

# 蒸汽温度优化控制在火电厂的应用

林雁平<sup>1</sup>, 周宝林<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 计算机科学与工程系, 上海 200030; 2. 艾默生过程控制有限公司, 上海 201206)

**摘要:** 由于电力市场竞争的日益激烈, 电力企业纷纷采用先进的控制策略和手段来加强市场竞争力。因此, 将模糊逻辑、神经网络等智能技术与基于模型的控制技术引入过程控制领域, 形成先进过程优化控制的研究得到广泛关注。本文介绍了一种蒸汽温度优化控制系统在火电厂中的应用, 设计了两种动态的优化过程, 分别基于模糊控制和神经网络, 并通过测试验证了该方案的应用, 可明显有效地提高电厂运行效率, 控制汽温范围, 具有较强的现实意义。

**关键词:** 先进过程控制(APC); 模糊逻辑; 神经网络;

蒸汽温度优化

中图分类号: TP273 文献标识码: B

## 1 前言

随着整个国民经济由计划经济向市场经济过渡, 电力行业同样进行着重大的变革, 电力市场的竞争不断加剧, 厂网分开、竞价上网已成为电力发展的必然趋势。提高电站的运行效率和安全系数、降低运行成本是发电企业的当务之急。

汽温控制系统是单元机组最重要的控制系统之一, 直接影响到全厂的热效率和设备的安全运行。蒸汽温度过低直接导致热效率降低; 蒸汽温度过高则会使锅炉、汽轮机的压力部件工作在异常工况; 汽温波动过大对压力部件造成的热应力不仅会限制负荷的响应速度, 更会缩短设备的寿命。所以, 正常运行时要求的汽温偏差范围较小。

汽温控制对象的特性比较复杂, 大延迟更是其固有的特性(通常为 2 min)。目前, 串级控制在汽温的控制上得到了广泛应用, 但在负荷/煤量、煤质、送引风量和吹灰等各种扰动作用下, 汽温的控制并未得到很好地解决: 两侧汽温不平衡, 汽温波动大, 严重时造成爆管; 减温水消耗量大, 在对给水控制形成扰动的同时, 加速了减温设备的磨损, 对于锅炉部件和汽轮机的寿命都造成一定的影响。

下面就介绍一种将模糊控制、神经网络等先进

控制技术引入汽温控制的方案。

## 2 控制优化方案

电厂现有的控制系统通常由串级 PID 组成: 温度变送器 TT 来的温度信号与设定值  $A$  的偏置  $T$  比较, 差值经 PID 运算, 送至第二级 PID 作为输入, 再经 PID 运算后通过自动(A)/手动(T)切换后作用到执行机构  $f(x)$ 。

为避免改动原有系统而产生巨大影响, 我们把优化过程设计为两个独立的优化控制器作用于原有的控制系统。外回路的控制由 Target 动态模型预测控制器对设定值偏置进行优化调节; 而内回路控制由 TTFuzz 动态前馈系统进行优化补偿。

图 1 显示了先进控制系统如何与串级控制系统接口。

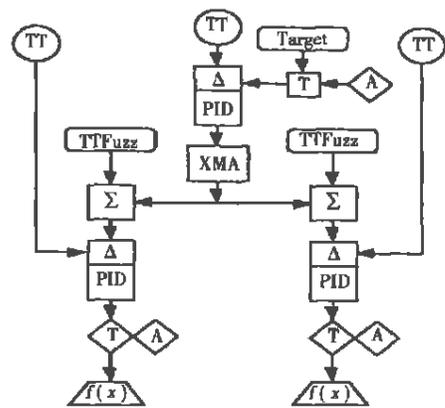


图 1 先进控制系统和串级 PID 系统的接口

## 3 动态模型预测控制器(Target 目标控制器)的设计

由于其超强的非线性映射和自学习能力, 神经

网络近年来被运用于复杂热力过程的建模。常规的神经网络模型的学习是根据有限数据进行的, 数据拟合时内插较为有效, 外推则易受到训练集数据的限制, 应用于实际控制过程时有可能产生稳定性问题。Target 目标控制器使用了由神经网络模型和一个线性最小二乘模型构成的混合模型, 有效避免了不稳定的问题。

