

文章编号: 1000-8152(2005)02-0254-07

## 非线性系统神经网络自适应控制的发展现状及展望

孙富春, 李 莉, 孙增圻

(清华大学 计算机科学与技术系, 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 简要回顾了神经网络控制及其应用的发展历程, 重点论述了人们在连续、离散时间非线性系统的神经网络以及神经模糊稳定自适应控制研究方面所取得的主要进展, 探讨了神经网络自适应控制研究方面存在的主要问题及解决问题的基本途径. 作为当前解决神经网络自适应控制问题的途径之一, 介绍了近来人们对二阶模糊神经网络以及量子神经网络的研究. 最后, 总结并指出了这一领域下一步的发展方向和有待解决的新课题.

**关键词:** 神经网络; 非线性系统; 自适应控制; 稳定性

**中图分类号:** TP301      **文献标识码:** A

## Survey on adaptive control of nonlinear systems using neural networks

SUN Fu-chun, LI Li, SUN Zeng-qi

(Department of Computer Science & Technology, State Key Laboratory of Intelligent Technology & Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A brief overview on the evolution of neural network-based control and applications is given. The emphasis is put on some recent advances on stable adaptive control for continuous and discrete-time systems using neural networks and neuro-fuzzy models. Open problems and problem-solving approaches are discussed. As one of the problem-solving approaches for neuro-adaptive control, Type-2 fuzzy neural networks and quantum neural networks are also introduced. Finally, the further research direction and new subjects are proposed.

**Key words:** neural networks; nonlinear systems; adaptive control; stability

### 1 引言(Introduction)

生产制造过程、航空航天、能源等领域中的一大类非线性系统具有如下共性: 1) 数学模型难于建立、扰动有界但未知; 2) 仅含有控制对象的输入/输出数据或在操作过程中积累起来的经验信息. 对该类系统采用常规的控制理论方法一般难以奏效, 而基于神经网络和模糊逻辑的控制方法则提供了解决这类系统控制问题的重要途径.

随着近年来不同神经网络控制结构的相继提出和神经网络学习算法的集成和扩展, 连续和离散时间非线性系统的神经网络自适应控制已得到了广泛的研究<sup>[1~8]</sup>, 并出版了多本专著<sup>[9~12]</sup>, 它们从不同侧面描述了过去 20 多年来人们在该领域理论与应用方面所取得的主要进展. 本文将回顾神经网络控制的发展历程, 重点讨论在神经网络自适应控制研究方面所取得的主要理论成果和面临的问题, 以期抛砖引玉, 促进该领域的深入研究和发

### 2 神经网络控制回顾(Review of neural network-based control)

第一个神经网络控制器是 Widrow 和 Smith 于 1963 年提出的动平衡器(broom balancer)<sup>[13]</sup>, 它由自适应线性单元 Adline 构成, 用于学习并产生一条开关曲线, 可产生二元的控制作用. 20 世纪 70 年代, Albus 提出一种模仿小脑如何控制肌体运动机理的控制模型, 小脑模型关节控制器简称 CMAC<sup>[14]</sup>, 并将其用于机械手的运动控制.

20 世纪 80 年代是神经网络控制理论研究的一个高潮. 这一时期有两项重要的工作, 一个是美国物理学家 Hopfield 于 1982 年提出的 Hopfield 人工神经网络<sup>[15]</sup>, 另一个是 Rumelhart 和 McClelland 于 1986 年提出的多层神经网络的反传学习算法<sup>[16]</sup>, 简称 BP 算法. 这两项重要工作掀起了 20 世纪 80 年代中期以来人工神经网络的研究热潮, 同时也推动了人工神经网络在控制中的空前应用.

收稿日期: 2003-10-16; 收修改稿日期: 2004-06-25.

基金项目: 全国优秀博士学位论文专项基金资助项目(200041); 国家自然科学基金资助项目(60474025, 60334020, 90405017); 国家重点基础研究专项基金资助项目(G2002cb312205); 清华大学清华基础研究基金资助项目(JC2003028).

