

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

加热炉自动控制系统研究

作 者 姓 名： 赵兴宇

指 导 教 师： 井元伟 教授 东北大学信息科学与工程学院

邱志宏 副高级工程师 首秦金属材料有限公司

申请学位级别： 硕士 学 科 类 别： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

论文提交日期： 2012 年 5 月 论文答辩日期： 2012 年 6 月

学位授予日期： 2012 年 月 答辩委员会主席： 高宪文

评 阅 人： 郑艳
刘鲁宁

东 北 大 学

2012 年 5 月

A Thesis in Control Engineering



J0124106

Research on Automation Control System of Heating Furnace

By ZhaoXingyu

Supervisor: Professor Jing Yuanwei

Senior: Engineer Qiu Zhihong

**Northeastern University
May 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谢意。

学位论文作者签名：成兴宇

日期：2012.6.13

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：

签字日期：2012.6.13

导师签名：

签字日期：

2012.6.13

加热炉自动控制系统研究

摘 要

目前我国宽厚板产能严重过剩,再加上金融危机造成的需求低迷,钢铁行业一直处在亏损状态。加热炉是轧钢生产线的重要设备之一,加热炉自动化控制技术是提高成品钢板质量和生产效率的关键,是提高首钢中厚板产品竞争力的重要保证。为了提高加热炉的生产能力,提高加热炉温度控制精度,保证产品的质量和性能,就必须对现有控制技术进行消化吸收、改进和创新。

本文简要介绍了国内蓄热式加热炉自动控制系统的应用情况,对加热炉自动控制系统进行了详细的分析,详细阐述了加热炉电控系统和仪控系统的具体设备、工艺参数和控制要求。分析了加热炉电控的详细工艺流程以及工作原理。论文对加热炉 L1(一级)、L2(二级)和 L3(三级)控制系统进行了详细的分析和研究。

本文以首秦 4300 生产线加热炉为背景,对首秦加热炉的自动化控制系统进行了研究,包括一级自动化系统、二级自动化系统和三级自动化系统。其中一级自动化系统主要负责现场机械、液压、气动等设备的控制和信号连锁及逻辑判断;二级自动化系统主要负责一级设定值的生成、过程值系统优化、生产数据传递及记录等;三级自动化系统主要负责 PDI 数据的下达、生产计划的生成、生产结果的处理评估等。本文最后结合工程应用实际对 PDI 输入系统的缺陷提出了改进和优化方案,达到了简化操作、减缓劳动强度、降低数据出错率的目的,提高了工作效率和准确率。

论文概括了加热炉控制系统的特点和实际成果,提出了进一步完善该系统的设想,并展望了该系统在今后生产中的应用前景。

关键词: 加热炉; 自动化; 控制系统; HMI; 物料跟踪;

Research on Automation Control System of Heating Furnace

Abstract

Currently, heavy plate productivity is seriously oversupplied in our country. Coupled with the small demand caused by the financial crisis, the steel industry has been in a deficit position. Heating furnace is one of important equipments in the rolling mill production line. Automation control system of heating furnace is the key to improve the quality and production efficiency of finished steel products, and also is an important guarantee for improving the competitiveness of plate products. In order to improve the production capacity of the furnace, enhance the furnace temperature control accuracy, and ensure product quality and performance, it is of great significance to conduct improvement and innovation on the existing control technology.

This Thesis briefly introduces the application of regenerative reheating furnace automatic control system, and carries out a detailed analysis on it. And then the author elaborates on the furnace electronic control systems, instrumentation and control system equipment, technological parameter and control requirements. Specific process and the working principle of the furnace electronic control are also analyzed. A detailed analysis and study on the furnace control system is carried out for L1, L2 and L3.

Based on the heating furnace of Shou Qin 4300 production line, this Thesis gives a detailed introduction on automation and control systems of Shou Qin heating furnace, which includes first level automated system, second level automated system and third level automated system. The first level automated system is mainly in charge of signal chain and logical judgment in on-site machinery, hydraulic and air-powered equipments. The second level automated system is mainly in charge of generation of first level set value, optimization of process value system, transmission and recording of production data. The third.

level automated system is mainly in charge of transmission of PDI data, generation of production plan, and process assessment of production result. Finally, combined with engineering applications, aiming at the defects of PDI input system, the Thesis proposes related improving and optimizing solutions, in order to simplify operations, mitigate the labor intensity, reduce the data error rate, hence to improve work efficiency and accuracy.

This Thesis summarizes the characteristics and actual outcomes of the furnace control system, and then proposes further improvement suggestions of the system, forecasting the system's future application prospect in production.

Keywords: heating furnace; automation; control system; HMI; material tracing

目 录

独创性声明	I
摘 要	II
ABSTRACT	III
第 1 章 绪 论	1
1.1 选题背景及意义	1
1.2 加热炉区工艺流程	1
1.3 加热炉 L1、L2 和 L3 系统的应用	2
1.4 本文主要内容	5
第 2 章 加热炉电气自动控制系统	7
2.1 加热炉电气基础自动化概述	7
2.2 钢坯装炉的自动控制与设备连锁	8
2.3 液压站控制	11
2.4 汽化冷却控制	12
2.5 本章小结	12
第 3 章 加热炉仪表自动控制系统	13
3.1 概述	13
3.2 加热炉仪表自动化控制分析	13
3.2.1 炉温控制	13
3.2.2 排烟温度控制	15
3.2.3 加热炉残氧量控制	15
3.2.4 炉压控制	17
3.2.5 换向控制	18
3.2.6 报警功能	19
3.2.7 安全联锁控制	19
3.3 汽化冷却检测控制	20
3.4 本章小结	22

第 4 章 加热炉二级自动控制系统	23
4.1 二级系统介绍	23
4.1.1 系统描述	23
4.1.2 总体设计	24
4.2 加热炉二级系统结构	25
4.3 加热炉二级系统分析	27
4.4 加热炉燃烧控制数学模型	30
4.5 加热炉二级系统功能设计	34
4.5.1 物料跟踪模块设计	35
4.5.2 温度跟踪模块设计	36
4.5.3 优化设定模块设计	37
4.5.4 反馈控制模块设计	38
4.5.5 通讯管理模块设计	38
4.5.6 数据管理模块设计	39
4.6 接口设计	40
4.6.1 内部接口设计	40
4.6.2 外部接口设计	40
4.7 数据库设计	42
4.7.1 数据库设计原则	42
4.7.2 关键表设计	42
4.7.3 存储过程设计	42
4.8 二级 HMI 画面设计	43
4.9 本章小结	44
第 5 章 加热炉二级系统优化设计	45
5.1 概述	45
5.1.1 首秦加热炉二级的功能及界面	45
5.1.2 首秦加热炉二级系统的优缺点	47
5.2 加热炉 2 级系统的模块设计	47
5.2.1 在线模块和离线模块	47
5.2.2 在线模块的操作模式	49
5.2.3 模块间的关系	49
5.3 加热炉二级报文	50

5.4 加热炉二级 PDI 系统优化	51
5.4.1 原始数据输入 (PDI)	51
5.4.2 PDI 输入方式及存在的问题	53
5.4.3 系统优化方案	54
5.5 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 选题背景及意义

加热炉是轧钢生产线的主要耗能设备,加热炉的能量消耗占整条生产线的80%左右^[1]。加热炉对设备系统的稳定性和安全性的要求很高。目前我国加热炉的加热效率还很低,主要表现为:炉内钢坯加热不均匀,对轧制板型和性能有很大的影响;炉内燃料燃烧过剩或不足,造成燃料的大量浪费,使环境受到污染,并造成钢坯氧化烧损严重。加热炉的计算机自动控制水平有待提高,近年来,随着计算机技术不断的进步,为解决加热炉高产、低耗、低污染和高自动化水平的控制难题提供了许多新的途径。

目前我国已建成各式中厚板轧机总数达到70多套,实际产能近亿吨,国内高水平的中厚板生产竞争格局已经出现,因为受到国内宽厚板产能严重过剩的困扰,再加上金融危机造成的需求低迷,钢铁行业一直处在亏损状态。

加热炉自动化控制是轧钢企业提高生产效率和强化管理的重要手段,加热炉自动化技术是提高成品钢板质量和生产效率的关键。随着生产的不断的进行,加热炉自动化控制系统的一些限制逐步的暴露出来:如加热炉二级如何能生成符合目前生产工艺要求的加热曲线;要想解决这些问题,需要我们必须掌握加热炉自动化控制系统的全部技术。为了提高加热炉的生产能力,提高加热炉温度控制精度,保证产品的质量和性能,并降低能耗,必须对现有加热炉控制技术的消化吸收、改进和创新,才能提高中厚板产品竞争力。本文对加热炉控制系统进行了系统的研究和分析。

1.2 加热炉区工艺流程

天车将钢坯从板坯库吊至上料辊道,然后输送到加热炉炉前,按提前制定的生产计划安排冷装或热装入炉。

钢坯在加热炉的炉前辊道上经过核对和测温,然后进行定位。当加热炉炉内有空位后,入炉炉门打开,装钢机开始动作前移摆正板坯后上升、前进并对送入炉内的板坯进行测宽并送入炉内,在与前一块坯料间隔50mm处停止。然后,装钢机迅速退回原来位置,准备重复送钢动作,同时装料炉门关闭。

步进梁通过上升和前进的矩形运动,炉内钢坯经过加热炉的预热段、加热段和均热段进行加热,使钢坯温度达到生产工艺的要求,当加热钢坯经过加热炉出料端激光检测处,触碰到激光线后,经炉内钢坯跟踪系统将钢坯在炉内的准确位置计算出来,并将信号送至出钢机,当轧机向加热炉发出要钢信号后,出钢机由低位伸进加热炉内,根据系统计算出的钢坯位置进行定位,将钢坯托起出炉,并将钢坯放在出炉辊道上,

出炉炉门关闭，同时将钢坯输送到轧机进行轧制，完成一次装、出钢动作^[2]。

为了使加热炉的操作更灵活，适应钢坯规格(主要是长度和厚度)的频繁变化和冷热坯装炉切换，更好地提高加热炉效率，加热炉配备了两套步进机械；按炉宽方向，步进框架(升降框架和平移框架)均分为左右两个框架，分别由两套步进机械单独传动。板坯在炉内运行由装料端到出料端总跑偏量为 $\pm 30\text{mm}$ 。加热炉工艺布置图(如图 1.1)。

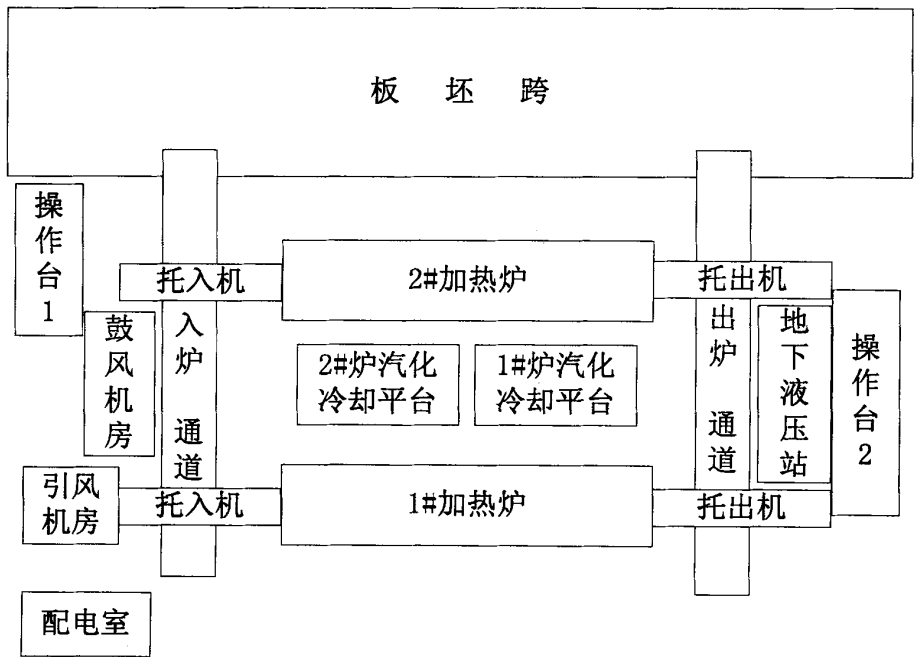


图 1.1 加热炉工艺平面布置图

Fig.1.1 Heating furnace process layout

1.3 加热炉 L1、L2 和 L3 系统的应用

(1) L1 基础自动化控制

轧钢生产线自动化控制系统按实现功能可以分为四个层级，即一级基础自动化、二级过程自动化、三级生产控制系统（MES）和四级企业资源管理系统（ERP）^[3]。

其中一级基础自动化负责执行二级过程自动化的设定值，完成对现场设备的直接控制，并向二级过程自动化提供现场的实际测量数据；一级基础自动化系统包括电控系统和仪控系统^[4]。电控 PLC 实现炉区的辊道控制，实现自动、半自动、手动装钢和出钢，实现步进梁自动控制，生成炉内钢坯的跟踪地图。仪控 PLC 实现炉区的燃烧控制和换向控制。

一级基础自动化系统是整条生产线计算机控制系统的基础，是轧钢生产的关键环节。可靠、快速、精确和稳定的基础自动化系统是保证产品质量和产量的基础。

加热炉一级级基础自动化系统包括电气自动化控制系统和仪表自动化控制系统，

主要控制功能：板坯称重、板坯在辊道上的运输、布料计算、板坯跟踪、炉前板坯定位、板坯上料液压站的控制、干油润滑系统控制、步进式加热炉区域、装钢机前进/后退行程设定及位置控制和板坯宽度测定、出钢机前进/后退行程设定及位置控制、装/出钢机升降位置控制、加热炉装/出炉炉门控制、步进梁控制、与加热炉 L2 计算机的通信、步进式加热炉液压站的控制、稀释风机等其他公辅设施的控制、炉内各段温度控制、各段燃料流量控制、各段燃烧空气流量控制、炉内氧量控制、炉膛压力控制、燃料主管压力控制、燃烧空气压力控制、烟道废气温度控制、燃烧空气温度控制、换热器空气放散控制、换热器温度检测、加热炉入口钢坯温度检测、加热炉内钢坯表面温度检测、燃料总流量检测、冷却水供水总管温度、流量、压力检测、冷却水各排水管温度、压力检测、烟囱废气温度检测、烟道 NOX、SO₂ 检测、吹扫氮气总管压力调节和切断控制、燃料段吹扫氮气支管切断控制、干油润滑系统控制、炉子安全联锁保护控制、步进式加热炉出料区域、出炉辊道控制、与轧线 PLC 之间的通信和信号联锁、干油润滑系统控制^[5]。

(2) L2 级过程控制系统

二级过程自动化为设备的各项控制功能进行设定计算，加热炉二级系统能够实时计算炉内钢坯的温度，生成每块钢坯的加热曲线，并将每块钢坯的出炉温度发送给轧机二级系统，通过二级模型的精确控制使产品满足各项工艺要求。

二级自动化系统将实现钢坯的自动跟踪和生产过程的自动化控制。钢坯跟踪功能可以自动跟踪生产线上的钢板，当钢板在一定的位臵时执行相应的动作。二级自动化系统根据工艺要求经过复杂的运算得出一系列设定值向一级自动化系统发送，一级自动化系统则根据二级系统的设定值控制机械设备的动作^[6]。

钢坯在进入加热炉时，加热炉自动化二级根据炉号调取该钢坯的原始数据，根据钢坯当前的状态和计划的出炉时间来计算加热炉各区域的温度设定点，每块钢坯都被赋予一个计划好的加热曲线。二级自动化系统负责将钢坯分派到最合适的道次。在加热炉内部，实际测得的钢坯温度和设定好的加热曲线每隔 30 秒进行一次比对，比较的结果和剩余的加热时间用来计算新的各加热区域温度设定点，这种闭环温度控制能够精确的完成加热任务。

板加区二级过程计算机主要负责加热炉设定控制，它和三级计算机通信以接收轧制计划和钢坯数据等信息，传输加热炉有关数据，它还和轧线二级计算机通信以传输加热炉和轧线有关数据。板坯库区一级 PLC 直接和三级通信，以接收控制指令和报告实绩。步进式加热炉和步进式加热炉前后辊道的一级 PLC 和二级通信，接受控制命令、报告实绩^[7]。过程控制计算机设备的选型在技术上应是成熟的、先进的，在硬件系统结构设计方面可靠性很高，同时为实现工艺过程优化控制，在各控制区过程控制机上都选用了技术成熟的数学模型。

二级控制计算机负责生产过程中的过程监视和跟踪、控制参数的设定、物料跟踪、

数据采集和处理、数据通信、优化控制、人机对话和打印生产报表等功能，保证产品加工的质量和产量^[8]。

(3) MES 系统在加热炉的应用

三级生产控制系统（MES）主要负责生产计划管理和产品质量管理；四级企业资源管理系统（ERP）主要包括销售、财务、设备和其它企业资源的管理^[9]。

在轧钢与炼钢之间的和谐连接是 MES 系统要解决的重要问题。其一是热装/温装/冷装的协调，其二是板坯库的管理。制约热装/混装有很多因素：如连铸机生产的规格、不同钢种板坯的温度要求、加热炉约束、板坯库约束；MES 系统经复杂的算法进行多次排序/优化，得到最为合理的热送计划，这也取决于 MES 供应商的经验和技术水平。MES 系统流程见图 1.2 所示。

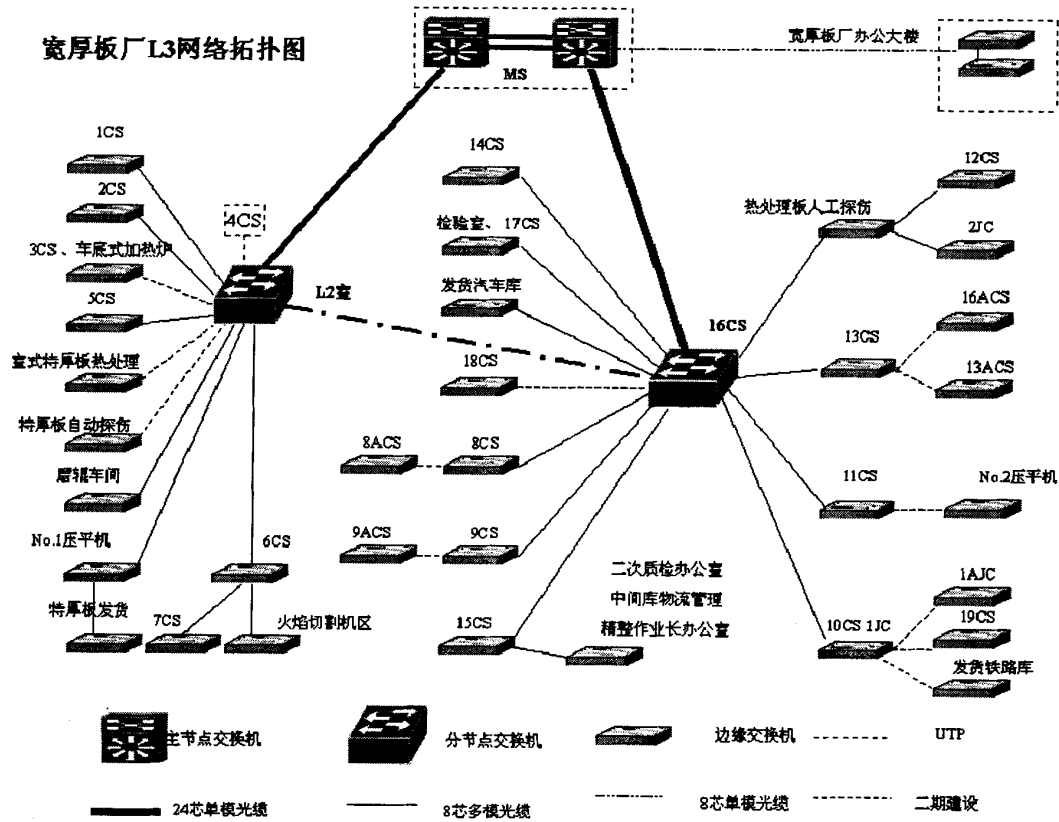


图 1.2 宽厚板三级网络拓扑图

Fig.1.2 Plate level three network topology

钢坯从加热炉开始，进入在线作业，由轧线二级系统接管并进行全程自动化生产，直到钢板下线。在此期间 MES 系统负责监视生产线并与二级系统交换一些必要的数
据。监视是指物料跟踪、订单跟踪等，与二级系统的跟踪类似但处理角度不同，MES 的跟踪主要是宏观的查看，比如查看某一个作业计划的工作情况，或是某一客户订单

的完成程度，以便在需求变化时及时处理。在监视生产线的过程中 MES 系统还负责生成一些报表和日志，以减少人的劳动量。

图 1.3 展示了首秦一期 MES 系统与二级 PCS 及四级 ERP 之间的信息交互关系，同时展示了 MES 系统模块构成。MES 与 PCS 之间主要进行计量、生产指令、检化验指令、生产实绩等信息的交互。MES 与 ERP 之间主要进行销售订单、投料记录/入库转储、交货及发货等信息的交互。

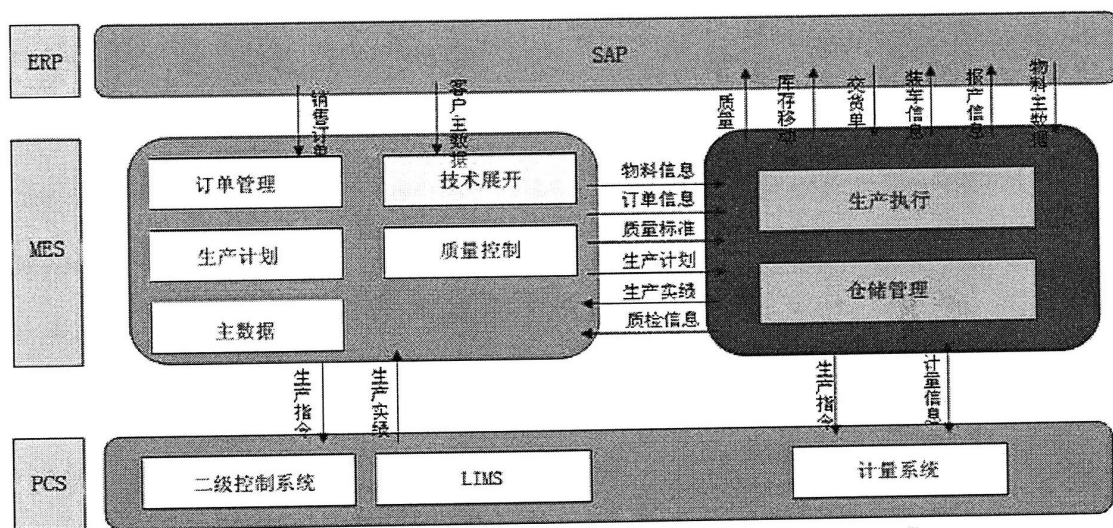


图 1.3 首秦 MES 系统总体架构图

Fig.1.3 The first Qin MES system architecture diagram

MES 位于 ERP 和 L2 的中间层，起着生产计划与调度、质量控制、物流跟踪等重要作用。MES 从上层 ERP 接收主数据和销售订单，并向 ERP 返回订单承诺信息和物料信息，对从订单下达到产品完成整个的生产过程进行控制与管理。另一方面，MES 制定作业计划并转化为生产指令（PDI）下达到 L2 系统去执行，并收集 L2 上传的各种生产实绩信息，包括物料、质量等。

