

1931818

分类号 _____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

热风炉自动燃烧模糊控制器的设计与实现

作者姓名： 唐晓军

指导教师： 高宪文 教授 东北大学信息科学与工程学院

许恩全 高工 北京首钢自动化信息技术有限公司

申请学位级别： 硕士 学科类别： 专业 学位

学科专业名称： 控制工程

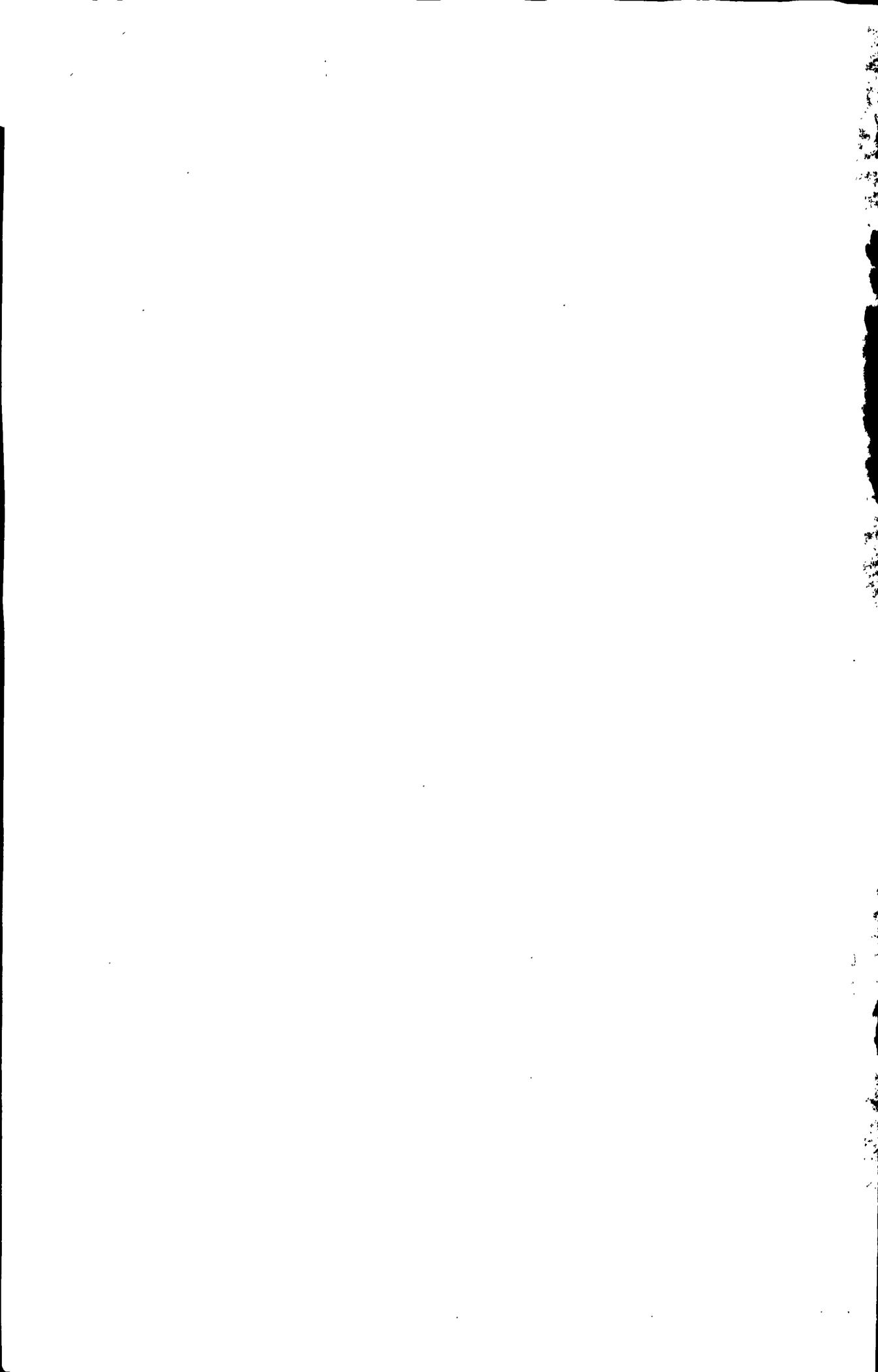
论文提交日期： 2008年6月30日 论文答辩日期： 2008年7月6日

学位授予日期： 答辩委员会主席： 井元伟

评阅人：

东 北 大 学

2008 年 6 月





Y1843945

A Thesis in Control Engineering

**Design and Realization of Fuzzy Controller in
Automatic Burning of the Blaze Furnace**

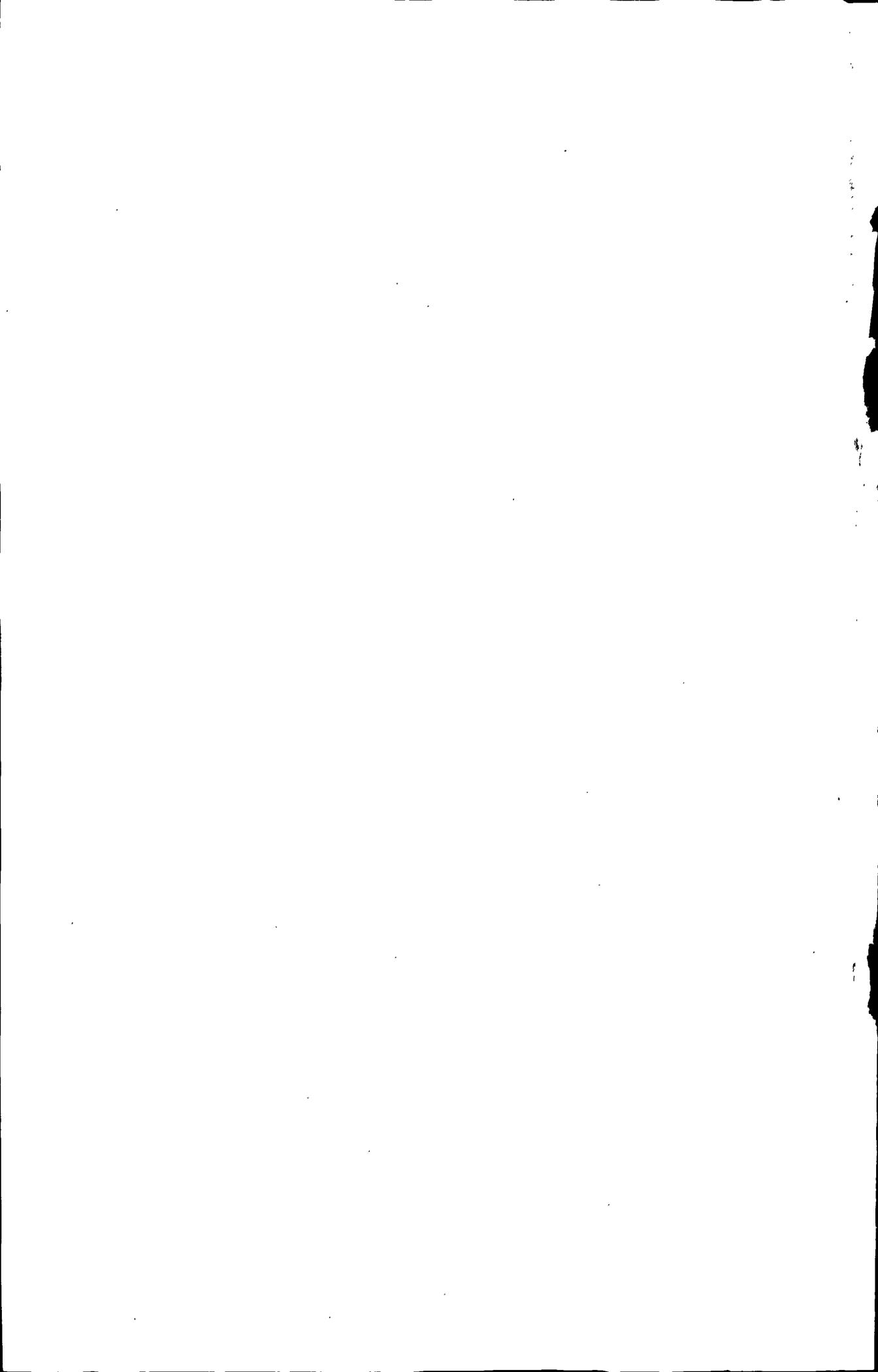
by Tang Xiaojun

Supervisor : Professor Gao Xianwen

Senior Engineer Xu Enquan

Northeastern University

June 2008



独创性声明

本人声明，所提交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。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： 

日期： 2008.7.7

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校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。本人同意东北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、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 一年 一年半 两年

学位论文作者签名： 

导师签名： 

签字日期： 2008.7.7

签字日期： 2008.7.7



热风炉自动燃烧模糊控制器的设计与实现

摘 要

热风炉工艺要求在规定的时间内要达到规定的拱顶温度，同时又要始终保持最佳的燃烧配比。热风炉燃烧的主要原料是高炉煤气，由于高炉煤气压力频繁波动，进而影响热风炉拱顶温度发生变化，最终影响送风温度。所以热风炉的燃烧控制是热风炉最复杂的控制系统。为了达到最佳的燃烧效果，需要不断地调整空气及煤气的供给量，这样，给热风炉燃烧操作带来一定的难度和较大的劳动强度。因此，寻找一种能够实现最佳燃烧，降低能耗，减轻劳动强度，同时提高热风炉效率的燃烧方法成为必然。

本文是以首钢三号高炉热风炉的自动燃烧系统为研究背景，详细介绍了热风炉自动燃烧模糊控制器的设计与实现。原来首钢炼铁厂热风炉的燃烧控制采用的是 PLC 双回路比值 PID 调节控制，控制回路较为复杂，并且两个回路相互影响，调节效果较差。现简化控制思想，采用模糊控制技术，在煤气压力和热值不断变化的情况下以热风炉拱顶温度和废气残氧值作为控制目标，设计两个相互独立的模糊控制器，分别控制参与燃烧的煤气流量和空气流量。

本文确定了模糊控制器的控制规则，合理选择了各输入输出变量相应的隶属度函数，根据过程参数和被控对象的物理特性选择了合适的论域范围并确定了相关参数；并确定了模糊化和反模糊化的方法。由于系统能力限制，将控制功能进行了分级处理，PLC 只负责输入输出变量的模糊化和反模糊化，大部分的模糊化推理程序由上位计算机完成。这样，既能保证热风炉拱顶温度的快速上升，又能保证燃烧过程的合理配比。

本文主要完成了自动燃烧系统模糊控制器的设计和实现，进行了现场的调试，取得了满意的效果。

关键词：热风炉；自动燃烧；模糊控制；煤气流量；空气流量；配比

Design and Realization of Fuzzy Controller in Automatic Burning of the Blaze Furnace

Abstract

The technology of the blaze furnace requires the blaze furnace vault temperature in stated time and at the same time keeps the best proportion of coal gas and air all the time. The main fuel of the blaze furnace burning is coal gas. The press of it changes with high frequency; this makes the top temperature change, and then influences the temperature of the blaze in the end. So the control of the burning of the blaze furnace is the most complex control. It needs adjust the flux of the gas and the air so that it makes the best burning affection. But this makes some difficulties and larger working intension for the burning of the blaze furnace. So it's necessary to find a way to realize the best burning, reduce energy consumption, alleviate the intension of working, and improve the efficiency of the blaze furnace.

The research of this paper is based on the automatic burning system of the blaze furnace of No.3 blaze furnace of Shougang Group. The originally way of burning controller adopts two loops of PLC with the control of PID. The controlled loop is very complex and the two loops influence each other. So the effect of adjusting is worse. Now this paper predigests the way of control, and uses the fuzzy control technology, designs two absolute fuzzy controller under the condition of the changing of gas pressure and the heat cost with the blaze furnace vault temperature and remaining oxygen of waste gas as the controlled target. This paper identified a fuzzy controller control rules, a reasonable choice of various input and output variables corresponding membership functions, in accordance with the process parameters and physical characteristics of the object choose the appropriate universe and to determine the scope of the relevant parameters and to determine the fuzzy and the anti-fuzzy approach. As hardware capacity constraints, we will control a hierarchical. PLC is only responsible for the input and output variables and fuzzy anti-fuzzy, Most of the fuzzy of the reasoning process completed by the top computer. And this controls the gas current and the air current which participate in the burning separately. So this promises that not only the blaze furnace vault temperature rising rapidly, but also the best proportion of burning process.

This paper mainly completes the design and realization of the automatic burning system with fuzzy controller of the blaze furnace. Through commissioning on site, and achieved

satisfactory results.

Key words: Blaze furnace; Automatic burning; Fuzzy control; Coal gas flow; Air flow;
Proportion

目 录

独创性声明.....	I
摘 要.....	II
Abstract.....	IV
目 录.....	VI
第一章 绪论.....	1
1.1 热风炉自动燃烧控制系统的发展概况.....	1
1.2 课题研究的背景和意义.....	3
1.3 本文主要工作.....	3
第二章 热风炉工艺过程及系统控制功能.....	5
2.1 热风炉生产工艺.....	5
2.2 自动燃烧控制的主要功能.....	5
第三章 模糊控制器的设计.....	9
3.1 引言.....	9
3.2 模糊控制器的设计理论.....	10
3.2.1 模糊控制器的结构设计.....	10
3.2.2 模糊控制器的规则设计.....	11
3.3 热风炉自动燃烧模糊控制器的设计.....	20
3.3.1 确定模糊控制器的输入和输出变量.....	21
3.3.2 归纳和总结模糊控制器的控制规则.....	22
3.3.3 选择论域并确定相关参数.....	24
3.3.4 确定模糊化和非模糊化的方法.....	25
第四章 模糊控制器的实现.....	29
4.1 引言.....	29
4.2 模糊控制器推理程序的开发.....	31
4.3 模糊控制器的部分功能在 PLC 中的开发.....	34
4.3.1 Concept 组态软件中 Fuzzy 模糊库介绍.....	34
4.3.2 利用 Fuzzy 库实现模糊控制.....	42
第五章 模糊控制器的现场调试.....	47
5.1 引言.....	47
5.2 燃烧过程不同阶段的控制目标.....	47

5.3 自动燃烧系统要实现的目标	49
5.4 模糊控制器的实际调试	49
5.5 实现模糊控制后的效果	52
第六章 总结	57
参考文献	59
致 谢	61

第一章 绪论

1.1 热风炉自动燃烧控制系统的发展概况

在高炉炼铁生产中,热风炉是重要的配套设备之一。高炉炼铁需要热风来燃烧焦炭,把铁矿石还原成铁水,热风炉的作用就是把鼓风加热到要求的温度,然后提供给高炉。自20世纪70年代以来,由于高炉的大型化发展,热风炉需要提供稳定的、满足高炉生产需要的、具有一定温度和流量的热风。风温问题也是进一步降低生产成本所要解决的关键问题之一,提高风温对于强化冶炼,降低焦比有着十分重要的意义。热风炉是一个具有本质非线性、大滞后、慢时变特性的复杂被控对象,如何安全、稳定、高效、环保地完成生产热风的任务,既是热风炉工艺研究的一个任务,同时也是自动控制系统在此领域所要完成的重要工作。其燃烧操作控制的好坏,直接影响风温的高低,燃烧过程既要使热风炉在规定的时间内达到设定的拱顶温度,又要使其始终保持最佳燃烧状态,即合理的燃烧配比。

热风炉燃烧主要使用高炉煤气,由于高炉在实际生产过程中炉况的波动或其它种种原因,高炉煤气压力和煤气热值波动频繁,使热风炉拱顶温度发生变化,最终影响送风温度。因此燃烧控制是热风炉最复杂的控制系统之一,其控制品质的好坏将直接影响热风炉的拱顶温度及燃烧的热效率。

为了达到和维持最佳的燃烧状态,需要不断地精确调整空气及煤气的供给量,给热风炉燃烧操作带来一定的难度和较大的劳动强度。因此寻找一种能够进行最佳燃烧,节省煤气,降低能耗,减轻劳动强度,同时提高燃烧效率的方法成为必然^[1]。

热风炉自动燃烧系统正是在这样一种需求下产生的。随着计算机技术和控制理论不断发展,各种控制思想不断出现,各种实现方式不断推出,为实现自动燃烧提供了多种手段和方法,并在生产实践中取得了非常好的效果,有力的促进了生产。自动燃烧系统主要经历了这样几个发展阶段:

(1) 单回路控制系统。在单回路控制系统中,煤气和助燃空气分别由两个独立的闭环控制进行控制。这种闭环控制系统,煤气与助燃空气两个调节回路是一样的,它们只能克服各自内部的扰动,二者之间没有联系,也就不能保证空燃比。即使设定值按照一定比例,但煤气和助燃空气任何一个发生扰动,都会使两者配合过程中出现较大的动态偏差,以至达不到较好的燃烧效果。

(2) 单闭环比值控制系统。其特点是控制系统具有结构简单,调整方便,实现两个

流量间的比值较精确等特点,所以应用较为广泛,缺点是,控制后的总流量总是变化的。

(3) 双闭环比值控制系统。其特点是在煤气闭环回路与助燃空气闭环回路之间加了一个乘法块,具有能实现两个流量间的原比值不变,主,从流量较稳定,升降负荷比较简便,只需改变主动量煤气的设定值,从动量助燃空气自动跟踪升降,并保持原来比值不变等特点,既能实现煤气量的定值控制和抗扰动,又能使助燃空气量比较稳定,从而使混合量比较平稳燃烧。缺点是对热值经常改变的生产应用效果较差。

(4) 串级比值控制系统。其特点是自动保持煤气与助燃空气量的最佳燃烧配比,在燃烧过程中进一步提高了热风炉的热效率,防止了大气污染。燃烧系统利用废气残氧量检测,判断热风炉的燃烧效果。这时可以把废气残氧量作为辅助被控参数,从而在比值控制基础上引入串级控制。采用串级控制系统可以大大提高调节品质,此系统中用管道气体流量来控制调节阀的开度,然后再用废气残氧量修定流量设定值。缺点是对废气残氧量的依靠性强,而废气残氧量的检测滞后性太大,严重影响了调节的快速性和准确性[2]。

从自动燃烧控制系统的发展过程来看,现有的燃烧控制系统虽然一定程度上改善了燃烧的效果。但是,距离我们期望的理想自动燃烧控制系统还是有差距的。利用模糊控制等新的控制理论来改造传统的燃烧控制方法被提上日程。

1965年,美国加利福尼亚大学自动控制教授 L. A. Zadeh 提出的《Fuzzy Set》开创了模糊数学的历史。1973年,他又给出了模糊推理的理论基础。从此,模糊数学逐渐发展、应用起来。自1974年伦敦大学的 E. H. Mamdani 成功的将模糊理论应用于锅炉和汽轮机的过程控制以来,模糊控制得到迅速发展。此后,模糊控制较大规模的研究是从1980年开始的。从90年代起,世界上一些大公司开始了模糊产品的开发,模糊理论与应用研究及模糊产品的开发像一股强劲的浪潮席卷世界各地。国内许多学者和单位自1979年以来,在模糊控制的理论、仿真实验及其应用方面做了大量的研究工作。

