

非线性系统神经网络预测控制研究进展

戴文战¹, 娄海川¹, 杨爱萍²

(1. 浙江理工大学 自动化所, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江财经学院, 浙江 杭州 310035)

摘要: 神经网络由于其在非线性系统建模与优化求解方面的优势, 被广泛应用于预测控制中, 形成了各种各样的神经网络预测控制算法. 本文系统地评述了非线性系统神经网络预测控制系统中的模型选取、控制器优化、控制系统结构设计以及收敛性理论等研究现状, 分析了非线性系统神经网络预测控制算法存在的问题和今后的研究方向.

关键词: 非线性系统; 神经网络; 预测控制; 稳定性; 收敛性

中图分类号: TP183

文献标识码: A

An overview of neural network predictive control for nonlinear systems

DAI Wen-zhan¹, LOU Hai-chuan¹, YANG Ai-ping²

(1. Department of Automatic Control, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;

2. Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou Zhejiang 310035, China)

Abstract: Neural network theory is widely applied to predictive control system because of its superiority in dealing with nonlinearities therein. Meanwhile, various algorithms for neural network predictive control have been put forward. For the neural network predictive control, we separately review the guideline for adopting predictive model, the optimization method for controller, the architecture strategy, and the existing problems as well as the research directions.

Key words: nonlinear systems; neural network; predictive control; stability; convergence

1 引言(Introduction)

预测控制是20世纪70年代直接从工业过程控制中产生的一类控制算法, 发展至今已有上百种算法, 典型的如动态矩阵控制(DMC)、模型算法控制(MAC)、广义预测控制(GPC)、模型预测启发控制(MPHC)等^[1~4]. 预测控制本质上是一种基于模型的有限时域的优化算法, 它对于不确定环境有极强的适应性, 在工业过程控制中显示出巨大的生命力.

然而, 对于工业过程中具有强非线性特性的被控对象, 基于线性系统建模和优化的预测控制算法难于应用. 而用来描述一般非线性系统的数学模型如块联模型、基于各种核函数描述的模型又存在结构特定、辨识困难、处理复杂等问题, 实际中很少应用. 由于神经网络能够充分逼近复杂的非线性映射关系, 具有学习与适应不确定系统的动态特性和较强的鲁棒性和容错性的特点, 使其成为对非线性系统建立预测模型和优化控制的关键技术之一, 并形成了各种基于神经网络的预测控制算法^[5~11].

本文系统地评述了非线性系统神经网络预测控

制系统中的模型选取、控制器优化、控制系统结构设计以及收敛性理论等研究现状, 分析了非线性系统神经网络预测控制算法存在的问题和今后的研究方向.

2 神经网络预测模型的选取及建模方法(The selection of NN prediction model and modeling method)

2.1 用于预测模型的神经网络选取(The selection of NN type for prediction model)

2.1.1 神经网络模型的选取(The selection of NN model)

神经网络用于预测模型的基本要求主要有: 较好的收敛性、实时性和一定的泛化能力等. 在训练神经网络之前, 首先要确定所选用的神经网络类型. 目前神经网络类型很多, 需根据问题的性质和任务要求来选择合适的网络类型. 不恰当的神经网络可能导致训练次数增加甚至无法收敛. 在预测建模中, 应用较多的网络有RBF网络, 它在一定程度上克服了BP网络存在局部最优、训练速度慢的问

题,具有良好的逼近非线性模型的性能^[12~14].除此之外,其他神经网络亦显出各自独特的建模优势.文[15]提出的基于滤波神经网络模型具有良好的动态建模能力,有效地减轻计算负担.文[16,17]基于状态空间递归神经网络建模,确保了系统稳定性,避免全局递归结构繁琐.文[18]用两步动态Levenberg-Marquardt(LM)方法建立非线性过程的循环神经网络模型.该模型能以足够的精度从过程的输入信息预测未来的响应.文[19]提出的Bayesian-Gaussian神经网络模型,当需要大量的新样本训练时,网络的拓扑结构和连接权值具有自动快速调节能力以适应在线过程的动态偏移特性.文[20]提出基于广义 Δ 规则(GDR)算法,通过对过程控制的映射,建模不需要直接的输入输出数据,可以补偿信息不足.文[21]结合模糊控制技术,提出递归模糊神经网络,用于非线性离散时间过程广义预测控制建模,同时证明了RFNN模型的收敛性.文[22,23]提出的自适应模糊神经网络,能对过程非线性关系进行建模,使系统适应不同的工作点,获得灵活的学习能力.近年来,还有学者将神经网络与ARX模型相结合提出混合神经网络模型,文[24]提出基于多输入多输出RBF-ARX模型及状态空间表示,可以描述一类工作点时变的多变量非线性系统的动态,这类模型具有滑模结构特性.文[25]提出基于Wiener模型和神经网络的混合模型,具有很强的辨识能力,可以快速的预测过程的阶跃响应.

2.1.2 神经网络模型的学习算法(The learning algorithms of NN model)

神经网络学习算法的收敛性,是保证神经网络能否成功用于预测模型的关键因素之一.文[26]采用统计Bayesian决策方法训练前馈网络,保证未知随机系统的闭环稳定性.文[27]针对BP算法无法对网络权值实时调整进行渐进计算的缺点,提出了将时间差分法和BP算法相结合的新的网络学习算法,对Elman网络模型进行训练.文[28]用分层自组织学习算法优化动态递归RBF神经网络预测模型.文[29,30]提出一种广义微分递归神经网络近似动态非线性系统,结合Taylor序列扩展Levenberg-Marquardt方法和自动微分技术对网络进行学习优化,在不同的采样速率下有很好的模型匹配.文[31]提出一种基于OBS(systematic optimal brain surgeon)学习算法,具有拓扑结构紧凑、计算量减少的优点.文[32]提出基于建构学习算法的单隐层神经网络结构来逼近一类复杂多变量过程的动态行为,该建构学习算法采用映射追踪技术,具有可靠的精度.此外,文[33~35]用遗传算法优化神经网络,优

化后的神经网络预测模型具有很强的自适应性和学习能力、非线性映射能力、鲁棒性和容错能力.

