

The research on the Control for Steam Pressure of Powerplant Boiler Steam Drum Based on Fuzzy Theory

Abstract

In the modern electric enterprises, because of many aspects of demands for producing safely, saving energy and reducing cost, raising productive efficiency and so on, The computer control system has been applied to powerplant control. But the controlled object of powerplant burning system is the complex system of non-linear, timing change, pure-lag, long-delay and multi-variables coupling. It is difficult to adopt the routine PID to obtain the satisfactory control result, because there is no accurate mathematical model.

The Thesis deals with the upgrade of boiler burning control system for a powerplant in Shenyang according to the real state. Considering the characteristics of the controlled object of boiler burning system, I adopt routine PID controller and Fuzzy self-adjustment PID parameter controller in the thesis, studying and contrasted the two kinds of control systems comparably. On the basis of constructing the mathematical model of the boiler burning system, the setting value disturbance and the response of coal inside disturbance are studied in the two kinds of control systems by using SIMULINK simulated software respectively. The simulated results have demonstrated that self-adjustment PID proportional parameter is superior to the routine PID controller. The Fuzzy self-adjustment PID proportional parameter possesses not only good dynamic characteristics, but also good environmental adaptive capacity.

The research result has demonstrated to be feasible in the theory and practice, which is a matter of significance for the project in practice in the future.

Key words: Boiler; Burning; Fuzzy control; PID; SIMULINK; Simulation

第一章 引言

1.1 模糊控制在电厂锅炉燃烧自动控制系统中应用的意义

1.1.1 电厂锅炉燃烧控制系统研究的背景和意义

火力发电是现代电力生产中的一种主要生产形式,作为火力发电厂主要设备的锅炉,对其生产过程进行有效的控制是电力工业中一项基本任务。锅炉是应用广泛的工业民用设备,据统计,全国小型锅炉超过30万台,每年耗煤量占我国原煤产量的1/3,我国目前运行的多数锅炉由于控制水平不高,其效率普遍低于国家标准,大多数锅炉仍处于能耗高,环境污染等严重的生产状态,每年因为热效率低而多消耗的标准煤达到近2000万吨^[1]。因此如何提高锅炉热效率问题,一直是专家学者所关注的问题。

本文通过沈阳某电厂电站锅炉控制系统改造项目,通过运用比较先进的算法,在火力发电厂中,实现锅炉热力过程自动化后,能使机组安全,可靠,经济地运行。

锅炉是一个典型的非线性时变多变量耦合系统,用常规的控制手段很难达到理想的效果,对其控制算法进行研究,具有比较重要的现实意义。

实现生产过程自动化对国民经济的发展有十分重要的意义。对其实现热力过程的自动化控制具体有以下几个方面的益处:

(1) 提高锅炉系统运行的安全可靠

机组运行的首要要求是安全可靠,特别是对大容量机组更是具有重要的意义。随着机组容量的增大,热力系统越来越复杂,需要监视、控制的项目显著增多。例如,一台500MW的机组,需要监视的项目达2,000多个,需要操作的项目达40,000多个。靠人来监视和操作,不仅劳动强度大,而且很难胜任,同时极易因误操作而造成事故,所以必须采用自动化仪表来完成监视和操作。因为检测装置能把机组的运行状态随时报告给人和调节装置;自动调节装置能随时对机组的运行状态进行调解,使机组在良好的状态下运行;程序控制装置能简化操作步骤和减少操作数量,避免误操作;保护装置能在机组运行中发生异常或运行参数超过允许值时进行报警,避免、限制、处理事故。计算机技术的应用使锅炉运行的可靠性得到了进一步的提高。

(2) 提高锅炉系统运行的经济性

目前,能源危机和市场竞争的加重,对节约能源和减少燃料消耗的要求不断提高,环境保护和文明生产的呼声日益高涨。对锅炉的控制系统实现自动化,不但可以减少事故停机的损失和检修的费用,还可以有效的提高热效率,降低供电热耗和煤耗。据统计,锅炉实现燃烧自动控制后,其热效率可提高0.5~3%。采用计算机进行运行指导时,供电热耗约降低25.1~54.4Kj/(Kwh)(占0.25%~0.5%)。两台600MW机组一年可节约1~2万吨煤;当机组按最佳方式运行时,热耗可降低62.7~125.4Kj/(Kwh)^[2]。机组还可实现自启停,可缩短启停时间,因而使各种热损失及工质损失都大为减少。

(3) 提高劳动生产率和改善劳动条件

实现生产过程自动化,可使运行人员从繁忙的体力劳动和紧张的精神负担中解脱出来,值班员除在机组启停时有些操作外,正常运行时只需要在控制室内集中监视主设备及自动化仪表的运行情况。以锅炉汽包水位为例,在旧式锅炉中,必须有司水员整天呆在温度高、飞灰多、工作环境很差的炉顶汽包旁进行监视。在新式锅炉中,利用电接点式水位或工业电视的摄像装置等将汽包水位真实地反映到控制室,值班员在控制室内就可以清楚地看到汽包水位的高低。通过采用自动装置和监控手段可以减少运行人员,有效地提高劳动生产率,由于实现了机组的自动启停,在机组启停阶段,不需要临时增加运行人员协助操作和抄表工作^[2]。

1.1.2 模糊控制技术的优点

锅炉控制的难点主要集中于燃烧控制上,蒸汽锅炉控制策略的研究工作也主要围绕它们展开。锅炉是高压运行设备,保证安全性极其重要,锅炉压力控制关系到锅炉正常运行;最优燃烧控制则关系到锅炉经济运行。汽包压力是个典型的大滞后环节,而同时,锅炉的燃烧过程是一个非线性时变多变量耦合的复杂过程,受煤质,给煤量,鼓风量,引风量等诸多因素的影响,燃烧风煤比是动态的,风煤比必须随负荷,煤质等因素的变化而变化,才可使燃烧效果始终保持在最佳状态。锅炉的燃烧检测需要经过复杂的热工检测,无法实现在线检测,在线控制。因此,可以这么说,目前锅炉控制的核心难点问题就是研究如何提高燃烧系统经济燃烧,如何对锅炉燃烧过程进行最有效的控制。

固定参数的PID调节已经不适合如锅炉燃烧过程这样的非线性,时变,多变量耦合的复杂系统。而模糊控制则以其响应速度快,鲁棒性好等特点而脱颖而出,在锅炉控制中得到比较广泛的应用。

模糊控制技术从广义上可给它定义为:“模糊控制指的是应用模糊集合理论,统筹考虑控制的一种控制方式”。目前在工业过程中投入运行的模糊控制器,主要指的是以模糊命题形式表示的一组控制规则,经模糊推理决定控制量的形式。

由于模糊控制的突出优点在于控制系统的设计不要求知道被控对象的精确数学模型,只需提供现场操作人员的经验知识及操作数据,而且在硬件配置不变的情况下,锅炉燃烧系统采用不同的算法就可实现不同的控制规律。实现不同的控制规律只需要修改软件,而不需要修改硬件。这样可以很方便地用同一套硬件构成满足不同要求的锅炉燃烧控制系统。体现了系统控制的灵活性。

综上所述,把模糊控制技术应用在锅炉燃烧系统,将有很好的和潜在的应用前景,并有明显的理论意义和实际意义。

1.2 电厂自动控制系统的现状

1.2.1 电厂自动控制系统的发展概况

电厂的自动控制的发展经历了由初级向高级不断发展和完善的过程,根据其各阶段的特点可大致分为以下四个阶段:

(1) 就地控制阶段

在 20 年代至 30 年代期间,火力发电机组的容量还不是很大,生产过程对自动控制的要求以及当时所具备的技术条件有限,仅能对发电机组实现简单的自动控制,例如锅炉蒸汽压力、汽包水位、汽轮机转速等的控制。所以控制系统基本上分散在各个控制对象所在的车间,各控制系统间相互独立,没有任何联系。运行人员在就地装置的控制盘上进行监视和操作,所应用的控制设备大都是尺寸较大的基地式仪表。国外 40 年代以前和我国 50 年代建设的火力发电厂基本上采用这种模式。

(2) 集中控制阶段

40 年代初期,由于中间再热式机组的出现,进一步密切了锅炉与汽轮机之间的关系,为了协调汽轮机与锅炉之间的运行,加强机组的操作管理和事故处理,满足负荷变化对热力设备的要求,维持运行参数的稳定等,要求对锅炉和汽轮机实现集中控制,即把锅炉和汽轮机的控制系统表盘相对集中地安装在一起,由工作人员来同时监视和控制机、炉的运行,保证机组的正常运行。当时所采用的控制设备主要是气动和电动单元组合仪表。国外 40 年代至 50 年代和我国 60 年代至 70 年代初期建设的火力发电厂大多采用这种控制方式——局部集中控制。

进入 50 年代后,随着火电机组容量的增大,机、炉、电三者的关系更为密切,生产迫切需要对机、炉、电三者实现集中控制与管理。同时,由于仪表和控制设备的尺寸缩小,新型巡回检测仪表和局部程控装置的出现,使得整个机组的监视和控制表盘集中在一个控制室内的要求成为现实。此时采用的控制设备有电动单元组合仪表、组件组装式仪表,也有以微处理机为核心的数字式仪表。国外 50 年代至 60 年代以及我国 70 年代至 80 年代建设的火力发电厂大都采用这种控制方式——机组集中控制。

(3) 计算机控制阶段

随着火力发电机组向着高参数、大容量的方向发展,生产设备走向大型化,生产系统日趋复杂。系统的耦合性、时变性、非线性等特点显得更加突出,生产过程中需要监视的内容愈来愈多,过程控制的任务愈来愈重,机组的运行和操作要求更为严格,世界范围内的能源危机和剧烈的市场竞争,对节约能源和减少燃料消耗要求不断提高,环境保护和文明生产的呼声日益高涨等,已反映出以往的生产自动化方式逐渐不能适应时代的发展,火力发电厂自动化面临着严重的挑战。

集中型计算机控制是火力发电厂计算机控制技术应用的初级阶段,普遍采用的是集中型计算机控制方式,即用一台计算机实现几十甚至几百个控制回路和若干过程变量的中型计算机控制方式,即用一台计算机实现几十甚至几百个控制回路和若干过程变量的

1.2 电厂自动控制系统的现状

1.2.1 电厂自动控制系统的发展概况

电厂的自动控制的发展经历了由初级向高级不断发展和完善的过程,根据其各阶段的特点可大致分为以下四个阶段:

(1) 就地控制阶段

在 20 年代至 30 年代期间,火力发电机组的容量还不是很大,生产过程对自动控制的要求以及当时所具备的技术条件有限,仅能对发电机组实现简单的自动控制,例如锅炉蒸汽压力、汽包水位、汽轮机转速等的控制。所以控制系统基本上分散在个控制对象所在的车间,各控制系统间相互独立,没有任何联系。运行人员在就地装置的控制盘上进行监视和操作,所应用的控制设备大都是尺寸较大的基地式仪表。国外 40 年代以前和我国 50 年代建设的火力发电厂基本上采用这种模式。

(2) 集中控制阶段

40 年代初期,由于中间再热式机组的出现,进一步密切了锅炉与汽轮机之间的关系,为了协调汽轮机与锅炉之间的运行,加强机组的操作管理和事故处理,满足负荷变化对热力设备的要求,维持运行参数的稳定等,要求对锅炉和汽轮机实现集中控制,即把锅炉和汽轮机的控制系统表盘相对集中地安装在一起,由工作人员来同时监视和控制机、炉的运行,保证机组的正常运行。当时所采用的控制设备主要是气动和电动单元组合仪表。国外 40 年代至 50 年代和我国 60 年代至 70 年代初期建设的火力发电厂大多采用这种控制方式——局部集中控制。

进入 50 年代后,随着火电机组容量的增大,机、炉、电三者的关系更为密切,生产迫切需要对机、炉、电三者实现集中控制与管理。同时,由于仪表和控制设备的尺寸缩小,新型巡回检测仪表和局部程控装置的出现,使得整个机组的监视和控制表盘集中在一个控制室内的要求成为现实。此时采用的控制设备有电动单元组合仪表、组件组装式仪表,也有以微处理机为核心的数字式仪表。国外 50 年代至 60 年代以及我国 70 年代至 80 年代建设的火力发电厂大都采用这种控制方式——机组集中控制。

(3) 计算机控制阶段

随着火力发电机组向着高参数、大容量的方向发展,生产设备走向大型化,生产系统日趋复杂。系统的耦合性、时变性、非线性等特点显得更加突出,生产过程中需要监视的内容愈来愈多,过程控制的任务愈来愈重,机组的运行和操作要求更为严格,世界范围内的能源危机和剧烈的市场竞争,对节约能源和减少燃料消耗要求不断提高,环境保护和文明生产的呼声日益高涨等,已反映出以往的生产自动化方式逐渐不能适应时代的发展,火力发电厂自动化面临着严重的挑战。

集中型计算机控制是火力发电厂计算机控制技术应用的初级阶段,普遍采用的是集中型计算机控制方式,即用一台计算机实现几十甚至几百个控制回路和若干过程变量的

控制、显示及操作、管理等。与常规仪表管理相比，集中型计算机控制的优点体现在以下几个方面：

第一 功能齐全，而且可实现先进的、复杂的控制和连锁功能；

第二 可通过修改软件增删控制回路、改变控制方案、调整系统参数，应用灵活；

第三 信息集中管理、便于分析和综合，为实现整个生产过程的优化控制创造了条件；

第四 CRT 显示替代了大量的模拟仪表，改善人机接口，缩小了监视面；

但是，集中型计算机控制也存在着严重的不足。由于当时的计算机硬件可靠性还不够高，而由一台计算机承担所有的控制和监视任务，使得危险高度集中，一旦计算机发生故障，将导致生产过程全面瞬间瘫痪，危及设备安全；另外控制系统软件庞大、复杂，开发难度大，周期长；还有就是一台计算机所承受的工作负荷过大，在计算机速度和容量有限的情况下，影响系统工作的实时性和正确性。若采用多台计算机，不仅要解决数据和控制信息的交换问题，而且将大大增加投资和维护费用，这是当时存在的较大实际问题。

除此之外，由于生产过程内部机理复杂，最优控制所必需的有关数学模型难以建立，性能指标不易确定，控制策略尚不完整等，使得现代控制理论一时难以适应计算机过程控制。历史条件的限制和集中型计算机控制存在的缺陷，促使计算机控制系统向着分散化发展。

70年代初，大规模集成电路的制造成功和微处理器的问世，使得计算机的可靠性和运算速度大大提高，计算功能增强、体积缩小，而价格大幅度下降。计算机技术的发展与日益成熟的分散型计算机控制思想相结合，促使火力发电厂自动化技术进入了分散控制系统（DCS, Distributed Control System）的新时代。

所谓分散控制系统，是指控制过程所采用的系统，是一种控制功能分散、操作管理集中、兼顾复杂生产过程的局部自治与整体协调的新型分布式计算机控制（又称分散控制系统）。分散控制系统以其功能强、可靠性高、灵活性好、维护和使用方便、良好的性能价格比等优点深受工业界的青睐。80年代中期，我国已开始火力发电机组上应用分散控制系统。

分散控制系统的应用及其自身的不断完善和发展，加速了火力发电厂的自动化进程。目前，分散控制系统的应用方兴未艾，在此基础上，火力发电厂正在向着更加完善、更高层次的综合自动化方向发展。

（4）综合自动化

综合自动化是一种集控制、管理、决策为一体的全局自动化模式。它是在对局部生产过程实现自动控制基础上，从全局最优的观点出发，把火力发电厂的运作体系视为一个整体，在新的管理模式和工艺指导下，综合运用现代科学技术和手段，将各自独立的局部自动化子系统有机地综合成一个较完整的大系统，对生产过程的物流流、管理过程

的信息流、决策过程的决策流等进行有效的控制和协调,实现生产系统的全局自动化,以适应生产和管理过程在社会发展的新形式下提出的高质量、高速度、高效率、高性能、高灵活性和低成本的综合要求。开发型分散控制系统的应用,为综合自动化的实现奠定良好的基础。目前,综合自动化的研究和应用正向纵深方向发展,已成为火力发电厂自动化的重要发展方向。

1.2.2 锅炉控制系统控制器的发展

传统的锅炉控制是依靠司炉工作人员进行人工控制,随着电子技术,计算机技术的发展,出现了锅炉计算机自动控制系统。锅炉计算机自动控制系统就是利用现代电子计算机技术,采用基于微处理器的微机设备取代人工控制,对锅炉的运行进行监视和控制。计算机控制系统对传统控制方式不是进行简单的替代,而是在替代的基础上充分发挥计算机的自身优势,充分利用计算机的强大计算能力,对锅炉的控制实施先进算法,这是传统的控制手段无法达到的。

计算机技术发展迅速,总的来说,目前,锅炉计算机自动控制系统的硬件配置可以分为以下几种类型:

(1) 智能仪表控制系统,这是最早出现的一种锅炉自动控制系统,由于其出现时间早,价格便宜,编程简单,容易掌握等优点而应用较广。但是智能仪表有着输入输出通道数较少,可靠性差,控制功能单调等缺点。目前正逐渐为其它更先进的计算机控制设备所代替。

(2) 工控机的控制系统,以采用 PC 总线结构,STD 总线结构或其它总线结构的工业控制计算机为控制单元。其中以 16 位 STD 总线工业控制机为主机构成的系统由于性能价格比较好。目前在我国的运用比较普及。STD 总线工控机内部一般采用总线式模块结构,组态灵活,维修方便。工控机的控制方式如图 1.1 所示^[3]。

这种以工控机为基础的锅炉控制系统可以充分利用计算机强大的计算功能和图形功能,在灵活地实现各种控制算法的同时,生成友好的用户交互界面,例如,对一些重要的运行检测参数,比如压力、温度等可以在计算机屏幕上生成流程动态模拟图,光柱模拟图等,并还可对汽包水位,压力,炉温等进行超限报警,还可定时或按照需要打印出十几种运行参数的数据,以生成生产日志或者班日生产消耗的统计报表并可进行打印输出。但是,这种控制也有缺点,其中最为严重的缺点是在运行条件恶劣的锅炉运行现场,工控机的信号采集抗干扰能力还是比较差的,并且工控机自身一旦发生故障将直接影响系统的正常运行。

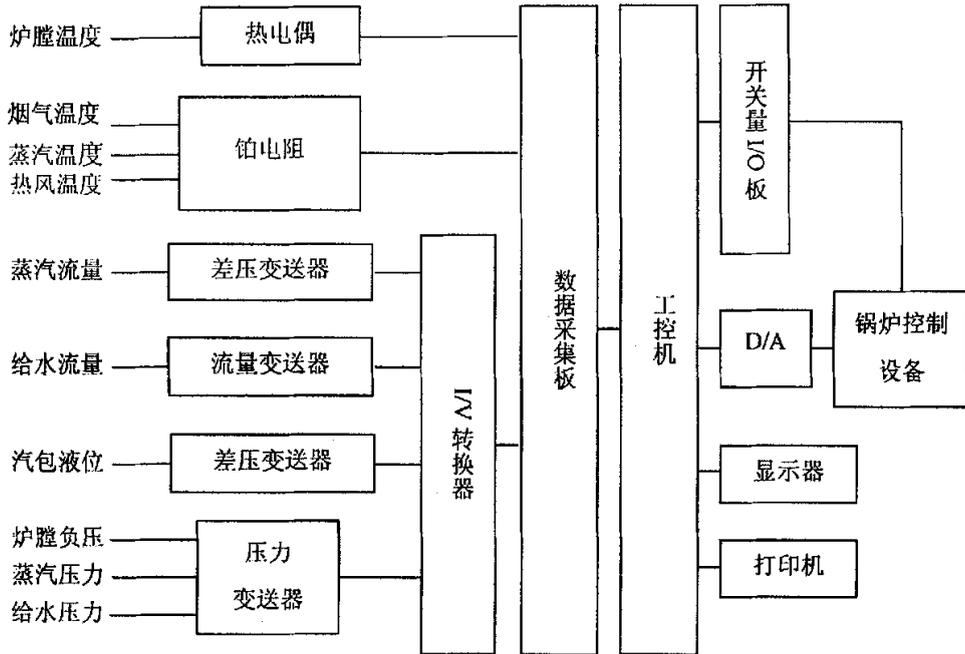


图1.1 锅炉工控机的控制系统结构图

Fig.1.1 The diagram of control system in boiler industry control computer

(3) 锅炉 DCS 系统（集散控制系统）。DCS 控制系统自 80 年代以来在工业控制场合得到了广泛的运用。DCS 具有可靠性高，硬件模块和系统提供的功能模块丰富，系统组态方便等优点，特别适合于石化，燃烧，发酵等过程控制场合。锅炉控制系统就是一个典型控制系统，但是，虽然 DCS 系统具有高性能，但是 DCS 系统造价高，很明显，这种高造价的 DCS 控制系统不适合于占我国锅炉控制系统自动化改造任务大多数的小型锅炉计算机自动化控制改造。

(4) 锅炉 PLC/上位机的控制系统。PLC 控制系统在近年来的锅炉控制系统中取得了长足的发展，PLC 是基于微处理器的一种工业控制设备，它融计算机技术、控制技术和通讯技术于一体，集顺序控制、过程控制和数据处理于一身，可靠性高、功能强大、控制灵活、操作维护简单。锅炉 PLC/上位机的控制方式如图 1.2 所示。

随着 PLC 技术的日趋成熟，PLC 的可靠性进一步提高，从而可以保证控制系统的稳定性，这极大地降低了控制系统的后期维护成本。因此，PLC 在安全性能要求较高的工业现场得到极其广泛的应用。PLC 原来比较多地用于顺序控制，而现在 PLC 则是越来越多地集成如 PID 功能块等一些过程控制功能。因此，PLC 控制技术运用于锅炉控制的条件已经成熟，PLC 用于锅炉控制系统将极大地提高锅炉系统的安全可靠性，将为用户取得可观的经济效益。对锅炉系统采用 PLC 控制方式时，我们一般采用 PLC/上位机的方式，即可靠性要求高的实时控制程序在 PLC 上运行，而对图形功能要求高的人机

交互功能在上位计算机上运行。PLC/上位机的控制方式既具备了传统计算机控制系统的低成本和易操作性，又具有DCS系统的高度可靠性。因此在锅炉PLC/上位机的控制系统在锅炉控制中拥有广阔的应用前景。

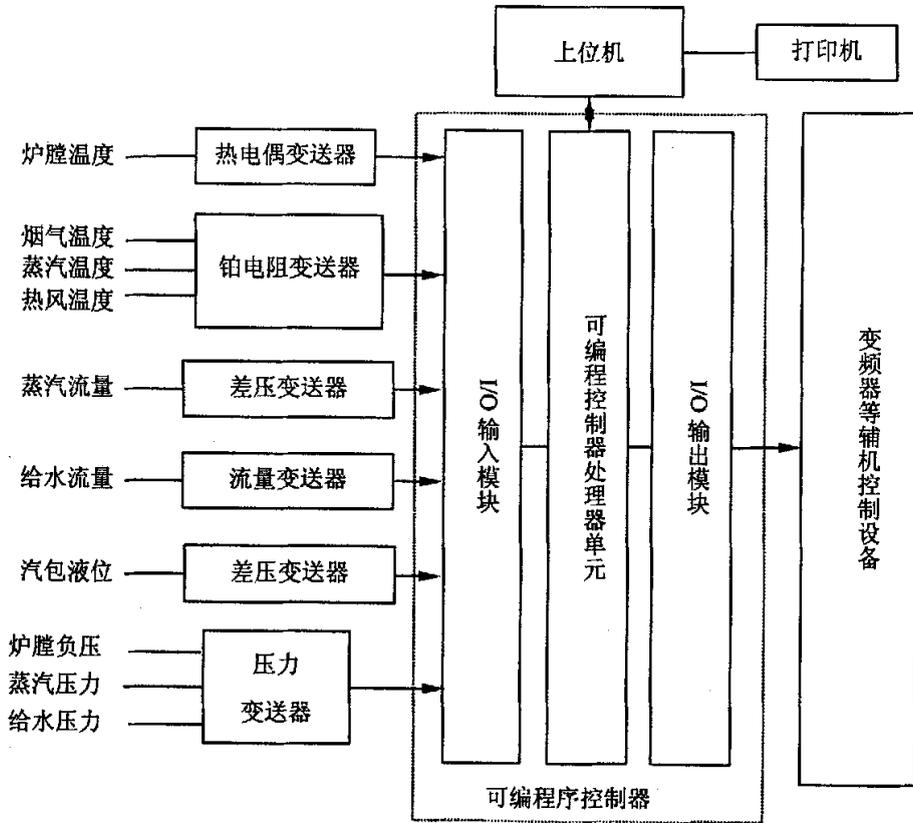


图1.2 锅炉PLC控制系统结构图

Fig.1.2 The diagram of control system in boiler PLC

1.3 某电厂 802 车间锅炉设备基本现状及改造目标

锅炉型号：额定蒸汽流量 35t/h 额定蒸汽压力 3.92MPa

额定蒸汽温度 450℃ 汽包水位 300mm

主要作用：带动 4.3MW 汽轮机发电以及冬季住宅区供暖

三台蒸汽锅炉的工况如下：

(1) 完全手动控制方式，汽包锅炉蒸汽温度、汽包锅炉水位、给煤控制、鼓风控制、引风的控制、二次风的控制和炉排控制均由现场操作工人凭借经验进行调节。在这样的控制方式下，工人的劳动强度大并且增加了系统的不可靠性。

(2) 检测手段落后，炉膛负压等许多检测装置失灵，不能使用。减温水控制阀经常失灵。

(3) 控制效果差, 急需改造, 汽包锅炉蒸汽温度、汽包锅炉水位、汽包压力等重要指标经常在大范围波动。

(4) 经济效益差, 工厂为防止冒黑烟, 锅炉长期工作在大鼓风大引风的状态下, 热量损失严重, 锅炉效率低。

本课题所研究的电站锅炉为 35T/h 的中温中压小型电站锅炉。根据现场调查及向其厂内专家请教, 得到其参数及控制指标如下:

(1) 在本系统中, 汽包直径 1500mm, 长 6300mm; 蒸汽压力信号为 4~20mA, 其测量采用压力变送器。

(2) 蒸汽压力正常运行为 3.5MPa, 允许的变化范围为 0.2MPa, 即其偏差范围为 [-0.2, 0.2]。蒸汽压力必须控制在该范围内, 否则会影响系统稳定运行, 出现安全事故。

(3) 当蒸汽压力值为 ± 0.5 MPa~ ± 0.2 MPa 时, 要求能快速恢复正常, 当蒸汽压力值在 ± 0.2 MPa 之间, 即可认为正常, 这时, 应使给煤机和抛煤机尽量少动作。

