

杭州电子科技大学

硕 士 学 位 论 文

题 目:工业过程的预测控制与模糊 PID 控制的研究

研 究 生 王 玉 中

专 业 控制工程

指导教师 张日东 研究员

邹洪波 副教授

完成日期 2017 年 3 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

**工业过程的预测控制与模糊 PID 控制的
研究**

研 究 生： 王玉中

指导教师： 张日东 研究员

邹洪波 副教授

2017 年 3 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi
University
for the Degree of Master**

**Research on Model Predictive Control
and Fuzzy PID Control of Industrial
Processes**

Candidate: Wang Yu-zhong
Supervisors: Prof. Zhang Ri-dong
Prof. Zou Hong-bo

March, 2017

杭州电子科技大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业后离校后，发表论文或使用论文工作成果时署各单位仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

在控制领域中，比例-积分-微分（PID）控制器是使用最多的一种控制器。因其简单结构、鲁棒性强以及便于实现等优点，所以在工业过程中被广泛使用。但是，由于工业过程变得越来越复杂，导致生产过程中不可避免的出现了时滞、非线性以及不确定性等问题，使得 PID 控制器越来越难满足需要的控制性能。

预测函数控制（PFC）作为预测控制中被广泛使用的算法，所以被广泛应用于石油化工过程中。主要是 PFC 对模型的精度要求不高，并且具有较高的鲁棒性和跟踪性能。模糊控制是在智能控制算法中经常被使用到的一种算法，目前已经在工业过程控制中被广泛使用。这是因为其不依赖于数学模型，仅仅通过相关经验以及数据就能够很好的控制被控对象，所以在控制领域具有越来越重要的地位。如果能够将 PID 控制与模糊控制和 PFC 这两种算法的优点进行结合，将会对工业上的生产效率进行改善。

本文通过总结前人优秀的成果，然后做了如下两方面的研究工作：一方面，通过将模糊理论与神经网络的相关性能进行结合，在此基础上提出了模糊网络 PID 控制器的一种设计方法。利用神经网络本身具有的自学能力与模糊推理能力相结合来对 PID 参数进行调整,从而提高了 PID 控制的自适应能力。最后，通过仿真来对模糊网络 PID 控制性能进行了验证。另一方面，通过结合预测控制、模糊控制和 PID 控制各自的优点，提出一种预测模糊 PID 控制器的设计方法。该方法是通过模糊控制达到自适应调整，并引入预测控制的预测模型来完成提前预测。从而在保证该控制器具有了预测控制的预测能力外，还同时具有模糊控制的推理能力。最后将该控制方法应用到工业中的焦化炉被控对象上，并结合仿真来对该设计方法的有效性进行了验证。

关键词：预测函数控制（PFC），PID 控制，模糊控制，模糊网络 PID

ABSTRACT

PID controller is a kind of classical controller in control field. It is widely used in control field due to its simple structure, strong robustness and easy realization. However, as the industrial process becomes more and more complex, several problem such as time delay, nonlinearity and uncertainty come out during the industrial process, which cause the PID controller can not satisfied the requirement of control performance.

As a widely used algorithm in predictive control, predictive function control is widely used in petrochemical industry. Mainly because its not require high accuracy of the model, and has a high robustness and tracking performance. Fuzzy control is kind of algorithm often used in intelligent control, and it is also widely used in industrial process. This is because it does not depend on the mathematical model, it is able to control the object only through the relevant experience and data, so it is has increasingly important position in the field of control. If we can combine the advantage of the PID controller with the advantage of fuzzy control and PFC, it will greatly improve the efficiency of industrial production.

On the basis of predecessors' achievements, this paper mainly studies the following two aspects. On the one hand, combining the fuzzy theory and neural network, we propose a design method about fuzzy network PID controller. The self-learning ability of neural network and fuzzy inference ability are combined to adjust PID parameters. The method improves the adaptive ability of PID control. Finally, the simulation results show that the fuzzy PID controller has good control performance. On the other hand, by combining the advantages of predictive control, fuzzy control and PID control, a design method of predictive fuzzy PID controller is proposed. This method achieves the adaptive adjustment by fuzzy control, and introduces the forecasting model of predictive control to complete the prediction in advance. The PID controller not only guarantees the predictive ability of predictive control, but also has the fuzzy control inference performance. Finally, applying the new PID controller in the industrial coking furnace, and verified it's validity through simulation.

Keywords: predictive function control (PFC), PID control, fuzzy control, fuzzy network PID

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 本课题研究现状.....	1
1.2.1 PID 控制的研究现状	2
1.2.2 预测控制的研究现状.....	3
1.2.3 模糊控制的研究现状.....	4
1.3 论文的主要内容及安排.....	6
第 2 章 基本的理论知识和算法实现.....	7
2.1 基本的 PID 控制算法	7
2.1.1 传统的 PID 调节方法	8
2.2 基本模糊控制算法	9
2.2.1 模糊控制的基本概念.....	9
2.2.2 模糊控制的基本理论.....	11
2.3 基本的预测控制算法	14
2.3.1 预测模型.....	15
2.3.2 滚动优化.....	15
2.3.3 反馈校正.....	16
2.3.4 预测函数控制系统的参数设计.....	16
2.4 本章小结	17
第 3 章 基于模糊控制优化的 PID 控制	18
3.1 引言	18
3.2 模糊自整定优化 PID 控制器方法	18
3.2.1 模糊控制中被控对象模型的建立.....	19
3.2.2 论域和语言变量的设置.....	19
3.2.3 隶属度函数设置.....	20

3.2.4 模糊规则集.....	21
3.3 案例分析	23
3.3.1 工艺流程介绍.....	23
3.3.2 控制目标.....	24
3.3.3 模糊 PID 方法与传统 PID 方法的比较.....	24
3.4 本章小结	28
第 4 章 基于模糊网络优化的 PID 控制	29
4.1 引言	29
4.2 模糊网络优化的 PID 控制方法	29
4.2.1 基于模糊的网络 PID 控制器设计	30
4.2.2 模糊神经网络的学习算法.....	31
4.3 案例分析.....	32
4.3.1 催化裂化工艺流程介绍.....	32
4.3.2 稳定系统的控制目标.....	33
4.3.3 模糊网络 PID 控制方法与其他 PID 优化方法的比较.....	33
4.4 本章小结	37
第 5 章 基于预测模型的模糊 PID 控制	38
5.1 引言	38
5.2 预测模糊 PID 控制方法	38
5.2.1 模糊控制.....	39
5.2.2 基于预测模型的优化模糊 PID 控制	40
5.3 案例分析.....	41
5.3.1 工艺流程介绍.....	41
5.3.2 控制目标.....	43
5.3.3 预测模糊 PID 控制方法与传统方法的比较	43
5.4 本章小结	47
第 6 章 总结与展望.....	48
6.1 论文研究工作总结	48
6.2 展望.....	48
致 谢.....	50
参考文献.....	51
附录.....	57

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景

由于控制理论的研究成果如雨后春笋般一直被提出，先进控制作为其中的一员被广泛应用在化工过程中。温度是工业过程控制中的一个非常重要的性能指标，且温度控制对于产品的质量、生产成本和生产效率也都将产生很大的影响。如果温度控制不当将可能造成资源的浪费，甚至还可能引发安全事故。目前，随着工业生产规模的不断扩大，生产设备之间的耦合程度也越来越严重。由于滞后、非线性、时变和耦合等问题的存在，导致在控制过程中出现很多的问题，所以温度控制一直以来都是一个研究热点。在当前工业中的温度控制系统一般还是在使用 PID 控制算法。近年来，国内外学者结合其它相关知识提出很多关于对 PID 控制器参数进行优化调整方法，并不断对 PID 控制器的性能进行改善。例如 A. Hoshinot 等学者经过对常规的一些 PID 控制器进行优化，然后利用优化好的 PID 控制器对绝热去磁冰箱的温度进行控制，从而验证了改善后的常规 PID 控制器的控制性能；F. G.Shinsky 学者将 PID 控制成功应用在了具有死区的分布式被控过程中，但同时还存在一些尚未解决的问题。例如电加热炉本身具有的大滞后特性和时变性导致不能达到令人满意的控制效果。

随着科学技术的不断进步，使得计算机技术产生了突飞猛进，从而使得先进控制在工业过程控制中的应用获得较快的进展。智能控制的出现才短短几十年，但它作为一种先进控制已经被提出，并与常规 PID 控制算法进行结合且已经成功使用在化工过程中。模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）自提出以来，已经从最初的启发式控制算法发展成为一个新的科学分支^[1-3]。预测控制是为了对控制中需求进行优化。经历 40 多年的发展，已经在复杂的工业中获得成功应用，这充分展示了它在进行约束优化控制方面的潜力。1965 年，美国著名教授 Zadach L. A. 首次提出了模糊集理论^[4]，试图寻找到一种处理不精确的描述模糊性问题的数学方法。模糊控制不需要精确的数学模型，仅依赖能够表现系统特性的专家经验，然后再利用一定规则就能进行有效控制。工业过程是一个非常复杂的过程，所以不可避免将会受到来自外界的各种随机扰动的干扰，导致要想获得精确的数学模型比较困难。传统 PID 控制器对于非线性和不确定性的被控对象不能取得令人满意的控制效果，因此，如果把模糊控制和预测控制应用到这些过程中将会对工业生产有很大帮助。

1.2 本课题研究现状

1.2.1 PID 控制的研究现状

为了达到工业过程的行业标准,需对过程中的一些参数进行有效控制。工业过程中变量的准确测量以及有效控制是保证质量、功耗和安全生产的前提条件。然而实际过程中由于大惯性和环境扰动等因素的存在,比较难获得满足控制性能的数学模型。在工业生产过程中,其中使用最为普遍的控制器的就是 PID 控制器^[5]。自 1942 年以来已经先后提出了大量的 PID 参数调整方法。然而在实际过程中,选择一个合适的调整 PID 参数方法显得尤为重要,并且也是当前一个热门的话题^[6]。在这几十年的成长过程中,国内外的学者针对 PID 控制器参数的优化已经提出了很多的技术方案。例如利用开环阶跃响应的 Coon-Cohen 响应曲线法;利用 Nyquist 曲线法的 Ziegler - Nichols 响应法。但是这些方法都只是识别了系统部分动态信息,所以并不能够调整出理想参数。从 1950 年开始,国内外的学者针对这些问题提出了一些像串级、前馈和 Smith 预估控制等比较复杂的控制系统,解决了控制系统中的一些技术难题。它们是基于经典控制理论的基础上来的,但是它相比经典控制具有更好的控制性能,所以目前还在不断的继续研究。

由于计算机技术被不断的应用到工业控制过程中,数字式 PID 控制已经在单回路的控制系统中获得了广泛的应用。在工业过程中, PID 调整方法对不同过程模型进行了分类,例如一阶惯性加纯滞后^[7-9]和积分加纯滞后^[10,11]。有些方法可以同时使用 FOPDT 和 IPDT 模型^[12,13]。下面简单介绍一下这些模型。在文献[12]中,该 PID 调整方法改进了 IPDT 过程的抗干扰能力,但没有提高大时滞过程的控制性能。在文献[11]中,该 PID 控制参数是通过内模控制方法来调整的,该方法具有较好的鲁棒性和跟踪性能,但对于扰动主导下的时滞过程的响应情况表现不佳。在文献[14]中,对于鲁棒性和控制性能进行了进一步的讨论比较。但是由于大时滞和模型失配情况的存在,传统的控制器并不能获得理想的控制性能,所以基于 PID 控制方法的预测策略也已经被提出来了^[15,16]。

随着智能算法研究的不断深入,提出了越来越多的研究成果,这给 PID 参数的整定注入了活力并且逐渐提出很多新的 PID 控制方案。比如最常用的模糊 PID 控制和神经网络控制。模糊 PID 控制器本质上其实是利用模糊逻辑和模糊规则来优化 PID 控制的比例、积分和微分系数。这样就可以大大提高控制效果,但其控制精度受控制规则表影响。由于该 PID 控制器的参数是不断的对实际情况检测,从而能够进行在线调整,所以该控制器对于时变对象往往能够表现出很好的控制效果。神经网络 PID 控制器利用神经网络本身具有的逼近能力和自学习能力来对 PID 控制参数进行优化,进而使其获得自适应能力。其中,对于该网络的选取以及加权系数的初始值大小都将会对该控制器的控制效果产生影

响。目前,神经网络中的 BP 网络是 PID 控制器中使用最为常见的一种。在此基础上研究了很多 BP 神经网络调整 PID 参数的方法。专家 PID 控制实际上就是利用专家经验和实验数据来对 PID 参数进行优化的一种控制方案。该方法通过选出能够表达系统特征的特征参数,找到不同特征参数下系统动态需要的控制量,并对此系统进行分类后存入到专家系统知识库中。在系统运行过程中,利用选出的特征参数值和知识库中存放的规则,通过一种推理方案来推理得到 PID 控制器参数值。在专家 PID 控制中,常见的性能参数通常是系统超调量、峰值比以及上升时间等。系统的控制精度将会受到专家系统中存放的知识的完整性以及如何进行推理过程的影响。

1.2.2 预测控制的研究现状

预测控制是一种先进控制算法,它是基于计算机的一种控制算法。多年以来在控制理论与工程领域中已经被国内外学者深入研究。该算法对于模型精度要求不高,且在处理复杂过程中表现出了优越性能。一般来说,模型预测控制(MPC)主要有三种设计方法,分别为阶跃响应、传递函数模型以及状态空间模型设计方法^[17]。一些参考文献中已经提出了很多的状态空间 MPC 变体^[1,18-26],在这些变体中,预测函数控制(Predictive Functional Control, PFC)是最受欢迎的一种,并且它已经被广泛研究并应用在了工业过程中^[27,28]。

针对动态快速系统 Richalet 首次提出了 PFC^[28],与其他 MPC 算法相似,PFC 也使用了预测时域和控制时域的概念。由于 PFC 本身对于大规模多变量设备具有操作输入和状态约束的能力,同时还具备公式简单且易于理解,所以 PFC 已经被广泛应用于工业过程中成为了 MPC 的标准。在文献[29]中,针对拥挤的 TCP/IP 网络中的如何自动进行队列管理,提出一种 ARM-PFC 控制器。在文献[30]中,针对 PMSM 系统设计了一种基于 PFC 的速度控制器。在文献[31]中,它已经被用于解决工厂中传送速度控制问题。在文献[32]中,预测函数控制技术通过 PLC 已经实现了反应堆的温度控制。在文献[33]中,针对 MIMO 过程首先通过简单的克莱姆法则转换成 MISO 过程的线性等式,然后 MISO 过程基于扩展状态空间预测函数控制进行设计控制器。在文献[34]中,针对批反应堆中存在的复杂控制问题,在此基础上提出了一种自适应模糊 PFC 控制器。由于该系统是一个非线性时变过程,所以它通过模糊辨识方法解决了动态特性并使用模糊 PFC 进行控制。在文献[35]和文献[36]中,针对具有连续和离散输入混杂系统的 MPC 控制已经被考虑,尤其是在文献[35]中,通过自适应 PFC 来控制反应堆中的温度。该系统是一个包含了离散和连续输入的混杂系统,仿真结果表明 PFC 在如此复杂的系统中仍然具有很好的控制能力。混杂 MPC 和混杂 PFC 控制器一直以来都被国内外学者研究,其中搜索算法(例如遗传算法 GA)已经被用来解

决优化问题。在文献[37]中,针对批反应堆过程提出一种基于 GA 的混合模糊预测控制。在文献[38]中,针对燃烧室炉膛压力设计一种基于 PFC 的 PID 控制器,并使用 GA 进行优化。在文献[39]中,针对批次过程中执行器故障已经开始考虑使用 GA 优化 PFC 控制。

在实际的过程控制中,状态空间 MPC 也是人们研究的一个热点。在所有设计状态空间 MPC 变体中存在一个主要的缺点,例如在 PFC 中使用观测器将使得非线性的闭环系统控制性能严重恶化^[17]。为了处理以上问题,在文献[40]中,提出了非最小状态空间(non-minimal state space, NMSS)模型,它包含了过程输入、输出及其过去值。后来,在文献[17,41-45]中,该想法被扩展并提出一个新的 NMSS 模型结构,该模型结构将输出跟踪误差也考虑进来。例如在文献[41]中,针对逆响应过程设计一种 NMSSPFC 控制器,在文献[42]中,针对 MIMO 过程提出了 NMSSPFC 控制。目前已经有成功的将提出的方法应用到了工业过程中,例如在文献[43]的工业焦化炉中、文献[44]的注塑批处理过程中和在文献[45]的焦化分馏塔中都具有良好的灵活性和处理能力。

一些研究学者对传统的 PID 进行了进一步的研究,研究发现传统 PID 对于耦合、时滞和非线性等特性并不能很好的处理^[5,46]。自从 PID 控制方法被提出来后,对于它的研究就一直没有停止并且产生了很多经典的调整方法^[44,47]。由于计算机技术的不断前进,从而产生了模型预测控制这种有效的控制算法,并且被广泛应用和研究^[12,48]。随着计算机控制技术的发展,提出了一种有效控制算法模型预测控制,并被广泛的使用和研究^[26,49]。由于 MPC 相比 PID 控制较为复杂,在实际实施过程中需要受硬件成本等一些因素的限制,所以导致 MPC 控制器在实际过程中没有常规 PID 控制使用广泛。为找到一种简单的应用 MPC 控制器方法或者将 PID 控制器优点和 MPC 算法结合将有重要意义。在文献[50]中,根据实际控制中的需要,将模糊和 PID 控制方法引入到 MPC 框架中提出了一种多变量的预测模糊 PID 控制器。张等人提出了一种新型的 PID 控制器,该方法利用 PFC 和常规 PID 控制优点并在工业分馏塔中测试它的控制性能^[51]。目前还有很多预测控制算法优化 PID 控制器的研究成果已经被提出并成功应用^[52,53]。

1.2.3 模糊控制的研究现状

由于炼焦工业为化工行业提供了多种石油化工产品,因此它的潜力引起越来越多的关注^[54,55]。然而,这个过程是一个复杂且含有非线性,使得改善控制性能加大了难度^[56]。工业过程中存在强的非线性、不确定性和耦合性,使用智能系统可以去解决这类问题。近年来,随着这个领域的发展,已经开始使用智能控制器,自适应控制器或者将它们进行组合。例如,模糊逻辑控制、非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NLMPC)等。模糊逻辑智能控

制结构被成功应用在一些非线性系统中，并且取得了有效地控制效果。模糊逻辑利用人们操作经验来解决问题，通过他们的经验设计控制器^[4]。目前 2 型的模糊逻辑控制器（fuzzy logic control, FLC）已经开始研究，它被用来抵抗不确定模型带来的影响。使用 2 型的 FLC 已经被成功应用在了各种化工过程，例如非线性的生物反应器^[57]，非等温连续搅拌釜反应器^[58]和双元精馏塔^[59]。由于缺乏对不确定性的处理能力，使得 2 型方法的出现吸引了很多学者的关注。尽管实际上 2 型模糊逻辑能够处理设备模型的不确定性，但是由于非线性过程的复杂性使得还需要更多鲁棒性强和自适应好的控制器。

实际工业过程中一般表现出很强的非线性、不确定性和耦合性，需要使用模糊系统来解决这些问题。由于常规 PID 控制器存在非线性和不确定性的影响下，被控对象不能获得满意的控制效果使得为引入模糊系统提供了条件。近年来，模糊控制器已经被大量使用，并且有些模糊控制器与自适应策略进行了结合（FLC 和模糊自适应控制器）。FLC 是使用人们的操作经验设计的控制器。在文献[58]中，通过使用 FLC 对非线性函数进行逼近，设计出了一种模糊自适应观测器并引入了 Nussbaum 增益函数来解决未知控制方向问题。在文献[59]中，提出了新的专家模糊系统设计策略，在没有增加模糊变量的情况下改进了性能，该新的方法扩展了传统模糊推理结构，给设计和执行过程带来了重要的简化。在文献[60]中，针对一类不确定非线性系统，利用 FLC 具有近似非线性的能力来对非线性控制输入进行近似，从而设计出一种自适应状态反馈跟踪控制器。在文献[61]中，针对自适应模糊量化输出反馈问题，利用 FLC 具有逼近未知的非线性函数的能力，提出了一种自适应模糊量化输出反馈方案。还有很多关于模糊控制的研究成果在文献[62-64]中进行了介绍，然而，对于模糊控制的控制精度还有一定的改善空间。

