

分类号_____

密级_____

UDC _____

学 位 论 文

热风炉全自动燃烧控制系统的设计与实现

作者姓名： 闫本领

指导教师： 陈晓波 教授 东北大学信息科学与工程学院

马金芳 高级工程师 首钢迁钢公司

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 12 日 论文答辩日期： 2011 年 12 月 23 日

学位授予日期： 年 月 答辩委员会主席： 高宪文

评 阅 人： 杨英华 崔允

东 北 大 学

2011 年 12 月

A Thesis in Control Engineering



Design and Implementation of Automatic Combustion Control System for Hot Blast Stove

By Yan Benling

Supervisor: Professor Chen Xiaobo

Senior Engineer Ma Jinfang

Northeastern University

December 2011

独创性声明

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

学位论文作者签名：闫本领

日期：2011.12.20

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：闫本领

导师签名：彭志良

签字日期：2011.12.20

签字日期：2011.11.20

热风炉全自动燃烧控制系统的设计与实现

摘 要

目前国内外热风炉日益朝大型化、多样化发展,国外大型热风炉设备基本上都实现了自动燃烧,而国内热风炉设备燃烧控制仍以摸索经验为主,缺乏相应的理论支持,大多以常规控制为主,实施风温调节时凭经验手动操作,一方面给操作人员增加了劳动强度,存在的误操作给生产带来了安全隐患,另一方面由于风温变化需要调节的参数比较多,手动操作很容易造成工况的波动,影响热风炉设备的稳定运行。

针对目前国内钢铁企业高炉连续生产以及高炉炉况的波动对热风炉高风温稳定需求,本文以首钢迁钢 2650m³ 高炉为原型,从工艺和设备特点出发,提出了自动燃烧控制原理及策略,以热风炉燃烧模型为基础,从物料平衡、能量平衡、相平衡出发,从而确定了实施自动燃烧和自动换炉控制过程中重要参数之间函数关系的数学模型,利用 Quantum PLC 控制系统提供的控制功能,通过软件组态设计了各个重要参数的控制回路及控制功能图,并设计了自动燃烧和换炉过程的监控和报警功能,从而实现了热风炉燃烧和换炉过程的平稳、安全、经济地运行。

实践证明,通过本套设备的自动燃烧和换炉控制系统的实施,实现了热风炉风温 1100-1310 度之间范围的调节能力,极大的提高了热风炉的风温,提高了高炉的产量,带来了良好的经济效益,同时降低了操作人员的劳动强度,提高了热风炉设备的自动化水平。

关键词: 热风炉; 自动燃烧; 换炉; 燃烧模型; 高炉

Design and Implementation of Automatic Combustion Control System for Hot Blast Stove

Abstract

The domestic and foreign hot-blast stove develops towards the maximization, diversification at present, Foreign large hot air stove equipment are basically achieved the automatic burning. While domestic hot air furnace equipment combustion control is still groping in the absence of corresponding experience, mainly theoretical support. For most conventional control-oriented, When implementation wind warm adjustment depends on the experience manual operation. On the one hand increased labor intensity for the operator, There is a mistake to bring the hidden safety production. On the other hand because of the need to regulate wind temperature changes more parameters. The manual operation is very easy to create the operating mode the undulation. Influence hot-blast stove equipment stable movement.

In view of domestic iron and steel enterprise blast furnace continuous production as well as blast furnace furnace conditions undulation to hot-blast stove noble character warm stable demand, The paper regards moving the steel 2650m³ blast furnace in qian'an Iron and Steel Co. as the prototype, Proceeding from technology and equipment features, and raised the automatic combustion control theory and strategy. Take hot-blast stove burning model as foundation, Equilibrate from the supplies, energy balance, setting out balancedly. To determine the effect the automatic burning stoves and automatic control function relationship between important parameters in the course of mathematical models. Exploit the function of control offered by Quantum PLC control system. Have designed the control return circuit of each important parameter and controlled the functional diagram through the software configuration, and designed and burnt and changed control and warning function of stove course automatically. Thus has realized hot-blast stove burns and trades the stove process steadily, safe, moves economically.

The practice proved that, and trades the stove control system through this set of

equipment automatic burning the implementation, has realized the hot blast stove blower warm 1100-1310 degree between scope adjustment ability, enormous enhancement hot-blast stove wind warm, enhanced the blast furnace output, has brought the good economic efficiency, simultaneously reduced operator's labor intensity, raised the hot-blast stove equipment automated level.

Key word: hot-blast stove; automatic burning; changes the stove; burning model; blast furnace

目 录

独创性声明 I

摘 要 II

Abstract III

第 1 章 绪 论 1

1.1 选题的背景和意义 1

1.2 热风炉工艺流程及控制系统的发展状况 2

1.3 自动燃烧控制系统设计要点 4

1.4 本文研究内容和结构 5

第 2 章热风炉生产工艺的流程分析 7

2.1 热风炉设备的组成 7

2.2 热风炉燃烧的基本原理 7

2.3 热风炉工艺流程分析 9

2.3.1 热风炉系统组成 11

2.3.2 热风炉主要设备配置 12

2.3.3 热风炉工艺特点 13

2.3.4 热风炉装置的生产能力 14

2.3.5 热风炉生产流程特点 14

2.4 本章小结 16

第 3 章 控制系统设计 17

3.1 控制系统总体设计 17

3.2 热风炉控制回路分析 18

3.2.1 热风炉的换炉控制和送风控制 19

3.2.2 热风炉的热风温度控制 19

3.2.3 热风炉的煤气和空气流量控制 20

3.2.4 废气温度上升速度的模糊控制 21

3.3 热风炉燃烧控制系统设计..... 22

 3.3.1 自动控制方式的确定..... 22

 3.3.2 热风炉燃烧控制的基本思想 23

 3.3.3 单回路控制系统..... 24

 3.3.4 比值控制..... 25

 3.3.5 串级控制..... 27

 3.3.6 复合控制..... 27

 3.3.7 废气温度上升速度的模糊控制器的设计..... 28

3.4 自动燃烧流程的计算..... 32

 3.4.1 煤气发热值的计算..... 33

 3.4.2 煤气燃烧中各参数的计算..... 33

3.5 本章小结..... 34

第 4 章 控制功能的实现.....35

4.1 下位机控制功能的实现..... 35

 4.1.1 顺序控制功能的实现..... 35

 4.1.2 自寻优微调过程的控制实现..... 40

 4.1.3 废气管理模糊控制的实现..... 42

 4.1.4 燃烧过程中异常情况处理功能控制的实现..... 45

 4.1.5 燃烧过程中安全控制的实现..... 45

4.2 监控功能的实现..... 46

4.3 本章小结..... 50

第 5 章 结论和展望.....51

5.1 结论..... 51

5.2 展望..... 52

参考文献.....53

致 谢.....55

第1章 绪论

1.1 选题的背景和意义

近年来随着国民经济的快速发展,我国的钢铁企业也得到了前所未有的高速发展,与钢铁生产密切相关的高炉热风炉设备也日益朝大型化^[1]、产品多样化方向发展。热风炉装置在钢铁企业主要为炼铁厂提供连续稳定的热风,以达到高炉冶炼的目的。因此其生产负荷受到高炉炉矿需求量变化的影响。在实际的生产过程中,炼铁用热风量受高炉生产工艺和其他因素的制约,始终存在着用热风量平稳的状况,而热风炉设备由于工艺的特点必须连续运行,当高炉用气量变化且大幅度波动时就要求热风炉装置的负荷也随之进行大范围的调整,而热风炉装置生产过程中不可能将生产能力立即提高或降低,实际生产中经常出现热风炉热风放散或供不应求的现象,前者造成了大量的能耗与经济损失,后者则影响了后续工业过程的生产。

为了降低控制热风温度和满足炼铁高炉用气需求,最重要的措施就是根据高炉炉况的变化规律,实施全自动燃烧控制调节,从而科学合理的调节热风温度变化,为高炉提供连续稳定的热风,达到节能降耗的目的。但迁钢炼铁作业部的2650高炉配套的热风炉设备从投产后由于没有自动燃烧控制系统而只能采用手动调节操作,由于高炉设备流程长、设备多,炉况和结构复杂,在保证热风供应的条件下增减热风温度所涉及的变量比较多,是一项复杂而有难度的工作^[2],这就对操作工的技术操作造成了一定的难度,另外手动燃烧存在以下诸多缺点:一方面稳定性不强,由于热风炉一些重要参数的变化对工况的影响比较滞后,所以手动燃烧和换炉很难掌握好各个量在燃烧时的变化节奏,造成每个参数的变化速率不均匀,很容易造成工况波动;另一方面安全性不高,手动操作很容易造成误操作,如一些重要参数一旦输入数据错误就会造成整个热风炉供风不稳定等;再者就是手动燃烧和换炉速度有限,由于燃烧时涉及的控制量比较多,造成手动燃烧和换炉时速度比较慢,这样通过自动燃烧来降低热风放散率的功能就会减弱,因此迫切需要根据热风炉装置的实际生产特点开发一套自动燃烧和换炉控制技术^[3],即根据用高炉炼铁需要热风温度的变化自动调节生产运行工况,运行参数在自动控制过程中向最佳点逼近,以降低热风放散量和减少热量损失,实现优化操作,从而进一步平稳生产,保证产品质量,降低劳动强度。

本文从首钢迁钢炼铁作业部的 2650m³ 高炉热风炉设备工艺流程特点和控制系统特点出发^[4]，通过分析确定了全自动燃烧时需要控制的各个参数之间的关系式，从而建立了各个参数之间的数学模型，在集散控制系统上通过组态实现了热风设备的自动燃烧和换炉，保证了燃烧过程的平稳快速，较大程度地降低了工人的劳动强度、降低了热风放散率，提高了热风温度，为高炉稳定顺行提供了有力的热风保障，取得了可观的经济和社会效益。

1.2 热风炉工艺流程及控制系统的发展状况

热风炉是把鼓风加热到要求的温度，是按“蓄热”原理工作的热交换器，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。高炉炼铁是一个连续过程^[5]，为保证高炉连续不断地得到大量的高温空气，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，因此三个热风炉轮流交替地进行燃烧和送风可以满足高炉连续热风的需要。

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^[6]，即控制助燃空气与煤气的流量按照一定的比例完全燃烧。燃烧效果可由拱顶温度和废气残氧量反映。

在热风炉燃烧初期是以较大的煤气量和合适的空燃比实行快速加热，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。在废气温度管理期，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的设定值。故其基础自动化系统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将包括：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。

目前国内外热风炉的燃烧控制主要有传统控制方式、数学模型方式、人工智能方式 3 种。

(1) 热风炉传统控制方式

传统的热风炉燃烧控制方法中，有比例极值调节法、烟气氧含量串级比例控

制法等。比例极值调节法是在烧炉时依靠操作者的经验预先设定一个空燃比，然后以拱顶温度为信号，改变空气和煤气比例进行搜索，寻找拱顶温度上升速率最快或合适的值，即用极值的方法来获得空气、煤气的最佳配比值。国内很多企业曾经或者仍然在采用这种烧炉方法，由操作者根据经验来手动改变燃烧的空燃比（或空气过剩系数）。此种方法对检测点要求不多，但并不能在煤气热值变化的时候及时改变空燃比，不容易实现热风炉的最佳燃烧。

(2) 热风炉数学模型方式

数模法的关键在于建立符合生产实际的控制模型，而建立模型的基础是热风炉的全炉热平衡计算。依此获得的控制模型不仅是使空气、煤气配比最合理，而且能够对燃烧速率进行控制，使燃料的流量最佳化，大大地提高了炉子的效率。日本在 1974 年就发表了关于热风炉数模法控制的专利，该法除对热风炉进行了精确的热平衡计算外，最大的特点是依据半经验公式求出了热风炉的“热焓”。由于该模型可随时反映炉子的热状态，故操作者可依据高炉生产的需要，使热风炉随时满足高炉对风温的要求。

最近几年，国外在热风炉学模型开发及应用上仍有新的进展。20 世纪 80 年代中期，国内宝钢等企业的几座高炉的热风炉开始相继采用数模法控制燃烧，从其应用实践来看，用数学模型控制热风炉燃烧及有关操作制度，选择合理的热工参数，及时调整控制变量，可以达到节约能源、提高风温的效果。实现热风炉的燃烧最优控制，数模法有其严密、科学优势，能根据各燃烧阶段的不同特点对整个燃烧过程进行合理的控制，并能将换炉、送风结合为一体，实现全闭环自动控制。其缺点是检测点多、投资大，在生产条件不够稳定、装备水平较低的热风炉中不容易实现，因此限制了模型方法的广泛应用。

(3) 热风炉人工智能方式

热风炉是一个具有本质非线性、大滞后、慢时变特性的复杂被控对象，随着燃烧工作环境的变化其特性也在不断发生变化，要准确地掌握热风炉的运行状态是很困难的。近年来，国内外都在致力于热风炉的智能控制研究，如日本川崎钢铁公司开发了模糊控制系统，新日铁则使用专家系统。国内在热风炉智能控制的研究也取得了一定进展，如模糊控制技术、专家控制系统、遗传算法优化技术、神经网络技术^[7]、基于规则的仿人智能控制技术等智能控制等，有些技术已经从实验模拟阶段发展到了工程化和实用化的阶段。

模糊控制的优点是不必建立被控系统的数学模型，它可将操作者或专家的控

制经验和知识表示成语言变量描述的控制规则，然后用这些规则去控制系统，给出短期的控制信号，具有较强的鲁棒性。正是由于模糊控制的优点，对于热风炉这种复杂被控对象，模糊控制逐渐显现出了优越性，尤其在设备配置水平较低的中小型高炉有很强的应用性。模糊控制可以基于很少的检测点，甚至只需要拱顶及废气的温度信号，即可实现较好的控制。从 20 个世纪 80 年代后期，模糊控制技术开始成功地应用于热风炉燃烧控制，而日本的应用比例居世界首位。日本川崎制铁公司的水岛铁厂 3 号高炉热风炉和叶制铁所 6 号高炉热风炉等先后成功应用了模糊控制技术。

热风炉的操作主要包括两大部分，即燃烧控制和自动换炉。这两部分操作，国内外的大中型高炉的热风炉都已部分自动化了，但主要是基础自动化。20 世纪 70 年代末，由于高炉大型化，需要高风温和较大风量，因此要求热风炉提供稳定的、满足高炉生产需要的、具有一定温度和流量的热风，而且要节省能源，故发达国家的热风炉都装有完善的自动化系统^[8]，即完善的基础自动化系统，带有数学模型并对基础自动化系统进行优化设定的过程自动化。运行结果表明：提高热效率、节约能源、提高风温以及保护设备和延长炉子寿命，因而收到重大的经济效益，故热风炉优化控制早上早得益。

发达国家的高炉热风炉自动控制都包括完善的基础自动化和过程自动化，其中过程自动化主要是监控和设有投入热量和换炉等优化的数学模型。

1.3 自动燃烧控制系统设计要点

迁钢炼铁热风炉3座，预热炉2座。全由人工手动操作进行燃烧、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，影响顶温温度，并且造成大量能源损失，风温指标也上不去。赶上换炉，或者煤气供应系统管网压力波动，至少还要一人值守，大大增加了职工的劳动强度。同时人工操作，微调方面没有一个合理界定，调节方法不统一，造成风温水平提升受限。

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。

参考国内外各大高炉热风炉应用的自动燃烧技术，总结得出：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, 换炉时间点的确定。这样则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。

结合热风炉控制系统国内外发展现状, 针对目前钢铁企业高炉连续生产以及高炉炉况的波动对热风炉高风温稳定需求, 本文以首钢迁钢 2650m³ 高炉为原型, 从工艺和设备特点出发, 提出了自动燃烧控制原理及策略, 以热风炉燃烧模型为基础, 从物料平衡、能量平衡、相平衡出发, 从而确定了实施自动燃烧和自动换炉控制过程中重要参数之间函数关系的数学模型, 利用 Quantum PLC 控制系统提供的控制功能, 通过软件组态设计了各个重要参数的控制回路及控制功能图, 并设计了自动燃烧和换炉过程的监控和报警功能, 从而实现了热风炉燃烧和换炉过程的平稳、安全、经济地运行。