2.2 神经网络预测模型的建模方法(The modeling methods of NN predictive control)

2.2.1 基于线性化模型(Based on linear model)

在处理非线性问题的众多方法中,基于局部线性化或局部线性近似的处理方法一直是十分常用的处理方法.它可将非线性系统局部线性化后,直接利用大量成熟的线性系统控制技术解决非线性系统的控制问题.这种局部线性化方法的处理方式有很多.文[36]用反馈线性化理论通过非线性状态反馈将非线性神经网络过程模型转化为线性模型.文[37,38]在非线系统神经网络模型的不同工作点做阶跃响应,建立其局部线性模型,再用隶属函数加权得到全局线性模型,实现非线性扩展DMC预测控制.文[39]将非线性对象在工作点附近进行Taylor级数展开,取其线性项作为非线性对象的预测模型,对非线性对象进行单步预测控制.文[40]利用分段局部线性近似方法将非线性统计回馈神经网络SRNN(statistic recurrent neural network)转化为混合统计模型,并利用信息几何投影算法,将SRNN混合统计预测模型转化为线性ARMA系统预测模型.针对离散非线性系统,文[41]利用非线性激励函数的局部线性表示方法,用一个神经网络将非线性多步预测转化为一组简单直观的线性多步预测形式,这种方法降低了系统结构的复杂性,减轻运算负担.

2.2.2 基于线性模型和神经网络相结合的模型(The combination of linear model and neural network)

将线性模型与神经网络非线性模型进行组合是一种常用的建模方法.文[42]将线性状态空间模型和非线性神经网络自适应校正模型组合得到多变量复合神经网络自适应模型,不仅有效控制非线性过程变量大幅度变化,而且适用于需严格循环时间的快速非线性过程.文[43]提出的神经网络广义预测控制算法,其预测模型的自由响应部分由非线性RBF神经网络模型产生,而强迫响应则由线性模型组成.文[44]将线性网络加动态递归神经网络组成复合神经网络,其线性网络用于描述系统的局部线性特性,动态递归神经网络主要对系统的非线性部分进行建模.与普通的前馈神经网络相比,该网络模型不必确切知道系统的阶次,并且具有结构简单,在线学习方便等优点.文[45]以多输入多输出状态空间模型作为基本模型,用多通道前向神经网络表示Wiener模型的非线性部分的静态增益.同时在每

个采样时刻对神经网络线性化, 将非线性模型变成线性, 整个过程就以线性模型来控制。

2.2.3 基于预测偏差补偿模型(Based on predictive error compensation model)

神经网络预测建模采用多步预测方法来预测其未来输出值, 以克服系统不确定性的影响, 增强系统的鲁棒性。但建模过程中存在模型误差, 这势必影响预测的精度。而随着预测长度的增加, 其预测误差也加大。针对这些问题, 有关文献提出相应的解决办法。文[46]用BP神经网络对系统的建模误差进行预测, 从而抑制模型失配的影响, 增强广义预测控制的鲁棒性。文[47]对过程采用多步递推预测的同时, 用新息来补偿在多步递推过程中产生的累加误差, 较好地解决了具有大滞后的非线性系统的预测控制问题。在文[47]的基础上, 文[48]用小波神经网络作为补偿模型, 获得了更好的补偿精度。文[49]以偏差补偿和模型修正相结合的方式对预测模型进行误差补偿, 通过对性能指标中的偏差项负指数加权, 进一步改善多变量非线性系统预测控制性能。文[50]采用阻尼最小二乘法进行在线训练, 该算法不需预先训练神经网络, 具有较好的自适应跟踪补偿性能。针对时滞系统的特点和采用神经网络单值预测控制存在的不足, 文[51]提出了多步超前预测与补偿的控制算法, 有效地增加了控制力度, 改善了动态性能。

2.2.4 基于多模块化模型(Based on multiple model)

利用多模型来反映动态特性的变化, 可以缩小局部模型的建模范围, 提高建模的精度, 具有很好的内插和外推特性^[52,53]。文[54~57]用神经网络在不同工作点建立一组局部动态模型, 同时设计相应的局部神经网络预测控制器, 通过加权合成的方式获得最终的控制信号, 在负荷大范围变化的工况下, 控制系统仍保持了良好的性能, 具有较强的鲁棒性。文[58,59]针对多变量系统, 考虑到系统各变量响应时间不同、动态或静态性能的非线性、时变、不确定性以及变量之间的强耦合、大干扰, 将一个多输入多输出模型近似成多个多输入单输出进行处理。文[60]则基于不同的采样速率建立多输入单输出的神经网络模型, 减少了待优化变量的维数和计算负担。

2.2.5 基于机理模型与神经网络模型相结合的混合模型(Based on the combination of analysis model and neural network)

工业应用中常用的建模方法主要有机理建模和辨识建模。把机理建模与系统辨识建模结合起来, 可

取长补短。这种将机理模型与神经网络辨识相结合的模型, 一般是通过机理分析以构架模型结构, 而模型的参数可根据工业现场数据利用神经网络辨识得到^[61,62]。文[63]针对一种复杂过程, 提出含机理模型和基于神经网络的稳态、动态补偿的混合模型。文[64]针对一类具有强非线性、大纯滞后的过程, 建立了机理模型与小波神经网络模型相结合的混合模型。文[65]构建的神经网络模型较好地体现了对象输入与输出间的机理关系, 除了具有常规的纯数值映射关系学习功能之外, 还保证了模型的外推效果。文[66]提出的结构逼近式混合神经网络充分利用已知非线性系统的结构信息, 使神经网络“灰盒”化, 较好地描述了系统各变量间的因果关系, 提高了模型的直观性。

3 神经网络预测控制器优化方法(The optimization of NN predictive controller)

3.1 神经网络优化方法(The optimization methods of NN)

在预测控制理论中, 非线性系统的优化控制问题一般可以通过动态规划(dynamic programming, DP)方法求取^[67,68]。但是DP方法求解如Bellman和Hamilton-Jacobi 的非线性模型, 需要进行大量的计算, 占用大量的存储空间, 尤其对于高阶系统而言更是如此。而采用神经网络求解优化控制器, 可以解决用DP方法难以解决的优化问题。文[69]用结构并行神经网络优化有约束的二次型性能指标, 其中用梯度映射学习算法训练, 具有很好的收敛性, 且利于硬件实现。文[70]利用混沌神经网络对基于Laguerre函数模型且有约束情况下的自适应预测控制性能指标寻优, 可以有效地避免优化过程陷入局部极小。文[71,72]将神经网络用作预测器的同时, 采用另一个神经网络作为优化控制器, 具有克服干扰和不确定性影响的优势。文[73]为了避免神经网络对复杂的非线性求解, 将预测控制与神经网络逆动态控制相结合, 用多步预测性能指标函数直接训练神经网络逆动态控制器的权值, 算法相对简单, 且具有更好的响应速度和性能。

3.2 数值优化方法(Based on numerical optimization)

由于神经网络自身具有非线性, 将其用以求解优化控制器, 不仅难以获得精确解析解, 而且要在足够短的时间内让算法收敛于一个次优解也是比较困难的。为了解决其不足, 许多文献采用数值优化方法提高控制器的优化速度和性能。文[74,75]采用迭代学习求取控制信号的同时, 用拟牛顿法求搜索

方向,保证了算法的快速性和稳定性.文[76]采用简化的Hessian方法对控制器进行优化,避免求解迭代的二次规划问题.文[77,78]将黄金分割法用于优化控制器,其中以系统输入的约束条件作为黄金分割法的动态搜索区间.文[79]提出带广义扩展控制时域的目标函数,并用Quasi-Newton方法优化GPC控制器.文[80]采用了Levenberg-Marquardt和Quasi-Newton算法优化控制器,避免了控制器参数的频繁调节,有效提高了抗扰能力.文[81]结合自调节线性PID控制策略,分别用Gradient-Descent(G-D), Newton-Raphson(N-R)和Levenberg-Marquardt(L-M)方法优化自适应非线性预测控制器,获得不同性能.其中,LM, GD具有较好的控制效果, NR对随机噪声干扰比较敏感,并且可避免局部最小. GD, NR适合简单的系统,而LM适合复杂的系统.

