

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

高炉热风炉控制系统的研究与应用

作者姓名： 史东磊

指导教师： 关守平 教授 东北大学信息科学与工程学院

辛鹏飞 高级工程师 首钢迁安钢铁集团有限公司

申请学位级别： 硕士 学 科 类 别： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

论文提交日期： 2011 年 11 月 论文答辩日期： 2011 年 12 月

学位授予日期： 答辩委员会主席： 王建辉

评 阅 人： 刘永军 徐林

东 北 大 学

2011 年 11 月

A Thesis in Control Engineering



Study and Application of Hot-blast Stove Control System

By Shi Donglei

**Supervisor : Professor Guan Souping
Senior Engineer Xin Pengfei**

Northeastern University

November 2011

独创性声明

本人声明，所提交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 史东磊

日期： 2011.12.24

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 一年 一年半 两年

学位论文作者签名： 史东磊

导师签名：

签字日期： 2011.12.24

签字日期 2011.12.24

高炉热风炉控制系统的研究与应用

摘 要

高炉热风炉燃烧过程是一种复杂的工业过程，具有多变量、非线性、大时滞、时变、难以建立数学模型等控制难点。空燃比和煤气流量是影响热风炉燃烧过程的重要工艺参数，如何确定合适的煤气流量和空气流量，保证热风炉的蓄热效率，使热风炉处于最优的燃烧状态，是热风炉燃烧过程自动控制的关键性问题。

高炉热风炉燃烧过程控制复杂，对各种参数，包括温度、流量和压力等的在线检测的前提下，分别对热风炉进行分阶段控制，同时针对国内钢铁企业热风炉送风温度不高、燃烧煤气热值低、缺乏检测设备的普遍现状，通过分析热风炉内气体流动的特点，针对不同的工况，采用模糊控制和专家经验相结合的方式，建立调节阀开度与煤气流量之间的关系模型，实时优化控制煤气流量和空气流量跟随空燃比和煤气流量的优化设定值，使热风炉处于最佳燃烧状态。

论文以首钢迁安钢铁有限公司铁厂 2 号高炉热风炉控制系统为研究背景，在查阅了大量国内外相关文献的基础上，综述了控制技术的发展历程，对热风炉自动控制方法进行了深入的研究。主要完成了以下几个方面的工作：

概述了控制原理，分析了影响燃烧的诸项因素，综合介绍了热风炉燃烧控制技术及发展趋势。介绍了热风炉燃烧控制的原理，论述了热风炉燃烧的控制方法以及控制参数的意义。热风炉燃烧控制是改善供高炉热风质量的重要手段之一。将模糊控制理论引入到热风炉自动控制中，建立起热风炉燃烧模型，取得了很好的效果，对提高热风质量起到了重要作用。完成了热风炉燃烧系统设计，实现了热风炉燃烧的模糊控制，并且在实际中进行应用。运行结果表明，所设计的热风炉燃烧控制器性能良好。

关键词：热风炉；控制；空燃比；模糊控制

Study and Application of Hot-blast Stove Control System

Abstract

The hot-blast stove burning process is a complex industrial process. The features of multi-variable, nonlinear large time-delay, changeable parameters, and hard in modeling are the major control challenges in the hot-blast stove burning process. The ratio between air flux and coal-gas flux is a key factor affecting the burning process. It is the key problem to set up proper coal-gas flux and air flux to ensure the hot-blast stove burning efficiency.

The burning process for hot-blast stove is of complexity and there are many parameters need to monitor. To measure these parameters including temperature, gas flux and gas pressure and phases control. Through profound research on the characters of gas flowing in hot-blast stove, an expert and fuzzy control model based on the relationship between the valve executing and the gas flux is established to adjust valve executing when the gas flux varies. So that, hot-blast can be maintained the optimal burning process.

Shougang Iron and Steel Co. paper Qian'an Iron Works No. 2 hot-blast stove control system for the study background, access to a large number of relevant literature, based on an overview of control technology development process, the stove automatic control method for in-depth research. Mainly accomplished the following areas:

An overview of control theory, analysis of the factors affecting the combustion, an overview of the stove combustion control technology and trends. Introduced of the principle of hot air furnace combustion control, discusses the stove automatic burn control methods and control parameters of significance. Hot-blast stove for combustion control is to improve the quality of hot-blast important means of hot air. Fuzzy control theory is introduced to the stove automatic combustion control, automatic combustion model to establish a hot stove, and achieved good results, to improve the quality of hot air played an important role. Completed the stove automatic combustion system design, implementation of automated burning stove fuzzy control, and applied in practice. The results show that the design of the stove burner control performance is good.

Keywords: hot-blast stove; control; air-fuel ratio; fuzzy control

目 录

独创性声明	I
摘 要.....	II
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题研究的背景及意义.....	1
1.2 热风炉燃烧系统的发展状况.....	1
1.2.1 国内热风炉燃烧系统的研究及发展状况.....	1
1.2.2 国外热风炉燃烧系统的研究及发展状况.....	2
1.3 模糊控制技术的发展历史及其在燃烧控制中的应用.....	3
1.3.1 模糊控制技术的发展历史背景.....	3
1.3.2 模糊控制的特点.....	4
1.3.3 模糊控制技术在燃烧控制中的应用.....	5
1.4 论文的主要工作.....	6
第 2 章 系统描述与控制系统总体设计.....	9
2.1 热风炉系统的基本概念.....	9
2.1.1 热风炉系统工艺简介.....	9
2.1.2 迁钢水平现状及面临的问题.....	11
2.1.3 研发的目标.....	16
2.2 控制系统的总体设计.....	16
2.2.1 控制思想及控制方法.....	16
2.2.2 基本结构和原理.....	22
2.3 本章小结.....	23
第 3 章 热风炉控制系统的硬件设计	25
3.1 燃烧控制系统的硬件设计.....	25
3.1.1 系统现状.....	25
3.1.2 设计系统的配置.....	25
3.1.3 设计实现热风炉自动系统的具体方案.....	27
3.2 设计方案针对现场情况进行的改造.....	29
3.3 本章小结.....	30
第 4 章 热风炉相关控制方法研究.....	31

4.1 控制系统的自寻优算法.....	31
4.2 基于自寻优算法的燃烧优化控制方案.....	32
4.3 最佳空燃比的控制方法.....	34
4.4 模糊控制器及优点.....	38
4.4.1 模糊化.....	39
4.4.2 模糊数据库和规则库.....	41
4.4.3 模糊推理.....	42
4.4.4 清晰化.....	43
4.5 拱顶温度模糊控制器的设计.....	44
4.6 本章小结.....	50
第 5 章 控制系统的软件设计与应用情况分析.....	51
5.1 系统的配置及具体方案.....	51
5.2 系统的软件实现.....	52
5.3 上位机监控系统的实现.....	55
5.4 本章小结.....	61
第 6 章 结论与展望.....	63
参考文献.....	65
致 谢.....	69

第1章 绪论

1.1 课题研究的背景及意义

近年来，国际上钢铁工业的竞争焦点已经从提高产量转到提高质量上来，高精度、高性能、高成材率、低成本，已经成为现代钢铁企业的目标和得以生存的必备条件^[1]。国内外钢铁企业都清醒地认识到，提高质量、提高成材率和降低成本才是它们生存和发展的关键。

高炉热风炉是给高炉燃烧提供热风以助燃的设备，是一种储热型热交换器。国内大部分高炉均采用每座高炉带3至4台热风炉并联轮流送风方式，保证任何瞬时都有一座热风炉给高炉送风，热风炉的操作主要包括两大部分，一是自动换炉，二是自动烧炉^[2]。热风炉为高炉冶炼过程不间断地提供一定温度的热风，本身需要消耗大量的能源，合理有效的燃烧过程是节约能源的关键环节，合理的配比能效地避免了能源的浪费和对环境的污染，同时也为热风炉的健康长寿提供了保障^[3]。高炉生产的目标是“优质、高效、低耗和长寿”，连续、稳定的高风温是确保这一目标实现的关键环节。而要确保连续、稳定的高风温仅仅依靠操作工的手动控制是不现实的，随着自动化控制理论的深入发展和控制设备的完善，热风炉的全自动控制正在成为可能。

高炉热风炉的全自动控制是冶金领域和自动控制领域的一大难题，主要原因是控制过程复杂，如热风炉顶温和烟道温度的双目标控制；工艺过程复杂，如高炉煤气量的频繁波动和自动换炉过程与高炉生产节奏相关^[4]。随着我国高炉热风炉自动燃烧技术的开发与研究的不断深入，开发人员将模糊控制、神经网络等先进的控制理论应用于热风炉自动燃烧控制系统中，有效地克服了热风炉燃烧过程中的各种扰动。合理配比，快速调节，再加上先进的控制算法，使热风炉自动燃烧控制较以前有了较大的改进。但是距离人们期望的热风炉全自动控制结果仍然有一定的差距，因此，开发和应用热风炉全自动控制系统具有明显的经济效益和广阔的发展前景^[5]。

1.2 热风炉燃烧系统的发展状况

1.2.1 国内热风炉燃烧系统的研究及发展状况

热风炉是高炉冶炼过程中重要的热交换设备。建立热风炉燃烧控制模型的目标是实现燃烧过程的自动控制，其核心是优化空燃比和煤气流量的实时调整，保证燃烧过程的

高效、节能、稳定，延长热风炉使用寿命。

目前，我国绝大多数热风炉的燃烧控制主要还是采用手动控制，煤气流量和空气流量的大小由人工凭经验手动调节，因此，供热温度波动较大，对热风炉的寿命也有很大影响，并造成煤气的巨大浪费^[6]。国内外热风炉的空燃比控制主要有传统控制方法、数学模型方法、人工智能方法。传统控制方法主要有比例极值调节法和烟气氧含量串级比例控制法，但是由于不能及时改变空燃比，不易实现热风炉的最佳燃烧，且测氧仪器成本高、难以维护，因此，实际使用效果不太理想；数学模型法能将换炉、送风结合为一体，实现全闭环自动控制，但由于检测点多，在生产条件不够稳定、装备水平较低的热风炉中不易实现；人工智能方法主要有神经网络和模糊控制，神经网络控制对热风炉燃烧过程有极强的自学习能力，但抗干扰能力较弱，而模糊控制不需数学模型，有较强的抗干扰能力且易于实现，因此尤其适用于热风炉这类难以确切描述的非线性系统^[7]。

传统的完善的高炉热风炉燃烧自动化系统都是具有完善的基础自动化和使用数学模型计算所需的加热煤气流量和助燃空气流量，并对基础自动化的热风炉燃烧自动控制系统进行有关的设定^[8]。完善的基础自动化对于燃烧混合煤气或燃烧预热的高炉煤气和预热空气的热风炉来说包括：煤气流量控制、空气流量控制、空燃比控制、拱顶温度控制和废气温度控制。在热风炉燃烧初期是以较大的煤气量和合适的空燃比（最好还设有燃烧废气成分分析，按残氧量来修正空燃比），以实行快速加热，使拱顶温度迅速达到规定值，然后逐步增加空气量以保持拱顶温度为规定值，当达到废气温度管理期，即温度达到某一规定值时，需要减少煤气及空气量以维持废气温度为设定值^[9]。对于燃烧高炉煤气和焦炉煤气具有三眼燃烧器的热风炉来说，由于高炉煤气和焦炉煤气分别送入，需分别设置其流量控制，该流量比例控制和空燃比要分别适应高炉煤气和焦炉煤气需要，因此使系统回路更多、更复杂。热风炉流量设定数学模型的基本原理是使燃烧时热风炉格子砖的蓄热量适合于加热鼓风到生产所需的热风温度和流量而需要的热量^[10]。此外要使数学模型有效，必须依靠完善的基础自动化。因此，在国内除宝钢以外，很少被采用。

1.2.2 国外热风炉燃烧系统的研究及发展状况

在国外，已经使用人工智能的方式来代替数学模型，如日本川崎钢铁公司就开发了模糊控制系统取代数学模型^[11]。日本钢铁公司（新日铁）也使用专家系统来取代数学模型。

德国西门子公司的热风炉优化数学模型。它有一个所谓的“热流计算模型”，其原理是在保证安全的基础上取得最高效率。热风炉的操作中，在所需风温和风量的条件下，用多大煤气量加热，什么时间换炉才能获得最高效率和最经济的指标是其主要目标^[12]。该数学模型是首先把热风炉的全部热损失热损失，包括表面、换炉和废气的热损失计算出来，再列出热风炉的工作循环式，最后求出每个循环的效率。此外燃烧器的瞬时煤气流量要同送风的炉子的风负载（混风温度、空气比热、冷风流量）成正比，和煤气发热值及效率成反比。最后得出结论，也就是瞬时输入必须以能量输出为基础，经一定的计算公式，求出最佳加热用煤气流量^[13]。

热风炉数学模型有多种，各公司的观点不尽相同，但总的一点要是送风的炉子加热到规定能量的水准而设定所需的煤气流量以获得最经济的条件。其中日本钢铁公司（新日铁）的热风炉气体流量设定数学模型使用效果不错，我国宝钢也引进该模型，并在其一、二、三号高炉使用。该模型是针对使用高炉煤气与转炉煤气、焦炉煤气以及助燃空气的三孔燃烧器的热风炉^[14]。

此模型的思路是：对热风炉进行燃烧管理和设备管理，前者是根据要存储下次送风所需的恰当热量，计算燃烧过程所需的煤气流量和空气流量。后者是从设备安全管理角度出发，管理热风炉最高温度部分，也就是筑炉结构最困难出的拱顶温度和炉篦子的温度控制，它控制高热值的焦炉煤气，即改变其与高炉煤气的混合比，从而控制拱顶温度，在废气温度管理期间，高炉煤气的流量将逐步减少，使煤气温度和金属篦子温度不超过上限值^[15]。

1.3 模糊控制技术的发展历史及其在燃烧控制中的应用

1.3.1 模糊控制技术的发展历史背景

几十年来，控制理论的发展经历了古典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个阶段。智能控制又包括模糊控制、神经网络控制、专家控制和仿人工智能控制等^[16]。

在古典控制理论中，应用最成功的是比例积分微分（PID）控制。它是一种在工业生产中广泛应用的常规控制算法，属于线性控制。这种控制方式的最大优点是结构简单，使用方便，可以不用被控对象的模型参数，直接根据输出的偏差进行调节。该算法由于其简单实用而被广大工程技术人员所熟悉。但是当被控对象比较复杂时，便难以取得满意的控制效果。

一个控制系统控制质量的优劣，关键在于它能否对被控对象提供精确的控制。当研

究的控制系统涉及非线性、多变量、时变性等这样的大系统时，如煤炭生产过程、金属冶炼、石油化工、工业锅炉等，系统的复杂性与控制技术的精确性便形成了尖锐的矛盾。由于被控对象和过程的非线性、时变性、多参数间的强烈耦合、随机干扰、被控过程的机理错综复杂等，很难建立被控对象的精确数学模型，只能测得其参数间的模糊关系的估计。这就给传统的古典控制理论及现代控制理论方法的应用带来了很大的困难。对于上述难以控制的工业生产过程，有时一个有实践经验的操作人员，手动操作效果却很好。操作人员恰恰是利用了人脑的特点，通过对外界事物进行识别与判决，使看来不经意的模糊手动操作，达到精确控制的目的。模糊控制技术就是建立在被控对象的数学模型较难、以及实现控制较难的背景上产生的^[17]。

1965年，美国加利福尼亚大学自动控制教授 L.A.Zadeh 提出的《Fuzzy Set》开创了模糊数学的历史。1973年，他又给出了模糊推理的理论基础。从此，模糊数学逐渐发展、应用起来^[18]。自1974年伦敦大学的 E.H.Mamdani 成功地将模糊理论应用于锅炉和汽轮机的过程控制以来，模糊控制得到迅速发展。模糊控制较大规模的研究是从1980年开始的。1985年，模糊推理集成块开始开发。1986年，在日本，基于模糊控制技术所开发的产品及系统开始出现，并在实际应用中取得明显的经济效益。之后，模糊控制在许多国家如美国、西欧、中国、东南亚引起了广泛的重视，并受到国际控制理论学术界的关注。1984年国际模糊系统学会成立。1985年，召开了第一届国际模糊系统学会的学术交流会，各国相继成立了模糊控制系统工程研究所，90年代起，世界上一些大公司开始了模糊产品的开发，模糊理论与应用研究及模糊产品的开发像一股强劲的风浪席卷世界各地^[19]。

1.3.2 模糊控制的特点

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊推理为基础，模拟人的思维方式，对难以建模的对象实施的一种控制方法^[20]。模糊控制与传统的控制方式相比，具有以下特点：

(1)模糊控制是一种基于规则的控制，它直接采用语言型控制规则，在设计系统时不需要建立被控对象的数学模型，只要求掌握现场有经验的操作人员或有关专家的经验、知识，或者操作者在操作过程中的操作数据及被控对象的运行数据等，因而使得控制机理和策略易于接受与理解，设计简单，便于应用。

(2)模糊控制系统本身对被控对象特性参数的变化具有较强的鲁棒性，对干扰有较强

的抑制能力, 适合于对难以建立被控对象的数学模型的复杂系统进行控制, 尤其适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制。

(3)模糊控制是基于启发性的知识及语言决策规则设计的, 这有利于模拟人工控制的过程和方法, 增强控制系统的适应能力, 使之具有一定的智能水平。

(4)为“语言型”控制, 由工业过程的定性认识出发, 比较容易建立语言变量控制规则, 易于形成知识库^[21]。因而模糊控制对那些数学模型难以获取, 动态特性不易掌握或变化非常显著的对象非常适用。

(5)由不同观点出发, 可以设计几个不同的指标函数, 但对一个给定系统而言, 其语言控制规则是分别独立的, 且通过整个控制系统的协调可以取得总体的协调控制。

(6)控制效果好, 且所需设备简单, 经济效益显著。

1.3.3 模糊控制技术在燃烧控制中的应用

热风炉是一个非线性的、大滞后系统, 影响热风炉的因素有很多, 并且各种因素相互牵制, 因此导致它的控制过程非常复杂, 很难用精确的数学模型描述^[22]。

模糊控制以模糊集合、模糊语言变量、模糊推理为其理论基础, 以实践知识和专家经验作为控制规则。模糊控制自动化燃烧技术是从热风炉现场仪表送出的数据中, 获取热风炉的拱顶温度、废气温度、煤气流量、空气流量、煤气及空气压力的多项参数, 经过双路隔离器隔离后, 一路送回原有控制系统的 I/O 模块, 另一路送到装有新程序的专家智能模糊控制数据库中。各项数据参数经此技术的软件运算处理后, 先与上一次烧炉的空燃比等参数对比, 在 1~2min 内寻找到本次热风炉燃烧的最佳配比值, 并不断的将现有的空燃比、拱顶温度、废气温度、烧炉时间等参数送回数据库中, 由数据库运算后决定当前在线空燃比是否最佳、是否需要修正, 保证当前的空燃比随时处于最佳状态, 确保热风炉在单位时间内获得最大的蓄热量, 达到提高风温、节省煤气的效果^[23]。

