

## 离子交换树脂法回收氰化物的 pH 值 智能控制系统研究

专    业：控制理论与控制工程

硕  士  生：薛岳钊

指导教师：于军琪  教授

### 摘    要

离子交换树脂法是一种回收氰化物的新方法,较目前工业中的酸化法具有工艺过程简单、易操作、回收率高、污染小等优点。但是,由于其过程进行缓慢、吸附困难、吸附容量小加之吸附、解吸及再生过程控制手段落后等因素的限制,从而影响了其工业化的程度。论文在分析以上工艺特性的基础上,针对其过程中的重要参数 pH 值提出了智能控制的研究方案。

文中首先采用径向基函数(RBF)神经网络对反应过程进行了离线模型辨识;然后,设计了参数自适应模糊 PID 控制器及其实现方案。该控制系统由上位机(PC)和下位机(PLC)构成;使用组态王软件(KingView)开发了控制系统人机界面(HMI);最后,运用 MATLAB 软件对这种智能控制算法进行了仿真分析,并与其它控制方法(常规 PID、纯模糊控制)的仿真结果进行了分析比较。

结果表明,文中提出的控制策略达到了较高工艺水平的要求,具有良好的自适应特性、抗干扰特性及的控制精度,为这种新型工艺的应用,打下了基础。

关  键  词：离子交换树脂法  吸附环节  pH 值  径向基函数  参数自适应模糊 PID

## **Research on Intelligent Control System for pH of Adsorption in the Method of Ion-Exchange Resin**

**Major:** Control Theory and Control Engineering

**Name:** Xue Yuezhao

**Tutor:** Prof. Yu Junqi

### **ABSTRACT**

The method of Ion-Exchange Resin is a new developing effective technology in recovering cyanide-containing wastewater, whose process is simple, operation is easy, ratio of recover is high and pollution is little. But, now, these are some problems such as the difficulty of adsorption, process slowness and noneffective to control adsorption, desorption and resin recover in china, so that limit its industrialization. Therefore the research is focused on intelligent control system of pH which is an important factor in the process of the ion-exchange resin adsorption.

Firstly, a neural network model is made by RBF (Radial Basis Function) off line. Secondly, the dissertation presents the design of Fuzzy-PID controller with self-tuning of parameters and proposes a control scheme, whose automatic control system is consisted of PC and PLC and Human Machine Interface (HMI) is given which is developed by KingView (a kind of industry control configuration software). Finally, through MATLAB simulation demonstrates and prove the control performance of the proposed control algorithm in comparison with the traditionally designed PID control and Fuzzy control.

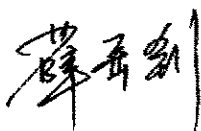
Simulation results show that the proposed Fuzzy-PID control with self-tuning of parameter has good adaptive performances, disturbance and high accuracy.

**Key words:** Ion-Exchange Resin Adsorption pH RBF Fuzzy-PID  
Self-tuning of parameters

## 声 明

本人郑重声明我所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或其他人在其它单位已申请学位或为其它用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的所有贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

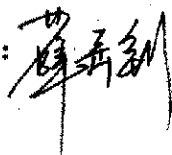
论文作者签名：

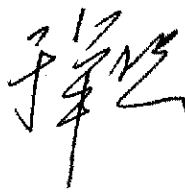
日期：2006.5.24

### 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安建筑科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或者其它复制手段保存论文。

(保密的论文在论文解密后应遵守此规定)

论文作者签名：

导师签名：

日期：2006.5.27

注：请将此页附在论文首页。

## 第1章 绪论

### 1.1 课题来源及研究意义

本课题“提金氰化物污染治理与综合回收成套技术及装备开发”是西安建筑科技大学冶金学院兰新哲教授负责的国家高新技术研究发展计划(863计划,项目编号:2003AA32X090)。作者负责该课题自动控制方面的研究和开发。

氰化物是一种剧毒物质,因此,氰化物回收技术的出发点是有效回收尾液中的氰化物并循环使用,这样不仅会提高氰化物的利用率,而且降低了生产成本;同时可回收有价金属,并能达到环保排放要求,使企业经济和环境效益达到双赢。而现阶段的氰化物回收法例如氧化消化或直接破坏类方法都由于经济原因及环境问题已经越来越不被人们所接受。<sup>[12]</sup>

离子交换树脂法回收氰化物是一种新兴的回收氰化物方法。离子交换法就是用阴离子交换树脂( $R_2SO_4$ )吸附废水中以阴离子形式存在的各种氰络合物,当流出液 $CN^-$ 浓度超标时( $>0.5mg/L$ )对树脂进行酸洗再生,从洗脱液中回收氰化钠。大部分洗脱液经再生并重复用于树脂的酸洗再生,少部分洗脱液经过中和,沉淀出重金属后排放。

目前,离子交换树脂法回收氰化物在国外已达到工业应用阶段,如南非的 Golden Jubilee 金矿。但在国内这方面的研究相对来说起步较晚,在实验室中虽然进行过工艺及理论研究,如英海燕在 1987 年进行了用 717 型阴离子交换树脂处理电镀含氰废水的半工业实验。但在工业应用上,工艺及理论仍然不是很成熟,并且市场没有成套设备供选择。所以进一步研究离子交换树脂法回收氰化物的基础工艺及理论,以及开发出成套设备及智能化控制手段,对于促进离子交换树脂法在我国的工业应用具有重要意义。

我国很多行业都需要使用氰化物,随着经济的发展和环境问题的日益严重,越来越受关注,特别是黄金生产企业的氰化尾液更是不容忽视,我国现行氰化尾液污染治理的普遍问题是含氰尾液、尾矿浆中的氰化物没有有效回收利用,多数被氧化破坏,部分被转化为硫氰化物,部分被转化为过渡金属络合物不能再用,因此导致我国黄金工业的生产成本高,一次氰化物用量大,而且大量有价金属没有被回收,造成大量的资源浪费和利用率低下。因此,采用新工艺进行氰化物及尾液中有价金属的回收研究,不仅会产生较大的经济效益、环境效益和社会效益,而且与行业关键难题紧密结合,具有重要的科学意义。而离子交换树脂法不但能综合回收氰化废水中各种金属元素及氰化物,而且具有工艺过程简单、易操作、回收率高、污染小等优点,能够达到经济效益和环境效益的双赢,但是,因为该工艺在国内还停留在半实验半工业阶段,其中大型设备的开发和自动控制系统的实现是其真正实现产业化的瓶颈,而本课题的研究就是基于智能控制与过

程控制理论, 通过对工艺过程控制中的重要影响因素 pH 值的智能控制的系统研究, 以期促进工艺设备的自动控制系统在其它方面的开发和研究。

## 1.2 国内外研究现状及发展水平<sup>[14][15]</sup>

工业生产中, pH 值的测量与控制非常普遍。大量化工过程都需要对其化学反应过程中的 pH 值进行控制, 如农药和医药生产、制皂、味精提炼、洗涤剂生产、油脂化学工业中的酸碱中和、废水处理中的重金属回收及废水排放前的中和处理、生化反应中的适当细胞生长环境等。它对溶液的性质、化学反应速度、生成物的成分、性质及微生物的生长和新陈代谢等, 均有很大影响。pH 值的测量和控制对于提高生产效率、产品质量、工厂设备的安全防护及环境保护是一个关键因素。因此, 对 pH 值的测量和控制具有十分重要的意义。但由于 pH 中和过程的高度非线性, 导致 pH 值及 pH 中和过程的控制一直是行业面临的难题。

在王树青等编著的《工业过程控制工程》中介绍了有关 pH 中和过程的滴定曲线, pH 中和过程的动态模型, 其中 pH 过程的典型控制系统如下。①单回路 PID 控制。该控制方案仅适用于被调溶液与中和液 pH 变化范围不大, 中和反应器具有充分混合并配有很灵敏的 pH 值测量系统的场合。②变比值串级 PID 控制。当被调液体的流量变化较大时, 可以通过引入前馈控制来改善控制系统质量, 它能有效地克服被调液体流量变化对中和反应器内 pH 值的影响。由于 pH 过程严重的非线性, 仍不能保证整个操作范围内控制系统均为稳定。③带有不灵敏区的非线性 PID 控制。该控制方案适用于当 pH 要求控制在 7 附近时, 也就是说当被控变量控制误差  $e$  在不灵敏区内, 控制器的增益很小; 当误差  $e$  超出不灵敏区时, 控制器增益增加数十倍或更多, 这样可能用控制器的非线性来补偿被控对象的非线性, 最终组成一个近似的线性控制系统, 这样在非线性的控制器参数整定适当的前提下, 就能保证系统的控制质量基本不变。④引入非线性变换的线性化 PID 控制。该控制方案适用于需要对混合液 pH 值进行定值控制的场合, 也适用于对混合液 pH 值实行宽范围控制的场合。

李斌海等人在 1994 年就当时的 pH 测量和控制技术进行了概述, 其中提到的控制方案有非线性 PID(简称 NPID)控制, 它是在常规 PID 算法前面串入一个非线性补偿环节而构成的。这种方法是利用非线性环节来补偿过程的非线性增益, 将非线性问题转化为线性问题来加以解决。

余鹤龄等人在 1995 年首次用非线性离散 Hammerstein 模型来描述 pH 过程, 该模型从本质上刻画出 pH 过程的非线性特性。同时, 结合中和过程的非线性特性, 设计了非线性最小方差控制器, 并在实验室装置上进行了试验, 取得了良好的效果。

Su Whan Sung 等人对 pH 过程进行了自适应控制的研究。他们假想弱酸的电离常数和总离子浓度通过在线最小二乘法来近似得到 pH 过程的平衡特性,采用参数估计的非线性 PI 控制器。仿真结果表明该控制策略解决了 pH 过程的非线性和时变特性。

Rohit S Patwardhan 等人提出了基于 Hammerstein 模型的非线性模型预测控制,其中 Hammerstein 模型中静态非线性部分采用基于部分最小二乘(PLS)结构的模型,并在酸碱中和反应过程中的 pH 和液位控制中得到了应用。

樊立萍等人在机理建模的基础上,探讨了用模糊推理系统(FIS)建立 pH 过程动态模型的问题。他们根据化学与物料平衡原理,推导 pH 过程的动态模型,介绍了模糊建模的方法以及在 pH 过程建模中的应用,并进行了计算机仿真。

何小其等人根据 pH 对象的特性曲线,设计了利用非线性增益来补偿 pH 静态增益变化的方法,运用模糊前馈系统抑制了 pH 的超调,实现了 pH 值的闭环控制,并把该控制方案应用在废水处理的 pH 控制中。

张智焕等人针对 pH 中和过程,提出了多模型预测控制设计方法,根据其工作范围建立了 pH 过程的多模型表示,同时设计了相应的预测控制器,通过模糊识别来调度控制器,从而获得大范围全局非线性对象的控制量,并进行了计算机仿真研究。

李林欢等人利用自适应学习算法及模糊推理方法,在线修正 pH 过程所得的局部线性化模型,同时基于广义预测控制(GPC)的思想和离散 PID 算法的相互关系,提出了一种以预测控制这类先进控制方法为思想,以经典 PID 控制为实现的新型控制器。其中,控制器的参数通过 GPC 与 PID 的相互关系递推计算得到。通过计算机仿真验证了算法的可行性和有效性。

李海生等人根据自抗扰控制器具有很强的适应性和鲁棒性,针对 pH 中和过程的强非线性,并结合工程实际和理论分析,对二阶自抗扰控制器的跟踪微分器的设计予以简化。计算机仿真结果表明,基于自抗扰控制器的 pH 中和过程的控制效果优于常规 PID 的控制效果。

杜树新根据某些工业生产过程只需控制在某一设定区间的要求,提出了设定区间的控制方法,将设定区间的上、下限作为控制设定值构成两个设定值控制器。根据系统输出,动态调度这两个设定值控制器,以确保系统输出在设定区间的范围内。

综上所述,我国在该工艺的总体控制技术上的,正从消化吸收、简单应用阶段向实用化、综合性应用阶段过渡和发展,但主要还是停留在理论上,控制效果、自动化程度、可靠性和可操作性与国外同类产品相比尚有较大差距。正因为如此,本课题针对离子交换树脂法回收氰化物工艺中的 pH 值,采用智能控制算法实现其过程有效控制并进行系统方案及其软硬件设计,这对于先进控制技术在工艺中的工程应用有着极其重要的参考价值。

### 1.3 本文解决的问题

氰化废液和离子交换树脂都为碱性,假设初始条件最优,其中 pH 值保持在 10~11 之间,离子交换后,反应液碱性将会降低,出现 pH 值低于最优值的问题,这时,就需要采用智能控制算法对 pH 值进行控制,以使离子交换时, pH 值始终保持在 10~11 之间,这有利于树脂吸附率的提高。但是, pH 值的控制具有高度非线性,时变,无法建立精确的数学模型,用常规的线性控制方法不可能对其进行有效控制。在对其自动控制算法的探索中,由于中和控制过程的反应过程变化复杂,模型难以确定,因此基于模型的前馈控制无法对 pH 值和流量值的波动进行有效的补偿<sup>[11]</sup>。一些如自适应控制及预测控制等都还处在理论研究阶段,不符合该项目面向工业应用的要求。常规 PID 控制算法也无法对反应的变化过程做快速的、精确的反应,在控制过程中很容易引起振荡现象,很难对系统实现最优控制。对此,本文提出了一种基于模糊规则的参数自适应模糊 PID 控制方案实现 pH 值的有效控制。

工业中 PID 控制仍然是主流,因为其控制精度高,鲁棒性好,但是由于 pH 值控制本身所具有的特点,参数固定的常规 PID 无法满足系统的要求,无法发挥其本身的特点,因此使 PID 的三个参数随系统的变化动态的调整成为一个解决方案,而模糊控制是一种不依赖于被控过程数学模型的仿人思维的控制技术,通过计算机来模拟人们用自然语言来描述的控制过程,它可以根据理论和实践的指导采用模糊规则对 PID 的参数进行自适应调整,从而实现对 pH 值的有效控制。<sup>[24][26]</sup>

目前,国内对于该工艺尚无智能化的控制手段,而实现本课题调整参数的模糊控制,可以通过采用工控机、PLC 或者专用模糊控制芯片进行硬件设计。因此,为了能够从系统上实现对 pH 值进行控制,在本课题中,也将探讨根据本工艺特点进行控制设备的选择和系统设计,比如,研华的 IPC-610 工控机,SIEMENS 的 PLC S7-200 等等。以及通过 Kingview 开发上层控制软件等等。希望以此促进工艺设备的自动控制系统的开发和其它方面的研究。

### 1.4 本文的目的和主要内容

#### 1.4.1 本文的目的

本课题研究的目的:

- 1) 根据之前人们在工艺上的研究得出的最优条件,建立有效过程模型;
- 2) 采用参数自适应的模糊 PID 控制思想进行控制,寻求最佳控制方案。

- 3) 仿真分析, 通过性能指标的各项比较, 得出该控制算法在本工艺中的优缺点;
- 4) 系统方案设计, 硬件选型, 软件设计及其系统集成。

#### 1.4.2 本文的主要内容

本课题主要是根据离子交换树脂法的原理, 以工艺中的影响因素之一 pH 为研究对象, 利用智能控制思想和自动控制技术实现工艺中 pH 值的有效控制。以期促进整个工艺过程的有效控制和工艺设备的自动控制系统的开发和研究。

现将论文主要工作内容总结如下:

1. 针对氰化废液回收工艺中的不同类型, 通过比较不同类型的氰化物氧化消化或直接破坏法中的各种方法和离子交换树脂法; 比较属相同类型的氰化物部分回收法中的各种具体方法, 如酸化法, 活性炭吸附法等, 了解离子交换树脂法的原理、优势, 应用的意义, 以及开发相关设备和设计有效控制算法的价值。
2. 根据被控对象和工艺的特点, 决定采用何种智能控制思想和控制器的设计方案。
3. 运用系统辨识原理, 根据输入输出数据通过径向基函数 (RBF) 网络进行过程辨识。
4. 采用基于模糊推理的参数自适应模糊 PID 算法对系统进行 pH 值控制。设计控制器, 并进行仿真分析。
5. 系统研究: 设备选型, 软件设计, 使用组态王开发监控软件, 实现数据通讯及系统集成等。
6. 仿真实验分析, 通过与其它控制方法比较, 如 PID 控制, 纯模糊控制, 得出本算法的优缺点。



## 第2章 离子交换树脂法工艺介绍

### 2.1 行业背景介绍<sup>[12][13]</sup>

我国很多行业都需要使用氰化物,随着经济的发展和环境问题的日益严重,越来越受关注,特别是黄金生产企业的氰化尾液更是不容忽视,在黄金提取中,用作浸取剂的氰化物,使用中仅少部分被消耗,大部分则含于废液或尾矿浆中经处理后排放。现有处理技术不仅会造成严重的环境污染,而且使大量有价已溶金属被白白排掉,使资源未能有效利用。这就造成了我国虽然是世界黄金生产第三大国,约占世界黄金产量的10%,但我国氰化物回收综合利用率却只有40%左右,而世界上其它主要产金国南非、美国、澳大利亚及俄罗斯等均达到70%以上,这方面我国与国际水平相差较大。因此,采用新工艺进行氰化物及尾液中有价金属的回收研究,不仅会产生较大的经济效益、环境效益和社会效益,而且与行业关键难题紧密结合,具有重要的科学意义。

氰化物是一种剧毒物质,但在现代工业中,它又是一种用途广泛的化学试剂。在冶金工业中用于提取金、银等贵金属;在电镀工业、化学工业、合成纤维工业、合成橡胶工业等也都离不开氰化物的应用,由此产生的环境污染和废液中氰化物及其相关有价金属的回收始终是人们最关心的问题。如果中、高浓度氰化尾液直接外排会造成严重的环境污染,甚至威胁人类的生命安全,因此国内外对氰化物污染控制与治理一直都很重视,也开发了一系列治理办法。主要分以下三种类型:

第一种类型:氰化物氧化消化或直接破坏法。这种方法主要包括二氧化硫—空气氧化法,过氧化氰法,臭氧法,氯氧化法,次氯酸盐法等。这种方法主要靠加入氧化剂并调整介质酸碱度而使剧毒氰化物氧化为无毒或低毒产物排放。这种方法虽然比较成熟,但运行成本较高,经常会出现氧化不完全就外排的情况,给环境造成巨大的危害,是现代工业中被取代的对象。

第二种类型:氰化物部分回收法。主要有酸化法,活性炭吸附法,离子交换树脂吸附法,萃取法,含氰尾液直接电积法等。这种方法从总体上讲,除酸化法外,我国在技术和设备方面还未完全过关,处于半工业半实验阶段,而有较高科技含量的氰化物和有关金属同时回收技术在国内仍然是处于工业实验阶段。

第三种类型:含氰废水、尾液或矿浆经压滤返回浸出,即所谓的废水零排放。虽然这种构思很好,但也避免不了洗水及含氰固体物的外排,存在潜在污染。且这种方法报道较少,在国内外均没有工业应用的报道。

实际上,上述三种类型的处理方法中第二、第三种方法是较好的方法,达到了社会

效益、经济效益和环境效益的统一，其中树脂法在国外最成功，且效益好，但国内仍处于半工业实验阶段，应用距离尚远。第三种方法应用上受到局限，尤其对有害杂质含量多的难处理矿难以完全有效循环而不影响继续提金效率，因此国内外都重视第二种方法，尤其是树脂法回收氰化物及其有价金属。

## 2.2 离子交换法

### 2.2.1 离子交换法的原理<sup>[12]</sup>

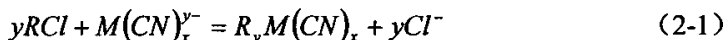
离子交换法就是用阴离子交换树脂（ $R_2SO_4$ ）吸附废水中以阴离子形式存在的各种氰络合物，当流出液  $CN^-$  浓度超标时（ $>0.5\text{mg/L}$ ）对树脂进行酸洗再生，从洗脱液中回收氰化钠。大部分洗脱液经再生并重复用于树脂的酸洗再生，少部分洗脱液经过中和，沉淀出重金属后排放。

目前，根据强碱，弱碱离子交换树脂的特点，提出了两种离子交换法工艺：第一种工艺是用弱碱性阴离子树脂处理高、中浓度含氰废水，旨在去除废水中的铜、锌，虽废水不达标，但由于铜、锌浓度的减少而有利于循环使用；第二种工艺是用强碱性树脂处理低浓度含氰废水，即以回收氰化物为主，处理后废水循环使用或达标排放。