近年来，由于模糊控制具有很强的自适应能力且不需要精确的过程模型，并且 MPC 具有良好的预测能力，所以将模糊控制和 MPC 引入来克服传统控制器的缺点将是一件很有意义的工作。目前对于将 PID 控制、MPC 算法以及模糊控制进行结合，已经在国内外被很多的学者进行研究并取得了较好的控制效果。对于汽车悬架系统，通过使用多目标粒子群（particle swarm optimization, PSO）进化算法来加强的自适应模糊 PID 控制器，但是却带来了稳态误差^[65]。Savran 和 Kahraman 通过在使用模糊模型的基础上提出一种自适应调整 PID 控制器参数方法^[66]。通过结合模糊控制和 MPC，提出了一种新的控制方法并应用到了医疗设备中，它成功解决了麻醉注射量的控制，使其确保在一定的安全设定值范围内^[67]。在文献[68]，提出了一个稳定模糊模型预测控制（stable fuzzy model predictive control, SFMPC），从而解决了发电机中过热的蒸汽温度（SST）控制

问题。在文献[69]中,通过引入 MPC 和模糊控制原理,提出一种新型的时延系统的控制问题,它是一种针对不确定和复杂过程系统的控制方法。除此之外,还有很多的研究成果已经被提出,例如在文献[70-73]中介绍了很多通过利用模糊控制和预测控制方法对 PID 控制器参数进行优化的研究成果。

1.3 论文的主要内容及安排

本文研究内容的结构组织如下:

第一章是本文的绪论概述。本章首先介绍了本文课题的研究背景和动机,在此基础上又分别介绍了 PID 控制、预测控制和模糊控制在国内外的研究现状。

第二章先后对 PID 控制、模糊控制以及 PFC 算法的基本知识进行了简要的介绍。随后又介绍了几种 PID 参数整定方法以及 PFC 算法的参数如何选取做了介绍。

第三章是将模糊控制的思想引入到 PID 控制参数的优化上,从而提出了一种模糊 PID 控制方法。本章开始介绍了技术背景,然后介绍了一种模糊控制优化 PID 设计方法,最后通过电加热炉温度模型实例进行仿真验证。

第四章是将模糊控制思想引入到了神经网络中,通过模糊推理与神经网络具有的自学习能力来对 PID 控制器的参数进行优化。和上一章结构相同,首先介绍了技术背景,接着详细介绍了模糊网络 PID 控制器设计方法,最后结合裂解炉温度模型实例进行仿真验证。

第五章是将 PFC 算法和模糊控制的思想与传统 PID 控制进行结合,从而提出一种新的调整 PID 参数的设计方案。本章也是先介绍技术背景,然后对预测模糊 PID 控制器设计方法进行介绍,最后与焦化炉温度模型实例结合,并通过使用仿真来进行验证。

第六章是作一个全文总结和展望。主要是总结本文所做工作,并对模糊控制的发展方向进行了展望。

第 2 章 基本的理论知识和算法实现

2.1 基本的 PID 控制算法

PID 控制器是工业过程中使用的最为经典的一种控制器, 因为其具有结构简单、鲁棒性强以及适应性强等特点, 所以在化工等相关领域已经取得了广泛使用。为了适应工业过程中各种不同的需求, 所以出现了很多改进 PID 控制参数的调整方法, 但是这些方法并没有与 PID 控制的思想脱离。由于对计算机技术的掌握越来越成熟, 使得其取得了飞速发展, 所以使得数字 PID 控制器相比模拟 PID 控制器也具有更为广泛的应用。下面对基本的数字 PID 控制算法进行介绍:

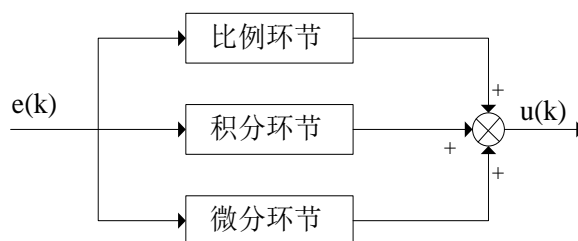


图 2.1 数字 PID 控制器

如图 2.1 所示, PID 控制器由比例、微分和积分这三个部分构成, 通过这三个环节就能够进行有效的控制。将 k 时刻的实际输出值与设定值的差值 $e(k)$ 送入这三个环节进行计算得到控制量 $u(k)$, 形式如下所示:

$$u(k) = K_p e(k) + \frac{K_p}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) T_s + K_p T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (2-1)$$

其中, T_s 表示采样时间, K_p 表示 PID 控制器的比例系数, T_i, T_d 分别表示 PID 控制器的积分和微分时间常数。

PID 控制器主要通过调整 K_p, T_i, T_d 这三个参数的取值来实现对被控对象的控制效果进行调整优化。

(1) 比例环节:

比例环节主要是放大跟踪误差 $e(k)$ 。当出现误差就会使用相应的控制量来进行调整, 但是它并不能消除余差。当 K_p 的值取得越大, 说明比例作用越强、快速性越好且具有较小的稳态误差。但如果 K_p 的值过大的话, 将会使得超调量也会变大, 严重的还将可能会导致被控系统出现发散失控情况。通常在 PID 控制器设计过程中, 初期时选取较小的 K_p 值, 可以避免开始阶段误差 $e(k)$ 被放大过渡而使得控制量 $u(k)$ 过大, 进而产生较大的超调量; 在中后期, 一般可以适当的加大 K_p 来调节系统的速度。

(2) 积分环节:

积分环节的主要作用是通过对余差进行消除，进而能够达到改善系统的控制精度的目的。对于一些非自衡系统中存在的积分环节将会导致出现积分饱和，从而可能不能获得预期想要的控制效果。当 T_i 的值越小，将会产生较大的积分作用，这样有利于消除余差。但如果积分作用取得过大的话，同时也会导致系统产生较大超调量，严重的话还将会导致系统出现振荡；当积分作用过小的话，将不能够消除余差，从而导致系统的控制精度降低。通常情况下在初期选取较小的积分系数从而避免产生较大的超调，在中后期将适当加大积分系数从而提高控制精度。

(3) 微分环节：

微分环节主要用来改善系统的动态性能，通过它可以了解到系统误差信号的变化趋势，这样可以起到一个提前修正信号，从而减小调节时间和超调量。如果 T_d 越大，则产生较强的微分作用，使得产生较好地动态性能。但是对于较大的微分作用将使得系统的抗干扰能力减弱；较小的微分作用将使得系统的稳定性变差、超调量增加、响应速度变慢。对于时滞较小的系统，一般可以去掉微分环节，对于时滞较大的系统，如果去掉微分环节将对PID控制器的调节效果产生严重的影响。

因为控制量 $u(k)$ 通常是与执行机构的位置进行对应，所以从式(2-1)看出其是位置式PID算法。对于位置式PID算法的控制量 $u(k)$ 通常与前一个时刻的误差有关从而加大了计算量；正是因为控制量 $u(k)$ 与执行机构的实际位置相对应，所以导致计算机在出现故障时候可能产生一个较大的 $u(k)$ 从而使得执行机构的位置产生一个较为大幅度，这样对于实际生产过程产生不利影响。

由于上述原因的存在，从而应运而生了增量式的PID算法，其表现形式如下所示：

$$\Delta u(k) = K_p(e(k) - e(k-1)) + \frac{K_p T_s}{T_i} e(k) + \frac{K_p T_d}{T_s} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (2-2)$$

其中，各参数的意义与式(2-2)中相同， $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ 。

从式(2-2)可以看出，在 k 时刻的控制增量 $\Delta u(k)$ 只与 $e(k), e(k-1), e(k-2)$ 相关，从而减小了计算量；由于控制增量 $\Delta u(k)$ 对应的是执行器位置的变化量，当计算机出现故障时，由于信号可以锁存，使得控制量可以保持在原来的值，从而减小该故障带来的后果。

在实际过程中，对于需要使用 k 时刻的控制量 $u(k)$ ，可以通过 $u(k) = u(k-1) + \Delta u$ 来计算得到。

2.1.1 传统的PID调节方法

在实际控制过程中，需要对PID控制器的三个参数进行调整，然而调整这三个参数达到一个合适的值并不是一件容易的事。自从PID被提出以来，对于

PID 参数调整一直被国内外的学者研究，不断的出现很多调整 PID 参数的方法，这里简单的介绍几种传统的 PID 参数调整方法。

(1) Ziegler-Nichols 方法

1942 年，Ziegler 和 Nichols 通过对前人的研究成果进行总结，并结合实验数据的基础上，提出了一种 PID 参数整定方法，即 Z-N 法。该方法是通过利用阶跃响应并利用临界稳定性中的增益获得的。该方法对于数学模型未知或不精确的被控对象具有非常有效的控制效果。具体方法如下所示：

表 2.1 Z-N 整定 PID 参数

控制器类型	K'_p	T'_i	T'_d
P	$0.5K_u$	∞	0
PI	$0.4K_u$	$0.833P_u$	0
PID	$0.6K_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

其中， K_u 为系统的临界增益， P_u 为系统的临界振荡周期。

(2) 内模控制整定法

Rivera 等学者在结合内模控制 (IMC) 的思想的基础上，提出了一种有效的 PID 参数整定方法，即 IMC-PID 方法。该方法是在一个假设模型的基础上，通过引入一个低通滤波器到控制器设计中，进而可以获得一个具有 IMC 性能的 PID 控制器。具体公式如下所示：

$$K_p = \frac{(T+0.5\tau)}{K(\lambda+0.5\tau)}, T_i = T+0.5\tau, T_d = \frac{T\tau}{2T+\tau} \quad (2-3)$$

其中， λ 用来调节 PID 控制器性能，通常取 $\lambda > 0.8\tau$ 。

2.2 基本模糊控制算法

由于计算机技术的飞快前进，面对的控制难题也日渐复杂，对于控制质量的要求也越来越高。但在实际过程中由于存在非线性和不确定性等问题，要想建立准确的数学模型也比较困难。为了解决这方法面问题，过去的传统控制理论提出了很多的方案，例如最优控制、自适应控制等等。然而这些方案都是基于被控对象的数学模型进行控制的，这将使得控制效果受模型的精度的影响。在这种背景下，模糊控制技术应运而生了。由于模糊控制技术并不是依赖于被控对象的数学模型，而是利用专家的经验以及实验数据来对被控对象进行控制。模糊控制通过模仿人的控制且不需要精确的数学模型，因此将模糊控制运用到工业控制中将产生很大的生产效益。

2.2.1 模糊控制的基本概念

模糊控制是基于计算机的基础上的一种智能控制方法，它主要是以模糊推理、模糊变量以及模糊集合作为理论基础。如图 2.2 所示是对于模糊控制器的基本机构进行了简单描述。模糊控制进行如下简单介绍：首先计算机经过采样获得实际值，随后求得输入输出的误差 e 。然后将 e 送给模糊控制器的输入端，然后对其进行模糊化处理得到模糊量。使用其所对应的模糊语言来对得到一个模糊子集 E 进行表示，然后将其与模糊算子进行推理合成运算获得了模糊控制量 U 。

$$U = E \circ R \quad (2-4)$$

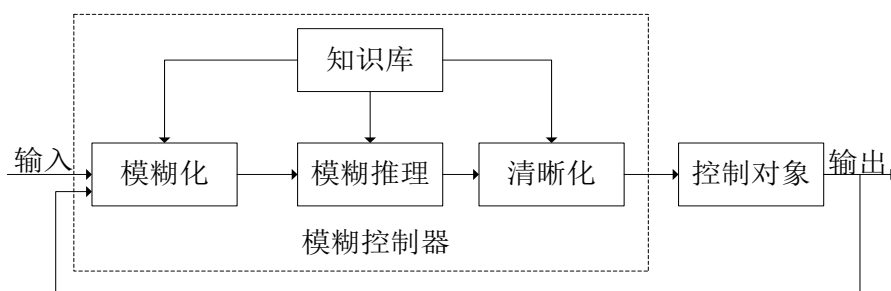


图 2.2 模糊控制器的结构图

(1) 模糊集合

假定论域 X ，其中 $A = \{x\}$ 是 X 的模糊集合，通过 $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ 来表示它的特征集合。由于模糊集合具有多种表示方式，本文主要采用如下使用最为广泛的形式进行表示：

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (2-5)$$

(2) 隶属度函数

隶属度函数本质上其实就是使用 $[0,1]$ 之间的数来对元素 x_i 属于该元素对应的模糊集的程度进行表示。对于某一个模糊集，通过一个函数来对隶属度变化规律进行描述，该函数就被称作“隶属度函数”。在模糊控制中，隶属度函数在整个控制过程中具有非常重要的作用。通常对于隶属度函数的确定主要采用平均法、专家经验法和模糊统计法等等一些方法。模糊关系

模糊关系 R 一般表示集合 A 和 B 的直积 $A \times B = \{(x, y) | x \in A, y \in B\}$ 得到的论域。当有 n 个集合的直积 $A_1 \times A_2 \times \cdots \times A_n$ 所得到的论域，通常将该论域称为 n 元模糊关系。

(3) 模糊逻辑

模糊逻辑就是通过对于模糊命题进行研究，研究其中的逻辑关系。一般模糊逻辑的值是取 $[0,1]$ 之间的值。

(4) 模糊语言变量

模糊语言变量就是通过使用一些语言词来进行定义，并且它的值是一些模糊数的变量。

(5) 量化因子和比例因子

在模糊控制中，基本论域实际上就是输入变量偏差 e 和偏差变化率 ec 以及输出变量的实际变化范围。一般来说，基本论域内的量都是使用精确量来进行表示。为了进行下一步的模糊化过程，需要将输入量由基本论域变换到其模糊论域中，在这个过程中需要用到量化因子 K_e ， K_{ec} 。由于经过模糊控制算法处理以后得到的是一个模糊量，它并不能够直接作用于被控对象，这个过程又需要用到比例因子 K_u 使其能够转换到被控对象它所能接受的论域中。以误差 e 进行说明，首先假设误差 e 它所对应的基本论域为 $[-x_e, x_e]$ ，其对应的模糊论域为 $\{-n, -(n-1), \dots, 0, \dots, n-1, n\}$ ，则它所对应的量化因子 k_e 为：

$$K_e = n / x_e \quad (2-6)$$

同理若选择相同的论域范围，则

$$K_{ec} = n / x_{ec} \quad (2-7)$$

比例因子

$$K_u = x_u / n \quad (2-8)$$

2.2.2 模糊控制的基本理论

在图中 2.2 中可以看到，模糊控制器需要经过模糊化、知识库、模糊推理以及清晰化四个过程。

(1) 模糊化

模糊化其实就是利用输入变量 E 和 EC 所对应的模糊子集的隶属度函数来找到其所对应语言值的隶属度，从而将精确量转换成了模糊控制中需要的模糊值。此外，还需要为能够利用模糊规则进行模糊推理提供与输出量有关的隶属度函数。模糊化过程实质是通过隶属度函数将输入的精确值变换到模糊集合上隶属度所对应的模糊变量。假定误差 e 其模糊论域定义为 {负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}。为了在实际过程中应用起来更加简单容易，一般情况下在实际中通常采用三角形隶属度函数。

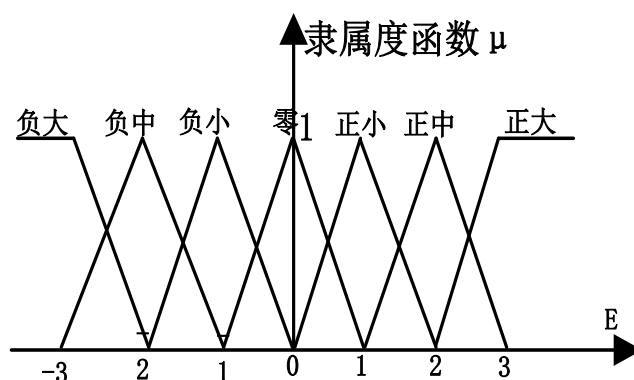


图2.3等分三角形隶属度函数

如图 2.6 所示的是一个等分三角形隶属度函数。在实际应用过程中，一般都可以采用如图 2.6 所示的隶属度函数来对一个变量属于其所对应的模糊集合的隶属度进行表示。

(2) 知识库

在知识库中一般都主要存放着该领域的一些相关的专家经验以及它所希望能够获得的一个控制目标。一般是由数据库和规则库构成。

①在数据库中，一般主要用来保存控制过程中与模糊数据和模糊规则使用有关的一些参数。通常情况下主要有论域变换相关参数、如何选取隶属度函数以及如何分割模糊空间等。

目前来说，对于模糊分割数的大小还没有一个明确的解决方案。一般主要还是采用经验和试凑方法。

表2.2 模糊控制规则表

U		EC						
		BN	MN	SN	Z	SP	MP	PB
E	BN	BP	BP	BP	BP	MP	MP	Z
	MN	BP	BP	BP	BP	MP	MP	Z
	SN	MP	MP	MP	MP	Z	Z	SN
	Z	MP	MP	SP	Z	SN	SN	MN
	SP	SP	SP	Z	MN	MN	MN	MN
	MP	Z	Z	MN	BN	BN	BN	BN
	BP	Z	Z	MN	BN	BN	BN	BN

②将模糊控制中需要用到的模糊规则存储到规则库中。模糊规则的制定通常是经历过长期的一个经验总结和相关专家知识才制定出来的，通过利用它来对被控对象的行为进行控制。该规则的精度通常来说会对模糊控制器的控制性能产生影响。在模糊控制中通常会使用一组语言来对专家知识进行描述，如下所示为专家知识的一般表示形式：

IF (满足一组条件) $THEN$ (可以推出一组结论)

通常把该 $IF-THEN$ 规则叫做模糊条件语句。模糊规则一般可以写成如下形式：

$$\begin{aligned}
 R_1 &: \text{if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1, \text{ then } z \text{ is } C_1 \\
 R_2 &: \text{if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2, \text{ then } z \text{ is } C_2 \\
 &\dots \\
 R_n &: \text{if } x \text{ is } A_n \text{ and } y \text{ is } B_n, \text{ then } z \text{ is } C_n
 \end{aligned}$$

表 2.2 中的模糊规则可以使用如下形式进行表示：

第 i 条规则：if E is E_i and EC is EC_i , then U is U_i ; $i=1, 2, \dots, m$ 。

其中, $E_i, EC_i, U_i \in \{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$ 。在模糊控制器设计过程中, 模糊规则的制定是设计的重点, 一般主要是采用经验归纳法设计模糊规则。

(3) 模糊推理

模糊推理过程实际上就是利用一些模糊的信息来模仿人的思维方式, 进而来完成一定的推理过程。一般情况下, 可以通过使用模糊关系矩阵来对模糊规则进行表示。然而模糊推理是通过一些推理手段进行合成操作, 由输入变量的模糊向量和模糊关系进而可以得到输出变量的模糊向量。通常情况下的模糊推理过程一般采用最大最小推理方法来完成。下面采用三角形隶属度函数来对模糊推理过程中的推理方法进行一个简单介绍。

对于一个有输入变量 E 和 EC , 输出变量 U 的模糊控制器, 模糊子集一般来说取 $s = (2n+1) = 5 \sim 7$ 个。控制规则可以表示为如下形式:

$$\begin{aligned} &\text{if } E \text{ is } A_{11} \text{ and } EC \text{ is } A_{12}, \text{ then } U \text{ is } U_1 \\ &\text{if } E \text{ is } A_{21} \text{ and } EC \text{ is } A_{22}, \text{ then } U \text{ is } U_2 \end{aligned}$$