(4) 由各传感器输出到控制器的信号及由执行机构接收的信号均为 4~20mA 的标准电流, 控制器只需对标准电流输入进行处理, 然后输出一个标准电流(控制)信号即可。

(5) 本系统对控制对象的响应曲线不要求很平滑, 同时, 对响应时间的要求也不高。有的要求在硬件设计时必须考虑到; 另外一些则是在软件设计时要完成的功能。根据具体控制要求, 现场采用的 PLC 选用德国西门子(SIEMENS)公司生产的 S7-300 系列 PLC (CPU314); PLC 编程采用 STEP7 梯形图语言; 上位机软件采用 SIMATIC WinCC 6.0 完成系统组态及过程监控等功能。通过详细调查, 我们可以看到沈阳某电厂 802 车间锅炉设备的整个控制系统是很落后的。802 车间是窗口单位, 领导也迫切希望通过对控制系统进行计算机自动化改造以达到降低能耗、减少环境污染、提高系统可靠性、减小工人劳动强度和提高经济效益的目的。

1.4 本文所做的工作

针对沈阳某电厂 802 车间自备电站锅炉燃烧控制系统, 应用模糊控制技术进行改造, 通过与传统的 PID 控制技术仿真对比, 来探讨模糊控制在发电厂锅炉燃烧控制系统中的应用。为此, 本文所做的主要工作如下:

(1) 就目前锅炉燃烧系统状况, 提出应用模糊控制技术的改造方案。

(2) 锅炉燃烧系统模糊控制器的总体方案设计。主要包括输入量的模糊化, 模糊控制规则的形成, 输出信息的模糊化。

(3) 通过利用 MATLAB/Simulink 系统仿真, 分析模糊控制较常规 PID 控制的优越性。

(4) 锅炉燃烧系统模糊 PID 控制的现场实现, 分析模糊 PID 控制的优越性

第二章 锅炉燃烧自动控制系统的理论基础

2.1 电站锅炉燃烧控制系统概况

2.1.1 电站锅炉控制系统的组成

电站汽包锅炉的控制系统大致上可以分为以下三个部分的控制系统：^[4]

- (1) 汽包锅炉蒸汽温度自动控制系统
- (2) 汽包锅炉给水自动控制系统
- (3) 汽包锅炉燃烧过程自动控制系统

汽包锅炉燃烧控制系统是由三个相对独立的子系统即燃料控制系统，送风控制系统，引风控制系统组成

2.1.2 燃烧控制系统的基本任务

锅炉燃烧过程控制的基本任务是既要提供热量适应蒸汽负荷的需要，又要保证燃烧的经济性、安全性。电站锅炉燃烧过程实质是将燃料化学能变为蒸汽热能的能量形式转换过程，是一个能量转换，传递的过程，也就是利用燃料燃烧的热量产生汽轮机所需蒸汽的过程。

燃烧过程控制的根本任务是使燃料所提供的热量适应锅炉蒸汽负荷的需要，并保证锅炉安全经济运行。虽然燃烧过程控制的具体任务及控制策略有所区别，燃烧控制系统的基本任务可归纳为以下几方面：

(1) 维持蒸汽压力稳定

锅炉蒸汽压力作为表征锅炉进行状态的重要参数，不仅直接关系到锅炉设备的安全运行，而且其是否稳定反映了燃烧过程中能量供求关系。锅炉蒸汽压力与汽机负荷是相互关联的，锅炉燃烧控制系统的任务是及时调整锅炉燃料量，使锅炉的能量输出与汽机为适应对外界负荷需求而需要的能量输入相适应，其标志是蒸汽压力的稳定。

(2) 保证燃烧过程的经济性

保证燃烧过程的经济性是提高锅炉效率的重要方面，它是通过维持进入炉膛的燃料量与送风量之间的最佳比值来实现，即是在有足够的风量使燃料得以充分燃烧的同时，尽可能减少排烟造成的热量损失。

(3) 维持炉膛压力稳定

锅炉炉膛压力是否稳定反映了燃烧过程中进入炉膛的风量与流出炉膛的烟气量之间的工质平衡关系。如果送风量大于引风量，炉膛压力升高，过高的压力会造成炉膛向外喷火；反之，送风量小于引风量炉膛压力下降，过低的压力会造成漏风而降低炉膛的温度，影响炉内燃烧工况，经济性下降。所以说，炉膛压力是否在允许范围内变化，关

系到锅炉的安全经济运行。

锅炉燃烧过程的上述三项控制任务是不可分开的，它的三个被控参数(被测量)蒸汽压力，过剩空气系数或最佳含氧量，炉膛压力与三个调节量燃料量，送风量，引风量间存在着关联。因此燃烧控制系统内的各个子系统应协调动作，共同完成其控制任务。

由于锅炉燃烧过程是典型的多变量复杂系统，对其难以建立精确的数学模型，使基于数学模型带固定参数的常规 PID 控制方案难以获得理想的控制效果，因此，锅炉燃烧系统的控制已成为火力发电厂过程控制中的一大难题。

当锅炉和汽轮机组成单元机组运行时，锅炉送出的蒸汽直接通往汽轮机。这样锅炉的燃烧过程自动控制的任务就有两种基本情况。

(1) 锅炉调蒸汽压力，汽轮机进汽阀调负荷（炉跟机的方式）

在这种情况下，锅炉燃烧过程自动控制的任务是：

(a) 维持机前压力 p_T （过热器出口汽压），机前压力应保持在给定值 $\pm 0.2M P_0$ 范围内。

(b) 维持炉内过剩空气稳定，以保证燃烧经济性，控制系统应能保持炉内氧量在给定值 $\pm 0.5\%$ 范围内。要求控制系统应能保持炉膛压力在给定值 $\pm 30 P_0$ 范围内。

(2) 锅炉调负荷，汽轮机调蒸汽压力（机跟炉的方式）

在这种情况下，汽轮机前的蒸汽压力由汽轮机阀门来调节，而锅炉燃烧过程自动控制的任务包括：

(a) 维持单元机组的负荷；

(b) 维持炉内过剩空气稳定，以保证燃烧经济性；

(c) 维持炉膛负压，控制系统应能保持炉膛压力在给定值 $\pm 30 P_0$ 范围内。

蒸汽压力的变化表示锅炉蒸汽的产生量与负荷的耗汽量不相适应，因此必须相应地改变燃烧的供应量，以改变锅炉的蒸汽产量。当燃烧量改变时，必须相应地改变送风量，使燃料量与空气量相适应，保证燃烧过程有较高的经济性。可惜的是，到目前为止燃烧经济性不能直接测量出来，因此往往要用一些间接方法来判断燃烧的经济性。当送风量改变时必须及时地改变引风量，使引风量与送风量相配合，以保证炉膛压力不变。

本系统为前种方式，锅炉调汽压，汽轮机进汽阀门调负荷（炉跟机的方式）

2.1.3 控制对象的动态特性分析

动态特性是热工对象从一个平衡状态到另一个平衡状态的过渡特性。对锅炉来说，是指锅炉在受到扰动（包括施加某一操作）时，汽包或受热面中各参数随时间变化的规律。根据锅炉的这些变化规律，就可了解锅炉对运行中可能产生的扰动的反应，确定在各种不同扰动下操作的极限允许值，从而认识锅炉变工况时的调节规律。因此，掌握锅炉动态特性对提高锅炉运行水平，分析处理异常工况，都很有意义。

影响蒸汽压力的因素是多种多样的，通常的分析是以燃料量扰动导致燃烧率扰动而

假定送风量、引风量等其它有关量作相应变化，汽机耗汽量作为外界负荷扰动，以此来分析蒸汽压力被控对象的动态特性。

2.1.3.1 蒸汽压力被控对象的生产流程分析

整个流程可划分为五个环节，其中环节 1 为炉膛，环节 2 为汽包和水冷壁蒸发受热面，环节 3 为过热器，环节 4 为蒸汽管路，环节 5 为汽机。

环节 1：其输入量为单位时间内炉膛燃烧的燃料量 M ，输出量为单位时间内传给炉膛受热量 Q_r ，即炉膛的热负荷。

锅炉运行中，燃料量变化的同时送风量和引风量均同时作相应的变化，因此燃料量变化也代表了锅炉燃烧率的变化。燃烧和传热过程是一个复杂的化学过程，燃料量改变后，首先将其释放的热量传给受热面的锅炉金属管壁，在传给锅炉的汽水容积。

W -给水量； i_s -给水热焓； P_b -汽包压力； D -蒸汽流量； D_T -汽机耗汽量；

μ_T -汽机调节阀开度； P_0 -汽机背压； i' -过热蒸汽焓； P_M -主蒸汽压力

因此，精确描述燃烧和传热的动态关系的数学模型十分复杂，一般较为实用的关系式为

$$W(s) = \frac{Q_r}{M} = K'_M e^{-\tau_M s} \quad \text{式 (2.1)}$$

式中 K'_M —— 燃料量 M 变化引起炉膛热负荷 Q_r 变化的比例系数；

τ_M —— M 变化到 Q_r 变化的滞后时间。

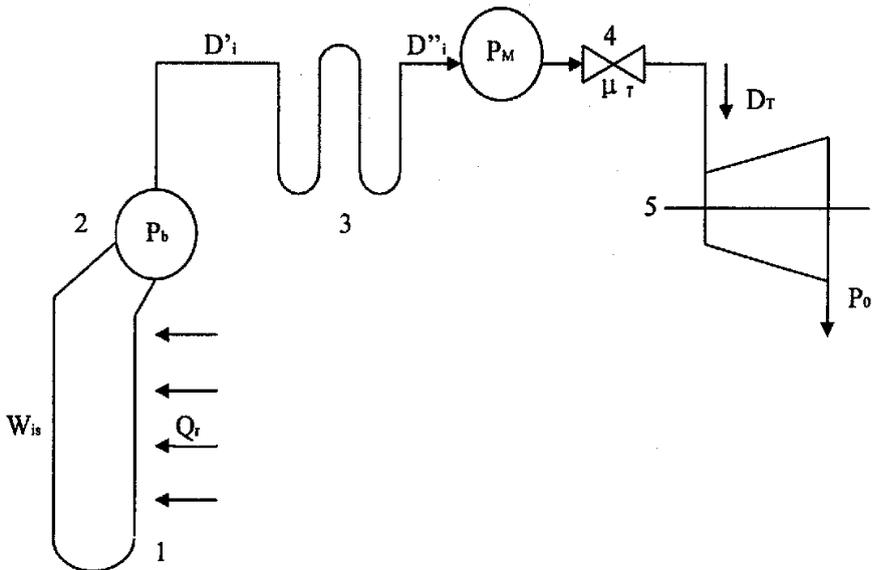


图 2.1 汽压受控对象生产流程示意图

Fig.2.1 The production flow sketch map of steam pressure controlled object

环节 2：对于锅炉受热面，其流入热量是燃烧后传给受热面的热量 Q_r ，并有一部分

热量储存在锅炉中；其输出量为蒸汽中的热量，流入热量与流出热量的平衡关系由汽包压力 P_b 所反映。基于动态热平衡方程可得

$$D_Q = D + C_b \frac{dP_b}{dt} \quad \text{式 (2.2)}$$

式中 D_Q —— 用蒸汽流量单位表示的锅炉汽水容积吸热量；

C_b —— 蓄热系数。

$$C_b = W_b \frac{df(P_b)}{dP_b} / (i'' - i_s) \quad \text{式 (2.3)}$$

式中 W_b —— 汽包蓄水量。

蓄热系数 C_b 代表了锅炉的蓄热能力，即锅炉蒸汽压力每改变 1MPa 时锅炉所释放出的蒸汽量。 D_Q 是代表热负荷 Q_r 的信号，又称为热量信号。

整理式可得

$$W_2(S) = \frac{P_b}{D_Q - D} = \frac{1}{C_b s} \quad \text{式 (2.4)}$$

环节 3：若仅考虑过热器的流通特性，其进口压力是汽包压力 P_b ，出口压力为主蒸汽压力 P_M 。过热器出口流量 D 与过热器流通阻力及进、出口压力差有关，其动态关系可近似为比例特性，即

$$W_3(S) = \frac{D}{P_b - P_M} = \frac{1}{R_g} \quad \text{式 (2.5)}$$

式中 R_g —— 过热器的动态阻力系数，与锅炉负荷 D 有关。

环节 4：蒸汽管道及汽机调节阀组成的环节 4，其流入量是锅炉的蒸汽量 D ，流出量是进入汽机的蒸汽量 D_T ，主汽压力 P_M （机前压力 P_M ）反映了流入、流出蒸汽量的物质平衡关系，其动态特性可近似为

$$W_4(S) = \frac{P_M}{D - D_T} = \frac{1}{C_M s} \quad \text{式 (2.6)}$$

式中 C_M —— 蒸汽管路的容量系数。

环节 5：汽机流通蒸汽量 D_T 是主蒸汽压力 P_M ，汽机背压 P_0 及汽机调节阀开度 μ_T 的函数。通常 P_0 变化很小，假定汽机调节阀为线性，则环节 5 的动态特性可近似为

$$D_T = \frac{1}{R_T} P_M + K_T \mu_T \quad \text{式 (2.7)}$$

式中 R_T —— 汽机动态流通阻力系数；

K_T —— 汽机调节阀静态放大系数；

为分析问题方便，我们用热量信号 D_Q 表示环节 1 的输出量，令

$$K_M = \frac{K_M}{i'' - i_s} \quad \text{式 (2.8)}$$

环节 1 的动态特性描述为

$$W_1(S) = \frac{D_0}{M} = K_M e^{-\tau_M S} \quad \text{式 (2.9)}$$

上述分析可得蒸汽压力受控对象动态特性传递函数方框图，如图 2.2:

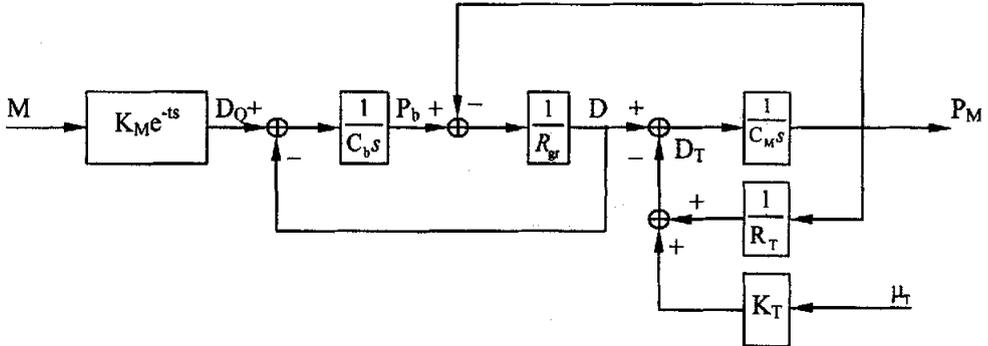


图 2.2 汽压受控对象传递方框图

Fig.2.2 The transfer sketch map of steam pressure controlled object

2.1.3.2 汽机受控对象的动态响应

由方框图可以看出，影响主蒸汽压力 P_M 的主要因素有锅炉的燃料量 M （实际是燃烧率 B ）和汽机调节阀开度 μ_T 两个参数。下面分析燃料量 M 和汽机调节阀开度 μ_T 分别作用下的汽压对象的动态响应。

(1) 燃烧率扰动下的气压动态特性。保持汽机调节阀开度 μ_T 不变，阶跃变化燃料量 M ，由传递方框图可得

$$W_{MB}(S) = \frac{P_b}{M} \approx \frac{K_{MB}}{T_b s + 1} e^{-\tau_M S} \quad \text{式 (2.10)}$$

$$W_{TB}(S) = \frac{P_M}{M} \approx \frac{K_{TB}}{T_b s + 1} e^{-\tau_M S} \quad \text{式 (2.11)}$$

其中，蒸汽管道环节的容量系数 C_M 很小而近似为零。

由上式可画出燃料量扰动下的蒸汽压力对象的动态响应曲线，如图 2.3

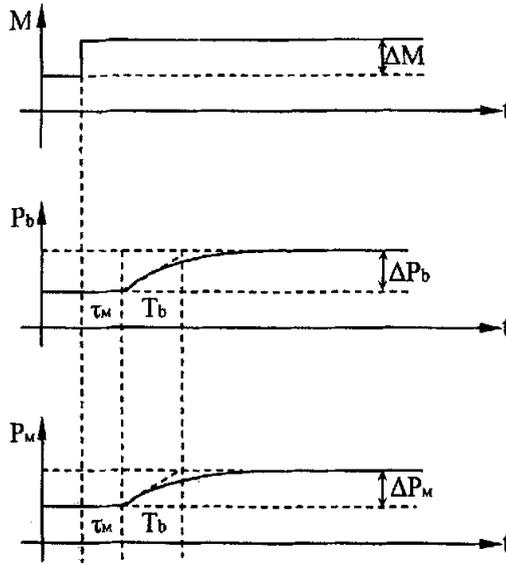


图 2.3 燃烧率扰动下的汽压响应曲线

Fig.2.3 The steam pressure response curve at burning rate disturbance

当汽机调节阀开度 μ_T 不变时, 锅炉燃烧率扰动下, 主汽压力 P_M 和汽包压力 P_b 均有一定的滞后 τ_M (主要是容积延迟)。随着锅炉蒸发量的增加, 汽包压力和主蒸汽压力均逐渐增加。由于 μ_T 不变, P_M 增加使汽机进汽量 D_T 增加, 这就自发地限制了主蒸汽压力和汽包压力的增加。最后, 当汽机的进汽量与锅炉的蒸发量平衡时, 汽压维持在一个新的平衡值, 其动态特性表现出自平衡能力。

(2) 汽机调节门开度扰动下的汽压动态特性。

由方框图可得锅炉燃料不变, 汽机调节门开度阶跃变化时, 汽压对象的传递函数

$$W_{TB}(S) = \frac{P_b(S)}{\mu_T(S)} \approx -\frac{K_{TB}}{T_b S + 1} \quad \text{式 (2.12)}$$

式中 $K_{TB} = K_T R_T$

$$W_{TM}(S) = \frac{P_M(S)}{\mu_T(S)} \approx -(K_1 + \frac{K_{TM}}{T_b S + 1}) \quad \text{式 (2.13)}$$

$$\text{式中 } K_1 = \frac{K_T R_T R_{gr}}{R_T + R_{gr}}$$

$$K_{TM} = \frac{K_T R_T^2}{R_T + R_{gr}}$$

由上式可画出汽机调节阀开度扰动下的汽包对象的动态响应曲线, 如图 2.4:

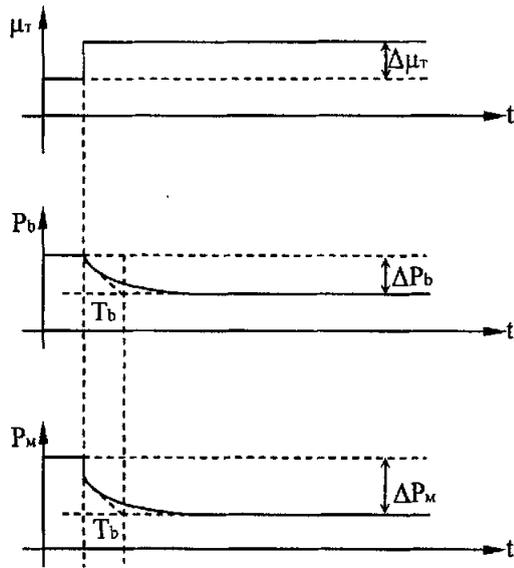


图 2.4 调节阀开度扰动下的汽压响应曲线

Fig.2.4 The steam pressure response curve at regulating valve disturbance

当汽机调节阀开度 μ_T 阶跃增加时，一开始汽机进汽量成比例的增加，主蒸汽压力 P_M 也成比例下降，汽包压力开始下降；汽压的下降使汽机的进汽量逐渐减少，最后进汽量几乎回到扰动前的数值。在这里受控对象呈现自平衡能力。

汽压受控对象在锅炉燃烧率扰动，汽机调节阀开度保持不变时和汽机调节阀开度扰动，燃烧率保持不变时，两个动态过程其共同点是呈出自平衡能力，其次它们的惯性时间常数均相同，与过热器的流通阻力 R_{gr} 及汽机通流阻力 R_T 有关。

以上对汽压特性的分析结果与对单元机组动态特性中汽压通道的特性分析是一致的，即燃烧率——汽压通道具有较大的惯性和延迟，汽机调节阀——汽压通道呈现阶跃性变化，即主蒸汽压力对汽机调节阀开度变化的响应是快的。

2.1.4 燃烧控制系统组成的基本原则

通过对燃烧过程控制基本任务以及汽压受控对象动态特性的分析，燃烧控制系统组成应考虑以下几方面：

(1) 燃烧过程控制的任务之一是维持主蒸汽压力的稳定，即保持锅炉和汽机之间的能量的供求关系的平衡。因此燃烧控制系统在外界负荷需求改变后立即改变锅炉的燃料量，维持燃烧过程的能量平衡。然而，主蒸汽压力对燃烧量的响应呈现较大的延迟和惯性，特别是采用直吹式制粉系统的燃烧过程，如何迅速改变燃烧率是至关重要的。

(2) 燃烧控制系统应能迅速发现并消除燃料量的自发扰动，维持蒸汽压力的稳定。另外，燃料量的自发扰动不仅影响蒸汽压力的稳定，在并列运行方式下，还会引起其他锅炉汽包压力 P_b 及锅炉负荷的变化，改变各锅炉的运行工况。

(3) 当外界负荷需求改变时, 锅炉的送风量和引风量应与燃料量协调动作。使锅炉燃烧经济性指标及炉膛压力参数保持平衡, 即锅炉燃烧工况的稳定。也就是说, 当燃烧率改变时, 只有保持送风量与燃料量成比例变化, 才能保证燃烧的经济性。只有保持引风量和送风量的协调变化, 才能保证炉膛压力稳定。因此确保燃料、送风和引风等参数协调变化是确保燃料工况稳定必不可少的条件。

(4) 对于单元制运行的锅炉允许主汽压力在一定范围内波动, 特别是滑压运行时汽压变动范围更大。因此, 系统中有关参数应加以温度和压力的修正, 以提高参数测量的精确性。

2.2 锅炉燃烧控制系统逻辑系统

单元机组中各部分之间的联系密切, 互相影响大, 设计的燃烧控制系统是不相同的。燃烧控制系统是由三个相对独立的子系统即燃料控制系统、送风控制系统、引风控制系统组成的, 下面分别对三个子系统进行分析和方案比较。

2.2.1 燃烧控制系统

燃料控制的目的在于进入锅炉的燃料量随时与外界负荷要求相适应。因为汽压是锅炉燃料热量与汽轮机需要能量的平衡标志, 并且在负荷扰动下汽压具有近似比例的响应特性, 因此汽压可以作为燃料控制系统的被调量。

(1) 燃料反馈的燃料控制系统

由于汽压被控对象在燃料量扰动下的动态响应较快 (τ_b 较小), 所以燃料量调节原则上可以采用以汽压作为被调量的单回路控制系统。但对燃煤锅炉来说, 运行中的煤量自发性扰动 (煤粉的阻塞与自流) 是经常容易出现的, 所以在设计燃煤锅炉燃料控制系统时, 必须考虑使系统具有快速消除燃料自发性扰动的措施。在这里引入燃料量的负反馈, 并送到副调节器 (燃料调节器) 构成串级控制系统如图 2.5 (a) 所示。采用这个方案, 如果燃料量能直接准确地测量, 可以消除燃料的自发性扰动, 使该燃料控制系统还具有带固定负荷和变动负荷的功能。但是由于燃料量的直接测量问题没有解决, 对于采用钢球磨煤机中储式制粉系统的锅炉均通过改变给粉机的转速的方法来改变燃料量。

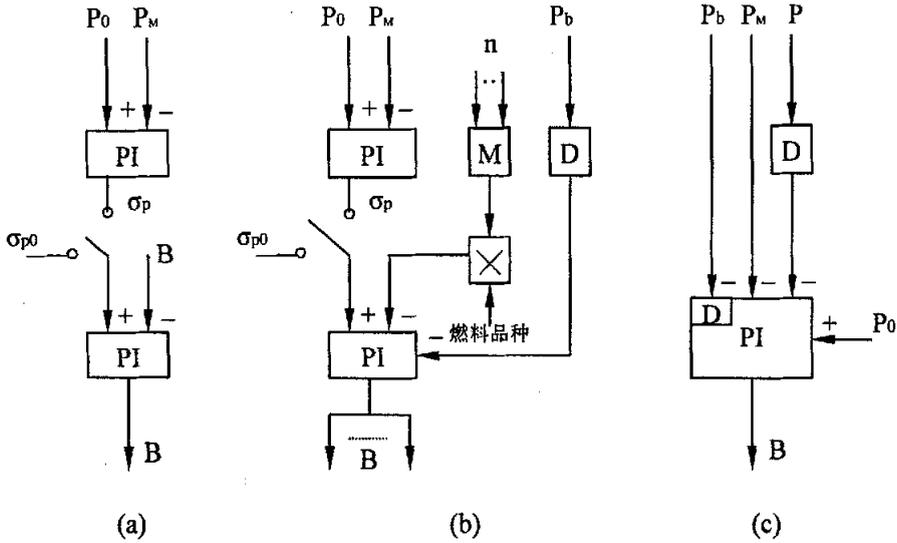


图 2.5 燃烧控制系统原理图

Fig.2.5 The schematic diagram of combustion control system

(2) 给煤机转速反馈的燃料控制系统

用各给煤机转速来反映燃料量或燃烧率的大小，构成采用给煤机转速反馈信号的燃料控制系统如图 2.5 (b) 所示。用给煤机转速之和作为总燃料量反馈信号，并进入副调节器与燃料量的给定值即锅炉负荷要求指令进行比较，对其偏差值进行运算，副调节器根据偏差的大小去调节燃料量的数值。稳态时锅炉负荷要求指令与给粉机转速反馈信号相平衡。

给煤机转速只能反映燃料量的大小而不能反映燃料品质的变化，为此，引入燃料品种校正信号。当更换煤种时，相应地调整校正系数的值，经乘法器修正燃料量反馈信号，以消除煤种变化对系统的影响。为了消除燃料侧的自发性扰动，系统引入了汽包压力的微分信号。当发生燃料量内扰时，汽包压力能较快地反映燃料量内扰，汽包压力的微分信号有超前和加强调节的作用，所以汽包压力的微分信号有助于尽快消除内扰。稳态时汽包压力的微分信号消失不影响副调节器入口的平衡关系。

