

文章编号: 1000-8152(2001)01-0083-04

输出饱和线性系统的稳定性及 L_2 增益性能*

熊学泉 薛安克 孙优贤

(浙江大学工业控制技术研究所, 工业控制技术国家重点实验室, 杭州, 310027)

摘要: 考虑输出饱和和线性系统的稳定性以及 L_2 增益性能. 在输出为状态量的饱和函数且饱和函数为能量有界的形式下, 得出了可稳线性系统为可静态反馈半全局镇定的结论, 并且对两类性能函数分别得出静态反馈下系统满足某 L_2 增益性能指标的充分条件.

关键词: 输出饱和; 线性系统; 静态反馈; 半全局镇定; L_2 增益

文献标识码: A

Stability and L_2 Gain Performance of Linear Systems Subject to Output Saturation

XIONG Xuequan, XUE Anke and SUN Youxian

(National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Industrial Process Control,
Zhejiang University, Hangzhou, 310027, P. R. China)

Abstract: The stability and L_2 gain performance of linear systems subject to output saturation are considered. The situation studied is that the output value is the saturation output of the state and the saturation function is the type of energy bounded. The result is represent that the stabilizable linear systems are semi-globally stabilizable via static feedback. In the present of static feedback, sufficient conditions which make close-loop systems satisfy the L_2 gain performance prior given for two types of performance function respectively are derived.

Key words: output saturation; linear systems; static feedback; semi-globally stabilize; L_2 gain

1 引言及符号(Introduction and notation)

在现实的控制系统中, 所有控制元件都是具有饱和性质的. 现在已有许多文献研究在输入饱和的情况下系统的分析与综合问题, 参看文[1~4]. 然而在系统中, 具有饱和性质的可能是输出量的测量元件. 对有输出饱和的线性系统, 文[5]研究了系统的可观测性, 也即根据饱和和输出重构状态量的可能性. 然而对具有输出饱和的系统的其它方面的研究并不多. 本文针对如图 1 所示的系统讨论了系统的稳定性及 L_2 增益性能(也即 H_∞ 性能), 其中 P 为线性对象, C 为控制器, $\sigma(\cdot)$ 为饱和函数, w, u, z, y 和下节定义相同. 对于输出量为状态的饱和量且饱和函数为一类特殊的饱和函数, 得出了可稳线性对象为可半全局镇定的结论; 并且分别针对两类特殊的性能函数对系统的 L_2 增益性能进行了分析与设计.

1.1 符号(Notation)

$P > 0$, P 为对称正定矩阵; $\|\cdot\|$: 向量的欧

几里德范数; $\|\cdot\|_{L_2}$: 信号的 L_2 范数; $\lambda_{\max}(\cdot)$: $\lambda_{\min}(\cdot)$: 矩阵的最大、最小特征值; $\exp(\cdot)$: 指数函数.

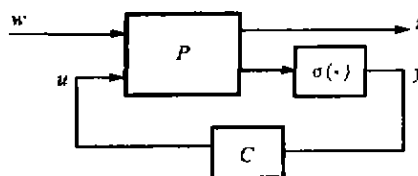


图 1 具有输出饱和的系统框图

Fig. 1 System subject to output saturation

2 问题描述(Problem description)

本文考虑如下两类具有输出饱和的线性系统:

$$\Sigma_1: \quad \dot{x} = Ax + Bu, \quad y = \sigma(x);$$

$$\Sigma_2: \quad \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ew, \\ z = Cx + Du, \\ y = \sigma(x). \end{cases}$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态量, $u \in \mathbb{R}^m$ 为控制量, $w \in \mathbb{R}^l$ 为

* 基金项目: 国家自然科学基金重点基金(69635010)及国家自然科学基金(69874036)资助项目.
收稿日期: 1998-12-14; 收修改稿日期: 1999-10-22.