其中, A_{11} 、 A_{21} 和 A_{12} 、 A_{22} 分别表示变量 E 和 EC 的相邻模糊子集; U_1 与 U_2 是变量 U 的相邻模糊子集。如果已知 $E = e_0, EC = ec_0$ 则依据对应的隶属度函数 $\mu_{A_{11}}(e_0)$ 和 $\mu_{A_{12}}(ec_0)$ 求解合成度:

$$\omega_i = \mu_{A_{11}}(e_0) * \mu_{A_{12}}(ec_0) \quad (2-9)$$

当上式中的运算符 * 取 \min (极小) 时, 对于第 i 条规则它的推理结果具有如下形式:

$$\mu_{U_i}(u) = \omega_i * \mu_{U_i}(u) \quad (2-10)$$

所以两条规则经过合成推理后得到如下结果:

$$\mu_U^*(u) = \bigvee_{i=1}^2 \omega_i * \mu_{U_i}(u) \quad (2-11)$$

当 * 取 \min 时,

$$\mu_U^*(u) = [\omega_1 \wedge \mu_{U_1}(u)] \vee [\omega_2 \wedge \mu_{U_2}(u)] \quad (2-12)$$

当 * 取 \cdot 时,

$$\mu_U^*(u) = [\omega_1 \mu_{U_1}(u)] \vee [\omega_2 \mu_{U_2}(u)] \quad (2-13)$$

通过以上过程完成模糊控制中的推理过程得到了推理结果, 但其结果一般来说只是一个模糊量并不能够直接作用于被控对象, 因此还需要进行一次转换才能够求出最后确定的控制量。

(4) 清晰化

由于经历了前面的模糊推理过程得到的仅仅只是一个模糊量, 然而并不能够使用它直接来对被控对象进行控制, 所以还需要完成一步叫做清晰化过程的操作。该过程需要进行以下两个步骤:

① 将模糊控制中的控制量经过一个解模糊过程的处理，使其转换成在论域范围内的一个清晰量；

② 将论域范围内的一个清晰量经过一次论域变换过程的处理后获得需要的实际控制量。

2.3 基本的预测控制算法

预测控制作为一种基于模型的先进的计算机控制算法，自提出以来就迅速被广泛应用于工业过程控制中，对于一些复杂过程对象表现出较强的控制性能。正是因为预测控制本身所具有的滚动优化和反馈校正的两个优点，所以在实际过程控制中它能更加可靠的应对被控对象存在的不确定性、时滞和时变等因素带来的影响。预测控制对模型的精度要求不高，所以被广泛应用在石油、化工等行业并取得了非常好的控制效果。在预测控制的算法中，通常来说使用最多的预测控制算法是 DMC 和 PFC 这两种算法，如图 2.4 对于模型预测控制的基本思想进行了简单的描述。在图中 $u(k+i)$ 表示优化控制律， $y(k)$ 表示当前的过程输出， $y_m(k+i)$ 表示过程模型预测输出， $y_r(k+1)$ 表示参考轨迹， $e(k+i)$ 表示模型与实际过程的输出误差， $y_s(k+i)$ 为设定值。

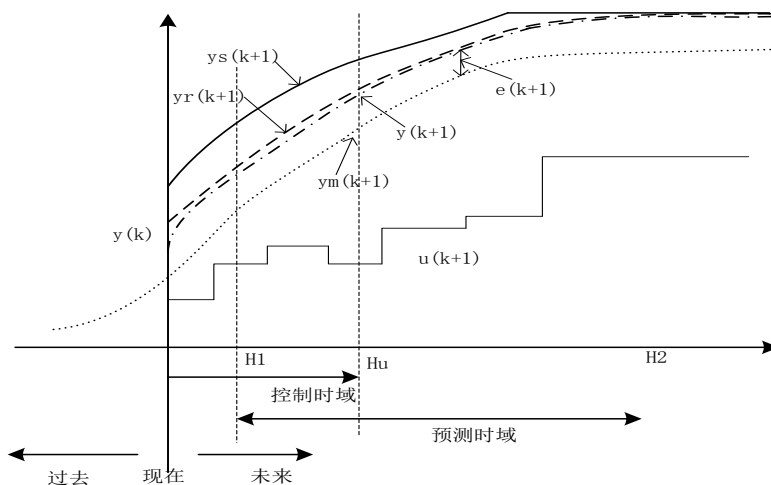


图2.4 预测控制的基本思想

在模型预测控制系统中，一般来说该结构主要是由预测模型、滚动优化，反馈校正以及参考轨迹这四个部分所组成的。基本结构如下图 2.5 所示：

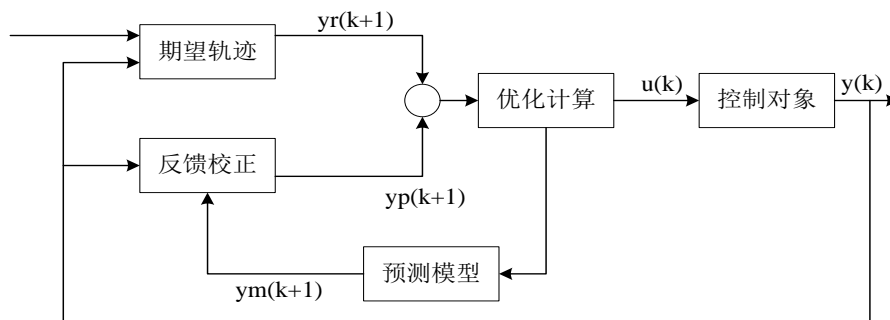


图 2.5 预测控制的基本结构

本文主要使用了预测函数控制（PFC）控制算法，所以接下来将对 PFC 进行介绍。

近年来，PFC 已经被扩展到以热焓为代表的各种工业控制中，例如工业加热炉，反应器等。在传统的预测控制算法中，由于并没有设置控制量的结构，因此求解出的最优输入量并没有明确的输入规律。然而在 PFC 算法中，通过将每个时刻的控制量使用一系列基函数的线性组合的形式进行表示，此时刻的系统输出为一组基函数作用于被控对象之后的加权组合。然后根据这些线性组合系数来确定最优控制律。由于求解的只是这些少量的权系数，因此在计算量上大大简化了。

在 PFC 控制过程中，主要依据参考轨迹和被控对象的特点来选择基函数。一般选取阶跃、斜坡以及指数函数等作为 PFC 的基函数，那么控制量就可以使用如下形式的若干事先选取好的基函数 $f_n(n=1,2,\dots,N)$ 的线性组合：

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N u_n f_n(i), \quad i=0,1,\dots,P-1 \quad (2-14)$$

其中， P 表示 PFC 的预测时域， u_n 表示第 n 个线性组合的系数， $f_n(i)$ 表示基函数在 $t=iT_s$ 时刻的值。

本节将从如下方面介绍 PFC 算法：

2.3.1 预测模型

首先假设被控对象的预测模型为 $F(\cdot)$ ， $X(k)$ 表示 k 时刻的已知信息，基函数 $f_n(t)$ 作用于模型后得到输出响应为 $g_n(t)$ ，则系统的预测输出为：

$$y_m(k+i) = F(X(k)) + \sum_{n=1}^N u_n g_n(i) \quad (2-15)$$

其中， $F(X(k))$ 为自由响应， $\sum_{n=1}^N u_n g_n(i)$ 为强迫响应。

2.3.2 滚动优化

在 PFC 算法中，利用性能指标在每一时刻求出一组最优的线性加权系数 $u_n(n=1,2,\dots,N)$ 。根据该加权系数可以得到控制输入 $u(k)$ ，并将得到的控制输入 $u(k)$ 作用于被控制对象。在下一时刻，线性组合系数需要重新计算，由此可得下一时刻的 $u(k+1)$ ，这样循环计算。利用滚动优化的思想，使预测输出不断靠近参考轨迹，取如下目标函数 $J(k)$ ：

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^P [y_r(k+i) - y_m(k+i) - e(k+i)]^2 \quad (2-19)$$

其中，

$$\begin{aligned} y_r(k+i) &= \beta^i y_p(k) + (1-\beta^i)c(k) \\ e(k+i) &= y_p(k) - y_m(k) \end{aligned}$$

$y_r(k+i)$ 表示参考轨迹, β 表示参考轨迹的柔化系数, $e(k+i)$ 表示模型对象在 $k+i$ 时刻的预测误差, P 表示优化时域, $y_p(k)$ 表示过程对象在 k 时刻被控对象的实际输出。

由以上可知, 对公式 (3) 进行求导可以求出线性组合系数 $u_n(n=1,2,\dots,N)$ 的值。依据这些组合系数得到 $u(k)$, 但下一时刻需要重新计算控制量。

2.3.3 反馈校正

在实际过程中, 实际过程和模型之间很难完全匹配导致出现预测偏差。若不对该偏差进行修正, 将会对实际生产过程造成很严重的影响, 因此需要对每一时刻的预测偏差进行修正。通常情况下, 利用传感器等测量工具检测实际过程某时刻的实际值。然后利用该偏差来补偿预测输出的偏差。公式如下所示:

$$y_m(k) = y_m(k-1) + e(k) \quad (2-20)$$

综上所述是对 PFC 算法的三个基本原理进行的简单介绍, 它和一般了解到的预测控制算法不同, 它的控制输入由若干个已知的基函数进行表示的线性组合。因此在优化过程中, 优化的变量不再是 $u(k), \dots, u(k+P-1)$, 而是组合系数 $u_n(n=1,2,\dots,N)$, 由于通常 $N \ll P$, 所以其在线优化计算量低于一般的预测控制算法。

在 PFC 算法中, 包含了基函数 $f_n(n=1,2,\dots,N)$ 、反映参考轨迹的时间常数 α 以及预测优化时域 P 等一些控制参数, 它们对于被控对象的动态响应、稳定性和控制精度造成了影响。其中动态响应主要受到参考轨迹的影响; 控制精度主要由选取的基函数来决定; 而预测优化时域 P 主要影响控制稳定性和鲁棒性。因此在控制系统设计过程中, 可以依据性能需求通过改变这些参数来较快地调整控制性能。

2.3.4 预测函数控制系统的参数设计

在 PFC 中, 选取基函数需要考虑被控对象的性质和设定值, 但实际上选择阶跃函数就能满足需求且减少计算量。有了基函数后, 预测函数控制的调整参数就只有优化时域 P 、采样时间 T_s 以及柔化系数 β 。

(1) 基函数的选择

依据对 PFC 算法的了解, 通过选取不同的基函数会对系统的控制精度造成不同大小的影响。通常可选如下几种形式的基函数:

如果输入信号是阶跃函数, 则基函数的可以选取为: $f_1(t)=1$

如果输入信号是斜坡函数, 则基函数的可以选取为: $f_1(t)=1, f_2(t)=t$

如果输入信号是指数函数, 则基函数的可以选取为: $f_1(t)=1, f_2(t)=t, f_3(t)=e^{-t/T_s}$

(2) 采样时间 T_s

对于采样时间 T_s 的选取是依赖被控对象的动态性且需满足香农采样定理。依据抗干扰性能的不同和动态性的快慢来调整采样时间 T_s 。若希望改善系统的稳定性，并且加快系统的动态性能，可以通过适当的减小 T_s 来达到要求。若期望改善系统的鲁棒性，可以适当增大 T_s 。

(3) 柔化系数

通常来说，选取不同柔化系数 β 对被控系统的跟踪速度产生不同的影响，一般情况下它的取值范围为 $0 \leq \beta < 1$ 。如果选取的 β 值越大，那么将会使得系统的跟踪速度变慢，但其输出响应曲线将会变得越来越平缓。在实际过程中，选取 β 值是依据动态性要求和跟踪速度的。

2.4 本章小结

本章首先通过对 PID 控制算法的基本原理进行了简单介绍，然后介绍了几种对于 PID 参数进行优化的方法。其次通过对模糊控制的原理进行了介绍，并且介绍了其中的一些主要参数的意义及如何选取。最后分别从预测控制的预测模型、滚动优化、反馈校正这三个基本原理上对 PFC 算法做了一些简单介绍，并且对该算法中存在的一些主要参数它所具有的意义及如何进行选择也进行了相关的说明。

第 3 章 基于模糊控制优化的 PID 控制

3.1 引言

正是因为模糊控制本身所具有的不依赖过程模型，并且能够通过使用语言变量来对系统进行描述的特点，所以使得该被控对象在时滞、非线性以及时变的情况下仍具备一定的自适应能力以及鲁棒性能，同时在有噪声扰动情况下仍然还具有较强的抗干扰能力。但是模糊控制也存在一些有待学者进行改进的地方，比如说模糊控制器具有较差的消除稳态误差的能力，因此很难达到较高的控制精度。正是由于调整模糊控制器的控制性能并不需要依赖准确的数学模型，这就为解决一些不确定性问题提供了一种解决方案。如果能够将模糊控制和 PID 控制这两种算法各自的优点进行结合将会获得较好的控制效果。因此本章将根据模糊控制和 PID 控制这两种方法各自的特点，设计出了一种模糊自整定 PID 控制器方法。通过使用一定的模糊规则来推理达到在线优化 PID 参数的目的。最后针对电加热炉这一被控对象设计出了一种模糊 PID 控制器，通过仿真结果验证了该控制器所具有的有效性和可行性。这样将进一步的促进了模糊控制在 PID 控制中的应用，如果设计的控制系统取得很好的控制效果，这样的工作也将是非常有意义的。

3.2 模糊自整定优化 PID 控制器方法

模糊控制不依赖于控制过程模型，使用语言变量来描述系统特点，而不是使用数值变量。它是根据系统的模糊规则推理和动态信息来进行一定的控制，但它却不能获得令人满意的控制精度。为了能够解决上述问题，考虑结合模糊控制和 PID 控制的优点，从而设计得到了一种新型的解决方案。

在本章中的模糊控制器采用的是一个两输入-三输出的形式控制方案。其中，如图 3.1 所示将误差 e 和误差变化率 ec 作为输入。具体形式如下所示：

$$\begin{cases} K'_p = K_p + \Delta k_p \\ K'_i = K_i + \Delta k_i \\ K'_d = K_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (3-1)$$

其中， K_p, K_i, K_d 分别表示模糊 PID 参数， K'_p, K'_i, K'_d 表示校正后的模糊 PID 参数， $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 表示待确定的参数。对于模糊控制器的控制结构图可以从图 3.1 看到，其中的 c 表示对于控制目标的一个设定值。

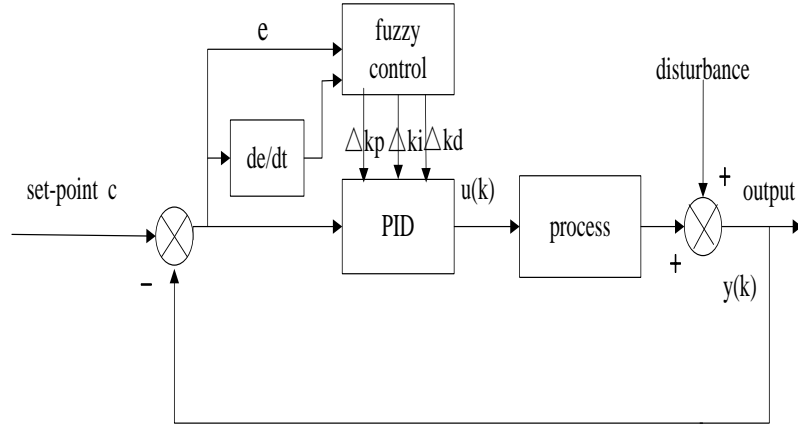


图3.1 模糊PID控制系统结构图

3.2.1 模糊控制中被控对象模型的建立

在通常的工业过程中，大多数的工业过程都是可以被看作是一个一阶惯性加纯滞后(FOPDT)模型

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (3-2)$$

参数的解释如下：将 $y(t)$ 表示为过程的实际输出， $y(\infty)$ 表示为实际输出的最终值， U_0 代表实际输出的阶跃信号幅度，实际输出首先被处理成 $y^*(t) = \frac{y(t)}{y(\infty)}$ ，那

么过程增益可以计算为 $K = \frac{y(\infty)}{U_0}$ 。

对于一阶过程， $y^*(t)$ 为下述形式：

$$y^*(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau \\ 1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}}, & t \geq \tau \end{cases} \quad (3-3)$$

当选取两个数值点 $t_2 > t_1 > \tau$ ，并且， $y^*(t_1) = 0.39, y^*(t_2) = 0.63$ 时， T 和 τ 可以相应的计算出来。

$$\begin{aligned} T &= 2(t_2 - t_1) \\ \tau &= 2t_1 - t_2 \end{aligned} \quad (3-4)$$

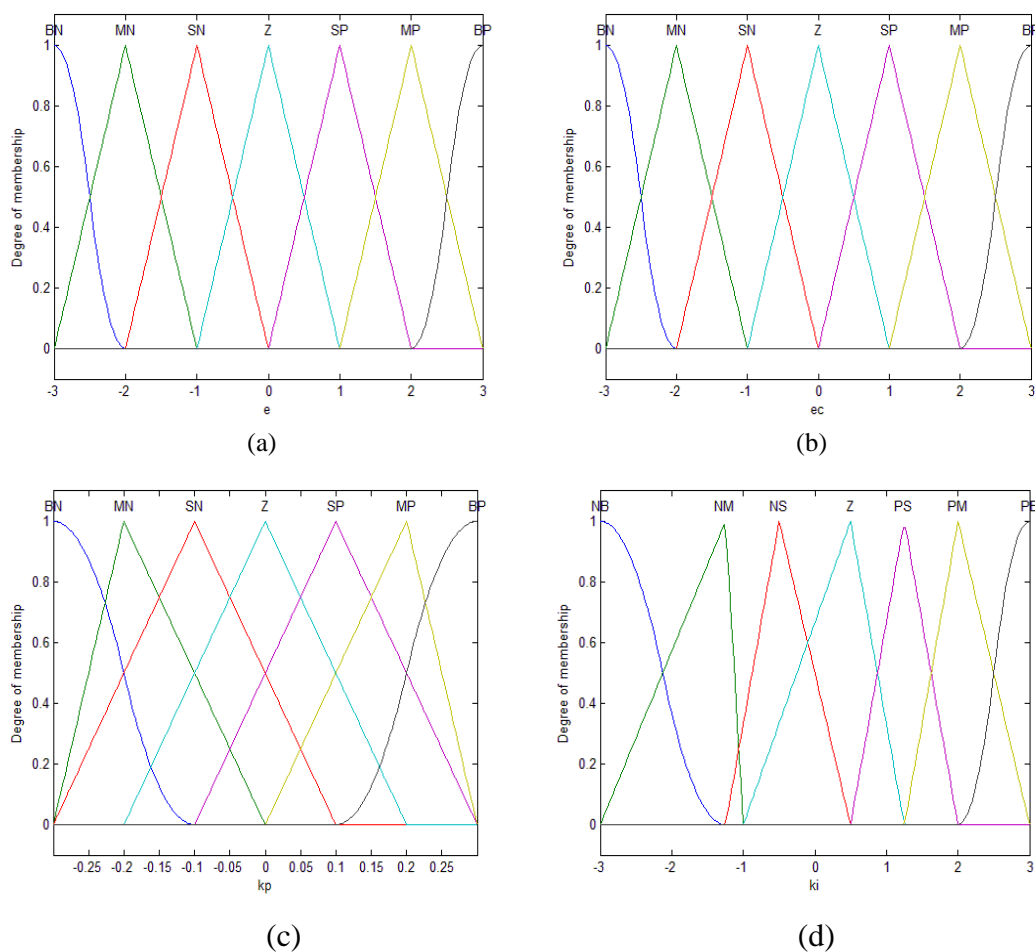
3.2.2 论域和语言变量的设置

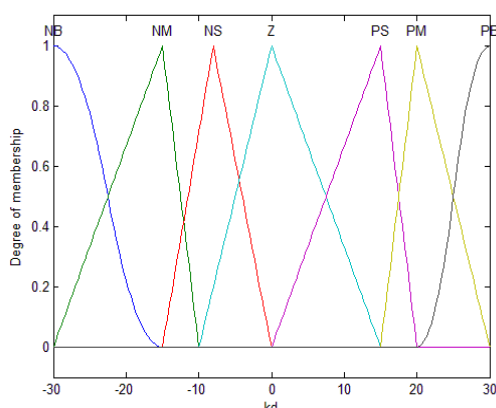
在实际过程中，其基本论域一般是表示控制器输入和输出它的一个实际变化范围，通常情况下它是以精确值来进行表示的。为能够顺利的进行模糊化过程，一般情况下会引入一个量化因子 k_e 和 k_{ec} 使得输入变量能够从基本论域变换到相应的模糊集范围内。由于通过模糊控制算法得到的控制量往往并不能直接用来进行控制被控对象，所以需要引入了比例因子 k_p, k_i, k_d 使其转换到其相对应的控制论域范围内。假定误差 e 的基本论域为 $[-x_e, x_e]$ ，则相应的论域的离散论域为 $\{-n, -(n-1), \dots, 0, \dots, n-1, n\}$ ，所以量化因子为 $k_e = n/x_e$ ，同理，如果选取相同的论域则 $k_{ec} = n/x_{ec}$ ，比例因子为 $k_p = x_p/n, k_i = x_i/n, k_d = x_d/n$ 。

