

② 7-11

智能控制技术在我国的轧钢炉窑控制中的应用<sup>1)</sup>

柴天佑 荣 莉 马庆云

(东北大学自动化研究中心 沈阳 110006)

**摘 要** 介绍智能控制技术在轧钢炉窑过程控制中的应用状况,并从过程控制、过程建模、过程观测以及智能PID控制4个方面提出了在我国实施智能控制技术的可行性方案。

**关键词** 轧钢炉窑 过程控制 智能控制

轧钢加热炉

## Application of intelligent control technology in reheating furnaces control for rolling process

Chai Tianyou Rong Li Ma Qingyun

(Research Center of Automation of Northeastern University Shenyang 110006)

**Abstract** The practical application of intelligent control technology in reheating furnaces control for rolling process is introduced. Its application prospect is presented in the aspects of process control, process modeling, process observation and intelligent PID

**Key words** furnaces for rolling process; process control; intelligent control

TG3  
TG3

## 0 前言

轧钢炉窑是一个具有大惯性、纯滞后和分布参数的非线性系统。炉窑使用的燃料品种繁多,有煤气、天然气、重油,也有煤块和煤粉,有的还要吹氧;其加热方式有连续式和批量式等多种多样,炉内的热状态变幻难测;钢坯温度分布等许多重要参数难以直接在线检测,炉型结构和工艺参数也各不相同。这些因素一直阻碍着炉窑过程控制技术的进一步发展。高产、优质、多品种、节能降耗最终达到降低成本,以获得最大利润一直是钢铁工业在竞争中获得生存和发展的目标。传统的以数学模型为基础的经典控制框架显然已不能适应这一要求。人们在生产实践中早已注意到,许多复杂的生产过程难以实现的控制目标,熟练的操作工或技术人员却可以操作自如并获得满意的控制效果。而这些熟练的操作工和技术人员的经验知识若能和控制理论相结合,把它作为控制理论解决复杂生产过程的一个补充手段,那将使控制理论解决复杂生产过程有一个突破性进展。事实也正是如此。近年来,随着信息技术和计算机

技术革命性的进步,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——智能控制的出现,为控制界解决传统难题带来了新的生机。智能控制的范围很广,在钢铁工业的应用中除少数智能机器人外,主要包括专家系统与传统控制相结合的专家控制方法;将人工神经网络用于智能控制的神经元控制;基于模糊集合论并模拟人的模糊推理和决策过程的模糊控制<sup>[1-2]</sup>。智能控制技术的出现为解决轧钢领域内的控制难题,谋求钢铁企业在21世纪发展的一席之地,提供了新的途径<sup>[3,4]</sup>。

## 1 应用现状

近10年来,随着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。从烧选到轧钢各工序以至能源、计划、运输、管理等均有使用智能控制技术的报道。目前,作为钢铁强国的日本、美国等已有了一些将专家系统和模糊控制技术应用于轧钢炉窑的燃烧控制和炉温控制的报道(见表1),并已取得显著的经济效益。

收稿日期:1998-12-02 修改稿收到日期:1999-07-07

柴天佑 男 1947年生 教授 博士生导师 从事自适应控制、非线性控制和工业综合自动化方面的研究。

1) 本课题为国家自然科学基金资助项目。

## 综述与评论

表 1 国外轧钢炉窑使用智能控制概况

应用名称	使用年代	模糊逻辑	专家系统	神经网络
热轧板带加热炉的燃烧控制	1987		*	
棒材加热炉抽出节奏控制	1988		*	
板坯加热炉抽出节奏控制	1989		*	
连续退火炉设备诊断	1989		*	
炉热预测和炉壁温度分布辨识	1990			*
加热炉出炉操作指导	1991	*		
电焊钢管感应加热控制	1991	*		
型钢加热炉控制	1992		*	
连续退火炉表面缺陷检测	1993			*
镀层退火炉反馈控制	1993	*		
连续退火炉作业	1993		*	
连续退火炉钢带温度控制	1993		*	

我国早在 70 年代末, 80 年代初就已开始了智能控制器的研究工作。近年来, 大批专家学者和工程技术人员为了将智能控制的研究成果, 推广应用在轧钢炉窑的过程控制中, 做了大量有益的尝试, 取得了不少的成果。

