

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

迁钢 210t 转炉自动化炼钢控制系统研究与设计

作 者 姓 名： 于新乐

指 导 教 师： 李鸿儒 教授 东北大学信息科学与工程学院

辛鹏飞 高级工程师 首钢迁安钢铁有限责任公司

申请学位级别： 硕士 学 科 类 别： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

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

学位授予日期： 2011 年 01 月 答辩委员会主席： 王建辉

评 阅 人： 刘永军 袁平

东 北 大 学

2011 年 11 月

A Thesis in Control Engineering



Design and Research of Automatic Steel-making Control System For QianAn 210t Converter

By Yu Xinle

Supervisor: Professor Li Hongru

Senior Engineer Xin Pengfei

Northeastern University

November 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： 王新宇

日 期： 2011.12.24

学位论文版权使用授权书

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

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☒ 一年 ☐ 一年半 ☐ 两年 ☐

学位论文作者签名： 王新宇

签字日期： 2011.12.24

导师签名： 李 强

签字日期： 2011.12.24

迁钢 210t 转炉自动化炼钢控制系统研究与设计

摘 要

转炉炼钢过程自动化控制，目的是为了将转炉冶炼这一高效率的炼钢方法潜力发挥到极致，减轻操作者的劳动强度、降低生产成本，减少冶炼过程中的人为干预，大幅度提高钢水质量，从而为生产高附加值产品打下坚实基础。目前计算机科学、电子技术、通讯总线技术、控制理论、人工智能技术等冶金行业的广泛应用，让数据采集精度和实时性普遍提高，使得把转炉炼钢的操作任务全部交由自动化控制系统独立完成成为现实。

本文以河北首钢迁安钢铁有限责任公司 210T 转炉自动化炼钢控制系统为背景，在查阅了大量国内外相关文献的基础上，综述了自动化炼钢控制系统的发展历程，对自动化炼钢的动态静态控制进行了深入研究，主要完成了一下几方面内容：

(1) 研究设计 210T 转炉自动化炼钢控制系统，完成了上位工控机，下位机 PLC 和光纤以太网维架构的控制系统设计，在分析研究炼钢自动化系统详细功能的前提下进行了自动化炼钢系统总体设计，确定了系统开发使用的软硬件工具，完成了基础控制级和过程控制级的设计。

(2) 针对副枪及烟气分析系统在冶炼过程中的应用将相关数据进行计算机提取分析处理、将采用数据指导冶炼生产提高冶炼水平及精度。深入研究副枪及烟气分析系统，针对副枪及烟气系统的硬件设备及自动化控制的主要逻辑、吹炼模式、参与成份的控制方面进行设计。

(3) 结合迁钢炼钢生产工艺建立吹炼静态控制模型、动态控制模型，分析研究了生产中涉及到自动化炼钢的相关内容和各种可能遇到的问题。确定了自动化炼钢模型原始数据及工艺制度，建立了模型关键的造渣制度、物料平衡、热平衡制度。建立了转炉终点控制数学模型，将转炉终点控制模型分为前期的静态控制建模、后期的终点温度动态控制模型，分别建立了相应的模型，完成了模型的实现和系统性能测试。

迁钢的副枪和烟气分析自动炼钢控制系统，目前已独立转化为首钢自有知识产权的国产化项目，在节约大量资金的同时它的成功应用标志着迁钢炼钢水平有了质的飞跃。

关键词：自动化炼钢；PID；静态模型；动态模型；终点控制

Design and Research of Automatic Steel-making Control System For QianAn 210 t Converter

Abstract

BOF steelmaking process automation control is designed to be efficient smelting of the steel-making methods to maximize the potential to reduce the operator's labor intensity, lower production costs, refining process to reduce human intervention significantly improve the quality of steel production of high value-added products and lay a solid foundation. Between the current computer science, electronic technology, communication bus technology, control theory, artificial intelligence technology, widely used in metallurgical industry, for precision data acquisition, real-time to improve, making it the task of all steelmaking operations by automatic control system independently become a reality. Will be able to make our steelmaking process control technology has reached international advanced level.

In this paper, Shougang Hebei Iron and Steel Co. Qian'an 210 t converter steel-making automation a key control system for the background hit rate for improved refining end, the access to a large number of relevant literature, based on an overview of the development of automated control systems steel course, the dynamics of automated static control of steel-depth research, mainly done about several aspects:

(1) Design and research 210T converter steelmaking automation control system, Controller PLC and fiber Ethernet-dimensional structure of the control system design, Further detailed analysis of steel-making automation system functions under the premise of total automation to the design of steel-making system. Overview of the development process of steelmaking automation.

(2) Detailed analysis of sub-lance and gas equipment and systems for its control and application of the smelting process to extract the relevant data for computer analysis and processing and critical data into the control system to guide the level of refining and smelting to improve accuracy. Study of sub-lance and gas analysis system, the sub-lance and the gas system for the vice hardware equipment and automatic control of the main logic, blowing mode, the control elements involved in the design and application of sound.

(3) Combined steel production process control of blowing the static model, dynamic model for in-depth study and control the production of steel involves the automation of

content-related assistance and possible problems were analyzed. Automation and process steel-making raw data model system to determine, especially for critical slagging system model, material balance, heat balance to determine, at the same time control the converter end mathematical modeling.

Keywords: BOF steelmaking process automation control; PID; the dynamic model ; the static model ;Endpoint prediction

目 录

独创性声明 I

摘 要..... II

ABSTRACT..... V

第 1 章 绪 论 1

1.1 课题研究的背景及意义..... 1

1.2 转炉自动化炼钢控制系统设计要点 2

1.3 计算机控制系统及数据库选择..... 4

1.4 自动化控制技术发展历史及其在转炉控制模型中的应用 4

1.5 本文的组织形式..... 5

第 2 章 转炉自动化炼钢基本原理 7

2.1 转炉自动化炼钢系统基本工作原理..... 7

2.2 转炉自动化炼钢静态模型和动态模型控制原理..... 9

2.3 转炉自动化炼钢氧枪控制系统..... 11

2.3.1 氧枪循环水系统..... 12

2.3.2 转炉氧枪氧、氮系统..... 13

2.3.3 氧枪换枪横移系统..... 13

2.3.4 氧枪位置控制系统..... 13

2.3.5 氧枪安全连锁系统..... 16

2.3.6 转炉氧枪系统的控制方式..... 17

2.4 本章小结..... 18

第 3 章 转炉自动化炼钢控制系统总体设计 19

3.1 转炉自动化控制系统组成..... 19

3.2 基础级控制系统..... 20

3.2.1 控制范围..... 20

3.2.2 控制功能..... 21

3.3 过程控制系统..... 22

3.3.1 控制范围..... 22

3.3.2 控制功能..... 22

3.4 数据采集系统总体设计 24

3.5 系统硬件总体设计..... 25

3.6 系统 HMI 软件设计 27

 3.6.1 Intouch10.0 介绍..... 27

 3.6.2 HMI 功能简介 28

3.7 系统安全及网络安全设计 29

3.8 本章小结..... 29

第 4 章 转炉烟气分析与副枪自动化控制系统.....31

4.1 烟气分析和副枪的控制原理..... 31

 4.1.1 烟气分析原理..... 31

 4.1.2 副枪控制原理与结构..... 32

 4.1.3 对终点碳、温度、磷、硫及碳氧积浓度的控制分析 35

 4.1.4 对原料消耗和设备维护的控制..... 37

 4.1.5 烟气、副枪自动化炼钢系统吹炼模式设计..... 37

4.2 副枪自动控制装置、逻辑控制及操作..... 40

 4.2.1 弹仓控制装置..... 40

 4.2.2 副枪升降装置..... 41

 4.2.3 副枪旋转装置..... 41

 4.2.4 副枪数据分析系统..... 41

 4.2.5 转炉副枪基础自动化的控制主要逻辑..... 42

 4.2.6 转炉副枪操作控制..... 43

4.3 设计完善副枪、烟气自动化炼钢模型..... 44

4.4 本章小结..... 48

第 5 章 转炉自动化炼钢静态、动态模型的建立及性能测试.....49

5.1 自动化炼钢模型原始数据及工艺制度的确定..... 49

 5.1.1 造渣制度的确定 49

 5.1.2 物料平衡的确定 51

 5.1.3 热平衡的确定 52

5.2 转炉终点控制数学模型..... 53

 5.2.1 静态控制模型..... 54

 5.2.2 动态控制模型..... 56

5.3 静态、动态模型系统性能测试..... 58

5.4 本章小结..... 60

第 6 章 结论与展望61

参考文献63

致 谢.....67

第1章 绪论

1.1 课题研究的背景及意义

近年来钢铁行业突飞猛进发展,国际钢材市场对国内市场冲击很大,为了适应未来发展和世界一流技术接轨,自动化转炉炼钢已成为目前世界上最主要的炼钢方法,转炉炼钢过程非常复杂,终点成份和温度的控制范围窄,使用的原材料和生产的品种多、数量大,冶炼过程温度高、时间短、可变因素多、变化范围大^[1]。因此,凭经验和直接观察很难适应现代转炉炼钢生产的需要。为了提高钢的质量,进一步提高产量、降低原料消耗,降低设备更换周期、提高炉龄、改善经营管理,欧美一些钢铁公司首先在世界上成功开发了转炉静态控制模型,并应用于实际生产,从此开始了转炉炼钢的自动控制时代^[2]。经地近几十年的发展,国外静态数模、动态数模已到了比较成熟阶段,同时也采用了溅渣护炉技术在提高炉龄和转炉利用系数,降低成本方面取得明显进步,而国内,炼钢的静态模型、动态模型的还处于不断提高完善阶段^[3]。正在和世界先进炼钢水平一步步靠近,可见建立精度较高的动态、静态数学模型是极其重要的,这将有利于进一步提高转炉炼钢过程的自动化控制水平。

选择此课题的意义是在此炼钢技术迅猛发展时代的大背景下实现首钢迁钢公司在210吨顶底复吹转炉的自动化炼钢控制系统设计和实现上达到国内领先世界先进的水平,提高迁钢公司在自动化炼钢技术上的硬实力和软实力。转炉自动化炼钢技术的成功运用从控制角度来看包含三方面关键内同:精准的模型计算、精确的数据采集、关键工艺设备的自动控制^[4],这些都依赖于计算机、仪表技术的飞速发展。选择应用国际优秀完善的炼钢吹炼模型,配合应用先进的计算机及控制仪表设备,架构完整合理的计算机动态控制网络 and 基础自动化控制系统是本课题研究和设计的关键,也是课题实施的关键所在。

迁钢计算机炼钢系统随转炉开炉同步投运,成功用于实际生产,使生产工艺指标大幅度改善:

(1) 提高了终点命中率:转炉炼钢一次拉碳出钢率从使用副枪及自动化炼钢前的71.63%提高到95%以上,目前达到96.84%。实际生产中转炉终点碳、温度双命中率已达到90.51%,碳命中率96.34%,温度命中率93.67%。其应用效果达到了国际先进水平;将对国内副枪计算机自动化炼钢技术的国产化起到显著的推动作用。

(2) 改善钢水质量：由于终点碳和终点温度的命中率提高，大幅度减少了后吹次数，钢水中氧含量低，提高了钢水的清洁度，钢水质量得到很好的改善。

(3) 减少钢水温度和成份的波动：由于提高了终点命中率，降低后吹次数，缩短冶炼时间，稳定钢水温度和成份的波动，为后期精炼、连铸创造良好工艺条件。

(4) 提高金属收的率：模型通过对吹氧制度和加料制度的调整可以控制渣中(FeO)的含量，使终渣(FeO)含量限制在下线；后吹次数的减少也使得渣中(FeO)的含量降低进一步提高金属收的率。

(5) 提高生产效率：由于实现了自动化不倒炉炼钢，使得冶炼时间缩短了 3-5 分钟，大大提高了钢水产量。

1.2 转炉自动化炼钢控制系统设计要点

首钢迁钢 210 吨转炉自动化炼钢控制系统实现计算机统一管理执行冶炼过程，只需按一下“吹炼开始”按钮就能进行全自动闭环控制，实现命中目标碳含量和温度，并实现自动停吹。其闭环控制过程中涉及到的转炉全自动炼钢过程流程图如图 1.1 所示。

转炉炼钢控制系统设计分为生产管控系统 L3、计算机二级控制系统 L2、一级 PLC 控制系统 L1、零级现场仪器仪表控制系统。自动化炼钢控制系统设计的要点在于：第一：结合生产工艺流程进行硬件设备选型配置，其中涵盖基础自动化 PLC 选型，上位 HMI 软件选型，自动化仪器仪表设备配置选型。第二：网络架构设计搭建，实现网络安全及可靠的数据交换。第三：自动化炼钢系统内功能软件、接口软件、冶炼数学模型及数据库结构设计。

根据冶炼理论及智能控制理论在过程控制级建立起用于指导与控制炼钢过程的静态控制模型和动态控制模型^[5]，生产管理级下达生产任务和生产指标以及相关控制指令到二级机，二级机服务器将下达的生产计划、钢水种类、冶炼炉次等信息传送到位于二级转炉本体工作站、二级炉前全自动检化验工作站以及倒灌站、脱硫站、废钢加工间等相关二级工作站。同时将各个二级工作站的相关参数以及相关炉次的历史数据通过交换机传给二级服务器，基础自动化级通过检测仪表，系统等设备检测出炼钢过程的各种参数经由 PLC 传给二级服务器并将上述生产指令、检测信息及过程参数进行相关提取和处理，将其转换为静态控制模型和动态控制模型所要求的输入参数信息：如铁水的质量、成分和温度、终点温度、终点成分、废钢的质量和分类以及参考炉次的历史生产数据^[6]。然后由静态控制模型采用机理分析、智能推理并与冶炼经验相结合的方法确定出

本炉次的氧耗量、钢水温度；进而确定各种主、副原料的加入量和吹炼过程中氧枪高度、氧气流量以及冶炼时间。在吹炼后期对钢水成分及温度进行一次化验检测其结果由炉前全自动检化验二级工作站，通过通讯送达转炉本体二级工作站，同时启动动态控制模型，以检测结果为依据采用自学习和智能控制算法，在线修正模型不断地调整吹炼轨迹直至命中终点^[7]。

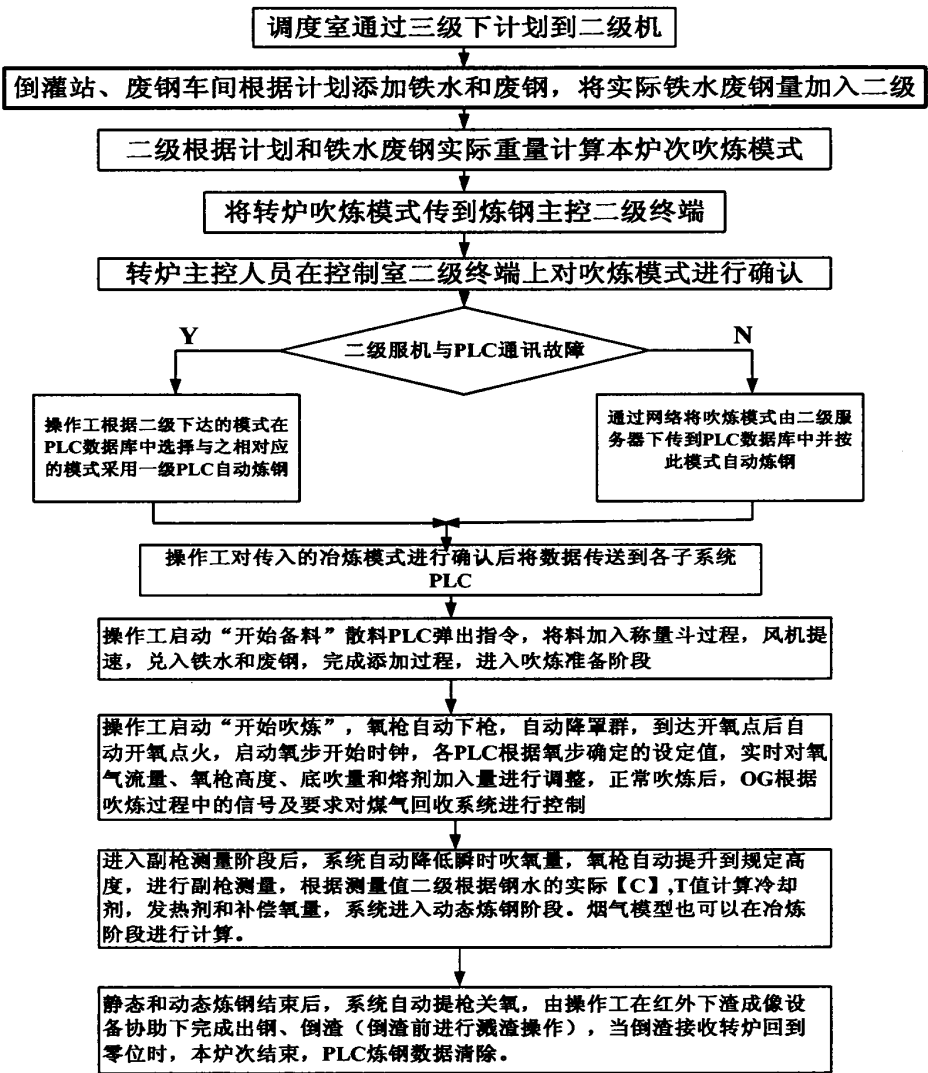


图 1.1 转炉全自动炼钢过程流程图
Fig.1.1 Automatic converter steelmaking process flow chart

根据转炉炼钢过程控制的复杂性和控制目标的具体要求系统采用工业以太网将 L1 级的 PLC 控制站于 L2 级的服务器、客户端连接；L1 级负责工艺过程级设备状态的实时数据采集处理，完成各工艺过程级设备过程的画面显示和报警处理，并根据 L2 或操作人员指令完成各工艺设备和工艺过程的顺序控制和 PID 调节控制。同时 L1 将冶炼过

程关键数据上传到 L2 级供模型计算、学习，实现对冶炼过程的高级控制。

综上所述：转炉炼钢厂总体自动化从功能设计上分为三级：一级 L1：基础自动化；二级 L2：过程控制计算机；三级 L3：ERP 系统；一级基础自动化由电气、仪表控制系统和操作站组成，主要功能是对转炉炼钢进行数据采集、顺序控制、生产过程控制操作及人机对话。并完成与其它系统的数据通讯。二级过程计算机通常以一个或多个高性能服务器为核心，完成铁水脱硫、转炉炼钢、钢包精炼炉和连铸等区域的生产控制。三级机在 ERP 投入运行的情况下，负责炼钢生产计划管理。

1.3 计算机控制系统及数据库选择

转炉自动化炼钢计算机控制系统系统采用 SIMENS S7400 PLC 根据国际电工委员会(IEC)制定了 PLC 的标准^[8]，并给出了它的定义。可编程序控制器是一种数字运算操作的电子系统，专为在工业环境下应用而设计，它采用可编程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作命令，并通过数字式、模拟式的输入和输出，控制各种类型的机械或生产过程。PLC 具有高速计数、中断技术、PID 控制等功能，同时联网通信能力也得到了加强，这些都使得可编程序控制器的应用范围和领域不断扩大。PLC 主站和从站之间采用 PROFIBUS-DP 通讯协议，PLC 与 HMI 通讯是基于快速以太网技术进行高速通讯，考虑到实际工况和生产的需求，决定炼钢自动化控制系统采用了基于 S7-400 PLC 控制系统。

同时由于转炉二级计算机所承担的计算、通讯和数据处理任务比较繁重，为提高系统的整体可靠性，设计选用二台高性能服务器构成转炉二级计算机，一台作为应用服务器集中处理应用进程，另一台作为数据库服务器集中存储数据。

为满足实时性的要求，转炉二级计算机与基础自动化通信接口协议采用 TCP/IP 协议，它是一个开放协议，能够满足异构系统互联的要求。转炉二级计算机与化验室，铁水预处理及转炉操作室的二级机 HMI 的通讯，是基于 1000M FAST ETHERNET 数据交换技术，转炉二级计算机作为 ORACLE 数据库服务器，而其他二级工作站作为客户机以 OPC 方式直接与服务器的数据库连接，实现可靠的数据交换。

1.4 自动化控制技术发展历史及其在转炉控制模型中的应用

几十年来，控制理论的发展经历了古典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个阶段。智能控制又包括模糊控制、神经网络控制、专家控制和仿人工智能控制等^[9]。

在古典控制理论中，应用最成功的是比例积分微分（PID）控制^[10]。它是一种在工

业生产中广泛应用的常规控制算法,属于线性控制。这种控制方式的最大优点是结构简单,使用方便,可以不用被控对象的模型参数,直接根据输出的偏差进行调节^[11]。该算法由于其简单实用而被广大工程技术人员所熟悉。但是当被控对象比较复杂时,便难以取得满意的控制效果。

