

先进控制策略在火电厂热工控制中的应用

陈立军,周正兴,赵丽丽

(东北电力大学 自动化工程学院,吉林 吉林 132012)

摘 要: 控制理论和计算机技术的发展,为工业控制技术的革新与发展提供了便利。由现代控制理论演化而来的各种先进控制策略,如模糊控制、神经网络控制、预测控制、Smith 控制和非线性控制等先进控制策略在工业过程控制中的应用日益广泛。针对电厂热工过程的特殊性,将先进控制方法应用到过程系统是目前研究的热点。主要介绍了先进控制策略在火电厂热工过程典型控制过程中的应用研究现状,并对其发展方向作了展望。

关 键 词: 火电厂;热工过程;先进控制策略;应用

中图分类号: TP 13

文献标识码: A

火力发电机组的热工自动化是保障设备安全、提高机组经济性、减轻劳动强度及改善劳动条件的重要技术措施。火力发电机组控制的中心问题是:一方面要求机组出力迅速地跟踪电网负荷的变化,另一方面在负荷变化时要保证机组的稳定运行,特别是保持主要参数(主汽压力、主汽温度、汽包水位等)的波动不超出运行规程规定的限值。电厂动力装置是一个高度复杂、慢时变和不确定的多变量控制对象,传统的控制方式主要是常规 PID 调节,并以它固有的简单性、通用性和鲁棒性等性能,始终在电厂过程中占首要地位^[1]。

目前电厂所采用的基于传统 PID 的控制系统,在对象参数有较大变动时难以获得令人满意的控制性能。先进控制在国内外始终是研究热点,但其应用远远落后于理论研究。为了克服控制理论和实际工业应用之间的脱节现象,各国都在优化控制、高级过程控制等方面进行研究,推出了从实际工业过程特点出发,寻求对模型要求不高、在线计算方便、对过程和环境的不确定性有一定适应能力的控制策略和方法^[2]。本文对模糊控制、神经网络控制和预测控制等先进控制策略在热工系统的研究现状进行了介绍。

1 先进控制策略的研究现状

1.1 模糊控制

现代控制理论的基础是需要建立精确数学模型,然而热工系统存在非线性、时变性、多参数间的强烈耦合,难以建立精确的数学模型,这就给基于知识规则的模糊控制的应用提供了广阔的空间。模糊控制的基本思想是,把人类专家对特定的被控对象或过程的控制策略总结成一系列以 IF(条件) THEN(作用)表示的控制规则,通过模糊推理得到控制作用集,作用于控制对象。将模糊控制引入电厂热工过程控制,具有较强的理论与实践意义^[3-5]。

虽然模糊控制对模型难以确定、非线性、大滞后的控制对象有良好的控制品质,但常规模糊控制器

收稿日期:2008-12-20

作者简介:陈立军(1968-),男,东北电力大学自动化工程学院副教授,从事节能检测新技术的教学与科研。

以误差和误差变化率作为输入变量,系统的动态性能较好,存在稳态误差;在线性理论中,积分控制作用能消除控制的稳态误差,但动态响应慢,比例控制作用动态响应快,而在稳态区域内,比例积分作用既能获得较高的稳态精度,又具有较快的动态响应。因此针对火电厂主汽温控制对象大迟延、大惯性的特点,保留串级控制抗内扰的性能,并结合模糊控制动态特性好的特点,文献[6]提出了一种 FUZZY—PI 串级控制设计方法。这种方法结合模糊控制动态性好的特点,在克服了常规模糊控制器无法消除静态误差的缺点上,保留了串级控制系统抑制内扰的优点,从而保证了控制精度和良好的动态品质,既具有模糊控制智能化的特点,又具有常规 PID 控制器结构简单、明确的优点。刘科等提出双模糊控制器 + PID 的混合模糊控制方案^[7],文献[8]通过改进传统模糊控制中的模糊隶属度函数的方法设计了模糊控制器,并分别应用 MATLAB 对系统进行了仿真分析,结果表明,采用混合模糊控制的效果明显优于常规 PID 控制。聂云峰等^[9]将模糊控制和预测控制结合起来用于热电厂锅炉燃烧系统的控制,设计了一种适用于蒸汽压力调节的模糊预测控制器,充分发挥模糊控制不需要精确的数学模型的长处,预测控制用于提前预测来调整控制的力度,维持良好的动态控制性能。并运用风/煤比模糊自寻优控制器来提高热电厂锅炉燃烧的效率。