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; 根据高炉工长确定热风温度和当时的煤气热值情况, 自动合理确定燃烧需要的煤气和空气用量; 燃烧过程实现煤气和空气流量的精确定值调节与控制^[9], 有效抑制高炉煤气压力的扰动, 实现燃烧过程快速寻找最优的空燃比; 自动控制燃烧进程的速度和节奏, 适应高炉节奏的变化; 根据热风炉实际的燃烧情况, 控制热风炉的燃烧、隔断和送风之间状态的转换, 实现单双炉燃烧的自动切换控制; 并进行系统连锁安全处理。

(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, 降低焦比, 在提高风温的同时节能减排。

(3)热风炉燃烧过程可通过建立符合生产实际的控制模型, 对热风炉热平衡进行计算, 利用数学模型技术计算结果(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^[10]。

(4)确保生产安全, 防止事故发生, 降低劳动强度。

1.4 本文研究内容和结构

本文在第1章简单介绍了选题背景和意义及热风炉生产工艺, 所要设计要点, 本文研究内容和机构。在第2章介绍热风炉生产工艺的基本原理和首钢迁钢 2650m³ 高炉热风炉的工艺流程及特点。在第3章以 2650m³ 高炉热风炉设备为背

景, 根据工艺和设备特点, 详细介绍了热风设备各个设备及主要参数的控制策略, 通过介绍热风炉燃料的物性计算、热值计算、流程计算等来确定自动控制时各个参数之间的关系, 从而确定了自动控制时的数学模型, 并详细介绍了自动燃烧控制实现的思路及控制原理。在第 4 章, 利用昆腾 PLC 可编程控制系统实现了热风炉自动燃烧控制^[11], 详细介绍了自动控制系统的硬、软件构成和自动燃烧时各个控制量的控制组态图及实现的控制功能等。第 5 章是结论与展望。

第 2 章热风炉生产工艺的流程分析

2.1 热风炉设备的组成

迁钢炼铁作业部热风炉配置有 5 座，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，高风温是高炉生产提高喷煤，降低焦比和降低成本的有效措施。热风炉采用低热值高炉煤气作为主要热源，设计建造配置的 3 座霍戈文改造型高风温内燃式热风炉及双预热系统于 2007 年投产。热风炉在高风温工艺、设备方面集中了诸多先进手段，其中首钢公司自主开发的高温预热助燃风系统主要工艺设备包括两座新型顶燃式预热炉、一座混风炉和相关配套设施。对热风炉的助燃空气进行高温预热，预热风温达到 600℃参与热风炉的燃烧过程，以提高理论燃烧温度，提供高温助燃空气，满足创造高风温供给条件，助燃空气温度的提高对热风炉蓄热效率和热风温度提高有着至关重要的作用。

2.2 热风炉燃烧的基本原理

热风炉是一种蓄热式热交换器，借助煤气燃烧将热风炉格子砖烧热，然后将冷风通入格子砖，冷风被加热，由于燃烧（即加热格子砖）和送风（即冷却格子砖）是交替工作的，为保证向高炉连续供风。

在一个工作周期内可分为燃烧和送风两个时期，在燃烧期，煤气的燃烧提供足够高的温度和热量，蓄热室的格子砖被加热。在送风期，格子砖放出其在燃烧期积蓄起来的热量而被冷却，热风炉是把鼓风加热到要求的温度，是按“蓄热”原理工作的热交换器，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，准备切换到“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。高炉炼铁是一个连续过程^[12]，为保证高炉连续不断地得到大量的高温空气，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，因此三个热风炉轮流交替地进行燃烧和送风可以满足高炉连续热风的需要。

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^[13]，即控制助燃空气与煤气的流量按照一定的比例完全燃烧。燃烧效果可由拱顶温度和废气残氧量反映。传统风炉燃烧控制原理如图2.1所示，

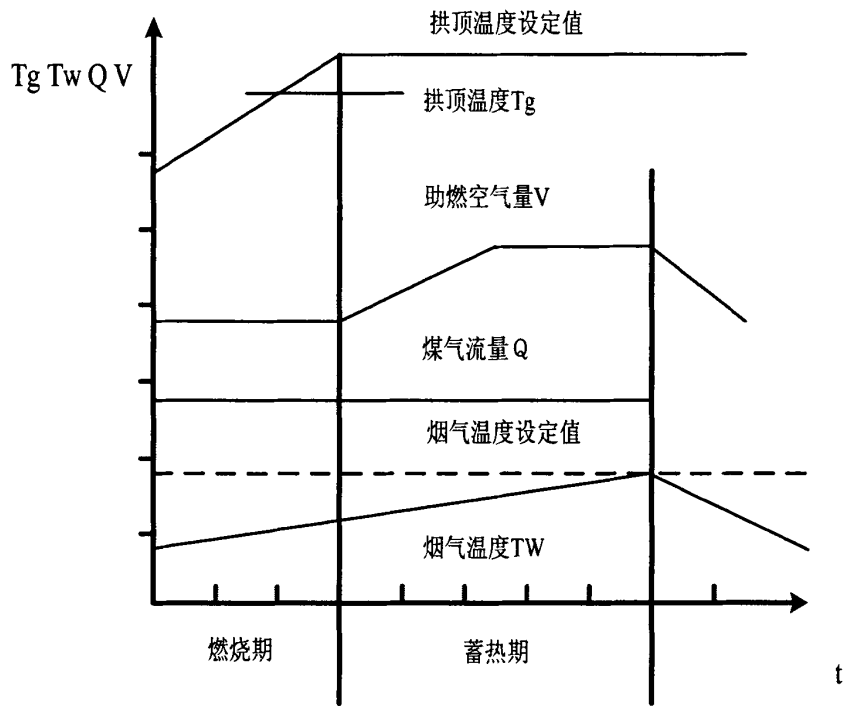


图 2.1 热风炉控制原理图
Fig. 2.1 Control Schematics of Hot Blast Stove

在热风炉燃烧初期是以较大的煤气量和合适的空燃比实行快速加热，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。在废气温度管理期，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的设定值。故其基础自动化系统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将包括：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^[14]。

图2.2为热风温度控制工艺图。各个热风炉的状态转换由温度控制系统控制，当送风管道混风后的风温低于要求风温时，对各个热风炉的工作状态进行切换，将新的热风炉转为送风状态，原送风炉转为燃烧状态。系统要求设计两种控制：自动PID控制、手动控制。

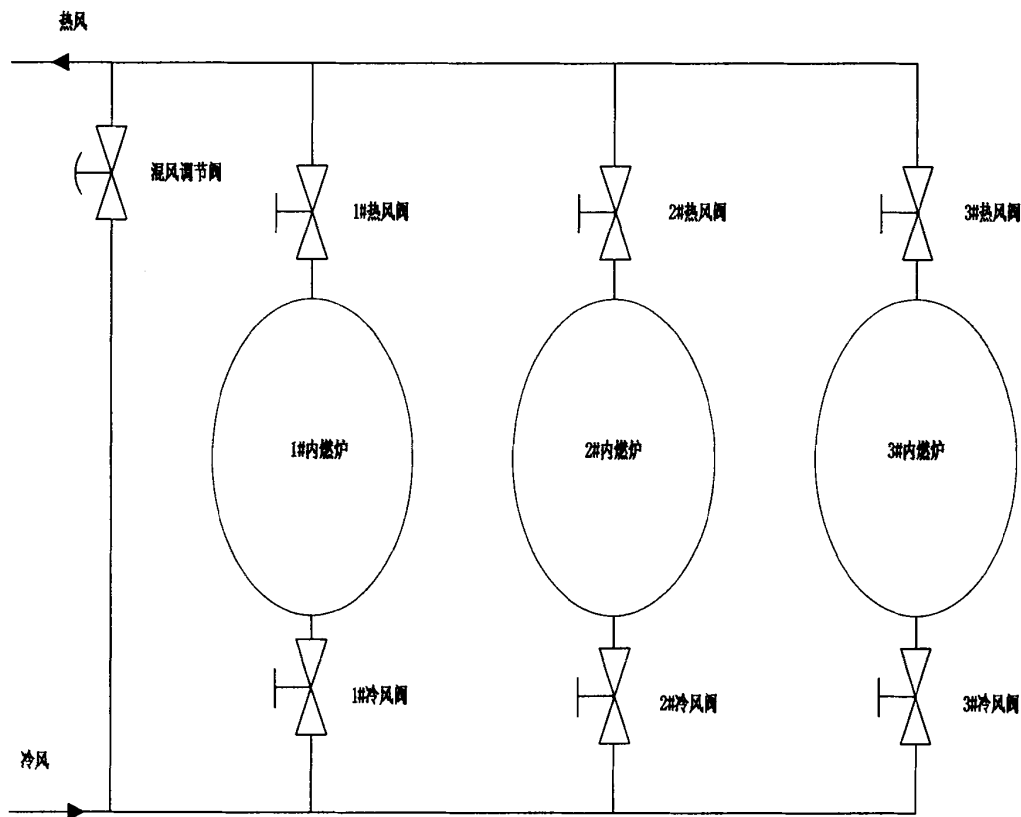


图 2.2 热风温度控制工艺图
Fig.2.2 Flow chart of hot-blast temperature control

迁钢炼铁各热风炉参与状态转换的有十一个切断阀和两个调节阀，分别是：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，热风切断阀和氮气吹扫阀。调节阀有煤气和助燃空气调节阀。通过各阀的不同动作，来实现热风炉的“燃烧”、“送风”、“隔断”等状态的转换。

2.3 热风炉工艺流程分析

迁钢炼铁热风炉配置有 5 座，3 座内燃炉为高炉提供持续热风，2 座预热炉为内燃炉和自身提供助燃风。正常情况下 3 座内燃炉采用两烧一送的工作方式，每 45 分钟-70 分钟换炉一次，换炉时间不超过 15 分钟。每座炉子都有 3 种工作状态，即燃烧、送风和隔断。

热风炉的换炉操作如下：

燃烧状态转送风状态：关闭煤气调节阀；关闭空气调节阀；关闭煤气切断阀；

关闭煤气燃烧阀；打开煤气小放散阀；关闭空气切断阀；关闭两台烟道阀和烟采阀；开启冷风均压阀，均压完毕后开启冷风阀；开启热风阀；关闭冷风均压阀；用混风调节阀调节入炉风温。

送风状态转燃烧状态：关闭冷风阀；关闭热风阀；开启废风均压阀；待热风炉内风放净后，开启两台烟道阀和烟采阀；关闭废风均压阀；开启空气阀；开启煤气燃烧阀；关闭煤气小放散阀；开启空气调节阀，调节到点火角度；开启煤气切断阀；开启煤气调节阀，点火，点着火后调节煤气和空气配比，保证供应风温所需要的最佳燃烧量。

燃烧状态转隔断状态：关闭煤气调节阀；关闭空气调节阀；关闭煤气切断阀；关闭煤气燃烧阀；打开煤气小放散阀；关闭空气切断阀。

送风状态转隔断状态：关闭冷风阀；关闭热风阀；开启废风均压阀；待热风炉内风放净后，开启两台烟道阀和烟采阀；关闭废风均压阀。

隔断状态转送风状态：先关闭两台烟道阀和烟采阀；再开启冷风均压阀，均压完毕后开启冷风阀；开启热风阀；关闭冷风均压阀；用混风调节阀调节入炉风温。

隔断状态转燃烧状态：开启空气阀；开启煤气燃烧阀；关闭煤气小放散阀；开启空气调节阀，调节到点火角度；开启煤气切断阀；开启煤气调节阀，点火，点着火后调节煤气和空气配比，保证供应风温所需要的最佳燃烧量^[15]。热风炉工艺系统如图 2.2。

预热炉的换炉操作如下：

燃烧状态转送风状态：关闭煤气调节阀；关闭空气调节阀；关闭煤气切断阀；打开充氮阀；关闭充氮阀；关闭煤气燃烧阀；打开煤气小放散阀；关闭空气切断阀；关闭两台烟道阀和烟采阀；开启预热炉冷风阀；开启预热炉热风阀；用混风调节阀调节入炉预热风温度^[16]。

送风状态转燃烧状态：关闭预热炉冷风阀；关闭预热炉热风阀；开启废风均压阀；待预热炉内风放净后，开启两台烟道阀和烟采阀；关闭废风均压阀；开启煤气燃烧阀；关闭煤气小放散阀；开启充氮阀；关闭充氮阀；开启空气燃烧阀；调节到点火角度；开启煤气切断阀；开启煤气调节阀，点火，点着火后调节煤气和空气配比，保证供应风温所需要的最佳燃烧量。

燃烧状态转隔断状态：关闭煤气调节阀；关闭空气调节阀；关闭煤气切断阀；打开充氮阀；关闭充氮阀；关闭煤气燃烧阀；打开煤气小放散阀；关闭空气切断阀；关闭两台烟道阀和烟采阀。如图 2.3 工艺流程图。

送风状态转隔断状态：关闭预热炉冷风阀；关闭预热炉热风阀；开启废风均压阀；待预热炉内风放净后，开启两台烟道阀和烟采阀。

隔断状态转送风状态：待预热炉内风放净后，开启两台烟道阀和烟采阀；关闭废风均压阀；开启煤气燃烧阀；关闭煤气小放散阀；开启充氮阀；关闭充氮阀；开启空气燃烧阀；调节到点火角度；开启煤气切断阀；开启煤气调节阀，点火，点着火后调节煤气和空气配比，保证供应风温所需要的最佳燃烧量^[17]。

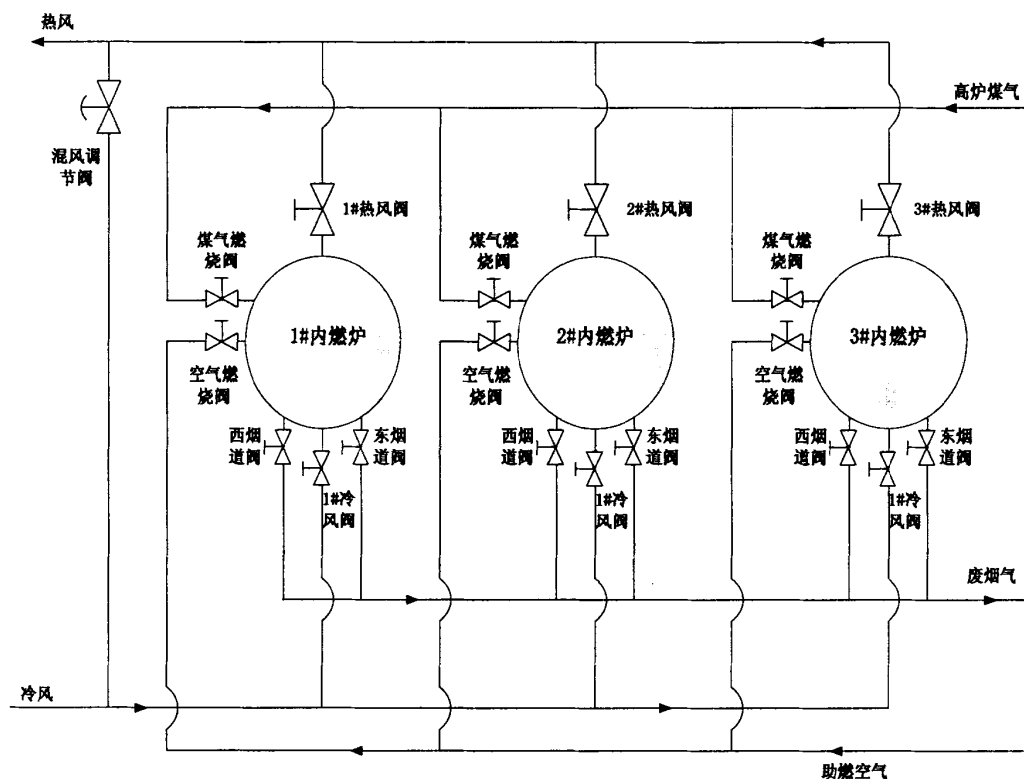


图 2.3 热风炉工艺系统图

Fig.2.3 System diagram of hot-blast stove

隔断状态转燃烧状态：开启空气阀；开启煤气燃烧阀；关闭煤气小放散阀；开启空气调节阀，调节到点火角度；开启煤气切断阀；开启煤气调节阀，点火，点着火后调节煤气和空气配比^[18]，保证供应风温所需要的最佳燃烧量。

