

## 非线性时滞系统的观测器设计

张宪福, 程兆林

(山东大学 数学与系统科学学院, 山东 济南 250100)

**摘要:** 研究了一类满足 Lipschitz 条件的下三角非线性时滞系统的观测器设计问题. 通过构造适当的 Lyapunov 泛函, 用递推法给出了使得误差动态系统渐近趋于零的非线性时滞系统的状态观测器.

**关键词:** 非线性时滞系统; 状态观测器; Lipschitz 条件; 递推法

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Observer design for nonlinear time-delay systems

ZHANG Xian-fu, CHENG Zhao-lin

(School of Mathematics and System Science, Shandong University, Jinan Shandong 250100, China)

**Abstract:** The problem of observer design for a class of lower triangular nonlinear time-delay systems satisfying Lipschitz condition was considered. By constructing the appropriate Lyapunov-Krasovskii functional and using recursive method, the state observer making the observer error asymptotically convergence to zero is constructed.

**Key words:** nonlinear time-delay systems; state observer; Lipschitz condition; recursive method

### 1 引言 (Introduction)

近年来, 非线性系统的观测器设计一直是控制理论和应用领域科研的一个重要课题. 文献[1]研究了一类下三角非线性系统的观测器设计问题. 在近期的文献[2]中, 用迭代方法给出了一类下三角非线性系统的观测器设计方法. 文献[3]基于误差动态系统的无源性给出了非线性系统的一个观测器设计方法.

对于非线性时滞系统的稳定性和观测器设计的研究目前还不多. 文献[4]着重研究了控制 Lyapunov-Razumikhin 泛函及其在非线性时滞系统鲁棒控制设计中的应用, 文献[5]研究了在输出中带有时滞的非线性系统的状态观测器设计问题. 本文中用递推方法给出了一类状态带有时滞的非线性系统观测器的设计方法.

### 2 问题描述和准备 (Problem statement and preparation)

考虑系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = x_{i+1}(t) + g_i(x_{[i]}(t), x_{[i]}(t-d), u(t)), \\ \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \dot{x}_n(t) = g_n(x_{[n]}(t), x_{[n]}(t-d), u(t)), \\ y = x_1(t), \end{cases}$$

(1)

式中,  $d > 0$  是时滞常数,  $x = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ ,  $u \in \mathbb{R}^m$ ,  $y \in \mathbb{R}$  分别是系统的状态、输入和输出,  $x_{[i]}(t) = [x_1(t), \dots, x_i(t)]^T$ . 在下文中除非特别说明, 一般用  $x_i, u, z_i, e_i$  和  $\xi_i$  表示  $x_i(t), u(t), z_i(t), e_i(t)$  和  $\xi_i(t)$ . 并且假设非线性函数  $g_i (i = 1, 2, \dots, n)$  满足以下一致 Lipschitz 条件:

**假设 1** 存在常数  $L \geq 0$ , 对任意  $[z_1, \dots, z_i]^T$  和  $[x_1, \dots, x_i]^T, [\tilde{z}_1, \dots, \tilde{z}_i]^T$  和  $[\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_i]^T$ , 有

$$|g_i(z_1, \dots, z_i, \tilde{z}_1, \dots, \tilde{z}_i, u) - g_i(x_1, \dots, x_i, \tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_i, u)| \leq$$

$$L \left( \sum_{j=1}^i |z_j - x_j| + \sum_{j=1}^i |\tilde{z}_j - \tilde{x}_j| \right). \quad (2)$$

本文的目的是设计系统(1)的状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{z}_i = z_{i+1} + g_i(z_{[i]}, z_{[i]}(t-d), u) + l_i(z_1 - y), \\ \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \dot{z}_n = g_n(z_{[n]}, z_{[n]}(t-d) + l_n(z_1 - y), \end{cases} \quad (3)$$

这里的  $l_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为待定常数,  $z = [z_1, \dots, z_n]^T$  是观测器的状态,  $z_{[i]} = [z_1, \dots, z_i]^T$ . 设  $e_i = z_i - x_i$ , 并记  $e = [e_1, \dots, e_n]^T$ , 则由式(1), (3)得误差动态系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_i = e_{i+1} + G_i(e_{[i]}, e_{[i]}(t-d), x_{[i]}, \\ \quad x_{[i]}(t-d), u) + l_i e_1, i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \dot{e}_n = G_n(e_{[n]}, e_{[n]}(t-d), x_{[n]}, \\ \quad x_{[n]}(t-d), u) + l_n e_1, \end{cases} \quad (4)$$

