

线性离散时滞系统的输出反馈耗散控制

邵汉永^{1,2}, 冯纯伯²

(1. 曲阜师范大学 电气信息与自动化学院, 山东 日照 276826; 2. 东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 考虑线性离散时滞系统的二次型耗散控制问题, 设计动态输出反馈使闭环系统渐近稳定且严格二次型耗散. 先将系统严格二次型耗散性转化为线性矩阵不等式的可解性, 得到了系统渐近稳定且严格二次型耗散的条件. 然后讨论输出反馈耗散控制问题, 给出了控制器的存在条件, 总结出了控制器的综合方法、步骤. 所得结果可为离散时滞系统的无源控制和 H_∞ 控制提供统一框架, 也为离散时滞系统的分析和设计提供了一种更灵活、保守性更小的方法.

关键词: 离散时滞系统; 二次型耗散性; 耗散控制; 线性矩阵不等式(LMI)

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Output feedback dissipative control for linear discrete-time systems with time-delay

SHAO Han-yong^{1,2}, FENG Chun-bo²

(1. College of Electric Information & Automation, Qufu Normal University, Rizhao Shandong 276826, China;

2. Institute of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: The quadratic dissipative control for linear discrete-time systems with time-delay is considered. The objective is to design a dynamic output feedback controller achieving asymptotic stability and strict quadratic dissipativeness. First, it is shown that the strict quadratic dissipativeness can be reduced to the solvability of LMIs and sufficient conditions are obtained for the system to be asymptotically stable and strictly quadratic dissipative, and then the output feedback dissipative control problem is addressed. Conditions for the existence of the output feedback controller are derived and steps for designing the controller are given. The results obtained provide not only a unified framework for H_∞ control and passive control, but also a more flexible and less conservative design method for linear discrete-time systems with time-delay.

Key words: discrete-time systems with delay; quadratic dissipativeness; dissipative control; linear matrix inequality(LMI)

1 引言(Introduction)

耗散性是系统和控制理论中的一个重要概念, 它在稳定性分析、非线性控制及自适应控制系统设计等方面有广泛应用^[1,2], 它是无源概念及 H_∞ 性能的推广. 近年来无源控制及 H_∞ 控制成为许多学者研究的热点问题^[3-6], 然而, 无源设计由于只提取了相位信息, 所得结果有较大保守性. H_∞ 控制则只利用了系统的增益, 所得结果也有较大保守性. 而基于耗散性的综合由于既利用了系统的增益又提取了相位信息, 在增益和相位之间进行了较好的折中, 所得结果保守性较小. 因此, 研究系统的耗散性具有重要意义. 近几年由于 H_∞ 理论的发展, 线性系统的二次型耗散问题得到进一步研究. 文献[7]讨论了线性连

续系统的二次型耗散控制问题, 文献[8]则给出了线性离散系统的二次型耗散控制器. 由于时滞现象在实际系统中普遍存在, 时滞系统的二次型耗散控制近来受到人们关注. 作为时滞系统耗散控制的特例, 线性时滞系统的 H_∞ 控制已得到广泛研究^[9,10], 线性时滞系统的无源控制问题在文献[11]中也进行了讨论. 然而, 对于时滞系统的一般耗散问题, 现有文献讨论得还很不够. 文献[12]对线性连续时滞系统考虑了严格二次型耗散控制, 给出了控制器的存在条件与综合方法. 文献[13]对只在状态方程中有时滞的情形, 研究了线性离散时滞系统的状态反馈耗散控制问题. 本文就状态方程和输出方程均有时滞的线性离散时滞系统, 考虑严格二次型耗散的

分析和输出反馈控制问题. 这里顺便说明, 文中出现的符号大部分为标准用法, 而 $\langle u, v \rangle_K = \sum_{l=0}^K u^T(l)v(l)$, “*”表示由对称性决定的矩阵块.