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

目前模糊控制数学模型中的语言模型 (Linguistic Models, 即 LM)^[12]已经在转炉后期的终点温度动态控制模型的预报模型中得到应用。

1.5 本文的组织形式

第二章分析阐述了转炉自动化炼钢控制基本原理、动态静态模型控制原理及炼钢过程中关键的氧枪控制系统的控制和调节原理,第三、四章以迁钢 210T 转炉自动化炼钢控制系统设计开发为背景,完成了用 PLC 实现的系统控制和在工控机上编制人机交互界面,对其自动控制系统的组成原理和功能设计,并以以太网为架构完成整个控制系统特别是对核心副枪系统和烟气分析系统进行了比较系统地阐述,第五章进行了自动化炼钢系统工艺制度确定及炼钢静、动态模型的建立测试及应用,第六章为结论与展望,简要总结本论文研究成果,对进一步的研究工作进行展望。

第2章 转炉自动化炼钢基本原理

如何做好一套完整的转炉自动化炼钢控制系统,首先要了解转炉炼钢原理,以及自动化炼钢过程中所涉及环节,其次要根据转炉自动化炼钢的整套工艺和用户的需求建立相应的动、静态模型,参与到对整套自动化炼钢控制系统实施怎样的调节和控制功能^[13]。本章的目的是对上述问题进行分析研究,然后如何实现系统的优化控制。

2.1 转炉自动化炼钢系统基本工作原理

转炉炼钢技术的发展从经验操作向科学控制炼钢技术发展过程主要完成于20 世纪50 年代末至70 年代末。由于转炉炼钢反应速度快、时间短,很难采用取样分析的方法来监控炼钢过程,也无法直接观察炉内的反应过程,而只能根据对火焰、声音第二次信息的观察体会逐步形成操作人员的经验,从而来调节反应过程和对终点的控制,这就是所讲的经验炼钢。由于经验炼钢的局限性, 无法满足用户需求以及高级别品种钢窄成分的控制需求,自然提出了炼钢过程实施科学控制的要求。从经验炼钢到科学控制炼钢大约经历了以下几个历程:

(1) 20 世纪50 年代末到60 年代初,炼钢科学工作者利用热力学试验数据已能精确计算出炼钢过程化学反应生成的热。这为科学控制炼钢过程打下了理论基础。

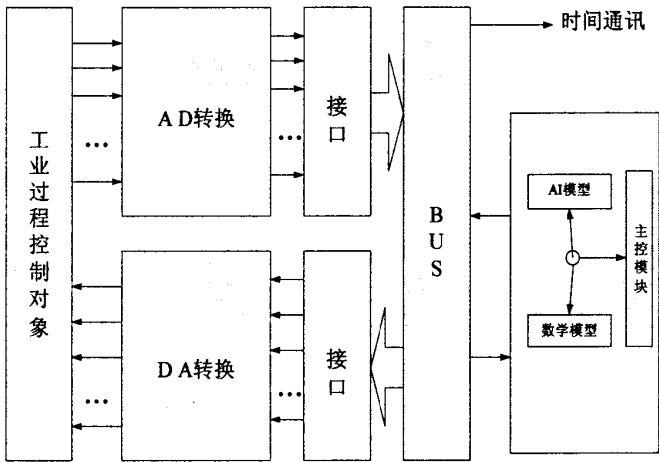
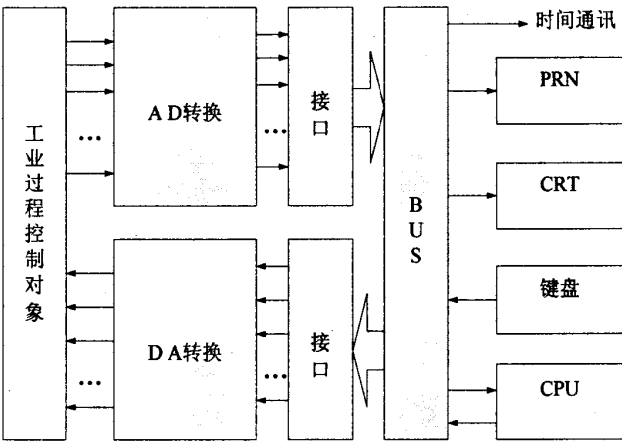
(2) 1960~1965 年,称量、检测、分析仪表迅速发展对加入转炉的主、副原料的质量、温度及化学成分可以进行测量,逐步实现能准确计量地加入炉料,另外计算机已用于生产,主要是采集、记录生产过程中的数据,而不进行控制。

(3) 1965~1970 年,采用计算机设定计算值并进行炼钢过程的监控,这实际上已是利用静态模型对炼钢过程进行开环控制的指导,然而终点的闭环控制尚未实现。

(4) 1970~1980 年,借助于测量技术的进一步发展,已能准确连续测量出吹入转炉的氧量及对废气的成分进行分析,特别是副枪技术的开发,使转炉炼钢基本实现由静态模型和副枪动态模型相结合的全过程控制炼钢的目标。20 世纪80 年代以来,随着计算机技术的全面推广以及各种检测手段的迅速发展,科学炼钢已达到很高水平,这为保证钢水质量、降低消耗及提高劳动生产率发挥了重要作用。因此可以说,转炉从经验炼钢发展到科学控制炼钢是转炉炼钢技术发展的一个重要方面,转炉炼钢的工业过程控制对象通过A/D转换、D/A转换通过总线与外部设备进行数据交换,从而达到控制目的。其中转炉工业过程控制结构如图2.1所示;具有人工智能炼钢工业过程控制结构如图2.2

所示：

转炉炼钢是我国目前炼钢的主要方式之一， 传统的炼钢生产现状是自动化程度低 生产成本低，资源消耗大， 环境污染严重。转炉炼钢过程不确定因素多， 特别是吹炼过程中氧枪高度制和对应的供氧量；加料过程中加料的时间和对应的物料种类对最终的钢水碳、磷、温度的命中率有很大的影响。因此， 采用传统的控制结构及方法难以对其进行有效的控制。



计算机全自动炼钢技术发挥优势：在科学控制炼钢的基础上成熟应用静态模型、副枪及动态模型、加之吹炼过程防喷溅动态枪位、加料控制以及终点磷、硫预报快速出钢技术使转炉炼钢实现全过程自动控制终点碳、温双命中率可稳定保持在 90% 以上，同时能降低终点钢水氧含量为洁净钢生产打下良好基础。^[14]与此同时长寿命炉衬技术的发

展,特别是溅渣护炉技术的开发与应用使炉龄可以提高到1~2万炉以上,不仅可大大降低耐材消耗,更重要的是改变传统“三吹二”、“二吹一”模式,大大提高转炉利用率,实现转炉“高效化”。

转炉自动化系统选用SIEMENS S7-400 控制器及INTOUCH软件完成生产过程的实时控制。该系统由S7-400 控制器、远程I/O 站、高速数据通讯网(工业以太网、Profibus、OPC)、人机接口组成^[15]。S7-400 控制器的合理应用充分保证了倾动的主从控制和负荷平衡、氧枪的升降和事故提升、吹氧量、复吹流量、合金副原料等过程信号的采集和处理、过程参数的设定和监视、设备的联锁控制、报警监测、实时和历史趋势的分析,并能与二级计算机进行实时数据通讯,接受过程计算机的模型计算结果,对生产过程进行自动控制^[16]。

2.2 转炉自动化炼钢静态模型和动态模型控制原理

炼钢终点控制是转炉吹炼末期的重要操作。因在吹炼过程中已尽可能提前将磷、硫去除到终点所要求的含量范围,故转炉的终点控制主要进行终碳控制和钢水温度控制。伴随着现代炼钢技术的发展,转炉终点控制技术大致经历了静态、动态和闭环控制三个发展阶段^[8]。静态控制阶段的主要特征是以碳含量、温度控制为主,实现终点的基本命中;动态控制阶段的主要特征是在吹炼后期测定熔池碳含量、温度,对静态模型进行动态校正,实现终点的精确命中^[17];闭环控制的主要特征是在静态、动态控制的基础上,实施在线检测和控制喷溅,全面预报终点C、S、P,实现全自动控制。

自20世纪60年代开始,为获取稳定的吹炼操作和命中钢水成分和温度,开始了在转炉吹炼中采用计算机技术的开发研究工作,并使吹炼数模在实际生产中应用逐步成为可能^[10]。按数模所描述变量在吹炼过程中状态的不同,数模又可分为静态模型和动态模型两种。实际应用中,往往根据不同类型的特点,采用理论模型与统计(或经验)模型相结合的方式建立模型(亦称其为“半经验模型”),并在逐步改进完善的前提下,由静态向动态不断演化发展,静态、动态控制模型是由一组计算模型组成的。静态模型基于热平衡、氧平衡、铁平衡和渣平衡建立的^[18]。为了建立各种平衡,主要使用了以下参数:

(1) 热平衡

- 反应热量
- 铁水热量(显热)
- 转炉等待过程中的热量损失

- 用于加热和熔化副原料需要的热量
- 用于加热和熔化废钢需要的热量
- 钢包中的热量损失，与钢包状态有关。

(2) 氧平衡

- 吹炼氧气
- 来自副原料的氧
- 用于反应的氧
- 溶解在钢水中的氧

(3) 铁平衡

- 来自含铁原料如铁水、废钢、铁矿石、球团等 Fe 加入量
- 烟囱排放中的 Fe 损失
- 渣中的 Fe
- 出钢过程中损失的 Fe
- 来自铁合金的 Fe

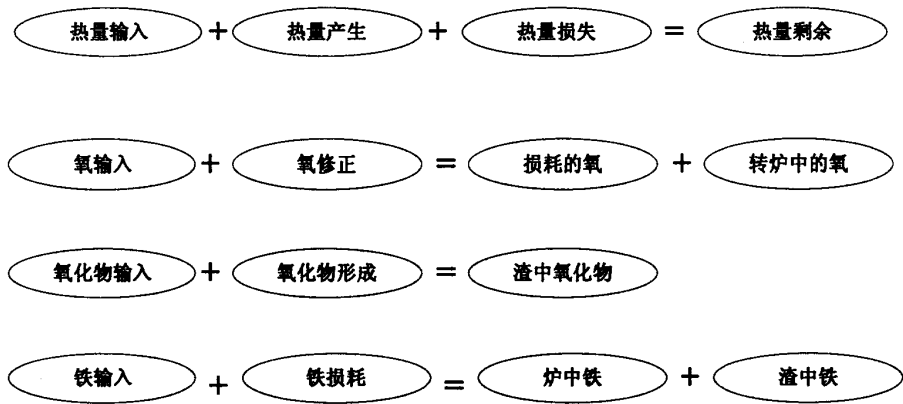
(4) 渣平衡:

- 来自副原料、铁水渣、前一炉的留渣及耐材内衬中的氧化物
- 反应生成的氧化物

系统计算以各种理论为基础，采用一定的数学算法，完成了控制过程各个环节的参数。计算此模型还包括进行热损失计算的冶金关系，它是根据钢包的内衬类型、钢包历史、钢包的加热和加盖情况来计算的。下图 2.3 为自动化炼钢动静态模型（static and dynamic model，简写 SDM）示意图：

静态模型主要采用热平衡、物料平衡数模，计算吹炼装入量、供氧量，控制终点温度，因炉子内部形态变化复杂，应用中存在较大的误差。动态模型主要采用钢水温度、碳量数模，对废气成分、流量及插入式热电偶测温结果进行计算，调整枪位进行控制，废气分析、热电偶测量精度决定其控制精度^[19]。采用烟气分析综合反应模型和副枪终点控制模型，直接测量熔池内钢液成分和温度，控制精度大大提高。采用炉内脱碳反应及碳、硅随吹炼过程变化的数模，增加石灰渣化、烟气组成、流量、温度及钢水温度等的计算，并考虑到锰、磷的气化反应、渣-金属间反应和石灰渣化速度等因素，全面反映转炉炼钢机理^[20]。对上述动静态模型加以融合变化，根据实测的转炉成分和流量，进行

实际吹炼过程的动态控制，取得终点[C]、[P]和温度预报精度分别为 0.050%、±0.010% 和 ±20℃ 的效果，指导了吹炼操作，降低了后吹率。



SDM平衡模型

图 2.3SDM 平衡模型示意图
Fig2.3 SDM balance model diagram

目前迁钢转炉静态模型与动态模型共 7 个模型：温度模型、主原料计算模型、溶剂加入量计算模型、氧量模型、动态模型、合金加入量模型、自学习模型。迁钢转炉炼钢终点控制技术历经静态、动态控制阶段后，目前已进入全自动吹炼控制阶段，其基本方法主要为副枪法、烟气分析法或副枪与烟气分析结合法。值得一提的是，由于气体快速分析与高精度分析技术的突破，目前正在逐步采用烟气分析技术代替副枪法控制转炉终点碳的实验。

2.3 转炉自动化炼钢氧枪控制系统

转炉氧枪控制系统包括：氧枪的供氧、供水、氮气、枪位置控制和换枪的横移控制。其中主要的部分氧枪传动装置选用 SIEMENS 6RA70 系列产品直流调速装置，采用 2 套直流调速装置控制，由传动装置对卷扬电机实施供电和控制。氧枪卷扬在工作中，1 台工作、1 台备用。当 1 台出现故障时可进行切换。为保证氧枪安全运行和工艺要求，氧枪操作与抱闸、主令、氧枪状态及其它设备的控制进行联锁。氧枪正常由 PLC 控制，并通过网络通讯来完成。当出现通讯中断，可以转换到事故状态下人为控制，确保氧枪的操作安全。控制方式选择：氧枪升降正常模式变频器主要完成手动、半自动、自动控制 3 种模式的操作而其定位精度以及操作精度要求很高，误差 2 cm 以内。所以正常工

作时直流调速装置选择 PROFIBUS-DP 网络给定，带绝对值编码器反馈的矢量控制模式； 应急模式是直流装置完成事故状态下氧枪的操作(仅提升)，将氧枪提升到安全高度，精度及速度控制要求不高，所以选择固定给定(20%)，事故提升执行时其供电系统将切换到电池供电，如供电系统故障也可确保氧枪提升到安全高度；此控制过程不受 PLC 连锁控制同时也属于无编码器矢量控制模式^[21]。迁钢氧枪系统控制操作 HMI 画面如图 2.4 所示：

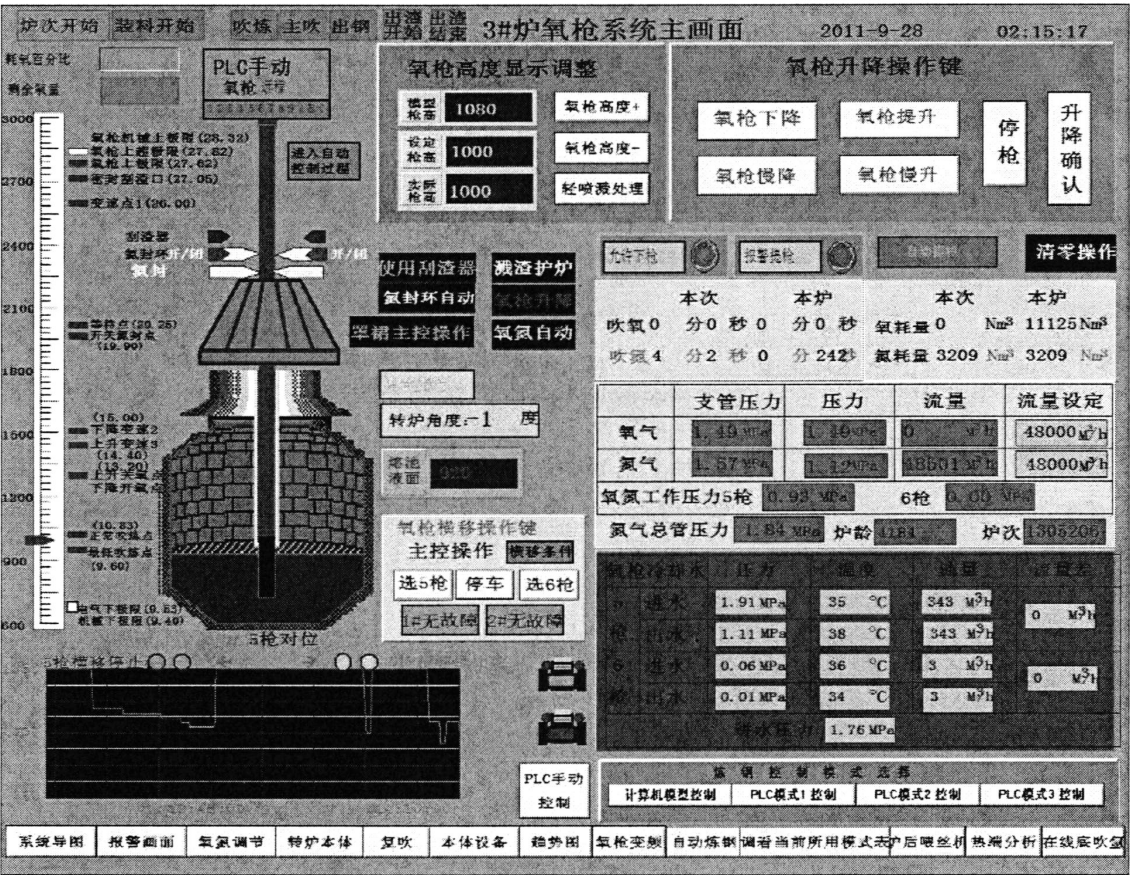


图 2.4 迁钢氧枪系统控制操作 HMI 画面

Fig2.4 BOF Lance system control operation of the HMI

2.3.1 氧枪循环水系统

转炉吹炼过程中，氧枪工作环境恶劣，枪头部位会受到不同程度的侵蚀，时常发生冷却水泄漏流到炉内的现象。小流量渗漏瞬间汽化掉，对安全生产不构成威胁，但大流量泄漏时，大量冷却水遇到高温，变成过热蒸汽，受炉内空间限制，高温蒸汽产生巨大的冲击力，对炉衬、炉体造成不同程度的损坏。这就需要控制系统具有有效的漏水检测和安全连锁控制功能。因此，氧枪水系统监控程序具备有如下重要连锁保护功能：

- (1) 氧枪漏水自动监测，采用流量差、温度差等条件进行连锁报警提枪。

- (2) 结合转炉炼钢生产工艺, 氧枪报警提枪时将氧枪提到氮封口以上, 同时关闭工作枪进水阀门, 延时3 秒再关出水阀门; 为杜绝因氧枪漏水、摇炉发生转炉爆炸事故, 在重度漏水提枪的瞬间切断转炉倾动零位控制回路, 禁止摇炉。
- (3) 氧枪供水系统程序能对氧枪冷却水进水压力、流量, 出水压力、流量, 进水温度, 进出水流量差进行检测并在HMI画面上进行显示、报警及声音提示功能, 提示操作人员做出安全有效判断。

2.3.2 转炉氧枪氧、氮系统

转炉供氧部分控制程序, 包括顶吹氧气压力、流量调节控制、顶吹氧气阀门和氮封阀门控制。供氧系统初始化后便完成如下功能:

- (1) 氧气总支管阀前、阀后压力显示、报警。
- (2) 氧气总支管流量的PID 调节, 吹炼开始时PID 调节自动投入, 按工艺要求结合副枪及烟气分析系统在PLC中经行按氧步调节吹氧量和枪高。
- (3) 氧气阀门的控制、检测及报警。

氧气阀门有: 氧气总管切断阀、氧气支管调节阀和氧气支管快切阀。转炉吹炼过程中氧气支管快切阀与氧枪枪位连锁。重要的枪位连锁点采用主令控制, 满足工艺吹炼过程中微调节枪位时使用氧枪绝对编码器信号进行调节控制。

氧枪氮系统包括溅渣氮气的状态监控和氮封阀的控制。溅渣氮气阀包括氮气支管调节阀、氮气支管快切阀, 系统要对溅渣阀前、阀后支管压力进行检测, 对总支管流量进行PID 调节。氮封阀部分包括氧枪水套氮封阀的控制、检测、报警。左右溜槽, 氧枪水套氮封检测及报警, 氮封总量显示, 氮气压力检测及报警。转炉本体的参数检测画面含有对氮气的分布及应用有明确描绘如图2.5所示:

2.3.3 氧枪换枪横移系统

转炉吹炼设AB两支氧枪, 一支在工作位, 一支在备用位。PLC 控制主枪与备用枪自动更换的过程为: 主枪及备枪均提至换枪点以上, 转动操作台上A、B 两枪选择开关(或在HMI 操作画面上选择A、B 枪), 控制程序自动拔起定枪销, 将在位枪移出炉口至备用位, 并将不在位枪移到炉口位。氧枪横移到位后, 将定枪销插入, 完成换枪功能。氧枪横移操作也可以在机旁箱和中控室维修画面上手动操作。

