

# 加热炉过程控制技术的新策略——智能控制\*

荣莉 柴天佑 钱晓龙  
(东北大学自动化研究中心 沈阳 110006)

**摘要** 论述了智能控制在加热炉过程控制、过程建模、过程观测中的应用状况及前景,并结合国情,提出了智能控制在加热炉窑过程控制的推广应用中应分两步走,即先实施智能 PD 控制再建立高级智能控制系统的可行性方案。

**关键词** 加热炉, 过程控制, 智能控制, 专家系统, 模糊控制, 神经网络

**分类号** TP 273

## New Scheme of Process Control for Reheating Furnace——Intelligent Control

Rong Li, Chai Tianyou, Qian Xiaolong  
(Northeastern University)

**Abstract** The application scopes of intelligent control for reheating furnaces in process control, process modeling and process observation are briefly introduced. The feasible scheme of two step-going about its future development in our country's process control for reheating furnaces is given. The first step is intelligent PD controller. The second step is advanced intelligent control system.

**Key words** reheating furnace, process control, intelligent control, expert system, fuzzy control, neural net

## 1 引言

加热炉是轧钢行业中最重要设备之一,其控制目标是在获得满足轧机开轧所要求的钢坯温度分布的前提下,实现最小的钢坯表面烧损和能耗的经济指标。通常采用的控制方法是将热工模型在稳态工作点附近线性化并进行降阶处理,然后根据简化后的线性模型利用线性系统的方法来设计控制器。但由于加热炉本质上是一个具有大惯性、纯滞后和分布参数的非线性系统,当炉内工况发生变化或出现大的扰动时,传统的线性近似模型显然具有较大的局限性。工程技术人员经过多年的工程实践已充分认识到,要想彻底解决加热炉窑的控制问题,必须跳出以简化的理想数学模型为基础的经典控制框架,面对其复杂性,应提出新的概念和模型,探索新的方法和手段,开发出能感知复杂环境、控制复杂对

象、解决复杂任务的新策略<sup>[1]</sup>。

近年来,随着计算机的广泛应用和人工智能技术的迅速发展,出现了一种以人工智能、控制理论和计算机科学为基础的新型控制技术——智能控制。智能控制不仅为传统控制理论和方法带来了新的生机,而且为解决轧钢领域内的控制难题,摆脱常规数学模型的困境,突破现有控制理论的局限性,开辟了一条新的途径<sup>[2-4]</sup>。

## 2 智能控制在加热炉控制中的应用领域

智能控制方法主要包括<sup>[5-7]</sup>:

- 1) 专家系统与传统控制相结合的专家控制方法;
- 2) 将人工神经网络用于智能控制的神经元控制;
- 3) 基于模糊集合论模拟人的模糊推理和决策过程的模糊控制;

\* 国家自然科学基金项目(69934020)

1998-11-03 收稿, 1999-02-02 修回

4) 模拟人脑的分层结构, 由执行级、协调级和组织级构成的分层递阶智能控制。

自从 20 世纪 80 年代初丹麦 Smith 公司将模糊技术用于水泥窑控制获得成功以来<sup>[8]</sup>, 钢铁等工业争先开发出了人工智能系统。近 10 年来, 计算机技术和人工智能技术的飞速发展, 为钢铁工业的智能化提供了先进的科学技术手段。迄今为止, 从烧选到轧钢各工序以至能源、计划、运输、管理等领域, 均有使用智能控制技术的报道。智能控制技术已被世界钢铁行业列为 20 世纪末、本世纪初的关键技术。它不仅可用于加热炉的过程控制, 还可用于加热炉的过程建模和过程观测<sup>[4, 9, 10]</sup>。

