

# 核动力蒸汽发生器水位控制方法分析

周刚, 彭威, 张大发

(海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**核动力蒸汽发生器(SG)是一个高度复杂的非线性时变系统。SG在瞬态、启动和低功率运行工况下的“收缩”与“膨胀”现象引起的逆动力学效应使SG的水位控制变得复杂。文章分析了SG水位控制方法的特点,重点分析了SG水位模糊控制方法与神经网络控制方法。指出了传统的PI(D)水位控制方法存在的问题,就SG水位控制发展趋势提出了看法。

**关键词:**蒸汽发生器; 水位; 模糊控制; 神经网络

**中图分类号:** TL362      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2004)S0-0019-05

## Analysis of Water Level Control Methods for Nuclear Steam Generator

ZHOU Gang, PENG Wei, ZHANG Da-fa

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Nuclear steam generator (SG) is a highly complex nonlinear time-changed system. The inverse dynamics effects, which are caused by shrink and swell under transient, startup and lower power operation, make the water level difficult to control. Methods of SG water level control are analyzed in the paper. The shortcoming of conventional PI(D) control for SG level is pointed out. It emphatically expounds the fuzzy logic control and the neural network control to nuclear steam generator level. Finally, the author brings forward his opinion upon the advance tendency of SG water level control.

**Key words:** steam generator; water level; fuzzy control; neural network

蒸汽发生器(以下简称SG)是压水堆核动力装置中的主要设备之一,也是把一回路冷却剂从反应堆堆芯带出的热量传给二回路水的关键设备。在运行过程中,SG水位低将引起蒸汽进入给水环,使管束传热恶化,或引起SG的管

板热冲击;水位过高,则影响汽水分离效果,造成蒸汽品质恶化,危害汽轮机的叶片。因此,SG的运行水位必须控制在一定范围内。但SG存在的“收缩”与“膨胀”现象引起的逆动力学效应、随运行功率而变化的动力学特性以及低功

收稿日期:2004-04-15;修回日期:2004-05-13

基金项目:海军工程大学科研基金资助项目(HGDJJ03015)

作者简介:周刚(1967—),男,河南信阳人,讲师,博士,核能科学与工程专业

率运行工况下流量测量误差等因素使 SG 的水位控制变得复杂。目前,大多数 SG 水位控制采用传统 PI(D)控制方法。为提高 SG 水位的控制效果,国内外提出了多种方法。本文对国内外主要的 SG 水位控制方法进行分析,在此基础上就 SG 水位控制方法的发展趋势提出看法。

## 1 基于经典控制理论的水位控制

在过程控制中,PI(D)控制是常用的方法。该方法具有直观、实现简单和鲁棒性好等优点。早期的核蒸汽发生器水位控制是采用传统 PI(D)控制方案的模拟控制系统。其水位控制系统是采用水位信号、蒸汽负荷(流量)、给水流量信号构成的三冲量水位控制系统,按照 PI(D)控制规律进行调节。其中,水位是主调节信号,蒸汽流量和给水流量信号作为辅助调节信号。这样,控制系统既可消除水位静态偏差,又可克服 SG 虚假水位对系统的影响,并能克服给水流量对 SG 水位的干扰。SG 水位控制的实质是给水量控制。大型压水堆核电站 SG 的水位控制是通过调节并联安装在每条给水管路上的(SG 入口侧)两个调节阀(高流量阀与低流量阀)的阀门开度控制给水流量,从而实现水位调节。

在 SG 中,由于蒸汽流量随负荷变化,使沸腾部分的汽泡量随局部的压力变化而变化,水位呈现所谓瞬时“虚假水位”现象。虚假水位现象的出现使得单参量控制不能获得良好的调节特性。引进蒸汽流量和给水流量的失配信号能够抑制调节阀受虚假水位的影响。将该失配信号加到水位偏差信号上可改善系统的动态响应特性。

