

# 基于 S7-300 模糊 PID 控制实验平台设计与开发

## 摘 要

随着 PLC 的技术越来越成熟，做为一种辅助控制工业生产的器件，已经越来越广泛的应用在工业生产的各个领域。S7-300 系列可编程控制器是西门子全集成自动化系统中的控制核心，是其集成与开放特性的重要体现。模糊 PID 控制一直是一种普遍应用于现在工业中的一种算法，它有十分突出的优点。以上两种方法和技术相结合就能完善的建立起完善的系统。通过实际液位和期望值的偏差或者是是偏差的变换率做为系统的控制输入，利用其输出控制来调节变频器达到控制流量，以达到控制液面随期望值变化的目的。本设计利用 WINCC 实现人机界面，应用 PLC 中的模糊 PID 模块控制，使 PLC 进行模糊计算后反模糊化后控制仿真平台，液面高度反馈回 PLC。实现对仿真平台的连续控制。通过此文可建立一套完整的系统，仅通过人机界面既可达到控制、检测、检验、手动调节、启动停止等功能的实现。

**关键词：**模糊算法、模糊 PID 控制、人机界面、PLC

# Design and the development of the experience platform based on S7-300 and Fuzzy PID Control

## Abstract

PLC technology as more and more mature, as an auxiliary device to control industrial production has become increasingly wide range of applications in various fields of industrial production.

S7-300 series programmable logic controller is the Siemens Totally Integrated Automation Control of the core system is its integrated and open an important manifestation of characteristics.

Fuzzy PID control has been applied to a general industry is now an algorithm, it has the advantage of very prominent. These two kinds of methods and technology will be able to complete the establishment of a sound system. Through the actual level and the expectations of the deviation is the deviation or change of rate control input for the system, using the output control to adjust the inverter to control the flow of liquid to achieve control with the aim of changing expectations

In this paper, the realization of human-machine interface WINCC fuzzy PID control as a PLC input, so that PLC control simulation platform and fed back to the PC. Simulation platform to achieve continuous control.

Through the establishment of this article can be a complete set of system can only achieve through the man-machine interface control, testing, inspection, manual adjustment, start to stop the realization of functions

**Key words:** PLC, fuzzy PID control, human-machine interface

# 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	III
<b>1 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1模糊控制 PID .....	1
1.2模糊控制研究方向展望 .....	3
1.3仿真平台 .....	6
1.4本文工作 .....	6
<b>2实验系统的软件设计 .....</b>	<b>8</b>
2.1实验平台的软件设计 .....	9
2.2平台的软件结构设计 .....	10
2.3平台功能设计 .....	10
2.4平台人机界面设计 .....	12
2.5平台的算法设计 .....	13
<b>3系统平台的软件开发 .....</b>	<b>15</b>
3.1平台的软件开发 .....	15
3.1.1平台的人机界面开发 .....	15
3.2平台的算法开发 .....	19
3.3本章小节 .....	24
<b>4 实验平台及实验研究.....</b>	<b>25</b>
4.1实验的硬件设计 .....	25
4.1.1平台的功能设计 .....	25
4.2 实验.....	26
结 论.....	29

---

致 谢.....	30
参考文献.....	31
附录 A （外文文献标题） .....	32
附录 B （中文译文标题） .....	39
附录 C （其它附录资料标题） .....	42

## 1 绪论

自从上世纪 30 年代以来,自动化技术获得惊人的成就,现在在工业生产和科学发展中起着关键作用。当前,自动化装置已成为大型设备不可分割的一部分。可以说,如果不配备适当的自动化设备,大型生产过程根本无法进行。事实上,自动化水平高低已经成为衡量工业企业现代化的一个重要标志。传统的过程控制中对液位高度等参数控制都采用 PID 控制,可以说获得了很好的效果。在生产过程中, PID 控制已经成为历史最悠久、生命力最强的基本方式。此后,随着计算机和 PLC 的发展,计算机和 PLC 与模糊 PID 控制技术完美的结合,可以通过计算机控制 PLC 产生 PID 参数,控制被控对象以及反馈数据给计算机进行处理。

模糊控制是近十几年来迅速发展的一项技术,与神经网络及专家控制并称为智能控制,但由于其简单实用,目前已成功应用于各种控制系统中。模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数学控制方法,属于非线性控制方法。由于引入专家的逻辑思维方式,使得模糊控制器具有一定的自适应控制能力,因而特别适用于难于用精确数学模型描述的系统,并且有很强的鲁棒性和稳定性。本设计针对常见的一阶大惯性环节温控对象,设计出一种 PID 控制与模糊控制(FLC)相结合的控制系统,可以取得良好的控制效果。<sup>[10]</sup>

### 1.1 模糊控制 PID

模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control)简称模糊控制(Fuzzy Control),是以模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制技术。1965 年,美国的 L. A. Zadeh 创立了模糊集合论;1973 年他给出了模糊逻辑控制的定义和相关的定理。1974 年,英国的 E. H. Mamdani 首先用模糊控制语句组成模糊控制器,并把它应用于锅炉和蒸汽机的控制,在实验室获得成功。这一开拓性的工作标志着模糊控制论的诞生。模糊控制实质上是一种非线性控制,从属于智能控制的范畴。模糊控制的一大特点是既具有系统化的理论,又有着大量实际应用背景。模糊控制的发展最初在西方遇到了较大的阻力;然而在东方尤其是在日本,却得到了迅速而广泛的推广应用。近 20 多年来,模糊控制不论从理论上还是技术上都有了长足的进步,成为自动控制领域中一个非常活

跃而又硕果累累的分支。其典型应用的例子涉及生产和生活的许多方面，例如在家用电器设备中有模糊洗衣机、空调、微波炉、吸尘器、照相机和摄录机等；在工业控制领域中有水净化处理、发酵过程、化学反应釜、水泥窑炉等的模糊控制；在专用系统和其它方面有地铁靠站停车、汽车驾驶、电梯、自动扶梯、蒸汽引擎以及机器人的模糊控制等。

模糊控制的基本思想是利用计算机来实现人的控制经验，而这些经验多是用语言表达的具有相当模糊性的控制规则。模糊控制器(Fuzzy Controller，即 FC)获得巨大成功的主要原因在于它具有如下一些突出特点：

- 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。
- 由工业过程的定性认识出发，比较容易建立语言控制规则，因而模糊控制对那些数学模型难以获取、动态特性不易掌握或变化非常显著的对象非常适用。
- 基于模型的控制算法及系统设计方法，由于出发点和性能指标的不同，容易导致较大差异；但一个系统的语言控制规则却具有相对的独立性，利用这些控制规律间的模糊连接，容易找到折中的选择，使控制效果优于常规控制器。
- 模糊控制算法是基于启发性的知识及语言决策规则设计的，这有利于模拟人工控制的过程和方法，增强控制系统的适应能力，使之具有一定的智能水平。
- 模糊控制系统的鲁棒性强，干扰和参数变化对控制效果的影响被大大减弱，尤其适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制。

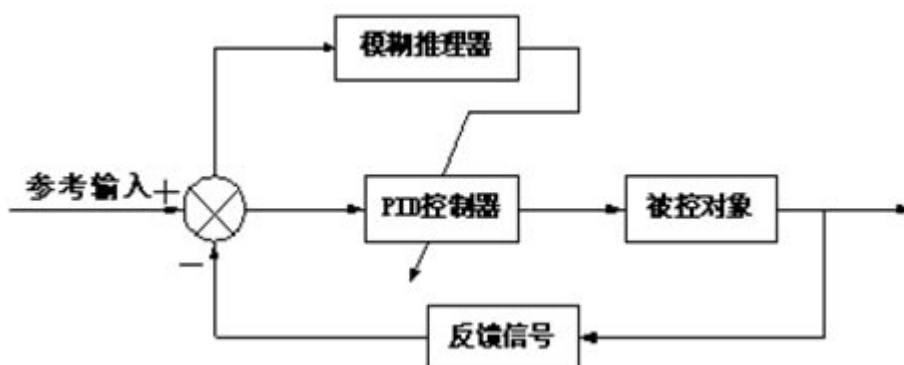


图 1.1 模糊 PID 控制

模糊 PID 控制工作原理如下：计算机根据参考输入和反馈信号，计算实际转速和理论转速之间的偏差以及当前的偏差变化速度，在模糊推理器中借助模糊经验进行模糊

推理, 模糊推理器输出 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数, 把它们作为当前控制器的参考进行 PID 控制, 由于每一次控制时控制器的参数都是根据具体控制情况进行实时修正的, 因而能够做到控制作用的最优。

## 1.2 模糊控制研究方向展望

模糊逻辑首次被美国加利福尼亚大学伯克利分校的拉特飞·扎德提出是在 1965 年发表的论文。在 1973 年的论文他阐述了他的观点, 介绍了“语言变量”, 在这一观点相当于一个变量定义为模糊集。其他的研究之后, 首次工业应用于建造丹麦的水泥窑, 于 1975 年建成。

模糊系统很大程度上被美国忽略, 因为他们致力于人工智能, 特别是在 20 世纪 80 年代中期, 直接导致美国损失了一个很大的商业市场。

日本没有这种偏见。模糊系统引起了诚安信和宗二宫本日立的兴趣, 他们在 1985 年提供了模拟仿真, 应用了优化了的模糊控制系统改造仙台铁路。他们的想法获得认同, 应用模糊系统是用来控制加速, 刹车和停车线时, 仙台铁路改造后 1987 年开放。

另一个事件促进模糊控制的兴起也是在 1987 年。在东京召开的模糊控制会议的那一年, 武山川通过一套简单的专用模糊逻辑芯片, 实现了“倒置钟摆”的实验。这是一个典型的控制问题, 一个小车尝试通过一个安装在其顶部铰链保持摇摆。

这次演示给其他人留下了深刻的印象, 包括后来的山川, 他模拟出一套装满水的水杯或是一个活老鼠做为钟摆。在这两种情况下, 该系统仍然保持稳定。山川最终组织了自己的模糊系统实验室, 以方便在这个领域进行研究。

通过这些示例, 日本工程师开发出了一系列以模糊控制为核心技术的工业和生活项目。在 1988 年日本成立了国际模糊工程实验室, 在这期间安排和 48 家公司合作进行模糊控制的研究。

日本的消费品往往应用模糊系统。松下吸尘器应用了微观控制器的运行模糊算法来控制粉尘传感器和相应的调整吸力大小。日立洗衣机使用模糊控制器负载重量, 纺织机构, 污脂传感器和自动设定洗涤周期, 合理的利用电力, 水资源和洗涤剂。

另外一个更具体的例子, 佳能开发了一个自动对焦相机, 采用电荷耦合器件 (CCD) 来衡量的清晰度图像在六个区域的视野和使用所提供的资料, 以决定是否改变焦点。它控制变化运动的焦点, 并控制其速度, 以防止超出范围。

相机的模糊控制系统使用 12 个投入：其中 6 个和，以获取当前的明确提供的数据的 CCD 和另外 6 个来衡量的变化率的镜头运动。输出的影象的镜头。模糊控制系统采用 13 条，以及 1.1 千字节的内存。

另一个例子是一个切实可行的制度，一个工业用的三菱空调有 25 个致热器和 25 个致冷器。温度传感器提供了输入，输出与模糊控制的逆变器，压缩机阀，和风扇电机。比以前的设计，模糊控制器加热和冷却快 5 倍，能耗降低了 24 %，提高温度稳定性的 1/2，并更少的使用传感器。

