

文章编号: 1001-0920(2006)10-1081-06

## 反推自适应控制的发展及应用

董文瀚<sup>1</sup>, 孙秀霞<sup>1</sup>, 林 岩<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038; 2 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 反推自适应控制是当前自适应控制理论和应用的前沿课题之一, 在航空航天等高新技术领域有着广阔的应用前景. 近年来, 在处理线性和某些非线性系统时, 该方法在改善过渡过程品质方面展现出较大的潜力, 已应用于飞机及导弹等的控制. 在此介绍了反推自适应控制的基本思想和方法, 该领域国内外研究现状和工程应用情况, 讨论了其存在的问题及可能的研究方向.

**关键词:** 自适应控制; 反推; 航空航天

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Adaptive Backstepping Control: Development and Applications

DONG Wen-han<sup>1</sup>, SUN Xiu-xia<sup>1</sup>, LIN Yan<sup>2</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2 School of Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China. Correspondent: DONG Wen-han, Email: dongwenhan@sina.com)

**Abstract:** Adaptive backstepping control is one of the advanced research directions of control theory and is of wide applications in industry, especially, in aeronautical and astronautical systems due to its strong ability to improve transient performance of tracking error for both linear and nonlinear systems. The history, the present research effort, the potential applications and the existing problems of adaptive backstepping control are discussed.

**Key words:** Adaptive control; Backstepping; Aeronautics and astronautics

### 1 引 言

早在 20 世纪 50 年代, 为了研究飞机自动驾驶仪的设计问题, 科研人员就提出了模型参考自适应控制(MRAC)的概念, 以期获得优良的控制性能. 但这种方法由于当时自适应理论本身不够成熟, 以及受软硬件等的制约, 有过惨痛的教训. 直到 70 年代末, Narendra 等人<sup>[1]</sup>提出“稳定自适应控制”方案后, 才基本解决了自适应控制系统的稳定性问题. 80 年代初, Bannou 等人<sup>[2]</sup>提出的“鲁棒自适应控制”, 部分地解决了对象存在未建模动态时的自适应控制问题. 但无论是稳定自适应还是鲁棒自适应控制方案, 都由于引入所谓“规范化信号”而使过渡过程品质变差, 这在很大程度上制约了自适应控制的工程应用. 为此, 90 年代, Kokotovic 等人<sup>[3]</sup>提出了一种

新型的自适应控制方案——反推自适应控制. 近年来, 在处理线性和某些非线性系统时, 反推自适应控制在改善过渡过程品质方面表现出较大的潜力, 尤其在航空航天领域, 因成功地应用于飞机和导弹的控制而倍受关注<sup>[4~8]</sup>.

本文介绍了反推自适应控制的基本思想和方法, 该领域的国内外研究现状和工程应用情况, 讨论了其存在的问题及可能的研究方向.

### 2 理论研究现状

反推控制的思想出现较早. 20 世纪 70 年代末, Morse 等人在处理自适应控制中被控对象相对阶较高的情况时就已涉及, 但并未引起重视. 原因有两个: 一是未能发展出类似于现今的系统递归设计方法, 因此, 当对象相对阶大于 3 之后, 控制律复杂且

收稿日期: 2005-07-26; 修回日期: 2006-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174001); 北京市自然科学基金项目(4022007).

作者简介: 董文瀚(1979—), 男, 江西鄱阳人, 博士, 从事自适应控制、飞行控制的研究; 孙秀霞(1962—), 女, 山东潍坊人, 教授, 从事鲁棒控制、飞行控制等研究.

无规律可循;另一更重要的原因是,同时期的规范化自适应方案吸引了多数相关研究人员的注意。当对象相对阶大于1时,规范化信号的引入解决了长期困扰传统自适应方法的稳定性问题<sup>[9,10]</sup>,然而,由此带来的问题是跟踪误差的过渡过程品质难以令人满意<sup>[11,12]</sup>。因此,寻求具非规范化的自适应控制方案始终是自适应控制理论的主要研究方向之一,并导致了90年代以来对反推自适应控制的再认识。所谓反推,可简单理解为:最终控制信号通过一系列“虚拟”信号以递归的方式得到,虚拟信号事实上无需通过硬件,可直接经由计算得到,故可简化控制器的结构;递归的每一步只需要处理一个相对简单的误差系统,从而可较灵活地选择控制信号,有效改善过渡过程品质。

