文章编号: 1001-0920(2003)02-0190-04

参数和时延不确定性离散时间系统的 H_∞ 鲁棒控制

姜培刚, 李春文, 龙图景, 石宗英
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘　要: 针对含有参数和时延不确定性线性离散时间系统的鲁棒控制问题, 构造改进的 Lyapunov 函数, 并采用 LMI 与 H_∞ 鲁棒控制相结合的方法, 使得系统在不含外界未知扰动时, 只需满足一个矩阵不等式, 便可通过状态的静态反馈控制使闭环系统达到二次稳定; 而在系统含有外界未知扰动时, 结合基于离散时间系统的无源性控制方法, 同样只需满足一个矩阵不等式, 便可通过状态的静态反馈控制使得闭环系统达到理想的干扰抑制作用。

关键词: 离散时间系统; 时延; 不确定性; 线性矩阵不等式; H_∞ 控制; 鲁棒控制
中图分类号: TP273　　文献标识码: A

Robust H_∞ control for discrete-time systems with parameter uncertainty and time-delayed uncertainty

JIANG Pei-gang, LI Chun-wen, LONG Tu-jing, SHI Zong-ying
(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new robust H_∞ control method is presented in terms of linear matrix inequality (LMI) approach for the discrete-time systems with parameter uncertainty and time-delayed uncertainty. When a matrix inequality is satisfied, based on the modified Lyapunov function, the system without unknown disturbance can be quadratically stabilized under static state feedback control. Furthermore, when another matrix inequality is satisfied, the system with unknown disturbance can be quadratically stabilized with a disturbance attenuation under static state feedback control by a innovative passive control method.

Key words: Discrete-time system; Delay time; Uncertainty; LMI; H_∞ control; Robust control

1　引　言

不确定性参数和时延的存在, 会影响线性离散时间系统的稳定性, 同时会削弱系统对外界未知扰动的抑制率。许多学者对含参数不确定性的线性离散时间系统进行研究[1~5], 设计了状态反馈控制器或输出反馈控制器, 使得闭环系统具有较好的稳定性和对外界未知扰动的抑制率。近年来, 对既含参数不确定性又含固定时延的线性离散时间系统也有了不少研究成果[6~10]。

针对状态系数矩阵存在不确定项的线性离散系统, Garcia[3] 和 Caliskan[5] 采用静态状态反馈控制, 使得闭环系统是二次稳定的。Xie[11] 设计的动态输出反馈控制器, 使得既有状态系数矩阵不确定性又有输入矩阵不确定性的系统达到了对干扰的抑制率为 1 的二次稳定。针对具有外部未知扰动输入而没有控制输入的不确定性离散时间系统, Yuan 等[1] 通

收稿日期: 2001-11-28; 修回日期: 2002-03-27。
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69774011); 国家自然科学基金重点资助项目(69934010); 国家重点基础研究专项基金资助项目(G1998020307)。
作者简介: 姜培刚(1976—), 男, 江苏南通人, 博士生, 从事时延控制、鲁棒控制等研究; 李春文(1958—), 男, 河南焦作人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制等研究。

过求解辅助系统,得出使原系统的闭环系统具有干扰抑制率 γ 的二次稳定性。针对具有固定状态时延的离散系统, Verriest[12] 设计了静态状态反馈控制器,使得在一个矩阵不等式有解的条件下,系统达到渐近稳定。当离散系统含参数不确定性和固定时延时, Song[6] 设计了静态反馈控制器,使得系统在满足两个矩阵不等式时,可以达到渐近稳定且干扰抑制率为 γ。针对具有连续时间对象和离散时间控制器的系统, Halevi 和 Ray[13, 14] 采用增广状态空间法表示,增广状态中除包含对象和控制中的现有状态外,还包含对象输入/输出的过去值,从而得到一个有限维的时变离散时间模型。但该控制方法仅适用于时延固定的系统,并且采用的增广状态的维数正比于系统的时延,当系统维数较高时,增广后的系统维数会很高,从而增加了计算的复杂度。

