

分类号_____密级_____

UDC _____

学 位 论 文

首钢京唐炼钢厂干法除尘控制系统研究与设计

作者姓名： 张红军

指导教师： 石海彬 副教授 东北大学信息科学与工程学院
王立华 高工 首钢自动化信息技术有限公司

申请学位级别： 硕士 学科类别： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

论文提交日期： 2011年11月 论文答辩日期： 2011年12月

学位授予日期： 年 月 日 答辩委员会主席： 关守平

评阅人： 郑艳 赵淑艳

东 北 大 学

2011年11月

A Thesis for the Degree of Master on Control Engineering



Control System Design and Research on Primary Waste Gas in Shougang Jingtang Steel Plant

By Zhang Hongjun

Supervisor: Associate Professor Shi Haibin

Senior Engineer WangLiHua

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：张红华

日期：2011年12月20日

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：张红华

导师签名：石海彬

签字日期：2011年12月20日

签字日期：2011, 12.21

首钢京唐炼钢厂干法除尘控制系统研究与设计

摘 要

本文以首钢京唐炼钢厂干法除尘系统为背景，结合首自信科研项目，对炼钢干法除尘控制系统进行设计研究。通过学习生产工艺、熟悉现场控制设备、解读控制程序，在掌握生产控制流程和设备控制参数后，结合现场实际工况对首钢京唐厂除尘生产进行工艺优化和设备改造。

本文的研究内容主要包括以下几个方面：

(1)电除尘原理和转炉炼钢生产的干法除尘生产工艺，比较了湿法除尘和干法除尘的技术参数和工艺参数，重点阐述了转炉干法除尘的工艺和干法除尘主要设备功能组。

(2)从现场设备的控制参数入手，结合生产工艺流程，详细讨论了干法除尘系统控制。对蒸发冷却器、静电除尘器、除尘灰输送、煤气输送、煤气回收功能组的控制设备、设备运行条件、主要技术参数及 HMI 人机操作功能进行研究。

(3)设计干法除尘系统软硬件。系统以西门子公司 S7-400 CPU 实现设备的控制调节；用 STEP7 软件实现硬件的在线检测、诊断功能；人机控制界面采用 WINCC 组态软件，用于显示设备运行状态，对重要工艺参数作实时和历史趋势，并实现故障报警、报表打印，进行数据设定和操作显示等功能。

(4)PLC 控制程序设计。按照设备的重要程度和功能，设计各个功能块的作用、执行频率、调用关系。详细讨论了蒸发冷却器的 PID 控制，通过对 PID 的算法的研究，修正 PID 控制参数。

(5)结合日常维护工作中的常见故障，对常见故障的设备提出维护方法和预防方案，并对部分工艺进行改进，对设备进行改造。

通过对干法除尘系统的研究，掌握生产工艺和工艺参数，理顺了控制程序和连锁条件。提高了维护队伍的技术水平，为工艺优化和设备改造创造了条件，为公司的技术输出打下基础。

关键词：转炉；干法除尘；PID；自动控制；蒸发冷却器

Control System Design and Research on Primary Waste Gas in Shougang Jingtang Steel Plant

Abstract

In this paper, have a research on the control system of primary waste gas base on production process of Shougang Jingtang Steel plant, at the same time have a research project about dry dedusting of Shougang Automation Information Technology Company Limited. Through the study of the production process, familiar with field control device, reading control program, master control process and control parameters, we have some process optimization and equipment modification combining with the actual conditions after know how it's work.

The main content of this paper includes the following aspects:

Firstly, described the principle of electric dust collector and electric dust collector in steelmaking converter, compared with the parameters of OG and LT method, elaborated with process and equipment functional group of LT method.

Secondly, start from the field device and combination with parameters of the production process, some control functions of the system are described in detail, including technical parameters, equipment operating conditions and HMI man-machine function on the evaporative cooler, electrostatic precipitator, dust removal ash conveying, gas transportation, gas recovery and functional group.

Thirdly, design hardware and software of the control system for gas dry dedusting system. Introduced the functions of siemens product briefly, S7-400 PLC have the fuction of on-line detection, control, regulation and diagnostic; monitoring machine adopts WINCC 6 configuration software, used to display the running state of the equipment, the important technological parameters for real-time and historical trend, and fault alarm, report printing, data set and operation display and other functions. To describe the technical principle, control method and application characteristics, and discussed in the dust production in rats.

Finally, design control program of the PLC, analyzes call relation and frequency of

execution each function block according to the important degree of equipment and function, PID control functions of the system are described in detail. Have some process optimization and equipment modification combined with the common faults in the maintenance work.

Through this article on the dry dedusting system research, master the process structure of the blind spots and to straighten out the control program in doubt, for process optimization and transformation equipment to create the condition, at the same time as the company's technical output to lay the founda.

Keywords: converter, dry dedusting, PID, auto-control, evaporation cooler

目 录

独创性声明.....	I
摘 要.....	II
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 课题研究行业背景.....	1
1.1.1 炼钢除尘背景.....	1
1.1.2 首钢京唐炼钢生产及干法除尘生产系统.....	3
1.2 本课题研究的意义.....	5
1.3 本文所做主要工作.....	5
第 2 章 干法除尘生产工艺流程.....	7
2.1 电除尘原理.....	7
2.2 干法除尘工艺流程.....	8
2.3 干法除尘系统.....	10
2.3.1 蒸发冷却器功能组.....	10
2.3.2 静电除尘器功能组.....	11
2.3.3 除尘灰输送功能组.....	13
2.3.4 煤气输送功能组.....	13
2.3.5 煤气回收功能组.....	14
第 3 章 干法除尘设备控制研究与改进.....	17
3.1 蒸发冷却器功能组研究.....	17
3.1.1 设备运行条件和控制要求.....	17
3.1.2 主要技术参数.....	19
3.1.3 HMI 控制.....	19
3.2 静电除尘器功能组研究.....	20
3.2.1 设备运行条件和控制要求.....	20
3.2.2 参数.....	22
3.2.3 HMI 控制.....	23
3.3 ID 风机的控制研究.....	24
3.3.1 设备运行条件和控制要求.....	24
3.3.2 参数.....	26
3.3.3 HMI 控制.....	26
3.4 液压控制系统研究.....	26
3.4.1 设备运行条件和控制要求.....	27

3.4.2 参数	28
3.4.3 HMI 控制	28
3.5 输灰功能组研究	29
3.5.1 设备运行条件和控制要求	29
3.5.2 HMI 控制	30
3.6 煤气分析	30
3.7 除尘系统改进和完善	32
3.7.1 粗输灰功能改进	32
3.7.2 煤气分析系统改进	33
3.7.3 煤气回收功能完善	33
3.7.4 急停系统完善	34
第 4 章 干法除尘系统设计	35
4.1 控制系统软硬件	35
4.1.1 STEP7	36
4.1.2 WINCC	37
4.2 系统设计	38
4.3 程序结构及程序块	40
4.4 其他系统功能	42
第 5 章 PID 控制器设计与实现	47
5.1 PID 控制原理	47
5.2 串级控制	49
5.3 西门子 PID 功能块	51
5.4 蒸发冷却器温度控制	52
第 6 章 总结与展望	57
6.1 总结	57
6.2 展望	58
参考文献	59
附 录	61
致 谢	63

第1章 绪论

1.1 课题研究行业背景

1.1.1 炼钢除尘背景

转炉炼钢过程中会产生大量高温烟气，其主要成分是一氧化碳。转炉煤气发热值可达 $7524\text{kJ}-9196\text{kJ}^{[1]}$ ，是一种上等燃料，可作为轧钢加热炉、石灰套筒窑、钢包烘烤等设备的燃料。同时烟气中还含有大量高铁含量的粉尘，收集后可作为烧结矿的上乘原料。另外，高温烟气通过热交换又可回收大量蒸汽，蒸汽用途甚广，既可用于生产，又可用于生活。因此，对转炉烟气能源利用意义十分重大。若这些高温烟气不回收，散发在车间和大气中会产生严重污染，危及人身健康和农业生产，同时会干扰电网、电视和通讯等。在转炉炼钢中，对炼钢产生烟气的处理是炼钢厂环保水平的主要标志之一，煤气和蒸汽的回收和再利用也是其耗能指标的重要因素，而转炉炼钢的蒸汽和煤气回收是通过烟气回收净化系统来实现。

汽化冷却烟道是转炉炼钢烟气回收净化系统的主要设备之一，它将转炉冶炼过程中产生的含有大量 CO 的高温含尘烟气收集降温并输送到煤气净化系统。该设备是炼钢生产过程中防止对环境污染和充分利用能源的一整套装置的门户和通道。在烟道系统中，为保证转炉炉口与烟道设备完好配合密封，烟道下方需设置一段可垂直升降的活动罩裙。而在保证活动罩裙与固定烟道之间密封的同时又不影响罩裙的升降是一个技术难题。传统的转炉烟道系统活动罩裙密封有砂封，水封等形式，设备使用过程中均出现过卡罩或密封不严等现象^[2]。

转炉烟气净化系统可概括为烟气收集与输导、降温与净化、抽引与放散及回收等三部分。转炉烟气通过汽化冷却烟道进入蒸发冷却塔中进行粗降温和降尘，烟气温度由 $800-1000^{\circ}\text{C}$ 降至 $180^{\circ}\text{C}^{[1-2]}$ 左右，烟气脱除大颗粒灰尘后，由转炉烟气管道输送至圆筒形干式电除尘器进行精除尘，使煤气含尘量降到 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，净化后的烟气经除尘风机加压后，不符合回收条件的烟气经切换站放散侧杯形阀进入放散烟囷燃烧后放散，符合回收条件的煤气经切换站回收侧杯形阀进入煤气冷却器进一步冷却，最终进入转炉煤气回收总管。

目前氧气转炉炼钢的净化回收主要有两种方法，一种是煤气湿法净化回收系统，一种是煤气干法净化回收系统。湿法系统主要由烟气冷却、净化、煤气回收和污水

处理等部分组成，烟气经冷却烟道后进入烟气净化系统。烟气净化系统包括两级文氏管、脱水器和水雾分离器，烟气经喷水处理后，除去烟气中的烟尘，带烟尘的污水经分离、浓缩、脱水等处理，污泥送烧结厂作为转炉和烧结原料，净化后的煤气被回收利用。

湿法系统全过程采用湿法处理，该技术存在以下缺点^[3]：

- (1)处理后的煤气含尘量较高，达 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 以上，要利用此煤气，需在后部设置湿法电除尘器进行精除尘，将其含尘浓度降至 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下；
- (2)系统存在二次污染，其污水需进行处理，有一套庞大的污水处理系统；
- (3)系统阻损大，能耗大，占地面积大，环保治理及管理难度较大。

干法除尘系统主要由蒸发冷却器、静电除尘器、风机和煤气回收系统组成。与湿法相比，干法除尘的主要优点是：除尘净化效率高，通过电除尘器可直接将粉尘浓度降至 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下；该系统全部采用干法处理，不存在二次污染和污水处理；系统阻损小，煤气热值高，回收粉尘可直接利用，节约了能源。因此，干法除尘技术比湿法除尘技术有更高的经济效益和环境效益。

干法除尘系统有如下特点^[4]：

- (1) 除尘效率高，经干法除尘除尘器净化后，煤气中的含尘量最低可达到 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，最高为 $25\text{mg}/\text{m}^3$ ，比湿法系统的 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 低；
- (2) 无污水、污泥，从冷却器和干法除尘系统排出的都是干尘，混合后压块，可返回转炉使用。无大量的污水处理设备，极大的降低了资金的利用；
- (3) 电能消耗量低，从综合电耗来看，干法除尘系统的电耗量要远低于湿法系统电耗量；
- (4) 一次性投资费用高，但回收期短。若改造老厂设备，投资费用还可降低许多；
- (5) 采用 ID 风机，操作简单，使用寿命长，易维护，结构紧凑，占地面积小；
- (6) 技术要求较高，转炉烟气在进入电除尘器之前，必须具有可靠的、精确的温度和湿度控制，同时要求在实际操作中要严格安全运行等制度。

下表是传统湿法除尘和干法除尘的数据比较^[5]：

表 1.1 湿法除尘和干法除尘数据比较
Table 1.1 Comparison data of OG method and LT method

OG 湿法除尘		LT 干法除尘	
降温文氏管	$t=78^\circ\text{C}$ $\Delta P=3000\text{ Pa}$	蒸发冷却塔	$T=150^\circ\text{C}$ $\Delta P=100\text{ Pa}$
除尘文氏管	$\Delta P=12000\text{ Pa}$ 出口含尘 $\leq 100\text{ mg}/\text{Nm}^3$	静电除尘器	$\Delta P=200\text{ Pa}$ 出口含尘 $< 10\text{ mg}/\text{Nm}^3$

高压离心风机	P=21000 Pa	单机轴流风机	P=6500 Pa
功耗	N=1865 kW	功耗	N=610 kW
-----		饱和冷却器	
	煤气含尘量~10 mg/Nm ³		煤气含尘量~10 mg/Nm ³
	污水沉凝装置		干法输送储存装置
	污泥脱水装置		干法成球压块装置
	污泥干燥	-----	
	污泥返回烧结		沉块返回烧结
消耗指标	每炉耗电 1235 kW	消耗指标	每炉耗电 335 kW
	每炉耗水 70 m ³		每炉耗水 25 m ³

转炉干法除尘技术在国际上已被认定为今后的发展方向，它可以部分或完全补偿转炉炼钢过程的全部能耗，有望实现转炉无能耗炼钢的目标。另外，从更加严格的环保和节能要求看，由于湿法净化回收系统存在着能耗高、二次污染的缺点，它将随着时代的发展而逐渐被转炉干法除尘系统取代，这是冶金工业可持续发展的要求^[7-8]。

1.1.2 首钢京唐炼钢生产及干法除尘生产系统

首钢京唐炼钢厂采用 2+3 的“全三脱”两步法治炼生产模式。配置 2 座 300t 脱磷转炉和 3 座 300t 脱碳转炉。脱磷转炉平均冶炼周期 25min，脱碳转炉平均冶炼周期 28min。正常情况下，实行 2+3 转炉全量脱磷、脱碳处理，转炉与板坯连铸机采用 3 对 3 的高效快节奏的生产模式。

京唐钢大容量转炉采用了炼钢新工艺、新技术，烟气净化采用了干法除尘技术。转炉干法除尘简单工艺流程为转炉 1500 ℃的高温烟气经气化冷却烟道冷却至 1100 ℃后，进入蒸发冷却器。高压水经雾化喷嘴喷出将烟气直接冷却到 220 ℃，喷水量根据烟气含热量精确控制，所喷出的水完全蒸发；喷水降温的同时对烟气进行了调质处理，使粉尘的比电阻有利于电除尘器的捕集。蒸发冷却器内约 40%~45%的粗粉尘沉降到底部，由卸灰阀排出。冷却和调质后的烟气进入有 4 个电场的圆形电除尘器，其入口处设有 3 层气流分布板，使烟气在圆形电除尘器内呈柱塞状流动，避免气体混合，减少爆炸成因。电除尘进、出口装有安全防爆阀，以疏导可能产生的压力冲击波。烟气经除尘后含尘量降至 25mg/m³。收集下的粉尘通过扇形刮板器、链式输送机和滑动卸灰阀排出，干法系统阻力很小，引风机采用轴流风机，有利于系统的泄爆。风机设变频调速，可实现流量跟踪调节，以保证煤气回收的数量与质量，以及节约能源。切换站有两个钟形阀组成，对回收煤气及放散、点燃两种状态进行快速

切换。回收的煤气在冷却器中通过直接喷淋冷却水，由 200℃ 降至 77℃，然后送入煤气柜供用户使用。转炉技术数据见表 1.2 和烟气技术见表 1.3。

表 1.2 转炉技术数据

Table 1.2 Technology data of converter

工艺	脱碳冶炼	脱磷冶炼	常规的氧气顶吹转炉
类型	顶底复合吹炼转炉	顶底复合吹炼转炉	顶底复合吹炼转炉
操作模式	3 / 3	2 / 2	
每炉平均产钢量	300 t	317 t	300 t
每炉最高产钢量	315 t	325 t	315 t
最大铁水装入量	1056公斤/吨钢	1025公斤/吨钢	980公斤/吨钢
废钢量, 最大		120公斤/吨钢	180公斤/吨钢
铁矿石量, 最大	5~8公斤/吨钢	20公斤/吨钢	20公斤/吨钢
锰矿含量,	15公斤/吨钢	-	-
铁水中的含碳量	3.2~4.0 %	4.5~5.0 %	4.5~5.0 %
含硅量, 最大	最大0.7 %, 标准平均0.35		
最大吹氧量	81,000 Nm ³ /小时	36,000 Nm ³ /小时	72,000 Nm ³ /小时
参加反应的最大氧气量	90,000 Nm ³ /小时	44,000 Nm ³ /小时	81,000 Nm ³ /小时
每炉的操作时间	24~30分钟	20~26分钟	35~40分钟
吹氧时间	大约10~12分钟	大约8~10分钟	大约13~15分钟
钢水终点含碳量	大约0.05 %	3.2~4.0 %	大约0.05 %

表 1.3 烟气技术数据

Table 1.3 Flue gas technology data

工艺	脱碳	脱磷	常规的氧气顶吹转炉
参加反应的最大氧气量	90,000 Nm ³ /小时	44,000 Nm ³ /小时	81,000 Nm ³ /小时
-通过氧枪	81,000 Nm ³ /小时	36,000 Nm ³ /小时	72,000 Nm ³ /小时
-通过铁矿石	9,000 Nm ³ /小时	9,000 Nm ³ /小时	9,000 Nm ³ /小时
转炉中的CO和CO ₂ 的比率	90: 10	90: 10	90: 10
燃烧系数	0.1	大约<1.0	0.1
煤气含量	最大192,000 Nm ³ /小时, 干燥	最大175,000 Nm ³ /小时, 干燥	最大175,000 Nm ³ /小时, 干燥