在日本模糊控制在很多地方都被广泛的应用，他们都被设计或是研发：字体和手写识别、光模糊系统、可以插花的机器人、语音控制机器人、类似于摇摆钟摆的保持停止在空中的直升飞机问题、控制液体流量、电梯系统等等。

模糊系统的研究在美国和欧洲也同样在进行研究，但是研究的热情程度却比不上在日本。美国环境保护局已经设计模糊控制节能型汽车，以及美国航空航天局研究了模糊控制全自动空间站对接：仿真结果表明，模糊控制系统可大大降低燃料消耗。波音，通用汽车，艾伦布拉德利，克莱斯勒，伊顿，以及惠而浦等公司已经把模糊逻辑用于低功耗的冰箱，改善汽车变速箱，和节能电动机中。

美泰在 1995 年推出的“智能”洗碗机应用了模糊控制器和“一站式传感模块”是结合了热敏电阻、温度测量、电导传感器，来测量洗涤剂含量从目前的洗涤浓度传感器，使分散和透光来衡量去污能力；用磁致伸缩传感器改为旋转率。该系统确定了最佳的洗涤周期的任何负载，以获取最佳效果与最少的电力，清洁剂和水。它甚至检测上一次衣服被弄干的时间，估计实际大门打开的时间。

模糊应用软件同样在被研究和发展，而不全是固件的设计，包括模糊专家系统和集成的模糊逻辑与神经网络和所谓的自适应“遗传”软件系统，其最终目标是建设“自动模糊控制系统”<sup>[1]</sup>

模糊控制仍然是一个充满争议的领域。由于它的发展历史还不长，理论上的系统性和完善性，技术上的成熟性和规范性都还是不够的，有待人们的进一步提高。

模糊系统理论还有一些重要的理论课题没有解决。其中两个重要的问题是：如何获得模糊规则及隶属函数，这在目前完全凭经验来进行；以及如何保证模糊系统的稳定性。

常规模糊控制的两个主要问题在于：改进稳态控制精度和提高智能水平与适应能力。在实际应用中，往往是将模糊控制或模糊推理的思想，与其它相对成熟的控制理论或方法



结合起来,发挥各自的长处,从而获得理想的控制效果。由于模糊规则和语言很容易被人们广泛接受,加上模糊化技术在微处理器和计算机中能很方便的实现,所以这种结合展现出强大的生命力和良好的效果。对模糊控制的改进方法可大致的分为模糊复合控制,自适应和自学习模糊控制,以及模糊控制与智能化方法的结合等三个方面。

复合控制指的是模糊技术与常规的 PID 控制算法相结合的一种控制方法。这种控制方法常见的一种是 Fuzzy-PI 双模控制形式。这种改进的控制方法的出发点主要是因为模糊控制器本身消除系统稳态误差的性能比较差,难以达到较高的控制精度。而 PI 调节器的积分调节作用从理论上可使系统的稳态误差控制为零,有着很好的消除误差作用。因此把模糊控制和 PI 调节器相结合以增加稳态控制性能。文献[8]介绍了当用常规 PID 控制无法满足控制精度且系统稳定性差时,可引入智能积分 Fuzzy 控制器来提高系统动态精度。

目前,模糊控制技术日趋成熟和完善。各种模糊产品充满了日本、西欧和美国市场,如模糊洗衣机、模糊吸尘器和模糊摄像机等等,模糊技术几乎变得无所不能,各国都争先开发模糊新技术和新产品。多年来一直未解决的稳定性分析问题正在逐步解决。模糊芯片也已研制成功且功能不断加强,成本不断下降。直接采用模糊芯片开发产品已成为趋势。模糊开发软件包也充满市场。模糊控制技术除了在硬件、软件上继续发展外,将在自适应模糊控制、混合模糊控制以及神经模糊控制上取得较大发展。随着其它学科新理论、新技术的建立和发展,模糊理论的应用更加广泛。模糊理论结合其它新技术和人工神经网络和遗传基因形成交叉学科神经网络模糊技术(Neuron Fuzzy Technique)和遗传基因模糊技术(Genetic Fuzzy Technique),用于解决单一技术不能解决的问题。模糊理论在其它学科技术的推动下,正朝着更加广泛的方向发展。模糊系统理论还有一些重要的理论课题还没有解决。其中两个重要的问题是:如何获得模糊规则及隶属函数,这在目前完全凭经验来进行;以及如何保证模糊系统的稳定性。大体说来,在模糊控制理论和应用方面应加强研究的主要方向为:

(1)适合于解决工程上普遍问题的稳定性分析方法,稳定性评价理论体系;控制器的鲁棒性分析,系统的可控性分析和可观性判定方法等。

(2)模糊控制规则设计方法的研究,包括模糊集合隶属函数设定方法,量化水平,采样周期的最优选择,规则的系数,最小实现以及规则和隶属函数参数自动生成等问题;进一步则要求我们给出模糊控制器的系统化设计方法。

(3) 模糊控制器参数最优调整理论的确立, 以及修正推理规则的学习方式和算法等。

(4) 模糊动态模型的辨识方法。

(5) 模糊预测系统的设计方法和提高计算速度的方法。

(6) 神经网络与模糊控制相结合, 有望发展一套新的智能控制理论。

(7) 模糊控制算法改进的研究: 由于模糊逻辑的范畴很广, 包含大量的概念和原则; 然而这些概念和原则能真正的在模糊逻辑系统中得到应用的却为数不多。这方面的尝试有待深入。

(8) 最优模糊控制器设计的研究: 依据恰当提出的性能指标, 规范控制规则的设计依据, 并在某种意义上达到最优。

(9) 简单、实用且具有模糊推理功能的模糊集成芯片和模糊控制装置、通用模糊控制系统的开发和推广应用。

在短短 20 多年时间里, 模糊控制得到长足发展。它的应用领域涉及各个方面, 控制方法也有很大进展, 模糊控制器的性能不断提高。模糊控制系统易于接受, 设计简单, 维护方便, 而且比常规控制系统稳定性好, 鲁棒性高。由于它的这些特点, 模糊控制正在得到越来越广泛的应用。

### 1.3 仿真平台

本次设计采用实物设计和开发, 应用 PLC S7300 以及天煌实验平台对系统进行仿真。通过计算机人机界面, 控制以及反馈到 PLC, 后通过 PLC 控制天煌实验平台中的电机, 以变频的方式改变电机的转数, 从而控制液体流量改变液面高度。

### 1.4 本文工作

本设计主要通过模糊控制算法, 计算出系统 P 比例环节, PI 积分环节。导入 PLC, 根据事先写好的程序处理后, 一方面传输回计算机, 另一方面输出到执行机构。本设计主要研究如何应用单纯的数学算法控制 PLC 输入输出控制, 并且实现人机界面。本设计主要工作模糊控制 PID 在工业生产中应用十分广泛, 为了提高工厂自动化水平, 减少人力成本, 国内外专家学者对基于 PLC 的模糊 PID 控制的仿真研究, 都是以对生产实践为指导。本设计既构建一套接近于工业生产的仿真环境。

本设计根据实际出发，在建立一套模糊 PID 仿真控制系统，在此基础上建立控制过程，控制机构、执行机构，具体如下：

(1) 设计和开发模糊 PID 控制系统的软件系统，由模拟控制软件和实际天煌实验台的执行机构组成。对整个系统进行仿真，通过反馈和输入来控制整个系统的控制液面高度，实现模拟实际工厂环境

(2) 建立了模糊 PID 控制模型，设计和开发了其软件系统。其中执行机构和检测装置为变频器、电动机、泵

(3) 应用 WINCC 编写了计算机的人机界面，通过人机界面可以检测实际工作数据，可以在线修改和控制实际 PID 数据。编写 PLC 程序，实现模糊 PID 控制，对 PC 的通信，以及对执行机构的控制。

## 2 实验系统的软件设计

### 西门子 PLC S7300

作为全球自动化领域技术、标准与时常的领导者，有着 150 余年历史的西门子公司，以其一贯的朴实、稳健的作风和博大精深的创新文化，致力于以最先进的自动化技术与产品，向用户提供具有前瞻性的和最优可靠的解决方案，以现实用户最大限度的可持续发展和长期的利益保障。全集成自动化技术 TIA (Totally Intergrated Automation) 是西门子自动化系统技术与产品的核心思想和主导理念。TIA 集高度的集成统一性和前所未有的开放性于一身，标准化的网络体系结构、统一的编程组态环境和高度一致的数据集成，使 TIA 为企业实现了横向和纵向的信息集成：领先的通讯标准、基于组件的自动化技术 (CBA) 与 IT 集成，使 TIA 对全球自动化市场的产品和服务范围真正开放。

SIMATIC S300 系列可编程控制器是西门子全集成自动化系统中的控制核心，是其集成与开放特性的重要体现。该系列 PLC 继承了西门子上一代 PLC SIMATIC S5 系统稳定、可靠和故障率低的精髓，将先进的控制思想、现代通讯技术和 IT 技术的最新发展集于一身，在 CPU 运算速度、程序执行效率故障自诊断、联网通讯、面向工艺和运动控制的功能集成以及实现故障安全的容错与冗余技术等方面取得了业界公认的成绩。不断创新的 PLC 编程组态工具 STEP7 采用 SIMATIC 软件的集成统一架构，为实现 PLC 编程组态的易用性和友好性以及与上位机组态系统的集成统一性提供了一个功能强大、风格一贯的软件平台，符合 IEC61131-3 的多种高级编程语言的补充，使 PLC 在实现复杂工艺编程、多重回路调节、甚至模糊控制 (Fuzzy Control) 和神经元控制 (Neuron Control) 等智能控制算法时具有类似高级编程语言的特点和优势。此外，SIMATIC S7300 PLC 集成强大通讯功能，是其得以成功的另一个重要方面。如今 PROFIBUS 有超过 1200 余家会员单位，全球的总安装节点已经突破 1000 万，是全球公认的工业现场总线标准的领跑者；新一代工业以太网标准 PROFINET 的提出，为以太网在工业领域更大范围的应用提供了

技术保障, 凭借集成统一的通讯, SIMATIC S7300 在现实车间级、工厂级、企业级乃至全球企业链的生产控制与协同管理中起到中坚作用。

几年以前, 当控制界在围绕 PLC、DCS 和基于 PC 的解决方案, 争论何者将成为控制系统主流时, 当人们在为如何突破“自动化孤岛”而积极思考、探索和忧虑时, 携全集成自动化的利念, 西门子提出通过不断丰富和发展 PLC 的控制功能和总线通讯技术, 实现了横跨工厂自动化和过程自动化两大自动化领域的统一的控制策略。如今 SIMATIC S7300 PLC 在全球自动化各个领域的广泛应用和成功经验, 充分证明了 PLC 解决方案的强大生命力和多种不同控制系统在技术、历年突飞猛进的过程中殊途同归的必然趋势。

## 2.1 实验平台的软件设计

### WINCC

SIMATIC WinCC 是第一个使用最新的 32 位技术的过程监视系统, 具有良好的开放性和灵活性。

从面市伊始, 用户就对 SIMATIC WinCC 印象深刻。一方面, 是其高水平的创新, 它使用户在早期就认识到即将到来的发展趋势并予以实现; 另一方面, 是其基于标准的长期产品策略, 可确保用户的投资利益。

凭籍这种战略思想, WinCC, 这一运行于 Microsoft Windows 2000 和 XP 下的 Windows 控制中心, 已发展成为欧洲市场中的领导者, 乃至业界遵循的标准。如果你想使设备和机器最优化运行, 如果你想最大程度地提高工厂的可用性和生产效率, WinCC 当是上乘之选。