### 2.1 在加热炉过程控制中的应用

传统的以数学模型为基础, PD 加反馈控制为主的经典控制方式, 已无法适应今后钢铁工业竞争的要求。智能控制从人工智能的角度出发, 充分重视大量定性的先验知识, 采用模糊、推理、逻辑的知识库和推理方式, 通过离线训练在线学习, 建立起智能动态控制系统, 以取代传统的控制器。将智能控制技术应用于炉窑的过程控制, 能继承熟练工人的操作经验, 并解决传统工艺理论、控制理论建立的数学模型无法适合非稳定工况的问题, 在异常情况下也能很好地控制。从而可大大提高加热炉窑控制过程的快速性和控制精度, 保证控制过程的稳定性, 提高产品的合格率和优质率。

### 2.2 在加热炉过程建模中的应用

目前国内外开发的加热炉钢坯温度预报数学模型, 无论是根据加热过程本身的内在机理, 运用能量平衡、物料平衡等建立起来的机理模型, 还是根据加热炉的输入输出数据建立起来的辨识模型, 其实质都是实验模型。实验数据的获取是基于拖偶实验或黑箱测试, 这两种实验手段代价较高, 并且所测数据不可避免地带有局限性。建立的模型依赖于建模时的炉况和实验条件, 当炉况变化或炉子更新、老化后, 模型的误差就会大大增加。另外, 建立炉内加热钢坯温度预报模型时, 通常忽略热辐射和热对流, 仅考虑热传导, 加热的三维空间被简化成一维或二维空间的热传导模型。由于这些方法假设太多, 以至使用起来误差较大。若模型精度过高, 其算法势必复杂, 运算起来就会占用大量的机时。上述这些因素都严重影响了模型的实用性。

面对上述传统建模方法的诸多缺陷, 可将人工智能方法与传统建模方法相结合, 根据加热炉的工艺特点, 将专家知识、熟练操作人员的经验与经验数

据结合起来, 研究和开发出加热炉的新型智能模型, 并利用机理模型和热平衡计算来修正实验模型, 使之能适应工况及炉体的不断变化。目前研究较多的智能建模方法有神经网络建模法和模糊建模法。多层前馈神经网络能以任意精度逼近非线性映射, 为加热炉的建模提供一种新的非传统的表达工具。模糊建模通过定义模糊变量、模糊集合及相应隶属函数, 将加热炉的输入输出之间的映射关系用一组人们易接受的“if-then”条件语句规则来描述。与传统的数学模型表示方法不同, 神经网络模型和模糊模型也称为广义数学模型。

### 2.3 在加热炉过程观测中的应用

加热炉内的温度分布很复杂, 有炉膛温度、炉壁温度、钢坯表面温度、钢坯断面温度、钢坯中心温度等, 而实际易测的只是炉内某一点的炉膛温度。对于控制最佳燃烧的空/燃配比, 通常难以在线检测燃料的发热值和炉子的热效率。另外, 对燃烧后废气中含氧量的测量也不尽如人意, 滞后大、标定难、精度低。这些因素都严重阻碍了加热炉控制品质的进一步提高。为此, 须将人工智能技术与自动检测相结合用于加热过程参数的观测, 根据离线或在线数据采用软测量技术重构过程信息, 应用模式识别与多媒体技术对加热炉的运行状况、实际工况、温度、压力、残氧量等关键参数进行智能检测、识别和监控, 并开发智能观测方法和技术, 以大大提高关键过程参数检测的快速性和准确性。

目前, 作为钢铁强国的日本、美国等, 已有一些将专家系统和模糊控制技术应用于加热炉燃烧控制的报道。我国的武汉钢铁公司多年来一直从事智能控制系统的开发研究<sup>[11]</sup>, 他们在对广州轧钢厂等十多座加热炉进行技术改造时, 将模糊控制技术成功地应用于炉温的建模和 PD 控制器参数的在线自动整定。改造后的加热炉, 其控温精度小于 1%, 氧化烧损减少 30% 以上, 大大提高了控制品质, 取得了良好的经济效益。莱芜钢铁公司也将神经网络成功地应用于加热炉的燃烧控制<sup>[12]</sup>, 他们利用 BP 网中带阻尼反馈的 recurrent 网络, 通过离线训练在线学习的方式自动寻找最佳空燃比。这套系统自 1997 年投入在线运行以来, 其控温精度小于 1%, 节油率提高了 10% - 20%, 氧化烧损降低了 35%, 不粘钢不生烧, 提高了加热质量, 不冒黑烟, 减少了环境污染, 取得了良好的经济效益和社会效益。