这里

$$\begin{aligned} G_i(e_{[i]}, e_{[i]}(t-d), x_{[i]}, x_{[i]}(t-d), u) = \\ g_i(e_{[i]} + x_{[i]}, e_{[i]}(t-d) + \\ x_{[i]}(t-d), u) - g_i(x_{[i]}, x_{[i]}(t-d), u), \\ e_{[i]} = [e_1, \dots, e_i]^T. \end{aligned}$$

显然有  $G_i(0, 0, x_{[i]}, x_{[i]}(t-d), u) = 0$ .

下面用  $n$  步递推法设计式(4)中的  $l_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), 使得  $e$  渐近趋于 0, 为此, 参照式(4)引入如下辅助系统:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_2 + G_1(\epsilon_{[1]}, \epsilon_{[1]}(t-d), \\ \quad x_{[1]}, x_{[1]}(t-d), u) + l_1^* \nu, \\ \dot{\epsilon}_2 = \epsilon_3 + G_2(\epsilon_{[2]}, \epsilon_{[2]}(t-d), \\ \quad x_{[2]}, x_{[2]}(t-d), u) + l_2^* \nu, \\ \dots \\ \dot{\epsilon}_{n-1} = \epsilon_n + G_{n-1}(\epsilon_{[n-1]}, \epsilon_{[n-1]}(t-d), \\ \quad x_{[n-1]}, x_{[n-1]}(t-d), u) + l_{n-1}^* \nu, \\ \dot{\epsilon}_n = G_n(\epsilon_{[n]} \otimes, \epsilon_{[n]}(t-d), \\ \quad x_{[n]}, x_{[n]}(t-d), u) + l_n^* \nu, \end{cases} \quad (5)$$

这里

$$\begin{aligned} G_i(\epsilon_{[i]}, \epsilon_{[i]}(t-d), x_{[i]}, x_{[i]}(t-d), u) = \\ g_i(\epsilon_{[i]} + x_{[i]}, \epsilon_{[i]}(t-d) + \\ x_{[i]}(t-d), u) - g_i(x_{[i]}, x_{[i]}(t-d), u), \\ \epsilon_{[i]} = [\epsilon_1, \dots, \epsilon_i]^T. \end{aligned}$$

为叙述方便, 记  $\epsilon_{[i,j]} = [\epsilon_i, \dots, \epsilon_j]^T$  ( $i \leq j$ ).

第一步从系统(5)最下面的一个子动态系统开始, 取  $\epsilon_{[n-1]} \equiv 0$ , 并把  $\nu$  看成输入, 确定常数  $l_n^*$  和  $\nu$ , 使得  $\epsilon_n \rightarrow 0$ ; 第二步考虑系统(5)最下面的两个子动态系统, 取  $\epsilon_{[n-2]} \equiv 0$ , 仍把  $\nu$  看成输入, 重新确定常数  $l_{n-1}^*$  和关于  $\epsilon_{n-1}$  的  $\nu$ , 使得  $\epsilon_{n-1} \rightarrow 0$ ,  $\epsilon_n \rightarrow 0$ ; 依次做下去, 第  $n$  步考虑系统(5)这个整体系统, 再确定常数  $l_1^*, \dots, l_n^*$  和关于  $\epsilon_1$  的  $\nu$ , 使得  $\epsilon_{[n]} \rightarrow 0$ . 比较系统(4)和(5), 可以确定使得系统(4)中  $e \rightarrow 0$  的  $l_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ).