突出的优点:

通用的应用程序, 适合所有工业领域的解决方案; 多语言支持, 全球通用; 可以集成到所有自动化解决方案内; 内置所有操作和管理功能, 可简单、有效地进行组态; 可基于 Web 持续延展, 采用开放性标准, 集成简便; 集成的 Historian 系统作为 IT 和商务集成的平台; 可用选件和附加件进行扩展; “全集成自动化”的组成部分, 适用于所有工业和技术领域的解决方案。

WinCC 集生产自动化和过程自动化于一体, 实现了相互之间的整合, 这在大量应用和各种工业领域的应用实例中业已证明, 包括: 汽车工业、化工和制药行业、印刷行业、能源供应和分配、贸易和服务行业、塑料和橡胶行业、机械和设备成套工程、金属加工

业、食品、饮料和烟草行业、造纸和纸品加工、钢铁行业、运输行业、水处理和污水净化。

WinCC 是 SIMATIC PCS 7 过程控制系统及其它西门子控制系统中的人机界面组件。

## 2.2 平台的软件结构设计

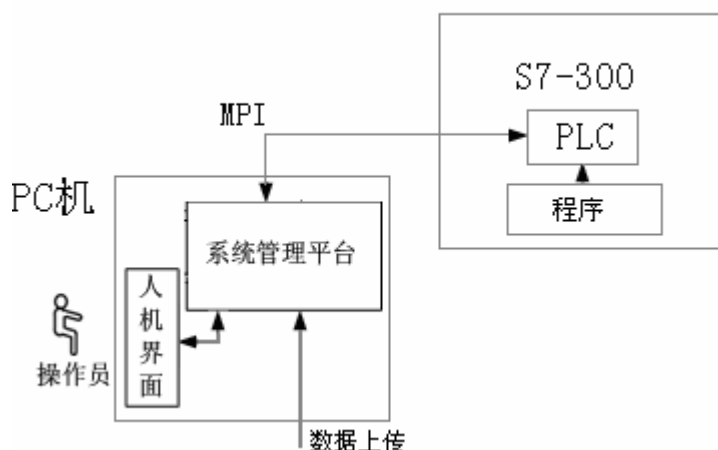


图 2.1 系统结构图

此系统 PC 机通过数据线与 PLC 连接，PC 机中的人机界面控制数据的期望值，通过数据线传送到 PLC。PLC 在系统中的作用是 PLC 接受 PID 控制器和电接点压力器的反馈信号，根据所编写的 PLC 程序控制向变频器传送信号，使变频器所控制的交流电机频率改变电机转数，从而水泵的流量改变控制液面高低的变化，液面检测器检测液面高低变化，并且将这些数据反馈传输给 PLC。PLC 一方面将这些数据传送到计算机的人机界面和模糊 PID 控制机构。人机界面就可以时时检测到系统各个参数的变化。模糊 PID 控制机构接受到反馈后立即通过计算得到了心的 E 和  $E_c$ ，计算出新的输出量继续传送到变频器，从而达到连续工作的目的。

## 2.3 平台功能设计

此系统通过 PC 机连接到 PLC 和执行机构，应用的人机界面实现了如下功能：

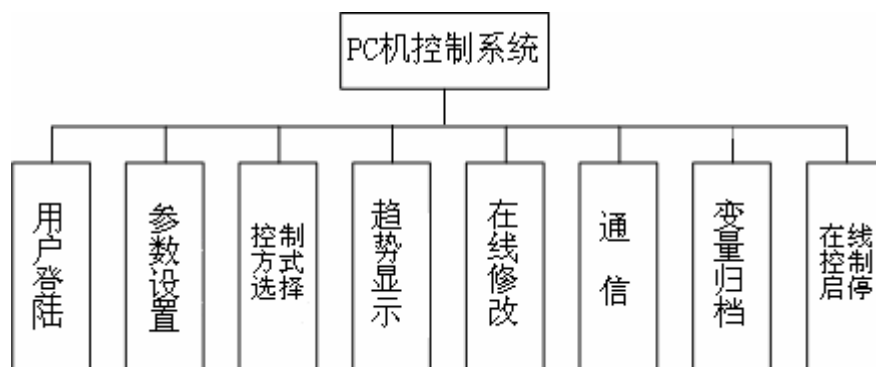


图 2.2 人机界面实现功能

### 1) 用户登陆

已经注册的用户可以通过人机界面首页的登陆框登陆系统,本系统可以记录保存个人设置信息,并且可以备份操作过程,也可以防止无关人员对系统的误操作带来的影响。

### 2) 参数设置

通过设置参数界面的数值,可以设置液面最大高度和最小高度,设置模糊控制器中的液面上下限,使液面不超过设置的指定范围。同时还可以设置报警液面高度值,通过此设置当液面达到或低于指定值时发出报警声。

### 3) 控制方式选择

用户可以选择手动控制或是自动控制,在手动控制时,用户可以输入  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , 系统将直接运行用户手动输入的 PID 数值进行控制水箱系统。在用户选择自动控制时,系统将自动计算  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , 按照系统设置的期望值进行运转。

### 4) 趋势显示

操作者可以通过人机界面的趋势显示图中看到系统的变化曲线,通过趋势显示图来进行手动矫正当前系统参数。当系统出现故障时也可以从趋势显示图中了解到什么时候出现偏差,排除故障。

### 5) 在线修改

当用户想更改系统参数或是排除故障时,不必须停止系统运转,可以直接通过在线修改参数来达到矫正或是修改当前系统的工作状态。

### 6) 通信

系统可以通过 PC 机与 PC 机的传输来上传当前系统的状态,也可以通过上层控制系统的要求对系统进行修改

### 7) 变量归档

当系统出现故障时候,可以不停止系统运转就使系统液位恢复到备分时的标准,也可以根据具体情况定时恢复备分时的状态

#### 8) 控制启动停止

用户可以通过人机界面的停止/启动按钮启动或停止系统,而不必须手段关断电源的方式使系统停止。

## 2.4 平台人机界面设计

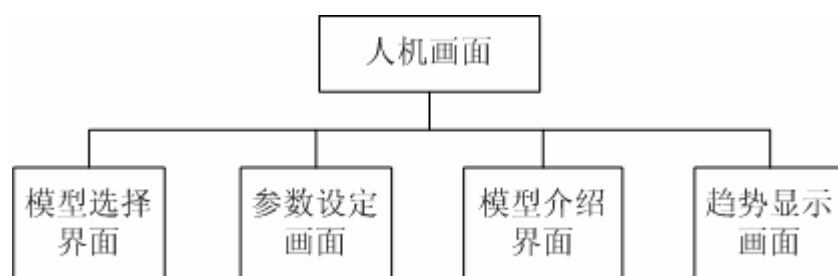


图 2.3 人机界面组成

#### 1) 初始界面

通过此界面用户可以登陆人机界面系统,也可以使用通讯按钮,实现 PC 机之间的数据交换以及控制

#### 2) 工艺流程界面

在此界面用户可以设置系统运转时需要事先设定好的参数,如警戒上下限,报警液位高度,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  等。也可以通过使用启动或是停止按钮来控制整个系统的启动和停止。并且改变手动或自动方式,如系统在手动状态下,还可以通过修改  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  实现对系统的手动操作。

#### 3) 趋势显示界面

在这个界面用户可以清晰的查看系统的运转曲线,非常直观的显示系统运行的状态和趋势

#### 4) 变量记录界面

用户可以使用这个界面上的备分和归档按钮,记录系统当前的各项数据或是恢复到备分之前的状态。



## 2.5 平台的算法设计

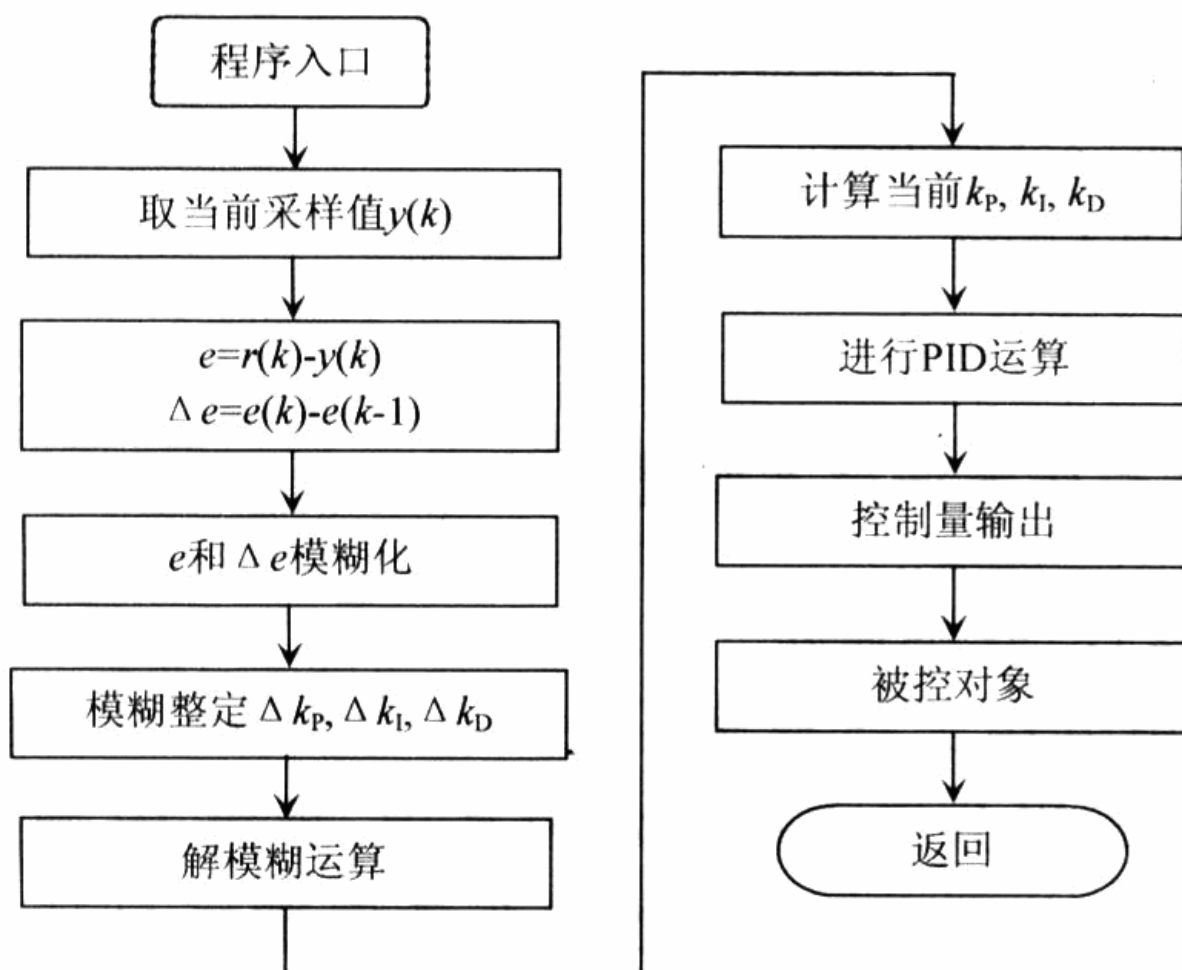


图 2.4 模糊控制数学计算流程图

模糊控制是以模糊数学为基础，用语言规则表示方法和先进的计算机技术，由模糊推理进行推理决策的一种高级控制策略。模糊控制器不要求掌握被控对象的精确数学模型，而根据人工控制规则组织控制决策表，然后由该表决定控制量的大小，模糊控制器适用于大滞后、时变、非线性的复杂系统，参数未知或变化缓慢及无法精确获得数学模型时应用。<sup>[4]5]</sup>

