

文章编号: 1001-0920(2002)06-933-04

核动力装置蒸汽发生器水位的分层模糊自适应控制

滕树杰¹, 张乃尧¹, 崔震华²

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘要: 针对压水堆核动力装置蒸汽发生器的水位控制提出一种分层模糊自适应控制方案。该方案中 2 个模糊控制器分层连接, 每个模糊控制器均采用典型模糊控制单元, 使得模糊规则个数和可调参数个数大大减少, 便于在线学习和实时控制。给出了分层模糊控制器的解析表达式及可调参数的在线学习方法。在快速加负荷和突然甩负荷的仿真实验中, 该方案的控制效果明显优于已有的变参数 PD 控制, 验证了该方案的有效性。

关键词: 核动力装置; 蒸汽发生器; 分层模糊自适应控制

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Hierarchical adaptive fuzzy control for steam generator level of nuclear power plants

TEN G Shu-jie¹, ZHAN G N ai-yao¹, CUI Zhen-hua²

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Nuclear Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A hierarchical adaptive fuzzy control scheme is proposed for steam generator level control of nuclear power plants. In this scheme two fuzzy controllers are connected hierarchically. Every fuzzy controller is a typical fuzzy control unit. Thus there are fewer fuzzy rules and adjustable parameters, which are easy to modify on-line. The output expression of the hierarchical fuzzy controller and the modification algorithm of adjustable parameters are presented. The simulation results show that the scheme has better performance than variable gain PD control.

Key words: nuclear power plant; steam generator; hierarchical adaptive fuzzy control

1 引言

核动力装置是核电站和核潜艇中的关键设备, 它是一个多变量、强耦合、非线性、时变、大滞后的复杂系统, 传统的控制方法难以满足核动力装置安全、可靠、经济运行的要求。20 世纪 90 年代以来, 国外发表了不少核动力装置模糊控制方面的研究成果。

在法国、比利时、日本等国家的一些核电站中, 已有部分子系统实际应用了模糊控制, 并取得了很好的效果^[1,2]。最近, 国内也开始了这方面的研究^[3-5], 其中朱雪耀等研究了压水堆负荷跟踪的模糊控制^[3], 吕志松等研究了核电站稳压器的模糊控制^[5]。但现有的研究成果大多是简单的模糊单变量控制, 而实际的核动力装置中许多子系统都是多变量系统, 因

收稿日期: 2001-07-16; 修回日期: 2001-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174015); 清华大学基础研究基金项目(200013004)

作者简介: 滕树杰(1976—), 男, 吉林省吉林市人, 硕士生, 从事模糊多变量控制及应用的研究; 张乃尧(1946—), 男, 河北丰南人, 教授, 博士生导师, 从事模糊控制、模糊神经网络及电脑音乐等研究。

此对核动力装置的模糊多变量控制方法的研究是必要的。

利用模糊控制解决复杂多变量系统的控制问题, 首先会遇到“维数灾”问题, 即对于MISO(多输入单输出)模糊系统, 模糊规则的数目会随着输入变量的数目指数增长。1991年Raju等^[6]首先提出了分层模糊控制方案, 并证明分层控制方案可以使规则总数减少为输入变量个数的线性函数。1997年Lin等^[7]将分层模糊自适应控制方法用于沸水堆(ABWR)的水位控制, 仿真实验结果优于PD控制。本文提出一种新的分层模糊自适应控制方案, 该方案的可调参数少, 并能给出输入输出的解析表达式, 因此大大提高了可调参数在线修正的速度。将这种分层模糊自适应控制方案用于蒸汽发生器的水位控制, 与文献[8]设计的变参数PD控制器进行比较, 验证了本方案的有效性。

2 蒸汽发生器的简化数学模型

文献[9]给出了蒸汽发生器的简化数学模型, 如图1所示。这是一个线性时变模型, 模型参数随负荷变化的对应关系列于表1。

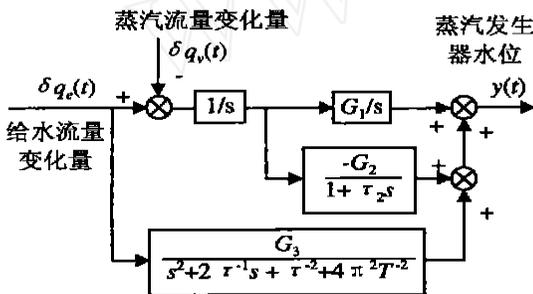


图1 蒸汽发生器的线性时变模型

表1 蒸汽发生器模型参数随负荷的变化

参数	蒸汽发生器负荷 / %				
	5	15	30	50	100
G_1	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058
G_2	9.63	4.46	1.83	1.05	0.47
G_3	0.181	0.226	0.310	0.215	0.105
τ_2 (s)	48.4	21.5	4.5	3.6	3.4
τ (s)	41.9	26.3	43.4	34.8	28.6
T (s)	119.6	60.5	17.7	14.2	11.7
q_v /(kg/s)	57.4	180.8	381.7	660	1435

