

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

高温环形退火炉控制方法的研究

作 者 姓 名： 苗贺武

指 导 教 师： 钱晓龙 教授

东北大学信息科学与工程学院

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： 2012 年 6 月 论文答辩日期： 2012 年 6 月 18 日

学位授予日期： 2012 年 7 月 答辩委员会主席： 高宪文 教授

评 阅 人： 赵东林 高级工程师 郑艳 副教授

东 北 大 学

2012 年 6 月

A Thesis in Control Engineering



Study of High Temperature Rotary Annealing Furnace Control Methods

By Miao Hewu

Supervisor: Professor Qian Xiaolong

Northeastern University

June 2012

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诚挚的谢意。

学位论文作者签名：苗望武
签 字 日 期：2012-6-18

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：苗望武

导 师 签 名：钱晓龙

签 字 日 期：2012-6-18

签 字 日 期：2012.6.18

高温环形退火炉控制方法的研究

摘 要

取向硅钢素有钢铁中的艺术品之称,技术含量高,工艺复杂。高温退火环形炉(SRAF)是取向硅钢生产中极其重要的一环,在硅钢加工生产过程中,环形炉的能耗量占了很大的比例。如何提高环形炉的自动控制水平,提高环形炉的热效率,降低能耗,是当前环形炉的技术改造以及节能工作中具有深远意义的一项工作。

退火炉是冷轧钢板热处理的重要热工设备,其直接影响到产品的质量、产量和成本,在生产中处于关键位置,研究退火炉温度控制系统在改善产品质量、提高生产率、改善生态环境和节约能源方面有着举足轻重的意义。一般的比例控制虽然保证了正常情况下燃烧控制的空燃比,但是当系统发生扰动时,由于空气的调节总是滞后于燃料的调节,所以在调节过程中空燃比可能过高或过低,无法满足过程要求。双交叉限幅控制克服了比例调节方式的局限性,使燃烧过程中空燃比保持在了最佳燃烧区内。

本文在研究集散控制系统体系结构的基础上,以首钢冷轧环形炉为背景,对迁钢环形炉的结构特点、工艺原理及其自动化系统组成进行了简要介绍,对目前国内外环形炉控制技术的发展现状进行了综述,并对控制系统中炉温控制、流量控制、炉压控制和台车旋转控制等控制功能进行了详细分析,同时,对双交叉限幅控制原理进行了深入的研究,并运用其对燃烧控制进行了分析与优化设计。最后使用在 MATLAB 中的 Simulink 工具箱对建立的仿真模型和控制系统进行仿真,验证其合理性与可行性,以达到节能减排的目的。

关键词: 环形炉; 燃烧控制; 集散控制; 双交叉限幅控制

Study of High Temperature Rotary Annealing Furnace Control Methods

Abstract

The oriented silicon steel is known as the art of steel industry, which has high technical content and complex process. High temperature rotary annealing furnace (SRAF) is oriented as a very important link in silicon steel production process, in which the annealing furnace energy consumption has a big margin. How to improve the automatic control level of the annealing furnace, improve annealing furnace thermal efficiency, reduce energy consumption, the annealing furnace technical reform and energy saving is a far-reaching work.

Annealing furnace is the important cold-rolled steel heat treatment thermal equipment, it directly affect the quality of products and the production as well as cost, playing a critical role in production. Research of anneal furnace temperature control system has a great significance in improving product quality, boosting productivity, improving environment and reducing the consumption of energy. General proportional control to ensure the air-fuel ratio combustion control, however, air regulation is always lagging behind the regulation of fuel when the system disturbance. So the air-fuel ratio in the adjustment process may be too high or too low, which can not meet under normal circumstances process requirements. The dual cross limiting control overcomes the limitations of the proportional control mode, to makes the air-fuel ratio maintain in the best combustion zone.

Based on the study of the distributed control system, and Shougang cold rolling rotary furnace as the background, the article introduces the structure, process principle and automation systems of rotary furnace briefly, and summarizes the control technology development and current situation of rotary furnace at home and aboard. The control functions of the control system, such as temperature control, flow control, furnace pressure control and spin control are analyzed in detail. Meanwhile, makes further research on the double cross amplitude limit control principle, and have analysis and optimal design on the combustion control to realize energy conservation and emission reduction. Simulation results of the dynamic model are validated by using Simulink Box of the MATLAB software.

Keywords: rotary furnace; combustion control; distributed control; double cross amplitude limit control

目 录

独创性声明..... I

摘 要..... II

ABSTRACT..... III

第 1 章 绪论 1

 1.1 高温退火环形炉控制研究的背景..... 1

 1.2 高温环形退火炉控制研究的意义..... 2

 1.3 退火炉温度控制技术的发展和现状..... 2

 1.4 本论文研究内容和论文结构..... 5

第 2 章 高温环形退火炉工艺 7

 2.1 取向硅钢生产工艺..... 7

 2.2 环形炉工艺..... 8

 2.3 环形炉结构..... 9

 2.4 台车驱动系统..... 10

 2.5 加热系统..... 12

 2.6 冷却系统..... 14

 2.7 保护气体供应系统..... 15

 2.8 本章小结..... 18

第 3 章 环形炉控制系统 19

 3.1 控制系统的组成..... 19

 3.2 炉温控制..... 22

 3.3 底板温度控制..... 26

 3.4 保护气体流量控制..... 28

 3.5 工艺流程的控制..... 29

 3.6 本章小结..... 35

第 4 章 燃烧控制改进设计与仿真 37

 4.1 双交叉限幅控制..... 38

 4.2 双交叉限幅控制系统设计..... 40

4.3 仿真结果分析..... 44

 4.3.1 仿真模型的建立..... 44

 4.3.2 双交叉限幅控制系统的仿真..... 45

4.4 本章小结..... 46

第 5 章 总结与展望.....49

 5.1 研究工作总结..... 49

 5.2 未来工作展望..... 49

参考文献.....51

致谢..... 55

第1章 绪 论

1.1 高温退火环形炉控制研究的背景

我国自改革开放以来,国民经济高速发展,硅钢的生产与电器行业有密切关系,无论是大型发电机组,还是各种电动机、变压器,包括所有的家用电器都需要大量的使用硅钢片,中国已成为全球电工钢最大消费国。根据资料表明,我国发电总容量到“十二五”至少要达到 6.7 亿 KW,平均每年消耗硅钢达 170 万吨以上,相当日本电工钢的全年产量。伴随着节能与新机电产品的需要,对电工钢质量要求也越来越高。如我国制造变压器最开始用热轧硅钢片,后来改用冷轧取向硅钢 Q08-010 牌号,到 90 年代初已大量使用 Hi-B 钢,使变压器重量与体积相应减少,噪音降低。而 90 年代末开始使用的细晶磁 Hi-B 钢使铁损大大下降,所以要不断开创新技术产品才会有市场竞争能力。

在过去的十几年中,我国工业化进程日新月异,经济快速发展,国内钢铁年产能已由约 2 亿吨发展到 6 亿吨左右,与之同步,取向硅钢的生产能力及消费量也达到了前所未有的水平。国内取向硅钢表观消费量由 1997 年的约 35 万吨增加到了 2010 年的约 65 万吨;同期,取向硅钢的年产能也大幅增加,超过了表观消费量。按有关消息证实,今后若干年内,取向硅钢的年产能将会进一步增加,有可能超过 100 万吨的水平,产能过剩的局面已然形成,市场竞争将日趋激烈。另一方面,由于石油天然气等能源资源供应紧张局面的形成,节能降耗成为世界各国追求的目标,国际上普遍采用发布和实施新的能效标准的形式来促进提高能效的工作。取向硅钢作为电力传输过程中最重要的功能材料,势必面临越来越严格的降耗压力,更进一步提高取向硅钢产品的实物质量水平、开发磁感更高铁损更低的取向硅钢产品,将是今后一段时期紧迫而现实的任务^[1-4]。

迁钢冷轧环形炉机组,带钢是以钢卷的形式入炉,每 3 个小时台车旋转一次,在经历了 152 个小时的退火周期后出炉。温度控制是退火炉控制的终极目标,反算到烧嘴的燃烧量进行控制,温度低就需要加大燃气的供应量,温度高就相应减少燃气的供应量。迁钢环形炉是按照设定空燃比,通过控制燃气量来调节空气的量从而来实现烧嘴燃烧控制的,但在实际生产应用中,环形炉在保证安全运行及完成硅钢退火任务的同时,还要考虑高效及经济地燃烧。如何采用合理有效的控制策略,当环形炉控制系统的负荷及燃气的质量等因素发生波动时,仍然能使环形炉内的炉膛温度、炉膛压力、排烟温度等参数稳定在控制范围之内,并且能够使环形炉工作在最佳燃烧区内,提高产品质量且能节约能耗、减少加热钢坯的氧化铁皮、降低对环境造成的污染等等,是提高企业竞争力的主要措施,也是企业界和科技界对加热技术改进一直关注的热门课题。

环形炉在保证安全运行及完成硅钢退火任务的同时,还要考虑高效及经济地燃烧。如何采用合理有效的控制策略,当环形炉控制系统的负荷及天然气的质量等因素发生波动时,仍然能使环形炉内的炉膛温度、炉膛压力、排烟温度等参数稳定在控制范围之内,并且能够使环形炉工作在最佳燃烧区内,提高产品质量且能节约能耗、减少加热钢坯的氧化铁皮、降低对环境造成的污染等等,是提高企业竞争力的主要措施,也是企业界和科技界对加热技术改进一直关注的热门课题。

1.2 高温环形退火炉控制研究的意义

随着工业的迅速发展和人口的不断增长,能源和环境问题成为倍受国人瞩目的两大问题。近些年来,我国经济发展取得了举世瞩目的成就。我国人口众多,能源资源相对不足,人均拥有量远低于世界平均水平,煤炭、石油、天然气人均剩余可采储量分别只有世界平均水平的 58.65%、7.69%和 7.05%。我国冶金行业是全国最大的能源用户,单以用电来说,约占全国总用量的 13%-15%。目前,我国又处于工业化、城镇化加快发展的重要阶段,能源资源的消耗强度高,消费规模不断扩大,能源供需矛盾越来越突出。迁钢环形炉采用天然气加热方式,天然气耗量达 2000m³/h,如何优化燃烧控制方式成为了亟待攻关的课题。

与同类退火炉相比,环形炉具有以下优点:

(1) 热处理工艺和技术先进,整个生产过程采用预热、均热、加热、再均热的模式,然后通过间接、直接相结合的冷却方式,来达到最佳的处理效果;

(2) 效率高,与传统罩式炉相比,单座环形炉一次可同时处理 100 个钢卷,实现了连续不间断生产;

(3) 能耗低,与传统罩式炉采用电加热相比,采用了天然气加热,大大降低了吨钢能耗;

(4) 节能环保,炉体耐材大量采用高绝热性能、低辐射的陶瓷纤维,很大程度上减少了热量损失,在烟道中安装有高效换热器,利用烟气余热可以把助燃空气预热到一定温度,从而提高了能源利用率;

(5) 控制精确,整个控制系统采用日本横河公司最先进的 CENTUM VP 集散控制系统,并采用新一代最先进仪表,大大提高了炉温、炉压、内罩压力等的控制精度。

1.3 退火炉温度控制技术的发展和现状

在环形炉自动控制方面,早期的环形炉控制主要集中在常规燃烧控制上,其直接的目标是获得较为稳定的炉子工况及追求最佳燃烧,其基本任务是:提高环形炉各段炉温的控制精度,获得满足开轧所要求的钢坯温度,同时保证经济地燃烧和安全地运行。70 年代以后,国际上对环形炉的最优控制进行了广泛的研究,并且随着计算机技术的深入

和发展, 环形炉的计算机控制技术进入实用化阶段^[5-11]。

温度控制电路广泛应用于社会生活的各个领域,如家电、汽车、材料、电力电子等,常用的控制电路根据应用场合和所要求的性能指标有所不同,传统的继电器调温电路简单实用,但由于继电器动作频繁,可能会因触点不良而影响正常工作。近几年快速发展的PID 温控,模糊控制,以及神经网络,遗传算法在温度控制中的应用做一综述^[12,13]。

(1) 串级并联双交叉限幅控制燃烧^[14]

双交叉限幅经历了燃料先行的比值或空气先行的比值调节系统、串级串联燃烧控制系统、串级并联燃烧控制系统、串级并联单交叉限幅燃烧控制系统四个发展阶段。它是以炉温调节回路为主环,燃料流量和空气流量调节为副环,构成串级并联双交叉限幅控制系统。双交叉限幅控制系统在负荷变化时,系统各参数变化,根据实测空气流量对燃料流量进行上、下限幅,而且还根据实测燃料流量对空气流量进行上、下限幅。在负荷增加或减小时,燃料流量和空气流量相互限制交替增加或减小,即使在动态情况下,系统也能保持良好的空燃比。串级并联双交叉限幅控制燃烧是仪表控制调节回路的基本方式,以前计算机水平较低、应用较少,比值调节、交叉限幅燃烧控制系统都是作为独立的控制单元。现在大多是计算机参与控制,与氧化锆残氧分析仪、热值分析仪、专家寻优、模糊控制等一起使用,控制效果比过去单独使用要理想。

(2) 氧化锆残氧分析法^[15,17]

采用电化学法,利用氧化锆固体电解质做成的检测器通过氧化锆测量烟气中氧含量的办法,判断炉内煤气燃烧是否充分,它可以避免煤气热值和压力波动或管道漏气而影响配比控制。残氧检测数据被送到计算机用来参与闭环控制,反馈速度快。计算机算出空燃比实现串级并联燃烧自动控制。但目前存在的主要问题是氧化锆探头价格昂贵,且使用寿命短。1999年,中日合作济南钢铁集团总公司(简称济钢)绿援项目加热炉高效燃烧控制系统,即采用日本横河 ZO21D 型氧化锆残氧分析仪在济钢中厚板厂两座推钢式加热炉上使用,起到了节能降耗,减少有害气体排放量,保护环境的目的。

(3) 用热值分析仪测煤气的热值^[18-20]

热值分析仪实际是一个小型燃烧炉,将经过预处理后的干净煤气引入,通过减压阀减压,进入陶瓷过滤器进行过滤,并经恒压调节,至燃烧室与机柜内的小型助燃风机经恒压调节后的空气混合燃烧。微机利用热电偶检测的燃烧装置温度场的废气温度,结合标定的系数和煤气、空气压差计算出热值及空燃比,将该信号输出至参与燃烧控制的计算机或其它显示仪。热值分析仪测得的数据较准确,但是热值分析仪一次性投资费用大,煤气清洁麻烦,维修量大。但随着热值分析仪技术水平的提高和价格的降低,热值分析仪在国内外大型加热炉上将进一步广泛运用,成为空燃比的主流检测设备。

(4) 利用高焦混合煤气成分理论推测空燃比^[21]

高焦比值即高炉煤气流量与焦炉煤气流量之比。假设现测高焦比为 7: 3 (计算时忽略空气中的水分), 根据煤气成分 (主要含 CO 、 H_2 、 CH_4) 可计算出理论空燃比:

L 理论空气需要量: $L \text{ 混合煤气量} = 1.77 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$

取空气过剩系数为 1.05, 则:

L 实际空气需要量: $L \text{ 混合煤气量} = 1.77 \times 1.05 = 1.86 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$

当混合煤气高焦比为 7: 3 时, 空燃比为 1.86。

理论计算空燃比采用的是高炉、焦炉煤气混合前的数值, 再考虑煤气压力变化、含水分、杂质等因素, 所以理论计算的只是一个近似值^[22-24]。

实践证明通过高焦比计算空燃比与其它几种方法结合使用, 反应快, 省去了大量的寻优时间。

(1) 多目标专家寻优算法

控制思想是: 在煤气热值、压力等炉况不稳定的状态下, 把影响燃烧的多个因素考虑进来, 炉温升温速度合理 (可能快或一般), 烟气升温速度合理 (满足一定范围), 炉压合理 (满足一定范围), 热风升温速度合理 (满足一定的范围), 满足所有这些条件的才是“最佳空燃比”。

当计算机燃烧控制系统开始运行时, 选用当前控制加热炉的平均空燃比值作为基值, “专家寻优系统”根据炉温、烟气上下部温度、炉压、热风等条件的变化寻找合适的空燃比^[25,26]。空燃比合适时, 升温、保温曲线良好, “专家寻优系统”不运行, 保持这个状态, 煤气流量、热风流量、炉压不变; 当煤气热值、压力变化时, 专家寻优系统推理机根据数据库内专家经验, 判断煤气加减方向及推算加减量, 寻找到“最佳空燃比”^[27-31]。多目标专家寻优算法的优点是避免了使用氧化锆、热值分析仪, 缺点是不如氧化锆、热值分析仪反馈时间快、数据准确。但寻优算法的思路在燃烧控制方面已得到广泛承认, 并越来越多地应用于实践^[32-37]。

(2) 模糊控制技术的应用

随着模糊控制技术的不断发展完善, 越来越多的模糊控制技术应用到加热炉的燃烧控制中^[38-42]。常用的是二维模糊控制器^[43], 即选用误差、误差变化率为输入, 一个输出量。多维模糊控制器 (三维及以上) 除了误差外, 还增加了误差变化率及误差变化的变化率, 从理论上讲, 控制会更加精细^[44]。但是, 由于模糊控制器输入维数增多, 控制规则的选取越来越困难, 相应的控制算法也越来越复杂^[45,46]。

1.4 本论文研究内容和论文结构

(1) 本文的研究内容:

在现有环形炉 DCS 控制系统硬件和软件系统下, 本课题的关键内容在以下几个方面入手:

- a. 在不同的温度、外部条件下, 采用不同的控制参数和方法, 使天然气最充分燃烧。
- b. 采用 PID 调节技术控制环形炉天然气和空气的流量、空气与天然气的空燃比, 以达到最小的天然气消耗和最低的原材料氧化烧损。
- c. 在燃烧控制中, 采用双交叉限幅控制技术; 在不同温度、不同阶段中, 保护气体流量、炉压控制满足工艺要求。
- d. 集散控制系统 CENTUM VP 的系统构成、特点及主要功能等。

(2) 本文的论文结构:

第一章: 介绍了本课题研究的背景和意义, 简要描述了当前环形炉生产控制系统广泛应用的主要技术。

第二章: 介绍了环形炉的工艺原理和炉体主体设备的特点及参数等, 同时对加热系统、冷却系统等进行了简要介绍。

第三章: 全面介绍了首钢冷轧环形炉 DCS 控制系统, 包括控制系统配置、主要功能、控制系统特点和系统设计概念等。

第四章: 详细分析了环形炉 DCS 控制系统的控制功能, 主要包括燃烧控制、炉温控制、底板温度控制、炉压控制、流量控制、台旋转控制等。

第五章: 深入分析了双交叉限幅控制原理, 并运用其对燃烧控制进行了分析及优化设计, 以达到节能减排、实现最优经济效益的目的。

第六章: 对此次的研究工作进行总结并对将来的工作进行展望。

课题依托首钢迁钢公司冷轧作业部的设备和技术资料, 给课题顺利完成提供了良好的条件。

第2章 高温环形退火炉工艺

2.1 取向硅钢生产工艺

取向硅钢素有钢铁中的艺术品之称，技术含量高，工艺复杂^[47]。高温退火环形炉（SRAF）是取向硅钢生产中极其重要的一环，在硅钢加工生产过程中，环形炉的能耗量占了很大的比例。如何提高环形炉的自动控制水平，提高环形炉的热效率，降低能耗，是当前环形炉的技术改造以及节能工作中具有深远意义的一项工作。

硅钢的冷轧不仅使带钢减薄而获得需要的厚度，同时为获得理想的初次再结晶组织及织构创造有利条件，因此冷轧分为一次冷轧法和二次冷轧法，根据不同牌号钢种而分别采用。原料的化学成分及纯净度、热轧工艺、冷轧及热处理工艺都是影响硅钢最终产品质量的重要因素。硅钢生产工艺实际上是从原、辅料开始，对炼钢、热轧、冷轧、热处理到精整进行产品质量的一贯管理，实行全过程的检测、控制的一个系统工程。原料的品质和生产工艺技术是硅钢生产的关键，图 2.1 为取向硅钢的工艺流程及平面示意图。

