

Study on Control of Water Level in Marine Boiler based on RBF Fuzzy Neural Network

Abstract

In this paper, the control system of marine boiler is studied. Because of the nonlinear nature of boilers with instable parameter and difficulties of building accurate math model, combined fuzzy control theory and neural networks theory, and proposed a controller based on RBF neural network to control marine boiler. Simulation is performed to the boiler control method of using RBF fuzzy neural network by Matlab software. The results indicate that the control arithmetic presented in this paper is effective, the control effect and the performance is better than that of the PID controller, the fuzzy PID controller and the neural network controller.

The main research of the paper is as follows:

Firstly, the accurate models of boiler drum water system are established in accord with the theory of marine boiler.

Second, relative theories of FNN are summarized. On the basis of fuzzy control and neural network theory, the paper presents a fuzzy neural networks controller which combines advantages of the fuzzy control and neural networks control through the analysis on the shortage of those. It is constructed by RBF fuzzy neural networks.

Third, it is designed for the fuzzy PID controller, RBF neural network controller and RBF fuzzy neural network controller based on the same model of boiler water level.

Fourth, simulation is performed to the PID controller, fuzzy PID controller, the neural network controller and RBF fuzzy neural network controller by Matlab software. The result indicates that RBF fuzzy neural network control system has a better adaptability and stronger anti-jamming ability, and it is practicable to apply in boiler water level control.

Key words: Boiler's water level; Fuzzy control; Neural Networks; RBF Fuzzy Neural Networks

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成硕士学位论文“基于 RBF 模糊神经网络的船用锅炉汽包水位控制研究”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：刘晓丹 2008年3月31日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连海事大学研究生学位论文提交、版权使用管理办法”，同意大连海事大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

保密☐，在_____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于： 保密☐

不保密☒（请在以上方框内打“√”）

论文作者签名：刘晓丹 导师签名：王琳

日期：2008年3月31日

第 1 章 绪 论

1.1 船用锅炉控制系统及其研究现状

船用锅炉同工业锅炉一样是一种复杂的被控对象，是一种生产蒸汽的换热设备。它通过煤、油和天然气等燃料的燃烧释放出化学能并通过传热过程把能量传递给水，使水转变成蒸汽，蒸汽直接供给生产所需的热能，或通过蒸汽动力机械转变为机械能，或通过汽轮发电机转变为电能。所以锅炉的中心任务是把燃料中的化学能最有效地转变为蒸汽的热能。因此，近代锅炉亦称作蒸汽发生器^[1]。

在蒸汽动力装置的船舶上，蒸汽锅炉产生的高温高压蒸汽用于驱动主汽轮机运转，以推动船舶前进，同时，也为各种以蒸汽为动力的复机和其他需要以蒸汽为热源的设备提供不同质量的蒸汽。这种以驱动主汽轮机为主要任务的蒸汽锅炉称为主锅炉，其要求蒸汽参数为：压力 6.0~10.0MPa，温度 520~545℃^[2]。

在柴油机动力装置的船舶上，锅炉产生的蒸汽主要用于加热燃油、滑油、工作水、驱动辅助及提供各种生活用汽，这种锅炉称为辅锅炉，其蒸汽参数较低^[3]。在柴油机动力装置的干货船上，一般设一台产生饱和蒸汽（0.5~0.8MPa）的辅锅炉，其蒸发量为 1~2t/h；在以柴油为动力装置的油船上，因为加热货油、驱动货油泵、锅炉给水泵及各种甲板机械以及洗舱需要大量的蒸汽，所以一般都装有 1~2 台压力为 1.3~1.7MPa，生产饱和的蒸汽的辅锅炉，其蒸发量为 20~150t/h。

1.1.1 船用锅炉的主要调节任务

船用锅炉设备要求根据生产负荷的需要，供应一定压力和温度的蒸汽，同时要保证在安全、经济的条件下运行^[4]。所以，其主要的调节任务有：

- (1) 锅炉供给负荷的蒸汽压力保持在一定范围内；
- (2) 锅炉汽包的水位保持在一定范围内；
- (3) 炉膛负压保持在一定范围内；
- (4) 保持锅炉燃烧的经济性和安全运行。

1.1.2 船用锅炉主要控制系统

锅炉是典型的复杂热工系统，其建模与控制问题一直是人们关注的焦点。在实际工程中，为实现上述调节任务，锅炉设备的控制主要包含了以下控制系统^[5]：

(1) 锅炉汽包水位的控制。操纵变量是给水流量。它主要考虑汽包内部的物料平衡，使给水量适应蒸发量，维持其保证水位在工艺允许范围内。这是保证锅炉安全运行的必要条件，也是锅炉正常运行的主要标志之一。

(2) 锅炉燃烧系统的控制。燃烧系统中有三个被控变量：蒸汽压力（或负荷）、烟气成分（反映燃烧经济性的指标）和炉膛负压及三个操纵变量（燃料量、送风量和引风量）。这些变量相互关联，需要统筹兼顾，组成合适的燃烧系统控制方案，使燃料量和空气量保持一定的比例，以保证燃烧的经济性和锅炉的安全性；同时使引风量和送风量相适应，使炉膛负压保持在一定的范围内。

1.1.3 船用锅炉控制的特点

作为过程控制的一个典型，船用锅炉控制具有以下特点：

(1) 锅炉控制的动态特性具有大惯性大延时特点，而且伴有非线性；

(2) 控制过程属于慢过程参数控制。由于控制过程具有大惯性大延时的特点，因而决定了锅炉控制是一个慢过程；

(3) 定值控制是锅炉控制的一种主要形式。在锅炉控制系统中，其给定值是恒定的或保持在很小的范围内变化，控制的主要目的是在于如何减小或消除外界干扰对被控制量的影响。

1.1.4 船用锅炉控制的研究背景与现状

船用锅炉属于过程控制中常见的一类较为典型的控制对象。作为实现生产过程自动化的过程控制系统，在近几十年发展很快，其控制技术的发展经历了几个历史阶段：

(1) 纯手动阶段。在六十年代以前，由于自动化技术与电子技术发展不成熟，人们的自动化观念还比较淡薄，这段时期的锅炉一般采用纯手动的控制方式，即操作工人通过经验决定送风、给水、引风、给煤的多少，通过调节电位器等方式

来达到控制锅炉的目的。这样就要求司炉人员必须由丰富的经验，增加了工人的劳动强度，事故率高，更谈不上保证锅炉的高效率运行。

(2) 自动化单元组合仪表控制阶段。随着自动化技术与电子技术的发展，国外已经开发并广泛应用了全自动工业锅炉控制技术。60 年代前期，我国船用锅炉的控制技术开始发展，60 年代后期我国引进了国外的全自动燃油船用锅炉的控制技术，70 年代后期已经研制了一些船用锅炉的自动化仪表，正式将自动化技术应用与船用锅炉控制领域，因而热效率有所提高，事故率也有所下降。但是，由于采用单元组合仪表靠硬件来实现控制功能，可靠性低，精度不高，而且只能完成一些简单的控制算法，不能实现一些较先进的算法和控制技术，控制效果仍然不理想。

(3) 采用微机测控阶段。随着电子技术的发展，高集成度、高可靠性、价格低廉的微型计算机、单板机、单片机、工业专用控制计算机的出现以及在我国广泛应用，为锅炉控制领域开辟了一片广阔的天地。运用计算机技术，开发出高效率，高可靠性，全自动的微机测控系统日益得到重视。80 年代后期至今，国内已经陆续出现了各种各样的锅炉微机测控系统，明显地改善了锅炉的运行状况，但还不够完善，并对环境和抗干扰要求较高。

(4) 智能控制理论的应用阶段。由于现代控制理论的发展以及各方面的应用，解决了传统控制理论难以解决的问题，给过程控制带来了崭新的应用前景，并取得了前所未有的效果，成为目前正在迅速发展中的一个领域。各种形式的控制系统、智能控制器不断地开发和利用。目前常用的有：多级递阶智能控制、专家控制系统与专家控制器、仿人智能控制器、自学习控制系统。除此之外还有综合了几种控制形式的混合式智能控制器等多种形式，如以模糊控制为基础的专家模糊控制系统，最常见的是以常规 PID 数字控制为基础，通过专家系统在线实时整定 PID 控制参数，即所谓的智能自适应 PID 控制器。

综上所述，近几十年来，过程控制系统硬件正在发生巨大的变化，但是从其控制算法来看，在锅炉的自动控制中普遍采用的还是传统的 PID 控制。虽然模糊神经网络技术已经得到比较广泛的应用于工业控制中，但模糊神经网络控制在船

用锅炉控制的应用还处于起步阶段，没形成系统理论，仍需进一步研究。

1.2 模糊神经网络的发展及研究现状

神经网络具有并行计算、分布式信息存储、容错能力强以及具备自适应学习功能等一系列的优点，在解决高度非线性和严重不确定性系统的控制方面具有很大的潜力。但一般来说，神经网络不适合表达基于规则的知识，因此在对神经网络进行训练时，由于不能很好的应用已有的经验知识，常常只能将初始权值取为零和随机数，从而增加了网络训练的时间或者陷入非要求的局部极值。

另一方面，模糊逻辑也是一种处理不确定性，非线性等问题的有力工具。它比较适合于表达那些模糊或定性知识，其推理方式比较类似于人的思维模式，这些都是模糊逻辑的显著优点。很多国际著名的专家学者指出：“模糊控制是 21 世纪的控制技术”，将有非常广阔的发展前途和产品市场。但是，一般来说模糊逻辑系统缺乏学习和自适应能力。虽然模糊自适应控制可以一定地实现这种功能，但设计和实现模糊系统的自适应控制是比较困难的。

基于上述讨论可以想到，若能将模糊逻辑与神经网络适当结合起来，吸取两者的长处，则可组成比单独的神经网络系统或单独的模糊系统性能更好的系统。

把模糊系统和神经网络有机的结合起来的研究始于 70 年代中期^[6]，但是进展比较快的还是进入 80 年代中期之后 (S. C. Lee 和 E. T. Lee, 1974; 高木, 1990)，特别是日本研究工作者在这方面的研究非常活跃，并应用到了温度控制、家用电器、模式识别、图像处理等领域。早期的尝试，主要是利用神经网络来改善模糊系统的学习能力，如采用神经网络来逼近模糊系统的输入输出^[7]，调整隶属度函数和规则，利用神经网络来学习关系矩阵等。但是，现在备受瞩目的方法是将模糊系统用等价的神经网络来实现，形成模糊神经网络 (FNN) 或称为神经模糊推理系统 (Neural-fuzzy inference system)。这样，模糊神经网络就一方面具有表达模糊知识与实现模糊推理的功能，另一方面又继承了神经网络的非线性映射能力和强大的数据信息处理能力、自适应能力、自调整、自学习能力。

模糊神经网络综合了模糊系统与神经网络两者的优点，既可以说是神经网络

实现了模糊逻辑推理,也可以认为是模糊化的神经网络。可以预见,模糊神经网络对智能控制技术将产生深远的影响。但是,模糊神经网络仍处于发展阶段,理论和技术还存在许多有待解决的问题^[8]:

(1) 采用何种神经网络模型、产生何种形式的规则和隶属度函数形式才能使系统达到最佳的结合;

(2) 模糊简化推理方法的研究,以满足系统设计的实时性、高精度要求;

(3) 模糊神经网络控制系统稳定性研究;

(4) 模糊神经网络自组织、自学习算法的研究。

1.3 课题的提出

船用锅炉同工业锅炉一样,是一种复杂的被控系统,它的控制具有如下特点:其要求监测点繁多、控制工艺复杂、各控制回路间耦合强烈,并具有严重的非线性特性和不确定性,控制对象容量较大并有较长的滞后时间,因此控制困难。传统的控制方式多采用 PID 控制,而 PID 控制存在着易产生超调等缺点,难以达到理想的控制效果。在大型的油轮上,辅锅炉的蒸发量一般较大,汽压较高,要求水位和汽压稳定,对控制系统提出了更高的要求^[9]。

模糊神经网络控制是智能控制的一个重要分支领域,它是一种基本上不依赖于数学模型的控制方法,适用于那些具有强耦合,不确定性或高度非线性的被控对象。所以本文以船用锅炉汽包水位为被控对象,提出了一种新的控制算法,基于 RBF 模糊神经网络控制器实现对锅炉的过程控制。课题包括以下几个方面的内容:

(1) 论文首先根据船舶锅炉的工作原理,通过机理建模的方法,并通过一定的假设和简化,得到锅炉汽包水位的数学模型。

(2) 模糊控制和神经网络理论的研究。在介绍模糊控制和神经网络理论的基础上,针对两者的不足,综合了模糊控制系统和神经网络系统的优点,提出了一种新的控制算法,基于 RBF 模糊神经网络控制器实现对锅炉汽包水位的控制。

(3) 为了验证 RBF 模糊神经网络控制器的可行性与优越性,在相同锅炉水位

模型的基础上,设计了相应的模糊 PID 控制器、RBF 神经网络控制器和 RBF 模糊神经网络控制器。

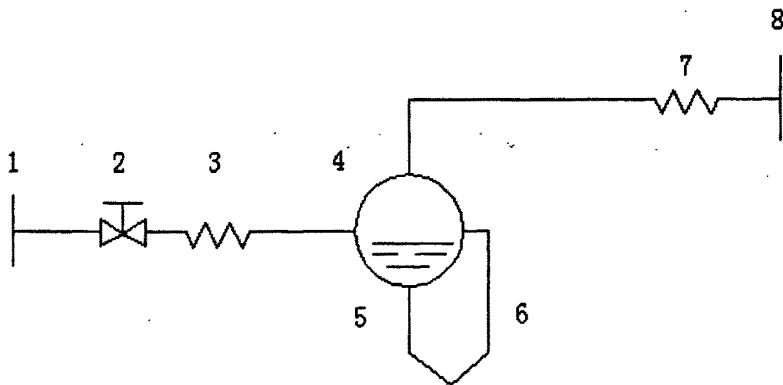
(4) 用 MATLAB 对应用模糊 PID 控制、RBF 神经网络控制及 RBF 模糊神经网络控制的锅炉汽包水位控制系统模型进行仿真,最后分析得出,RBF 模糊神经网络控制系统具有良好的控制效果,说明了这种控制系统的可行性与优越性。

第 2 章 船用锅炉汽包水位的数学模型及其传统控制算法

汽包水位是锅炉运行的重要指标。锅炉汽包水位控制的任务是使给水量跟踪锅炉蒸发量，并保持水位在一定范围内。维持汽包水位在给定范围内是保证锅炉运行的重要条件，也是锅炉正常运行的主要指标之一，水位的过高、过低都会给锅炉及蒸汽用户的安全操作带来不利的影响。首先，水位过高会影响汽包内的汽水分离，饱和水蒸气将会带走过多水，导致过热气管壁结垢并损坏。其次，水位过低，会因为汽包内的水量较少，而负荷很大，加快水的汽化速度，使汽包内的水量变化速度加快，若不及时加以控制，将使汽包内的水全部汽化，尤其对大中型锅炉，水在汽包内的停留时间极短，从而导致水冷壁烧坏，甚至引起爆炸。所以，必须对汽包水位进行自动调节，将水位严格控制在规定的范围之内。因此，我们有必要对汽包水位的动态特性进行学习研究。