武汉钢铁公司多年来一直在从事智能控制系统的开发研究<sup>[6]</sup>, 近年来已在广州轧钢厂、韶关钢铁厂和韶关特钢厂等 10 多座加热炉上得到了良好的应用。该系统避开了炉子控制中遇到的参数难测及建模困难等因素, 而直接根据容易检测的炉膛温度, 根据炉膛温度与炉壁温度、钢锭表面温度及钢锭中心温度之间的升降关系来模糊推知后三者的温度, 这就大大降低了检测和建模的难度。同时将模糊控制技术用于常规 PID 控制器参数的自动整定, 这样就能保持其最佳的工作参数和良好的控制品质。这些原本设备陈旧、手工操作的加热炉经采用模糊控制后, 整个加热炉实现了全自动控制, 自寻优并跟踪最佳燃烧, 各段炉温自动协调, 各设定值自动修整, 各参数在线自动整定。改造后的加热炉, 其控温精度  $< 1\%$ , 氧化烧损减少 30% 以上, 年创经济效益在 200 万元以上。这项技术的成功应用, 是轧钢炉窑控制技术的一大突破性成果, 为智能控制技术在我国的推广应用开辟了广阔的前景。

神经网络具有并行处理、高度容错、自学习和自组织能力, 近些年来作为智能控制领域的一个新分支而受到工业过程控制界的普遍关注。莱芜钢铁公司已于 1997 年初将神经网络成功地应用于莱钢特钢厂 1<sup>#</sup> 加热炉的燃烧控制中<sup>[7]</sup>。该加热炉为 3 段式推钢加热炉, 加热燃料采用重油, 整

个炉子分均热段、上加热段、下加热段、第 2 加热段共 4 段单独控制。系统硬件采用 Honeywell 模块化自动控制系统, 通过引进美国 WORD SYSTEM 公司的 NEUROSHELL 神经元网络软件技术, 组成神经元网络控制平台, 采用 BP 网中带阻尼反馈的 recurrent 网络的寻优功能离线寻找最佳空燃比。选定与炉子燃烧有关的参量如风压、油压等作为神经元模型的输入量, 选定 4 段的炉温作为输出量, 读取相关数据库内炉况稳定时的历史数据, 利用 EXCEL 软件进行预处理, 作为神经元训练时的数据。在神经元网络高级应用窗口内调用训练神经元模型的数据, 确定神经元的输入/输出属性, 设定神经网络中神经元的个数和功能函数, 以平均误差作为训练停止条件。将离线训练好的神经元网络用于寻找最佳空燃配比。这套系统自 1997 年 4 月投入在线运行以来, 其控温精度  $< 1\%$ , 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。

## 2 在我国应用的可行性方案

目前, 对智能控制系统的理论研究还不太多, 特别是对智能控制系统的稳定性和鲁棒性研究几乎是一片空白。但国外学者对智能控制系统的应用研究较为广泛, 在钢铁领域从冶炼到轧钢, 从控制、管理、诊断到设计都已初步覆盖了智能方法。目前, 国外各电气公司都生产有各种智能控制与管理用的产品。以日本为例, 有富士 MICRE 模糊控制器, 日立 EX-FUZZY 模糊控制器, 明电模糊控制器, 横河 Centum-XL 模糊控制器。商品化的专家开发系统开发工具有日立公司的 Eureka-II, ES/Kernel, 横河公司的 Exapro, 富士公司的 AIMAX 等。美国有 Guru, Exsys, G2 等。各钢铁公司为了降低成本和适应钢铁工业某些快速过程也开发了许多通用的专家系统开发工具, 如日本钢铁公司的 FAIN、ESTO, 川崎钢铁公司的 K-Engine, 住友金属公司的 SMI 等。不少开发工具是多种技术的综合, 如 G2、Exsys 不但包括专家系统的软件平台, 还包括神经网络平台。为此, 国外学者曾对钢铁工业有过这样的预言: 无人工厂将在 2000 年以后真正实现。

