

文章编号: 0255-8297(2005)06-0620-05

# 具有线性输出结构的非线性系统 故障诊断和容错控制

王宏, 沈岭, 岳红  
(中科院自动化研究所, 北京 100080)

**摘要:** 研究了一类具有线性输出结构的非线性系统故障诊断和容错控制, 利用自适应观测器来构造线性残差, 同时构造李亚普诺夫函数, 使其一阶导数为负来得到故障估计值, 容错控制部分设计了 2 个自适应观测器, 通过控制器重组使故障发生后的系统输出跟踪原系统输出. 理论分析和仿真结果证明了该方法的有效性.

**关键词:** 非线性系统; 李亚普诺夫函数; 自适应观测器; 故障诊断; 容错控制

中图分类号: TP13 文献标识码: A

## Fault Diagnosis and Fault-Tolerance Control for Nonlinear Systems with Linear Output Structure

WANG Hong, SHEN Ling, YUE Hong  
(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** A new formulation of fault diagnosis and fault-tolerant control algorithm is presented for a class of nonlinear dynamic systems with a linear output structure. A Lyapunov-based adaptive observer is proposed to produce a residual signal. The fault estimate guarantees negativity of the first order derivative of the Lyapunov function using Lyapunov analysis. Two adaptive observers are designed for fault-tolerant control, and the system output after occurrence of a fault tracks the output of the original system through a nonlinear controller reconfiguration. Simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** nonlinear systems; Lyapunov function; adaptive observers; fault diagnosis; fault-tolerant control

非线性系统的故障诊断和容错控制一直是控制领域的一个难点问题. 一个普遍的处理方法是对非线性系统进行局部线性化<sup>[1]</sup>, 利用线性系统故障诊断技术进行研究, 这类方法主要适用非线性程度不高的系统. 对于更一般的非线性系统, 人们主要利用智能故障诊断方法来诊断故障, 包括专家系统, 模糊控制和神经网络等技术. 近来人们更多地把模糊控制和神经网络技术结合起来进行研究<sup>[2]</sup>, 这类方法需要较多的先验知识来建立模糊规则. 利用解析方法对具有一般性的非线性系统进行故障诊断的研究

不多, 已有的成果主要是针对某种特定的非线性系统进行分析, 文献[3]采用观测器的方法对双线性系统故障检测进行了研究. 而对非线性系统容错控制的研究比较困难, 文献[4, 5]研究了两类特殊的非线性系统容错控制.

本文采用了自适应观测器的方法对一类具有线性输出结构的非线性系统进行了故障诊断研究, 很多非线性系统可以表示成这种模型形式. 通过对李亚普诺夫函数及其一阶导数进行分析来获得系统的故障诊断算法设计, 从而获得故障的估计值和观测

收稿日期: 2004-06-30; 修订日期: 2004-09-24

基金项目: 中科院知识创新工程重大项目(KGCX-SW-15)

作者简介: 王宏(1960-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博导. E-mail: hong.wang@unist.ac.uk

器自适应增益的调节规律,同时保证了观测器的稳定性和收敛性.在容错控制器的设计中也采用了类似的方法.

### 1 系统描述

本文研究的非线性系统描述如下

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) + B(t)(x, u) + B(y, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $x \in R^n$  为系统状态,  $u \in R^r$  为控制输入,  $y \in R^m$  为测量输出,  $B(t) \in R^{m \times k}$  是一个参数矩阵 ( $R^{m \times k}$  是一个  $m \times k$  维的矩阵空间), 它数值的未预期变化表示待检测的故障,  $f(x, u) \in R^n$  和  $(x, u) \in R^k$  表示已知的非线性函数,  $C \in R^{m \times n}$  和  $B \in R^{m \times m}$  是已知的参数矩阵, 其中  $C \in R^{m \times n}$  表示系统具有线性输出结构,  $(y, u)$  表示系统的不确定性和系统受到的噪声干扰, 其中包括了有色噪声. 假设存在  $\delta_1, \delta_2$  和  $\delta_3$  使  $(y, u) = \delta_1 y + \delta_2 u + \delta_3$ ,  $(y, u)$  项表明本文的故障诊断和容错控制方法具有一定的鲁棒性. 在本文中  $\delta$  表示矩阵的 2-范数.

