

线性系统区域稳定的可靠控制

王福忠^{1,2}, 姚波³, 张嗣瀛²

(1. 沈阳工程学院 基础部, 辽宁 沈阳 110036; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004;

3. 沈阳师范大学 数学与系统科学学院, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 针对线性系统, 提出了抵御系统执行器故障和不确定性的状态反馈区域稳定可靠控制设计问题. 通过对具有连续增益故障控制系统的分析, 给出了区域稳定可靠控制器存在的充分条件和设计方法. 所设计的区域稳定可靠控制器可以消除执行器故障对闭环系统极点配置的影响. 使用线性矩阵不等式(LMI)表示的结果能够容易得到可靠控制增益的数值解. 通过 CH-47 双旋翼直升机的实例仿真验证了该结果的可行性. 通过比较区域稳定正常控制系统和可靠控制系统, 进一步说明对系统进行可靠控制设计的必要性.

关键词: 执行器故障; 传感器故障; 区域稳定; 可靠控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Reliable control of regional stabilizability for linear systems

WANG Fu-zhong^{1,2}, YAO Bo³, ZHANG Si-ying²

(1. Basic Science Course Department, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang Liaoning 110036, China;

2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;

3. College of Mathematics and Systems Science, Shenyang Normal University, Shenyang Liaoning 110034, China)

Abstract: The reliable control design of regional stabilizability for linear systems is presented to avoid plant uncertainty and actuator faults. Based on the analysis of systems with continuous gain faults, the sufficient conditions for the existence of regional stabilizability reliable control synthesis were given, and then, the corresponding synthesis conditions for the reliable controllers were developed. The results were cast conveniently into a linear matrix inequality (LMI) framework, which could be solved numerically. The CH-47 helicopter flight control example was given, the computer simulation result illustrated the validity and effectiveness of the proposed methods. Furthermore, the necessity of the reliable design was addressed via the comparisons of the normal control and the reliable control.

Key words: actuator fault; sensor fault; regional stabilizability; linear matrix inequality

1 引言(Introduction)

可靠控制指在设计控制器时把系统部件(执行器和传感器)的故障考虑在设计过程中, 无论部件是否出现故障系统都能满足一定的性能指标. 自从 20 世纪 70 年代 Siljak 第一次提出可靠控制以来, 一些可靠控制器的设计方法相继提出^[1~3].

在实际控制系统设计中, 极点配置是重要的问题之一. 极点配置问题是设计反馈控制器, 将闭环系统极点配置在所期望的位置上, 以保证闭环系统具有所要求的动态和稳态性能. 由于不确定因素和各种扰动的存在, 使精确的极点配置难以实现. 实际控制系统设计只要将闭环系统极点配置在复平面左半平面一个适当的区域内, 就可以使所设计的控制系

统具有一定的动态和稳态特性. 近年来, 人们已提出了一些区域稳定控制器设计的方法^[4~6].

在区域稳定的研究中, 区域稳定可靠控制问题却很少涉及. 文献[6]利用 Lyapunov 方程和广义逆理论, 提出了一种多变量控制系统设计方法, 但所使用的故障模型是离散故障模型. 离散故障模型将发生故障部件的输出信号设定为零输出. 这种假设虽然简化了问题的处理, 但却不是实际故障的真实描述. 在实际问题中, 系统部件出现故障将导致控制器输出控制信号偏离准确值, 这种偏离一般并不是简单的中断. 文献[3]首次提出连续故障模型并使用这种故障模型研究了线性系统 H_∞ 可靠控制问题.

作者针对考虑执行器故障的线性系统, 利用连

续故障模型^[8],研究了区域稳定的可靠控制器和鲁棒区域稳定的可靠控制器设计问题.根据修正的 Lyapunov 方程给出了状态反馈的可靠控制器存在的充分条件,通过求解 LMI 完成系统控制器的设计.无论系统部件是否发生故障,文中所设计的区域稳定可靠控制器都使闭环系统的极点配置在指定的圆形区域内.通过 CH-47 双旋翼直升机的实例仿真验证了本文所提出方法的可行性.通过比较说明对系统进行可靠控制设计的必要性和有效性.