1.4 本文主要内容

本文内容简介：

第 1 章绪论，简要介绍了国内蓄热式加热炉自动控制系统的的发展以及应用情况；介绍了加热炉控制系统 L1、L2 和 L3 级之间的联系和应用，并提出了本课题研究的背景和意义。

第 2 章加热炉电控系统的分析，明确了加热炉电控系统的具体设备、工艺参数和控制要求。分析了加热炉电控的详细工艺流程以及工作原理。

第 3 章加热炉仪控系统的分析，明确了加热炉电控系统的具体设备、工艺参数和

控制要求。分析了加热炉电控的详细工艺流程以及工作原理。

第 4 章加热炉二级系统研究,对加热炉控制系统进行了详细的分析和论述。

第 5 章加热炉 PDI 数据录入系统,对首秦公司加热炉二级系统进行了详细的分析,对 PDI 输入方式及存在的问题进行了详细的分析,并进行了改造和优化。

第2章 加热炉电气自动控制系统

2.1 加热炉电气基础自动化概述

首秦中板工程一期建设一座步进梁式钢坯加热炉，并预留一座同样规模的步进梁式加热炉。单台炉子加热能力为 230t/h，钢坯代表规格为 250×2000×3800mm。钢坯加热温度 950~1280℃，炉底梁采用汽化冷却方式，燃料为高炉煤气，发热值： $750 \times 4.18 \text{kJ/m}^3$ 。

电气基础自动化控制范围：9组上料辊道、1套板坯称重装置、步进梁式加热炉（包括汽化冷却）1座（称1#炉）、出料辊道（至除磷前一组辊）5组、钢坯的计数、测长及物料跟踪等。

电气基础自动化系统选用一套 SIMATIC S7-400 系列 PLC，CPU416。主要由 PLC 主机柜、远程 I/O 站 ET200M、操作员站、网络等组成，PLC 主站设置在加热 2CS 控制室内。I/O 模块为 DC24V 供电。

PLC 主机柜内配置：UR1 机架，PS407 电源模块，CPU416-2DP 模块，CP443 模块，S7-400 I/O 模块。远程 I/O 站(ET-200M)配置：PS307 电源模块，IM153 接口模块，ET-200M I/O 模块。

设置两层通讯网络：PROFIBUS 总线和快速工业以太网。PLC 主机 CPU 与远程 I/O 站、ABB 变频系统之间用 PROFIBUS 总线通信。PLC 和操作员站之间采用以太网通讯，有与轧线、二级系统的以太网通讯接口。

操作方式：加热炉设置下列机旁操作箱，在机旁操作箱上安装常规按钮，指示灯，转换开关等，设机旁和远程 2 种方式，可在机旁操作箱或操作台操作，机旁方式优先。当选择机旁时，在机旁操作；当选择远程时，在操作台操作。当液压站选择远程时，在 CRT 上操作。远程操作时设手动方式、半自动方式和自动方式。

加热炉电气自动化 PLC 的功能：信号采集及处理、辊道的顺序控制、坯料在装料辊道上的测长、坯料在装料辊道上的称重、坯料在装料辊道的定位控制、坯料测宽、装钢机的位置及行程控制、装钢炉门的控制、步进炉步进梁的控制、出钢机前进、后退行程设定及位置控制、出钢炉门的控制、炉底液压站的控制、板坯在辊道和炉内的位置跟踪、坯料跟踪显示、设备监视和控制、事件记录和报警记录。

加热炉电气自动化控制系统的操作方式设有自动、半自动和手动方式三种。

(1) 手动方式：操作工通过操作控制台、HMI 界面对设备进行各个单项操作。主要用在故障时或机械维修等紧急情况下的操作方式。分为远控和机旁 2 种方式，手动方式优先。

(2) 半自动方式: 加热炉的每个单体运行设备(如装钢机、步进梁、出钢机和出入炉门)自动地完成其各自的一个周期的顺序运行。启动运行指令由操作人员给定, 其控制通过基础自动控制系统完成。

(3) 自动方式: 根据各机械设备的运行状况, 自动地完成各工作顺序、设备之间的运行连锁等。全部控制通过过程计算机设定与基础自动化系统协同完成。

2.2 钢坯装炉的自动控制与设备连锁

步进炉的工艺流程主要为: 上料系统输送板坯(测长、测宽、称重、核对和测温)→冷装、热装或直接热装→炉前上料辊道定位(炉内有空位)→装钢炉门打开(到位)→装钢机前移→装钢机将板坯拨正、拖起并送入炉内→装钢机把板坯在与前一块板坯间隔 50mm 处放下→装钢机退回原位(准备重复送钢)→装钢炉门关闭→步进梁矩形运动、板坯加热→步进梁激光检测信号→步进梁减速、停止并下降(钢坯被放到固定梁的一定位置等待出钢)→出钢激光检测信号→出钢炉门打开(到位)→出钢机从低位运行进入炉内, 根据计算出的钢坯在炉内的位置, 将钢坯拖起出炉, 并放在出料辊道上→炉门关闭, 同时将钢坯输送至轧机。加热炉用到的线性位移传感器、称重传感器、接近开关和编码器等, 随设备成套。

加热炉的检测设备有线性位移传感器、称重传感器、接近开关和编码器等。其中线性位移传感器 8 套, 装于液压缸内, 用于步进梁平移、升降位移及装出钢机升降位移的检测; 增量型编码器 9 套, 用在板坯测长 1 套、双排料装炉定位 4 套、双排料装钢机位移检测 2 套、双排料出钢机位移检测 2 套; 激光测宽装置 2 套, 用于板坯测宽; 冷热金属检测器 11 套, 用于板坯测长、加热炉双排料定位、板坯跟踪; 热金属检测器 6 套, 用于出料板坯跟踪。炉内激光检测器 1 套, 用于加热炉出炉坯料位置检测。

(1) 钢坯测长、测宽装置

测长装置设计: 在 A5 辊道一的适当位置(始端)安装 2 支冷热金属检测器(P1、P2, 冷热通用), 在其中 1 台齿轮减速电动机尾部装有旋转编码器, 在钢坯运行中测出钢坯的长度, 以便 PLC 控制系统实现钢坯在 1#或 2#炉的两个装炉辊道上按照给定的布料图自动定位。冷热金属检测器安装在支架上, 支架的角度和高度可调。

测宽装置设计: 在 A7 辊道适当位置两侧装有一对 Delta FT2007 测宽装置, 当钢坯经过时, 测宽装置取得信号, 送给 PLC, 经过计算处理, 得到钢坯的宽度数据。

(2) 钢坯定位装置

在炉子来料方向数第一或二组装炉辊道的适当位置(起始部位)安装冷热金属检测器, 冷金属检测器安装在支架上; 支架高度和角度可调。并在该组装炉辊道上其中 1 台齿轮减速电动机上安装旋转编码器, 当冷热金属检测器检测到钢坯头部时, 旋转编码器开始计数, PLC 根据前部在钢坯运行中测出钢坯的长度, 通过计算与调速控制电

机运转, 根据钢坯在布料图中设定的位置, 完成钢坯在第一或二组辊道上自动定位。

(3) 装钢机的控制

装钢机布置在加热炉入炉端, 用于将入炉辊道上的钢坯推入加热炉。装钢机的水平运动由液压驱动, 装钢机操作方式设有自动和手动两种。步进式加热炉电控系统根据核实的钢坯数据, 按照炉内钢坯布钢要求, 经动态位移检测(编码器激光电开关)自动将加热炉入炉侧的钢坯在步进炉上料辊道上进行定位。在具备入炉条件后, 入炉炉门打开, 由2套入炉装钢机将上料辊道上的钢坯推到炉内固定梁上。加热炉装钢机的装钢臂上有一个高于辊面的推头, 装钢臂上的推头将上料辊道上歪斜的钢坯推正, 缓慢向前推入加热炉内^[10]。装钢机需要满足下列条件才可以运行: 钢坯已经在上料辊道上准确的停位、入炉炉门已经打开、加热炉内有可以入炉的空位。

(4) 步进机械的控制

加热炉内的钢坯通过安装在炉底机械上的水梁立柱来支撑。通过步进梁的平移运动和升降运动, 使钢坯在炉内沿炉长方向作步进移动。步进梁抬起和放下钢坯时, 要求运行要平稳, 减少冲击和震动^[11]。为减小生产过程中机械和液压的冲击与振动对步进梁及钢坯造成不利影响, 必须对加热炉步进梁的升降和平移运动的加速度、减速度和速度进行精确的控制。步进梁是严格按照矩形轨迹运动的, 即分别进行水平和升降运动, 而且水平运动和升降运动过程中的速度是在不断变化的, 这样的目的在于能够保证水平和升降开始或停止时, 及在抬起或放下钢坯时能够以较慢的速度来运行, 防止步进机构产生较大的震动, 避免损坏加热炉步进机构的支撑梁和立柱管的绝热材料, 也能够避免因震动引起加热钢坯表面的氧化铁皮的脱落^[12]。

步进机构可以实现全自动、半自动、手动、点动、上升、下降、前进、后退、正循环、逆循环、踏步、及中间保持等多种操作功能, 步进梁是按照矩形轨迹运动的, 即分别进行升降和水平运动, 而且升降运动和水平运动过程中的速度是变化的, 以实现钢坯的轻抬轻放, 减缓步进梁产生的震动和冲击, 可以防止支撑梁和立柱管的耐火材料的损坏, 同时也能防止钢坯氧化铁皮因震动造成的脱落^[13]。

步进机构的平移运动: 步进梁的水平行程为 600mm, 通过步进机构的平移液压缸驱动步进梁的支撑平移框架, 使它在提升支撑框架上部的两排平移滚轮上作水平运动。在平移框架安装有上部导轮进行导向, 防止步进机构跑偏。此时的升降液压缸处于锁定的状态。

步进机构的升降运动: 升降行程为 200mm(以固定梁顶面为基准, 各上升下降 100mm), 通过步进机构的升降液压缸来驱动在斜台面上的升降框架, 当升降框架下部的两排升降滚轮沿斜台面进行滚动时, 步进梁开始进行升降运动。在升降框架安装有下部导向轮进行导向, 防止步进机构跑偏。液压缸运动靠升降框架的液压系统和刚性保持同步。此时的平移液压缸处于锁定的状态。

在轧机发出要钢信号后, 加热炉步进系统接收到正循环动作指令, 步进梁才能由

最低点向最高点动作，按上升速度控制要求完成上升、前进、下降、后退动作，完成一次正循环运行；将料放于炉子出料位，此时激光检测品已测到并完成这最后一步的循环，或已完成最后料位的布料。出料机取料前，出料炉门开启达到中位，出料机取料杆伸进料的下面（若双排料则确定哪侧出料，此时开启哪侧的炉门），此时炉门开到上位，料被取出放于辊道中送至轧机。要求每一循环内两根坯料在规定时间内出炉。

钢坯在整个加热炉中的位置（单位 mm）是通过 PLC 跟踪的，当钢坯在炉尾装料辊道上并被装钢机推到指定位置后，钢坯位置值是“0”。只要钢坯被步进梁移动，它的位置就被不断修正。不管步进梁是向前或向后，自动或手动。在步进梁开始某一个步进行程时，当步进梁上升通过中心线时，平移液压缸的位置被记录下来。同样在步进周期之末，步进梁下降并通过中心线时，平移液压缸的位置也被记录下来。净水平移动距离就等于此两位置之差，然后这个距离被加到钢坯的原来位置值上。必须注意的是，逆循环或倒料时应减去这个值。

当坯料已经被装钢机装到第一料位时，“第一料位有料”的信号灯将闪亮。当步进梁把坯料向前移动一个步距时，这个信号灯熄灭并发出允许装料的信号。N 个步距后，把坯料从第一料位（位置值是 0）向前移到固定梁上“最后一个坯料位”。再一个步距将使坯料从“最后一个坯料位”移到炉外辊道上。当坯料到达最后一个位置时，“坯料准备出炉”指示灯亮。

如上所述，步进梁必须走 N 个循环才能把坯料从装料端送到出料端，为了精确控制坯料的位置，步进梁的步距是自动修正的。如果编码器测出的实际步距与目标值（步距）有偏差，下一个循环的步距是目标值加上或减去这个较小的偏差值，所以每个步进循环的步距都是不断修正的。如果一个步距的偏差大于 10mm，将产生报警。注意步进机械和出钢机与出料炉门的联锁。

(5) 出料托出机

加热炉的出钢机被布置在出炉侧，用于从加热炉中取出达到工艺温度要求的钢坯，并将钢坯放在出炉辊道上。加热炉出钢机运动轨迹为：进/升/退/降，电动齿轮驱动出钢机的水平运动，出钢机的升降由液压驱动^[14]。加热炉出钢机设有两套传动，每套有二根出料杆。

加热炉出钢机的运动采用变频调速控制，优点是运动速度平稳，并且振动和冲击较小。出钢机拥有可逆的功能，既可将加热钢坯从加热炉中取出，同时也可将加热钢坯从出炉辊道上托起，再放回加热炉内。

电控系统 PLC 控制出钢机的运行，操控方式分自动和手动两种。如果出钢机到达平稳而准确地工作，必须满足下列条件：出炉辊道上没有钢坯、出炉辊道停止运转、出料炉门已打开、步进梁必须在下极限位置、出料杆的端部平齐。

(6) 各设备之间的动作联锁关系

装钢机：装钢时入炉辊道不得动作；只有在加热炉炉尾第一装钢料位无钢时（指

示灯灭), 步进梁处于下位时才能进行装钢动作。如有坏, 装钢不能动作, 装钢要求平稳, 并在任意点可停止启动。装炉完成后装炉装钢机缩回到原位, 第一装钢料位有钢(指示灯亮)。为确保安全, 推杆前后各装有一个接近开关, 用于极限控制, 同时推杆前的接近开关还用于确定装钢机后退后的起始位置(清零)。

步进梁: 步进梁的升、进、降、退动作互为联锁关系。严禁出现重叠动作。只有在步进梁处于最前或最后位置时, 才能有上升或下降动作。

出料炉门: 出料或事故倒料过程中, 要求出料炉门必须处于上位(行程开关控制)。

出钢机: 接到出钢指令, 出料炉门开到一半时, 开始伸进, 出料辊道无料并停转, 炉门上限时托起料, 出料; 料已在最后的料位。步进梁已停止。

出料炉门: 出料或事故倒料过程中, 要求出料炉门必须处于上位(行程开关控制)。

2.3 液压站控制

加热炉液压站共有5台主泵, 其中1台备用, 另外4台工作。如果某一台工作油泵组发生故障, 立刻进行声光报警, 停止该油泵工作, 备用泵自动投入为止。主泵吸油口球阀处各设一限位开关, 当相应球阀打开, 限位开关发出信号, 确认油路接通后, 相应的油泵方可启动。否则, 球阀关闭时电动机不能启动或中途误关闭时, 相应泵电机即立刻切断电源。

某主泵电机启动时, 其相应电磁溢流阀先得电, 0.5S后再启动主泵电机, 经延时8秒后电磁溢流阀失电。在停止某油泵电机工作时, 其相应电磁溢流阀先得电, 0.5S后油泵电动机断电停止运转, 延时5秒电磁溢流阀失电。若主油路电接点压力显示器, 检测到液压系统压力达到15MPa, 并持续了3秒钟不变时所有的工作泵立刻停止工作, 同时进行主油路高压极限声光报警。

加热炉液压站的正常工作油温是30℃-50℃, 油箱中油温由设置于油箱上的温度显示及传感器, 温度显示及传感器输出信号, 分别对应于油温下限报警和油温上限报警及加热器启停和电磁水阀的通断。

当油温 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ 时, 液压站内操作箱进行油温下限报警, 主泵禁止启动同时加热器工作, 油温达到30℃以上时, 停止加热器的工作。当油温 $\geq 45^{\circ}\text{C}$ 时, 电磁水阀得电, 冷却水通入冷却器直到油温降到35℃时, 电磁水阀失电, 关闭冷却水。当油温 $\geq 65^{\circ}\text{C}$ 时, 液压站内操作箱进行油温上限报警, 当执行机构处于原位时, 自动停止各主油泵工作^[15]。

油箱液位由液位控制显示器检测。液压站内操作箱分别设置液位极高, 液位偏低和液位极低声光报警。当液位极高时, 电磁水阀断电, 停止各泵工作, 声光报警。当液位偏低时, 声光报警。当液位极低时, 停止各泵工作, 声光报警。液压站油箱设有过滤器若发生堵塞, 液压站内操作箱分别进行过滤器堵塞声光报警。

2.4 汽化冷却控制

汽化冷却装置是加热炉的重要组成部分之一,其主体部分为固定设备和管路,汽化冷却控制水平关系到汽化冷却装置的正常运行及使用寿命。汽化冷却装置的工艺流程:软水站—软水箱—软水泵—调节阀—给水泵—给水调节阀—汽包—2 根下降管—进水联箱—3 台循环水泵—循环回路总分配联箱—8 根循环回路供水管—各回路的步进梁及固定梁的进水固定联箱—入梁冷却—水汽化—上升管—汽包—汽水分离。

电动热水循环泵、电动给水泵、软水泵的运行泵和备用泵之间设置联锁,当运行泵故障时,备用泵立即自动启动。单台机组设有就地启停按钮,在控制室内设置单机启停按钮。软水箱水位过高关闭软水进口电动阀,软水箱水位过低开启软水进口电动阀,同时使软水泵处于运行状态,电动阀采用集中和就地控制。

汽包设有水位监控,汽包紧急放水电动阀与汽包高水位连锁,汽包必须保持正常水位,保持均衡给水,使汽包最高和最低水位不允许超过正常水位 $\pm 100\text{mm}$ 高水位时电动阀开,低水位时电动阀关,(汽包中心线为 ± 0.00 , $\pm 150\text{mm}$ 为高低水位开闭),电动放水阀采用集中和就地控制。汽包压力过高与电动排汽阀连锁,电动排汽阀采用集中和就地控制。停电时在 10 秒内应急柴油泵自动启动。

汽包压力必须维持稳定,不宜波动过大过快,以保证汽化冷却系统循环稳定和供汽压力恒定。汽包压力超过设定的运行压力时,自动排汽阀应自动开启向外排汽;压力仍在升高时,安全阀应开启向外排汽^[16]。当汽包压力降到 $0.3\sim 0.4\text{Mpa}$ 时,汽包排污阀开始排污,排出汽化冷却系统底部的沉淀物,同时密切注意汽包水位变化,使汽包的水位降到最低水位面,这时可用手动调节水位;当汽包压力降到 0.1Mpa ,为了不使系统内形成真空,缓慢打开汽包上的排汽阀,直至汽包压力为零,炉温降至 400°C 以下。

2.5 本章小结

一级基础自动化是加热炉控制系统的基础,由于一级基础自动化控制水平的高低与产品质量的优劣有着密切的关系,而且与生产效率及安全生产亦有着紧密的联系,可靠、快速、精确和稳定的一级基础自动化系统是保证产品质量和产量的基础。加热炉一级基础自动化系统包括电控系统和仪控系统。电控 PLC 实现炉区的辊道控制,实现自动、半自动、手动装钢和出钢,实现步进梁自动控制,生成炉内钢坯的跟踪地图。

本章主要阐述了加热炉电控系统的具体设备、工艺参数和控制要求。分析了加热炉电控系统的详细工艺流程以及工作原理。电控系统根据先进和成熟的技术、设备可靠实用的原则进行设计。

第3章 加热炉仪表自动控制系统

3.1 概述

目前国内加热炉大量的采用蓄热式燃烧技术使加热炉的热效率得到了大幅度提高,为配合燃烧器的投入使用,并使其处在最佳的工作状态。国内加热炉的控制系统大都采用 S7-300 可编程控制器(PLC)来控制燃烧介质的换向,进行蓄热式燃烧器的换向燃烧,由远程计算机进行控制。具备自动和手动的换向燃烧功能;能够手动通过气动调节阀远程控制调节加热炉上下各段煤气和空气的流量、加热炉温度和压力;显示各种工艺参数,并进行安全报警,并有一定的自动处理功能^[17]。使加热炉在各种工艺条件下都能稳定并安全的运行,达到节约减排的目的。

根据蓄热式加热炉的特点和工艺条件,加热炉控制系统设计方案是以提高炉子的检测精度和合理燃烧并确保安全性稳定性为准则,采用国内外成熟的控制方案,并考虑到炉窑控制技术,特别是计算机技术的不断发展,为将来控制策略的升级和发展留有接口^[18]。

加热炉采用两套 SIMATIC S7-400 PLC 分布结构控制系统,一套控制加热炉本体燃烧和汽化冷却系统,另一套为电气传动控制系统。两套控制系统通过工业以太网通讯方式将两套系统相互连接起来,相互之间可进行数据交换。同时又互不干扰,使得系统更加安全可靠,完成加热炉的各项操作和监控。根据实际操作要求设置 3 台操作站(仪控两台互为热备,电气一台)作为操作、监视及工程组态用。设置 1 台彩色喷墨打印机,用于打印报警记录、报表及编程打印。整个 PLC 系统设一套 UPS 电源装置,停电后能维持 30 分钟以上的供电时间,可以保证数据的存贮和安全处理。

加热炉 PLC 控制系统每套 PLC 通过工业以太网卡 CP443 连接到以太网交换机,完成仪表 PLC 与电气 PLC 的数据交换及 HMI 的数据交换,以太网交换机配置冗余电源,通讯中断可以报警提示。西门子 CP1613 网卡连接完成 PLC 对现场操作信号、检测信号的采集及现场设备的控制信号的传送;上位机采用 SIEMENS 窗口控制中心 WinCC 工控软件,并配备功能强大的工业过程计算机组成人机接口系统,对加热炉燃烧系统进行在线监视和操作。

3.2 加热炉仪表自动化控制分析

3.2.1 炉温控制

加热炉各加热段分上下供热段,每段炉温检测采用两只热电偶检测,利用操作站键盘可任意切换选择其中一支作为炉温信号,也可高值自动选择,上部供热段检测在

炉宽方向安装两只热电偶；下部供热段在炉子两侧各安装一支热电偶，正常情况下供热段炉温检测以该段平均温度为对象进行自动控制；当其中一支热电偶故障时系统设置有断偶判断功能，可以通过人工或自动方式的选择炉顶两只热电偶的工作状态。如果出现热电偶断偶时系统会根据控制状态完成电偶的选择，确保控制回路连续运行。各段炉温的变化是通过改变煤气的流量值实现。各段空气、煤气流量均作了温度、压力以及流量系数修正运算，燃烧控制采用串级解耦优化燃烧控制系统，以实现加热炉低过剩空气系数燃烧^[19]。该系统还接受来自炉内的氧量信号进行修正，上部段和下部段采用主/从控制的方式，避免上下段的干扰，也可采用独立控制。

