

文章编号: 1001-0920(2003)05-0615-04

一种基于模糊切换的模糊复合控制器及其应用

刘红波¹, 李少远¹, 柴天佑²

(1. 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030; 2. 东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 基于线性控制器与模糊控制器的特点, 通过使两者并行结合, 提出一种模糊复合控制器的设计方法。该模糊复合控制器采用模糊推理完成两组控制器的平稳“切换”, 而且其中模糊控制器的比例因子的初始整定可由 PD 控制器的整定参数获得, 从而简化了模糊控制器的设计。在某电厂 300MW 机组的实际应用结果表明, 采用该方法设计的过热蒸汽温度控制系统具有较强的适应能力和良好的控制效果。

关键词: 模糊控制; PD 控制; 复合控制; 模糊推理; 锅炉过热汽温

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Fuzzy hybrid controller based on fuzzy switching and its application

LIU Hong-bo¹, LI Shao-yuan¹, CHAI Tian-you²

(1. Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: A fuzzy hybrid controller is proposed by combining fuzzy and PD controls in parallel. Smooth actions of the controller during switching are guaranteed by using fuzzy inference. Moreover, the initial scaling gains of the fuzzy controller in the hybrid control can be obtained from the controller parameters of well-tuned PD controller. The results of industrial application in a 300MW unit show that the main steam temperature control system adopting this fuzzy hybrid controller has better control performance and stronger adaptability.

Key words: Fuzzy control; PD control; Hybrid control; Fuzzy inference; Boiler superheated steam temperature

1 引 言

PD 线性控制器至今仍在过程控制的应用中占有统治地位, 但 PD 线性控制器只在工作点附近具有良好的控制性能。自从 Mamdani 首次将模糊控制技术应用于锅炉和蒸汽机的控制以来, 模糊控制在工业过程控制中获得了广泛应用^[1]。模糊控制的特点是在偏离工作点较远的区域可明显改善控制的动态性能, 而且对控制对象特性的变化比 PD 线性

控制器具有更强的鲁棒性。然而, 模糊控制缺乏通用的系统化设计方法, 控制系统的稳定性难以保证, 稳态精度不够高。在实际应用中, 模糊控制器的设计和参数整定往往过分依赖于现场操作经验和试凑法。

本文基于 PD 线性控制器和模糊控制器的特点, 通过使两者并行结合, 提出一种模糊-PD 复合控制新方法, 并采用模糊推理完成“切换”, 保证两种控制的平稳过渡, 实现了两种控制器的优势互补和

收稿日期: 2002-06-19; 修回日期: 2002-09-09。

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA 412130); 山东省科技发展计划资助项目(012050114)。

作者简介: 刘红波(1964—), 男, 山东荣成人, 副教授, 博士后, 从事复杂工业过程建模与控制、模糊控制等研究; 李少远(1965—), 男, 河北枣强人, 教授, 博士生导师, 从事模糊智能控制、预测控制等研究。

控制性能的明显改进;在模糊控制器设计和参数整定方面,借助于模糊传递函数^[2]的定义,建立 PD 线性控制器整定参数与模糊 PD 控制器比例因子的近似对应关系式,于是模糊 PD 控制器的最佳参数便可通过较少的试凑被整定出来,从而简化了模糊控制器的工程设计。在某电厂 300MW 机组的实际应用结果表明,用该方法设计的过热蒸汽温度控制系统具有较强的适应能力和良好的控制效果,取得了显著的经济效益^[3]。

2 模糊-PD 复合控制器设计方法

2.1 模糊-PD 复合控制器的结构

本文提出的模糊-PD 复合控制器的结构如图 1 所示。两种控制的控制作用信号 U_C 和 U_{FZ} 根据设计的模糊切换隶属函数 SE , $S\Delta E$ 和模糊切换控制规则平稳地进行切换,产生复合控制器的控制作用 U , 以克服干扰信号和跟踪设定值。

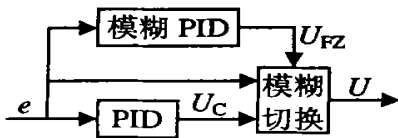


图 1 模糊-PD 复合控制器结构

2.2 模糊 PD 控制器设计和参数整定

模糊 PD 控制器由模糊 PI 控制器和模糊 PD 控制器组合而成,两者共用模糊 PI 控制器的模糊规则基。

本文提出的模糊 PI 控制器的模糊化策略采用工业过程控制应用中普遍使用的 TPE 系统^[4]。为使设计的模糊 PD 控制器算法通用化,其前提变量 (e 和 Δe) 和结论变量 Δu 的隶属函数都进行了归一量化处理。

