

分类号_____

密级_____

U D C _____

编号_____

中南大學

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕士学位论文

论文题目 燃煤锅炉燃烧过程控制系统

设计与研究

学科、专业 控制工程

研究生姓名 施修峰

导师姓名及
专业技术职务 桂卫华 教授
姚继东 高级工程师

2005年11月

摘要

洛阳市热力公司 26#供热站担负着为西工区供暖的任务。虽然设备几经更新，但由于种种原因，采暖能耗一直很高。其中锅炉燃烧控制落后是原因之一。

本文以 26#供热站的 2 台 50t/h 燃煤锅炉的燃烧控制系统为研究对象，以改进原有 PID 控制系统为目的，以当前发展比较迅速的模糊控制理论为手段，提出了采用 8051 单片机控制变频器改变给煤机、引风机和送风机转速的设计方案，实现了燃烧过程的计算机控制。系统对锅炉燃烧进行监控，通过传感器采样信号，计算是否达到最佳含氧量、最佳风煤比，来控制给煤量、引风量和送风量，使燃烧达到最佳热效率和提高锅炉运行的经济效益。用 MATLAB 对基于模糊自整定 PID 控制器的锅炉燃烧控制系统模型进行仿真研究。

锅炉燃烧过程具有非线性、参数时变、难以建立精确数学模型的特点，采用传统的 PID 控制，效果不佳。结合模糊控制理论和 PID 控制，本文提出用模糊自整定 PID 控制器实现对锅炉的燃烧过程控制。并利用 MATLAB 仿真工具对模糊自整定 PID 控制器的性能作了初步研究。仿真结果表明，模糊自整定 PID 控制明显优于传统 PID 控制，具有超调量小、过渡时间短、稳定性好、适应性强等特点，能够达到预期的控制效果。

论文详细介绍了锅炉控制系统的设计，其中包括硬件结构、系统主要功能、系统硬件配置、软件设计原则、主程序流程等。系统投入运行后，锅炉的燃烧效率和稳定运行情况都有了明显改善，有利于锅炉高效稳定运行，实现增产降耗的目标。

关键词：锅炉，模糊自整定 PID 控制，单片机，系统仿真

ABSTRACT

The No.26 heating station of Luo Yang Heating Company takes on the heating task for Xigong area. Although the equipments have been renovated for several times, heating energy waste remains very high. One reason is burning control level is too low.

In order to improve the primary PID controller, two 50t/h coal-fired boilers' burning control system of 26# heating station was studied as its thesis in this paper. The design scheme was that controlling transducers change rotate speed of supplying coal electromotor, fan, and blower using 8051 micro-controller, which based on fuzzy control theory developed rapidly at present. It realized computer control of burning process. This system finished supervisory control of boiler burning, sampled signals through sensors and calculated the signals whether reached the best content of oxygen and the best wind-coal ratio, which was used to control the quantity of coal, entering wind and sending wing for reaching the best thermal efficiency of burning and improving economy benefit of boiler running. Simulation of boiler burning control system was also performed to study the fuzzy self-tuning PID controller by MATLAB.

Aiming at the nonlinear object of boiler with instability parameter and difficult building math model, using traditional PID controller can't reach the best effect. Combining fuzzy control theory and PID control, a fuzzy self-tuning PID controller is proposed in this paper. The capability of the fuzzy self-tuning PID controller was studied using MATLAB. The result of simulation shows fuzzy self-tuning PID controller is better than PID controller. The system based on it has many characteristics, such as small exceeded value, short transition, better stability and strong adaptability etc, and it can reach anticipative control effect.

Since this system has carried out. The combustion efficiency and stabilization of boiler in evidence. So which has made for effective and stable circulation of boiler and the realization of increasing production and dropping cost goal.

This paper introduced the design of the boilers' control system, including main configuration of hardware, main function of system, dispose of hardware, fundamental of software's design, flow of main process, and so on. This system improved the burning efficiency and running situation, also make the boiler running stably and realized the purpose of reducing energy consumption while increasing output.

Keywords: boiler, fuzzy self-tuning PID controller, micro-controller, simulation

目 录

第一章 绪论	1
1.1 论文研究背景	1
1.2 论文研究的对象及改造要求	1
1.3 国内外现状	4
1.4 论文研究内容及结构安排	5
第二章 燃煤锅炉工艺情况介绍及对控制系统要求	6
2.1 链条锅炉系统介绍	6
2.1.1 燃煤链条锅炉各部分的组成	6
2.1.2 锅炉的工作过程	7
2.1.3 锅炉设备的主要控制系统	8
2.2 锅炉燃烧系统的动态特性	9
2.2.1 燃料传送过程	9
2.2.2 燃料燃烧过程	9
2.2.3 蒸汽形成过程	9
2.3 锅炉供暖系统的控制要求	10
2.4 小结	11
第三章 锅炉自动化控制系统方案设计	12
3.1 系统概述	12
3.2 锅炉燃烧控制系统框图	13
3.3 模糊控制原理	13
3.3.1 模糊控制器	14
3.3.2 模糊控制系统原理框图	16
3.4 模糊—PID 复合控制	16
3.4.1 PID 参数 Fuzzy 自整定控制原理	17
3.4.2 PID 参数 Fuzzy 整定模型	18
3.4.3 模糊自整定 PID 控制器	19
3.5 锅炉控制系统方案设计	20
3.5.1 给煤调节系统的设计	20
3.5.2 送风调节系统的设计	22
3.5.3 引风调节系统的设计	22
3.5.4 炉膛负压调节系统	23
3.6 锅炉汽包水位的控制	25
3.7 蒸汽过热系统的控制	26
3.8 计算机控制设计原理	27
3.9 小结	28

第四章 锅炉燃烧控制系统实现	29
4.1 硬件实现	29
4.1.1 硬件结构	29
4.1.2 系统主要功能	30
4.1.3 系统硬件配置	31
4.1.4 存储器扩展电路	32
4.1.5 键盘接口电路	34
4.1.6 模拟量输入电路	35
4.1.7 模拟量、开关量输出电路	36
4.2 软件实现	38
4.2.1 软件设计的基本原则	38
4.2.2 软件实现的功能	38
4.2.3 系统主程序流程图	39
4.2.4 锅炉点火启动子程序流程图	41
4.2.5 A/D 采样子程序流程图	42
4.2.6 控制算法子程序流程图	43
4.3 模糊自整定 PID 控制器在锅炉控制中的仿真	44
4.3.1 仿真工具介绍	44
4.3.2 SIMULINK 构造的模糊自整定控制器模型	45
4.3.3 供暖锅炉燃烧控制系统仿真	47
第五章 锅炉自动化控制系统的运行	50
第六章 结 论	55
6.1 本篇论文完成的主要工作	55
6.2 需要进一步完善的工作	56
参考文献	57
致 谢	60
攻读硕士学位其间发表及完成论文情况	61

第一章 绪 论

1.1 论文研究背景

随着城市建设的迅速发展，北方地区冬季城市集中供热成为现代化建设必须采取的步骤。而供热面积的不断扩大，使如何科学有效的控制和管理供热系统，提高供热的经济效益和社会效益，成为急需解决的重要课题。

在供热系统中，锅炉房供热所占比例很大。据对全国 29 个大中城市近 3.7 亿平方米的调查，分散锅炉房供热占 84%，且锅炉容量大多在 20t/h 以下。这些锅炉是主要的耗能设备。据不完全统计，采暖地区采暖能耗已达 1.27 亿吨标准煤，占全国总能耗的 10.7%^{[1][2]}。而其中大部分锅炉自动化程度不高，运行效率低，浪费能源严重。为此，国内专家对锅炉本体燃烧的自动控制做了很多研究，本篇论文以洛阳市热力公司 26#热力站锅炉系统的改造为背景，利用近几年来工业控制领域中比较先进的模糊控制技术，来改善原有锅炉系统的控制方式，使锅炉燃烧系统得到最佳控制^[3]。

当然供热系统的功效不仅仅是通过锅炉系统本身来完成的，更需要热源（锅炉系统）、热网、热用户构成不可分割的整体之间合理匹配才能最大限度的实现高效节能的目的。本文主要针对锅炉燃烧控制系统进行研究，供热系统中其它部分的改造在此不作为讨论对象。

1.2 论文研究的对象及改造要求

经过对洛阳市热力公司的调研，课题研究集中在对热力公司 26#供热站的改造上，26#供热站现有 2 台 50t/h 链条锅炉（3#锅炉，4#锅炉），设计供回水温度为 130 ℃/80 ℃供热面积 80 万 m²，有 7 个换热站（分别为 26#、25#、16#、4#、3#东、3#西、2#换热站），分布在洛阳市的各个住宅小区内，由锅炉房 2 台热水锅炉送出的高温高压水送至各个换热站，再由各个换热站采用板式换热器换热送至用户。

26#供热站使用的锅炉是链条型，针对链条锅炉燃烧的特点，炉膛内不同地带的燃烧层进行着不同的燃烧阶段，因此各个区域燃烧所需的空气量和燃烧层中释放的气体成份也是不同的。对于每个燃烧阶段的长短和所需的空气量会有所不同，即氧气含量多少会有变化，采用合适的风煤比才能较好配合燃烧过程，以达到充分燃烧的目的。燃煤锅炉的燃烧过程具有较大的热惯性，且受煤质、煤种、炉排配风是否

合理及炉膛漏风等因素影响，使燃煤锅炉的自动调节更困难。洛阳市 26#供热站原有的燃烧控制系统在控制方法设计上没有达到最佳控制效果，系统因控制手段不精确，引起过多空气进入炉膛，将热量带走，降低了效率。在实际运行中，由于送风和给煤调节存在一定的滞后时间，加上过程对象本身的时间常数又较大，现场实施中控制效果不理想。为此，结合本工程实际情况决定对燃烧系统进行必要的改造，采用比较先进的模糊控制技术，来代替原有传统 PID 控制方法。

分析链条炉的燃烧动态特性，发现它具有很大的惯性和纯时延。从加热扰动到蒸汽发生变化一般滞后 2~3 分钟以上。燃料的种类、质量、炉排上煤层厚度等的各种情况的变化，导致燃烧过程的不稳定。因此，锅炉燃烧过程是个具有大惯性、大纯时延、变参数的多输入多输出复杂过程。传统的锅炉燃烧控制多采用 PID 控制器。但 PID 调节控制是无法为具有大惯性、大纯时延和变参数的过程提供高质量的控制。解决这些问题的方法是采用比 PID 更为有效的控制技术。采用模糊控制技术完成对燃烧系统的控制，就能达到较好的控制效果，能够弥补 PID 的不足，有较强的适应性。这为链条炉的燃烧控制开辟了新的途径。

模糊控制是经典控制理论发展的高级阶段。主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制，其中包括智能机器人系统、复杂工业过程控制系统，航空航天控制系统、交通运输系统等，实现对生产过程的多模态复合智能控制。其目的是提高系统的鲁棒性、容错性和解决具有严重的非线性和不确定系统的控制问题。

模糊控制同传统控制的不同在于，它不依赖于被控对象的数学模型，而是在总结经验操作的基础上实现自动控制的一种手段，它根据人工控制规则组织控制决策表，然后由该表决定控制量的大小。其组成核心是具有智能性的模糊控制器，这是它与一般 PID 在原理和方法上完全不同之处。

PID 控制是最早发展起来的应用经典控制理论的控制策略之一。由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高，被广泛应用于工业过程控制中。尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。而实际工业控制过程中经常会遇到大滞后、时变、非线性的复杂系统。其中，有的参数未知或缓慢变化、有的存在滞后和随机干扰、有的无法获得精确数学模型等，应用常规 PID 控制不能达到理想的控制效果；另外传统 PID 控制算法呆板、整定不便、性能欠佳、对运行工况的适用性较差等，单纯采用 PID 控制往往达不到满意的效果。

模糊控制与传统 PID 控制理论有机结合起来，可构成 Fuzzy-PID 复合型控制系统，既具有模糊控制灵活而适应性强的优点，又具有 PID 控制精度高的特点。因此模糊控制并不是代替，而只是拓展了传统的控制。模糊自整定 PID 参数控制系统能在控制过程中对不确定的条件、参数、延迟和干扰等因素进行检测分析，采用模

糊推理的方法实现 PID 参数 K_p 、 K_I 和 K_D 的在线自整定，不仅保持了常规控制系统原理简单、使用方便、鲁棒性较强等优点，而且具有更大的灵活性、适应性，控制也更精确。

控制系统计算机仿真对控制系统进行科学的研究的十分重要的手段。通过计算机仿真来对比各种控制策略和方案、优化并确定相关参数、以获得最佳控制效果是多年来控制系统设计尤其是新型控制策略与算法研究中必不可少的技术。采用 MATLAB 对模糊自整定 PID 控制进行计算机仿真，可快速方便地实现多种规则和参数的准确仿真效果，极大地提高模糊自整定 PID 参数控制系统设计的效率和准确性。

MATLAB 是 Math Works 公司推出的应用开发工具，在国际学术界 MATLAB 已经被确认为准确、可靠的科学计算标准软件^[4]。其中 SIMULINK 是 MATLAB 中一个进行动态系统建模、仿真和综合分析的集成软件包。它可以处理的系统包括：线性、非线性系统；离散、连续及混合系统；单任务、多任务离散事件系统。MATLAB5.X 在原有版本基础上作了较大改进，不仅使 SIMULINK 可以用结构图的形式、选择各种数值算法及仿真步长参数、图形显示仿真结果等，而且可以对较复杂的控制规律以直接传递参数的方式直接实现仿真。其中 FuzzyLogicToolbox 最大的优点之一是能够使模糊系统直接进入 SIMULINK 并在仿真环境中检验它们的输出。因此，MATLAB5.X 运用于基于模糊控制系统的计算机仿真变得极为方便和有效。

锅炉供暖控制系统包括两个控制任务，燃烧系统控制和给水系统控制。本篇论文的主要任务是对燃烧系统进行改造。燃烧控制的基本任务既要使热量适应负荷的需要，还要保证燃烧的经济性和锅炉运行的安全性。因此燃烧控制要通过调节给煤量来保持分配到的负荷；调节送风使之随时与给煤量保持适当的比例，以保证完全燃烧和最小热损失；调节引风使之随时与送风相适应，以保证炉膛负压在一定的范围内。对于洛阳市 26#供热站的两台锅炉并列运行的母管制方式，还要实现按预定比例向两台锅炉分配负荷，使两台锅炉负荷均衡，共同维持供热母管的正常运行。根据母管制并列运行锅炉燃烧过程调节所要完成的任务，可将整个系统分为四个密切联系的子系统，即与并列运行的两台锅炉均有关的母管压力调节系统、锅炉的给煤调节系统、送风调节系统和引风调节系统。为了使给煤机、鼓风机、引风机协调工作，以克服耦合的影响，必须采用多变量输入输出的模糊控制方式控制锅炉的燃烧过程。

给水控制的任务主要是控制供水流量和回水流量，从而间接影响供水温度和回水温度。对于给水控制的改造，在本文不作讨论。

1.3 国内外现状

锅炉的自动化控制经历了三、四十年代单参数仪表控制，四、五十年代单元组合仪表、综合参数仪表控制，直到六十年代兴起的计算机过程控制几个阶段。尤其是近一、二十年来，随着先进控制理论和计算机技术的发展，加之计算机各项性能的不断增强及价格的不断下降使锅炉应用计算机控制很快得到了普及和应用^{[5][6][7][8]}。

在国外，锅炉的控制已基本实现了计算机自动控制，在控制方法上都采用了现代控制理论中最优控制、多变量频域、模糊控制等方法。因此，锅炉的热效率高、锅炉运行平稳、而且减少了对环境的污染^{[9][10][11]}。

在国内，由于经济技术条件的限制，我国中小企业锅炉控制水平一直比较落后，大多数中小型锅炉水平基本上停留在手工及简单仪表操作的水平。80年代中后期，随着各类先进的控制技术引进我国，锅炉控制水平也得到了很大提高。至90年代，锅炉的自动化控制已成为一个热门领域，利用单片机、可编程控制器、工业计算机以及引进的国外控制设备开发的各种控制系统，已逐渐应用于对原有锅炉的技术改造中，并向与新建炉体配套的方向发展。许多新的控制方法，诸如最优控制^[12]、自适应控制^[13]、模糊控制^{[14][15]}、神经网络控制^[16]、专家控制^[17]等都在锅炉自动控制中得到了尝试和应用。

从30年代起，锅炉控制中就采用了PID控制器。目前，国内的锅炉燃烧控制仍然大多采用常规PID控制器，或者为了改善控制效果，加一些前馈控制。控制方法远远落后于国外的控制技术，尤其是北欧国家和德国。据国外报道：在10t/h炮粉锅炉上应用自校正技术和在SIG-20型链条炉上使用Fuzzy控制已取得了节约燃料的良好效果。

现代工业向着大型化和连续化的方向发展，生产过程也随着日趋复杂，对生态环境的影响也日益突出，这些都对控制提出了更高的要求。不仅如此，生产的安全性和可靠性，企业的经济效益等都成为衡量当今自动控制水平的重要指标。因此，仅用常规仪表已不能满足现代化企业的控制要求。由于计算机具有运算速度快、精度高、存储量大、通讯灵活等特点，已在过程控制中得到十分重要的应用。锅炉作为一种典型的生产过程，其自动控制水平已随着过程计算机的发展而发展^{[18][19][20][21]}。

从当前的发展趋势看，在大型工厂中，过程计算机正成为一种把控制和管理融为一体综合自动化系统。它是在自动化技术，信息技术和各种^[17]工业生产技术的基础上，通过计算机将工厂生产活动所需的信息和各种分散的自动化系统有机的集

成起来，形成一个能适应生产环境不确定性和市场需求多变性总体最优的高质量、高效益、高柔性的智能系统，现已成为当前控制领域的一个重要研究方向。在控制技术方面，近年来，为了获得更好的控制性能，把基于数学模型的控制技术和基于经验知识的控制技术相结合的集成控制技术受到了重视，获得了广泛的研究[22][23][24][25]。

因此，锅炉的自动控制正朝着多学科结合的计算机技术的应用，管理控制一体化的发展[26][27]。

1.4 论文研究内容及结构安排

本文首先分析了链条锅炉的结构与运行特点，着重对锅炉燃烧控制系统进行研究。改变传统 PID 控制方法，采用 PID 控制器与模糊控制相结合的控制手段对锅炉燃烧进行控制，对锅炉控制系统中的其它自动控制系统简略予以描述，并给出燃烧控制系统与其它自动控制的接口；对锅炉燃烧的模糊—PID 控制算法进行 SIMULINK 仿真研究，与传统 PID 控制方法进行比较，仿真结果表明，优于传统控制，并且方案是有效可行的。

在锅炉燃烧系统中，给煤系统、送风系统、引风系统是燃烧控制系统的重要环节，以 MCS-51 系列单片机作为主控设备，通过传感器采集炉膛温度压力、含氧量和炉膛负压来调节锅炉的给煤量、送风量和引风量从而达到最佳热效率。同时采用 MCS-51 单片机控制变频器交流调速来控制给煤电动机、炉排电动机、鼓风机和引风机的转速，使它们协调动作，达到准确调节、快速反应的控制效果。

MCS-51 系列单片机可扩展外部接口电路，与其它自动控制系统（汽包水位控制系统、过热蒸汽气温调节系统）相连接，实现锅炉整体的监控，改善了系统的快速响应性能，达到稳态控制的要求。

论文的结构安排如下：

第二章 锅炉的工艺情况及对控制系统要求。

第三章 锅炉自动化控制系统方案设计。

第四章 锅炉燃烧控制系统软、硬件设计及仿真。

第五章 锅炉自动化系统的运行。

第六章 结论。

第二章 燃煤锅炉工艺情况介绍及对控制系统要求

近年来随着模糊集合理论与计算机技术的发展，模糊控制理论在各行各业得到了广泛的应用。基于模糊控制的锅炉计算机控制系统越来越受到关注^{[29][30][31][32][37]}。对 26#供热站的采暖锅炉进行计算机控制系统改造，采用模糊自整定 PID 的控制方法，对供暖锅炉的给煤系统、送风系统、引风系统进行了控制规律的设计。

2.1 链条锅炉系统介绍

2.1.1 燃煤链条锅炉各部分的组成

燃煤链条锅炉的组成如图 2-1 所示。锅炉组成主要由以下几部分组成：

1. 汽锅：由上下锅筒和管簇组成。水在管内受外烟气加热，因而管簇内发生自然的循环流动，并逐渐汽化，产生的饱和蒸汽聚集在上锅筒里面。下锅筒起着连接沸水管的作用，同时储水和水垢。