下面就线性系统和非线性系统两个方面来分别讨论国内外反推自适应控制理论的研究现状。

## 2.1 线性系统反推自适应控制

定常线性系统的反推自适应控制理论研究以Krstic等的著名论文<sup>[13]</sup>为起点,取得了一些较好的结果。图1给出了文献<sup>[13]</sup>反推自适应方案的基本结构,其中,被控对象相对阶为 $N$ , $y$ 为对象输出, $y_r$ 为参考模型输出, $r$ 为参考模型输入,最终控制信号 $u$ 通过虚拟控制信号 $\alpha$ 及调参律 $\tau$ 以递归方式一步步得到。事实上,在反推控制律设计中,棘手的是如何处理对虚拟控制信号的微分问题。而文献<sup>[13]</sup>的核心,正是巧妙地提出了一种构造Lyapunov函数的方法,避开对信号的微分。

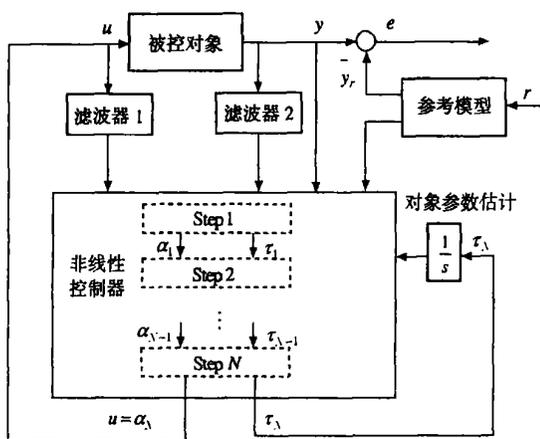


图1 文献<sup>[13]</sup>反推自适应控制基本原理

由于放弃了确定性等价原则和规范化调参律,文献<sup>[13]</sup>所设计的反推自适应控制器较传统自适应控制器具有如下优点<sup>[14]</sup>:

1) 可显著改善系统跟踪误差的过渡过程品质,给出了系统跟踪误差 $L_2$ 性能指标与设计参数间的明确关系;当高频增益确切已知的情况下,可给出系

统跟踪误差 $L_2$ 性能指标与设计参数间的明确关系,从而为改善跟踪精度指出了具体途径。

2) 削弱了调参律对系统的影响。

3) 在无调参律的情况下,反推控制对参数不确定性仍具有一定的鲁棒性。

在文献<sup>[13]</sup>的基础上,近年来相关的研究工作有:文献<sup>[15]</sup>将<sup>[13]</sup>的结果推广到了对象高频增益符号未知的情形;<sup>[16]</sup>讨论了当存在未建模动态和外干扰时该方法的鲁棒性问题;<sup>[17]</sup>将此方法推广到时变系统,并对闭环系统稳定性进行了讨论;<sup>[18]</sup>则对线性时变系统设计了一类鲁棒反推自适应调节方法;<sup>[19,20]</sup>将此方法推广到多变量(MMO)系统,给出了收敛性和稳定性的证明,但能否改善系统的跟踪误差品质还需进一步研究;对多变量系统,<sup>[21]</sup>提出了一类反推自适应律,可放松传统自适应控制对高频增益矩阵所作的苛刻假设。

结合反推控制与传统规范化方法的优点,文献<sup>[22]</sup>提出了一种新的反推自适应方案。较之<sup>[13]</sup>,该方案控制律稍显简单,并获得了类似的性能结果。此前,一般认为反推控制可改善过渡过程性能恰恰在于放弃了规范化自适应律,但<sup>[22]</sup>的研究却表明它们并非相互排斥,从而指出了另一条可能的研究途径。<sup>[23]</sup>给出了存在模型不确定性情况下该方法的鲁棒性分析;<sup>[24,25]</sup>则进一步将其推广到了慢时变线性系统。

