文章编号: 1001-0920(2004)03-0277-04

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

邵汉永, 冯纯伯
(东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 讨论一类线性不确定系统的鲁棒严格正实分析和控制问题, 其中各不确定参数矩阵具有线性分式形式. 分析了这类系统对所有容许不确定性严格正实的条件, 并综合了使闭环内稳且严格正实的动态输出反馈控制器. 通过适当地构造增广系统, 将这类问题转化为确定系统的严格正实分析和设计, 并按增广系统给出了这类不确定系统鲁棒严格正实的充分必要条件以及动态输出反馈鲁棒严格正实控制器的存在条件.

关键词: 不确定动态系统; 扩展严格正实; 线性多变量系统; 正实控制
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Robustness analysis and output feedback control for strictly positive real linear MIMO systems

SHAO Han-yong, FENG Chun-bo
(Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: SHAO Han-yong, E-mail: hanyongshao@163.com)

Abstract: The problem of robustly strict positive real analysis and synthesis is addressed for linear time-invariant systems subjected to a class of parameter uncertainty which can be expressed in a linear fraction form. The conditions under which the uncertain system is strictly positive real for all admissible uncertainties are characterized. A dynamic output-feedback controller is designed to stabilize the uncertain system and achieve the extended strict positive realness property for a given chose-loop transfer function. By constructing augmented systems, the robustly strict positive real analysis and design for the uncertaion system can be converted into the strictly positive real analysis and synthesis for the system without uncertainties. Based on the augmented systems, necessary and sufficient conditions are obtained for the uncertain systems to be robustly strict positive real. Conditions for the existence of the dynamic output-feedback robustly strict positive real controller are also derived.

Key words: uncertain dynamic systems; extended strict positive real; linear MIMO system; positive real control

1 引 言

正实概念在系统分析和综合中起着很重要的作用, 它已广泛应用于鲁棒性分析、自适应控制和非线性控制等方面[1~4]. 综合内稳且闭环传递函数正实的问题称为正实控制问题. 正实控制问题的解可通过解黎卡提方程或不等式得到[5]. 由于不确定性的存在, 鲁棒正实性的研究显得尤为必要. 对此, 文献[6]讨论了状态反馈正实化问题, 文献[7]则考虑了一类输出反馈正实控制器. 但这些讨论大多假定不确定部分范数有界, 而这样界定不确定性所得出的结果具有一定的局限性. 在本文所考虑的对象中, 引用了文献[8]提出的一种不确定性表达方式, 这种不确定性的意义较为广泛. 本文对这类系统进行了鲁棒严格正实分析, 考虑了动态输出鲁棒正实控制器

收稿日期: 2003-01-17; **修回日期**: 2003-04-22
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(69934010).
作者简介: 邵汉永(1964—), 男, 山东济宁人, 博士生, 从事无源性分析、鲁棒控制等研究; 冯纯伯(1928—), 男, 江苏金坛人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与优化、智能系统分析与设计等研究.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的设计. 通过适当地构造增广系统, 将这类问题转化为确定系统的严格正实性分析和控制问题.

2 系统描述

考虑如下系统(Σ):

$$\dot{x} = A_\Delta x + B_\Delta w + B_{1\Delta} u,\ x(0) = 0;$$
$$z = C_\Delta x + D_\Delta w + D_{12\Delta} u;$$
$$y = C_{1\Delta} x + D_{21\Delta} w + D_{22\Delta} u. \tag{1}$$

其中: $x \in R^n$ 为状态, $w \in R^p$ 为外部输入, $z \in R^p$ 为被控输出, $u \in R^m$ 为控制输入, $y \in R^r$ 为量测输出. 系统(Σ) 中各参数矩阵含有不确定性且具以下形式:

$$\begin{bmatrix} A_\Delta & B_\Delta & B_{1\Delta} \\ C_\Delta & D_\Delta & D_{12\Delta} \\ C_{1\Delta} & D_{21\Delta} & D_{22\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^0 & B^0 & B_1^0 \\ C^0 & D^0 & D_{12}^0 \\ C_1^0 & D_{21}^0 & D_{22}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H^0 \\ H_1^0 \\ H_2^0 \end{bmatrix} F(I + JF)^{-1}[E^0 \quad E_1^0 \quad E_2^0]. \tag{2}$$

