

文章编号: 1001-0920(2006)09-1077-04

一种注汽锅炉蒸汽干度控制方法

段黎明¹, 周艳君¹, 石红武²

(1. 重庆大学 ICT 研究中心, 重庆 400044; 2. 重庆新仪自控系统工程有限公司, 重庆 400700)

摘要: 为了实现注汽锅炉蒸汽干度的高质量控制, 提出一种蒸汽干度控制方法。该方法采用基于 T-S 模糊模型的模糊预测控制获得主回路控制量, 来自水流量的前馈控制量与主回路控制量相乘, 形成蒸汽干度的前馈-反馈控制, 以实现水火量的自动跟踪, 同时在控制结构中引入非线性跟踪-微分器以增强系统的抗干扰能力。应用结果表明该方法具有良好的控制效果。

关键词: 注汽锅炉; 干度; 模糊预测控制; 前馈-反馈控制

中图分类号: TP273.4; TP29

文献标识码: A

A Control Method for Dryness Fraction of Steam-injection Boiler

DUAN Liming¹, ZHOU Yan-jun¹, SHI Hongwu²

(1. ICT Research Center, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Xinyi Autocontrol Systems Engineering Corporation, Chongqing 400700, China. Correspondent: DUAN Liming, Email: duanliming163@163.com)

Abstract: To implement the high-quality control for dryness fraction of steam-injection boiler, a control method of dryness fraction is presented. A fuzzy predictive controller based on T-S fuzzy model is used to obtain the control variable of main loop. The output of feedforward controller multiplied by the control variable of main loop, to automatically track the feedwater quantity. For enhancing the anti-jamming capability of the control system, a nonlinear tracking-differentiator is employed. The application result shows that this method has an excellent control effect.

Key words: Steam-injection boiler; Dryness fraction; Fuzzy predictive control; Feedforward-feedback control

1 引言

注汽锅炉是油田稠油热采的关键设备。它将增压后的软化水加热蒸发成饱和湿蒸汽, 然后将其强制送入地下油层, 为稠油热采提供热源。注汽锅炉蒸汽干度是指湿饱和蒸汽中所含干饱和蒸汽的质量百分比。实际应用表明, 注汽锅炉的蒸汽干度稳定在 80% 最为理想, 干度值太高将使大量的钙镁离子沉积在炉管中, 导致炉管过热和损坏; 干度值过低将使油层积水过多。因此, 干度值是影响重油热采效果的重要指标, 也是注汽锅炉安全运行的重要参数^[1,2]。

由于注汽锅炉是一种单管直流锅炉, 炉管总长达 700 多米, 介质流动距离较长, 使得干度对象具有

较大的时滞, 且影响蒸汽干度的因素众多, 很难找到一种行之有效的蒸汽干度控制方法。目前注汽锅炉干度控制系统大都采用串级 PD 控制、模糊 PD 控制器、多变量预测控制等几种控制方案, 这些方案均以燃料量为操纵变量, 蒸汽干度为被控变量, 构成控制回路^[3,4]。但由于仅根据当前被控量偏差信息来确定控制量, 这些控制方案不能及时克服扰动对蒸汽干度的影响, 导致干度在很大范围内波动, 控制效果较差。

模糊预测控制是模糊控制与预测控制相结合的产物, 对蒸汽干度这类难以建立精确数学模型的大时滞、复杂系统具有较好的控制效果。

收稿日期: 2005-06-21; 修回日期: 2005-10-21

基金项目: 重庆市科技计划基金项目(7703)。

作者简介: 段黎明(1964—), 男, 四川营山人, 副教授, 博士, 从事控制理论及应用、制造自动化等研究; 周艳君(1979—), 男, 湖北利川人, 硕士生, 从事控制理论及应用的研究。

根据蒸汽干度对象特性和各影响因素之间的关系, 本文设计了一个蒸汽干度控制方法 它以蒸汽干度为被控变量, 天然气调节阀阀位为操纵变量构成控制回路, 在回路中采用基于 T-S 模糊模型的模糊预测控制器获得控制量 来自水流量的前馈控制量与主回路控制量相乘, 形成蒸汽干度的前馈-反馈控制, 以实现水火量的自动跟踪, 同时在控制结构中引入非线性跟踪-微分器以增强系统的抗干扰能力

2 干度影响因素分析

根据能量守恒, 注汽锅炉存在如下能量关系^[1]:

$$\eta B Q_D = D (h + \gamma \xi - h_m), \quad (1)$$

即

$$\gamma = \frac{B}{D} \frac{\eta Q_D}{\xi} - \frac{h - h_m}{\xi} \quad (2)$$

其中: γ 为干度(%), B 为锅炉每小时的天然气消耗量(m^3/h), D 为给水流量(kg/h), η 为热效率(%), Q_D 为天然气的低位发热量(kJ/m^3), ξ 为汽化潜热(kJ/kg), h 为饱和水焓(kJ/kg), h_m 为给水焓(kJ/kg).