20世纪90年代是神经网络控制理论和应用蓬勃发展的时期,理论方面的工作主要包括:1)为克服以往神经网络控制采用梯度法学习的不足,研究了基于线性参数化、多层和递归神经网络的稳定自适应控制;2)研究神经网络与变结构控制相结合的自适应控制方法;3)利用神经网络与模糊系统在功能上的等价性研究神经模糊稳定自适应控制的理论与方法。

新世纪初人们除继续研究非线性系统的神经模糊建模与控制外<sup>[17-19]</sup>,还针对一些复杂且较为特殊的非线性系统<sup>[20-22]</sup>,开展了神经网络控制理论及其应用方面新的研究。同时,在神经网络、模糊系统与遗传算法相结合的计算智能方面继续进行研究<sup>[23]</sup>,积极探索采用二阶神经模糊网络<sup>[24-26]</sup>和量子神经网络进行非线性系统建模与控制的相关理论问题<sup>[27]</sup>。

### 3 神经网络稳定自适应控制现状 (Stable adaptive control using neural networks)

#### 3.1 连续时间系统的神经网络稳定自适应控制 (Stable adaptive control for continuous systems using neural networks)

稳定自适应控制是近年来基于神经网络自适应控制方法研究的主流<sup>[1-6]</sup>。按照所使用神经网络的类型,可以将其分为:基于线性参数化神经网络<sup>[28,29]</sup>、多层<sup>[3,5]</sup>和动态神经网络<sup>[30,31]</sup>的稳定自适应控制。

基于线性参数化神经网络的稳定自适应控制首先由 Sanner<sup>[28]</sup>和 Polycarpou<sup>[29]</sup>等人于1991年针对连续非线性系统提出。他们的工作促进了人们在这一领域的深入研究<sup>[1,32,33]</sup>。通过采用线性参数化神经网络,可调参数与神经网络基函数的线性关系成立。所以传统自适应控制的严格结论可以直接用于神经网络的权值调整,从而得到稳定的闭环控制系统。通常,李雅普诺夫稳定理论或无源性理论用于设计全局稳定的闭环控制系统。这里,典型的应用是将直接的和间接的神经网络自适应方法和变结构方法结合以得到改进的系统性能,变结构用于克服系统的建模误差,保证系统的全局稳定性。

相对于线性参数化神经网络,多层神经网络具有许多独特的优点。首先,多层神经网络具有较好的逼近精度;其次,采用多层神经网络的自适应控制器可调参数较少,这对控制的实时实现是非常重要的<sup>[3,5]</sup>。

Chen等人于1992年成功地将多层神经网络用

于非线性系统的自校正控制问题中<sup>[5]</sup>,作者提出了一种带有死区的权值调整算法,并给出了系统局部收敛性的证明。然而,提出的控制器性能仍然依赖死区的选择和输入信号的激励性,并且需要初始的神经网络离线学习过程。1995年,Lewis等人<sup>[3]</sup>提出采用三层前向神经网络结构的控制器,中间隐层采用的是非线性变换函数,而神经网络输出与输出层权值成非线性关系。他们基于李雅普诺夫稳定理论给出了一、二层和输出层权值调整算法,并讨论了神经网络调整算法的无源性,得到了保证性能的神经网络稳定自适应控制方法。Lewis的工作是这一领域的先导,其后他的研究组又在这一领域做出了一系列的卓有成效的工作。此外,孙富春等人进一步研究了基于观测器的机械手多层神经网络自适应控制方法<sup>[34]</sup>。

由于含有反馈连接,动态神经网络固有的动态记忆使得它特别适合于动态系统的建模与控制。动态神经网络不仅能够模拟某些动态行为,如极限环和混沌等,而且能够以较小的规模提供规模大得多的多层神经网络的性能。1990年,Narendra和Parthasarathy<sup>[35]</sup>最早将动态神经网络应用于非线性系统的辨识与控制。然而,他们没有提供闭环系统稳定性的证明。1994和1999年,Rovithakis等人<sup>[36]</sup>采用动态神经网络研究非线性动力学未知系统的神经网络稳定自适应控制。提出的控制算法分两步进行,首先,采用一个动态神经网络完成“黑箱”辨识,然后,用动态反馈对非线性系统进行控制。文中采用奇异摄动分析研究了动态神经网络辨识器的稳定性和鲁棒性,并研究了各种建模误差对系统性能的影响。由于滑模控制对模型不确定性的鲁棒性,人们已开始研究将动态神经网络与滑模控制相结合<sup>[19,30]</sup>。比较典型的工作是Edgar和Miguel<sup>[30]</sup>于2000年提出的自适应神经网络控制器,系统控制律包括神经网络的线性化项、反馈控制和滑模项。该控制器不需要离线训练,但要求系统状态完全可量测且已知建模误差的界。