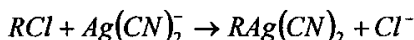
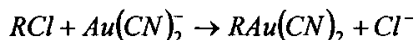
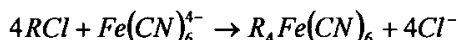
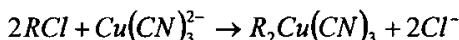
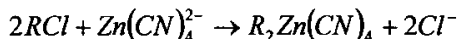
### 2.2.2 离子交换树脂法在回收氰化废液中的应用

离子交换树脂法原理如下<sup>[13]</sup>：

离子交换树脂法处理氰化物就是用阴离子交换树脂（ $RCl$ ）吸附废水中以阴离子形式存在的各种氰化物，离子交换实质是可逆性化学吸附过程，反应式如下：



式中  $R$  表示树脂基体； $M$  表示氰化尾液中的各种金属离子。氰化尾液中几种主要阴离子与树脂的交换反应如下：

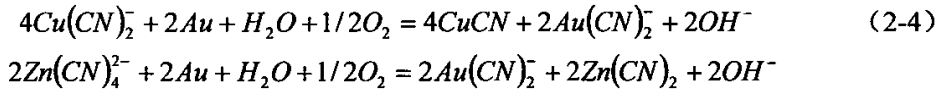


$Pb(CN)_4^{2-}$ 、 $Ni(CN)_4^{2-}$  和  $Cu(CN)_2^-$  等离子的吸附过程与上述方程类似，同时氰化液中多存在硫氰化物阴离子，这种离子在树脂上的吸附力比  $CN^-$  更大，更易吸附在树脂上，吸附反应如下所示：



像这种与树脂结合能力很强的离子进入溶液，并且被吸附到树脂上，这使得树脂的洗脱变得非常复杂甚至很困难，这便是树脂的中毒现象。应尽量避免这种现象的发生。

当氰化液中游离氰较少时，还会发生如下反应：



在强碱性阴离子交换树脂上，黄金氰化厂废水中主要的几种阴离子的吸附能力如下：



因此，当树脂吸附饱和时，如继续处理废水，新进入树脂层与树脂结合能力强的离子（ $Zn(CN)_4^{2-}$ ）便会将一些与树脂结合能力弱的离子排挤下来，使他们重新进入溶液，这不利于综合回收各种金属离子，同样不利于将处理后的氰化物浓度降低到国家排放标准以下。

## 2.3 实验流程

结合以上基本原理，根据工艺特性，我们可以将工艺简单分为以下几个主要步骤：

- 1) 吸附：用阴离子交换树脂吸附废水中以阴离子形式存在的各种氰化物。
- 2) 解吸：实验中采用酸化法（ $H_2SO_4$ ）进行解吸，回收氰化物。
- 3) 树脂还原：实验中通过加入  $HCl$  溶液进行树脂还原。

实验流程图如图 2.1。

其中：吸附过程中的影响因素为：pH 值、温度、氰化物浓度、树脂量和超声波外场强化等。

解析过程中的影响因素为：解吸剂浓度、温度和超声波场外强化等。

洗涤：用蒸馏水进行清洗，使 pH 值为中性。



## 2.4 小结

### 2.4.1 本工艺控制方面存在的问题

根据工艺要求，面对工艺和设备的自动控制，存在以下问题：

- 1) 树脂法回收尾液中存在过程缓慢、吸附困难、吸附容量小等问题。
- 2) 树脂法回收尾液中国内无专门高效集成的设备。
- 3) 树脂法吸附、解吸及再生过程尚无智能化控制手段，效益和效率相对较低。
- 4) 树脂法吸附、解吸及再生过程中存在各种干扰因素，如 pH 值、温度、氰化物浓度、树脂量及超声波外场强化等都对树脂的吸附和解吸有影响。

### 2.4.2 控制思路的提出

据文献<sup>[13]</sup>知在离子交换树脂回收氰化废液的工艺中，离子交换过程实质是可逆性化学吸附过程，因此，提高吸附率就成为改进工艺的一个有效途径。

根据文献<sup>[12]</sup>所得结论可知：（在实验条件下）

**最佳吸附条件为：pH=10~11、室温、磁力搅拌 60 分钟及树脂量为理论量的 5 倍。**

**最佳解吸条件为：静态解吸 30 分钟、解吸剂（硫酸）质量百分比浓度为 0.5%、室温。**

但是，在真正工业条件下，任何一个在实验中，对工艺影响小，甚至可以忽略不计的因素，都需要考虑，例如，离子交换树脂法吸附工艺图如图 2.2。

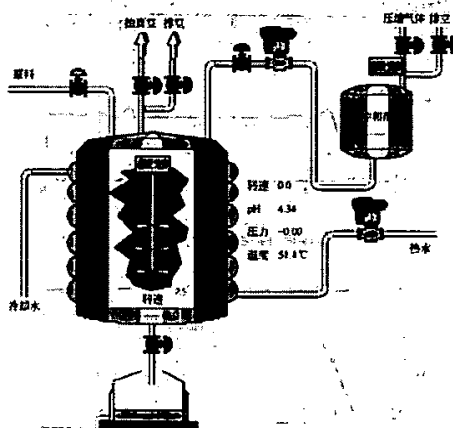


图 2.2 离子交换树脂法吸附工艺图

吸附环节中，pH 值、温度、树脂量、氰化物浓度等许多因素都对树脂吸附率有影响。在实验条件下，最佳吸附条件为：pH=10~11，室温、磁力搅拌 60 分钟及树脂量

为理论量的 5 倍。其中, pH 值是一个重要的影响因素, 从工艺中知, 氰化废液和离子交换树脂都为碱性, 离子交换后, 反应液碱性将会降低, 若能在离子交换过程时, 使 pH 值在其它干扰因素的影响下, 始终保持在 10~11 之间, 则有利于提高树脂吸附率, 降低废液氰化物含量, 其控制基本原理图如图 2.3。

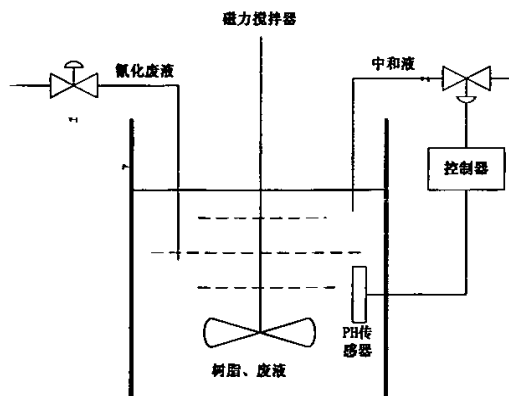


图 2.3 pH 值控制基本原理图

然而, 中和过程的反应过程变化复杂, pH 值的控制具有高度非线性, 时变, 无法建立精确的数学模型, 常规 PID 控制算法无法对反应的变化过程做快速的、精确的反应, 在控制过程中很容易引起振荡现象, 很难对系统实现最优控制。

PID 控制器由于结构简单、稳定性好、控制精度高, 在工业过程控制中广泛应用, 然而面对复杂的控制系统, 特别是具有非线性、大滞后和时变不确定系统, 常规 PID 控制器由于采用固定的参数, 难以保证系统在任何工况条件下始终具有最佳的控制性能。而模糊控制是一种不依赖于被控过程数学模型的仿人思维的控制技术, 其建立在人工经验基础之上, 无须知道控制对象数学模型, 采用语言变量来描述系统特征, 并根据系统动态信息和模糊规则进行推理以获得合适的控制量, 具有对参数变化不敏感和鲁棒性强等特点, 但控制精度不高, 因此, 本文提出了一种基于模糊规则的参数自适应的模糊 PID 控制方案实现 pH 值的有效控制。即用模糊推理的方法实现 PID 参数的在线自整定, 使系统动态过程各阶段的 PID 参数都处于最佳状态, 以获得满意的控制效果。这样将模糊理论与 PID 控制器相结合, 使系统既具有模糊控制的灵活、适应性强的优点, 又具有 PID 控制精度高的特点<sup>[20][48][51][52]</sup>。则得到 pH 值控制结构如图 2.4。

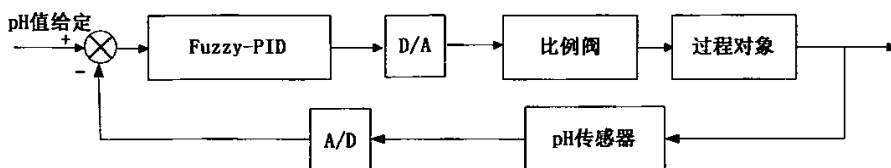


图 2.4 pH 控制结构图

## 第3章 系统建模

### 3.1 控制系统建模概述

为了能设计出有效的有利于离子交换树脂回收氰化物中的 pH 值控制的控制器，需要建立能够充分描述被控对象特性的模型，这样有利于控制器的设计及仿真分析。建模就是指建立所研究被控对象的数学模型。而获取被控对象的数学模型是参数自适应控制仿真的关键之一<sup>[22]</sup>。所以，系统建模的有效性是课题研究的首要工作。

#### 3.1.1 系统建模分类<sup>[31][32]</sup>

建模的基本方法有两种：机理分析法和实验测试法（系统辨识）。

机理分析法通常需要通过分析过程的运动规律，运用一些已知的定律、定理和原理，如化学动力学原理、生物学定律、牛顿定理、物料平衡方程、能量平衡方程和传热传质原理等，才能建立过程的数学模型。这种方法也称作理论建模。理论建模问题也称作“白箱”问题。理论建模仅适用于简单的系统，该方法的优点在于充分揭示对象的内在规律，但对比较复杂的系统推导出的数学模型，由于太复杂而不便于对系统动态特性的分析和控制器的设计，或者不可能推导出系统完整的数学模型。

实验测试法即系统辨识。过程的输入输出信号一般总是可以测量的。由于过程的动态特性必然表现在这些输入输出数据之中，那么就可以利用输入输出数据提供的信息来建立过程的数学模型。这种建模方法就叫做辨识。所谓辨识就是通过测取研究对象在人为输入作用下的输出响应，或正常运行时的输入输出数据记录，加以必要的数据处理和数学计算，估计出对象的数学模型。这是因为对象的动态特性被认为必然表现在它的变化着的输入输出数据之中，辨识只不过是利用数学的方法从数据序列中提炼出对象的数学模型而已，因此又把辨识建模问题称作“黑箱”问题。但该方法得到的数学模型只能反映输入输出之间的特性，而得不到反映系统内在特性的信息。

由于 pH 值控制的高度非线性、时变，难以建立精确的数学模型，故本课题采用系统辨识的方法进行建模。

#### 3.1.2 pH 值控制系统模型辨识的数据来源

系统辨识是建立在输入输出数据基础上的，因此首先需要采集实时测量的输入输出数据。

该课题的工艺过程主要是在西安建筑科技大学冶金工程学院冶金实验室完成的,由于未建立实验用的自动 pH 值采集及控制设备,因此数据主要来源于静态测试,以数显酸度计及数显流量计为工具,在标准实验条件下,对吸附过程实验中的数据进行记录(根据文献<sup>[12]</sup>知处理氰化尾液时,如果 pH 值较低会生成剧毒气体 HCN,因此实验 pH 值应严格控制在碱性范围内,另一方面 pH 值过高时,会影响树脂对氰化物的吸附性能。因此,取 pH 范围为 9.5~12.5 进行试验。故主要记录 pH 值在 9.5--12.5 之间的数据),以流量和 pH 值组成数据对作为模型建立的输入输出数据(采样间隔 5s)。

又知静态测试无法完全反应系统的动态过程特性,故在记录数据中通过故意突然加大或减小流量来获得数据,以期望数据能尽可能的反应真实系统的特性。两组纪录数据如图 3.1 所示:

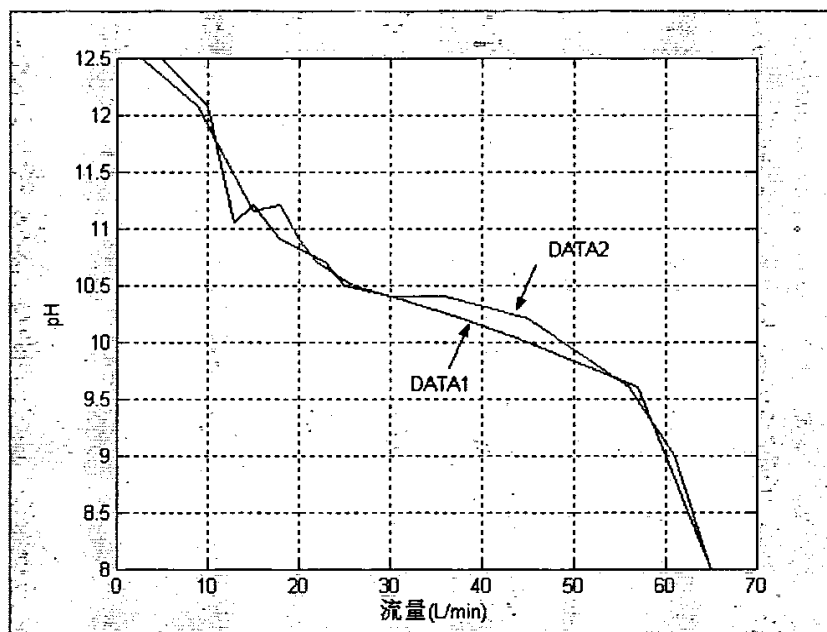


图 3.1 流量和 pH 的关系图

### 3.2 pH 值控制系统模型辨识

系统辨识就是在输入输出数据的基础上,从一组给定的模型类中确定一个与所测系统等价的模型。它有经典的辨识方法和现代的辨识方法之分<sup>[32]</sup>。

经典的辨识方法(非参数模型辨识方法):在假设系统是线性的前提下,不必事先确定模型的具体结构,所以这类方法适用于任意复杂的系统,现在工程上仍然采用。比如说阶跃响应法、脉冲响应法和频率响应法。

现代的辨识方法(参数模型辨识方法):必须事先假设一种模型结构,通过极小化



模型与系统之间的误差准则函数来确定模型的参数。比如说相关分析法、谱分析法和最小二乘法。

它的三大要素为：

- 1). 输入输出数据——辨识的基础
- 2). 优化准则——辨识的目标
- 3). 模型类——寻找模型的范围

然而，传统的辨识方法对于一般的非线性系统的辨识是很困难的。而神经网络因其具有对非线性函数具有任意逼近和自学习能力，所以神经网络系统辨识为非线性系统的辨识提供了一条有效的途径<sup>[33]</sup>。

神经网络系统辨识实质上就是在输入和输出数据的基础上，选择一个适当的神经网络模型来逼近实际系统的动态或静态特性。

与传统的基于算法的辨识方法比较，其具有以下特点：

(1) 由于神经网络可以任意逼近非线性函数，故它可为非线性系统的辨识提供一种通用的模式。

(2) 神经网络系统辨识是非算法式的，神经网络本身就是辨识模型，其可调参数反应在网络内部的连接权上。它不需要建立以实际系统数学模型为基础的辨识格式。

(3) 神经网络作为实际系统的辨识模型，实际上也是系统的一个物理现象，可以用于在线控制。

### 3.2.1 神经网络辨识模型的选择

基于神经网络的非线性系统辨识，就是应用神经网络能逼近任意非线性函数这一特性，而用于非线性函数逼近的前向神经网络主要有两种：BP（反向传播算法）网络和 RBF（径向基函数）网络。基于 BP 网络的非线性函数逼近虽然在理论上是可行的，但是其学习效率低，收敛速度慢，易陷于局部极小状态，网络的泛化及适应能力较差等缺点，限制了其在实际中的应用效果，而 RBF 网络既有生物背景又符合逼近理论，当中心点集选择适当时，很少的神经元就可获得很好的逼近效果，它还具有唯一最佳逼近特性，无局部最小的优点，其网络的隐层与输出层的连接权与输出成线性关系，可以采用保证全局收敛的线性优化算法<sup>[38]</sup>。因此，本文采用 RBF 对控制对象进行辨识，并将其作为仿真的过程对象。

### 3.2.2 RBF 的网络结构和特点

径向基函数 (Radial Basis Function, 简称 RBF) 网络是一种三层前馈网络。第一层为输入层, 只传递输入信号到隐层; 第二层为隐含层, 传递函数为 RBF 非线性函数, 它是一种局部分布对中心径向对称衰减的非负非线性函数; 第三层为输出层, 它对输入模式的作用做出响应, 传递函数为线性函数。假设网络有  $n$  个输入单元,  $q$  个隐单元和  $m$  个输出单元, 其拓扑结构如图 3.2 所示。

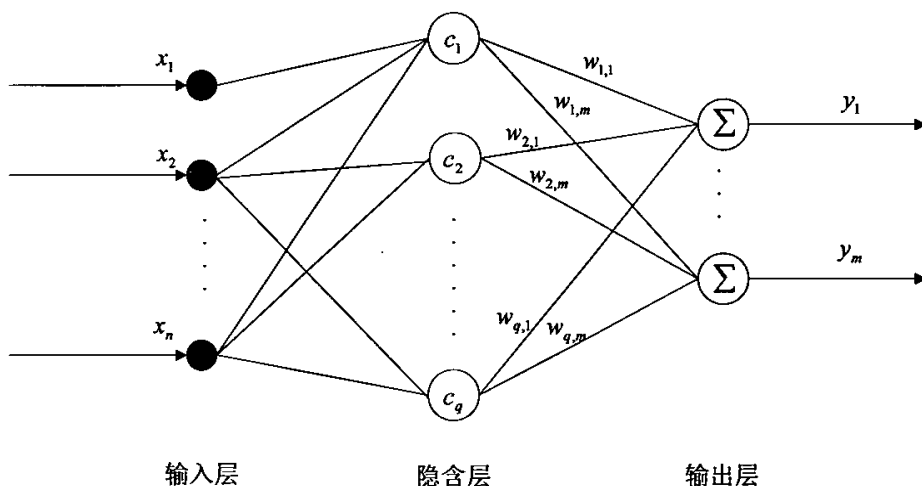


图 3.2 RBF 网络的拓扑结构

RBF 网络由输入空间到隐含层空间的变换是非线性的, 而从隐含层空间到输出层空间的变换是线性的。隐单元的变换函数是径向基函数, 网络能够实现输入输出之间如下的映射关系:

$$y_i = \sum_{j=1}^q w_{ji} \Phi(\|x - c_j\|) \quad (3-1)$$

其中  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  为输入矢量,  $y_i$  为第  $i$  个输出单元的输出值,  $w_{ji}$  为第  $j$  个隐单元到第  $i$  个输出单元的权值,  $\|\bullet\|$  为欧氏范数,  $\|x - c_j\|$  表示  $x$  和  $c_j$  之间的距离,  $\Phi(\bullet)$  为径向基函数,  $c_j$  为第  $j$  个隐单元的中心矢量。

径向基函数是一种局部分布的对中心点径向对称衰减的非负非线性函数, 且神经元的输入离该中心点越远, 神经元的激活程度就越低。常用的有高斯函数 (Gauss function)、多二次函数 (multiquadric function)、逆多二次函数 (inverse multiquadric function)、薄板样条函数 (thin-plate-spline function) [34]。

这里我们选用高斯函数，其定义如下：

$$\Phi(v) = \exp\left(\frac{-v^2}{2\delta^2}\right) \quad (3-2)$$

其中， $\delta$  是该基函数的扩展常数 (Spread) 或宽度。显然， $\delta$  越小，径向基函数的宽度就越小，基函数就越具有选择性。

采用高斯函数，具备如下优点<sup>[36]</sup>：

- 表示形式简单，即使对于多变量输入也不增加太多的复杂性。
- 径向对称。
- 光滑性好，任意阶导数存在。
- 该基函数表示简单且解析性好，便于进行理论分析。

由此可知，设计与训练 RBF 网络的重点在于确定网络的结构。其中网络的输入单元数和输出单元数由训练样本确定，待定的网络参数包括隐含层单元数  $q$ 、中心矢量  $c$ 、扩展常数  $\delta$ 、网络的连接权  $w_{ji}$ 。这些待定网络参数的确定正是 RBF 网络研究的关键性问题，需要通过学习 and 训练的方法来完成。

### 3.2.3 RBF 的学习算法

RBF 网络的学习过程为每次自动生成一个 RBF 神经元和调整相应的网络权重，这样，不断地增加 RBF 神经元数目和调整权重，直至达到误差指标要求和最大的训练步数为止。

其主要学习算法有 Moody 和 Darken 提出的混合自适应  $k$  均值和 LMS 算法，Chen 等人提出的正交最小二乘算法 (Orthogonal Least Square) 和递推混合算法 (Recursive Hybrid Algorithm) 等等<sup>[37]</sup>。

