文章编号: 1001-0920(2004)01-0001-06

混沌系统时滞反馈控制综述

陈 亮, 韩正之
(上海交通大学 智能工程实验室, 上海 200030)

摘 要: 综述了混沌系统时滞反馈控制的研究成果, 包括基本思想、控制器设计、稳定性分析及其各种改进方法等. 最后展望了其未来发展方向.

关键词: 混沌控制; 时滞反馈; 稳定性; 不稳定周期轨道
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

A survey on time-delayed feedback control for chaotic systems

CHEN Liang, HAN Zheng-zhi
(Intelligent Engineering Laboratory, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: CHEN Liang, E-mail: chenliang@sjtu.edu.cn)

Abstract: Research results on time-delayed feedback control for chaotic systems are summarized in four aspects: fundamental ideas, controller design, stability analysis and modifications. Finally, further research directions are pointed out.

Key words: chaos control; time-delayed feedback; stability; unstable periodic orbit

1 引 言

近年来, 混沌控制已成为一个研究热点. 混沌控制的目标有很多, 一个比较活跃的研究方向是镇定混沌吸引子中嵌入的不稳定周期轨道. 在这方面, OGY 法[1]是最早也是卓有成效的一种控制方法, 并已成功地应用到许多典型混沌系统.

1992 年, Pyragas 提出了时滞反馈控制(TDFC)[2], 并立即引起学术界的广泛关注. 这是因为它具有许多不可比拟的优越性: 首先, 它是基于系统状态的自相似性, 用时滞反馈信号近似不稳定周期轨道, 从而避免了OGY 等方法中目标轨道的确定问题; 其次, 它采用连续时间激励作为控制信号, 而不是OGY 法中的间歇脉冲式的微小参数扰动, 所以在一定程度上避免了控制对象因系统的涨落和环境噪声而偏离期望轨道; 最后, 它不需要事先知道系统的任何解析知识, 也无需像OGY 法那样大量的计算机在线分析系统状态, 仅使用简单的模拟装置就能实现, 所以非常易于工程实现, 并已成功地应用到许多物理系统, 如激光系统[3]、电子线路[4]、磁机械系统[5]等.

经过十多年的发展, 时滞反馈控制取得了一些有意义的理论和实践成果, 并逐渐成为控制混沌的一种重要理论方法和技术手段, 在混沌控制理论体系中占据着举足轻重的地位. 本文主要从基本思想、控制器设计、稳定性分析及其各种改进方法等方面, 对时滞反馈控制的研究概况进行总结, 并展望了其未来发展方向.

2 时滞反馈控制的基本思想

考虑一般混沌连续系统

$$\dot{x} = f(x) + u. \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$, $u \in R^n$ 分别为系统状态和控制, $f(x)$

收稿日期: 2002-07-04; **修回日期**: 2002-09-11.
作者简介: 陈亮(1976—), 女(回族), 江苏常熟人, 博士生, 从事非线性系统混沌及其控制等研究; 韩正之(1947—), 男, 浙江慈溪人, 教授, 博士生导师, 从事控制理论与应用、计算机控制等研究.

为可导的向量函数. 为方便起见, 这里只讨论自治系统, 本文所涉及的大部分结果很容易延伸到非自治系统.

令 x^* 是系统 $\mathring{x} = f(x)$ 的一个不稳定 T-周期轨道, 则有

$$\mathring{x}^* = f(x^*), \tag{2}$$

并且 $x^*(t) = x^*(t - T)$. 控制的目的是为给定系统设计一个控制器 u, 使得系统在控制作用下渐近收敛到 x^*, 并且满足 $\lim_{t\to\infty}\|u\| = 0$, 这里 $\|u\| = |u^{\mathrm{T}}u|^{1/2}$ 为 Euclidean 范数. 在传统控制中, 控制器通常设计为 $u = K(x - x^*)$, $K \in R^n$. 但由于期望轨道特别是目标为高周期轨道的不稳定性和对噪声的极其敏感性, 不能直接将 x^* 的信息加入到控制器中, 也很难得到不稳定周期轨道的解析解. 于是人们采取各种方法来模拟和代替期望轨道 x^*.