3.3 神经网络与PID组合优化方法(The combination optimization of NN and PID)

在先进控制策略逐渐推广的今天, PID控制器仍发挥着重要的作用. 将PID控制和神经网络预测控制结合将获得鲁棒性更强的控制器. 文[82]用神经网络在线修正PID参数, 获得了有效的自整定PID型广义预测控制器. 文[83]提出了一种具有预测功能的神经网络PID控制器, 采用一个神经网络对被控系统辨识和预测, 同时以P, I, D参数作为网络权值构成线性网络作为控制器来求解性能指标. 文[84]采用PID长程预测能量函数作为优化函数, 并用局部递归神经网络(LCNN)在线调整控制器的参数, 实现非线性PID神经网络多步预测控制算法, 有很好的自适应能力和鲁棒性.

3.4 智能优化方法(Intelligent optimization methods)

综合神经网络和其他智能控制方法的优势, 可以设计出控制效果更好的智能优化算法. 文[85]采用特殊遗传算子设计的遗传算法优化有约束控制器, 增强了系统的稳定性. 文[86]用遗传算法优化自适应预测控制器, 避免矩阵求逆, 成功地解决其抗干扰、鲁棒性与实时性的矛盾. 文[87]将Tent-map混沌算法用于滚动优化提高系统的收敛性和精度. 文[88]将改进的粒子群优化算法(MPSO)作为非线性优化控制器, 并应用于一类强非线性、大时变、大时滞、大惯性的对象时获得了良好的控制性能. 在差分进化算法的基础上, 文[89]引进了免疫方法, 可以动态修改搜索区间, 增加了收敛速度以及求取全局精确解的概率. 文[90]为克服系统的大滞后以满足精馏塔过程每个时期的不同生产要求, 采用一系列模糊优化控制器, 同时用遗传算法自动调整模糊控

制器的隶属度函数. 此外还有将神经网络与模糊控制结合的优化控制器, 文[91]根据预测模型求得预测偏差和控制量模糊规则, 并通过神经网络实现模糊逻辑控制器的结构, 设计出模糊神经优化控制器. 文[92]为了避免算法在训练过程中很可能陷入局部极小点, 采用遗传算法对上述模糊神经网络优化控制器进行训练, 以达到最佳的控制效果.

4 神经网络预测控制系统结构设计(The architecture design for NN predictive control system)

神经网络预测控制(NNMPC)系统的典型结构与传统的模型预测控制结构一样, 包括: 参考轨迹、预测模型、滚动优化和反馈校正. 但是在算法研究以及实际的应用中, 为了满足被控对象或过程的各种不同要求, 出现了不同形式的控制结构.

4.1 并行控制结构(Parallel control)

一种方法是融合神经网络预测控制器和PID控制器. 考虑到两个控制器的控制目的和效果不同, 将前者作为主控制器, 后者作为辅助控制器, 两者以并行控制的方式工作. 文[93]将PID控制器和NNMPC的并行控制结构应用于小车移动机器人的控制, 初始阶段采用PID控制, 使机器人沿其运动轨迹运行, 产生神经网络建模需要的训练数据, 之后切换到神经网络预测控制器对机器人路径进行精确控制. 文[94]提出基于时变补偿算子的RBF-ARX全局模型预测控制器, 采用结构非线性参数优化方法对模型参数离线快速辨识, 其中用增量式PID控制器并行控制来获取过程的实时数据作为RBF-ARX的离线辨识数据.

另一种是将神经网络预测控制器和神经网络控制器结合的并行控制结构. 为控制强非线性的PH过程, 文[95]提出基于神经网络预测控制和自适应神经网络控制的并行鲁棒预测控制算法, 其中设计了一个协调器以协调两个控制器的输出, 产生模型使用的适应度来决定最后的控制动作, 同时引入区域知识分析方法调整控制器的权值. 为提高系统的响应实时性, 文[96]先用基于BP网络建模的NNMPC产生期望的控制输出, 用一个并行的NN控制器实时学习控制输出数据, 产生新的控制量, 代替NNMPC的优化模块控制整个过程.

针对一类具有NARMA形式的不确定非线性离散时间动态系统, 文[97]提出基于神经网络与多模型方法的非线性广义预测自适应并行控制结构. 该结构由线性鲁棒广义预测自适应控制器、神经网络非线性广义预测自适应控制器和切换机制3部分构成, 线性鲁棒广义预测自适应控制器保证闭环系统

的输入输出信号有界,神经网络非线性广义预测自适应控制器能够改善系统的性能,切换策略通过对上述两种控制器的切换,在保证系统稳定的同时,改善系统性能。

4.2 监督控制结构(Supervision control)

这种监督控制结构是以预测控制为监督层,其他控制器为控制层的双层控制结构。监督层以下层闭环回路为控制对象,其控制输出用于修正下层闭环回路的设定值。文[98]将PI控制器作为控制层,神经网络预测控制器作为监督层,应用到tennessee eastman(TE)控制过程。在此过程中,采用两个神经网络辨识器,其中一个辨识器辨识过程基底参数,用于PI控制,另一个辨识器对多重二次测量参数值进行建模,用于监督层预测控制,并且用powell方法对有约束的控制器进行优化,之后输出多个控制变量作为PI控制器设定值,从而实现过程基底的动态控制。文[99]提出结合线性模型和神经网络非线性模型的监督预测控制结构,线性模型主要用于捕捉过程的线性特性,神经网络用于建立对象非线性部分的模型。相应的控制器分别为线性预测控制器,以及迭代逆控制器(iterative inversion controller, IIC),其中线性控制器作为监督层,决定IIC的参考输入, IIC作为控制层决定过程的控制变量。由于神经网络只用来局部非线性建模控制,减少了计算负担,提高了系统的实时性。

4.3 反馈控制结构(Feedback control)

