, 15)$ $K(j)=0, (j=14)$ 3# 仪表有故障 重构元 P_8
$t=30.0$	检测剩余奇偶方程: $\min df(i) = 5.2573e-4,$ ($i=14$)	$T=1.0e-10$	$K(i)=1, (i=1, \dots, 15)$ 发生第 3 个仪表故障 无法识别, 重构元 P_{22}
	检测作线性估计后的奇偶方程: $\min dfe(i) = 5.256e-4,$ ($i=1, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15$) $\max dfe(j) = 1.335e-7,$ ($j=2, 3, 6, 9, 13$)	$T_e=1.9e-6$	调用线性估计法 $K_e(i)=1, K_e(j)=0 (i, j \text{ 与左相同})$ 由重构元 P_4 判断出 4# 仪表有故障
$t=40.0$	检测作线性估计后的奇偶方程: $\min dfe(i) = 5.257e-3,$ ($i=1, 2, \dots, 15$) $\max dfe(j) = 2.628e-4, (j=2)$	$T_e=2.2e-3$	调用线性估计法 $K_e(i)=1, K_e(j)=0 (i, j \text{ 与左相同})$ 由重构元 P_{20} 判断出 6# 仪表有故障

1.5 结 论

硬件冗余与解析冗余相结合,使得引入动态解析余度的逻辑比较法,能够更好地完成故障检测与识别功能。逻辑比较法有硬件余度支持,简单、迅速、计算量小,易于实现。当需要识别第 $n-3$ 个故障时,调用动态解析余度,最大限度发挥余度系统的容错能力。该方案不失为一种简便可行的故障管理方案。

2 采用方差补偿的广义似然检验法

2.1 简化的 GLT 法(Generalized Likelihood Test Algorithm——广义似然检验法)

余度惯性传感器系统的测量方程见(1)式。

三维空间中,大于 3 个测量向量一定线性相关,故一定存在 V 阵($(n-3) \times n$ 维),使得(详见文献[3]):

$$\underset{(n-3) \times 1}{P} = \underset{(n-3) \times n}{V} \cdot \underset{n \times 1}{M} \quad (11)$$

P 称为奇偶向量,由各测量误差,测量噪声引起。在传感器无测量误差及噪声的理想情况下, $P=0$ 。 P 代表了测量值之间的不一致性,与被测量 X 无关。故:

$$V \cdot H = 0 \quad (12)$$

$$V \cdot V^T = I_{(n-3) \times (n-3)} \quad (13)$$

$$P = V \cdot M = V \cdot (HX + E) = V \cdot E \quad (14)$$

当传感器发生常值偏移型故障时,测量方程为:

$$\underset{n \times 1}{\mathbf{M}_t} = \underset{n \times 3}{\mathbf{H}} \cdot \underset{3 \times 1}{\mathbf{X}} + \underset{n \times 1}{\mathbf{E}} + \underset{n \times 1}{\mathbf{B}_t} \quad (15)$$

\mathbf{B}_t 为故障向量,其中正常传感器所对应的行为零,若第 i 号传感器偏移 b_{ti} ,则 \mathbf{B}_t 中第 i 行为 b_{ti} .

故障状况下的奇偶向量为:

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{V} \cdot \mathbf{M}_t = \mathbf{V}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{E} + \mathbf{B}_t) = \mathbf{V} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{V} \cdot \mathbf{B}_t \quad (16)$$

广义似然检验法假设奇偶向量为高斯随机向量,根据发生故障时奇偶向量均值变化,而方差不变的假设,检测故障。

常用的简化 GLT 法不考虑仪表误差,仅仅把 \mathbf{E} 作为零均白色的测量噪声,并假定其方差为 $\mathbf{I}_{n \times n}$ (单位阵),故

假设 H_0 : 正常状态, $E[\mathbf{P}] = 0$, $E[\mathbf{P}\mathbf{P}^T] = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}_{n \times n} \cdot \mathbf{V}^T = \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}^T = \mathbf{I}_{(n-3) \times (n-3)}$

假设 H_1 : 故障状态, $E[\mathbf{P}_t] = \mathbf{V}\mathbf{B}_t \neq 0$,

$$E[(\mathbf{P}_t - \mathbf{V}\mathbf{B}_t) \cdot (\mathbf{P}_t - \mathbf{V}\mathbf{B}_t)^T] = \mathbf{I}_{(n-3) \times (n-3)}$$

两种状态下,奇偶向量的对数似然比为:

$$\Lambda(\mathbf{P}) = \frac{1}{2} [\mathbf{P}^T \mathbf{P} - (\mathbf{P} - \mu)^T (\mathbf{P} - \mu)] \quad (17)$$