2. 炉膛：是使燃料充分燃烧并放出热能的设备。燃料（煤）由煤斗落在转动的链条炉炉箅上，进入炉内燃烧。所需的空气由炉箅下面的风箱送入，燃尽的灰渣被炉箅带到除灰口。落入灰斗中，得到的高温烟气依次经过各个受热面，将热量传递给水以后，由烟囱排到大气中。

3. 过热器：是将锅炉所产生的饱和蒸汽继续加热为过热蒸汽的换热器。

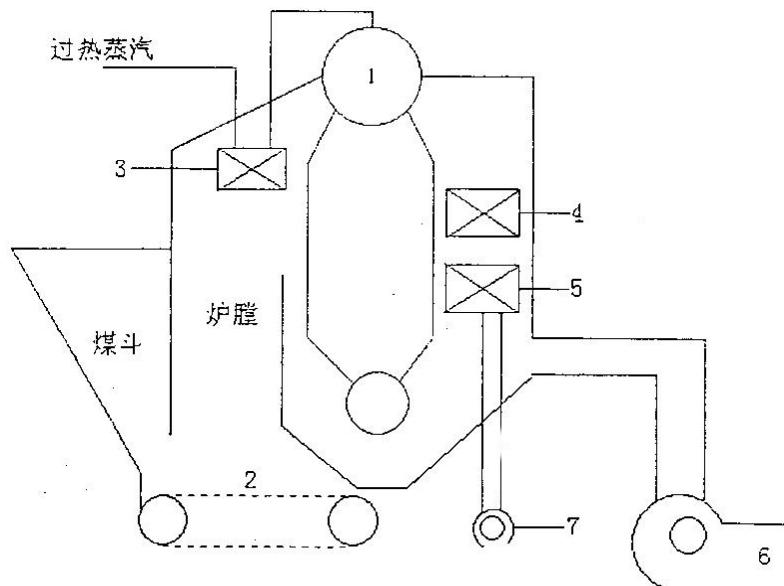
4. 省煤器：是利用烟气余热加热锅炉给水，以降低排出烟气温度的换热器。

5. 空气预热器：是继续利用离开省煤器后的烟气余热，加热燃料燃烧所需要的空气的换热器。通常，大、中型锅炉中均设有空气预热器。

为保证正常工作，锅炉还必须有一些辅助设备，包括以下几个部分：

1. 引风设备：包括引风机、烟囱、烟道口几部分，用它将锅炉中的烟气连续排出。

2. 送风设备：由送风机和风道所组成，用它来供应燃料燃烧所需的空气。



1- 锅筒 2-链条炉排 3-过热器 4-省煤器 5-空气预热器 6-引风机 7-送风机

图 2.1 燃煤链条锅炉结构简图

3. 给水设备：由给水泵和给水管组成。给水泵是用来克服给水管路以及省煤器的阻力和锅筒的压力，把给水送入锅筒。

4. 水处理设备：其作用为清除水中杂质和降低给水硬度，以防止在锅炉受热面上结水垢或腐蚀，从而提高锅炉的经济性和安全性。

5. 燃料供给设备：由运煤设备、原煤仓和储煤斗等设备组成，保证锅炉所需燃料的供应。

6. 除灰除尘设备：除灰设备是收集锅炉灰渣并运往储灰场地的设备。除尘设备是除去烟气中的灰粒，以减少对周围环境污染的设备。

2.1.2 锅炉的工作过程

锅炉的工作过程概括起来包括三个同时进行着的过程：燃料的燃烧过程，烟气向水的传热过程和水的汽化过程。现简要叙述锅炉的三个过程。

1. 燃煤锅炉的燃烧过程：燃料煤加到煤斗中并落在炉排上，电机通过减速机、链条带动炉排转动，将燃料煤带入炉内。燃料煤一边燃烧一边向后移动，燃烧所需要的空气由引风机送入炉排中间的风箱后，向上通过炉排到达燃料燃烧层。风量和燃料量成比例（风煤比），以便进行充分燃烧，形成高温烟气。燃料煤燃烧剩下的灰渣，在炉排末端通过除渣板后排入灰斗。这一整个过程称为燃烧过程。

2. 烟气向水的传热过程：由于燃料的燃烧放热，炉膛内温度很高。在炉膛四周

墙面上都布置着一排水管，称为水冷壁。高温烟气与水冷壁进行强烈的辐射换热和对流换热，将热量传递给管内的水。继而烟气受引风机、烟囱的引力向炉膛上方流动。烟气出烟窗（炉膛出口）并通过防渣管后就冲刷蒸汽过热器（蒸汽过热器是一组垂直放置的蛇形管受热面，使汽锅中产生的饱和蒸汽在其中受烟气加热而过热）。烟气流经过热器后又经过安装接在上、下炉筒间的对流管束，使烟气冲刷管束，再次以对流换热方式将热量传递给管束内的水。沿途降低温度的烟气最后进入尾部烟道，与省煤器和空气预热器内的水进行热交换后，以较低的烟温排出锅炉。省煤器实际上就是给水预热器，它和空气预热器一样，都设置在锅炉尾部烟道中，以降低排烟温度提高锅炉效率，从而节省燃料。

3. 水的汽化过程：就是蒸汽的产生过程，主要包括水循环和汽水分离过程。经过处理的水由泵加压，先流经省煤器而得到预热，然后进入汽锅。锅炉工作时，汽锅中的工作介质是处于饱和状态下的汽水混合物。位于烟温较低区段的对流管束，因受热较弱，汽水的容重较大；而位于烟气高温区的水冷壁和对流管束，因受热强烈，相应水的容重较小，因而容重大的往下注入下锅筒，而容重小的则向上注入上锅筒，形成水的自然循环。

蒸汽产生的过程是借助上炉筒内装设的汽水分离设备，以及在锅筒本身空间中的重力分离作用，使汽水混合物得到分离。蒸汽在上锅筒顶部引出后进入蒸汽过热器，而分离下来的水仍回到上锅筒下半部分的水中。

2.1.3 锅炉设备的主要控制系统

供热锅炉设备的控制任务是根据热负荷的需要，供应一定温度的蒸汽，同时使锅炉在经济的条件下运行。按照这些控制要求，锅炉设备有以下主要的控制系统。

1. 锅炉汽包水位控制：被控变量是汽包水位，操纵变量是给水流量。它主要是保持汽包内部的物料平衡，使给水量适应锅炉的蒸汽量，维持汽包中水位在允许的范围内。这是保证锅炉安全运行的必要条件，是锅炉正常运行的重要指标。

2. 锅炉燃烧系统的控制：燃烧控制中三个被控变量是蒸汽压力（或负压）、烟气成分（经济燃烧指标）和炉膛负压。可选用的操纵变量也是三个：燃烧量、送风量和引风量。组成的燃烧系统控制方案要满足燃烧所产生的热量；要使燃料与空气量之间保持一定的比值，保证燃烧的经济性和锅炉的安全运行；要使引风量与送风量相适应，保证炉膛负压在一定的范围内。

3. 过热蒸汽系统的控制：被控变量为过热蒸汽温度，操纵变量为减温器的喷水量。使过热器出口温度保持在允许范围内，并保证管壁温度不超过允许的温度。

在本文中着重对锅炉燃烧系统进行研究，设计出燃烧系统的控制方式。而对其它控制系统的控制不作详细描述，只进行简单介绍。

2.2 锅炉燃烧系统的动态特性

2.2.1 燃料传送过程

燃料煤传送过程的输入参数是给煤机的转速，输出参数是给煤量的多少。当给煤机从中间储仓供应炉膛燃料时，给煤机在动态特性上是一个一阶滞后环节。同时，给煤机传送具有纯滞后时间 τ ，所以，煤粉传送过程的传递函数为：

$$G_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s} \quad (2-1)$$

其中： K_1 ——放大系数；

T_1 ——时间常数， s；

τ ——煤传送滞后时间， s；

2.2.2 燃料燃烧过程

燃料燃烧过程的输入参数是给煤量，输出参数是燃料燃烧所产生的热量，可以用一阶滞后环节来近似描述其动态特性：

$$G_2 = \frac{K_2}{T_2 s + 1} \quad (2-2)$$

其中： K_2 ——燃烧过程的放大系数；

T_2 ——燃烧过程的时间常数。

2.2.3 蒸汽形成过程

蒸汽形成过程包括汽水蓄热和蒸汽析出两个过程，它的输入参数为导管传递给省煤器省煤段和循环系统中汽水混合物的热量，输出参数按理应当是锅炉水所含有的热量，但是在一定的压力下，蒸发强度与受热强度成正比，因此可以用受热过程中析出的蒸汽量 D_s 来衡量锅炉水含热量的变化。所以，输出参数可以为析出管道出口的蒸汽量 D_s 。在研究蒸汽形成过程的动态特性时，可以分省煤器省煤段和循环系

统中蒸发段两部分。

对于循环系统蒸汽段，其传递函数可表示为：

$$G_{31}(s) = \frac{D_s}{D_{\text{出}}} = K_{31} \frac{1 - e^{-T_{31}s}}{T_{31}s} \quad (2-3)$$

省煤器省煤段的传递函数可表示为：

$$G_{32}(s) = K_{32} \frac{1 - e^{-T_{32}s}}{T_{32}s} \quad (2-4)$$

其中： T_{31} ——循环系统蓄热过程的时间常数， s；

K_{31} ——循环系统蓄热过程的放大系数；

T_{32} ——省煤器省煤段的停留时间， s；

K_{32} ——省煤器省煤段的放大系数。

综合上面两部分的公式，可以求出蒸汽形成过程的传递函数：

$$G_3(s) = G_{31}(s) + G_{32}(s) = K_{31} \frac{1 - e^{-T_{31}s}}{T_{31}s} + K_{32} \frac{1 - e^{-T_{32}s}}{T_{32}s} \quad (2-5)$$

2.3 锅炉供暖系统的控制要求

锅炉供暖系统包括两个主要控制任务，一个是燃烧系统控制，另一个是给水系统控制；另外还有过热蒸汽系统的控制和锅炉水处理过程的控制等。其中燃烧系统的控制是主要的。燃烧控制的基本任务既要供热量适应负荷的需要，还要保证燃烧的经济性和锅炉运行的安全性^[39]。因此，燃烧控制要通过调节给煤量来保持分配到的负荷；调节送风量使之随时与给煤保持恰当的比例，以保证完全的燃烧和最小的热损失；调节引风使之随时与送风相适应，以保持炉膛负压在一定的范围内多台锅炉并列运行的母管制方式，还要实现按预定比例向各台锅炉分配负荷，使各台负荷均衡，共同维持供热母管的正常运行。给水控制的任务主要是控制供水流量和回水流量，从而间接地影响供水温度和回水温度，从一定程度上解决一直困扰供热系统的竖向失调问题。

燃烧自动控制的任务是：使燃烧燃料产生的热量适应需求量，使燃料量与送风量随时保持适当的配比，以保证烟气中含氧的最佳值，即最佳过剩空气系数，达到经济燃料^{[43][49]}；使引风量随时与送风量保持平衡，维持炉膛负压不变。根据锅炉燃

烧过程的特点，燃烧自动控制是这样来实现的，即：通过调节给煤、送风和引风来保证蒸汽压力、烟气含量和炉膛负压为一定值。因此，锅炉燃烧自动控制系统包括三个子系统：1、热负荷调节子系统；调节给煤量，保证蒸汽压力为一恒值；2、燃烧经济性子系统：改善炉膛燃烧工况，提高热效率；3、炉膛负压子系统：维护炉膛负压为额定值。燃烧控制系统所受到的主要扰动有：蒸汽负荷、送风量、给煤扰动、煤种和煤质发生变化而引起扰动。评价一个燃烧控制系统性能优劣有一个重要标准是：当被控量由于扰动偏离给定值时，能否很快地恢复到给定值。

燃烧过程的控制基本要求有三个：

1. 保证出口蒸汽压力稳定，能按负荷要求自动增减燃料量；
2. 燃烧良好，供气适宜。既要防止空气不足使烟囱冒黑烟，也不要因空气过量而增加热量损失；
3. 保证锅炉安全运行。保持炉膛一定的负压，以免负压太小，甚至为正，造成炉膛内热烟气往外冒出，影响设备和工作人员的安全；如果负压过大，会使大量冷空气漏进炉内，从而使热量损失增加。

2.4 小结

本章针对燃煤锅炉的特点，详细介绍了锅炉各部分的组成、锅炉的工作过程、燃料传递过程的动态特性、锅炉供暖系统的控制要求等内容，为燃烧煤锅炉控制系统设计打下基础。

第三章 锅炉自动化控制系统方案设计

3.1 系统概述

工业锅炉是一个典型的多输入、多输出、多变量互相耦合的复杂非线性被控对象。热水锅炉控制系统主要包括给水系统控制、燃烧系统控制两个任务(见图 1.1.1)。其中锅炉燃烧系统的控制是主要的。

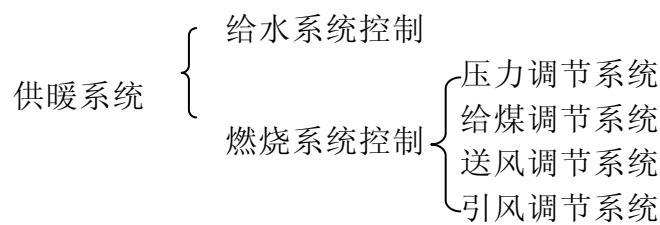


图 3-1 锅炉控制系统组成

锅炉燃烧系统是一个复杂的多输入多输出对象^{[35][46]}，而且各量之间存在着关联(见图 1.1.2)。炉膛负压主要受引风和送风的影响，而其它各量对它的影响很小；V-O%通道是保证锅炉燃烧经济性的做法，即通过送风—氧量通道使含氧量稳定在最佳值附近，通过对含氧量的调节达到对送风系统的调节。燃烧调节主要分为三个回路：燃烧量(给煤量)调节，送风量(最佳燃烧)调节，引风量(保证炉膛负压)调节。

给水调节系统主要控制目标是二次供水温度，次要目标是一次供水温度。鉴于给水调节不是本篇研究的问题，在此不作过多介绍。

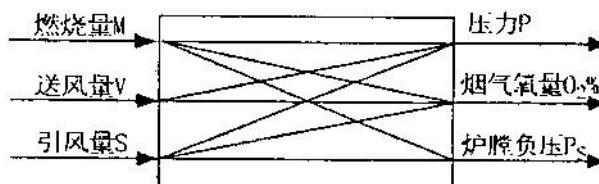


图 3-2 燃烧系统输入输出关系

对于锅炉燃烧过程，通常由于其时变性和不确定性，很难建立既有足够精度又便于系统控制的数学模型。鉴于锅炉燃烧过程的复杂性和控制难点，要实现既提高

锅炉的热效率，又满足用户负荷要求，并保证运行安全，其控制算法与决策的参考因素必须是多元的，控制算法应根据多个工艺参量的现行值和历史数据，进行综合分析、推理和计算，这是传统控制理论不易实现的，常规的 PID 控制器，很难整定 PID 参数，因此比较难达到预期效果。总结分析发现，在复杂控制系统中，采用 Fuzzy-PID 复合型控制器，可以达到理想的控制效果，它对各种被控系统中，不同的控制指标均能实现 PID 最佳效果^{[29][32][36][38][39]}。

模糊控制器是近年发展起来的新型控制器，其优点是不要求掌握受控对象的数学模型，而根据人工控制规则组织控制决策表，然后由该表决定控制量的大小。将模糊控制和 PID 控制两者结合起来，扬长避短，既具有模糊控制的灵活性、适应性强的优点，又具有 PID 控制精度高的特点^{[40][41]}。

3.2 锅炉燃烧控制系统框图

根据母管制并行运行锅炉燃烧过程调节所要完成的任务，可将整个系统分成四个相互联系的子系统，即压力调节系统（调节与并列运行的所有锅炉均有关的母管压力）、每台锅炉的给煤调节系统、送风调节系统和引风调节系统。通过对这四个系统的分析，可以得到锅炉燃烧控制系统的结构（如图 3-3）。为了使给煤机、送风机、引风机协调工作，以克服耦和的影响，必须采用多变量输入多变量输出的协调控制方式控制锅炉的燃烧过程。

图 3-3 给出了锅炉燃烧系统中各控制量之间的相互关系。例如，引风量与送风量和炉膛负压之间存在相互关系；送风量与给煤量之间存在关系等。

3.3 模糊控制原理

模糊控制的基本原理模糊（Fuzzy）控制是以模糊集合论、模糊数学、模糊语言形式的知识表示和模糊逻辑的规则推理为理论基础，是采用计算机控制技术构成的一种具有反馈通道的闭环结构的数字控制系统^{[36][48]}。其基本概念是由美国加利富尼亚大学著名教授扎德（L.A.Zadeh）首先提出的，经过 20 多年的发展，在模糊控制理论和应用研究方面均取得重大成功。其组成核心是具有智能性的模糊控制器，这也是它与一般的 PID 在原理和方法上完全不同之处。

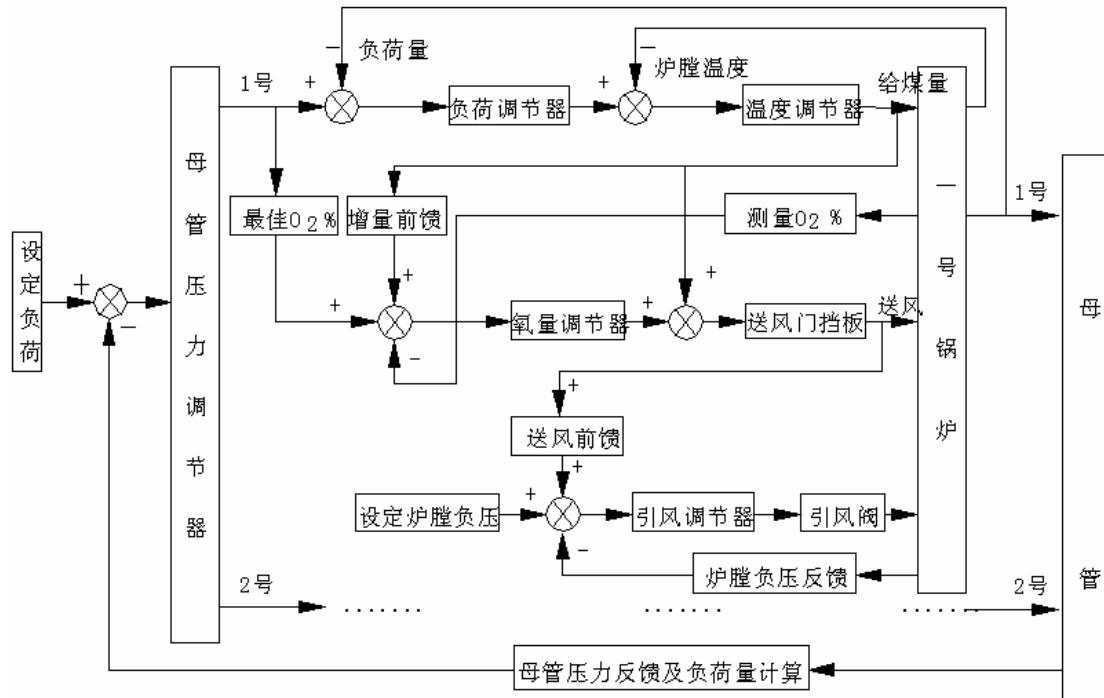


图 3-3 锅炉燃烧系统控制图

3.3.1 模糊控制器

模糊控制器 (FC-Fuzzy Controller) 也称为模糊逻辑控制器 (FLC-Fuzzy Logic Controller)，由于其所采用的模糊控制规则是由模糊理论中模糊条件句来描述的，因此，模糊控制器是一种语言型控制器，故也称为模糊语言控制器^{[38][40]} (FLC-Fuzzy Language Controller)。

模糊控制器的组成框图如图 3-4 所示。它包括有：输入量模糊化接口、数据库、规则库、推理机和输出解模糊接口 5 个部分。

1. 模糊化接口：模糊控制器的输入必须通过模糊化才能用于模糊控制器输出的求解，因此它实际上是模糊控制器的输入接口。它的主要作用是将真实的确定量输入转换成一个模糊矢量。

2. 数据库：所存放的是所要输入、输出变量的全部模糊子集的隶属度矢量值 (即经过域等级的离散化以后对应值的集合)，若论域为连续域，则为隶属度函数。在规则推理的模糊关系议程求解过程中，向推理机提供数据。