模糊 PI 控制器的模糊推理规则由一组线性规则构成,表示为

$$R_i: \text{If } e(k) \text{ is } E_i \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } \Delta E_j$$

$$\text{Then } \Delta u(k) \text{ is } \Delta U_{(i+j)}$$

其中: E_i 表示一个“偏差 e ”的模糊集, ΔE_j 表示一个“偏差变化 Δe ”的模糊集, $\Delta U_{(i+j)}$ 表示一个“输出量 Δu ”的模糊集。以上规则的构造基于控制对象的阶跃响应特性。这些规则可用语言形式表示为:若“偏差”为“正大(PB)”,“偏差变化”为“正大(PB)”,则输出量为“正很大(PVB)”等。

模糊 PI 控制器的全部模糊推理规则如表 1 所示。

由上面给出的模糊推理规则 R_i , 对 k 时刻的清

表 1 模糊推理规则

$\Delta E \Delta U$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NVB	NB	NM	NS	NVS	NZ	Z
NM	NB	NM	NS	NVS	NZ	Z	PZ
NS	NM	NS	NVS	NZ	Z	PZ	PVS
Z	NS	NVS	NZ	Z	PZ	PVS	PS
PS	NVS	NZ	Z	PZ	PVS	PS	PM
PM	NZ	Z	PZ	PVS	PS	PM	PB
PB	Z	PZ	PVS	PS	PM	PB	PVB

晰输入量 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$, 按 TPE 系统规定的隶属函数进行模糊化, 采用代数积求出前提部分强度 $\mu_i = \mu_{E_i}(e(k)) \mu_{\Delta E_j}(\Delta e(k))$, 也就是推理结论的隶属度。采用隶属度加权平均模糊判决方法, 由式 (1) 可计算出 k 时刻的控制增量 $\Delta u(k)$ 为

$$\Delta u(k) = \sum_{i=1}^n \mu_i \Delta u_i \quad (1)$$

式中 Δu_i 为第 i 条模糊推理规则 R_i 结论部分模糊集 $\Delta U_{(i+j)}$ 的中心值。于是得到模糊控制的控制输出为 $U^{PI}(k) = U^{PI}(k-1) + \Delta u(k) K_{PI}$, 这种模糊控制器称为模糊 PI 控制器。如果将式 (1) 中的控制增量 $\Delta u(k)$ 视为控制位置输出 $u(k)$, 则可得到模糊 PD 控制器。

研究表明, 模糊 PI 控制器对高阶被控过程的动态控制性能较差, 而模糊 PD 控制器常常会产生大的稳态误差。因此有必要提出模糊 PD 控制器, 其组成如图 2 所示。

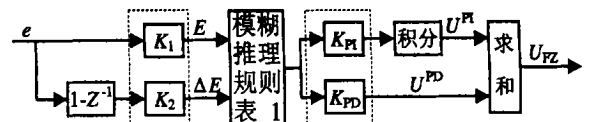


图 2 模糊 PD 控制器的构成

本文的模糊 PD 控制器采用了输入输出归一量化的 TPE 系统和线性规则基, 使得模糊控制器的控制性能主要取决于其比例因子, 而且两个输入比例因子 K_1 和 K_2 之间的关系可近似为 $K_2 = CK_1$ ^[5], 其中 C 为常数。具有线性规则基的模糊 PD 控制器与其对应的常规线性 PD 控制器有许多可类比之处, 通过直接比较和利用模糊传递函数性质, 可得到 PD 线性控制器整定参数 (K_p, T_i, T_d) 与模糊 PD 控制器比例因子 (K_1, K_2, K_{PI}, K_{PD}) 的近似对应关系式^[2]

$$\begin{cases} B = K_{PD}/K_{PI} \\ B + C = T_i \\ BC = T_i T_d \end{cases} \quad (2)$$

$$K_{PI} = K_p/T_i \quad (3)$$

当采用常规方法获得了良好整定的线性 PD 控制器参数 (K_p, T_i, T_d) 后, 按上述关系式可获得模糊 PD 控制器的初始整定参数, 这时将取得与相应的线性 PD 控制器非常接近的动态控制性能。再根据模糊 PD 控制器比例因子对控制性能所起的作用, 通过较少的试凑便可获得更加理想的控制效果。

2.3 模糊切换方案设计

为避免采用常规方法实现两种控制的切换所引起的不希望的扰动, 本文采用模糊切换来保证两种控制的平稳过渡。用于完成模糊 PD 和线性 PD 平稳切换的模糊推理规则为

If $e(k)$ is SE and $\Delta e(k)$ is S ΔE

Then "output" is U_C Else "output" is U_{FZ} (4)