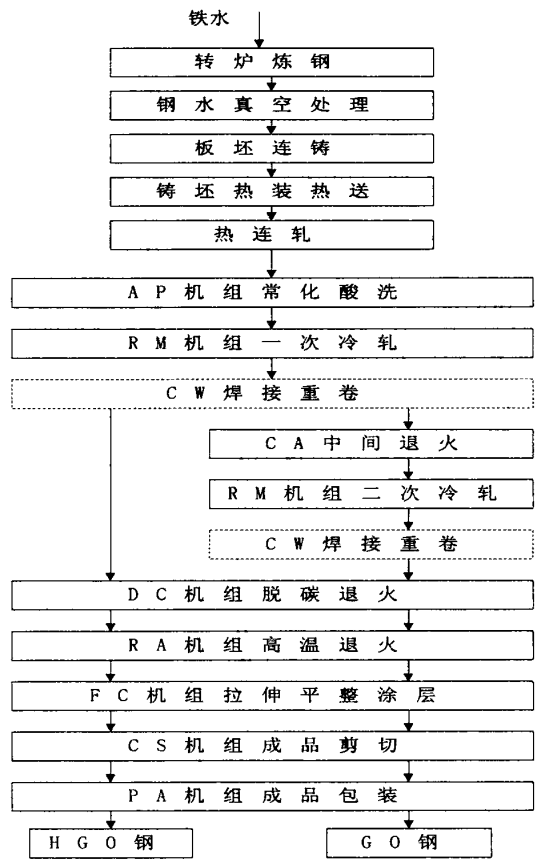


图 2.1 取向硅钢的工艺流程及平面示意图
Fig. 2.1 Process and sketch map of the grain oriented silicon steel

2.2 环形炉工艺

高温环形退火炉（SRAF）是取向硅钢生产过程中极其重要的一环，首钢迁钢冷轧有两座环形炉：SRAF1 和 SRAF2，本章以一号环形炉（SRAF1）为例，对环形炉的工艺、主体结构等进行介绍。

研究高温退火环形炉的控制不仅具有高效、节能、环保的目的，更主要的是提高取向硅钢在环形炉内进行高温退火的功能：

(1)去除 MgO 涂层中的化合水。环形炉表面涂敷有 MgO 的钢卷，涂层中 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 在 400°C 开始分解，用时较长，所以要在 $400\text{-}500^\circ\text{C}$ 时保温一段时间，如果在这段时间内温度过高，分解出的水会加速钢卷氧化。

(2)发展二次再结晶。对于取向硅钢，当温度大于一定值时， MnS 或 AlN 便开始聚集和分解来抑制初次晶粒的长大，与此同时发生二次再结晶，并随着温度的升高最终完成。此时在二次晶粒边界处和二次晶粒内部仍残存有较大的初次晶粒。

(3)高温保温，钢卷净化。高温保温阶段二次晶粒异常长大，并吞噬残留的初次晶粒，使二次再结晶进一步完善，形成具有单一位向的二次再结晶组织。该阶段采用纯干氢气作保护气体，在二次再结晶完善的同时，进行脱硫和脱氮，来达到净化钢质的目的。

(4)硅酸镁薄膜形成。在二次再结晶发展和完善的同时， MgO 和钢带表面的 SiO_2 发生反应形成 Mg_2SiO_4 薄膜（玻璃膜），对钢卷表面起到保护作用，防止钢卷被氧化或发生粘结。

一般要求电机、变压器和其他电器部件效率高，耗电量少，体积小和重量轻。电工钢板通常以铁芯损耗和磁感应强度作为产品磁性保证值，对电工钢板性能的要求如下：

(1)铁损(Pt)低。铁损低可节省大量电力、延长电机和变压器工作时间并简化冷却装置。因此电工钢的铁损造成的电量损失占一个国家年发电量的 2.5%-4.5%，其中变压器所造成的电量损失约占 50%，小电机占 30%，镇流器占 15%。因此，生产电工钢板总是千方百计地降低铁损，并以铁损作为考核产品磁性能的最重要的指标，按铁损值作为划分牌号的依据。

(2)磁感应强度（B）高。磁感应强度高，铁芯励磁电流（空载电流）降低，导线电阻引起的铜损和铁芯铁损降低，可节省电能。当电机或变压器容量不变时，磁感应强度高可使铁芯体积缩小和质量减轻，节省电工钢板、导线等的用量，并使铁芯铁损和制造成本降低，有利于制造、安装和运输。

(3)对磁各向异性的要求。硅钢是体心立方晶体结构，其晶轴不同，磁化特性也不同。三个主轴方向的磁性，〔100〕方向易磁化轴，〔110〕方向为次易磁化轴，〔111〕方向为难磁化轴。这种磁化特性称为磁各向异性。

电工钢的用途不同，要求磁各向异性不同。电机在旋转状态下工作，要求电工钢个

向同性，用无取向电工钢制造；变压器在静止状态下工作，要求磁各向异性，用冷轧取向硅钢制造。

(1)冲片性良好。电工钢成形的冲剪工作量很大，特别是微、小电机，所以要求电工钢板的冲片性好。冲片性好能够提高冲剪的尺寸精度，延长冲剪工具的使用寿命。

(2)钢板表面光滑、平整和厚度均匀。此要求主要为了提高产品的叠片系数（铁芯有效利用空间），保证冲剪片尺寸精度和便于铁芯装配。电工钢板的叠片系数降低 1%，相当于铁损增高 2%和磁感强度降低 1%。

(3)绝缘薄膜性能好。冷轧电工钢产品表面涂有无机盐或半有机盐绝缘薄膜，以防止铁芯叠片间发生短路而增高涡流损耗。对绝缘膜的要求是：1）绝缘薄膜性能好。2）膜薄且均匀；3）层间电阻高；4）附着性好；5）冲片性好；6）耐腐蚀性和防锈性好。高磁感取向硅钢表面涂以应力涂层，使钢板中产生拉应力，通过细化磁畴使铁损和磁致伸缩明显降低。

(4)磁时效现象小。铁芯的磁性随使用时间而变化的现象叫磁时效。磁时效主要是由于过饱和碳和氮析出微小碳化物和氮化物而引起的。所以要求电工钢产品中碳含量（质量分数）和氮含量（质量分数）分别小于 0.0030%和 0.005%。

2.3 环形炉结构

环形炉从结构上可分为炉体、炉内环及炉外环三部分，炉体部分包括炉体固定部分和炉体旋转部分。炉体固定部分划分为 PH、1S、2H、2S、1C、2C、3C、4C 八个处理段，主要设备包括炉壳、炉门、烧嘴等；炉体旋转部分主要设备包括上部台车、下部台车、钢卷支撑、内罩等；炉内环布置有换热器、助燃风机、点火风机、排烟风机、液压泵、移动臂、移动小车、各种接头等；炉外环布置有液压缸、冷却风机、通风机。同时，配有天然气、助燃空气、烟气、冷却空气、氮气、氢气、压缩空气、水等介质系统。主要设备布置见环形炉鸟瞰图 2.2。

在每个旋转周期完成后，炉门开启，炉体旋转部分在液压系统的驱动下旋转一个卷位，旋转完成后炉门关闭，来达到隔离气氛的目的。退火过程中，助燃风机及点火风机分别向主烧嘴和点火烧嘴提供空气用来助燃，烟气在 PH 段通过烟道依次经换热器和排烟风机排出厂房。冷却风机提供冷却空气进行钢卷的冷却。固定接头和移动接头在移动臂及移动小车的配合下将保护气体连续供给到内罩中。冷却循环泵及排污泵主要排放炉底的密封水及污水，环形炉各段主要参数如表 2.1 所示。

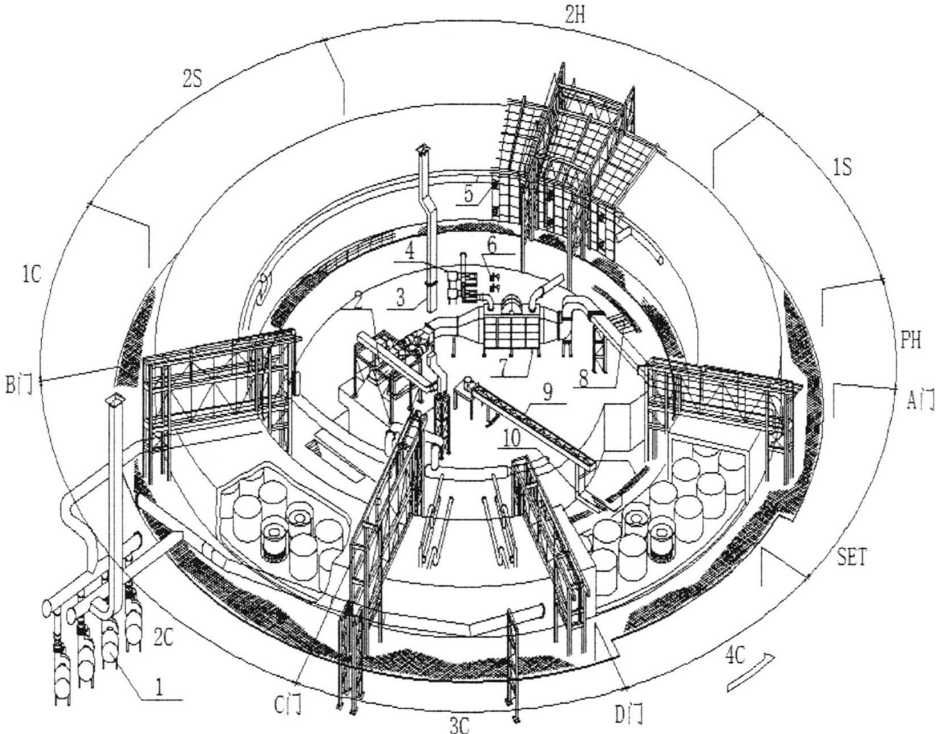


图 2.2 环形炉俯视图
Fig. 2.2 The top view of rotary furnace

表 2.1 环形炉各工艺段参数表
Table 2.1 Various process parameters table of the rotary furnace

工艺段	钢卷数	温度范围	保护气体
SET	4	-	N ₂
PH	4	650-850℃	N ₂
1S	12	700-850℃	N ₂ 或 AX
2H	22	700-850℃ → 1210-1250℃	AX 或 H ₂
2S	16	1210-1250℃	H ₂
1C	8	1210-1250℃ → 1080℃	H ₂
2C	14	1080-700℃	H ₂ 或 AX
3C	10	700-500℃ 或 700-550℃	H ₂ 、AX、N ₂
4C	10	500-300℃ 或 550-400℃	N ₂

2.4 台车驱动系统

台车结构要求能承受大载荷且必须具有热稳定性，按照结构可分为上部台车和下部台车。上部台车安装双层波纹板来防止内罩气体的泄露，表面覆盖耐火材料。台车上的钢卷座采用特殊设计，安装有钢卷支撑和底板。下部台车主要由钢结构组成，共支撑约 4600t 的重量。整个台车系统由 200 个支撑轮支撑，并作间歇式旋转。如下图 2.3 所示：

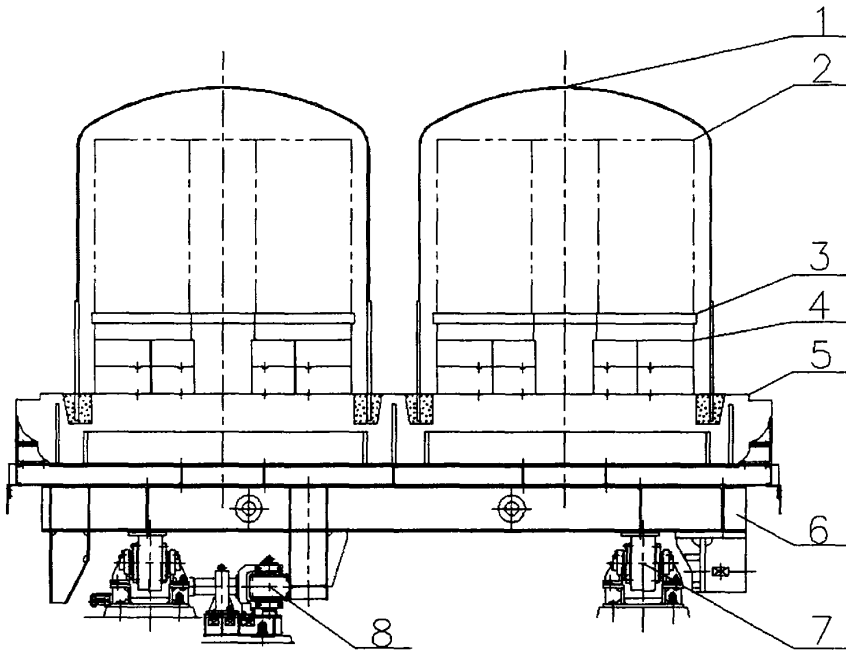


图 2.3 台车结构图
Fig. 2.3 Trolley chart

下部台车（共 25 个）是由 SS400 钢结构焊接而成，用于支撑载荷，所有下部台车焊接成整体圆周，并沿径向膨胀。台车下部安装有驱动液压缸支撑，布置有小孔用于安装保护气体供应管路。

上部台车主要有钢结构、波纹板和耐材组成，耐材共有 7 层，其中包含大量的浇注料，为了减少烘炉时间，上部台车在安装之前，先要在烘烤炉中进行烘烤，300℃保温一段时间来去除耐材内部的水分。为了对台车的烘炉情况进行准确控制，确保耐火材料砌体中的水分被烘干，需要对第一组台车中处于上部位置的其中一个台车进行露点检测，通过测量气氛中的水蒸汽含量，确认台车的烘烤是否达到要求。

整个台车由 200 套支撑轮来支撑，并作圆周运动，保护气体阀台由阀台支撑轮支撑，共 25 套。台车的旋转由液压系统驱动，运行速度有两个档位，并作间歇式运动，台车允许进行倒转。在环形炉圆周外侧安装有 4 套液压缸，每套液压缸包含主缸和副缸，为了保证旋转时精确定位，安装有 25 套导轮。台车驱动装置布置图如图 2.4。

驱动台车时，首先副缸前行将主缸轨道连同主缸推至下部台车推座处，然后主缸前行推动台车旋转。台车旋转完成后，先是主缸点动后退一段距离，然后副缸退回到初始位置，最后主缸退回到初始位置，驱动结束。

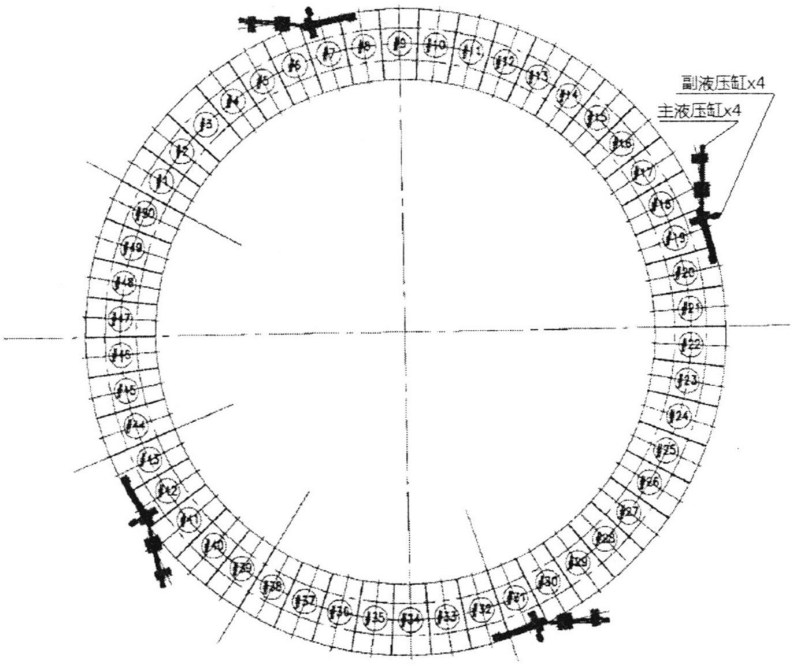


图 2.4 台车驱动装置布置图
Fig. 2.4 Trolley drive layout

2.5 加热系统

(1) 加热基本原理

工业炉内的燃烧是一个物理和化学的综合过程，其中物理方面的因素（气体的混合和加热）对整个燃烧过程起着更为重要的作用。

燃烧是指可燃物跟空气里的氧气发生一种发热发光的剧烈氧化反应。当燃料中的可燃分子与氧化剂分子相接触，在一定的温度和浓度条件下，可发生燃烧反应，放出一定的热量，这便是通常见到的燃烧现象。气体燃烧过程包括以下三个阶段：天然气与空气的混合；混合后的可天然气体的加热和着火；完成燃烧化学反应。根据天然气与空气在燃烧前的混合情况，可将气体的燃烧方法分为三种：有焰燃烧法、无焰燃烧法、半无焰燃烧法。其中天然气和空气在燃烧装置中不预先进行混合，而是分别将它们送进燃烧室中，并在燃烧室中边混合边燃烧，这时火焰较长，并有鲜明的轮廓，故为有焰燃烧。有焰燃烧的燃烧速度取决于天然气空气的混合速度，烧嘴能力范围较大，火焰稳定性较好，火焰黑度较大，有利于低热值的天然气获得较高的燃烧温度，可以充分利用废气预热节约燃料。炉子的燃料消耗量较大，或者需要长而亮的火焰时，都采用有焰燃烧法。

环形炉采用天然气作燃料，用于主烧嘴、点火烧嘴燃烧，天然气 CH₄ 的含量一般在 80-90%之间，此外还有少量的重碳氢化合物及 H₂、CO 等可天然气体，不可燃成分很少，所以发热量很高，大多在 33500-46000kJ/m³。

(2) 加热主要设备

环形炉安装有 130 套主烧嘴, 140 套点火烧嘴, 空气由助燃风机提供, 每个主烧嘴均配有一个点火烧嘴, 空气由点火风机供给, 主天然气及点火天然气经各自阀站调节后供应到环形总管中, 经过天然气阀站调压后, 压力为 14-28kPa。而后根据各燃烧回路需要按一定流量及压力供应到烧嘴处, 烧嘴处天然气压力 Max.2kPa。助燃空气经换热器换热后首先供应到环形总管中, 而后按一定流量供应到烧嘴处与主天然气混合燃烧, 点火空气直接供应到环形总管中, 而后供应到点火烧嘴处与点火天然气混合燃烧。

1S-2C 段及 B 门处共安装有 130 套主烧嘴, 分 28 个环路进行燃烧控制, 1S-2S 段烧嘴分上、下两层布置, 2C 段及部分 1C 段烧嘴布置在炉壳下部位置。环形炉烧嘴为空气预热型高速烧嘴, 在空气过量时能够保证天然气和空气按照预设的空燃比进行燃烧, 并具有维护量少、寿命长等优点。主烧嘴主要由空气管路、天然气管路、烧嘴砖及附属的法兰连接件等组成, 如图 2.5 所示。烧嘴通过双交叉限幅控制来保证燃料的充分燃烧, 但炉膛内仍可能存有内罩泄漏的氢气或未完全燃烧的天然气, 当温度较低时, 它们与空气混合后会有爆炸危险, 安全起见, 在 PH、2C、3C 段安装有 28 组辉光加热器, 由 1 个环路进行控制。

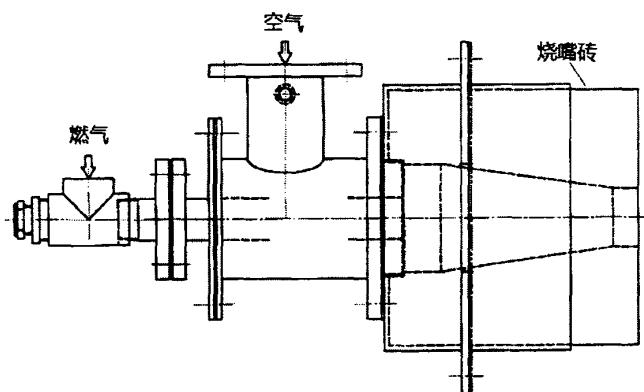


图 2.5 主烧嘴结构图
Fig. 2.5 The main burner chart

点火烧嘴主要用来引燃主烧嘴或燃烧炉膛泄露的保护气体, 带有火焰探测器和自动点火装置, 由点火烧嘴本体、气体减压阀、混合器、球阀及一些附件组成。共 140 套, 用 29 个环路进行控制。

