

## 摘 要

本文针对含有时滞的工业过程控制问题,吸取了系统辨识与建模、内模控制、模糊系统与模糊控制、工业自动化等相关领域的研究成果,提出将内模控制和模糊控制算法并行结合针对滞后过程实施控制,并将其应用于一个纯滞后电加热炉的实时温度控制。仿真运行与实际试验结果均表明了这一控制策略的有效性,且控制系统不需要经过很复杂的在线计算与编程,对硬件要求较低,其控制效果能够满足系统的要求,为工业生产中普遍存在的复杂时滞过程控制提供了借鉴,具有一定的实际应用价值。

本文主要取得了以下研究成果:

理论方面:分别针对内模控制和模糊控制的优缺点,提出将模糊控制和内模控制并行相结合应用于纯滞后工业过程控制;进一步从模糊控制系统的性质与稳定性分析、内模控制系统的性质与优点等方面论证了此控制策略的可行性,并结合MATLAB仿真软件的运行结果做了分析。

应用方面:基于可编程逻辑控制器实现了离散内模控制系统与在线查表式模糊控制系统的并行控制方案,在纯滞后电加热炉温度控制中的应用证实了其控制效果优于原先的控制策略,积累了一些将先进控制与智能控制在实际生产中的应用经验。

关键词: 内模控制, 模糊控制, 模糊内模, 电加热炉, 温度控制, 控制限幅

## Abstract

Aimed at solve the problem of dead time system control, this paper proposed a method that utilized internal model control and fuzzy control together to get a better performance. The scheme was realized based on programmable logical computer and was applied to a electrical heating furnace with dead time. Study show better results could be achieved compared to common control methods in the face of dead time system and could be widely used in industry process.

The main contents of this paper are as follows:

Theoretical achievements:

To the questions of advantages and disadvantages of fuzzy control and internal model control, this paper proposed a hybrid scheme combine the fuzzy control and internal model control. Furthermore, the feasibility of this scheme was demonstrated by stability analysis of fuzzy control and advantages of internal model control. Then provide the simulation results of MATLAB.

Practical developments:

Realized the design of discrete internal model controller and fuzzy controller based on programmable logic computer(PLC). Subsequently applied this scheme to a dead time electrical heating furnace and got better control results compared to original common control schemes. And some experiences of realize of advantage control is accumulated.

**Keyword:** internal model control, electrical heating furnace, fuzzy internal model, fuzzy control, dead time process

Written by Zhang Hongxing

Directed by Professor. Li Ming

Major in Chemical Process Mechanical

Environmental & Chemical Engineering School of Nanchang University

## 独创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，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，也不包含为获得 南昌大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：张红星 签字日期：2006年6月8日

---

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 南昌大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 南昌大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：张红星

导师签名：李

签字日期：2006年6月8日

签字日期：2006年6月8日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

纯滞后过程是一类在石油、化工、冶金、制药、酿造等工业生产中广泛存在的复杂被控对象。一般来讲,产生纯滞后主要是由于以下几方面的原因<sup>[1]</sup>:

- ① 物料及能量在管道或容器中的传输及运送需要一定的时间;
- ② 物质反应及能量交换需要一定的过程;
- ③ 多个设备串联在一起;
- ④ 测量装置的时间滞后;
- ⑤ 执行机构的动作需要一段时间。

纯滞后过程的控制问题一直是工业控制理论研究的重点和难点之一。对于此类过程,因为当前施加的控制作用,需要经过一段滞后时间才会在输出中反映,所以困难就在于怎样选择一个合适的控制量,使系统未来的输出恰是所希望的形式<sup>[2]</sup>。工业过程实际上大多是多变量复杂的动态过程,描述过程的数学模型与实际过程之间存在误差,从而使得控制起来更加困难。另一方面,当对象受到干扰而引起控制量的改变时,控制器产生的控制作用并不能立即对干扰产生抑制作用。因此,含有纯滞后环节的闭环控制系统一般会存在较大的超调量和较长的调节时间,纯滞后过程也因此而成为难以控制的对象,而且,纯滞后时间占整个动态过程的时间越长,难以控制的程度越大<sup>[3]</sup>。

其次,由于工业过程大多为复杂的动态过程,使得描述过程的数学模型总是与实际过程的模型存在较大的误差,从而将一些基于模型的先进控制策略实施起来更加困难,因此纯滞后过程的控制问题一直是困扰着工业自动控制和计算机应用领域的一大难题<sup>[2]</sup>。所以,寻找对此类过程的有效控制方法具有积极的理论意义和广泛的实用价值。几十年来,对纯滞后、不确定、有非线性特征的工业过程的控制策略与机理研究一直受到相关领域学者的重视,并在理论上和应用上取得了较大进展。

## 1.2 纯滞后过程控制策略研究

近年来,国内外的学者与工程技术人员在时滞过程控制方法与应用方面均做

了大量研究,取得了相当的进展。其控制策略也已经由经典控制理论转到了先进控制理论或智能控制理论,或者是二者的结合。

然而,在自动控制领域,由于种种原因导致理论与实际相脱节的问题比较严重。许多理论上可行的算法还不能应用于实际生产。故以下仅从实际应用出发,介绍几种在工业上应用较多的时滞过程控制策略:

### 1.2.1 PID控制

众所周知,PID控制是迄今为止应用最广泛的一种控制算法。其优点是原理直观、通用性强且使用简便。应用PID控制的一个关键问题是PID控制参数的设置和整定,它应使系统达到满意的控制品质。常见的参数整定方法有:衰减曲线法、临界振荡法(Z-N法)等<sup>[5][6]</sup>,其研究和应用已发展得相当成熟。

然而,PID在纯滞后系统中的应用是有一定限制的。对于滞后时间较大的被控过程(即 $\tau/T \geq 0.3$ 时),常规PID控制往往无能为力,很难取得较好的控制效果。已经证明,在一定的条件下,PID控制器可以和Smith预估器等价<sup>[7]</sup>,也可以和Dahlin控制器等价,而PID控制的一些优点还吸引着许多研究者,探讨将它与其它方法相结合来改善时滞过程的控制效果。此外,合理地调整PID参数也可以达到滞后补偿的作用,其参数整定是否恰当对于过程控制效果有很大影响,特别在有较大时滞的过程更是如此。过程参数的不确定性和多变性,要求PID控制器的参数也应与之对应,因此,在时滞不太严重时,PID参数自适应可成为一种较好的控制方法。

基于经典理论的PID控制能够解决工业生产过程中约80%以上的控制问题,但在被控对象具有一定的非线性、较大纯滞后、大惯性等特征时,一般的PID控制就很难取得满意的控制效果,其参数整定也是个较难解决的问题。

### 1.2.2 Smith预估控制及其改进算法

O.J.M.Smith在1958年提出预估补偿控制器<sup>[8]</sup>,这是一个专门针对时滞过程的预估补偿算法。它通过估计对象的动态特性,用一个预估模型进行补偿,从而得到一个没有时滞的被调节量反馈到控制器,使得整个系统的控制犹如没有时滞环节。

Smith控制的结构是在常规的控制器 $G_c(s)$ 上并联一个时滞预估器,从而构

成了 Smith 预估控制器。当预估模型完全准确时，该系统闭环特征方程为

$$1+G_c(S)G_p(s)=0 \quad (1-1)$$

Smith 预估控制系统最大的优点是能够将时滞环节移到闭环之外，从而使控制品质得到较大提高。但是，其最大的缺点就是过于依赖精确的数学模型，当估计模型和实际对象稍有误差时，其控制品质就会显著恶化，甚至发散，且对于外部扰动也非常敏感，鲁棒性较差。所以，一般的 Smith 预估控制系统难以在实际的应用中得到较好的控制效果<sup>[4]</sup>。

为了解决这个问题，很多学者提出了基于常规 Smith 预估控制器的各种改进方法<sup>[4]</sup>，大致可以分为以下两种：

一种是基于结构上的改进，它们结合智能控制的各种方法，即通过在不同位置增加一些并联或者串联的环节进行补偿。C.C.Hang 在结构上进行改进，提出了一种改进型的 Smith 预估器，其主反馈通道传递函数为

$$G(s)=\frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} \quad (1-2)$$

这样实际上是在反馈通道中加了一个滤波器，理论分析和实践证明，该方法的稳定性和鲁棒性比原来的 Smith 预估系统要好，它对对象的模型精度要求明显地降低了，控制品质也得到了很大的改善。但是当过程参数变化时，滤波器的参数也要调整，否则不能适应当前的系统<sup>[10]</sup>。

还有一种是在参数整定上的改进，例如文[12]提出了一种 Smith 预估器解析设计方法，用现代鲁棒控制理论结合对时滞项的 Taylor 展开来对 Smith 预估器进行优化设计，这种设计方法较原来的 Smith 预估器有更好的鲁棒性。但由于这些方法计算较为复杂，而且对实际控制系统的适应能力也不是很强，因此在实际中的改进方案不是很多，应用范围有限。

### 1.2.3 模糊控制

在先进控制策略不断被提出的同时，自动控制理论不断地与其它学科相互交叉、相互渗透，向纵深方向发展，形成了以智能控制为代表的第三代控制理论<sup>[13]</sup>，实现了对传统方法难以控制的复杂工业过程的优化控制。

其中，模糊逻辑控制是一种应用十分广泛的智能控制策略。它以语言而非数值来归纳操作者的经验积累，运用语言变量和模糊逻辑推理形成控制算法。采用

模糊控制算法时不需要知道被控对象的精确数学模型,因而对于无法建立数学模型或建模较难的工业过程控制,其控制效果是非常突出的。模糊控制系统的核心就是由所谓的IF—THEN规则组成的知识库<sup>[11]</sup>。

在时滞系统中,模糊控制一般是针对误差和误差变化率而进行的,将输入变量的精确值模糊化,根据输入变量和模糊控制规则,按照模糊推理合成规则计算控制量,再将它反模糊化,得到精确输出去控制过程。其中,模糊控制规则是最重要的,应该根据控制系统的实际情况来制定,对控制产生的效果影响很大。

模糊算法用在时滞系统中是非常适用的,因为时滞系统的难以定量化和不确定性决定了它需要采用不确定的处理手段。但是,如果用传统的模糊控制器来控制大时滞、大惯性系统时,在响应曲线的稳态误差较小时容易出现振荡,会存在稳态误差<sup>[4]</sup>。因此,在实际应用中一般需要将模糊控制与其他控制方法结合起来或加以改进才能达到较理想的控制效果。

#### 1.2.4 内模控制

随着计算机在工业过程控制的广泛应用,一些新型的控制方案和算法也不断得到应用,但这些方案和算法大都依赖于对象的精确数学模型。而在许多的实际工业过程中,精确的数学模型常常难以得到。

在这种状况下,人们开始寻求一些对模型精度要求较低、在线计算方便、时滞控制效果较好的控制方案。其中,内模控制(IMC)、模型算法控制(MAC)和动态矩阵控制(DMC)等一些控制算法就是在这—形势下发展起来的<sup>[9]</sup>。内模控制与常规反馈控制系统相比,主要区别是在内模控制系统中引入了被控制对象的模型 $G^{\wedge}(z^{-1})$ (即内模环节)<sup>[19]</sup>,这是内模控制的基本特征。它们有的采用容易检测的对象脉冲响应作为模型,有的是采用对象阶跃响应作为模型,即非参数模型。在采用非参数模型以后,相应地,其控制器的设计与参数模型的控制器设计相比也要发生变化,以获得所期望的动、静态特性。

内模控制<sup>[14-18]</sup>产生的背景主要有两个方面:一是为了对当时提出的两种预测控制算法MAC和DMC进行系统分析;其次是作为Smith预估器的一种扩展,使其设计更为简便,鲁棒性及抗干扰性得到改善。

自面世以来,内模控制在工业过程获得了较为广泛的应用,并且表现出了在控制系统的稳定性和鲁棒性方面的优势。它与经典PID控制相比,仅有一个整定

参数需要调节；参数调整与动态品质和鲁棒性的关系较明确；特别是对于大时滞系统的控制效果尤为显著，其鲁棒性及抗干扰性也得到大幅改善。因此，自从其产生以来，内模控制不仅在慢响应的过程控制中获得了大量应用，在快响应的电机控制中也能取得了比 PID 更为优越的效果。

经过十多年的发展，IMC 方法不仅已扩展到了多变量和非线性系统，还产生了多种设计方法。较典型的有零极点对消法、预测控制法、针对 PID 控制器设计的 IMC 法、有限拍法等。值得注意的是，目前已经证明，成功应用于大量工业过程各类预测控制算法在本质上都属于 IMC 类，在其等效的 IMC 结构中特殊之处只是其给定输入采用了未来的超前值(预检控制系统)，这不仅可以从结构上说明预测控制为何具有良好的性能，而且为其进一步的深入分析和改进提供了有力的工具<sup>[9]</sup>。

但是，由于在设计内模控制器时必须已知被控对象的数学模型，其控制器由内部模型的逆构成，通常实现起来较困难；而且，在实际生产中应用内模控制时会遇到控制量受限问题，如果仅将内模控制器输出的控制量经过简单限幅后输送到执行机构，那么就相当于在系统中引入了非线性环节，会使控制的效果显著下降<sup>[39]</sup>，这些因素在一定程度上制约了内模控制的广泛应用。而 IMC 与其他控制方法的结合非常容易，因此许多学者开始在这个方向开始研究和探讨。R.Gorez 在 1992 年提出将模糊控制与内模控制结构相结合<sup>[20-21]</sup>，1997 年，W.F.Xie 等人<sup>[22]</sup>在此基础上提出了一种混合型模糊内模控制方法，他们虽然在仿真上取得了较好的控制效果，但大多没有进行工业过程的实时控制。潘立登等<sup>[23]</sup>研究了 IMC PID 鲁棒控制器的设计及其在蒸馏装置上的应用，提出了一种简便的闭环系统辨识算法，与 IMC PID 鲁棒控制器设计结合起来，并开发了一个软件包，将它用于某厂常减压蒸馏 DCS 装置上，使控制系统性能与鲁棒性大为提高，取得很好的控制效果。文<sup>[24]</sup>针对非线性对象，提出一种线性化模糊内模自适应控制算法，也取得了较好的仿真效果。刘瞰东等人对不确定时滞系统，提出了一种新的模糊内模预估控制方法<sup>[25]</sup>，它的最大特点是采用智能化的模糊模型预估器作为被控过程的内部模型，对实际输出起预测作用，从而克服时滞对系统带来的不利影响。同时，根据预测误差建立模糊内模控制器，在线修正、补偿被控过程的模型失配。其数字仿真和电阻炉温度实时控制结果表明，这种控制方法优于常规控制方法，有一



定的实用前景。但是以上控制策略在实际应用时,编程应用的工作量很大,实现成本较高,对硬件也有一定的配置要求。

### 1.2.5 预测控制

预测控制是在 20 世纪 70 年代提出的。最早应用的预测控制算法有 1978 年 Richalet、1982 年 Mehra 等提出的,建立在非参数模型脉冲响应基础上的模型预测启发控制(MPHC)<sup>[27]</sup>,或称为模型算法控制(MAC)<sup>[28]</sup>,以及 1980 年 Culter 等提出的建立在非参数型阶跃响应基础上的动态矩阵控制(DMC)<sup>[29]</sup>等。这类算法用来描述过程动态行为的信息是直接从生产现场检测到的过程响应(即脉冲响应或阶跃响应),无须事先知道过程模型的结构和参数的有关先验知识,也无须通过复杂的系统辨识来建立过程的数学模型,只是根据某一优化指标设计控制系统,确定一个控制量的时间序列,使未来一段时间内被调量和经柔化后的期望轨迹之间的误差为最小。从而,基于脉冲响应或阶跃响应非参数模型设计的预测控制算法具有建模方便、滚动优化、模型误差反馈校正 3 个基本特征。此外,由于采用了多步预测的方式,扩大了反映过程未来变化趋势的信息量,因而能克服各种不确定性、大滞后等复杂的影响,使预测控制具有较高的鲁棒性。预测控制与内模控制(IMC)<sup>[14]</sup>、推理控制(IC)<sup>[30]</sup>这类算法在控制结构上有着密切的联系,预测控制具有内模控制结构,应用内模控制结构分析预测控制系统,有利于从结构设计的角度理解预测控制的运行机理,可进一步利用它来分析预测控制系统的闭环动态特性、稳定性和鲁棒性。内模控制结构为预测控制的深入研究提供了一种新方法。国内学者自 20 世纪 80 年代以来,在预测控制新算法及全局收敛性等方面的理论研究<sup>[31-35]</sup>取得了丰硕的成果,在应用方面<sup>[36-38]</sup>也取得一些进展。但总体来说,将预测控制用于工业控制还处于起步阶段,面临的问题还很多,尚有许多工作要进一步展开。

## 1.3 含时滞过程控制的发展趋势

以上列举了几种时滞过程控制理论,很多工程技术人员尝试着把各种控制方法应用到工程实际中去。有一些是把各种改进的 Smith 预估器进行了一些工程应用,以克服控制理论和工程实际严重脱节的不足。这些应用的结果初步说明了一些针对时滞过程的控制方法的有效性和实用性,但目前的应用状况表明控制方法

还是比较单一的,范围也不够广,控制品质尚需技术人员不断地维护,很多在理论上效果颇为有效的方法还不能真正实际应用在工业过程中<sup>[4]</sup>。

在基于参数模型的控制方法中,Smith 预估控制法是最经典和最成熟的方法。它不仅对设定值和外部扰动输入的稳态误差为零,还可以结合很多智能控制方法形成各种改进的智能 Smith 预估系统来提高控制的品质。除此之外,还可以推广到多变量时滞系统,针对状态滞后和控制滞后都可以进行各种最优设计。

然而,对于时滞系统的模型不确定性和干扰的不可知性,非参数模型显得更为有效,其中模糊控制和神经网络控制可以发挥很大的作用。神经网络有学习与适应不确定性动态特性的能力,并且具有很强的鲁棒性和容错性;模糊控制理论具有处理不精确信息的能力,从而使模糊控制能模仿人的经验对复杂被控对象进行专家式的控制。对于那些时变的、非线性的复杂系统,为了获得良好的控制效果,必须要求模糊控制具有较完善的控制规则<sup>[26]</sup>。自适应控制方法的出现无疑又丰富了时滞系统的控制方法,它和各种方法结合形成了各种有效实用的新方法,有很大的优越性。鲁棒控制和变结构控制针对时滞系统的控制在理论上的研究也很成功,但它们计算复杂,有时甚至会出现找不到解的情况,所以其应用价值在当前仍然有限<sup>[4]</sup>。