3. 规则库：模糊控制器的规则是基本专家知识或手动操作熟练人员长期积累的经验，它是按人的直觉推理的一种语言表示形式。模糊规则通常由一系列的关系词连接而成，如 if-then、also、or、and 等。关系词必须经过“翻译”，才能将模糊规

则数值化。

假设有控制规则 $\text{if } A \text{ and } B \text{ then } C$, 其中, A 是论域 U 上的一个模糊子集, B 是论域 V 上的一个模糊子集。根据人工试验, 可离线组织其控制决策表 R , R 是笛卡尔乘积集 U^*V 上的一个模糊子集。则某一时刻, 该控制的控制量由下式得出:

$$C = (A * B) * R$$

规则库是用来存放全部模糊控制规则的, 在推理时为“推理机”提供控制规则。知识库由数据库和规则库两部分组成。

4. 推理机: 推理是控制器中根据输入模糊量, 由模糊控制规则完成模糊推理来求解模糊关系方程, 并获得模糊控制量的功能部分。在模糊控制中考虑到推理时间, 通常采用运算较简单的推理方法。最基本的有 Zadeh 近似推理, 它包含有正向推理和逆向推理两类。正向推理常被用于模糊控制中。而逆向推理一般用知识工程学领域的专家系统中。

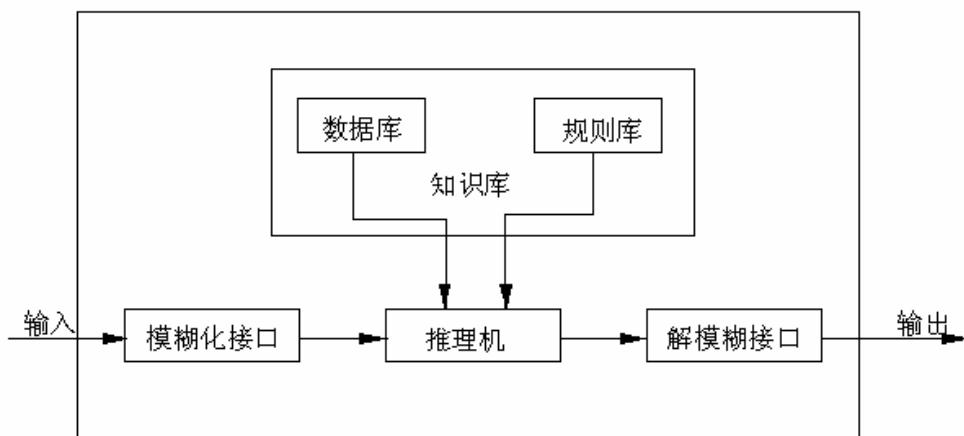


图 3-4 模糊控制器的组成框图

5. 解模糊接口: 推理结果的获得, 表示模糊控制的规则推理功能已经完成。但是, 至此所获得的结果仍是一个矢量, 不能直接用来作为控制量, 还必须作一次转换, 求得清晰的控制量输出, 即为解模糊。通常氢输出端具有转换作用的功能部分称为解模糊接口。

综上所述, 模糊控制器实际上就是一个微机系统。它的绝大部分功能都是由计算机程序来完成的, 随着专用模糊芯片的研究和开发, 也可以由硬件逐步取代各组单元的软件功能。

3.3.2 模糊控制系统原理框图

模糊控制系统原理框图也可以由图 3-5 所示, 其中的模糊量化处理、模糊控制规则、模糊决策、非模糊化处理环节组成模糊控制器。

模糊控制的核心问题是建立一个好的模糊控制器, 也称为模糊逻辑控制器。由于其采用的模糊控制规则是由模糊理论中模糊条件语句 (if-then) 来描述的, 因此模糊控制器是一语言控制器, 故也称为模糊语言控制器。事实上对模糊控制, 不需要人们对控制器本身的作用原理方式有很多理解; 模糊控制完全是模仿人脑的思维方式, 一个模糊控制器就是通过 if-then 形式的规则进行控制的。模糊控制过程是对系统输入信号进行分析、判断、输出控制量的过程, 由于它是模拟人的模糊推理和决策过程的一种实用的控制方法, 因此非常适合非线性和多输入多输出系统。根据模糊控制器的结构可分为: 一维模糊控制器、二维模糊控制器、三维模糊控制器、多变量模糊控制器等。

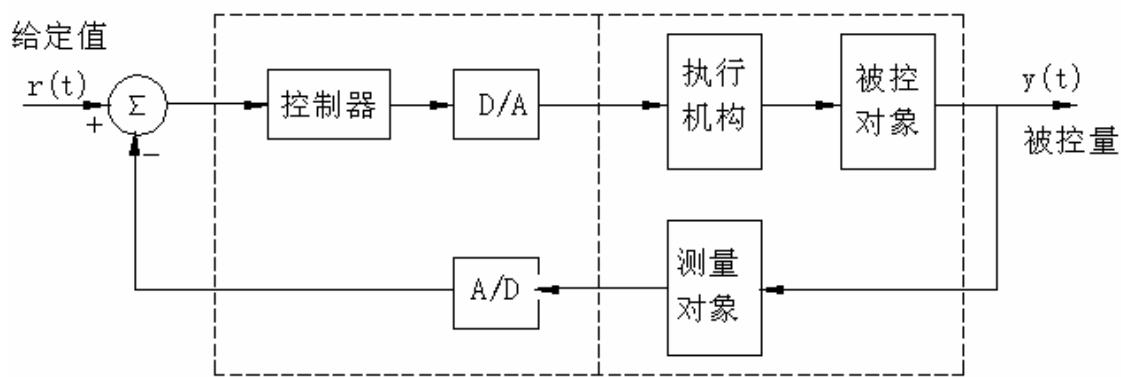


图 3-5 模糊控制系统原理图

但是由于模糊控制的控制精度不够高, 单纯利用模糊控制方法进行锅炉燃烧系统的改造, 不够理想。因此, 下面介绍模糊—PID 复合控制算法。

3.4 模糊—PID 复合控制

模糊控制与传统的 PID 控制相结合, 具有广泛的实用性^{[41][42]}。Fuzzy-PID 复合控制的应用方式有: 模糊自整定 PID 控制、Fuzzy-PID 复合开关控制、模糊自适应 PID 控制、设定值迁移模糊 PID 控制器等。这些新型控制器已引起人们的普遍关注和极大兴趣, 并已得到较为广泛的应用。随着模糊控制技术的应用, 还会出现各种各样的复合方式, 对实际过程进行有效的控制。

本文仅对锅炉燃烧系统中采用的模糊自整定 PID 控制进行介绍。

3.4.1 PID 参数 Fuzzy 自整定控制原理

常规 PID 算法为：

$$u(k) = k_p E(k) + K_I \sum E(k) + K_D E(k)$$

其中， $E(k)$ 为其输入变量偏差；

$$\sum E(k) = E(k) + E(k-1)$$

$$E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (k=0,1,2,\dots) \text{ 为偏差变化；}$$

其中： K_p 为表征比例 (P) 作用的参数；

K_I 为表征积分 (I) 作用的参数；

K_D 为表征微分 (D) 作用的参数。

Fuzzy 自整定 PID 参数控制器是一种在常规 PID 控制器的基础上，就用 Fuzzy 集合理论建立参数 K_p 、 K_I 、 K_D 同偏差绝对值 $|E|$ 和偏差变化绝对值 $|EC|$ 间的二元连接函数关系： $K_p = f_1(|E|, |EC|)$

$$K_I = f_2(|E|, |EC|)$$

$$K_D = f_3(|E|, |EC|)$$

并根据不同的 $|E|$ 和 $|EC|$ 在线自整定参数 K_p 、 K_I 、 K_D 的 Fuzzy 控制器。PID 参数 Fuzzy 自整定控制原理如图 3-6 所示。

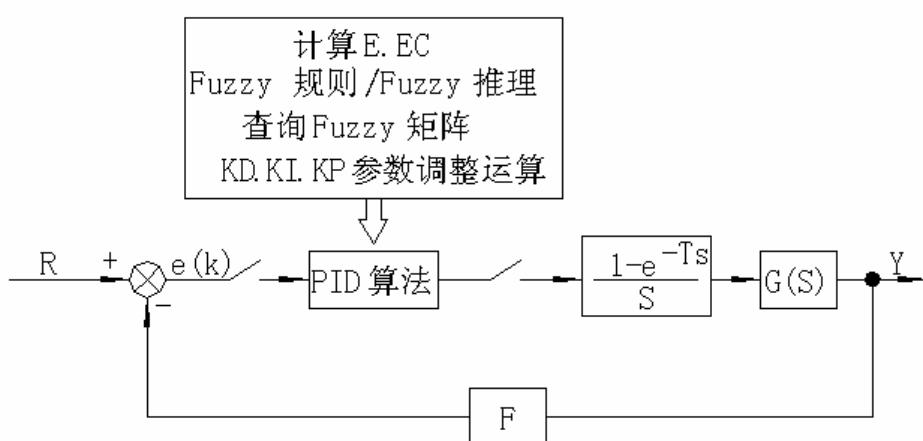


图 3-6 PID 参数 Fuzzy 自整定控制原理

3.4.2 PID 参数 Fuzzy 整定模型

一般情况下，在不同 $|E|$ 、 $|EC|$ 下被控过程对参数 K_P 、 K_I 、与 K_D 的自整定要求可归纳为：

1. 当 $|E|$ 较大时，为使系统具有良好的快速跟踪性能，应取较大的 K_P 与较小的 K_D ，同时为避免系统响应出现较大的超调，应对积分作用加以限制，通常取 $K_I=0$ ；
2. 当 $|E|$ 处于中等大小时，为使系统响应具有较小的超调， K_P 应取得小些；在这种情况下， K_D 的取值对系统响应的影响较大， K_I 的取值要适当；
3. 当 $|E|$ 较小时，为使系统具有较好的稳态性能， K_P 与 K_I 均应取得大些，同时为避免系统在设定值附近出现振荡， K_D 值的选择是相当重要的。

对于 Fuzzy 自整定 PID 参数控制器，在具体做法上，根据语言变量 E 以及偏差变化 EC ，应用 Fuzzy 集合理论总结出一套 K_P 、 K_I 与 K_D 的 Fuzzy 整定模型。如表 3-1、表 3-2 和表 3-3 所示。

表 3-1 K_P 整定 Fuzzy 规则集模型

E K_P	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
EC							
PB	O	O	NS	NM	NM	NB	NB
PM	O	O	NS	NM	NM	NB	NB
PS	PM	PM	O	NS	NM	NB	NB
O	PB	PB	PM	O	NM	NB	NB
NS	PB	PB	PM	PS	O	NM	NM
NM	BP	PB	PM	PM	PS	O	O
NB	PB	PB	PM	PM	PS	O	O

表 3-2 K_I 整定 Fuzzy 规则集模型

E K_I	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
EC							
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PS
PS	O	O	O	O	O	NS	NS
O	NS	NS	NS	NS	NS	NB	NB
NS	O	O	O	O	O	NS	NS
NM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PS
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

3.4.3 模糊自整定 PID 控制器

根据被控对象的性能要求, 本文采用一种与传统 PID 控制器不同的模糊自整定 PID 控制器, 它与基本模糊控制器相比, 增加了一个参数在线自整定机构。该机构的修正算法是模仿人的控制思想, 分析和识别系统的输出状态, 动态独立地对 K_P 、 K_I 、 K_D 进行在线整定, 以调整整个控制过程中不同阶段的控制特性^[44]。这种算法, 实际上相当于增加了查询表的级数, 体现了在不同阶段采用不同的量化等级也就是间接修改了控制规则。

表 3-3 K_D 整定 Fuzzy 规则集模型

E K_D	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
EC	PS	PS	O	O	O	PS	PS
PB	PS	PS	O	O	O	PS	PS
PM	NB	NB	NM	NS	NM	NB	NB
PS	NB	NB	NM	NS	NM	NB	NB
O	NS	NS	NS	NS	NS	NM	NM
NS	NB	NB	NM	NS	NM	NB	NB
NM	NB	NB	NM	NS	NM	NB	NB
NB	PS	O	O	O	PS	PS	PS

该控制器如图 3-7 所示, 也就是由一个标准 PID 控制器和一个 Fuzzy 自调节机构组成。Fuzzy 自调节机构根据输入信号 (即偏差 e) 的大小、方向以及变化趋势等特性, 通过 Fuzzy 推理做出相应决策, 在线整定 PID 参数 K_P 、 K_I 、 K_D , 以期获得满

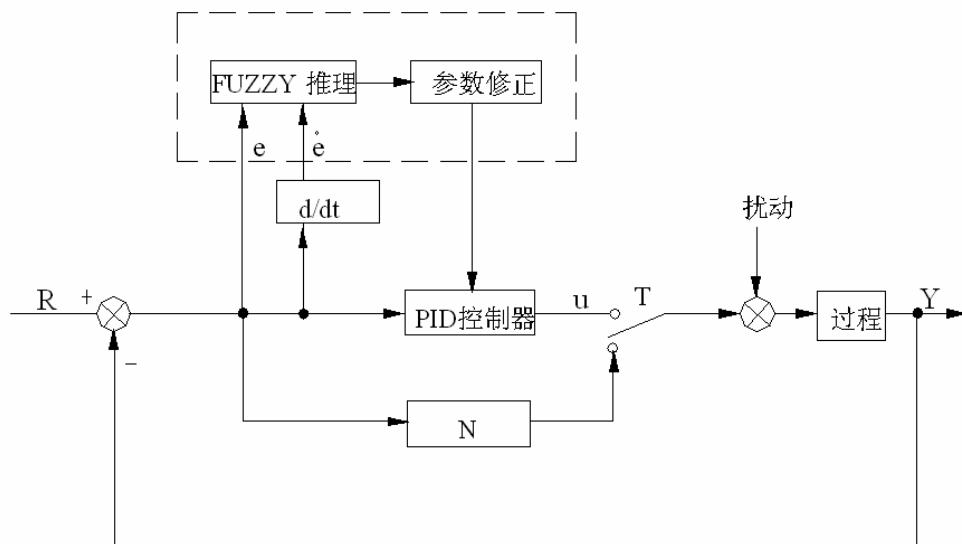


图 3-7 Fuzzy 自整定 PID 控制器原理图

意的控制效果。由于该 Fuzzy 自调节 PID 控制器是基于规则的，所以便有一个参数的初始化问题。图 3.7 中 N 为继电特性非线性环节，用于 PID 参数的预整定。当系统闭环运行后，Fuzzy 自调整系统就自动地在线整定 PID 参数。这种结构，无论是在跟踪设定值还是抑制扰动方面，控制效果都有很大改善。

3.5 锅炉控制系统方案设计

3.5.1 给煤调节系统的设计

在锅炉的燃烧系统中，给煤调节器是整个燃烧控制系统中的重要环节，是节约能源，提高经济效益的主要实现途径。燃料在锅炉中燃烧形成烟气，烟气中的含氧量由氧化锆分析仪表来检测，并转换为标准的 0~5 伏电压信号，送给单片机的模拟输入通道，单片机接受到信号后进行判断后，将信号送出，对变频器进行相应的控制，以此来控制电动机的转速，从而控制送入锅炉的给煤量，使燃烧达到最佳热效率。在给煤调节系统中，分为两部分：一个是负荷主调节器，另一个是炉膛温度副调节器。主副调节器都采用模糊自整定 PID 控制器。

由于系统在动态调节过程中，要求控制器具有较好的鲁棒性和快速性，对精度要求不是十分高，因此采用常用的二维模糊控制器。在实时控制过程中，为了减少运算量，将模糊控制规律制成模糊控制表。模糊控制器的输入变量是锅炉的负荷及锅炉负荷变化，输出是链条炉的给煤量。根据现场的控制要求和模糊推理求出模糊控制规则（见表 3-4）。

表 3-4 主调节器模糊控制表

		DC												
		B		DC										
D	DC	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
3	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5
4	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6
5	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6
6	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

为了使锅炉的炉膛温度控制在稳定的范围之内，提高锅炉的运行工况，缩小各锅炉之间的不均衡性，还要引入副调节器，对给煤量进行修正，以使炉膛温度控制在一定的范围之内。对于炉膛温度修正副调节回路，取炉膛温度的偏差及偏差变化率为模糊控制器的输入变量，修正给煤量为控制器的输出变量，求出模糊控制规律（见表 3-5）。

这些工作都是离线进行的，求出模糊控制表后，将其存入计算机中，实时控制时，模糊控制器只需要进行以下的工作：在每个控制周期中采样给定负荷值，炉膛温度值，并计算出相应的负荷偏差、温度偏差及偏差的变化量，再将各变量分别进行模糊量化，取得以相应论域元素表征的查找模糊控制表所需的模糊量的论域值，然后根据论域元素的值查找模糊控制表可以得出输出论域值元素。将该论域元素值乘以相应的调节器的比例因子，得出给煤量的输出信号。

表 3-5 炉膛温度修正量调节模糊控制表

e	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	3	3	4	5	6
e	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	3	3	4	5	6
-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-4	-3	-2	-1
-5	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-4	-3	-3	-2	-2	-1
-4	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-4	-3	-1	-1	0	0	0
-3	-5	-5	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	-1	0	0	0
-2	-4	-4	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	0	0	0	0
-1	-3	-3	-3	-2	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
0	-2	-2	-2	-1	0	0	0	0	1	1	2	2	2
1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1	2	2	3	3	3
2	0	0	0	0	0	1	2	2	3	3	4	4	4
3	0	0	0	1	1	2	3	3	4	4	5	5	5
4	0	0	0	1	2	3	4	4	5	5	6	6	6
5	1	2	2	3	3	4	5	5	5	5	6	6	6
6	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6

主副调节器的给煤量信号按以下公式合成：

$$B_w = \kappa_b B + \kappa_c T_c \kappa_{\Delta b} \Delta B \quad (3-1)$$

其中， B_w ——总的给煤量输出； ΔB 修正给煤量；

B ——主调节器的给煤量； $\kappa_{\Delta b}$ 修正项比例因子；

κ_b ——主调节器给煤量比例因子；

T_c ——控制时间常数；

K_c ——修正项系数；

3.5.2 送风调节系统的设计

锅炉的热损失（经济燃烧）最简单的检测方法是用烟气中的含氧量来表示。根据燃烧方程式，可以计算出燃料完全燃烧时所需的氧量，从而得出所需的空气量，称为理论空气量 Q_T 。但是，实际上完全燃烧所需的空气量 Q_P 要超过理论空气量 Q_T ，即需要一定的空气过剩量。当过剩空气量增多时，不仅使炉膛温度下降，而且也使最重要的烟气热损失增加。因此，过剩空气量要有一个最优值，即所谓的最经济燃烧。过剩空气量常用过剩空气系数 α 来表示，即实际空气量 Q_P 与理论空气量 Q_T 之比：

$$\alpha = \frac{Q_P}{Q_T}$$

送风调节系统的主要任务是调节送风量使之随时与给煤量保持适当的比例（风煤比），以保证完全的燃烧和最小的热损失。由于到目前为止，还没有找到一种有效的方法能够准确地测量给煤量信号，工程实际中一般以烟气含氧量作为给煤量的一种间接反馈信号，以最佳含氧量信号作为标识来控制系统的经济燃烧。含氧量信号具有时间延迟短，对判断是否充分燃烧反映快等优点。因此，可将送风调节系统直接看成是氧量调节的过程。

氧量调节器有三个输入变量：最佳含氧量、含氧量测量值以及给煤增量前馈。在本文设计的模糊—PID 控制器中，主要的设计目的是使含氧量稳定在最佳值附近，以保证煤完全燃烧和达到最小的热损失。因此，对模糊—PID 控制器来讲，主要的控制任务就是保持含氧量的最佳值。为此，模糊控制输入变量的选取包括烟气含氧量的给定值与实际值 e 及偏差变化 Δe ，再加上给煤量前馈，就构成了三维模糊控制器。如果模糊控制器的 3 个输入变量都取 7 个模糊子集，那么满控制规则将达到 $7^3=343$ 条。为了简化控制规则，对于给煤量增量只取 3 个模糊子集，即 N（负）、O（零）、P（正）。并采用对二维模糊表扩展的方法（见表 3-6）来简化三维模糊控制表。

3.5.3 引风调节系统的设计

引风调节器通过调节引风门挡板开度的变化控制炉膛负压在一定的范围之内。

系统的被控制对象特性与送风控制系统相似，控制器也需要对环境有一定的适应能力，因而可采用和送风系统相同的控制策略。但是为了取得系统的快速响应性能，使得系统在给煤量分档切换时炉膛负压能够尽快稳定，本文采用非线性模糊量化方法对模糊控制系统进行设计。