冷却烟囱出口处烟 气温度	最高1000°C	最高1000°C	最高1000°C
每吨钢的烟尘量	最大18 公斤/吨	包括D蒸发冷却器	最大17公斤/吨

1.2 本课题研究的意义

由于转炉烟气湿法净化回收技术操作简单、投资少、周期短等优点，所以国内转炉基本上都采用此项技术。转炉煤气干法净化回收技术与转炉煤气湿法净化回收技术相比，其技术含量高、装备复杂、自动化程度高，更重要的是它具有除尘效率高、节水节电、回收煤气量大、粉尘利用率高、风机寿命长、无二次污染、占地面积小等优点。随着我国社会和经济的发展，对环保和节能提出了更高的要求，因此，在上世纪 90 年代我国就对转炉煤气干法净化回收技术进行了密切关注，并于 97 年上海宝钢首次全套引进了此项技术，此后又将此项技术列为“十五”计划中重点开发推广技术项目。

干法除尘系统技术要求设备、自动化精度高，操作严格。而且干法除尘系统的工艺过程均是由外方作自动化控制，或是由设计院按照外方的工艺描述进行自动化控制，按照外方的工艺描述进行自动化控制。但一般外方的工艺描述非常复杂，经常由于一些不必要的条件影响转炉的生产。基于安全生产的前提同时要求转炉冶炼工艺产生烟气的成分都随固定规律变化。如果因冶炼工艺变化瞬时产生大量烟气，使烟气中的 CO、O₂、H₂、CO₂ 含量超标，干法除尘系统就会发生泄爆事故，必须停止吹炼。所以，干法除尘系统对转炉冶炼工艺有严格的要求，转炉冶炼也对干法除尘系统产生了一定影响。只有二者有机地结合起来，才能保证生产顺利进行。

由于首钢的架构调整，首自信公司为适应市场化发展的要求也努力提高自己的技术能力和技术储备，项目在对整套系统进行消化后，在维护的基础上结合曹妃甸及其他几个工业区的实际对生产进行优化调整，优化工艺并对设备进行改造。同时提供技术输出能力。通过熟悉工艺和程序，了解现场的设备。形成技术文档，为维护人员提过培训，能够很多程度的提高维护人员的技术实力，降低故障处理时间和减少故障率，保证生产的正常运行。

1.3 本文所做主要工作

首自信负责维护京唐炼钢厂的设备和 PLC 系统，由于投产初期维护人员对于设备运行情况不熟悉；在发生生产故障时处理速度慢；同时对于程序架构没有理顺，

导致程序维护难度大，不能适应京唐的生产需求。为此由首自信科研项目成立专项资金，搭建 PLC 实验平台。利用控制程序进行 PLC 实验，解读 PLC 控制程序，理清程序架构，熟悉设备运行条件，并成立维护文档。在熟悉工艺结构和程序的基础上结合现场的实际环境和工矿对系统进行一定改进，也有利于提高生产效率。通过对干法工艺学习，控制设备的维护，总结经验，编写技术文档，为日后维护工作奠定坚实的基础。

(1)电除尘原理和转炉炼钢生产的干法除尘生产工艺，比较了湿法除尘和干法除尘的技术参数和工艺参数，重点阐述了转炉干法除尘的工艺和干法除尘主要设备功能组。

(2)从现场设备的控制参数入手，结合生产工艺流程，详细讨论了干法除尘系统控制。对蒸发冷却器、静电除尘器、除尘灰输送、煤气输送、煤气回收功能组的控制设备、设备运行条件、主要技术参数及 HMI 人机操作功能进行研究。

(3)设计干法除尘系统软硬件。系统以西门子公司 S7-400 CPU 实现设备的控制调节；用 STEP7 软件实现计算机对干法除尘系统的在线检测、诊断功能；人机控制界面采用 WINCC 组态软件，用于显示设备运行状态，对重要工艺参数作实时和历史趋势，并实现故障报警，报表打印，进行数据设定和操作显示等功能。阐述了它们的技术原理、控制思路以及应用特点，并讨论其在除尘生产中的作用。

(4)PLC 控制程序设计。按照设备的重要程度和功能，分析各个功能块的作用、执行频率、调用关系。详细讨论了蒸发冷却器的 PID 控制，通过对 PID 的算法的研究，修正 PID 控制参数。

(5)结合日常维护工作中的常见故障，对常见故障的设备提出维护方法和预防方案，并对部分工艺进行改进，对设备进行改造。

通过对干法除尘系统的研究，掌握生产工艺和工艺参数，理顺了控制程序和连锁条件。提高了维护队伍的技术水平，为工艺优化和设备改造创造了条件，为公司的技术输出打下基础。

第2章 干法除尘生产工艺流程

2.1 电除尘原理

由于辐射摩擦等原因，空气中含有少量的自由离子，单靠这些自由离子是不可能使含尘空气中的尘粒充分荷电的。因此，要利用静电使粉尘分离须具备两个基本条件，一是存在使粉尘荷电的电场；二是存在使荷电粉尘颗粒分离的电场。一般的静电除尘器采用荷电电场和分离电场合一的方法。

电除尘器是在两个曲率半径相差较大的金属阳极和阴极上，通过高压直流电，维持一个足以使气体电离的静电场，气体电离后所生成的电子，阴离子和阳离子、吸附在通过电场的粉尘上，而使粉尘获得电荷。荷电粉尘在电场力的作用下，便向电极性相反的电极运行而沉积在电极上。可达到粉尘和气体分离的目的。用细金属线的一端用绝缘子，悬挂在接地的金属圆筒的轴心上，并在其上施加负性高电压。当电压达到一定值时，在金属线的表面上出现青蓝色的光点，并发出嘶嘶之声，这种现象称为电晕放电，此时若从金属圆筒底部通入含尘气体，绝大多数粉尘粒子便向圆筒运动而沉积，在圆筒的内壁上。当沉积在圆筒壁上的粉尘达到一定厚度时，借助于振打机构使粉尘落入下部灰斗，净化后的气体便从圆筒向上部排出，一般称圆筒为收尘板金属线为电晕极或放电极。除尘器除尘原理是含尘烟气通过高压静电场时，与电极间的正、负离子荷电子发生碰撞或在力离子扩散运动中荷电，带上电子和离子的尘粒在电场力的作用下向异性电极运动并吸附在异性电极上，通过振打等方式使电极上的灰尘落入集灰器中^[9]。

干法静电除尘系统设有平行布置的集尘电极，它们与机壳一起接地。这些电极如需净化的废气形成了通道。在通道中间设置了放电电极作为负极，由绝缘子来支承。在机壳内通道一个接一个地平行布置。电场配有振打装置，锤头由齿轮电机驱动。配有防反转装置的齿轮电机的外面用法兰连接在机壳的壁上，并通过插入式联轴器与锤头的轴相连接。放电极的振打装置采用相同的工作原理。每个放电极的框架由一个锤头来振打。

静电除尘器工作原理如图 2.1 所示。以导线作放电电极也称电晕电极，为负极；以金属管或金属板作集尘电极，为正极。在两个电极上接通数万伏的高压直流电源，两极间形成电场，由于两个电极形状不同，形成了不均匀电场；在导线附近，电力

线密集，电场强度较大，使正电荷束缚在导线附近，因此，在空间电子或负离子较多。于是通过空间的烟尘大部分捕获了电子，带上负电荷，得以向正极移动。带负电荷的烟尘到达正极后，即失去电子而沉降到电极板表面，达到气与尘分离的目的。定时将集尘电极上的烟尘振落或用水冲洗，烟尘即可落到下部的积灰斗中。

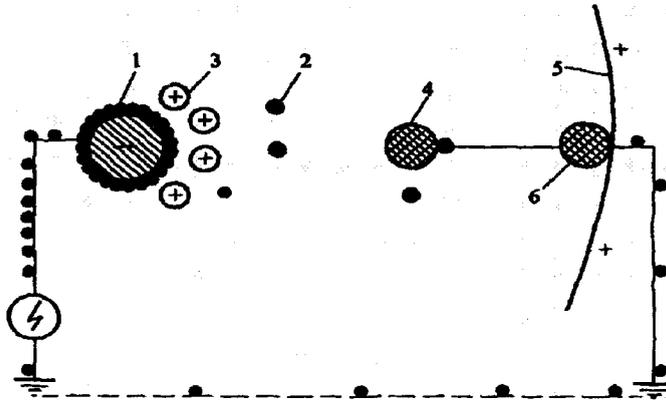


图 2.1 静电除尘器的工作原理

Fig.2.1 The working principle of electrostatic precipitator

- 1-放电电极, 2-烟气电离后产生的电子; 3-烟气电离后产生的正离子;
- 4-捕获电子后的尘粒; 5-集尘电极; 6-放电后的尘粒

静电除尘器由三段或多段串联使用。烟气通过每段，都可去除大部分尘粒，经过多段可以达到较为彻底净化的目的。烟气进入前段除尘器时，烟气含尘量高，且大颗粒烟尘较多，因而静电除尘器的宽度可以宽些，从此以后宽度可逐渐减小。后段烟气中含尘量少，颗粒细小，供给的电压可由前至后逐渐增高。

烟气通过除尘器时的流速约为 2~3m/s 为好，流速过高，易将集尘电极上的烟尘带走；流速过低，气流在各通道内分布不均匀，设备也要增大；电压过高，容易引起火花放电；电压过低，除尘效率低。集尘电极上的积灰可以通过敲击振动清除，落入积灰斗中的烟尘通过螺旋输送机运走，又称干式除尘。还可以用水冲洗集尘电极上的积尘，也称湿式除尘，污水与泥浆需要处理，用水冲洗方式除尘效率较高。干式除尘适用于板式静电除尘器；而湿式除尘适用于管式静电除尘器。

2.2 干法除尘工艺流程

在氧气顶吹转炉炼钢工艺中利用氧气进行铁水脱碳，从而将铁水炼成钢。氧气顶吹转炉是通过氧枪将必需的氧气吹入熔池，从而降低铁水中的碳含量。熔池中的碳氧反应会产生含一氧化碳浓度较高的烟气，为了回收利用热值很高的烟气，必须

对烟气进行冷却和净化。在烟气除尘后，热值很高的转炉煤气将被送至煤气柜和净化煤气用户分配系统，供若干用户使用。其工艺流程图如图 2.2。

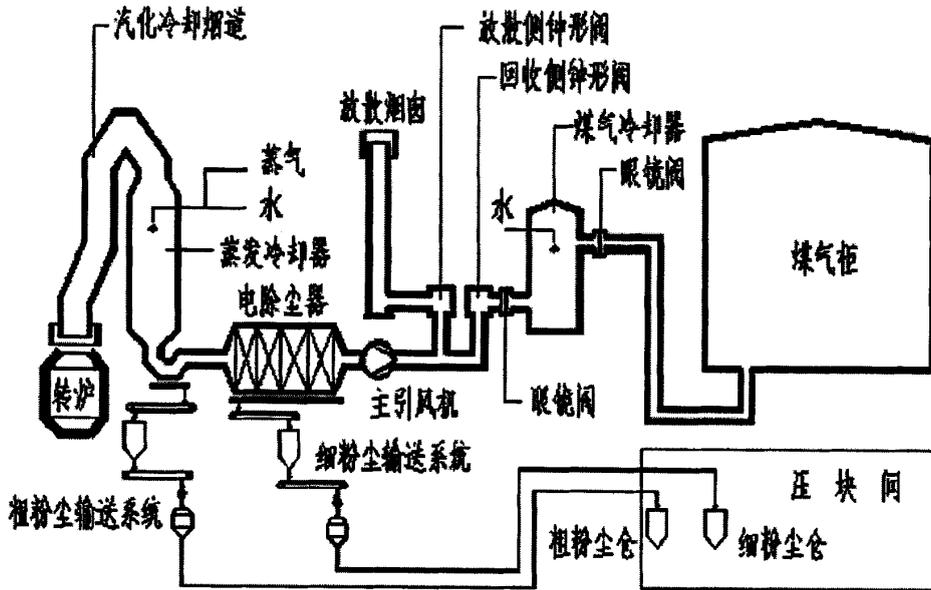


图 2.2 工艺流程图

Fig.2.2 Process flow diagram

干法除尘烟气净化回收处理过程是从转炉炉口开始的。约 1,600°C 的高温烟气经汽化冷却烟道间接冷却至约 1,000°C 后，进入蒸发冷却器。蒸发冷却器通过雾状喷水，直接冷却烟气。喷水量是根据烟气含热量被精确控制的。所喷的水完全被蒸发，使烟气始终为干烟气。伴随喷水降温，烟气在蒸发冷却器内的流速很低，占烟气含尘量 40% 的粗粉尘沉降到蒸发冷却器的底部，经链式输送机 and 卸灰阀输出。烟气流经蒸发冷却器时，温度已降至 170°C 左右。

从蒸发冷却器出口流出的烟气经输送管道进入圆筒形干式电除尘器。烟气流入干式电除尘器时，首先通过三层气流分布板，烟气在电除尘器内呈柱塞状流动，避免不同成分气体混合，减少爆炸成因。电除尘器两端设有自动启闭安全防爆阀，一旦煤气和空气混合，发生突然燃烧压力升高时，可有效地进行卸压，不致损坏设备。电除尘器内设有 4 个电场，根据电除尘器出口管道上烟气含尘浓度分析仪提供的数据，由专用的微机控制和监测各电场的电压。含尘量 75g/m³ 的烟气经电除尘器净化后，烟气的含尘量降至 20mg/m³ 以下。电除尘器收集的粉尘通过扇形刮灰器、链式输送机 and 卸灰阀输出。

净化后的烟气经管道进入 ID 风机。由于干法除尘法系统阻力小，从而为轴流式风机的选型创造了非常理想的条件。干法煤气净化回收系统采用轴流式风机，在

系统发生突然燃烧时，可以顺畅卸压，保护系统设备不受损坏。风机采用变频调速方式，可以实现变流量跟踪调节，这不仅保证了煤气回收的数量和质量，而且有着明显的节能效果。

风机压送出的干净烟气通过管道进入切换站。切换站主要由放散侧钟形切换阀和回收侧钟形切换阀组成。根据设定的煤气回收条件自动快速切换烟气流向，或送向放散烟囱，或将合格煤气送向煤气柜。钟形阀由与控制系统连接的液压系统驱动，在快速切换的过程中，不会产生由于压力波动引起的干扰性烟气喘振现象。在切换站回收侧钟形切换阀后设有一个由液压系统驱动的眼镜阀，在检修钟形切换阀及其上游部件时，用该阀关闭通向煤气柜的输送管路。当切换站将烟气切换至放散侧时，烟气将通过管道被送入放散烟囱。放散烟囱顶部设有焦炉煤气点火装置，当烟气从顶部排出时，烟气中的 CO 将被点着燃烧。放散烟囱还设有氮气引射装置，以便在 ID 风机跳闸和故障时可将系统中的烟气诱引出去。当切换站将烟气切换至回收侧时，说明烟气中的 CO 含量达到设定值，作为合格煤气被送入煤气冷却器。

净煤气的温度约在 150°C - 170°C 之间，进入煤气冷却器后，通过冷却水的直接喷淋冷却，温度可降至 70°C 。对净煤气进行冷却降温处理，其目的是为了使煤气柜的容积尽可能小，同时还可以进一步降低烟尘含量，在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。在煤气冷却器出口设有一个由液压系统驱动的眼镜阀，在检修煤气冷却器及其上游部件时，用该阀关闭通向煤气柜的输送管路。冷却后的净煤气通过管道被送入煤气柜^[10]。

2.3 干法除尘系统

干法除尘系统在功能上分蒸发冷却器功能组、静电除尘功能组、输灰功能组、煤气输送功能组、煤气回收功能组。

2.3.1 蒸发冷却器功能组

蒸发冷却器主要目的是将转炉产生的高温烟气进行降温处理，使进入静电除尘器的烟气温度在合理的范围内。蒸发冷却器主要由以下设备组成：水冷烟道供水泵、喷射水切断阀、喷射蒸汽切断阀、喷射水调节阀、喷射蒸汽调节阀。

蒸发冷却器是通过控制喷射蒸汽和喷射水的流量调节控制蒸发冷却器出口的烟气温度，为更好的控制出口温度及水量调节，主要通过 S7 系统软件的 PID 功能块的参数修正精确控制水量。蒸发冷却器水量控制的不准确，会影响静电除尘器的除尘效果，并且有可能对静电除尘起内的设备造成严重损坏。

蒸发冷却器是整个干法除尘的核心，通过喷嘴将适量的水雾化喷入烟气中直接冷却烟气的，雾化水蒸发形成饱和蒸汽并吸收烟气中的热量。因此，为了保证烟气的冷却效果，必须要有足够水的蒸发量。另外，蒸发冷却器除了通过汽化来冷却烟气，其主要目的是收集粗颗粒粉尘。伴随喷水降温，烟气在蒸发冷却器内产生了一个调质过程，使粉尘的比电阻发生变化，这对于电除尘器的除尘效果是非常有利的。此外，由于烟气在蒸发冷却器内的流速很低，占烟气含尘量约40%的粗粉尘沉降到蒸发冷却器的底部，经链式输送机和卸灰阀输出。烟气出蒸发冷却器时，温度已降至170℃。

喷嘴系统通过双流喷嘴实现水的雾化。喷水装置装在冷却器的入口，当水用双回流喷嘴按要求喷出雾化水雾时，水从喷嘴的中心孔喷出，蒸汽从孔周围的环形缝隙中喷出，喷出的水和蒸汽混合，雾化成很细的水雾。每个双流喷嘴可以通过手动隔离阀来单独切断。喷管的开口安装在烟气汽化冷却烟道的尾部，通过两根环形主管输送水和蒸汽，水流量由控制阀来控制。在操作过程中，根据蒸发冷却器出口的温度以及入口温度和烟气流量来确定水流量，喷嘴中蒸汽的流量保持恒定。