2 问题描述和耗散性分析 (Problem description and dissipative analysis)

考虑下面的线性离散时滞系统

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + A_d x(k-d) + B_1 w(k) + B_2 u(k), \\ z(k) = C_1 x(k) + C_{1d} x(k-d) + D_{11} w(k) + D_{12} u(k), \\ y(k) = C_2 x(k) + C_{2d} x(k-d) + D_{21} w(k), \\ x(k) = x_0(k), \quad -d \leq k \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态, $w \in \mathbb{R}^q$ 为外部输入, $z \in \mathbb{R}^p$ 为被控输出, $y \in \mathbb{R}^r$ 为量测输出, $u \in \mathbb{R}^m$ 为控制输入, $x_0(k) (-d \leq k \leq 0)$ 为初始条件. $A, A_d, D_{11}, B_i, C_i, C_{id}, D_{i1} (i = 1, 2)$ 为适当维数的已知矩阵.

令 $u(k) = 0$, 从系统(1)得

$$U := \begin{bmatrix} -P + W + A^T P A - C_1^T Q C_1 & * & * & * & * \\ A_d^T P A - C_{1d}^T Q C_1 & -W + A_d^T P A_d - C_{1d}^T Q C_{1d} & * & * & * \\ -S^T C_1 + B_1^T P A - D_{11}^T Q C_1 & -S^T C_{1d} + B_1^T P A_d - D_{11}^T Q C_{1d} & -R - D_{11}^T S - S^T D_{11} + B_1^T P B_1 - D_{11}^T Q D_{11} & * & * \\ P A & P A_d & P B_1 & -P & * \\ L C_1 & L C_{1d} & L D_{11} & 0 & -I \end{bmatrix} < 0,$$

于是存在 $\alpha > 0$ 使 $U + \alpha I < 0$.

记

$$V(x(k)) = x^T(k) P x(k) + \sum_{l=k-d}^{k-1} x^T(l) W x(l),$$

$$\varphi^T(k) = [x^T(k) \quad x^T(k-d) \quad w^T(k)],$$

则沿系统(2)的轨线, 经过一些代数运算有

$$\begin{aligned} V(x(k+1)) - V(x(k)) + \alpha w^T(k) w(k) - z^T(k) Q z(k) - 2z^T(k) S w(k) - w^T(k) R w(k) = \\ (Ax(k) + A_d x(k-d) + B_1 w(k))^T P (Ax(k) + A_d x(k-d) + B_1 w(k)) - x^T(k) P x(k) + \\ x^T(k) W x(k) - x^T(k-d) W x(k-d) + \\ \alpha w^T(k) w(k) - w^T(k) R w(k) - 2(C_1 x(k) + C_{1d} x(k-d) + D_{11} w(k))^T S w(k) - (C_1 x(k) + C_{1d} x(k-d) + D_{11} w(k))^T Q (C_1 x(k) + C_{1d} x(k-d) + D_{11} w(k)) = \\ \varphi^T(k) (U + \alpha I) \varphi(k) < 0. \end{aligned} \quad (3)$$

对 k 从 0 到 K 求和, 在零初始条件下有

$$\begin{aligned} \langle z, Q z \rangle_K + 2\langle z, S w \rangle_K + \langle w, Q w \rangle_K \geq \\ \alpha \langle w, w \rangle_K + V(x(K+1)) \geq \alpha \langle w, w \rangle_K, \end{aligned}$$

故系统(2)严格 (Q, S, R) -耗散.

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + A_d x(k-d) + B_1 w(k), \\ z(k) = C_1 x(k) + C_{1d} x(k-d) + D_{11} w(k), \\ x(k) = x_0(k), \quad -d \leq k \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

给定适当维数的矩阵 Q, S, R , 使

A1) $Q \leq 0$;

A2) $R + D_{11}^T S + S^T D_{11} + D_{11}^T Q D_{11} > 0$.

下面给出严格 (Q, S, R) -耗散性^[13] 的一个分析结果, 它是严格二次型耗散控制的基础.