结合 OGY 法和非反馈控制中连续周期扰动的设计思想, 时滞反馈控制采用如下形式:

$$u = K[x(t) - x(t - \tau)]. \tag{3}$$

其中延迟时间 τ 为可调参数, 当增益矩阵 K 非奇异时, τ 为 x^* 周期 T 的整数倍[6], 一般情况下, $\tau = T$. 当系统轨迹收敛到 x^* 时, 控制作用消失. 因此时滞反馈控制可看作一个简单的误差估计器, 根据目标轨道的周期特性, 用时滞误差信号估计传统跟踪误差, 从而实现不稳定周期轨道的镇定.

从通讯的角度看, 时滞反馈控制可看作系统当前状态与 τ 时间前的状态的同步, 因此 Socolar 等人[7] 把这种方法称为时滞自同步法. 从控制论的角度看, 时滞反馈控制实际上是自回归滑动平均控制或标准的状态空间控制问题的一种特殊形式[6], 不稳定周期轨道的镇定问题可看作经典控制理论中的跟踪问题, 不过利用的跟踪信息是跟踪目标的周期 T 而不是目标状态轨迹 x^*. 正是这种替代, 使得二者又不能完全等价. 因为时滞反馈控制只是将系统稳定在具有期望周期的轨道上, 至于具体是哪一轨道, 取决于系统的初始状态和延迟时间初值的选取.

时滞反馈控制最初是用于连续系统的一种控制混沌的方法, 但它更多的是作为一种概念或新的思维方式引入到混沌控制中, 因此也广泛用于离散系统. 离散系统的理论分析比连续系统要容易得多, 所以在某种程度上, 前者对后者起到了很好的指导作用.

3 控制器的设计

在时滞反馈控制器的设计过程中, 主要解决以下 3 个问题:

(1) 反馈增益的设计

与传统控制不同, 时滞反馈控制的反馈增益 $K \in R$ 限制在一个有限的通常是狭窄的范围内. 对于离散系统, 时滞反馈控制只是将有限维数 τ 引入到原系统, 而且一般研究的是平衡点的镇定问题, 即 $\tau = 1$, 所以很容易得到 K 的取值范围. 对于连续系统, K 的求解则要困难得多, 目前还没有系统的求解方法. 这主要是因为连续时滞反馈控制是由时滞微分方程描述的, 状态空间呈无限维, 即使是线性稳定问题也无法获得完全的解析解.

在实际使用过程中, 目前主要有两种方法: 一是数值法, 文献[2] 通过计算最大 Lyapunov 指数来确定 K. 数值法的缺点在于它是一种离线设计, 对噪音干扰非常敏感. 另一种是自适应法, 文献[8] 介绍了一种以时滞误差函数作为品质因子, 根据梯度下降理论自动校正反馈增益的方法. 自适应法可在没有预先计算或试凑的情况下进行反馈增益的自动搜索, 抗干扰性也比较强, 但其收敛性还是一个尚未解决的问题.

(2) 延迟时间的确定

时滞反馈控制在处理周期轨道的镇定问题时, 一定要预先知道目标轨道的周期[6], 这对自治系统来说尤其困难; 加之系统对延迟时间的敏感性强于反馈增益, 因此延迟时间的确定更复杂也更需要仔细调整. 目前主要有 3 种方法: 一是实验法[2], 二是解析法[9]. 这两种方法获得的都是延迟时间的静态值, 没有考虑到实际系统中延迟时间本身也会波动, 而且实验法既耗时又费力. 为此, 有的学者提出了第 3 种方法, 即自适应法.

文献[10] 将受控信号峰-峰值间的时间间隔作为延迟时间不断在线调整. 这种方法简单易行, 但是当测量受到噪音干扰时, 信号的峰值很难确定, 尤其是在线控制. 为此, 文献[11] 将测量峰值间隔改成搜寻相似轨道. 这两种方法致命的弱点是缺乏理论依据. 文献[8] 给出一种基于梯度下降理论的自校正法, 但这种方法仍没有摆脱对采样数据测量准确性的依赖. 针对这一点, 文献[12] 介绍了一种连续校正法, 它具有较强的抗干扰能力但设计比较复杂.