模糊推理规则 (4) 中 U_C 是线性 PD 的控制输出, U_{FZ} 是模糊 PD 的控制输出, SE 和 S ΔE 分别是模糊变量 E 和 ΔE 的模糊切换隶属函数 (如图 3 所示)。模糊切换的执行区域可通过设定 E 和 ΔE 的模糊切换隶属函数的形状参数 L_E 和 $L_{\Delta E}$ 加以确定, 图 3 中 L_E 和 $L_{\Delta E}$ 统一用 L 表示。

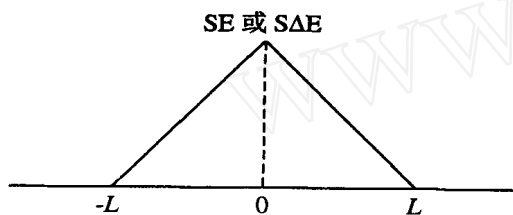


图 3 模糊切换隶属函数

2.4 模糊 -PD 复合控制器控制输出的算法

由式 (4) 给出的模糊切换控制规则, 对 k 时刻的清晰输入量 $e(k)$ 和 $\Delta e(k)$ 按图 3 规定的隶属函数进行模糊化, 采用代数积求出前提部分强度 $\mu_{PD} = \mu_{SE}(e(k))\mu_{S\Delta E}(\Delta e(k))$, $\mu_{FZ} = 1 - \mu_{PD}$, 则 k 时刻模糊 -PD 复合控制器的控制输出为

$$U(k) = \mu_{PD}U_C(k) + \mu_{FZ}U_{FZ}(k) \quad (5)$$

3 应用实例

某电厂 300 MW 机组锅炉有三级过热器, 在一、二级过热器之间和二、三级过热器之间分别设有一级喷水减温和二级喷水减温自动调节系统。原有一级喷水和二级喷水调节系统分别采用具有导前汽温信号的按温差进行控制的双回路调节方案和具有导前汽温信号的按定值进行控制的串级调节系统, 以控制三级过热器出口蒸汽温度 (即主蒸汽温度) 在大部分工况下保持在 535 ~ 550 范围内。该机

组原常规控制方案在有效抑制外部扰动 (例如蒸汽吹灰的程序投入、汽机负荷或机组电功率 N_E 变化引起的主汽压波动、给水流量及温度等)、各调节器参数整定及静态配合等方面存在不完善之处。再加上汽温调节对象的多容大惯性和时变、非线性特征及控制回路仪表的老化, 致使机组投运以来一直难以投入正常运行。

为了保证机组的安全经济运行, 用 FOXBORO 公司的 I/A Series 集散控制系统对该机组主要控制系统进行了技术改造^[3]。针对原过热汽温控制方案存在的问题, 精心设计了改进的控制方案。此方案的基本控制策略充分吸收了原常规方案的优点, 弥补了其许多不足, 可使汽温调节质量达到基本满意的程度。但当工况发生较大变化时, 难以保证系统满足较高要求的控制品质。为此, 首先针对一级喷水调节系统常规温差控制方案的缺点, 设计了一种模仿有经验操作人员行为的“超驰”控制方法, 使一级喷水控制系统在保证二级过热器出口汽温不超过 479 的前提下, 在机组运行工况变化较大时, 为二级喷水调节系统动态地提供充足的调节范围; 其次对主汽温控制质量起关键作用的二级喷水串级调节系统, 提出了主回路模糊 -PD 复合控制方案。

在系统改进方案调试过程中, 利用系统辨识方法获取了过热汽温非线性对象调节通道 210 MW, 240 MW 和 270 MW 附近的 3 个工况的降阶模型, 整定出多组控制器参数用于工况大范围变化时实现增益调度适应控制。在将改进的一级喷水控制系统投入自动运行后, 进入二级喷水控制系统的调试工作。下面以 210 MW 工况为例, 说明主回路模糊 -PD 复合控制器的调试过程。210 MW 工况常规 PD 控制模块参数 PBAND (比例带)、NT (积分时间) 和 DERIV (微分时间) 经整定确定为: 37.25%, 164.5 s 和 36.6 s。由此组参数, 根据式 (2) 和 (3) 可计算出相应模糊 PD 控制模块参数 (K_{PI}, K_I, K_{PD}, K_2) 为 (0.016, 1, 1.785, 55)。在 210 MW 工况附近进行调试。结果表明, 采用这组整定参数初始值的模糊 PD 控制器抑制扰动的动态控制性能已接近于 PD。保持 B 不变, 同时适当增大 K_{PD} 和 K_{PI} , 使抑制扰动的动态控制性能获得显著改善, 再通过增大 K_I 和适当减小 K_2 , 经过几次试凑确定了动态控制性能最好的一组整定参数。根据模糊 -PD 复合控制器的设计思想, 汽温误差信号的模糊切换隶属函数形状参数 L_E 整定为 4, 误差变化率信号模糊切换隶属函数的形状参数 $L_{\Delta E}$ 由调试和工艺要求整定为