要设计 Target 目标控制器, 首先需要的是确定控制过程的模型。根据火电厂的生产工艺, 过热蒸汽温度由两级喷水控制, 再热蒸汽温度则由喷水阀和烟气挡板控制。优化前, 喷水控制的设定值往往是经验值或通过传统的 PID 运算得到, 未考虑扰动变量的干扰效应, 设置 Target 目标控制器的目的是把扰动变量对汽温的干扰效应——对应并进行补偿。由于扰动变量对汽温的干扰很难用传统的数学模型对应, 而利用神经网络可以把原先非常复杂的数学模型转换成比较简单的自变量和因变量的映射关系。我们分别以一级减温水出口温度(左/右)、二级减温水出口温度(左/右)和再热水出口温度这五个过程变量作为模型的过程变量; 同时, 由于汽温受许多扰动变量影响, 我们选用其中 32 个主要扰动变量作为输入进行建模, 如磨煤机负荷、送煤量、煤质、送引风量、减温器前温度和烟气挡板开度等。模型的输出变量有 5 个, 分别是一级减温水设定偏置量(左/右)、二级减温水设定偏置量(左/右)和再热水设定偏置量。

为使模型计算能更好地反映可行域的全面情况, 我们采用了最适用的正交试验设计方法进行设计, 因为自变量数较多, 所以采用不完全组织正交表。便于训练和运行, 神经网络内部采用三层前向神经网络模型。网络训练算法是 BP 算法, 网络的中间层单元数通过试差法优选确定。

电厂运行特定的检测程序采集控制器的输入输出以及扰动信号作为网络训练的数据集。该程序设计为可激励电厂模式识别所需要的各种变量。所有蒸汽温度的控制回路都需进行开环和闭环定点的步进测试; 同时, 也对负载变化和磨煤机的启停等所产生的扰动进行了测试。训练采集了大约 150 个数据点, 经过 3 天的训练, 初步构造出神经网络模型。构造出的神经网络模型, 还用未在训练时用过的其它工艺数据进行校验, 以确定与实际情况是否吻合。

#### 4 动态前馈控制器(TTF<sub>uzz</sub> 模糊控制器)

##### 的设计

模糊控制是将模糊数学理论用于自动控制领域的一种方法, 模糊集合中各种模糊逻辑运算均构成模糊控制方法, 各种模糊控制可归纳为用计算机较易处理的条件判断(IF A and B THEN C)形成模糊控制中的模糊控制规则。

模糊控制器设计时模糊算法是其关键。TTF<sub>uzz</sub> 前馈控制器采用的是基于 Takagi—Sugeno 模糊算法的控制。对于多输入单输出的结构, Takagi—Sugeno 模糊算法的规则可表述如下:

$$\text{IF } X \text{ is } A_i \text{ THEN } y_i = f_i(X)$$

其中:  $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$

$$A_i = [A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{mi}]$$

$$f_i(X) = [P_{0i} + P_{1i}x_1 + \dots + P_{mi}x_m]$$

$i = 1, 2, \dots, n$ 。

在控制规则中,  $X$  是输入;  $A_i$  是模糊量;  $A_{ki}$  是第  $k$  个输入分量  $x_k$  的第  $i$  个模糊量。  $f_i(X)$  是对应于输入  $X$  的输出,  $P_{ki}$  是第  $i$  个规则输出二项式中的输入量  $x_k$  的系数。

对于第  $i$  条规则, 其匹配度用  $D_i$  表示, 并且有:

$$D_i = A_{1i}(x_1) \circ A_{2i}(x_2) \dots \circ A_{mi}(x_m)$$

其中:  $x_1, x_2, \dots, x_m$  —输入精确量;

$A_{1i}(x_1)$  为  $(x_1)$  对  $A_{1i}$  的隶属度, 其余  $A_{1i}(x_2), \dots, A_{mi}(x_m)$  同理。