### 3 智能控制技术推广应用的几点建议

在集散控制系统(DCS)、可编程控制器(PLC)、工控机及智能仪表高速发展和普及的今天,控制装置已不是主要问题,除检测手段外,其症结主要在于控制方法本身。控制性能的好坏不仅影响产品质量和成品率,而且对炉窑的寿命以及节能和优化等综合指标带来很大影响。目前国内冶金系统约有 20% - 30% 的加热炉窑,通过引进国外的先进设备或技术改造装备了计算机系统,这就为智能控制技术的实施提供了先决条件。根据我国现有的基础自动化水平和现有的智能控制的研究成果,建议智能控制技术在加热炉窑过程控制的推广应用应分两步走:第一步是智能控制与 PD 控制相结合的智能 PD 控制技术<sup>[13, 14]</sup>,这是现阶段较为可行的方案;第二步是将专家系统、模糊控制、神经元这三大研究成果结合起来,研制出具有高度自学习、自适应和自组织功能的高级智能控制系统。

#### 3.1 智能 PD 控制器

PD 调节器问世至今已有近 60 年的历史了,它以其结构简单、稳定性好、工作可靠而成为工业控制中主要和可靠的技术工具。即使在微处理器技术飞速发展的今天,过程控制的大部分规律仍未能离开 PD,这充分说明 PD 控制仍具有很强的生命力。但是,传统的 PD 控制器还有许多不完善之处,其中最主要的问题就是 PD 控制器参数的整定问题。工程上常用的 ZN 和 RZN 规则整定的 PD 控制器参数,一旦计算好后,无论是跟踪设定值还是抑制干扰,也不管过程是否发生变化,在整个控制过程中都是固定不变的。当工况变化过大时,需要人工进行干预,因此很难达到最佳的控制效果。智能 PD 控制器的设计思想就是利用专家系统、模糊控制和神经元技术,将人的智能以非线性控制的形式引入到控制器的设计当中,使系统在任何运行状态下均能得到远比传统 PD 控制更好的控制性能和更强的鲁棒性。

##### 3.1.1 专家自整定 PD 控制器

专家自整定 PD 控制器(见图 1)的参数整定过程包括对控制系统性能的判别,过程响应曲线的识别,控制参数修正量的确定以及 PD 控制器参数的修改。通过对系统误差的模式识别,确定出过程响应曲线的超调量、阻尼比和衰减振荡周期,以了解被控过程动态特性的变化;然后根据用户事先设定好的

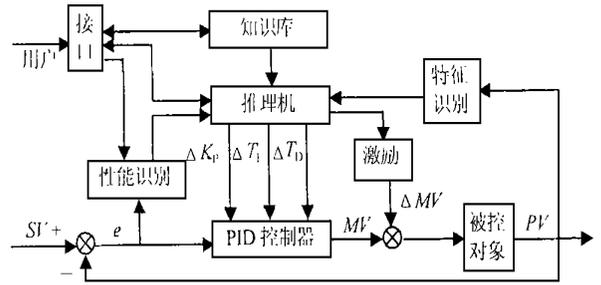


图 1 专家自整定 PD 控制系统

超调量、阻尼等约束条件,在线调整 P、I、D 三个参数,直到过程的响应曲线为某种指标下的最佳响应曲线。这是一种基于启发式规则推理的自适应技术,其目的就是为了应付过程中出现的不确定性。美国 Foxboro 公司已将这项技术用于 PD 控制器的生产中,取得了良好的控制效果<sup>[6, 15, 16]</sup>。

