第19卷 第3期 控 制 与 决 策 2004年3月
Vol 19 No. 3 Control and Decision Mar. 2004

文章编号: 1001-0920(2004)03-0281-04

基于LMI的广义系统正实反馈控制

靖 新[1,2], 张庆灵[1]
(1. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳建筑工程学院 基础科学部, 辽宁 沈阳 110163)

摘 要: 建立连续情形广义系统新的正实引理. 通过对线性矩阵不等式(LMI)的求解和系统的等价变换, 给出了正实状态反馈控制的充分必要条件, 构造了保持系统稳定性的正实控制器设计方法. 数值实例表明, 该求解控制器的方法简单方便, 具有实际意义.

关键词: 广义系统; 广义代数黎卡提不等式; 线性矩阵不等式; 正实; 状态反馈控制
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Design of positive real state feedback control for continuous-time descriptor systems based on LMI

JING Xin, *ZHANG Qing-ling*
(1. School of Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Basic Science Departmant, Shenyang Architectural and Civil Engineeing Institute, Shenyang 110163, China. Correspondent: JING Xin, E-mail: jingxinsy@yahoo.com.cn)

Abstract: For continuous-time descriptor systems, a new positive real lemma is given. Based on the solution to LMIs and simple system transformations, sufficient and necessary conditions for positive real state feedback control design are derived. When the strictly-positive-real state feedback controller is applied to the system, the stability of the closed-loop system is guaranteed.

Key words: descriptor system; GARI; LMI; positive realness; state feedback control

1 引 言

正实性是网络理论中的一个重要概念, 在系统的稳定性、耗散性、二次型最优、代数Riccati方程、鲁棒性及非线性控制研究中具有重要应用. 如何构造一个反馈控制器使得闭环系统不仅内部稳定而且正实, 在鲁棒控制和非线性控制等问题中具有重要意义. 关于正常系统的正实性研究, 由于近年来LMI的求解已有良好的内点算法, 许多研究人员基于LMI取得了时域研究的可喜成果[1~6], 但对广义系统的正实性研究尚不多见. 由于广义系统比一般的系统在描述实际问题时具有更精确的特点, 在电子网络系统、电力系统、经济系统、机械系统、机器人系统、惯性导航系统、交联大系统、化学工程、导弹系统以及航空工程、生物系统、时间序列分析、社会系统等方面有着重要应用. 因此, 对广义系统的正实性研究具有重要意义. 文献[7]基于广义代数黎卡提方程和广义代数黎卡提不等式分别建立了连续与离散情形的正实引理, 获得了广义系统正实性研究的重要成果. 本文在此基础上, 进一步研究广义系统的正实控制问题, 通过构造一个状态反馈控制器, 使闭环传递函数正实, 给出了连续情形的广义系统状态反馈严格正实控制器的设计方法.

收稿日期: 2003-01-22; **修回日期**: 2003-04-01.
基金项目: 辽宁省普通高校学科带头人基金资助项目(124210); 辽宁省科技基金资助项目(2001401041).
作者简介: 靖新(1963—), 女, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士生, 从事广义系统模型降阶、正实控制研究; 张庆灵(1956—), 男, 辽宁营口人, 教授, 博士生导师, 从事广义系统的鲁棒控制、广义系统的H_2/H_∞控制等研究.

2 预备定义及引理

考虑如下线性连续广义系统:

$$E\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx + Du. \tag{1}$$

其中: $E, A \in R^{n\times n}, B \in R^{n\times m}, C \in R^{m\times n}, D \in R^{m\times m}$ 是已知实矩阵; x 为状态向量; y 为输出向量; u 为输入向量. 根据系统的受限等价性, 为研究方便, 设 (E, A) 为Weierstrass 标准形.

系统(1) 的传递函数矩阵为

$$G(s) = C(sE - A)^{-1}B + D. \tag{2}$$

设系统的状态反馈控制为

$$u = Kx + v.$$

其中: $K \in R^{m\times n}$ 为状态反馈控制矩阵, v 为新的参考输入向量.