传统的 PI(D)控制方法虽能满足 SG 水位控制要求,但仍存在着一些缺点<sup>[1]</sup>。SG 是一个高度复杂的非线性、时变的非最小相位系统,具有较小的稳定裕度。欲在变工况运行情况下获得良好的控制效果,往往需要改变 PI(D)控制器的参数和增益。由于模拟控制系统 PI(D)控制器的参数难以实现在线整定,其增益也不能调得过高,否则会引起控制系统闭环不稳定,因此,难以满足核动力装置瞬态情况下的自动控制要求。为提高 PI(D)控制器的效果,Irving

等<sup>[2]</sup>建立了蒸汽发生器线性变参数模型,并在此基础上提出了模型参考自适应 PID 水位控制器。随后,Choi 等<sup>[3]</sup>应用 Irving 建立的模型设计了局部稳定的 PI 控制器,其特点是应用基于模型的观测器来估计 SG 中的存水量。从前面的分析可以清楚看出 PI(D)控制器的优点。然而,在这类控制器中,输入输出的限制、鲁棒性、稳定性以及动力学模型及其参数的不确定性问题是采用间接方法处理的。

## 2 基于现代控制理论的水位控制

控制理论及计算机技术的发展使复杂的控制策略在实际中能够容易实现。人们考虑采用更为先进的控制方法设计水位控制器。Memmon 与 Parlos<sup>[4]</sup>通过对一个非线性模型的局部线性化,设计了基于 LOQ/LTR 的广义控制器。通过改变局部线性控制器的增益,使其适用于整个运行功率范围。M. G. Na 提出了流量误差预测控制。Mayuresh、Mettler 与 Morari 等<sup>[5]</sup>提出了 SG 模型预测控制方案(MPC),其方法是:1) 建立 SG 的预测模型;2) 在采样时刻  $k$ ,利用系统输出测量值  $y$  与模型预测控制估计器估计得到系统的状态量  $x(k)$ ;3) 用蒸汽需求量辨识功率水平  $d$ ;4) 从蒸汽发生器线性时变模型集中选择对应该功率水平的模型;5) 将所选择的模型作为预测模型,通过极小化目标函数解决 MPC 的优化问题;6) 计算得到控制量  $u$ ;7) 重复上述步骤。这一方法的原理框图示于图 1。图中, $r$  为参考输入, $A$ 、 $B$  为状态方程系数矩阵。仿真研究表明,该方法可以减小测量噪声带来的误差。

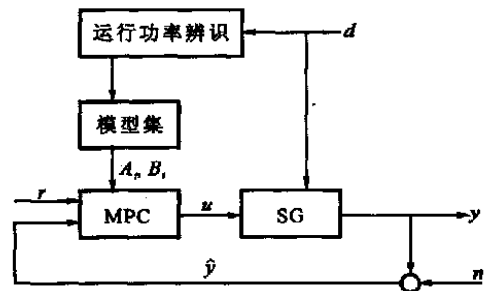


图 1 SG 水位模型预测控制

Fig. 1 Model predictive control for SG water level

Myung-Ki Kim 等<sup>[6]</sup>提出了变增益  $L_2$  水位控制器,该控制器在整个功率运行范围内能够保证其稳定性以及  $L_2$  性能。其设计方法能够随着功率的变化自动调节控制器,避免了传统变增益所遇到的困难。计算机仿真表明,该控制器优于传统的 PI(D) 控制器。Ambos 等<sup>[7]</sup>提出了基于  $H$  范数的非线性水位控制器,通过变增益得到全局水位控制器。仿真结果显示,该控制器在所有功率工况下均具有令人满意的效果。