(3) 前馈+反馈的燃料控制系统

燃料在锅炉中燃烧、传热和水的蒸发过程都需要一定的时间，这样就使锅炉对负荷变化的响应比汽轮机慢得多。为了减小锅炉对负荷响应的迟延和惯性，可以采用功率的微分信号作为前馈信号送入汽压调节器，如图 2.5 (c) 所示。功率的微分信号有超前和加强调节的作用，以提前平衡负荷扰动，提高锅炉对负荷的响应速度。前馈信号还可以采用电网频率 f 、发电机功率 P_E 、汽轮机调速级汽压 p_1 、调速级后压力与主汽压力的比值 p_1/p_T 、汽轮机调速系统二次油压等信号。

汽包压力微分信号的作用与前述一样。稳态时汽包压力的微分信号消失不影响调节

器入口平衡关系。

根据燃烧控制系统原理图，绘制 SAMA (美国科学仪器制造协会图例) 系统逻辑图：

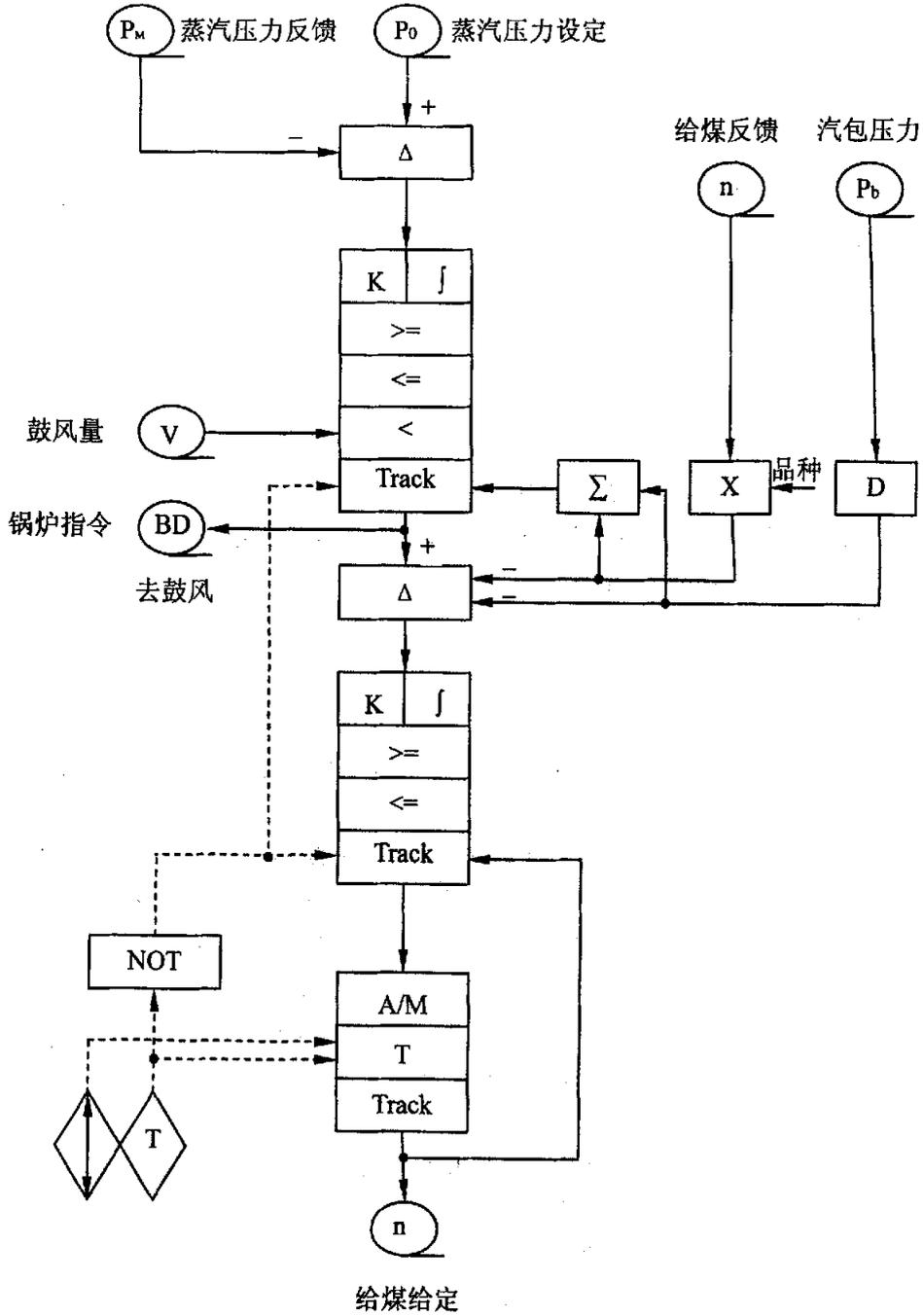


图 2.6 燃烧控制系统逻辑图

Fig.2.6 The logic diagram of combustion control system

2.2.2 送风控制系统

(1) 单闭环比值送风控制系统

送风调节的任务在于保证燃烧的经济性,具体地说,就是要保证燃烧过程中有合适的燃料与风量比例,送风调节对象近似比例环节。因此通常采用保持燃料量与送风量成比例关系的送风控制系统,如图 2.7 (a) 所示,燃料量信号 B 以前馈形式引入送风控制系统,作为送风调节器的给定值;送风量信号 V 作为反馈信号引入送风调节器,构成一个单闭环比值控制系统,可以实现送风量快速跟踪燃料量的变化。

由于送风调节器采用 PI 作用调节器,所以静态时,调节器入口信号平衡关系为

$$BK - V = 0 \quad \text{或} \quad V/B = K \quad \text{式 (2.14)}$$

式中 K —— 风煤比例系数。

只要调整比例系数 K 到适当的值,控制系统就能使进入锅炉的送风量与燃料量保持最合适的比例,达到经济燃烧的目的。

在实际运行中,送风量和燃料量的最佳比例值 K 不是常数, K 是随不同的负荷和燃料品种变化的。上述系统把 K 选为常数,就不能始终保证燃烧过程的最佳经济性。而送风量 V 和燃料量 B 的最佳比例 K 是随不同负荷、不同燃料品种而变化的。因此,可以选用随负荷、燃料品种变化而修正送风量的送风控制系统,如图 2.7 (b) 所示。这个系统是用乘法构成的单闭环比值送风控制系统,燃料量的修正值作为送风量的给定值,实现 B 与 V 的比值控制。

根据负荷、燃料品种的变化去修正最佳风煤比例系数 K ,此系统结构简单、整定投运方便,但负荷和燃料品种的修正系数在实际应用中较难确定。

(2) 串级比值送风控制系统

采用有燃烧经济性指标的校正送风量,使送风量与燃料量之间的比值达到最佳,采用氧量校正的送风控制系统,如图 2.7 (c) 所示。这个系统是采用以燃烧经济性指标(烟气含氧量)为被调量的单回路控制系统。

采用氧化锆仪器测量锅炉排烟中的含氧量,氧量信号反应迅速可靠,烟所中最佳含氧量与煤种无关,对于煤种变化大的锅炉或煤油混烧的锅炉的燃烧自动化具有重大意义。根据氧化锆的测氧性能,完全可以用氧量信号作为送风控制信号。送风调节器仅接受氧量信号并与定值信号平衡,为单参数单回路控制系统,定值信号可将氧量定在最佳值。同时,送风调节器可采用纯比例型调节器。因为,锅炉最佳含氧是随负荷增加而减小的,比例调节器的静态偏差也正好随负荷增加而减少。适当地调整比例带,可保证锅炉在不同负荷下的静态配合,使锅炉在最佳含氧量条件下经济运行。

送风调节器是单信号、单参数的纯比例调节,故参数整定简单,系统稳定性好。该系统省去了风量信号,无需风量测量装置,节约了设备,解决了风量信号难于测准问题,同时也解决了炉膛部分漏风问题。因为炉膛的漏风都包含在烟气里,故在漏风严重时(如

除灰期间的漏风) 送风系统会自动减少送风以维持最佳含氧量, 这对减少漏风损失稍有好处。当然最根本的办法是消除漏风。

采用氧量信号直接控制送风的燃烧系统的缺点是:

(a) 很难找出能代表整个炉膛含氧量的准确测点, 因而氧量计测出的信号是否能保证最佳含氧量值得考虑。

(b) 氧量计测出的是整个炉膛的平均最佳含氧量, 它不能保证每个喷燃器的完全燃烧。对于大型锅炉, 尤其是直吹式锅炉, 氧量仍有可能达到最佳, 而实际上这台锅炉燃烧并没有达到最佳。

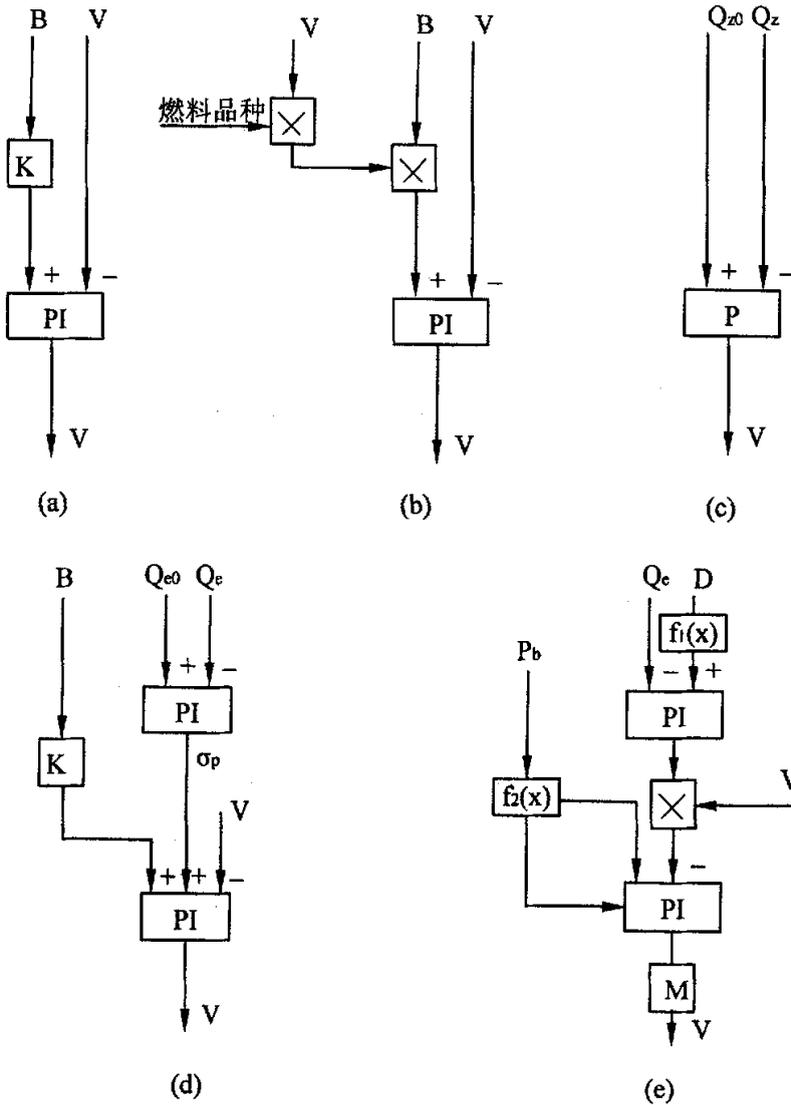


图 2.7 送风控制系统原理图

Fig.2.7 The schematic diagram of blast control system

综上所述，对于图 2.7 (c) 所示的系统，它只适用于中、小型锅炉，对于大型锅炉还是用氧量作为校正信号为佳。

采用氧量作为校正信号的送风控制系统如图 2.7 (d) 所示。它是一个串级比值控制系统，主调节器（氧量校正调节器）接受氧量与氧量定值信号。副调节器接受燃料信号 B，反馈信号 V 及氧量校正调节器的输出，副回路保证风煤的基本比例，起粗调作用。主回路用来进行氧量校正，起细调作用。当烟气中含氧量高于给定值时，氧量校正调节器发生校正信号，修正送风控制系统的给定值，使送风调节器减少送风量。经过校正后的送风量将保证烟气中含氧量等于给定值。当系统处于静态时，副调节器的入口信号的平衡关系为

$$BK - V + \sigma_{O_2} = 0 \quad \text{式 (2.15)}$$

因此，校正后的送风量信号为

$$V = BK + \sigma_{O_2} \quad \text{式 (2.16)}$$

式中 σ_{O_2} ——氧量校正调节器的输出信号。

可见，在有氧量校正的送风控制系统中，送风量除了需要与燃料量保持比例外，还要附加一个校正送风量信号 σ_{O_2} ，才能使烟气中含氧量达到最佳值。

(3) 前馈+反馈的送风控制系统

烟气中的最佳含氧量的数值随锅炉的负荷改变而变化。一般在负荷增加时，最佳含氧量的值减小。为了使氧量给定值随负荷的改变而变化，可将负荷信号 D 通过一个函数器 $f_1(x)$ ，产生一个随负荷而改变的最佳氧量信号作为氧量校正调节器的给定值，如图 2.7 (e) 所示。不同负荷下的最佳氧量值由锅炉热效率试验后确定，然后设置在函数器中。氧量偏差信号经过校正调节器运算，输出送风量校正信号，通过乘法器去校正送风量反馈信号。采用这种校正方法的控制系统的调节精确度较高。在该系统中，负荷指令通过函数模块 $f_2(x)$ 的运算，送出在不同负荷下所需要的理论空气量，并把它作为送风调节器的给定值信号，这样系统输出的送风量信号对应锅炉的负荷值，以使炉内维持最佳燃烧工况。另外为了克服送风调节通道中存在的延迟和惯性，系统中还引入负荷指令的前馈调节作用，以改善动态过程中的燃风配合。

还有采用汽轮机调速级后压力 P_1 作为前馈信号送入副调节器，由于汽轮机调速级后压力 P_1 与汽轮机负荷成比例关系，因此可以用它来协调锅炉的燃风比。另外， P_1 信号对汽轮机负荷反映灵敏，测量简单、准确，用它来粗调燃风比比采用蒸汽负荷 D 或燃料量 B 更优越。有氧量校正的送风控制系统，其结构比较复杂，又由于其主、副回路的时间常数（工作速度）相关不大，所以系统的整定投入比较困难。

根据送风控制系统原理图，绘制 SAMA (美国科学仪器制造协会图例) 系统逻辑图：

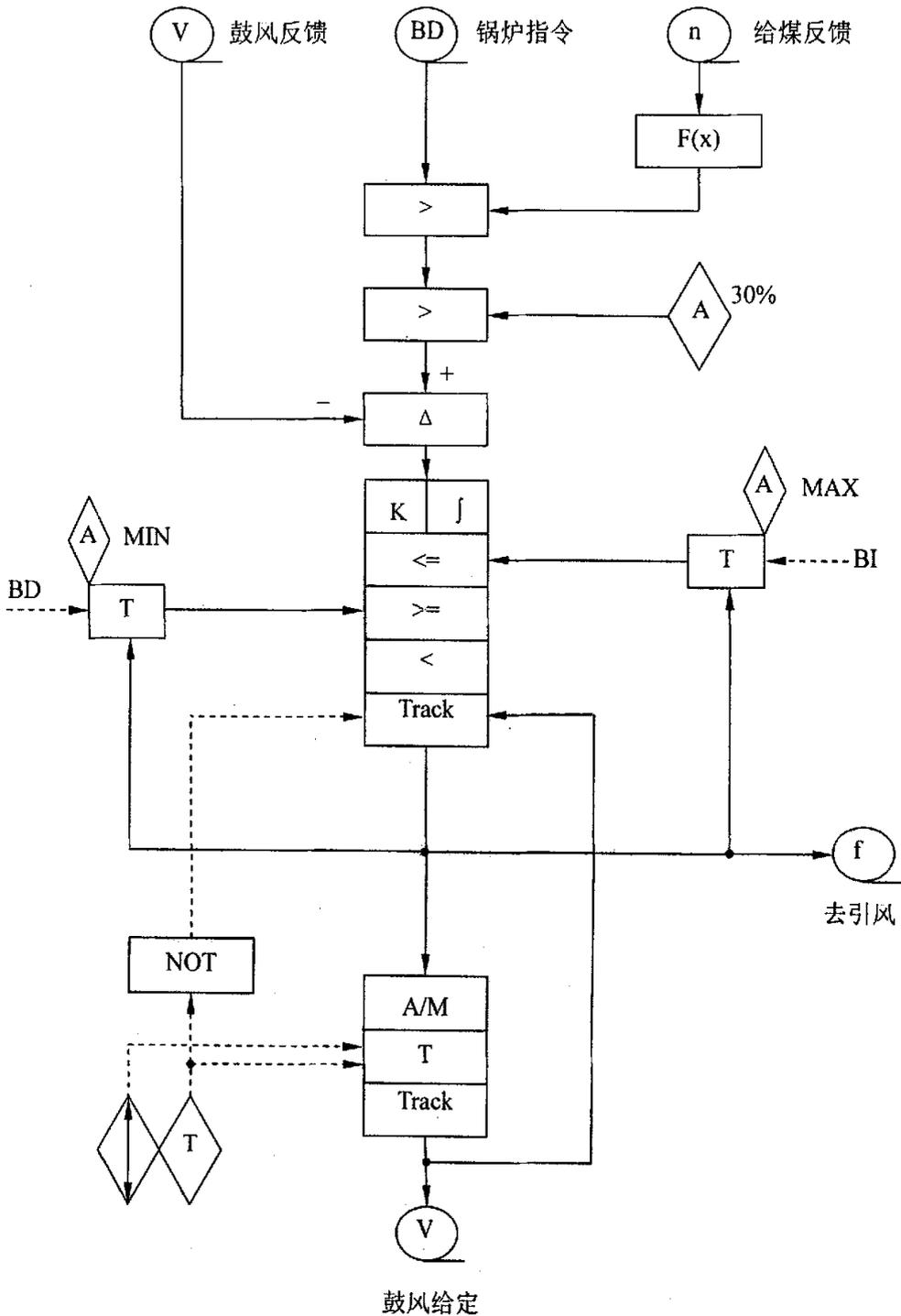


图 2.8 送风控制系统逻辑图

Fig.2.8 The logic diagram of blast control system

2.2.3 引风控制系统

对于负压燃烧锅炉，如果炉膛压力接近于大气压力，则炉烟往外冒出，影响设备与工作人员的安全；反之，如果炉膛压力太低，又会使大量的冷空气漏入炉膛内，降低了炉膛温度增大了引风机负荷和排烟带走的热量损失。一般炉膛压力维持在比大气压力低 $20\sim 50 p_a$ 左右。

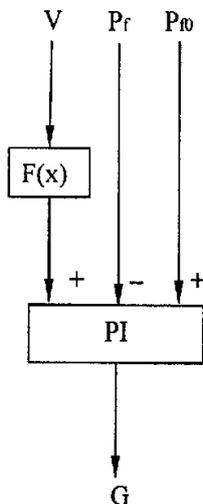


图 2.9 引风控制系统原理图

Fig.2.9 The schematic diagram of induced draft control system

引风控制的任务是保持炉膛负压在规定的范围之内。由于引风调节对象的动态响应快，测量也容易，所以引风控制系统一般只需采取以炉膛负压 p_f 作为被调量的单回路控制系统，如图 2.7 所示。由于送风量的变化是引起负压波动的主要原因，为了能使引风量快速地跟踪送风量，以保持二者的比例，可将送风量作为前馈引入引风调节器。这样当送风控制系统动作时，引风控制系统立即跟着动作，而不是等炉膛负压偏离给定值后再动作，从而使炉膛负压基本不变。所以引风控制系统引入送风前馈信号以后，将有利于提高引风控制系统的稳定性和减小炉膛负压的动态偏差。

送风量信号通过前馈补偿装置 $f(x)$ 送到引风调节器而使引风量跟着改变，是一个快速补偿（前馈）系统。但当系统处静态时，前馈补偿装置 $f(x)$ 的输出应为零，以使炉膛负压保持给定值。

根据引风控制系统原理图，绘制 SAMA（美国科学仪器制造协会图例）系统逻辑图：

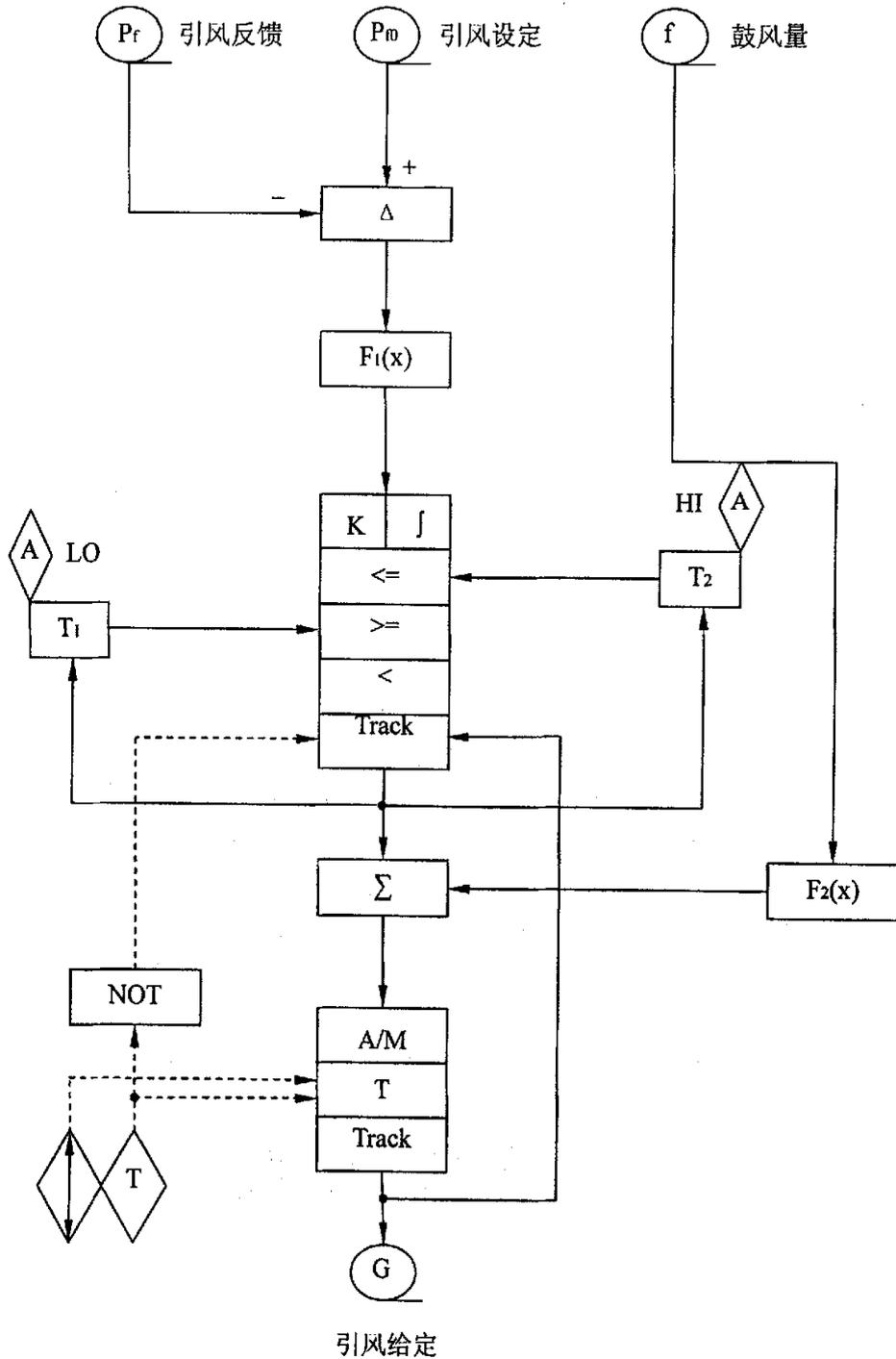


图 2.10 引风控制系统逻辑图

Fig.2.10 The logic diagram of induced draft control system

第三章 模糊控制的原理及控制方法

3.1 模糊控制的产生和发展

3.1.1 模糊控制的概况

科学技术不断发展,使人们所面临的控制问题越来越复杂,对于控制质量的要求也越来越严格,要对那些复杂的工业过程和具有强烈的非线性,不确定性,甚至根本无法建立精确数学模型的系统进行有效而精确的控制就非常困难。为了解决这个问题,传统理论提出了许多对策,如最优控制,自适应控制等。然而这些控制方式的共同特点是必须建立在被控对象的数学模型上。模糊控制技术可以解决这些困难,这是因为它不依赖于被控制对象的数学模型,而只要求掌握现场操作人员和有关专家的经验,知识或者操作数据。因此,把模糊控制技术应用到工业控制现场将具有很好的应用前景,且具有明显的理论和实际意义及巨大的经济效益。模糊控制技术在自动控制领域和智能控制领域占有相当重要的地位^[5]。

控制理论自诞生至今也经历了一个不断发展、完善和更新的过程。1948年, N. 维纳发表了“控制论”一书之后,标志着现代控制理论的诞生。它是自动控制、电子计算机、无线电通信与神经生理学、数学等学科互相渗透的一门新的综合性科学。维纳对控制论的定义是“关于动物和机器中控制和通讯的科学”。1961年, G. 克劳斯在“从哲学看控制论”中,提出了一个更全面的定义:“控制论是关于可能的动态调节及其子系统的联系理论”。所以,控制论是一门研究各种不同系统共同控制规律的科学。维纳在创立控制论过程中,常常将机器人、动物进行类比,因而发现了生物系统、工程系统、社会系统都有相似的控制与信息过程,都有共同的控制规律。从方法论来说,这正是维纳的高明之处,他冲破了传统观点和方法束缚,开创性的建立了控制论这门科学。控制论的创立,在科学方法论的发展中具有十分重要的意义,控制论的理论、方法和原则,已广泛应用与工程技术、生物、社会经济等许多领域,形成了工程控制论、生物控制论、经济控制论等边缘学科,有力地推进了人类的进步,并且正在成为人们认识世界和改造世界的有力工具。现有的系统控制理论可分为:经典控制论、现代控制论、模糊控制论和灰色控制论。经典控制论又成为自动调节原理,它是第二次世界大战期间,为了提高武器发射命中率的需要发展起来的,它主要研究单输入单输出的线性定常系统,系统数学模型的基本形式是传递函数,主要分析方法是频域法和根轨迹法,已广泛用于工业生产系统中。但是经典控制论的设计带有试凑的特点,因而无法设计高精度的最优控制系统、自适应控制系统和其它复杂系统。现代控制论是五十年代末和六十年代初在经典控制论基础上针对导弹、航天、航海的制导、导航和控制发展起来的,它能用于设计各种高精度复杂系统的控制问题;用状态来描述系统的行为,系统数学模型的基本形式是状