热风炉自动燃烧系统是一套高炉热风炉燃烧自动控制系统。该系统由拱顶温度管理、废气温度管理、热水准管理、技术计算四部分构成。是以煤气和空气流量的闭环自适应自动调节控制为基础的, 以拱顶温度最快, 最大的上升速率和烟气温度的均衡稳定上升为目标的自动燃烧控制系统和自动分析判断送风炉的时间与风温使用情况, 自动进行换炉操作的自动换炉控制系统的组合。通过对热风炉煤气流量和空气流量的精确定值调节, 对煤气压力波动等外界扰动的合理抑制, 快速寻优最佳的空燃比, 从而实现整个燃烧过程在满足高炉风温需要, 节约燃料的前提下, 实现热风炉整个燃烧过程自动化控

制,且燃烧过程稳定,安全,节能。其燃烧过程实际上是一个非常复杂的综合反应过程,一个典型的多输入单输出的相互影响的复杂系统。

热风炉燃烧系统是以数据为基础。数据包括三个来源:一是热风炉生产过程中的主要工艺参数(拱顶温度、废气温度、煤气流量、空气流量、煤气压力、空气压力等),这些实时工艺参数是系统正常工作的基础。这些数据经过滤波,平均等处理后供给自动燃烧系统使用。二是由操作人员输入的初始数据,这些数据一般在开发和调试过程中就已经输入,使用中可根据实际情况可以适当修改。三是自动燃烧系统根据一定的推理和运算,自动产生的数据(烧火的最佳煤气流量、空气流量等)^[24]。

拱顶温度上升速度模糊控制器的主要作用是用来调节煤气流量和空气流量的供给大小。模糊控制器的控制目标为拱顶温度上升速度。因为拱顶温度上升速度是直接反应热风炉燃烧周期快慢的重要参数,因此,选择拱顶温度这个参数作为该模糊控制器的输入信号。在燃烧过程中,调整煤气流量和空气流量的供给大小则可以改变拱顶温度的上升速度。因此,用拱顶温度模糊控制器的输出控制煤气流量和空气流量的修正大小。当拱顶温度的变化速度偏离正常值较大时,则采取较大的流量修正值,当拱顶温度的变化速度偏离正常值较小时,则采用较小的流量修正值。

采用模糊控制自动化燃烧技术,一是在最短时间内可寻找出最佳的空燃比;二是自动控制整个燃烧过程,不需要人为操作,三是拱顶及烟道温度控制可达到设定值,四是在规定的时间内能将热风炉烧到最佳状态。

1.4 论文的主要工作

高炉热风炉自动化燃烧控制系统采用自动寻优与模糊控制相结合的自动化控制系统,提高了热风炉的热效率,使得高炉生产过程温度稳定,炼铁质量高。同时,充分发挥了自动控制理论在冶金过程与科学管理中的实际应用价值,减轻了工人的劳动强度,提高了能源利用率,利于系统的维护和发展。在提高燃烧效率,降低环境污染等方面取得很好的效果。

本文的主要工作:以首钢迁安钢铁集团有限公司 2#高炉热风炉控制系统为研究对象,在查阅了大量国内外相关文献的基础上,综述了热风炉自动控制的发展历程,对燃烧控制方法进行了深入的研究。论文的内容安排如下:

第一章介绍了热风炉燃烧控制发展现状及模糊控制在燃烧控制上的发展及应用。

第二章从总体上介绍了燃烧控制的基本原理,并研究了影响燃烧效果的主要因素,

以及详细介绍自动燃烧控制的主要方法。

第三章设计了热风炉燃烧系统的硬件设计方案,以及针对现场设备使用情况进行的设备改造方案。

第四章设计了模糊控制原理,模糊控制器的方案。重点研究了控制变量的选择、模糊化和相关规则的建立。

第五章完成了燃烧系统控制设计,给出了系统的硬件、软件的具体实现方法。

第六章为结论与展望,简要总结本论文研究成果,对进一步的研究工作进行展望。

第2章 系统描述与控制系统总体设计

2.1 热风炉系统的基本概念

2.1.1 热风炉系统工艺简介

热风炉是为高炉加热鼓风的设备，是现代高炉不可缺少的重要组成部分。提高风温可以通过提高煤气热值、优化热风炉及送风管道结构、预热煤气和助燃空气、改善热风炉操作等技术措施来实现。理论研究和生产实践表明，采用优化的热风炉结构、提高热风炉热效率、延长热风炉寿命是提高风温的有效途径^[25]。

20世纪50年代，我国高炉主要采用传统的内燃式热风炉。这种热风炉存在着诸多技术缺陷，且随着风温的提高二暴露的更加明显。为克服传统内燃式热风炉的技术缺陷，20世纪60年代，外燃式热风炉应运而生。该设备将燃烧室与蓄热室分开，明显的提高了风温，延长了热风炉寿命。20世纪70年代，荷兰霍戈文（现达涅利公司）对传统的内燃式热风炉进行了优化和改进，开发了改造型内燃式热风炉，在欧美等地区得到应用并获得成功。于此同时，我国炼铁工作者开发成功了顶燃式热风炉，并于上世纪70年代末在首钢2#高炉上应用成功。自上世纪90年代KALUGIN(卡鲁金)顶燃式热风炉（小拱顶）投入运行，迄今为止在世界上有80多座KALUGIN顶燃式热风炉投入使用^[26]。

截至目前，顶燃式热风炉由于具有结构稳定性好、气流分布均匀、布置紧凑、占地面积小、投资少、热效率高、寿命长等优势，已在国内几十座高炉上应用。

根据实践，现代大型高炉配置3到4座热风炉比较合理。大型高炉如果配置4座热风炉，可以实现交错并联送风，能提高风温20-40度，在炉役的中后期，还可以在1座热风炉检修的情况下，采用另外3座热风炉工作，使高炉生产不会出现过大的波动。目前，国内外许多大型高炉都配套建设了4座热风炉，但采用3座热风炉可以大幅度降低建设投资，减少占地面积，也同样具有非常大的吸引力。随着设计和安装大直径热风炉条件的改进，热风炉设计的日趋合理，热风炉使用的耐火材料质量也得到了提高，设备更经久耐用，控制系统也日益成熟可靠，形成了多种多样的热风炉高温和长寿技术，使得热风炉操作可以更加平稳可靠，从而保证了高炉稳定操作。以此为基础，小袋热风炉的发展方向转变为减少热风炉座数，延长热风炉寿命、强化燃烧能力、缩短送风时间、较少蓄热面积、回收废气热量、提高总热效率上^[27]。另外，尽量缩短送风时间的操作方式也得到重视，基于新设计理念和完备的技术支撑，国内钢铁七月将热风炉数量从4座减少

到3座，热风炉的操作模式改为“两烧一送”，风温的调节控制依靠混风实现，也同样达到了高风温的效果。

现代高炉多采用蓄热式热风炉，其工作原理是先燃烧煤气，用产生的烟气加热蓄热室的格子砖，再将冷风通过炙热的格子砖进行加热，然后将热风炉轮流交替进行燃烧和送风，使高炉连续获得高温热风^[28]。因此，提高热风炉热效率对提高风温有着重要意义。而增加格子砖的加热面积是提高传热能力的重要技术措施。近年来，随着热风炉操作值得改进，国内钢铁企业在应用高效格子砖方面进行了尝试，通过对格子砖结构进行优化，缩小格子砖孔径，加大其加热面积，从而提高了格子砖的传热效率和加热性能。

热风炉是为高炉提供热风的特殊设备。炉内由格子砖砌筑，热风炉的加热过程实际上就是加热格子砖的过程，称为“燃烧”过程。即高炉煤气和助燃空气混合燃烧，热气到达炉顶，经格子砖加热热风炉，废气从烟道排出。当热风炉被加热到一定温度时，燃烧状态结束，准备转换到“送风”状态，为高炉提供热风。此过程是冷风通过格子砖反向吹进。砖的热量传递给流过的空气，被加热的空气（热风），通过环管进入高炉^[29]。高炉炼铁是一个连续过程，热风不能中断，所以热风炉是高炉炼铁不可缺少的部分，但是一个热风炉不能连续提供热风，因此三个热风炉循环送风可以满足高炉连续供风的需要。

为了在规定的燃烧周期内，按照温升曲线完成对热风炉的加热，达到低能耗、低污染、高效率的要求，热风炉燃烧需要助燃空气与煤气量的合理配比与精确控制，即控制助燃空气与煤气的流量按照一定的比例完全燃烧。由拱顶温度和废气残氧量可反映燃烧效果。

各热风炉参与状态转换的有十一个切断阀和两个调节阀，切断阀是：南、北烟道切断阀，废气切断阀，助燃风、煤气切断阀，高炉煤气燃烧阀，煤气烟采阀，冷风切断阀，冷风均压阀，热风切断阀和氮吹扫阀。调节阀有煤气和助燃空气调节阀。通过不同切断阀的不同动作，能实现热风炉的“燃烧”、“送风”、“隔断”等状态的转换。

热风炉为高炉冶炼过程不间断地提供一定温度的热风，本身需要消耗大量的能源，合理有效的燃烧过程是节约能源的关键环节，合理的配比能效地避免了能源的浪费和对环境的污染，同时也为热风炉的健康长寿提供了保障。高炉生产的目标是“优质、高效、低耗和长寿”，连续、稳定的高风温是确保这一目标实现的关键环节^[30]。而要确保连续、稳定的高风温仅仅依靠操作工的手动控制是不现实的，随着自动化控制理论的深入发展和控制设备的完善，热风炉的全自动控制正在成为可能。

高炉热风炉的全自动控制是冶金领域和自动控制领域的一大难题，主要原因是控制过程复杂，如热风炉顶温和烟道温度的双目标控制；工艺过程复杂，如高炉煤气量的频繁波动和自动换炉过程与高炉生产节奏相关。随着我国高炉热风炉自动燃烧技术的开发与研究的不断深入，开发人员将模糊控制、神经网络等先进的控制理论应用于热风炉自动燃烧控制系统中，有效地克服了热风炉燃烧过程中的各种扰动^[31]。合理配比，快速调节，再加上先进的控制算法，使热风炉自动燃烧控制较以前有了较大的改进。但是距离人们期望的热风炉全自动控制结果仍然有一定的差距，因此，开发和应用热风炉全自动控制系统具有明显的经济效益和广阔的发展前景。

2.1.2 迁钢水平现状及面临的问题

迁钢2#高炉有效容积2650m³，热风炉3座，预热炉2座。全由人工纯手动操作进行燃烧、换炉控制，整体制约了热风炉自动化控制水平的提高，同时制约了高炉的生产水平。由于是手动控制，操作根本赶不上流量的变化，一般是将调节阀开到一个固定阀位进行燃烧，这样流量的波动直接导致燃烧效果不理想，且造成大量能源损失，风温指标也上不去，赶上换炉，至少还要一人值守。为了提高高炉的生产水平，实现高炉的生产目标，有必要开发一套热风炉全自动控制系统来提高整体自动化控制水平，优化操作，达到节能降耗，稳定风温，安全生产的目的^[32]。

迁安2#高炉热风炉系统包括：

(1)燃烧系统

设置和计算各种燃烧数据，通过调整参数，管理和控制炉子的加热过程。

(2)换炉系统

根据炉子的状况，安排炉子的送风顺序，自动运行各个阀门，通过阀门的动作组合使炉子改变燃烧、送风、隔断的状态。为操作人员提供可用的显示。

(3)热风炉送风和公用系统

跟所有炉子都相关的设备。例如：混风系统、液压系统等等。

(4)热风炉阀门冷却系统

阀门冷却对热风炉燃烧是一个非常重要的部分，在非常高的温度下工作阀如热风阀等，水冷是必要的保护措施，可以减少设备的故障率，同时通过对水温的分析可以确保重要阀门都处于可操作的工作状态下。

以下是迁安2#高炉热风炉投产以后热风炉运行的指标：

为高炉提供的送风量：4600—5200 m³/min

为高炉提供的热风温度：1230—1250℃

单炉送风时间：65—75分钟

单炉燃烧时间：105—110分钟

燃烧结束后：顶温1370—1390℃，烟道400℃

送风结束后：顶温降30--50℃

排均压时间：22分钟

阀门周期动作时间：4分钟

热风炉的工艺特点决定了热风炉燃烧过程的复杂性与不易控性，具体体现在以下几个方面：

(1)燃料热值的不可控性

热风炉燃烧使用的是高炉煤气。由于高炉生产的不稳定性，造成高炉煤气的热值波动较大且高炉煤气压力波动频繁，这些都会造成燃烧过程的波动。

(2)燃烧配比的不易确定性

由于燃料本身的成份波动，造成燃烧过程燃料配比的变动较大，最合理的空燃比不易确定且不易寻找。因此，整个燃烧过程必须克服这个问题^[33]。

(3)燃烧过程速度的不易控制性

燃烧速度的控制也是一个重要问题。过快的燃烧速度削弱了热风炉的蓄热量，过慢的燃烧速度又不能满足高炉对风温的使用要求。因此，必须通过合理的控制手段，使热风炉按照设定的燃烧时间合理的燃烧。

(4)确保燃烧过程的安全性

热风炉燃烧过程有严格的安全规定。确保燃烧过程的安全稳定是自动燃烧系统首先要解决的问题。

(5)换炉与燃烧的连锁控制

换炉过程与燃烧过程的自动衔接过程是热风炉全自动控制的重要部分，根据各自过程的起始与结束位置来启动和停止另一过程，两个控制过程相互连锁，且过程衔接要紧密^[34]。

(6)热风炉燃烧技术计算

如何解决根据用户设定的温度指标与燃烧周期时间，由各热风炉的燃烧特点计算出相应的使用流量与配比，来指导用户对热风炉的工作制度进行调整。

(a)煤气的种类

高炉煤气：经热风炉预热的高温空气（热风）进入高炉后，与白热状态的焦碳相遇发生化学反映，随着氧化铁（矿石）还原的进行，生成气中的CO及H₂逐渐减少，CO₂及H₂O逐渐增加，到期炉顶的气体就是高炉煤气。其主要成份是CO₂、CO、H₂、N₂、H₂O、O₂等^[35]。

焦炉煤气：是炼焦过程中的副产煤气。可燃物多，属高热值煤气，具有易燃性。其主要成份是：H₂、CH₄、O₂、C₂H₄、N₂、CO₂和C_nH_m等。

转炉煤气：是转炉冶炼时由氧气同铁水中的碳、硫、磷等元素氧化生成的，在吹炼过程中从炉口喷出，含有大量的CO。其主要成份是：CO、O₂、CO₂、N₂和H₂等。

(b)煤气发热值与燃烧的计算

干、湿煤气成份换算：

在燃烧计算时，需要用煤气的湿成份作为计算的依据。气体燃料的组成是用所含各种单一气体的体积的百分数来表示。并有干成分和湿成分两种表示方法。

气体燃料的湿成分，是指包括水蒸汽在内的成分，各种成分的关系如下：

$$CO_{湿\%} + H_2_{湿\%} + CH_4_{湿\%} + N_2_{湿\%} + O_2_{湿\%} + H_2O_{湿\%} = 100\% \tag{2.1}$$

煤气的干成分中不包括水蒸汽在内，各个成分的关系如下：

$$CO_{干\%} + H_2_{干\%} + CH_4_{干\%} + \dots + CO_2_{干\%} + O_2_{干\%} + N_2_{干\%} = 100\% \tag{2.2}$$

式中：X_湿为煤气的湿成分；

X_干为煤气的干成分；

H₂O_湿---为湿煤气中所含水蒸汽的百分体积。

(c)煤气发热值的计算

煤气的发热值，是指完全燃烧一标准立方米煤气时所释放出的热量。发热量有高热量和低发热量。高发热量：单位燃料完全燃烧后，燃烧产物中的水蒸汽冷却到零度的水所放出的热量也计算在内的发热量，用Q_高表示。低发热量：单位燃料完全燃烧后，燃烧产物中的水蒸汽冷却到20℃时所放出的热量，用Q_低表示。

$$Q_{高} = (30.19CO + 30.5H_2 + 94.99CH_4 + 150.54C_2H_4 + 60.05H_2S) \times 4.1868KJ/m^3 \tag{2.3}$$

$$Q_{低} = (30.19CO + 25.8H_2 + 85.6CH_4 + 141.15C_2H_4 + 55.36H_2S) \times 4.1868KJ/m^3 \tag{2.4}$$

换算式:4.1868KJ=1Kcal (千卡)

根据不同煤气中所含的可燃组分，将这些组分的体积百分含量代入低发热量公式，就可计算出不同煤气的低发热量^[36]。

(d)煤气的燃烧过程

煤气的燃烧过程，包括以下三个阶段，煤气与空气的混合、混全后的可燃气体的加热和着火、完成燃烧化学反应。煤气与空气的混合，需要消耗一定的能量和时间。混合后的可燃气体在加热到它的着火温度时才进行燃烧。这种激烈氧化反应是在一瞬间完成的。因此，煤气燃烧速度的主要矛盾是煤气与空气的混合以及混合后的可燃气体的加热升温速度。由此可见，空气和煤气的预热对提高燃烧速度和煤气的完全燃烧都大有好处。

(e)换炉次数的计算：

燃烧和送风交替循环进行。一个周期就是从燃烧开始到送风終了需要的整个时间。即：燃烧、送风和换炉三个过程所需的时间^[37]。

燃烧期长对提高风温有利，过长要造成废气升高，热损失过大、炉体寿命受影响。送风期长热量输出多，对提高风温不利，过短要造成蓄热量利用不充分，再次燃废气升温过快。燃烧期、送风期二者相互影响，选择合理的周期对提高风温延长炉体寿命十分重要，根据经验换炉次数的选择以送风时间长短而决定。

表 2.1 热风炉最大流量
Table 2.1 hot blast stove maximum flow

项目	单位	3 座工作	2 座工作	3 座工作	2 座工作
混合煤气	Nm ³ /hr	92300	141470	104480	143020
助燃空气	Nm ³ /hr	94040	143030	75220	101560
废气最大	Nm ³ /hr	174260	265980	167480	227860