一般而言,模糊控制对于非线性或不确定对象具有很好控制效果,但由于锅炉现场其他一些随机干扰、噪音、过程时变性等等因素,有时会造成控制规则较粗糙、控制精度低,而影响控制品质,因此在运用模糊控制方法时,如果考虑与其他控制方法结合运用时,也会取得想的控制效果。

1.2 神经网络控制

近些年再度兴起的神经网络及应用研究热潮给控制领域也带来了新的生机,并出现了许多这方面的研究及应用的文章。神经网络具有快速处理,高度非线性,高度容错,联想记忆,自学习与自适应等优点,能够学习与适应严重不确定性系统的动态特性。目前将神经网络运用于自动控制系统的方式主要有两种:一种是直接将神经网络作为控制器,通过学习训练或示教,自动归纳出控制规律来;另一种方式是将神经网络与传统的控制规律结合起来。

王万召等将 BP 神经网络与常规 PID 控制器相结合,利用 BP 网络的任意非线性逼近特性及很强的自学习能力找寻到最佳组合的 PID 控制参数,实现 PID 控制器的参数自整定功能,从而得到基于 BP 神经网络整定的 PID 控制器,并将此控制器用于超临界机组过热汽温的控制^[10]。仿真结果表明基于 BP 神经网络整定的 PID 控制器具有较强的自适应能力和鲁棒性,且结构简单,稳态精度高,弥补了常规 PID 控制在解决控制对象非线性、参数时变系统中的不足。文献[11]设计了基于神经网络的主汽温控制系统。如图 1 所示:

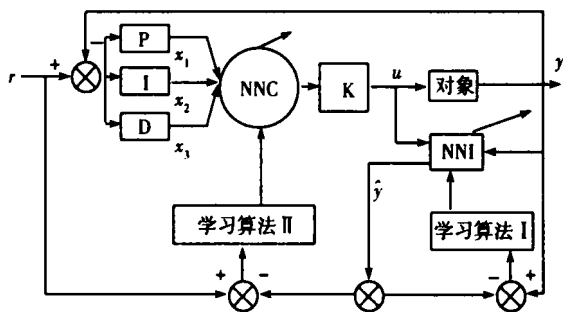


图 1 基于神经网络的主汽温控制系统

系统结构为串级系统。内回路采用常规比例调节器,以消除减温水自发扰动,外回路采用带辨识器的单神经元 PID 控制器,以克服对象的大迟延和模型的不确定性。辨识器为 3 层 BP 网络结构,以广义 δ 规则为学习规则。控制器学习算法为有监督的 Hebb 算法,教师信号由系统定值和辨识器输出构成。并以 300 MW 机组主汽温为被控对象,对系统在多种工况下进行单位阶跃定值扰动的仿真结果表明,所设计的系统在控制品质、鲁棒性方面明显优于主汽温常规 PID 控制系统,且能够较好地满足工程控制要求。基于神经网络的控制器能通过自身的学习过程,了解系统的结构、参数、不确定性和非线性,并相应改变其控制参数,而具有很强的鲁棒性。以某电厂 300MW 单元机组中储式负压运行煤粉锅炉的燃烧系统为研究对象刘海波等设计了神经元控制器并引入锅炉燃烧系统^[12],在 SIMULINK 下建立燃烧系统神经元控制仿真模型,并对其作了单位阶跃响应曲线以及当对象参数变化时的响应曲线,仿真结果表明该方案的控制品质较好;文献[13]设计了一个模糊神经控制器,将模糊逻辑与神经网络结合起来,吸取两者的长处,并且采用改进的粒子群算法对模糊神经网络控制器的参数进行离线优化训练,不但很好的避免系统陷入局部最优甚至发散的情况,而且该控制器在响应速度、抗干扰能力方面都优于常规的 PID 控制。