2.3.2 静电除尘器功能组

静电除尘器本体系统主要是通过高压电场将转炉烟气中的灰尘吸附到收集电极，然后通过振打装置及刮灰机使灰尘落入除尘器底部的链式输灰机，通过细输灰系统收集灰尘。

静电除尘器由绝缘子加热器、电场板振打、卸爆阀组成。绝缘子加热器保证电场绝缘子有足够高的温度，保证高压安全可靠运行。电场的作用是给电除尘器提供直流高压电、吸附灰尘、净化煤气；振打器的作用是将气流分配板阴阳极板上吸附的灰尘通过振打振到除尘器内^[11]。转炉烟气成分中含有大量H₂、O₂、CO、CO₂等气体，在静电除尘器内受电场电离的作用下容易燃烧、爆炸而损坏设备。燃烧产生大量的气体达到卸爆极限时卸爆阀打开，大量的气体排出，从而保护了静电除尘器。

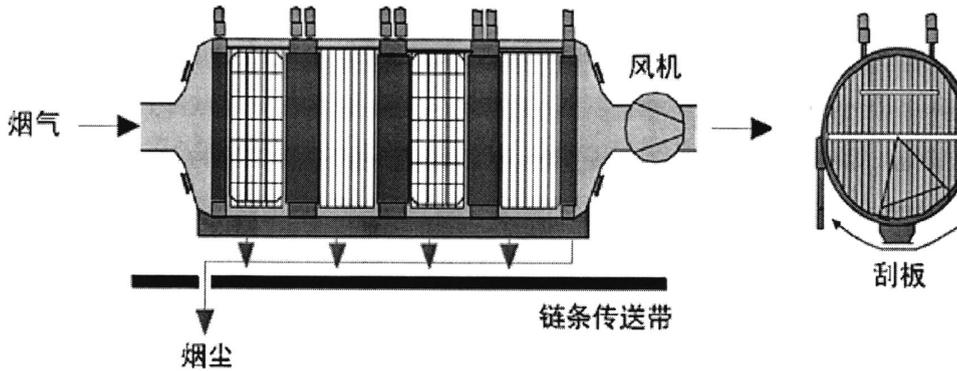


图 2.3 静电除尘器结构示意图

Fig.2.3 Electrostatic precipitator structure diagram

静电除尘系统设有平行布置的极板，它们与机壳一起接地。这些相互平行的电极板形成了烟气通道，通道中间设置极线作为负极，并通过绝缘子连接和支承，极线在机壳内的极板之间一个接一个地平行布置。极板配有振打装置，锤头由齿轮电机驱动。配有防反转装置的齿轮电机的外面用法兰连接在机壳的壁上，并通过插入式联轴器与锤头的轴相连接。放电极的振打装置采用相同的工作原理，每个放电极的框架由一个锤头来振打。

静电除尘器含有一个带隔热材料的圆柱体外壳，内部分布四个独立的电场。由接地的极板以及布置在极板之间的高压放电极形成电场。极板是由沿气流方向一个接一个地垂直悬挂的单板组成的，而每块极板又包含了若干个板带，这些板带电极从上、下支撑结构的每个接点上悬挂下来。

放电极由位于通道中心的放电框架组成，并沿通道布置。放电框架通过支架、悬吊式框架和悬管固定在位于机壳上部的支承绝缘子上。每个支承框架通过两根悬管从支承绝缘子上悬吊下来，这些绝缘子垂直布置在绝缘拱顶的里面，悬管将喷吹系统的荷载传递到静电除尘器的外壳上。各喷吹系统由专门的固定装置来固定，以防止其掉到刮板器上。

振打装置是在用来清除附着在极板和放电极线以及气体分配板上的粉尘。在静电除尘器内部。每排极板配置一个振打锤头，这些自由落体式锤头布置在位于除尘器附近的锤轴上，振打锤头落在振打杆的头部，使其能周期和持续性地对相应的极板排进行清灰。极线的振打装置通过一个立式锤轴来动作。因此，极线是与其支撑机构一起提起和落下的。用齿轮电机对气体导流板、极线和极板进行振打。传动装置可以顺利地从其维护平台上通过。

清灰装置用于清除从电极落到链式运输机上的粉尘，链式运输机纵向布置在除

尘器外壳的下面。有两套刮板装置，一套用于 No.1 和 No.2 电场，另一套用于 No.3 和 No.4 号电场，各配有单独的齿轮电机。

静电除尘器的粉尘始终由链式运输机运输。粉尘将通过一个气动式插板阀和一个双摆式闸阀被运送到输灰系统。配有插板阀和双摆式闸阀的系统可确保在转炉吹炼期间安全和持续地除尘。

2.3.3 除尘灰输送功能组

干法除尘系统中会有大量的灰尘，在系统中设置两个除尘系统。粗灰系统和细灰系统。一个是运送来自汽化冷却器的粗颗粒粉尘；一个是运送来自静电除尘器的细颗粒粉尘。两个系统都包含有与各自的储灰仓相联的带链条运输机的机械式输灰系统和倾斜的链式运输机。由于粉尘有自燃特性，所以整个输送系统将充入氮气。为输灰系统配备氮气密封装置以保证输灰系统的安全。

粗灰系统包含蒸发冷却器输灰系统、粗灰传送机械设备、粗灰仓和斜料设备；由蒸发冷却器收集出来的烟尘占整个烟尘的 40%左右，粒度大，故属粗灰。由于量多，容易卡灰而导致设备瘫痪，所以粗灰系统是有独立的输灰时间的。在自动模式下，当收到出钢信号时，开始从灰仓开始向前逐个启动输灰设备。

细灰系统包含静电除尘器输灰系统、粗灰传送机械设备、机械斗提机、细灰仓和斜料设备。由静电除尘器内分离出的烟尘，数量少，颗粒小，称为细灰。为了节省输灰时间，加大产量，结合细灰灰质特点，转炉在任何状态下，细输灰系统都一直工作，源源不断的将静电除尘器中的烟尘输送到灰仓中。

2.3.4 煤气输送功能组

煤气输送系统包含 ID 风机，包括变频器，冷却风机、煤气分析系统、点火装置和放散塔。

由于干法除尘器压力损失低，要求的风机功率也相对较小，因此可选用轴流风机。在将煤气回收到煤气柜时，风机出口需要有较高的压力。因此要对风压和风量进行控制，风机用 VVVF 变频调速电机来控制。ID 风机流量控制在干法系统中非常重要，风机转速过高，会导致管道内负压过大，炉口吸入大量空气，从而在经过静电除尘器时发生泄爆。转速过低，又会使在炉内反映过后的烟气大量囤积，无法抽离，加重风机叶轮的负荷。所以如何控制好转速，合理调节显得极为重要。ID 风机风量调节系统分为两种调节方式，一种是根据安装在转炉炉口的微差压控制器来控

制风机转速。另一种是根据转炉的各种阶段和吹炼过程中的吹氧量进行调节。风机的速度控制主要是根据转炉在各个阶段的信号进行速度调节,只有在吹炼过程中,为了保证能更好的控制除尘效果加入了炉口微差压,EP 出口流量 F1505 参与风机 PID 调节。理论吹炼过程中炉口微差压控制在+20Pa~-20Pa,实际控制在+50Pa~-50Pa。

煤气分析系统可随时对转炉烟气进行抽气取样,准确分析出烟气中四种重要含量, $O_2/CO/CO_2/H_2$ 。对预防干法静电除尘器的泄爆和转炉的烟气回收起到极其重要的作用^[12]。

安装在圆筒式后面的 ID 风机用于将转炉废气输送到放散塔的出口或煤气柜。干法除尘系统的特点是在静电除尘器上的压力损耗低,它可选用较低的风机功率,为此可以使用轴流风机。与离心风机相比,轴流风机可通过变频电机实现无级调速。另外,气流送进煤气柜之前应升高到较高的压力水平,为了在流量控制范围内升高压力,调整 ID 风机的速度。放散塔布置在 ID 风机的下游。点火装置位于清洗塔上部。在放空前,含有一氧化碳的废气用点火装置点燃后放散。根据一氧化碳的含量,在从风机到放散塔或煤气柜之间装有切换杯阀。由高压泵、比例阀等组成的液压系统控制二个杯阀的开启和闭合,达到或放散或回收的目的。

2.3.5 煤气回收功能组

从风机到煤气冷却器之间配有切换阀和切断阀,根据一氧化碳的含量进行煤气回收的操作。煤气回收系统包含煤气切换站、液压站、煤气冷却器、煤气冷却器泵站、氮吹扫设备。

切换站工作原理为烟道和煤气柜操作所需的烟气静态压力是不同的,因此,在切换之前,必须通过钟形阀和电机的速度控制装置将从净化烟气管线到烟囱的压力调节到从烟道到煤气柜的压力。在切换期间,切断阀关闭到烟囱的直接通道,在压力补偿期间,带控制叶片的钟形阀打开向煤气柜的通道。在吹炼末期,先关闭到煤气柜通道,然后再完全打开到烟囱的直接通道。

此外,为了能在煤气柜中存储更多的转炉煤气,每次进入煤气柜前要先用煤气冷却器冷却煤气,以压缩煤气体积。为了方便对煤气回收系统进行维修,在煤气冷却器前后各配备一个可选的气密式眼镜阀。另外,每一部分都应设置人孔以及氮气吹扫用的通风连接管线。

回收系统主要由切换站和煤气冷却器组成。切换站的作用是将烟气放散操作切换到烟气回收操作或执行相反的操作。烟气切换站主要包括两个钟形阀,由液压机

构调节，且各自独立。切换整个系统用的切换信号由烟气分析站的一氧化碳和氧气含量数值来给出，系统通过差压检测来控制，为了进行控制，在钟形阀的两个设定点对压力进行检测，并与预定值加以比较。

在切换站和煤气柜之间设置了煤气冷却器。通过直接水冷，尽量压缩回收煤气的体积，喷射出来的水同烟气中粉尘一起被引入水处理站进行处理。在烟气放散操作期间（即烟道钟型阀打开），用煤气冷却器的供水系统将上部贮水罐充满。在贮水罐达到最高水位后，水流到下部的锥形体部分。在烟气回收操作期间（即烟道钟型阀不打开），下面的喷嘴由上部的贮水罐供水，而上面的喷嘴则由煤气冷却器供水系统供水。在煤气冷却器的出口设置了一个带液压执行机构的眼镜阀。这样就可以在一座转炉处于煤气回收操作时，允许对另一座转炉的煤气回收系统进行检修。

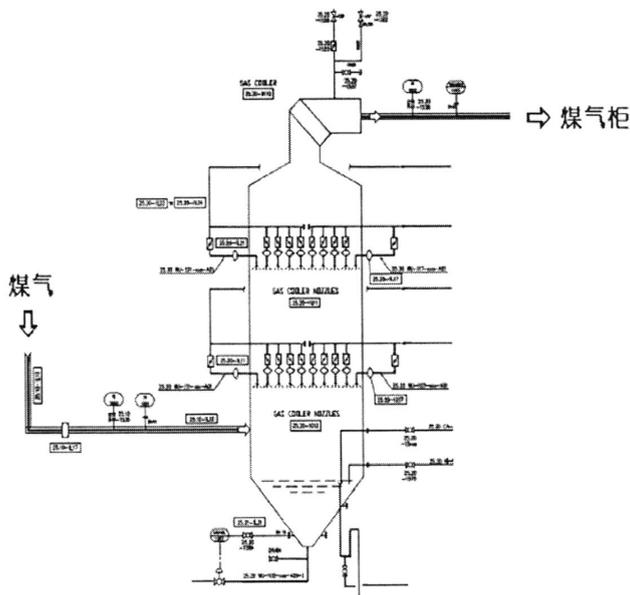


图 2.4 煤气冷却器结构示意图
Fig.2.4 Schematic diagram of gas cooler

第3章 干法除尘设备控制研究与改进

3.1 蒸发冷却器功能组研究

蒸发冷却器主要目的是将转炉产生的高温烟气进行降温处理,使进入静电除尘器的烟气温度在 120~140 之间。蒸发冷却器水量控制的不准确,会影响静电除尘器的除尘效果。水量多,含有大量水蒸气的烟气进入电场,电场的放电频率会增加,电离出大量的 H_2 和 O_2 , H_2 和 O_2 燃烧容易发生泄爆。由于水量的增多,输灰系统内的灰会潮湿成块,容易堵卸灰阀。喷射水量的控制主要是通过蒸发冷却器的入口温度,蒸发冷却器出口温度设定值以及经过静电除尘器后的废气流量计算出来的。通过温度 PID 和水量 PID 的调节控制蒸发冷却器出口温度接近蒸发冷却器出口设定。

将适量的计量水直接加入要冷却的废气,废气中的热量通过汽化被提取出来。为了传热,必须要有足够的蒸发量。另外,汽化冷却工艺在汽化冷却器中发生,并将收集粗颗粒粉尘作为第一目的。粗颗粒粉尘的收集是通过降低废气流量来完成的。以这样一种方式来确定冷却器的冷却能力,从而能够根据有利的流动路线和适当的停留时间将干燥粉尘排放出去。

通过双流喷嘴实现水的雾化。冷却水从中间的孔流出,然后再通过中心孔周围的环缝从喷嘴喷射出来。每个双流喷嘴可以通过手动隔离阀来单独切断。喷管的开口安装废气冷却系统的下行部件上。通过两根环形主管来通过水和蒸汽。水流量由控制阀来控制。在操作过程中,蒸汽的流量是恒定的。根据汽化冷却器出口的温度以及入口温度和废气流量来控制水流量。

3.1.1 设备运行条件和控制要求

蒸发冷却器主要目的是将转炉产生的高温烟气进行降温处理,使进入静电除尘器的烟气温度在合理的范围内。蒸发冷却器水量控制的不准确,造成烟气温度变化和湿度变化大,从而影响静电除尘器的除尘效果,并且有可能对静电除尘起内的设备造成严重损坏。如果烟气温度过低,所产生的灰尘将出现板结现象,造成蒸发冷却器粗输灰系统和细输灰系统的潮湿、堵塞,且湿灰尘易挂在阴极丝和阳极板上,不容易震落,造成阴极丝变粗,减小了异极距,导致电场的放电频率增加,电压升不上去影响除尘效果,造成卸爆可能性增加,更严重的是会加剧电场内设备的腐蚀,降低设备的使用寿命。如果烟气温度过高,将降低除尘器内设备的使用寿命,影响除尘效果,在将阴极丝和阳极板灰

尘震落的过程中，极易在电场内产生二次扬尘。所以当转炉生产吹炼过程中，喷射蒸汽和喷射水阀的开关顺序有严格的要求，并且对喷射水量的控制要求平稳且准确。

表 3.1 蒸发冷却器控制要求

Table 3.1 Evaporative cooler control requirements

设备动作	操作条件
在吹炼阶段蒸汽切断阀打开	氧气阀必须打开、 蒸发冷却器的入口温度大于 250℃；
非吹炼阶段蒸汽切断阀打开	蒸发冷却器的入口温度>370℃、 蒸发冷却器的出口温度>140℃；
在吹炼阶段蒸汽切断阀关闭	氧气阀必须关闭、 喷射水的切断阀关闭后的 20s、 蒸发冷却器的出口温度小于 160℃；
非吹炼阶段蒸汽切断阀关闭	蒸发冷却器的入口温度≤350℃、 蒸发冷却器出口温度<160℃；
蒸汽调节阀打开	当蒸汽的切断阀打开之后延时 5s 后自动打开。
喷射水切断阀打开	蒸发冷却器的入口温度≥350℃、 氧气阀打开 3s 之后、 蒸汽的调节阀打开之后；
喷射水切断阀关闭	氧气阀关闭超过 10s、 蒸发冷却器的入口温度≤370℃、 蒸发冷却器的出口温度≤160℃；

当蒸汽切断阀打开后，调节阀按转炉不同阶段打开，当转炉处于预热阶段，调节阀控制蒸汽流量 2.5t/h；当转炉处于兑铁/加废钢阶段，调节阀控制蒸汽流量 2.5t/h；当转炉处于吹炼阶段，调节阀全开，流量应大于 5.6t/h；当转炉处于出钢阶段，调节阀控制蒸汽流量 1.5t/h。

蒸发冷却器蒸发冷却器是通过控制喷射蒸汽和喷射水的流量调节控制蒸发冷却器出口的烟气温度，为更好的控制出口温度及水量调节，主要通过 S7 系统软件的 PID 功能块的参数修正精确控制水量。

在吹炼开始，管道及蒸发冷却器本体烟气温度上升过快，检测温度达到控制温度时，再开阀喷水、蒸汽已经滞后，造成蒸发冷却器出口温度长期持续高温。为解决这个问题，在吹炼初期喷射蒸汽和喷射水都以恒定阀开度喷射，对烟气进行快速降温。吹炼开始实际设定阀开 25%，约 30m³/h 的水量，持续 30s，之后进入 PID 控制。使蒸发冷却器的出口温度的实际温度与设定温度趋于一致。

3.1.2 主要技术参数

表 3.2 蒸发冷却器技术参数
Table 3.2 Evaporative cooler technology parameters

工艺参数	数值
水冷烟道冷却水压力	0.4~0.7Mpa
水冷烟道冷却水进水温度	MAX 35 摄氏度
水冷烟道冷却水水流量	MAX 200m ³ /h, 通常为 160 m ³ /h 左右
水冷烟道冷却水 PH 值	8.0~9.5
水冷烟道冷却水悬浮物	MAX: 20mg/L
水冷烟道冷却水总硬度	MAX: 200mg/L
水冷烟道冷却水钼酸根	Cl ⁻ : MAX: 10 mg/L
水冷烟道冷却水硫含量	SO ₄ ⁻ : MAX: 50 mg/ L
水冷烟道冷却水含氧量	MAX: 0.1 mg/ L
蒸发冷却器蒸汽压力	0.9~1.0Mpa
蒸发冷却器蒸汽流量	9.0t/h
蒸发冷却器蒸汽管道通径	DN200