本文采用混合自适应  $K$ -均值和 LMS 算法，其中用  $K$ -均值聚类算法确定 RBF 网络数据中心  $c_i$  和扩展常数  $\delta_i$ ；用 LMS 算法确定输出权矢量  $w_{ji}$ 。具体算法如下<sup>[25][33-39]</sup>：

假设  $k$  为迭代次数，第  $k$  次迭代时的聚类中心为  $c_1(k), c_2(k), \dots, c_q(k)$ ，相应的聚类域为  $w_1(k), w_2(k), \dots, w_q(k)$ 。

- (1) 算法初始化：选择  $q$  个不同的初始聚类中心，并令  $k=1$ 。初始聚类中心的方法很多，比如，从样本  $X_j (j=1, 2, \dots, N)$  输入中随机选取  $q$  个，或者选择前  $q$  个样本输入，但这  $q$  个初始数据中心必须取不同的值。
- (2) 计算所有样本输入与聚类中心的距离  $\|X_j - c_i(k)\|$ ， $i=1, 2, \dots, q; j=1, 2, \dots, N$ 。

(3) 对样本输入  $X_j$ ，按最小距离原则对其进行分类，即当  $i(X_j) = \min_i \|X_j - c_i(k)\|$ ，

$i=1,2,\dots,q$  时， $X_j$  即被归为第  $i$  类，即  $X_j \in w_i(k)$ 。

(4) 重新计算各类的新的聚类中心：

$$c_i(k+1) = \frac{1}{N_i} \sum_{x \in w_i(k)} x, \quad i=1,2,\dots,q \quad (3-3)$$

其中， $N_i$  为第  $i$  个聚类域  $w_i(k)$  中包含的样本数。

(5) 如果  $c_i(k+1) \neq c_i(k)$ ，转到步骤 (2)，否则聚类结束，转到步骤 (6)

(6) 根据各聚类中心之间的距离确定各隐节点的扩展常数。隐节点的扩展常数取

$\delta_i = \frac{d_i}{\sqrt{2M}}$ ，其中  $d_i$  为第  $i$  个数据中心与其它最近的数据中心之间的距离，即

$d_i = \min_j \|c_j - c_i(k)\|$ ， $M$  为隐层单元数。

(7) 中心和宽度确定后，采用迭代的 LMS(最小二乘法) 调节隐层与输出层的连接权重  $w_{ji}$ ，利用一组输入样本  $X_j(j=1,2,\dots,N)$  及其对应的实际输出样本  $Y_j(j=1,2,\dots,N)$ ，则使能量函数

$$E = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^m e_{jk}^2 \quad (3-4)$$

其中，据式 (3-1) 知

$$e_{jk} = y_{jk} - \sum_{i=1}^q w_{ik} \Phi(\|X_j - c_i\|) \quad (3-5)$$

最小，从而达到调节权重  $w_{ji}$  的目的。 $w_{ji}$  的调节公式如下：

$$w_{ji}^{b+1} = w_{ji}^b - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \quad (3-6)$$

其中， $\eta$  为学习速率。

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^m e_{jk} \Phi(\|X_j - c_i\|) \quad (3-7)$$

### 3.2.4 系统模型辨识的实现<sup>[35]</sup>

根据以上算法，结合 MATLAB 神经网络工具箱及其提供的有效子函数，编写 MATLAB 程序，命名为 rbf.m。其程序流程图如图 3.3:

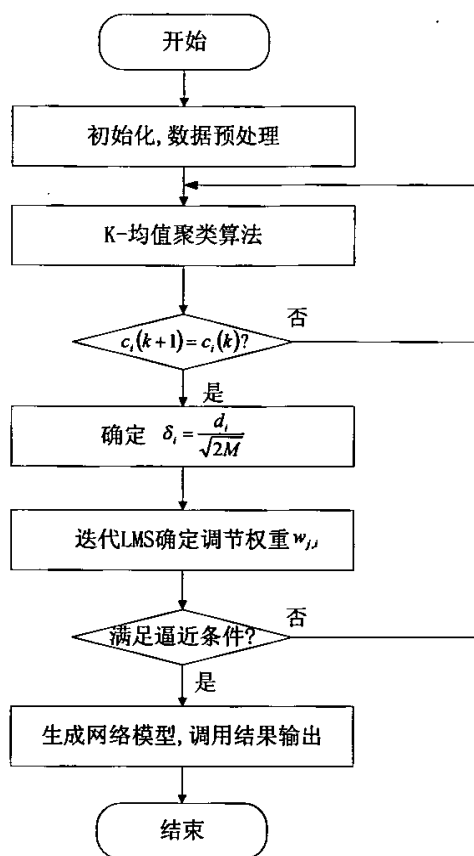


图 3.3 系统辨识的程序流程图

在 MATLAB 环境下, 运行 `rbf.m`。设定目标误差为 0.1, 最大隐单元不超过 20 个, 网络性能评价函数使用 MATLAB 自带的 MSE (Mean Squared Error) 和 SSE (Sum Squared Error) 函数。生成网络模型结构如图 3.4。

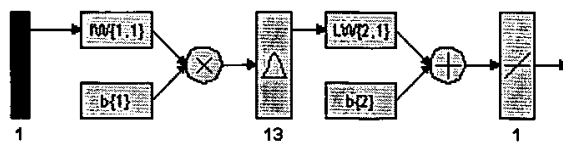


图 3.4 网络模型结构

网络模型的结构确定后, 进行训练学习, 其训练过程如图 3.5, 由图可知该网络在训练不到 15 次后就达到目标误差。然后将生成的网络模型命名为 `net`, 保存在工作空间。图 3.6 表示由 DATA1 所建立模型的跟踪情况, 说明 `net` 完全跟踪于模型的训练用输入输出样本。

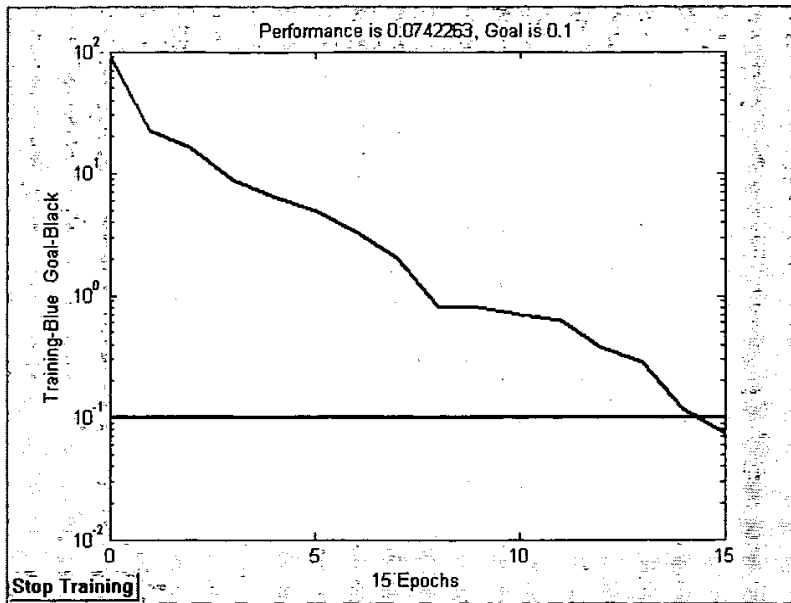


图 3.5 网络的训练过程

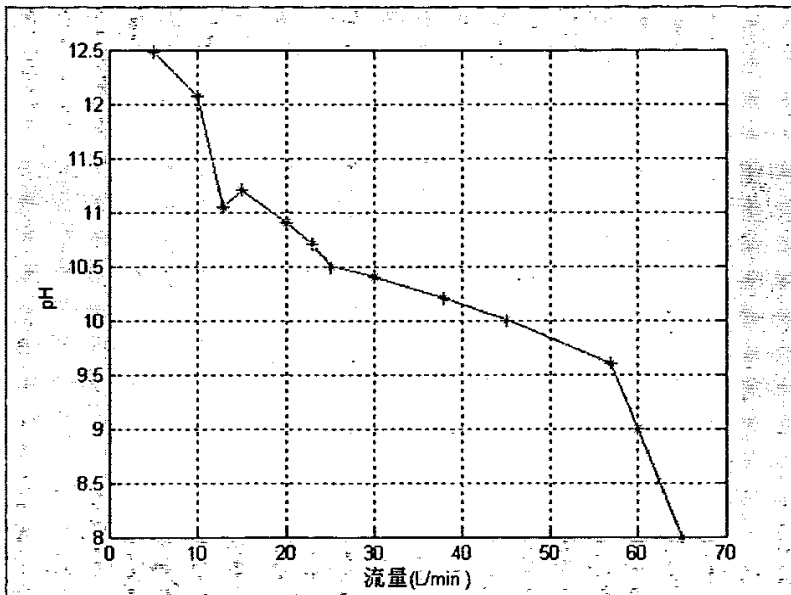


图 3.6 DATA1 建立的模型的自我跟踪情况

为了检测所建立模型的非线性逼近能力，是否能较好的反应被控对象的特性，进行拟合实验，将 DATA2 作为测试用数据，使用 MATLAB 自带的 sim 函数，生成模型仿真输出，并绘制拟合图形如图 3.7，具体程序如下：

```

yy=sim(net,t2);    % t2 is the vector of inputs of DATA2
plot(t2,yy,'b');   % yy is the vector of outputs of simulink
hold on;
plot(t2,y2, '*');  % y2 is the vector of outputs of DATA2
hold off;

```

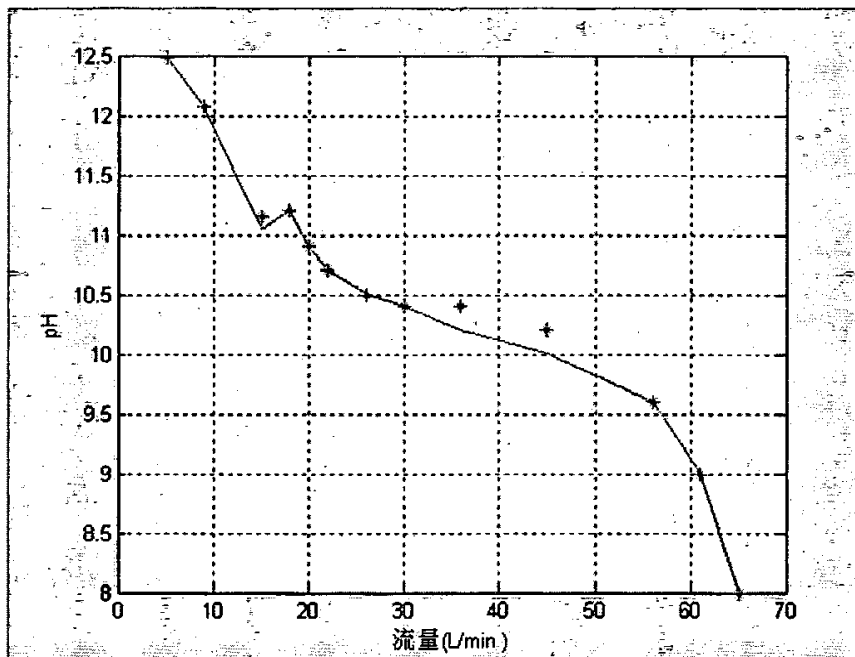


图 3.7 拟合图

从图中我们可以看到模型 `net` 能很好的对测试数据真实的输出进行逼近 (\* 号代表真实数据点)。

为了能更好的说明 RBF 的网络优势,又用同样的数据 DATA1 建立了 BP 网络模型,并用 DATA2 进行测试,使用 SSE (方差和)、MSE (均方误差) 和收敛时间  $T$  对两种网络性能进行比较,如表 3.1。

表 3.1 RBF 与 BP 网络模型性能比较

	SSE	MSE	T
<b>RBF</b>	<b>0.0742</b>	<b>0.0069</b>	<b>1.7820</b>
<b>BP</b>	<b>4.5048</b>	<b>0.3465</b>	<b>3.2030</b>

两者拟合曲线比较如图 3.8。

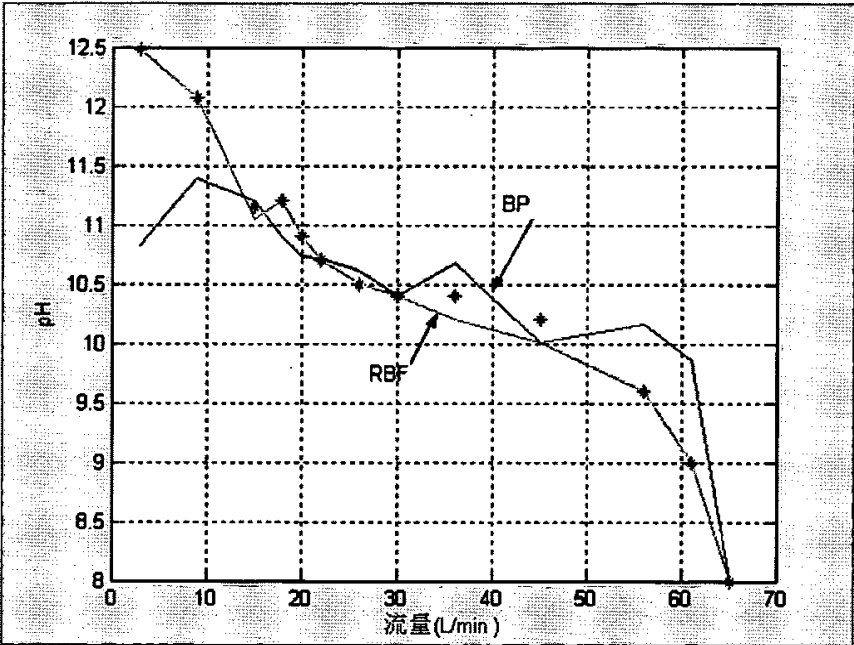


图 3.8 RBF 和 BP 网络模型的拟合比较图

由表 3.1 和图 3.8 可以看出 RBF 网络比 BP 网络学习速率高，收敛速度快，非线性逼近性能好。可以这样认为，在足够大量合理的数据训练的前提下，RBF 的精度会更高，泛化能力会更好，收敛速度会更快。

为了能够将辨识模型应用在控制系统仿真中，采用 MATLAB 自带 gensim 函数，生成 RBF 神经网络仿真模块，命名为 pHnet\_model，如图 3.9。



图 3.9 RBF 仿真模块

双击 pHnet\_model 模块，可以得到模块内部仿真结构如图 3.10。

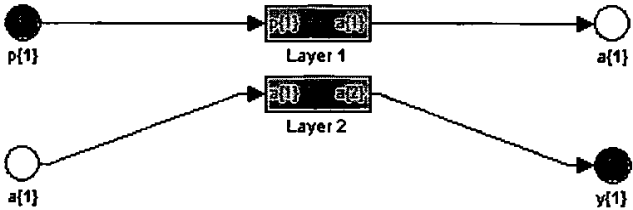


图 3.10 pHnet\_model 模块内部仿真结构图



分别双击 **Layer1** 和 **Layer2** 模块，得其内部仿真结构图如图 3.11 和图 3.12。

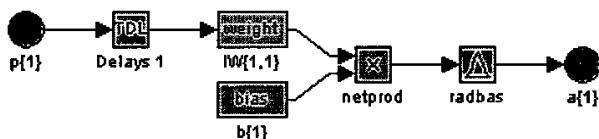


图 3.11 Layer1 内部仿真结构图

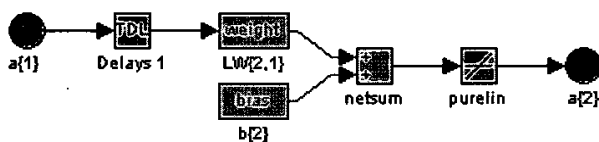


图 3.12 Layer2 内部仿真结构图

双击图 3.12 中 **weight** 模块，得其内部仿真结构图如图 3.13。

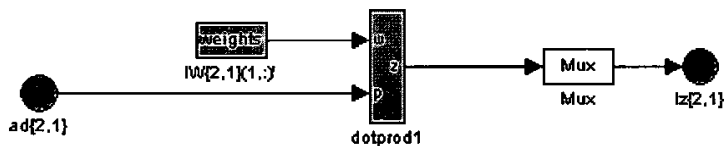


图 3.13 Layer2/weight 内部仿真结构图

分别双击图 3.11 中的 **radbas** 和 **weight** 模块，得其内部仿真结构图如图 3.14 和 3.15。

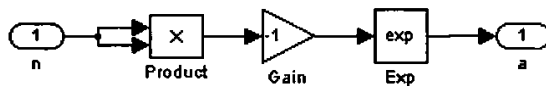


图 3.14 Layer1/radbas 模块内部仿真图

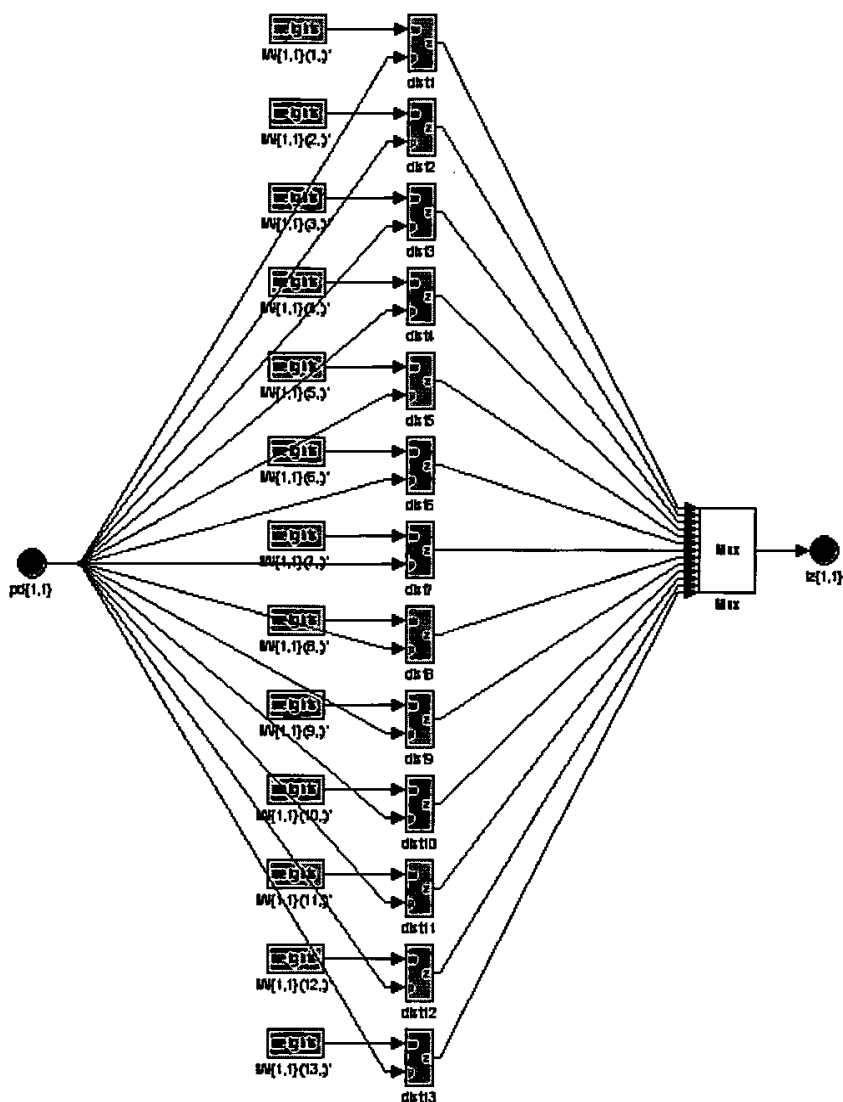


图 3.15 Layer1/weight 的内部仿真结构图

### 3.3 比例阀模型

由图 2.4 pH 控制结构原理图知，整个闭环控制的对象除了过程对象外，还有比例阀环节，故需要建立比例阀的模型，才能进行控制系统仿真。由文献<sup>[56][57]</sup>知比例流量阀输出流量对输入电流的传递函数可用二阶环节表示，即：

$$G_v(s) = \frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{k_q}{\frac{s^2}{w_v^2} + \frac{2\delta_v s}{w_v^2} + 1} \quad (3-8)$$

式中：

$k_q$ —比例阀的流量增益；

$w_v$ —固有频率；

$\delta_v$ —阀的阻尼系数；

这里我们选择如下比例阀传递函数：

$$G_v(s) = \frac{1.0003}{0.0052s^2 + 0.2651s + 1} \quad (3-9)$$

### 3.4 小结

本章采用具有学习速率高，收敛速度快，非线性逼近性能好的 RBF 网络函数构建过程对象的神经网络辨识模型，达到了很好的拟合度，并通过与同一条件下构建的 BP 网络辨识模型比较，验证了其所具有的良好特性。