表 3-6 三维模糊控制表

			EC																		
			-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6																		
			BCN	BCD	BCP																
UC	E	UC				-7	-7	-7	-7	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-3	0	0	0		
			-6	-6	-6	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-3	0	0	0		
			-5	-5	-5	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-2	0	0	0	
			-4	-4	-4	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	0	0
			-3	-3	-3	-6	-6	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	0	0	0
			-2	-2	-2	-6	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	1	1	1	1
			-1	-1	-1	-5	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-2	-1	0	0	1	1	1	1
			0	0	0	-4	-4	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	2	2	2
			1	0	1	-3	-3	-2	-2	-1	-1	-1	0	1	1	1	2	2	3	3	3
			2	1	0	-2	-2	-1	-1	0	0	0	1	1	1	2	2	3	4	4	4
			3	2	1	-1	-1	-1	0	0	0	1	2	2	2	3	4	4	5	5	5
			4	3	2	-1	-1	-1	0	1	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
			5	4	3	0	0	0	1	2	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
			6	5	4	0	0	0	1	2	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6
			6	5	4	0	0	0	2	4	4	5	5	6	6	6	6	7	7	7	7
			6	0	0	0	3	4	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7

在锅炉引风模糊控制器中，两个输入变量炉膛负压 e 及偏差变化 Δe ，其基本论域整定为 $[-12, 12] \text{Pa}$ ， $[-1, 1] \text{Pa/min}$ ，输出变量引风门挡板开度变化 Δu ，基本论域整定为 $[-0.1, 0.1]$ 。偏差 (E) 及偏差变化 (EC) 论域都量化为 13 档，送风门挡板开度变化 (UC) 论域量化为 15 档。非线性量化见表 3-7。

由于引风系统控制对象与送风系统相似，因此，在非线性量化表参数整定之后，可以按照表 3-7 得出的控制表对送风系统进行控制，这样就减少了计算机的存储空间，提高了计算机对其他事件的反应能力。

3.5.4 炉膛负压调节系统

炉膛负压是锅炉系统中重要的参数之一，负压是送风量和引风量是否平衡的指

标。炉膛负压过高或过低都会影响锅炉的安全生产和经济燃烧。如果炉膛负压过小，燃料不能充分燃烧；若负压过大，则漏风严重，从而导致总风量增加、烟气热损失增大、煤耗增加。炉膛负压对象时间常数小，几乎没有纯滞后，也不是高阶对象，

表 3-7 引风系统模糊控制表

	E	EC	UC
-7			$UC \leq -0.1$
-6	$E \leq -12$	$EC \leq -1$	$-0.1 \leq UC \leq -0.06$
-5	$-12 < E \leq -8$	$-1 \leq EC \leq -0.6$	$-0.06 \leq UC \leq -0.04$
-4	$-8 < E \leq -4$	$-0.6 < EC \leq -0.3$	$-0.04 < UC \leq -0.025$
-3	$-4 < E \leq -2$	$-0.3 < EC \leq -0.16$	$-0.025 < UC \leq -0.015$
-2	$-2 < E \leq -1$	$-0.16 < EC \leq -0.08$	$-0.015 < UC \leq -0.01$
-1	$-1 < E \leq -0.5$	$-0.08 < EC \leq -0.04$	$-0.01 < UC \leq -0.005$
0	$-0.5 < E \leq 0.5$	$-0.04 < EC \leq 0.04$	$-0.005 < UC \leq 0.005$
1	$0.5 < E \leq 1$	$0.04 < EC \leq 0.08$	$0.005 < UC \leq 0.01$
2	$1 < E \leq 2$	$0.08 < EC \leq 0.16$	$0.01 < UC \leq 0.015$
3	$2 < E \leq 4$	$0.16 < EC \leq 0.3$	$0.015 < UC \leq 0.025$
4	$4 < E \leq 8$	$0.3 < EC \leq 0.6$	$0.025 < UC \leq 0.04$
5	$8 < E \leq 12$	$0.6 < EC \leq 1$	$0.04 < UC \leq 0.06$
6	$12 < E$	$1 < EC$	$0.06 < UC \leq 0.1$
7			$0.1 < UC$

比较容易控制。本系统利用调节引风挡板的开度，引入送风量作为前馈信号，控制它的引风量来实现。系统方框图见图 3-8 所示。当负荷增大时，需要利用调速电机增大煤量。同时，与给煤量成正比例的送风量也要相应增大。此时炉膛负压即下降，需要增加引风量以保证炉膛负压稳定。由于炉膛负压变化有一段滞后，虽然调节了引风挡板的开度，但在一段时间里炉膛负压仍在下降。因此将送风调节器的输出作为前馈信号，送到炉膛负压调节回路的引风调节器，使送风量变化时引风量也立即变化，以解决滞后问题。

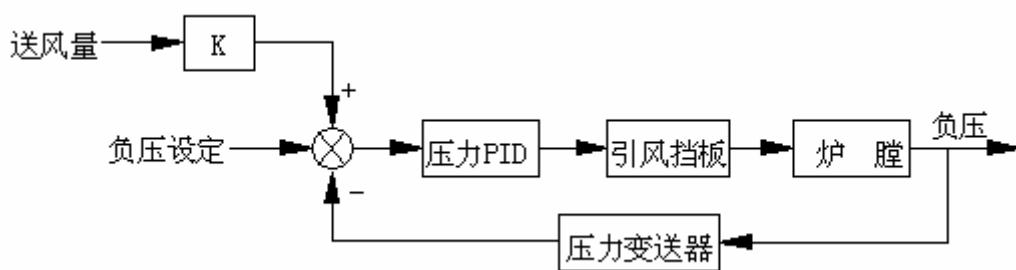


图 3-8 炉膛负压调节系统方框图

3.6 锅炉汽包水位的控制

汽包水位是锅炉运行的重要指标。锅炉汽包水位控制^{[33][34]}的任务是使给水量跟踪锅炉的蒸发量，并保持水位在一定范围内。维持汽包水位在给定范围内是保证锅炉运行的重要条件，也是锅炉正常运行的主要指标之一。水位的过高、过低都会给锅炉及蒸汽用户的安全操作带来不利的影响。首先水位过高会影响汽包内的汽水分离，饱和水蒸汽将会带走过多水，导致过热器管壁结垢并损坏，使过热蒸汽的温度严重下降。其次，水位过低，会因汽包内的水量较少，而负荷很大，加快水的汽化速度，使汽包内的水量变化速度加快，若不及时加以控制，将使汽包内的水全部汽化，尤其对大中型锅炉，水在汽包内的停留时间极短，从而导致水冷壁烧坏，甚至引起爆炸。所以，必须对汽包水位进行严格的控制。

锅炉水位自动控制的任务是控制给水流量，使其适应蒸发量的变化，维持汽包水位在允许的范围内。

影响汽包水位有四个因素，除了给水量 W 和输出蒸汽量 D 外，汽包压力和燃料的变化也会对汽包水位产生影响。此外决定汽包水位的还有汽包中（包括循环水管）储水量的多少、水位下汽泡容积与锅炉的负荷、蒸汽压力、炉膛热负荷等都有关。在影响汽包水位的诸多因素中，以锅炉蒸汽量 D 和给水量 W 为主。

1. 汽包水位在给水流量作用下的动态特性，即控制通道特性。由于给水温度要比汽包内饱和水的温度低，所以给水流量增加后，需从原有饱和水中吸取部分热量，使水位下汽泡容积减小。当水位下汽泡容积不再变化时，水位变化就完全反映了因储水量的增加而直线上升。 H 是水位的实际变化。在给水量作阶跃变化后，汽包水位不会马上增加，而呈现一段起始惯性段。用传递函数来描述时，近似于一个积分环节和纯滞后环节的串联，可表示为：

$$\frac{H(s)}{W(s)} = \frac{K_0}{s} e^{-\tau s} \quad (3-2)$$

其中： K_0 ——飞升速度，即给水流量变化单位流量时水位的变化速度；

τ ——纯滞后时间，s。

给水温度越低，纯滞后时间 τ 越大。

2. 汽包水位在蒸汽流量扰动下的动态特性，即干扰通道的动态特性。当蒸汽流量 D 突然增加，在燃料量不变的情况下，从锅炉的物料平衡关系来看，蒸汽量 D 大于给水量 W ，设此时的水位变化为 H_1 。在实际工作中，由于蒸汽用量突然增加，瞬间必导致汽包压力下降，汽包内水沸腾突然加剧，产生闪蒸，水中汽包迅速增加，

水位变化表示为 H_2 。实际显示的水位变化 H 为 H_1 与 H_2 的叠加，即 $H=H_1+H_2$ 。当蒸汽量加大时，虽然锅炉的给水量小于蒸发量，但在一开始，水位不仅不下降反而迅速上升，然后再下降（反之，蒸汽流量突然减少时，则水位先下降，然后上升）。这种现象称为“虚假水位”。蒸汽流量扰动时，水位变化的动态特性可用传递函数来表示为：

$$\frac{H(s)}{D(s)} = \frac{H_1(s)}{D(s)} + \frac{H_2(s)}{D(s)} = \frac{K_f}{s} + \frac{K_2}{T_2 s + 1} \quad (3-3)$$

其中： K_f ——飞升速度，即在蒸汽流量变化单位流量时水位的变化速度；

K_2 ——响应曲线 H_2 的放大系数；

T_2 ——响应曲线 H_2 的时间常数。

虚假水位的变化大小与锅炉的工作压力和蒸发量等有关。对于一般的中大型锅炉，当负荷变化 10% 时，虚假水位可达 30-40mm。虚假水位现象属于反向特性，给控制带来一定的困难，在控制方案设计中，必须引起注意。

在设计汽包水位控制系统时，可不考虑燃料扰动和汽包压力扰动对水位的影响，而只考虑给水量扰动和蒸汽负荷扰动对水位的影响，特别是虚假水位的影响。

汽包水位控制系统中存在两个难点：一个是蒸汽负荷变化造成的虚假水位现象；当给水量稳定时，蒸汽量阶跃增大，汽包水位应该下降，但是由于汽包内蒸汽处于饱和状态，一旦流量突变，压力也变化，水的沸点也随之变化，造成汽包内汽水混合物体积改变，因此水位不但没有下降，反而有所上升，这就是“虚假水位”。另一个是由于炉体内影响汽水变化的对流管束的物理特性变化引起的，所以，水位系统是一个慢时变系统。根据锅炉汽包容量大小，阀位变化到水位变化需要一定时间。因此，系统具有延时，而且系统存在着较大的干扰。综上所述，汽包水位系统是一个具有大的扰动和非线性特性的滞后系统。

3.7 蒸汽过热系统的控制

蒸汽过热系统的自动调节任务维持过热器出口蒸汽温度在允许的范围之内，并保护过热器，使过热器管壁温度不超过允许的工作温度。蒸汽过热系统包括一级过热器、减温器、二级过热器。

过热蒸汽温度过高或过低，对锅炉运行及蒸汽用户设备都是不利的。过热蒸汽温度过高，过热器容易损坏，影响安全运行；过热蒸汽温度过低，使设备的效率降低。所以必须把过热器出口蒸汽的温度控制在规定的范围内。

影响过热蒸汽温度的因素主要是减温水扰动、烟气热量扰动和蒸汽流量变化。

在这些扰动的情况下，蒸汽温度对象的动态特性直接影响着调节系统和特性。

1. 减温水量扰动时，过热器是一个有纯滞后的对象。扰动发生后，要隔一段时间蒸汽温度才发生相应变化。这主要是由于扰动点至被调量测量点之间的距离造成的传递滞后，以及过热器管壁储热和表面传热阻力造成的容量滞后。

2. 烟气侧热量扰动下蒸汽温度对象的动态特性：

烟气侧热量扰动，包括烟气流速和烟气温度的扰动。在这种扰动下，烟气与蒸汽之间的换热条件发生变化，由于这个变化全部是在过热器中同时发生的，因此过热器吸收热量的改变应该没有传递滞后。实际上，传递滞后很小，它主要由扰动导致过热器周围烟道中烟气量或烟气温度发生变化所需的时间决定。

3. 蒸汽流量扰动下蒸汽温度对象的动态特性：

蒸汽流量变化时，过热器的动态特性与烟气侧热量扰动下的动态特性是相似的，具有较小的滞后和时间常数。

3.8 计算机控制系统原理

锅炉微机控制系统框图如图 3-9 所示

将原来的传统控制系统改造为以 MCS-51 系列单片机 8051 控制。原来的控制系统采用可编程控制器（PLC）控制。但 PLC 价格较高，不如单片机价格低；单片机的抗干扰性能虽不 PLC，但通过在输入、输出端采用光电隔离等措施后。实际应用既能提高锅炉热效率，达到节能效果，又能使运行安全可靠，实现控制自动化。

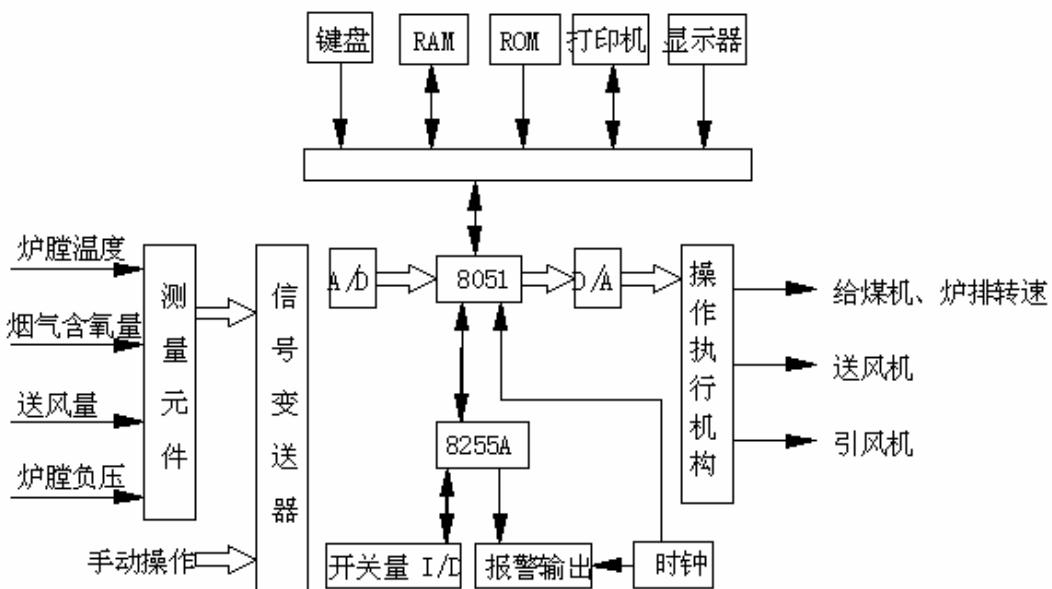


图 3-9 锅炉微机控制系统框图

炉膛负压调节子系统的主要干扰是引风量的变化，当因汽包压力变化而引起送风量变化时，必须使引风量作相应变化，以使送风和引风匹配，保证炉膛处于微负压。

为实现无扰动手动/自动切换，还对手操跟踪信号进行采样。主机输出的数字信号经 D/A 转换，变为相应的模拟量去推动现场执行机构动作，控制给煤机转速、炉排转速、鼓风机风门开度、引风机风门开度，实现系统控制方案的各项要求。

另外，8051 单片机还可以通过扩展外部接口电路，与其它锅炉控制系统（汽包水位控制系统、过热蒸汽温度控制系统）进行连接，为以后的工作打好铺垫。

3.9 小结

对于锅炉燃烧过程，通常由于其时变性和不确定性，很难建立既有足够精度又便于系统控制的数学模型。鉴于锅炉燃烧过程的复杂性和控制难点，常规的 PID 控制器，很难整定 PID 参数，因此比较难达到预期效果。总结分析发现，在复杂控制系统中，采用 Fuzzy-PID 复合型控制器，可以达到理想的控制效果，它对各种被控系统中，不同的控制指标均能实现 PID 最佳效果。本章对锅炉送风调解系统、锅炉负压调解系统、送排风系统进行了论述，并对计算机控制系统和模糊控制原理进行了论述。

第四章 锅炉燃烧控制系统实现

4.1 硬件实现

4.1.1 硬件结构

系统的主要控制芯片采用 AT89C51 单片机, 8KEPROM2764, 8KRAM6264, 可编程 L/O 接口芯片 8255A, A/D 转换器选用 ADC0809, D/A 转换器选用 DAC0832, 地址及数据锁存器选用 74LS373, 显示部分选用键盘显示器接口芯片 8279 等构成。

锅炉燃烧控制硬件结构见图 4-1 所示。

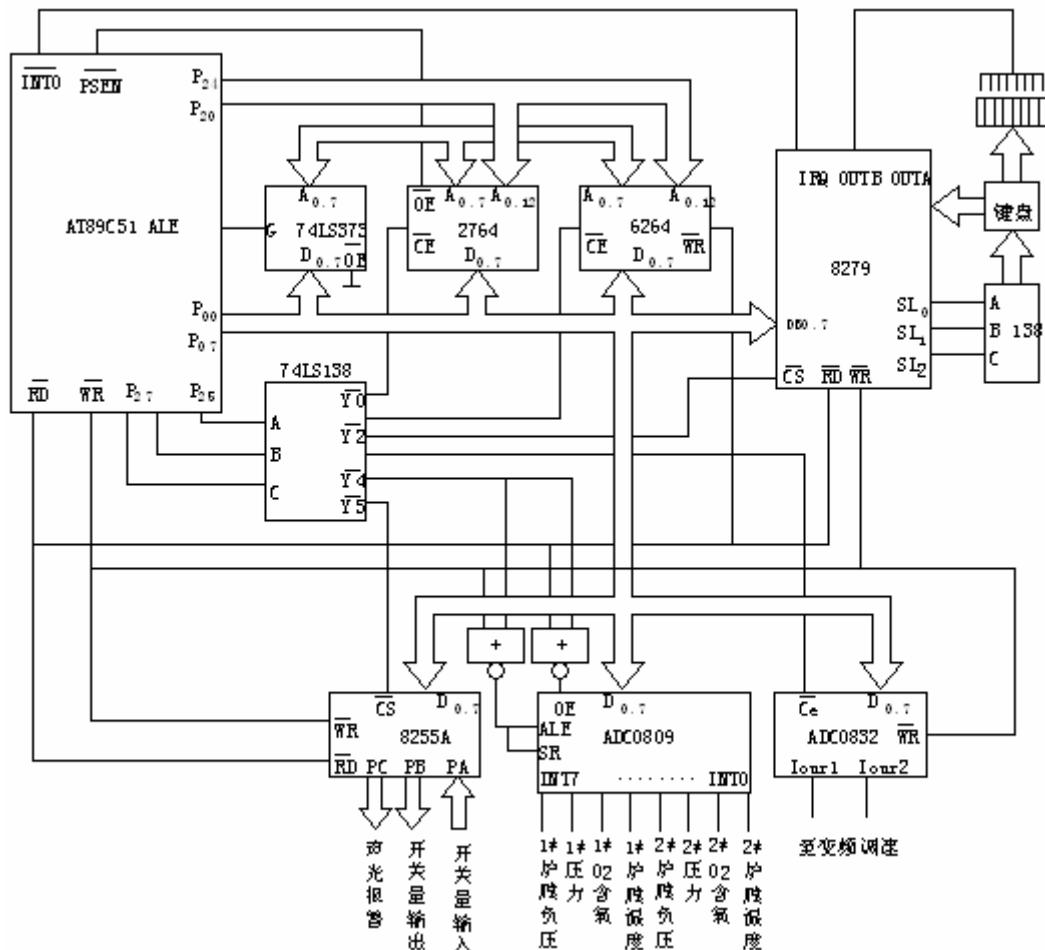


图 4-1 系统硬件结构图

锅炉控制系统采用 AT89C51 作为主机, AT89C51 单片机是 ATMEL 公司生产的,

之所以选用 AT89C51 单片机，是由于 AT89C51 芯片内有 4K 字节的 EPROM，可随时擦除程序存储器中的内容，使用方便，多用于程序设计阶段。而且和一般的 8051 相比，价格便宜，而引脚的功能与 8051 完全兼容，其功能/价格比较 8051 高。比较实用，而 8031 虽价格便宜，目前应用较广，但内部无 ROM，所以选用 AT89C51 作为系统的主要控制芯片。

