

· 工艺材料进展 ·

运用智能控制技术改进交流电弧炉电极调节器的研究

赵 健 刘 平

(首钢贵阳特殊钢责任有限公司, 贵阳 550005)

摘 要 介绍了几种将智能控制技术(模糊控制器 FC, 人工神经网络 ANN, 遗传算法 GA)与传统的 PID(比例积分微分)控制方式相结合, 并将其运用于交流电弧炉的电极控制器上以实现电极控制参数优化和电流解耦。总结了交流电弧炉智能 PID 电极调节器的应用前景和发展趋势。

关键词 交流电弧炉 电极调节器 PID 控制 智能控制 参数优化 解耦

Research on Utilizing Intelligent Control Technology to Improve Traditional Electrode Regulator of AC Arc Furnace

Zhao Jian and Liu Ping

(Guiyang Special Steel Co Ltd, Shougang Steel, Guiyang 550005)

Abstract Several kinds of solution modes are presented which integrate intelligent control technology (FC-fuzzy controller, ANN-artificial neural network and GA-genetic algorithm) with traditional proportional plus integral plus derivative (PID) control model and are applied for electrode regulator of AC arc furnace to realize electrode control parameter optimization and current decoupling. The application prospects and development trend of intelligent PID control electrode regulator for AC arc furnace are summarized.

Material Index AC Arc Furnace, Electrode Regulator, PID Control, Intelligent Control, Optimization of Parameters, Decoupling

传统的 PID 控制(Proportion plus Integral plus Derivate Control-比例积分微分控制)是通过固定的比例、积分和微分系数来决定控制器的固定响应特性,该方式在一般情况下有其固有的优点,即结构简单、稳定性能好、可靠性高。但在电弧炉电极控制这种具有多变量耦合、系统参数时变等复杂因数的环境中,传统的 PID 控制方式也突显出一些问题。将模糊控制、神经网络、专家系统等现代先进智能控制思想融合其中的智能 PID 控制模式在对复杂对象控制方面已被证明具有更好的特性。用这种模式对传统的电弧炉 PID 电极控制器进行改造,已逐步成为提升其控制品质的一种有效途径。

基于传统 PID 型式的电极调节器是目前国内电弧炉电极调节中最常见的方式,但是实际工作的三相交流电弧炉电极系统是一个具有三相强耦合特征,同时又有非线性、时变性、随机性的复杂系统,其过程参数甚至模型结构均会随时间和工作环境的变化而变化,因此传统的控制方法很难达到良好的效果。近年来具有解决非线性、时变性和多变量解耦等方面问题优势的智能控制技术已开始逐步在电弧炉电极控制得到实际应用^[1]。目前较有代表性的电弧炉智能电极调节器主要有^[2]: IAF 和 SmartArc

以及 Simelt NEC。IAF 系统是美国 NAC 开发的,由于开发较早所以已得到较广泛的运用,广州钢铁公司和天津钢管公司都先后引进了该系统。基于快速测量系统的 SmartArc 电极调节系统是美国 SME 公司研发的,在北美得到较多的运用;Simelt NEC 系统是德国西门子公司针对欧洲市场研发的,在莱钢 50 t 超高功率电弧炉的改造中,该产品得到运用^[3]。另外,值得关注的还有意大利德兴公司注册的 iEAF 型智能电弧炉动态控制系统,它能够实现包括电极调节在内的电弧炉多种智能控制,并在意大利 Ternaris Dalmine 厂成功投入使用^[4]。

就整体而言,引进此类技术后所产生的效果是明显的:例如,天津钢管公司 150 t 超高功率电弧炉在投入 IAF 控制系统后,生产运行结果表明,电弧炉供电保护跳闸进一步减少,电耗降低 10 ~ 15 kWh/t,由于供电平稳,电极消耗也相应降低,基本消灭了电极折断现象^[5];舞阳钢铁公司 100 t 电弧炉电极系统在采用了以 Simelt NEC 为核心的恒抗神经网络调节控制器后,每炉供电时间缩短 8 min,冶炼电耗减少 60 kWh/t_钢,电极消耗下降 0.25 kg/t_钢^[1]。然而国内绝大多数电弧炉电极调节器仍然使用的是传统的 PID 调节方式^[6],由于国内对智