对于许多工业过程控制，现实中很难建立过程的精确的数学模型，在这种情况下，在某一领域的专家对过程控制的启发式规则和实际操作经验显得尤为重要，通过总结专家经验来建立模糊控制系统是解决这类问题的有效的方法。<sup>[2]16]</sup>

模糊控制中常用的是二维模糊推理，以误差和误差变化作为模糊推理系统的输入，

这种结构反映模糊控制器具有非线性 PD 控制规律, 有利于保证系统的稳定性, 并可减少系统的超调量, 削弱系统的振荡。在控制系统中, 误差  $e$  及其变化率  $\dot{e}$  的实际值变化范围称为误差及其变化率语言变量的基本论域, 分别计为  $[-e, e]$  及  $[-\dot{e}, \dot{e}]$ , 在模糊控制系统中, 模糊集合的论域为  $X = \{-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n-1, n\}$ , 实际控制系统中, 一般误差及其变化率的变化不是论域  $X$  中的元素, 这就需要通过量化因子进行论域变换, 设误差  $e$  的基本论域为  $[-e, e]$ , 所取模糊集合的论域为:  $X = \{-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n-1, n\}$ , 则

量化因子  $k_e$  定义为:  $k_e = \frac{n}{e}$ 。选定量化因子后, 对于系统的任何误差都可以量化为论域  $X$  上的某一个元素。对于误差变化率及其它模糊量, 同样可以定义相应的量化因子。在设计模糊控制器时, 对于误差、误差变化率和控制量的变化等语言变量, 常用“正大”(PB)、“正中”(PM)、“正小”(PS)、“零”(0)、“负小”(NS)、“负中”(NM)和“负大”(NB)这 7 个语言变量来描述。<sup>[1][3][7]</sup>语言变量论域上的模糊子集由隶属函数  $\mu(x)$  来描述, 隶属函数一般可通过总结操作者的操作经验或采用模糊统计方法来确定。在确定语言变量在各自论域上的模糊子集后, 可为语言变量分别建立用以说明各语言值从属于各自论域程度的表格, 即语言变量赋值表。一般模糊控制器主要由以下 5 部分组成:<sup>[8][9]</sup>

#### ①输入输出量化

输入输出量化的作用是通过比例变换将实际输入变量由基本论域变换到各自语言变量的论域范围内, 将表示在控制量语言变量论域范围内的控制量变换成实际控制量。

#### ②模糊化

模糊化模块的作用是对已经变换到语言变量论域范围内的精确的输入变量进行模糊处理, 通过定义在其论域上的隶属度函数计算出其属于各模糊集合的隶属度, 使原先精确的输入量变成模糊量, 并用相应的模糊集合来表示。

#### ③模糊控制规则

模糊控制规则是操作经验和专家知识的总结, 是进行模糊推理的依据。模糊控制规则对整个控制器的控制效果有很大的影响。

#### ④模糊推理

模糊推理是模糊控制器的核心, 它具有模拟人的基于模糊概念的推理能力。

该推理过程是基于模糊逻辑中的蕴涵关系及模糊控制规则来进行的。

### ⑤模糊量的精确化

将模糊推理得到的控制量(模糊量)变换为表示在其论域范围中的精确量。

## 3 系统平台的软件开发

### 3.1 平台的软件开发

#### 3.1.1 平台的人机界面开发

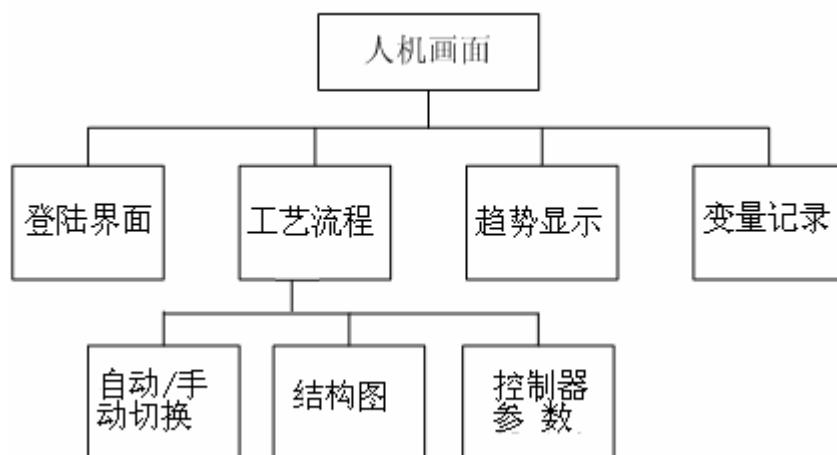


图 3.1 人机界面的开发

#### 1) 登陆界面



图 3.2 登陆界面

此图为登陆界面 当用户提交用户的用户名和密码后,就会进入此界面。在此界面中,用户可以选择进入工艺流程界面、趋势显示界面、变量记录界面。

## 2) 变量记录



图 3.3 变量记录界面

进入变量记录界面后,可以观察到当前系统的液位和时间,可以在此界面选择归档。也可以选择返回初始界面,也可以进入趋势显示、工艺流程界面

### 3) 工艺流程

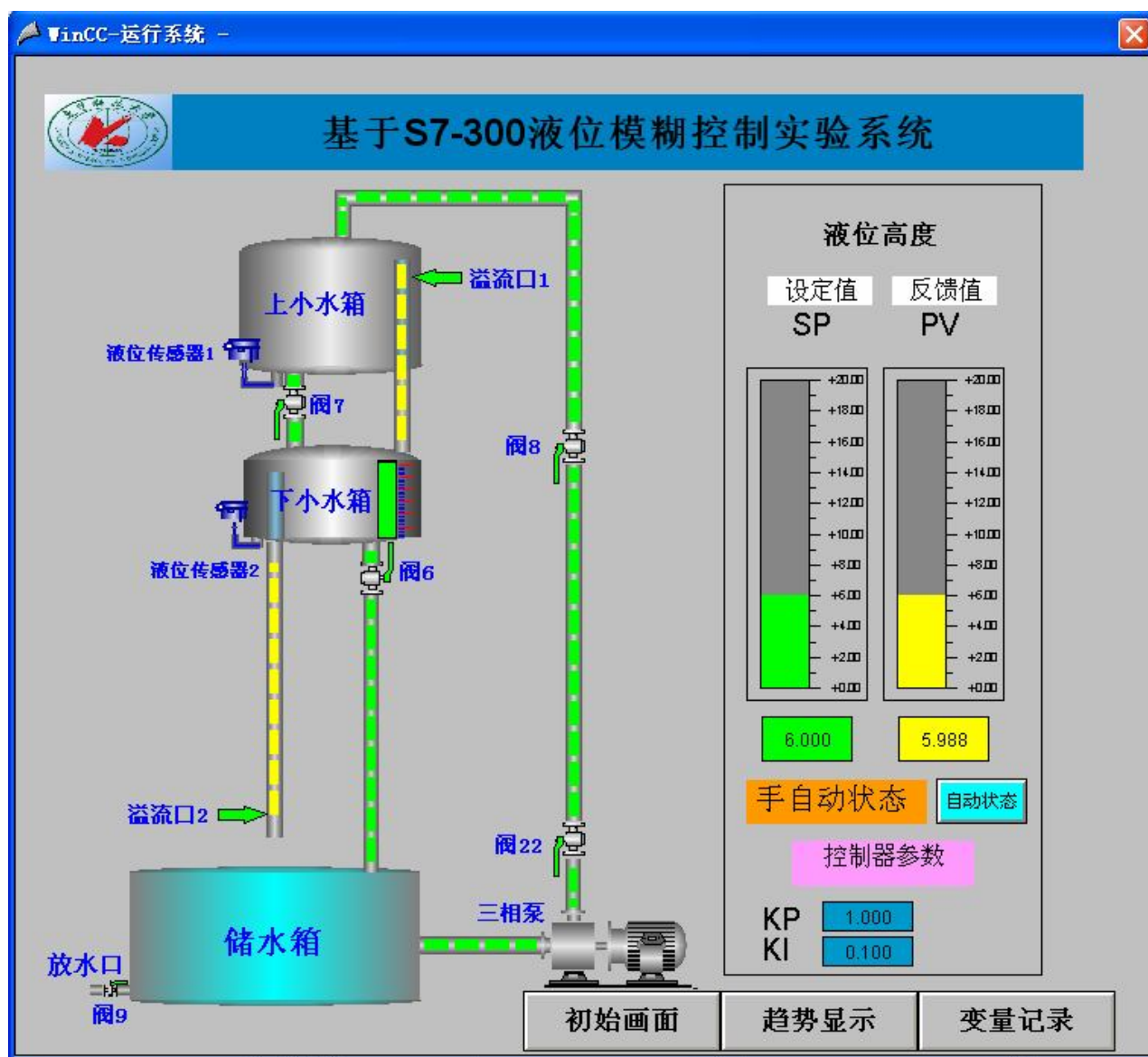


图 3.4 工艺流程界面

在此界面中 用户可以观察到系统的工作原理 以及各个阀门的开启或关闭状态，还可以观察和设置液面的设定值，也可以观察反馈值，也可以切换自动/手动方式，设置 KP/KI 值。