AT89C51 硬件结构的特点：

- (1) AT89C51 与 MCS-51 产品兼容，内部有 4K 字节可编程闪速程序存储器，寿命为 1000 写/擦循环，数据保留时间为 10 年；
- (2) 128 字节内部存储器 RAM，32 个 I/O 线，2 个 16 位定时器/计数器，5 个两级中断源结构，一个全双工串行口，片内振荡器和时钟电路。
- (3) AT89C51 还设有静态逻辑，可以在低到零频率的条件下工作，支持两种软件可选的省电模式。在闲置模式下，CPU 停止工作，但 RAM、定时器/计数器、串行口和中断系统仍在工作；在掉电模式下，保存 RAM 的内容并且冻结振荡器，禁止所有其它片内控制单元功能，直到下一个硬件复位为止。

4.1.2 系统主要功能

系统实现炉膛温度采集；压力、氧含量、炉膛负压的测量；实现开关量的输入输出；压力上、下限信号，风定的挡风板控制及报警信号的输出均为开关量控制。在线修改参数，实现声光报警等功能。

该系统由 4 个控制部分组成，采用模糊控制，其方法是：从传感器采集的各路模拟量信号（炉膛负压、炉膛温度、压力、含氧量），经采样、放大、滤波后，利用转换器 ADC0809 将模拟信号转换为数字量信号，A/D 转换后与期望比较，按其差值大小，查表决定调节量，然后利用 DAC0832 将数字信号转换为模拟信号，D/A 转换后送到变频调速器，利用其输出改变送煤机、鼓风机、引风机转速去调节被控量，使系统达到最佳燃烧状态。

(1) 炉膛温度控制：以负荷主调节器和炉膛负调节器共同完成。主调节器的输入变量是锅炉的负荷及负荷变化，输出是链条锅炉的给煤量。负调节器的输入变量是炉膛温度的偏差及偏差变化，经过修正的给煤量为输出变量。

(2) 烟气氧量控制：氧化锆氧量分析仪是一种用于锅炉燃烧效率控制的智能化工业控制仪表。它以氧化锆为传感器探头，探测炉膛内的氧含量，经过快速的分析比较，输出标准的工业控制信号，使烟气中的含量保持在最佳状态，达到提高燃烧效率，节约能源的目的，并能减少因不完全燃烧而引起的烟气污染。

控制系统通过测量氧化锆探头输出的氧电势，热电偶传感器输出的热电势，算出氧量值，并输出控制信号。由于氧化锆传感器需在 650℃以上的高温环境才能获得良好的测量效果，温度需要控制在 750℃左右，所以采用的温度传感器是热电偶。

用输出的氧量信号及鼓风的前馈信号来调节燃料量，以达到最佳含氧量。

(3) 炉膛负压控制：由炉膛负压信号及鼓风的前馈信号，来调节引风量，控制档风板开度的变化，以维持炉膛负压。

(4) 参数给定及报警控制由键盘、检测部分、开关量 I/O 部分；实现这些功能，完成数学计算中所需的定值计算，完成对热量及热效率的计算，对炉膛压力、温度进行声光报警。

这 4 部分构成了燃烧系统的自动控制。自动控制给煤、鼓风、引风，使系统在负荷变化等干扰因素作用下，保持希望的炉膛负压和最佳含氧量。

4.1.3 系统硬件配置

现对各部分电路组成芯片分别予以说明：

1. 74LX373：是一种带输出三态门的 8D 锁存器，作为 AT89C51 的地址锁存器。1D~8D 为 8 个输入端，作为数据线。1Q~8Q8 个输出端，作为地址线。

2. EPROM2764：程序存储器扩展使用可擦除式，在调试和修改程序时，可以反复擦除，带来了很大方便。2764 芯片为双列直插式 28 引脚的标准芯片，容量为 8K*8 位。A12~A0 为 13 位地址线、D7~D0 为 8 位数据线。

3. RAM6264：数据存储器 RAM 与 ROM 不同之处在于可以进行读、写两种操作。6264P 容量为 8K*8 位，28 引脚双列直插式芯片。

4. 模数转换器 ADC0809：因为本系统中需要经过 A/D 转换的模拟量为多个，故采用多模拟输入 A/D 转换器 ADC0809 是 CMOS 工艺的逐次比较型 A/D 转换器，目前在 8 位微机系统中有广泛的使用。它是 8 位 A/D 转换器，由 8 路模拟开关、地址锁存、译码器、8 位 A/D 转换器以及三态输出锁存器构成。ADC0809 芯片可以处理多路模拟信号，输出为 8 位数字量 DB₇~DB₀。

5. 数模转换器 DAC0832：根据设计要求，需输出 4-20mA 的控制信号，D/A 转换器采用 DAC0832，片内有 2 信 8 位数据锁存器，电流输出可进行 8 位数模转换，其主要特征有：

- (1) 分辨率为 8 位；
- (2) 电流稳定时间 11us；
- (3) 可双缓冲、单缓冲、或直接数字输入；

- (4) 只需在满量程不调整其线性度;
- (5) 单一电源供电 (+5V~+15V);
- (6) 显示器地址寄存器及显示 RAM。

CPU 对 DAC0832 执行写操作，则把一个数据直接写入 DAC 寄存器，DAC0832 的、IOUT₁、IOUT₂ 随输入数据的变化而变化，输出的是电流量。ADC0832 的 D₀~D₇ 的 8 位数据线直接与 AT89C51 的 P₀ 口相连。

6. 74LS138：是一种地址译码器，16 个引脚，当 GI=1 且 $\overline{G2A}$ 、 $\overline{G2B}$ 均为“0”时，译码器才能进行译码输出。

7. 8255A：是一种可编程并输入/输出接口芯片，由 Intel 公司生产的标准外围接口电路，采用 NMOS 工艺制造，具有 40 条引脚，采用双列直插式封装。有 A、B、C 三个端口共 24 条 I/O 线，可以通过编程的方法来设定端口的各种 I/O 功能。PA7~PA0 是 A 口数据线，PB7~PB0 是 B 口数据线，PC7~PC0 是 C 数据线。D7~D0 是 8255A 的数据线。

8. 8279：是一种通用的可编程键盘/显示器接口芯片。它能够接收与识别来自键盘阵列的输入数据并完成预处理，还能显示数据和对数码显示器进行自动扫描控制，是实现 CPU 与键盘、数码显示器之间进行信息交换的专用接口芯片。

8279 芯片有 40 条引脚，DB0~DB7 是 8 位双向数据总线，它主要有以下几个特点：

- (1) I/O 控制和数据缓冲器；
- (2) 控制和定时寄存器及定时控制部分；
- (3) 扫描计数器；
- (4) 回送缓冲器与键盘去抖动控制电路；
- (5) FIFO（先进先出）寄存器和状态电路；
- (6) 显示器地址寄存器及显示 RAM。

整个硬件电路分成几个部分：

1. 存储器扩展电路；
2. 键盘接口电路；
3. 模拟量输入电路；
4. 模拟量、开关量输出电路；

4.1.4 存储器扩展电路

AT89C51 芯片内部虽然有 4K 字节可编程闪速程序存储器，128 字节内部存储器

RAM，但不能满足设计要求，必须在片外扩展程序存储器和数据存储器。锅炉燃烧控制系统采用 2764 芯片作为扩展的程序存储器，用 6264 芯片作为扩展的数据存储器。

1. 在进行程序存储器扩展中，由于用作程序存储器的 2764EPROM 芯片不能锁存地址，所以扩展时还应加上一个地址锁存器 74LS373，用于锁存低 8 位地址。2764 作为 EQPOM 芯片， \overline{EA} 端必须接低电平， \overline{PSEN} 与 EPROM 的输出允许端 \overline{OE} 连接，ALE 信号与地址锁存器的锁存控制端 G 连接。

系统工作时，PO 口分时用作地址总线或数据总线，地址锁存器的输出作为地址总线的低 8 位，P2 口作为地址总线的高 8 位。连线图见图 4-2 所示。

占用地址为 0000H~1FFFFH。

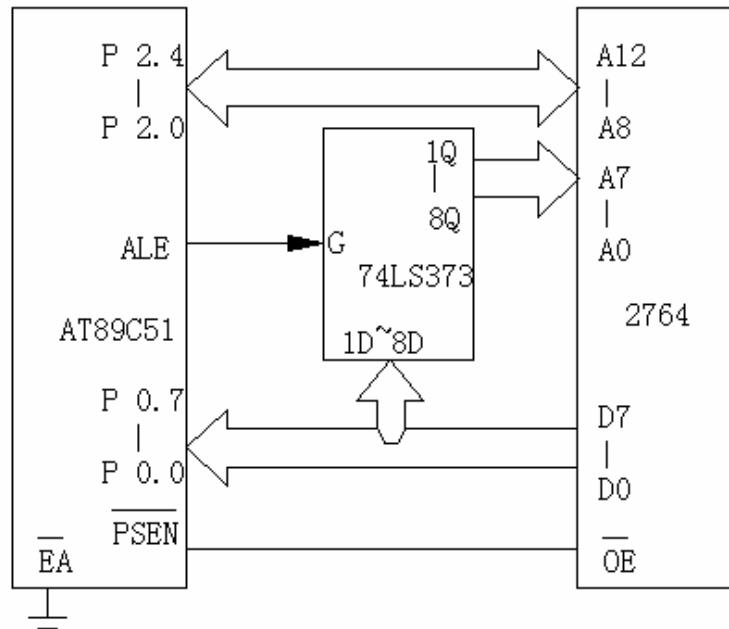


图 4-2 程序存储器扩展电路图

2. 进行数据存储器时，利用了静态 RAM6264 数据存储器芯片。与 2764 芯片相同之处在于，6264 也需要在扩展时加上一个地址锁存器 74LS373，用于锁存低 8 位地址。不同之处主要在于扩展信号的接法不一样，不用 \overline{PSEN} 信号，而用 \overline{RD} 和 \overline{WR} 信号，且直接与数据存储 \overline{OE} 端和 \overline{WE} 端相连。连线图见图 4.1-3 所示。

所占用的地址为：

第一组：4000H~5FFFFH ($A13=0$)

第二组：6000H~7FFFFH ($A13=1$)

在进行程序存储器和数据存储器的扩展时，2764、6264 可以共用一个 74LS373

芯片。

4.1.5 键盘接口电路

任何种类的键盘输入都会遇到触头抖动以及在操作时按下多余键的误操作等现象。8279 芯片在内部设置了消除触头抖动以及消除重键的电路，因此选用 8279 芯片管理键盘；线选法，口地址由 74LS138 的 $\overline{Y4}$ 确定，同时以 \overline{WR} 作为写选通信号， \overline{RD} 作为读选通信号。启动 A/D 转换时，使用一条 MOVX 指令来完成。

与 AT89C51 单片机连接。作为一个外设接口芯片，8279 的片选信号 \overline{CS} 出 AT89C51 的 P2.5、P2.6、P2.7 这 3 条地址线经地址译码器 74LS138 后得到的 (P2.7P2.6P2.5=010)。8279 向 AT89C51 申请中断的信号 IRQ 经反相后与 AT89C51 的外部中断的输入端 \overline{INTO} 相连。利用扫描线 SL2、SL1、SL0 再经 3-8 译码器 74LS138 后得到与 OUTA0~A3、OUTB3~B0 共 8 位线组成 24 个键编码扫描式的工作方式。

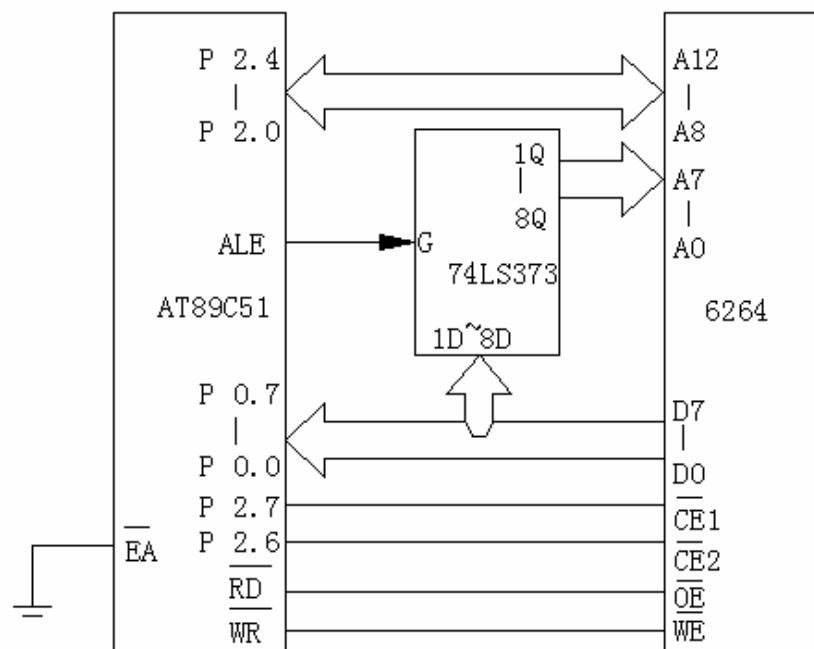


图 4-3 数据存储器扩展电路图

键盘接口电路见图 4-4 所示。

键盘接口电路的工作过程：每当按下一个键，8279 会自动识别键号，产生相应的键编码自动送入先进先出寄存器 FIFO 中，同时产生请求信号 IRO，向 CPU 请求中断。当 CPU 响应中断，执行中断服务程序，并从 FIFO 中读了数据之后，则 IRO

信号将自动撤消。

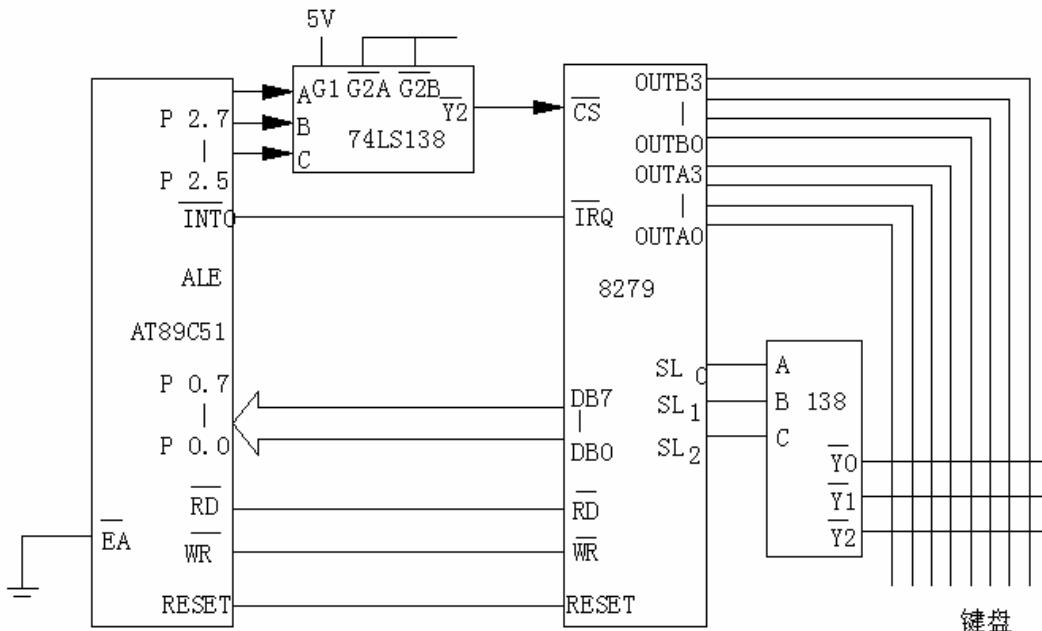


图 4-4 键盘接空口电路图

如果上一个键的编码数据尚未取走，下一个键又被按下，则新的键码会自动进入 FIFO 中。由于 FIFO 由 8 个存储器单元组成，故最多可依次暂存 8 个键码，只有在读完所有数据时，IRQ 信号才会撤消。在中断服务程序中，CPU 是用外取数指令（MOVX 指令）从 FIFO 中读取数据的。

4.1.6 模拟量输入电路

锅炉燃烧控制系统中共有 8 个测点，各测点见表 4-1 所示。对这 8 个模拟量采用 ADC0809 芯片对模拟量进行转换，变成数字量。ADC0809 与 AT89C51 单片机的连接主要涉及两个问题，一个是 8 路模拟信号的通道选择，另一个是 A/D 转换完成后转换数据的传送。

1. 8 路模拟通道选择: ADDA、ADDB、ADDC 分别按系统地址锁存器 74LS373 提供的末 3 位只要把 3 位地址写入 0809 中的地址锁存器, 就实现了模拟通道的选择。对系统来说, 0809 的地址锁存器是一个输出口, 为了把 3 位地址写入, 还要提供口地址。

2. 转换数据的传送: A/D 转换后得到的数据为数字量, 这些数据应传送给单片机进行处理。数据传送的关键问题是 A/D 转换的完成, 数据转换完成后, 才能进行传送。这里采用中断方式传送数据, 把转换结束的状态信号 (EOC) 作为中断请

示信号，通过指令进行数据传送。

MOV DPTR, #FE00H

MOVX A, @DPTR

表 4-1 锅炉本体测点清单

序号	测点名称	型号	信号	量程
1	1#炉膛温度	S形热偶	4-20mA	0-1200
2	1#烟气含氧量	氧化锆	4-20mA	
3	1#锅炉蒸汽压力	PMC	4-20mA	
4	1#炉膛负压	1151	4-20mA	
5	2#炉膛温度	S形热偶	4-20mA	
6	2#烟气含氧量	氧化锆	4-20mA	
7	2#锅炉蒸汽压力	PMC	4-20mA	
8	2#炉膛负压	1151	4-20mA	

指令在送出有效地址的同时，发出 RD 有效信号，使 0809 的输出允许信号 OE 有效，从而打开三态输出，使转换后的数据通过数据总线送入累加器中。

模拟量输入电路接线图见图 4.1-1，不再重复给出。利用各种传感器得到锅炉燃烧控制所涉及的模拟量，经过变送器变为 4~20mA 的标准电流信号。4~20mA 电流信号再给 I/V 变换，变成 0V~5V 电压信号输入 ADC0809 引脚，完成模/数转换。

4.1.7 模拟量、开关量输出电路

在锅炉燃烧控制系统中有 8 个控制点，各控制点清单见表 4-2 所示。

表 4-2 锅炉本体控制点清单

序号	测点名称	信号
1	1#引风速度	4-20mA
2	1#鼓风速度	4-20mA
3	1#给煤机速度	4-20mA
4	1#炉排速度	4-20mA
5	2#引风速度	4-20mA
6	2#鼓风速度	4-20mA
7	2#给煤机速度	4-20mA
8	2#炉排速度	4-20mA

在锅炉燃烧控制系统中，根据各模拟量输入的情况，经单片机运算得出引风、送风、给煤和炉排转速调节参量，再由 D/A 变换把这些调节量送给各自的变频器，控制电机转速，从而保持燃烧的最佳热效率。这三个变频器具有相同的接线，在这里只给出给煤机和炉排的变频器接线图^[53]，见图 4-5 所示，其余两个不再做详细描述。AT89C51 单片机运算得出的数字量需要通过 DAC0830 芯片进行转换，变成模拟量，送入变频器。由于不同的模拟量送入不同的变频器，因此需要 3 片 DAC0830 芯片，来控制三个变频器。本系统选用的变频器是 ABB 公司生产的 ACS-600 系列变频器^[53]。

由于有三路模拟量输出，采用双缓冲方式。双缓冲方式就是把 DAC0832 的两个锁存器都接成受控锁存方式。由于芯片内有两个数据寄存器，就可以将 8 位输入数据先保存在输入存储器中，当需要 D/A 转换时，再将数据从输入寄存器送至 DAC 寄存器中锁存并进行 D/A 转换输出。

