文章编号: 1001-0920(2005)08-0939-04

基于观测器的故障诊断技术的鲁棒性

赵 瑾[1,2], 顾幸生[1], 申忠宇[2]
(1. 华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237; 2. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 南京 210042)

摘 要: 基于观测器的动态系统故障诊断技术的可行性和应用性, 关键是对系统不确定性因素具有良好的鲁棒性. 根据基于观测器的故障诊断系统鲁棒性的特点, 强调通过增加观测器自身的鲁棒性, 提高线性不确定系统的故障诊断鲁棒性, 并对利用未知输入观测器方法增强鲁棒性进行讨论. 提出估计复合故障的一种新的复合故障估计器的设计方法, 给出其存在条件以及理论证明, 并提出相应的算法.

关键词: 故障诊断技术; 未知输入观测器; 复合故障估计器; 鲁棒性; 不确定性
中图分类号: TP306 **文献标识码**: A

Robustness of Observer-based Fault Diagnosis Technology

ZHAO Jin[1,2], *GU Xing-sheng*[1], *SHEN Zhong-yu*[2]
(1. School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China. Correspondent: ZHAO Jin, E-mail: zhaojin@njnu.edu.cn)

Abstract: A key for the feasibility and applicability of the techniques of observer-based fault diagnosis for dynamic systems is a satisfactory robustness with respect to system uncertainties. According to the features of studying robustness of observer-based fault diagnosis systems, emphasis is put on robustness improvement of fault diagnosis in linear uncertain systems by increasing robustness of observers, and enhancement of robustness by using unknown input observers. A new design method of compound fault estimator is developed to estimate compound faults. The existence condition of a estimator is given and a related computing method is proposed.

Key words: Fault diagnosis technology; Unknown input observers; Compound fault estimator; Robustness; Uncertainness

1 引 言

故障诊断技术的重要研究课题之一是基于观测器的动态系统故障诊断. 其基本思想是针对被诊断系统的数学模型, 构造不同类型的观测器, 通过对输出估计误差进行适当的转换生成残差发生器, 根据决策逻辑判断故障的产生并实现故障诊断. 实际情况下难以建立系统精确的数学模型, 对系统结构和参数的不确定性、时变性、干扰和噪声造成的影响等缺乏充分了解, 因此在应用基于观测器的故障诊断技术时常出现如下问题: 1) 故障误报警频繁产生, 难以区别是故障还是误差信号, 降低了系统的灵敏度和检测性; 2) 随着动态系统复杂性的增加以及建模任务的加重, 系统的不确定性日渐严重, 以至造成诊断系统不能正常工作. 鲁棒性故障诊断技术的目的是在存在不确定性因素的情况下, 仍能快速、可靠、准确地检测、分离和诊断出系统中产生的各种故障.

基于观测器的故障诊断的鲁棒性及其在实际中的应用, 一直是学术界和工业界所关注的重要课题之一[1~3]. 一般基于观测器的故障诊断技术的鲁棒性问题常采用两条途径: 1) 设计观测器时充分考虑系统所存在的不确定性, 使设计的观测器自身具备

收稿日期: 2004-04-29; **修回日期**: 2004-07-16.
基金项目: 上海市科技局重大科技攻关项目(04dz11008); 江苏省教育厅自然科学研究项目(04KJD510111).
作者简介: 赵瑾(1961—), 女, 浙江诸暨人, 副教授, 博士生, 从事故障检测与诊断、网络化控制的研究; 顾幸生(1960—), 男, 江苏海门人, 教授, 博士生导师, 从事生产计划与调度、故障检测与诊断等研究.

