不确定性时滞系统的鲁棒镇定控制器设计——LMI方法*

程储旺 宋执环 孙优贤
(浙江大学工业控制技术国家重点实验室,浙江大学工业控制技术研究所·杭州,310027)

摘要:采用线性矩阵不等式方法,研究一类不确定性动态系统.这类系统具有多重时变状态时滞和多重时变控制输入时滞,其不确定性满足范数有界条件.我们得到了一类不确定性时滞系统可状态反馈镇定的充分条件.通过解几个特定线性矩阵不等式,即可得到镇定已知系统的控制器.最后通过一个例子说明了本文方法的有效性和较黎卡提方程方法的优越性.

关键词:时变时滞;不确定性系统;线性矩阵不等式;李雅普诺夫函数

Designing of the Robust Stabilizing Controller for Uncertain Delay Systems——LMI Approach

Cheng Chuwang, Song Zhihuan and Sun Youxian
(National Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Industrial Control Technology, Zhejiang University ·Hangzhou,310027,P.R.China)

Abstract: Using linear matrix inequality approach, this paper deals with a class of uncertain dynamic systems. The class of systems under consideration is described by a continuous-time uncertain model with multiple time-varying delays in both states and controls. The uncertainties are unknown but norm-bounded. A sufficient condition for a class of uncertain delay system to be stabilizable is obtained. It is shown that the construction of the stabilizing controller involves solving several linear matrix inequalities. Finally, an example is given both to illustrate the proposed approach's effectiveness and to show the proposed approach's advantages over Riccati equation approach.

Key words: uncertain dynamic systems; time-varying delay; linear matrix inequality; Lyapunov function

1 引言(Introduction)

近一、二十年来,利用状态反馈镇定不确定性系统的问题在很多文献中相继出现.目前对系统不确定性的描述研究最多的有三类:匹配条件[1~4],范数有界条件和秩-1条件[5,6].文献[7]指出,匹配条件是不适当的限制,因为有很多不确定性系统不满足匹配条件但可很容易镇定.文献[5,7~14]研究了范数有界不确定性系统.文献[8]推广了文献[15]的结果.但文献[5,9~11]还要求系统的不确定性满足匹配条件.文献[16]又将文献[8]的结果推广到最一般的范数有界不确定性系统,即具有多重时变状态时滞和多重时变输入时滞的不确定性系统.但所有这些作者采用的都是黎卡提方程方法,得到的结果均以黎卡提方程或黎卡提不等式的形式给出.在解黎卡提方程或黎卡提不等式时,有大量的参数和正定对称矩阵需要预先调整.这给实际应用时带来极大不便.有时候,即使问题本身是有解的,也找不出问题的解.

近几年来,国外有很多学者采用线性矩阵不等式的方法[17]研究这些问题,见文献[18,19]及其参考文献.线性矩阵不等式方法可很好地弥补上述不足.但国内的文献中很少看到相关报道.本文亦采用线性矩阵不等式方法,研究文献[16]中考虑的系统,得到了一类不确定性时滞系统可状态反馈镇定的充分条件,其结果由几个线性矩阵不等式给出.最后,用一例题说明了本文方法的有效性和较文献[16]的优越性.

2 系统描述和准备知识(System description and preliminaries)

考虑下述时滞不确定性系统:

$$\left\{\begin{aligned} \dot{x}(t) =& (A_0+\Delta A_0(t))x(t) + \\ & \sum_{i=1}^{N}(A_i+\Delta A_i(t))x(t-d_{xi}(t)) + \\ & (B_0+\Delta B_0(t))u(t) + \\ & \sum_{l=1}^{M}(B_l+\Delta B_l(t))u(t-d_{ul}(t)), \\ x(t) =& 0,\ t<0,\ x(0)=x_0. \end{aligned}\right. \tag{1}$$

* 国家"九·五"重点科技攻关,国家自然科学基金(69604007)和中国博士后科学基金资助项目.
本文于1997年3月12日收到.1998年8月17日收到修改稿.