有一种反馈控制结构是为了克服一类工业过程中的大时延提出的,如文[100]。它由输出模型、输出预测器和反馈控制器3部分组成。与一般预测控制结构有所区别的是,这3部分都有反馈环节,且建模只需要可测量的输出信号数据。其中用神经网络建立输出预测模型,反馈控制器用来抑制过程的不稳定,以克服动态行为不确定和系统的时延。

5 算法稳定性和收敛性(Stability and convergence)

神经网络预测控制本质上是一种非线性控制,只有在确保了其稳定性和收敛性以后,才能真正适用于实际生产过程中。目前,许多学者在这方面开展了工作。对于一步超前神经网络预测控制系统,文[101]采用一个ERNN同时作为建模和控制,用Lyapuno闭环稳定性分析证明,当神经网络模型预先设置,闭环的稳定性主要取决于参数 $\beta = \lambda/(1 + \alpha\lambda)$,其中 λ 为优化步数, α 为控制加权因子。文[102]在RBF神经网络模型中定义了一个附加不确定参数,模型的失配不会破坏系统的稳定性。同时为了进一步提高控制性能,在优化函数

中加入了一个二次型补偿函数,文中给出了闭环稳定性的证明。针对一类未知稳态的非线性系统,文[103]提出RBF-ARX模型进行建模,并用带有输入约束的min-max的鲁棒预测控制算法对未知稳态非线性环节进行输出追踪控制。针对一类混沌非线性系统,文[104]为将模型未知时的混沌运动控制到不稳定的不动点(UFP)处,提出了一种神经网络预测控制算法,它不需要知道UFP的位置,方法简便,收敛速度快。

6 算法应用(Application)

正如预测控制理论来源于工业实践,基于神经网络的预测控制随着其研究的不断深入,在工业过程的应用越来越广泛,应用范围涉及石油化工,冶金机械,加工生产线,机器人等领域。

比如在化工过程领域,文[105]将并行结构的递归神经网络应用于套管式化学反应釜,很好地模拟各个反应器不同的加热冷却回路中的动力学行为。文[106]将神经网络逆控制和预测控制应用在试验性化学反应堆上,比原先的自校正PID控制器有更好的控制品质。文[107]提出一种能够对未知非线性系统进行控制的直接自适应神经网络预测控制器,成功地将其应用在化工热交换过程的流速与温度控制中。文[108]将NN预测控制算法应用到生产核黄素的工业饲料批次过程,大大提升了核黄素的产量。文[109]将多输入多输出的神经网络预测控制算法引入过程约束,应用到液化催化裂化单元的试验平台,具有很好的调节和追踪性能。文[110]则利用RBF神经网络预测控制算法实现了一阶双曲型分布参数系统,长管道温度的实时控制。用于机器人控制的,如文[111]针对力觉临场感系统传输通道中存在时变通讯时延造成系统不稳定和操作性能降低的问题,利用前向神经网络建立主、从机械手和环境的预测模型,进而控制主机机械手速度和从机械手受力,以消除或减少通讯时延对系统的影响。

在自动生产线上的应用研究也取得了突破,文[112]设计了基于模糊神经网络模型的有约束多步预测控制,将其应用于烧结生产线的线速度控制。文[113]提出的一种新型神经网络自校正预测控制器,成功地应用于涤纶片基拉膜生产线的横向分布多变量非线性系统控制。文[114]用RBF神经网络对半导体生产线建立预测模型,利用所提出的控制算法确定将要采取的投料策略和调度策略组合,并对Intel公司开发的用于研究调度的生产线实验平台进行了有效的控制。

MPC软件在工业界的应用已体现出重大的经济效益。由于神经网络辨识非线性系统的优势,出现

了不少基于神经网络预测控制算法的软件产品.目前,国外成型的通用商品化软件有AspenTech公司的Aspen IQ、Honeywell的Profit SoftSensor和Fisher-Rosemount的Intelligent SoftSensor等等,这些软件适用于建模对象机理复杂、多种因素强耦合,且具有很强的非线性关系.另外Pavilion Tech.公司的Process Perfecter软件包,则采用非线性神经网络作为非线性预测模型.其他文献中介绍的,如文[115]中开发的控制算法的软件包,应用到糖厂溶化单元的实时专家系统.文[116]开发出控制电厂热废水温度的神经网络预测控制软件包,用于Honeywell DCS的客户端,运行结果验证了神经网络预测控制软件的有效性.

7 存在的问题及展望(Problems and future)

7.1 存在的问题(Problems)

非线性系统神经网络预测控制算法的研究已经取得较大的进展,但作为一种新颖的先进控制算法,还存在以下一些问题有待于进一步解决.

1) 神经网络模型结构选取准则和学习算法的局限性.一方面,虽然目前已有适用预测控制系统的神经网络不少,性能各有所长.但面对复杂的控制对象,到底采用哪种结构的神经网络并没有具体的准则,这在一定程度上限制了神经网络的应用.另一方面,迄今为止的学习算法,大多存在着计算量大,收敛速度慢,易陷入局部极小等缺点.对于一些实时性要求较高的生产过程而言,这些缺点是致命的.虽然有不少学者提出新的算法提高收敛速度,但是这些算法仍然难以同时兼顾快速性和全局寻优两方面的要求.

2) 滚动优化算法的收敛速度慢.神经网络优化控制是多步预测,通常计算量大,求解复杂,且一般得不到最优解.随着预测步数的增多,要考虑的因素更复杂,难度将成倍递增.为提高的收敛速度,许多文献对此做了大量的工作,并取得丰富成果,但所提出的算法不同程度地存在设计复杂、计算量过大问题.

3) 算法稳定性和收敛性理论分析.现有文献中,对其理论分析探讨较少,而且已有的对神经网络预测控制系统的稳定性和收敛性判别方法,大多必须在严格的假设条件下进行,只适用某一种特定类型的神经元网络模型.对于一般结构的神经元网络,目前尚无通用的稳定性判别准则.

7.2 发展方向展望(Future)

虽然神经网络预测控制算法因为其自身存在的缺点束缚了它的应用,但由于其有效的综合控制性能,以及潜在的应用价值,展现出诱人的发展前景.

1) 建立将先验知识嵌入网络内部的神经网络预测模型.加强非线性预测控制中各种神经网络的理论研究,包括结构参数的选取规律,有效的实时学习算法等是很有必要的.现有的神经网络预测模型的建立未考虑先验知识,对于实际系统而言,是一种资源的巨大浪费.如何建立将先验知识嵌入网络内部,提出新的功能更强的神经网络预测模型将成为研究的热点.

2) 有约束的多变量神经网络预测控制算法研究.现代工业生产过程本身存在的复杂性和控制目标的多样性,使优化控制策略从目前的求解无约束二次性能指标优化问题转为面向有约束多目标多自由度的优化问题.加强对有约束多变量神经网络预测控制算法的研究,能更好地拓宽其应用领域.