表 2.2 热风炉主要设计参数
Table 2.2 The main design parameters of hot blast stove

序号	项目	单位	数值
1	最大热风量, 设计能力	Nm ³ /min	5500
2	热风温度	℃	1250
3	富化比	%	7.6
4	高炉有效容积	m ³	2650
5	热风炉数目	座	3
6	拱顶设计温度	℃	1450
7	拱顶设计温度	℃	1400
8	热风湿度	G/Nm ³	14
9	操作送风压力	bar	4
10	最大送风压力	bar	4.5
11	冷风温度	℃	170
12	送风时间	min	45
13	烧炉时间	min	75
14	换炉时间	min	15
15	助燃空气预热温度	℃	200
16	格子砖孔直径	mm	30
17	单位格子砖的加热表面积	M ² /m ³	47.08
18	格子砖的相对活面积	%	33
19	废气最高温度	℃	400
20	拱顶的操作温度与热风温度差	℃	150
21	过量空气	%	10
22	炉壳直径	m	10.5
23	格子砖室高度	m	31.3
24	硅格砖高度	m	9.1
25	蓄热室横断面积	M ²	44
26	燃烧室面积	M ²	10.9
27	燃烧器	m	4.4
28	炉壳直段部分温度保证	℃	90--110
29	拱顶壳体温度	℃	110-120
30	热风总管壳体温度	℃	90--110
31	平拱部分的壳体温度	℃	110-150

2.1.3 研发的目标

实现热风炉全自动燃烧控制系统，需要解决合理及时的最佳燃烧配比关系，拱顶温度与烟道温度的控制，调节阀控制，换炉时点的确定。就可以有效克服煤气压力和热值变化对燃烧过程产生的影响，使燃烧过程趋于合理状态来提高和稳定风温，同时，自动换炉控制将操作者从岗位中解放出来。

热风炉全自动燃烧控制系统最终目标包括以下几点：

(1)实现现有工艺下的热风炉全自动控制，即自动点火、自动寻优空燃比、自动燃烧、自动停烧、自动换炉；

(2)控制性能良好、精度高，当负荷变化时，响应速度快，稳定性好，整个燃烧过程合理，在提高风温的同时节能减排；

(3)热风炉燃烧过程可通过数字模型技术计算结果（如：煤气合理用量、空燃比、理论燃烧温度等）进行燃烧控制，还可用人工智能控制器进行燃烧控制。

2.2 控制系统的总体设计

2.2.1 控制思想及控制方法

根据全自动燃烧控制系统要解决的燃烧过程的实际特点及换炉过程的要求，控制程序的设计思想如下

(1)燃烧过程控制

将原煤气和空气流量的开环手动调节改为煤气和空气流量的单闭环控制调节。设定煤气流量和空气流量为控制目标，煤气调节阀和空气调节阀为控制对象，根据设定值与过程值之间的偏差大小自动改变调节阀的阀位，通过调节阀的及时动作，克服煤气流量和空气流量的波动。

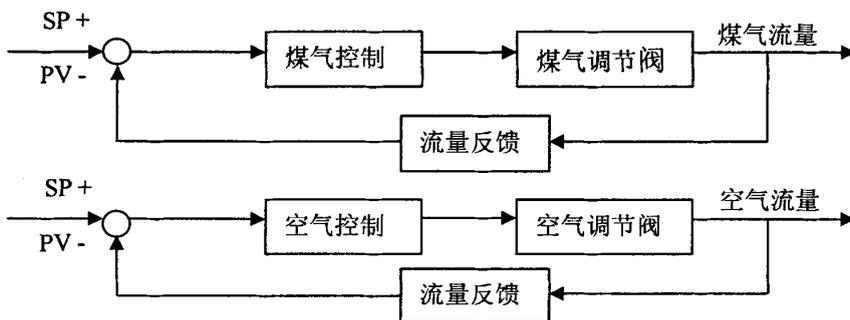


图 2.1 煤气流量和空气流量的单环控制

Fig. 2.1 Gas flow and air flow, single-loop control

热风炉的燃烧过程可分为燃烧初期、蓄热期和蓄热饱和期三个阶段，热风炉在燃烧期间拱顶和废气温度的变化曲线^[38]。根据各阶段的不同特点，可将自动燃烧控制也分为三个阶段，即燃烧初期、蓄热期和蓄热饱和期。在不同的阶段，采用不同的控制方法。

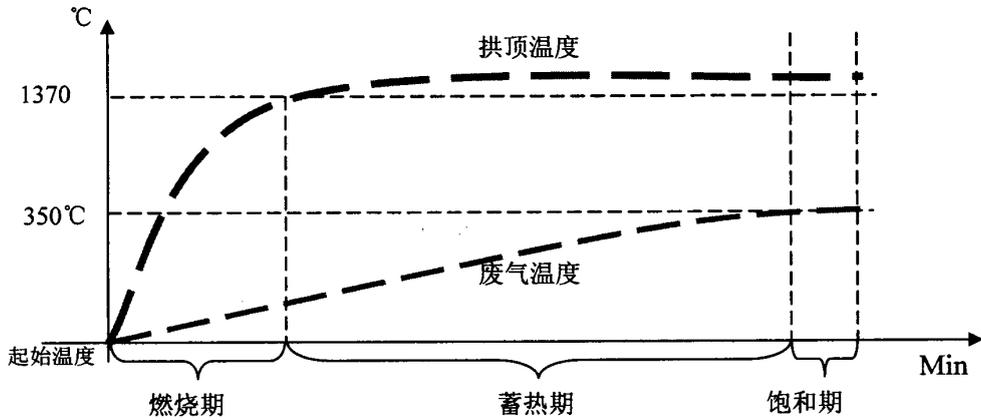


图 2.2 拱顶温度和废气温度变化曲线

Fig. 2.2 Vault temperature and exhaust gas temperature curve

燃烧初期主要是拱顶温度控制。此控制是保护热风炉拱顶砌体和强化加热过程，即以较小的煤气和空气流量点火后，在拱顶温度未达到上限时，以最合适的空燃比使燃烧温度达到最高，使拱顶温度按照规定的梯度快速上升到规定值，此后逐步改变过量空气系数以使拱顶温度不超过规定值^[39]。以此为基础，目标就是拱顶温度的上升，可以将废气含氧量作为参考，依据初始煤气和空气流量设定值自动修正，并使这一时间尽量缩短，在保证燃烧充分的条件下，从燃烧一开始就处于最佳的燃烧配比状态，从而使拱顶温度快速上升^[40]。一般情况，持续时间在10分钟左右，此期间，拱顶温度快速上升并接近最高温度，在其到达规定值后，转入蓄热期。

蓄热期主要是废气温度控制同时兼顾拱顶温度控制^[41]。废气温度管理是防止废气温度太高，若其太高将表征热效率下降和对格子砖支承的金属会被烧坏，因此废气温度达到上限时就应停止加热(即进入隔断状态)，应避免出现上述情况，一般应使废气温度上升曲线在规定燃烧周期内平稳达到燃烧终点温度。此阶段主要特点是一方面维持拱顶温度或缓慢升高，另一方面与蓄热室的格子砖热交换加剧，使蓄热室温度上升，随着蓄热室温度的上升，废气温度也不断升高。调节特点是维持拱顶温度继续上升，同时兼顾废气温度上升的速度。依据拱顶温度的变化情况，修正空燃比，保证拱顶温度稳定且维持上升趋势，若废气温度升温速度较快或较慢，就要进行减烧或加烧操作，使废气温度上升曲线恢复平稳均衡。废气温度升温较快，说明燃烧用空气流量较大，减小煤气流量

设定值，空气流量相应减少，这样，在保持拱顶温度不变的情况下，废气温度升速会下降^[42]。反之，各流量相应增加，会在保持拱顶温度不变的情况下，使废气温度升速上升。废气将热量带到蓄热室，随着蓄热室温度上升，废气温度也不断升高，达到设定温度时，就进入了蓄热饱和期^[43]。

蓄热饱和期当废气温度达到设定值后，程序会根据送风炉的送风时间及风温使用情况，来决定此炉是由燃烧转入隔断，还是由燃烧转入送风状态。若继续烧火，则可手动减烧，以较少的能源消耗维持拱顶温度，直到燃烧结束，转为送风状态。

以上这些都是在深入了解工艺和实际操作后，提出的初步控制方案，并向工艺专家请教、提出问题、讨论、删改、增添，最终形成总结性的控制方案。在此基础上，燃烧过程引进模糊控制和自寻优理论，通过生产工艺参数得出热风炉各燃烧阶段及实际燃烧情况，按方案由拱顶温度和废气温度的变化，自寻优空燃比控制燃烧过程使燃烧效果更加理想，达到节约能源的最大化。

(2)自动换炉控制

主要是热水准管理。热水准管理就是当送风炉热水准达到零时自动换炉，来节约能源消耗和提高热风炉效率。因热水准计算较为复杂，所以，以混风调节阀开到某一阀位时作为零值，即该热风炉不能维持热风温度在规定值上时。同时，热风炉是定时换炉的，换炉时间要热水准为零时，由于到达热水准为零的时间与送风温度和送风量有关，由此而算出在设定换炉时间内煤气用量的修正量，通过修正投入燃料量数值来使换炉时热水准为零。此阶段主要特点是根据送风炉的送风时间与风温使用情况及燃烧炉的燃烧情况进行计算修正操作，当送风炉达到送风时间或满足不了高炉用风温，且燃烧炉烧到设定温度，这些条件满足后，自动结束燃烧，紧接着执行燃转送过程，当为送风状态后，自动将送风炉执行送转燃过程，燃烧状态一到，系统自动开始燃烧过程控制。自动换炉控制主要是判断控制送风情况及燃烧情况，使两者能更好的转换，防止出现燃烧未结束就需要送风，或送风未结束而燃烧的炉子提前烧到了的情况出现。以下为换炉过程各阀的动作控制顺序。

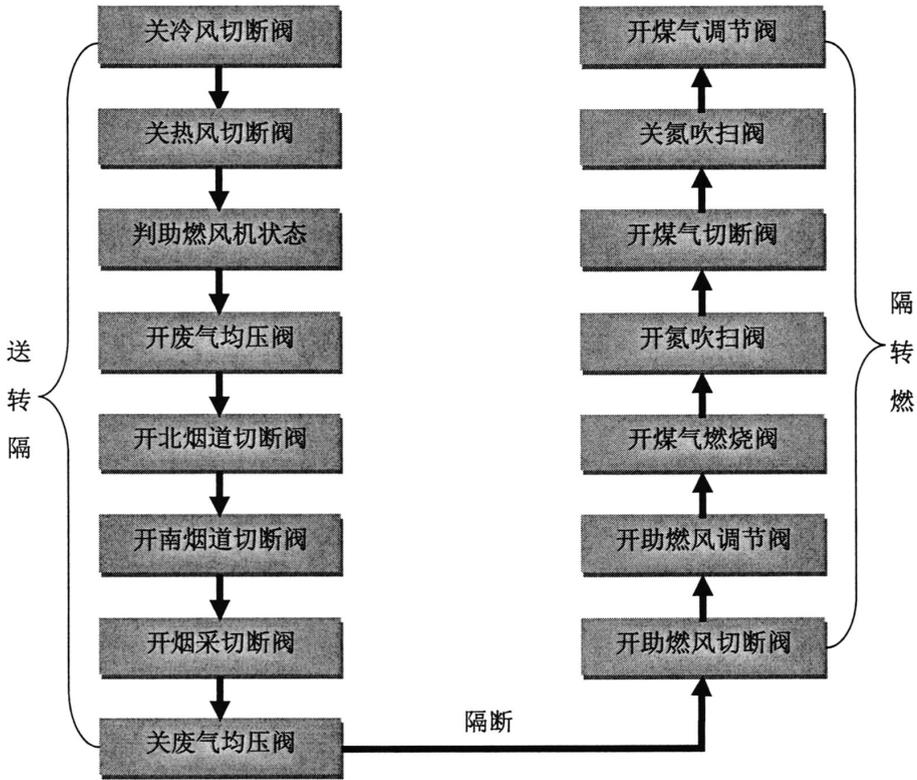


图 2.3 动作顺序

Fig. 2.3 Valve action sequence

(3) 燃烧技术计算

为热风炉操作所需技术计算提供方便, 在本系统中已有煤气热值计算、空燃比计算、理论燃烧煤气用量、理论燃烧温度等, 其它技术计算可根据生产实际需要, 进行编程添加。

(4) 投入与退出

为保证与一级PLC控制程序的紧密结合, 在PLC与系统通讯模块中建立完善的通讯接口程序及报警程序, 保证系统通讯数据稳定可靠。

在两系统中都添加了各系统状态点的互传程序, 并对原系统进行通讯状态监测, 根据各自系统状态, 可进行任意切换, 不会对系统产生任何影响, 任一系统出现问题时, 都能随时通过好的系统进行切换操作。同时, 在原系统中, 对现场设备的控制程序添加了双系统的互切控制程序, 避免两系统同时控制一个现场设备, 造成设备的损坏, 保证对现场设备的最终控制命令只能由一个系统发出。以此保证系统切换过程的安全和稳定。

(5)自动点火与停烧

根据迁钢二炉热风炉的特点,采用步进式控制过程来满足点火与停烧过程的要求,使系统的换炉过程更稳定,将各炉间的相互影响降到最小。系统实现了小流量稳定点火,大流量快速燃烧。当热风炉为“燃烧”状态时,系统以自学习算法确定的最优空煤气流量和阀位作为初始燃烧值(保证热风炉燃烧从开始就以最佳的空燃比快速进入燃烧状态)并采用步进式小流量点火方式完成控制。点火成功的判断依据为在一定时间内所有采样温度都升高。系统停烧过程则包括了相关连锁保护措施,在停烧操作中考虑空/煤气流量同时减小问题,避免造成拱顶温度的大幅下降以及有煤气而无空气的危险情况出现,停烧过程则依照点火过程反向动作,以保护系统安全稳定。

具体点火操作步骤:从初始状态开始(空气调节阀 $<10\%$,煤气调节阀 0%)系统先开空气阀到点火阀位,待流量达点火设定值后,再开煤气阀到点火阀位,待流量达点火设定值后,两阀同步按设定步长开阀,同时判断阀位反馈是否到位,流量是否上升,循环涉进直到达到设定初始燃烧阀位至,系统根据上炉燃烧最优流量做为设定值进行阀的自动调节控制。之后,按照残氧指标和热值进行空煤比的微调,小波动信号(流量低于设定的死区值)不参与调节。

停烧操作步骤:系统先自动置流量手自动设定值为零,判断空煤气调节阀位最小值是否超设定的大阀位,若超则以大阀位为标准,否则以最小阀位为标准,将此阀位做为设定值关阀,当两阀关到位后,系统按设定步长进行循环动作,同时判断阀位反馈是否到位,流量是否下降,且保证空气阀比煤气阀大 5% 。直到煤气流量降到设定值,系统设置空煤气阀为停烧阀位,停烧过程结束,所有这些操作均由系统自动完成。

(6)自寻优空燃比

系统点火完成后,待燃烧进入稳定状态,系统以拱顶温度作为寻优空燃比的依据,根据拱顶温度的实际变化情况,启动寻优空燃比过程;所谓自动寻优,就是以直接利用调节影响控制指标、可控参数的方法,试探其对控制指标的影响,从而做出下一步决定,一步步搜索,获得最佳控制指标的可控制参数值。当外界不可控的干扰因素使得最佳指标产生漂移时,它又进行新的搜索,这样就始终不断地使控制指标以最短时间达到或接近最佳值。假定该系统从某一点投入工作,顶温为 T_1 ,每隔时间 t ,控制仪控制阀门开大 1% ,控制仪立即对此时的顶温 T_2 进行测量,若 $T=T_2-T_1>0$,表示方向正确,下一步仍按原方向调节,直至达到 T_{\max} 。若再开大 1% , $T=T_3-T_{\max}<0$,调节方向错误,控制仪经过逻辑判断,发出反向指令,下一步按反方向调节,这样往返调节阀门位置,不停地

搜索使温度达到最佳值，进入燃烧稳定状态。

修正主要过程为，当前拱顶温度若下降超过一定的时间则启动修正过程。首先启动增加空气流量过程，经过延时，如果修正后拱顶温度上升了，说明修正的过程有效且正确，则返回正常过程。如果拱顶温度仍然没有上升，说明此修正过程无效，则恢复空气流量的原值，转而减小空气流量，延时后，返回正常控制过程。如果再次启动流量的修正过程，则启动减少空气流量的过程。经过延时，如果修正后拱顶温度上升了，说明修正的过程有效且正确，则返回正常过程。如果拱顶温度仍然没有上升，说明此修正过程无效，则恢复空气流量的原值，转而增加空气流量，延时后，返回正常控制过程。

在每一个燃烧周期结束时，对拱顶温度的上升温度值进行比较运算，如果大于上一个周期，则刷新存贮的煤气流量和空气流量数据；如果小于等于上一个周期的上升值，则保留当前的寻优数据，为了更好的适用于一炉热风炉的实际情况，以双炉燃烧期为标准进行自寻优，以满足下一炉点火需求。

(7)拱顶温度

拱顶温度主要是控制燃烧速度在燃烧期间平稳均衡地变化。燃烧速度过快会削弱热风炉的蓄热量，过慢则不能满足高炉对风温的使用要求。因此，在燃烧过程中，系统要根据拱顶温升率变化的特点分段自动调整煤气和空气流量的供给大小，使拱顶温升率与实际燃烧过程相符合。当拱顶温升率偏离正常值较大时，则采取较大的流量修正值进行自动加减烧，当拱顶温升率偏离正常值较小时，则采用较小的流量修正值进行自动加减烧。除此之外，系统还提供手动加减烧功能。操作人员可根据需要，手动按比例增加或者减少燃料的大小。自动加减烧处理程序将寻优过程与烧炉过程统一，保证系统时实控制烧火过程，在自动进行加烧减烧处理时，使系统也能够快速跟踪控制和自动寻优，对拱顶温升率进行的分段处理，避免出现燃烧前期不断加烧，后期不断减烧而影响整个燃烧过程稳定的现象发生。

本系统，在燃烧过程进入稳定状态后便开始热风炉燃烧节奏的控制，此过程采用模糊控制的算法，根据拱顶温度在采样周期内的实际上升值与初始计算的标准上升值的差值的大小和变化率，快速修正燃料供给。具体控制过程如下

- (a)获取系统投入时计算的此次燃烧拱顶温度需要满足的标准温升率；
- (b)判断当前工况满足管理条件，则计算拱顶实际温升率；
- (c)以拱顶温度在采样周期内的实际上升值与标准上升值的差值大小和变化率为输入参数，输入拱顶温度上升速度模糊控制器；

(d)根据拱顶温度的上升速度偏离正常值得大小，快速修正燃料。

系统安全管理存在于系统的每个操作、过程、角落中，如：相关检测数据的实时跟踪报警，人工输入参数的有效性分析，问题数据的过滤处理，异常情况的必要控制保护等，都以保证系统的安全、稳定、可靠为准则实现系统的安全保护。

2.2.2 基本结构和原理

热风炉全自动燃烧系统的硬件平台是原热风炉控制系统的 PLC，I/O 模块全部利用原系统的，这样，既降低了硬件费用的投入，也便于操作人员使用与维护。本系统在高炉主控室及液压站各增加上位监控系统一套，主要为生产人员提供输入必要参数的界面和用来监控自动燃烧执行的过程。

