第 23 卷第 6 期　　控 制 理 论 与 应 用　　Vol. 23 No. 6
2006 年 12 月　　Control Theory & Applications　　Dec. 2006

文章编号: 1000−8152(2006)06−0861−06

一类非线性系统的输出反馈容错控制

王　敏, 周东华, 陈茂银

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对一类非线性系统, 研究了故障情况下基于输出反馈的容错控制问题. 首先基于Zhang的自适应观测器和Lin的输出反馈控制律设计了正常系统的标称控制律, 分析了该控制律的性能, 并得到了故障发生后仍然采用该控制律时闭环系统状态有界的充分条件. 在此基础上, 设计了故障系统的容错控制律, 证明了若发生的故障满足前述的充分条件, 则故障系统在该容错控制律下稳定. 数值仿真表明了该方法的有效性.

关键词: 自适应观测器; 输出反馈; 容错控制

中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Output feedback fault-tolerant control of a class of nonlinear systems

WANG Min, ZHOU Dong-hua, CHEN Mao-yin

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An output feedback fault-tolerant control scheme is proposed for a class of nonlinear systems with unknown faults. Firstly, a nominal controller is designed by integrating Zhang's adaptive observer with Lin's output feedback controller. Under the nominal controller, the closed-loop system without faults is stable, and the closed-loop system with faults is bounded if a sufficient condition on the faults holds. Then, a fault-tolerant controller is designed for the faulty system. For faults satisfying the former sufficient condition, the faulty system under the fault-tolerant controller is proved stable. Finally, a numerical example is included to demonstrate the effectiveness.

Key words: adaptive observer; output feedback; fault-tolerant control

1 引言(Introduction)

现代化工程技术正朝着大规模、复杂化的方向发展, 一旦发生故障, 就可能造成很大的损失和人员伤亡. 容错控制就是在这种背景下诞生的. 容错控制的主要目标是当控制系统发生故障时, 系统仍然能够保持一定的性能. 到目前为止, 线性系统的容错控制技术已经基本发展成熟. 非线性系统的容错控制研究也取得了一些成果, 具体参见容错控制方面的综述[1~3].

现有的非线性系统容错控制方法中较多成果都假设了所有状态都可测的条件[4,5]. 实际工业过程中, 很多系统并不满足这一假设. 研究基于输出的容错控制器的设计是非常有必要的. 由于非线性系统并不满足分离原理, 这一问题非常困难, 目前这方面成果较少[6~8].

本文针对一类特殊的非线性系统, 分别设计了基于输出反馈的标称控制律和容错控制律, 分析了正常系统采用标称控制律时闭环系统的性能; 指出了故障发生后在标称控制律下闭环系统状态有界的充分条件; 针对满足该充分条件的故障, 证明了故障系统在所设计的容错控制律下的稳定性.

2 问题描述(Problem formulation)

考虑一类非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{\mathrm{o}}x(t) + g(x(t))u(t) + \psi(t)\theta, \\ y(t) = c_{\mathrm{o}}x(t). \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n, u(t)) \in \mathbb{R}^n, y(t) \in \mathbb{R}$和$\theta \in \mathbb{R}^p$ 分别是系统状态、输入、输出和故障参数;

$$A_{\mathrm{o}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix},$$

收稿日期: 2004−12−06; 收修改稿日期: 2006−04−11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574084, 60434020); 国家973资助项目(2002CB312200).

$$g(x)=\begin{bmatrix} g_1(x_1)\\ g_2(x_1,x_2)\\ \vdots\\ g_n(x_1,x_2,\cdots,x_n)\end{bmatrix},$$

$g:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}^{n\times n}$为光滑函数; $c_o=[1,0,\cdots,0]$; $\psi(t)\in\mathbb{R}^{n\times p}$为已知的时变矩阵, 故障$\theta$为未知常数, 未发生故障时$\theta=0$.

对系统(1)做如下假设:

i) 存在正定阵P使得$A_o^{\rm T}P+PA_o=-I$;

ii) $\|\psi(t)\|\leqslant\varPsi<\infty$;

iii) $g(x)$在D上满足局部Lipschitz条件, 其Lipschitz常数为L;

iv) $g(x)$在D上可逆.

注 1 $D\subset\mathbb{R}^n$是一个包含原点的紧集. $\|\cdot\|$为欧氏范数及其诱导范数.