##### 3.1.2 模糊自整定 PD 控制器

模糊自整定 PD 控制器如图 2 所示<sup>[17, 18]</sup>。在控制回路上仍保留 PD 调节器用模糊推理方法作为 PD 控制器的自适应机构,采用继电器反馈作为 PD 参数的预整定。

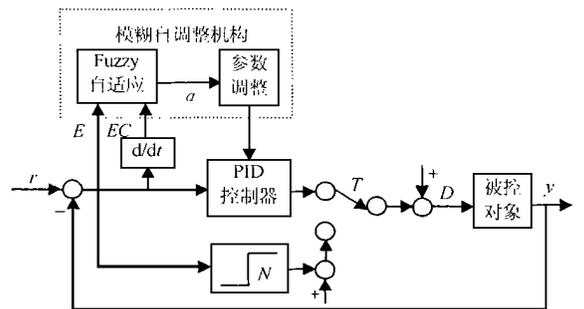


图 2 模糊自整定 PD 控制器

设计的主要思想是通过调整一个单一的参数  $\alpha(t)$  来在线调整一组类似于 ZN 整定规则的公式。 $\alpha$  函数的在线调整规律可根据当前控制偏差  $E$  和偏差  $EC$ , 结合被控过程动态特性的变化以及针对具体过程的实际经验,由一个模糊推理过程产生。此外,还可根据反映系统动态特性的超调量、上升时间、响应时间和静态误差这 4 个指标来整定 PD 控制器参数<sup>[7, 19, 20]</sup>。

##### 3.1.3 神经元 PD 控制器

与上述两种控制器不同,神经元 PD 控制器不是用神经元来整定 PD 的参数,而是用神经元直接作为控制器,通过训练神经元的权系数间接地调整 PD 参数(见图 3)<sup>[21, 22]</sup>。

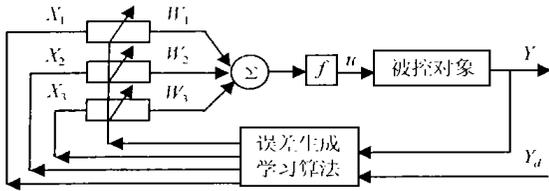


图3 神经元自适应控制系统

系统用单个神经元作为控制器兼计算单元, 它有 3 个输入  $X_1, X_2, X_3$ 。令

$$\begin{cases} X_1 = Y_d - Y = e_n \\ X_2 = e_n - e_{n-1} \\ X_3 = e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2} \end{cases} \quad (1)$$

功能函数  $f(x) = X$ , 则神经元的加权和为

$$u = f(x) = \sum_{j=1}^3 W_j X_j = W_1 e_n + W_2 (e_n - e_{n-1}) + W_3 (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (2)$$

$W_1, W_2, W_3$  恰好是增量式 PD 调节器的 I, P, D 系数, 被控对象的控制量正好实现系统误差增量的 PD 调节输出。通过采用一学习规则来训练神经元的权重  $W_j$ , 使控制器适应被控对象结构参数及环境的变化。该调节器利用神经元的自学习功能, 间接地完成了 PD 控制器参数的自动整定。

### 3.2 高级智能控制器

从映射的角度看, 模糊系统和神经网络都具有非线性函数近似的能力, 因此模糊系统和神经网络可以互为等价表示, 理论上也证明了这一点<sup>[7, 23]</sup>。本文将模糊理论和神经网络有机地结合起来, 充分利用模糊逻辑具有较强的结构性知识表达能力, 神经网络强大的自适应自学习能力和定量数据的直接处理能力, 设计出一类新颖的高级智能控制器——用神经网络实现模糊推理的自适应模糊控制器(见图 4)<sup>[10, 24-26]</sup>。