其中 $x \in \mathbb{R}^n$ 是状态向量，$u \in \mathbb{R}^m$ 是控制输入向量，$A_i(i=0,\cdots,N)$ 和 $B_l(l=0,\cdots,M)$ 是有适当维数的常值矩阵.假设时滞项满足：

$$\begin{cases} d_{xi}(t), d_{ul}(t) \leqslant \bar{d} < \infty \text{ and } |\dot{d}_{xi}| \leqslant \bar{m}_{xi} < 1, \\ |\dot{d}_{ul}| \leqslant \bar{m}_{ul} < 1, \end{cases} \tag{2}$$

并设系统的不确定性满足下述形式的范数有界条件：

$$\begin{cases} \Delta A_i(\cdot) = H_i F(t) E_i, & i = 0,1,\cdots,N, \\ \Delta B_l(\cdot) = H_{N+1+l} F(t) E_{N+1+l}, & l = 0,1,\cdots,M. \end{cases} \tag{3}$$

其中 H_i, E_i 是常值矩阵，F 是未知的矩阵函数.不失一般性，设

$$\| F(t) \| \leqslant 1, \tag{4}$$

$F(t)$ 的元素是勒贝格可测的.

本文将构造以下形式的无记忆状态反馈控制器：

$$u(t) = Kx(t). \tag{5}$$

其中 K 是待求的反馈增益矩阵.

为方便起见，我们引入以下符号：

$$\tilde{A}_i = A_i + \Delta A_i(t),\ i = 0,\cdots,N;$$

$$\tilde{B}_l = B_l + \Delta B_l(t),\ l = 0,\cdots,M.$$

引理 1[20] 设 U, V 和 W 是具有适当维数的向量或矩阵，则对任意正数 $\alpha, \beta > 0$，成立以下不等式

$$U^{\mathrm{T}}V + V^{\mathrm{T}}U \leqslant \alpha U^{\mathrm{T}}U + \frac{1}{\alpha}V^{\mathrm{T}}V,$$

$$2W^{\mathrm{T}}V \leqslant \beta W^{\mathrm{T}}W + \frac{1}{\beta}V^{\mathrm{T}}V.$$

引理 2[20] 设 Z, H, E 和 $F(t)$ 是具有适当维数的实矩阵，且 $\|F(t)\| \leqslant 1$，则对任意正数 $\varepsilon > 0$，使得 $I - \varepsilon EE^{\mathrm{T}} > 0$，总成立以下不等式

$$[Z + HF(t)E][Z + HF(t)E]^{\mathrm{T}} \leqslant$$

$$Z(I - \varepsilon EE^{\mathrm{T}})^{-1}Z^{\mathrm{T}} + \frac{1}{\varepsilon}HH^{\mathrm{T}}.$$

3 主要结果(Main results)

首先给出一个有用的命题.

命题 若下列 LMI 存在正定对称解 P，

$$\begin{bmatrix} P\tilde{A}_0(t) + \tilde{A}_0^{\mathrm{T}}P + I & P\tilde{B}_0 & 2K^{\mathrm{T}} & L^{\mathrm{T}} \\ \tilde{B}_0^{\mathrm{T}}P & -I & & \\ 2K & & -2I & \\ L & & & -G \end{bmatrix} < 0. \tag{6}$$

其中

$$L^{\mathrm{T}} = [P\tilde{A}_1 \cdots P\tilde{A}_N\, P\tilde{B}_1 \cdots P\tilde{B}_M],$$

$$G = \mathrm{diag}\Big(\frac{1}{N}(1 - \dot{d}_{x1})I_{n\times n}, \cdots, \frac{1}{N}(1 - \dot{d}_{xN})I_{n\times n}, \frac{1}{M}(1 - \dot{d}_{u1})I_{m\times m}, \cdots, \frac{1}{M}(1 - \dot{d}_{uM})I_{m\times m}\Big),$$

则式(5)是不确定性系统(1)的线性状态反馈镇定控制器.

证 采用式(5)给出的控制器，则对应的闭环系统可表示为：

$$\dot{x}(t) = (A_0 + \Delta A_0(t))x(t) + \sum_{i=1}^{N}(A_i + \Delta A_i(t))x(t - d_{xi}(t)) + (B_0 + \Delta B_0(t))Kx(t) + \sum_{l=1}^{M}(B_l + \Delta B_l(t))Kx(t - d_{ul}(t)).$$

取李雅普诺夫函数为：

$$V(x(t)) = x^{\mathrm{T}}Px + \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\int_{t-d_{xi}}^{t} x^{\mathrm{T}}(\tau)x(\tau)\mathrm{d}\tau + \frac{1}{M}\sum_{l=1}^{M}\int_{t-d_{ul}}^{t} x^{\mathrm{T}}(\tau)K^{\mathrm{T}}Kx(\tau)\mathrm{d}\tau.$$