态方程，主要的分析方法是状态空间分析法，所设计的控制系统用数字计算机来实现，对于非线性系统、随机性系统，常用状态微分方程和观测方程来描述，在航天工业和其它工业生产上的应用都很见效。例如，用卡尔曼（Kalman）滤波能解决有噪声测量情况下，估计系统状态的问题；用最大值原理实现某些最优控制问题等。但是，许多大型工业系统、生物系统、经济系统、社会系统等等，由于其非线性、随机性干扰、大的时间滞后和时变性，信息不完备，就很难建立精确的数学模型，无法取得控制效果。即使用最优参数估计得到了一个数学模型，而这个模型也是很复杂的。

综上所述，如果用普通控制理论实现的控制技术，必须要依靠一个有效的精确数学模型，一离开数学模型，这些控制技术极其产生的理论就不起作用了。然而，在一些复杂的工业生产过程中，那些并无高深数理知识的操作人员，往往控制比任何常规控制都有成效。因而，随着生产力的发展就要求我们去研究操作人员在这些生产过程中的控制策略，并设法通过自动化的办法来实现。由于他们使用的策略是建立在直觉的和经验基础之上，所以是模糊的和定性的描述，是一种启发式的判决法则或经验法则。例如，“若锅炉蒸汽压力大且在增加，则把燃料减少一点”。于是把人的经验归纳成定向表达的一条简单明了的条件语句，然后利用模糊数学的工具把它量化，使控制器得以接受人的经验，模仿人的操作策略，从而产生了模糊控制器。在实际运行时，控制器先要了解对象的输出情况，查控制表，发出控制信号。1974年英国的 E.H.Mamdani 首先利用模糊控制语句组成模糊控制器。并成功地将模糊控制应用于锅炉和蒸汽机控制；1977年又用于十字路口的交通管理实验；1975年，英国的 Fing 及 Mandani 利用模糊控制器控制一个反映炉搅拌池的温度，并获得成功；1976年荷兰 W.J.M.Kickert 等研究了热水站的模糊控制，使这个用传统方法难以进行控制的多变量非线性对象实现了稳定可靠的运行。丹麦 Storgard 利用模糊控制器对双输入，双输出的热交换过程进行了模糊控制。英国学者 Tong 对压力容器内部的压力和液位进行了模糊控制，也得到传统控制方法难以得到的控制效果；1979年，英国的 Pappis 利用模糊控制对十字路口的交通管理进行实验，取得了成功。我国在模糊控制方面的研究也取得了比较丰硕的成果。1979年北京控制工程研究所刘志俊应用模糊集合论设计出一类典型的模糊控制器，并对模糊理论测变系统模型进行了分析。北京工业大学涂向出与北京师范大学的汪培庄提出了 Fuzzy—PID 调节器与人工智能控制问题^[5]。这些在工业上的应用成果，以及 R.M.Tong 和汪培庄等理论性论文，标志着模糊控制理论的形成和初期成就。1985年，世界上第一块模糊逻辑芯片在美国著名的贝尔实验室问世。这是模糊技术走向实用化的又一里程碑；1990年以来，模糊控制的应用得到了进一步的推广，模糊家电开始出现在我们的日常生活中。

3.1.2 模糊控制的特点

模糊控制之所以能获得这样迅速的发展，与其自身具备的特点不无关系，模糊控制的突出特点在于：

(1) 模糊控制器是建立在对专家、操作人员的经验和现场操作数据的模仿总结基础之上, 这种控制器的设计不要求知道被控对象的精确数学模型, 而只需要提供现场操作人员的经验知识及操作数据。

(2) 控制系统的鲁棒性强, 对于非线性时变滞后系统, 因为其对参数变化不敏感, 所以其动态特性和静态特性均优于常规控制手段。

(3) 以语言变量代替常规的数学变量, 易于构造形成专家的知识。能实现非线性系统的控制, 而且对参数的变化有较强的适应性。

(4) 控制推理采用“不精确推理”(approximate reasoning)。由于推理过程模仿认得思维过程, 介入了人类的经验, 因而能够处理复杂甚至“病态”系统^[6]。

模糊控制理论之所以能广泛发展并在现实中得以成功应用, 其根源在于模糊逻辑本身提供了由专家构造语言信息并将其转化为控制策略的一种系统的推理方法。从广义讲, 模糊控制是基于模糊推理, 模仿人的思维方式对难以建立精确数学模型的对象实施的一种控制。尤其是它用 L.A.Zadeh 所定义的隶属函数来表达定性信息的能力和简明的执行方法, 获得广泛的应用和发展。它是模糊数学同控制理论相结合的产物。

模糊控制理论的主要缺点是信息利用率不高, 控制粗糙, 精度低。显然在高精度场合难以胜任。随着模糊数学理论的逐步完善, 这一缺点正在得到克服。例如, T.J.Procyk 和 H.Mamdani 研究了自组织控制问题, 这种控制起初允许有非常粗糙拙劣的规则; 而后根据实际的控制效果自动修改, 最后收敛出一个较好的规则。一系列模拟实验表明, 它对控制对象及其参数有较弱的依赖性和敏感性, 能处理的范围较为广泛, 如多变量、非线性以及带随机干扰的系统等。

正是由于生产过程和非生产过程自动控制的要求, 1965 年美国加利福尼亚大学的 L.A.Zadeh 教授创建模糊集理论来描述模糊事物, 并且在以后得到了迅速的发展, 形成了一系列比较完善的基础理论。模糊集合理论是具有处理语言信息能力的工具, 它的引入使得用比较简单的方法对复杂系统做出合乎实际的符合人类思维方式的成为可能。1973 年, L.A.Zadeh 继续丰富和发展了模糊集合论, 提出了一种把逻辑规律的语言表达转化成相关控制量的思想从而为近代模糊控制理论的形成奠定了理论基础。

模糊控制方法与通常分析系统所用的定量方法本质是不同的, 它有三个主要特点:

- (1) 用语言变量代替数学变量或两者结合使用。
- (2) 用模糊条件语句来规划变量间的函数关系。
- (3) 用模糊算法来刻划复杂关系。

模糊控制器本身消除系统误差的性能比较差难以达到较高的控制精度。尤其是在离散有限论域设计时更为明显。模糊控制器要把误差输入信号转化为误差论域上的点, 即

$$n' = INT(k_1 e' + 0.5) \quad \text{式 (3.1)}$$

式中: e' 为某时刻的输入误差; k_1 是误差的量程转换比例因子; n' 为转化到误差论域上的点。

当 $n'=0$ 时, 仍有

$$|k_1 e'| < 0.5 \quad \text{式 (3.2)}$$

$$\text{即 } |e'| < 0.5/k_1 \quad \text{式 (3.3)}$$

式中 k_1 是误差信号的物理范围 $[-e, e]$ 到误差论域 $\{-n, -(n-1), \dots, 0, \dots, n-1, n\}$ 量程转换的比例因子, $k_1 = n/e$ 。于是上式变为

$$|e'| < 0.5e/n \quad \text{式 (3.4)}$$

一般规范化的离散论域形式通常取 $n=6$, 因此大约有

$$|e'| < 7\%e \quad \text{式 (3.5)}$$

也就是说, $|e'|$ 在误差量程最大值 e 的大约 7% 以内时, 模糊控制已经把它当作 0 来对待了, 因此, 对 $|e'| < 7\%e$ 的稳态误差模糊控制器无法消除, 这是控制点附近的一个控制上的盲区和死区^[6]。

对于控制作用, 模糊控制器可以采用它的增量 ΔU 作为输出, 积分后输出给被控对象, 这样相当于引入了积分作用, 有利于消除稳态误差。然而, ΔU 是解模糊后的离散点, 不连续, 因而控制作用不细腻, 不利于精调消除稳态误差。

目前, 模糊控制无论在理论上还是在工程应用上都有了很大的发展。由于许多生产过程, 例如: 金属冶炼、石油化工、工业锅炉等工业控制过程的精确数学模型难以建立, 故不宜采用传统控制方式实现对过程的控制。如果应用传统的控制方法, 有时会遇到很大的困难, 而模糊控制的主要工作是建立在人工手动控制的基础上, 根据在实践中积累的经验, 采取适当的对策对被控过程实现定量控制, 这就是设计基本模糊控制器的指导思想。

3.2 模糊控制系统的指标问题

(1) 稳定性 关于模糊控制稳定性分析, 至今还没有统一的方法。但没有一篇报告提到由于隶属函数和控制规则选择不当而引起不稳定的。只要准确地模仿操作者的经验, 就不会出现不稳定的现象。

(2) 精度 模糊控制系统的精度是令人满意的。例如, 当列车的制动性能和上下坡分别为 $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$ 的大干扰情况下, 模糊控制比 PID 控制精度提高 2/3。许多模糊控制器比传统的 DDC 系统有更快的响应、更小的稳态误差。

(3) 效益 美国 SouthnestBell 电话网络系统连接着 50 万台电话, 当发生故障时, 即使专家也要花一周时间查找, 而模糊分析系统只需要几分钟就可以找出故障地点。又例如日本日立公司在仙台市投入运行的地铁模糊控制系统比原来的 PID 系统节省能源 14%。

3.3 前景及研究动向

所谓模糊控制, 既不是指被控过程是模糊的, 也不意味着控制器是不确定的, 它是

表示知识、概念上的模糊性。一个模糊控制算法虽然是通过模糊语言来描述，但它所完成的确是一项完全确定的工作。对从事控制工程的工作者来说对此是应该十分明确的。

模糊控制理论是在控制理论领域中很有发展前途的一个分支，这是因为对于工业生产过程来说，模糊控制具有一系列传统控制无法与之比拟的优点。基于模糊逻辑实现的模糊控制，并鉴于它所具有的独特优点，国外专家预言，模糊逻辑可使电子计算机模拟人的直觉，并依据不确切信息做出决定，这将是下一代工厂自动化的基础。美国奥姆伦电子公司是工厂自动化设备的主要生产厂家，它的副总经理弗兰克纽伯恩说：“模糊逻辑使用的是主观的，面向语言的知识，例如操作人员的专门知识，而不是复杂的数学构模。它基本上是以规则为基础的专家系统，工作起来速度非常快，而且模拟人的判断力效率非常高”。他还说：“就工厂而言，模糊逻辑可以帮助那些用常规技术无法实现自动化的任务实现自动化，而且使机器和操作人员之间形成一种新型伙伴关系”。他最后说：“模糊逻辑这项技术在 90 年代肯定会发生重大影响。这是人工智能的一个子系统，具有巨大的潜力”。

但目前模糊控制器尚处于发展过程的初步阶段，还存在大量有待解决的问题，其中主要有：

(1) 非模糊的精确量该如何处理，目前按模糊独点集的处理方法是否最好？在有模糊控制器的输出模糊集确定一个相应的精确工作量，即在模糊判决问题上，至今尚有争议。

(2) 在进行模糊化时，输入输出模糊变量的基本论域应分成多少档次为最佳？控制规则的条数、采样间隔以及系统增益如何最优化？

(3) 如何衡量一个模糊控制系统的功能？稳定性问题、最优化问题该如何评价？

(4) 在模糊运算中，似乎丢失了大量信息，却又能获得优于常规控制的良好控制效果，起控制作用的因素是什么？模糊运算中的信息损失应否设法修正或补偿？

综上所述，就目前的现状来说，模糊控制所面临的主要工作拟可归结为：

(1) 模糊微机的研制 处理模糊信息的处理器——模糊逻辑电路，于 1984 年召本研制成功，这意味着模糊控制理论开始深入到硬件技术中。目前国内已生产出能够设计出几十条控制规则的模糊微型机，这种硬件系统的实现将带来控制系统的新飞跃。即由目前结构：“检测——比较——计算——执行”发展到新的结构：“识别——推理——决策——执行”。控制系统的输入输出不仅是数字的，而且还可以是文字符号、图象、语言等非数字量。

(2) 理论上的突破 为使模糊控制向工程化发展和推广，必须解决许多理论问题，特别是有系统的内容，应通过进一步加强研究，解决模糊控制的机理、稳定性分析和可遵循的一般设计准则等一系列问题，以促进模糊控制理论的发展。目前，模糊控制系统稳定性分析可归纳为两大类：

第一类是一定的条件下把模糊稳定性问题看作多输入多输出系统在频域稳定问题。

第二类是把系统看作是灰色系统，并根据系统矩阵的特征根的性质来讨论。这些方法需有严格的前提条件，因而难以解决工程的普遍问题。

(3) 设计方法的规范化 关于工程设计，至今缺少设计规范。例如在系统设计中建立模糊关系只是个关键问题。然而，目前还停留在定性地讨论影响模糊关系的因素，如模糊变量参数集、隶属函数、语言变量规则等因素。

关于量化水平，采样周期的最优选择、规则的条数、最小实现问题及评价系统特性的方法，都需要规范化。

(4) 把已取得的研究成果尽可能应用到实际过程中去，尽快地转化为生产力。

(5) 模糊控制是出自工程实际问题的迫切需要，在充分发其独特优点的基础上，确立其不可取代的优越地位。

(6) 传统控制与模糊控制的相互结合以及相互渗透，是今后模糊控制理论研究的一个重要的考虑方向。

综上所述，模糊控制在工业中的应用，是一个相对迅速发展的领域，随着模糊控制理论的不断发展和运用，模糊控制技术将为今后工业过程控制开辟广阔的前景。

3.4 模糊控制器

通常将模糊控制器输入变量的个数称为模糊控制的维数。下面是单输入单输出模糊控制器的几种结构，如图 3.1 所示^[7]。一般情况下，一维模糊控制器用于一阶被控对象，由于这种控制器输入变量只选误差一个，它的动态控制性能不佳。所以，目前被广泛采用的均为二维模糊控制器，这种控制器以误差和误差的变化为输入变量。

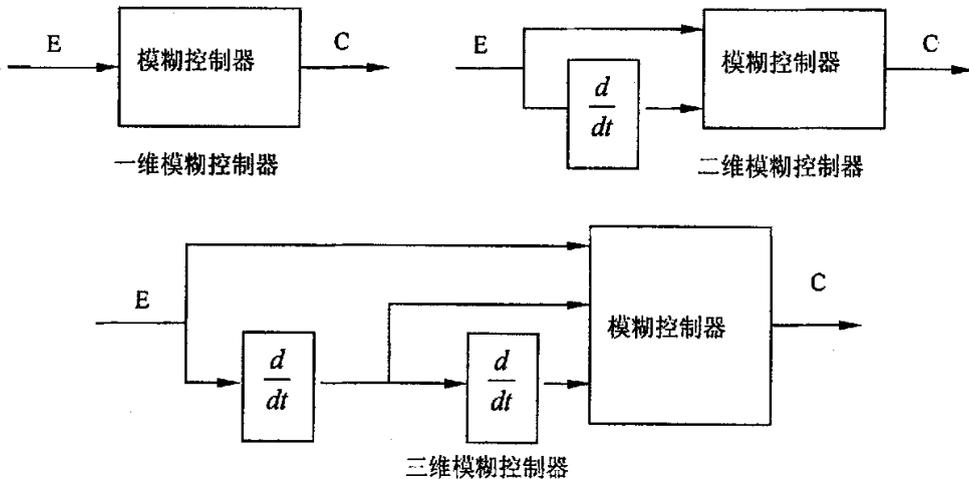


图 3.1 模糊控制器的结构图

Fig.3.1 The structural drawing of fuzzy controller

二维模糊控制器的原理图如下图 3.2:

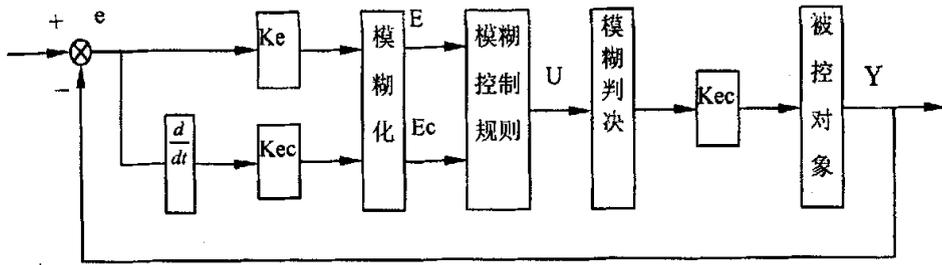


图 3.2 模糊控制器的原理图

Fig.3.2 The schematic diagram of fuzzy controller

由上图可知，要用模糊控制器实现语言控制，必须确定模糊控制器的结构，也就是解决以下三方面的问题：

- (1) 模糊化：把输入量转化为模糊变量；
- (2) 模糊控制规则：通过一组模糊条件语句构成模糊控制规则，并计算由模糊控制规则所确定的模糊关系；
- (3) 模糊判决（去模糊化）：把计算出模糊控制量转化为精确的输出控制量。

3.4.1 模糊化

由于模糊控制实质是语言控制，因而在模糊化部分中必须首先确定模糊控制中的语言变量值和语言变量的数目。语言变量由一组形如 X 、 $T(x)$ 、 G 、 M 的参数表示，其中 x 为变量名， $T(x)$ 为 x 的语义项集合（即为 x 的语言值的集合）， G 是产生 x 语言值的规则， M 则为语义规则。例：“电压”为一个语言变量，它的语义项集合 P （电压）可为 $P(\text{电压}) = \{\text{低, 中等, 高}\}$ 。在基本模糊控制系统中，只要有三个语言变量：偏差语言变量 E ，偏差变化语言变量 Ec 和输出语言变量 U 。一般这三个量划分为七个模糊语言变量集，分别为：PB（正大），PM（正中），PS（正小），Z（零），NS（负小），NM（负中），NB（负大）。

确定完了模糊语言变量和模糊语言变量集后，还要确定好把输入的化为精确量的比例因子 K_3 和 K_4 。在模糊控制系统中，实际的偏差 e 、偏差变化 ec ，和输出 u 有一基本论域。记为 $[-e, +e]$ 、 $[-ec, +ec]$ 和 $[-u, +u]$ ，相应的模糊语言变量 E 、 Ec 和 U 的模糊集合的论域为 $\{-n, -n+1, \dots, -1, 0, -1, \dots, n-1, n\}$ (n 为任意正整数)。通过量化因子 K_1 、 K_2 ，比例因子 K_3 、 K_4 就可以进行论域变换，将 E 、 Ec 和 U 的论域划分成若干个等级。一般 E 、 Ec 和 U 的论域划分为 13-15 个等级 (n 一般为 6 或 7)。 E 、 Ec 和 U 的基本论域对称时： $K_1 = n_1/e$ ， $K_2 = n_2/ec$ ， $K_3 = u/n_3$ ， $K_4 = u/n_4$ ；当 E 、 Ec 和 U 的基本论域不对称时：以 E 为例，若其变化范围为 $[a, b]$ ，则 $K_1 = 2 \cdot n_1 / (b - a)$ ，通过 $E = K_1 \cdot (e - (a + b) / 2)$ ，变化为落在 $[-n_1, +n_1]$ 中的值。这样系统的任何误差 e 、误差变化 ec 及控

制量 u 总可以分为转化为论域上的任何元素。

最后，在确定了模糊控制器的语言变量（如偏差语言变量 E ，偏差变化语言变量 E_c 和输出语言变量 U ）及其所取的语言变量值（如：PB, ..., 0, ..., NB），以及量化因子、比例因子模糊等级以后，可为语言变量（ E 、 E_c 、 U ）建立用以说明各自论域程度的表格，即语言变量的赋值表。

做完上面三项工作后，就可以对精确量进行模糊化。当测量出输入参数值后根据量化因子 K_1 和 K_2 ，就可得到偏差语言变量 E ，偏差变化语言变量 E_c 在基本论域 $[-e_c, +e_c]$ 的量化等级 n_e, n_{ec} 。根据 n_e, n_{ec} 查找偏差语言变量 E 的赋值表和偏差变化语言 E_c 的赋值表，就可得到在元素 n_e, n_{ec} 上与最大隶属度对应的语言值所决定的模糊语言变量集合。该语言变量集合便代表输入参数的模糊化。

3.4.2 模糊控制规则

模糊控制规则是整个模糊控制器的核心部分，它能够模仿人脑决策的特点并使模糊蕴涵关系和模糊推理规则导出相应的控制规则，这一部分包含两个知识基。

(1) 数据基：提供必要的定义，用于定义控制器中的语言控制规则和模糊数据运算。

(2) 规则基：应用模糊控制规则的方法定义控制目标和控制策略，即把专家知识转化为语言控制规则。

数据基和规则基的建立，一般是根据用户和工程技术人员的生产实践经验，由于用户和工程技术人员自己应用模糊控制规则的方法定义模糊数据运算方法、控制目标和控制策略，及把专家知识转化成语言控制规则，对控制对象进行模糊控制。

模糊控制器的模糊推理机制的设计，主要是选择一种模糊推理算法。当模糊控制器采用查表法实现时，用来离线设计查询表，当模糊控制器采用软件推理法实现时，用来在线进行模糊推理。

下面是几种常用的模糊推理算法

(1) MIN-MAX-重心法

有前提 “ x_0 and y_0 ” 和各模糊规则 “if A_i and B_i then C_i ($i=1,2,\dots,n$)” 可以得到推理结果 C_i 为

$$\mu_{C_i}(z) = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \wedge \mu_{C_i}(z)$$

最终结论 C 是由综合推理结果 $C_1, C_2 \dots C_n$ 得到的，即

$$\mu_C(z) = \mu_{C_1}(z) \vee \mu_{C_2}(z) \vee \dots \vee \mu_{C_n}(z)$$

模糊集合 C 的“重心”可由下式计算

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_C(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_C(z_i)} \tag{3.6}$$

这就是有名的 Mamdani 推理法，其实质是加权平均法。

(2) 代数积—加法—重心法

MIN-MAX 重心法推理过程采用了 MIN 和 MAX 的强非线性运算其过程不够直观，用代数积代替 MIN 用加法代替 MAX 就构成了代数积—加法—重心法。

各模糊规则的推理结果 C_i 采用代数积则有：

$$\mu_{C_i}(Z) = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0) \cdot \mu_{C_i}(Z)$$

综合推理结果采用加法可得：

$$\mu_C(Z) = \mu_{C_1}(Z) + \mu_{C_2}(Z) + \dots + \mu_{C_n}(Z)$$

模糊集合 C 的“重心”可由下式计算：

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_C(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_C(z_i)} \tag{3.7}$$

(3) 模糊加权型推理法

各模糊规则为“if A_i and B_i then W_i/Z_i ”， W_i 表示权重。

将前提“ x_0 and y_0 ”和各模糊规则的前件“if A_i and B_i ”的适合度定义为：

$$h_i = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0)$$

则最终结论 z_0 可将规则后件 z_1, z_2, \dots, z_n 在各适合度 h_1, h_2, \dots, h_n 中带上权重 w_1, w_2, \dots, w_n 由加权平均求得：

$$z_0 = \frac{h_1 w_1 z_1 + h_2 w_2 z_2 + \dots + h_n w_n z_n}{h_1 w_1 + h_2 w_2 + \dots + h_n w_n} \tag{3.8}$$

(4) 函数型推理法

只要将上述推理的后件部分变为函数，即为函数型推理法，各模糊规则为“if A_i and B_i then $f_i(x, y)$ ”。函数 $f_i(x, y)$ 是 $X \times Y \rightarrow Z$ 的函数。

最终推理结论 z_0 为：

$$z_0 = \frac{h_1 f_1(x_0, y_0) + h_2 f_2(x_0, y_0) + \dots + h_n f_n(x_0, y_0)}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \tag{3.9}$$

其中 $h_i = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0)$

(5) 加权函数型推理法

作为模糊加权型推理法的一般形式，将上述的函数推理法中的函数 $f_i(x, y)$ 附加权重函数 $w_i(x, y)$ ，则各模糊规则为 if A_i and B_i then $w_i(x, y)/f_i(x, y)$ 。

推理结论 z_0 为^[7]：

$$z_0 = \frac{h_1 w_1(x_0, y_0) f_1(x_0, y_0) + h_2 w_2(x_0, y_0) f_2(x_0, y_0) + \dots + h_n w_n(x_0, y_0) f_n(x_0, y_0)}{h_1 w_1(x_0, y_0) + h_2 w_2(x_0, y_0) + \dots + h_n w_n(x_0, y_0)} \tag{3.10}$$

3.4.3 模糊判决

模糊控制器的输出是一个模糊集合，它反映了控制语言的不同取值的一种组合，如果被控对象只能接受一个控制量，这就需要从输出的模糊子集中判决出一个精确量，也就是设计一个由模糊集合到普通集合的映射，这个映射称为判决。判决的方法很多，较常用的有三种：

(1) 最大隶属度法

它取控制输出论域上的点作为解模糊结果，在点控制输出的隶属函数达到最大值。

$$U(u_0) = \max_{u \in U} U(u) \quad \text{式(3.11)}$$

但是当隶属函数有多个最大值点时， u_0 则不能唯一确定。为此，有下述的平均最大隶属度法。

(2) 平均最大隶属度法

平均最大隶属度法取所有达到控制作用隶属函数的最大值的点平均值作为解模糊结果。设有 r 个点 u_1, u_2, \dots, u_r 其隶属函数都达到最大值，那么解模糊结果 u_0 为：

$$u_0 = \sum_{i=1}^r \frac{u_i}{r} \quad \text{式(3.12)}$$

若出现所有的隶属度最大的点构成一条直线，则取这条直线中点作为解模糊的结果。

(3) 重心法

重心法亦称加权平均法，它以控制作用论域上的点 $u \in U$ ，对控制作用模糊集的隶属度 $U(u)$ 为权系数进行加权平均而求得模糊结果。

对于离散论域的情况，设 $U = \{u_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 有：

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^n U(u_i) u_i}{\sum_{i=1}^n U(u_i)} \quad \text{式(3.13)}$$

对于连续论域的情况：

$$u_0 = \frac{\int_U U(u) u du}{\int_U U(u)} \quad \text{式(3.14)}$$

(4) 取中位数法

取中位数法把控制作用模糊集的隶属函数与横坐标所围成的面积分为左右相等的两部分，取平分的点为解模糊的结果。对于离散论域的情况，设控制作用 U 论域上有 r 个点 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为 U 的支集 $\text{supp}U$ ，论域为规范型的定义： $U = \{-n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n\}$ ，则解模糊结果 $u_k (1 \leq k \leq r)$ 满足：

$$\sum_{i=1}^{k-1} U(u) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r U(u) \quad \text{式(3.15)}$$

此式大部分情况不能精确的成立, 可以按照靠近原则, 取靠近隶属函数面积平分点的点。

对于连续论域的情况, 设控制作用 U 的支集 $\text{supp}U=[u_1, u_2]$, 则解模糊结果 $u_0 \in [u_1, u_2]$ 满足:

$$\int_{u_1}^{u_2} U(u) du = \frac{1}{2} \int_{u_1}^{u_2} U(u) du \quad \text{式(3.16)}$$