由式(2)可以看出给水流量、天然气流量、蒸汽压力、锅炉热效率、饱和水焓、汽化潜热、给水焓和天然气低位发热量的扰动都将引起蒸汽干度的波动 此外, 对注汽锅炉运行情况进行分析可知:

- 1) 锅炉热效率、饱和水焓、汽化潜热、给水焓和天然气低位发热量都不会发生剧烈变化;
- 2) 在注汽锅炉正常运行过程中, 蒸汽压力受到地层压力、注汽井数量和蒸汽流量变化等因素的影响, 但不会发生急剧变化, 可以设计一个独立的控制器控制蒸汽压力稳定;
- 3) 给水流量、天然气流量和蒸汽压力扰动是蒸汽干度的最主要影响因素, 且在它们扰动的情况下, 干度对象都表现出显著的时滞特性;
- 4) 如果在蒸汽压力稳定的情况下, 要保持蒸汽干度不变就必须让天然气流量与给水流量维持某一比例关系

基于以上分析可以发现, 蒸汽干度主要受天然气流量与给水流量的比值和蒸汽压力的影响

3 控制器结构及算法

本文提出的蒸汽干度控制方法由非线性跟踪-

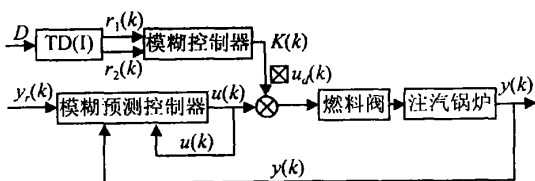


图 1 蒸汽干度控制器结构

微分器(TD)、前馈模糊控制器、模糊预测控制器等几部分组成 控制器结构如图 1 所示, 其中: D 为给水流量; $y_r(k)$ 为蒸汽干度的参考值, 即为设定值 SP 的柔化函数值; $y(k)$ 为蒸汽干度检测值; $r_1(k)$, $r_2(k)$ 为给水流量及其变化率; $K(k)$ 为前馈控制量; $u(k)$ 为模糊预测控制量

3.1 非线性跟踪-微分器

TD 改变了通常采用的差分求微分方法, 由它得到的微分信号是输入信号广义导数的光滑逼近 在噪声扰动的情况下, 跟踪-微分器能高精度地给出可靠的微分信号, 因而得到广泛的应用^[5].

本文采用一个二阶跟踪-微分器^[5]. 对于给定的输入信号 $r(k)$, TD 能够提供输出信号 $r_1(k)$, $r_2(k)$, 并使 $r_1(k) \rightarrow r(k)$, $r_2(k) \rightarrow r'(k)$.

3.2 前馈模糊控制器

蒸汽注入量是时间的函数, 在注汽过程中是变化的 当注入量增大时, 给水流量增大, 流量的变化率为正; 当注入量减小时, 给水流量减小, 流量的变化率为负 因此用给水流量及其变化率作为前馈模糊控制器输入, 调节控制器输出 $K(k)$, 使天然气流量跟随给水流量的变化而变化, 粗略调节天然气流量, 而后通过反馈控制细调, 以达到干度恒定控制的目的

R_1 和 R_2 为 $r_1(k)$ 和 $r_2(k)$ 的模糊集合. $r_1(k)$ 的基本论域为 $[0, 1, 1]$, 选定 R_1 的论域 $X = [1, 2, \dots, 10]$; $r_2(k)$ 的基本论域为 $[-0.5, 0, 0.5]$, 选定 R_2 的论域 $Y = [-5, -4, \dots, 5]$; $K(k)$ 的量化因子可以根据不同的注汽锅炉燃烧特性在线调整, 其基本论域是可变的, 模糊集合的论域 $Z = [1, 2, \dots, 10]$ 根据实际操作经验, 通过对 R_1 和 R_2 的分析, 得出如表 1 所示的控制规则

表 1 前馈模糊控制规则

| R_2 | R_1 | | | | | | | | | |
|-------|-------|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| -5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| -4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| -3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| -2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| -1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 |
| 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 |
| 5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 10 | 10 |

3.3 模糊预测控制器

系统的数学模型可以由如下所示的受控自回归积分滑模平均模型(CARMA)表示^[6]:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + \xi(k)/\Delta \quad (3)$$

其中: $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 是后移算子 z^{-1} 的多项式, $\xi(k)$ 是白噪声, $\Delta = 1 - z^{-1}$ 为一阶滞后因子, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示模糊预测器输出和蒸汽干度检测值

广义预测控制的性能指标为

$$J = \sum_{j=1}^{N_y} (y_r(k+j) - y(k+j))^2 + \alpha \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u^2(k+j) \quad (4)$$