加热炉温度控制系统能实现按加热炉炉温变化要求先加空气量后加煤气量，或先减煤气量后减空气量的逻辑关系。当加热炉的炉温低于设定值时，先适当增加空气电动调节阀的开度，当空气流量的变化趋稳后，再适当增加煤气电动调节阀的开度，加热炉开始升温。当加热炉的炉温高于设定值时，先适当减小煤气电动调节阀的开度，当煤气流量的变化趋稳后，再适当减小空气电动调节阀开度，加热炉开始降温。加热炉温度控制系统能在满足工艺要求的情况下，保持空气和煤气的比例，使燃烧系统安全充分的燃烧^[20]。

加热炉的炉温控制采用多种手段控制方式，一是加热炉采用双交叉限幅模拟量连续控制方式；二是根据双交叉限幅调节的幅度通过自动打开和关闭部分烧嘴的方式，保证燃烧器的燃烧状态，确保钢坯在加热炉中的加热质量，使得控制精度更加准确。

控制方式上采用数字量控制与模拟量控制相结合的控制方式。

(1) 数字量控制方式

根据生产的出钢节奏和加热炉的供热状况，加热炉的空气量和煤气量是在不断的变化的，根据工艺设计的要求，加热炉每个燃烧段的烧嘴大小和供应的空气量和煤气量应该是相互对应的，这样才能保证该燃烧段烧嘴的燃烧状态，当实际供热量减小时，会相应的减小空气量和煤气量来满足要求，这样就改变了烧嘴的燃烧状态，影响了加热炉的加热精度和质量。

所以，加热炉采用自动关闭烧嘴上三通换向阀的控制方式来确保每个燃烧段烧嘴的燃烧状态。首先通过模拟量控制方式来调节空气量和煤气量的供应大小。当煤气量的供应小于单个烧嘴的能力，加热炉控制系统会自动进行计算并关闭烧嘴两侧的空气三通阀与煤气三通阀，将烧嘴关闭并不再进行换向，其它的烧嘴仍然按设计的要求正常的工作。加热炉控制系统会根据负荷的各种变化最大限度的保证加热精度和质量。

(2) 模拟量控制方式

双交叉限幅对炉温进行自动控制。采用空、煤气比例系数根据煤气热值变化采用人工输入方式，确保因燃料热值变化而造成空燃比不平衡现象不发生。交叉限幅控制是先进的燃烧控制算法。普通的PDI控制算法只能保证在稳定的燃烧条件下的空燃比，在温度动态调节过程中则无法保证^[21]。交叉限幅控制考虑了空气和燃气的实际流量，

因此即使在温度的动态调节过程中也能保证正确的空燃比。其控制逻辑见图 3.1 所示。

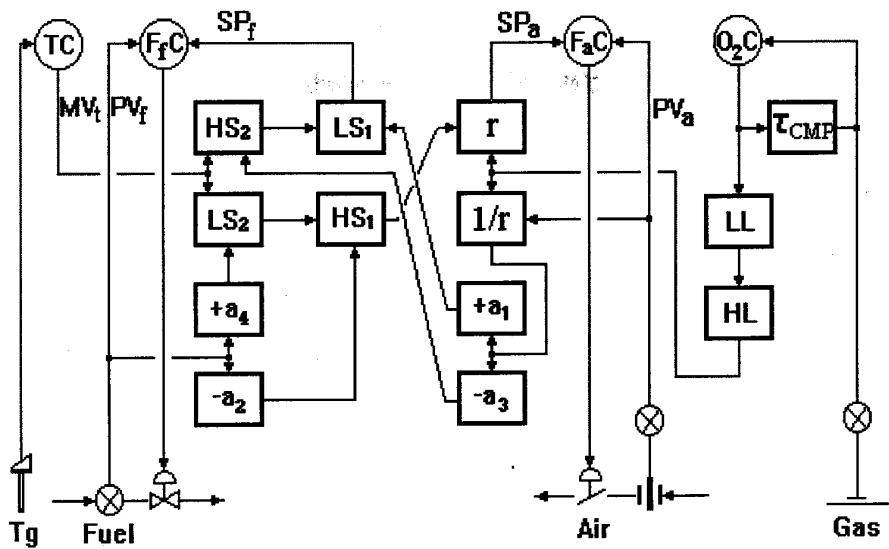


图 3.1 双交叉限幅控制逻辑

Fig.3.1 Double cross limit control logic

3.2.2 排烟温度控制

排烟温度控制对于蓄热式加热炉是一个非常重要的指标，排烟温度过高会造成设备的损坏，排烟温度过低会造成能源的浪费和炉压过高的现象发生。所以我们在每台三通阀阀体上都安装有温度检测（PT100 或 WSS），可以检测到每个烧嘴的工作状态情况。

在每个烧嘴后设置有独立的手动调节阀，通过手动方式在调试过程中一次调节完成各烧嘴的排烟量。同时在每个供热段设置有独立的烟气调节阀，根据该段的供热负荷情况作相应的自动调节控制，确保排烟温度保证在稳定范围内。

为了保护换热器不致温度过高而烧坏。测量烟道排出废气有四支热电偶，测量热风管道温度有八支热电偶，温度超高限则报警。

同时对炉子废气出炉口进行温度测量，其调节器输出用以控制风机出口阀的开度，温度上升过高则开度增大，参入烟道冷风增多以保护换热器，还利用换热器出口温度的上限接点和燃烧空气总流量的下限接点来控制热风放散阀。其中任一条件满足则放散阀自动打开，使换热器温度恢复到设定值以下。

3.2.3 加热炉残氧量控制

残氧量的控制是用利用检测仪器检测出炉内气氛的氧含量，然后根据检测到的测量值，通过改变通风量对空燃比进行调整。

(1) 在线测量

在不破坏加热炉主体的情况下，利用现有预留的测试孔（温度测点）通过喷射泵产生的负压将被测气体引入测量气室，然后排放到空气中。流量约 500mL/m（可通过压力调节）。经氧检测器将被测残氧浓度转换为电信号通过电缆送至氧转换器完成氧量的数据处理及标准电流输出。氧检测器采用氧化锆传感器，其工作温度为 700℃，因测量气体温度过高，故必须将其引入测量气室进行自然冷却以满足测量要求。（如图 3.2 所示）。

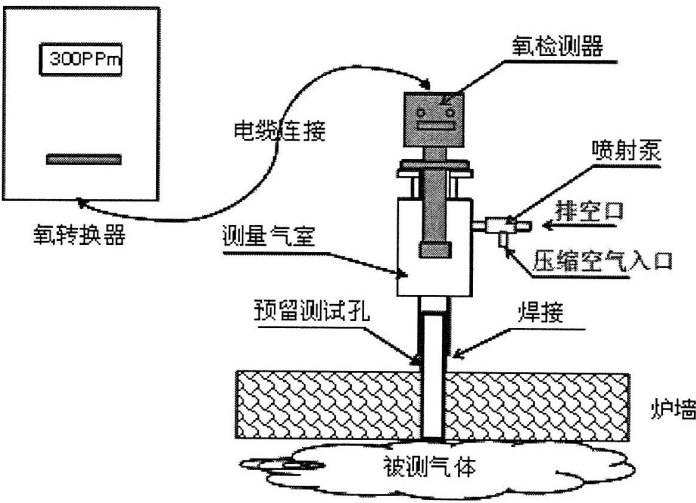


图 3.2 在线测量示意图

Fig.3.2 On line measurement schematic diagram

在线测量是直接点对点测量，安装简单、测量滞后小、可最小减少空气渗漏对测量带来的误差。此方式是典型气体分析方案。缺点是安装数量较多。

(2) 间歇测量

在不破坏加热路主体的情况下，利用现有预留的测试孔（温度测点）通过金属管将被测气体引入预处理单元，然后分时段经手动切换送到氧分析仪完成氧量的数据处理及标准电流输出。流量约 500mL/m（可通过压力调节）。其原理见图 3.3 所示。

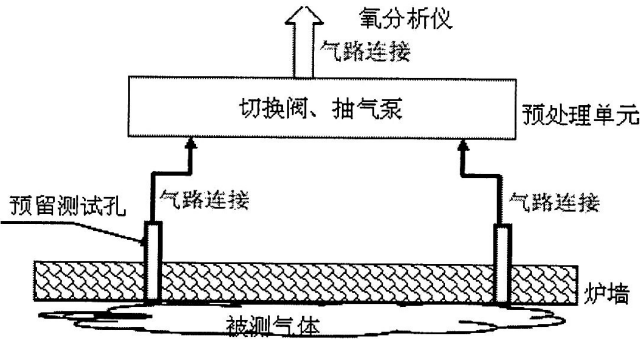


图 3.3 间歇测量示意图

Fig.3.3 Intermittent measurement schematic diagram

间歇测量可实现一机对两个点的测量，减少分析仪的数量。但不能对两个点同时连续测量，只能手动切换。

现场安装气路长、测量滞后、工程量大。气路连接要求高、不能有空气渗漏，特别是切换阀必须选用气体分析专用阀门。造价较高。

3.2.4 炉压控制

炉压控制是根据均热段炉膛压力检测信号和引风机前空气、煤气烟气总管调节阀以及旁通烟道的执行机构构成控制回路，当炉压升高时，采用远程控制方式调节空气、煤气烟气总管调节阀及烟道闸板开度增大排烟量，从而达到降低炉压目的^[22]。各段烟气温度通过调节排烟调节阀来控制。

为了减小加热炉炉门开启时炉压偏离造成的炉内气氛紊乱，可以采用炉压自学习功能。

测量加热炉炉门打开时造成的炉压偏差，经过补正运算，得出下次炉门开启时烟道闸板开度的附加修正值。这样逐次修正，以达到炉压稳定。其控制程序框图见图 3.4 所示。

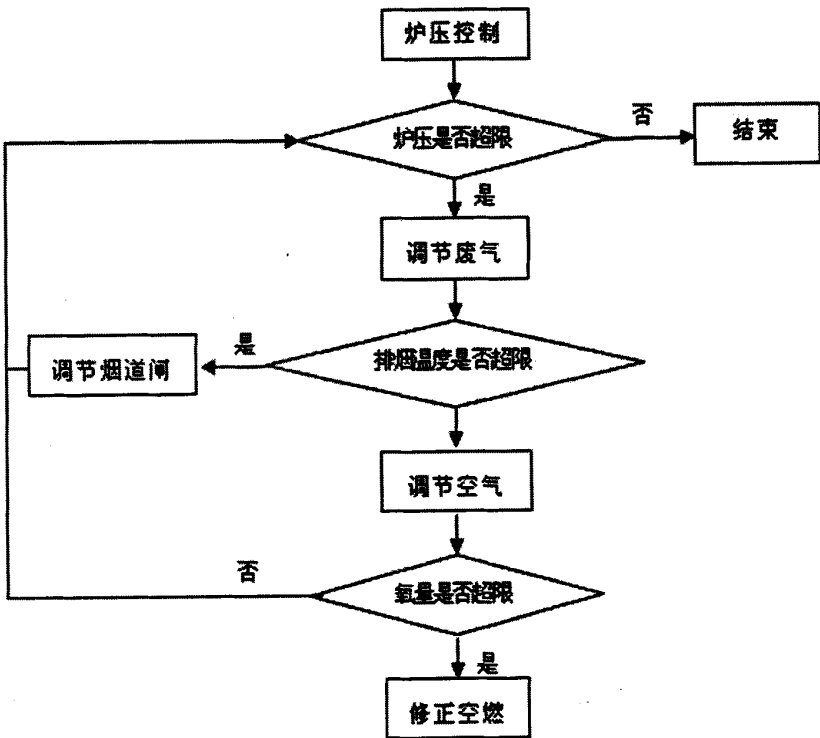


图 3.4 炉压及排烟控制程序框图

Fig.3.4 Furnace pressure and smoke control Program diagram

3.2.5 换向控制

换向控制是蓄热式加热炉的关键控制系统，三通换向阀是保证蓄热式加热炉稳定运行非常重要的设备。三通换向阀的主要功能有顺序动作、定时换向、自动保护、超温自动报警等。其运行的稳要影响到炉膛内废气的排出和温度、燃料的供给量、加热炉运行的安全、加热坯料的能力及质量等，对加热工艺的执行、烧钢质量起至关重要的作用。

换向控制采用定时、定温的原则，系统设置有手动控制、单动控制和自动控制功能。手动控制方式是在调试系统和检修工况下对换向阀进行检修调试。单动控制方式是为了调节空气换向阀和煤气换向阀动作一致性。在正常生产情况下换向控制为自动控制方式，按照换向周期作定时分散换向。相邻烧嘴之间间隔换向，换向时间为 45~80 秒可调，系统默认为 60 秒。

换向控制采用微单元时序分散换向检测控制方式，具有炉压稳定、空煤气流量稳定、段内没有断火及控温稳定性的优点。为保证炉膛两侧的换向温度均衡性，A 侧及 B 侧的换向时间均可调整。当某段排烟温度超过设定温度时，系统会自动强制换向，确保燃烧设备安全运行^[23]。

如该供热段其中有一个烧嘴排烟温度过高时，系统就会自动切掉该烧嘴，不会影响其他烧嘴的正常换向燃烧，经过人工检修确认后才能重新投入换向燃烧。另外，为了确保三通阀运行可靠在每个三通阀气缸上安装有位置检测开关，如遇三通阀故障系统会发出报警，自动关闭该三通阀和相对应的三通阀，经过人工检修确认后可重新投用。换向系统控制图如图 3.5 所示。

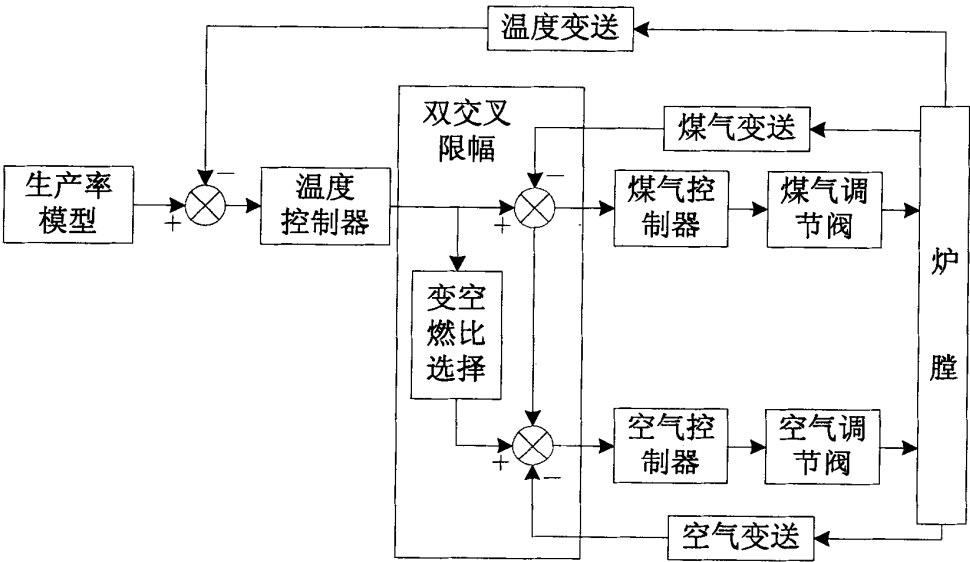


图 3.5 换向系统控制图

Fig.3.5 The reversing system control diagram

3.2.6 报警功能

加热炉控制系统中设置有报警功能，根据报警的轻重和处理的缓急，系统设置三级语音报警系统：警告(WARNING)、报警 (ALARM)、故障 (FAULT)。炉区现场设置重故障闪光报警器。

(1) 一级语音报警：轻度故障报警提示包括炉温超限、炉压超限、CO 超限、水封槽液位超限；

(2) 二级语音报警：中度故障报警提示包括换向阀、快切阀故障、废气温度超限、步进梁水回路温度或流量超限；

(3) 三级语音报警：重度故障报警提示包括风机故障、通讯中断、煤气压力超低限、压缩空气压力超低限、空气压力超低限、水回路供水总管流量超低限；

报警原理：

(1) 换向阀动作不到位报警：空气三通换向阀和煤气三通换向阀装有到位行程开关（分 A 位、中位和 B 位）。阀门动作到位后均通过 PLC 检测对应的行程开关到位信号，其中任意的一个行程开关在阀动作 6 秒后仍无到位信号输出时，均会进行声光报警。

(2) 上下各段空气废气和煤气废气温度超过设定值时，自动发出声光报警，废气温度显示块闪烁，当温度下降至设定值以下时，报警自动解除。

(3) 当上下各段烧嘴冷端温度超过设定的温度时，自动发出声光报警，烧嘴冷端温度显示块闪烁。当温度下降至设定值以下时，报警自动解除。

(4) 当加热炉的炉膛压力高、空气总管压力低、煤气总管压力低和氮气压力低的时候，蜂鸣器发出声音报警，这时应立即查看显示屏上的状态显示，并马上作出相应调整。

(5) 当发生鼓风机、引风机突然关闭及空气总管压力超低、煤气总管压力超低和氮气压力超低时蜂鸣器发出声音报警并自动关闭煤气快断阀，并且需手动调整或关闭煤气调节阀、空气调节阀、废气调节阀等。

报警记录图：对炉温超温、排烟超温、炉压过高、过低，燃气及空气总管压力过高、过低等进行声光报警，同时提示故障点和建议处理方法，以便操作人员及时进行处理各种故障。

本方案控制系统的上位机可以把各种需要保存的工艺参数定时存入数据库。各种历史数据、曲线可以通过查询菜单，方便、快捷地检索、查询，并可根据用户要求打印各种报表。

3.2.7 安全联锁控制

在加热炉的控制系统中设置了安全联锁系统，用来确保加热炉的安全稳定运行。

加热炉的控制系统中的安全联锁共有三级联锁：

(1) 一级安全联锁

当加热炉的燃气压力和空气压力过低和压缩空气压力过低时，系统会自动发生联锁切断煤气总管切断阀，同时烧嘴前换向阀置为进空气侧（SAFTY LOCATION）和关煤气侧（SAFTY LOCATION）、保证加热炉安全运行。另外系统中设置手动急停按钮，用来人工停炉及事故状态下作停炉处理。

(2) 二级安全联锁

烧嘴前的燃烧单元（空气、煤气换向阀）联锁，当该单元的换向阀故障时，相应的烧嘴煤气三通阀联锁关煤气侧（安全位置）。每只空气三通阀及煤气三通阀均设置动作反馈联锁，当发出动作信号三秒后，未检测到反馈则该阀将被置为安全位置（SAFTY LOCATION），即空气换向阀进空气位置、煤气换向阀关煤气位置。

(3) 三级安全联锁

为了防止炉膛内温度过高，保护加热炉内水梁及钢坯燃烧安全，在加热炉控制系统中设置了各加热段炉温联锁，当各个加热段炉膛温度过高时，控制系统启动安全联锁，将该加热段的所有烧嘴前煤气三通换向阀关闭，直到该加热段的炉膛温度降温到允许的范围内^[24]。

3.3 汽化冷却检测控制

汽化冷却装置是加热炉的重要组成部分之一，其主体部分为固定设备和管路，汽化冷却控制水平关系到汽化冷却装置的正常运行及使用寿命^[25, 26]。

(1) 汽包水位检测控制

汽包水位是一个重要的安全控制目标，主要的检测手段采用差压方式或电接点方式来检测，检测点分别设在加热炉汽包的两侧，通过低选方式选择其中的一个水位作为控制给水调节的测量值。控制方式采用双充量连续补水形式有效避免假水位现象出现。

(2) 汽包压力控制

汽包蒸汽主要是通过工厂管网外送蒸汽压力调节阀排出，起到了一定的控制压力的目的，但当汽包压力高上限值时，控制系统为了保证汽包安全会自动打开蒸汽放散阀放散蒸汽，快速降低汽包压力，当汽包压力降到安全设定值时，控制系统会自动关闭放散阀。确保安全运行。

(3) 循环水泵连锁

加热炉汽化冷却系统一般有三台循环水泵，其中两台循环水泵由电机来驱动，第三台循环水泵靠柴油机来驱动，柴油机循环泵作为事故和停电等特殊情况下的备用泵。三台循环水泵的出口管都连接至循环水泵出水联箱，从出水联箱接出两根供水管，通

过供水管将循环水分别送入加热炉步进梁和固定梁的进水固定联箱，通过旋转接头组和活动联箱将加热炉步进梁的冷却水管和进水固定联箱相连接。

压差测量设在加热炉电动循环水泵的出水和进水联箱之间，当压差低的时候，自动发出报警信号，这时备用柴油机循环水泵自动启动。如果在规定的时间内，压差测量值不能够恢复到正常值范围内，将自动发出联锁停炉的信号。

(4) 给水泵连锁

汽化冷却系统2台给水泵为电机驱动，另一台是汽化泵。汽化泵作为停电、事故备用泵。每台给水泵与软水箱连接通过给水泵加压后经给水调节阀送至汽包。正常情况下为一用一备，当两台电动泵故障时系统会自动发生连锁打开气动泵前开关阀，启动气动泵确保汽包水位。

(5) 外网蒸汽压力控制

外网蒸汽调节阀来控制外网蒸汽压力，根据外网蒸汽压力设定值自动控制蒸汽调节阀，达到与外网压力一致要求。

(6) 步进梁水回路检测控制

在炉底机械水系统各回路中分别设置了流量检测，通过现场手动调节方式调节各回路流量满足工艺设计要求。

(7) 除氧器液位控制

控制模式分为手动模式和自动模式。手动模式为操作人员根据除氧器液位在操作站上手动操作阀门进行控制。自动模式为加热炉控制系统根据除氧器的液位检测信号自动控制液位的高低。除氧器的液位检测装置有2套。1套为现场玻璃管式液位计，安装在除氧器上作为现场巡视人员观察用，另外一套则经差压变送器输出给加热炉控制系统。

(8) 除氧器压力调节

由蒸汽管网输送来的蒸汽经过减压阀一次降压后，再由调节阀实施调节向除氧器提供蒸汽。除氧器的蒸汽压力由压力变送器检测后转为4~20mA的电信号传到汽化冷却控制系统。

控制系统则根据该信号与给定值进行比较，并发出指令调节蒸汽压力。当蒸汽压力过高或过低时发出报警信号。除氧器压力调节分为手动模式和自动模式。在手动模式下，操作人员根据除氧器压力在操作站上手动操作阀门进行控制；在自动模式下，控制系统根据除氧器压力的检测信号自动控制液位的高低。

(9) 水封槽水位控制

在水封槽中安装静压液位变送器用于检测水封槽水位，当水位下降到下限时，系统自动打开补水O型切断阀进行补水，当水位到达上限时系统关闭O型切断阀停止补水，保证水位始终控制在安全的范围内。

(10) 地坑水位控制

根据地坑水位测量值判断是否到达高限，当到达高限时自动启动外排水泵；当水位到达低水位时自动关闭排水泵。

(11) 工业电视监控

在加热炉的装料侧和出钢侧炉内各设置 1 台高温型摄像机，用来监视炉内钢坯装料和出料情况。拟采用国内组装的优质高温工业电视系统设备。摄像机采用高温探头式，故障状态下（停气、停水、停电、超温）时均能自动将摄像机从炉壁内退出。摄像机头部最高允许工作温度达 1800℃，视场角 110°。