对于离散论域的情况, 解模糊结果不一定正好在控制论域 U 上的点。对于规范型的论域 $U=\{-n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n\}$ 解模糊结果不一定正好在 $-n$ 和 n 之间的整数, 此时有两种处理办法: 一是按靠近原则取最接近的论域上的点作为解模糊结果; 二是可以直接取计算出的数值。它虽然不是 $-n$ 和 n 之间的整数, 但还属于 $[-n, n]$ 范围, 量程转换后同样在实际控制信号的物理范围上, 而且这种取法控制作用更加细腻。我们就可利用计算得出非模糊子集控制量合成总控制表。这样, 在控制过程软件处理过程中, 计算机将采样和变换得来的 E 和 EC 直接与表中的行列相比较, 即可马上得出所需要的控制量 U , 这就构成了基本模糊控制器。

这四种方法多是对模糊控制器的输出控制量中各个模糊等级的隶属度的值加以分析、判断而后得到被控对象的模糊控制量。再把模糊控制量和比例因子相作用, 就可以得到实际的精确控制量, 从而实现了从模糊量到精确量的转化。在实际的模糊控制中, 通过上述三个环节的运算, 可实现实时控制。但是, 如果按上述步骤进行控制, 对机器的性能要求较高, 一般是预先选定某一种模糊判决方法, 根据偏差 E 和偏差变化 E_c 所对应的模糊等级 n_e 和 n_{ec} 。计算出所对应的控制量 U , 从而得到一张控制表——查询表, 实际控制时, 实现模糊控制的过程便转化为查找查询表的过程, 这样就大大加快了运算速度。

3.4.4 确定模糊控制器结构和控制规则应遵循的基本原则

因模糊控制器的设计是根据经验来确定它的控制参数和控制规则, 然后在实际当中进行调整, 因此在设计模糊控制器的工作中首先要解决它的结构和控制规则。

(1) 模糊控制器的结构

在设计模糊控制器时, 首先是根据被控对象的具体情况确定模糊控制器的结构。所谓模糊控制器的结构是确定哪些变量作为它的输入变量和输出变量。还包括模糊化、合成算法或模糊数学模型以及模糊判决等部分。

由于模糊控制器的控制规则是根据操作人员的控制经验提出的, 而一般操作人员只能观察到被控对象的输出变量和输出变量的变化, 或者观察到输出变量和输出变量的总和这两个状态, 因此在模糊控制器中总是选取误差及误差的变化率或误差及误差的和作

为它的输入变量，而把控制量的变化作为模糊控制器的输出变量，这样就确定了模糊控制器的结构。

(2) 模糊控制器的控制规则

模糊控制规则是模糊控制器的核心，其设计一般要考虑下面几个问题：

(a) 模糊控制的算法设计 如果考虑一个消除被控对象的误差 E 和误差变化率 C 输出为控制量的变化 U ，操作人员的控制策略可表为下列一些语句

if E then U

if E then U_1 else U_2

等等，这方面内容前面已经讨论过了，此处不在赘述。

(b) 选择输入和输出变量的模糊状态 在设计模糊控制器时，论域 E 、 C 和 U 常采用 7 个语言变量来描述输入输出变量，如“正大”，“正中”，“正小”，“零”，“负小”，“负中”，“负大”等。这些我们称之为输出和输入的模糊状态。显然对每个变量用较多的状态来描述，制定规则就比较灵活，规则也比较细致，但相应地也使规则变得复杂了，制定起来也比较困难，因此在选择模糊状态时要兼顾简单性和灵活性，一般每个变量宜选用 2—10 个模糊状态来描述。

(c) 定义输入状态的模糊集或模糊数 在定义模糊集时，首先要考虑的是模糊集的隶属度曲线形状。

确定模糊状态表 一般我们把代表控制规则的模糊条件语句简写为一个表，即模糊控制状态表，根据该表就可说明它的确定方法。

考虑误差为负的情况，当误差为负大时，若当误差变化率为负，为尽快消除误差，应使控制量增加较快，所以控制量的变化为正大；而当误差变化率为正时，误差有减少的趋势，所以可取较小的控制量，即误差变化率为 PS（正小），输出为 M（正中），误差变化率为 PM 或 PL 时，可不增加控制量，所以这时控制量变化取值。当误差为 NM（负中）时，考虑的原则仍然是尽快消除误差，其控制量的变化选取同上。

当误差较小时，为了防止超调并使系统尽快稳定（此时主要矛盾已转化为稳定问题），这时应主要根据误差的变化来安排控制量的变化，例如当误差为 NS，误差变化率为 PL，这时控制量的变化取为 NS。

根据系统的工作特点，误差和误差变化率同时变号时，控制量的变化也相应变号，这样误差为正就可对称地得出控制量变化的值从而得出模糊控制状态表，根据这个表不难写出相应的模糊条件语句。

(d) 模糊控制器的控制算法是由计算机的程序实现的。图 3.3 给出了单变量二维模糊控制器模糊控制查询表的算法流程图。不难看出，这种控制算法程序简单，计算机易于实现。

3.5 模糊自整定 PID 参数控制

在工业生产过程中，大量采用的仍然是 PID 算法，PID 参数的整定方法很多，但大多数都是以对象特性为基础的。

随着计算机技术的发展，人们利用人工智能的方法将操作人员的调整经验作为知识存入计算机中，根据现场的实际情况，计算机能自动调整 PID 参数，这样就出现了智能 PID 控制器。这种控制器把古典的 PID 控制与先进的专家系统相结合，实现系统的最佳控制。这种控制必须精确地确定对象模型，首先将操作人员（专家）长期实践积累的经验知识用控制规则模型化，然后运用推理便可对 PID 参数实现最佳调整。

由于操作者经验不易精确描述，控制过程中的各种信号量及评价指标不易定量表示。模糊理论是解决这一问题的有效途径，所以人们利用模糊数学的基本理论和方法，把规则的条件、操作用模糊集表示，并把这些模糊控制规则及有关信息作为知识存入计算机知识库中，然后计算机根据控制系统的实际响应情况（专家系统的输入条件），运用模糊推理，即可自动实现对 PID 参数的最佳调整，这就是模糊自整定 PID 控制。目前模糊自整定 PID 控制有多种结构形式，但其工作原理基本一致。

模糊自整定 PID 控制器以误差 e 和误差变化 ec 作为输入，可以满足不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数自整定的要求，利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改，便构成了自整定模糊 PID 控制器，其结构如图 3.4:

PID 参数模糊自整定是找出 PID 三个参数与 e 和 ec 之间的模糊关系，在运行中通过不断检测 e 和 ec ，根据模糊控制原理来对三个参数进行在线修改，以满足不同的 e 和 ec 时对控制参数的不同要求，而使被控对象有良好的动、静态性能。

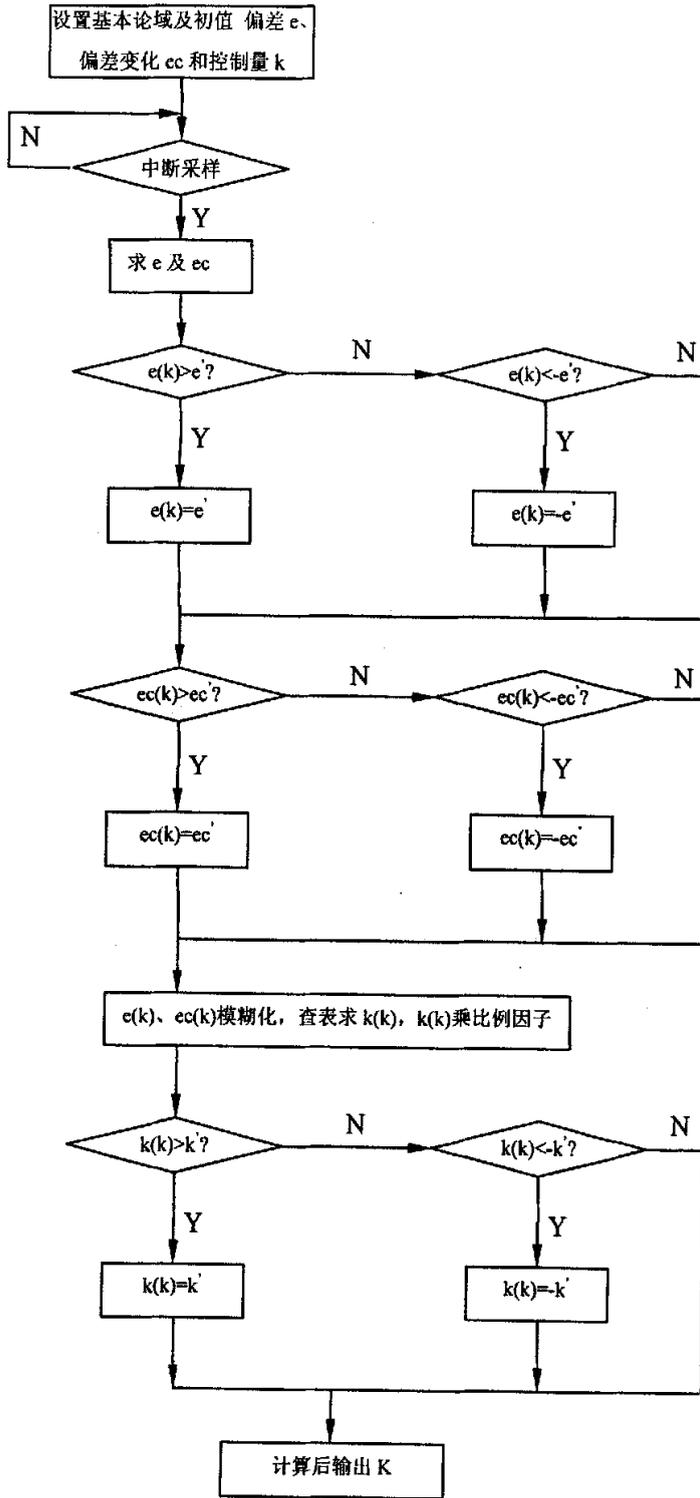


图 3.3 算法流程图

Fig.3.3 The algorithm flowchart

从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面来考虑， k_p 、 k_i 、 k_d 的作用如下：

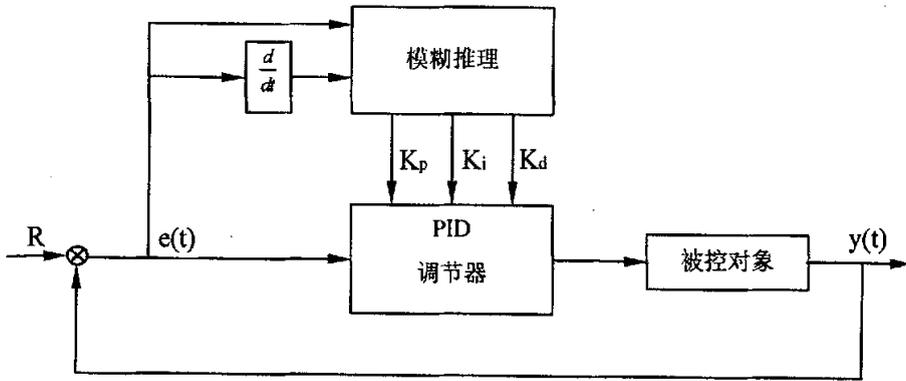


图 3.4 自整定模糊 PID 控制器结构图

Fig.3.4 The structural drawing of adaptation fuzzy PID controller

(1) 比例系数 K_p 的作用是加快系统的响应速度，提高系统调节精度。 K_p 越大，系统响应速度越快，系统的调节精度越高，但易产生超调，甚至会导致系统不稳定。 K_p 取值过小，则会降低精度，使响应速度缓慢，从而延长调节时间，使系统静态、动态特性变坏。

(2) 积分作用系数 K_i 的作用是消除系统的稳态误差。 K_i 越大，系统的静态误差消除越快，但 K_i 过大，在响应过程初期会产生积分饱和现象，从而引起响应过程的较大超调。若 K_i 过小，将使系统静态误差难以消除，影响系统的条件精度。

(3) 微分作用系数 K_d 的作用是改善系统的动态特性。其作用主要是在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化，对偏差变化进行提前预报。但 K_d 过大，会使响应过程提前制动，从而延长调节时间，而且会降低系统的抗干扰性能。

第四章 模糊控制在电厂锅炉燃烧自动控制系统中的应用

4.1 某电厂 802 车间锅炉燃烧控制系统现状

4.1.1 某电厂 802 车间锅炉控制系统现状

某电厂 802 车间共有三台蒸汽锅炉，负责厂内的蒸汽供给任务，带动汽轮机发电以及冬季住宅区供暖。由于设备投产较早，受当时的技术条件限制，该车间三台蒸汽锅炉普遍存在着控制效果差、锅炉热效率低、能耗大、环境污染比较严重等诸多问题。通过详细调查，我们发现该车间锅炉控制系统的严重落后是导致以上述诸多问题的直接原因。

我们发现该车间锅炉控制系统存在以下四方面主要问题：

(1) 完全手动控制方式，汽包锅炉蒸汽温度、汽包锅炉水位、给煤控制、鼓风控制、引风控制、二次风控制和炉排控制均由现场操作工人凭借经验进行调节。在这样的控制方式下，工人的劳动强度大并且增加了系统的不可靠性；

(2) 检测手段落后，炉膛负压等许多检测装置失灵，不能使用，减温水控制阀经常失灵；

(3) 控制效果差，急需改造，汽包锅炉蒸汽温度、汽包锅炉水位、汽包压力等重要指标经常在大范围波动；

(4) 经济效益差，工厂为防止冒黑烟，锅炉长期工作在大鼓风大引风状态下，热量损失严重，锅炉效率低。

由于沈阳某自备电厂 802 车间是窗口单位，经常有省领导、中央领导前来视察参观，所以厂领导希望通过对控制系统进行计算机自动化改造以达到降低能耗、减少环境污染、提高系统可靠性、减小工人劳动强度和提高经济效益的多重目标。

4.1.2 控制系统软硬件配置情况

根据该车间锅炉的具体情况，控制系统硬件选用了 SIMATIC Step7 系列产品，软件则采用同来自 SIMATIC 的 WinCC。在进行硬件设计中我们遵循了以下基本原则：

(1) 最大限度地满足被控对象的控制要求。设计之前深入现场进行调查研究，收集资料，并与相关部分的设计人员和实际操作人员密切配合，共同拟订控制方案，协同解决设计中出现的各种问题。

(2) 在保证控制系统安全、可靠的前提下，力求使控制系统简单、经济、使用及维修方便，满足控制要求。

(3) 考虑到生产的发展，工艺的改进及系统的扩充，在选择可编程控制器的 CPU 模

板及 I/O 模板时, 应当适当留有余量。

WinCC 是 SIMATIC 全集成自动化的核心组件。统一的编程/组态, 统一的数据管理和统一的通讯是全集成自动化的核心, 来自 SIMATIC 的各自动化软件均统一在一个公共的框架之下, 这就是 SIMATIC Manager。统一的软件平台使在自动化环境下没有异种系统互联带来的问题, 并极大降低了工程费用。使自动化任务在集成的优势中获得了最大的益处。

WinCC 的开发性架构为自动化软件提供了坚实的平台, 由于 WinCC 内置了数据库, 同时支持开放性脚本语言, 其功能实际上是不受任何限制的, WinCC 支持主流数据库, 适用于各种综合任务的集成, 并可通过各种编程语言开发 WinCC 功能外的特殊任务。WinCC 支持所有行业领域的可视化控制和数据管理任务, WinCC 还具有十分卓越的延伸能力, 提供完全的冗余系统, 满足系统改造和发展的要求。

4.2 控制对象传递函数的确定

确定锅炉燃烧系统的传递函数不是一件容易的事, 控制对象的动态特性一般是用高阶微分方程描述的, 很难通过内在机理的分析直接求出它们的传递函数。因此, 为了确定它们的动态特性, 实际上主要借助于实验方法来进行确定, 并对现场设定的实验数据进行适当的数学加工和处理, 最后得到控制对象动态特性的近似数学表达式, 即传递函数。

在确定求解传递函数的方法后, 根据现场实验曲线记下需要确定点的坐标。本文采用的是两点法。在本文的第二章, 我们通过近似推导已经知道: 在燃烧率扰动下的汽压动态特性。保持汽机调节阀开度 μ_T 不变, 阶跃变化燃料量 M , 由传递方框图可得

$$W_{TB}(S) = \frac{P_M}{M} \approx \frac{K_{TB}}{T_C S + 1} e^{-\tau_M S} \quad \text{式 (4.1)}$$

通过实验曲线确定了控制对象的传递函数为有延迟的一阶对象, 它可用迟延环节和一阶惯性环节串联来等效。这和理论推导所获得的结论是一致的。其中的特征参数 K_{TB} 、 T_C 、 τ_M 通过两点法在阶跃响应曲线上求得。

两点法避免了做切线时容易引起的误差。此法是阶跃响应 $y(t)$ 上适当选择两点, 然后把着两点的数值代入经验公式, 从而确定被控对象的迟延和时间常数。增益 K_{TB} 按下式计算。

$$K_{TB} = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta \mu_0} \quad \text{式 (4.2)}$$

计算 T_C 、 τ_M 时, 首先要把 $y(t)$ 转换成它的无量纲形式 $y^*(t)$, 即

$$y^*(t) = \frac{y(t)}{y(\infty)} \quad \text{式 (4.3)}$$

$y^*(t)$ 为无量纲形式的阶跃响应曲线。有延迟一阶对象的阶跃响应无量纲形式为

$$y^*(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau_M \\ 1 - e^{-\frac{t-\tau_M}{T_c}} & t \geq \tau_M \end{cases} \quad \text{式 (4.4)}$$

上式中只有两个参数即 T_c 和 τ_M 因此只能根据两个点的测试数据进行拟和。为此先选定两个时刻 t_1 和 t_2 ，其中 $t_2 > t_1 \geq \tau_M$ ，从测试结果中读出 $y^*(t_1)$ 和 $y^*(t_2)$ 并写出下述联立方程：

$$y^*(t_1) = 1 - e^{-\frac{t_1-\tau_M}{T_c}} \quad \text{式 (4.5)}$$

$$y^*(t_2) = 1 - e^{-\frac{t_2-\tau_M}{T_c}} \quad \text{式 (4.6)}$$

对上式取对数并解出参数 T_c 和 τ_M 值如下：

$$T_c = \frac{t_2 - t_1}{\ln[1-y^*(t_1)] - \ln[1-y^*(t_2)]} \quad \text{式 (4.7)}$$

$$\tau_M = \frac{t_2 \ln[1-y^*(t_1)] - t_1 \ln[1-y^*(t_2)]}{\ln[1-y^*(t_1)] - \ln[1-y^*(t_2)]} \quad \text{式 (4.8)}$$

为了计算方便一般取 $y^*(t_1) = 0.39$ 和 $y^*(t_2) = 0.63$ ，则上式可简化为：

$$T_c = 2(t_2 - t_1) \quad \text{式 (4.9)}$$

$$\tau_M = 2t_1 - t_2 \quad \text{式 (4.10)}$$

考虑到两个特定点的选择具有某种随意性，所得的结果准确性不高，我们采用多次测量和改变实验阶跃幅度的方法分别计算，再取平均值的办法求取 T_c 和 τ_M 值。

表 4.1 阶跃实验

Table 4.1 step experiments

	$\Delta u_0=10\%$		$\Delta u_0=11.5\%$		$\Delta u_0=12\%$	
$y(\infty)$	3.60	3.64	3.78	3.75	3.93	3.96
$y(t_1)$	1.404	1.420	1.472	1.463	1.533	1.544
$y(t_2)$	2.268	2.293	2.381	2.363	2.476	2.495
t_1	201	199	197	195	196	198
t_2	368	364	363	358	358	366
K_{TB}	32.73	33.09	32.87	32.61	32.75	33
T_c	334	330	332	326	324	336
τ_M	34	34	31	32	34	30

4.3 PID 和 Fuzzy 控制策略剖析和参数整定

锅炉本身是一个较为复杂的被控对象，虽然可以用以下模型定性的来确定它：

$$W_{TB}(S) = \frac{P_M}{M} \approx \frac{K_{TB}}{T_c S + 1} e^{-\tau_M S} \quad \text{式 (4.11)}$$

式中： K_{TB} 为放大倍数； T_c 为时间常数； τ_M 为纯滞后时间

但是在实际热力过程中，由于煤种，蒸汽流量等因素的不同，直接影响着 K_{TB} 、 τ_M 等参数的变化。因此，锅炉本身具有很大的不确定性。对这样一个大惯性、纯滞后、参数时变的非线性对象的控制，至今仍是一个热点和难点。

4.3.1 PID 控制的特点

在 PID 控制算法中，存在着比例、积分、微分 3 种控制作用。这三种控制作用的特点如下：

(1) 比例控制作用的特点

系统误差一旦产生，控制器立即有控制作用。使 PID 控制的对象朝着减小误差的方向变化，控制作用的强弱取决于比例系数 K_p 。缺点是对于具有自平衡（即系统阶跃响应终值为一有限值）能力的被控对象存在静差。加大 K_p 可减小静差，但 K_p 过大，会导致

系统超调增大,使系统的动态性能变坏。

(2) 积分控制作用的特点

能对误差进行记忆并积分,有利于消除系统的静差。不足之处在于积分作用具有滞后特性,积分作用太强会使被控对象的动态品质变坏,以至于导致闭环系统不稳定。

(3) 微分控制作用的特点

通过对误差进行微分,能感觉出误差的变化趋势,增大微分控制作用可加快系统响应,使超调减小。缺点是对于干扰同样敏感,使系统对干扰的抑制能力降低。

4.3.2 参数的自整定要求

一般情况下,在不同的 $|E|$ 和 $|E_c|$ 下,被控过程对参数 K_p , K_i , K_d 的自整定要求可归结如下:

(1) 当 $|E|$ 较大时,为使系统具有较好的快速跟踪性能,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 应取的小些,在这种情况下, K_d 的取值对系统影响较大, K_i 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_i 与 K_p 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。

根据被控对象的不同,适当地调整PID参数,可以获得比较满意的控制效果。因为其算法简单,参数调整方便,并且有一定的控制精度,因此它已成为当前最为普遍采用的控制算法。

PID控制算法也有它的局限性和不足,由于PID算法只有在系统模型参数为非时变的情况下,才能获得理想的效果。当一个调好参数的PID控制器被应用到模型参数时变系统时,系统的性能会变差,甚至不稳定。另外,在对PID参数进行整定的过程中,PID参数的整定值是具有一定局域性的优化值,而不是全局性的最优值,因此这种控制作用无法从根本上解决动态品质和稳态精度的矛盾。

4.3.3 PID控制系统的设计

在本文的第二章已经讨论了燃料控制系统的结构。针对本工程的锅炉燃烧系统的特点,控制系统结构框图4.1如下:

系统由主蒸汽压力控制和燃烧率控制组成串级控制系统。主蒸汽压力控制回路可看作系统的主回路,燃烧率控制可视为系统的内回路。燃烧率控制回路是多个并列的子系统组成的多参数比值控制系统,按照压力调节器PID2(主调节器)给出负荷指令(燃烧率指令),控制燃料、送风、引风各量成适当比值协调变化,以保证炉膛发热量与负荷指令相适应。图中PID1则代表燃烧率调节器。燃烧率子系统既可以是燃烧率调节回路,也可以是燃料量调节回路。在本期工程中为燃料量调节回路。

4.3.3.2 串级控制系统主副回路和主副调节器的选择

(1) 主副回路选择原则

(a) 副回路应该把生产过程的主要干扰包括在内, 应力求把变化幅度最大、最剧烈和最频繁的干扰包括在副回路内, 充分发挥副回路改善系统动态特性的作用, 保证参数的稳定。

(b) 选择副回路时, 应力求把尽量多的干扰包括进去, 以尽量减少它们对主参数的影响, 提高系统抗干扰能力。

(c) 主副对象的时间常数应适当匹配, 原则是两者相差大一些, 效果好一些。过大过小都不好。一般取 $T_1/T_2=2\sim6$ (或 $3\sim10$) 之间较合适。如果 $T_1/T_2>10$, 表示 T_2 很小, 包括的干扰因素少, 克服干扰能力强的优点不能充分利用。 $T_1/T_2<3$ 时, T_2 过大, 副回路包括的干扰多, 控制不及时。当 $T_1\approx T_2$ 时, 主副对象之间的动态联系十分密切。如果在干扰下, 主副参数任一个先振荡, 必将引起另一个也振荡。这样两个参数互相促进, 振荡加强, 即所谓的“共振现象”, 应当避免。

(2) 主副回路调节器调节规律的选择原则

(a) 主参数要求不高, 副参数要求不严格时, 主副调节器均可采用比例控制。

(b) 主参数波动范围较小, 且不允许有稳态误差时, 主调节器采用比例积分控制, 副调节器采用比例控制; 主参数要求较高, 副参数也有一定要求, 主副调节器均可采用比例积分控制。

4.3.4 PID 控制系统的参数整定

在许多书中都有关于串级 PID 控制系统整定的方法, 我们选择了一种比较容易掌握的试验整定法的边界稳定法。

(1) 先决定副调节器的比例带。方法如下:

主副回路全部投入闭环, 主调节器参数设置: δ_1 置于较大位置, $T_{i1}=\infty$, $T_{d1}=0$, 副调节器的 δ_2 置于较大位置, 且 $T_{i2}=\infty$, $T_{d2}=0$, 而后将副调节器的比例带由大往小调, 使副回路产生不衰减振荡 (同时观察 θ_2), 并记下此时的 δ_{2k} (临界比例带)、(振荡周期), 则副调节器的参数设置为

$$W_{T_2}(s) = \frac{1}{\delta_2} \text{ 时, } \delta_2 = 2\delta_{2k} \quad \text{式 (4.12)}$$

$$W_{T_2}(s) = \frac{1}{\delta_2} \left(1 + \frac{1}{T_{i2}S}\right) \text{ 时, } \delta_2 = 2.2\delta_{2k}; T_{i2} = \frac{T_{2k}}{1.2} \quad \text{式 (4.13)}$$

(2) 决定主调节器的参数。副调节器参数按步骤(1)整定好并投入后, 主调节器此时仍在步骤(1)设置的位置上。闭合主、副回路逐渐减小 δ_1 , 观察 θ_1 , 使主回路产生不衰减振荡, 记下此时的 δ_{2k} 和 T_{2k} 。则副调节器的参数设置为

$$W_{T1}(s) = \frac{1}{\delta_1} \text{时}, \quad \delta_1 = 2\delta_{1K} \quad \text{式 (4.14)}$$

$$W_{T1}(s) = \frac{1}{\delta_1} \left(1 + \frac{1}{T_{i1}S} \right) \text{时}, \quad \delta_1 = 2.2\delta_{1K}; T_{i1} = \frac{T_{1K}}{1.2} \quad \text{式 (4.15)}$$