下面将给出一个引理. 考虑系统(5)中的最后  $(m+1)$  行, 令  $\epsilon_{[n-m-1]} \equiv 0$ ,  $l_i^* = k_i$  ( $k_i$  为给定常数,  $i = n-m+1, \dots, n$ ),  $l_{n-m}^* = 1$ . 并记  $k_{[n-m+1,i]}$

$= [k_{n-m+1}, \dots, k_i]^T$ ,  $i = n-m+1, \dots, n$ , 则有

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_{n-m} = \epsilon_{n-m+1} + \tilde{G}_{n-m}^{(\epsilon)} + \nu, \\ \dot{\epsilon}_{[n-m+1,n]} = \begin{pmatrix} 0 & I_{m-1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \epsilon_{[n-m+1,n]} + \\ \quad \tilde{G}_{[n-m+1,n]}^{(\epsilon)} + k_{[n-m+1,n]} \nu, \end{cases} \quad (6)$$

这里

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{[n-m+1,n]}^{(\epsilon)} &= [\tilde{G}_{n-m+1}^{(\epsilon)}, \dots, \tilde{G}_n^{(\epsilon)}]^T, \\ \tilde{G}_i^{(\epsilon)} &= G_i(0, \epsilon_{[n-m,i]}, 0, \epsilon_{[n-m,i]}(t-d), x_{[i]}, \\ &\quad x_{[i]}(t-d), u), i = n-m, \dots, n. \end{aligned}$$

显然, 当把  $\nu$  形式地看成反馈输入时, 式(6)有零解. 以下考察式(6)的零解的渐近稳定性. 采用所谓“零动态法”, 即引入式(6)的输出

$$\tilde{y} = \epsilon_{n-m}, \quad (7)$$

证明若零动态下的系统方程零解渐近稳定, 则可设计关于  $\epsilon_{n-m}$  的  $\nu$ , 使得式(6)零解渐近稳定. 显然, 在输出(7)下, 式(6)的零动态方程为

$$\dot{\epsilon}_{[n-m+1,n]} = M \epsilon_{[n-m+1,n]} + \bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\epsilon)}. \quad (8)$$

这里  $\bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\epsilon)}$  是式(6)中  $\tilde{G}_{[n-m+1,n]}^{(\epsilon)}$  取  $\epsilon_{n-m} \equiv 0$  时的值,

$$M = \begin{pmatrix} 0 & I_{m-1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} - k_{[n-m+1,n]}(1, 0, \dots, 0).$$

**引理 1** 若存在对称常数矩阵  $P > 0$ ,  $Q > 0$  和  $R > 0$ , 使得

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \epsilon_{[n-m+1,n]}^T P \epsilon_{[n-m+1,n]} + \\ &\quad \int_{t-d}^t \epsilon_{[n-m+1,n]}^T(\tau) Q \epsilon_{[n-m+1,n]}(\tau) d\tau \end{aligned}$$

满足

$$\dot{V}|_{(8)} \leq -\epsilon_{[n-m+1,n]}^T R \epsilon_{[n-m+1,n]},$$

则存在对称常数矩阵  $\tilde{P} > 0$ ,  $\tilde{Q} > 0$  和  $\tilde{R} > 0$  以及  $\nu$   $= -b_{n-m} \epsilon_{n-m}$  ( $b_{n-m}$  是常数)使得

$$\begin{aligned} \tilde{V} &= \frac{1}{2} \epsilon_{[n-m,n]}^T \tilde{P} \epsilon_{[n-m,n]} + \\ &\quad \int_{t-d}^t \epsilon_{[n-m,n]}^T(\tau) \tilde{Q} \epsilon_{[n-m,n]}(\tau) d\tau \end{aligned}$$

满足

$$\dot{\tilde{V}}|_{(6)} \leq -\epsilon_{[n-m,n]}^T \tilde{R} \epsilon_{[n-m,n]}.$$

**证** 引入线性满秩坐标变换:

$$\xi_{[n-m,n]} = T \epsilon_{[n-m,n]}, \quad (9)$$

这里

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -k_{[n-m+1,n]} & I_m \end{pmatrix}.$$

将系统(6)等价变换为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{n-m} = \xi_{n-m+1} + k_{n-m+1}\xi_{n-m} + \bar{G}_{n-m}^{(\xi)} + \nu, \\ \dot{\xi}_{[n-m+1,n]} = Mk_{[n-m+1,n]}\xi_{n-m} + M\xi_{[n-m+1,n]} + \\ \quad \bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\xi)} - k_{[n-m+1,n]}\bar{G}_{n-m}^{(\xi)}, \end{cases} \quad (10)$$