3 分层模糊自适应控制方案

蒸汽发生器的水位控制是压水堆(PWR)核动力装置中一个重要的问题, 它的控制难点在于: 第

一, 模型参数 G_2, τ, T 等随负荷有 10 ~ 20 倍的变化; 第二, 存在“收缩与膨胀”现象, 即当蒸汽流量(负荷)发生变化时, 水位会呈现出瞬时的“逆响应”, 造成“虚假水位”, 从模型上看这是非最小相位系统, 在低负荷时尤为严重。在已有文献中, 控制器的输入量一般取水位误差 e , 水位误差的变化率 \dot{e} , 以及蒸汽/给水流量失配量 $\delta q_v(t) - \delta q_e(t)$, 因此这是一个 3 输入的控制。为减少模糊控制规则, 我们采用分层模糊自适应控制方案, 如图 2 所示。

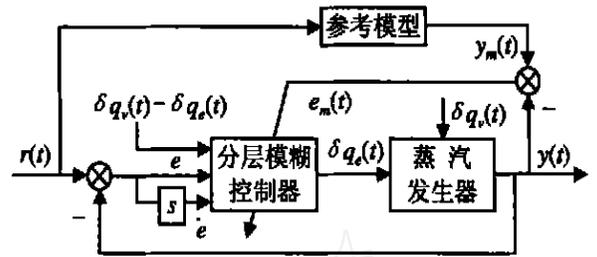


图2 蒸汽发生器水位的分层模糊自适应控制系统

3.1 分层模糊控制器的解析表达式

采用的分层模糊控制器如图 3 所示。

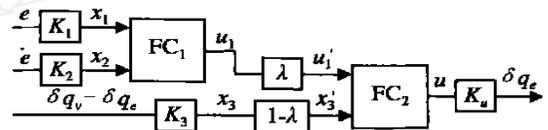


图3 分层模糊控制器

图中, x_1, x_2, x_3 和 u 分别是经比例因子 K_1, K_2, K_3 和 K_u 归一化处理后得到的输入和输出变量, 即 $x_1, x_2, x_3, u \in [-1, 1]$ 。中间变量 u_1 和 x_3 分别乘以加权系数 λ ($0 < \lambda < 1$) 和 $(1 - \lambda)$ 后得到 u_1' 和 x_3' 。FC1 和 FC2 均采用文献[10]提出的典型模糊控制器。FC1 的设计参数如下:

1) 输入变量均采用三角形、全交迭、对称、不均匀分布的隶属函数, 输出变量采用均匀分布的单点隶属函数, 如图 4 所示。设模糊控制器的输入变量 x_i ($i = 1, 2$) 均取 5 个模糊集, 其中 2 个为正, 2 个为负, 1 个为零, 分别用 X_j^i 表示, $j = -2, -1, 0, 1, 2$ 。这些模糊集的中心分别为 α_j^i 。输出变量 u_1 取 9 个模糊集(为了满足线性控制规则), 用 U_k 代表, $k = -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$, U_k 的中心为 $\delta_k = k/4$ 。