#### 3.2 离散系统的神经网络稳定自适应控制 (Stable adaptive control for discrete-time systems using neural networks)

由于现有的控制系统大多采用计算机控制,研究离散非线性系统的神经网络自适应控制具有重要的现实意义。然而,与连续系统相比,离散系统还存在以下的困难:1)为保证系统稳定,有时需要持续激励。离散系统如何获得持续激励,是一个未解决的

问题;2) 如果系统的相对阶大于一,当前输入将依赖于系统的未来状态,即所谓的非因果性(causality);3) 对于多输入/出离散系统,如何对系统进行解耦也是目前的一大难题.另外,李亚普诺夫函数的选择会更加困难.正因为以上这些问题,使得在离散系统的神经网络自适应控制方面的研究成果相对较少.

为了解决单输入/出离散系统的非因果性问题,人们通常采用坐标变换的方法,将一步提前描述变换成多步预测的形式,在此基础上设计神经网络自适应控制器.目前自适应控制器的设计主要是基于反馈线性化的方法,采用等效控制器<sup>[5]</sup>或者离散“后退”设计算法<sup>[37]</sup>进行设计.然而文献<sup>[5]</sup>提出的控制器性能依赖于死区的选择和输入信号的激励性,并且需要初始的神经网络离线学习过程,没有解决控制增益的非奇异问题.文献<sup>[37]</sup>则采用高阶神经网络来逼近系统的非线性动力学,“后退”方法用于设计全状态自适应神经网络控制器,避免了自适应非线性控制中可能的控制器增益奇异,同时解决了离散时间“后退”设计步骤中的非因果问题.然而,由于变换后每一子系统虚拟控制器均需用高阶神经网络进行逼近,需要调节的参数很多,增加了计算的复杂性.输出反馈自适应神经网络通过构造非线性变换解决了这一问题,然而如何选择恰当的控制参数,文中没有给出.此外,这两种控制器均要求已知干扰的上界和部分的初始权重,其应用有一定的局限性.

对于多输入/出系统,由于子系统间存在耦合,其控制律的设计远较单输入/出系统困难. Jaganathan<sup>[38]</sup>在1996年提出了采用两层和多层神经网络逼近系统中的未知函数,应用改进的权值调整算法,避免了常规离散神经自适应方法对持续激励的要求.他们的工作起先是针对一类解耦的 $mn$ 阶多输入/出离散系统,后来又将其推广到了一般性的离散非线性系统.

鉴于现有神经网络稳定自适应控制研究中采用的神经网络和变结构控制机械结合的模式,即在状态空间的某一区域以外采用变结构控制,区域以内采用神经网络控制,孙富春等人提出了扇区神经变结构控制的思想<sup>[39,12]</sup>,并在此基础上建立了较为系统的多输入/出采样非线性系统的神经网络稳定自适应控制方法.扇区神经变结构控制的控制量是神经网络基函数与系统状态误差的有机调制,它能随着系统跟随误差度量向开关流形的趋近,动态地调

整控制量的大小以有效地补偿系统的动力学不确定性,加速神经网络权值的收敛速度,改善系统的稳定性和动态性能.后来,他们又研究了基于动态神经网络的离散非线性系统自适应控制方法,设计方法除继承了静态神经网络稳定自适应控制方法的优点外,通过动态逆的设计,保证了闭环系统在初始段的动态性能,克服了目前大多数动态神经网络自适应方法需要系统状态位于某一紧集的局限<sup>[32]</sup>.

### 3.3 神经模糊稳定自适应控制 (Stable neuro-fuzzy adaptive control)

根据规则后件的类型,T-S模糊模型可以分为两类:静态和动态的T-S模糊模型.具有线性状态函数的静态T-S模糊模型<sup>[40]</sup>可以表示为某种前向神经网络的形式,其在控制器设计中的作用是作为非线性函数的逼近器.这样,静态神经网络自适应控制的所有方法都适用于静态T-S模糊模型.这些工作包括反馈线性化非线性系统的稳定自适应模糊控制<sup>[18]</sup>和基于滑模的机械手模糊自适应控制器的设计<sup>[41]</sup>等.