文献<sup>[26]</sup>中,我国学者解学军等人也提出了一种具有未规范化自适应律的直接模型参考反推控制器,并给出了性能分析。文献<sup>[27,28]</sup>提出了一种不含自适应律的模型参考反推鲁棒控制方案,当存在非线性干扰和未建模动态时,跟踪误差仍能收敛到一个小的残集内,缺点在于跟踪误差高度依赖控制幅度,难以用于实际工程。

此外,有关线性系统PD控制、变结构控制等与反推自适应相结合方案的讨论可在文献<sup>[29,30]</sup>中找到。

## 2.2 非线性系统反推自适应控制

由于更加贴近工程实际,非线性系统的自适应控制始终是控制理论中最具吸引力的研究方向。自从文献<sup>[3]</sup>首先就一类非线性系统提出反推自适应控制方案以来,对非线性系统的反推自适应控制研究取得了多方面的进展。

### 2.2.1 严格反馈非线性系统的反推自适应控制方案

#### (1) 基本的非线性反推方案

严格反馈非线性系统的反推自适应控制方案主要以文献<sup>[3,31]</sup>为基础,已有较充分的研究,并在

工程方面有成功应用 设计过程为: 考虑参数化严格反馈系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \varphi_1(x_1)\theta \\ \dot{x}_2 = x_3 + \varphi_2(x_1, x_2)\theta \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n + \varphi_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})\theta \\ \dot{x}_n = \beta(x)u + \varphi_n(x)\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $x \in R^n$  为状态,  $u \in R^1$  为控制,  $\theta \in R^q$  为未知的常参数矢量,  $\beta(x)$  和  $\varphi_i(x)$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 为光滑函数且对于任意的  $x \in R^n, \beta(x) > 0$

基本思想是采用递归方法设计控制器, 将某些状态变量视为“虚拟控制”并设计控制律: 首先将式(1)第 1 个等式视为一个独立的子系统, 定义误差变量  $z_1 = x_1$ , 虚拟控制  $x_2$  用来稳定第 1 个等式 由于参数  $\theta$  未知, 采用自适应方法来完成该任务, 则此时的控制器包含控制律  $\alpha_1(x_1) = (x_2)_d$  以及调参律  $\dot{\theta} = -\tau(x_1)$ ; 由于  $x_2$  并非最终的实际控制, 反推的下一步定义误差变量  $z_2 = x_2 - \alpha_1$ , 虚拟控制  $x_3$  则用来稳定包含第 1, 第 2 个等式的子系统 以下的设计类似, 在每一步中产生一新的控制律和新的调参律, 最后一个控制信号  $\alpha_n$  则为最终控制  $u$ . 图 2 给出了该方法的大致设计过程

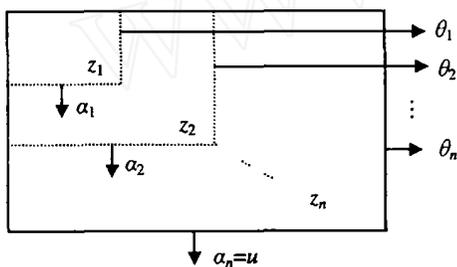


图 2 严格反馈非线性系统反推自适应控制基本原理

上述方案的主要优点在于:

- 1) 仍然基于 Lyapunov 方法, 但克服了传统方法“匹配条件”的束缚;
- 2) 对参数化严格反馈非线性系统, 解决了全局稳定和跟踪收敛的难题;
- 3) 当参数未知时, 传统的反馈线性化设计方法会抵消系统中有用非线性特性, 而反推自适应则较为灵活, 可通过增加附加非线性项来改善系统过渡过程性能

(2) 调节函数方案

显然, 上述基本反推自适应方法对同样的参数  $\theta$  进行了  $n$  次估计. 文献[31]采用调节函数方案克服了这种过参数化的缺点. 调节函数方案可以视为基本反推自适应方案的更高级形式. 以第 1 步为例, 反推一开始, 该方案并非将  $\dot{\theta} = -\tau(x_1)$  视为调参律, 而

仅视为一“调节函数”; 调节函数  $\tau(x_1)$  在后面的递归设计中将被用到, 它与调参律间的误差  $\theta - \tau(x_1)$  可通过增加控制器的附加项来补偿. 除继承了基本反推方案的优点外, 调节函数方案还可使自适应控制器的动态阶数最小, 同时也使状态和参数估计收敛到的集合的维数最小