目前神经网络的主要研究方向包括:多层网络反向传播(BP)算法、Hopfield 网络模型、自适应共振理论(ART)、自组织特征映射理论等。从控制角度看,神经网络为寻求高可靠、鲁棒性、智能型、简便易行的控制理论与方法提供了一条新思路。

1.3 预测控制

预测控制通常称为基于模型的预测控制(MPC),又叫模型预测控制,是目前应用最广泛的先进控制策略之一。模型预测控制产生于20世纪70年代,模型预测控制算法的首次开发是为了满足电厂和石油冶炼的控制需要,后来在模型预测控制技术的应用领域越来越广泛,主要原因就是它具有预测模型、滚动优化和反馈校正3个基本特征。预测控制是一种优化控制算法。为了优化对象的未来行为,采用了滚动式的有限时域优化策略,反复在线的使模型输出不断得到反馈校正,从而得到了最优的控制规律。模型预测控制技术现在有好多种算法,如内模控制(IMC)、动态矩阵控制(DMC)、模型算法控制(MAC)、广义预测控制(GPC)、预测函数控制(PFC)等等。此外,由于模型预测控制对模型的要求低,动态控制效果良好,可实现多目标控制等特点,其已经在过程控制中得到了广泛的应用。

MPC 算法对线性系统的模型预测控制问题已经得到了解决,但是对非线性系统的模型预测控制,由于要建立非线性系统的预测模型,所以解决要困难的多。文献[14]将改进粒子群优化算法(MPSO)融合到神经网络预测控制中,且在充分利用了神经网络的非线性映射能力以及预测控制滚动优化、反馈校正的机理的基础上,融合具有全局搜索能力、实用性强的 PSO 算法提出了基于 MPSO-RBF 混合优化策略的模型预测器,以及基于 MPSO 算法的非线性优化控制器,可满足实时性高的系统。刘吉臻等提出一种基于对象特征参数极大极小值的多模型集建立方法,采用递推贝叶斯概率加权方法获得全局预测模型,为了提高控制精度,引入了前馈补偿来克服扰动所带来的预测误差,该方法具有多模型集建立方便、建模工作量小、控制算法计算量小的特点^[15]。此外,广义预测控制(GPC)是随着自适应控制的研究而发展起来的一种预测控制方法,GPC 基于参数模型,引入了不同的预测水平和控制水平,系统设计灵活方便,具有预测模型、滚动优化和在线反馈校正等特征,呈现优良的控制性能和鲁棒性,被广泛地应用于工业过程控制中,取得了明显的经济效益。但是,GPC 算法中控制增量的计算涉及到矩阵求逆,因而在在线计算量相当大,影响控制系统的实时性。因此,文献[16]提出了 Elman 网络的直接辨识控制器参数的隐式广义预测控制,并将其用于过热汽温控制系统,很好的解决了这个问题。仿真结果表明通过直接辨识控制器参数求解最优控制增量,不但极大地减少了控制系统的在线计算量,而且实时性高,且其控制性能优良。

1.4 Smith 控制

Smith 控制算法是一种具有代表性的纯滞后补偿控制方法,它在一定条件下可以消除纯滞后对调节过程的影响,大大提高控制品质。自适应预估控制方法用于汽温控制系统,既能一定程度地补偿控制对象的纯滞后,又具有适应被控对象增益变化的自适应能力。针对常规 PID 控制器在控制具有大时变、大滞后等特性的实际被控对象效果不理想的问题,综合 smith 预测控制和自适应模糊 PID 控制的优点,文献[17]提出了一种新的控制器——smith 自适应模糊 PID 控制器。经仿真表明,它超调量小、响应速度快、动态性能好,适用于参数变化的大时滞工业过程。邹丽等提出基于串级和增益自适应 Smith 预估控制的复合控制系统,结合了串级、Smith 预估以及增益自适应算法,通过在线的模型辨识提高系统适应工况变化的能力^[18]。利用基于 RBF 整定的 PID 控制提高对被控对象参数变化的自适应能力和 smith 预测控制能够克服被控对象的大延迟特性,王广军提出了一种 RBF(Radial Basis Function)—smith 预测控制算法^[19],文献[20]设计了 FUZZY 自调整 PID 参数的 smith 预测主汽温控制系统。运用 MATLAB 进行了仿真,结果表明,复合控制具有超调量小,变化平缓的优点,满足热工过程控制的要求。复合控制对模型的不确定性和外扰均具有较强的适应能力,其控制的稳定性和鲁棒性优于常规的 PID 控制。