同时，根据 pH 值控制系统的原理图，建立了比例阀的模型，为第 6 篇的仿真工作做好了准备。

## 第4章 pH 值控制算法研究

### 4.1 引言

PID 控制器由于结构简单、稳定性好、控制精度高，在工业过程控制中广泛应用，然而面对复杂的控制系统，特别是具有非线性、大滞后和时变不确定系统，常规 PID 控制器由于采用固定的参数，难以保证系统在任何工况条件下始终具有最佳的控制性能。而模糊控制是一种不依赖于被控过程数学模型的仿人思维的控制技术，其建立在人工经验基础之上，无须知道控制对象数学模型，采用语言变量来描述系统特征，并根据系统动态信息和模糊规则进行推理以获得合适的控制量，具有对参数变化不敏感和鲁棒性强等特点，但控制精度不高，因此，针对本工艺具有高度非线性、时变，滞后的特点，本文提出了一种基于模糊推理规则的参数自适应的模糊 PID 控制方案实现 pH 值的有效控制。即用模糊推理的方法实现 PID 参数的在线自整定，使系统动态过程各阶段的 PID 参数都处于最佳状态，以获得满意的控制效果。这样将模糊理论与 PID 控制器相结合，使系统既具有模糊控制的灵活、适应性强的优点，又具有 PID 控制精度高的特点。

#### 4.1.1 典型 PID

在自动控制发展历程中，PID 历时最悠久、应用最广泛。目前，大多数的控制器还是使用 PID 调节。其结构图如图 4.1

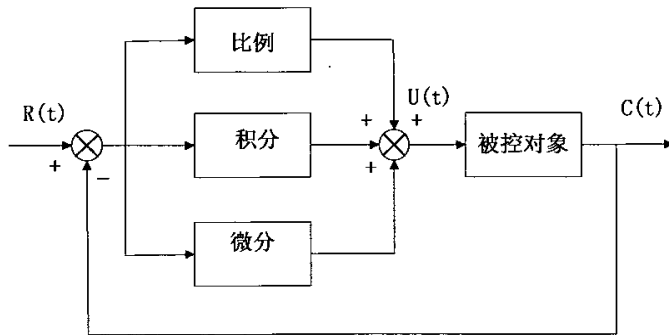


图 4.1 PID 调节结构

典型的 PID 控制结构有以下几种<sup>[27]</sup>：

- 模拟 PID 控制器，其传递函数为：

$$G(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4-1)$$

- 位置式 PID 控制器控制算法的离散形式为：

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d (e(k) - e(k-1)) \quad (4-2)$$

式中

$k_p$ ——比例系数

$k_i = k_p T / T_i$ ——积分系数

$k_d = k_p T_d / T$ ——微分系数

$T$ ——采样时间

$k$ ——采样序号  $k = 0, 1, 2, \dots$

$u(k)$ ——第  $k$  次采样时刻的计算机输出值

$e(k)$ ——第  $k$  次采样时刻的误差值

$T_i$ ——积分时间常数

$T_d$ ——微分时间常数

● 增量式 PID 控制器控制算法的离散形式为：

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + \Delta u(k) \\ \Delta u(k) &= k_p (e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (4-3)$$

PID 控制效果的好坏在很大程度上取决于系统参数的整定，即控制器 P、I、D 三个参数的选择。从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态误差等方面考虑，其各个参数的作用如下<sup>[48]</sup>：

1) 比例系数  $k_p$  的作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度。 $k_p$  越大，系统的响应速度越快，系统的调节精度越高，但易产生超调，甚至导致系统不稳定。 $k_p$  取值过小，则会降低调节精度，使响应速度缓慢，从而延长调节时间，使系统静态、动态特性变坏。

2) 积分作用系数  $k_i$  的作用是消除系统的稳态误差。 $k_i$  越大，系统的稳态误差消除越快，但  $k_i$  过大，在响应过程的初期会产生积分饱和现象，从而引起响应过程的较大超调。若  $k_i$  过小，将使系统稳态误差难以消除，影响系统的调节精度。

3) 微分作用系数  $k_d$  的作用是改善系统的动态特性。其作用主要是能反应误差信号的变化趋势。并能在误差信号值变得太大之前，在系统引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减少调节时间。

简单而成熟的 PID 参数自整定方法很多种如：Z-N 法、最优整定法、工程整定法（经验试凑法、临界比例度法、衰减曲线法、响应曲线法）、扩充临界比例带法等<sup>[28]</sup>。

#### 4.1.2 模糊控制<sup>[1][2]</sup>

模糊控制是一种不依赖于被控过程数学模型的仿人思维的控制技术,通过计算机来模拟人们用自然语言来描述的控制过程,从而实现对工业生产的自动控制。所谓模糊控制,就是指一类应用模糊集合理论的控制方法。一方面,模糊控制提出了一种新的机制,用于实现基本知识(规则)甚至语义描述的控制规律;另一方面,模糊控制为非线性控制器提出了一个比较容易的设计方法,尤其是当受控装置(对象或过程)含有不确定且很难用常规非线性控制理论处理时,更是有效。

模糊控制系统设计的关键在于模糊控制器的设计,模糊控制器的基本结构如图4.2所示。

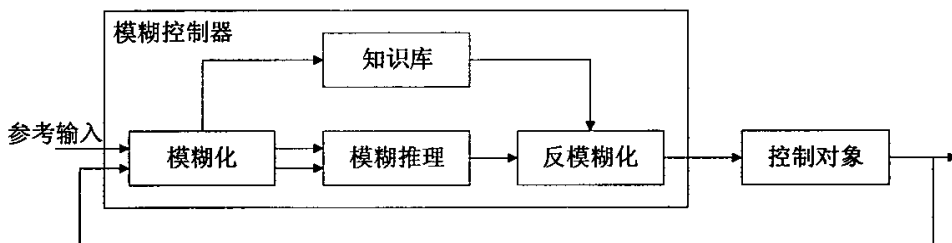


图 4.2 模糊控制器的基本结构图

该控制器的设计主要有以下三个部分<sup>[24]</sup>:

##### 1) 输入输出量的模糊化

所谓模糊化(Fuzzification)就是先将某个输入测量量的测量值作标准化处理,将该输入测量量的变化范围映射到相应论域中,再将论域中的各输入数据以相应的模糊语言值的形式表示,并构成模糊集合。这样就把输入的测量量转换为用隶属度函数表示的某一模糊语言变量。其中需要关心的问题如下:

- ① 量化因子的确定
- ② 精确量的离散化选择(即模糊集及模糊论域的确定)
- ③ 隶属函数的选择

##### 2) 模糊逻辑推理

根据事先已定制好的一组模糊条件语句构成模糊规则库(IF-THEN),运用模糊数学理论对模糊控制规则进行推理计算,从而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量,即模糊输出量。完成这部分功能的过程就是模糊逻辑推理过程。其中需要关心的问题如下:

- ① 模糊控制器的结构选择(即何种输入何种输出)

## ② 模糊控制规则的建立 (IF-THEN)

## 3) 反模糊化过程 (清晰化)

反模糊化 (Defuzzification) 有时又叫模糊判决。就是将模糊输出量转化为能够直接控制执行部件的精确输出量的过程。其中需要关心的问题如下:

## ① 比例因子的确定

## ② 反模糊化计算方法的选择 (主要有最大隶属度法、中位数法、重心法等)

在 MATLAB 中, 可以利用模糊逻辑工具箱 (Fuzzy Logic Toolbox)<sup>[19]</sup> 与动态仿真软件 Simulink 结合, 建立模糊控制查询表, 对模糊控制系统进行设计与仿真。

## 4.2 参数自适应模糊 PID 的控制思想和结构

参数自适应模糊 PID 控制器设计的思想是先找出 PID 调节器的参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  与误差  $e$  和误差变化率  $ec$  之间的模糊关系, 并将它们作为控制器的输入, 根据模糊控制规则对 PID 的 3 个参数进行在线调整, 设计出模糊控制器; 将 PID 调节器的三个参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  作为模糊控制器的输出; 最后根据调整后 PID 参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  重新带入 PID 公式进行运算, 计算结果即为控制器的最终输出, 从而使被控对象具有良好的动、静特性。

具体控制框图如图 4.3。

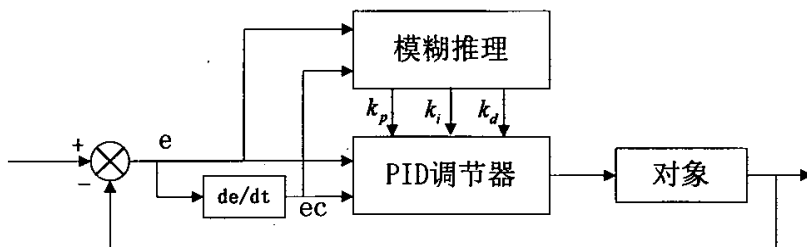


图 4.3 Fuzzy-PID 控制框图

由图可知, 该控制器以常规 PID 控制为基础, 采用模糊推理思想根据不同的  $e$  和  $ec$  对 PID 的三个参数进行在线自整定。其控制结构分为两部分, 即常规 PID 控制部分与模糊推理的参数校正部分。其中, 模糊推理的参数校正部分的设计是关键。

## 4.3 参数校正部分设计

本控制系统采用的参数自适应的模糊控制器属于增益调整型中的基于误差驱动的模糊 PID 控制器, 是利用误差  $e$  和误差变化率  $ec$  的值进行参数调节。即模糊推理的参数校正部分采用增量式, 设计为三个两输入单输出的模糊控制器分别控制 PID 的三个参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 。

共同输入为：pH 测量值的误差  $e$  和误差变化  $ec$

分别输出为： $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 。

其中  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  由以下各项决定：

$$\begin{aligned} k_p &= k_p' + \{E, EC\}_p \\ k_i &= k_i' + \{E, EC\}_i \\ k_d &= k_d' + \{E, EC\}_d \end{aligned} \quad (4-4)$$

其中  $\{E, EC\}_p$ 、 $\{E, EC\}_i$ 、 $\{E, EC\}_d$  为模糊推理的结果，即参数的校正量  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、

$\Delta k_d$ ； $k_p'$ 、 $k_i'$ 、 $k_d'$  为参数初值。

这里以比例系数  $k_p$  的模糊推理结构为例，如图 4.4，其它相同。

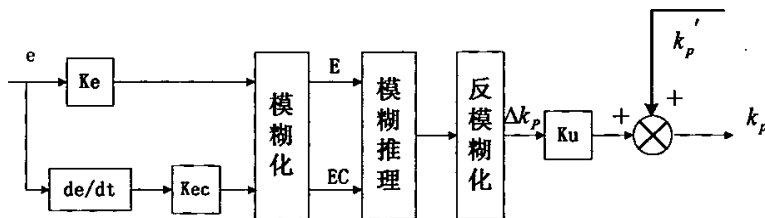


图 4.4  $k_p$  的模糊推理机构

### 4.3.1 输入输出的映射

根据本工艺特性，该控制器做如下设定：

- 误差  $e$  的模糊论域为  $\{-5, +5\}$  和模糊集  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ；
- 误差变化率  $ec$  的模糊论域为  $\{-5, +5\}$  和模糊集  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ；
- 控制增量  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  的模糊论域为  $\{-5, +5\}$  和模糊集  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ；

（其中语义变量词汇负大（NB）、负中（NM）、负小（NS）、零（ZE）、正小（PS）、正中（PM）、正大（PB）就是变量的模糊状态）。

d) 量化因子

假设误差的基本论域  $e = [-e_{\max}, e_{\max}]$

模糊论域  $A = \{-n_a, -n_a + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n_a - 1, n_a\}$

则  $Ke = \frac{n_a}{e_{\max}}$  就是误差  $E$  的量化因子。 $Kec$  的确定同上。



但是，上述确定的因子量只是理论值，在仿真中可能还需要修改调整。

e) 比例因子

设控制增量的基本论域为  $\Delta u = [-\Delta u_{\max}, \Delta u_{\max}]$

模糊论域  $C = \{-n_c, -n_c + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n_c - 1, n_c\}$

则  $K_u = \frac{\Delta u_{\max}}{n_c}$  就是比例因子。

但是，上述确定的因子量只是理论值，在仿真中可能还需要修改调整。

### 4.3.2 隶属函数的确定

隶属函数的确定要遵守以下原则<sup>[42]</sup>：

- 1) 表示隶属函数的模糊集合必须是凸模糊集。
- 2) 变量所取隶属函数通常是对称和平衡的。
- 3) 隶属函数要符合人们的语义顺序，避免不恰当的重叠。
- 4) 论域中的每个点至少属于一个隶属函数，同时，它一般属于至多不超过两个隶属函数的区域。
- 5) 当两个隶属函数重叠时，重叠部分的任何点的隶属函数的和应该小于等于 1。

Mamdani 方法就是一种常用的方法。选择一些简单的、能反映模糊推理结果的隶属函数，可以大大简化模糊推理的计算过程。目前常用的有三角形隶属函数、梯形隶属函数、高斯隶属函数和钟型函数等。

本设计选择常用的高斯函数为隶属函数，因为其具有较好覆盖度，连续且处处可微，适合自适应，自学习。其函数图如图 4.5。

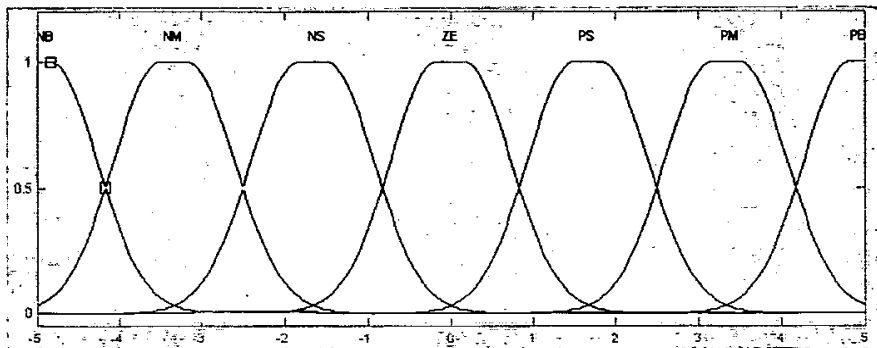


图 4.5 高斯隶属函数图

以误差  $e$  根据高斯隶属函数制表 4.1 为例：

表 4.1 变量 $e$ 的隶属函数表

	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
NB	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NM	0.03	0.7	0.9	0.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NS	0.0	0.0	0.15	0.9	0.7	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ZE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
PS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05	0.6	0.9	0.15	0.0	0.0
PM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	0.7	0.03
PB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0

### 4.3.3 模糊推理规则的确定

由PID控制器的原理可知，其三个参数 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 的作用如4.1.1节所述。根据参数 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 对系统特性的影响情况，可以得到对于不同的误差 $e$ 和误差变化率 $ec$ 时，参数的自整定原则<sup>[50][52]</sup>：

(1) 当误差 $|e|$ 较大，系统处于响应阶段，为加快响应速度并防止开始时误差 $|e|$ 瞬间变大，需要取较大的 $k_p$ 。为了防止积分饱和，应取较小的 $k_i$ ，同时为了防止微分饱和，避免系统响应出现较大的超调，应去掉微分作用，即 $k_d=0$ 。

(2) 若 $e \bullet ec > 0$ ，说明误差在向绝对值增大的方向变化。当误差 $|e|$ 和误差变化率 $|ec|$ 为中等大小，系统处于跟随阶段，为了使系统响应的超调减小， $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 都不能太大，需要取较小的值，和的值大小要适中，以保证系统的响应速度。若误差 $|e|$ 较大，则应实施较强的控制，以改变误差的变化趋势，并迅速减小误差绝对值，可取较大的 $k_p$ 值，同时可取较小 $k_i$ 的和中等的 $k_d$ 值，以提高动态性能和稳态性能。若误差 $|e|$ 较小， $k_i$ 可实施一般控制，以改变误差的变化趋势，可取中等的 $k_p$ 值，同时取较大的 $k_i$ 值和较小的 $k_d$ 值，以提高系统的稳态性能，避免产生振荡。

(3) 若 $e \bullet ec < 0$ ，说明误差在向绝对值减小的方向变化。若误差 $|e|$ 较大，则应实施一般的控制，迅速减小误差绝对值，可取中等的 $k_p$ ，同时可取较小的 $k_i$ 和中等的值 $k_d$ ，以提高动态性能和稳态性能。若误差 $|e|$ 较小，为了使系统具有良好的稳态性能，应增大 $k_p$ 和 $k_i$ 的值，同时为了避免系统在设定值附近振荡，并考虑系统的抗干扰性能，可选取适当的值， $k_d$ 通常为中等大小。

此外，在控制系统中纯滞后往往是影响系统动态特性的不利因素。对于这类系统的控制，快速性往往是次要的，主要要求系统很少超调量，要求系统闭环稳定，而调整时间允许在较多的采样周期内结束。根据以上分析，可以得到控制器的模糊参数调节规则

表，如表 4.2、4.3、4.4所示。

表 4.2  $\Delta k_p$  的模糊规则表

$\begin{matrix} ec \\ e \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 4.3  $\Delta k_i$  的模糊规则表

$\begin{matrix} ec \\ e \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	PM	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

表 4.4  $\Delta k_d$  的模糊规则表

$\begin{matrix} ec \\ e \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZE
NS	ZE	NS	NM	NM	NS	NS	ZE
ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	NS	ZE
PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

#### 4.3.4 反模糊化方法

反模糊化就是将模糊输出量转化为能够直接控制执行部件的精确输出量的过程。反模糊化的主要方法有最大隶属度法、中位数法、重心法。本设计选择重心法，即：

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u_i) u_i}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)} \quad (4-5)$$

#### 4.4 PID 部分设计

本设计方案的 PID 部分为常规设计

$$Out1 = k_p e + \frac{1}{s} k_i e + k_d \dot{e} \quad (4-6)$$

MATLAB 仿真设计图如图 4.6，其输入 In1 为误差  $e$ 。

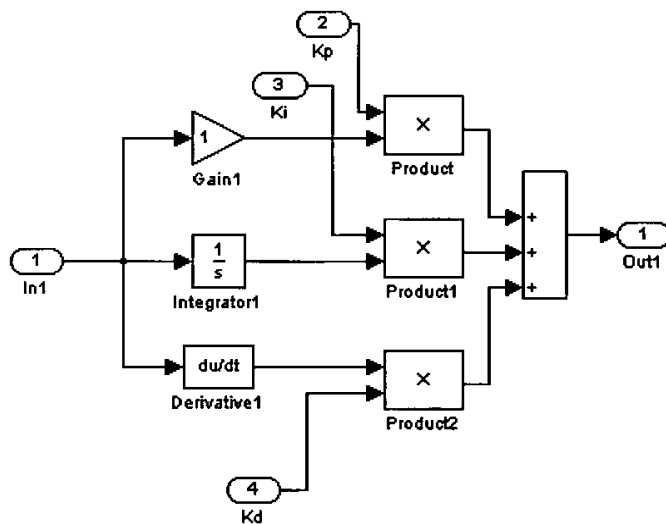


图 4.6 PID 仿真图

#### 4.5 小结

本章根据第 2 章的控制思路 and pH 控制系统结构原理图，对参数自适应的模糊 PID 控制器进行了理论分析和具体的设计，包括参数校正部分的设计和 PID 部分设计，这为下一步的仿真工作奠定了理论基础、明确了设计思路。

## 第5章 pH 值控制系统设计

### 5.1 系统总体设计

根据工艺流程知,整个工艺的影响因素较多,包括温度、压力、pH 值、氰化物浓度、树脂量、解吸剂浓度和超声波外场强化等。据此,真实系统的控制参数是多个,需要采集多个对象的数据,虽然本文只考虑了过程的一个控制参数 pH 值,但在系统实现时并不影响从整体的角度设计控制系统的具体实现。考虑到控制程序会经历多次改动,而在 PLC 的程序编制中会涉及到许多对硬件的操作和对中断的处理,且部分中断需要进行及时处理,所以如果将参数自适应模糊 PID 控制程序与系统常规控制程序(涉及硬件和中断处理的部分)一并使用 PLC 来实现,必然会增加调试的难度。所以在系统的初步设计阶段,我们采用了将参数自适应模糊 PID 控制程序与系统常规控制程序分开调试的办法。具体是将系统常规控制程序放在 PLC 中,而参数自适应模糊 PID 控制程序则在 PC 机上进行编制,PLC 与 PC 机之间进行 PPI(西门子 S7-200 PLC 通讯协议)通讯。

