

多传感器故障检测与隔离的残差产生器 设计方法研究

侯彦东^{1,3},文成林²,陈志国³

(1.上海海事大学电气自动化系,上海 200135; 2.杭州电子科技大学自动化学院,浙江杭州 310018;
3.河南大学计算机与信息工程学院,河南开封 475001)

摘 要: 为了解决多传感器故障检测与隔离这一难题,建立了包含卡死、增益时变和偏差时变等三种典型传感器故障的数学模型.借助输出方程,将待检测的传感器故障转换到系统状态方程中进行处理.设计出既能检测出故障,又能将各个故障进行有效隔离的残差产生器,同时还要给出设计残差产生器过程中未知参数的求解方法.用算例对上述设计结果的有效性进行计算机仿真验证.

关键词: 传感器故障; 残差产生器; 故障检测与隔离; 不可观测子空间; 故障特征

中图分类号: TP206. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 02-0429-06

Designing Method of Residual Generator for Multi-sensor Fault Detection and Isolation

HOU Yan-dong^{1,3}, WEN Cheng-lin², CHEN Zhi-guo³

(1. Department of Electrical Automation, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;

2. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

3. College of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng, Henan 475001, China)

Abstract: In order to solve the problem of multi-sensor fault detection and isolation, a unified fault model for lock-in-place, gain time-varying and bias time-varying is established. We resort the output equation to converted sensor fault into state disturbance of the dynamic system. A residual generator which can well be used to fault detection and isolation is designed. In addition, we also put forward the method of solving unknown parameters in it. The effectiveness of this method is verified through example simulation.

Key words: sensor fault; residual generator; fault detection and isolation; unobservability subspace; fault feature

1 引言

随着系统自动化程度的不断提高,要求系统具有更强的容错性变得越来越重要^[1],而故障诊断则是实现容错控制的主要前提,其中最为关键的一步就是如何及时进行故障的检测与隔离(Fault Detection and Isolation, FDI).传统的故障诊断方法整体上可以分为定性方法和定量方法^[2],其中定量分析方法又分为基于解析模型的方法和基于数据驱动的方法.文献[3]将信度分配小脑神经网络应用于主元分析模型,实现了传感器故障的检测与隔离.目前基于模型的故障诊断方法已有很多研究成果^[4],文献[5]给出了基于全解耦奇偶方程的动态系

统执行器故障检测与辨识方法,但在该方法中全解耦奇偶向量的产生却存在约束条件严格和计算量大等不利因素.

Wonham在文献[6]中,将几何方法成功应用于线性多变量控制系统,并利用不变子空间的概念对系统的能控性和能观性进行了几何方法框架下的重新定义,从而给出了一种系统观测器的设计方法.文献[7]系统描述了线性系统几何方法设计与分析的基础理论和方法,并给出了单变量输入输出系统鲁棒调节器的设计方法.文献[8,9]对几何方法在有限维线性时不变系统故障诊断中的应用进行了初步探讨,给出了一种残差产生器的设计方法.文献[10]给出了线性变参数系统故障检测与

隔离的一种几何方法.然而文献[8~10]对基于几何方法的故障检测与隔离问题研究还只是仅停留在理论层面.文献[11]利用几何方法实现了轻空气飞行器的执行器故障检测与隔离.文献[12]提出了一种基于几何方法的时滞系统鲁棒的故障检测与隔离算法,解决了系统在未知时变时滞情况下的执行器故障检测与隔离问题.

文献[8~12]在研究故障检测与隔离问题的同时,还对传感器故障给出了一种形式上的描述,即可从形式上先将传感器故障转换为伪执行器故障,即将测量方程中的传感器故障特征转换为状态方程中的伪执行器故障特征,然后就可利用已建立的针对执行器故障检测与隔离的几何方法进行对多传感器故障的检测与隔离.但是均未对传感器故障的建模进行具体分析,因此多传感器故障检测与隔离问题并未得到根本解决.本文针对这一问题,在对传感器故障进行合理建模的基础上,采用切实有效的方法进行故障特征的转换;然后通过故障特征空间分割,抽取出故障特征对应的不可观测子空间,实现故障特征之间的解耦;最后再利用空间投影运算,来具体实现多传感器故障的检测与隔离.