高温工业电视系统主要由摄像机，特种防护罩，传动装置，控制箱，水冷风扫装置和特殊电缆等组成。同时在加热炉进料区设置一台低温风冷式摄像头，用于监视装出料设备运行情况和钢坯的运送情况，将原出钢侧工业电视保留并移至入钢侧入钢监控，另外新增一台安装在出钢侧。监视器设在加热炉操作室。

(12) CO（一氧化碳）浓度监控

为了保证加热炉操作人员的人身安全在炉区两侧（6 套）、炉底（1 套）及引风机房（1 套）设置 8 套固定式 CO 报警器。报警器具有现场发出声光报警功能，同时信号远传控制系统报警，当上述区域的 CO 浓度超限时，控制系统会发出报警，同时现场也会发出声光报警，确保仪表室以及现场操作人员的安全。

3.4 本章小结

一级基础自动化系统是加热炉控制系统的基础，可靠、快速、精确和稳定的一级基础自动化系统是保证产品质量和产量的基础。加热炉一级基础自动化系统包括电控系统和仪控系统。仪控 PLC 主要实现炉区的燃烧控制和换向控制。加热炉仪控系统可以提高炉子的检测精度和合理的燃烧，并确保安全性。

本章主要阐述了加热炉仪控系统的具体设备、工艺参数和控制要求。对加热炉仪控系统的炉温控制、排烟温度控制、加热炉残氧量控制、炉压控制、换向控制、报警功能、安全连锁控制、汽化冷却检测控制进行了详细的分析。

第 4 章 加热炉二级自动控制系统

4.1 二级系统介绍

加热炉区 L2 过程计算机主要负责加热炉设定控制, 它和 L3 级计算机通讯以接收轧制计划和板坯数据等信息, 传输加热炉有关数据, 它还和轧线 L2 计算机通讯以传输加热炉和轧线有关数据。原料库区 L1 级 PLC 直接和 L3 级通讯, 以接收控制指令和报告实绩。本章对加热炉区 L2 级过程计算机系统进行详细的分析。

在钢坯的热加工成型的过程中, 加热炉的作用是将钢坯的入炉温度提高到适合轧制的出炉温度。钢坯的出炉温度必须控制在工艺要求的范围内, 并且要求钢坯的加热温度差别必须尽可能的小, 这样才能保证钢材的轧制板型和性能, 因此精确地控制加热工艺、提高实际生产中的自动化和信息化水平显得非常重要^[27]。

近年来, 随着计算机技术、信息技术、网络技术的不断深入发展, 加热炉的生产自动化控制水平也相应地不断提高。自动化控制系统分为基础自动化系统、过程控制系统 PCS (Production Control System) 和生产执行系统 MES (Manufacture Executive System) 三级。其中, 过程控制系统又称为二级控制系统 (L2 系统), 主要任务包括完成物料跟踪、过程控制参数的计算与设定、质量数据收集与分析、操作指导等。

4.1.1 系统描述

二级控制系统是在基础设备完全实现自动化的基础上, 增加一套二级计算机作为监控机, 通过工业以太网与基础燃烧控制工控机和生产执行系统计算机 (也称三级系统或 L3 系统) 进行通讯而组成的控制系统。该系统能够根据实际生产过程中的具体情况, 优化生产操作, 自动调度生产, 协调加热炉与轧机、连铸间的生产匹配, 实现系统节能的目的。

加热炉基础自动化系统 (也称一级系统或 L1 系统) 将生产过程参数传输给上位二级控制系统。二级控制系统根据这些过程参数, 对加热炉内的板坯进行跟踪, 同时利用传热数学模型, 计算出加热炉中钢坯的温度分布。系统根据实际钢温的分布 (计算值) 与理想加热曲线进行对比, 通过一定的优化算法, 动态地确定加热炉的最佳热工操作方案, 实现各生产参数的实时显示和在线控制。其中, 数学模型是实现加热炉优化控制的基础^[28]。因此, 二级控制系统能够根据生产工艺的要求, 合理准确的控制加热过程, 提高产品的加热质量, 减少钢坯氧化烧损, 并降低能耗; 同时还能够对生产过程进行集中监督和管理, 自动适应炉况变化等干扰, 协调加热炉与连铸、轧机间的生产匹配等作用, 成为热轧生产自动化控制系统中的重要组成部分。

加热炉的二级控制系统与其他自动化系统中的关系如图 4.1 所示

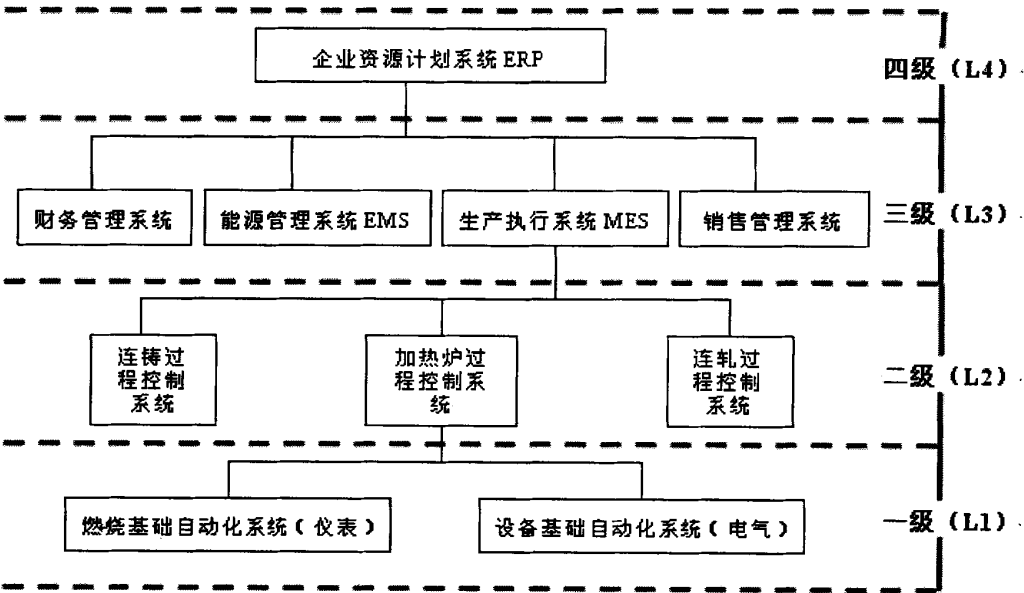


图 4.1 加热炉二级系统与其他自动化系统间关系

Fig.4.1 The heating furnace two level system and other automation system

根据步进梁式加热炉内热过程的热工特点，结合加热炉的设计要求，基于数学模型的加热炉二级优化控制系统计划预期达到以下目标：在满足各种钢种和规格的钢坯加热工艺要求的条件下，以轧线产量为先决条件，以最小能耗为优化目标，来实现钢坯的优化加热。同时完成炉区钢坯的物流信息管理和生产业绩统计等管理目标。

基于数学模型的加热炉二级控制系统，采用如下技术手段达到上述目标：

- (1)提高各控温炉段的供热控制精度；
- (2)提高钢坯的出炉温度和出炉温差的控制精度；
- (3)减少加热炉燃烧过程中的燃料消耗；
- (4)在线坯料的实时跟踪；
- (5)降低被加热钢坯的氧化烧损和脱碳；
- (6)与外部系统（轧机、连铸等二级系统）间的数据传送；
- (7)加热炉内钢坯的出炉时间预估；
- (8)加热炉内任意钢坯的实时温度计算；
- (9)在线数据的存储与评价；
- (10)加热炉炉温的优化设定。

4.1.2 总体设计

加热炉二级系统采用 Client/Server 系统结构；客户端 Client 的操作系统选用

Microsoft 中文 Windows2000，应用软件采用 VB2005.NET 开发；服务端 Server：操作系统选用 Microsoft 中文 Windows2000；网络协议采用 TCP/IP，数据库选用 Oracle 10g 企业版，提供 5 个或 5 个以上客户端。

根据二级控制系统数据交换和处理的基本需要，需完成以下任务：

- (1) 能够对连铸、轧机、原料库等下达的生产计划数据（PDI）进行管理；
- (2) 能够根据一级系统监测到的特征事件，及时完成对应的数据处理，实现钢坯的物料和信息跟踪；
- (3) 能够对每块钢坯的坯号、规格、钢种、材质、位置、加热温度等进行管理，可对这些对象进行创建和删除，并自动定义它们之间的关系；
- (4) 能够自动完成与其它系统间通讯的数据准备；
- (5) 能够自动完成对历史数据的备份和清理；
- (6) 能够对每个班组的生产情况数据进行统计，并形成报表；
- (7) 为轧线提供出炉钢坯的信息，显示出炉队列，并预测每块钢坯的出炉时间；
- (8) 能够根据实际生产节奏和钢种，实时在线优化设定加热制度，降低能耗；
- (9) 整个系统具有可靠的稳定性、安全性，当发生异常时，能立刻转入异常处理机制，并同时报警，保证系统稳定、安全的运行。

4.2 加热炉二级系统结构

加热炉二级系统由信息处理系统、优化控制系统和报警处理系统三大部分组成。这三大系统通过操作界面和数据库紧密的有机的结合在一起。整体结构如图 4.2 所示。

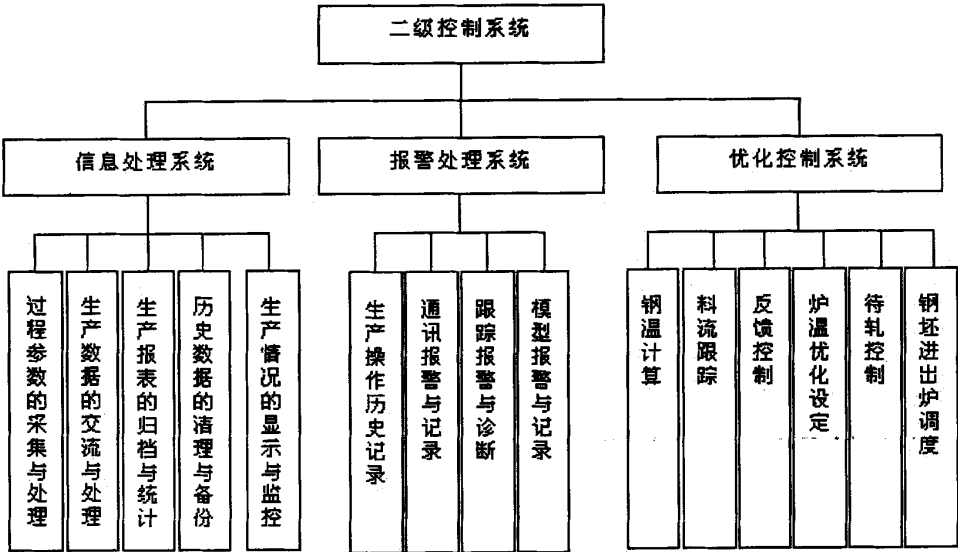


图 4.2 加热炉二级系统的整体结构图

Fig.4.2 Heating furnace two system structure diagram

(1) 信息处理系统

信息处理系统主要具备下列功能：

① 生产数据的交换和处理：通过工业以太网，从上位系统（MES 或 ERP）或其他二级系统（连铸或轧机）中得到生产计划数据（PDI），获取钢坯的坯号、钢种、材质、规格等物流数据，并上传一些特定的生产信息（如出炉钢坯坯号、出炉钢坯温度和温差等）。

② 过程控制参数的采集与处理：通过网络协议采集设备 PLC 系统（一级）的相关数据，获取各段炉温、设备动作、流量等过程参数，并同时二级系统优化好的设定值下达给一级设备来执行。

③ 历史数据的备份与清理：备份、清理系统数据库的历史数据，保证系统运行稳定和通畅。

④ 生产报表的统计与归档：统计产量、加热能耗等，并生成生产报表。

⑤ 生产情况的监控合和显示：通过 HMI 操作界面，显示加热钢坯在炉区的加热温度和位置等；允许操作人员根据现场实际情况在操作界面上灵活的调整各项工艺参数、下达设备动作指令等。

(2) 报警处理系统

报警处理系统主要具备下列功能：

① 生产操作的历史记录：对设备的运行历史进行记录，如钢坯的上料、入炉、出炉、回炉、再热等；操作人员的操作过程和内容，如对物料的跟踪修正、手动与自动模式的切换、炉温的人工设定等。

② 跟踪报警与诊断：跟踪炉区料流的运行状况，如产生逻辑偏差，立即进行诊断，并分析出原因，同时初步处理，并根据故障级别进行报警，等待操作工确认。

③ 通讯报警与记录：监测一级系统与二级系统、外部系统（如 MES、ERP、其他二级系统等）间的通讯状况，如发生故障，立即报警并进行记录。

④ 模型报警与记录：监控加热炉炉内钢坯的加热过程，如加热速度过快，上下温差过大等，立即发出模型报警信息，提示操作人员注意。

(3) 优化控制系统

优化控制系统主要具备下列功能：

① 料流跟踪：根据一级的设备动作信息，计算出每块钢坯在炉区的具体位置。

② 反馈控制：根据测温仪对钢坯出炉温度的测量值、计算值和目标值三者间的偏差，为加热炉炉温优化和模型修正提供反馈值。包括出炉温度反馈和终轧温度反馈等。

③ 对加热钢坯的钢温计算：根据物料跟踪得到的炉内钢坯的具体位置，和一级采集到的当前炉温，计算出炉内各钢坯的具体温度分布，形成温度跟踪，为炉温的优化设定和生产调度提供依据。

④ 加热炉炉温优化设定：对比实际钢温与标准加热曲线，同时考虑反馈值和生产

节奏等因素,动态调整加热炉炉温,为一级设备提供最佳的炉温设定值。

⑤ 待轧控制:根据生产中待轧时间,确定待轧策略,动态地设定炉温。

⑥ 钢坯出入炉调度:一般适用于一条轧线上有多座炉子的情况。根据钢坯的材质,钢种、规格,加热炉装料等信息,确定加热钢坯的入炉顺序;根据每座炉子的第一块钢坯的位置、温度等因素,确定出炉顺序。

4.3 加热炉二级系统分析

加热炉二级系统具有如下功能:

(1) 板坯核对:在钢坯核对处,用在加热炉操作室推钢 HMI 画面上显示的轧制计划和钢坯的数据,与钢坯秤称得的钢坯重量和板坯上的炉号进行核对,判断钢坯是否正确。若正确则按回车键,核对完毕。若不正确则要进行强制核对或者吊销处理^[29]。

(2) 钢坯位置跟踪:

① 加热炉入口侧板坯位置跟踪

当从钢坯核对完毕到板坯入炉结束,都是加热炉入口侧钢坯位置跟踪的范围。基础自动化将 HMD 信号发送至过程控制计算机,按辊道分别跟踪钢坯的尾端和前端的位置,并将钢坯与数据相对应,实时启动相应的程序。

② 加热炉内跟踪

当从钢坯入炉到钢坯出炉结束的过程,都是炉内钢坯位置跟踪的范围。基础自动化将测得的各钢坯装料时装入行程和步进梁每周期的移动量等信号发送至过程控制电脑,对加热炉内各钢坯的位置进行实时的跟踪。

(3) 跟踪修正

① 一般跟踪修正

当板坯的实际位置和基础自动化系统测得的板坯位置出现偏差时,操作工可以使用此跟踪修正功能,将偏差消除。

② 特殊跟踪修正

为了保持跟踪的正常,在某些情况下还必须使用一些特殊跟踪修正方法,包括:

板坯核对异常时的板坯吊销:当板坯在辊道上进行板坯核对时,如果板坯实测重量与计算机中板坯重量之差超过允许范围值,或者板坯上的实际板坯号与计算机中的板坯号不一致时。由操作人员判断此板坯是否允许继续装入加热炉。如果不能装入加热炉,则进行“板坯吊销”操作。

数据强制装入:当板坯已经被装入到加热炉里,而数据还停留在加热炉炉前辊道时,需要进行“数据强制装入”操作。

数据强制抽出:当板坯已被从加热炉中拖出到出炉辊道上时,而数据或影像还留在炉内时,需进行数据强制抽出操作。

装入返回:当板坯入炉后,若需要从加热炉入炉侧返回到炉前上料辊道上时,需要进行装入返回操作。

返装入炉:当已经在出炉辊道上的板坯需要从加热炉出炉侧返回到加热炉里时,需要进行“返装入炉”操作。

已出炉的板坯返回板坯库:当已经在出炉辊道上的板坯需要经过出炉辊道返回板坯库时,需要进行“返回板坯库”操作。

(4) 设定功能

自动确定钢坯入炉出炉的道次和炉号、确定装钢机动作的行程、出炉还是装炉优先、步进梁运转方式、对加热炉各段的炉温进行设定等,实现加热炉的全自动操作。

(5) 模拟程序

用于实验室调试、现场程序改造后的确认等。实时模拟来自轧线过程计算机和基础自动化等所有外部系统输入本过程计算机系统的信息,使系统所有应用程序如在线运行一样执行,以确认软件系统的正确性。

(6) 班管理

班管理主要对如下项目进行管理:班装炉钢坯块数、班装炉钢坯重量、班出炉钢坯块数、班出炉钢坯重量、返回钢坯库钢坯的数量、班煤气消耗量、班生产时间、按加热炉统计停炉次数和停炉时间。

(7) 打印生产报表

主要报表种类有:燃烧控制周期记录、板坯历史记录、炉图、事件记录、生产班报表、板坯图。

① 燃烧控制周期记录

按周期输出加热炉煤气流量、实际炉温、设定炉温、修正炉温、水印温度等燃烧控制信息。

② 板坯历史记录:记录每块板坯的尺寸、装入时间、抽出时间、温度等。

③ 炉图:打印加热炉内的所有或个别钢坯的钢板号、板坯规格、制造规格、炉内位置等信息。

④ 事件记录

跟踪修正记录:打印钢板号、板坯的前进/后退/吊销等信息。

事件记录:在发生强制入炉或出炉、返装炉等各类事件时的记录输出。

报警事件记录:在称重、装入、抽出等操作时发生各类异常的记录输出。

⑤ 班报:一个班内入炉或出炉的钢坯块数及重量,各炉的煤气耗量、热效率等。

(8) 显示操作画面

加热炉主要显示画面有:轧制顺序画面、初始数据输入画面、加热炉入口操作画面、加热炉出口操作画面、板坯位置跟踪画面、板坯位置跟踪修改画面、炉内板坯温度显示画面、加热炉炉内画面、加热炉状态画面、装炉板坯数据显示画面、出炉板坯

的数据显示画面、报表打印画面等。画面的数量、格式待基本设计时确定，其主要内容包括：

① 轧制顺序画面

显示加热炉区板坯的轧制顺序相关信息。项目包括：钢板号、钢板厚度、钢板宽度、钢板长度、板坯厚度、板坯宽度、板坯长度、板坯重量、钢种等。

② 初始数据输入画面：主要输入和修改板坯信息和轧制信息等初始数据。

③ 加热炉入口操作画面

加热炉入口操作画面包括板坯核对、板坯吊销、变更装炉炉号等操作的输入和显示。

④ 加热炉出口操作画面

出口操作画面包括节奏方式、炉温设定、炉内跟踪、出炉等操作的显示和输入。

⑤ 板坯位置跟踪画面：分区显示加热炉入口辊道、炉内的板坯跟踪情况。

⑥ 板坯位置跟踪修改画面：

用鼠标或手动输入信息对跟踪信息进行向前和向后的跟踪修正。

⑦ 炉内板坯温度显示画面：

动态显示加热炉的每块板坯的温度棒型图。和每块板坯的温度趋势图。

⑧ 加热炉状态画面：

显示所有加热炉的运行状态。包括预热段、各加热段、均热段的实际温度，各加热段、均热段的设定温度，实际燃料流量等。

⑨ 加热炉炉内画面：

显示在加热炉内板坯的有关信息，包括炉内板坯位置、钢板号、板坯的最小装炉时间、板坯已装炉时间、板坯炉内剩余时间、板坯装炉实际温度等。

⑩ 装炉板坯数据显示画面：

显示在装炉辊道上的板坯的有关信息和最后装入炉的三块板坯。包括轧制顺序号、钢板号、板坯号、计划装炉炉号，炉列，板坯长度、宽度、厚度（PDI 值）、板坯实测长度，重量，装炉时间，板坯实际宽度等数据。

(9) 数据通讯

为传输数据，加热炉二级控制系统与 L3 控制系统、轧线计算机、基础自动化之间进行数据通讯，具体的数据通讯规格有：

① 与 L3 生产控制计算机通信。

板加区计算机接收 L3 下列信息：轧制计划信息、原始数据信息、轧制计划改变信息、原始数据删除信息、轧制顺序改变信息等。

加热炉过程控制计算机传送给 L3 下列信息：拒绝坯信息、再热坯信息、强制核对信息等。

② 与轧线过程计算机通信

加热炉过程控制计算机接收轧线过程计算机下列信息：粗轧出口温度实际值信息、钢坯吊销信息、钢坯回送信息、装炉钢坯抽出节奏信息、抽出开始信息。

加热炉过程控制计算机传送给轧线过程计算机下列信息：装炉钢坯信息、出炉钢坯信息、停止出炉信息、装炉返回信息、反装入炉信息、再热钢坯信息等。

③ 与基础自动化通信

加热炉过程控制计算机与加热炉仪表和电气 L1 系统进行数据通信。

传送设定值或控制信息包括：加热炉炉号设定信息、装钢机设定信息、步进梁设定信息、出钢机设定信息、加热炉炉温设定等。

接收过程控制信号及测量值包括：钢坯长度和重量、钢坯温度、加热炉炉温、燃料流量、燃料消耗量、跟踪信息、设备动作信息等。

4.4 加热炉燃烧控制数学模型

加热炉的二级控制系统成功实施的关键是建立精确、可靠的加热炉数学模型。加热炉内的热过程包括流体流动、燃料燃烧、传热传质等物理化学过程，建立的模型包括加热炉内炉膛的辐射传热模型、钢坯的氧化模型、导热模型以及黑印模型等^[30]。

加热炉数学模型，实际上是加热炉加热过程的数学描述，即一系列的数学方程（可以是代数方程、偏微分方程、常微分方程、积分方程或积分微分方程）及其定解条件（初始条件或边界条件）。它描述加热炉炉内发生的热过程的基本规律和热状态，确定炉内热过程参数间的定量关系^[31]。通过加热炉数学模型，可以模拟出钢坯在炉内的加热过程，进而自动优化加热炉的热工操作。对于在线控制数学模型而言，模型的计算精度和计算速度都直接影响着控制效果，因此，如何构造简单、可靠、高效的在线控制数学模型是实现在线数学模型优化控制的重点问题。

目前加热炉大都采用了蓄热技术的步进梁蓄热式加热炉，和传统的步进梁加热炉相比较有如下主要特点：

(1) 步进梁蓄热式加热炉取消了预热段回收烟气余热，加热钢坯入炉后马上在高温辐射下快速的加热。

(2) 蓄热式加热炉燃气喷口火焰的边界不明显，燃烧的速度快，且加热炉炉温均匀。

虽然步进梁蓄热式加热炉的炉温是分段控制的，但各段上下的炉温大致相同。目前，基于不同的研究和应用目的，针对不同的步进梁式蓄热式加热炉，国内外研究人员提出了多种形式的燃烧、流动和传热数学模型，进行了大量的理论和实践的分析验证，为加热炉二级控制系统的数学模型优化实施奠定了坚实的基础。钢坯传热模型图如图 4.3 所示：