2.3.1 热风炉系统组成

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。

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^[19]，

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

热风炉送风和公用系统：根所有炉子都相关的设备如混风系统、液压系统等。

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。

2.3.2 热风炉主要设备配置

(1) 助燃风机系统

主要包括三台助燃风机；两台预热风机。助燃风机是用来把预热的空气送到热风炉和煤气混合后进行燃烧的装置。两台预热风机是把常温的空气进行预热，便于提高热风炉热风的初始温度。

(2) 热风公共系统

主要包括：热风管道，热风阀。热风管道分热风总管和热风支管，主要功能是传输热风介质，内部砌筑耐火材料来满足提高传输热风的强度和寿命。热风阀是用来控制热风流量，以满足高炉对热风的要求。

(3) 热风换热系统

主要包括：板式换热器。用来把煤气通过热交换系统用热风炉废烟气进行交换热量，以达到提高煤气燃烧前的温度，从而有利于提高热风炉燃烧所达到的最终温度^[17]。

(4) 液压系统

通过液压站液压油泵提供阀门需要的润滑油脂，以提高阀门的灵活性和使用寿命。两套液压系统共包括四台液压泵；两台循环泵；四台加热泵。

(5) 热风炉混风系统

热风炉混风系统是把热风 and 冷风进行混合。以满足高炉对热风的需求。

(6) 热风炉自动调节系统

根据燃烧的需要，对助燃空气和高炉煤气进行流量调节，间接控制空然比，以达到煤气的充分燃烧。进一步提高热效率^[20]。

(7) 预热炉自动控制系统

为提高热风温度，对入炉的空气进行预热相似于热风炉控制系统。

(8) 热风炉冷却水系统

热风炉冷却系统用来对设备降温，对十一个切断阀和两个调节阀阀体冷却，

保证设备性能可靠运行。

(9) 热风炉报警系统

通过报警画面对生产过程中, 出现不稳定因素后及时报警, 提供岗位操作人员直观的提醒。报警主要包括, 液压系统压力过高过低报警, 阀门冷却系统故障报警, 煤气泄漏报警。

2.3.3 热风炉工艺特点

热风炉的工艺特点决定热风炉燃烧过程的复杂性与不易控性, 总结起来具有以下特点:

(1) 随机性大。例如拱顶温度和废气温度测量值随机波动性大;

(2) 由于燃烧过程复杂, 存在大量的非线性关系以及许多随机因素影响, 无法建立准确的数学模型;

(3) 热风炉燃烧工作环境不断变化, 系统是个时变系统;

(4) 具有较大的滞后性, 尤其是在燃烧的中后期, 煤气和空气量调整的效果要经过一定的时间才能从废气和拱顶温度的变化中反映出来。对于这种情况要采取相应的控制措施, 其特性具体体现如下:

(a) 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。

(b) 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。

(c) 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。

(d) 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。

(e) 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。

(f) 热风炉燃烧技术计算

如何解决根据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是整个全自动燃烧控制的核心。

2.3.4 热风炉装置的生产能力

为高炉送供应持续不断的热风风量：4600—5200m³；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；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。

2.3.5 热风炉生产流程特点

热风炉是高炉冶炼过程中很重要的热交换设备，其作用是把鼓风加热到要求的温度，即先用煤气燃烧后加热格子砖，再使空气通过炽热的格子砖被加热并送出。长期理论和实践证明，高风温对高炉生产尤为重要，它是高炉所需热量的主要来源。提高热风炉的送风温度可以使高炉降低焦比，提高产量，从而节约焦炭，达到降低成本的目的，同时热风炉的能耗十分巨大，因此提高热风炉热效率具有十分重要意义^[2]。

近年来，我国炼铁生产技术取得了长足进步，如高炉利用系数、入炉焦比、综合焦比、喷煤比、高炉寿命等方面均缩小了与国际先进水平的差距。但是热风的温度提高不大，成为与国际先进水平差距最大之处。在日本、德国、韩国等国外先进高炉使用的风温达1300℃，在我国只有宝钢、包钢等少数先进高炉的风温达到1200℃，而国内大多数钢铁企业的风温水平一直在1050℃左右徘徊。因此，这已成为进一步提高喷煤量、改善高炉指标的最主要障碍，在一定程度上制约了我国炼铁技术的发展。我国大多数钢铁企业风温低的主要原因有：热风炉老化严重；高热值煤气缺乏；热风炉潜力没有充分发挥；高炉接收风温的能力低等。煤气热值低是提高风温的主要困难，随着高炉的大型化，原料的改善，操作的改进，高炉煤气的物理和化学性能越来越被高炉充分利用，致使高炉煤气日益贫化，我国许多现代化高炉的煤气热值已经降低到3100 kJ/m³左右，而高热值煤气(焦炉煤

气、天然气等)的短缺情况会越来越严重,因此,如何利用低热值煤气获得较高的风温,在我国具有特殊的意义。实现煤气的合理燃烧,才能将其能量充分利用,热风炉才有可能在消耗同样煤气量情况下,蓄到更多的热量,为提高送风温度创造条件。由于高炉的操作或炉况等种种原因,造成煤气压力不稳定,煤气热值也往往存在波动,因而热风炉燃烧控制是热风炉最难、最关键的控制环节之一,燃烧控制得好坏将直接影响到热风炉的拱顶温度及燃烧的热效率^[22]。

控制热风炉燃烧主要目的是为了确保所规定的送风的温度、流量和时间,提高热效率,同时也为保护设备,这样就必须将格子砖温度和废气温度保持在一定范围内,因而需要在一定约束条件下选取炉顶温度、废气温度、蓄热量、加热时间和残氧含量等作为目标函数进行研究^[23]。提高送风温度,首要提高热风炉的拱顶温度和蓄热量,而提高拱顶温度和蓄热量,又必须找到合适空燃比,以利于高炉煤气充分利用,加快传热,缩短烧炉时间,节约煤气消耗。因此,热风炉燃烧系统的优化控制对于提高送风温度、节约能源至关重要。在现有高风温的基础上,如何能利用现有条件,稳定高风温,并能有所提高,是值得研究和解决的问题。

目前热风炉加热控制多为手动人工控制,不但需要专人操作,且难以在热风炉整个燃烧时期各个阶段及时设定煤气和助燃空气流量,也难以在预热煤气和空气温度变化时、高炉所需鼓风温度和流量变化时、助燃空气压力变化时、热风炉蓄热量尚有富裕时,及时修正热风炉加热的煤气和空气量,因而达不到节能和优化热风炉操作的目的。故要面对我国的操作和自动化以及维护水平的实况,而需要开发适合于我国的实际情况的、且需低成本和便于推广的热风炉全自动化专家系统^[20]。同时人工手动控制,加热燃烧不均匀,对热风炉的寿命有很大影响。

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。在科技和生产水平高速发展的今天,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,针对被控对象、控制目标及任务的复杂性,提出了热风炉智能控制系统^[24],包括模糊控制^[25]、神经网络控制、专家控制等几种主要的研究方法。开发人员将模糊控制^[26]、神经元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改进^[27]。但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。

2.4 本章小结

本章主要从热风炉生产原理出发，详细介绍了热风炉生产热风的基本原理，接着介绍了热风炉设备的组成及各部分的作用，结合首钢迁钢热风炉生产流程图详细介绍了本套热风炉设备配备、流程特点和流程的详细描述，最后介绍了本套热风炉设备的生产能力。以及热风炉生产流程的特点。

第 3 章 控制系统设计

3.1 控制系统总体设计

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。

本控制系统结构考虑到迁钢热风炉实际操作方式， 热风炉岗位分别位于两处， 一是主控室， 另一是液压站， 为了便于操作人员能在异地进行操作需要增加客户端， 来保证两个操作室都能实现操作功能的切换， 同时也提供了系统的互备功能， 即： 当一台机器故障， 可切到另一台继续进行操作。 同时本系统也可扩展到多台机器， 同时进行监视， 操作则可由任一台机器完成。 因而迁钢热风炉自动燃烧控制系统是多用户系统结构， 即由一个控制器与多个监视器组成， 相互之间可以无扰动自由切换， 前提是原控制器放弃控制权限并成为监视器后， 其它监视器才能得到控制权限成为控制器， 此结构能灵活地满足现场生产过程中的异地操作控制。 本系统的结构原理如图 3.1 所示。 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。

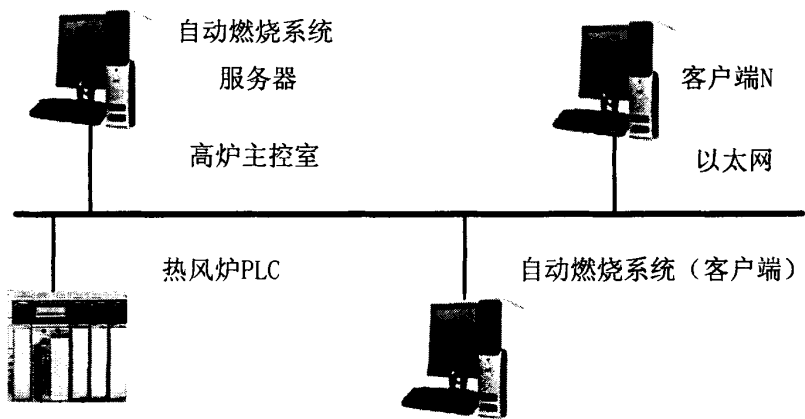


图 3.1 热风炉全自动燃烧系统结构原理图

Fig. 3.1 System structure diagram of automatic hot blast stove combustion

数据通讯协议研发之处就以通讯稳定性问题做为主要修改方向， 同时兼顾并行通讯问题的解决。

项目经常采用的 TCP/IP 协议^[28]由于与下位 PLC 进行通讯时存在通讯程序的局限性， 常出现数据包丢失， 通讯错误等情况， 造成系统不稳定， 通常此种情况

将直接影响系统的使用。而 OPC 通讯方式因其以稳定，可靠做为改进方向，因而迁钢热风炉自动燃烧控制系统采用 OPC 远程数据通讯方式。其特点是：通讯方式灵活，数据传输快速、可靠和稳定；允许不同用户同时并行通讯；跟自动燃烧程序相互独立，互不干扰。避免众多客户端与下位 PLC 间的大量数据的交换^[29]，提高了下位 PLC 的运行效率。本系统的数据流向如图 3.2 所示。

同时迁钢自动燃烧系统是多用户并行系统，因此，数据通讯的并行问题均由 OPC 服务器来自动协调，各客户端程序全部通过 OPC 方式访问 OPC 服务器，只有 OPC 服务器与下位 PLC 进行通讯。

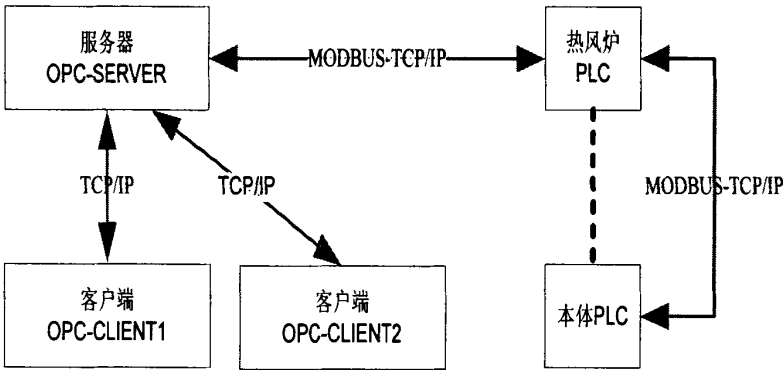


图3.2 自动控制系统的硬件结构图

Fig. 3.2 Hardware structure chart of the automatic control system

在自动化控制方面，控制器部分全部采用 Quantum PLC 控制器^[30]，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^[31]。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。热风炉共有十个 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。

热风炉系统采用冗余 CPU 设计，中央处理器选用两个 140CPU67160 模块，电源模块选用 140CPS11420，以太网模块选用 140NOE77101，开关量输入模块选用 140DDI84100 模块，开关量输出模块选用 140DDO35300 模块，模拟量输入模块选用 140ACI04000 模块，模拟量输出模块选用 140ACO13000 模块。

3.2 热风炉控制回路分析

热风设备上典型的控制回路主要有：热风炉换炉控制和送风控制、热风炉的

热风温度控制、煤气流量和空气流量控制和废气温度上升速度的模糊控制等。最终实现全自动燃烧控制系统来解决燃烧过程中的实际问题。

3.2.1 热风炉的换炉控制和送风控制

正常情况下三座内燃炉采用二烧一送的工作方式，特殊情况下允许二烧一送的工作方式，每45分钟-70分钟换炉一次，换炉时间不超过15分钟。每座炉子都有3种工作状态，即是燃烧、送风和隔断。

热风炉的换炉控制软件结构分为如下三层：

第一层为主干控制层，其控制对象为三座热风炉，其控制功能为决定四座热风炉的运行方式，热风炉之间的送风顺序等。第二层为单炉控制层，单炉控制程序根据主干程序或操作人员在HMI上发出的换炉指令，给出各个热风炉各种状态改变的指令。第三层为单炉阀门控制层，单炉阀门控制层根据单炉控制层发来的指令，完成热风炉各种状态转变时各个阀门动作的顺序。

(a)、主干控制层根据操作人员设定值，决定三座热风炉的运行方式，热风炉之间的送风顺序等。如图3.1所示，其主要控制功能为：

(1)热风炉的自动换炉

当热风温度低于要求的送风温度时，主干控制层发出送风换炉指令。下一座热风炉按预先设定好的送风顺序自动地由“焖炉”状态转为“送风”状态。

(2)热风炉半自动换炉

热风炉在完全同“自动”方式运行的条件下，仅其“送风”换炉指令是由操作人员在HMI画面上发出的。

3.2.2 热风炉的热风温度控制

热风炉热风温度控制工艺如图3.4所示，热风炉单炉送风经过一段时间后，热风温度下降，第二座热风炉送风，第一座热风炉转燃烧，如此循环。

(1)送风温度保持在1250℃左右，不能出现大的波动，要求控制风温在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$

(2)开始送风时风温较高，将控制回路置为手动，预置一个较大的开度，送入较多的冷风；新炉送风时，相当产生 $t=30\text{s}$ 的扰动。

(3)风温达到可以使用PID调节时^[32]，转换为自动，进行PID调节，通过控制混

风管上蝶阀位置，改变混入的冷风量以保持所需的热风温度。

(4)混风温度控制系统可等价于一阶惯性环节：

为安全起见，在送风管道上安装两只热电偶，选择其中之一作为测量值热风温度控制设计为PID控制回路，以确保较高精度的控制。

(a)自动PID控制指通过PLC中的PID模块自动控制混风阀调节阀的开度。

(b)手动控制指由操作人员通过上位机界面或键盘手动输入控制调节阀开度。

3.2.3 热风炉的煤气和空气流量控制

(1)空气和煤气流量控制引入串级闭环控制，由于高炉煤气压力波动具有频繁性、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，即使调节阀立刻动作，但由于调节阀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改变。此时的调节效果刚好与系统实际运行情况相反，只能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。结果就使得整个系统偏差更大，更不稳定。为避免上述情况发生，自动燃烧系统在调节阀前，先按照一定算法，判断当前偏差是否需要去调节。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，很大程度上保证了系统稳定性。

