

# 干熄焦系统温度模糊串级 PID 控制策略

高 健<sup>1</sup>, 陈先桥<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 自动化学院, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 计算机学院, 武汉 430063)

**摘要:**干熄焦生产过程中产生大量热能用于生产蒸汽发电,既保护了环境、节省了能源,还提高了焦炭质量。然而,蒸汽发电过程中要求蒸汽温度恒定在局部范围内,但负载变化等因素会对蒸汽温度稳定产生严重影响。该文针对以上问题,在干熄焦锅炉蒸汽发电系统中,改进了传统的串级PID控制方法,利用主蒸汽温度与设定值之差实现主蒸汽温度“粗调”。在此基础上,综合考虑反应负载的主蒸汽流量、主蒸汽压力等因素,进一步“细调”减温水流量。为进一步优化系统控制性能,对起主要作用的主蒸汽温度控制回路引入模糊控制策略,实现了更稳定的蒸汽温度控制。该方法已成功应用于某钢厂干熄焦主蒸汽温度调控中,并取得了良好的应用效果。

**关键词:**PID控制器;模糊控制;串级调节;蒸汽温度控制

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**B

## Fuzzy-cascade PID Method for Temperature Control in Coke Dry Quenching

GAO Jian<sup>1</sup>, CHEN Xian-qiao<sup>2</sup>

(1.School of Automatization, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2.School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:**In the production processing of in coke dry quenching, generates exists a lot of hot energy, which can be used to produce steam and steam was used to generate power. For many reasons the power station requires that the temperature must be kept in a narrow scope, but the load various often in practice and this will affect steam temperature seriously. To solve this problem, an improved method was proposed in this paper, by which a primary controlling output was achieved. On the base of primary control, combined with steam flow, steam pressure, etc. a refined control method was provided for coal water flow. For further more optimize results, a fuzzy cascade control was provided to make the steam temperature in a more stable status. The method proposed has been applied in a coke dry quenching system to control the main steam temperature successfully, and the results shows that it was very effectiveness in the steam temperature control.

**Key words:**PID controller; fuzzy-control; cascade control; steam temperature control

干熄焦在热交换过程中产生的大量蒸汽用于发电,但是,蒸汽输出温度要求维持在一恒定的范围内。如果蒸汽温度过高,则可能导致二次过热器、蒸汽管道及汽轮机等设备损坏。反之,如蒸汽温度过低,则可能会引起汽轮机工作效率降低,造成汽

轮机叶片的侵蚀,严重时还会影响汽轮机的安全运行。正常情况下,一般要求蒸汽温度控制在 465℃左右(根据工艺和环境要求有所不同),偏差不应超过±10℃。但由于受负载和生产环境等因素影响,干熄焦蒸汽温度控制系统非常复杂。关于温度控制,

收稿日期:2012-08-17;修订日期:2012-10-22

作者简介:高健(1964—),女,实验师,主要从事自动控制应用研究。

已有一些较为成熟的控制方法<sup>[1-2]</sup>,如 Smith 预测控制算法、Dahlin 算法等,但在应用到本领域时都存在很大的局限性,效果并不理想。本文结合工程实际问题,在总结现场工程师人工调节经验的前提下,给出一种参数自调节的模糊串级 PID 控制方法,它比常规的控制方法具有更好的稳定性。仿真和实际应用都表明系统具有很好的性能,并已成功应用于实际的干熄焦蒸汽发电系统中。

## 1 干熄焦系统蒸汽温度控制系统

### 1) 系统工艺简介

干熄焦系统蒸汽温度控制系统工艺如图 1 所示,经锅炉加热后产生的蒸汽 TE-36102 在进口与减温水 FT-36103 合并后进入二次过热器<sup>[3]</sup>。二次过热器前的温度为 TE-36103,二次过热器输出的主蒸汽温度为 TE-36101A。主蒸汽流量和压力分别为 FT-36101、PT-36101。