3) 神经网络与其他智能控制方法的结合研究.智能控制不但在处理复杂系统时能进行有效的控制,同时具有学习能力、组织综合能力、自适应能力和优化能力.为了解决复杂工业过程中的不确定性、多目标优化问题,智能控制中的其他一些方法(模糊控制,遗传算法或专家系统)可积极引入到神经网络预测控制中.

4) 非线性系统神经网络预测控制的收敛性理论分析研究.任何一种控制方案,只有在确保了其稳定性以后,才能真正适用于实际生产过程中.神经网络预测控制本质上是一种非线性控制,对其进行理论分析是具有挑战性的课题,有必要深入研究.

5) 加强对神经网络预测控制的应用研究.目前大部分神经网络预测控制算法只停留在理论研究,可以尝试将一些理论研究成果应用于实际工业过程,以解决一些复杂的实际工业控制难题.

参考文献(References):

- [1] CUTLER C R, RAMALER B L. Dynamic matrix control—a computer control algorithm[C] // *Proceedings of the 1980 Joint Automatic Control Conference*. San Francisco: American Automatic Control Council, 1980, WP5-B.
- [2] ROUHA N R, MEHRA R K. Model algorithmic control (MAC): Basic theoretical properties[J]. *Automatica*, 1982, 18(4): 401–414.
- [3] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137–162.
- [4] RICHalet J. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes[J]. *Automatica*, 1978, 14(5): 413–428.
- [5] KWAKU O T, PHILLIP D S, THOMAS J M. Model predictive control of an industrial packed bed reactor using neural networks[J]. *Journal of Process Control*, 1995, 5(1): 19–27.
- [6] KODOGIANNIS V S, LISBOA P J G, LUCAS J. Neural network modeling and control for underwater vehicles[J]. *Artificial intelligence in Engineering*, 1996, 10(3): 203–212.
- [7] TRAJANOSKI Z, REGITTINIG W, WACH P. Neural predictive controller for closed-loop control of glucose using the subcutaneous

- route: a simulation study[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(12): 1727 – 1730.
- [8] ANDRE M S, FRANCIS J D. Multivariable nonlinear control applications for a high purity distillation column using a recurrent dynamic neuron model[J]. *Journal of Process Control*, 1997, 7(4): 255 – 268.
- [9] BENNE M, PEREZ B G, HERVE P. Artificial neural networks for modelling and predictive control of an industrial evaporation process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2000, 46(4): 227 – 234.
- [10] GAO F R, WANG F L, LI M Z. A simple nonlinear controller with diagonal recurrent neural network[J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(7): 1283 – 1288.
- [11] RASIT K. Design and performance of an intelligent predictive controller for a six-degree-of-freedom robot using the Elman network[J]. *Information Science*, 2006, 176(12): 1781 – 1799.
- [12] SHARAD B, JAMES R W. Benefits of factorized RBF-based NMPC[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, 26(9): 1185 – 1199.
- [13] 宗晓萍, 冯贺平. 基于神经网络的时滞系统预测控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 24(12): 635–628.
(ZONG Xiaoping, FENG Heping. Neural network-based predictive control for time-delay systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 24(12): 635 – 628.)
- [14] HUO H B, ZHONG Z D, ZHU X J, et al. Nonlinear dynamic modeling for a SOFC stack by using a Hammerstein model[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 175(1): 441 – 446.
- [15] TURNER J, MONTAGUE P, MORRIS G. Dynamic neural networks in non-linear predictive control (an industrial application)[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996, 20(Supp.1): 937 – 942.
- [16] ZAMARRENO J M, VEGA P. Neural predictive control. Application to a highly non-linear system[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1999, 12(2): 149 – 158.
- [17] ZAMMARRENO J M. State-space neural network for modelling, prediction and control[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(9): 1063 – 1075.
- [18] YE H W, NI W D. Nonlinear system identification using a bayesian-gaussian neural network for predictive control[J]. *Neurocomputing*, 1999, 28(1-3): 21 – 36.
- [19] 古勇, 苏宏业, 褚健. 循环神经网络建模在非线性的预测控制中的应用[J]. 控制与决策, 2000, 15(2): 254 – 256.
(GU Yong, SU Hongye, CHU Jian. Recurrent neural network modeling and its application in nonlinear predictive control[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(2): 254 – 256.)
- [20] ZEYBERK Z, CETINKAYA S, HAPOGLU H, et al. Generalized delta rule (GDR) algorithm with generalized predictive control (GPC) for optimum temperature tracking of batch polymerization[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(20): 6691 – 6700.
- [21] LU C H, TSAI C C. Generalized predictive control using recurrent fuzzy neural networks for industrial processes[J]. *Journal of Process Control*, 2007, 17(1): 83 – 92.
- [22] HUANG M Z, MA Y W, WAN J Q, et al. Simulation of a paper mill wastewater treatment using a fuzzy neural network[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 5064 – 5070.
- [23] SENIZ E. Predictive modeling of human operators using parametric and neuro-fuzzy models by means of computer-based identification experiment[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2008, 21(2): 259 – 268.
- [24] PENG H, WU J, GARBA I, et al. Nonlinear system modeling and predictive control using the RBF nets-based quasi-linear ARX model[J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(1): 59 – 66.
- [25] MOHAMMAD M A, MONTAZERI A, POSHTAN J, et al. Wiener-neural identification and predictive control of a more realistic plug-flow tubular reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 138(3): 274 – 282.
- [26] VILA J P, VERENE W. Predictive neuro-control of uncertain systems: design and use of a neuro-optimizer[J]. *Automatica*, 2003, 39(5): 767 – 777.
- [27] 王雪松, 程玉虎. 一种基于时间差分算法的神经网络预测控制系统[J]. 信息与控制, 2004, 33(5): 531 – 535.
(WANG Xuesong, CHENG Yuhu. A neural network based predictive control system with temporal differences method[J]. *Information and Control*, 2004, 33(5): 531 – 535.)
- [28] VENKATSWARLU C, VENKAT R K. Dynamic recurrent radial basis function network model predictive control of unstable nonlinear processes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(23): 6718 – 6732.
- [29] SEYAB R K A, CAO Y. Differential recurrent neural network based predictive control[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2008, 32(7): 1533 – 1545.
- [30] SEYAB R K A, CAO Y. Nonlinear system identification for predictive control using continuous time recurrent neural networks and automatic differentiation[J]. *Journal of Process Control*, 2008, 18(6): 568 – 581.
- [31] ZOLTAN K N. Model based control of a yeast fermentation bioreactor using optimally designed artificial neural networks[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 127(3): 95 – 109.
- [32] LUIZ A D, CRUZ M. Constructive learning neural network applied to identification and control of a fuel-ethanol fermentation process[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(2): 201 – 215.
- [33] 刘宝坤, 王慧, 曹明, 等. 基于神经网络模型的直接优化预测控制[J]. 信息与控制, 1998, 27(5): 386 – 390.
(LIU Baokun, WANG Hui, CAO Ming, et al. Direct optimizing predictive control based on neural network[J]. *Information and Control*, 1998, 27(5): 386 – 390.)
- [34] 张阿卜, 黄伟斌. 采用遗传算法训练对角递归神经网络预测控制器[J]. 信息与控制, 2000, 29(1): 70 – 75.
(ZHANG Abu, HUANG Weibin. Training of diagonal recurrent neural network predictive controller using genetic algorithms[J]. *Information and Control*, 2000, 29(1): 70 – 75.)
- [35] WU X J, ZHU X Y, CAO G Y, et al. Predictive control of SOFC based on a GA-RBF neural network model[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 179(1): 232 – 239.
- [36] HUBERT A, BRAAKE B, ERIC J L. Control of nonlinear chemical processes using neural models and feedback linearization[J]. *Computers Chemical Engineering Journal*, 1998, 22(8): 1113 – 1127.
- [37] 刘军, 赵霞, 许晓鸣. 基于神经网络非线性模型的扩展DMC预测控制[J]. 信息与控制, 1998, 27(5): 391 – 393.
(LIU Jun, ZHAO Xia, XU Xiaoming. Extended DMC predictive control using neural network model[J]. *Information and Control*, 1998, 27(5): 391 – 393.)
- [38] 刘军, 何星, 许晓鸣. 基于神经网络非线性模型的多级工作点阶跃响应预测控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 342–344.
(LIU Jun, HE Xing, XU Xiaoming. Extension of DMC predictive control using neural network based nonlinear models and multi-step operation point response[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 342 – 344.)
- [39] 张广莹, 邓正隆, 林玉荣. 一类基于神经网络的非线性模型预测控制[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(2): 275 – 278.
(ZHANG Guangying, DENG Zhenglong, LIN Yurong. Predictive control of nonlinear model based on neural network[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2003, 15(2): 275 – 278.)