则其沿闭环系统对时间的导数由下式给出：

$$\begin{aligned} \dot{V}(x,t) = {} & x^{\mathrm{T}}(t)P\tilde{A}_0(t)x(t) + x^{\mathrm{T}}(t)\tilde{A}_0^{\mathrm{T}}Px(t) + \\ & x^{\mathrm{T}}(t)P\tilde{B}_0Kx(t) + x^{\mathrm{T}}(t)K^{\mathrm{T}}\tilde{B}_0^{\mathrm{T}}Px(t) + \\ & x^{\mathrm{T}}P\sum_{i=1}^{N}\tilde{A}_i(t)x(t - d_{xi}(t)) + \\ & x^{\mathrm{T}}(t - d_{xi}(t))\sum_{i=1}^{N}\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}(t)Px(t) + \\ & x^{\mathrm{T}}(t)P\sum_{l=1}^{M}\tilde{B}_l(t)Kx(t - d_{ul}(t)) + \\ & x^{\mathrm{T}}(t - d_{ul}(t))\sum_{l=1}^{M}K^{\mathrm{T}}\tilde{B}_l^{\mathrm{T}}(t)x(t) + x^{\mathrm{T}}(t)x(t) - \\ & \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(1 - \dot{d}_{xi})x^{\mathrm{T}}(t - d_{xi})x(t - d_{xi}) + x^{\mathrm{T}}(t)K^{\mathrm{T}}\cdot \\ & Kx(t) - \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}(1 - \dot{d}_{ul})x^{\mathrm{T}}(t - d_{ul})K^{\mathrm{T}}Kx(t - d_{ul}). \end{aligned}$$

利用引理 1 可得：

$$x^{\mathrm{T}}(t)P\tilde{B}_0Kx(t) + x^{\mathrm{T}}(t)K^{\mathrm{T}}\tilde{B}_0^{\mathrm{T}}Px(t) \leqslant$$

$$x^{\mathrm{T}}(t)P\tilde{B}_0\tilde{B}_0^{\mathrm{T}}Px(t) + x^{\mathrm{T}}(t)K^{\mathrm{T}}Kx(t).$$

记

$$\hat{X} = [x^{\mathrm{T}}(t)\ x^{\mathrm{T}}(t - d_{x1}) \cdots x^{\mathrm{T}}(t - d_{xN})\ x^{\mathrm{T}}(t - d_{u1})K^{\mathrm{T}} \cdots x^{\mathrm{T}}(t - d_{uM})K^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},$$

则下式成立：

$$\dot{V}(x,t) \leqslant \hat{X}^{\mathrm{T}} Q \hat{X} \triangleq$$

$$\hat{X}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} \tilde{A}(t) & P\tilde{A}_1 & \cdots & P\tilde{A}_N & P\tilde{B}_1 & \cdots & P\tilde{B}_M \\ \tilde{A}_1^{\mathrm{T}}P & -\frac{1}{N}(1-\dot{d}_{x1})I_{n\times n} & & & & & \\ \vdots & & \ddots & & & & \\ \tilde{A}_N^{\mathrm{T}}P & & & -\frac{1}{N}(1-\dot{d}_{xN})I_{n\times n} & & & \\ \tilde{B}_1^{\mathrm{T}}P & & & & -\frac{1}{M}(1-\dot{d}_{u1})I_{m\times m} & & \\ \vdots & & & & & \ddots & \\ \tilde{B}_M^{\mathrm{T}}P & & & & & & -\frac{1}{M}(1-\dot{d}_{uM})I_{m\times m} \end{bmatrix}\hat{X}.$$

其中 $\bar{A} = P\tilde{A}_0(t) + \tilde{A}_0(t)P + P\tilde{B}_0\tilde{B}_0^{\mathrm{T}}(t)P + 2K^{\mathrm{T}}K + I$. 如果 $Q < 0$，则闭环系统渐近稳定. 由 Schur 补知：$Q < 0$ 与 LMI(6)等价.　　证毕.

在上述命题中，我们未考虑系统的不确定性. 以下我们处理系统的不确定性，得到一般的范数有界不确定性系统的状态反馈控制律.