减温器喷水流量为 FT-36103,调整减温水调节阀开度可以改变二次过热器进口处蒸汽温度 TE-36103,相应地间接改变二次过热器出口处的蒸汽温度 TE-36101A。由于过热器管路较长,当减温水流量发生扰动时,出口处蒸汽温度的反应相对较慢,具有较长的滞后和惯性。图 1 中 FVI-36103 为减温水调节阀开度指示。



图 1 锅炉蒸汽温度控制系统工艺结构示意图

Fig.1 Sketch map for steam temperature control system

### 2) 蒸汽温度串级控制规则

干熄焦蒸汽温度控制系统原理如图 2 所示。

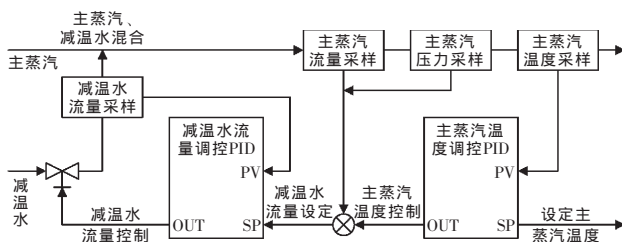


图 2 锅炉蒸汽温度控制系统原理图

Fig.2 Principle for steam temperature control system

在温度控制系统中,有三个传感器分别监测主蒸汽温度、流量、压力。根据主蒸汽温度的监测值和设定值之差,按照事先设计的控制规则,通过减温水控制阀自动调节减温水的补水量,从而实现主蒸汽的平衡,使输出蒸汽温度达到恒定。然而,根据模型分析和经验可知系统存在大时间延时问题,常规的 PID 控制模型很难达到满意控制结果。为取得理想的控制效果,采用两 PID 串级模式实现温度调控。第一级 PID1 利用主蒸汽设定温度  $T_S$  和实际检测温度  $T_I$  之差  $e_T$ ,计算出理论上的温度控制量  $O_T$ ;第二级根据温度控制量  $O_T$ ,组合负载压力  $P_{ST}$ 、主蒸汽流量  $F_{ST}$ 、主蒸汽温度  $T_{ST}$ 、减温水温度  $T_{CT}$  等量计算处理后作为第二级 PID 控制器减温水要求流量的设定量  $F_S$ 。以实际检测的减温水流量  $F_I$  作为减温水输出反馈,由 PID2 调控得到要求的减温水调节阀控制开度  $O_{VO}$ 。理论上讲,串级 PID 调控方法可以更好地逼近真实的锅炉蒸汽控制模型,但串级调控模型也增加了实际应用中参数选择的难度。一方面,第二级 PID 中要求的理想减温水流量  $F_S$  与各因子之间  $O_T, P_{ST}, F_{ST}, T_{ST}, T_{CT}$  的函数关系  $F_S = f(O_T, P_{ST}, F_{ST}, T_{ST}, T_{CT})$  难以确定;另一方面两个 PID 控制模型的比例、积分、微分因子的最优系数也很难得到。干熄焦锅炉蒸汽温度 PID 控制模型可归纳为

$$O_T(t) = K_{p1}e_T + K_{i1} \int_0^t e_T dt + K_{d1} \frac{de_T}{dt} \quad (1)$$

$$O_{VO}(t) = K_{p2}e_F + K_{i2} \int_0^t e_F dt + K_{d2} \frac{de_F}{dt} \quad (2)$$