动态T-S模糊模型是规则后件为线性动态方程的模糊模型,这些线性动态方程可以是状态方程<sup>[42]</sup>、广义系统模型<sup>[43]</sup>和线性奇异摄动模型<sup>[21]</sup>等.因此,现代控制领域的控制器综合方法都可以应用于这类系统控制器的设计.一方面,动态T-S模糊模型可以用于研究基于模型的控制方法,这是目前该领域研究的主流,代表性的工作包括:二次型性能指标下的连续<sup>[44]</sup>和离散<sup>[45]</sup>最优控制,应用LMI的鲁棒最优模糊控制<sup>[42]</sup>, $H_\infty$ 控制<sup>[46]</sup>等等,这里分段连续<sup>[46]</sup>和多李雅普诺夫函数<sup>[47]</sup>已成为该类系统综合的主要工具.另一方面,将动态T-S模糊模型用作非线性动态系统的逼近器,研究基于动态神经模糊系统的自适应控制方法.动态神经模糊系统不仅可以模拟极限环、混沌等动态行为,而且能够以比神经网络小的网络规模达到相同的逼近效果.然而,目前这方面的研究工作还很少.2003年,Wang等人<sup>[17]</sup>将神经模糊控制和传统的PD控制相结合,动态神经模糊系统作为前馈控制用于逼近自主水下潜器的逆动力学,使得系统非线性对于潜器沿期望轨迹运动的影响最小,而反馈回路PD控制则用来减小潜器的跟随控制误差.然而,由于动态神经模糊系统采用梯度法学习,系统的全局稳定性难于在理论上得到保证.冯刚等人<sup>[48]</sup>的工作是基于模型参考自适应方法,根据模糊子集将动态模糊系统分为几个子系统,对每一个子系统设计控制器,子系统间的互联耦

合作为非线性不确定项,采用滑模控制进行补偿.在每一个子系统中,取隶属度最大的作为最终控制器.采用分段连续的李亚普诺夫函数来证明系统的稳定性.缺点是需要调节的参数随着子系统的增加而成倍增加,增大了计算量,此外,系统的收敛速度也难以保证.以上两种设计方法在实际应用中遇到的共同问题就是要求系统的状态应位于某一紧集,否则一旦系统状态超出论域,在此基础上所建立的控制律难于保证设计系统的性能,甚至导致系统的不稳定.此外,这些设计方法没有考虑神经模糊自适应控制系统在初始段的动态性能.为此,孙富春等人<sup>[49]</sup>在已有工作的基础上<sup>[32]</sup>,深入研究了基于动态神经模糊系统的自适应控制问题,通过动态逆的设计克服系统状态位于某一紧集的要求,并保证了设计系统在初始段的动态性能.

#### 4 神经网络自适应控制展望 (Prospects for adaptive control using neural networks)

尽管以神经网络、模糊逻辑和进化计算等为代表的计算智能理论与技术已成为复杂非线性系统建模、控制和最优化的主要工具之一.然而这些理论与方法所面临的问题也比较突出,如对高维非线性系统容易产生“维数灾”问题,对高维多时标系统、非最小相位系统,无穷维的分布参数系统以及混成系统目前还缺乏有效的解决方法.现有理论与技术的研究没有突破传统的计算构架,其局限与不足主要体现在:1) 传统意义上的学习在信息量大的情况下处理速度过慢,不符合人脑实时反应、大容量作业的特征;2) 记忆容量有限;3) 需要反复训练,而人脑具有一次学习的能力;4) 在接受新的信息时会发生灾变性失忆(catastrophic forgetting)现象等.这些本质上的缺陷使得人们开始研究计算智能方法与其它理论方法相结合的实践,而目前人们对二阶模糊系统和量子神经网络的研究就是这一方面的代表.

最初,扎德只是将二阶模糊集作为普通模糊逻辑系统的扩展<sup>[50]</sup>,后来 Dubois 和 Prade<sup>[51]</sup>以及 Mizumoto 和 Tanaka<sup>[52]</sup>在上世纪 70~80 年代零星地提出了该系统的一些运算.之后,直到 20 世纪末和本世纪初,Karnik 和 Mendel 才提出完整的二阶模糊逻辑系统理论体系<sup>[53,54]</sup>.接着二阶模糊集理论开始用于模糊聚类<sup>[55]</sup>、系统辨识<sup>[24]</sup>和模式分类<sup>[56]</sup>中,并取得了较好的效果.由于二阶模糊集的隶属函数也是模糊的,比一阶模糊逻辑系统需要更复杂的计算,而神经网络强大的并行计算能力可以弥补这种不足.目前,已经有研究者试图将二者结合起来,例如

在文献[24]中,提出一种二阶模糊神经网络系统和一种扩展的反传算法,用于系统辨识.在控制方面,Melin 和 Castillo<sup>[25]</sup>针对摆动机器人(pendubot)的控制,研究了基于二阶模糊逻辑系统的神经模糊自适应控制,仿真结果表明提出的神经模糊自适应控制器较之一阶模糊逻辑控制器具有更好的控制效果.可以想象基于二阶模糊逻辑的神经模糊稳定自适应控制将可能成为神经网络自适应控制领域的又一热点.