3.1.3 HMI 控制

蒸发冷却器的控制画面完成蒸发冷却器温度、压力、流量实时显示；调节阀的开关、开度显示及设定值和实际值显示；除尘水泵站的液位、供水的压力、流量、温度显示。完成蒸汽压力的设定，调节阀的开度设定，显示和选择功能组的运行和停止，还显示蒸发冷却器功能组启动的条件。

蒸发冷却器的控制画面如下图所示：

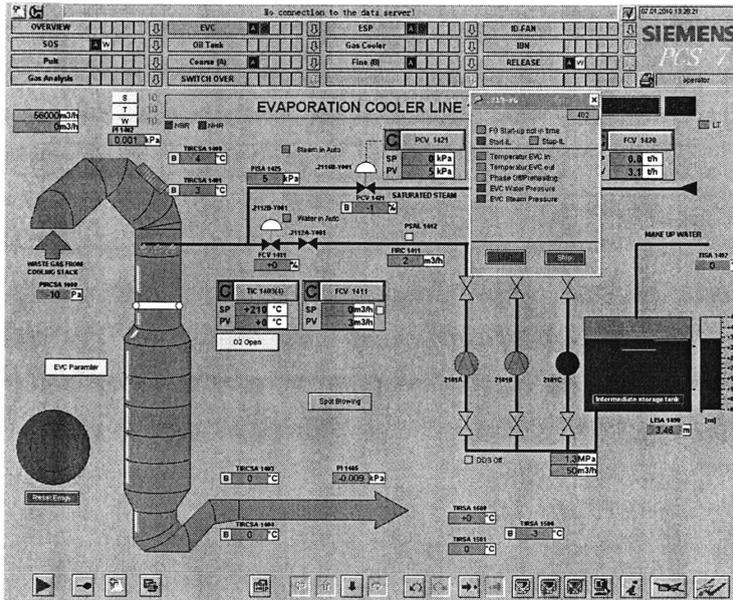


图 3.1 蒸发冷却器监控画面
Fig.3.1 Evaporative cooler monitor screen

3.2 静电除尘器功能组研究

主要通过对阴极线施加高压电，阴极框架和阳极板之间形成电场，将通过电场气流中的颗粒进行电离，使其中的灰尘分别带有正电荷和负电荷，分别向阴极线和阳极板上移动，在移动的过程中对其它的中型颗粒进行击打，使其变为带电体，向两极移动，达到除尘的效果。静电式除尘器是干法除尘的关键。

3.2.1 设备运行条件和控制要求

绝缘子加热器的每个电场有 4 个绝缘子，在第一次启动时，绝缘子必须加热 8 个小时后，方可启动电场。绝缘子的温度设定最大值 65℃；最低值 50℃。当绝缘子的温度低于 50℃时，绝缘子加热器就自动启动，当绝缘子的温度高于 65℃时，绝缘子加热器就自动停止加热。

振打装置开始于吹炼阶段。振打周期的不同取决于转炉的状态。A 类振打开始于吹炼阶段，停止于转炉出钢阶段，如阴阳极振打。B 类振打开始于转炉出钢阶段，停止于转炉兑铁加废钢阶段，如出入口分布板振打。同一电场的同一振打不能同时启动。入口分布板的振打不能同时启动。分布板振打的次数为 5rpm，振打的时间为 10s，振打的周期为 60s。阳极板的振打的次数为 4rpm，振打的时间为 30s。阴极板的振打的次数为 1.2rpm，再吹炼阶段，振打的时间为 1000s，出钢阶段为 50 s。

表 3.3 振打装置运行周期
Table 3.3 Rapping device cycle of run

类别	电极	振打次数 (rpm)	停止	启动	停止	启动	停止	启动
A	阳极 A1	4	100s	30s			100s	30s
A	阳极 A2	4			100s	30s		
A	阳极 B1	4	300s	30s			300s	30s
A	阳极 B2	4			300s	30s		
A	阳极 C1	4	900s	30s			900s	30s
A	阳极 C2	4			900s	30s		
A	阳极 D	4	1800s	30s	1800s	30s	1800s	30s
A	阴极 A1	1.2	0s	100s			0s	100s
A	阴极 A2	1.2			0s	100s		
A	阴极 B1	1.2	0s	100s			0s	100s
A	阴极 B2	1.2			0s	100s		
A	阴极 C	1.2	100s	100s	100s	100s	100s	100s
A	阴极 D	1.2	100s	100s	100s	100s	100s	100s
B	阳极 A1	4	1800s	30s			1800s	30s
B	阳极 A2	4			1800s	30s		
B	阳极 B1	4	1800s	30s			1800s	30s
B	阳极 B2	4			1800s	30s		
B	阳极 C1	4	1800s	30s			1800s	30s
B	阳极 C2	4			1800s	30s		
B	阳极 D	4	3600s	30s	3600s	30s	3600s	30s
B	阴极 A1	1.2	900s	50s			900s	50s
B	阴极 A2	1.2			900s	50s		
B	阴极 B1	1.2	900s	50s			900s	50s
B	阴极 B2	1.2			900s	50s		
B	阴极 C	1.2	900s	50s	900s	50s	900s	50s
B	阴极 D	1.2	3600s	50s	3600s	50s	3600s	50s
B	分布 A	5	60s	10s				
B	分布 B	5			60s	10s		
B	分布 C	5					60s	10s
B	分布 D	5	24h	10s	24h	10s	24h	10s

刮灰机的动作顺序为中间位→左极限位→右极限位→左极限位→中间位。刮灰机到左右极限位后，停止 5s 后再启动。A 刮灰机的动作时间是由吹炼信号来之后，开始动作，直到出钢信号来之后，再运行 15min 后停止。B 刮灰机的动作时间是由出钢信号来之后，开始动作，运行 20min 后停止。细输灰系统出现任何故障，A、B 刮灰机必须停止运行。并且细输灰系统不再集中自动的模式下，A、B 刮灰机不能用集中自动和集中顺序进行启动。

集中润滑分为机旁控制和集中控制；机旁分为手动润滑和持续润滑；集中控制分为自动润滑和持续润滑。机旁手动润滑的操作：当选中该操作模式时，须手动启动润滑泵，润滑泵启动后，供油两个周期（即每线供油两次），然后自动停止。机旁持续润滑的操作：当选中该操作模式时，须手动启动润滑泵，润滑泵将对两线进行持续供油，直到人为强制进行停泵，否则无法停止。集中自动润滑的操作：当选中该操作模式时，润滑泵自动启动，供油三个周期（即每线供油 3 次）后自动停止，间隔 1 小时后自动启动，再供油三个周期，依次类推。集中持续润滑的操作：当选中该操作模式时，须手动启动润滑泵自动启动，润滑泵将对两线进行持续供油，直到人为强制进行停泵，否则无法停止。润滑泵的每线压力设定为 18~20Mpa，达到该压力后，自动切换到另一线。如果泵的操作大于 10 分钟没有动作会产生一个错误，打油泵会停止。当润滑油液位低于 s11 会产生一个报警，液位低于 s12，油箱空，并且打油泵停止工作。

在启动振打装置前，必须细输灰功能组先启动。无论机旁操作，还是集中手动/自动操作，位于一个区的两个振打器严禁同时振打。同一个区的两个振打器严禁同时操作当出现电源故障，过热动作，机旁箱上的选择开关在错误的位置等情况时，振打器停止并且报警信号到画面上显示。其他振打器继续运行。当振打器 Q 点输出，3s 后没有收到合闸反馈信号，则发出警报信号，同时给 Q 点复位，这个警报需要操作员在画面上复位。

3.2.2 参数

表 3.4 静电除尘器技术参数

Table 3.4 Electrostatic precipitator technology parameters

工艺参数	数值
阳极板(2mm,普碳钢)	30 块/电场
阴极框架	29 块/电场（阴极丝 A, B 电场 2mm 不锈钢, C,D 电场 6mm 普碳钢）
同级距	350mm
异级距	150mm

阳极振打驱动装置	7套, A、B、C电场为双侧振打, D电场为单侧振打
阳极振打锤	30件/电场
阴极振打驱动装置	6套, A、B电场为双侧振打, C、D电场为单侧振打
阴极振打锤	29件/电场
入口分布板振打驱动装置	3套
振打锤的数目	4/6/8
出口分布板振打驱动装置	1套
振打锤数目	8件
刮灰机的驱动装置	2套, 其中A、B电场为1套, 其中C、D电场为1套
刮灰机的数目	4套, 每个电场为1套。
绝缘子的氮气流量	300m ³ /h
除尘器的直径	Φ10.8m
除尘器出口气流的含尘量	15mg/m ³
A、B电场的电压为50KV以上, 电流1800ma以上。	
C、D电场的电压为50KV以上, 电流2500ma以上。	

3.2.3 HMI 控制

静电除尘的控制画面主要完成除尘器出入口的压力, 温度、风量显示; 电场的电压电流显示; 电机的运行状态显示; 润滑油站油位开关、供油泵、加热器、切换阀状态显示。并完成功能组的控制, 显示和选择功能组的运行和停止条件。

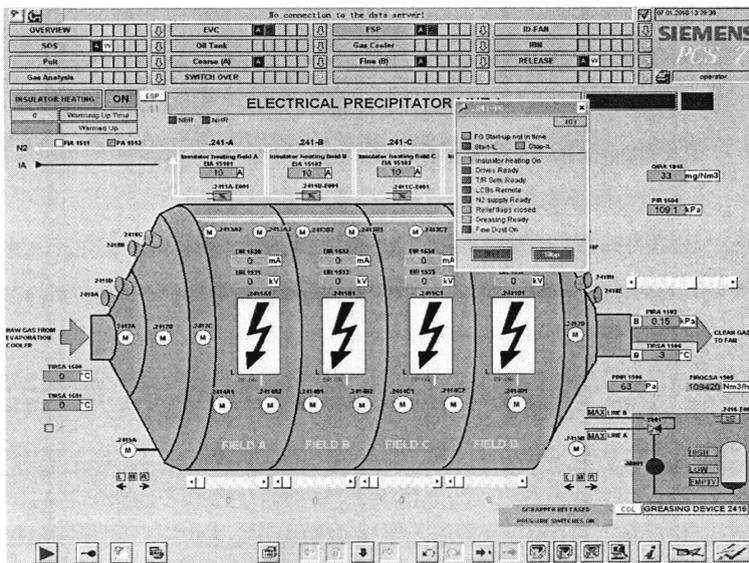


图 3.2 静电除尘器监控画面
Fig.3.2 Electrostatic precipitator monitor screen

3.3 ID 风机的控制研究

为干法除尘系统提供动力，将转炉在生产过程中产生的废气和灰尘吸到除尘器内，通过除尘器对转炉废气进行净化，净化后的转炉废气分别送往煤气柜或者排放到大气内。ID 风机是干法除尘设备维护的一个重点。

3.3.1 设备运行条件和控制要求

表 3.5 ID 风机控制要求
Table 3.5 ID fan control requirements

设备动作	操作要求
风机启动	整个系统处于集中自动的模式下、 风机两侧轴承的温度 $\leq 95^{\circ}\text{C}$ 、 电机的定子温度 $\leq 95^{\circ}\text{C}$ 、 风机两侧轴承的振动值 $\leq 8.8\text{ mm/s}$ 、 放散杯阀处于打开位置，回收杯阀处于关闭位置；
风机停止	在转炉的预热、吹炼、吹炼终止、出钢、溅渣阶段风机不能停止，其余的阶段可以停止风机
风机的急停条件	电机的定子温度 $\geq 95^{\circ}\text{C}$ 、 风机轴承温度 $\geq 95^{\circ}\text{C}$ 、 电气故障、 风机轴承的振动值 $> 8.8\text{ mm/s}$ 、 机旁操作箱的急停按钮被按下；
控制连锁	风机轴承的振动大于 8.8 mm/s 开始报警延时 10s 停机、 振动值达到 11mm/s 开始报警延时 1s 停机、 风机轴承座的温度大于 95°C 开始报警延时 10s 停机、 温度达到 105°C 开始报警延时 1s 停机、 ID 风机停止后冷却风机滞后 15Min 后自动停止、 冷却风机停止并不影响风机的运转；

在正常的生产过程中，风机必须在集中自动模式下，这样才能满足转炉在不同的阶段风机转速的自动调整。

风机的速度控制主要是根据转炉在各个阶段的信号进行速度调节，只有在吹炼过程中，为了保证能更好的控制除尘效果加入了炉口微差压，EP 出口流量 F1505 参与风机 PID 调节。理论吹炼过程中炉口微压差控制在 $+20\text{Pa} \sim -20\text{Pa}$ ，实际控制在 $+50\text{Pa} \sim -50\text{Pa}$ 。以下列出各阶段风机的速度：

- (1) 转炉预热阶段：1200/1300rpm
- (2) 转炉吹炼阶段：1300/1400 rpm；煤气回收为 1400/1500 rpm；吹炼阶段转炉加料为 1550 rpm
- (3) 转炉溅渣阶段：1300 rpm
- (4) 转炉出钢阶段：950/1000rpm
- (5) 卸爆阶段：在卸爆后风机速度控制在高速，至少 1550rpm。实际卸爆发生后，立即抬枪停氧，进入吹炼停止阶段，风机转速降为 850/950rpm。
- (6) 其他阶段：850 /950rpm

转炉炉口的压力设定直接决定着风机的流量，一般炉口的压力设定量程在 -300pa~+300pa。炉口的压力在吹炼阶段，开始投入运行，这里有两个设定点：在开始吹炼阶段，设定值为-15pa。在吹炼期间的加料阶段，设定值为-40pa。转炉在不同阶段的风机流量的设定值：

表 3.6 ID 风流量设定值
Table 3.6 ID fan flow setpoint

转炉状态	流量 (m3/h)	控制类型
转炉立直	120000	流量控制
转炉预热	140000	流量控制
吹炼 (开始 1 分钟)	290000	流量控制
转炉吹炼	220000	流量+压力
吹炼终止	140000	流量
转炉出钢	120000	流量
转炉溅渣	220000	流量+压力
吹炼阶段 $Q = (O_2 \text{ 流量} * 2.1438) + \text{炉口吸入空气流量}$		
吹炼阶段加辅料 $Q = (O_2 \text{ 流量} * 2.1438 * 1.07) + \text{炉口吸入空气流量}$		

罩裙的控制要求。罩裙的控制主要是根据吹炼信号以及氧气切断阀的关闭来控制允许升降的动作，但在氧枪急停信号产生后，罩裙会有平滑的提升，来防止空气进入烟道。在下副枪的同时，罩裙至少要上升 200mm。当静电除尘器出口流量小于 120000 m³/h，罩裙上升 100mm。

3.3.2 参数

表 3.7 ID 风机技术参数
Table 3.7 ID fan technology parameters

工艺参数	数值
------	----

风机的转速	MAX1750rpm
电机的功率	1150KW
风机流量	101.1m3/s
气流温度	MAX: 125 摄氏度
气流密度	0.72kg/m3
风机全压	8120pa

3.3.3 HMI 控制

ID 风机的主画面完成 ID 风机的电机的运行状态；电机定子的温度；电机的电流转数功率；ID 风机的前后轴的震动，温度；电机的运行状态；完成静电除尘器风量的设定，ID 风机的控制画面如下：

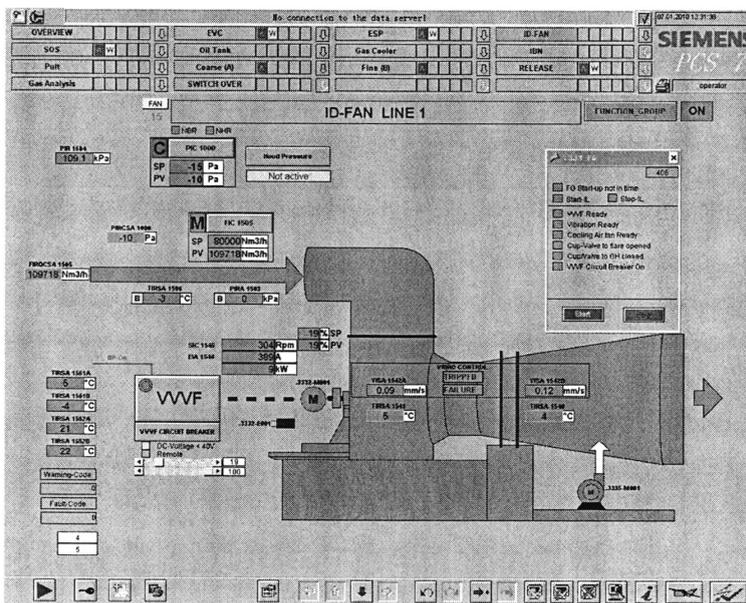


图 3.3 ID 风机监控画面
Fig.3.3 ID fan monitor screen

3.4 液压控制系统研究

液压站的控制主要是保证切换站能正常的切换，所以在控制方面保证加压泵及循环泵的正常运行就可以。

当转炉产生的煤气含量达到回收条件时放散杯阀关闭回收杯阀打开，在回收期间只要两个杯阀不正常以及煤气含量不合格，通过对液压阀的控制将杯阀达到放散位置。液压站出现故障时通过对蓄能器阀体的控制，紧急打到放散位置。