其中:  $e_T = T_S - T_I$ ;  $e_F = F_S - F_I$ 。

$$F_S = f(O_T, P_{ST}, F_{ST}, T_{ST}, T_{CT}) \quad (3)$$

式(1)~(3)描述了图 2 所示的控制系统模型,系统的优化目标是当负载或外部环境等出现扰动时主蒸汽输出温度基本稳定。然而,式(3)中准确函数关系模型一般难以确定,同时式(1)、(2)中两个 PID 控制器的比例、积分、微分系数也存在优化问题。本文作者提出了以线性函数逼近  $f(O_T, P_{ST}, F_{ST}, T_{ST}, T_{CT})$ ,并通过分析现场技术人员手工调节减温水流量的经验值,优化计算该线性函数中的相关系数,取得了较好的应用效果。

$$F_S = C_5 O_T + C_4 P_{ST} + C_3 F_{ST} + C_2 T_{ST} + C_1 T_{CT} + C_0 \quad (4)$$

设采样的时间点为:  $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,相应地,主蒸汽温度、主蒸汽流量、减温水流量等分别记为:  $\{Q_{Ti}, P_{STi}, F_{STi}, T_{STi}, T_{CTi}\}, i=1, 2, \dots, n$ ,由式(4)可得:

$$\begin{cases} F_{S1}=C_5O_{T1}+C_4P_{ST1}+C_3F_{ST1}+C_2T_{ST1}+C_1T_{CT1}+C_0 \\ \dots\dots\dots \\ F_{Sn}=C_5O_{Tn}+C_4P_{STn}+C_3F_{STn}+C_2T_{STn}+C_1T_{CTn}+C_0 \end{cases} \quad (5)$$

方程组(5)中  $C_0, C_1, \dots, C_5$  为待定的系数, 一般来说方程组的数量  $n$  远大于未知数个数, 实际应用中求出最小二乘解。

实际应用表明, 该算法基本有效可行。然而, 在该文中两个 PID 控制模型中的比例、积分、微分系数是采用经验值给定的, 在实际应用中存在操作困难, 需要进一步优化完善。

## 2 干熄焦系统蒸汽温度模糊串级控制方法

从图 2 中容易发现, 两个 PID 控制器工作在串联状态。以 PID1 为主导, 两个串级控制器相互配合, 实现主蒸汽温度稳定目标, 串级控制效果明显优于单级控制系统。

方程组(5)中数据采样的主要来源是优秀的现场操作技术人员手工调节值, 待系统中参数优化确定后转入自动控制模式<sup>[3-4]</sup>。但在方程组(5)中使用了 PID1 的输出量  $O_T$ , 该数据项依赖于 PID1 的比例、积分、微分系数, 转入自动模式后 PID2 的比例、积分、微分系数也会影响系统的稳定效果, 系统存在进一步的优化问题。因此, 在通过人工经验值优化中间输出量基础上, 引进模糊 PID 参数自调节控制策略, 使系统在主蒸汽输出温度控制上具有更好的灵敏性、稳定性、精确性。

串级控制系统中, PID1 实现“粗调”, PID2 实现“微调”。因此, 基于模糊策略的干熄焦主蒸汽温度串级 PID 控制, 在原有的串级控制系统中 PID1 控制器选择使用模糊控制器, 动态优化调整 PID1 控制器中的比例、积分、微分系数  $k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}$ , 如图 3 所示。

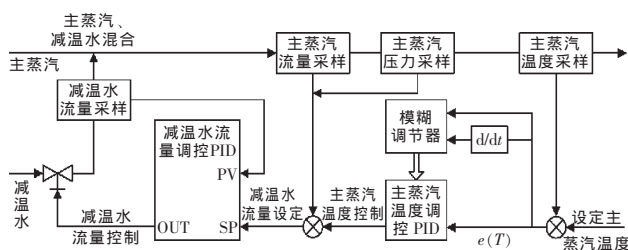


图3 锅炉蒸汽温度模糊控制原理图

Fig.3 Principle of fuzzy control for steam temperature

为动态优化 PID1 的控制参数  $k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}$ , 采用下面模糊逻辑控制规则。

### 1) 模糊隶属度函数的确定

假设: PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB 分别表示正大、正中、正小、零、负小、负中、负大。模糊控制器的输入和输出项分别为:  $E, EC$  和  $k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}$ , 此处  $E, EC$  表示  $e_T, \frac{de_T}{dt}$  的离散项, 其模糊子集为

$E, EC: \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$

$k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}: \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$  (6)