2.3.4 氧枪位置控制系统

氧枪升降装置，是使氧枪升降的动力装置。它由氧枪升降小车、导轨、卷扬机、横移装置、钢丝绳滑轮及氧枪高度指示标尺等组成。氧枪固定在升降小车上，升降小车沿导轨上下移动。钢丝绳卷筒与氧枪升降电机同轴，由PLC 控制的变频器驱动氧枪电机，控制氧枪的上升和下降。转炉控制系统的关键是氧枪定位，因为一旦定位不准就会影响炼钢的质量，甚至引发安全事故。在氧枪电机轴头设位置主令控制器对关键位置作硬保护。另加一套绝对位置编码器安装到氧枪卷筒轴上，检测结果分别在工作站和操作台上数码显示并参与枪位控制。氧枪位置控制的软件设计是根据“计算机、自动、手动、机旁”四种控制方式对操作站、PLC 及变频器进行编程和参数设置。氧枪上升、下降时PIC 接收HMI 操作站的枪位设定值，控制枪位准停；接收来自现场特殊点位信号，并处理参考点信号，控制氧阀的联锁和开关；给变频器发送上升、下降、停止及开启氧枪抱闸的命令。在动枪程序运行时屏蔽其它用户程序中断，以保证氧枪安全升降。

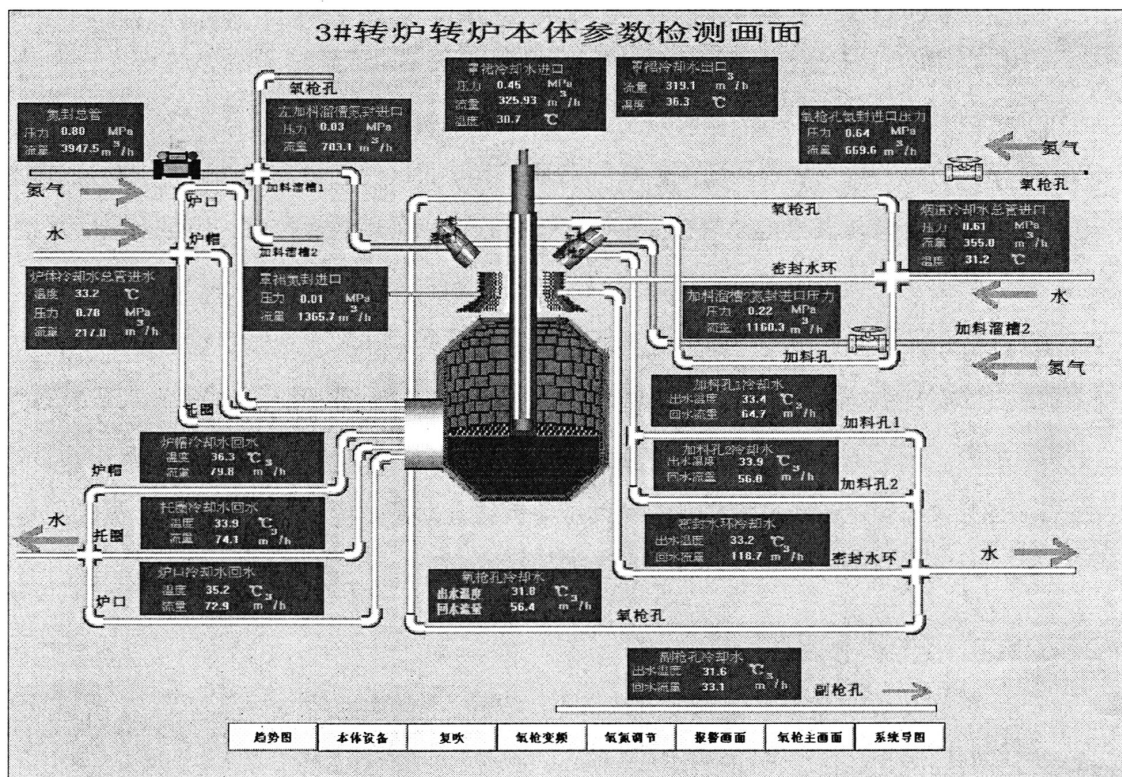


图 2.5 转炉本体参数监测画面
Fig2.5 BOF main body parameter HMI

吹炼过程中,氧枪的枪位需要根据吹炼情况频繁的变动高度,并要求快速准确地实现定位,在工厂的实际生产中,氧枪的上升下降会受到粘渣和冷却水等诸多因素影响,这些因素对氧枪的升降机械特性的影响是不同的,将会使系统的传递函数不断发生变化,所以我们设计了一种需要自适应的PID控制算法来实现氧枪的自动控制^[22]。下面对

PID算法进行简单介绍: 在控制系统中, 控制器最常用的控制规律是PID控制, 常规的PID控制原理框图如图2.6所示。系统由PID控制器和被控对象组成:

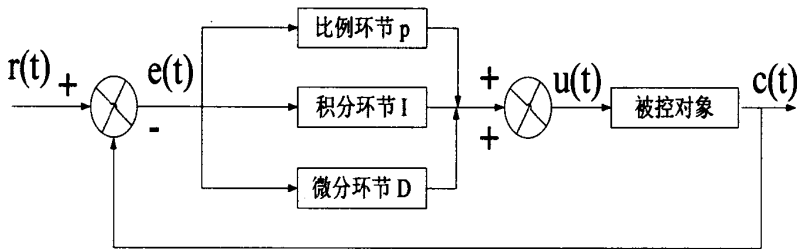


图 2.6 PID 控制原理框图
Fig2.6 Block diagram of PID control

PID控制器是一种线性控制器, 它根据 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差如下:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.1)$$

将偏差的比例(P)、积分(I)、微分(D)通过线性组合构成控制量, 对被控对象进行控制, 故称作PID控制器。其控制规律为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.2)$$

或写成传递函数形式:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} s + T_d s \right) \quad (2.3)$$

式中 K_p —比例系数;

T_i —积分时间常数;

T_d —微分时间常数

由于计算机技术和单片机技术的发展, 数字PID控制器组建取代了传统的模拟PID控制器, 常用的位置式数字PID算式结构如下:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2.4)$$

K —采样序号。 $K = 0, 1, 2, \dots$;

$u(k)$ —第 K 次采样时刻控制器输出值;

$e(k)$ —第 K 次采样时刻的输入偏差值;

$e(k-1)$ —第 $K-1$ 次采样时刻的输入偏差值;

K_i —积分系数

K_d —微分系数

改进型增量式PID控制算法结构如下：

$$\begin{aligned}\Delta u(k) &= K_p[e(k)-e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k)-2e(k-1)+2e(k-2)] \\ &= k_p \Delta e(k) + k_i(k) + k_d[\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]\end{aligned}\quad (2.5)$$

其中： $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (2.6)$$

增量式控制虽然只是在算法上作了一点改进，但是带来不少优点：由于计算机输出增量，所以误动作时影响小，必要时可用逻辑判断的方法消除。便于实现无扰切换，同时当计算机发生故障时，由于输出通道和执行装置具有信号自锁功能，故依然能保持原值。同时算法中不需要进行累加，控制增量 $\Delta u(k)$ 的确定仅仅与最近三次的采样值有关系，所以比较容易通过加权处理获得较好的控制效果。

氧枪枪位的自动控制系统PLC编程，应用西门子STEP7编程，程序结构SFB在冲洗启动组织块OB100和循环中断组织块OB35中调用，模式为：

OB100 Call SFB/FB41, DB40

OB35 Call SFB/FB41, DB40

SFB/FB “CONT_C” 连续控制器用于使用连续的I/O变量在SIMATIC S7控制系统中控制技术过程^[14]，并通过设置相关参数打开或者关闭PID控制器，以此来控制系统。

氧枪枪位控制通过PID调节控制具有结构简单，算法容易的特点，我们在S7-400上编程，将枪位控制应用到炼钢转炉氧枪的控制系统中，对氧枪的定点控制效果显著，氧枪的枪位是根据吹炼的实际情况由上位或者二级计算给出，调整的对象为直流装置的输出，从PLC程序控制上达到平滑输出。PLC通过计数模块和控制程序来控制直流装置来控制电机调整枪位。实现无极减速控制，克服了监控控制的平滑性差和一次准确定位能力差的缺点。此设计使系统运行可靠，生产操作灵活方便，过程控制时间短，减少机械冲击，减少故障率，提高生产效率。系统的先进性能和完善的软件功能大大提高了炼钢过程的自动化水平、生产管理水平 and 设备检修维护水平。

2.3.5 氧枪安全连锁系统

为使氧枪安全运行，氧枪的动枪安全连锁是十分重要的。根据冶炼工艺要求，控制程序中应设置如下几项安全连锁：

(1) 氧枪自动提升到等候点连锁，当降枪条件不具备，或在吹炼过程中，安全联

锁条件不满足时,出于安全的考虑,将氧枪提升并停在一个固定的高度以上,一般是等候点。变频系统故障;氧枪钢绳张力报警;转炉不在“0”位;氧枪电机联锁错误;氧枪超上限报警,不能提枪;氧枪超下限报警,不能降枪。

(2) 氧枪在吹炼过程中因故停氧,或因手动转入维修方式后停氧时,如果氧枪在等候点以下,则不允许再次开氧,必须抬枪至等候点。再行下枪,方可开氧。

(3) 为保证无配重枪,在事故状态下的设备及人身安全,设置了手动提枪。在发生意外事故时,由操作人员通过操作事故开关提枪,手动提枪控制不经过 PLC 及通讯网络,直接控制备用电池组,接通电气回路,将氧枪提到等候点位置。

(4) 同时氧枪系统采用自动互投双路供电作保安电源。在交流控制电源突然停电时,为避免烧毁氧枪,可立即用旁路保安电源将氧枪提出炉外。

2.3.6 转炉氧枪系统的控制方式

转炉氧枪系统的控制方式有四种:自动方式、半自动方式、手动方式和维修方式。控制方式的选择采自HMI 上的选择开关,其选择顺序为:维修→手动→半自动→自动。其中,自动方式要求条件最高,在检测过程计算机通讯正常且所有联锁条件满足后,方能成功切换。其次为半自动方式,在所有联锁条件满足时,才能切换。当某一方式选择失败或在开始吹炼后,方式选择只能由高级向低级方向转换,而不能由低级向高级操作方式转换。

(1) 自动模式:接收二级计算机枪位、氧气、氮气流量累计的氧步设定值,结合吹炼方案,将其以表格形式存于特定的存贮区中,且可随时调看,并根据此表所形成的曲线进行各参数的设定执行。如果在冶炼过程中枪位需临时微调,可按动操作台上升、下降按钮进行调整,然后程序按氧步继续执行^[23]。在自动方式下,介入全部动枪联锁,动枪联锁包含提枪至安全点联锁和不动枪联锁,并提示报警;根据操作台按钮(开始吹炼按钮)及上位机枪位设定值,通过枪位差与速度曲线的运算,给出动枪控制输出值,驱动变频传动系统动枪;根据模型计算或人工测量的数据,修改氧枪喷头到钢水液面的相对值;按氧枪位编码器及主令控制器信号自动开启氧枪孔氮封、开启氧气阀门;根据上位机的吹炼终点氧累计设定值自动提枪,也可人工将其转到手动方式下提枪;副枪下降测试或测温取样后,根据副枪测试或化验结果,启动补吹模型或直接出钢^[24];总、支管氧气流量的温压补正及PID 调节自动投入,实时检测总支管及在位枪的氧气压力和压力超限报警。

(2) 半自动模式:半自动方式是脱离过程二级计算机的自动控制方式,此时氧枪

系统按照基础级计算机内存的冶炼方案,由HMI 监控,对氧枪枪位、氧气流量,按氧步控制自动执行。其间枪位可使用操作台按钮微调,冶炼方案应由工艺人员提出,并根据实际冶炼需要由专人修改;根据方案表中的最后氧步的氧累量自动提枪,也可根据冶炼具体情况手动干预提枪;半自动方式下,介入全部动枪联锁及安全保护联锁;按氧枪位编码器及主令控制器信号进行开氮封,开关氧气的自动控制;根据开始吹炼按钮,通过枪位差与速度曲线驱动变频器传动系统动枪;总支管氧气流量的温压补正及流量的PID 调节自动投入;实时检测总支管及在位枪氧气的压力及压力超限报警;根据副枪或人工测试的结果,在键盘上修改氧枪喷头至钢水面的相对值。

(3) 手动模式:在HMI 上随机设定氧枪喷头到钢水液面的相对值,氧气流量按最后设定值执行,即在非吹炼情况下设定液面高度;按动“到吹炼点”按钮,氧枪自动下降到设定位置停止,吹炼过程中可介入全部动枪联锁及安全保护联锁;按氧枪位编码器及主令控制器信号自动开、关氮封和自动开氧阀;吹炼结束时,操作工根据具体情况,按动操作台上的“到等候点”按钮氧枪自动提至等候点;投入总支管氧气流量的温压补正及流量的PID 调节;用氧枪枪位高度位置联锁开关氧气阀门。

(4) 检修模式:检修模式含有脱机控制的机旁箱操作和HMI 的单体调试,用鼠标单体开关每一个切断阀;操作台开关氧按钮,可以开关在位枪的切断阀,且显示切断阀的开、关及报警状态。维修方式下解除全部动枪联锁,只保留至超上极限不能提枪,至下极限不能降枪报警,由于溅渣护炉要求低枪位,故也可在维修方式下操作。

2.4 本章小结

转炉炼钢工艺较复杂,检测参数多,设备动作频繁,由此,必须有一套检测准确及时,自动控制水平较高的控制系统和精确的模型系统,才能稳定生产,满足企业生存与发展的需求。本章主要研究设计迁钢炼钢厂基础自动化控制系统的结构和实现方法,详细分析了过程控制的基本理论知识,着重研究自动化炼钢过程的控制流程,转炉炼钢的控制模型的基本原理、以及转炉重点设备氧枪的自动控制系统,研究氧枪枪位控制的PID 调节基本原理及相关算法,并利用下位、上位软件实现对硬件的组态、对现场过程参数的实时监控、实时报警,使用生动准确地工业监控画面显示工业流程、同时将重要的参数进行实时趋势显示。

第3章 转炉自动化炼钢控制系统总体设计

河北省首钢迁安钢铁公司炼钢厂 5 座 210t 顶底复吹转炉及相关公辅设施,采用先进的高炉铁水——铁水脱硫预处理——顶底复吹转炉——钢水二次精炼——连铸生产工艺流程,生产钢水约 800 万 t/年。其中,采用两级自动化控制系统,实现炼钢过程的自动化控制,降低劳动强度,提高劳动生产率,为实现产品质量控制、跟踪管理创造条件。为确保转炉炼钢系统的安全高效运行,建立一套全面的自动化控制系统做后盾,因为只有强大的控制系统才能对转炉氧枪、转炉本体、散料合金系统、煤气清洗及回收系统、气化冷却系统的各种模拟量、开关量信号监测和连锁,现实测值超出连锁值时会发出停吹报警提枪,并将各个系统通过工业以太网组网实现系统间横向通讯,形成一个严谨的报警连锁系统,确保转炉安全高效运行。转炉炼钢系统是由划分为上述五个的子系统,为了满足后续 MES 系统需求,需要为基础的数据采集搭建一个稳定可靠的网络平台,设计上采用了环网结构,形成三个环:炼钢环网、炼钢公辅环网、连铸环网;并通过千兆网络交换机将整个炼钢及相关部分充分融合到一起。将数据采集层双网卡计算机接入不同网段,用 WONDERWARE 公司的 IDAS 软件将数据传输至 INSQL 数据库,并通过 ACTIVEFACTORY 在公司局域网上查询控制过程的模拟量和开关量曲线,协助故障诊断、故障排除等一系列的问题。本章将根据自动化炼钢工艺的要求对系统进行需求分析,确定系统的总体架构及各系统的应具备哪些功能;同时网络安全功能在本章中也做设计

3.1 转炉自动化控制系统组成

控制系统的先进性、安全性、可靠性关系到生产人员、设备的安全性,关系到产品的产量、合格率。低成本、高效益是一个现代化企业的标志, 控制系统的良好使用对于企业有着深远的经济效益和社会意义^[25]。设计的转炉控制系统采用三级自动化控制系统:基础级和过程级和管理级。基础级(一级)控制系统实现工艺设备运行生产参数的检测与控制,并完成生产数据的自动统计及打印报表等功能。过程级(二级)控制系统完成数学模型应用软件开发^[26]。管理级(三级)下达生产计划生产任务,上传生产数据。上述三级自动化控制系统工作原理如图 3.1 所示:

控制系统需要满足一座公称容量为 $3 \times 210\text{t}$ 的转炉炼钢车间的安全高效运转,达到年产合格铸坯 800 万吨,配备连铸连轧。为了适应市场的需求,主要产品定位在管线钢、汽车用钢和集装箱用钢板。设计为 5 座公称容量为 210 吨的氧气顶底复吹转炉,并配四

座 LF 炉，四座 RH 炉和两座铁水预脱硫站。且均达到了国内外平均先进水平。这些系统包括铁水供应系统、废钢供应系统、散装料供应系统、铁合金供应系统、氧气供应系统、烟气净化系统、炉外精炼系统等。

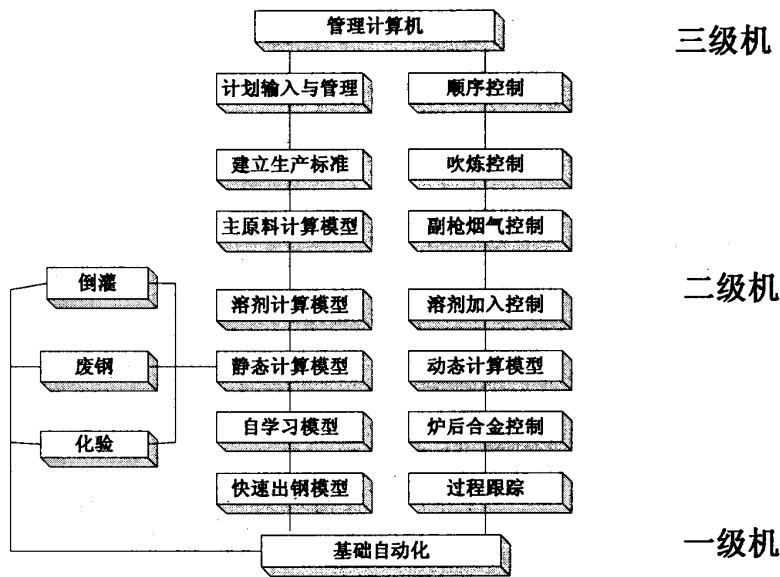


图 3.1 炼钢自动化系统工作原理图

Fig 3.1 Steel-making automating systems operating principle diagram

3.2 基础级控制系统

3.2.1 控制范围

迁钢5台210t转炉，每台转炉主工艺设施的电气仪表控制合用一套基础级控制系统，实现转炉本体(包括:氧枪系统、底吹系统、副枪系统、副原料系统、转炉倾动、转炉冷却水)、余热锅炉、一次除尘风机房及煤气回收等工艺生产参数的检测与控制。转炉基础级控制系统面向生产过程，完成生产参数的在线检测、数据处理运算、显示、存储、管理、控制输出、报表打印等功能。操作人员可通过人机对话修改、设定过程参量并控制设备运行状态。炼钢转炉主工艺控制系统采用SIEMENS 公司PCS7及S7-400、S7-300系统。采用分散型结构，即控制系统的CPU集中放置在转炉主控楼的PLC室，而控制系统I/O机架、机柜，根据现场各层平台的测控工艺设备及I/O点数，尽量放置在现场的就地控制室。现场各层平台为此设置相应的就地控制室。控制系统

CPU与远程I/O机架的通讯采用Profibus-DP网。采用分散型结构便于集中快速管理控制系统的CPU，同时节约了大量的测控电缆， 减少维护量， 且可准确、快速地找到故障所在。转炉铁合金加料、钢水吹氩站工艺为2台转炉公用，其控制系统同上。转炉炼钢辅助工艺控制系统采用S7-300，包括:转炉二次除尘、循环水泵站、炼钢除尘循环水泵

站等。

3.2.2 控制功能

(1) 操作站功能

各操作站监控画面的设计以满足其工艺生产监控、操作的要求为准,体现画面美观、切换方便、操作简单、集中与分散相结合等特点。操作站画面说明如下:

- 流程总貌图—各工艺系统对应的操作站有生产所必需的数据、设备状态、报警和事件显示;有设备操作的对话控件;有自动/手动选择的切换按钮;设定值的修改等。
- 工艺流程子画面—每个子工艺系统的流程图及相关的显示、操作等。
- 控制回路画面—设备控制的状态、测量值、过程值、反馈值的显示; 设定值的修改;输出值的控制。
- 报警画面—操作站各画面顶部均设有报警信息条,当生产参数报警出现时报警信息条闪烁自动显示报警信息。报警发生时自动存储报警相关信息(包括报警信息、连锁信息)以备分析报警原因。
- 历史数据画面—历史数据的存储、查询。
- 操作事件记录、查询—为事故分析提供依据。
- 生产数据的显示、存储—日报、班报的打印功能。
- 能源介质计量数据显示、累计。

(2) 控制器功能

PLC 控制器 CPU 是控制系统的核心,经过 I/O 模块输入/输出信号,实现转炉生产参数采集、数据处理、输出信号控制设备。CPU 与操作站通讯,如果操作站故障,控制器可独立完成工艺过程的控制。

(3) 服务器功能

每台转炉的控制系统在二级室设置 1 台二级服务器。调度室设有三级服务器客户端可用于转炉生产数据的调度、管理、历史数据存储查询、报表的打印,三级服务器将生产计划下达到三级客户端,客户端将炉次钢种等计划信息下达给二级服务器,二级服务器直接与一级通讯进行生产操作。