1S~2C 段: 每个主烧嘴均配有一个点火烧嘴, 用来引燃主烧嘴内天然气;

3C 段: 安装有 10 个点火烧嘴, 用来点燃炉膛泄露的保护气体。点火烧嘴结构如图 2.6 所示。

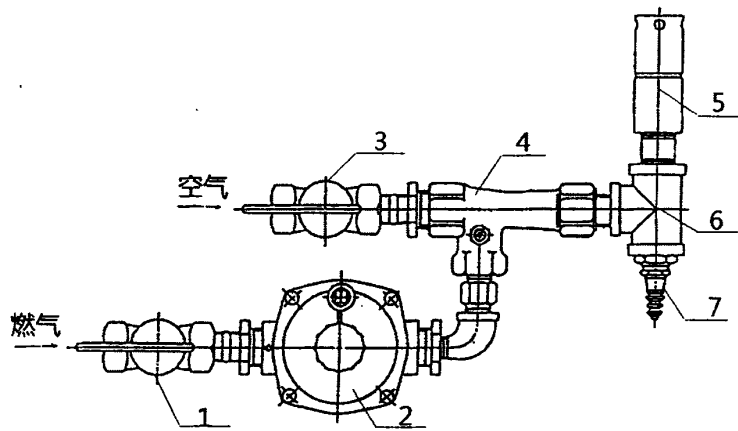


图 2.6 点火烧嘴结构图
Fig. 2.6 Ignition burner chart

从 PH 段排放的烟气温度达 500℃ 以上，为了充分利用烟气余热，在烟气管路上，安装有一套换热器，利用烟气余热将助燃空气预热到 450℃。这样可以达到以下目的：节约燃料、提高燃烧温度、改善燃料燃烧、提高炉子的生产率。换热器采用 4 通道逆叉流式，内部安装有管路，烟气在管外流动，助燃空气在管内流动，来达到换热的效果。换热器结构见图 2.7：

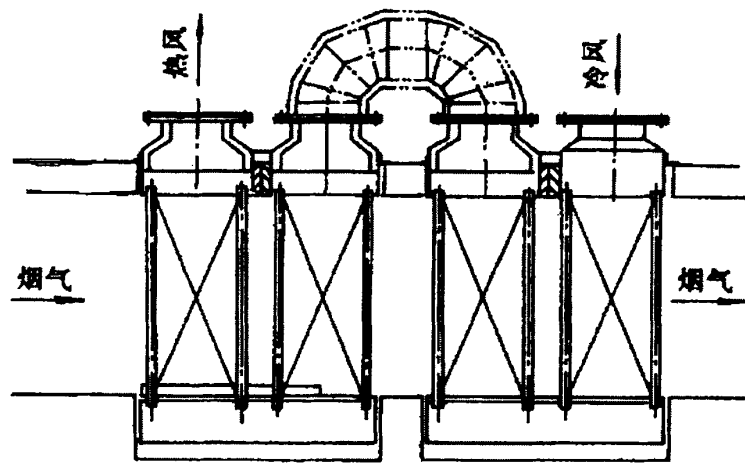


图 2.7 换热器结构图
Fig. 2.7 Heat exchanger structure diagram

2.6 冷却系统

在四个冷却段中，1C 是自然冷却，2C-4C 段设有冷却管路进行强制冷却，冷却空气是由四台冷却风机来提供的。强制冷却分为间接冷却和直接冷却两种方式，间接冷却

空气是在管内流动的，冷却后的空气通过烟囱排出炉外，而直接冷却是喷射式的，冷却空气直接喷到内罩上，利用切断阀和流量控制阀来控制，整个冷却系统分 15 个控制环路。

冷却管路的布置如图 2.8 所示，除此之外，生产过程中，炉内温度较高，容易导致炉门变形，致使炉门不能够完全开启或关闭，而影响炉压和炉温的控制。所以在 A 门、B 门、C 门中通入冷却空气进行炉门冷却，紧急情况下，启用氮气。

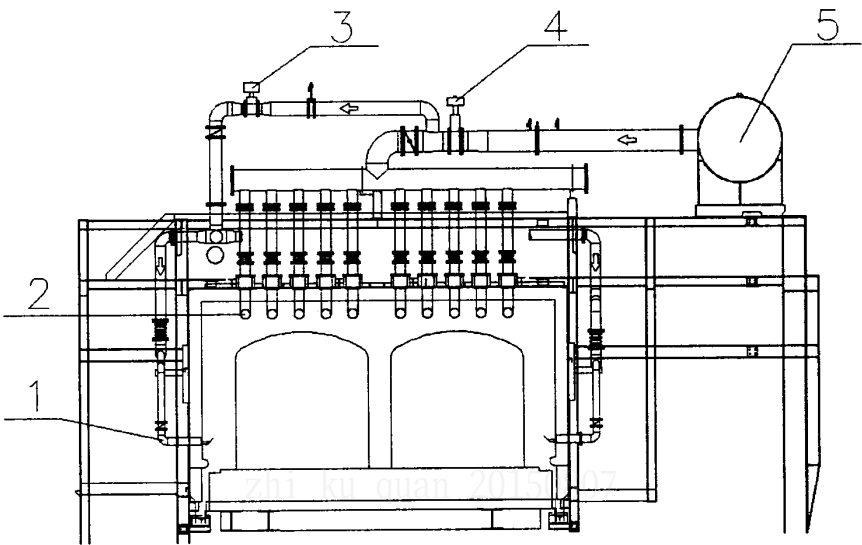


图 2.8 冷却系统管路布置图
Fig. 2.8 Cooling system piping layout

2.7 保护气体供应系统

保护气体包含 N_2 、 H_2 ， N_2 除了供应到内罩之外，还用一部分用于氢气、燃气管路吹扫用途，以及紧急情况下门的冷却。

保护气体系统主要由移动供应系统、固定供应系统、气体分析系统及阀台构成。环形炉退火过程中，通过移动供应系统和固定供应系统相互配合将保护气体（ N_2 ， H_2 ）供给到阀台上，然后通过阀台将保护气体调节到控制所需要的流量，再连续供给到内罩中。气体分析系统分四处布置在环形炉内环，来分析内罩中的保护气体成分。

移动供应系统、固定供应系统及气体分析系统通过各自对应的接头与台车接头连接和切换完成保护气体的供给和分析。接头分布如图 2.9 所示。

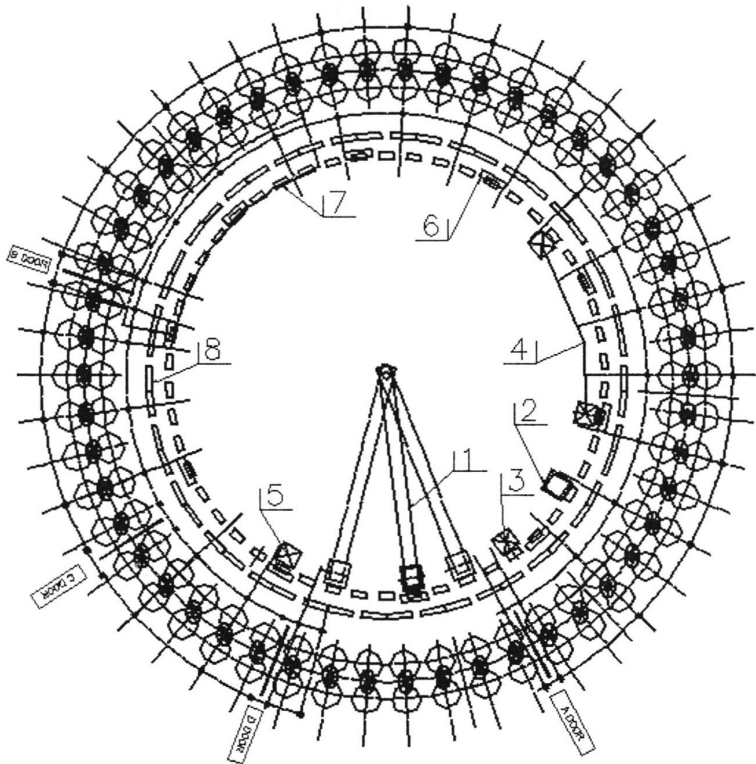


图 2.9 接头布置图
Fig. 2.9 Connector layout diagram

(1) 移动供应系统

移动供应系统是由移动臂、移动小车、移动接头、液压驱动、轨道等组成，移动接头的管路由移动臂来支撑。移动接头安装在移动臂上，在台车的带动下前进、或在小车的驱动下后退，移动接头与台车接头连接时，台车锁锁紧，然后导向销插入提供导向，之后移动接头连接，最终通过臂锁锁紧后，方可供应保护气体。主要设备布置如图 2.10 所示：

各设备参数如下：

移动臂移动角度 36°，臂长度 14800mm，上层高度 FL + 1480mm，轨道材质 SS400

移动小车：轨道驱动系统，电机驱动，轨道材质 SS400

移动接头：运转角度 36°，供应 N₂/H₂/压缩空气，液压缸驱动，接头采用三重密封

台车接头：10 套，布置在炉子圆周内侧

液压缸：接头 1 组，台车锁 1 组，导向销 2 组，臂锁 1 组

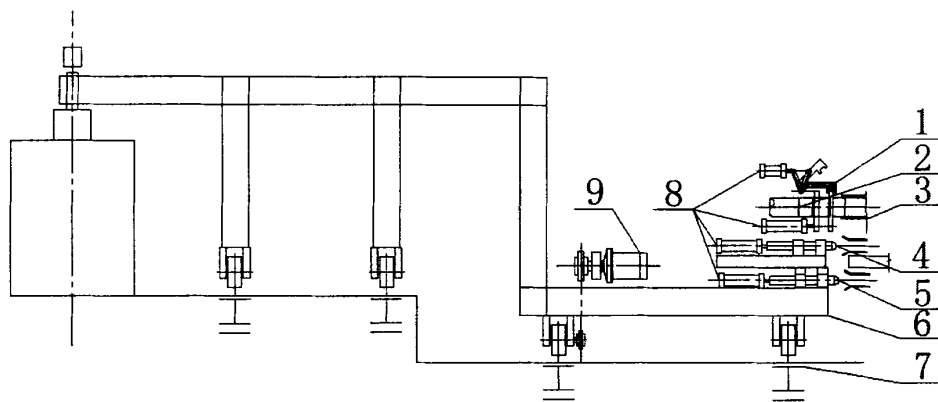


图 2.10 移动供应系统示意图
Fig. 2.10 Mobile supply system diagram

(2) 固定供应系统

固定接头是在固定位置供应保护气体，只是在移动接头反向旋转时使用。固定供应系统主要包括固定接头、导向销及配套液压驱动组成。固定接头连接时，先是导向销插入进行导向，然后连接固定接头。接头退出时顺序与连接时相反。相关设备参数如下：

固定接头：供应 N_2/H_2 / 压缩空气，采用液压缸驱动，接头采用三重密封

液压缸：接头 1 组，导向销 2 组

(3) 保护气体分析系统

在环形炉圆周内部四个位置设有内罩保护气体分析系统，用来检测内罩气体成分，#2 区分析氧气含量，#8、#15 区分析露点，#43 区分析氢气含量。每套分析系统主要包括分析仪本体、分析仪接头、导向销及配套气缸。分析仪接头连接时，先是导向销插入提供导向，然后连接接头进行分析，接头退出时顺序与连接时相反。分析接头布置如图 2.11 所示。

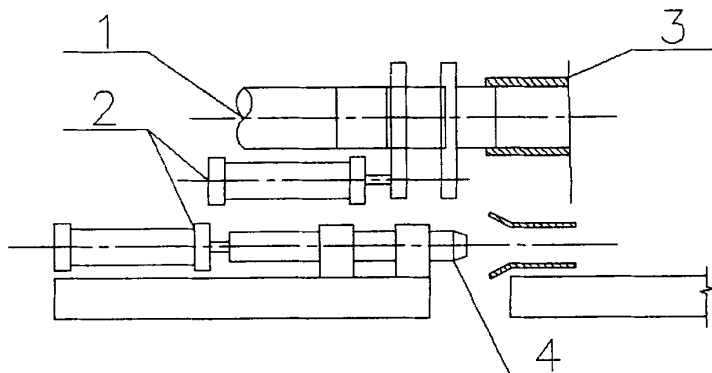


图 2.11 分析接头布置图
Fig. 2.11 Analysis of connector layout

分析接头：4组，接头采用气缸驱动

气缸规格：导向销8组，起导向作用；接头4组，用于接头的连接和断开

（4）保护气体阀台

钢卷在炉内旋转时，内罩中的保护气体是按照工艺曲线时刻变化的，这种变化是由保护气体阀台（共50组）来调节的， N_2 和 H_2 经过环路集管后，通过保护气体阀台按照一定配比混合，再供到各个内罩中。

2.8 本章小结

本章以首钢迁钢一号环形炉为研究背景，对环形炉的结构进行了描述，同时介绍了炉体的结构及重要设备的特点和参数。环形炉在正式生产过程中，关键的控制技术主要有以下几点：

（1）环形炉的燃烧控制

根据炉膛的温度变化，计算机系统自动调节各天然气分管的流量，按一定比例调节各空气分管的流量，实现空燃配比调节。

（2）换向阀的自动换向

排烟管道和空气管道轮流切换，正常情况下时间换向，当任一点排烟温度超高报警时，系统强制换向。时间换向为主，温度换向优先。

（3）炉膛压力的控制

根据炉膛的压力变化，自动调节烟道上的调节阀改变烟气流量，稳定炉压，减少坯料的烧损。

（4）炉内气氛的控制和调节

钢材在加热过程中氧化烧损是必然的，钢材的温度、在炉时间、炉内气氛有关。通过调节燃烧空燃比可在一定范围内对炉内气氛进行有效控制，进而降低钢材氧化烧损。

第3章 环形炉控制系统

环形炉控制系统根据规定的条件给放置在旋转台车上的钢卷进行加热处理。每个钢卷按照单个顺序预热→加热→均热→冷却进行连续的退火处理，利用保护气体(主要是 N_2 、 H_2)脱碳。在这个加热过程中，控制系统对炉内钢卷进行跟踪控制、各区域的温度模式控制、烧嘴燃料系数控制、保护气体流量模式控制和钢卷控制。

首钢迁钢环形炉的控制系统采用了复合式分布控制系统(DCS)。系统包含一个过程控制系统来进行连续控制、顺序控制、数字控制，一个数据基站来对档案和样本进行数据收集和储存，一个操作员站来进行中央监控和过程控制。它由过程控制级和过程监控级组成的以通信网络为纽带的多级计算机系统，综合了计算机、通讯、显示和控制4C技术，其基本思想是分散控制、集中操作、分级管理、配置灵活、组态方便。现场控制站、数据总线和远程I/O总线均采用冗余系统配置，保证了控制系统的高可靠性。同时，人机接口站和现场控制站还具有强大的自我诊断功能。

3.1 控制系统的组成

首钢迁钢环形炉机组DCS控制系统配置情况如图3.1所示。

其中，Ethernet(以太网)是操作站和操作站之间以及操作站和上位计算机之间的通讯线，它们是通过HUB集线器来连接的，每根线都是独立的，没有备用线，如果取掉一根只是影响该操作站或者是上位计算机和网络的连接，但是不会影响其它操作站和上位计算机。

V网是实时控制总线网，它是控制站和控制站之间以及控制站和操作站之间的通讯线。它是挂在一条总线上的，有两根互为热备用，可以取下一个操作站或者是控制站的V网线，而不会影响其它的工作站工作。需要特别注意的是在最后一台操作站必须要连接一个连接终端，该连接终端千万不要随便取下，否则将造成控制站和操作站的通讯中断，操作工将看不到工艺参数，同时也不能对现场的调节阀进行控制，使这个系统处在不可以控制的状态，这对于生产来说是相当危险的，这样做还可能造成CPU板和V网通讯卡板的损坏。

RIO线是用来连接远程I/O单元到FCS控制单元的通讯总线。是控制站和节点(NODE)之间的通讯线，其结构和特点与V网比较相同，但材质不同，作用也不同。

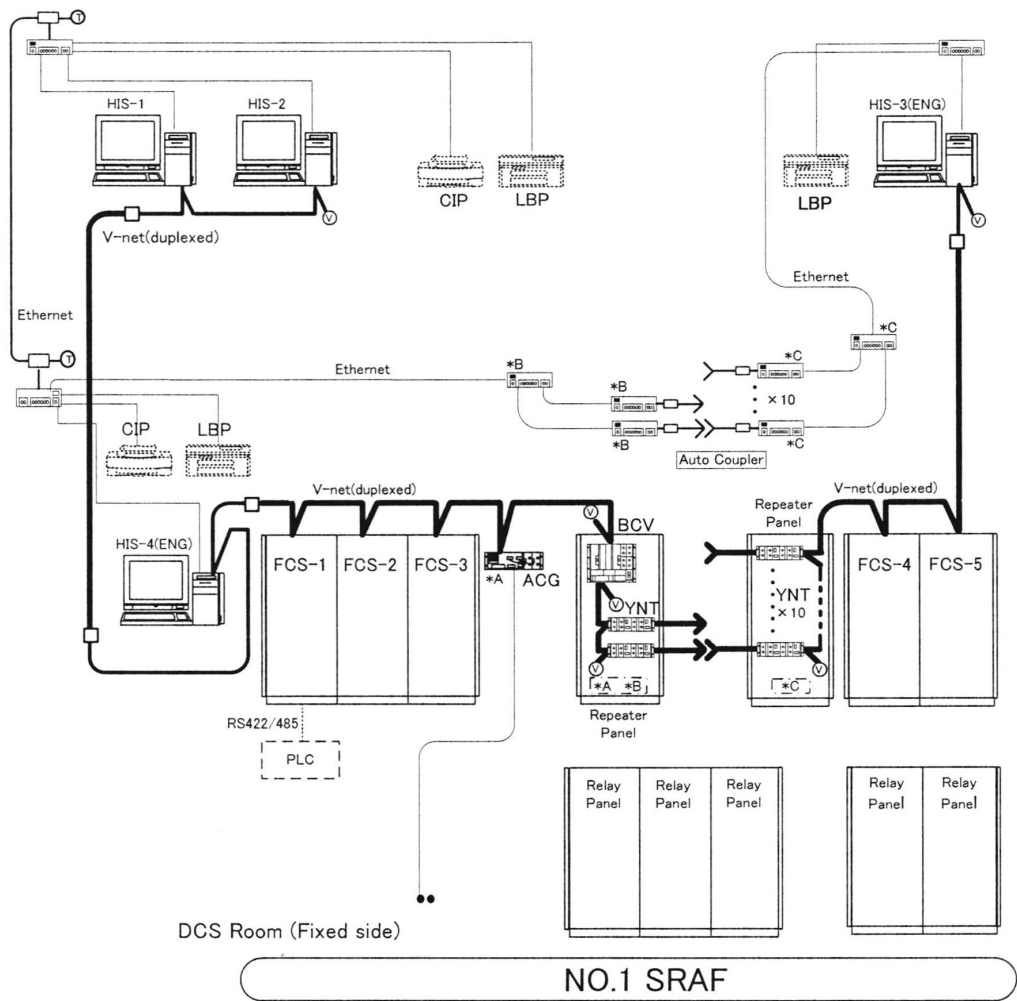


图 3.1 DCS 系统配置图
Fig. 3.1 DCS system configuration diagram

(1) 现场控制站（FCS）

环形炉现场控制站(Field Control Station, FCS)采用的集散控制系统装置是日本横河电子公司（YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION）推出的 CENTUM VP 系统，它是横河电机株式会社基于最新的信息技术和计算机技术进行设计和构思的综合控制系统。如：常规控制、顺序控制、批量控制和复杂运算等等，适合于各种工业过程。FCS 由电源单元、CPU 单元、Vnet 连接器、电池单元、电源分配卡和 I/O 模件等组成，它接受来自现场的各种过程信号，并根据设定条件和 HIS(人机接口站)发出的指令完成对工业控制对象的过程控制功能，使整个生产过程被控制在最优化的状态下运行，FCS 和 HIS 之间通过 V net 总线进行信息交换。