(3) 模块设计方案

调节函数方案尽管拥有许多优点, 但也存在下述缺点:

- 1) 调参律设计没有太大的选择余地;
- 2) 虽然调节函数控制器的阶数是最小的, 但对于高阶系统, 由于与辨识器之间的相互作用, 控制律的非线性表达变得非常复杂

为克服上述缺点, 文献[31]还提出了一种模块化设计方案. 该方案在反推自适应的基础上, 借用了线性系统设计的一些传统方法, 即令辨识器模块设计和控制器模块设计相互独立. [31]首先分析了将线性系统方法引入非线性系统时所遇到的主要障碍: 除非对系统非线性特性加以严格限制, 上述控制器不能实现辨识器和控制器的分离. 进而, 提出了一类具有较强鲁棒性的控制器, 即所谓的 ISS 控制器 (Input-to-State Stability Controller). 该类控制器不仅对常参数误差, 而且对时变参数估计均可保证信号的有界性, 从而使 ISS 控制器能够适用于模块化的非线性反推自适应设计. 此外, [31]还提出一类 SG 控制器, 采用了类似于线性系统中的小增益性质. SG 控制器减少了 ISS 控制器的非线性复杂性, 但同时也降低了其过渡过程性能

除了调节函数方案和模块设计方案, 在[3, 31]的基础上, 近年来相关的研究工作还有: 我国学者周绍生等人<sup>[32]</sup>就一类更广泛的非线性系统讨论了反推自适应控制器的设计, 解决了系统全局稳定性问题; [33]采用 Nussbaum 增益方法研究了在高频增益未知情况下的非线性反推算算法, 进而, 当外界干扰的上界未知时, 该文讨论了此算法的鲁棒性; Jiang 等人在[34, 35]中研究了存在未建模动态、系统不确定性及外界输入干扰时的非线性反推自适应控制律的鲁棒设计; [36]讨论了非线性非最小相位系统的反推自适应方法及其全局渐近稳定性分析; [37, 38]则将反推方法推广到多变量非线性系统

2.2.2 其他方案

除了以文献[3, 31]为代表的严格反馈非线性系统的反推自适应控制方案, 其他类型的非线性系统的反推自适应研究包括: Kristic 等人<sup>[39]</sup>的工作解决了随机严格反馈系统的镇定问题; 我国学者刘允刚等人<sup>[40, 41]</sup>针对该类系统设计了一系列输出反馈

控制方法; [42] 则解决了非严格反馈随机系统的镇定问题; [43] 结合 Morse 的高阶调节器方案<sup>[44]</sup>, 提出了一种新的反推自适应控制方案, 其突出优点是算法简单, 但跟踪误差的  $L$  性能指标并不理想。此外, 国内外学者还提出了许多将非线性系统反推自适应控制与神经网络、模糊控制等相结合的方案<sup>[45, 46]</sup>。

### 3 工程应用研究现状

近年来, 反推自适应控制的工程应用在国内外均有成功例子。

#### 3.1 航空航天领域

1995 年, Richard 等人<sup>[7]</sup> 首先讨论了导弹纵向运动控制器的反推控制方案; 文献 [4] 对某复杂高性能飞机设计了反推自适应飞行控制律并进行了仿真研究, 结果表明: 即使存在较大的模型误差, 甚至在飞机某个平尾失效的情况下, 反推自适应控制律都展现出了快速的收敛性和良好的鲁棒性; [5] 对飞控系统的反推自适应控制进行了初步研究, 比较了不同的飞控设计方法 (模糊控制、反推自适应控制、变结构控制、非线性动态逆控制、间接自适应控制等), 结果表明, 反推方法在未来飞控系统设计中具有突出优点; [6] 采用神经网络和反推自适应相结合的方法讨论了飞行控制器的设计问题; [47] 则讨论了反推方法在航空发动机控制等设计中的应用。航天方面也有许多应用反推自适应控制的例子, 但因设计者保密而无法了解细节, 仅有少量有关太空飞行器反推控制设计方案的例子可以参考文献 [48, 49]。