记故障发生时刻为$T_{\rm f}$. 假定发生故障前未知参数的估计值$\hat{\theta}(t)$已经收敛到0附近, 即$\|\hat{\theta}(t)\|\leqslant\delta_{\rm d}$, $\delta_{\rm d}$是事先选定的阈值. 当$\|\hat{\theta}(t)\|>\delta_{\rm d}$时, 判断系统发生故障. 记检测出故障的时刻为$T_{\rm d}$. 获得故障信息后控制律重构的时刻记为容错时刻$T_{\rm r}$($T_{\rm f}<T_{\rm d}<T_{\rm r}$). 针对系统(1), 设计基于输出反馈的控制器

$$u(t)=\begin{cases}u_{\rm o}(t),\ 0\leqslant t<T_{\rm r},\\ u_{\rm r}(t),\ t\geqslant T_{\rm r},\end{cases}\tag{2}$$

使得

a) $0\leqslant t<T_{\rm f}$, 故障发生前系统稳定;

b) $T_{\rm f}\leqslant T_{\rm d}<T_{\rm r}$, 故障发生后系统状态有界;

c) $t\geqslant T_{\rm r}$, 控制律重构后$\|\bar{x}\|\leqslant\varepsilon$.

其中$\bar{x}\triangleq\lim\limits_{t\to\infty}x(t)$表示$t$充分大时的情况.

3 主要结论(Main results)

3.1 标称控制律的设计及其性能分析(Nominal controller and analysis of its performance)

本节将文[9]的自适应观测器和文[10]的输出反馈控制律相结合, 设计了系统(1)的标称控制律并分析了它的性能.

文[9]的自适应观测器形式如下:

$$\begin{aligned}\dot{\varUpsilon}(t)=&\rho(A_{\rm m}-K_{\rm o}c_{\rm o})\varUpsilon(t)+\rho\varLambda\psi(t)\varOmega,\\ \dot{\hat{\theta}}(t)=&\rho\varOmega\varGamma\varUpsilon^{\rm T}(t)c_{\rm o}^{\rm T}[y(t)-c_{\rm o}\hat{x}(t)],\\ \dot{\hat{x}}(t)=&A_{\rm m}\hat{x}(t)+K_{\rm o}\hat{x}(t)+g(\hat{x}(t))u(t)+\\ &\psi(t)\hat{\theta}+\rho\varLambda^{-1}K_{\rm o}(y(t)-c_{\rm o}\hat{x}(t))+\\ &\varLambda^{-1}\varUpsilon(t)\varGamma\varUpsilon^{\rm T}(t)c_{\rm o}^{\rm T}(y(t)-c_{\rm o}\hat{x}(t)).\end{aligned}\tag{3}$$

上述公式中的符号的含义同文[9]: $\hat{x},\hat{\theta}$分别表示状态x和故障参数θ的估计值; 常数$\rho>0$是该自适应观测器的设计参数;

$$K_{\rm o}=:\begin{bmatrix}0&1&\cdots&0\\ \vdots&\vdots&\ddots&0\\ 0&0&\cdots&1\\ -a_n&-a_{n-1}&\cdots&-a_1\end{bmatrix},$$

$$A_{\rm m}=A_{\rm o}-K_{\rm o},$$

$$\varLambda={\rm diag}(1,\rho^{-1},\cdots,\rho^{-(n-1)}),$$

$$\varOmega={\rm diag}(\rho^{q_1},\cdots,\rho^{q_p}).$$

选取非负整数$q_1,\cdots,q_p$使得$\varLambda\varPsi\varOmega$每一列中非零元素关于$\rho$的最高次幂都是零, 即使得$\varLambda\varPsi\varOmega$每一列中只含有$\rho$的负指数幂. 当$\rho$充分大时可得$\varUpsilon(t)$的上界与$\rho$独立. S满足方程$A_{\rm m}^{\rm T}S+SA_{\rm m}+S=c_{\rm o}^{\rm T}c_{\rm o}, K_{\rm o}=S^{-1}c_{\rm o}^{\rm T}/2$.

由文[9]可知, 如果式(3)中$\varUpsilon(t)$满足持续激励条件, 则该自适应观测器误差是指数收敛的. 记$\tilde{x}\triangleq\hat{x}(t)-x(t),\tilde{\theta}(t)\triangleq\hat{\theta}(t)-\theta$, 该自适应观测器估计误差可以写成

$$\begin{aligned}&\dot{\eta}(t)=\rho(A_{\rm m}-K_{\rm o}c_{\rm o})\eta(t)+\xi(t),\\ &\dot{\tilde{\vartheta}}=-\varGamma\varUpsilon^{\rm T}(t)c_{\rm o}^{\rm T}c_{\rm o}[\eta(t)+\varUpsilon(t)\tilde{\vartheta}(t)].\end{aligned}\tag{4}$$

