多重故障诊断方法研究 *

张晓梅
(上海财经大学 应用数学系, 上海 200433)

摘　要: 针对复杂系统故障模式较多时难以满足实时性的要求,对传统降阶观测器的诊断方法进行了改进,提出了基于动态观测器的诊断方法。该方法通过设计一个动态观测器去检测一系列故障,其效果等同于使用了一族观测器。当把耦合故障表示成故障信号的组合时,该方法可推广到耦合故障的诊断中。

关键词: 降阶观测器; 动态观测器; 多重故障; 故障诊断
中图法分类号: TP206　文献标识码: A　文章编号: 1001- 3695(2004)07- 0051- 03

Study of Multiple Fault Diagnosis Method

ZHANG Xiao- mei
(Dept. of Applied Mathematics, Shanghai University of Finance & Economics, Shanghai 200433, China)

Abstract: When the complicated system has more fault modes, the necessity of real- time can 't be satisfied. So the diagnosis method on the dynamic observer is proposed to improve the traditional diagnosis method based on the reduced order observer. A series of faults can be detected through the dynamic observer, which is equal to a set of observers. When the couple fault can be expressed combination of the fault noise, this method can be used on the decoupling of the couple fault.

Key words: Reduced Order Observer; Dynamic Observer; Multiple Fault; Fault Diagnosis

由于自动化水平的不断提高,被诊断对象通常都是十分复杂的系统,所发生的故障更是多种多样。现有的多重故障诊断方法主要有两种,即 B- J 检测滤波器法[1,2]和降阶观测器法[3,4]。前一种方法是将观测器的残差固定于不同的方向,使之敏感于不同的故障;第二种方法是设计一族观测器,每个观测器只对一个故障敏感,并与其他故障解耦。但是在实际应用中,当被诊断对象故障模式较多时,上述两种方法都存在诊断速度较慢、观测器增益矩阵的设计过程十分烦琐等缺点,往往难以满足实时性的要求。因此,全面、系统和深入地研究基于模型的多重故障诊断方法,对提高系统的故障诊断能力显得格外重要。本文对传统的降阶观测器结构进行了改进,提出了基于动态观测器的诊断方法。该方法是通过设计一个动态观测器去检测一系列故障,效果等同于使用了降阶观测器。并将此方法推广到了耦合故障的情况。仿真结果表明了该方法的实时性和有效性。

1　带有多重故障的系统模型

设带有多重故障的线性系统模型表示为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^{q} F_i\mu_i \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{2}$$

其中,$x(t) \in R^n$ 状态向量,$y(t) \in R^m$ 输出向量,$u(t) \in R^r$ 已知输入向量,A,B,C 分别为相应维数的实数矩阵,μ_i (i = 1,2, …,q) 是故障种类,F_i (i = 1,2, …,q) 是故障大小。显然,当 $F_i\mu_i = 0$ 时意味着第 i 个执行机构处于正常状态;而 $F_i\mu_i \neq 0$ 则表明处于故障状态。

2　动态观测器的结构设计

现假设式(1)中的故障向量组 $F_1, F_2 \cdots F_q$ 线性无关,且同一时刻只发生一种故障,则某时刻系统的故障模型为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_i\mu_i \tag{3}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{4}$$

设计动态观测器

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - C\hat{x}(t)) \tag{5}$$

$$z_i(t) = T_i x(t) \tag{6}$$

$$r_i(t) = L_i z_i(t) + P_i y(t) \tag{7}$$

其中,变换矩阵 T_i,L_i 和 P_i 须满足以下条件:

$$L_iT_i + P_iC = 0 \tag{8}$$

$$T_iF_i = 0 \tag{9}$$

因 F_i 和 F_j 线性无关,故 $T_iF_j \neq 0 (j \neq i)$,说明 T_i 使故障 F_i 与其他 q - 1 个故障分离开来。

考虑状态估计误差和输出残差方程

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = (A - KC)e(t) + F_i\mu_i \tag{10}$$

$$r_i(t) = L_iT_ix(t) + P_iCx(t) \tag{11}$$

根据式(10),式(11)变成以下形式

$$r_i(t) = L_iT_ie(t) \tag{12}$$

当系统正常时,由 $F_i\mu_i = 0$ 可知 $\lim_{t\to\infty} e(t) = 0$,$\lim_{t\to\infty} r_i(t) = 0$;