对应的闭环系统为

$$E\dot{x} = A_kx + Bv, y = C_kx + Dv. \tag{3}$$

其中: $A_k = A + BK, C_k = C + DK$.

记闭环系统(3) 的传递函数矩阵为

$$T(s) = (C + DK)[sE - (A + BK)]^{-1}B + D. \tag{4}$$

定义 1 如果系统的传递函数 $G(s)$ 满足条件: 1) 当 $R(s) \geq 0$ 时 $G(s)$ 解析; 2) 对于 $\omega \in [0, +\infty)$, 满足 $G(j\omega) + G^T(-j\omega) > 0$. 则称系统严格正实(SPR).

定义 2 如果系统严格正实, 且传递函数满足条件 $G(j\infty) + G^T(-j\infty) > 0$, 则称系统扩展严格正实(ESPR).

定理 1 如果 (E, A) 稳定、无脉冲, 且存在矩阵 X, Q, W 和 P 使得

$$\begin{aligned} &E^TX = X^TE \geq 0,\\ &A^TX + X^TA = -P^TP < 0,\\ &B^TX + W^TQ = C,\\ &D + D^T = W^TW, \end{aligned} \tag{5}$$

则 $\Phi(s) = G(s) + G^T(-s) \geq 0$; 如果 B, C^T 列满秩, 则 $\Phi(s) = G(s) + G^T(-s) > 0$, 即 $G(s)$ 严格正实.

证明略.

引理 1 如果矩阵 L 列满秩, 且 F 正定, 则当 $K = -\alpha F^{-1}L\ (0 < \alpha < 1)$ 时, 有

$$(K + F^{-1}L)^TF(K + F^{-1}L) - L^TF^{-1}L < 0. \tag{6}$$

证明略.

记

$$\begin{aligned} &\Phi(X; A_k, B, C_k, D) =\\ &A_k^TX + X^TA_k + (C_k - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}(C_k - B^TX),\\ &\Phi(X; A, B, C, D) =\\ &A^TX + X^TA + (C - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX). \end{aligned}$$

引理 2 下列结论成立:

$$\Phi(X; A_k, B, C_k, D) = \Phi(X; A, B, C, D) + \Psi.$$

其中

$$\begin{aligned} \Psi = &\{(D + D^T)^{-1/2}D[K + (D^T(D + D^T)^{-1}D)^{-1}(B^TX + D^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX))]\}^T\{(D + D^T)^{-1/2}D[K +\\ &(D^T(D + D^T)^{-1}D)^{-1}(B^TX + D^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX))]\} -\\ &[X^TB + (C - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}D](D^T(D + D^T)^{-1}D)^{-1}[B^TX + D^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX)]. \end{aligned}$$

证明

$$\begin{aligned} &\Phi(X; A_k, B, C_k, D) =\\ &A_k^TX + X^TA_k + (C_k - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}(C_k - B^TX) =\\ &A^TX + X^TA + (C - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX) + K^TD^T(D + D^T)^{-1}DK + K^TB^TX + X^TBK +\\ &(C - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}DK + K^TD^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX) =\\ &A^TX + X^TA + (C - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX) + \{(D + D^T)^{-1/2}D[K +\\ &[D^T(D + D^T)^{-1}D]^{-1}(B^TX + D^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX))]\}^T\{(D + D^T)^{-1/2}D[K +\\ &[D^T(D + D^T)^{-1}D]^{-1}(B^TX + D^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX))]\} - [X^TB + (C -\\ &B^TX)^T(D + D^T)^{-1}D][D^T(D + D^T)^{-1}D]^{-1}[B^TX +\\ &D^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX)] =\\ &A^TX + X^TA + (C - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX) + \Psi =\\ &\Phi(X; A, B, C, D) + \Psi. \end{aligned}$$

定理 2[7] 如果系统(1) 正则且 $D + D^T > 0$, B 和 C^T 是列满秩矩阵, 则下列结论等价:

1) 系统(1) 允许且严格正实;

2) 下列 GARI:

$$\begin{aligned} &A^TX + X^TA + (C - B^TX)^T(D + D^T)^{-1}(C - B^TX) < 0,\\ &X^TE = E^TX \geq 0, \end{aligned} \tag{7}$$

存在允许解 X.