本章通过采用了一个两输入-三输出的模糊控制器来对 PID 参数进行调整, 从而实现了在线优化的目的。其中, 模糊控制器的输入模糊变量分别为误差 e 和误差变化率 ec , 模糊控制器的输出模糊变量分别为 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。分别选取范围为 $[-3\ 3], [-3\ 3], [-0.3\ 0.3], [-0.06\ 0.06], [-3\ 3]$, 并且模糊语言集合选择为 $[BN\ MN\ SN\ Z\ SP\ MP\ BP]$ 。

3.2.3 隶属度函数设置

在模糊控制中, 由于隶属度函数的形状的不同, 将会对其控制性能产生不同程度的影响。一般在进行隶属度函数的选取时, 若曲线形状比较尖, 将会使得其分辨率相比其他较高并且也会造成其控制灵敏度也较高; 相反, 若曲线形状比较平缓的话, 将会使得其控制性能也较为平缓且其具有很好的稳定性。在选取模糊变量时候, 通常在误差较大场合建议使用低分辨率隶属度函数。在误差接近 0 的场合建议使用高分辨率的隶属度函数。在本章的模糊控制中的输入、输出变量通常选取三角形隶属度函数、S 型隶属度函数以及 Z 型隶属度函数。设计如下图 3.2 所示的输入 e, ec 和 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 输出隶属度函数。





(e)

图3.2 隶属度函数

3.2.4 模糊规则集

在常规 PID 控制的三个参数中，其中的比例系数一般用来调整系统响应速度和其控制精度；积分系数一般用来消除稳态误差；微分系数主要用来对系统的动态特性进行改善的。根据 K_p, K_i, K_d 和 e, ec 之间的关系可以得到其整定过程的基本原则如下所示：

- ① 当 $|e|$ 的值较大时，为能够提高系统的响应速度，一般选取较大的 K_p 值和适当的 K_d 值。为了防止系统发生积分饱和现象且避免出现较大的超调量，一般建议选取较小的 K_i 值。
- ② 当 $|e|$ 的值为中等大小时候，为减小产生的超调量过大，一般选取较小的 K_i 值和适当的 K_p 和 K_d 值。
- ③ 当 $|e|$ 较小时，为提高稳态精度，一般选取较大 K_p 和 K_i 值。为了避免在设定值附近出现振荡，并且为提高系统的抗干扰的能力，一般使用较小的 K_d 值。
- ④ 当 $|ec|$ 较大时，为保证系统响应速度、稳定精度以及避免超调量过大，一般使用较小或适当 K_p 值，并且尽量使用较小 K_i 值。
- ⑤ 当 $|ec|$ 的值为中等大小时候，为提高系统的响应速度，并且为了保证系统有较好稳态性能，通常建议应选取较大 K_p 、 K_i 的值以及较小 K_d 值。
- ⑥ 当 $|ec|$ 的值为较小时候，为了保证系统具有较快响应速度，一般选取较大的 K_p 和 K_i 值以及适中的 K_d 值。

依据上面描述的准则，再结合相关领域的技术人员的一些专业知识和实际经验，然后对其进行总结可以得到一个较为合理的模糊规则表^[77]。如下表 3.1 描述的是一个两输入-三输出的模糊 PID 控制（FPID）的模糊控制规则。

表3.1 模糊规则

Δk_p ec e	BN	MN	SN	Z	SP	MP	BP
BN	BP	BP	MP	MP	SP	Z	Z
MN	BP	BP	MP	SP	SP	Z	SN
SN	MP	MP	MP	SP	Z	SN	SN
Z	MP	MP	SP	Z	SN	MN	MN
SP	SP	SP	Z	SN	SN	MN	MN
MP	SP	Z	SN	MN	MN	MN	BN
BP	Z	Z	NM	NM	NM	BN	BN

(a)

Δk_i ec e	BN	MN	SN	Z	SP	MP	BP
BN	BN	BN	MN	MN	SN	Z	Z
MN	BN	BN	MN	SN	SN	Z	Z
SN	BN	MN	SN	SN	Z	SP	SP
Z	MN	MN	SN	Z	SP	MP	MP
SP	MN	SN	Z	SP	SP	MP	BP
MP	Z	Z	SP	SP	MP	BP	BP
BP	Z	Z	SP	MP	MP	BP	BP

(b)

Δk_d ec e	BN	MN	SN	Z	SP	MP	BP
BN	SP	SN	BN	BN	BN	MN	SP
MN	SP	SN	BN	MN	MN	SN	Z
NS	Z	SN	MN	MN	SN	SN	Z
Z	Z	SN	SN	SN	SN	SN	Z
SP	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
MP	BP	NS	SP	SP	SP	SP	BP
BP	BP	MP	MP	MP	SP	SP	BP

(c)

3.3 案例分析

3.3.1 工艺流程介绍

图 3.3 是 SXF-4-10 高温炉温度控制系统的一个工艺流程图。从该图可以看出，温度控制主要采用对 SSR-380D40 固态继电器的通断来实现。其中，炉温的设定值是事先通过计算机进行设置。

当给固态继电器 SSR-380D40 输入一个+5V 的电压时，此时固态继电器处于导通状态，高温炉进行加热。炉子的加热回路描述如下：自 220V 的交流电的正极依次到达分压电阻、电阻丝、固态继电器左侧的正极，从固态继电器右侧的负极出来以后回到 220V 的交流电负极。

当固态继电器 SSR-380D40 输入一个 0V 的电压时，此时固态继电器处于断开状态，加热回路被断开，电阻丝停止加热，高温炉正在进行散热。

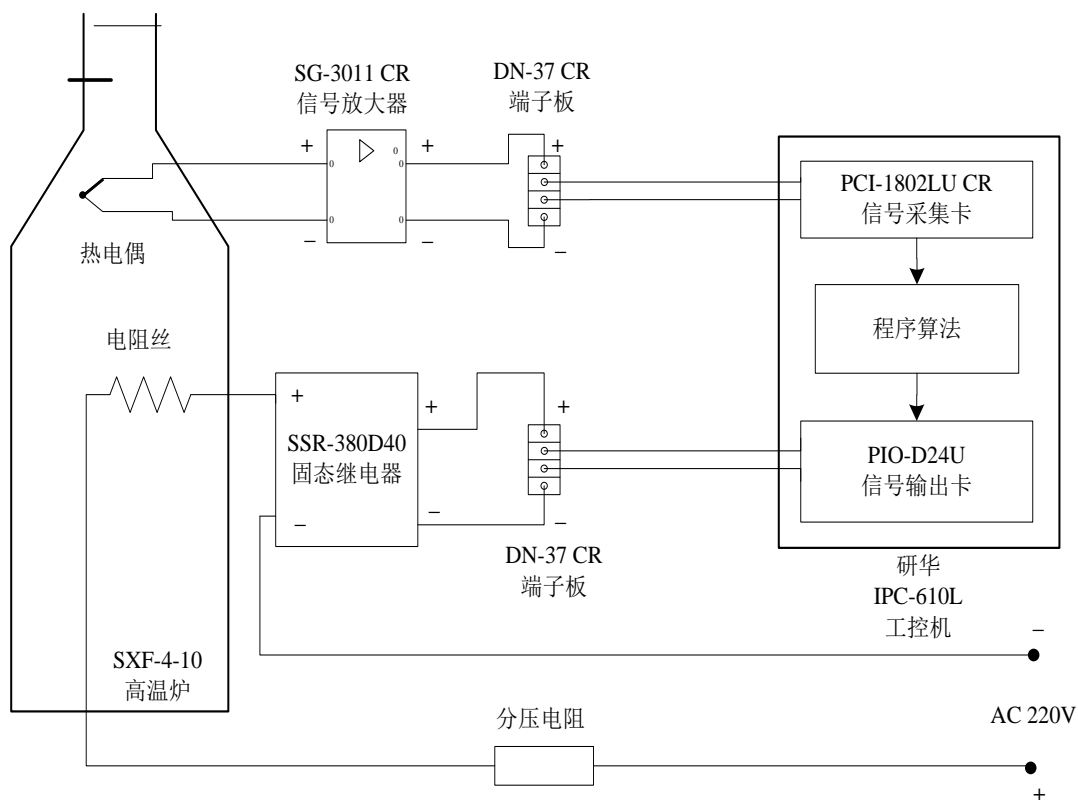


图 3.3 SXF-4-10 高温炉温度控制系统

从图中可知，该加热炉的整个加热过程主要是由测量模块和加热模块这两部分所组成。这两个模块通过一台计算机连接，该过程包括过程控制算法和实时温度与相应电压之间的转换规则。在测量模块中，热电偶通常用来作为温度测量的功能，而 PCI-1802LU CR 信号采集卡是用来收集相应的电压相应的实时温度数据。因为电压太小而不能被识别，SG-3011CR 信号放大器通常被加入来放大电压信号以避免较大的测量误差。对于加热模块它的温度控制本章一般是利用 SSR-380D40 固态继电器它的通断来进行调整的。PIO-D24U 信号输出卡通

常用作给固态继电器传输相应的电压值。当通过计算机设置 PIO-D24U 的输入数字信号为 0x01，则固态继电器将获得+5v 输出电压。此时的 SSR-380D40 继电器处于连通状态且 SFX-4-10 电加热炉处于加热状态。相反，如果输入信号为 0x00，则信号输出卡的输出电压为 0V 且 SSR-380D40 处于断开状态。此时的加热模块被切换到断开状态且电阻丝将停止工作。除此之外，DN-37 CR 端子板通常用来传输电压且分压电阻用来分担交流电压。

在 IPC 中，实际测量温度与设定值温度的偏差通常作为控制算法的输入，然后计算输出占空比，即对于加热炉选定的加热时间 nT_s 中处于加热状态的占空比 dr 。其中，采样时间 $T_s = 10s$ ， n 加热时间的数目。在当前的加热周期 nT_s ，占空比 dr 将输出温度。从另一方面来说，如果在时间 $dr \cdot nT_s$ 输入信号是 0x01，则固态继电器处于连通状态。如果在时间 $(1-dr) \cdot nT_s$ 的时候输入的信号是一个 0x00，那么此时固态继电器将处于一个断开的状态。

通过比较设定值与实际测量温度计算出占空比 dr ，它可以被认为是温度控制过程中操作变量，加热时间或者固态继电器的连通状态决定着加热周期的占空比，在下一个 nT_s 加热周期将继续依次循环。

3.3.2 控制目标

从图 3.3 中可知，本章方法的控制目标是使加热炉 SXF-4-10 能够按照设定值来进行加热温度。根据实际工况和工艺需求来决定加热炉的出口温度的设定值，通过控制固态继电器 SSR-380D40 的通断来控制温度。

3.3.3 模糊 PID 方法与传统 PID 方法的比较

由加热炉的实时温度数据得到一阶加纯滞后模型，通过控制占空比来调节一个控制周期内的加热时间，从而实现加热炉的温度控制。

首先输入一个阶跃信号给加热炉输出加热炉的温度值。然后通过采集到的加热炉温度输出数据利用两点法来建立加热炉温度对象的一阶惯性加纯滞后模型。其具体形式为如下所示：

$$G(s) = \frac{1}{600s+1} e^{-100s} \quad (3-5)$$

采样时间选择为 30s，然后将公式（3-5）转换成离散形式后设计焦化炉的控制器。在 FPID 控制中， $e, ec, \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 模糊域分别选取为[-3 3], [-3 3], [-0.3 0.3], [-3 3], [-30 30]。量化因子选取为 $k_e = 0.001, k_{ec} = 0.001$ 。比例因子选取为 $k_p = 0.001, k_i = 0.008, k_d = 12.8$ 。这里的 PID 参数是基于内模控制（IMC）选取的 $K_p = 2.1667, K_i = 0.0033, K_d = 100, \lambda = 2.5\tau$ 。设定值为 300，在 $t = 244$ 加入过程输出扰动为-5。

表 3.2 实验参数表

类型 参数	IMC-PID	FPID
$k_e, k_{ec}, k_p, k_i, k_d$	/	1, 1, 3, 0.001, 5
K_p, K_i, K_d	2.1667, 0.0033, 100	2.1667, 0.0033, 100
设定值	300	300

如图 3.4 所示是在模型匹配的情况下对 FPID 控制和 PID 控制进行的仿真图：

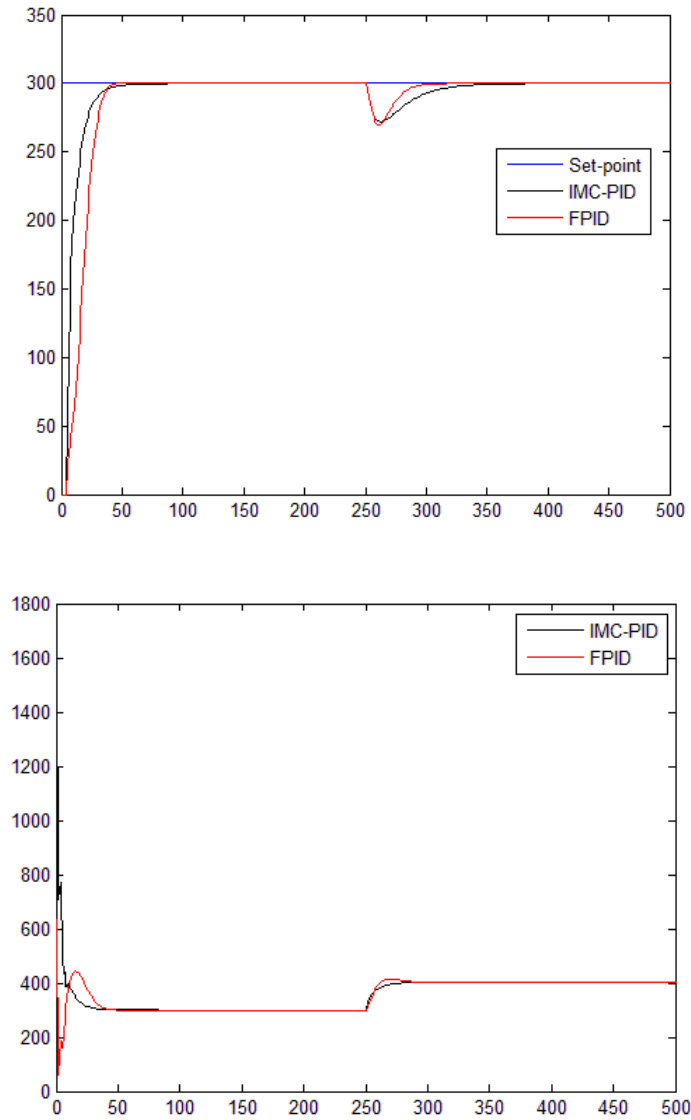


图 3.4 具有扰动无失配情况下的闭环响应

图 3.4 中表明的是模糊 PID 与常规 PID 控制方法的控制效果的输出响应和控制量的比较结果。从图中可以看出，在常规 PID 控制器它的响应时间比较大

且在有扰动的情况下超调量相比模糊 PID 控制器较大。而模糊 PID 控制具有较快的响应时间，超调量相比而言较小。通过如上的仿真图比较可知，模糊 PID 控制器的总体控制性能相比常规 PID 控制器要好。如表 3.3 所示的是两种控制器响应参数：

表 3.3 控制器响应参数

控制器	响应时间	超调量	抗干扰时间
PID	44	27.8	62
FPID	34	29.4	47.6

由于内模 PID 控制的控制性能受到 λ 的影响且 $\lambda > 0.8\tau$ ，所以本章又做了如下的测试：Case1: $\lambda=1.0\tau$ ，Case2: $\lambda=1.5\tau$ ，Case3: $\lambda=1.6\tau$ ，Case4: $\lambda=1.7\tau$ ，从图 3.5 和图 3.6 可以看出，随着 λ 的值越大，响应曲线越稳定，本章考虑到这样的问题所以选择 $\lambda = 2.5\tau$ 较为合适，仿真图如下所示：

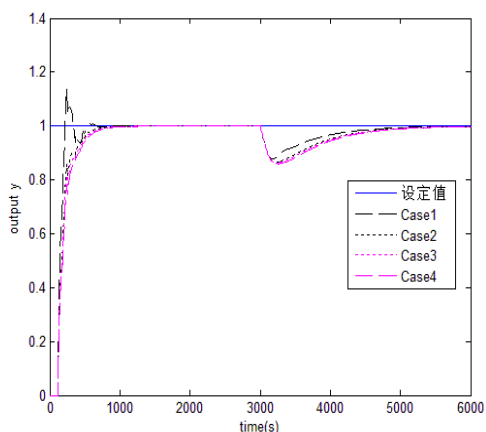
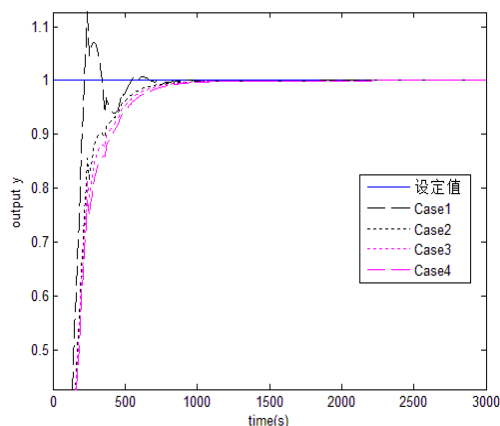
图 3.5 不同 λ 的响应曲线

图 3.6 放大后的响应曲线

然而如果要想在实际控制过程中获取到精确的数学过程模型通常情况下往往是比较困难的。模型匹配只是人们假设的理想情况，但是在实际过程中这种情况是不存在的。因此，实际过程中的不确定性将可能导致模型失配并且影响着控制器的性能，关于这个问题存在的重要性也具有很重要的研究价值。这就意味着在公式 (3-5) 中的模型可能不能准确的描述焦化炉的动态性，通常模型和实际过程是不相同的。为了模仿这样的条件，本文采用蒙特卡洛方法随机产生四组实际的工业过程^[75]。它们是根据公式 (3-5) 随机产生最大 30% 不确定性的模型失配情况。这四组实际过程的传递函数如下所示：

$$\text{第一组: } G(s) = \frac{0.9632}{432.4006s + 1} e^{-92.8935s} \quad (3-6)$$

$$\text{第二组: } G(s) = \frac{0.9674}{596.3152s+1} e^{-108.7s} \quad (3-7)$$

$$\text{第三组: } G(s) = \frac{1.0512}{542.5389s+1} e^{-83.4287s} \quad (3-8)$$

$$\text{第四组: } G(s) = \frac{0.8180}{545.9942s+1} e^{-85.06s} \quad (3-9)$$

仿真结果给出了通过公式 (3-5) 过程模型设计控制器，并用该控制器来控制通过公式 (3-6) 到公式 (3-9) 描述的实际过程。图 3.7 到图 3.10 表明四组响应过程，并且可以从仿真结果中发现 **FPID** 控制器仍然具有满意的控制性能。在图 3.7 中可以看出，本文提出的模糊 **PID** 控制器的输出响应相比于常规 **PID** 控制器具有较快的跟踪性能且还具有比较小超调量。在图 3.8、图 3.9 和图 3.10 中，仿真结果具有和图 3.7 相似的结果，模糊 **PID** 具有更快的跟踪速度和强的抗干扰能力。经过仿真比较发现，模糊控制器相比常规 **PID** 在模型失配时候仍然具备较好的控制性能。

