

东北大学

硕士学位论文

模糊控制技术在热风炉自动燃烧中的应用

姓名：杨永奇

申请学位级别：硕士

专业：控制工程

指导教师：王建辉;魏建平

20060101

模糊控制技术在热风炉自动燃烧中的应用

摘 要

本文是以首钢三号高炉热风炉的模糊控制自动燃烧系统为研究背景,详细介绍了模糊控制技术在热风炉自动燃烧系统中的开发与应用。热风炉的燃烧控制是热风炉最复杂的控制系统。其燃烧过程控制的好坏,品质的高低,直接影响热风炉的拱顶温度及燃烧的热效率,进而影响到高炉风温。燃烧过程要求热风炉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,由于高炉在实际生产操作过程中炉况不稳定或其它种种原因,导致高炉煤气压力频繁波动,煤气热值也时有改变,进而影响热风炉拱顶温度发生变化,最终影响送风温度。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。

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。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。

本文中深入分析了自动燃烧系统模糊控制器的设计思想,设计过程和实现方法,并结合现场的实际调试,说明了相关参数的调试过程。最后,结合自动燃烧系统的特点,对如何利用本控制系统做了详细的总结和介绍。

关键词: 模糊控制 自动燃烧 煤气流量 空气流量 配比

The application of Fuzzy control in automatic burning of the blaze furnace

Abstract

This paper presents the Fuzzy control in automatic burning of the blaze furnace actuality of research and application on the background of NO. 3 blaze furnace of Shougang Group. The control system of burning of the blaze furnace is the most complex control. The control and operation is good or bad and quality is fine or bad immediacy affecting the high or low of the top temperature and efficiency of burning of the blaze furnace. So that it bring on the temperature of hot wind fall. The process of burning request the top temperature of the blaze furnace arrive at the target temperature in time and the process of burning at the best proportionment of coal gas and air. The main fuel of the blaze furnace burning is coal gas, Because of the environment and conditions of the blaze furnace actual operation, the pressure and the component of coal gas change high frequency. So that, the top temperature of blaze furnace get influence. In the end, the temperature of hot wind get influence either. In order to let its effect of burning is best, high frequency adjust the flux of coal gas and air. So the intension of working is very hard, operate the burning is very difficulty. Search a easy way to realization the best burning, economize coal gas, reduce the expend, alleviate the intension of working, improve efficiency of the blaze furnace is very necessary.

The originally way of burning control adopt two loop PID of PLC. The loop is very complex and the two loop influence one another. The adjust effect is very bad. Now, we used Fuzzy control predigest the way of control. Under pressure and component of coal gas change high frequency, consider the goal is the top temperature and the content of exhaust gas, design two independence Fuzzy controller, One control the flux of coal gas, the other one control the flux of air. Assure the top temperature rising rapidly, as well as the burning process at its best proportionment.

In this thesis, the design idea, the design process and the way of achieve of the two Fuzzy controller is analyzed deeply. Combine the process of actual debugging,

introduced how to modify the parameter of the Fuzzy controller, then analysis the capability of the two Fuzzy controller in theoretic.

Key words: Fuzzy control; automatical burning; flux of coal gas; flux of air proportion

独创性声明

本人声明所呈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：杨永奇

日期：2006.2.25

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。

（如作者和导师同意网上交流，请在下方签名：否则视为不同意）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

第一章 绪论

1.1 热风炉自动燃烧系统的产生和发展

热风炉是高炉冶炼系统重要的组成部分。它承担着为高炉提供热风的重要任务。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。

模糊理论是在美国柏克莱加州大学电气工程系 Lotfi. A. Zadeh 教授于 1965 年创立的模糊集合理论的数学基础上发展起来的,主要包括模糊集合理论、模糊逻辑、模糊推理和模糊控制等方面的内容。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^[3]。

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,使用了天硕钢铁软件(福建)有限公司开发的 TS3000 系列热风炉燃烧自动控制软件系统,平均风温提高了 15℃,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 课题的背景和意义

首钢炼铁厂现有热风炉 20 座,现在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。

目前首钢炼铁厂热风炉风温已达到极限状态,提高风温 1°C 难度都很大,因此炼铁厂和首自信公司借鉴已有的热风炉自动燃烧控制软件,自主开发了基于模糊控制的自动燃烧系统,即能达到提高风温的目的,又能形成自主的知识产权,同时提高了首钢炼铁区域的自动化水平,该项目达到的目标为:

- (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, 系统的响应快, 稳定性好;
- (3) 燃烧合理, 节约能源;
- (4) 提高风温 $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$, 节约能源 6%;
- (5) 确保安全生产, 防止事故发生, 减少空气污染, 降低劳动强度。

1.3 本文中所作的工作

1.3.1 主要的研究任务

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) 分析和观察现场操作人员的手动操作方法, 总结相应的控制规律和特点, 并具体化。
- (3) 结合模糊控制理论, 设计相应的模糊控制器。
- (4) 确定自动燃烧系统控制程序与原来手动控制系统程序的衔接和转换问题。
- (5) 确定自动燃烧系统的硬件结构, 研究如何与现有的硬件系统的匹配和衔接问题。
- (6) 确定实现模糊控制器的具体方案, 即具体的功能分配
- (7) 数据采集与处理

基于模糊控制的热风炉自动燃烧系统是以数据为基础的。这里所指的数据包括三个方面,一是热风炉在生产过程之中的主要工艺参数,主要包括热风炉的拱顶温度,煤气流量,空气流量,煤气压力和空气压力等,这些实时的工艺参数是自动燃烧系统正常工作的基础。这些数据经过滤波,平均等处理,直接提供给自

动燃烧系统使用。另外一些数据是自动燃烧系统工作时操作人员输入的初始数据, 这些值一般在开发和调试过程中就已经输入, 之后, 根据实际情况还可以适当修改。第三部分数据是自动燃烧系统在工作当中根据一定的推理和运算, 自动产生的一些数据, 比如烧火的最佳煤气流量和空气流量等。

(8) 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。模糊控制器的设计实际上就是建立两个相互独立的模糊控制器, 分别确定它们的输入参数是什么, 输出参数是什么, 去控制什么设备。输入参数如何进行模糊化处理, 论域范围如何确定, 隶属函数如何选择, 模糊控制器的推理规则如何建立, 控制器的输出如何反模糊化处理, 论域范围和隶属函数如何确定, 量化因子和比例因子如何确定等问题, 这些都是模糊控制器设计成败的关键问题。

(9) 通讯程序编制与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到 PLC。另外, PLC 所采集的实时工艺参数需要传送到监控界面显示, 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, 数据的采集和处理, 模糊控制器输入参数的模糊化, 模糊控制器输出参数的反模糊化等工作在 PLC 中完成, 模糊控制器的推理计算在上位监控系统中完成, 这样一是减少了上位系统与 PLC 之间的通讯数据量, 另外, 也提高了模糊推理的速度。

(10) 人机界面的开发

为了满足自动燃烧系统的需要, 主控室增加上位监控系统一套。主要用来开发自动燃烧系统的上位监视系统, 为生产人员提供输入必要的参数的界面和用来监控自动燃烧执行的过程。按其功能来分, 主要分为以下几个部分:

- (a) 主画面: 显示整个热风炉系统的工艺流程图和所有工艺过程参数。
- (b) 分画面: 显示单个热风炉的工艺流程和全部的工艺过程参数。
- (c) 数据输入和选择部分: 主要包括煤气流量和空气流量得设定输入, 流量控制的手自动选择, 燃烧系统的手自动选择等。
- (d) 趋势显示部分: 显示各个热风炉的煤气流量, 空气流量, 焦炉煤气流量, 残氧含量, 拱顶温度, 废气温度的实时和历史趋势。

1.3.2 涉及的主要工作

本课题涉及的主要工作如下：

(1) 设计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。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。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。

(2) 编制满足自动燃烧系统需要的基础过程参数处理程序，完成数据的滤波，平均等基础的处理工作。因为现场实际的过程数据波动较大，尤其是煤气流量和空气流量，因为燃烧时使用的数值较大，所以检测环节的精度有限，造成正常情况下数值波动范围较大。为了控制系统的稳定，有必要对过程数据进行必要的处理。再有就是热风炉的拱顶温度，由于煤气流量和空气流量的自动修正的重要依据就是拱顶温度变化的大小与变化的速率。所有，有必要对其进行相应的处理，以克服干扰等意外情况对这些参数的影响。

(3) 编制上位监控系统与下位 PLC 之间的通讯程序，主要完成它们之间的数据通讯工作。通讯的数据主要包括实际过程数据，上位监控系统的设定参数以及模糊控制器的输出结果等。

(4) 利用 IFIX 软件提供的 VBA 工具开发模糊推理的计算程序。推理程序主要是根据确定的关系矩阵和输入变量计算相应的输出。推理程序是模糊控制器的核心，关系着控制器控制性能的好坏。

(5) 使用 IFIX 软件开发上位监控系统的界面。监控界面主要包括整体工艺参数的显示，整体工艺过程状态的显示，以及相关参数的实时曲线和历史曲线显示界面。

(6) 在原 PLC 中开发模糊控制器的模糊化和反模糊化功能及其自动燃烧系统其他的控制程序。模糊化处理过程主要将过程实时参数按照选定的模糊化处理方法进行模糊化处理，反模糊化功能主要完成控制器输出结果的精确化过程。其他控制程序主要完成自动燃烧系统与手动系统的平稳切换，控制器的输

出影响实际的调节阀阀位，以及相关报警，联锁保护等功能。

第二章 热风炉自动燃烧系统功能分析

2.1 热风炉工艺及控制现状

2.1.1 热风炉简单工艺介绍

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^[4]。

下面给出三个热风炉操作时送风与燃烧相位图,每个热风炉送风 45 分钟,燃烧时间=2*送风时间-2*换炉时间=80 分钟。

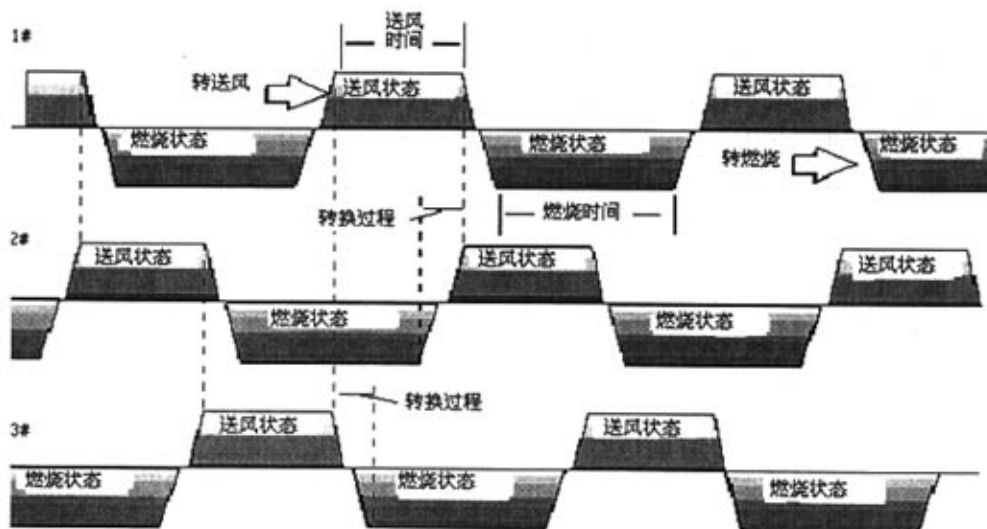


图 2.1 三座热风炉送风与燃烧相位图

Fig. 2.1 Phasic of burning and winding of three blaze furnace

在一个热风炉故障时,剩下的两个热风炉还可正常供热风,只是动作周期不同于三个热风炉操作。下面图 2.2 给出两个热风炉的燃烧与送风相位图,每个热风炉送风 60 分钟,燃烧时间=1*送风时间-2*换炉时间=50 分钟。