简而言之,模糊控制就是一种基于语言规则、模糊推理的高级控制技术。广义上讲,模糊控制指的是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊推理为基础的一类计算机数学控制方法;或者说是基于模糊理论、模糊逻辑,并同传统控制理论相结合,模拟人的思维方式,对难以建立数学模型的对象实施的一种控制方法^[3]。

模糊理论发展的事实说明模糊逻辑应用最有效,最广泛的领域就是模糊控制,模糊控制在各种领域出人意料地解决了传统控制理论无法解决或难以解决的问题,并取得了一些令人信服的成效。

目前,国内外对热风炉自动燃烧系统都投入了较大的研究力量,有一定的研究成果,但是距离人们期望的结果仍然有一定的差距。主要的原因包括燃烧过程的复杂性以及工艺设备的局限性。纵观同行业的热风炉现状,已经有不少热风炉利用诸如模糊控制等先进的控制理论开发了新的自动燃烧的过程,并且已经收到很好的效果。如济钢炼铁厂,使用热风炉燃烧自动控制软件系统,平均风温提高了 15°C ,节约煤气消耗8%,并能在1-2分钟左右找到实际最佳空燃比,通过控制煤气调节阀及空气调节阀,使实际流量的随时处于最佳状态,而不受煤气压力变化及煤气热值变化的影响。同时大大降低了工人劳动强度^[4]。

正是基于以上的对热风炉自动燃烧系统的发展历史及现状概况的分析,才提出利用模糊控制技术改造首钢现有的自动燃烧控制系统。

1.2 课题研究的背景和意义

首钢炼铁厂现有热风炉20座,采用的燃烧方式全部是纯手动操作或者是简单的双闭环比值控制燃烧。操作人员根据热风炉的炉顶温度和烟道温度的变化情况,根据个人的工作经验,人为更改煤气和空气的配比,人工烧火升温。由于煤气的压力和热值波动频繁,使得煤气流量也要随之变动,虽然操作人员的工作量很大,但控制燃烧效果较差,且浪费了大量能源,风温指标又达不到高炉的需要。

随着首钢结构调整步伐的加快,厂内能源越来越紧张,对风温等各项生产指标的要求越来越高。因此,对原有的生产方式的改造迫在眉睫。经过科学的分析和前期的广泛的调研,决定利用模糊控制技术改造首钢现有的燃烧控制系统。

1.3 本文主要工作

热风炉的燃烧过程是一个非常复杂的综合反应过程,是一个典型的多输入单输出的相互影响的复杂系统。开发这样一套功能完备且高效率的控制系统主要的研究内容包括:

- (1) 确定自动燃烧系统的控制方式,即煤气流量和空气流量的调节策略。
- (2) 模糊控制器的设计

模糊控制器的设计是自动燃烧系统的核心工作之一,也是热风炉自动燃烧系统成功与否的关键所在。本文设计了两个独立的模糊控制器,分别用来调节煤气流量和空气流量。两个模糊控制器的控制目标分别为控制热风炉的拱顶温度和燃烧后产生的残氧含量。

(3) 上位与下位程序的分工

在上位监控系统与下位 PLC 之间需要进行数据的通讯，一是将操作人员输入的参数和上位监控程序推理计算的结果传送至 PLC。另外，PLC 所采集的实时工艺参数需要传送至监控界面显示，并进行后台的计算。通讯所采用的协议是 MODBUS PLUS 协议，它是一种专用工业总线协议。

另外，由于 PLC 内存的限制，需要合理分配 PLC 与上位监控软件的资源，对自动燃烧系统的各个部分的功能究竟在上位系统还是 PLC 中实现进行了分配。

第二章 热风炉工艺过程及系统控制功能

2.1 热风炉生产工艺

热风炉是用各种特殊材料建成，可以耐受很高的温度。炉内砌有许多格子砖，对热风炉的加热，也就是加热这些格子砖。在加热期间，也被称为“燃烧”状态，高炉煤气和大量的助燃空气混合燃烧，热气到达炉顶，然后通过格子砖，使热风炉被加热，废气从热风炉烟道排出。当热风炉被加热到一定温度时，结束燃烧状态，然后准备向高炉提供热风，也就是准备换到“送风”状态。在送风期间，冷风通过格子砖反向吹进。砖的热量传递给流过的空气，被加热的空气也称作热风，通过环管送入高炉。高炉炼铁是一个连续的过程，热风不能中断，所以热风炉是高炉炼铁不可缺少的部分，但是一个热风炉不能连续提供热风，因此三个热风炉循环送风可以满足高炉需要的连续供风^[5]。

每座热风炉参与状态转换的有九个切断阀和两个调节阀，这九个切断阀包括烟道阀、废气阀、助燃风阀、煤气阀、燃烧阀、烟采阀、冷风阀、冷风均压阀、热风阀。两个调节阀包括煤气调节阀和助燃空气调节阀。同时，设置热值分析仪检测高炉煤气热值；设置残氧分析仪分析烟气含氧量。其简易流程图参见图 2.1。

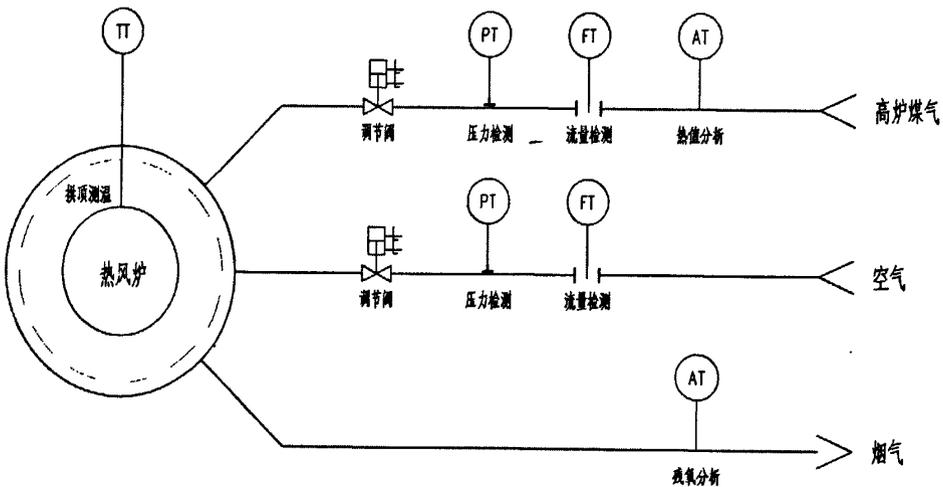


图 2.1 热风炉燃烧系统简易流程图

Fig 2.1 The schematic of the blast furnace burning

2.2 自动燃烧控制的主要功能

为了在规定的燃烧时间内，按照温升曲线完成对热风炉的加热，并且达到低污染、高效率的要求，热风炉燃烧需要助燃空气与煤气量的精确控制，即控制助燃空气与煤气的流量，使二者按照一定的空燃比完全燃烧。通过检测炉顶温度和废气的含氧量可以反

映燃烧过程的效果。

热风炉控制系统主要采用 PLC 可编程控制器，其逻辑控制功能强大，且过程控制功能也很丰富，其灵活的数字 PID 功能块与逻辑控制相结合，可适应各种控制回路。所以利用 PLC 很容易实现热风炉燃烧的各种控制方式。

热风炉控制系统主要采用 PLC 可编程控制器，其逻辑控制功能强大，且过程控制功能也很丰富，其灵活的数字 PID 功能块与逻辑控制相结合，可适应各种控制回路。所以利用 PLC 很容易实现热风炉燃烧的各种控制方式。

手动方式(MAN): 操作人员直接控制助燃空气与煤气调节阀的开度。

自动方式(AUT): 操作人员输入所需助燃空气与煤气流量设定值，控制系统将根据过程反馈自动计算调节阀的输出开度。

串级方式(CAS): 操作人员选择炉顶温度和废气残氧含量以及热值分析来控制助燃空气与煤气调节回路的设定值。按升温要求进行控制，炉顶温度作为主回路，煤气流量作为付回路，助燃空气流量根据煤气流量作比率调节。

热风炉的被控参数和控制参数主要包括如下项目:

- 被控参数包括拱顶温度和残氧含量
- 控制参数包括煤气流量和助燃空气流量

现在采用的控制方式为比值控制。在燃烧过程中，保持燃烧煤气与助燃空气量按一定比例混合后送入热风炉。把煤气作为主动量 Q_C ，助燃空气作为从动量 Q_A ，比值控制就是使助燃空气按照一定的比例关系 $K_x = Q_A / Q_C$ 跟随煤气量的变化。其控制框图如下所示。

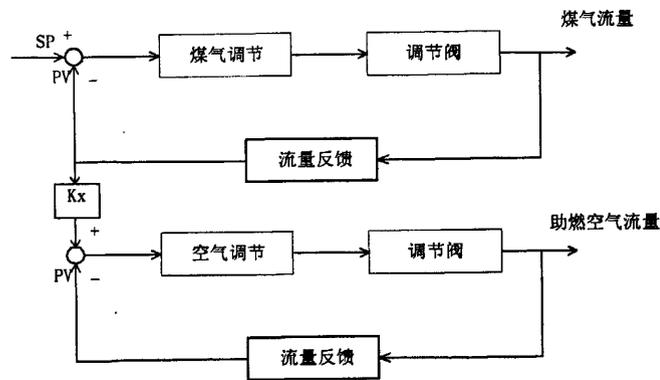


图 2.2 热风炉调节回路控制方式

Fig 2.2 The loop control mode of the blaze furnace

热风炉自动燃烧系统主要的目的就是克服各种扰动的影响，实现热风炉均衡稳定的燃烧，使热风炉达到最大的蓄热能力，为高炉实现高风温提供保证。具体说就是实现燃

烧过程合理, 节约能源, 燃烧初期拱顶温度快速上升, 蓄热期保持拱顶温度的稳定, 均衡控制废气温度, 同时兼顾燃烧过程的平稳, 节能, 环保等因素。同时, 实现整个燃烧过程的安全保护, 防止事故发生。

根据热风炉生产工艺的实际要求, 自动燃烧系统应实现以下功能:

(1) 实现热风炉燃烧过程的全自动, 正常情况下不需要人工干预。实现自动点火, 燃烧初始煤气流量和空气流量的自动设定, 燃烧过程煤气流量和空气流量的自动调节, 按照实际的燃烧速度, 根据实际的需要, 提供自动和手动控制燃烧进程的手段, 当废气温度达到要求时自动停烧等过程。

(2) 因为热风炉拱顶温度的快速升温是生产最需要的, 影响拱顶温度的最直接因素就是煤气流量的供给大小与燃烧的配比是否合理。因此, 需要设计一个控制器, 选择拱顶温度这个参数作为控制器的输入信号, 在燃烧的过程中, 根据燃烧的不同阶段和不同要求, 根据拱顶温度实际变化的情况, 用该控制器的输出控制煤气调节阀开度大小, 用以调节煤气流量的大小。

(3) 废气的残氧量是检测煤气与空气配比是否合理, 燃烧充分与否的重要指标, 因此, 需要设计一个控制器, 选择残氧值作为控制器的输入。影响废气残氧值的主要因素是空气流量的供给大小, 在燃烧的过程中, 用这个控制器的输出控制空气调节阀, 用以调节空气流量。将废气含氧量控制在一定水平, 也就保证了煤气与空气的合理配比, 保证了燃烧的充分。

(4) 为了确保热风炉拱顶温度初始的快速升温, 要求在投入燃烧系统时, 初始煤气流量和空气流量要满足最佳的配比, 因此, 自动燃烧系统要自动寻找到适合本个热风炉初始的煤气和空气流量, 以便系统一投入, 热风炉便快速的升温。

(5) 为了满足生产人员对四座热风炉燃烧节奏的控制, 要求提供方便的加烧和减烧功能。反映燃烧速度快慢的指标就是废气温度, 当废气温度达到设定值时, 该热风炉必须停止烧火。因此, 根据燃烧时间的进度, 在拱顶温度保持稳定的前提下, 自动调节烟道温度上升的速度, 自动加减煤气和空气流量, 实现燃烧过程的平稳均衡。

(6) 满足操作人员方便使用自动燃烧系统的要求, 开发出美观, 便捷的人机界面。为生产人员提供输入必要参数的界面和用来监控自动燃烧系统运行状态和过程。按其功能来分, 主要分显示整个热风炉系统工艺流程图和所有工艺过程参数的主画面, 显示单个热风炉工艺流程和工艺过程参数的分画面, 煤气流量和空气流量的设定等数据输入画面, 流量控制的手自动, 燃烧系统的手自动等选择切换画面。

(7) 实现操作人员对自动燃烧系统与原来手动系统之间进行切换,实现无扰动自由转换。手动燃烧状态下,可以无扰动切入自动燃烧系统。而当自动燃烧系统出现故障时,操作人员要无扰动转换到手动燃烧系统。所有这些切换操作对正常的生产不能产生任何的影响。

(8) 实现在自动燃烧系统出现机器死机,通讯失败等意外情况发生时,如何提供必要的提示与相关动作的保护措施等。

第三章 模糊控制器的设计

3.1 引言

模糊控制方法模仿人的思维方式和人的控制经验,用电脑代替人脑来实施有效的控制措施。模糊控制依赖于被控系统的物理特性,而物理特性的提取要靠人的直觉和经验。人可以根据不精确信息来进行推理而得到有意义的结果,那么怎样用机器来模仿这样的过程呢?使用的数学工具就是 Zadeh 提出的模糊集合论,或者说模糊集合论在控制上的应用。这是一种解决复杂系统控制决策的技巧和方法。用这种方法可以把人的经验形式化并引入控制过程,再运用比较严密的数学处理过程,实现模糊推理,进行判断决策,以达到令人满意的控制效果。在工程实现上,则使用模糊逻辑语言分析方法,且这种语言可以转换为计算机能够接受的算法语言。这种方法有三个特点,第一,它不用数值变量而是用语言变量来描述系统;第二,它是利用附带条件的命题来描述变量之间的关系,第三,它是使用模糊运算法则进行推理^[6]。

目前,模糊控制主要还是建立在人的直觉和经验的基础上,也就是说,操作人员对被控系统的了解不是通过精确的数学表达式,而是通过操作人员丰富的实践经验和直观感觉。这种方法可以看成是一组探索式决策规则。由于人的决策过程本质上就具有模糊性,因此,控制动作并非稳定一致,且有一定的主观性。但是,有经验的模糊控制设计可以通过对操作人员控制动作的观察和与操作人员的交谈讨论,用语言把操作人员的控制策略描述出来,以构成一组用语言表达的定性的决策规则。如果把那些熟练技术工人或者技术人员的实践经验进行总结和形式化描述,用语言表达成一组定性的条件语句和不精确的决策规则,然后利用模糊集合作为工具,使其量化,设计一个控制器,用形式化的人的经验去模仿人的控制策略,再驱动设备对复杂的工业控制过程进行控制,这就是模糊控制器^[7]。

为了能够使热风炉的拱顶温度以最快的速度上升并且保证煤气燃烧的稳定,利用模糊控制的办法改变原来采用的比值控制的方式,简化控制思想。设计两个独立的模糊控制器,分别用来控制热风炉的拱顶温度和燃烧后产生的残氧含量。

因为热风炉的拱顶温度快速升温是生产最需要的,因此,选择拱顶温度这个参数作为第一个模糊控制器的输入信号。在燃烧的过程中,煤气是主要原料,因此,用第一个模糊控制器的输出控制煤气调节阀。

废气的残氧量是检测煤气与空气配比是否合理,燃烧充分与否的重要指标,因此,

选择它作为第二个模糊控制器的输入。在燃烧的过程中，空气是次要原料，因此，用第二个模糊控制器的输出控制空气调节阀。将废气含氧量控制在一定水平，也就保证了煤气与空气的合理配比，保证了燃烧的充分^[8]。

3.2 模糊控制器的设计理论

模糊逻辑控制器简称模糊控制器，其控制规则是以模糊条件语句控制规则为基础的。因此，模糊控制器又称为模糊语言控制器。模糊控制器是模糊控制系统的核心，因而在模糊控制系统设计中怎样设计和调整模糊控制器及其参数是一项很重要的工作。一般而言，设计模糊控制器主要包括以下几项内容：

- (1) 确定模糊控制器的输入变量和输出变量；
- (2) 归纳和总结模糊控制器的控制规则；
- (3) 确定模糊化和非模糊化的方法；
- (4) 选择论域并确定相关参数；
- (5) 模糊控制器的软硬件实现；
- (6) 合理确定采样时间；

3.2.1 模糊控制器的结构设计

模糊控制器的结构设计就是要确定模糊控制器的输入变量和输出变量。究竟选择何种信息作为模糊控制器的变量，必须深入研究手动控制过程中有经验的操作人员主要根据哪些信息来控制被控对象向预期目标逼近。

(1) 手动控制过程中的信息量

人在进行手动控制过程中，操作者期望实现控制目标，一旦偏离了目标，出现了偏差，操作者便根据偏差的大小进行调整，人的大脑中误差的“大”或“小”，这些概念是模糊的。在整个手动控制过程中，人所能获得的信息一般可以分为三个，即误差，误差的变化和误差变化的速率。

(2) 模糊控制器的输入和输出变量

由于模糊控制器的控制规则是根据手动控制的大量实践经验总结出来的，因此，模糊控制器的输入变量自然也有三个，即误差，误差的变化和误差变化的速率。而输出变量则一般选择为控制量的变化，即增量。

通常将模糊控制器输入变量的个数称为模糊控制的维数。常见的模糊控制器有三种结构形式，如图 3.1 所示。从理论上讲，模糊控制器的维数越高，控制的效果越好，但

是维数高的模糊控制器实现起来相当复杂和困难。而维数低的模糊控制器控制效果又不理想，因此，目前大都使用二维的模糊控制器，其控制精度一般可以满足要求。如果仅仅选择模糊控制器的输入信号为误差，则不可避免的会出现超调；而要达到不超调或者少超调的目的，相当于减少超调量，必须消弱偏差的作用，这样又会出现调节时间过长的问题，相当于过渡过程时间长。在这个过程中，模糊控制按照非线性的比例(P)控制规律来控制调节过程，很难同时达到超调小而过渡过程时间短这两个性能指标的要求。为此，可以引用偏差的变化或者偏差的变化率这两个信息做为模糊控制器的输入变量。一方面要看当前的偏差，另一方面要看到目前的偏差减小的速度。通过这两个物理量的综合来得到一个理想的控制动作，达到预期的控制目标^[9]。