其中 α 为加权系数 假设 $N_y = N_u = N$, 则使性能指标取最小值的控制律为

$$u = [\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+N-1)]^T = (H^T H - \alpha I)^{-1} H^T (y_r - f) \quad (5)$$

其中

$$f = [f(k), \dots, f(k+N-1)]^T = \begin{bmatrix} (G_1(q^{-1}) - g_{1,0})\Delta u(k) + F_{1y}(k) \\ q(G_2(q^{-1}) - q^{-1}g_{2,0} - g_{2,0})\Delta u(k) + F_{2y}(k) \\ \vdots \\ q^{N-1}(G_2(q^{-1}) - q^{-(N-1)}g_{N,N-1} - \dots - g_{N,0})\Delta u(k) + F_{Ny}(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & g_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

k 时刻的控制增量为 $\Delta u(k) = h^T (y_r - f)$, h 为 $(H^T H - \alpha I)^{-1} H^T$ 的第一行

将每条模糊规则视作线性时不变模型, 针对每个模型求取广义预测控制律, 当前时刻的控制器输出由所有子模型所对应控制量的凸组合决定 对每条模糊规则应用广义预测控制算法, 可以得出一步模糊广义预测控制规则^[7-9]

$$R_i: \text{if } Y \text{ is } A_i, \text{ then } \Delta \mu_i(k) = h_i^T (y_r - f_i) \quad (8)$$

规则中 Y 是输入输出变量, 为 $\{y(k), y(k-1), \dots, y(k-N_y+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-N_u+1)\}$, $A_i = \{A_{1,i}, A_{2,i}, \dots, A_{N_y,i}, B_{1,i}, B_{2,i}, \dots, B_{N_u,i}\}$ 是第 i 条模糊规则的隶属度函数集, 矢量 h_i 和 f_i 是基于第 i 条模糊规则的广义预测控制参数, $\Delta \mu_i(k)$ 是第 i 条模糊规则的控制量增量 根据每条规则的满意度 λ 加权求和, 可得出 k 时刻的控制量

$$\mu(k) = \mu(k-1) + \sum_{i=1}^{N_c} \lambda \Delta \mu_i(k) \quad (9)$$

系统的最终控制量 $u_d(k)$ 由前馈控制量 $K(k)$ 与模糊预测控制量 $u(k)$ 的乘积确定

3.4 控制器参数确定

(1) 模糊预测控制器中的 A_i 和模糊规则数采用模糊C聚类法确定^[9]

(2) 非线性跟踪微分器的采样步长与控制器周期相同为30 s, 决定非线性跟踪微分器的过渡过程快慢的速度因子越大, 过渡过程的时间越短, 本文经多次仿真后确定速度因子为0.75

(3) 加权系数 α 用于限制控制增量的急剧变化, 以减少对系统过大的冲击 增大控制加权系数, 可以实现稳定控制, 但动态响应将会变慢, 本文取0.9

(4) 假设控制时域和预测时域长度相等, 预测时域长度过小, 会使系统失稳, 太大则可能导致系统失去快速性; 控制时域长度越大, 控制的机动性越强, 可提高控制的灵敏度, 但系统的稳定性和鲁棒性随之下降 这里, 通过仿真试验, 预测时域长度和控制时域长度定为3