2.1 汽包水位模型及其动态特性分析

锅炉汽水系统的结构可用图 2.1 来表示。



1—给水管 2—调节阀 3—省煤器 4—汽包
5—下降管 6—上升管 7—过热器 8—蒸汽母管

图 2.1 船用锅炉汽水系统结构图

Fig. 2.1 The structure of steam and water system of marine boiler

锅炉汽包水位不仅受到锅炉的给水流量（输入量）和蒸汽流量（输出量）之间平衡关系的影响，同时还受到汽水循环管路中汽水混合物内汽水体积变化的影响。因为水位 H 不仅反映了汽包（包括水循环的管路）中的蓄水体积，也反映了水面下气泡的体积，而水面下气泡的体积又与锅炉的负荷及蒸汽压力有关。综合来看，影响锅炉汽包水位变化的因素有以下四个方面：

- (1) 给水扰动，包括给水母管压力的变化和给水调节阀开度的变化；
- (2) 蒸汽负荷的变化；
- (3) 燃料量的变化，包括影响燃料发热量变化的其他因素；
- (4) 蒸汽压力的变化。

在蒸汽发生过程中，汽包内部容积可以看成由蒸发面（即水面）上方的蒸汽体积 V_D 、蒸发面下方的汽水混合体积，即气泡体积 V_g 和汽包内水的体积 V_w 三部分组成。由于燃料量对汽包水位的影响有较大的传输滞后和容量滞后，变化十分缓慢，可以忽略不计；而蒸汽压力的变化往往是由于蒸汽负荷变化引起的，因此，压力的变化可以归并到蒸汽负荷中去，这样，压力的变化对汽包水位的影响也可以忽略。

经过理论推导及化简后，汽包水位的动态特性可用如下方程式表示^[10]：

$$T_1 T_2 \frac{d^2 h}{dt^2} + T_1 \frac{dh}{dt} = (T_w \frac{du_w}{dt} + K_w u_w) - (T_D \frac{du_D}{dt} + K_D u_D) \quad (2.1)$$

式中，

h — 汽包水位；

T_1, T_2 — 时间常数，s；

D — 锅炉蒸汽流量，kg/s；

W — 锅炉给水流量，kg/s；

$$u_D = \frac{\Delta D}{D_{\max}}; \quad u_w = \frac{\Delta W}{D_{\max}};$$

T_w — 给水流量项的时间常数，s；

T_D — 蒸汽流量项的时间常数，s；

K_w — 给水流量项的放大倍数；

K_D — 蒸汽流量项的放大倍数。

通过这个方程式，我们可以知道：在众多影响汽包水位的因素中，最主要的是蒸汽流量 D 和给水流量 W 的变化。因此，我们将分别讨论在给水流量和蒸汽流量扰动的作用下，汽包水位变化的动态特性^[11]。

2.1.1 汽包水位在给水流量作用下的动态特性

如果蒸汽流量不变，给水流量发生变化时，汽包水位调节对象的运动方程可表示为：

$$T_1 T_2 \frac{d^2 h}{dt^2} + T_1 \frac{dh}{dt} = T_w \frac{du_w}{dt} + K_w u_w \quad (2.2)$$

将式(2.2)进行拉氏变换可得：

$$T_1 T_2 S^2 H(s) + T_1 S H(s) = T_w S U_w(s) + K_w U_w(s) \quad (2.3)$$

由式(2.3)可得到汽包水位调节对象在给水扰动下的传递函数：

$$G_w(s) = \frac{H(s)}{U_w(s)} = \frac{T_w S + K_w}{T_1 S(T_2 S + 1)} \quad (2.4)$$

在工程中，中压以下（蒸汽压力 < 2.0 MPa）的锅炉，给水量项的时间常数 T_w 一般比较小，，可以忽略不计，因此式(2.4)可简化为：

$$G_w(s) = \frac{H(s)}{U_w(s)} = \frac{\varepsilon}{S(T_2 S + 1)} \quad (2.5)$$

式(2.5)中， $\varepsilon = \frac{K_w}{T_1}$ 称为反应速度，即给水改变单位流量时水位的变化速度

(mm/s*t/h)，它与锅炉的蒸发量和汽包水容量有关。

由式(2.5)可看出，汽包水位在给水作用下的动态特性，是由一个积分环节和一个惯性环节组成。图 2.2 描述了一个 ΔW 的阶跃(a)，汽包水位在给水扰动下初始阶段的阶跃响应曲线(b)。

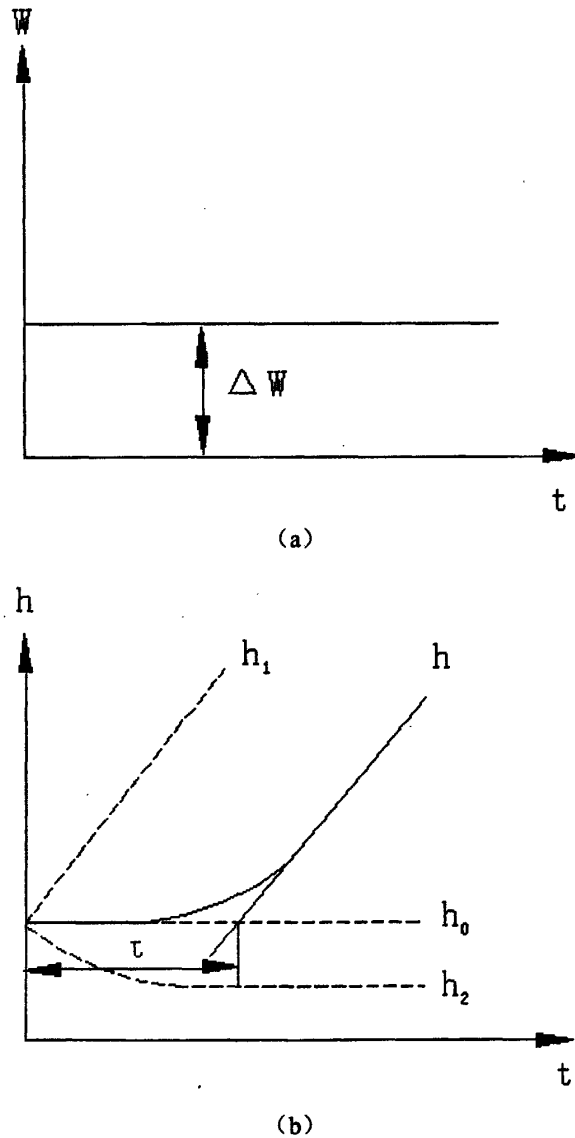


图 2.2 船用锅炉汽水系统给水扰动下初始阶段阶跃响应曲线图

Fig. 2.2 Step response curves caused water disturbance of marine boiler

从曲线可知, 当突然加大给水量后, 汽包水位一开始并不立即增加, 而呈现出一段起始惯性段, 后阶段近于等速变化。反应曲线 h 可认为是曲线 h_1 和 h_2 相加而成。 h_1 仅反映了汽包储水量的变化所引起的水位变化, 当给水量 W 作阶跃变化时,

h_1 的变化反映了汽包水位的积分特性； h_2 反映了蒸发面下气泡容积变化时水位的变化，因为在给水量增加的初始阶段，温度较低的给水进入水循环系统，使原来的水温降低，从而使汽水混合物中气泡的体积减少，导致汽包水位的下降。从上述分析可以看出，式(2.5)真实地反映了给水扰动下汽包水位的变化趋势。

2.1.2 汽包水位在蒸汽流量扰动下的动态特性

现假设给水流量不变，蒸汽流量发生阶跃变化，根据式(2.1)，此时汽包水位的动态特性微分方程可表示为：

$$T_1 T_2 \frac{d^2 h}{dt^2} + T_1 \frac{dh}{dt} = -(T_D \frac{du_D}{dt} + K_D u_D) \quad (2.6)$$

对式(2.6)进行拉氏变换：

$$T_1 T_2 S^2 H(s) + T_1 S H(s) = -[T_D S U_D(s) + K_D U_D(s)] \quad (2.7)$$

由式(2.7)可得蒸汽流量扰动下汽包水位调节对象的传递函数：

$$G_D(s) = \frac{H(s)}{U_D(s)} = -\frac{T_D S + K_D}{T_1 S(T_2 S + 1)} \quad (2.8)$$

式(2.8)可用二个动态环节的并联来等效：

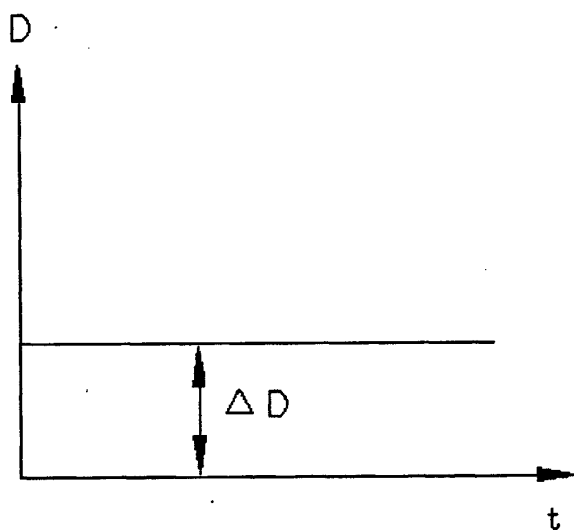
$$G_D(s) = \frac{H(s)}{U_D(s)} = -\frac{1}{T_a S} + \frac{K_2}{T_2 S + 1} \quad (2.9)$$

式中，

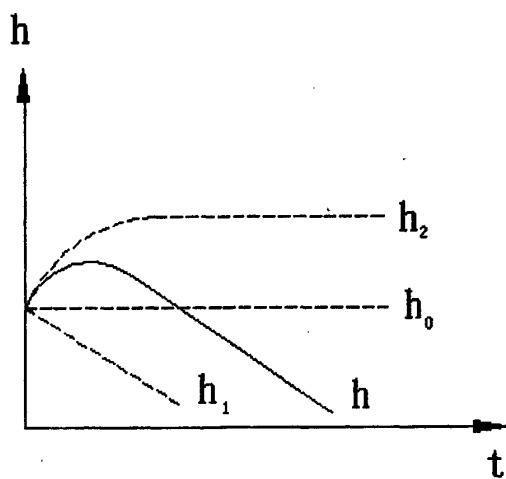
$$K_2 = (K_D T_2 - T_D) / T_1$$

$$T_a = T_1 / K_D$$

由式(2.9)可知，蒸汽流量发生如图 2.3 (a) 所示的阶跃时，锅炉汽包水位的初始阶段动态响应曲线如图 2.3 (b) 所示。



(a)



(b)

图 2.3 船用锅炉汽水系统蒸汽扰动下初始阶段阶跃响应曲线图

Fig. 2.3 Step response curves caused by steam disturbance of marine boiler

从图 2.3 可以看出, 汽包水位在蒸汽扰动下的动态特性曲线 h 由 h_1 和 h_2 迭加而成, h_1 相当于式 (2.9) 中的 $-1/T_a S$ 一项, 是直线下降的。但实际的响应曲线 h 是

先上升再下降，这是由于随着负荷的增加，汽包压力减小，沸腾突然加剧，蒸发受热面下的气泡体积急剧增加（如图中曲线 h_2 所示），导致响应曲线与实际水位出现相反的趋势，这种现象称为“虚假水位”。当气泡容积和负荷相适应时， h_2 趋于平稳，实际响应曲线和 h 的变化趋势相同，这时它才反映出给水和蒸汽流量的不平衡。当负荷阶跃变化时，蒸发受热面下的气泡容积变化是非常快的，如果要求水位波动不能太大，应该限制负荷的变化速度^[12]。

2.2 传统的锅炉控制算法

对于蒸发量较小的锅炉，对锅炉控制的要求不是很高，允许水位和汽压在一定范围内波动，可以采用简单可靠的双位控制。对于蒸发量较大的锅炉，要求水位和汽压稳定在某一给定值上，一般采用 PID 控制或控制精度更高的控制算法，以下先介绍 PID 控制原理^[13]。

在当今工业生产控制方案中，有很大一部分是采用 PID 或改进的 PID 控制。PID 控制器大多是液压的、气动的、电气和电子型的，或者是由它们构成的组合型。当前，许多这类控制器通过采用微处理器，都转变成了数字型 PID 控制器。在工业锅炉的自动控制中，无论是串级控制还是前馈控制，最终还是通过 PID 控制器实现的。

PID 控制的价值在于它们对大多数数控制系统的广泛适应性。众所周知，在过程控制系统领域，基本的和变形的 PID 控制器已经证明具有良好的适应性，它们可以提供满意的控制，然而，PID 控制器在许多给定的情况下还不能提供最佳控制，在控制规模日益扩大，控制要求日益复杂的今天，显然有必要发展先进的控制方式。

下面对过程控制中常见的 PID 控制作一介绍。

2.2.1 PID 控制原理

在模拟控制系统中，常规 PID 控制原理框图如图 2.4 所示，系统由 PID 控制器和被控对象组成^[14]。

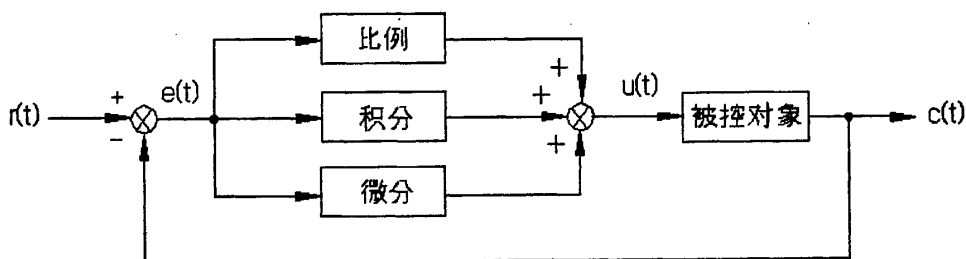


图 2.4 常规 PID 控制系统原理图

Fig. 2.4 Conventional PID control system schematic

PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差：

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.10)$$

将偏差的比例（P）、积分（I）和微分（D）通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制，故称 PID 控制器。其控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.11)$$

或写成传递函数形式

$$G(S) = \frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (2.12)$$

式中，

K_p 为比例系数；

T_i 为积分时间常数；

T_d 为微分时间常数。

简单说来，PID 控制器各校正环节的作用如下^[15]：

(1) 比例环节即时成比例地反映控制系统的偏差信号 $e(t)$ ，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差。

(2) 积分环节主要用于消除静差，提高系统的无差度。

(3) 微分环节能反映偏差信号的变化趋势(变化速率),从而加快系统的动作速度,减小调节时间。

2.2.2 数字 PID 控制算法

在当前常见的计算机控制系统中,使用的是数字 PID 控制器, PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。

(1) 位置式 PID 控制算法

在计算机控制系统中,式(2.11)中的积分和微分项不能直接使用,需要进行离散化处理。按模拟 PID 控制算法的算式(2.11),以一系列的采样时刻点 kT 代表连续时间 t ,以和式代替积分,以增量代替微分,则可做如下近似变换:

$$\left\{ \begin{array}{l} t \approx kT \quad (k=0, 1, 2, \dots) \\ \int_0^t e(t)dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} = \frac{e(kT) - e(k-1)T}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

式中, T 为采样周期。

显然,上述离散化过程中,采样周期 T 必须足够短,才能保证有足够的精度。将 $e(kT)$ 简化表示 $e(k)$ 等,将式(2.13)带入式(2.11)可得离散的 PID 表达式为

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (2.14)$$

$$\text{或 } u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (2.15)$$

式中,

k 为采样序号, $k=0, 1, 2, \dots$;

$u(k)$ 为第 k 次采样时刻的计算机输出值;

$e(k)$ 为第 k 次采样时刻输入的偏差值;

$e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样时刻输入的偏差值;