能控制技术的研究起步较晚,成熟的特别是能够实际运用的研究成果并不多,所以,与工业发达国家相比,有明显的差距,这给国内智能控制在电极调节器领域的研究和运用带来了挑战和机遇^[7,8]。

近年来针对交流电弧炉的传统电极 PID 控制方式存在的问题,即电流耦合与系统参数时变,取得了以下的研究成果和解决方案。

1 PID 电极调节器参数智能整定的基本形式

如何对 PID 参数进行整定,从而达到期望的控制指标是 PID 控制中的关键,同时也是传统 PID 控制器的一个难点^[9]。而三相交流电弧炉电极系统是一个具有非线性、时变性、随机性并且具有三相强耦合特征的复杂系统,其过程参数甚至模型结构均会随时间和工作环境的变化而变化,因此传统的控制方法很难达到良好的效果。近年来具有学习、推理等功能的智能控制技术已开始逐步在电弧炉电极控制领域得到了实际应用^[11]。其中,智能 PID 控制器吸收了智能控制与常规 PID 控制两者的优点而成为交流电弧炉电极调节器家族中一种较理想的控制方式:

(1) 首先能够根据被控对象和过程参数的变化自动整定控制参数达到要求的控制结果;

(2) 其次它思路明确,容易理解且具有常规 PID 控制器结构简单、灵活、抗干扰能力强的优点。

1.1 模糊 PID 控制

模糊控制器 FC (fuzzy controller) 是一种建立在模糊集合论基础上的智能控制器,其因为具备根据人工控制规则来设计控制决策表而不要求提供受控对象的数学模型的优点,使得控制思路比较明确,所以模糊控制与 PID 控制结合的方式较为流行。而模糊 PID 控制器不仅具有 PID 控制结构简单、鲁棒性好的特点,又有模糊控制适应性强等优点,所以甚至被很多学者誉称为非线性控制领域的 PID 控制器。在实际的控制系统中,通常采用误差和误差的变化作为模糊控制器的输入来实现控制的简便性和快速性。但此类模糊控制器虽然可能获得良好的动态特性却无法消除静态误差,通常的方法是通过在模糊控制系统中引入分环节来改善模糊控制的稳态性能。利用模糊控制机制对 PID 参数进行整定是有代表性的研究工作,针对电弧炉这一特殊对象的电极模糊调节器有不少学者进行了研究,但是对于模糊-PID 控制的研究还不够完善^[8,10]。

刘小河等在这方面做了较为深入的研究,图 1

是其在所著文献[11]中对电极调节器模糊 PID 控制设计的一种控制模式。

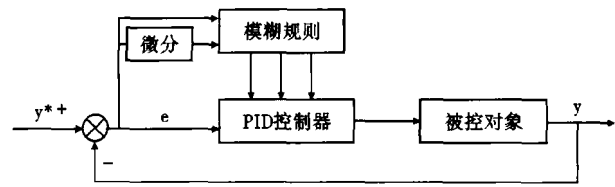


图 1 模糊 PID 控制器

Fig. 1 Fuzzy PID controller

1.2 神经网络 PID 控制

人工神经网络 ANN (artificial neural network) 是基于模仿生物大脑的结构和功能而构成的一种信息处理系统,最近发展十分活跃,它以大规模并行处理为主要特征且涉及生物、电子计算机、数学和物理等学科。基于神经网络的 PID 控制器的结构方式有两类:一类是以单神经元输入权值——对应 PID 控制参数,以偏差值作为神经元输入的单神经元 PID 控制方式,其优点是简单,但是函数逼近能力有限;另一类是按照 BP 学习算法进行离线学习而调整 PID 参数,同时,为了适应被控对象的变化还要继续学习,并不断地调整神经网络中各神经元间权系数,因此具有很强的适应性。