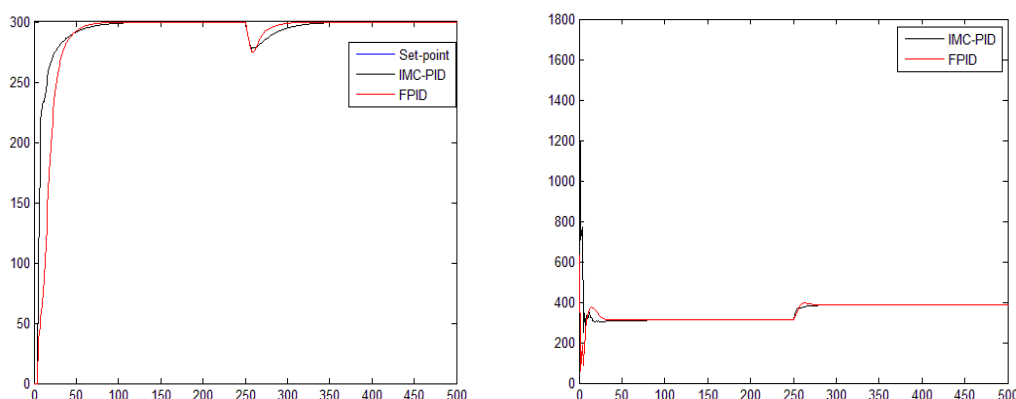


图 3.7 第一组模型失配情况下的闭环响应

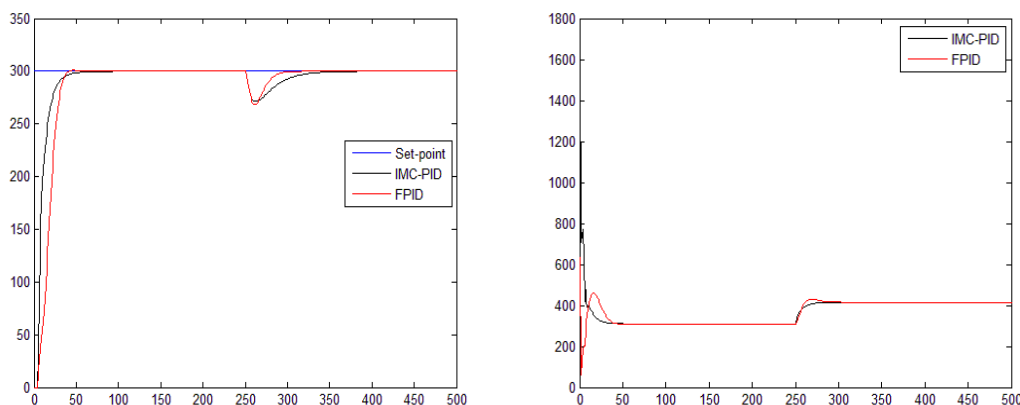


图 3.8 第二组模型失配情况下的闭环响应

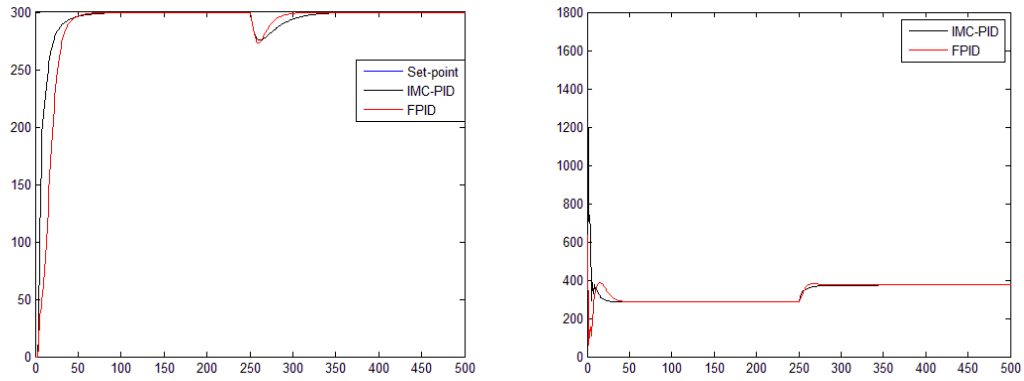


图 3.9 第三组模型失配情况下的闭环响应

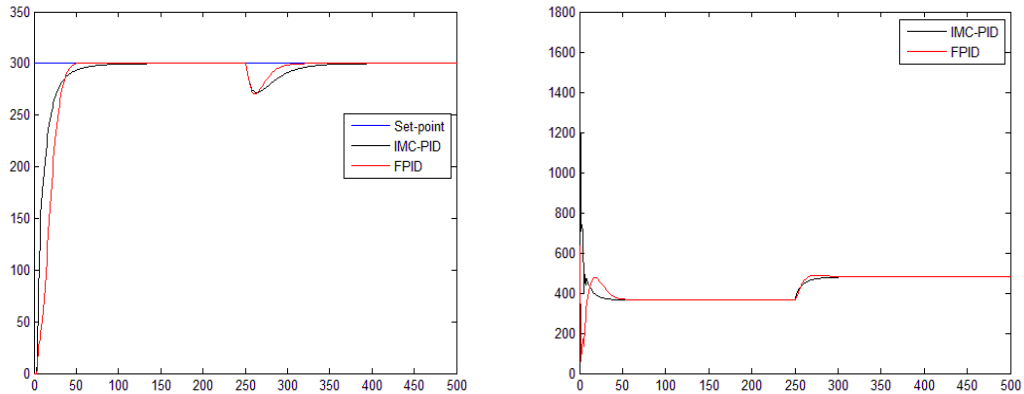


图 3.10 第四组模型失配情况下的闭环响应

3.4 本章小结

本章首先根据模糊控制的特性，运用模糊控制原理提出了一种利用模糊控制来调整 PID 参数的方法。该方法不仅具备了模糊控制算法优良的控制性能，并且还保留了常规 PID 控制器的结构简单、易于实现的特点，从而设计出了一种 PID 参数自调整的方法。最后将其与常规 PID 应用在加热炉的温度模型上，从而通过其验证了本章方法的可行性。

第 4 章 基于模糊网络优化的 PID 控制

4.1 引言

近年来，随着神经网络技术和模糊理论的研究越来越活跃，其研究成果也越来越多。学者通过神经网络来模拟人脑的思维，从而具有了学习和联想的能力，并且能很好的利用专家经验知识，但是对于模糊信息的处理能力还有待提高。模糊系统相比神经网络具有推理能力且对于专家经验也有很好的利用，但还是不具备自学习的能力。因此如何使得隶属度函数和模糊规则自行生成，成为了一个有待研究的命题。PID 控制器能够在线性系统中获得较好的控制效果得益于其结构简单、可靠性高等特点。而实际过程中往往存在非线性、不确定性以及时变等因素，往往并不能获得理想的控制效果。模糊控制具有不需要精确数学模型、对时滞、时变性以及非线性有较好的适应能力的优点，但模糊控制器中的模糊规则是总结人们经验得到的，所以控制精度不高，很难完全消除系统误差。神经网络可以从数据中自动总结规则，因此，对经验知识要求并不高。所以，假使能够把神经网络的自学习能力与模糊系统较强的推理能力结合，很可能会起到扬长避短的效果。

本章依据现有模糊 PID 控制方法中存在的不足，设计了一种焦化炉炉膛压力系统的模糊 RBF 网络优化 PID 控制方法，以获得更好的实际控制性能。通过将模糊控制和神经网络控制方法相结合，进而得出一种优化 PID 的控制方法。该方法在保证模糊控制和神经网络的优良特性的同时具备形式简单且满足了实际过程的需要。本章方法首先基于裂解炉炉膛压力模型设计控制器，然后对裂解炉炉膛压力对象仿真验证该 PID 控制的控制效果。

4.2 模糊网络优化的 PID 控制方法

模糊 RBF 网络整定 PID 控制框图如图 4.1 所示：

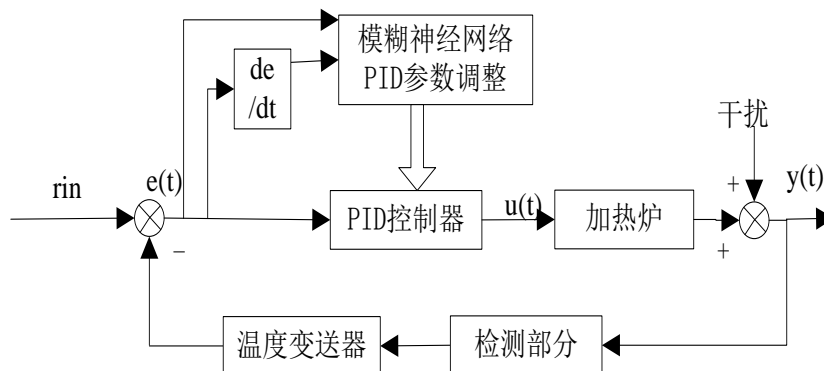


图 4.1 模糊 RBF 网络整定 PID 控制图

4.2.1 基于模糊的网络 PID 控制器设计

模糊网络的结构如图 4.2 所示，从该网络可以看出它的组成主要是输入层、模糊化层、模糊推理层和输出层这四个部分。从图中可以看出，网络输出为 k_p, k_i, k_d 。

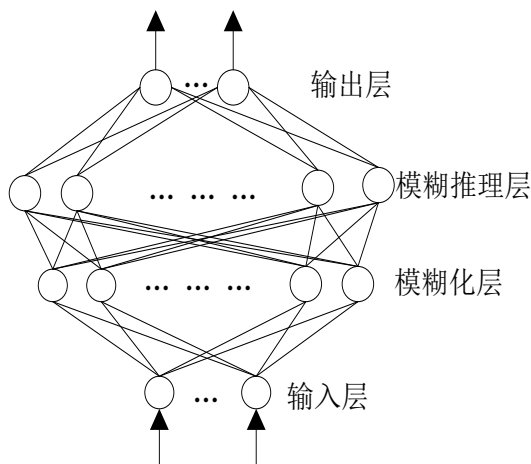


图 4.2 模糊 RBF 神经网络结构

下面将对模糊 RBF 网络中每一层信号是如何传播，并对神经网络的每一层的功能分别进行了介绍^[79]。

(1) 第一层：输入层

输入信号首先被送入到输入层的各个节点，然后输入层将该输入量传递到下一层。该层的每个节点 i 的输入输出可以表示成如下形式：

$$f_1(i) = X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (4-1)$$

(2) 第二层：模糊化层

隶属度函数选取高斯型函数。其中 c_{ij} 表示隶属度函数的均值， b_{ij} 表示隶属度函数的标准差。

$$f_2(i, j) = \exp \left[\frac{(f_1(i) - c_{ij})^2}{(b_{ij})^2} \right] \quad (4-2)$$

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

(3) 第三层：模糊推理层

模糊推理层首先要和模糊化层进行连接，利用它来完成模糊规则的一个匹配，然后再利用各个节点来完成模糊运算工作，亦或理解为模糊推理层通过利用各个模糊节点关系获得对应的激活强度。将所有的输入信号的乘积传到每个节点 j 上得到该节点的输出，可表示为如下形式：

$$f_3(j) = \prod_{i=1}^N f_2(i, j) \quad (4-3)$$

式中, $N = \prod_{i=1}^n N_i$ 。

(4) 第四层: 输出层

经过如上步骤后可以从输出层 f_4 得到的实际上是整定后得到的 K_p, K_i, K_d , 其中在这一层它是由三个节点组成, 形式如下:

$$f_4(i) = w \cdot f_3 = \sum_{j=1}^N w(i, j) \cdot f_3(j) \quad (4-4)$$

式中, $i=1,2,3$, w_{ij} 它所表示的是输出节点与第三层每个节点之间进行连接的权矩阵。

经过以上 RBF 整定后可以得到 PID 参数值, 则可以求出控制量为:

$$\Delta u(k) = f_4 \cdot x = K_p x(1) + K_i x(2) + K_d x(3) \quad (4-5)$$

其中,

$$K_p = f_4(1), K_i = f_4(2), K_d = f_4(3)$$

$$x(1) = e(k)$$

$$x(2) = e(k) - e(k-1)$$

$$x(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$$

采用增量式 PID 控制算法:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (4-6)$$

4.2.2 模糊神经网络的学习算法

通过利用 Delta 学习规则可以进行校正一些可调的参数, 因此定义如下形式的目标函数:

$$E = \frac{1}{2} (rin(k) - yout(k))^2 \quad (4-7)$$

其中, $rin(k)$ 和 $yout(k)$ 分别表示该网络的实际输入、输出。而每一次迭代步骤 k 的调整误差为 $rin(k) - yout(k)$ 。网络权值的学习算法如下:

$$\begin{aligned} \Delta w_j(k) &= -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w_j} = \eta \cdot (rin(k) - yout(k)) \cdot \frac{\partial yout}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial f_4} \frac{\partial f_4}{\partial w_j} \\ &= \eta \cdot (rin(k) - yout(k)) \cdot \frac{\partial yout}{\partial \Delta u} x(j) f_3(j) \end{aligned} \quad (4-8)$$

其中 w_j 表示该网络的输出节点与上一层各节点之间所连接的权重, $j=1,2,\dots,N$, η 表示对于该网络进行学习的速率。

倘若将动量因子考虑进来, 那么得到输出层的权值为:

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \Delta w_j(k) + \alpha(w_j(k-1) - w_j(k-2)) \quad (4-9)$$

其中, k 表示该网络所进行的一个迭代步数, α 表示该网络进行学习所需要的一个动量因子。

Jacobian 阵 (对象的输出对控制输入变化的灵敏度信息), 表现形式如下所示:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^m w_j f_j \frac{c_{ji} - x_1}{b_j^2} \quad (4-10)$$

式中， $x_1 = \Delta u(k)$ 。

4.3 案例分析

4.3.1 催化裂化工艺流程介绍

在催化裂化过程中，吸收塔、解吸塔、稳定塔和再吸收塔组成，并配置一些辅助硬件一起构成吸收稳定系统^[76]。图 4.3 所示的是吸收稳定系统催化裂化过程的工业流程图。该稳定系统的主要目的就是要将由分馏塔的塔顶分离出来的粗汽油和富气通过催化裂化作用进一步得到所需的干气、液化石油气以及一些合格并稳定的汽油等等。

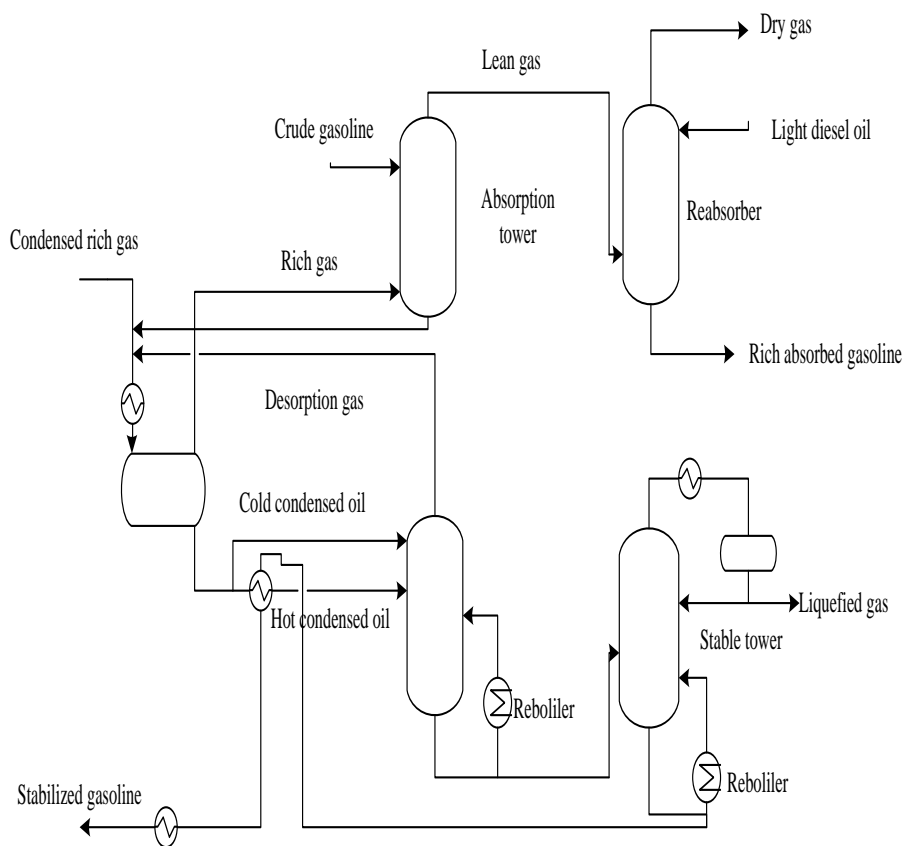


图 4.3 催化裂化过程中的吸收稳定系统

首先通过热传导将流入的富吸收汽油、压缩富气以及解吸气经过混合处理，且要在平衡罐中进行平衡闪蒸。然后得到的富气通过平衡罐的顶部进入吸收塔，其中富气中的轻烃成分利用吸收塔中吸收的粗汽油进行回收。经过吸收塔回收处理后的气体被称为贫气；然后贫气通过吸收塔的塔顶进入再吸收塔，并利用再吸收塔中的吸收剂做进一步分离后，在塔顶所得的产品称为干气。富吸收汽油由再吸收塔的塔顶流入主分馏塔。由平衡罐流出的凝缩汽油被可分成两部分：

一部分与稳定汽油经过热交换之后被传送至解吸塔的中上部，另一部分则直接作为冷进料传送至解吸塔中得到解吸气。在解吸塔塔顶所得的脱乙烷汽油将流入稳定塔中做进一步分离，并进行加热处理，在塔底得到稳定汽油，并在塔顶得到液化石油气。稳定汽油的流向主要有两部分组成：一部分流入到稳定塔。然而另外一部分与热凝缩油通过热交换后到达吸收塔，然后再与最初的吸收剂相混合，并通过循环重复使用。

4.3.2 稳定系统的控制目标

催化裂化的工业过程中，稳定汽油的质量和纯度的提高均是过程控制所追求的重要目标。稳定汽油的蒸汽压力作为催化装置中的一个关键性能指标，其大小在很大程度上决定了系统产生的稳定汽油质量和纯度。蒸汽压力过高或过低均会对汽油的智联好坏产生影响。因此必须对蒸汽压力进行有效的控制，设计的控制器要尽量满足抗干扰性强和跟踪速度快的要求。

4.3.3 模糊网络 PID 控制方法与其他 PID 优化方法的比较

考虑在文献[74]实际过程中的例子，考虑采用如下模型：

$$G(s) = \frac{1}{60s+1} e^{-80s} \quad (4-11)$$

仿真参数选取如下：本章网络根据实际过程的需要选取了两个输入信号（输入信号和被控对象的实际输出信号），在每个输入过程中使用了 5 个模糊集对其进行模糊化操作，其中的 $n=2$ ， $N=5$ 。网络结构使用 2-5-5-3 的形式，网络学习参数使用 $\eta=0.40$ ， $\alpha=0.04$ 。本章中的隶属度函数参数初值及神经网络的初始权重值可以通过试验来获取。在 $t=251$ 时加入一个 -0.1 的输出扰动，设定值 $rin=1$ ，采样时间 $ts=20$ 。实验数据如表 4.1 所示：

表 4.1 实验参数表

类型 参数	IMC-PID	Z-N PID	RBF PID
K_p, K_i, K_d	0.4167, 0.0042, 10	1.044, 0.0080, 33.93	/
λ	2.5	/	/
设定值	1	1	1
扰动	-0.1	-0.1	-0.1
η, α	/	/	0.6, 0.02