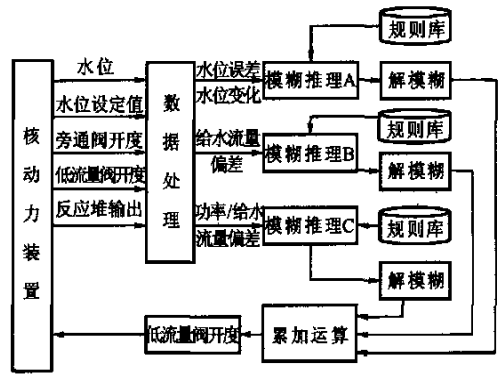
### 3 蒸汽发生器水位智能控制方法

#### 3.1 模糊控制

模糊理论由美国加利福尼亚大学著名学者 L. A. Zadeh<sup>[8]</sup>教授于 1965 年首先提出。模糊集合的引入可将人的判断与思维过程用比较简单的数学形式直接表达出来,从而对复杂系统作出合乎实际及人类思维方式的处理成为可能,为处理客观世界中存在的一类模糊性问题提供了有力的工具。1974 年,英国伦敦大学教授 Mamdani E H 研制成功第一个模糊控制器。其控制方法的特点是把人的经验转化为控制策略,为模型未知的复杂系统控制提供了简便的模式,取得了优于常规调节器的控制品质。

Terunuma、Akin 以及 Kuan 等分别研究了模糊逻辑在 SG 水位控制中的应用问题<sup>[9~11]</sup>。研究结果显示,模糊逻辑控制器在水位控制中具有优于传统 PI(D) 控制器和最优控制器的性能。Marchleuba、Abdalla 以及 Ford<sup>[12]</sup>、Raju、Zhou 等<sup>[13]</sup>在模糊理论的基础上提出了 SG 模糊逻辑水位控制器。Na、Kwon、Ham<sup>[14]</sup>以及 Park、Seong 等<sup>[15]</sup>应用模糊理论解决 SG 的水位控制问题。Takaski Iijima 等<sup>[16]</sup>设计了模糊逻辑控制系统,并将其应用到 165 MWe 的 Fugen 反应堆的给水控制中,其 SG 水位模糊控制推理流程图(低流量)示于图 2。Park 与 Seong 等<sup>[17]</sup>设计了自组织模糊逻辑水位控制器。我国也开展了模糊理论在 SG 水位控制中的应用研究,并自主设计了水位模糊控制器。上述研究及其在水位控制中的实际应用都表明,模糊逻辑水位控制器比传统的 PI 水位控制器具有更好的性能,可以对水位实现更为精确的控制,且具有泛化能力和抗干扰能力强

的特点。



2 Fugen 堆 SG 水位模糊控制推理框图(低流量)<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of fuzzy control inference for the SG water level of Fugen reactor (low flow rate)<sup>[17]</sup>

#### 3.2 神经网络控制

自动控制理论及其应用技术的发展促进了新理论新技术在 SG 水位控制中的应用研究。SG 水位控制在经历了古典 PI(D) 控制、基于现代控制理论的模型预测控制以及基于模糊逻辑的模糊控制之后,逐渐向一种新的方向即神经网络控制发展。

A. G. Parlos 等<sup>[18]</sup>用递归神经网络研究了 SG 水位的预测控制。其方法是先利用递归神经网络构造多步神经预测器,并用于 SG 动态过程建模。然后结合传统的 PI 控制器,采用并行学习结构和梯度下降算法,以获得控制器增益自适应律。在此基础上,设计了自适应 PI 控制器(图 3)。仿真研究表明,自适应 PI 控制器通过在线自适应调节增益,能够成功地对 SG 水位进行控制。