定理 1 设 $-Q$ 的满秩分解为 $L^T L$. 若存在 $P > 0, W > 0$ 使

$$\begin{bmatrix} -P + W & * & * & * & * \\ 0 & -W & * & * & * \\ -S^T C_1 & -S^T C_{1d} & -D_{11}^T S - S^T D_{11} - R & * & * \\ P A & P A_d & P B_1 & -P & * \\ L C_1 & L C_{1d} & L D_{11} & 0 & -I \end{bmatrix} < 0,$$

则系统(2)渐近稳定且严格 (Q, S, R) -耗散.

证 由定理的条件知存在 $P > 0, W > 0$, 使

$$\begin{bmatrix} -P + W + A^T P A - C_1^T Q C_1 & * & * & * & * \\ A_d^T P A - C_{1d}^T Q C_1 & -W + A_d^T P A_d - C_{1d}^T Q C_{1d} & * & * & * \\ -S^T C_1 + B_1^T P A - D_{11}^T Q C_1 & -S^T C_{1d} + B_1^T P A_d - D_{11}^T Q C_{1d} & -R - D_{11}^T S - S^T D_{11} + B_1^T P B_1 - D_{11}^T Q D_{11} & * & * \\ P A & P A_d & P B_1 & -P & * \\ L C_1 & L C_{1d} & L D_{11} & 0 & -I \end{bmatrix} < 0,$$

令 $w(k) = 0$, 由式(3)得 $V(x(k+1)) - V(x(k)) - z^T(k) Q z(k) < 0$; 再由假设 A1), $\Delta V(x(k)) < 0$. 故系统(2)是渐近稳定的.

这里给出的定理 1 是线性离散时滞系统的无源性引理^[11] 的推广, 也是离散时滞系统的有界实引理的一般化. 该定理还进一步推广了文献[8]和[13]中关于线性离散非时滞系统和线性离散时滞系统的严格二次型耗散引理. 当 $A_d = C_{1d} = W = 0, L = L^T = (-Q)^{1/2}$ 时, 由定理 1 可得文献[8]中的严格二次型耗散引理; 当 $C_{1d} = 0, L = L^T = (-Q)^{1/2}$ 时, 由定理 1 可得文献[13]中的引理 1.

与文献[7, 8, 12, 13]相比, 采用 $-Q$ 的满秩分解而不是平方分解得到的矩阵维数较小, 因而有利于节省计算时间和存储空间.

3 输出反馈严格 (Q, S, R) -耗散控制 (Output feedback strictly (Q, S, R) -dissipative control)

本节的目的是对系统(1)设计输出反馈控制器

$$\begin{cases} \xi(k+1) = A_c \xi(k) + B_c y(k), \quad \xi(0) = 0, \\ u(k) = C_c \xi(k) \end{cases} \quad (4)$$

使闭环系统渐近稳定且严格\$(Q, S, R)\$-耗散,这就是输出反馈严格\$(Q, S, R)\$-耗散控制问题.下面就来解决这个问题.首先,系统(1)与控制器(4)组成的闭环系统为

$$\begin{cases} \bar{x}(k+1) = \bar{A}\bar{x}(k) + \bar{A}_d x(k-d) + \bar{B}w(k), \\ z(k) = \bar{C}\bar{x}(k) + \bar{C}_d x(k-d) + \bar{D}w(k), \\ \bar{x}(k) = \bar{x}_0(k), -d \leq k \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\bar{x}(k) = [x^T(k) \quad \xi^T(k)]^T, \\ \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{A}_d & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{C}_d & \bar{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_2 C_c & A_d & B_1 \\ B_c C_2 & A_c & B_c C_{2d} & B_c D_{21} \\ C_1 & D_{12} C_c & C_{1d} & D_{11} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对系统(5)应用定理1立即可得输出反馈严格\$(Q, S, R)\$-耗散控制问题的可解条件.