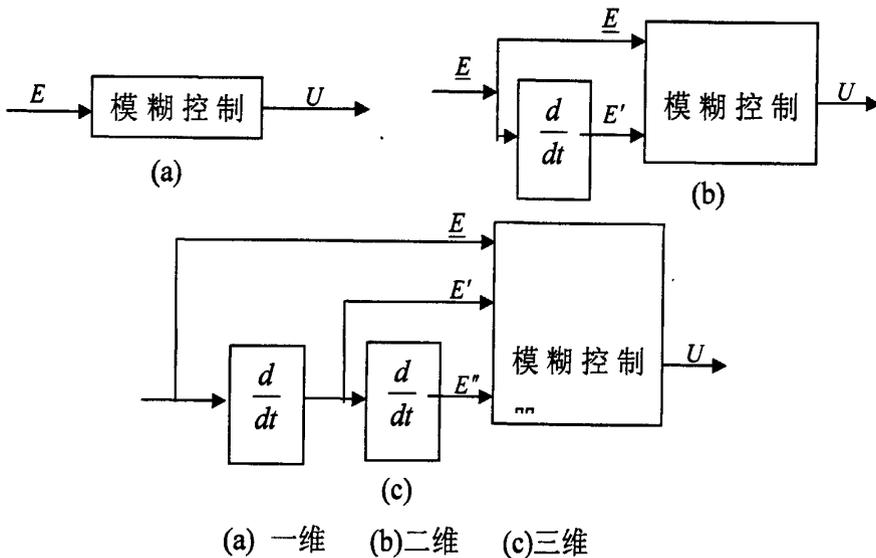


图 3.1 模糊控制器的一般结构

Fig 3.1 Commonly structure of Fuzzy controller

3.2.2 模糊控制器的规则设计

模糊控制规则的设计是设计模糊控制器的关键，具体设计内容包括以下几个方面。

(1) 选择描述输入输出变量的词集

一般要求词集中词汇少，并且利用这些词汇又可以对各种自然现象进行准确的描述。

模糊控制器的控制规则表现为一组模糊条件语句，在条件语句中用于描述输入输出变量状态的词汇（如“正大”，“负小”等）的集合，称为这些变量的词集，亦称变量的模糊状态。

一般选用“大”，“中”，“小”三个词汇来描述输入输出变量的状态。由于人的行为

在正, 负两个方向的判断是对称的, 将大, 中, 小再加上正, 负两个方向(极性)并考虑零状态, 这样, 一共就有七个词汇, 即

{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}

或者用英文词头缩写的形式表示为

$$\{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\} \quad (3.1)$$

对误差变化这个输入变量, 在选择描述其状态的词汇时, 常常将“零”分为“正零”和“负零”, 以表示误差的变化在当前是“增加”的趋势还是“减少”的趋势, 于是, 词集又增加了负零(NO)和正零(PO)。

描述输入输出变量的词汇都具有模糊特性, 可用模糊集合来表示。因此, 模糊集合的确定问题就转化为求取模糊集合的隶属函数的问题了。

(2) 隶属函数及其选择方法

模糊集合是通过隶属函数来定义的, 正确地确定隶属函数是运用模糊集合理论解决实际问题的基础。隶属函数的确定实质上是人们主观对客观事物概念的外延不分明性(即中介过渡性)的定量描述, 这种描述本质上是客观的。但因为每个人对同一模糊概念的认识理解上存在差异, 因此又含有一定的主观因素。对于同一个模糊概念, 不同的人会建立不完全相同的隶属函数。但只要反映同一模糊概念, 尽管形式不同, 在解决和处理模糊信息问题中仍然殊途同归, 只是有优劣之分。校验隶属函数建立得是否合适的标准是看其是否符合实际, 通常是初步确定粗略的隶属函数, 再通过“学习”和“校验”逐步修正完善, 达到主观与客观的一致^[10]。

确定隶属函数的方法大致有以下几种:

1) 主观经验法

当论域是离散量时, 根据主观认识或个人经验, 直接或间接给出元素隶属度的具体值, 由此确定隶属函数。具体的实现方法有以下几种: 专家评分法、因素加权综合法和二元排序法。

2) 分析推理法

当论域连续量时, 根据问题的性质, 应用一定的分析与推理, 决定选用某些典型函数作为隶属函数, 比如三角形函数、梯形函数等。

3) 调查统计法

以调查统计结果所得出的经验曲线作为隶属函数曲线, 根据曲线找出相应的函数表达式^[11]。

(3) 定义各个模糊变量的模糊子集

由于模糊变量没有明确的外延，如何用具体的数据来刻画一个模糊变量的性质，这就是模糊子集的确切问题。对模糊子集的理想要求是它必须客观地反映实际情况。

定义一个模糊子集，实际上就是要确定模糊子集隶属函数曲线的形状。将确定的隶属函数曲线离散化，就得到了有限个点上的隶属度，便构成了一个相应的模糊变量子集，如图 3.2 所示的隶属函数曲线表示论域 X 中的元素 x 对模糊变量 A 的隶属程度。

$$\begin{aligned} \text{设定} \quad & x = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\} \\ \text{则有} \quad & \mu(2) = \mu(6) = 0.2 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned} & \mu(3) = \mu(5) = 0.7 \\ & \mu(4) = 1 \end{aligned} \tag{3.3}$$

在论域 X 内，除 $x = 2, 3, 4, 5, 6$ 各点外，其余离散点上的隶属度均为 0，此时，模糊变量 A 的模糊子集可以表示为：

$$A = \frac{0.2}{2} + \frac{0.7}{3} + \frac{1}{4} + \frac{0.7}{5} + \frac{0.2}{6} \tag{3.4}$$

由上述算例可知，当确定了某一个模糊变量 A 的隶属曲线后，就可以很容易的获得该模糊变量的一个模糊子集^[12]。

统计结果表明，用正态型模糊变量来描述人进行控制活动时的模糊概念是比较适宜的。通常可以用下述隶属函数曲线来定义误差 e ，位差变化率 ec 及控制量 u 的七个语言值 $\{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$ 的隶属度。

上述论域 E, EC, U 上的七个模糊变量均是假定为正态分布型模糊变量，其正态函数为

$$F(X) = \exp \left[- \left(\frac{x - \alpha}{\sigma} \right)^2 \right] \tag{3.5}$$

其中参数 σ 的大小直接影响隶属函数曲线的形状，而隶属函数曲线形状的不同会导致不同的控制特性，如下图所示，三个模糊子集 A, B, C 的隶属函数曲线的形状不同，显然，模糊子集 A 的形状尖一些，它的分辨率高，其次是 B ，最低的是 C 。如果输入误差在模糊子集 A, B, C 的子集上的变化相同，由它们所引起的输出的变化是不同的。容易看出，由 A 所引起的输出变化最剧烈，其次是 B ，再次是 C 。

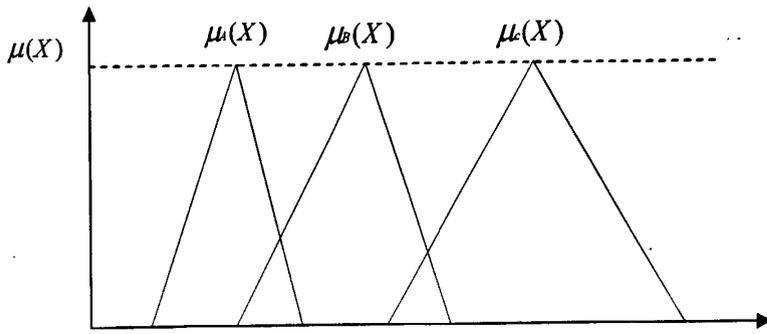


图 3.2 不同分辨率的隶属函数曲线

Fig 3.2 Subjection function curve of different differentiate

上述分析表明，隶属函数曲线较尖的模糊子集，其分辨率较高，控制灵敏度也高；相反，隶属函数曲线较平缓，控制特性也就比较平缓，稳定性能也比较好。因此，在选择模糊变量的隶属函数曲线时，在误差较大的区域采用低分辨率的模糊集，在误差较小的区域采用较高分辨率的模糊集，在误差接近零时选用高分辨率的模糊集，这样才能达到控制精度高稳定性好的效果^[13]。

从自动控制的角度看，希望一个控制系统在要求的范围内都能够很好的实现控制。模糊控制系统设计时也要重视这个问题。因此在选择描述某一个模糊变量的各个模糊子集时，要使它们在整个论域上分布合理，即它们应该较好的覆盖整个论域。通常的方法是：在定义这些模糊子集时要注意使论域中任何一点对这些模糊子集的隶属度的最大值不能太小，否则，在这样的点的附近将出现控制动作的死区，使控制性能变坏^[14]。

此外还须考虑一下，各模糊子集（尤其是相邻的两个模糊子集）之间的相互影响。如图所示，图 3.3 中 a_1 和 a_2 分别是两种情况下的两个模糊子集 A 和 B 的交集的最大隶属度，显然， a_1 小于 a_2 。一般可用 a 值（两个模糊子集之交集的最大隶属度）的大小来描述两个模糊子集之间的影响程度。当 a 值较小时，控制动作的灵敏度较高；而 a 值较大时，具有较好的适应系统参数变化的能力。 a 值不应取得过大或者过小，若 a 值取得过小时，控制过程变化太剧烈，系统不易稳定运行；当 a 值取得过大时，则两个模糊子集难以区分，造成控制灵敏度大大下降，控制精度得不到保证^[15]。

(4) 建立模糊控制器的控制规则

模糊控制规则应该是人们在手动控制过程中经过长期的操作实践，不断修正完善后的一套行之有效的控制策略。

模糊控制器的控制规则是以手动控制策略为基础的。它利用模糊集合理论将手动控制策略上升为具体的数值运算，根据推理运算的结果做出相应的控制动作，使执行机构

控制被控对象的运行^[16]。

要建立模糊控制器的控制规则，就是要利用语言来归纳手动控制过程所使用的控制策略。

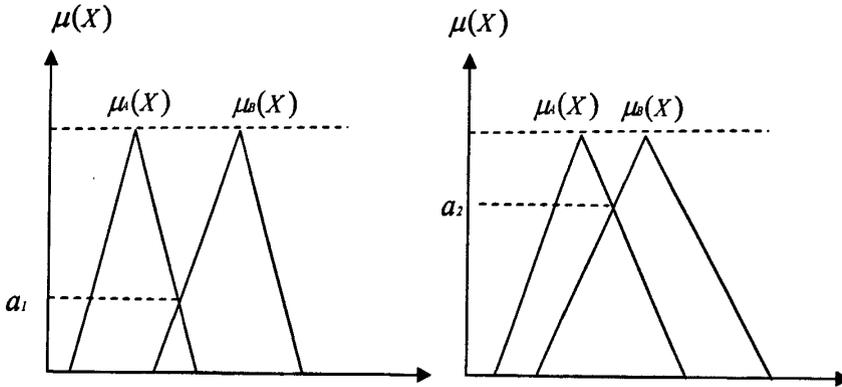


图 3.3 不同模糊子集的相互关系
Fig 3.3 Correlation of different fuzzy subclass

(5) 精确量和模糊量之间的转换

由模糊控制器的结构图可知，模糊控制器的输入和输出信号均是精确量，而进行模糊推理需要模糊量，这样就需要在模糊控制算法实现过程中，能够进行精确量与模糊量之间的相互转换。

1) 模糊化的方法

将精确量（实际是数字量）转换为模糊量的过程称为模糊化或者模糊量化。

模糊化的方法一般有两种：

(a) 把精确量离散化

如把在 $[-6,+6]$ 之间变化的连续量分为 7 个档次，每一档对应一个模糊集，这样处理使模糊化过程较为简单。否则，将某一个精确量对应一个模糊子集，有无穷多个模糊子集，使模糊化过程复杂化。

如下表，在 $[-6,+6]$ 区间的离散化了的精确量与模糊语言的模糊量建立了对应关系，这样，就可以将 $[-6,+6]$ 区间的任意精确量用模糊量 y 来表示。如在 -6 附近称为负大，用 NB 表示；在 -4 附近称为负中，用 NM 表示；如果 $y = -5$ 时，这个精确量没有在档次上，但是由于 $\mu_{NM}(-5) = 0.7, \mu_{NB}(-5) = 0.8, \mu_{NB} > \mu_{NM}$ ，因此， -5 用 NB 表示。

如果精确量 x 的实际范围为 $[a,b]$ ，将 $[a,b]$ 区间的精确量转换为 $[-6,+6]$ 区间变化的变量 y ，可采用如下公式：

$$y = \frac{12 \left[x - \frac{(a+b)}{2} \right]}{(b-a)} \quad (3.6)$$

由上式计算出的 y 值若不是整数，可以把它归入最接近的 y 的整数，例如 $-4.9 \rightarrow -5$ 。

必须强调指出的是，实际的输入变量（如误差和误差的变化率）都是联系变化的量，通过模糊化处理，把连续量离散为 $[-6,+6]$ 之间有限个整数值的做法是为了使模糊推理合成方便，其结果如表 3.1。

表 3.1 连续量离散为 $[-6,+6]$ 之间模糊化处理

Table 3.1 Fuzzy disposal between $[-6, +6]$ of continuous variable

语言变量	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.0	0.7	0.2	0	0
O	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.2	0.7	1.0	0.9	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) 第二种方法比较简单，它是将在某区间的精确量 x 模糊化成这样一个模糊子集，它在点 x 处的隶属度为 1，除 x 点以外的各点隶属度均取 0，显然，这种模糊化的方法相对粗略一点^[17]。

2) 模糊量到精确量的转换方法

模糊控制器的输出是一个模糊量，这个模糊量不能用来控制执行机构，还需要将这个模糊量转换为一个精确量，这种转化过程称为清晰化，或者称为非模糊化，也称为判决。

一般而言，非模糊化的方法有三种：

(a) 选择最大隶属度方法

该方法是选择模糊子集中隶属度最大的元素称为控制量，若对应的模糊决策的模糊集为 c ，则决策（所确定的精确量） u^* 应满足

$$\mu_c(u^*) \geq \mu_c(u), u \in U \quad (3.7)$$

这个判别方法简单易行，实时性也好，但它概括的信息量少，因为它完全不考虑其

余一切从属程度较小的点的情况。如果这样的最大点 u^* 有好几个, 就取它们的平均值 \bar{u} , 或者取 $[u_i^*, u_p^*]$ 的中点 $(u_i^* + u_p^*)/2$ (其中, $u_i^* \leq u_r^* \leq \dots u_p^*$) 作为控制量。

(b) 选中位数法

对于已知的模糊子集 (由模糊合成关系得到的), 求得对应的隶属函数曲线, 计算出该隶属函数曲线与横坐标所围成的面积, 再除以 2, 将所得的平分结果作为控制量。这种判决方法综合的考虑了各个点上的情况, 充分的利用了模糊子集提供的信息量, 但是计算工作比较麻烦。

(c) 加权平均判决方法

这种方法就是依照普通加权平均公式, 按照下式来计算控制量:

$$\mu^* = \frac{\sum \mu(\mu) \cdot \mu}{\sum \mu(\mu)} \tag{3.8}$$

例如:
$$c = \frac{0.3}{-1} + \frac{0.8}{-2} + \frac{1}{-3} + \frac{0.5}{-4} + \frac{0.1}{-5} \tag{3.9}$$

则
$$\mu^* = \frac{(-1) \times 0.3 + (-2) \times 0.8 + (-3) \times 1 + (-4) \times 0.5 + (-5) \times 0.1}{0.3 + 0.8 + 1 + 0.5 + 0.1} = -2.74 \tag{3.10}$$

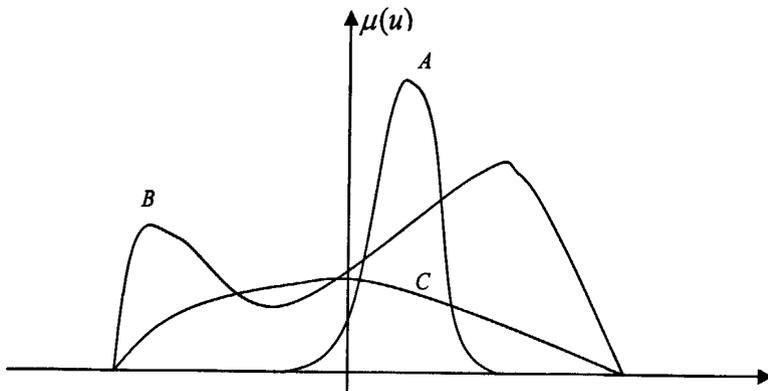


图 3.4 控制量的模糊集隶属函数曲线

Fig 3.4 Subjection function curve of different control parameter

最后应该注意, 经过模糊推论运算以后得到的输出量的模糊子集是否与实际的操作一致。一般说来, 由模糊控制算法计算出的控制量的模糊隶属函数曲线的形状如图 3.4 所示, 图中 A, B, C 分别为三种不同形状的模糊集的隶属函数曲线, 图 A 是单峰, 类似正态分布曲线, 这种模糊集表现为一种控制规则。图 B 是双峰的, 表明前述总结出来的控制规则出现了相互矛盾的情况; 图 C 是平缓的无峰曲线, 控制动作不明确, 性能不好, 一个设计得好得模糊控制器, 其输出得模糊控制量应类似于 A^[18]。

(6) 论域, 量化因子和比例因子的选择

1) 论域和基本论域

模糊控制器的输入信号(误差和误差的变化率)的实际范围称为这些变量的基本论域, 基本论域中的量时精确量。通常可以定义误差的基本论域为 $[-x_e, +x_e]$, 误差的变化率的基本论域为 $[-x_{ec}, +x_{ec}]$ 。模糊控制器的输出信号(控制量)的实际变化范围是控制量的基本论域, 通常定义为 $[-y_u, +y_u]$, 它也是精确量。

在模糊控制器的设计中, 通常令误差 E , 误差变化率 EC 和控制量 U 所取的模糊子集的论域分别为:

$$E = \{-n, -n+1, \dots, 0, 1, \dots, n-1, n\} \quad (3.11)$$

$$EC = \{-m, -m+1, \dots, 0, 1, \dots, m-1, m\} \quad (3.12)$$

$$U = \{-l, -l+1, \dots, 0, 1, \dots, l-1, l\} \quad (3.13)$$

其中, n, m, l 分别为正整数。由于语言变量的词集通常选择7个(或8个), 为了确保各模糊子集能够较好的覆盖论域, 避免出现失控现象, 通常要求 $n \geq 6, m \geq 6, l \geq 7$ 。从理论上讲, 增加论域的元素个数, 可以提高控制精度, 但也带来了计算量增大, 占用内存增多等不利因素。实际经验表明, 把等级分得过细并没有太大的必要。对基本论域的选择, 由于在系统调试对被控对象缺乏足够的经验知识, 因此只能做初步的确定, 在实际调试时再加以确定^[19]。

2) 量化因子和比例因子

在实现模糊控制算法时, 通过每隔一定的时间(采样周期)采样被控对象的输出信号(数字量)后, 把该数字量和内部数字设定信号(参考输入信号)进行比较就可以得到当前的输入变量信号(误差信号)。通过前后两次采样对应的误差信号除以时间间隔就是误差变化率信号。为了进行模糊运算, 必须把这两个精确量转换为模糊集的论域中的某一个对应的值。这实际上就是要进行基本论域(精确量)到模糊集的论域(模糊量)的转换, 这种转换过程的实现就需要引入量化因子的概念^[20]。