CENTUM VP 的 FCS 同以往 CENTUM 一类的集散控制系统现场控制单元比较，有其独特的性能：

- a. 配置了冗余 CPU 同步热备份系统的冗余控制站;
- b. 可靠的错误检测和校正记忆(ECC);
- c. I/O 模块可以直接与现场信号相连, 不需要任何信号转换卡, 降低了现场边线费用;
- d. 根据 I/O 信号类型可选择多种 I/O 模块, 如: 电流/电压输入模块、MV、热电偶及热电阻温度检测输入模块、脉冲输入模块、电流/电压输出模块;
- e. 利用各种功能块进行各种功能的扩展;
- f. 根据用户的需求, 有多种应用软件可供选择;
- g. 单元监督功能可应用于各种顺序控制;
- h. 符合 ISAS88 的批量管理功能;
- i. 全面支持符合 Foundation 现场总线标准的数字现场总线。

(2) 人机接口站(HIS)

环形炉的人机接口站(Human Interface Station, HIS)与以往集散控制系统的操作站有所不同, 它采用通用 PC 机作为其人机接口站(HIS), 以 Windows XP 作为操作系统, 使 HIS 具有开放的操作环境, 同时将 DCS 的功能和 PC 系统的易于操作性紧密相结合, 在简洁的窗口操作界面之后蕴藏着强大的能力, 使 HIS 不仅仅只用于操作、监视和控制工厂, 而且还可以进行系统生成功能和维护功能。

HIS 操作于 PC/AT 兼容机的 Windows XP 操作平台上, 因此可以在 PC 机上同时使用 HIS 的软件以及 Windows XP 的应用软件, 同时 HIS 还提供动态数据交换(DDE)和过程控制连接嵌入(OPC)接口。在一个 HIS 上不仅可以进行生产过程及装置的操作、监视和控制, 并可以进行各种日报、月报、年报、过程报告、报警、数据分析以及与其它 HIS 的通信。HIS 所有用于操作、监视管理的窗口都是分层管理, 使得诸如自上向下的窗口切换和分层次的报警管理等操作变得简单而有效。由于 CENTUM VP 的 HIS 一直在其窗口的上方显示系统信息窗口, 从而使操作者随时可以监视报警动作, 一旦报警产生, 无论进行何种操作, 都可以通过一触式画面展开功能进入相关的报警窗口。HIS 可以把相关的窗口一个个打开, 然后作为一组存储起来, 不再像以往的集散系统一次又一次地打开相关的窗口, 而是一次即可调出这一组相关的窗口。CENTUM VP 的 HIS 具有各种类型的趋势记录, 如: 实时趋势、批量趋势以及参照趋势等等, 数据采样周期可以从 1 秒(实时)到 10 分钟不等。CENTUM VP 的安全性可以避免操作错误和非权威的进入, 根据区别限制使用者的操作和监视的级别, 保证 HIS、现场控制站以及整个生产的正常运行, 而且每个使用者的权限可以定义, 并很容易查询到。

(3) 工程师站功能

CENTUM VP 是以 Windows XP 为操作系统而在通用 PC 机上运行的新一代开放型

集散控制系统，其工程师功能的性能与以往集散控制系统有相同之处，也有不同之处。

a. 运行于通用 PC 机上的工程师功能类似于 CENTUM VP 的 HIS 操作监视功能，其工程师功能也是运行在 PC 机的 Windows XP 平台上，无须特殊机器。当 HIS 在操作监视功能状态时，也可以通过窗口的切换直接进入工程师功能状态。

b. 网络上共存的工程师功能。利用 Windows XP 磁盘共享功能，其他工程师也可同时通过网络在网上操作相同的工程数据。

c. 应用 Windows XP 软件进行数据交换。利用 Windows XP 典型应用软件，如 Excel 的剪贴功能，很容易进行工程数据交换。

d. 虚拟测试功能。CENTUM VP 的虚拟测试功能是在 FCS 不存在的情况下，通过 HIS 对 FCS 控制功能进行仿真测试和调试。一旦组态程序完毕后，即可进入测试功能，因为程序和测试是不可分的，从而提高效率。

e. 工程数据的再使用。工程数据可以由其它站或项目调用，进行数据共享。

3.2 炉温控制

每座环形炉设置有 28 个燃烧控制环路，正常生产情况下，控制系统接收二级设定值对炉温进行控制。炉子每区炉顶安装有一个或两个热电偶，用于炉膛温度的测量。自动模式下系统采用两个热电偶测量的平均值进行控制，当其中一个发生故障时，系统自动切换到另一个热电偶用于控制；如果两个都发生故障，系统发出报警并关闭自动控制。与此同时，系统对两个热电偶间的温差也进行了设定，并可以通过 HIS 屏幕发出报警信号。

每座环形炉设置有 28 个燃烧控制环路，正常生产情况下，控制系统接收二级设定值对炉温进行控制。炉子每区炉顶安装有一个或两个热电偶，用于炉膛温度的测量。自动模式下系统采用两个热电偶测量的平均值进行控制，当其中一个发生故障时，系统自动切换到另一个热电偶用于控制；如果两个都发生故障，系统发出报警并关闭自动控制。与此同时，系统对两个热电偶间的温差也进行了设定，并可以通过 HIS 屏幕发出报警信号。炉温按照工艺温度曲线的设定值控制和调节。各环路 TIC 接收温度设定值和热电偶测量值后，通过 PID 调节器调节烧嘴前天然气、助燃空气流量控制阀的开度，来达到控制炉温的目的。主要控制功能如下图 3.2 所示。

台车旋转过程中，为了减少直接火焰对内罩的损害，所有燃烧区域均进入低焰燃烧状态。在每个环路中，低焰燃烧的控制是不一样的。

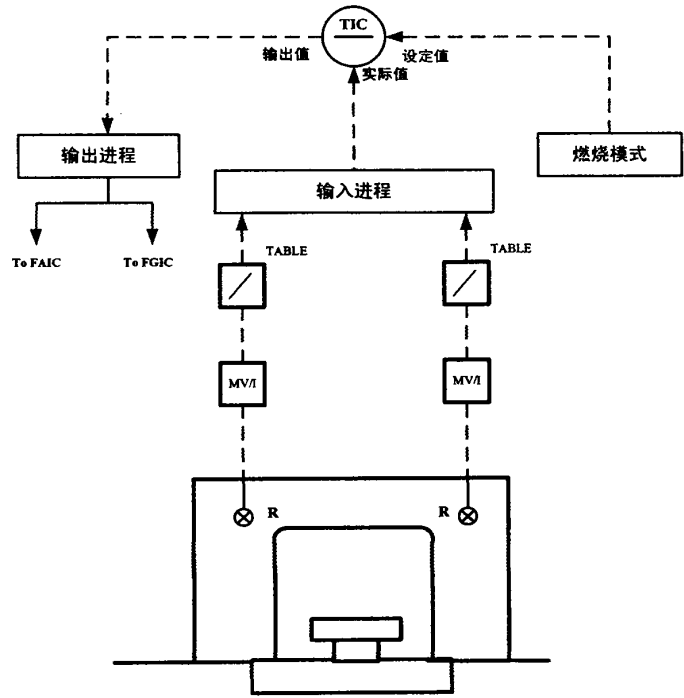


图 3.2 炉内温度控制原理图
Fig. 3.2 Furnace temperature control schematics

(1) 1S、2H、2S、1C 段 (1-25Loop)

炉门开启前炉温按照工艺温度曲线的设定值改变。门开启前几秒内，温度输出值按照斜率 θ 进入到低焰燃烧状态，并在低焰燃烧信号结束后，经过一定时间的延时按照设定斜率恢复至正常燃烧状态。如下图 3.3 所示。

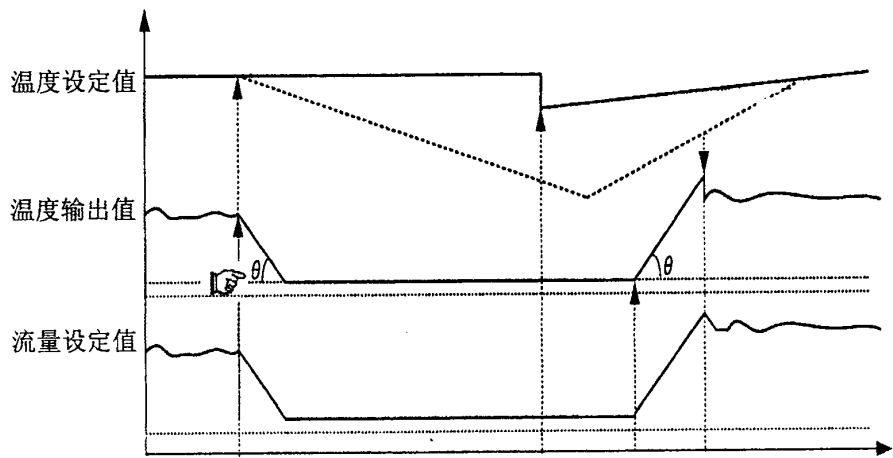


图 3.3 1-25 环路低焰燃烧控制图
Fig. 3.3 1-25 Loop low combustion control chart

控制画面如 3.4 图所示：

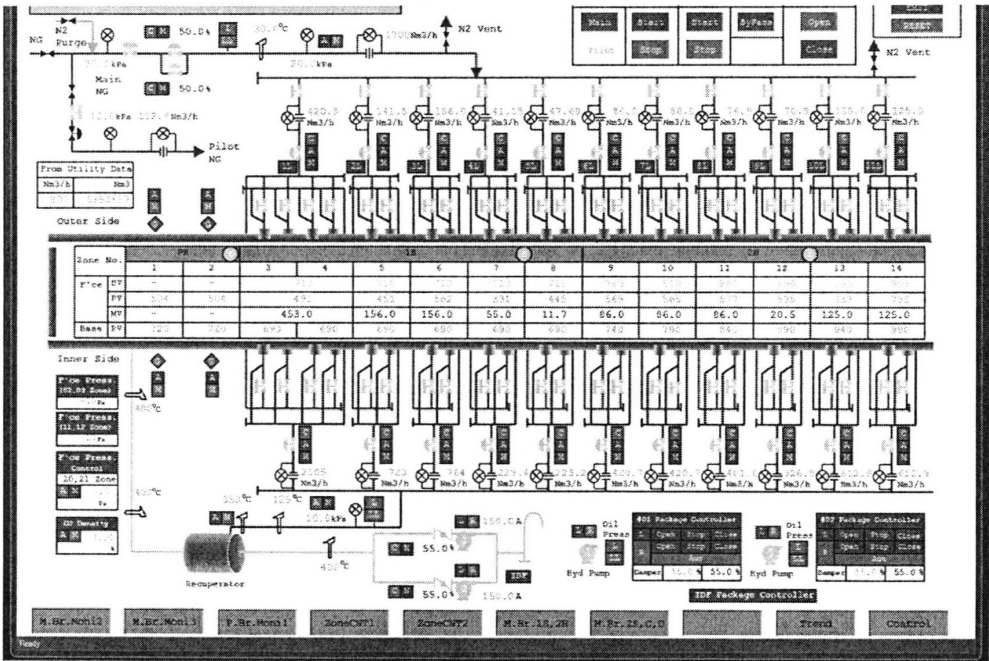


图 3.4 环路低焰燃烧控制画面
Fig. 3.4 Low control screen loop combustion control charts

(2) B 门 (26Loop)

B 门燃烧控制有两种模式：炉门关闭状态下，炉内设定固定值来控制燃烧；台车旋转时，顺序设定固定值来控制燃烧，具体控制如图 3.5 所示：

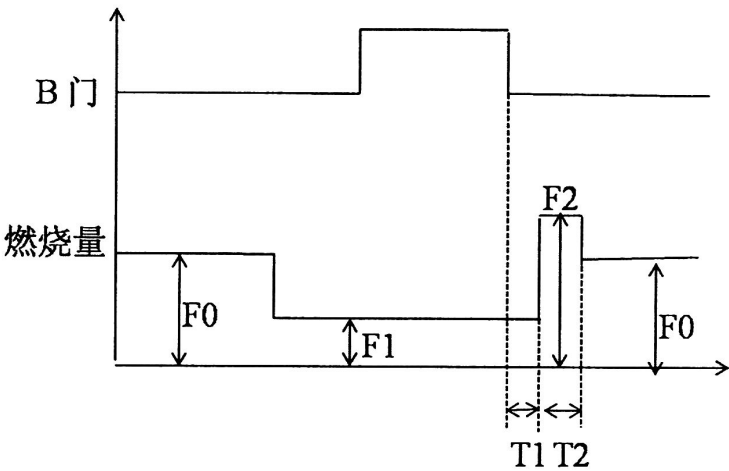


图 3.5 B 门燃烧控制图
Fig. 3.5 Gate B combustion control chart

控制画面如 3.6 图所示：

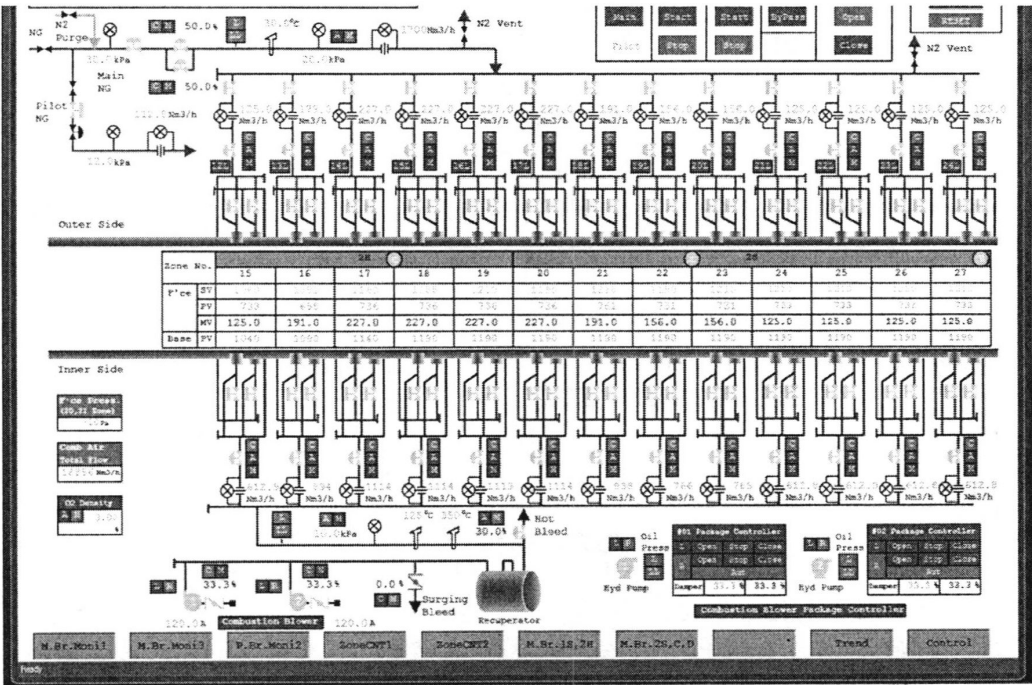


图 3.6 B 门燃烧控制画面
Fig. 3.6 Door combustion control screen

(3) 2C 段 (27、28Loop)

系统对 2C 段的烧嘴设定固定值燃烧来达到控制冷却的目的，从而使得钢卷按照设定的冷却速度进行冷却。如图 3.7 所示：

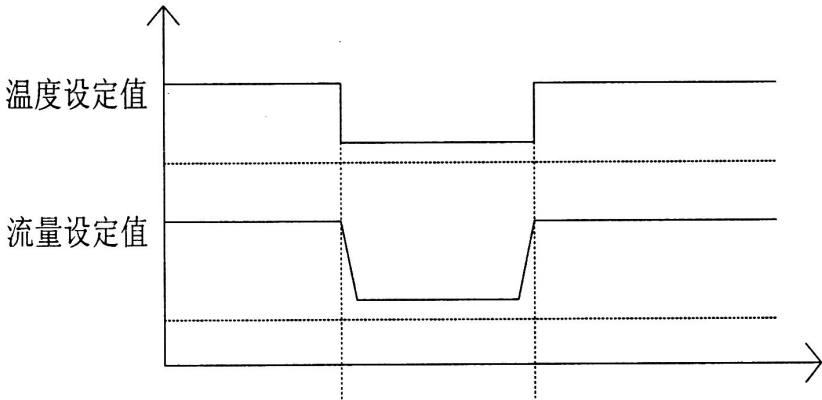


图 3.7 2C 段固定值燃烧
Fig. 3.7 2C fixed value of the combustion

控制画面如 3.8 图所示：

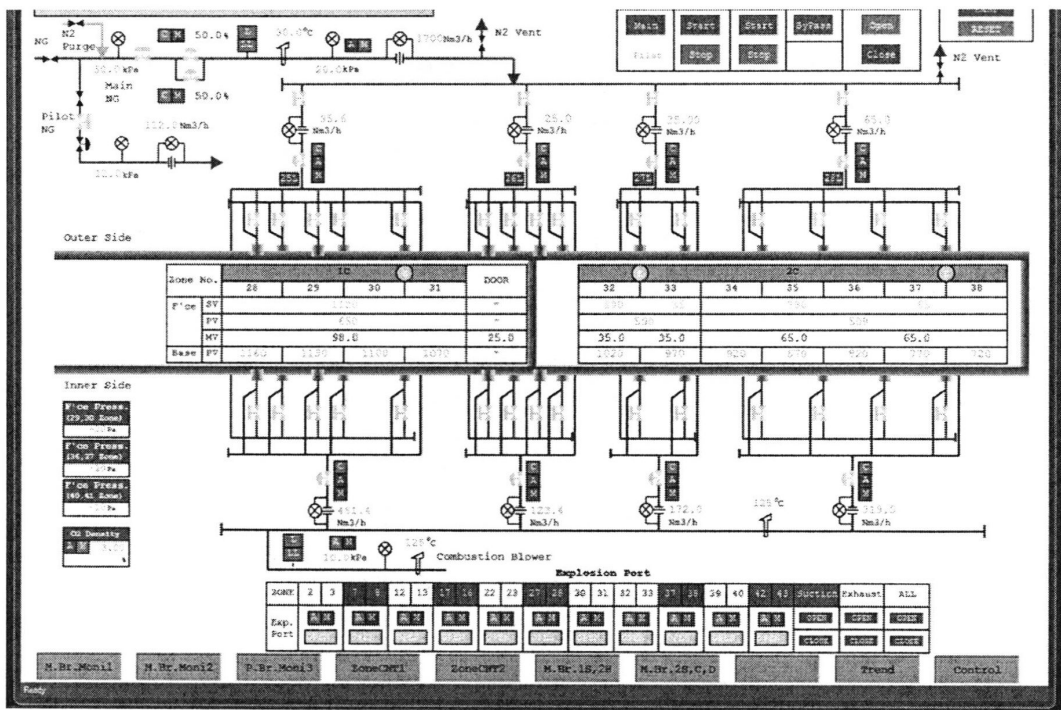


图 3.8 2C 段固定值燃烧控制画面
Fig. 3.8 2C fixed values of the control screen burning

3.3 底板温度控制

为了更准确地控制钢卷冷却速度，系统对 2C-4C 段采用底板温度控制，控制区域为 32-46 区，每区对应 1 个冷却环路，共 15 个。通过比较底板温度的设定值和实际检测值，来控制冷却空气的流量。

为了保证控制精度，系统通常采用内外侧两个热电偶采集信号的平均值（也可根据实际情况手动设定）作为控制温度。在自动模式下，如果一个热电偶被烧坏，系统自动切换。冷却空气流量采用温度控制输出串级控制。