#### 4) 趋势显示界面

在这个界面中，实验平台可以记录实验数据，并且根据实验数据绘制出实验数据趋势图

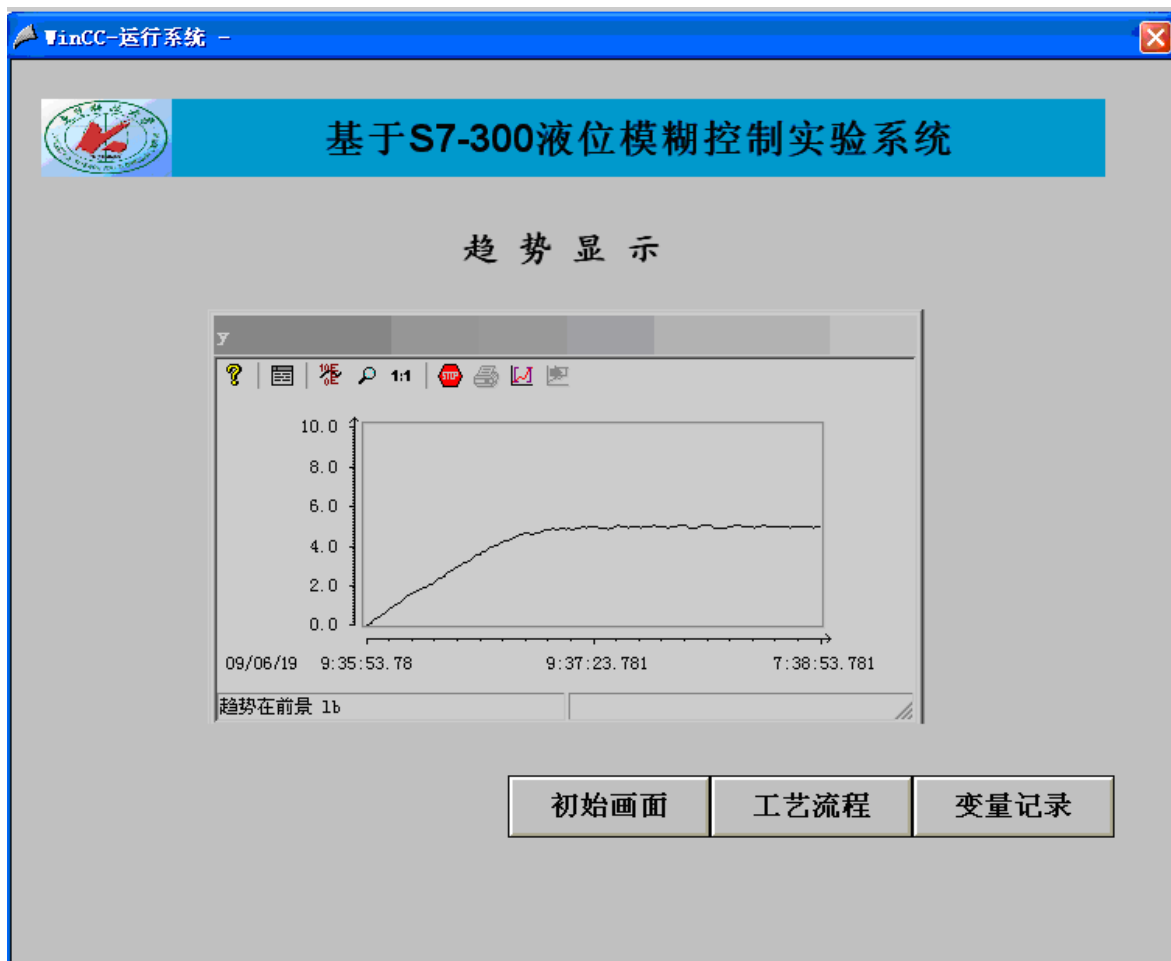


图 3.5 趋势显示界面

### 3.2 平台的算法开发

#### (1) 精确量的模糊化

在流量模糊控制器的设计中，对于模糊控制器的输入变量，取误差  $EM$  的基本论域为  $[-2, 2]$ ，误差  $EF$  的基本论域为  $[-1.5, 1.5]$ 。把误差论域量化为 9 档，即

$\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ ，则量化因子  $k_{EM} = 2$ ， $k_{EF} = \frac{8}{3}$ 。选择误差变量的模糊子集为：

$\{PB, PS, O, NS, NB\}$ ，模糊变量的隶属函数如表 3.1 所示：

模糊子集	隶属函数表达式
$PB$	$e^{-((x-4)/2)^2}$
$PS$	$e^{-((x-2)/2)^2}$

$O$	$e^{-(x/2)^2}$
$NS$	$e^{-((x+2)/2)^2}$
$NB$	$e^{-((x+4)/2)^2}$

表 3.1 误差模糊变量隶属函数表

Table3.1 membership function of error fuzzy variables

误差模糊变量的赋值如表 3. 2:

	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
$PB$	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1
$PS$	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4
$O$	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0
$NS$	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0
$NB$	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0

表 3.2 误差模糊变量赋值表

Table 3. 2 The value of error fuzzy variables

将误差变化率( $CEM, CEF$ )量化为 7 档, 即:  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ , 取  $CEM$  基本论域为  $[-3, 3]$ ,  $CEF$  的基本论域为  $[-2, 2]$ , 则量化因子  $k_{CEM} = 1$ ,  $k_{CEF} = 1.5$ 。选择误差变化率的模糊子集为:  $\{PB, PS, O, NS, NB\}$ , 误差变化率模糊变量的隶属函数如表 3. 3:

模糊子集	隶属函数表达式
$PB$	$e^{-((x-3)/2)^2}$
$PS$	$e^{-((x-1)/2)^2}$
$O$	$e^{-(x/2)^2}$
$NS$	$e^{-((x+1)/2)^2}$
$NB$	$e^{-((x+3)/2)^2}$

表 3.3 误差变化率模糊变量隶属函数表

Table 3.3 membership functions of error-changed fuzzy variables



其模糊变量赋值如表 3.4:

	-3	-2	-1	0	1	2	3
<i>PB</i>	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1
<i>PS</i>	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4
<i>O</i>	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1
<i>NS</i>	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0
<i>NB</i>	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0

表 3.4 误差变化率模糊变量赋值表

Table 3.4 The value of error-changed fuzzy variables

对于模糊控制器的输出变量, 这里为在单独调节液面高度氨水的方式下液体的流量调节量。

模糊子集	隶属函数表达式
<i>PB</i>	$e^{-((x-4)/2)^2}$
<i>PM</i>	$e^{-((x-3)/2)^2}$
<i>PS</i>	$e^{-((x-1)/2)^2}$
<i>O</i>	$e^{-(x/2)^2}$
<i>NS</i>	$e^{-((x+1)/2)^2}$
<i>NM</i>	$e^{-((x+3)/2)^2}$
<i>NB</i>	$e^{-((x+4)/2)^2}$

表 3.5 输出模糊变量隶属函数表

Table 3.5 membership functions of output fuzzy variables

把液体的流量变化量(*DNS*)的论域量化为 9 档, 即:  $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ 。取单独调节液体的流量时, *DNS* 的基本论域为  $[-0.3, 0.3]$ , 则量化因子  $k_{DNS}=0.075$ 。对于单独调节液体的流量的方式, 其模糊变量的论域均化为 9 档, 即:  $\{-4, -3, -2,$

-1, 0, 1, 2, 3, 4}。模糊变量对应的基本论域和量化因子如下： $DHS$  的基本论域为  $[-0.2, 0.2]$ ，对应的量化因子  $k_{DHS}=0.05$ 。 $DN$ 的基本论域为  $[-0.2, 0.2]$ ，对应的量化因子  $k_{DN}=0.05$ 。 $DH$ 的基本论域为  $[-0.15, 0.15]$ ，对应的量化因子为  $k_{DH}=0.0375$ 。对上述输出模糊变量其模糊子集选取为： $\{PB, PM, PS, O, NS, NM, NB\}$ 。对应输出模糊变量的隶属函数如表 3.5，对应输出模糊变量的赋值如表 3.6：

	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
$PB$	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1
$PM$	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8
$PS$	0	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1
$O$	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0
$NS$	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0
$NM$	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0
$NB$	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0

表 3.6 输出模糊变量赋值表

Table 3.6 The value of output fuzzy variables

(2) 模糊控制规则

以单独调节液体的流量为例，由实际操作经验可总结出以下模糊控制规则：

$$R^1 : \text{if } EF = PB \text{ and } EM = PB \text{ then } DNS = PB$$

$$R^2 : \text{if } EF = PB \text{ and } EM = PS \text{ then } DNS = PM$$

$$R^3 : \text{if } EF = PB \text{ and } EM = O \text{ then } DNS = PS$$

$$R^4 : \text{if } EF = PB \text{ and } EM = NB \text{ then } DNS = NM$$

$$R^5 : \text{if } EF = PS \text{ and } EM = PB \text{ then } DNS = PM$$

$$R^6 : \text{if } EF = PS \text{ and } EM = PS \text{ and } CEF = PB \text{ then } DNS = PM$$

$$R^7 : \text{if } EF = PS \text{ and } EM = PS \text{ and } CEF = PS \text{ and } CEM = PB \text{ then } DNS = PM$$

$$R^7 : \text{if } EF = PS \text{ and } EM = PS \text{ and } CEF = PS \text{ and } CEM = PS \text{ then } DNS = PS$$

$$R^7 : \text{if } EF = PS \text{ and } EM = O \text{ and } CEF = PB \text{ and } CEM = PB \text{ then } DNS = PM$$

$$R^8 : \text{if } EF = PS \text{ and } EM = O \text{ and } CEF = PB \text{ and } CEM = PS \text{ then } DNS = PS$$

$R^9$  : if  $EF = PS$  and  $EM = NS$  and  $CEF = NB$  then  $DNS = NM$

$R^{10}$  : if  $EF = PS$  and  $EM = NS$  and  $CEF = NS$  and  $CEM = (NS \text{ or } NB)$   
then  $DNS = NM$

$R^{11}$  : if  $EF = O$  and  $EM = PB$  and  $CEF = PB$  then  $DNS = PM$

$R^{12}$  : if  $EF = O$  and  $EM = PB$  and  $CEF = PS$  then  $DNS = PS$

$R^{13}$  : if  $EF = O$  and  $EM = NS$  and  $CEF = (NS \text{ or } NB)$  and  $CEM = (NS \text{ or } NB)$   
then  $DNS = PS$

$R^{14}$  : if  $EF = O$  and  $EM = NB$  and  $CEF = (PS \text{ or } O \text{ or } NS \text{ or } NB)$  then  $DNS = NM$

$R^{15}$  : if  $EF = NS$  and  $EM = PB$  and  $CEF = PB$  then  $DNS = PS$

$R^{16}$  : if  $EF = NS$  and  $EM = O$  and  $CEF = (NB \text{ or } NS)$  and  $CEM = (NB \text{ or } NS)$   
then  $DNS = NM$

$R^{17}$  : if  $EF = NS$  and  $EM = NS$  then  $DNS = NM$

$R^{18}$  : if  $EF = NS$  and  $EM = NB$  then  $DNS = NB$

$R^{19}$  : if  $EF = NB$  and  $EM = O$  then  $DNS = NM$

$R^{20}$  : if  $EF = NB$  and  $EM = (NS \text{ or } NB)$  then  $DNS = NB$

### (3) 模糊量的精确化

模糊控制器输出的是一个模糊集合，它反映控制语言的不同取值的一种组合，很多情况下，被控对象只能接受一个控制量，这就需要从输出的模糊集合判决出一个精确的控制量，也就是设计一个由模糊集合到普通集合的映射，即判决方法。常用的判决方法有最大隶属度法、加权平均法等。这里采用最大值隶属度方法，当在多个论域上同时出现隶属度最大值，取其平均值作为判决结果。这样得出的判决结果为输出论域上的一个具体论域值。要得到精确的控制量变化量，还要乘上相应的量化因子。

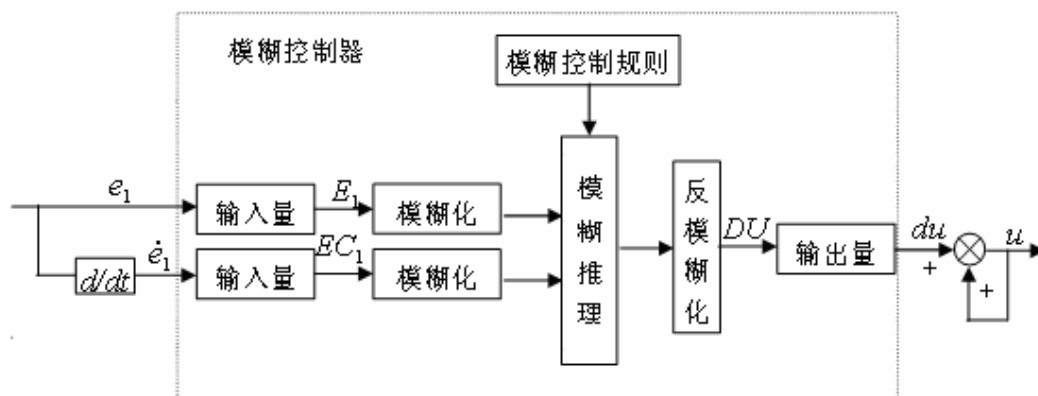


图 3.6 算法开发过程

### 3.3 本章小节

本章主要介绍了模糊控制算法的开发，通过输入量→模糊化→模糊推理→反模糊化→输出量的计算。以模糊控制算法为核心，在模糊控制模块中实现了模糊算法对实验系统的开发。通过 PC 机中开发的人机界面实现对模糊控制模块的控制，开发出了初始界面、工艺流程界面、变量记录、趋势显示界面。