收稿日期: 2003- 06- 29; 修返日期: 2003- 09- 10
基金项目: 国家"863"高技术研究资助项目(863- 2- 4- 8- 1)

当系统发生故障时,由 $F_i\mu_i \neq 0$ 可知 $\lim\limits_{t\to\infty} e(t) \neq 0$, $\lim\limits_{t\to\infty} r_i(t) \neq 0$。若进一步用 T_i 左乘 $\dot e(t)$ 时并结合式(9),则

$$T_i\dot e(t) = T_i(A-KC)e(t) + T_iF_i\mu_i = T_i(A-KC)e(t) \tag{13}$$

式(13)表明变换矩阵 T_i 能消除故障 F_i 对 $e(t)$ 的影响,使 $\lim\limits_{t\to\infty} r_i(t) = 0$ 仍然成立。若此时发生的故障为 $F_j\mu_j$,则式(13)变为

$$T_i\dot e(t) = T_i(A-KC)e(t) + T_iF_j\mu_j \tag{14}$$

于是 $\lim\limits_{t\to\infty} r_i(t) \neq 0$,表明 T_i 并不影响故障 F_j 在残差中的输出。

下面讨论观测器增益 K 与变换矩阵 T_i, L_i 和 P_i。

(1) 观测器增益 K 满足 $(A-KC)$ 的特征向量取自 $(F_1 \cdots F_q)$ 中。

证明:由式(10)可得方程的稳态解

$$e(t) = e^{(A-KC)(t-t_0)}e(0) + \int_0^t e^{(A-KC)(t-\tau)}F_i\mu_i(\tau)d\tau \tag{15}$$

再根据文献[5],式(15)等价于以下形式

$$e(t) = e^{(A-KC)(t-t_0)}e(0) + (F_i \cdots (A-KC)^{n-1}F_i)\begin{pmatrix}\alpha_1(t)\\ \alpha_2(t)\\ \cdots\\ \alpha_n(t)\end{pmatrix} \tag{16}$$

设

$$\varepsilon(t) = T_ix(t) - z_i(t) = T_ie(t) \tag{17}$$

将式(16)代入(18)中得

$$\varepsilon(t) = T_ie^{(A-KC)(t-t_0)}e(0) + T_i(F_i \cdots (A-KC)^{n-1}F_i)\begin{pmatrix}\alpha_1(t)\\ \alpha_2(t)\\ \cdots\\ \alpha_n(t)\end{pmatrix} \tag{18}$$

由式(18)可以看出,为了消除故障 F_i 的影响,必须使下式成立

$$T_i(F_i \cdots (A-KC)^{n-1}F_i) = 0 \tag{19}$$

即等价于

$$\begin{aligned} &T_iF_i = 0\\ &T_i(A-KC)F_i = 0\\ &\cdots\\ &T_i(A-KC)^{n-1}F_i = 0 \end{aligned} \tag{20}$$

当 F_i 是 $(A-KC)$ 的特征向量时,必有

$$(A-KC)^kF_i = \lambda_i^kF_i \tag{21}$$

$$T_i(\lambda_i^kF_i) = \lambda_i^kT_iF_i = 0 \tag{22}$$

(2) $T_iF_i = 0$ 意味着 T_i 是 F_i 的正交补。

(3) 由于式 $L_iT_i + P_iC = 0$ 可改写为 $(L_i\ P_i)\begin{pmatrix}T_i\\ C\end{pmatrix} = 0$,故 $(L_i\quad P_i)$ 是 $\begin{pmatrix}T_i\\ C\end{pmatrix}$ 的正交补。