显然, μ 的极大似然估值为:

$$\hat{\mu} = \mathbf{P}_t \quad (18)$$

将 $\hat{\mu}$ 代入(17)式,得到故障检测决策函数 DFD(Decision Function of Failure Detection):

$$\text{DFD} = \mathbf{P}^T \mathbf{P} \quad (19)$$

选择适当的检测门限 T , 若 $\text{DFD} \leq T$, 接受 H_0 假设; 否则, 接受 H_1 假设。

故障隔离可视为 n 个假设的检验问题。

假设 H_i : 第 i 号传感器出故障

$$E[\mathbf{P}_t] = \mathbf{V}_i b_{ti}, \quad i = 1, \dots, n$$

$$E[(\mathbf{P}_t - \mathbf{V}_i b_{ti})(\mathbf{P}_t - \mathbf{V}_i b_{ti})^T] = \mathbf{I}_{n \times n}$$

其中, \mathbf{V}_i 为 \mathbf{V} 的列向量,

$$\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_n]$$

利用 \mathbf{P} 具有高斯随机噪声的假设, 可得相应于第 i 号传感器的似然函数:

$$\Delta_k = K \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{P}_t - \mathbf{V}_i b_{ti})^T (\mathbf{P}_t - \mathbf{V}_i b_{ti}) \right] \quad (20)$$

在假设 H_i 下, b_{ti} 的极大似然估值为:

$$\hat{b}_{ti} = [\mathbf{P}_t^T \mathbf{V}_i] / [\mathbf{V}_i^T \mathbf{V}_i] \quad (21)$$

把 \hat{b}_{ti} 代入(20)式, 可得故障隔离决策函数 DFI _{i} (Decision Function of Failure Isolation):

$$\text{DFI}_i = [\mathbf{P}_t^T \mathbf{V}_i]^2 / [\mathbf{V}_i^T \mathbf{V}_i] \quad (22)$$

由故障情形下的 \mathbf{P}_t 可算出相应于各假设 H_i 的 n 个 DFI _{i} 值, 对应于其中最大值 $\text{DFI}_k = \max_{1 \leq i \leq n} (\text{DFI}_i)$ 的第 k 号传感器最有可能出故障, 应将其从余度测量系统中隔离。

由以上推导可看出, 简化的 GLT 法没有考虑仪表误差, 仅把测量方程中的 \mathbf{E} 作为零均、方差为 $\mathbf{I}_{n \times n}$ 的白色测量噪声, 故得到较为简单的故障检测决策函数 DFD((19)式)和故障隔离决策函数 DFI((22)式)。

下面, 将介绍采用方差补偿的 GLT 法。与简化 GLT 法相比, 它能够在相同的门限之下, 检测到更小的故障, 提高了余度系统对故障的灵敏性。

2.2 采用方差补偿的 GLT 法

考虑到传感器误差及测量噪声,惯性传感器输出的测量方程为:

$$\mathbf{M} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_k \quad (23)$$

其中 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \cdots, \mathbf{E}_k$ 为不同的误差源引起的 n 维误差向量。

奇偶向量则为:

$$\mathbf{P} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{M} = \mathbf{V}\mathbf{E}_1 + \mathbf{V}\mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{V}\mathbf{E}_k = \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \cdots + \boldsymbol{\varepsilon}_k \quad (24)$$

假设误差项 $E_i (i=1, \cdots, k)$ 是不相关的,则 \mathbf{P} 的方差 C_P 可表示为:

$$C_P = C_1 + C_2 + \cdots + C_k \quad (25)$$

其中

$$C_i = E[\boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i^T] = \mathbf{V} E[\mathbf{E}_i \mathbf{E}_i^T] \mathbf{V}^T = \mathbf{V} \mathbf{R}_i \mathbf{V}^T \quad (26)$$

\mathbf{R}_i 是 E_i 的方差阵, $i = 1, 2, \cdots, k$

当传感器发生故障时,奇偶向量:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_f &= \mathbf{V}\mathbf{M} = \mathbf{V}(\mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_k + \mathbf{B}_f) \\ &= \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \cdots + \boldsymbol{\varepsilon}_k + \mathbf{V}\mathbf{B}_f \end{aligned} \quad (27)$$

其中 \mathbf{B}_f 为故障向量。

故障判别决策的假设检验:

假设 H_0 : 正常状态, $E[\mathbf{P}] = 0$, $E[\mathbf{P}\mathbf{P}^T] = C_P$

假设 H_1 : 故障状态, $E[\mathbf{P}_f] = \mathbf{V}\mathbf{B}_f \neq 0$,

$$E[(\mathbf{P}_f - \mathbf{V}\mathbf{B}_f)(\mathbf{P}_f - \mathbf{V}\mathbf{B}_f)^T] = C_P$$

两种状态下,奇偶向量的对数似然比:

$$\Lambda(\mathbf{P}) = \frac{1}{2} [\mathbf{P}^T (C_P)^{-1} \mathbf{P} - (\mathbf{P}_f - \boldsymbol{\mu})^T (C_P)^{-1} (\mathbf{P}_f - \boldsymbol{\mu})] \quad (28)$$

则 $\boldsymbol{\mu}$ 的极大似然估值为: $\hat{\boldsymbol{\mu}} = \mathbf{P}_f$

故障检测函数 DFD 为:

$$\text{DFD} = \mathbf{P}^T (C_P)^{-1} \mathbf{P} \quad (29)$$

故障隔离包含 n 个假设检验:

假设 H_{ii} : 第 i 号传感器出故障,

$$E[\mathbf{P}_f] = \mathbf{V}_i b_{ii}, \quad i = 1, \cdots, n$$

$$E[(\mathbf{P}_f - \mathbf{V}_i b_{ii})(\mathbf{P}_f - \mathbf{V}_i b_{ii})^T] = C_P$$

相应于第 i 号传感器的似然函数:

$$\Delta_k = K \exp \left[-\frac{1}{2} [(\mathbf{P}_f - \mathbf{V}_i b_{ii})^T C_P^{-1} (\mathbf{P}_f - \mathbf{V}_i b_{ii})] \right] \quad (30)$$

b_{ii} 的极大似然估值为:

$$\hat{b}_{ii} = [\mathbf{P}_f^T C_P^{-1} \mathbf{V}_i] / [\mathbf{V}_i^T C_P^{-1} \mathbf{V}_i] \quad (31)$$

则故障隔离函数 DFI_i:

$$\text{DFI}_i = [\mathbf{P}_f^T C_P^{-1} \mathbf{V}_i]^2 / [\mathbf{V}_i^T C_P^{-1} \mathbf{V}_i] \quad (32)$$

至此,我们得到了方差补偿的 GLT 法的故障检测函数 DFD 和故障隔离函数 DFI.

2.3 仿真结果

采用方差补偿的 GLT 法的关键,是要对惯性传感器的误差特性和测量噪声特性作深入了解。实际应用中,可通过实验测试来达到。

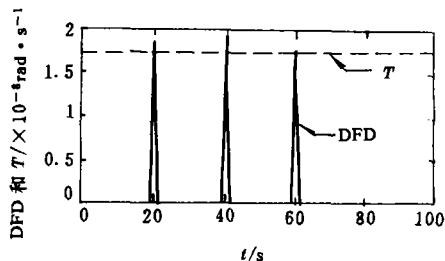


图3 故障检测函数 DFD 与门限 T

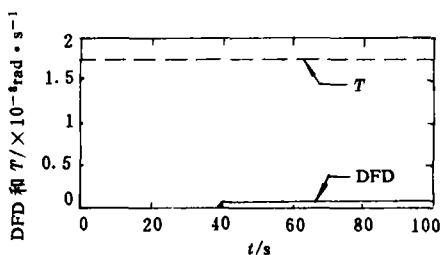


图4 故障检测函数 DFD 与门限 T

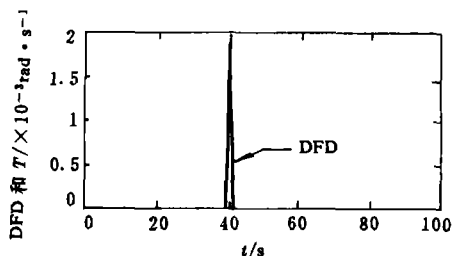


图5 故障检测函数 DFD 与门限 T

我们选用 4 个双自由度陀螺仪正八面体对称配置的余度系统^[3]作研究对象。由惯导仿真器^[3], 产生惯性传感器的测量输出。限于篇幅补偿方差阵 C_p 的推导略^[3,4]。这里仅给出仿真结果。