其中 $\begin{bmatrix} A^0 & B^0 & B_1^0 \\ C^0 & D^0 & D_{12}^0 \\ C_1^0 & D_{21}^0 & D_{22}^0 \end{bmatrix}$ 为已知标称参数矩阵, 而 $\begin{bmatrix} H^0 \\ H_1^0 \\ H_2^0 \end{bmatrix} \in R^{(n+p+r)\times i}$, $[E^0 \quad E_1^0 \quad E_2^0] \in R^{i\times(n+p+m)}$. 为表示不确定性结构的已知矩阵, $F \in R^{i\times i}$ 为未知矩阵且属于以下集合: $F \in \Omega = \{F: F + F^{\mathrm T} \geq -Q,\ J + J^{\mathrm T} > JQJ^{\mathrm T}\}$, Q 为已知对称矩阵, J 为已知可逆矩阵. 这里, 集合 Ω 中的每一个值称为系统(Σ) 的容许不确定性.

注 1: 当 J 退化为 0 时, 式(2) 成为文献[7] 所研究的对象的不确定性形式, 那里假定 F 的范数有界: $F^{\mathrm T}F \leq I$. 而文献[9] 中的不确定性虽具线性分式形式, 但假定 F 为正实的, 即 $F + F^{\mathrm T} \geq 0$. 采用这两种方法界定不确定性有失一般性. 下面来看一个例子:

$$\dot{x} = A_\Delta x.$$

其中

$$A_\Delta = A_0 - H_0 F(I + JF)^{-1}E_0 = -1 - 1\cdot F(1 + 1\cdot F)^{-1}a = -\frac{1 + (1 + a)}{1 + F},\ a > 0.$$

易见该系统对不确定性参数 F 的变化范围 $(-1/(1 + a), +\infty)$ 是鲁棒稳定的. 当 $a \to 0$ 时, 这个范围趋于 $(-1, +\infty)$, 该范围比把 F 界定为正实的范围 $[0, +\infty)$ 或把 F 界定为范数有界的范围 $(-1, 1)$ 都大. 对这类系统在“不确定性 F 为正实的”前提下讨论鲁棒稳定性所得到的结果必是保守的, 把 F 界定为范数有界亦然. 为此本文引进集合 Ω 描述的不确定性, 可望减小保守性. 其中的约束条件 $J + J^{\mathrm T} > JQJ^{\mathrm T}$ 是为确保式(2) 有定义, 即 $I + JF$ 可逆.

事实上

$$\begin{aligned} & J^{-1} + F + (J^{-1} + F)^{\mathrm T} = \\ & J^{-1} + J^{-\mathrm T} + (F + F^{\mathrm T}) = \\ & J^{-1}(J + J^{\mathrm T})J^{-\mathrm T} + (F + F^{\mathrm T}) \geq \\ & J^{-1}(JQJ^{\mathrm T})J^{-\mathrm T} - Q > Q - Q = 0. \end{aligned}$$

所以 $I + JF = J(J^{-1} + F)$ 是可逆的.

在上面的例子中, 若按集合 Ω 描述不确定性, 则因为 $J = 1, Q < 2$, 从而 $F > -1$. 这样界定不确定性来研究鲁棒性, 保守性会小些.

3 预备知识

为研究系统(Σ) 的正实性, 首先回顾一下有关的正实概念和引理. 对于如下系统(Σ_0):

$$\dot{x} = Ax + Bw,\ z = Cx + Dw,$$

有以下定义:

定义 1 1) 系统(Σ_0) 称为正实的, 如果它的传递函数矩阵 $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ 在 $\mathrm{Re}(s) > 0$ 处解析且 $G(s) + G^{\mathrm T}(s^*) \geq 0$; 2) 系统($\Sigma_0$) 称为严格正实的, 如果它的传递函数矩阵 $G(s)$ 在 $\mathrm{Re}(s) \geq 0$ 处解析且 $G(\mathrm{j}\omega) + G^{\mathrm T}(-\mathrm{j}\omega) > 0$, $\forall \omega \in [0, +\infty)$; 3) 系统($\Sigma_0$) 称为扩展严格正实的, 如果它是严格正实的且 $G(\mathrm{j}\infty) + G^{\mathrm T}(-\mathrm{j}\infty) > 0$.