系统监控界面主要提供以下功能：

(1)热风炉工艺过程状态和参数的监控和显示；

(2)拱顶温度和拱顶温度等的实时监控曲线和历史曲线；

(3)提供手动投入、退出，加、减烧，在线修改流量设定功能，实现手自动之间的无扰动切换；

(4)提供热水准管理，根据自动分析判断送风炉的时间与风温使用情况，自动进行换炉操作的控制。

(5)提供燃烧过程技术计算。本功能将为热风炉操作所需技术计算提供方便，在本系统中已有煤气热值计算、空燃比计算、理论燃烧煤气用量、理论燃烧温度等，其它技术计算可根据生产实际需要添加。

(6)提供拱顶温度与拱顶温度管理。此部分是按生产工艺参数得出热风炉各燃烧阶段及实际燃烧情况，并给出设定煤气量，由计算机进行定值控制。

该上位监控系统选用研华工控机，操作系统为 Windows XP Professional，开发工具 Microsoft Visual Basic 6.0。原上位监控系统的开发工具为 INTOUCH，编程工具为 CONCEPT2.5。DCS 使用施耐德昆腾系列。

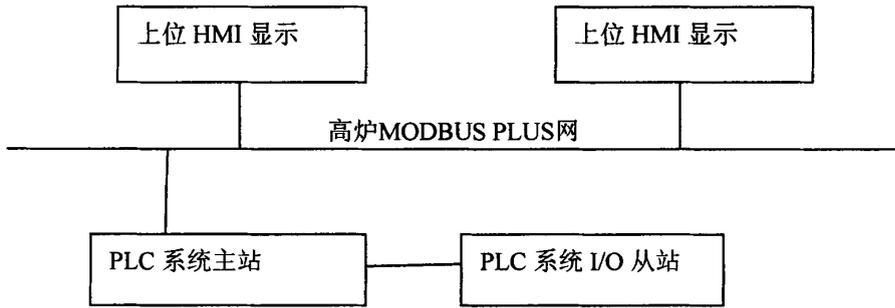


图 2.4 系统框图

Fig. 2.4 System Block Diagram

2.3 本章小结

主要介绍了热风炉的基本概念、和相关的生产工艺以及主要使用的设备、参数等基本情况，并研究了实际中生产设备存在的问题及主要相关控制目标。重点介绍了燃烧系统的设计思想和方法，以及根据现场情况得出的设计方案的基本结构和原理。

第3章 热风炉控制系统的硬件设计

3.1 燃烧控制系统的硬件设计

3.1.1 系统现状

迁安 2#高炉热风炉于 2005 年投产运行。热风炉配置有 5 座，3 座热风炉 2 座预热炉，3 座热风炉为高炉提供持续热风，2 座预热炉为热风炉和自身提供助燃风，在自动化控制设计方面，控制器部分全部采用 QUANTUM PLC 控制器，编程软件使用 concept。上位监控采用 Pentium IV 工业微机，监控软件选用软件包 InTouch。PLC 控制器和各工业监控机通过以太网进行通讯。各工业监控机和上位机还通过以太网进行通讯。PLC 和其各 I/O 站是通过远程 I/O 通讯连接的。热风炉共设计了十个 I/O 机架，分别装在 01G-06G 控制柜内。其中 01G 是主机柜。01G、02G、03G 位于主控室，04G、05G 柜位于液压站，06G 位于煤气加压站。

设计的热风炉控制系统控制回路主要包括以下几个方面：

(1)燃烧系统

设置和计算各种燃烧数据，通过调整参数，管理和控制炉子的加热过程。

(2)换炉系统

根据炉子的状况，安排炉子的送风顺序，自动运行各个阀门，通过阀门的动作组合使炉子改变燃烧、送风、隔断的状态。为操作人员提供可用的显示。

(3)热风炉送风和公用系统

跟所有炉子都相关的设备。例如热风炉混风系统、液压系统等。

(4)热风炉阀门冷却系统

阀门冷却对热风炉燃烧是一个非常重要的部分，在非常高的温度下工作阀如热风阀等，水冷是必要的保护措施，可以减少设备的故障率，同时通过对水温的分析可以确保重要阀门都处于可操作的工作状态下。

3.1.2 设计系统的配置

设计的热风炉自动燃烧系统的硬件平台是利用原系统热风炉控制系统的 PLC，I/O 模块，这样，既降低了硬件费用的投入，也便于操作人员使用与维护。该系统按照设计在高炉主控室及液压站各增加上位监控系统一套，主要为生产人员提供输入必要参数的界面和用来监控自动燃烧执行的功能。

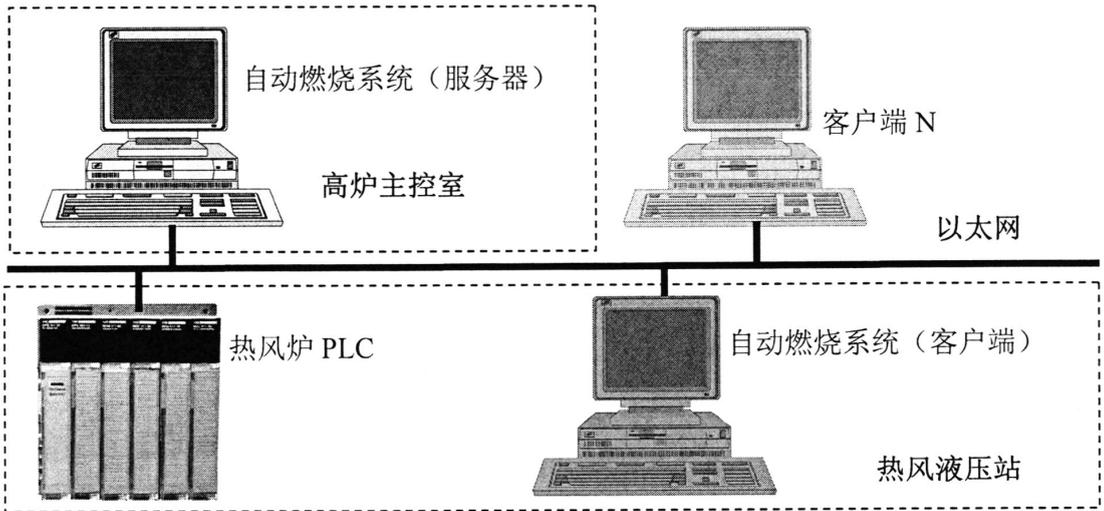


图 3.1 热风炉自动燃烧系统硬件结构

Fig. 3.1 hot blast stove automatic combustion system hardware architecture

设计出的系统监控界面应该主要提供以下功能：

- (1)热风炉工艺过程状态和参数的监控和显示；
- (2)拱顶温度和拱顶温度等的实时监控曲线和历史曲线；
- (3)提供手动投入、退出，加、减烧，在线修改流量设定功能，能够实现手自动之间的无扰动切换；
- (4)提供热水准管理，根据自动分析判断送风炉的时间与风温使用情况，自动进行换炉操作的控制；
- (5)提供燃烧过程技术计算。本功能将热风炉操作所需技术计算提供了方便，在本系统包含有煤气热值计算、空燃比计算、理论燃烧煤气用量、理论燃烧温度等，其它技术计算可根据生产实际需要添加；
- (6)提供拱顶温度与拱顶温度管理。此部分是按生产工艺参数得出热风炉各燃烧阶段及实际燃烧情况，并给出设定煤气量，由计算机进行定值控制。

控制方案中设计上位监控系统选用研华工控机，操作系统为 Windows XP Professional，开发工具 Microsoft Visual Basic6.0。原上位监控系统的开发工具为 INTOUCH，编程工具为 CONCEPT2.5。

在上位监控系统与下位 PLC 之间需要进行数据的通讯，一是将系统运算调节结果传送至 PLC。另外，PLC 所采集的实时工艺参数需要传送至监控界面显示，并进行后台计算。通讯所采用的协议是 MODBUS TCP/IP 协议，它是一种工业以太网通讯协议。

3.1.3 设计实现热风炉自动系统的具体方案

基于迁钢公司的高炉已经投入了生产，整个燃烧方案的设计原则为：不影响高炉的生产；在检修过程更换和安装设备；增加的功能和修改的程序分步实施测试、调试、投入；做好和生产人员的密切配合。

(1)燃烧方面。

(a)设计实现根据高炉工长确定需要的热风温度和当时的煤气热值情况，合理确定燃烧需要的煤气和空气用量。

最佳煤气流量的确定采用流量设定的数学模型，即根据高炉的热风温度和热风流量，高炉煤气实际的热值含量，自动计算满足当前热量需要的煤气流量。同时确定最佳的空气流量。

由于计算过程需要较多的检测参数，因此，计算过程在现有的 PLC 中编程实现，将计算结果送给自动燃烧系统。

(b)设计实现燃烧过程煤气和空气流量的精确定值调节与控制，有效抑制高炉煤气压力的扰动。

燃烧模型可以有效抑制炉煤气压力的扰动对燃烧过程造成的影响。同时采用信号波动切除技术，有效的抑制住调节阀震荡调节的现象，让燃烧过程更稳定、更安全。

(c)设计实现燃烧过程快速寻找最优的空燃比。

采用流量的自动闭环调节，煤气流量的修正过程包含燃烧初始期和蓄热期两个阶段，初始投入自动燃烧系统后，系统经过一定的延时，根据实际的燃烧效果自动修正一次设定值，以保证快速升温。蓄热期则根据拱顶温度的实际上升情况，按照一定的算法，启动推理燃烧模型，寻优最佳的空燃比。

当需要在燃烧过程中人为对设定的煤气和空气流量进行修正时，可以选择煤气和空气流量的手动控制方式，进行人工干预。选择煤气和空气流量的手自动切换时，实现无扰动的切换。选择手动调节方式后，操作人员可以点击加烧，减烧等按钮实现。

流量修正时，根据设定值与过程值的偏差大小选择修正阀位的开度。然后根据偏差存在的时间和大小自动修正阀位。

(d)设计实现燃烧过程适应高炉节奏的变化，自动控制燃烧进程的速度和节奏。

燃烧节奏的控制，系统可以按照初始投入燃烧时拱顶温度，燃烧终点的拱顶温度，以及高炉工长确定的燃烧周期，自动计算理想情况下的拱顶温度的上升速率。当此燃烧

速率确定以后，系统则按照一定的周期比较实际的上升速率，按照理想速率与实际速率之间的差异，自动调整实际的燃料供给，控制燃烧的节奏。另外，系统同时应该提供提供操作人员手动加减烧功能。

(e)设计实现投入燃烧过程。

热风炉的燃烧开始自动实现。当热风炉的状态由送风，隔断转入燃烧时，提示工长是否可以进入燃烧过程。工长确认且自动燃烧系统接收到燃烧状态信号后，即自动进入点火过程。按照先开空气后开煤气的顺序进行。

自动点火的判断：在一定时间内所有采样温度都升高，视为点火成功。初始点火的煤气和空气流量采取参考历史燃烧炉次使用的最佳流量与系统自动计算的最佳流量的方法来确定。先把空气调节阀开 5%，煤气调节阀开 0%，煤气切断阀开过程中，根据上炉燃烧最优流量，空气调节阀开 25%，煤气到相应比例，最后直接到上次的燃烧最优流量。之后，按照残氧指标和热值进行空煤比的微调，小波动信号（压力低于 100pa、流量低于 1000 m³/min）不参与调节。残氧作为调节的参考条件，根据公式理论温度=热值 x 1.2 + 330℃，把热值作为主要计算条件，同时要分析预热空气温度（大约 550℃）和预热煤气（大约 160℃）对温度的影响。

(f)设计实现停烧操作。

当燃烧炉的拱顶温度和拱顶温度同时达到工艺要求的燃烧终了温度时，系统发出燃烧完成的信号到工长操作界面，提示工长此炉已经烧好，经过工长的实际确认，同意停烧，则向系统发出停烧指令，系统则按照先关煤气再关空气的顺序停烧。

(g)设计实现退出和投入自动燃烧之间无扰动切换。

燃烧过程当中，操作人员可以根据实际的工艺情况随时无扰动推出自动燃烧，进入燃烧的手动控制状态。操作人员同时可以由燃烧的手动控制状态无扰动的切换到燃烧的自动控制状态。

(2)换炉方面。

(a)设计实现为高炉工长提供燃烧状况的指示，根据热风炉实际的燃烧情况，可控制热风炉的燃烧，隔断和送风之间状态的转换控制。高炉炼铁是一个连续的过程，热风不能中断，但是一个热风炉不能连续提供热风，因此三个热风炉循环送风可以满足高炉需要的连续供风，根据模型计算最优换炉时间，提示工长是否进行换炉操作，换炉时必须经过工长确认后方可继续执行。

(b)设计实现换炉时间和燃烧时间优化。

换炉时间可以采用固定时间，也可以根据各个炉子的送风能力（单位时间内温降）不同和混风阀位状态等因素，采用一定的算法算出各个炉子的最佳送风时间，有了送风时间和炉况（换炉阀动作的过程时间、炉子可否进行燃烧和送风工作）等因素就可以确定出燃烧时间。工长可以根据实际情况在燃烧开始前进行修改燃烧时间，下一次的燃烧过程即按照设定的燃烧周期来执行。

(3)送风系统方面。

(a)设计实现混风调节。

根据工长设定的风温和热风炉温度，采用抗信号波动干扰技术，有效的控制混风阀，保证给高炉提供平稳的风温。开始送风时混风阀开大约 40%，送风结束时到 0—5%，此时为工长提示换炉操作。

(b)回压阀。

回压阀和热风阀、混风阀都有连锁，高炉停风时，关混风阀，关热风阀，然后开回压阀；送风之前先关闭回压阀，再开热风阀、混风阀。回压阀设计成提示操作，工长确认后才可以继续动作。

3.2 设计方案针对现场情况进行的改造

迁钢的高炉热风炉自动燃烧系统项目设计方案需要解决的主要问题为以下几个方面：

(1)调节阀为气动调节阀，需要更化灵敏度高的控制盒设备，保证控制精度。

(2)增加气源系统的过滤罐，以增强滤水效果，保证气动阀气源安全性。

(3)增加调节阀的阀位反馈，便于操作人员判断调节阀的状态和阀位。

根据以上的功能要求，需要设计研究和改造的内容包括：增加硬件设备，增加软件功能，现有软件的功能修改和现场调试。

(4)设计增加的设备

(a)服务器：热风炉参数存档保留在服务器的数据库中，同时有工长的操作和监视画面。

(b)计算机 HMI：显示热风炉岗位的监视画面。

(c)智能阀门定位器：实现调节阀的精准定位，控制精度 1%。

(d)cpu 模块：增加 cpu 模块内存，保证内存使用率在 40%以内，满足现场通讯速率的要求。

(e)气源过滤装置：提高气源的质量，保证气动式调节阀能正常工作。

(f)混风阀处增加流量计：计算热风炉实际热量输出，从而计算出换炉时间和下次燃烧时间。

(g)增加声卡和音箱：语音提示报警。

(5)设计增加的软件或功能

(a)WIN2000 Professional：计算机操作系统

(b)Visual Studio 2005：编程软件

(c)ORACLE Oracle for Windows：数据库开发软件

(6)设计中的软件修改

(a)现有的 plc 程序修改：和二级系统做接口，满足全自动系统的要求。

(b)现有的上位 HMI 画面修改：满足全自动系统的要求。

(7)设计方案现场的调试

(a)Visual Studio 2005 软件调试，调试工长操作画面和热风炉岗位监视画面和程序，满足全自动系统的功能要求。

(b)ORACLE Oracle for Windows 软件调试，调试服务器数据库，各种热风炉重要数据存档。

(c)PLC 软件 concept 调试，主要调试 plc 程序，和新增的二级系统各自分工，共同完成全自动系统的功能要求。

(d)上位 hmi 软件 intouch 调试，主要调试原有画面，保持原系统的基础上增加新系统接口的融合。

3.3 本章小结

本章研究了热风炉自动燃烧系统的硬件设计情况以及针对现场设备（比如阀门定位器、新的气源过滤装置等）使用情况进行的相应整改措施。

第4章 热风炉相关控制方法研究

本章主要研究了热风炉燃烧设计方案中的两个控制方法，一个是为了保证热风炉煤气燃烧效果而采用的自寻优算法，保证煤气和空气使用量，保证最佳空燃比。二是为了保证蓄热效果，对拱顶温度模糊控制器的设计。

4.1 控制系统的自寻优算法

从各种燃烧装置的实际运行都可知道：如果空气量不足、燃烧不充分，其燃烧效率肯定是不高的；但空气过多也会使排烟带走的热量增加，同样也是不经济的。根据以上分析有如图 4.1 的曲线。

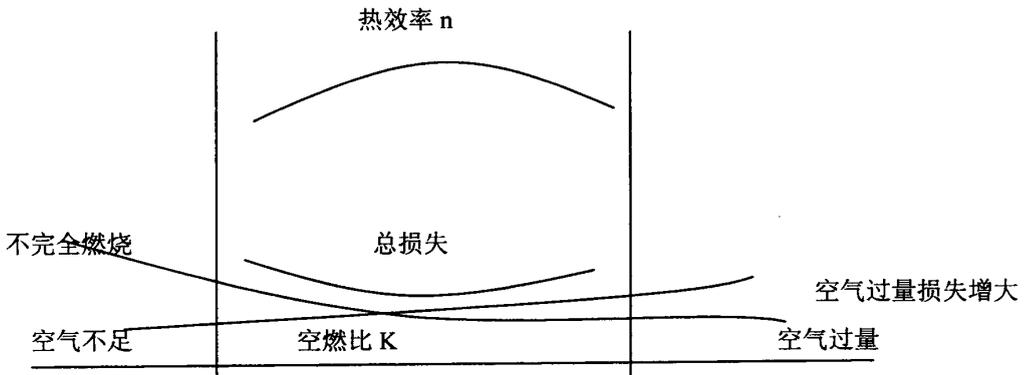


图 4.1 燃烧效率曲线

Fig. 4.1 Combustion efficiency curve

关于燃烧问题存在一个普遍的燃烧效率山顶现象，即热效率对空燃比来说都有一个最大值，可以肯定燃烧效率是空燃比的上单峰函数，这是在燃烧系统进行优化控制的基础。

用改进的极值搜索法设计的自寻优算法模型计算过程如图 4.2 所示：

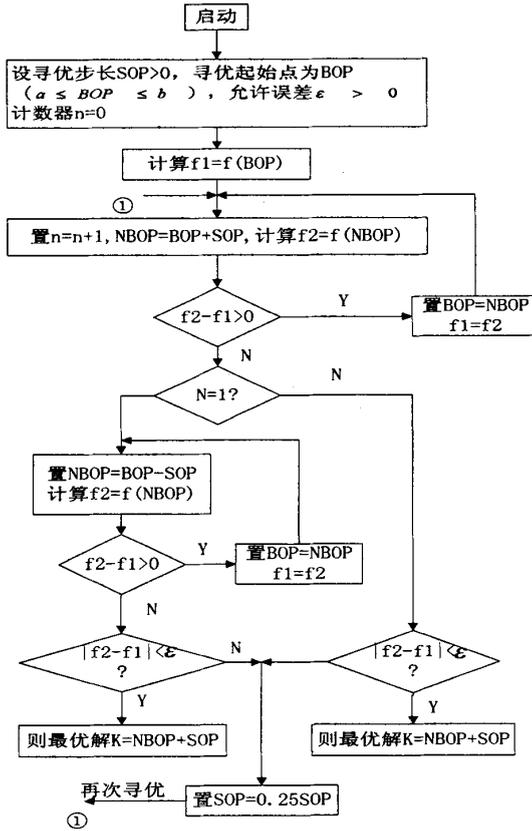


图 4.2 模型框图

Fig. 4.2 Model diagram

本模型具有两个特点：一是具有智能性，无论寻优的起始点在最大值的哪边，它都可以迅速找对优化的方向；二是它可以达到任何所要求的寻优精确度。

4.2 基于自寻优算法的燃烧优化控制方案

热风炉自动燃烧系统是一套高炉热风炉燃烧自动控制系统。该系统由拱顶温度管理、热水准管理、技术计算等部分构成。是以煤气和空气流量的闭环自适应自动调节控制为基础的，以拱顶温度最快，最大的上升速率和烟气温度的均衡稳定上升为目标的自动燃烧控制系统和自动分析判断送风炉的时间与风温使用情况，自动进行换炉操作的自动换炉控制系统的组合。通过对热风炉煤气流量和空气流量的精确定值调节，对煤气压力波动等外界扰动的合理抑制，快速寻优最佳的空燃比，从而实现整个燃烧过程在满足高炉风温需要，节约燃料的前提下，实现热风炉整个燃烧过程自动化控制，且燃烧过程稳定，安全，节能。其燃烧过程实际上是一个非常复杂的综合反应过程，一个典型的多输入单输出的相互影响的复杂系统。要开发功能完备且高效率的自动燃烧控制系统主要