底板温度控制原理图如下图 3.9 所示。

在自动模式下，系统会根据所需要的冷却空气总量自动控制 No.1-No.4 冷却风机开启的数量。总的冷却空气流量可在 HIS 进行监视和控制。

冷却风机自动启停如图 3.10 所示。

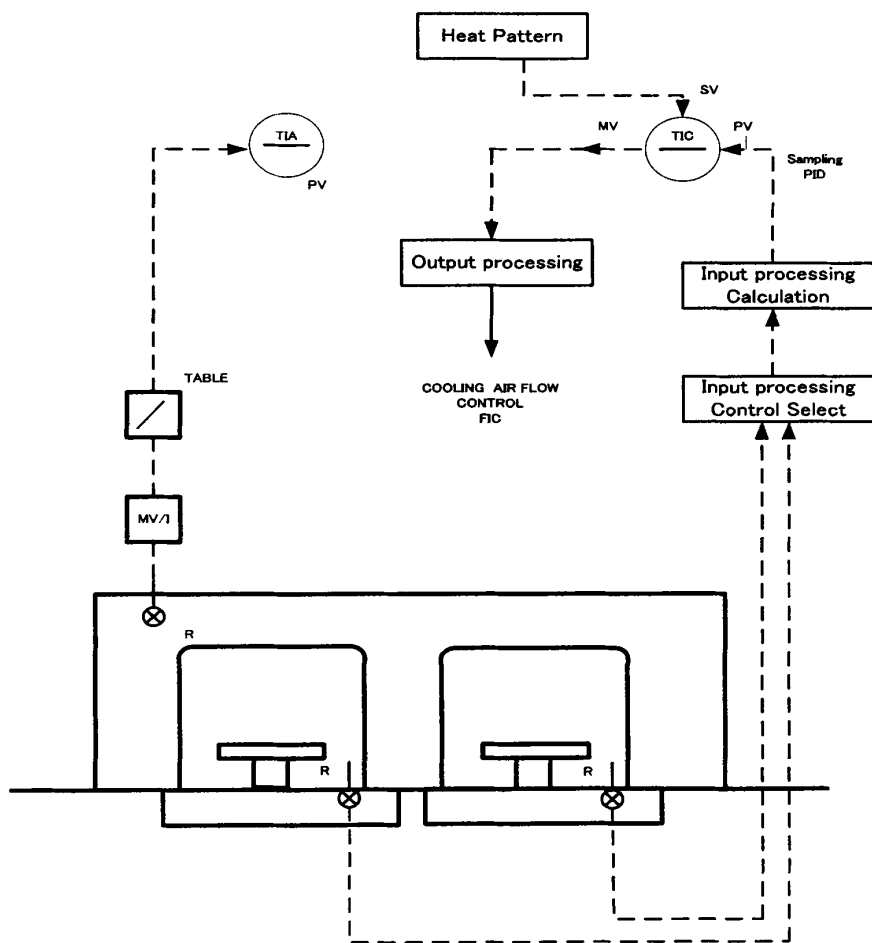


图 3.9 底板温度控制原理图
Fig. 3.9 Base plate temperature control schematics

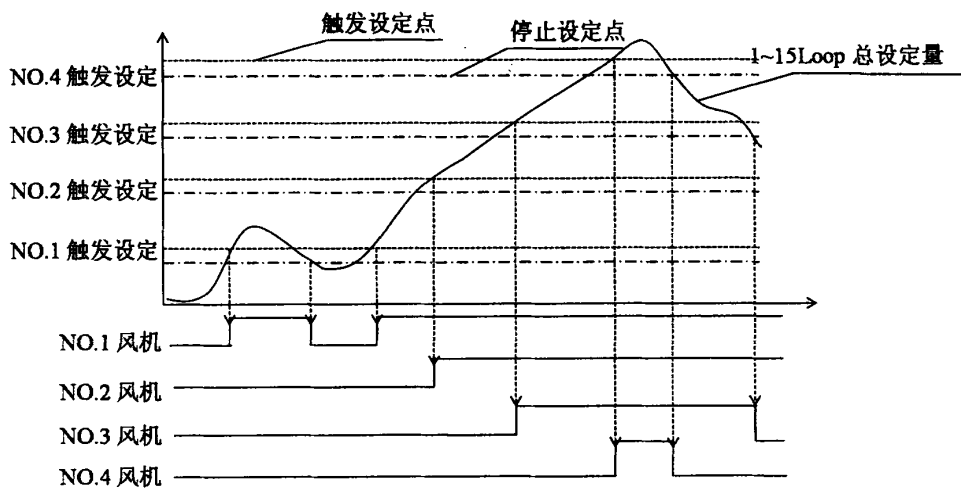


图 3.10 冷却风机自动启停顺序图

Fig. 3.10 The cooling fan automatically start and stop sequence diagram

3.4 保护气体流量控制

保护气体控制是 DCS 根据二级钢卷管理模型对每个内罩内保护气体的流量和类型进行实时控制的过程，这种控制是通过对各排的跟踪来实现的，出于安全考虑，钢卷在 43-49 区之间停止 H₂ 供应，当到达 49 区时，所有保护气体供应自动停止。保护气体有四种类型：N₂=100%；H₂=100%；N₂/H₂=50/50%；N₂/H₂=25/75%。系统按照设定温度在四种类型之间自动切换。控制原理如下图 3.11 所示：

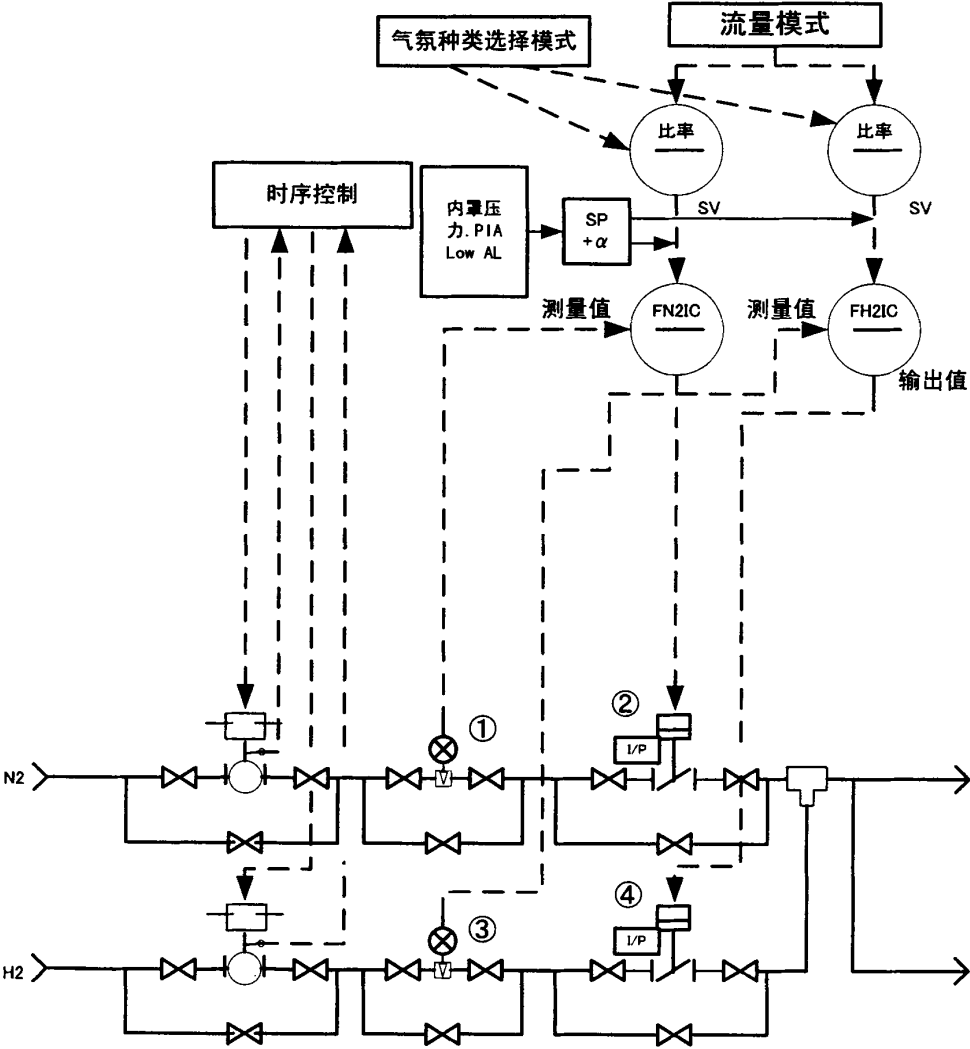


图 3.11 保护气体流量控制原理图
Fig. 3.11 Shielding gas flow control schematic

保护气体流量控制画面如 3.12 图所示：

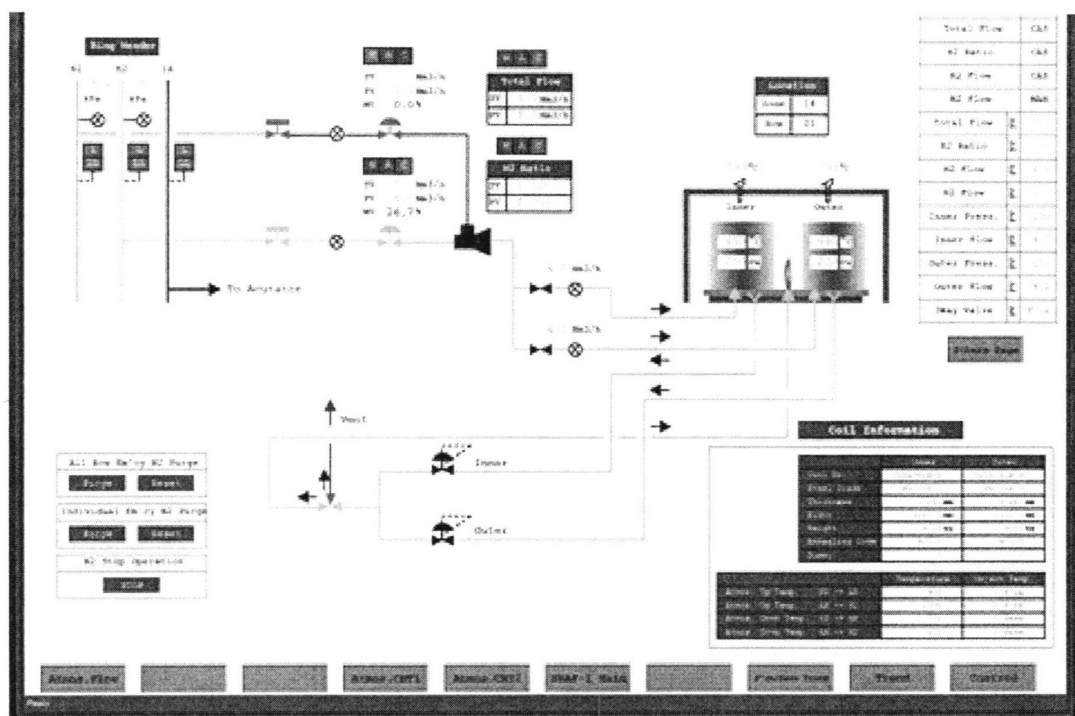


图 3.12 保护气体流量控制画面
Fig. 3.12 Protection of the gas flow control screen

环形炉在旋转的过程中为保证保护气体的连续供应，上部台车每移动 5 个垛位需要进行保护气体供应管线的转换。管线自动断开或连接均通过接头实现，接头有两种：固定接头和移动接头。两种接头通过和移动侧总管接头（10 个）的交替连接，来保证连续不断地为台车供应保护气体。

3.5 工艺流程的控制

(1) 助燃空气控制

每座环形炉安装有两套助燃风机(一用一备)。助燃风机启动顺序可控,在每个助燃风机入口均安装有一个液压驱动挡板,来调节燃烧所用的助燃空气流量。与此同时,为了保护换热器,系统在换热器出口对助燃空气温度进行测量和监视,如果温度过高,系统自动打开放散阀。助燃空气温度控制原理如图 3.13 所示。

(2) 内罩压力控制

系统在每个踩位通过保护气体阀台上的差压变送器对内罩内的压力进行测量和监视，并在保护气体出口管路上安装有自调阀来保证内罩压力的稳定。当系统检测到内罩压力下降时，增加保护气体流量；如果内罩压力反常下降，强制吹入氮气，关闭旁通阀并打开三通阀用于气体排放。三通阀通过联锁信号自动将排放的气氛切换到炉内或炉外，整个过程中的相关信息通过 HIS 进行监视和控制。如下图 3.14 所示。

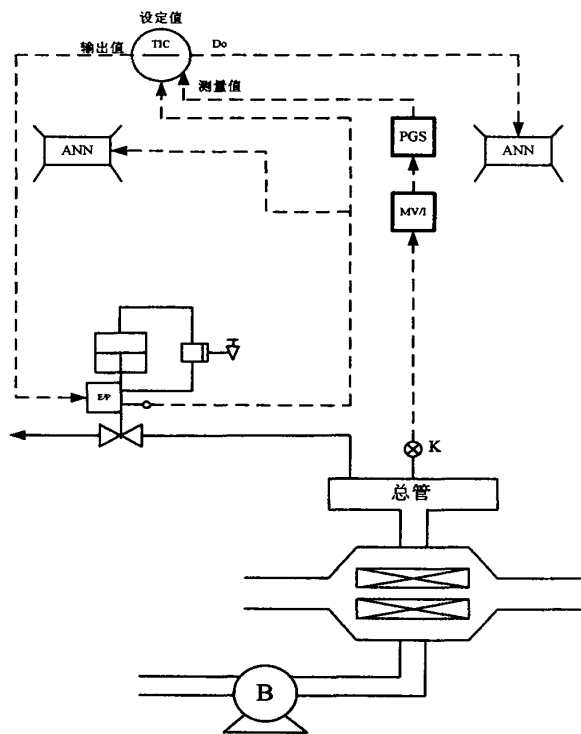


图 3.13 助燃空气温度控制原理图
Fig. 3.13 Combustion air temperature control schematics

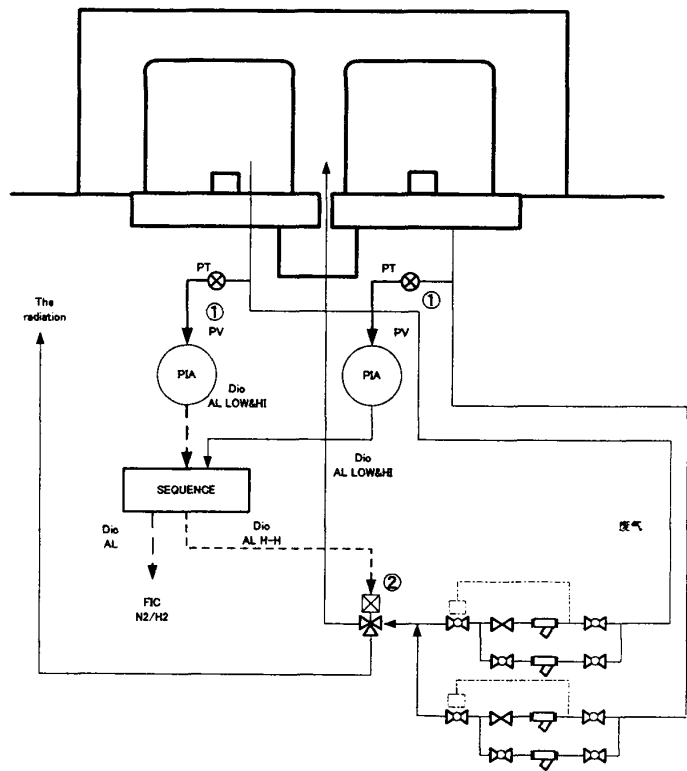


图 3.14 内罩压力控制原理图
Fig. 3.14 Within the hood pressure control schematic diagram

(3) 炉压控制

炉膛压力直接影响钢坯加热质量、炉温分布、燃料消耗及炉体寿命，一般控制在微正压(0-20Pa)以内，以使炉子既不吸入冷空气，又不造成炉气大量外溢。系统在炉内 6 个位置设置了炉压传感器，其中，5 个用于监视 1 个用于控制。通过比较控制点炉压信号和预设值的差值自动控制烟道内炉压挡板的开度，从而进行炉压控制。炉压控制器设自动和手动两种模式。自动方式时：在上位机中设定炉压调节回路的炉压设定值；手动方式时：在上位机中或操作台上调节烟道挡板阀的开度。当控制传感器的炉压信号出现错误时，控制模式自动切换到“手动”并保持原控制状态。如下图 3.15 所示。

(4) PLC 台车旋转控制

环形炉 PLC 控制系统如图 3.16 所示。

环形炉为间歇式旋转型退火炉，按照一定的旋转周期进行旋转。正常生产时，当前一次旋转周期结束后，DCS 自动切换到低焰燃烧状态，并向 PLC 下发指令，由 PLC 控制与台车旋转相关设备的动作。

台车旋转控制有自动、半自动及手动三种模式，旋转之前首先判断联锁条件是否满足。联锁条件包括：液压驱动装置正常、压缩空气正常、移动小车未到达极限位置、移动接头连接、固定接头断开、#2 区氧含量<1%、#43 区氢含量<1%、吊桥升起。门开启、分析仪接头断开后旋转开始，门关闭、分析仪接头连接后旋转结束，控制流程如图 3.17 所示。

