

基于神经网络的自适应控制研究综述

王文军¹, 宋苏¹, 郭贤娴²

(1 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

2 泰山玻璃纤维股份有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 神经网络与自适应控制相结合的研究, 已成为智能控制的一个新的分支。自适应具有强鲁棒性, 神经网络则具有良好的自学习功能和良好的容错能力, 神经网络自适应控制由于较好地融合了两者的优点而具有强大的优势。该文综述了近年来神经网络自适应控制的研究现状, 阐述了神经网络模型参考自适应控制及神经网络自校正控制两种典型的控制方案, 并对神经网络自适应控制的应用作了介绍。在此基础上, 对神经网络自适应控制存在的主要问题, 如稳定性、鲁棒性及收敛性等问题作了积极有益的探讨。最后, 展望了神经网络自适应控制未来的发展趋势, 并指出了其研究方向。

关键词: 神经网络; 自适应控制; 神经网络控制器; 神经网络辨识; 稳定性; 鲁棒性; 收敛性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Overview of Neural Network Adaptive Control

WANG Wen - jun¹, SONG Su¹, Guo Xian - xian²

(1. School of Electronic Information & Control Engineering Beijing University of Technology

Beijing 100022 China

2 Taishan Fiberglass Inc. Tai'an Shandong 271000 China)

ABSTRACT Research on a neural network combined with adaptive control has become one of new branches for intelligent control. The adaptive control has high robustness while the neural network has a self-learning function and fault-tolerance ability. As neural network adaptive control incorporates the said advantages, it has powerful superiority. This paper overviews comprehensively the existing situation of neural network adaptive control, describes two typical control schemes: neural network model reference adaptive control and neural network self-tuning control. Furthermore, the main applications of neural network adaptive control are introduced. On the basis of which, this paper discusses its existing problems such as stability, robustness, convergence. In the end, this paper reviews the development trend and indicates the future research direction.

KEYWORDS Neural network; Adaptive control; Neural network controller; Neural network identification; Stability; Robustness; Convergence

1 引言

人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 是从微观结构与功能上对人脑神经系统的模拟而建立起来的一类模型, 具有模拟人的部分形象思维的能力, 其特点主要是具有非线性特性、学习能力和自适应性, 是模拟人的智能的一条重要途径。

近年来自适应控制等先进控制理论取得了长足发展。然而, 在越来越高的性能要求下, 在过程与环境高度不确定性的情况下, 对于越来越复杂的系统, 将自适应控制用于实际

控制时还存在一些问题, 如自适应控制器结构过于复杂, 模型参考自适应控制系统 (MRACS) 对确定性干扰不能确保零稳态误差等。

为了充分发挥自适应控制技术的优越性能, 提高控制的鲁棒性、实时性、容错性以及对控制参数的自适应和学习能力, 更有效地实现对一些存在多种不确定性和难以确切描述的非线性复杂过程的控制, 人们将自适应控制与神经网络适当组合, 组成基于神经网络的自适应控制系统。

2 神经网络自适应控制系统的典型结构

目前已经出现的神经网络自适应控制方案很多, 其中典型的控制方案有神经网络模型参考自适应控制 (NNMRACS)

和神经网络自校正控制 (NNSTC) 等。

2.1 神经网络模型参考自适应控制

神经网络模型参考自适应控制 (简称 NNM RAC), 分为直接型和间接型两种结构, 分别如图 1 和图 2 所示。其中 NN I 和 NNC 分别表示神经网络辨识器和控制器。构造一个参考模型, 使其输出为期望输出, 则控制的目的是使 y 跟踪 y_M 。