需要完成以下工作：

- (a)确定自动燃烧控制方式，即煤气和空气流量的调节策略。
- (b)总结出控制规律和特点并具体化，结合模糊控制理论，设计相应的模糊控制器。
- (c)通过数学模型技术计算得出燃烧用最佳配比，流量等参数。

热风炉全自动燃烧系统是以数据为基础。数据包括三个来源：一是热风炉生产过程中的主要工艺参数（拱顶温度、煤气流量、空气流量、煤气压力、空气压力等），这些实时工艺参数是系统正常工作的基础。这些数据经过滤波，平均等处理后供给自动燃烧系统使用。二是由操作人员输入的初始数据，这些数据一般在开发和调试过程中就已经输入，使用中可根据实际情况可以适当修改。三是自动燃烧系统根据一定的推理和运算，自动产生的数据（烧火的最佳煤气流量、空气流量等）。

拱顶温度上升速度模糊控制器的主要作用是用来调节煤气流量和空气流量的供给大小。模糊控制器的控制目标为拱顶温度上升速度。因为拱顶温度上升速度是直接反应热风炉燃烧周期快慢的重要参数，因此，选择拱顶温度这个参数作为该模糊控制器的输入信号。在燃烧过程中，调整煤气流量和空气流量的供给大小则可以改变拱顶温度的上升速度。因此，用拱顶温度模糊控制器的输出控制煤气流量和空气流量的修正大小。当拱顶温度的变化速度偏离正常值较大时，则采取较大的流量修正值，当拱顶温度的变化速度偏离正常值较小时，则采用较小的流量修正值。

在上位监控系统与下位 PLC 之间需要进行数据的通讯，一是将系统运算调节结果传送至 PLC。另外，PLC 所采集的实时工艺参数需要传送至监控界面显示，并进行后台计算。通讯所采用的协议是 MODBUS TCP/IP 协议，它是一种工业以太网通讯协议。

为了满足生产的需要，主控室及液压站各增加上位监控系统一套。实现自动燃烧系统的多客户异地操作上位监视系统，为生产人员提供输入必要的参数的界面和用来监控自动燃烧执行的过程。按其功能来分，主要有以下几个部分：

主画面：显示整个热风炉系统工艺流程图和所有工艺过程参数。

分画面：显示单个热风炉的工艺流程和主要的工艺过程参数。

数据输入和选择部分：主要包括煤气流量和空气流量得设定输入、流量控制的手自动选择、燃烧系统的手自动选择等。

趋势显示部分：显示各个热风炉的煤气流量、空气流量、残氧含量、拱顶温度、等的实时和历史趋势。

模型计算部分：可以按当前燃料情况及风温使用情况，技术计算出燃烧用量及配比

等。

在风量控制点的组成中，其一是经验配比下的“基本风量”，它可用优化完毕后的最佳风煤比进行更新；其二是留给操作人员在全自动状态下进行特别干预的“人工干预风量”，有经验的操作人员可用它来辅助优化来达到特别的效果；其三是来自“自寻优算法模型”的“优化风量”，这是在任何情况下寻找到最优工况的可靠手段。虽然无法利用有限的测量变量得到量化的燃烧效率，但可以用它们搭建一个用以表达燃烧效果好坏的中间变量 F ，且有：

$$F=f(\text{TE212}, \text{TE213}, \text{FT211}, \text{FT212}, \text{C1}, \dots, \text{Cn}) \quad (4.1)$$

式中： TE212 ——热风炉拱顶温度， $^{\circ}\text{C}$

TE213 ——热风炉烟道温度， $^{\circ}\text{C}$

FT211 ——热风炉煤气流量， m^3/h

FT212 ——热风炉助燃空气流量， m^3/h

$\text{C1}, \dots, \text{Cn}$ ——一些特定的模型常数

从对式(4.1)的分析可知：在启动优化后的每一次改变风量， F 都将有一个新值被计算出来，直到优化模型判断 F 达到最大为止。此时我们也可以知道，在优化的过程中 F 的绝对量大小并无任何意义，只要它能反映燃烧效果好坏的变化趋势即可。对助燃风量进行优化的操作步骤非常简单：当用优化模型判断优化时机到来时(判断相应回路是否在自动状态、相关仪表是否工作正常、工艺运行是否具备优化的条件、优化参数的设置是否正确等)，系统可自动进行风量的优化过程，当然操作人员也可人工启动优化。

4.3 最佳空燃比的控制方法

对煤气和空气流量采用单闭环控制调节。设定煤气和空气流量为控制目标，煤气和空气调节阀为控制对象，根据设定值与过程值之间的偏差大小自动改变调节阀的阀位，通过调节阀的及时动作，克服煤气流量和空气流量的波动。这种控制方式有以下优点：

(1)最大程度克服了煤气压力的频繁扰动，实现了煤气量的定值控制；

(2)方便了操作人员对煤气和空气流量控制，由控制阀位改为更加精确快捷的流量控制；

(3)热风炉自动化燃烧控制系统的实现

(a)热风炉控制系统采用以下三种控制方式

手动方式 (MAN)

自动方式 (AUT)

串级方式 (CAS)

(b)被控参数与控制参数选择

被控参数：热风炉主要指标是其燃烧加热的温度，所以选炉顶温度为主要参数；而为了得到煤气燃烧的高效率，把拱顶的 O^2/CO 含量作为次要参数。

控制参数：热风炉的燃烧过程中需要煤气和助燃空气的混合，通过分别调节这两个量的大小就可控制炉温和拱顶的 O^2/CO 含量，所以控制参数就是煤气流量和助燃空气流量。

(4)控制方法

(a)单回路控制系统

在自动方式下，采用的是单回路控制系统，即煤气和助燃空气分别是两个独立的闭环控制。其控制框图如图 4.3 所示：

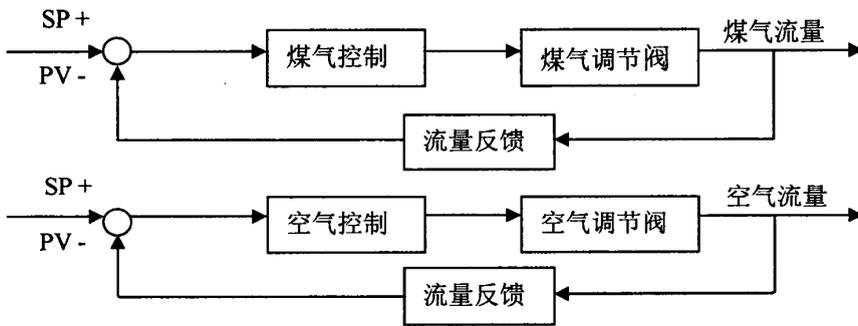


图 4.3 煤气流量和空气流量的单环控制

Fig. 4.3 Gas flow and air flow, single-loop control

(b)比值控制

在燃烧过程中，为了保证其燃烧的经济性，防止大气污染，需要自动保持燃烧煤气与助燃空气量按一定比例混合后送入热风炉。把煤气作为主动量 QG ，助燃空气作为从动量 QA ，比值控制就是使助燃空气按照一定的比例关系跟随煤气量的变化。其控制框图如图 4.4 所示：

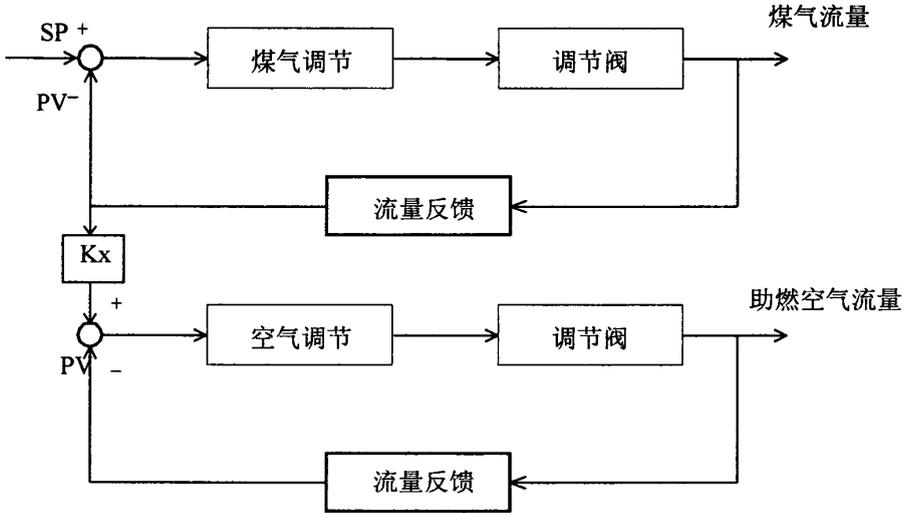


图 4.4 煤气流量和空气流量的比值控制

Fig. 4.3 Gas flow and air flow, ratio control

图 4.4 是一个双闭环比值控制，它在煤气闭环回路与助燃空气闭环回路之间加了一个乘法块。既能实现煤气量的定值控制和抗扰动，又能使助燃空气量比较稳定，从而使混合量比较平稳燃烧。另一优点是升降负荷比较方便，只需改变主动量煤气的设定值，从动量助燃空气自动跟踪升降，并保持原来比值不变。

(c) 串级控制

为了在燃烧过程中进一步提高热风炉的热效率，防止大气污染，需要自动保持煤气与空气量按一定比例混合后送入热风炉。在煤气控制回路引入温度串级控制，通过选定炉顶温度为被控参数，可以使热风炉根据模型设定的温度曲线来控制煤气流量，实现热风炉的炉顶温度跟踪模型的温度曲线变化。串级设定时，给定的炉顶温度偏差不应高于 10 度低于 20 度。此系统中用管道气体流量来控制调节阀的开度，然后再用拱顶 CO/O₂ 含量修定流量设定值。其控制框图如图 4.5 所示：

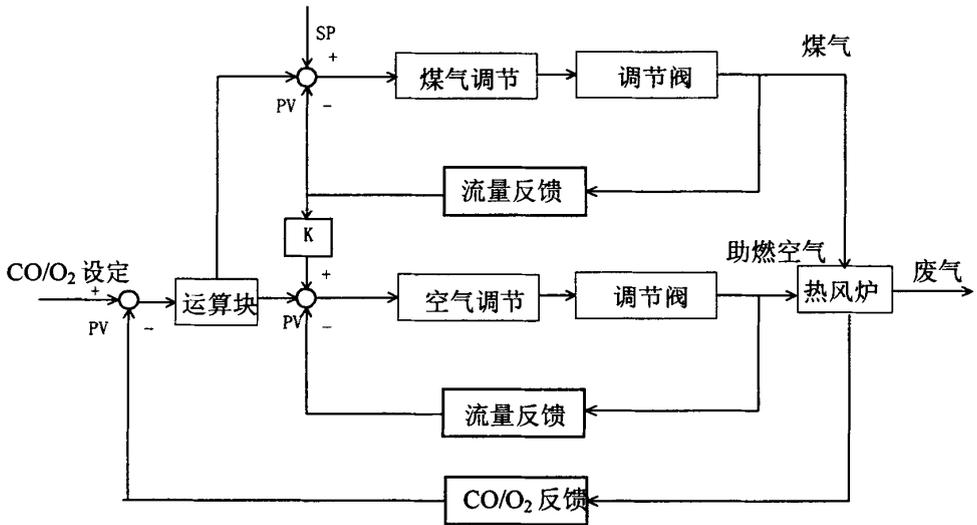


图 4.5 煤气流量和空气流量的串级控制

Fig. 4.5 Gas flow and air flow, cascade control

串级系统和简单系统有一个明显区别，即在结构上形成两个环，里面的环起粗调作用，外面的环用来完成细调任务，以最终满足热风炉燃烧工艺要求。

(d)复合控制

本系统还可以实现煤气和助燃空气的复合比值控制。控制框图如图 4.6 所示：

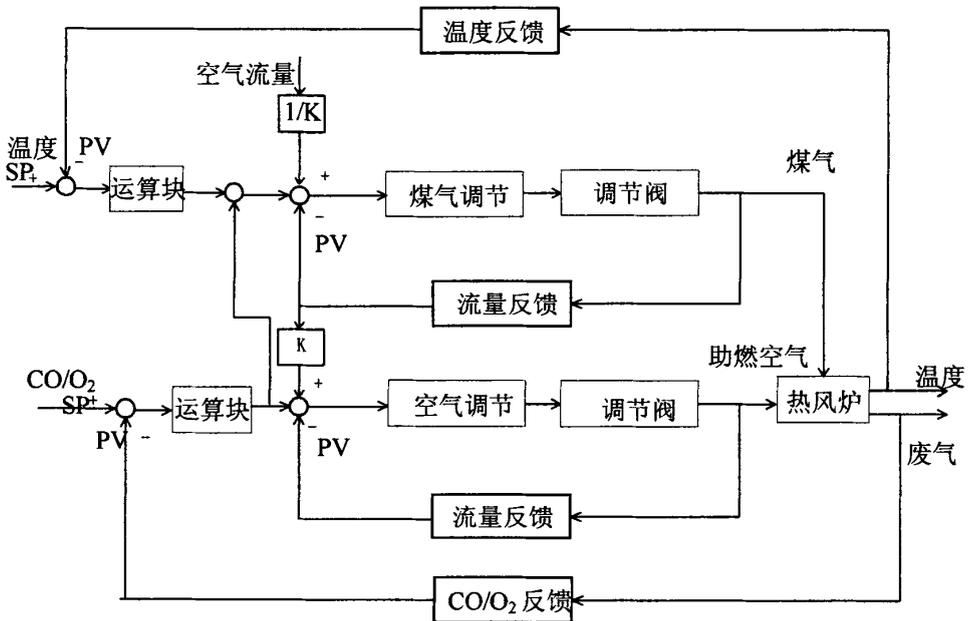


图 4.6 煤气流量和空气流量的复合控制

Fig. 4.6 Gas flow and air flow, compound control

此系统中煤气设定值跟踪助燃空气的流量，助燃空气设定值跟踪煤气的流量。系统是在比值控制稳定后，可选择切换到复合比值控制。

4.4 模糊控制器及优点

模糊控制就是以人的控制经验作为控制的知识模型，以模糊集合、模糊语言变量以及模糊逻辑推理作为控制算法的数学工具，用计算机来实现的一种智能控制。用模糊数学的方法来描述过程变量和控制作用的这些模糊概念以及它们之间的关系，根据这些模糊关系及某时刻过程变量的检测值（需化成模糊量）用模糊逻辑推理的方法得出当前时刻的控制量。

由于模糊控制器的模型不是由数学公式表达的数学模型，而是由一组模糊条件语句构成的语言形式，因此从这个角度上讲，模糊控制器又称为模糊语言控制器。模糊控制适用于非线性系统控制，它与常规控制方法相比有以下优点：

(1)模糊控制是一种非线性控制方法，工作范围广，适用范围广，特别适合于非线性系统的控制。

(2)模糊控制不依赖于对象的数学模型，对无法建模或很难建模的复杂对象，也能利用人的经验知识来设计模糊控制器完成控制任务。而传统的控制方法都要已知被控对象的数学模型，才能设计控制器。

(3)模糊控制具有内在的并行处理机制，表现出极强的鲁棒性，对被控对象的特征变化不敏感，模糊控制器的设计参数容易选择调整。

(4)模糊控制与通常计算机数字控制系统的主要区别是采用了模糊控制（fuzzy controller）。而模糊控制器均以计算机为主，因此，它不仅兼有计算机控制系统所具有的数字控制精确性和软件编程的柔软性，而且可以拥有友好的人—机界面，操作简单方便，容易实现。

模糊控制器是模糊控制系统的核心。一个模糊控制系统的性能优劣，主要取决于模糊控制器的结构、所给出的模糊规则和采用的合成推理算法以及模糊决策方法等因素。模糊控制器由输入量模糊化接口、数据库、规则库、模糊推理机和输出解模糊化五部分组成。如图 4.7 所示。

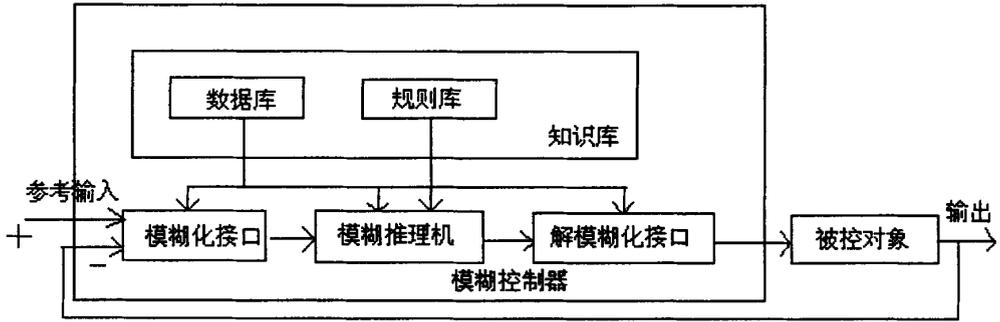


图 4.7 模糊控制器基本结构图
Fig. 4.7 Basic structure of fuzzy controller

4.4.1 模糊化

进行模糊控制时，模糊推理过程是通过模糊语言变量进行的，在清晰量和模糊量之间有一定的对应关系。这种把物理量的清晰值转换成模糊语言变量值的过程叫做清晰量的模糊化。

通常把系统输出反馈与给定值之间的误差 e 和误差变化率 Δe 作为模糊控制器输入语言变量 E 和 EC ，其语言值实际上是一个模糊子集，是通过隶属函数来描述的。语言值隶属函数又称为语言值的语言规则，它可以以连续函数或离散量化等级形式出现，前者比较准确，后者简洁直观。在实际控制问题中，根据能满足一般要求，又可简化计算的原则。以下介绍常见的五种隶属函数：