下面将对 IMC-PID 控制，Z-N PID 控制以及模糊网络 PID 控制这三种控制的控制效果进行比较，仿真结果可以从如图 4.4 和表 4.2 看到。

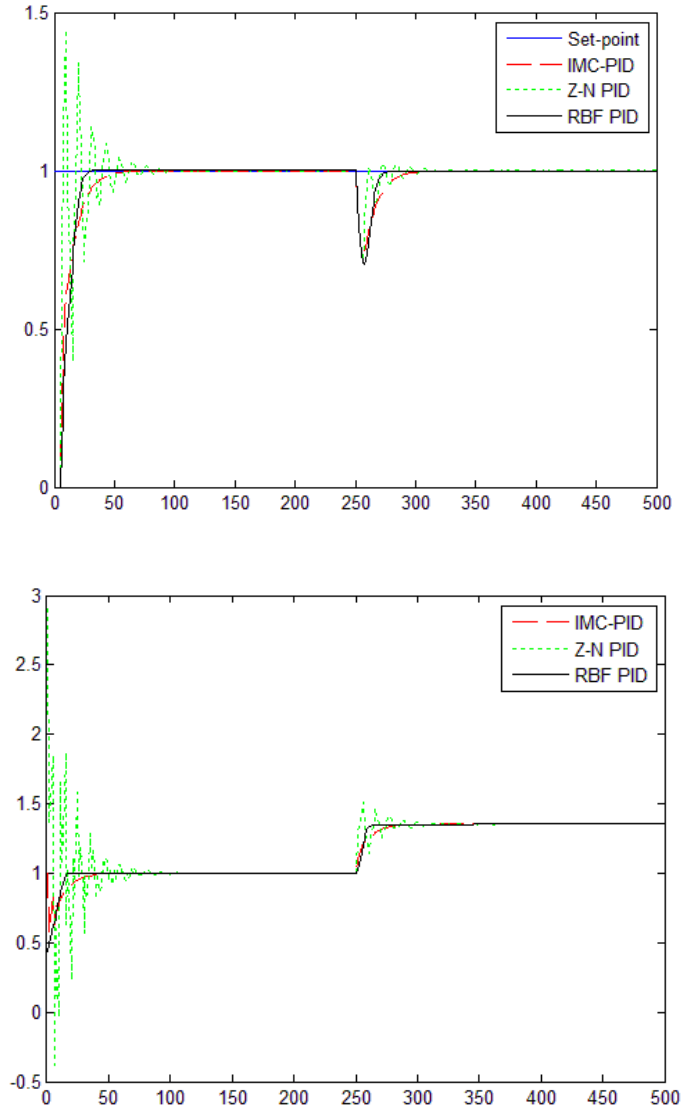


图4.4 模型匹配系统的输入输出

从图 4.4 中，可以观察到，模糊网络 PID 控制系统的响应速度较快，抗干扰能力相比于其他两种调整 PID 参数的方法要强，抗干扰时间较小。对于输入量本章方法相比其他两种方法较为光滑。与 IMC-PID 控制和 Z-N PID 控制相比，本文提出的 PID 控制方法对于被控对象的整体控制性能进行较为明显的改善。表 4.2 描述了这三种控制器的响应参数，从该表中可以看出本文提出的控制器在抗干扰的时候具有较强的鲁棒性。

表 4.2 控制器响应参数

控制器	响应时间	超调量	抗干扰时间
IMC-PID	28	0.2861	25
Z-N PID	45	0.2861	29
模糊网络 PID	18	0.2977	19

然而，由于系统本身和环境因素的影响，使得在实际过程中要想获得精确的数学模型比较困难。模型匹配只是人们假设的理想情况，但是在实际过程中这种情况是不存在的。因此，实际过程中的不确定性将可能导致模型失配并且影响着控制器的性能，关于这个问题存在的重要性也具有很重要的研究价值。这就意味着在公式（4-11）中的模型可能不能准确的描述焦化炉的动态性，通常模型和实际过程是不相同的。为了模仿这样的条件，本文采用蒙特卡洛方法随机产生四组实际的工业过程^[75]。它们是根据公式（4-11）随机产生最大 30% 不确定性的模型失配情况。这四组实际过程的传递函数如下所示：

$$\text{第一组: } G(s) = \frac{1.0794}{74.8815s + 1} e^{-60.6819s} \quad (4-12)$$

$$\text{第二组: } G(s) = \frac{0.9531}{47.1079s + 1} e^{-99.9553s} \quad (4-13)$$

$$\text{第三组: } G(s) = \frac{1.0933}{56.1202s + 1} e^{-64.2170s} \quad (4-14)$$

$$\text{第四组: } G(s) = \frac{0.8531}{69.0456s + 1} e^{-80.2859s} \quad (4-15)$$

仿真结果给出了通过公式（4-11）过程模型设计控制器，并用该控制器来控制通过公式（4-12）到公式（4-15）描述的实际过程。图4.5到图4.8表明四组响应过程，并且可以从仿真结果中发现模糊网络PID控制器仍然具有满意的控制性能。在图4.5中，本文提出的控制器的抗干扰能力相比于其他方法跟踪性能更好，响应时间较快。在图4.6和图4.7中，仿真结果具有和图4.5相似的结果，模糊网络PID控制器具有更快的跟踪速度和强的抗干扰能力。在图4.8中，基于内模控制的PID控制器响应时间比模糊网络慢，然而模糊网络PID仍能迅速跟踪设定值且具有较强的抗干扰能力。可以从这四组情况下看到，模糊网络PID控制的输入信号相比于其它几种方法，稳定且光滑、没有较大的振荡和波动。从下面几组仿真结果表面本章的控制方法总体性能要优于其他两种方法。

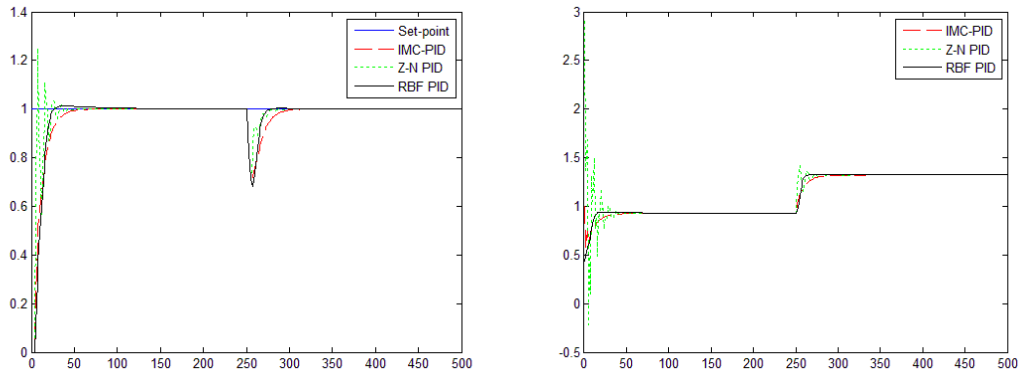


图 4.5 第一组模型失配情况下的闭环响应

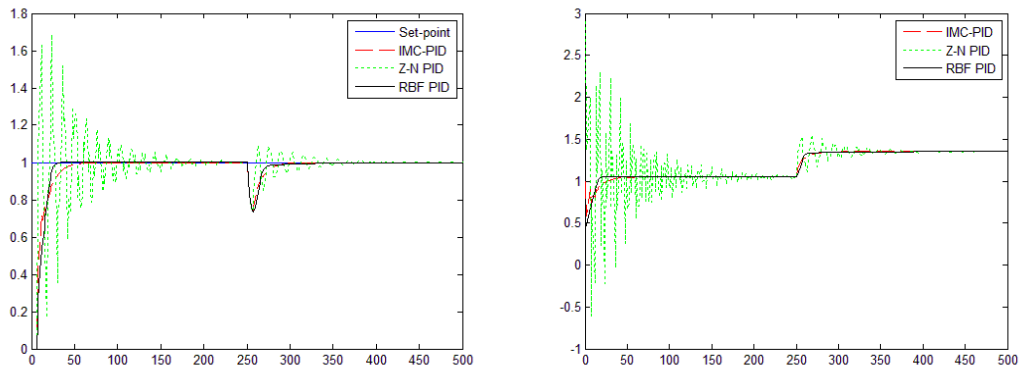


图 4.6 第二组模型失配情况下的闭环响应

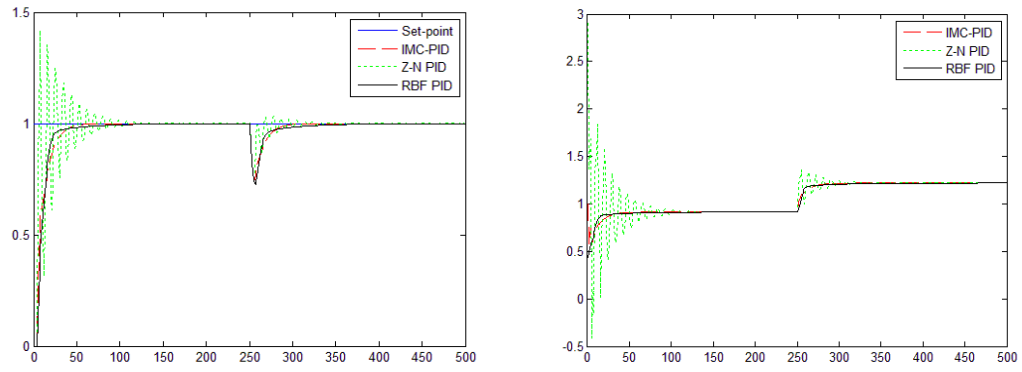


图 4.7 第三组模型失配情况下的闭环响应

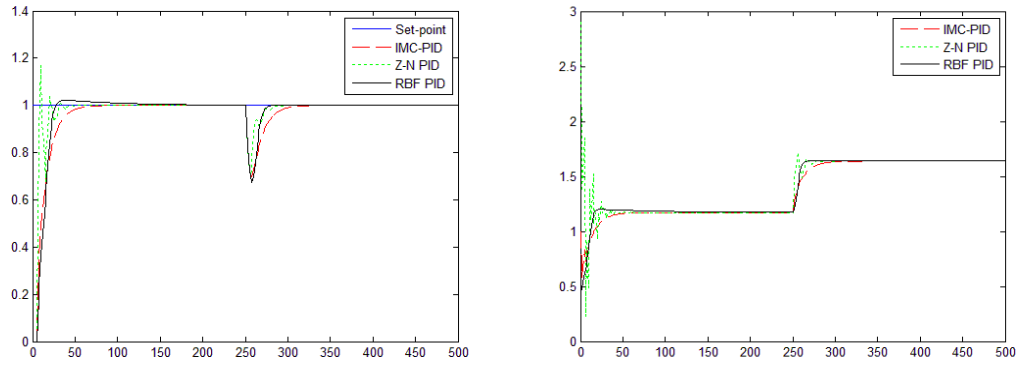


图 4.8 第四组模型失配情况下的闭环响应

4.4 本章小结

模糊神经网络就是通过结合模糊理论中所具有的推理能力以及在神经网络中具有的学习能力的一种控制方法。由于在吸收稳定系统中的压力是通常情况下都具有滞后性、非线性以及时变性的特点，所以如果使用单纯的 PID 进行控制往往并不能够获得控制目标所期望的控制效果。如果能够使用模糊神经网络与 PID 控制方法进行结合，将会是获得一种比较好的控制方法。利用模糊神经网络来调整 PID 参数将进一步改善 PID 控制的自适应能力。最后通过 MATLAB 仿真进一步验证了该方法的有效性。该方法不仅发挥了模糊控制的鲁棒性、上升速度快和超调量小的特点，而且又保证了 PID 控制器的动态跟踪品质和稳态精度。

第 5 章 基于预测模型的模糊 PID 控制

5.1 引言

在实际的工业过程控制中，对于具有时变、非线性以及滞后等特性的复杂系统将会是普遍碰到的。其中最为常见的主要是：有不确定参数、存在大滞后和随机扰动等情况。近年来随着模糊理论的发展得到一种新型控制器，其不需要被控对象精确的数学模型，仅仅通过人的经验知识和实验数据就能够进行有效控制。因此，如果能够将模糊控制和 PID 控制两种控制算法相结合将会得到具有控制灵活、适应性强以及控制精度高的特点，从而获得取得扬长避短的效果。实际工业生产过程对于产品的控制精度和安全操作的要求越来越高，PFC 因其具有计算量小、鲁棒性强、控制性能好等特点，在实际过程控制领域成功推行并被大量应用。为了达到提前调整的目的引入了预测函数模型，设计了预测模糊 PID 控制器来控制加热炉温度跟踪设定值。

本章在第三章内容的基础上，通过进一步将预测控制和模糊控制两种控制方法与常规 PID 控制优点进行了结合。根据模糊控制与预测控制的特点，提出了一种预测模糊 PID 控制方法，从而进一步提高了模糊 PID 控制器的控制性能和控制精度，最后针对工业焦炉压力系统设计了一种预测模糊 PID 控制器，并进行了 MATLAB 仿真研究，其仿真结果表明本章提出的预测模糊 PID 控制器相比常规 PID 控制以及模糊自整定 PID 控制具有更好的控制性能。

5.2 预测模糊 PID 控制方法

近年来，预测函数控制已经被广泛应用于工业过程中，例如反应堆、加热炉等等。通常对于动态矩阵控制（DMC）算法来说，在处理过程中需要找到在没有指明最优输入模式的前提下，得到每个时刻需要的最优输入比较困难。而 PFC 算法则不同，其每一个时刻的输入都是由一组线性组合的基函数得到。要想求出每个时刻的最优输入，只需要通过少量的计算就可以获得线性组合的系数，从而能够确定最优控制律。

在本章节中，通过引入了 PFC 算法和模糊控制算法来对 PID 控制参数进行调整，利用该方法不仅得到了 PFC 算法的性能，同时还具备了常规 PID 控制器所具有的简单结构。PFPID 控制系统主要由预测部分和控制部分组成。预测部分主要是利用预测模型来预测未来时刻的输出值，控制部分主要目的是使控制器的预测输出尽量跟踪本文设计的设定值。PFPID 控制系统结构图如图 5.1 所示。

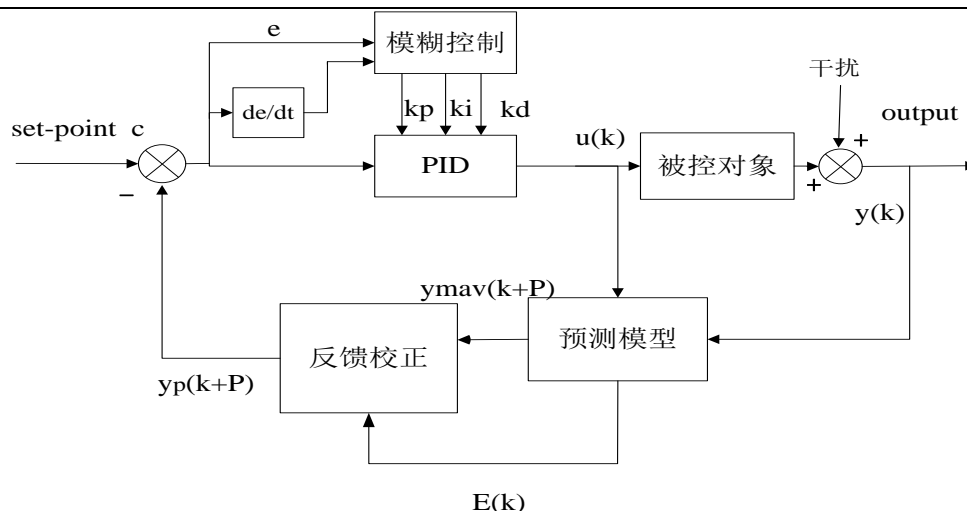


图 5.1 PFPID 控制系统结构图

如图 5.1 所示的控制系统结构图中，通过 PID 算法计算得到控制量 $u(k)$ 并且将其作用于实际的被控对象上，从而得到实际输出值 $y(k)$ 。由于在实际工业生产过程中存在各种各样的环境扰动，使得模型和实际过程很难匹配，所以导致预测值和实际值不可避免的出现误差，如果不校正该误差，将会对实际生产过程产生严重的影响。为了让输出值跟踪上设定值，通过预测模型预测 k 时刻的输出值和反馈校正来获得预测在 $k+P$ 时刻的输出值 $y_p(k+P)$ ，然后得到设定值 c 与输出值 $y_p(k+P)$ 之间的差值，即为误差 e 。

5.2.1 模糊控制

通常情况下的自适应模糊 PID 控制器实际上就是将模糊控制与常规 PID 控制原理进行相互结合，从而实现了对 PID 参数的一个自整定过程。在本章所利用到的隶属度函数和对于模糊规则的选择是基于第三章所设计的模糊 PID 控制器的基础之上得到的。

对于模糊自整定 PID 控制器中的参数主要是通过找到 PID 参数与误差 e 和误差变化率 ec 之间的一个对应关系，然后在此基础设计出来的控制器。利用不断检测运行过程中的 e 和 ec 得到满足不同时间下误差 e 和误差变化率 ec 对应的 PID 参数，使得控制目标具有很好的动态特性。与常规的 PID 控制器进行比较后，该控制器对于控制性能来说具有更好的灵活性。而 PID 的控制参数是根据误差 e 和误差变化率 ec 设计出的一个两输入三输出模糊控制器来对其进行调整，从而能够达到自适应控制的目的。

在图 5.1 所示的 PFPID 控制器的结构图可以看出，该控制器是通过误差 e 和误差变化率 ec 设计出来的一个两输入三输出的模糊控制器，具体形式如下：

$$\begin{cases} K'_p = K_p + \Delta k_p \\ K'_i = K_i + \Delta k_i \\ K'_d = K_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (5-1)$$

其中, $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 为模糊推理参数, K'_p, K'_i, K'_d 为校正后的 PID 参数, K_p, K_i, K_d 为内模整定到的参数。

5.2.2 基于预测模型的优化模糊 PID 控制

为了达到跟踪的目的, 需要在每个时刻 k 都要尽可能的使控制器通过第 P 步预测输出值来接近预先设定好的设定值。在整个控制器的设计中, PFC 主要起到了一个预测的角色, 并不参与系统的控制过程。

本文采用如下所示的 FOPDT 模型作为 PFC 的预测模型:

$$G(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-\tau_m s} \quad (5-2)$$

根据上面的公式 (5-2) 利用零阶保持器进行离散化后得到了模型的差分方程为如下形式:

$$y_m(k+1) = a_m y_m(k) + K_m(1-a_m)u(k-L) \quad (5-3)$$

其中, $a_m = e^{(-T_s/T_m)}$, T_s 表示采样时间, $L = \tau_m / T_s$ 。

从预测控制的原理可以知道 PFC 的控制性能与其控制器的控制输入结构有着相互的联系, 所以在 PFC 中控制作用一般都是使用若干个基函数的线性组合进行表示。其中基函数选择一般是阶跃函数、斜坡函数等一些函数。在本章中选取的是一个阶跃函数作为基函数, 并依据阶跃函数和 PFC 的结构化可知控制变量的特点为如下形式:

$$u(k+i) = u(k), i = 1, 2, \dots \quad (5-4)$$

依据 PFC 本身自有的特点, 过程的预测输出值一般是利用当前时刻的信息和未来时刻加入的控制量进行推导而得到的。首先假设公式 (5-3) 中的 $L=0$, 然后通过数学归纳法进行推导得到了第 P 步的模型预测输出值, 形式如下:

$$y_{mav}(k+1) = a_m y_{mav}(k) + K_m(1-a_m)u(k) \quad (5-5)$$

$$y_{mav}(k+P) = a_m^P y_{mav}(k) + K_m(1-a_m^P)u(k) \quad (5-6)$$

其中, $a_m^P y_{mav}(k)$ 表示模型的自由响应, $K_m(1-a_m^P)u(k)$ 表示模型的强迫响应。

当 $L \neq 0$ 时, 参考 Smith 预估器的思想, PFC 仍采用 $L=0$ 的模型。但是, 系统的输出需要被修改为如下形式:

$$y_{pav}(k) = y(k) + y_{mav}(k) - y_{mav}(k-L) \quad (5-7)$$

其中, $y(k)$ 表示被控对象在第 k 时刻的实际过程输出值, $y_{pav}(k)$ 表示校正以后的预测模型的过程输出值。

校正预测误差为:

$$E(k) = y_{pav}(k) - y_{mav}(k) \quad (5-8)$$

为了消除扰动和模型失配的影响, 本文对预测输出值采用了反馈校正, 形式如下所示:

$$y_p(k+P) = y_{mav}(k+P) + E(k) \quad (5-9)$$

$$e = c - y_p(k+P) \quad (5-10)$$

其中, $y_p(k+P)$ 表示校正后的预测值, $y_{mav}(k+P)$ 表示模型在 $k+P$ 时刻的模型输出值, c 表示设定值。

5.3 案例分析

5.3.1 工艺流程介绍

焦化炉 (F101/3) 主要是用来提炼化工油渣, 原油被分离成各种处理焦化装置, 然后再进行各种后续处理。在图 5.2 中, 本文给出了焦化炉的原理图, 焦化炉是由一个分馏塔 (T102), 三个焦化炉 (F101/1, 2, 3) 和六个焦化塔 (T101/1, 2, 3, 4, 5, 6) 组成。焦化炉的主要功能是提炼残油。本文以焦化炉 (F101/3) 为例。