本文针对既含有参数不确定性又含有时延不确定性的线性离散时间系统,构造改进的适用于此类离散时间系统的 Lyapunov 函数,并采用 LMI 与 H_∞ 鲁棒控制相结合的控制方法,使不确定性离散时间系统在不含外界未知扰动时,只需满足一个矩阵不等式,便可通过状态的静态反馈控制使闭环系统达到二次稳定;而在系统含有外界未知扰动时,结合采用基于离散时间系统的无源性控制方法,同样只需满足一个矩阵不等式,便可通过状态的静态反馈控制使得闭环系统达到理想的干扰抑制作用。

2　问题描述

设被控对象为如下数学模型(Σ_Δ)

$$x_{k+1} = \underbrace{(A+\Delta A)}_{A_\Delta} x_k + \underbrace{(E+\Delta E)}_{E_\Delta} x_{k-\tau} + \underbrace{(B+\Delta B)}_{B_\Delta} u_k + R d_k \tag{1}$$

$$z_k = C x_k \tag{2}$$

其中: $x_k \in R^n$, $x_{k-\tau} \in R^n$, $u_k \in R^{m_1}$, $d_k \in R^{m_2}$ 和 $z_k \in R^l$ 分别为系统的状态变量、存在时延的状态变量、系统输入、外界未知扰动和控制输出; A, E, B, R 和 C 为有相应维数的系数矩阵,且外界未知扰动 $d_k \in l_2[0, \infty)$。由于测量和建模的不精确性,系统中存在不确定项 ΔA, ΔE 和 ΔB,类似于文献[5～11]的假设,本文设定

$$[\Delta A, \Delta E, \Delta B] = L \Delta_k [M_1, M_2, M_3]$$

其中: $L \in R^{n\times\alpha}$; $M_1, M_2 \in R^{\beta\times n}$; $M_3 \in R^{\beta\times m_1}$; $\Delta_k \in R^{\alpha\times\beta}$; $\Delta_k^{\mathrm{t}}\Delta_k \le I$。

系统(Σ_Δ)中的时延量 τ 是随时间变化的,并不是一个固定值,它的变化范围是 $(0, \tau_m)$ 中的整数。

在没有外界未知扰动时,即 $d_k = 0$,系统(Σ_Δ)可写为(Σ_u)

$$x_{k+1} = \underbrace{(A+\Delta A)}_{A_\Delta} x_k + \underbrace{(E+\Delta E)}_{E_\Delta} x_{k-\tau} + \underbrace{(B+\Delta B)}_{B_\Delta} u_k \tag{3}$$

若不考虑系统输入,即 $u_k = 0$,则系统(Σ_u)可写为(Σ_D)

$$x_{k+1} = \underbrace{(A+\Delta A)}_{A_\Delta} x_k + \underbrace{(E+\Delta E)}_{E_\Delta} x_{k-\tau} \tag{4}$$

文献[8]针对时延未知但不变的系统构造 Lyapunov 函数来设计控制器,本文则在此基础上通过增加加权系数 λ 以构造出改进的适用于时延未知且时变离散时间系统的 Lyapunov 函数,即

$$V_k := x_k^{\mathrm{t}} P x_k + \sum_{i=1}^{\tau_m} (x_{k-i}^{\mathrm{t}} \lambda^i W x_{k-i}) = \xi_k^{\mathrm{t}} \cdot \mathrm{diag}(P, \lambda W, \cdots, \lambda^{\tau_m} W) \cdot \xi_k$$