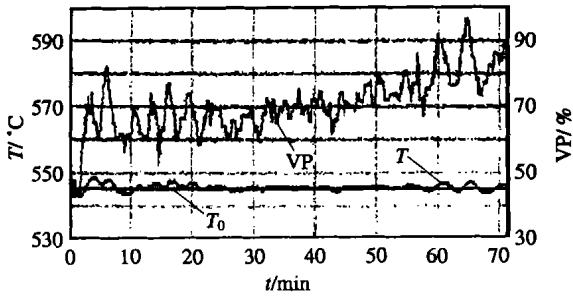


图4 290MW 工况二级喷水控制系统运行曲线

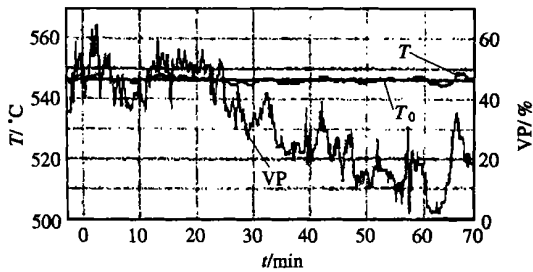


图5 240MW 工况二级喷水控制系统运行曲线

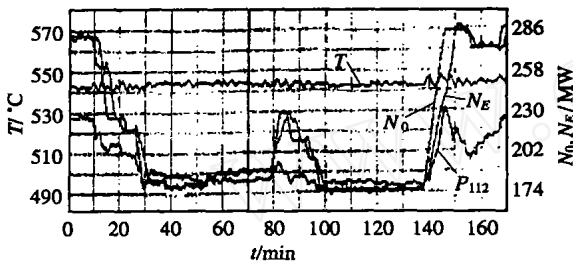


图6 机组负荷大范围变化时的运行曲线

3 /min。

经过调试,采用本文提出的模糊-PD复合控制器的机组二级喷水控制系统投入自动运行。图4和图5分别显示了机组在290MW附近和240MW附近运行时二级喷水控制系统的运行曲线。从图中可以看出,由于一级喷水控制系统为二级喷水调节阀位VP提供了合适的调节范围,使得二级喷水控制系统可以充分发挥模糊-PD复合控制的优势,迅速消除各种干扰的影响,将主汽温控制在 (545 ± 4) 范围内。图6记录了当机组升降负荷速率超过运

行规程规定的最大变负荷速率 $3\%M_{cr}/\text{min}$ 时,机组在协调控制运行方式下的主要参数的变化曲线。图中汽轮机液压控制系统112回路油压 P_{112} 代表汽轮机调汽阀门开度大小。由曲线可知,机组升降负荷速率的显著提高,使得机组各控制回路的耦合加强,主汽温度波动加剧,尽管如此,由于采用了模糊-PD复合控制等先进控制技术,机组控制性能仍达到了令人满意的程度,整个控制过程平稳,主汽温 T 与设定值 T_0 的偏差保持在 ± 5 之内,满足了现场运行的要求,保证了机组的安全经济运行,为该厂带来了显著的经济效益。

4 结 语

本文提出的基于模糊切换的模糊-PD复合控制器,实现了两组控制器的优势互补和控制性能的明显改进。在某电厂300MW机组的实际应用结果表明,该复合控制器在主汽温偏差较大时,可利用模糊控制的仿人智能特性,迅速给出适当的控制量,快速且平稳地抑制干扰,保证系统动态响应的快速性和鲁棒性;当主汽温偏差较小时,常规PD起主要作用,保证了良好的稳态性能,从而取得了比常规方法设计的系统更强的适应能力和良好的控制效果,为企业创造了显著的经济效益。

参考文献(References):

- [1] Lee C C. Fuzzy logic in control system: Fuzzy logic controller[J]. *IEEE Trans on SMC*, 1990, 20(2): 404-435
- [2] Li H X. A comparative design and tuning for conventional fuzzy control[J]. *IEEE Trans on SMC*, 1997, 27(5): 884-889
- [3] 刘红波. 先进控制技术在大型火力发电机组中的应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2000
- [4] Sudkamp T, Hammel R J II. Interpolation, completion, and learning fuzzy rules[J]. *IEEE Trans on SMC*, 1994, 24(2): 332-342
- [5] Tang K L, Mulholland R J. Comparing fuzzy logic with classical controller designs[J]. *IEEE Trans on SMC*, 1987, 17(6): 1085-1087.