该系统将已知或部分已知的模糊系统用等价

的神经网络来表示, 并根据实际的输入 / 输出数据调整网络的参数, 然后将训练好的网络再转换成模糊系统。当系统环境发生变化时, 利用神经网络的自适应自学习功能, 产生新的隶属函数和控制规则以适应变化的环境, 从而大大提高了控制系统的性能。为了构造一个成功的高级智能控制器, 必须考虑所有的情况及可能出现的各种条件下的不同组合情况。控制器的设计是在线自动完成的, 所有情况都必须包含在控制算法中, 因此有一个“安全网”是很重要的。这种“安全网”能覆盖起动、停止以及手动和自动之间的切换操作<sup>[16]</sup>。采用专家控制的思想可以实现这种安全逻辑。用一个专家系统把控制算法、管理和自适应和谐地结合起来, 构成一个有机的集合体。这个集合体不仅包括控制算法和估计算法, 还包括激励和诊断算法以及数据存储表。此外, 该专家系统还具有决定何时使用何种算法以及含有具体算法的知识和使用它们的条件的功能。

## 4 结 语

智能控制技术已成功地应用于自动化系统的许多领域, 在过程控制中也有许多深入的研究。但由于过程控制对象常具有非线性和时变等特点, 其动态模型的实施较为复杂。同时, 模糊规则不能根据实时工况进行在线调整, 神经网络中常用的 BP 算法收敛速度较慢, 且有可能陷入局部极小。这些因素使得智能控制技术还不能满足过程控制对实时性和高可靠性的要求。从智能控制的本质特征出发, 将控制理论、人工智能和计算机科学相结合的智能控制, 同仅仅依靠数学模型进行控制的经典控制和现代控制相比, 具有强大的功能。大量仿真结果已证明智能控制在过程控制中的有效性, 但要真正实现智能控制在加热炉窑过程控制中的广泛工程应用, 还需要进行大量深入的研究和实验, 并与日新月异的计算机技术紧密结合。