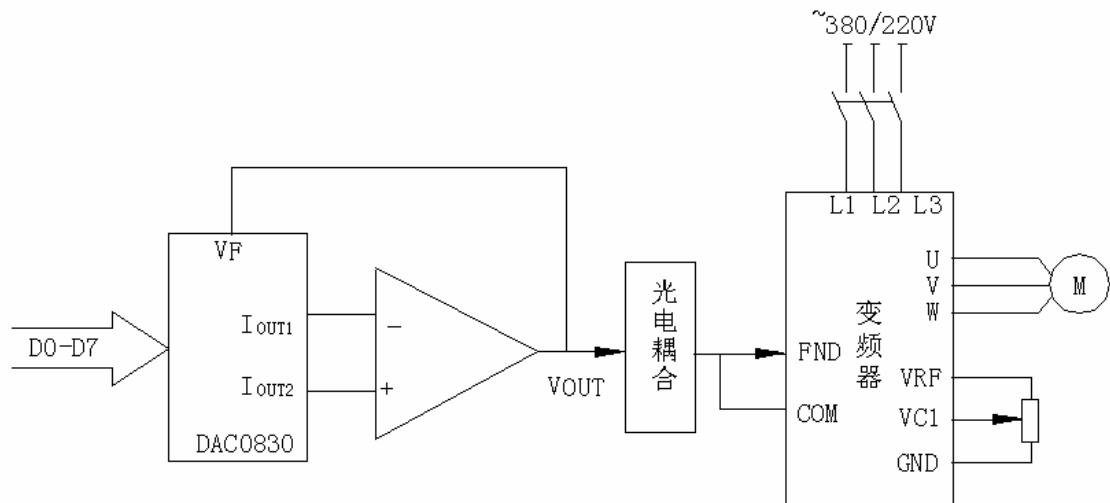


图 4-5 变频器接线图

另外，燃烧控制中还有一些开关控制量。包括压力上、下限信号，风室的挡风板控制及报警信号的输出均为开关量控制。用 8255A 芯片对开关量输入输出进行控制，选择 74LS138 译码器的_____作为 8255A 的片选信号，故 8255 地址为 BFFCH~BFFFFH。A、B、C 端口地址分别是 A 口地址：BFFCH；B 口地址：BFFDH；C 口地址：BFFEH；控制口地址：BFFFH。

A 口接开关量输入（压力上、下限信号，温度上、下限信号），B 口接开关量输出（风室挡风板开关控制），C 口接报警输出（对炉膛压力、温度上下限进行声光报警）。

4.2 软件实现

4.2.1 软件设计的基本原则

软件设计工程中应该遵循的基本原则^{[45][50][51][52]}是：

1. 模块化原则：采用模块化原则可以使软件结构清晰，不仅容易设计也容易阅读和理解。因为程序通常局限在有关的模块及模块之间的接口中，所以模块化使软件容易测试和调试，因而有助于提高软件的可靠性。因为变动往往只涉及少数几个模块，所以模块化能够提高软件的可修改性。

2. 抽象原则：抽象就是抽出事物的本质特性而暂不考虑细节问题。对问题进行模块化时，可以提出许多抽象的层次。在抽象的最高层次使用问题环境的语言，以概况的方式叙述问题的解法；在较低抽象层次采用更过程化的方法，把面向问题的术语和面向实现的术语结合起来叙述问题的解法；最后，在最低的抽象层次用可以直接实现的方式叙述问题的解法。

3. 信息隐蔽和局部化原则：局部化是指把一些关系密切的软件元素物理地址放得彼此靠近。局部化有助于实现信息隐蔽。隐蔽意味着有效的模块化可以通过定义一组独立的模块而实现，这些独立的模块彼此间仅仅交换那些为了完成系统功能而必须交换的信息。

4. 模块独立原则：设计软件结构使得每个模块完成一个相对独立的特定子功能，并且和其它模块之间的关系很简单。；独立的模块不仅容易开发出来，而且比较容易测试和维护。

4.2.2 软件实现的功能

锅炉燃烧系统模糊控制软件完成的任务有：

1. 各路 A/D 转换信号的采集：包括炉膛温度、压力、烟气含氧量、炉膛负压、送风量、引风量等。
2. 给定信号输入：包括压力上、下限，最佳氧含量、设定炉膛负压等。
3. 控制算法的实现：对输入量采用模糊控制算法进行计算，输出控制量。
4. 模拟量、开关量输出：通过 D/A 转换，将模拟输出控制量转变为实际输出。
5. 故障报警和处理：对各种异常情况进行声光报警和实时处理。

4.2.3 系统主程序流程图

系统主程序流程图见图 4-6 所示。

程序实时控制时，在每个控制周期进行各变量采样，经过 A/D 转换后，与希望值比较，按其差值大小，查相应的模糊控制表决定调节量。将调节量经 D/A 转换，送到相应的变频器，利用变频器的输出改变给煤机、鼓风机、送风机的转速，达到对被控量的调节。

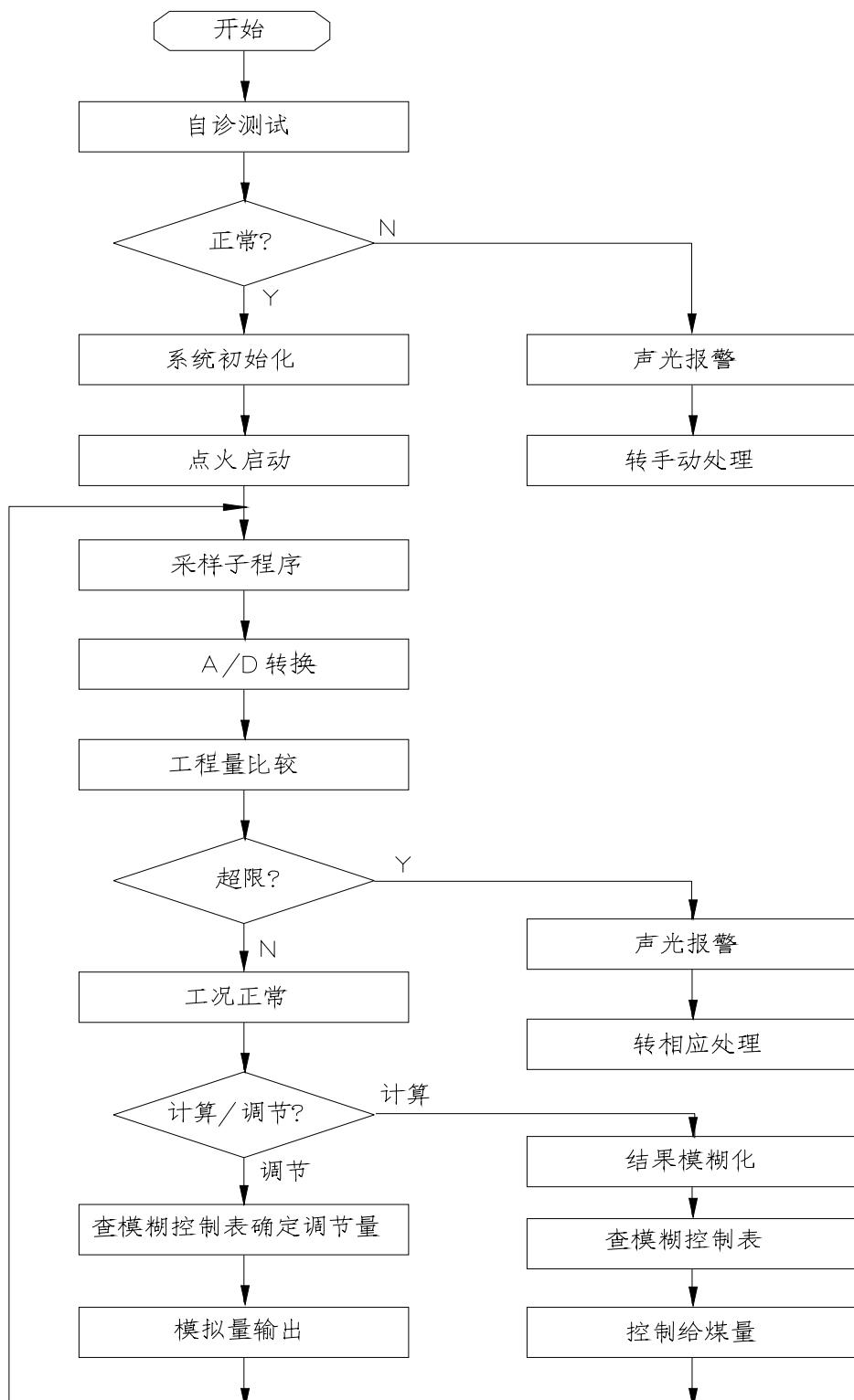


图 4-6 系统主程序流程图

4.2.4 锅炉点火启动子程序流程图

系统开始执行时经达自检、初始化后，进入点火启动子程序，图 4-7 为锅炉点火启动程序流程图。

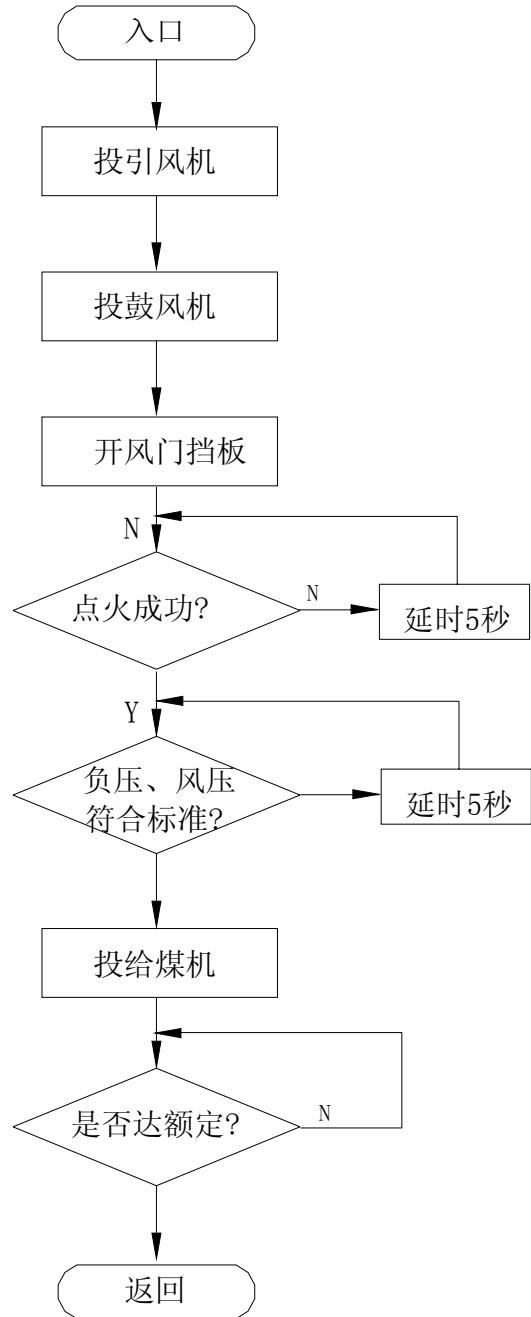


图 4-7 点火启动子程序流程图

4.2.5 A/D 采样子程序流程图

在 A/D 采样子程序中，对各路传感器传送的信号进行多次采样，程序流程图见图 4-8 所示。

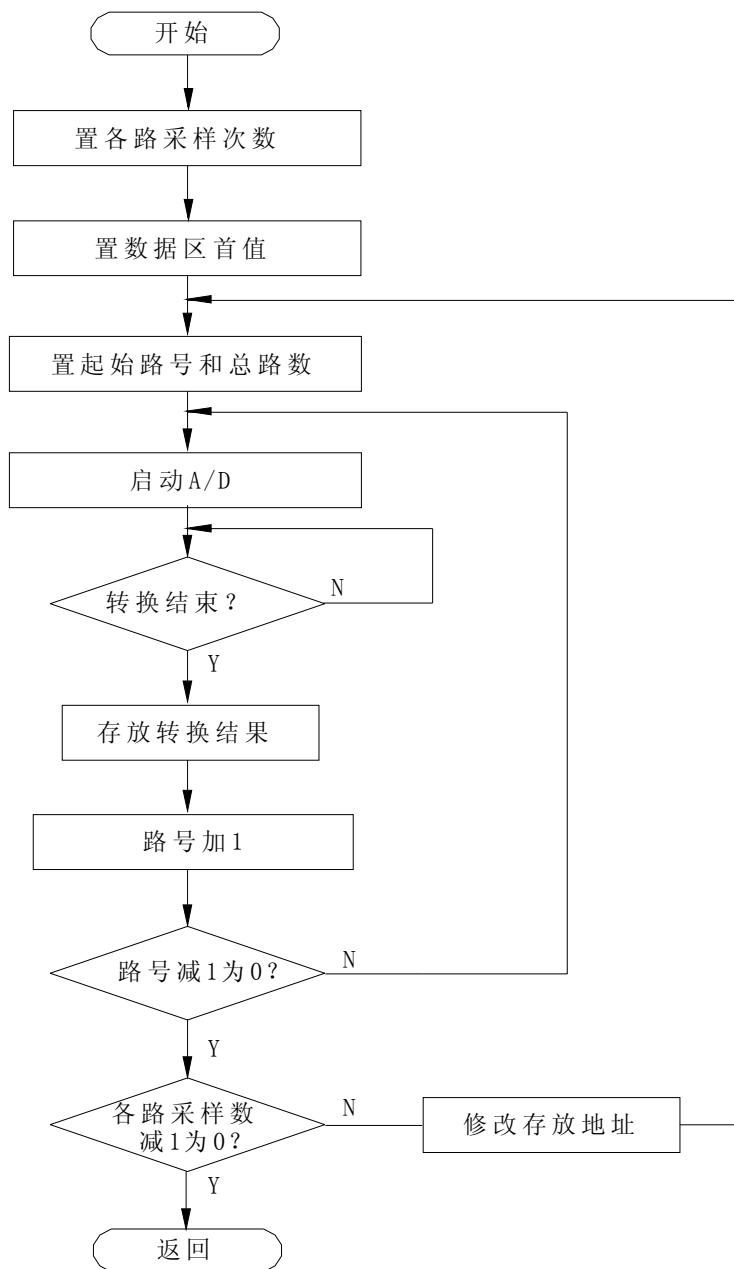


图 4-8 A/D 采样子程序

4.2.6 控制算法子程序流程图

锅炉燃烧控制采用模糊-PID 控制算法，在此给出控制算法子程序流程图，见图 4-9 所示。

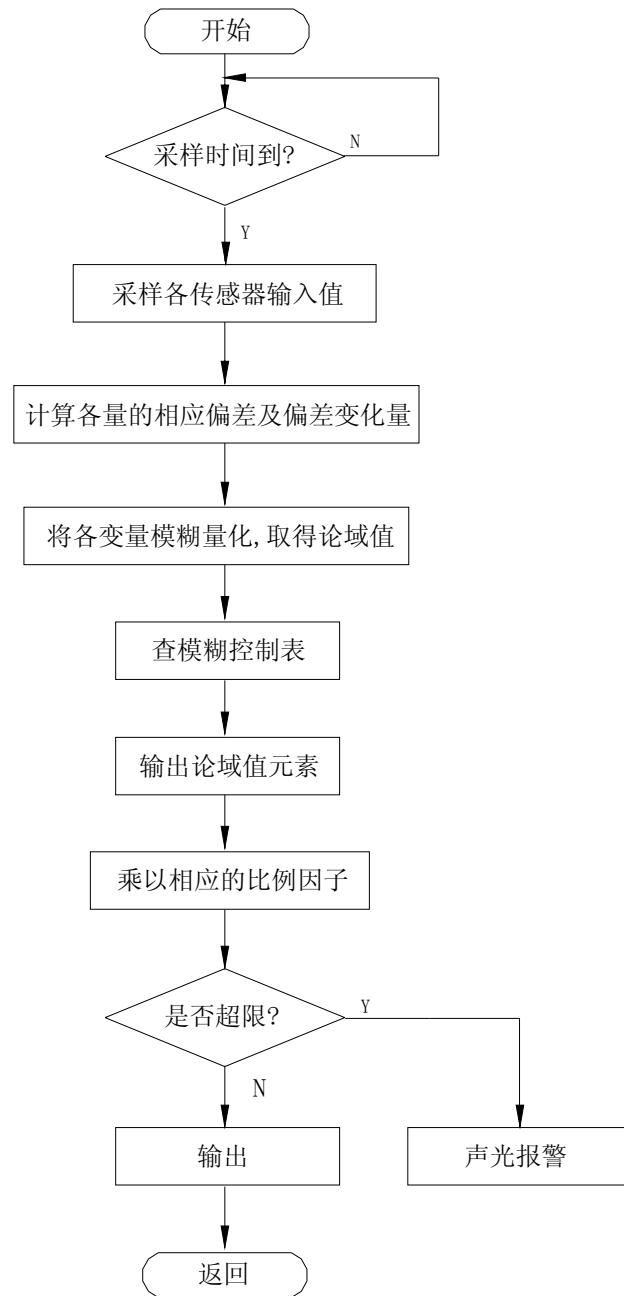


图 4-9 控制算法子程序流程图

4.3 模糊自整定 PID 控制器在锅炉控制中的仿真

本文设计的模糊自整定 PID 控制器是一个两输入、单输出的系统。输入是系统误差 e 和误差变化率 Δe ，控制器的输出直接送给被控对象，实现对被控量的控制。使用的仿真工具是 Mathworks 公司开发的 MATLAB5.X 中用于动态系统建模与仿真的 SIMULINK 软件包。

4.3.1 仿真工具介绍

MATLAB 最早在 1984 年推出了以矩阵运算为核心的线性系统的仿真和分析工具。除了常用的矩阵运算，MATLAB 还提供了类似于其它编程语言的特性。MATLAB 语言的另一大特色就是具有丰富的工具箱。工具箱和具有矩阵数据结构编程的特色使其成为一个功能强大的工具。因为其丰富的数值计算功能和简洁的语句函数，MATLAB 语言在设计研究单位和工业部门，被认为是一种准确、可靠的科学计算标准软件。在科学工作者和工程技术人员中非常普及。

MATLAB 对其早期版本作了较大改进，推出了 SIMULINK，其工作空间（Workspace）提供了编写程序、运行程序、跟踪调试程序以及与实用工具箱运行结果无间隙访问等强大功能，不仅使其 SIMULINK 可以以结构图的形式，方便地选择各种数值算法及仿真步长参数、图形显示仿真结果等，而且可以对较复杂的控制规律以直接传递参数的方式直接实现仿真。因此，SIMULINK 软件包以成为学术界和工业领域应用最广泛的软件包。SIMULINK 是用于动态系统建模与仿真的交互式系统，允许用户在屏幕上绘制框图来模拟一个系统，并能够动态地控制该系统，在系统模型构造过程中，通过图形用户接口（GUI）可以利用 SIMULINK 及 MATLAB 工具箱提供的大量现成模块。用户还可以创造自己的模块，通过 MATLAB Function 和 S-Function 建立比较复杂的系统模型。系统模型建立之后，选定恰当的算法，就可以进行仿真，进一步对系统进行分析。

SIMULINK 可以处理线性、非线性系统；离散、连续及混合系统；单任务、多任务离散事件系统。在用户界面 GUI 上，只要进行鼠标的简单拖拉操作就可以构造出复杂的仿真模型。

SIMULINK 又是一种用来对系统进行建模、动态仿真与分析的集成环境，用户可以利用 SIMULINK 提供的功能众多的各种图形化模块方便地搭建系统，进行建模仿真。在 SIMULINK 环境下，其菜单中的 FuzzyLogicToolbox 最大的优点之一就是

能够使模糊系统直接进入 SIMULINK 并在仿真环境中检验它们的输出。因此，MATLAB5.X 运用在基于模糊控制系统的计算机仿真上变得极为方便和有效。

4.3.2 SIMULINK 构造的模糊自整定控制器模型

MATLAB5.XR 的模糊控制工具箱提供的 FIS (Fuzzy Inference System) 编辑器是一种方便的模糊控制器编辑工具。在 MATLAB 命令窗口运行 Fuzzy 函数来打开 FIS 编辑器，建立一个 Mzmdani 型模糊控制器。通过其 Edit 菜单可以增加模糊控制器输入/输出，改变其变量名：双击输入/输出框在第二个窗口中增加各变量的隶属函数、隶属函数类型和值域范围；双击中间的模糊规则框可以编辑模糊规则。FIS 系统的规则语句可根据模糊控制器设计的输出变量控制规则表（见第三章）直接写出。

例如：(1) if (E is O) and (EC is O) then (K_P is O) (1)

(2) if (E is NS) and (EC is O) then (K_P is PS) (1)

其中：规则语句前面的数字是规则语句序号，其末尾括号的数字是该条规则的权值。在 FIS 编辑器中，对相关运算的方法有：与 (And)、或 (Or)、推理 (Implication)、合成 (Aggregation)、非模糊化 (Defuzzification)。