其中:

$$\begin{aligned}&z(t)=\varLambda x(t),\ \hat{z}(t)=\varLambda\hat{x}(t),\ \tilde{z}(t)=\varLambda\tilde{x}(t),\\ &\tilde{\vartheta}(t)=\rho^{-1}\varOmega^{-1}\tilde{\theta}(t),\ \eta(t)=\tilde{z}-\varUpsilon(t)\tilde{\vartheta},\\ &\xi(t)=\varLambda[K_{\rm o}\varLambda^{-1}\hat{z}(t)-K_{\rm o}\varLambda^{-1}z(t)]+\\ &\qquad\varLambda[g(\varLambda^{-1}\hat{z}(t))-g(\varLambda^{-1}z(t))]u(t).\end{aligned}$$

当$0\leqslant t<T_{\rm r}$时, 设计标称控制律

$$u_{\rm o}(t)=\begin{bmatrix}-{\rm sgn}(\hat{x}^{\rm T}Pg_{.1})\min(|\hat{x}^{\rm T}Pg_{.1}|,\alpha)\\ \vdots\\ -{\rm sgn}(\hat{x}^{\rm T}Pg_{.n})\min(|\hat{x}^{\rm T}Pg_{.n}|,\alpha)\end{bmatrix}.\tag{5}$$

其中: $g_{.i}(x)(1\leqslant i\leqslant n)$是$g(x)$的第$i$列, 常数$\alpha>0$为设计参数, 正定矩阵$P$是假设i)中黎卡提方程的解.

引理 1[9] 如果$\varUpsilon(t)$满足持续激励条件, $F(t)$为方程

$$\begin{aligned}\dot{F}(t)=&[\varGamma\varUpsilon^{\rm T}(t)c_{\rm o}^{\rm T}c_{\rm o}\varUpsilon(t)]^{\rm T}F(t)+\\ &F(t)[\varGamma\varUpsilon^{\rm T}(t)c_{\rm o}^{\rm T}c_{\rm o}\varUpsilon(t)]-I\end{aligned}$$

的解, 那么存在正常数α_1和β_1, 使$F(t)$满足$\alpha_1 I\leqslant$

$F(t) \leqslant \beta_1 I$.

为了叙述方便, 定义一些集合如下:

$$D \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n \,|\, \|x\| \leqslant r\},$$
$$D_{\mathrm{c}} \triangleq \{x \in \mathbb{R}^n \,|\, x^{\mathrm{T}} P x \leqslant c\},$$
$$X_{\mathrm{D}} \triangleq \max_{c>0}\{D_{\mathrm{c}} \,|\, D_{\mathrm{c}} \subset D\},$$
$$V(t,\eta,\tilde{\vartheta}) \triangleq \eta^{\mathrm{T}}(t) S \eta(t) + \tilde{\vartheta}^{\mathrm{T}}(t) F(t) \tilde{\vartheta}(t),$$
$$\Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta},t) \triangleq X_{\mathrm{D}} \times \{V \leqslant d\}.$$

引理 2　考虑闭环系统(1)(3)(5), 如果假设i)～iv)满足, $\varUpsilon(t)$满足持续激励条件, 那么当故障参数θ满足式(6)时, 一定存在常数$\alpha > 0$和$d > 0$使得$\Delta(x,\zeta,\tilde{\vartheta},t)$是该闭环系统的正不变集合.

$$\|\theta\| \leqslant \frac{1}{2\|P\|\psi}\sqrt{\frac{c}{\lambda_{\max}(P)}}. \tag{6}$$

证　选取自适应观测器的设计参数$\rho > 1$. 由$\hat{x} = x + \varLambda^{-1}[\eta + \varUpsilon(t)\tilde{\vartheta}]$, 可得

$$\|\hat{x}\| \leqslant \|x\| + \rho^{n-1}[\|\eta\| + \|\varUpsilon(t)\|\|\tilde{\vartheta}\|] \leqslant$$
$$\sqrt{\frac{c}{\lambda_{\min}(P)}} + \rho^{n-1}[\sqrt{\frac{d}{\lambda_{\min}(S)}} + \|\varUpsilon(t)\|\sqrt{\frac{d}{\alpha_1}}].$$

选取适当的d, 使得下式成立:

$$\sqrt{\frac{c}{\lambda_{\min}(P)}} + \rho^{n-1}[\sqrt{\frac{d}{\lambda_{\min}(S)}} + \|\varUpsilon(t)\|\sqrt{\frac{d}{\alpha_1}}] \leqslant r.$$

从而当$(x,\eta,\tilde{\vartheta}) \in \Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta},t)$时, 有$\hat{x} \in D$.