综上所述, 在一般场合下, 基于梯度下降理论的自校正法是一种较为理想的确定延迟时间的方法. 这一点得到了文献[6] 和[13] 的支持, 并将其改进以便更有利于数值实现.

(3) 控制量的限制

与 OGY 法相比, 时滞反馈控制允许初始扰动较

大, 但是过大的扰动会改变原系统的相关属性, 还会因为初始条件的不同而存在多重稳态解 这在一般情况下并不是人们所期望的, 所以使用时通常给控制量加一个较小的阈值[2,14]. 但是这样一来, 平均控制时间会变长 另外, 文献[5] 采用了启动窗口技术, 但它只适用于 Poincare 截面分析的连续系统

4　稳定性分析

稳定性分析主要研究为稳定混沌吸引子中嵌入的不稳定周期轨道, 控制增益应满足的基本条件以及各种因素对控制能力和控制效果的影响程度 分析非线性系统的方法主要有两种:

第 1 种方法是直接从描述系统非线性方程出发的非线性法 这种方法比较困难, 相关的文献也不多, 其中文献[6] 基于Lyapunov 稳定性理论研究了时滞反馈控制的可镇定性问题

联立方程(1)～ (3), 得到误差动力系统

$$\mathring{e} = F(x) + K[x(t) - x(t-\tau)]. \tag{4}$$

其中: $e = x - x^*$, $F(x) = f(x) - f(x^*)$.

令 $J(t) = \mathrm{d}F(x)/\mathrm{d}x$ 为 Jacobi 阵 关于不稳定周期轨道的镇定问题, 有如下结论:

定理 1　对于误差动力系统(4), 若存在两个正定对称常数矩阵 P 和 Q 以及一个常数矩阵 K, 使得 Riccati 多项式

$$J^{\mathrm{T}}(t)P + PJ(t) + PKQ^{-1}K^{\mathrm{T}}P + PK + K^{\mathrm{T}}P + Q = 0, \tag{5}$$

或为负(半) 定, 则当 $\|e\|$ 充分小时, e 必定趋近于 0, 即当 $t \to \infty$ 时, $\|e\| \to 0$.

上述定理为控制器的设计提供了理论指导, 但是缺乏可计算性和可操作性 至于如何解决 K 的计算问题, 如何去除“ $\|e\|$ 充分小 ”这一保守的前提条件等, 还有待于进一步研究

第 2 种分析方法是线性化法, 即根据结构稳定性理论将系统在目标轨道附近线性化, 讨论局部稳定性问题 这种方法是分析非线性系统的常用方法, 目前时滞反馈控制的理论研究大多基于这种方法, 其中获得的最重要的理论成果是关于时滞反馈控制的稳定局限性问题

Ushio[15] 指出: 考虑混沌离散系统 $x(k+1) = f[x(k)]$ 在双曲平衡点 x^* 处的线性变分方程 $\delta x(k+1) = J\delta x(k)$, 其中 $J = Df(x^*)$ 为 Jacobi 阵 对于控制 $u(k) = K[x(k) - x(k-1)]$, 有如下定理:

定理 2　如果 A 有奇数个大于 1 的实特征值, 则反馈增益 K 无论取何值, 都不能实现双曲平衡点 x^* 的镇定

后来人们又发现, 时滞反馈控制在稳定离散系统和连续系统中的不稳定周期轨道时, 具有类似的稳定局限性 有关这方面较详细的介绍可参阅文献[16, 17]. 时滞反馈控制的这种性质可统一称为奇数乘子限制问题, 也称为拓扑局限问题 文献[17] 用分岔理论对这种现象做出了直观解释

上述都是通过分析线性化系统的特征方程得到的一些结论 Just 从分析线性化系统的 Floquet 指数的角度, 得到了一些解析结果 他主要研究了低维混沌系统中常见的 flip 轨道, 给出了关于反馈增益 K 的 Floquet 指数的一阶泰勒展开式

$$\Lambda + \mathrm{i}\Omega = \lambda + \mathrm{i}\omega + cK[1 - \exp(-\Lambda\tau - \mathrm{i}\Omega\tau)] + O(K^2). \tag{6}$$