图 2 所示为文献[12]中给出的一种神经网络 PID 控制电极调节器的典型结构,它由经典的 PID 控制器和神经网络控制器组成,对被控对象进行闭环控制由 PID 控制器完成,同时,为了实现电极调节器性能指标的最优化控制,PID 参数由神经网络根据系统状态的变化而进行调节。这种智能神经网络 PID 控制方式在有效地提高系统的精度和自适应能力的同时,还能确保控制系统的稳定性和鲁棒性。

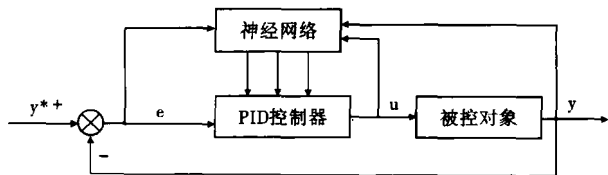


图 2 神经网络 PID 控制器

Fig. 2 Neural network PID controller

针对神经网络在对电弧炉电极控制方面的运用,国内也有不少学者作了研究,近期国内取得了一些理论成果^[10,13]。

1.3 遗传算法 PID 控制

遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 是基于“适者生存”的法则和基因遗传学理论而建立起来的一门新兴学科^[14]。其基本思想就是以选择、复制、交叉、变异为基础,通过种群的演化方式来求解问题,从而获得最优解。图 3 是一种基于自适应 PID 遗传算法的一种典型原理框图。

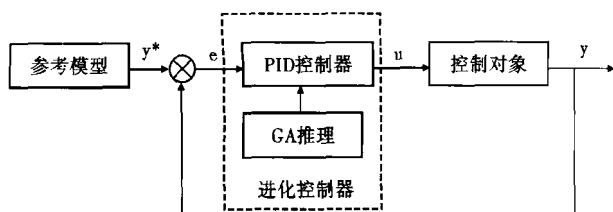


图 3 遗传算法 PID 控制器

Fig. 3 Genetic algorithm PID controller

遗传算法 PID 控制参数寻优的操作流程主要包括:问题的表述、初始化和通过复制、交叉以及变异等算法寻优和最优判定。基于遗传算法的 PID 具有以下特点:(1)将时频指标紧密结合保证鲁棒性和时域性,(2)有效提升收敛速度和明显提高全局优化能力,(3)直观且适应性强且克服了主观盲目性而较为科学地解决了寻优问题。文献[15]在提高寻优精度和快速收敛性能以及解决遗传算法存在的缺陷方面提出了新的思路。文献[11]中作者针对电弧炉电极调节系统存在的非线性与三相耦合特征,采用模糊控制方法来对其进行控制,并用遗传算法对模糊规则进行了优化,其仿真结果表明:与传统的 PID 控制比较,采用遗传算法优化后的模糊控制的控制效果有明显提高。

2 PID 电极调节器智能解耦的实现

在电弧炉电极工作过程中,由于三相电极电流互相耦合,一次电流扰动要经过若干次调节才能使三相电流恢复到平衡。造成的结果是:由于电极频繁动作导致执行机构的使用寿命缩短且调节过程加长,特别是无谓的消耗增大、电流波动大。因此,将智能控制在自适应方面的优势和传统的 PID 控制器结合起来,实现多变量解耦和 PID 控制进行统一设计,对于进一步提高电极调节器的性能具有非常重要的现实意义。

2.1 神经网络解耦方法

神经网络具有较强的学习能力和非线性映射能力。因此在多变量和非线性系统的解耦控制中得到

了广泛应用^[16]。目前,对神经网络解耦在一类非线性系统中的应用进行了大量研究。神经网络解耦控制系统的结构通常采用神经网络解耦补偿器置于被控制对象与控制器之间和神经网络解耦补偿器置于控制器之前以及神经网络解耦补偿器置于反馈回路中三种形式。由三层 BP 前向神经网络组成的解耦补偿器是通常采用的形式。其中,一些专家给出了一种具有解耦功能的神经网络结构 PID 新模型(图 4)。