外界干扰量, $x \in \mathbb{R}^n$ 为被控量, 也即性能函数, $y \in \mathbb{R}^m$ 为输出量, 在此为状态量的饱和输出: A, B, C, D, E 为适当维数的矩阵; $\sigma(\cdot)$ 为一类特殊的饱和函数, 其数学描述如下:

$$\sigma(x) = \beta(x)x, \quad (1)$$

$$\beta(x) = \begin{cases} 1, & \|x\| \leq 1, \\ 1/\|x\|, & \|x\| > 1. \end{cases} \quad (2)$$

此类函数为能量饱和函数. 本文以下分别针对系统 Σ_1 的稳定性以及系统 Σ_2 的 L_2 增益性能进行分析与设计.

3 稳定性分析 (Analysis of the stability)

众所周知, 对于线性系统可通过静态状态反馈实现全局镇定, 其结论可表示为如下引理:

引理 1 对于系统 Σ_1 , 如 (A, B) 可稳, 则对于任意的 $Q > 0$, 下列 Riccati 方程必存在 $P > 0$ 的解:

$$A^T P + PA - PBB^T P + Q = 0, \quad (3)$$

且系统可通过状态反馈 $u = -B^T P x$ 实现全局渐进镇定.

此结论在一般的线性系统著作中均有论述.

但是由于输出饱和的存在, 不是所有的 (A, B) 可稳系统 Σ_1 可通过静态反馈实现全局镇定, 这一结论可由一简单的例子证实. 设系统为:

$$\dot{x} = x + u, \quad y = \sigma(x). \quad (4)$$

显然此系统为可稳的, 且 $x = 0$ 为平衡点, 取李雅普诺夫函数为 $V = \frac{1}{2}x^2$, 则对于任意的 $u = ky$ 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= dV/dt = x\dot{x} = \\ &x(x + k\sigma(x)) = x^2(1 + k\beta(x)). \end{aligned} \quad (5)$$

对于任意的 $k \geq 0$, $\dot{V} \geq 0$; 而对于任意的 $k < 0$, 当 $\|x\| > -k$ 时, $\dot{V} \geq 0$. 此系统是不能由静态反馈实现全局镇定的.

尽管可稳系统有如上的结论, 但它却可以通过静态反馈 $u = ky$ 实现如下定义的半全局镇定.

定义 1 (半全局镇定)^[4] 考虑系统 Σ_1 , 如果对于任意给定的有界集 $\Psi \subset \mathbb{R}^n$, 存在一静态反馈 $u = Ky$ 使闭环系统的平衡点 $x = 0$ 为局部渐近稳定的, 且 Ψ 包含于局部渐近稳定收敛域之中, 则称系统 Σ_1 为可以通过静态反馈 $u = Ky$ 实现半全局镇定的.

定理 1 如 (A, B) 可控, 则系统 Σ_1 为可通过静态反馈 $u = Ky$ 实现半全局镇定.

证 对于任意给定的有界集 $\Psi \subset \mathbb{R}^n$, 必定存在常数 $a > 0$, $\Psi \subset \{x \mid \|x\| < a, x \in \mathbb{R}^n\}$.

因 (A, B) 可稳, 给定 $Q > 0$, 由引理 1, Riccati 方程(3)必定存在 $P > 0$ 的解. 可以证明当取 $u =$

$-\frac{1}{2}c\alpha B^T P y$ 时, 闭环系统在 Ψ 内为渐近稳定的. 其中 $c = \sqrt{\lambda_{\max}(P)/\lambda_{\min}(P)}$, 显然 $c \geq 1$.

取李雅普诺夫函数为 $V = x^T P x$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= dV/dt = x^T(A^T P + PA)x + 2x^T P B u = \\ &-x^T Q x + x^T P B B^T P x - c\alpha x^T P B B^T P \sigma(x) = \\ &-x^T Q x + (1 - c\alpha\beta(x))x^T P B B^T P x, \end{aligned} \quad (6)$$

则当 $\beta(x) \geq 1/(c\alpha)$, 即 $\|x\| \leq c\alpha$ 时, $\dot{V} < 0$.