这里

$$\begin{aligned} \bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\xi)} &= [\bar{G}_{n-m+1}^{(\xi)}, \dots, \bar{G}_n^{(\xi)}]^T, \\ \bar{G}_i^{(\xi)} &= G_i(0, \xi_{n-m}, \xi_{[n-m+1,i]} + k_{[n-m+1,i]}\xi_{n-m}, \\ &\quad 0, \xi_{n-m}(t-d), \xi_{[n-m+1,i]}(t-d) + \\ &\quad k_{[n-m+1,i]}\xi_{n-m}(t-d), u), i = n-m, \dots, n. \end{aligned}$$

若在系统(10)中取  $\xi_{n-m} \equiv 0$ , 则有

$$\dot{\xi}_{[n-m+1,n]} = M\xi_{[n-m+1,n]} + \bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\xi)}, \quad (11)$$

这里的  $\bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\xi)}$  与式(8)中  $\bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\xi)}$  中的  $\varepsilon$  换成  $\xi$  得到的列向量是完全一样的.

取

$$\begin{aligned} \bar{V}_1 &= \frac{1}{2} \xi_{[n-m+1,n]}^T P \xi_{[n-m+1,n]} + \\ &\quad \int_{t-d}^t \xi_{[n-m+1,n]}^T(\tau) Q \xi_{[n-m+1,n]}(\tau) d\tau + \frac{1}{2} \xi_{n-m}^2. \end{aligned}$$

注意到引理的条件以及系统(8)和式(11)的相同形式, 可得出

$$\begin{aligned} \dot{\bar{V}}_1|_{(10)} &\leq -\xi_{[n-m+1,n]}^T R \xi_{[n-m+1,n]} + \\ &\quad \xi_{[n-m+1,n]}^T P (Mk_{[n-m+1,n]}\xi_{n-m} - \\ &\quad k_{[n-m+1,n]}\bar{G}_{n-m}^{(\xi)} + \\ &\quad (\bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\xi)} - \bar{G}_{[n-m+1,n]}^{(\xi)})) + \\ &\quad \xi_{n-m}(\xi_{n-m+1} + k_{n-m+1}\xi_{n-m} + \bar{G}_{n-m}^{(\xi)} + \nu). \end{aligned}$$

记  $R$  的最小特征根为  $\lambda_{\min}$ , 注意到  $g_j$  是 Lipschitz 的, 故存在仅依赖于  $k_{[n-m+1,n]}$ ,  $L$  和矩阵  $P$  的常数  $c_j > 0, \tilde{c}_j > 0, (j = n-m, \dots, n)$  使下式成立:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{V}}_1|_{(10)} &\leq -\xi_{[n-m+1,n]}^T R \xi_{[n-m+1,n]} + \\ &\quad \sum_{j=n-m}^n c_j |\xi_j| |\xi_{n-m}| + \\ &\quad \sum_{j=n-m}^n \tilde{c}_j |\xi_j| |\xi_{n-m}(t-d)| + \xi_{n-m}\nu \leq \\ &\quad -\xi_{[n-m+1,n]}^T R \xi_{[n-m+1,n]} + \\ &\quad \left(\frac{\tilde{c}_{n-m}}{2} + c_{n-m} + \sum_{j=n-m+1}^n \frac{c_j^2}{\lambda_{\min}}\right) \xi_{n-m}^2 + \\ &\quad \left(\frac{\tilde{c}_{n-m}}{2} + \sum_{j=n-m+1}^n \frac{\tilde{c}_j^2}{\lambda_{\min}}\right) \xi_{n-m}^2(t-d) + \\ &\quad \sum_{j=n-m+1}^n \frac{\lambda_{\min}}{2} \xi_j^2 + \xi_{n-m}\nu. \end{aligned}$$

取

$$\begin{aligned} \bar{V}_2 &= \frac{1}{2} \xi_{[n-m,n]}^T \bar{P} \xi_{[n-m,n]} + \\ &\quad \int_{t-d}^t \xi_{[n-m,n]}^T(\tau) \bar{Q} \xi_{[n-m,n]}(\tau) d\tau, \\ \nu &= -b_{n-m}\xi_{n-m}, \end{aligned}$$

这里

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & P \end{pmatrix}, \\ \bar{Q} &= \begin{pmatrix} \frac{\tilde{c}_{n-m}}{2} + \sum_{j=n-m+1}^n \frac{\tilde{c}_j^2}{\lambda_{\min}} & 0 \\ 0 & Q \end{pmatrix}, \\ b_{n-m} &= 1 + \sum_{j=n-m+1}^n \frac{c_j^2 + \tilde{c}_j^2}{\lambda_{\min}} + \tilde{c}_{n-m} + c_{n-m}, \end{aligned}$$

于是有

$$\dot{\bar{V}}_2|_{(10)} \leq -\xi_{[n-m,n]}^T \bar{R} \xi_{[n-m,n]},$$

其中

$$\bar{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & R - \frac{\lambda_{\min}}{2} I \end{pmatrix},$$

易见  $\bar{R}$  是正定的.