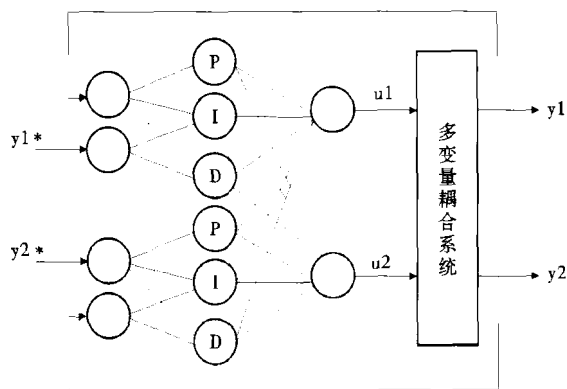


图 4 PID 神经网络解耦结构

Fig. 4 PID neural cell network decoupling structure

PID 神经网络解耦结构的特点是:将 PID 控制器的输入输出特性置于隐含层神经元,融解耦与控制于一体而且网络结构简单规范,易于实现非线性多变量系统的解耦控制;另外,由于网络连接权初值是依 PID 控制规律确定,所以具有参数快速收敛的优点。在实际的 PID 神经网络多变量解耦控制系统中,常通过分段学习算法或多步预测目标函数下的学习算法及遗传算法来提高参数收敛速度和避免陷入局部极值^[17]。文献[18,19]介绍的在 PID 模式下神经网络解耦的研究成果都对电弧炉电极电流解耦有一定的参考价值。

2.2 模糊解耦方法

当对象的输入输出之间存在耦合且没有确定的映射关系,建立相应的模糊规则进行模糊解耦是一种解耦的途径。对于模糊解耦理论,许多学者进行了研究,张化光等人认为模糊解耦理论主要有对被控制对象进行直接解耦和对控制器解耦的直接解耦法以及对多变量模糊控制规则进行模糊子空间的分解间接解耦两大类方法。源于经典解耦理论的这两种方法能使系统实现鲁棒解耦控制,但实践表明也存在自适应能力较差的问题^[20]。随着模糊解耦研究的发展和理论的丰富,能够实际运用的模糊解耦

模型逐渐增多。在文献[21]中作者设计了兼PID参数整定和模糊解耦功能的电极调节器,并做了仿真实验,有一定的参考价值。另外一个值得注意的是融合了自适应、预测、神经网络以及模糊控制等几种不同控制方法的复合解耦方法将可能在MIMO解耦控制系统中取得更好的控制效果。文献[22]介绍了一种具有这种复合特征的电极控制方案。

3 智能PID电极调节器及应用展望

除上述的几种控制和解耦方法以外,专家控制、学习控制、仿人控制、免疫算法等都在发展之中。近年来智能电极调节器的发展特点为:

(1)传统的PID电极调节器控制并没有因为新技术的出现而遭到淘汰,相反,它和智能控制等方法结合并形成新一轮的研究热潮。AS. TROM教授(国际著名控制理论学者)在其论著^[23]中指出:PID控制器将成为各种复杂控制器的基本单元并在未来的控制工程中继续扮演重要的角色。

(2)智能复合控制的研究正逐渐成为热点,为提高和改善传统的电弧炉电极PID控制性能提供了有效的途径,王顺幌等人分析电极升降调节在不同冶炼过程中不同的控制性能要求后,针对电弧炉炼

钢过程特点,提出了电弧炉炼钢过程电极升降智能复合控制方法^[24]。值得注意的一个动向,即是针对神经网络PID控制器的权系数,利用遗传算法GA进行寻优;而另外一种已被证明为有效的复合控制方法是:遗传算法+模糊控制模式,即通过遗传算法寻优得到模糊控制的调整规则和隶属函数^[25]。

(3)国内与国外在电弧炉电极智能PID控制领域有明显差距:在理论研究方面和工程实践方面,美国、德国等工业发达国家都有明显的优势。要尽快转变这一局面,需要科学研究人员和工程技术人员共同努力。