1.5 非线性控制

作为一个高维非线性动态系统,电力系统具有网络结构不断变化及干扰频繁的特点,其实时控制必须适应这一特点才能达到较理想的控制性能。这就要求热工系统实时控制器具备下述能力:(1)控制原理是针对非线性系统的,能真实反映被控对象的非线性特性;(2)控制器应具有足够的“知识”储备,能在不同受控系统结构下做出正确的反应;(3)控制器应具备在线自学习能力,即能跟踪受控系统的特

征变化,并根据控制目标不断调整自身控制行为,优化控制性能。非线性系统稳定性不仅与系统的内部结构有关,而且与系统的初态和扰动的性质有关,这些正是常规控制方式难以处理的。总体评价法是处理非线性系统的一种新方法,它是通过一张总体评价图和总体评价表来示非线性系统的各种内在特点,可用来进行汽轮发电机组的非线性控制系统的研究。尹昭辉等提出了一种层叠小脑模型关节控制器(CMAC)神经网络同传统 PD 控制相结合的控制策略,该策略利用改进 CMAC 学习控制系统的不确定信息,并作为前馈补偿来确保跟踪误差的快速收敛,采用 PD 控制系统实现反馈控制,保证系统的稳定性,且抑制扰动。仿真结果表明该控制策略提高了系统的控制精度和响应速度,并且具备较强的抗干扰能力和鲁棒性^[21]。

为了保证标准锅炉系统实现大范围、全工况优化运行,文献[22]提出一种双环的控制结构,内环采用适应性非线性控制,实现输入-状态反馈线性化,而外环采用线性控制器。如图 2 所示:

该控制策略能自动抑制系统参数不确定性和外部扰动等模型未知因素的影响,不依赖模型的精确数学表达式。仿真表明,该适应性非线性控制策略是解决一类具有非最小相位特性的非线性系统

控制问题的有效途径,具有很好的抗干扰、快速响应以及稳定跟踪能力。另外,模糊(Fuzzy)控制方法对非线性系统也有很好的鲁棒性,这方面的研究较多,如电厂磨煤机采 Fuzzy 控制方法,可克服负荷测量信号的非线性、慢时变性,使其负荷在很大范围内都能得到较好的控制。

被控对象的动态特性或模型一般是随工况参数的变化而变化的,而且当工况大范围变化时,模型(包括时间常数、增益、甚至被控对象阶次等)将有很大变化^[23]。对这类工况参数对模型有较大影响的被控对象,能否采用固定参数的 PID 控制器,不增加现有控制设备的投资,使系统达到一定的鲁棒性能,成为热工自动控制研究课题之一。 H_∞ 控制理论是研究不确定系统鲁棒性能设计的有效工具,为鲁棒性能设计提出了理论基础^[24,25]。针对锅炉过热汽温系统,文献[26]提出了 H_∞ 鲁棒 PID 控制系统设计方法,对具有多模型摄动的过热汽温系统进行了 H_∞ 鲁棒 PI 控制器的设计并讨论了该模型摄动不确定性权函数及性能权函数的选择。该控制器的物理实现,不需要增加现有控制设备的投资。仿真结果表明,设计的控制系统具有较好的鲁棒性能。文献[27]首次提出在过热汽温控制中,采用取实根的相位补偿,即 2 个串联的超前/滞后环节,在工程中方便实现。按机理分析法得出的过热器汽温动态特性计算方法简便,同时二阶超前/滞后 PID 串级控制系统及整定计算公式简便实用,大大地提高了汽温控制系统的控制品质。采用二阶超前/滞后 PID 串级控制系统后,放宽了对过热汽温动态特性的要求,甚至可采用一级喷水减温,这就简化了过热器系统的结构,减少了设备投资。此外常用于火电厂热工系统的控制方法还有:内模控制、混沌理论、模糊自整定 PID 控制、自适应控制和模糊免疫 PID 控制等^[28-33]。