从以上的介绍和分析可以看出,纯滞后过程的控制不一定是靠某个单一的方法就可以解决的。工业计算机的出现与完善可以很容易地实现各种复杂的高级控制算法,因此,针对大时滞过程的特点,开发与设计出各种智能控制方法或以不同的形式结合在一起,将是提高工业大时滞过程控制水平的有效途径。本文即是由此出发,探索将模糊控制与内模控制相结合,以分别利用模糊控制的优点和内模控制的时滞克服能力来取得对纯滞后过程的理想控制效果。

#### 1.4 本文的立题依据与研究目的

对于纯滞后工业过程,由于很难得到过程的精确数学模型,传统的基于精确数学模型的控制系统设计理论(包括古典控制理论和现代控制理论)受到了严重挑战。寻求新的控制算法,在满足工业过程控制品质要求的前提下,尽量降低对模型的要求,已成为控制理论及其应用的主要研究任务和方向<sup>[1]</sup>。因此,开展时滞过程控制的应用研究具有积极的理论意义和重大的实际价值。

本文针对含时滞过程的控制问题,提出一种将模糊控制与内模控制并行结合对其实施控制,利用这两种控制策略的优点以期取得好的控制效果。下文将主要研究这两种控制策略的结合方式、控制系统的稳定性和鲁棒性、基于可编程逻辑控制器的实施方案等内容,将通过 MATLAB 仿真结果和实时运行结果两方面证明此控制策略的有效性与优越性。

## 1.5 本文的主要内容安排

文章的主要内容安排如下:

第一章绪论部分:回顾针对复杂的含时滞工业过程控制的理论进展与发展趋势,指出本文的研究目的、主要内容和结构安排。

第二章Smith控制与内模控制原理:介绍Smith预估控制和内模控制系统的基本结构及其主要性质,进一步说明内模控制器的两步设计方法,对IMC的鲁棒稳定性进行分析;其次论证了内模控制作为Smith预估控制的扩展更具有优越性,并以特定的实验对象通过数学分析和仿真结果说明与PID控制和Smith预估控制相比,内模控制在设计和控制性能等方面具有的优点。

第三章模糊控制原理及其控制器设计:概述模糊系统与模糊控制理论的产生背景、模糊数学基础,进一步分析模糊控制的主要特点与稳定性以及模糊控制系统的设计步骤,指出了为提高模糊控制的效果可以采用的几个途径。

第四章模糊内模并行控制算法原理:介绍了本文的实验装置含时滞电加热炉的结构,软件平台和硬件组成,着重说明了PLC和上位机的通讯组态及部分计算内模控制和模糊控制复合算法的程序流程。

第五章电加热炉温度的模糊内模控制应用:针对含时滞的复杂被控过程,提出基于模糊内模控制算法以及在实验装置上的实施方案,并给出基于PLC的部分编程步骤和上位机WINCC组态监控,最后给出实验结果并与其它的控制效果相对比分析,进一步验证其控制策略的有效性和优越性,并为其今后实现工业上的实际应用提出建议。

第六章结论与展望:对本文的结论进行回顾,说明了本文取得的成果和存在的不足之处,进一步指出今后改进这一控制策略的主要方法和途径。

## 第二章 Smith 预估控制与内模控制原理

### 2.1 概述

前已指出, 在滞后过程控制中应用最多的是 PID 控制和 Smith 预估控制<sup>[4]</sup>。采用 PID 控制时, 很难取得理想的控制效果, 而采用 Smith 预估控制往往由于模型难以精确获得而使控制效果下降, 即鲁棒性问题。与这两种控制策略相比, 内模控制的时滞克服效果更好, 对模型精度的要求不高, 仅有一个需要调整的参数, 从而使得滞后过程的控制方法更加丰富。自从产生以来, 内模控制经过 20 多年的研究, 在理论和应用上都得到了较大的发展<sup>[65-66]</sup>。近年来, 过程控制界注重研究将智能控制与内模控制理论相结合应用, 为 IMC 的发展开辟了新的领域。

本章首先介绍 Smith 预估控制系统的结构和时滞补偿原理, 简要分析 Smith 控制的不足之处和几种改进算法; 其次介绍内模控制系统的结构, 分析算法的性质, 说明内模控制器的两步设计步骤, 并对 IMC 的鲁棒稳定性进行探讨, 进一步给出 Smith 预估器的内模控制结构, 说明 IMC 与 Smith 预估器相比在性能上有更大的改善, 鲁棒性更强, 设计也更为直观简便, 最后通过仿真验证了 IMC 算法的有效性。

### 2.2 Smith 预估控制的时滞补偿原理

一般来讲, 克服时滞的一个重要途径是对其进行补偿。有研究表明, 是否需要补偿取决于当被控过程的纯滞后时间  $\tau$  与整个对象的过渡过程时间  $T$  之比。当其比值小于 0.1 时, 无须补偿; 当比值达到 0.5 时, 采用常规的反馈调节很难满足工艺上提出的较高动态要求, 此时要采取补偿作用<sup>[40]</sup>。

1958 年 O.J.M.Smith 针对纯滞后过程提出预估补偿算法, 也称为史密斯 (Smith) 预估控制算法<sup>[8]</sup>。其基本思想是按照过程的特性预估出一种模型, 加入到反馈控制系统中, 以消除或减弱闭环系统中纯滞后因素的影响, 从而提高闭环系统的动态质量。

#### 2.2.1 Smith 预估控制系统的结构

在调节通道具有纯滞后的被控系统中, Smith 提出采用并联补偿装置可以消

除纯滞后对调节过程的影响。其基本原理是，设被控对象的传递函数为  $W_0(s)$ ，补偿装置的传递函数为  $W_m(s)$ ，则二者复合的方框图如图 2-1 所示：

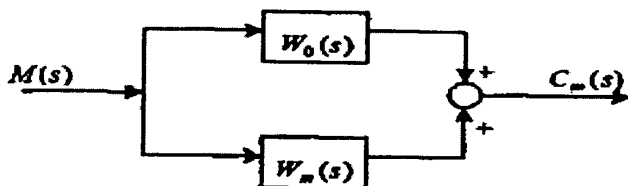


图2-1 预估补偿原理图

下面求所需补偿环节的传递函数  $W_m(s)$ 。

由图2-1可知：

$$C_m(s) = M(s)[W_0(s) + W_m(s)] \quad (2-1)$$

当  $W_0(s) = G_0(s)e^{-\tau s}$  时，代入上式，得：

$$C_m(s) = M(s)[G_0(s)e^{-\tau s} + W_m(s)] \quad (2-2)$$

由于补偿的目的是消除纯滞后  $e^{-\tau s}$  对调节过程的影响，即要使下式成立：

$$C_m(s) = M(s)G_0(s) \quad (2-3)$$

所以，可由式(2-2)和(2-3)得：

$$G_0(s)e^{-\tau s} + W_m(s) = G_0(s) \quad (2-4)$$

故可以推出补偿环节的传递函数

$$W_m(s) = G_0(s)(1 - e^{-\tau s}) \quad (2-5)$$

式(2-5)即为补偿装置所需的数学模型，如图2-2所示：

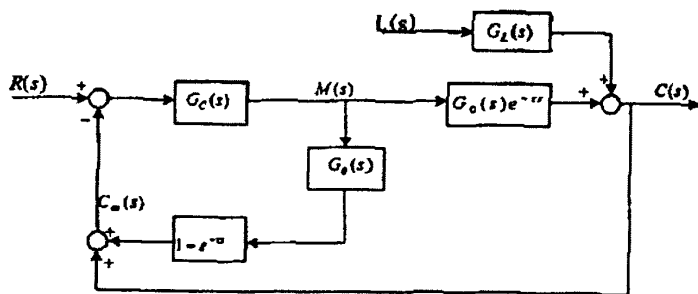


图2-2 Smith预估补偿控制系统方框图

可以看出，Smith预估控制算法将广义对象  $G_0(s)e^{-\tau s}$  输出的信号  $C(s)$  与预估

补偿器  $G_0(s)(1 - e^{-s\tau})$  的输出信号相加后才作为反馈信号，因此这种补偿是超前的反馈补偿，可知控制系统的闭环传递函数为：

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_0(s)G_c(s)e^{-s\tau}}{1 + G_0(s)G_c(s)} \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} \frac{C(s)}{L(s)} &= \frac{G_L(s) \left[ 1 + G_0(s)G_c(s)(1 - e^{-s\tau}) \right]}{1 + G_0(s)G_c(s)} \\ &= G_L(s) \left( 1 - \frac{G_0(s)G_c(s)e^{-s\tau}}{1 + G_0(s)G_c(s)} \right) \end{aligned} \quad (2-7)$$

在模型精确的情况下，其等效方框图为

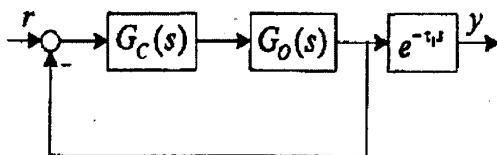


图2-3 Smith预估控制等效方框图

由式(2-6和2-7)可知，不论对于给定值作用还是负荷扰动，闭环系统特征方程式是相同的，即：

$$1 + G_0(s)G_c(s) = 0 \quad (2-8)$$

一个闭环控制系统的动态特性主要取决于其闭环特征方程式，经过Smith预估补偿后，原来含时滞闭环系统的特征方程中不再含有纯滞后环节，而是将系统控制过程曲线在时间轴上推迟一个  $\tau$  时间，所以预估补偿消除了纯滞后对过程的不利影响，使系统品质与无滞后过程完全相同，故有可能通过提高调节器  $G_c(s)$  的增益来提高闭环系统的动态质量。可见，从理论上讲Smith预估控制在一定的范围内能克服纯滞后的影响。

### 2.2.2 Smith 预估控制的不足之处

Smith 预估控制系统最大的优点是时将滞环节移到了闭环之外，从而使时滞过程的控制品质得到大大提高。但是，在实际应用中其最大的缺点是太过于依赖精确的数学模型且对某些干扰的抵抗能力较差。

首先，当预估模型和实际对象存在误差时，控制品质会显著恶化，甚至发散，

而且对于外部扰动也非常敏感,鲁棒性较差<sup>[40]</sup>。因此,Smith 预估控制系统对于模型参数有变化的系统很难有好的控制效果。

其次,如图 2-3 所示,当被控系统受到  $f_2$  或  $f_3$  干扰时,信号要经过几个环节的传递之后才能得到补偿,而并不像来自  $f_1$  通道的干扰那样能立即得到补偿。因此,对这些类型的干扰,Smith 预估控制系统的调节效果就不很理想。而且,对于传递函数为  $G(s) = e^{-\sigma} \frac{1}{T_s}$  的非自衡过程,采用 Smith 预估控制将存在稳态偏差。

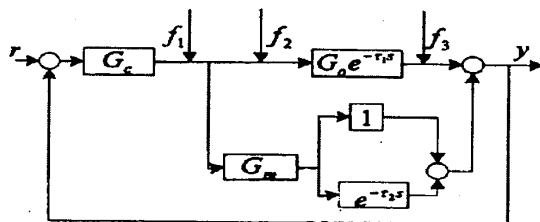


图 2-4 Smith 预估控制的受干扰情况

### 2.2.3 Smith 预估控制的改进算法

由于 Smith 预估算法基于模型控制的特性,因而在建模不准确、参数时变系统及干扰频繁的情况下难以达到理想的效果。为了解决这个问题,很多学者提出了基于常规 Smith 预估控制器的各种改进方法,大致可以分为以下两种:

(1)一种是基于结构上的改进,即通过在不同位置增加一些并联或者串联的环节进行补偿;还有就是参数整定上的改进,它们或者将含时滞项通过泰勒多项式展开用鲁棒性能指标及其它指标函数对控制器进行解析设计,或者对其中的控制参数进行鲁棒调整,或者对预估系统的反馈传递函数进行改进,以增强它的鲁棒性和稳定性。

在结构上进行改进的,比如 C.C.Hang 提出的改进型 Smith 预估器<sup>[10]</sup>,其主反馈通道的传递函数不是 1,而是函数:

$$W(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (2-9)$$

这样实际上是在反馈通道中加了一个滤波器。理论分析和实践证明,该方法的稳定性和鲁棒性比原来的 Smith 预估控制系统要好,它对对象的模型精度要求明显地降低了,控制品质也得到了很大的改善。但是当过程的参数变化时,滤波器的参数也要调整,否则不能适应当前的系统;也有很多论文针对这一要求,介

绍改进滤波器中滤波常数调整的方案。主反馈通道在一定的条件下可以简化为一个惯性环节,只要对惯性环节中的惯性时间常数进行自调整就可以动态适应系统的变化。文[41]据此提出了用模糊算法对控制器的比例增益  $K_c$  进行自整定的方法,实际上就是调整了滤波时间常数,该改进方法可以较好地控制过程参数变化较大的系统。根据对 Smith 预估系统的分析,可以知道过程增益的变化对系统的稳定性有很大的影响,因此也有人专门针对增益变化进行研究,提出了在 Smith 预估基础上的增益自适应补偿方法<sup>[42-44]</sup>。而有的文献则是把控制对象与模型间的差异用增益来补偿<sup>[45]</sup>,通过动态地调整模型的增益,使得模型的输出和控制对象的输出不断逼近,仿真结果表明了这种方法能大大改善 Smith 预估补偿控制的动态性能,有较强的抗干扰能力。

(2) Smith 预估器也可以在控制器参数整定上进行改进。有学者提出一种 Smith 预估器解析设计方法,用现代鲁棒控制理论结合对时滞项的 Taylor 展开来对 Smith 预估器进行优化设计,并提出一种整定方法<sup>[46]</sup>,也同样是从  $H_\infty$  最优控制的基本结论出发,解析地得到一种新的 Smith 预估器,能保证好的干扰抑制特性和鲁棒性。该控制器完全可以用一般的 PID 控制器来实现。

由于以上这些方法计算非常复杂,对系统的适应能力也不是很强,因此在实际应用时改进方案不是很多,所以在实际中的应用范围还不够广泛。

## 2.3 内模控制原理

内模控制是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略。它具有一些别的控制策略无可比拟的优点,如设计简单、控制性能好、鲁棒性好等等,是研究基于模型的控制算法的理论基础和提提高常规控制系统设计水平的有力工具。工业控制界的专家学者在 1950 年时就已经采用类似于内模控制的概念来设计最优反馈控制器。1974 年,德国学者 Frank 首先在工业过程控制中提出内模控制结构,1982 年, Garcia 和 Morari 完整地提出并改进了这一控制结构,并将其取名为内模控制<sup>[14-18]</sup>。

### 2.3.1 内模控制系统的结构

内模控制结构示意图如下:



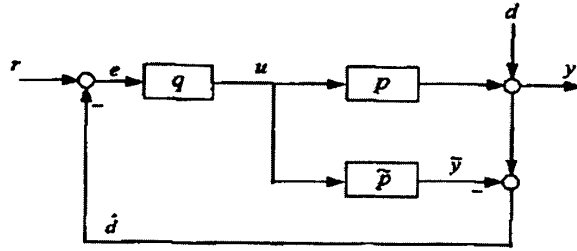


图 2-5 内模控制结构方框图

这里  $r(z)$  为系统输入,  $d(z)$  为过程不可测干扰输入,  $y(z)$  为系统的输出,  $\tilde{y}(z)$

为内模输出,  $q(z)$  为内模控制器,  $p(z)$  为被控对象,  $\tilde{p}(z)$  为内部模型。

可以知道:

$$u(z) = \frac{q(z)}{1 + q(z)[p(z) - \tilde{p}(z)]} [r(z) - d(z)] \quad (2-10)$$

$$y(z) = d(z) + \frac{p(z)q(z)}{1 + q(z)[p(z) - \tilde{p}(z)]} [r(z) - d(z)] \quad (2-11)$$

$$\hat{d}(z) = \frac{d(z)}{1 + [p(z) - \tilde{p}(z)]q(z)} \quad (2-12)$$

从而, 在内部模型准确时, 即:

$$p(z) = \tilde{p}(z) \quad (2-13)$$

此时, 系统的反馈信号为  $d(z)$ , 相当于开环结构, 系统是稳定的; 在被控对象与内部模型失配时, 反馈信号  $d(z)$  将包含一些偏差的信息, 通过调整  $\hat{d}(z)$  就可以获得较好的鲁棒性。

### 2.3.2 内模控制系统的性质

下面分析内模控制系统的性质。由式 2-10 可知, 内模控制系统稳定的充要条件是使得下式的特征方程根严格地位于单位圆内:

$$\frac{1}{q(z)} + [p(z) - \tilde{p}(z)] = 0 \quad (2-14)$$

#### (1) 对偶稳定性

如果内部模型完全准确, 即:

$$p(z) = \tilde{p}(z) \quad (2-15)$$

则内模控制系统稳定的充要条件是：

被控对象  $p(z)$  与控制器  $\tilde{p}(z)$  都是稳定的。

### (2)理想控制器特性

设被控对象是稳定的，不存在时滞和非最小相位部分且内部模型精确，即：

$$p(z) = \tilde{p}(z) \quad (2-16)$$

如果取：

$$q(z) = \frac{1}{p(z)} \quad (2-17)$$

且模型的逆存在并可实现，根据式(2-10)可知，在任何干扰下系统输出都等于设定值，即：

$$y(z) = r(z) \quad (2-18)$$

此时可知，系统对任何干扰都能够克服，可以对参考输入进行无偏差跟踪。然而，实际上理想控制器是无法实现的，即使在没有时滞存在的时候。

这是由于采样保持后对象的脉冲传递函数也会有一拍时延，所以理想的控制器无法实现。但是这为实际的控制器设计指明了方向，下面将会对此问题说明。

### (3)零稳态特性

如果闭环系统稳定，而过程与模型失配，即：

$$p(z) \neq \tilde{p}(z) \quad (2-19)$$

但此时只要使设计的控制器满足：

$$q(z) = \frac{1}{p(z)} \quad (2-20)$$

系统输出将产生无偏差作用，即对于任何的阶跃输入和常值干扰，其输出不会存在稳态误差。这也表明，内模控制本身含有误差的积分作用，不需要在设计时再次引入积分因子。

## 2.3.3 内模控制系统的设计方法

内模控制系统的对偶稳定性是基于内部模型精确的情况下得到的，这在实际应用中很难保证。因为当模型与对象失配时，即使控制器和对象模型都稳定时，闭环系统仍有可能不稳定。所以，内模控制系统的设计还要使系统具有足够的鲁