关于扩展严格正实, 有著名的正实引理:

引理 1[5] A 是稳定的且系统(Σ_0) 是扩展严格正实的充要条件为存在 $P > 0$, 使

$$\begin{bmatrix} PA + A^{\mathrm T}P & C^{\mathrm T} - PB \\ C - B^{\mathrm T}P & -(D + D^{\mathrm T}) \end{bmatrix} < 0. \tag{3}$$

对系统(Σ) 进行正实性分析和综合, 还需要下面的引理:

引理 2[8] 设 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, R$ 为实矩阵且 R 半正定, Ω_3 对称, 则对 $\forall \Pi: \Pi^{\mathrm T}\Pi \leq R$, $\Omega_3 + \Omega_1\Pi^{\mathrm T}\Omega_2 + \Omega_2^{\mathrm T}\Pi\Omega_1^{\mathrm T} < 0$ 成立的充要条件是存在 $\epsilon > 0$, 使

$$\Omega_3 + \epsilon^{-2}\Omega_2^{\mathrm T}\Omega_2 + \epsilon^2\Omega_1 R\Omega_1^{\mathrm T} < 0.$$

引理 3 集合 $Y = \{\Delta = F(I + JF)^{-1}, F + F^{\mathrm T} \geq -Q\}$ 可等价地表示为

$$Y = \{\Delta = (I - JQ)^{\mathrm T}M^{-1} + \Pi^{\mathrm T}M^{-1/2}, \Pi^{\mathrm T}\Pi \leq R\}.$$

其中

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$M = J + J^{\mathrm{T}} - JQJ^{\mathrm{T}} > 0,$$
$$R = Q + (I - JQ)^{\mathrm{T}}M^{-1}(I - JQ) \geq 0.$$

证明参见文献[7].

由引理 2 容易得到下面的推论:

推论 1　系统(Σ) 可表为

$$\begin{bmatrix} A_\Delta & B_\Delta & B_{1\Delta} \\ C_\Delta & D_\Delta & D_{12\Delta} \\ C_{1\Delta} & D_{21\Delta} & D_{22\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & B_1 \\ C & D & D_{12} \\ C_1 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H^0 \\ H_1^0 \\ H_2^0 \end{bmatrix} \Pi^{\mathrm{T}}[E \quad E_1 \quad E_2]. \tag{4}$$

其中

$$\begin{bmatrix} A & B & B_1 \\ C & D & D_{12} \\ C_1 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^0 & B^0 & B_1^0 \\ C^0 & D^0 & D_{12}^0 \\ C_1^0 & D_{21}^0 & D_{22}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H^0 \\ H_1^0 \\ H_2^0 \end{bmatrix} (I - JQ)^{\mathrm{T}}M^{-1}[E^0 \quad E_1^0 \quad E_2^0],$$

$$[E \quad E_1 \quad E_2] = M^{-1/2}[E^0 \quad E_1^0 \quad E_2^0].$$

4　正实性分析

有了上述这些知识准备, 下面分析系统(Σ) 的正实性. 在系统(Σ) 中令 $u = 0$, 得系统(Σ_1) 为

$$\dot{x} = A_\Delta x + B_\Delta w, z = C_\Delta x + D_\Delta w.$$

注意到系统(Σ_1) 为不确定系统, 一个基本问题是它在什么条件下对所有容许不确定性都是从 w 到 z 扩展严格正实的. 这是系统的鲁棒正实分析问题.

定义 2　系统(Σ_1) 称为鲁棒稳定且扩展严格正实的, 若对所有容许不确定性都是稳定且扩展严格正实的.

分析系统(Σ_1) 鲁棒稳定且扩展严格正实的等价条件十分困难, 这里试将这个概念加强, 给出它的一个充分条件.

定义 3　系统(Σ_1) 称为强鲁棒稳定且扩展严格正实的, 若存在 $0 < P \in R^{n\times n}$, 使

$$\begin{bmatrix} PA_\Delta + A_\Delta^{\mathrm{T}}P & C_\Delta^{\mathrm{T}} - PB_\Delta \\ C_\Delta - B_\Delta^{\mathrm{T}}P & -(D_\Delta + D_\Delta^{\mathrm{T}}) \end{bmatrix} < 0,$$

对所有容许不确定性都成立.