由 Schur 补知：LMI(6)等价于下述矩阵不等式

$$\bar{A} + N\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{1-\dot{d}_{xi}}P\tilde{A}_i\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}P + M\sum_{l=1}^{M}\frac{1}{1-\dot{d}_{ul}}P\tilde{B}_l\tilde{B}_l^{\mathrm{T}}P < 0. \tag{7}$$

利用引理 1 可得：

$$P\tilde{A}_0(t) + \tilde{A}_0^{\mathrm{T}}P =$$
$$PA_0 + A_0^{\mathrm{T}}P + PH_0F(t)E_0 + E_0^{\mathrm{T}}F^{\mathrm{T}}(t)H_0^{\mathrm{T}}P \leqslant$$
$$PA_0 + A_0^{\mathrm{T}}P + \alpha_0 PH_0H_0^{\mathrm{T}}P + \frac{1}{\alpha_0}(t)E_0^{\mathrm{T}}E_0. \tag{8}$$

由引理 2 可得：

$$P\tilde{A}_i\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}P \leqslant PA_i(I - \alpha_iE_i^{\mathrm{T}}E_i)^{-1}A_i^{\mathrm{T}}P + \frac{1}{\alpha_i}PH_iH_i^{\mathrm{T}}P,\ i = 1,\cdots,N; \tag{9}$$

$$P\tilde{B}_l\tilde{B}_l^{\mathrm{T}}P \leqslant PB_l(I - \alpha_{N+1+l}E_{N+1+l}^{\mathrm{T}}E_{N+1+l})^{-1}B_l^{\mathrm{T}}P + \frac{1}{\alpha_{N+1+l}}PH_{N+1+l}H_{N+1+l}^{\mathrm{T}}P,\ l = 0,\cdots,M. \tag{10}$$

为简单起见，记

$$\frac{N}{1-\bar{m}_{xi}} = \bar{c}_{xi},\quad \frac{M}{1-\bar{m}_{ul}} = \bar{c}_{ul}. \tag{11}$$

由不等式(7)~(11)可知：如果下述不等式成立

$$PA_0 + A_0^{\mathrm{T}}P + \alpha_0PH_0H_0^{\mathrm{T}}P + \frac{1}{\alpha_0}E_0^{\mathrm{T}}E_0 + 2K^{\mathrm{T}}K + I + \sum_{i=1}^{N}\bar{c}_{xi}[PA_i(I-\alpha_iE_i^{\mathrm{T}}E_i)^{-1}A_i^{\mathrm{T}}P + \frac{1}{\alpha_i}PH_iH_i^{\mathrm{T}}P] + \sum_{l=1}^{M}\bar{c}_{ul}[PB_l(I-\alpha_{N+1+l}E_{N+1+l}^{\mathrm{T}}E_{N+1+l})^{-1}B_l^{\mathrm{T}}P + \frac{1}{\alpha_{N+1+l}}PH_{N+1+l}H_{N+1+l}^{\mathrm{T}}P] + PB_0(I - \alpha_{N+1}E_{N+1}^{\mathrm{T}}E_{N+1})^{-1}B_0^{\mathrm{T}}P + \frac{1}{\alpha_{N+1}}PH_{N+1}H_{N+1}^{\mathrm{T}}P < 0, \tag{12}$$

则不确定性系统(1)可状态反馈镇定.

由以上讨论可很容易得到下述定理. 它给出了一般形式的线性不确定时滞系统可状态反馈镇定的充分条件.

定理　已知不确定性系统(1). 假设存在正数 $\alpha_i(i = 0,1,\cdots,N+M+1)$ 和正定对称矩阵 X，矩阵 Y 使下述线性矩阵不等式成立：

$$\begin{bmatrix} S & XE_0^{\mathrm{T}} & 2Y^{\mathrm{T}} & X & L_1^{\mathrm{T}} & L_2^{\mathrm{T}} \\ E_0X & -\alpha_0I & & & & \\ 2Y & & -2I & & & \\ X & & & -I & & \\ L_1 & & & & -G_1 & \\ L_2 & & & & & -G_2 \end{bmatrix} < 0,$$

$$I - \alpha_iE_i^{\mathrm{T}}E_i > 0,\ i = 1,2,\cdots,N+M+1.$$

其中

$$S = A_0X + XA_0^{\mathrm{T}} + \alpha_0H_0H_0^{\mathrm{T}},$$

$$L_1 = [\bar{c}_{x1}A_1 \cdots \bar{c}_{xN}A_N \quad B_0 \quad \bar{c}_{u1}B_1 \cdots \bar{c}_{uM}B_M]^{\mathrm{T}},$$