(3) 微调参数，直到满意为止。

4.4 模糊自整定 PID 参数控制系统的设计和参数整定

常规 PID 控制器对于改善锅炉系统的运行状况起到了良好的作用，但在实际热力过程中，由于被加热对象的热导率、装入量以及加热温度等因素的不同，直接影响了 K_{TB} 、 T_c 、 τ_M 等参数的变化。因此，对这样的大惯性、纯滞后、参数时变的非线性对象的控制至今仍然是学术界讨论的热点。

通过上述分析不难看出，对于锅炉这样的具有较大的滞后性、非线性、时变性的控制对象，单纯采用 PID 控制或模糊控制都不会取得较好的控制效果。大量的理论研究和工程实践也充分证明了这一点。而采用模糊自整定 PID 复合控制方式控制锅炉蒸汽压力则不失为是一种比较好的解决办法。它能发挥模糊控制鲁棒性强、动态响应好、上升时间短、超调小的特点，又具有 PID 控制器的动态跟踪品质和稳态精度。因此在本压力控制器的设计中，采用了 PID 参数模糊自整定复合控制，实现了 PID 参数的在线自调整功能，进一步完善了 PID 控制的自适应性能，在实际应用中取得了较好的效果。

随着计算机技术的发展，采用模糊自整定 PID 参数控制器解决锅炉燃烧系统的控制问题是极具有代表性的。运用人工智能的方法将操作人员的调整经验作为知识存入计算机中，再根据现场的实际情况，运用推理对 PID 参数实现最佳调整。

目前，常规 PID 调节器大量应用于工业过程控制，并取得了较好的控制效果。其控制作用的一般形式为 $U(k) = K_p E(k) + K_I \sum E(k) + K_D E_C(k), (k = 0, 1, 2, \dots)$ ， $E(k), E_C(k)$ 分别为其输入偏差和偏差变化率； K_p, K_I, K_D 分别为表征其比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 作用的参数。但由于常规 PID 调节器不具有在线整定参数的功能，因此不能满足在不同工况下系统对参数的自整定功能的要求，从而影响其控制效果的进一步提高。本文采用具有 PID 参数 Fuzzy 自整定功能的一类 Fuzzy-PID 控制器的设计方法。

PID 参数 Fuzzy 自整定控制器是一种在常规 PID 调节器的基础上 $U(k) = K_p E(k) + K_I \sum E(k) + K_D E_C(k), (k = 0, 1, 2, \dots)$ ，应用 Fuzzy 集合理论建立参数 K_p, K_I, K_D 与偏差绝对值 $|E|$ 和偏差变化绝对值 $|E_C|$ 间的二元连续函数关系为

$$\begin{aligned} K_p &= f_1(|E|, |E_C|) \\ K_I &= f_2(|E|, |E_C|) \\ K_D &= f_3(|E|, |E_C|) \end{aligned} \quad \text{式 (4.16)}$$

并根据不同的 $|E|$ 和 $|E_C|$ 在线自整定参数 K_p, K_I, K_D 。

在本次改造中，模糊控制系统的结构仍然如图 4.1 所示，但对主 PID（即 PID2）控制器中的控制参数 K_p 采用了模糊控制自整定方案。意图通过动态改变主 PID 的控制参数达到改善控制器动态特性和适应能力的目的。具体实施如下：

4.4.1 确立模糊控制器的基本结构

设计一个采用二输入控制器的模糊控制器，定义为：误差 E、误差变化 EC、及控制量 U。如图 4.2 所示^[8]：

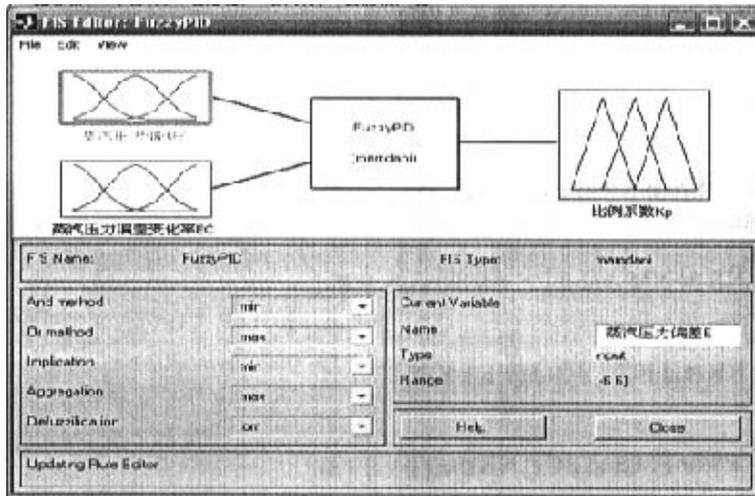


图 4.2 FIS 编辑器

Fig.4.2 FIS editor

确定 E、EC、K 的模糊集及其论域

(1) 输入变量 e 为给定蒸汽压力与实际蒸汽压力的差值。

在模糊控制区内，偏差 e 的变化范围为 $[-0.2, 0.2]$ ，偏差 e 的模糊论域为 $E = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，偏差 e 的量化因子为 $K_e = 6/0.2 = 30$ ，模糊集 \hat{E} 为 {NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB}；

(2) 输入变量 ec 为给定蒸汽压力与实际蒸汽压力的偏差变化率。

在模糊控制区内，偏差变化率 ec 的变化范围为 $[-0.06, 0.06]$ ，的模糊论域为 $EC = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ；的量化因子为 $K_{ec} = 6/0.06 = 100$ ，模糊集 $\hat{E}C$ 为 {NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}；

(3) 输出变量 K 即控制量为 PID 控制器的比例系数

输出控制采用增量形式，控制量 ΔK 的变化范围为 $[-0.15, 0.15]$ ，划分为 13 个等级，即 $\Delta K = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，则控制量 ΔK 的比例因子 $K_u = 0.15/6 = 0.025$ 。模糊集 ΔK 为 {NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}。

4.4.2 模糊控制规则的建立

根据系统输出的误差及误差的变化趋势来消除误差的模糊控制规则是基于该系统多年现场运行试验、经验积累、手动操作策略来确立的系统模糊控制规则。对于压力控制系统来说控制对象的控制规则共有 49 条规则，用下述 30 条模糊条件语句来描述：

- (1)if E = NB or NM and EC = NB then k = PB
or
- (2)if E = NB and EC = NM then k = PB
or
- (3)if E = NS or ZO and EC = NB then k = PM
or
- (4) if E = NM or NS and EC = NM then k= PM
or
- (5)if E = NB or NM and EC = NS then k = PM
or
- (6)if E = NB and EC = ZO then k = PM
or
- (7) if E = PS or PM and EC = NB then k = PS
or
- (8) if E = ZO or PS and EC = NM then k = PS
or
- (9) if E = NS or ZO and EC = NS then k = PS
or
- (10)if E = NM or NS and EC = ZO then k = PS
or
- (11) if E = NB or NM and EC = PS then k = PS
or
- (12) if E = NB and EC = PM then k = PS
or
- (13) if E = PB and EC = NB then k = ZO
or
- (14) if E = PM and EC = NM then k= ZO
or
- (15)if E = PS and EC = NS then k = ZO
or

- (16) if $E = NS$ and $EC = PS$ then $k = ZO$
or
- (17) if $E = NM$ and $EC = PM$ then $k = ZO$
or
- (18) if $E = NB$ and $EC = PB$ then $k = ZO$
or
- (19) if $E = PB$ and $EC = NM$ then $k = NS$
or
- (20) if $E = PM$ or PB and $EC = NS$ then $k = NS$
or
- (21) if $E = PS$ or PM and $EC = ZO$ then $k = NS$
or
- (22) if $E = ZO$ or PS and $EC = PS$ then $k = NS$
or
- (23) if $E = NS$ or ZO and $EC = PM$ then $k = NS$
or
- (24) if $E = NM$ or NS and $EC = PB$ then $k = NS$
or
- (25) if $E = PB$ and $EC = ZO$ then $k = NM$
or
- (26) if $E = PM$ or PB and $EC = PS$ then $k = NM$
or
- (27) if $E = PS$ or PM and $EC = PM$ then $k = NM$
or
- (28) if $E = ZO$ or PS and $EC = PB$ then $k = NM$
or
- (29) if $E = PB$ and $EC = PM$ then $k = NB$
or
- (30) if $E = PM$ or PB and $EC = PB$ then $k = NB$

形成控制规则表 4.2

表 4.2 控制规则表

Table 4.2 The control rule table

E								
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
EC	K							
	EC	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
	NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
	NS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
	ZE	PM	PS	PS	O	NS	NS	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB	

4.4.3 模糊变量赋值表的确定

模糊变量偏差 e、偏差变化 ec 及控制量 k 的模糊集和论域确定后，考虑对论域的覆盖程度、灵敏度、稳定性以及鲁棒性原则，各模糊集以三角形曲线为隶属函数曲线，如图 4.2。对模糊变量赋值，确定论域内元素对模糊语言变量的隶属度。

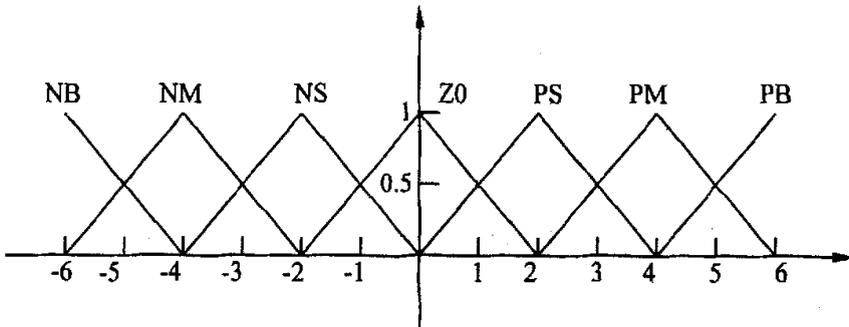


图 4.3 隶属函数图

Fig.4.3 The membership function diagram

取三角函数作为隶属函数的曲线，这不仅出于形状简单，计算工作量少，可节约存储空间考虑，也是在于三角形状的隶属函数具有更大的灵敏性，当存在一个与设定值的偏差时，能很快产生调整量的输出，这点对于控制器的特性来说是相当重要的。

如：变量误差 E

$$PB_e = 0/4 + 0.5/5 + 1.0/6$$

$$PM_e = 0/2 + 0.5/3 + 1.0/4 + 0.5/5 + 0/6$$

$$PS_e = 0/0 + 0.5/1 + 1.0/2 + 0.5/3 + 0/4 \quad \dots \dots \text{式 (4.17)}$$

则：模糊变量 E、EC 及 K 的赋值分别添表 4.3，4.4 及 4.5 所示。

表 4.3 模糊变量 E 的赋值表

Table 4.3 The valuation table of fuzzy variable E

e		u												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
E	PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0
	PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0
	PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0.1	0	0
	ZO	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
	NS	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
	NM	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NB	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.4 模糊变量 EC 的赋值表

Table 4.4 The valuation table of fuzzy variable EC

ec		u												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
EC	PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0
	PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0
	PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0.1	0	0
	ZO	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
	NS	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
	NM	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NB	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.5 模糊变量 K 的赋值表

Table 4.5 The valuation table of fuzzy variable K

K		u												
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
k	PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0
	PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0
	PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0.1	0	0
	ZO	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
	NS	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
	NM	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NB	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.4.4 模糊查询表的建立

非模糊化——即控制量的模糊量 K 转化为精确量，采用最大隶属度的方法进行解模糊，由于计算量大，下面给出算法：

(1) 由 30 条模糊条件语句确定相应模糊关系

第一条语句确定：

$$R_1 = [(NB_E + NM_E) \times PB_k] \cdot (NB_{EC} \times PB_k)$$

第二条语句确定：

$$R_2 = (NB_E \times PB_k) \cdot (NM_{EC} \times PB_k)$$

... ..

第三十条语句确定：

$$R_{30} = [(PB_E + PM_E) \times NB_k] \cdot (PB_{EC} \times NB_k)$$

(2) 根据误差量 e 和误差的变化 ec ，由相应控制规则可以算出模糊控制量为

$$u_1 = e \circ [(NB_E + NM_E) \times PB_k] \cdot ec \circ (NB_{EC} \times PB_k)$$

$$u_2 = e \circ (NB_E \times PB_k) \cdot ec \circ (NM_{EC} \times PB_k)$$

... ..

$$u_{30} = e \circ [(PM_E + PB_E) \times NB_k] \cdot ec \circ (PB_{EC} \times NB_k)$$

则控制量为模糊集合 k ，表示为

$$k = k_1 + k_2 + \dots + k_{30}$$

(3) 采用最大隶属度的方法，将控制量由模糊量变为精确量。

根据各模糊变量的赋值表取值，预先计算好控制量 k ，制成如表 4.6 所示的模糊查询表，作为“文件”存贮在计算机中，便于根据输出的信息，从“文件”中查询所需采取的控制策略。

表 4.6 模糊查询表

Table 4.6 The fuzzy query table

E K EC		E											
		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-6	6	6	6	5	4	4	4	3	2	2	2	1	0
-5	6	5	5	5	4	3	3	3	2	1	1	0	-1
-4	6	5	4	4	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2
-3	5	5	4	3	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2
-2	4	4	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2
-1	4	3	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-3	-3
0	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4
1	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4
2	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4
3	2	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4	-5	-5
4	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-5	-6
5	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4	-5	-5	-5	-6
6	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-5	-6	-6	-6

计算出的模糊控制量可以选用一种判决方法，本文采用最大隶属度，控制量的模糊量变为精确。选择最大隶属度方法简单易行，算法实时性好，这种方法突出了隶属度最大元素的控制作用，对于隶属度较小的元素的控制作用没有考虑，利用的信息量少。

利用计算机可根据不同的 i 和 j 预先计算好控制量 k ，制成如表 4.6 所示的控制表，作为“文件”存储在计算机中。当进行实时控制时，便于根据输入的信息，从“文件”中查询所需采用的控制策略。因此，该表又称查询表。

以上即是模糊自整定 PID 参数控制器的设计，将其应用于锅炉燃烧系统的控制中控制出口蒸汽压力，可以同时吸收模糊控制器和 PID 控制器的优点。它既能够发挥模糊控制鲁棒性强、动态响应好、上升时间快、超调小的特点，又具有 PID 控制器的动态跟踪品质和稳态精度，从而达到较好的控制效果^[9-13]。

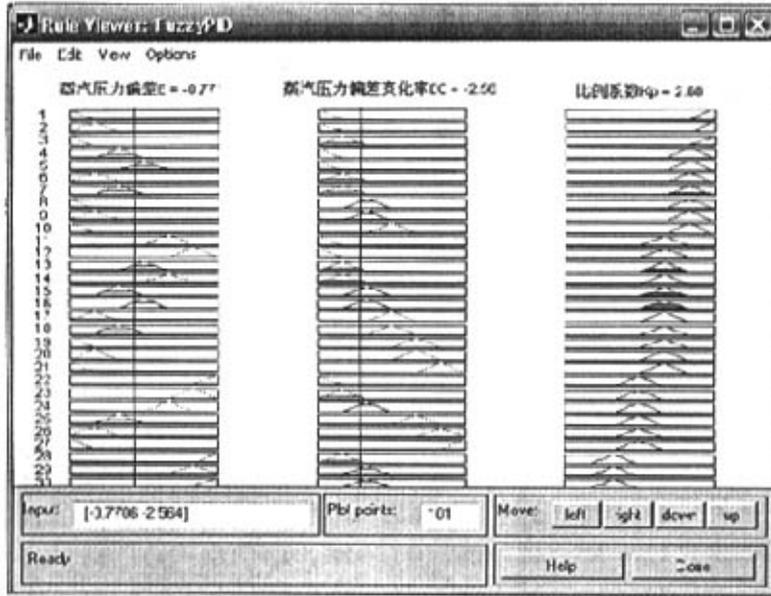


图 4.4 模糊规则观察器

Fig.4.4 rule viewer

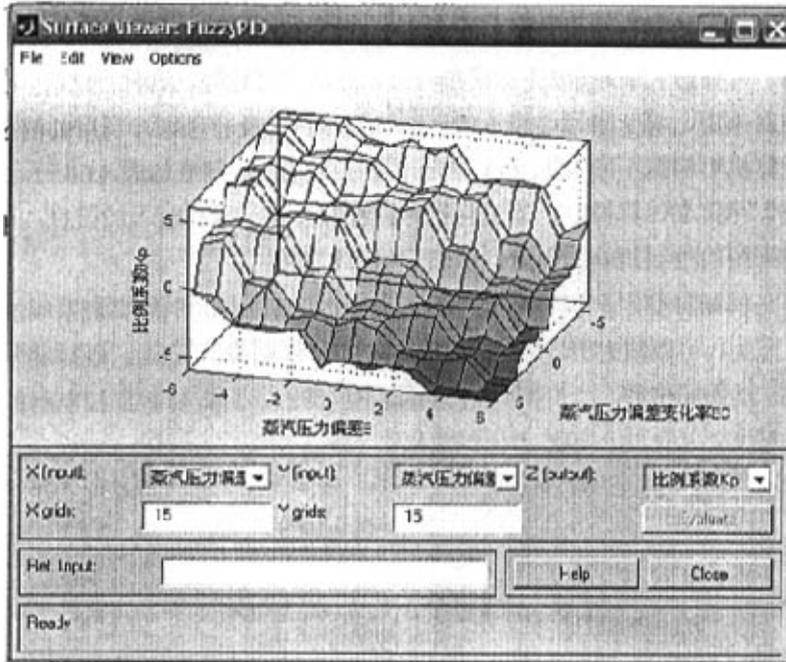


图 4.5 模糊推理输出曲面

Fig.4.5 surface viewer

4.4.5 Fuzzy PID 自整定控制算法

在 PID 控制中，将系统的设定值 R 与系统的输出值 Y 比较，得出控制偏差 $e=R-Y$ ，并依据偏差情况，给出控制量 u。对于连续时间系统来讲，模糊 PID 控制算法的一般表示形式为

$$u = K_p(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt}) \quad \text{式 (4.18)}$$

写成拉氏变换形式为

$$u(k) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)E(s) \quad \text{式 (4.19)}$$

数字式 PID 控制作用的离散形式为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad \text{式 (4.20)}$$

式中 K_p, K_i, K_d 分别为 PID 控制作用的^{比例}比例、积分和微分系数。采用增量形式的控制输出有

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \quad \text{式 (4.21)}$$

式中： $K_1 = K_p + K_D/T; K_2 = K_i T - K_p - K_D/T; K_3 = K_D/T$ ；T 为采样周期。

从现场的调试和运行情况来看，PID 参数 Fuzzy 自整定控制算法具有方法简便、调整灵活、计算量小、实用性强、控制效果好等特点。不仅适合于过程控制，而且也适合于实时控制。

第五章 锅炉燃烧自动控制系统仿真与应用

5.1 仿真技术及仿真软件

5.1.1 用仿真技术分析研究锅炉燃烧控制的特点

仿真也称模拟，它不是直接对实际系统进行研究，而是根据模拟理论先设计一个能反映系统的模型，然后通过模型试验求得结论，进而通过对模型结论的分析得出实际系统的结果。最初，人们在相似理论的指导下设计并构成物理模拟，或称物理仿真。例如，电力系统动态模拟就是一种研究电力系统动态特性的物理模拟系统。它把实际电力系统的各个部分，如同步发电机、变压器、输电线路、负荷等按照相似条件设计和建造并组成一个电力系统模型。用这种模型可以代替实际电力系统进行各种正常与故障状态的试验和研究。

随着实际系统的规模和复杂程度的增加，使物理模拟方法受到很大限制。与此同时，随着计算机技术和计算技术的飞速发展，出现了数学仿真。所谓数学仿真就是将实际系统的运动规律用数字形式表达，然后在计算机上做实验。数学仿真的主要步骤为建立数学模型和仿真模型，进行仿真试验。建立数学模型是用数学表达式来描述物理原理。建立仿真模型是处理数字模型与计算机之间的关系。按照使用计算机的类型不同，数学仿真又可分为用模拟计算机实现的模拟仿真、用数字计算机实现的数字仿真、用模拟计算机和数字计算机实现的混合式仿真，以及数学仿真和物理仿真组成的联合仿真等。

用仿真技术分析研究系统的特性，可以保证被研究系统的安全，且经济性好（省钱、省物、省时），可以使试验研究变得方便灵活，可以使许多无法做的实验变成为可能。由于上述许多观点，仿真技术在近 50 年中有了很大的发展。尤其是近 20 年来，随着计算机技术的迅速发展，数字计算机的性能价格比不断提高，数字计算机在我国已日益普及。在这种情况下，数字仿真技术已经成为电力系统控制工程师们必须掌握的一门技术。仿真技术对于分析研究锅炉燃烧自动控制系统的特性是非常有用的，主要用于以下两个方面。

(1) 控制系统设计与试验

设计新型控制系统时，由于所设计的控制装置尚未生产出来，因此无法通过试验研究其特性。进行新型励磁系统研究设计时，应该先提出系统的结构和参数，建立所设计系统的数学模型，在计算机上进行仿真，了解新系统的性能。如果新系统的性能不理想，则修改系统的参数或结构，然后再修改数学模型，在计算机上重新进行仿真，求出其性能。依此反复分析研究，直到对系统性能满意为止。

(2) 动态特性的分析与研究

一个已经生产出来的控制系统投入运行前,要整定许多参数。为了能适用于不同的锅炉系统,控制器的参数在应用不同的锅炉系统是需要整定的,具体的控制器参数应在投入运行前确定。这些可整定的参数整定值可以通过仿真确定。通过仿真还可以模拟系统在正常运行状态和非正常运行状态下的动态行为,以便研究系统动态特性和稳定性,也可分析系统故障的发生、发展及后果。

目前,控制系统数学仿真技术已基本成熟,也积累了一些锅炉燃烧控制系统的仿真经验。数学仿真还有一个突出的优点是可以很方便地仿真各种非线性特性控制器对系统运行的影响。

5.1.2 仿真软件

为了验证模糊控制系统在锅炉燃烧系统中应用的效果,对整个锅炉燃烧控制系统进行数学仿真。软件采用 MATLAB7.01 及其中的动态系统仿真工具箱 Simulink。

1980 年美国的 Cleve Moler 博士研制的 MATLAB 环境/语言对后来的控制理论及计算机辅助设计技术起到了巨大的推进作用。该软件出现后一直在美国 New Mexico 大学作为教学辅助软件使用,并作为面向公众的免费软件而广为流传。由于该软件使用非常容易,并提供了丰富的矩阵处理功能,所以很快引起了控制理论领域研究人员的注意,并在它的基础上开发了控制理论专门的程序集(工具箱),使之很快在国际控制界流行起来。

Mathworks 公司自 1984 年推出正式版本的 MATLAB 后,经过多年不断的更新,功能越来越强大, MATLAB 现已成为国际公认的最优秀的数学、控制等领域的应用软件之一。MATLAB 在国内大范围推广是从 MATLAB4.x 开始的。MATLAB 提供的工具箱有丰富的用户资源,涵盖了科学研究的许多门类,目前,已经有涉及数学、控制、通信、信号处理、图象处理、经济、地理等学科 20 多种 MATLAB 工具箱投入使用,比如:控制界最流行的控制系统工具箱(control system toolbox)、系统辨识工具箱(systemidentification toolbox)、信号处理工具箱(signal processing toolbox)、控制界最流行的控制系统控制箱(control system toolbox)、多变量频域设计工具箱(multivariable frequency design toolbox)和仿真环境 Simulink 等。这些工具箱的作者都是相关领域的顶级专家,应用 MATLAB 工具箱可以在很大程度上减小用户编程时的复杂程度,使 MATLAB 的应用变得更加得心应手。

MATLAB 是一种基于矩阵/数组的高级语言,它具有流程控制语句、函数、结构、数据结构、输入输出和面向对象的程序设计特性。MATLAB 工作环境集成了许多工具和程序,有工作空间内变量的输入、输出数据功能,可实现二维、三维数据可视化,图象处理功能; Simulink 是 MATLAB 的用于动态系统仿真的交互式系统。Simulink 允许用户在屏幕上绘制框图来模拟一个系统,并能动态地控制该系统,它可以处理线性、非线性、连续、离散、多变量以及多级系统^[14]。

MATLAB 提供的动态系统 Simulink，是众多仿真软件中功能最强大、最优秀的一种。它使建模、仿真算法、仿真结果分析与可视化等实现起来非常方便。它既适用于连续系统，也适用于离散系统，也适用于线性系统和非线性系统。它采用系统模块直观地描述系统典型的环节，本论文就是利用 Simulink 来进行仿真研究。

5.2 仿真调试

5.2.1 仿真模型方框图的建立

在做仿真研究时，应首先建立仿真模型方框图。根据本文在第四章讨论的控制策略，根据系统传递函数就可在 Simulink 软件环境下建立仿真模型方框图。具体做法就是从 Simulink 库中取出相应的模块放入模型界面上，用线连接好，并设置对应参数。再根据需要对控制对象和传递函数进行封装另外，对于其中模糊控制器，要先编好其对应的 S-Function 函数，然后封装起来，就完成了 Simulink 仿真模型的建立。常规 PID 控制系统仿真模型如图 5.1；模糊自整定 PID 参数控制系统仿真模型如图 5.2。

5.2.2 给定值扰动试验及结果分析

分别对常规 PID 控制系统和模糊自整定 PID 参数控制系统加给定值+3.5MPa，常规 PID 控制下的扰动响应如图 5.3 和图 5.4 所示；模糊自整定 PID 参数控制下的扰动响应如图 5.5 所示。