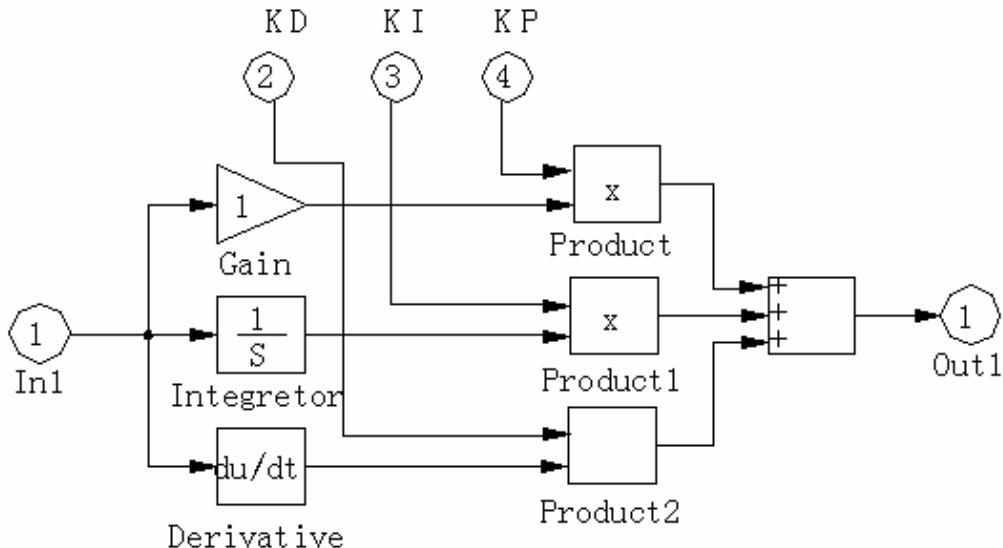


图 4-10 参数可控式 PID 仿真框图

MATLAB5.X 的 SIMULINK 图库中只有通用 PID 控制器图块，为了实现 PID 模糊自整定控制系统仿真，需要在图库中扩充参数 K_P、K_I 与 K_D，可控式 PID 控制器图块可以参考其通用 PID 控制器图块进行修改来得到。SIMULINK 提供了极为便利

的图块扩充方法：在 SIMULINK 窗口中选择新建图库，并从 SIMULINK 图库中选择相应的图块并连接成图 4-10 所示的参数 K_P 、 K_I 与 K_D 可调式 PID 控制器。从图 4-10 中可以看出，参数 K_P 、 K_I 与 K_D 是通过三个输入端分别输入至各自的 Prodict 图块，以实现与（输入信号）经比例、微分和积分处理后的三路信号进行乘法运算，最终实现参数可控 PID 控制器的运算。然后，利用创建子系统功能（CreateSubsystem）将该图建成子系统图块形式（见图 4-11）。

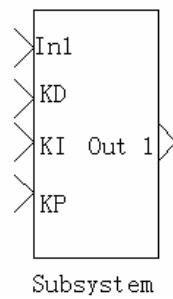


图 4-11 参数可控式 PID 图块

模糊控制和 PID 控制两者结合起来，扬长避短，既具有模糊控制的灵活性、适应性强的优点，又具有 PID 控制精度高的特点。模糊自整定 PID 控制器为两输入单输出的系统，控制器的输入是系统误差 e 和误差变化率 Δe ，控制器输出用于控制被控对象。

在前面得到的参数可控 PID 的基础上，可以用 SIMULINK 构造出模糊自整定 PID 的仿真模型，如图 4-12 所示。

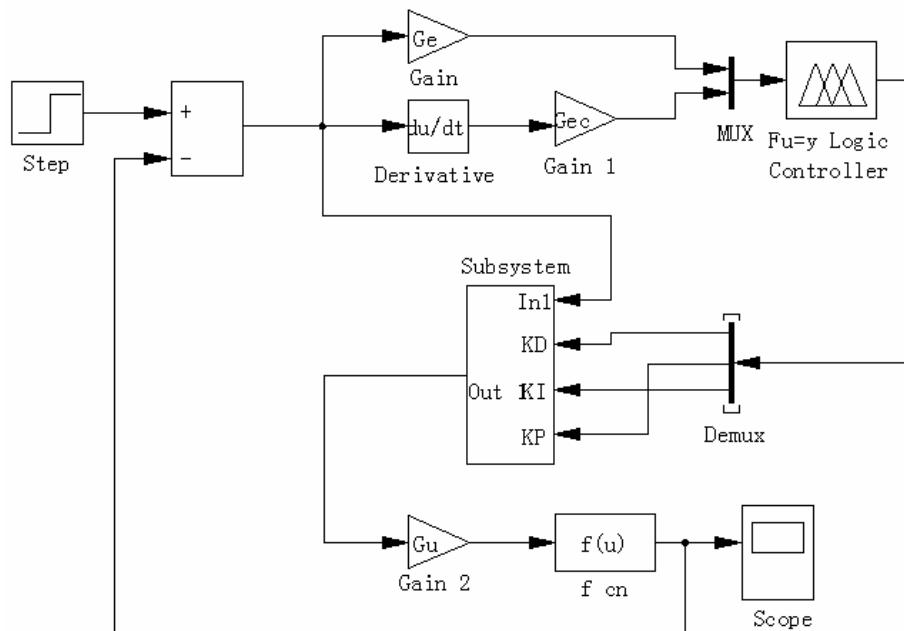


图 4-12 模糊自整定 PID 控制系统仿真图

4.3.3 供暖锅炉燃烧控制系统仿真

燃料量与主蒸汽通道的动态特性可近似为惯性环节与纯滞后环节构成。因实际过程中具有一定的传递滞后，可以得到数学模型为：

$$G(s) = \frac{e^{ts}}{(Ts + 1)}$$

这个数学模型只是一种近似，为了便利进行仿真，用来比较常规 PID 控制方法与模糊自整定 PID 控制方法的不同。下面分别对 PID 和模糊自整定 PID 进行仿真。

首先，选取 $T=480s$ ，采用常规 PID 控制时系统结构如图 4-13 所示。PID 控制器的参数为 $K_p=25$, $K_i=0.05$, $K_d=12$.

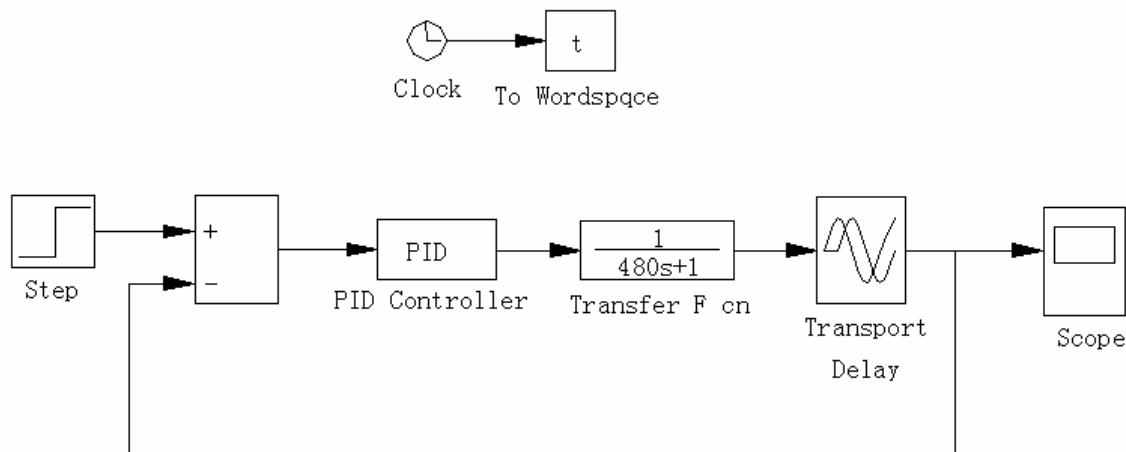


图 4-13 PID 控制系统仿真模型

仿零点结果如图 4-14 所示。

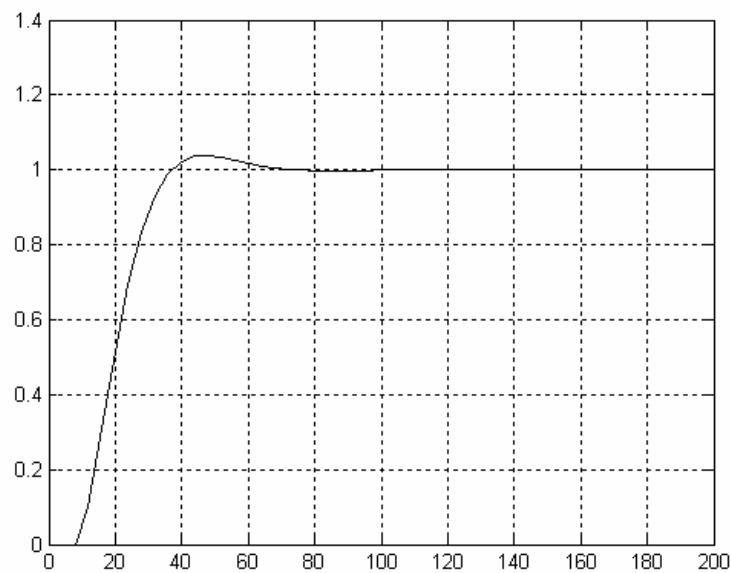


图 4-14 PID 控制相应曲线

超调量为 4.60%，过渡过程时间为 64s。

采用模糊自整定 PID 控制器时，系统结构如图 4-15 所示。

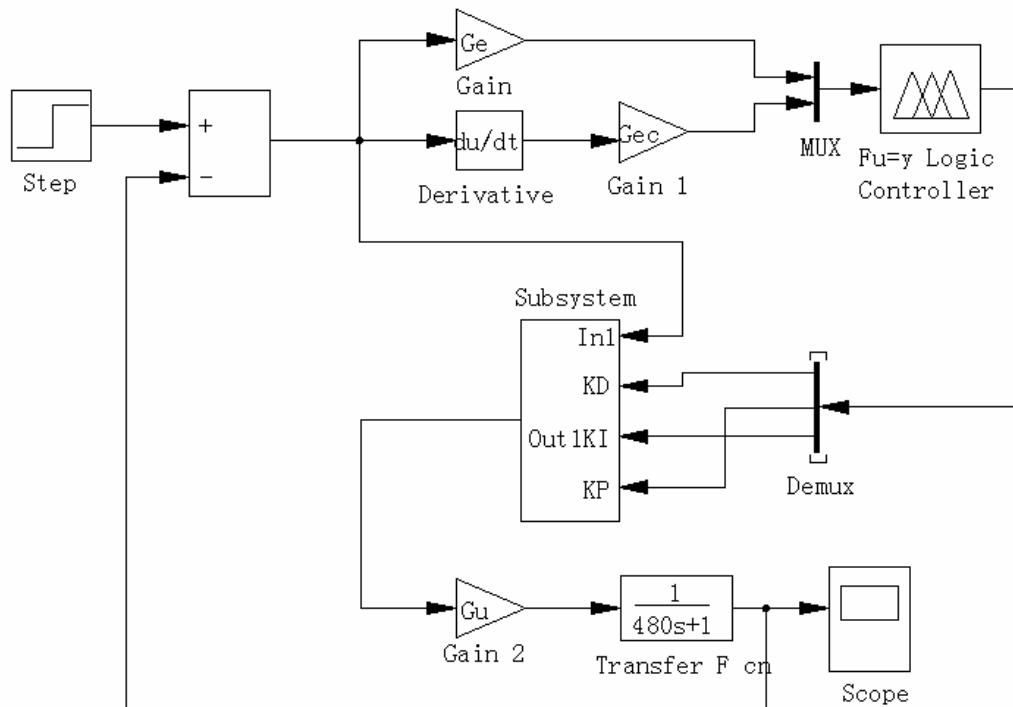


图 4-15 模糊自整定 PID 控制结构图

仿真结果响应曲线如图 4-16 所示。

超调量为零，过渡过程时间 58s。

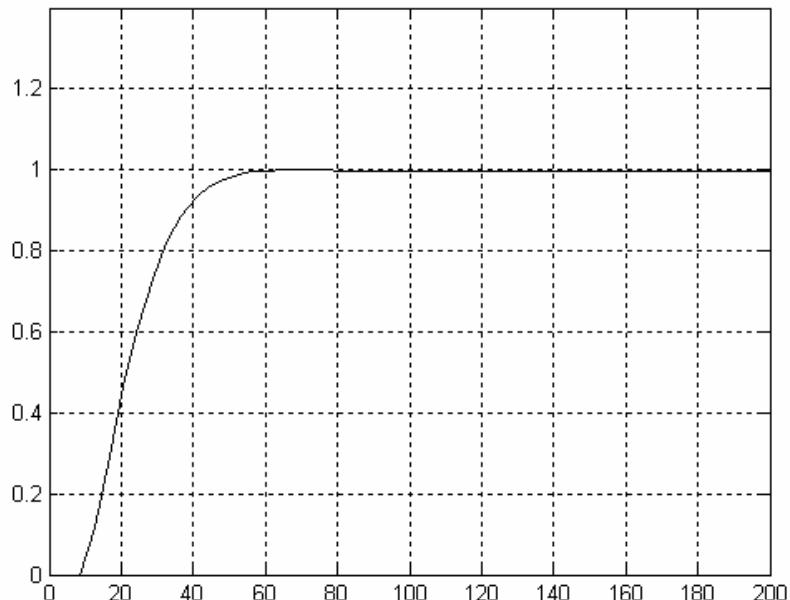


图 4-16 模糊自整定 PID 控制相应曲线

由仿真结果可以看出，对于上述给定的控制对象，模糊自整定 PID 控制系统的阶跃响应要优于 PID 控制系统。

第五章 锅炉自动化控制系统的运行

该热力站在进行锅炉燃烧系统改造的同时，对仪表系统进行了改造，取消了原有的二次仪表，所有的检测数据均通过单片机进行 A/D、D/A 转换，在计算机上进行显示和控制。图 5-1 给出了 1 号炉司炉操作画面。

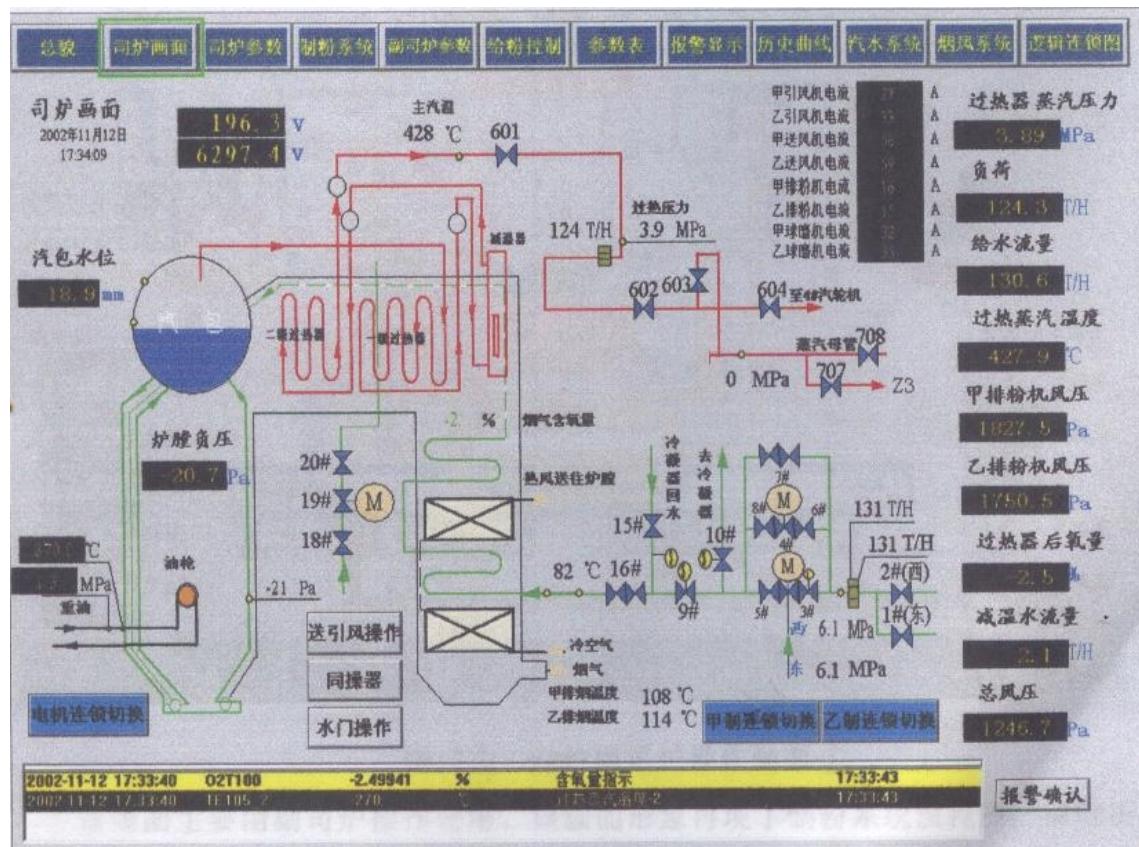


图 5-1 1号炉司炉操作画面

该画面主要供操作人员使用，画面的上方为主要画面的切换菜单。画面中的中部显示了锅炉主体及水、汽系统的工艺流程。画面的底部有一个报警的提示窗口。每个报警产生时，将会以红色闪动条的形式出现在报警窗口的最上方，同时发出声光报警。此时，操作人员点击“报警确认”按钮，确认相应报警。若此时报警信息仍保留在报警窗口，说明故障依然存在，直到故障消失时报警信息才能消失。

所有要求司炉实时掌握的重要参数，在画面的两侧和流程中均以黑底黄字醒目框表示，汽包水位以数字和填充的两种方式直观地显示出来。相关控制回路如汽包水位控制回路、送引风控制回路、负荷控制回路等均可以通过相关按钮弹出子窗口进行操作控制。

图 5-2 给出了 1 号炉的付司炉操作画面。

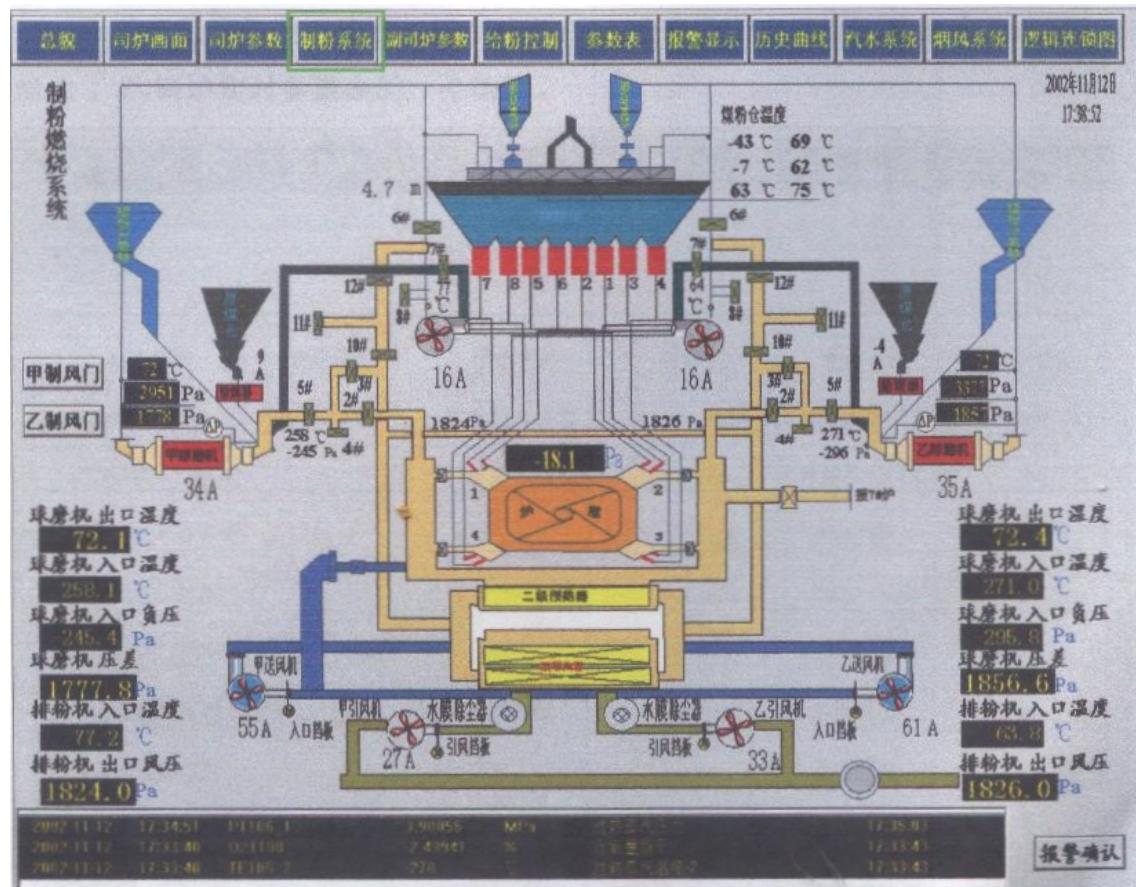


图 5-2 1 号炉副司炉操作画面

该画面主要由副司炉操作使用。该画面形象再现了制粉系统流程图，实时反映和显示副司炉所需掌握的信号当前值。画面的整体布局与图 5-1 相同。

从该图上可看到整个制粉图上可看到整个制粉系统各设备的名称及各台电机的动态显示。各台电机的当前运行状态用颜色划分，黄色表示电机控制回路未送电，绿色表示电机控制回路已送电而电机停止，红色表示电机运转。