棒性，即在模型失配的情况下闭环系统仍能稳定。

按照内模控制的相消法<sup>[19]</sup>设计步骤，系统设计可分为以下两步：

### (1) 稳定控制器的设计

先不考虑模型误差及约束条件，首先保证控制器的稳态无差。将  $p(z)$  分解为两部分，即

$$p(z) = p_{m^+}(z)p_{m^-}(z) \quad (2-21)$$

这里， $p_{m^-}(z)$  为最小相位部分，是稳定的，不含时滞部分， $p_{m^+}(z)$  为非最小相位部分。令内模控制器为：

$$q(z) = \frac{1}{p_{m^-}(z)} \quad (2-22)$$

### (2) 滤波器的设计

为了减小对建模误差的敏感性，可通过在反馈通道或内模控制器前附加一个滤波器  $f(z)$  来实现，如下图所示：

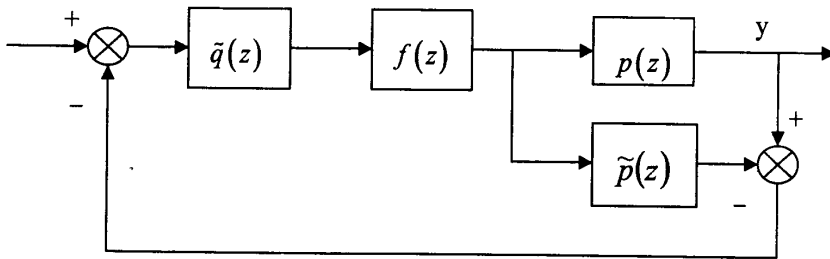


图 2-6 含滤波器的内模控制结构图

当滤波器取为一阶形式时，即在连续系统的传递函数为：

$$f(s) = \frac{1}{\lambda s + 1} \quad (2-23)$$

则上式在 Z 域的表达式为：

$$f(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (0 \leq \alpha < 1) \quad (2-24)$$

其中， $\alpha = e^{-\frac{\lambda}{T_s}}$ ， $\lambda$  为滤波器的时间常数， $T_s$  为控制系统采样周期。

由于滤波器的存在，原闭环系统的特征方程就变为：

$$1 + \tilde{q}(z)f(z)[p(z) - \tilde{p}(z)] = 0 \quad (2-25)$$

于是，在模型失配时，总可以通过调整设计参数  $f(z)$  使特征方程的根严格地位于单位圆内。

这里  $\alpha$  的值对内模控制系统的影响很大。当  $\alpha$  值很小时，可以明显地改善动态性能，但系统对模型误差比较敏感；而当  $\alpha$  值较大而接近于 1 时，能显著地增强系统的鲁棒性，但反应变得迟钝。所以， $\alpha$  的取值必须在鲁棒性和动态性能之间取一个适当的折中来达到好的控制效果。

## 2.4 内模控制与 Smith 预估控制的关系

以上讨论了 Smith 预估控制和内模控制的原理与性质，内模控制实际上是 Smith 预估控制的扩展<sup>[1]</sup>，而在设计上更为简便，其鲁棒性和抗干扰性也得到大为改善。下面分析二者之间的关系：

在 Smith 预估控制系统中，当控制器采用常用的 PID 控制器时，可将其标准结构改动为如图 2-7 所示：

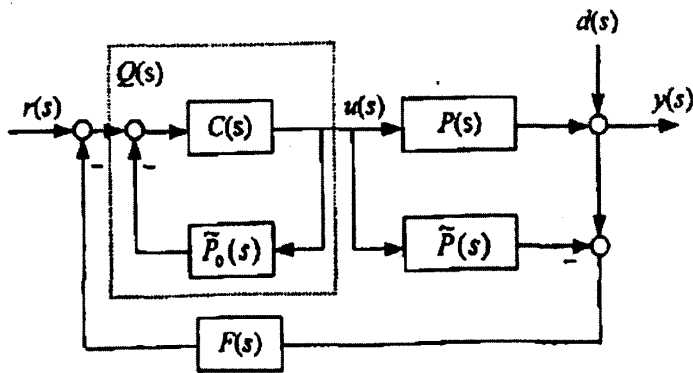


图 2-7 Smith 预估控制系统的内模结构

可以看出，内模控制器  $Q(s)$  与 Smith 预估控制  $C(s)$  关系如下：

$$Q(s) = \frac{C(s)}{1 + \tilde{P}_0(s)C(s)} \quad (2-26)$$

若令

$$f(s) = 1 \quad (2-27)$$

则 Smith 预估控制系统的内模结构与 Smith 预估控制系统标准结构等价。 $Q(s)$  的设计与开环系统一样， $F(s)$  则取一阶的低通滤波器，只有一个调节参数。下

面针对一阶时滞对象为例加以说明。

对于工业上典型的一阶时滞对象：

$$\tilde{P}(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (2-28)$$

显然有：

$$\tilde{P}(s) - \tilde{P}_0(s) = \frac{K}{Ts+1} (e^{-\tau s} - 1) \quad (2-29)$$

则IMC控制系统的Q(s)为：

$$Q(s) = \frac{Ts+1}{K(\lambda s+1)} \quad (2-30)$$

而Smith预估控制器为PI型，即：

$$c(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_j s} \right) \quad (2-31)$$

利用式(2-25)，推出PID型Smith预估控制结构与IMC结构等价的成立条件：

$$k_c = \frac{T}{\lambda K} \quad (2-32)$$

$$\tau_j = T \quad (2-33)$$

其系统响应的快慢由 $\lambda$ 决定。其值的选取在快速性和鲁棒性之间取折衷，设计较为简单明了。

以上分析可以说明：

Smith预估控制是IMC的一种特例。内模控制不仅保留了Smith预估控制克服大时滞的优点，而且在性能改善上有更大的回旋余地，鲁棒性得到提高，设计也更为直观简便。

## 2.5 Smith控制与内模控制仿真分析

以上分析了Smith预估控制和内模控制的原理与关系，下面以一阶含时滞对象为例说明几种较常见的控制策略在纯滞后过程控制中的控制结果。设一含有较大纯滞后的被控过程传递函数为：

$$G(s) = \frac{1.3}{300s+1} e^{-100s} \quad (2-34)$$

下面分别采用PID控制、Smith预估控制和内模控制策略实施控制，则在模

型与对象完全匹配时，通过分别调整各控制器的参数，获得由初始值 0 到设定值 1 的阶跃响应曲线，如下图 2-8 所示。

其中，绿色曲线为 Smith 控制；紫色曲线为内模控制；蓝色曲线为 PID 控制。仿真时间为 1500 秒，内模控制滤波器参数为  $\lambda=30$ 。可以看出，PID 控制具有较大的超调量，过渡过程时间很长；此时 Smith 控制的模型与实际对象完全匹配，能够消除滞后的影响，但效果类似于 PID 控制的效果；而内模控制很快能达到稳定，且没有超调，显示了优越的动态和静态性能。

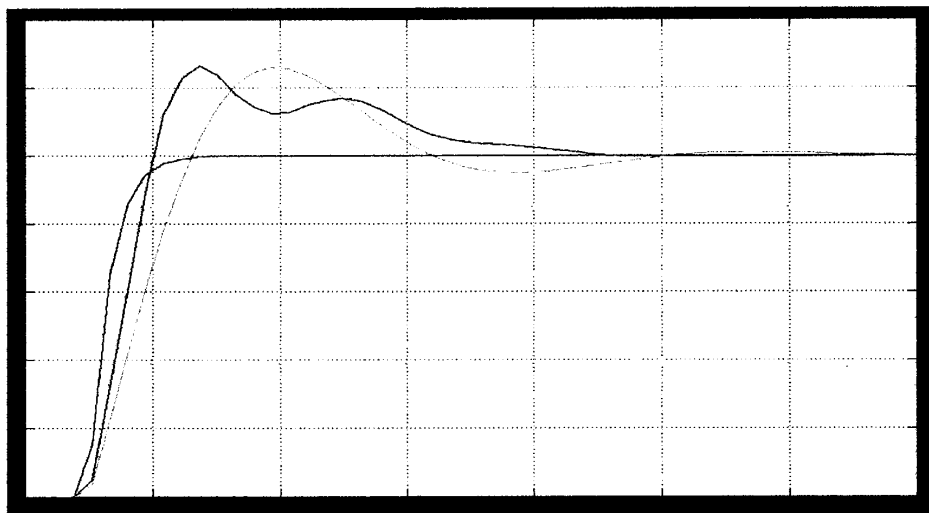


图 2-8 模型与对象完全匹配时控制效果对比

接着，改变实际对象传递函数的参数  $K=1.15$ ，即假设模型不准确或被控制对象发生一定的变化，而控制器调节参数保持不变，得到仿真结果如下图 2-9：

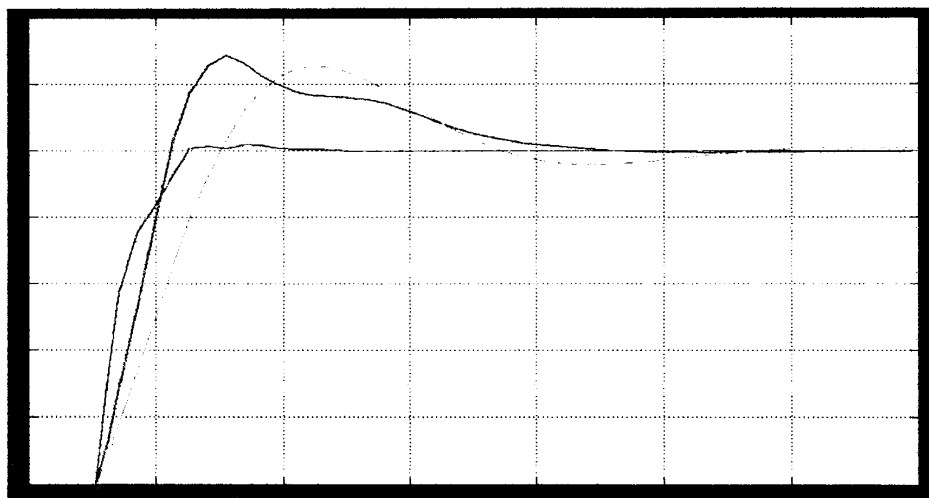


图 2-9 K 失配时控制效果对比

其次，改变被控对象的参数  $T=330$ ，其余不变，仿真结果如下图 2-10:

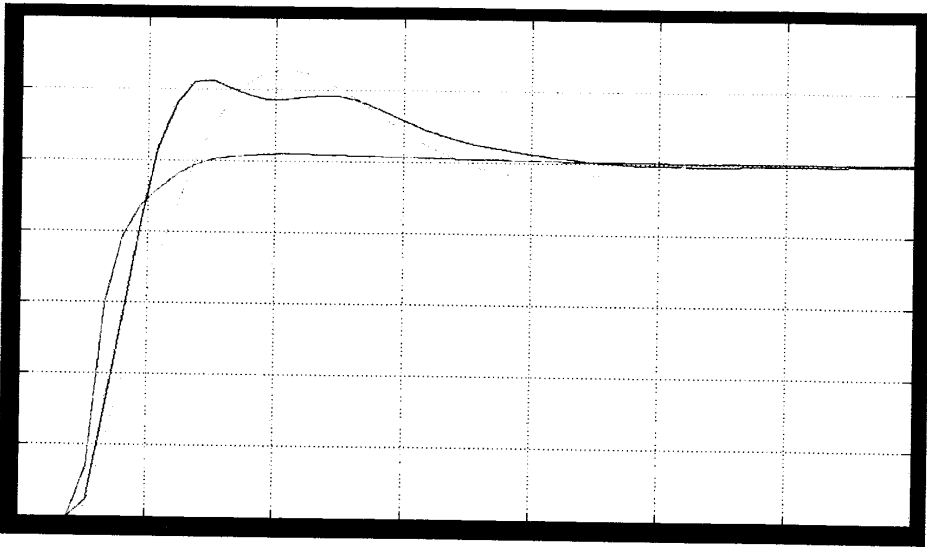


图 2-10 T 失配时控制效果对比

随后，改变滞后时间使  $\tau=110$ ，其余参数不变，仿真结果如下图 2-11。可以看出，对于被控对象的参数改变情况，时滞造成的影响最大。这时，PID 控制的超调量加大，Smith 控制则有加剧振荡的趋势，也使内模控制出现一定的超调但仍能很快达到稳定。

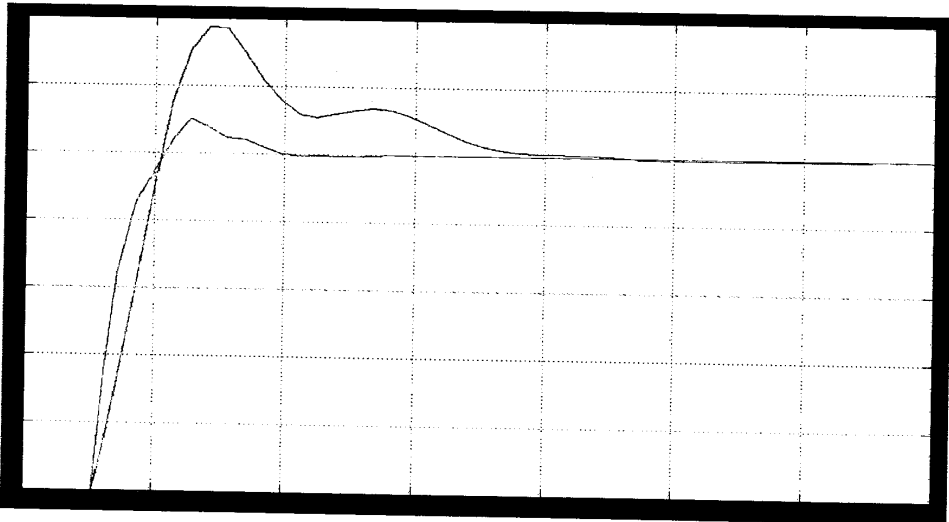
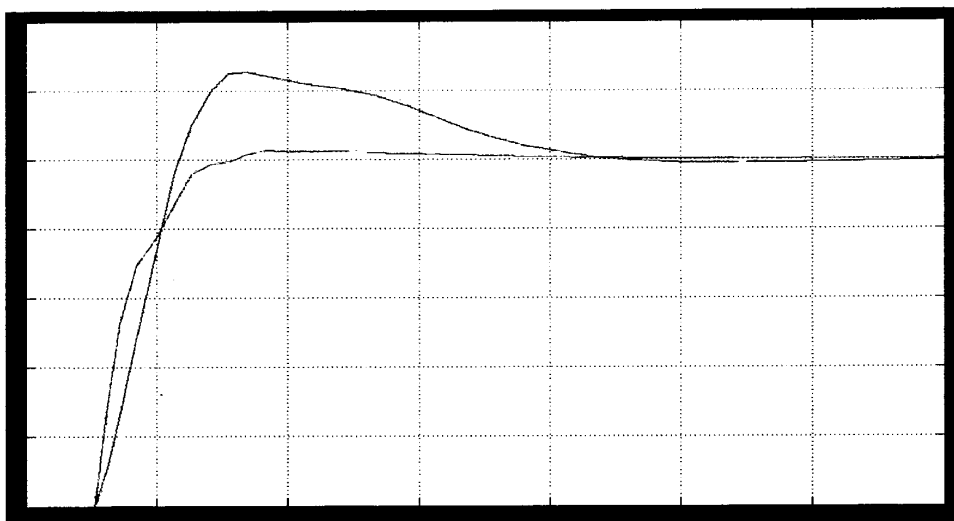
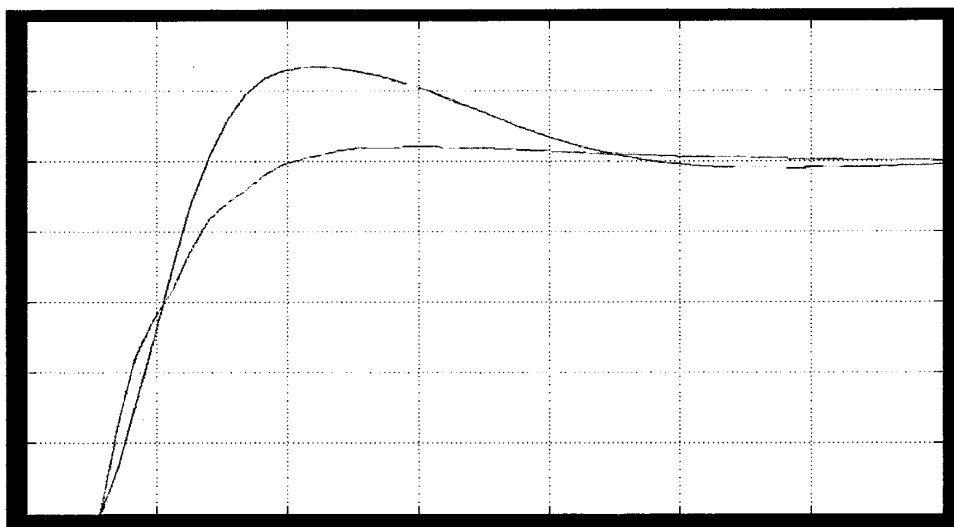


图 2-11  $\tau$  失配时控制效果对比

更进一步，同时改变被控过程的所有参数，使参数变化处于一定范围，即令  $K=1.15$ ， $T=330$ ， $\tau=110$ ，其仿真结果如图 2-12:

图 2-12 K、T、 $\tau$ 全部失配时

最后，假设被控对象与模型严重失配，参数漂移很大，均达到了 30%左右，使  $K=0.9$ ， $T=390$ ， $\tau=130$ ，并且受到频率为 10，幅值为 0.1 的方波干扰，其仿真结果如图 2-13:

图 2-13 K、T、 $\tau$ 严重失配时

由上图可见，PID 控制和 Smith 控制出现了长时间的振荡和不稳定现象，这十分不利于工业生产；而内模控制也出现了一定的超调，但经过一段时间后能够稳定到较小的误差范围，显示出了较强的鲁棒性，可以满足实际要求，并且此时可通过调整滤波器参数来改善控制效果。



## 2.6 内模控制的输出受限问题

由以上仿真结果可以看出,内模控制在时滞过程方面相对于PID控制和Smith控制具有更好的控制效果。但是,按照上面算法设计出的内模控制器,其输出控制量 $U$ 的幅值是没有限制的,仅仅是在理想状态下的一种情形。在实际应用中,控制量 $U$ 由于受到执行机构的限制<sup>[48-50]</sup>,其输出不能超出其相应执行机构的工作范围,即:

$$U_{\min} \leq U(\Delta k) \leq U_{\max} \quad (2-35)$$

这样就使得控制量并不能无限制的增加或减少,从而在应用时难以取得内模控制的理想仿真结果。这样,就产生了内模控制量的输出受限问题。如果仅将内模控制器输出的控制量经过简单限幅后输送到执行机构,那么就相当于在系统中引入了非线性环节,会使内模控制的效果显著下降。