K_I 为积分系数, $K_I = K_p T / T_i$

K_D 为微分系数, $K_D = K_p T_D / T$

由 Z 变换的性质

$$z[e(k-1)] = z^{-1}E(z) \quad (2.16)$$

$$z\left[\sum_{j=0}^k e(j)\right] = \frac{E(z)}{1-z^{-1}} \quad (2.17)$$

式 (2.15) 的 z 变换式为

$$U(z) = K_p E(z) + K_I \frac{E(z)}{1-z^{-1}} + K_D [E(z) - z^{-1}E(z)] \quad (2.18)$$

由式 (2.18) 便可得到数字 PID 控制器的 z 传递函数为

$$G(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D(1-z^{-1}) \quad (2.19)$$

因此构造的数字 PID 控制器如图 2.5 所示, 由于计算机输出的 $u(k)$ 直接去控制执行机构 (如阀门), $u(k)$ 的值和执行机构的位置是一一对应的, 所以通常称为位置式 PID 控制算法。但是, 这种算法还存在它的缺点, 因而产生了下面介绍的增量式 PID 控制算法。

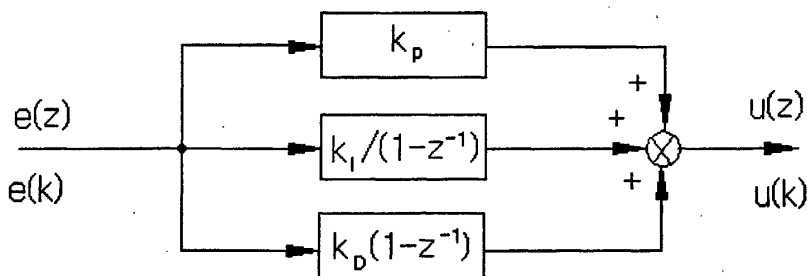


图 2.5 数字 PID 控制器原理图

Fig. 2.5 Digital PID controller schematics

(2) 增量式 PID 控制算法

当执行机构需要的是控制量的增量时, 可由式 (2.15) 导出提供增量的 PID 控制算式。根据递推原理可得

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_I \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \quad (2.20)$$

用式(2.15)减去式(2.20)，可得

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) - K_I \Delta e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (2.21)$$

式中，

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2.22)$$

式(2.21)称为增量式 PID 控制算法。可以进一步改写为

$$\Delta u(k) = A e(k) - B e(k-1) + C e(k-2) \quad (2.23)$$

式中，

$$A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}\right) \quad (2.24)$$

$$B = K_p \left(1 + 2\frac{T_D}{T}\right) \quad (2.25)$$

$$C = K_p \frac{T_D}{T} \quad (2.26)$$

它们都是与采样周期、比例系数、积分时间常数、微分时间常数有关的系数。

可以看出，由于一般计算机控制系统采用恒定的采样周期 T ，一旦确定了 K_p ， K_I ， K_D ，只要使用前后 3 次测量值的偏差，即可求出控制增量。

增量式控制与位置式控制相比，虽然只是算法上作了一点改进，却带来了不少优点：

- (1) 由于计算机输出增量，所以误动作时影响小。
- (2) 手动/自动切换时冲击小，便于实现无扰动切换。
- (3) 算式中不需要累加，较容易通过加权处理而获得比较好的控制效果。

增量式的不足之处主要表现在，积分截断效应大，有静态误差，溢出的影响大。

2.2.3 对 PID 控制的分析

PID 控制作为生产过程控制中应用最为广泛的控制方式，至今在过程控制中的

应用已有几十年的历史。PID 控制在过程控制中的生命力如此之强,是由于它本身的优点:PID 控制的原理简单,使用起来比较方便;在过程控制中的适应性强,在多种生产部门都得到应用,在生产过程控制发展过程中,尽管控制器的实现几经换代,但基本的控制功能仍然是 PID 控制;PID 控制的控制品质对被控对象的变化不很敏感,具有一定的鲁棒性。

但是,尽管具有上述的优点,PID 控制仍然有其局限性,它是线性的,适用于小惯性小滞后的过程,当把 PID 控制应用在非线性、大时滞、参数不确定的情况下,很难获得满意的控制效果,特别是在一些控制要求较高,参数不稳定的控制系统中,PID 控制的效果并不能十分令人满意^[16]。

就本课题而言,传统的控制方式已不能满足生产实际的需求;因此,我们只能在最近发展起来的新技术中需求答案。二十世纪六十年代产生并在最近几年飞速发展的模糊控制、神经网络控制技术无疑经入了我们的视线。

第 3 章 智能控制技术

人工智能是一门新兴的边缘学科，它主要研究如何使计算机去做那些只有人才能做的具有智能性质的工作。

智能控制是一种模拟人类智能的高级控制系统，它是基于知识的控制，是将控制人员和专家的控制经验与知识作为被控对象的知识模型。智能控制的思想最早来自傅京孙教授，他通过人——机控制器和机器人方面的研究，首先提出把人工智能的直觉推理方法用于学习控制系统，将智能控制概括为自动控制和人工智能的结合。智能控制的基本出发点是仿人的智能实现对复杂不确定性系统进行有效的控制，要模拟人的思维形式就要模拟人的抽象（逻辑）思维，模拟人的形象（直觉）思维及模拟人的灵感（顿悟）思维。模糊逻辑是模拟人的逻辑思维能力，神经网络是从人脑神经系统结构和功能上模拟人的智能，它是研究智能控制的重要基础^[17]。

智能控制的类型很多，如模糊逻辑控制与神经网络控制均属于智能控制的范畴^[18]。

3.1 模糊逻辑控制

3.1.1 模糊理论基础

模糊控制是以模糊数学的有关理论为基础的。模糊数学是研究模糊现象的，所研究的事物概念本身是模糊的。即一个对象是否符合一个概念难以确定，这种处于概念的外延的模糊而造成的不确定性称为模糊性。为了进一步掌握模糊控制的理论，有必要了解关于模糊数学的有关知识。

一. 模糊集合和模糊关系

(1) 模糊集合定义：所谓给定论域 X 上的一个模糊集合 A 是指对于任意的 $x \in X$ ，都确定了一个数 $\mu_A(x)$ ，它表示 x 对 A 的隶属程度。映射：

$$\begin{aligned} \mu_A : U &\rightarrow [0,1] \\ \mu &\rightarrow \mu_A(x) \end{aligned} \quad (3.1)$$

确定论域 U 的一个模糊子集 A ，是一隶属函数 μ_A 表征的集合。

(2) 模糊向量的定义：若向量 $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 的分量满足条件 $0 \leq a_i \leq 1$ ， $i=1, 2, \dots, n$ ，则称其为一个 n 维模糊向量。

(3) 模糊集合运算的定义：与经典集合运算类似，模糊集合之间也存在交、并、补等运算关系。设 A, B 是论域 U 上的模糊集合， A 与 B 的交集 $A \cap B$ 、并集 $A \cup B$ 和补集 $\bar{A}$ 也是论域 U 上的模糊集合。

$$\text{交运算(AND 运算): } \mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (3.2)$$

$$\text{并运算(OR 运算): } \mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (3.3)$$

$$\text{补运算(NOT 运算): } \mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad (3.4)$$

与经典的二值逻辑不同，模糊集合的运算是一种多值逻辑。同时，模糊集合的运算也满足一系列性质，如幂等率、交换率、结合率、分配率、吸收率等定律。

(4) 模糊关系定义：关系是客观世界存在的普遍现象。它描述了事物之间存在的某种联系。两个客体之间的关系称为二元关系，三个客体以上的关系称为多元关系。普通关系只是表示元素之间是否联系，但客观世界存在的很多关系是很难用“有”或“没有”这样简单的术语来划分，因此引出了模糊关系：

直积空间 $X \times Y = \{(x, y) | x \in X, y \in Y\}$ 上的模糊关系是 $X \times Y$ 的一个模糊子集 R ， R 的隶属度函数 $R(x, y)$ 表示了 X 中的元素 x 与 Y 中的元素 y 具有这种关系的程度。

上述定义的模糊关系，又称为二元模糊关系，当 $X=Y$ 时，称为 X 上的模糊关系 R 。当论域为 n 个集合的直积 $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ 时，它对应的为 n 元模糊关系 R 。

通常所谓的模糊关系 R ，一般是指二元模糊关系。

(5) 模糊关系的合成

模糊关系的合成是普通关系合成的推广，它的定义是：

设 U, V, W 是论域， Q 是 U 到 V 的一个模糊关系， R 是 V 到 W 的一个模糊关系， W 对 R 的合成 $Q \circ R$ 指的是 U 到 W 的一个模糊关系，它具有隶属函数：

$$\mu_{Q \cdot R}(u, w) = \vee(x_Q(u, v) \wedge x_R(v, w)) \quad (3.5)$$

二. 模糊推理

模糊推理实际上是从模糊前提出发按照模糊规则进行推理,而后得出结论(也是模糊的)。模糊规则是模糊推理的依据,这些模糊规则是人们实际工作中的经验用语言的表达,因此也称之为语言规则,基本上采用如下三种形式:

(1) “如 A 则 B” 型。此种形式可写成 “IF A THEN B” 的条件语句形式。

(2) “如 A 则 B 否则 C” 型。此种形式可写成 “IF A THEN B ELSE C”。

(3) “如 A 且 B 则 C” 型。此种形式可写成 “IF A AND B THEN C”。

在以上几种模糊规则中,第三种用得最多,尤其在模糊控制中更是如此。因为在控制过程中,不但要考虑实测值与设定值之间所形成的误差,而且还要考虑这个误差的变化率,一般用 A 表示误差,用 B 表示误差变化率,而用 C 表示控制量。

3.1.2 模糊控制原理

一. 模糊控制系统的组成

模糊控制属于计算机数字控制的一种形式,因此模糊控制系统的组成类同于一般的数字控制系统,唯一不同的是控制装置由模糊控制器来代替。其方框图如图 3.1 所示。

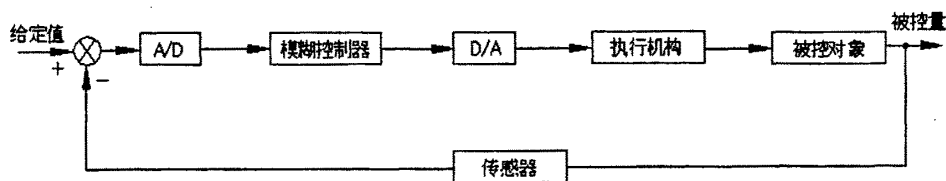


图 3.1 模糊控制系统的组成

Fig. 3.1 The composition of fuzzy control system

二. 模糊控制器的组成

模糊控制的核心部分是模糊控制器,它的控制规律一般由计算机的程序实现。

模糊逻辑控制器简称模糊控制器，因为模糊控制器的控制规则是基于模糊条件语句的语言控制规则^[19]。所以模糊控制器又称为模糊语言控制器。模糊控制器在模糊控制系统中具有举足轻重的作用，因此在模糊控制系统中，设计和调整模糊控制器的工作是很重要的。

模糊控制器通常由下面几个部分组成^[20]，其组成由图 3.2 所示。

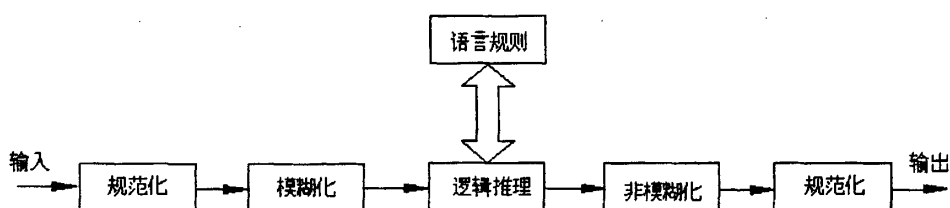


图 3.2 模糊控制器的组成

Fig. 3.2 The composition of fuzzy controller

输入、输出量的规范化是指将控制器的输入输出限制在规定的范围内，以便于控制器的设计和实现。由于控制器的输入一般是非模糊化的值，模糊化过程就是将输入值转化为模糊量。语言控制规则和模糊逻辑推理是控制器的核心。根据模糊输入量和语言控制规则，模糊逻辑推理最后决定输出量的一个分布函数。非模糊化过程将输出量的分布函数转化为规范化的输出量。最后控制器将规范化的输出量转换为实际的输出值（即控制量）去控制对象。上述控制系统中，给定量与被控制量之间的偏差是控制器的输入。控制器通过此偏差来控制系统的输出值，使其稳定在给定的范围内。

3.1.3 模糊控制器设计的基本方法

一、模糊控制器的结构设计^[21]

模糊控制器的结构设计是指确定模糊控制器的输入变量和输出变量。由于模糊控制器的控制规则是根据人的手动控制规则提出的，所以模糊控制规则的输入变量可以有三个，即误差、误差的变化及误差变化的变化，输出变量一般选择控制量的变化。一般情况下，一维模糊控制器用于一阶控制被控对象，由于这种控

制器输入变量只选择误差一个，它的动态控制性能不佳。所以目前广泛采用的均为二维模糊控制器，这种控制器以误差和误差的变化为输入变量，以控制量的变化为输出变量。

二. 模糊控制规则的设计^[22]

控制规则的设计是设计模糊控制器的关键，一般包括三部分设计内容：选择描述输入输出变量的词集，定义各模糊变量的模糊子集及建立模糊控制器的控制规则。

(1) 选择描述输入和输出变量的词集

模糊控制器的控制规则表现为一组模糊条件词句，在条件语句中描述输入输出变量状态的一些词汇（如“正大”、“负小”等）的集合，称为这些变量的词集。

一般选用“大、中、小”三个词汇来描述模糊控制器的输入、输出变量的状态。将大、中、小再加上正、负两个方向并考虑变量的零状态，共有七个词汇，即

{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}

一般用英文字头缩写为

{NB、NM、NS、O、PS、PM、PB}

(2) 定义各模糊变量的模糊子集

模糊子集使得某元素可以以一定程度属于某集合，而某元素属于某集合的程度是用隶属度来刻画的。定义一个模糊子集，实际上就是要确定模糊子集隶属函数曲线的形状。

(3) 模糊规则库

模糊规则库是由具有形式为“if-then”的若干模糊规则组成，它是模糊系统的核心部分，系统其他部分的功能在于解释和利用这些模糊规则来解决具体问题。关于模糊规则的获得，需要一些相关的专业和实践知识。一般模糊规则可以由两种途径获得：请教专家或采用基于测量数据的学习算法。

三. 输入量的模糊化

因为控制器的输入值一般都不是模糊数，因此模糊化过程就是将输入值转化

为模糊量。模糊化的基本思想是定义一个模糊语言映射作为从数值域到语言域的模糊关系，从而在数值测量的基础上，将数值域中的数值信号映射到语言域上，为实现模糊推理奠定基础。目前常用的方法有线性划分法和非线性划分法。

四. 模糊推理与模糊量的解模糊化

(1) 模糊推理

模糊推理主要包括将模糊规则库中的模糊“if-then”规则转换成某种映射，即将输入空间上的模糊集合映射到输出空间模糊集合^[23]。主要包括连接词的计算、“if-then”规则的表示、直接推理判据和一些相关的运算性质。