在量子神经网络方面,目前主要存在 3 种典型的定义:第 1 种是 Tammy 等人<sup>[57]</sup>提出的基于杨氏双缝实验思想的叠加态量子神经网络;第 2 种是 Gopathy<sup>[58]</sup>基于模糊前馈神经网络思想的量子神经网络;第 3 种是 Bohmian 提出的基于量子力学本体表示的非叠加态量子神经网络<sup>[59]</sup>.然而,目前量子神经网络的理论还远不够成熟,甚至还没有一个大家一致认同的定义.在如何确定量子神经网络的结构、基函数以及量子神经网络同普通神经网络的性能比较方面,都有待进一步的研究.到目前为止,量子神经网络的应用仅限于模式分类、建模,在控制领域还没有相应的报道.可以相信,随着量子神经网络理论的发展,其在控制系统中应用将是必然的事情.

#### 5 结束语 (Conclusion)

经过 20 余年的努力,神经网络自适应控制在连续和离散非线性系统中的研究已经取得了丰硕的成果.目前,结合模糊逻辑的神经模糊系统仍然是现阶段研究的一个热点,同时人们开始将神经网络和其它新兴理论结合起来研究新型神经网络,如量子神经网络、二阶模糊神经网络等,这一领域呈现出欣欣向荣的景象.但必须清醒的认识到,神经网络自适应控制研究方面还存在很多问题,这些问题如果得不到解决,将会影响它的进一步发展.下面作者将根据自己的理解,谈几点认识:

- 1) 神经网络控制发展到现在,更多的是作为一种工程手段,缺少系统化的理论分析和证明.而且,其逼近误差对神经网络自适应控制的性能影响很大,与具体的神经网络结构有关.研究如何根据系统的结构特点选择神经网络的类型,神经网络隐层数、非线性变换函数以及针对不同网络结构(多层、动态递归)的自适应控制理论与方法等是有待进一步研究的课题;

- 2) 递归型神经模糊系统近年来已引起广泛重视,并在时间序列预测、模式识别等领域获得成功应用.对于控制问题,引入递归型神经模糊结构的控制器或辨识器及其所引发的一系列理论问题尚未得到

充分研究;

3) 针对一些特定对象的神经模糊控制问题,由于可以充分利用关于对象的一些先验知识,能获得更好的性能.而如何将这先验知识与神经模糊结构有机结合是一个非常有趣的课题.例如,对于柔性机器人,奇异摄动方法是一种非常有效的手段,考虑这一特点的神经模糊奇异摄动方法具有很强的吸引力,这一问题已成为我们现阶段的一个重要研究方向<sup>[21]</sup>;

4) 继续深化研究新型的神经模糊结构,拓展其应用范围.根据控制系统要求,提出新型的三角范数<sup>[60]</sup>和信息合成方法,以简化模糊自适应控制器的设计.此外,需要提出系统和有效的非线性系统神经模糊建模方法,以解决大多数理论工作的验证实例应用的是低阶系统这一现实问题.如对于后件是状态空间形式的 T-S 模糊模型,如何保证建立的模糊模型不仅与原非线性系统输入/出等价,而且在每一个工作点其物理特性也是等价的,这是基于模糊模型的最优鲁棒控制器设计的基础;

5) 量子神经网络和二阶模糊神经网络是采用多分辨率手段进行系统建模与控制的代表,而这一方面的理论还远不够成熟,可以说是任重而道远.此外,从生物机理的角度研究新型的生物神经网络也是一个很有前途的发展方向.