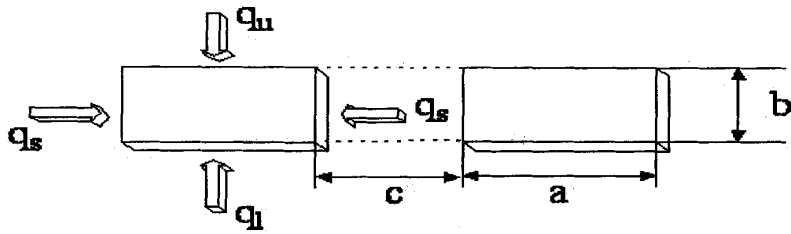


图 4.3 钢坯传热模型图

Fig.4.3 Billet heat transfer model figure

三维非稳态导热数学模型的控制方程:

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (4.1)$$

初始条件:

$$T(0, x, y) = T_0(x, y) \quad (4.2)$$

边界条件:

$$x=0, \quad \lambda(t) \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (4.3)$$

$$x=\frac{a}{2}, \quad \lambda(t) \frac{\partial T}{\partial x} = q_s \quad (4.4)$$

$$y=0, \quad \lambda(t) \frac{\partial T}{\partial y} = q_l \quad (4.5)$$

$$y=b, \quad \lambda(t) \frac{\partial T}{\partial y} = q_u \quad (4.6)$$

$$q_s = (q_u + q_l) \cdot \frac{c}{2b} \cdot \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{b}{c} \right)^2} + \frac{b}{c} \right] \quad (4.7)$$

炉温分布估计模型:

$$T_f(s) = a + bs + cs^2 + ds^3 \quad (4.8)$$

式中, λ —导热系数;

C_p —比热;

t —温度;

$q(t)$ —钢坯表面的热流密度。

计算模型程序框图如图 4.4 所示:

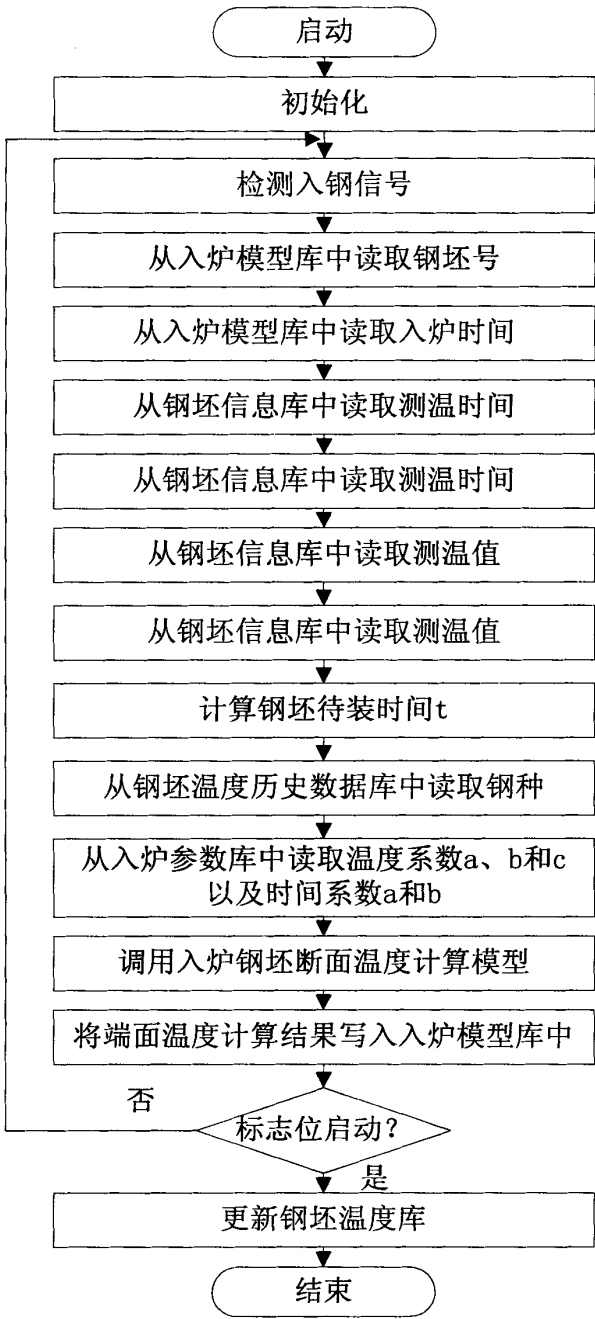


图 4.4 计算模型程序框图

Fig.4.4 Billet heat transfer model figure

经模型计算和黑匣子实验后温度曲线对比图如图 4.5 所示：

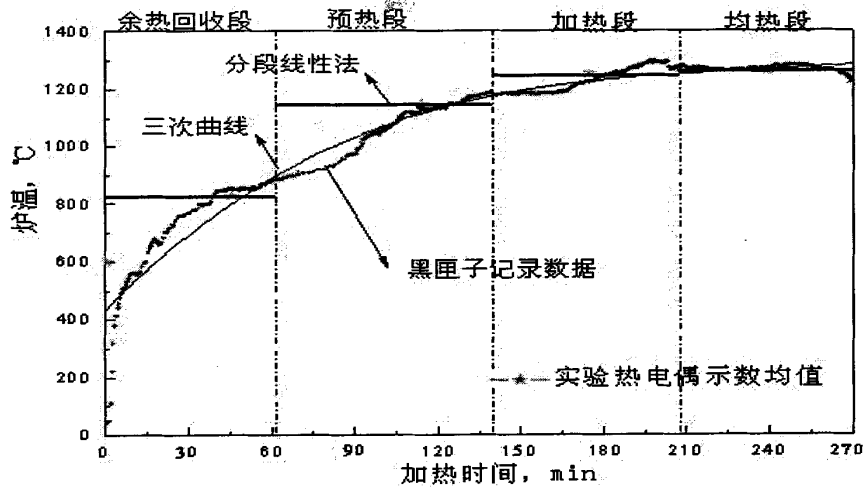


图 4.5 钢坯传热模型图

Fig.4.5 Billet heat transfer model figure

加热炉燃烧控制数学模型主要具备如下功能：

(1) 钢坯入装炉温度计算

对于热装钢坯，根据钢坯在加热炉上料辊道上的停留时间和上料辊道上的高温计测得的钢坯表面温度，计算出钢坯的入炉温度。对于冷装钢坯的入炉温度等于大气的温度。

(2) 炉内钢坯温度计算

加热炉内的钢坯上下表面的炉气温度是根据钢坯在炉内的位置、热电偶测得的炉温和钢坯的入炉温度计算出的，对加热炉内的每一块钢坯进行传热计算，通过解差分方程，求出钢坯内部和表面的温度，计算出钢坯水印部和非水印部的温度。

(3) 炉温设定值计算

根据生产节奏预估的钢坯出炉间隙，计算出钢坯的在炉时间，跟据预计的钢坯在炉时间、钢坯的当前温度和炉温等，计算预计的钢坯到达加热炉各加热段出口的温度，并将此温度与加热炉的目标出炉温度相比较，计算出各加热段炉温的设定值。

(4) 必要的在炉时间计算

当进行加热炉炉温设定值计算，按轧机生产节奏出钢时，如靠加热炉各加热段的温度的改变，仍不能达到目标出炉温度的要求，根据加热炉数学模型，将修改板坯的在炉时间，协调轧线与加热炉的生产节奏，控制钢坯的出炉节奏，延长钢坯在炉内的停留时间。

(5) 出炉温度控制

通过对钢坯在炉时间的调整和各段炉温的设定，控制钢坯在加热炉各加热段末端的温度，可以准确的控制出炉温度，并使温度均匀的分布。

(6) 停炉处理

当需要加热炉停止出钢时，操作工输入停止结束时间和停止开始时间，停炉期间的加热炉各段的温度模式由计算机自动决定，这样可以节省燃料，又能保证在停炉结束时的正常生产。

(7) 自学习

将数学模型的计算值和实际值不断的进行对比，可对生产节奏的时间、板坯在炉时间和预估的板坯的出炉时间等进行自学习。

4.5 加热炉二级系统功能设计

为了实现以上介绍的各项功能，将加热炉二级系统设计成分布式结构，以数据库和人机操作界面为平台，通过不同的控制模块组成各个子系统。

二级控制系统一般由数据库、HMI 人机操作界面和功能模块三大部分组成。

功能模块一般有：温度跟踪模块、炉温优化设定模块、物料跟踪模块、空燃比设定模块、待轧控制模块、反馈控制模块、数据管理模块、通讯管理模块等，根据实际情况的不同，具体情况可能有所变化。

其中，HMI 人机操作界面与数据管理模块相结合组成报警控制系统；温度跟踪模块、反馈控制模块、炉温优化设定模块、物料跟踪模块、待轧控制模块、空燃比设定模块等组成优化控制系统；通讯管理模块、数据管理模块等组成信息处理系统。其整体结构如图 4.6 所示。

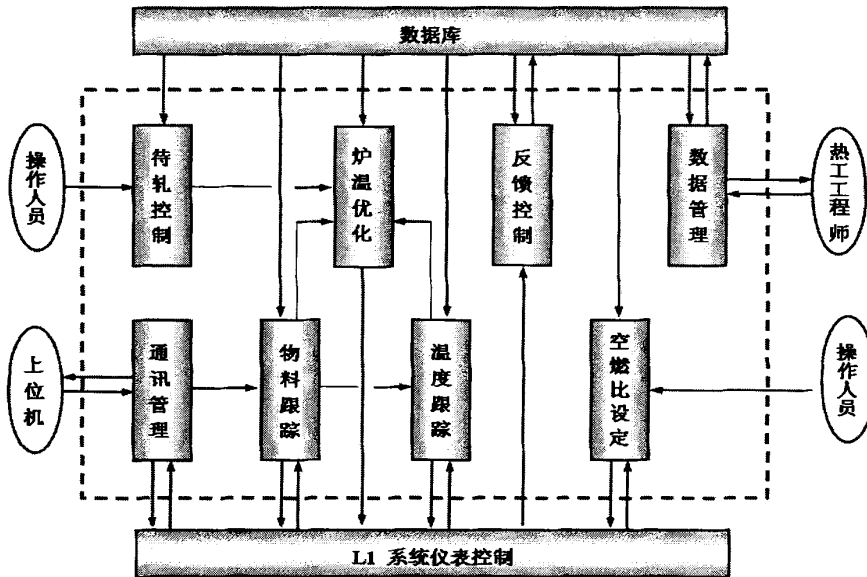


图 4.6 加热炉二级控制系统的整体结构图

Fig 4.6 Heating furnace two level control system structure diagram

4.5.1 物料跟踪模块设计

物料跟踪模块是整个数模优化和二级控制系统的基础。物料跟踪模块通过实时监控一级系统的特征事件来判断、计算每块钢坯处于跟踪区域的位置，为温度跟踪和优化设定提供准确的料流信息，并及时通过人机操作界面进行动态显示^[32]。包括装出炉协调、炉内物料跟踪和炉外物料跟踪等。

(1) 钢坯炉外物料跟踪

当钢坯从入上料辊道开始到除磷机全过程的位置跟踪。

钢坯炉外跟踪的实现原理是：采用 OPC 协议，通过订阅的方式来采集加热炉一级系统的 HMD 信号、CMD 信号、进出钢信号和辊道运转信号等来完成的。

具体流程设计如下：

- ① 当上料辊道的 CMD 检测到有钢坯时，向连铸二级或原料库发送钢坯数据请求；
- ② 接收数据并将其写入数据库；
- ③ 确定钢坯位置，并写入区域代码；
- ④ 当 CMD 由 0 变 1 时，同时 CMD 的前一组辊道向前运转，则说明钢坯已经到达此 CMD 处，修改这块钢坯的区域代码；
- ⑤ 当此 CMD 由 1 变 0 时，同时 CMD 后面的上料辊道组向前运转，则说明钢坯从此 CMD 处已经过去，修改这块钢坯的区域代码（以后同理。当钢坯后退时，采用相反的操作）；
- ⑥ 钢坯到达加热炉前时，并收到一级设备的入炉信号后，装钢机将这块钢坯从前辊道处入炉，修改这块钢坯的区域代码；
- ⑦ 当收到一级设备出炉信号，钢坯出炉，修改这块钢坯的区域代码；
- ⑧ 加热炉出炉辊道的流程同上，当钢坯进入除磷机后，结束跟踪。

(2) 炉内钢坯物料跟踪

- ① 钢坯从入炉到钢坯出炉的位置跟踪，当接收到一级设备的入炉信号后，包括炉内钢坯的 XY 坐标，钢坯进入到此模块的跟踪范围，开始记录其初始的坐标；
- ② 当接收到一级设备的步进梁步进距离和步进完成信号后，加热炉内所有钢坯的位置自动增加相应的长度；
- ③ 当接收到一级设备的出钢完成信号后，修改此钢坯的区域代码。

(3) 加热炉出钢协调

根据轧机的轧制节奏及各座加热炉内的钢坯温度协调出钢，出钢机设定一般分四种方式：顺序出钢模式、温度优先模式、手动模式和队列模式。

- ① 顺序出钢模式：根据提前做好的生产计划，按钢坯的入炉的顺序出炉；
- ② 温度优先模式：当钢坯温度比数学模型计算出的值高的钢坯优先出炉；
- ③ 手动模式：当轧机 2 级发出出炉信号时，弹出一个窗口要求出炉。

④ 队列模式：根据工作人员提前输入的出炉顺序出炉。

(4) 加热炉装钢协调

考虑加热炉的空位、钢种、材质、规格、温度等情况，协调装钢，分为下列模式：

① 空位优先模式：如果在加热炉内有合适空位的道次，加热炉二级优先将钢坯定位在此；若同时有 N 项条件符合的道次，离入炉最远的空位优先被选择^[33]。

② 计划优先模式：根据提前制定的生产安排的入炉炉号和道次来定位。

③ 钢种优先模式：当两炉子同时生产多个钢种时，如船板和管线钢，可以让其中一个入船板，而另一个入管线钢，这样既提高了热效率，又可以保证加热性能。

④ 手动模式：当 PLC 发送定位的请求，弹出一个窗口选择入炉的位置。

⑤ 队列模式：根据工作人员提前输入好的队列定位。

⑥ 顺序装钢模式：根据入炉的顺序定位。

4.5.2 温度跟踪模块设计

数模控制的核心是在线跟踪钢坯温度模块。它的功能是依据物料跟踪模块提供的钢坯位置信息和加热炉内变化的炉温信息，利用钢坯加热过程传热数学模型，以一定的周期计算加热炉内钢坯的温度分布，实现加热炉内钢坯温度的动态计算，为优化炉温设定提供数据依据^[34]。为了方便工作人员的监控，钢温的变化情况可以在人机操作界面上动态的显示。程序流程如图 4.7 所示。

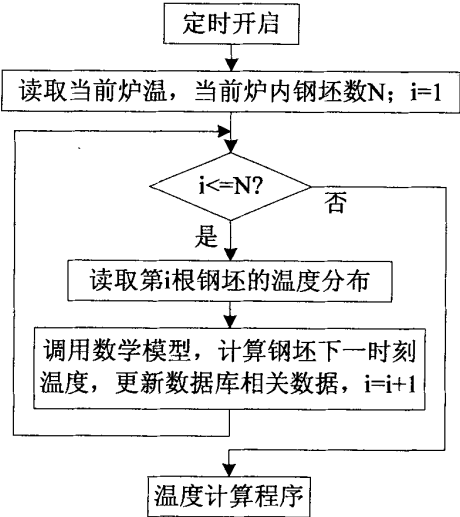


图 4.7 温度跟踪程序框图

Fig. 4.7 Temperature tracking program block diagram

温度跟踪模块的参数包括炉内所有钢坯的基本信息^[35]。模型具有自学习的功能，它根据钢坯的终轧温度和出炉温度的模型计算值和测量值的偏差，动态的调整模型的参数，以提高模型的准确性。

温度跟踪模块投入使用后，温度计算程序以设定的频率运行，它不直接控制炉子的炉温，而是将计算出来的温度跟踪结果发送给优化设定模块作为优化炉温的依据。

4.5.3 优化设定模块设计

二级优化控制系统的决策核心是优化设定模块，优化控制关联图如图 4.8 所示。

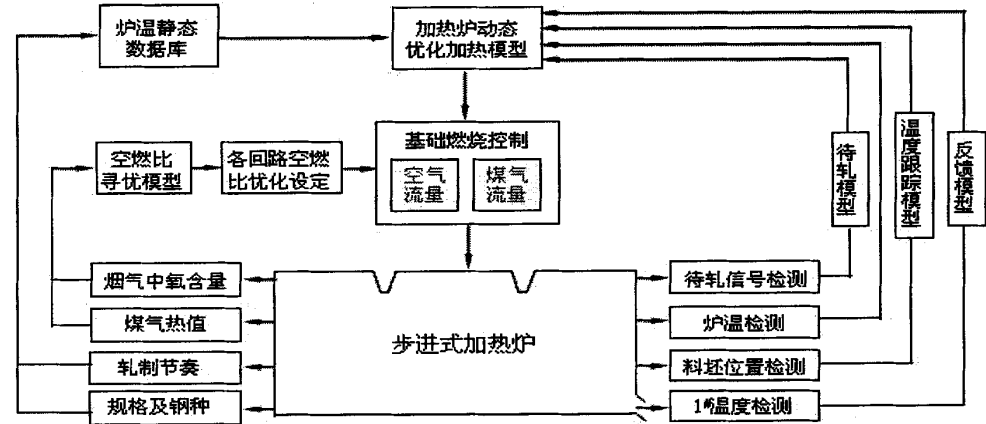


图 4.8 加热炉优化控制关联图

Fig.4.8 Heating furnace optimization control association figure

优化设定模块程序框图如图 4.9 所示：

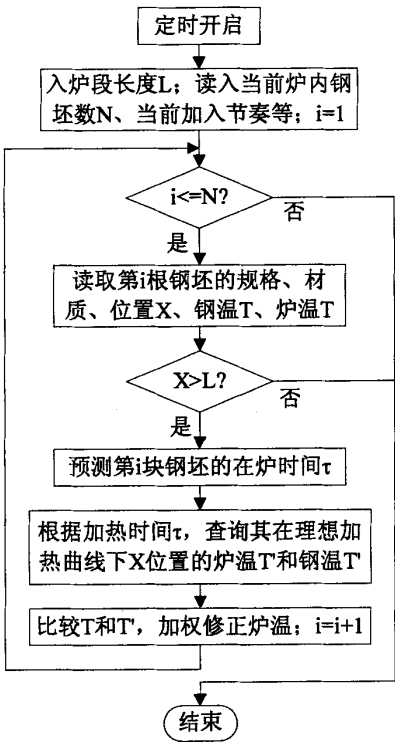


图 4.9 优化设定模块程序框图

Fig.4.9 Optimal setting module flow chart

4.5.4 反馈控制模块设计

钢坯温度反馈控制模块是优化设定模块正常运行的保证，反馈控制系统包括钢坯终轧温度反馈和钢坯出炉温度反馈^[36]。

因为加热炉内燃料燃烧的不稳定性和生产的变化，加热炉是有很大的滞后性和随机行的控制对象，所以加热炉实际的炉温和设定值之间经常存在偏差，也导致生产工艺要求的钢坯温度与实际的出炉温度存在较大的偏差^[38]。

生产中用辐射高温仪来测量钢坯实际温度，辐射高温仪的测温值受环境因素影响有一定的波动性，需用多个测量数据的平均值作为反馈计算的依据，辐射高温仪测得的钢坯实际温度发送至反馈控制系统，反馈控制系统再与目标温度和模型计算温度的差值对比，将比较结果反馈给温度跟踪模块和优化设定模块，进而调节加热炉炉温的设定值，并根据计算误差对数学模型进行修正^[39]。如图 4.10 所示。

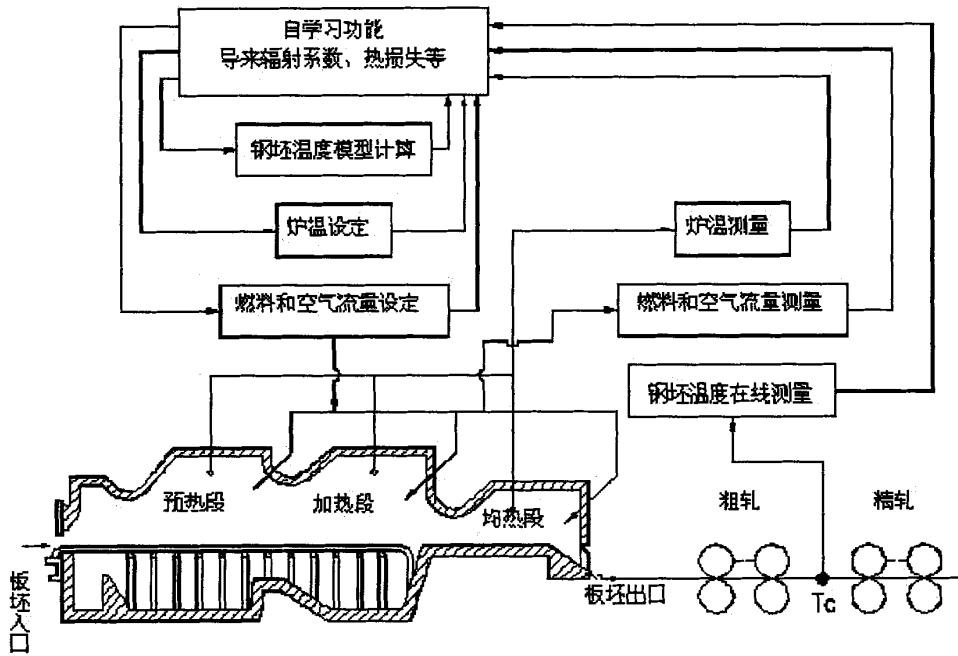


图 4.10 料坯温度反馈控制模块流程图

Fig.4.10 Material billet temperature feedback control module flow chart

4.5.5 通讯管理模块设计

数据通讯模块是保证整个二级系统正常运行的基本条件。它包括三部分：二级系统与一级系统之间的通讯、二级系统与其他二级系统之间的通讯、二级系统与三级系统之间的通讯。二级系统与一级系统间的通讯一般采取 OPC 订阅方式；二级系统与其他系统间的通讯一般采取 TCP/IP 电文或 Oracle SQLnet 方式^[40]。

二级系统与一级系统之间的通讯,一方面从下位机(一级系统)读取动作事件和炉温数据,另一方面将二级优化的结果下达给一级系统;二级系统与其他二级系统之间的通讯,一般有两种方式:通过三级系统中转或直接通讯;二级系统与三级系统之间的通讯,一方面从上位机(三级系统)读取生产坯料的基本信息,另一方面将入炉出炉等过程信息和加热质量报告给三级系统。