2 多传感器故障建模

考虑正常情况下的线性时不变系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y_0(t) = Cx(t) \quad (2)$$

其中, $x \in R^n$ 是系统的状态变量, $u \in R^m$ 和 $y_0 \in R^q$ 分别是正常情况下系统的输入和输出信号, $A \in R^{n \times n}$ 是系统矩阵, $B \in R^{n \times m}$ 是输入矩阵, $C \in R^{q \times n}$ 是输出矩阵.

传感器故障一般呈现为卡死、增益时变和偏差时变等三种形式.若设 $y_{i0}(t)$ 为第 i 个传感器正常的输出值, $y_i(t)$ 为它在可能包含上述三类故障情况下的输出值,那么带有上述三类故障形式的传感器 i 可描述为

$$y_i(t) = \eta_i(t)y_{i0}(t) + \lambda_i(t), i = 1, 2, \dots, q \quad (3)$$

其中, $\eta_i(t)$ 为时变的增益比例因子, $\lambda_i(t)$ 为随时间微变的传感器自身所固有的偏差, q 代表传感器个数.

注释 1 当 $\eta_i(t) = 0$ 时,模型(3)对应传感器发生卡死的故障类型;当 $\eta_i(t) \neq 0$ 时,模型(3)对应传感器发生增益时变的故障类型.由于 $\lambda_i(t)$ 是由传感器本身固有特性所决定的,且在一定时间范围内,会随时间有很小变化,因而通常可视为一个非零常数,即 $\lambda_i(t) = \lambda_i \neq 0$.特别要注意的是:当传感器发生卡死故障时,系统输出将保持长时间的非正常恒定值,因而极容易被检测出,所以本文可暂不考虑此类故障.

因此,依据注释 1 所分析的情况,第 i 个传感器带

有非零固定微小偏差、且发生增益时变故障的模型又可以描述为

$$y_i(t) = \eta_i(t)y_{i0}(t) + \lambda_i, i = 1, 2, \dots, q \quad (4)$$

且它对应式(2)的向量形式为

$$y(t) = \Delta Cx(t) + \Gamma \quad (5)$$

其中

$$\Delta = \begin{bmatrix} \eta_1(t) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \eta_2(t) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \eta_q(t) \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_q \end{bmatrix}$$

由于矩阵 Δ 可逆,因此式(5)又可等价地表示为

$$\Delta^{-1}y(t) = Cx(t) + \Delta^{-1}\Gamma = Cx(t) + \sum_{i=1}^q I_i \frac{\lambda_i}{\eta_i(t)} \quad (6)$$

其中, I_i 是 q 阶单位矩阵的第 i 列向量,同时,它也表示第 i 个传感器发生故障时的特征向量, $\lambda_i/\eta_i(t)$ 对应是第 i 个传感器发生的故障模式.

在文献[11]中,对执行器所发生的故障,利用几何方法已进行了成功的检测与隔离.因此,为了利用文献[11]中的已有成果,我们拟通过适当的变换与系统重写等过程,将传感器故障转换到系统状态模型中,然后再利用文献[11]中给出的几何方法进行处理.为了实现此目的,首要任务就是如何能将在式(6)中对应传感器故障的特征向量 I_i 和故障模式 $\lambda_i/\eta_i(t)$ 相应地转换到状态方程中.为此,依据系统状态 $x(t)$ 与系统输出 $y(t)$ 的联系是通过输出模型 $y(t) = Cx(t)$ 实现的,因此,借助于方程

$$I_i = Cf_i \quad (7)$$

求得的解 f_i ,就可以形式上将对应于第 i 个传感器故障特征向量 I_i 转换到状态方程中所对应的故障特征向量.

结合式(7),由式(6)所表示的传感器故障模型就可进一步表示为

$$\Delta^{-1}y(t) = C(x(t) + \sum_{i=1}^q f_i \frac{1}{\eta_i(t)} \lambda_i) \quad (8)$$

若令

$$\bar{y}(t) = \Delta^{-1}y(t), \bar{x}(t) = x(t) + \sum_{i=1}^q f_i \frac{1}{\eta_i(t)} \lambda_i \quad (9)$$

则系统(1)和(6)可被改写为

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= A\bar{x}(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^q L_i m_i(t) \\ \bar{y}(t) &= C\bar{x}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $L_i = [-Af_i]$ 表示对应第 i 个传感器故障特征向量 I_i 的在新系统模型(10)中故障特征向量的形式化表示, $m_i(t) = \lambda_i/\eta_i(t)$ 为相应故障模式.