#### 参考文献(References):

- [1] ROVITHAKIS G A. Stable adaptive neuro-control design via Lyapunov function derivative estimation [J]. *Automatica*, 2001, 37(8): 1213 - 1221.
- [2] 王源,胡寿松,吴庆宪.一类非线性系统的自组织模糊 CMAC 神经网络重构跟踪控制[J].控制理论与应用,2003,20(1):70 - 77.  
(WANG Yuan, HU Shousong, WU Qingxian. Adaptive reconfigurable tracking control of a class of nonlinear systems based on self-organizing fuzzy CMAC neural networks [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(1): 70 - 77.)
- [3] LEWIS F L, YESILDIREK A, LIU K. Multilayer neural net robot controller: structure and stability proofs [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1996, 7(2): 388 - 399.
- [4] 金波,俞亚新.一种自适应 CMAC 神经网络控制器及其在水轮调速器中的应用[J].控制理论与应用,2002,19(6):905 - 908.  
(JIN Bo, YU Yaxin. Adaptive CMAC controller for hydraulic turbine speed governor [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(6): 905 - 908.)
- [5] CHEN F C, KHALIL H K. Adaptive control of nonlinear systems using neural networks [J]. *Int J Control*, 1992, 55(6): 1299 - 1317.
- [6] 牛玉刚,邹云,杨成梧.基于神经网络的一类非线性系统自适应跟踪控制[J].控制理论与应用,2001,18(3):461 - 464.  
(NIU Yugang, ZOU Yun, YANG Chengwu. Neural network-based adaptive tracking control for a class of nonlinear systems [J]. *Control Theory & Application*, 2001, 18(3): 461 - 464.)
- [7] 李翔,陈增强,袁著祉.非最小相位非线性系统的简单递归神经网络控制[J].控制理论与应用,2001,18(3):456 - 460.  
(LI Xiang, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Simple recurrent neural network control for non-minimum phase nonlinear system [J]. *Control Theory & Application*, 2001, 18(3): 456 - 460.)
- [8] CHEN S, BILLINGS S A, GRANT P M. Recursive hybrid algorithm for nonlinear system identification using radial basis function networks [J]. *Int J Control*, 1992, 55(5): 1050 - 1070.
- [9] BROWN M, HARRIS C J. *Neurofuzzy Adaptive Modeling and Control* [M]. Hertfordshire: Prentice Hall International (UK) Limited, 1994.
- [10] LIN C T, LEE G C S. *Neural Fuzzy Systems-A Neuro-fuzzy Synergism to Intelligent Systems* [M]. New York: Prentice Hall Inc., A Simon & Schuster Company, 1996.
- [11] GE S S, LEE T H, HARRIS C J. *Adaptive Neural Network Control of Robotic Manipulators* [M]. Singapore: World Scientific, 1998.
- [12] 孙富春,孙增圻,张钺.机械手神经网络稳定自适应控制的理论与方法[M].北京:高等教育出版社,2004.  
(SUN Fuchun, SUN Zengqi, ZHANG Bo. *Theory and Approaches for Stable Adaptive Control of Robotic Manipulators Using Neural Networks* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.)
- [13] WIDROW B. The original adaptive neural net broom-balancer[C]// *Proc of IEEE Int Symposium on Circuits and Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1987: 351 - 357.
- [14] ALBUS J S. New approach to manipulator control: the cerebellar model articulation controller (CMAC) [J]. *J of Dynamics Systems, Measurement and Control*, 1975, 97(3): 220 - 227.
- [15] HOPFIELD J J, TANK D W. Computing with neural circuits: A model [J]. *Science*, 1986, 233: 625 - 633.
- [16] RUMELHART D E, MCCLELLAND J L. *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition* [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- [17] WANG Jeen-Shing, LEE G C S. Self-adaptive recurrent neuro-fuzzy control of an autonomous underwater vehicle [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2003, 19(2): 283 - 295.
- [18] DIAO Yixin, PASSINO K M. Adaptive neural/fuzzy control for interpolated nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2002, 10(5): 582 - 595.
- [19] 达飞鹏,宋文忠.基于模糊神经网络的滑模控制[J].控制理论与应用,2000,17(1):128 - 132.  
(DA Feipeng, SONG Wenzhong. Sliding mode control based on the fuzzy neural networks [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(1): 128 - 132.)
- [20] DENG Hui, SUN Fuchun, SUN Zengqi. Observer-based adaptive controller design of flexible manipulators using time-delay neuro-fuzzy networks [J]. *J of Intelligent and Robotic Systems*, 2002, 34