- [40] 戴宪华. 基于信息几何的统计反馈神经网络非线性自适应预测控制[J]. 自动化学报, 1999, 25(5): 640 – 646.
(DAI Xianhua. Recurrent neural network prediction controller based on the information geometry[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(5): 640 – 646.)
- [41] 张日东, 王树青. 基于神经网络的非线性系统多步预测控制[J]. 控制与决策, 2005, 20(3): 332 – 336.
(ZHANG Ridong, WANG Shuqing. Neural network based multi-step predictive control for nonlinear systems[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(3): 332 – 336.)
- [42] CASIMIR C K. Hybrid modeling for robust nonlinear multivariable control[J]. *ISA Transactions*, 1998, 37(4): 291 – 297.
- [43] ARABAL M R, BERENGUEL M, CAMACHO E F. Neural identification applied to predictive control of a solar plant[J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(3): 333 – 344.
- [44] 杨煜普, 黄新民, 许晓鸣. 非线性系统多步预测控制的复合神经网络实现[J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 314 – 318.
(YANG Yupu, HUANG Xinmin, XU Xiaoming. Nonlinear Multi-step predictive control-Using compound neural networks[J]. *Control and Decision*, 1999, 14(4): 314 – 318.)
- [45] SEYAB R K A, Cao Y. Nonlinear model predictive control for the ALSTOM gasifier[J]. *Journal of Process Control*, 2006, 16(8): 795 – 808.
- [46] 李少远, 刘浩, 袁著祉. 基于神经网络误差修正的广义预测控制[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(5): 677 – 680.
(LI Shaoyuan, LIU Hao, YUAN Zhuzhi. Generalized predictive control based on error correction using neural network[J]. *Control Theory & Applications*, 1996, 13(5): 677 – 680.)
- [47] HUANG D P, CAUWENBERGHE A R V. Neural-network-based multiple feedback long-range predictive control[J]. *Neurocomputing*, 1998, 18(3): 127 – 139.
- [48] 王群仙, 李少远, 李焕芝. 基于小波网络动态补偿的广义预测控制器[J]. 自动化学报, 1999, 25(5): 701 – 704.
(WANG Qunxian, LI Shaoyuan, LI Huanzhi. Generalized predictive control with dynamic compensation based upon wavelet network[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(5): 701 – 704.)
- [49] 刘贺平, 张兰玲, 孙一康. 基于多层局部回归神经网络的多变量非线性系统预测控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 298 – 300.
(LIU Heping, ZHANG Lanling, SUN Yikang. Predictive control of multivariable nonlinear system based on multilayer local recurrent neural networks[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(2): 298 – 300.)
- [50] 林茂琼, 陈增强, 袁著祉. 基于阻尼最小二乘法的神经网络预测偏差补偿自校正控制器[J]. 信息与控制, 2000, 29(1): 27 – 33.
(LIN Maoqiong, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Self-tuning controller for neural network predictive deviation compensation based on damped least square[J]. *Information and Control*, 2000, 29(1): 27 – 33.)
- [51] 徐湘元, 毛宗源. 时滞系统的神经网络预测控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(6): 932 – 934.
(XU Xiangyuan, MAO Zongyuan. The neural network predictive control of time-delay systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(6): 932 – 934.)
- [52] JOHANSEN T, FOSS B A. Identification of non-linear system structure and parameters using regime decomposition[J]. *Automatica*, 1995, 31(2): 321 – 326.
- [53] ANASS B, GILLES M, JOSE R. Non-linear dynamic system identification: a multi-model approach[J]. *International Journal of Control*, 1999, 72(7/8): 591 – 604.
- [54] RUSSELL N T, BAKKER H H C. Modular modeling of an evaporator for long-range prediction[J]. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1997, 11(4): 347 – 355.
- [55] RUSSELL N T, BAKKER H H C, CHAPLIN R I. Modular neural network modeling for long-range prediction of an evaporator[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(1): 49 – 59.
- [56] 栾秀春, 李士勇. 基于局部神经网络模型的过热气温多模型预测控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 190 – 195.
(LUAN Xiuchun, LI Shiyong. A study on multiple models predictive control for superheated steam temperature based on local neural network models[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2004, 24(8): 190 – 195.)
- [57] KAOOTHER L, FAOUZI B, MEKKI K. Multi-criteria optimization in nonlinear predictive control[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, 76(5/6): 363 – 374.
- [58] YU D L, GOMM J B. Implementation of neural network predictive control to a multivariable chemical reactor[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(11): 1315 – 1323.
- [59] JING O, RHINEHART R R. Grouped neural network model-predictive control[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(7): 723 – 732.
- [60] YU D W, YU D L. Multi-rate model predictive control of a chemical reactor based on three neural models[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, 37(1): 86 – 97.
- [61] AGGEOLOGIANNAKI E, HARALAMBOS S. Nonlinear model predictive control for distributed parameter systems using data driven artificial neural network models[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, 32(6): 1225 – 1237.
- [62] AHMED S I, MOHAMED A H, NAYEF M G. Mathematical Model and Advanced Control for Gas-phase Olefin Polymerization in Fluidized-bed Catalytic Reactors[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, 16(1): 84 – 89.
- [63] 王雷, 陈宗海, 张海涛, 等. 复杂过程对象混合建模策略的研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1794 – 1804.
(WANG Lei, CHEN Zonghai, ZHANG Haitao, et al. Study of hybrid modeling strategy for complex processes[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2004, 16(8): 1794 – 1804.)
- [64] 黄德先, 金以慧, 张杰, 等. 基于小波网络模型的EPI过程的控制和优化[J]. 控制工程, 2005, 12(4): 357 – 360.
(HUANG Dexian, JIN Yihui, ZHANG Jie, et al. Morris julian control and optimization of EPI reaction distillation process based on wavelet networks[J]. *Control Engineering of China*, 2005, 12(4): 357 – 360.)
- [65] 王广军, 何祖威, 陈红. 基于神经网络和过程机理特性的锅炉蒸发系统仿真[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 65 – 68.
(WANG Guangjun, HE Zuwei, CHEN Hong. Boiler evaporation system simulation based on neural network and process mechanism characteristic[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2001, 21(11): 65 – 68.)
- [66] 曹柳林, 李晓光, 王晶利. 利用结构逼近式混合神经网络实现间歇反应器的建模[J]. 化工学报, 2008, 59(4): 959 – 963.
(CAO Liu lin, LI Xiaoguang, WANG Jingli. Modeling of batch reactor based on structure approaching hybrid neural networks approach[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)*, 2008, 59(4): 959 – 963.)
- [67] DONAT J S. Neural net based model predictive control[J]. *International Journal of Control*, 1991, 54(6): 1453 – 1486.
- [68] MILLS P M, ZOMAYA A Y, TADE M O. Adaptive model based control using neural networks[J]. *International Journal of Control*, 1994, 60(6): 1163 – 1192.
- [69] WANG L X, WAN F. Structured neural networks for constrained model predictive control[J]. *Automatica*, 2001, 37(8): 1235 – 1243.