3　单故障诊断

考虑到在实际系统中,由于建模误差和噪声等各种扰动因素的影响,即使在系统无故障的情况下,稳态误差 $e(t)$ 和残差 $r(t)$ 也不可能精确地等于零,因此,可以根据实际系统中各种扰动因素对残差影响的大小,适当地选择阈值 r。当残差 $r(t)$ 超过此阈值时可判断系统发生了故障,然后结合上述诊断方法,给出如下的故障诊断策略:

(1) 如果残差 $r(t) \leq r$,则系统处于正常状态,q 种故障均未发生。

(2) 如果残差 $r(t) > r$,则系统发生了故障。是哪一个故障发生了,还要作进一步的诊断:

①设计如式(5)～式(7)的观测器,计算所有的变换矩阵 T_i。取满足 $T_1F_1 = 0$ 的矩阵 T_1 变换观测器的状态,输出残差相应的会发生变化。若此时残差 $r(t) \leq r$,则故障 μ_1 发生;否则,转②。

②取满足 $T_2F_2 = 0$ 的矩阵 T_2 变换观测器的状态。若此时残差变为 $r(t) \leq r$,则故障 μ_2 发生;以此类推。

q-1 取满足 $T_{q-1}F_{q-1} = 0$ 的矩阵 T_{q-1} 变换观测器的状态。若此时残差变为 $r(t) \leq r$,则故障 μ_{q-1} 发生,否则必为故障 μ_q 发生。

4　耦合故障诊断

假设故障有两个或两个以上同时发生(线性相关的故障看成同一故障),在系统中两个故障或多个故障同时发生会导致一个新的故障信号,相应于两个故障影响的叠加,其故障分配矩阵可用两个故障分配矩阵的组合,形成一个新的故障模式。具体方法如下:

设系统原故障模式为 $\mu_1, \mu_2 \cdots \mu_q$,相应的向量为 $F_1, F_2 \cdots F_q$,满足两两线性无关。若 μ_i 与 μ_j 同时发生,就将其看成是一个新的故障 μ_{ij} 产生,相应的故障向量为 $F_{ij} = (F_i\ F_j)$, F_{ij} 是由 F_i, F_j 组成的增广矩阵。而且向量 $F_1, F_2 \cdots F_q, F_{ij}$ 仍线性无关,当故障 F_i 发生时,必有

$$T_1F_i \neq 0 \tag{23}$$

$$T_2F_i \neq 0 \tag{24}$$

$$T_iF_i = 0 \tag{25}$$

当故障 F_{ij} 发生时,必有

$$T_1F_{ij} \neq 0 \tag{26}$$

$$T_iF_{ij} = T_i(F_i\quad F_j) = (0\quad *) \neq 0 \tag{27}$$

$$T_jF_{ij} = T_j(F_i\quad F_j) = (*\quad 0) \neq 0 \tag{28}$$

$$T_{ij}F_{ij} = 0 \tag{29}$$

按照这种办法及结合专家经验,将 $\mu_1, \mu_2 \cdots \mu_q$ 所有可能组合的情况加以考虑。考虑到具有一定可靠性的实际系统不可能开始就出现多个故障,不妨设系统故障模式最终有 l 个,即 $\mu_1, \mu_2 \cdots \mu_q, \mu_{q+1} \cdots \mu_l$,其中 $\mu_{q+1} \cdots \mu_l$ 是耦合故障模式(排列次序为某两个耦合,进而某三个耦合等)。设计动态观测器,对上述故障进行检测与诊断。若诊断结果为故障 μ_i $(i = 1, 2, \cdots, q)$ 发生,则为单故障发生;若诊断结果为故障 μ_i $(i = q+1, q+2, \cdots, l)$ 发生,则为耦合故障发生,且具体是哪几个故障发生是明确的。