## 4 实验平台及实验研究

### 4.1 实验的硬件设计

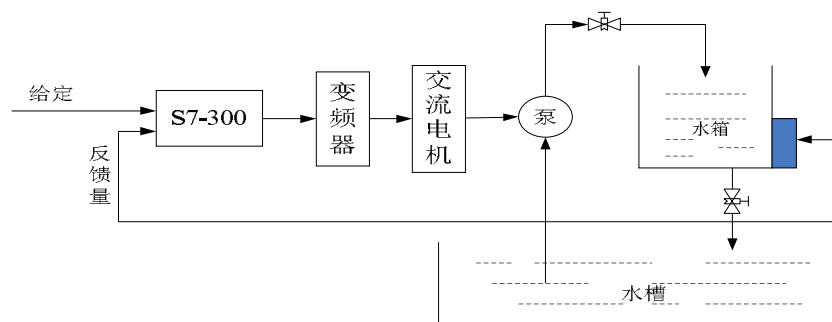


图 4.1 系统硬件结构简图

#### 4.1.1 平台的功能设计

本系统是通过 PC 机与 PLC 的数据线连接，PLC 对变频器的控制来控制整个系统。水箱水位高度信号经 A/D 转换进入 PLC 内，在运行过程中不断计算出  $e$  和  $ec$ ，根据这两个参数进行查表运算，实现对  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  三个参数的在线修改，然后由 PLC 运算后经 D/A 转换得出控制作用输出  $u$ ，通过  $u$  来控制变频器的输出，进而实现对水泵的转速控制，最终达到控制水位的目的。

本设计中开发一套完整的人机界面通过 PC 机的通讯协议连接到 PLC 中的输入模块，再与 PLC 实际控制机器设备。

硬件连接先如下图所示：

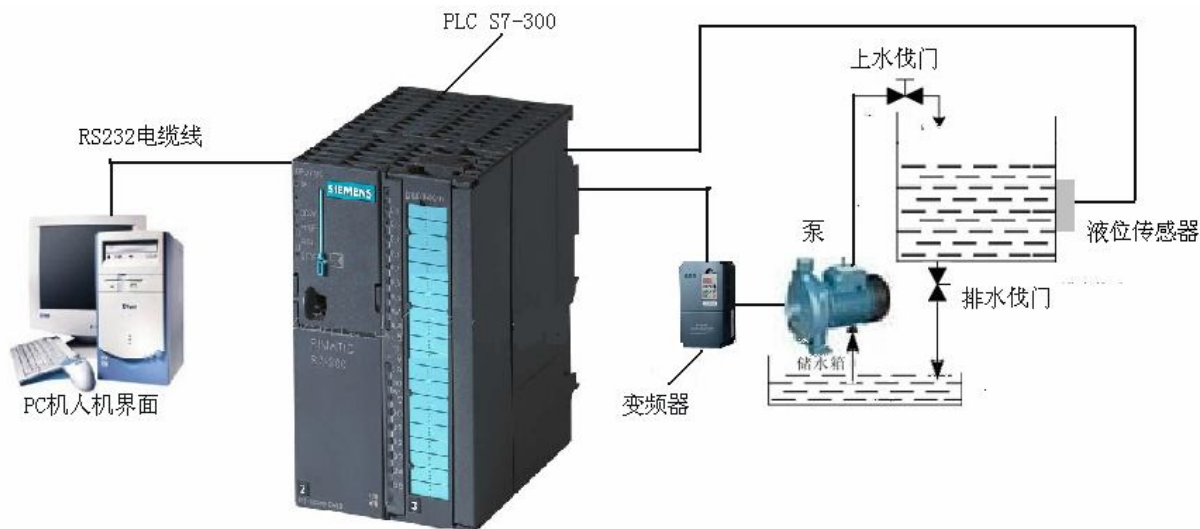


图 4.2 实物连接图

PC 机后的串联通讯接口用 RS232 电缆线连接，另外一端接 PLC 的输入端口。PLC 设备根据预先存放在 PLC 存储器中的程序计算出  $E$ ,  $E_c$ 。PLC 根据 I/O 输入输出对系统进行控制，经 A/D 转换后，输出端用电缆线连接到变频器。变频器改变泵的电压，从而控制泵的转速。改变转速能够使上水管道的流量改变，当流量增大时候，水箱液面高度升高，反之，水箱液面高度降低。水面高低对液面检测器影响，使它产生信号，反馈回 PLC，进行 D/A 转换后输入给 PLC 做为系统的输入。

## 4.2 实验

本设计中应用了模糊 PID 方式对实验系统进行了仿真控制，通过在 PLC 内部进行模糊 PID 的运算实现了对变频器的控制，并且绘制出了曲线。作为对比本设计又以经验设计出传统 PID 仿真做出了传统 PID 曲线。系统的比较了模糊 PID 控制算法和传统 PID 算法的优点。模糊 PID 控制的超调时间很短，而传统 PID 控制的超调时间比模糊 PID 超调时间长一些。在超调量上，模糊 PID 控制没有超调，传统 PID 有一定的超调量，这一点上模糊 PID 控制也优于传统 PID 控制。当系统趋于平稳后，模糊 PID 控制的曲线比较稳定，而传统 PID 控制还存在扰动，不稳定。综上所述，模糊 PID 控制无论在各个方面上都优于传统 PID 控制。