3 多传感器故障检测与隔离

3.1 残差产生器设计

实现故障检测与隔离的关键就是如何构造出能满足既能检测故障,同时又能将其有效隔离的残差产生器,并记输出的残差信号为 $r(t)$;然后再根据残差信号 $r(t)$ 与预定允许阈值 ϵ 的比较结果,来判断故障是否已发生.为此,利用线性系统理论中观测器的设计思想,基于系统(10),构造如下观测器

$$\begin{aligned}\dot{w}(t) &= Fw(t) - E\bar{y}(t) + Gu(t) \\ r(t) &= Mw(t) - H\bar{y}(t) + Ku(t)\end{aligned}\quad (11)$$

其中, $w \in R^n$ 为观测器的状态变量.

为了设计出仅对第 j 个故障敏感的残差产生器,通过合并式(10)和式(11),就可得

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -EC & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & L_i^j \\ G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ m_i^j(t) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} L_j \\ 0 \end{bmatrix} m_j(t)\end{aligned}\quad (12)$$

$$r(t) = \begin{bmatrix} -HC & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ m_i^j(t) \end{bmatrix}$$

其中, $L_i^j = [L_1, \dots, L_{j-1}, L_{j+1}, \dots, L_q]$, $m_i^j(t) = [m_1(t), \dots, m_{j-1}(t), m_{j+1}(t), \dots, m_q(t)]^T$

若记

$$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ w(t) \end{bmatrix}, \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -EC & F \end{bmatrix},$$

$$\tilde{u}(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ m_i^j(t) \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B & L_i^j \\ G & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{L} = \begin{bmatrix} L_j \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{H} = \begin{bmatrix} -HC & M \end{bmatrix}, \tilde{K} = \begin{bmatrix} K & 0 \end{bmatrix},$$

那么,式(12)可进一步表示为更简洁形式

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}(t) &= \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{B}\tilde{u}(t) + \tilde{L}m_j(t) \\ r(t) &= \tilde{H}\tilde{x}(t) + \tilde{K}\tilde{u}(t)\end{aligned}\quad (13)$$

从式(13)不难看出,设计所需要的残差产生器的关键问题是,如何找到合适的参数矩阵 F 、 E 、 G 、 M 、 H 和 K ,使得输出残差信号 $r(t)$ 不仅不受 $\tilde{u}(t)$ 的影响,而且满足从 $m_j(t)$ 到 $r(t)$ 是输入可观测的.

3.2 残差产生器参数求解

正如第 2 节中所分析的,为了利用文献[8]所提供的几何方法实现被转换到如式(10)所示故障的检测与隔离,我们须先引用几个有用的定义和算法^[6,7,9].

定义 1 设 $L \subset R^n$, 若 $\forall x_1, x_2 \in R^n$, 若满足 $x_1 - x_2 \in L$, 则称 x_1 和 x_2 等价; 由所有等价类 $\{x | x \in R^n, x - x_1 \in L, x_1 \in R^n\}$ 为元素构成的集合, 称为商空间, 并常记为 R^n/L .

定义 2 设算子 $A: R^n \rightarrow R^n$, 对任意子空间 $W \subseteq R^n$, 若满足 $AW \subseteq W$, 则称 W 为 A 的一个不变子空间; 若进一步满足 $A(W \cap \text{Ker}C) \subseteq W$, 则称 W 为一个 (C, A) 不变子空间.

对任意的 $L \in R^n$, 若记 $\underline{W}(A, C, L) = \{W | A(W \cap \text{Ker}C) \subseteq W, W \subseteq R^n, L \in W\}$ 为包含 L 的所有 (C, A) 不变子空间构成的集合, 那么对任取 $W_1, W_2 \in \underline{W}(L)$, 显然 $L \in W_1 \cap W_2$ 和 $W_1 \cap W_2 \in \underline{W}(L)$ 成立.

事实上

$$A(W_1 \cap \text{Ker}C) \subseteq W_1, A(W_2 \cap \text{Ker}C) \subseteq W_2$$

$$A(W_1 \cap \text{Ker}C) \cap A(W_2 \cap \text{Ker}C) \subseteq W_1 \cap W_2$$

$$A(W_1 \cap W_2 \cap \text{Ker}C) \subseteq W_1 \cap W_2$$

因此, 所有包含给定子空间 $L (L \subset R^n)$ 的 (C, A) 不变子空间构成的集合, 对交运算是封闭的, 因此这个集合必有下确界, 并记它为 $W^* = \inf W(A, C, L)$, 亦即 W^* 为包含 L 的最小 (C, A) 不变子空间. 问题是如何求取 W^* .