系统(1)表示了一些典型的非线性系统, 例如 AC 发电机和三箱系统等.

本文中此非线性系统满足以下假设:

设对于  $x_1, x_2 \in R^n$ , 存在正定矩阵  $P = P^T > 0$  和已知的函数  $(C(x_1 - x_2), u) > 0$ , 使下面的不等式成立

$$\begin{aligned} & (x_1 - x_2)^T P [f(x_1, u) - f(x_2, u)] \\ & (C(x_1 - x_2), u), \quad u \end{aligned} \quad (2)$$

且矩阵  $C$  和  $B$  满足  $B = P^{-1} C^T$ .

条件(2)是关于非线性系统无故障项  $f(x, u)$  及其输出结构的一个假设条件, 它和关于系统稳定性的假设是不同的, 应该说这个条件既包含了稳定的, 也包含了非稳定的  $x = f(x, u)$ . 例如对不稳定系统  $x = x \sin u; y = 2x$ , 我们可以证明当  $P = 1$  时  $(x_1 - x_2) | x_1 \sin u - x_2 \sin u | \leq | (x_1 - x_2)^2 \sin u |$

$$(x_1 - x_2)^2 = \frac{1}{4} (y_1 - y_2)^2 = (2(x_1 - x_2))^2 > 0$$

此外, 存在正数  $\delta_{\min}$  和  $\delta_{\max}$  使得函数  $(x, u)$  和  $(t)$  满足

$$(x, u) \in [\delta_{\min}, \delta_{\max}], \quad (t) \in [\delta_{\min}, \delta_{\max}] \quad (3)$$

### 2 故障诊断

下面考虑如何利用已知的输入和输出信息诊断出未知的故障. 系统在无故障时,  $B = B_0$  是一个已知矩阵, 表示系统处于正常状态, 在  $t_f$  ( $t_f$  表示故障出现的时间) 时刻,  $B$  突变为  $B_f$ ,  $B_f$  就是所要估计的故障矩阵. 为了进行故障诊断, 对系统(1)设计如下自适应观测器

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= f(\hat{x}, u) + \hat{B}(t)(\hat{x}, u) + B h(t, y) \\ &= C \hat{x} - y \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\hat{x} \in R^n$  表示状态向量的估计值,  $h(t, y) \in R^p$  表示已知的平滑函数, 它依赖于自适应调节参数矩阵  $(t) \in R^q$ ,  $(t) > 0$ , 例如, 可以令  $h(t, y) = (t) \cdot y$ . 表示故障观测器的残差, 此时故障矩阵  $(t) = B_f$ ,  $(t) \in R^{m \times k}$  表示  $B_f$  的估计值, 它的维数和  $(t)$  一致. 在此观测器中, 观测器误差定义为

$$e = \hat{x} - x \quad (6)$$

则可以得到误差动态方程

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \hat{x} - x = f(\hat{x}, u) - f(x, u) + \\ & B \hat{B}(t)(\hat{x}, u) - B_f(x, u) + \\ & B h(t, y) - B(y, u) \end{aligned} \quad (7)$$

用于诊断故障的残差可表示为

$$r = C \hat{x} - y = Ce \quad (8)$$

对于故障诊断观测器, 我们希望通过  $\{ (t), \hat{B}(t) \}$  选择稳定自适应调节规律使得  $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$ , 和  $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{B}(t) = B_f$ .

为了得到  $(t)$  和  $\hat{B}(t)$  的调节规律, 取李亚普诺夫函数如下

$$\begin{aligned} V(e, (t), \hat{B}(t)) &= \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2} \text{tr} \{ (t) (t) + \\ & \frac{1}{2} \text{tr} \{ \hat{B}^T(t) G (t) \} \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $(t) = \hat{B}(t) - B_f$  表示故障诊断的误差.  $P > 0$  和  $G = G^T > 0$  是两个预先假定的正定矩阵,  $\text{tr}$  表示对矩阵求迹.