其中: $0 < P = P^{\mathrm{t}}$, $0 < W = W^{\mathrm{t}}$, $0 < \lambda \le 1/2$, $\xi_k = [x_k^{\mathrm{t}}, x_{k-1}^{\mathrm{t}}, \cdots, x_{k-\tau_m}^{\mathrm{t}}]^{\mathrm{t}}$。则 $V_k \ge 0$,且

$$V_{k+1} = x_{k+1}^{\mathrm{t}} P x_{k+1} + \sum_{i=1}^{\tau_m} (x_{k+1-i}^{\mathrm{t}} \lambda^i W x_{k+1-i})$$

$$\Delta V_k := V_{k+1} - V_k = x_{k+1}^{\mathrm{t}} P x_{k+1} - x_k^{\mathrm{t}} P x_k + x_k^{\mathrm{t}} \lambda W x_k - \sum_{i=1}^{\tau_m - 1} x_{k-i}^{\mathrm{t}} (\lambda^i - \lambda^{i+1}) W x_{k-i} - x_{k-\tau_m}^{\mathrm{t}} \lambda^{\tau_m} W x_{k-\tau_m}$$

引理 1　对既不存在外界未知扰动,又不存在系统输入的系统(Σ_D),若存在 $0 < P = P^{\mathrm{t}}$, $0 < W = W^{\mathrm{t}}$,满足矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} A_\Delta^{\mathrm{t}}(k) P A_\Delta(k) - P + \lambda W & A_\Delta^{\mathrm{t}} P E_\Delta \\ E_\Delta^{\mathrm{t}} P A_\Delta & -\lambda^{\tau_m} W + E_\Delta^{\mathrm{t}} P E_\Delta \end{bmatrix} < 0 \tag{5}$$

则系统(Σ_D)是二次稳定的。

证明　由式(5)可得: 对任何 $\zeta_k = [x_k^{\mathrm{t}}, x_{k-\tau}^{\mathrm{t}}]^{\mathrm{t}} \ne 0$,有

$$\zeta_k^{\mathrm{t}} \begin{bmatrix} A_\Delta^{\mathrm{t}}(k) P A_\Delta(k) - P + \lambda W & A_\Delta^{\mathrm{t}} P E_\Delta \\ E_\Delta^{\mathrm{t}} P A_\Delta & -\lambda^{\tau_m} W + E_\Delta^{\mathrm{t}} P E_\Delta \end{bmatrix} \zeta_k < 0 \tag{6}$$

由式(4)展开上式得

$$\Delta V_k := x_{k+1}^{\mathrm{t}} P x_{k+1} - x_k^{\mathrm{t}} P x_k + x_k^{\mathrm{t}} \lambda W x_k - x_{k-\tau}^{\mathrm{t}} \lambda^{\tau_m} W x_{k-\tau} < 0$$

因为 $-x_{k-\tau}^{\mathrm{t}}(\lambda^{\tau} - \lambda^{\tau+1}) W x_{k-\tau} < -x_{k-\tau}^{\mathrm{t}} \lambda^{\tau_m} W x_{k-\tau}$,由文献[7, 8]可知系统($\Sigma_D$)是二次稳定的。□

注 1 若系统(Σ_D)是二次稳定的,且存在$0< P=P^t$, $0<W=W^t$,使得

$$|x^t_{k-\tau}\lambda^{\tau_m}Wx_{k-\tau}-\sum_{i=1}^{\tau_m-1}x^t_{k-i}(\lambda^i-\lambda^{i+1})Wx_{k-i}-x^t_{k-\tau_m}\lambda^{\tau_m}Wx_{k-\tau_m}|<|\Delta V_k|$$

成立,则式(5)有解。

3 系统(Σ_u)的H_∞鲁棒控制

引理 2[7](Schur 补引理) 已知 3 个矩阵$Z_1=Z_1^t$, $0<Z_2=Z_2^t$和Z_3,则$Z_1+Z_3^tZ_2^{-1}Z_3<0$,当且仅当$\begin{bmatrix}Z_1 & Z_3^t\\ Z_3 & -Z_2\end{bmatrix}<0$或$\begin{bmatrix}-Z_2 & Z_3\\ Z_3^t & Z_1\end{bmatrix}<0$。