3.4.1 设备运行条件和控制要求

液压站的主要作用是给两个杯阀以及 GC 入口眼镜阀提供动力的装置，其中两高压泵供杯阀使用一用一备，一小泵供眼睛阀单独使用。

表 3.8 ID 液压系统控制要求

Table 3.8 Hydraulic control requirements

设备动作	操作要求
GC 入口眼睛阀泵检测	油箱液位低，禁止泵运行、 油箱温度超高于 65℃禁止泵运行、 油箱温度超低于 20℃禁止泵启动或延时 3m 停泵；
高压泵检测	油箱油位低的没有报警、 油箱温度超高禁止泵运行、 高压泵的出口阀门供电检测、 油箱温度超低于 20℃禁止泵启动或延时 3m 停泵、 高压泵的出口压力大于 80bar、 泵运行 30s 后，检测是否有低压报警，若有低压报警，延时 5s 启动备用泵、 高压供油滤芯的压力差达到 5bar，开始报警。回油滤芯和循环泵的滤芯压力差达到 1.5bar，开始报警；
油箱冷水阀与加热器控制	温度高于 40℃延时 10m 打开冷却水阀、 温度高于 55℃立即打开冷却水阀、 循环泵未运行—关闭冷却水阀、 冷却油路中流量低—关闭冷却水阀、 温度低于 20℃启动加热器、 温度高于 40℃停止加热器、 循环泵未运行—禁止加热器运行、 冷却油路中流量低—延时 2m 停止加热器；

泵运行 3-5s 时间后，给阀送电；泵停止，立即给阀断电。正常生产时，均应在“远程”方式，自动切换备用泵功能仅在两泵均选择“远程”控制时才投入使用。泵检测到低压故障启动了备用泵，3s 时间停工作泵。若备用泵启动后仍报低压故障，投入液压紧急切换，高压泵均停止。要重新启动高压泵需在 HMI 操作故障复位。

在切换的过程中，蓄能器的控制阀得电，其他时间均失电。蓄能器的控制阀常得电，只有在事故状态下失电。蓄能器的压力应保证在 180bar 左右，氮气的压力应控制 min=90bar，max=95bar。

所有过程信号均有带有定时器滤波功能和保持报警，滤波时间可以自行设定。为能

清楚的掌握设备运行的情况，将大部分报警作了保持处理，例如泵一旦产生压力低故障，泵会停止，对于这种要在设备运行后检测的故障点，则无法从程序中得知泵停止的原因。因此此类故障点均作保持处理。部分保持报警在程序中起作用，因此要在画面设定故障复位按钮，确保故障复位。

3.4.2 参数

表 3.9 液压技术参数
Table 3.9 Hydraulic system technology parameters

工艺参数	数值
冷却水泵数目	3 台
上塔泵数目	2 台
冷却水压力	0.7Mpa
每台冷却器的流量	大于 200m ³ /h
供水温度	MAX=35 摄氏度
回水温度	50~65 摄氏度

3.4.3 HMI 控制

液压系统的控制画面主要完成液压站油温、液位的状态显示；供油泵的运行状态；显示和选择功能组的运行和停止，还显示切换站功能组启动的条件；液压站液压油循环泵运行状态。完成液压站手阀的开关控制；放散阀和回收阀的控制。液压系统的控制画面如下：

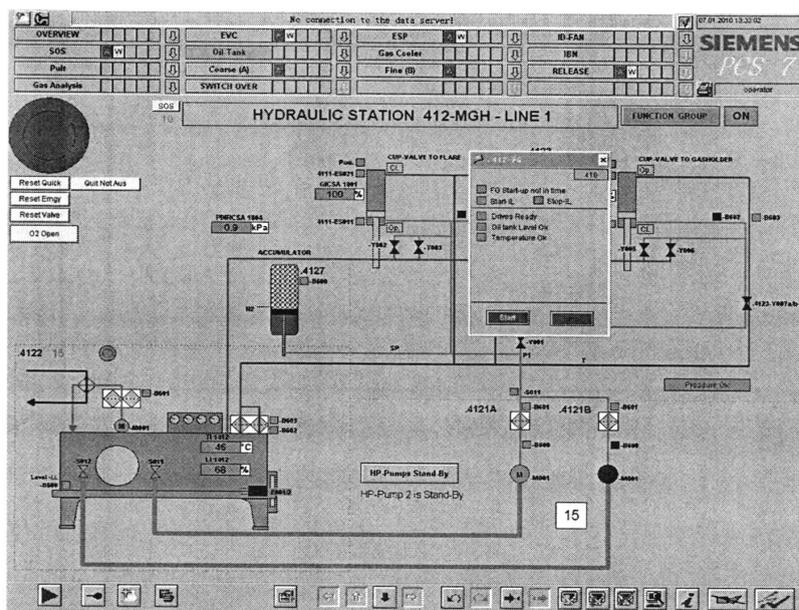


图 3.4 液压系统监控画面

Fig.3.4 Hydraulic system monitoring picture

3.5 输灰功能组研究

3.5.1 设备运行条件和控制要求

表 3.10 输灰功能组控制要求

Table 3.10 Ash conveying function group control requirements

设备动作	操作要求
细输灰系统启动	设备均处于集中自动的模式下、 清除延时报警、 双层翻板阀的上下板均在关闭位并有关闭信号、 插板阀处于关闭状态并有关闭信号、 紧急插板阀处于关闭状态并有关闭信号、 输灰链条的速度监测点和机械故障点正常没有报警；
细输灰系统启动顺序	螺旋输灰机→斗提机→2#输灰链→双层翻板阀→插板阀→1#输灰链；
细输灰系统停止顺序	1#输灰链→插板阀斗→双层翻板阀→2#输灰链→提机→螺旋输灰机；
控制连锁	细输灰系统任何设备出现故障整个细输灰系统将自动停止、 双层翻板阀没有关闭位和打开位、 系统将自动停止紧急插板阀和插板阀没有关闭位和打开位系统将自动停止、

正常情况下紧急插板阀均在关闭位如果紧急插板阀没有关闭位，禁止吹炼、紧急插板阀只能在机旁进行操作、

输灰链和斗提机均设有速度监测点和机械故障点，其中一点产生报警，整个系统将停止、

双层翻板阀的上下板的打开和关闭需要 5s，如果超过 5s 将显示延时报警，系统自动停止、

用功能组启动细输灰系统时，每个单体设备启动的时间间隔为 5s、任何环节的启动超过 5s，系统将自动停止；

3.5.2 HMI 控制

输灰功能组控制画面显示电机的运行状态；显示和选择功能组的运行和停止，还显示细输灰功能组启动的条件；

完成插板阀，双摆阀的控制

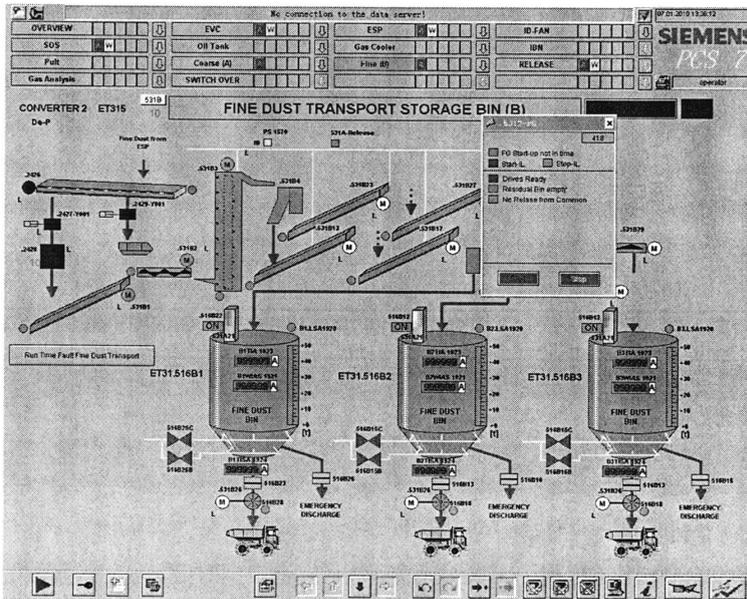


图 3.5 输灰监控画面
Fig.3.5 Ash monitoring picture

3.6 煤气分析

首钢京唐转炉干法除尘煤气分析系统采用 SIEMENS VAI 成套烟气分析系统，其中包括 VATRON 成套配柜及西门子 ULTRAMAT/OXYMAT 6E & CALOMAT 6 气体分析仪。该系统可随时对转炉烟气进行抽气取样，准确分析出烟气中四种重要气体

O₂/CO/CO₂/H₂ 含量,对预防干法静电除尘器的泄爆和转炉的烟气回收起到极其重要的作用。

作为转炉烟气回收的重要的工艺环节,烟气分析故障的出现会直接导致转炉的吹炼中断,造成事故提枪。因此,首先了解其分析的工作原理,对日后出现的复杂、多样性故障的处理方法有着很大的帮助。

ULTRAMAT 6通道是根据交替红外双光束原理并使用双层检测气室和光耦合器来测量气体的。测量原理是基于特定分子的红外光辐射吸收波段。对于不同的气体,虽然吸收的波长各不相同,但是也可能会部分重叠。这就导致了交叉干扰,在ULTRAMAT通道中,使用如下的方法来最大限度地降低这种交叉干扰,填满气的滤波单元;带有光耦合器的双层检测器。

烟气分析系统中的取样过程并非复杂,但在进入分析仪之前对烟气的温度、湿度要求较高,而且需要多重过滤,以去掉烟气中的灰尘,确保进入分析仪的样气质量。按图示介绍分析流程:

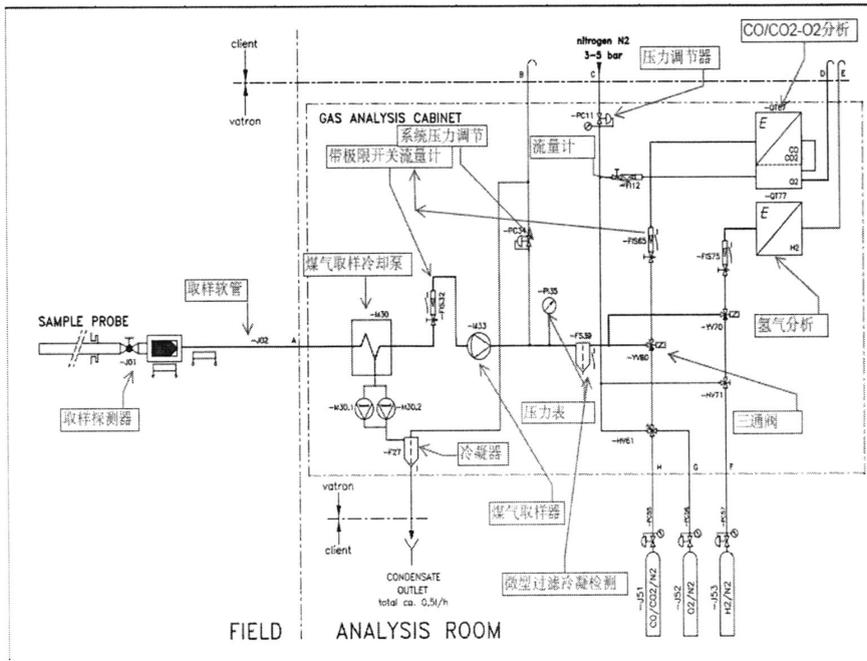


图 3.6 煤气分析仪取样结构图

Fig.3.6 Gas analyzer sampling structure diagram

分析的取样口作用在干法ID风机后,是经过降温和除尘的。由一台在柜内的抽气泵作为整个分析流程的动力源,先通过第一层过滤(碳纤维)并对烟气进行加热,使其温度保持在120℃左右,再进入柜内的冷凝器降温,出来的样气温度只有4℃—6℃,这样

降温是因为分析仪的样气输入条件最高不能超过50℃。冷凝后的水分由2台蠕动泵排出。出来的样气经过带有棉质过滤芯的湿度检测来判断冷凝器的工作是否正常。3个带有低流量报警的浮子流量计用来检测总管和平均分成2条支管的样气流量，当低报警信号出现超过5秒时，泵会自动停止。2路样气分别经过由24V电磁阀控制的3通阀门YV60①和YV70②后进入到分析仪分析，CALOMAT 6单独检测H₂含量，CALOMAT 6和OXYMAT 6检测CO/CO₂/O₂含量。此过程是持续、不间断的取样，实时准确的分析出各种阶段转炉烟气的四种含量。

3.7 除尘系统改进和完善

3.7.1 粗输灰功能改进

原始的粗输灰系统是在每一炉次吹炼结束后由操作人员点击开始输灰按钮或等待接受到出钢信号后开始输灰，粗输灰系统需要 15-20 分钟才能将一个炉次的所有粗灰输送干净，因此进行下一炉次需要等待 15-20 分钟左右，此种方式不仅延长了冶炼周期，而且由于粗灰中含有一定水份，一个炉次的所有粗灰同时输灰易造成输灰链堵塞，严重影响正常的生产，但是若直接改造在吹炼时输灰又会将空气吸入烟道中与煤气混合发生卸爆。

经过维护过程中的总结对输灰进行改进。在原有的粗输灰设备中加入双摆阀，安装在插板阀下方，因为双摆阀的运行方式是不会同时打开，这样就防止了将空气吸入烟道中与煤气混合发生卸爆。将原有的粗输灰系统各个设备之间的逻辑关系进行改造，将双摆阀之后的设备运行正常信号加入到双摆阀的运行启动条件里，再将双摆阀设备运行正常信号加入到双摆阀之前的设备运行启动条件里，使有设备出现故障时，此设备之前的设备都会停止运行，从而保证不会使设备堵灰。将粗输灰系统启动方式由原有的由操作人员点击开始输灰按钮或等待接受到出钢信号改造成粗输灰系统一直运行，只有在操作人员点击停止或出现设备故障时才会停止。

改进后可以在吹炼的同时进行输灰，缩短了冶炼周期，并且保证了气密性，避免发生卸爆；改造前平均每个月因为粗输灰系统堵灰造成的设备故障有 30 次左右，改造后这一故障次数就地到了平均每个月 4 次左右；使粗输灰系统在正常情况下不用操作工进行手动控制，实现了粗输灰系统的全自动控制。

3.7.2 煤气分析系统改进

经过一年多的投产使用，煤气分析系统中的冷凝器冷凝效果逐渐下降，尤其是在冬季的连续生产过程中，由于烟气温度较低，每一炉次形成的水量需要 60 分钟才能充分排出。长时间的水分堆积使湿度报警器大约每 4、5 个小时便会报警，维护人员需要更换棉质过滤芯，等待冷凝水完全排出方可解除故障，严重影响了转炉的正常生产，另外煤气分析系统的原取样过滤芯为棉制过滤芯，不易清理、使用寿命短。

我们在原有的两台排水用蠕动泵上又增加一台泵，并缩减了原来过长的排水管，加大了排水效率；同时将煤气分析系统的原取样棉制过滤芯改为碳纤维材质。

改进后使其一炉次形成水量的排出时间缩短到了 40 分钟；湿度报警出现的次数减少到一个月 1-2 次；使之后的故障处理和改造更加方便快捷。

3.7.3 煤气回收功能完善

为保证气柜安全，气柜回收需要双方确认。京唐一期的五座转炉全部投产，而且公用一条管道输送转炉煤气到煤气柜，经常出现有两座转炉同时具备回收煤气条件，原有的只有一座转炉可以回收的程序设计已经不能满足其工艺需求，实现双炉回收可以提高转炉煤气的利用率，而且可以大幅度的减少转炉煤气对大气的污染。原有的干法除尘与煤气柜的通信方式是，五座转炉任意哪一座通过操作工点击申请回收煤气按钮，煤气柜方面同意时，会点击同意申请回收煤气按钮发送给此转炉一个同意信号，此信号是煤气回收的必要条件，而且此时煤气柜方面无法再给其他转炉发送同意信号，所以其他转炉由于条件不满足而不能回收煤气。

将干法除尘与煤气柜的通信方式改为，五座转炉与煤气柜方面都是单独对应，五座转炉任意哪一个点击申请回收煤气按钮时，会在煤气柜方面显示是哪一座转炉申请回收，煤气柜方面同意时，会通过点击同意此转炉申请回收煤气按钮单独发给此转炉一个同意信号，此时如果另一座也申请回收，并且煤气柜方面同意时，会通过点击同意另一座转炉申请回收煤气按钮单独发给另一座转炉一个同意信号，此时这两座转炉可以同时回收，即使有第三或更多的转炉也可以同时回收。

通过新增程序实现了双炉和多炉同时回收煤气，每月可多回收煤气 600-1000 万立方米，大大提高了转炉煤气利用率，大幅度的降低了转炉煤气对大气的污染。

3.7.4 急停系统完善

安装在液压站 PLC 柜内的硬线急停装置，可确保在急停信号出现后，切断液压系统控制杯阀的电磁阀电源，开启安全泄油阀，使两个杯阀按自身重力自由下落，切到放散状态。但干法一期一步所设计的急停继电器没有自动复位功能，导致每次急停故障都必须在继电器内短接 24V 电源方可复位，增加了故障的处理时间，没有完全做到自动化生产。

在该柜内输出模块的备用点中，接出一根导线，连接到急停继电器的线圈中，并在 HMI 画面中做出对应的复位按钮；利用停炉间隙，更换了新的带有自复位功能的急停继电器

经过改进出现急停信号，待故障解除完毕后，主控室操作人员可在 WINCC 操作画面中直接按“急停复位”按钮，此时 24V 电源可由输出点直接接通继电器线圈，完成故障复位，缩短了处理时间，安全可靠；急停信号出现后，该继电器可自动检测常闭触点的状态，当信号恢复后，线圈会再次自动吸合，正常工作。操作人员只要点击画面中的“故障复位”按钮即可完成全部操作。

第4章 干法除尘系统设计

4.1 控制系统软硬件

可编程控制器(Programmable Controller)^[15]是计算机家族中的一员,是为工业控制应用而设计制造的。早期的可编程控制器称作可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller),简称 PLC,它主要用来代替继电器实现逻辑控制。基本由中央处理器、存储器,电源,组成;当 PLC 投入运行后,其工作过程一般分为三个阶段,即输入采样、用户程序执行和输出刷新三个阶段。完成上述三个阶段称作一个扫描周期。在整个运行期间,PLC 的 CPU 以一定的扫描速度重复执行上述三个阶段。