我国在此方面也进行了许多研究, 在应用上投入了不少资金, 做了大量的工作, 但成功的在现

场使用极少。因此,如何根据我国的国情,找准突破点,发展国内智能控制技术,真正做到将智能控制技术广泛应用于轧钢炉窑过程控制中已成为焦点问题。

## 2.1 基于智能方法的过程控制

面对传统的以数学模型为基础的 PID 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,充分重视大量的定性的先验知识,采用模糊的、推理的、逻辑的知识和推理方式,通过离线训练或在线学习,建立起智能动态控制系统,来取代传统的控制器。从对表 1 的分析可以看出,专家系统是轧钢炉窑过程控制中应用最早、最广泛的智能控制技术。但专家系统无法表达符号以外的知识,存在着获取知识难,实时性和自适应性差等缺陷。而模糊控制的主要难点是规则的获取和规则的自适应性差。神经网络虽然具有并行处理和高度自学习、自组织、自适应能力,但它不能定义事例特征,缺乏逻辑模型具有的体系性等问题,而使应用受到局限。因此,任何单一的控制方法都不可能取得最优的控制效果,必须将三者结合起来,取长补短,充分发挥各自优势。将专家控制器和神经网络控制器相结合,神经网络和模糊控制相结合是两种非常有发展前途的自动控制系统结构<sup>[8~10]</sup>(分别见图 1 和图 2)。图 1、2 中的 NN 为神经网络控制器。在图 1 中,首先通过建立知识库、推理机构和控制策略来建立被控对象的专家控制器,然后由专家控制器实时地把部分功能教给神经网络控制器来完成。神经网络经初步训练后由运行监控器进行管理,可以根据当前系统的运行状况,使专家控制器和神经网络控制器各自单独运行或同时运行。在图 2 中, Fuzzy 为模糊控制器。由于神经网络本身的自学习、自组织和自适应能力,可以使模糊控制器能够不断适应对象的变化,具有自适应能力。模糊控制器采用似然推理机制,模仿人在不确定环境下作出决策,但没有学习功能,而神经网络控制器为之提供在线学习功能,增强了控制效果。将智能控制技术应用与炉窑的过程控制,能解决熟练工人操作经验的继承和传统工艺理论、控制理论建立的数学模型无法适合非稳定工况的问题,并在异常情况下也能很好的控制,从而可大大提高轧钢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。

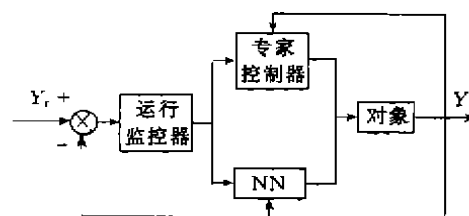


图 1 NN 和专家系统混合控制系统框图

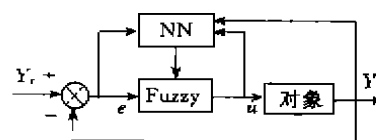


图 2 NN 和模糊控制器混合控制系统框图

## 2.2 基于智能方法的建模与辨识

目前国内外开发的轧钢炉窑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、物质平衡等建立起来的机理模型,还是根据轧钢炉窑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,其实验数据的获取是基于脱耦实验或黑箱测试,这两种实验手段代价较高,这就决定了所测数据的局限性。同时,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大大增加。另外建立炉内加热钢坯温度预报模型时,通常假定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来建立钢坯加热的热传导模型。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,运算起来就要占用大量的机时。另外,传统的数学模型不能处理过程现象中的模糊信息,而轧钢炉窑的过程控制中却大量存在这种信息。上述这些因素都严重影响了模型的可靠性和实用性。

随着智能控制时代的到来,面对上述传统建模方法的诸多缺陷,可以将人工智能方法与传统建模方法和技术相结合,根据轧钢炉窑的工艺特点,将专家知识,熟练操作员的经验和行为与实际数据结合起来,研究和开发出轧钢炉窑的新型智能模型,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,这将是今后数模研究的方向。通过数学模型和智能模型的有机结合,实现对生产过程更为有效的控制。目前研究较多的智能建模方法有神经网络建

## 综述与评论

模法和模糊建模法。多层前馈神经网络能够以任意精度逼近非线性映射,给轧钢炉窑的建模带来了一种新的非传统的表达工具。模糊建模通过定义模糊变量、模糊集合及相应的隶属函数将轧钢炉窑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。由于与传统的数学模型表示的方法不同,所以神经网络模型和模糊模型也称作广义数学模型。