为解决这一问题,有不少学者做了研究,如利用柔化滤波器来限制控制量幅值<sup>[51]</sup>,延长调节时间使控制量最小化<sup>[52]</sup>等,但这些将会使系统响应减慢;Garcia<sup>[53]</sup>、Little<sup>[54]</sup>、Dion<sup>[55]</sup>、席裕庚<sup>[56]</sup>等人采用线性规划、二次规划技术来处理线性不等式约束,但其运算复杂,实现起来非常困难。文[57]提出用对控制器输出采用分段计算的方法,分别设定控制量的上、下限,当系统响应小于控制量下限时,选用最大控制量;当系统响应大于控制量上限时,选用最小控制量;当系统响应位于二者之间时选用内模控制的输出量。可见,这实际上是一种切换的比例-内模复合控制方法。本文采用的模糊-内模复合控制方案即与此类似,不同之处是采用模糊控制来取代其比例控制,使其获得比上文更好的动态性能。

## 2.7 本章小结

本章主要介绍了内模控制的结构、原理及主要性质,并指出作为传统的Smith预估控制算法的扩展,内模控制不仅保留了Smith预估控制克服大时滞的优点,而且在性能上有所改善,鲁棒性得到提高,是一类基于非参数模型的、较适合于纯滞后过程控制的工业过程高级控制算法,设计也更为直观简便。以上结果通过MATLAB仿真证明了其优越性;同时讨论了内模控制在应用时会遇到的控制量输出受限问题及其解决方法。

## 第三章 模糊系统与模糊控制原理

### 3.1 概述

工业生产规模的不断扩大及复杂化使得过程越来越复杂,而对控制动态性能和稳态精度的要求越来越高,经典控制理论和现代控制理论由于种种原因已不能满足日益复杂的工业控制要求。在处理过程模型不确定或难以建模等问题时,PID控制和基于现代控制理论的控制策略就显得无能为力,因此在应用于复杂过程控制时往往受到限制。1965年,美国加利福尼亚大学 L.A.Zadeh 教授提出的《Fuzzy Sets》<sup>[58]</sup>开创了模糊数学的历史,从此模糊科学开始发展起来。1974年,英国的 Mamdani 教授<sup>[59]</sup>成功地将模糊控制运用于在蒸汽发动机上,使模糊控制开始了其应用阶段并得到大规模发展。

模糊控制从诞生到现在仅仅经历了几十年的时间,就已在经济、医学、军事尤其是工业应用方面取得了巨大的发展,是一种十分适合于工业生产过程和大系统控制的方法,对象越模糊,这种控制方法就越能反映出它比其它控制方法更多的优越性,例如在纯滞后、难以准确建模、参数漂移大及非线性不确定分布参数系统中,采用模糊控制往往能取得令人满意的意外效果<sup>[11]</sup>。

模糊控制是一种应用模糊集合理论,统筹考虑控制策略的应用方式,具有如下几个主要特点<sup>[60]</sup>:

- (1) 只要求掌握现场操作人员或有关专家的经验、知识或者数据等,而不需要建立被控对象的精确数学模型;
- (2) 系统的鲁棒性强,尤其适应非线性、时变、纯滞后过程的控制;
- (3) 由工业过程的定性认识出发,容易建立语言变量的控制规则;
- (4) 对系统的干扰有较强的抑制能力。

本章将简要介绍模糊控制基本原理、模糊控制器的设计方法与稳定性分析,其次说明模糊控制具有的主要性质、在工业控制应用中的巨大优势及传统模糊控制系统存在的不足之处及其改进方法。

### 3.2 模糊控制基本原理

模糊系统是一种基于知识或规则的系统,其核心是由 IF-THEN 规则组成的

知识库<sup>[62]</sup>。给模糊系统加上模糊器和解模糊器以后,就能使其完成将实值向量向实值标量所作的多输入单输出映射,并且能够得到映射的精确数学公式。可见模糊控制理论的重大贡献是它为由知识库向非线性映射的转换提供了一套系统的程序<sup>[11]</sup>。因此,我们能将基于知识的系统采用同数学模型及传感器测量一样的方式应用到工程中去。从而,其系统分析设计就会以数学这种严密的推理方式进行。

模糊控制采用计算机控制技术构成一种具有反馈通道的闭环数字自动控制系统,以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础,基本原理如下:

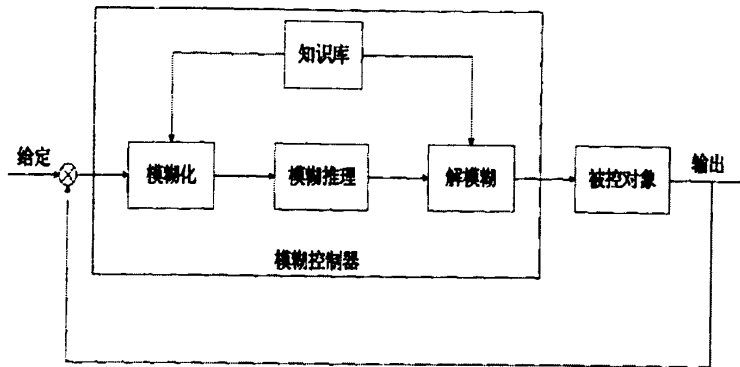


图 3-1 模糊控制基本原理图

模糊控制器的几个重要功能<sup>[60]</sup>有:

- (1) 把系统的偏差从数字量转化为模糊量;
- (2) 将模糊量按照给定规则进行模糊推理;
- (3) 把推理结果模糊输出量转化为实际系统能够接受的精确数字量输出。

### 3.2.1 模糊系统的基本构成<sup>[11]</sup>

#### 1、模糊器(Fuzzifier)

模糊器可定义为实值点  $x^*$  向  $U$  上的模糊集  $A'$  的映射,选用原则有以下三点:

- (1) 模糊器应考虑到是在清晰点  $x^*$  输入这一事实,即在点  $x^*$  处模糊集  $A'$  要有一个更大的隶属度值;
- (2) 如果模糊系统的输入受到噪声影响,要求模糊器有助于克服噪声的影响;
- (3) 模糊器应该有助于简化模糊推理机的计算,在模糊推理中,最复杂的计算是  $\sup$  (合成),所以设计模糊器的目标是简化合成运算。

模糊化过程主要有以下几步:

- (1) 对这些输入量进行处理以变成模糊控制器要求的输入量;

- (2) 将已经处理的输入量进行尺度变换,使其由清晰值变换到各自模糊论域;
- (3) 已经变换到论域范围的输入量进行模糊化处理,使原先精确的输入量变为模糊量并用相应的模糊集合表示。

## 2、知识库系统(Knowledge Based System)

包含了应用领域中知识要求的控制目标,通常由数据库和模糊规则库组成:

- (1) 数据库包括各语言变量的隶属度函数、变换因子及模糊空间的分级数等;
- (2) 规则库包括了用模糊语言变量表示的一系列控制规则,它们反映了控制专家的经验 and 知识。

## 3、模糊推理机(Fuzzy Logic Inference Engine)

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推理规则来进行的。

## 4、解模糊器(Defuzzifier)

解模糊器是将模糊推理得到的控制量变换为实际应用于控制的清晰量,包括两个部分内容:将模糊控制量经过解模糊变成在论域范围的清晰量、将清晰量经过尺度变换成为实际的控制量。

### 3.2.2 模糊控制器的结构选择

可将模糊控制器按结构分为单输入—单输出(SISO)和多输入—多输出(MIMO)两种。对于复杂的MIMO系统难以直接提取控制规则,常用的方法是将其化为MISO结构,然后利用SISO系统的设计方法进行模糊控制器的设计。通常把模糊控制器的输入量个数称为维数,基于此,可将模糊控制器分为三种:

#### 1、一维模糊控制器

此类模糊控制器结构最为简单,其输入变量往往是受控变量和给定输入的偏差值 $E$ ,由于包含的系统运动信息较少,所以很难反映被控过程的动态品质,因此很难获得较满意的系统动态性能,一般应用与一阶被控对象;

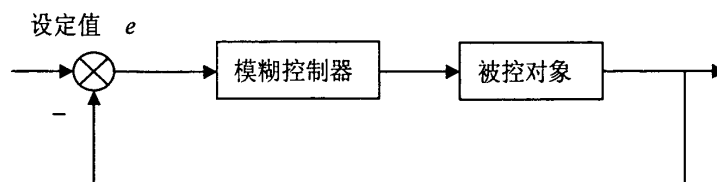


图 3-2 一维模糊控制器结构图

## 2、二维模糊控制器

此类模糊控制器的两个输入变量一般多选用受控变量和输入给定量的偏差  $E$  和偏差变化  $EC$ ，它们能较好地反映被控过程中输出变量的动态特性，因此能得到比较满意的控制效果，是目前最为常用的一类模糊控制器；

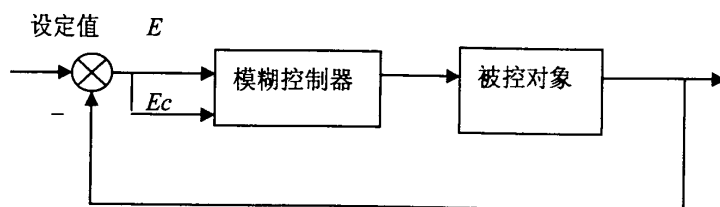


图 3-3 二维模糊控制器结构图

## 3、多维模糊控制器

一般输入大于二维的模糊控制器都可定义为多维模糊控制器，它将系统的偏差量  $E$ ，偏差变化量  $EC$ ，偏差变化的变化率  $ECC$  等作为输入变量，以达到提高控制性能的目的，但大大增加了控制器的复杂性和推理运算时间，一般较少使用。

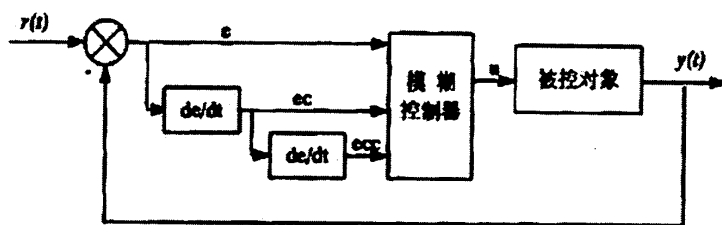


图 3-3 多维模糊控制器结构图

综合而言，二维模糊控制器不仅对被控量的误差进行反馈，同时还要对被控量的误差变化率进行反馈，是工矿场合较为理想也最为常用的控制器。

### 3.2.2 模糊控制器的设计

针对具体的被控对象的不同，模糊控制器的设计也大不相同，但其总体设计思想是遵循 Zadeh 的五言体原则， $\{X, T(X), U, G, M\}$ ，各部分代表的意义分别如下<sup>[60]</sup>：

$X$ ：语言变量名称；

$T(X)$ ：语言变量的语言值集合；

$U$ ：模糊论域；

$G$ : 语法规则, 决定  $X$  应取的语言值;

$M$ : 语义规则, 定量产生隶属度函数描述语言值;

设计模糊控制器的步骤如下:

### 1、模糊语言变量的确定

根据语法规则, 选择输入输出模糊语言变量的词集。对于描述误差和误差变化量等语言变量的语言值, 根据控制需要一般可转化为7个词汇, 即: {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}; 用英文缩写为: (NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB)。

### 2、确定语言值的隶属度函数

把精确量离散化并将其由基本论域变换到模糊论域, 根据语义规则定义各模糊变量的模糊子集, 即形成隶属度函数或模糊变量赋值表。这里, 隶属度函数曲线的形状对控制性能具有一定的影响; 还应使模糊子集分布合理, 覆盖整个论域。一般来讲, 有以下几种常见的模糊器及其相应的隶属度函数类型<sup>[11]</sup>:

#### (1) 单值模糊器

单值模糊器将一个实值点  $x^* \in U$  映射为  $U$  上的模糊单值  $A'$ ,  $A'$  在  $x^*$  上的隶属度为 1, 而在  $U$  中其他所有点上的隶属度为 0, 即

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x = x^* \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-1)$$

#### (2) 高斯模糊器

高斯模糊器将一个实值点  $x^* \in U$  映射为  $U$  上的模糊集  $A'$ , 它具有如下高斯隶属度函数

$$\mu_{A'}(x) = e^{-\left(\frac{x_1 - x_1^*}{a_1}\right)^2} * \dots * e^{-\left(\frac{x_n - x_n^*}{a_n}\right)^2} \quad (3-2)$$

其中, 参数  $a_i (i=1, 2, \dots, n)$  是正数,  $*$  通常取代数积算子或最小(min)算子。高斯模糊器的隶属度函数连续且点点可导, 是描述模糊子集的一种比较合理的形式, 适合于自适应、自学习模糊控制, 对于计算的要求相对较高。

#### (3) 三角形模糊器

三角形模糊器将一个实值点  $x^* \in U$  映射为  $U$  上的模糊集  $A'$ , 它具有如下三角形隶属度函数:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{其它情况} \\ \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) * \dots * \left(1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}\right) & |x_i - x_i^*| \leq b_i (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (3-3)$$

其中, 参数  $b_i (i=1, 2, \dots, n)$  是正数,  $t$  范数 \* 常取代数积算子或最小(min)算子。

三角形隶属度函数呈线性, 且计算较为简单, 适应于工业过程控制场合, 是应用非常广泛的模糊器。

### 3、建立模糊控制规则

模糊控制规则是对系统控制经验的总结, 这些经验用模糊条件语句来表示。一般来讲, 模糊控制规则的生成有四种方法:

- (1) 根据专家经验或过程控制知识生成控制规则;
- (2) 根据过程的模糊模型生成控制规则;
- (3) 根据对手动控制操作的系统观察和测量生成控制规则;
- (4) 根据学习算法生成控制规则。

### 4、模糊推理机

在模糊推理中, 模糊逻辑常用于将模糊规则库中的 IF-THEN 规则组合成一个从  $U$  上的模糊集合  $A'$  到  $V$  上的模糊集合  $B'$  的映射, 分为组合推理和独立推理。

#### (1) 组合推理

在组合推理中, 规则库中的所有规则都被组合到  $U \times V$  中的单一模糊关系中, 并将这一模糊关系看作单独的模糊 IF-THEN 规则。令  $R_u^{(l)}$  为  $U \times V$  中的一个模糊关系, 表示模糊 IF-THEN 规则, 即:

$$R_u^{(l)} = A_1^l \times \dots \times A_n^l \rightarrow B^l \quad (3-4)$$

可知,  $A_1^l \times \dots \times A_n^l$  是  $U = U_1 \times \dots \times U_n$  的一个模糊关系, 定义:

$$\mu_{A_1^l \times \dots \times A_n^l}(x_1, \dots, x_n) = \mu_{A_1^l}(x_1) * \dots * \mu_{A_n^l}(x_n) \quad (3-5)$$

这里 \* 表示任意一个  $t$ -范数算子。

如果认为规则库中的  $M$  条规则是  $U \times V$  的独立模糊关系  $Q_M$ , 则要用“并”算子来组合规则, 其定义如下:

$$Q_M = \bigcup_{l=1}^M R_u^{(l)} \quad (3-6)$$

此式称为 Mamdani 组合。如用 + 表示 S-范数, 上式变为:

$$\mu_{Q_M}(x, y) = \mu_{R_u^{(1)}}(x, y) + \dots + \mu_{R_u^{(M)}}(x, y) \quad (3-7)$$

如果认为规则是具有耦合性的，须使所以规则的条件得到满足，则要用“交”算子来组合规则。即：

$$Q_G = \bigcap_{l=1}^M R_u^{(l)} \quad (3-8)$$

此式称为 Godel 组合。如用 \* 表示 t-范数，则变为：

$$\mu_{Q_G}(x, y) = \mu_{R_u^{(1)}}(x, y) * \dots * \mu_{R_u^{(M)}}(x, y) \quad (3-9)$$

这样当输入模糊集合为  $A'$  时，采用 Mamdani 组合的模糊推理机，其输出为：

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in U} t [\mu_{A'}(x), \mu_{Q_M}(x, y)] \quad (3-10)$$

而当输入到采用 Godel 组合的模糊推理机时，其输出为：

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in U} t [\mu_{A'}(x), \mu_{Q_G}(x, y)] \quad (3-11)$$

## (2) 独立推理

在独立推理中，每个规则都确定一个输出的模糊集合，整个模糊推理机的输出就是这  $M$  个独立集合的组合，这一组合既可以用“交”也可以用“并”组合得到。

对于输入为  $A'$  的模糊集合，可确定每个规则  $R_u^{(l)}$  的输出模糊集  $B_l$ ，即：

$$\mu_{B'_l}(y) = \sup_{x \in U} t [\mu_{A'}(x), \mu_{R_u^{(l)}}(x, y)] \quad (3-12)$$

当取并组合时，模糊推理机的输出是  $M$  个模糊集  $\{B_1, \dots, B'_M\}$  的并运算，即：

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{B'_1}(y) + \dots + \mu_{B'_M}(y) \quad (3-13)$$

当取交组合时，模糊推理机的输出是  $M$  个模糊集  $\{B_1, \dots, B'_M\}$  的交运算，即：

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{B'_1}(y) * \dots * \mu_{B'_M}(y) \quad (3-14)$$

这里，\* 表示 t-范数，+ 表示 s-范数。

由以上可知，推理机可有很多种选择，一般应选取原则是具有直观性，计算效率高的模糊推理机，常用的有以下几种：

### A、乘积推理机 (Product Inference Engine)

采用模糊并组合的独立推理，用 Mamdani 积含义解释的 IF-THEN 规则，所有 t-范数选用代数积算子，所有 S-范数选用最大算子。

### B、最小推理机 (Minimum Inference Engine)



使用模糊并组合的独立推理, 用 Mamdani 最小含义解释 IF-THEN 规则, 所有 t-范数选用最小算子, 所有 S-范数选用最大算子。

### C、Zadeh 推理机 (Product Inference Engine)

使用模糊交组合的独立推理, 用 Zadeh 含义解释 IF-THEN 规则, 所有 t-范数选用最小算子。

## 5、解模糊(Defuzzifier)

解模糊器可定义为  $V \subset R$  上的模糊集合  $B'$  向清晰集合  $y^* \in V$  的一种映射。从概念上讲, 解模糊的任务是确定一个最能代表模糊集  $B'$  的  $V$  上的点。应考虑计算的简便性和连续性,  $B'$  的微小变化不会造成  $y^*$  的大幅度变动。即根据模糊推理的结果, 求得最能反映控制量的真实分布。下面列出较常用的几种解模糊方法:

### (1) 重心解模糊器 (Center of Gravity Defuzzifier)

重心解模糊器所确定的  $y^*$  是  $B'$  的隶属度函数所涵盖区域的中心, 其数学表达式如下:

$$y^* = \frac{\int_V \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (3-15)$$

这里的  $\int_V$  是常规积分运算。重心解模糊器是比较合理的解模糊方法, 但计算比较复杂, 因为隶属度函数通常是不规则的, 故解积分方程的难度很大, 实际应用较少。

### (2) 中心平均解模糊器 (Center of Gravity Defuzzifier)

由于模糊集合  $B'$  是  $M$  个模糊集的模糊并或模糊交合成, 所以一个较好的逼近就是  $M$  个模糊集中心的加权平均, 其权重等于相应模糊集的高度。令  $y^l$  为第  $L$  个模糊集的中心,  $w_L$  为其高度, 中心平均解模糊器由下式确定:

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M y^l w_l}{\sum_{l=1}^M w_l} \quad (3-16)$$

中心平均解模糊器是最常用的解模糊器, 直观合理, 计算也较为简便。

### (3) 最大值解模糊器 (Maximum Defuzzifier)

最大值解模糊器是把  $y^*$  确定为  $V$  上的  $\mu_{B'}(y)$  取得最大值的点。设  $hgt(B')$  是  $V$  上所有的  $\mu_{B'}(y)$  取得其最大值的点的集合, 则当有多个最大值点存在的时候, 大中取平均值的解模糊器为:

$$y^* = \frac{\int hgt(B') y dy}{\int hgt(B') dy} \quad (3-17)$$

此类解模糊器合理简便, 但有可能存在  $B'$  的微小变化就造成  $y^*$  的很大变化, 应用时应当注意防止这一情况的发生。

## 6、模糊控制器的论域及比例因子与量化因子<sup>[60]</sup>

模糊控制器的运算是基于模糊论域进行的, 而模糊论域正是由表征实际系统的基本论域通过比例因子这一通道增益而来, 模糊控制器的论域和比例因子的选择往往对控制器动、静态性能会有较大的影响。以  $K_e$ 、 $K_{ec}$ 、 $K_u$  分别表示误差、误差变化率和控制量的比例因子与量化因子, 则模糊论域为:

$$E = \{-n_1, -(n_1 - 1) \cdots, 0, 1, \cdots, n_1 - 1, n_1\} \quad (3-18)$$

$$EC = \{-n_2, -(n_2 - 1) \cdots, 0, 1, \cdots, n_2 - 1, n_2\} \quad (3-19)$$

$$U = \{-m, -(m - 1) \cdots, 0, 1 \cdots, m - 1, m\} \quad (3-20)$$

比例因子有如下数学表达式:

$$K_e = n_1 / |e_{\max}| \quad (3-21)$$

$$K_{ec} = n_2 / |ec_{\max}| \quad (3-22)$$

$$K_u = m / |u_{\max}| \quad (3-23)$$

一般来说,  $K_e$ 、 $K_{ec}$ 、 $K_u$  对模糊控制系统的动静态影响有如下描述:

$K_e$  越大, 系统的超调越大, 过度过程越长;  $K_e$  越小, 系统变化越慢, 稳态精度越低;

$K_{ec}$  越大, 系统输出变化率越小, 系统变化越慢;  $K_{ec}$  越小, 系统响应越快, 但超调量增大;

$K_u$  的作用则复杂得多。在具体的工程应用中  $K_e$ 、 $K_{ec}$ 、 $K_u$  的选取还需考虑计算机字长; 输入输出、A/D、D/A 转换精度及其变化范围等因素。

### 3.3 模糊控制系统的性质

经过众多模糊控制学者的研究,发现模糊系统具有如下重要性质:

#### 3.3.1 万能逼近定理<sup>[11]</sup>

Mamdani 模糊系统和 T-S 模糊系统在过去几年中被证明是万能逼近器,即模糊系统同多项式一样能以任意精度逼近紧集上的任意非线性函数。从而模糊系统就能够广泛应用到各类问题中去。下面将模糊系统的万能逼近特性概括如下:

假定输入论域  $U$  是  $R^n$  上的一个紧集,对于任意定义在  $U$  上的连续函数  $g(x)$  和任意的  $\varepsilon > 0$ ,一定存在一个模糊系统  $f(x)$  使得下式成立:

$$\sup |f(x) - g(x)| < \varepsilon \quad (3-24)$$

上式说明了对于任意非线性运算,总能设计出一个模糊系统,使其以任意精度完成所需运算,这是模糊控制能够在工业上大量成功应用的一个重要原因。

#### 3.3.2 非线性 PD 控制特性<sup>[62]</sup>

研究证明,常规的模糊控制系统以误差及误差的变化作为输入变量,因此具有比例和微分的作用,而缺少积分环节的作用,故类似于非线性 PD 控制律。这样在变量分级不够多的情况下,常常会引起在平衡点附近有振荡现象或存在稳态误差,这是常规模糊控制器难以实际应用的一个不足之处。

因此,在采用模糊控制时,为取得较好的控制效果需要引入积分环节或者与其它控制策略相结合以消除误差。目前针对复杂过程而言,研究较多的有自适应模糊控制、预测模糊控制或其它智能控制或先进控制技术融合应用。

### 3.4 传统模糊控制的优缺点

自1974年应用于锅炉和蒸汽机控制以来,模糊控制取得了很大进展并在现实中成功应用,其根源在于模糊逻辑本身提供了由专家构造语言信息并将其转化为控制策略的系统推理方法,因而能解决许多复杂而无法建立精确数学模型的控制问题,是处理推理系统和控制系统中不精确和不确定性的有效方法。

#### 3.4.1 模糊控制的优点

其主要优点<sup>[26]</sup>表现在以下几个方面:

- (1) 模糊控制系统的设计不要求知道被控对象的精确数学模型, 只需要提供现场操作人员的经验知识及操作数据, 因而使得控制机理和策略易于接受与理解;
- (2) 由工业过程的定性认识出发, 用语言变量代替常规的数学变量, 因而模糊控制对数学模型难以获取、动态特性不易掌握或变化非常显著的对象较为适用;
- (3) 与常规控制器相比, 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, 适应于解决常规控制难以解决的非线性、时变及滞后系统;
- (4) 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;
- (5) 控制推理采用“不精确推理”(Approximate Reasoning)。推理过程模仿人的思维过程, 由于介入了人类的经验, 因而能够处理复杂甚至“病态”的系统。

### 3.4.2 传统模糊控制的局限性

模糊控制系统是处于发展中的一种控制方法, 它的理论和方法正在完善。常规的模糊控制器依赖人的经验, 易受主观意志的影响, 因此对于复杂的生产过程要进一步提高其控制效果就必须改进常规模糊控制器的性能, 使其具有自组织和自适应能力, 以满足控制过程的不同要求。同时, 在现代控制工程中, 许多被控系统具有很强的非线性, 而且系统中存在许多不确定量, 导致其模型往往具有一定的不确定性, 因而对于某些复杂的工业过程, 往往难以总结出较完善的经验, 此时, 模糊控制规则或者缺乏, 或者很粗糙, 往往难以达到高水平控制。另外, 当被控对象参数发生变化, 或受到随机干扰的影响时, 都会导致模糊控制效果变差。随着模糊控制理论的日益完善和模糊控制技术的不断发展, 模糊控制的不足会得到逐步解决, 而模糊控制也就会进入更高的层次。

### 3.4.3 模糊控制的发展方向

在模糊控制理论与应用研究中, 尚有以下一些课题需要加强:

- (1) 研究模糊控制器工作的实质和机理, 分析规则本身非线性问题, 揭示非线性本质同常规控制策略的联系;
- (2) 研究模糊控制器的在线优化设计问题。由于模糊控制器源于启发式直觉推理, 其本身的推理方式难于保证控制效果的最优, 解决模糊控制器的优化问题是进一步将其推向工业应用的有效手段;
- (3) 在理论及实际应用中模糊控制器的规则自学习和自动获取问题。前者之所

以成为难点,是因为具有线性规则的模糊控制器本身已属非线性控制,非线性规则使问题的系统化研究方法困难;后者则构成智能控制中专家系统的核心问题;

(4) 在理论研究中,需进一步从模糊系统的固有特点出发,研究诸如稳定性、模糊规则的设计方法、动态系统模糊模型化、控制器参数的最优调整等问题,以便完善模糊控制理论体系,使之更适合解决工程实际问题;

(5) 将模糊控制同其它领域的理论研究方法相结合,利用模糊控制的优势解决该领域中过去用常规方法难以解决的问题。

本文正是根据以上几条内容,提出将模糊控制与内模控制相结合对一个含时滞电加热炉实施温度控制,分别利用了二者的优点并对其缺点加以克服,从而在达到快速跟踪的同时取得了较高的稳态控制精度。

### 3.5 本章小结

模糊控制非常适合于工业过程控制,近年来在理论研究和实际应用上都取得了巨大进展。本章在介绍了模糊控制的原理、结构及设计方法的基础上,进一步说明了模糊控制具有非线性 PD 性质、万能逼近能力、存在稳态误差等特点。最后,指出了模糊控制今后的研究方向及在应用时进一步提高控制效果的途径。

## 第四章 模糊内模并行控制算法原理

### 4.1 概述

前已介绍,内模控制系统的设计与实现较为直观,具有调节性能好、鲁棒性强的优点,可消除不可测干扰的影响,非常适合于时滞过程的控制,但在实际生产中由于实际的执行机构并不能满足所需要的输出量的幅度,从而使其应用效果大为降低<sup>[48-50]</sup>。这样就使得在应用时控制量并不能无限制的增加或减少,即控制量受限问题,从而在应用时达不到内模控制的理想控制结果。模糊控制具有万能逼近能力<sup>[11]</sup>,能以任意精度接近输入量,鲁棒性强,具有很好的跟踪性能,超调量较小,尤其适合于非线性、时滞过程和不确定系统的控制。但是一般的模糊控制属于非线性 PD 控制律<sup>[60]</sup>,存在一些本身难以克服的缺点,如没有积分作用,使模糊控制在接近平衡时会存在稳态误差或振荡现象,不能达到较高的控制精度等。因此,需要对以上两种控制方法加以改进才能应用于实际生产过程。

针对以上两种控制策略的优点与不足,本文提出一种模糊内模复合控制算法对时滞过程进行控制,即在误差较大时采用模糊控制策略,此时追求是快速性目标;而在误差较小时采用内模控制来消除稳态误差,以提高控制精度为主,两种控制方法的切换可由计算得到或根据经验确定的阈值设定来实现。以下首先介绍纯滞后过程的模糊内模并行切换控制算法的结构和原理。

### 4.1 模糊内模并行控制结构

本文提出的时滞过程模糊内模复合控制算法如下图所示:

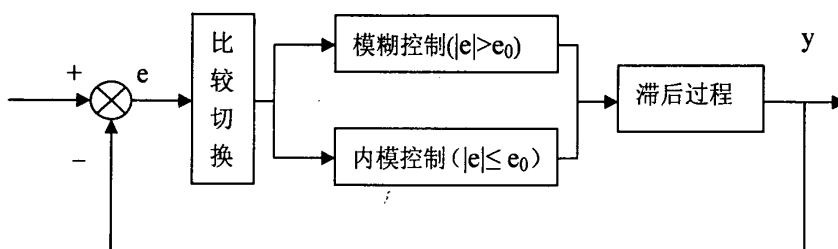


图 4-1 模糊内模并行控制算法原理图

如图所示,其控制思想是设定一个阈值  $e_0$ , 首先将偏差的绝对值与阈值  $e_0$  ( $e_0 > 0$ ) 相比较。当  $|e| > e_0$  时,采用模糊控制策略,利用模糊控制的快速跟踪特

性迅速接近设定值；当 $|e| \leq e_0$ 时，切换到内模控制策略，此时利用内模控制的稳态精度高的特性和鲁棒性强的特点，实施精确控制，及时克服扰动和时滞的影响。

## 4.2 离散系统内模控制器设计

电加热炉是一个含有较大纯滞后、惯性较大、易受干扰、有一定非线性的系统，其对象特性不像简单的线性系统那样，各个环节的传递函数可以用机理建模的方法，最后得到一个比较精确的数学模型。这里将其看作一个黑箱，用实验方法测试其输入输出特性，然后用近似数学模型来拟合。其对象特性可表示为：

$$G(s) = \frac{k}{1+Ts} e^{-\tau s} \quad (4-1)$$

在实际的计算机控制系统里，需要加入采样保持环节。可知被控对象离散化后的Z域传递函数为：

$$G(z) = z^{-(N+1)} \frac{K(1-\alpha_m)}{1-\alpha_m \cdot z^{-1}} \quad (4-2)$$

$T_s$ 为采样时间， $N$ 为纯滞后时间对采样周期的整数倍。

再根据内模控制器的设计步骤，将 $G(z)$ 分解为含时滞部分和不含时滞部分：

$$G_m(z) = G_{m^+}(z) \cdot G_{m^-}(z) \quad (4-3)$$

取内模控制器为不含时滞部分的逆：

$$G_{m^-}^{-1}(z) = \frac{K(1-\alpha_m)}{1-\alpha_m \cdot z^{-1}} \quad (4-4)$$

对于滤波器，这里选用一阶形式的滤波器：

$$F(s) = \frac{1}{1+\lambda s} \quad (4-5)$$

同样将 $F(s)$ 离散化得到：

$$F(z) = \frac{1-\alpha_f}{1-\alpha_f \cdot z^{-1}} \quad (4-6)$$

$$\text{这里, } \alpha_m = \exp\left(-\frac{T_s}{T}\right) \quad (4-7)$$

$$\alpha_f = \exp\left(-\frac{T_s}{\lambda}\right) \quad (4-8)$$

这样，就得到包括一阶滤波器在内的控制器在 Z 域的传递函数为：

$$G(z) = G_m^{-1}(z) \cdot f(z) = \frac{1 - \alpha_m z^{-1}}{k(1 - \alpha_m)} \cdot \frac{1 - \alpha_f}{1 - \alpha_f z^{-1}} \quad (4-9)$$

将其转化为控制器的输入-输出差分方程为：

$$U_k = \frac{1 - \alpha_f}{K(1 - \alpha_m)} [e(k) - \alpha_m e(k-1)] + \alpha_f U(k-1) \quad (4-10)$$

用于计算模型输入、输出的差分方程为：

$$T_m(k) = \alpha_m T_m(k-1) + k(1 - \alpha_m)U(k-N+1) \quad (4-11)$$

根据已知条件：经多次开环阶跃响应实验测试，求得电加热炉在其主要工作区域的一阶近似传递函数为：

$$G(s) = \frac{1.3}{300s+1} e^{-100s} \quad (4-12)$$

本次实验将采样保持周期取为 5 秒，由仿真结果取  $\lambda$  的值为 30。

依次代入计算式 (4-7)、(4-8) 得：

$$\alpha_m = 0.9835,$$

$$\alpha_f = 0.8465。$$

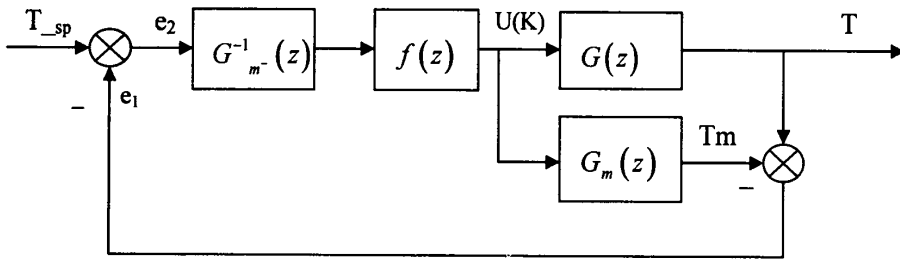


图 4-2 内模控制系统计算结构图

最终，将以上已知条件代入 (4-10) 和 (4-11)，得到内模控制系统的差分方程计算式为：

$$U(k) = 7.1395[e_2(k) - 0.9835e_2(k-1)] + 0.8465U(k-1) \quad (4-13)$$

用于计算内部模型输出的差分方程为：

$$T_m(k) = 0.9835T_m(k-1) + 0.02145U(k-19) \quad (4-14)$$



其中,  $e_1(k)$ 、 $e_2(k)$ 分别为:

$$e_1(k) = T(k) - T_m(k) \quad (4-15)$$

$$e_2(k) = T_{sp} - e_1(k) \quad (4-16)$$

这里,  $U(k)$ 为内模控制系统输出,  $T(k)$ 为采样得到的实际温度值,  $T_m(k)$ 为过程内部模型的输出值,  $e_1(k)$ 为过程输出与模型输出之差,  $e_2(k)$ 为温度设定值与 $e_1(k)$ 之差。

可以看出, 由于纯滞后的存在, 使得在计算内部模型输出时需要用到前 19 次的控制器输出量, 即当前时刻输出量变化在 19 个采样周期后才能够反映出来, 这也正是此类过程易产生振荡和难以控制的原因。

### 4.3 模糊控制系统设计

模糊控制系统的设计主要包括模糊控制器的结构选择、模糊规则库的建立、模糊推理机的选择、模糊器和解模糊器、比例因子及量化因子的选择等几个内容。这里主要是对温度的上升和下降区域进行控制, 因此追求好的跟踪性能最为重要, 以下选择均是出于此考虑。

#### 4.3.1 模糊控制器的结构选择

为了取得较好的动态性能及方便计算, 这里选用二维输入单输出控制器, 即取采样温度和设定温度的误差  $e$  及误差的变化率  $\Delta e$  作为输入量, 选用 PLC 的输出增量  $\Delta U$  作为控制器的输出电流, 以实现加热功率的调节。

经实验测定, 当以最大输出量加热时, 水温大约会在每 10 秒上升 1 度; 系统滞后为 100 秒; 惯性约 300 秒; 而降温速度比升温速度有所减慢, 常常出现减小输出量后温度仍有大幅上升和不稳定现象。因此, 根据以上经验可知此系统实现较好控制的一个关键问题是减少超调, 抑制振荡, 克服时滞作用。

##### 1、温度误差

这里, 为包含尽量多的可能出现情况, 选取温度误差  $e$  的语言变量为  $E$ , 其论域为:

$$X = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\} \quad (4-17)$$

论域上的模糊子集为:

$$\tilde{A}_i (i=1,2,\dots,7) \quad (4-18)$$

模糊子集语言值分别对应:

[负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 正好(ZO), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)],

表示当前温度对于温度设定值为“很高, 较高, 偏高, 正好, 偏低, 较低, 很低”。

## 2、温度变化率

温度变化率  $\Delta e$  采用每隔一分钟的采样温度差值:

$$\Delta e = T_1 - T_2 \quad (4-19)$$

作为变化率, 取语言变量为 EC, 论域为:

$$Y = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\} \quad (4-20)$$

论域上的模糊子集为:

$$\tilde{B}_j (j=1,2,\dots,5) \quad (4-21)$$

模糊子集语言值分别对应:

[负大(NB), 负小(NS), 不变(ZO), 正小(PS), 正大(PB)], 表示当前温度的变化为“快速下降, 下降, 不变, 上升, 快速上升”。

## 3、输出控制量

输出控制量  $\Delta U$  取其语言变量为  $U$ , 论域:

$$Z = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\} \quad (4-22)$$

论域上的模糊子集为:

$$\tilde{C}(k) (k=1,2,3,4,5,6,7) \quad (4-23)$$

相应的模糊子集语言值对应:

[负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 不变(ZO), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)],

表示控制执行机构的加热量为“大幅度减小加热量, 加热电流减小量中等, 加热电流减小, 电流不变, 加热电流增加, 加热电流增加量大, 大幅增加加热量”。

另外, 当出现测量值超出各变量的基本论域范围时, 将其作为临近的边界值作边界处理。

### 4.3.2 输入量模糊化

对输入变量  $e$  和  $\Delta e$  的模糊化选用了三角形模糊器<sup>[11]</sup>。其隶属度函数为:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{其它情况} \\ \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) * \dots * \left(1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}\right) & |x_i - x_i^*| \leq b_i (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (4-24)$$

下面是用模糊器离散为量化等级的  $e$ 、 $\Delta e$  和  $U$  隶属度赋值表:

#### 1、温度偏差量 $E$

表 4-1 偏差量模糊集合隶属度赋值表

	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
PB	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0.5	1	0.5
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0
Z	0	0	0.5	1	0.5	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NM	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0

#### 2、偏差变化率 $EC$

表 4-2 偏差变化率模糊集合隶属度赋值表

EC	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
PB	0	0	0	0	0.3	0.7	1
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0
Z0	0	0	0.5	1	0.5	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NB	1	0.7	0.3	0	0	0	0

#### 3、控制量 $U$

这里, 对控制量  $U$  的模糊化选用了高斯隶属度函数, 其赋值表如下:

表 4-3 输出控制量模糊集合隶属度赋值表

U	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
PB	0	0	0	0	0	0.3	1
PM	0	0	0	0	0.4	1	0.4
PS	0	0	0	0.4	1	0.4	0
ZO	0	0	0.4	1	0.4	0	0
NS	0	0.4	1	0.4	0	0	0
NM	0.4	1	0.4	0	0	0	0
NB	1	0.3	0	0	0	0	0

### 4.3.3 模糊控制规则表

根据控制经验的积累，得到如下形如：

$$\text{if } E=X \text{ and } EC=Y, \text{ then } U=Z$$

的 35 条模糊控制规则，表示各种可能出现的情况。具体见下表 4-4。

表 4-4 模糊控制规则表

E \ EC	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
PS	PM	PM	ZO	NS	NS	NB	NB
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
NS	PB	PB	PS	PS	ZO	NM	NM
NB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM

### 4.3.4 模糊推理机

这里选用了乘积推理机，使用模糊并组合的独立推理和 Mamdani 积含义，其中 t-范数取代数积算子，s-范数取最大算子。其计算式<sup>[11]</sup>如下：

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^M \left[ \sup_{X \in U} \left( \mu_{A'}(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x) \mu_{B'}(y) \right) \right] \quad (4-25)$$

这样，给定一个模糊输入集合 A' 即可由上式推出模糊集合 B'。

### 4.3.5 解模糊器

中心平均解模糊器(Center Average Deffuzzifier)是模糊系统与模糊控制中最常用的解模糊器,计算较为简便,故这里选用了中心平均解模糊器。具体讲,令  $\bar{y}^l$  为第  $l$  个模糊集的中心,  $w_l$  为其高度,则中心平均解模糊器<sup>[11]</sup>可由下式计算确定:

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \bar{w}_l}{\sum_{l=1}^M w_l} \quad (4-26)$$

### 4.3.6 模糊控制表

模糊控制应用时通常采用离线计算在线查询的工作方式。即根据上面所述的输入语言变量的模糊量化,再经过乘积推理机和中心平均解模糊器的解模糊离线运算,可得到一个  $7 \times 7$  的模糊矩阵查询表,从而可将此表输入到计算机内部,即可进行在线查询实施电加热炉的温度模糊控制。见下表 4-5 所示:

表 4-5 模糊控制查询规则表

E							
EC	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
-3	-1.62	-0.9	0	0.9	1.62	2.04	2.46
-2	-1.56	-0.96	-0.06	0.84	1.44	1.8	2.34
-1	-1.8	-1.26	-0.12	0.6	1.02	1.56	2.22
0	-2.04	-1.44	-0.72	0	0.72	1.44	2.04
+1	-2.22	-1.56	-1.02	-0.6	0.12	1.26	1.8
+2	-2.34	-1.8	-1.44	-0.84	0.06	0.96	1.56
+3	-2.46	-2.04	-1.62	-0.9	0	0.9	1.62

可知,根据每次的误差及其变化率输入都可以得到一个控制量  $U$ ,然后将  $U$  乘以量化因子即可变换为实际的控制量,从而推动执行器改变动作实施控制。这里所得到的模糊控制量为量化值,需进行解模糊处理以获得执行机构可以执行的精确控制量  $\Delta U$ ,其计算式如下:

$$\Delta U(k) = U \cdot k_u \quad (4-27)$$

对于比例因子和量化因子的选择, 经过计算和运行调整, 这里  $Ke$  取为 0.1,  $Ke_c$  取为 0.5,  $Ke$  取为 25。

经过解模糊处理得到的是增量形式的控制输出, 不能直接用来控制被控对象, 需要和上一时刻计算机输出值相加。设  $U(k)$  为  $k$  时刻执行器所需要的控制量,  $U(k-1)$  为计算机的上时刻输出值, 则有:

$$U(k) = U(k-1) + \Delta U(k) \quad (4-28)$$

由此即完成了计算机的模糊控制器设计, 经过和内模控制器并行切换即可实现对电加热炉的模糊内模并行切换控制。

#### 4.4 本章小结

以上介绍了本文提出的模糊内模并行控制方案及其控制器的具体设计方法。这里, 一阶滤波器参数  $\alpha_f$  的设计往往不是通过计算得出或仿真得到, 而需要在实际运行时调整到最佳取值。另外, 关于阈值的确定也需要进一步探讨, 本文对此是通过反复试验来获得最佳取值。如果取值与设定值相比太小, 不能更有效地发挥出模糊控制的快速性优点, 也不能解决内模控制的限幅问题; 而如果取值太接近于设定值, 则容易产生反复切换现象, 而且超调现象也较严重, 并行切换控制的优势就不能有效地发挥出来。

## 第五章 电加热炉温度的模糊内模控制应用

### 5.1 概述

电加热炉是一种在过程工业中广泛应用的供热设备,一般具有大时滞、大惯性、干扰频繁等特点。在采用传统 PID 控制策略对其温度进行控制时一般会出现超调量大,不易稳定等现象,很难达到较为精确的控制效果,从而使其它相关反应过程受到影响甚至引起事故。而当今一些基于模型辨识、在线计算、滚动优化的复杂算法对硬件要求很高,编程复杂,在工业过程中实现起来较为困难。因此,开展对适合于工业生产实际的新型控制策略研究,有效提高对类似过程的控制精度具有积极的理论意义和广泛的应用价值。

下文将依据前面章节里介绍的模糊内模复合控制算法对一个大时滞电加热炉温度控制系统实施实时控制,以期说明在硬件要求不高的情况下,将模糊控制与内模控制两种控制策略结合起来所表现出来的优越性能。

本章将简要说明温度控制装置的锅炉整体结构、PLC 硬件配置情况、上位机监控组态软件等;其次介绍基于 PLC 编程实现的模糊内模并行控制算法的步骤;给出实时温度监控曲线并与其它控制策略的效果相对比证明其有效性,并根据运行结果进行分析;最后进一步指出此控制算法的优越性及本次实验的需要改进之处,为今后的应用指出具体建议。

### 5.2 电加热炉温度控制系统介绍

#### 5.2.1 系统硬件结构

电加热炉温度控制系统的硬件整体结构由温度控制部分、冷却水压力控制部分、冷却水流量控制部分、可编程逻辑控制器、上位计算机和通讯部分等构成。其控制核心为可编程逻辑控制器,集中处理通讯、信号采集与变换、计算控制量、各控制回路的启停等;上位计算机用来完成控制程序的编写、下载,以及通过组态软件对变量运行情况实施监控、归档,也可以发布控制命令修改运行参数。

控制系统整体结构如下图 5-1 所示:

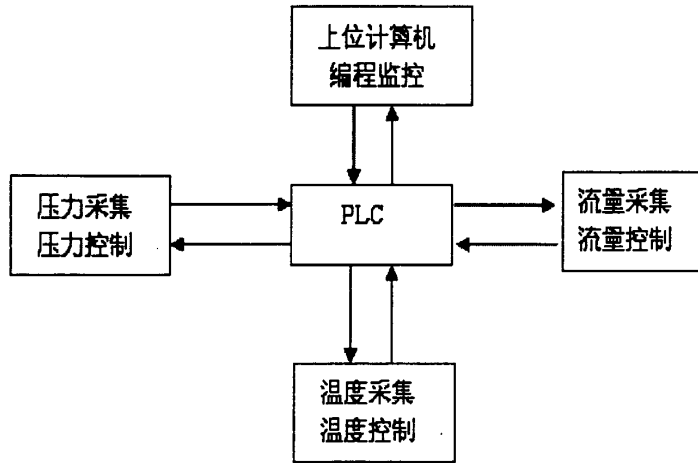


图 5-1 电加热炉温度控制整体结构图

### 1、温度控制部分

本文的研究对象电加热炉温度控制系统是一个采用 220V 电力供热的小型锅炉，如图 5-2 所示：

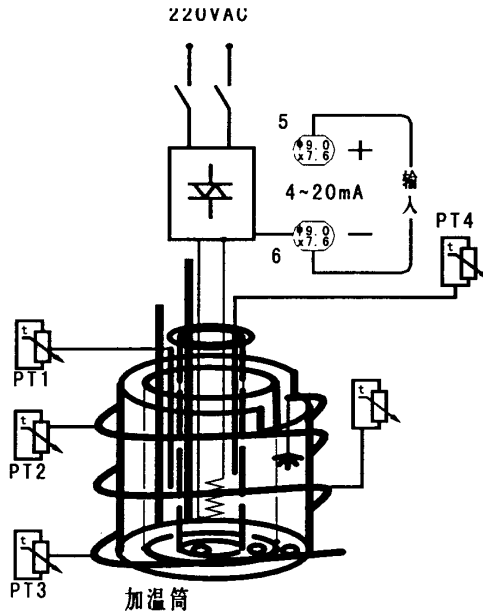


图 5-2 电加热炉结构示意图

锅炉的整体结构从里向外可分为三层：最里面是加热层，是一个以水为加热介质的静态储水容器。其加热执行机构是 2KW 的电阻丝，通过接收 0-220V 的电压信号来改变加热功率；锅炉中间部分是冷却层，装有动态的流水，由传热元件将加热层的热量向冷却层的水传递热量，在这里实现换热以提高流水水温；最



外面一层是溢流层，在冷水进入冷却层完成热交换后，热水通过一段较长的盘管流出备用。这里需要控制的是盘管末端的温度，由于盘管的存在，使得滞后时间达到了 100 秒以上，因而采用常规的 PID 控制效果不佳，超调量很大，过渡过程时间较长，易产生振荡。

图 5-3 是锅炉温度控制系统简图。用于检测出水口温度的是三线制 Cu50 温度传感器，经过变送器可将温度信号转化为 4~20mA 的直流信号，完成信号检测与变送。PLC 接收温度变送器信号并与给定值对比，通过内置的算法计算所需的输出量，输出 4~20mA 标准电流信号到交流固体继电器，并线性转换为 0-220V 交流电压控制电热丝的功率，从而完成温度闭环控制。

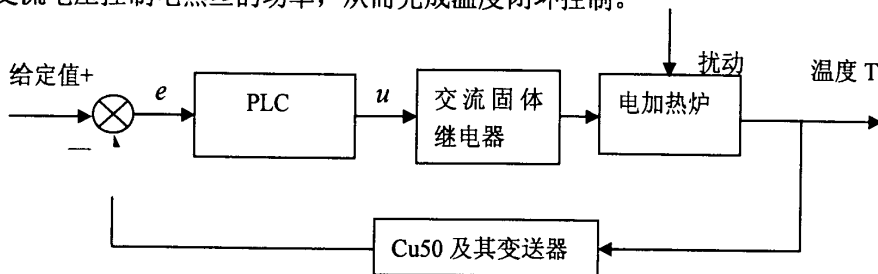


图 5-3 温度控制系统简图

## 2、冷却水流量控制部分

由于这里水管压力和流量也会对温度产生影响，在水压波动时会引起流量变化，会产生干扰影响温度平衡。故需要同时对这两个回路加以控制实现恒压恒流。

冷却层内水的流量控制系统如图 5-4 所示：

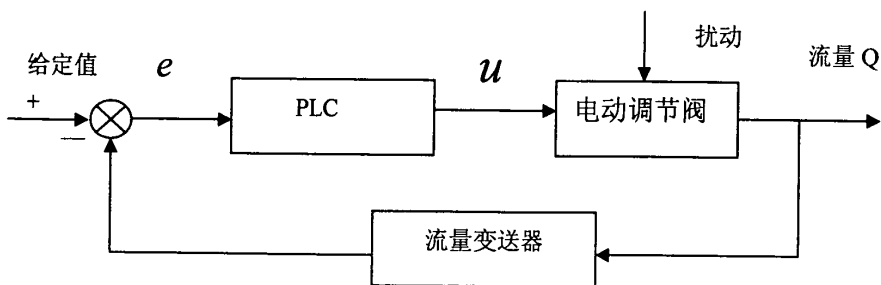


图 5-4 冷却水流量控制系统简图

这里，冷却水的流量控制和压力控制较为简单，采用 PID 控制足可满足控制要求。用流量计采集管路的流量信号，并转变为 4-20mA 电流信号，输入到 PLC 中，经过与给定流量比较及计算，产生控制信号输出给电动调节阀改变其开度，实现闭环控制。

## 3、冷却水压力控制部分

冷却层内水的压力控制系统如图 5-5 所示,由压力采集及变送装置将压力信号 4-20mA 电流传输至 PLC 中,与设定压力比较并计算,产生控制信号 4-20mA 电流传输给变频器,实现对水泵的变频调节其转速从而控制水管压力。

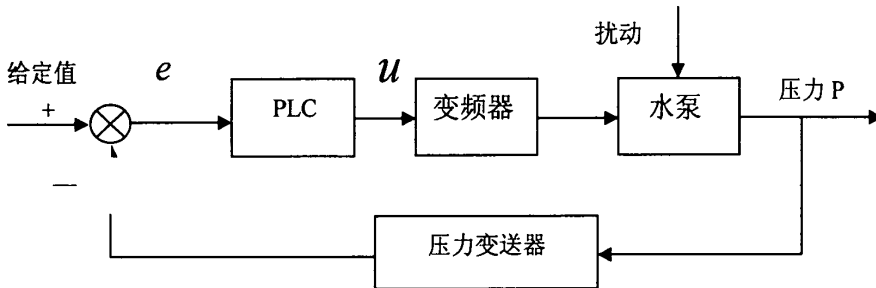


图 5-5 管网压力控制系统简图

#### 4、可编程逻辑控制器

实现这几个回路控制的系统核心为 Siemens S7-300PLC,它基于模块化结构设计,各种单独模块之间可进行广泛组合和扩展,具有强大的运算和控制功能。系统主要由中央处理单元、存储器、信号模块、通信处理器、功能模块以及其他辅助设备。

主要配置为: S7-314C-2DP CPU、MMC64K 存储器、SM331 8AI 模块、SM334 4AI/2AO 模块、PROFIBUS-DP 处理器及 PS307 专用电源等。

#### 5、通讯

上位计算机的串口和 PLC 的 MPI 口连接采用 PC-ADAPTER,工程师站\操作员站和 PLC 的多点连接用 CP5611 通讯卡,可支持 MPI 协议、PROFIBUS-DP 协议和 S7 connections 等。

#### 6、上位计算机

一般将装有 PLC 编程软件的计算机称为工程师站,其主要完成系统硬件组态、符号编辑及程序编写等任务;将一台装有监控软件的计算机称为操作员站,其主要完成操作员站画面组态、变量连接、系统报警、变量曲线生成等功能。需要通过通讯接口将上位机和 PLC 连接起来,在本控制系统中,是用 MPI 网络组建上位机和 PLC 的连接,从而可实现编程和指令的下载及数据交换。

在本套温度控制系统装置里,操作员站和工程师站为同一台计算机。

### 5.2.2 控制系统软件环境

控制系统的主要支持软件包括 Simens S7 系列 PLC 编程软件 STEP 7 和上位机组态软件西门子视窗控制中心(Windows Control Center)。STEP 7 是支持用户开发应用程序的软件包; WinCC 为人机界面/数据采集监控系统(HMI/SCADA)组态软件, 是 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)的软件平台工具。

### 1、STEP 7<sup>[63]</sup>

STEP 7 主要包括以下几种组件:

- (1) SIMATIC 管理器, 用于集中管理所有工具以及自动化项目数据;
- (2) 程序编辑器, 用于 LAD、FBD、STL 语言生成用户程序;
- (3) 符号编辑器, 用于管理全局变量;
- (4) 精简组态, 用于组态和参数化硬件;
- (5) 硬件诊断, 用于诊断自动化系统的状态;
- (6) NetPro, 用于组态 MPI 和 PROFIBUS 等网络连接。

STEP 7 标准软件包支持自动任务创建过程的各个阶段, 可在 Windows 操作系统下运行并于 Windows 的图形和面向对象的操作原则相匹配。

### 2、SIMATIC WinCC<sup>[64]</sup>

SIMATIC WinCC 是 1996 年进入世界工控组态软件市场的 HMI/SCADA 软件, 适合于世界上各主要制造商生产的控制系统, 如 A-B、Modicon、GE 等, 并且通讯驱动程序种类还在不断增加。通过 OPC 方式, WinCC 能与更多的第三方控制器进行通讯。作为 SIMATIC 系列产品的重要组成部分, WinCC 确保与 SIMATIC S5、S7 和 S05 系列的 PLC 连接的方便和通讯的高效, 而且 WinCC 与 STEP 7 编程软件的紧密结合有利于缩短项目开发的周期。