- [70] 张海涛, 陈宗海. 重油分馏塔基于混沌神经网络的Laguerre 函数模型自适应预测控制[J]. 信息与控制, 2004, 33(1): 13 – 17.
(ZHANG Haitao, CHEN Zonghai. A laguerre function model adaptive predictive control strategy based on a chaotic neural network for heavy oil distillation column[J]. *Information and Control*, 2004, 33(1): 13 – 17.)
- [71] MIRCEA L, OCTAVIAN P. A neural predictive controller for non-linear systems[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, 60(3): 315 – 324.
- [72] 魏东, 张明廉, 支谨. 神经网络非线性预测优化控制及仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 697 – 700.
(WEI Dong, ZHANG Minglian, ZHI Jin. Artificial neural network-based nonlinear predictive optimal control and simulation[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2005, 17(3): 697 – 700.)
- [73] 靳其兵, 王建辉, 顾树生. 多步预测性能指标函数下的神经网络逆动态控制方法[J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 308 – 313.
(JIN Qibing, WANG Jianhui, GU Shusheng. A method of neural network inverse control under the multi-step predictive index function[J]. *Control and Decision*, 1999, 14(4): 308 – 313.)
- [74] SORENSEN P H, NORGAARD M, RAVN O. Implementation of neural network based nonlinear predictive control[J]. *Neurocomputing*, 1999, 28 (1): 37 – 51.
- [75] 李素杰, 申东日, 陈义俊. 基于神经网络的迭代优化预测控制[J]. 计算机仿真, 2006, 23(10): 147 – 150.
(LI Sujie, SHEN Dongri, CHEN Yijun. An iterative optimal predictive control based on neural network[J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(10): 147 – 150.)
- [76] WANG S W, YU D L, GOMM J B. Adaptive neural network model based predictive control for air-fuel ratio of SI engines[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2006, 19(2): 189 – 200.
- [77] 周黎辉, 韩璞, 孙海蓉. 一种有约束的神经网络预测控制方法[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(5): 715 – 717
(ZHOU Lihui, HAN Pu, SUN Hairong. A strategy of neural network predictive control with constraints[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2003, 15(5): 715 – 717.)
- [78] 王世虎, 沈炯, 李益国. 基于逆模型区间优化的神经网络预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 115 – 120.
(WANG Shihu, SHEN Jiong, LI Yiguo. Neural networks predictive control using optimizing intervals of inverse models[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(26): 115 – 120.)
- [79] SORENSEN P H, NORGAARD M. Implementation of neural network based non-linear predictive control[J]. *Neurocomputing*, 1999, 28(3): 37 – 51.
- [80] NAND K, SINGH S P. Simulated response of NN based identification and predictive control of hydro plant[J]. *Expert Systems with Applications*, 2007, 32(1): 233 – 244.
- [81] TAN Y H, ACHIEL R. VAN C. Optimization techniques for the design of a neural predictive controller[J]. *Neurocomputing*, 1996, 10(1): 83 – 96.
- [82] 王群仙, 陈增强, 袁著祉. 基于BP网络的PID型预测自校正控制器[J]. 控制与决策, 1998, 13(2): 185 – 188.
(WANG Qunxian, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. PID structure predictive self-tuning controller based on BP neueral network[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(2): 185 – 188.)
- [83] 李奇, 李世华. 一类神经网络智能PID控制算法的分析与改进[J]. 控制与决策, 1998, 13(4): 312 – 316.
(LI Qi, LI Shihua. Analysis and improvement of a kind of neural networks intelligent PID control algorithm[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(4): 312 – 316.)
- [84] ZHANG Y, CHEN Z Q, YUAN Z Z. Nonlinear system PID-type multi-step predictive control[J]. *Journal of Control Theory and Application*, 2004, 2(3): 201 – 204.
- [85] PRIMOZ P, IGOR G. Nonlinear model predictive control of a cutting process[J]. *Neurocomputing*, 2002, 43(4): 107 – 126.
- [86] 程宏亮, 张国贤, 包海昆. 基于GA神经网络的自适应预测控制的设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(5): 718 – 721.
(CHENG Hongliang, ZHANG Guoxian, BAO Haikun. The design and simulation of a self-turning predictive Control Based on Neural Network Optimized by Genetic Algorithm[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2003, 15(5): 718 – 721.)
- [87] YING S, CHEN Z Q, YUAN Z Z. Neural network nonlinear predictive control based on tent-map chaos optimization[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2007, 15(4): 539 – 544.
- [88] 肖本贤, 王晓伟, 朱志国, 等. 基于改进PSO算法的过热气温神经网络预测控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 569 – 573.
(XIAO Benxian, WANG Xiaowei, ZHU Zhiguo, et al. Neural network predictive control for superheated steam temperature based on modified particle swarm optimization[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(3): 569 – 573.)
- [89] WU Y L, LU J G, SUN Y X. An improved differential evolution for optimization of chemical process[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, 16(2): 228 – 234.
- [90] JOAO A F, ARRUDA L V R, FLAVIO N J. Startup of a distillation column using intelligent control techniques[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, 30(2): 309 – 320.
- [91] 窦春霞. 基于混沌神经网络模型的模糊预测控制及应用[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(10): 1372 – 1375.
(DOU Chunxia. Fuzzy forecast controller based on chaos neural network model research and its application[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2002, 14(10): 1372 – 1375.)
- [92] 窦春霞. 采用炉膛辐射信号的锅炉燃烧系统模糊神经网络预测控制的仿真研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 445 – 451.
(DOU Chunxia. Simulation of fuzzy neural network forecast control based on radiation signal of furnace[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 445 – 451.)
- [93] GU D B, HU H S. Neural predictive control for a car-like mobile robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 39(2): 73 – 86.
- [94] PENG H, TOHRU O, YUKIHIRO T. RBF-ARX model-based nonlinear system modeling and predictive control with application to a NO_x decomposition process[J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(2): 191 – 203.
- [95] TAI P F, CHU J Z, JANG S S. Developing a robust model predictive control architecture through regional knowledge analysis of artificial neural networks[J]. *Journal of Process Control*, 2002, 13(5): 423 – 435.
- [96] ZENG G M, QIN X S, LIN L H. A neural network predictive control system for paper mill wastewater treatment[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2003, 16(2): 121 – 129.
- [97] 石宇静, 柴天佑. 基于神经网络与多模型的非线性自适应广义预测控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(5): 540 – 545.
(SHI Yujing, CHAI Tianyou. Neural networks and multiple models based nonlinear adaptive generalized predictive control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(5): 540 – 545.)
- [98] GAO F R, WANG F L, LI M Z. Predictive control for processes with input dynamic nonlinearity[J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(19): 4045 – 4052.
- [99] YEH T M, HUANG M C, HUANG C T. Estimate of process compositions and plant wide control from multiple secondary measurements using artificial neural networks[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(1): 55 – 72.
- [100] LIU G P, DALEY S. Output-model-based predictive control of unstable combustion systems using neural networks[J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(5): 591 – 600.