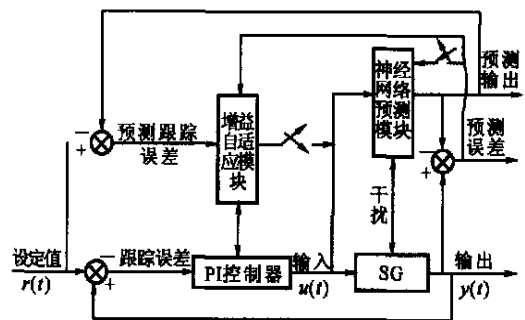


图 3 SG 水位神经网络预测控制<sup>[18]</sup>

Fig. 3 Neural network predictive control for SG water level<sup>[18]</sup>

### 3.3 模糊神经网络控制

把神经网络、模糊逻辑结合起来解决问题的效果往往更好。模糊神经网络控制把模糊逻辑方法和神经网络方法有机地融合在一起,将模糊控制的模糊化、模糊推理和解模糊3个基本过程全部用神经网络来实现。其主要特点是:借助神经网络的信息存储能力和学习能力,在对广泛选择的样本进行学习后,优化了控制规则、各语言变量的隶属函数及每条规则的输出函数,使系统本身朝着自适应、自组织、自学习的方向发展。Byung Hak Cho 等<sup>[19]</sup>将模糊逻辑与神经网络相结合提出了稳定模糊神经网络水位控制器(NFLC)。

NFLC的特点是将任意的二输入、单输出线性控制器映射为特殊的控制规则集(图4)。为了设计稳定的控制器,作者利用李亚普洛夫稳定性准则取得稳定向量。应用反传算法实现NFLC规则表的自动更新。仿真实验表明,该控制器在水位与蒸汽流量的扰动下能够减小“收缩-膨胀”的不良影响。此外,NFLC能够满足多变量被控对象对渐进稳定性和良好控制性能的要求。

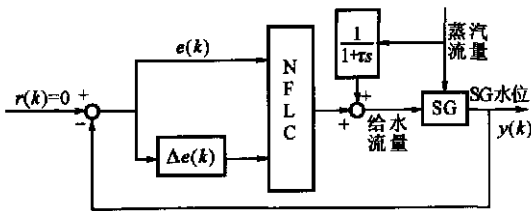


图4 模糊神经网络水位控制器<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Water level controller on fuzzy neural network<sup>[19]</sup>

## 4 分析与讨论

对SG水位控制二十多年的文献资料的分析表明,长期以来,国内外研究人员对水位控制的研究作出了不懈地努力,提出了一些新的控制方法。但研究的范围并不是非常广泛,研究的层次也不是特别深入。相当一部分水位控制器的研究与设计是通过有限的仿真来验证其控制性能的,并未在实际中应用。这大概与核动力这个特殊的应用领域有关。众所周知,应用于核动力的技术必须是十分成熟且经过充分验证的,而传统的PI(D)控制器早已为人们普遍

接受,且能够满足现有生产条件下对水位控制的要求。应该指出的是,模糊控制方法在SG水位控制中取得了相当大的进展,在实际中取得了成功的应用,并且显示出优于传统PI(D)控制的良好性能,因而具有广阔的应用前景。另一种智能控制方法——神经网络控制在SG水位控制中的应用研究刚刚起步,在核动力领域尚未被普遍接受,应用研究很少且不深入。可以认为,随着神经网络控制理论的发展和应用的不断深入,神经网络在SG水位控制中也是具有较大发展潜力的方法。

从SG水位控制发展的过程来看,水位控制方法的不断改进和提高是与自动控制理论以及计算机技术的不断发展分不开的。现代控制理论和基于模糊逻辑、神经网络的智能控制为更好地解决SG水位控制提供了一新思路。计算机技术的发展为上述新理论的实际实现提供了技术手段。特别需要指出的是,智能控制理论的出现使人们可从一全新的角度去考虑SG水位控制器的设计,也使控制器的设计更趋于合理,更能满足实际控制的需要。

## 5 结论

传统的PI(D)控制是常用的方法,具有直观、实现简单和鲁棒性好等优点,能够满足现有生产条件下对SG水位控制的要求,但存在着一定的不足。基于现代控制理论的控制方法在实际应用中尚不多见。基于模糊逻辑、神经网络的智能控制方法为更好地解决蒸汽发生器的水位控制问题提供了一新思路,具有较大的发展潜力。