其中: $\Lambda + \mathrm{i}\Omega$ 为受控系统的 Floquet 指数, $\lambda + \mathrm{i}\omega$ 为原系统的 Floquet 指数, c 包含了控制量耦合机制的具体细节. 在式(5) 的基础上, 文献[18～ 22] 研究了各种因素对时滞反馈控制的稳定能力和控制效果的影响程度, 对工程应用具有一定的指导意义

以上是近年来主要的理论成果, 目前还只限于粗浅的研究 这主要是因为混沌动力学和时滞动力学系统本身的理论体系还不够完备, 还有大量的问题亟待解决 另外, 上述方法均是基于 Lyapunov 指数判据, 虽然目前在混沌控制机理的分析方面普遍采用这种方法, 但此判据仍存在许多争议, 而且高阶系统的 Lyapunov 指数计算十分困难

5　时滞反馈控制的改进

在镇定期望周期轨道的过程中, 简单的时滞反馈控制(3) 有两大缺点: 一是实现镇定的系统参数限制在一定范围内, 无法镇定高周期轨道; 二是具有由奇数实乘子引起的拓扑局限性 为此, 很多学者提出了各种改进方法, 本文归类如下:

5.1　静态时滞反馈控制

静态时滞反馈控制是指控制器仅仅利用时滞误差作为反馈信号, 通过调整反馈增益阵或延迟时间来实现镇定期望轨道的目的 静态时滞反馈控制一般可分为两大类:

一类是线性时滞反馈控制, 即控制量是时滞误差的线性函数, 其基本形式为

$$u(t) = \sum_{m=1}^{M} K_m[x(t) - x(t-m\tau)] \times F_m[x(t), x(t-m\tau)]. \tag{7}$$

其中: M 为正整数或 $M = \infty$, K_m 为反馈增益阵, $F_m(x_1, x_2)$ 为向量函数 具体的有广义时滞反馈控

制(也称为广义时滞自同步控制)[7]、N 时滞自同步控制和指数时滞反馈控制[17] 等. 其中以广义时滞反馈控制最受关注, 其表达式为

$$u(t) = K\Big[x(t) - (1 - R)\sum_{m=1}^{\infty} R^{m-1} x(t - m\tau)\Big]. \tag{8}$$

其中 $R \geq 0$ 和 K 为可调参数. 当 $R = 0$ 时, 式(8) 转化为简单的时滞反馈控制; 当 $R > 1$ 时, 式(8) 则变成一个不稳定的控制器. 广义时滞反馈控制的优点是实现镇定的系统参数范围大, 能稳定较高的周期轨道[19]; 工程实现也很容易, 只要在电路中用一个延迟线便可产生式(8) 中的无限序列, 或采用光学手段, 如 Fabry-Perot 干涉仪[7]. 问题是它和简单时滞反馈控制一样, 增加了原系统的维数, 并且存在奇数乘子限制问题[14,17] (这里不包括离散型不稳定广义时滞反馈控制[23]). 文献[24] 介绍了一种振荡时滞反馈控制, 这种方法本质上是一种离散型控制器, 从理论上能克服一类混沌系统的奇数乘子限制问题, 但需要较强的条件.

另一类是非线性时滞反馈控制, 其基本形式为

$$u(t) = K[x(t) - P(x)]. \tag{9}$$

其中 P 为向量函数, 且在目标轨道 x^* 上有 $x^* = P(x^*)$. 文献[25～27] 根据离散系统的特点, 分别基于系统过去、当前和未来的状态信息提出了非线性函数估计器. 文献[28] 则利用某些连续系统的对称性提出了半周期时滞反馈控制. 非线性时滞反馈控制的最大优点是在一定程度上克服了线性反馈的拓扑局限性, 但其物理机制还有待于进一步研究.