(2)该系统通过自学习热风炉燃烧过程的历史数据，来确定下一个燃烧过程初始的煤气流量和空气流量，即初始的空燃配比，即确定下一个燃烧过程初始的煤气调节阀和空气调节阀的阀位设定值；同时为了避免初始煤气量太大引起爆震，在点火操作过程中采用小流量点火操作。

(3)通过自寻优过程燃烧过程的最优空燃比，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，而不依赖废气含氧量等检测数据，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，拱顶温度会及时反映出上升趋势，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。

(4)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。蓄热期以拱顶温度的恒温或缓慢上升为目标,确保煤气和空气流量稳定,把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,准确计算废气温度上升速率,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。

3.2.4 废气温度上升速度的模糊控制

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^[33],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。根据模糊控制的特点,本系统中设计了废气温度上升速度模糊控制器,在燃烧过程进入稳定状态后,采用模糊控制的方法,系统开始热风炉燃烧节奏的控制,根据废气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。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,控制效果显著。

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^[34]。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。

原手动燃烧与全自动燃烧过程之间可实现无扰动切换,操作人员自由切换过程是在保证调节阀原状态不变的情况下进行,所有控制操作都是在此状态下完成。

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,为高炉工长提供燃烧状况的指示。

换炉时间和燃烧时间优化,根据各个炉子的送风能力不同和混风阀位状态等因素,采用一定算法算出各个炉子的最佳送风时间,有了送风时间和炉况等因素就可确定出燃烧时间。自动燃烧过程具有安全联锁保护及与换炉过程的紧密联锁

控制功能，同时，提供重要参数及操作的报警提示。

3.3 热风炉燃烧控制系统设计

热风炉全自动燃烧系统是一套高炉热风炉燃烧全自动控制系统。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。热风炉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。

3.3.1 自动控制方式的确定

为了保证自动控制过程稳定安全运行，需要对重要的工艺参数进行控制，当操作员改变热风温度，可以监控各个控制回路的数值和状态，当有重要参数数据状态不正常时，应停止传送数据或停止变负荷，为此每个参数设定可以不同的高报警值、高高报警值、低报警值、低低报警值等。为了分析和查找问题，对应每个控制回路应该设有趋势图。

- (1) 确定自动燃烧控制方式，即煤气和空气流量的调节策略。
- (2) 根据操作人员的操作方法，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。
- (3) 通过数学模型技术计算得出燃烧用最佳配比，流量等参数。
- (4) 根据热水准管理确定自动燃烧与自动换炉的连锁与衔接，本系统与原手动控制系统的衔接和转换问题。
- (5) 根据自动燃烧系统的硬件结构，确定与现有硬件系统的匹配和衔接问题。
- (6) 确定数据通讯方式，通讯程序编制，数据采集与处理。
- (7) 人机界面的开发。

热风炉的燃烧过程对应着蓄热室的蓄热过程，它分为加热期和拱顶温度管理

期。当拱顶温度上升到一定值后, 需要保持拱顶温度维持在这个定值, 此时拱顶几乎不再吸收废气的热量, 而废气的热量主要被蓄热室中下部所吸收。从废气管道排出的废气, 它的温度比较低时, 说明热风炉的热交换效率比较高, 反之, 热交换效率比较低。因此, 在拱顶温度达到一定值后, 合理控制废气的温度上升速率对热风炉的燃烧显得尤其重要。

3.3.2 热风炉燃烧控制的基本思想

燃烧控制是根据热风炉拱顶温度, 烟气温度及炉子燃烧状况, 合理调节煤气量和空气量的比例, 即空燃比。空燃比是热风炉燃烧过程中的重要参数, 如果混合煤气过量, 则燃烧不充分, 多余的煤气随燃烧废气排放到大气中, 既是一种浪费, 也是对大气的一种污染; 如果混合煤气不足, 又无法保证热风炉炉顶温度达到设定值, 即热风炉储蓄的热量不足, 无法满足高炉正常生产。因此, 如何在保证高炉正常生产的前提下, 最大限度地提高煤气的燃烧率有着重大的意义。实现热风炉燃烧过程自动控制的关键是随着煤气、空气压力和质量的波动及热风炉燃烧状态的变化对煤气流量和空气流量进行实时调整, 空气流量的调整可以转化为对空燃比的调整。故在加热期, 可以最大空气流量进行加热, 据此来调整合适的煤气流量或者以最大煤气流量进行加热, 并调整合适的空燃比, 迅速提高拱顶温度; 到达拱顶温度管理期, 适当减小煤气流量, 并调整合适的空燃比, 保证拱顶温度不变的情况下, 提高废气的升温速率。通过检测炉顶温度和废气的 O_2/CO 含量可以反映燃烧过程的效果。

热风炉控制系统采用施耐德昆腾 140 系列 PLC 可编程控制器, 其逻辑控制功能强大, 且过程控制功能也很丰富, 其灵活的数字 PID 功能块与逻辑控制相结合, 可适应各种控制回路。所以利用 PLC 很容易实现热风炉燃烧的各种控制方式。

(1) 手动方式 (MAN): 允许操作人员直接控制助燃空气与煤气调节阀开度。

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

(3)、串级方式 (CAS): 允许操作人员选择炉顶温度和废气 O_2/CO 含量以及热值分析来控制助燃空气与煤气调节回路的设定值。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, 把废气的 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废气的 O₂/Co 含量，所以控制参数就是煤气流量和助燃空气流量。

3.3.3 单回路控制系统

在 AUT 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。调节采用 PID 功能块，其传递函数为：

$$G(s) = KP + \frac{K_I}{s} + KD * S / (S + \frac{1}{T_D})$$
 (3.1)

输出公式为： $Y = YP + YI + YD + bias$

比例部分： $YP = KP * ERR$

积分部分： $YI_{(new)} = YI_{(old)} + KI * dt * (ERR_{(new)} + ERR_{(old)}) / 2$ (3.2)

微分部分： $YD_{(new)} = \frac{TD}{(dt + TD)} * (YD_{(old)} + KD * (ERR_{(new)} + ERR_{(old)}))$ 或

$$YD_{(new)} = T_D / (dt + TD) * (YD_{(old)}) + KD * (PV_{(new)} + PV_{(old)})$$
 (3.3)

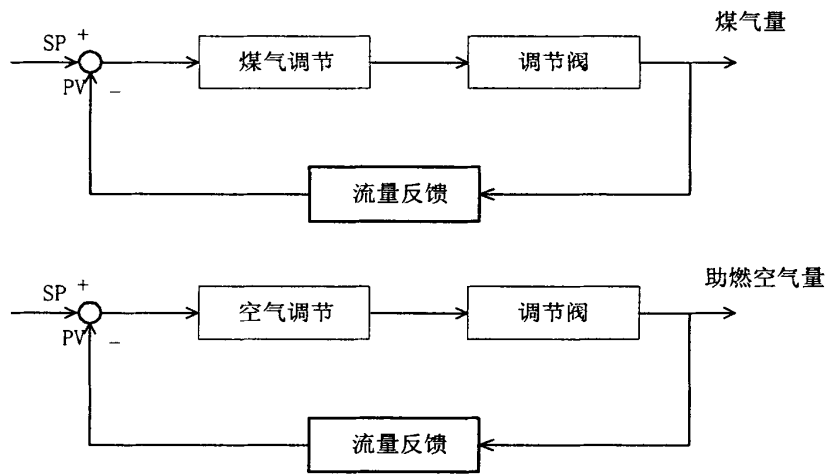


图 3.3 单回路控制系统图

Fig.3.3 Control system picture of single return circuit

$ERR = SP - PV$ 设定与过程值的差； T_D ：微分时间； dt ：扫描间隔； $bias$ ：偏差

数字 PID 功能块的比例、积分、微分作用彼此独立，使其控制很灵活，而且可以实现各种非标准的 PID 控制算式：积分分离、微分先行、不完全微分等。例如积分作用是消除残差，但当大幅度改变设定或有大扰动时，在积分分项的作用下，往往会产生较大的超调和长时间的波动，所以可以引入积分分离功能，即在偏差大于某一个设定值时不用积分控制，而当偏差小于此值时引入积分控制。在

控制中仅仅 PID 运算块是不够的，还必须考虑下列一些问题：

给定值选择、变化率限制、数字滤波、高低限报警、手自动无扰动切换、输入信号补偿等。

图 3.3 煤气与助燃空气两个调节回路是一样的，它们只能克服各自内部的扰动，二者之间没有联系，也就不能保证空燃比。即使设定值按照一定比例，但煤气和助燃空气任何一个发生扰动，都会使两者配合过程中出现较大的动态偏差，以至达不到较好的燃烧效果。

3.3.4 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 Q_G ，助燃空气作为从动量 Q_A ，比值控制就是使助燃空气按照一定的比例关系 $K_x = Q_A/Q_G$ 跟随煤气量的变化。

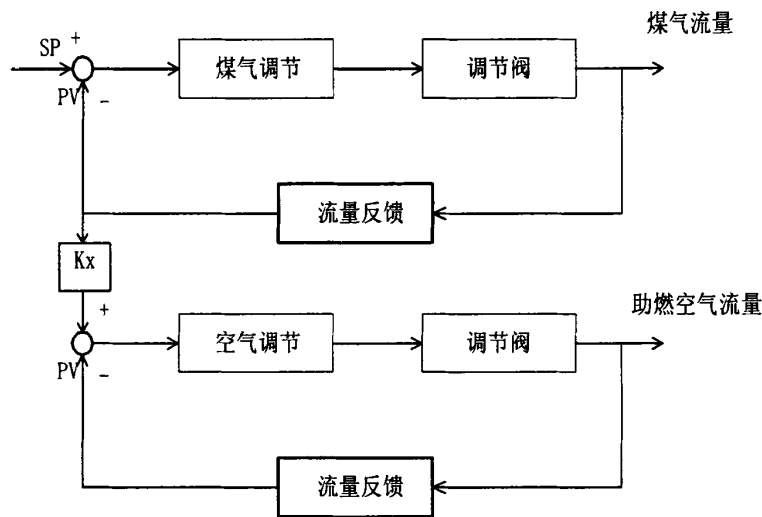


图 3.4 双闭环控制系统图

Fig.3.4 Pair closes the control system picture of the ring

图 3.4 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。

比值系数计算：

流量与测量信号之间是非线性关系, 对于流量检测元件差压变送器来说, 差压与流量的平方成正比。所以煤气与助燃空气管路的差压与流量关系式为:

$$\Delta P_A = K_A Q_A^2; \Delta P_G = K_G Q_G^2 \quad (1)$$

ΔP_A 、 K_A 、 Q_A : 空气管路节流元件的差压、放大系数、流量。

ΔP_G 、 K_G 、 Q_G : 煤气管路节流元件的差压、放大系数、流量。

对于最大量程公式也成立:

$$\Delta P_{A\max} = K_A Q_{A\max}^2; \Delta P_{G\max} = K_G Q_{G\max}^2 \quad (3.4)$$

差压变送器将差压信号线形转换为标准 4-20mA 电信号。

转换式为: $I_A = \Delta P_A / \Delta P_{A\max} (20 - 4) + 4$

$$I_G = \Delta P_G / \Delta P_{G\max} (20 - 4) + 4 \quad (3.5)$$

经变换后为: $(I_A - 4) / 16 = \Delta P_A / \Delta P_{A\max}; (I_G - 4) / 16 = \Delta P_G / \Delta P_{G\max}$ (3)

将公式(1)和(2)代入(3)得:

$$(I_A - 4) / 16 = (Q_A / Q_{A\max})^2; (I_G - 4) / 16 = (Q_G / Q_{G\max})^2 \quad (3.6)$$

差压变送器的 4~20mA 信号输入到 PLC 的模拟量输入模块, PLC 采用 12 位转换精度, 转换后数值范围为 0~4095, 转换公式为:

$$\begin{aligned} F_A / 4095 &= (I_A - 4) / 16 \\ F_G / 4095 &= (I_G - 4) / 16 \end{aligned} \quad (3.7)$$

所以有下列关系:

$$\begin{aligned} F_A / 4095 &= (I_A - 4) / 16 = \Delta P_A / \Delta P_{A\max} = (Q_A / Q_{A\max})^2 \\ F_G / 4095 &= (I_G - 4) / 16 = \Delta P_G / \Delta P_{G\max} = (Q_G / Q_{G\max})^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

空气与煤气的比值系数为: $K_X = F_A / F_G = (Q_A / Q_G)^2 * (Q_{G\max} / Q_{A\max})^2$

已知助燃空气与煤气的流量量程相等, 所以 $Q_{G\max} / Q_{A\max} = 1$;

假设工艺要求助燃空气与煤气的流量比值为 $K = Q_A / Q_G$

所以比值系数为: $K_X = F_A / F_G = (Q_A / Q_G)^2 * (Q_{G\max} / Q_{A\max})^2 = K^2$

如果在系统中采用热值分析仪实时检测煤气的热值, 则可以实现变比值控制,

即比值系数 $K_x = (\text{热值} / \text{热值常数})$ 。

3.3.5 串级控制

单回路控制和比值控制基本可满足工艺要求，但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送入热风炉。串级控制如图 3.5。

串级控制是改善控制质量的一个有效方法，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。串级系统在结构上形成两个环，内环起粗调作用，外环用来完成细调任务，以最终满足热风炉燃烧工艺要求。

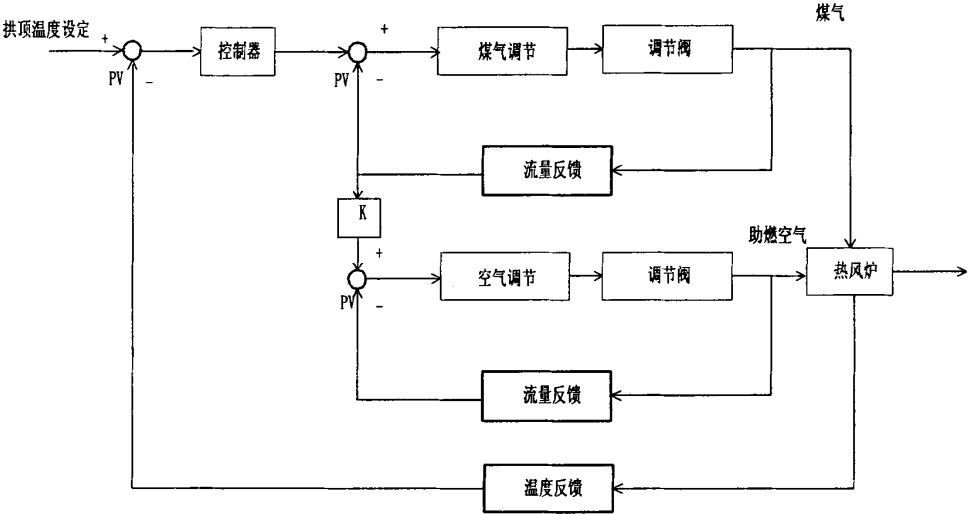


图 3.5 串级控制系统图
Fig.3.5 Cascade control system diagram

3.3.6 复合控制

本系统还可实现煤气和助燃空气的复合比值控制。控制框图如图 3.6。因为在检测系统中采用分析仪对废气中 CO/O2 的含量检测，可得出热风炉的燃烧效果。所以可把 CO/O2 作为被控参数，从而在比值控制基础上引入串级控制。采用串级控制系统可大大提高调节品质。此系统中用管道气体流量来控制调节阀的开度，然后再用废气 CO/O2 含量修定流量设定值。系统在比值控制稳定后，可切换到复合比值控制。此方式可使比值控制更加灵敏，从而使燃烧效果更好。

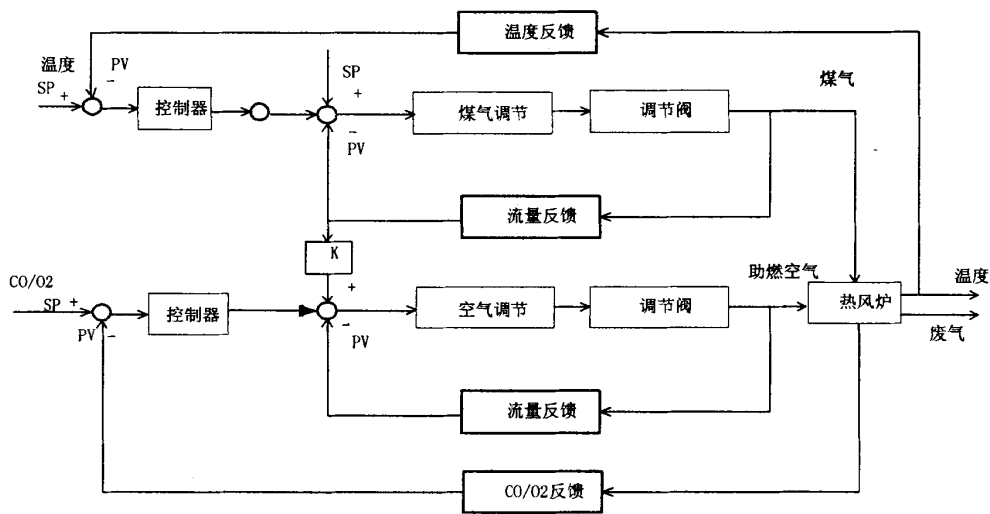


图 3.6 复合比值控制系统图
Fig.3.6 Compound the control system picture of the ratio

3.3.7 废气温度上升速度的模糊控制器的设计

为满足高炉对热风温度得要求，供给稳定持续的热风。更好的控制废气温度的上升速度，从而引入了模糊控制。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。根据模糊控制的特点，本系统中设计了废气温度上升速度模糊控制器，在燃烧过程进入稳定状态后，采用模糊控制方法，系统开始热风炉燃烧节奏的控制，根据废气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。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，控制效果非常明显。

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：

- （1）确定模糊控制器的输入和输出变量；
- （2）归纳和总结模糊控制器控制规则；
- （3）确定模糊化和非模糊化的方法；
- （4）选择论域并确定有关参数；

- (5) 模糊控制器的软硬件实现;
- (6) 合理确定采样时间.