鲁棒性; 2) 从基于观测器的故障诊断基本原理出发, 全面考虑系统不确定性因素对整个故障诊断系统的影响, 并对其进行智能优化, 使系统对不确定性因素呈现出鲁棒性

本文首先强调了增加观测器的鲁棒性, 以实现线性不确定系统的鲁棒故障诊断; 然后讨论了利用未知输入观测器增强观测器的鲁棒性, 并提出估计复合故障的复合故障估计器的设计方法; 最后给出了复合故障估计器的存在条件、理论证明以及相应算法

2 问题描述

一个复杂的动态系统, 总是存在一些未建模动态和未知扰动因素 从故障诊断的角度出发, 还应考虑系统存在的建模误差、参数不确定性、非线性、干扰等未知因素的影响 则动态系统的数学模型一般表达式[3]为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) + \\ \qquad \Delta N_{f1}w_f + R_1 f(t), \\ y(t) = (C + \Delta C)x(t) + (D + \Delta D)u(t) + \\ \qquad \Delta N_{f2}w_f + R_2 f(t). \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t)$ 为 n 维系统状态向量, $y(t)$ 为 m 维输出观测向量, $y(t)$ 为 p 维控制输入向量, $f(t)$ 为 q 维故障向量, w_f 为干扰; A, B, C 为合适维数的系统矩阵, R_1 和 R_2 为合适维数的故障系数矩阵; $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \Delta D$ 表示由于参数误差或参数变化引起的建模误差, ΔN_f 表示系统非线性或扰动系数

把式(1) 的未知因素归纳到一起, 则系统的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \underbrace{[\Delta A \quad \Delta B \quad \Delta N_{f1}]}_{E_1} \times \\ \qquad \underbrace{[x \quad u \quad w_f]^{\mathrm{T}}}_{d} + R_1 f(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + \underbrace{[\Delta C \quad \Delta D \quad \Delta N_{f2}]}_{E_2} \times \\ \qquad \underbrace{[x \quad u \quad w_f]^{\mathrm{T}}}_{d} + R_2 f(t). \end{cases} \tag{2}$$

即

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_1 d(t) + R_1 f(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + E_2 d(t) + R_2 f(t). \end{cases} \tag{3}$$

其中: $d(t)$ 表示系统不确定性因素的未知输入向量, E_1 和 E_2 为合适维数的扰动系数矩阵 根据式(3) 构造相应的全阶 Lyapunov 状态观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + Bu(t) + L(\tilde{y}(t) - y(t)), \\ \tilde{y}(t) = C\tilde{x}(t) + Du(t),\ e(t) = \tilde{x}(t) - x(t), \\ r(t) = \tilde{W}(\tilde{y}(t) - y(t)). \end{cases} \tag{4}$$

其中: $\tilde{x}(t)$ 和 $\tilde{y}(t)$ 分别表示观测器的估计状态和估计输出, $e(t)$ 为状态估计误差, $r(t)$ 为残差, L 和 $\tilde{W}$ 分别表示观测器的反馈增益矩阵和残差发生器的加权转换矩阵 通过一系列的推导可得出

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = (A + LC)e(t) - (E_1 + LE_2)d(t) - \\ \qquad (R_1 + LR_2)f(t), \\ r(t) = \tilde{W}Ce(t) - \tilde{W}E_2 d(t) - \tilde{W}R_2 f(t). \end{cases} \tag{5}$$

由此可见, 残差不仅是状态误差和故障的函数, 而且受到未知输入即系统不确定性的影响 在建模误差和干扰等未知输入因素不可避免的情况下, 残差表现出不同于标称状态下的残差特性, 因此在故障诊断过程中必须消除或削弱未知输入对残差的作用

3 增强观测器的鲁棒性

增加故障观测器鲁棒性的目的是使故障的作用能从不确定因素中完全解耦或优化近似解耦 基于观测器的线性系统故障诊断技术所采用的方法和研究工作主要在以下几方面: 1) Frank 等[3~5] 设计的未知输入观测器; 2) Patten 等[6,7] 提出的特征结构分配方法; 3) Chow 和 Willsky[8] 提出的鲁棒故障诊断方法; 4) Hou 等[3] 利用 H_2/H_∞ 优化理论设计的混合 H_2/H_∞ 观测器