由式(9)可得到李亚普诺夫函数的一阶导数为

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= e^T P [f(\hat{x}, u) - f(x, u) + \hat{B}(t)(\hat{x}, u) - \\ & B_f(x, u) - B(y, u)] + e^T P B h(t, y) + \end{aligned}$$

$$\dot{\hat{f}}(t) = -\Gamma^{-1} \left[ \hat{f}(t) + \text{tr} \left\{ \Gamma^{-1}(t) \mathbf{G}^{-1}(t) \right\} \right] \quad (10)$$

由假设条件已知

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_3 \quad (11)$$

我们可以得到

$$\frac{d}{dt} \left( \hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u} \right) + \Gamma^{-1} h(\hat{\mathbf{x}}_1(t), \mathbf{u}) + \Gamma^{-1}(t) \left( \hat{\mathbf{x}}_1(t) + \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_3 \right) + \text{tr} \left\{ \Gamma^{-1}(t) \mathbf{G}^{-1}(t) \right\} + \Gamma^{-1}(t) (\hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u}) \quad (12)$$

令上式右边= -\Gamma^{-1} \hat{\mathbf{x}}\_1(t), 则 \hat{\mathbf{x}}\_1(t) 的调节规律可选为

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_1(t) = -\Gamma^{-1} h(\hat{\mathbf{x}}_1(t), \mathbf{u}) - \Gamma^{-1} (\hat{\mathbf{x}}_1(t) + \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_3), \quad \hat{\mathbf{x}}_1(t) = \mathbf{0} \quad (13)$$

同时得到 \hat{f}(t) 的自适应调节规律

$$\dot{\hat{f}}(t) = -\mathbf{G}^{-1} \Gamma^{-1} (\hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u}); \quad \hat{f}(t_f) = \mathbf{0} \quad (14)$$

可以证明式(13)和式(14)保证了

$$\frac{d}{dt} V = -V, \quad t \geq t_f \quad (15)$$

上式表明了当 t \to \infty 时, 李亚普诺夫函数的一阶导数为负, 其本身单调下降且有下界. 这表明当时间趋于无穷大时, V 是有极限的, 因此 \hat{\mathbf{x}}\_1 趋于零, 这保证了 \hat{f}(t) 的收敛性. 当 (\hat{\mathbf{x}}\_1, \mathbf{u}) 是充分激励的条件下, \hat{f}(t) 收敛于系统的故障值. 因此当系统出现故障时, 对故障矩阵采用式(14)的调节规律, 就可以估计出故障值的大小.

### 3 容错控制

容错控制的目标是当系统发生故障时其输出在控制器重组情况下仍能跟踪系统原来的输出. 图1表示了系统进行故障诊断和容错控制的输出情况.

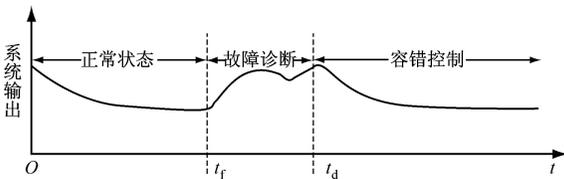


图1 系统故障诊断和容错控制示意图  
Fig.1 Schematic diagram of fault diagnosis and fault-tolerant control

在上图中, 当 t \in [0, t\_f], 系统没有故障, \hat{f}(t) = \mathbf{0}.

当 t \in [t\_f, t\_d], 系统出现故障, \hat{f}(t) = \mathbf{f}\_1, 进行故障诊断, 此时输入仍为 \mathbf{u}\_1. 当 t = t\_d (t\_d 表示故障诊断完成, 进行容错控制的时刻), 已估计出故障大小, \hat{f}(t) = \mathbf{f}\_1, 进行控制器重组, 输入切换为 \mathbf{u}\_2.

当 t \in [0, t\_f] 时, 系统模型可以描述如下

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) + \mathbf{B}_H(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) + \mathbf{B}_1(\mathbf{y}_1, \mathbf{u}_1) \\ \mathbf{y}_1 = \mathbf{C}\mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (16)$$

式中 \mathbf{u}\_1 和 \mathbf{B}\_H 已知, \mathbf{u}\_1 可以保证系统稳定和良好的性能, \mathbf{y}\_1 是我们希望的输出.