引理 3[8](矩阵逆引理) 对任何具有适当维数的非奇异实矩阵Z_1及实矩阵Z_2, Z_3和Z_4,有

$$(Z_1+Z_2Z_3Z_4)^{-1}=Z_1^{-1}-Z_1^{-1}Z_2[Z_3^{-1}+Z_4Z_1^{-1}Z_2]^{-1}Z_4Z_1^{-1}$$

引理 4[8] 给定矩阵Z_1, Z_2和Z_3,则

$$Z_1+Z_3\Delta_kZ_2+Z_2^t\Delta_k^tZ_3^t<0,\quad \forall\Delta_k:\Delta_k^t\Delta_k\leq I$$

当且仅当

$$Z_1+\epsilon^{-1}Z_3Z_3^t+\epsilon Z_2^tZ_2<0\quad \exists:\epsilon>0。$$

定理 1 对系统(Σ_u),若存在矩阵$0<P=P^t$, $0<W=W^t$,以及正实数μ_1, μ_2和μ_3,满足线性矩阵不等式

$$-P+\lambda W+\mu_1^{-1}M_1^tM_1+A^t\{\Phi^{-1}+\mu_3B(M_3^tM_3)^{-1}B^t\}^{-1}A<0 \quad (7)$$

其中

$$\Phi=\{P^{-1}-E\cdot\Xi^{-1}\cdot E^t-(\mu_1+\mu_2+\mu_3)LL^t\}^{-1}>0 \quad (8)$$

$$\Xi=\lambda^{\tau_m}W-\mu_2^{-1}M_2^tM_2>0$$

则系统(Σ_u)通过静态控制律$u_k=Kx_k$反馈控制后的闭环系统是二次稳定的。其中

$$K=-\{B^t\Phi B+\mu_3^{-1}M_3^tM_3\}^{-1}B^t\Phi A \quad (9)$$

证明 通过静态控制律$u_k=Kx_k$反馈后,式(3)改写为

$$x_{k+1}=\underbrace{\{A_c+L\Delta_kM_c\}}_{A_{c\Delta}}x_k+\underbrace{(E+\Delta E)}_{E_{c\Delta}}x_{k-\tau}$$

其中:$A_c=A+B\cdot K$, $M_c=M_1+M_2\cdot K$。利用式(8)和引理 3,将式(7)展开,可得

$$-P+\lambda W+\mu_1^{-1}M_1^tM_1+A^t\Phi A-A^t\Phi B[B^t\Phi B+\mu_3^{-1}M_3^tM_3]^{-1}B^t\Phi A<0$$

由A_c的表达式和式(9),上式可改写为

$$-P+\lambda W+\mu_3^{-1}K^tM_3^tM_3K+\mu_1^{-1}M_1^tM_1+A_c^t\Phi A_c<0$$

由引理 2,上式可写为

$$\begin{bmatrix}-P+\lambda W+\mu_3^{-1}K^tM_3^tM_3K+\mu_1^{-1}M_1^tM_1 & A_c^t\\ A_c & -\Phi^{-1}\end{bmatrix}<0$$

再利用引理 4,且由A_c和M_c的表达式,可得

$$\begin{bmatrix}-P+\lambda W & A_{c\Delta}^t\\ A_{c\Delta} & -P^{-1}+\mu_2LL^t+E\cdot\Xi^{-1}\cdot E^t\end{bmatrix}<0$$

利用引理 2,上式可写为

$$-P+\lambda W+A_{c\Delta}^t\{P^{-1}-\mu_2LL^t-E\cdot\Xi^{-1}\cdot E^t\}^{-1}A_{c\Delta}<0$$

令$\Theta=(P^{-1}-\mu_2LL^t)^{-1}$,由引理 3 展开上式得

$$A_{c\Delta}^t\Theta A_{c\Delta}-P+\lambda W+A_{c\Delta}^t\Theta E(\Xi-E^t\Theta E)^{-1}E^t\Theta A_{c\Delta}<0$$

两次引用引理 2,得

$$\begin{bmatrix}-P+\lambda W & 0 & A_{c\Delta}^t\\ 0 & -\Xi & E^t\\ A_{c\Delta} & E & -P^{-1}+\mu_2LL^t\end{bmatrix}<0$$