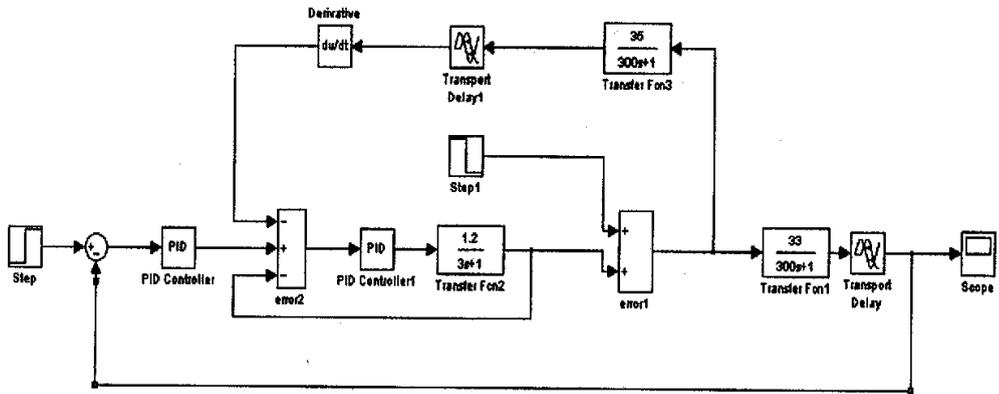


图 5.1 常规 PID 控制系统仿真模型

Fig.5.1 The simulation model of general PID control system

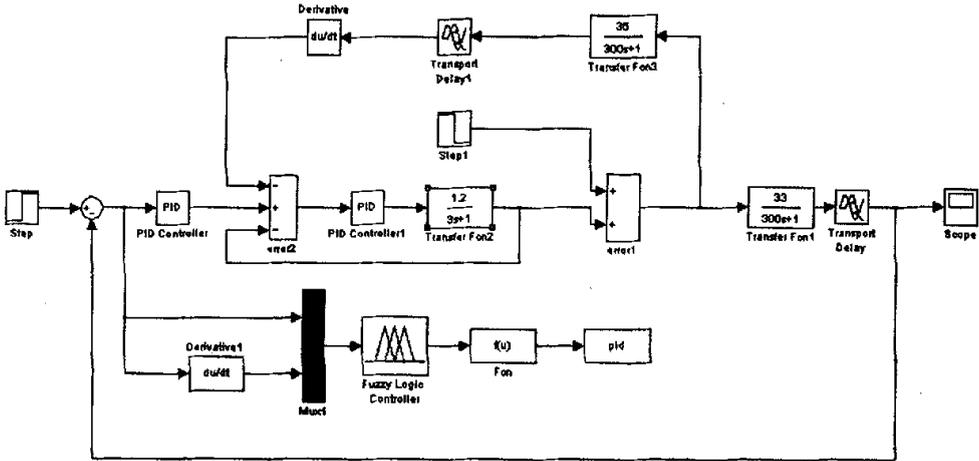


图 5.2 模糊自整定 PID 参数控制系统仿真模型

Fig.5.2 The simulation model of fuzzy adaptation PID control system

为了检验 PID 参数 Fuzzy 自整定算法在控制系统中的有效性和实用性，同时也为了与常规 PID 控制器控制性能进行比较，根据锅炉简化的数学模型，用常规 PID 控制和 Fuzzy-PID 复合控制方法进行仿真试验。把锅炉近似看作具有时滞特性的一阶惯性环节，其传递函数为

$$G(s) = \frac{k}{T_c s + 1} e^{-\tau_M s} \quad \text{式 (5.1)}$$

式中：放大系数 $k=33$ ；纯滞后时间 $\tau_M=32s$ ；惯性时间常数 $T_c=300s$ 。

针对上述被控对象，采用常规 PID 控制和 Fuzzy-PID 复合控制的仿真结果如下：采用常规 PID 控制算法，系统响应曲线如图 5.3 所示

蒸汽压力设定值为 3.5MPa，在稳态误差为 2% 的情况下，其超调量 $\delta=17.6\%$ ，调节时间 $t_s=360s$ 。

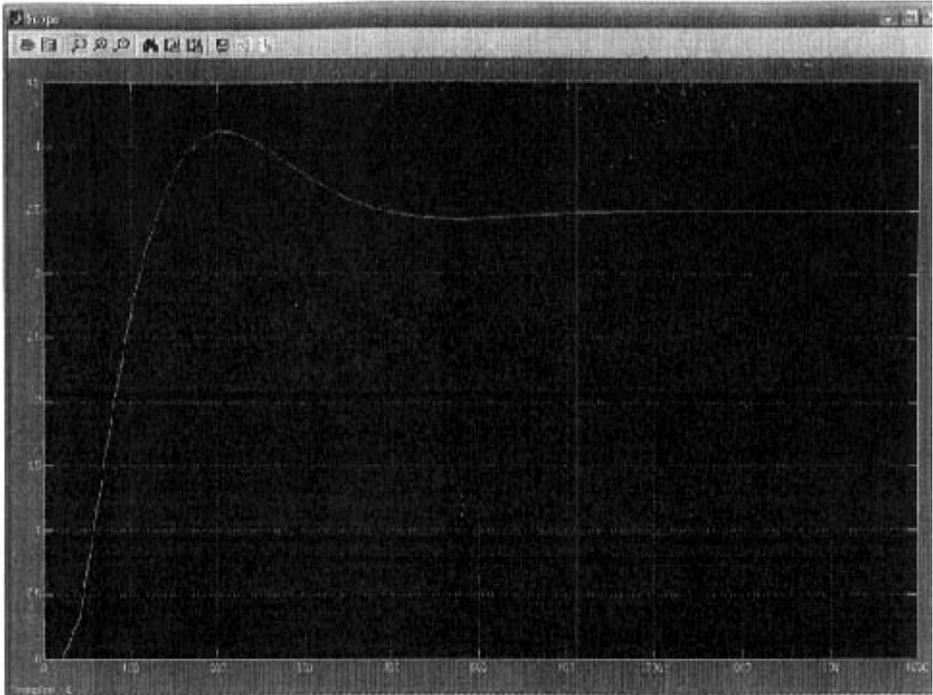


图 5.3 常规 PID 控制下的给定值扰动响应

Fig.5.3 The set value response of general PID control

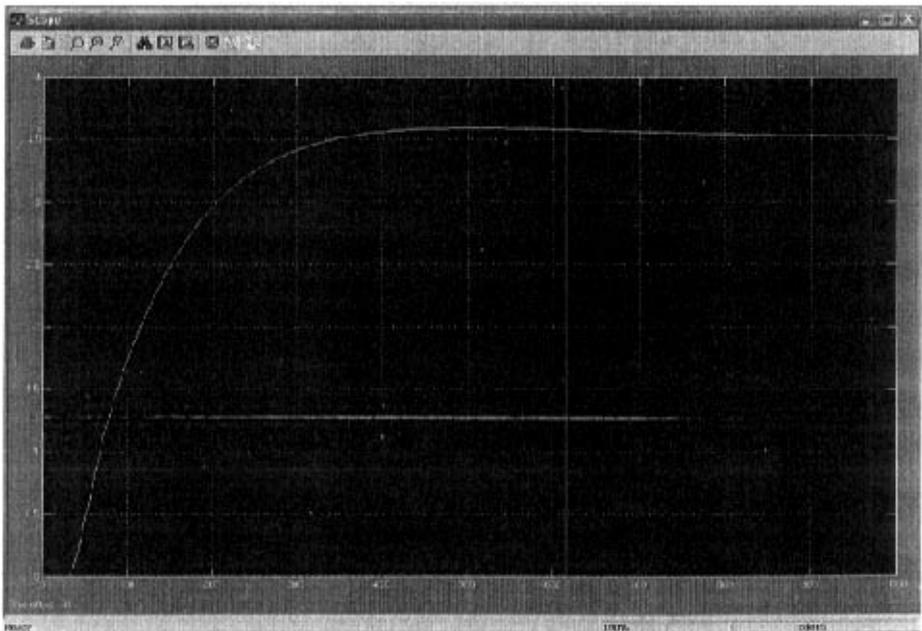


图 5.4 常规 PID 控制下的给定值扰动响应

Fig.5.4 The set value response of general PID control

若调节 PID 参数, 使 $\delta=2.5\%$ 以内时, 则 $t_s=650s$, 如图 5.4 所示。

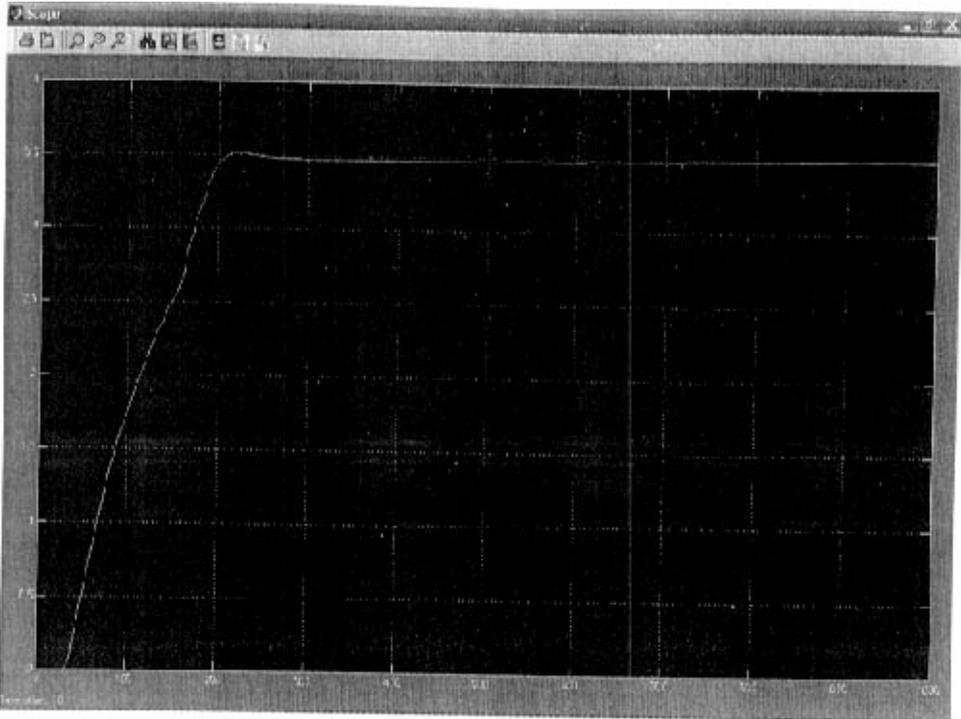


图 5.5 模糊自整定 PID 参数控制下的给定值扰动响应

Fig.5.5 The set value response of fuzzy adaptation PID control

采用 Fuzzy-PID 复合控制算法, 系统的响应曲线如图 5-5 所示,

在稳态误差为 2% 的情况下, 其超调量 $\delta=0.9\%$, 调节时间 $t_s=195s$ 。

以上仿真结果可以看出, 传统 PID 控制算法存在过度过程时间与超调量之间的矛盾。无论怎样调节 PID 的 3 个参数, 也无法解决。若要超调量小, 则过度过程时间增长; 如果要求过度过程快, 则必然出现较大的超调, 二者难以求全。而 Fuzzy-PID 复合控制算法很好的解决了这个矛盾, 过度过程的快慢几乎与超调无关, 因而可以方便灵活的改变参数, 以最快速无超调 (或很小的超调) 进入稳态。通过比较分析以上仿真结果, 在固定的给定值扰动状况下, 采用模糊自整定 PID 参数控制系统, 通过模糊调整 PID 参数可以获得更快的动态响应, 更小超调量, 有效的改善了系统的动态特性。

5.2.3 观察两种控制算法的抗干扰特性

分别对常规 PID 控制系统和模糊自整定 PID 参数控制系统加内扰+5%, 常规 PID 控制下扰动响应如图 5.5 所示; 模糊自整定 PID 参数控制下扰动响应如图 5.6 所示。

工作蒸汽压力设定值为 3.5MPa, 当系统进入稳态工作点后, 给系统加入一定量的扰动信号, 观察两种控制算法的抗干扰特性。PID 控制算法的最大偏差为 0.21MPa, 过渡过程时间为 $t_s=260s$, 其响应曲线如图 5.6 所示;

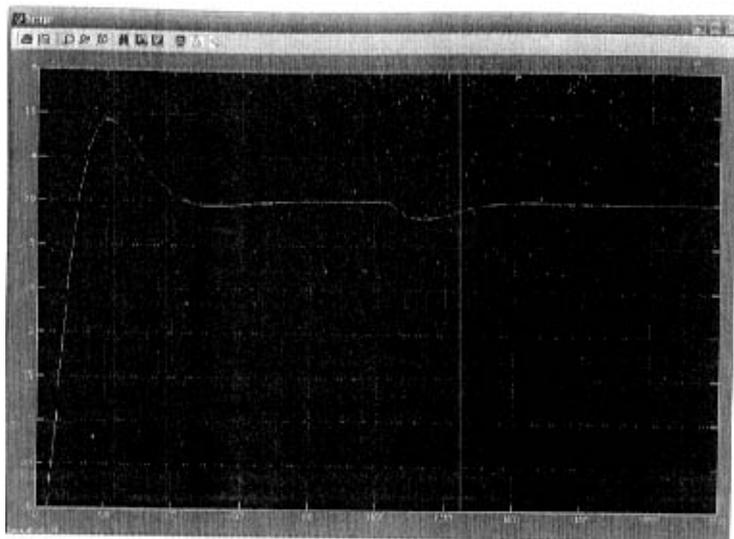


图 5.6 常规 PID 控制下的燃料量内扰响应

Fig.5.6 The charge of fuel inner disturb response of general PID control

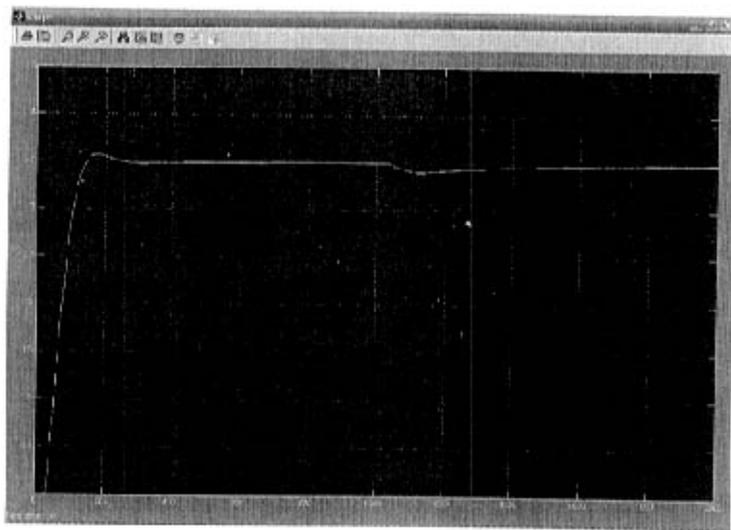


图 5.7 模糊自整定 PID 参数控制下的燃料量内扰响应

Fig.5.7 The charge of fuel inner disturb response of fuzzy adaptation PID control

而 Fuzzy-PID 控制算法的最大偏差为 0.09MPa，过度过程时间 $t_s=240s$ ，其响应曲线如图 5.7 所示。

通过比较可知，Fuzzy-PID 复合控制算法能够有效地抑制随机干扰，并在系统遇到各种干扰时，及时对控制作用进行调整，并以比常规 PID 更小的偏差和更快的速度重新进入预先设定的稳态工作点，它的抗干扰性能要优于常规的 PID 控制器。

从以上仿真结果可以看出,在相同的燃料量内扰下,常规 PID 控制系统的最大偏差为 0.21MPa,而模糊自整定 PID 参数控制系统的最大偏差仅为 0.09MPa。通过比较分析以上仿真结果,模糊自整定 PID 参数控制系统能够有效的抑制由燃料量引起的内扰,在系统遇到燃料量内扰时,系统能及时地对控制作用进行调整,并能够以较快的速度重新进入预先设定的稳态工作点。因此,模糊自整定 PID 参数控制系统的抗干扰能力要优于常规 PID 控制系统。

5.2.4 仿真调试总结

针对沈阳某厂自备电站锅炉燃烧系统,我们分别应用常规 PID 控制和模糊自整定 PID 参数控制两种控制算法进行了控制器的设计。从仿真结果来看,模糊自整定 PID 参数控制器的控制性能总体优于常规 PID 控制器。它主要体现在以下三方面:

- (1) 模糊自整定 PID 参数控制器的动态特性较好,在做给定值扰动试验时,不仅响应速度快,而且超调量小;
- (2) 模糊自整定 PID 参数控制器具有良好的稳态品质,稳态过程没有震荡;
- (3) 模糊自整定 PID 参数控制器系统的抗干扰能力强,在进行燃料量内扰试验时偏差很小,且回到稳态工作点的时间短。对生产现场的干扰具有较好的抑制作用。

5.2.5 现场应用及结果

应用于沈阳某自备电站的 35t/h 汽包锅炉燃烧自动控制系统中的模糊控制表如表 5.1,其它调整如仿真过程,不再叙述。表 5.1 模糊控制表

Table 5.1 fuzzy control table

注:单位 1×10^{-6}

K		误差 e				
		NM	NS	0	PS	PM
变化率 ec	NM	5.65	5.61	5.58	5.53	5.5
	NS	5.61	5.59	5.53	5.5	5.53
	0	5.58	5.53	5.5	5.53	5.58
	PS	5.53	5.5	5.53	5.6	5.61
	PM	5.5	5.53	5.58	5.61	5.65

$T_f=5s$

电站锅炉蒸汽压力控制系统实际输出曲线如图 5.9、图 5.10 所示。

图 5.9、图 5.10 中的横坐标:时间(小时/分/秒)。纵坐标(由左向右):蒸汽压力实际值(0~6MPa),从图 5.9 可以看出,手动调节的蒸汽压力超调量比较大($\pm 0.5MPa$);图 5.10 中是引入了单参数模糊 PID 控制后的变化曲线,系统具有比较理想的稳态品质,系统的抗干扰能力增强,对生产现场的干扰有较好的抑制作用,超调量小,水位的变化幅度能控制在较小的范围内($\pm 0.2MPa$)。

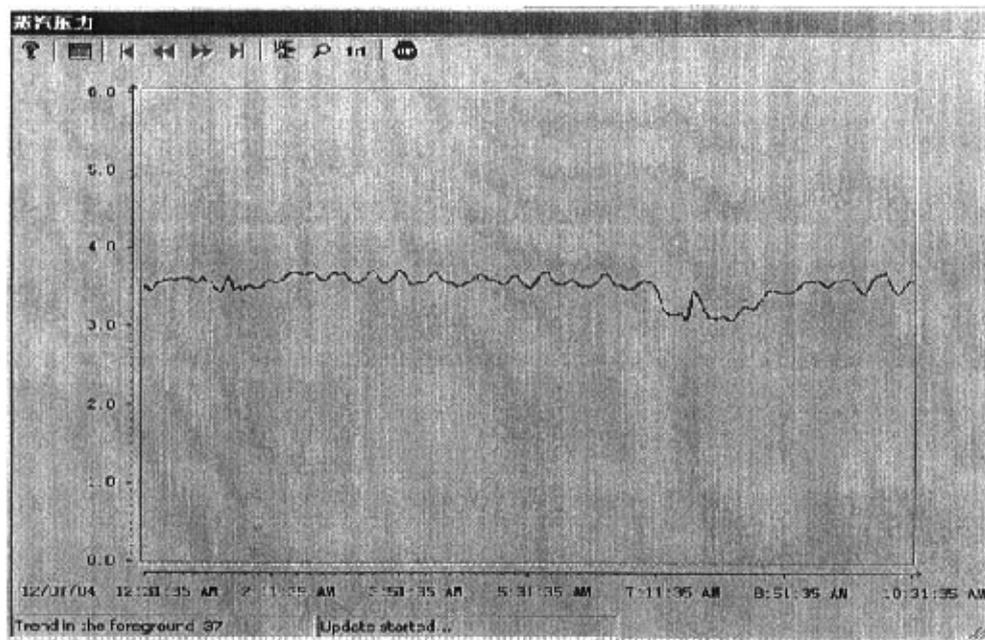


图 5.9 手动调节时的实时蒸汽压力曲线图

Fig.5.9 steam pressure curve diagram of hand operations online

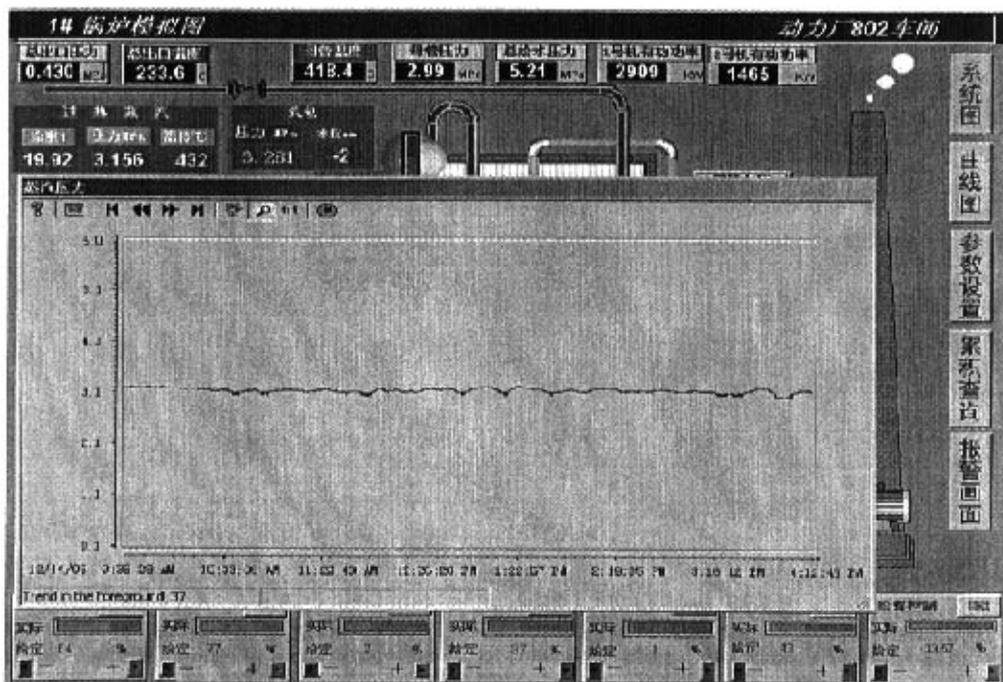


图 5.10 模糊自整定 PID 调节的实时蒸汽压力曲线图

Fig.5.10 steam pressure curve diagram of fuzzy self-adaptation PID conditioning online

第六章 控制系统上位机和下位机的设计

下面对选用的 PLC 以及组态工具、编程语言和上位机软件作简要介绍。

6.2 下位机的设计

6.2.1 可编程控制器介绍

可编程控制器 (PLC) 是在计算机、通信技术和继电器控制技术的基础上开发起来的, 现已广泛应用于工业控制的各个领域。它以微处理器为核心, 用编写的程序进行逻辑控制、定时、计数和算术运算等, 并通过数字量和模拟量的输入/输出来控制机械设备或生产过程, 同时还具备 PID 调节、通信联网、故障自诊断及 DCS 生产监控等功能。PLC 的主要特点有: [15]

(1) 高可靠性

在硬件方面, 由于采用性能优良的开关电源, 并且对采用的器件进行严格的筛选, 加上合理的系统结构, 最后加固、简化安装, 因此 PLC 具有很强的抗振动冲击功能; 无触电的半导体电路来完成大量的开关动作, 就不会出现继电器控制系统中的器件老化、脱焊、触点电弧等问题; 所有的输入/输出 (I/O) 接口都采用了光电隔离措施, 使外部电路和 PLC 内部电路能有效的进行隔离; PLC 模块式的结构, 可以在其中一个模块出现故障时迅速的判断出故障的模块并进行更换, 这样就能尽量缩短系统的维修时间。

在软件方面, PLC 的监控定时器可用于监视执行用户程序的专用运算处理器的延迟, 保证在程序出错和程序调试时, 避免因程序错误而出现死循环; 当 CPU、电池、I/O 口、通信等出现异常时, PLC 的自诊断功能可以检测到这些错误, 并采取相应的措施, 以防止故障扩大; 停电时, 后备电池和正常工作一样, 进行对用户程序及动态数据的保护, 确保信息不丢失。

(2) 应用灵活、使用方便

模块化的 PLC 设计, 使用户能根据自己控制系统的大小、工艺流程和控制要求等来选择自己做需要的 PLC 的模块并进行资源配置和 PLC 编程。这样, 控制系统就不再需要大量硬件装置, 用户只需要根据控制需要设计 PLC 的硬件配置和 I/O 的外部接线即可。而在 PLC 控制系统中, 当控制要求改变时, 不改动 PLC 外部接线, 只需修改程序即可。

(3) 面向控制过程的编程语言

PLC 的编程语言采用继电器控制电路的梯形图语言, 清晰直观。虽然 PLC 是以微处理器为核心的控制装置, 但是它不需要用户具有很强的程序设计能力, 只要用户具

备一定的计算机软、硬件知识和电器控制方面的知识即可。

(4) 易于安装、调试、维修

在安装时,由于 PLC 的输入/输出接口已经做好,因此可以直接和外部设备相连,而不再需要专用的接口电路。而且 PLC 的软件功能取代了原来继电器控制中的中间继电器、计时器、计数器等一些器件,所以硬件安装上的工作量相应减少。

PLC 的调试可先在实验室模拟完成,模拟调试完成后再现现场安装、调试。这样可以避免可能在现场会出现的一些问题,从而缩短调试周期。

在维修方面,PLC 完善的诊断和显示功能,可以通过模块上的显示或编程器等很容易地找出故障的模块,而且由于模块化设计,因此只需要对出错的模块进行更换即可。

(5) 网络功能强大

PLC 具有强大的网络功能。PLC 不仅能做到远程控制、进行 PLC 内部通信与上位机进行通信,还具备专线上网、无线上网等功能。这样,PLC 就可以组成范围很大的控制网络,整个工厂,甚至整个系统都可以实现自动化,从而提高生产效率。

(6) 体积小,重量轻

由于 PLC 内部电路主要采用微电子技术设计,因此它具有体积小、重量轻等特点。

正是由于 PLC 具有以上优点,在全世界工业控制领域范围内的各个著名公司都在积极开发本公司的 PLC 产品。目前,全世界的 PLC 生产厂家约有 200 家,生产 300 多个品种主要集中在美国、德国、日本等多家公司。其中德国和美国是以大型 PLC 而闻名,而日本则主要生产小型 PLC。德国西门子公司与 20 世纪 80 年代初开发生产 U 系列 S5 PLC。1995 年又推出 S7 系列 PLC。S7 系列 PLC 以其国际化、高性能、安装空间小以及良好的 WINDOWS 用户界面等优势使西门子的 SIMATIC S5 逐渐过渡到 SIMATIC S7。在过程控制领域,西门子公司又提出 PCS7 (过程控制系统 7) 概念,将其优势的 WINCC (Windows Control Center)、PROFIBUS COROS (工业现场总线监控系统)、SINEC (西门子工业网络) 及控制调节技术融为一体。现在,西门子公司又提出 TIA (全集成自动化) 概念,将 PLC 技术溶于全部自动化领域。最新的 SIMATIC 产品为 SIMATIC S7、M7 和 C7 等几大系列。S7 系列可编程控制器分为 S7-200、S7-300、S7-400 等几个子系列,分别为 S7 系列的小、中、大型系统^[16]。

(7) 本工程一台锅炉主要硬件配置如下:

CPU 选择	CPU314;	电源模块	PS305;
模拟 I/O	SM331 8 个;	数字 I/O	SM321 8 个;
功能模块	FM;	接口模块	IM365;
PC 机	一台;		