(1) 高斯型隶属函数。

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \tag{4.2}$$

高斯型隶属函数有两个特征参数 σ 和 c 。例如，如果 $x = [0, 10]$ ， $\sigma = 2$ ， $c = 5$ 则隶属函数曲线如图 4.8 所示。

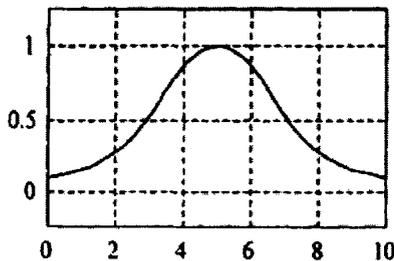


图 4.8 高斯型隶属函数曲线图
Fig.4.8 Membership Function of Guess

(2) 梯形隶属函数。

$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (4.3)$$

或
$$f(x, a, b, c, d) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}), 0) \quad (4.4)$$

梯形隶属函数有四个参数 a, b, c, d 。例如，如果 $x = [0, 10]$ ， $a = 1, b = 5, c = 7, d = 8$ ，则梯形隶属函数曲线如图 4.9 所示。

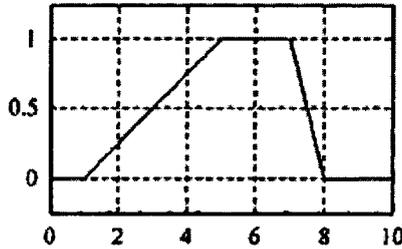


图 4.9 梯形隶属函数曲线图

Fig.4.9 Membership Function of Trapezium

(3) 三角形隶属函数。

$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (4.5)$$

三角形隶属函数有三个参数 a, b, c 。例如，如果 $x = [0, 10]$ ， $a = 3, b = 6, c = 8$ ，则三角形隶属函数曲线如图 4.10 所示。

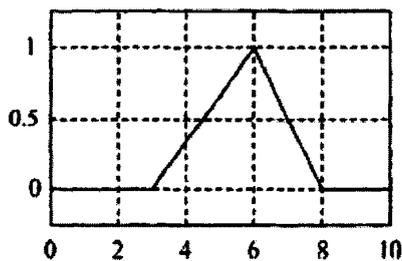


图 4.10 三角形隶属函数曲线图
Fig.4.10 Membership Function of Triangle

(4) sigmoid 函数型隶属函数。

$$f(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \tag{4.6}$$

Sigmoid 函数型隶属函数有两个特征参数 a 和 c 。例如，如果 $x = [0,10]$ ， $a = 2$ ， $c = 4$ ，则 sigmoid 函数型隶属函数曲线如图 4.11 所示。

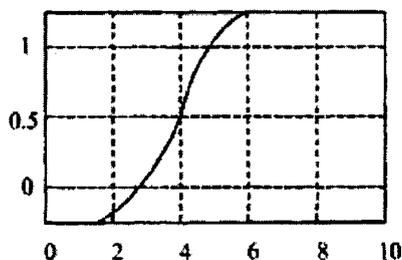


图 4.11 sigmoid 型隶属函数曲线图
Fig.4.11 Membership Function of Sigmoid

(5) Z 形隶属函数。

Z 形隶属函数有两个参数 a ， b 分别为隶属函数曲线中斜线部分极点的位置。例如，如果 $x = [0,10]$ ， $a = 3$ ， $b = 7$ ，则 Z 形隶属函数曲线如图 4.12 所示。

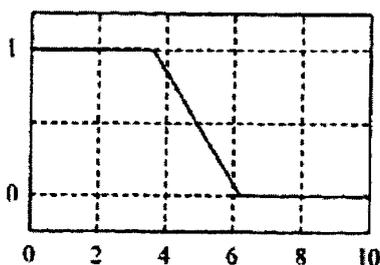


图 4.12 Z 型隶属函数曲线图
Fig.4.12 Membership Function of Zigzag

4.4.2 模糊数据库和规则库

数据库和规则库这两部分合起来构成的知识库包含了该模糊控制器在具体应用领

域中的知识和所要求的控制目标。数据库主要包括各种语言变量的隶属函数，输入输出的尺度变换因子以及对输入输出空间所进行的模糊划分的级数等；规则库包括用语言变量所描述的一整套模糊控制规则，由于控制规则一般来源于专家经验知识，所以规则库反映了此具体应用领域内的控制经验和知识。知识库是模糊控制系统必不可缺的基础。模糊规则库包含有与过程相关的经验型知识，控制规则就是这些规则的描述。规则库存放的知识可以用一簇规则的形式给出或用矩阵表的形式给出。

(1) 用语言规则形式描述的规则库的格式如下：

$$\begin{aligned}
 r_1: & \text{ 若 条件 } P_1 \text{ 则 结论 } C_1 \\
 r_2: & \text{ 若 条件 } P_2 \text{ 则 结论 } C_2 \\
 & \dots\dots \\
 r_n: & \text{ 若 条件 } P_n \text{ 则 结论 } C_n
 \end{aligned}$$

对于规则 r_k ，有

$$P_k = P_{k1} \text{ and } P_{k2} \text{ or } (\text{not } P_{k3}) \tag{4.7}$$

即条件 P_k 可以是多个条件的组合。同样，对于规则的结论也可以不只一个，即

$$C_k = C_{k1} \cdot C_{k2} \tag{4.8}$$

(2) 用矩阵表形式描述的规则库如表 4.1 所示：图中 NB 为负大，NS 为负小，ZE 为零，PS 为正小，PB 为正大。

表 4.1 控制规则的矩阵表
Table 4.1 Matrix of control rules

		输入变量 x_1				
		NB	NS	ZE	PS	PB
输 入 变 量 x_2	NB	NB	NS	ZE	PS	PS
	NS	NS	NS	ZE	PS	PB
	ZE	ZE	ZE	PS	PB	PB
	PS	ZE	ZE	PS	PB	PB
	PB	ZE	NS	PB	PB	PB

这一矩阵表上有 $5 \times 5 = 25$ 条控制规则。依此类推，若每个输入语言变量划分的级数增加到 7 档，那么就需要多至 49 条规则才能全部覆盖。

4.4.3 模糊推理

模糊推理包括三个组成部分：大前提、小前提和结论。大前提是多个多维模糊条件语句，构成规则库；小前提是一个模糊判断语句，又称事实。以已知的规则库和输入变

量为依据，基于模糊变换推出新的模糊命题作为结论的过程叫做模糊推理。

模糊推理机是模糊控制系统的核心，它具有模拟人的基于模糊概念的推理能力。模糊推理机运用知识库内的模糊规则，按照模糊逻辑中的蕴涵关系以及各种模糊推理方法进行模糊推理。所以，模糊系统中的知识库和推理机是紧密结合的。

模糊推理机根据模糊逻辑法则把模糊规则库中的模糊“if-then”规则转换成某种映射，即将： $U = U_1 \times U_2 \times A \times U_R \subset R^n$ 上的模糊集合映射成 V 上的模糊集合。

4.4.4 清晰化

清晰化又称去模糊化和反模糊化。模糊推理所得的结果是一个模糊集或者是它的隶属函数，不能直接用于作为控制器，因而还必须作一次转换，将模糊量转换为清晰的数字量。清晰化有各种方法，下面是几种常用的方法。

(1) 最大隶属度法

最大隶属度法是指选取推理结论的模糊集中隶属度最大的元素作为控制量的方法。例如模糊集 C ，所选取的隶属度最大的元素 u^* 应满足：

$$\mu_c(u^*) \geq \mu_c(u), u \in U \quad (4.9)$$

这种方法的优点是简单易行，缺点是它囊括的信息量较少，因为这种方法完全排除了其他一切隶属函数较小元素的影响。

(2) 重心法

重心法是指取模糊集隶属函数曲线同基础变量轴所围面积的重心对应的基础变量值作为清晰值的方法。重心法的计算公式在输出量隶属函数为连续变量情况下可表示为：

$$u^* = \frac{\int_{MIN}^{MAX} u \mu(u) du}{\int_{MIN}^{MAX} \mu(u) du} \quad (4.10)$$

其中， u^* 为清晰化输出量， u 为输出变量， μ 为模糊集隶属函数， MIN 为清晰化值的下限， MAX 为清晰化值的上限。

(3) 加权平均法

加权平均法是指以各条规则的前件和输入的模糊集按一定的法则确定的值 k^i 为权值，并对后件代表值 u_i 加权平均计算输出的清晰值 u^* 的方法。其计算公式为：

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n k_i k_u}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (4.11)$$

其中， i 为规则序号， n 为规则总数。可根据每条控制规则对系统品质不同的影响，进行有意识的人为调节。

模糊控制自动化燃烧技术的优点

热风炉是一个非线性的、大滞后系统，影响热风炉的因素有很多，并且各种因素相互牵制，因此导致它的控制过程非常复杂，很难用精确的数学模型描述。

模糊控制以模糊集合、模糊语言变量、模糊推理为其理论基础，以先验知识和专家经验作为控制规则。模糊控制自动化燃烧技术是从热风炉现场仪表送出的数据中，获取热风炉的拱顶温度、拱顶温度、煤气流量、空气流量、煤气及空气压力的多项参数，经过双路隔离器隔离后，一路送回原有控制系统的 I/O 模块，另一路送到装有新程序的专家智能模糊控制数据库中。各项数据参数经此技术的软件运算处理后，先与上一次烧炉的空燃比等参数对比，在 1-2min 内寻找到本次热风炉燃烧的最佳配比值，并不断的将现有的空燃比、拱顶温度、拱顶温度、烧炉时间等参数送回数据库中，有数据库运算后决定当前在线空燃比是否最佳、是否需要修正，保证当前的空燃比随时处于最佳状态，确保热风炉在单位时间内获得最大的蓄热量，达到提高风温、节省煤气的效果。

采用模糊控制自动化燃烧技术，一是在最短时间内可寻找出最佳的空燃比；二是自动控制整个燃烧过程，不需要人为操作，三是拱顶及烟道温度控制可达到设定值；四是在规定的时间内能将热风炉烧到最佳状态。

4.5 拱顶温度模糊控制器的设计

在热风炉的燃烧过程进入稳定状态后，系统开始热风炉燃烧节奏的控制，采用模糊控制的方法，根据拱顶温度在采样周期内的实际上升值与初始计算的标准上升值的差值的大小和变化率，快速修正燃料供给。

(1) 模糊控制器的设计

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

(a)确定模糊控制器的输入变量和输出变量;

(b)归纳和总结模糊控制器的控制规则;

(c)确定模糊化和非模糊化的方法;

(d)选择论域并确定有关参数;

(e)模糊控制器的软硬件实现;

(f)合理确定采样时间;

拱顶温度上升速度模糊控制器的设计如下:

(a)确定模糊控制器的输入变量和输出变量;

输入变量为: 拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 和采样周期内温度的变化率 ΔT 。

拱顶温度在采样周期内温度的变化 T 的模糊子集为:

{正大大, 正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大, 负大大}

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

拱顶温度采样周期内温度的变化率 ΔT 的模糊子集为:

{正大大, 正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大, 负大大}

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

输出变量为控制信号 U , 其模糊子集为:

{正大大, 正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大, 负大大}

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

(b)归纳和总结模糊控制器的控制规则

根据采对实际工艺及控制的分析, 总结出拱顶温度上升速度模糊控制器的控制策略, 可以获得如下表所示的模糊控制规则表 4-2 所示:

(c)选择论域并确定有关参数

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

根据拱顶温度上升速度模糊控制器输入信号的量程和正常燃烧状态下采样周期内的变化的大小, 确定了相关的输入变量的论域范围:

表 4.2 拱顶温度上升速度模糊控制器的控制规则

Table 4.2 Temperature increases the speed dome control rules of fuzzy controller

$\Delta T \backslash T$	PB+	PB	PS+	PS	Z	NS	NS+	NB	NB+
NB+	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB+	PB+
NB	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB+
NS+	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PB
NS	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB
Z	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PS	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PS+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
PB	NB+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS
PB+	NB+	NB+	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z

拱顶温度上升速度在采样周期内温度的变化 T 的论域范围为 $(-4,4)$ ；

拱顶温度上升速度的变化率 ΔT 的论域为 $(-0.4,+0.4)$ ；

根据输出信号对拱顶温度的影响的程度，确定输出信号的论域范围：输出量为 U ，论域范围为 $(-400,400)$ ，400 表示的机器数，对应的阀位为 +10%。

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

(d)确定模糊化和非模糊化的方法

根据前述对隶属函数选择的原则，要求所选则的隶属函数分辨率和控制灵敏度较高，在整个论域上分布要合理以及各模糊子集（尤其是相邻的两个模糊子集）之间的相互关系和影响，并结合编程软件实现三角形的隶属函数。并根据论域的选择，确定了各个模糊控制器的隶属函数形状。

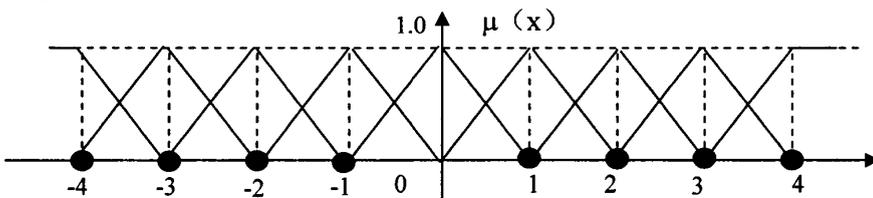


图 4.13 拱顶温度上升速度在采样周期内温度的变化 T 隶属函数曲线

Fig.4.13 Vault temperature rise rate of temperature change in the samplingperiod T curve membership function

对应的隶属度函数赋值如表 4-3 所示。

表 4.3 拱顶温度上升速度在采样周期内温度的变化 T 隶属函数曲线

Table 4.3 Vault temperature rise rate of temperature change in the sampling period T curve membership function

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

拱顶温度上升速度的变化率 ΔT 的论域为 $(-0.4,+0.4)$ 其隶属函数如图 4-14 所示。

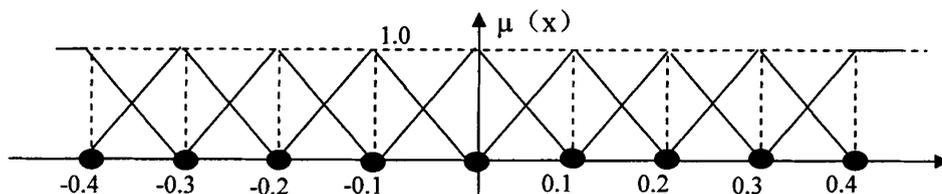


图 4.14 拱顶温度上升速度的变化率 ΔT 隶属函数曲线

Fig.4.14 Vault temperature rise rate of change of velocity curvemembership function

对应的隶属函数赋值如表 4-4 所示。

表 4.4 拱顶温度上升速度的变化率采样周期内温度的变化率 ΔT 的隶属度赋值表

Table 4.4 Vault temperature rise rate of temperature change rate of the sampling period the rate of change of membership assignmenttable

ΔT	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4
PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
PS+	0	0	0	0	0	0	1	1	0
PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NS+	0	1	1	0	0	0	0	0	0
NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0

拱顶温度上升速度模糊控制器输出量为 U ，论域范围为 $(-400,400)$ ，其隶属函

数如图 4-15 所示，对应的隶属函数赋值表 4-5 所示：

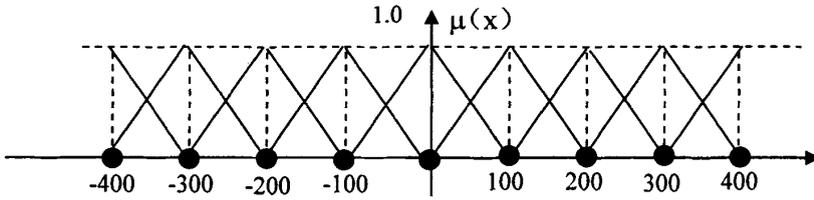


图 4.15 拱顶温度上升速度的输出量 U 隶属函数曲线

Fig.4.15 Vault temperature rise rate of output membership function curves of U

表 4.5 拱顶温度上升速度的变化率输出量 U 的隶属度赋值表

Table 4.4 Vault temperature rise rate of change of output speed U of the membership assignment table

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

(e)模糊控制器的实现

具体的计算过程为：

将监控系统的主画面作为监控系统的启动画面，同时初始化事件程序。程序主要的任务是从各个模糊控制器的输入输出变量的文本文件读入各个模糊控制器的模糊变量隶属度赋值表到相应的数组变量中，然后按照模糊关系的推理方法生成相应的规则库。由规则表可以看到，模糊控制规则表实际是由 9×9 条模糊规则组成的，比如第一条模糊控制规则可以表示为：

$$\text{If } E = NB+ \text{ and } EC = PB+ \text{ then } U = Z \tag{4.12}$$

与上述条件语句对应的模糊关系矩阵可以按照下面的方法计算：

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

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

第三步：求取 $A \times B$

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

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

第六步：求取 $R_i = R \times C$ ；

同理，可以求取另外 80 条模糊控制语句相对应的模糊关系矩阵 $R_2, R_3, R_4, \dots, R_{81}$ 。

最后，根据上述已知的 $R_i, i = 1, 2, 3, \dots, 81$ ，可求得与模糊控制规则表相对应的模糊关系矩阵，即

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

然后按照模糊关系的直积运算法则（取小法则）计算。

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

(f) 拱顶温度模糊控制器具体过程如下：

- (1) 读取投入自动燃烧时计算出的此次燃烧拱顶温度需要满足的上升速率；
- (2) 判断当前的工况，满足条件则计算拱顶温度实际的上升速率；
- (3) 以拱顶温度在采样周期内的实际上升值与初始计算的标准上升值的差值的大小和变化率为输入参数，输入拱顶温度上升速度模糊控制器；
- (4) 根据拱顶温度的上升速度偏离正常值得大小，快速修正燃料。