以下证明当 $x(0) \in \Psi$ 时, $\forall t > 0, \dot{V} < 0$, 即系统为渐近稳定的. 采用反证法, 假设存在 $T_1 > 0$, $\dot{V}(T_1) \geq 0$. 显然 $\dot{V}(0) < 0$, 则必存在 $0 < T \leq T_1$, $\forall t \in (0, T), \dot{V}(t) < 0$, 且 $\dot{V}(T) = 0$, 因此

$$\begin{aligned} \|x(T)\|^2 &= x^T(T)x(T) \leq \\ &x^T(T)P x(T)/\lambda_{\min}(P) < x_0^T P x_0/\lambda_{\min}(P) \leq \\ &\lambda_{\max}(P)x_0^T x_0/\lambda_{\min}(P) \leq (c\alpha)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)可知 $\dot{V}(T) < 0$, 与假设矛盾, 结论得证. 证毕.

4 L_2 增益性能分析与综合 (Analysis and synthesis of the L_2 gain performance)

本节考虑系统 Σ_2 的 L_2 增益性能问题.

引理 2 如果对于任意的 $t \leq T$, 有 $\dot{V}(t) \leq -aV(t) + b$, 且 $V(0) = 0$, 其中 $a > 0, b > 0$. 则对于任意的 $t \leq T, V(t) \leq b/a(1 - \exp(-at))$.

证 结论显然.

首先讨论系统 Σ_2 在 $D = 0$ 时的 L_2 增益性能. 当饱和不存在时, 此时控制律 $u = Kx$ 的设计问题即为标准的 H_∞ 状态反馈控制问题, 有如下的结论.

定理 2^[6] 当 $D = 0$ 时, 系统 Σ_2 可通过静态状态反馈 $u = Kx$ 使闭环系统为内稳定且 H_∞ 性能指标 $\|G_w(s)\|_\infty \leq \gamma$ 的充分必要条件为: 存在 $Q > 0, \tau > 0$ 使下列 Riccati 方程存在 $P > 0$ 的解:

$$A^T P + PA + C^T C - \tau P B B^T P + \gamma^{-2} P E E^T P + Q = 0, \quad (8)$$

特别地可取 $K = -\frac{\tau}{2} B^T P$.

当饱和存在时, 可有如下结论:

定理 3 考虑以下两命题:

1) 当 $D = 0$ 时, 系统 Σ_2 可通过静态状态反馈 $u = K_1 x$ 使闭环系统内稳定且 H_∞ 性能指标 $\|G_w(s)\|_\infty \leq \gamma$;

2) 当 $D = 0$, 干扰信号幅值有界时 (即 $\forall t > 0, \|w(t)\| < a, a$ 为一确定的常数), 系统 Σ_2 可通过静态反馈 $u = Ky$ 使闭环系统在无干扰时 ($w(t) = 0$) 局

部稳定,且在零初始条件下($x(0) = 0$)其 L_2 增益小于 γ (即 $\|z\|_{L_2}/\|w\|_{L_2} < \gamma$).

则 1) \Rightarrow 2).

证 这也就是要证明:当 $w^T(t)w(t) < a^2$ 时,系统可通过静态反馈 $u = Ky$ 满足 2) 中的稳定性及性能要求的充分条件为:存在 $\tau > 0, Q > 0$, 式(8)有 $P > 0$ 的解.