5　诊断仿真

不失一般性,考虑如下系统,其中相应矩阵分别为

$$A = \begin{pmatrix}-1 & 0\\ 0 & -2\end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix}1\\ 1\end{pmatrix}, u = 1, C = \begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix},$$

$$F_1 = \begin{pmatrix}0.8\\ 1.3\end{pmatrix}, F_2 = \begin{pmatrix}1.12\\ -0.58\end{pmatrix}$$

应用动态观测器进行检测,仿真结果如图 1～图 10 所示。

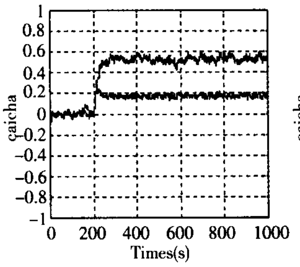

图 1　发生故障 F_1 的残差曲线

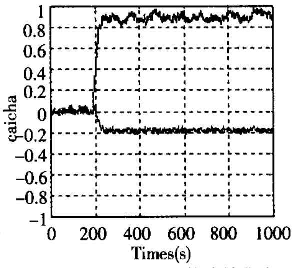

图 2　发生故障 F_2 的残差曲线

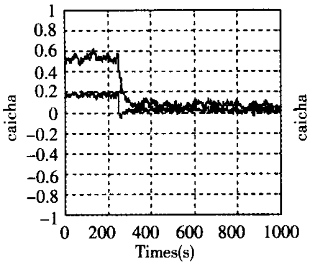

图 3　T_1 变换后的残差曲线

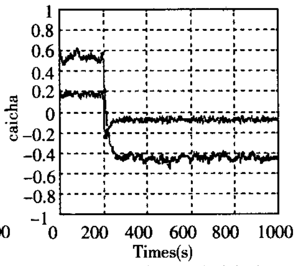

图 4　T_2 变换后的残差曲线

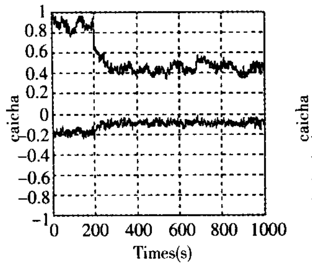

图 5　T_1 变换后的残差曲线

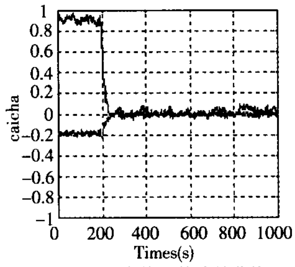

图 6　T_2 变换后的残差曲线

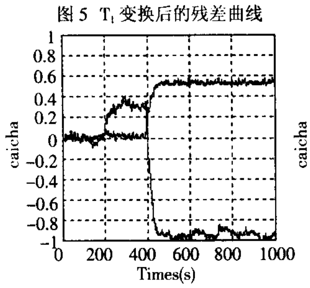

图 7　F_1 和 F_2 同时发生的残差曲线

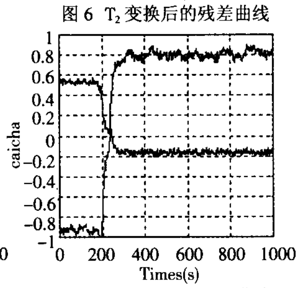

图 8　T_1 作用下的残差曲线

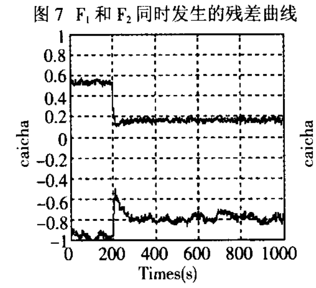

图 9　T_2 作用下的残差曲线

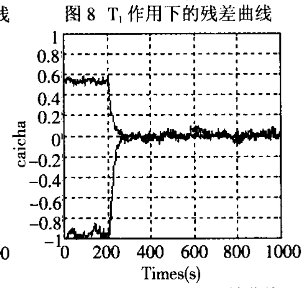

图 10　T_{12} 作用下的残差曲线

其中,图 1 和图 2 是故障 F_1,F_2 分别发生时观测器输出残差曲线;图 3～图 6 是系统发生故障时,变换动态观测器的结构后所得残差曲线。从图 3 和图 4 可以判断出故障 F_1 发生了,从图 5 和图 6 可以判断出故障 F_2 发生了,与所设定的故障模式相符。故障 F_1,F_2 同时发生的残差曲线如图 7 所示。分别用 T_1,T_2 和 T_{12} 变换动态观测器的结构,输出残差曲线如图 8～图 10 所示。从这几个图中可以看出,动态观测器只有用 T_{12} 变换后,其输出残差才趋于零。故诊断结果为故障 F_1,F_2 同时发生,这与所设定的故障模式完全相符。

6　结论

本文针对复杂系统故障模式较多时,传统的基于降阶观测器的诊断方法实时性难以保证的问题,提出了基于动态观测器的诊断方法。其思想是只设计一个动态观测器,但其结构可不断变换,使每次变换后的动态观测器对相应的故障具有鲁棒性,而对其他故障都敏感,通过判别残差列实现故障检测和诊断。该方法大大减少了观测器的数量,又达到了使用一族观测器的效果。将此方法进一步推广,提出了耦合故障的诊断方法。通过"组合"多种故障分配矩阵的方法重构故障模式,可有效地诊断出耦合故障。该方法具有推理简单,诊断速度快的优点。