算法 1 求解子空间 W^* 的算法如下

$$Z_0 = L$$

$$Z_i = L + A(Z_{i-1} \cap \text{Ker}C), i = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

当 $Z_k = Z_{k+1} (k < n)$ 时, 即可得到 $W^* = Z_k$.

定义 3 对任意输出单射 $D: R^q \rightarrow R^n$ 和测量映射 $H: R^q \rightarrow R^q$, 定义

$$S^* := \langle \text{Ker}(HC) | (A + DC) \rangle$$

$$= \bigcap_{i=0}^{-(n-1)} (A + DC)^i \text{Ker}(HC)$$

为一个 (C, A) 不可观测子空间 (Unobservability Subspace, UOS), 同时 S^* 也是包含在核空间 $\text{Ker}(HC)$ 中最大的 $(A + DC)$ 不变子空间, 其中, $(A + DC)^i$ 表示 $(A + DC)$ 的 i 次幂.

算法 2 求解子空间 S^* 的算法如下

$$Z_0 = R^n$$

$$Z_i = W^* + (A^{-1}Z_{i-1}) \cap \text{Ker}C, i = 1, 2, \dots, k \quad (15)$$

当 $Z_k = Z_{k+1} (k < n)$ 时, 即可得到 $S^* = Z_{k+1}$.

记 $L = \text{Im} \sum_{i=1, i \neq j}^q L_i$, 依据上述定义, 针对式(13), 为了设计出满足一定要求的残差产生器, 即使得输出残差信号 $r(t)$ 不受 $\tilde{u}(t)$ 的影响, 而且还要满足 $m_j(t)$ 到 $r(t)$ 是输入可观测.

基本思路为: 首先利用算法 1 求解包含 L 的最小 (C, A) 不变子空间 W^* ; 然后利用算法 2 求解包含 L 的最小 (C, A) 不可观测子空间 S^* , 以产生包含故障特征 L 的商空间 R^n/S^* ; 由于 $\text{Im}L_j \cap S^* = \phi$, 最后再利用式(13)产生的残差信号 $r(t)$ 就仅受第 j 个传感器故障

的影响,而与其他传感器故障无关.

注释 2 在式(13)中,若 $r(t)$ 不受 $u(t)$ 和 $m_i(t)$ ($i \neq j$) 的影响,则须有 $\tilde{K} = 0$, $\langle \tilde{A} | \text{Im} \tilde{B} \rangle$ 为包含 $\text{Im} \tilde{B}$ 的 \tilde{A} 不变子空间, $\tilde{S} := \langle \text{Ker} \tilde{H} | \tilde{A} \rangle$ 是包含在 $\text{Ker} \tilde{H}$ 中的最大 \tilde{A} 不变子空间,并使得

$$\langle \tilde{A} | \text{Im} \tilde{B} \rangle \subseteq \tilde{S} \quad (16)$$

显然, $\text{Im} \tilde{B} \subseteq \tilde{S}$, 若定义嵌入映射 Q 为 $Qx(t) = [x(t) \ 0]^T$, 则有 $Q^T \text{Im} \tilde{B} \subseteq S^* := Q^T \tilde{S}$; 由于 S^* 是 (C, A) 不可观测子空间, 且 $Q^T \text{Im} \tilde{B} \supseteq L$, 所以 S^* 就是包含 L 的 (C, A) 不可观测子空间. 又因为 $m_j(t)$ 到 $r(t)$ 是输入可观的, 所以 \tilde{L} 是列满秩的, 且 $\text{Im} \tilde{L} \cap \tilde{S} = \phi$; 进而 L_j 也是列满秩的, 并且满足

$$Q^T (\text{Im} \tilde{L} \cap \tilde{S}) = Q^T \text{Im} \tilde{L} \cap Q^T \tilde{S} = \text{Im} L_j \cap S^* = \phi$$

设 $D_0 \in \underline{D}(S^*)$, $A_0 = (A + D_0 C: R^n / S^*)$ 是 $A + D_0 C$ 在商空间 R^n / S^* 上的诱导映射, $P_j: R^n \rightarrow R^n / S^*$ 是标准投影算子. 因为 S^* 是包含 L 的 (C, A) 不可观测子空间, 所以存在 $D_0 \in \underline{D}(S^*)$ 和 H_j 使得

$$S^* = \langle \text{Ker}(H_j C) | (A + D_0 C) \rangle$$

其中, H_j 由方程 $\text{Ker} H_j C = \text{Ker} C + S^*$ 解得.