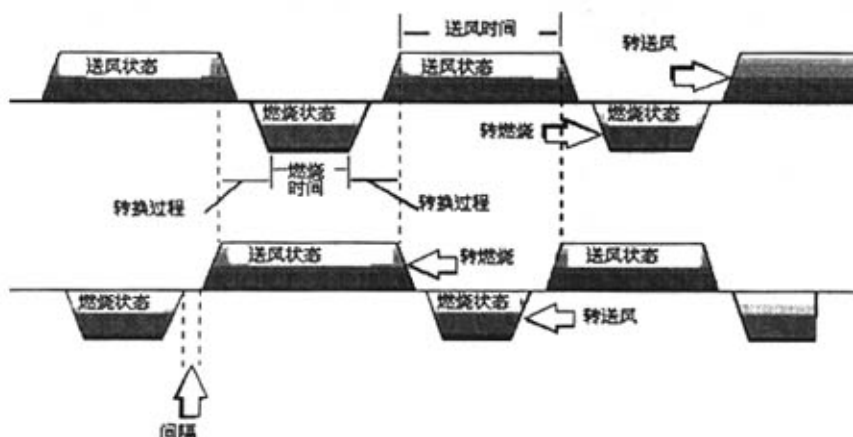


图 2.2 两座热风炉送风与燃烧相位图

Fig. 2.2 Phasic of burning and winding of two blaze furnace

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。热风炉状态转换时相应阀门的动作过程为：

- (1) 送风 → 隔断 → 燃烧
 - (a) 关冷风切断阀
 - (b) 关热风切断阀
 - (c) 开废气均压阀
 - (d) 开烟道切断阀
 - (e) 开烟采切断阀
 - (f) 关废气均压阀
 - (g) 开助燃风切断阀
 - (h) 开助燃风调节阀
 - (i) 开煤气隔断阀
 - (j) 开煤气切断阀
 - (k) 开煤气调节阀
- (2) 燃烧 → 隔断 → 送风
 - (a) 关煤气调节阀
 - (b) 关煤气切断阀
 - (c) 关煤气燃烧阀
 - (d) 助燃风调节阀
 - (e) 关助燃风切断阀

- (c) 关助燃风切断阀
- (f) 关北烟道阀
- (g) 关南烟道阀
- (h) 关烟采阀
- (i) 开均压阀
- (j) 开冷风阀
- (k) 开热风阀
- (l) 关均压阀

2.1.2 热风炉燃烧的控制

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。

(1)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。

(2)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。

(3)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:

- (1) 被控参数包括拱顶温度和残氧含量
- (2) 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 $K_r = Q_a/Q_c$ 跟随煤气量的变化。其控制框图如下所示。

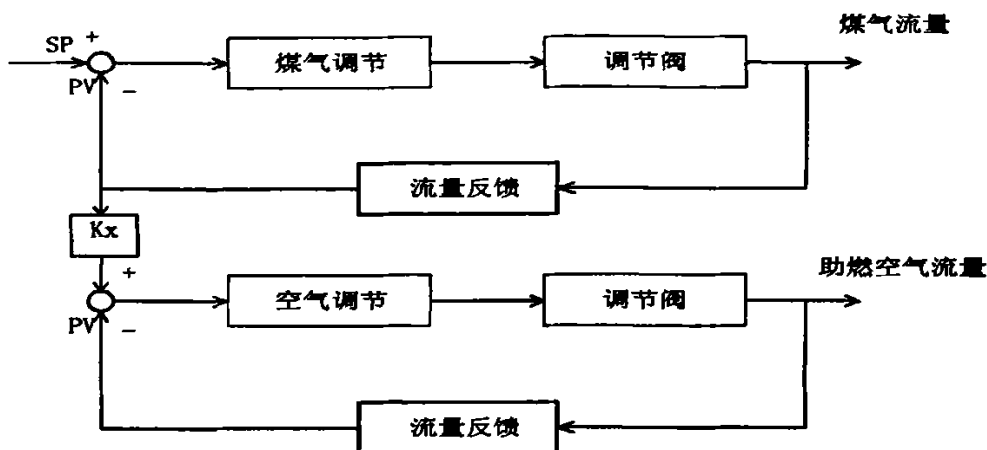


图 2.3 热风炉调节回路控制方式

Fig. 2.3 The loop control mode of the blaze furnace

2.2 热风炉自动燃烧控制系统的主要功能分析

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保安全生产，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

值得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优找到适合本个热风炉的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) 满足热风炉燃烧过程对安全性的要求。点火过程要求先开空气调节阀,待空气流量达到允许值,再开煤气调节阀。停烧的过程要求先关煤气调节阀,待实际的煤气流量回零后,再关空气调节阀。新开发的控制系统必须满足工艺对安全操作提出的要求,这也是最重要的。

(7) 完成自动燃烧控制系统数据采集与处理功能。主要的包括热风炉的拱顶温度,煤气流量,空气流量,煤气压力和空气压力等热风炉在生产过程之中的主要工艺参数,这些实时的工艺参数是自动燃烧系统正常工作的基础。这些数据经过滤波,平均等处理,直接提供给自动燃烧系统使用。再有就是自动燃烧系统工作时操作人员输入的初始数据,还有就是自动燃烧系统在工作当中根据一定的推理和运算,自动产生的一些数据,比如烧火的最佳煤气流量和空气流量等。

(8) 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。

(9) 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。

(10) 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 热风炉燃烧模糊控制器设计

3.1 概论

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,操作人员根据热风炉的炉顶温度,烟道温度和残氧量的变化情况,依据工作的经验,人为改变参与燃烧的煤气和空气的配比,因为生产环境的复杂,控制效果较差,基本上是最原始的手工调节方式,结果风温很难达到高炉的要求,造成高炉生产的不稳定,有时就算是达到了高炉的要求,但是浪费了大量的能源。

为了解决这个问题,满足生产的需要,必须开拓思路,利用其他方法来改造原有的控制系统。利用模糊控制技术改造原有的控制系统就成为可以选择的方案之一。

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^[5]。

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,然后利用模糊集合做为工具,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^[6]。

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对原来的控制系统进行了改造。

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^[4]。

3.2 模糊控制器设计理论

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) 选择论域并确定有关参数;
- (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。究竟选择何种信息做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。

3.2.1.1 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,误差的变化和误差不变化的速率。

3.2.1.2 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,必须削弱偏差的作用,这样又会出现调节时间过长的的问题,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^[7]。

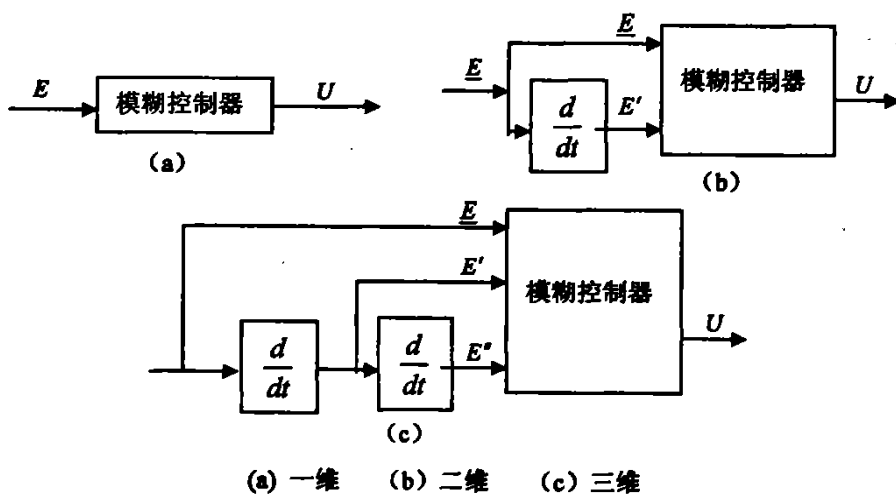


图 3.1 模糊控制器的一般结构

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三个方面。

3.2.2.1 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(N0)和正零(P0)。

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^[8]。

3.2.2.2 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^[9]。

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:

(a) 专家评分法

即综合多数专家的评分来确定隶属函数的方法,这种方法广泛应用于经济与

管理的各个领域。

(b) 因素加权综合法

若模糊概念是由若干因素相互作用而成,而每个因素本身又是模糊的,则可综合考虑各因素的重要程度来选择隶属函数。

(c) 二元排序法

通过对多个事物之间两两对比来确定某种特征下的顺序,由此来决定这些事物对该特征的隶属函数的大致形状。

(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做为隶属函数曲线,根据曲线找出相应的函数表达式^[10]。

3.2.2.3 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定问题。对模糊子集的理想要求是它必须客观的反映实际情况。

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。设定

$$x = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad (3.2)$$

则有

$$\begin{aligned} \mu(2) &= \mu(6) = 0.2 \\ \mu(3) &= \mu(5) = 0.7 \\ \mu(4) &= 1 \end{aligned} \quad (3.3)$$

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:

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

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^[11]。

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 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ 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

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

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 的支集上的变化相同, 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 。

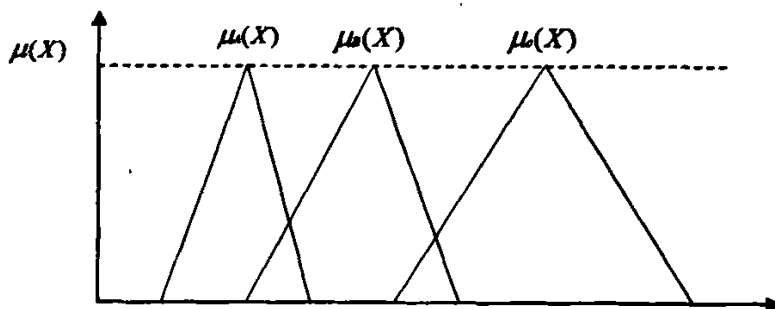


图 3.2 不同分辨率的隶属函数曲线

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^[12]。

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^[13]。

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 2.3 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 α 值较小时,控制动作的灵敏度较高;而 α 值较大时,具有较好的适应系统参数变化的能力。 α 值不应取得过大或者过小,若 α 值取得过小时,控制过程变化太剧烈,系统不易稳定运行;当 α 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^[14]。

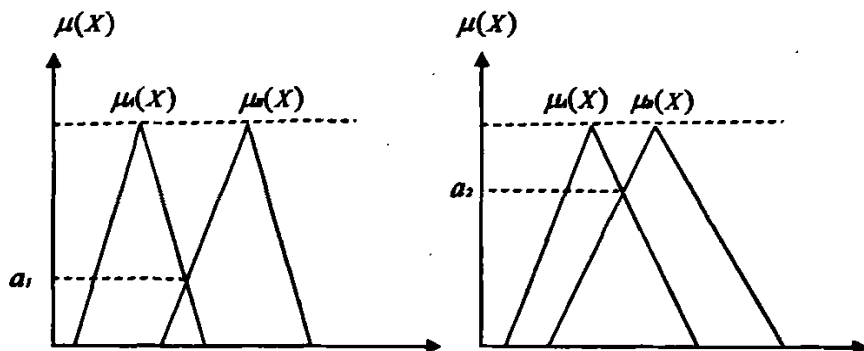


图 3.3 不同模糊子集的相互关系

Fig. 3.3 Correlation of different fuzzy subclass

3.2.2.4 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^[15]。

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。手动控制策略一般都可以用“IF-THEN”的形式语句来加以描述。常见的模糊条件语句及其对应的模糊关系有:

(1) if A then B (若 A 则 B)

$$R = A \times B \quad (3.6)$$

例句: 如果液位偏低则开大阀门。

(2) if A then B else C (若 A 则 B 否则 C)

$$R = (A \times B) + (\bar{A} \times C) \quad (3.7)$$

例句: 如果水温高则加点冷水, 否则加点热水。

(3) if A and B then C (若 A 且 B 则 C)

$$R = (A \times B) \cdot (B \times C) \quad (3.7)$$

这条语句也可以表述为:

if A then if B then C (若 A 则若 B 则 C)

$$R = A \times (B \times C) = A \times B \times C \quad (3.8)$$

例句：如果液位偏高且液位继续上升，则关闭进水阀门。

(4) if A or B and C or D then E (若 A 或 B 且 C 或 D 则 E)

$$R = [(A + B) \times E] \cdot [(C + D) \times E] \quad (3.9)$$

例句：如果液位高或偏高一点且液位继续上升很快或较快，则进水阀门多关闭一点。

(5) if A then B and if A then C (若 A 则 B 且若 A 则 C)

$$R = (A \times B) \cdot (A \times C) \quad (3.10)$$

该语句也可以表述为：

if A then B, C (若 A 则 B, C)