### 2.3 基于智能方法的过程参数的观测

轧钢炉窑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。同时,对控制最佳燃烧的空/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轧钢炉窑控制品质的进一步提高。面对传统的参数检测的困难,将人工智能与自动检测技术相结合用于加热过程参数的观测中。应用离线或在线数据对加热炉的运行状况、实际工况、温度、压力、流量、残氧量等关键参数进行智能观测,采用软测量技术实时重构过程信息;应用模式识别与多媒体技术,实现过程控制的智能检测、识别和监控,为轧钢炉窑的控制提供定量的指导。同时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。

### 2.4 智能 PID 控制器

目前世界过程控制领域里所使用的控制器 90% 以上仍然是 PID 控制器,既然 PID 控制器的数目如此巨大,则 PID 控制器的整定问题就显得非常重要。工程上常用的 ZN 和 RZN 规则整定的 PID 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,无论过程是否发生了变化,在整个控制过程中都是固定不变的。当工况变化过大时,还需要人工进行干预,因此很难达到最佳的控制效果。如何将智能控制技术应用用于 PID 控制器参数的整定,是当前轧钢炉窑过程控制中最需解决的实际问题之一。智能 PID 控制器的设计思想就是利用专家系统、模糊控制、神经网络技术,将人的智能以非线性控制方式的形式引入到控制器的设计当中去,使系统在任何运行状态下均能得到远比传统 PID 控制更加好的控制性能和强的鲁棒性<sup>[11~12]</sup>。

最新的研究成果表明,将神经网络技术应用用于 PID 控制器的参数整定能够取得比传统的线性参数整定方法更好的控制效果<sup>[13,15,20]</sup>,其整定原理主要是利用神经网络能够逼近任意非线性函数的能力来建立被控对象的非线性模型。由于神经网络具有高度自学习、自组织和自适应能力,所以这一非线性模型能够实时跟踪被控对象的变化(见图 3)。其中  $N$  为一非线性环节,采用继电器极限环法来进行 PID 控制器参数的预整定, $T$  为控制器的输出, $D$  为一外界干扰。

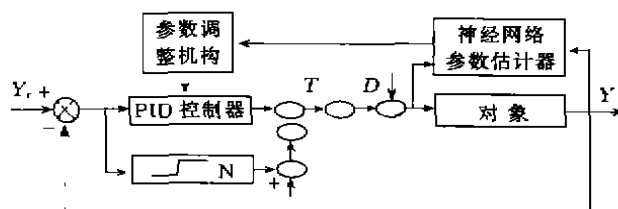


图 3 神经网络 PID 自整定控制器

美国 Foxboro 公司曾将专家系统应用于 PID 控制器参数的整定,并在 1987 年生产出了专家自整定 PID 控制器——EXACT<sup>[14,22]</sup>。其主要原理是通过对系统误差的模式识别,识别出过程响应的超调量、阻尼比和衰减周期,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超调量、阻尼等约束条件在线调整  $T_P$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  这 3 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。此外,文献[4]、[16]和[17]也介绍了一些采用模糊逻辑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 PID 控制器参数的智能方法。