模糊推理机由知识库（数据库和规则库）与提供模糊推理算法的模糊推理决策逻辑构成，这是最基本的三个部分；有时还要加上控制规则修改、隶属函数修正和控制状态显示等模块；如果要用模糊推理调整 PID 控制中的参数，还需要加上 PID 控制模块；为了便于对设计的模糊控制系统在真正投入前了解其控制效果，并据此进行系统优化，系统设计时往往还要加上模拟模块，据此构成了完整的模糊推理机。

a. 知识库

知识库中存储着有关模糊控制器的所有相关知识，它们决定着模糊控制器的性能，是模糊控制器的中心。其中知识库包括的应用领域只是和响应控制目标有关的知识，它由数据库和语言控制规则库两部分组成。

数据库是用来定义模糊控制器中语言控制规则和模糊数据操作的，它被称做数据库，但并不是常规计算机软件中数据库的概念，它存储着有关模糊化、模糊推理、解模糊等相关知识，如模糊化中的论域变换方法、输入变量各模糊集合的隶属函数定义、模糊推理算法、解模糊算法、输出变量各模糊集合的隶属函数定义等。

规则库包含若干组模糊控制规则，即以“if-then…”形式表示，对专家控制经验集成而形成的模糊条件语句。

语言控制规则库通过一系列语言控制规则来表征控制目标和该领域专家的控制策略，它是根据被控系统的行为特性和专家的控制经验总结编写而成的。

b. 模糊推理机

模糊推理机的主要功能是模仿人的思维特征, 根据事先定好的由专家知识或控制经验取得的若干组模糊条件语句构成的模糊控制规则, 运用模糊数学理论对模糊控制规则进行计算推理, 实际上是根据模糊控制规则对输入的一系列条件进行综合评估, 以得到一个定性的用语言表示的决策输出量, 这个结果给出某一个确定的输出范围, 即所谓模糊输出量, 完成这部分功能的模块就称作模糊推理机。在模糊推理机中, 模糊推理决策逻辑是核心, 它能模仿人的模糊概念和运用模糊蕴涵运算以及模糊逻辑推理对模糊控制作用的推理进行决策。

(2) 解模糊化

通过模糊推理得出的模糊输出量是不能直接去控制执行机构的, 在这确定的输出范围中, 还必须确定一个最具有代表性的值作为真正的输出控制量, 完成这部分功能的模块就是解模糊化接口。

解模糊的主要功能是把经模糊推理得到的模糊控制量转化为精确的控制作用, 解模糊可以看作是模糊化的反过程, 它从模糊推理结果中产生控制数值, 作为模糊控制器的输出, 也就是说, 根据推理结果得到的值计算实际的输出值。具体做法是计算每个输入变量在其对应模糊集上的隶属度, 其中用的最多的是 gravity 法。

3.2 人工神经网络技术

3.2.1 人工神经网络概述

人工神经网络是指利用工程技术手段模拟人脑神经网络的结构和功能的一种技术系统, 是一种大规模并行的非线性动力学系统。它以一种简单计算——处理单元(即神经元)为节点, 采用某种网络拓扑结构构成。人工神经网络可以充分逼近任何复杂的非线性关系, 可学习和自适应不知道或不确定的系统, 它的所有定量或定性的信息都等势分布储存于网络内的各神经元, 有很强的鲁棒性和容错性, 由于采用了并行分布处理方法, 使得快速进行大量运算成为可能。它反映了人脑功能的若干基本特征, 包括并行信息处理、学习、联想、模式分类、记忆等。

神经网络是由大量的神经元广泛互联而成的网络。根据连接方式的不同,神经网络可分成两大类:没有反馈的前向网络和互相结合性网络。前向网络由输入层、中间层(或叫隐层)和输出层组成,中间层可有若干层,每一层的神经元只接受前一层神经元的输出。而相互连接型网络中任意两个神经元都有可能连接,因此输入信号要在神经元之间反复往返传递,从某一初态开始,经过若干次的变化,渐渐趋于某一稳定状态或进入周期震荡等其他状态。

目前已经建立了多种神经元与网络的模型,尤其在自动控制领域神经网络技术得到了巨大发展。神经网络对控制领域有着巨大吸引力,是由它本身的一些重要特点和性质决定的^[24]。

(1) 人工神经网络是从输入到输出的高度非线性映射,任意连续非线性函数映射关系都可由某一多层神经网络以任意精度加以逼近,便于解决非线性控制问题。

(2) 具有分布式存储信息的特点,即一个信息不是存在一个地方,而是分布在不同的位置,当局部网络受损时,能恢复原来的信息。

(3) 对信息的处理及推理过程具有并行的特点。大规模互联网络结构能很快实现全局性的实时信息处理,并很好地协调多种输入信息之间的关系,同时人工神经网络模型具有自动搜索能量函数极值点的功能,这种优化计算能力在自适应控制设计中十分有用。

(4) 神经网络具有自组织、自学习、自适应等特点。信息处理过程中具有很强的泛化能力。同时它还具有较强的容错特性,提高了信息处理的可靠性和鲁棒性。

(5) 神经网络的结构是相同神经元的大规模组合,可处理多输入信号并具有许多输出,适合用于多变量系统;适合用大规模集成电路实现;也适合于用计算技术进行模拟实现。

一、人工神经网络的分类^[25];

(1) 前向网络。前向网络又称前馈神经网络。如图 3.3 所示,神经元分层排列,有输入层、中间层(或叫隐层,可有若干层)和输出层,每一层的神经元只接受

前一层神经元的输出。前向网络是一种强有力的学习系统，其结构简单易于编程，它通过简单非线性处理单元的复合映射，可获得复杂的非线性处理能力，但是它缺乏丰富的动力学行为。

(2) 反馈网络

反馈网络的结构如图 3.4 所示。若总节点（神经元）数为 N ，则每个节点有 N 个输入和输出，也就是说，所有节点都是一样的，它们之间都可以相互连接。

反馈网络是一种反馈动力学系统，它需要工作一段时间才能达到稳定。

(3) 自组织网络

自组织网络中，输出节点与邻域其他节点广泛相连，并互相激励。输入节点和输出节点之间通过强度 $w_{ij}(k)$ 相连接，通过某种控制规则，不断的调整 $w_{ij}(k)$ 使得在稳定时，每一邻域的所有节点对某种输入具有类似的输出，并且这种聚类的概率分布与输入模式的概率分布相接近。

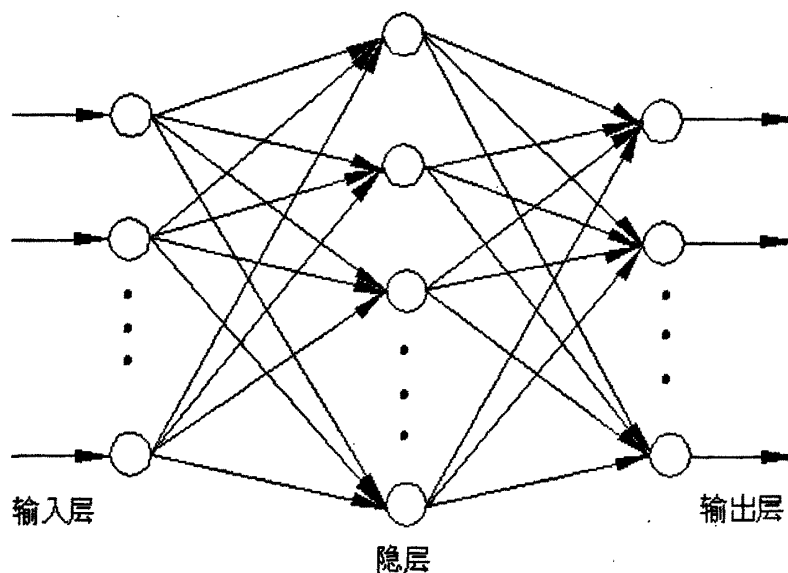


图 3.3 前向网络结构框架

Fig. 3.3 The frame of Feed forward NNS

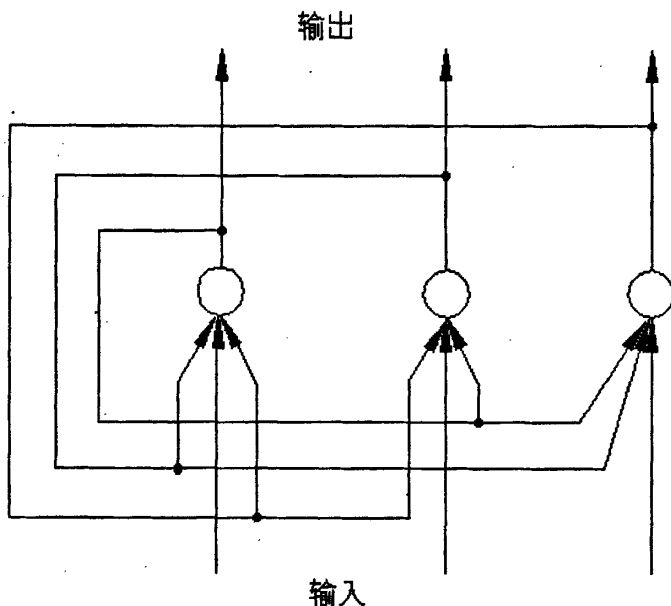


图 3.4 反馈网络结构图

Fig. 3.4 The frame of Feedback NNS

二. 人工神经网络的学习方法

学习能力是人工神经网络智能特性的主要标志，所谓神经网络的学习，主要是指通过一定的学习算法实现对突触结合强度（权值）的调整，使其达到具有记忆、识别、分类、信息处理和问题优化求解等功能。

目前神经网络的学习方法有多种，按有无导师可分为^[26]：有教师学习、无教师学习和再励学习。在有教师的学习方式中，网络的输出和期望的输出（即教师信号）进行比较，然后根据两者之间的差异调整网络的权值，最终使差异变小。在无教师的学习方式中，输入模式进入网络后，网络按照一预先设定的规则（如竞争规则）自动调整权值，使网络最终具有模式分类等功能。再励学习是介于上述两者之间的一种学习方式。

3.2.2 神经网络控制

由于非线性系统的多样性与复杂性，至今还未确立通用的非线性控制系统设计论。一些传统的方法如相平面法，线性化法和描述函数法不足以解决所有的非

线性问题。而神经网络具有处理非线性的能力，从控制理论的观点来看这一点很有意义。

神经网络自身的一些优良特点，使其在自动控制中发挥着举足轻重的作用^[27]：

- (1) 神经网络在精确模型的各种控制结构中充当对象的模型。
- (2) 在反馈控制系统中直接充当控制器的作用。
- (3) 在传统控制系统中起优化计算作用。
- (4) 在与其他智能控制方法和优化算法，如模糊控制、专家控制及遗传算法等相融合中，为其提供非参数化对象模型、优化参数、推理模型及故障诊断等。

神经网络在控制中的应用几乎涉及到传统控制、系统辨识、滤波和预报等所有方面。其控制结构分为监督控制、直接逆控制、模型参考控制、内模控制、预测控制、系统辨识、最优决策控制、自适应线性控制与增强学习控制等。神经网络控制系统的基本原理图如图 3.5。

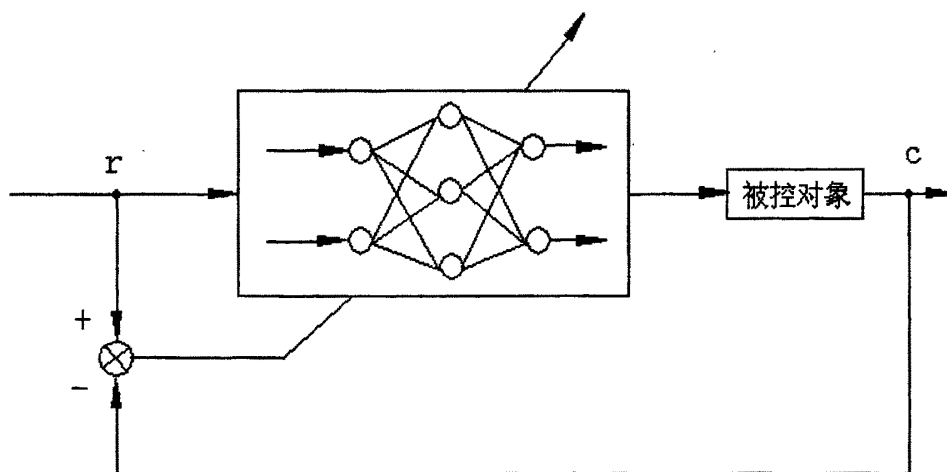


图 3.5 神经网络控制系统基本原理图

Fig. 3.5 Fundamental schematics of neural network control system

3.3 模糊神经网络

神经网络具有并行计算、分布式信息存储、容错能力强以及具备自适应学习功能等一系列的优点。由于这些优点,神经网络的研究受到广泛的关注并引起了学多研究工作者的兴趣。但一般来说,神经网络不适合表达基于规则的知识,因此在对神经网络进行训练时,由于不能很好的应用已有的经验知识,常常只能将初始权值取为零和随机数,从而增加了网络训练的时间或者陷入非要求的局部极值。这应该是神经网络的一个不足^[28]。

另一方面,模糊逻辑也是一种处理不确定性,非线性等的问题有力工具。它比较适合于表达那些模糊或定性知识,其推理方式比较类似于人的思维模式,这些都是模糊逻辑的显著优点。但是,一般来说模糊逻辑系统缺乏学习和自适应能力。虽然模糊自适应控制可以一定地实现这种功能,但要求设计和实现模糊系统的自适应控制是比较困难的。

基于上述讨论可以想到,若能将模糊逻辑和神经网络适当的结合起来,吸取两者的长处,则可以组成比单独的神经网络系统和单独的模糊系统性能都更好的系统,模糊神经网络就是在这种背景下产生的一门新兴技术^[29]。

模糊神经网络是指全部或部分采用各类模糊神经元所构成的一类可处理模糊信息的神经网络系统,它是模糊逻辑推理与神经网络有机结合的产物。与传统的神经网络模型不同,模糊神经网络中的结构与权值都有一定的物理含义。在设计模糊神经网络结构时,可以根据问题的复杂程度以及精度要求,并结合已得先验知识来构造相应的模糊神经网络模型。同时,模糊神经网络中的权值的初始化可根据先验知识人为的加以选择。这样,网络的学习速度大大加快,并在一定程度上回避了梯度优化算法带来的局部极值问题^[30]。

一. 模糊神经网络的特点

模糊神经网络具有一般神经网络的性质和特点外,还具有一些其他特殊的性质^[31]:

(1) 由于采用了模糊数学中的计算方法,使一些处理单元的计算变得较为简便,从而使信息处理的速度加快;

(2) 由于采用了模糊化的运行机制, 这使得系统的容错能力得到加强;

(3) 最主要的是, 模糊神经网络扩大了系统处理信息的范围, 使系统可同时处理确定性信息和非确定性信息;

(4) 同时, 它也大大增加了系统处理信息的手段, 使系统处理信息的方法变得更加灵活。

二. 模糊神经网络的分类

目前, 从神经网络与模糊系统的融合方式看, 模糊神经网络大致分为以下三种^[32]:

(1) 用神经网络实现模糊推理的模糊逻辑系统

该方法利用神经网络实现常规模糊逻辑系统的模糊规则库及其推理功能, 而模糊化、去模糊等功能既可由通常的模糊处理来实现, 也可由其他方法 (包括神经网络) 来实现。这样构成的模糊逻辑系统如图 3.6 所示。

实现模糊推理的神经网络可以是前馈型网络, 也可以是反馈型动态网络。最常见的是多层前馈网络。网络的输入层节点数对应输入模糊量化的总级数, 每个输入节点输入的即是输入所对应量化级的隶属度。神经网络的输出层节点数对应输出模糊量化的总级数, 输出推理所得的系统输出模糊集。