3.1 未知输入观测器

未知输入观测器是一类特殊的观测器, 在存在系统不确定性、干扰等未知输入的情况下, 能使观测器估计的不确定系统状态不受上述因素的干扰 未知输入观测器近年来受到人们的关注[9~11], 并应用到基于定量模型的故障检测与诊断系统中 Yu 等[12] 对未知输入观测器进行扩展, 分别应用到双线性系统和一类非线性系统中, 设计双线性未知输入观测器和带有非线性解耦未知输入观测器

本文所讨论的未知输入观测器是从基于观测器的故障诊断基本原理出发, 利用 Luenberger 观测器的结构推导出相应的未知输入观测器, 其数学描述形式为

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + Ju(t) + Ky(t), \\ r(t) = L_1 z(t) + L_2 y(t). \end{cases} \tag{6}$$

其中: $z(t) = Tx(t)$ 为观测器状态估计向量; T 是待设计的未知非奇异矩阵; F, J, L_1, L_2 为合适维数的

待定系统矩阵, 且 F 的全部特征根 $\lambda_i(F)$ 具有负实部; 同时假定状态估计误差 $e(t) = z(t) - Tx(t)$. 则

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Fe(t) + (FT + KC - TA)x(t) + \\ \qquad (J - TB + KD)u(t) + (KE_2 - \\ \qquad TE_1)d(t) + (KR_2 - TR_1)f(t), \\ r(t) = L_1e(t) + (L_1T + L_2C)x(t) + \\ \qquad L_2Du(t) + L_2E_2d(t) + L_2R_2f(t). \end{cases} \tag{7}$$

未知输入观测器的目的是使生成的残差满足相应的解耦条件, 并从不确定性作用中解耦出来, 即

$$\begin{cases} TA - FT = KC,\ J = TB - KD, \\ L_1T + L_2C = 0,\ L_2D = 0,\ LE_2 = 0, \end{cases} \tag{8}$$

由此可得到系统的状态误差和残差方程

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Fe(t) + (KR_2 - TR_1)f(t), \\ r(t) = L_1e(t) + L_2R_2f(t). \end{cases} \tag{9}$$

根据现代控制理论和鲁棒控制理论(如 Kronecker, LMI 和 LTP) 求解上述待定矩阵. 为使故障能被残差向量正确地反映出来, 并确保故障的可检测性, 还必须满足:

1) $\operatorname{rank}\begin{bmatrix} -T & K \\ 0 & L_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \operatorname{rank}\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix}$;

2) (F, L_1) 可观测.

从而使残差只对故障向量灵敏, 不受未知输入的影响, 实现基于观测器的故障诊断的鲁棒性. 有关这方面理论、推导和证明参见文献[4, 5].

3.2　复合故障估计器

复合故障估计器是基于未知输入观测器的设计原理, 不同之处在于它不是利用未知输入观测器设计相应的残差, 而是直接通过未知输入观测器对复合故障进行估计, 并由故障评价系统实现故障诊断. 本节重点讨论复合故障的形成、估计和相应算法的实现.

对于系统(2), 假设 D, E_2, R_2 为零, 并将故障归结到不确定因素一起考虑, 则系统(2) 变为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \\ \qquad \underbrace{[\Delta A \quad \Delta B \quad \Delta N_f \quad R_1]}_{F} \times \\ \qquad \underbrace{[x \quad u \quad w_f \quad f]^{\mathrm{T}}}_{f'(t)}, \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \tag{10}$$

即

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff'(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \tag{11}$$

其中 $f'(t)$ 是未知输入和故障的综合输入, 定义为系统的复合故障, 它既包含系统的不确定性, 又包含待诊断的系统故障. 利用观测器直接对复合故障进行估计, 并由故障评价系统实现故障的检测和诊断.