2 问题描述(Problem fomulation)

考虑不确定线性系统

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u^F. \quad (1)$$

不确定性描述为

$$[\Delta A \quad \Delta B] = E\Theta[F_1 \quad F_2]. \quad (2)$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$ 为系统的状态变量, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 为适维常值矩阵; $u^F \in \mathbb{R}^p$ 为考虑执行器故障的控制输入. Θ 为满足 $\Theta^T \Theta \leq I$ 的时变适维矩阵.

系统(1)不考虑不确定性时,变为

$$\dot{x} = Ax + Bu^F. \quad (3)$$

控制器形式及执行器连续故障模型分别为

$$u = Kx, u^F = Mu. \quad (4)$$

其中 $M = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_p)$, $0 \leq m_{li} \leq m_i \leq m_{ui}$, $m_{ui} \geq 1$ ($i = 1, 2, \dots, p$), 称为执行器连续故障矩阵, 当 $m_i = 0$ 时, 表示执行器第 i 条通道信号中断; 当 $m_i = 1$ 时, 表示执行器第 i 条通道正常工作; 当 $0 \leq m_{li} < m_i < m_{ui}$, $m_{ui} \geq 1$ 且 $m_i \neq 1$ 时, 表示执行器第 i 通道部分失效, 部分失效表示执行器输出信号偏离准确值. 可以看出, 连续故障模型既包含离散故障模型, 又表示离散故障模型不能表示的故障情况. 引进如下矩阵

$$M_0 = \text{diag}(m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0p}),$$

$$J = \text{diag}(j_1, j_2, \dots, j_p),$$

$$L = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_p),$$

$$|L| = \text{diag}(|l_1|, |l_2|, \dots, |l_p|).$$

其中

$$m_{0i} = \frac{1}{2}(m_{ui} + m_{li}), \quad j_i = \frac{m_{ui} - m_{li}}{m_{ui} + m_{li}},$$

$$l_i = \frac{m_i - m_{0i}}{m_{0i}} \quad (i = 1, 2, \dots, p).$$

由此得 $M = M_0(I + L)$, $|L| \leq J \leq I$

定义 对于系统(1)如果存在控制(4)使其闭环系统的极点配置到指定区域内, 则称控制(4)为鲁棒区域稳定可靠控制; 系统(1)称为鲁棒区域稳定可靠

控制系统. 对于系统(3)如果存在控制(4)使其闭环系统的极点配置到指定区域内, 称控制(4)为区域稳定可靠控制; 系统(3)称为区域稳定可靠控制系统. 特殊地, 当故障矩阵 $M = I$ 时, 对应的控制分别称为鲁棒区域稳定正常控制和区域稳定正常控制; 对应的系统(1)和(3)分别称为鲁棒区域稳定正常控制系统和区域稳定正常控制系统.

引理 1 对于适当维数矩阵 X, Y , 及 $\epsilon > 0$, 则

$$X^T Y + Y^T X \leq \epsilon X^T X + \epsilon^{-1} Y^T Y.$$

引理 2 设 Y 为对称矩阵, N_1, N_2 为适维常值矩阵, Ξ 为时变适维矩阵, 且满足 $\Xi^T \Xi < \rho I$, 其中 $\rho > 0, \alpha > 0$, 则

$$Y + N_1 \Xi N_2 + N_2^T \Xi^T N_1^T < 0$$

的充分必要条件为

$$Y + \alpha N_1 N_1^T + \rho \alpha^{-1} N_2^T N_2 < 0.$$

引理 3 设 R_1, R_2 为适维常值矩阵, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)$ 为时变适维对角矩阵, 且 $|\Sigma| \leq U$, U 为正定对角矩阵, $\beta > 0$, 则

$$R_1 \Sigma R_2 + R_2^T \Sigma^T R_1^T \leq \beta R_1 U R_1^T + \beta^{-1} R_2^T U R_2.$$