$$G_1 = \mathrm{diag}[\bar{c}_{x1}(I-\alpha_1E_1^{\mathrm{T}}E_1),\cdots,\bar{c}_{xN}(I-\alpha_NE_N^{\mathrm{T}}E_N),(I-\alpha_{N+1}E_{N+1}^{\mathrm{T}}E_{N+1}),\bar{c}_{u1}(I-\alpha_{N+2}E_{N+2}^{\mathrm{T}}E_{N+2}),\cdots,\bar{c}_{uM}(I-\alpha_{N+1+M}E_{N+1+M}^{\mathrm{T}}E_{N+1+M})],$$

$$L_2 = [\bar{c}_{x1}H_1 \cdots \bar{c}_{xN}H_N \quad H_{N+1} \quad \bar{c}_{u1}H_{N+2} \cdots \bar{c}_{uM}H_{N+M+1}]^{\mathrm{T}},$$

$$G_2 = \mathrm{diag}[\bar{c}_{x1}\alpha_1I,\cdots,\bar{c}_{xN}\alpha_NI,\alpha_{N+1}I,\bar{c}_{u1}\alpha_{N+2}I,\cdots,\bar{c}_{uM}\alpha_{N+M+1}I],$$

则不确定性系统(1)可状态反馈镇定，且控制器为

$$u(t) = Kx(t) = YX^{-1}x(t).$$

证　令 $X = P^{-1}, Y = KX$, 由 Schur 补和不等式(12)易知定理成立.　证毕.

注 1　在处理范数有界不确定性时,用引理 2 可降低结果的保守性.所以本文提出的方法优于那些在处理不确定性的放大过程中全部用引理 1 的方法.

4　仿真算例(Simulation example)

考虑下面微分方程表示的时滞不确定性系统:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) = {} & (A_0 + \Delta A_0(t))x(t) + (A_1 + \Delta A_1(t)) \cdot \\ & x(t - d_1(t)) + (B_0 + \Delta B_0(t))u(t) + \\ & (B_1 + \Delta B_1(t))u(t - d_2(t)).\end{aligned}$$

其中

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -2 \end{bmatrix},\quad A_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 \\ 0.5 & 0.3 \end{bmatrix},$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \end{bmatrix},\quad B_1 = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix};$$

$$\Delta A_i(\cdot) = H_i F(t) E_i,\ i = 0,1;$$

$$\Delta B_l(\cdot) = H_{N+1+l} F(t) E_{N+1+l},\ l = 0,1;$$

$$H_0 = H_1 = H_3 = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix},\ H_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix},$$

$$E_0 = [0\quad 1], E_1 = [1\quad 0], E_2 = E_3 = 0.1,$$

$$F(t) = \sin(t),\ d_1(t) = 0.3 + 0.1\sin t,$$

$$d_2(t) = 0.2 + 0.1\cos t.$$

在 LMITOOL 环境下可一次性求得镇定控制器为

$$u = -2.5975x_1 - 0.8084x_2.$$

注 2　待求不等式本身有多个参数,但在 LMI-TOOL 环境下求解时,非常方便,无需我们预先对参数作任何调整.甚至在要解几个互相关联的 LMI 时,也可一次性得出问题的解.这是 LMI 方法较黎卡提方程方法的最大优越性.

5　结语(Conclusion)

对于具有多重时变状态时滞和多重时变控制时滞的范数有界不确定性系统,本文给出了一种新的状态反馈控制器设计方法.通过一次性解几个线性矩阵不等式,立即可得镇定已知系统的控制器.LMI 方法较黎卡提方程方法有很大的优越性.有好多控制论问题包括有些限制条件均可化为线性矩阵不等式来处理.笔者认为值得在国内推广.

参考文献(References)

1　Leitmann G. On the efficacy of nonlinear control in uncertain linear systems. J. Dynamic Syst. Measurements Contr., 1981, 103: 95 – 102

2　Corless M, Leitmann G. Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundless of uncertain dynamic systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1981, 26(5): 1139 – 1141

3　Barmish B, Corless R, Leitmann M. A new class of stabilizing controllers of an uncertain system. SIAM J. Contr., 1983, 21(2): 246 – 252

4　杨保民,孙明,孙翔.滞后不确定性系统的鲁棒稳定调节器设计.自动化学报,1994,20(2):202 – 208

5　Shen J C, Chen B S, Kung F C. Memoryless stabilization of uncertain dynamic delay system: Riccati equation approach. IEEE Trans. Automat. Conrt., 1991, 36(5): 638 – 640

6　Chio H H. Memoryless stabilization of uncertain dynamic systems including time-varying delayed states and controls. Automatica, 1995, 31(9): 1349 – 1351