$$\begin{cases} \Psi_1 = \begin{bmatrix} \phi_{11} & * & * & * \\ 0 & -W & * & * \\ \phi_{13}^T & -S^T C_{1d} & -D_{11}^T S - S^T D_{11} - R & * \\ \phi_{14}^T & \phi_{24}^T & \phi_{34}^T & \phi_{44} \end{bmatrix}, \Psi_2^T = \begin{bmatrix} \phi_{15}^T & LC_{1d} & LD_{11} & 0 \\ \phi_{16}^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \Psi_3 = -\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & W^{-1} \end{bmatrix}, \\ \phi_{11} = \begin{bmatrix} -X & -I + XW \\ -I + WX & -Y + W \end{bmatrix}, \phi_{14} = \begin{bmatrix} AX + B_2 G & A \\ H & YA + FC_2 \end{bmatrix}, \\ \phi_{24}^T = \begin{bmatrix} A_d \\ YA_d + FC_{2d} \end{bmatrix}, \phi_{34}^T = \begin{bmatrix} B_1 \\ YB_1 + FD_{21} \end{bmatrix}, \phi_{44} = -\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix}, \\ \phi_{13}^T = -S^T [C_1 X + D_{12} G \quad C_1], \phi_{15}^T = L [C_1 X + D_{12} G \quad C_1], \phi_{16}^T = [X \quad 0]. \end{cases} \quad (8)$$

下面的定理进一步给出了输出反馈严格二次型耗散控制问题的可解条件和控制器的综合方法.

定理2 若对某个给定的\$W > 0\$, 下面的线性矩阵不等式系统

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 & \Psi_2 \\ \Psi_2^T & \Psi_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

关于\$Y, X, F, G, H\$有可行解, 则关于系统(1)的输出反馈严格\$(Q, S, R)\$-耗散控制问题有解, 而控制器参数矩阵满足

$$\begin{cases} F = NB_c, G = C_c M^T, \\ H = YAX + YB_2 G + FC_2 X + NA_c M^T, \\ MN^T = I - XY. \end{cases} \quad (10)$$

证 设\$X, Y, F, G, H\$为式(9)的可行解, 则\$I - XY\$可逆. 由式(10)得可逆阵\$M, N\$, 进而可得\$A_c\$,

引理 如果存在\$P > 0, W > 0\$使

$$\begin{bmatrix} -P + \bar{W} & * & * & * & * \\ 0 & -W & * & * & * \\ -S^T \bar{C} & -S^T \bar{C}_d & -\bar{D}^T S - S^T \bar{D} - R & * & * \\ \bar{P} \bar{A} & \bar{P} \bar{A}_d & \bar{P} \bar{B} & -P & * \\ \bar{L} \bar{C} & \bar{L} \bar{C}_d & \bar{L} \bar{D} & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \\ \bar{W} = \text{diag}\{W, 0\}, \quad (7)$$

则系统(1)存在形如(4)的输出反馈控制器使闭环系统渐近稳定且严格\$(Q, S, R)\$-耗散.

注意到式(7)关于控制器参数及Lyapunov矩阵\$P\$是非线性的, 不能简单的像状态反馈那样线性化, 直接求解较困难. 为此, 采用变量替换法将其化为线性矩阵不等式, 从而可用MATLAB中的LMI工具箱求解. 为简便, 引入以下记号

\$B_c, C_c\$. 下证这样得到的\$A_c, B_c, C_c\$即为所求控制器参数.

令

$$X_1 = \begin{bmatrix} X & I \\ M^T & 0 \end{bmatrix}, X_2 = \begin{bmatrix} I & Y \\ 0 & N^T \end{bmatrix}, \quad (11)$$

取

$$P = X_2 X_1^{-1}, \quad (12)$$

则

$$P = \begin{bmatrix} Y & N \\ N^T & \times \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & M \\ M^T & \times \end{bmatrix}^{-1} \quad (' \times ' \text{ 为无关块}). \quad (13)$$

下面证明在式(12), (13)下, 式(7)与(9)等价即可.