要使闭环系统(3) 正实, 需确定合适的 K. 将 $A_k = A + BK$, $C_k = C + DK$ 代入式(7), 有

$$\begin{aligned}&A_k^{\mathrm T}\hat X + \hat X^{\mathrm T}A_k + (C_k - B^{\mathrm T}\hat X)^{\mathrm T}(D + D^{\mathrm T})^{-1}(C_k - B^{\mathrm T}\hat X) < 0,\\ &\hat X^{\mathrm T}E = E^{\mathrm T}\hat X \ge 0.\end{aligned} \tag{8}$$

并记

$$\hat B = \begin{bmatrix}\hat X^{\mathrm T}B\\ D\\ 0\end{bmatrix},\ \hat C = [I \quad 0 \quad 0],$$

$$\Omega = \begin{bmatrix}A^{\mathrm T}\hat X + \hat X^{\mathrm T}A & C^{\mathrm T} - \hat X B & 0\\ C - B^{\mathrm T}\hat X & -2(D + D^{\mathrm T}) & (D + D^{\mathrm T})^{1/2}\\ 0 & (D + D^{\mathrm T})^{1/2} & -I\end{bmatrix}.$$

3　严格正实控制器设计

下面给出状态反馈正实控制器 K 存在的充要条件. 当满足LMI的矩阵 $\hat X$ 确定后, 便可根据所给出的状态反馈正实控制器公式, 对系统进行严格正实反馈控制.

定理 3　设系统(1) 是允许的, 存在使闭环传递函数(4) 正实的充分必要条件是: 如下LMIs 有解 $\hat X$:

$$\begin{aligned}&\hat B K\hat C + (\hat B K\hat C)^{\mathrm T} + \Omega < 0,\\ &\hat X^{\mathrm T}E = E^{\mathrm T}\hat X \ge 0.\end{aligned} \tag{9}$$

证明　根据定理 2, 状态反馈控制正实的充分必要条件是存在矩阵 $\hat X$ 使得不等式(8) 成立. 由 Schur 引理, 有

$$E^{\mathrm T}\hat X = \hat X^{\mathrm T}E \ge 0,$$

$$\begin{bmatrix}A_k^{\mathrm T}\hat X + \hat X^{\mathrm T}A_k & C_k^{\mathrm T} - \hat X^{\mathrm T}B & 0\\ C_k - B^{\mathrm T}\hat X & -2(D + D^{\mathrm T}) & (D + D^{\mathrm T})^{1/2}\\ 0 & (D + D^{\mathrm T})^{1/2} & -I\end{bmatrix} < 0$$

成立. 因为

$$\hat B K\hat C = \begin{bmatrix}\hat X^{\mathrm T}B\\ D\\ 0\end{bmatrix} K [I \quad 0 \quad 0] = \begin{bmatrix}\hat X^{\mathrm T}BK & 0 & 0\\ DK & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$(\hat B K\hat C)^{\mathrm T} = \begin{bmatrix}K^{\mathrm T}B^{\mathrm T}\hat X & K^{\mathrm T}D^{\mathrm T} & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}.$$

于是式(8) 成立当且仅当 $E^{\mathrm T}\hat X = \hat X^{\mathrm T}E \ge 0$, 且

$$\hat B K\hat C + (\hat B K\hat C)^{\mathrm T} + \Omega = \begin{bmatrix}A^{\mathrm T}\hat X + K^{\mathrm T}B^{\mathrm T}\hat X + \hat X^{\mathrm T}A + \hat X^{\mathrm T}BK & C^{\mathrm T} + K^{\mathrm T}D^{\mathrm T} - \hat X B & 0\\ C + DK - B^{\mathrm T}\hat X & -2(D + D^{\mathrm T}) & (D + D^{\mathrm T})^{1/2}\\ 0 & (D + D^{\mathrm T})^{1/2} & -I\end{bmatrix} < 0$$