取

$$\begin{aligned} \tilde{V} &= \frac{1}{2} \varepsilon_{[n-m,n]}^T \tilde{P} \varepsilon_{[n-m,n]} + \\ &\quad \int_{t-d}^t \varepsilon_{[n-m,n]}^T(\tau) \tilde{Q} \varepsilon_{[n-m,n]}(\tau) d\tau, \\ \nu &= -b_{n-m}\varepsilon_{n-m}, \end{aligned}$$

其中  $\tilde{P} = T^T \bar{P} T > 0, \tilde{Q} = T^T \bar{Q} T > 0$ , 则有

$$\dot{\tilde{V}}|_{(6)} \leq -\varepsilon_{[n-m,n]}^T \tilde{R} \varepsilon_{[n-m,n]},$$

这里  $\tilde{R} = T^T \bar{R} T > 0$ .

### 3 主要结论(Main results)

**定理** 对于满足假设 1 的非线性时滞系统(1), 存在形如式(3)的观测器, 使得误差动态系统(4)中的  $e$  渐近趋于 0.

**证** 第一步: 在系统(5)的最后一式中取  $\varepsilon_{[n-1]} \equiv 0, l_n^* = 1$ , 则有

$$\dot{\varepsilon}_n = G_n(0, \varepsilon_n, 0, \varepsilon_n(t-d), x_{[n]}, x_{[n]}(t-d), u) + \nu, \quad (12)$$

取

$$V_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_n^2 + \int_{t-d}^t \frac{L}{2} \varepsilon_n^2(\tau) d\tau, \nu = -b_n \varepsilon_n, b_n = 1 + 2L,$$

注意到  $g_n$  满足式(2), 可得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1|_{(12)} &\leq L\varepsilon_n^2 + L|\varepsilon_n| |\varepsilon_n(t-d)| - b_n \varepsilon_n^2 + \\ &\quad \frac{L}{2} \varepsilon_n^2 - \frac{L}{2} \varepsilon_n^2(t-d), \leq -\varepsilon_n^2. \end{aligned}$$

第二步:在系统(5)的最后两式中取  $\varepsilon_{[n-2]} \equiv 0$ ,  $l_n^* = b_n, l_{n-1}^* = 1$ , 则有

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{n-1} = \varepsilon_n + G_{n-1}(0, \varepsilon_{n-1}, 0, \varepsilon_{n-1}(t-d), \\ x_{[n-1]}^*, x_{[n-1]}^*(t-d), u) + \nu, \\ \dot{\varepsilon}_n = G_n(0, \varepsilon_{[n-1, n]}, 0, \varepsilon_{[n-1, n]}(t-d), \\ x_{[n]}^*, x_{[n]}^*(t-d), u) + b_n \nu, \end{cases} \quad (13)$$

由第一步结果和引理1可知,存在  $P_2 > 0, Q_2 > 0, R_2 > 0$  和  $\nu = -b_{n-1}\varepsilon_{n-1}$  ( $b_{n-1}$  为正的常数)使得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \frac{1}{2} \varepsilon_{[n-1, n]}^T P_2 \varepsilon_{[n-1, n]} + \\ &\int_{t-d}^t \varepsilon_{[n-1, n]}^T(\tau) Q_2 \varepsilon_{[n-1, n]}(\tau) d\tau, \end{aligned}$$

满足

$$\dot{V}_2|_{(13)} \leq -\varepsilon_{[n-1, n]}^T R_2 \varepsilon_{[n-1, n]}.$$

这样依次做下去,设在前  $(n-1)$  步已经得到了  $b_n, b_{n-1}, \dots, b_2$ .