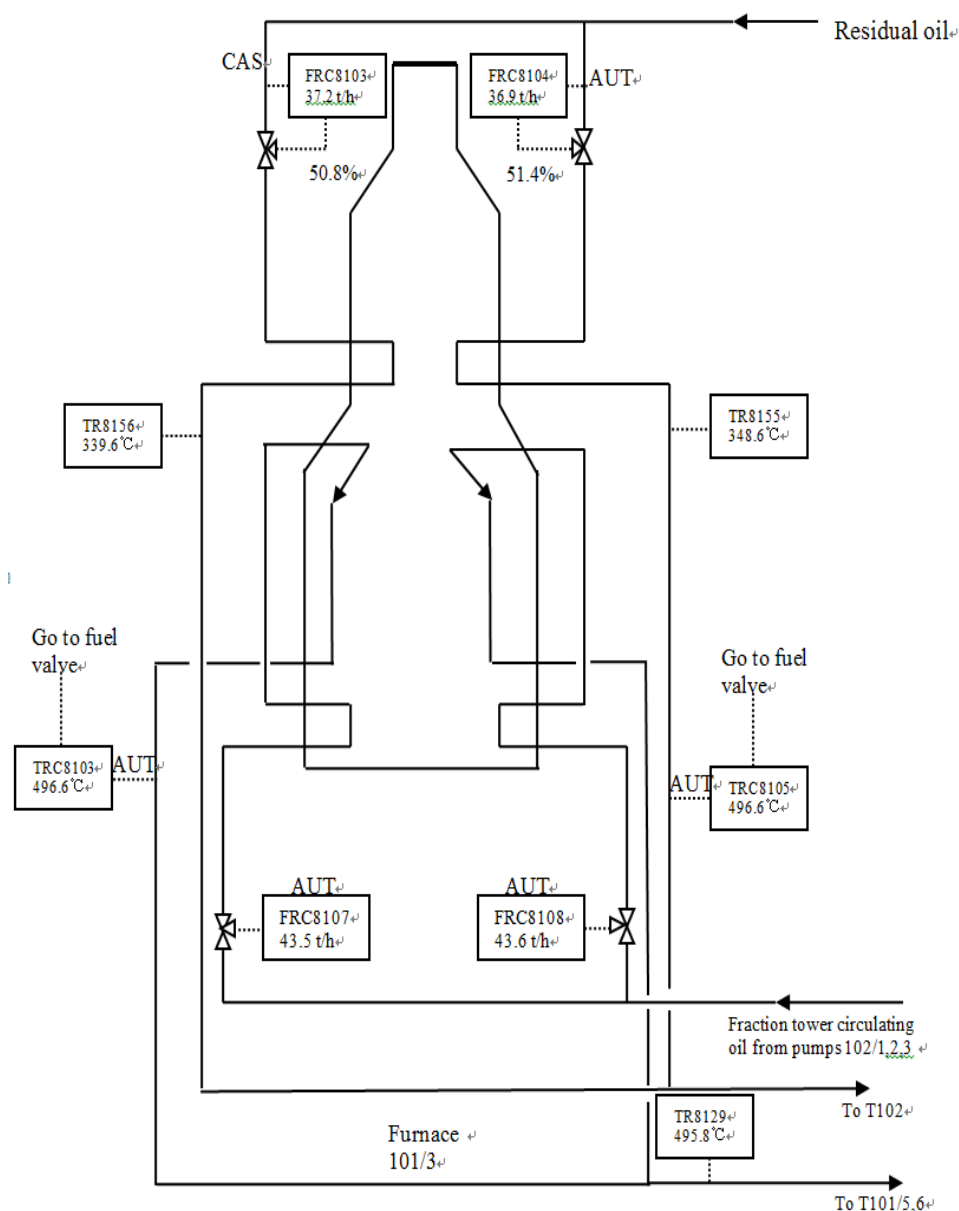


图 5.2 焦化炉的工艺流程图 (F101/3)

首先将残油进入到焦化炉后，残油将会被分离为两个部分（FRC8013，FRC8014），然后被送入到焦化炉 F103/3 的转换室加热至大约 330℃。经过加热后的残油将被重新混合送入到分馏塔（T102）。在到达了分馏塔中的混合残油将会被进行加热之后，与来自焦化塔（T101/5，6）中的一些重油部分将会进行一个热交换的处理过程。当热交换完成后，残油中重的部分将会与热交换完成后的汽油混合，然后被分成两部分（FRC8107，FRC8108）后通过泵（102/1,3）进入到辐射室（F101/3）加热到 495℃。最后两个分支都将进入到焦化塔（T101/5,6）然后离开。另外两个焦化炉（F101/3）具有相似的处理过程，只是焦化塔不一样。其中，焦炭塔（T101/1，2）对应的焦化炉（F101/1），焦化塔（T101/3，4）对应的焦化炉（F101/2）。

在整个设备运行过程中，同一时刻仅仅只有一对焦化塔工作。当它满了以后，另外一对将会代替它进行工作。由于每组焦化塔它所具有的容量不同，所以这三组焦化塔在进行交换的时候需要的时间是不同的。

表5.1 装置控制参数表

焦化炉		分馏塔		焦化塔	
辐射输出温度	495℃	塔顶温度	350℃	塔底温度	415℃
传递输出温度	330℃	液位	70%	塔顶温度	300℃
炉膛温度	800℃	/	/	冷却后温度	85℃
氧含量	5%	/	/	塔顶压力	0.25Mpa
循环油流量	35t/h	/	/	/	/

5.3.2 控制目标

从图 5.2 的焦化炉工艺流程图可知，原油到达加热炉(F101/3)后，随后分别从出口 TRC8103 和出口 TRC8105 流出。本章将对 TRC8103 口处理过程进行介绍，希望使 TRC8103 出口温度靠近设定值。实际的工况和工艺要求来决定取多大的设定值，一般是通过加热炉燃料的供应体积来进行控制。

5.3.3 预测模糊 PID 控制方法与传统方法的比较

针对前面提到的，本文采用了 FOPDT 模型作为过程模型，考虑到实际工程中操作条件的特点，焦化炉模型本文采用如下形式^[16]：

$$G(s) = \frac{e^{-300s}}{350s + 1} \quad (5-11)$$

采样时间选择为 50s，然后将公式 (14) 转换成离散形式后设计焦化炉的控制器。在 FPID 控制中， $e, ec, \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 模糊域分别选取为[-3 3], [-3 3], [-0.3 0.3], [-3 3], [-30 30]。量化因子选取为 $k_e = 0.001, k_{ec} = 0.001$ 。比例因子选取为 $k_p = 0.1, k_i = 0.0009, k_d = 2$ 。这里的参数是基于内模控制（IMC）选取的 $K_p = 0.5556, K_i = 0.0011, K_d = 58.3333$ ，根据第三章的分析后选择 $\lambda = 2.5\tau$ 。设定值为 300，在 $t = 244$ 时加入过程输出扰动-5。对于 PFPID 控制，预测时域为 $P = 9$ ，量化因子选取为 $k'_e = 0.001, k'_{ec} = 0.001, k'_p = 0.1, k'_i = 0.016, k'_d = 4.8$ 。

表 5.2 实验参数表

类型 参数	PID	FPID	PFPID
$k_e, k_{ec}, k_p, k_i, k_d$	/	0.001, 0.001, 0.1, 0.0009, 2	0.001, 0.001, 0.1, 0.016, 4.8
K_p, K_i, K_d	0.5556, 0.0011, 58.3333	0.5556, 0.0011, 58.3333	0.5556, 0.0011, 58.3333
P	/	/	9
设定值	300	300	300

下面将对 PID 控制, FPID 控制以及 PFPID 控制这三种控制的控制效果进行比较, 仿真结果可以从如图 5.3 和表 5.3 看到。

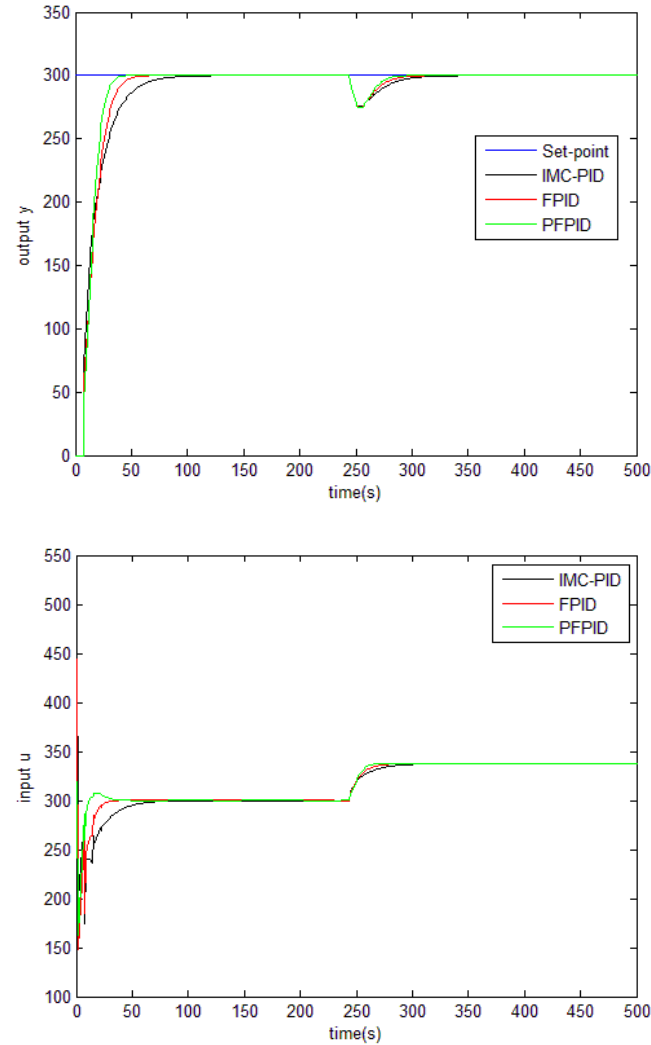


图 5.3 具有扰动无失配情况下的闭环响应

从图 5.3 中, 可以观察到, PFPID 控制系统的响应速度较快, 对于扰动能快速抑制, 超调量和振荡相对较小。与常规 PID 控制和模糊 PID 控制相比, 本文提出的 PID 控制方法对于被控对象的整体控制性能进行较为明显的改善。表 5.3

描述了这三种控制器的响应参数，从该表中可以看出本文提出的控制器具有较快的响应时间。

表 5.3 控制器响应参数

控制器	响应时间	超调量	抗干扰时间
PID	73	24.3	56
FPIID	43	24.3	55.4
PFPID	30	24.3	35

然而，由于系统本身和环境因素的影响，使得在实际过程中要想获得精确的数学模型比较困难。模型匹配只是人们假设的理想情况，但是在实际过程中这种情况是不存在的。因此，实际过程中的不确定性将可能导致模型失配并且影响着控制器的性能，关于这个问题存在的重要性也具有很重要的研究价值。这就意味着在公式（5-11）中的模型可能不能准确的描述焦化炉的动态性，通常模型和实际过程是不相同的。为了模仿这样的条件，本文采用蒙特卡洛方法随机产生四组实际的工业过程^[75]。它们是根据公式（5-11）随机产生最大 30% 不确定性的模型失配情况。这四组实际过程的传递函数如下所示：

$$\text{第一组:} \quad G(s) = \frac{1.2604}{408.6251s + 1} e^{-233.3831s} \quad (5-12)$$

$$\text{第二组:} \quad G(s) = \frac{0.8103}{270.8970s + 1} e^{-253.1915s} \quad (5-13)$$

$$\text{第三组:} \quad G(s) = \frac{1.0051}{309.3334s + 1} e^{-301.9389s} \quad (5-14)$$

$$\text{第四组:} \quad G(s) = \frac{0.8109}{335.3436s + 1} e^{-372.8786s} \quad (5-15)$$

仿真结果给出了通过公式（5-11）过程模型设计控制器，并用该控制器来控制通过公式（5-12）到公式（5-15）描述的实际过程。图 5.4 到图 5.7 表明四组响应过程，并且可以从仿真结果中发现 PFPID 控制器仍然具有满意的控制性能。在图 5.4 中，本文提出的控制器的输出响应相比于其他方法跟踪性能更快，并且具有很小的超调量。在图 5.5 和图 5.6 中，仿真结果具有和图 5.5 相似的结果，PFPID 具有更快的跟踪速度和强的抗干扰能力。在图 5.7 中，基于内模控制的 PID 控制器已经不能迅速的跟踪设定值，然而 PFPID 仍能跟踪设定值且具有快速的响应速度。可以从这四组情况下看到，PFPID 控制输入信号相比于其它几

种方法，稳定且光滑、没有较大的振荡和波动。

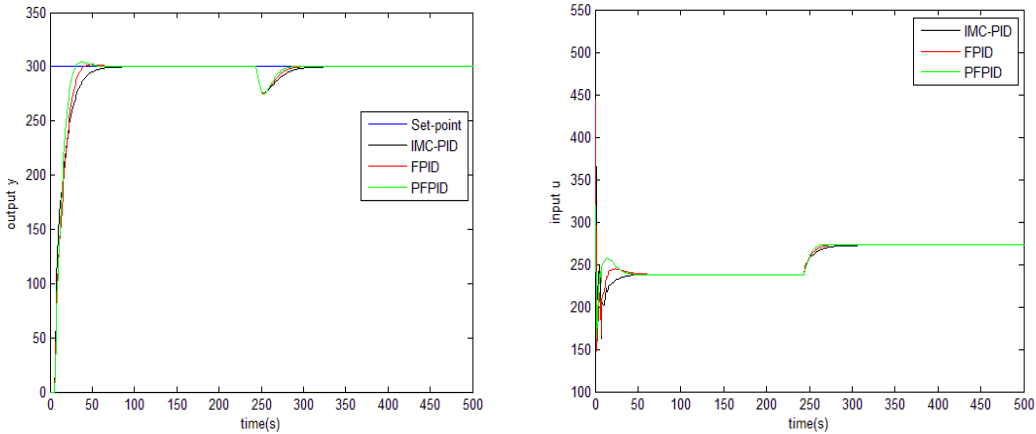


图 5.4 第一组模型失配情况下的闭环响应

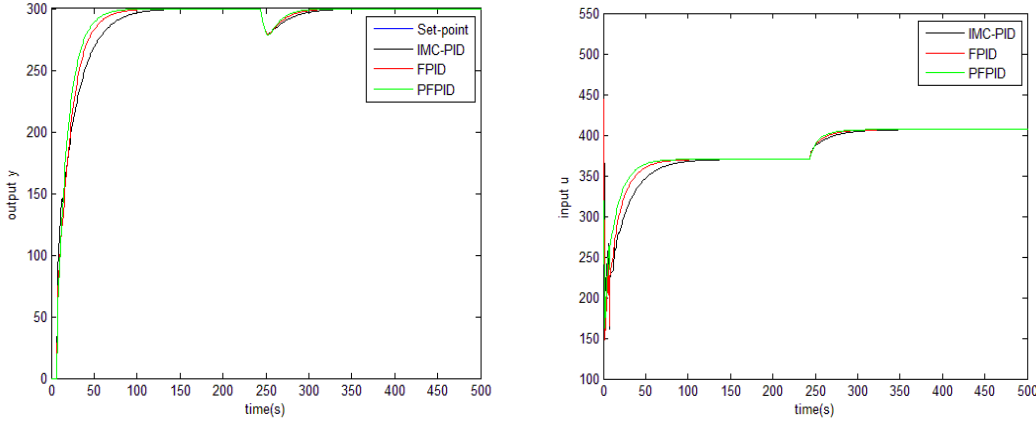


图 5.5 第二组模型失配情况下的闭环响应

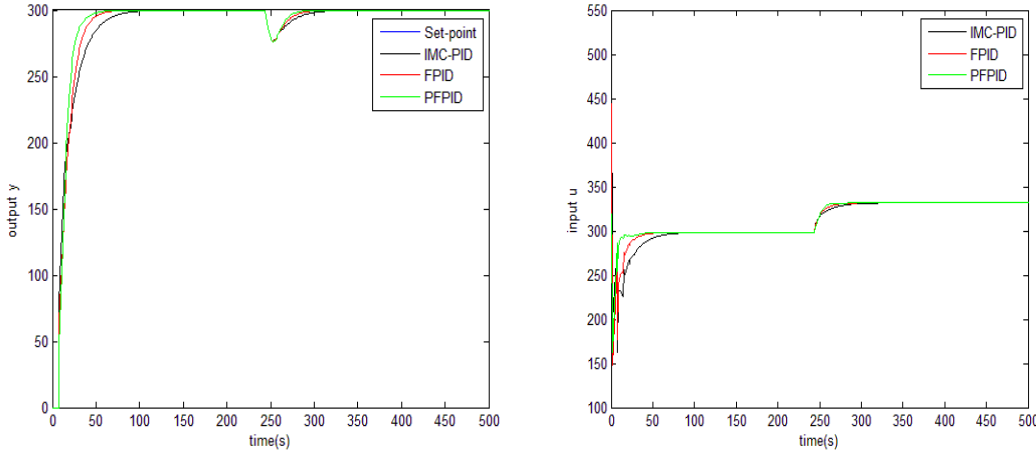


图 5.6 第三组模型失配情况下的闭环响应

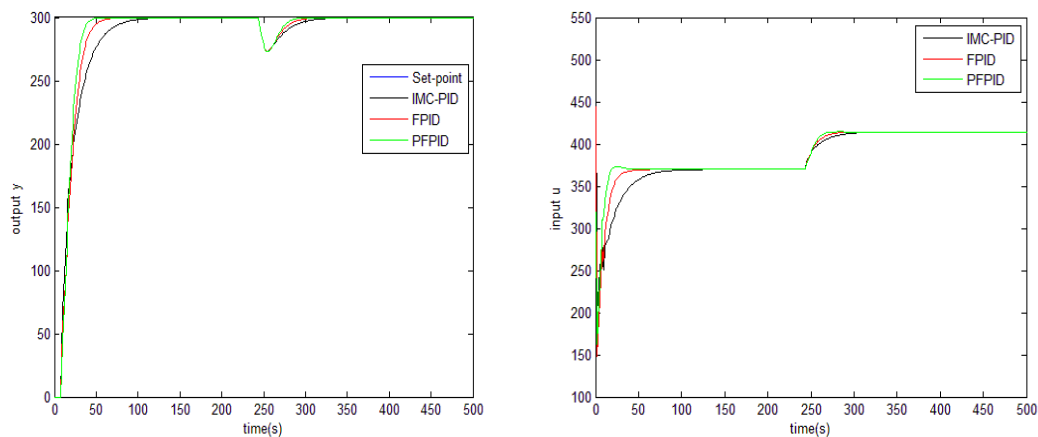


图 5.7 第四组模型失配情况下的闭环响应

5.4 本章小结

在本章中，通过对模糊 PID 和 PFC 算法这两种算法的基本原理的深入了解的基础上，根据它们的特点设计出了一种新型 PID 控制方法。首先根据实际控制要求的需要，设计出合理的在模糊控制中应用中需要的模糊规则和隶属度函数。其次，通过将自适应控制机制引入到了 PID 控制中来对 PID 参数进行优化，并且在结合了 PFC 控制策略的基础之上提出了一种预测模糊 PID 控制器设计方法。最后，通过焦化炉炉膛温度系统这个被控对象，利用 MATLAB 仿真来对该实例进行验证本文提出的 PFPID 算法，并且与常规 PID 控制器和模糊 PID 控制器进行了仿真对比，从而进一步的证明本文提出的方法在控制性能上具有的优越性能。