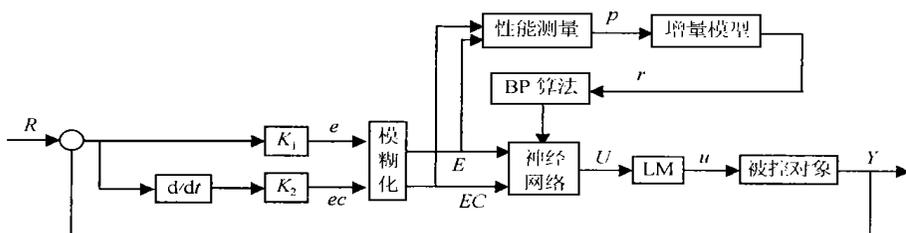


图4 基于神经网络的模糊自适应控制器

## 参 考 文 献

- 1 K S Fu *et al.* Heuristic approach to reinforcement learning control system. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1965, 10(4): 390- 398
- 2 Anderson B D O. Issues regarding the future of IFAC. *IFAC Document*, 1985
- 3 张嗣瀛, 等译 对于控制的挑战——集体的观点 控制与决策, 1987, 4: 52- 64
- 4 Yongzai Lu Meeting the challenge of intelligent system technologies in the iron and steel industry. *Iron and Steel*, 1996, (9): 139- 149
- 5 陈燕庆, 宋东, 吴成富, 等 工程智能控制 西安: 西北工业大学出版社, 1991
- 6 王俊普 智能控制 合肥: 中国科技大学出版社, 1996
- 7 赵震宇, 徐用懋 模糊理论和神经网络的基础与应用 北京: 清华大学出版社, 1996
- 8 P M Larsen Industrial application of fuzzy logic control in fuzzy reasoning and its application. London: Academic Press Inc, 1981
- 9 K S Narendra, K Parthasarathy. Identification and control systems using neural networks *IEEE Trans on Neural Networks*, 1990, 1(1): 4- 27
- 10 李学桥, 马莉 神经网络·工程应用 重庆: 重庆大学出版社, 1996 83- 86
- 11 陈书瀚 智能模糊控制在工业炉窑自动化中的应用 冶金自动化, 1996, 20(2): 31- 33
- 12 吴晓锋, 李恩伟, 郝锡才, 等 神经网络在加热炉自控系统中的应用 冶金自动化, 1997, 21(4): 32- 34
- 13 Astrom *et al.* Towards intelligent PD control *Automatic*, 1992, 28(1): 1- 9
- 14 蒋新华 自适应 PD 控制综述 信息与控制, 1988, 12(5): 41- 50
- 15 T W Kraus, T J Myron. Self-tuning PD controller uses pattern recognition approach. *Control Engineering*, June, 1984 106- 111
- 16 K J 奥斯特隆姆, 威顿 马克 自适应控制 北京: 科学出版社, 1992
- 17 Shizhong He *et al.* Fuzzy self-tuning of PD controllers *Fuzzy Sets and Systems*, 1993 37- 46
- 18 李卓, 何世忠 一种新型的控制规则和参数在线自调整模糊控制器 见: 第一届中国智能控制与智能自动化学术会议论文集 1994
- 19 Zhao Z Y, Sagara S, Tomizuka M. A fuzzy tuner for fuzzy logic controllers In: *IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics* Chicago, 1992 1603- 1608
- 20 Zhao Z Y, Tomizuka M, Isaka S Fuzzy gain scheduling of PD controller. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1993, 23(5): 1392- 1398
- 21 王宁, 涂健 陈锦江 电渣重溶过程的神经元智能控制 自动化学报, 1993, 19(5): 634- 636
- 22 杨自厚 神经网络技术及其在钢铁中的应用 冶金自动化, 1996, 20(4): 48- 51; 1997, 21(5): 50- 53
- 23 Jokinen Petir A. On the relations between radial basis function network and fuzzy systems *IJCNN 92*, Baltimore, 1992 717- 722
- 24 Lin C T *et al.* Neural network-based fuzzy logic control and decision system. *IEEE Trans on Computers*, 1991, 40(2)
- 25 Wang Lixing, Mendal Jerry M. Back-propagation fuzzy systems as nonlinear dynamic systems identification *IEEE Fuzzy s*, 1992 220- 225
- 26 Keller *et al.* Neural network implementation of fuzzy logic *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(1): 1- 12

## 作 者 简 介

荣 莉 女, 1970 年生。东北大学自动化研究中心博士研究生。研究领域为自适应控制, 智能控制和工业过程控制。

柴天佑 男, 1947 年生。东北大学自动化研究中心主任, 教授, 博士生导师。研究领域为自适应控制, 非线性控制和工业综合自动化。

钱晓龙 男, 1966 年生。1998 年于东北大学获工业自动化专业硕士学位, 现为东北大学讲师。研究领域为智能控制, 工业过程控制, 网络通讯。

(上接第 268 页)

- 70 S A rora, Y Rabani, U Vazirani Simulating quadratic dynamical systems is SPPACE-complete In: *Proc of the 26th Annual ACM Symposium on Theory of Computing* New York: ACM Press, 1994 459\_ 467
- 71 Wolpert D H, Macready W G. No free lunch theorems for search. *The Santafe Institute*, 1995
- 72 Radcliffe N J, Surry P D. Fundamental limitations on search algorithms UK: University of Edinburgh, 1995
- 73 Baeck T, Kok J N, Kusters W A. Theory of genetic algorithm s *Eatcs Bulletin*, 1997. 161\_ 192
- 74 恽为民, 席裕庚. 遗传算法综述. *控制理论与应用*, 1996, 13(6): 697—708

## 作 者 简 介

戴晓晖 男, 1970 年生。天津大学系统工程研究所博士生。研究方向为遗传算法, 软件工程。

李敏强 见本刊第 14 卷增刊第 620 页。

寇纪淞 见本刊第 14 卷增刊第 620 页。