参考文献:

[1]　Chen J, Patton R J, Zhang H Y. Design of Unknown Input Observers and Robust Fault Detection Filters[J]. Int. Journal of Control, 1996, 63(1): 85-105.

[2]　Chung W. Game Theoretic and Decentralized Estimation for Fault Detection[D]. Ph. D. Thesis, University of California, Los Angeles, 1997.

[3]　Hou M, Muller P C. Fault Isolation Filter Design for Linear Time-invariant Systems[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1994, 42(5): 704-707.

[4]　Shen L C, Chang S K, Hsu P L. Robust Fault Detection and Isolation with Unstructured Uncertainty Using Eigenvalue Assignment Journal of Guidance[J]. Control and Dynamics, 1998, 21: 50-57.

[5]　Chen C T. Linear Systems Theory and Design[M]. Holt, Rinehart and Winston, 1984.

作者简介:

张晓梅(1972-),女,讲师,工学博士,研究方向为控制系统故障诊断。

(上接第 50 页) switch-case, do-while 等语句,它们的使用不当也会影响程序代码的效率。DSP 多采用流水线结构,频繁的跳转指令将使流水线难以发挥作用。因此要尽量对程序流程进行分析,用简单的条件组合来代替判断转移。另外要尽量地把常量表达式移出循环,这样就不用每次都计算常数表达式的值而耗费大量的时间。

4　结束语

本文通过对 DSP 定点算法的深入分析,提出了一种在上位 PC 机上对 DSP 定点算法进行 C 语言定点模拟的方案。该方案不但发挥了 C 语言的优点,而且由于采用了定点算法,同时也兼顾了汇编语言的优点,使得在上位机上进行的 DSP 算法模拟很接近 DSP 实际的运行状况。经调试通过的算法很容易移植到 DSP 中运行,大大缩短了软件开发周期。

参考文献:

[1]　张雄伟. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 北京:电子工业出版社,1997.

[2]　张卫宁,赵子婴. 定点 DSPs 的定标及其运算方法[J]. 计算机工程,2002, 28(3): 223-225.

[3]　高颉. 定点 DSP 中运算精度的提高[J]. 电子工程师,2001, 27(2): 3-4.

作者简介:

苏义鑫(1965-),男,副教授,硕士生导师,博士研究生,研究方向为计算机控制,运动控制与智能控制;孙帅华(1976-),男,硕士研究生,研究方向为数字化工程。