则废气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: 废气温度在采样周期内温度的变化 T 和采样周期内温度变化率 ΔT 。

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

废气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, 总结出废气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 3.1:

表 3.1 废气温度上升速度模糊控制器的控制规则

Table 3.1 Fuzzy control rule table of exhaust temperature increase speed control

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

- (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。

根据废气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：

废气温度上升速度在采样周期内温度的变化 T 的论域范围为 $(0.6,1.4)$ ；

废气温度上升速度的变化率 ΔT 的论域为 $(-0.4,+0.4)$ ；

根据输出信号对废气温度的影响的程度，确定输出信号的论域范围：输出量为 U ，论域范围为 $(-4000,4000)$ ，4000 表示的 4000m³/h。

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

首先，在确定模糊化和非模糊化的方法之前，先来确定所要使用的隶属函数的形状和参数。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之间的相互关系和影响，并结合编程软件实现三角形隶属函数。并根据论域选择，确定各个模糊控制器的隶属函数形状。废气温度上升速度在采样周期内温度的变化 T 论域范围 $(0.6,1.4)$ ，其隶属函数如图 3.7 所示。

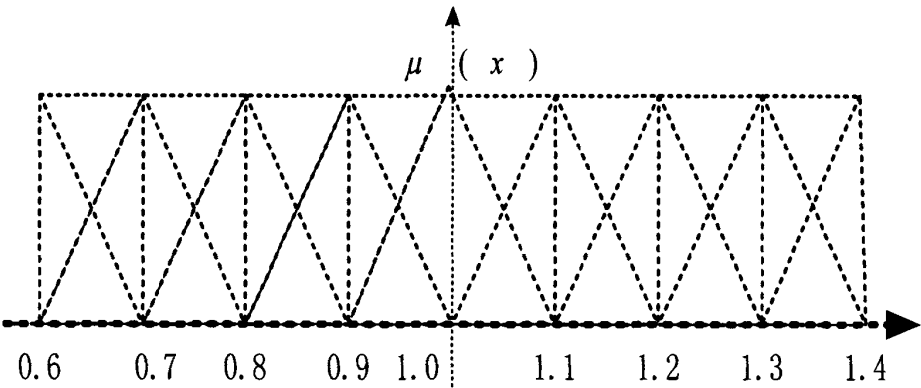


图 3.7 废气温度上升速度在采样周期内温度的变化 T 隶属函数的曲线

Fig.3.7Change of rising speed of the temperature for the waste gas Curve under the jurisdiction

对应的隶属度函数赋值如表 3.2 所示。

表 3.2 废气温度在采样周期内温度的变化的隶属度赋值表

Table 3.2 Membership assignment of exhaust gas temperature change in the period

T	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
PS+	0	0	0	0	0	0	1	0	0
PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NS+	0	0	1	0	0	0	0	0	0
NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0

废气温度上升速度变化率 ΔT 论域 $(-0.4,+0.4)$ ，其隶属函数如图 3.8 所示。

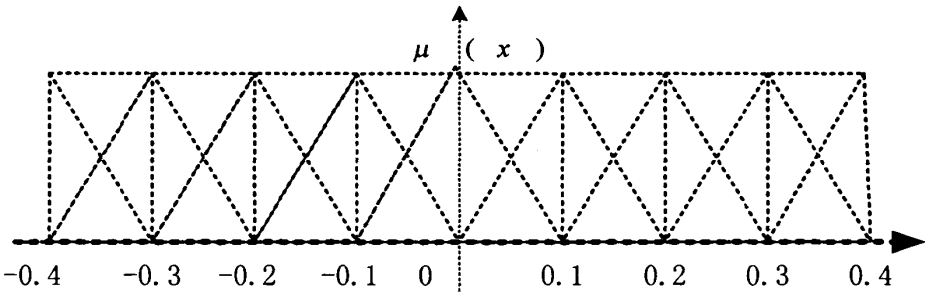


图 3.8 废气温度上升速度的变化率 ΔT 隶属函数的曲线

Fig. 3.8 Exhaust gas temperature rise rate of change of velocity curve membership function

对应的隶属函数赋值如表 3.3 所示。

表 3.3 废气温度上升速度变化率采样周期内温度的变化率 ΔT 的隶属度赋值表

Table 3.3 Exhaust gas temperature rise rate of temperature change of membership assignment

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	0	0
PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NS+	0	0	1	0	0	0	0	0	0
NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0

废气温度上升速度模糊控制器输出量为 U ，论域范围为 $(-4000,4000)$ ，其隶属函数如图 3.9 所示，对应的隶属函数赋值表 3.4 所示：

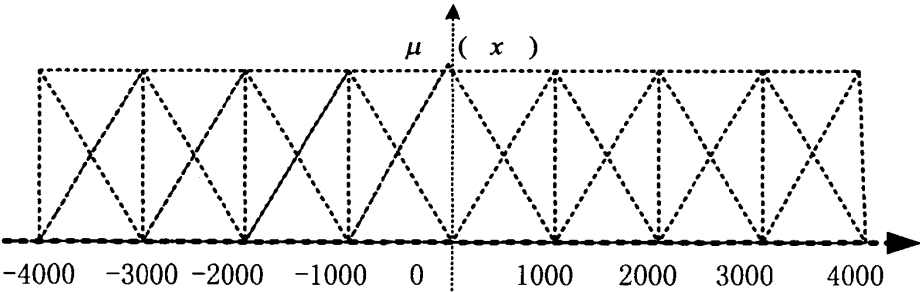


图 3.9 废气温度上升速度模糊控制器输出量 U 隶属函数的曲线

Fig. 3.9 Exhaust gas temperature increases the speed controller output fuzzy membership

表 3.4 废气温度上升速度模糊控制器输出量 U 的隶属度赋值表如下

表 3.4 废气温度上升速度模糊控制器输出量 U 的隶属度赋值表

Table 3.4Exhaust gas temperature rise rate of the fuzzy controller output membership assignment

U	-400	-300	-200	-100	0	1000	2000	3000	4000
0	0	0	0	0					
PB+	0	0	0	0	0	0	0	0	1
PB	0	0	0	0	0	0	0	1	0
PS+	0	0	0	0	0	0	1	0	0
PS	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0	1	0	0	0	0	0
NS+	0	0	1	0	0	0	0	0	0
NB	0	1	0	0	0	0	0	0	0
NB+	1	0	0	0	0	0	0	0	0

3. 4 自动燃烧流程的计算

热风流程计算是流程设计和优化的先导，只有通过大量的流程计算找到流量、压力、纯度之间的关系，才能进行流程的分析、控制以及优化等。迁钢 2 炉热风炉使用煤气种类为高炉煤气，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，到达炉顶的气体就是高炉煤气。其主要成份是 CO₂、CO、H₂、N₂、H₂O、O₂ 等。

热风流程计算一般包括三个方面：

- (1) 热风炉燃烧的物性计算；(2) 热风热值的计算；(3) 热风流程的计算

3.4.1 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。发热量有高发热量和低发热量。

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。

$$Q_{\text{高}} = (30.19\text{CO} + 30.5\text{H}_2 + 94.99\text{CH}_4 + 141.15\text{C}_2\text{H}_4 + \dots + 55.36\text{H}_2\text{S}) \times 4.1868\text{KJ}/\text{m}^3$$

$$Q_{\text{地}} = (30.19\text{CO} + 25.8\text{H}_2 + 85.6\text{CH}_4 + 150.54\text{C}_2\text{H}_4 + \dots + 60.05\text{H}_2\text{S}) \times 4.1868\text{KJ}/\text{m}^3$$

$$\text{换算式} = 4.1868\text{KJ} = 1\text{Kcal} \text{ (千卡)}$$

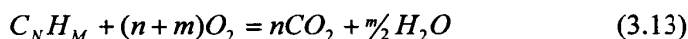
根据不同煤气中所含的可燃组分，将这些组分的体积百分含量代入低发热量公式，就可计算出不同煤气的低发热量。

3.4.2 煤气燃烧中各参数的计算

煤气的燃烧过程，包括以下三个阶段，(1) 煤气与空气的混合。(2) 混合后的可燃气体的加热和着火。(3) 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反应。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。

因此，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。

(1) 燃烧中可燃成分化学反应式：



(2) 空气需要量的计算：

各气体的公斤分子体积均相等为 22.4 m^3 。故每 m^3 煤气完全燃烧的理论空气量 (m^3) 为:

$$L_o = (CO + 0.5H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_4 + \dots + 1.5H_2S - O_2) \div 21 \quad (3.14)$$

(3) 过剩空气系数的计算:

实际生产中,实际空气量均大于理论空气量。实际空气量的计算式为: $L_n = aL_o$

式中: L_n =实际空气量; a =过剩空气系数

因此,过剩空气系数的计算式为: $a = L_n/L_o > 1$

(4) 燃烧产物量的计算:

完全燃烧时,按理论空气计算出理论燃烧产物量,按燃烧的化学反应式可得:

$$V_o = V_{100}(CO + H_2 + \sum(N + M/2)C_N H_M + 2H_2S + CO_2 + N_2 + H_2O) + 7\%_{100} * L_o \quad (3.15)$$

式中: V_o =理论燃烧产物量

燃料完全燃烧的理论燃烧产物量与燃料成分有关。燃料中的可燃成份含量越高,发热量越高,则理论燃烧产物量也越大。

实际燃烧产物量由于过剩空气系数 ($a > 1$) 所影响,会大于理论燃烧产物量。

因此,计算实际燃烧产物量要加上过剩的空气需要量。即: $V_B = V_o + (a-1)L_o$

V_N = 实际燃烧产物量

理论温度经验计算: 高炉煤气为: $T_{理} = 1.2Q_{低} + 330$

$Q_{低}$: 高炉煤气发热值; 高炉混合煤气: $T_{理论} = 0.622Q_{低} + 770$

3.5 本章小结

本章主要介绍了热风炉预热系统、自动点火系统、自动换炉系统、安全监控系统、热风送出系统等典型控制,又介绍了全自动燃烧控制方式的确定及自动燃烧的控制原理及自动控制时参数确定的原则等,再从热风流程的计算数学模型出发,引出了热风设备自动控制时各参数之间的函数关系,对应每一个关系式,又详细介绍了每个控制器的工作原理及控制策略。

第4章 控制功能的实现

热风炉全自动燃烧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。热风炉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：

- (1) 确定自动燃烧控制方式，即煤气和空气流量的调节策略。
- (2) 据操作人员的操作方法，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。
- (3) 通过数学模型技术计算得出燃烧用最佳配比，流量等参数。
- (4) 根据热水准管理确定自动燃烧与自动换炉的连锁与衔接，本系统与原手动控制系统的衔接和转换问题。
- (5) 根据自动燃烧系统的硬件结构，确定与现有的硬件系统的匹配、衔接问题。
- (6) 确定数据通讯方式，通讯程序编制，数据采集与处理。
- (7) 人机界面的开发。

4.1 下位机控制功能的实现

4.1.1 顺序控制功能的实现

(1) 自动点火控制功能实现

初始点火过程，实现小流量点火，大流量燃烧。系统根据热风炉当前工艺状态满足“燃烧”的前提，以自学习算法确定的煤气流量，煤气调节阀阀位，空气

流量和空气调节阀阀位为初始值，按照工艺的要求，进行点火的操作。自动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。本系统以自动寻优的方式，保证热风炉从点火就以最佳的空燃比，快速进入燃烧状态。

初始点火流程如图 4.1。从第一种方式投入指从原来没有燃烧的状态投入自动燃烧状态；从第二种方式投入指从原来手动燃烧状态切换到自动燃烧状态。以第一种方式投入自动燃烧系统，系统将以自动寻优的煤气和空气流量设定值作为初始点火的设定值，按照先开空气调节阀，再开煤气调节阀的原则实现点火燃烧。从第二种状态投入自动燃烧，需要将实际的煤气流量和空气流量分别置给煤气流量的自动设定值，调节阀阀位保持原来的阀位值不变，实现无扰动的切换过程。

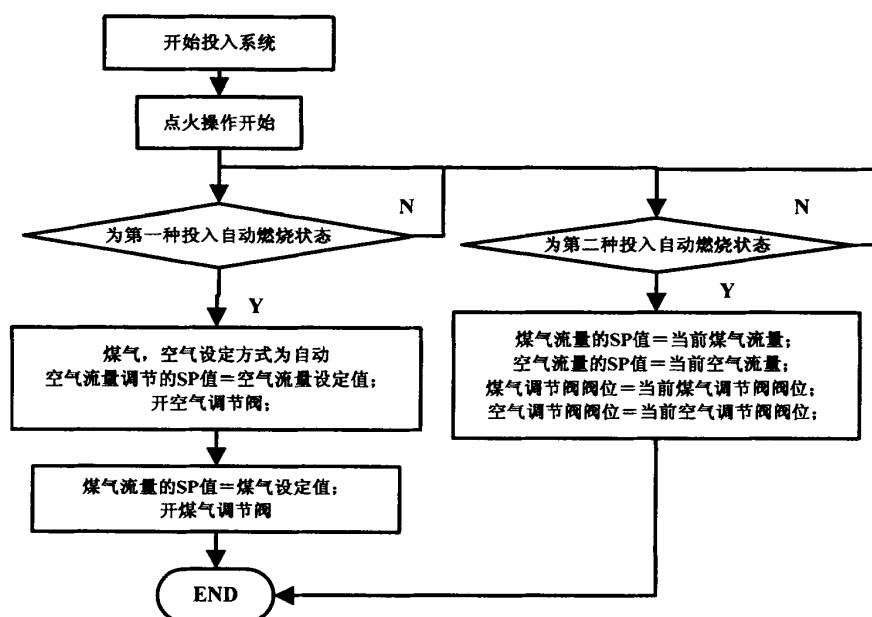


图 4.1 初始点火流程图

Fig. 4.1 The flow of Ignite diagram initially

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。以最佳流量的判定周期为标准，而不是以实时值做为标准，这样避免了流量的实时值波动产生的误差。本系统按照如下发放完成点火操作：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。