操作工可以通过该画面连锁起停相关电气设备，点击每台电机都会弹出该电机的启停操作窗口。

除了工艺流程图，该系统还以表格的形式提供了实时检测数据列表，图 5-3 给出了锅炉实时参数表的一个画面。操作工可以通过该画面查看在工艺流程图上未列出的一些参数。

测点名称	测量值	测点名称	测量值	测点名称	测量值
过热蒸汽温度	432 ℃	门前给水压力	6.1 MPa	甲球磨机出口负压	-999 Pa
甲排粉机入口温度	77 ℃	门后给水压力	6.1 MPa	乙球磨机出口负压	-999 Pa
乙排粉机入口温度	63 ℃	汽包压力	-1 MPa	炉膛负压	-17 Pa
甲球磨机出口温度-1	72 ℃	过热蒸汽压力	3.9 MPa	给水流量-1	131 T/H
乙球磨机出口温度-1	70 ℃	母管压力	0.0 MPa	给水流量-2	132 T/H
甲球磨机出口温度-2	℃	重油压力	1.3 MPa	蒸汽流量-1	127 T/H
乙球磨机出口温度-2	℃	甲球磨机入口负压	-217 Pa	蒸汽流量-2	128 T/H
重油温度	870 ℃	乙球磨机入口负压	-242 Pa	连续排污流量	0 T/H
汽包水位-1	-20 mmH2O	汽包水位-2	8 mmH2O	含氧量指示	-2 %

2002年11月12日
18:01:09

图 5-3 1号锅炉参数表画面

图 5-4 给出了报警屏的画面。在该画面上，顺序列出了警报日期、警报时间、标记名、描述、警报时的数值、确认时间等各项。当一个新的报警产生时，在该画面的最上方第一条的位置以红色闪动条的形式出现，同时报警音响产生相应的报警声音。操作工可以确认单个和多个报警。图 5-4 画面看到的是已经确认但仍未消失的报警。

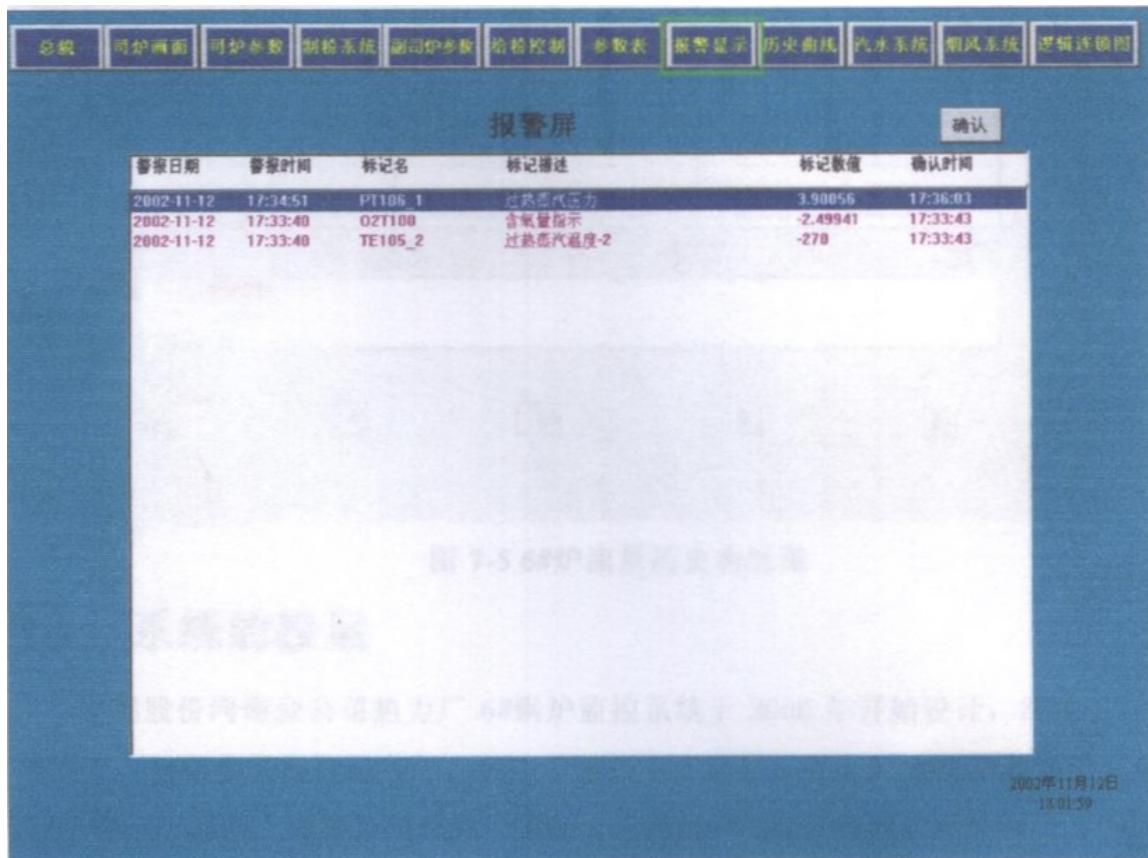


图 5-4 1号炉报警画面

另外，1号炉监控系统根据工艺要求给出了一些重要的运行参数相关历史指标。图 5-5 给出了部分流量的历史曲线。在历史曲线画面中，红色表示给水流量曲线、绿色表示蒸汽流量曲线、蓝色表示减温水流量曲线、操作人员可以移动图中的时间轴检测当时时间的实时数据，也可以通过移动画面底部的操作按钮移动历史曲线。

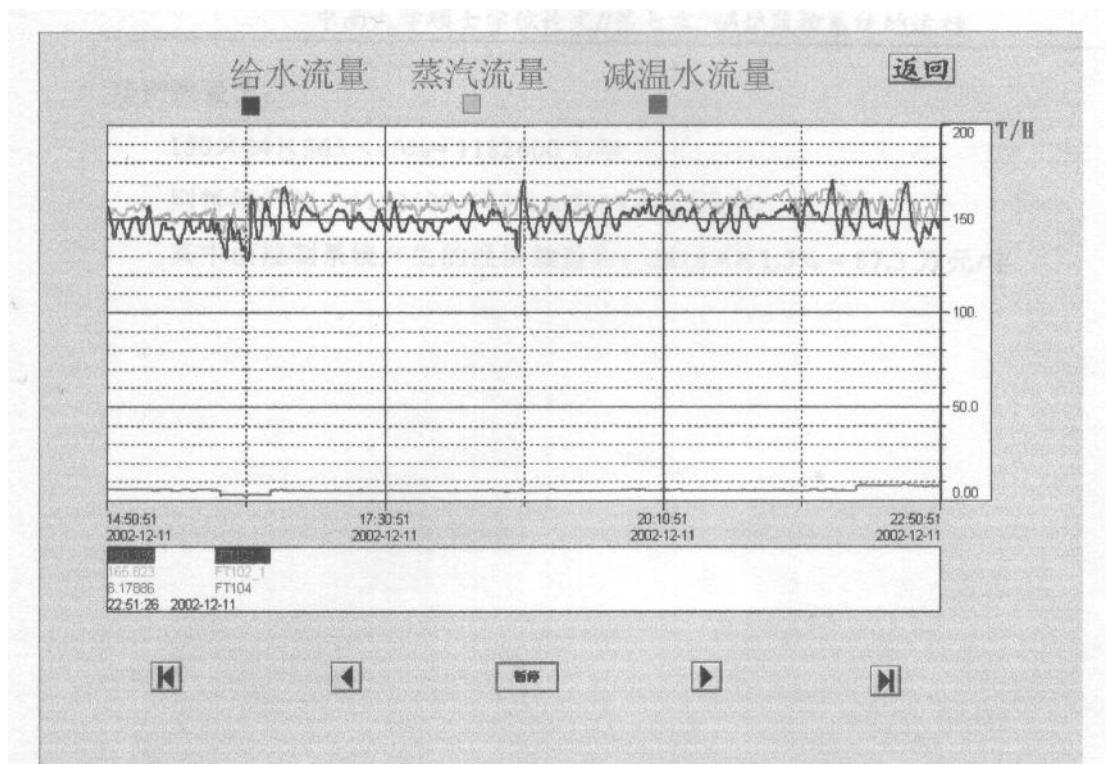


图 5-5 1号炉流量历史曲线图

第六章 结 论

6.1 本篇论文完成的主要工作

本篇论文以洛阳市热力公司供暖锅炉设备为研究对象，以锅炉的燃烧控制为研究内容，以改进原有 PID 控制为目的，结合当前发展比较迅速的模糊控制理论，提出了一种基于模糊控制的自整定 PID 控制器，采用了计算机控制系统对锅炉燃烧进行监控，并通过仿真对模糊-PID 控制器的性能进行了研究，并与常规的 PID 控制进行了比较。

对锅炉燃烧系统进行了分析，得出炉膛温度、压力、含氧量和炉膛负压等这些受控量之间存在的相互关系，提出用模糊自整定 PID 控制器取代原来使用的 PID 控制器，来控制系统变量。使用模糊控制理论和 PID 相结合的控制器来改造原有的 PID 控制方式，是根据当前模糊理论发展的现状，结合系统的实际情况确定的。

采用计算机控制锅炉燃烧系统，硬件设备采用性能/价格比相对高的单片机为主机，控制系统实现了如下功能：

1. 计算输入量是否合理和实现最佳控制：根据负荷变化计算输入量是否合理，确定输出值如何变化，通过输出调整输入，从而对锅炉生产过程的运行工况进行调节，实现燃烧工况的最佳控制。

2. 锅炉的点火启动和停炉：该系统能完成锅炉启停过程中的绝大部分操作和调整。运行人员只需发出“启动”命令，锅炉就从自动点火开始，启动运行，直到达到额定负荷为止。同样，锅炉处于正常运行时，若发出“停炉”锅炉就会逐步降温，减负荷，直到全部停止为止。在锅炉启停过程中，也可由自动运行改为人为控制。

3. 交流变频器控制电机转速：系统通过计算得到的输出量，送给不同的变频器来控制给煤机转速、炉排转速、鼓风机转速和引风机转速，使系统进行自动调节，达到燃烧控制的目的。

4. 声光报警：当锅炉在运行过程中发生故障时，及时进行报警提示，并予以处理。若通过处理无法排出事故时，及时作停炉处理。

用 MATLAB 对应用模糊自整定 PID 控制器的锅炉燃烧控制系统模型进行仿真研究。对于锅炉这种具有非线性、参数不稳定、难以建立精确的数学模型的控制对象，只有通过仿真结果证明，新的控制器比原有的 PID 控制器具有更好的控制效果，而且系统的鲁棒性和抗干扰能力均有所提高，达到了设计目的。

6.2 需要进一步完善的工作

1. 在对锅炉燃烧控制系统的改造过程中，暂时忽略了锅炉控制中其它的控制系统对燃烧过程的影响，没有做到对整个锅炉系统的改造工作，在以后的研究工作中有必要进一步改进和完善。
2. 在计算机控制中，尚未实现对汽包水位和过热蒸汽的控制。
3. 本文所做的 SIMLINK 仿真实验，初步证明了其可行性，在具体实践中还有很多的工作要做。

参考文献

- [1] 孙秀权.锅炉原理[M].机械工业出版社, 1981
- [2] 范从振.锅炉原理[M].水利电力出版社, 1996
- [3] 何 平, 王鸿绪.模糊控制器的设计及应用[M].科学出版社, 1997
- [4] 张志涌.精通 MATLAB (5.3 版) [M].北京航空航天大学出版社, 2000
- [5] 于晓东.计算机控制在锅炉运行中的应用[J].化工装备技术, 2001; 21 (5): 43-45
- [6] 侯海明.微机控制锅炉经济燃烧寻优方法的探讨[J].自动化仪表, 1998; 19 (12): 7-9
- [7] 增干文.锅炉燃烧风煤配比智能鲁棒控制节能算法[J].湘潭大学自然科学学报, 1994; (3): 121-126
- [8] 五一.智能控制在工业锅炉燃烧系统中的应用[J].黑龙江大学自然科学学报, 1996; 13 (3): 43-45
- [9] Booth,R.C.Neural network-based combustion optimization reduces NOx emissions while improving performance.proceedings of the American Power Conference v 2 1998 Illinois Inst of technology,1998:667-672
- [10] Obemberger,Ingwald.Decentralized biomass combustion:State of the art and future development .Biomass and Bioenergy,1998;14(1):33-56
- [11] Tao,L. Uses of a computer model for evaluation of combustion and NOx control alternatives in a kraft recovery boiler,International Chemical Recovery Conference. TAPPI Press,1998;1:299-312
- [12] 林 瑞.工业锅炉最佳燃烧控制器的研究[J].电气自动化, 1994; (4): 14-16
- [13] 王鉴光.工业锅炉热效率自寻优计算机控制系统[J].化工自动化及仪表, 1994; (3): 31-35
- [14] 刘向杰.动力锅炉燃烧控制系统的模糊控制策略[J].自动化学报, 1998; 24 (4): 534-538
- [15] 田瑞中.供暖锅炉的计算机模糊控制系统设计[J].基础自动化, 2001; 8 (1): 32-35
- [16] 范伊波.基于自适应神经元网络的过热气温智能控制[J].动力工程, 1998; 18 (2): 7-10
- [17] Wu Men,Shen Deyao. Expert Control Based on Neural Networks and Mathematical Models for the Coal Blending process[J].Control Theory and Applications,2000;17(6):869-872
- [18] 叶思伦.利用 HS2000 系统完成的燃烧器管理系统[J].自动化博览, 1998; (2): 15-19
- [19] Miyayama,Toshio.A Combustion control support expert system for a coal-fired boiler.ECON Proceedings (Industrial Electronics Conference) v 2 Oct 28-Nov 1 1991 Sponsored by:IEEE Industrial Electronics Soc;Soc of Instrument & Control

Engineers of Japan Publ by IEEE,1991;2:1513-1516

[20] Wang,Siyuan.Algorithm of simulating human intelligent contral for combustion system[J].Proceedings of the IEEE International Conference on intelligent Proceeding Systems,ICIPS v 1 Oct 28-31 1997 Sponsored by IEEE:768-771

[21] Zhou,H.C.,Monitoring of 2-D combustion temperature images in a 670t/h utility boiler and simulation of its application in combustion contra[J]. Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing 8 3 2000 Curtin Univ Technology, 2000:311-322

[22] Gui Weihua,et al.Intelligent modeling and optimization on time-sharing power dispatching system electrolytic zinc process[J]. Transaction of Nonferrous Metal Society of China,2000;10(4):561-565

[23] 邓春萍, 吴敏.先进控制技术控制理论与控制系统[J].计算技术与自动化, 2000; 19 (4): 1-5

[24] 刘晓颖, 桂卫华.复杂系统的集成智能故障诊断系统[J].化工自动化及仪表, 2001; 28 (4) 16-18

[25] 李人厚.复杂大系统的集成控制[J].控制理论与应用, 1994; 11 (2): 222-225

[26] 白发琦.利用分散控制系统完成锅炉控制安全保护及燃烧器管理[J].热力发电, 1999; (3): 17-20

[27] 黄义华.循环硫化床锅炉实时监控与管理信息系统[J].自动化及仪表, 2000; (6): 18-21

[28] 刘浩.多级热网分布式微机监控系统现场控制机的研制与应用[J].基础自动化, 1998; (3): 17-18

[29] 徐邦荃, 张锦泽.模糊控制在炉温控制系统中的试验研究[J].华中理工大学学报, 1994; 22 (8)

[30] 韩树龙, 姜永森.工业锅炉燃烧过程自寻最优控制[J].基础自动化, 1998; (5): 14-17

[31] 寇群, 曹文权.区域锅炉房供热微机自动监控系统[J].区域供热, 2002; (4): 1-4

[32] 周以琳, 戚淑芬.锅炉燃烧系统优化控制及实现方法[J].工业仪表与自动化装置, 1998; (4): 50-53

[33] 何华堂.现代燃煤锅炉的汽包压力控制系统[J].炼油化工自动化, 1997; (2): 20-23

[34] 吴宇.工业锅炉汽包水位智能控制系统的应用[J].电子与自动化, 1999; (2): 16-19

[35] 尹尔为, 丁永和.锅炉燃烧系统的模糊控制研究[J].洛阳工学院学报, 1994; 15 (2)

[36] 赵守庭, 刘洹君.模糊控制技术在加热炉燃烧控制系统中的应用[J].基础自动化, 1997; (6): 26-28

[37] 姜铁源, 张来仁.多台工业锅炉微机控制系统[J].黑龙江自动化技术与应用, 1999; 18 (4): 26-28

- [38] 陶永华.模糊 PID 控制[J].自动化仪表与自动化装置, 1998; (1): 57-62
- [39] 刘慧珠.锅炉燃烧系统的智能化控制[M].石油化工自动化, 1999; 28-30
- [40] 赵廷东, 于锡纯.模糊 PID 控制器的稳定性分析[J].控制与决策, 2002; 17 (5): 631-633
- [41] 谭文, 王耀南.一种参数自调整 PID 模糊控制器[J].基础自动化, 2001; 8 (6) 12-13
- [42] 张建民, 张建文.自适应模糊炉温控制系统[J].基础自动化, 2001; 8(2)21-22
- [43] 管丰年, 孙庆玉.锅炉自动燃烧系统中空气/燃料比控制方案的分析[J].石油化工自动化, 2001; 18-21
- [44] 李继容, 鲍芳.模糊控制器的两种设计方法.仪器与测控, 2002; (4): 23-25
- [45] 林寥廓, 孟双成.用 PLC 实现锅炉燃烧系统的控制[J].自动化与仪表, 1998; 13 (4) 48-50
- [46] 石兆三.模糊控制在火电厂热力过程自动化控制中的应用.自动化仪表, 1994; 13 (10)
- [47] 陈忠保, 姜超.小型 DCS 在工业锅炉控制中的应用[J].自动化与仪表, 1997; 12 (5) 30-32
- [48] 刘向杰, 柴天佑.动力锅炉燃烧系统的模糊控制策略[J].自动化学报, 1998; 24 (4) 534-538
- [49] 孙玉娟, 孙世荣.燃煤工业炉燃烧控制[J].冶金自动化, 1997; (4) 13-16
- [50] 李娟.一种实现单片机模糊控制器的新方法[J].系统工程与电子技术, 2001; 23 (6) 70-72
- [51] 程万胜, 王雪洁.计算机与 51 系列单片机多机通讯的实现[J].鞍山钢铁学院学报, 2002; 25 (4) 248-250
- [52] 张海藩.软件工程导论[M].清华大学出版社, 2001;
- [53] 曹承志, 曲红梅.基于参数自调整模糊控制的变频闭环调速系统[J].电力电子技术, 2001; (1): 29-32

致 谢

本篇论文从选题、开题、论文撰写等都是在导师桂卫华教授和姚继东高级工程师的悉心指导下完成的，在此完稿之际对教导和关心作者的导师致以最深切的感谢。桂卫华老师勤勤恳恳的工作态度、治学严谨的学者风范，不论在学术上还是在生活中都是我终生学习的榜样，在严师的带领下作者才能顺利完成研究生学业。

在研究生学习期间，得到各科老师的精心指导和热情帮助，在此表示真挚的感谢。特别感谢李勇刚博士在论文定稿期间给予的帮助。

最后，感谢母校中南大学的培养和教育，感谢作者父母给予的关爱与鼓励以及经济上的支持，使学业得以顺利完成。

施 修 峰

2005 年 11 月

攻读硕士学位其间发表及完成论文情况

1. 施修峰。PLC 自动控制系统在工频感应炉上的应用。 《有色金属加工》2005 年第 3 期
2. 施修峰。有色金属加工企业谐波的产生与治理。 《有色金属加工》2005 年第 4 期
3. 施修峰, 桂卫华。自适应 PID 在低同步串级调速系统中的应用 《有色金属加工》2004 年第 5 期
4. 施修峰。卷取机张力微机控制系统 《电气时代》2002 年第 6 期