引理 1[9]　系统(11) 存在状态观测器的条件是:

1) $\operatorname{rank}[C \quad F] = \operatorname{rank} F$;

2) $\operatorname{rank}\begin{bmatrix} sI - A & F \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \operatorname{rank} F$;

3) 复合故障 $f'(t)$ 未知且有界.

其中 $\| f'(t) \| \le \gamma$, γ 是非负常数.

定义 1　在满足观测器存在的条件下, 设计系统(11) 的复合故障估计器

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + \\ \qquad K(\hat{y}(t) - y(t)) + F\hat{f}'(t), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \\ \hat{f}'(t) = \rho G(\hat{y}(t) - y(t)). \end{cases} \tag{12}$$

其中: $\hat{x}(t)$ 和 $\hat{f}'(t)$ 分别为状态和复合故障的估计值, K 和 G 为待定矩阵, $\rho > 0$ 且为常数.

引理 2　任意常数 $\epsilon_1 > 0$, $\epsilon_2 > 0$, 存在 $\rho_1 \ge 0$, $\rho_2 \ge 0$. 对于所有的 $\rho \ge \rho_1$, $\rho \ge \rho_2$, 有下式成立:

$$\begin{cases} \lim\limits_{t\to\infty} \sup \| \hat{x}(t) - x(t) \| \le \epsilon_1, \\ \lim\limits_{t\to\infty} \sup \| \hat{f}'(t) - f'(t) \| \le \epsilon_2. \end{cases} \tag{13}$$

引理 2 说明利用复合故障估计器, 可按一定精度实现对系统状态和复合故障的渐近估计. 为计算复合估计器的矩阵 K 和 G, 引出如下重要定理:

定理 1　当且仅当引理 1 假设条件 1) 和 2) 成立时, 存在矩阵 $K \in R^{n\times p}$, $G \in R^{m\times p}$, $P \in R^{n\times n}$, 其中 P 是正定实对称矩阵, 使如下 Lyapunov 矩阵不定式成立:

$$P(A + KC) + (A + KC)^{\mathrm{T}}P < 0, \tag{14}$$

且 $F^{\mathrm{T}}P = GC$.

证明　若系统(11) 满足引理 1 假设 1) 和 2), 则存在变换矩阵 T 和 S, 使转换后的矩阵具有以下形式[10]:

$$\bar{A} = T^{-1}AT = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

$$\bar{C} = S^{-1}CT = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{22} \end{bmatrix},$$

$$\bar{F} = T^{-1}F = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

其中: F_1 和 C_{11} 具有相同的列, F_1 列满秩, C_{11} 可逆. 假设

$$P = T^{-\mathrm{T}}\bar{P}T^{-1},\ K = T\bar{L}\bar{S}^{-1},\ G = \bar{G}S^{-1}, \tag{15}$$

其中 $\bar{P}$ 是对称矩阵. 所以

$$\bar{P} = T^{\mathrm{T}}PT,\ \bar{K} = T^{-1}KS,\ \bar{G} = GS. \tag{16}$$

这时式(15) 的 P, K, G 等价于式(16) 的 $\bar{P}, \bar{K}, \bar{G}$, 即

$$\bar{P}(\bar{A} + \bar{K}\bar{C}) + (\bar{A} + \bar{K}\bar{C})^{\mathrm{T}}P < 0,$$

$$\bar{P} > 0,\ \bar{F}^{\mathrm{T}}\bar{P} - \bar{G}\bar{C} = 0.$$

由于$[C_{22}\quad A_{22}]$的可检测性(证明见文献[10]),则存在矩阵K_{22}使$(A_{22}+K_{22}C_{22})$为Hurwitz阵,从而存在矩阵P_{22}使下式成立:

$$-Q_{22}=P_{22}(A_{22}+K_{22}C_{22})+(A_{22}+K_{22}C_{22})^{T}P_{22}<0,\ P_{22}>0.$$

令

$$\bar{P}=\begin{bmatrix}-I_{\bar{m}} & 0\\ 0 & P_{22}\end{bmatrix},\ \bar{L}=\begin{bmatrix}-\kappa C_{11}^{-1} & 0\\ 0 & K_{22}\end{bmatrix}.$$