目前, 许多国内学者也致力于反推控制在航空航天中的应用研究。文献 [8, 50] 较为详细地讨论了导弹的反推自适应控制, [51, 52] 分别就无人机、超机动战斗机的自适应反推控制器的设计问题进行了讨论, [53] 则研究了再入飞行器自动驾驶仪的反推设计方案。

#### 3.2 其他工业控制领域

除航空航天领域外, 在液压控制、电机控制、机器人控制、船舶控制等许多工业控制领域, 反推自适应控制的应用在国内外均有大量报道。由于篇幅所限, 这里仅列出较具代表性的文献 [54~57] 以供参考。

### 4 目前存在的问题及研究方向

从上述的研究现状可以看到, 尽管反推自适应控制在理论和应用方面已取得了诸多成果, 但仍然存在许多需要完善的地方, 主要包括以下几个方面:

1) 当被控对象为定常 SISO 线性系统时, 目前的反推自适应控制方案<sup>[13, 22]</sup> 均不能给出高频增益

未知 (符号已知) 时  $L$  性能指标和设计参数之间的明确关系, 因而无法给出改善系统跟踪误差过渡过程的具体途径。而要求高频增益完全已知对实际系统过于苛刻。当前的研究方向是提出一种反推控制方案, 解决高频增益未知时  $L$  性能指标问题。

2) 与传统自适应控制相同, 目前的多变量反推自适应系统对高频增益矩阵施以了苛刻的限制, 例如要求具有某种正定性。尽管这种假设近年来已放松到仅要求其顺序主子式符号已知, 但从工程应用的角度看, 仍嫌保守且物理意义不甚明确。如何提出一种在工程上可普遍接受的方案不论对反推自适应控制或其他自适应控制均具重大价值。

3) 当被控对象含有输入扰动和未建模动态时, 现有反推自适应控制方案的结果并不理想, 跟踪误差仅能收敛到与未建模动态的强度系数、扰动及其导数成正比的某个残集内, 这甚至不如文献 [2] 所提出的鲁棒自适应方案。由于大多数复杂工业系统的建模过程都会忽略某些次要因素, 因此, 反推控制的这一理论缺陷使其工程应用颇受质疑。

4) 时变系统的反推自适应控制方案仅对慢时变系统适用, 这限制了它的应用范围; 而模型参考反推鲁棒控制方案尽管可适用于快时变系统, 但目前为止同样难以建立跟踪误差性能指标和设计参数之间的明确关系。多变量反推鲁棒控制方案亦存在同样的问题。

5) 随着被控对象相对阶的增加, 现有的反推自适应控制方案控制律高度非线性、高度复杂, 尤其当应用于导弹、飞控等多变量非线性系统时, 其计算量往往是机载计算机难以承受的。如何减少非线性控制律的复杂程度, 同时不降低其过渡过程品质, 是反推自适应系统急需解决的问题。

6) 工程应用有待进一步开拓。需要指出, 尽管目前已有若干工程上成功应用的例子, 但更多的方案仍停留在数值仿真阶段。

### 5 结 论

综上所述, 反推自适应控制的研究已取得诸多进展, 在航空、航天和其他工业领域具有较广泛的应用前景, 但其理论和应用研究尚未成熟, 还存在一系列尚待解决的问题。

#### 参考文献 (References)

- [1] Narendra S, Annaswamy M. *Stable Adaptive Systems* [M]. New York: Prentice Hall, 1989.
- [2] Ioannou P A, Jing Sun. *Robust Adaptive Control* [M]. New York: Prentice Hall, 1996.
- [3] Kanellakopoulos I, Kokotovic P V, Morse A S. *Systematic Design of Adaptive Controllers for Feedback*