2) 采用线性模糊控制规则, 其一般形式为

If x_1 is X_m^1 and x_2 is X_n^2 , Then u is U_k

线性控制规则是指 m, n, k 之间有线性关系: $k = m + n_0$ 。

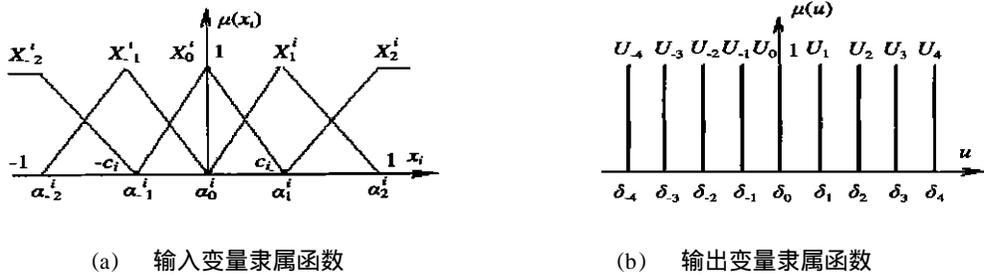


图 4 典型模糊控制器输入输出隶属函数

3) 采用 Sum-Product 模糊推理方法, 其中算子的定义如下

$$\text{Sum (有界和): } x \oplus y = \min\{1, x + y\}$$

$$\text{Product: } x \cdot y = xy$$

4) 清晰化采用加权平均法, 因此模糊控制器 FC₁ 的输出为

$$u = \frac{\sum_{i,j=-2}^2 w(i,j) \cdot \delta_{i,j}}{\sum_{i,j=-2}^2 w(i,j)} \quad (1)$$

其中, $w(i,j) = \mu_i(x_1) \cdot \mu_j(x_2)$ 是规则的激活度, $\delta_{i,j} = (i+j)/4$ 是线性规则输出的单点值。

FC₂ 的输入变量采用三角形、全交迭、均匀分布的隶属函数, 其他与 FC₁ 相同。应用文献[10]的定理和推论很容易推导出分层模糊控制器的解析表达式为

$$\delta q_e = K_u \left\{ \frac{\lambda(i+j+1)}{8} + \frac{\lambda}{8} \left[\frac{K_1 e^{-\frac{1}{2}(\alpha_{i+1}^1 + \alpha_i^1)}}{\alpha_{i+1}^1 - \alpha_i^1} + \frac{K_2 e^{-\frac{1}{2}(\alpha_{i+1}^2 + \alpha_i^2)}}{\alpha_{i+1}^2 - \alpha_i^2} \right] + \frac{(1-\lambda)K_3(\delta q_v - \delta q_e)}{2} \right\} \quad (2)$$

注意到 $\alpha_2^1 = -1, \alpha_1^1 = -c_1, \alpha_0^1 = 0, \alpha_i^1 = c_i, \alpha_i^2 = 1 (i = 1, 2)$, 因此, 分层模糊控制器的解析表达式中只含有 7 个可调参数, 分别是 c_1, c_2, λ 和 4 个比例因子 K_1, K_2, K_3, K_u , 这是本方案的显著优点。

3.2 参考模型的选取

选取典型二阶系统作为参考模型

$$R(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_s s + \omega_s^2} \quad (3)$$

其中, K, ξ 和 ω_s 的值分别设计为 $K = 1, \xi = 0.7, \omega_s = 0.1$ 。

3.3 分层模糊控制器可调参数的粗调/细调在线

修正方法

在负荷大幅度变化时, 分层模糊控制器的可调参数必须在线修正。由于比例因子 K_1, K_2, K_3, K_u 对控制性能影响很大, 可根据相应变量的变化范围首先修正, 作为粗调; 然后再用梯度法修正参数 c_1, c_2, λ 作为细调。

设指标函数为 $J = \frac{1}{2} \int_t e_m^2(t)$, 采用梯度法可以得到可调参数 c_1, c_2, λ 的在线修正算法

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \eta \cdot e_m(t) \frac{\partial y(t)}{\partial \theta(t)} \cdot \frac{\partial u(t)}{\partial \theta(t)} \quad (4)$$

其中, θ 代表可调参数 c_1, c_2 和 λ, η 为学习率。通过分层模糊控制器的解析表达式可直接计算 $\partial u(t)/\partial \theta(t)$, 而 $\partial y(t)/\partial u(t)$ 的重要性在于符号, 可用 $(y(t) - y(t-1))/(u(t) - u(t-1))$ 近似。

4 仿真实验结果

将分层模糊自适应控制和文献[8]给出的变参数 PD 控制进行比较。在仿真实验中, 蒸汽发生器水位的给定值不变 (0 mm), 而负荷按照典型工况变化 (蒸汽发生器负荷从 100% 降到 30%; 稳定后, 再按每分钟 10% 的负荷快速升到 100%)。图 5 为仿真

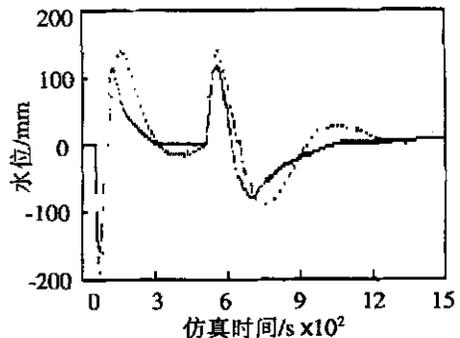


图 5 蒸汽发生器水位响应曲线

实验结果, 其中实线为分层模糊自适应控制的响应

曲线, 虚线为变参数 PD 控制的响应曲线。

在用负荷过程中, 分层模糊自适应控制的水位最小值为 -153 mm, 调整时间为 248 s, 变参数 PD 控制的相应值为 -192 mm 和 450 s; 在负荷线性上升的过程中, 分层模糊自适应控制的水位最大值为 115 mm, 调整时间为 558 s, 变参数 PD 控制的相应值为 142 mm 和 760 s。由仿真实验结果可以看出, 分层模糊自适应控制方案具有响应快, 超调量小, 振荡少等优良特性。