由引理 1, 系统(Σ_1) 强鲁棒稳定且扩展严格正实必是鲁棒稳定且扩展严格正实的, 反之不成立. 若能找出前者的等价条件, 也就给出了后者的一个充分条件. 但强鲁棒稳定且扩展严格正实也要求考虑到所有容许不确定性. 为克服这一困难, 引入下面的增广系统(Σ_1^α):

$$\dot{x} = Ax + B_\epsilon w, z = C_\epsilon x + D_\epsilon w.$$

其中

$$B_\epsilon = (B \quad -\epsilon H \quad 0), C_\epsilon = \begin{bmatrix} C \\ 0 \\ \epsilon^{-1}E \end{bmatrix},$$

$$D_\epsilon = \begin{bmatrix} D & -\epsilon H_1 & 0 \\ 0 & 2^{-1}I & 0 \\ \epsilon^{-1}E_1 & 0 & 2^{-1}I \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} H \\ H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^0 \\ H_1^0 \\ H_2^0 \end{bmatrix} R^{1/2}. \tag{5}$$

关于两系统(Σ_1) 与(Σ_1^α) 正实性之间的关系, 有下面的定理.

定理 1　不确定系统(Σ_1) 强鲁棒稳定且扩展严格正实的充要条件是存在 $\epsilon > 0$, 使得增广系统(Σ_1^α) 是稳定且扩展严格正实的.

证明　由定义 3, 系统(Σ_1) 强鲁棒稳定且扩展严格正实等价于存在 $P > 0$, 使

$$\begin{bmatrix} PA_\Delta + A_\Delta^{\mathrm{T}}P & C_\Delta^{\mathrm{T}} - PB_\Delta \\ C_\Delta - B_\Delta^{\mathrm{T}}P & -(D_\Delta + D_\Delta^{\mathrm{T}}) \end{bmatrix} < 0,$$

对所有容许不确定性都成立.

由式(4), 该条件等价于 $P > 0$, 使

$$\begin{bmatrix} PA + A^{\mathrm{T}}P & C^{\mathrm{T}} - PB \\ C - B^{\mathrm{T}}P & -(D + D^{\mathrm{T}}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} PH^0 \\ H_1^0 \end{bmatrix} \Pi^{\mathrm{T}}[E \quad -E_1] - [E \quad -E_1]^{\mathrm{T}}\Pi \begin{bmatrix} PH^0 \\ H_1^0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} < 0,$$

$\forall \Pi: \Pi^{\mathrm{T}}\Pi \leq R$ 都成立.

由引理 2, 并注意到式(5), 该条件等价于存在 $\epsilon > 0, P > 0$, 使

$$\begin{bmatrix} PA + A^{\mathrm{T}}P & C^{\mathrm{T}} - PB \\ C - B^{\mathrm{T}}P & -(D + D^{\mathrm{T}}) \end{bmatrix} + \epsilon^2 \begin{bmatrix} PH \\ H_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PH \\ H_1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \epsilon^{-2}[E \quad -E_1]^{\mathrm{T}}[E \quad -E_1] < 0,$$

即

$$\begin{bmatrix} PA + A^{\mathrm{T}}P & C^{\mathrm{T}} - PB & \epsilon PH & \epsilon^{-1}E^{\mathrm{T}} \\ C - B^{\mathrm{T}}P & -(D + D^{\mathrm{T}}) & \epsilon H_1 & -\epsilon^{-1}E_1^{\mathrm{T}} \\ \epsilon H^{\mathrm{T}}P & \epsilon H_1^{\mathrm{T}} & -I & 0 \\ \epsilon^{-1}E & -\epsilon^{-1}E_1 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0.$$

这正是系统(Σ_1^α) 稳定且扩展严格正实的条件. □

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由定理 1, 不确定系统(Σ_1) 的鲁棒严格正实性可转化为确定系统(Σ_1^a) 的严格正实性, 而后者可用 LMI 工具箱解决

定理2 系统(Σ_1^a) 稳定且扩展严格正实的充要条件是存在 $0 < X \in R^{n\times n}$ 及 $\mu > 0$, 使

$$\begin{bmatrix} XA^{\mathrm{T}} + AX & XC^{\mathrm{T}} - B & \mu H & XE^{\mathrm{T}} \\ CX - B^{\mathrm{T}} & -(D + D^{\mathrm{T}}) & \mu H_1 & -E_1^{\mathrm{T}} \\ \mu H^{\mathrm{T}} & \mu H_1^{\mathrm{T}} & -\mu I & 0 \\ EX & -E_1 & 0 & -\mu I \end{bmatrix} < 0.$$