例句：如果水温已到，则停止进热水，也停止进冷水。

(6) if A then B or if C then D (若 A 则 B 或若 C 则 D)

$$R = A \times B + C \times D \quad (3.11)$$

例句：如果液位偏高则关小进水阀门，如果液位偏低则开大一点进水。

3.2.2.5 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 $\mu_{NB}(-5) = 0.7, \mu_{NM}(-5) = 0.8, \mu_{NB} > \mu_{NM}$ ，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：

$$y = \frac{12 \left[x - \frac{(a+b)}{2} \right]}{(b-a)} \quad (3.12)$$

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 → -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
0	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^[16]。

(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

$$\mu(u^*) \geq \mu(u), u \in U \quad (3.13)$$

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 $[u_1^*, u_n^*]$ 的中点 $(u_1^* + u_n^*)/2$ （其中， $u_1^* \leq u_2^* \leq \dots u_n^*$ ）做为控制量。

(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：

$$\mu^* = \frac{\sum \mu(\mu) \cdot \mu}{\sum \mu(\mu)} \quad (3.14)$$

例如：

$$c = \frac{0.3}{-1} + \frac{0.8}{-2} + \frac{1}{-3} + \frac{0.5}{-4} + \frac{0.1}{-5} \quad (3.15)$$

则

$$\mu^* = \frac{(-1) \times 0.3 + (-2) \times 0.8 + (-3) \times 1 + (-4) \times 0.5 + (-5) \times 0.1}{0.3 + 0.8 + 1 + 0.5 + 0.1} = -2.74 \quad (3.16)$$

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^[17]。

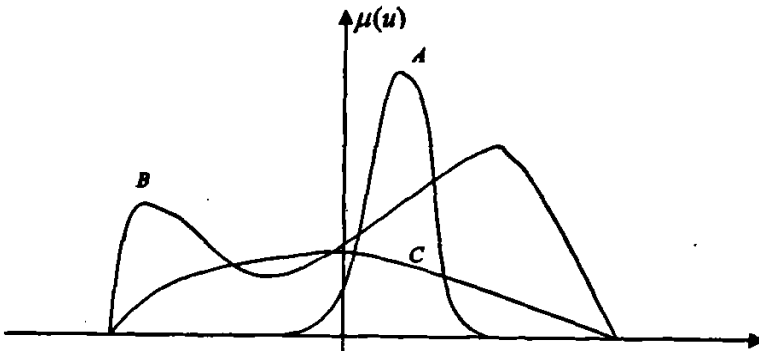


图 3.4 控制量的模糊集隶属函数曲线

Fig. 3.4 Subjection function curve of different control parameter

3.2.2.6 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：

$$E = \{-n, -n+1, \dots, 0, 1, \dots, n-1, n\} \quad (3.17)$$

$$EC = \{-m, -m+1, \dots, 0, 1, \dots, m-1, m\} \quad (3.18)$$

$$U = \{-l, -l+1, \dots, 0, 1, \dots, l-1, l\} \quad (3.19)$$

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^[18]。

(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^[19]。

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:

$$K_e = \frac{n}{x}, \quad K_{ec} = \frac{m}{x} \quad (3.20)$$

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:

$$K_u = \frac{y}{l} \quad (3.21)$$

(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

$$\Delta u = f(E, EC) \quad (3.22)$$

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:

$$E(k) = \text{int}(Ke(k) + 0.5) \quad (3.23)$$

$$EC(k) = \text{int}(Kec(k) + 0.5) \quad (3.24)$$

带入 Δu 的公式中有

$$\Delta u(k) = f'[\text{int}(Ke(k) + 0.5), \text{int}(Kec(k) + 0.5)] = f[Ke(k) + Kec(k)] \quad (3.25)$$

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：

$$\Delta u(k) = Ku D\{f[Ke(k), Kec(k)]\} \quad (3.26)$$

式中 $D\{\circ\}$ 表示判断。从而有

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) = u(0) + Ku \sum_{i=0}^k D\{f[Ke(i), Kec(i)]\} \quad (3.27)$$

如果输入输出的特性由下式描述

$$y = g(u) \quad (3.28)$$

$$\text{则} \quad y(k) = g\left\{u(0) + Ku \sum_{i=0}^k D\{f[Ke(i), Kec(i)]\}\right\} \quad (3.29)$$

由上式可见， Ke ， Kec 和 Ku 对输出特性均有影响，其中， Ke ， Kec 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^[20]。

(1) Ke ， Kec 对系统动态性能的影响

由上述 Ke ， Kec 公式可以看到， Ke ， Kec 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， Ke ， Kec 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。

Ke 对动态性能的影响是： Ke 大，调节死区小，上升速率大。但是， Ke 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^[21]。

Kec 对动态性能的影响是： Kec 大，反映较迟钝， Kec 小，反映快，上升速率大。而 Kec 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) Ke ， Kec 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， Ke 增加，稳态误差将减小， Ke 增大，稳态时误差变化率也将减小。然而 Ke ， Kec 对动态性能也有影响，因此，必须兼顾两个方面的性能^[22]。

(3) 系统性能的影响

Ku 则相当于常规系统中比例增益的作用，一般 Ku 加大，上升速度较快。但 Ku 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 Ku 一般不影响系统的稳态误差^[23]。

3.3 热风炉燃烧模糊控制器设计

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变量和输出变量

(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:

- (a) 热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T
- (b) 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}

对应的模糊语言变量:

$$\{PB+, PB, PM, PS, 0, NS, NM, NB, NB+\}$$

(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:

(a) 取实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E

(b) 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}

相应的语言变量为:

$$\{PB+, PB, PM, PS, 0, NS, NM, NB, NB+\}$$

(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}

语言变量为:

$$\{PB+, PB, PM, PS, 0, NS, NM, NB, NB+\}$$

(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}

对应的模糊语言变量:

$$\{PB+, PB, PM, PS, 0, NS, NM, NB, NB+\}$$

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达两个月的仔细观察。在不断总结和完善的基礎上, 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^[24]。

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：

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

$\Delta T \backslash T$	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

(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^[25]。

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 所示。

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

EC E	PB+	PB	PS+	PS	Z	NS	NS+	NB	NB+
	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 选择论域并确定有关参数

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^[26]。

(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 $(-0.4,+0.4)$ ；

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：

(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 $\pm 10\%$ 。

(d) 量化因子和比例因子的取值：

根据设计的需要，暂时将量化因子确定取 1，比例因子取 1。

(d) 量化因子和比例因子的取值:

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^[27]

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^[28]。

根据前述对隶属函数选择的原则, 要求所选则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。

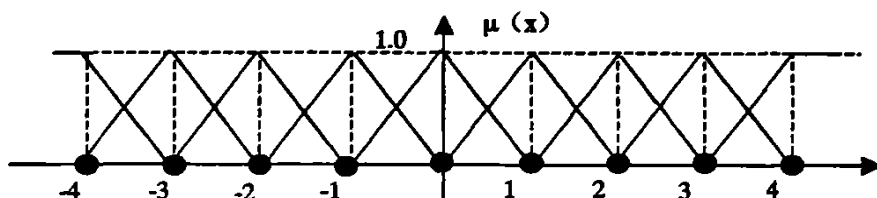


图 3.5 拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 隶属函数曲线

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	0	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	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

(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。

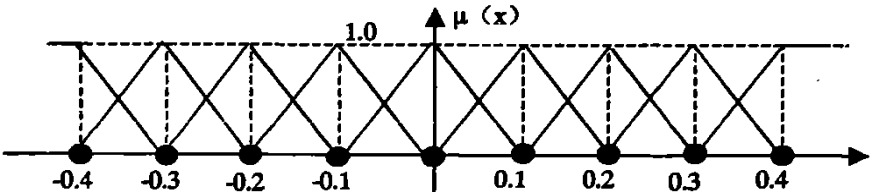


图 3.6 拱顶温度采样周期内温度的变化率 ΔT 隶属函数曲线

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。：

(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 , 对应的隶属函数赋值表 3.6 所示 :

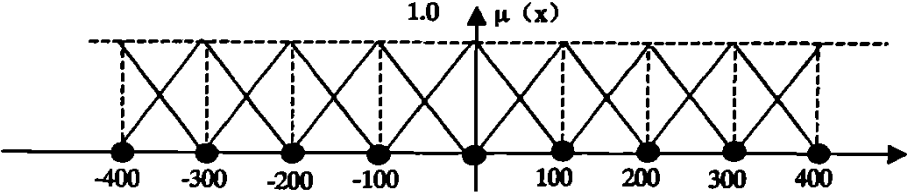


图 3.7 煤气调节模糊控制器输出量 U 隶属函数曲线

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

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	0	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	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

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 ttable 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	0	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	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

(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。

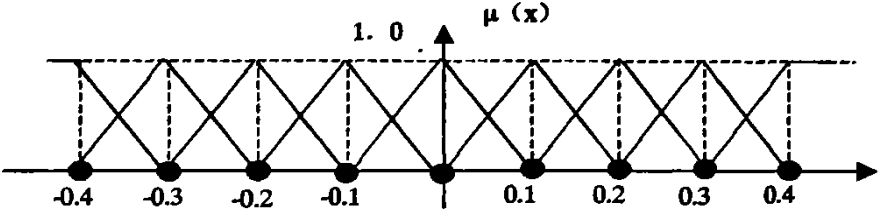


图 3.8 实际废气含氧量与充分燃烧时标准含氧量的差值 E 隶属函数曲线

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

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 standardence									
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	0	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	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

(b) 废气含氧量的变化速率 EC 的论域为 $(-0.4,+0.4)$,其隶属函数如图 3.9:

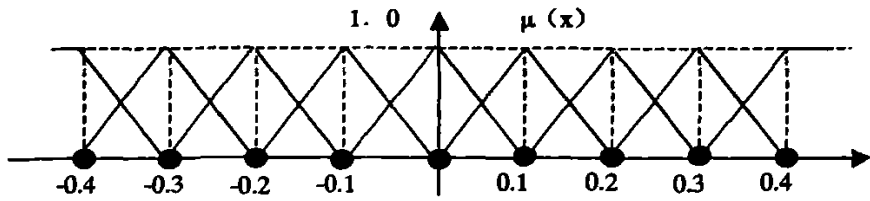


图 3.9 废气含氧量的变化速率 EC 隶属函数曲线

Fig. 3.9 Subjection function curve of content change velocity of exhaust

对应的隶属函数赋值如表 3.8 所示。

(c) 输出量为 U ，论域范围为 $(-400,+400)$ ，隶属函数如图 3.10 所示，对应的隶属函数赋值如表 3.9 所示。

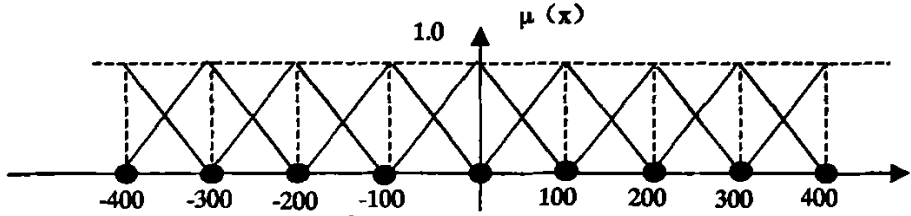


图 3.10 空气调节模糊控制器输出量 U 隶属函数曲线

Fig. 3.10 Subjection function curve of the output of air fuzzy controller

表 3.8 废气含氧量的变化速率 EC 的隶属度赋值表

Table 3.8 Subjection function table of content change velocity of exhaust

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	0	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	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