I)　对所有的

$$(x,\eta,\tilde{\vartheta}) \in \{x \in \mathbb{R}^n : x^{\mathrm{T}} P x = c\} \times$$
$$\{\eta \in \mathbb{R}^n, \tilde{\vartheta} \in \mathbb{R}^p : V(t,\eta,\tilde{\vartheta}) \leqslant d\}, \tag{7}$$

根据假设i)可得

$$\frac{\mathrm{d}(x^{\mathrm{T}}(t) P x(t))}{\mathrm{d}t} \leqslant$$
$$-\|x(t)\|(\|x(t)\| - 2\|P\|\bar{g}_{X_{\mathrm{D}}}\sqrt{n}\alpha - 2\|P\|\varPsi\|\theta\|).$$

其中$\bar{g}_{X_{\mathrm{D}}} \triangleq \max_{x \in X_{\mathrm{D}}} \|g(t)\|$. 若故障参数$\theta$满足式(6), 则总可以找到一个$\alpha$使得$\dfrac{\mathrm{d}(x^{\mathrm{T}} P x)}{\mathrm{d}t} \leqslant 0$.

II)　对所有的

$$(x,\eta,\tilde{\vartheta}) \in \{x \in \mathbb{R}^n : x^{\mathrm{T}} P x \leqslant c\} \times$$
$$\{\eta \in \mathbb{R}^n, \tilde{\vartheta} \in \mathbb{R}^p : V(t,\eta,\tilde{\vartheta}) = d\}, \tag{8}$$

由假设iii)和u_{o}有界, 类似于文[9]的收敛性证明, 可得$\dot{V}(t) \leqslant 0$.

从I)和II)的证明过程可看出: 如果$(x(0),\eta(0),\tilde{\vartheta}(0)) \in \Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta},0)$, 那么在集合$\Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta},t)$的边界上, 系统运动都是指向其内部的. 从而有$(x(t),\eta(t),\tilde{\vartheta}(t)) \in \Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta},t)$.

证毕.

注 2　对于闭环非线性连续系统(1)(3)(5), 如果系统满足引理2的条件, 初值$(x(0),\eta(0),\tilde{\vartheta}(0)) \in \Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta},0)$, 则由引理2和集合$\Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta})$的有界性可得: 故障发生后, 系统的状态有界. 这实际上是故障发生后闭环系统状态有界的充分条件.

注 3　为了论文的完整性, 这里列出正不变集合的定义. 考虑系统$\dot{x} = f(x)$, 如果对所有的$x(0) \in M \Rightarrow x(t) \in M, \forall t > 0$, 则称集合$M$为正不变集合[11].

注 4　是自适应观测器(3)的设计参数. 它的设计方法详见文[9]. 笔者总是可以选择ρ使得$\rho > 1$成立. 不失一般性, 在本文中, 假设$\rho > 1$.

定理 1　若闭环系统(1)(3)(5)满足引理2的条件, 且初值$(x(0),\eta(0),\tilde{\vartheta}(0)) \in \Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta},0)$, 那么该闭环系统局部指数稳定, 其平衡点为$(x,\tilde{x}) = (0,0)$.

证　同文[9], 可证明自适应观测器误差$(\tilde{x},\tilde{\theta})$指数收敛到零. 只需要再证明$\hat{x}(t)$的收敛性. 发生故障前$\theta = 0, \tilde{\theta} = \hat{\theta}$. 考虑状态的估计值$\hat{x}(t)$.

$$h(t) =: \rho\varLambda^{-1}k_{\mathrm{o}}(y - c_{\mathrm{o}}\hat{x}) +$$
$$\varLambda^{-1}\varUpsilon(t)\varGamma\varUpsilon^{\mathrm{T}}(t)c_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}}[y - c_{\mathrm{o}}\hat{x}(t)].$$

注意到发生故障前, $\theta = 0, \tilde{\theta}(t) = \hat{\theta}(t)$. 由$\tilde{x}(t)$和$\tilde{\theta}(t)$指数收敛性, 假设ii)和$\varUpsilon(t)$有界可得$\exists M > 0, \beta > 0$使得

$$\|h(t) + \psi(t)\hat{\theta}\| \leqslant$$
$$\|\psi(t)\| \cdot \|\hat{\theta}\| + \|\rho\varLambda^{-1}k_{\mathrm{o}}c_{\mathrm{o}}\tilde{x}\| +$$
$$\|\varLambda^{-1}\varUpsilon(t)\varGamma\varUpsilon^{\mathrm{T}}(t)c_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}}c_{\mathrm{o}}\tilde{x}(t)\| \leqslant M\mathrm{e}^{-\beta t}.$$