式(7)中矩阵左右两边分别乘以\$\text{diag}\{X_1^T, I, I, X_1^T, I\}, \text{diag}\{X_1, I, I, X_1, I\}\$, 得

$$\begin{bmatrix} -X_1^T X_2 + X_1^T \bar{W} X_1 & * & * & * & * \\ 0 & -W & * & * & * \\ -S^T \bar{C} X_1 & -S^T \bar{C}_d & -\bar{D}^T S - S^T \bar{D} - R & * & * \\ X_2^T \bar{A} X_1 & X_2^T \bar{A}_d & X_2^T \bar{B} & -X_1^T X_2 & * \\ L \bar{C} X_1 & L \bar{C}_d & L \bar{D} & 0 & -I \end{bmatrix} < 0.$$

将式(6)和(11)代入并利用式(8),(10),上述条

取

件就是

$$\begin{bmatrix} \bar{\phi}_{11} & * & * & * & * \\ 0 & -W & * & * & * \\ \phi_{13}^T & -S^T C_{1d} & -D_{11}^T S - S^T D_{11} - R & * & * \\ \phi_{14}^T & \phi_{24}^T & \phi_{34}^T & \phi_{44} & * \\ \phi_{15}^T & L C_{1d} & L D_{11} & 0 & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (14)$$

其中

$$\bar{\phi}_{11} = \phi_{11} + \begin{bmatrix} X W X & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

由 Schur 补可见式(14)与(9)是等价的。

定理2 可将控制器参数的计算转化为新变量 Y, X, F, G, H 的求解,而式(9)关于这组新变量又是线性的,因此该定理给出了输出反馈耗散控制的一种有效解法,其综合步骤可总结如下:

1) 给定 $W > 0$ 解线性矩阵不等式(9)得 Y, X, F, G, H ;

2) 由式(10)求得 M, N ;

3) 将 Y, X, F, G, H, M, N 代入式(10)解得 A_c, B_c, C_c .

4 仿真示例(Numerical example)

将系统(1)的参数矩阵取为

$$A = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 \\ 0 & -0.2 \end{bmatrix}, A_d = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.05 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 \\ 0.12 & 0.01 \end{bmatrix}, C_{1d} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.01 \\ 0.1 & 0.11 \end{bmatrix},$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.01 \\ 0.2 & 0.3 \end{bmatrix}, D_{12} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ -0.2 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & -0.1 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, C_{2d} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$D_{21} = \begin{bmatrix} 0.1 & -0.1 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}.$$

给定

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q = -\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

由 MATLAB 中的 LMI Control Toolbox 解不等式(9),得可行解

$$X = \begin{bmatrix} 0.8455 & -0.0151 \\ -0.0151 & -0.8458 \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} 2.3831 & 0.0081 \\ 0.0081 & 2.3618 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.0526 & 0.0908 \\ -0.0143 & -0.1507 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} -0.1682 & -0.2999 \\ -0.0311 & 0.3776 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.0296 & 0.0119 \end{bmatrix}.$$

由式(10)先解得

$$M = \begin{bmatrix} -0.7794 & -0.6265 \\ -0.6265 & 0.7794 \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 1.4557 & 1.0935 \\ 1.1699 & -1.3607 \end{bmatrix}.$$

最后求得控制器参数矩阵

$$A_c = \begin{bmatrix} -0.0472 & -0.0264 \\ 0.0299 & -0.0198 \end{bmatrix},$$

$$B_c = \begin{bmatrix} -12.3639 & -0.0653 \\ 2.0816 & -3.6095 \end{bmatrix},$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 0.0156 & 0.0278 \end{bmatrix}.$$

5 结论(Conclusion)

本文讨论线性离散时滞系统的输出反馈二次型耗散控制问题,分析了系统渐近稳定且严格二次型耗散的条件,给出了输出反馈控制器的存在条件,进一步总结出了输出反馈耗散控制问题的解法和步骤.所得结果可为线性离散时滞系统的 H_∞ 控制和无源控制提供统一的框架,也可看作线性离散系统二次型耗散控制的推广.