- Linearizable Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1991, 36(11): 1241-1253
- [4] Steinberg M L, Page A B. Nonlinear Adaptive Flight Control with a Backstepping Design Approach [A]. *IAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit* [C]. Boston, 1998: 729-738
- [5] Steinberg M L. A Comparison of Intelligent, Adaptive, and Nonlinear Flight Control Laws [A]. *IAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit* [C]. Portland, 1999: 488-498
- [6] Lee T Y, Kim Youdan. Nonlinear Adaptive Flight Control Using Backstepping and Neural Networks Controller [J]. *J of Guidance Control and Dynamics*, 2001, 24(4): 675-682
- [7] Richard A Hull, Darren Schumacher, Qu Z H. Design and Evaluation of Robust Nonlinear Missile Autopilots From a Performance Perspective [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Seattle, 1995: 189-193
- [8] 张友安, 胡云安. 导弹控制和制导的非线性设计方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003  
(Zhang Y A, Hu Y A. *Nonlinear Design Approaches of Missile Control and Guidance* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003)
- [9] Feuer A, Morse A S. Adaptive Control of Single-input, Single-output Linear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1978, 23(4): 557-569
- [10] Narendra K S, Valavani L S. Stable Adaptive Controller Design-direct Control [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1978, 23(4): 570-583
- [11] Zang Z, Bitmead R R. Transient Bounds for Adaptive Control Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(1): 171-175
- [12] Hsu L, Costa R. Bursting Phenomena in Continuous-time Adaptive Systems with a  $\sigma$ -Modification [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1987, 32(1): 84-86
- [13] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P V. Nonlinear Design of Adaptive Controllers for Linear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(4): 738-752
- [14] Krstic M, Kokotovic P V. Transient Performance Improvement with a New Class of Adaptive Controllers [J]. *Systems and Control Letters*, 1993, 21(6): 451-461
- [15] Zhang Y, Wen C, Soh Y C. Adaptive Backstepping Control Design for Systems with Unknown High-frequency Gain [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(12): 2250-2254
- [16] Faycal I, Krstic M. Robustness of the Tuning Functions Adaptive Backstepping Design for Linear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(12): 431-437
- [17] Giri F, Arabeh, Ikhouane F. Backstepping Adaptive Control of Time-varying Plants [J]. *Systems and Control Letters*, 1999, 36(4): 245-252
- [18] Marino R, Tomei P. Robust Adaptive Regulation of Linear Time-varying Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 36(7): 1301-1311
- [19] Yi Ling, Gang Tao. Adaptive Backstepping Control Design for Linear Multivariable Plants [A]. *Proc of 35th Conf on Decision and Control* [C]. Kobe, 1996: 2438-2443
- [20] Wu Y Q, Yu X H. Adaptive Control of Linear MIMO Systems Using Backstepping Approach [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Philadelphia, 1998: 599-603
- [21] Ramon R Costa, Liu Hsu, Alvaro K Mai, et al. Adaptive Backstepping Control Design for MIMO Plants Using Factorization [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Anchorage, 2002: 4601-4606
- [22] Youping Z, Bannou P A. A new Linear Adaptive Controller: Design, Analysis and Performance [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(5): 883-897
- [23] Youping Z. A New Linear Adaptive Controller: Robustness [A]. *Proc of American Control Conf* [C]. Chicago, 2000: 3671-3675
- [24] Youping Z, Baris F, Bannou P A. Backstepping Control of Linear Time-varying Systems with Known and Unknown Parameters [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(11): 1908-1925
- [25] Baris F, Youping Z, Bannou P A. Adaptive Control of a Class of Slowly Time Varying Systems with Modeling Uncertainties [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2005, 50(6): 915-920
- [26] 解学军, 吴昭景, 张嗣瀛. 具有未规范化自适应律的直接模型参考自适应反推控制器 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(1): 53-56  
(Xie X J, Wu Z J, Zhang S Y. Direct Model Reference Adaptive Backstepping Controller with Unnormalized Adaptive Laws [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(1): 53-56)
- [27] Qu Z, Dorsey J F, Dawson D M. Model Reference Robust Control of a Class of SISO Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(11): 2219-2234
- [28] Ambrose H, Qu Z. Model Reference Robust Control for MIMO Systems [J]. *Int J of Control*, 1997, 68(3): 599-623
- [29] Benaskeur A R, Desbiens A. Backstepping-based Adaptive PD Control [J]. *IEEE Control Theory*