(4) 网络功能

网络本是计算机系统的组成,利用网络技术替代“硬接线”连接,实现生产的连锁控制^[19],如转炉与风机启停的连锁、煤气是否回收等均有着重要的意义。控制系统网

络配置如下:

- 现场设备网: 基础级控制系统的总线 Profi-bus, 用于 PLC 控制器与现场设备模块的连接, 如变频器等。

- 控制系统主机架与远程单元机架通讯网: Ethernet 高速工业以太网 1000M, 或总线 Profi-bus 网^[20]。

- 转炉基础级控制系统主控制网: 环形 Ethernet 工业 1000M 高速以太网, 该网是基础级控制系统的核心网络, 速度快、安全性高、具有开放性。将转炉本体、散状料加料、铁合金加料、吹氩站、蓄热器、一次除尘、一次除尘除尘风机房、煤气回收各控制系统连为一体。

- 炼钢车间级(或公司级)管理网: 采用 Ethernet 1000M 以太网将车间铁水脱硫站、转炉、LF 精炼炉、RH 精炼炉、连铸机等独立工艺的控制系统服务器相连接, 实现生产调度、能源管理数据的相互通讯, 为厂级管理人员、调度人员提供生产数据。

3.3 过程控制系统

3.3.1 控制范围

过程级控制系统完成整个转炉生产过程的管理及控制, 并协调转炉和连铸的生产。转炉过程计算机的控制范围: 从铁水处导报理开始, 经转炉吹炼、炉外精炼, 与连铸过程计算机系统进行通信接口, 使转炉和连铸匹配以协调全厂的生产。包括: 转炉操作室接到来自连铸的命令, 由调度制定出钢计划并输入过程计算机; 转炉操作室根据调度命令, 向铁水及废钢系统提出各种申请; 根据钢种、铁水和废钢的具体情况决定其原料的配比, 期间要经过铁水及废钢的成分、重量、温度等信息的处理; 吹炼过程中起动标志模型进行实时的检测跟踪; 吹炼终点指挥副枪测试读取化验成果, 然后进行铁合金的计算, 最后将全部冶炼数据收集整理形成生产报表及数据分析报表。

3.3.2 控制功能

转炉过程控制系统的主要任务是根据控制对象的数据流, 安排相应的人机接口, 使操作人员能够监视和管理所控制的过程, 并进行必要的数据输入输出, 从而达到过程控制的目的。转炉过程控制系统按功能可分为以下多个子系统:

(1) 转炉调度子系统转炉调度子系统需要向操作人员提供以下信息:

- 连铸生产情况包括: 钢包重量、铸机拉速、浇注钢种、浇注时间等。
- 转炉生产情况包括: 吹氧时间、枪位、下料量、转炉处于修炉、正常吹炼、设

备故障、等铁等。

- 钢水包准备情况包括： 炉后有无钢水包等。
- 计划格式包括： 熔炼号、钢种、出钢量、用途、出钢时间。计划编排后即可下达至转炉炼钢控制子系统。
- 附加功能包括： 提供钢种表供操作人员参考;提供报表查询和打印的功能等。

(2) 铁水管理子系统

主要功能：采集由化验处理子系统传来的数据存档，并传至其他系统。

(3) 废钢调度子系统

主要功能：采集废钢重量、废钢种类等。根据操作要求将本炉使用的废钢重量、废钢种类等信息经终端通知操作室并收集废钢的实际使用情况。

(4) 炼钢控制子系统

过程控制系统的核心，负责炼钢过程的计算机控制。由操作人员输入必要的数据后启动冶炼模型对炼钢过程进行控制，以达到自动炼钢的目的。

(5) 合金管理子系统

主要功能：根据出钢量、出钢钢种及化验成分，启动合金计算模型按最终钢成分计算出所需合金品种及数量并交操作人员确认。同时搜集每炉钢的合金料的实际使用情况： 包括合金种类和重量存入数据库中供自学习和打印报表使用。

(6) 数据通信系统

负责三类数据间的通信：

- 和基础级通信
- 内部各站之间通信
- 与预留的生产管理级(三级)通信

(7) 打印报表系统

完成三类报表的功能：

- 转炉过程记事
- 转炉熔炼记事
- 转炉生产过程日报表

(8) 参数维护子系统

主要负责维护各生产系统的参数供数学模型使用。主要有：造渣剂的成分、炉渣成分、模型接口参数表等。

3.4 数据采集系统总体设计

迁钢公司炼钢自动化系统可以划分三级：一级是基础自动化、二级是过程控制、三级是MES（制造执行管理系统）和ERP（企业资源计划）。各级系统之间存在着大量的数据采集、传递、交换。一级自动化主要完成动态控制，比如速度控制，液位控制，阀位控制等功能和各工序的控制。主要控制设备包括现场传感器、执行器、PLC和DCS等。二级自动化主要依据数学模型设定计算来控制产品质量，转炉、精练、连铸等自适应控制、转炉出钢终点控制等^[27]。还包括全公司的数据管理以及数据收集、生产操作指导等功能。三级自动化主要完成材料跟踪、生产订单的处理、生产定单的跟踪，原料管理，出铁管理，钢、板坯库管理，成品库管理，转炉连铸的操作管理，以及生产计划的发行和生产实际数据收集、制表等功能。迁钢物资计量网钢坯发运系统和材料供应系统属于三级自动化的范畴。同是还有ERP主要完成合同管理、合同进程管理、生产计划、全公司原材料平衡、生产能力平衡、质量管理、发货管理、财务管理、设备管理、人事管理、生产数据的统计分析以及生产标准、技术标准的修改和补充等功能。

迁钢公司炼钢基础自动化控制主要是PLC系统，PLC系统分上位和下位，上位（主控室工控机）HMI主要是从下位（PLC）采集各工艺数据，实时监视系统运行状态，允许操作员通过键盘、鼠标输入操作命令，通过下位（PLC）对工艺设备进行控制。上位还具有数据报警、历史数据记录和处理（实时趋势、历史趋势、生产报表）等功能。炼钢系统选用的上位软件是INTOUCH，下位PLC选用西门子S7-400系列，配合数据采集的数据库采用INSQL数据库。数据采集到数据库后可以通过WEB发布软件，将现场工艺画面在公司局域网内显示，限制为只具有监视功能，便于生产调度及时监控各工艺环节生产情况，同时通过常规的趋势查询功能，掌握设备运行时实动态，根据趋势变化判断设备运行状况，做到防患于未然。并借助趋势的历史记录功能为查找分析故障原因，提供可靠数据资料，为设备人员故障分析和操作提供给原始数据，还能如图3.2所示为数据采集系统原理。

设计选用INSQL（IndustrialSQL Server）是实时、关系型工厂信息数据库，由美国Wonderware公司开发的成型自动化商业软件。迁钢公司一期工程中大量应用的InTouch上位软件是Wonderware公司开发的商业软件。与INSQL数据库同属一个集成的工业自动化软件包FactorySuite，SuiteVoyager这个基于Internet/Intranet的生产制造信息门户发布趋势和生产过程图形到公司内部。

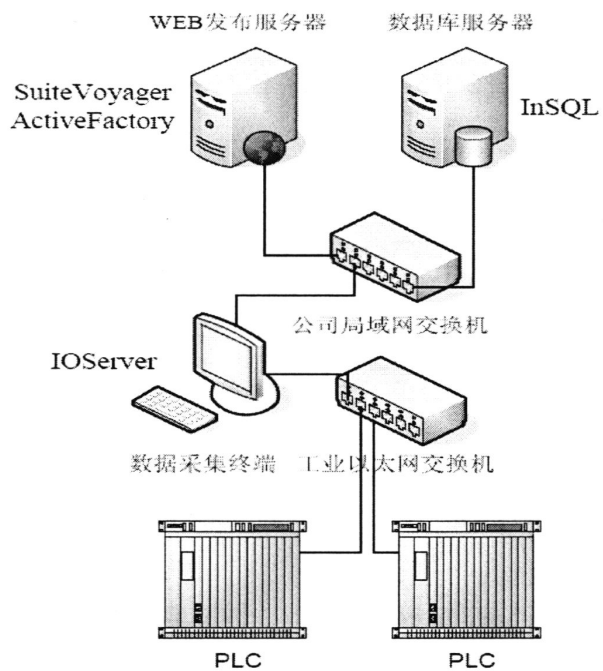


图3.2数据采集系统示意图
Fig3.2 Schematic diagram of the data acquisition system

此采集系统设计目的是通过常规的趋势查询功能，掌握设备运行时实动态，根据趋势变化判断设备运行状况，并借助趋势的历史记录功查询能为查找分析故障原因，提供可靠数据资料。通过INSQL 数据库将数据整理分类并编写接口程序，为其他系统提供详实可靠基础数据。迁钢公司炼钢分厂的数据采集网络结构示意图3.3。

3.5 系统硬件总体设计

可编程序控制器(Programmable Logic Controller，PLC)是以微处理器为基础，综合了计算机技术、自动控制技术和通信技术而发展起来的一种通用工业自动控制装置。近年来，以西门子S7300/400为代表的PLC已成为我国工业控制领域中最主要的工业自动控制装置之一，为工业自动化提供了安全可靠和比较完善的解决方案。S7300/400系列PLC的工作原理、硬件结构、指令系统、程序结构和STEP 7 V5.4专业软件包的使用方法更为严谨，编程方法涵盖梯形图的经验设计法和顺序控制设计法以及基于S7 Graph语言的顺序功能图设计方法。S7300/400的网络结构、ASi网络、工业以太网、PROFINet网络， MPI 网络、PROFIBUS网络、点对点通信、PRODAVE通信软件的组态、参数设置及通信程序的编写方法等，以及如何使用系统功能实现PID控制的方法。包括如下功能：

- (1) 支持多种编程语言：梯形图、语句表、功能流程块图。

- (2) 先进的指令集：包括基本的和先进的ASCII 串指令，先进的算术功能。
- (3) 多种函数块、功能块。
- (4) 内置的通讯：RS232/485，远程I/O 控制网络，远程I/O 通讯。
- (5) 通讯模块提供了以太网端口，端口提供了嵌入的TCP/IP 通讯功能，使处理器能够和以太网口主机通讯。

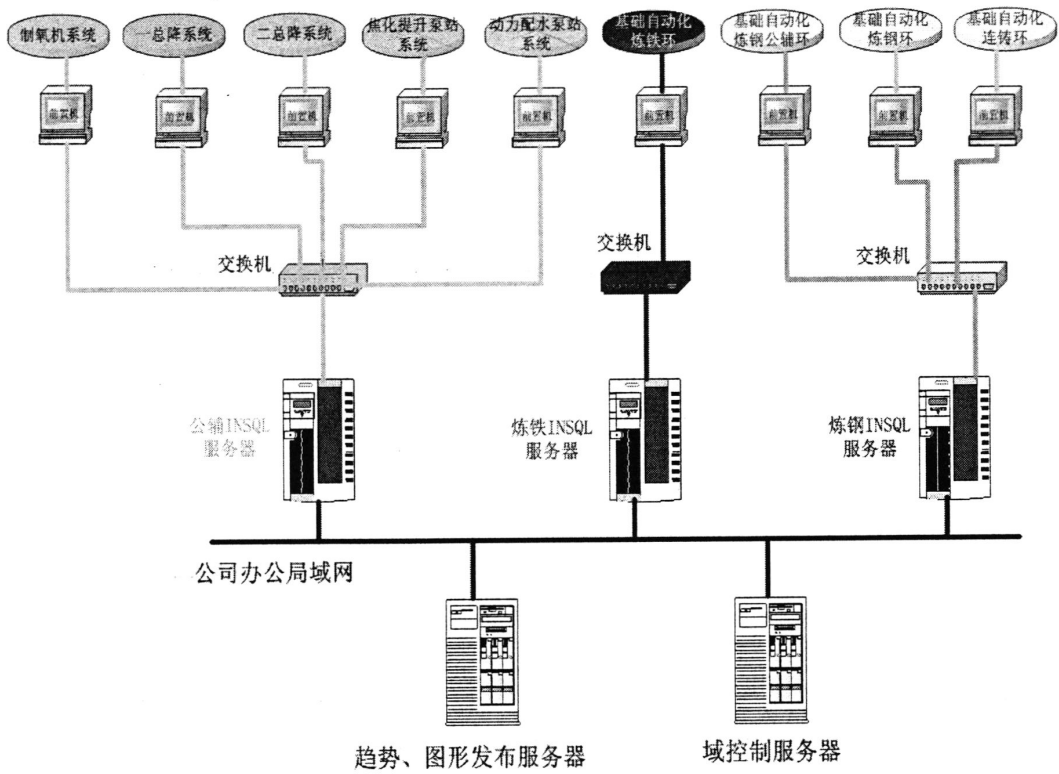


图3.5迁钢公司炼钢分厂的数据采集网络结构示意图
Fig3.3 Schematic diagram of steel plant data acquisition network

自动化炼钢基础自动化网络采用千兆工业以太网光纤环网结构，交换机使用赫斯曼系列交换机，光纤采用多模光纤，为基础数据的传输通讯提供高速稳定的数据链路。环网上的节点，如果出现单一节点故障或者断路情况将不会影响到整个网络通讯。我们先来介绍一下以太网（Ethernet）1975年由美国 XEROX公司研制成功，由于采用无源介质（如双绞线、同轴电缆、光纤 等）来传播信息，采用历史上把传播电磁波称为“以太”（Ether）来命名。并用于商业办公用途，1984年将普通以太网应用到工业控制系统，这种网络叫工业以太网^[28]。两种网络是兼容的。区别在于工业以太网有更高的确定性、实时性更强，满足工业数据传输要求、可靠性更高，确保控制系统稳定运行。在自动化行业中我们按行业习惯把PLC 控制器称为下位机，操作站、工程师站称为上位机，它们之间通过以太网线连接起来，通讯使用TCP/IP 和DDE 协议，光纤环网。每个转炉控制

系统设置一台工程师站，安装在中心控制室的工程师室内，连接在PLC以太网通讯模块的通讯接口上，用于PLC控制器的组态、除错、修改、测试、软件装载及维护^[29]。工程师站具备打印组态数据和图形功能。工程师站的PC 机的规格与操作站的相同，并配备软盘驱动器、光盘驱动器，并留有人机接口(HMI)。五台操作站，用于操作员操作，分别为氧枪系统、转炉本体系统、散料及铁合金系统、气化冷却系统、煤气清洗及回收系统。炼钢自动化网络结构图如图3.4所示

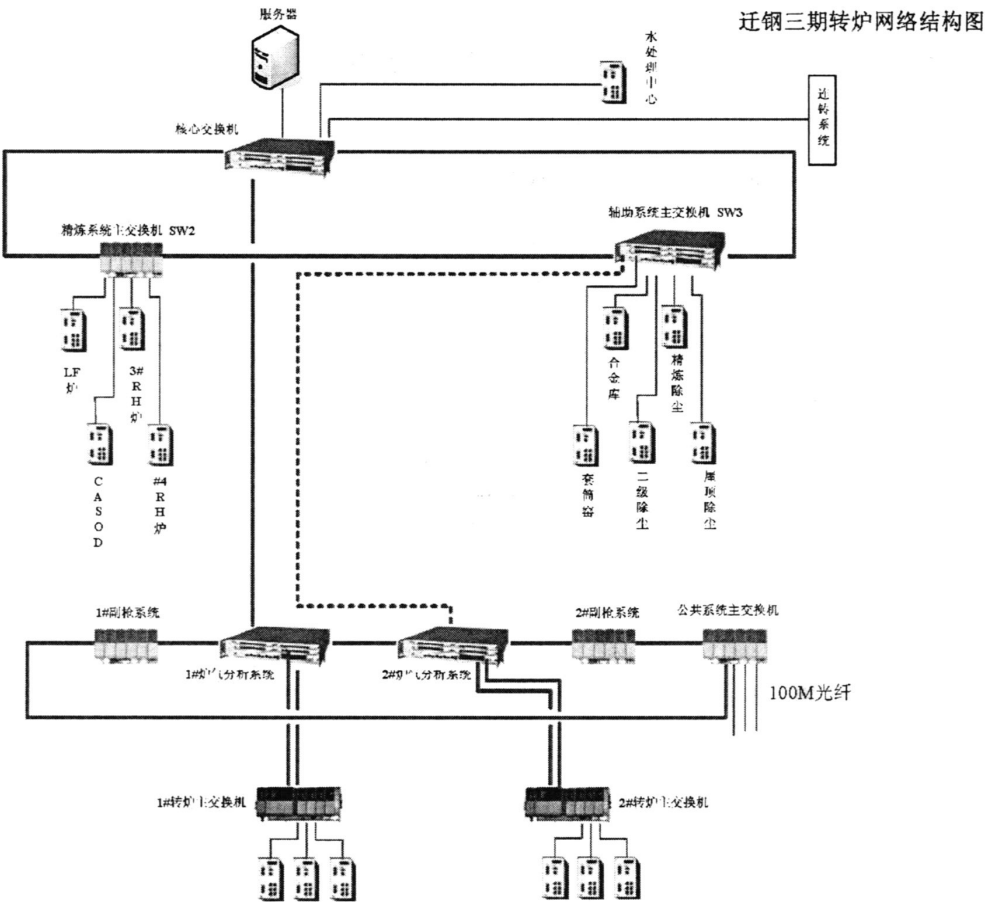


图3.4炼钢自动化网络结构图
Fig3.4 Steel-making automation network structure

3.6 系统 HMI 软件设计

3.6.1 Intouch10.0 介绍

Intouch10.0 是Wonderware 公司在英国Invensysplc 的一个子公司，创建于1987 年4 月，开发基于IBMPc 及其兼容计算机的、应用于工业及过程自动化领域的人机界面 (HMI)软件。软件开发平台选择INTOUCH 组态软件，它是基于Windows 的软件，用于

开发和运行人机界面的应用程序，它提供了创建和运行高效监视和管理控制应用控制程序所需要的全部工具。它具有功能完善、操作简便、可视性好、可维护性强的突出特点。它的工具供您建立所有人机界面的外观，包括实时动画显示、趋势及报警汇总。INTOUCH 容易与TRICONEX、Microsoft 及其它第三方的产品结合，从而最大限度的发挥ActiveX, VBA, OLE, ODBC, OPC 及DDE 技术的功能，具体包括：

(1) 应用INTOUCH 的ActiveX 和OLE 载体功能以充分利用先进技术。例如：在RSView32 图形显示里嵌入Visual Basic 或其它ActiveX 组件以扩展INTOUCH的功能。

(2) 运用您目前所使用Microsoft 程序配备的工具来创建并编辑显示，使用高级的面向对象图形和动画，再加上简单的拖放和剪切粘贴功能，简化应用程序的开发。

(3) 使用INTOUCH 对象模型和VBA 与Microsoft Access Microsoft SQLserver 等其它windows 程序共享数据，与Microsoft Excel 等其它Windows 程序交换操作，以制定并扩展INTOUCH 以适应您的特定需求。

(4) 采用INTOUCH 图形库的图形或从Core Draw 及Adobe Photoshop 等其它绘图封装软件输入文件。

(5) 用INTOUCH 报警通知分组功能监视多种严重程度的过程事件，所创建的多个报警汇总可提供特定的报警数据，而不必监视整个系统的警报。

(6) 创建用来显示进程对时间变化的趋势。每个趋势图可用多达16 支笔来显示实时数据或历史数据。

(7)同时将数据记录到多个文件或远程ODBC 数据库，以提供各项生产数据的记录。记录的数据可直接作为Microsoft Excel 等其它程序的数据，而不需要进行文件的转换。基于上述INTOUCH 的强大功能，本项目选择它来组态配置高性能、高可靠性和高度专业化的工业控制监控系统。

3.6.2 HMI 功能简介

本系统采用INTOUCH 组态软件开发的监控系统来监控压缩机的运行，首先利用刀I/O 驱动取得数据送入PDB 中并在画面上显示；能在画面上手工输入一些设定值及控制器参数；报警及操作记录存入数据库以备查询；一些重要的现场数据存入数据库用于历史趋势浏览以及生成报表等。

以下是监控画面组态中遵循的原则：

(1) 界面设计的一致性。一致性原则在界面设计中最容易违反，同时也最容易修

改和避免。只有符合一致性原则，软件的风格才能统一和规范，从而迎合用户的审美要求。例如，在菜单和联机帮助中必须使用相同的术语；对话框必须具有相同的风格等。

(2) 常用操作的直接性。常用操作的使用频度大，应该减少操作序列的长度。使常用操作具有捷径，不仅会提高用户的工作效率，还使得界面在功能实现上简洁和高效。

(3) 信息反馈的必要性。对操作人员的重要操作要有信息反馈。对常用操作和简单操作的反馈可以不作要求，但是对不常用操作和至关重要的操作，系统应该提供信息的反馈，以帮助用户确定操作的结果。