证明 由引理 1, 系统(Σ_1^a) 稳定且扩展严格正实的充要条件是存在矩阵 $P > 0$, 使

$$\begin{bmatrix} PA + A^{\mathrm{T}}P & C^{\mathrm{T}} - PB & \epsilon PH & \epsilon^{-1}E^{\mathrm{T}} \\ C - B^{\mathrm{T}}P & -(D + D^{\mathrm{T}}) & \epsilon H_1 & -\epsilon^{-1}E_1^{\mathrm{T}} \\ \epsilon H^{\mathrm{T}}P & \epsilon H_1^{\mathrm{T}} & -I & 0 \\ \epsilon^{-1}E & -\epsilon^{-1}E_1 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0.$$

矩阵左右两边各乘以 $\mathrm{diag}(P^{-1}, I, \epsilon I, \epsilon I)$, 再令 $P^{-1} = X$, $\epsilon^2 = \mu$, 便得到定理 2 的结果 □

注 2 定理 2 的条件可用 LMI 工具箱中的 feasp 求解器验证, 从而得到 μ 的存在性, 进而可得 ϵ 的存在性

5 严格正实设计

基于上述正实性分析, 下面考虑系统(Σ) 的正实设计

对于系统(Σ), 考虑如下动态输出反馈控制器(Σ_c):

$$\dot{\eta} = A_0\eta + B_0 y,\ u = K_0\eta,$$

在什么条件下使闭环系统是强鲁棒稳定且扩展严格正实的 为此, 引入下面的增广系统(Σ_ϵ):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_\epsilon w + B_1 u, \\ z &= C_\epsilon x + D_\epsilon w + D_{1\epsilon} u, \\ y &= C_1 x + D_{2\epsilon} w + D_{22} u. \end{aligned}$$

其中

$$B_\epsilon = [B \quad -\epsilon H \quad 0],$$

$$D_{2\epsilon} = [D_{21} \quad -\epsilon H_2 \quad 0],$$

$$C_\epsilon = \begin{bmatrix} C \\ 0 \\ \epsilon^{-1}E \end{bmatrix}, D_{1\epsilon} = \begin{bmatrix} D_{12} \\ 0 \\ \epsilon^{-1}E_2 \end{bmatrix},$$

$$D_\epsilon = \begin{bmatrix} D & -\epsilon H_1 & 0 \\ 0 & 2^{-1}I & 0 \\ \epsilon^{-1}E_1 & 0 & 2^{-1}I \end{bmatrix}.$$

于是有如下定理

定理3 对于系统(Σ), 控制器(Σ_c) 使闭环强鲁棒稳定且扩展严格正实的充要条件是存在 $\epsilon > 0$, 使该控制器与系统(Σ_ϵ) 构成的闭环系统是稳定且扩展严格正实的

证明 系统(Σ) 与(Σ_c) 构成的闭环系统为

$$\dot{x}_c = \hat{A}_\Delta x_c + \hat{B}_\Delta w,\ x_c(0) = 0,$$
$$z = \hat{C}_\Delta x_c + D_\Delta w.$$

其中

$$x_c = \begin{bmatrix} x \\ \eta \end{bmatrix}, \hat{B}_\Delta = \begin{bmatrix} B_\Delta \\ B_0 D_{21\Delta} \end{bmatrix},$$

$$\hat{A}_\Delta = \begin{bmatrix} A_\Delta & B_{1\Delta}K_0 \\ B_0C_{1\Delta} & A_0 + B_0D_{22\Delta}K_0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{C}_\Delta = [C_\Delta \quad C_{12\Delta}K_0].$$

而系统(Σ_c) 与(Σ_ϵ) 构成的闭环系统为

$$\dot{x}_c = \hat{A}x_c + \bar{B}w,\ x_c(0) = 0,\ z = \bar{C}x_c + D_\epsilon w.$$

其中

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & B_1K_0 \\ B_0C_1 & A_0 + B_0D_{22}K_0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B_\epsilon \\ B_0D_{2\epsilon} \end{bmatrix}, \bar{C} = [C_\epsilon \quad D_{1\epsilon}K_0].$$

记

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} H^0 \\ B_0H_2^0 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ B_0D_{21} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{H} = \hat{H}R^{1/2}, \hat{C} = [C \quad D_{12}K_0],$$

$$\hat{E} = [E \quad E_2K_0].$$

则 $\hat{A}_\Delta = \hat{A} - \hat{H}\Pi^{\mathrm{T}}\hat{E}$, $\hat{B}_\Delta = \hat{B} - \hat{H}\Pi^{\mathrm{T}}E_1$, $\hat{C}_\Delta = \hat{C} - H_1^0\Pi^{T}\hat{E}$, 而

$$\bar{B} = [\hat{B} \quad -\epsilon\tilde{H} \quad 0], \bar{C} = \begin{bmatrix} \hat{C} \\ 0 \\ \epsilon^{-1}\hat{E} \end{bmatrix}.$$