- (34):453 - 466.
- [21] LIU Huaping, SUN Fuchun, HE Kezhong, et al. Controller design and stability analysis for fuzzy singularly perturbed systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(4):494 - 500.
- [22] 胡寿松, 周川, 胡维礼. 神经网络的模型跟随鲁棒自适应控制[J]. *自动化学报*, 2000, 26(5):623 - 629.  
(HU Shousong, ZHOU Chuan, HU Weili. Model-following robust adaptive control based on neural networks [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(5):623 - 629.)
- [23] PARTRICIA Melin, OSCAR Castriello. Intelligent adaptive control of non-linear dynamical systems with a hybrid neuro-fuzzy-genetic approach [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001:1508 - 1513.
- [24] LEE Ching-hung, LIN Yu-hing, LAI Wei-yu. Systems identification using type-2 fuzzy neural network (type-2 FNN) systems [C]// *Proc of 2003 IEEE Int Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003:1264 - 1269.
- [25] PARTRICIA M, OSCAR C. A new method for adaptive model-based control of nonlinear plants using type-2 fuzzy logic and neural networks [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2003:420 - 425.
- [26] MENDELAND J M, BOB John R I. Type-2 fuzzy sets made simple [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2002, 10(2):117 - 127.
- [27] Ezhov A A, Khromov A G, Berman G P. Analog quantum neuron for functions approximation [C]// *Proc of Int Joint Conf on Neural Networks*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001, 2:1577 - 1582.
- [28] SANNER R M, SLOTTINE J J E. Stable adaptive control and recursive identification using radial Gaussian networks [C]// *Proc of IEEE Conf on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1991:2116 - 2123.
- [29] POLYCARPOU M M, IOANNOU P S. *Identification and control of nonlinear systems using neural network models: design and stability analysis EE-Report 91 - 09 - 01* [R]. Los Angeles: University of Southern California, 1991.
- [30] SANCHEZ E N, BERNAL M A. Adaptive recurrent neural control for nonlinear system tracking [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2000, 30(6):886 - 889.
- [31] SUN Fuchun, LI HanXiong, LI Lei. Robot discrete adaptive control based on dynamic inversion using dynamical neural networks [J]. *Automatica*, 2002, 38(11):1977 - 1983.
- [32] SANNER R M, SLOTTINE J J E. Structurally dynamic wavelet networks for the adaptive control of uncertain robotic systems [C]// *Proc of the 34th IEEE Conf on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995:2460 - 2467.
- [33] POLYCARPOU M M. Stable adaptive neural control scheme for nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(3):447 - 451.
- [34] SUN Fuchun, SUN Zengqi, WOO Pengyun. Neural network-based adaptive controller design of robot manipulators with an observer [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2001, 12(1):54 - 67.
- [35] NARENDRA K S, PARTHASARATHY K. Identification and control of dynamical systems using neural networks [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1990, 1(1):4 - 27.
- [36] ROVITHAKIS G A. Tracking control of multi - input affine nonlinear dynamical systems with unknown nonlinearities using dynamical neural networks [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 1999, 29(2):179 - 189.
- [37] GE S S, LI G Y, LEE T H. Adaptive NN control for a class of strict-feedback discrete-time nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2003, 39(5):807 - 819.
- [38] JAGANNATHAN S, LEWIS F L. Multilayer discrete-time neural-net controller with guaranteed performance [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1996, 7(1):107 - 130.
- [39] SUN Fuchun, SUN Zengqi, WOO Pengyun. Stable neural network-based adaptive control for sampled-data nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1998, 9(5):956 - 968.
- [40] CHENG C M, REES N W. Stability analysis of fuzzy multivariable systems: vector Lyapunov function approach [J]. *IEEE Proceeding of Control Theory*, 1997, 144(5):403 - 412.
- [41] SUN Fuchun, SUN Zengqi, FENG Gang. An adaptive fuzzy controller based on sliding mode for robot manipulators [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 1999, 29(5):661 - 667.
- [42] TANAKA K, WANG H O. *Fuzzy Control Systems Design and Analysis-A Linear Matrix Inequality Approach* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [43] TANIGUCHI T, TANAKA K, WANG H O. Fuzzy descriptor systems and nonlinear model following control [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(4):442 - 452.
- [44] WU S J, LIN C T. Optimal fuzzy controller design: local concept [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(2):171 - 185.
- [45] WU S J, LIN C T. Discrete-time optimal fuzzy controller design: global concept approach [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2002, 10(1):21 - 38.
- [46] CAO S G, REES N W, FENG G. H<sub>∞</sub> control of uncertain fuzzy continuous - time systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 115(2):171 - 190.
- [47] TANAKA K, HORI T, WANG H O. A fuzzy Lyapunov approach to fuzzy control system design [C]// *Proc of American Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001:4790 - 4795.
- [48] FENG G, CAO S G, REES N W. Stable adaptive control of fuzzy dynamic systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 131(2):217 - 224.
- [49] SUN Fuchun, SUN Zengqi, LI Hanxiong. Adaptive dynamic neuro-fuzzy controller design of robotic manipulators [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 134(1):117 - 133.
- [50] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-1 [J]. *Information Science*, 1975, 8(4):301 - 357.
- [51] DUBOIS D, PRADE H. Operations on fuzzy numbers [J]. *Int J of Systems Sciences*, 1978, 9:613 - 626.
- [52] MIZUMOTO M, TANAKA K. Fuzzy sets and type-2 under algebraic product and algebraic sum [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1981, 5(3):