- [101] TAN Y H, ACHIEL V C. Nonlinear one-step-ahead control using neural networks: control strategy and stability design[J]. *Automatica*, 1996, 32(12): 1701 – 1706.
- [102] KAMBHAMPATI C, MASON J D, WAREICK K. A stable one-step-ahead predictive control of non-linear systems[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 485 – 495.
- [103] HUI P, YANG Z J, GUI W H. Nonlinear system modeling and robust predictive control based on RBF-ARX model[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2007, 20(1): 1 – 9.
- [104] 李冬梅, 王正欧. 混沌系统的神经网络预测控制[J]. 控制与决策, 2002, 17(6): 912 – 919.
(LI Dongmei, WANG Zhengou. Neural network predictive control of chaotic systems[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(6): 912 – 919.)
- [105] GALVAN I M, ZALDIVAR J M. Application of recurrent neural networks in batch reactors part 1: normal modeling of the dynamic behavior of the heat transfer fluid temperature[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 1997, 36(6): 505 – 518.
- [106] GALVAN I M, ZALDIVAR J M. Application of recurrent neural networks in batch reactors part 2: nonlinear inverse and predictive control of the heat transfer fluid Temperature[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 1998, 37(2): 149 – 161.
- [107] JOSE R N, WANG H. A direct adaptive neural network control for unknown nonlinear systems and its application[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1998, 9(1): 27 – 33.
- [108] KARIN K K, STEFAN G, AXEL K. Application of model-predictive control based on artificial neural networks to optimize the fed-batch process for riboflavin production[J]. *Journal of Biotechnology*, 2000, 79(1): 39 – 52.
- [109] VIEIRA W G, SANTOS V M L, CARVALHO F R. Identification and predictive control of a FCC unit using a MIMO neural model[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2005, 44(8): 855 – 868.
- [110] ELENI A, HARALAMBOS S, DIMITROMS K. Model predictive temperature control in long ducts by means of a neural network approximation tool[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14/15): 2363 – 2369.
- [111] 陈启宏, 费树岷, 宋爱国. 基于神经网络的力觉临场感系统的预测控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(3): 336 – 339.
(CHEN Qihong, FEI Shumin, SONG Aiguo. Predictive control of force telepresence systems based on neural network[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(3): 336 – 339.)
- [112] HU J Q, ROSE E. Generalized predictive control using a neural fuzzy model[J]. *International Journal of System Sciences*, 1999, 30(1): 117 – 122.
- [113] 陈增强, 袁著祉, 刘忠信, 等. 涤纶片基拉膜生产线横向分布神经网络自校正预测控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 332 – 337.
(CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi, LIU Zhongxin, et al. Neural-net-based self-tuning predictive control for crossdirection distribution of apolyster film and sheet spread line[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 332 – 337.)
- [114] 王令群, 郑应平, 潘石柱. 基于RBF神经网络预测模型的VLSI生产线智能控制算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 336 – 338.
(WANG Lingqun, ZHENG Yingping, PAN Shizhu. Intelligent control algorithm for vlsi manufacturing line based on RBFNN predictive model[J]. *Control and Decision*. 2006, 21(3): 336 – 338.)
- [115] ZAMARREIIO J M, VEGA P. Identification and predictive control of a melter unit used in the sugar industry[J]. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1997, 11(4): 365 – 373.
- [116] CARLOS E R, SHAN J F. Development of artificial neural network-based software for prediction of power plant canal water discharge temperature[J]. *Expert Systems with Applications*, 2005, 29(4): 831 – 838.

作者简介:

戴文战 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 浙江理工大学副校长, 浙江理工大学自动化研究所所长, 研究方向为智能控制、系统建模与控制等, E-mail: dwzhan@zstu.edu.cn;

姜海川 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制、预测控制, E-mail: migui_2002@163.com;

杨爱萍 (1970—), 女, 博士研究生, 研究方向为复杂系统建模与控制等, E-mail: aiping_yang@hotmail.com.