德国的西门子(SIEMENS)公司是欧洲最大的电气、电子制造商,一直以品质精良的电气、电子产品闻名于世,也是国际上较早研制和生产 PLC 产品的主要厂家之一。目前使用最广泛的西门子 PLC 产品是 SIMATICS7 系列,它在自动化各个领域都得到广泛应用,它具有的各种功能、各种尺寸、各种结构适用于许多应用场合,有适合于起重机械或各种气候条件的坚固型,有使用于狭小空间具有高处理性能的密集型,有运行速度极快且有优异的扩展能力的机型,可配置种类繁多的输入/输出模块、智能模块、编程器、软件、过程通信和显示部件等,所以在逻辑控制、运动控制、过程控制以及工厂全集成自动化系统中均得到广泛的应用。

西门子公司于 20 世纪 90 年代中期推出的 SIMATICS7 系列 PLC 取得了巨大成功,得到了广泛的应用,它包括 S7-200、S7-300、S7-400 三大类。S7-200 系列小型 PLC 是整体式结构,它结构小巧,可靠性高,运行速度快,指令丰富。S7-200 的功能很强已经向日本的小型 PLC 提出了严峻的挑战。S7-300 系列中型 PLC 是模板式结构。其模板品种齐全,各种数字量和模拟量 I/O 模块(包括用于危险场所的 EX I/O 型)、功能模板、通讯模板等,以各种不同方式组合在一起可将控制系统设计成完全符合应用的需要。其指令系统包括 350 多条指令。单机架配置时,最大是 256 个 I/O;多机架配置时,最多可达 1024 个 I/O,若使用 PROFIBUS-DP 的分布式系统,最多可以连接 65536 个 I/O^[16-19]。S7-300 一般称为通用型 PLC,它能够满足绝大部分普通工业应用。S7-400 系列大型 PLC 也是模板式结构。它被成为功能最强大的 PLC,适宜于自动化生产和过程工程中做高级控制应用。它有多种不同性能档次的 CPU 可供选择。在一个 S7-400 中央控制器中可包括多个 CPU,它可以使不同的功能分离开来。

CPU 启动后执行启动 OB 块后循环执行 OB1，OB1 的优先级别最低可以被高优先级的 OB 中断，因此可以在 OB1 或者循环 OB32~OB38 中编写用户程序块。用户程序块主要是 FB 和 FC，在 CPU 的扫描过程中首先会更新输入/输出映像缓冲区，达到更新 IO 模块数据的目的，之后会执行用户的程序，最后会执行通讯相关的功能。CPU 的执行周期如下图所示：

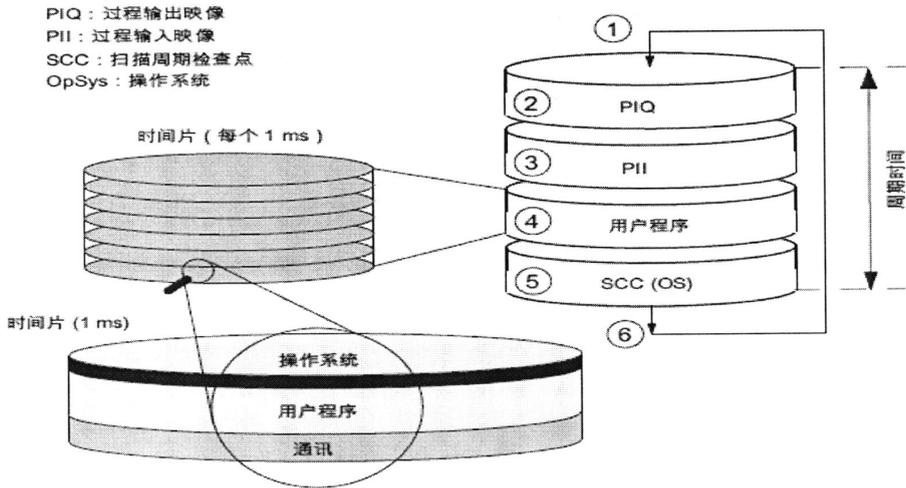


图 4.1 西门子 CPU 执行周期图
Fig.4.1 Cycle time of CPU

工业通讯网络是自动化系统的支柱，西门子的全集成自动化网络平台提供了从控制级一直到现场级的一致性通讯，“SIMATIC NET”是全部网络系列产品的总称，他们能在工厂的不同部门，在不同的自动化站以及通过不同的级交换数据，有标准的接口并且相互之间完全兼容。通过不同的通讯模块实现 TCP/IP 和 profibus DP 的通讯^[20]。

人机界面 (HMI) 硬件 HMI 硬件配合 PLC 使用，为用户提供数据、图形和事件显示，主要有文本操作面板 TD200 (可显示中文)，OP3，OP7，OP17 等；图形/文本操作面板 OP27，OP37 等，触摸屏操作面板 TP7，TP27/37，TP170A/B 等；SIMATIC 面板型 PC670 等。个人计算机 (PC) 也可以作为 HMI 硬件使用。HMI 硬件需要经过软件 (如 ProTool) 组态才能配合 PLC 使用。

4.1.1 STEP7

STEP7 可采用 LAD(梯型图)、STL(语句表)、FBD(逻辑框图)进行程序设计，硬件设备的组态，故障诊断等。操作站编程软件可对整个控制系统进行编程，它提供了一系列工具与功能，从而使控制系统程序开发变得简便易行。

STEP7 是一种基于 Microsoft Windows 环境的编程工具, 提供包括 FBD、LAD、STL 等多种编程语言的单一开发环境, 用于生成控制系统程序。使用汇集在一个应用中的熟悉的标准化的编辑器, 能够生成逻辑、通信和诊断, 并将他们与同一数据库和选择的 3 个编辑器集成在一起。

STEP7 包括从程序生成到内置的简单易用的复杂算法等强有力的工具, 来满足设计和维护人员的要求。这些强有力的工具为传统的平面梯型逻辑程序开辟了一个第三维的空间。由于将复杂的控制结构载入基本逻辑中, 减少了应用的复杂性, 简化了维护。

STEP7 使用强有力的搜索功能简化了程序开发。搜索功能允许您搜索变量, 发现错误和识别未用的变量。其它功能包括 STEP7 的分层结构, 它简化复杂的程序并提供易于读出的监控概况。

STEP7 提供易于使用的接口、可重复使用的程序、强有力的搜索功能、自由格式图形编辑器和在线帮助程序, 简化了 S7 系列自动化控制系统的写入文件编制和维护。

4.1.2 WINCC

上位监控在自动化控制系统中, 以直观友好的图形操作界面, 广泛用于对工业现场的设备及数据进行集中管理和监控^[21]。

上位监控软件选用的是西门子的上位监控软件 WINCC, 该软件具有强大的数据处理能力, 能实时、动态地监控现场过程, 并具有配方功能, 能将一批预先存储的参数一次调出并下传给 PLC 执行。它含有强大的图形工具集, 可进行方便的画面设计、报警显示、历史数据存储、数据趋势显示、报表处理等有利于操作工积累经验, 迅速熟悉生产线的特性。

WINCC 是 Simens 自动化软件家族中的 HMI 组件, 是基于 Windows NT 或 Windows 2000 的对生产过程监视和控制的自动化解决方案。WINCC 是所有需要采集, 管理可视化数据的企业必备工具, 同时可以控制关键性的过程和操作。

WINCC 是 Simens 自动化软件家族中的 HMI 组件, 是基于 Windows NT 或 Windows 2000 的对生产过程监视和控制的自动化解决方案。WinCC 是所有需要采集, 管理可视化数据的企业必备工具, 同时可以控制关键性的过程和操作。

WINCC 组态软件的特点:

- (1)过程可视化
- (2)实时和历史趋势
- (3)监视性控制

- (4)数据采集和数据管理
- (5)用户综合报表
- (6)报警和报警管理
- (7)基于用户的分级安全管理
- (8)网络功能
- (9)在线组态
- (10)事件计划
- (11)WINCC 历史数据库或超级历史数据库 (OSI)
- (12)基于对象的图形界面

4.2 系统设计

干法除尘 PLC 系统包括 1 个 S7-400 主站、4 个 ET200M 从站和一个带 CPU 的 S7-300 从站。安装在主站柜 A 柜中的 ET200M 全部都是模拟量输入模块，检测除蒸发冷却器以外所有设备上的仪表信号；B 柜全部都是数字量模块，主要检测静电除尘器上泄爆阀开启信号以及控制细灰系统阀门的输出信号；C 柜则都为蒸发冷却器上和其设备底部粗灰系统的信号；D 柜主要控制液压站和前后眼镜阀；煤气分析系统的 PLC 设备为带有 315-2DP 的 CPU 从站，专以处理四种含量和控制柜内电气设备。

HMI 人机界面与 PLC 之间通讯采用以太网 TCP/IP 协议，同时干法除尘系统属于炼钢生产的一部分。干法除尘系统通过光纤交换机接入炼钢光纤环网中，与其他系统进行数据交换和连锁控制。

而 CPU 和远程 IO 之间通讯采用 profibus DP 通讯协议。在 CPU 中通过 CP443-5 和 IM964 进行 DP 总线扩展。系统中总共有 4 条 DP 总线如下：第一条通过 OLM 扩展用于控制转炉附件的 IO 设备；第二条用于高压电场控制柜；第三条用于风机变频器控制；第四条用于控制机电除尘器附件的 IO 设备。

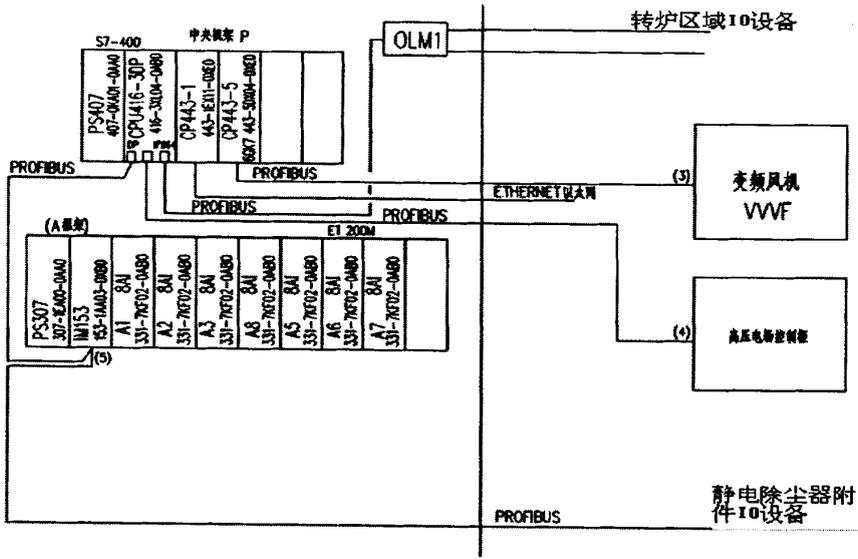


图 4.2 CPU 硬件设计图

Fig.4.2 Hardware design of CPU

系统中配备了公用总线系统，用于工厂不同部分的连接以及 1 级与 2 级系统之间的连接。工业以太网（TCP/IP 100 Mbit）或光纤电缆可用于远距离（工厂不同部分之间）的连接。工业以太网（TCP/IP 10 Mbit）和绞股双芯电缆可用于工厂一个部分内的连接。将采用 PROFIBUS（既可使用绞股双芯电缆，也可使用同轴电缆或光缆，将按距离确定）来实现 PLC 与外围设备的连接，如分散式 I/O 装置、智能型 MCC、智能型就地控制箱等。在 PLC 室内和控制台上安装了以太网开关。将采用 PROFIBUS 实现与分散式 I/O 装置(ET 200)以及就地控制柜的连接。光缆可用于距离在 100 米以下的以及 100 米以上的电气连接。其详情如下：

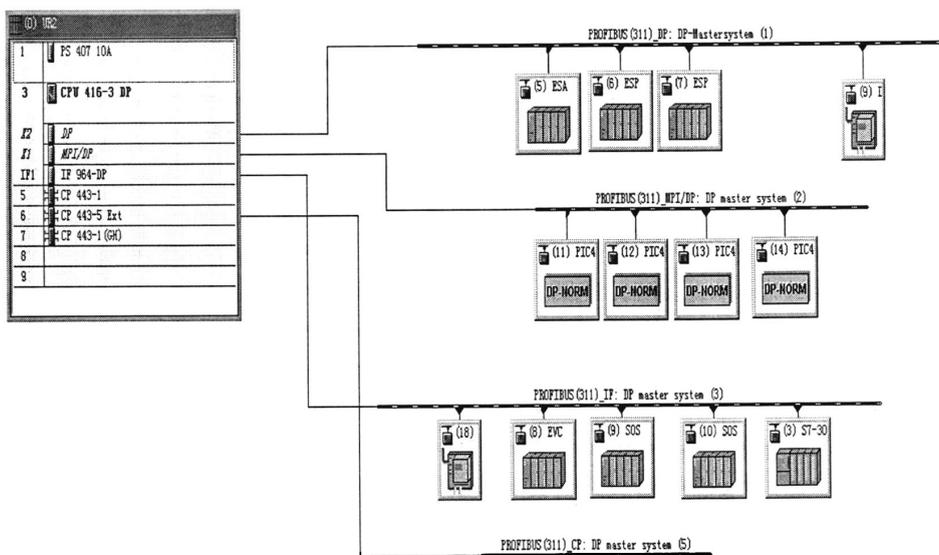


图 4.3 系统硬件配置图

Fig.4.3 Hardware configuration of the system

4.3 程序结构及程序块

在 CPU 中系统组织功能块完成对用户程序的执行周期进行控制，而用户程序完成对现场设备的控制和工艺连锁控制。程序的功能块如表 4.1。

表 4.1 程序功能块

Table 4.1 Function blocks of system

程序块	程序块说明	启动、调用的功能块
OB1	程序循环组织块	FC3、FC4、FC7、FC8、FC9、FC24、FC100、FC200、FC300、FC400、FC420、FC440、FC500、FC520、FC700、FC800
FC8	调用启动功能块	FC10
FC9	风量控制调试功能块	FB40
FC10	转炉状态信号	FB10
FC50	计算煤气回收累积量功能块	FB50
FC100	电机功能块启用:	FC101~FC164
FC101	蒸发冷却器下刮灰机	FB11
FC102~FC105	静电除尘器 A.B.C.D 电场	FB9
FC127~FC128	刮灰机	FB12

FC133	ID 风机电机	FB13、FB22
FC134	ID 风机电机冷却风机	FB11
FC135	放散点火系统	FB343
FC200	切断、调节阀功能块启 用:	FC201~FC245
FC209	静电除尘器下双板阀	FB16
FC219	液压站 004 电磁阀	FB14、FB413、FC15、FC16
FC225	出口眼睛阀	FB14
FC235	蒸发冷却器蒸汽管道切 断阀电磁阀	FB15
FC245	蒸发冷却器下双摆阀	FB16
FC300	模拟信号启用	FC301~FC387
FC301~FC302	蒸发冷却器入口温度	FB17
FC303	蒸发冷却器入口压力	FB18
FC304~FC305	蒸发冷却器出口温度	FB17、FB23
FC316	静电除尘器入口温度 2	FB18、FB7
FC343	粗灰仓仓内重量	FC15
FC354	一氧化碳含量	FB17
FC400	功能组功能块启用	FC402~FC419
FC420	自动控制处理	FC421~FC439
FC421	蒸发冷却器功能组自动	FB211、FB27
FC422	刮灰机润滑油站功能组 自动	FB243
FC423	静电除尘器功能组自动	FB241
FC425	ID 风机功能组自动	FB244
FC426	入口眼睛阀功能组自动	FB333
FC427	液压站功能组自动	FB22、FB437
FC428	切换站功能组自动	FB22、FB411、FB412
FC430	煤气冷却器功能组自动	FB435
FC431	出口眼睛阀功能组自动	FB22、FB436
FC434	粗灰功能组自动	FB531
FC435	细灰功能组自动	FB532
FC439	复位功能组自动	FB439
FC440	开关量启用	FC441~ FC499
FC441~FC499	报警	FB19

FC500	各控制块启用	FC501~FC509
FC501	炉口微差压控制	FB51
FC503	蒸发冷却器出口温度控制	FB53
FC504	蒸发冷却器喷水量控制	FB54
FC505	蒸发冷却器蒸汽调节阀后压力控制	FB55
FC506	ID 风机流量控制	FB56
FC507	ID 风机转速控制	FB57
FC508	风机后与煤气柜差压控制	FB58
FC509	蒸发冷却器蒸汽流量控制	FB59
FC520	泄爆阀接近开关反馈	FB21
FC560	放散回收杯阀开关位置	FB25
FC700	各转炉干法除尘之间通讯	FC701~FC705
FC800	与本体、干法除尘水、公共输灰、网关、气柜通讯	FC801、FC810、FC830、FC840、FC850
FC801	与转炉之间通讯	FC5、FC6
FC810	与干法除尘水处理之间通讯	FC5、FC6
FC830	与公共输灰之间通讯	FC5、FC6
FC840	与网关之间通讯	FC5、FC6
FC850	与煤气柜之间通讯	FC5、FC6

4.4 其他系统功能

操作站:WINCC 是一个工业化和工艺化的中性系统,用来在生产和工艺自动化中处理图形画面和完成控制系统任务。该系统为以下系统提供工业化的适用功能模块:

- (1)图像画面系统(图形设计):用图形显示并连接工艺过程;
- (2)动作编辑(全局画面):使项目动态满足具体要求;
- (3)信息系统(报警记录):输出信息并确认;
- (4)检测值归档和编辑(标志记录):编辑检测值和用户型数据并进行长期存储;
- (5)报表系统(报表设计):报表系统说明可视化系统基于 Windows XP 操作系统。