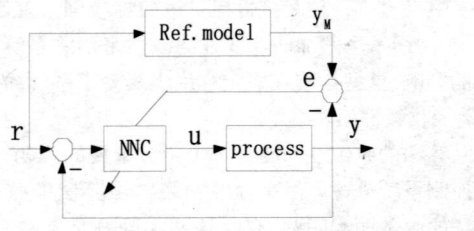


图 1 神经网络模型参考直接自适应控制

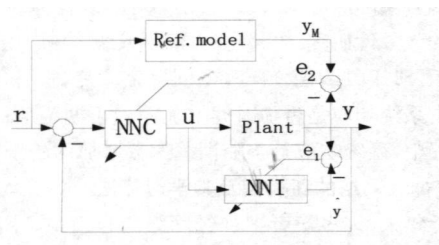


图 2 神经网络模型参考间接自适应控制

由于反向传播需要知道被控对象的数学模型, 因而神经网络的学习与修正已经遇到许多问题。文献 [2 3 10] 采用 NNM RAC 直接结构, 基于稳定性理论选择控制律, 提高了仿射非线性系统的跟踪精度, 并使整个闭环系统渐近稳定。文献 [4 11 12] 应用神经网络间接自适应结构, 首先由神经网络辨识器离线辨识被控过程的前馈模型, 然后进行在线学习与修正, 显然 NN I 能提供误差或其变化率的反向传播。

2.2 神经网络自校正控制

神经网络自校正控制 (简称 NNSTC) 也有两种结构: 直接型与间接型, 分别如图 3 和图 4 所示。

自校正控制是一种用辨识器将对象参数进行在线估计, 用调节器实现参数的自动整定相结合的自适应控制技术, 可用于结构已知而参数未知但恒定的随机系统, 或结构已知而参数慢时变的随机系统。神经网络自校正控制一般是用神经网络去逼近被控对象的未知非线性函数, 然后研究如何寻找控制器及神经网络权值调整自适应律, 使得在保证稳定性的基础上实现控制目标。文献 [13 19 - 21] 均采用了间接自校正结构。文献 [13] 利用外部信号的反馈和内模确保稳定性、渐进跟踪和控制; 文献

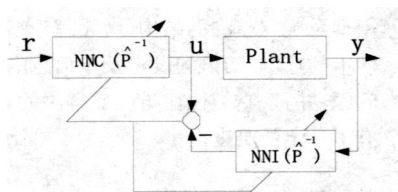


图 3 神经网络直接自校正控制

[19] 将神经网络自校正控制应用到感应电机的驱动之中; 文献 [21] 把遗传算法与神经网络自校正控制结合起来。

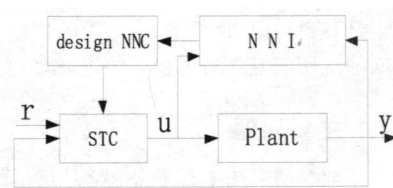


图 4 神经网络自校正控制

3 人工神经网络在自适应控制系统中的应用

将神经网络用于控制领域, 已取得如下几方面的进展:

3.1 基于神经网络的系统辨识

基于神经网络的系统辨识, 就是将神经网络作为被辨识系统 P 的模型。它已在以下两个方面得到了广泛应用:

- 1) 可在已知常规模型结构的情况下, 估计模型参数。
- 2) 利用神经网络的线性、非线性特性, 可建立线性、非线性系统的静态、动态、逆动态及预测模型, 重点在于非线性系统的建模与辨识。

3.2 神经网络控制器

神经网络作为实时控制系统的控制器, 对于不确定、未知系统以及扰动进行有效的控制, 使控制系统达到所要求的动态、静态特性。目前这一方面的研究兴趣日益高涨, 各种典型的神经网络模型均可作为控制器。文献 [4 5] 采用了 BP 网络作为控制器, 文献 [6 7 14] 等采用了 RBF 网络作为控制器。对神经网络控制系统的稳定性和鲁棒性分析也同时展开。

3.3 神经网络与其它算法相结合用于控制系统

神经网络与专家系统、模糊逻辑、遗传算法、小波、混沌等相结合用于控制系统, 可为系统提供非参数模型、控制器模型。文献 [9 22] 采用模糊逻辑与神经网络相结合来设计控制器, 而文献 [21 - 23] 把遗传算法引进到控制器中, 同时文献 [18 24] 也是模糊控制、遗传算法和神经网络三者结合的典型文献。神经网络与小波、混沌的结合也可见于一些文献中。