其中:$\bar{m}$是F_1列数目,κ是可选择的标量.由此可知,当$\bar{P}>0$时$\bar{P}$是对称矩阵. □

为了估计出复合故障,必须计算矩阵K,G,P,可有两种方法:1) 利用奇异值分解,由定理1的算法[11]求出K,G,P;2) 利用线性矩阵不等式(LMI)计算K,G,P.这里仅对第2种方法简要叙述如下:

利用LMI方法将解K,G,P问题化为如下有一个最优值ξ^*的优化问题:

$$\begin{aligned}&\min\ \xi,\\ &\text{s.t.}\ PA+LC+(PA+KC)^{T}<0,\\ &\begin{bmatrix}\xi I & F^{T}P-GC\\ (F^{T}P-GC)^{T} & \xi I\end{bmatrix}\geq 0,\\ &P>I.\end{aligned}$$

优化上述问题是一个具有线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题.应用LMI工具箱求解该问题,解出P,L,G,ξ,根据定理1得到矩阵$K=P^{-1}L$.

一旦估计出复合故障的值,在故障决策判断阶段,利用H_∞优化理论对作用在复合故障上的不确定性因素设置上确界,实现故障诊断.

4 结 语

本文强调通过增加观测器的鲁棒性来加强故障诊断系统的鲁棒性,在讨论未知输入观测器的基础上,提出利用未知输入观测器对系统复合故障进行估计,并给出相应的设计算法.下一步的研究工作是在故障决策系统中利用智能优化理论,实现复合故障的分离,判断出系统产生的故障.将智能观测器应用于故障诊断系统,提高故障诊断系统的鲁棒性,将是基于观测器的鲁棒故障诊断技术的发展方向之一.

参考文献(References)

[1] Frank P M. Enhancement of Robustness in Observer-based Fault Detection[J]. *Int J of Control*, 1994, 59(4): 955-981.

[2] Patton R J, Chen J. Observer-based Fault Detection and Isolation: Robustness and Applications[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(5): 671-682.

[3] Patton R J. Robustness in Model-based Fault Diagnosis: The 1995 Situation[J]. *Annual Review Control*, 1997, 21(1): 103-123.

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

[5] Chen J, Zhang H Z. Robust Detection of Faulty Actuators via Unknown Input Observers[J]. *Int J of Systems Science*, 1991, 22(6): 1829-1839.

[6] Patton R J, Chen J. Robust Fault Detection of Jet Engine Sensor Systems Using Eigenstructure Assignment[J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1992, 15(6): 1491-1497.

[7] Shen L C, Chang S K, Hsu P L. Robust Fault Detection an Isolation with Unstructured Uncertainty Using Eigenstructure Assignment[J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1998, 21(1): 50-57.

[8] Chow E Y, Willsky A. Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1984, 29(7): 603-614.

[9] Hou M, Muller P C. Design on Observers for Linear Systems with Unknown Inputs[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(6): 871-875.

[10] Martin C, Jay T. State and Input Estimation for a Class of Uncertain Systems[J]. *Automatica*, 1998, 34(6): 757-764.

[11] 闫伟冬, 吕恬生, 于岩. 具有未知输入线性系统观测器的设计与分析[J]. *系统仿真学报*, 2002, 14(7): 952-954, 967.
(Yan W D, Lv T S, Yu Y. Design and Study of Observer for Linear System with Unknown Input[J]. *J of System Simulation*, 2002, 14(7): 952-954, 967.)

[12] Yu D, Shields D N. A Bilinear Fault Detection Observer[J]. *Automatica*, 1996, 32(11): 1597-1602.