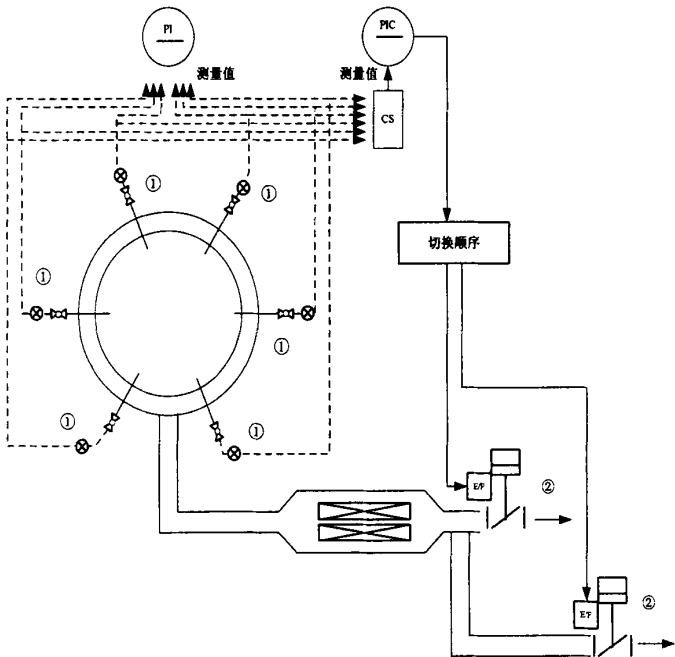


图 3.15 炉压控制原理图

Fig. 3.15 Furnace pressure control schematic diagram

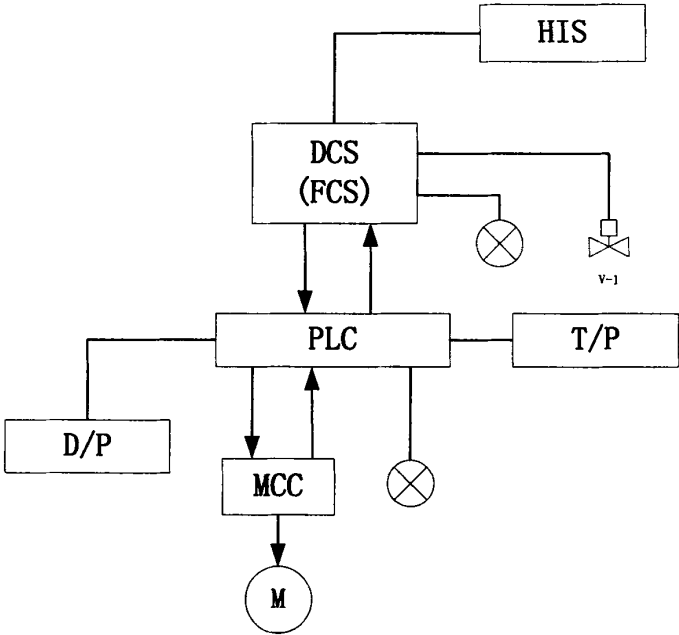


图 3.16 PLC 与 DCS 系统联系图
Fig. 3.16 Contact diagram of PLC and DCS system

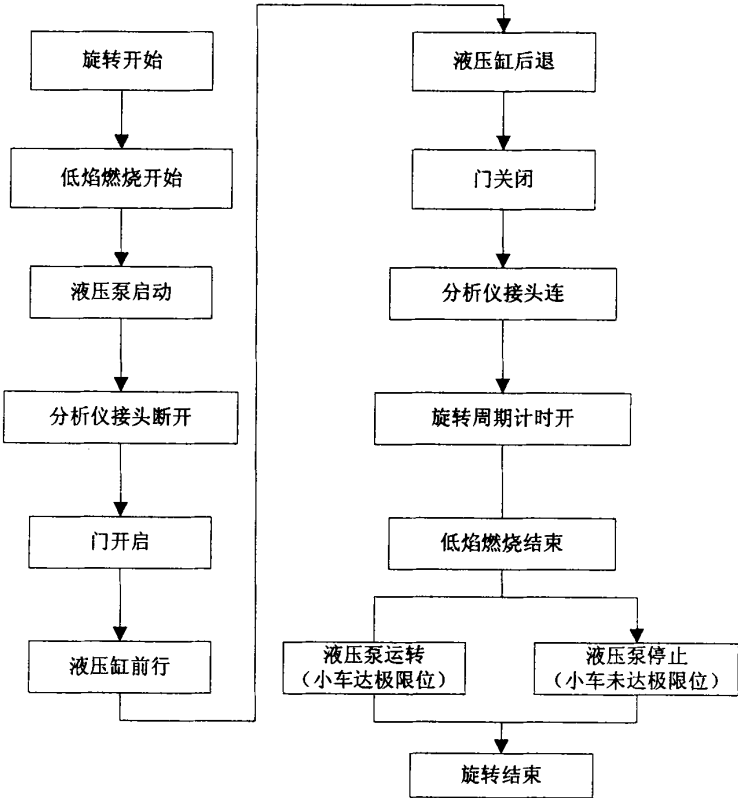


图 3.17 台车旋转控制流程图
Fig. 3.17 Trolley rotation control flow graph

控制画面台车旋转控制流程图如 3.18 所示：

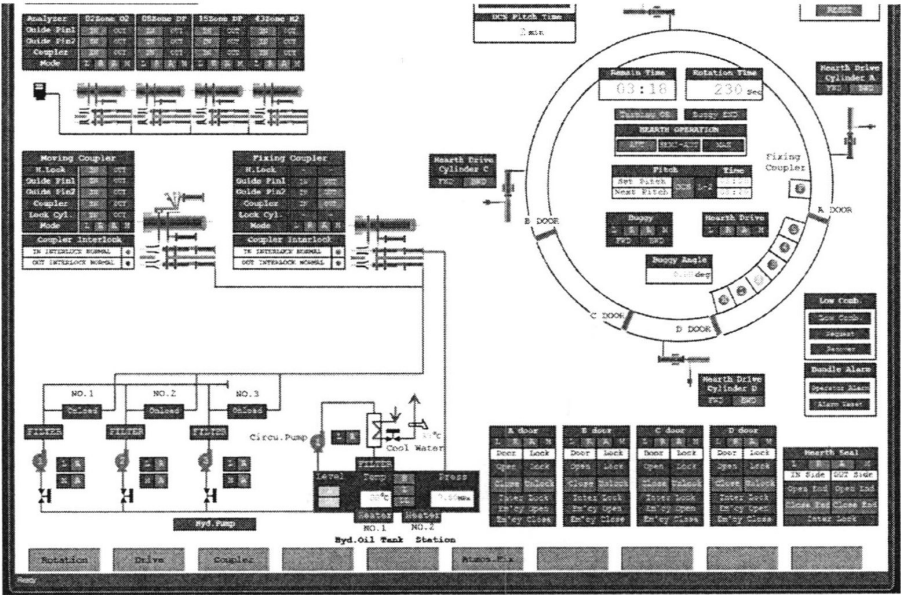


图 3.18 台车旋转控制流程图
Fig. 3.18 Control screen trolley rotation control flow chart

(5) 辉光加热器控制

系统分别在 PH、2C、3C 设置有 28 个辉光加热器。辉光加热器设置为自动模式，当炉内温度高于某一设定值后，辉光加热器自动关闭，当炉温低于某一设定值后，辉光加热器自动开启，从而保证各区的可燃气体能够安全燃烧，控制如图 3.19 所示：

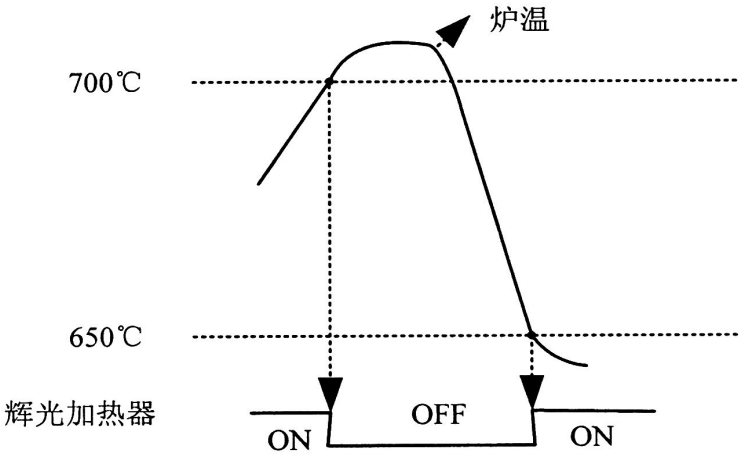


图 3.19 辉光加热器控制图
Fig. 3.19 Glow heater control diagram

(6) 分析仪检测

分析仪用于分析内罩中保护气体和烟道气氛的成分。主要有三种类型： H_2 分析仪、

O₂ 分析仪、D/P 分析仪。分析仪布置如下图 3.20:

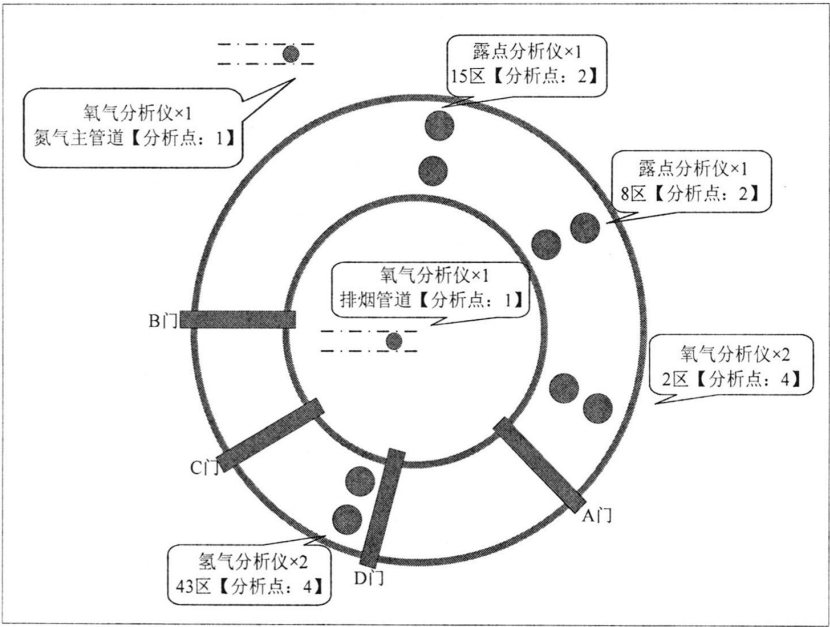


图 3.20 分析仪布置图
Fig. 3.20 Analyzer layout

分析仪检测控制画面如 3.21 图所示:

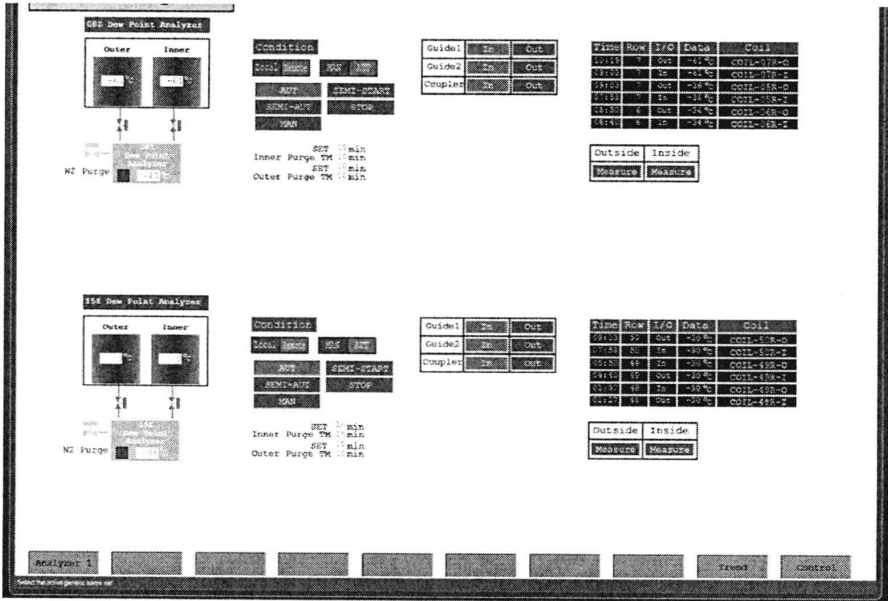


图 3.21 分析仪检测图
Fig. 3.21 The control screen analyzer map

炉区内布置有 H₂ 分析仪、D/P 分析仪、O₂ 分析仪，当接收到分析信号后，分析仪按照系统设定的顺序对内罩气氛开始分析。台车旋转期间，由于分析仪接头的断开，分析自动中止。台车旋转完成后，分析仪自动重新开始分析。

同时，烟道内布置有氧气分析仪，通过计算废气中氧气浓度实际值（PV）和设定值（SV）的偏差来控制空燃比。烟道 O₂ 控制原理如图 3.22 所示。此外，在氮气主管道也设置有氧气分析仪，用于分析 N₂ 管路中氧气的含量。

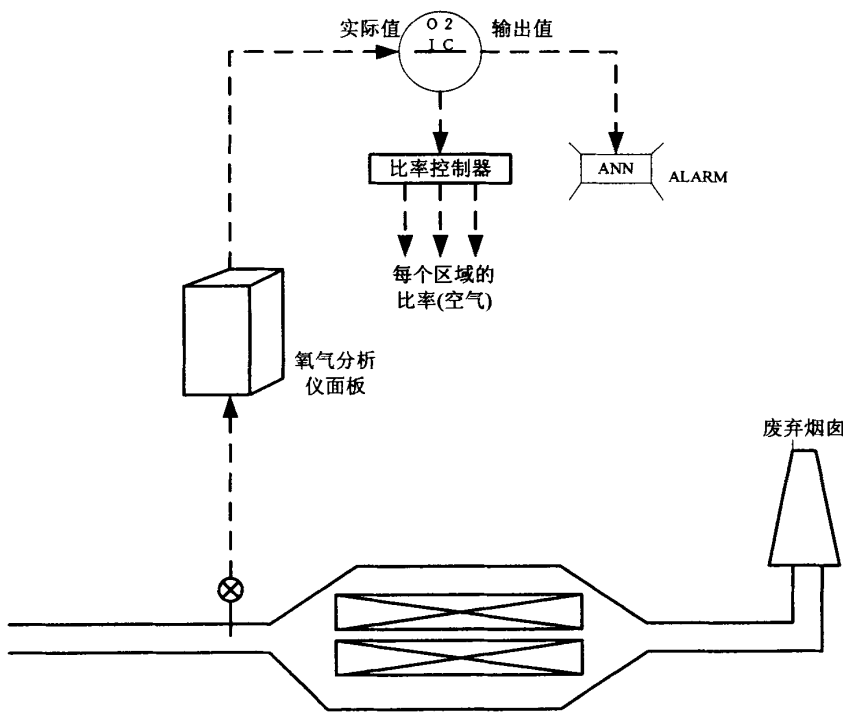


图 3.22 O₂ 控制原理图
Fig. 3.22 O₂ control schematic diagram

3.6 本章小结

本章以首钢迁钢一号环形炉为研究背景，对环形炉的结构进行了描述，同时介绍了炉体的结构及重要设备的特点和参数。环形炉在正式生产过程中，关键的控制技术主要有以下几点：

(1) 环形炉的燃烧控制

根据炉膛的温度变化，计算机系统自动调节各天然气分管的流量，按一定比例调节各空气分管的流量，实现空燃配比调节，并通过废气烟道的氧分析仪检测数据进行补偿，使燃烧控制更加精确，保证了生产顺稳运行。

(2) 换向阀的自动换向

排烟管道和空气管道轮流切换，正常情况下时间换向，当任一点排烟温度超高报警时，系统强制换向。时间换向为主，温度换向优先。

(3) 炉膛压力的控制

在前几章的基础上，对首钢迁钢一号环形炉 DCS 控制系统的主要控制功能进行了

详细分析,包括炉温控制、底板温度控制及保护气体控制等,其控制精度高,相应速度快,在实际的生产应用中都起到了很好的效果,为下一章燃烧控制改进设计效果验证奠定了基础。

根据炉膛的压力变化,自动调节烟道上的调节阀改变烟气流量,稳定炉压,减少坯料的烧损。

(4) 炉内气氛的控制和调节

钢材在加热过程中氧化烧损是必然的,钢材的温度、在炉时间、炉内气氛有关。通过调节燃烧空燃比可在一定范围内对炉内气氛进行有效控制,进而降低钢材氧化烧损在加热过程中,控制系统对炉内钢卷进行跟踪控制、各区域的温度模式控制、烧嘴燃料系数控制、保护气体流量模式控制和钢卷控制。炉温控制是加热炉的核心控制部分,其目的是通过控制燃料——燃气和助燃剂——热空气的流量,使炉温的动态性能指标和静态性能指标满足工艺要求。炉子每区炉顶安装有一个或两个热电偶,用于炉膛温度的测量。炉压控制对保护炉膛、炉壁和炉门,控制炉内合理的气氛有重要的意义。为防止冷风吸入炉内和火焰从炉内喷出,加热炉炉内应保持微正压。调节器根据安装在均热段壁上的微压力变送器测量的压力变化去控制烟道上挡板阀的开度,以保证炉内微正压。保护气体控制是 DCS 根据二级钢卷管理模型对每个内罩内保护气体的流量和类型进行实时控制的过程,系统在每个垛位通过保护气体阀台上的差压变送器对内罩内的压力进行测量和监视,并在保护气体出口管路上安装有自调阀来保证内罩压力的稳定。

由于环形炉温度高,燃料是易燃易爆的天然气,因此采取必要的保护措施是必须的。换热器的保护是通过放散预热空气进行的。炉内每个冷却水回路上均配有温度检测开关和流量检测开关,可对炉内每个水管进行间接监视。环形炉设有完善的安全联锁装置。在空气或燃气在低压或断电事故发生时,控制系统可报警并安全地切断燃气供应。

第4章 燃烧控制改进设计与仿真

迁钢冷轧环形炉的烧嘴燃烧控制通过固定空气的量，通过空燃比例阀来调节天然气的流量达到平衡燃烧的目的，如下图 4.1 所示。

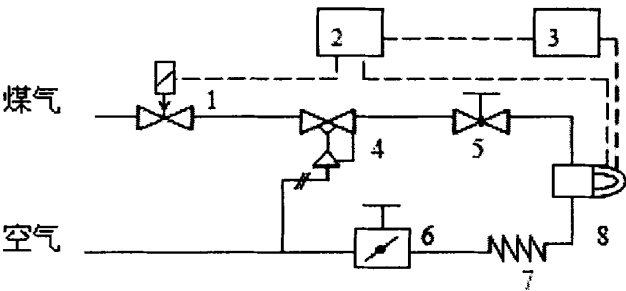


图 4.1 环形炉燃烧控制原理图
Fig. 4.1 Rotary furnace combustion control schematic

燃烧产生的火焰温度可用下列的公式表达：

$$T = (Hr + CpTp + KaCaTa) / (Cp + KaCa)$$

式中：T——火焰温度；Hr——燃料热值；Cp——燃料比值；
Tp——燃料入口温度；Ca——空气比热；Ta——空气入口温度；
Ka——空燃比(空气质量流量/燃料质量流量)

上式在没有燃料过剩的情况下才成立。如果燃料过量，多余的燃料不但未燃烧产生热量，反而起到了稀释作用，降低了火焰温度。如果空气过量，Ka 值增大从上式可以得出火焰温度同样要降低，因此只有在燃料和空气都不过量的情况下，即适当的空燃比，火焰温度才能达到最大值，才能保证加热炉的热效率最高。

环形炉生产最高温度 1200℃，要求控制精度达到±5℃，一般的比值控制虽然保证了正常情况下环形炉燃烧的空燃比，但是当系统发生扰动时，由于空气的调节总是滞后于燃料的变化，所以在调节过程中空燃比可能过高或过低，无法满足过程要求。双交叉限幅控制就是为了克服比值调节方式的局限性而产生的，它实际上是一个具有两个并联回路的串级调节系统，炉出口温度作为主回路，燃料气和空气流量回路并联作为副回路。首先根据实际空气流量，通过“低选器”对流量进行上限限幅，其次，根据实际燃料气流量，通过“高选器”对实际空气流量进行下限限幅，这样就构成了“交叉限幅”。交叉部分是为了改善系统的动态特性，仅在动态时才起作用，系统正常时就是一般的串级调节系统。总之，双交叉限幅不仅在稳态时保持合适的空燃比，在动态时也能维持适当的空燃比，可以说“双交叉限幅”就是动态比值为了使燃烧过程中空燃比保持在最佳燃烧区内。

4.1 双交叉限幅控制

(1) 双交叉限幅控制燃烧机理和重要参数

下图 4.2 所示的燃烧特性图描绘了空燃比、热损失、热效率和公害的相互关系。当空气过剩率 $u < 1.02$ 时，空气量不足，入炉的燃料不能完全燃烧，化学热损失较大，同时造成烟囱冒黑烟，污染环境；而空气过剩率 $u > 1.10$ 时，炉内空气过剩，出现过氧燃烧，部分空气未参与燃烧但把热量带走，造成热损失。同时，过氧燃烧产生大量的 Sox 及 Nox ，对设备不利并造成环境的污染。燃烧控制的目的是既要达到炉温控制要求，又要寻求最佳的空气过剩率，实现高效率低污染的燃烧。

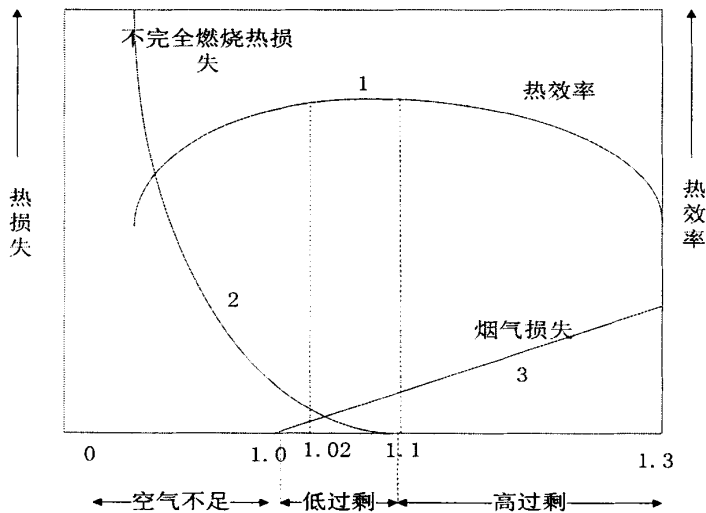


图 4.2 空气过剩系数与节能的关系
Fig. 4.2 The relationship of excess air ratio and energy conservation

(2) 双交叉限幅串级比例介绍

环形炉燃烧控制目前广泛采用的是双交叉限幅控制方式，即根据给定的空燃比，合理的同时调节空气流量和燃气流量，以保证在炉温调节过程中，燃料和空气都达到充分燃烧，这样既可节约能源，又可防止环境污染。下图 4.3 为双交叉控制系统的原理方框图。从图中可以看出，它是一个串级并联回路，中间经过交叉制约网络，使空气量和燃气量相互制约，动态跟踪，确保调节过程中的精确空燃比。

图 4.3 中 $W1(s)$ 为炉温 PID 调节器传递函数， $W01(s)$ 、 $W02(s)$ 、 $W03(s)$ 分别为炉温、空气、气对象的传递函数， $X1(S)$ 为炉温设定值， $Z1(S)$ 为炉温反馈值， $X2(S)$ 为空气流量给定值， $Z2(S)$ 为空气流量反馈值， $X3(S)$ 为燃气流量给定值， $Z3(S)$ 为燃气流量反馈值， $Wm1(S)$ 为温度测量变送器传递函数， $Wm2(S)$ 为空气测量变送器传递函数， $Wm3(S)$ 为燃气测量变送器传递函数， $Y1(S)$ 为主控制参数炉温， $Y2(S)$ 为副控制参数空气流量， $Y3(S)$ 为副控制参数燃气流量。空气流量、燃气流量调节器采用比例调节器，炉温调节器采用 PID 调节器。