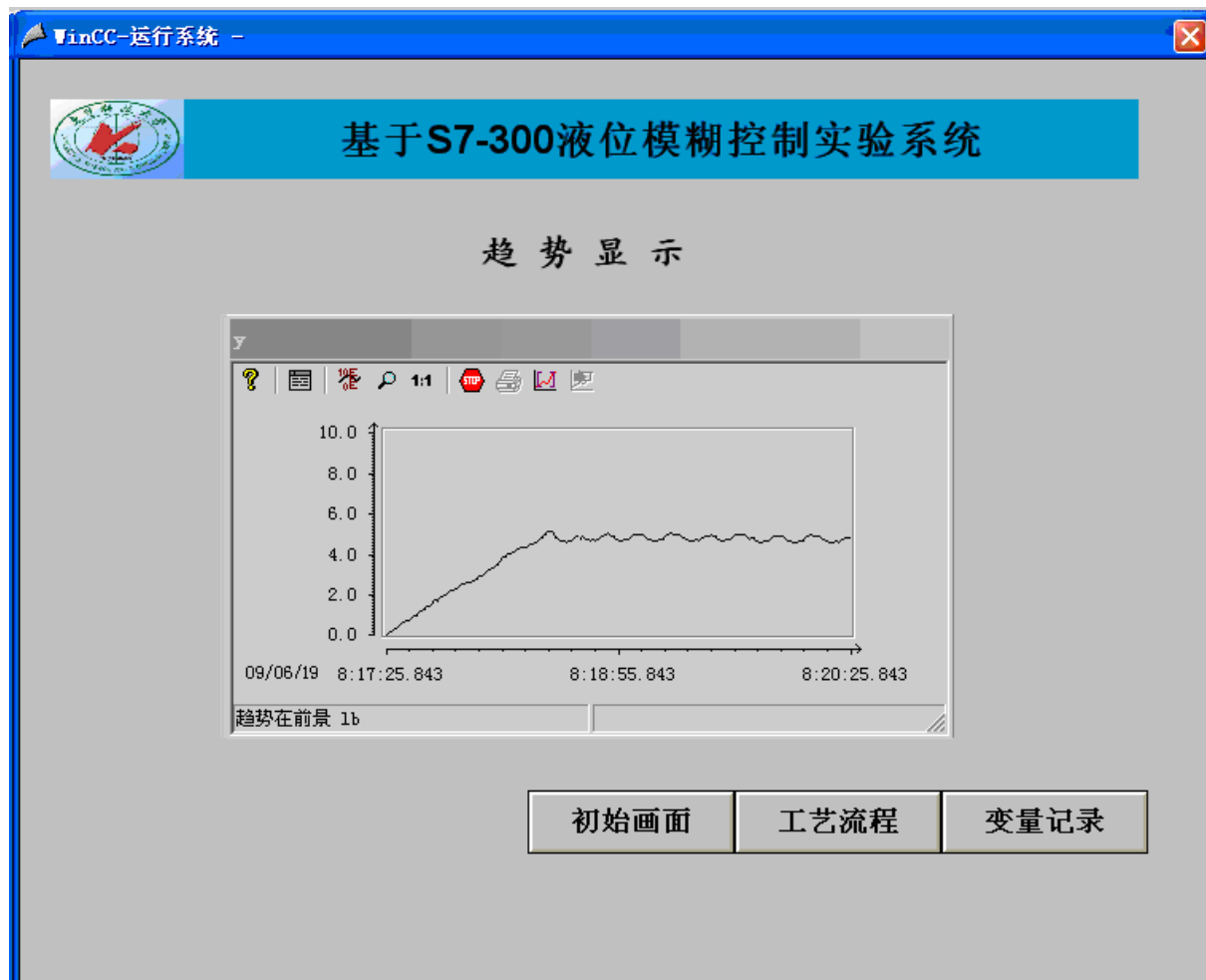


图 4.3 系统常规 PID 响应曲线

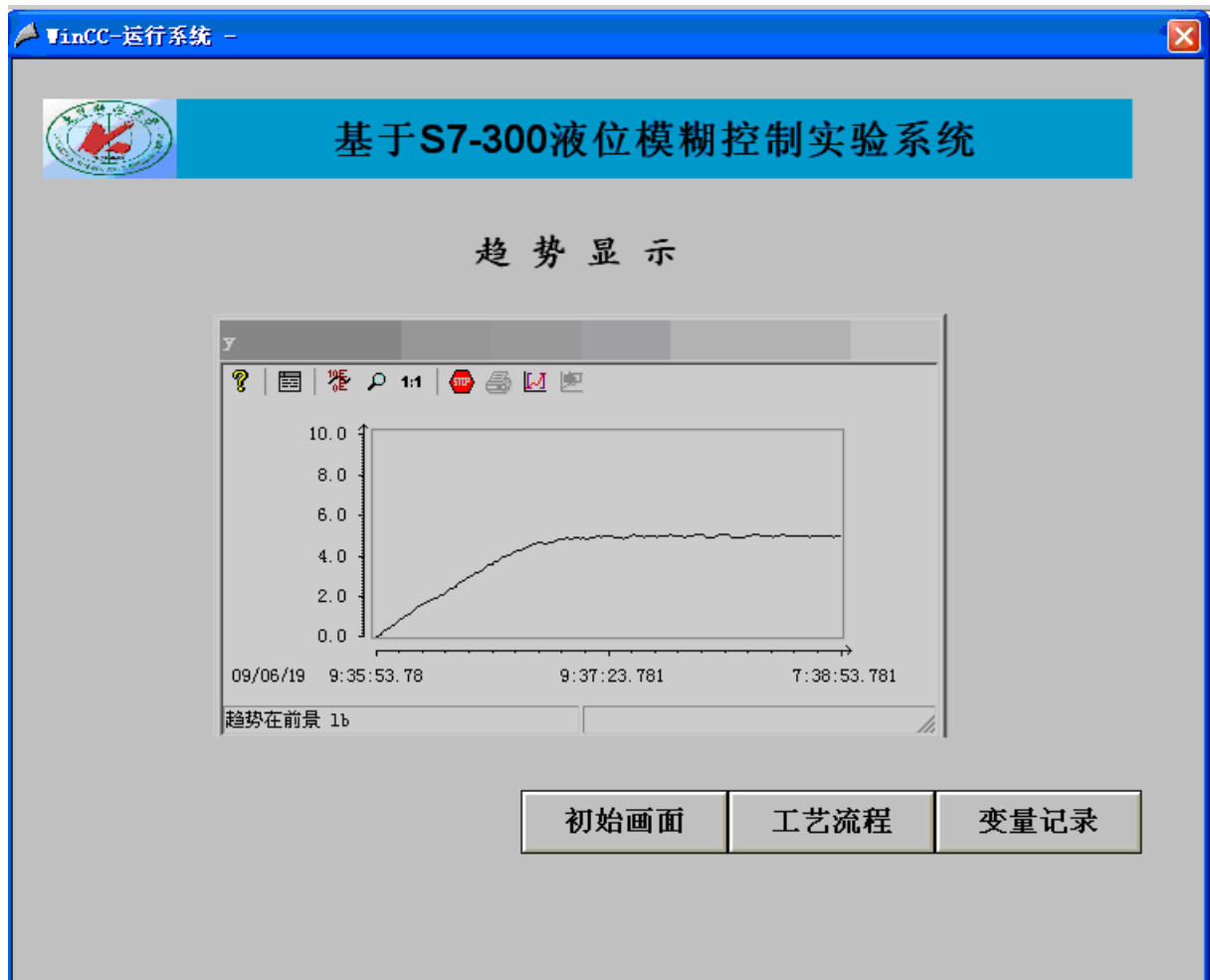


图 4.4 模糊 PID 控制响应曲线



## 结 论

本设计成功的实现 PLC 与仿真系统相结合,应用 WINCC 在 PC 机平台上控制 PLC 实现模糊 PID 控制。通过实际仿真系统的设计,成功的验证了 PLC 实现模糊 PID 控制的可行性。

本设计还通过传统PID控制与模糊PID控制的比较说明了,两者优缺点。本设计只是利用简单的模糊PID控制,深入研究还有多种方式的模糊PID控制如:模糊自适应PID控制、设定值迁移模糊PID控制器、模糊自适应PID控制器等。这些方法比简单的模糊PID更加优秀的控制系统,使系统更加稳定或是符合实际要求。

事实上,目前有关模糊控制的理论还是不完整的,在当前仅仅是模糊逻辑的极小一部分应用于模糊控制上,在模糊控制理论和应用方面,还有不少问题有待人们去深入研究。

## 致 谢

在我写此篇论文时，李应森老师给予了我极大的支持，在他耐心细心的指导下使我完成了本篇论文。对于模糊 PID 控制方面以前我了解的不是很多，有幸遇到李老师，是他给予我信心和帮助，而且他锻炼了我的主动动手能力，使我的动手能力有了很大提高。李应森讲师的知识渊博，严谨的工作态度都是我以后再学习和工作中非常值得学习的。

再次感谢李应森讲师在进行毕业论文工作中所给予的帮助。

## 参考文献

- [1]刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [2]孙增圻.智能控制理论与技术[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [3]叶军.模糊控制系统的计算机设计与仿真的研究[J].计算机仿真,2002,19(6):49-52.
- [4]庄利锋,杨慧中.模糊自适应 PID 控制器的设计及应用[J].自动化仪表,2005(1):30-31.
- [5]郑恩让.控制系统计算机仿真与辅助设计[M].西安:陕西科学技术出版社,2002.
- [6]黄道平 MATLAB 与控制系统的数字仿真及 CAD[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [7]陶永华.新型 PID 控制及其应用[M].第 2 版.北京:机械工业出版社,2005.
- [8]曾光奇,胡均安,王东,等.模糊控制理论与工程应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2006.
- [9]王三武,董金发.基于 MATLAB 模糊自整定 PID 控制器的设计与仿真[J].机电工程技术,2006(2):8-1077 第 3 期
- [10] Lyngby. Tuning of Fuzzy PID Controllers, Bldg 326, DK-2800[J]. DENMARK.Tech report No 98-H 871 , 30 Sep 1998,19-20.

## 附录 A (外文文献标题)

## Tuning Of Fuzzy PID Controllers

## Abstract

Since fuzzy controllers are nonlinear, it is more difficult to set the controller gains compared to proportional-integral-derivative (PID) controllers. This research paper proposes a design procedure and a tuning procedure that carries tuning rules from the PID domain over to fuzzy single-loop controllers. The idea is to start with a tuned, conventional PID controller, replace it with an equivalent linear fuzzy controller, make the fuzzy controller nonlinear, and eventually fine-tune the nonlinear fuzzy controller. This is relevant whenever a PID controller is possible or already implemented. The response of FLC is fast and stable in the dynamic state, then conventional linear PID controller guarantee zero-error in the steady state. As such, the system have good control performances.

## 1. Introduction

When the control problem is to regulate the process output around a set point, it is natural to consider error as an input, even to a fuzzy controller, and it follows that the integral of the error and the derivative of the error may be useful inputs as well. In a fuzzy PID controller, however, it is difficult to tell the effect of each gain factor on the rise time, overshoot, and settling time, since it is most often nonlinear and has more tuning gains than a PID controller. The objective in this paper is to find a systematic tuning procedure by carrying PID tuning rules over to the fuzzy domain. A systematic tuning procedure would make it easier to install fuzzy controllers, and it might pave the way for auto-tuning of fuzzy controllers.

PID controllers may be tuned in a variety of ways, including hand-tuning, Ziegler-Nichols tuning, loop shaping, analytical methods, by optimisation, pole placement, or autotuning (Smith, 1979; Åström & Hägglund, 1995). Furthermore, fuzzy controllers show similarities with PID controllers under certain assumptions (Siler & Ying, 1989; Mizumoto, 1992; Qiao & Mizumoto, 1996; Tso & Fung, 1997). But there is still a gap, it seems, between the PID tuning methods and a design strategy for fuzzy controllers of the PID type.

This paper proposes a design strategy, which makes use of known PID design ques, before

implementing the fuzzy controller:

1. Tune a PID controller
2. Replace it with an equivalent linear fuzzy controller
3. Make the fuzzy controller nonlinear
4. Fine-tune it

It seems sensible to start the controller design with a crisp PID controller, maybe even just a PID controller, and get the system stabilised. From there it is easier to go to fuzzy control. Each step will be investigated in the following.

## 2. Tuning a PID controller

The first step in the design strategy is to install and tune a PID controller. The ideal continuous PID controller

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

returns the controller output  $u$ , the constant  $K_p$  is the proportional,  $T_i$  is the integral time,  $T_d$  the derivative time, and  $e$  is the error between the reference and the process output  $y(e = Re f - y)$ . We are concerned with digital control, and for small sampling periods  $T_s$ , the equation may be approximated by a discrete approximation. Replacing the derivative term by a backward difference and the integral by a sum using rectangular integration, an approximation is

$$u_n = K_p \left( e_n + \frac{1}{T_i} \sum_{j=1}^n e_j T_s + T_d \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \right) \quad (2)$$

Index  $q$  refers to the time instant. By tuning we shall mean the activity of adjusting the parameters  $K_p, T_i$  and  $T_d$ .

Several tuning aspects may be illustrated by static considerations (Åström & Hägglund, 1995). For purely proportional control ( $T_d = 0$  and  $1/T_i = 0$ ), the control law (2) reduces to

$$u_n = K_p e_n \quad (3)$$

Consider the feedback loop in Fig 1, where the controller has the proportional gain  $K_p$  and the process has the gain  $K$  in steady state. The process output  $x$  is related to the reference  $Ref$ , the load  $l$ , and the measurement noise  $n$  by the equation

$$x = \frac{K_p K}{1 + K_p K} (Ref - n) + \frac{K}{1 + K_p K} l \quad (4)$$

If  $n$  and  $l$  are zero, then  $K_p$  should be high in order to ensure that the process output  $x$  is close to the reference  $Ref$ . Furthermore, if  $l$  is nonzero, a high value will make the system less sensitive to changes in the load  $l$ . But if  $q$  is nonzero  $K_p$  should be moderate, otherwise the system will be too sensitive to noise. If the process dynamics are considered, the closed loop system will normally be unstable if  $K_p$  is high. Obviously the setting of  $K_p$  is a balance between the control objectives: stability, noise sensitivity, and load regulation. A PID controller may be tuned using the Ziegler-Nichols frequency response method (Ziegler & Nichols in Åström & Hägglund, 1995).

#### Procedure Ziegler-Nichols

- (a) Increase the proportional gain until the system oscillates; that gain is the ultimate gain  $K_u$ .
- (b) Read the time between peaks  $T_u$  at this setting.
- (c) Table 1 gives approximate values for the controller gains.

The sample period may be related to the derivative gain  $T_d$ . Åström and Wittenmark (1984) suggest that the sample period should be between 1/10 and 1/2 of  $T_d$ . In connection with the Ziegler-Nichols rules, this implies that  $T_s$  should approximately equal 1/5 percent of the ultimate period  $T_u$ . Another rule says that it should be chosen somewhat smaller than the dominating time constant in the process, for instance between 1/10 and 1/5 of that time constant.

Ziegler and Nichols also give another method called the reaction curve or step response method (see

for example Åström & Hägglund, 1995). That method uses the open loop step response to find the gains, and this is an advantage if oscillations in the closed loop system cannot be tolerated.

Ziegler and Nichols derived the rules for a linear system with a time lag and an integrator. Their design criterion is to obtain a decay ratio of one quarter; decay ratio is the ratio between two consecutive peaks of the error after a step change in reference or load. Thus in a quarter-decay response the second overshoot is 25 % of the first - a compromise between a fast response and a small overshoot. The results are poor for systems where the time lag is much greater than the dominating time constant. In general, the rules often result in rather poor damping, but they do provide the right magnitude of the gains.

A related, more accurate method is Kappa-Tau tuning based on the dimensionless parameters: relative gain  $k$  and relative deadtime  $\tau$  (Åström & Hägglund, 1995; Åström, Hang, Persson & Ho, 1992).

The gains found by either method, must sometimes be regarded as approximate values, a starting point for a hand-tuning. Hand-tuning is based on certain rules of thumb used by experienced process engineers (Table 2). The tuning is a compromise between fast reaction and stability. There are exceptions to the rules in the table. If, for example, the process contains an integrator, an increase in  $N_s$  often results in more stable control. The rules of thumb may also be illustrated in tuning maps (see, e.g., Åström & Hägglund, 1995). The following is a hand-tuning procedure adapted from Smith (1979).

Procedure Hand-tuning.

- (a) Remove all integral and derivative action by setting  $T_d = 0$  and  $1/T_i = 0$ .
- (b) Tune the proportional gain  $K_p$  to give the desired response, ignoring any final value offset from the set point.
- (c) Increase the proportional gain further and adjust the derivative gain  $T_d$  to dampen the overshoot.
- (d) Adjust the integral gain  $1/T_i$  to remove any final value offset.
- (e) Repeat until the proportional gain  $K_p$  is as large as possible.

The procedure adjusts the derivative gain before the integral gain, but in practice the sequence may be reversed. The advantage of hand-tuning is that a process engineer can use the procedure right away, on-line, and develop a feel for how the closed loop system behaves. A disadvantage is that it may take a long time to develop this feel, and it is difficult to sense whether the final settings are optimal.