借助于功能键盘和/或鼠标的操作：不同画面的选择、传动装置的起/停、设定值的输入、操作模式的选择、控制元件的手动设定、故障信息的确认。为了保证操作方便或出于紧急状况的需要，可通过常规的控制元件（如：按钮和开关等）来完成某些操作功能。为此，除了采用带监视器和功能键盘的控制台以外，还配置了带常规控制元件的控制台。这些将在基本设计阶段确定。

下图是干法除尘的总览界面：

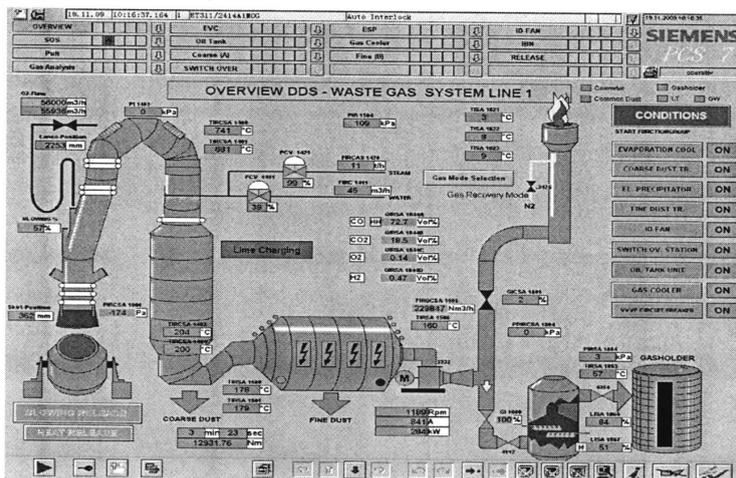


图 4.4 系统总览

Fig.4.4 Overvier of system

在报警画面中，操作人员可以通过报警画面中显示的文字和颜色清楚的得知现场哪个设备出现了异常，下图为报警画面：

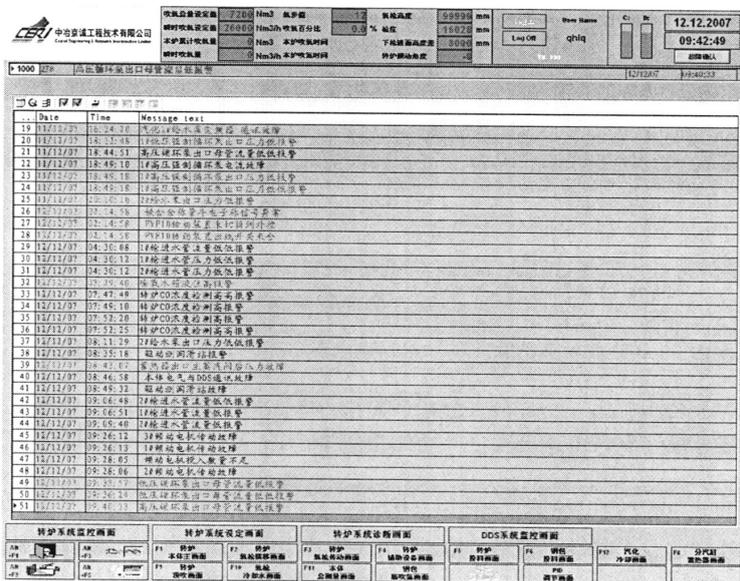


图 4.5 系统报警画面

Fig.4.5 System alarm screen

在线监测设备报警，连锁值和连锁设备：

表 4.2 报警综合
Table 4.2 Alarm integrated

在线监测点	设备量程	报警，连锁值	连锁设备
蒸发冷却器烟道入口温度	0-1200 摄氏度	<350 低低报警关蒸汽阀； <370 低报警关水阀； >900 高报警； >1100 高高报警提氧枪	蒸发冷却器蒸汽、水调节阀、氧枪
蒸发冷却器烟道出口温度	0-600 摄氏度	<160 低低报警关蒸汽阀； <185 低报警关水阀； >360 高报警； >380 高高报警提氧枪	蒸发冷却器蒸汽、水调节阀、氧枪
蒸发冷却器蒸汽总管流量	0-15 吨/小时	<5 低低报警提氧枪； <6 低报警	蒸发冷却器蒸汽调节阀、氧枪
蒸发冷却器水总管流量	0-130 立方米/小时	>60 高报警关阀	蒸发冷却器水调节阀、氧枪
电除尘器入口烟气温 度	0-400 摄氏度	<110 低低报警； <125 低报警； >250 高报警； >270 高高报警提氧枪	氧枪
电除尘器出口烟气温 度	0-400 摄氏度	>230 高报警； >250 高高报警提氧枪	氧枪
电除尘器出口压力	-8-0 千帕	<-5 低报警提氧枪	氧枪
电除尘器出口流量	0-40000 标准立方 米/小时	<110000 低低报警； <130000 低报警提氧枪	ID 风机、氧枪
ID 风机前轴承震动	0-20 毫米/秒	>8.8 高报警； >11 高高报警停 ID 风机	ID 风机
ID 风机前轴承温度	-30-150 摄氏度	>85 高报警； >95 高高报警停 ID 风机	ID 风机
ID 风机电机前轴承温 度	-30-110 摄氏度	>90 高报警； >100 高高报警停 ID 风机	ID 风机
ID 风机电机定子温度	-30-150 摄氏度	>130 高报警； >140 高高报警停 ID 风机	ID 风机

眼镜阀前压力	-2-10 千帕	<0.5 低报警关回收杯阀、开 放散杯阀； >5 高报警关回收杯阀、开放 散杯阀	杯阀
眼镜阀后压力 煤气 冷却器入口	-2-10 千帕	<0.5 低报警关回收杯阀、开 放散杯阀； >4.7 高报警； >6.5 高高报警关回收杯阀、 开放散杯阀	杯阀
切换站差压	-5-10 千帕	<0.2 低报警关回收杯阀、开 放散杯阀； >0.6 高报警关回收杯阀、开 放散杯阀	杯阀
引射氮气压力	0-2.5 兆帕	<1.2 低报警； <1.3 低报警提氧枪	氧枪
钟型阀液压站油温	0-100 摄氏度	<15 低报警开加热器； <30 低报警； >55 高报警； >60 高高报警关加热器	杯阀液压站加热器

在趋势窗口中可以查看生产过程中各仪器仪表所测得的所有实时数据，也可以查询以往的历史数据，并为以后的生产提供参考数据。

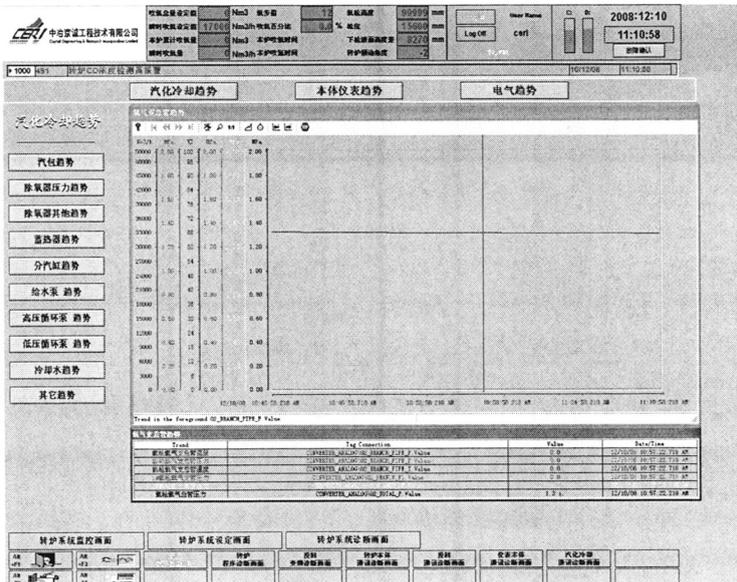


图 4.6 系统趋势画面

Fig.4.6 System trend display

第 5 章 PID 控制器设计与实现

5.1 PID 控制原理

目前工业自动化水平已成为衡量各行各业现代化水平的一个重要标志。同时,控制理论的发展也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。智能控制的典型实例是模糊全自动洗衣机等。自动控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。一个控制系统包括控制器、传感器、变送器、执行机构、输入输出接口。控制器的输出经过输出接口、执行机构,加到被控对象上;控制系统的被控量,经过传感器,变送器,通过输入接口送到控制器。不同的控制系统,其传感器、变送器、执行机构是不一样的。

开环控制系统是指被控对象的输出(被控制量)对控制器的输出没有影响。在这种控制系统中,不依赖将被控量反送回来以形成任何闭环回路^[26]。

闭环控制系统的特点是系统被控对象的输出(被控制量)会反送回来影响控制器的输出,形成一个或多个闭环。闭环控制系统有正反馈和负反馈,若反馈信号与系统给定值信号相反,则称为负反馈,若极性相同,则称为正反馈,一般闭环控制系统均采用负反馈,又称负反馈控制系统。闭环控制系统的例子很多。比如人就是一个具有负反馈的闭环控制系统,眼睛便是传感器,充当反馈,人体系统能通过不断的修正最后作出各种正确的动作。如果没有眼睛,就没有了反馈回路,也就成了一个开环控制系统。另例,当一台真正的全自动洗衣机具有能连续检查衣物是否洗净,并在洗净之后能自动切断电源,它就是一个闭环控制系统。

阶跃响应是指将一个阶跃输入加到系统上时,系统的输出。稳态误差是指系统的响应进入稳态后,系统的期望输出与实际输出之差。控制系统的性能可以用稳、准、快三个字来描述。稳是指系统的稳定性,一个系统要能正常工作,首先必须是稳定的,从阶跃响应上看应该是收敛的;准是指控制系统的准确性、控制精度,通常用稳态误差来描述,它表示系统输出稳态值与期望值之差;快是指控制系统响应的快速性,通常用上升时间来定量描述。

在工程实际中,应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制,简称 PID 控制,又称 PID 调节。PID 控制器问世至今已有近 70 年历史,它以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一。当被控对象的结构和

参数不能完全掌握,或得不到精确的数学模型时,控制理论的其它技术难以采用时,系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定,这时应用 PID 控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象,或不能通过有效的测量手段来获得系统参数时,最适合用 PID 控制技术。PID 控制,实际中也有 PI 和 PD 控制。PID 控制器就是根据系统的误差,利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。

比例控制是一种最简单的控制方式。其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差。

在积分控制中,控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。对一个自动控制系统,如果在进入稳态后存在稳态误差,则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统。为了消除稳态误差,在控制器中必须引入“积分项”。积分项对误差取决于时间的积分,随着时间的增加,积分项会增大。这样,即便误差很小,积分项也会随着时间的增加而加大,它推动控制器的输出增大使稳态误差进一步减小,直到等于零。因此,比例+积分(PI)控制器,可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

在微分控制中,控制器的输出与输入误差信号的微分(即误差的变化率)成正比关系。自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳。其原因是由于存在有较大惯性组件(环节)或有滞后组件,具有抑制误差的作用,其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差的作用的变化“超前”,即在误差接近零时,抑制误差的作用就应该是零。这就是说,在控制器中仅引入“比例”项往往是不够的,比例项的作用仅是放大误差的幅值,而目前需要增加的是“微分项”,它能预测误差变化的趋势,这样,具有比例+微分的控制器,就能够提前使抑制误差的控制作用等于零,甚至为负值,从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象,比例+微分(PD)控制器能改善系统在调节过程中的动态特性^[27-28]。

PID 控制器的运动方程为:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p K_i \int_0^t e(t) dt + K_p K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.1)$$

相应的传递函数为:

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \\ &= K_p \cdot \frac{K_i s^2 + K_d s + 1}{s} \end{aligned} \quad (5.2)$$

PID 控制的结构如图 5.1 所示。

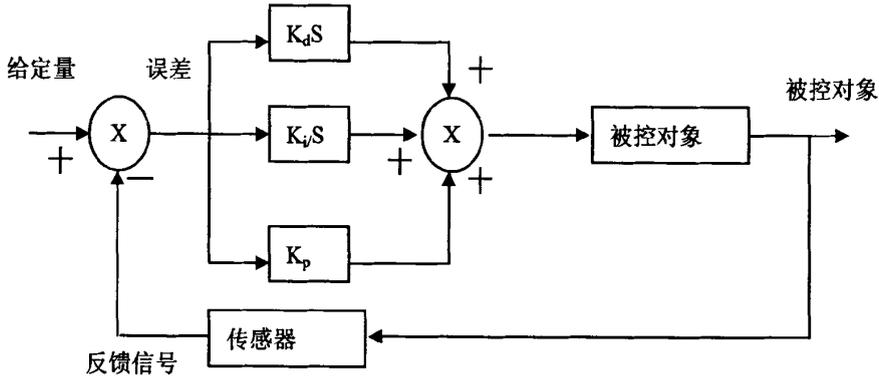


图 5.1 PID 控制结构图

Fig.5.1 Control structure diagram of PID

若 $4\tau/T_i < 1$ ，式 (5.2) 可以写成：

$$G_c(s) = K_p K_i \cdot \frac{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{s} \tag{5.3}$$

由此可见，当利用 PID 控制器进行串联校正时，除可使系统的型别提高一级外，还将提供两个负实零点。与 PI 控制器相比，PID 控制器除了同样具有提高系统的稳态性能的优点外，还多提供一个负实零点，从而在提高系统动态性能方面，具有更大的优越性。因此，在工业过程控制系统中，广泛使用 PID 控制器。PID 控制器各部分参数的选择，在系统现场调试中最后确定。通常，应使积分部分发生在系统频率特性的低频段，以提高系统的稳态性能；而使微分部分发生在系统频率特性的中频段，以改善系统的动态性能^[29]。

5.2 串级控制

随着生产过程向着大型、连续和强化方向发展，对操作条件要求更加严格，参数间相互关系更加复杂，对控制系统的精度和功能提出许多新的要求，特别是在电厂的主要热工过程自动调节系统中，由于对生产过程的安全性和经济性要求较高，如果仍然采用单回路调节系统，往往不能满足生产的要求，因此，要采用复杂的调节系统，即采用串级控制系统可有效地提高调节品质，并且得到了广泛的应用。

串级控制是改善调节过程极为有效的方法，并且得到了广泛的应用。串级控制系统是在结构上增加了一个内回路。首先是内环具有快速作用，它能够有效地克服二次扰动的影响。可以说串级系统主要是用来克服进入副回路的二次扰动的^[30]。

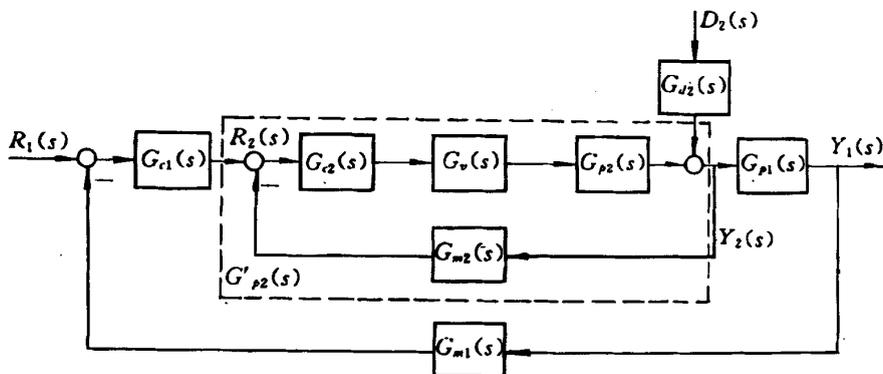


图 5.2 串级控制系统的方框图

Fig.5.2 Cascade control system block diagram

现在对图5-2所示方框图进行分析，可进一步揭示问题的本质。图中： $G_{c1}(s)$ 、 $G_{c2}(s)$ 是主、副调节器传递函数； $G_{p1}(s)$ 、 $G_{p2}(s)$ 是主、副对象传递函数； $G_{m1}(s)$ 、 $G_{m2}(s)$ 是主、副变送器传递函数， $G_v(s)$ 是调节阀传递函数。 $G_{d2}(s)$ 是二次干扰通道的传递函数。

当二次干扰经过干扰通道环节 $G_{d2}(s)$ 后，进入副环，首先影响副参数 y_2 ，于是副调节器立即动作，力图消弱干扰对 y_2 的影响。显然，干扰经过副环的抑止后再进入主环，对 y_1 的影响将有较大的减弱。按图5-2所示串级系统，可以写出二次干扰 D_2 至主参数 y_1 的传递函数是

$$\begin{aligned}
 \frac{Y_1(s)}{D_2(s)} &= \frac{G_{d2}(s) G_{p1}(s)}{1 + G_{c2}(s) G_v(s) G_{p2}(s) G_{m2}(s)} \\
 &= \frac{G_{d2}(s) G_{p1}(s)}{1 + G_{c1}(s) G_{m1}(s) G_{p1}(s) \frac{G_{c2}(s) G_v(s) G_{p2}(s)}{1 + G_{c2}(s) G_v(s) G_{p2}(s) G_{m2}(s)}} \\
 &= \frac{G_{d2}(s) G_{p1}(s)}{1 + G_{c2}(s) G_v(s) G_{p2}(s) G_{m2}(s) + G_{c1}(s) G_{m1}(s) G_{p1}(s) G_{c2}(s) G_v(s) G_{p2}(s)} \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

为了与一个简单回路控制系统相比较，由图5.2可以得到回路控制下 D_2 至 y_1 的传递函数为：

$$\frac{Y_1(s)}{D_2(s)} = \frac{G_{d2}(s) G_{p1}(s)}{1 + G_c(s) G_v(s) G_{p1}(s) G_{p2}(s) G_m(s)} \quad (5.5)$$