5.2 动态时滞反馈控制

动态时滞反馈控制是在静态时滞反馈控制的基础上, 将时滞误差信息存储在一个微分方程中, 其基本形式为

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bv(t), \\ u(t) = Cz(t) + Dv(t). \end{cases} \tag{10}$$

其中: A, B, C, D 均为控制器的系数矩阵, z 为控制器状态, v 为系统的时滞误差.

动态时滞反馈控制最初是在文献[29] 中以离散观测器的形式提出的, 后经 Yamamoto 等人[30,31] 不断泛化和改进. 同时, 对连续系统也提出了相应的控制方法[23,32]. 从频域角度看, 动态时滞反馈控制的物理机制是人为地引入不稳定自由度, 从而将原系统的实特征乘子由奇数变成偶数, 所以能稳定实特征乘子不等于 1 的任何轨道. 关于这一点, 在混沌吸引子中很容易得到满足. 但是动态时滞反馈控制有个最大缺点, 即控制器的设计需要知道原系统在期望轨道处线性化的 Jacobi 矩阵或其部分属性, 这显然不太实际.

5.3 与其他控制方法相结合的时滞反馈控制

为改善时滞反馈控制的控制效果, 提高对系统参数摄动和环境噪声的抵抗力, 许多学者提出了与其他控制理论和技术相结合的多种改进方法. 如基于时滞反馈的滑模控制[13], 它不需要选取精确的延迟时间, 鲁棒性强; 又如基于最优原则的时滞反馈控制[33], 它能有效克服奇数乘子的限制问题. 另外, 文献[34] 针对外部激励系统用频域控制理论给出了控制器的设计方法, 物理意义明确, 设计简单, 并可实现最优; 文献[35] 基于不变流形方法和重复学习控制原则提出一种学习型时滞反馈控制, 通过不断地自适应学习, 寻找合适的控制激励, 从而避免了粗糙控制, 也没有传统自适应控制的保守性; 文献[36] 提出将模糊控制、神经网络与时滞反馈控制相结合的智能控制方法, 可以提高系统的鲁棒性.

目前, 对时滞反馈控制的改进主要集中在经典控制理论方法上, 至于结合智能控制理论, 进行智能时滞反馈控制的研究还很欠缺, 有待于今后进一步的发展.

6 几点展望

本文综述了 10 年来混沌系统时滞反馈控制技术的相关进展, 总结了以镇定混沌吸引子中的不稳定周期态为目的的理论研究成果. 关于时滞反馈控制的实验研究, 可参阅文献[36]中关于两个典型实验的详细介绍. 从目前研究的发展现状看, 时滞反馈控制的理论研究尚处于初级阶段, 实际应用也远未挖掘出其真正潜力, 还有大量困难的课题亟待解决. 时滞反馈控制未来的发展方向主要表现在以下几方面:

1) 结合控制理论、时滞动力系统和混沌动力系统理论, 建立完整的稳定性理论体系, 包括控制变量的选取和优化组合, 吸引域的确定, 全局稳定性判据, 可控性和可观性研究等, 这些都将成为今后研究的重点课题.

2) 结合学习控制、神经网络等智能控制理论和鲁棒控制理论, 建立智能时滞反馈控制的理论体系, 重点研究鲁棒性、收敛性和容错性等问题. 特别是鲁棒性研究将是一个重要的课题.

3) 充分挖掘时滞反馈控制在实际应用中的潜力, 可将应用范围扩大到混沌信息处理、工程系统灾变防治与控制、复杂网络的拥塞控制、生物系统的研

究等诸多方面, 并针对各领域的应用特点提出适宜的改进方法. 当然, 理论研究的进度将直接影响实际应用的效果.

上述问题的深入研究必将大大促进时滞反馈控制理论和应用的发展.

参考文献(References):

[1] Ott E, Grebogi C, Yorke Y A. Controlling chaos[J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(11): 1196-1199.

[2] Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback [J]. *Physics Letters A*, 1992, 170: 421-428.

[3] Ott E, Simmendinger C, Hess O. Controlling delayed-induced chaotic behavior of a semiconductor laser with optical feedback[J]. *Physics Letters A*, 1996, 216: 97-105.

[4] Pyragas K, Tamasevieius A. Experimental control of chaos by delayed self-controlling feedback [J]. *Physics Letters A*, 1993, 180: 99-102.