系统常规控制程序包括数据通道的选择、A/D 转换采样、控制量 D/A 转换、比例阀控制输出、发送及接受 PPI 通讯数据等基本功能。这些程序一旦编制调试通过,就基本不再变化,因此可以将它们下载到 PLC 中去。如需修改,只要有备份,修改后就可再次下载到 PLC 中即可更新。参数自适应模糊 PID 控制程序则包括发送和接收数据(包括控制量数据)、实时计算控制量和存储有关数据到数据库中等功能。其中的计算控制量部分将是程序编制的重点。

综上所述,设计阶段系统将在这样的一种构想下工作:首先 PLC 选择通道,完成 A/D 转换和 pH 值计算,然后当前的 pH 值按照某一格式通过串行口传输至计算机;之后调用相关程序完成 pH 值的显示及存入数据库,并与之前接受到的 pH 值数据进行数值计算,并经过模糊推理,计算实时 PID 三个参数值,将此值通过计算机串行口下传至 PLC,动态调节 PID 参数,输出控制量,经过 D/A 转换,发送给流量比例阀的 AI(模拟量输入)口,流量比例阀便按照它进行阀门流量控制<sup>[29]</sup>。整个系统控制流程图如图 5.1。

这种控制形式的意义不仅仅在于方便测试初始阶段的调试工作,而且可以形成类似于上、下位机的控制形式。在上位机进行核心程序的编制,负责进行数据的转换处理以及形成控制量,下位机则按照接收到的控制量进行执行元件的控制,其本身并不完成关键的数据处理工作。如果上位机采用 PC 机,则其程序可在 VB, VC, Delphi, Matlab 等编程平台上完成。在这些平台之上进行程序编制的效率将大大高于 PLC 的编程语言(如梯形图)。本文采用 MATLAB 作为上位机编程平台,组态王作为人机界面开发平台。

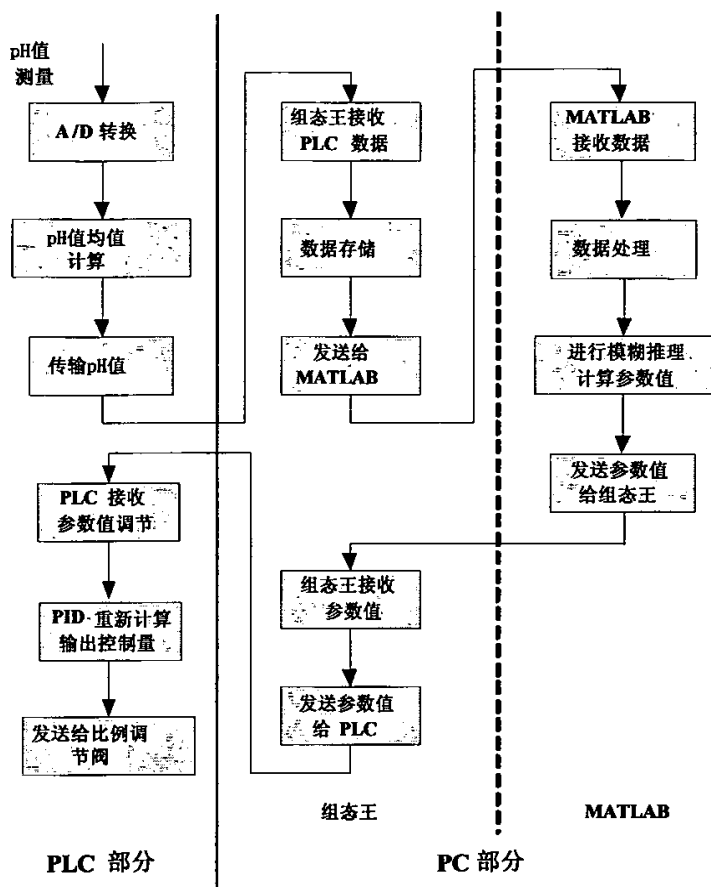


图 5.1 系统控制流程图

则上位机的主要设计功能有：

1. 数据的采集；
2. 过程监控。包括参数显示，数据打印，事故报警等；
3. 数据库的管理；
4. 与下位机通讯；
5. 故障处理与报警；
6. 先进控制算法的实现和实时控制。

下位机的主要设计功能有：

1. 实际 pH 采集；
2. 常规 PID 控制算法，实时控制功能；
3. 与上位机通讯；
4. 故障信号的检测，处理与报警。

5.2 硬件构成及选型<sup>[16][18][21][30][53]</sup>

硬件原理图如图5.2所示。pH传感器（复合电极）将采集到的pH值以变化范围0~14间的采集酸度信号（4个）传送给PLC的扩展模块—EM231，它是一个4输入模拟量模块（AI），考虑今后系统扩展裕量，选用两块EM231。四个pH信号经过PLC计算取均值即为反应液检测酸度P；通过RS485串口通讯将酸度P上传给上位机（PC），与设定值比较，并按照本文设计的模糊控制器得出PID三个参数，即 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ ，然后再通过串口通讯将其下传给PLC，PLC再通过动态调节s7-200中的普通PID的参数，输出控制信号 $u(t)$ ；模拟量输出（AO）模块EM235将控制量 $u(t)$ 发送给比例调节阀的模拟量输入口（AI，接受4~20mA的标准调节信号），调节中和液流量，从而有效地控制反应炉的pH值在稳定状态。

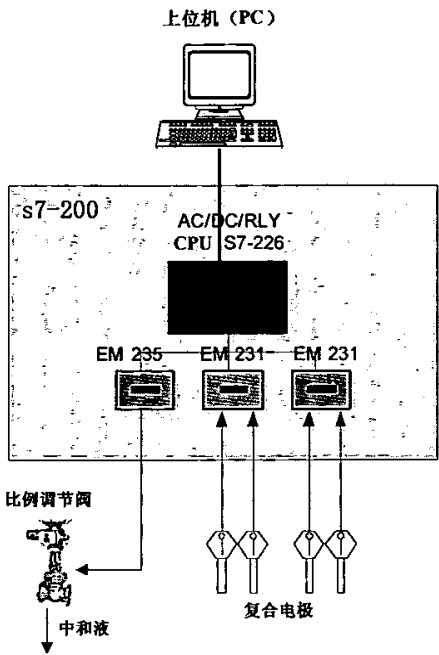


图 5.2 测控系统硬件原理图

根据工艺要求，监测系统的硬件要求必须选择抗干扰能力强、品质优良、性能可靠的设备。故主要硬件选择设备表如表5.1<sup>[59]</sup>：

表 5.1 硬件选择设备表

名称	型号	数量	备注
计算机	奔腾 IV IBM 兼容机 (PC)	1	带有组态王加密狗
控制模块	CPU 226	1	Siemens 公司
输入输出混合模块	EM 235 AI4/AQ1x12 位	1	Siemens 公司
输入模块	EM 231 AI4X12	2	Siemens 公司
pH 传感变送器	cpm152	4	Endress+Hauser 公司
比例调节阀	SK-FCQ	1	DELTA POWER-TECNORD 公司

### 5.3 软件设计

软件部分包括系统常规控制软件 (PLC 程序, 简称“系统软件”) 和参数自适应模糊 PID 控制应用软件 (MATLAB 程序, 简称“应用软件”)。系统软件完成对硬件的控制, 硬件部分确定之后, 系统软件的变化不大。而应用软件则实现控制算法, 采用不同的控制算法将形成不同应用程序。系统软件可由 Step7-Micro/WIN32 事先编译通过后下载到 PLC 中, 应用软件即控制算法由上位机完成。采用 MATLAB 和组态王组合方式: MATLAB 实现控制算法, 每个采样瞬间将计算的控制量发送给组态王; 组态王实现人机界面。要求 MATLAB 可实现实时控制算法, 满足实时性。

#### 5.3.1 软件开发环境

软件开发环境包括上位机 (PC) 软件环境和下位机 (PLC) 软件环境。参见图 5.3 所示。上位机控制算法由 MATLAB 完成, 人机界面是基于组态王的二次开发。下位机 PLC 程序由 Step7-Micro/WIN32 完成。

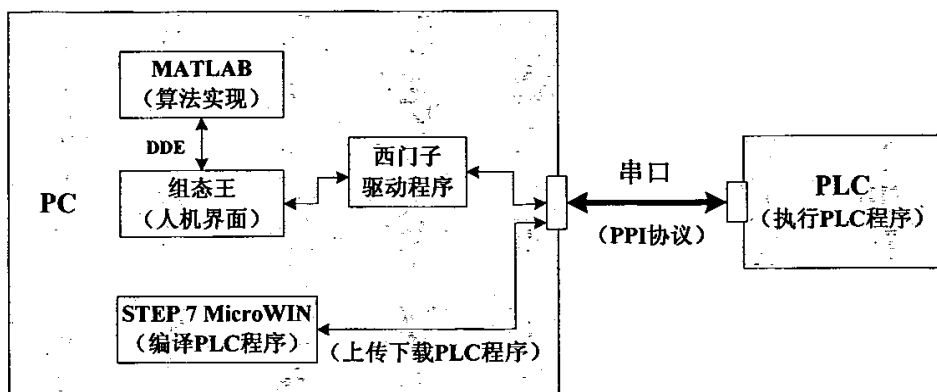


图 5.3 PC 和 PLC 的软件开发平台及通信



### 5.3.2 数据通信<sup>[29][54][58][60]</sup>

#### (a) PPI 通讯

组态王装有 Siemens PLC 的通讯驱动程序, 组态王与 PLC 之间通信采用的是 PPI 通讯协议。组态王通过串行口与 PLC 进行通信, 访问 PLC 相关的寄存器地址, 以获得 PLC 所控制设备的状态或修改相关寄存器的值。在实际编程过程不需要编写读写 PLC 寄存器的程序, 组态王提供了一种数据定义方法, 在定义了 I/O 变量后, 可直接使用变量名用于系统控制、操作显示、趋势分析、数据记录和报警显示。

I/O 地址设置需编程软件 STEP 7 Micro /WIN 来设置。同时必须保证在组态王上定义的设备地址与连接 PC 机的 PLC 的 PORT 口地址一致。

使用西门子公司提供的 PC/PPI 电缆与组态王通讯当中, 先用 PLC 的编程软件 Step7-Micro/WIN32 与 PLC 通讯一次, 组态王和设备才能通讯上。一旦设备断电通讯不可恢复, 重新运行组态王系统通讯也不能建立。通讯完毕后, 可先在 Step7-Micro/WIN32<sup>[59]</sup>上查看数据是否传送成功而显示, 然后再查看组态王的运行情况。

#### (b) 动态数据交换 (DDE)

组态王与 MATLAB 之间是通过动态数据交换通讯的。动态数据交换 (Dynamic Data Exchange, 简称 DDE) 实际上是一种协议<sup>[60]</sup>。DDE 协议使用共享内存存在应用程序之间传输数据, 完成应用程序之间的数据交换。而两个同时运行的程序之间通过 DDE 方式交换数据时是 Client/Server 关系。一旦 Client 和 Server 建立了连接关系, 则当 Server 中的数据发生变化后就会通知 Client 或随时等待 Client 的查询。此外, 通过 DDE 方式建立的数据连接信道是双向的, 即 Client 不但可以读取 Server 中的数据, 而且可以对其进行修改。在 Windows 操作系统中通过一个专门的程序 DDEML (DDE 管理库) 来协调 DDE 通信。同时, 一个程序可以同时是 Client 和 Server。

DDE 的方式有冷连接(Cool Link), 温连接(Warm Link)、热连接(Hot Link)等 3 种。在冷连接方式下, 当 Server 中的数据发生变化后不通知 Client, 但 Client 可以随时从 Server 中读取数据; 在温连接方式下, 当 Server 中的数据发生变化后马上通知 Client, Client 得到通知后将数据取回。在热连接方式下, 当 Server 中的数据发生变化后马上通知 Client, 同时将变化后的数据直接送给 Client。本设计采用热连接方式, 其中 MATLAB 和组态王以对等方式连接, 即两者互为对方的 Server 和 Client。

进行 DDE 通讯的应用程序相互间是通过三个标识名来约定的, 即一方的应用程序要想获取另一方的数据, 必须定义另一方的三个标识<sup>[65]</sup>:

应用程序名: 即进行 DDE 对话的双方的名称, 组态王的应用程序名为 “view” ;

主题：即被讨论的数据对象。组态王的主题规定为“tagname”；

项目：即被讨论的特定的数据对象。若工程人员把组态王作为服务器向另一个应用程序提供数据时，在数据词典里进行 I/O 变量定义后，其“设备名.寄存器名”就作为项目名。

利用函数 `channel = ddeinit('view', 'tagname')` 即可建立 MATLAB 与组态王之间的连接。MATLAB 既可以向组态王发送数据，也可以接受组态王的数据。具体步骤如下：

- 1) 在组态王中定义串口 (COM1) 连接设备，如 Siemens226PLC；
- 2) 在组态王数据词典中定义设备变量；指定连接设备寄存器；
- 3) 在 MATLAB 中利用函数 `ddeinit` 初始化 DDE 连接；
- 4) 运行组态王；
- 5) 运行 MATLAB 程序。

### 5.3.3 PLC 软件设计

PLC 程序控制主要负责数据采集，比例阀的控制。具有故障报警功能。可脱离上位机实现 PID 实时控制作用，但不能实现自适应控制。PID 三个参数的初值采用工程整定中的试凑法进行确定。

手动/自动控制：手动控制包括本地控制即控制柜面板控制；自动控制则是有两种方案：1) 由 PC 和 PLC 共同完成，实现参数自适应控制；2) 由 PLC 实现 PID 自动控制。在两种控制方式，系统正常运行后，无需操作者的参与。

pH 控制系统 PLC 程序流程图如图 5.4 和 5.5：

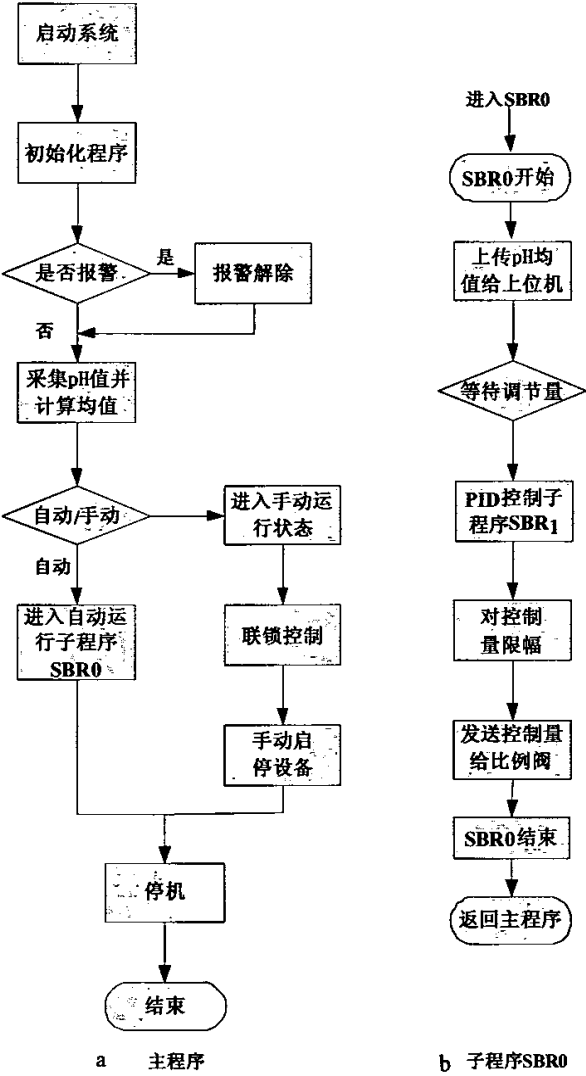
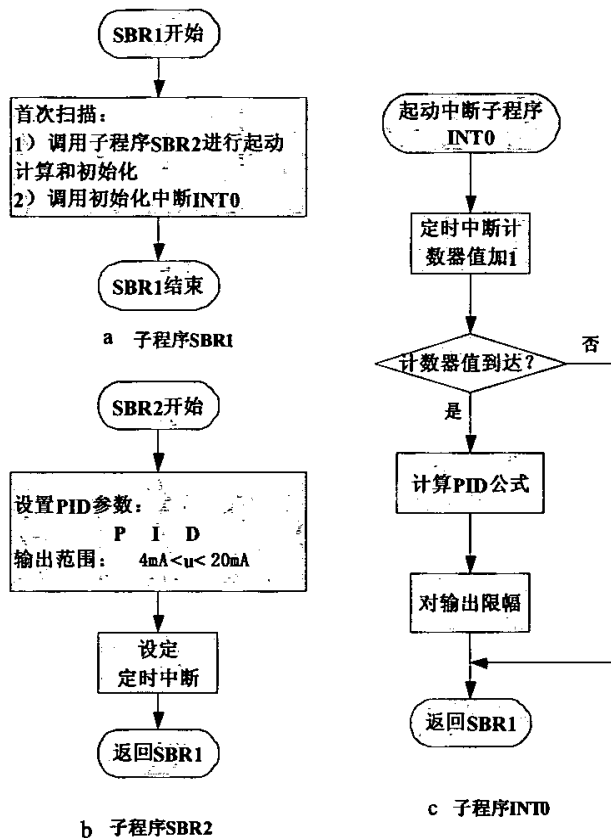


图 5.4 pH 值控制系统 PLC 程序流程图



### 5.3.4 PC 机软件设计

PC 机主要工作有数据接收, 过程监控, 参数自适应模糊 PID 控制算法调节, 故障报警等。

其中, 控制算法的实现是整个软件系统的关键, 其它都属于组态王的显示、监控、报警、数据存储、打印等功能 ( 详见 5.4)。控制算法的程序流程图如图 5.6。

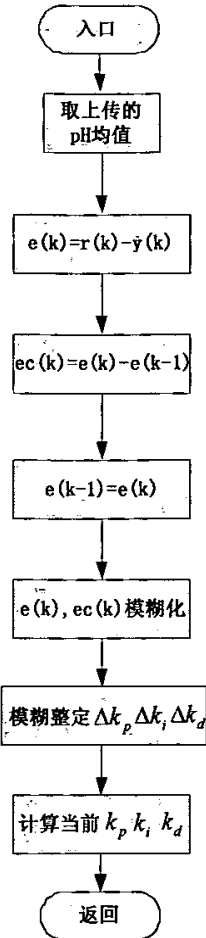


图 5.6 参数自适应控制算法流程图

## 5.4 上位机监控系统人机界面 (HMI) 设计

### 5.4.1 工控组态软件 KingView6.5<sup>[54][55]</sup>

#### (a) 组态王概述

当前流行的组态软件较多, 如INTOUCH、FIX、组态王、LABVIEW等, 其中组态王6.5 性价比高, 界面友好、网络通讯功能比较完善, 能满足本系统设计要求, 故采用之。

“组态王”是在流行的PC 机上建立工业控制对象人机接口的一种智能软件包, 它以Windows98/ Windows 2000/ Windows NT4.0 中文操作系统作为其操作平台, 充分利用了Windows 图形功能完备、界面一致性好、易学易用的特点。使用PC 机开发组态王的系统工程比以往使用专用机开发的工业控制系统更具有通用性, 从而大大减少了工控软件开发者的重复性工作, 并可运用PC机丰富的软件资源进行二次开发。

## (b) 组态王的主要功能

## ①基本人机界面功能

组态王作为一种应用软件, 很好的人机界面, 为用户提供了丰富的快速应用设计的工具和便利的集成开发环境。

## ②强大通讯功能

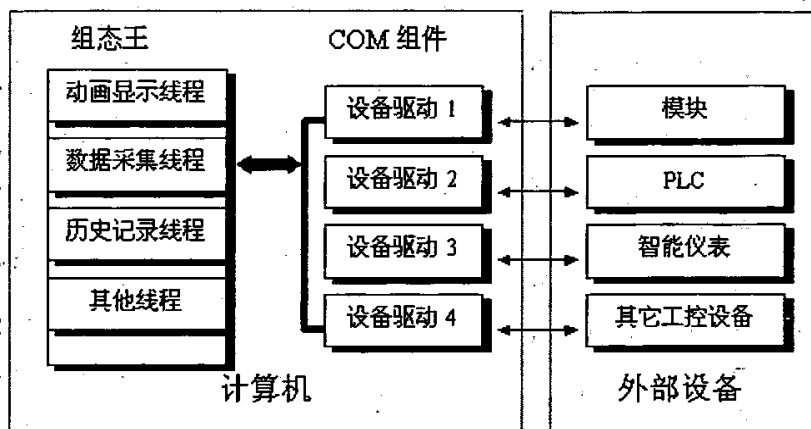


图 5.7 组态王与下位机通讯原理

如图 5.7 所示, “组态王”把每一台与之通讯的设备看作是外部设备, 目前能连接 PLC、智能仪表、板卡、模块、变频器等几百种外部设备, 为实现和外部设备的通讯, 组态王内置了大量设备的驱动作为组态王与外部设备的通讯接口。在运行期间, 组态王就可通过驱动接口和外部设备交换数据, 包括采集数据和发送数据指令。