图 3.6 用神经网络实现模糊推理的模糊逻辑系统

Fig. 3.6 Neural networks based on fuzzy logic systems

(2) 用模糊逻辑增强的神经网络

在神经网络中引入模糊逻辑技术, 利用对网络学习性能分析过程中获取的适当启发性知识来控制学习算法, 就能动态地调整网络的学习过程, 加快学习速度, 改善性能。此外, 还可借鉴模糊逻辑的思路设计一些特殊结构的神经网络, 改善网络性能。

(3) 基于连接机制的模糊逻辑系统

若将模糊逻辑系统设计方法与神经网络的连接机制结构和学习方法结合起来,将模糊系统表达成连接机制方式的网络结构,就可得到一种模糊神经网络。

3.4 模糊神经网络控制在锅炉汽包水位控制中的适应性

在锅炉汽包水位控制系统中,各控制量和被控量之间关系非常复杂,且存在非线性、大延时、大惯性,难以用一个精确的数学模型来表达,现有的PID控制系统很难达到令人满意的效果,但在长期的生产过程中,积累了丰富的经验。本研究课题,利用模糊神经控制技术实现锅炉汽包水位控制,是因为:

模糊控制是一种基于规则的控制,它直接采用语言型控制规则,出发点是现场操作人员的控制经验或相关专家的知识,在设计中不需要建立被控对象的精确数学模型,因而使得控制机理和策略易于接受与理解,设计简单,便于应用。

神经网络具有自组织、自学习、自适应等特点。信息处理过程中具有很强的泛化能力。同时它还具有较强的容错特性,提高了信息处理的可靠性和鲁棒性。

模糊控制全过程可以用神经网络来实现,形成具有学习功能的模糊神经控制。

所以,基于上述分析,本论文设计了一种基于RBF模糊神经网络的控制器,并在第四,第五章中进行设计与仿真,进而分析该控制器的可行性与优越性。

第 4 章 船用锅炉汽包水位控制器的设计

本文在建立模型时主要考虑给水流量的影响，而蒸汽流量就作为实际控制中的补偿。在第三章的介绍中，我们了解到，模糊控制和神经网络控制拥有各自的优缺点，若能将模糊逻辑和神经网络适当的结合起来，吸取两者的长处，则可以组成比单独的神经网络系统和单独的模糊系统性能都更好的系统。因此，在本章中，针对锅炉汽包水位的数学模型，设计了三种控制器。分别是：基于 Fuzzy-PID 控制器、RBF 神经网络控制器和 RBF 模糊神经网络控制器。并将在第五章中，分别对其进行仿真，通过分析，验证模糊神经网络的可行性与优越性。

4.1 锅炉汽包水位的模糊 PID 控制

4.1.1 PID 参数模糊自整定控制系统结构

该控制器是由一个标准 PID 控制器和一个 Fuzzy 自调整机构组成。根据输入信号偏差 e 的大小，方向以及变化趋势等特征，通过 Fuzzy 推理作出相应决策，在线调整 P、I、D 参数修正值以适应控制系统的参数变化和工作条件变化。

基于模糊逻辑推理的 PID 控制器以控制专家整定控制器参数的经验和知识为基础，在 PID 算法的基础上增加了 E 和 EC 的计算，并将在工艺分析和操作经验基础上总结的专家知识，以产生语句 IF（条件）THEN（结果）的形式组成知识库，经模糊合成推理形成模糊查询矩阵。根据模式状态变量 E 和 EC ，通过实时调整机构在知识库中搜索相应的模糊推理矩阵，并进行参数调整^[33]，如图 4.1。

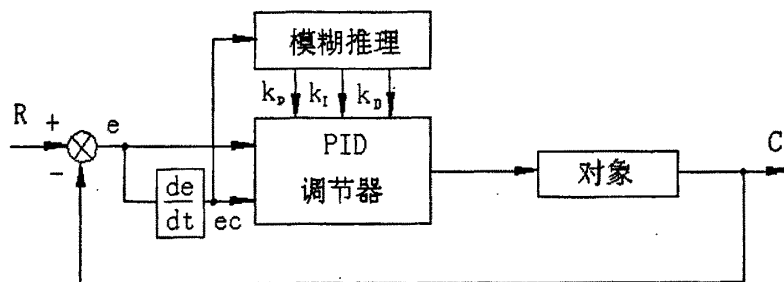


图 4.1 PID 参数模糊自整定控制系统结构图

Fig. 4.1 The frame of PID parameter fuzzy self-tuning control system

4.1.2 PID 参数模糊自整定的原则

PID 调节器的控制规律为： $u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d ec(k)$ ，其中： K_p 为比例系数； K_i 为积分系数； K_d 为微分系数； $e(k)$ 、 $ec(k)$ 分别为偏差和偏差变化率。

模糊自整定 PID 参数的目的是使参数 K_p 、 K_i 、 K_d 随着 e 和 ec 的变化而自行调整，故应首先建立它们之间的关系，根据实际经验，参数 K_p 、 K_i 、 K_d 在不同的 e 和 ec 下自调整要满足如下调整原则^[34]：

(1) 当 e 较大时，为加快系统的相应速度使系统具有较好的跟踪性，防止因开始时 e 的瞬间变大可能会引起的微分溢出，应取较大的 K_p 和较小的 K_d ；同时由于积分作用太强会使系统超调加大，因而要对积分作用加以限制，通常取较小的 K_i 值。

(2) 当 e 中等大小的时候，为减小系统的超调量，保证一定的相应速度， K_p 应适当减小；在这种情况下， K_d 的取值对系统的影响较大，应取得较小些， K_i 的值取值大小要适中。

(3) 当 e 较小时，为了减小稳态误差，使系统具有较好的稳态性能， K_p 与 K_i 应取得大些，为了避免输出响应设定值附近振荡，同时考虑系统的抗干扰性能，当 ec 较大时， K_d 的取值可取得小些；当 ec 较小时， K_d 的取值可取得大些。

根据以上规则可得参数模糊规则表如表 4.1、表 4.2 和表 4.3。

表 4.1 ΔK_p 的模糊控制规则

Tab. 4.1 Fuzzy control rules of ΔK_p

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 4.2 ΔK_i 的模糊控制表

Tab. 4.2 Fuzzy control rules of ΔK_i

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 4.3 ΔK_d 的控制规则表Tab. 4.3 Fuzzy control rules of ΔK_d

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

在汽包水位实时控制中, 根据汽包水位的误差 e 和误差变化量 ec , 直接查找模糊控制规则表得出校正量, 用重心法将其去模糊转化为清晰量, 分别乘以量化因子求得最终结果 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。将其与 PID 基准值 K_p' 、 K_i' 、 K_d' 分别相加得到最佳的瞬态 PID 参数, 然后按照常规的 PID 运算计算。

4.1.3 输入输出变量的 Fuzzy 化

由参数自整定 Fuzzy-PID 控制器的系统框图可知, 其中的参数校正部分实质为一个 Fuzzy 控制器, 其输入语言变量为 E 、 EC , 输出语言变量分别为 K_p 、 K_i 、 K_d 。

运用 Fuzzy 规则集推理进行 PID 参数自校正的 Fuzzy 算法设计步骤如下^[35]:

Step1: 将 E 、 EC 和 K_p 、 K_i 、 K_d 变量 Fuzzy 化, 确定各自 Fuzzy 子集的隶属度;

Step2: 用 K_p 、 K_i 、 K_d 的 Fuzzy 校正模型来表达参数的校正过程;

Step3: 应用 Fuzzy 合成推理计算出 K_p 、 K_i 、 K_d 的 Fuzzy 校正矩阵表。

对于系统响应的误差 E 、误差变化率 EC 分别具有一定的变化范围, 将其变化范围分别定义为 Fuzzy 集上的论域。

$E、EC = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

$K_p、K_i、K_d = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

并设其 Fuzzy 子集为:

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

$K_p、K_i、K_d = \{ NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB \}$

(1) $E、EC$ 的模糊化

$E、EC$ 隶属度函数为三角形函数，隶属度函数如图 4.2。

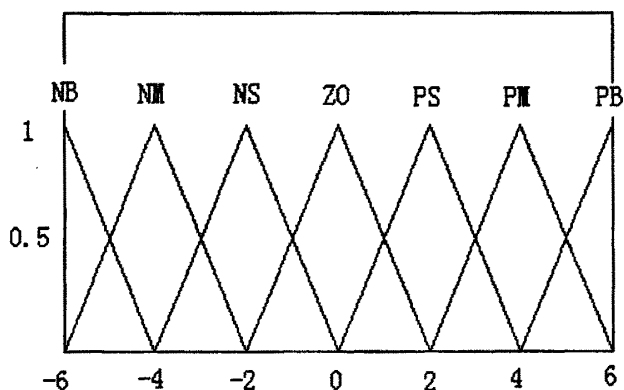


图 4.2 E/EC 隶属函数曲线

Tab. 4.2 Membership function curves of E/EC

对应的误差 E 和误差变化率 EC 的模糊变量表如表 4.4。

表 4.4 E/EC 模糊变量表

Tab. 4.4 Fuzzy variable of E/EC

E/EC	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(2) K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊化

K_p 、 K_i 、 K_d 隶属函数如图 4.3 所示。

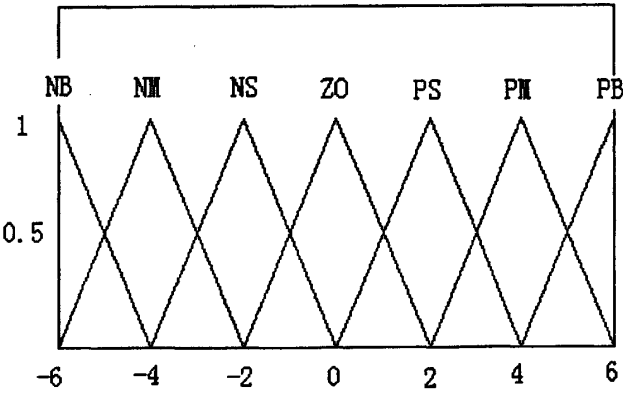


图 4.3 所示 K_p 、 K_i 、 K_d 隶属函数曲线

Fig. 4.3 Membership function curves K_p 、 K_i 、 K_d

对应的 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊变量表如表 4.5。

表 4.5 K_p 、 K_i 、 K_d 模糊变量表

Tab. 4.5 Fuzzy variable of K_p 、 K_i 、 K_d

$K_p/K_i/K_d$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.1.4 Fuzzy 合成推理算法

由 Fuzzy-PID 控制器的结构可知,它属于二维输入三维输出的 Fuzzy 控制系统,输入分别为 E 和 EC , 而输出分别为 PID 的三个调节参数 K_p 、 K_i 和 K_d , 在获得了三者的调整规则模型后,接下来的工作即是根据模糊理论进行算法合成,求得相应的 K_p 、 K_i 、 K_d 的三个控制表,因为三个控制表的求解过程完全一样,故在此仅将 K_p 控制表的求取过程详述如下^[36]:

(1) 合成推理算法

对于二维输入 (E 、 EC), 单输出 (K_p) 的 Fuzzy 控制系统, 其控制规则可写成如下语言推理形式:

$$\text{If } E = E_i \text{ and } EC = EC_j \text{ then } K_p = K_{pij} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (4.1)$$

其中 E_i 、 EC_j 、 K_{pij} 分别是定义在 E 、 EC 、 K_p 上的 Fuzzy 集, 式 (4.1) 一般可用一个 $E_i \times EC_j$ 到 K_{pij} 的 Fuzzy 关系 R 来描述, 即

$$R = U_{ij} (E_i \times EC_j) \times K_{pij} \quad (4.2)$$

根据 Fuzzy 数学理论, “ $\times$ ” 运算的含义由下式定义

$$\mu_R(e, ec, K_p) = \vee [\mu_{E_i}(e) \wedge \mu_{EC_j}(ec) \wedge \mu_{K_{pi}}(K_p)] \quad (4.3)$$

如果偏差和偏差变化率分别取 E 和 EC ，则 Fuzzy 控制器给出的控制量的变化由 Fuzzy 推理合成规则算出：

$$K_p = (E \times EC) \circ R \quad (4.4)$$

$$\text{即 } \mu_{K_p}(K_p) = \vee (\mu_R(e, ec, K_p) \wedge (\mu_E(e) \wedge \mu_{EC}(ec))) \quad (4.5)$$

因此，根据所得 K_p 的模糊规则就可按式 (4.2)、式 (4.3) 把相应的 Fuzzy 关系 R 求出来，反之，若系统的 Fuzzy 关系 R 为已知时，就可根据输入 E 和 EC 利用式 (4.4) 求出 K_p 的调整表。

(2) PID 参数解模糊判决

这里根据实际情况采用了最大隶属度法进行解模糊判决，从而得到了 K_p 参数的 Fuzzy 调整控制表 4.6。同理可得 K_i 和 K_d 的 Fuzzy 调整决策矩阵表 4.7 和表 4.8。

表 4.6 K_p 参数的 Fuzzy 调整控制表

Tab. 4.6 Fuzzy regulation of parameter K_p

E/EC	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	+6	+6	+6	+5	+4	+4	+4	+3	+2	+1	0	0	0
-5	+6	+6	+6	+5	+4	+3	+3	+3	+2	+1	0	-1	-1
-4	+6	+6	+6	+5	+4	+3	+2	+2	+2	+1	0	-1	-2
-3	+5	+5	+5	+5	+4	+3	+2	+1	+1	0	-1	-1	-2
-2	+4	+4	+4	+4	+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-2	-2
-1	+4	+4	+3	+3	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-3	-3
0	+4	+4	+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-4
+1	+3	+3	+3	+2	+1	0	-1	-1	-2	-3	-4	-4	-4
+2	+2	+2	+2	+1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4
+3	+2	+1	+1	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-4	-5	-5
+4	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-6
+5	+1	+	0	-2	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-6
+6	0	0	0	-2	-4	-4	-4	4	-4	-5	-6	-6	-6

由 E 、 EC 及 K_p 、 K_i 、 K_d 的 Fuzzy 子集的隶属度，再根据各 Fuzzy 子集的隶属度赋值表和各参数的 Fuzzy 调整规则模型，运用 Fuzzy 合成推理设计出的 PID 参数 Fuzzy 调整矩阵（表 4.6，4.7，4.8），这是整定系统 Fuzzy 控制算法的核心，我们将其存入程序存储器中供查询^[37]。

表 4.7 K_i 参数的 Fuzzy 调整控制表

Tab. 4.7 Fuzzy regulation of parameter K_i

E/EC	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	0	0
-5	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	0	0
-4	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	0	0
-3	-6	-5	-5	-4	-3	-3	-2	-1	-1	0	+1	+1	+1
-2	-6	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	+1	+2	+2	+2
-1	-5	-5	-4	-3	-2	-1	-1	0	+1	+2	+3	+3	+3
0	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+4	+4
+1	-4	-3	-3	-2	-1	0	+1	+1	+2	+3	+4	+5	+5
+2	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+2	+2	+3	+4	+5	+6
+3	-2	-2	-1	0	+1	+1	+2	+3	+3	+4	+5	+5	+6
+4	0	0	0	+1	+2	+2	+2	+3	+4	+5	+6	+6	+6
+5	0	0	0	+1	+2	+3	+3	+3	+4	+5	+6	+6	+6
+6	0	0	0	+1	+2	+3	+4	+4	+4	+5	+6	+6	+6