所有的控制规则产生的总输出为  $y$ :

$$y = \sum D_i f_i(X) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

在本例中, TTF<sub>uzz</sub> 模糊控制器是为补偿已测到影响过程的扰动信号设计的。控制器通过 Takagi—Sugeno 模糊算法对每个输入(包括过程变量和扰动变量)与每个输出(控制变量)之间的关系进行推理, 并以推理出的模型为传递函数。过程变量到控制变量的模型(传递函数)可以通过模糊控制器在测试中得出, 扰动变量到控制变量的模型也一样。因为现有的扰动变量值是可测的, 所以它对控制变量的作用也可以确定, 可以计算出对过程变量的校正以使扰动对控制变量的影响最小。将计算出的前馈校正信号设置以补偿 PID 回路中的扰动。该校正信号的精确性依赖于过程模型和扰动模型的精确性, 模型的精确程度对于系统的性能影响不大, 因为前馈控制是与串级控制相结合的, 前馈用以平衡扰动的变化趋势, 系统鲁棒性则由反馈保证。

TTF<sub>uzz</sub> 系统设计有六个前馈输出和大约 40 个扰动输入, 扰动输入主要为磨煤机电流、磨煤机的负

荷、减温器前温度和蒸汽流量等。

## 5 电厂应用验证

为验证优化方案的效果,我们设计了一个详细验证测试计划。验证测试在美国 George Nead 电站的一台 500 MW 机组上进行。验证分别采用 4 种不同的控制器组态进行 3 类测试,共计 9 个实验。

控制器组态是:

(1) 按专业调试人员优化后的参数设置,不应用先进控制。

(2) 新的 PID 参数设置,应用 TTFuzz 优化控制。

(3) 新的 PID 参数设置,同时应用 TTFuzz 和 Aspen 目标控制器优化控制。

3 类测试是:

(1) 负载从满负荷(大约 500 MW)降到 400 MW,而后升至满负荷。

(2) 负载从 380 MW 降低到 280 MW,而后升到 380 MW。

(3) 改变磨煤机组配置。

吹灰是蒸汽温度控制的一个主要扰动。为了减少吹灰对测试结果的影响,每次试验都进行相同的吹灰操作。

两个优化控制器驻留在 DCS 系统的工作站中。控制器与 DCS 的数据接口软件用于逻辑的数据交换。在操作画面上可以选择先进控制模式或传统控制模式,该程序同时允许操作人员在线选择启动或停止先进控制程序。

优化软件根据机组当前的运行工况,计算出设定点的最佳偏置信号。在系统以开环方式运行时,这些偏置信号将被提供给操作员以指导运行。投入闭环运行时,优化系统则直接参与 DCS 系统控制运行。

DCS 系统的历史记录系统用来记录测试的结果。测试结果见表 1,它显示了 3 种控制方式下过热温度对负荷的响应。

表 1 3 种控制方式下过热温度对负荷的响应表现

	过程变量与设定值偏差平均值	过程变量与设定值偏差最大值	过程变量到设定值偏差标准差
人工调整参数后	0.358 786	6.862 772 6	2.691 803 8
使用 TTFuzz	-0.071 26	5.325 073	2.179 9182
使用 TTFuzz+Target 目标控制器	0.306 466	5.037 455 3	1.681 178 8

测试数据分析了平均误差、最大误差和标准偏差。从表中的数据可以看出,即使在专业人员设置了最佳参数后再运用先进控制系统,系统性能也有显著的提高。偏差平均值减少到原来的 85%,最大值减少到原先的 73%,而最能体现性能的标准差减少到 62%。统计数据显示,主蒸汽温度在优化后,振荡范围被控制在 5 °F 之内,标准差下降了近 40%。先进控制系统在相当程度改善蒸汽温度的响应。

同时,在安装先进控制系统后,机组再没有经历此前频繁发生的锅炉泄漏,机组管理人员认为,改进后的蒸汽温度控制很大程度上减少了锅炉的泄漏。

## 6 结 论

本文中设计的控制方案将先进控制理论实际应用于电厂控制过程中,明显提高控制效率和设备使用寿命,对电厂的生产控制有较大的现实意义。同时,该方案还具有两大特色:一是可动态优化,常见的静态优化软件只能在锅炉负载稳定时才能执行,而文中的优化模块可在任何时候动态优化过程。而且,优化模块可随时并入现有 DCS 系统参与控制,也可随时切换成只提供参考给操作者而不参与控制,具有相当的灵活性;二是它的平台独立性,该方案形成的软件可作为独立的软件应用于市场上任一 DCS 系统。目前,该方案已形成软件包,成为在现有装置和 DCS 系统基础上挖潜增效的有效技术手段。对国内相关领域的研究具有一定的参考价值。

### 参考文献:

[ 1 ] 靳其兵.集散控制系统中一种先进控制软件的开发[ J ].石油化工高等学校学报, 2003(3): 75- 77.