本文就典型热工控制系统过热汽温和燃烧系统介绍了模糊控制、神经网络控制、预测控制以及非线性控制和 smith 控制等先进控制策略的研究现状,以推动先进控制系统的应用研究。在智能控制领域中,专家系统控制、神经网络控制、模糊逻辑控制等方法各自有着不同的优势及适用领域。因而将几种方法与传统的 PID 控制方案相融合,成为设计更高智能控制系统的可取方案。

2 结束语

尽管现代控制理论已有很大发展,但在电厂实际热工过程中各种先进控制方案还未能得到广泛应用,其重要原因在于实施困难。计算机技术的迅速发展和分散控制系统在火电厂的应用,使热控人员将先进控制策略用于热工过程变得易于实现。实际情况表明,先进控制策略在电厂的应用研究潜力很大,特别是优化控制、自适应控制和智能控制等的应用会使电厂自动控制达到一个新的水准。由于不能完全取代原有的控制系统,故需改进和完善现有系统,应用新老控制系统相结合的方法获得较佳的工作效益,如逐渐从局部最优控制过渡到整个发电机组的整体最优控制。可以预见,随着各种先进控制系统的

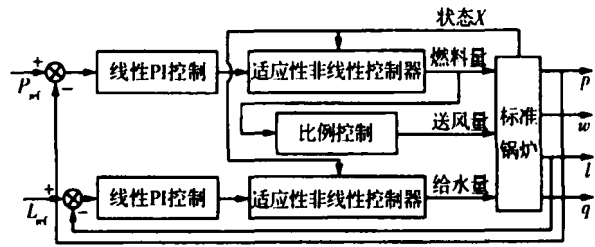


图 2 改进的适应非线性控制框图

开发应用,必将进一步促进我国整个电力工业自动化水平的提高。

参 考 文 献

- [1] 周俊霞,边立秀,王丽君. 火电厂热工控制系统的现状及展望[J]. 电站系统工程. 2003,1(5):53~55.
- [2] 俞金寿. 工业过程先进控制. 北京:中国石化出版社[M],2002.
- [3] 丁柯柯. 热工过程自动调节. 北京:中国电力出版社[M],2007.
- [4] 葛薇,朱张青. 基于仿真技术的模糊自适应 PID 锅炉汽包水位控制[J]. 可编程控制器与工厂自动化. 2008,18(5):71~98.
- [5] 胡一倩,吕剑虹,张铁军. 模糊控制在锅炉热工控制中的应用简介及研究前景[J]. 工业控制计算机. 2002,15(4):25~27.
- [6] 马玲,王炎心,谷毅. FUZZY—PI 串级系统在火电厂汽温控制中的应用[J]. 华北电力技术. 2004,36(3):36~38.
- [7] 刘科,许洪华. 电厂过热汽温混合模糊控制仿真分析. 计算机工程与应用[J]. 2004,212(3):212~214.
- [8] Juang YT, Chang YT, Huang CP. Design of fuzzy PID controllers using modified triangular membership functions[J]. Information Sciences. 2008,178(5):1325~1333.
- [9] 聂云峰,荣丽红,高飞等. 模糊预测控制在热电厂锅炉燃烧系统中的应用[J]. 自动化技术与应用. 2008,27(2):19~21.
- [10] 王万召,王增欣. BP 神经网络 PID 控制器在汽温控制中的应用[J]. 自动化仪表. 2006,27(12):31~33.
- [11] 马平,朱燕飞,牛征. 基于神经网络的主汽温控制系统[J]. 华北电力大学学报. 2001,52(4):52~55.
- [12] 刘海波,周洪,林光锐. 神经元控制在锅炉燃烧系统中的应用研究[J]. 电力科学与工程. 2004,32(3):32~34.
- [13] 白江斌,金慰刚,张建华. 电厂球磨机的模糊神经网络控制[J]. 仪器仪表用户. 2007,43(3):43~45.
- [14] 肖本贤,王晓伟,朱志国等. 基于改进 PSO 算法的过热汽温神经网络预测控制[J]. 控制理论与应用. 2008,25(3):569~573.
- [15] 刘吉臻,岳俊红,谭文. 基于多模型集的主汽温多模型预测控制方法[J]. 热能动力工程. 2008,23(4):395~398.
- [16] 周洪煜,张坚. 基于 Elman 网络的过热汽温隐式广义预测控制[J]. 自动化技术与应用. 2003,22(3):13~16.
- [17] 张明光,王鹏,王兆刚. Smith 自适应模糊 PID 控制算法的研究及仿真[J]. 甘肃科学学报. 2008,20(1):109~111.
- [18] 邹丽,杨献勇. 复合控制在过热汽温控制中应用的仿真研究[J]. 锅炉技术. 2003,34(5):1~4.
- [19] 王广军. 基于 SMITH 预估的神经网络再热汽温控制[J]. 计算机仿真. 2008,25(1):256~293.