输入和输出隶属函数分别选择如图 4 所示的三角函数。

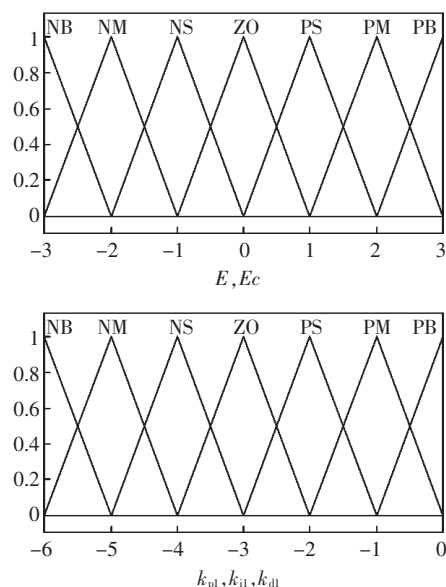


图4  $E, EC$  和  $k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}$  模糊隶属度函数

Fig.4 Fuzzy subjection function for  $E, EC$  and  $k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}$

### 2) 模糊推理规则的确定

模糊推理规则是模糊控制系统的核心, 确定模糊控制规则通常有如下几种方法。

a) 基于专家知识库存方法, 通过总结相关领域专家与技术人员的经验, 以适当的语言描述形成模糊控制规则;

b) 基于过程的模糊模型方法, 传统的模型多为定量的微分方法等数学模型描述。而基于过程的模糊模型, 控制器和控制对象均是用模糊的方法描述, 建立模糊控制规则;

c) 基于学习的模糊规则方法, 根据已有知识建立模糊控制规则, 并具有自学习完善功能。

针对本文中控制系统, 结合现场工艺要求和技术人员操作经验, 主要要求有:

①当  $E$  较大时, 取  $k_{p1}$  较大、 $k_{d1}$  较小、 $k_{i1}=0$ , 使系

统具有较好的跟踪性能及避免较大的超调现象;

②当  $E$  中等时, 取  $k_{pi}$  较小、 $k_{di}$  较大、 $k_{ii}$  适中, 使系统具有较小的超调;

③当  $E$  较小时, 取  $k_{pi}$  和  $k_{ii}$  较大、 $k_{di}$  适中, 使系统具有较好的稳态性, 同时避免出现振荡。

按照所选的模糊集、调整函数, 归纳可得表 1 所示的调整规则。

表 1 人工调控锅炉主蒸汽温度模糊控制规则

Tab.1 Manual fuzzy control rule for steam temperature control system

$E$	$EC$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$						
NB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB
NM	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/NS/NM	ZO/NM/ZO	ZO/NM/ZO
NS	ZO/PM/ZO	ZO/PM/NS	ZO/PS/NM	NS/PS/NM	NM/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
ZO	NS/PM/NS	NS/PM/NS	NS/PS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NS/PM/NS
PS	NM/PM/ZO	NM/PM/NS	NM/PS/NM	NS/PS/NM	ZO/PS/NS	ZO/PM/NS	ZO/PM/ZO
PM	ZO/NM/ZO	ZO/NM/ZO	ZO/NS/NM	PS/NS/NM	PM/NS/PS	PM/NM/ZO	PM/NM/ZO
PB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB

### 3) 控制策略

按照图 4 所示的隶属度函数, 每一个输入的  $E_0$ 、 $EC_0$  分别隶属于两个模糊子集  $E_0^i$ 、 $E_0^j$ 、 $EC_0^k$ 、 $EC_0^l$ , 各模糊子集的中心分别为  $E_m^i$ 、 $E_m^j$ 、 $EC_m^k$ 、 $EC_m^l$ 。设它们所对应的模糊隶属度分别为:  $\lambda_i$ 、 $\lambda_j$ 、 $\mu_k$ 、 $\mu_l$ , 查表 1 可得比例、积分、微分系数增量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的推理值。不失一般性, 此处仅讨论  $\Delta K_p$ , 设其推理值对应模糊子集为  $K_p^{ik}$ 、 $K_p^{il}$ 、 $K_p^{jk}$ 、 $K_p^{jl}$ , 其中心分别为  $K_{pm}^{ik}$ 、 $K_{pm}^{il}$ 、 $K_{pm}^{jk}$ 、 $K_{pm}^{jl}$ , 对应的模糊隶属度分别为  $\lambda_i\mu_k$ 、 $\lambda_i\mu_l$ 、 $\lambda_j\mu_k$ 、 $\lambda_j\mu_l$ 。在以上假设条件下, 按去模糊化原则, 综合输出  $\Delta K_p$  的调节值为

$$\Delta K_p = \lambda_i\mu_k K_{pm}^{ik} + \lambda_i\mu_l K_{pm}^{il} + \lambda_j\mu_k K_{pm}^{jk} + \lambda_j\mu_l K_{pm}^{jl} \quad (7)$$

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p \quad (8)$$

在某钢厂干熄焦主蒸汽温度控制系统中, 采用本文提出的模糊串级 PID 控制策略, 结合现场技术人员及相关已有专家知识, 建立了减温水流量控制系统, 实现了输出主蒸汽温度良好控制效果。

### 4) 应用实例

在某钢厂干熄焦主蒸汽温度控制系统中, 采用本文提出的模糊串级 PID 控制策略, 结合现场技术人员及相关已有专家知识, 建立了减温水流量控制系统, 实现了输出主蒸汽温度良好控制效果。

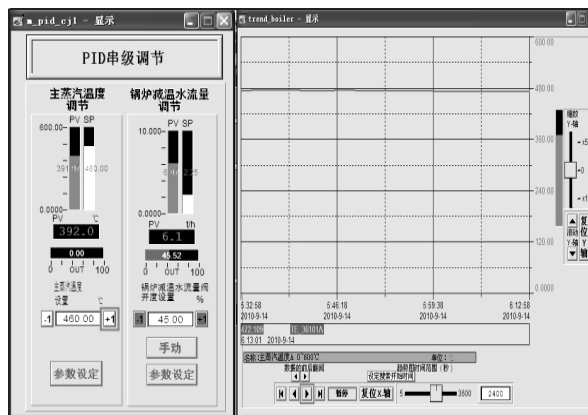


图 5 某钢厂干熄焦主蒸汽温度模糊控制操作及输出界面

Fig.5 Example of temperature control with fuzzy PID method

## 3 结语

通过理论分析和实际运行效果的对比分析, 可以看出: 采用本文提出的模糊串级 PID 控制方法, 对负载和环境变化有较好的适应性, 蒸汽输出温度和减温水流量都具有较好的稳定性, 避免了较大的超调现象出现。应用表明, 基于模糊的锅炉主蒸汽温度串级控制方法能很好地兼顾系统的负载变化和精度控制要求, 系统鲁棒性强, 具有良好的快速跟踪性能。

### 参考文献:

- [1] RICHLET J. Predictive functional control: application to fast and accurate robots[C]//Proc. of 10th IFAC World Congress. Munich, PRG, 1997: 251-258.
- [2] VANDOREN V J. Advanced control software goes beyond PID[J]. Control Engineering, 1998, 45(1): 73-78.
- [3] 刘文勇, 袁康. 焦化干熄炉主蒸汽温度串级调节[J]. 仪表技术, 2008, 27(8): 43-45.
- [4] 马聪, 吴建国, 朱海荣. 模糊 PID 控制在烟酸反应釜温度控制中的应用[J]. 南通大学学报, 2006, 5(2): 227-229.

## 本刊声明

为适应我国信息化建设需要, 扩大作者学术交流渠道, 《自动化与仪表》杂志已经加入: 《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》等数字、网络媒体。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入以上数据库, 请在来稿时声明, 本刊将作适当处理。本刊对所登载的文章享有版权, 未经同意不得转载, 否则将依法追究。