7　Petersen I R, Hollot C V. A Riccati equation approach to the stabilization of uncertain linear systems. Automatica, 1986, 22(4): 397 – 411

8　Mahmoud M S, Al-Muthairi N F. Quadratic stabilization of continuous time systems with state-delay and norm-bounded time-varying uncertainties. IEEE Trans. Automat. Contr., 1994, 39(10): 2135 – 2139

9　Thowsen A. Uniform ultimate boundedness of the solutions of uncertain dynamic delay systems with statedependent and memoryless feedback control. Int. J. Control, 1983, 37(5): 1135 – 1143

10　Cheres E, Gutman S, Palmor Z G. Stabilization of uncertain dynamic systems including state delay. IEEE Trans. Automat. Contr., 1989, 34(11): 1199 – 1203

11　Mahmoud M S, Al-Muthairi N F. Design of robust controllers for time-delay systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1994, 39(5): 995-999

12　Petersen I R. A Riccati equation approach to the design of stabilizing controllers and observers for a class of uncertain linear systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1985, 30(9): 904-907

13　Petersen I R. A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems. Systems & Control Letters, 1987, 8: 351 – 357

14　刘永清,邓飞其,冯昭枢.线性时滞系统滞后反馈鲁棒镇定(英文).控制理论与应用,1996,13(6):754 – 762

15　Su J H, Fong I K, Tseng C L. Stability analysis of linear systems with time delay. IEEE Trans. Automat. Contr., 1994, 39(6): 1341 – 1344

16　程储旺,孙优贤.时变时滞不确定性系统的状态反馈控制器设计.自动化学报,1998,24(1):81 – 84

17　Boyd S L, El Ghaoui, et al. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia: SIAM, 1994

18　Iwasaki T and Skelton R E. All controllers for the H_∞ control problem: LMI existence conditions and state space formulas. Automatica, 1994, 30(8): 1307 – 1317

19　Zhou K, Khargonekar P P, Stoustrup S and Niemann H H. Robust performance of systems with structured uncertainties in state space. Automatica, 1995, 31(2): 249 – 255

20　Wang Y Y, Xie L H and E de Souza. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems. Systems & Control Letters, 1992, 19: 139 – 149

(下转第 663 页)

Appleication. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993

5 Skeppstedt A, Ljung L and Millnery M. Construction of composite models from observed data. Int. J. Control, 1992, 55(3): 141 – 152

6 Yosko J and Kalata R P. Optimal and sub-optimal function of α-β target tracks. Proceedings of American Control Conference, Maryland, 1992, 857 – 861

7 Blair D W. Fixed-gain two-stage estimations for tracking maneuvering targets. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1993, 29(3): 1004 – 1014

8 Kalata R P. The tracking index: a generalized parameter for α-β and α-β-γ target trackers. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1984, 20(2): 174 – 182

9 Rhatigan T B. An α-β Target tracking approach to the Benchmark tracking problem. Proceedings of American Control Conference, Maryland, 1994, 2076 – 2080

10 Pan Quan, Liang Yan, Zhang Hongcai and Dai Guanzhong. Interacting multiple models algorithm based on alpha-beta/alpha-beta-gamma filter. Proceedings of American Cntrol Conference, Albuquerque, New Mexico, 1997, 3698 – 3701

11 梁彦. 混合估计自适应算法研究: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 1997

本文作者简介

梁 彦 1971年生. 西北工业大学控制理论与控制工程专业博士生. 研究方向: 自适应滤波, 机动目标跟踪, 动态系统的建模、辨识与仿真.

潘 泉 见本刊1999年第4期第469页.

张洪才 见本刊1999年第4期第469页.

(上接第658页)

本文作者简介

程储旺 1965年生. 1987年7月于安徽师范大学获学士学位, 1994年7月于杭州大学数学系几何专业获硕士学位. 1997年5月于浙江大学工业控制技术研究所获博士学位. 现为中国纺织大学博士后. 目前主要研究兴趣为: 时滞不确定性(大)系统的鲁棒控制理论及应用等.

宋执环 1962年生. 讲师, 博士. 1986年毕业于合肥工业大学工业自动化专业, 获工学硕士学位; 1996年在浙江大学工业控制技术研究所获工学博士学位. 主要研究兴趣为工业过程建模与控制, 鲁棒控制, 预测控制理论及应用, 小波分析在系统辨识和控制理论中的应用.

孙优贤 见本刊1999年第1期第112页.