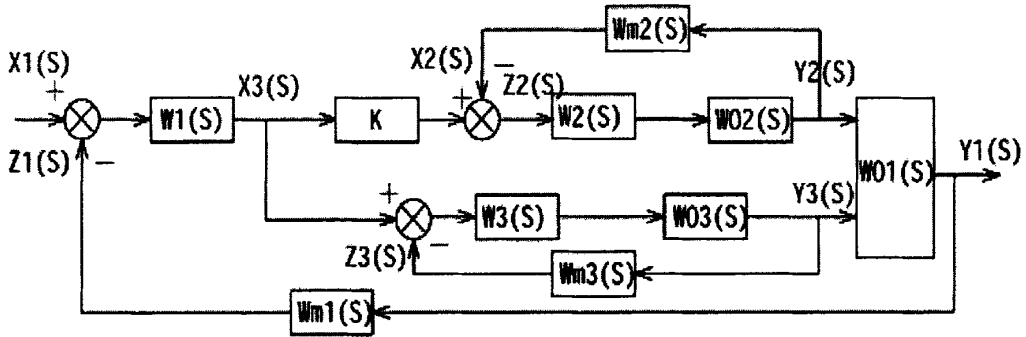


图 4.3 双交叉限幅控制系统原理方框图

Fig. 4.3 Dual cross limiting control system schematic block diagram

$$W2(S) = K2, W02(S) = Kv2, W03(S) = Kv3, W01(S) = K1e^{-\sigma S} / (TS + 1) = 0.44S / (24S + 1)$$

$$W3(S) = K3, Wm2(S) = Km2, Wm3(S) = Km3, Wm1(S) = Km1$$

$$W2'(S) = Y2(S) / X2(S) = K2Kv2 / (1 + K2 * Kv2 * Km2)$$

$$W3'(S) = Y3(S) / X3(S) = K3Kv3 / (1 + K3 * Kv3 * Km3)$$

炉温控制取燃气流量回路作为其控制通道,

$$\text{开环传递函数 } W1'(S) = Y1(S) / X3(S) = W2'(S)W01(S) = K1e^{-\sigma S} / (TS + 1)$$

$$\text{其中 } K = K1 * K2 * Kv2 / (1 + K2 * Kv2 * Km2)$$

通过设定每一个加热区的温度,使温度控制器的输出经过比例系统控制器作为空气和燃气的流量控制器的设定值,按照交叉限幅控制理论进行燃气和空气流量的调节。在通常的燃烧控制系统中,采用串级比例调节系统。温度调节器的输出直接作为空气流量调节控制器的给定,然后空气流量实际值除以空燃比作为燃气流量调节控制器的给定。在稳态时,燃气量可按一定的空燃比跟随空气流量变动;但在动态时,如升温、降温等变化时,这种常规系统就无法保证燃气量的精确变化。然而采用交叉限幅控制方式就能保证无论是在动态还是稳态时都能满足一定的空燃配比性能,使系统无论在稳态还是在动态时,都可获得较好的空燃比性能。同时由于没有过氧和缺氧燃烧从而起到节能降耗的效果。

(3) 双交叉限幅燃烧控制思想

双交叉限幅控制系统是目前燃烧系统中较为合理、成熟和先进的一种控制方案,其结构是以出炉温度为一个主控回路,燃料流量和空气流量为两个副控回路的并联串级系统。当需升负荷时(要升高温度时),燃料和助燃风同时增加,当需降负荷时,燃料和助燃风同时减少。由于助燃风控制有一定的滞后,环形炉会形成动态的缺氧和富氧,双交叉限幅控制系统的思想是:在燃料副控回路的设定值通路中,加入由空气流量决定的上下限定值,使燃料流量只能在该限定范围内逐步地变动(增加或减少);同样,在空

气副控回路的设定值通路中,加入由燃料流量决定的上下限定值,使空气流量只能在该限定范围内逐步地变动。

(4) 双交叉限幅燃烧控制原理

双交叉限幅燃烧控制原理是:炉温调节器的输出信号决定燃料流量和空气流量调节器设定值,同时,在燃料控制回路与空气控制回路都设有低选和高选的比较选择器。比较的参考信号是由实测的燃料流量或空气流量换算成相应对方的允许流量,与温度调节器输出的要求流量进行比较后组成交叉限幅选择性控制。

燃料流量的控制:炉温调节器的输入信号与实测的空气流量经计算得出相应理想的最优燃烧燃料换算流量,再加上一个正值偏移余量相比较,比较低的一方信号选择为燃料流量调节器的给定值。这个正值偏移余量就是不出现缺氧燃烧燃料流量的上限值。

空气流量的控制:炉温调节器的输出信号与实测燃料流量换算成相应要求的空气流量,再加上一个负值偏移余量相比较,比较高的一方信号与空气过剩率、理论空气量程校正系数相乘作为空气流量设定值。这个负值偏移余量就是不出现缺氧燃烧空气流量的下限值。

由于交叉上、下限幅的作用相互牵制,保证了系统始终处于合理配比状态下。当串级系统主调节器的输出增大,即要提升输入的燃料和空气时,首先增大空气流量,接着增加燃料流量。相反,当主调节器的输出减小,即要降低输入的燃料和空气时,先减少燃料流量,再减少空气流量。当负荷急剧增减,燃料急剧增减过渡状态期间,该控制方式可有效的防空气不足而产生的黑烟,同时也可避免由于燃料流量脉动导致的燃料流量控制系统和空气流量控制系统的摆动现象。

4.2 双交叉限幅控制系统设计

燃烧控制是环形炉控制系统中最重要的控制单元之一,系统采用了双交叉限幅控制来控制燃烧空燃比。一般的比例控制虽然保证了正常情况下燃烧控制的空燃比,但是当系统发生扰动时,由于空气的调节总是滞后于燃料的调节,所以在调节过程中空燃比可能过高或过低,无法满足过程要求。双交叉限幅控制克服了比例调节方式的局限性,使燃烧过程中空燃比保持在了最佳燃烧区内。双交叉限幅控制示意图如 4.4 所示。

它实际上是一个具有两个并联回路的串级调节系统,炉温作为主回路,天然气和助燃空气流量回路并联作为副回路。PID 温度调节器的温度设定值 SP 由人工在计算机上手动设定(或二级下发)。在稳态状态下,天然气和空气侧流量调节器的设定值均由 PID 温度调节器的输出 A 决定,属于一般的串级调节系统。

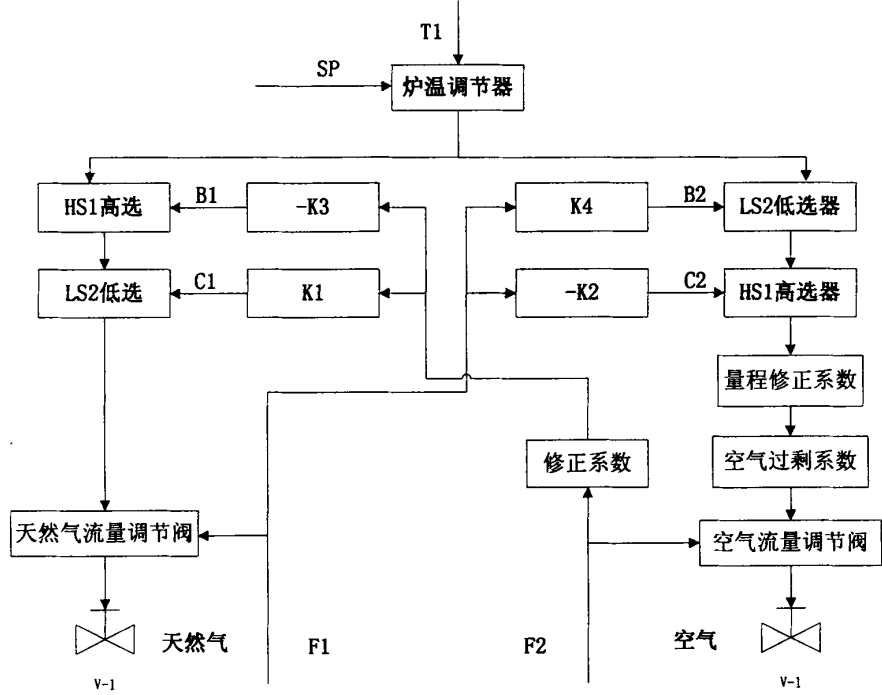


图4.4 交叉限幅控制示意图
Fig. 4.4 Dual cross limiting control system schematic block diagram

当炉子升温（PV<SP）时，PID 调节器的输出 A 大幅度增加，对于天然气回路，在高选器中因 A>B1 输出为 A，在低选器中 A 与 C1 进行比较，A>C1，输出为 C1，即 C1 作为天然气调节器（FIC）的设定值。对于空气回路，在低选器中因为 A 的增加使得 A 大于 B2，输出为 B2，而 B2>C2 所以在高选器中输出 B2，即 B2 作为空气回路的设定值。可以看出升温时，天然气和空气同时取上限限幅值。随着温度的升高，A 值将逐渐变小；当温度上升到 PV=SP 时，双交叉限幅过程结束，系统进入平衡状态。炉子降温（PV>SP）时，天然气和空气则同时取流量的下限限幅值。总之，双交叉限幅不仅在稳态时保持了合适的空燃比，在动态时也能维持适合的空燃比。

系统一方面通过判断烧嘴负荷大小来补偿一定的空燃比，另一方面通过烟道 O2 控制器输出进行补偿，补偿后的空燃比（μ）的计算公式如下：

$$\mu = \mu_0 + \Delta\mu_O + \Delta\mu_F$$

- μ：补偿后的空燃比；
- μ₀：初始空燃比设定值；
- Δμ_F：天然气流量补偿值；

$$\Delta\mu_O = \frac{MV - 50}{100} \times K ;$$

$\Delta\mu O$: O_2 控制器补偿值;

MV: O_2 控制器输出值 (0-100.0%);

K: 系数

同时, 为了避免空燃比过量, $\Delta\mu F + \Delta\mu O$ 需满足以下要求:

$$\text{低限} \leq \Delta\mu F + \Delta\mu O \leq \text{高限}$$

综上, 可以得出燃烧控制的实际空燃比为:

$$\text{Air Ratio} = A0 \times \mu \quad A0: \text{理论空燃比}$$

由于内罩采用砂封及内罩压力大于炉膛压力的缘故, 保护气体会不可避免向炉膛内泄漏, 因此系统采用了保护气体泄漏补偿。另一方面, 由于助燃空气的最高设计温度是 450°C , 但总管路很长, 势必会引起温度的下降, 所以系统在空燃比补偿的基础上又采用了天然气总管的流量、温度和压力补偿。燃烧控制优化设计如下图 4.5 所示。

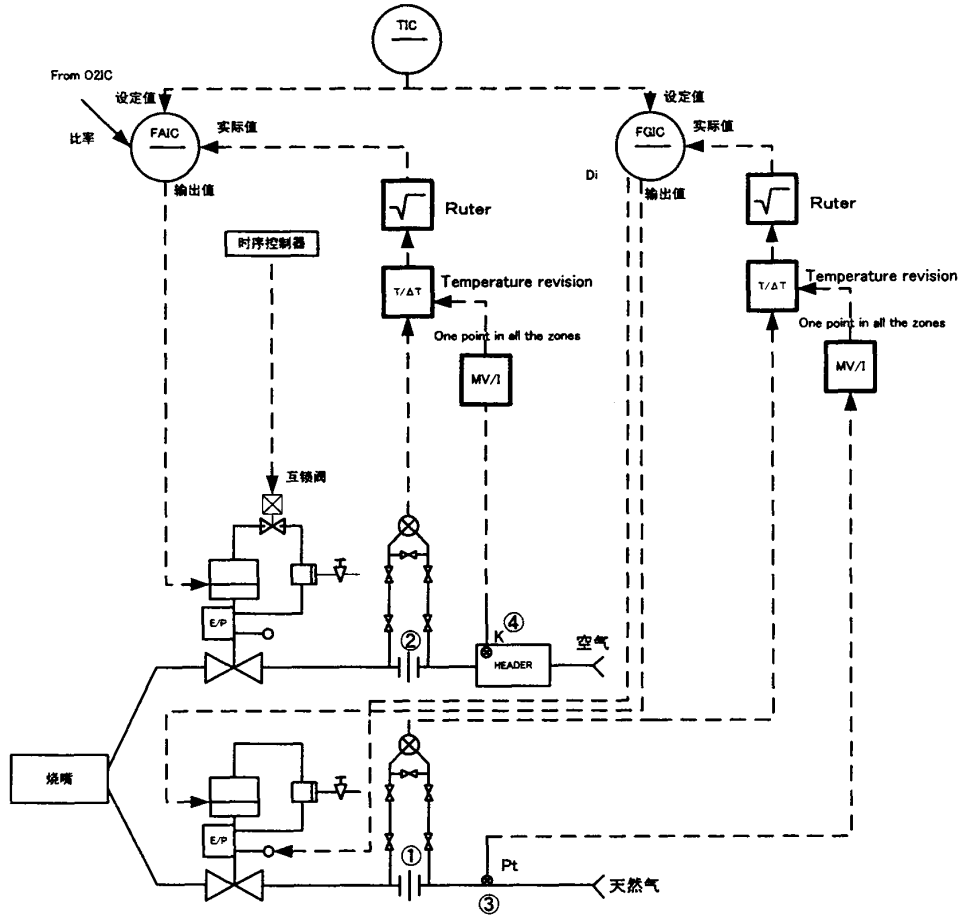


图 4.5 燃烧控制优化设计图
Fig. 4.5 Combustion control to optimize the design

燃烧控制画面如 4.6 图所示。

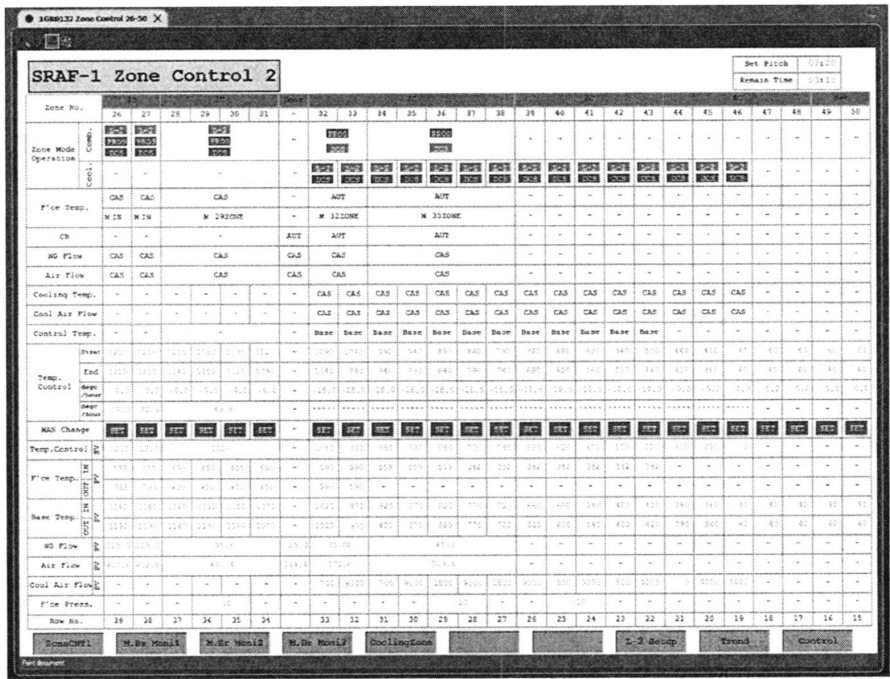


图 4.6 燃烧控制画面
Fig. 4.6 Combustion control screen

从控制精度和节能两个方面的要求来考虑合理的热工制度及控制方案。采用双交叉限幅燃烧控制设计,经仿真试验和初步投入运行,结果表明,这种控制策略能大幅度地改变控制性能。

双交叉限幅控制系统是在单交叉限幅设置冒黑烟界限限制的基础上增加了空气过剩界限限制的一种控制系统。双交叉限幅可消除单交叉限幅空气过剩和减轻燃料流量系统互相影响引起的振荡。由上述分析可知,当炉内检测点的温度改变时,温度调节器 TC 的输出会发生相应变化,而空气和燃料的流量设定值均不直接跟踪 TC 的改变。空气和燃料的流量实际值交替地跟踪对方的流量实际值的变化,变化速度取决于双边系统的惯性。同无限幅的系统相比,本系统是将 TC 的输出对下面直接大幅度设定改成由对象时间常数规定的小幅度的设定,是等待对方流量变化后再进行己方控制的过程,从而使动态响应时间变长,超调量相应地减小。本系统基本上杜绝了冒黑烟和过度排热的情况,实现了空燃比较稳定的炉内温度稳定控制。

本系统的优点是,在降负荷时,空气过剩系数不超过上限值;在升负荷时,空气过剩系数不低于防止冒黑烟的下限值。这样就确保了燃烧过程中都在最佳燃烧区内进行,达到节能、完全燃烧、防止污染和提高产品质量。

4.3 仿真结果分析

4.3.1 仿真模型的建立

为了对本设计中的双交叉限幅燃烧控制系统进行分析,在设计中用 Simulink 对控制系统调试仿真,使控制效果达到最佳,最终改进环形炉燃烧控制的性能。

由于环形炉温度控制有大滞后、大惯性的特点,而其也可以看成单容对象,因此温度的传递函数可以设定为:

$$G(S) = \frac{Ke^{-\tau s}}{TS+1} \quad (4-1)$$

燃料流量和空气流量反应较快,又是单容对象,因此它们都可以看成一阶惯性环节,其传递函数如下:

燃料流量对象传递函数:

$$G(S) = \frac{K}{TS+1} \quad (4-2)$$

空气流量对象传递函数:

$$G(S) = \frac{K}{TS+1} \quad (4-3)$$

由于温度对象的传递函数具有滞后和非线性,则温度 PID 中要有比例、积分和微分环节。微分的作用是克服温度的滞后,积分的目的是消除静态误差和稳定温度控制对象。因此温度 PID 的传递函数为:

$$G(S) = Kp + \frac{K_i}{S} + \frac{K_d S}{TS+1} \quad (4-4)$$

流量是个脉动信号,因此不能在控制器中加入微分作用,否则系统对输入太敏感,容易引起系统严重不稳定。同时为了控制器可以快速对偏差做出反应,燃料流量和空气流量 PID 设定为纯比例,即

$$G(S) = Kp \quad (4-5)$$

根据执行器的原理可知,如果系统接受一阶阶跃信号,执行器得由一个开度变化到另一个开度,因此这有一个过程,则中间就有一个过渡,但时间较短。因此执行器的传递函数可以近似为一阶惯性环节:

$$G(S) = \frac{K}{TS+1} \quad (4-6)$$

由于检测和变送器的输入信号和输出信号可以看成已线性化,因此其传递函数可以看成纯比例,即:

$$G(S) = Kp \quad (4-7)$$

4.3.2 双交叉限幅控制系统的仿真

为了更直观的观测改进设计后的燃烧控制效果，对改进后的系统进行仿真，横坐标为温度的将量，纵坐标为空燃比。

(1) 下面是双交叉限幅控制系统温度降量时空燃比的仿真图如 4.7 所示。

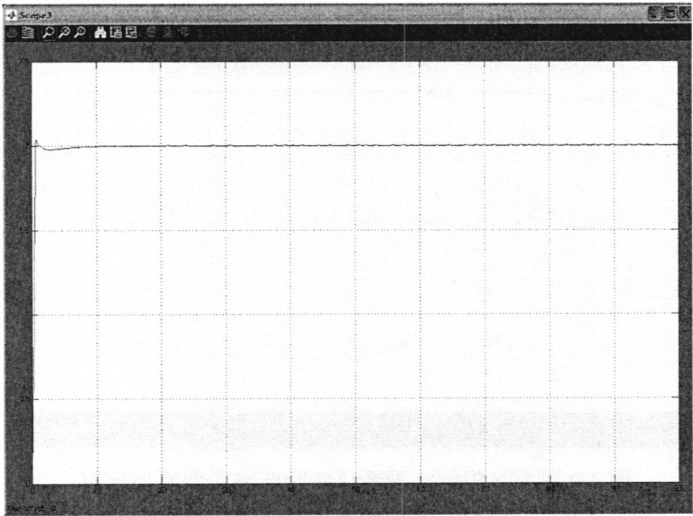


图 4.7 双交叉限幅控制系统降量时空燃比仿真图
Fig. 4.7 Dual cross limiting control system for lowering the amount of air-fuel ratio simulation