6.2.2 S7-300 与梯形逻辑说明

PLC 的组态工具及编程语言——STEP 7/梯形图语言 (LAD)

S7-300 可编程序控制器是西门子公司于 20 世纪 90 年代中期推出的新一代 PLC, 它采用模块化结构设计, 用户可根据自己的应用要求来选择正确的模块, 它具有无排风扇设计, 易于实现分布, 用户友好等特点, 具有最高级的工业兼容性, 允许最高环境温度达 60℃, 安装方便, 维护简单。S7-300 通用型的特点是循环周期短, 处理速度快, 指令集功能强大, 产品设计紧凑, 模块化结构, 适合密集安装。有不同档次的 CPU, 各种各样的功能模块和 I/O 模块可供选择。S7-300 的模板之间用 U 型连接器连接, 可利用 MPI、PROFIBUS 和工业以太网组成网络, 使用 STEP7 组态工具可以对硬件进行组态和设置, CPU 的智能化诊断系统可连续监控系统功能并记录错误和特定的系统事件, 多级口令保护可使用户有效保护其专用技术, 防止未经允许的拷贝及修改。

STEP 7 是用于 SIMATIC PLC 组态和编程的标准软件包。它是 SIMATIC 工业软件的组成部分。用 STEP 7 创建自动化解决方案, 完成一系列基本任务: 为功能模块和通讯处理器赋值参数; 强制和多处理器模式; 全局数据通讯; 使用通讯功能模块的事件驱动数据传送; 组态连接等^[16]。

PLC 的编程语言主要有以下几种: 梯形图、指令表、逻辑功能图和高级语言。绝大部分 PLC 是用梯形图和语句表编程的。梯形图是一种图形语言, 它沿用了传统的继电器接触器控制中的继电器触电、线圈、串并联等术语和图形符号, 并且还增加了许多功能强大而又使用灵活的指令符号。梯形图比较直观, 对于熟悉继电器接触器控制系统的人来说, 也容易接受, 世界上各厂家的 PLC 都把梯形图作为第一用户编程语言。

6.3 上位机的设计

6.3.1 WINCC6.0 说明

西门子视窗控制中心 SIMATIC WinCC (Windows Control Center) 是 HMI/SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition 监控和数据采集)软件中的后起之秀, 它集成了 SCADA、组态、脚本语言和 OPC 等先进技术, 为用户提供了 Windows 操作系统环境下使用各种通用软件的功能。WinCC 继承了西门子的全集成自动化产品的技术先进和无缝集成的特点。1996 年进入世界工控组态软件市场, 当年就被美国 Control Engineering 杂志评为最佳 HMI 软件, 以最短的时间发展成第三个在世界范围内成功的 SCADA 系统; 而在欧洲, 它无可争议地成为第一。

WinCC 运行于个人计算机环境, 可以与多种自动化设备与控制软件集成, 具有丰富的设置项目、可视窗口和菜单选项, 使用方式灵活, 功能齐全。用户在其友好的界面下进行组态、编程和数据管理, 可形成所需的操作画面、监视画面、控制画面、报警画面、实时趋势曲线、历史趋势曲线和打印报表等。WinCC 的另一个特点在于其整

体开放性，它可以方便地与各种软件 and 用户程序组合在一起，建立友好的人机界面，满足实际需要。用户也可将 WinCC 作为系统扩展的基础，通过开放式接口，开发其自身需要的应用系统。

在设计思想上，SIMATIC WinCC 秉承西门子公司博大精深的企业文化理念，性能最全面、技术最先进、系统最开放的 HMI/SCADA 软件是 WinCC 开发者的追求。WinCC 是按世界范围内使用的系统进行设计的，从一开始就适合于世界上个主要制造商生产的控制系统，如 A-B, Modicon, GE 等，并且通讯驱动程序的种类还在不断增加。通过 OPC(OLE for Process Control)的方式，WinCC 还可以与更多的第三方控制器进行通讯。

WinCC V6.0 采用标准 Microsoft SQL Server2000(WinCC V6.0 以前版本采用 Sybase)数据库进行生产数据的归档，同时具有 Web 浏览器功能，可使经理、厂长在办公室内看到生产流程的动态画面，从而更好地调度指挥生产，是工业企业中 MES(Manufacturing Execution Systems)和 ERP(Enterprise Resource Planning)系统首选的生产实时数据平台软件。

作为 SIMATIC 全集成自动化系统的重要组成部分，WinCC 确保与 SIMATIC S5, S7 和 505 系列的 PLC 连接的方便和通讯的高效；WinCC 与 STEP7 编程软件的紧密结合缩短了项目开发的周期。此外，WinCC 还有对 SIMATIC PLC 进行系统诊断的选项，给硬件维护提供了方便。

6.3.2 WinCC 系统构成

WinCC 基本系统是很多应用程序的核心。它包含以下九大部件：^[17]

(1) 变量管理器

(tag management)管理 WinCC 中所使用的外部变量、内部变量和通讯驱动程序。

(2) 图形编辑器

(graphics designer)用于设计各种图形画面。

(3) 报警记录

(alarm logging)负责采集和归档报警消息。

(4) 变量归档

(tag logging)负责处理测量值，并长期储存所记录的过程值。

(5) 全局脚本

(global script)是系统设计人员用 ANSI-C 及 Visual Basic 编写的代码，以满足项目的需要。

(6) 用户管理器

(user administrator)用来分配、管理和监控用户对组态和运行系统的访问权限。

(7) 交叉引用表

(cross-reference)负责搜索在画面、函数、归档和变量、函数、OLE 和 ActiveX。

6.4 电站锅炉系统组态

使用图形编辑器 (graphics designer) 设计系统图形画面。

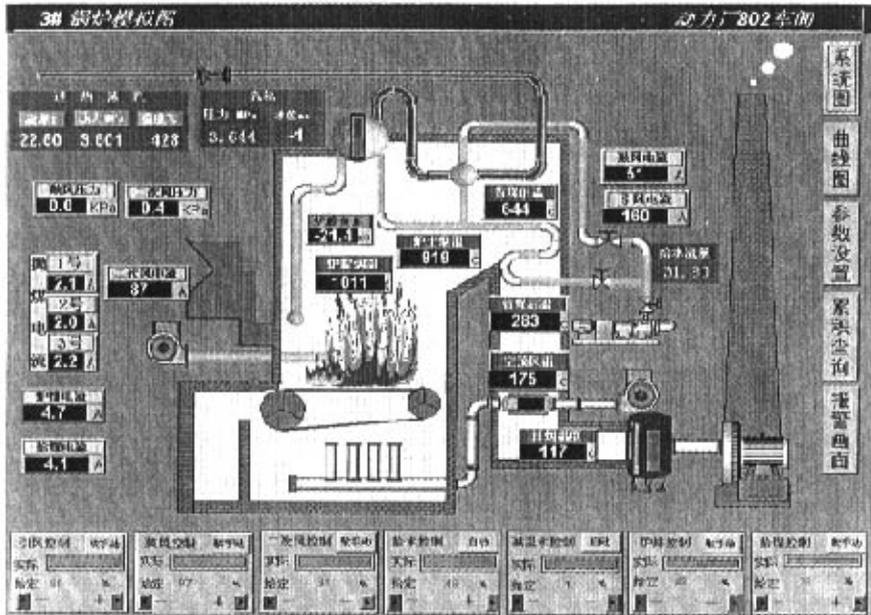


图 6.1 上位机画面 1—系统图

Fig.6.1 human-computer interface 1-system drawing

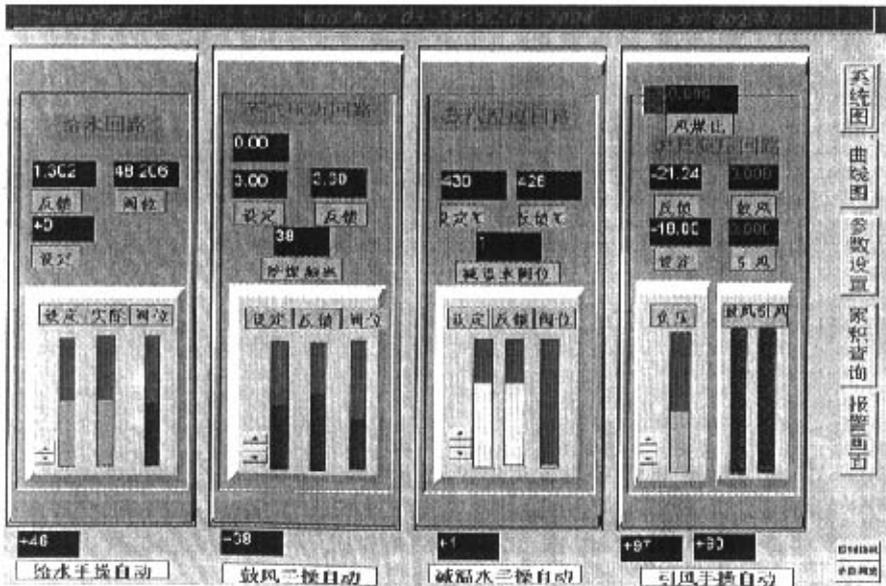


图 6.2 上位机画面 2—参数设置

Fig.6.2 human-computer interface 2-parameter setting

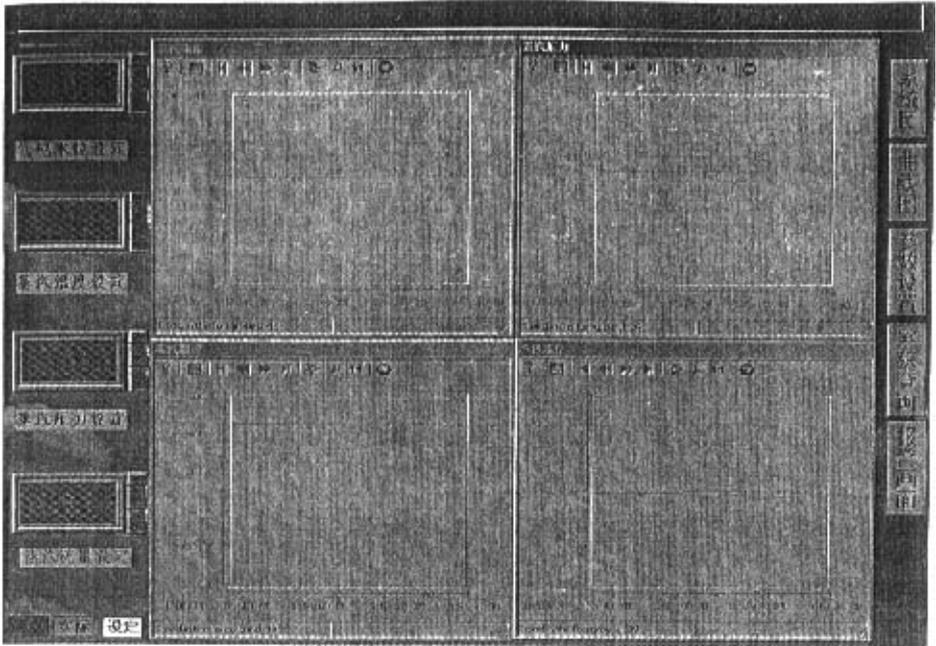


图 6.3 上位机画面 3—曲线图

Fig.6.3 human-computer interface 3-curve drawing

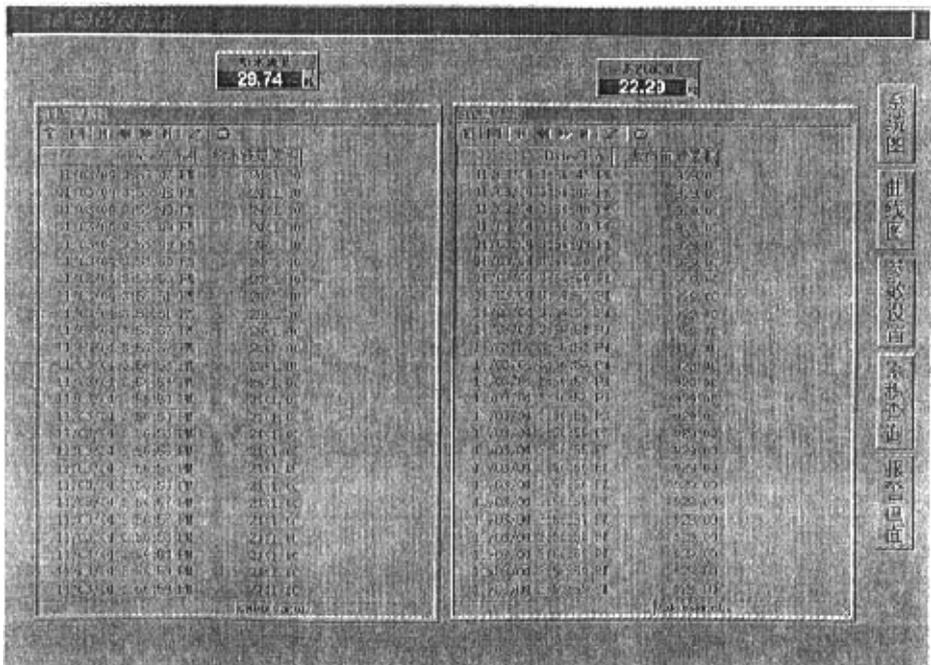


图 6.4 上位机画面 4—累积量查询

Fig.6.4 human-computer interface 4-cumulant query

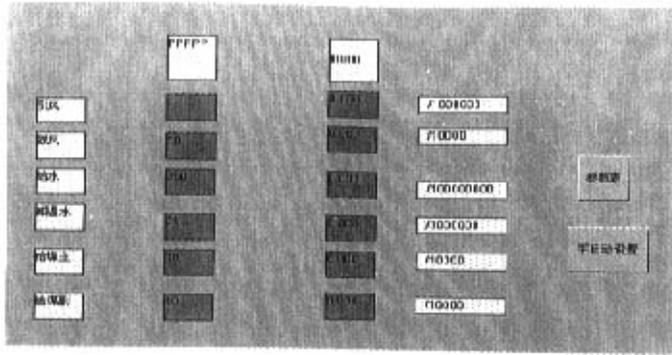


图 6.5 上位机画面 5—PID 调节

Fig.6.5 human-computer interface 5-PID adjust

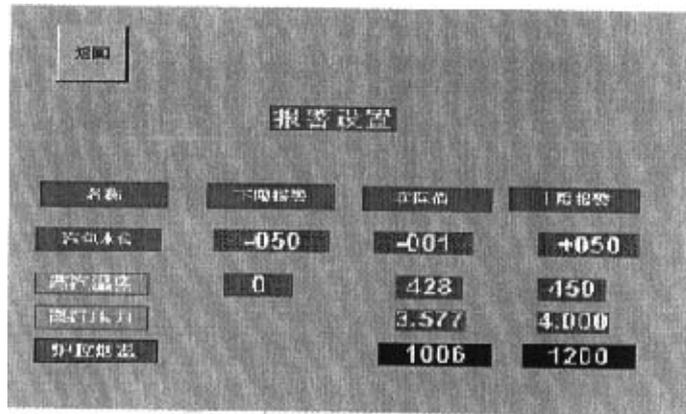


图 6.6 上位机画面 6—报警设置

Fig.6.6 human-computer interface 5-alert set

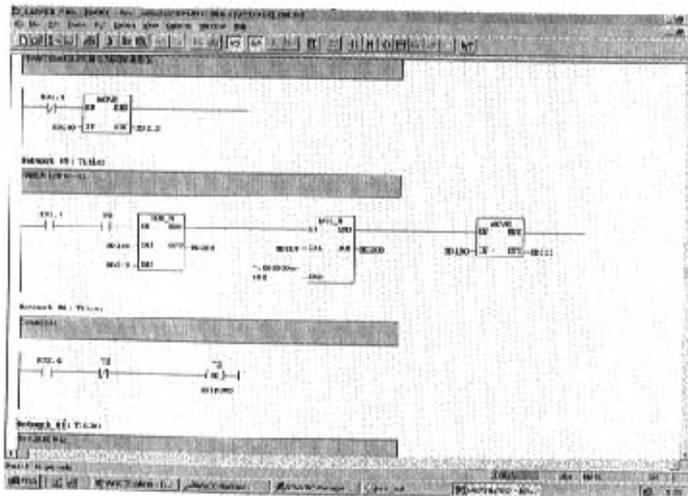


图 6.7 上位机画面 7—LAD

Fig.6.7 human-computer interface 7- LAD

第七章 结论

本文针对该厂锅炉燃烧系统的特点,以锅炉燃烧系统为控制对象进行了分析,提出了针对该锅炉燃烧系统的自动化改造方案。首先对控制系统的硬件进行了初步设计,并将常规 PID 控制理论应用于锅炉燃烧系统的控制中。但是考虑到锅炉燃烧系统本身具有很大的不确定性,锅炉燃烧系统具有较大的滞后性、非线性、时变性的控制对象,单纯采用常规 PID 控制或模糊控制都不会取得较好的控制效果。大量的理论研究和工程实践都充分证明了这一点。针对该控制系统采用模糊自整定 PID 参数控制器是一个比较好解决方案。它能够发挥模糊控制鲁棒性强、动态响应好、上升时间快、超调小的特点,又具有 PID 控制器的动态跟踪品质和稳态精度。

模糊自整定 PID 参数控制器的设计主要包括:第一,建立了模糊逻辑控制器的结构模型;第二,确立了模糊输入/输出量,并给出了模糊输入/输出量的隶属函数模型;第三,提出了相应的模糊控制规则和算法;第四,在对锅炉燃烧系统建立了数学模型的基础上,对模糊自整定 PID 参数控制器应用 MATLAB7.01 中的 Simulink 软件进行了综合算法仿真。

通过应用 MATLAB7.01 中的 Simulink 软件对常规 PID 控制器和模糊自整定 PID 参数控制器进行仿真研究,模糊自整定 PID 参数控制器的控制性能总体优于常规 PID 控制器。首先,模糊自整定 PID 参数控制器的动态特性较好,不仅响应速度快,而且超调量小;其次,模糊自整定 PID 参数控制器具有良好的稳态品质,稳态过程没有震荡;最后,模糊自整定 PID 参数控制器系统的抗干扰能力增强,对生产现场的各种噪声和干扰具有较好的抑制作用。

本文将传统 PID 控制器和模糊自整定 PID 参数控制器应用于锅炉燃烧系统的控制中。通过对模糊自整定 PID 参数控制器在锅炉燃烧控制系统中应用的研究探讨,取得了一些应用结论。通过研究所获得的结论从控制理论上分析也是完全可行的,并已经应用于工程的设计和施工调试,本次研究对提高火力发电厂锅炉的运行稳定性和抗干扰能力都有积极的作用,对解决工程实践中的类似问题也具有直接的理论指导意义。

在本文中为模糊自整定 PID 参数控制器应用于锅炉燃烧系统提供了理论基础和应用方法,但是对于如何进一步完善模糊控制规则,提高它的控制精度,如何完善控制系统硬件,把该理论应用于其它各种类型锅炉等相关问题,还需要继续深入研究。

参考文献

1. 王洪国. 自动控制技术在工业锅炉上的应用[J]. 云南冶金, 1999,28(3): 10~13
2. 边立秀, 周俊霞等. 热工控制系统 [M], 北京: 中国电力出版社, 2002, 1—20
3. 王永征. 工业锅炉计算机监控系统的设计[J]. 山东建筑工程学院学报, 2000,15(3):34~37
4. 罗万金. 电厂热工过程自动调节 [M], 北京: 中国电力出版社, 1991, 18—26
5. 孙庚山, 兰西柱. 工程模糊控制[M]. 北京:机械工业出版社,1995,4~10
6. 张化光, 何希勤. 模糊自适应控制理论及其应用 [M], 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002, 297—306
7. 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论 [M], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004, 254—341
8. 刘金琨. 先进 PID 控制与 MATLAB 仿真 [M], 北京: 电子工业出版社, 2004, 115—129
9. 张恩勤, 施颂椒, 翁正新. 模糊控制与 PID 控制方法的比较 [J], 上海交通大学学报, 1999, 33 (4): 501-503
10. 关学忠, 高杉, 曾凡军. 锅炉燃烧器模糊—PID 复合控制器的设计 [J], 自动化技术与应用, 2004,15(1):45-51
11. 刘国荣, 阳宪惠. 模糊自适应 PID 控制器 [J], 控制与决策, 1995,10 (6): 559-562
12. 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M], 西安: 西北工业大学出版社, 1999,67-72
13. 杨辉, 王金章. 模糊控制技术及其应用[M], 南昌: 江西科学技术出版社, 1997,32-34
14. 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现 [M], 北京: 电子工业出版社, 2005,194-260
15. 王常力, 廖道文. 集散型控制系统的设计与应用 [M], 北京: 清华大学出版社, 1993, 297-333
16. 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 深入浅出西门子 WINCC V6.0 [M], 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004
17. 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 深入浅出西门子 S7—300PLC [M], 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004
18. 李遵基. 热工自动控制系统 [M], 北京: 中国电力出版社, 1997, 139—180
19. 张栾英, 孙万云. 火电厂过程控制 [M], 北京: 中国电力出版社, 2000, 59-81
20. 高伟. 计算机控制系统 [M], 北京: 中国电力出版社, 2000, 4-14
21. 黄焕春. 发电厂热力设备 [M], 北京: 水利电力出版社, 1985, 88-120
22. 金以慧. 过程控制 [M], 北京: 清华大学出版社, 1998
23. 易继铭, 侯媛彬. 智能控制技术 [M], 北京: 北京工业大学出版社, 1999

24. 戴绪愚. 自寻优控制 [M], 北京: 科学出版社, 1986, 18-57
25. 廖鸿培. 发电厂的计算机控制 [M], 北京: 水利电力出版社, 1987
26. 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用 (第三版) [M], 广州: 华南理工大学出版社, 2002
27. 孙海维. SIMATIC 可编程控制器及应用 [M], 北京: 机械工业出版社, 2005
28. 周怀春, 韩才元. 电站燃煤锅炉燃烧计算机控制问题探讨 [J], 热能动力工程, 1994, 9 (2): 111-116
29. 尹尔为. 煤粉锅炉燃烧系统的模糊控制研究 [J], 工业控制计算机, 1994, 4: 13-15
30. 张万忠. 基于可编程控制器的模糊自学习锅炉控制系统 [J], 自动化仪表, 1994, 2 (26): 54-56
31. 李文学, 李慧, 张德江, 许春光. 电厂锅炉燃烧优化控制系统的设计 [J], 光学精密工程, 2004, 2 (12): 240-243
32. 张艳, 李少远. 热电厂 75t/h 循环流化床锅炉自动控制系统的设计与实现 [J], 高技术通讯, 2004, 17: 74-78
33. 周洪, 刘海波. 模糊控制在锅炉燃烧系统中的仿真研究 [J], 热力发电, 2005, 1: 9-11
34. 胡一倩, 吕剑虹等. 模糊控制在火电厂热力过程自动控制中的应用 [J], 工业控制计算机, 2002, 15(4): 25-27
35. 陈新华. 链条锅炉蒸汽压力模糊控制系统的分析和研究 [J], 山东矿业学院学报, 1999, 18 (4): 56-59
36. K J Astrom, C C Hang, P Persson. Towards Intelligent PTD Control Automatic [J], 1998, 28 (1): 83-87
37. Kickert, W. J. M. and Matndani, E. H. Analysis of a fuzzy logic controller, Fuzzy Sets and Systems [J], 1998 (1)
38. 尹尔为, 丁永和, 夏新民. 锅炉燃烧系统的模糊控制研究 [J], 洛阳工学院学报, 1994, 15 (2): 83-87
39. 李明, 徐向东, 吕泽华. 链条锅炉模糊控制研究 [J], 清华大学学报, 1998, 38 (4): 86-89
40. 宋清昆, 满春涛, 吕宁. 链条炉排锅炉燃烧系统动态自寻优 [J], 哈尔滨理工大学学报, 1998, 33 (1): 56-59
41. 陈冬林. 工业锅炉微机控制的仿真研究 [D], 武汉: 华中理工大学, 1988
42. Elena Grassi and Kostas Tsakalis .PID Control Turning by Frequency Loop-Shapeing: Control [M]. IEEE Trans. On Application to Diffusion Control Systems Tech. 2000 Furance Temperature.
43. Kundu, K.M, Banejee, D. Bhaduri, D. Theoretical Analysis On Flame Stabilization by

- a Bluff-Body.[J], Combustion Science. and Technology 1977
44. Kickert, W. J. M. and Matndani, E. H. Analysis of a fuzzy logic controller, Fuzzy Sets and Systems[J], 1998 (1): 56-59
45. Lopez, A.M. Murrill, P.W., Smith, C.L., Tuning PI and PID Digital Contereollers, Instruments and Control systems, 1969, 429(2)
46. Tu Kuo-Yang, Lee Tsu-Tian, Wang Wen-jieh. Design of a multilayer fuzzy logic controller for multiinput multioutput systems[J], Fuzzy Sets and Systems, 2000, 111(2): 199~214
47. Glower J S, Munighan J. Designing fuzzy controllers from a variable structure Standpoint[J], IEEE Trans on Fuzzy System, 1997, 5(1): 138—144

致 谢

本文写作的全过程自始至终都得到了导师于锡纯教授的悉心指导。在论文的写作研究阶段，引导我充分运用实践经验，理论与实践相结合，并给我提供了宝贵的技术资料 and 耐心的理论指导。

在这两年半的学习、生活和课题研究中，于锡纯老师给予我极大的支持和鼓励，他无微不至的关怀和教导，将给予我巨大的力量，令我终生受益。尤其在我硕士学位论文写作期间，从选题、资料搜集、草拟提纲直至最终定稿，于锡纯老师更是为我倾注了大量的心血，才使我的论文顺利完成。于锡纯治学严谨，追求创新，为人正直，胸襟宽广，威严中饱含着慈祥，尽显大家风范！于锡纯老师的品格时刻激励和鞭策着我！在此，谨向恩师于锡纯表达我最诚挚的感谢！

在攻读硕士学位期间，东北大学信息科学与工程学院的老师们也给予我大力的支持和帮助，对我论文的完成提出了许多宝贵的意见，在此，也向他们表达深深的谢意！

同时感谢答辩委员会的各位老师给予本文的指导。在我漫长的人生之路上，您们的教诲，将是我行囊里永远的珍藏！

在论文的写作过程中，也得益于同学们的帮助。同学姜广田、姜文佳、刘航、曲听和郎伟明为我提供了论文写作必备资料，对本文的形成起着至关重要的作用，在此对他们一并表示感谢！

最后向给予无私支持和帮助的父母、妻子、哥哥等表示感谢。

再一次感谢给予我支持和帮助的老师、同学和亲人们！