由线性系统中观测器的构造过程可知, 存在 $D_1 \in \underline{D}(S^*)$, 使得 F_j 的谱 $\sigma(F_j) = \Lambda$, 其中 $F_j = A_0 + D_1 M_j$, Λ 为任意对称集, M_j 是方程 $M_j P_j = H_j C$ 的解.

若令 $D = D_0 + P_j^+ D_1 H_j$ (其中 $P_j P_j^+ = I$), $E_j = P_j D$, $G_j = P_j B$, $K_j = 0$, 结合式(11), 则构造出如下状态观测器

$$\dot{w}_j(t) = F_j w_j(t) - E_j \bar{y}(t) + G_j u(t) \quad (17)$$

而相应的残差产生器

$$r_j(t) = M_j w_j(t) - H_j \bar{y}(t) + K_j u(t) \quad (18)$$

将满足设计要求, 即残差信号 $r_j(t)$ 就仅受第 j 个传感器故障的影响, 而与其他传感器故障无关.

为了验证由式(18)所产生的残差信号是否满足设计要求, 不妨设

$$e_j(t) = w_j(t) - P_j \bar{x}(t) \quad (19)$$

则

$$\dot{e}_j(t) = F_j e_j(t) - P_j L_j m_j(t) \quad (20)$$

$$r_j(t) = M_j e_j(t) \quad (21)$$

对式(20)一式(21)进行拉普拉斯变换, 整理合并可得

$$r_j(s) = T(s) m_j(s) \quad (22)$$

其中 $T(s)$ 是 $m_j(t)$ 到 $r_j(t)$ 的传递函数, 且

$$T(s) = -M_j (sI - F_j)^{-1} P_j L_j$$

由式(22)可以看出, $r_j(t)$ 仅受 $m_j(t)$ 的影响, 而不受 $\bar{u}(t)$ 的影响. 又由 $\text{Im} L_j \cap S^* = \phi$ 和 L_j 列满秩, 容易推导出 $P_j L_j$ 也是列满秩的, 所以 (M_j, F_j) 是可观的, 即 $m_j(t)$ 到 $r_j(t)$ 是输入可观. 所以, 至此, 已设计出满足要求的残差产生器.

3.3 确定故障与残差之间的对应关系

为了讨论故障与残差之间的对应关系,

定义 4 称 $\Omega_i = \{l | r_l(t) \neq 0, m_i(t) \text{ 到 } r_l(t) \text{ 可观测}, l = 1, 2, \dots, p\}$ 为第 i 个故障的残差指标集, 其中 p 为最大残差个数.

残差指标集的选取将依据实际系统的结构不同而不同. 记 $\Omega_i = \{l_1, l_2, \dots, l_{q_i}\}$, 其中 $q_i \in \{1, 2, \dots, p\}$, 若 $\Omega_i = \phi$, 显然没有残差信号对第 i 个故障敏感, 因而此故障不可检测. 若 $\Omega_i = \{1, 2, \dots, p\}$, 则表示所有残差对第 i 个故障都敏感, 此时尽管可以检测出此故障, 但却不能对其隔离; 所以要完成对已发生的并发故障的检测和隔离, 就须要求残差指标集是非空、唯一且均不相同的. 若 $\Omega_i = \{i\}$, $i = 1, 2, \dots, q$, 则此时 $p = q$, 对应所有的故障, 残差指标集非空、唯一且各不相同, 所以基于这样一组残差指标集, 就可以实现对并发故障的检测与隔离.

显然前面描述的是残差指标集的三种特殊情形. 考虑一般情况, 假设有三个残差指标集 Ω_i, Ω_j 和 Ω_l , 其中 $i \neq j, j \neq l, i \neq l, \{i, j, l\} \in \{1, 2, \dots, q\}$. 若 $\Omega_i \cap \Omega_j \cap \Omega_l = \phi$, 则第 i, j 和 l 个故障完全独立, 因而第 i, j 和 l 个故障的并发是可以被检测的; 若 $\Omega_i = \Omega_j = \Omega_l$, 则第 i, j 和 l 个故障完全耦合, 因而第 i, j 和 l 个故障的并发是不能被检测的; 若 $\Omega_i \cap \Omega_j \cap \Omega_l \neq \phi$, 且各不相等, 则第 i, j 和 l 个故障部分耦合, 此时的并发故障能否检测取决于故障特征的相互独立部分.