下面证明当以上条件成立且同时取 $K = -\frac{\delta}{2}B^TP$, 则闭环系统能满足上述稳定性及性能要求,其中

$$\delta \geq \max(a\gamma\tau/\sqrt{\lambda_{\min}(P)\lambda_{\min}((C^TC+Q)P^{-1})}, \tau).$$

令 $\varepsilon = \lambda_{\min}((C^TC+Q)P^{-1})$, 则

$$\varepsilon P = P^{1/2}\lambda_{\min}(P^{-1/2}(C^TC+Q)P^{-1/2})P^{1/2} \leq C^TC+Q. \quad (9)$$

由式(8),可得

$$A^TP + PA - \tau PBB^TP + \gamma^{-2}PEE^TP + \varepsilon P \leq 0. \quad (10)$$

取李雅普诺夫函数为 $V = x^TPx$. 对 V 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = dV/dt = & x^T(A^TP + PA)x + 2x^TPBu + 2x^TPEw \leq \\ & -\varepsilon x^TPx + \tau x^TPBB^TPx - \delta\beta(x)x^TPBB^TPx + \gamma^2w^Tw \leq \\ & -\varepsilon V + (\tau - \delta\beta(x))x^TPBB^TPx + (a\gamma)^2. \end{aligned} \quad (11)$$

另外当 $V \leq (a\gamma)^2/\varepsilon$ 时,可得 $\tau - \delta\beta(x) \leq 0$. 这是因为:

$$x^Tx \leq \frac{1}{\lambda_{\min}(P)}x^TPx \leq (a\gamma)^2/(\varepsilon\lambda_{\min}(P)). \quad (12)$$

当 $(a\gamma)^2/(\varepsilon\lambda_{\min}(P)) \leq 1$ 时, $\beta(x(t)) = 1$. 而当 $(a\gamma)^2/(\varepsilon\lambda_{\min}(P)) > 1$ 时, $\beta(x(t)) \geq \sqrt{\varepsilon\lambda_{\min}(P)}/(a\gamma)$. 由 δ 满足的条件易证 $\tau - \delta\beta(x) \leq 0$.

首先证明稳定性. $w(t) = 0$ 时,

$$\dot{V} \leq -\varepsilon V + (\tau - \delta\beta(x))x^TPBB^TPx. \quad (13)$$

同定理 1 的证明可证当 $x(0) \in \{x \mid x^TPx \leq \lambda_{\min}(P)\delta^2/\tau^2\}$ 时,系统为渐近稳定的.

以下证明 L_2 增益性能. 在此又首先证明 $\forall t \in [0, +\infty), V(t) < (a\gamma)^2/\varepsilon$. 采用反证法,即假设存在 $T_1 > 0, V(T_1) \geq (a\gamma)^2/\varepsilon$. 显然 $V(0) = 0$, 则必存在 $0 < T \leq T_1, \forall t \in (0, T), V(t) < (a\gamma)^2/\varepsilon$, 且 $V(T) = (a\gamma)^2/\varepsilon$. 则 $\forall t \in (0, T], \tau - \delta\beta(x) \leq 0$. 因此由式(11)得: $\forall t \in (0, T]$.

$$\dot{V} \leq -\varepsilon V + (a\gamma)^2, \quad (14)$$

$$V \leq \frac{(a\gamma)^2}{\varepsilon}(1 - \exp(-\varepsilon t)), \quad (15)$$

$$V(T) < (a\gamma)^2/\varepsilon. \quad (16)$$

上式与假设矛盾, 结论得证, 同时有 $\forall t \in [0, +\infty), \tau - \delta\beta(x) \leq 0$.

$$\begin{aligned} dV/dt + z^Tz - \gamma^2w^Tw \leq \\ -x^TQx + (\tau - \delta\beta(x))x^TPBB^TPx < 0, \end{aligned} \quad (17)$$

则闭环系统 L_2 增益小于 γ . 证毕.

根据定理 3, 当 $D = 0$, 且干扰信号幅值有界时, 可由不考虑饱和设计静态反馈控制器来设计有饱和时的静态反馈控制律.

当 $C^TD = 0$ 时, 针对静态反馈控制器的设计, 可得如下结论.