(2)、自动燃烧阀门控制的实现

单炉阀门控制程序根据单炉控制层传来的状态转换指令，自动地完成热风炉各种状态转换以及逻辑联锁，实现热风炉的燃烧、隔断、送风的状态转换，来满足高炉生产的要求。程序流程图见图4.2。

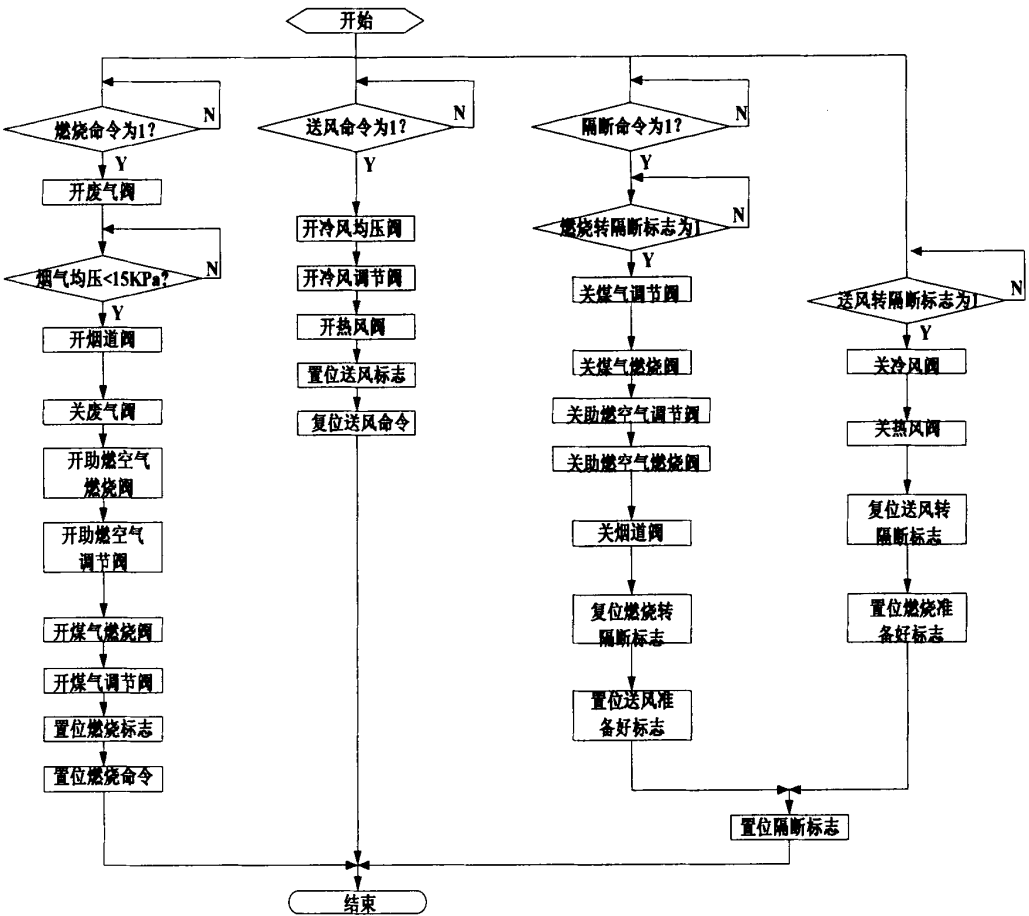


图4.2 单炉阀门控制流程图
Fig.4.2 Flow of single furnace valve control

(3) 自动换炉控制的实现

热风炉实现根据炉顶温度和烟道温度及送风时间进行燃烧、隔断与送风状态的自动换炉控制。为高炉生产的需要在本体画面增加了换炉工长确认提示画面。

(a) 燃烧转隔断的控制：燃烧过程中当炉顶温度和烟道温度达到设定值自动

转到隔断状态。

(b) 送风转燃烧的控制：可选时间控制和温度控制，也可全选。送风过程中当送风时间到设定值或炉顶温度低于设定值时发出联锁控制命令，首先自动控制另一座具备送风条件的热风炉转到送风状态，之后控制本热风炉转到燃烧状态。

(c) 燃烧转送风的控制：燃烧过程中具备了送风条件便可自动替需要送风转燃烧的热风炉转到送风。

(d) 隔断转送风的控制：具备送风条件的隔断过程中的热风炉可自动替需要送风转燃烧的热风炉转到送风。

(e) 隔断转燃烧的控制：如果不具备送风条件的隔断过程中的热风炉，当其它热风炉自动转送风时自动转到燃烧。

以上热风炉自动换炉命令都由工长指令确认后执行换炉。热风炉换炉指令发出后，要求热风炉按照事先设定的送风顺序自动地进行相应的状态切换。当某座热风炉发生故障或停止运行时，自动按照事先设定的送风顺序选择下一个该送风的热风炉送风。

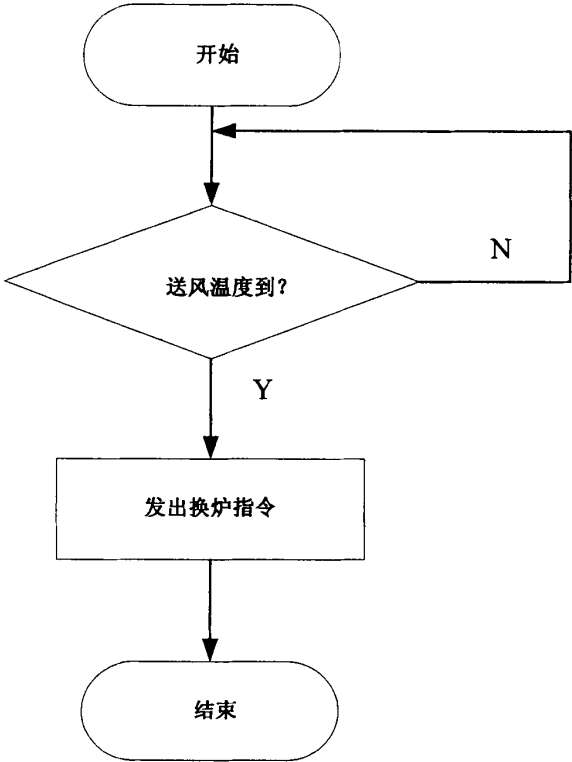


图 4.3 换炉流程图

Fig.4.3 Flow of change stove

单炉控制层控制功能根据主干程序或操作人员在监视器上发出换炉指令，自

动给出各个热风炉各种状态改变的指令。热风炉状态改变时，换炉逻辑会对所输入的换炉指令进行判断，对于非法的换炉指令则会拒绝执行(如要求转入该热风炉已在状态或要所有热风炉同时退出送风状态的指令等)。程序流程如图4.4所示。

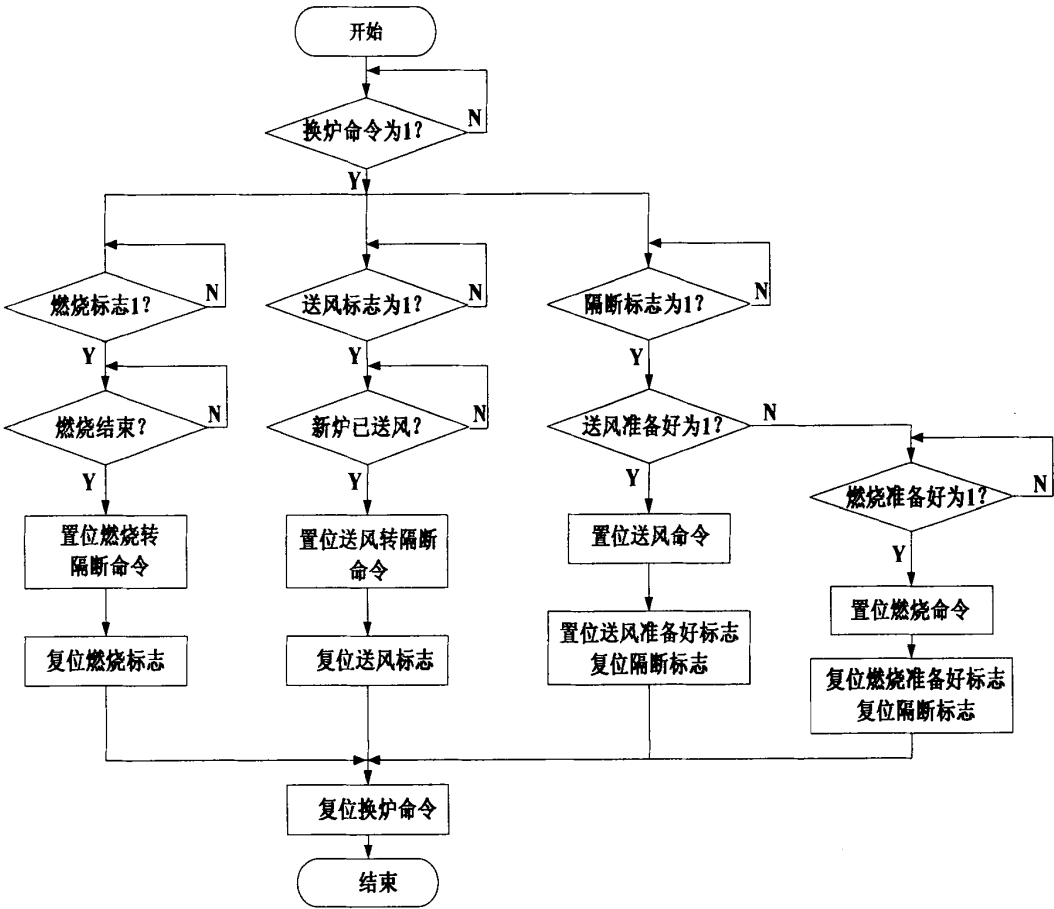


图 4.4 换炉控制流程图
Fig4.4 Flow of furnace control

(4) 自动停烧过程控制的实现

系统在停烧过程中，进行了相关连锁保护措施，在停烧操作中考虑空/煤气流量同时减小的问题，避免拱顶温度下降很多的现象以及有煤气而无空气的危险情况。当停烧命令发出，系统首先会自动置流量手自动设定值为零，煤气调节阀为 0%，空气调节阀为 15%，待煤气流量小于设定值后，再置空气调节阀为 5%，此时，停烧过程结束。所有这些操作均由系统完成，完全实现了自动化，当热风炉当外部条件满足后系统自动进行相应控制。停烧过程图如图 4.5。

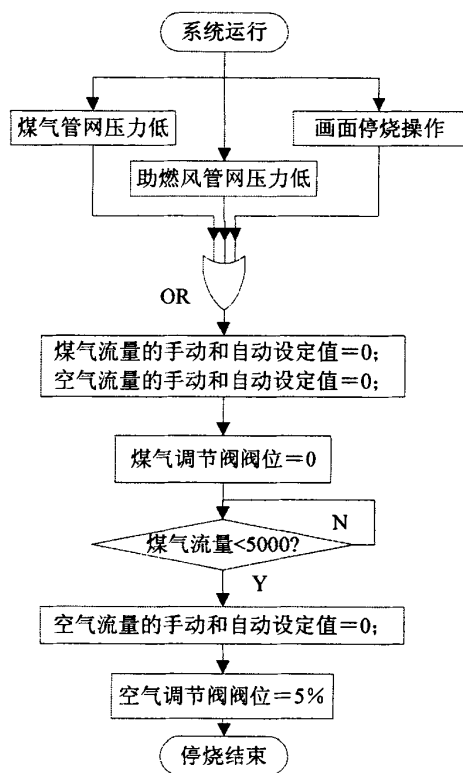


图 4.5 停烧过程

Fig. 4.5 Process of stop burning

4.1.2 自寻优微调过程的控制实现

自动燃烧控制系统点火步骤完成后，等待燃烧进入稳定状态，系统选择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，就是可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，从而做出下一步的决定，一步一步搜索，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。假定该系统自某一点投入工作，每隔一定时间， 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，这样往返调节阀门的位置，不停地搜索使温度达到最佳值，进入燃烧稳定状态。空气和煤气流量修正流程图如4.7所示。

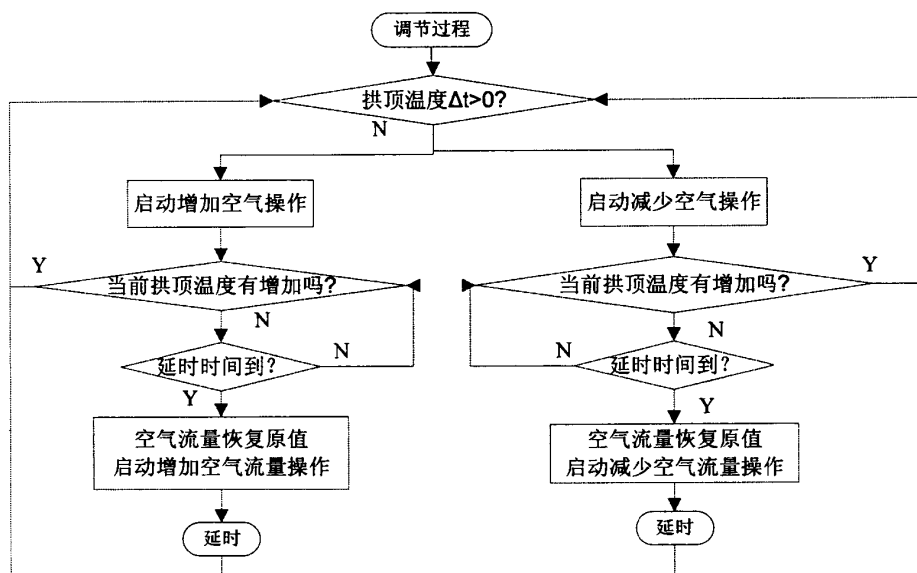


图 4.6 空气和煤气流量修正

Fig. 4.6 Flow of air and gas rate correction

修正的步骤主要过程为，当前拱顶温度如果超过一定的时间没有上升则启动修正过程。首先启动增加煤气流量过程，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，则恢复煤气流量的原值，转而增加空气流量，延时后，返回正常控制过程。如果再次启动流量的修正过程，则启动减少煤气流量的过程。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，则恢复煤气流量的原值，转而减少空气流量，延时后，返回正常控制过程。

同时本系统能够自动判断单双炉燃烧转换的过程，根据不同的状态采取不同的流量修正策略。如：拱顶温度在规定时间内下降了，则启动修正过程。首先增加空气流量，延时判拱顶温度上升了，则说明修正过程有效；若没上升，则说明此修正过程无效，则恢复空气流量原值，转而减小空气流量，延时再判拱顶温度上升了，说明修正的过程有效。修正过程调节阀控制过程如图 4.6 所示。