Fuzzy Logic is basically a multi-valued logic that allows intermediate values to be defined between conventional evaluations like yes/no, true/false, black/white, etc. Notions like rather warm or pretty cold can be formulated mathematically and processed by computers. In this way an attempt is made to apply amore human-like way of thinking in the programming of computers.

Fuzzy logic is a superset of conventional (Boolean) logic that has been extended to handle the concept of partial truth - truth values between "completely true" and "completely false". It was introduced by Dr. Lotfi Zadeh of U.C. Berkeley in the 1960's.

Fuzzy logic is a way of interfacing inherently analog processes, which move through a continuous range of values, to a digital computer, that likes to see things as well-defined discrete numeric values.

For example, consider an antilock braking system, directed by a microcontroller chip. The microcontroller has to make decisions based on brake temperature, speed, and other variables in the system.

The variable "temperature" in this system can be divided into a range of "states": "cold", "cool", "moderate", "warm", "hot", "very hot". The transition from one state to the next is hard to define. An arbitrary threshold might be set to divide "warm" from "hot", but this would result in a discontinuous change when the input value passed over that threshold.

The way around this is to make the states "fuzzy", that is, allow them to change gradually from one state to the next.

The input variables in a fuzzy control system are in general mapped into by sets of membership functions similar to this, known as "fuzzy sets".

A control system may also have various types of switch, or "ON-OFF", inputs along with its analog inputs, and such switch inputs of course will always have a truth value equal to



either 1 or 0, but the scheme can deal with them as simplified fuzzy functions that are either one value or another.

Given "mappings" of input variables into membership functions and truth values, the microcontroller then makes decisions for what action to take based on a set of "rules", each of the form:

IF brake temperature IS warm AND speed IS not very fast

THEN brake pressure IS slightly decreased.

In this example, the two input variables are "brake temperature" and "speed" that have values defined as fuzzy sets. The output variable, "brake pressure", is also defined by a fuzzy set that can have values like "static", "slightly increased", "slightly decreased", and so on.

This rule by itself is very puzzling since it looks like it could be used without bothering with fuzzy logic, but remember, the decision is based on a set of rules:

- All the rules that apply are invoked, using the membership functions and truth values obtained from the inputs, to determine the result of the rule.
- This result in turn will be mapped into a membership function and truthvalue controlling the output variable.
- These results are combined to give a specific ("crisp") answer, the actual brake pressure, a procedure known as "defuzzification".

This combination of fuzzy operations and rule-based "inference" describes a "fuzzy expert system".

Traditional control systems are based on mathematical models in which the control system is described using one or more differential equations that define the system response to its inputs. Such systems are often implemented as "PID" (proportional-integral-derivative) controllers. They are the products of decades of development and theoretical analysis, and are highly effective.

If PID and other traditional control systems are so well developed, why bother with fuzzy control? It has some advantages. In many cases, the mathematical model of the control process may not exist, or may be too "expensive" in terms of computer processing power and memory, and a system based on empirical rules may be more effective.

Furthermore, fuzzy logic is well suited to low-cost implementations based on cheap sensors, low-resolution analog-to-digital converters, and 4-bit or 8-bit onechip microcontroller chips. Such systems can be easily upgraded by adding new rules to improve performance or add new features. In many cases, fuzzy control can be used to improve existing traditional controller systems by adding an extra layer of intelligence to the current control method.

## 附录 B (中文译文标题)

### 模糊 PID 复合控制器

#### 摘要

模糊控制器是非线性的,与 PID 控制器的控制相比确实是复杂一些。这篇论文提出了一种新的设计过程和调节过程,从 PID 控制领域到模糊单循环控制器的协调过程。主要想法是在开始调试常规 PID 控制器时,用等效非线性模糊的控制器与 PID 控制器相互切换,并且最终优化非线性模糊控制器。这与 PID 控制器是否已经开始运行是密切相关的。系统响应在暂态时有着模糊控制器的快速性和稳定性的特点,稳态时由线性 PID 控制器来保证它的高精度特性,因而系统有着较好的控制性能

#### 1. 引言

在过渡时间和超调量方面,模糊控制比 PID 控制的控制效果要好的多,但是在上升时间和稳态精度方面,模糊控制却不如 PID 控制。然而,在模糊 PID 复合控制器中,它难以保证作用在上升时间,设定时间和超调量的各个因素,因为它是传统非线性的,具有较大超调量的 PID 控制器。在本设计中客观的发现了一个系统协调的方法。由于模糊控制器的输入是误差、误差微分和误差积分的线性函数,模糊推理的规则数仅仅取决于单变量输入的模糊子集的划分。因此,模糊控制器的复杂性大大降低,但是,由于它的输入量是线性组合,模糊控制器的设计自由度减小,模糊控制器的控制效果将降低。

PID 控制器参数的整定存在着许多的经验公式和整定方法,包括手动调整和 ZN 法调节等方法。(史密斯,1979 年;8Astr5om & H5agglund,1995)。此外,模糊控制器的显示与 PID 控制器在某些方面具有相似性(Siler & Ying,1989 年;Mizumoto 1992 年;Qiao & Mizumoto,1996 年;Tso & Fung,1997)。PID 整定方法和设计方法取决于模糊 PID 控制器的类型,但是仍然存在缺陷。

本设计提出利用传统的 PID 的设计方法来设计模糊控制器,步骤如下:

- (1)整定 PID 控制器;
- (2)用线性模糊控制器替换 PID 控制器;
- (3)使模糊控制器非线性化;
- (4)优化模糊控制器;

把传统线性 PID 和模糊控制各自长处结合起来,可使系统的动、静态性能均可得到提高。在模糊控制器设计上,如何选取隶属度函数、规则的描述、解模糊及结构的

选取以进一步提高系统响应快速性和稳定性；如何将两者协调的结合在一起均有很大的研究空间。

## 2. 调节 PID 控制器

设计方法的首要步骤是安装并且调节 PID 控制器。理想的线性PID控制器的数学模型为：

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

理想的线性 PID 控制器的输出为  $u$ ，比例系数为  $K_p$ ，积分时间为  $T_i$ ，响应时间为  $T_d$ 。

这种简明的控制分量和独立整定方法对于工程应用操作是十分方便的。对于不同的被控对象只要适当地整定 PID 三个参数，可以获得满意的控制效果，实际上它是对比例、积分和微分三部分控制作用的折中。实践表明，PID 控制有着高精度的稳定特性，但系统参数变化时，PID 控制动态特性较差。

控制定律为：

$$u_n = K_p e_n$$

### • 整定方法—ZN 法整定

- (a) 增加比例系数直到系统稳定；最后得出稳定值时的  $K_u$ 。
- (b) 待系统运行稳定后，计算两个波峰间的时间。
- (c) 求出调节器各整定参数。

采用 Ziegler—Nichols 法整定时，控制系统应工作在线性区，否则得到的持续振荡曲线可能时极限环，不能依据此时的数据来计算整定参数。

应当指出，由于被控对象特性的不同，按上述经验公式求得的调节器整定参数不一定都能获得满意的结果。实验证明，用 Ziegler—Nichols 法求得的调节器参数往往使系统响应衰减率偏大。为此，上述求得的调节器参数，需要针对具有系统在实际运行过程中做在线校正。

这是一种闭环的整定方法。它基于纯比例控制系统临界振荡试验所得数据，即临界比例带，利用一些经验公式，求取调节器最佳参数值。注意，在采用这种方法时，控制系统应工作在线性区，否则得到的持续振荡曲线可能是极限环，不能依据此时的数据来计算整定参数。

应当指出, 由于被控对象特性的不同, 按上述经验公式求得的调节器整定参数不一定都能获得满意的结构。实践证明, 对于无自平衡性的对象, 用稳定边界法求得调节器参数往往使系统响应的衰减率偏大; 而对于有自平衡特性的高阶等对象, 用此法整定调节器参数, 系统响应的衰减率大多偏小。为此, 上述求得的调节器参数, 需要针对具体系统在实际运行过程中做在线校正。

#### • 手动调节

- (a) 设  $T_d = 0$  和  $1/T_i = 0$ , 去掉所有的积分和微分作用。
- (b) 调节比例参数  $K_p$  得到期望的响应, 忽略终值和设定值之间的偏差。
- (c) 进一步增加比例增益, 调整微分增益  $T_d$  以便减小超调量;
- (d) 调整积分增益  $1/T_i$  的值, 去除终值静差;
- (e) 重复调整过程, 使比例增益  $K_p$  尽可能大。

模糊逻辑基本上是允许中间值被定义在常规评估之间。模糊控制是以模糊集合论、模糊数学、模糊语言形式的知识表示和模糊逻辑的规则推理为理论基础, 是采用计算机控制技术构成的一种具有反馈通道的闭环结构的数字控制系统。经过多年的发展, 在模糊控制理论和应用研究方面均取得重大成功。模糊控制不依赖于被控对象的数学模型, 而是在总结经验操作的基础上实现自动控制的一种手段, 它根据人工控制规则组织控制决策表, 然后由该表决定控制量的大小。其组成核心是具有智能性的模糊控制器, 这也是它与一般的PID在原理和方法上完全不同之处。

模糊控制器和常规的(PID调节器)相比具有无须建立被控对象的数学模型, 对被控对象的时延, 非线性和时变性具有一定的适应能力等优点。同时对噪声也具有较强的抑制能力, 即鲁棒性较好。但它也有需要进一步改进和提高的地方。模糊控制器本身消除系统稳态误差的性能比较差, 难以达到较高的精度。尤其时在离散有限论域设计时更为明显。

常用的模糊控制器有单输入单输出型和两输入单输出型, 为了提高控制精度和速度, 拟采用两个输入为偏差和偏差变化率、控制对象输出的两输入单输出控制方式。另外, 为了使控制器响应较快, 在偏差较大时利用PID 控制使输出较快的接近目标值。因此, 采用了PID 与模糊控制分段控制的策略。在这里, 模糊控制器的实现由实测值的模糊化、

模糊关系矩阵的求取和模糊决策三部分组成。

模糊控制是近十几年来迅速发展的一项技术,与神经网络及专家控制并称为智能控制,但由于其简单实用,目前已成功应用于各种控制系统中。模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数学控制方法,属于非线性控制方法。由于引入专家的逻辑思维方式,使得模糊控制器具有一定的自适应控制能力,因而特别适用于难于用精确数学模型描述的系统,并且有很强的鲁棒性和稳定性。本设计针对常见的一阶大惯性环节温控对象,设计出一种PID控制与模糊控制(FLC)相结合的控制系统,可以取得良好的控制效果。

传统控制系统是以系统的数学模型为基础的,数学模型常常是定义输入到输出的一个或多个微分方程。这样系统通常被称为PID控制器。他们经过数十年的发展和理论分析,已形成产品并且具有非常高效的性能。

如果PID和其它传统控制系统性能非常好,为什么还采用呢?模糊控制有很多优点。在许多情况下,控制过程的数学模型不存在,或者可能是太复杂,计算机处理能力不能满足要求,并且系统根据经验规则来设计也许是更加有效的。

此外,模糊逻辑很适合低价的传感器和低分辨率的模数转换器,以及4位或8位微处理器芯片。这样系统可以通过添加新规则而很容易的更新,从而提高性能或增加功能。在许多情况下,模糊控制可以用于改善传统控制器的性能,只要给现有的控制方法增加一个额外的智能层即可。

## 附录 C (其它附录资料标题)