视$h(t)$和$\psi(t)\hat{\theta}$为下面系统的扰动:

$$\dot{\hat{x}} = A_{\mathrm{m}}\hat{x}(t) + K_{\mathrm{o}}\hat{x}(t) + g(\hat{x}(t))u(t).$$

由该系统的指数收敛性, 可以证明: 当$t \to \infty$时, $x(t)$指数收敛到0, 从而由$\tilde{x} = \hat{x}(t) - x(t)$和$\hat{x}(t)$的指数收敛性可得$x(t)$指数收敛到0.

证毕.

3.2 容错控制律的设计(Fault tolerant controller)

容错时刻$T_{\rm r}$是待定参数, 设计容错控制律为

$$u_{\rm r}=-g(x(t))^{-1}\psi(t)\hat{\theta}(T_{\rm r}). \tag{9}$$

需选择合适的$T_{\rm r}$使得闭环系统满足控制目标c).

引理 1 假设系统满足引理2的条件, 且初值$(x(0),\eta(0),\tilde{\vartheta}(0))\in\varDelta(x,\eta,\tilde{\vartheta},0)$, 那么一定存在时刻$T_{\rm r}$使得控制律重构以后, 闭环系统(1)(3)(9)的状态满足

$$(x(t),\eta(t),\tilde{\vartheta}(t))\in\varDelta(x,\eta,\tilde{\vartheta},t),\ \forall t\geqslant T_{\rm r}.$$

证 故障发生后, 控制律重构之前, 自适应观测器仍然收敛, 有

$$V(t,\eta,\tilde{\vartheta})\leqslant$$
$$\mathrm{e}^{-\alpha(t-T_{\rm f})}V(T_{\rm f},\eta(T_{\rm f}),\tilde{\vartheta}(T_{\rm f}))\leqslant \mathrm{e}^{-\alpha(t-T_{\rm r})}d.$$

选择$d_\varepsilon\overset{\Delta}{=}\mathrm{e}^{-\alpha(t-T_{\rm f})}d,\rho\geqslant 1$, 可得

$$\|\hat{x}(t)-x(t)\|\leqslant\rho^{n-1}[\|\eta\|+\|\varUpsilon(t)\|\|\tilde{\vartheta}\|]\leqslant$$
$$\rho^{n-1}[\sqrt{\frac{d_\varepsilon}{\lambda_{\min}(S)}}+\|\varUpsilon(t)\|\sqrt{\frac{d_\varepsilon}{\alpha_1}}].$$

记

$$\underline{g}_{\rm D}\overset{\Delta}{=}\min_{x\in{\rm D}}\|g(x)\|,\ q\overset{\Delta}{=}\max(q_1,q_2,\cdots,q_p),$$
$$\varepsilon_x\overset{\Delta}{=}\rho^{n-1}[\sqrt{\frac{d_\varepsilon}{\lambda_{\min}(S)}}+\|\varUpsilon(t)\|\sqrt{\frac{d_\varepsilon}{\alpha_1}}],$$
$$\varepsilon_\theta\overset{\Delta}{=}\rho^{n-1}\sqrt{\frac{d_\varepsilon}{\alpha_1}},$$

有下式成立:

$$\|\hat{\theta}(t)-\theta(t)\|\leqslant\rho\varOmega\|\tilde{\vartheta}\|\leqslant\rho^{q+1}\sqrt{\frac{d_\varepsilon}{\alpha_1}}.$$

I) 在边界式(7)上, 与引理2证明类似, 可得

$$\frac{\mathrm{d}(x^{\rm T}Px)}{\mathrm{d}t}\leqslant$$
$$-\|x\|[\|x\|-2\|P\|L\|g^{-1}(\hat{x})\|\|\psi(t)\|\cdot\|\hat{\theta}(T_{\rm r})\|\varepsilon_x-$$
$$2\|P\|\|\psi(t)\|\varepsilon_\theta].$$

控制律重构之前, 由$\tilde{\theta}(t)$的指数收敛性和θ的有界性, 可知$\|\hat{\theta}(T_{\rm r})\|$有界. 只要误差$\varepsilon_x,\varepsilon_\theta$足够小, 使得

$$2\|P\|[L\underline{g}_{\rm D}^{-1}\|\psi(t)\|\cdot\|\hat{\theta}(T_{\rm r})\|\varepsilon_x+\|\psi(t)\|\varepsilon_\theta]\leqslant$$
$$\sqrt{\frac{c}{\lambda_{\max}(P)}}$$

成立, 则$\frac{\mathrm{d}(x^{\rm T}Px)}{\mathrm{d}t}\leqslant 0$成立.