对应上述一般情况残差指标集, 为了完成对所有故障的检测与隔离, 则产生的残差信号 $r_l(t)$ 须进一步满足如下要求:

(1) 当没有故障发生时, 所有的残差信号均满足 $r_l(t) \equiv 0, l = 1, 2, \dots, p$;

(2) 当第 j 个故障发生时, 则一部分残差信号 $r_l(t) \neq 0, l \in \Omega_j$; 而余下的残差信号 $r_i(t) = 0, i = \{1, 2, \dots, p\} \setminus \Omega_j$.

3.4 残差产生器参数求解的具体算法与步骤

至此, 几何方法的故障检测与隔离问题转化为求解式(11)残差产生模型的对应系数, 产生满足要求残差信号的问题. 具体算法步骤如下:

(1) 求取包含故障特征 L 的商空间 R^n / S^* : 利用算法 3.2 计算 S^* , 进而得到 R^n / S^* , 实现故障特征 L_j 的解耦;

(2) 构造可观测对 (M_j, F_j) :

① 因为 M_j 是方程 $M_j P_j = H_j C$ 的解, 所以首先通过解方程 $\text{Ker} H_j C = \text{Ker} C + S^*$, 求取测量混合映射 $H_j: R^n \rightarrow R^q$; 然后由 $P_j S^* = 0$ 可解得状态空间 R^n 到商空间 R^n / S^* 的投影算子 P_j , 即可得到 M_j ;

②因为 $F_j = A_0 + D_1 M_j$, (M_j, F_j) 可观测, 存在输出映射 D_1 使得 $\sigma(F_j) = \Lambda$, Λ 是任意对称集合, 所以首先利用不可观测子空间 S^* , 通过求解 $P_j(A + D_0 C) S^* = 0$, 得到输出映射 $D_0: R^q \rightarrow R^n$; 然后根据诱导映射的性质 $P_j(A + D_0 C) = (A + D_0 C: R^n/S^*) P_j$, 求得 $A_0 = (A + D_0 C: R^n/S^*)$, 即可得到 F_j .

(3) 计算剩余的残差产生器系数: $G_j = P_j B$; 由 $D = D_0 + P_j^+ D_1 H_j$, 求得 D , 进而得到 $E_j = P_j D$;

(4) 最后构造残差产生器 $r_j(t)$ 如式 (3.13):

$$\begin{aligned} \dot{w}_j(t) &= F_j w_j(t) - E_j \bar{y}(t) + G_j u(t) \\ r_j(t) &= M_j w_j(t) - H_j \bar{y}(t) \end{aligned} \quad (23)$$

依照上述步骤, 依次产生 q 个残差信号, 即可实现对 q 个故障的检测与隔离。

4 计算机仿真实验

考虑系统 (10) 中:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

为了将传感器故障转换到系统状态模型中, 然后再利用几何方法进行处理, 首先依据第 2 节中的方法计算传感器故障在新系统下的故障特征, 即 $L_i = [-A f_i]$, 计算可得 L_1 、 L_2 和 L_3 . 然后根据 3.4 节的算法步骤, 计算相应的残差产生器模型。

图 1 给出了系统 1 号传感器在 8 秒时发生增益突然增加 1.5 倍 (即 $\eta_1 = 1.5$, $\lambda_1 = 0.02$) 的故障情况, 阈值选取为 $\epsilon = 0.06$, 可以看出, 残差信号 r_2 和 r_3 变化很小, 而 r_1 发生明显变化, 实现了对 1 号单传感器故障的有效检测; 图 2 给出了在 8 秒时, 三个传感器同时发生增益突变故障时的情形, 可以看出, 通过残差信号 r_1 、 r_2 和 r_3 的变化, 可以有效检测与隔离多传感器的并发故障; 图 3 给出了系统 5 秒时, 2 号和 3 号传感器发生增益