表 3.9 空气调节模糊控制器输出量 U 的隶属度赋值表

Table 3.9 Subjection function table of the output of air 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	0	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	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

第四章 自动燃烧模糊控制器的实现

4.1 概论

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：

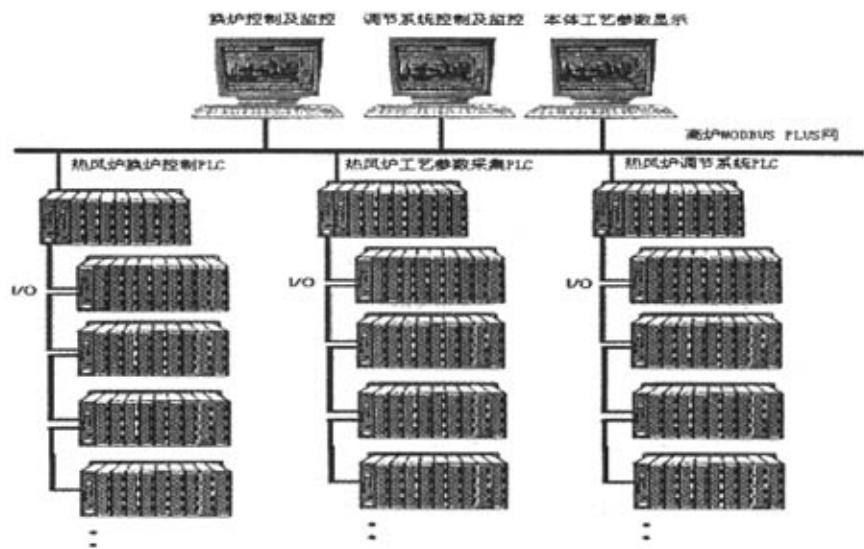


图 4.1 热风炉计算机控制系统结构图

Fig. 4.1 Comput network structure of the blaze 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，做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。

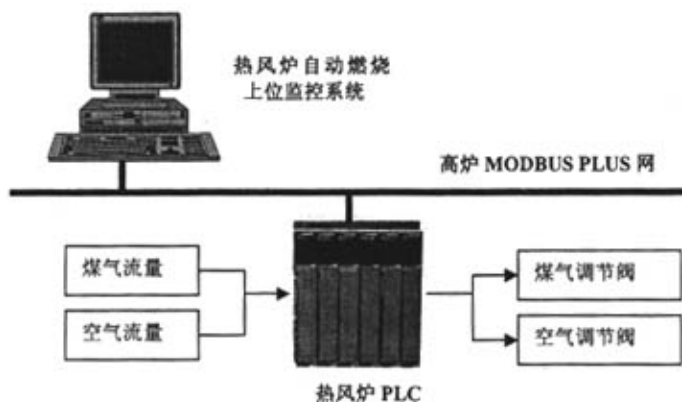


图 4.2 自动燃烧系统硬件原理结构图

Fig. 4.2 The hardware structure of auto buring 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改监控软件。

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烧火操作, 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。

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^[31]。

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。

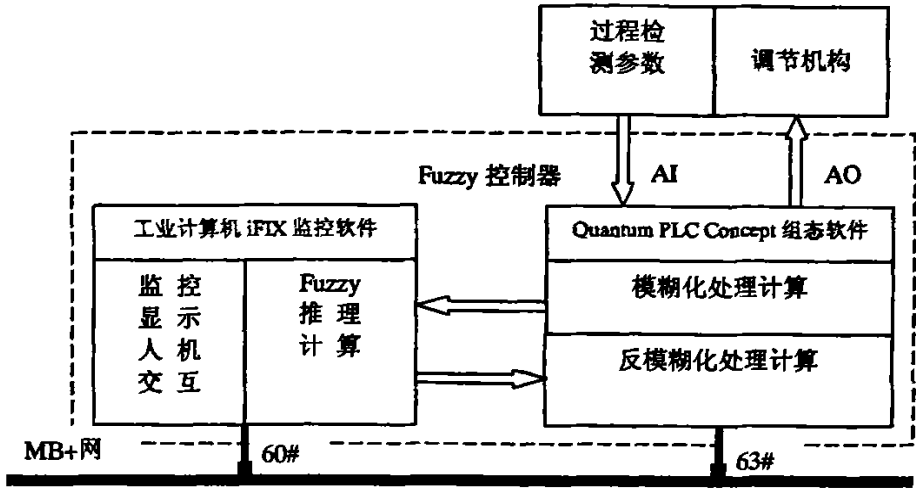


图 4.3 自动燃烧系统功能结构图

Fig. 4.3 Function structure of the auto burning system

下面，就相关的内容进行详细的介绍。

4.2 相关技术的介绍

4.2.1 iFIX 监控软件简介

iFIX 是 Intellution 公司工业自动化软件 FIX 家族中的最新产品，是全球最领先的 HMI/SCADA 自动化监控组态软件。Intellution 在提供强有力的工业自动化软件方面处于领先地位，iFIX 是世界领先的工业自动化软件解决方案，提供了生产操作的过程可视化，数据采集和数据监控。iFIX 可以帮助您精确地监视、控制生产过程，并优化生产设备和企业资源管理。它能够对生产事件快速反映，减少原材料消耗，提高生产率，从而加快产品对市场的反应速度，提高用户收益 [29]。

iFIX 监控软件提供的具体功能包括：

- (1) 监视：将现场数据实时提供给操作员；
- (2) 监控：监视实时数据并对特殊数据提供必要的控制；
- (3) 报警：识别控制过程中的异常事件能力并予以报告；
- (4) 控制：提供必要的算法，调整过程数据值。

4.2.2 Concept 组态软件简介

施耐德电气公司的 Concept 工程师站组态软件包，是业界公认的功能强大的编程组态平台，其主要特点是 [32]：

- (1) 支持多种操作系统平台: Windows 95/98/NT/2000;
- (2) 符合 IEC 1131-3 标准的全部五种编程模式: 梯形图, 结构化文本, 顺序功能图, 功能块图和指令表;
- (3) 派生函数块 (DFB) 编辑器;
- (4) 面向对象的编程方式符合当今系统集成的趋势;
- (5) 内置模拟仿真调试器: 可离线仿真, 加快应用软件的开发和调试;
- (6) 提供 C 语言开发工具;
- (7) 专业化的过程控制函数库;
- (8) 提供多达 7 层的软件存取保护, 防止非法访问, 安全、可靠;
- (9) 强大的在线帮助功能, 界面友好, 信息量大, 极大方便应用开发人员的使用。

4.2.3 MODBUS PLUS 网络简介

MODBUS PLUS (即 MB+) 总线协议是由美国 Modicon Inc. 开发设计的一种工业数据总线, 适用于建立工业实时控制局域网。典型的应用包括过程控制、数据监测、程序上传/下载、远程编程、连接操作员接口及主计算机数据采集等^[32]。

MODBUS PLUS 总线协议是一种异步半双工通讯的对等网络协议, 遵循 IEEE802.4 局域网标准, 物理接口是 RS485, 通讯介质采用屏蔽双绞线或光纤, 最大节点数 64 个, 通讯速率 1Mbps。其对应于 OSI 参考模型的协议体系结构见下表 4.1 所示。

在链路层, MODBUS PLUS 采用 IEEE802.2 逻辑链路控制协议和 IEEE802.4 令牌总线媒体访问控制协议。在会话层、描述层, MODBUS PLUS 采用 NetBIOS 网络编程接口。NetBIOS 实际上介于会话层和描述层之间。在应用层 MODBUS PLUS 采用 MODBUS 的通讯协议, 主要包括寄存器读写、开关量 I/O 等命令。MODBUS 协议在 MODBUS PLUS 网络中使用时, 要将传递的信息的内容进行相应的封装, 封装格式有两种 ASCII 和 RTU(Remote Terminal Unit), 如表 4.2、表 4.3 所示。

它们的具体封装格式如下:

- (1) ASCII: 在 ASCII 形式下, 消息以“:”开始, 以两个回车换行符(CRLF)结束。中间的信息为 MODBUS 协议的内容。由于 MODBUS PLUS 一次传输的信息最多可以有 500 个字节, 则 n 最大为 491。

表 4.1 Modbus plus 协议体系结构
Table 4.1 The protocol of Modbus plus

分层	协议
应用层	Modbus
描述层	NetBIOS
会话层	
传输层	
网络层	IEEE802.2LLC IEEE802.4MAC
链路层	
物理层	IEEE802.4

表 4.2 ASCII 封装格式
Table 4.2 The format of ASCII

开始	地址	功能	数据	校验	结束
..	2 字节	2 字节	N 字节	2 字节	2CRLF

(2) RTU: 在 RTU 形式下, 消息的传递是以一段空闲时间开始的, 这段时间不短于 3.5 倍的字符发送时间, 一般取 4T。以同样的标志来表示信息的结束。其中 n 最大为 486。

表 4.3 RTU 封装格式
Table 4.3 The format of ASCII

开始	地址	功能	数据	校验	结束
4T	2 字节	2 字节	N 字节	2 字节	4T

MODBUS PLUS 采用屏蔽双绞线时, 传输距离是 1500ft(1ft=30.48cm); 如加中继器(RR85), 则距离最远为 6000ft(最多加 3 个中继器)。对于高可靠性的应用场合, MODBUS PLUS 还可以采用双电缆结构, 这种结构允许 Modbus plus 在两条独立的电缆上通讯, 如果一条发生故障, 系统自动切换到另一条, 故障电缆则进入故障统计状态。

作为一个判定性高速令牌循环式现场总线, MODBUS PLUS 总线网络以 1Mbps 的速率进行通讯, 可以快速存取过程数据, 它的实力表现在它的控制实时控制装置如 I/O 装置的能力, 不会由于加载或通讯量的原因而性能有所下降。由于 MODBUS PLUS 综合高速、对等通讯和易于安装等特点, 使得计算机、可编程逻辑控制器(PLC)和其它数据源, 通过使用低成本的双绞线电缆或光纤电缆在整个网络上作为同位体进行通信。

4.3 上位监控系统的开发

为了满足自动燃烧的需要, 增加上位监控系统一套。主要用来实现对自动燃烧系统的监控, 同时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执行的过程。

4.3.1 监控画面功能简介

监控画面主要提供以下功能:

- (1) 输入模糊控制器拱顶温度目标值, 空燃比, 初始煤气流量, 最大煤气流量, 燃烧时间等参数的监控和修改界面;
- (2) 显示拱顶温度和废气温度的实时监控曲线和历史曲线;
- (3) 提供投入燃烧自动与退出自动燃烧的手段;
- (4) 两个模糊控制器的参数输入界面;
- (5) 后台运行的利用 VBA 编写的模糊控制器推理程序。