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。

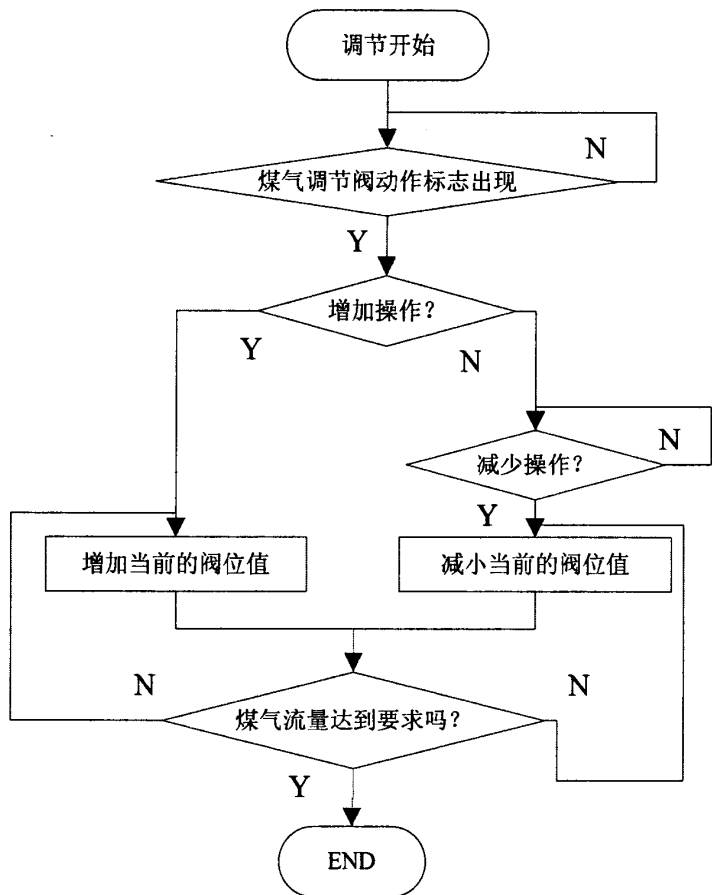


图 4.7 调节阀控制过程
Fig. 4.7 Process of Valve Control

4. 1. 3 废气管理模糊控制的实现

在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，根据废气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。为了保证自动控制过程中设备的安全和工况的稳定，需要对一些重要参数的变化速率做出一定的限制，控制烟道温度不能超过 400 度，烟道废气温度上升速率不能过快，否则燃烧效果不好，热值利用率比较低，同时过高的温度对设备的使用寿命造成影响。

1). 模糊控制器的实现

通过对废气温度变化量和废气温度上升率模糊推理，利用专家经验完成对热风炉燃烧的修正。自动燃烧系统的功能结构如图 4.8 所示。

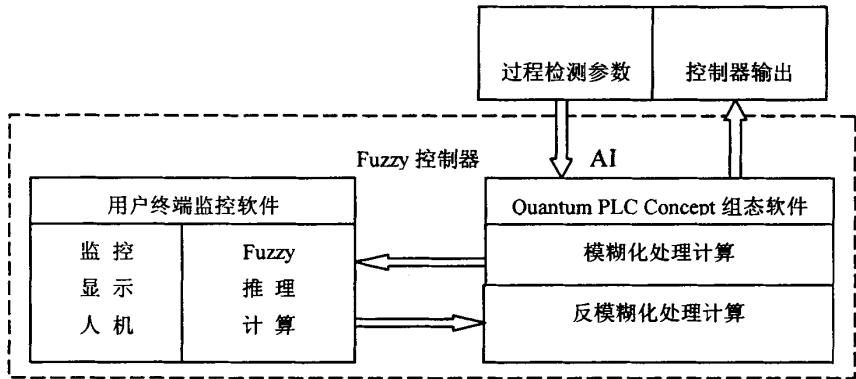


图 4.8 自动燃烧系统功能结构图

Fig. 4.8 Function Structure of Automatic Combustion System

模糊控制器推理计算程序的总体思路如图 4.9 所示。

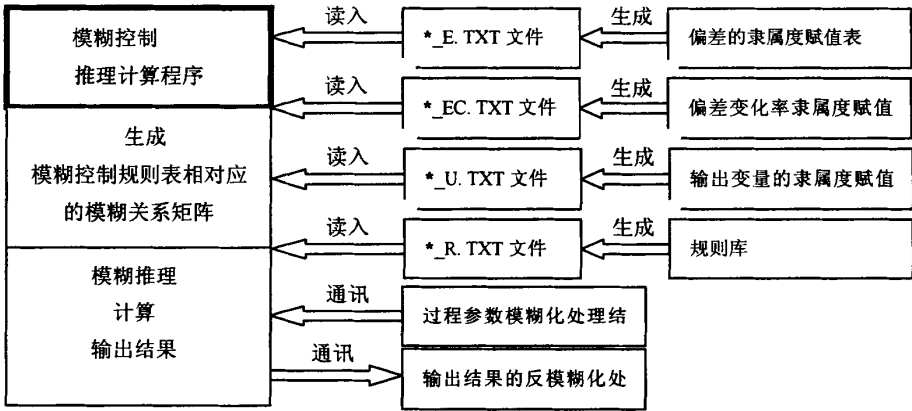


图 4.9 模糊控制器计算程序的总体思路图

Fig. 4.9 Calculates the total of the program for Fuzzy controller

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：

If $E = NB +$ and $EC = PB +$ then $U = Z$

与上述条件语句对应的模糊关系矩阵可以按照下面的方法计算：

- 第一步：从煤气调节模糊控制器的输入变量 1 的隶属函数赋值表中取出 $NB +$ 对应的向量，定义为 A ；
- 第二步：从煤气调节模糊控制器的输入变量 2 的隶属函数赋值表中取出 $PB +$ 对应的向量，定义为 B ；

第三步：求取 $A \times B$

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

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

第六步：求取 $R_1 = R \times C$ ；

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

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

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

2) 废烟气管理具体过程如下：

- (a) 读取投入自动燃烧时计算出的此次燃烧废气温度需要满足的上升速率；
- (b) 判断当前的工况，满足条件则计算废气温度实际的上升速率；
- (c) 以废气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，输入废气温度上废气温度上升速度模糊控制器；
- (d) 根据废气温度的上升速度偏离正常值得大小，快速修正燃料。

(3) 燃烧过程中自动加烧减烧处理的控制实现

燃烧过程中，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，迁钢热风炉自动燃烧控制系统在燃烧过程中，根据废气温度上升速率变化的特点分段自动调整煤气和空气流量的供给大小，使废气温度的上升速度与实际燃烧过程相符合。当废气温度的上升速度偏离正常值较大时，则采取较大的流量修正值进行自动加烧减烧，当废气温度的上升速度偏离正常值较小时，则采用较小的流量修正值进行自动加烧减烧。除了自动控制废气温度上升的速度以外，系统还为操作人员提供了手动加烧减烧功能。操作人员可根据自己的需要，手动按照比例增加或者减少燃料的大小。同时自动加烧减烧处理程序将寻优过程与自动加烧减烧过程和烧炉过程统一，保证系统时实控制烧火过程，自动进行加

烧减烧处理，致使系统能够快速跟踪控制和自动寻优，并在废气温度上升速率进行分段处理，避免出现自动加减烧在燃烧前期不断加烧，在后期不断减烧，影响整个燃烧过程稳定的现象发生。

4.1.4 燃烧过程中异常情况处理功能控制的实现

(1) 燃烧过程中自动与手动操作切换过程

控制系统实现燃烧过程手动控制与自动控制的无扰动切换。根据实际工况，操作人员可以在自动燃烧和手动控制方式下选择，燃烧过程可实现无扰动控制。

(2) 异常情况的处理控制过程

控制系统自动处理煤气突然中断，助燃空气突然中断等异常情况的控制。当出现前述的状况时，系统自动实现热风炉停烧控制。

(3) 停烧控制过程

控制系统自动完成停烧过程的控制，当发生停烧条件时，系统自动实现停烧控制，即按照工艺的要求，先关煤气调节阀，再关空气调节阀。

(4) 当发生调节阀阀位处于极限位置，而实际的流量仍然没有达到设定值时，系统自动按照标准的空燃对比对流量进行重新折算，保证燃烧过程稳定，当异常状态消除后，则自动恢复正常的燃烧状态。

(5) 当流量的设定值和实际值产生的偏差超过系统设定的死区范围时，激活调节阀动作，系统采用以大脉冲触发调节阀动作，再以正常值结束的调节阀控制策略，并采用模糊控制器控制调节阀触发阀位脉冲的宽度和高度，将每次驱动调节阀动作的信号发出后，实际流量达到设定值的时间作为输入变量，根据时间的长短，自动修正触发脉冲宽度和高度，同时，系统根据流量的偏差大小，方向自寻优调节阀的动作的周期和调节阀动作的动作幅度。

4.1.5 燃烧过程中安全控制的实现

迁钢热风炉自动燃烧控制系统在点火、停烧、投入、退出等过程中增加了相关连锁保护措施，最大程度的保证了安全，也省掉了部分操作过程，较原手动系统大为简化，同时规范了控制过程，提高了操作的安全性和可靠性。连锁保护动作过程如图：4.10

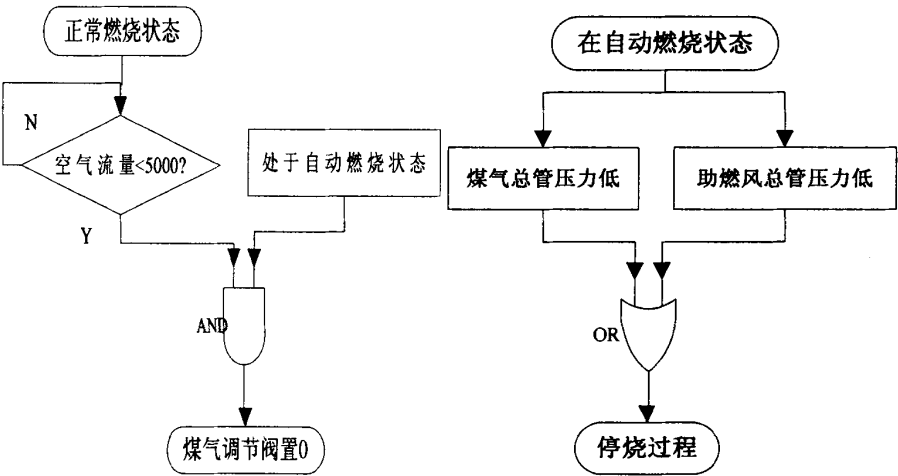


图 4.10 连锁保护动作过程

Fig. 4.10 The chain protects the course picture of movements

4. 2 监控功能的实现

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。

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、废气温度等的实时和历史趋势。
- 模型计算部分：可按当前燃料情况及风温使用情况，算出燃烧用量及配比等。

(1) 热风炉全自动燃烧控制功能的实现

全自动燃烧的控制实现就是运用 Quantum PLC 控制系统提供的各种功能，通过组

态把变负荷过程中相关的量之间的函数关系表达出来，得到各个量的目标计算值，为了平稳过渡，中间加入一些限制功能块，然后把运算输出值作为各个控制器的设定值，再通过设置合理的 P、I、D 值来实现对阀门或设备的平稳控制和过渡。最终实现的目标是：只需操作员输入新的产品量(主要是高温热风量)，点击确认后，各个设备及控制量就会自动平稳的过渡到新的工作点上。自动燃烧控制得以实现主要是依靠控制以下重要参数来实现的。首钢迁钢炼铁作业部的热风炉自动控制系统如图 4.11 所示：

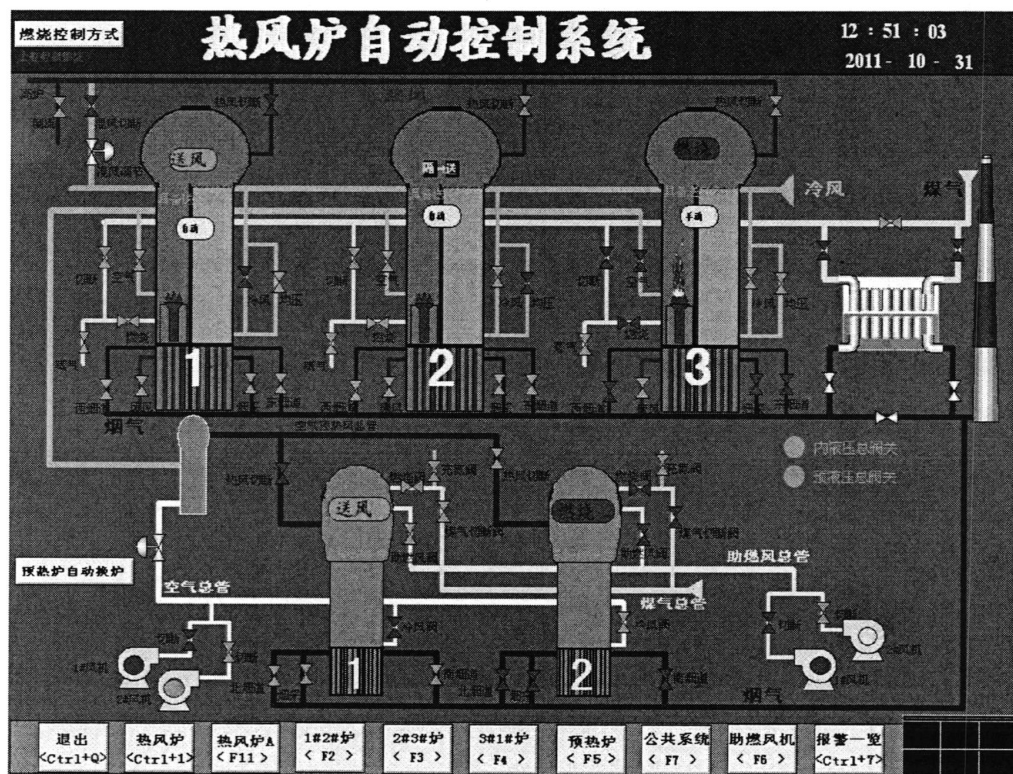


图 4.11 热风炉自动控制系统图

Fig.4.11 Automatic control system picture of hot-blast Stove

(2) 热风炉工艺过程状态和参数的监控和显示

如下图4.12，热风炉通过燃烧、送风、隔断分段过程为高炉提供稳定连续的热风，根据工长的要求做出相应的工艺调整，以满足高炉炉况的特殊要求。有时高炉煤气的成分出现变化，其热值也发生变化，通过热分析仪可以随时监控进入热风炉的煤气的成分及热值。

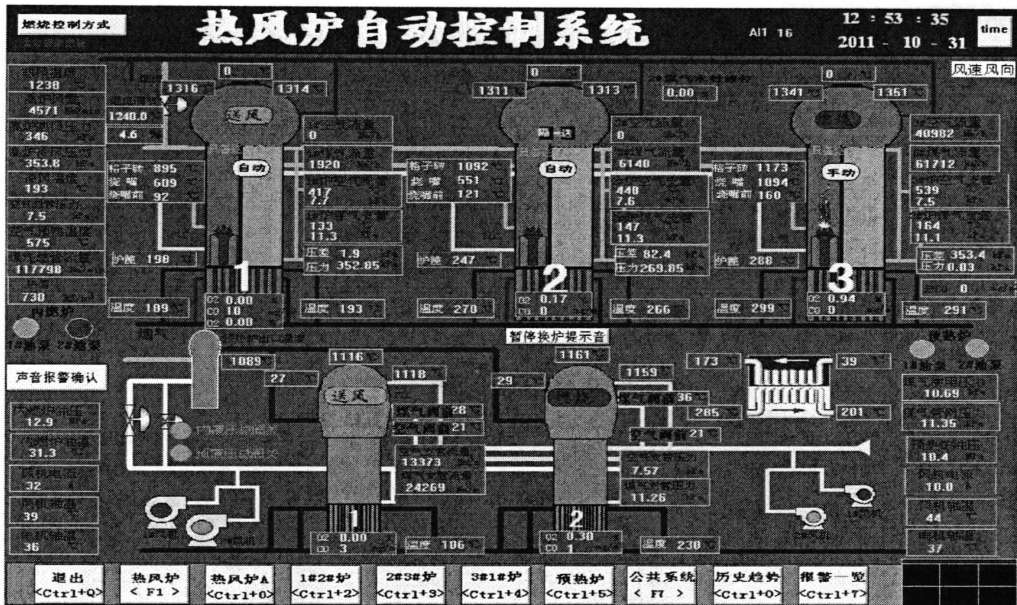


图 4.12 热风炉工艺过程状态和参数的监控和显示

Fig. 4.12 Control and showing pursuing of process state of the hot-blast stove

(3) 拱顶温度和废气温度等的实时监控曲线和历史曲线如下图4.13。通过拱顶温度曲线可以分析计算热风炉煤气和空气流量的配比是否合理，燃烧是否充分。从而为下一步的燃烧控制提供科学依据。