(4) 操作的可逆性。操作应该可逆，这对于不具备专门知识的操作人员是必要的。可逆的动作可以是单个的操作，或者是一个相对独立的操作序列。

3.7 系统安全及网络安全设计

STEP 7提供各种系统安全等级的密码保护。内嵌的安全系统通过设置用户名和密码，控制进入项目和程序的各种功能级。通过STEP7安全系统对话框，可改变、添加和取消用户进入的权限。任何对安全系统的修改被记录在项目历史记录中。系统通过了TUV 认证，确认了系统的功能满足关键过程应用所要求的最大安全性和无间断操作的要求。STEP 7根据TUV 认证使用进程的要求，达到德国安全要求第五级和第六级要求。同时，在HMI 操作画面上，根据用户不同操作级别，设立了进入系统的安全权限。例如：操作员级、工段长级和程序员级等。并对所有的操作都记录在历史记录中。达到系统安全设计要求。

由于企业内部工业网络属于独立网络系统和外界没有直接联系，但是由于网络环境的复杂性、多变性以及信息系统的脆弱性，界定了网络安全威胁的客观存在，这就要求我们在加强网络安全管理和建立保护屏障不可或缺，针对我们的工业网络环境我们在网络中设计了双网卡防病毒服务器，防病毒软件采用卡巴斯基企业安全空间249节点，保证网络内的所有计算机服务器全部安全覆盖，服务器通过防火墙访问外网升级病毒库，然后将最新病毒库传至各个节点，确保每台计算机客户端最新病毒库。

3.8 本章小结

本章在分析系统应该具备哪些功能后对系统进行了总体设计。确定了系统开发所使用的软硬件工具，并对软硬件的优点进行详述。本章进行炼钢自动化控制系统的组成，其中基础控制级和过程控制级的组成及功能设计，针对系统数据采集传递采集做了总体设计，设计出炼钢自动化网络结构图，在搭建完成系统硬件和软件功能同时完成系统的

设计与应用，同时在系统安全和网络安全方面也做出设计。

第4章 转炉烟气分析与副枪自动化控制系统

20世纪60年代,法国钢铁研究院最早从事以碳平衡为主的炉气定碳法,随后世界各国开始了烟气分析动态控制的实验,并于70年代前投入了使用^[30]。然而受检测设备水平的限制,转炉控制效果较差。到70~80年代,副枪法得到了长足的研究和发展,并逐渐发展成熟。与此同时,烟气分析法由于当时使用的烟气分析设备(红外分析仪)延时时间太长,而且当时的称量系统和测压系统的误差较大,加上当时的冶炼水平有限,计算机控制基础比较薄弱,终点控制精度难以提高;而副枪技术的发展和获得的成功,使烟气分析动态控制在随后一段时间里发展放慢,许多厂家在进行了一系列的试验后,在未能取得满意结果的情况下纷纷放弃烟气分析法而转攻副枪法^[31]。80年代末90年代初,国外的副枪技术已基本发展成熟。进入90年代,由于气体快速与高精度分析技术的突破,基于烟气分析的转炉动态控制再次引起了人们的关注。目前美国、欧洲、韩国、日本等国的转炉钢厂正逐步采用烟气分析技术代替副枪控制转炉终点碳^[32]。

在冶炼过程中,使用副枪可在不中断吹炼或不倒炉的状态下,去获得转炉熔池的各种所需要的信息,例如:温度、碳含量、氧含量、熔池高度及熔池内液体的各种化学成分。这样便可以借助转炉计算机对吹炼所需要的氧量和冷却剂的添加量进行反复计算,调整系统的各种参数,以命中碳、温度的目标值,避免后吹。

4.1 烟气分析和副枪的控制原理

在三期即将投产的两座 210t 转炉,引进澳钢联的烟气分析(LOMAS)进行全程动态控制炼钢技术,这项技术是根据炉气变化情况全程动态计算脱碳速率和钢水碳含量,特别在吹炼末期炉内[C][O]反应趋于平衡后,动态计算、校正熔池温度,准确预报吹炼末期熔池的碳和温度,根据动态计算、预报的终点碳和温度并结合转炉烟气变化曲线确定吹炼终点并自动提枪结束吹炼,实现转炉直接出钢的自动化炼钢。下面通过对烟气分析和副枪控制两种方式的过程控制及终点命中的比较,对烟气分析动态控制炼钢技术的优势进行探讨。

4.1.1 烟气分析原理

整个系统由三部分组成:① 负责转炉烟气采集、处理的LOMAS系统;② 在线分析质谱仪;③ 转炉烟气分析动态控制系统。烟气分析系统的系统接口示意如图4.1所示:

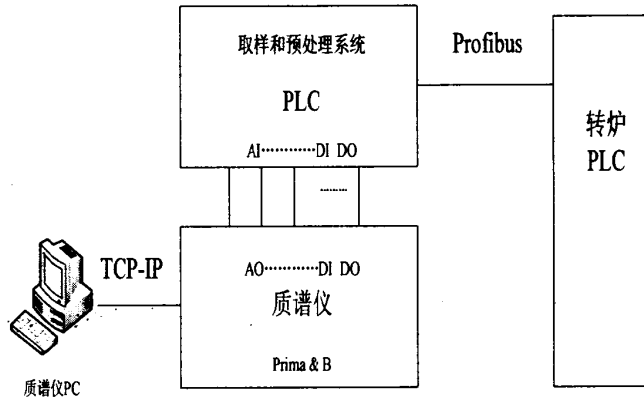


图 4.1 烟气分析系统接口示意图
Fig4.1 Converter gas analysis system interface diagram

LOMAS烟气采集和处理系统可以采集温度高达1800℃、烟尘含量高达100mg/m³的气体。LOMAS系统由两个气体采集探头、现场处理柜、气体处理柜、控制柜、分析柜组成。分析系统借助每一转炉上的2个探头来保证无间断连续性测量的进行，其中一个探头用于烟气周期性取样，另一个进行清洗备用，将多余的测量烟气反吹到烟气冷却段。在线分析质谱仪对LOMAS系统采集处理后的转炉烟气进行成分分析，其主要特点是分析速度快、精度高，分析转炉烟气中的六种主要气体成分的周期小于1.5秒，可根据转炉烟气中CO、CO₂和O₂含量的变化进行及时准确的测定，以便动态模型对吹炼后期脱碳速率变化进行计算，为终点碳和温度预报提供准确的计算依据。

转炉烟气分析控制系统主要由静态模型和动态模型两部分组成。静态控制模型的主要任务是依据原料条件寻找最佳原料配比，并根据实际配料确定冶炼方案进行吹炼，在吹炼过程中一级系统根据静态模型的设定值自动进行加料、吹氧等操作，并根据铁水、废钢以及造渣料的信息计算终点钢水温度^[33]。

动态控制模型是整个系统的核心部分，同时是对静态模型精度的补偿。动态模型主要由炉气定碳模块、温度预报模块、喷溅预报模块、冷却剂控制模块构成。模型的自学习、自适应功能的实现是提高模型精度和实用性的关键。动态控制模型主要在吹炼末期2分钟炉内碳氧反应趋于平衡后，通过取样系统和质谱仪连续采集、分析转炉炉口逸出的炉气成分，根据炉气成分的变化计算出脱碳速率，为操作人员提供吹炼结束前2分钟钢中碳含量的变化情况，根据动态模型计算的终点碳和温度并结合转炉烟气变化曲线由模型自行确定吹炼终点^[34]。

4.1.2 副枪控制原理与结构

副枪动态控制功能是根据静态模型计算当转炉吹氧量达到80%左右，即吹炼接近终点前2~3 min时，指令副枪第一次向熔池内插入测温-取样-定碳探头(TSC) 进行检测，依据检测结果修正静态模型的计算结果，重新计算命中终点所需的供氧量(或供氧时间)和造渣剂加入量，以实现终点碳温双命中。第二次副枪检测安排在吹炼终点，采用TSO(测温-取样-定氧)探头检测熔池温度和钢水氧活度，测氧在几秒内完成，根据碳-氧活度关系计算出钢水的实际碳含量，并取出金属样化验分析成分，若终点命中则决定该炉直接出钢，若检测结果与目标值不符再通过模型计算或人工干预进行补吹，以达到目标值。下面介绍一下副枪的结构及性能指标，为迁钢副枪系统操作人机界面清晰显示副枪本体结构如图4.2所示：

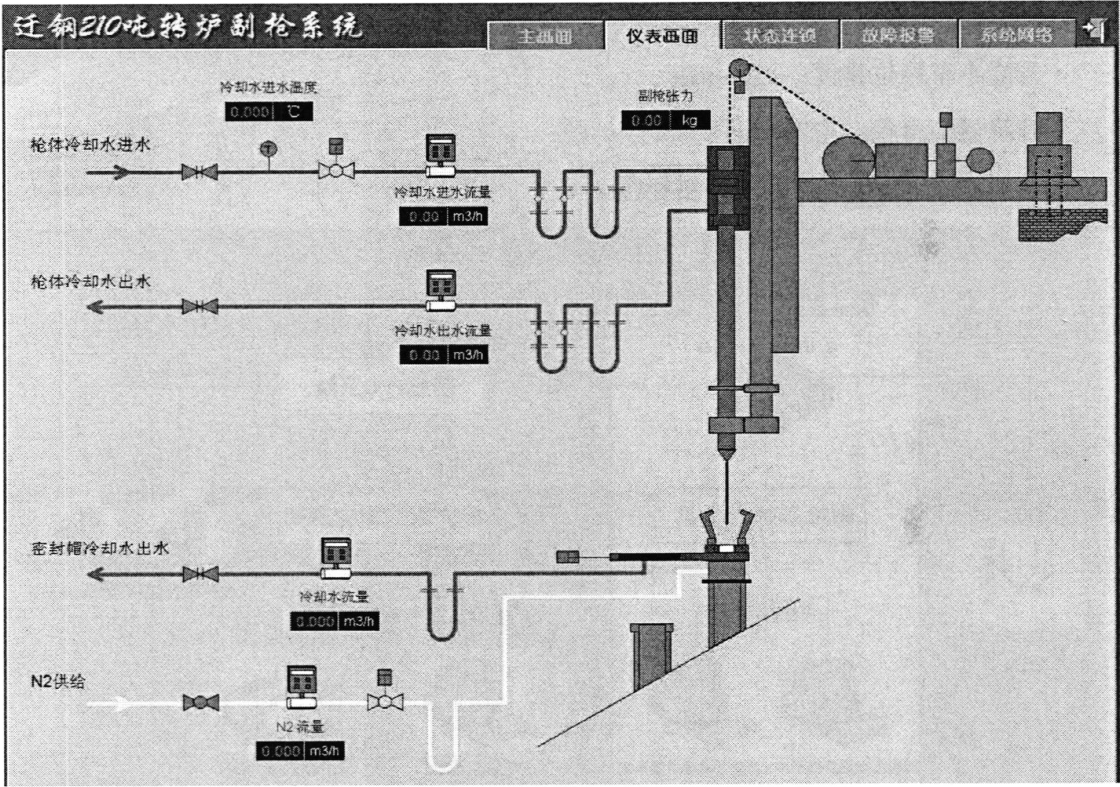


图 4.2 迁钢副枪系统操作人机界面
Fig 4.2 Sub-lance system operation HMI

副枪系统的主要技术参数如下：

- 氧枪和副枪的中心距：1.1m
- 副枪长度(含探头)：23.584m
- 副枪外径：114.3mm
- 测量周期：120s

- 探头尺寸：Φ 80mm×2000mm
- 机型：旋转式
- 旋转半径：4505mm
- 旋转角度：96°
- 旋转速度：0~1.5r/min
- 旋转定位精度：±2。
- 升降行程：22.640m
- 升降速度：高速 150m/min
- 中速 36m/min
- 低速 6m/min
- 升降小车停位精度：±10mm
- 升降卷筒直径：1274mm

图 4.3 为转炉副枪系统的网络拓扑图：

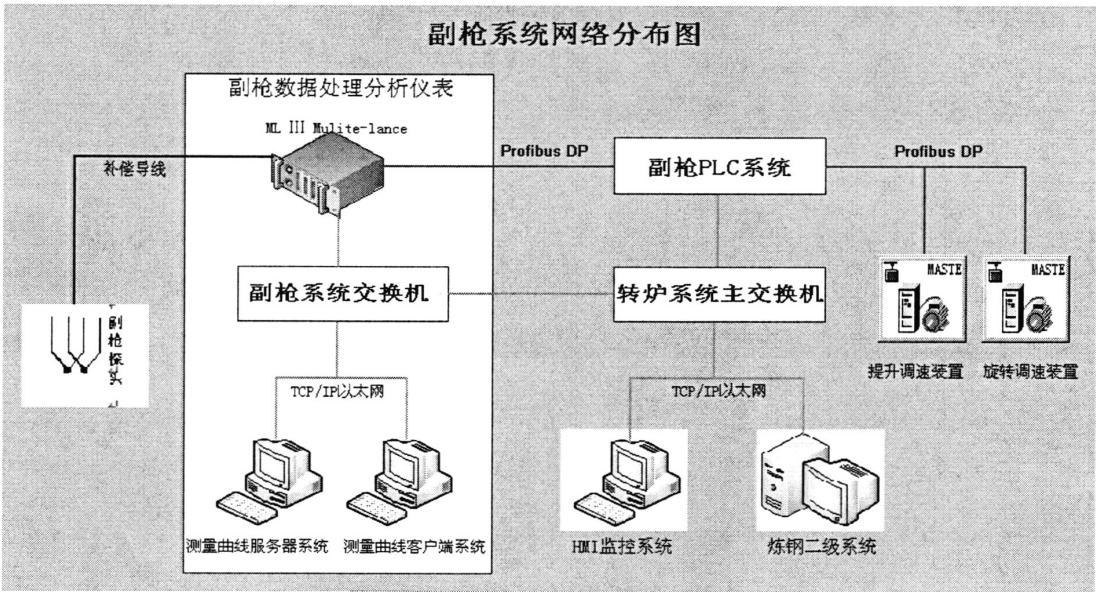


图 4.3 转炉副枪网络拓扑图

Fig.4.3 Network topological diagram of converter sublance

副枪是自动化炼钢必备的重要设备，在炼钢吹炼过程的后期（供氧量达 85%），副枪开始第一次测量（温度、结晶定碳和采样），动态控制模型根据副枪测量的结果对吹炼前静态控制模型（物料平衡、热平衡、氧平衡等）计算的数据进行校正，同时实时预测钢水的温度和碳含量。当预测值进入吹炼终点目标范围，发出提枪停吹指令。吹炼停止后，副枪开始第二次测量(温度、活度氧和取样)，终点碳含量由活度氧计算得到。吹

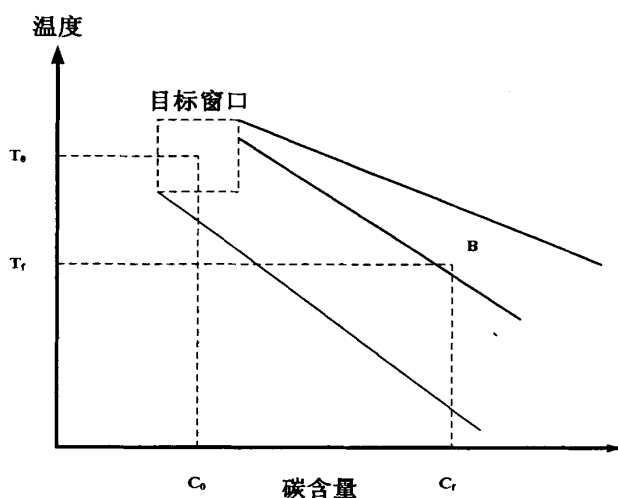
炼模式设计与成份控制分析

4.1.3 对终点碳、温度、磷、硫及碳氧积浓度的控制分析

首先,从一些钢厂的低碳到中高碳钢终点碳和温度命中率来看,烟气分析动态控制高于副枪。原因在于,采用烟气分析可根据烟气曲线变化判断炉内冶炼状况,实现过程的连续控制。从吹氧开始随时预报吹炼过程中的碳温变化,计算机根据从质谱仪得到的分析值信号、供氧速度、和造渣原料的投入速度等实际吹炼数据,每隔 2s 对相关项目进行一次计算,得到瞬时炉气流量、温度及脱碳速率,连续预测钢水碳含量,为动态模型进行终点预报提供依据,逐步朝终点命中^[35]。副枪控制在转炉吹炼绝大多数时间是靠人工经验控制,终点前 2~3min 向熔池内插入副枪进行检测,检测结果命中率较低^[36]。虽然测温、定碳分析结果直观可靠,但最后的终点碳、温度命中主要依赖后期吹炼参数的调整,即延长吹氧时间或重新加料补吹来命中终点,若想提高第一次副枪检测碳温命中率,相对更依赖于静态模型的准确性^[37]。图 4.4 为转炉动态控制阶段钢水温度和碳含量预测示意图。从统计分析来看,随着终点碳的提高,二种控制方式的终点命中率都是下降的,主要原因在于终点碳高时,碳氧反应仍在激烈进行,终点碳和温度波动很大,预报准确和一次命中难度加大,导致命中率下降,这也是二种动态控制方式今后着重需解决的课题。

然后,从冶金学原理可知,转炉脱磷、脱硫比较关键的是在炼钢过程中要形成良好的炉渣,造好渣是去除钢水中磷硫的前提条件。下面以一些数据为例来比较烟气分析动态控制与副枪控制对脱磷、脱硫效率的高低。首先,通过烟气分析动态控制系统监控 CO 浓度曲线的变化和发展趋势,操作者参照 CO 浓度曲线变化调整枪位和加料时机。根据“初期渣早化、过程渣化透、终点渣化好”的造渣原则,使碱度在冶炼过程中逐步增加,8min 以后取渣样石灰已基本熔化,整个吹炼过程化渣良好,终渣碱度在 3.4。而副枪控制则依赖经验操作,在 8min 以后取渣样仍有少量石灰未化,终渣碱度在 3.2。副枪比烟气分析控制终点渣样碱度相应要低 0.2~0.3。其次,从渣中 FeO 变化可看出,副枪控制在吹炼过程中 FeO 先明显下降再急剧上升,终点 $w(\text{FeO})$ 平均为 25%,75% 以上炉次炉渣存在返干现象;而烟气分析动态控制,FeO 先缓慢下降再平缓上升,终点 $w(\text{FeO})$ 为 19%,只有 20% 炉次炉渣存在返干现象,副枪控制的终点 $w(\text{FeO})$ 比烟气分析控制要高 6% 左右,当渣中 $w(\text{FeO}) \geq 20\%$ 时不利于转炉脱硫。第三,采用烟气分析动态控制过程温度是逐步上升的,操作者根据温度预报采用加料和控制枪位调整温

度，避免过程温度大起大落，终点温度可有 92 %控制在目标范围之内，终点温度波动范围在 27℃之间；副枪控制温度由于人工经验操作，83%炉次存在过程温度偏高或偏低，造成吹炼后期要加料降温或继续吹氧提温，终点温度波动范围在 36℃之间，终点温度波动范围相应比烟气分析要高 3~12℃，也影响到脱磷效果。以上几点原因从统计结果可得到验证，采用烟气分析动态控制的脱磷率、脱硫率分别达到 93%、33 %以上，相比副枪控制要高出 6 %和 4 %。



动态控制阶段钢水温度与碳含量预测示意图

图 4.4 转炉动态控制阶段钢水温度和碳含量预测示意图

Fig 4.4 Converter dynamic control of temperature and carbon content of molten steel stage prediction diagram

另外，烟气分析和副枪动态控制都要求转炉必须有良好的底吹搅拌来均匀熔池中钢水的成分和温度，保证烟气分析预报和副枪检测的结果能真实反映转炉的冶金反应过程，达到预报准确性和检测代表性。实践中以碳氧浓度积的低高来反映底吹搅拌效果好坏，底吹搅拌效果好一定程度上意味着终点命中率高。要求在吹炼过程中关注炉底涨落和底枪状况，确保良好的底吹效果以保证熔池的成分和温度均匀，实现提高终点命中率。副枪控制的终点碳氧浓度积相对要高于烟气分析控制的终点碳氧浓度积，主要原因在于烟气分析是恒压、恒氧量一枪吹到终点命中，不倒炉直接出钢。由于在吹炼中实行烟气成分的连续检测、分析，无须中断吹炼，保证了转炉的连续操作；而副枪在终点前2~3min须进行测温-取样-定碳探头检测，为确保检测正常，这时氧枪氧压流量要减少，检测完毕恢复氧压流量，吹炼终点再安排第二次副枪检测，若终点没有命中再吹氧一次，钢水氧的质量分数就要增加，同时为确保直接出钢，副枪控制终点往往存在过吹现象。

4.1.4 对原料消耗和设备维护的控制

通过烟气曲线的变化掌握炉内反应情况,可自动或人工干预,不断地动态校正,准确预报钢水终点碳和温度及磷硫含量,进行过程控制。同时,吹炼后期动态控制模型根据炉气成分的变化计算终点碳和温度,并结合转炉烟气变化曲线由模型准确预报钢水终点碳和温度,系统自行确定吹炼终点,确保转炉终点命中率实现直接出钢,使散状料和合金消耗明显下降,从而实现最佳冶炼效果。