定理 4 考虑系统 Σ_2 , 当 $C^TD = 0$, 且 $\|w(t)\| < 1$ (取 1 是为了简洁, 取其他值时同理), 如果存在 $\alpha > 0, v > 0$, 使下列矩阵不等式有 $Q > 0, \eta > 1$ 的解:

$$\begin{bmatrix} AQ + QA^T + \alpha Q - BB^T & E \\ E^T & -vI \end{bmatrix} < 0, \quad (18)$$

$$vQ - \alpha\eta I < 0, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} -\alpha Q + \eta(\gamma^{-2}vBD^TDB^T/4) & QC^T \\ CQ & -v^{-1}\gamma^2I \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

或者使式(18)、(19)以及矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} -\alpha Q + \gamma^{-2}vBD^TDB^T/4 & Q^TC^T \\ CQ & -v^{-1}\gamma^2I \end{bmatrix} < 0, \quad (21)$$

有 $Q > 0, 0 < \eta \leq 1$ 的解, 则反馈控制器 $u = -\frac{\delta}{2}B^TQ^{-1}y$, 其中 $\delta = \max(1, \sqrt{\eta})$, 可使闭环系统无干扰时局部稳定, 且在零初始状态条件下, L_2 增益小于 γ .

证 取李雅普诺夫函数 $V = x^TPx$, 其中 $P = Q^{-1}$, 对 V 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = x^T(A^TP + PA)x + 2x^TPBu + 2x^TPEw < \\ -\alpha V + (1 - \delta\beta(x))x^TPBB^TPx + vw^Tw. \end{aligned} \quad (22)$$

当 $w = 0$ 时, 同定理 1 可证系统在 $\Omega = \{x \mid x^TPx \leq \lambda_{\min}(P)\delta^2\}$ 之内渐近稳定.

由式(19)可见得当 $V \leq v/a$ 时, $\|x\| < \sqrt{\eta}$. 由此以及 δ 满足的条件易证当 $V \leq v/a$ 时, $1 - \delta\beta(x) \leq 0$.

因 $\forall t \in [0, +\infty), \|w(t)\| \leq 1$, 和定理3的证明同理, 可以证明 $\forall t \in [0, +\infty), V(t) < v/\alpha$. 则同时有 $\forall t \in [0, +\infty), 1 - \delta\beta(x) \leq 0$. 由式(22)得:

$$\dot{V} < -\alpha V + vw^T w, \quad (23)$$

则:

$$\int_0^{+\infty} \alpha V dt < \int_0^{+\infty} \alpha V dt + V(\infty) - V(0) < v \int_0^{+\infty} w^T w dt = v \|w\|_{L_2}^2. \quad (24)$$

当 $\eta > 1$ 时, $u = -\frac{1}{2}\sqrt{\eta}B^T P y$, 由式(20)得:

$$\begin{aligned} \|z\|_{L_2}^2 &= \int_0^{+\infty} x^T (C^T C + \beta_2(x) \eta P B D^T D B^T P / 4) x dt \leq \\ &\int_0^{+\infty} x^T (C^T C + \eta P B D^T D B^T P / 4) x dt < \\ &\int_0^{+\infty} (\gamma^2 \alpha x^T P x / v) dt < \gamma^2 \|w\|_{L_2}^2. \end{aligned} \quad (25)$$

当 $0 < \eta \leq 1$ 时, $u = -\frac{1}{2}B^T P y$ 由式(21)同理可得:

$$\|z\|_{L_2}^2 < \gamma^2 \|w\|_{L_2}^2. \text{ 则系统的 } L_2 \text{ 增益小于 } \gamma.$$

矩阵不等式(18)~(21)对于 α 和 v 为非线性的, 需固定 α 和 v 才能将其转化为线性矩阵不等式并利用 MATLAB 的 LMI toolbox 来求解. 为简化求解可将 v 取为和 α 相同, 此时以上几式可以通过只对 α 的搜索来求解.