成立. □

定理 4　设 $\hat B$, $\hat C$, Ω 已知, 且 $\hat B$ 不行满秩, $\hat C$ 不列满秩, 则关于 K 的LMI(9) 有解的充分必要条件是 $\hat B^{\perp\mathrm T}\Omega\hat B^{\perp} < 0$, $E^{\mathrm T}\hat X = \hat X^{\mathrm T}E \ge 0$, 其中 $\hat B^{\perp} = \mathrm{Ker}(\hat B)$.

证明　因为

$$\hat B^{\perp} = \begin{bmatrix}\hat X^{-1} & 0 & 0\\ 0 & I & 0\\ 0 & 0 & I\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}B\\ D\end{bmatrix}^{\perp} & 0\\ 0 & I\end{bmatrix},$$

使 $\hat B^{\perp\mathrm T}\hat B = 0$, 所以式(9) 成立当且仅当

$$\begin{aligned}&(\hat B^{\perp})^{\mathrm T}\hat B K\hat C\hat B^{\perp} + ((\hat B^{\perp})^{\mathrm T}\hat B K\hat C\hat B^{\perp})^{\mathrm T} +\\ &(\hat B^{\perp})^{\mathrm T}\Omega\hat B^{\perp} < 0,\ E^{\mathrm T}\hat X = \hat X^{\mathrm T}E \ge 0,\end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned}&(\hat B^{\perp})^{\mathrm T}\Omega\hat B^{\perp} =\\ &\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}B\\ D\end{bmatrix}^{\perp\mathrm T} & 0\\ 0 & I\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat X^{-\mathrm T} & 0 & 0\\ 0 & I & 0\\ 0 & 0 & I\end{bmatrix}\times\\ &\begin{bmatrix}A^{\mathrm T}\hat X + \hat X^{\mathrm T}A & C^{\mathrm T} - \hat X^{\mathrm T}B & 0\\ C - B^{\mathrm T}\hat X & -2(D + D^{\mathrm T}) & (D + D^{\mathrm T})^{1/2}\\ 0 & (D + D^{\mathrm T})^{1/2} & -I\end{bmatrix}\times\\ &\begin{bmatrix}\hat X^{-1} & 0 & 0\\ 0 & I & 0\\ 0 & 0 & I\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}B\\ D\end{bmatrix}^{\perp} & 0\\ 0 & I\end{bmatrix} < 0,\\ &E^{\mathrm T}\hat X = \hat X^{\mathrm T}E \ge 0\end{aligned}$$

成立. □

定理 5　设系统(1) 是允许的, 闭环传递函数(4) 正实的充分必要条件是存在满足如下LMI的可逆矩阵 $\hat X$:

$$\begin{aligned}&\hat X^{\mathrm T}E = E^{\mathrm T}\hat X \ge 0,\\ &\begin{bmatrix}B\\ D\end{bmatrix}^{\perp\mathrm T}\times\\ &\begin{bmatrix}A\hat X^{-1} + \hat X^{-\mathrm T}A^{\mathrm T} & \hat X^{-\mathrm T}C^{\mathrm T} - B\\ C\hat X^{-1} - B^{\mathrm T} & -(D + D^{\mathrm T})\end{bmatrix}\begin{bmatrix}B\\ D\end{bmatrix}^{\perp} < 0.\end{aligned} \tag{10}$$

其中 D 可逆, 且

$$D + D^{T} > 0,$$
$$K = -\alpha(D^{T}(D + D^{T})^{-1}D)^{-1}[(I - D^{T}(D + D^{T})^{-1})B^{T}\hat{X} + D^{T}(D + D^{T})^{-1}C],\ \alpha \in (0, 1). \quad (11)$$