第  $n$  步:在系统(5)中取  $l_j^* = \prod_{i=2}^j b_i (j=2, 3, \dots, n, l_1^* = 1)$ , 由第  $(n-1)$  步结果和引理1可知,存在  $P_n > 0, Q_n > 0, R_n > 0$  和  $\nu = -b_1 \varepsilon_1$  ( $b_1$  为正的常数)使得

$$V_n = \frac{1}{2} \varepsilon_{[n]}^T P_n \varepsilon_{[n]} + \int_{t-d}^t \varepsilon_{[n]}^T(\tau) Q_n \varepsilon_{[n]}(\tau) d\tau,$$

满足

$$\dot{V}_n|_{(5)} \leq -\varepsilon_{[n]}^T R_n \varepsilon_{[n]}.$$

比较系统(4)和(5)可知,当  $l_j = -\prod_{i=1}^j b_i (j=1, 2, \dots, n)$  时,系统(4)中的零解  $e = 0$  渐近稳定,即在式(3)中取  $l_j = -\prod_{i=1}^j b_i (j=1, 2, \dots, n)$ , 式(3)就是系统(1)的观测器。

#### 4 例子(Example)

对于系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \cos x_1(t-d) + 2u, \\ \dot{x}_2 = x_2(t-d) + \sin u \cdot \arctan x_2 - x_1(t-d), \\ y = x_1, \end{cases} \quad (14)$$

考察它的状态观测器设计问题.显然满足假设1 ( $L=1$ ),按定理证明中提供的方法,容易算得系统:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \cos z_1(t-d) + 2u - 10(z_1 - y), \\ \dot{z}_2 = z_2(t-d) + \sin u \cdot \arctan z_2 - \\ z_1(t-d) - 30(z_1 - y) \end{cases} \quad (15)$$

为系统(14)的一个状态观测器.图1和图2表示了时滞为  $d=1$ , 控制输入为  $u = 2\sin 0.1t$ , 初始函数为  $[x_1(t), x_2(t), z_1(t), z_2(t)] = [-2.5, -3.5, 0, 0], t \in [-1, 0]$  时,观测器(15)状态  $[z_1(t), z_2(t)]$  逼近(14)状态  $[x_1(t), x_2(t)]$  的仿真图像.

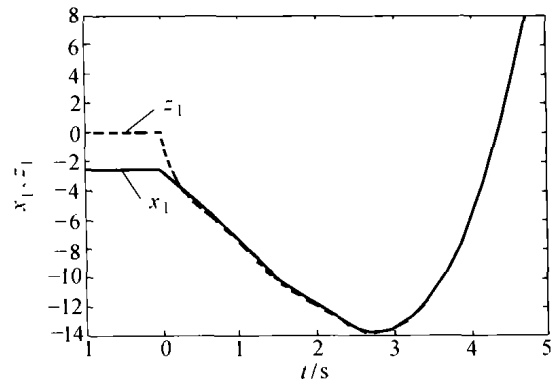


图1 状态  $x_1$  和  $z_1$  的仿真曲线

Fig. 1 Trajectories of  $x_1$  and  $z_1$

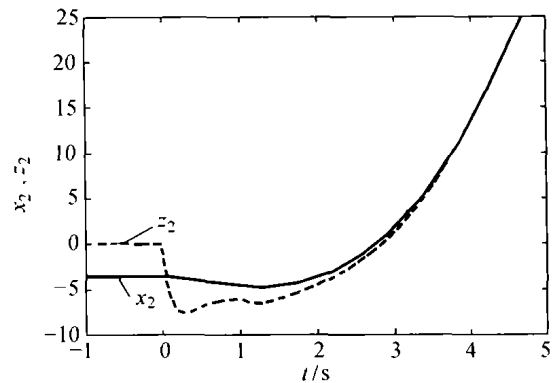


图2 状态  $x_2$  和  $z_2$  的仿真曲线

Fig. 2 Trajectories of  $x_2$  and  $z_2$

#### 5 结束语(Conclusion)

利用迭代方法构造出了一类满足 Lipschitz 条件的下三角非线性时滞系统的状态观测器.这种迭代方法类似于反馈镇定控制中的反步设计法(Backstepping)(见文献[6]等),后者是从离实际输入最近的动态系统开始(前到后),用递推方法得到了镇定系统的控制器.而本文中是从离输出最远的动态系统开始(后到前),逐步地确定状态观测器中的增益.