[5] Hilkihara T, Touno M, Kawagoshi T. Experiment stabilization of unstable period orbit in magneto-elastic chaos by delayed feedback control [J]. *Int J of Bifurcation and Chaos*, 1997, 7(12): 2837-2846.

[6] Chen G, Yu X. On time-delayed feedback control of chaotic systems[J]. *IEEE Trans on Circuits Systems I*, 1999, 46(6): 767-772.

[7] Socolar J E S, Sukow D W, Gauthier D J. Stabilizing unstable periodic orbits in fast dynamic systems [J]. *Physical Review E*, 1994, 50(4): 3245-3248.

[8] Nakajima H, Ito H, Ueda Y. Automatic adjustment of delay time and feedback gain in delayed feedback control of chaos[J]. *IEICE Trans on Fundamentals*, 1997, 80 (9): 1554-1559.

[9] Just W, Reckwerth D, Mockel J, et al. Delayed feedback control of periodic orbits in autonomous systems[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81 (3): 562-565.

[10] Kittel A, Parisi J, Pyragas K. Delayed feedback control of chaos by self-adapted delay time [J]. *Physics Letters A*, 1995, 198: 433-436.

[11] 裴文江, 黄俊, 刘文波, 等. 自适应延迟反馈控制混沌[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(2): 297-300.
(Pei Wen-jiang, Huang Jun, Liu Wen-bo, et al. Adaptive delayed feedback control of chaos [J]. *Control Theory and Applications*, 1999, 16 (2): 297-300.)

[12] Herrmann G. A robust delay adaptation scheme for Pyragas' chaos control method[J]. *Physics Letters A*, 2001, 287: 245-256.

[13] Yu X. Tracking inherent periodic orbits in chaotic dynamic systems via adaptive variable structure time-delayed selfcontrol [J]. *IEEE Trans on Circuits Systems I*, 1999, 46(11): 1408-1411.

[14] Konishi K, Ishii M, Kokame H. Stability of extended delayed-feedback control for discrete-time chaotic systems [J]. *IEEE Trans on Circuits Systems I*, 1999, 46(10): 1285-1288.

[15] Ushio T. Limitation of delayed feedback control in nonlinear discrete-time systems [J]. *IEEE Trans on Circuits Systems I*, 1996, 43(9): 815-816.

[16] Hino T, Yamamoto S, Ushio T. Stabilization of unstable periodic orbits of chaotic discrete-time systems using prediction-based feedback control [J]. *Int J of Bifurcation and Chaos*, 2002, 12(2): 439-446.

[17] Nakajima H, Ueda Y. Limitation of generalized delayed feedback control[J]. *Physics D*, 1998, 111: 143-150.

[18] Just W, Bernard T, Ostheimer M, et al. Mechanism of time-delayed feedback control[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(2): 203-206.

[19] Just W, Reibold E, Benner H, et al. Limits of time-delayed feedback control[J]. *Physics Letters A*, 1999, 254: 158-164.

[20] Just W, Reibold E, Kacperski K, et al. Influence of stable Floquet exponents on time-delayed feedback control[J]. *Physical Review E*, 2000, 61(5): 5045-5056.

[21] Just W, Reckwerth D, Reibold E, et al. Influence of control loop latency on time-delayed feedback control [J]. *Physical Review E*, 1999, 59(3): 2826-2829.

[22] Just W. On the eigenvalue spectrum for time-delayed Floquet problems[J]. *Physics D*, 2000, 142: 153-165.

[23] Pyragas K. Control of chaos via an unstable delayed feedback controller [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(11): 2265-2268.

[24] Schuster H G, Stemmler M B. Control of chaos by oscillating feedback[J]. *Physical Review E*, 1997, 56 (6): 6410-6417.

[25] Ushio T, Yamamoto S. Delayed feedback control with nonlinear estimation in chaotic discrete-time systems [J]. *Physics Letters A*, 1998, 247: 112-118.

[26] Vieira M de S, Lichtenberg A J. Controlling chaos using nonlinear feedback with delay [J]. *Physical Review E*, 1996, 54(2): 1200-1207.