对于副枪控制,静态模型不能根据吹炼情况采集炉内金属液成分和温度变化等炉内信息来调整吹炼参数,在转炉吹炼绝大多数时间是靠人工经验控制^[38]。因此一次命中率较低,需重新计算命中终点所需的供氧量(或供氧时间)和冷却剂加入量以实现第二次副枪检测终点碳温双命中。副枪相当于事后挽救控制,烟气分析相当于事前预防控制。

烟气分析动态控制技术只需增加一套烟气采集、处理系统和质谱仪分析系统,分析系统借助转炉上的两个探头来保证连续测量,其中一个探头用于烟气周期性取样,另一个进行清洗和再使用,原材料消耗少,维护也很方便,对厂房和现有设备不需要做任何大的改造,因此技改、安装、维护成本低。烟气分析动态控制技术适用于各种转炉,不受炉口尺寸和厂房高度的限制。

副枪控制其本身设备系统比较复杂,对炉口直径有一定要求,需要较高的厂房高度,一般只能用于新建大转炉采用。同时使用副枪由于工作条件恶劣,如转炉炉膛泡沫渣严重,副枪取样段若粘钢、粘渣将影响探头安装,对设备使用维护要求高,副枪属于一次性高成本消耗材料,使用起来成本较高。而且副枪控制过度依赖探头的质量,若探头质量不好将严重影响测量结果的准确性,从而对钢水质量产生很大影响,且副枪无法进行连续检测,不能实现真正意义上的动态炼钢。

4.1.5 烟气、副枪自动化炼钢系统吹炼模式设计

在钢种字典中设计了冷却剂模式,发热剂模式,吹炼模式,加料模式和出钢合金加入模式。

(1) 冷却剂模式

- 1) 冶金工程师可预先定义最多两种冷却剂组合作为冷却剂使用。
- 2) 各种物料可按照预定规则,在保证总的冷却效果的前提下进行合理的分配。

(2) 发热剂模式与冷却剂模式相同。

(3) 吹炼模式

- 1) 此模式按照实际过程的吹氧量的百分比来设计的。
- 2) 吹炼模式中按照主吹阶段,修正阶段和副枪吹炼控制三个部分定义整个吹炼模式,定义不同氧步下氧枪的枪高和氧枪吹氧实时流量一级底吹流量信息。
- 3) 后搅模式是根据吹炼过程的状态变化来激活控制的。
- 4) 副枪控制模式是根据剩余的氧量来控制的。

表4.1为炼钢系统吹炼模式表,详细介绍了吹连过程各数据参数的情况,如氧吹氧百分含量,以及枪位高度、熔池液位、底吹信息等相关信息。

表 4.1 炼钢吹炼模式表

Table.4.1 Steel-making blowing mode

步骤号	氧百分比	吹氧量	枪高	熔池液位	氧气流量	氮气流量	氩气流量
1	0	500	220	150	500	300	—
2	2	1000	220	150	500	300	—
3	30	1500	240	150	500	300	—
4	35	2000	240	150	500	300	—
5	50	4000	240	150	500	300	—
6	70	5000	180	150	500	—	400
7	75	6000	180	150	500	—	400
8	80	7000	180	150	500	—	400
9	95	8000	160	150	500	—	400
10	100	10000	160	150	500	—	400
11 (后搅)	—	—	—	—	—	—	500
12 (后吹)	—	—	150	150	500	—	500
13 (后搅)	—	—	—	—	—	—	500
出钢	—	—	—	—	—	—	500
出完钢	—	—	—	—	—	—	500
副枪下枪	—	-1600	160	—	300	—	200
副枪提枪	—	-1350	160	—	800	—	400
后氧步1	—	-1000	160	—	800	—	400
后氧步2	—	-800	160	—	800	—	400
后氧步3	—	-500	160	—	800	—	400

(4) 加料模式

- 1) 加料模式按照预加料, 主吹阶段, 修正阶段和副枪动态吹炼控制分四个部分。
- 2) 模式按照实际过程的吹氧量的百分比来定义的加料批次的;
- 3) 各个批次是按照实际需要加入的散装料的重量来定义的。
- 4) 修正阶段包括后搅, 后吹阶段相关信息的定义。
- 5) 副枪动态吹炼控制部分定义动态阶段冷却剂和发热剂的加入模式的定义。此阶段是以剩余氧量的值来触发加入的。以保证动态加入量的加入合适的时机。详细加料情况如表4.2所示:

表 4.2 炼钢加料模式图
Table.4.2 Steel-making feeding mode

	步骤号	氧百 分比	吹氧 量	石灰	生白 云石	轻烧	萤石	FeSi	焦炭	矿石	锰矿
主 吹 阶 段	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	500	7000	800	1500	0	0	0	5000	0
	2	2	1000	3000		500	0	0	0	3000	0
	3	32	1500	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	35	2000	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	50	4000	0	0	0	200	0	0	0	0
	6	70	5000	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	75	6000	0	0	0	200	0	0	0	0
	8	85	7000	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	90	8000	0	0	0	0	0	0	0	0
修 正 副 枪 控 制	10	100	10000	0	0	0	0	0	0	0	0
	11 (后搅)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12 (后吹)	—	—	1000	—	300	—	—	—	—	—
	13 (后搅)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
副 枪 控 制	动态冷却	—	1500	—	—	—	—	—	—	100%	—
	动态发热	—	1500	—	—	—	—	100%	—	—	—

(5) 出钢合金加入模式

- 1) 此模式定义出钢阶段合金的加入顺序和加入量。

- 2) 合金加入顺序是针对每个合金的模式来定义的。
- 3) 在同一个合金模式中如果存在相同优先级的合金则同时加入。
- 4) 冶金工程师根据每个合金模式中包含的合金的种类的特点,进行合金加料顺序的定义。
- 5) 系统提供修改加入顺序的操作界面供冶金工程师使用。(一级PLC程序考虑计入顺序的编程问题)
- 6) 合金的加入顺序分为1, 2, 3, 4四个级别, 表4.3为合金加入模式表。
 - 1表示出钢之前需要加入的合金,
 - 2表示出钢开始需要加入的合金,
 - 3表示出钢期间加入的合金,
 - 4表示出钢结束需要加入的合金。

表 4.3 炼钢出钢合金加入模式

Table.4.3 Steel-making Alloy adding model

	步骤号	合金1	合金2	合金3	合金4	合金5	合金6	合金7	合金8	合金9	合金10
出	17(1)	N	N	N	N	N	N	N	Y	N	Y
钢	18(2)	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N
阶	19(3)	Y	N	N	N	N	Y	N	N	Y	N
段	20(4)	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	Y

4.2 副枪自动控制装置、逻辑控制及操作

转炉副枪基础自动化部分从控制上分为弹仓控制装置、副枪升降装置、副枪旋转装置和副枪数据分析系统四部分组成, 最终实现副枪探头的自动装卸, 副枪测量过程以及通过数据分析系统获得转炉钢水的熔池温度、结晶温度、氧电势, 并计算出钢水中的碳含量和转炉熔池液位。

4.2.1 弹仓控制装置

弹仓控制装置是将副枪测量所用的探头提前放置在弹仓控制装置的5个弹仓内, 其中每个弹仓可存放26支探头, 探头的种类一般分为TSC、TSO、T探头三种, 其中TSC探头用于吹炼过程测量, 有测温/取样/定碳功能; TSO用于吹炼结束测量, 有测温/取

样/定氧功能；T用于烟气分析系统的温度校正，有测温功能。副枪在连接探头时，根据操作人员对探头类型进行选择或者在自动方式下探头类型的选择，将所选择的弹仓内的探头通过气动翻版阀控制，将副枪探头放置在副枪传输链上，在通过传输链将探头运输至副枪摆动臂上，副枪夹持器夹紧后，副枪摆动臂开始由水平位置提升到垂直位置，摆动臂到达垂直位置后副枪导向锥开始关闭，等待副枪的下降，当副枪下降到导向锥打开高度时，导向锥打开，副枪继续下降直到检测到副枪过程连接信号后，副枪夹持器打开，副枪开始提升到可旋转的高度，同时摆动臂开始下降直到水平位置。

4.2.2 副枪升降装置

副枪的升降由1台直流电动机驱动相应的机械设备完成，直流电动机由可控硅调速装置供电。副枪的位置控制由PLC及外围设备共同完成。副枪升降装置是完成副枪在连接、测量、复位周期中的副枪升降动作，副枪的升降控制采用的是直流调速装置进行调速的，通过PLC的脉冲发生器进行位置确认，并最终通过副枪的过程到位信号对副枪的高度进行校准。在副枪的整个升降控制中主要分为四个速度控制，即为0.1m/s、0.2m/s、0.6m/s、2.5m/s的速度提升或者下降。

4.2.3 副枪旋转装置

副枪的旋转由1台交流电动机(由SIEMENS 6ES70 VVVF变频装置供电)驱动相应的机械设备完成。副枪的位置控制由PLC及外围设备共同完成。副枪旋转的目的主要是在副枪完成测量后由测量位置旋转到副枪连接/脱卸探头位置，或在修炉时将副枪移开。副枪旋转装置是完成副枪在测量、复位周期中的副枪选装动作，副枪的旋转装置采用的是变频调速传动系统，通过PLC的脉冲发生器进行检测，在旋转过程中通过PLC的软点减速点或者现场的硬点减速点进行减速，并最终通过旋转到位信号进行位置对中。副枪的选装控制分为高速和低速两个速度控制。

4.2.4 副枪数据分析系统

副枪数据分析系统是将副枪在测量过程中测量的毫伏信号，通过副枪数据分析系统进行分析计算后，获得的转炉钢水温度和氧电势以及钢水的碳含量和熔池液面高度，通过网络通讯将所获得信息发送到副枪控制PLC，并最终将所测的温度和碳等信号发送到副枪二级模型系统，以实现副枪二级模型系统的动态启动。图4.8为自动化炼钢系统数据流示意图，介绍了自动化炼钢系统副枪、烟气、转炉数据交换流向。

副枪数据分析系统采用的是上海贺利氏电测骑士公司MLIII_Multi-lance分析仪表，实现副枪数据分析功能，主要是实现测量和分析转炉熔池温度、结晶温度和氧电势参数，并具有结晶定碳、定氧定碳和熔池液位等测量功能。同时配套副枪数据管理分析软件，安装运行于PC机，与分析仪表通过TCP/IP协议通讯。该软件可显示测量数据的实时和历史曲线，具有测量分析结果显示和查询管理功能。图4.9为转炉副枪测量曲线：其中红色线为熔池温度测量曲线、蓝色线为氧电势测量曲线、黑色线为副枪高度曲线。

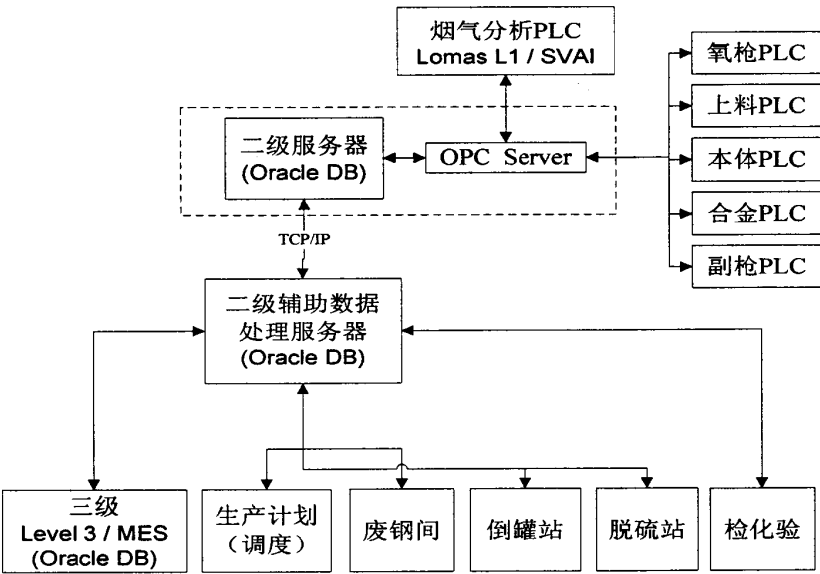


图4.8自动化炼钢系统数据流示意图
Fig4.8 Automated steel-making system data flow diagram

4.2.5 转炉副枪基础自动化的控制主要逻辑

转炉副枪基础自动化控制主要分为3个主周期和2个辅助周期，3个主周期为连接周期、测量周期、复位周期；2个辅助周期为至测量位周期和至连接位周期。

(1) 连接周期是完成转炉副枪探头的连接过程，其主要动作是实现副枪弹仓控制装置的自动控制以及副枪在连接位的升降控制，并最终完成副枪探头的连接；

(2) 测量周期是完成转炉副枪的测量过程，其主要的动作为副枪由连接位旋转到测量位，在测量位下降控制，并实现副枪在钢水中停留一段时间，以满足测温取样的过程；

(3) 复位周期是完成副枪动作的复位过程，并最终将副枪停止在副枪连接的高度，复位周期的动作不受位置的限制，在测量周期结束后会自动转为复位周期的动作，其余的动作都是有操作人员手动来启动；

(4) 至测量位周期控制是实现副枪在连接位到测量位的自动控制周期，主要是为了调整副枪在连接位和测量位的位置对中控制，以及在副枪探头连接好后，先旋转至测量位等待，以缩短副枪测量周期的运行时间；

(5) 至连接位周期控制是实现副枪在测量位到连接位的自动控制周期，主要是为了调整副枪在连接位和测量位的位置对中控制；

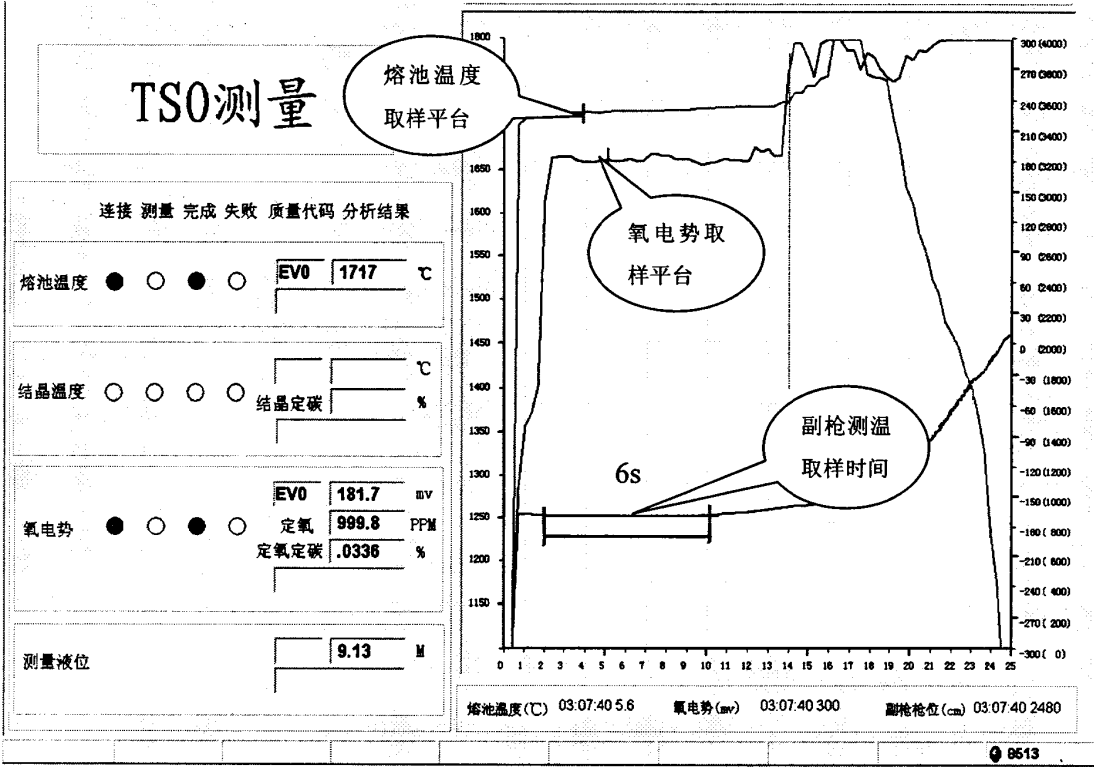


图 4.9 副枪测量曲线
Fig 4.9 Sub-lance measurement curve

4.2.6 转炉副枪操作控制

目前，国内采用转炉副枪计算机动态控制的钢铁企业越来越多，副枪及自动炼钢控制系统已成为转炉自动控制的主要手段，但在使用过程中仍存在问题，导致转炉副枪系统未发挥应有作用，其原因主要是思想、管理、操作和设备维护不到位，副枪及自动炼钢控制系统投入运行之后，应坚定不移地采用，不能因为有人工操作可备用，就有轻视的思想，炼钢分厂管理模式应服从于计算机自动炼钢的需求；实现计算机动态控制的首要条件是输入数据准确、可靠、稳定，这对原料的管理和计量提出了更高要求，所以对原料进行分类管理和采用高精度计量器必不可少；副枪在运转过程中，经常会发生设备故障，为提高其可靠性，应提前做好准备，采取相应措施，例如：

(a)为防止枪头粘渣、粘钢，枪头应急剧冷却，并应采用铜质枪，施加涂敷剂；

- (c)为使枪体表面光滑,可用机械除渣装置,并且使吹扫枪体氮气压力保持 0.2MPa;
- (d)为防止枪体弯曲,应提高冷却水量,并安装在线校正装置;
- (e)为防止枪体漏水,应从材料强度、冷却方式等方面加以解决;
- (f)为防止电气和机械出现故障,可采用全密封式,并使用耐高温的元件和零件。

同时要注重熟悉转炉副枪可以在多个位置进行副枪系统的控制。重要的控制位置有:转炉主控室的人机界面(HMI)、事故提升控制(A操作台)、APC控制(B操作台)、旋转平台控制(C操作台)、维护处理位(D操作台)和副枪枪体冷却水控制(E操作台)。

4.3 设计完善副枪、烟气自动化炼钢模型

副枪烟气自动化炼钢模型开发使熔池的钢水成分和温度均匀,并使烟气中的一氧化碳、二氧化碳和氧浓度能真实反映转炉熔池氧化反应过程,保持全炉役烟气分析有效、准确^[39]。同时针对所用造渣原料质量不稳定、成分波动大,相应对平衡方程计算原理进行修改。全过程追踪参数,提高终点碳、温度的达标率,实现直接出钢。结合迁钢现状,将副枪和烟气分析动态炼钢技术取长补短结合使用,即为验证烟气分析模型预测结果的准确性,在冶炼的不同时期,如5min、9min、13min 和出钢前,用副枪测温、定碳、取样;最大限度的发挥自动化炼钢技术的优势,实现真正意义上的动态控制炼钢,从而提高钢水质量降低成本,增加经济效益。下面对模型情况进行设计说明:

(1) 一次加料计算模型

操作人员通过HMI利用可用的钢水重量和钢种等级来触发一次加料计算。

模型的输入表 (4.4)
Table.4.5 Fist feeding model of Steel-making input

项目	输入	单位	描述
目标值	出钢量	Kg	目标的出钢量
	出钢温度	℃	吹炼终点温度
	钢种成分	%	终点的钢水成分
	终渣碱度和成分	—	渣碱度和 MgO 含量
实际过程数据	铁水的成分和温度	—	倒罐站的铁水成分和温度
	预准备的铁水成分和温度	—	已经准备好的铁水的温度和成分
	废钢	%	—
	散装料	%	成分, 可用性, 料罐信息

模型的输出表（4.5）

Table.4.6 Fist feeding model of Steel-making output

输出	单位	描述
铁水重量	Kg	加入的铁水量
废钢重量	Kg	加入的废钢量
钢水重量	Kg	计算的终点的钢水重量
钢水的成分	%	计算的终点的钢水成分
渣量	Kg	计算的终点的渣量
渣成分	%	计算的终点的渣成分
氧耗量	Nm3	需要的氧耗量
散装料	Kg	需要的散装料的量

（2）二次加料计算模型

SCC的启动是自动的或者依赖实际装入的铁水的重量，成份和温度来触发，附加的触发条件是操作人员输入铁水温度后通过HMI触发。

模型的输入表（4.6）

Table.4.7 Second feeding model of Steel-making input

项目	输入	单位	描述
目标值	钢水温度	℃	吹炼终点的温度
	钢水成分	%	吹炼终点的成分
实际过程数据	加入的铁水量		温度，重量，成分
	加入的废钢量	Kg	重量
	废钢的成分	%	—
	散装料的成分	%	—

模型的输出表（4.7）

Table.4.8 Second feeding model of Steel-making output

输出	单位	描述
氧耗量	Nm3	需要的氧耗量
散装料	Kg	需要的散装料的量
钢水重量	Kg	计算的终点的钢水重量
钢水的成分	%	计算的终点的钢水成分
渣量	Kg	计算的终点的渣量
渣成分	%	计算的终点的渣成分