3.4 优化计算

在常规控制系统的设计中, 常遇到求解约束优化问题, 神经网络为这类问题的求解提供了有效的途径。因为反馈网络表现出一个系统的动态特性, 所以可以利用控制系统的分析方法求解出神经网络系统稳定时的参数。Hopfield 在 80 年代初提出了一个对反馈连续网络的稳定性判别的函数。同 Lyapunov 函数一样, 此函数具有明确的物理意义, 是建立在能量基础上的。利用能量函数的概念, 可以设计连续反馈网络进行优化计算, 有可能解决优化计算中的“指数爆炸”问题。典型的例子是旅行商问题: 一个商人要在 n 个城市中不重复地各走一遍的最短路径的求解。

3.5 控制系统的故障诊断

随着对控制系统安全性、可靠性、可维护性要求的提高, 对系统的故障监测与诊断问题的研究不断深入。神经网络由

于具有自适应、自组织、自学习的优点,使得神经网络在这方面的应用研究取得了相应的进展。

4 主要问题

神经网络用于控制领域的研究还处于初级阶段,目前大部分研究还停留在仿真和实验阶段,缺乏深入的理论分析与证明,控制系统的一些基本问题尚待解决^[8]。

4.1 稳定性问题

对一个控制系统来说,稳定性是首要的。然而,神经自适应控制系统的稳定性分析难度极大。这是因为:非线性对象的模型往往是未知的,一般是具有严重非线性和不确定性的复杂系统,而神经网络本身又是一个大规模非线性系统,因而,由它们按一定方式组织起来的神经控制系统具有更为复杂的动力学特性。

80年代后期以来,控制工作者提出了各种基于神经网络的自适应控制方案来解决非线性系统的跟踪控制问题,大多数研究集中在用最优化技术(尤其是梯度法)推导参数自适应规律。但是基于梯度法的神经网络控制方案的最大缺点是难以保证闭环系统的稳定性,特别是在线调整控制器参数时,问题尤为突出。为了克服这些难题,90年代初国际上有人提出了关于神经控制系统的稳定性问题,开始研究设计基于Lyapunov稳定性理论的自适应系统。该系统的优点是由Lyapunov法推导出的自适应律,可以保证闭环系统的稳定性。目前,基于Lyapunov法的神经网络自适应律已经被应用于一类简单的非线性系统,即仿射非线性系统之中。另外的假设条件是在自适应神经网络控制算法中,神经网络估计误差的界限是已知的。但是,在很多实际系统中这样的神经网络估计误差的约束是不能得到的。文献[15]放松了对神经网络估计误差的约束,提出了一种自适应神经控制方案,已经应用到如有固定中心和大小的RBF神经网络的线性参数的在线辨识中。但是目前基于Lyapunov稳定性的神经自适应控制研究的方案,基本上是针对一类仿射非线性时不变系统。

从以上介绍可以看出,目前已有的神经网络自适应控制研究存在的主要问题是:①研究的对象多局限于仿射非线性系统,而工程上遇到的非线性系统大多是非仿射的;②研究稳定性的方法一般是先构造一个自适应律,然后再构造一个Lyapunov函数来证明自适应控制系统是稳定的。在如何选择合适的Lyapunov函数上,现有研究大多是建立在直觉及经验的基础上,针对具体的对象进行反复分析而得出的,然而这样的试凑方法在实际工程分析中是很难应用的。

4.2 鲁棒性问题

当被控过程存在未建模动态特性,或者过程噪声及扰动远比所设想的情况复杂时,自适应控制系统会失去其稳定性(称为“缺乏鲁棒性”)。因此在自适应控制系统的设计中,根据鲁棒性要求所设计的系统比单纯按收敛性和稳定性指标所设计的系统具有更好的控制效果。目前,对于非线性控