4 结束语

传统PID控制方式有使用简单、适应性强等特点;而智能控制技术具有解决非线性、时变性以及三相电流耦合等方面问题的优势,将两者有机的结合起来形成的智能PID控制可以较好地解决传统交流电弧炉电极调节实际工作中所遇到的参数整定、电流耦合等问题。可以预见,随着相关控制理论进一步完善和计算机软硬件技术的不断发展,智能PID控制将是今后交流电弧炉电极调节器一个重要的发展方向之一。

参考文献

- 1 朱荣,何春来. 电弧炉炼钢装备技术的发展. 中国冶金, 2010, 20(4):8
- 2 李京社,武骏,王雅娜,等. 智能炼钢电弧炉技术. 特殊钢, 1999, 20(6):41
- 3 杜光辉. 智能电极调节系统在电弧炉的运用. 设备管理与维护, 2007, 21(2):41
- 4 Joe Maiolo, Paolo Lerci. iEAF Technology: Dynamic Process Control for the Electric Arc Furnace. Aistech 2009 Rocceedings. St. Louis: Association for Iron and Steel Technology, 2009:565
- 5 黄华,蔡继明. 现代电炉炼钢技术发展趋势. 特钢技术, 2006, 12(4):58
- 6 金伟强,李济顺. 电弧炉电极调节系统的设计. 工业加热, 2008, 37(2):45
- 7 员卫国. 炼钢电弧炉电极升降微机控制的回顾与总结. 工业加热, 2009, 38(1):26
- 8 关新民. 电弧炉电极调节系统 Fuzzy-PD 控制器的仿真研究. 计算机仿真, 2002, 19(5):28
- 9 须田信英. PID 控制理论与实务. 台北: 全华科技图书股份有限公司, 1992
- 10 殷杰,刘小河. 电弧炉电极调节系统的模糊控制. 北京机械工业学院学报, 2004, 5(6):67
- 11 蒯熔,刘小河. 电弧炉电极调节系统的模糊-PID 控制研究. 机床与液压, 2008, 36(7):21
- 12 赵望达. PID 控制器及其智能化方法探讨. 化工自动化及仪表, 1999, 26(6):45
- 13 黄永平. 电弧炉神经网络电极控制系统设计. 机电工程技术, 2009, 38(9):66
- 14 蔡自兴. 智能控制的结构理论. 中国人工智能学会首届计算机视觉与智能控制学术年会论文集, 重庆, 1989
- 15 伍筱菁. 基于改进遗传算法寻优的神经网络PID控制及应用. 传感技术学报, 2006, 19(3):85
- 16 沈永福,吴少军,邓方林. 智能PID控制综述. 工业仪表与自动化装置, 2002, 17(6):11
- 17 傅强,樊丁. 航空发动机PID神经网络解耦控制. 推进技术, 2007, 28(2):208
- 18 付龙海. 基于PID神经网络解耦控制的变风量空调系统. 西南交通大学学报, 2005, 40(1):13
- 19 李晓静,吴庆宪. 一类神经网络整定PID参数的非线性系统解耦方法. 河南科技大学学报(自然科学版), 2006, 26(1):48
- 20 胡慧,刘国荣. 多变量系统模糊自适应解耦控制方法综述. 湖南工程学院学报, 2004, 14(3):21
- 21 陈龙,马伯渊. 智能PID控制在电石炉电极调节系统中的应用. 系统仿真学报, 2007, 19(7):1544
- 22 洪镇南. 基于模糊专家控制的交流电弧炉电流平衡控制器的研制. 电气自动化, 2006, 28(5):45
- 23 许力. 智能控制与智能系统. 北京:机械工业出版社, 2007
- 24 王顺幌. 电弧炉炼钢电极升降智能复合控制. 北京:冶金工业出版社, 1994
- 25 Srinivas W M, Patnaik I. M. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 224(4):656

赵健(1957-),男,副总经理,高级工程师,贵州工业大学毕业,计算机在电弧炉炼钢自动化控制方面的运用。

通讯作者:刘平(1972-),男,高级工程师,贵州工业大学毕业,自动化技术在电弧炉炼钢方面的运用。

收稿日期:2011-04-18