（3）在线预测模型

在线预测模型在炉次吹炼开始后自动在后台开始运行，对熔池内的钢水成分和温度进行连续的在线预报。

(4) 补吹修正计算模型

修正计算模型的启动是操作人员根据需要，通过HMI，在炉次吹炼结束后开始的。

模型的输入表（4.8）

Table.4.9 After blowing Correction model of Steel-making input

项目	输入	单位	描述
目标值	钢水温度	℃	吹炼终点的温度
	钢水成分	%	吹炼终点的成分
实际过程数据	测量的温度	℃	—
	测量的碳含量	%	—
	加入的铁水量	—	温度，重量，成分
	加入的废钢量	Kg	重量
	加入的散装料量	Kg	—
	吹氧量	Nm3	—
	补吹的原因	—	温度，P，C 等成分

模型输出表（4.9）

Table.4.10 After blowing Correction model of Steel-making output

输出	单位	描述
氧耗量	Nm3	需要增加的氧耗量
散装料	Kg	需要增加的散装料的量
钢水温度	℃	补吹后的钢水温度
钢水重量	Kg	补吹后的钢水重量
钢水成分	%	补吹后的钢水成分
渣量	Kg	补吹后的渣量
渣成分	%	补吹后的渣成分

(5) 出钢合金计算模型

模型计算的目的是为了满足不同出钢后钢水的目标成分和重量计算的所必须的原料。

模型考虑价格的因素，实现合金加入的最优最佳匹配方案，计算的除的结果满足综合的成本最优的原则。

模型输入表 (4.11)

Table.4.11 Alloy adding model of Steel-making input

项目	输入	单位	描述
目标值	钢水成分	%	吹炼终点的成分
实际过程数据	测量的温度	℃	—
	测量的碳含量	%	—
	加入的铁水量	—	温度, 重量, 成分
	加入的废钢量	Kg	重量
	加入的散装料量	Kg	—
	吹氧量	Nm3	—
合金原料数据	成分	%	温度, P, C 等成分
	收得率	%	—
	价格	—	—

模型输出表 (4.12)

Table.4.12 Alloy adding model of Steel-making output

输出	单位	描述
出钢期间的合金加入量	Kg	需要增加的氧耗量
钢水温度	℃	补吹后的钢水温度
钢水重量	Kg	补吹后的钢水重量
钢水成分	%	补吹后的钢水成分
渣量	Kg	补吹后的渣量
渣成分	%	补吹后的渣成分

(6) 反馈计算模型

反馈模型的作用是在线修改模型的参数，以使冶炼过程缓慢的改变。在修正计算和出钢计算时自动启动。

模型输入表 (4.13)

Table.4.13 Feedback calculation model of Steel-making input

项目	输入	单位	描述
实际过程数据	测量的温度	℃	—
	测量的碳含量	%	—

模型输出：修正的参数包括模型运算的静态参数，动态参数和副枪系数等。

4.4 本章小结

首钢迁钢公司炼钢厂自主研发、自主创新、自主集成的副枪新项目，实现了副枪连接、副枪测量以及副枪复位周期的各个动作。该系统完全满足自动化炼钢生产的使用要求，取得了较好的应用效果，得到生产工艺技术人员的认可。

本章主要针对副枪及烟气系统工作原理，深入研究副枪及烟气系统的硬件设备及自动化控制的主要逻辑，副枪的控制装置以及吹炼模式设计与成份控制分析，从设计和应用不同角度完善副枪系统和烟气分析系统。

第5章 转炉自动化炼钢静态、动态模型的建立及性能测试

转炉冶炼的静态数学模型，实际上是一种炉料计算。这种计算可采用三种方法进行：理论模型、统计模型、经验模型^[40]。本章对数模的建立是以理论模型为主，结合经验模型，即根据炼钢过程的物料平衡和热平衡方程式以及生产实际情况作一系列假设建立起来的模型。动态模型主要是在吹炼末期用副枪大量测试取得钢水温度和含碳量的数据，通过统计分析和总结操作经验建立起来的，包括脱碳速度模型、钢水升温模型和冷却剂加入量模型，图 5.1 为转炉冶炼数学模型计算模式图：

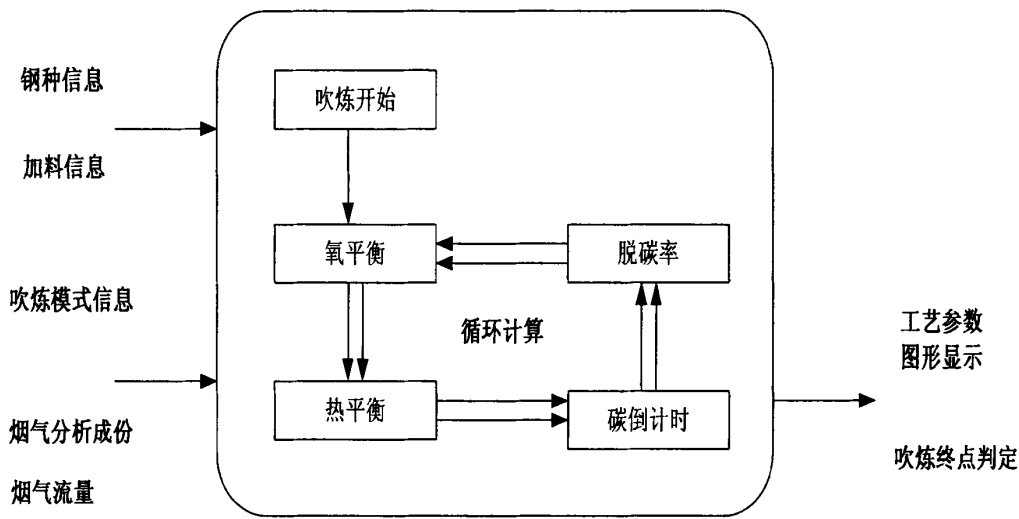


图 5.1 转炉冶炼数学模型计算模式图
Fig5.1 Converter smelting mathematical model diagram

5.1 自动化炼钢模型原始数据及工艺制度的确定

主要的原始数据有转炉公称容量，金属材料(液态生铁、废钢、成品钢)的成分及铁水温度;废钢及氧化铁皮(辅助冷却剂)、石灰及白云石(辅助熔剂)的成分。参与冶炼意义不大的材料中有转炉炉村、高炉炉渣及废钢中的泥土和铁锈，可以简化取之为固定值进入炉渣。

5.1.1 造渣制度的确定

确定造渣制度首先要搞清楚可否进行单渣法冶炼以去除杂质。为此，先要对渣量进行半经验性计算，然后根据造渣方法确定石灰用量和渣量。

(1) 总渣量的估算式

$$W_{Cs} = 2B[1.7(W_{[Si],P} + W_{[Si],sc}) + g_{SiO_2}] \quad (5.1)$$

式中 W_{Cs} ——100 kg 金属炉料的总渣量(估算)/kg

B —炉渣碱度为 2.5~3.5(冶炼低磷铁水时)

$W_{[Si],P}$ —生铁中的硅含量/kg

$W_{[Si],sc}$ —废钢中的硅含量/kg

g_{SiO_2} —由其它原料带入的二氧化硅量/kg

(2) 脱磷程序

由磷平衡, 可知金属中残余的磷含量 $W[P]$ 可用下式计算:

$$W[P] = \frac{100W_{p,料}}{W_m + 0.437L_{cp}W_{cs}} \quad (5.2)$$

式中 W_m —钢液量/kg

$W_{p,料}$ —金属炉料所带入的磷含量

L_{cp} —磷在渣、钢中的分配系数

0.437—将 P_2O_5 折算为 P 的系数

(3) 脱硫程度

由硫平衡, 可知金属中的硫含量 $W[S]$ 可用下式确定:

$$W[S] = \frac{100(W_{S,料} - W_{S,气化})}{W_m + L_s W_{cs}} \quad (5.3)$$

式中 $W_{S,料}$ —炉料带入的硫含量

$W_{S,气化}$ —气化脱硫的硫含量

L_s —硫的分配系数。

(4) 冷却剂用量的确定

1) 废钢的最大可用能量

在废钢为唯一冷却剂的情况下, 废钢用量可按式计算:

$$G_{max} = \frac{[(\Delta H_p + 88t_p + Q_s + Q_{FeO} + Q_{CO}) - (Q_{cm} + Q_{cs} + Q_{cg} + Q_m)]}{[61.9 + 0.88t_p + (\Delta H_{FeO} + \Delta H_p - \Delta H_{sc}) \times 10^2 - 0.7t_{sc}] \quad (5.4)$$

式中 G_{max} —废钢的最大可能装入量 kg

ΔH_p —100 kg 生铁中杂质全部氧化时放出的热量 kJ

ΔH_{sc} —100 kg 废钢中杂质全部氧化时放出的热量 kJ

t_p, t_{sc} —生铁、废钢温度 $^{\circ}\text{C}$

0.88, 0.7—分别为铁水、废钢比热容

Q_s, Q_{FeO}, Q_{CO} —由炉渣形成、渣中氧化铁形成的 CO 燃烧成
CO₂ 而获得的热量 kJ

2) 废钢用量及辅助冷却剂用量的确定

若当量系数 R 和氧化铁压块加入量 $G_{\text{辅}}$ 已知, 则废钢实际用量 G_{sc} 为:

$$G_{sc} = G_{\text{max}} - RG_{\text{辅}} \quad (5.5)$$

(5) 石灰用量的确定

在采用单渣法操作时, 石灰用量 $G_{\text{石灰}}$ 确定如下:

$$G_{\text{石灰}} = \frac{100}{(W_{\text{CaO, 石灰}} - W_{\text{SiO}_2, \text{石灰}} \cdot B)} \cdot [B \cdot (2.14\Delta W_{\text{Si}} + 2.29\Delta W_{\text{P}} + g) - g_{\text{CaO}}] \quad (5.6)$$

式中 $W_{\text{CaO, 石灰}}, W_{\text{SiO}_2, \text{石灰}}$ —石灰中 CaO、SiO₂ 的质量百分数%

$\Delta W_{\text{Si}}, \Delta W_{\text{P}}$ —分别为被氧化的 Si 和 P 的质量百分数%

g, g_{CaO} —除石灰外, 其它材料带入的(SiO₂+P₂O₅)量及 CaO 量/kg

2.14, 2.29—分别为 SiO₂ 与 Si 的分子量之比, P₂O₅ 与 2P 分子量之比。

(6) 准确渣量的确定

准确渣量 W_s 由下式确定:

$$W_s = \frac{100}{100 - W_{(\text{FeO})}} \cdot (2.14\Delta W_{\text{Si}} + 2.29\Delta W_{\text{P}} + 1.29\Delta W_{\text{Mn}} + g_s) \quad (5.7)$$

式中 $W_{(\text{FeO})}$ —渣中氧化铁的质量百分数%

g_s —来源于金属炉料之外的炉渣量 kg

$\Delta W_{\text{Si}}, \Delta W_{\text{P}}, \Delta W_{\text{Mn}}$ —分别为被氧化的 Si、P、Mn 的质量百分数%

2.14, 2.29, 1.29—分别为 SiO₂ 与 Si 分子量之比, P₂O₅ 与 2P 分子量之比,
MnO 与 Mn 分子量之比

5.1.2 物料平衡的确定

物料平衡包括炉气、炉渣、钢液数量及组成的确定, 吹氧量和吹氧时间的确定等。

钢液量可由金属平衡决定。

(1) 钢液中残余杂质含量

钢液中残余的锰、磷、硫的百分含量分别为:

$$W_{[2Mn]} = \frac{100W_{2Mn}}{Wm + 0.775K_{Mn}W_{(FeO)}Ws} \quad (5.8)$$

$$W_{2Mn} = 0.775W_{2MnO} + W_{Mn料}$$

式中 $W_{(FeO)}$ —渣中 FeO 质量百分数/%

W_{2Mn} —除金属炉料外其他物质所带入 MnO 质量百分数/%

$W_{Mn料}$ —金属材料中锰的平均质量百分数/%

Wm —钢液量/kg

$$W_{[P]} = \frac{100W_{2Mn}}{Wm + 0.437L_{cp}Ws} \quad (5.9)$$

$$W_{2P} = 0.437W_{2P_2O_5} + W_{P料}$$

式中 $W_{2P_2O_5}$ —除金属料外其它物质所带入的 P2O5 质量百分数/%

$$W_{[S]} = \frac{100W_{2S}}{Wm + L_sWs} \quad (5.10)$$

$$W_{2S} = W_{s料} + W_{s外} + W_{s气化}$$

式中 $W_{s外}$ —源于金属料外的硫的质量百分数/%

(2) 供氧制度

1) 供氧量由下式确定:

$$Go_2 = \frac{100}{Bo_2Wo_2} [g_{o_2}^C + g_{o_2}^E + g_{o_2}^{2FeO} - (g_{o_2}^{石灰} - g_{o_2}^{其他})] \quad (5.11)$$

式中 Go_2 —100 kg 钢的吹氧量/kg

Bo_2 —氧气被熔池吸收的系数

Wo_2 —氧气中氧的质量百分数/%

$g_{o_2}^C, g_{o_2}^E, g_{o_2}^{2FeO}$ —分别为脱碳、氧化其他杂质及形成渣中氧化铁所需氧量/kg

$g_{o_2}^{石灰}, g_{o_2}^{其他}$ —参加反应的石灰中 CO2 所含氧量及其他材料带来的氧量/kg

$$\text{已知耗氧量后可将其表示成体积量为: } Vo_2 = 7Go_2 \quad (5.12)$$

2) 吹氧时间的确定:

$$\text{若单吹氧强度 } Io_2 \text{ 已知, 可知吹氧时间 } t \text{ 为: } t = Vo_2 / Io_2 \quad (5.13)$$

5.1.3 热平衡的确定

热平衡的确定, 主要是转炉炼钢的能量分配, 主要表现为温度控制。由冶炼过程中的热平衡方程可获得金属溶池温度 t_m 如下:

$$t_m = \frac{Q_2 - Q_{\text{其他}} - 54.8W_m + 1379W_s}{0.84W_m + 2.09W_s} \quad (5.14)$$

式中 Q_2 —收入的全部热量/kJ

$Q_{\text{其他}}$ —除加热钢液和炉渣外的全部热耗量/kJ

$(54.8+0.84t_m)$ —钢液热效应 kJ

$(2.09t_m-1379)$ —碱性炉渣热效应 kJ

5.2 转炉终点控制数学模型

转炉终点控制的内容广泛，磷、硫含量等都应该纳入控制的范围，但是最为核心的还是碳含量和温度的控制，转炉炼钢终点控制分为两个阶段，前期的静态控制和后期的动态控制，其中前期的静态控制设定：

$$v_{\text{铁}} = T_c \times T_{\text{Si}} \times T_{\text{Mn}} \times T_s \times T_p \times T_t \times T_{w1} \times T_{w2} \quad (5.15)$$

其中 $T_c, T_{\text{Si}}, T_{\text{Mn}}, T_s, T_p, T_t, T_{w1}, T_{w2}$ 分别表示炼钢初态时 C, Si, Mn, S, P 含量、铁水温度、铁水量、废钢量的论域，并且称 $v_{\text{铁}}$ 为初态空间。

$$v_{\text{钢}} = G_c \times G_{\text{Si}} \times G_{\text{Mn}} \times G_s \times G_p \times G_t \quad (5.16)$$

其中 $G_c, G_{\text{Si}}, G_{\text{Mn}}, G_s, G_p, G_t$ 分别表示炼钢终态时成品 C, Si, Mn, S, P 含量、成品温度的论域，并且称 $v_{\text{钢}}$ 为终态空间。

$$v_{\text{过}} = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times C_6 \dots \times C_{14} \times C_{O2} \times C_T \quad (5.17)$$

其中 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6 \dots C_{14}, C_{O2}, C_T$ 分别表示炼钢过程中添加的铁矾土、石灰、白云石、铁皮、菱镁石、焦炭、硅锰、硅铁、硅钡铝、硅钙铁、铝锰铁、C-Si 中 SiMn 的含量论域和吹氧量、测定温度和碳含量的的论域，并且称 $v_{\text{过}}$ 为过程空间。

前期的静态控制是从转炉吹炼开始到副枪测定时刻，为了便于讨论研究考虑用如下非线性函数表示前期静态模型：

$$y = g(X_1, X_2) \quad (5.18)$$

式中： $y \in v_{\text{过}}$

$X_1 \in v_{\text{铁}}$

$X_2 \in v_{\text{钢}}$

后期的动态控制从副枪测定的结束时刻开始，此时杂质元素已经基本去处，剩下的任务就是确定合适的后吹氧量继续将碳氧化至目标值，同时还应该考虑这一阶段的升温过程以确定合适的冷却剂加入量使停吹温度同时命中目标。尽管后吹阶段时间较短，但

同样既有化学变化又有物理变化，是一个存在严重非线性的多输入多输出的复杂系统，这里我们用如下非线性函数来表示后期动态模型：

$$y = f(X_2, X_3) \quad (5.19)$$

式中， y 对应停吹钢水温度或碳含量。

$$X_2 \in V_{\text{钢}},$$

$$X_3 \in V_{\text{过}}$$

将整个冶炼数学模型中的几十个方程组应用计算机程序完成，可迅速地得到较为准确的计算机方案。通过钢厂的实际数据代入该软件进行上机运行，它不但可通过计算机建立起来的模型可以判断可否进行单渣冶炼、预报冶炼终点含碳量和温度值，而且可以预先确定物料平衡、热平衡和全炉物料用量^[41]。这些结果与炼钢厂的实测值误差很小。经过多次上机运行表明该软件可得到较为满意的效果。

5.2.1 静态控制模型

转炉静态控制是转炉计算机的基本控制方式，副枪动态控制也以静态控制为基础，静态模型包括终点预报模型、供氧模型、造渣模型和底吹模型。

(1) 终点预报模型

终点预报模型，它通常选取钢水终点温度和终点碳作为目标值，以冷却剂(矿石或铁皮等)加入量和氧耗量作控制变量，即用冷却剂加入量预报终点温度，用氧耗量预报终点碳。因此，终点预报模型包括冷却剂加入量和氧耗量两个方程。为减少系统误差的影响和提高模型的适应能力，我们采用以参考炉为基准的方式，并以单位冷却剂量和单位氧耗量表示，即建立本炉与参考炉各参数之差的模型，本炉的冷却剂加入量和氧耗量等于参考炉的冷却剂量和氧耗量加上各自的增量。本炉冷却剂量为：

$$\begin{aligned} W_{CL} &= \left(\frac{W_{CL}}{W_{CH}} \right)_R W_{CH} + \Delta W_{CL} + W_{CH} \\ \Delta W_{CL} &= f_1(\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n) \end{aligned} \quad (5.20)$$

本炉氧耗量为：

$$\begin{aligned} V_{O_2} &= \left(\frac{V_{O_2}}{W_{HM}} \right)_R W_{HM} + \Delta V_{O_2} W_{HM} \\ V_{O_2} &= f_2(\Delta X_{11}, \Delta X_{12}, \dots, \Delta X_{1n}) \end{aligned} \quad (5.21)$$

式中： $\left(\frac{W_{CL}}{W_{CH}} \right)_R$ ， $\left(\frac{V_{O_2}}{W_{HM}} \right)_R$ ——参考炉的单位冷却剂量和单位氧耗量；

W_{CH} 一装入量，等于铁水和废钢重量之和；

W_{HM} 一铁水重量；

ΔW_{CL} , ΔV_{O2} —本炉的单位冷却剂量和单位氧耗量与参考炉的单位冷却剂量和氧耗量之差;

$\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n$ —冶炼参数(铁水量、钢水终点目标温度、铁水温度、废钢量、铁水碳含量和硅含量、石灰量、白云石量、萤石量等)本炉与参考炉之差;

$\Delta X_{11}, \Delta X_{12}, \dots, \Delta X_{1n}$ —冶炼参数(铁水碳含量和硅含量、废钢量、冷却剂量、石灰量、白云石量、萤石量等)本炉与参考炉之差。

这种模型对参考炉的选择十分重要,直接影响计算结果的准确性,通常根据与本炉相似相近的原则按一定算法确定。

(2) 供氧模型

供氧模型包括氧流量、枪位制度的确定、氧枪高度的计算。氧流量是总结现场工艺操作经验,对不同钢种按不同装入量和炉役期确定一定的模式,在吹炼中按此模式改变。枪位制度是根据生产工艺要求,按不同钢种分组制定的氧枪枪位变化的模式,如图 5.5 所示。氧枪高度根据钢水液面高度加上氧枪间隙值(即氧枪喷口与液面的相对距离)来确定,其中氧枪间隙值按工艺要求制定的变更模式。钢水液面高度按照每班实测的装入铁水后的液面高度,考虑装入量和炉役期不同用模型逐炉计算。

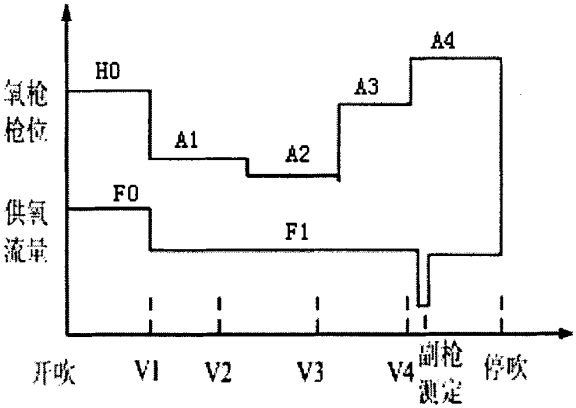


图 5.5 吹炼中氧枪枪位和供氧量变化示意图
Fig5.3 Lance position and oxygen supply schematic changes Schematic diagram