5 算例(Numerical example)

考虑如下系统 Σ :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -10 & -10 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \end{bmatrix} w,$$

$$z_1 = [0 \ 1] x,$$

$$z_2 = [0 \ 1] u.$$

首先当 $w^T(t)w(t) \leq 10$ 时, 针对性能函数 z_1 进行控制器的设计. 此时 $D = 0$, 当 $\gamma = 1$ 时, 根据定理3取 $Q = I$, 有解:

$$\tau = 2, P = \begin{bmatrix} -0.8263 & 0.0102 \\ 0.0102 & -0.0984 \end{bmatrix}.$$

则在考虑输出饱和时可得反馈控制器:

$$K_0 = -\frac{\tau}{2} B^T P = \begin{bmatrix} -0.8263 & 0.0102 \\ 0.0102 & -0.0984 \end{bmatrix}.$$

在不考虑输出饱和时可得反馈控制器:

$$\delta = 20 / \sqrt{\lambda_{\min}(P) \lambda_{\min}((C^T C + Q)P^{-1})} = 6.6112,$$

$$K_1 = -\frac{\delta}{2} B^T P = \begin{bmatrix} -2.7314 & 0.0336 \\ 0.0336 & -0.3254 \end{bmatrix}.$$

图2为当系统 Σ 在干扰为 $w(t) = 10\sin(\pi t)$ 时 z_1 的时间响应图, 从图可以看出取 K_1 时的响应明显要好于取 K_0 时的响应.

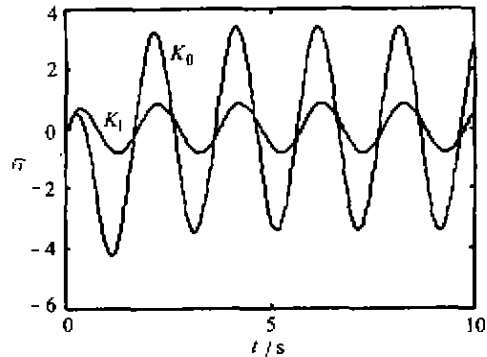


图2 z_1 的时间响应图
Fig. 2 Time response of z_1

当性能函数取 z_2 且 $w^T(t)w(t) \leq 1, \gamma = 1$ 时, $C = 0, C^T D = 0$. 求解矩阵不等式(18)~(20)有解 $Q = \begin{bmatrix} 0.09 & -0.23 \\ 0.23 & 3.40 \end{bmatrix}, \eta = 7.49$, 由于 $\eta > 1$, 则可取控制律:

$$K = -\frac{\sqrt{\eta}}{2} B^T Q^{-1} = \begin{bmatrix} -18.32 & -1.24 \\ -1.24 & -0.47 \end{bmatrix}.$$

6 结束语(Conclusion)

本文针对具有输出饱和的线性系统讨论了系统的稳定性以及 L_2 增益性能, 当输出量为状态量且饱和函数为能量饱和函数, 得出了可稳线性系统为可半全局镇定的结论; 并且针对两类性能函数 ($D = 0$ 以及 $D \neq 0$) 对系统的 L_2 增益性能的分析与设计进行了讨论. 最后给出了一简单的算例. 本文第一次讨论了输出饱和情况下系统的稳定性及性能问题, 但所考虑的情况是比较特殊的, 进一步的研究是如何处理更一般的问题, 如饱和函数为幅值有界形式的、输出量为一般的量而不是状态量, 以及反馈为动态的等.