量化因子一般用 K 表示, 误差的量化因子 K_e 和误差变化率的量化因子 K_{ec} 分别由以下两个计算公式确定:

$$K_e = \frac{n}{x_e} \quad K_{ec} = \frac{m}{x_{ec}} \quad (3.14)$$

此外, 模糊控制器运算以后得到的控制量, 不能直接控制执行结构, 还必须讲其转换为控制对象所能接受的基本论域中去。输出控制量的比例因子由下式确定:

$$Ku = \frac{y_i}{l} \quad (3.15)$$

3) 量化因子和比例因子的选择方法

设计模糊控制器除了要有一套有效的控制规则外,还必须合理的选择模糊控制器的量化因子和比例因子系数。大量的试验结果表明,量化因子和比例因子的大小及两个量化因子之间的大小相对关系,对模糊控制器的控制性能影响极大。

例如: if $E = A_i$ and $EC = B_i$, then $\Delta u = C_i$

其中, E , EC 和 u 分别为被控变量的误差,误差变化率和控制变量的语言变量;而 A_i , B_i 和 C_i 为其论域上的语言值(如 NB, NM 等)。由上述控制规则,根据近似推理可以计算出对应于 E , EC 的 Δu , 用函数 f 表示为

$$\Delta u = f(E, EC) \quad (3.16)$$

若第 k 个采样时刻的实际误差为 $e(k)$, 误差变化率为 $ec(k)$, 对其进行量化并模糊化,可得到其对应论域中的两个独立的模糊集:

$$E(k) = \text{int}(K_e e(k) + 0.5) \quad (3.17)$$

$$EC(k) = \text{int}(K_{ec} ec(k) + 0.5) \quad (3.18)$$

带入 Δu 的公式中有

$$\Delta u(k) = f[\text{int}(K_e e(k) + 0.5), \text{int}(K_{ec} ec(k) + 0.5)] = f[K_e e(k) + K_{ec} ec(k)] \quad (3.19)$$

对其进行判断并乘以比例因子 Ku , 得到实际的控制量的变化为:

$$\Delta u(k) = Ku D\{f[K_e e(k), K_{ec} ec(k)]\} \quad (3.20)$$

式中 $D\{\bullet\}$ 表示判断。从而有

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) = u(0) + Ku \sum_{i=1}^k D\{f[K_e e(k), K_{ec} ec(k)]\} \quad (3.21)$$

如果输入输出的特性由下式描述

$$y = g(u) \quad (3.22)$$

$$\text{则} \quad y(k) = g\left\{u(0) + Ku \sum_{i=1}^k D\{f[K_e e(k), K_{ec} ec(k)]\}\right\} \quad (3.23)$$

由上式可见, K_e , K_{ec} 和 Ku 对输出特性均有影响,其中, K_e , K_{ec} 是通过调整语言变量的取值来改变控制器的输出,而 Ku 则相当于常规系统中比例增益的作用^[21]。

(1) K_e , K_{ec} 对系统动态性能的影响

由上述 K_e , K_{ec} 公式可以看到, K_e , K_{ec} 变化时,实际误差和误差的变化率所对应的论域上的语言值也将发生变化。一般而言, K_e , K_{ec} 越大,对应的语言值也越大,

反之亦然。由模糊控制规则表可以看出,在误差变化所取语言值不变的情况下,误差所取语言值越大,相应的控制器的输出(控制量变化)所取语言值也越大;而在误差所取语言值不变的条件下,误差变化所取语言值越大,相应的控制器的输出所取的语言值越小。

K_e 对动态性能的影响是: K_e 大,调节死区小,上升速率大。但是, K_e 取得过大,将使系统产生较大的超调,调节时间增大,甚至产生振荡,使系统不能稳定工作^[22]。

K_{ec} 对动态性能的影响是: K_{ec} 大,反映较迟钝, K_{ec} 小,反映快,上升速率大。而 K_{ec} 过小,将引起较大的超调,使调节时间长,严重时不能稳定工作。

(2) K_e , K_{ec} 对系统稳态性能的影响

在模糊控制系统中,一般不可能消除稳态误差,更不可能消除误差变化率。一般而言, K_e 增加,稳态误差将减小, K_e 增大,稳态时误差变化率也将减小。然而 K_e , K_{ec} 对动态性能也有影响,因此,必须兼顾两个方面的性能^[23]。

(3) 系统性能的影响

K_u 则相当于常规系统中比例增益的作用,一般 K_u 加大,上升速度较快。但 K_u 过大,将产生较大的超调,严重时会影响稳态工作,和一般系统不同的是 K_u 一般不影响系统的稳态误差^[24]。

3.3 热风炉自动燃烧模糊控制器的设计

为了实现对热风炉燃烧的合理控制,并结合热风炉自身的工艺特点,改变原来采用的比值控制的方式,简化控制思想。设计两个独立的模糊控制器,分别用来控制热风炉的拱顶温度和燃烧后废气的残氧含量。

根据热风炉拱顶温度的变化自动修正煤气调节阀,确保拱顶温度始终保持最大最快的上升趋势,称其为煤气调节模糊控制器。因为热风炉的快速升温是生产最需要的,而拱顶温度是最直接反映这一情况的唯一参数,因此,选择拱顶温度这个参数作为第一个模糊控制器的输入信号。在燃烧的过程中,煤气是主要原料,因此,用第一个模糊控制器的输出控制煤气调节阀。

根据废气中含氧量的变化自动修正空气调节阀,保持废气中含氧量的数值为最佳值,称其为空气调节模糊控制器。废气的残氧量是检测煤气与空气配比是否合理,燃烧充分与否的重要指标,因此,选择它作为第二个模糊控制器的输入。在燃烧的过程中,空气是次要原料,因此,用第二个模糊控制器的输出控制空气调节阀。将废气含氧量控

制在一定水平，也就保证了煤气与空气的合理配比，保证了燃烧的充分。

下面，根据模糊控制器设计的步骤和方法，分别对两个模糊控制器进行设计。

3.3.1 确定模糊控制器的输入和输出变量

(1) 煤气调节模糊控制器的输入变量和输出变量

利用采样周期内热风炉拱顶温度的变化量和变化率来判断当前的煤气流量是否合适，因此，确定该模糊控制输入变量为：

热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T

采样周期内温度的变化率 ΔT

由于 Concept 编程软件模糊功能包中所有的模糊处理功能块都具有 9 个输入级别，所以，确定变量的模糊子集为：

(a) 热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 的模糊子集为：

{正大大，正大，正中，正小，零，负小，负中，负大，负大大}

相应的模糊语言变量设定为：{ $PB+$, PB , PM , PS , 0 , NS , NM , NB , $NB+$ }

(b) 热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化率 ΔT 的模糊子集为：

{正大大，正大，正中，正小，零，负小，负中，负大，负大大}

相应的模糊语言变量设定为：{ $PB+$, PB , PM , PS , 0 , NS , NM , NB , $NB+$ }

(c) 输出变量为控制信号 U ，其模糊子集为：

{正大大，正大，正中，正小，零，负小，负中，负大，负大大}

相应的模糊语言变量设定为：{ $PB+$, PB , PM , PS , 0 , NS , NM , NB , $NB+$ }

(2) 空气调节模糊控制器的输入变量和输出变量

空气调节模糊控制器是利用废气中含氧量与理论充分燃烧条件下的残氧含量的差值和当前采样周期废气中含氧量的变化率来自动修正空气的供给量，因此，选择以下两个量为输入变量：

取实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E

取废气含氧量的变化速率 EC

输入变量和输出变量的模糊子集和语言变量为：

(a) 选取实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E 的模糊子集为：

{正大大，正大，正中，正小，零，负小，负中，负大，负大大}

相应的模糊语言变量设定为：{ $PB+$, PB , PM , PS , 0 , NS , NM , NB , $NB+$ }

(b)选取废气含氧量的变化速率 EC 模糊子集为:

{正大大, 正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大, 负大大}

相应的模糊语言变量设定为: $\{PB+, PB, PM, PS, 0, NS, NM, NB, NB+\}$

(c)输出变量为控制信号 U , 其模糊子集为:

{正大大, 正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大, 负大大}

相应的模糊语言变量设定为: $\{PB+, PB, PM, PS, 0, NS, NM, NB, NB+\}$

3.3.2 归纳和总结模糊控制器的控制规则

模糊控制规则应该是人们在手动控制过程中经过长期的操作实践, 不断修正完善后的一套行之有效的控制策略。为了获得既准确又完整的控制规则, 对操作人员手动燃烧的方法和特点进行了长期仔细观察。对两个模糊控制器的规则进行了总结。

(1) 煤气调节模糊控制器的控制规则

拱顶温度与煤气流量的供给有着直接的关系。在合理燃烧的条件下, 如果拱顶温度上升较慢, 说明当前煤气的供给量较少, 不足以使拱顶温度保持快速上升。如果想使拱顶温度快速上升, 则需要增加煤气流量的供给。如果拱顶温度上升较快, 说明当前煤气的供给量较大, 如果想降低拱顶温度的上升速度, 则需要减小煤气流量的供给^[25]。

根据煤气调节模糊控制器的输入变量和输出变量以及输入变量和输出变量的模糊子集和所对应的语言变量, 有如下控制过程:

当发现“热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 为正, 并且拱顶温度采样周期内温度的变化率 ΔT 很大, 即拱顶温度有进一步快速上升的趋势时”, 应采取的动作是“减小煤气流量的供给, 即减小煤气调节阀的开度”, 用条件语句可以表示为:

“若误差正大且误差变化率也正大时, 则控制量应负大”, 即

“if $T = PB+$ and $\Delta T = PB+$, then $U = NB+$.”

根据上述类似的分析, 可以总结出在控制煤气调节阀时所使用的控制策略, 可以获得如下表所示的模糊控制规则表 3.2。

(2) 空气调节模糊控制器的控制规则

废气中的含氧量表明当前参与燃烧的煤气和空气的燃烧效果。当废气中的含氧量较高时, 说明当前参与燃烧的两种物料中煤气量较少, 空气量较大, 此时应该在保持煤气流量不变的前提下, 适当减小空气流量的供给; 当废气中的含氧量较低时, 说明当前参与燃烧的两种物料中煤气量较多, 空气量较少, 此时, 在保持煤气流量不变的前提下,

应该适当增加空气流量的供给^[26]。

根据空气调节模糊控制器的输入变量和输出变量以及输入变量和输出变量的模糊子集和所对应的语言变量，有如下控制过程：

当发现“实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E 为正，并且废气含氧量的变化速率 EC 为正大，即废气含氧量有进一步快速上升的趋势时”，应采取的动作是“减小空气流量的供给，即减小空气调节阀的开度”，用条件语句可以表示为：

“若误差正大且误差变化率也正大时，则控制量应负大”，即

“if $E = PB+$ and $EC = PB+$, then $U = NB+$.”

根据上述类似的分析，可以总结出在控制空气调节阀时所使用的控制策略，可以获得如下表所示的模糊控制规则表 3.3。

表 3.2 煤气调节模糊控制器的控制规则

Table 3.2 The control rules of the Fuzzy controller of adjust coal gas

T	ΔT								
	PB+	PB	PS+	PS	Z	NS	NS+	NB	NB+
NB+	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB+	PB+
NB	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB+
NS+	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB
NS	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB
Z	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PS	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PS+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
PB	NB+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS
PB+	NB+	NB+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z

表 3.3 空气调节模糊控制器的控制规则

Table 3.3 The control rules of the Fuzzy controller of adjust air

E	EC								
	PB+	PB	PS+	PS	Z	NS	NS+	NB	NB+
NB+	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB+	PB+
NB	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB+
NS+	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB
NS	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB
Z	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PS	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PS+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
PB	NB+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS
PB+	NB+	NB+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z

3.3.3 选择论域并确定相关参数

根据模糊控制器设计的一般方法,需要确定的模糊控制器输入和输出变量的论域,以及量化因子和比例因子等相关参数。

论域的确定主要取决于模糊控制器所选择的输入变量和输出变量的物理意义和自身特点,所确定的论域要能够反映所控制的物理过程的控制要求。通过对热风炉长期的实际观察和分析,通过总结所控物理参数的变化特点,确定了两个模糊控制器的论域和量化,比例因子^[27]。

(1) 煤气调节模糊控制器的论域及相关参数

根据煤气调节模糊控制器输入信号的量程和正常燃烧状态下采样周期内的变化的大小,确定了相关的输入变量的论域范围:

- (a) 热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 的论域范围为 $(-4,4)$;
- (b) 拱顶温度采样周期内温度的变化率 ΔT 的论域为 $(-0.4,+0.4)$;
- (c) 输出量为 U ,论域范围为 $(-400,400)$,400表示的是机器数,对应的阀位为 $\pm 10\%$ 。

调节阀的控制信号为4-20MA的标准电流信号,是由PLC的模拟量输出模块输出(12位精度)的。对应于4-20MA的标准电流信号,相应的机器数为0-4095。根据输出信号对调节阀的控制的灵敏度和对相应的流量的影响的程度,确定输出信号的论域范围:

(d) 量化因子和比例因子:根据设计的需要,暂时将量化因子确定取1,比例因子取1。

(2) 空气调节模糊控制器的论域及相关参数^[28]

根据空气调节模糊控制器输入信号的量程和正常燃烧状态下采样周期内的残氧量变化的大小,确定了相关的输入变量的论域范围:

输入信号的论域范围:

- (a) 实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E 的范围为 $(-0.4,0.4)$;
- (b) 废气含氧量的变化速率 EC 的范围为 $(-0.4,0.4)$;
- (c) 根据煤气调节阀阀位输出控制量的论语确定的方法,确定空气调节模糊控制器

输出信号的论域范围:输出量为 U ,论域范围为 $(-400,400)$ 。

(d) 量化因子和比例因子:根据设计的需要,暂时将量化因子确定取1,比例因子取1。

3.3.4 确定模糊化和非模糊化的方法

首先，在确定模糊化和非模糊化的方法之前，先来确定所要使用的隶属函数的形状和参数^[29]。

根据前述对隶属函数选择的原则，要求所选择的隶属函数分辨率和控制灵敏度较高，在整个论域上分布要合理以及各模糊子集（尤其是相邻的两个模糊子集）之间的相互关系和影响，并结合实现这种隶属函数的 Concept 编程软件所提供的编程工具，选择三角形的隶属函数。并根据论域的选择，确定了各个模糊控制器的隶属函数形状。

(1) 煤气调节模糊控制器的隶属函数

(a) 热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 的论域范围为 $(-4,4)$ ，其隶属函数如图 3.5 所示。

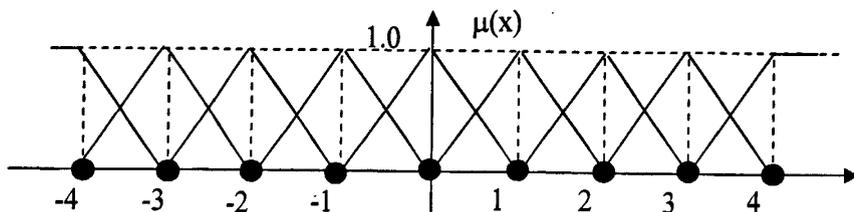


图 3.5 拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 隶属函数曲线

Fig 3.5 Subjection function curve of the top temperature

对应的隶属度函数赋值如表 3.4 所示。

表 3.4 拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 的隶属度赋值表

Table 3.4 Subjection function table of the top temperature

E	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
PS+	0	0	0	0	0	0	1	1	0
PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NS+	0	1	1	0	0	0	0	0	0
NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) 拱顶温度采样周期内温度的变化率 ΔT 的论域为 $(-0.4,+0.4)$,其隶属函数如图 3.6 所示。

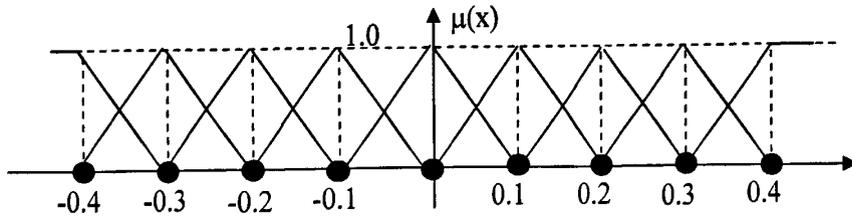


图 3.6 拱顶温度采样周期内温度的变化率 ΔT 隶属函数曲线

Fig 3.6 Subjection function curve of the top temperature change velocity

对应的隶属函数赋值如表 3.5 所示：

表 3.5 拱顶温度采样周期内温度的变化率 ΔT 的隶属度赋值表

Table 3.5 Subjection function table of the top temperature change velocity

EC	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4
PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
PS+	0	0	0	0	0	0	1	1	0
PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NS+	0	1	1	0	0	0	0	0	0
NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0

(c) 煤气调节模糊控制器输出量为 U , 论域范围为 $(-400,400)$, 其隶属函数如图 3.7 所示。

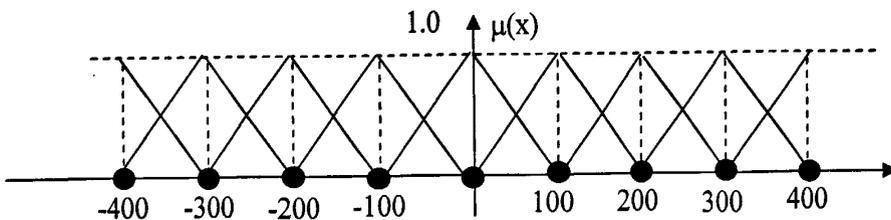


图 3.7 图 3.7 煤气调节模糊控制器输出量 U 隶属函数曲线

Fig 3.7 Subjection function curve of the output of coal gas fuzzy controller

对应的隶属函数赋值表 3.6 所示：

表 3.6 煤气调节模糊控制器输出量 U 的隶属度赋值表

Table 3.6 Subjection function curve of the output table of coal gas fuzzy controller

EC	-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400
PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
PS+	0	0	0	0	0	0	1	1	0
PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NS+	0	1	1	0	0	0	0	0	0
NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0

(2) 空气调节模糊控制器的隶属函数

(a) 实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E 的论域范围为 $(-0.4, +0.4)$ ，其隶属函数如图 3.8 所示。

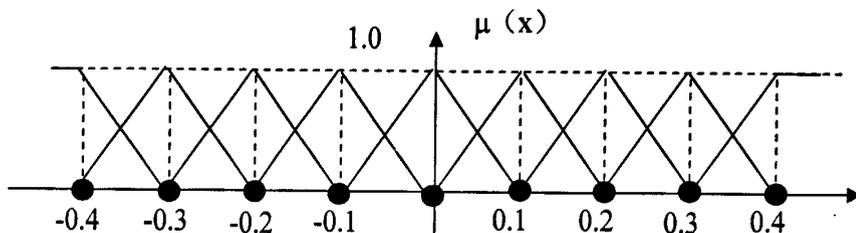


图 3.8 实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E 隶属函数曲线

Fig 3.8 Subjection function curve of content of exhaust gas in fact and standarence