为了得到系统状态的估计值, 对系统(16)建立如下状态观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_1 = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u}_1) + \mathbf{B}_H(\hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u}_1) + \mathbf{B}\mathbf{L}_1(t) \mathbf{e}_1 \\ \dot{\mathbf{e}}_1 = \hat{\mathbf{y}}_1 - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_1 \end{cases} \quad (17)$$

\mathbf{L}\_1(t) \in \mathbb{R}^{m \times n} 是时变的观测器增益, 与前文类似, 为了得到 \mathbf{L}\_1(t) 的自适应调节规律, 取李亚普诺夫函数为

$$V_1(\mathbf{e}_1, \mathbf{L}_1(t)) = \frac{1}{2} \mathbf{e}_1^T \mathbf{P} \mathbf{e}_1 + \text{tr}(\mathbf{L}_1^T(t) \mathbf{L}_1(t)) \quad (18)$$

式中 \mathbf{e}\_1 = \hat{\mathbf{x}}\_1 - \mathbf{x}\_1 是状态估计误差.

李亚普诺夫函数的一阶导数为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_1 &= \mathbf{e}_1^T \mathbf{P} [f(\hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u}_1) - f(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) + \mathbf{B}_H(\hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u}_1) \\ &\quad - \mathbf{B}_H(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) + \mathbf{B}\mathbf{L}_1(t) \mathbf{e}_1 - \mathbf{B}(\mathbf{y}_1, \mathbf{u}_1)] \\ &\quad + \text{tr} \left( \frac{d(\mathbf{L}_1^T(t) \mathbf{L}_1(t))}{dt} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

考虑假设条件, 可以得到

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_1 &= \mathbf{e}_1^T \mathbf{P} (\mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_3) + \mathbf{e}_1^T \mathbf{P} \mathbf{B}_H(\hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u}_1) \\ &\quad - \mathbf{e}_1^T \mathbf{P} \mathbf{B}_H(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) + \mathbf{e}_1^T \mathbf{P} \mathbf{B}(\mathbf{y}_1, \mathbf{u}_1) \\ &\quad + \text{tr}(\mathbf{L}_1^T(t) \mathbf{L}_1(t)) \end{aligned} \quad (20)$$

令上式右边= -\Gamma^{-1} V\_1, 则得到 \mathbf{L}\_1(t) 的调节规律

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{tr}(\mathbf{L}_1^T(t) \mathbf{L}_1(t)))}{dt} &= -\Gamma^{-1} \mathbf{L}_1(t) \mathbf{1} - \\ &\quad \mathbf{1}^T (\mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_3) - \mathbf{1}^T \mathbf{B}_H(\hat{\mathbf{x}}_1, \mathbf{u}_1) \\ &\quad + \mathbf{1}^T \mathbf{B}_H(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_1) + \mathbf{1}^T \mathbf{B}(\mathbf{y}_1, \mathbf{u}_1) \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)保证了观测器的稳定跟踪, 参见文献[6].

当 t \in [t\_f, t\_d] 时, 故障出现, \mathbf{B}\_H 突变为 \mathbf{B}\_H, 按上文所述对系统进行故障诊断后, \hat{f}(t) = \mathbf{f}\_1 为已知量.

当  $t = t_d$  时, 对故障后的系统重组控制器, 即把系统的输入  $u_1$  切换为  $u_2$ , 使  $\lim_{t \rightarrow \infty} y_2 = y_1$ , 其中  $y_1$  为未出现故障时系统的稳定输出.

得到控制器重组后的系统

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = f(x_2, u_2) + B_f(x_2, u_2) + B(y_2, u_2) \\ y_2 = Cx_2 \end{cases} \quad (22)$$

对系统(22)建立如下观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = f(\hat{x}_2, u_2) + B_f(\hat{x}_2, u_2) + BL_2(t) \\ \hat{y}_2 = C\hat{x}_2 \end{cases} \quad (23)$$

与前文类似,  $L_2(t)$  的调节规律为

$$\frac{d(\text{tr}(L_2^T(t)L_2(t)))}{dt} = -\text{tr}(L_2(t) - \dots) \quad (24)$$

为了求  $u_2$ , 定义

$$e = \hat{x}_2(t) - \hat{x}_1(t + t_d + t_f) = \hat{x}_2 - \hat{x}_1 \quad (25)$$

在下面的推导过程中, 有关  $\hat{x}_1$  和  $\hat{x}_2$  及其函数的相减运算都是指在上述意义下的运算. 这样, 的动态方程可进一步表示为

$$\dot{e} = f(\hat{x}_2, u_2) + B_f(\hat{x}_2, u_2) - f(\hat{x}_1, u_1) - B_H(\hat{x}_1, u_1) + BL_2(t) - BL_1(t) \quad (26)$$