证明 1) 必要性: 由给定条件知, 闭环系统严格正实. 根据定理 2, $\hat{X}$ 使 GARI(8) 成立. 根据定理 3 和定理 4, 由 $\hat{B}^{\perp T}\Omega\hat{B}^{\perp} < 0$, $E^{T}\hat{X} = \hat{X}^{T}E \geq 0$, 得

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}^{\perp T} \begin{bmatrix} A\hat{X}^{-1} + \hat{X}^{-T}A^{T} & \hat{X}^{-T}C^{T} - B \\ C\hat{X}^{-1} - B^{T} & -2(D + D^{T}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}^{\perp} & \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}^{\perp T} \begin{bmatrix} 0 \\ (D + D^{T})^{1/2} \end{bmatrix} \\ [0 \quad (D + D^{T})^{1/2}] \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}^{\perp} & -I \end{bmatrix} < 0,$$

$$E^{T}\hat{X} = \hat{X}^{T}E \geq 0.$$

根据 Schur 补引理, $-I$ 可逆, 可得

$$\begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}^{\perp T} \begin{bmatrix} A\hat{X}^{-1} + \hat{X}^{-T}A^{T} & \hat{X}^{-T}C^{T} - B \\ C\hat{X}^{-1} - B^{T} & -(D + D^{T}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}^{\perp} < 0,$$

$$E^{T}\hat{X} = \hat{X}^{T}E \geq 0.$$

再由引理 2, 由于系统(1) 非正实, 要使 $\Phi(\hat{X}; A_k, B, C_k, D) = \Phi(\hat{X}; A, B, C, D) + \Psi < 0$, 必有 α 使 $K = -\alpha F^{-1}L$. 取 $F = D^{T}(D + D^{T})^{-1}D$, $L = B^{T}\hat{X} + D^{T}(D + D^{T})^{-1}(C - B^{T}\hat{X})$, 于是 $\Psi = (K^{T} + L^{T}F^{-1})F(K + F^{-1}L) - L^{T}F^{-1}L < 0$, 且 $K = -\alpha(D^{T}(D + D^{T})^{-1}D)^{-1}[B^{T}\hat{X} + D^{T}(D + D^{T})^{-1})(C - B^{T}\hat{X})]$.

2) 充分性: 根据给出的 $\hat{X}$, K, 可取: $W = (D + D^{T})^{1/2}$, $Q = W^{-1}(C_k - B^{T}\hat{X})$, $A_k^{T}\hat{X} + \hat{X}^{T}A_k < 0$, $\hat{X}^{T}E = E^{T}\hat{X} \geq 0$. 根据引理 1 可知闭环系统(3) 严格正实. □

4 数值例子

考虑广义系统(1), 其中的矩阵分别为

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\ A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1.2 \end{bmatrix},\ C = [1 \quad 1 \quad 1],\ D = 0.5.$$

系统正则、稳定、无脉冲、非正实.

用 Matlab 计算的结果如下:

线性矩阵不等式(10) 的解为

$$X = \begin{bmatrix} 0.7273 & -0.9091 & 0 \\ -0.9091 & -0.6364 & 0 \\ 0.6784 & 1.0553 & 0.4500 \end{bmatrix}.$$

根据式(11), 用搜索方法取 $\alpha = 0.5$, 求出状态反馈控制矩阵为

$$K = [-1.6323 \quad -1.9937 \quad -1.5400].$$

将 $s = j\omega$ 代入 $T(s) = (C + DK)[sE - (A + BK)]^{-1}B + D$, 进一步计算可得

$$T(s) + T^{T}(-s) = \frac{11.5300\omega^{2} + 190.1168}{0.6037\omega^{2} + 86.4240} + 1 > 0$$

即闭环系统 (E, A_k, B, C_k, D) 正则、稳定且严格正实.

5 结 论

本文针对连续型广义系统, 基于线性矩阵不等式(LMI) 给出了在存在新的参考输入情况下, 通过状态反馈正实控制使系统保持内稳定的充分必要条件. 该方法仅涉及到 LMI 的求解和系统的等价变换等. 数值实例表明, 求解控制器的方法简单方便, 具有实际意义.