对应的隶属函数赋值表 3.7:

表 3.7 实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E 的隶属度赋值表

Table 3.7 Subjection function table of content of exhaust gas in fact and standarence

E	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4
PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
PS+	0	0	0	0	0	0	1	1	0
PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NS+	0	1	1	0	0	0	0	0	0
NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) 废气含氧量的变化速率 EC 的论域为 $(-0.4, +0.4)$ ，其隶属函数及赋值表拱顶温度的变化率相同，详见图 3.6 和表 3.5 所示。

(c) 空气调节模糊控制器输出量为 U ，论域范围为 $(-400, +400)$ ，隶属函数及赋值表与煤气调节模糊控制器输出量相同，详见图 3.7 和表 3.6 所示。

第四章 模糊控制器的实现

4.1 引言

前面对热风炉自动燃烧系统的煤气调节和空气调节两个模糊控制器进行了理论上的设计，本章将介绍如何实现这个模糊控制器。

实现整个系统包括两个方面的内容，一是自动燃烧系统控制系统物理结构的搭建，再有就是自动燃烧系统控制程序的编程。

首钢三高炉的计算机控制系统为以 PLC 为主的集散控制系统，生产部分的联网方式为专用工业局域网，使用的协议为 MODBUS PLUS 工业局域网协议。数据处理及管理部分为星型局域以太网，使用 TCP/IP 协议，做为首钢炼铁厂生产信息管理系统的一个子网。生产的专用工业 MODBUS PLUS(MB+)网通过专用的数据处理机为管理信息系统提供生产过程数据^[30]。

热风炉自动控制系统是整个高炉生产 MB+网的一个节点，包括上位监控系统三套，PLC 三套。主要功能及分布情况如图 4.1 所示。

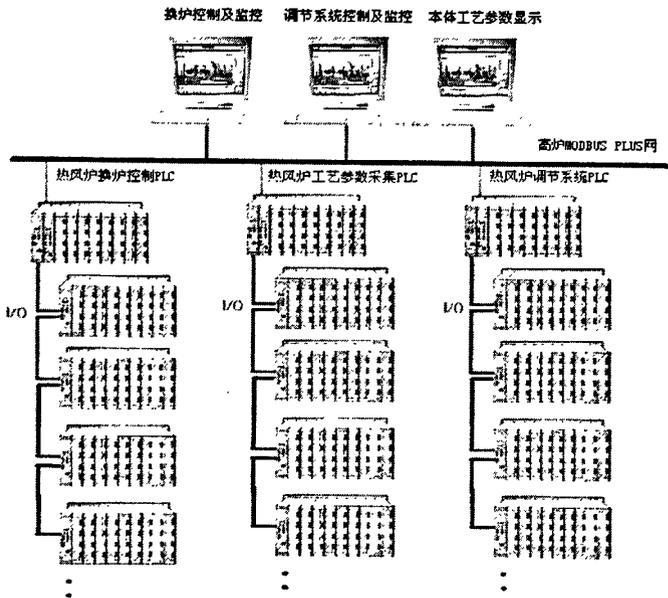


图 4.1 热风炉计算机控制系统结构图

Fig 4.1 Computer network structure of the blast furnace

新的自动燃烧系统就是建立在原有的热风炉计算机控制系统上的。在原来的 MODBUS PLUS 网上新增加上位监控系统一套，作为自动燃烧系统的监视和控制系统。利用原来热风炉调节系统的 PLC，重新编制控制程序，模糊控制器的主要功能由其来实

现，自动燃烧系统的硬件结构图如图 4.2 所示。

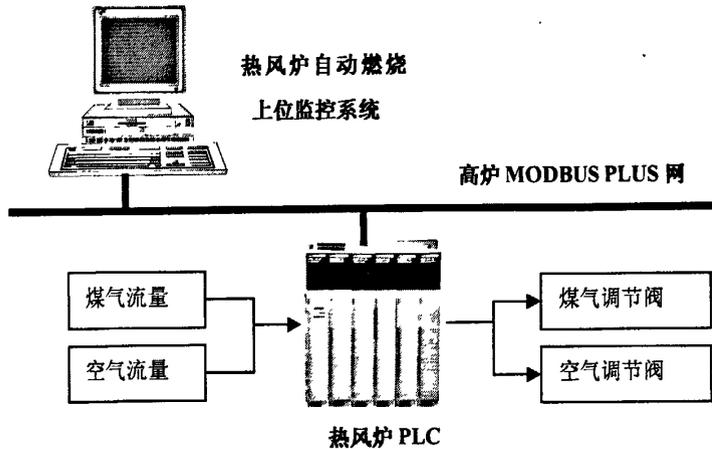


图 4.2 自动燃烧系统硬件原理结构图

Fig 4.2 The hardware structure of auto burning system

原来控制系统的上位监控软件选用的是 Intellution 公司的 iFIX 软件，该监控软件开发出的监视界面优美，而且还嵌套 VBA 编程功能，同时为了使用及维护上的方便，自动燃烧系统仍选用该监控软件。

原来的 PLC 为施耐德电气公司 Quantum 434 12A 系列，为大规模高级机型。为了在改造的同时不影响原来正常的操作，因此新编的程序仍然利用原 PLC。

Quantum 434 12A 系列 PLC 使用 Concept 组态编程软件，该软件是符合可编程序控制器的世界标准 IEC 1131，提供了大量集成的逻辑功能程序包，可以开发各种结构和用途的程序。特别是在其提供的程序包库中包含 Fuzzy 功能块包库，其中有许多可供使用的 Fuzzy 功能，更加便于开发基于模糊控制思想的控制程序^[31]。

但是，由于 PLC 可供使用的程序存储器容量是有限的，模糊控制器的推理计算过程较为复杂，所有的模糊控制器功能全部利用 PLC 提供的 Fuzzy 程序包是不行的。为此，只把过程数据的模糊化处理，模糊控制器以外的其他逻辑功能，以及模糊控制器输出控制结果的反模糊化等功能利用 PLC 来完成。而将模糊控制器的推理过程（运算过程）转移到自动燃烧系统的上位监控系统来完成^[32]。

由于上位监控软件嵌套 VBA 编程功能，这就为模糊控制器的推理的实现提供了极为便利的手段。在 VBA 语言中，可以直接访问现场的过程数据，也可以对访问到的过程数据进行处理，并且将处理后的结果输出反馈给下位 PLC，从而参与完成整个的过程控制。自动燃烧系统的功能结构如图 4.3 所示。

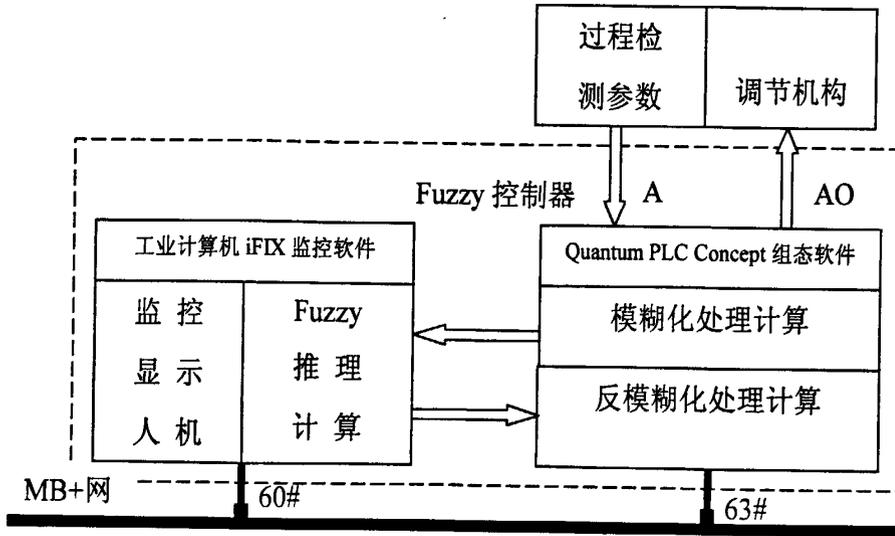


图 4.3 自动燃烧系统功能结构图

Fig 4.3 Function structure of the auto burning system

4.2 模糊控制器推理程序的开发

根据自动燃烧系统功能结构的划分，整个模糊控制器的推理计算完全由上位监控系统完成。iFIX 监控软件是基于面向对象技术的图形监控界面开发软件，它内嵌面向对象的开发工具语言 VBA，任何在 iFIX 软件下开发的图象，动画，数据链接等都可直接调用和处理其后台脚本。利用这一特点，可以在软件提供的现有功能的基础上，开发出更多的用户需要的新的功能，也可以对软件现有的功能进行必要的扩充开发。

模糊控制器推理计算程序的总体思路如图 4.4 所示。

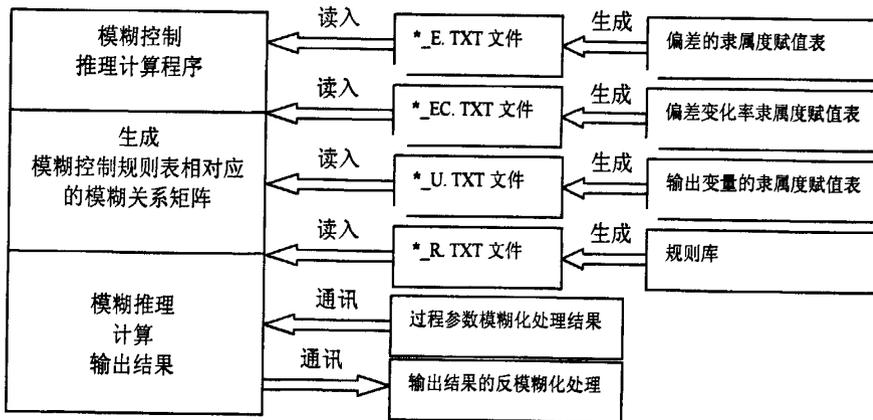


图 4.4 模糊控制器推理计算程序的总体思路

Fig 4.4 Collectivity method of fuzzy controller

后台运行的模糊控制推理程序的处理过程如下：

首先将两个模糊控制器的输入和输出变量的隶属函数赋值表（如第二章）分别生成

相应的文本文件，如输入变量 1，生成*_E.TXT；输入的第二个变量生成*_EC.TXT，输出变量生成 *_U.TXT。这样处理的目的是为了简化上位系统的标签数量和上位软件与下位 PLC 之间的通讯。如一号热风炉煤气调节模糊控制器的输入变量 1 的模糊变量的隶属度赋值表对应的文本文件为 DATA11_E.TXT，其内容如图 4.5 所示。

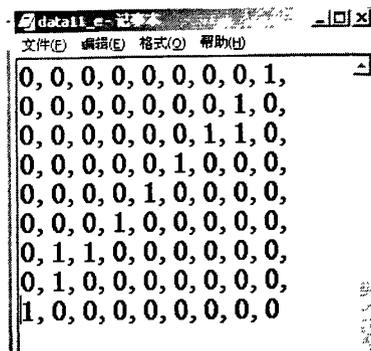


图 4.5 模糊变量的隶属度赋值表对应的文本文件

Fig 4.5 The file of subjection of fuzzy variable

为了程序处理的便利，将各个模糊控制器的规则表进行相应的变换，生成规则表文件*_R.TXT，变换的方法为将语言变量{PB+,PB,PM,PS,0,NS,NM,NB,NB+}用数字数组来代表，表示为{8,7,6,5,4,3,2,1,0}，相应的一号热风炉煤气调节模糊控制器有的规则表可以表示如图 4.6 所示。



图 4.6 模糊控制器有的规则表对应的文本文件

Fig 4.6 The file of fuzzy controller rules

将监控系统的主画面作为监控系统的启动画面，同时编辑画面的 VBA 脚本，编写画面启动时的初始化事件程序。程序主要的任务是从各个模糊控制器的输入输出变量的文本文件读入各个模糊控制器的模糊变量隶属度赋值表到相应的数组变量中，然后按照

模糊关系的推理方法生成相应的规则库。由规则表可以看到，模糊控制规则表实际是由 9×9 条模糊规则组成的，比如第一条模糊控制规则可以表示为：

$$\text{If } E = NB+ \text{ and } EC = PB+ \text{ then } U = Z$$

与上述条件语句对应的模糊关系矩阵可以按照下面的方法计算：

第一步：从煤气调节模糊控制器的输入变量 1 的隶属函数赋值表中取出 $NB+$ 对应的向量，定义为 A ；

第二步：从煤气调节模糊控制器的输入变量 2 的隶属函数赋值表中取出 $PB+$ 对应的向量，定义为 B ；

第三步：求取 $A \times B$

第四步：将 $A \times B$ 运算后生成的向量按照行展开，并将展开以后的向量定义为 R ；

第五步：从煤气调节模糊控制器的输出变量的隶属函数赋值表中取出 Z 对应的向量，定义为 C ；

第六步：求取 $R_i = R \times C$ ；

同理，可以求取另外 80 条模糊控制语句相对应的模糊关系矩阵 $R_2, R_3, R_4, \dots, R_{81}$ 。最后，根据上述已知的 $R_i, i = 1, 2, 3, \dots, 81$ ，可求得与模糊控制规则表相对应的模糊关系矩阵，即

$$R = \bigcup_{i=1}^{81} R_i \tag{4.1}$$

然后按照模糊关系的直积运算法则（取小法则）计算。计算的过程为^[33]：

(1) 读取各个模糊控制器的输入变量，输出变量和规则赋值表对应的文本文件中的数据到相应的数组中。如一号热风炉煤气调节模糊控制器的输入变量，输出变量和规则赋值表中的数据分别读入数组 $FZ11_E(i, M)$ ， $FZ11_EC(i, M)$ 和 $FZ11_U(i, M)$ ， $FZ11_R(i, M)$ 中，其中 i, M 分别取值 0 到 8。

(2) 求取 $E \times EC$ ，按照取小的计算原则用 E 的每一列分别与 EC 的所有元素进行取小操作，结果作为新生成数组 $fz11_e_c(c, d)$ 的一行，其中 c, d 的取值分别为 0 至 8，数组为 9 乘 9 方阵。

(3) 求取该模糊控制语句对应的模糊关系矩阵，按照取小的原则用 $fz11_e_c(c, d)$ 的所有元素分别与控制量对应的向量进行操作，结果生成新的数组 $fz11_e_c_u_m(y, m)$ ，其中， y 取值为 0 至 81， m 取值为 0 至 8，为 81 行 9 列数组，此为规则 1 所对应的模糊关系矩阵。同理可以求得另外 80 条规则所对应的模糊关系矩阵。求模糊控制规

则表对应的模糊关系矩阵。对所有各条规则计算出来的模糊关系矩阵按照对应元素取大的原则进行操作,最后生成模糊控制规则表对应的模糊关系矩阵 $fz11_e_c_u_m_n(w, z)$ 。其中 w 取值为 0 至 80, z 取值为 0 至 8。

(4) 在求得模糊关系矩阵之后,利用双输入单输出模糊控制算法可以求得在输入 E^* 和 EC^* 作用下的输出模糊向量,再利用“最大隶属度的方法”进行非模糊化处理,可以得到精确的输出。具体处理过程如下:

(a) 利用 Concept 软件提供的模糊化功能包直接对所确定的模糊控制器输入信号进行模糊化处理,并即将处理的结果通过通讯的方式传送至上位软件的标签库中。

(b) 上位监控系统接受到输入信号的模糊化结果后,分别存储在相应的数组中,然后按照取小的原则进行运算,生成数组 $fz11_in11(k)$ 。

(c) 按照取大的原则,在输入信号 1 和 2 的时候,计算相应的输出向量。并将输出向量赋值给标签库中对应的标签,传送给 PLC。

(d) 利用 Concept 中的反模糊化处理功能包,按照加权平均的方法将模糊的输出转化为精确的物理量。

4.3 模糊控制器的部分功能在 PLC 中的开发

在 PLC 中,为了实现热风炉自动燃烧系统的煤气调节和空气调节两个模糊控制器,需要使用 PLC 本身的组态软件完成相关的过程参数模糊化处理的功能,并将数据传送给上位监控系统。同时,还要将上位系统模糊推理的结果进行反模糊化处理的功能,并将这个结果作用于实际的输出。除此以外,下位控制程序还要完成自动燃烧系统与手动烧火系统的转换,相关的连锁,保护,报警等功能。下面就相关的内容作详细的介绍。

4.3.1 Concept 组态软件中 Fuzzy 模糊库介绍

在 Concept 组态软件中,为模糊控制这种控制方式提供了较为完善的功能包。在开发模糊控制器的时候,可以根据需要选用其中的功能块,实现模糊控制的相关功能。在 Concept 组态软件中 Fuzzy 模糊函数库包含的功能块如表 4.1 所示。

在使用 Concept 组态软件提供的各种 Fuzzy 功能块的时候,要注意区分所要处理的数据类型是使型数据还是整形数据,如果是整形数据,算法中成员的隶属度的单位为 0.01%,所以,正常的隶属度的范围是 0-1 在这时就被调整为 0-10000。当模糊控制应用在物理过程的控制中时,一般使用实形算法,隶属度的范围为 0-1,在执行的速度上,

实形算法要快于整形算法。

表 4.1 Concept 组态软件中 Fuzzy 模糊函数库包含的功能块

Table 4.1 The fuzzy function block list of Concept software

类别	名称	描述
模糊化	FUZ_STERM_INT, FUZ_STERM_REAL	对一个精确值进行模糊化处理
模糊化	FUZ_ATERM_INT, FUZ_ATERM_REAL	同时对九个精确值进行模糊化处理
模糊化	FUZ_ATERM_STI, FUZ_ATERM_STR	同时对九个精确值进行模糊化处理, 并将模糊化处理结果存储在结构化数据中.
模糊推理	FUZ_MAX_INT, FUZ_MAX_REAL	OR 操作, 取隶属度最大值
模糊推理	FUZ_MIN_INT, FUZ_MIN_REAL	AND 操作, 取隶属度最小值
模糊推理	FUZ_SUM_INT, FUZ_SUM_REAL	OR 操作, 取隶属度之和
模糊推理	FUZ_PROD_INT, FUZ_PROD_REAL	AND 操作, 取隶属度之积
反模糊化	DEFUZ_INT, DEFUZ_REAL	对模糊推理的结果进行反模糊化处理
反模糊化	DEFUZ_STI, DEFUZ_STR	对模糊推理的结果进行反模糊化处理, 模糊处理的结果来自结构化数据.

下面就本课题中涉及到的功能块的使用原理分别简单介绍一下:

(1) 模糊化功能块 FUZ_STERM_***: 对一个精确值进行模糊化处理

该功能块将一个精确量做为输入, 将该精确量对应所选择的隶属函数的隶属度在输出端显示. 对于整形数据, 其输入和输出的数据范围是 1 ... 10000, 对实形数据为 0 ... 1.