制系统的鲁棒性已有许多研究结果,一般是针对一类仿射非线性系统进行的,对于系统的条件限制较严,研究中多采用基于梯度法的自适应律;为解决系统的全局稳定性及跟踪问题,通常要设定十分复杂的控制律。目前的研究结果还很难应用于工程实际中去,而针对神经网络自适应控制系统研究鲁棒性的文献较少见到。文献[4]中提出了一种神经网络动态补偿的模型跟随非线性鲁棒自适应控制策略,文献[6]中提出了一种间接鲁棒自适应神经网络控制算法,文献[16]则用一个附加的非线性滤波器来消除系统外部干扰带来的影响。这些策略在一定程度上提高了系统的鲁棒性。

4.3 收敛性问题

算法的收敛性问题是一个十分重要的问题。对神经自适应控制系统来说,存在神经网络学习算法的收敛和自适应算法的收敛两类问题。有时这两类问题是混在一起的。对自适应控制来说,如果一种自适应算法被证明是收敛的,那该算法就有实际的应用价值。目前,对非线性系统自适应控制算法的收敛性研究结果较少,很不系统,与应用要求还有较大差距。对于收敛性,有两个问题需要考虑,一是一次学习过程中系统响应是否随时间增加而趋于期望值;二是多次学习过程中,系统响应是否随训练次数增加而趋于期望值。

4.4 神经网络的新模型及其学习算法

近年来,许多学者把神经网络与自适应、小波、混沌、模糊集以及遗传算法等结合起来,进行了研究。小波神经网络可看作是以小波函数为基底的一种函数连接网络,也可以认为是径向基函数网络的推广,但又具有与一般前馈网络和RBF网络所不同的特点,在神经网络研究领域中具有巨大潜力。目前神经网络的研究正逐步由单纯的神经计算转向计算智能并结合脑科学的研究,向生物智能方向发展,神经网络的研究也应该考虑与其它智能的结合^[9,18,22,24],如神经网络与模糊逻辑的结合,神经网络与遗传算法和进化计算的结合研究^[18,21-23]等,如何利用遗传算法优化神经网络的模型结构,是今后的一个研究热点。

另外,在逼近非线性函数问题上,现有理论只解决了存在性问题;对于控制器及辨识器,如何选择合适的神经网络模型及确定模型的结构,尚无理论指导。在具体应用时,学习样本的选取、初值的设定及多信息的融合等也是必须考虑的问题,并且,它们往往与所要解决的实际问题相关,使其解决有了一定的难度。

5 结论

综上所述,神经网络自适应控制,主要是为了解决复杂的非线性、不确定、不确定系统的控制问题。一方面,由于神经网络在自适应控制中的巨大作用和潜能,人们迫切需要开发实用的神经控制系统以满足工程实际的需要;另一方面,神经自适应控制系统的基本理论研究严重滞后,一些重要理论问题,如稳定性判据、基于稳定性及鲁棒性的工程设计方法等,几乎还未开展研究。这种现象的存在,将严重制