组态王的大部分驱动程序采用组件 (COM) 技术, 这种方式使驱动和组态王构成一个完整的系统, 即保证了运行系统的高效率, 也使系统有很强的扩展性。

组态王与 I/O 设备之间的数据交换采用以下五种方式: 串行通讯方式、DDE 方式、板卡方式、网络节点方式、人机接口卡方式。

## ③高效的数据采集

组态王对通讯程序做了多种优化处理, 尽量使通讯瓶颈对系统的影响最小, 同时保证数据传递的及时和准确。

## ④故障诊断与恢复

在工业现场中, 由于通讯故障而引起的损失可能是非常巨大的, 为了将这种损失降为最小, 组态王精心优化了通讯故障的诊断机制, 可以在极短的时间 (1—2 个采集周期) 内报告故障的发生, 并诊断出出现故障的下位机, 非常有助于现场工程师及时排除险情。

## ⑤先进的报警和事件管理

完善的“监控和数据采集系统”应当能检测到非正常状态的发生, 并将报警信息按

照正确的顺序登录到数据库，并且不能丢失任何数据，以便事后对它进行分析。组态王是通过报警和事件这两种情形通知操作人员过程的活动情况。组态王的事件驱动的报警方式和紧凑高效的结构使得报警信息可以被完整的记录，即使突然发生大量的报警也不会遗漏。

报警是过程状态出现问题时发生的警告，同时要求操作人员做出响应。组态王报警系统具有方便、灵活、可靠、易于扩展的特点，提供多种报警管理功能，包括：基于事件的报警、报警分组管理、报警优先级、报警过滤、新增死区和延时概念等功能，以及通过网络的过程报警管理。

#### ⑥广泛的数据获取和处理

一般的，由工业现场设备构成的控制网络负责完成自动控制的功能，以保证工厂的运行，但它难于让工厂操作和管理人员看到生产过程的实际运行状况。组态王能够从不同的数据源读取数据，并直观、形象的显示出来，供操作和管理人员操作和分析。在组态王的开放结构中，系统可以与广泛的数据源交换数据，如 I/O 驱动程序、ODBC 数据库、OPC 服务器、动态数据交换（DDE）、ActiveX 控件等，同时可以将数据以趋势、报表等形式显示出来。

#### ⑦强大的网络和冗余功能

组态王基于网络的概念，可运行在基于 TCP/IP 网络协议的网上，使用户能够实现上、下位机以及更高层次的厂级连网，另外，随着网络的无限延伸，组态王每一台数据采集站从工业现场采集的数据都可以被网络上的所有其它站点直接访问，使数据在任何时间、任何地点畅通无阻。同时支持分布式网络报警、分布式历史数据库等，功能强大，稳定可靠。

组态王的网络是一种基于分布式处理的柔性结构。在一个分布的系统上，可以将整个应用程序分配给多个服务器，可以提高项目的整体容量并改善系统的性能。

在单主机、单网络或单设备系统中，机器或设备出现检修或故障时，整个系统都将停止运行，给生产造成损失。组态王充分考虑到现场的各种需要，提供多重冗余手段，用户可自由选择多重冗余方式来构造自己的可靠系统。

#### ⑧组态王组态和编程

组态王可读取 PLC 监测到的设备运行状态、模拟量采样数据等信息，根据这些实时数据，在屏幕上动态显示各个储运流程情况、各个控制设备的运行情况等。一旦发现故障报警信息，系统立刻显示报警画面，向 PLC 发出相应动作指令，保存并记忆故障发生的时间、方位和原因等原始数据，还可根据客户需求保存历史数据，定时、实时打印数据。

组态王软件可将过程或生产中发生的事件清楚的记录、显示出来，完成参数设定、

操作控制和动态画面监视的功能。它显示当前状态并按顺序记录，所记录的数据可以全部或有选择的简要显示，亦可编辑、输出。可结合用户程序进行信息处理、测量值处理和报表打印。运行时，它具有很强的实时性。

5.4.2 监控界面设计及功能

本设计中，组态王的主要作用是和下层的 PLC 通讯，获取过程数据，显示 pH 值流程、报警画面、报表生成及打印、历史曲线、数据查询等， 要求界面友好，可视性强。其界面结构如图 5.8 所示。

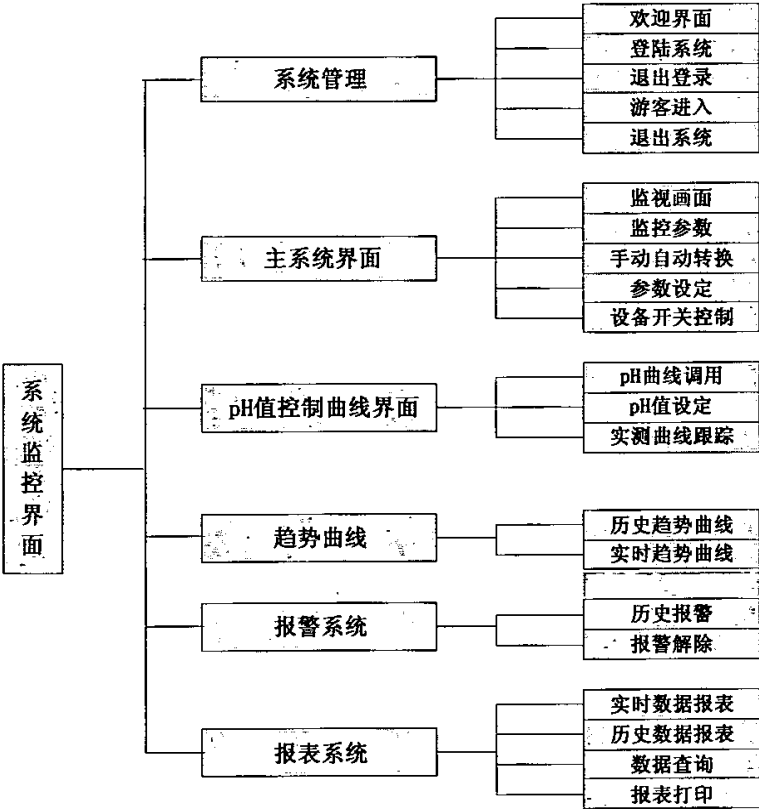


图 5.8 系统监控界面结构

根据本课题，这里只针对吸附环节，以主系统界面、pH 控制曲线界面、历史趋势界面、报表界面为例介绍如下：

在系统管理界面中进行登录，如果登录成功后，进入到如图 5.9 所示的系统监控主画面，该画面是监控系统模拟现场的主画面，在该画面中可实时监测各运行参数的变化，可以直观、形象的显示系统的重要参数，如反应罐温度、pH 值、压力、手动/自动切换等。



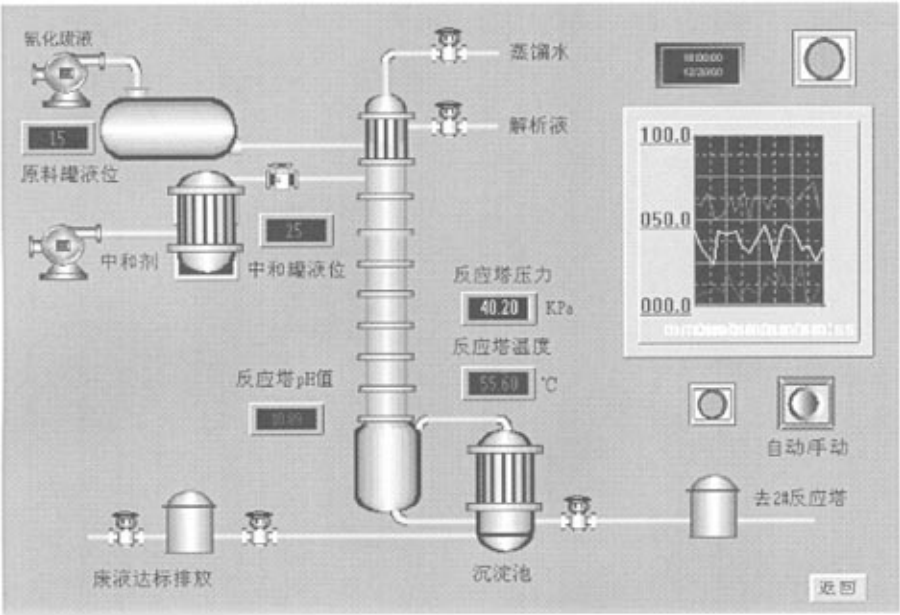


图 5.9 主系统界面

pH 控制曲线反映出实际测量值按设定曲线变化的情况，如图 5.10 所示。在 pH 控制曲线中，纵轴代表 pH 值，横轴对应时间的变化，同时将每一个 pH 值采样点显示在曲线中。界面中包括了 pH 值设定值和实测值的框图显示。

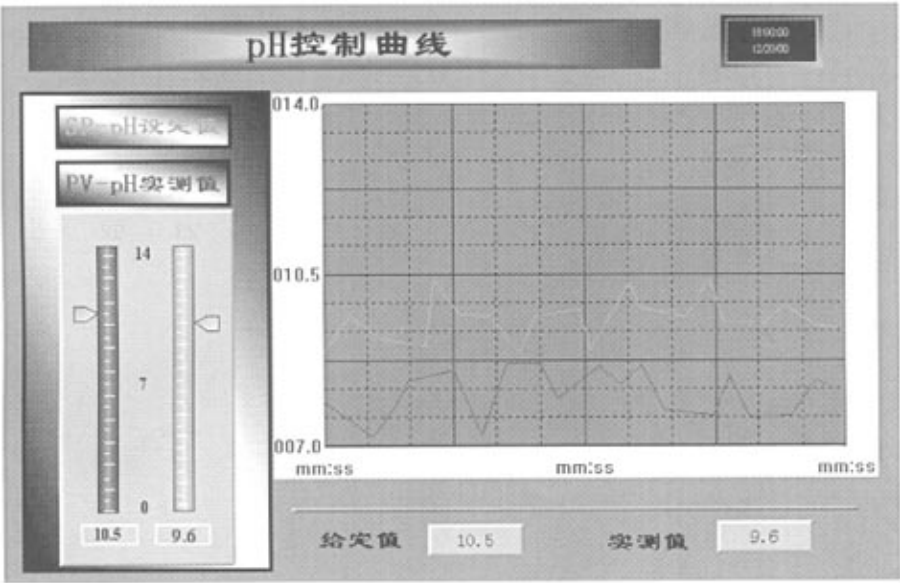


图 5.10 pH 控制曲线界面

趋势曲线是用于反映对应变量的实际变化情况，通过趋势曲线可以清楚地看出变量在某段时间或当前的变化趋势。趋势曲线包括实时趋势曲线和历史趋势曲线两种，实时

趋势曲线反映的是变量数值当前的变化情况，并且可以根据时间地推移，自动刷新至当前时间；历史趋势曲线则提供的是查看历史数据，可以细分到某一段很短的时间，所以可以对数据进行分析，如图 5.11 所示。

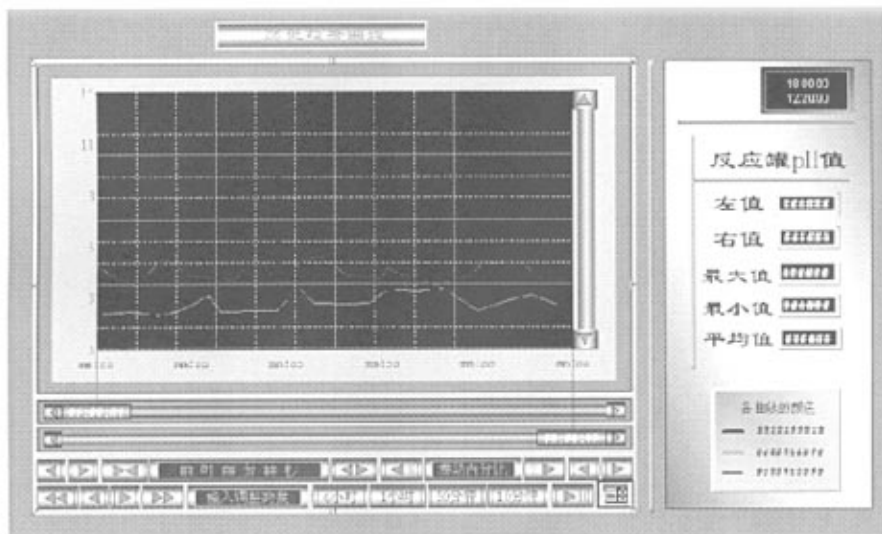


图 5.11 历史趋势曲线界面

数据报表是反应生产过程中的数据、状态等，并对数据进行记录的一种重要形式，是控制过程必不可少的一个部分。如图 5.12，本系统中数据报表分实时数据报表和历史数据报表两种。实时数据报表能反映系统实时的运行情况，历史数据报表能对长期的过程进行统计、分析，使管理人员能够掌握和分析系统情况。



图 5.12 历史报表界面

## 第 6 章 系统仿真及实验结果分析

### 6.1 MATLAB 仿真软件介绍

MATLAB 软件是由美国 Mathworks 公司推出的用于数值计算和图形处理的科学计算系统环境。MATLAB 是英文 MATRIX LABORATORY(矩阵实验室)的缩写。它的第 1 版(DOS 版本 1.0)发行于 1984 年,经过 20 余年的不断改进,现今已推出它的 Windows 2000/XP/NT 版本(7.0.1 版)。MATLAB 软件主要由主包、Simulink 和工具箱三大部分组成,它以矩阵运算为基础,把计算、可视化、程序设计融合到了一个简单易用的交互式工作环境中。在这里可以实现工程计算、应用程序设计、应用软件开发(包括图形用户界面设计)、建模、仿真等功能。正是凭借 MATLAB 的这些突出的优势,它现在已成为世界上应用最广泛的工程计算软件<sup>[40]</sup>。

本文涉及到的 Matlab 工具箱 (Tool Box) 有神经网络 (Neural Network) 工具箱, 控制系统(Control System) 工具箱和模糊逻辑 (Fuzzy Logic) 工具箱以及 Simulink 仿真平台。

### 6.2 系统仿真<sup>[41]</sup>

为了验证本文所述的理论分析和采用的控制方案(详见第 4 章)能否在实际条件下,实时、有效地实现参数自适应控制,从而获得良好的 pH 控制性能,进行了如下仿真试验。

#### 6.2.1 参数自适应模糊 PID 控制仿真实现

据 2.4.2 节 pH 值控制原理图,知整个闭环控制系统如下图 6.1 所示。

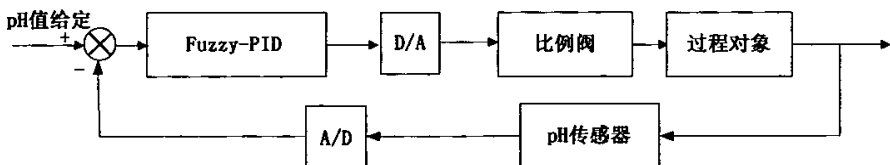


图 6.1 闭环控制系统结构图

据第 3 章知比例阀模型和过程对象的 RBF 网络辨识模型, 如下图 6.2 (a) 和 (b) 所示 :

$$G_v(s) = \frac{1.0003}{0.0052s^2 + 0.2651s + 1}$$

(a)



(b)

图 6.2 控制对象模型

依据第 4 章参数自适应模糊 PID 控制器的设计和 MATLAB 相关工具箱及 Simulink 仿真平台, 得到如图 6.3 所示的控制系统仿真结构图。

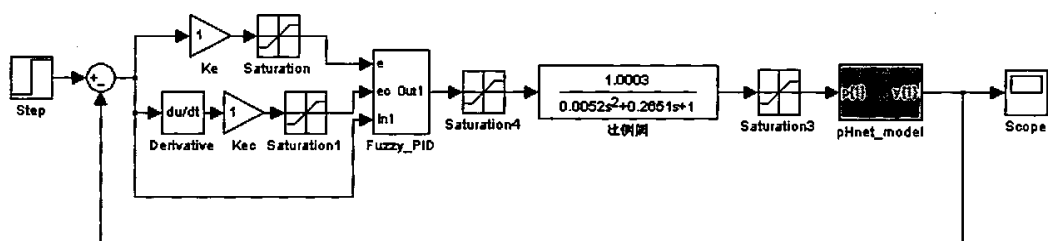


图 6.3 控制系统仿真结构图

其中,  $K_e$ ,  $K_{ec}$  是量化因子, Fuzzy-PID 是控制器 (这里采用子模块的形式进行封装), Saturation 是限幅器, 在本设计中, Saturation4 限幅为 4~20, 对应比例阀的调节电流 4mA~20mA, Saturation3 限幅为 0~70, 对应于流量变化范围。双击 Fuzzy-PID 模块, 得到参数自适应的 Fuzzy-PID 仿真结构图<sup>[43-45][47-52]</sup>, 如图 6.4 所示。

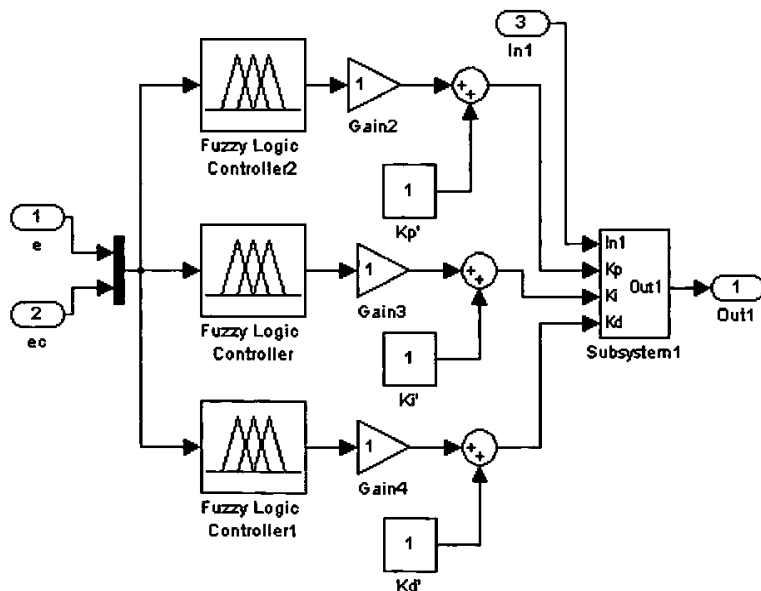


图 6.4 Fuzzy-PID 仿真结构图

其中,  $k_p'$ 、 $k_i'$ 、 $k_d'$  为参数的初始值, 将 4.3.3 节中的  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  模糊控制表 4.1~4.3 分别输入给三个模糊控制器, 此模糊控制器使用 MATLAB 的模糊逻辑工具箱进行设计, 具体步骤参见文献<sup>[7][44]</sup> (也可以采用查询表方式, 具体参见文献<sup>[46]</sup>), 则其输出分别为对应三个参数的校正量。双击 Subsystem1, 其为 PID 部分的仿真结构图。如图 6.5。

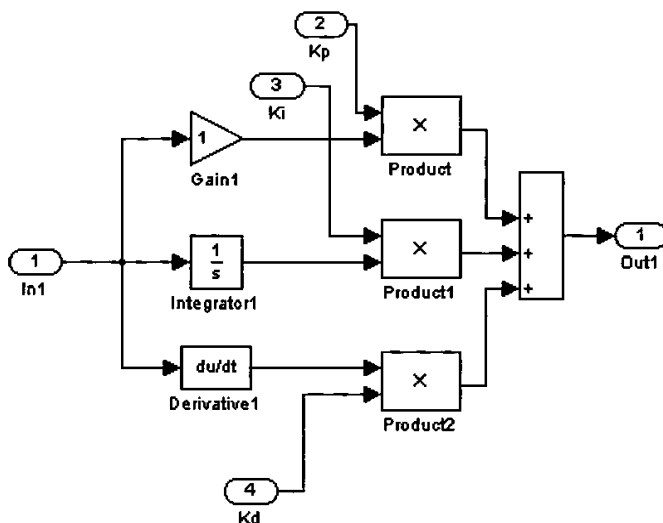


图 6.5 PID 仿真结构图

在仿真中, 首先对比例阀的特性进行了仿真研究如图 6.6, 当给定为斜坡信号时, 经过比例阀传递函数, 输出如图 6.7 (a) 所示; 当给定阶跃时 (给定值任意), 经过比例阀传递函数, 输出如图 6.7 (b) 所示。说明此比例阀模型跟踪性能良好, 在不到 2 秒的时间就达到稳定状态, 且稳态误差为 0, 输入输出比例度近似为 1: 1, 为了满足工艺要求, 在控制系统仿真图中加了个放大器, 增益为 3.5。