该功能块所确定的隶属函数形状取决于 S1,S2,S3,S4 四个输入点数据的选择, 其输入端数据的个数可以由 2 到 4 个可选, 2 个输入点实现了斜坡函数功能, 3 个输入点实现了三角函数功能, 4 个输入点实现了梯形函数功能, 不同的初始化点决定了该功能块所能执行的动作. 输入信号的数量可以改变功能块的结构而增加道最大 4 个, 如表 4.2 所示.

表 4.2 FUZ_STERM_***功能块的功能说明

Table 4.2 The function introduce of FUZ_STERM_*** block

隶属函数	选择输入点数	信号条件
下降斜线	2	S2<S1
上升斜线	2	S1<S2
三角形	3	S1<S2<S3
梯形	4	S1<S2<S3<S4

不同的输入信号选择可以实现不同的隶属函数形状，其原理如下：

隶属函数形状：下降斜率函数

输入信号条件： $S_2 < S_1$ ，如图 4.7 所示。

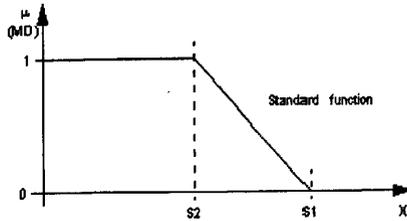


图 4.7 下降斜率隶属函数

Fig 4.7 Falling ramp function

隶属函数形状：上升斜率函数

输入信号条件： $S_2 > S_1$ ，如图 4.8 所示。

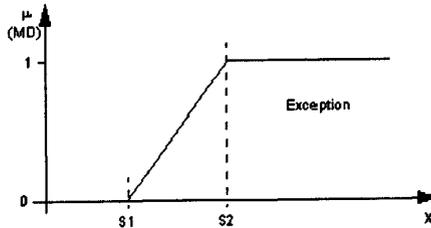


图 4.8 上升斜率隶属函数

Fig 4.8 Rising ramp function

隶属函数形状：三角形函数

输入信号条件： $S_1 < S_2 < S_3$ ，如图 4.9 所示。

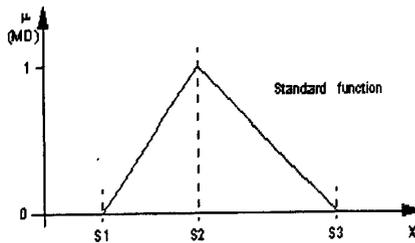


图 4.9 三角形隶属函数

Fig 4.9 Triangle function

隶属函数形状：下降斜率函数

输入信号条件： $S_2 < S_3$ and $S_1 > S_2$ ，如图 4.10 所示。

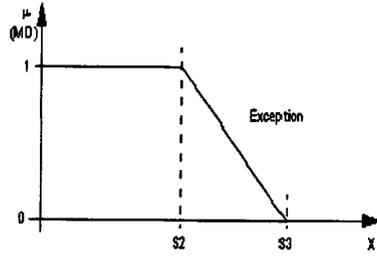


图 4.10 下降斜率隶属函数

Fig 4.10 Falling ramp function

隶属函数形状：上升斜率函数

输入信号条件： $S1 < S2$ and $S3 < S2$ ，如图 4.11 所示。

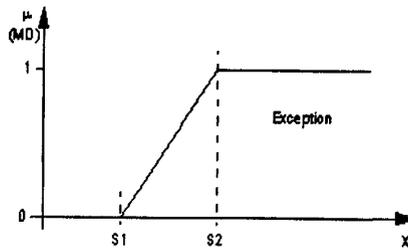


图 4.11 上升斜率隶属函数

Fig 4.11 Rising ramp function

隶属函数形状：梯形函数

输入信号条件： $S1 < S2 < S3 < S4$ ，如图 4.12 所示。

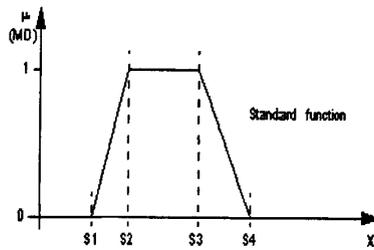


图 4.12 梯形隶属函数

Fig 4.12 Trapezoid function

隶属函数形状：三角形函数

输入信号条件： $S1 < S2 < S4$ and $S3 \leq S2$ ，如图 4.13 所示。

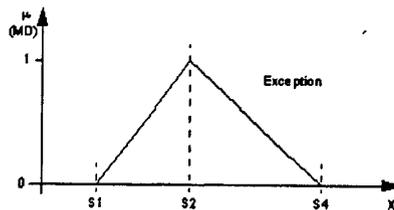


图 4.13 三角形隶属函数

Fig 4.13 Triangle function

隶属函数形状：下降斜率函数

输入信号条件： $S2 = S3 < S4$ and $S1 > S2$ ，如图 4.14 所示。

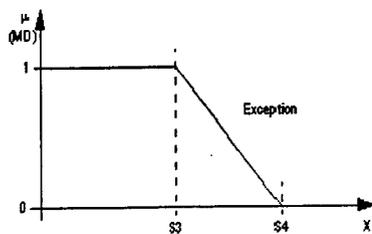


图 4.14 下降斜率隶属函数

Fig 4.14 Falling ramp function

隶属函数形状：上升斜率函数

输入信号条件： $S1 < S2 \leq S3$ and $S4 < S3$ ，如图 4.15 所示。

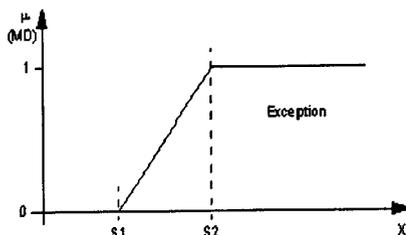


图 4.15 上升斜率隶属函数

Fig 4.15 Rising ramp: function

隶属函数形状：矩形函数

输入信号条件： $S1 = S2 < S3 = S4$ ，如图 4.16 所示。

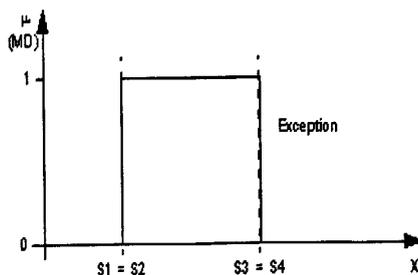


图 4.16 上升斜率隶属函数

Fig 4.16 Rectangle: function

隶属函数形状：单独点函数

输入信号条件： $S1 = S2 = S3 = S4$ ，如图 4.17 所示。

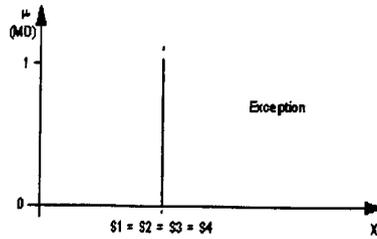


图 4.17 单独点隶属函数

Fig 4.17 Singleton: function

该功能块在 Concept 软件中的符号表示如图 4.18 所示。

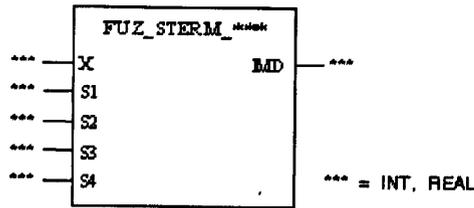


图 4.18 功能块在 Concept 软件中的符号表示

Fig 4.18 Symbol Figure of function block

该功能块输入输出信号的类型和意义如表 4.3 所示。

表 4.3 FUZ_STERM_***功能块输入输出信号的类型和意义

Table 4.3 The input/output signal types and means of FUZ_STERM_***block

参数	数据类型	含义
X	INT, REAL	输入的精确量
S1	INT, REAL	分割点 S1
S2	INT, REAL	分割点 S2
S3	INT, REAL	分割点 S3
S4	INT, REAL	分割点 S4
MD	INT, REAL	输出对应隶属函数的隶属度

(2) 反模糊化功能块 DEFUZ_STI, DEFUZ_STR: 带有各自独立点模糊度的反模糊化功能块

该功能块在语言上的条件由各个单独的设定点来代表，与取最大值的方法是相同的。各个单独位置的点通过 S1 ... S9 来定义，每一项的权值(term1 ... term9)由结构形数据 FUZ_MD_INT 来定义。对于整形数据，其隶属关系的程度范围是 0 ... 10000，对实形数据为 0 ... 1。输入信号的数量可以改变功能块的结构而增加到最大 9 个，这代表可以有 9 个信号的设定点。所有输入信号和输出信号的数据类型必须相同。有一个特殊的功能块可以用来处理不同的数据类型的输入。

功能块符号如图 4.19 所示。

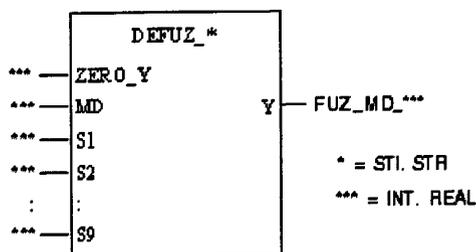


图 4.19 功能块在 Concept 软件中的符号表示

Fig 4.19 Symbol: Figure of function block

输入输出规则为:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n MD_i \times S_i}{\sum_{i=1}^n MD_i} \quad (4.2)$$

其中, n 为信号的设定个数; 首要工作条件: $2 \leq n \leq 9$, 输入输出信号的类型和意义如表 4.4 和表 4.5 所示。

表 4.4 DEFUZ_STI, DEFUZ_STR 功能块输入输出信号的类型和意义

Table 4.4 The input/output signal types and means of DEFUZ_STI, DEFUZ_STR block

参数	数据类型	含义
ZERO_Y	BOOL	为 0 时, 输出信号为最后一次扫描的值
MD	FUZ_MD_INT FUZ_MD_REAL	MD 成员 Term1-Term9 的隶属度
S1	INT, REAL	分割点 1
S2	INT, REAL	分割点 2
...
S9	INT, REAL	分割点 9
Y	INT, REAL	输出

结构化数据描述如表 4.5 所示。

表 4.5 DEFUZ_STI, DEFUZ_STR 功能块输入输出信号的类型和意义

Table 4.5 The input/output signal types and means of DEFUZ_STI, DEFUZ_STR block

成员	数据类型	含义
n	INT	数据项的个数
Term1	INT, REAL	成员项 Term1 的隶属度
...
Term9	INT, REAL	成员项 Term9 的隶属度

(3) 模糊推理功能块

(a) FUZ_MAX_INT, FUZ_MAX_REAL: 模糊取大

本功能块可以找出所以输入信号中的最大值，并将其在输出端显示。它可以处理的数据类型为整形和实形，对于整形数据，其输入和输出的数据范围是 1 ... 10000，对实形数据为 0 ... 1。输入信号的数量可以改变功能块的结构而增加道最大 32 个。

功能块符号如图 4.20 所示。

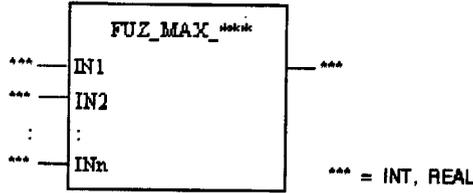


图 4.20 功能块在 Concept 软件中的符号表示

Fig 4.20 Symbol: Figure of function block

输入输出规则为：

$$OUT = MAX(0, IN_1, IN_2, \dots, IN_n) \tag{4.3}$$

输入输出信号的类型和意义如表 4.6 所示。

表 4.6 FUZ_MAX_INT, FUZ_MAX_REAL 功能块输入输出信号的类型和意义
Table 4.6 The input/output signal types and means of FUZ_MAX_INT, FUZ_MAX_REAL block

参数	数据类型	含义
IN1	INT, REAL	第一个输入值
IN2	INT, REAL	第二个输入值
...
INn	INT, REAL	第 n 个输入值
OUT	INT, REAL	输出

(b) FUZ_MIN_***: 模糊取小

本功能块可以找出所以输入信号中的最小值，并将其在输出端显示。它可以处理的数据类型为整形和实形，对于整形数据，其输入和输出的数据范围是 1 ... 10000，对实形数据为 0 ... 1。输入信号的数量可以改变功能块的结构而增加道最大 32 个，功能块符号如图 4.21 所示。

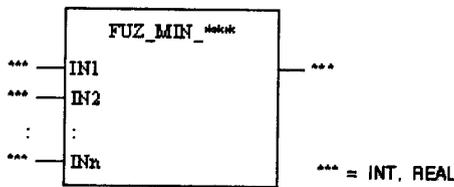


图 4.21 功能块在 Concept 软件中的符号表示

Fig 4.21 Symbol: Figure of function block

输入输出规则为：

$$REAL : OUT = MIN(1, IN_1, IN_2, \dots, IN_n) \tag{4.4}$$

$$INT : OUT = MIN(10000, IN_1, IN_2, \dots, IN_n) \tag{4.5}$$

输入输出信号的类型和意义如表 4.7 所示。

表 4.7 FUZ_MIN_*** 功能块输入输出信号的类型和意义
Table 4.7 The input/output signal types and means of FUZ_MIN_*** block

参数	数据类型	含义
IN1	INT, REAL	第一个输入值
IN2	INT, REAL	第二个输入值
...
INn	INT, REAL	第 n 个输入值
OUT	INT, REAL	输出

4.3.2 利用 Fuzzy 库实现模糊控制

前面详细介绍了 Concept 软件 Fuzzy 功能库中所提供用于模糊控制功能的功能块，利用这些功能块，解决了自动燃烧系统模糊控制器的过程检测量的模糊化处理，模糊控制器输出控制量的反模糊化处理以及如何将这些模糊推理的结果作用于实际的调节阀的输出等工作。下面，就相关的内容进行介绍。

(1) 过程精确物理量的模糊化处理

由于煤气调节模糊控制器的输入变量为热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 和采样周期内温度的变化率 ΔT ，空气调节模糊控制器的输入变量为实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E 和废气含氧量的变化速率 EC ，所以需要将这四个物理量进行模糊化处理。

综合考虑 PLC 的扫描时间以及流量变化与拱顶温度和废气含氧量的变化的先后关系，确定煤气调节模糊控制器和空气调节模糊控制器的采样周期均为 2 分钟。

根据选定的煤气调节模糊控制器和空气调节模糊控制器的隶属函数曲线，确定选用 FUZ_STERM_REAL 模糊化功能块来进行模糊化处理。

下面以热风炉煤气调节模糊控制器的输入信号之一拱顶温度为例，详细说明模糊化和反模糊化的具体实现过程。

由前面对该模糊控制器的设计，该输入信号的论域范围为 $(-4,4)$ ，按照模糊变量子集和模糊语言变量的设计，将论域范围 $(-4,4)$ 进行离散化处理，这里离散化为 8 个区间，即：

$$X = \{-4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4\} \tag{4.6}$$

由隶属函数曲线可以看出，在区间 $[-4, +4]$ 上，其隶属函数由一个上升沿函数，一个下降沿函数和七个三角形函数组成。按照 Concept 软件中 FUZ_STERM_REAL 功能块实现上升沿函数，下降沿函数和三角形函数的方法，分别对该功能块的输入端 S1, S2, ... 等进行不同的取值，分别实现相应的隶属函数曲线。下降沿函数的方法，当取 $S_{11}=-3, S_{12}=-4$ ，可以实现下降沿的隶属函数，如下图 4.22 所示，当取 $S_{91}=4, S_{92}=3$ ，可以实现上升沿的隶属函数，如下图 4.23 所示。

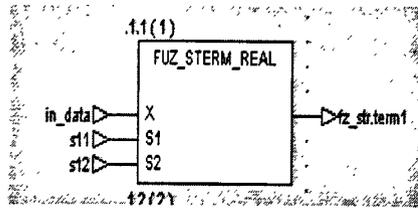


图 4.22 下降沿隶属函数的实现

Fig 4.22 Falling ramp function

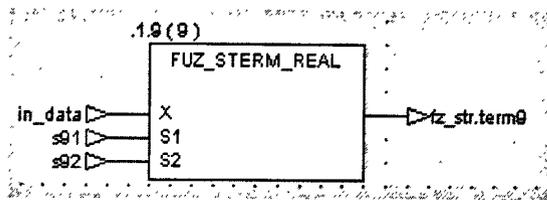


图 4.23 上升沿隶属函数的实现

Fig 4.23 Rising ramp function

同理，分别按照论域内的各个取值点以及三角函数所处的位置，分别确定各个三角形函数的参数，如下图为 FUZ_STERM_REAL 功能块实现一个三角形函数的方法，其中所 $S_{31} < S_{32} < S_{33}$ ，如图 4.24 所示。

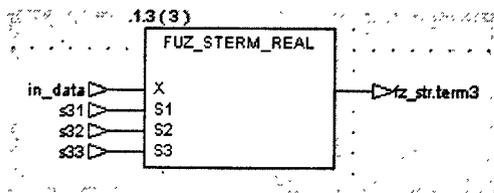


图 4.24 上升沿隶属函数的实现

Fig 4.24 Triangle function

为了编程的方便，设计了用户自定义功能块 FZ_FUZ，其中包含一个上升沿函数，一个下降沿函数和 7 个三角形函数，实现整个隶属函数的刻画。FZ_FUZ 功能块如图 4.25 所示。

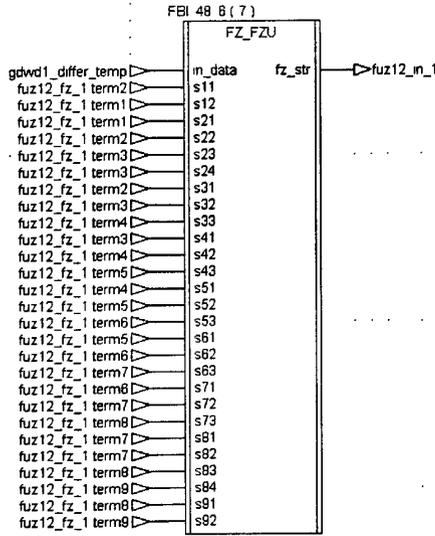


图 4.25 实现整个隶属函数的用户自定义功能块

Fig 4.25 user define function block realization Subjection function

该功能块输入输出信号的含义如下：

(a) `dwd1_differ_temp`: 热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T

(b) `fuz12_fz_1.term1-fuz12_fz_1.term8`: 是由模糊控制器输入变量的论域所确定的模糊语言变量的具体数据，是由设计人员由上位软件界面输入的。

(c) 输出信号端为数组 `fuz12_in_1`，其包含 `term1-term9` 九个成员，可以存储物理量进行模糊化处理以后的结果。这个结果通过通讯的方式传输到上位系统的标签库中。上位系统可以直接使用。