表 4.7 K_d 参数的 Fuzzy 调整表Tab. 4.7 Fuzzy regulation of parameter K_d

E/EC.	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	+2	0	-2	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-1	+2
-5	+2	0	-2	-3	-6	-5	-5	-5	-5	-4	-3	-1	+1
-4	+2	0	-2	-3	-6	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0
-3	+1	0	-2	-4	-5	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0
-2	0	-1	-2	-3	-4	-4	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0
-1	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-1	0
0	0	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	0
+1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+3	+2	+2	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+2	+2
+4	+6	+3	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+3	+6
+5	+6	+4	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+2	+2	+2	+3	+6
+6	+6	+5	+4	+4	+4	+4	+4	+3	+2	+2	+2	+3	+6

定义 K_p 、 K_i 、 K_d 参数调整算式如下：

$$K_p = K_p' + \{E, EC\} K_p = K_p' + \Delta K_p \quad (4.6)$$

$$K_i = K_i' + \{E, EC\} K_i = K_i' + \Delta K_i \quad (4.7)$$

$$K_d = K_d' + \{E, EC\} K_d = K_d' + \Delta K_d \quad (4.8)$$

式中， K_p 、 K_i 、 K_d 是 PID 控制器的参数， K_p' 、 K_i' 、 K_d' 是 K_p 、 K_i 、 K_d 的初始参数，它们通过常规方法得到。在线运行过程中，通过微机测控系统不断的检测系统的输出响应值，并实时的计算出偏差和偏差变化率，然后将它们模糊化得到 E 和 EC ，通过查询 Fuzzy 调整矩阵可得到 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数的调整量，完成对控制器参数的调整。

4.2 锅炉汽包水位的 RBF 神经网络控制

4.2.1 RBF 神经网络的结构

径向基函数神经网络也称 RBF (Radial Basis Function) 神经网络, 是一种局部逼近的神经网络。它是由 J. Moody 和 C. Darken 在 20 世纪 80 年代末提出的一种神经网络, 是具有单隐层的三层前馈网络^[38]。其特点是由输入到输出的映射是非线性的, 而隐含层空间到输出空间的映射是线性的, 从而大大加快了学习速度并避免了局部极小问题。

RBF 神经网络的结构如图 4.4 所示:

RBF 神经网络选取的基函数为

$$\alpha_j(x) = \psi_j(\|x - c_j\|/\sigma_j) \quad (4.9)$$

其中 c_j 是第 j 个函数的中心点, σ_j 是一个可以自由选择参数, 它决定了该基函数围绕中心点的宽度, $\|x - c_j\|$ 是向量 $x - c_j$ 的范数, 它通常表示 x 和 c_j 之间的距离。 ψ_j 是一个径向基对称的函数, 它在 c_j 处有一个唯一的最大值, 随着 $\|x - c_j\|$ 的增大, ψ_j 迅速衰减到零, 对于给定的输入 $x \in R^n$, 只有一小部分中心靠近 x 的处理单元被激活。

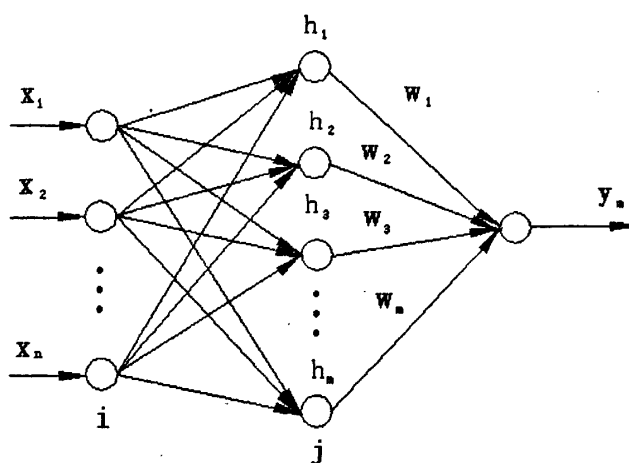


图 4.4 RBF 神经网络结构

Fig. 4.4 Structure of RBF Neural network

最常用的 RBF 基函数是高斯 (Gaussian) 基函数, 即

$$\alpha_j(x) = \psi_j(\|x - c_j\|/\sigma_j) = e^{-\frac{\|x - c_j\|^2}{\sigma_j^2}} \quad (4.10)$$

RBF 神经网络由两层组成: 输入层实现从 $x \rightarrow \alpha_j(x) = \psi_j(\|x - c_j\|/\sigma_j)$ 的非线性映射, 输出层实现 $\alpha_j(x)$ 到 y 的线性映射, 即

$$y = W\alpha(x) \quad (4.11)$$

$$\text{或 } y_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} \alpha_j(x) \quad i=1, 2, \dots, r \quad (4.12)$$

其连接权的学习算法为:

$$w_{ij}(l+1) = w_{ij}(l) + \beta[y_i^d - y_i(l)]\alpha_j(x)/\alpha^T(x)\alpha(x) \quad (4.13)$$

由于 $\alpha_j(x)$ 为高斯函数, 因而对任意 x 均有 $\alpha_j(x) > 0$, 从而失去局部调整权值的优点。而事实上当 x 远离 c_j 时, $\alpha_j(x)$ 已非常小, 可作为 0 对待。因此实际上只当 $\alpha_j(x)$ 大于某一数值 (例如 0.05) 时才相应的权值 w_{ij} 进行修改。经过处理后 RBF 神经网络也同样具备局部逼近网络学习收敛快的优点。

上面学习算法中的学习率 β 选取为: 选取 $0 < \beta < 2$ 时可确保迭代学习算法的收敛性, 但实际上通常只取 $0 < \beta < 1$ 。

上述高斯基函数具有如下一些优点:

- (1) 表示形式简单, 即对于多变量输入也不增加太多的复杂性;
- (2) 径向对称;
- (3) 光滑性好, 任意阶倒数均存在;
- (4) 由于该函数表示简单且解析性好, 因而便于进行理论分析。

高斯函数不具备紧密性, 这是该基函数的一个主要缺点。但采用的近似处理 ($\alpha_j(x)$ 小于某一小数时即取其为 0), 可以在一定程度上克服该缺点。

4.2.2 RBF 神经网络控制系统的设计

(1) 控制系统的结构^[39]

传统的 PID 控制具有结构简单、鲁棒性好等优点，但由于过程的时变性，一组 PID 参数很难取得满意的控制效果。神经网络具有自学习和自适应的能力，因此利用神经网络的特点对系统进行学习，可以针对不同的运行工况找到最佳的 PID 控制参数。本文的神经网络控制器就是利用 RBF 神经网络不断调整 PID 的控制参数，此控制器的结构框图如图 4.5 所示^[40]。

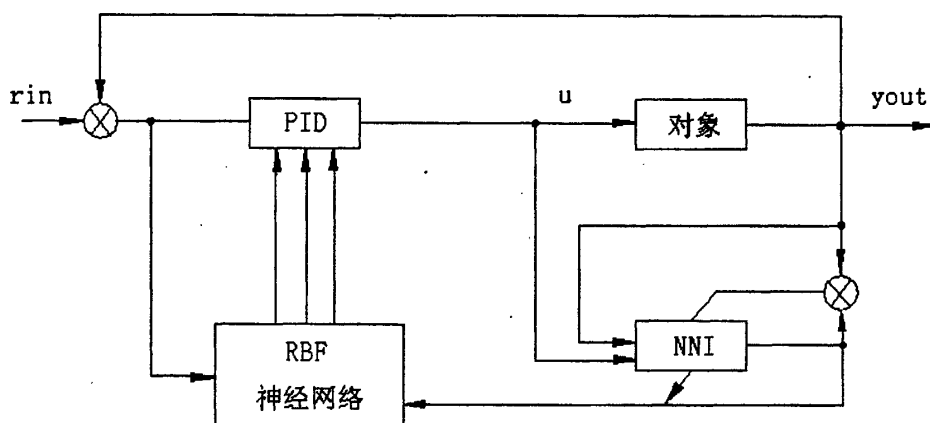


图 4.5 RBF 神经网络控制系统框图

Fig. 4.5 The frame of RBF Neural network control system

(2) 控制器的设计^[41]

采用增量式 PID 控制器，控制误差为：

$$error(k) = rin(k) - yout(k) \quad (4.14)$$

PID 的三项输入为：

$$xc(1) = error(k) - error(k-1)$$

$$xc(2) = error(k)$$

$$xc(3) = error(k) - 2error(k-1) + error(k-2) \quad (4.15)$$

控制器的控制算法为：

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

$$\Delta u(k) = k_p(error(k) - error(k-1)) + k_i error(k) + k_d(error(k) - 2error(k-1) + error(k-2)) \quad (4.16)$$

式中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例增益、积分系数、微分系数, K_p 、 K_i 、 K_d 的调整采用梯度下降法:

$$\Delta k_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_p} = \eta error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(1) \quad (4.17)$$

$$\Delta k_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial E}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_i} = \eta error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(2) \quad (4.18)$$

$$\Delta k_d = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_d} = \eta error(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(3) \quad (4.19)$$

式中, $\frac{\partial y}{\partial \Delta u}$ 为被控对象的 Jacobian 信息, 可以通过神经网络的辨识而得。

神经网络整定指标选择为:

$$E(k) = \frac{1}{2} error(k)^2 \quad (4.20)$$

(3) RBF 辨识网络结构

利用 RBF 神经网络来辨识系统信息 $\frac{\partial y_{out}}{\partial \Delta u}$

RBF 神经辨识网络是三层前向网络, 由输入层、中间层和输出层组成, 其结构与图 4.4 相同。

在 RBF 神经网络结构中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量。在中间层 RBF 网络采用径向基向量 $H = [h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_m]^T$, 其中 h_j 为高斯基函数:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|X - C_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (4.21)$$

网络的第 j 个结点的中心矢量为 $C_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}]^T$, 其中 $i=1, 2, \dots, n$

设网络的基宽向量为:

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$$

b_j 为节点 j 的基宽度参数, 且为大于零的数。

网络的权向量为:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_m]^T$$

辨识网络的输出为:

$$y_m(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m \quad (4.22)$$

辨识器的性能指标函数为:

$$J = \frac{1}{2} (y_{out}(k) - y_m(k))^2 \quad (4.23)$$

根据梯度下降法, 输出权、节点中心及节点基宽参数的迭代算法如下:

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta (y_{out}(k) - y_m(k)) h_j + \alpha (w_j(k-1) - w_j(k-2)) \quad (4.24)$$

$$\Delta b_j = (y_{out}(k) - y_m(k)) w_j h_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3} \quad (4.25)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta \Delta b_j + \alpha (b_j(k-1) - b_j(k-2)) \quad (4.26)$$

$$\Delta c_{ji} = (y_{out}(k) - y_m(k)) w_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2} \quad (4.27)$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta \Delta c_{ji} + \alpha (c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \quad (4.28)$$

式中, η 是学习速率, α 为动量因子。

Jacobian 阵 (即为对象的输出对控制输入变化的灵敏度信息) 算法为:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_{ji} - x_i}{b_j^2} \quad (4.29)$$

式中 $x_i = \Delta u(k)$

4.3 锅炉汽包水位的 RBF 模糊神经网络控制

本文选择了基于 RBF 模糊神经网络的 PID 控制器对锅炉水位系统进行控制。径向基函数 RBF 模糊神经网络克服了模糊系统和神经网络各自的缺点, 网络选择的基函数不仅径向对称, 而且具有良好的光滑性和任意阶导数, 便于理论分析。

采用RBF神经网络模型构成模糊神经网络的最大优势在于RBF神经网络和模糊推理过程的函数等价性。

4.3.1 RBF 模糊神经网络的结构

RBF 模糊神经网络是由神经网络结构实现模糊控制的算法，其结构如图 4.6 所示。该网络由输入层、模糊化层、模糊推理层及输出层构成。

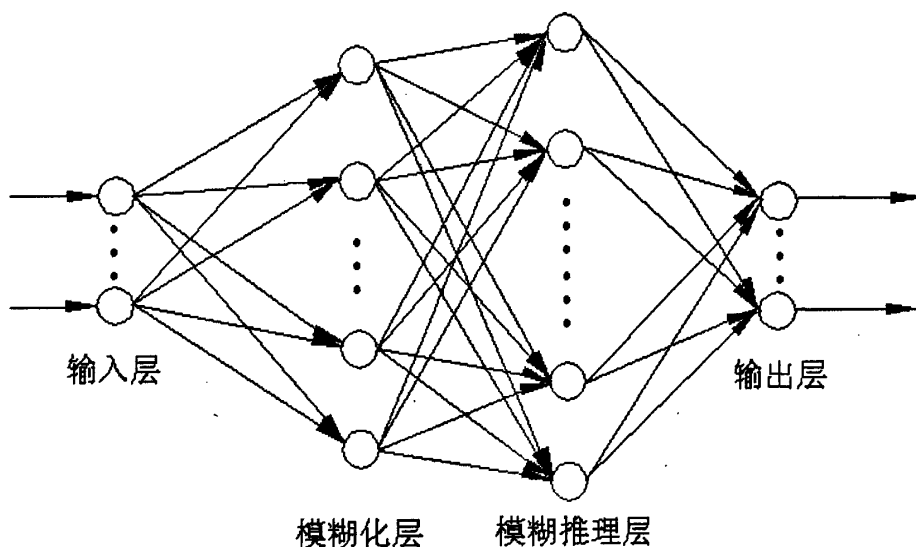


图 4.6 RBF 模糊神经网络结构

Fig. 4.6 RBF fuzzy neural network structure

第一层：输入层。

输入节点个数为输入变量个数，输入层的各个节点直接与输入量的各个分量连接，将输入量传到下一层。对该层的每个节点 i 的输入输出表示为：

$$f_1(i) = X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (4.30)$$

第二层：输入空间划分层。

也可以称为隶属度函数层，实现输入变量的模糊化，节点的个数是各个输入变量的模糊子集数的和，每个节点代表一个语言变量值，它的作用是计算每个输

入分量属于各语言变量值模糊集合的隶属度函数。采用高斯函数作为隶属函数, c_{ij} 和 b_{ij} 分别是第 i 个变量第 j 个模糊集合的隶属函数的中心和宽度。

$$f(i, j) = \exp\left\{-\frac{(f_1(i) - c_{ij})^2}{(b_{ij})^2}\right\} \quad (4.31)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。

第三层: 模糊推理层。

模糊推理层通过与模糊化层的连接来完成模糊规则的匹配, 各个节点之间实现模糊运算, 即通过各个节点的组合得到相应的点火强度。每个节点 j 的输出为该节点所有输入信号的乘积, 即:

$$f_3(j) = \prod_{i=1}^N f_2(i, j) \quad (4.32)$$

第四层: 输出层。

输出层输出为 k_p , k_i , k_d 整定结果, 该层由三个节点构成, 即:

$$f_4(i) = w \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N w(i, j) \cdot f_3(j) \quad (4.33)$$

式中, w_{ij} 组成输出节点与第三层各节点的连接权矩阵 $i = 1, 2, 3$ 。

4.3.2 RBF 模糊神经网络 PID 控制器的设计

(1) 控制系统的结构设计^[42]

本文设计的 RBF 神经网络控制器采用 PID 控制器、模糊 RBF 神经网络与 RBF 辨识网络相结合的控制方法, 其结构如图 4.7 所示。由 RBF 网络作为辨识器 NNI, 实现对被控对象的 Jacobian 信息辨识, 由模糊 RBF 神经网络在线调整 PID 控制器的 k_p , k_i , k_d 三个参数, 再由 PID 控制器实现对被控对象的控制。