### 参考文献:

- [1] Na M G. Design of a Steam Generator Water Level Controller via the Estimation of the Flow Errors [J]. Ann Nucl Energy, 1995, 22(6): 367 ~ 376.
- [2] Irving E, Miossec C, Tassart J. Towards Efficient Full Automatic Operation of the PWR Steam Generator with Water Level Adaptive Control[A]. Proceedings of Conference on Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations [C]. London: [s. n.], 1980. 309 ~ 329.
- [3] Choi J I, Meyer J E, Lanning D D. Automatic Controller for SG Water Level During Low Power Op-

- eration[J]. Nucl Eng Design, 1989, 117: 263 ~ 274.
- [4] Menon SK, Porlos AG. Gain-scheduled Nonlinear Control of U-tube Steam Generator Water Level[J]. Nuc Sci Eng, 1992, 111: 294 ~ 308.
- [5] Mayuresh V K, Mettler B, Morari M, et al. Linear Parameter Varying Model Predictive Control for Steam Generator Level Control [J]. Computers Chem Eng, 1997, 21: S861 ~ S866.
- [6] Kim MK, Shin MH, Chung MJ. A Gain-scheduled  $L_2$  Control to Nuclear Steam Generator Water Level [J]. Ann Nucl Energy, 1999, 26: 905 ~ 916.
- [7] Ambos P, Duc G, Falinower CM. The Application of  $H_2$  Control Design With Disturbance Feedforward to Steam Generator Level in EDF PWR Units [A \ ]]. Proceedings of the Symposium on Control Optimization and Supervision [C]. France: [s. n.], 1996. 1 299 ~ 1 304.
- [8] Zadeh LA. Fuzzy Sets [J]. Information Control, 1965, 8: 338 ~ 353.
- [9] Terunma A. Simulation Study on the Application of a Fuzzy Algorithm to a Feedwater Control System in a Nuclear Power Plant [J]. Relab Eng Syst, 1990: 319 ~ 335.
- [10] Akin HL, Altin V. Rule-based Fuzzy Logic Controller for a PWR-type Nuclear Power Plant [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1991, NS38: 883 ~ 890.
- [11] Kuan CC, Lin C, Hsu CC. Fuzzy Logic Control of Steam Generator Water Level in Pressurized Water Reactors [J]. Nucl Technol, 1992, 100: 125 ~ 134.
- [12] Marchleuba C, Abdalla M, Ford CE, et al. A Hybrid Fuzzy-PI Adaptive Control of U-tube Steam Generators [J]. Control Theory and Advanced Technology, 1992, 8(3): 567 ~ 575.
- [13] Raju GVS, Zhou J. Fuzzy Logic Adaptive Algorithm to Improve Robustness in a Steam Generator Water Level Controller [J]. Control Theory and Advanced Technology, 1992, 8(3): 479 ~ 493.
- [14] Na M, Kwon K, Ham C, et al. A Study on Water Level Control of PWR Steam Generator at Low Power and the Self-tuning of its Fuzzy Controller [J]. Fuzzy Sets and System, 1995, 74(1): 43 ~ 51.
- [15] Park GY, Seong PH. Application of a Fuzzy Learning Algorithm to Nuclear Steam Generator Level Control [J]. Ann Nucl Energy, 1995, 22(3-4): 135 ~ 146.
- [16] Iijima T, Nakajima Y, Nishiwaki Y. Application of Fuzzy Logic Control System for Reactor Feedwater Control [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 74: 61 ~ 72.
- [17] Park GY, Seong PH. Application of a Self-organizing Fuzzy Logic Controller to Nuclear Steam Generator Level Control [J]. Nucl Eng Design, 1997, 167: 345 ~ 356.
- [18] Parlos AG, Parthasarathy S, Atiya A. Neuro-predictive Process Control Using On-line Controller Adaptation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(5): 741 ~ 755.
- [19] Cho BH, No HC. Design of Stability-guaranteed Neurofuzzy Logic Controller for Nuclear Steam Generators [J]. Nucl Eng Design, 1996, 166: 17 ~ 29.