同理，输入信号之二的拱顶温度采样周期内温度的变化率 ΔT 进行反模糊化处理，根据前述设计，其论域为 $(-0.4,+0.4)$ ，进行离散化处理，这里离散化为 8 个区间，即：

$$X = \{-0.4,-0.3,-0.2,-0.1,0,+0.1,+0.2,+0.3,+0.4\} \quad (4.7)$$

由隶属函数曲线看出其隶属函数由一个上升沿函数，一个下降沿函数和七个三角形函数组成。按照处理输入信号之一的方法，采用同样的功能块，进行模糊化处理。

空气调节模糊控制器输入变量的模糊化处理过程与煤气调节模糊控制器输入变量的模糊化处理过程完全相同，不再详细说明了。

(2) 模糊控制器输出结果的反模糊化处理

经过上位监控软件模糊推理过程的计算，产生模糊控制器的输出结果，并保存在相关的标签变量中，通过通讯的方式传送至下位 PLC 程序的变量中，并保存在数组 `fuz_dfz_out_1` 中，数组 `fuz_dfz_out_1` 包含 `fuz_dfz_out_1.term1-fuz_dfz_out_1.term9` 九个成员，分别表示控制器输出在隶属函数不同位置上的隶属度，此数组作为反模糊化功能

块的输入信号。

根据前面我们就煤气调节模糊控制器的设计，输出量 U 的论域范围为 $(-400,400)$ ，其隶属函数由一个上升沿函数，一个下降沿函数和七个三角形函数组成。将其进行离散化处理为 8 个区间，即：

$$X = \{-400, -300, -200, -100, 0, +100, +200, +300, +400, \} \quad (4.8)$$

根据离散化的结果，可以确定反模糊化功能块的 S1-S9 的输入值。为了操作上的方便，这些数值由上位监控界面输入，通过通讯的方式传送至下位 PLC 的程序变量中，保存在数组 `fuz_fz_u_1` 中，数组 `fuz_fz_u_1` 包含 `fuz_fz_u_1.term1-fuz_fz_u_1.term9` 九个数据成员。

根据 Concept 软件中反模糊化功能块的用法，选用 DEFUZ_STR 为反模糊化处理的功能块，如图 4.26 所示。

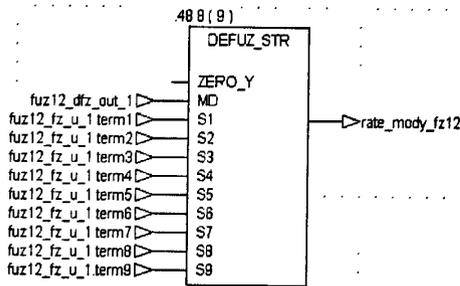


图 4.26 反模糊化处理使用的功能块

Fig 4.26 Defuzzifies disposal used defuzzifies block

该功能块输入输出信号的含义如下：

- (a) 输入信号为数组 `fuz_dfz_out_1`，其数据来源于上位监控软件计算的结果，其数据为一个数组，包含模糊控制器输出变量论域所确定的模糊语言变量的隶属度。
- (b) 输入信号 `fuz_fz_u_1.term1-fuz_fz_u_1.term9` 是由模糊控制器输出变量论域所确定的模糊语言变量的具体数据，是由设计人员由上位软件界面输入的。
- (c) 输出量 `rate_mody_fz12` 即为一个物理的精确量。

输入输出规则为：

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n MD_i \times S_i}{\sum_{i=1}^n MD_i} \quad (4.9)$$

(3) 模糊控制器输出信号的作用过程

下面介绍模糊控制器的输出结果如何实现对煤气理论调节阀和空气流量调节阀的控制。

以煤气调节模糊控制器为例，说明模糊控制器是怎样影响煤气流量调节阀的。模糊控制器的输出信号经过反模糊化处理后，其结果直接与当前的煤气调节阀阀位的输出信号相叠加，对实际的输出阀位进行修正。

煤气调节阀和空气调节阀选用的都是气动执行器，输入信号类型为 4-20MA 标准信号，控制信号由 PLC 系统的 AO 模块提供。在 PLC 中，AO 模块的处理精度为 12 位，对应的数字量位 0-4095。模糊控制器的输出论域为(-400,400)，其数值为数字量，在选定的周期内直接与当前阀位的数字量数值相叠加,如图 4.27 所示，VALVE_MQ_OUT_1 为煤气调节阀阀位输出的当前值，输出范围为 0-4095，ADD_REAL 为加法功能块，实现模糊控制器的输出与当前阀位值叠加的功能，SAMPLETM 为脉冲发生器，其脉冲的周期为 1 分钟，实现控制扫描周期的作用，AND_BOOL 为与功能块，连锁允许模糊控制器输出修改当前值信号。

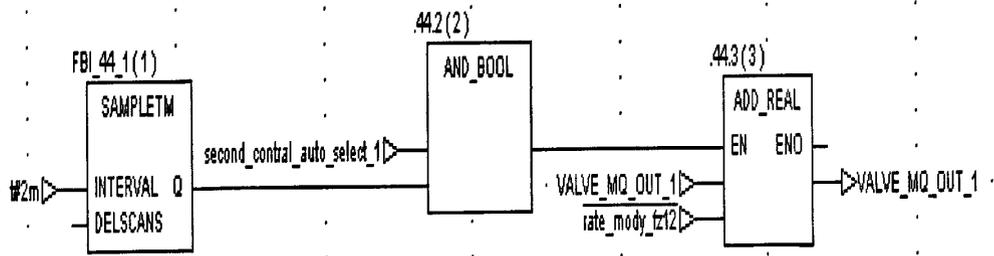


图 4.27 煤气调节模糊控制器对煤气流量调节阀的控制

Fig 4.27 The control to coal gas adjust valve from coal gas adjust fuzzy controller

需要注意的是，实际的控制程序并不是仅仅如此，现场的控制要求既要保证控制功能的实现，又要确保安全，因此，程序中连锁了阀位最大值与最小值限制等许多保护措施。其他相关功能的实现均在 PLC 中完成。

以上过程为煤气调节模糊控制器输入变量的模糊化和输出变量的反模糊化以及输出结果如何作用的全过程。空气调节模糊控制器与此相同，区别只是在论域的选择，离散点的确定以及扫描时间的不同等方面。

另外，热风炉由四座完全相同的单炉构成，在模糊控制器的设计和实现上完全相同。最大的区别在于由于各个气动执行机构的灵敏度不同，造成各个执行机构的扫描时间不同。

第五章 模糊控制器的现场调试

5.1 引言

在完成设计和具体编程的工作之后,就进入了更为关键的现场调试阶段。现场的调试工作主要完成两个方面的内容。一是调整所设计的两个模糊控制器的相关的参数,通过实际数据的输入和输出,检验模糊控制器的设计是否合理,能否满足工艺的需要;二是检验使用模糊控制器的自动燃烧系统的实际应用效果,并对比原来的调节系统,新的控制系统对提高风温,节约能源等方面的作用^[33]。

常规的模糊控制器有一些不足之处,比如系统的上升特性不理想,超调量大,调节时间长,甚至产生振荡,抗干扰能力差等。产生这些缺点的原因主要是常规的模糊控制器在结构上过于简单,在设计中包括不少主观因素,而且模糊控制器的规则确定后一般不再有变化。从模糊控制器的结构上看,影响控制器性能的主要环节有模糊语言值的选择,各语言值的隶属函数,模糊控制规则的因果关系,模糊规则的质量和数量,模糊推理和模糊判决方法以及比例因子和量化因子的选择等,这些问题的效果如何都有待于实际的调试^[34]。

对原有的控制系统进行了改造,采用模糊控制器分别控制煤气流量和空气流量。改造后实际的应用效果如何,能否满足实际生产对自动燃烧系统的要求,实现设计提出的目标,也是需要到现场调试时进行检验的。

5.2 燃烧过程不同阶段的控制目标

热风炉的整个燃烧过程实际上就是拱顶温度和废气温度的一个由低到高的升温过程。由于热风炉本身的特点,其拱顶温度和废气温度的上升又有其自身的特点。在燃烧期间拱顶温度和废气温度的变化曲线如图 5.1 和图 5.2 所示。从图中可以看出热风炉的燃烧过程可以明显的分为燃烧初期、蓄热期和蓄热饱和期三个阶段,根据各个阶段的不同特点,可以将自动燃烧的控制也分为三个阶段,即燃烧初期、蓄热期和蓄热饱和期。在不同的阶段,采用不同的控制方法^[35]。

(1) 燃烧初期

此阶段的主要目的是使拱顶温度按照规定的梯度快速上升,调节的特点是不断增大煤气流量,在此基础上,以拱顶温度的上升为参考,按照选定的空燃比例系数自动修正

空气流量。在保证燃烧充分的条件下，随着空气和煤气的不断增大，拱顶温度会快速上升。

一般情况下，燃烧初期的持续时间不超过 15 分钟，煤气流量由起始的 $5000\text{M}^3/\text{h}$ 到燃烧初期结束时最大为 $70000\text{-}80000\text{M}^3/\text{h}$ 左右，且煤气流量增加的过程为匀速上升过程，在煤气流量不断上升的同时，由空燃比自动计算的空气流量也不断上升。这样，在保证最佳燃烧效果的基础上使拱顶温度快速上升。在拱顶温度到达设定值后，转入蓄热期。

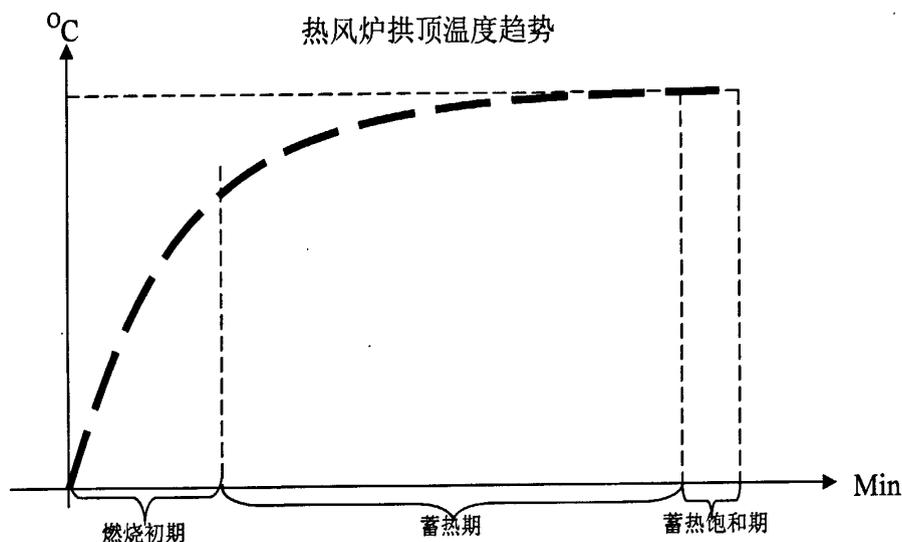


图 5.1 热风炉拱顶温度趋势曲线

Fig 5.1 The top temperature curve of the blaze furnace

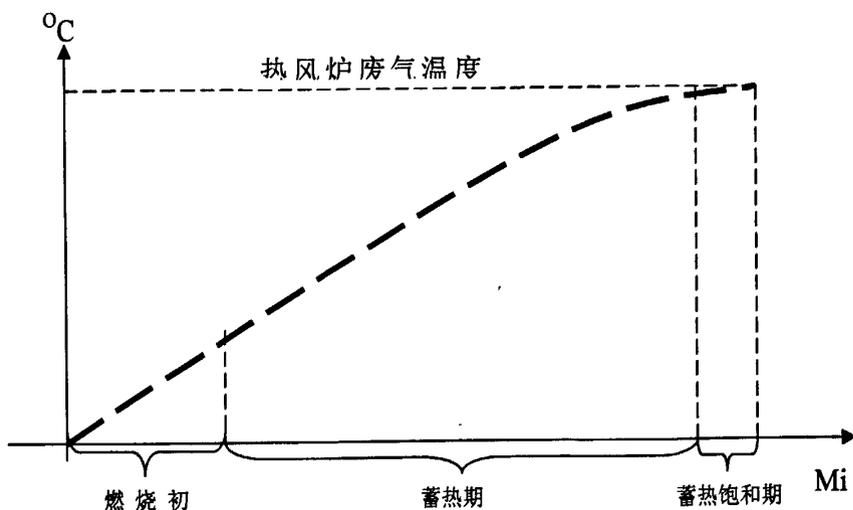


图 5.2 热风炉废气温度趋势曲线

Fig 5.2 The exhaust gas temperature curve of the blaze furnace

(2) 蓄热期

此阶段的主要特点是一方面拱顶温度继续不断升高，另一方面又与蓄热室的格子砖

热交换加剧,使其温度加速上升,随着蓄热室的温度的上升,废气的温度也不断升高。

调节的方式是:根据废气温度的变化情况修改燃烧初期结束时的最大煤气流量,如果废气温度升温较快,说明燃烧用空气流量较大,减小煤气流量设定值,空气流量相应减少,这样,在拱顶温度保持不变的情况下,废气温度的升速会下降。如果废气温度升温较慢,说明燃烧用空气流量较小,增大煤气流量设定值,空气流量相应增加,这样,在拱顶温度保持不变的情况下,废气温度的升速会上升^[36]。

这时,大量废气将热量带到蓄热室,随着蓄热室的温度的上升,废气的温度也不断升高,当废气温度达到设定值时,就进入了蓄热饱和期。

(3) 蓄热饱和期

当废气温度达到设定值后,生产人员可根据实际情况选择操作。如果结束燃烧,转入隔断,选择进入燃烧转隔断程序。如果继续烧火,则可以减少煤气流量设定值,以较少的能源维持拱顶温度,直到燃烧结束。

5.3 自动燃烧系统要实现的目标

热风炉自动燃烧控制系统投入后可以实现以下目标:

- (1) 燃烧实现全自动, 正常情况无人参与调节;
- (2) 控制性能良好, 控制精度高, 当负荷变化时, 系统的响应要快, 稳定性要好;
- (3) 燃烧合理, 节约能源;
- (4) 防止空气污染, 节约能源;
- (5) 确保安全生产, 防止事故发生;
- (6) 原手动调节与自动燃烧系统可以方便的切换。

5.4 模糊控制器的实际调试

从模糊控制器的结构上看,影响控制器性能的主要环节有模糊语言值的选择,各语言值的隶属函数,模糊控制规则的因果关系,模糊规则的质量和数量,模糊推理和模糊判决方法以及比例因子和量化因子的选择等。这些不但是在设计模糊控制器时需要重点考虑得问题,也是在实际调试模糊控制器的时候,主要需要调整和测试的内容^[37]。

(1) 模糊控制器控制规则完整性的测试

模糊控制器的控制规则是模糊控制器的核心。依据模糊控制器的控制规则,通过模糊推理,模糊关系的合成等一系列运算,最终获得一定的控制量。对模糊控制器的控制规则考察的主要内容包括控制规则的完整性,相容性和干涉性三个方面。

模糊控制器控制规则的完整性是指对任意的模糊输入，模糊控制器都能产生一个相应的控制量。即不允许出现有输入而无输出的情况发生。当模糊规则库不完整时，将发生匹配不能完成的情况，可导致不正确的输出，使控制性能恶化。

煤气调节模糊控制器的输入输出测试关系如表 5.1，表 5.2 所示。

表 5.1 煤气调节模糊控制器的输入输出测试关系表 1

Table 5.1 The input/output test result of the first table of coal gas fuzzy controller

精确值		400	300	200	100	0	-100	-200	-300	-400
拱顶温度 T	PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	PS+	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	NS+	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0
拱顶温度变化率 ΔT	PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	PS+	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	NS+	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0
输出变量 U	PB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	PB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	PS+	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	PS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	NS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	NS+	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	NB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	NB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1

通过上面的测试，在输出变量 U 论域(400, -400)的整个范围内，任意的输入均对应着一个单一的输出，因此，说明煤气调节模糊控制器的控制规则是完整的。

同理，对于空气调节模糊控制器，在输出变量 U 论域(400, -400)的整个范围内，任意的输入均对应着一个单一的输出，因此，说明空气调节模糊控制器的控制规则是完整的。

(2) 模糊控制器控制规则干涉性测试

若模糊控制规则之间存在相互干涉的化，则 X_i 对模糊关系 R 进行合成运算后得到的控制量不再等于 U_i 。亦即任意的一个模糊输入将不能够产生预料的控制输出结果，这是在设计模糊控制器的时候所不希望的。

那么，为保证控制规则之间不存在干涉作用，控制量 U 的各个模糊子集 U_i 不能太

精确，而且它们必须覆盖控制变量的整个论域空间。在确定输入变量的模糊语言值的隶属函数分布时，应尽量避免不同模糊子集之间重叠太多，也就是说，输入变量不能太“模糊”，否则，控制量 U 也因此会变得很“模糊”，最终导致它们不同语言值的隶属函数几乎相同。这意味着控制量无法传给多少有意义的信息，从而导致控制品质的降低。

表 5.2 煤气调节模糊控制器的输入输出测试关系表 2

Table 5.2 The input/output test result of the second table of coal gas fuzzy controller

精确值		200	150	100	50	0	-50	-100	-150	-200
拱顶温度 T	PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	PS+	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	NS+	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0
拱顶温度变化率 ΔT	PB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	PB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	PS+	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	PS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	NS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	NS+	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	NB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	NB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
输出变量 U	PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	PS+	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	PS	0	1	1	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	NS	0	0	0	0	0	1	1	1	0
	NS+	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	NB	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NB+	0	0	0	0	0	0	0	0	0

从煤气调节模糊控制器和空气调节模糊控制器的输入变量和输出变量的隶属函数曲线来观察，不存在模糊子集之间重叠过多的问题，因此也就大大消除了产生控制规则相互干涉的可能性。

通过实际测试，无论是煤气调节模糊控制器或者是空气调节模糊控制器，都不存在控制规则相互干涉的现象。

(3) 模糊控制器控制规则相容性测试

控制规则相容性是指模糊控制器控制规则的一致性，模糊控制规则的相容性对控制器的性能有较大影响。如果控制规则中有两条或两条以上的规则不相容，那么控制效果将变差，甚至出现无法预料的结果。对一组模糊控制规则，如果给定一个输入，结果产

生两组不同的,甚至是矛盾的输出,那么至少存在两条模糊规则,它们的前提部分相同或者相似,但结论部分却有很大的差别。

在建立模糊规则时,有必要深入考虑不同规则之间的相互关系,消除存在明显矛盾的规则,尤其是要注意前提部分的隐含情况。

通过对煤气调节模糊控制器和空气调节模糊控制器的控制规则实际应用,并观察相应的控制输出,没有发生不相容的问题。

(4) 量化因子和比例因子的调试

事实上,量化因子和比例因子在很大程度上影响模糊控制器的性能。取 $K_e = n/X_e$, $K_{ec} = n/X_{ec}$, 若误差量化因子 K_e 增大,缩小了误差的基本论域,则增大了误差的控制使用,使系统的调节死区变小,上升时间变短,但使超调增大,过渡过程也变长,严重时将产生振荡;误差变化量化因子 K_{ec} 变大,即缩小了误差变化的基本论域,则系统的上升时间变长,超调量减小,系统反应迟钝;反之,上升速率变大,系统反应灵敏,但过小将引起较大的超调,调节时间变长,严重时使系统振荡而不能稳定运行。