4.5.6 数据管理模块设计

(1) 生产计划数据(PDI)录入

轧机二级系统可以自动向加热炉二级系统发送轧制计划。为了确保在通讯故障和其它特殊情况时不影响加热炉的生产,加热炉二级系统向操作工提供人工录入和修改生产计划数据的接口。当钢坯进入加热炉二级系统跟踪区域时,向轧机二级系统请求该块钢坯的PDI数据;当钢坯离开加热炉二级系统跟踪区域时,向轧机二级系统返回该钢坯的加热质量信息^[43]。

(2) 用户与班别管理

加热炉二级系统的用户共有工程师和操作员两种权限。工程师可以进行所有的操作为最高权限。

班别管理包括:班生产时间、班入炉和出炉钢坯块数和重量、回炉钢坯的块数、班燃气消耗量、加热炉停炉时间和次数等。

(3) 生产统计报表

在换班时系统将班组的生产和能源消耗等信息记录在数据库中。其中包括:入炉钢坯的块数和总重量、出炉钢坯的块数和总重量、第一块入炉钢坯、最后一块入炉钢坯、第一块出炉钢坯、最后一块出炉钢坯、高炉煤气、压缩空气等能源消耗量。

(4) 操作与报警日志

操作日志记录了设备的辊道动作、测长、定位、测温、步进、出炉返回、入炉、出炉、再热等操作。报警日志记录了模型警告、通讯警告、跟踪警告等警告的发生时间、处理方式、处理时间等信息。

(5) 历史信息查询

可以查询出炉钢坯(或炉内钢坯)的基本信息、入炉时间、出炉温度、出炉时间、升温曲线、出炉温差等信息。

(6) 数据清理与备份

为了保证二级系统运行的速度,需对历史数据及时清理,注意清理前,一般需将历史数据备份。这些数据一般都由系统自动保存在特定表里,由专业的系统管理员定时清理或备份。

4.6 接口设计

4.6.1 内部接口设计

加热炉二级系统包括数据库、人机 HMI 操作界面、数学模型、优化模型、通讯程序等部分，各部分间需要数据交换，所以各程序必须有内部接口。二级控制系统由于设计成分布式结构，各部分通过数据库相连，因此数据交换非常方便，一般通过 ADODB 方式进行读取即可，加热炉二级系统内部通讯方式如图 4.11 所示。

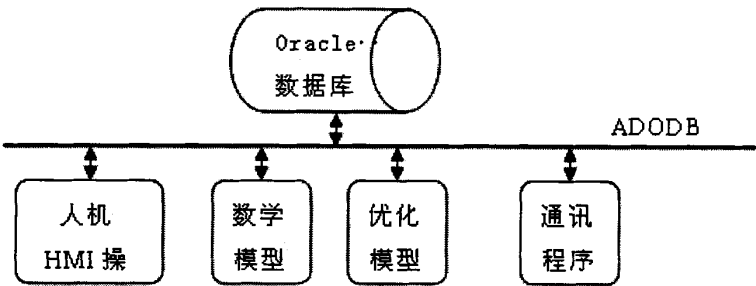


图 4.11 二级系统内部通讯网络图

Fig.4.11 Two level system internal communication network diagram

加热炉二级系统内部通讯内容如表 4.1 所示。

表 4.1 加热炉二级控制系统内部通讯内容

Table 4.1 Heating furnace two level control system internal communication content

对象		通讯内容	通讯方式
HMI 界面	读	温度分布、钢坯位置分布、详细信息等	ADODB
	写	位置修正、生产计划、查询条件等	ADODB
优化模型	读	温度分布、钢坯位置分布、当前炉温设定值等	ADODB
	写	新炉温设定值	ADODB
数学模型	读	温度分布、钢坯位置分布、炉温测量值等	ADODB
	写	钢坯温度分布	ADODB
通讯程序	读	—	ADODB
	写	事件表	ADODB

4.6.2 外部接口设计

根据系统和工艺的要求，加热炉二级(Furnace L2)与轧线二级(Mill L2)、连铸二级(Caster L2)、加热炉一级(Furnace L1)间需要进行必要的信息交换。其网络拓扑图及运

行环境如下图 4.12 所示：

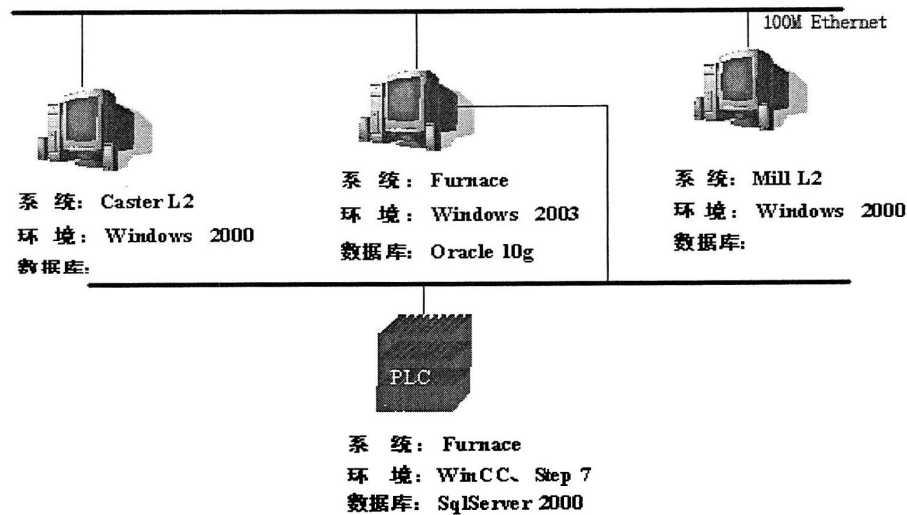


图 4.12 通讯网络拓扑图

Fig.4.12 Communication network topology

加热炉 L2 与连铸 L2 通讯方式为读写通讯表；网络协议为 Oracle SQLnet。连铸 L2 向加热炉 L2 发送连铸钢坯信息、生产计划等数据。如图 4.13。

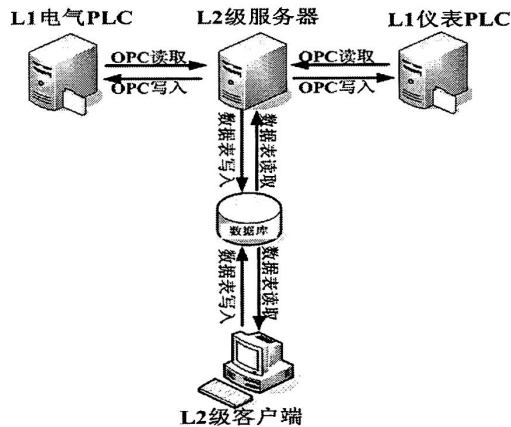


图 4.13 通讯方式

Fig. 4.13 Communication network topology

加热炉 L2 与轧机 L2 通讯方式为读写通讯表；网络协议为 Oracle SQLnet。轧机 L2 向加热炉 L2 发送待轧信息、要钢信息、出钢 ID 判断等数据；加热炉 L2 向轧机 L2 发送钢坯入炉信息、钢坯出炉信息、加热质量、出炉队列等数据。

加热炉 L2 与加热炉 L1 通讯方式为订阅、异步读取 PLC、插入 Oracle 事件表；网络协议为 OPC、ADODB；加热炉 L1 向加热炉 L2 发送设备信号、炉温测量值等数据；加热炉 L2 向加热炉 L1 发送炉温设定、空燃比设定等数据。

4.7 数据库设计

4.7.1 数据库设计原则

服务端 Server 的操作系统选用 Microsoft 中文 Windows2003；网络协议采用 TCP/IP，数据库选用 Oracle 10g 企业版，提供 5 个或 5 个以上客户端。根据对工艺过程的分析，加热炉的二级数据库系统需实现从连铸二级系统（或人工录入、三级系统）的任务下达至物料出炉全过程数据记录及物流跟踪的自动化，并向轧线二级系统报告跟踪结果和出炉序列的钢坯信息。

系统必须满足正常生产需求及通讯故障出现时的人工干预需求，以保证生产顺利完成，并进行历史数据的保存和生产数据的统计报表。

为操作界面、数据通讯、数学模型等角色设计不同权限的普通用户，数据库管理员用于 DBA 权限，普通用户一般只有查询权限，若需要其他权限，单独赋予。只有数据库系统管理员和内部用户才可以访问数据库，系统管理人员可以根据存储在数据库中的物料信息了解生产情况，并调整加热工艺；一般情况下，不允许普通用户对表数据直接删除或修改，如有需要，设计成特定的存储过程，统一执行。

4.7.2 关键表设计

根据系统需求，可以列出以下关键表的数据结构和数据项：

钢坯基本信息表：保存一个钢坯的钢坯号、规格、材质、钢种、入炉时间、出炉时间、入炉温度等基本信息。

位置跟踪表：保存钢坯所在位置的代码、位置（炉内）、区域队列等信息。

事件表：接收一级设备检测到的组合成事件，保存该事件的代码、发生时间、特征数据等信息，并同时触发存储包体，完成事件的数据处理。

炉温设定表：设定各加热段的炉温。

加热制度表：保存不同材质、不同规格钢坯的标准加热曲线（包括不同位置的钢温、各加热段的炉温等）。

炉温测量表：保存各个热电偶的所在加热段、测量值、位置、权限等。

温度跟踪表：保存炉内每块钢坯特征温度（表面、黑印、中心、温差等）和网格化各点的温度分布。同一钢坯根据网格划分的细密，拥有多条数据。

4.7.3 存储过程设计

利用存储过程各异保持应用程序的执行效率并简化数据层，另外还可以增加系统设计的灵活性。本系统通过设计一系列存储过程，实现了许多复杂的数据访问和数据处理过程。本系统一些主要的存储过程如表 4.2 所示：

表 4.2 数据库主要存储过程列表

Table 4.2 Database list of stored procedures

存储过程	主要涉及表	描述
Pro_Create_Track	钢坯信息表	L1 检测到来料，对钢坯创建跟踪
	位置跟踪表	
Pro_Track	事件接收表	根据 L1 事件实现物料跟踪
	位置跟踪表	
Pro_Measure	炉温测量表	计算各加热段的平均炉温
Pro_Sheet	位置跟踪表	统计班组产量，生成报表
Pro_Backup	钢坯信息表	历史数据的清理与备份
	温度跟踪表	

4.8 二级 HMI 画面设计

在加热炉操作台和计算机房的终端上有表示生产所需要的各种操作画面和显示画面，便于操作人员了解生产情况并进行有关操作。主要的操作画面包括：

(1) 主画面

下图为加热炉二级系统 HMI 的主画面。如图 4.14。

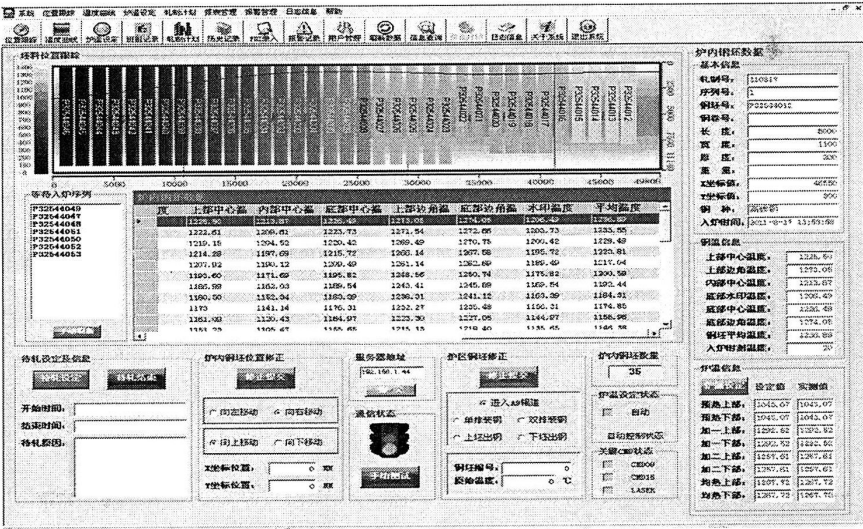


图 4.14 HMI 主画面示例

Fig.4.14 HMI main picture sample

所有二级系统的关键数据均显示在该画面上。最上面一行按钮为工具栏，通过它

可以快速切换到各子画面。在工具栏下面为炉内钢坯位置/温度跟踪画面，图中显示了钢坯在炉内的位置以及它们的长度宽度，并用不同的颜色表示钢坯当时的温度。当操作人员点击某块钢坯时，该块钢坯的详细数据和温度显示在右侧的信息栏中。同时，炉内钢坯信息还以列表方式显示在画面中心。画面左侧显示入炉辊道上等待入炉的钢坯信息。在画面的下方显示其它重要信息，如通讯状态、待轧信息、模型状态、数据修正、加热炉炉况等，点击相关按钮则进入相关子画面进行详细的设定。

(2) 炉内钢坯的温度曲线

通过炉内钢坯的温度曲线画面，可以直观地了解钢坯从入炉开始到现在，各关键点的温度变化情况，既可以按钢坯在炉内的位置显示，也可以按钢坯的在炉时间显示。

(3) 出炉钢坯的查询画面

在出炉钢坯的查询画面上，可以通过各种条件的组合来查询出炉钢坯的历史信息，并且可以将结果导出为数据文件（Excel 或 txt），也可以通过打印机打印出来。

(4) 报表画面

二级系统为操作人员提供了各种不同的报表。报表中包括实际生产量和热效率的数据。根据需要，报表可以从操作员界面生成，其数据可以在屏幕上显示，并可以打印出来。通过对显示器的配置，报表在有关事件时（例如，每班热工数据报表可以在交接班时打印），还可以定期自动打印。

4.9 本章小结

在整个加热炉自动化体系中，二级自动化系统处于核心地位，直接关系到产品质量，技术含量也最高。本章详细介绍了二级控制系统的相关知识，详细分析了二级控制系统的物料跟踪、控制参数的设定、数据采集和处理、数据通信、优化控制、人机对话和打印生产报表等功能和原理，为后面二级控制系统改进设计打下基础。

第 5 章 加热炉二级系统优化设计

5.1 概述

首钢 4300mm 宽厚板轧机工程是首钢引进 Siemens 和 SMS 最先进的宽厚板生产线，是首钢推进精品工程的重要环节。目前西门子已经在国内建设了多条中厚板轧钢生产线，包括宝钢、济钢、沙钢和湘钢等众多国内生产厂具备和首钢相似的轧钢软硬件设备，国内高水平的中厚板生产竞争格局已经出现。宽厚板二级自动化技术是提高成品钢板质量和生产效率的关键^[42]。因此对现有控制技术的消化吸收、改进和创新，是提高首钢中厚板产品竞争力的重要保证。

加热炉自动化控制是提高生产效率和强化管理的重要手段。首秦 4300mm 宽厚板有两套加热炉系统，轧机设计每年可以轧制钢板 180 万吨，这就要求单个加热炉的能力为每小时出炉 120 吨，加热炉的出炉温度为 1100 到 1250 度。1# 和 2# 加热炉各包括一套电控和仪控 PLC(西门子 S7-400)，采用 DP 总线，实现分布控制，使用 WinCC 进行设备的操作和监控。加热炉二级系统的硬件为西门子富士通 TX300 服务器，操作系统为 windows 2003 server，编程环境为 Visual c++，操作界面是用 WinCC 开发。

5.1.1 首秦加热炉二级的功能及界面

计算加热炉内钢坯的加热曲线和实际温度，显示加热炉内钢坯的跟踪画面和加热数据，提供轧机二级钢坯出炉温度数据和出炉序列，向三级 MES 系统发送装炉报文和出炉报文，从三级 MES 系统请求 PDI 数据，存储加热数据。具体功能如下：

- (1) 加热炉 2 级与其他系统的数据通讯，有：MES 系统、轧机 2 级系统、剪切线 2 级系统、PLC 系统、WinCC 界面，通讯都采用 TCP/IP 报文方式；
- (2) 计算加热炉内钢坯的实时温度；
- (3) 为加热炉计算每个区域的温度设定值；
- (4) 控制钢坯加热，使之能够满足出炉温度；
- (5) 形成出炉序列，并发送给轧机 2 级；
- (6) 实现加热炉一级的自动装钢、出钢以及移动；
- (7) 计算每一块钢坯的加热曲线以及加热炉的加热曲线；
- (8) 统计加热炉的能量消耗数据并存储到数据库；
- (9) 和轧机通讯发送报文。

图 5.1 显示的是加热炉的相关数据。例如加热炉每段的设定温度，每段的实际温度，每段的燃料、空气总量，出炉的温度等等。点击界面上面的“FU1”或者“FU2”按钮，

就会显示加热炉的曲线以及地图，如图 5.2 这个图分为两个部分，上半部分显示的加热炉的加热曲线，下半部分显示的是加热炉里的钢坯排列的分布图。点击单个钢坯，会弹出一个对话框显示此钢坯相关数据。

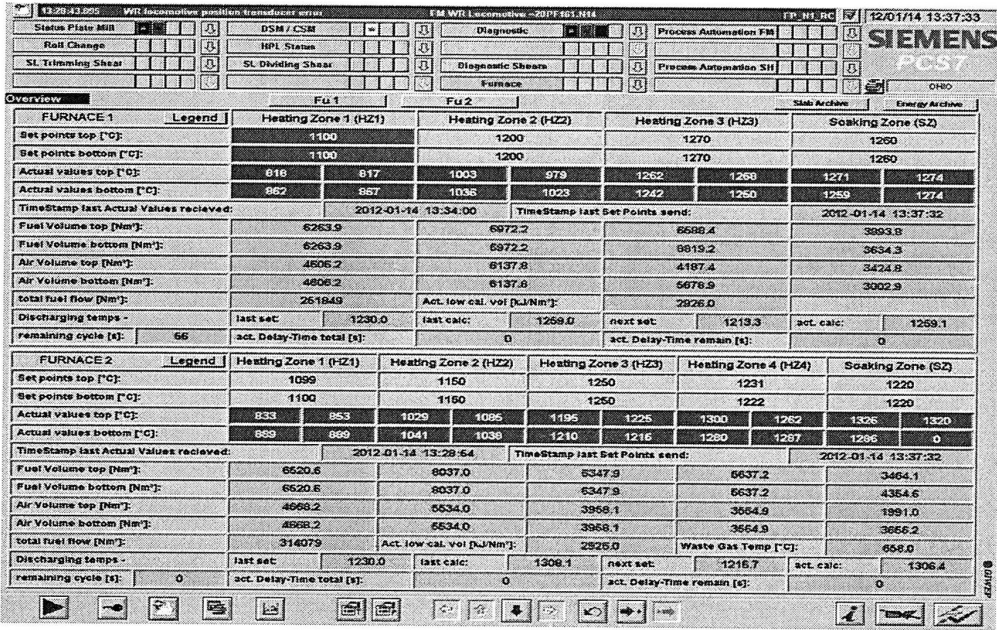


图 5.1 加热炉相关数据

Fig.5.1 Heating furnace related data

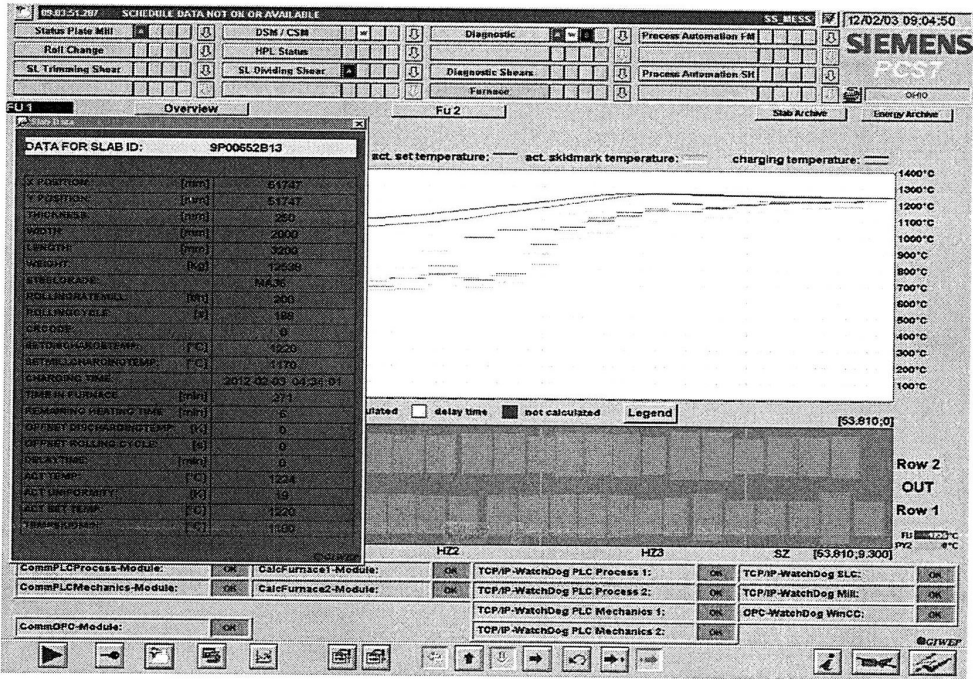


图 5.2 钢坯相关数据图

Fig.5.2 Billet related data graph

5.1.2 首秦加热炉二级系统的优缺点

建立准确可靠的加热炉数学模型，采用燃烧自动化控制技术，排除操作工不同的操作水平、操作习惯的差别，在相同的控制策略下进行钢坯加热，能够达到如下目的：

- (1) 各段炉温控制精度高；
- (2) 以最少的燃料消耗完成加热过程，燃料消耗低；
- (3) 加热钢坯温度精度高，钢温均匀性好；
- (4) 钢坯的氧化和脱碳低；
- (5) 消除人工操作所造成的钢坯加热质量差别，保证轧钢工艺的稳定；
- (6) 加热炉设计建设、一级程序编制、二级程序编制均为神雾公司一家，所有信息沟通在神雾公司内部与轧钢部之间即可完成；
- (7) 与加热炉一级能够方便地划分控制范围，可在统一领导下各自完善，达到最优的控制目标；
- (8) 二级的核心数学模型具有自主知识产权，修改调整方便，有售后地理优势；
- (9) 与现用的加热炉二级模型相比，不需要准确的热值检测、燃料流量检测，适应性较强。

采用二级模型后，也并非没有缺点：

- (1) 轧钢生产、加热炉运行工况的复杂性对其是个考验，轧制节奏的不稳定、钢坯及钢种的多样化等因素都会对其连续、稳定运行造成影响，现实情况千差万别，机器控制远没有人工操作灵活；
- (2) 操作工的工作习惯也往往使其不信任计算机的控制，使应用半途而废；
- (3) 经过生产检验的程序需要不断完善、更新控制策略，如果维护跟不上，也将导致应用失败。

5.2 加热炉 2 级系统的模块设计

5.2.1 在线模块和离线模块

加热炉自动化二级以数学模型和物理模型为基础，采用先进的控制算法对燃烧控制系统进行优化，在提高加热质量的同时，又节约了能源。加热炉 2 级系统软件模块分为在线模块和离线模块两部分^[41]。