5 结 论

本文针对蒸汽发生器的水位控制提出了一种分层模糊自适应控制方案。由于采用分层模糊控制器, 模糊规则数和可调参数大为减少; 在此基础上又采用了粗调/细调的在线调整方法, 进一步加快了在线学习的速度。仿真实验结果表明, 本文提出的分层模糊自适应控制方案易于实现, 且控制效果明显优于变参数 PD 控制, 初步验证了本方案的有效性。当然, 本文介绍的对于蒸汽发生器水位的分层模糊自适应控制方案只是原理性的, 实际应用还要进行许多深入细致的研究。

参考文献(References):

- [1] Fodil M S, Siarry P. A fuzzy rule base for the improved control of a pressurized water nuclear reactor [J]. *IEEE-FS*, 2000, 8(1): 1-10
- [2] Iijima T, Nakajima Y, Nishiwaki Y. Application of fuzzy logic control system for reactor feed-water control [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, 74: 61-72
- [3] 朱雪耀, 赵福宇, 万百五. 压水堆负荷跟踪的模糊控制系统 [J]. *核动力工程*, 1998, 19(5): 456-461.

- (Zhu Xueyao, Zhao Fuyu, Wan Baiwu. A fuzzy control system of PWR power following control [J]. *Nuclear Power Engineering*, 1998, 19(5): 456-461.)
- [4] 姚良忠, 郭人俊. 核电厂中的模糊控制 [J]. *核动力工程*, 1996, 17(1): 17-22
(Yao Liangzhong, Guo Renjun. Fuzzy control in nuclear power plants [J]. *Nuclear Power Engineering*, 1996, 17(1): 17-22.)
- [5] 吕志松, 崔震华. 核电站稳压器模糊控制方法研究 [J]. *核动力工程*, 2001, 22(1): 83-86
(Lu Zhisong, Cui Zhenhua. Fuzzy control methods of nuclear power plant stabilizer [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2001, 22(1): 83-86.)
- [6] Raju G V S, Zhou Jun. Hierarchical fuzzy control [J]. *Int J Control*, 1991, 54(5): 1201-1216
- [7] Lin C, Jeng F, Lee C. Hierarchical fuzzy logic water-level control in advanced boiling water reactors [J]. *Nuclear Technology*, 1997, 1(118): 254-263
- [8] Byung Hak Cho, Hee Cheon No. Design of stability-guaranteed fuzzy logic controller for nuclear steam generators [J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 1996, 43(2): 716-730
- [9] E Irving, et al. Toward efficient full aromatic operation of the PWR steam generator with water level adaptive control [A]. *Proc 2nd Int Conf Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations 2* [C]. Bournemouth, 1979. 309-329.
- [10] 李宁, 张乃尧. 输入隶属函数不均匀分布时典型模糊控制器的结构分析 [J]. *清华大学学报*, 2000, 40(1): 120-123
(Li Ning, Zhang Naiyao. Structure analysis of typical fuzzy controllers with unevenly distributed input membership functions [J]. *J of Tsinghua University*, 2000, 40(1): 120-123.)

下 期 要 目

- MAS 技术在学习调度研究中的应用 赵 博, 范玉顺
 基于模糊逻辑系统的输出跟踪控制问题 张严心, 等
 蚁群算法在连续空间寻优问题的求解中的应用 汪 镭, 吴启迪
 二阶加纯滞后过程的非脆弱 PD 稳定化控制器设计 徐建明, 等
 图象雅可比矩阵的在线 Kalman 滤波估计 钱 江, 苏剑波
 时序 Ada 网的语言性质 丁志军, 蒋昌俊
 正则模糊神经网络是模糊值函数的泛逼近器 刘普寅
 基于 PD 控制的机器人轨迹跟踪性能研究与比较 陈启军, 等
 一类非最小相位系统的多变量多模型解耦控制器 王 昕, 等
 模糊时滞系统的输出反馈控制及其稳定性分析 佟绍成