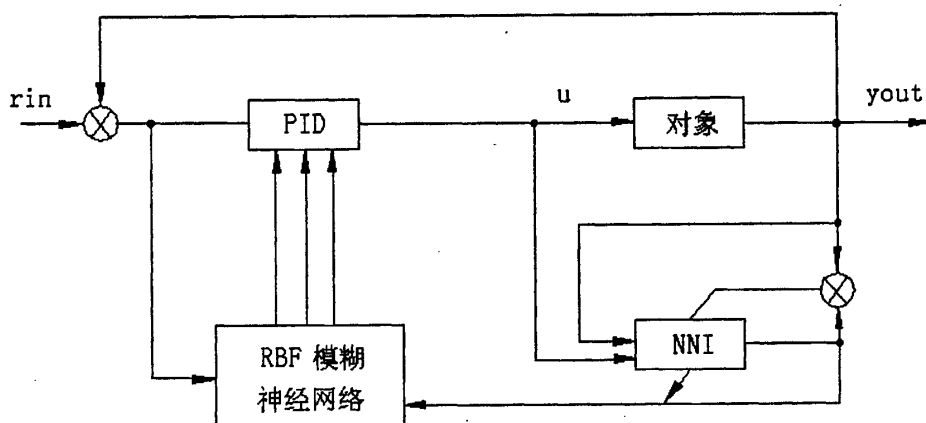


图 4.7 模糊 RBF 神经网络 PID 控制系统

Fig. 4.7 Fuzzy RBF network PID control system

(2) 控制器的具体实现

控制器采用增量式 PID 控制算法，有：

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (4.34)$$

式中

$$\Delta u(k) = f_4 \cdot xc = k_p xc(1) + k_i xc(2) + k_d xc(3) \quad (4.35)$$

其中 f_4 是 RBF 模糊神经网络的输出层的输出，为 k_p ， k_i ， k_d 的整定结果。具体为：

$$k_p = f_4(1), k_i = f_4(2), k_d = f_4(3) \quad (4.36)$$

$$xc(1) = e(k) \quad (4.37)$$

$$xc(2) = e(k) - e(k-1) \quad (4.38)$$

$$xc(3) = \Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (4.39)$$

采用 Delta 学习规则来修正可调参数，定义目标函数为

$$E = \frac{1}{2} (rin(k) - yout(k))^2 \quad (4.40)$$

式中， $rin(k)$ 和 $yout(k)$ 分别表示网络的实际输出和理想输出，每一个迭代步骤 k 的控制误差为 $rin(k) - yout(k)$ 。

网络权值的学习算法如下：

$$\Delta w_j(k) = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w_j} = \eta \cdot (rin(k) - yout(k)) \cdot \frac{\partial yout}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial f_4} \frac{\partial f_4}{\partial w_j} \quad (4.41)$$

式中， $\frac{\partial yout}{\partial \Delta u}$ 为被控对象的 Jacobian 信息，可通过神经网络的辨识而得，其方

法可参照第四章中关于 RBF 神经网络辨识的有关知识。 w_j 为网络输出节点与上一层节点的连接权, $j=1,2,\dots,N$, η 为学习速率。

第 5 章 控制系统的仿真与分析

系统仿真是在 Matlab 软件环境下进行的仿真。为了对所设计的几种控制器的性能进行比较,下面分两种情况分别进行仿真。在本文中,给水流量的时间常数确定为 10s, ε 为 20mm, 因此水位被控对象数学模型为: $G_D(s) = \frac{0.02}{10s^2 + s}$

5.1 无扰动时的仿真研究

(1) PID 控制

系统的阶跃信号仿真响应曲线如图 5.1 所示, 其中 k_p , k_i , k_d 的数值选取为 5, 0.001, 8。

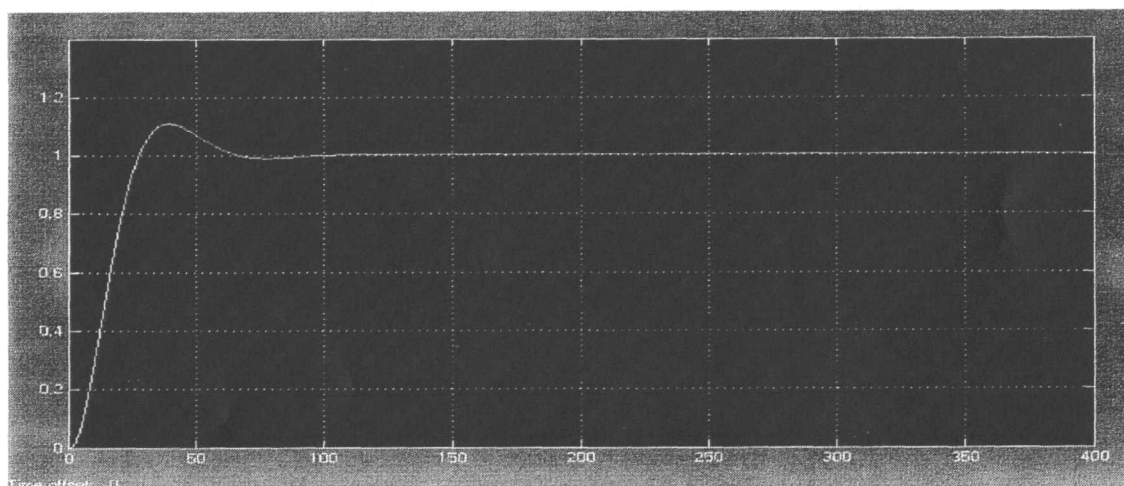


图 5.1 传统 PID 控制阶跃响应图

Fig. 5.1 Respond curve of PID control

由图 5.1 可以看出, 系统在单位阶跃信号控制作用下, 调节时间约为 105s, 超调量为 11%, 稳态余差基本上为零, 说明锅炉汽包水位采取传统的 PID 控制方法时, 如果选取适当的 PID 参数, 系统的响应曲线较为理想。

(2) 模糊 PID 控制

将 4.1 中设计的模糊控制器应用到水位控制系统中, 其阶跃响应仿真曲线如

图 5.2 所示。

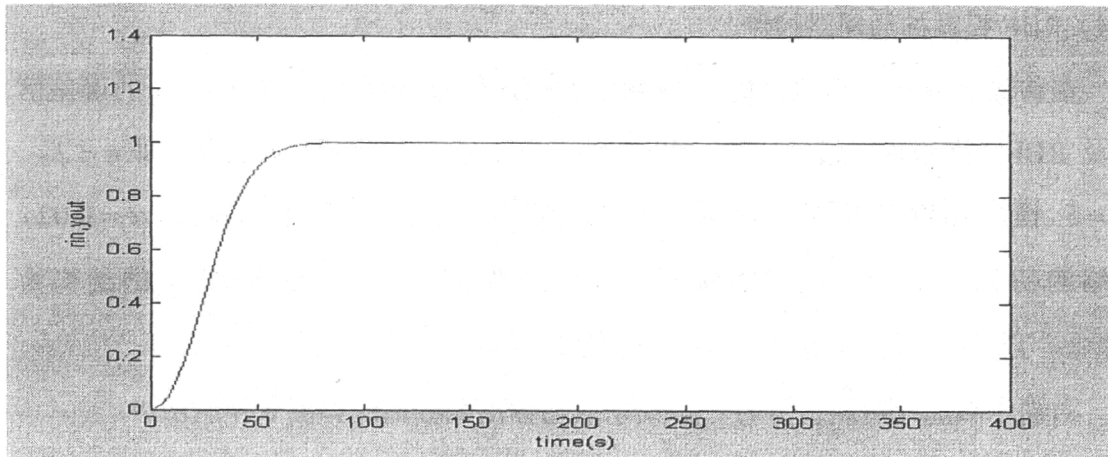


图 5.2 模糊 PID 控制仿真曲线图

Fig. 5.2 Fuzzy PID control simulation curve

由图 5.2 可以看出，模糊 PID 控制调节时间约为 78s，与传统的 PID 控制系统相比，模糊 PID 控制调节时间快，超调量明显减小，系统很快就能达到稳定状态。

(3) RBF 神经网络控制

当在输入端加入阶跃信号时，系统的仿真响应曲线如图 5.3 所示。

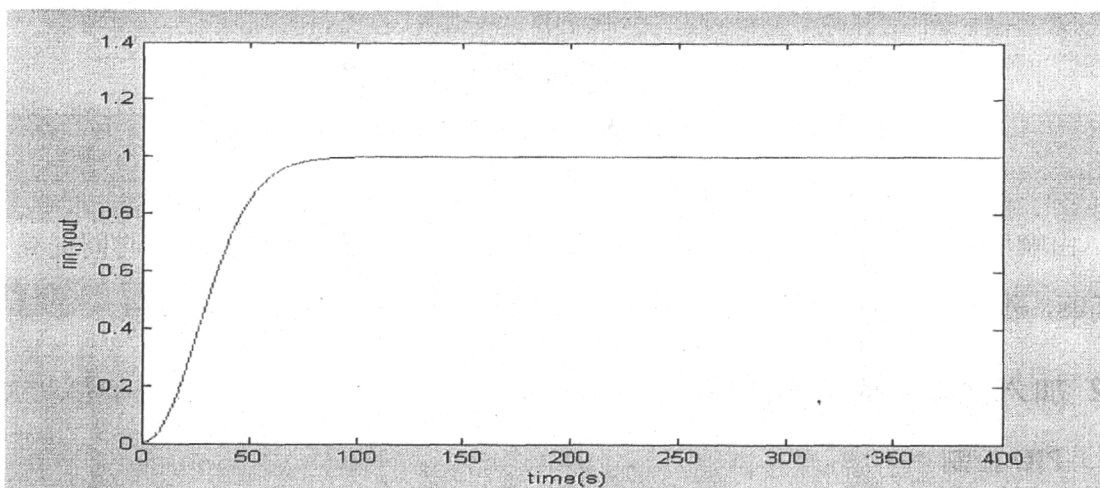


图 5.3 RBF 神经网络控制仿真曲线图

Fig. 5.3 RBF Neural network control simulation curve

由图 5.3 可以看出,神经网络控制调节时间约为 100s,系统的优点是没有稳态余差,超调量较小,但是系统的调节时间较长。

(4) RBF 模糊神经网络控制

在仿真过程中,模糊 RBF 神经网络的输入信号为两个,即控制系统的误差信号及 RBF 网络的辨识信号,针对每个输入取 5 个模糊集进行模糊化,即 $n = 2$, $N = 5$,模糊 RBF 神经网络取 2-5-5-3 的形式,网络学习参数取 $\eta = 0.20$, $\alpha = 0.02$,网络的初始权值及隶属函数参数初值通过实验得到。RBF 辨识网络的结构为 3-6-1,它的输入信号为: $\Delta u(k)$, $yout(k)$, $yout(k-1)$ 。