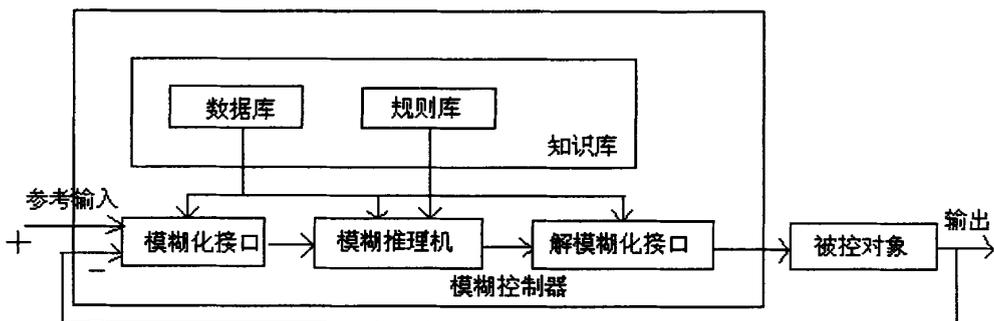


图 4.16 拱顶温度模糊控制器基本结构图

Fig. 4.16 Vault temperature basic structure of fuzzy controller

4.6 本章小结

研究了设计方案中的自动燃烧系统的自寻优算法。研究了设计方案中基于自寻优算法的热风炉自动燃烧系统。详细研究了设计方案中的自动燃烧系统的最佳空燃比的确定方法。主要介绍模糊控制器的五个组成部分：输入量模糊化接口、数据库、规则库、模糊推理机和输出解模糊化，以及各部分主要常用方法。根据模糊控制器设计原则，对热风炉燃烧时拱顶温度进行了模糊控制器的设计。

第5章 控制系统的软件设计与应用情况分析

5.1 系统的配置及具体方案

热风炉燃烧系统的硬件平台是原热风炉控制系统的 PLC，I/O 模块全部利用原系统的，这样，既降低了硬件费用的投入，也便于操作人员使用与维护。本系统在高炉主控室及液压站各增加上位监控系统一套，主要为生产人员提供输入必要参数的界面和用来监控自动燃烧执行的过程。

系统监控界面主要提供以下功能

(1)热风炉工艺过程状态和参数的监控和显示。

(2)提供燃烧过程技术计算。本功能将为热风炉操作所需技术计算提供方便，在本系统中已有煤气热值计算、空燃比计算、理论燃烧煤气用量、理论燃烧温度等。

(3)提供拱顶温度与拱顶温度管理。此部分是按生产工艺参数得出热风炉各燃烧阶段及实际燃烧情况，并给出设定煤气量，由计算机进行定值控制。

该上位监控系统选用研华工控机，操作系统为 Windows XP Professional，开发工具 Microsoft Visual Basic 6.0。原上位监控系统的开发工具为 INTOUCH，编程工具为 CONCEPT2.5。

在上位监控系统与下位 PLC 之间需要进行数据的通讯，一是将系统运算调节结果传送至 PLC。另外，PLC 所采集的实时工艺参数需要传送至监控界面显示，并进行后台计算。

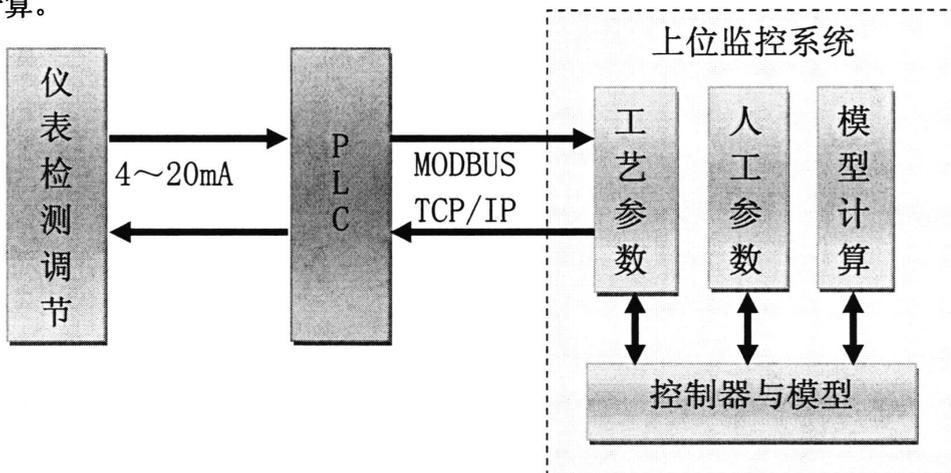


图 5.1 控制系统数据结构
Fig.5.1 Control system data structures

5.2 系统的软件实现

设计出一种性能优越的算法是实现控制要求的首要保证，而如何在现有的技术条件和被控对象所处的环境下实现这些算法是理论应用于实际的重要环节。PLC 程序是整个自动燃烧模糊控制系统的核心，也是连接现场信号和上位机的纽带。根据工艺设备的控制要求及控制系统应实现的功能。

(1)空气和煤气流量修正

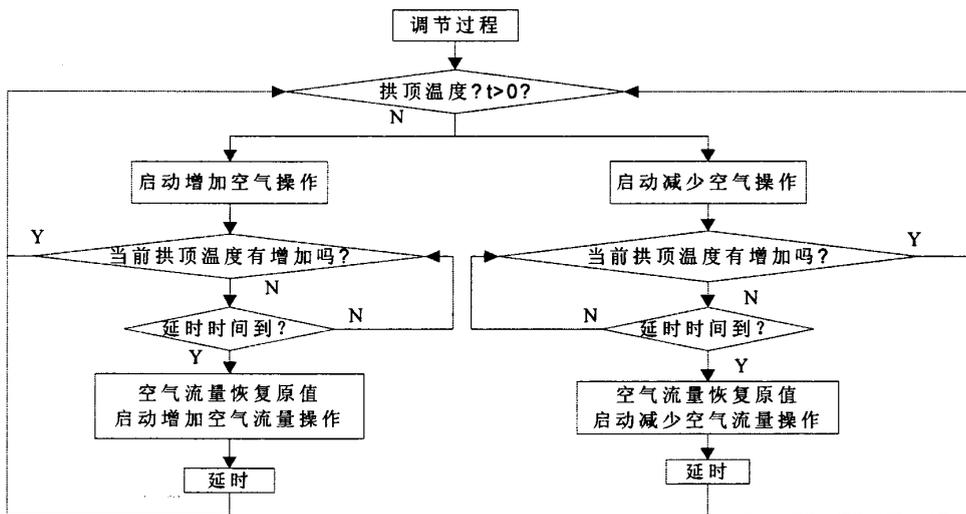


图 5.2 空气和煤气流量修正过程
Fig.5.2 Air and gas flow rate correction process

(2)系统停烧过程

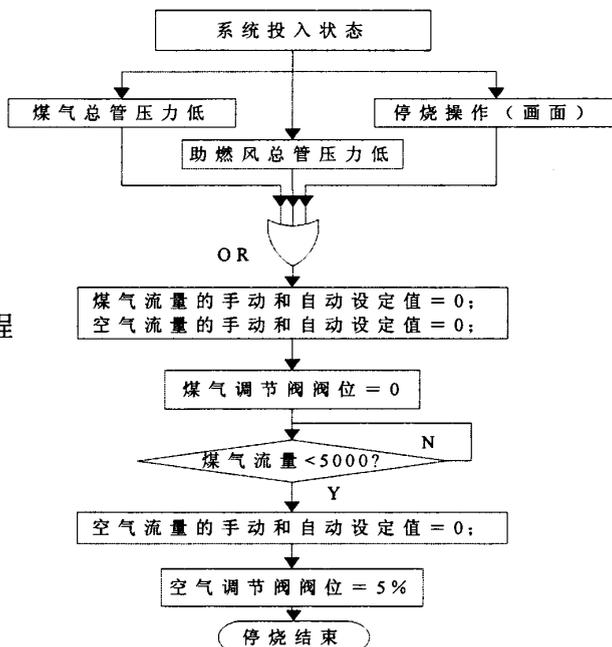


图 5.3 系统停烧过程
Fig.5.3 System stops burning process

(3) 软件系统的特点

(a)多用户控制系统结构,即多用户相互之间可以无扰动自由切换工作方式,前提是原控制器放弃控制权并成为监视器后,其它监视器才能得到控制权成为控制器,此结构能灵活地满足现场生产过程中的异地操作控制。

(b)OPC 远程数据服务器通讯方式。通讯方式灵活,数据传输快速、可靠和稳定,各用户均通过数据服务器与下位 PLC 进行通讯。避免了众多数据用户与下位 PLC 间的大量数据的交换,提高了下位 PLC 的运行效率。

(c)热风炉控制过程全部自动化,提供便捷的操作手段,力求操作简单规范,将点火、调节、停烧、换炉等工作规范化、程序化,无需人为干预;若要人工干预,则只需点击功能按钮即可完成相应操作。

(d)煤气和空气流量控制引入非简单负反馈方式闭环控制,由于高炉煤气压力波动的频繁性、无规律性和往复性,使传统闭环控制或前馈控制都无法满足控制要求。当煤气压力发生波动,若马上调节阀动作,由于调节阀的动作和流量检测的滞后,调节效果还未显现,此时煤气压力的波动已消除或已向相反方向变化。这样调节效果正好与系统实际情况相反,只会给系统带来更为频繁和不可预见的干扰。这时,调节系统实际进行了无效调节即多余调节。调节效果就使得整个系统偏差更大,更不稳定。为避免发生上述情况,自动燃烧系统在调节阀前,先按照一定算法,判断当前偏差是否该去调节。若短时间或相对较小的偏差干脆就不去调节。正是采取了这种调节策略,使得当前自动燃烧系统能较为有效的克服煤气压力波动对流量造成的影响,很大程度的保证系统稳定。

(e)燃烧过程最优空燃配比确定,即能通过自寻优过程确定,达到快速调节修正燃料的目的;自寻优空燃比以拱顶温度为主要依据,而不依赖拱顶含氧量等检测数据,是因为热风炉整个燃烧过程中最为敏感而有效的参量就是拱顶温度。当配比合理,燃烧充分时,拱顶温度会马上反映出上升趋势,反之则呈下降趋势。因此,由拱顶温度的变化情况,很容易判断当前燃烧的状态变化。当拱顶温度发生不上升或下降的情况时,则反应燃料配比或热值已发生变化,此时,应启动寻优空燃比过程,寻找一个更适合当前状态的空燃比例系数。数学模型计算值,则是通过精确计算煤气热值及损耗得到一个最适合当前时刻的空燃比。

(f)根据热风炉燃烧工艺特点,按照燃烧过程中不同阶段选定不同控制目标,采取不同控制方案。燃烧初期以拱顶温度快速上升为目标,确保煤气和空气流量配比,并据实际拱顶温度的上升情况,自动修正当前煤气和空气流量,保证快速升温。蓄热期(以拱

顶温度达到或接近最高温度为标志)以拱顶温度的恒温或缓慢上升为目标,确保煤气和空气流量稳定,将压力波动造成的影响降到最低。同时控制烟道温度均衡变化,根据燃烧时间,准确计算拱顶温度上升速率,自动修正燃料供给的多少,控制烟道温度上升速率,在保证热风炉充分蓄热的基础上,实现燃烧过程的平稳均衡及节能的最大化;

(g)模糊控制的使用。该方法模仿人的思维方式和控制经验,用电脑代替人脑来实施有效的控制措施,可以把人的经验形式化并引入控制过程,再运用比较严密的数学处理过程,实现模糊推理,进行判断决策,以达到令人满意的控制效果。目前,模糊控制主要还是建立在人的直觉和经验基础上,也就是说,操作人员对被控系统的了解不是通过精确的数学表达式,而是通过操作人员丰富的实践经验和直观感觉。这种方法可以看成是一组探索式决策规则。由于人的决策过程本质上就具有模糊性,因此,控制动作并非稳定一致,且有一定的主观性。但是,有经验的模糊控制设计可以通过对操作人员控制动作的观察和与操作人员的交谈讨论,用语言把操作人员的控制策略描述出来,构成一组用语言表达的定性的决策规则。如果把熟练技术工人或技术人员的实践经验进行总结和形式化描述,用语言表达成一组定性的条件语句和不精确的决策规则,然后利用模糊集合作为工具,使其量化,设计成控制器,用形式化的人的经验去模仿人的控制策略,再驱动设备对复杂的工业控制过程进行控制,这就是模糊控制器。根据模糊控制的特点,本系统中设计了拱顶温度上升速度模糊控制器。该控制器完全模仿人对燃烧速度的判断及操作,自动实现热风炉燃烧速度的控制,通过实际应用,控制效果明显。

(h)控制系统中使用了自学习和自寻优控制算法,对系统中重要的参数进行自学习和寻优处理。一个控制系统,只有适用范围更宽,适应性更强,且能根据实际的控制效果进行自学习,自修正,那么它的使用效果才能保持在最佳状态。为了使系统有良好的适应能力,最佳的初始燃烧煤气和空气流量值的确定,采用了学习参考炉次燃烧状况的自寻优算法。修正空燃比的修正流量的大小的绝对值的确定,采用了根据设定值的大小范围自寻优确定的算法,当设定值较大时,修正的范围较大,当设定值较小时,采用较小的修正值;通过使用自学习和自寻优算法,使系统的灵活性和自适应性明显提高。