II) 另一方面, 在边界式(8)上, 同引理2的证明可得$\dot{V}\leqslant 0$.

从而若$(x(T_{\rm r}),\eta(T_{\rm r}),\tilde{\vartheta}(T_{\rm r}))\in\varDelta(x,\eta,\tilde{\vartheta},T_{\rm r})$, 在边界上式(7)和(8)运动曲线都指向集合$\varDelta(x,\eta,\tilde{\vartheta},t)$内部, 可知该命题成立. 证毕.

定理 2 假设系统满足引理2的条件, 且初值$(x(0),\eta(0),\tilde{\vartheta}(0))\in\varDelta(x,\eta,\tilde{\vartheta},0)$, 那么一定存在时刻$T_{\rm r}$使得控制律重构以后, 闭环系统(1)(3)(9)的状态满足$\|\bar{x}\|\leqslant\varepsilon$.

证 由引理3可知

$$(x(t),\eta(t),\tilde{\vartheta}(t))\in\varDelta(x,\eta,\tilde{\vartheta},t),\ \forall t\geqslant T_{\rm r}.$$

容错控制律(9)满足

$$\|u_{\rm r}\|\leqslant\|g^{-1}(\hat{x})\|\|\psi(t)\|\cdot\|\hat{\theta}(T_{\rm r})\|\leqslant\varPsi\underline{g}_{\rm D}^{-1}\|\hat{\theta}(T_{\rm r})\|.$$

由$\|\hat{\theta}(T_{\rm r})\|$有界可知$\|u_{\rm r}\|$有界. 由文[9]中证明可知, 自适应观测器(3)仍然指数收敛. 考虑状态估计器方程

$$\dot{\hat{x}}(t)=A\hat{x}(t)+\psi(t)(\hat{\theta}(t)-\hat{\theta}(T_{\rm r}))+h(t). \tag{10}$$

视$h(t)+\psi(t)(\hat{\theta}(t)-\hat{\theta}(T_{\rm r}))$为系统(10)的输入. 由估计误差的收敛性可知存在h_0,β_0使得

$$\|h(t)+\psi(t)(\hat{\theta}(t)-\hat{\theta}(T_{\rm r}))\|\leqslant$$
$$h_0\mathrm{e}^{-\beta_0 t}+\|\psi(t)\|\|(\hat{\theta}(t)-\theta)+(\theta-\hat{\theta}(T_{\rm r}))\|$$

成立.

由A稳定和式(10)可得

$$\|\lim_{t\to\infty}\hat{x}(t)\|\leqslant\varPsi\|\theta-\hat{\theta}(T_{\rm r})\|/\lambda_{\rm A}.$$

式中$\lambda_{\rm A}$=$1/\|A^{-1}\|$. 由上式和$\lim\limits_{t\to\infty}\tilde{x}(t)$=$\lim\limits_{t\to\infty}\hat{x}(t)-\lim\limits_{t\to\infty}x(t)=0$可得

$$\|\bar{x}\|=\|\lim_{t\to\infty}x(t)\|\leqslant\varPsi\|\theta-\hat{\theta}(T_{\rm r})\|/\lambda_{\rm A}.$$

选择$T_{\rm r}$使得$\|\theta-\hat{\theta}(T_{\rm r})\|$足够小, 从而使得$\varPsi\|\theta-\hat{\theta}(T_{\rm r})\|/\lambda_{\rm A}\leqslant\varepsilon$成立. 证毕.

3.3 容错时刻的选取(Choice of controller switching time)

定义 1 定义系统故障发生时刻$T_{\rm f}$到容错时刻$T_{\rm r}$的时间为容错时间.

从实际考虑, 希望容错时间越短越好, 但从定

理2的证明中可以看出, 容错时间和容错的性能这两者是一对矛盾. 要求容错的快速性, 容错控制性能就有可能下降. 要求容错控制性能, 就必须要有足够的辨识时间. 下面给出T_r的一个保守的下界.

注 5 在满足引理2的条件下, 初值$(x(0),\eta(0),\tilde{\vartheta}(0))\in\Delta(x,\eta,\tilde{\vartheta},0)$, 由定理2可得容错时间满足$T_r\geqslant T_f+\frac{1}{\alpha d}\ln\frac{1}{\alpha_1}(\frac{\rho^{q+1}\Psi}{\lambda_A\varepsilon})^2$.