下面图 4.4,图 4.5 ,图 4.6 为自动燃烧系统主要监控画面。

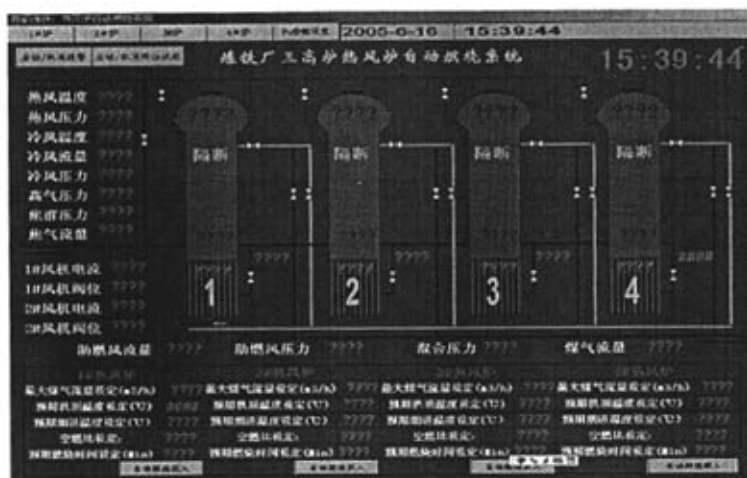


图 4.4 自动燃烧系统主画面

Fig. 4.4 Main picture of the auto burning system

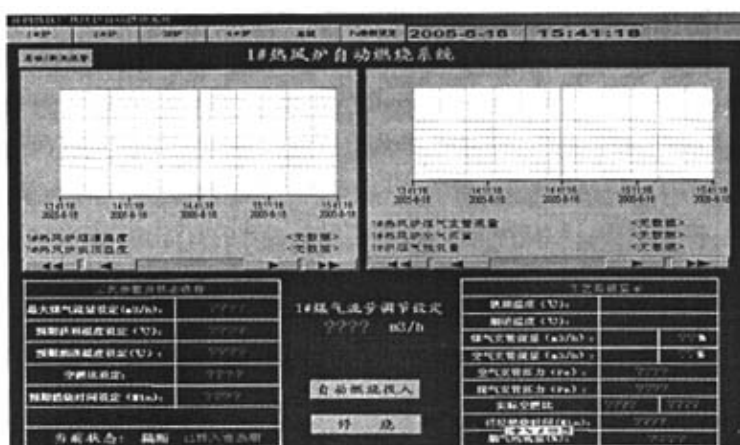


图 4.5 自动燃烧系统 1#炉画面

Fig. 4.5 No.1 blaze furnace 's picture of the auto burning system



图 4.6 自动燃烧系统 1#炉模糊控制器参数输入画面

Fig. 4.6 No.1 blaze furnace 's fuzzy parameter input picture of the auto burning system

4.3.2 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 4.7 所示。

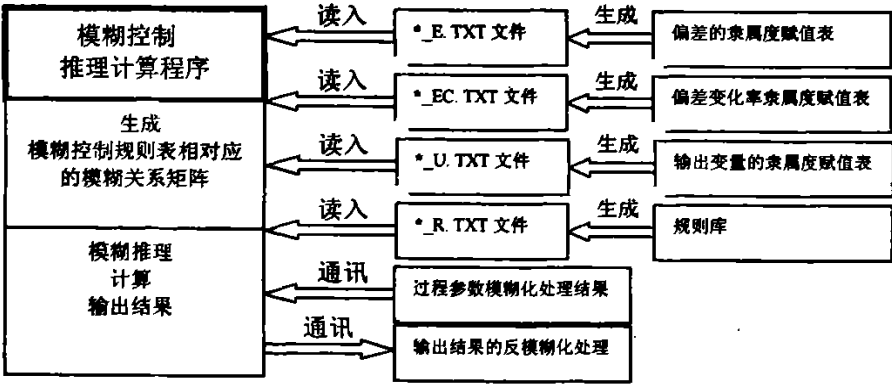


图 4.7 模糊控制器推理计算程序的总体思路

Fig. 4.7 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 4.8 所示。



0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 4.8 模糊变量的隶属度赋值表对应的文本文件

Fig. 4.8 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 4.9 所示。



4	5	5	6	6	7	7	8	8
3	4	5	5	6	6	7	7	8
3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	3	3	4	5	5	6	6	7
2	2	3	3	4	5	5	6	6
1	2	2	3	3	4	5	5	6
1	1	2	2	3	3	4	5	5
0	1	1	2	2	3	3	4	5
0	0	1	1	2	2	3	3	4

图 4.9 模糊控制器有的规则表对应的文本文件

Fig. 4.9 The file of fuzzy controller rules

将监控系统的主画面做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 $R, i = 1, 2, 3, \dots, 81$, 可求得与模糊控制规则表相对应的模糊关系矩阵,即

$$R = \bigcup_{i=1}^{81} R_i \quad (4.1)$$

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, 具体程序如下:

```
x = "C:\Dynamics\PDB\data11_e.txt"
Call A(x)
For i = 0 To 8
  For M = 0 To 8
    FZ11_E(i, M) = AA(i, M)
  Next M
Next i

x = "C:\Dynamics\PDB\data11_ec.txt"
Call A(x)
For i = 0 To 8
```

```

For M = 0 To 8
    FZ11_EC(i, M) = AA(i, M)
Next M
Next i

x = "C:\Dynamics\PDB\data11_u.txt"
Call A((x))
For i = 0 To 8
    For M = 0 To 8
        FZ11_U(i, M) = AA(i, M)
    Next M
Next i

x = "C:\Dynamics\PDB\data11_r.txt"
Call A((x))
For i = 0 To 8
    For M = 0 To 8
        FZ11_R(i, M) = AA(i, M)
    Next M
Next i

```

(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, 结果做为新生成数组 $fz11_e_c(c, d)$ 的一行, 其中 c, d 的取值分别为 0 至 8, 数组为 9 乘 9 方阵。具体程序如下:

```

For e = 0 To 8
    For b = 0 To 8
        For c = 0 To 8
            For d = 0 To 8
                Call min((FZ11_E(e, c)), (FZ11_EC(b, d)))
                fz11_e_c(c, d) = Val(mindate)
            Next d
        Next c
    Next b
Next e

```

(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。具体程序为：

```

For N = 0 To 8
  For i = 0 To 8
    For M = 0 To 8
      Call min((fz11_e_c(N, i)), (fz11_1(M)))
      y = i + N * 9
      fz11_e_c_u_m(y, M) = Val(mindate)
    Next M
  Next i
Next N

```

(4) 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。具体计算程序为：

```

For w = 0 To 80
  For z = 0 To 8
    Call max((fz11_e_c_u_m(w, z)), (fz11_e_c_u(w, z)))
    If maxdate > fz11_e_c_u_m_n(w, z) Then
      fz11_e_c_u_m_n(w, z) = Val(maxdate)
    End If
  Next z
Next w

```

(5) 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，在利用“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 $fz11_in1(k)$ 。

```

fz11 = Fix32.FUZ11_KE_1.F_CV
fz12 = Fix32.FUZ11_KEC_2.F_CV
fz11_in1(0) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM1.F_CV * fz11

```

```

fz11_in1(1) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM2.F_CV * fz11
fz11_in1(2) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM3.F_CV * fz11
fz11_in1(3) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM4.F_CV * fz11
fz11_in1(4) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM5.F_CV * fz11
fz11_in1(5) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM6.F_CV * fz11
fz11_in1(6) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM7.F_CV * fz11
fz11_in1(7) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM8.F_CV * fz11
fz11_in1(8) = Fix32.FUZ11_IN_1_TERM9.F_CV * fz11

```

```

fz11_in2(0) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM1.F_CV * fz12
fz11_in2(1) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM2.F_CV * fz12
fz11_in2(2) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM3.F_CV * fz12
fz11_in2(3) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM4.F_CV * fz12
fz11_in2(4) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM5.F_CV * fz12
fz11_in2(5) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM6.F_CV * fz12
fz11_in2(6) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM7.F_CV * fz12
fz11_in2(7) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM8.F_CV * fz12
fz11_in2(8) = Fix32.FUZ11_IN_2_TERM9.F_CV * fz12

```

```

For c = 0 To 8
    For d = 0 To 8
        Call min((fz11_in1(c)), (fz11_in2(d)))
        k = d + c * 9
        fz11_in11(k) = Val(mindate)
    Next d
Next c

```

(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。

```

For M = 0 To 8
    For N = 0 To 80
        Call min((fz11_in11(N)), (fz11_RULE(N, M)))
        If mindate > fz11_in22(M) Then
            fz11_in22(M) = Val(mindate)
        End If
    Next N
Next M

```

Next N

Next M

$fz13 = \text{Fix32.FUZ11_KU_1.F_CV}$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM1.F_CV} = fz11_in22(0) * fz13$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM2.F_CV} = fz11_in22(1) * fz13$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM3.F_CV} = fz11_in22(2) * fz13$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM4.F_CV} = fz11_in22(3) * fz13$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM5.F_CV} = fz11_in22(4) * fz13$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM6.F_CV} = fz11_in22(5) * fz13$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM7.F_CV} = fz11_in22(6) * fz13$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM8.F_CV} = fz11_in22(7) * fz13$

$\text{Fix32.FUZ11_DFZ_OUT_1_TERM9.F_CV} = fz11_in22(8) * fz13$

(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。

4.3.3 上位监控系统的使用

上位监控系统主要提供人机交互的手段，并完成模糊控制器的推理计算功能，下面，就如何使用上位监控系统说明如下：

(1) 换炉后直接投入自动燃烧系统的步骤：

(a) 检查将要投入燃烧的热风炉监控界面的设定参数是否合理，主要是煤气流量和空燃比参数的设定，初始的煤气流量和空燃比不应设定过大；

(b) 检查煤气和空气调节阀阀位是否在最小阀位，空气调节阀和煤气调节阀的手动设定阀位为 5% 和 0%；

(c) 当前“燃烧”信号是否出现；

(d) 单击“自动燃烧投入”按钮，按钮文字显示红色，即可；

(e) 观察着火正常后，可以根据需要在设定参数界面修改煤气流量的设定值和空燃比。

(2) 在燃烧期间投入自动燃烧系统的步骤：

(a) 检查选中将要投入燃烧的热风炉监控界面的设定参数是否合理，主要是空燃比参数的设定；

(b) 单击“自动燃烧投入”按钮，按钮文字显示红色，即可；

(c) 观察当前在监控界面中间显示的煤气流量手动设定界面显示的煤气流量是否合理，可以在此修改煤气流量的设定值，在设定参数界面修改空燃比。

(3) 在燃烧期间修改煤气流量和空燃比的步骤:

(a) 如果是在燃烧期间投入自动燃烧系统的, 在转换至蓄热期之前可以在设定参数界面修改煤气流量和空燃比参数来调整烧火状况; 在转换至蓄热期后, 可以在监控界面中间显示的煤气流量手动设定界面修改煤气流量, 在设定参数界面设定空燃比来调整烧火状况;

(b) 如果是在燃烧期间投入自动燃烧系统的, 可以在监控界面中间显示的煤气流量手动设定界面修改煤气流量, 在设定参数界面设定空燃比来调整烧火状况。

(4) 退出自动燃烧系统的步骤:

(a) 正常情况下, 单击“自动燃烧投入”按钮, 按钮文字显示蓝色, 即可。此时, 当前的煤气调节阀和空气调节阀阀位会自动切换至原手动烧火系统的阀位设定值, 当前热风炉燃烧状况保持不变;

(b) 自动燃烧系统出现异常情况时, 可以单击手动烧火系统监控界面的 F11 键, 全部退出自动燃烧系统, 且当前工况不变。

(5) 停烧的步骤

(a) 正常情况, 单击“停烧”按钮, 按钮文字显示红色, 即可;

(b) 当出现助燃风总管压力低和煤气总管压力低连锁信号时, 系统自动执行停烧过程。

(6) 注意事项

(a) 监控界面所有设定参数必须输入, 不能为空值, 特别应检查煤气流量和空燃比参数的设定是否合理。具体参数输入参数范围如表 4.4 所示。

表 4.4 输入的参数及范围
Tab 4.4 The range of input parameter

参数	范围
拱顶温度	1000℃-1500℃
废气温度	300℃-350℃
最大煤气流量	10000 m ³ /h -120000 m ³ /h
空燃比	0.3-1.5
燃烧时间	120min-180min

(b) 换炉后选择直接投入自动燃烧系统, 需要检查原来手动操作系统的空气调节阀和煤气调节阀的手动设定阀位是否为 5% 和 0%, 如果不是, 需要按照这两个数值设定后, 再选择投入自动燃烧系统。

(c) 换炉后选择直接投入自动燃烧系统, 初始的煤气流量和空燃比不应设定过大, 以免造成由于煤气流量的设定过大, 从而空气流量设定过大, 造成空气调节阀开到位后流量不能达到设定值的情况发生, 这时, 自动燃烧系统会等待空气

流量达到设定值,造成煤气不能投入,延误点火。可以先适当以较小的煤气流量做为设定值,待空气,煤气都增加到设定值,点火成功后,再将煤气流量设定到需要的量值。

(d) 根据目前的使用条件,空燃比系数自动修正选择手动。

(e) 如果投入自动燃烧系统后,空气调节阀或者煤气调节阀出现阀位不动等异常情况,可以马上退出自动燃烧系统,等调节阀故障处理完成后,可以利用原来系统手动烧火,也可以继续投入自动燃烧系统。

(7) 报警和保护

本系统提供了语音报警功能,主要的报警项目和参数如下:

(a) 废气温度: $>330^{\circ}\text{C}$

(b) 煤气流量: $<20000\text{ m}^3/\text{h}$

(c) 空气流量: $<20000\text{ m}^3/\text{h}$

(d) 异常流量的保护: 在燃烧期间,如果瞬时流量 $<1000\text{ m}^3/\text{h}$,则保存上一次的平均值作为 PID 的过程值;

(e) 当空气流量 $<1000\text{ m}^3/\text{h}$ 时,煤气流量 PID 的设定值为 0;

(f) 空气 PID 调节器的最小输出值为 5%;

当出现报警项目时,系统将提示声音报警,在了解报警信息后,可以单击“取消语音”按钮,消除音响。

(8) 其他功能

当热风炉处于送风状态时,为了保证调节阀的动作的灵敏性,系统输出模拟的控制信号驱动调节阀在 10%-30%之间动作。单击“取消阀位实验”按钮,可以取消实验信号的变化,保持当前输出不变。

4.4 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。

4.4.1 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 4.5 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。

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:

表 4.5 Concept 组态软件中 Fuzzy 模糊函数库包含的功能块

Tab 4.5 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.