(i)原手动燃烧与全自动燃烧过程之间实现无扰动相互切换,操作人员可自由切换,切换过程是在保证调节阀原状态不变的情况下进行的,所有控制操作都是在此状态下完成。

(j)自动燃烧过程具有安全连锁保护及与换炉过程的紧密连锁控制功能,同时,提供重要参数及操作的报警提示。

5.3 上位机监控系统的实现

下面几幅图是软件在现场的使用情况介绍。

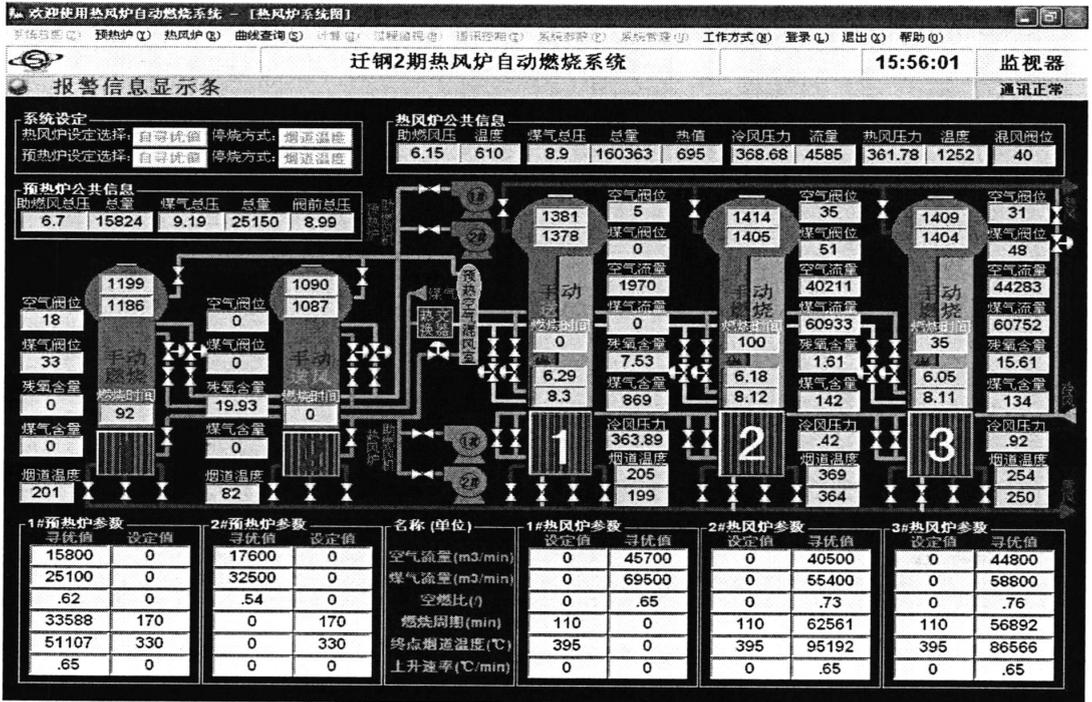


图 5.4 系统总画面
Fig.5.4 Total system picture

当需要控制某一具体的热风炉，可以点击总画面的相应图例或菜单上的相应炉号即进入具体的操作界面。

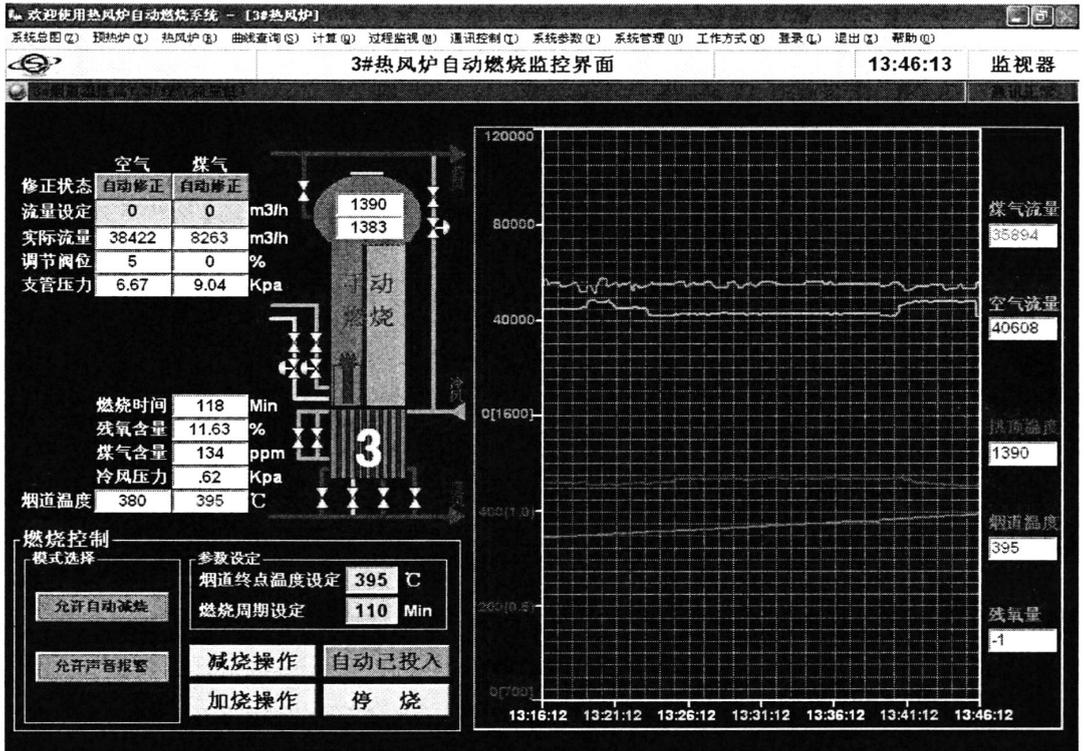


图 5.5 系统分画面
Fig.5.5 System screen

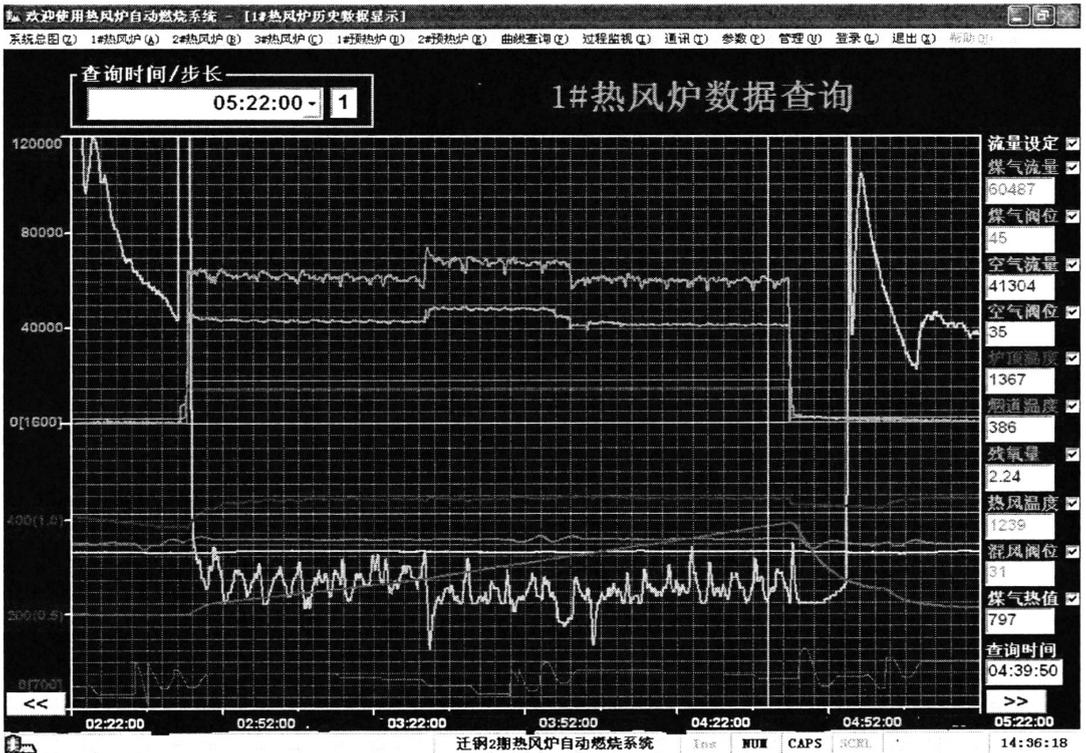


图 5.6 历史数据查询画面
Fig.5.6 Historical data query screen



图 5.7 模型计算画面
Fig.5.7 Model picture

模型计算可对热风炉进行在线或离线理论模型计算，用来分析热风炉的操作过程是否合理，以改进燃烧过程。其中有一部分参数是需要用户设定后保存；另一部分是通过过程数据进行计算所得需要过程数据准确。

模型计算包括对煤气成份的干湿转换、煤气热值计算、理论用空气量、实际用空气量、理论空燃比、拱顶成份、烟气比焓、理论燃烧温度、热效率、使用煤气量，使用空气量等。

过程监控画面主要监视控制过程的走向与处理，用于分析整个控制过程的合理性与判断的准确性。

控制系统参数画面主要有报警项参数、历史数据保存参数、基础数据处理参数、调节阀控制参数、系统过程控制参数等，其中大部分为系统控制参数。每个设置项均直接影响控制过程效果。



图 5.8 过程监视画面
Fig.5.8 Process monitoring screen

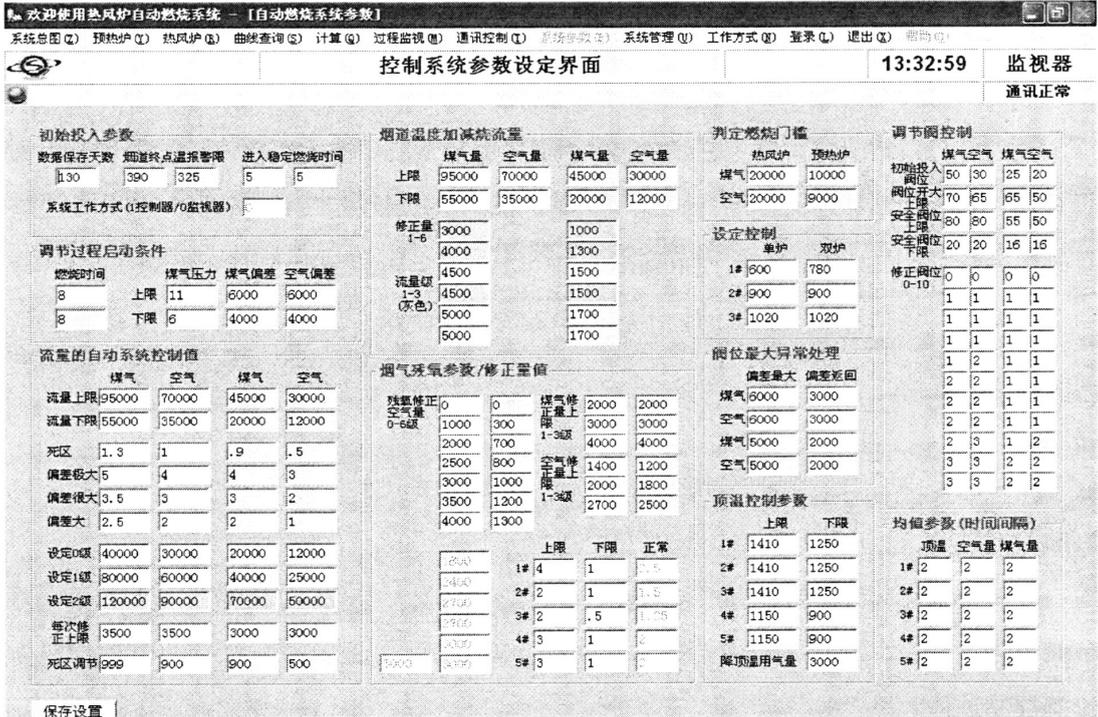


图 5.9 控制参数画面
Fig.5.9 Control parameters screen

的。另外，从实际应用来看，热风炉烧火操作较以前有了很大变化，从初始煤气和空气流量的确立；双炉、单炉烧火的过渡；煤气和空气流量的自动修正，烟道温度的均衡控制；停烧、换炉过程的自动控制，基本上无须人为干预，减轻了操作人员的工作强度，实现了全自动控制的要求。同时，自动燃烧系统整体上提高了燃烧过程的安全性。系统增加了点火过程和停烧过程的程序连锁和确认保护。如：点火时只有当空气流量达到设定值，煤气调节阀才能动作。从根本上避免操作人员先设定空气调节阀开度，再设定煤气调节阀开度，一旦遇到空气调节阀出现故障，往往造成煤气送出而空气未送出或者送出量极小的危险情况；停烧时，只有当煤气流量确认回零后，空气调节阀才能关闭，避免了操作人员为了提高操作的快速性，而未完全做到在煤气流量回零后再关空气调节阀的问题，因此，也就会存在煤气未回零，空气流量就回零的危险情况，从而在最大程度上保证了安全。

另外，自动燃烧系统还增加了拱顶温度、煤气和空气流量、点火、停烧等报警提示功能，能够及时给操作人员提示重要报警信息，避免了因发生意外情况而造成对生产的影响。

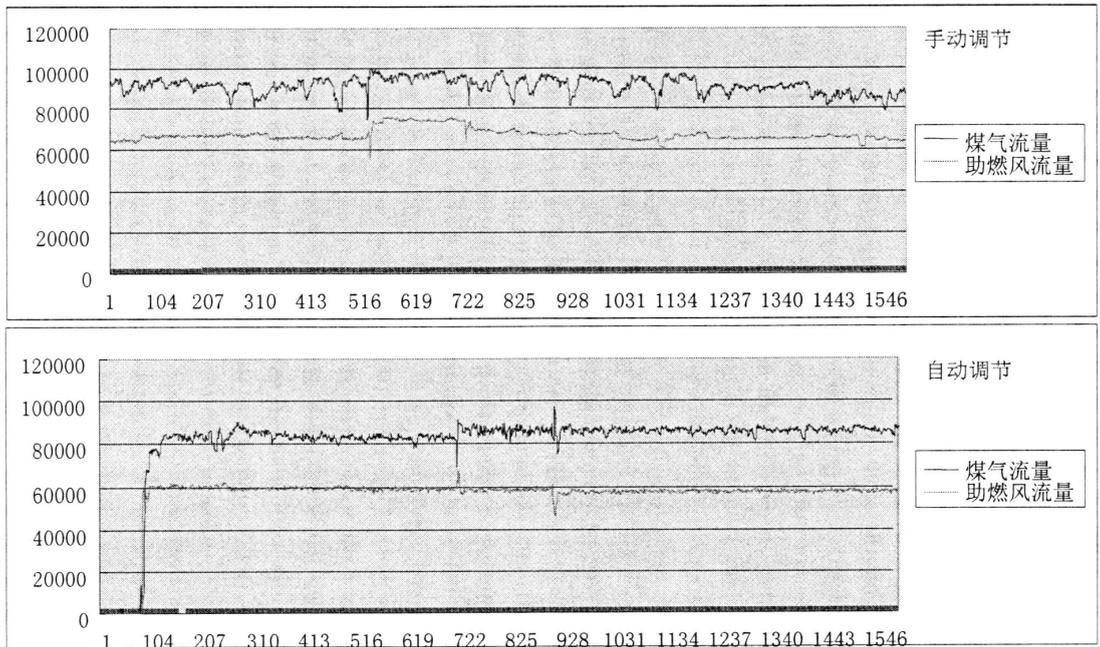


图 5.11 流量调节效果对比
Fig.5.11 Effect of contrast flow regulation

5.4 本章小结

针对自动燃烧系统控制方案，对系统进行软、硬件配置，实现热风炉自动燃烧控制系统在现场的应用。对操作和监控画面进行设计，满足现场生产需求，保证操作方便，维护简单。

第6章 结论与展望

本文以首钢迁安钢铁集团有限公司2号高炉热风炉自动燃烧控制系统为背景,在简明研究了热风炉控制发展过程的同时着重论述了自动燃烧模糊控制系统,并展开了全面的理论分析。

主要研究工作及创新点总结如下:

在查阅大量国内外文献的基础上,进一步研究热风炉燃耗过程中控制复杂的主要原因,综合分析了各种影响因素。

在介绍自动控制各种方法后,利用模糊控制理论与热风炉控制系统相结合,实现了热风炉燃烧全自动,即自动点火、自动寻优空燃比、自动停烧、自动换炉,正常情况下无须人为参与调节。

实现了流量的闭环调节与控制,为燃烧过程的稳定奠定了基础。燃烧过程自寻优空燃比,为燃烧过程合理化及下炉点火做好准备。实现燃烧进程的速度控制,使燃烧过程符合燃烧制度的变化,根据设定参数系统自动调节燃烧速度。

在本文的研究过程还有以下问题需要完善和进一步研究:

- (1)当现场高炉煤气、焦炉煤气流量剧烈波动时,调节效果不好,需要人工手动控制。
- (2)对调节阀调节特性要求比较高,需要使用较好阀门定位器保证阀门精度。

在论文的撰写过程中,由于本人理论功底浅薄,实践经验匮乏,难免存在这样那样的错误,恳请老师和同学指正。

参考文献

1. 黄庆学, 梁爱生.高精度轧制技术[M], 北京: 冶金工业出版社, 2008, 9-11.
2. 宋建成.高炉炼铁理论与操作[M], 北京: 冶金工业出版社, 2009, 216-221.
3. 项钟庸, 郭庆弟.蓄热室热风炉[M], 北京: 冶金工业出版社, 2007, 54-55.
4. 顾飞.我国高炉热风炉基本情况调查报告[M], 北京: 科技大学, 2009, 67-68.
5. 贺友多.提高热风炉风温的途径[J], 钢铁, 2003, 38(3): 70-72.
6. 朱文学.热风炉原理与技术[M], 北京: 化学工业出版社, 2008, 89-93.
7. Weng Yuqing.Scientific and Technological Progerss of Metallurgical Industry in China at ht beginning of 21” Century Iron and Steel[J],Iron and Steel Engineer 2004.,39(1):6-8.
8. Kenneth R Muske , James W Howse, Glen A Hansen.Hot Blast Stove Process Model and Model-based Controller[J],Iron and Steel Engineer,1999,76(6):56-62.
9. LIU Yuncai.The Achievements of Modem Ironmaking[J],Ironmaking, 2001,20(3):27-31.
10. Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich. Fuzzy Control[M], 北京:清华大学出版社,2001,7-10.
11. Seop Choili,Byeong Hyeon Park,Senng Gapchoi.Design of Optimal Combustion Controller for Temperature Control in Hot Blast Stoves Intelligent Systems and Control[J],J Sound and Vibration, 2000, 76(6):357-361.
12. 马竹梧.高炉热风炉全自动控制专家系统[J], 控制工程, 2002, 9(4): 57-61.
13. 马智慧, 吴敏, 曹卫华等.钢厂热风炉燃烧控制模型的开发与应用[J], 计算机测量与控制, 2006, 14(1): 54-55.
14. 汪光明, 胡伟莉等.专家模糊控制系统在热风炉燃烧过程的应用[J], 工业仪表与自动化装置, 2006, 4(1): 17-19.
15. 王军, 王晋萍等.各因素对热风炉理论燃烧温度的影响[J], 包头钢铁学院学报, 2002, 22(3): 283-287.
16. 马竹梧.高炉热风炉流量设定及自控专家系统[J], 自动化博览, 2002, 2(5): 11-14.
17. 杨西侠, 林家恒.基于专家系统的自校正模糊控制器[J], 控制技术, 2000, 3(3): 42-44.
18. 赵元黎, 刘越.专家调整量化因子的模糊控制器[J], 电子技术应用, 2000, 1(4): 46-48.
19. 姜玉山, 严文福, 王育红等.热风炉加热优化串级控制方案的研究与应用[J], 山东冶金, 2005, 27(2): 25-27.

20. 马竹梧, 邱建平, 李江. 钢铁工业自动化炼铁卷[M], 北京: 冶金工业出版社, 2000, 15-53.
21. 吴启常, 张建梁. 我国热风炉的现状 & 提高风温的对策[J], 炼铁, 2002, 21(5): 1-4.
22. 高军伟, 贾利民. 切换系统建模、控制理论与应用研究[M], 北京: 铁道部科学研究院, 2003, 23-24.
23. 郑明东, 宁方青. 热风炉燃烧过程控制研究[J], 大连理工大学学报, 2001, 41(4): 442-445.
24. 徐辉利, 孙杰. 大时滞过程中的智能复合控制方法及应用[J], 广东化工, 2005, 2(4): 48-50.
25. 潘峰, 韩如成. 时变大时滞系统的控制方法综述[J], 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 789-791.
26. Min Wu, Micho Nakano, Jin-hua She. A distributed expert control system for a hydrometallurgical zinc process[J], Control Engineering Practice, 1998, 2(6): 1435-1446.
27. Min Wu, Jin-hua She, Micho Nakano, Weihua Gui. Expert control and fault diagnosis of the leaching process in a zinc hydrometallurgy plant[J], Control Engineering Practice, 2002, 10(6): 433-442.
28. Yogesh Srinivas, William D. Timmons, John Durkin. A comparative study of three expert systems for blood pressure control[J], Expert Systems with Applications, 2001, 4(20): 267-274.
29. 杨智, 高靖. 时变大时滞神经元自适应预测 PID 控制器[J], 仪器仪表学报, 2000, 21(3): 300-303.
30. 达飞鹏, 宋文忠. 基于模糊神经网络的大时滞系统的预测控制[J], 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(2): 67-70.
31. 姜楠. 控制方式的选择研究[J], 现代电子技术, 2003, 150(7): 27-29.
32. 楼顺天等. 基于 Matlab 的系统分析与设计—模糊系统[M], 西安: 电子科技大学出版社, 2001, 24-26.
33. 戴葵译. 神经网络设计[M], 北京: 机械工业出版社, 2002, 55-57.
34. 易继锴等. 智能控制技术[M], 北京: 工业大学出版社, 2001, 45-47.
35. 胡淑礼. 模糊数学及其应用[M], 成都: 四川大学出版社, 2008, 79-101.
36. 杨枫, 于在河, 田彦涛. 一类纯滞后系统的变结构模糊控制[J], 吉林工业大学自然科学学报, 1997, 27(4): 91-96.
37. 罗安. 时滞参数不确定的专家 Smith 预估控制[J], 中南工业大学学报(自然科学版),

- 1995, 26(5): 665-669.
38. 周明德.微型计算机系统原理及应用[M], 北京: 清华大学出版社, 1998, 57-58.
39. 蔡自兴.智能控制[M], 北京: 国防工业出版社, 1998, 66-172.
40. 蔡自兴.人工智能控制[M], 北京: 化学工业出版社, 2005, 168-211.
41. 宋健.智能控制—超越世纪的目标[J], 中国工程学报 IFAC 第 14 届世界报告大会, 1999,6(5): 55-56.
42. 钱学森, 宋健.工程控制论(修订版) [M], 北京: 科学出版社, 1980, 34-35.
43. 刘云彩, 张宗民, 杨天均.人工智能高炉冶炼专家系统的开发[J], 首钢科技报, 1999, 2(5): 210-221.

致 谢

本论文的各项工作的在导师关守平教授的悉心指导下完成的。从论文的选题，课题研究过程中关键问题的解决到论文的修改，都离不开老师的精心指导。感谢导师在百忙之中仔细审阅了本文，使本文得以顺利完成，更使我受益终身！

在整个论文写作过程中，导师用其渊博的控制理论知识及丰富的实践经验，对作者给予了悉心的启发、指导、鼓励和支持。几年来，导师对问题的思维方式，对客观事物敏锐的洞察力、对事业的忘我精神和工作作风以及纯朴的处世态度使作者终生受益。

在完成课题的过程中，辛鹏飞同志也给我提出了许多很有启发性的建议，给予了我许多的指导和帮助，在此表示衷心的感谢！

感谢首钢迁钢公司提供的一流的科研和学习环境，使我能够有机会得到更多的锻炼机会，对于我论文的完成和科研能力的提高起到了很大的帮助。

另外，在课题的进行过程中，我还得到了许多同学的关心和帮助。在此向众多的同学和朋友表示感谢。

衷心感谢我的爱人、父母及所有爱我、关心我的朋友们给我的鼓励和无私的爱。

衷心感谢百忙中抽出宝贵时间评审本文的各位专家、教授，在此致以诚挚的敬意！