[27] Ushio T, Yamamoto S. Prediction-based control of chaos[J]. *Physics Letters A*, 1999, 264: 30-35.

[28] Nakajima H, Ueda Y. Half-period delayed feedback control for dynamical systems with symmetries[J]. *Physical Review E*, 1998, 58(2): 1757-1763.

[29] Konishi K, Kokame H. Observer-based delayed-feedback control for discrete-time chaotic systems [J]. *Physics Letters A*, 1998, 248: 359-368.

[30] Yamamoto S, Hina T, Ushio T. Dynamic delayed feedback controller for chaotic discrete-time systems [J]. *IEEE Trans on Circuits Systems I*, 2001, 48(6): 785-789.

[31] Yamamoto S, Hino T, Ushio T. Delayed feedback control with minimal-order observers for chaotic discrete-time systems[J]. *Int J of Bifurcation and Chaos*, 2002, 12(5): 1047-1055.

[32] Nakajima H. Delayed feedback control with static predictor for continuous-time chaotic systems[J]. *Int J of Bifurcation and Chaos*, 2002, 12(5): 1067-1077.

[33] Tian Y P, Yu X. Stabilizing unstable periodic orbits of chaotic systems via an optimal principle[J]. *J of the Franklin Institute*, 2000, 337(6): 771-779.

[34] Basso M, Genesio R, Tesi A. Stabilizing periodic orbits of forced systems via generalized Pyragas controllers[J]. *IEEE Trans on Circuits Systems I*, 1999, 44(10): 1203-1207.

[35] Yu X, Song Y X, Chen G, et al. Time delayed repetitive learning control for chaotic systems[J]. *Int J of Bifurcation and Chaos*, 2002, 12(5): 1057-1065.

[36] 刘向东, 黄文虎. 混沌系统延迟反馈控制的理论与实验研究[J]. 力学进展, 2001, 31(1): 18-31.
(Liu Xiang-dong, Huang Wen-hu. Theoretical and experimental research on delayed feedback control in chaotic systems[J]. *Advances in Mechanics*, 2001, 31(1): 18-31.)

第 23 届中国控制会议征文通知

中国控制会议是由中国自动化学会控制理论专业委员会组织召开的国际性学术会议, 每年举办一次。其宗旨是为海内外系统控制领域的专家、学者、研究生及工程设计人员提供一个学术交流的机会, 以便推动系统与控制科学的发展。第 23 届中国控制会议定于 2004 年 8 月 10 日～ 13 日在无锡市湖滨饭店举行。我们热忱欢迎世界各地的同仁参加本届大会。征文范围请查看会议网页: http://ccc.iss.ac.cn。

征文要求

1. 稿件内容包括: ①首页: 论文所属方向(选自征文范围)、论文题目、摘要、3～ 5 个关键词, 联系人姓名、职称、地址、邮编、电话、E-mail; ②论文题目、摘要、3～ 5 个关键词、正文(中、英文均可); ③凡邀请组论文, 请将①中的首页和论文的详细摘要交组织者, 由组织者统一投稿。

2. 投稿可直接寄至程序委员会秘书处, 也可通过 E-mail。直接邮寄论文需一式二份。

3. 大会设立关肇直优秀论文奖, 申请办法和条例请查看会议网页: http://ccc.iss.ac.cn。

4. 拟组织邀请组的组织者, 请提供 1 000 字的组织建议书及该组全部拟邀请论文的首页和详细摘要。同一邀请组的论文主题应鲜明、集中, 邀请组一般有 6 篇论文。

重要日期

提交论文截止日期: 2004 年 3 月 31 日
录用/不录用通知日期: 2004 年 4 月 30 日前
提交最终论文截止日期: 2004 年 5 月 31 日

投稿地址

程序委员会秘书处: 上海华山路 1954 号
200030 上海交通大学自动化系 李少远 收
电话/传真: +86-21-62932114
E-mail: ccc04@sjtu.edu.cn
中国控制会议网址: http://ccc.iss.ac.cn
CCC'04 网址: http://ccc04.sjtu.edu.cn