当输入端加入阶跃信号时,仿真系统的输出响应曲线如图 5.4 所示。

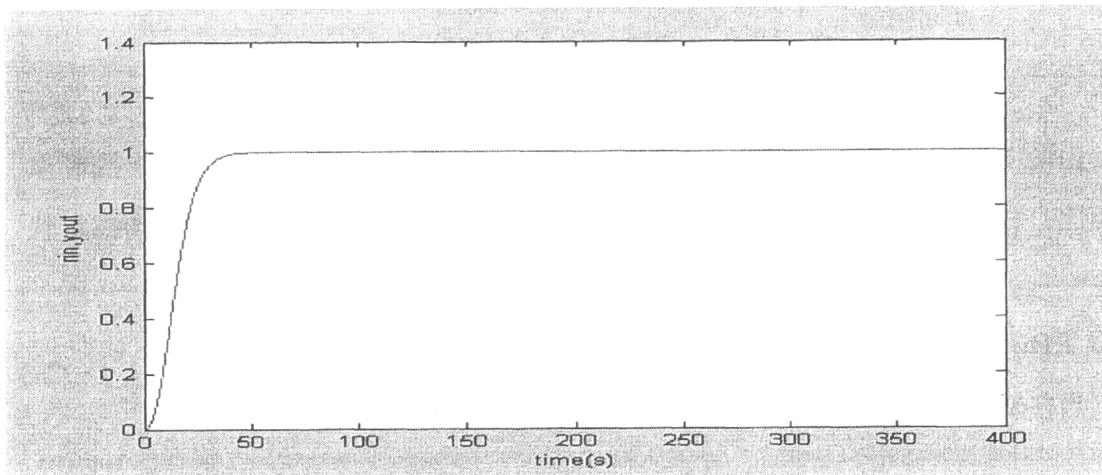


图 5.4 RBF 模糊神经网络控制仿真曲线图

Fig. 5.3 RBF fuzzy neural network control simulation curve

由响应曲线可以看出,应用模糊神经网络的控制系统,系统的响应时间提高到 50s,没有超调量,没有余差,具有良好的性能。

5.2 加入扰动后的仿真研究

(1) PID 控制

加入一个小的正弦干扰信号(幅值为 0.1,频率为 0.05),控制系统的仿真曲线如图 5.5 所示。

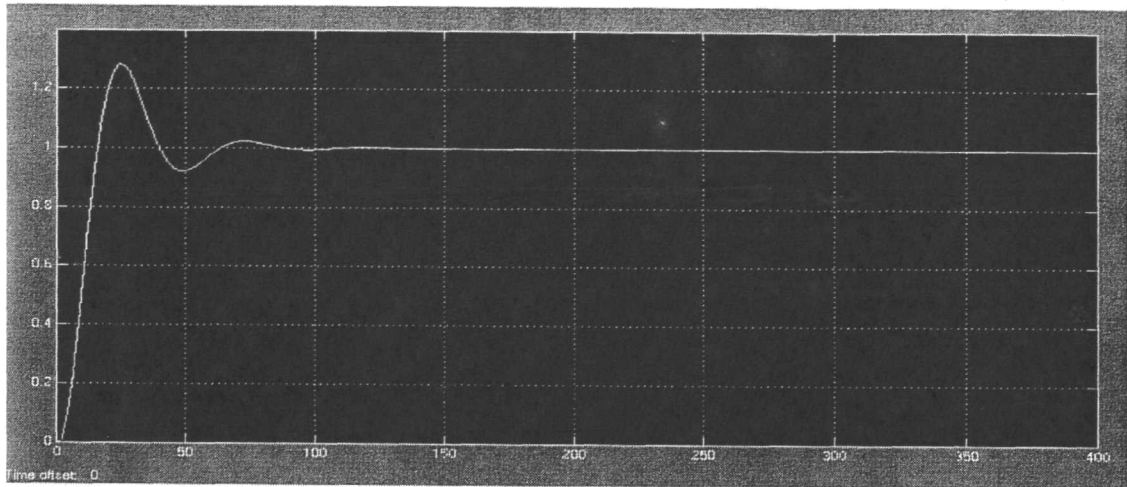


图 5.5 加入扰动时 PID 控制仿真曲线图

Fig. 5.5 PID control simulation curve when it is disturbed

从图 5.5 可以一看出，PID 控制对干扰的抑制能力较强，但是超调量增大，调节时间变长，调节时间约为 130s。

(2) 模糊 PID 控制

加入干扰信号后，相应的仿真曲线如图 5.6 所示。

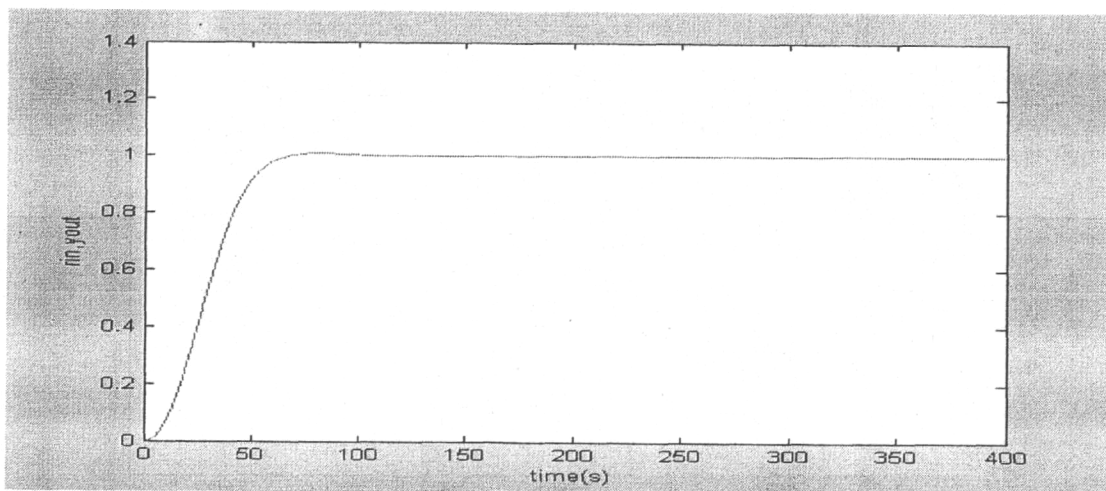


图 5.6 加入扰动时模糊 PID 控制仿真曲线图

Fig. 5.6 Fuzzy PID control simulation curve when it is disturbed

由图 5.6 可以看出，加入扰动后，系统超调增大，调节时间变长，约为 100s。

(3) RBF 神经网络控制

系统加入干扰信号后，相应的仿真曲线如图 5.7 所示。

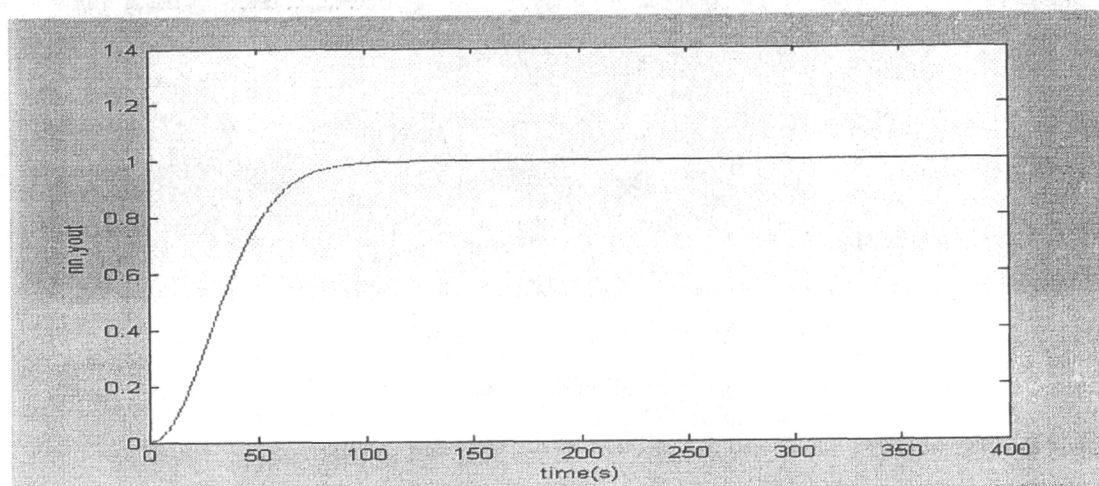


图 5.7 加入扰动时 RBF 神经网络控制仿真曲线图

Fig. 5.7 RBF Neural network control simulation curve when it is disturbed

(4) RBF 模糊神经网络控制

系统加入干扰信号后，相应的仿真曲线如图 5.8 所示。

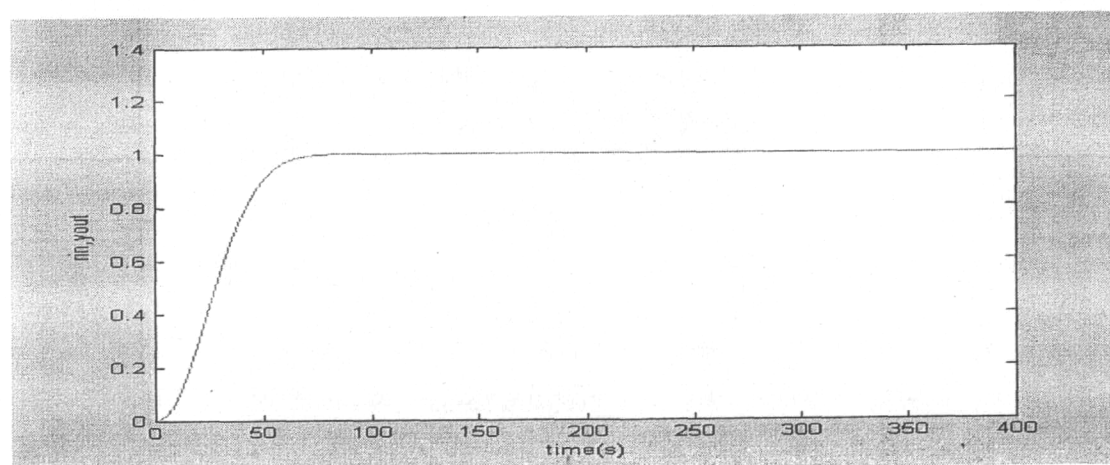


图 5.8 加入扰动时 RBF 模糊神经网络控制仿真曲线图

Fig. 5.8 RBF fuzzy neural network control simulation curve when it is disturbed

由上图可以看出, 加入干扰后, 超调量为 0.05%, 稳态余差为零。说明使用模糊神经网络控制的水位控制系统在抗干扰方面有很强的鲁棒性, 并保持着很好的静态特性。

5.3 仿真分析

对船用锅炉汽包水位的传统 PID、模糊 PID 控制、神经网络以及模糊神经网络的仿真结果进行比较, 如表 5.1, 表 5.2。

表 5.1 阶跃信号下响应曲线的性能指标

Tab.5.1 Step response curve of the signal performance indicators

	调节时间 T_s (秒)	超调量 σ_p (%)	稳态余差 $e(\infty)$ (%)
传统 PID 控制	105	12	约为 0
模糊 PID 控制	78	0	0
RBF 神经网络控制	100	0	0
RBF 模糊神经网络控制	50	0	0

表 5.2 加入干扰时响应曲线的性能指标

Tab.5.1 Response curves performance indicators when it is disturbed

	调节时间 T_s (秒)	超调量 σ_p (%)	稳态余差 $e(\infty)$ (%)
传统 PID 控制	130	25	约为 0
模糊 PID 控制	100	2	0
RBF 神经网络控制	120	0.1	0
RBF 模糊神经网络控制	80	0.05	0

由以上两个表格中的数据可以看出, RBF 模糊神经网络的控制性明显优于其他几种控制方式。这种控制系统的调节时间快, 抗干扰性强, 适应性好, 充分说明了 RBF 模糊神经网络控制系统的可行性与优越性。

结 论

锅炉汽包水位的控制是船用锅炉控制当中最重要的一个环节, 稳定汽包的水位对锅炉的正常运行有着重大意义。本论文以船用锅炉设备为研究对象, 以锅炉的控制为研究内容, 结合当前发展得比较迅速的模糊控制理论和神经网络理论, 设计了一种基于 RBF 模糊神经网络 PID 控制器对锅炉水位进行控制。

一. 论文所做的工作

(1) 根据船舶锅炉的工作原理, 通过机理建模的方法和一定的假设和简化, 得到汽包水位的数学模型。

(2) 在设计模糊神经网络控制系统之前, 分别对模糊控制理论和神经网络控制理论进行了学习。通过理论的学习, 提出一种基于 RBF 模糊神经网络构造控制器实现对锅炉的过程控制。并在相同锅炉水位模型的基础上, 设计了相应的模糊 PID 控制器、RBF 神经网络控制器和 RBF 模糊神经网络控制器。

(4) 通过对传统 PID 控制器、模糊 PID 控制器、RBF 神经网络控制器和 RBF 模糊神经网络控制器的仿真, 分析得出, RBF 模糊神经网络控制系统具有良好的控制效果, 说明了这种控制系统的可行性与优越性。

二. 需要进一步完善的工作

(1) 仿真使用的被控对象的模型较为简单, 系统的给定也只是采用了阶跃信号, 应在此基础上改变不同的输入信号, 从而能全面地验证系统的性能。

(2) 本文只是对几种控制方法进行了简单的比较, 需要进一步对每种控制理论进行深入的研究, 从而达到对控制理论更好的掌握。

(3) 本文所做的研究结果只是通过仿真实验, 初步证明了其可行性, 距离具体到实践中应用, 还有很多的工作要做, 在今后的研究工作中有必要进一步改进。

相信, 随着理论和实践的不断深入, 模糊神经网络必将发挥越来越大的作用, 为自动控制及其他领域中的问题的解决作出更大的贡献!

由于时间紧迫, 加上作者水平有限, 文中有不妥之处, 恳请各位专家和老师批评指正。

参 考 文 献

- [1] 奚士光, 吴味龙. 锅炉及锅炉房设备. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] 赵志斌. 轮机模拟器中蒸汽系统的仿真研究: (硕士论文). 大连海事大学, 2001.
- [3] 陈一亮. 船用锅炉与汽轮机. 大连海事大学出版社, 1995.
- [4] 高才平. 船舶辅助锅炉及自动控制. 人民交通出版社, 1985.
- [5] 王智. 锅炉汽包水位的自动控制. 化工科技市场, 2003, 8: 69-72.
- [6] S. Lee, E. Lee. Fuzzy sets a neural network. J of Cybernetics, 1974, 1(4): 83-87.
- [7] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论. 修订 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [8] H. Takagi, N. Suzuki. Neural Network designed on approximate reasoning architecture and their applications. IEEE Trans. Neural Network, 1992, 3(6): 228-333.
- [9] 王磊, 王为民. 模糊控制理论及应用. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [10] 杨正进. 工业锅炉汽包水位单冲量仿人智能控制的研究及应用: [学位论文]. 重庆大学, 2002.
- [11] 张亮明, 夏杜鹃. 工业锅炉自动控制. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [12] 孙优贤, 孙红. 锅炉设备的自动调节. 北京: 化学工业出版社, 1982.
- [13] Glickman S. Identification-based PID control tuning for power station processes. IEEE Trans. Control systems Technology, 2004, 12(1): 123-132.
- [14] 王东风等. 锅炉燃烧系统的一种实用控制方案及其应用. 电站系统工程, 2001, 17(3): 172-175.
- [15] 刘志远. 智能 PID 控制器在电厂热工过程控制中的应用前景[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 128-134.
- [16] 王庆东, 冯增健, 孙优贤. 锅炉热工过程先进控制策略研究综述. 电力系统及其自动化学报, 2004, 22(8): 128-134.
- [17] Zhang J, Moris A J. Fuzzy neural networks for nonlinear systems modeling. IEEE Trans. Man and Cybernetics, 1995, 142(6): 551-561.
- [18] 金晓明, 荣冈, 王骥程. 自适应模糊控制的新进展. 信息与控制, 1996, 25(4): 217-223.
- [19] Sun Zengqi, Deng Zhidong. A fuzzy neural network and its application to controls. Artificial Intelligence in Engineering, 1996, 2(5): 311-315.
- [20] 储月娥, 吕宗伟. 模糊控制器的设计原理及其应用. 自动化与仪表, 2005, 5: 102-110.

- [21] 王立新, 王迎军. 模糊系统与模糊控制教程. 清华大学出版社, 2003.
- [22] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用. 西北工业大学出版社, 1999.
- [23] 李人厚. 智能控制理论和方法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [24] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术. 清华大学出版社, 1997.
- [25] 韦巍. 智能控制技术. 机械工业出版社, 1999.
- [26] 史忠科. 神经网络控制理论. 西北工业大学出版社, 1997.
- [27] 葛红, 毛宗源. 变结构神经网络模糊控制器的研究. 控制理论与应用, 1999, 16(2): 184-189.
- [28] 刘永江. 神经网络理论与前沿问题. 信息与控制, 1999, 3: 56-59.
- [29] 杨滨, 邓洪敏. 基于神经网络的模糊控制. 四川大学学报, 1996, 4: 55-62.
- [30] 叶少真. 基于神经网络的模糊系统的研究. 福州大学学报, 2000, 6: 22-39.
- [31] 刘增良, 刘有才. 模糊逻辑与神经网络——理论研究与探索. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
- [32] 周志坚, 毛宗源. 模糊神经网络的交叉研究. 电路与系统学报. 1998, 3(3): 81-85.
- [33] 王金章. 模糊调节器参数的在线自整定. 控制与决策, 1989, 4: 40-45.
- [34] 李华. 用模糊控制实现 PID 参数自整定的研究. 甘肃科学学报, 1998, 10(1): 71-74.
- [35] 尹尔为, 刘增良. 模糊专家系统原理与设计. 北京: 北京航空航天大学出版, 1995.
- [36] 尹尔为. 具有参数在线修正机构的模糊控制器. 控制与决策, 1994, 6: 455-458.
- [37] 王华祥, 孙金刚, 陈磊. 一种新型模糊 PID 调节器的设计. 自动化仪表, 2002, 21(5): 8-10.
- [38] 孙增圻, 张载兴. 智能控制理论与技术. 修订 2. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [39] 李春香, 钟碧良. 基于神经网络的 PID 控制器. 石油化工高等专科学校学报, 1999, 1(12): 70-80.
- [40] 孙伟. 三冲量汽包水位自适应神经元控制算法. 中国矿业大学学报, 1996, 3(9): 43-47.
- [41] 龙晓林, 苏义鑫. 基于 PID 神经网络的控制器研究. 武汉理工大学学报, 2002, 24(10): 32-35.
- [42] 赵春元, 张玉艳. 神经网络控制及其对汽包水位控制的仿真研究. 沈阳师范大学学报, 2005, 23(4): 123-12.

攻读学位期间公开发表的论文

[1] 刘晓丹, 张鑫. 基于模糊 RBF 神经网络控制器的锅炉汽包水位控制的实现. 自动化信息. 2007 年 8 月.

[2] 张鑫, 刘晓丹. 基于 Labview 虚拟仪器系统的串行通讯. 自动化信息. 2007 年 7 月.

致 谢

在研究生学习和论文的撰写过程中，一直得到导师王琳副教授的精心指导，在论文选题到完成的全过程中无不倾注着导师的心血，谨此向导师致以最诚挚的谢意。导师严谨的治学态度和敬业精神使我受益匪浅，对我以后的学习和工作必将产生深远的影响。

感谢在我攻读硕士学位期间给予我极大帮助的老师 and 同学，他们在日常学习和生活中给予我极大的关心、支持和帮助，我很高兴自己身处这样一个充满温暖的集体之中。

感谢各位评委老师在百忙之中抽出宝贵时间认真地评阅本论文。

最后，感谢培养了我近 3 年的海事大学，我深以自己是大连海事大学的学生为荣。

研究生履历

姓 名	刘晓丹
性 别	
出生日期	1983 年 1 月 14 日
获学士学位专业及门类	自动化 工学
获学士学位单位	大连轻工业学院
获硕士学位专业及门类	电力电子与电力传动 工学
获硕士学位单位	大连海事大学
通信地址	辽宁省大连市凌海路 1 号
邮政编码	116026
电子邮箱	liu-xiao-dan@hotmail.com