参考文献(References):

- [1] HILL D J, MOLAND P J. Stability of nonlinear dissipative systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1976, 21(5): 708 - 711.
- [2] 冯纯伯. 应用无源性分析研究时变非线性系统的稳定性[J]. 自

- 动化学报,1997,23(6):775-781.
(FENG Chunbo. Stability analysis for time-varying nonlinear systems via passivity analysis [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(6): 775-781.)
- [3] 郭雷,忻欣,冯纯伯. 线性对象的正实控制问题[J]. 自动化学报,1997,23(5):577-582.
(GUO Lei, XIN Xin, FENG Chunbo. The positive real control problem for generalized linear plants [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(5):577-582.)
- [4] 邵汉永,冯纯伯. 一类不确定多变量线性系统的鲁棒严格正实性分析及其输出反馈控制[J]. 东南大学学报,2003,33(4):492-494.
(SHAO Hanyong, FENG Chunbo. Robustly strict positive real analysis and output feedback control for a class of uncertain MIMO linear systems [J]. *J of Southeast University*, 2003, 33(4):492-494.)
- [5] 邵汉永,冯纯伯. 严格正实线性多变量系统的鲁棒性分析及其输出反馈控制[J]. 控制与决策,2004,19(3):277-280.
(SHAO Hanyong, FENG Chunbo. Robustness analysis and feedback control for strictly positive real linear MIMO systems [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(3):277-280.)
- [6] MAHMOUD M, XIE L. Positive real analysis and synthesis of uncertain discrete-time systems [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems*, 2000, 47(3):403-406.
- [7] XIE S, XIE L, de SOUZA C E. Robust dissipative control for linear systems with dissipative uncertainty [J]. *Int J Control*, 1998, 70(2):169-191.
- [8] TAN Zhiqiang, SOH Yeng Chai, XIE Lihua. Dissipative control for linear discrete-time systems [J]. *Automatica*, 1999, 35(9):1557-1564.
- [9] GUO L, CHEN W H. Output feedback control for a class of uncertain nonlinear discrete-time delay systems [J]. *Trans of the Institute of Measurement and Control*. 2003, 25(2):117-130.
- [10] SHAKED U, YAESH I, CARLOS E. Bounded real criteria for linear time-delay systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(7):10176-1022.
- [11] 关新平,龙承念,段广仁. 离散时滞系统的鲁棒无源控制[J]. 自动化学报,2002,28(1):146-149.
(GUAN Xinping, LONG Chengnian, DUAN Guangren. Robust passive control for discrete time-delay systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(1):146-149.)
- [12] LI Zhihu, SHAO Huihe, WANG Jingcheng. Dissipative control for linear time-delay systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(6):838-842.
- [13] 刘飞,苏宏业,褚健. 线性离散时滞系统鲁棒严格耗散控制[J]. 自动化学报,2002,28(6):897-903.
(LIU Fei, SU Hongye, CHU Jian. Robust strictly dissipative control for linear discrete time-delay systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(6):897-903.)

作者简介:

邵汉永 (1965—),男,博士生,研究领域为无源性分析、自适应控制、鲁棒控制等, E-mail: hanyongshao@163.com;

冯纯伯 (1928—),男,教授,中国科学院院士,研究领域为复杂系统控制、无源控制、切换控制等。

(上接第626页)

- [7] 卢志刚,于灵慧,柳晓菁,等. 克服扰动的混沌逆控制系统[J]. 物理学报,2002,51(10):2211-2215.
(LU Zhigang, YU Linghui, LIU Xiaojing, et al. The chaotic inverse control system of against perturbation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(10):2211-2215.)
- [8] WINDROW B, WALACH E. *Adaptive Inverse Control* [M]. London: Prentice Hall, 1996:209-255.

作者简介:

于灵慧 (1978—),女,博士研究生,研究方向为混沌控制研究、卫星姿态控制执行机构非线性控制研究、高速磁悬浮轴承、控制力矩陀螺的稳定性控制研究, E-mail: linghuiyu@126.com;

房建成 (1965—),男,教授,博士生导师,主要从事航天飞行器(卫星、空间站、深空探测器等)姿态控制技术及自主定位导航技术的研究,以及航空航天飞行器 GNC 系统集成技术和信息集成技术研究。