作为一个完整的软件体系, WinCC 主要由以下几大部件构成:

#### (1) 变量管理器

用于管理 WinCC 中所有使用的外部变量、内部变量和通讯驱动程序。

#### (2) 图形编辑器

用于设计各种图形组态画面。

#### (3) 报警记录

负责采集和归档报警信息。

#### (4) 变量归档

负责处理测量值, 并长期存储所记录的过程值。

(5) 报表编辑器

提供许多标准的报表，也可自行设计报表并进行打印。

(6) 全局脚本

这部分是系统设计人员用 ANSI-C 或 VB 编写的代码，以满足项目的需要。

(7) 文本库

用来编辑不同语言版本下的文本消息。

(8) 用户管理器

用来分配、管理和监控用户对组态和运行系统的访问权限。

(9) 交叉引用表

负责搜索画面、函数、归档和消息中使用的变量、OLE 对象和 ActiveX 控件。

### 5.3 温度控制 STEP-7 程序编写步骤

前面已经介绍，本套装置中的整个电加热炉温度控制程序要实现 3 个回路的控制和输出量计算。其流程图如下所示：

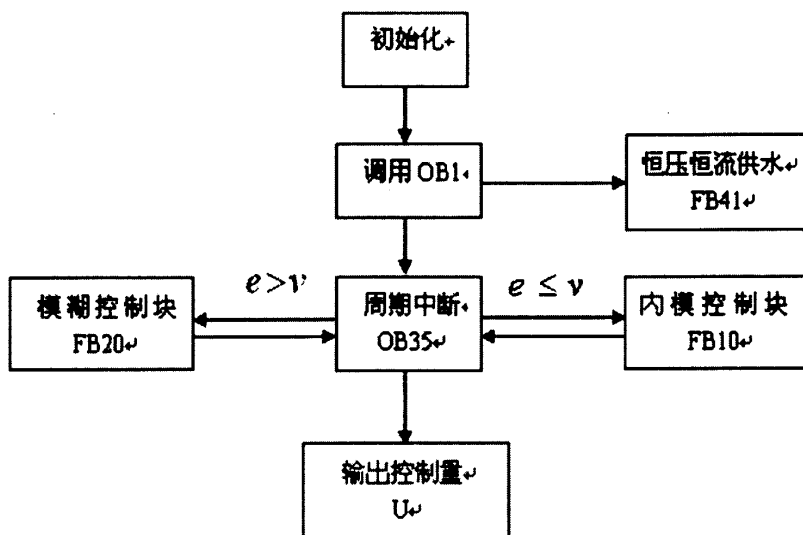


图 5-6 电加热炉温度控制程序流程图

其中，流量控制和压力控制采用 PID 控制程序，在主程序 OB1 中实现；温度控制计算程序采用上述的模糊控制和内模控制的并行切换算法，通过中断功能块 OB35 循环条件根据误差的大小实现条件调用，其周期为每 5 秒执行一次。当误差大于阈值时，调用模糊控制功能块 FB20 与相应的功能 FC 和数据块 DB；当

误差小于等于阈值时，调用内模控制计算程序块 FB10 与相应数据块 DB。

### 5.3.1 模糊控制程序步骤

为减小 PLC 的计算量，这里采用了离线计算、在线查询的模糊控制步骤 [68-70]。编程时采用了模块化方法，即将模糊控制功能块 FB20 所要完成的任务分别以功能的形式分割实现，然后通过 FB20 按顺序调用各个功能块。这里，由功能 FC1 实现温度误差及其变化率的采集、计算；由功能 FC2 实现温度误差及其变化率的模糊化处理；由功能 FC3 实现模糊控制表的查询功能；由功能 FC4 实现模糊控制量  $U$  到精确量的转化。其流程图如下：

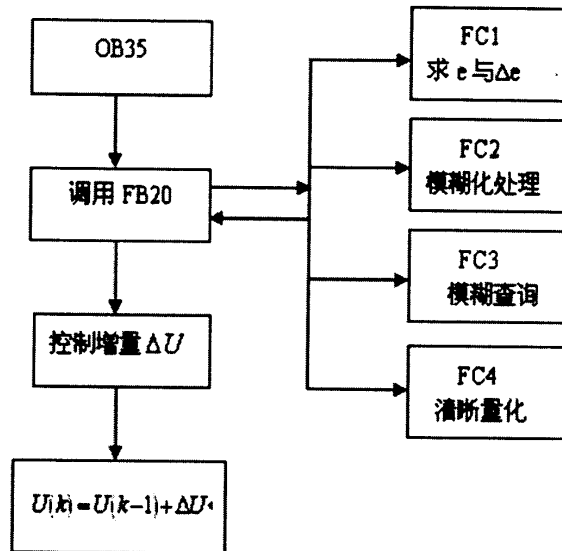


图 5-7 PLC 模糊控制流程图

整个控制程序的关键部分是模糊控制表的存储与查询功能，即 FC3 部分，这里采用了语句表编程实现模糊量的寻址。为适合于查询，在存储模糊控制表时分别将表 4-5 中的  $E$  和  $EC$  的输入集  $(-3, 3)$  变换为  $(0, 6)$ ，如下表 5-1 所示。然后按照从上到下、从左到右的顺序依次将对应的实数型控制量存入到 DB8 中，比如第 1 行第 1 列的相应控制值 -1.62 存为 DB8.DBD0.0，第 2 行第 1 列的相应控制值 -1.56 存为 DB8.DBD4.0，依次类推，共需存储 49 个地址，每个地址占用空间为 4 字节。从而可知， $m$  行  $n$  列的控制量地址的指针一定为  $4 \times (7n + m)$ ，则寻址时需取出 DB8.DBD $[4 \times (7n + m)]$  的值，即完成了模糊控制量的间接寻址。

表 5-1 模糊控制量间接寻址查询表

EC \ E	0	1	2	3	4	5	6
0	-1.62	-0.9	0	0.9	1.62	2.04	2.46
1	-1.56	-0.96	-0.06	0.84	1.44	1.8	2.34
2	-1.8	-1.26	-0.12	0.6	1.02	1.56	2.22
3	-2.04	-1.44	-0.72	0	0.72	1.44	2.04
4	-2.22	-1.56	-1.02	-0.6	0.12	1.26	1.8
5	-2.34	-1.8	-1.44	-0.84	0.06	0.96	1.56
6	-2.46	-2.04	-1.62	-0.9	0	0.9	1.62

### 5.3.2 内模控制计算流程

根据前面已得出的内模控制器差分方程(式 4-4 到 4-7), 即可求所需的数据, 然后逐步编程实现, 其流程图如下:

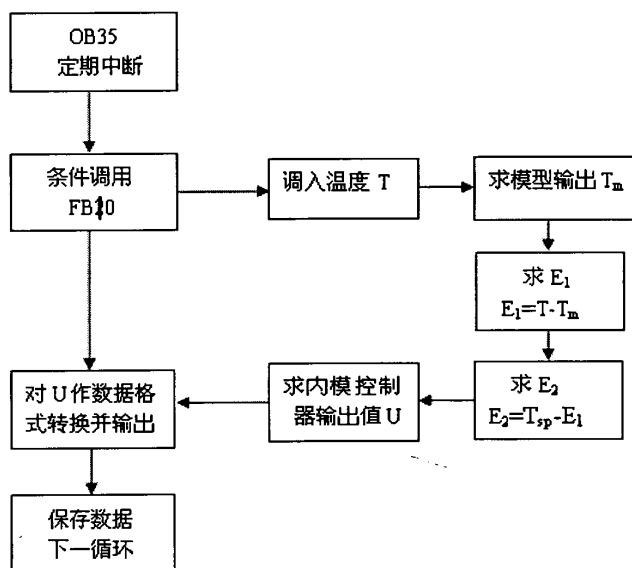


图 5-8 PLC 内模控制计算流程图

## 5.4 WinCC 界面组态与监控

前面程序部分的相关变量和数据经下载到 PLC 中后, 可通过 WINCC 进行

在线监控。组态的主监控界面如下图 5-9 所示。在此可观察到温度、压力、流量等多个参数的即时运行数据，经切换画面可观察到各被控参数的详细运行曲线。

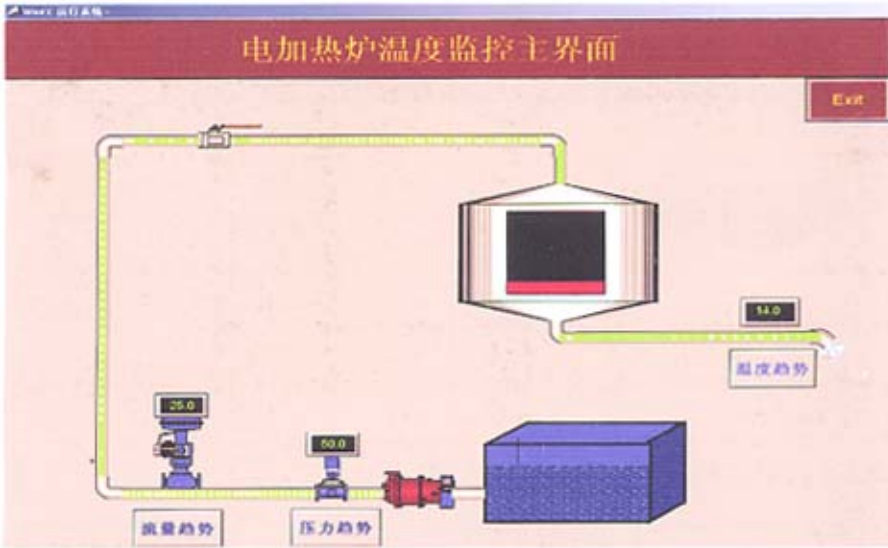


图 5-9 WinCC 监控主界面

在压力和流量控制界面中，可随时从上位计算机改变 P、I、D 参数和控制设定值，并有手动和自动两种运行方式。其运行界面如下图 5-10 所示：

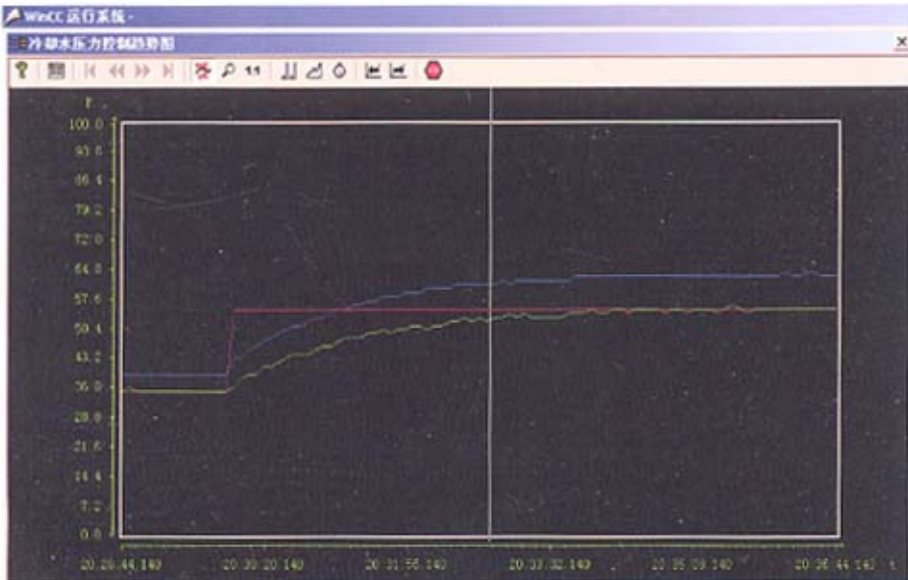


图 5-10 冷却水压力监控界面

同时,为了观察模糊控制计算与查询过程的一些详细运行状况,对模糊量化计算与查询的相关变量进行了组态,从而可以清晰的观察到在不同的输入下系统内模糊规则的选取和输出量的详细计算情况,具体如下图 5-11:

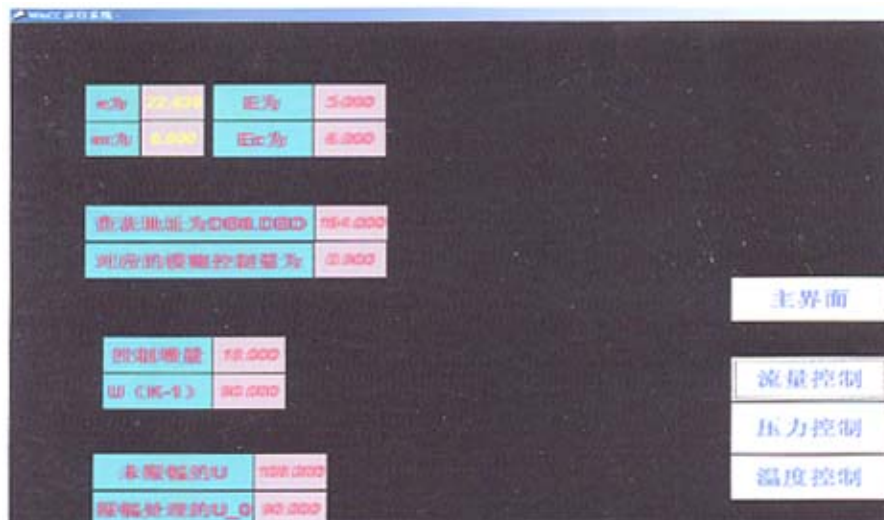


图 5-11 模糊控制运行过程监控界面

## 5.5 实时运行结果

以下是根据上述运行系统下用几种不同的控制策略得到的电加热炉上温度实时运行曲线。实验时,系统的冷却水压力控制和流量控制参数均经过 PID 参数的整定,实现了精确控制。这里,水管压力稳定在满量程的 55%;水流量则稳定在 6%,所有实验均在此条件下进行。

在以下各图中,蓝色曲线为温度控制器的输出量记录曲线,红色曲线为温度设定值,绿色曲线为实时温度响应曲线。

下图所示为采用纯模糊控制的温度响应曲线。可以看出,与前文所述的模糊控制系统的性质相同,未作改进的模糊控制实际运用时虽然具有很好的快速跟踪性能,但由于缺少积分环节,会存在静态误差,或在平衡点附近振荡,尤其在过程滞后较大时更为明显,不容易实现稳定。解决这些问题需要通过进一步引入误差积分环节与模糊控制输出相加作为实际输出,或者通过与其它控制策略相结合以改善运行效果。



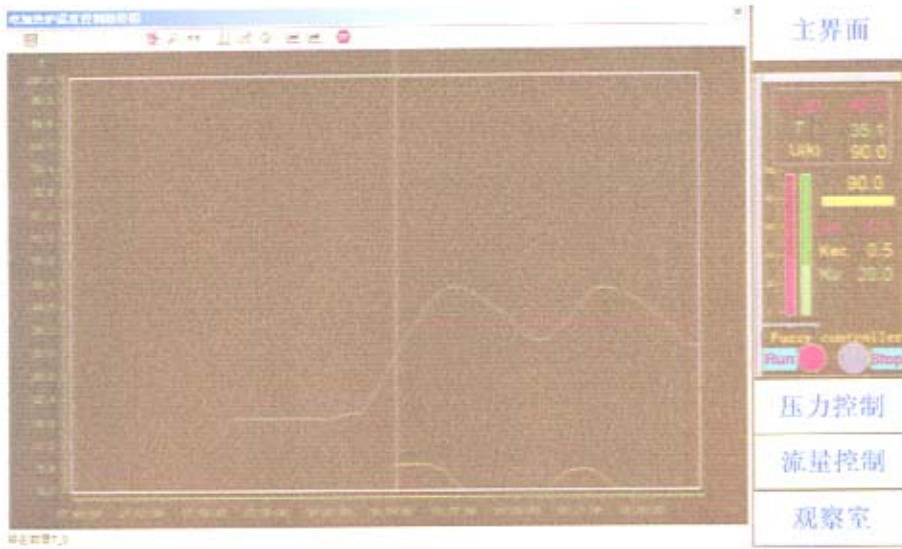


图 5-12 模糊控制实时温度趋势图

其次，采用未做任何改进的内模控制其温度响应曲线如图 5-13 所示：

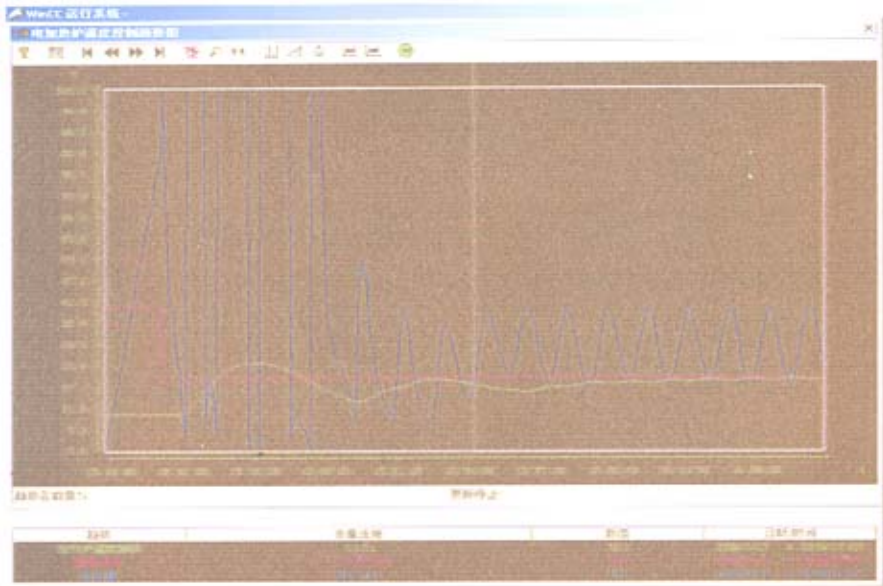


图 5-13 内模控制实时温度趋势图

可以看出，在未达到平衡之前响应曲线出现了一段超调，输出的控制量多次出现大幅振荡现象。这是由于控制量已经超出了执行器的范围，并不能满足实际的计算需要而被限幅，相当于引入了非线性环节。这对于发挥内模控制的优点十分不利，影响了动态控制品质，使过渡过程时间增大，需要进一步改进控制算法，

消除控制量受限的影响。

最后,采用本文所提出的模糊内模并行控制算法控制效果如下图 5-14 所示:

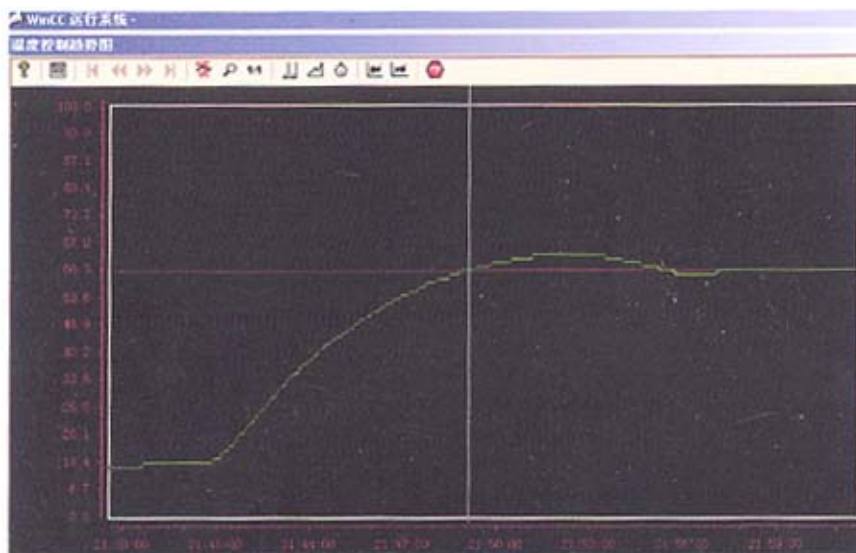


图 5-14 模糊内模并行控制算法实时温度趋势图

可见,与其它控制策略相比,模糊内模并行控制算法的超调量很小,达到稳态时间较短,稳定精度也较高,运行平稳,实现了无偏差跟踪,表现出了处理后过程的优越性能,具有较好的应用前景。

## 5.6 小结

以上给出了电加热炉温度控制系统的结构和特点,以及基于 S7-300PLC 实现的模糊内模并行算法编程结构,然后比较分析了几种不同的控制策略在纯滞后电加热炉上的控制效果。可以发现,模糊内模并行控制算法与其余的时滞控制算法相比,超调较小,过渡过程时间短,具有明显的优势,适合于工业广泛存在的时滞控制问题。此外本章介绍了将内模控制和模糊控制在西门子 S7-300 PLC 上编程实现的步骤。这些程序块结构组织较为合理,任务分割清晰,可以置于 PLC 的标准库中调用到其它时滞控制过程直接使用,而且对控制系统的硬件要求不高,并为其在工业上的进一步推广应用积累了一些工程经验。

## 第六章 结论与展望

本文的主要工作是分析和研究模糊控制与内模控制的结合,探讨了如何将这种控制方式在一个含有纯滞后电加热炉温度控制过程中加以应用。本课题涉及的内容较广,综合了先进控制理论、智能控制理论、控制系统建模、计算机仿真、PLC技术及其组态监控等多方面的内容。经过反复的计算机仿真和大量的实际控制试验,提出了将模糊内模并行控制方法应用于纯滞后过程的具体方案。

根据以上研究,本文主要得到以下几点结论:

1、经过理论分析和仿真证明,作为Smith预估控制的扩展,内模控制能够避免不可测扰动并降低建模精度的要求,有比较合理的设计步骤,能清楚地表明调整参数和闭环响应及鲁棒性的关系,是一种效果较好的、易于实现的纯滞后过程控制方法。内模控制不仅保留了Smith预估控制克服大时滞的优点,而且在性能上有所改善,鲁棒性得到提高,设计也更为直观简便。在实际应用内模控制时会遇到控制量受限问题,本文也介绍了解决方法。

2、从模糊控制的性质和特点出发,指出了模糊控制在应用中的优点及不足之处,进而提出将模糊控制和内模控制相结合应用于时滞过程的控制。通过设置一个阈值使模糊控制与内模控制分别工作在不同的局部区域,从而能够克服模糊控制的稳定性问题和内模控制的限幅问题,并且使建立被控对象的准确内部模型更为容易。

3、在实际应用方面,基于可编程逻辑控制器实现了模糊控制与内模控制的复合切换控制实施方案。整套控制系统较好地完成了数据采集与处理、内模控制器与模糊控制器的实现、上位机的组态监控等问题,并在一个纯滞后较大的电加热炉温度控制中获得了成功的应用,效果优于PID控制、Smith预估控制、模糊控制与未作改进的内模控制。

由于时间有限,本文未能在更多方面进一步探讨,存在一些不足之处。作为研究工作的延续和展望,笔者认为后续工作可以在以下几个方面展开:

1、本文的内模控制部分是假设被控对象的工作点附近区域近似为一个线性系统来设计的,而当其工作于较大范围内时就有可能出现模型严重失配情况。解决此问题的方法可采用动态建模方法或者在线调整滤波器的设计参数。

2、阈值的设定对于提高控制水平有较大影响，其设定原则要兼顾系统的动态性能和稳态性能，还应保证切换时两种控制器输出一致而不出现大的扰动。本文仅是以试凑的方法得出一个切换值，需要进一步的数学推导和理论支持。

自本文的研究开展以来，作者切身地体会到在工业生产中将先进控制和智能控制实施应用的复杂和困难。由于开题以来时间较为紧迫，工作量也较大，所以没能对所有问题都仔细推敲，加之作者自身的水平所限，本文肯定会存在一些不妥之处和错误，恳请各位老师和专家批评指正。

## 参考文献

- [1] 刘瞰东(方廷健), 基于模糊内部模型的复杂过程控制研究[J], 中国科学技术大学博士学位论文, 2003年
- [2] 韩江洪, 鲁照权, 滞后不确定系统控制[J], 合肥工业大学学报(自然科学版)Vol.23№1, 16-20
- [3] 王树青等, 先进控制技术及应用[M], 化学工业出版社, 北京, 2001
- [4] 宋云霞, 朱学峰, 大时滞过程控制方法及应用[J], 化工自动化及仪表, 2001(04), 9-15
- [5] 金以惠, 过程控制[M], 清华大学出版社, 1996, 11
- [6] 邵惠鹤, 工业过程高级控制[M], 上海交通大学出版社, 上海, 1997, 10
- [7] 朱学峰, 大林算法与Smith预估器[J], 自动化与仪器仪表
- [8] Smith O.J.M. Closer Control of Loops with Dead Time[J]. Chemical Engineering Progress, 1957, 53(5): 217-219.
- [9] 舒迪前, 预测控制系统及其应用[M], 北京, 机械工业出版社, 1996
- [10] Hang C.C. A Performance Study of Control System With Dead Time[J]. I E E E. I E C I, 1980, 27: 234-241.
- [11] 王立新, 模糊系统与模糊控制教程[M], 清华大学出版社, 北京, 2003年6月
- [12] 张卫东, 孙优贤, 基于Taylor展开的Smith预估优化设计[J], 仪器仪表学报, 1997, 18(2)
- [13] 章卫国, 杨向忠, 模糊控制理论与应用[M], 西北工业大学出版社, 兰州, 2000年
- [14] Garcia C.E, Morari M., Internal Model Control-1. A Unifying Review and Some New Results[J]. Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development, 1982, 21(2): 308~323
- [15] Garcia CE, Morari M. Internal Model Control. Design Procedure for Multivariable Systems[J]. I&E C Process Des. Dev., 1985, 24(2): 472~484
- [16] Ecnomou CG, Morari M. Internal Model Control. 5. Extension to Nonlinear Systems[J]. I&E C Process Des. Dev., 1986, 25(2): 403~411
- [17] Garcia C E, Morari M. Internal Model Control. 3. Multivariable Control Law Computation and Tuning Guidelines[J]. I&E C Process Des. Dev., 1985, 24(2): 484~494
- [18] Garcia CE, Morari M. Internal Model Control. 4. PID Controller Design[J]. I&E C Process

- Des.Dev., 1986,25(1): 252~265
- [19] 李嗣福, 计算机控制基础[M], 中国科学技术大学出版社, 合肥, 2001 年
- [20] Gorez R, Galardini D, ZhuKY. Model based control systems [A].Mathematics of the Analysis and Design of Process Control [M]. North\_Holland: Elsevier Science Publishers B.V., 1992,70: 223-232
- [21] Gorez R, M De Neyer, Barreto J. Model based fuzzy control systems [A]. Mathematics of the Analysis and Design of Process Control [M]. North\_Holland: Elsevier Science Publishers B.V.,1992,613-623
- [22] Xie W F, Rad A B, Wang Y K. Evaluation of A Hybrid Fuzzy Internal Model Control[J]. Control and Computers, 1997, 25(3): 65-72
- [23] 潘立登, 孔德宏等, IMC PID 鲁棒控制器设计及其在蒸馏装置上的应用[J], 北京化工大学学报, 2004
- [24] 刘墩东, 陈得宝, 郑国祥等, 一种线性化模糊内模自适应控制算法[J], 控制工程, 2003.11
- [25] 刘墩东, 杨智, 一种新的模糊内模预估控制器及应用[J], 控制理论与应用, 2002, 19(4): 607-610.
- [26] 章卫国, 杨向忠等, 模糊控制理论与应用[M], 西北工业大学出版社, 兰州, 2000 年 10 月
- [27] Richalet J. Model predictive heuristic control: application to industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(5): 413—428.
- [28] Rouhani.R, Mehro R.K. Model algorithmic control(MAC), basic theoretical properties[J], Automatica, 1982,18(4):401—404.
- [29] Cutler C.R, Ramaker B.L. Dynamic matrix control- A computer control algorithm proc [J]JACC, San Francisco,1980(1):46-48
- [30] Brosilow C B, Tong M. The structure and dynamics of inferential control system. [J]. AICHE Journal,1978,24(3):485—499.
- [31] 邹志云, 顾钟文, 周春晖.新型自适应模型算法控制算式[J], 控制与决策, 1988,3(3): 11-16
- [32] 袁著祉, 递推广义预测自校正控制器[J], 自动化学报, 1989,15(4):348—351.
- [32] 石中锁, 舒迪前等, 隐式自校正增量型模型算法控制器的全局收敛性[J], 控制理论与应用, 1994,11(4):434—443.

- [33] 石中锁, 舒迪前, 显式自校正增量型模型算法控制的内模结构及其全局收敛性[J], 信息与控制, 1993,22(2):97—104.
- [34] 石中锁, 舒迪前, 广义预测自校正控制器的内模结构及其全局收敛性[J], 北京科技大学学报, 1994, 16(1):69—73.
- [35] 石中锁, 一种前馈校正极点配置自适应动态矩阵控制算法[J].计算技术与自动化, 1993,12(3):15-18.
- [36] 贾磊, 孙优贤, 增益自适应内模控制器及其在纸机控制中的应用[J].信息与控制, 1993,22(4):242—245.
- [37] 曾松, 舒迪前, 王顺晃, 预测控制算法的统一格式及其在电加热炉中的应用[J].控制与决策,1991,6(6):440—446.
- [38] 舒迪前, 田学锋, 吴保亮, 冷轨煤气退火炉的建模及自校正前馈内模预测控制[J].冶金自动化,1993,17(4):36—40.
- [39] 李成鑫, 有控制限幅的模型参考自适应内模控制研究[J], 四川大学硕士学位论文, 2003年
- [40] 郭巨众, 模糊内模控制在火电厂过热气温中的应用[J], 太原理工大学硕士论文, 2003
- [41] 韩如成, 李霄峰, 王亚惠, 大时滞系统模糊自整定Smith预估补偿控制方案的研究[J], 钢铁, 1999, 34(4).
- [42] Giles R.f, Bartley T M. Gain adaptive dead time compensation[J]. I S A. Trans, 1977,(1):46 49.[21]
- [43] 王连铮, 张建华, 孟庆贤, 增益预估自适应纯滞后补偿控制器[J], 自动化学报, 1997,23(1)139-142.
- [44] 李遵基, 袁应钦, 段志刚.主汽温自适应预估控制方法的研究[J], 华北电力大学学报, 1999,23(4).
- [45] 汪秉文, 李国宽, 姜新, 一种改进的Smith预估补偿方法[J], 华中理工大学学报, 1999, 27(12).
- [46] 张卫东, 孙优贤, 一类Smith预估器及其鲁棒整定[J], 自动化学报, 1997,23(5).
- [47] 赵曜, 内模控制发展综述[J], 信息与控制, 2000, 29 (6) 526-531
- [48] 祝小莲等,一种有输出限幅的智能内模控制器设计方法[J], 昆明理工大学学报
- [49] 李成鑫,赵曜,有控制输出限幅的智能内模控制器的一种改进[J], 贵州科学学报, 2002, 20(4):10-12

- [50] 彭辉, 一类输入受限的内模控制器[J], 自动化仪表, 1997, 18 (9) 6-8
- [51] Tomizuka. M, Auslander. D. M and Takahashi. Y. Simple finite-time control and manipulated-variable softening for reverse reaction, overshoot and oscillatory processes[J]. ASME. Transactions on Dynamic Systems, Measurement and control, 1978,100(50-58)
- [52] Jordan.D and Korn.J, Deadbeat algorithms for multivariable process[J].IEEE.Transactions on automatic control,1980,25(486-491)
- [53] Garcia,C.E, etal. Quadratic programming solution of dynamic matrix control[J], Chem. Engng.Commun.,vol.46,No1, 73-87
- [54] Little, D.L, etal, Predictive control using constrained optional control[J], ACC,1986, 1365-1371
- [55] Dion,J.M., etal., Multivariable adaptive control with input constraints, IEEE CDC, 1987, 1233-1238
- [56] 席裕庚, 许晓鸣, 张钟俊, 预测控制的研究现状个多层智能预测控制[J], 控制理论与应用, 1989, 6 (2) 1-7
- [57] 郝建实, 萧蕴诗等, 基于内模控制的液位控制系统的研究[J], 工业控制计算机, 2005, vol.18: 20-21
- [58] Zadeh L A. Fuzzy Sets[J]. Information and control, 1965, 8: 338-353.
- [59] Mamdani E H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant Proc[J]. I.E.E., 1974, 121: 1585-1588.
- [60] 诸静, 模糊控制原理与应用[M] (第二版), 北京, 机械工业出版社, 2005年1月.
- [61] 陈国良, 并行算法的设计与分析[M], 北京, 高等教育出版社, 2002.
- [62] 李士勇, 模糊控制、神经网络和智能控制论[M].哈尔滨工业大学出版社, 哈尔滨, 1990
- [63] 西门子(中国)有限公司, 深入浅出S7-300 PLC[M], 北京, 北京航空航天大学出版社, 2003年
- [64] 西门子(中国)有限公司, 深入浅出WINCC V6[M], 北京, 北京航空航天大学出版社, 2004年5月
- [65] 陈婷, 赵曜, 吴刚, 关于内模控制结构中二阶反馈滤波器的研究[J], 陕西工学院学报, Vol.20 No.2: 22-24
- [66] 周涌, 陈庆伟, 胡维礼, 内模控制研究的新发展, 控制理论与应用[J], 2004年6月, Vol.21No.3: 475-482



- [67] 王福永, 基于Pade逼近的纯滞后系统内模控制器的设计, 苏州大学学报(工科版), 2004年8月, Vol.24No.4: 26-29
- [68] 田媛, 刘振娟, 模糊控制在SIEMENS PLC系统中的实现[J], 中国仪器仪表, 2005年第5期:72-75
- [69] 王志凯, 郭宗仁, 用PLC实现模糊控制的两种程序设计方法[J], 工业控制计算机, 2002年15卷第二期:61-63
- [70] 汪小澄, 方强, 基于PLC的模糊控制研究[J], 武汉大学学报, 2002.Vol.35,No3:79-112

## 硕士阶段论文发表情况

- [1] 张红星, 李鸣, 汤志彪等, 一种基于变频调速的恒压供水控制系统, 机电设备, 2005.Vol.22 No.3 P18-21
- [2] 张红星, 李鸣, 汤志彪等, 袋式除尘技术机理及其应用, 轻工机械, 2005 Vol.23No.2 :126-129
- [3] 杨大勇, 李鸣, 张红星等, 组态软件在过程控制实验中的应用, 江西化工, 2005 No.1:132-134
- [4] 张宇, 李鸣, 汤志彪, 张红星等, 基于 S7-300PLC 的电加热器控制编程实现, 南昌大学学报, 2005 Vol.27.No.3:59
- [5] 汤志彪, 李鸣, 张红星等, 智能PID控制在流程工业中的应用, PLC&FA, 2005 (8)
- [6] 汤志彪, 李鸣, 常江, 张红星等, 基于 PROFIBUS-DP 智能流量传感器模块的开发与实现, 工矿自动化, 2006.No2:25-27
- [7] TangZhibiao, Lee Ming, Zhang Hongxing, Intelligent PID Control and Its Application to Process Industry, 2005 Seminar on Engineering Education Cooperation & Academic Research for Chinese-French Universities, 2005 (5)
- [8] 李鸣, 张红星等, 模糊内模并行控制及其在电加热炉温度控制中的应用, (投稿至电气应用杂志, 正在审阅)

## 致 谢

首先要对我的导师李鸣教授表示衷心的感谢!

在三年来的紧张学习和生活中,李老师给予了悉心的教导和亲切的关怀,提供了优越的学习环境和实验条件,在课题进行过程中多次提出建议、指点方向,使我得以顺利地完成硕士阶段的学业和论文。可以说,我的每一个进步无不凝聚着恩师的辛勤汗水。李老师渊博的知识、稳健的作风、严谨的态度以及宽广的胸襟将对我今后的工作、生活和学习产生巨大的影响。

其次要感谢黄克敏、胡兆吉、周国发、谭志洪、王先平和衷卫声等几位老师,他们在学业上的言传身教、谆谆教诲以及生活上的关心给我留下了深刻印象,使我受益匪浅,为研究生阶段的学习和课题进展打下了良好基础。

本文的成文过程中,还得到了本校自动化系龙伟教授和南昌航空学院伍家驹教授的审阅,他们提出了一些很有针对性的修改意见,使得本文更加完善,在此向他们表示感谢。

还有上届的师兄师姐、下届的师弟师妹等人几年来在学业上提供了不少帮助,以及各位同窗学友在学习、生活上互相关心,一起度过了紧张而又快乐、匆忙而又难忘的求学时光,我将终生铭记,祝愿在他们今后的工作、学习和生活中一切顺利。

最后要感谢我的家人,是他们在精神和物质上给予了我巨大的关怀和支持,我所有的前进动力都来源于他们。

谨以此文献给敬爱的父母!

作者:

2006年6月6日

于 南昌大学