引理 4 矩阵 A 的所有特征值都在中心为 $(-a, 0)$, 半径为 r 圆盘内的充分必要条件是存在 $P > 0$, 使得

$$(A - aI)P(A - aI)^T - r^2 P < 0. \quad (5)$$

3 系统分析(System analysis)

定理 1 系统(3)为区域稳定可靠控制系统充分必要条件为存在正定矩阵 $P > 0$, 故障矩阵 M 和矩阵 S 使

$$\begin{bmatrix} -rP & Q \\ Q^T & -rP \end{bmatrix} < 0. \quad (6)$$

其中 $Q = (A - aI)P + BMS$.

当 $M = I$ 时, 易得

推论 1 系统(3)为区域稳定正常控制系统的充分必要条件为对于所有允许的故障矩阵 M , 存在正定矩阵 $P > 0$ 和矩阵 S 使

$$\begin{bmatrix} -rP & (A - aI)P + BS \\ ((A - aI)P + BS)^T & -rP \end{bmatrix} < 0. \quad (7)$$

如果 (\bar{S}, \bar{P}) 为不等式(7)的可行解, 那么系统(3)的区域稳定正常控制器为 $u = Kx$, 其中 $K = \bar{S}\bar{P}^{-1}$.

定理 2 系统(1)为鲁棒区域稳定可靠控制系统的充分条件为存在标量 $\epsilon_1 > 0$, 正定矩阵 $P > 0$, 矩阵 S , 对所有允许的故障矩阵 M 使

$$\begin{bmatrix} -rP + \varepsilon_1 EE^T & Q & 0 \\ Q^T & -rP & (F_1P + F_2MS)^T \\ 0 & F_1P + F_2MS & -\varepsilon_1 I \end{bmatrix} < 0. \quad (8)$$

如果 $(\bar{\varepsilon}_1, \bar{S}, \bar{P})$ 为不等式(8)的可行解,那么系统(1)的区域稳定可靠控制器为 $u = Kx$,其中 $K = \bar{S}\bar{P}^{-1}$.

证 对于系统(1)和控制器(4)构成的闭环系统

$$\dot{x} = \bar{A}x,$$

其中

$$\bar{A} = (A + \Delta A + BMK + \Delta BMK).$$

设

$$H_0 = F_1P + F_2MKP,$$

$$H_1 = (A - aI)P + BMKP,$$

$$H_2 = H_1 + \Delta AP + \Delta BMKP,$$

则

$$\begin{bmatrix} -rP & H_2 \\ H_2^T & -rP \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -rP & H_1 \\ H_1^T & -rP \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \Theta [0 \ H_0] + \left(\begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \Theta [0 \ H_0] \right)^T \leq$$

$$\begin{bmatrix} -rP + \varepsilon_1 EE^T & H_1 \\ H_1^T & -rP \end{bmatrix} + \varepsilon_1^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ H_0^T \end{bmatrix} [0 \ H_0].$$

根据 Schur 补引理及式(8)得

$$\begin{bmatrix} -rP & H_2 \\ H_2^T & -rP \end{bmatrix} < 0,$$

即 $(\bar{A} - aI)P(\bar{A} - aI)^T - r^2P < 0$. 证毕.

当 $M = I$ 时,易得

推论 2 系统(1)为鲁棒区域稳定正常控制系统的充分条件为存在标量 $\varepsilon_1 > 0$,正定矩阵 $P > 0$ 和矩阵 S 使

$$\begin{bmatrix} -rP + \varepsilon_1 EE^T & (A - aI)P + BS & 0 \\ ((A - aI)P + BS)^T & -rP & (F_1P + F_2S)^T \\ 0 & F_1P + F_2S & -\varepsilon_1 I \end{bmatrix} < 0. \quad (9)$$

如果 $(\bar{\varepsilon}_1, \bar{S}, \bar{P})$ 为不等式(9)的可行解,那么系统(1)的区域稳定正常控制器为 $u = Kx$,其中 $K = \bar{S}\bar{P}^{-1}$.