第 6 章 总结与展望

6.1 论文研究工作总结

本文的研究内容是针对 PID 参数的优化展开的，主要的内容包括模糊控制算法优化 PID 参数、模糊 RBF 网络优化 PID 参数以及基于 PFC 算法的预测模型通过模糊控制来优化 PID 参数这三个方面。

在实际的工业过程中，通常对于 τ/T 小于或等于 0.6 使用常规 PID 控制就能够获得较好的控制性能。但在 $\tau/T > 0.6$ 的时候，如果使用常规的 PID 控制器一般并不能够获得比较理想的控制效果。由于先进算法需要的成本高、硬件搭建困难以及实施难度大等原因，所以目前工业控制中主要还是使用 PID 控制。由于工业过程控制随着控制要求的不断提高也变得日渐复杂，所以再使用常规的 PID 控制已经不能再获得让人满意的控制效果。

本篇论文的主要工作在于：

在模糊 PID 的控制中，通过应用智能控制中最为普遍的模糊控制进行了研究。针对一组已经整定好的 PID 参数并不能适应各种情况下期望达到的控制要求的问题。本文为达到 PID 参数在线整定的目的，特引入模糊控制，然后再将模糊控制算法应用于 PID 参数控制中。经过改进后的模糊 PID 控制算法保留了常规 PID 算法简单结构且更加适用于在时变、时滞等情况，第三章的仿真也进一步证明了算法的有效性能。

将模糊控制中的模糊推理过程引入到神经网络中，为的是结合模糊控制的推理能力和神经网络的自学习能力。PID 控制器通过神经网络来求得 PID 控制器的参数，其具备模糊控制推理能力和神经网络的自学习能力。第四章详细介绍了设计步骤，最后使用仿真对其有效性进行验证。

借助 PFC 的思想，基于 PFC 中的预测模型提出一种模糊 PID 的控制方法，并将其应用到了焦化炉装置模型上。为了提高加热炉温度控制的跟踪精度，该方法将预测模型引入到了模糊 PID 控制中，达到了提前调整的目的。通过将模糊控制、PID 控制以及预测控制的各自的特点进行结合，从而实现在线优化 PID 控制器参数的目的。对 PID 控制器的不足之处进行了有效的改善，不仅提高了系统的控制性能，同时也促进了预测控制和模糊控制在 PID 控制中的应用。

6.2 展望

预测控制自出现以来就收到了很多学者的关注，已经在化工、炼油等行业中被广泛应用且取得了很大的经济效益。模糊控制通过使用专家经验来进行控

制，对于越来越复杂的工业过程也已经取得了广泛的应用。由于模糊控制和预测控制所具有的研究潜力，所以近年来对该领域的探索和研究一直从未停止。

模糊控制的提出不过短短几十年，还有许多待完善和细化的事项。并且模糊控制其本质是一种非线性控制，而非线性控制理论还不成熟且模糊系统本身就比较复杂，所以它的研究并不像研究现代控制理论那么简单。由于本人受研究水平的限制，模糊控制还有很多方面的理论问题需要进一步解决：

- (1) 控制器设计。此环节首要问题在于如何设计一个模糊控制器，但截至目前模糊控制系统的可控性和可观性仍未解决。因为仍无一个统一的模糊控制器的设计标准，所以控制器在设计时具有随意性。
- (2) 稳定性。稳定性是任何一个系统得以正常运行的前提条件，是评价模糊控制的重要指标。虽然目前国内外诸多关于模糊系统稳定性的判据风起云涌，但该类判据大多是针对某一具体控制对象且没有统一的假设条件和方法，因此稳定性依旧是模糊控制领域一个亟待解决的事项。
- (3) 鲁棒性。工业过程的系统模型存在未知因素，当在设备中某些配件发生特性变化时，暂时仍无法获知是否仍具有很好的控制效果。虽然目前发表的很多论文表明其模糊控制系统具有一定的鲁棒性，但这仅仅是基于仿真的结论成果，因此对于模糊控制器的鲁棒性问题还有待进一步研究。

致 谢

岁月如梭、如歌，转眼间，三年的研究生生活即将结束，站在毕业的门槛上，回首往昔，奋斗和辛劳成为丝丝的记忆，甜美与欢笑也都尘埃落定。杭州电子科技大学以其优良的学习风气、严谨的科研氛围教我求学，以其博大包容的情怀胸襟、浪漫充实的校园生活育我成人。值此毕业论文完成之际，我谨向所有关心、爱护、帮助我的人们表示最诚挚的感谢与最美好的祝愿。

首先，特别感谢的人是我的导师张日东老师。正是在张老师的悉心指导和殷切关怀下，我才能如此顺利的完成毕业论文。三年来，张老师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，朴实无华、平易近人的人格魅力对我影响深远。导师不仅授我以文，而且教我做人，虽历时三载，却赋予我终生受益无穷之道。本论文从选题到完成，几易其稿，每一步都是在导师的指导下完成的，倾注了导师大量的心血，在此我向我的导师张日东教授表示深切的谢意与祝福！

同时，还要感谢邹洪波老师的悉心指导，是他不厌其烦地指导着我们进行加热炉实验的整个过程。从实验设备的选型、搭建和操作等各个环节，都离不开邹老师的耐心教导和帮助，是邹老师指导着我们如何将理论研究运用于实际过程，在这里向您道一声感谢。

其次，感谢杭州电子科技大学和自动化学院给我提供了良好的学习环境和设备。也要感谢师兄师姐和师弟们的帮助，尤其是师姐邹琴和师兄李海生，一直不厌其烦的为我解答专业知识上的难点，同时还要感谢室友和实验室同窗好友，与你们在一起的时光很欢乐。

最后，感谢我的父母，是你们的支持，才让我走到了今天。你们的辛勤劳动。付出的汗水，只为我创造一个好的学习条件。你们不辞辛劳，尝尽冷暖，只为给我一个家，一个温暖的港湾。是你们一如既往的鼓励，才让我有勇气面对挫折和困难。再次感谢你们的支持、理解和关怀。

杭州电子科技大学两年半的研究生求学的时光，是我过得最快乐，最充实的日子。在这里我有幸向很多德艺双馨的老师学习，也结识了很多青春可爱的同学和朋友。这些美好的日子我将永生难忘。最诚挚的谢意献给你们！

2016 年 12 月于杭州

参考文献

- [1] Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(7):733-764.
- [2] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, et al. Survey Constrained model predictive control: stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6):789-814.
- [3] Morari M, Barić M. Recent developments in the control of constrained hybrid systems[J]. Computer & Chemical Engineering, 2006, 30(10-12): 1619-1631.
- [4] Zedch L A. Fuzzy sets[J]. Information & Control, 1965, 8(3):338-353.
- [5] Astrom K J, Hagglund T. Advanced PID control[J]. ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Research Triangle Park, NC 27709, 2005.
- [6] Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning [J]. Journal of Process Control, 2003, 13(4):291-309.
- [7] 赵彬, 尤文. 针对一阶惯性加纯滞后过程的模型算法控制研究[J]. 石油化工自动化, 2008, 44(1):42-44.
- [8] Marchetti G, Scali C, Lewin D R. Identification and control of open-loop unstable processes by relay methods[J]. Automatica, 2001, 37(12) : 2049-2055.
- [9] Zhang R, Wu S, Gao F. Improved PI controller based on predictive functional control for liquid level regulation in a coke fractionation tower[J]. Journal of Process Control, 2014, 24(3):125-132.
- [10] Tyreus B D, Luyben W L. Tuning PI controllers for integrator/dead time processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002, 31(11): 2625-2628.
- [11] Luyben W L. Tuning proportional-integral-derivative Controllers for integrator/Deadtime Processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1996, 35 (10):3480-3483.
- [12] Ziegler J G. Optimum settings for Automatic Controllers[J]. Transactions of the ASME, 1942, 115(2B):759-768.
- [13] Astrom K J, Hagglund T. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control[J]. Journal of Process Control, 2004, 14(6):635-650.
- [14] Normeyrico J E, Guzman J L. Unified PID tuning approach for stable, integrative and unstable dead-time processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(47):35-40.

- [15]Zhang R, Wu S, Lu R, et al. Predictive control optimization based PID control for temperature in an industrial surfactant reactor[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2014, 135(8):48-62.
- [16]Wu S, Zhang R, Lu R, et al. Design of dynamic matrix control based PID for residual oil outlet temperature in a coke furnace[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2014, 134(5):110-117.
- [17]Zhang R, Xue A K, Wang S, et al. An improved state space model structure and a corresponding predictive functional control design with improved control performance[J]. International Journal of Control, 2012, 85(8):1-16.
- [18]张日东, 王树青, 李平. 一类非线性系统的扩展状态空间预测控制[J]. 控制与决策, 2005, 20(7):807-810.
- [19]李平. 扩展状态空间预测控制[J]. 石油化工高等学校学报, 1996(4):45-50.
- [20]唐斌, 章云, 刘国平, 等. 基于状态空间模型的网络化广义预测控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(4):535-541.
- [21]梁晓明, 刘福才, 王娟. 基于状态空间模型的广义预测控制快速算法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(4):335-338.
- [22]Nagy Z K, Mahn B, Franke R, et al. Evaluation study of an efficient output feedback nonlinear model predictive control for temperature tracking in an industrial batch reactor[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(7):839-850.
- [23]Blazic S, Škrjanc I. Design and stability analysis of fuzzy model-based predictive control—A Case Study[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2007, 49(3):279-292.
- [24]Lauri D, Rossiter J A, Sanchis J, et al. Data-driven latent-variable model-based predictive control for continuous processes[J]. Journal of Process Control, 2010, 20(10):1207-1219.
- [25]Oblak S, Škrjanc I. Continuous-time wiener model predictive control of a PH process based on a PWL approximation[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(5):1720-1728.
- [26]Prakash J, Patwardhan S C, Shah S L. State estimation and nonlinear predictive control of autonomous hybrid system using derivative free state estimators[J]. Journal of Process Control, 2010, 20(20):787-799.
- [27]王国玉, 韩璞, 王东风. 预测函数控制及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(8):1087-1091.

-
- [28]Richalet J. Pratique de la Commande Prédicative[J]. Traité des nouvelles technologies, 1993.
 - [29]Bigdeli N, Haeri M. Predictive functional control for active queue management in congested TCP/IP networks[J]. ISA Transactions, 2009, 48(1):107-121.
 - [30]Liu H, Li S. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2):1171-1183.
 - [31]Dovzan D, Škrjanc I. Control of mineral wool thickness using predictive functional control[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(3):344-350.
 - [32]Song Y, Yang B, Qiu S, et al. Cascade temperature control for bench-scale batch reactor—an application of predictive functional control technique[C]. Intelligent Control and Automation(WCICA), 2012 10th World Congress on IEEE, 2012:1564 -1569.
 - [33]Zhang R, Xue A, Wang S, et al. Partially decoupled approach of extended non-minimal state space predictive functional control for MIMO processes[J]. Journal of Process Control, 2012, 22(5):837-851.
 - [34]Dovzan D, Škrjanc I. Predictive functional control based on an adaptive fuzzy model of a hybrid semi-batch reactor[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(8):979-989.
 - [35]Karer G, Škrjanc I, Zupancic B. Self-adaptive predictive functional control of the temperature in an exothermic batch reactor[J]. Chemical Engineering & Processing, 2008, 47(12):2379-2385.
 - [36]Potocnik B, Music G, Škrjanc I, et al. Model-based predictive control of hybrid systems: a probabilistic neural-network approach to real-time control[J]. Journal Intelligent & Robotic Systems, 2008, 51(1):45-63.
 - [37]Causa J, Karer G, Nunez A, et al. Hybrid fuzzy predictive control based on genetic algorithms for the temperature control of a batch reactor[J]. Computers Chemical Engineering, 2008, 32(12):3254-3263.
 - [38]Tao J, Yu Z, Zhu Y. PFC based PID design using genetic algorithm for chamber pressure in a coke furnace[J]. Chemometrics Intelligent Laboratory Systems, 2014, 137(20):155-161.

- [39]Zhang R, Zou H, Xue A, et al. GA based predictive functional control for batch processes under actuator faults[J]. Chemometrics Intelligent Laboratory Systems, 2014, 137(1):67-73.
- [40]Wang L, Young P C. An improved structure for model predictive control using non-minimal state space realization[J]. Journal of Process Control, 2006, 16(4):355-371.
- [41]Zhang J. A non-minimal state space formulation based predictive functional control design for inverse-response processes[J]. Chemometrics Intelligent Labory Systems, 2014, 139:70-75.
- [42]王东风, 韩璞, 王国玉, 董泽. 基于前馈补偿解耦的多变量汽温系统预测函数控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2):158-162.
- [43]张日东, 王树青. 基于神经网络的非线性系统预测函数控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6):949-953.
- [44]Zhang R, Lu R, Xue A, et al. Predictive functional control for linear systems under partial actuator faults and application on an injection molding batch process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(2):723-731.
- [45]Zhang R D, Xue A K, Wang S. Modeling and nonlinear predictive functional control of liquid level in a coke fractionation tower[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(23):6002-6013.
- [46]Dubay R. Self-optimizing MPC of melt temperature in injection moulding[J]. ISA Transactions, 2002, 41(1):81-94.
- [47]霍炬, 曹贵奇, 杨明. 基于预测控制的PID调节位置跟踪系统的设计[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(2):127-144.
- [48]席裕庚, 李德伟, 林殊. 模型预测控制-现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3):222-236.
- [49]Gonzalez A H, Adam E J, Marcovecchio M G, et al. Application of an extended IHMPC to an unstable reactor system: study of feasibility and performance[J]. Journal of Process Control, 2011, 21(10):1493-1503.
- [50]Savran A. A multivariable predictive fuzzy PID control system[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(5):2658-2667.
- [51]Zhang R D, Li P, Ren Z, et al. Combining predictive functional control and PID for liquid level of coking furnace[C]. IEEE International Conference on Control and Automation. IEEE, 2009:314-318.

- [52]Shabani H, Vahidi B, Ebrahimpour M. A robust PID controller based on imperialist competitive algorithm for load-frequency control of power systems[J]. ISA Transactions, 2013, 52(1):88-95.
- [53]冯东青, 邢广成, 费敏锐, 等. 基于改进PSO算法的多变量PID型神经网络控制[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(2):363-366.
- [54]李平, 王树青, 王骥程, 等. 催化裂化装置稳定汽油蒸汽压的预测控制[J]. 控制工程, 1996(5):37-39.
- [55]Zhang R, Wang S. Support vector machine based predictive functional control design for output temperature of coking furnace[J]. Journal of Process Control, 2008, 18(5):439-448.
- [56]Miccio M, Cosenza B. Control of a distillation column by type-2 and type-1 fuzzy logic PID controllers[J]. Journal of Process Control, 2014, 24(5):475-484.
- [57]葛根, 王洪礼, 张海丰, 孙宝盛. 膜生物反应器简化模型的数值模拟及非线性动力学参数分析[J]. 环境工程, 2009, 27(1):44-46.
- [58]Heydari G, Vali M A, Gharaveisi A A. Chaotic time series prediction via artificial neural square fuzzy inference system[J]. Expert Systems With Applications, 2016, 55:461-468.
- [59]He Y L, Wang X Z, Huang Z. Fuzzy nonlinear regression analysis using a random weight network[J]. Information Sciences, 2016, (364-365):222-240.
- [60]Gao Y, Tong S, Li Y. Observer-based adaptive fuzzy output constrained control for MIMO nonlinear systems with unknown control directions[J]. Fuzzy Sets & Systems, 2015, 290(C):79-99
- [61]Wu L B, Yang, G H. Adaptive fuzzy tracking control for a class of uncertain non-affine nonlinear systems with dead-zone inputs[J]. Fuzzy Sets & Systems, 2015, 290(C):1-21
- [62]陈家伟, 陈杰, 陈冉, 等. 变速风力发电机组自适应模糊控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21):93-101.
- [63]王永富, 柴天佑. 自适应模糊控制理论的研究综述[J]. 控制工程, 2006, 13(3):193-198.
- [64]丁东, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助AGC调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8):81-87.
- [65]Chiou J S, Tsai S H, Liu M T. A PSO-based adaptive fuzzy PID-controllers[J]. Simulation Model Practice & Theory, 2012, 26(8): 49-59.

- [66] Savran A, Kahraman G, A fuzzy model based adaptive PID controller design for nonlinear and uncertain processes[J]. ISA Transactions, 2014, 53(2):280-288.
- [67] Méndez J A, Marrero A, Reboso J A, et al. Adaptive fuzzy predictive controller for anesthesia delivery[J]. Control Engineering Practice, 2016, (46):1-9.
- [68] Wu X, Shen J, Li Y, et al. Fuzzy modeling and predictive control of superheater steam temperature for power plant[J]. ISA Transactions, 2015, 56(2):241-251.
- [69] Lu J L, Chen G R, Ying H. Predictive fuzzy PID control: theory, design and simulation[J]. Information Sciences, 2001, 137(1-4):157-187.
- [70] 赵新华, 王璞, 陈晓红. 智能投球机器人模糊PID控制[J]. 智能系统学报. 2015, 10(3):399-406.
- [71] 李佛垚, 李晓林. 筒仓定量装车系统加料阀门的模糊控制[J]. 煤炭工程. 2015, 47(6):109-115.
- [72] 陈小强, 马永娟, 侯涛, 等. 预测模糊PID在高速列车速度控制中的研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1):191-196.
- [73] 张永立. 预测模糊自整定PID集成控制系统在温度控制中的应用研究[J]. 河北科技大学学报, 2006, 27(3):242-245.
- [74] 吴宏艳. 模糊PID在集中供热系统中的应[J]. 科技传播, 2014, 11(1):203-204.
- [75] Zou Q, Jin Q, Zhang R. Design of fractional order predictive functional control for fractional industrial processes[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory System, 2016, 152: 34-41.
- [76] 詹雪兰. 催化裂化主分馏塔和吸收稳定系统的全流程模拟与优化[D]. 上海市: 华东理工大学, 2014.
- [77] Thanana N, Thananchai L. Fuzzy self-tuning PID control of Hydrogen-Driven pneumatic artificial muscle actuator[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(3):329-340.
- [78] 李海生. 基于预测控制优化的PI-PD控制研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
- [79] 张金龙, 徐慧, 刘京南, 等. 基于模糊神经网络的精密角度定位PID控制[J], 仪器仪表学报, 2012, 3(33):549-554.

附 录

发表的学术论文

- [1] Yuzhong Wang, Ridong Zhang. Improved predictive fuzzy PID controller design for the temperature process in an industrial coke furnace. ISATRANS-D-16-00939R2, (小修, 即将录用, SCI, IF=2.6).
- [2] Yuzhong Wang, Jili Tao, Ridong Zhang. Predictive fuzzy PID control for temperature model of a heating furnace. (已投 36th Chinese Control Conference 2017).

公开的发明专利

- [1] 张日东, 张俊锋, 王玉中. 遗传算法优化加热炉温度的分数阶预测函数控制方法. 发明专利, 公开号: CN105955350A.
- [2] 张日东, 王玉中, 张俊锋. 一种遗传算法优化预测模糊 PID 焦化炉温度控制方法. 发明专利, 公开号: CN105807607A.
- [3] 王玉中, 张日东, 张俊锋. 预测模糊控制优化的废塑料炼油裂解炉炉膛压力控制方法. 发明专利, 公开号: CN105807635A.
- [4] 张日东, 王玉中. 焦化炉压力的多目标遗传算法与 RBF 神经网络优化建模方法. 发明专利, 公开号: CN105608295A.
- [5] 王玉中, 张日东. 一种批次注塑过程的约束跟踪控制方法. 发明专利, 公开号: CN105353618A.
- [6] 张日东, 王玉中, 王俊宏. 炼油加热炉炉膛压力的多变量预测控制 PID 控制方法. 发明专利, 公开号: CN105159097A.
- [7] 张日东, 王玉中. 一种焦化炉炉膛压力系统模糊网络优化 PID 控制方法. 发明专利, 公开号: CN106371321A.
- [8] 张日东, 王玉中. 一种废塑料裂解温度系统的模糊 RBF 网络优化 PI 控制方法. 发明专利, 公开号: CN106444389A.
- [9] 张俊锋, 王玉中, 张日东. 一种焦化炉炉膛压力系统稳定切换控制器设计方法. 发明专利, 公开号: CN106054667A.