(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,将该精确量对应于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 ... 10 000 ,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,不同的初始化的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 4.6 所示。

表 4.6 FUZ_STERM_***功能块的功能说明
Table 4.6 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： $S2 < S1$ ，如图 4.10 所示。

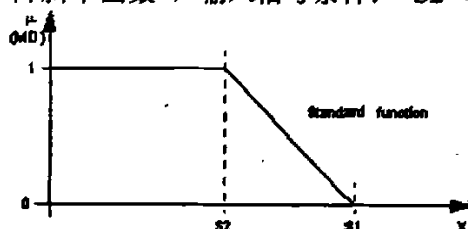


图 4.10 下降斜率隶属函数

Fig. 4.10 Falling ramp function

隶属函数形状：上升斜率函数

输入信号条件： $S2 > S1$ ，如图 4.11 所示。

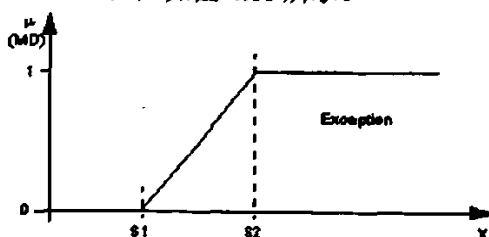


图 4.11 上升斜率隶属函数

Fig. 4.11 Rising ramp function

隶属函数形状：三角形函数

输入信号条件： $S1 < S2 < S3$ ，如图 4.12 所示。

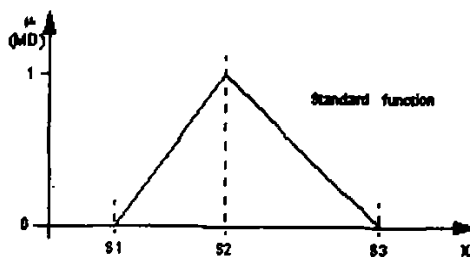


图 4.12 三角形隶属函数

Fig. 4.12 Triangle function

隶属函数形状：下降斜率函数

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

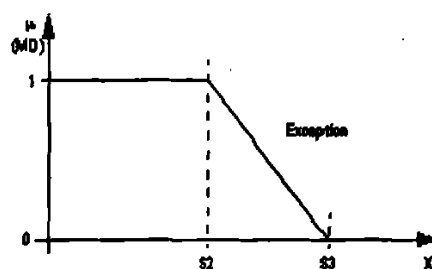


图 4.13 下降斜率隶属函数

Fig. 4.13 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 4.14 所示。

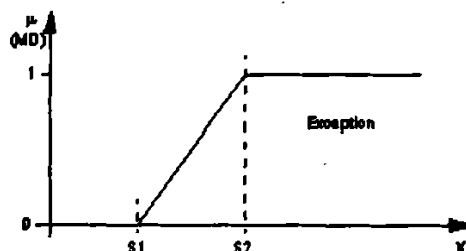


图 4.14 上升斜率隶属函数

Fig. 4.14 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 4.15 所示。

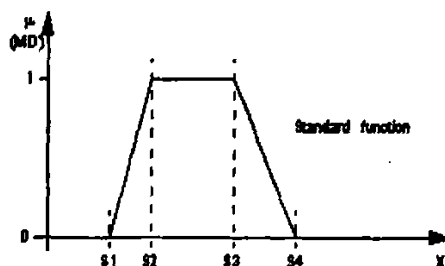


图 4.15 梯形隶属函数

Fig. 4.15 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 4.16 所示。

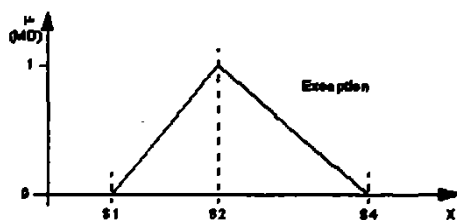


图 4.16 三角形隶属函数

Fig.4.16 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 4.17 所示。

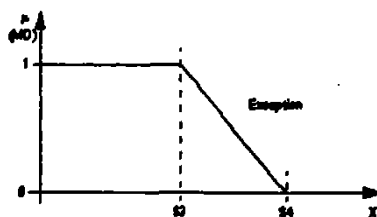


图 4.17 下降斜率隶属函数

Fig. 4.17 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 4.18 所示。

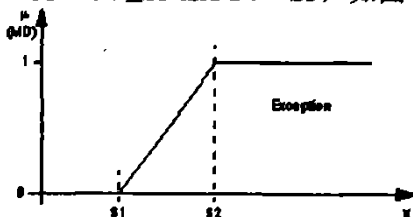


图 4.18 上升斜率隶属函数

Fig. 4.18 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 4.19 所示。

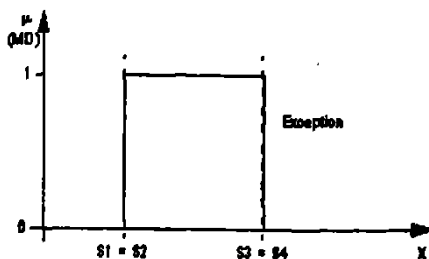


图 4.19 上升斜率隶属函数

Fig. 4.19 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 4.20 所示。

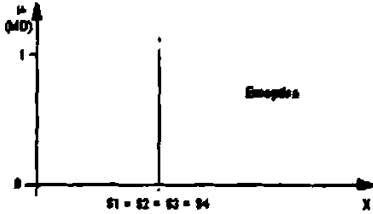


图 4.20 单独点隶属函数

Fig. 4.20 Singleton: function

该功能块在 Concept 软件中的符号表示如图 4.21 所示。

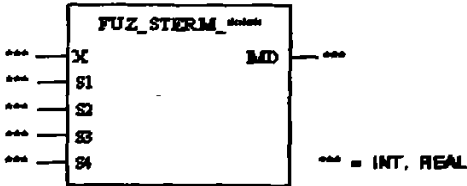


图 4.21 功能块在 Concept 软件中的符号表示

Fig. 4.21 Symbol Figure of function block

该功能块输入输出信号的类型和意义如表 4.7 所示。

表 4.7 FUZ_STERM_***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_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 ... 10 000，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 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 4.28 所示。

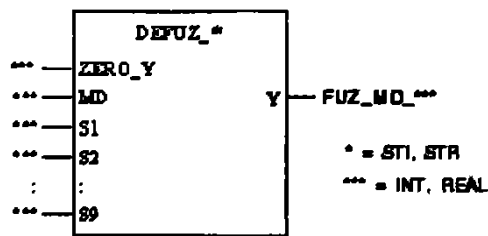


图 4.28 功能块在 Concept 软件中的符号表示

Fig. 4.28 Symbol: Figure of function block

输入输出规则为：

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

其中，n 为信号的设定点数；首要工作条件：2≤n ≤9，输入输出信号的类型和意义如表 4.8 和表 4.9 所示。

表 4.8 DEFUZ_STI, DEFUZ_STR 功能块输入输出信号的类型和意义		
Table 4.8 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 4.9 所示。

表 4.9 DEFUZ_STI, DEFUZ_STR 功能块输入输出信号的类型和意义		
Table 4.9 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 ...

10 000，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 4.29 所示。

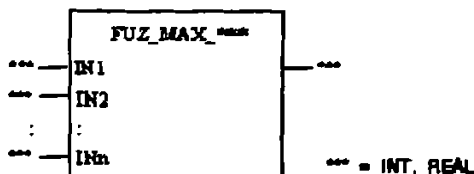


图 4.29 功能块在 Concept 软件中的符号表示

Fig. 4.29 Symbol: Figure of function block

输入输出规则为：

$$OUT = MAX(0, IN_1, IN_2, \dots, IN_n) \quad (4.3)$$

输入输出信号的类型和意义如表 4.10 所示。

表 4.10 FUZ_MAX_INT, FUZ_MAX_REAL 功能块输入输出信号的类型和意义

Table 4.10 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 ... 10 000，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 4.30 所示。

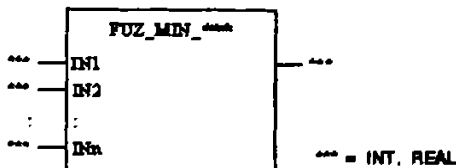


图 4.30 功能块在 Concept 软件中的符号表示

Fig.4.30 Symbol: Figure of function block

输入输出规则为：

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

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

输入输出信号的类型和意义如表 4.11 所示。

表 4.11 FUZ_MIN_*** 功能块输入输出信号的类型和意义
Table 4.11 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

4.4.2 利用 Fuzzy 库实现模糊控制器

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。

4.4.2.1 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:

$$X = \{-4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4\} \quad (4.6)$$

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 S_1 , S_2 , ... 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 4.31 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 4.32 所示。

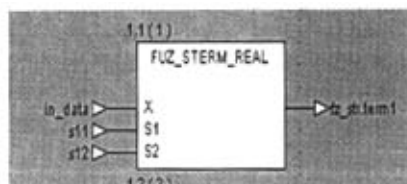


图 4.31 下降沿隶属函数的实现

Fig. 4.31 Falling ramp function

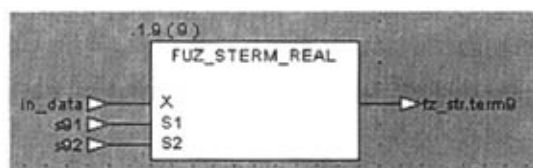


图 4.32 上升沿隶属函数的实现

Fig. 4.32 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 4.33 所示。

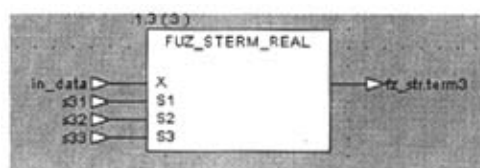


图 4.33 上升沿隶属函数的实现

Fig. 4.33 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 4.34 所示。

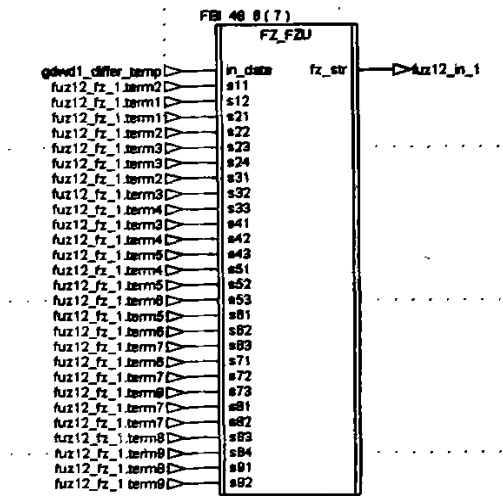


图 4.34 实现整个隶属函数的用户自定义功能块

Fig. 4.34 user define function block realization Subjection function

该功能块输入输出信号的含义如下：

- (1) dwd1_differ_temp: 热风炉拱顶温度在采样周期内温度的变化 T
- (2) 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。
- (3) 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：

$$X = \{-0.4,-0.3,-0.2,-0.1,0,+0.1,+0.2,+0.3,+0.4,\} \tag{4.7}$$

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。

4.4.2.2 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 4.35 所示。

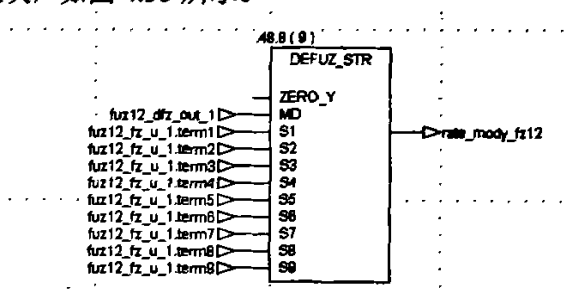


图 4.35 反模糊化处理使用的功能块

Fig. 4.35 Defuzzifies disposal used defuzzifies block

该功能块输入输出信号的含义如下：

(1)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。

(2)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。

(3)输出量 rate_mody_fz12 即为一个物理的精确量。

输入输出规则为：

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

4.4.2.3 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

(2)输入信号 $\text{fuz_fz_u_1.term1-fuz_fz_u_1.term9}$ 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。