从图中可以看出，双交叉限幅控制系统在温度降量时，空气过剩系数一直处于最佳燃烧区。这样，既不会造成冒黑烟，浪费能量，也不会造成产品氧化，质量下降。

(2) 下面是双交叉限幅控制系统温度提量时的空燃比仿真如图 4.8 所示：

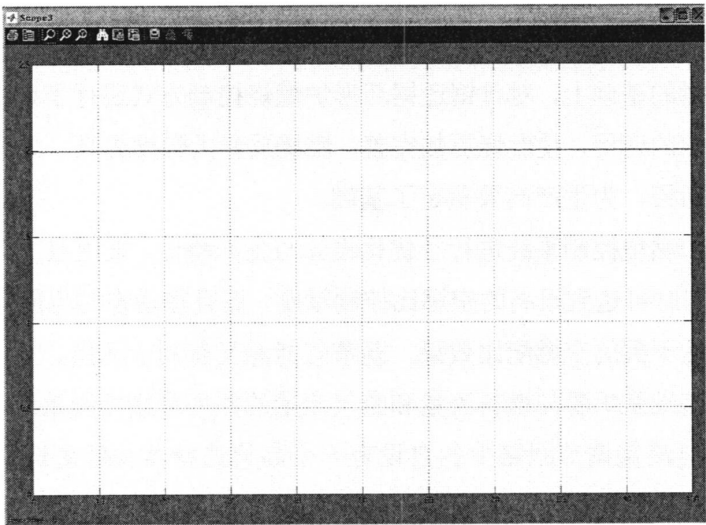


图 4.8 双交叉限幅控制系统提量时空燃比仿真图
Fig. 4.8 Dual cross limiting air-fuel ratio control system to mention the amount of a simulation

从图中可以知道，温度提量和温度降量时一样，空气过剩系数一直在最佳燃烧区。这就是说，不管温度升降，空气过剩系数就在最佳燃烧区。

(3) 下面是双交叉限幅控制系统的阶跃响应曲线仿真图 4.9:

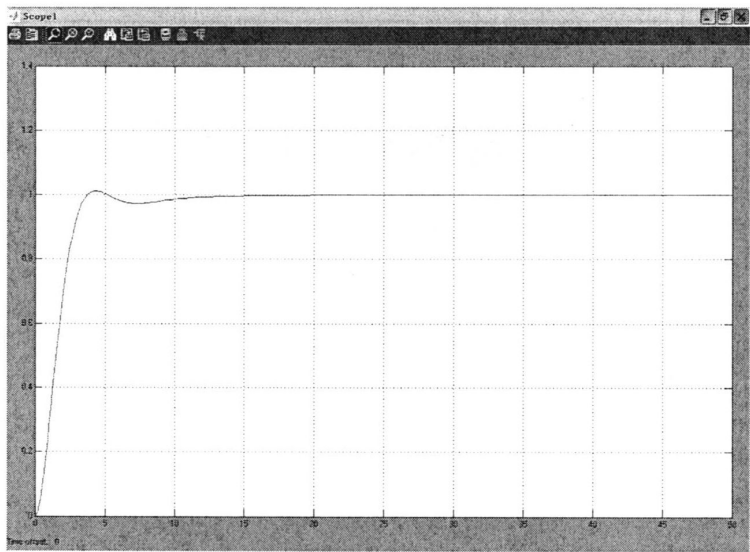


图 4.9 双交叉限幅控制系统的阶跃响应曲线仿真图
Fig. 4.9 Dual cross limiting step response curve of the control system simulation diagram

本图是温度的阶跃响应曲线，由于本图设定值是 1，而实际温度在 1200 左右，则其缩小了 1200 倍。

通过以上双交叉限幅控制系统的仿真图谱我们可以看出，采用了双交叉限幅控制解决了原设计控制精度低，响应缓慢的不足，很好的满足了现场工艺需求。

4.4 本章小结

本章在第 3 章的基础上，对首钢迁钢环形炉燃烧控制方式进行了设计，通过双交叉限幅控制在实践中的应用，使燃烧更加完善，燃烧质量大幅度提高，大大减少了生产成本，减少了废弃污染，为生产高效奠定了基础。

通过对环形炉燃烧控制系统进行了优化设计与生产验证，采用双交叉限幅燃烧控制方案，不仅在稳态时可达到很高的空燃比控制精度，而且在动态时也能够解决传统串级比值燃烧控制所达不到的空燃配比效果，既节省能源又有利于环保。

系统构成的基础是炉温与燃料流量和空气流量的并列串级控制系统，然后在空气流量调节回路和燃料流量调节回路中各自设有一个高值选择器和低值选择器及一些运算单元。在燃料流量调节回路中，炉温调节器输出信号，与根据实际空气流量算出的燃料流量分别减去和加上一个偏差系数得到的信号相比较，由高低值选择器来选定，并以此作为燃料流量调节器的设定值。在空气流量调节回路中，炉温调节器的输出信号，与实

际燃料流量分别加上和减去一个偏差信号而得出的信号相比较，由高低值选择器选定，再乘以流量测定范围补正系数和空气过剩系数，又经低值限幅后作为空气流量调节器的设定值。

该系统的特点是系统处于稳定状态时，空气过剩系数等于设定值在过渡阶段，负荷减少时，空气过剩系数不超过设定的上限值，负荷急剧增加时，空气过剩系数不低于防止冒黑烟的下限值。从而确保了燃烧过程都能在最佳燃烧区内进行，达到了节能、完全燃烧、防止污染的目的。常规控制一般用烟气含氧量调节助燃风量，但它有些缺点：

(1)于滞后控制，反应慢；

(2)氧化锆故障率高，控制系统难以长期可靠运行；

(3)测点不当，氧量值不准，控制精度低。本系统采用双交叉限幅控制，严格控制空燃比，实现优化燃烧控制，克服了上述缺点，特别值得一提的是关于氧量修正问题的解决。理想状态下的环形炉燃烧排烟中的含氧量应随环形炉热负荷的变化而变化，实际中由于环形炉本体的漏风及空气、燃料油检测的误差偏移了理想的比例，需要加以修正。由于采用了双交叉限幅控制，其误差和偏移在动态中不断地得到修正，使得控制系统在动态中趋于合理。另外，该系统较好地解决了自动升降负荷的问题，可达到静态寻优、动态限幅跟踪变动，使环形炉自始至终在合理高效的区间运行。

第5章 总结与展望

5.1 研究工作总结

本文以首钢迁钢冷轧作业部环形炉为研究背景,对环形炉的工艺原理、主体设备结构特点等进行了简单描述,并介绍了其 DCS 控制系统的系统构成、主要功能及特点。集散控制系统的主要特性是它的集中管理和分散控制,而且,随着计算机技术的发展规律,网络技术已经使集散控制系统不仅主要用于分散控制,而且向着集成管理的发展方向发展规律,系统的开放不仅使不同制造商的集散控制系统产品可以互相连接,而且使得它们可以方便地板进行数据交换。日本横河(YOKOGAWA)公司生产的 CENTUM VP 系统是一套成熟的 DCS 控制系统,和世界上其它 DCS 控制系统相比较,它尤其在可靠性方面更突出,其编程组态和操作都比较简单,无需太多的计算机知识。在对环形炉及其控制系统的了解上,对环形炉的燃烧控制、炉温控制、炉压控制、保护气体流量控制、旋转控制等控制功能进行了详细的分析,实际也证明该控制系统满足了环形炉的各种控制要求,体现出了良好的效果。

燃烧控制是环形炉控制系统中最重要的控制单元之一,环形炉燃烧控制目前广泛采用的是双交叉限幅控制方式。本文研究了双交叉限幅控制原理,并运用其对环形炉的燃烧控制进行了深入分析及优化设计。实践证明,DCS 系统是很容易实现双交叉限幅这样复杂的控制方案的,且功能齐全、完善、运行可靠、维护量小,体现了 DCS 高级控制功能。双交叉限幅控制实质是一种选择性调节,把最佳燃烧工艺过程要求的限制条件组成逻辑关系,用选择器实现这种逻辑规律,从而形成了新的组合调节方法,特别是计算机在工控领域中的广泛使用更促使这类控制系统不断发展。一般的比例控制虽然保证了正常情况下燃烧控制的空燃比,但是当系统发生扰动时,由于空气的调节总是滞后于燃料的调节,所以在调节过程中空燃比可能过高或过低,无法满足过程要求。双交叉限幅控制克服了比例调节方式的局限性,能保证在负荷波动或稳定时,燃料与空气能合理的燃烧,炉内空气过剩率在最佳限制区域内变化。同时将确保燃烧消耗最佳化有更好选择,通过降低爆炸的风险使运行条件更安全,燃烧特性调整更快,诊断与检修效率更高,过程可视性更佳。

5.2 工作展望

20 世纪 90 年代走向实用化的现场总线控制系统(FCS)经历了二十多年的发展,作为目前自动化技术的一个热点正以迅猛的势头快速发展。

现场总线控制系统(FCS)是在DCS/PLC基础上发展起来的新技术。现场总线是“从控制室连接到现场设备的双向串行数字通信总线”。现场总线的“现场”更多的是指现场设备,而不是指位置。FCS主要特点是采用总线标准,一种类型的总线,只要其总线协议一经确定,相关的关键技术与有关的设备也就被确定。开放的现场总线控制系统具有高度的互操作性。FCS既是一个开放的通信网络,又是一个全分布式的控制系统。

DCS当前正面临着FCS技术的挑战。尽管现场总线的国际标准不理想,但是作为一种技术趋势已经是不可阻挡的了。目前各家公司都采用将自己的DCS和各种现场总线协议通过接口设备实现连接的过渡方式,在不久的将来,环形炉DCS控制系统也可能实现到FCS控制系统的升级,以使环形炉的各种控制更加优化。

随着现代工业技术的发展,被控对象和生产过程日益复杂,系统的非线性、时滞性和环境的不稳定性导致难以建立精确的数学模型,这使传统控制技术受到挑战,但却为模糊控制技术的发展提供了广阔空间。模糊控制技术的控制算法由控制规则和推理机构组成,不需控制对象的数学模型,描述控制人员的操作经验,达到较好控制效果。目前,国内外很多科研工作者在工作中采用神经网络技术、模糊控制技术等先进控制技术,并取得了比较满意的结果,这也将成为未来的发展趋势。

在模糊控制的发展初期,大多数学者的主要精力放在模糊控制的应用研究上,在很多领域取得辉煌的成果。但与应用的成果相比,模糊控制的系统分析和理论研究却没有显著进展,以至于西方的一些学者对模糊控制的理论依据和有效性产生疑虑。目前模糊控制的理论研究很热,并已取得了许多显著进展,模糊控制在理论上和应用方面都取得了巨大成就。虽然模糊控制技术发展历史只有三十年,本身还有待于完善,理论与实际的结合也有待于进一步探索,但是其发展前景十分诱人。

目前在国际大趋势的推动下,模糊控制已开始向多元化和交叉学科方向发展。国外专家预言:模糊技术、神经网络技术、混沌理论作为人工智能的三大支柱,将是下一代工业自动化的基础。随着模糊控制理论研究的不断完善和应用的广泛深入、高性能模糊控制器的研究开发,模糊控制技术将会更限度地发挥其优势,为工业过程控制、运动控制和其它领域的控制开辟新的应用前景。

作为智能控制的一种新方法,模糊控制与智能领域的一些其他新技术相结合,向着更高层次的应用发展也是目前研究热点之一。环形炉燃烧控制系统在节能的问题上还有很大的改进空间,成本控制也将成为产品市场战争的主流,通过对系统的不断优化,最终达到节能减排的目的。

参考文献

1. 王勇. Centum-CS 系统在石化生产装置上的应用[J], 石油化工自动化, 2006, 1: 66-67.
2. 朱忠尧, 张小东. Centum-CS 在 800kt/a 催化裂化装置中的应用[J], 石油化工自动化, 2003, 5:59-61.
3. 荆胜南, 李东文. Centum CS3000 系统在 PVC 聚合装置上的应用[J], 石油化工自动化, 2003, 4: 52-55.
4. 张志忠. 利用 CENTUM 顺控功能实现大机组联锁控制[J], 工业仪表与自动化装置, 1994, 05: 25-28.
5. 邹积明. CENTUM 集散系统应用的几点体会[J], 石化技术与应用, 1990, 2:12-15.
6. 杨仲平. CS3000 系统在四川维尼纶厂的应用[J], 石油化工自动化, 2002, 6:30-33.
7. 张志忠. 利用 CENTUM 顺控功能实现大机组联锁控制[J], 工业仪表与自动化装置, 1994, 11:51-55.
8. 马宏远.高炉分布式计算机系统[J], 冶金自动化, 1986, 6:34-38.
9. 许峰, 尹峰, 耿红敏. CENTUM-CS3000 集散控制系统在大型天然气处理装置中的应用[J], 河南化工, 2004, 8: 51-55.
10. 王希军. 选择性串级控制在 CS3000 系统中的实现[J], 石油化工自动化, 2004, 2:45-48.
11. 童建军, 钟耀球. CENTUM CS1000 在贵冶炼铜倾动炉的应用[J], 南方金属, 2004, 6:11-18.
12. 洪宝庆, 吴斌. Centum-CS 在 PVA 生产中的应用[J], 石油化工自动化, 2006, 5: 65-68.
13. 杜中东. CS3000 组态软件使用技巧[J], 化工自动化及仪表, 2003, 2:51-57.
14. 梁根东, 杜中东, 戴金祥. CS3000 操作站安全性的提高方法[J], 石油化工自动化, 2004, 3:66-70.
15. Yokogawa Electric Corporation. CENTUM CS3000 Integrated Production Control System Overviews [M]. 9nd Edition Yokogawa Electric Corporation. NOV. 2005:1-1~9-10.
16. Yokogawa Electric Corporation. CENTUM CS3000 Installation Manual [M] 12nd Edition Yokogawa Electric Corporation.DEc. 2005:4-2~4-4~4-5~4-61.

17. 梁伟栋, 詹康生, 肖行星. 基于 DCS 原理的供热自动控制系统[J], 自动化与仪器仪表, 2006, 5:70-73.
18. 温菊芳. 韶关发电厂 10 机组 DCS 调试期间出现的问题及改进措施[J], 自动化与仪器仪表, 2005, 6:101-105.
19. 干建民, 姜国焕, 郝成. 冶金峰炉烧结温度的仿真与控制[J], 冶金自动化, 2004, 5:120-125.
20. 赵瑾. CENTUM CS1000 集散控制系统[M], 北京: 化学工业出版社, 2001.
21. 韩启钢, 吴锡祺. 计算机模糊控制技术与仪表装置[M], 中国计量工业出版社, 1999.
22. 梁莉, 李强. 工业计算机网络在控制的系统中应用[J], 计算机工程, 2002, 10:117-122.
23. 汤技杨. 基于现场总线技术的先进控制系统[M], 制造业自动化, 2000.
24. 黄耀军, 周云, 严国平. VHDL 及其在温控系统中的应用[J], 电子与自动化, 1999, 3:6-11.
25. L Y Zu, T JW illiams. Energy saving and productivity increase with computers-a case study of the steel ingot handling process[J], Computers in Industry, 1983, 4: 1-18.
26. J FMacGregor, TKourti andNomikosPAnalysis. monitoring and faultdiagnosis of industrial processes using multivariate statistical projectionmethods[C], Proceedings of 13th IFACWorld Con- gress, San Francisco, USA, 1996.
27. Gyung-Min Choi, Masashi Katsuki. Advanced low NOx combustion using highly preheated air[J], Energy Conversion and Management, 2001, 2: 639-652.
28. 沈俊. 加热炉系统的模糊建模与控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
29. Fred Shenvar. Walking beam furnace supervisory control atInland s 80-in hot strip mill[J]. Iron and Steel Engineer, 1994(7):25~34.
30. Timothy A.Veslocki. Development and verification of a slabreheating furnace mathematical model[J]. Iron and SteelEngineer, 1982(4):46~51.
31. 陈南岳. 现代加热炉过程控制技术及其数学模型[J], 冶金自动化, 1985, 3:12-22.
32. 杨永耀, 吕勇哉. 钢坯加热炉计算机控制动态数学模型的开发[J], 自动化学报, 1987, 13: 257-264.
33. 毕春长, 李柠, 黄道. 蓄热式加热炉钢温预报与炉温优化设定研究[J], 自动化学报, 2004, 30: 476-480.
34. 许东, 吴铮. 基于 MATLAB 6.x 的系统分析与设计—神经网络[M], 西安: 西安电

子科技大学出版社, 2002.

35. 张世龙, 唐雅娜. 模拟退火算法的 BP 算法研究[J], 现代计算机, 2007, 235: 30-32.

36. 曹军, 苏建民, 孙丽平, 胡昆仑. 遗传算法与模拟退火算法在神经网络优化中的性能分析[J], 东北林业大学学报, 2002, 30:26-28.

37. Alsulranny, Yas Abbas, Aqe, Musbah. Pattern Recdcognition Using Multilayer Neural-Generic Algorithm [J], Neurocomputing, 2003, 51: 237-247.

38. Goldberg D E. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning. [M]. MA: Addi-son-Wesley, 1989, 26-56.

39. 李军红, 周天瑞, 郑荣. 模拟退火改进遗传算法及其应用[J], 南昌大学学报(理科版), 2005, 29:387-340.

40. Martin T.Hagan, Howard B.Demuth.Neural Network Design[M], China Machine Press, 2002.

41. Paul K.H.Phua, Daohua Ming.Parallel Nonlinear Optimization Techniques for Training Neural Networks[J]. IEEE Transac-tions on Neural Networks, 2003, 14(6):1460-1467.

42. 田旭光, 宋彤, 刘宇新. 结合遗传算法优化 BP 神经网络的结构和参数[J], 计算机应用软件, 2004, 21(6):69-71.

43. TA Veslock.i Application of a Dynamic Mathematical Model of a Slab Reheating Furnace[C], Proceedings of 3rd Process Technology Conference, 1982.

44. 柴天佑, 王中杰, 张莉. 加热炉的炉温优化设定模型[J], 自动化学报, 2000, 6: 537-541.

45. 王红瑞, 张棣. 邯钢薄板坯连铸连轧衔接区板坯温度模型的研究[J], 冶金能源, 2001, 20:13-14.

46. 刘晓志, 赵忠磊, 秦树凯. 蓄热式加热炉钢温智能预报与炉温优化设定[C], 中国控制与决策学术年会论文集, 沈阳, 2007.

47. 乌江津. 加热炉优化控制方法与仿真系统研究[D], 大连: 大连理工大学, 2006.

48. 王彦龙. 基于复合建模技术的加热炉建模方法研究[D], 沈阳: 东北大学, 2008.

致谢

本论文的研究工作一直得到了钱老师的悉心指导。钱老师不仅为本论文的研究指出了方向，而且提出了许多方向性的指导意见，使我受益匪浅。在日常的学习和生活中，钱老师也给予了我很多宝贵意见和帮助。导师深厚的基本功、严谨求实的治学态度、孜孜不倦的工作精神及博大精深的知识体系使我受益终身；导师对新知识的浓厚兴趣，敏锐把握，更给予我极大的启迪，是我在今后的学习和工作中的榜样。我不仅学到了宽广的专业知识，打下了扎实的基础，而且也学会了很多为人处世的道理。在论文完成之际，谨向尊敬的导师钱晓龙教授致以深深的谢意和最诚挚的祝福。

然后，还要感谢颜廷洲、杨佳等同学，在本文的撰写过程中给予我很大帮助和支持，由衷地感谢他们。

同时感谢 3 年时间攻读东北大学工程硕士期间，各位教授、导师的精心培育和爱护，感谢首钢迁钢公司领导为我提供的这次学习深造机会。在今后的工作中，我将秉承“自强不息，知行合一”的东大校训，以更好的工作成绩回报母校，回报首钢。