[ 2 ] 敖晨虹.先进控制与优化控制在过程工业应用中若干问题探讨[ J ].石油化工自动化, 2002(5): 28- 30.

[ 3 ] 徐育新.提高 SMITH 预测控制系统鲁棒性的方法研究[ J ].现代电力, 2003(2): 64- 67.

[ 4 ] 赵景波,赵景晖.模糊理论在预测函数控制上的应用[ J ].自动化与仪表, 2003(1): 32- 34.

[ 5 ] DOYLE F J, GATZKE E P, PARKER R S. Process control modules: a software laboratory for control design[ M ]. USA: Prentice Hall, 2000.

[ 6 ] Westinghouse. Ovation algorithms reference manual[ R ]. USA: Westinghouse Process Control Inc, 2003.

[ 7 ] Westinghouse. Ovation simulator user' s guide[ R ]. USA: Westinghouse Process Control Inc, 2002.

[ 8 ] Westinghouse. Using your ovation database[ R ]. USA: Westinghouse Process Control Inc, 2003.

燃气轮机冷热电联产系统技术与经济性分析 = **Technology of Gas Turbine Tri-generation (Cooling Heating and Electric Power) System and Its Economic Analysis** [刊, 汉] / FENG Zhi-bing, JIN Hong-guang (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 425 ~ 429

An analysis is given of the performance of current commercial gas turbines when used for the cogeneration of process heat and electric power and for the tri-generation of cooling and heating energy and electric power. Compared with conventional single generation systems the above-mentioned two systems both have a relatively great edge in terms of thermodynamic performance with energy saving rate in most cases surpassing 20%. Gas turbines with a relatively small output power involve an excessively high manufacturing cost and result in a relatively poor cost-effectiveness when used for the tri-generation of cooling and heating energy and electric power. With an increase in output power and continual improvement of cost-effectiveness the economic performance of a tri-generation system is subject to the influence of numerous factors, among others, those of operation time and electricity price being the most conspicuous. This is followed by the price of fuel with the price of heating and cooling energy having comparatively the least influence. The above-mentioned factors exercise a comparatively great influence when the output power of a gas turbine is relatively small. The influence decreases with an increase in output power. **Key words:** tri-generation system of heating and cooling energy and electric power, cogeneration system of process heat and electricity, gas turbine, economic analysis

蒸汽温度优化控制在火电厂的应用 = **The Application of a Steam Temperature Optimized Control System in Thermal Power Plants** [刊, 汉] / LIN Yan-ping (Computer Science and Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), ZHOU Bao-lin (Emerson Process Control Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 201206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 430 ~ 432

As a result of more and more aggressive competition, power plants are taking steps to strength their ability by applying advanced control strategy and technology. Therefore, the study of advanced process control (APC) composed of model control technology and intelligent control strategy such as Fuzzy Logic, Neural Network got popularly attention. Here we introduce an application of advanced steam temperature control strategy on fuel power station. There are two kinds of control were designed based on Fuzzy Logic and Neural Network. After testing, it indicated that the efficiency of the power plant could be distinctly improved by the application of these advanced control technology. **Key words:** APC, Fuzzy Logic, Neural Network, Advanced Steam Control

SSS 离合器故障仿真研究 = **Simulation Study of the Failure of a Synchro-self-shifting (SSS) Clutch** [刊, 汉] / WANG Ming-wei, LI Shu-ying, WEI Xin-yun, et al (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 433 ~ 437

The failure of a synchro-self-shifting clutch (SSS clutch), a key component in many power units, can lead to the loss of engine power, thereby the failure of the power plant as a whole. Through an analysis of the force-bearing condition of the main elements of a SSS clutch a kinematic equation of an intermediate element was obtained. By using software MATLAB/simulink a simulation of the displacement curves of the intermediate element was performed with respect to its movement under the condition of an absence of failure and the highest possibility of a failure occurring. Furthermore, the characteristics of displacement curves of the intermediate element under various kinds of failure were deduced and summarized. Through a comparative analysis of the intermediate element displacement curves characterized by a failure and those characterized by an absence of failure one can identify and reveal the causes leading to a potential failure. **Key words:** synchro-self-shifting clutch, simulation, failure