由引理 4,上式可写为

$$\begin{bmatrix}-P+\lambda W & 0 & A_{c\Delta}^t\\ 0 & -\lambda^{\tau_m}W & E^t\\ A_{c\Delta} & E & -P^{-1}\end{bmatrix}+[0\ \ M_2\ \ 0]^t\Delta_k^t[0\ \ 0\ \ L^t]+[0\ \ 0\ \ L^t]^t\Delta_k[0\ \ M_2\ \ 0]<0$$

经合并且利用引理 2,得

$$\begin{bmatrix}-P+\lambda W & 0\\ 0 & -\lambda^{\tau_m}W\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}A_{c\Delta}^t\\ E_{c\Delta}^t\end{bmatrix}P[A_{c\Delta}\ \ E_{c\Delta}]<0$$

因此,根据引理 1 可得系统(Σ_u)通过静态控制律$u_k=Kx_k$反馈控制后的闭环系统是二次稳定的。□

4 系统(Σ_Δ)的H_∞鲁棒控制

定理 2 对系统(Σ_Δ),任意给定实数$\gamma>0$,若存在$0<P=P^t$, $0<W=W^t$,以及正实数μ_1, μ_2和μ_3,满足线性矩阵不等式

$$-P+\lambda W+C^tC+\mu_1^{-1}M_1^tM_1+A^t\{\Omega^{-1}+\mu_3B(M_3^tM_3)^{-1}B^t\}^{-1}A<0 \quad (10)$$

其中

$$\Omega=\{P^{-1}-\gamma^{-2}RR^t-(\mu_1+\mu_2+\mu_3)LL^t-E\cdot\Xi^{-1}\cdot E^t\}^{-1}>0$$

$$\Xi=\lambda^{\tau_m}W-\mu_2^{-1}M_2^tM_2>0$$

且$\forall k\leq 0$, $x_k=0$。则系统(Σ_Δ)通过静态反馈控制$u_k=\hat{K}x_k$控制后的闭环系统可以实现对干扰的抑制率为γ,其中

$$\hat{K}=-\{B^t\Omega B+\mu_3^{-1}M_3^tM_3\}^{-1}B^t\Omega A$$

证明　通过静态控制律 $u_k = \hat{K}x_k$ 反馈后, 式(1) 变为

$$x_{k+1} = \underbrace{(A_c + L\Delta_k M_c)}_{A_{c\Delta}} x_k + \underbrace{(E + \Delta E)}_{E_{c\Delta}} x_{k-\tau} + Rd_k \qquad (11)$$

其中 $A_c = A + B \cdot \hat{K}$, $M_c = M_1 + M_2 \cdot \hat{K}$。

因为 $\forall k \le 0$, $x_k = 0$, 所以 $V_0 = 0$。设 $H := \Delta V_k + z_k^t z_k - \gamma^2 d_k^t d_k$, $\bar{H} := \Delta\bar{V}_k + z_k^t z_k - \gamma^2 d_k^t d_k$, 仿定理 1 的推导可得

$$\begin{bmatrix} -P + \lambda W + C^t C + A_{c\Delta}^t P A_{c\Delta} & A_{c\Delta}^t P E_{c\Delta} & A_{c\Delta}^t P R \\ E_{c\Delta}^t P A_{c\Delta} & -\lambda^{\tau_m} W + E_{c\Delta}^t P E_{c\Delta} & E_{c\Delta}^t P R \\ R^t P A_{c\Delta} & R^t P E_{c\Delta} & -\gamma^2 I + R^t P R \end{bmatrix} < 0$$

令 $\zeta_k = [x_k^t, x_{k-\tau}^t, d_k^t]^t$, 则

$$\bar{H} = \zeta_k^t \begin{bmatrix} -P + \lambda W + C^t C + A_{c\Delta}^t P A_{c\Delta} & A_{c\Delta}^t P E_{c\Delta} & A_{c\Delta}^t P R \\ E_{c\Delta}^t P A_{c\Delta} & -\lambda^{\tau_m} W + E_{c\Delta}^t P E_{c\Delta} & E_{c\Delta}^t P R \\ R^t P A_{c\Delta} & R^t P E_{c\Delta} & -\gamma^2 I + R^t P R \end{bmatrix} \zeta_k < 0$$