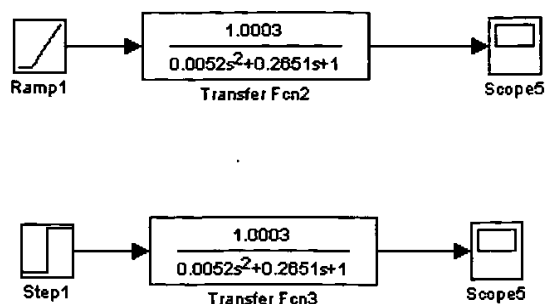
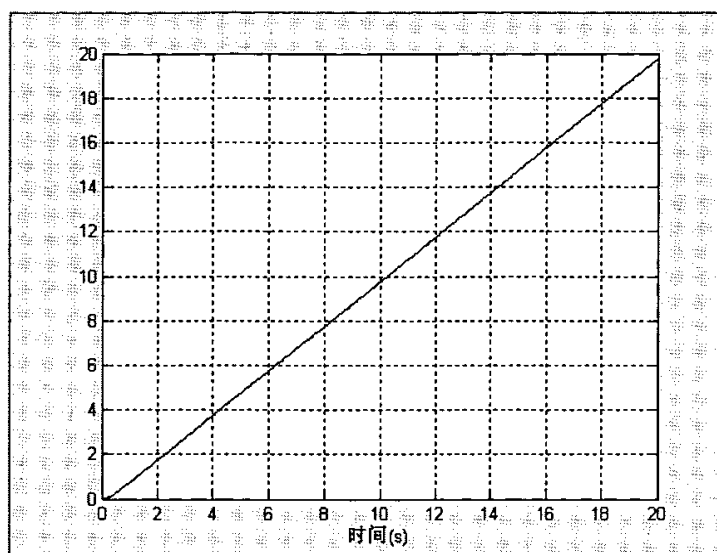
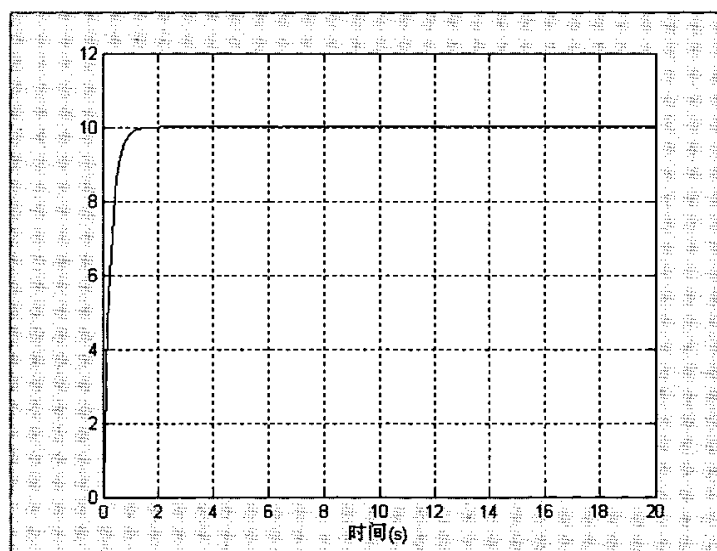


图 6.6 比例阀特性仿真研究图



(a)



(b)

图 6.7 比例阀输出曲线

另外由于 RBF 神经网络模型是根据 pH 值与流量的数据对建立起来的, 其中的数据主要是静态测试获得的, 输出对应输入, 又知, 化学反应都有延迟、惯性, 而神经网络模型有一个输入就对应一个输出, 其不能较好的反应过程对象的惯性特性, 故, 在过程对象仿真中, 根据实验情况, 加了个惯性环节, 使其更好反应动态特性, 其具体如下式:

$$G_d(s) = \frac{1}{5s+1} \quad (6-1)$$

综上所述, 得到最终控制系统的仿真结构如图 6.8 所示。

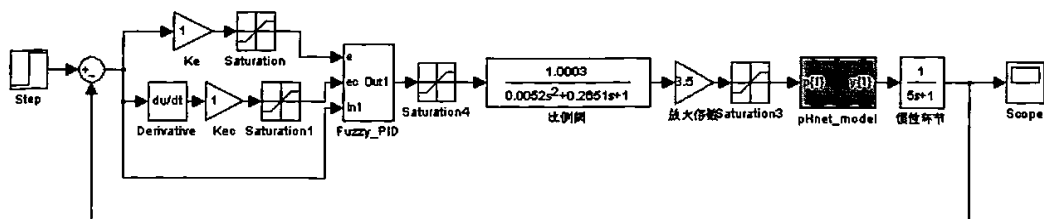


图 6.8 最终控制系统的仿真结构图

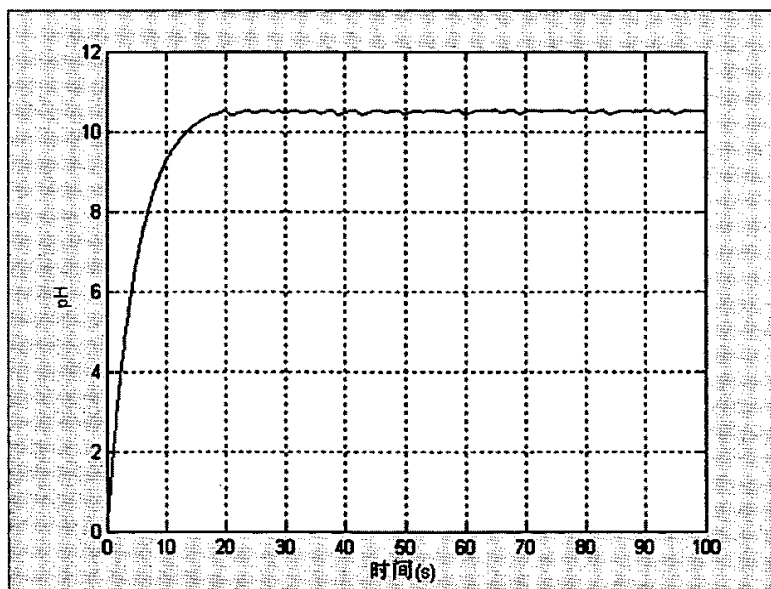
### 6.2.2 参数自适应模糊 PID 控制仿真研究

根据工艺要求和最佳吸附条件<sup>[12]</sup>, pH 值要控制在 10~11 之间, 故本设计取 pH=10.5 为给定值, 仿真时间为 100s, 要求系统响应曲线调节时间短、无超调、稳态误差要在 5%以内。根据工艺特性和仿真原理, 仿真分析过程如下:

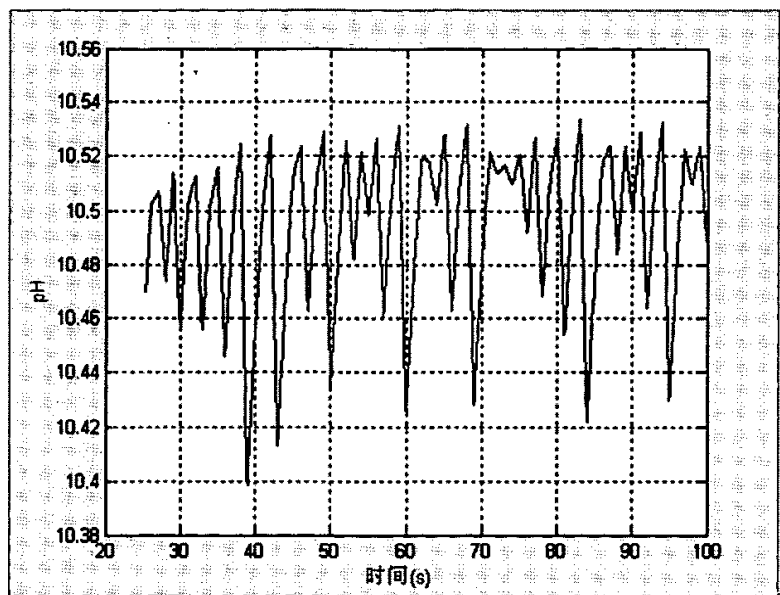
1) 采用工程整定法中的试凑法<sup>[28]</sup>确定 PID 三个参数初始值;

这里通过 Simulink 仿真平台, 采用连续 PID 仿真模块进行三个参数初值整定。确定参数初值  $k_p' = 10$ 、 $k_i' = 0.4$ 、 $k_d' = 1$ 。

2) 通过调节量化因子和比例因子, 确定最佳系统响应如图 6.9 所示, 其中 (a) 是系统响应全图, (b) 是稳态时的响应图。



(a)



(b)

图 6.9 系统响应图

由图 6.9 可以看出,采用参数自适应模糊 PID 控制策略仿真后,当给定为 10.5,系统响应无超调,上升时间为 20 秒,稳态误差小于 2%。满足系统要求。可见,参数自适应模糊 PID 具有很好的调节精度。在仿真中会遇到仿真停止运行的情况,这时候可以通过修改仿真参数中的最小步长和选择其它数值积分方法来解决。

误差变化和误差变化率如图 6.10 和图 6.11 所示。

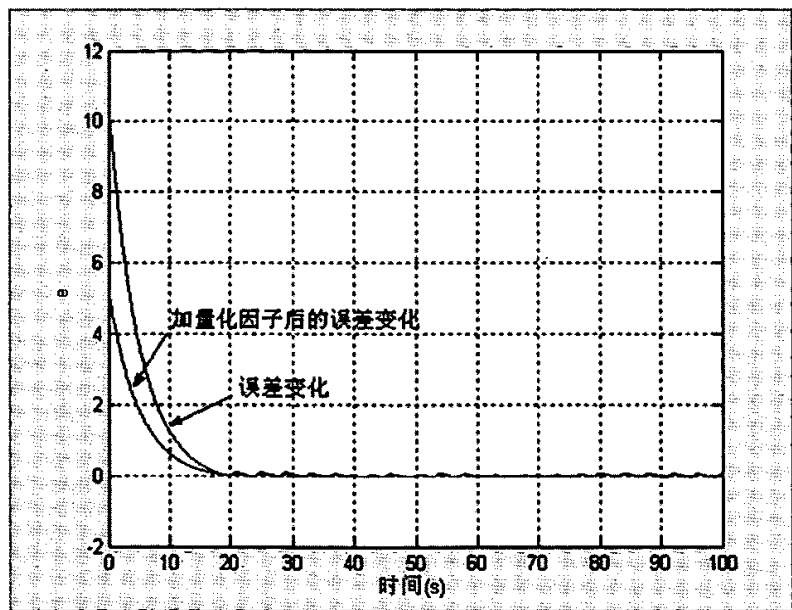


图 6.10 误差变化响应图



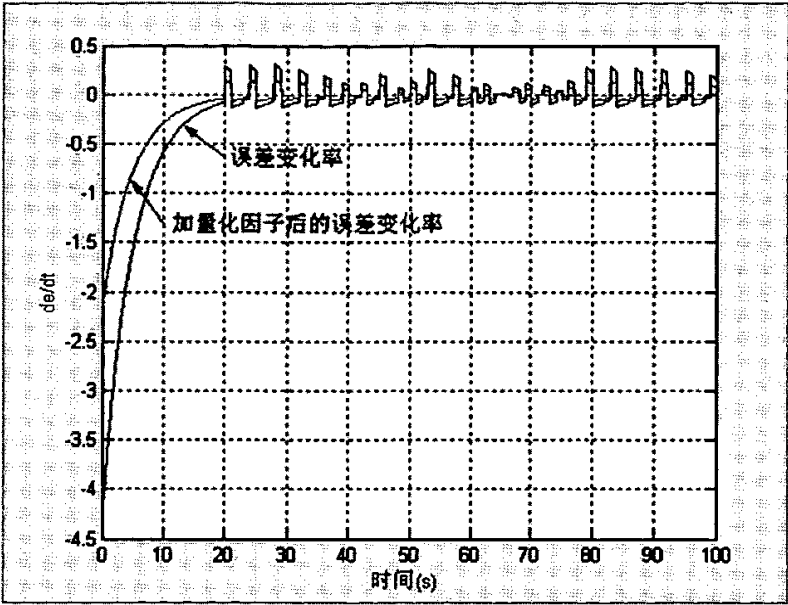


图 6.11 误差变化率响应图

$\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  校正量的响应图如图 6.12 ~ 6.14。

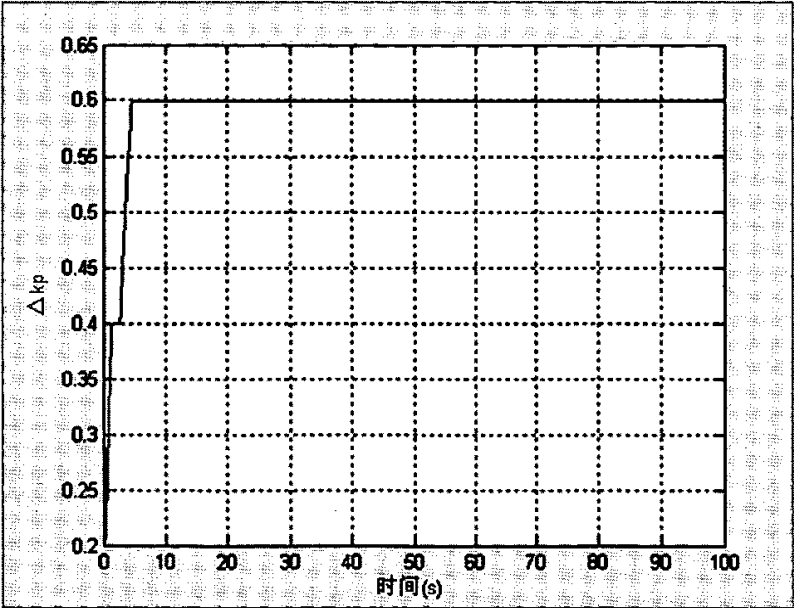
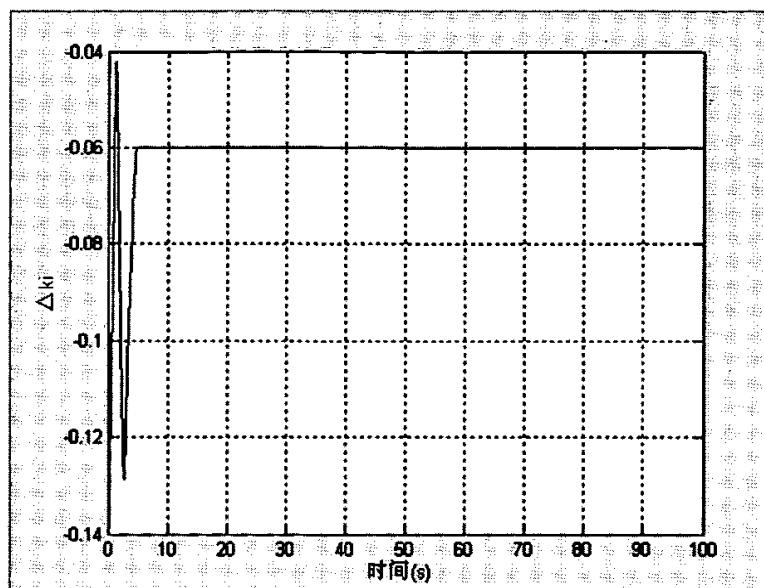
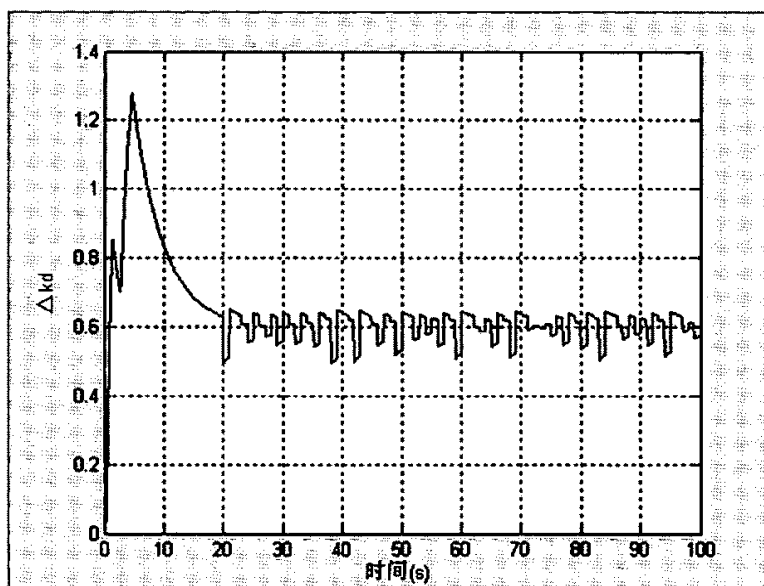


图 6.12  $\Delta k_p$  的响应图

图 6.13  $\Delta k_i$  的响应图图 6.14  $\Delta k_d$  的响应图

### 3) 抗干扰分析。

所加干扰源为 Random Number (随机数字)

该模块用于产生正态分布的随机信号。在每一次仿真开始时,种子都设置为指定的值。默认时,产生随机序列均值为 0,方差为 1,即使用户改变这些参数。随机序列是可重复的并且可由相同的种子和参数的任意一个 Random Number 模块产生。将 Initial seed 值指定为矢量,则模块可产生有相同均值和方差的一个随机信号矢量。

当给定及其它设置不变时,稳态时的系统响应如图 6.15 所示:

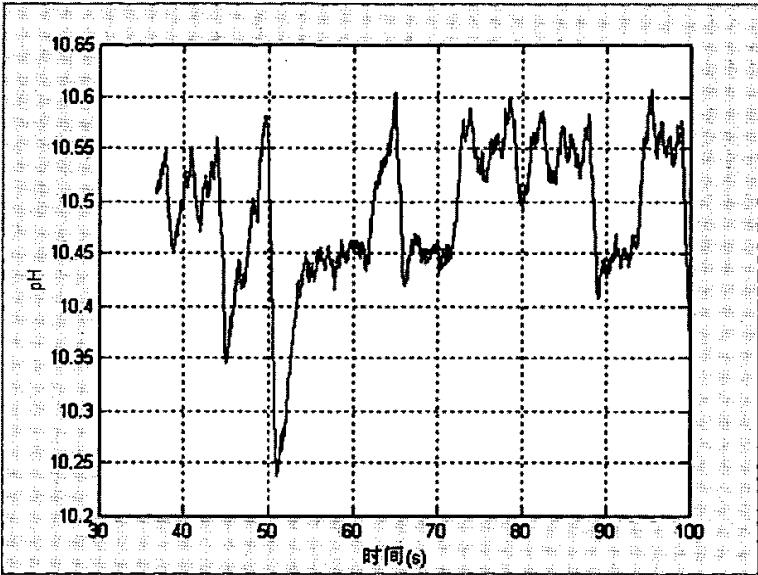


图 6.15 抗干扰系统响应图

由上图可知，在干扰信号-随机数字的作用下，参数自适应模糊 PID 能很好的抑制干扰，使稳态误差保持在 3%以内。故，参数自适应模糊 PID 具有很好的鲁棒性和抗干扰性。

6.2.3 与其它控制方法的比较

为了能说明该算法的有效性，特将其与 PID 控制和纯模糊控制策略进行对比。其仿真结构对比图如图 6.16 所示。其中，纯模糊控制器的控制规则<sup>[46]</sup>如表 6.1 所示（采用十字交叉法）。

表 6.1 纯模糊控制器的控制规则

$\Delta U$		$E$						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
$EC$	NL	NL	NL	NL	NL	ZE	ZE	PS
	NM	NL	NL	NL	NM	ZE	ZE	PM
	NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PL
	ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
	PM	NM	ZE	ZE	PM	PL	PL	PL
	PL	NM	ZE	ZE	PL	PL	PL	PL