神经网络在控制领域的进一步应用和开展。因此,开展对神经自适应控制系统的稳定性、鲁棒性研究,不仅具有十分重要的理论意义,而且对促进我国自动化技术的发展、提高人工智能领域的研究水平,亦具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 徐丽娜.神经网络控制[M].北京:电子工业出版社,2003.119-121
- [2] 冯国膺,张力.一种神经元控制模型参考自适应伺服系统[J].控制与决策,1997,12(4):312-316
- [3] 徐普水,施颂椒,袁向阳.基于神经网络的一类非线性系统稳定自适应控制及其设计方法[J].控制理论与应用,1999,16(5):751-753.
- [4] 胡寿松,周川.基于神经网络的模型跟随鲁棒控制[J].自动化学报,2000,26(5):624-629
- [5] 刘延年,忻欣,冯纯伯.基于神经网络的一类非线性连续系统的稳定自适应控制[J].控制理论与应用,1999,13(1):70-75
- [6] 王殿辉,柴天佑.一个基于神经网络模型的鲁棒控制算法[J].自动化学报,1996,22(7):447-450
- [7] 陆璐,李天石,史维祥.非线性系统神经网络稳定自适应控制器的研究[J].控制与决策,1998,13(5):598-602
- [8] 汪镭,周国兴,吴启迪.人工神经网络理论在控制领域中的应用综述[J].同济大学学报,2001,29(3):357-361
- [9] 张智星,孙春在,[日]水谷英二.神经——模糊和软计算[M].西安:西安交通大学出版社,2000.36-60.
- [10] M S Ahmed Neural-net-based direct adaptive control for a class of nonlinear plants[J]. IEEE Trans on Neural Networks 2000 45(1): 119-124
- [11] Wang Dazhi, Wang Zhenlei Identification and control of induction motor using artificial neural network[C]. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems Beijing The International Academic Publishers of World Publishing Corporation 2001 751-754
- [12] Sakthi Kh M A Badr Analysis of PM SM control system using artificial neural network [C]. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems The International Academic Publishers of World Publishing Corporation 2001 791-795
- [13] H K Song S L Shat and D G Fisher A Self-tuning Robust Controller[J]. Automation 1986 22(5): 521-531
- [14] S Fabri Dynamic Structure Neural Networks for Stable Adaptive Control of Nonlinear Systems [J]. IEEE. Trans on neural network 1996 7(5): 1151-1167

- [15] Polycarpou Stable adaptive tracking of uncertain systems using nonlinearly parameterized on-line approximators[J]. NTJ Control 1998 70(3): 363-384.
- [16] G L Plett Adaptive Inverse Control of Linear and Nonlinear System Using Dynamic Neural Networks[J]. IEEE. Trans on neural networks 2003 14(2): 360-376.
- [17] Zhang Youping Stable neural controller design for unknown nonlinear systems using backstepping[J]. IEEE Trans on Neural Networks 2000 70(3): 1347-1360
- [18] C I-Fang Chung Chen-jian Lin Chin-Teng Lin A GA-based fuzzy adaptive learning control network[J]. Fuzzy Sets and Systems 2003 112(20): 65-84.
- [19] S O W on B K Bose Self tuning neural network controller for induction motor drives[J]. IEEE trans on Industrial Electronics Society 2002 1(3): 152-156.
- [20] W Y Wu A S Poznyak Indirect adaptive control via parallel dynamic neural networks [J]. IEEE Transactions on Control Theory and Applications 1999 146(1): 25-30.
- [21] Zongyi Xing Lin Jia Tianyun Shi Self-tuning of controller using neural network and genetic algorithm[C]. Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2002 748-752.
- [22] W Y Wang C Y Cheng Y G Leu An Online GA-Based Output-Feedback Direct Adaptive Fuzzy-Neural Controller for Uncertain Nonlinear Systems[J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics 2004 34(1): 334-345
- [23] C Wook, B P Jia H J Young GA-based intelligent digital redesign of fuzzy-model-based controllers[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 2003 11(1): 35-44.
- [24] H G Leu T T Lee Weyen Wang On-line tuning of fuzzy-neural network for adaptive control of nonlinear dynamical systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics 1997 27(6): 1034-1043.

[作者简介]



王文军(1978-),男(汉族),山东省泰安市人,现为北京工业大学电控学院硕士研究生,主要研究方向为:神经网络控制 自适应控制。

宋 苏(1963-),男(汉族),江西省永新市人,现为北京工业大学自动化系教授,硕士生导师,博士,研究方向为自适应控制,智能信息处理。

郭贤娴(1978-),女(汉族),山东省泰安市人,现为泰山玻璃纤维股份有限公司工程项目部职员,主要从事自动控制、工程项目管理等方面的工作。