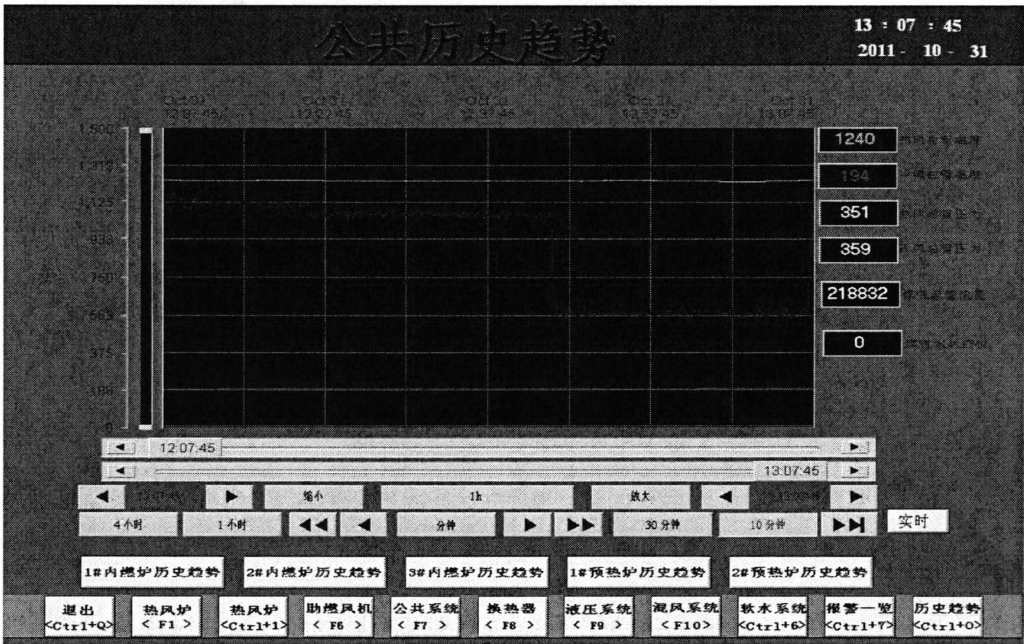


图 4.13 趋势图

Fig. 4.13 The trend graph of history

(4) 安全报警功能的实现

热风炉燃烧控制的基础必须保证热风炉生产的安全性，所以在做热风炉控制系统摆在首位的是安全，一旦热风炉控制系统出现突发情况，可以直接切换控制手段，等故障排除后再恢复正常的控制，这样既保证了高炉生产同时对设备和人身都进行了相应保护。画面提供报警功能主要是热风拱顶温度报警，烟道温度超高报警和液压系统压力过高或过低都会造成系统报警。热风炉监控报警功能如图 4.14 所示：



图 4.14 热风炉报警画面

Fig .4.14 Alarm screenof hot blast stove

通过该控制系统的投入运行，前后对比趋势图 4.15 上显示了较好的运行效果，煤气和空气流量控制比以前更平稳，降低了工人的劳动强度，提高了热风温度 10-20 度。实现了节能降耗的目的。提高了热风炉整体自动化控制水平。

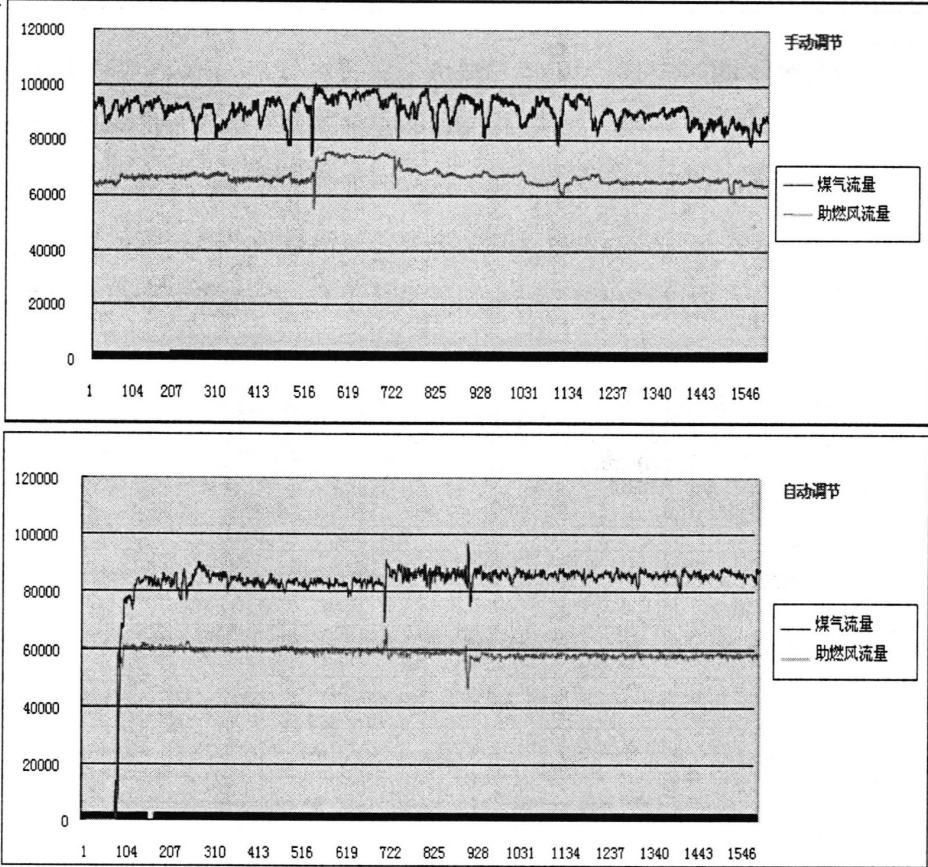


图 4.15 手自动对比图
Fig.4.15 Compare of manual between auto

4.3 本章小结

本章首先简单介绍了昆腾 Quantum PLC 软件的系统组成及各部分的基本功能，接着详细介绍了实施全自动燃烧所需要控制系统的硬件和软件的实现，并详细介绍了自动燃烧相关的重要参数控制回路的组态功能构建及实现的控制功能，最后介绍了自动燃烧控制中暂停功能的实现、监控及报警功能的实现。

第5章 结论和展望

5.1 结论

由全自动燃烧系统的实际使用情况来看, 本系统对热风炉自动燃烧、自动换炉过程的控制较为合理, 考虑因素也较全面, 对燃烧过程中各种工况条件和变化因素都有相应处理方法。自动换炉系统与自动燃烧系统配合投入使用效果较好, 两系统间连锁安全可靠, 控制衔接紧密。系统投入使用率高, 除因流量检测环节及调节阀出现问题而退出外, 其余时间全部在线运行, 工作稳定性较好。满足了高炉对风温的需要, 使高炉能继续维持较高的风温水平和负荷水平。同时, 系统对点火、停烧、流量、温度的控制, 使得燃烧过程对热风炉燃烧口、燃烧器以及燃烧阀的冲击减小, 延长了设备的使用寿命, 并可实现节约能源的目的。系统增加了点火过程和停烧过程的程序连锁和确认保护, 从整体上提高了燃烧过程的安全性。

迁钢热风炉全自动燃烧控制系统通过合理的系统架构、精心的软件编程和长期的调试、修改和完善, 使得系统应用效果明显, 拱顶温度较手动状况下提高 21°C , 系统稳定运行率达到98%, 节约煤气95665856立。

通过自动燃烧设备自动燃烧和换炉控制的实施, 将产生以下几方面的效益:

(1) 降低焦碳费用

经计算助燃空气温度每提高 100°C , 炉顶温度上升 $20\text{—}30^{\circ}\text{C}$, 所供热风温度也相应上升 $20\text{—}30^{\circ}\text{C}$ 。迁钢高炉采用热风炉高温空气燃烧技术(达到 650°C 助燃风温度)风温提高了 130°C , 计算降低焦比(按照 130°C 风温计算)为:

焦比系数:取 0.030%。折算焦比:419.37

吨铁节约焦炭 $\Delta K=0.030\%\times 130\times 419.37=16.36\text{kg/t}$, 按 2007 年二高炉铁水产量 225 万吨, 每吨价格焦炭 1200 元/吨, 每年节约焦炭费用:

$$16.36\times 225\times 1200=441.72 \text{ 万元}$$

(2) 降低吨铁燃气费用

2#高炉通过使用高温助燃空气预热系统—顶燃式预热炉控制技术, 平均风温与 1#高炉风温水平接近, 但 2#高炉吨铁燃气费用比 1#高炉低 5 元, 按 2#高炉 2007 年铁水产量 225 万吨, 每年经济效益:

$225 \times 5 = 1125$ 万元

总经济效益: $441.72 + 1125 = 1566.72$ 万元

(3) 在保证热风温度的前提下, 实现全自动控制调节, 自动调节能力达到正常负荷的 80%~98%。

(4) 控制过程速度快、时间短, 克服了手动调节不能实现的“快、准、稳”要求, 大大优于以前实施的手动变负荷调节速度。

(5) 自动燃烧控制的实施, 实现了热风温度的稳定, 提高高炉的产量, 取得了较好的经济效益。

(6) 自动燃烧控制的实施, 降低了工人的劳动强度, 提高了热风设备的自动化程度。

5.2 展望

随着大型、特大型高炉设备的迅速发展和节能降耗的要求, 热风炉设备对燃烧和换炉控制的要求也越来越高, 目前国外热风炉设备已经出现了更高级的控制系统: 全自动控制专家系统, 它能够很好地对热风炉连续高温协调控制, 并能减少前馈变量的数量和提高控制系统的鲁棒性, 有利于实现全自动控制过程中整个装置的优化要求, 它综合了热风炉装置中所有的操作变量和可控变量的优化关系并以动态模型的方式实施控制和调节, 使变热风炉燃烧和换炉变得更加可靠和稳定, 也大大提高了热风的温度, 常规控制热风炉温度可以达到 1000-1100 摄氏度左右, 而全自动燃烧控制可以达到 1200-1310 摄氏度, 这种先进的控制系统将进一步高炉冶炼强度, 提高高炉铁水产量, 使热风炉设备的自动化水平更上一个台阶。

参考文献

- 1.刘全兴. 我国高炉热风炉的新技术应用回顾与展望[J]. 炼铁, 2010, 19(3): 31-32
- 2.马智慧等. 钢厂热风炉燃烧控制模型的开发与应用[J]. 炼铁, 2006, 14(1): 54-55
- 3.黄天胜, 李汉江等. 高炉热风炉燃烧控制系统[J]. 炼铁, 2005, 17(3): 11-14
- 4.邓则名, 邝惠芳主编, 可编程应用技术[M].北京: 机械工业出版社, 2004, 101-103
- 5.邓守强主编.高炉炼铁技术[M], 北京: 冶金工业出版社, 1995, 53-54
- 6.Kenneth R. Muske, Glen A. Hanson, Blast furnace stove control[M], Proceedings of the American Control Conference, 2008, 23(6)p3 809-p3 810
- 7.阳宪惠主编.工业数据通讯与控制网络[M], 北京: 清华大学出版社, 2003, 89-90
- 8.阳宪惠主编.现场总线技术及其应用[M], 北京: 清华大学出版社, 2004, 76-78
- 9.尔桂花等编.运动控制系统[M], 北京: 清华大学出版社, 2003, 21-23
- 10.丁建辉.用以太网技术设计的炼铁厂高炉局域网控制系统.洛阳工学院学报[J], 2010 (9): 44-47
- 11.王宏.PLC控制系统设计要点[J], 矿山机械, 2004, 12(6): 29-61
- 12.张才, 关淑林.PLC与上位机监控系统的串行通信的实现[J].基础自动化, 2002, 7(4): 50-53
- 13.马竹梧等.钢铁工业自动化[M], 北京: 冶金工业出版社, 2000, 21-23
- 14.郑贤峰 .炼铁热风炉提高风温的有效途径[J].冶金设备, 2004, 8(4): 52-54
- 15.肖文, 张娟, 贾国栋等.热风炉自动燃烧技术在300m³高炉的应用[J], 河南冶金, 2003, 11(5): 32—33
- 16.Sheng Qiang, x. z. Gaol, Xianyi Zhuang, PLC-based Control Systemsfor Industrial Production of Fuel Alcohol[J], IEEE Intemational Conference onIndustrial Technology, 2007, 9(1 2), p827-p832
- 17.孙增圻等.智能控制理论与技术[M], 北京: 清华大学出版社, 2002
- 18.徐湘元, 毛宗源.过程控制的发展方向-智能控制[J], 化工自动化及仪表, 2011, 25(2): 1-5
- 19.沙青, 曾小宁, 刘坤庭等.热风炉最佳燃烧状态的调节与控制[J], 武汉钢铁学院学报, 2010, 16(5): 71-74

20. Tsumura K, Modeling for Control of Blast Furnace[J], IEEE International Conference on Control Applications, 2009, 12(8), p 1-p6
21. 李硕杰. 热风炉燃烧中残氧控制和燃烧量调节[D], 冶金自动化, 13(4) : 2010, 9-13, 58
22. 汪光阳, 王志英, 张雷等. 用于热风炉燃烧系统的模糊控制器[J], 钢铁研究学报, 2010, 16(5) : 71-74
23. 王欣. 高炉热风炉智能控制系统[M], 中南林学院, 2004, 67-68
24. 刘全兴. 我国高炉热风炉的新技术应用回顾与展望[J], 炼铁, 2007, 8(3): 29-32
25. 黄天胜, 李汉江等. 高炉热风炉燃烧控制系统[J], 炼铁, 2005, 17(3): 11-14
26. Biao Huang, Ramesh Kadali. Dynamic Modeling, Predictive Control and Performance Monitoring[M], Canada: Suncor Energy Inc, 2010, 298-301.
27. 李硕杰. 热风炉燃烧中残氧控制和燃烧量调节[D], 冶金自动化, 2009, 13(4): 9-13, 58
28. QIN S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. Control Engineering Practice, 2009, 11(7): 733-738.
29. 韩金旭, 周宝昌, 于宝川等. 模糊控制在焦炉自动控制系统上的应用[J], 制造业自动化, 2004, 26(7): 62-65.
30. 袁曾任. 智能控制研究的新进展[J], 信息与控制, 1994, 23(5): 257-261
31. 黄有猷. 攀钢 4 号高炉热风炉合理燃烧制度[D], 钢铁钒钛 2005, 15(4): 50-55
32. Kenneth R. Muske, Glen A Hanson, Blast furnace stove control[J], Proceedings of the American Control Conference, 2008, 11(6) : p3809-p3810
33. 沙青, 曾小宁, 刘坤庭等. 热风炉最佳燃烧状态的调节与控制[J], 武汉钢铁学院学报, 2008, 16(2): 126-130
34. 汪光阳, 王志英, 张雷等. 用于热风炉燃烧系统的模糊控制器[J], 钢铁研究学报, 2007, 16(5): 71-74

致 谢

本文是在陈晓波导师的悉心指导下完成的。在近一年的论文工作期间，陈老师在学习和生活上给予了我很大的帮助，从题目的确立、课题的进行直到论文的完成，都倾注了大量的心血。他渊博的知识、丰富的教学经验和一丝不苟的治学态度给了我极大的启迪和教育，在此表示衷心的感谢。

感谢首钢迁钢公司崔允高工、马金芳高工、赵娜老师、白松老师。你们在学业上和生活中给予我的无私帮助也是我不断努力向前的动力。

感谢邢文莱、薛理政、王坤、刘艳玲等同学与同事。在与你们的合作和交流中，我丰富了专业知识，开阔了眼界，更体验到了集体的力量。

我更要感谢我的父母。正是你们的培养与支持，才使我有足够的信心和勇气去迎接未来的挑战。

感谢在我工程硕士期间各位老师和同学的热心帮助。

感谢参考文献中提到的所有编者和老师。

感谢评审论文的各位专家，教授为本文提出宝贵意见和建议。