4 主要结果(Main results)

定理 3 系统(3)为区域稳定可靠控制系统的充分条件为存在标量 $\varepsilon_2 > 0$,正定矩阵 P 及矩阵 S ,使得

$$\begin{bmatrix} G & Q_0 & 0 \\ Q_0^T & -rP & S^T J^{\frac{1}{2}} \\ 0 & J^{\frac{1}{2}} S & -\varepsilon_2 I \end{bmatrix} < 0. \quad (10)$$

其中

$$Q_0 = (A - aI)P + BM_0S,$$

$$G = -rP + \varepsilon_2 BM_0JM_0B^T.$$

如果 $(\bar{\varepsilon}_2, \bar{S}, \bar{P})$ 为不等式(10)的可行解,那么系统(3)的区域稳定可靠控制器为 $u = Kx$,其中 $K = \bar{S}\bar{P}^{-1}$.

证

$$\begin{bmatrix} -rP & Q \\ Q^T & -rP \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -rP & Q_0 \\ Q_0^T & -rP \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BM_0 \\ 0 \end{bmatrix} L \begin{bmatrix} 0 \\ S^T \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} BM_0 \\ 0 \end{bmatrix} L \begin{bmatrix} 0 \\ S^T \end{bmatrix} \right)^T \leq$$

$$\begin{bmatrix} G & Q_0 \\ Q_0^T & -P \end{bmatrix} + \varepsilon_2^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ S^T J^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ S^T J^{1/2} \end{bmatrix}^T.$$

由式(10)和 Schur 补引理,可得到

$$\begin{bmatrix} -rP & Q \\ Q^T & -rP \end{bmatrix} < 0.$$

根据定理 1,可知定理 3 获证.

定理 4 系统(1)为鲁棒区域稳定可靠控制系统的充分条件为存在标量 $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$,正定矩阵 P 及矩阵 S , 使

$$\begin{bmatrix} N_1 & Q_0 & N_4 & 0 \\ Q_0^T & -rP & N_5^T & S^T J^{1/2} \\ N_4^T & N_5 & N_3 & 0 \\ 0 & J^{1/2} S & 0 & -\varepsilon_2 I \end{bmatrix} < 0. \quad (11)$$

其中

$$N_1 = -rP + \varepsilon_1 EE^T, N_3 = -\varepsilon_1 I + \varepsilon_2 F_2 M_0 J (F_2 M_0)^T,$$

$$N_4 = \varepsilon_2 BM_0 J (F_2 M_0)^T, N_5 = F_1 P + F_2 M_0 S.$$

如果 $(\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2, \bar{S}, \bar{P})$ 为不等式(11)的可行解,那么系统(1)的鲁棒区域稳定可靠控制器为 $u = Kx$,其中 $K = \bar{S}\bar{P}^{-1}$.

证

$$\begin{bmatrix} -rP + \varepsilon_1 EE^T & Q & 0 \\ Q^T & -rP & (F_1P + F_2MS)^T \\ 0 & F_1P + F_2MS & -\varepsilon_1 I \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -rP + \varepsilon_1 EE^T & Q_0 & 0 \\ Q_0^T & -rP & N_5^T \\ 0 & N_5 & -\varepsilon_1 I \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} BM_0 \\ 0 \\ F_2M_0 \end{bmatrix} L[0 \ S \ 0] + \left(\begin{bmatrix} BM_0 \\ 0 \\ F_2M_0 \end{bmatrix} L[0 \ S \ 0] \right)^T \leq \begin{bmatrix} G + \epsilon_1 EE^T & Q_0 & N_4 \\ Q_0^T & -rP & N_5^T \\ N_4^T & N_5 & N_3 \end{bmatrix} + \epsilon_2^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ S^T \\ 0 \end{bmatrix} J[0 \ S \ 0].$$

根据 Schur 补引理和式(11)可得到

$$\begin{bmatrix} -rP + \epsilon_1 EE^T & Q & 0 \\ Q^T & -rP & (F_1P + F_2MS)^T \\ 0 & F_1P + F_2MS & -\epsilon_1 I \end{bmatrix} < 0.$$

根据定理 2,可知定理 4 获证.