取 $K_u = y_u/l$, 比例因子 K_u 只起比例作用,它把根据 E 和 C 的值查模糊控制查询表而得出的控制量 U 转化为一个精确量 U 的作用。但和一般控制系统的比例增益不同,它一般不影响系统的稳态误差。 K_u 越大,系统上升越快。但过大将使超调量增大,甚至引起控制系统振荡而不能稳定运行。

由模糊控制器的设计,暂时将量化因子确定取 1,比例因子取 1。根据模糊控制器输入输出的关系,在观察实际的模糊控制器输出对煤气调节阀和空气调节阀修正作用的影响效果,量化因子取值 1 是合适的,比例因子取值 1 也是合适的。所以在调试时没有进一步的修改。

5.5 实现模糊控制后的效果

应用模糊控制的自动燃烧系统实际投入的使用后,无论从燃烧操作的简便性还是从节约能源,提高风温等方面较未改造前的控制系统都有了较大的改善和提高。下面就相关的情况分别给与详细的介绍。

(1) 简化燃烧操作

(a) 简化点火和停烧的操作过程

原来热风炉燃烧需要根据经验手动设定空气调节阀和煤气调节阀阀位,停烧时需要手动关闭煤气调节阀和空气调节阀。

现在采用自动燃烧系统后，在监控画面点击“投入自动燃烧”和“停烧”按钮即可。

点击“投入自动燃烧”按钮后，系统按照事先设定的煤气流量值和空燃比，按照先开空气后开煤气的原则。将煤气流量 \times 空燃比计算出来的数值做为调节系统空气流量的设定值，先开空气调节阀，待实际空气流量达到设定值后，自动将所设定的煤气流量做为调节系统煤气流量的设定值，再开煤气调节阀。调节阀阀位依设定值与过程值之差自动调节，直到达到预先的设定值为止。启动燃烧过程结束后，进入正常燃烧状态。

单击“停烧”按钮后，系统将按照先关煤气调节阀，再关空气调节阀的原则，先将煤气调节阀阀位自动设定为0；待实际煤气流量下降到0时，空气调节阀阀位自动设定为最小阀位5%，完成停烧过程。

(b) 简化和精确燃烧过程中煤气流量和空气流量的调节操作

原来在燃烧的过程中，要调节煤气流量和空气流量，需要手动改变煤气调节阀和空气调节阀的阀位，因为调节阀阀位与实际的流量之间没有严格的对应关系。想达到某个流量数值非常困难，要多次反复手动修正阀位输出，不但繁琐，而且效果不理想。

现在，投入自动燃烧系统后，阀位随实际流量值跟踪设定流量值自动修正，无需人工干预。如果需要修改煤气流量值，只需要在设定窗口以数字形式输入所需要的煤气流量值，实际煤气流量值自动会跟踪到设定值。如果需要改变空气流量值，只需要在空燃比设定窗口以数字形式输入所需要的空燃比，空气流量值按照煤气流量 \times 空燃比的关系自动修改设定值，实际空气流量值自动会跟踪到设定值。

下图 5.3 为输入煤气流量设定值和空燃比的窗体，操作人员可以非常方便的输入所需要的数据。

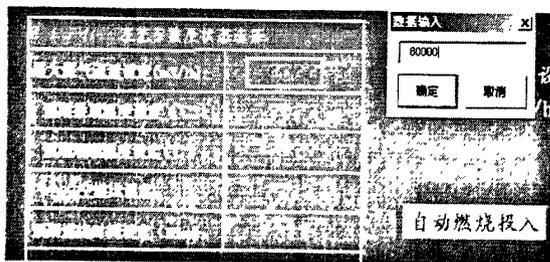


图 5.3 输入煤气流量设定值和空燃比的窗体

Fig 5.3 The form of input flux of coal gas and proportionment of air and coal gas

(2) 稳定燃烧过程

自动燃烧系统稳定了燃烧过程，体现在以下几个方面：

(a) 实现煤气和空气流量的精确控制及配比

原来系统需靠手动改变煤气和空气调节阀阀位设定煤气和空气流量，因为调节阀阀位与实际的流量之间没有严格的对应关系，煤气和空气的调节和配比根本无从谈起。

现在使用自动燃烧系统，操作人员可以方便地根据当时的工况，在设定窗口以数字形式输入所需要的煤气流量值，在空燃比设定窗口以数字形式输入所需要的空燃比，就可以便捷快速改变煤气和空气的设定值，实现煤气流量和空气流量的精确配比燃烧。

(b) 克服高炉煤气压力等外界干扰对煤气流量的扰动，稳定煤气和空气流量

在燃烧过程中，煤气和空气流量的稳定供给非常重要。原系统当煤气压力突变或者出现其他扰动时人为调节非常滞后，经常造成煤气流量的剧烈波动。从而影响燃烧过程的稳定，拱顶温度波动较大。原来煤气流量的最大波动在 $10000\text{M}^3/\text{min}$ 左右，如图 5.4 所示为 2#热风炉煤气流量和空气流量的实时显示曲线，其中蓝色曲线代表煤气流量，绿色曲线代表空气流量。在图中可以明显看到燃烧过程当中煤气流量的剧烈波动情况。

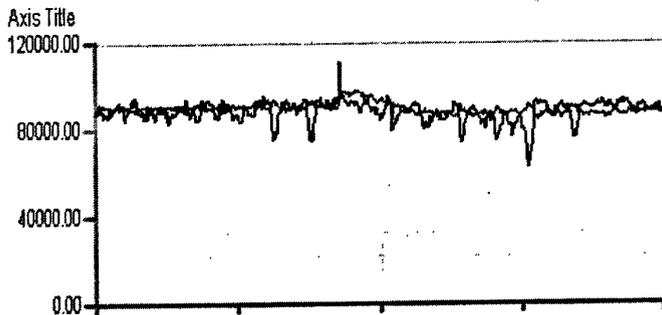


图 5.4 原来系统煤气流量和空气流量的实时显示曲线

Fig 5.4 The real time curve of coal gas and air in old system

现在自动燃烧投入后，调节的效果大大改善，减小了煤气流量和空气流量的波动，使得燃烧过程较为平稳。投入自动燃烧系统后，煤气流量和空气流量的波动范围明显减小，煤气流量的最大波动可以控制在 $3000\text{M}^3/\text{min}$ 左右，如图 5.5 所示为投入自动燃烧系统后，燃烧过程中煤气流量和空气流量的实时曲线，可以看到煤气流量的波动较小。

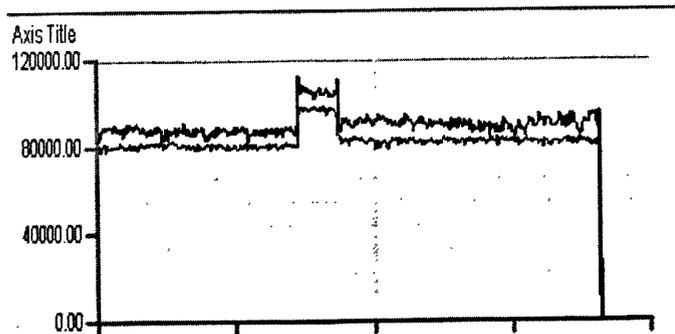


图 5.5 改造后煤气流量和空气流量的实时显示曲线

Fig 5.5 The real time curve of coal gas and air in new system

(c) 稳定残氧值

热风炉的废气含氧量是观察燃烧是否充分，配比是否合理的最直接的指标，残氧量指标的好坏可以直接说明热风炉燃烧过程稳定与否和燃烧质量的好坏。

原系统没有残氧控制，只是根据残氧值的变化手动改变空气或者煤气的流量，残氧值对烧火效果的修正作用极为有限。残氧值的变化范围达到 0.3%~3.5%。如图 5.6 所示，图中的红色曲线是 1#热风炉在投入空燃比自动修正之前的残氧量变化的曲线。

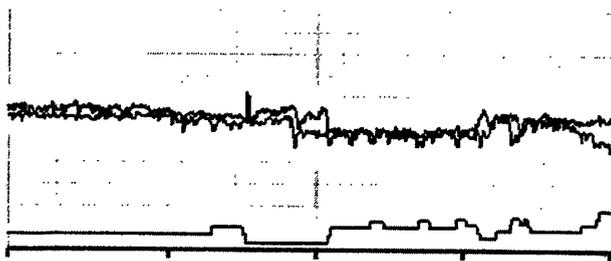


图 5.6 原来系统废气残氧量的实时显示曲线

Fig 5.6 The real time curve of exhaust gas oxygenous consistence in old system

现在的自动燃烧系统，根据实际残氧值与理想充分燃烧情况下的残氧值的差值变化，采用模糊控制技术，利用空气调节模糊控制器自动修正空气流量。由于对空气流量的及时、快速修正，使得参与燃烧过程的煤气流量和空气流量保持了最佳的配比，燃烧过程非常充分。热风炉残氧值的波动范围大大缩小，现在，残氧量变化范围能够控制在 1.4%-2.2%之间。图 5.7 中的红色曲线为空气调节模糊控制器自动修正空气流量后的残氧值曲线。

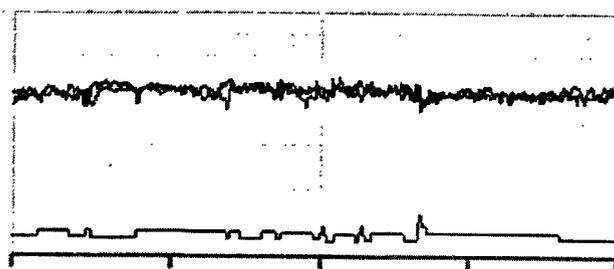


图 5.7 改造后废气残氧量的实时显示曲线

Fig 5.7 The real time curve of exhaust gas oxygenous consistence in new system

由于以上三个方面的改进，使得热风炉的燃烧效果明显改善，蓄热能力有了明显提高。

(3) 提高高炉风温

自动燃烧系统投入以来三高炉风温提高非常明显，对比情况如表 5.3:

表 5.3 三高炉风温指标情况的对比

Table 5.3 The temperature of hot wind of third blast furnace

月份	月平均风温(°C)	较上月提高或降低(°C)
3月	1088	
4月	1093	
5月	1097	
6月	1111	+14

(4) 节约能源

通过两个月三高炉使用焦炉煤气量和高炉煤气量的比较,焦炉煤气和高炉煤气的用量有了较大幅度的减少,使用自动燃烧系统节能效果非常明显。详见焦炉煤气和高炉煤气用量对比表 5.4 和 5.5。

表 5.4 三高炉焦炉煤气用量的对比情况

Table 5.4 The wastage of coking plant gas of third blast furnace of SG

月份	总耗用量 (万立方米)	日平均 (万立方米)	月较上月增加或 减少(%)	日较上月增加或 减少(%)
5月	244.6954	7.89		
6月	200.4958	6.68	-18.06	-15.34

表 5.5 三高炉高炉煤气用量的对比情况

Table 5.5 The wastage of blast furnace gas of third blast furnace of SG

月份	总耗用量 (万立方米)	日平均 (万立方米)	月较上月增加或 减少(%)	日较上月增加 或减少(%)
5月	9405.4850	303.4		
6月	8849.7045	294.99	-5.9	-2.8

第六章 总结

热风炉自动燃烧模糊控制器主要实现了以下的控制功能:

(1) 燃烧过程实现全自动,即实现自动点火,自动寻找最优的空燃比和最合适的煤气流量和空气流量,自动停烧,正常情况无人参与调节;

(2) 实现燃烧过程煤气流量和空气流量的定值控制。在保证最佳空燃比的前提下,保证参与燃烧的煤气流量和空气流量的精确定值控制。控制性能良好,控制精度高,当负荷变化时,系统的响应快,稳定性好,使得整个燃烧过程合理,同时节约能源;

(3) 实现以拱顶温度的快速上升为目标的煤气流量和空气流量的自寻优控制。确保在燃烧初期拱顶温度快速达到最高温度,蓄热期拱顶温度始终保持向上趋势。

(4) 实现整个燃烧过程的均衡控制,按照废气温度上升的快慢自动调节煤气流量和空气流量的供给,确保热风炉蓄热量的最大化。

根据本系统在现场的实际应用情况,发现以下几个问题还有待于今后不断的优化。

(1) 调节阀的灵敏度和控制精度还不是很理想。由于气动调节阀本身的特点,其灵敏度较差,控制精度较低,造成整个自动燃烧系统对流量的追踪速度较慢,精度较差。可否考虑更换为其他类型的调节阀效果可能更好。

(2) 空气和煤气流量的检测环节波动较大。首钢的热风炉检测流量的装置一直为文丘力管,此种装置虽然在技术上非常成熟,但是精度较差,并且波动较大,导压环管易堵。可否改造为其他检测装置,以提高检测的精度。

由于时间仓促和水平有限,本文还有很多不足和不尽完善之处,希望各位老师多多批评指正。

参考文献

1. 刘全兴. 高炉热风炉操作与煤气知识问答[M], 北京: 冶金工业出版社, 2005, 122-130.
2. 孙进生, 吴建华, 许小强. 高炉热风炉可变周期运行策略的研究和实现[J], 自动化仪表, 2006,(S1):32-34.
3. 廉小亲. 模糊控制技术[M], 北京: 中国电力出版社, 2003, 7-9.
4. 张逸君, 金宁德, 董晓军. 我国高炉热风炉燃烧控制技术进展[J], 包钢科技, 2005,(06):24-25.
5. 林立恒. 高炉热风炉过程控制模型[J], 炼铁技术通讯, 2005,(02):56-58.
6. 刘杰, 那树人. 热风炉燃烧过程模糊控制的一种策略研究[J], 包头钢铁学院学报, 2006,(01):36-37.
7. 汪光阳, 王志英, 张雷, 张辉宜, 钱亚平, 李明, 黄发元. 用于热风炉燃烧系统的模糊控制器[J], 钢铁研究学报, 2004,(05):113-115.
8. 汪光阳, 王志英, 张雷, 张辉宜. 热风炉燃烧系统模糊控制参数优化[J], 安徽工业大学学报(自然科学版), 2003,(04):63-65.
9. 许永华, 吴敏, 曹卫华, 马智慧. 热风炉燃烧控制方法与应用[J], 计算机测量与控制, 2008,(01):43-44.
10. Yunosuke Maki, Akihiro Inayama, Katsumi Jno. The Latest Technologies for Process Control and Automation in Blast Furnace[J], KAWASAKI Steel Technical Report, 2000, :61-67.
11. 王立新. 自适应模糊系统与控制-设计与稳定性分析[M], 北京: 国防工业出版社, 2002:132-156.
12. Kosko B. Neural network and fuzzy systems [M]. A dynamical approach to intelligence .NJ:Prentice-Hall.1992:102-105.
13. Seop Choi II, ByeongHyeon Park, Seung Gap Choi. Design of Opti-mal Combustion Controller for Temperature Control in Hot Blast Stove[J], Intelligent Systems and control. 2000, (43) :357-361.
14. R.Stokman, E.van Stein Callenfels, F.Niem eijer. 达涅利康力斯为中国建造的热风炉[J], 钢铁, 2004,(12):37-39.
15. 吕砚山, 赵正琦. BP 神经网络的优化及应用研究[J], 北京化工大学学报, 2001,(01):3-4.
16. CHAI Tianyou, TONG Shaocheng. Fuzzy direct adaptive control for a class of nonlinear systems .Fuzzy Sets and Systems. 1999, 103(3) :379-387.
17. Wang Lixin, Mendel J M .Generating fuzzy rules by learning from examples.IEEE Trance SMC.1992(6):1414-1427.
18. 樊波, 齐渊洪, 严定鏊, 许海川. 热风炉燃烧控制技术的研究[J], 钢铁, 2005,(04):64-66.
19. 孙铁, 陈桂华, 王俊然. 模糊神经网络在热风炉中的应用[D], 北京: 中国冶金.2004:300-303.
20. Nie J H, Linkens D. A.Back-propagation neural network based fuzzy controllers with self-learning tercher[J].Int. J.Congtrol.1994,60(1):17-39.
21. Nie J H, Linkens D. A.Fast self-learning multivariable fuzzy controllers with a self-learning tercher[J].Int. J.Congtrol, 1994,60(3):369-393.
22. 汪光阳, 胡伟莉. 专家模糊控制系统在热风炉燃烧过程的应用[J], 工业仪表与自动化装置, 2005,(01):78-79.

23. 马竹梧. 高炉热风炉全自动控制专家系统[J], 控制工程, 2002,(04):42-43.
24. V.R.Radhakrishnan, A.R.Mohamed.Neural networks for identification and control of blast furnace hot metal quality[A].Journal of Process control.2000,10:509-524.
25. CHAI Tianyou,TONG Shaocheng. Fuzzy direct adaptive control for a class of nonlinear systems .Fuzzy Sets and Systems. 1999, 103(3) :379-387.
26. Wang G Y,Wang Z Y,Zhang H Y,et al. Control strategy of hotblast stove's combustion system-Fuzzy self-adaptive control[A], .Proceedings of the 5thworld congress on intelligent controland automation, Hangzhou. 2004, :3907-3910.
27. Hayashi Y,Buckey J J. Fuzzy neural networks, A surveyy[J].Fuzzy Sets and Systems , 1994,66(1):1-13.
28. 李海波. 热风炉控制系统的设计与研究[D], 安徽: 合肥工业大学, 2007.
29. 王欣. 高炉热风炉智能控制系统[D], 中南林学院, 2004.
30. 任艳艳. 基于 PLC 实现的热风炉自动控制系统[D], 重庆: 重庆大学, 2006.
31. 马智慧,吴敏,曹卫华,许永华. 钢厂热风炉燃烧控制模型的开发与应用[J], 计算机测量与控制, 2006,(01):46-47.
32. Ying H, Chen G R. Necessary conditions for some typical fuzzy systems as universal approximators[J], Automatica, 1997, (33) :1333-1338.
33. 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M], 北京: 机械工业出版社, 2005:23-25.
34. 贺友多,张胤,窦立威,汤清华,李恒旭. 提高热风炉风温的途径[J], 钢铁, 2003,(03):33.
35. 杨俊,杜涛,蔡九菊,董辉. 国外热风炉发展综述[J], 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2005,(04):27-29.
36. 马竹梧,郭荣,赵燕,高达,慎乃光. 国外高炉热风炉优化控制技术进展[J], 钢铁研究, 2004,(03):34.
37. 杨军统. 炉燃烧管理系统控制策略的改进[J], 电力系统自动化, 2003,7(10):65-73.

致 谢

在本论文完成之际，首先要感谢我的指导老师高宪文教授对我论文工作的耐心指导，热情的帮助和鼓励。我的论文是在老师高屋建瓴的指导下、认真细致的批改下、循循善诱的教导下才得以顺利完成。充分体现了老师科学严谨的治学风范和知行合一的精神楷模。特别是他们对学术研究认真负责的态度，将对我以后的工作和学习产生深远的影响。

其次要感谢许恩全高级工程师、杨永奇高级工程师和单位领导、同志们在我编写论文的过程中他们为我提供的大量的帮助和支持。

最后要感谢我的家人对我工作的理解，她是最坚强的后盾。