### 3 结论

我国自“六五”期间就已将加热炉窑的计算机控制列为用电子技术改造传统产业的三大突破口之一。经过几十年的努力,国内冶金系统约有 20%~30% 轧钢炉窑通过引进国外的先进设备或进行技术改造并装备了计算机系统,这就为智能控制技术的实施提供了先决条件。智能控制也并非万能,它仅仅是一项新兴的有效技术,能解决一些传统理论和方法不易解决的问题。但随着被控对象的复杂化、控制任务的多样化以及控制环境的苛刻化,同时也随着计算机技术的飞速发展,未来的过程控制领域必将沿着以智能控制为主导的方向发展。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 孙增圻,张再兴,邓晓东.智能控制理论与技术.北京:清华大学出版社,1997.
- 3 Anderson B D O. Issues Regarding the Future of IFAC IFAC Document, May, 1985.
- 4 赵震宇,徐用慧.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
- 5 Yong-zai Lu. Meeting the challenge of intelligent system technologies in the iron and steel industry. Iron and Steel Engineer, 1996, 73(9): 139~149
- 6 陈书翰.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
- 7 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
- 8 王顺晃,舒迪前.智能控制系统及其应用.北京:机械工业出版社,1995
- 9 S Shao. Fuzzy Self-organizing Controller and Its Application for Dynamic Process. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 26(2): 135~142
- 10 Lin C T, Lee C S G. Neural Network-based Fuzzy Logic Control and Decision System. IEEE Trans on Computers, 1991, 40(2): 156~163
- 11 Astrom K J, Wittenmark B. Towards Intelligent PID Control. Automatics, 1992, 28(1): 1~9
- 12 蒋新华.自适应PID控制综述.信息与控制,1988,12(5): 41~50
- 13 A J MORRIS, G A MONTAGUE, M J WILLIS. Artificial Neural Networks Studies in Process Modeling and Control. Institution of Chemical Engineers, 1994, 72(1): 3~18
- 14 T W KRAUS, T J MYRON. Self-Tuning PID Controller Uses Pattern Recognition Approach. CONTROL ENGINEERING, 1984, 31(6): 106~111
- 15 Shi-zhong He, Shao-hua Tan, Feng-lan Xu, et al. Fuzzy self-tuning of PID controllers. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 56(12): 37~46
- 16 Zhao Z Y, Sagara S, Tomizuka M. A fuzzy tuner for fuzzy logic controllers. IEEE Int Conference on Systems, Man and Cybernetics. Chicago, 1992. 1 603~1 608
- 17 Zhao Z Y, Tomizuka M, Isaka S. Fuzzy gain scheduling of PID controller. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(5): 1 392~1 398
- 18 杨自厚.神经网络技术及其在钢铁工业中的应用.冶金自动化,1996,20(4):48~51;1997,21(5):50~53
- 19 刘增良.模糊技术与应用选编.北京:北京航空航天大学出版社,1997. 163~167
- 20 Wang Lixing, Mendel, Jerry M. Back-propagation Fuzzy Systems as Nonlinear Dynamic Systems Identification. IEEE Fuzzy Systems, 1992, 1(1): 220~225
- 21 N F Portman, D Lindhoff, Sorgel. Application of Neural Networks in Rolling Mill Automation. Iron and Steel Engineer, 1995, 72(2): 33~36
- 22 K J 奥斯特隆姆,威顿马克.自适应控制.李清权译.北京:科学技术出版社,1991.

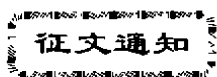
(编辑 魏 方)

## PLC984 智能模块 B885 在焦炉工业现场的应用

我们运用 MODICON PLC984 系列的 B885 智能模块成功地解决了焦炉工业现场的设备监控管理难题。焦炉移动机械在 PLC 系统的控制下,已经实现了机械自动化,整个机械系统犹如一个智能机械手进行有条不紊的工作。现以取门单元的单步动作取门机左旋为例说明系统的故障监控过程。这个过程主要包括故障的检测,故障数据的产生,故障数据的传输以及故障数据的处理 4 个部分,其中前 3 项由 PLC 主机模块中的梯形图编程语言完成,故障数据的处理打印由 B885 智能模块中的 QBASIC 语言完成。在故障处理程序中,如果检测到限位开关 SQ1 未闭合,则将 SQ1 的错误代码 SQCODE 送给专用数据寄存器 40011,同时由于联锁欠落属于重故障,因此将重故障代码 AL1 送专用寄存器 40012,并且将故障发生时间代码送专用数据寄存器 40013,故障数据产生并传输完成后,通过子程序调用,执行 B885 模块中的程序段。在 B885 模块的程序段中,对主机模块传送过来的数据进行分析,分析的方法是按照事先约定的原则,分别对故障时间寄存器、故障性质寄存器和故障部位寄存器逐一进行数据识别,然后即可进行故障的打印输出,同时对不同的故障性质给以声、光、电报警。

经过在武钢焦化厂 7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>焦炉拦焦车上近两年的在线使用,利用 B885 智能模块,可以简单方便地完成特殊工业现场的故障诊断、监控和报警任务,能够极大地提高焦炉移动机械的自动化管理水平,具有直接的经济效益,值得在环境恶劣的工业现场推广应用。

(武汉大学光电技术系 张 斌)



全国电气自动化与电控系统学术会将于 2000 年 10 月在河北省秦皇岛市召开。征文截止日期:2000 年 3 月 15 日。  
论文请寄:300180 天津市河东区津塘路 174 号 中国自动化学会电气自动化专委会