- Application*, 2002, 149(1): 54-59
- [30] Lin Yan, Mao Jianqin. A Robust VSMRAC Using Switching Scheme for the Gain of Control Variables [J]. *Int J of Control*, 2001, 74(3): 225-238
- [31] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P V. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1995
- [32] 周绍生, 费树岷, 冯纯伯. 多输入非线性串级系统的非过参数化自适应控制[J]. *控制与决策*, 2000, 15(4): 411-414  
(Zhou S S, Fei S M, Feng C B. Adaptive Control of Multi-input Cascade Nonlinear Systems without Overparametrization [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4): 411-414)
- [33] Ding Z T, Ye X D. A Flat-zone Modification for Robust Adaptive Control of Nonlinear Output Feedback Systems with Unknown High-frequency Gains [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(2): 358-363
- [34] Jiang Z P, Hill D J. A Robust Adaptive Backstepping Scheme for Nonlinear Systems with Unmodeled Dynamics [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(9): 1705-1711
- [35] Chen W T, Xu C X. Simple Robust Output-feedback Controller for Uncertain Nonlinear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(11): 1765-1772
- [36] Onishi N, Yamashita Y, Nishitani H. Global Asymptotic Stabilization of Nonminimum Phase Nonlinear Systems via Extended Backstepping [A]. *Proc of the 41st SICE Annual Conf* [C]. Osaka, 2002: 2249-2254
- [37] Liu X P, Gu G X, Zhou K. Robust Stabilization of MIMO Nonlinear Systems by Backstepping [J]. *Automatica*, 1999, 35(5): 987-992
- [38] Wei L in. Robust Control of a Class of MIMO Minimum-phase Nonlinear Systems [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Albuquerque, 1997: 838-842
- [39] Krstic M, Deng H. *Stabilization of Nonlinear Systems* [M]. London: Springer-Verlag, 1998
- [40] 刘允刚, 施颂椒, 潘子刚. 随机非线性系统鲁棒自适应反馈控制器的积分反推方法设计[J]. *自动化学报*, 2001, 27(5): 613-620  
(Liu Y G, Shi S J, Pan Z G. Backstepping Robust Adaptive Feedback Control Design for Stochastic Nonlinear Systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(5): 613-620)
- [41] Liu Y G, Zhang J F, Pan Z G. Design of Satisfaction Output Feedback Controls for Stochastic Nonlinear Systems under Quadratic Tracking Risk-sensitive Index [J]. *Science in China (Series F)*, 2003, 46(2): 126-144
- [42] 陈志福, 季海波, 奚宏生, 等. 参数非严格反馈形式的随机非线性系统的自适应控制[J]. *中国科学技术大学学报*, 2002, 32(6): 720-726  
(Chen Z F, Ji H B, Xi H S, et al. Adaptive Control of Stochastic Nonlinear Systems in Parametric Non-strict-feedback Forms [J]. *J of University of Science and Technology of China*, 2002, 32(6): 720-726)
- [43] Nikiforov V O, Voronov K V. Adaptive Backstepping with a High-order Tuner [J]. *Automatica*, 2001, 37(12): 1953-1960
- [44] Ortega R. On Morse's New Adaptive Controller: Parameter Convergence and Transient Performance [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1993, 38(8): 1191-1202
- [45] Zhang T, Ge S S, Hang C C. Adaptive Neural Network Control for Strict-feedback Nonlinear Systems Using Backstepping [J]. *Automatica*, 2000, 36(12): 1835-1840
- [46] Hyeoncheol Lee, Masayoshi Tomizuka. Robust Adaptive Control Using a Universal Approximator for SISO Nonlinear Systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(1): 95-106
- [47] Krstic M, Fontaine D, Kokotovic P V, et al. Useful Nonlinearities and Global Stabilization of Bifurcations in a Model of Jet Engine Surge and Stall [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(12): 1739-1745
- [48] Krstic M, Tsotras P. Inverse Optimal Stabilization of a Rigid Spacecraft [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(5): 1042-1049
- [49] Ki-Seok Kim, Youdan Kim. Robust Backstepping Control for Slew Maneuver Using Nonlinear Tracking Function [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(6): 822-829
- [50] 曹邦武, 姜长生. 基于回馈递归方法的导弹鲁棒飞行控制系统设计[J]. *宇航学报*, 2005, 26(2): 148-151  
(Cao B W, Jiang C S. A Robust Control Approach to Missile Autopilot Design Based on Backstepping [J]. *J of Astronautics*, 2005, 26(2): 148-151)
- [51] 苏丙未, 曹云峰, 陈欣, 等. 基于Backstepping的无人机飞控系统设计研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2001, 33(3): 250-253  
(Su B W, Cao Y F, Chen X, et al. Design of Adaptive Backstepping Flight Control System of UAV [J]. *J of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2001, 33(3): 250-253)