4 仿真(Simulation results)

参考文[9], 考虑如下的双线性系统

$$\dot{x}=\begin{bmatrix}0&1\\-2&-4\end{bmatrix}x+\begin{bmatrix}1&0\\0&-4x_1-4x_2+8\end{bmatrix}u+\begin{bmatrix}\sin(2t)+\cos(20t)&0\\\sin(5t)+\cos(16t)&\sin(3t)+\cos(27t)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta_1\\\theta_2\end{bmatrix},$$
$$y=[1\ \ 0]x.$$

系统初值$x(0)=[1,1]^{\mathrm{T}}$. t=10 s时发生故障: $\theta_1=1.5,\theta_2=1$. 设计控制器使得系统满足条件a) b) c), 指标$\varepsilon=0.02$.

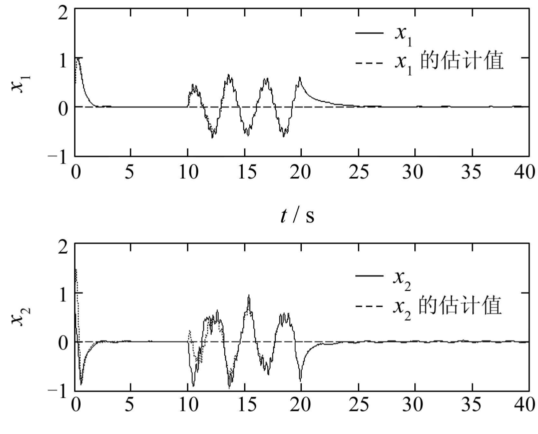

图 1 状态x_1,x_2及其估计值的曲线

Fig. 1 State x_1,x_2 and their estimation

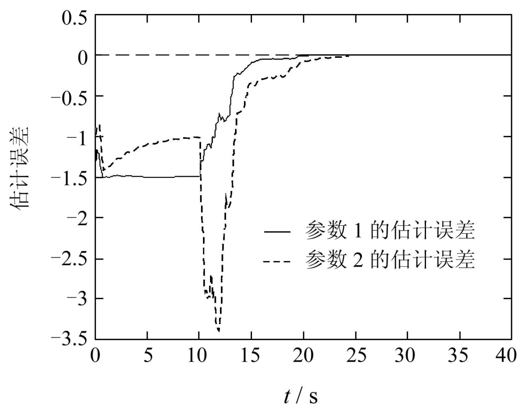

图 2 参数估计误差曲线

Fig. 2 Estimation error of fault parameters

故障发生前, 采用控制律(5), 控制器参数$\alpha=0.5$, t=20 s时进行控制律重构, 控制律形式如(9). 自适应观测器参数$\rho=7,\Gamma=\mathrm{diag}(3,0.5),\Omega=\mathrm{diag}(1,7),K_o=[1,0.5]^{\mathrm{T}},S=\begin{bmatrix}1&-1\\-1&2\end{bmatrix}$. 自适应观测器初始值$\hat{x}(0)=[0,0]^{\mathrm{T}},\hat{\theta}(0)=[0,0]^{\mathrm{T}}$.

图1是状态x_1和x_2及其估计值的曲线, 图2是故障参数的估计误差曲线. 从图1可以看出控制律重构后系统状态收敛到零附近, 从而验证了本文方法的有效性.

5 结论(Conclusion)

本文针对一类特殊的非线性系统, 利用现有的自适应观测器技术设计了一种容错控制策略, 并从理论上证明了该方法的有效性.

本文的容错控制律设计是一种“分离”设计的思想: 当故障估计足够好之后, 再进行控制律重构. 这样的策略可以避免联合分析的困难.

由于本文考虑的对象较为特殊, 如何将这种方法推广到更广的系统, 将是笔者继续研究的方向.

参考文献(References):

[1] PRTTON R J. Fault tolerant control systems: the 1997 situation[C] // *Proc of IFAC/IMACs Symposium on Fault Detection and Safety for Technical Process*. [S.l.]: [s.n.], 1997: 1033 – 1055.

[2] 周东华, DING X. 容错控制理论及其应用[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 65 – 70.
(ZHOU Donghua, DING X. Theory and applications of fault tolerant control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(6): 65 – 70.)

[3] 王敏, 臧曙, 周东华. 非线性动态系统的容错控制[J]. 计算技术与自动化, 2004, 23(4): 7 – 10.
(WANG Min, ZANG Shu, ZHOU Donghua. Fault tolerant control of nonlinear dynamic systems[J]. *Computing Technology and Automation*, 2004, 23(4): 7 – 10.)