5 仿真实例(Example)

参考一个以标准 40 节(一节为 1.85 km/h)的飞行速度作水平飞行的 CH-47 双旋翼直升机的线性模型

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -0.02 & 0.005 & 2.4 & -32 \\ -0.14 & 0.44 & -1.3 & -30 \\ 0 & 0.018 & -1.6 & 1.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.14 & -0.12 \\ 0.36 & -8.6 \\ 0.35 & 0.009 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 57.3 \end{bmatrix}.$$

输出: y_1 垂直速度(节/h), y_2 倾斜角度(rad); 控制输入: u_1 集流螺旋桨推力, u_2 差动集流螺旋桨推力. 稳定的区域为指定的圆形区域,其中圆心: $-3 + 0i$, 半径: $r = 2$. 故障矩阵

$$M = \text{diag}(m_1, m_2),$$

$$0.6 \leq m_1 \leq 1.25, 0.4 \leq m_2 \leq 1.45.$$

系统(12)的极点集合

$$\{-2.23, 0.07, 0.49 + 0.42i, 0.49 - 0.42i\}$$

为不稳定系统.

对系统(12),分别利用推论 1 及定理 3 进行区域稳定正常控制器及区域稳定可靠控制器的设计:

$u = K_{\text{normal}}x, u = K_{\text{reliable}}x$, 其中

$$K_{\text{normal}} = \begin{bmatrix} 2.1161 & -0.0981 & -21.059 & -81.282 \\ 0.076 & 0.3958 & -1.0262 & -6.9184 \end{bmatrix},$$

$$K_{\text{reliable}} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.7861 & -0.0822 & -15.2475 & -46.3392 \\ -0.1947 & 0.428 & -1.0237 & -3.7203 \end{bmatrix}.$$

当系统不发生故障时,两种控制作用下的闭环系统极点集合

$$\{-1.17, -2.23, -3.46, -3.24\},$$

$$\{-2.52, -3.09 + 0.18i, -3.09 - 0.18i, -2.99\}$$

均在指定的圆形区域内.

当系统发生故障时,区域稳定正常系统部分极点将跳出指定的稳定区域,从而破坏系统的区域稳定性.可靠系统极点都在指定的区域内.由图 1 进一步看出,当控制输入的第一条通道即直升机的集流螺旋桨推力为额定输入的 68% 以下或额定输入的 112% 以上时,无论第二条控制通道输入如何都将丧失系统的区域稳定性.从图 1 中还可以看出,差动集流螺旋桨推力 u_2 故障对区域稳定性影响不大.

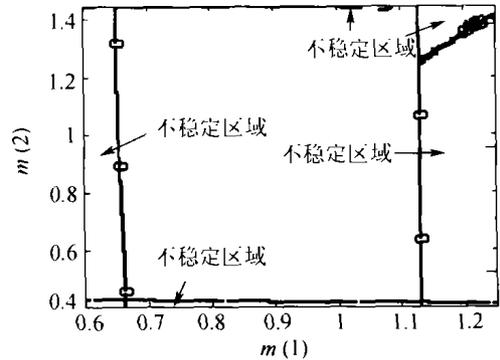


图 1 系统不稳定的故障分布
Fig. 1 Fault region of unstable

注 图 1 中 $m(1)$ 和 $m(2)$ 轴确定的坐标平面为故障增益 m_1 和 m_2 取值的坐标平面.

由仿真实例可以得出,不对系统进行可靠设计,虽然可以将系统的极点配置到指定圆盘内,但是一旦系统发生故障,闭环系统的极点可能脱离指定的圆盘区域内.如果对系统进行可靠设计,无论系统发生故障与否,极点均在指定的圆形区域内.这说明了本文设计方法的可行性和必要性.