(下转第 1102 页)

- (Zhang W H, Chen S F, Shi J J. Eco-industry, Circular Economy and Sustainable Development [J]. *J of Southeast University*, 2004, 7(3): 59-62.)
- [4] 张文红, 陈森发. 生态工业系统——一个开放的复杂巨系统[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(3): 20-25  
(Zhang W H, Chen S F. Eco-industry System—An Open Complex Giant System [J]. *J of System Simulation*, 2004, 16(3): 20-25.)
- [5] Farreell A. Sustainability and the Design of Knowledge Tools [J]. *IEEE Technology and Society Magazine*, 1996, 15(4): 11-20
- [6] Bailey R. Designing Robust Industrial Ecosystems: A Systems Approach [DB/OL]. <http://www.srl.gatech.edu/people/reid/rb.thesis.html>, 1997.
- [7] Koenig H E, Cantlon J E. Quantitative Industrial Ecology [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, Part C: Application and Review*, 1998, 28(1): 16-28
- [8] 陈定江, 李有润, 沈静珠, 等. 生态工业园区的M NLP模型[J]. *过程工程学报*, 2002, 2(1): 75-80  
(Chen D J, Li Y R, Shen J Z, et al. A M NLP Model of Eco-industrial Parks [J]. *J of Process Engineering*, 2002, 2(1): 75-80.)
- [9] 张文红. 生态工业发展的模式、途径及定量仿真模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2004  
(Zhang W H. *The Modes and Ways of Developing Ecological Industry and Its Quantitative Simulation Models* [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.)
- [10] 唐焕文, 秦学志. 实用最优化方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2000  
(Tang H W, Qin X Z. *Practicality Optimization Method* [M]. Dalian: Dalian University Technology, 2000.)

(上接第 1086 页)

- [52] 吴文海, 耿昌茂, 罗德林, 等. 现代战机超机动攻击研究 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, 36(4): 417-421.  
(Wu W H, Geng C M, Luo D L, et al. Modern Fighter Study on PST-Attacking [J]. *J of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 36(4): 417-421.)
- [53] 连葆华, 崔祐涛, 崔平远. 再入飞行器自动驾驶仪的自适应退步控制设计[J]. *中国空间科学技术*, 2003, (1): 7-13  
(Lian B H, Cui H T, Cui P Y. Adaptive Backstepping Control Based Autopilot Design for Reentry Vehicle [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2003, (1): 7-13.)
- [54] Guang Li, Amir K. Robust Control of a Hydraulically Driven Flexible Arm Using Backstepping Technique [J]. *J of Sound and Vibration*, 2004, (208): 759-775.
- [55] 王家军, 赵光宙, 齐东莲. 基于反推的永磁同步电动机伺服系统的位置跟踪控制[J]. *电路与系统学报*, 2004, 9(6): 19-21.  
(Wang J J, Zhao G Z, Qi D L. Backstepping Position Tracking Control for Permanent Magnetic Synchronous Motor Servo System [J]. *J of Circuits and Systems*, 2004, 9(6): 19-21.)
- [56] 张春朋, 林飞, 宋文超, 等. 异步电机鲁棒控制及其 Backstepping 设计[J]. *控制与决策*, 2004, 19(3): 267-271.  
(Zhang C P, Lin F, Song W C, et al. Backstepping Design for Robust Controller of Induction Motor [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(3): 267-271.)
- [57] 纪志成, 李三东, 沈艳霞. 自适应积分反步法永磁同步电机伺服控制器的设计[J]. *控制与决策*, 2005, 20(3): 329-331.  
(Ji Z C, Li S D, Shen Y X. Adaptive Backstepping Design for the Servo Controller of Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(3): 329-331.)