(3)输出量 rate_mody_fz12 即为一个物理的精确量。

输入输出规则为:

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

4.4.2.3 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 3.36 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 2 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。

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。

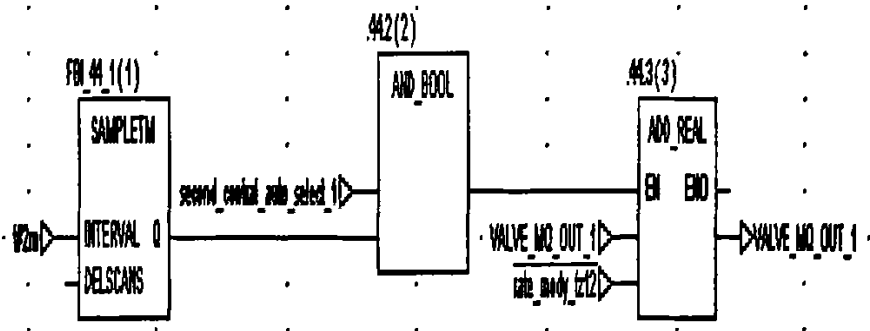


图 4.36 煤气调节模糊控制器对煤气流量调节阀的控制

Fig. 4.36 The control to coal gas adjust valve from coal gas adjust fuzzy controller

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 自动燃烧模糊控制器的现场调试

5.1 概论

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。

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。

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,操作人员根据热风炉的炉顶温度,烟道温度和残氧量的变化情况,依据工作的经验,人为改变参与燃烧的煤气和空气的配比,因为生产环境的复杂,控制效果较差,基本上是最原始的手工调节方式。这样的结果就是风温很难达到高炉的要求,造成高炉生产的不稳定,有时就算是达到了高炉的要求,但是浪费了大量的能源。

为了解决上述生产上存在的问题,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,也是需要在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。

(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。

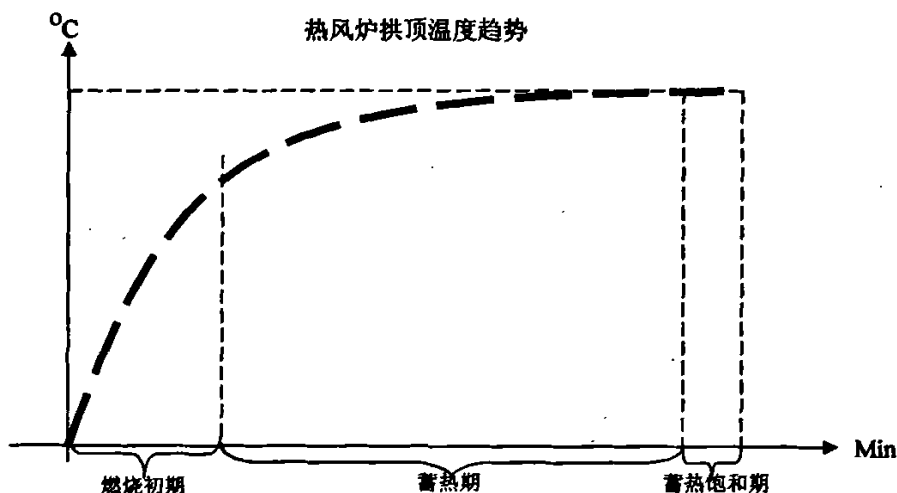


图 5.1 热风炉拱顶温度趋势曲线

Fig. 5.1 The top temperature curve of the blast furnace

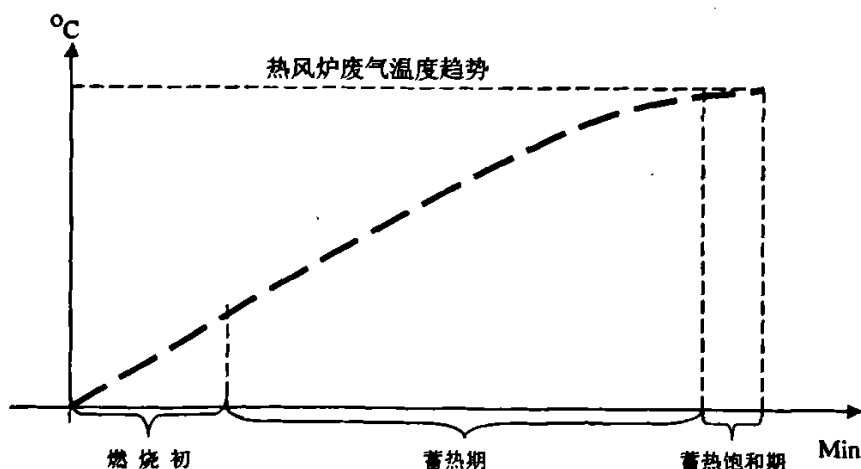


图 5.2 热风炉废气温度趋势曲线

Fig. 5.2 The exhaust gas temperature curve of the blast 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。

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,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。

(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。从输入输出的角度看,所谓控制规则的完整性,是指对任意的模糊输入,模糊控制器均能产生一个对应的控制量,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。

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。

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

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

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
精确值		400	300	200	100	0	-100	-200	-300	-400

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 $Ke = n / Xe, K_{ec} = n / X_{ec}$ 。若误差量化因子 Ke 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。

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

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
精确值		200	150	100	50	0	-50	-100	-150	-200

5.5 应用模糊控制后自动燃烧系统的实际效果

应用模糊控制的自动燃烧系统实际投入使用后,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。

5.5.1 简化了燃烧操作

(1) 简化了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。

初始烧火时先手动设定 40%-50%空气调节阀阀位,再手动设定 40%-50%的煤气调节阀阀位。停烧时,先手动设定煤气调节阀阀位 0%,再手动设定空气调节阀阀位 5%,操作较为繁琐。

现在采用自动燃烧系统后,只需要在监控画面点击“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,直到实际过程值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。

(2) 简化和精确了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,实际煤气流量值会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,实际空气流量值会自动会跟踪到设定

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

5.5.2 稳定了燃烧过程

自动燃烧系统稳定了燃烧过程，体现在以下几个方面：

- (1) 实现了煤气和空气流量的精确控制及配比
原来手动烧火，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，根本无法精确定量煤气和空气，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，操作人员可以极其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。
- (2) 克服了高炉煤气压力等外界干扰对煤气流量的扰动，稳定了煤气和空气流量

在燃烧的过程中，煤气和空气流量的稳定供给非常重要。原来手动烧火，阀位固定不变，当煤气压力突变或者出现其他扰动时，没有调节手段，人为调节又非常滞后，因此经常造成煤气流量的剧烈波动。由于煤气流量的频繁剧烈波动，直接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 10000M³/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，途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。

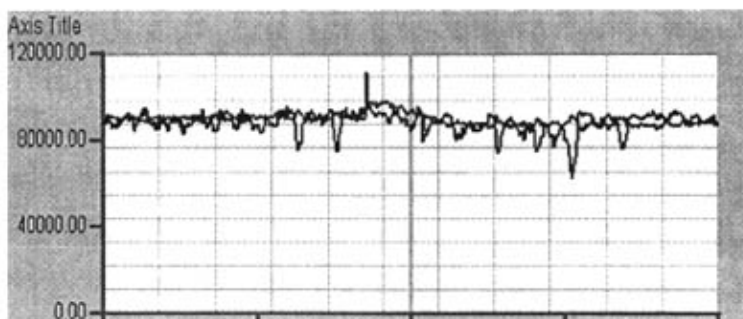


图 5.4 原来系统煤气流量和空气流量的实时显示曲线

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。

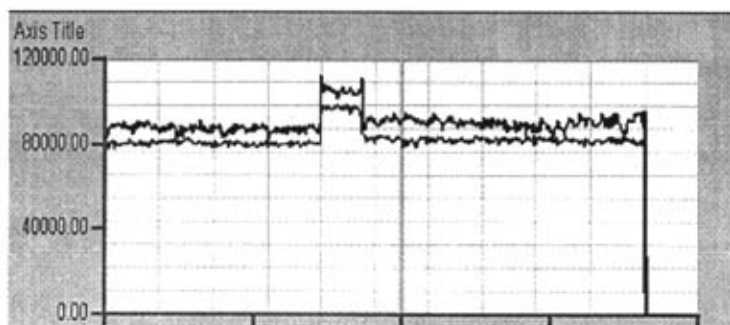


图 5.5 改造后煤气流量和空气流量的实时显示曲线

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

(3) 稳定了残氧值

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。

原来手动烧火没有残氧控制,只是根据残氧值的变化手动改变空气或者煤气的流量,原系统修正量值非常困难,再加上人为判断的不准确,残氧值对烧火效果的修正作用极为有限。残氧值的变化范围很大,有时 0.3%,有时 3.5%,由此可以看出实际燃烧效果非常不好,时而煤气过剩,时而空气过剩,浪费了很多宝贵的能源,也影响了拱顶温度的稳定。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,可以看到变化非常大。

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,通过在热风炉的实际应用,对稳定残氧值,效果非常明显。

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,效果很好,热风炉拱顶温度在蓄热期保持稳定缓慢上升的趋势非常理想。同时,也弥补了煤气流量波动对燃烧过程的影响,基本上使得两种参与燃烧的物质在整个燃烧期间保持了较为合理的配比。

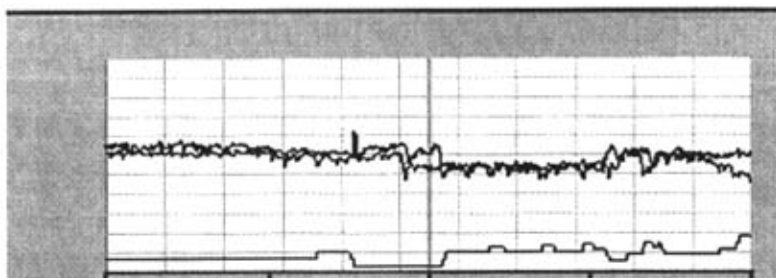


图 5.6 原来系统废气残氧量的实时显示曲线

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

通过系统的实际控制,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。下图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,可以看到,在整个燃烧周期中,残氧值的波动很小,说明整个燃烧过程很稳定,燃烧充分,配比合理。