离线模块内可以修改设备参数、热电偶的位置和热传导系数等数据，归档数据查看、导出查看已经加热过的钢坯的加热曲线。离线模块的功能为改变使用者的权限、改变语言、生成加热炉的参数、删除加热炉的参数、存储加热炉的参数、恢复参数、打印参数、导出参数到一个文件。

在线模型包含了数学模型、物料跟踪、钢坯加热数据归档等功能模块。所有的模

型计算都是基于加热炉地图^[44]。加热炉地图由加热炉一级进行管理。当加热炉的地图发生变化时（入炉、出炉、步进），加热炉一级重新发送加热炉地图给加热炉数学模型。为了计算炉内坯料温度，加热炉沿长度方向上分成大约 400 段，坯料沿厚度方向分成 9 段。坯料温度计算分为两部分：静梁上的部分（滑道黑印）和其他部分。坯料温度计算大约每 30 秒执行一次。当坯料进入加热炉时，根据原始数据，每一个坯料都被赋予一个计划好的加热曲线（考虑了坯料尺寸、钢级、目标出炉温度、计划的加热时间）。在加热炉内，实际计算的坯料温度和计划好的加热曲线每隔一段时间（30 秒）就进行比较一次，比较的结果和剩余的加热时间用来计算新的各区域温度设定点。通过这种控制方式，形成了坯料温度控制闭环。其原理如图 5.3 所示。

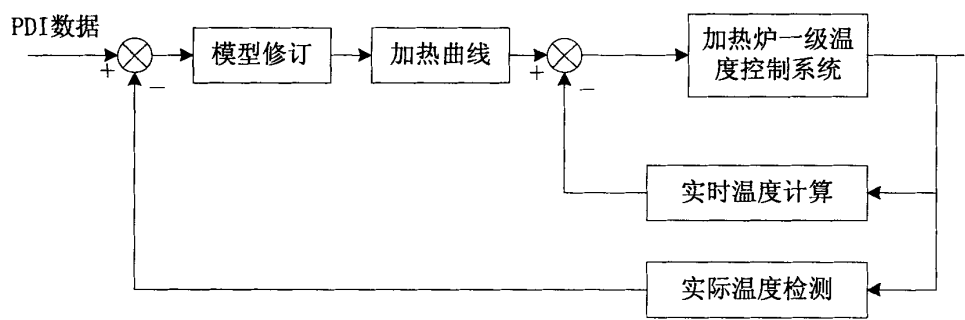


图 5.3 温度控制闭环示意图

Fig.5.3 Temperature control loop diagram

数学模型的功能描述：接收 mes 系统或剪切线 2 级系统发来的 pdi 数据、接收加热炉 1 级系统发来的加热炉内的地图、接收界面输入值、根据炉内各区的温度计算炉内钢坯的温度、根据钢坯当前的状况和钢坯预计的出炉时间计算加热炉各区的设定温度、钢坯加热数据和能量数据归档、发送计算数据到相应的系统。

除了温度控制外，数学模型还执行下列任务：

- (1) 根据预先选定的装料顺序表，把坯料自动分派到最合适的加热炉和加热炉排。
- (2) 根据从加热炉一级传送的流量数据计算和记录能源消耗。
- (3) 在非计划的生产中断时，降低加热炉温度保持坯料当前的加热状态，能够随时准备出炉。
- (4) 在计划的停机时，控制加热炉的升温 and 降温，这样在停机结束时，加热炉能够做好出料的准备。

加热的结果数据存储在一个数据表中，这个表位于轧机二级服务器的 ORACLE 数据库里。存储的数据包括：装炉和出炉时间、剪切线二级发送的原始数据、在加热过程中的操作模式、出料的温度和均匀性、非黑印区和黑印区的加热曲线(上表面、中间、下表面)。

加热炉二级收集每个加热炉、每个班次的燃料消耗数据存储到轧机二级的数据库

中。将加热的坯料重量、加热的坯料数量、全部的燃料消耗、全部的坯料吸收的热量(计算)、吨钢的燃料消耗等信息按每个加热炉、每个班次存储。

显示和操作使用一个 WinCC 客户端，分为几个表显示，包括下列信息：加热炉内坯料的位置和尺寸、实际计算的坯料温度、加热炉各区的测量数据和设定值、计划的出炉时间、坯料的原始数据（例如钢级，出料温度）。

5.2.2 在线模块的操作模式

被动模式：这是一种开环控制模式，在这种模式下，加热炉二级计算坯料温度和各区域温度设定值，但不用于控制，区域温度设定值在加热炉一级 HMI（人机接口）上人工输入。

主动模式：这是一种闭环控制模式，在这种模式下，加热炉二级计算坯料温度和各区域温度设定值，并用于控制加热炉一级。

这两种模式的切换在加热炉一级 HMI 上完成并进行设定值的合法性检查。非法的设定值不能用于加热炉控制。当一个加热炉区处于主动模式，设定值非法时，温度控制器切换到内部模式，使用最后有效的二级设定值作为内部设定点，一个报警信息显示在一级 HMI 上；当一个加热炉区处于被动模式，设定值非法，在一级 HMI 上切换到二级控制的动作被禁止；当加热炉处于主动模式，在一定的时间段内，没有新的设定值信息从二级传送到一级，全部的加热控制器被切换到内部模式，使用最后有效的设定值作为一个设定值，一个报警信息显示在一级 HMI 上，通知操作者没有通信。

二级设定值在下列情况下变为非法：

- (1) 加热炉在线模块关闭和重新启动。
- (2) 坯料的原始数据丢失。
- (3) 加热炉二级系统一段时间内没有收到一级系统的过程数据。

当加热炉在线模块关闭时，应该在没有二级设定值的情况下操作加热炉，直到在模块重新启动的这段时间内，入炉的坯料全部出炉为止。这是因为加热炉二级对这些坯料的加热状态不了解，没有二级控制的基础。为了最小化没有加热炉二级操作的时间，加热炉二级定时的存储加热炉地图和坯料温度。在线模块关闭时间较短的情况下，如果加热炉地图没有显著变化，加热炉二级使用存储的数据，重新启动后，立刻接管加热炉的控制。

5.2.3 模块间的关系

首秦加热炉二级系统主要分为五个模块：电控 PLC 模块，仪控 PLC 模块，1#加热炉计算模块，2#加热炉计算模块，OPC 通讯模块。

仪控 PLC 模块的主要功能是把采集和存储一级电控 PLC 的相关数据，主要是一些温度的数据、燃料消耗的数据，并且提供给计算模块使用。

电控 PLC 模块的主要功能有三项：

(1) 采集一级仪控 PLC 的板坯位置坐标，根据这个坐标在板坯布局图中正确显示。

(2) 与外界通讯的功能，它的通讯包括有和一级 PLC 的通讯、和轧机二级的通讯、和剪切线二级的通讯。

(3) 报文的发送接收，这也是加热炉二级的一个很重要的功能，它接收来自剪切线二级、轧机二级的报文，并且发送相应报文，实现生产的顺利进行。

1#加热炉计算模块和 2#加热炉计算模块是加热炉最核心的模块。它的主要功能就是根据采集来的相关数据和板坯的原始数据来计算出板坯在加热炉中的加热趋势、加热时间，并且把加热炉各区域段的温度设定值发送给加热炉一级 PLC，保证每块板坯出炉的时候都能达到它的目标温度。

OPC 通讯模块的主要功能就是和 WinCC 服务器进行通讯，使得加热炉的界面可以在 WinCC 界面上显示。

这个五个模块各自独立，然而又彼此联系，是密不可分的。计算模块要计算加热趋势，那么它要用到来自仪控 PLC 的温度、燃料等数据，它还要用到来自电控 PLC 的板坯位置，并且还要用到来自剪切线二级（三级）的板坯原始数据，所以任何一个模块出现问题都可能会影响到加热炉二级的正常运行。

5.3 加热炉二级报文

首秦加热炉二级主要与轧机二级、剪切线二级（三级）进行通讯，而通讯的主要形式是相互之间发送报文。例如：当钢坯入炉时，加热炉二级就会给轧机二级发送 FUMLCARGE 的报文，通知轧机二级有一块新的钢坯入炉了，这时轧机二级就会对这一块新入炉的钢坯进行与计算。轧机二级在轧制过程中会给加热炉二级发送 MLFUREQDISCHARGESEQ 的报文请求加热炉二级出炉。在加热炉二级，报文都写在共享内存里了，存储量有限所以只可查当前的报文。2 级与 1 级间的通讯与外部系统的通讯采用 tcp/ip 报文方式，发送和接收采取单独的端口。

(1) 加热炉 2 级和加热炉 1 级间的通讯

从 1 级发送到 2 级的报文：

PLCFUPROCVALUES1 内容包含加热炉各区的温度、空气用量、煤气用量。

PLCFUFURNACEMAPX 内容为加热炉地图 x/y 坐标、入炉温度、钢坯炉列等。

从 2 级发送到一级的报文：

FUPLCSETPOINTS1 的内容主要为加热炉各区的温度设定值。

(2) 加热炉 2 级与 MES 间的通讯

MES 发送到加热炉 2 级的报文：

L3FURPRIMARYDATA 内容包含钢坯的尺寸、钢种等原始数据。

加热炉 2 级发送到 MES 的报文：

FURSLABIN 的内容主要为加热炉入炉信息

FURSLABOUT 的内容为加热炉出炉信息 炉号、列号、出炉温度、能量消耗。

(3) 加热炉 2 级与轧机 2 级

FURMILDISCHARGESEQ 内容为出炉序列。

FURMILDISCHARGE 内容为钢坯出炉信息，出炉温度等。

(4) 加热炉 2 级与剪切线 2 级

MES 系统出现故障时，剪切线 2 级可以向加热炉 2 级发送原始数据。

5.4 加热炉二级 PDI 系统优化

首秦 4300 宽厚板生产线是一条具有世界先进水平的宽厚板生产线，具备一级、二级、三级自动化水平。随着 4300 生产线自动化程度的日益提高，钢板的产量和质量已经在很大程度上依赖于自动化系统，为了保证自动化系统能够生产出合格的产品，正确的生产数据传递是非常重要的，而这些数据中 PDI 是最重要的数据，它包括坯料尺寸、合金成分，钢板目标尺寸，工艺控制要求，标识取样要求等等。PDI（材料原始数据）作为自动化系统的数据基础，从加热炉开始进入自动化系统进行传递。

5.4.1 原始数据输入（PDI）

对于每一块钢坯，它的原始数据是整个自动化系统控制的数据基础。原始数据包括钢坯属性、目标钢板的信息以及加热、轧制、冷却、切割的指令。在钢坯加热之前，调度室计划员根据轧制计划将每块钢坯的原始数据按顺序通过终端计算机输入到剪切线二级服务器里，然后剪切线二级将原始数据通过通信报文发送到轧机二级和加热炉二级并存储。（和轧机通讯报文 L3_ML_PDI；和加热炉通讯报文 L3FuPrimData）。

如果轧机二级和加热炉二级的坯料的 PDI 数据丢失，轧机二级和加热炉二级将发送 PDI 请求报文（MIL3ReqPrimData 和 FuL3ReqPrimData）给剪切线二级，接到请求后剪切线二级将发送相应的 PDI 数据。接受到 PDI 数据以后轧机二级将做 PDI 数据有效性检查，并计算一个初步的轧制表存储在轧机二级里。（检查 PDI 是否满足设备要求，工艺要求等）如果连铸二级将钢坯数据发送到剪切线二级，在 PDI 中钢坯数据就需要不人工输入。

当来自于原料库的冷装坯或来自于连铸的热装坯出现在入炉辊道上时，加热炉二级系统通过加热炉一级系统对该坯料进行跟踪，如果该坯料的 PDI 数据存在，则将相应的坯料 ID 号和数据（长宽厚等）传送到加热炉一级。装入到哪个加热炉，哪排，可由加热炉二级系统自动给出或由操作员人工输入。如果设有称重设备、测长、测宽、测厚设备，还可以对该坯料的合法性进行检查。如果该坯料的 PDI 数据不存在，加热

炉二级系统将向剪切线二级发送请求 PDI 数据的报文，直到收到 PDI 数据为止。当装料可以进行时，加热炉二级发送报文 FU_PLC_CHARGE 给加热炉一级，报文内容包括：坯料 ID，加热炉号，排号；加热炉一级系统据此数据进行自动装料。装料完成后，加热炉一级将发送装料完成消息给加热炉二级。当加热炉二级从加热炉一级得到装料完成的消息后，加热炉二级将发送 FU_ML_CHARGE 报文给轧机二级，轧机二级将更新轧制节奏控制功能。轧制节奏功能将计算该坯料的轧制时间，ACC 系统将计算 ACC 和矫直机的处理时间。轧机二级通过报文 ML_ACC_REF_PDI 和 ML_ACC_REF_SETUP 将 PDI 和设定数据发送到 ACC 二级系统，ACC 二级系统据此计算中间冷却、最终冷却和矫直的时间，并通过报文 ACC_ML_COOLING_TIMES 发送到轧机二级。

轧机二级系统通过报文 ML_FU_PROCESSING_TIME 将该坯料在轧区的处理时间发送给加热炉二级系统。在这个过程中，加热炉二级系统也将一个出料顺序通过报文 FU_ML_DISCHARGE_SEQUENCE 发送到轧机二级系统。在以下两种情况下发送这个报文：(1) 出料顺序发生改变时；(2) 轧机操作人员人工请求时，这一般发生在轧机二级系统刚刚启动时。加热炉二级同时也发送报文 FuSlabFuInOut 给剪切线二级系统，使剪切线二级保持一个加热炉内的坯料 ID 列表，用于将来的 PDI 数据请求。

当轧机准备轧制下一块钢坯，轧机二级发送报文 ML_FU_SLAB_CALL 给加热炉二级，这个报文包含下一块钢坯出现在交接点的时间。这个时间是由“轧制节奏功能”计算出。如果在这个时间内，钢坯能够传输到交接点，加热炉二级将发送报文 ML_FU_ACK_SLAB_CALL 给轧机二级，这个报文包含的时间将和 ML_FU_SLAB_CALL 包含的时间一样。如果在这个时间内，钢坯无法传输到交接点，加热炉二级也将发送报文 ML_FU_ACK_SLAB_CALL 给轧机二级，但这个报文包含的时间将和 ML_FU_SLAB_CALL 包含的时间不一样，而是由加热炉二级计算的所需的最小时间。在这种情况下，轧机二级将重新计算轧制节奏，并发送一个新的 ML_FU_SLAB_CALL 报文给加热炉二级，包含的时间间隔将被延长。如果这是个批次轧制（热机轧制），由于不能按时出炉，下一块钢坯不能在该批次轧制，下一块钢坯被赋予下个批次。最终加热炉将能在规定的时间内将钢坯传送到交接点，加热炉二级将启动出料程序，当坯料做好出炉准备时（到达出炉位置），发送报文 FU_PLC_DISCHARGE 给加热炉一级系统，报文内容包括：钢坯 ID 号、加热炉号、排号，加热炉一级完成出料操作。当坯料被放到辊道上，加热炉一级系统通知加热炉二级系统出料完成，加热炉二级系统发送报文 FU_ML_DISCHARGE_WBF 给轧机二级系统，报文内容包括：坯料 ID，尺寸，沿厚度方向的温度分布，加热炉号，排号。

接收到 FU_ML_DISCHARGE_WBF 报文后，轧机二级将执行下列动作：给坯料 ID 号分配一个 BA ID 号（轧机一级系统使用），并发送到轧机一级系统，轧机一级系统被告知即将出现在交接点上的坯料的相关信息，据此轧机一级系统能够对除磷系统

进行设定。根据加热炉二级系统计算的温度分布，一个循环的温度计算将被启动。根据 PDI 数据，一个轧制表将被轧机二级系统计算，前三个道次的设定值将发送到轧机一级系统。当坯料出现在交接点时，轧机一级系统将接管钢坯，并对其进行跟踪。

5.4.2 PDI 输入方式及存在的问题

热轧区轧钢生产线坯料跟踪系统，以自动化一级为基础，通过二级系统对坯料位置进行精确的跟踪。以 1CS 操作台将坯料装入加热炉内开始的瞬间，启动跟踪程序。装钢操作前，1CS 操作台要对即将入炉的坯料基本数据进行手动输入（包括坯料的炉号、尺寸、温度、重量、装炉道次），在确认数据输入正确后，方可装钢，但操作较为繁琐。以每个班次装钢至少 100 块为例，操作工至少进行 2200 个字符的输入工作，此外还要进行踩板台、辊道、装钢机、步进梁、炉门等设备的操作，可见操作工任务十分繁重，入炉数据出现差错在所难免。由自动化一级输入的炉号首先被发送到加热炉二级系统，二级系统以接收到的炉号作为标志，向数据库请求 PDI 数据，二级系统将得到的 PDI 数据作用到热计算模型上从而计算出坯料的实际温度。如果炉号错误，与实际不符，那么加热炉二级将无法计算出钢坯的实际温度或计算值与实际偏差很大。此时轧机二级根据加热炉二级发送给它的错误数据计算出的规程将不再是最优的。

目前的 PDI 数据传递流程如图 5.4 所示：

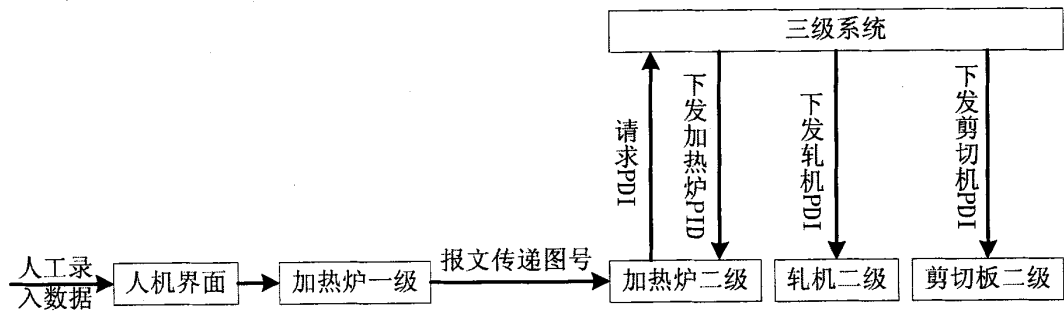


图 5.4 PDI 数据传递流程图

Fig.5.4 Data transmission flow diagram

由此可见，1CS 操作台炉号的输入工作不仅仅是作为物料跟踪的开始，而且对产品质量也会造成间接的影响，有时甚至会对三级系统造成影响。故在此基础上需对输号系统进行完善，达到简化操作、减缓操作工劳动强度、降低数据出错率的目的。

从图 5.4 可以看出，整个生产线 PDI 数据传递的发动是从在加热炉一级自动化系统上人工录入炉号开始的，目前轧钢部 1#台设有一名专职人员负责每块钢坯的数据录入工作，输入的数据包括炉号宽度、重量、温度、装炉道数，由于生产节奏较快，没有检查时间，因此出错次数较多，对生产、质量、设备影响较大，同时工人的劳动强度也较大。

5.4.3 系统优化方案

针对目前 1#台数据录入的实际情况，轧钢部自动化专业在同生产技术人员沟通后，结合目前的设备配置，本着满足生产指标的同时，降低费用的实用原则，制定了一个比较可行的改造方案。

在新的方案中，三级系统生成的生产计划文件转化为文本文件，通过网络传递到加热炉一级界面计算机，生产计划将显示在计算机界面上，最多可存储 500 块钢坯的数据，操作工选择对应坯料，数据将自动发往加热炉一级，操作工只需要输入装炉道数和温度。

优化后的 PDI 数据传递流程如图 5.5 所示：

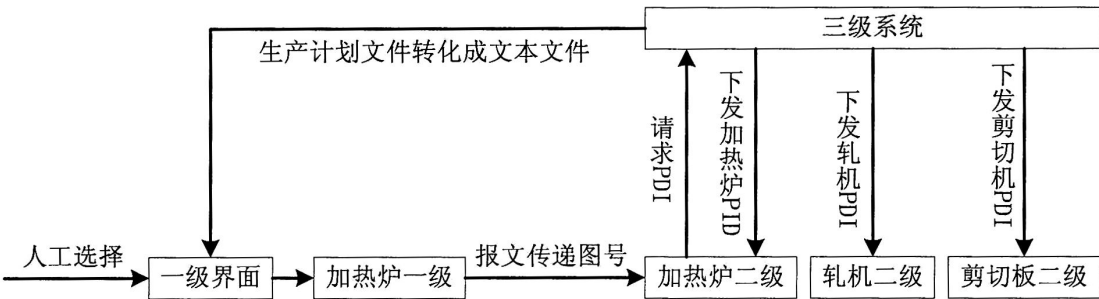


图 5.5 PDI 数据传递流程图

Fig.5.5 Data transmission flow diagram

由调度室生成的生产任务单通过 OA 网络发送给 1CS 操作台，经过转化文件格式后发送到装钢计算机上。随后，操作工通过新编制的程序在原有的 HMI 机上进行数据录入操作，只需通过点击鼠标，在任务单中的坯料数据列表对坯料数据进行选择，就可完成装钢数据的输入工作。

系统网络图如图 5.6 所示：

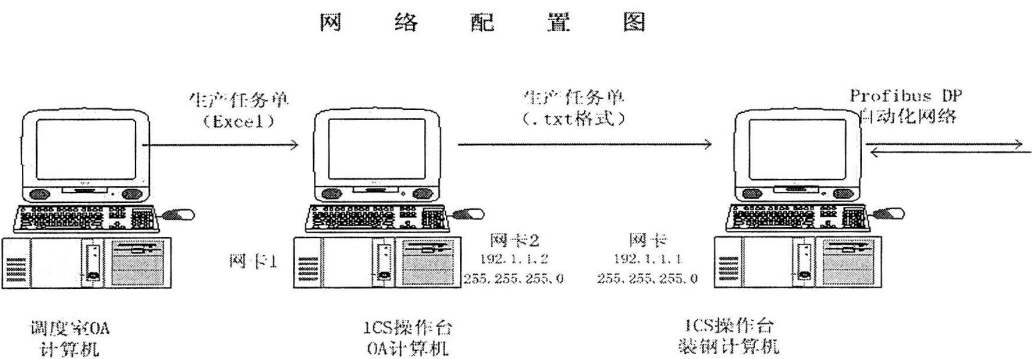


图 5.6 系统网络配置图

Fig.5.6 System configuration diagram

数据录入画面如图 5.7 所示。

1号操作台入炉钢坯数据输入系统

原料号	炉 号	宽 度	重 量
原料1	0.000000	0	0
原料2	0.000000	0	0
原料3	0.000000	0	0
原料4	0.000000	0	0
原料5	0.000000	0	0
原料6	0.000000	0	0
原料7	0.000000	0	0
原料8	0.000000	0	0
原料9	0.000000	0	0
原料10	0.000000	0	0
原料11	0.000000	0	0
原料12	0.000000	0	0
原料13	0.000000	0	0
原料14	0.000000	0	0
原料15	0.000000	0	0
原料16	0.000000	0	0
原料17	0.000000	0	0
原料18	0.000000	0	0
原料19	0.000000	0	0
原料20	0.000000	0	0