为了保证容错后的系统能够恢复正常系统的特性, 取李亚普诺夫函数为

$$V(e, u) = \frac{1}{2} e^T P e \quad (27)$$

则

$$\frac{dV}{dt} = e^T P [f(\hat{x}_2, u_2) - f(\hat{x}_1, u_1) + B_f(\hat{x}_2, u_2) - B_H(\hat{x}_1, u_1) + BL_2(t) - BL_1(t)] \quad (28)$$

考虑假设条件, 得

$$\frac{dV}{dt} = e^T P [f(\hat{x}_2, u_2) - f(\hat{x}_1, u_1)] + e^T C^T [B_f(\hat{x}_2, u_2) - B_H(\hat{x}_1, u_1)] + e^T P [BL_2(t) - BL_1(t)] \quad (29)$$

令上式右边 = -\lambda^T, 得

$$e^T P [f(\hat{x}_2, u_2) - f(\hat{x}_1, u_1)] + e^T C^T [B_f(\hat{x}_2, u_2) - B_H(\hat{x}_1, u_1)] + e^T P [BL_2(t) - BL_1(t)] = -\lambda^T \quad (30)$$

这表明  $\frac{dV}{dt} = -\lambda^T$ . 利用上一节分析, 同样可以证明

是趋近于零的. 上式是关于  $u_2$  的非线性表达式,

除  $u_2$  外的其余项都是已知的, 可以从中求得  $u_2$  的值. 如果上式求解  $u_2$  困难, 可以考虑采用非线性代数方程的数值求解方法来迭代找出每一个时刻的  $u_2$ . 也可以采用近似求解方法来得到  $u_2$  的线性表达式

$$\left[ \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{u_1} + \frac{\partial B_f}{\partial u} \Big|_{u_1} + \frac{\partial C^T H_f}{\partial u} \Big|_{u_1} \right] (u_2 - u_1) + \dots \quad (31)$$

本节对系统状态设计了自适应观测器, 经过足够长的时间  $\hat{x}_1$  趋近于  $x_1$ ,  $\hat{x}_2$  趋近于  $x_2$ . 在容错控制设计中, 通过选取关于跟踪误差的李亚普诺夫函数, 保证了系统的输入由原来的  $u_1$  切换到  $u_2$  后  $\hat{x}_2$  趋近于  $\hat{x}_1$ , 也就是说经过足够长的时间  $x_2$  趋近于  $x_1$ , 同时系统的线性输出结构保证了  $y_2$  趋近于  $y_1$ , 这就说明在故障情况下系统的输出可以跟踪原来的输出.

### 4 仿真结果

为了验证前文的算法, 首先对如下非线性系统进行故障诊断仿真

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} -x_1 - x_2 - 0.5x_1^3 \\ \sin x_1 - x_2 - x_2^3 \end{bmatrix} + u + B \begin{bmatrix} H \\ H_2 \end{bmatrix} \sin x_1 + B\$(y, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (32)$$

其中  $B = C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\$(y, u) = \begin{bmatrix} 0.02y_1 + 0.02 \\ 0.03u_2 - 0.04 \end{bmatrix}$ ,

$$u = \begin{bmatrix} -0.2y_1 + 0.4 \\ -0.3y_2 + 2.4 \end{bmatrix}$$

相应参数和系统初值为

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1.2 \end{bmatrix}, \quad \hat{x}(0) = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.8 \end{bmatrix}, \quad H(t_f) = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix},$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.3 \end{bmatrix}, \quad Q(E, u) = 0$$

$H(t)$  的调节规律:  $\dot{H}(t) = -G^T E_N(\hat{x}, u) = -E \sin \hat{x}_1$  (33)

图 2 表示了故障诊断的结果. 其中图(a)表示观测器残差  $E(t)$  的变化情况, 可以看出观测器的输出较好地跟踪了原系统的输出; 图(b)表示  $G_1(t)$  的自适应变化规律; 图(c)和图(d)分别表示两个故障的变化情况和故障诊断的结果, 这些图表明了本文的