4 应用

4.1 控制系统构成

采用工控机作为中央控制器, 研祥PCL 818数据采集卡实现数据采集和控制量输出 控制系统组成如图2所示

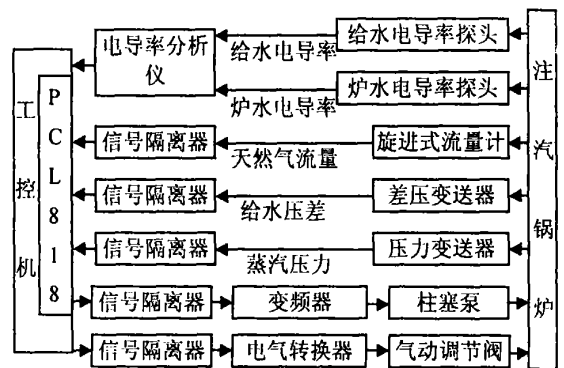


图 2 干度控制系统

1) 通过检测给水电导率 C_{in} 和炉水电导率 C_{out} 间接实现干度的 Y 测量

2) 用差压流量计检测给水流量, 旋进流量计检测天然气流量 用带阀门定位器的调节阀调节天然气流量

3) 注汽锅炉的给水泵是柱塞泵, 其排量与电机的转速成正比, 所以本文通过改变变频器频率调节给水流量

注汽锅炉干度控制算法在VC++ 6.0环境下

编写生成,并运行于Windows2000操作环境下.控制算法流程如图3所示

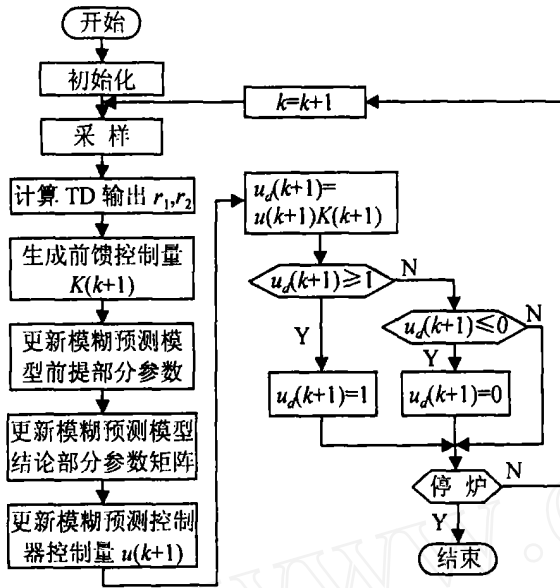


图3 控制算法流程

4.2 应用效果

该控制系统已经在克拉玛依油田某注汽锅炉上投产运行.在系统投入控制之前,采用500组该锅炉以前在手动模式下的运行数据(给水流量、天然气流量、蒸汽压力、干度)对预测模型进行辨识.利用模糊C聚类法确定模糊系统的规则数以及高斯型隶属度的中心和宽度^[9].

图4是采用本文提出的控制方法后的8小时历史曲线(蒸汽干度、给水流量、天然气流量以百分比显示),天然气流量能自动跟踪给水流量的变化,有效地克服了给水流量扰动对干度的影响,干度波动明显减小.从控制曲线可以看出,本文提出的控制方法有较好的控制效果,蒸汽质量得到较大提高

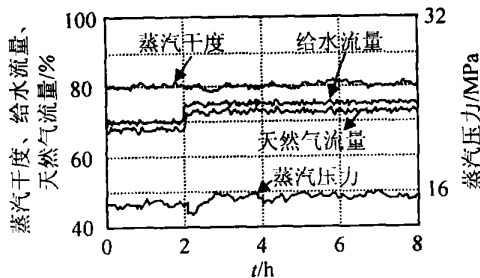


图4 干度模糊前馈-反馈控制曲线

5 结语

本文根据注汽锅炉干度对象特性,提出了一个基于模糊预测控制的蒸汽干度控制方法.能够对

具有大时滞特性的蒸汽干度控制对象进行有效的控制,同时对干扰噪声具有很强的抑制能力.应用结果表明该方法具有良好的控制性能

参考文献 (References)

[1] 武占. 油田注汽锅炉[M]. 新疆: 新疆大学出版社, 1997: 5-10
(Wu Z. Steam-injection Boiler in Oil Field [M]. Xinjiang: Xinjiang University Press, 1997: 5-10)

[2] 梁月霞. 稠油注蒸汽热采系统中技术问题的探讨[J]. 石油规划设计, 1996, 6: 1-3
(Liang Y X. The Study of Technology Issue about Steam Injection System of Heavy Oil [J]. Petroleum Planning and Designing, 1996, 6: 1-3)

[3] 卞永钊. 注汽锅炉控制系统的改造与设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2003: 1-10
(Bian Y Z. The Reform and Design of Control System for Steam-injection [D]. Shenyang: Northeastern University, 2003: 1-10)

[4] 邢远华, 黄德先, 张丽香. 注汽锅炉蒸汽干度的多变量预测控制[J]. 控制工程, 2004, 11(4): 309-312
(Xing Y H, Huang D X, Zhang L X. Multi-variable Predictive Control of Steam Dryness for Steam-injection Boiler [J]. Control Engineering, 2004, 11(4): 309-312)

[5] Su Y X, Duan B Y, Zhang Y F. Robust Precision Motion Control for AC Servo Systems [A]. The 4th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Beijing: Science Press, 2002: 3319-3323

[6] 王伟. 广义预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 20-30
(Wang W. Generalized Predictive Control [M]. Beijing: Science Press, 1998: 20-30)

[7] 王寅, 荣刚, 王树青. 基于T-S模糊模型的非线性预测控制策略[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 599-603
(Wang Y, Rong G, Wang S Q. Nonlinear Predictive Control Strategy Based on T-S Fuzzy Model [J]. Control Theory and Application, 2002, 19(4): 599-603)

[8] Hadjili M, Wertz V. Generalized Predictive Control Using Takagi-sugeno Fuzzy Models [A]. Proc IEEE Int Symposium Intelligent Control [C]. Cambridge: Cambridge Press, 1999: 405-410

[9] Wang L X. Adaptive Fuzzy Systems and Control, Design and Stability Analysis [M]. Englewood: Prentice-Hall Inc, 1994: 80-90