原料炉温度输入

原料炉道数输入

数据读取操作

数据调入1-20	数据调入21-40
数据调入41-60	数据调入61-80
数据调入81-100	数据调入101-120
数据调入121-140	数据调入141-160
数据调入161-180	数据调入181-200
数据调入201-220	数据调入221-240
数据调入241-260	数据调入261-280
数据调入281-300	数据调入301-320
数据调入321-340	数据调入341-360
数据调入361-380	数据调入381-400
数据调入401-420	数据调入421-440
数据调入441-460	数据调入461-480
数据调入481-500	

钢坯块数

图 5.7 数据录入图

Fig.5.7 Data input graph

操作步骤：

任务单存放路径要固定。上位机程序只能通过规定的存储路径及文件名称读取数据。任何不符合文件存放要求的操作都将导致无法正常的读取数据。任务单要以固定格式存在，必须是文本格式（后缀名.txt）。文件内容以字符形式保存。采取流水式，即从第 1 个到第 10 个字符代表炉号，第 11 个到第 14 个代表宽度，第 15 个到第 19 个代表重量，如果位数不足，用空格代替。下一块坯料的数据从第 20 个字符开始，依次类推。操作时只要点击鼠标按钮，选中要转换的生成任务单文件，等待数秒，所需的文本格式数据就生成在和生产任务单文件所在目录下。文本格式数据文件名由生成任务单编号和生产任务单文件名组成，十分方便操作工查找和识别。生成的文本格式数据位数是绝对固定的，每块钢坯数据 19 位字符（钢坯号 10 位、钢坯宽度 4 位、钢坯重量 5 位），从而保证了传送到装钢计算机里数据的准确性和一致性。

1CS 操作台入炉钢坯数据输入系统，是在保持原设计、原功能的基础上，进行改进创新。原来的程序及输号功能百分百的保留下来，防止当新功能出现意外故障时，不会影响到正常的装钢操作。新的入炉数据输入系统功能如下：

(1) 生成任务单文本格式数据生成功能

生成任务单文本格式数据生成功能是通过 Excel 文件“首秦公司轧钢部加热炉 1 号台板坯入炉记录”来实现的，程序运行在 OA 电脑中，只要安装有 Microsoft Excel 就能

完成读取生成任务单数据和生成文本格式文件的动作。程序读取的源文件是调度室制作的生成任务单，数据来源方便、及时、稳定和可靠。

(2) 生产任务单钢坯块数计算功能

当将生产任务单（文本格式）拷贝到规定的硬盘目录下后，点击操作画面上的钢坯块数按钮，系统将自动计算本张任务单中包含的钢坯块数，并在对话框中显示。同时激活钢坯数据调入按钮，所有在本张任务单总钢坯数量内的数据调入按钮都被激活，例如，任务单中包含 150 块钢坯的数据，如上图，对应的 1~160 的数据调入按钮将被激活，后面的按钮将显示成不可操作状态。

(3) 生产任务单数据读取功能

可通过点击鼠标按钮，将通过 OA 发送过来的钢坯数据读取到上位操作画面上。

(4) 重复进行数据读取操作

考虑到操作画面尺寸大小的限制，设计为每次只读取 20 块钢坯的数据并在画面上显示出来。由于生产方面采取的是动态计划，经常需要将不在任务单中的坯料插入到正常的计划当中。例如，当正要进行 15 号钢坯入炉时，计划改变，需要插入 3 块钢坯，这时需人工将 15~17 号钢坯的数据修改成临时插入计划的钢坯数据即可。当这三块钢坯入炉后，仍然可进行原计划的数据读取操作，这时已被修改的 15~17 号钢坯数据被刷新，成修改之前的数据，恢复到正常的装钢计划中。

(5) 装钢道次自动累加功能

正常生产秩序下，按照计划单顺序进行装钢，系统可进行自动累加，无需人工操作。若出现特殊情况，也可灵活修改，不会发生混乱。程序流程图如图 5.8 所示。

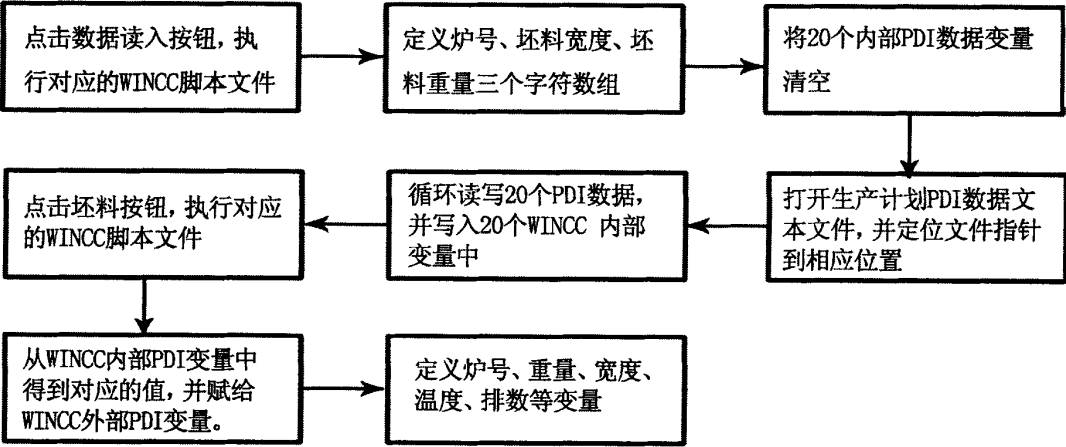


图 5.8 程序流程图

Fig.5.8 Program flow chart

部分源程序：
操作按钮“数据输入 1~20”

```
#include "apdefap.h"

void OnClick(char* lpszPictureName, char* lpszObjectName, char*
    lpszPropertyName)
{
#pragma option(mbcx)
    FILE*fp;                //建立指针
    char s[11];              //定义数组，炉号
    char b[5];               //定义数组，坯料宽度
    char w[6];               //定义数组，坯料重量
    int c;

    SetTagChar("炉号 1","#####");
    SetTagChar("炉号 2","#####");
    SetTagChar("炉号 3","#####");
    SetTagChar("炉号 4","#####");
    SetTagChar("炉号 5","#####");
    SetTagChar("炉号 6","#####");
    SetTagChar("炉号 7","#####");
    SetTagChar("炉号 8","#####");
    SetTagChar("炉号 9","#####");
    SetTagChar("炉号 10","#####");
    SetTagChar("炉号 11","#####");
    SetTagChar("炉号 12","#####");
    SetTagChar("炉号 13","#####");
    SetTagChar("炉号 14","#####");
    SetTagChar("炉号 15","#####");
    SetTagChar("炉号 16","#####");
    SetTagChar("炉号 17","#####");
    SetTagChar("炉号 18","#####");
    SetTagChar("炉号 19","#####");
    SetTagChar("炉号 20","#####");

    fp=fopen("d:\\plan.txt","r+");//打开生产任务单文本文件，进行操作
    fseek(fp,0,0);                //通过指针对文件进行读写操作
    fgets(s,11,fp);
    fgets(b,5,fp);
    fgets(w,6,fp);
```

```

        if(feof(fp)==0)           //对文件进行读取操作，并将数值赋值给 WinCC 内部变量
        {
            c=((int)b[0]-48)*1000+((int)b[1]-48)*100+((int)b[2]-48)*10+((int) b[3]-48)*1;
            SetTagChar("炉号 1",s);
            SetTagWord("宽度 1",c);
            if((int) w[0]==32)
            {
                c=((int)w[1]-48)*1000+((int)w[2]-48)*100+((int)w[3]-48)*10+((int) w[4]-48)*1;
            }
            else
            {
                c=((int)w[0]-48)*10000+((int)w[1]-48)*1000+((int)w[2]-48)*100+((int)w[3]-48)*10+((int)w
[4]-
                48)*1;
            }
            SetTagWord("重量 1",c);
        }
        操作按钮“文件处理”
        FILE*fp;           //打开文件，并计算任务单中钢坯的数量，并对相应的按钮进行使能设置
        fp=fopen("d:\\plan.txt","r+");
        if(fp!=0)
        {
            while(feof(fp)==0)
            {
                count=count+1;
                fgets(s,11,fp);
                fgets(b,5,fp);
                fgets(w,6,fp);
            }
            SetTagWord("钢坯数量",count-1);
            操作按钮“坯料 1”
            #include "apdefap.h"
            void OnClick(char* lpszPictureName, char* lpszObjectName, char*
lpszPropertyName)
            {

```

```
#pragma option(mbcx)
float width,weight;
int tempture,row;
char *slabid;
SetForeColor(lpszPictureName,lpszObjectName,255); //采集数据赋值给输号对话框
SetFontUnderline(lpszPictureName,lpszObjectName,1);
width=GetTagWord("宽度 1")*1.0;
slabid=GetTagChar("炉号 1");
weight=GetTagWord("重量 1")*1.0;
tempture=GetTagWord("温度");
row=GetTagWord("道数");
SetTagChar("ROW1_ID_IN",slabid);
SetTagFloat("ROW1_SLAB_WIDTH",width);
SetTagFloat("ROW1_WEIGHT_IN",weight);
SetTagWord("ROW1_TEMP_IN", tempture);
SetTagWord("ROW1_FUR",row);
row=row+1; //装炉道次自动累加
if(row=5)
{
row=1;
}
SetTagWord("道数",row);
}
```

系统经优化后的优点如下：

(1) 降低甚至杜绝数据出错率

生产任务单通过软件生成，格式固定、出错率低，操作工进行操作时只需点击鼠标即可完成输号工作，有效防止了输错号情况的发生，有利于加热炉二级模型温度的计算和轧机二级轧制规程的优化。

(2) 简化操作步骤，降低劳动强度

每块待入炉的钢坯数据包括炉号、温度、重量、宽度、道次，操作工对应每个数据要输入 22 个字符，一个班次以装钢 150 块为例，需要输入 3300 个字符，一天总共需要输入近 1 万个字符，由此可见，靠手动输入如此庞大的数据量，出现错误是难免的，简化操作后，操作工不需手动输入，通过点击鼠标让程序来完成输入操作，避免出错，并大大降低了劳动强度，加快了装钢速度。

(3) 功能扩展性强

西门子 WinCC 系统内嵌的脚本语言功能十分强大,通过西门子 WinCC 软件进行编程,扩展性较强,可在原有的功能基础上添加新的操作指令,方便操作,节省成本。

(4) 费用少,以现有的硬件和软件为基础,进行技术改造

之前曾向原厂家设计人员提出过类似改善操作工输号操作的要求,厂家设计人员给出的报价大约在 150 万元,需要添加硬件,包括工控机 1 台,光缆及施工和敷设,各种计算机软件,数据库软件等。而此次改造在原有硬件基础上进行,硬件方面只添加了 1 块以太网卡,费用只有 50 元左右,大大的降低了成本。软件方面仍然使用西门子 WinCC 画面组态软件,使用其自带的 C 语言脚本功能,只需通过编写 C 语言源代码,便可在软件上实现工艺要求。由此节省了大量的设备费、施工费、编程费、人员费等一系列工程费用,几乎以零成本完成了这项改造工程,为公司节省了百万的成本。

5.5 本章小结

本章以首钢 4300mm 宽厚板轧机工程为背景,介绍了首秦 4300 生产线加热炉二级系统的相关情况,对 PDI 数据录入系统的设计思路、系统构成、具备的优势及操作方法进行了详细的分析,并对 PDI 输入方式进行了改造和优化。简化操作步骤,降低劳动强度,提高了效率,保证了准确率。

第 6 章 结论与展望

在钢坯的热加工成型的过程中,要求钢坯的加热温度必须控制在工艺要求的范围内,加热炉自动化控制技术是提高成品钢板质量和生产效率的关键。只有精确地控制钢坯的加热温度,才能保证钢材的轧制板型和性能,因此提高实际生产中的自动化和信息化水平显得非常重要。本文对加热炉控制系统进行了细致的学习和研究,详细的介绍了加热炉控制系统 L1、L2 和 L3 级之间的联系和应用,详细阐述了加热炉 L1、L2 的发展趋势和技术特点。

一级基础自动化系统是整条生产线计算机控制系统的基础,是轧钢生产的关键环节。可靠、快速、精确和稳定的基础自动化系统是保证产品质量和产量的基础。一级基础自动化负责执行二级过程自动化的设定值,完成对现场设备的直接控制,并向二级过程自动化提供现场的实际测量数据;一级基础自动化系统包括电控系统和仪控系统。电控 PLC 实现炉区的辊道控制,实现自动、半自动、手动装钢和出钢,实现步进梁自动控制,生成炉内钢坯的跟踪地图;仪控 PLC 主要实现炉区的燃烧控制和换向控制,可以提高炉子的检测精度和合理的燃烧,并确保安全性。本文在第 2 章和第 3 章里详细分析了加热炉一级控制系统的工艺流程以及工作原理。对加热炉一级控制系统的具体设备、工艺参数和控制要求进行了详细的论述。

加热炉二级控制系统接收来自一级基础自动化系统传输的生产过程参数,然后根据这些过程参数,对加热炉内的板坯进行跟踪,同时利用传热数学模型,计算出加热炉中钢坯的温度分布。系统根据实际钢温的分布(计算值)与理想加热曲线进行对比,通过一定的优化算法,动态地确定加热炉的最佳热工操作方案,实现各生产参数的实时显示和在线控制。本文第 4 章和第 5 章详细阐述了二级控制系统的物料跟踪、控制参数的设定、数据采集和处理、数据通信、优化控制、人机对话和打印生产报表等功能,并结合首秦公司加热炉实际应用,介绍了首秦 4300 生产线加热炉二级系统的相关情况,对 PDI 数据录入系统的设计思路、系统构成、具备的优势及操作方法进行了详细的分析,针对 PDI 输入方式的缺陷进行了改造和优化,对加热炉二级系统进行了完善,使加热炉二级温度的温度计算更加精确,保证加热炉出炉温度符合工艺要求,有利于钢板性能的稳定。同时,出炉温度准确性的提高,保证了轧机温度模型的计算精度,本文涉及的控制系统改进设计,通过后续生产实践证明,解决了先前存在的技术难题,达到了简化操作、减缓操作工劳动强度、降

低数据出错率的目的，提高了生产效率。

对首秦加热炉系统改进设计方面的研究工作，有如下展望：

在 4300 生产线一期精轧机项目调试中，加热炉二级调试专家根据产品大纲对厚度范围为 150-320 毫米钢坯的加热模型参数进行了调试，根据多年来轧机的轧制参数反馈，钢坯加热温度计算的准确性满足了轧机二级模型的要求，保证了轧制的正常进行。同时加热炉操作工根据二级计算的加热曲线进行操作，满足了生产工艺要求。

随着首秦公司目前世界上最厚的立弯式板坯连铸机的投产，350 毫米和 400 毫米厚钢坯开始大量使用。根据一段时间以来厚板坯轧制情况，发现存在以下问题：350 毫米和 400 毫米的钢坯加热时，操作工仍然按照二级计算的加热曲线进行加热，二级计算的出炉温度也满足工艺要求，但是在粗轧机前几道次轧制过程中，计算轧制力和实际轧制力、计算扭矩和实际扭矩的偏差较大，最大达到 30%，严重威胁设备安全，同时也限制了粗轧机设备能力的发挥。对轧制数据进行分析 and 现场试验，发现主要是由于加热炉二级提供给轧机二级模型的出炉温度偏高造成的。由于 350 毫米和 400 毫米厚度钢坯的加热模型参数没有调试，导致加热模型计算的加热曲线不准确，计算的出炉温度也不准确。

下一步要针对 350 毫米和 400 毫米厚度钢坯，进一步对控制程序消化吸收，要对二级数学模型进行研究，对其换热系数、加热曲线、钢板在炉加热制度进行建立和优化，逐步将其投入自动控制，与一级控制协调开来，通过对加热炉二级模型进行优化，建立厚板坯（大于 320 毫米）对应的加热曲线和模型参数，提高厚板坯温度分布的计算精度，保证 350 毫米和 400 毫米厚度钢坯出炉温度计算的准确性。降低设备故障钢板轧废、提高板形控制，提高生产节奏。同时实现减少板坯烧损和节约能源消耗。

参考文献

1. 王秉芝. 搞好加热炉节能晋等竞赛的做法[J], 冶金能源, 1993, (1): 36-38.
2. 曹强. 承钢公司棒材生产线步进梁式加热炉工程设计总结[J], 设计技术, 2004, (2): 43-45.
3. 张玉生. 四位一体短流程生产线的三电一体化[J], 钢铁厂设计, 1998, (5): 33-35.
4. 王志刚. 钢厂板坯库加热炉区自动化控制系统[M], 黑龙江科技信息出版社, 2004, 58-62.
5. 卫恩泽. 板坯加热炉控制技术现状和发展[J], 钢铁技术, 2010, (3) : 3-5.
6. 张伟. 高炉自动化炼铁[D], 哈尔滨工业大学, 2011.
7. 刘启香. 步进式加热炉设计与操作的改进[J], 钢铁, 1991, (5): 26-32.
8. 赵树俭. 产品质量在线测控系统在中厚板厂的应用[J], 冶金设备管理与维修, 2011, 29: 56-59.
9. 武力. MES 在批流程制造业的应用与发展[M], 电子工业出版社, 2002, 55-58.
10. 张燕. 环形加热炉管坯过程跟踪系统的设计与实现[J], 冶金自动化, 2009, (4): 37-39.
11. 安建广. 印度 TATA 步进梁式加热炉步进机械的设计与开发[J], 工业炉, 2011, 33(2): 7-9.
12. 吴世锋. 步进式加热炉电液比例液压系统的设计[J], 液压气动与密封, 2011, 31(1) : 113-116.
13. Elizabeth Joseph. Plate development and technology progress[J], Metallurgy Management, 2005, (8): 46-50.
14. Molinari A, Straffelini G, Tomasi A, et al. Oxidation behavior of ledeburitic steels for hot rolls .Materials Scienceand Engineering A, 2000, 280 (2):255-262 .
15. 程慧. PCR 微流控芯片温度控制的研究[D], 河北工业大学, 2011.
16. Sarah Joshua. Heating furnace control system design and implementation [J], Automation and Instrumentation, 2010, (4):22-28.
17. 张忠臣. 蓄热式加热炉在线材线上的应用[J], 黑龙江冶金, 2010, (1): 45-49.
18. 张树胜. 1780mm 热轧蓄热步进式加热炉设计[D], 大连理工大学, 2006.

19. 袁善华. 高线步进梁加热炉控制系统设计与应用[D], 南昌大学, 2009.
20. 张忠臣. 蓄热式加热炉在线材线上的应用[J], 黑龙江冶金, 2010, (1): 38-42.
21. Juha. Roning. An adaptive neural network model for predicting the post roughing mill temperature of steel slabs in the reheating furnace [J], Journal of Materials Processing Technology, 2005, 16(8): 423-430.
22. 申江. 双蓄热式加热炉燃烧系统控制策略的研究[J], 自动化仪表, 2010, 31(9) : 54-58.
23. 何敬斌. 蓄热式循环瓦斯管式加热炉研发及热工特性分析[D], 东北大学, 2009.
24. Stephanie Ryan. Analysis of process control instrumentation and process control system [J], Digital Technology and Application, 2011, (3) : 3-4.
25. Acharya Ashok, Chattopadhyay. Reheat furnace temperature control and 27 performanceat Essar Steel [J], Iron and Steel Engineer, 1998, 9: 31-36.
26. 赵维娜. 加热炉自动装出钢过程控制研究[J], 工业控制计算机, 2010, 4: 62-66.
27. 侯立柱. 轧钢加热炉的自动化控制[J], 中国科技博览, 2011, 27, 76-79.
28. 洪博. 浅谈步进梁式加热炉自动化控制[J], 金属材料与冶金工程, 2011, 39 (2): 22-25.
29. 张素洁. 太钢热连轧厂 2250mm 加热炉炉区软件的应用[J], 科技情报开发与经济, 2011, 21(2): 59-63.
30. J.Hellander. Ceramic coatings-reheat furnace applications [J], Iron and Steel Engineer, 1987, 64(6): 40-43.
31. 王腊梅. 步进式加热炉温度控制系统设计及实现[J], 山西冶金, 2009, (2): 31-35.
32. 范圣冲. 基于 Layers 架构模式的热轧计划编排系统实现[D], 大连理工大学, 2008.
33. 陈伟. 基于 PSO 的复杂工业环境视觉目标检测算法应用研究[D], 武汉科技大学, 2008.
34. 张维. 模糊神经网络在钢坯出炉温度建模和控制中的应用[D], 重庆大学, 2007.
35. Halldy. Computer control model for continuous reheat furnaces metallurgia [J]. Heat Mass Transfer, 1990, 78(10): 412-413
36. 岳临萍. 强力矫直机控制模式分析及应用[J], 电气应用, 2010, 4: 86-89.
37. 朱若明. 上网行为监控系统的设计与实现[D], 中南大学, 2011.

38. Shaesby, N Birks, GHMeier. Introduction to high temperature oxidation of metals [J]. Heat and Mass Transfer, 1983, 16 (9) : 19-25 . B.
39. Kofstad. High Temperature Corrosion[M]. London, New York: Elsevier Applied Science Publishers Ltd, 1988.
40. 李光辉. 舞钢新宽厚板轧钢厂加热炉二级过程控制系统的应用[J], 宽厚板, 2010, (5): 85-89.
41. Katherine John. Steel rolling reheating furnace control [J], Control Engineering, 2004. (3):22-23.
42. 王琦. 宝钢机械厂冶金机械市场营销策略研究[D], 复旦大学, 2007.
43. Yonshisuke Misaka. Computer control of a reheat furnace at Kashima Steel Works hot strip mill [J], Iron and Steel Engineer, 1982, (5):51-55.
44. Adelaide. The Use of STEELTEMP Software in Heating Control [M], Techniques of Automation and Applications, Machinery Industry Press, 1: 11-12.

致 谢

在本文即将结束之际，我要由衷的感谢在我毕业设计阶段帮助过我的师长和同事。

我要首先感谢我的导师井元伟教授。井教授给予了我极大的关心和帮助。井教授从论文的选题、方案论证以及论文的组织到问题的解决各方面给予了悉心的指导与帮助。井教授渊博深厚的专业造诣、自身渊博的学识、一丝不苟的工作作风、诲人不倦的高尚品德、丰富的实践经验和认真负责的敬业精神，使我非常钦佩并终身受益。井教授治学严谨、知识渊博、诲人不倦，在学术和为人上都为我做出了榜样。在井教授的指导下，使我的课题研究能够顺利开展，并取得一定阶段性成果。再此，我向井教授表示最真挚的感谢。

我衷心地感谢东北大学信息科学与工程学院的各位老师。他们在专业课上的悉心教导使我获得了丰富的基础理论知识，为写好论文打下了坚实的基础。衷心地感谢刘婷师姐在论文修改过程中给予的耐心指导和帮助。

在论文完成的过程中同时得到单位高级工程师邱志宏及其他同志的大力支持和帮助，在此表示由衷的谢意。感谢河北首秦公司各级领导和同事在作者学习和生活中给予的各种帮助和支持。

最后，作者以十分崇敬的心情感谢参加论文评审和答辩的各位老师。感谢各位老师在百忙中抽出时间对论文进行审阅和指导。