仿真时间选取为 0.0~100.0s, 计算间隔 $\Delta t = 1.0s$, 在 $t_1 = 20.0s$, $t_2 = 40.0s$, $t_3 = 60.0s$ 时测量轴 1*, 2*, 4* 相继发生幅值为 $1.0e-2(^{\circ})/s = 1.7453e-4 \text{ rad/s}$ 的常值阶跃突变型故障。检测门限选择 $T = 1.0e-6(^{\circ})/s = 1.7453e-8 \text{ rad/s}$ 。采用简化的 GLT 法, 作出 DFD 及 T 的曲线, 见图 3。

显然, 在 $t_1 = 20.0s$, $t_2 = 40.0s$, $t_3 = 60.0s$ 时, $DFD > T$, 余度系统检测到了故障。

设检测门限不变, 在 0.0~100.0s 时间内只发生一个故障, 故障时间 $t = 40.0s$, 故障仪表轴为 1*, 幅值减小为 $b_1 = 0.002(^{\circ})/s = 0.34907e-6 \text{ rad/s}$ 。

采用简化的 GLT 法, 作出 DFD 及 T 的曲线, 见图 4。

从图中可看出, $DFD < T$, 发生漏检。

现在用方差补偿的 GLT 法, 在相同的门限 T 下, 检测这个幅值很小的软故障。作出 DFD 及 T 的曲线, 见图 5。

由于在 $t = 40.0s$ 时, DFD 量级 (10^{-3}) 远大于 T 的量级 (10^{-8}), 故图 5 中 T 未显示出来。由 $DFD > T$ 可知, $t = 40.0s$ 时, 有故障发生。这说明在同样的门限下, 补偿的 GLT 法能够检测到更小的故障。

2.4 结 论

由前面的推导、仿真结果可知, 采用方差补偿的 GLT 法, 在同样的门限下, 能够比简化的 GLT 法检测到更小的软故障, 提高了余度系统的故障检测能力。

3 余度惯性传感器系统故障管理方案的比较

引入解析余度的逻辑比较法(方案 1), 简单、迅速、易于实现, 不需要对传感器的噪声作任何假设或了解。在传感器测量轴总数目 n 较少 ($n \leq 8$) 或正交配置的情况下, 选用它较合适。若 n 较大 ($n > 8$), 则相应奇偶方程数目多, 用真值表或识别码来识别故障时, 需要考虑所有的故障轴分布情况, 造成了算法的复杂化。

若余度传感器系统测量轴较多 ($n > 8$), 最好采用 GLT 法(简化的或方差补偿的)。GLT 法通过调用计算 V 阵的子程序, 建立现有正常传感器的奇偶方程, 并通过计算检测函数 DFD 和

隔离函数 DFI 来检测、识别故障。传感器测量轴总数目的增多,不会导致算法的复杂化。

方案 1 及简化的 GLT 法不能排除传感器刻度因子误差,输入轴不对准及传感器测量噪声对故障检测与隔离 FDI(Failure Detection and Isolation)算法的影响,因此不具备检测软故障的能力。

采用方差补偿的 GLT 法(方案 2),虽然需要了解传感器的误差特性和测量噪声特性,但是它能够排除这些因素对 FDI 的影响,故它具有较强的软故障检测能力,可提高 FDI 方法的性能。

从检测时间考虑,方案 2 由于要计算补偿的方差阵 C_P ,完成同样的检测任务,其程序执行时间大于方案 1 和简化的 GLT 法的执行时间。

参 考 文 献

- 1 以光衢等编. 惯性导航原理. 北京:航空工业出版社,1988.
- 2 陈 哲编著. 捷联惯导系统原理. 北京:宇航出版社,1986.
- 3 程慧俐. 捷联惯导系统可靠性及其仿真研究:[硕士论文]. 北京:北京航空航天大学,1990.
- 4 Paul Motyka, Renato Ornedo, Rami Mangoubi. Fault-tolerant system considerations for a redundant strapdown inertial measurement unit. NASA Contractor Report 172426, August 1984.

THE FAILURE MANAGEMENT SCHEMES OF REDUNDANT INERTIAL SENSORS SYSTEM

Cheng Huili Yi Guangqu Zhang Hongyue

(Dept. of Auto. Control)

ABSTRACT

Two failure management schemes of redundant inertial sensors system are discussed. The first is the logical comparison algorithm with analytical redundancy. It makes redundant systems have higher fault-tolerant ability. Analytical redundancy are generated by linear estimation method. The second is GLT (Generalized Likelihood Test) algorithm with error covariance compensation. By using this method, the effects of normal sensor errors will not adversely affect failure detection and isolation performance. It will allow the redundant system to detect smaller failures. Finally, the comparison of two schemes are given.

Key words: reliability, failure detection and identification (isolation), redundant system, strapdown inertial navigation system.