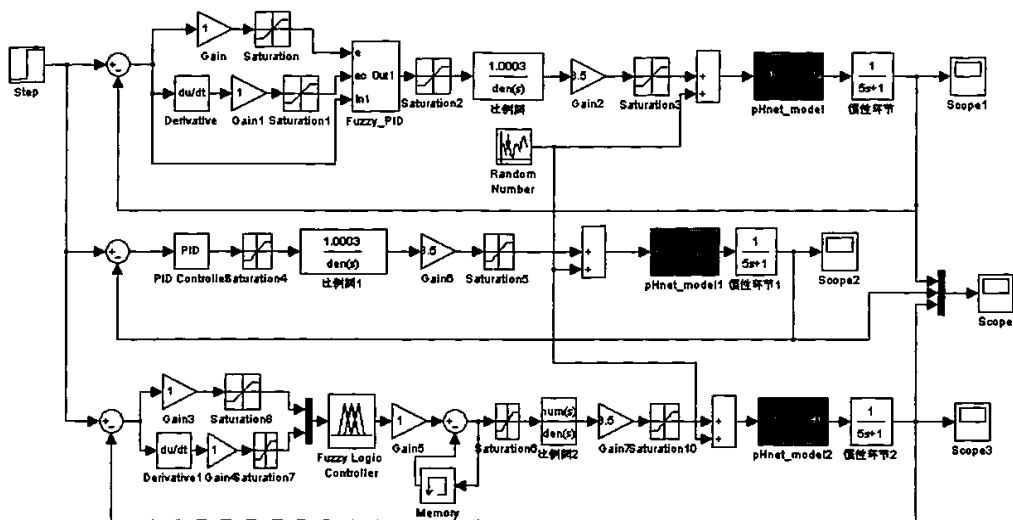


图 6.16 三种控制策略的仿真对比图

1) 不加干扰时的三种仿真系统响应对比图，如下图 6.17。

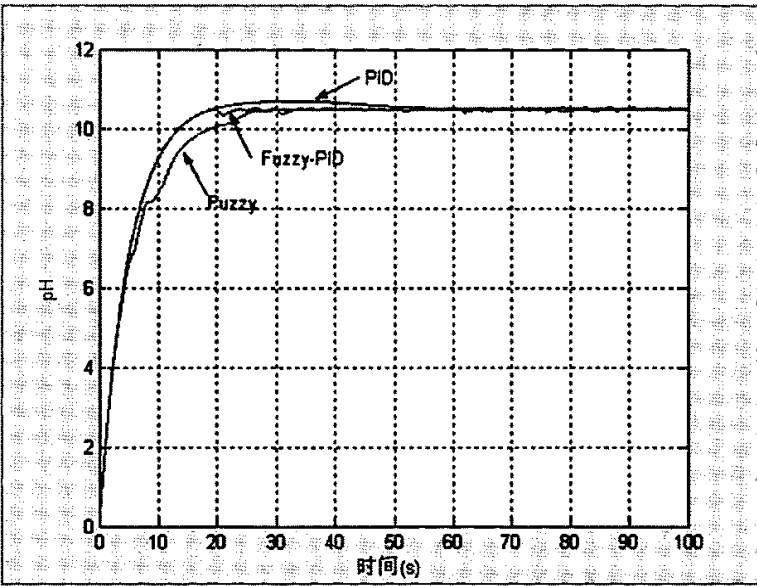


图 6.17 不加干扰三种控制策略系统响应图

由上图可得三种控制的性能对比表 6.2。

表 6.2 三种控制策略性能指标对比表

控制策略	调节时间 (s)	稳态误差	超调
PID	60	$\leq 1\%$	有
Fuzzy	30	$\leq 5\%$	无
Fuzzy-PID	20	$\leq 2\%$	无

根据图 6.17 和表 6.2 可以得出以下结论：参数自适应模糊 PID 比起 PID 具有调节时间短，无超调的优点；比起纯模糊控制具有调节时间短，稳态误差小的优点。

2) 加干扰 (Random Number) 时三种控制策略的系统响应如图 6.18 所示。

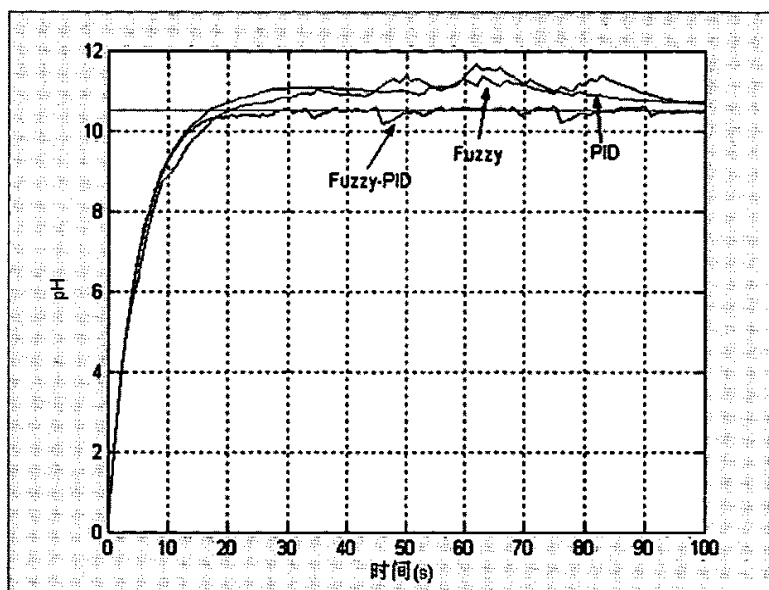


图 6.18 加干扰三种控制策略的系统响应图

由上图可知，参数自适应的模糊 PID 比起常规 PID 和纯模糊控制具有更强的干扰抑制能力。

### 6.3 小结

由以上仿真分析和抗干扰研究可知，PID 有超调，纯模糊几乎无超调，但稳态误差较大，而参数自适应的模糊 PID 调节时间短，无超调，稳态误差小于 2%，并且在抗干扰分析中，参数自适应 PID 有很好的抗干扰性和鲁棒性，达到了工艺要求。故，参数自适应模糊 PID 适合对 pH 值实施有效控制。

现将仿真中遇到的问题及其解决方法叙述如下：

- (1) 在仿真中会遇到仿真停止运行的情况，这时候可以通过修改仿真参数 (Simulation parameter) 中的最小步长 (Min step size) 和选择其它数值积分方法 (如 ode45、ode23 等<sup>[23]</sup>) 来解决。
- (2) 在模糊控制器的仿真中，可能会遇到布尔逻辑错误，可以通过在仿真参数中的高级控制项中，关闭布尔逻辑信号 (Boolean logic signals) 来解决。
- (3) 除了使用模糊推理器进行模糊规则推理控制外，也可以使用查询表的方式进

行模糊控制，具体参见文献<sup>[45]</sup>。二者区别为，使用模糊推理器控制精度高，但运算速度慢，而查询表方式控制精度虽不如模糊推理器精度高，但运算速度快。

## 第 7 章 论文总结

### 7.1 论文工作总结

本课题针对采用离子交换树脂法回收氰化物的工艺,对其吸附环节中的影响因素之一 pH 值的智能控制进行了系统研究。主要包括:

- 1) 根据工艺特性和被控对象的特点,对 pH 值提出了采用参数自适应的模糊 PID 控制策略。
- 2) 在冶金工程学院冶金实验室获取相关实验数据。
- 3) 运用系统辨识原理,根据所需实验数据通过径向基函数(RBF)网络辨识过程对象模型。
- 4) 通过参数自校正部分和 PID 部分的设计,实现了基于模糊推理的参数自适应模糊 PID 控制器。
- 5) 控制系统设计及系统集成。进行了设备选型,软件开发设计,使用组态王(KingView)进行了上层监控界面的开发。
- 6) 通过仿真分析,并与其它控制方法的比较,得出了参数自适应模糊 PID 所具有的优势,其达到了该工艺的控制要求,适合对该工艺中的 pH 值进行有效控制。

### 7.2 下一步工作和展望

下一步的研究和开发工作:

- 1) 采购硬件,进行控制系统实体调试和开发。
- 2) 引入前馈环节,进一步提高 pH 值控制系统精度。
- 3) 使用 RBF 实现包括 pH 值在内的温度、压力、氰化物浓度的多参数模型,并进行多输入多输出控制研究。
- 4) 对多参数系统进行耦合性分析。

## 致 谢

本论文是在导师于军琪教授的悉心指导下完成的。于军琪教授严谨的治学作风、渊博的知识、对科学孜孜以求的态度和勤于实践的精神使作者受益匪浅。在论文完成之际，对导师几年来对作者在各方面的关心、指导和教诲表示衷心的感谢！

本论文的实验工作得到了冶金工程学院宋永辉老师和梁帅表同学的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！同时特别感谢席爱民老师、孟庆龙师兄、万文辉同学和闫秀英同学在课题研究中的帮助！

对评审本论文和参加本论文答辩的专家、教授表示诚挚的谢意！

感谢父母对作者学业的大力支持！

最后，向所有曾在学习、生活和工作中给予作者关心、支持和帮助的老师、同学和朋友们表示衷心的感谢！



## 参考文献

- [1] L.A. Zadeh. Fuzzy logic, neural networks and soft computing. Journal on Automatic Control, 1995, 13(2): 21 ~ 28
- [2] L.A. Zadeh. Fuzzy sets and their applications New York; Academic press 1975
- [3] Debrup Chakraborty and Nikhil R. Pal, A Neuro-Fuzzy Scheme for Simultaneous Feature Selection and Fuzzy Rule-Based Classification IEEE Transaction on Neural Networks, Vol. 15, No. 1, 110-123, 2004
- [4] Emilio Soria-Olivas, José D. Martín-Guerrero, Gustavo Camps-Valls, Antonio J. Serrano-López, Javier Calpe-Maravilla, and Luis Gómez-Chova; A Low-Complexity Fuzzy Activation Function for Artificial Neural Networks IEEE Transaction on Neural Networks, Vol. 14, No. 6, 1576-1579, 2003
- [5] F.G. Shinskey Process control – Application Design and Tuning
- [6] Lennart Ljung, System identification Theory for the User, Tsinghua University Press Prentice Hall PTR 2002
- [7] Fuzzy logic toolbox for use with Matlab, The Mathworks, Inc., 1999
- [8] G.K.I. Mann and R.G. Gosine Adaptive hierarchical tuning of fuzzy controllers Expert Systems 2002. No1 34-45
- [9] TONG SHAOCHENG, CHAI TIANYOU, LI QINGGUO, Fuzzy Direct Adaptive Control for A Class of Decentralized Nonlinear Systems
- [10] YAOCHU JIN and BERNHARD SENDHOFF Extracting Interpretable Fuzzy Rules from RBF Networks Neural Processing Letters 17: 149–164, 2003.
- [11] ZHANGHUAGUANG and LIMING Fuzzy Adaptive Control of Nonlinear Processes with Feedforward Compensator and Its Application Cybernetics and Systems: An International Journal, 33: 171–187, 2002
- [12] 陈德武, 导师: 兰新哲, 用 717 树脂处理氰化尾液的应用基础研究
- [13] 王碧侠, 导师: 兰新哲, 用离子交换树脂处理氰化尾液的方法研究
- [14] 罗均 蒋泰等, 智能控制基础及其应用实例, 化学工业出版社 2002
- [15] 王树青 金晓明等, 先进控制技术应用实例, 化学工业出版社, 2005
- [16] pH 值控制-酸/氨比值控制系统在硝酸铵中和反应中的应用 《石油化工自动化》2005 年第 5 期 25-26
- [17] 康荣学 朱永生 张优云, 无毒提金新工艺中控制反应液 pH 值的智能复合控制算法, 《电子技术应用》2000 年第 11 期 37-40

- [18] 司文慧, 导师: 曹玉强 工业酸碱度的测量及中和反应中 pH 值得预测控制 山东大学 2002
- [19] 张国良 曾静, 模糊控制及其Matlab 应用, 西安交通大学出版社
- [20] 于军琪, 吴 涛等, 磨矿分级系统溢流浓度的模糊智能控制, 西安交通大学学报 1999 第 9 期 30-34
- [21] 于军旗, 兰心哲, 黄永宣, 无毒提金计算机控制系统的研究与开发, 《仪器与仪表学报》 2002 年第 5 期 512-514
- [22] 谢新民, 丁锋 自适应控制系统 清华大学出版社 2002
- [23] 陈在平 杜太平等, 控制系统计算机仿真与 CAD, 天津大学出版社 2001
- [24] 张化光 孟祥萍, 智能控制基础理论及应用, 机械工业出版社, 2005
- [25] 徐英, 杨尔辅, 徐用懋 一类基于RBF神经网络的动态系统在线自适应辨识方法 《信息与控制》 2001年第6期 508-512
- [26] 汤兵勇等, 模糊控制理论与应用技术, 清华大学出版社, 2002
- [27] 王锦标, 计算机控制系统, 清华大学出版社, 2004
- [28] 秦杰, 导师: 任庆昌, 模式识别自适应控制器 (PRAC) 西安建筑科技大学硕士学位论文 2005 7-16
- [29] 孟庆龙, 导师: 任庆昌, 自适应控制在环境模拟技术中的应用研究, 西安建筑科技大学硕士学位论文 2005
- [30] 翁维勤 同庆海, 过程控制系统及工程, 化学工业出版社 2001
- [31] 候媛彬, 系统辨识及其 MATLAB 仿真, 科学出版社, 2004
- [32] 刘宏才, 系统辨识与参数估计, 冶金工业出版社, 1999
- [33] 王洪元, 史国栋 人工神经网络及其应用 中国石化出版社 2002
- [34] 周开利, 康耀红 神经网络模型及其MATLAB仿真程序设计 清华大学出版社 2005
- [35] 丛爽 面向MATLAB工具箱的神经网络理论与应用 中国科学技术出版社 1998
- [36] Matlab6.5辅助神经网络分析与设计, 飞思科技产品研发中心电子工业出版社, 2003
- [37] 姜静清, 宋初一等 RBF神经网络的训练方法及分析 《内蒙古民族大学学报》 2003年第4期 301-303
- [38] 张俊峰 RBF神经网络在非线性系统辨识中的应用研究 《仪器仪表与分析监测》 2003年第1期 1-3
- [39] 李燕君, 吴铁军, 赵明旺 一种新的RBF神经网络非线性动态系统建模方法 《系统工程理论与实践》 2001年第3期 64-69
- [40] Matlab7 辅助控制系统设计与仿真, 飞思科技产品研发中心电子工业出版社, 2005
- [41] 范影乐, 杨胜天 MATLAB仿真应用详解, 人民邮电出版社, 2001
- [42] 张化光 何希勤等, 模糊自适应控制理论及其应用, 北京航空航天大学出版社, 2002

- [43] 邢春贵, 何熙文, 模糊控制系统的MATLAB仿真与应用; 微处理机, No1, 34-36, 2004
- [44] 孙施良, 王阳明; 模糊控制系统的Matlab 仿真过程; 《机械与电子》14-16 2005
- [45] 曹志国, 廉小亲; 基于MATLAB 的两种模糊控制系统的仿真方法; 计算机仿真, 第21卷, 第3期, 41-44, 2004
- [46] 薛岳钊 于军琪 于瑛 离子交换树脂吸附环节中温度的模糊智能控制研究 《自动化与仪表》 2006年第5期
- [47] 储岳中, 陶永华 基于MATLAB的自适应模糊PID控制系统计算机仿真 《安徽工业大学学报》 2004年第1期 49-52
- [48] 张军锋, 吴海峰, 梁艳红 基于MATLAB FIS工具箱的模糊自整定PID控制系统设计与实现 《微计算机信息》 2004年第6期 23-25
- [49] 候勇严, 郭文强 一种模糊PID控制器的设计方法研究 《陕西科技大学学报》 2005年第2期 83-86
- [50] 高宏伟, 赵宝永, 付兴武 模糊自整定PID控制策略的MATLAB仿真研究 《电气传动自动化》 2002年第5期 21-28
- [51] 陈跃东, 郎郎 用FUZZY-PID控制器实现控制参数的自整定 《安徽机电学院学报》 2002年第3期 24-28
- [52] 黄良沛, 刘义伦, 阳小燕 参数自适应模糊PID控制在恒压供水系统中的应用 《矿山机械》 2005年第7期 82-84
- [53] 朱永生 康荣学 张剑锋 王成栋 张优云, 连续生产过程集散式监测系统的开发 《电子技术应用》 2001年第11期 43-46
- [54] 组态王6.5使用手册, 北京亚控科技发展有限公司
- [55] 组态王 6.5 命令语言参考手册, 北京亚控科技发展有限公司
- [56] 李宝仁, 张庆先, 杜经民, 吴谷河, 电-气比例流量阀特性分析及研究 《机床与液压》 2000.No.3 51-52
- [57] 朱冬梅, 李炳文, 朱其慎, 李海龙, 煤耙液压系统的改进及仿真 《煤矿机电》 2003年第2期 14-15
- [58] SIMENTIC S7-200 系统手册 2002
- [59] SIMENTIC S7-200 可编程序控制器 产品目录 2002.5
- [60] 苏金明 黄国明 刘波 编著. MATLAB与外部程序接口. 北京: 电子工业出版社, 2004.1, 132-135
- [61] Wang, Li-xin. 1993. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2:146-155.
- [62] Tong Shaocheng and Chai Tianyou. 1996. Adaptive fuzzy sliding mode control for nonlinear systems. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems.*

## 附录 I 图表索引

图 2.1 实验流程图 .....	9
表 2.1 实验用主要设备、仪器 <sup>[12]</sup> .....	9
图 2.2 离子交换树脂法吸附工艺图 .....	10
图 2.3 pH 值控制基本原理图 .....	11
图 2.4 pH 控制结构图 .....	11
图 3.1 流量和 pH 的关系图 .....	13
图 3.2 RBF 网络的拓扑结构 .....	15
图 3.3 系统辨识的程序流程图 .....	18
图 3.4 网络模型结构 .....	18
图 3.5 网络的训练过程 .....	19
图 3.6 DATA1 建立的模型的自我跟踪情况 .....	19
图 3.7 拟合图 .....	20
表 3.1 RBF 与 BP 网络模型性能比较 .....	20
图 3.8 RBF 和 BP 网络模型的拟合比较图 .....	21
图 3.9 RBF 仿真模块 .....	21
图 3.10 pHnet_model 模块内部仿真结构图 .....	21
图 3.12 Layer2 内部仿真结构图 .....	22
图 3.13 Layer2/weight 内部仿真结构图 .....	22
图 3.14 Layer1/radbas 模块内部仿真图 .....	22
图 3.15 Layer1/weight 的内部仿真结构图 .....	23
图 4.1 PID 调节结构 .....	25
图 4.2 模糊控制器的基本结构图 .....	27
图 4.3 Fuzzy-PID 控制框图 .....	28
图 4.4 $k_p$ 的模糊推理机构 .....	29
图 4.5 高斯隶属函数图 .....	30
表 4.1 变量 $e$ 的隶属函数表 .....	31
表 4.2 $\Delta k_p$ 的模糊规则表 .....	32
表 4.3 $\Delta k_i$ 的模糊规则表 .....	32
表 4.4 $\Delta k_d$ 的模糊规则表 .....	32
图 4.6 PID 仿真图 .....	33
图 5.1 系统控制流程图 .....	35

图 5.2 测控系统硬件原理图 .....	36
表 5.1 硬件选择设备表 .....	37
图 5.3 PC 和 PLC 的软件开发平台及通信 .....	37
图 5.4 pH 值控制系统 PLC 程序流程图 .....	40
图 5.5 PID 控制算法流程图 .....	41
图 5.6 参数自适应控制算法流程图 .....	42
图 5.7 组态王与下位机通讯原理 .....	43
图 5.8 系统监控界面结构 .....	45
图 5.9 主系统界面 .....	46
图 5.10 pH 控制曲线界面 .....	46
图 5.11 历史趋势曲线界面 .....	47
图 5.12 历史报表界面 .....	47
图 6.1 闭环控制系统结构图 .....	48
图 6.2 控制对象模型 .....	49
图 6.3 控制系统仿真结构图 .....	49
图 6.4 Fuzzy-PID 仿真结构图 .....	49
图 6.5 PID 仿真结构图 .....	50
图 6.6 比例阀特性仿真研究图 .....	50
图 6.7 比例阀输出曲线 .....	51
图 6.8 最终控制系统的仿真结构图 .....	52
图 6.9 系统响应图 .....	53
图 6.10 误差变化响应图 .....	53
图 6.11 误差变化率响应图 .....	54
图 6.12 $\Delta k_p$ 的响应图 .....	54
图 6.13 $\Delta k_i$ 的响应图 .....	55
图 6.14 $\Delta k_d$ 的响应图 .....	55
图 6.15 抗干扰系统响应图 .....	56
表 6.1 纯模糊控制器的控制规则 .....	56
图 6.16 三种控制策略的仿真对比图 .....	57
图 6.17 不加干扰三种控制策略系统响应图 .....	57
表 6.2 三种控制策略性能指标对比表 .....	57
图 6.18 加干扰三种控制策略的系统响应图 .....	58

## **附录 II 研究生期间发表的学术论文**

薛岳钊 于军琪 于瑛 离子交换树脂吸附环节中温度的模糊智能控制研究 自动化与仪表 (已录用, 2006年9月25日第5期)

## **附录 III 软件文档 (另册装订)**