6 结论(Conclusion)

通过以上论证可以看出,利用修正的 Lyapunov 不等式,对具有执行器故障的线性系统的可靠控制进行分析,在系统分析基础上,分别得到鲁棒区域稳定正常控制器、区域稳定正常控制器、鲁棒区域稳定可靠控制器和区域稳定可靠控制器存在的充分条件和设计方法.所设计的可靠控制器,不仅使无故障系统的极点保持在指定圆盘内,而且当系统发生故障时仍能使极点保持在相同的圆盘内.通过对 CH-47 双旋翼直升机的线性模型的实例仿真,验证了本文

中提出方法的有效性.通过比较区域稳定正常控制系统和区域稳定可靠控制系统,进一步说明对系统进行可靠控制设计的必要性.

参考文献(References):

[1] VEILLETTE R J, MEDANIC J V, PERKINS W R. Design of reliable control system [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(3): 770 - 784.

[2] YANG G H, LAM J, WANG J. Reliable H_{∞} control for affine nonlinear system [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(8): 1112 - 1117.

[3] YANG G H, WANG J L, SOH Y C. Reliable H_{∞} design for linear system [J]. *Automatica*, 2001, 37(5): 717 - 725.

[4] FURUTA K, KIM S B. Pole assignment in a specified disk [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1987, 32 (5): 423 - 427.

[5] 王远钢, 郭治. 状态反馈中圆形极点与状态方差约束的相容性 [J]. *自动化学报*, 2001, 27(2): 207 - 213.
(WANG Yuangang, GUO Zhi. Consistency of circular pole and state variance constraints state-feedback control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(2): 207 - 213.)

[6] 俞立, 陈国定, 杨马英. 不确定系统的鲁棒输出反馈区域极点配置 [J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(2): 244 - 247.
(YU Li, CHEN Guoding, YANG Maying. Robust regional pole assignment of uncertain systems via output feedback controllers [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(2): 244 - 246.)

[7] 张华春, 谭民. 具有执行器完整性的容错控制器设计 [J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(5): 687 - 690.
(ZHANG Huachun, TAN Min. Design of fault-tolerant controller possessing integrity to actuator [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 687 - 690.)

[8] YANG G H, WANG J L, SOH Y C. Reliable LQG control with sensor failures [J]. *IEE Proc-Control Theory and Applications*, 2000, 147 (4): 433 - 439.

作者简介:

王福忠 (1963 —), 男, 沈阳工程学院副教授, 博士, 主要研究方向为鲁棒控制和容错控制等, E-mail: Fuzhongwang@163.com;

姚波 (1963 —), 女, 沈阳师范大学副教授, 博士, 主要研究方向为广义系统容错控制等;

张嗣瀛 (1925 —), 男, 东北大学教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事微分对策、复杂系统的结构和控制等方向的研究.

下 期 要 目

动态模型的多尺度自适应跟踪算法 李 涛, 王宝树

时延网络控制系统的稳定性 樊卫华, 蔡 骅, 陈庆伟, 胡维礼

随机优化问题基于假设检验的遗传算法(英文) 张 亮, 王 凌, 郑大钟

考虑交易费的融资与分红最优控制模型(英文) 张 磊

分数阶线性定常系统的稳定性及其判据 王振滨, 曹广益, 朱新坚

事件反馈与状态反馈的混合模监控 王 飞, 胡奇英

一类随机人口发展系统的指数稳定性 张启敏, 聂赞坎

有交易费的未定权益无套利公平定价 许世蒙, 张玉忠

以可存品与非可存品为消费对象的最优投资消费决策 郭文旌, 明宗峰, 胡奇英

关于耦合混沌系统完全同步的参数选择 闵富红, 王执铨

内共振系统的混沌同步现象 毕勤胜, 邹 勇, 刘曾荣, 陈关荣

人工免疫系统在复杂系统免疫辨识中的应用 徐雪松, 诸 静

滞后广义系统的状态反馈 H_{∞} 控制 董心壮, 张庆灵

基于向量图分析的迭代学习控制非线性算法 谢胜利, 田森平, 谢振东