方法能有效地诊断出故障的大小。

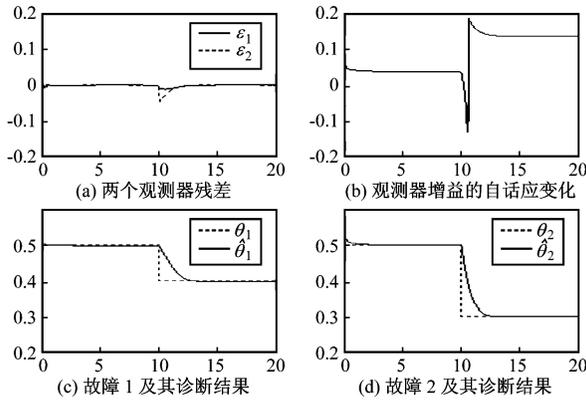


图2 故障诊断结果

Fig. 2 The results of fault diagnosis

下面进行容错控制的仿真. 故障出现前的系统表示如下

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \begin{bmatrix} -x_{11} - x_{12} - 0.5x_{11}^3 \\ \sin x_{11} - x_{12} - x_{12}^3 \end{bmatrix} + u_1 + BH \sin x_{11} + B\phi(y_1, u_1) \\ y_1 = Cx_1 \end{cases} \quad (34)$$

相应参数表示同上文, 系统输入为

$$u_1 = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2y_{11} + 0.4 \\ -0.3y_{12} + 2.4 \end{bmatrix}$$

控制器重组后系统表示如下

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = \begin{bmatrix} -x_{21} - x_{22} - 0.5x_{21}^3 \\ \sin x_{21} - x_{22} - x_{22}^3 \end{bmatrix} + u_2 + BH \sin x_{21} + B\phi(y_2, u_2) \\ y_2 = Cx_2 \end{cases} \quad (35)$$

根据前文的结果计算得

$$u_2 = u_1 - L_1(t)E_1 - L_2(t)E_2 \quad (36)$$

图3表示了容错控制的结果. 其中图(a)和图(b)分别表示两个输出在无故障时和进行容错控制后的变化情况; 图(c)和图(d)分别表示两个原始输入的情况和容错控制后新输入的变化情况. 这些图表明在故障诊断后采用容错控制, 系统的输出可以较好地跟踪无故障时系统的输出情况, 达到了容错控制的目的.

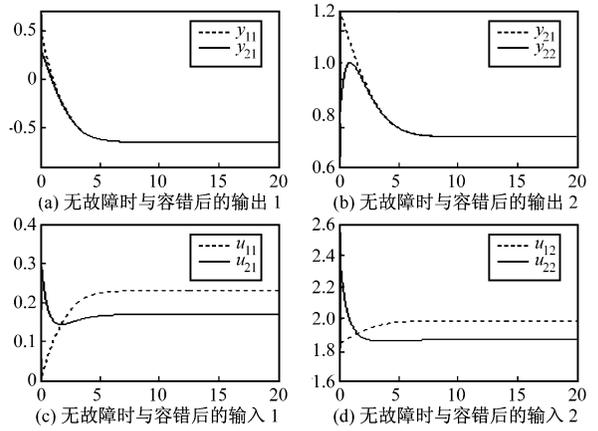


图3 容错控制的结果

Fig. 3 The results of fault-tolerant control.

### 5 结论

本文对具有线性输出结构的非线性系统提出了基于观测器设计的故障诊断方法,  $G(t)$  和  $\hat{H}(t)$  的自适应调节规律保证了李亚普诺夫函数的一阶导数为负, 实现了残差信号的收敛. 在容错控制部分, 通过控制器重组使系统在故障的情况下跟踪原来的输出, 提高了系统的可靠性.

### 参考文献:

- [1] Chen J, Patton R J, Zhang H Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters [J]. International Journal of Control, 1996, 63(1): 85- 105.
- [2] 张小松, 陈文楷. 电厂水汽循环系统模糊神经网络故障诊断[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(1): 117- 120.
- [3] 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. 279- 298.
- [4] Zhang X, Parisini T, Polycarpou M M. Integrated design of fault diagnosis and accommodation schemes for a class of nonlinear systems [A]. Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control [C]. Orlando, FL, 2001. 1448- 1453.
- [5] Kabore P, Wang H. Design of fault diagnosis filters and fault tolerant control for a class of nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(11): 1805- 1809.
- [6] Shen L, Wang H. Adaptive observer design for general nonlinear systems with linear output structure [A]. The Fourth International Conference on Control and Automation [C]. Montreal, Canada, 2003. 48- 52.

( : )