(3) 造渣模型

造渣模型包括两部分: (1)根据铁水中 S, P 的含量和装入量以及炉渣碱度的要求,对操作数据进行统计分析得出石灰、白云石、萤石等造渣料加入量的计算公式; (2)副原料加料制度:根据操作经验按不同钢种确定副原料的加入批数、时间和各批料的加入量如图 5.6 所示:

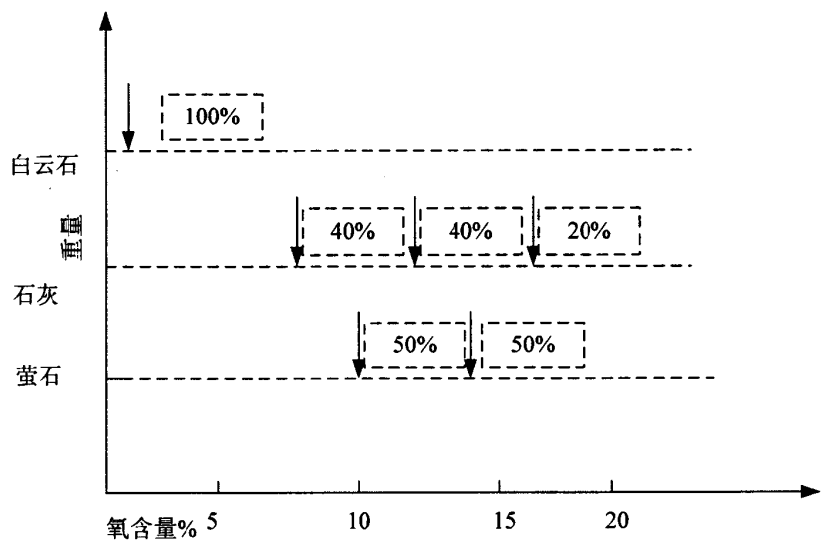


图 5.6 副原料加料模式示意图

Fig5.6 Steel-making Vice raw material feeding pattern diagram

(4) 底吹模型

底吹模型是根据底部供气工艺研究和总结操作实践提出的底部供气制度，包括供气种类、压力、流量以及气体的切换时刻等，如图 5.7 所示。

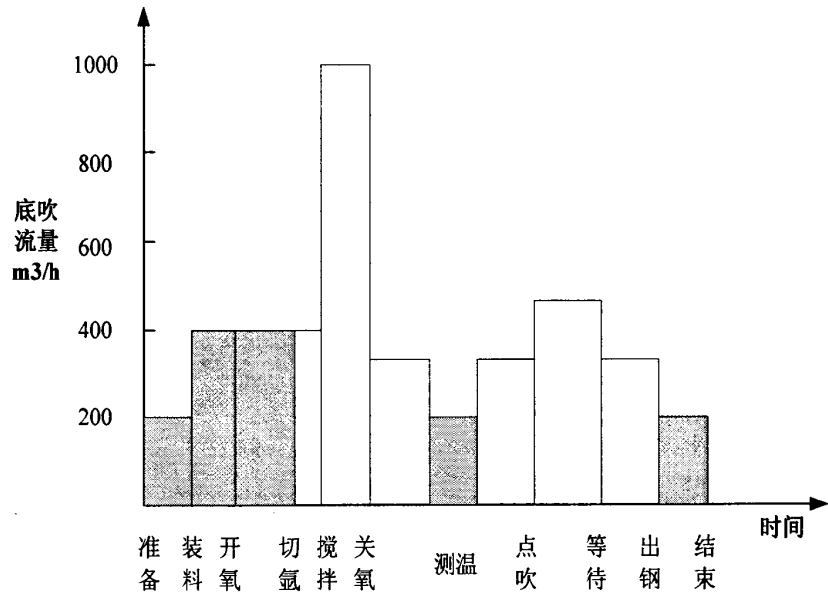


图 5.7 底吹供气模式示意图

Fig 5.7 Schematic diagram of bottom blowing gas model

5.2.2 动态控制模型

动态模型主要是在吹炼末期用副枪大量测试取得钢水温度和含碳量的数据，通过

统计分析和总结操作经验建立起来的,包括脱碳速度模型、钢水升温模型和冷却剂加入量模型。

(1) 脱碳速度模型

以指数曲线形式来拟合吹炼末期的脱碳速度如:

$$\frac{dc}{do_2} = A[1 - \exp(C - C_0)PB] \quad (5.22)$$

式中: $\frac{dc}{do_2}$ —脱碳速度;

C—钢水含碳量;

C₀—最低限界碳;

A, B—系数。

所需的吹氧量由上式的积分求得:

$$V_{O_2} = \int_{C_E}^{C_S} \left(\frac{do_2}{dc} \right) dc \quad (5.23)$$

式中:C_S, C_E—副枪中间测试的含碳量和终点含碳量。

(2) 钢水升温模型

由吹氧量 V_{O_2} 造成的钢水温升为:

$$\Delta T = aV_{O_2} + b \quad (5.24)$$

式中:a, b—系数。

预测的终点温度为:

$$T_p = T_s + \Delta T \quad (5.25)$$

式中:T_s—副枪中间测试的温度。

如果 T_p 在终点目标温度范围之内则按 V_{O_2} 吹氧即可达到同时命中。如 T_p 大于终点目标温度的上限则必须加冷却剂降温。

(3) 冷却剂加入量模型

冷却剂加入量模型按下式计算:

$$W_{co} = K_{co}(T_s + \Delta T - T_E) \quad (5.26)$$

式中: T_E —终点温度目标值;

K_{co} —系数。

(4) 合金模型

此模型根据钢种目标成分和预计出钢量确定出钢时应加入钢包的各种铁合金量以

及脱氧用铝量，应加入钢包的各种元素量一般均按下式计算：

$$W_i = \frac{(X_{ai})W_{st}}{Y_i} \quad (5.27)$$

式中：
 W_i —第 i 种元素量；
 X_{ai} —第 i 种元素的目标含量；
 W_{st} —出钢量；
 Y_i —第 i 种元素的收得率。

应加入的铁合金量为：
$$W_{Aj} = \frac{W_i}{R_{ij}} \quad (5.28)$$

式中： W_{Aj} —第 j 种牌号铁合金加入量；
 R_{ij} —第 j 种铁合金中第 i 种元素含有率。

在使用多种牌号铁合金量时，可用线性规划算法选择最佳配比使铁合金成本最低。

5.3 静态、动态模型系统性能测试

炼钢模型性能测试保证条件是转炉设备的设计和制造以及原料的选用既要符合选定钢种生产的要求，也要符合氧气顶吹炼钢的冶金和技术原理；铁水中的渣子应尽量去除。与铁水一起兑入的渣量不得超过铁水重量的 0.2%；炼钢过程中不得出渣；出钢和溅渣后留在转炉内的残渣将被倒入渣罐；

基础自动化系统达到设计功能，各个 PLC 工作站连续稳定运行，运行率 $\geq 99.9\%$ 。单体设备实现远程自动控制功能。基础自动化系统实现自动控制功能，重点在氧枪系统、倾动系统、氧气调节系统、副枪系统、底吹系统、除尘系统、OG 系统、加料系统、加合金系统、铁水和废钢称量系统、测温装置等。化验服务器与转炉计算机通讯正常，成分数据收发无错误，炼钢计算机与各个相关 PLC 通讯正常、收集和上传数据无失帧，炼钢计算机与终端/客户端通讯正常无中断。

全炉冶炼累计氧气计量标定和校准误差 $\pm 50\text{Nm}^3$ ，氧气压力满足工艺设计要求；在动态模型调试前保证 TSC 测成率 $\geq 95\%$ ，副枪系统运行稳定，实现远程自动控制。实现铁水全部脱硫、扒渣工艺；必须通过氧枪向钢水吹入纯氧(氧含量不低于 99.5%)制成，并加入冷却剂和造渣料；每一炉的添加料的加料精确度和加料速度的具体要求如表 5.1 所示：

表 5.1 炼钢吹炼模式表
Table.5.1 Blowing mode of steel-making

料仓	最低喂料速度
石灰	3000 千克/分钟.
矿石	1000 千克/分钟.
熔剂	1000 千克/分钟.

料仓称重精确度：满量程的 +/- 0.5 %

吹炼期间如果一炉需要添加的冷却剂超过二吹阶段 90%剩余时间内所需的量，此炉将不包括在性能测试中。一座转炉两次连续冶炼之间的时间间隔(指从一炉吹炼结束到下一炉吹炼开始之间的时间)最长为 60 分钟。铁水的测温取样必须在铁水装满铁水包后 15 分钟内进行。铁水装入转炉至转炉出钢的时间间隔不超过 60 分钟。铁水装入转炉至开始喷吹的时间间隔不超过 5 分钟。从铁水脱硫后的测温到开始喷吹之间的间隔时间不得超过 30 分钟。使用炼钢模型炼钢期间对数据的测量精确度有以下限制：测温精度+/- 4℃。铁水和钢水中碳、锰、磷和硅含量的精确度要求如表 5.2 所示。加废钢之前不需要预热。转炉车间的工作人员需要具有工作经验。钢水中的硅含量应小于 1%，熟石灰中：CaO% >= 90%; SiO2% <3.0%; LOI<5%;反应度>= 350ml. 炼钢模型必须输入转炉添加料的成份，且每种成分的偏差不得大于 2%.底吹供气元件性能和供气强度稳定，且复吹效果稳定，控制系统能够接收炼钢计算机供气流量设定值调节实际流量。在性能测试阶段，钢水成分结果要在取样后 10 分钟内输入模型系统。而钢渣成分结果需在 12 小时内输入。

表 5.2 元素精度要求表
Table.5.2 Element accuracy requirements of steel-making

元素	范围	最大偏差	
		钢水	铁水
C	C <= 0.1%	0.007%	-
	0.1% < C <= 0.2%	0.010%	-
	0.2% < C <= 0.6%	0.015%	-
	0.6% < C	0.020%	0.1%
Mn	-	0.020%	0.040%
P	-	0.0015%	0.01%
Si	-	-	0.050%

炼钢动静态模型性能保证在设备工艺稳定运行条件下，终点[C]-T 双命中率应达到如

下表 5.3 工艺目标:

表 5.3 工艺目标值

Table.5.3 Process target steel-making

C 范围 (%)	C 精度(%)	T 精度(℃)	投产 6 个月内命	投产 12 个月内命
			中率 (%)	中率 (%)
0.02~0.6	±0.015	±12	70	90
0.6~0.12	±0.025	±12	65	86
0.12~0.24	±0.030	±12	58	80

注：计算公式 命中率= [C] - T 命中累计炉数/符合计算机控制炼钢总炉数

考核办法：在开工投产和计算机炼钢控制系统投运的前提条件下，数据收集和模型调试运行启动后，经过双方同意，确定实施工艺目标考核验收过程。考核验收方法是在选定的一座转炉连续统计 100 炉的数据，再统计出其中符合计算机控制炼钢的炉数和计算机控制炼钢[C]-T 双命中的炉数，最后计算出[C]-T 双命中率。

如果统计数据不能计算出[C]-T 双命中率，如入选炉数小于 50 炉，或者命中率达不到考核目标，视为考核验收失效。

5.4 本章小结

本章研究了自动化炼钢模型原始数据及工艺制度，进行了造渣制度、物料平衡、热平衡的确定；同时对转炉终点控制数学模型建模，前期的静态控制建模、后期的终点温度动态控制模型建模以及模型的实现及模型系统性能进行测试。转炉应用数学模型控制吹炼过程，具有控制精度高、调节方便的优点，对冶炼高牌号，窄成份的高端用钢冶炼生产提供可靠保障，是提高企业行业竞争力和盈利能力的重要组成部分。

第6章 结论与展望

本论文在分析了转炉自动化炼钢控制系统的工作原理、以及冶炼过程中动态模型和静态模型的建立和应用,并在此基础之上对自动控制系统中的重要环节氧枪系统,副枪系统及烟气分析系统进行了比较系统地阐述,本文并以设计研究迁钢 210T 转炉项目自动控制系统,完成了以上位工控机、可编程控制器 PLC 和光纤以太网为架构的控制系统的设计,采用 INTOUCH 组态软件完成了上位机监控系统的设计开发,并根据转炉炼钢冶炼工艺详细介绍了自动化炼钢动态、静态模型的的不同建模方法,有机理模型(即以热力学参数反映炉内反应,它根据物料平衡和热平衡方程,参考生产实际并在一系列假设下推导得出并建立模型)、统计模型(应用数理统计方法,例如多元回归法等,对大量生产数据进行统计分析来建立模型)和经验模型三种,经验模型在结构形式上也有纯量和增量两种方式。为减少系统误差的影响和提高模型的适应能力,我们采用以参考炉为基准的增量方式。随着新技术新工艺的不断涌现,自动化炼钢的动、静态模型也在不断地更新发展中,推动着转炉冶炼技术的向前发展。

对今后工作的展望:

近年来蓬勃兴起的智能控制技术,例如,模糊控制、神经网络控制技术更是对传统转炉冶炼过程供了新的思路。但是,如何应用这些先进的控制技术到实际中去成了一个需要解决的问题。对于更先进的转炉自动化炼钢的控制策略,它完全改变了传统冶炼思想,如何将这新技术、新思想融入到转炉冶炼工艺工程中来提高冶炼效率,创造更大的经济效益,更值得去关注和进行这方面的研究。今后的研究重点,应该是模糊控制、智能控制和主动控制在转炉冶炼过程中的切入策略和应用。如何将这理论转换为现实的应用,在现实应用中完善和发展这理论,是一个非常具有挑战 and 现实意义的问题。

参考文献

1. 马竹梧. 钢铁工业自动化, 炼钢卷[M], 北京: 冶金工业出版社, 2003, 9-17.
2. 殷瑞钰. 我国炼钢-连铸技术发展和 2010 年展望 [C], 2008 年全国炼钢——连铸生产学术会议文集, 北京: 2008, 6-9.
3. 刘玠, 孙一康, 王京. 冶金过程自动化基础[M], 北京: 机械工业出版社, 2006, 65-69.
4. 刘玠, 蒋慎言, 陈大纲. 炼钢自动化技术[M], 北京: 冶金工业出版社, 2006, 239-245.
5. 余志祥. 现代转炉炼钢技术[J], 炼钢, 2001, 3(2): 6-10.
6. 陶钧, 谢书明, 柴天佑. 转炉炼钢控制模型的研究与展望[J], 钢铁, 1999, 5(8): 69-72.
7. 冯捷, 贾艳, 转炉炼钢实训[M], 北京: 冶金工业出版社, 2004, 24-30.
8. 崔坚, 李佳, 杨光. 西门子工业网络通讯指南[M], 北京: 机械工业出版社, 2005, 239-245.
9. Pataki G, Horvath Gy, Strausz Zs Talata. Inverse Neural Modeling of a Linz-Donawitz Steel Converter [J], E&I Elektrotechnik and Informationstechnik, 2000, 117(1): 13-17.
10. 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M], 北京: 机械工业出版社第一版, 2000, 15-36.
11. 王连华, 李江. 转炉炼钢动态过程控制量算法的改进[J], 江苏冶金, 2003, 23(1): 45-47.
12. S.M. Chen, J.M. Tan. Handling multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague sets theory [J], Fuzzy Sets and Systems, 1994, 67 (2) :163 –172 .
13. 冯捷, 张景进, 时彦林, 杨娟. 数学模型在转炉中的研究与应用[J], 河北科技大学学报, 2006, 7(01): 45-51 .
14. 张志军, 王建伟, 南晓东, 李承祚, 张立国. 副枪自动化炼钢技术在 210t 转炉上的应用[C], 2008 年全国炼钢——连铸生产学术会议文集, 北京: 2008, 38-42.
15. 杨金奇, 刘学军. 工业以太网技术及其应用现状与发展[J], 四川工业学院学报, 2002, 15(03) : 35-37 .
16. 薄涛, 刘世平, 王得卫, 左威. PLC 在转炉炼钢过程中的应用[C], 2009 年河北省轧钢技术与学术年会论文集(下), 唐山: 2009, 52-56.
17. 郭亚芬, 杜斌. 宝钢有副枪转炉吹炼终点控制模型研究与应用[C], 全国冶金企业计控网络化研讨会论文集, 北京: 2003, 20-24.
18. 籍建欣. 转炉数学模型应用的新进展[J], 河北冶金, 2005, 12(2): 12-14.
19. 李福进 等. 炼钢厂过程测量及控制仪表[M], 北京: 冶金工业出版社, 1995, 76-78.
20. 万雪峰, 舒宏富, 应用炉气分析的转炉动态模型的初步研究[J], 材料与冶金学报 2004, 6(9): 15-24.

21. 郑文静, 吴树涛, 王囡囡. 转炉氧枪控制系统的设计应用 [J], 莱钢科技, 2008,17 (03): 7-9.
22. 于洋. 专家系统在转炉氧枪枪位控制中的应用研究[D], 东北大学, 2005 .
23. 刘浏.转炉控制信息与在线检测技术(下) [J], 冶金自动化, 2000, 24(30): 5-7.
24. CHAI T Y, LIH Y, YU Z Y, et al. The integrated automation sys-tem of iron&steel enterprise[C], 15 th IFAC W orld Congress. Barcelona: E lsevier Science Ltd, 2002,9-12.
25. 柴天佑, 郑秉霖, 胡毅, 黄肖玲. 制造执行系统的研究现状和发展趋势[J], 控制工程, 2005, 31(06) : 42-45.
26. 田超, 吴敏, 曹卫华.转炉炼钢综合自动化控制系统[J], 自动化与仪表, 2005, 8(6): 7-10.
27. 邢曼华, 袁守谦, 赵田丽, 李雪洁, 董鹏. 转炉终点控制技术的研究[J], 金属材料与冶金工程, 2010, 17(02): 23-25.
28. 陈长庚. 以太网技术应用于工业现场总线时的高可靠性与实时性研究[D], 浙江大学, 2002.
29. 王胜. BOF 副枪控制和数据处理[J], 冶金自动化, 2006, 6(04): 19-22.
30. Hei-ichiro ISO, Yutaka JYONO, Michitaka KNNE MOTO, et al. Dynamic Refining Control by Analysis of Exhaust Gas form LD Converter .Transaction ISI[J], 1987, 27(5) :351~358 .
31. 乔卫国, 杨怀玲, 臧元国, 孟伟. 基于副枪技术的动态炼钢系统的研究和应用[J], 信息技术与信息化, 2009, 2(04): 33-35.
32. 吴明, 李应江. 烟气分析与副枪动态控制炼钢技术的实践分析[J], 钢铁, 2009, 28(04): 123-125.
33. 吴明, 梅忠. 转炉烟气分析动态控制炼钢技术[J], 冶金设备, 2006,2(04): 19-21.
34. 张旭升. 质谱仪在转炉炼钢终点控制中的应用[J],鞍钢技术, 2003, 4(06): 30-37.
35. 邱成国, 张红卫, 转炉自动化炼钢动静态模型研究[C], 中国计量协会冶金分会论文集, 北京: 2007, 18-22.
36. Ramaseder N, Pirklbauer W, Kalisch J. Slanted, subalance system for blowing process contron[J], Metallurgical Plant and Technology, 1993, 16(3) :42-45.
37. 许刚, 雷洪波, 李惊鸿, 叶印鹏, 薛军. 转炉炼钢终点控制技术[J], 炼钢, 2011, 6(01) :21-23.
38. 高玉. 转炉炼钢终点静态预测系统的研究[D], 辽宁科技大学, 2008.
39. A process model for BOF process based on bath mixing degree[J], International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2010, 2(06): 12-18 .
40. 孟祥宁, 张海鹰, 朱苗勇. 转炉炼钢过程静态控制模型的改进[J], 材料与冶金学报, 2004, 6(04): 31-32.

41. A.M.彼格耶夫.炼钢过程的数学描述与计算[M], 北京: 冶金工业出版社, 1988, 25-27.

致 谢

本论文的各项工作是在导师李鸿儒教授的悉心指导下完成的。从论文的选题，课题研究过程中关键问题的解决到论文的修改，都离不开李老师的精心指导和辛鹏飞高工的帮助。感谢导师在百忙之中仔细审阅了本文，使本文得以顺利完成，更使我受益终身。

同时要感谢迁钢公司设备部的领导和同事给予的帮助与支持，使我在良好的工作环境中能够顺利的完成论文的创作，在此表示深深的谢意!在此也感谢我的家人，在我研究生学习中，家人不但在生活上无微不至的照顾我，而且给学习也提供了良好的环境和生活上的方便!

感谢信息学院所有相关领导以及老师们，感谢给予我这次学习的机会和亲切的关怀!

衷心感谢百忙中抽出宝贵时间评审本文的各位专家、教授，在此致以诚挚的敬意!