所以

$$H = \zeta_k^t \begin{bmatrix} -P + \lambda W + C^t C + A_{c\Delta}^t P A_{c\Delta} & A_{c\Delta}^t P E_{c\Delta} & A_{c\Delta}^t P R \\ E_{c\Delta}^t P A_{c\Delta} & \aleph & E_{c\Delta}^t P R \\ R^t P A_{c\Delta} & R^t P E_{c\Delta} & -\gamma^2 I + R^t P R \end{bmatrix} \xi_k < 0$$

其中

$$\aleph = -\sum_{i=1}^{\tau_m - 1} x_{k-i}^t (\lambda^i - \lambda^{i+1}) W x_{k-i} - x_{k-\tau_m}^t \lambda^{\tau_m} W x_{k-\tau_m} + E_{c\Delta}^t P E_{c\Delta}$$

展开并利用式(11) 得

$$H(x, d, k) = \Delta V_k + z_k^t z_k - \gamma^2 d_k^t d_k < 0$$

因此根据离散时间系统的无源性控制理论[8], 可得系统(Σ_Δ) 通过静态控制律 $u_k = \hat{K}x_k$ 反馈控制后的闭环系统可以达到对干扰的抑制率为 γ。□

从定理 2 可以看出, 当 $d_k = 0$ 时, $H(x, d, k) = \Delta V_k + z_k^t z_k < 0$, 所以 $\Delta V_k < 0$。此时通过满足式(10) 的反馈控制 $u_k = \hat{K}x_k$, 也可实现闭环系统的二次稳定。

5 仿真实例

离散时间系统的各参数选取如下

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -0.3 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.2 \\ 0.4 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

$$C = [0.2 \quad 0.1], \quad L = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = M_2 = [0.1 \quad 0.1]$$

$$\lambda = 0.5, \quad \tau_m = 3$$

显然(Σ_D) 的标称系统

$$x_{k+1} = Ax_k + Ex_{k-\tau}$$

不是二次稳定的。

存在 $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 10$, $\mu_3 = 1$, $P = \mathrm{diag}(2.5, 2.5)$, $Q = \mathrm{diag}(1.3, 1.3)$ 满足定理 1 中的矩阵不等式, 可以构造系统的反馈控制

$$u_k = [-0.826\,1 \quad 0.218\,6] x_k$$

使得(Σ_u) 是二次稳定的。

选取(Σ_Δ) 对干扰的抑制率为 $\gamma = 0.6$, 存在 $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 10$, $\mu_3 = 1$, $P = \mathrm{diag}(2.2, 2.3)$, $Q = \mathrm{diag}(1.2, 1.1)$, 满足定理 2 中的矩阵不等式, 可以构造系统的反馈控制

$$u_k = [-0.813\,1 \quad 0.159\,9] x_k$$

使得(Σ_Δ) 对干扰的抑制率为 0.6。

注 2　从仿真实例可以看出, 不等式(7) 和(10) 是可能有解的, 又由定理 1 和定理 2 推导过程的可逆性(引理 2 ～ 引理 4 中的条件是充分必要的), 可以看出不等式(5) 有解存在的可能性。针对含有不变时延的系统, Magdi[8] 给出了类似于不等式(5) 的矩阵不等式, 作为判别系统二次稳定的条件。

6 结　论

本文针对含有参数不确定性和时延不确定性的线性离散时间系统, 首先构造改进的适用于此类离散时间系统的 Lyapunov 函数; 然后采用所提出的 LMI 和 H_∞ 鲁棒控制相结合的控制方法, 使得不确定性系统不含外界未知扰动时, 在满足一个矩阵不等式的条件下, 通过状态的静态反馈控制达到闭环系统的二次稳定, 而在系统含有外界未知扰动时, 结合采用基于离散时间系统的无源性控制方法, 同样只需满足一个矩阵不等式, 便可通过状态的静态反馈控制达到理想的干扰抑制作用。

(下转第 198 页)

1990, 26(3): 567-572.