参考文献(References):

[1] Huang C H, Ioannou P A, Maroulas, et al. Design of strictly positive real systems using constant output feedback[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(3): 569-573.

[2] 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): 577-583.
(Guo L, Xin X, Feng C B. The positive real control problem for generalized linear plants [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(5): 577-583.)

[3] 郭雷, 忻欣, 冯纯伯. 基于线性矩阵不等式的奇异 H_∞ 控制问题的降阶控制器[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 622-628.
(Guo L, Xin X, Feng C B. A linear-matrix-inequality based design method of reduced-order controllers for singular H_∞ control problems[J]. *Control Theory and Applications*, 1996, 13(6): 622-628.)

(下转第 318 页)

4 结 论

本文提出的粗糙-模糊集集成方法, 将连续属性值转换成模糊隶属函数值, 可以避免直接离散化带来的一些不足, 而且对于边界不清晰的连续属性, 可以有更为符合实际问题的表示. 这种粗糙-模糊集集成方法通过定义模糊相似关系及模糊相似类得到粗糙-模糊近似空间的下、上近似, 从而获得决策规则, 为解决粗糙集中连续属性的决策问题提供了一个有效的方法.

参考文献(References):

[1] RicheldiM, Rossotto M. Class-driven statistical discretization of continuous attributes (extended abstract) [A]. *Machine Learning: ECML-95, Lecture Notes in Artificial Intelligence* [C]. Berlin: Springer Verlag, 1995. 335-338.

[2] Chmielewski M R, Grzymala-Busse J W. Global discretization of attributes as preprocessing for machine learning [A]. *Soft Computing: Rough Sets, Fuzzy Logic Neural Networks, Uncertainty Management, Knowledge Discovery, Simulation Councils* [C]. CA: San Diego, 1995. 294-297.

[3] Skowron A, Nguyen H S. Quantization of real value attributes: Rough set and Boolean reasoning approach [J]. *Bulletin of International Rough Set Society*, 1996, 1: 5-16.

[4] Jensen R, Shen Q. Fuzzy-rough sets for descriptive dimensionality reduction[A]. *Proc of the 11th Int Conf on Fuzzy Systems*[C]. HI: Honolulu, 2002. 29-34.

[5] 徐德友. 粗集信息分析在故障诊断中的应用及自修复飞行控制系统效能评估[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.

(上接第 284 页)

[4] 曹永岩, 孙优贤. 鲁棒严格正实控制器设计[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(1): 109-112.
(Cao Y Y, Sun Y X. Synthesis of robust strictly positive real controllers [J]. *Control Theory and Applications*, 1999, 16(1): 109-112.)

[5] Sun W, Khargonekar P P, Shim D. Solution to the positive real control problem for linear time-invariant systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(10): 2034-2046.

[6] Xin C, John T Wen. Positive realness preserving model reduction with H_∞ norm error bounds[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 1995, 42(1): 23-29.

[7] Zhang L Q, James Lam, Xu S Y. On positive realness of descriptor system [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 2000, 49(3): 401-407.

(上接第 314 页)

[7] 姚琼荟, 宋立忠, 温洪. 离散变结构控制系统的比例-等速-变速控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 329-332.
(Yao Q H, Song L Z, Wen H. Proportional-constant-variable rate control for discrete-time variable structure systems[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 329-332.)

[8] Bartoszewicz A Jrzej. Discrete-time quasi-sliding-mode control strategies [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1998, 45(4): 633-637.

[9] 于双和, 强文义, 傅佩琛. 无抖振离散准滑模控制[J]. 控制与决策, 2001, 16(3): 380-382.
(Yu S H, Qiang W Y, Fu P C. Chattering-free discrete quasi-sliding mode controller[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 380-382.)

[10] Chakravatchini a M, Bandyopashyay, Heinz Ueinz Unbehauen. A new algorithm for discrete-time sliding-mode control using fast output sampling feedback [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2002, 49(3): 518-523.