- [20] 王斌,李鹏. Fuzzy 自调整 PID 的 smith 预估主汽温控制系统[J]. 电气技术. 2008,(4):45~50.
- [21] 尹昭辉,季进军,叶畅. 基于神经网络与 PD 的非线性控制[J]. 电子机械工程. 2007,23(2):62~64.
- [22] 王军,李东海. 标准锅炉系统的适应性非线性控制[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2007,47(11):2022~2025.
- [23] 范永胜,徐治平,陈来九. 基于动态特性极力分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究[J]. 中国机电工程学报. 1997,17(1):23~28.
- [24] 马亮,王兴成. 基于 H_{∞} 控制理论的 PID 控制器设计与仿真研究[D]. 大连海事大学. 2008. 21~32.
- [25] 恒庆海,鲁靖,恒庆珠等. 参数及延迟摄动过热汽温系统鲁棒控制器的设计[J]. 电工技术学报. 2001,16(1):68~71.
- [26] 恒庆海. 采用 H_{∞} 性能指标的锅炉过热汽温鲁棒控制. 电机与控制学报[J]. 2004,8(4):319~321.
- [27] 李旭. 过热汽温的动态特性与控制[J]. 动力工程. 2007,27(2):199~203.
- [28] 赵英,丁维明. 过热汽温多内模控制[J]. 能源研究与利用. 2007,37(3):37~39.
- [29] 宴春霞. 基于混沌理论的过热汽温最优预测控制策略[J]. 燃烧科学与技术. 2003,9(4):367~371.
- [30] 马常举,马伯渊. 基于 MATLAB 的参数模糊自整定 PID 控制器的设计与仿真研究[J]. 电子测试. 2007,20~22.
- [31] 邢军. 立式旋风锅炉的燃烧自适应控制[J]. 自动化博览. 2006,(2):66~67.
- [32] 张夕林,朱小良. 过热汽温控制中的自适应控制器设计及其组态实现[J]. 热力发电. 2003,(8):23~26.
- [33] 刘久斌,李德桃. 电厂锅炉燃烧系统的模糊免疫 PID 控制[J]. 动力工程. 2005,(25):673~697.

Application of Advanced Control Strategy in Thermal Control of Power Plant

CHEN Li-jun, ZHOU Zheng-xing, ZHAO Li-li

(Automation Engineering College of Northeast Dianli University, Jilin, Jilin, 132012)

Abstract: The paper proposes some advanced control strategies, such as the fuzzy control, neural network control, prediction control, Smith control, and non-linear control. These control strategies are comprehensively applied in industry control process. For the special nature of thermal power plant process, the application of advanced control strategies is currently a hot research. This paper presents the application status of an advanced control strategies in the typical control process of thermal power plant process, and predicts its developing direction.

Key words: Power plant; Thermal control process; Advanced control strategy; Application