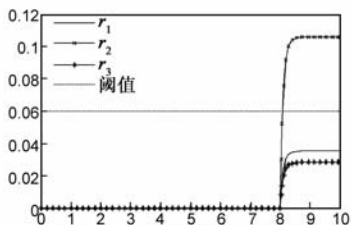


图1 2号传感器增益突变故

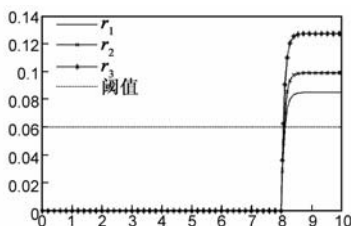


图2 1、2和3号传感器增益突变并

突发故障, 1 号传感器发生增益时变故障的情况, 可以看出该方法构造的残差产生器不仅对增益突变故障敏感, 对增益随时间变化的故障同样具有很好的检测与隔离效果。

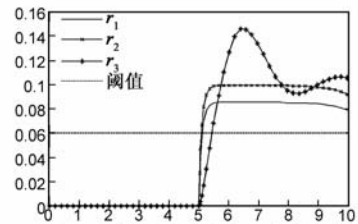


图3 传感器增益时变和突变并发

5 结论

在对传感器故障进行合理建模的基础上, 实现了故障特征由测量方程到状态方程的转换; 结合线性系统理论中观测器的设计方法, 构造了用以实现传感器故障检测与隔离的残差产生器; 利用几何理论中的不变子空间理论, 通过特征空间分割, 实现了故障特征的解耦; 利用空间投影运算, 具体实现了传感器故障的检测与隔离; 仿真结果表明该方法不仅对单故障可以实现检测与隔离, 而且对多传感并发故障同样具有很好的检测与隔离效果, 同时对传感器增益时变故障同样具有很好的检测效果, 因而该方法不仅具有较好的理论意义, 而且具有较强的实用价值。

参考文献:

- [1] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
Zhou Donghua, Ye Yinzong. Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748 - 758.
Zhou Donghua, Hu Yanyan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. ACTA Automatica Sinica, 2009, 35(6): 748 - 758. (in Chinese)
- [3] 朱大奇, 陈楚瑶, 颜明重. 基于 CA-CMAC 的快速传感器故障诊断方法[J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1646 - 1650.
Zhu Daqi, Chen Chuyao, Yan Mingzhong. Fast sensor fault diagnosis method based on CA-CMAC[J]. ACTA Electronica Sinica, 2008, 36(8): 1646 - 1650. (in Chinese)
- [4] Ding S. Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [5] 宋华, 张洪钺. 基于全解耦奇偶方程的动态系统执行器故障检测与识别[J]. 航天控制, 2002, 1: 65 - 70.
Song Hua, Zhang Hongyue. A fully-decoupled parity equation approach to actuator fault detection and identification of dynam-

- ic systems[J]. *Aerospace Control*, 2002, 1: 65 – 70. (in Chinese)
- [6] Wonham W M. *Linear Multivariable Control: A Geometric Approach*[M]. Springer-Verlag, 1985.
- [7] G Basile, G Marro. *Controlled and Conditioned Invariant Subspaces in Linear System Theory*[M]. Prentice-Hall, 1992.
- [8] M A Massoumnia. A geometric approach to the synthesis of failure detection filters[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1986, 31(9): 593 – 603.
- [9] M A Massoumnia, G C Verghese, A S Willsky. Failure detection and identification[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(3): 316 – 321.
- [10] J Boker, G Balas. Detection filter design for LPV systems—a geometric approach[J]. *Automatic*, 2004, 40(3): 511 – 518.
- [11] Meskin N, Liang S, Sobhani E, et al. A nonlinear geometric fault detection and isolation approach for almost-lighter-than-air-vehicles[A]. 16th IEEE International Conference on Control Applications, Part of IEEE Multi-Conference on System and Control[C]. Singapore, 2007. 1073 – 1078.
- [12] Nader Meskin, K Khorasani. Robust fault detection and isolation of time-delay systems using a geometric approach[J]. *Automatic*, 2009, 45(6): 1567 – 1573.

作者简介:



侯彦东 男, 1971 年生, 副教授, 上海海事大学博士研究生. 研究方向: 故障诊断与容错控制、系统安全监测与可靠性评估.
E-mail: hydong@henu.edu.cn



文成林 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师. 研究方向: 多源同步和异步信息建模理论与融合技术、系统安全检测、监控与故障诊断.
E-mail: wencil@hdu.edu.cn