[11] Syrmos Vassilis L. Disturbance decoupling using constrained sylvester equations[J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 1994, 39(4): 797-803.

[12] Hou M, Muller P C. Disturbance decoupled observer design: A unified viewpoint[J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 1994, 39(6): 1338-1341.

[13] 胡品慧,袁璞. 有不可测输入时的变结构观测器[A]. 1997 中国控制与决策学术年会论文集[C]. 沈阳: 东北大学出版社, 1997. 274-276.

[14] 袁璞,左信,郑海涛. 状态反馈预估控制[J]. 自动化学报, 1993, 19(5): 569-577.
(Yuan P, Zuo X, Zheng H T. State feedback predictive control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(5): 569-577.)

[15] Hu P H, Zuo X, Yuan P. Properties of state feedback model predictive control systems[A]. *3rd World Cong Intell Contr Autom*[C]. Hefei, 2000. 4: 2774-2778.

[16] 胡品慧, 袁璞. 状态反馈预测控制系统的鲁棒稳定性[J]. 控制与决策, 2001, 16(1): 126-128.
(Hu P H, Yuan P. Robustness of state feedback predictive control systems[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(1): 126-128.)

(上接第 193 页)

参考文献(References):

[1] Yuan L, Achenie L E K, Jiang W. Robust H_∞ control for linear discrete-time systems with norm-bounded time-varying uncertainty[J]. *Systems & Control Letters*, 1996, 27(4): 190-208.

[2] Schapiro N S, Palmor Z J. Output stabilizing robust control for discrete uncertain systems[J]. *Automatica*, 1998, 34(6): 731-739.

[3] Germain G, Jacques B, Denis A. Robust stabilization of discrete-time linear systems with norm-bounded time-varying uncertainty[J]. *Systems & Control Letters*, 1994, 22(5): 327-339.

[4] Carlos E S, Minyue F, Xie Lihua. H_∞ analysis and synthesis of discrete-time systems with time-varying uncertainty[J]. *IEEE Trans on AC*, 1993, 38(3): 459-462.

[5] Fikret C, Mohamed A Z. Design of robust discrete control with desirable quadratic stability[J]. *ISA Trans*, 2000, 39(4): 401-406.

[6] Song S H, Kim J K. H_∞ control of discrete-time linear systems with norm-bounded uncertainties and time-delays in state[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 137-139.

[7] Xu Shengyuan, James Lam, Yang Chengwu. Quadratic stability and stabilization of uncertain linear discrete-time systems with state delay[J]. *Systems & Control Letters*, 2001, 43(2): 77-84.

[8] Magdi S M. Robust H_∞ control of discrete systems with uncertain parameters and unknown delays[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 627-635.

[9] Guan X, Lin Z, Duan G. Robust guaranteed cost control for discrete-time uncertain systems with delay[J]. *IEE Proc- Control Theory Applications*, 1999, 146(6): 598-602.

[10] Peng Shi. H_∞ control of discrete-time linear uncertain systems with delayed-state[A]. *Proc of the 37th IEEE Conf on Decision & Control*[C]. Tampa, 1998. 4551-4552.

[11] Xie Lihua. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainty[J]. *Int J Control*, 1996, 63(4): 741-750.

[12] Verriest E I, Ivanov A F. Robust stability for delay-difference equations[A]. *Proc of the 34th Conf on Decision & Control*[C]. New Orieans, 1995. 386-391.

[13] Halevi Yoram, Ray A. Integrated communication and control systems: Part Ⅰ—Analysis[J]. *J of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1988, 110(4): 367-373.

[14] Ray A, Halevi Yoram. Integrated communication and control systems: Part Ⅱ—Design considerations[J]. *J of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1988, 110(4): 374-381.