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。

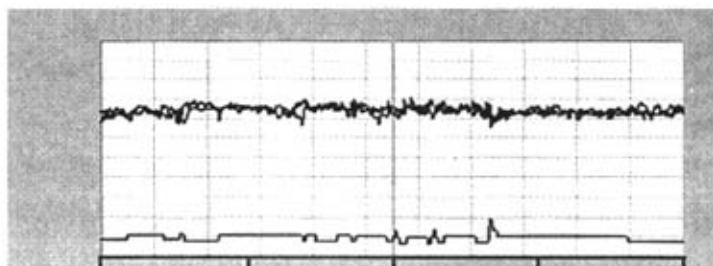


图 5.7 改造后废气残氧量的实时显示曲线

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

5.5.3 提高了操作的安全性和可靠性

(1) 增加了点火过程的安全性

原来点火过程完全靠手动打开煤气和空气调节阀,操作人员先设定空气调节阀的开度,马上就设定煤气调节阀开度,一旦遇到空气调节阀出现故障,往往造成煤气送出而空气未送出或者送出量极小的危险情况。原来的操作方式只有规程上的约束,没有实际的连锁保护,安全性不高。

现在使用自动燃烧系统的点火过程,有程序的连锁保护。点火时只有在空气流量达到设定值的前提下,煤气调节阀才能开。这样,从根本上避免了有煤气而无空气的危险情况的发生。

(2) 增加了停烧过程的安全性

原来停烧过程也是靠手动关闭煤气和空气调节阀,为了提高操作的快速性,操作人员往往也不能完全做到在煤气流量回零以后再关空气调节阀。因此,也存在煤气未回零就发生空气流量回零的危险情况。

现在使用自动燃烧系统的停烧过程,程序上也增加了连锁保护。煤气流量确认回零后,空气调节阀才能关闭,最大程度上保证了安全。

5.5.4 提高了高炉风温

自动燃烧系统投入以来三高炉风温指标情况的对比情况如表 5.3:

表 5.3 三高炉风温指标情况的对比 (2005 年)		
Table 5.3 The temperature of hot wind of third blast furnace of SG (2005 year)		
月份	月平均风温 (°C)	月较上月提高或降低 (°C)
3 月	1088	
4 月	1093	
5 月	1097	
6 月	1111	+14

通过以上两个月三高炉风温指标的比较,使用自动燃烧系统后对提高风温效果非常明显。

5.5.5 节约了能源

自动燃烧系统投入以来能源使用情况的对比:

(1) 焦炉煤气用量的比较情况如表 5.4 所示。

表 5.4 三高炉焦炉煤气用量的对比情况 (2005 年)				
Table 5.4 The wastage of coking plant gas of third blast furnace of SG (2005 year)				
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

(2) 高炉煤气用量的对比情况如表 5.5 :

表 5.5 三高炉高炉煤气用量的对比情况 (2005 年)
Table 5.5 The wastage of blast furnace gas of third blast furnace of SG (2005 year)

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

通过以上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。

第六章 结束语

6.1 热风炉自动燃烧系统的主要功能总结

基于模糊控制的热风炉自动燃烧系统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。

6.2 热风炉自动燃烧系统系统有待改进之处

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。

(3) 现在自动燃烧系统为单独的一套上位监控系统,画面和功能与原来的手动系统有重复之处,将来可否考虑将此两套系统合而为一,以增加操作的简便性。

(4) 现在的自动燃烧系统与换炉过程没有关联,将来可考虑将点火和停烧与换炉联系,以减轻操作人员的工作强度。

6.3 如何使用好自动燃烧系统

为了充分发挥自动燃烧系统的作用,提高使用自动燃烧系统的规范性和正确性,可以按照下面的步骤使用自动燃烧系统。

(1) 投入自动燃烧系统操作

(a) 换炉后直接投入自动燃烧系统

投入自动燃烧系统前，应检查以下项目：

- 空气调节阀阀位<10%
- 煤气调节阀阀位 0%
- “燃烧”信号出现

在上述条件满足后，单击“自动燃烧投入”按钮，按钮文字显示红色，即可。

(b) 燃烧期间投入自动燃烧系统

单击“自动燃烧投入”按钮，按钮文字显示红色，即可。

(2) 手动修改煤气空气流量

(a) 单击监控画面上的“煤气流量自动设定”绿色按钮，此时按钮变为黄色，显示“煤气流量手动设定”，此时可以人为输入煤气流量设定值，再次单击该按钮，恢复自动；

(b) 单击监控画面上的“空气流量自动设定”绿色按钮，此时按钮变为黄色，显示“空气流量手动设定”，此时可以人为输入空气流量设定值，再次单击该按钮，恢复自动；

(3) 退出自动燃烧系统操作

(a) 正常情况下，单击“自动燃烧投入”按钮，按钮文字显示蓝色，即可。此时，当前的煤气和空气调节阀阀位自动切换至原手动系统的阀位设定值，当前热风炉燃烧状况保持不变。

(b) 异常情况下，单击手动烧火系统监控界面的 F11 键，全部退出自动燃烧系统，且当前工况不变。

(4) 加，减烧操作

(a) 自动加，减烧：

自动燃烧系统根据烟道温度的上升速度会自动进行加减烧操作（每 15 分钟）。当上升速率 $>1.3^{\circ}\text{C}$ 时，执行煤气流量和空气流量同时减量（ 3000m^3 ）操作；当出现手动加烧操作信号时，自动减烧操作禁止；

当上升速率 $<1.0^{\circ}\text{C}$ 时，执行煤气流量和空气流量同时加量（ 3000m^3 ）操作；当出现手动减烧操作信号时，自动加烧操作禁止；点击“取消自动减烧”按钮，可以取消自动减烧功能。

(b) 手动加减烧：

单击监控界面的“加烧操作”按钮，当前的煤气流量和空气流量设定值同步执行增加（ 3000m^3 ）操作，此按钮单击 30 秒后继续有效；

单击监控界面的“减烧操作”按钮，当前的煤气流量和空气流量设定值同步执

单击监控界面的“减烧操作”按钮，当前的煤气流量和空气流量设定值同步执行减少（3000m³）操作，此按钮单击 30 秒后继续有效；

单炉烧火时，此功能无效。

(5) 停烧操作

正常情况，单击“停烧”按钮，按钮文字显示红色，即可；

自动连锁停烧：当出现以下情况时，自动燃烧系统自动停烧。

(a) 助燃风总管压力低

(b) 煤气总管压力低

(c) 空气流量<5000m³/h

(6) 单炉烧火操作

系统自动检测单炉信号，单炉时，煤气和空气流量自动按照单炉烧火的情况配比，无需人为干预，单炉取消时，煤气和空气流量自动恢复双炉烧火配比。

(7) 注意事项

换炉后选择直接投入自动燃烧系统，需要检查原来手动操作系统的空气调节阀和煤气调节阀的手动设定阀位是否为 5% 和 0%，如果不是，需要按照这两个数值设定后，再选择投入自动燃烧系统。

如果投入自动燃烧系统后，空气调节阀或者煤气调节阀出现阀位不动等异常情况，可以马上退出自动燃烧系统，等调节阀故障处理完成后，可以利用原来系统手动烧火，也可以继续投入自动燃烧系统。

(8) 报警和保护

本系统提供了语音报警功能，主要的报警项目和参数如下：

(a) 废气温度：> 347℃

(b) 废气温度：< 150℃

(c) 煤气总管压力：< 7 KPa

(d) 煤气总管压力：>12 KPa

(e) 混合煤气压力：< 8 KPa

(f) 混合煤气压力：>13 KPa

(g) 空气总管压力：< 2 KPa

(h) 空气总管压力：> 6 KPa

(i) 助燃风机电流：> 60 A

(j) 拱顶温度：>1300 ℃

(k) 拱顶温度：< 800 ℃

(l) 煤气流量: $<20000 \text{ m}^3/\text{h}$

(m) 空气流量: $<20000 \text{ m}^3/\text{h}^3$

当出现报警项目时,系统将提示声音报警,单击“取消语音”按钮,消除音响。

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] 胡仁安. 钢铁工业自动化的新技术(下) [M].冶金自动化.2001(2): 6-9
- [3] 马竹梧, 邱建平,李江.钢铁工业自动化(炼铁卷)[M].北京:冶金工业出版社.2002:227-230
- [4] 冯冬青,谢宋和. 模糊智能控制[M].北京:化学工业出版社.1998:33-38
- [5] 李士勇等. 模糊智能和智能理论与应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社.1990:23-28
- [6] 韦思亮.Visual Basic 6.0 实用技术指南[M].北京:人民邮电出版社.2003:145-167
- [7] 刘立志等.一种新的智能模糊算法及其应用[J], 控制与决策, 1995 (1) :93-96
- [8] 孔兴朗. 单片机原理及其在家电中的应用[M],郑州:河南科学技术出版社,2004:142-154
- [9] 杨松林. 工程模糊论方法及其应用[M], 北京:国防工业出版社, 1996:20-25
- [10] 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
- [11] Kosko B. Neural network and fuzzy systems [M].A dynamical approach to intelligence .NJ.Prentice -Hall.1992:102-105
- [12] Patrikar A, Provence J. A self-organizing fuzzy controller for dynamic process using neural network techniques[J]. Amercian Control Conference 1989:359-364
- [13] Iwata T,Machida K.Today Y.Fuzzy control using neural network techniques[J].Amercian Control Conference 1989:365-370
- [14] Lee C C .A self -lerning rule -based controller employing approximate reasoning and neural network Concepts[J].Int.J.Inter Syst.1991(6):71-94
- [15] Berenji H R ,Khedkar P.Lerning and tuning fuzzy logic Controller through reinforcement.IEEE Trans NN.1992(3):724-740
- [16] Wang Lixin,Mendel J M .Generating fuzzy rules by lerning from examples.IEEE Trance SMC.1992(6):1414-1427
- [17] 刘全兴. 模糊控制系统稳定性分析和控制器设计[J].控制与决策.1991(3):178-184
- [18] 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
- [19] Nie J H, Linkens D. A.Back-propagation neural network based fuzzy controllers with self-lerning tercher[J].Int .J.Congtrol.1994,60(1):17-39
- [20] Nie J H ,Linkens D. A.Fast self-lerning multivariable fuzzy controllers with a self-lerning tercher[J].Int .J.Congtrol, 1994,60(3):369-393
- [21] 万谷志. 钢铁冶炼[M].北京:冶金工业出版社.2003:99-105
- [22] 余永权.单片机模糊逻辑控制[M].北京:北京航空航天大学出版社.2002:15-19
- [23] 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.
- [24] Linkens D A ,Nie J H .Constructing rules - bases for multivariable fuzzy control by self - lerning[J].Int .J.System Sci.1993,24(1):111-156
- [25] K.Mastuda et al.APPlications of artificial intelligence to operation control of Kobe[A].No.3 blast furnace.Proc.of the Sixth International Iron and Steel Congress. Nagoya, Japan,ISIJ1990,5:1-9.
- [26] Hayashi Y,Buckey J J. Fuzzy neural networks,A survey[J].Fuzzy Sets and Systems , 1994,66(1):1-13
- [27] 王意冈.一类模糊系统模式的稳定性研究[D],控制理论与应用.1995(4):437-444

- [28] 邵军力, 张景, 魏长华. 人工智能基础[M]. 电子工业出版社. 2000: 133-138
- [29] 蔡自兴, 徐光佑. 人工智能及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社. 2000: 119-124
- [30] 宫叔家. 冶金仪表与自动调节[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1990: 55-60
- [31] 阮智利. 自动检测与转换技术[M]. 北京: 机械工业出版社. 1994: 78-84
- [32] 邵裕森. 自动控制系统工业生产过程自动控制系统[M]. 北京: 中央广播电视大学出版社. 1996: 132-156
- [33] 诸静等. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社. 1995: 6-9

致 谢

在本论文完成之际，首先要感谢我的指导老师王建辉教授，对我撰写论文所给予的悉心的指导，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。

感谢魏建平，胡丕俊高工在繁忙的工作之余对我完成论文的鼎力相助。还要感谢首钢炼铁厂朱继东，刘景春工程师以及有关人员对我们完成项目试验给予的大力支持。感谢在我编写论文期间给予我支持与帮助的同学和同事们。