#### 参考文献(References):

- [1] GAUTHIER J, HAMMOURI H, OTHMAN S. A simple observer for nonlinear systems: Applications to bioreactors [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(6): 875-880.
- [2] SHIM H, SEO J H. Recursive observer design beyond the uniform observability [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(2): 294-298.
- [3] SHIM H, SEO J H, TEEL A R. Nonlinear observer design via passi-

- vation of error dynamics [J]. *Automatica*, 2003, 39(5): 885 - 892.
- [4] JANKOVIC M. Control Lyapunov-Razumikhin functions and robust stabilization of time delay systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(1): 96 - 101.
- [5] GERMANI A, MANES C, PEPE P. A new approach to state observation of nonlinear systems with delayed output [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(7): 1048 - 1060.
- [6] QIAN Chunjiang, LIN Wei. Output feedback control of a class of nonlinear systems: a nonseparation principle paradigm [J]. *IEEE Trans*

on Automatic Control, 2002, 47(10): 1710 - 1715.

#### 作者简介:

张宪福 (1968 —), 男, 山东建筑工程学院讲师, 现在山东大学数学与系统科学学院攻读博士学位, 主要从事非线性系统和时滞系统的研究, E-mail: xianfu\_sjg@yahoo.com.cn;

程兆林 (1939 —), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为多变量控制系统的理论与应用、奇异系统、时滞系统和非线性系统等。

## 人工智能又添新篇

### 《人工智能及其应用》第三版出版

继《人工智能及其应用》第三版本科生用书在不久前问世之后, 由蔡自兴教授和徐光佑教授编著的《人工智能及其应用》第三版研究生用书又于2004年8月由清华大学出版社出版发行。该书第一版于1987年出版, 是国内率先公开出版的人工智能教材。1992年在海外出版繁体字版。1996年出了第二版。该书已先后印刷了10多次, 共发行10万多册, 已为国内多所大学用作教材和教学参考书。由于该教材的特色和优势, 它曾获1999年度国家教育部科技进步一等奖和2002年国际优秀论文(作品)奖, 并与其他成果一起获2000年中国高校自然科学二等奖和2001年省部级优秀教学成果一等奖。

本书系统地介绍人工智能的基本原理及其应用, 全面地反应国内外人工智能研究与应用的最新进展。该书第三版研究生用书共12章。第一章叙述人工智能的概况, 列举出人工智能的研究与应用领域。第二章和第三章研究传统人工智能的知识表示方法、搜索推理和高级知识推理技术。第四章阐述了计算智能的基本知识, 包括神经计算、模糊计算、粗糙集理论、进化计算、人工生命、群智能、自然计算和免疫算法诸内容。第五章至第十一章详细地讨论了人工智能的主要应用, 包括专家系统、机器学习、自动规划、艾真体(Agent)、机器视觉、自然语言理解和智能控制等。第十二章评述近年来关于人工智能的争论, 讨论人工智能对人类经济、社会和文化的影响, 展望人工智能的发展。与第二版相比, 许多内容都是第一次出现的, 如高级知识推理、分布式人工智能与艾真体、计算智能、进化计算、群智能优化、自然计算、免疫计算以及知识发现和数据挖掘等。其他章节也在第二版的基础上作了相应的修改、精简或补充。

该书可作为高等院校计算机专业及相关专业研究生的人工智能课程教材, 也可供从事人工智能研究与应用的科技工作者学习参考。研究生教材可使用该书的姊妹篇“研究生用书”。分别编著出版“本科生用书”和“研究生用书”是一种尝试, 可望能够发挥更好的作用。

中国科学院院士、中国科学院数学与系统科学研究院研究员吴文俊先生为该书作了“计算机时代的脑力劳动机械化与科学技术现代化”的代序, 畅谈实现脑力劳动自动化问题, 并指出: 关于人工智能, 读者“可从本书得到充分的了解”。中国科学院院士、清华大学信息学院院长李衍达教授为该书作序, 对该书的特点和创新给予充分肯定。该书第三版还发表了全国工程院首任院长、原全国政协副主席宋健院士1988年2月任国务委员兼国家科委主任时给蔡自兴教授的亲笔信, 对该书给予高度评价。

(朝阳、敏捷)