[4] DIAO Y X, PASSINO M K. Intelligent fault-tolerant control using adaptive and learning methods[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(8): 801 – 817.

[5] POLYCARPOU M M. Fault accommodation of a class of multivariable nonlinear dynamical systems using a learning approach[J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 46(5): 736 – 742.

[6] MARINO R, TOMEI P. Observer-based adaptive stabilization for a class of nonlinear systems[J]. *Automatica*, 1992, 28(4): 787 – 793.

[7] BOSKOVIC J D, LI S M, RAMAN K M. Intelligent control of spacecraft in the presence of actuator failures[C]// *Proc of the 38th Conference on Decision & Control*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1999: 4472 – 4477.

[8] KABORE P, WANG H. Design of fault diagnosis filters and fault tolerant control for a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(11): 1805 – 1810.

[9] ZHANG Q H, XU A P, BESANCON G. An efficient nonlinear adaptive observer with global convergence[C]// *Proc of the 13th IFAC Symposium on System Identification*. Rotterdam, Netherlands: IFAC / IFORS Press, 2003: 1737 – 1742.

[10] LIN W. Input saturation and global stabilization of nonlinear systems via state and output feedback[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1995, 40(4): 776 – 782.

[11] KHAIL H K. *Nonlinear Systems*[M]. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2002.

作者简介:

王 敏 (1980—), 女, 2002年在天津大学获学士学位, 现为清华大学自动化系博士研究生, 研究方向为非线性系统容错控制, E-mail: wang-m02@mails.tsinghua.edu.cn;

周东华 (1963—), 男, 博士生导师, 1990年在上海交通大学获博士学位, 主要研究方向为故障诊断、预报和容错控制;

陈茂银 (1975—), 男, 2003年在上海交通大学获博士学位, 现为清华大学自动化系讲师, 主要研究方向为故障诊断、容错控制和混沌系统控制.

中国自动化学会第二十二届青年学术年会(YAC'2007)征文通知

中国自动化学会第二十二届青年学术年会(YAC'2007)将于2007年8月初在山水甲天下的桂林召开，本次会议由中国自动化学会、中国自动化学会青年工作委员会举办，桂林空军学院承办，热烈欢迎全国青年科技工作者及学生积极参加. 会议设有优秀论文奖和优秀应用论文奖，会议还将评选有一定成就和愿意为青年委员会工作的年青委员数名.

征文范围

1) 线性与非线性系统控制; 2) 自适应控制和预测控制; 3) H_∞控制和鲁棒控制; 4) 智能控制、模糊控制; 5) 系统辨识与建模; 6) 故障诊断与容错控制; 7) 神经网络及控制; 8) 自动化仪表与过程控制; 9) 软件工程、并行处理; 10) 人工智能与专家系统; 11) 计算机视觉、图象处理与模式识别; 12) 机器人与机器人控制; 13) 大系统; 14) 电力系统及其自动化; 15) 电机驱动及运动控制; 16) 传感器与检测技术; 17) 离散事件动态系统; 18) 计算机集成制造系统; 19) 计算机软硬件技术及其应用; 20) 系统工程理论、方法及其应用; 21) 自动化指挥系统; 22) 数据融合与软测量; 23) 单片机控制及应用技术; 24) 火力指挥与控制系统; 25) 企业改革、发展策略及管理决策; 26) 工业过程控制与生产管理; 27) 图书馆自动化与数字图书馆技术; 28) 其他.

征文要求

1) 录用论文将以国家中文核心期刊专集或者由出版社出版论文集(《自动化理论、技术及应用》)等形式刊登出版; 2) 论文应具有一定的学术或实用价值, 未在国内外学术期刊或会议发表过; 3) 论文第一作者的年龄不超过45岁; 4) 来稿中英文皆可, 请用word2000以上版本文稿编排, 版面格式见《自动化学报》, A4纸打印, 一式三份邮寄或用E-mail发出(地址见下文); 5) 投稿时请注明文章所属的方向(见征文范围); 6) 请说明联系作者的详细通讯地址、电话及电子邮箱; 7) 因版权或保密等引起的纠纷或责任, 作者自负.

重要日期

截稿日期: 2007年5月31日; 录用日期: 2007年6月30日以前发录用与否通知.

投稿地址

广西桂林空军学院火力与指挥控制系YAC'2007组委会 倪国旗

邮编: 541003

电话: 0773-2084109 或13977383512

E-mail: yac2007@163.com 或yac2007@sina.com