- 277 - 290.
- [53] KARNIK N N, MENDEL J M. Introduction to type-2 fuzzy logic systems [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998: 915 - 920.
- [54] KARNIK N N, MENDEL J M. Operations on type-2 fuzzy sets [J]. *Fuzzy Sets Systems*, 2001, 122(2): 327 - 348.
- [55] JOHN R I, INNOCENT P R, BARNES M R. Neuro-fuzzy clustering of radiographic tibia image data using type-2 fuzzy sets [J]. *Information Sciences*, 2000, 125(1/4): 65 - 82.
- [56] FRANK Chung-hoon, HWANG Cheul. An interval type-2 fuzzy perceptron [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002, 2: 1331 - 1335.
- [57] AJIT N, Tammy M. Quantum artificial neural network architectures and components [J]. *Information Sciences*, 2000, 128(3): 231 - 255.
- [58] GOPATHY P, NICOLAOS B. Karayiannis. Quantum neural networks (QNN's): Inherently fuzzy feed forward neural networks [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1997, 8(3): 679 - 693.
- [59] CHRISLEY R L. *Bohman quantum neural networks* [R]. Brighton: School of Cognitive & Computing Sciences, University of Sussex, 2000.
- [60] RUTKOWSKI L, CPALKA K. Flexible neuro-fuzzy systems [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2003, 14(3): 554 - 574.

#### 作者简介:

孙富春 (1964—),男,清华大学计算机科学与技术系教授,博士生导师,主要研究领域包括智能系统理论、网络控制与管理、机器人动力学与智能控制等, E-mail: sfc@s1000e.sc.tsinghua.edu.cn;

李莉 (1978—),女,2003年获西北工业大学硕士学位,现为清华大学计算机系博士研究生,研究方向主要是模糊自适应控制、神经网络控制;

孙增圻 (1943—),男,清华大学计算机科学与技术系教授,博士生导师,当前研究领域为月球探测机器人、足球机器人、空间遥操作系统和模糊神经网络理论, E-mail: szq-dcs@tsinghua.edu.cn.

#### (上接第253页)

- [11] WATSON I, MARIR F. Case-based reasoning: A review [J]. *Knowledge Engineering Review*, 1994, 9(4): 355 - 381.
- [12] AAMODT A, PLAZA E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations and system approaches [J]. *AI Communications*, 1994, 7(1): 39 - 59.
- [13] 王笑波,任德祥,邵惠鹤,等.一种多层次递阶建模方法[J].系统仿真学报,2001,13(S1):18-20.  
(WANG Xiaobo, REN Dexiang, SHAO Huihe, et al. A hierarchical modeling method [J]. *J of System Simulation*, 2001, 13(S1): 18 - 20.)
- [14] 谭明皓.基于案例推理的热轧层流冷却过程建模与控制研究[D].东北大学,2004.  
(TAN Minghao. *Case-based modeling and control of the laminar cooling process on the runout table* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2004.)
- [15] 单旭沂.宝钢2050mm热轧层流冷却控制系统改造开发[C]//中国科技年会论文集.杭州:冶金工业出版社,1999.  
(SHAN Xuyi. Transformation and development of Baosteel 2050mm hot strip mill laminar cooling control system [C]// *Proc of Chinese Conference on Science and Technology*. Hangzhou: Metallurgical Industry Press, 1999.)

#### 作者简介:

谭明皓 (1972—),男,博士,研究方向为复杂工业过程的建模与控制, E-mail: timhowe@21cn.com;

柴天佑 (1947—),男,东北大学国家冶金自动化工程技术研究中心主任,教授,工程院院士,研究领域为自适应控制、智能控制与综合自动化系统.