故由定理 1 的证明过程知, 定理 3 成立 □

注 3 定理 3 只给出了控制器满足的条件, 进一步可用线性矩阵不等式处理方法求解, 限于篇幅, 这里不再赘述

6 结 论

本文分析了一类不确定线性多变量系统的鲁棒稳定和正实性问题, 并考虑了动态输出反馈鲁棒正实控制 结果表明, 这类问题可转化为确定系统的正实分析和控制问题 与文献[7, 9]考虑的不确定性相比, 不确定性意义较广泛, 得到的结果更具一般性 但这里仅考虑了各不确定性参数矩阵满足匹配条件的情况, 即式(2) 所规定的情况, 进一步扩大不确定范围是下一步要做的工作

(下转第 289 页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

给出整体解决方案指导下的企业集成平台实施步骤后, 对基于模型的企业集成平台演进进行了讨论. 本文的工作对促进企业信息化整体解决方案和集成平台技术的研究具有一定的参考价值.

参考文献(References):

[1] 范玉顺. 信息时代企业综合发展框架和信息化整体解决方案[J]. 航空制造技术, 2002, (8): 17-22.
(Fan Y S. Enterprise development framework in the information age and total solution for information system implementation [J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2002, (8): 17-22.)

[2] David S Linthicum. Mercator: Next generation application integration [EB/OL]. http://www.mercator.com, 2002-05-20.

[3] 范玉顺, 吴澄, 石伟. CMS 应用集成平台技术发展现状与趋势[J]. 计算机集成制造系统, 1997, 3(5): 3-8.
(Fan Y S, Wu C, Shi W. The current technical state and development trend of CMS application integration platform [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1997, 3(5): 3-8.)

[4] Scheer A W. *Architecture of Integrated Information System-Foundations of Enterprise Modeling* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

[5] Rodin E. *Dynamic Enterprise Innovation: Establishing Continuous Improvement in Business*[M]. Netherland: BAAN Business Innovation B V, 1998.

[6] 范玉顺, 王刚, 高展. 企业建模理论与方法学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

(上接第 271 页)

[4] Darren M Dawson, Jun Hu, Timothy C Burg. *Nonlinear Control of Electric Machinery* [M]. New York: Dekker, 1998.

[5] Hualin Tan, Jie Chang. Adaptive backstepping control of induction motor with uncertainties[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. San Diego, 1999. (1): 1-5.

[6] Hualin Tan, Jie Chang. Field orientation and adaptive backstepping for induction motor control [A]. *IAS Annual Meeting*[C]. Phoenix, 1999. (4): 2357-2363.

[7] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
(Han J Q. The "extended state observer" of a class of uncertain systems[J]. *Control and Decision*, 1995, 10(1): 85-88.)

[8] 高为炳. 非线性控制系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

[9] Mirosiav Krstic, Loannis Kanellakopoulos, Petar Kokotovic. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1995.

(上接第 280 页)

参考文献(References):

[1] Anderson B D O, Vangpanitlerd S. *Network Analysis and Synthesis: A Modern Systems Theory Approach* [M]. NJ: Prentice-Hall, 1973.

[2] Vidyasagar M. *Nonlinear Systems Analysis* [M]. NJ: Prentice-Hall, 1993.

[3] Hadad W M, Bernstein D S. Explicit construction of quadratic Lyapnov functions for the small gain, positive, circle and Popov theorems and their application to robust stability [A]. *Proc of the 30th conf on Decision and Control* [C]. Brighton, 1991. 2618-2623.

[4] Rolf Johansson, Anders Robertsson. Observer-based strict positive real feedback control system design[J]. *Automatica*, 2002, 38, 1557-1564.

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

[6] Molander P, Willems J C. Synthesis of state feedback control laws with a specified gain and phase margin[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1980, 25: 928-931.

[7] Xie L, Soh Y C. Positive real control problem for uncertain linear time-invariant systems[J]. *Systems Control Letter*, 1995, 24: 265-271.

[8] Xie L, Soh Y C. Robust control of linear system with generalized positive real uncertainty [J]. *Automatica*, 1997, 33(5): 963-967.

[9] Shim D. Equivalence between positive real and norm-bounded uncertainty [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(8): 1190-1193.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net