参考文献(References)

- [1] Bernstein D S and Michel A N, Editors. Special issue on saturating actuators[J]. Int. J. of Robust and Nonlinear Control, 1995, 5(5): 375-512
- [2] Sussmann H J, Sontag E D and Yang Y. A general result on the stabilization of linear system using bound controls[J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1994, 39(12): 2411-2425
- [3] Nguyen T and Jabbari F. H. design for system with input saturation: an LMI approach[A]. Proc. of the American Control Conference [C], Albuquerque, New Mexico, USA, 1997, 1791-1795

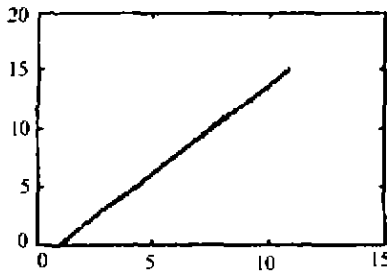


图2 周期输入无记忆地带入噪声

Fig. 2 Periodical input carries with noise memorylessly

6 结论(Conclusion)

采用周期输入进行控制也能达到使用状态反馈进行闭环控制时任意配置系统周期的目的.但实现周期输入却很容易,只要直接控制输入速率就可,它避免了反馈控制所带来的对实时性有较大影响的大计算量.在抑制噪声、明确系统特性等方面周期输入也都比反馈要好.当输入周期 μ 小于系统固有周期 λ 时系统的利用率最高,但存在过量的加工任务因而产生阻塞.当 $\mu > \lambda$ 时,系统利用率没有达到最高,但是却具有一定的抗抖动的能力,裕度为 $\mu - \lambda$.

参考文献(References)

[1] Cohen G, Didier D, Jean P D, et al. A linear system theoretic view

of discrete event processes and its use for performance evaluation in manufacturing [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1985, 30(3):210-220

[2] Chen Wende and Qi Xiangdong. Discrete Event Dynamic System [M]. Beijing: Science Publishing House, 1994 (in Chinese)

[3] Chen Wende, Qi Xiangdong and Deng Shuhui. The eigen-problem and period analysis of discrete event dynamic system [J]. System Science and Mathematical Science, 1990, 3(3):243-260

[4] Cao Jing, Chen Shuzhong and Yuan zhendong. The period analysis of the matrices on maximal algebra [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1999, 3(3):6-11 (in Chinese)

[5] Kleinrock L. Queuing Systems, Vol. 1: Theory [M]. New York: Wiley, 1976

[6] Chen Qizong. Linear System Theory and Design [M]. Beijing: Science Publishing House, 1994 (in Chinese)

本文作者简介

曹敬 1965年生.1985年毕业于苏州大学数学系,分别于1991年与1999年于华东师范大学系统所获硕士、博士学位,现为河海大学计算机学院教师.主要兴趣为建模,自适应控制,离散动态系统及模糊控制.

陈树中 1943年生.1965年毕业于南京大学数学系,1981年获华东师范大学硕士学位,现为华东师范大学系统所教授.研究兴趣为大系统控制,解耦控制,自适应控制,离散动态系统.

(上接第86页)

[4] Lin Z. A semi-global low-and-high gain design technique for linear systems with input saturation-stabilization and disturbance rejection [J]. Int. J. of Robust and Nonlinear Control, 1995, 5(5):381-398

[5] Schwartzschild R and Sontag E D. Output saturation systems [A]. Proc. of the American Control Conference [C], Chicago, Illinois, USA, 1992, 2504-2509

[6] Zhou K and Khargonekar P P. An algebraic Riccati equation approach to H_∞ optimization [J]. Systems & Control Letters, 1988, 11(2):85-91

本文作者简介

熊学泉 1973年生.1997年获西北工业大学自动控制理论与应用工学硕士学位,现为浙江大学工业控制技术研究所工业自动化专业博士研究生.主要研究方向为鲁棒控制和最优控制,饱和和非线性控制.

薛安克 1957年生.副教授.1997年获浙江大学工业自动化专业工学博士学位,现在浙江大学工业控制技术研究所从事博士后研究工作.目前主要研究领域为鲁棒控制和最优控制,智能控制等理论及其在工业生产过程中的应用.

孙优贤 见本刊2001年第1期第54页.