比较式(5.4) 和(5.5)。先假定 $G_c(s) = G_{c1}(s)$ ，且注意到单回路系统中的 $G_m(s)$ 就是

串级系统中的 $G_{m1}(s)$ ，可以看到，串级中 $Y1(s)/D2(s)$ 的分母中多了一项，即 $G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s) \cdot G_{m2}(s)$ 。在主环工作频率下，这项乘积的数值一般是比较大的，而且随着副调节器比例增益的增大而加大；另外式(5-4)的分母中第三项比式(5.5)分母中第二项多了一个 $G_{c2}(s)$ 。一般情况下，副调节器的比例增益是大于1的。因此可以说，串级控制系统的结构使二次干扰 $D2$ 对主参数 $y1$ 这一通道的动态增益明显减小^[36-39]。当二次干扰出现时，很快就被副调节器所克服。与单回路控制系统相比，被调量受二次干扰的影响往往可以减小10~100倍，这要视主环与副环中容积分布情况而定。

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容。几种常用的控制器参数的工程整定方法有临界比例度法、衰减曲线法、经验凑试等几种。

临界比例度法：在系统闭环情况下，将控制器的积分时间 iT 放到最大，微分时间 dT 放到最小，比例度 δ 放于适当数值(一般为 100%)。然后使 δ 由大到小逐步改变，并且每改变一次 δ 值时，通过改变给定值给系统施加一阶跃干扰，同时观察被控变量 y 的变化情况。若 y 的过渡过程呈衰减振荡，则继续减小 δ 值，若 y 的过渡过程呈发散振荡，则应增大 δ 值，直到调至某一 δ 值，过渡过程出现不衰减的等幅振荡为止。

这时的过渡过程称之为临界振荡过程。出现临界振荡过程的比例度 K 称为临界比例度，而临界振荡的周期 KT ，则称临界周期。有了 $K\delta$ 及 KT 这两个试验数据，按表 5.1 所给出的经验公式，就可计算出当采用不同类型控制器而使过渡过程呈 4: 1 衰减振荡状态的控制器参数值^[40]。

表 5.1 临界比力度法整定控制器参数经验公式

Table 5.1 Critical strength of PID parameters by experience formula

控制器类型	控制参数		
	$\delta / \%$	T_i / min	T_d / min
P	$2.8x$	$2.8x$	$2.8x$
PI	$2.2\delta x$	$0.85T_x$	$0.85T_x$
PID	Δx	$0.5T_x$	$0.13T_x$

按表 5.1 算出控制器参数后，先将 δ 放在比计算值稍大一些(一般大 20%)数值上，再依次放上积分时间和微分时间(如果有的话)，最后再将 δ 放回到计算数值上即可。如果这时加干扰，过渡过程与 4: 1 衰减还有一定差距，可适当对 δ 值做一点调整，直到过渡过程达到满意为止。至此，整定完毕。

5.3 西门子 PID 功能块

PLC 的 PID 控制器的设计是以连续系统的 PID 控制规律为基础，将其数字化写成离

散形式的 PID 控制方程，再跟据离散方程进行控制程序设计。

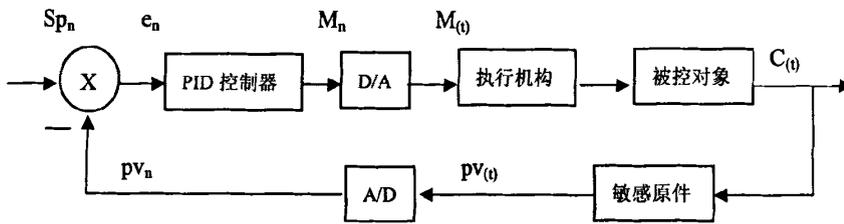


图 5.3 PLC 闭环控制系统方框图

Fig.5.3 Close loop control system block diagram

在许多控制系统内，可能只需要 P、I、D 中的一种或两种控制类型。如可能只要求比例控制或比例与积分控制，通过设置参数可对回路进行控制类型进行选择。PID 控制有两个输入量：给定值(sp)和过程变量(pv)。多数工艺要求给定值是固定的值，如加热炉温度的给定值。过程变量是经 A/D 转换和计算后得到的被控量的实测值，如加热炉温度的测量值。给定值与过程变量都是与被控对象有关的值，对于不同的系统，它们的大小、范围与工程单位有很大的区别。应用 PLC 的 PID 指令对这些量进行运算之前，必须将其转换成标准化的浮点数(实数)。同样，对于 PID 指令的输出，在将其送给 D/A 转化器之前，也需进行转换。过程变量可以在外围设备(I/O)或者浮点数值格式输入。“CRP_IN”功能可以将“PV_PER”外围设备数值转换为一个浮点格式的数值，在 -100 和+100% 之间，转换方法 CPR_IN 的输出= $PV_PER \times 100 / 27648$ ；“PV_NORM”功能可以根据下述规则标准化“CRP_IN”的输出：输出 $PV_NORM = (CPR_IN \text{ 的输出}) \times PV_FAC + PV_OFF$ 。“PV_FAC”的缺省值为“1”，“PV_OFF”的缺省值为“0”。变量“PV_FAC”和“PV_OFF”为下述公式转化的结果：

$$PV_OFF = (PV_NORM \text{ 的输出}) - (CPR_IN \text{ 的输出}) \times PV_FAC$$

$$PV_FAC = (PV_NORM \text{ 的输出}) - PV_OFF / (CPR_IN \text{ 的输出})$$

西门子 PID 功能块 PID 算法作为一种位置算法进行控制。比例运算、积分运算 (INT) 和微商运算 (DIF) 都可并行连接，也可以单独激活或取消。这就允许组成成 P、PI、PD 和 PID 控制器。也可以是纯 I 和 D 调节器。

5.4 蒸发冷却器温度控制

干法除尘的核心是温度的控制，包括蒸发冷却器出入口的温度，静电除尘器出入口的温度，如何保证上述温度的控制是保证干法除尘系统正常运行的前提，温度控制的基础就是保证在 EP 的电场内不出现气流冷凝的现象，既在电场不会出现潮湿现象，吸附

的灰尘是干燥的，不潮湿。如果气流温度过低，所产生的灰尘将出现板结现象，造成蒸发冷却器粗输灰系统及 EP 细输灰系统的堵塞，并且潮湿的灰尘容易挂在阴极线和阳极板上，不容易下落，造成阴极线的肥大，减小了极距，导致电场的放电频率增加，容易引起卸爆，并且影响除尘器的除尘效率，更严重的是加剧电场内设备的腐蚀，降低设备的使用寿命；另外气流温度过低，将造成风机内出现积水现象，增大风机叶轮的腐蚀速度；但是气流的温度过高将造成设备的额外烧损，降低电场的除尘效果。

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容。它是根据被控过程的特性确定 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间的大小。PID 控制器参数整定的方法很多，概括起来有两大类：一是理论计算整定法。它主要是依据系统的数学模型，经过理论计算确定控制器参数。这种方法所得到的计算数据未必可以直接用，还必须通过工程实际进行调整和修改。二是工程整定方法，它主要依赖工程经验，直接在控制系统的试验中进行，且方法简单、易于掌握，在工程实际中被广泛采用。PID 控制器参数的工程整定方法，主要有临界比例法、反应曲线法和衰减法。三种方法各有其特点，其共同点都是通过试验，然后按照工程经验公式对控制器参数进行整定。但无论采用哪一种方法所得到的控制器参数，都需要在实际运行中进行最后调整与完善。现在一般采用的是临界比例法。利用该方法进行 PID 控制器参数的整定步骤如下：

(1) 首先预选择一个足够短的采样周期让系统工作；

(2) 仅加入比例控制环节，直到系统对输入的阶跃响应出现临界振荡，记下这时的比例放大系数和临界振荡周期；

(3) 在一定的控制度下通过公式计算得到 PID 控制器的参数。

干法除尘控制系统共分三个控制回路：蒸发冷却器的温度控制、风机流量控制、切换站气体成分控制。整个控制系统的关键技术是静电除尘器的高压变压整流设备的控制，其性能特点是全面结合了湿、干及热性气体静电除尘器的电子处理技术及相关领域的知识和经验。对于诸如不断变化的操作状态、极端的过程波动和多电极配置等情况，不能完全用纯数学的方式描述；因此在闪络判别、电晕效应的最优化等方面采用了模糊控制，改善了烟气的净化效果；通过数字输入来实现外部操作或触发操作方式，具有处理特殊的负载状态的功能，并根据工艺过程引起的负载变化来调节电压以达到节能目的。通过光缆与配套系统或 PC 连接，实现计算机对除尘器节能的自动控制与除尘器的电流、电压值在远程的实时监视。另该技术设备是与干式静电除尘配套设备。根据吹炼、停吹、振打等三种工作状态，进行火花跟踪控制、间歇供电、反电晕检测、峰值跟踪控制并提供各种保护功能。按设定好的程序对电压和电流进行调节，以发挥最大的电流效

率，确保安全生产。该成套技术设备是由北京博谦工程技术有限公司在研究和跟踪国外技术的基础上自主创新，并已经将该套设备投入钢铁企业实际运行。

蒸发冷却器的温度控制根据出入口烟气温度、流量调节喷水量，确保烟气出口温度在控制范围内。烟气在汽化冷却和除尘装置中的流量由流量控制系统确定。烟气流量可通过烟气流量调节器的输出信号控制，这种控制可通过改变风机的转速来实现，使炉口保持微正压。汽化冷却烟道中的静压力是决定烟气流量调节的主要参数，另外对烟气流量调节起作用的影响参数是吹氧量和烟量，在转炉正常作业中，计算机负责处理这三个参量并将此作为修正参量输给风机速度调节控制机构。对于在炼钢过程中进行的加料作业，如矿石或石灰石，或者辅助作业，干法除尘系统的烟气流量调节系统将根据给定的程序做出反应。

切换站气体成分控制是在规定的时间内根据烟气成分分析确定切换站的动作。当烟气中 CO 含量大于规定值 30%、氧气含量小于规定值 2%时，回收烟气阀打开。烟道转换所用阀门配有调节元件，流线型通道形状调整膜，便于在烟气切换时平衡系统的压力，防止在转炉口烟气捕集点发生喘振现象。转炉煤气干法除尘系统自动化控制范围从汽化冷却烟道开始到煤气冷却器结束，设一级基础自动化，与转炉本体、汽包等自动化系统进行联网通讯，组成以太网光纤环网。其自动化控制水平高，具有自适应功能的控制软件，使得干法除尘系统的运行更加符合炼钢工艺的实际变化情况。

喷水水调节阀的阀位取决于蒸发冷却器的入口温度、出口的设定温度和 EP 的出口流量以及喷射蒸汽的流量。蒸发冷却器的出口温度以蒸发冷却器出口温度的两块温度计的最小温度为参考值。水流量的计算公式如下：

$$W[kg/h] = \frac{Q_{dry}[Nm^3/h] \times \Delta T[k] \times cp[kJ/K \cdot m^3]}{const.[kJ/kg]} \quad (5.6)$$

$$Q_{n, wet}[Nm^3(wet)/h] = FIRQCSA1505 \times \frac{273.15^{\circ}K}{TIR1506 + 273.15^{\circ}K} \times \frac{PIR1504 + PIRCSA1503}{1013.25mbar}$$

$$Q_{n, wet}[Nm^3(dry)/h] = Q_{n, wet} - \frac{FIRC1411 + FIRSA1420}{0.804}$$

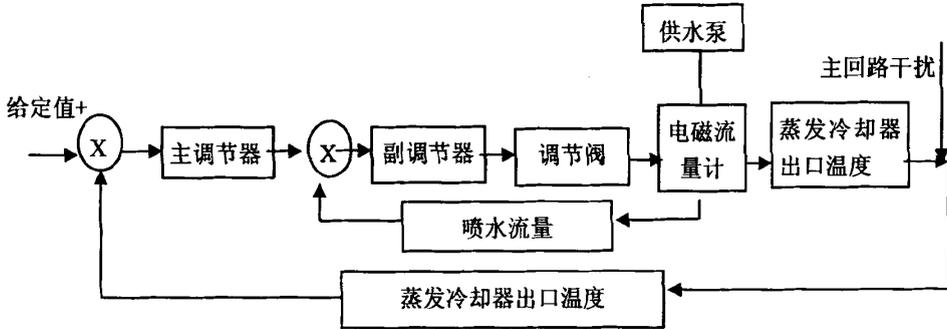
$$\Delta T[K] = MAX[TIR1400, TIR1401] - Setpoint Value[TIRC1403/TIRC1404]$$

$$cp[kJ/(Nm^3(dry) \times K)] = f_{interpolation}(\Delta T):$$

$$Const. = 2500[kJ/kg]$$

在蒸发冷却器设计中采用两个 PID 控制器。第一个 PID 温度控制器是根据出口温度设定与实际出口温度的偏差计算出喷射水流量主给定值。第二个 PID 控制器是将主给定

和计算出的补偿值相加后得出喷射水的流量给定值以控制喷射水调节。由于 PID 温度控制器参数调整不好，在温度急剧上升时，主给定不能跟随变化，经过在实际情况将比例和积分参数调整后，通过喷射水的调节将出口温度控制在规定的范围内，控制方框图如图 5.4 所示。



5.4 蒸发冷却器温度和喷水量串级控制框图

Fig.5.4 Evaporative cooler temperatures and wate cascade control block diagram

程序流程图如图 5.5 所示。

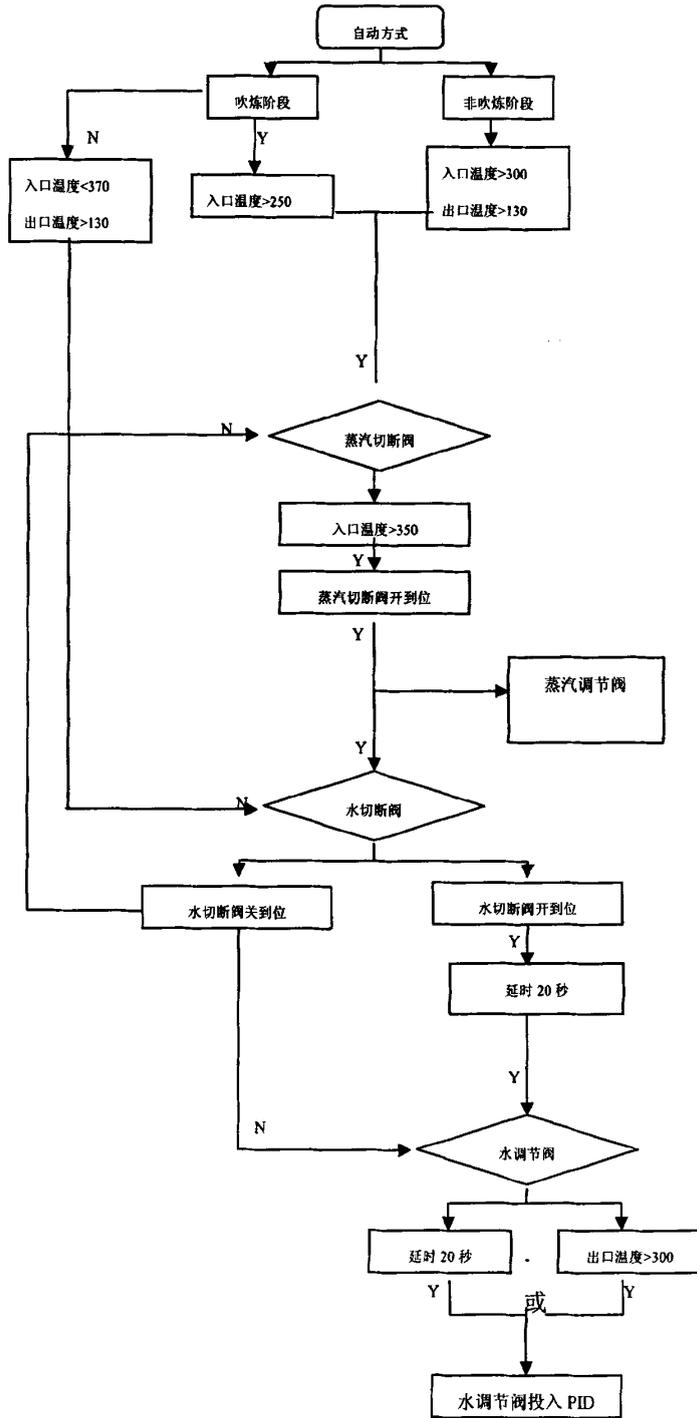


图 5.5 蒸发冷却器喷水 PID 控制
Fig.5.5 Evaporative cooler water PID control

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文基于首自信科研项目“首钢转炉干法除尘控制系统的研究”，对首钢京唐炼钢厂干法除尘系统进行学习研究。采用搭建实验平台的方式，学习系统的硬件和软件，并测试程序的运行。通过生产工艺学习、现场控制设备了解、PLC 控制程序解读，了解工艺参数和控制连锁关系，总结关键设备的操作经验和维护处理过程，并整理维护技术文档。

阐述了湿法除尘和干法除尘的技术参数和各自的优点，电除尘原理和电除尘在炼钢生产废气除尘中的作用，详细讨论了干法除尘的生产工艺，各个设备功能组的功能。从控制设备入手，了解设备的位置、结构、功能，结合工艺参数整理设备的控制流程、运行条件及和其他系统的重要连锁关系。重点讨论了蒸发冷却器、静电除尘器、输灰、煤气输送、煤气回收功能组的程序连锁，技术参数和 HMI 人机操作功能。

完成对系统的设计研究。首钢干法除尘系统采用西门子产品，控制系统为 S7-400 CPU，现场控制网络采用 profibus DP 和 ASI 网络，终端总线采用工业以太网进行操作和监控。人机监控界面采用 WINCC。S7-400 PLC 实现系统的在线检测、控制、调节和诊断功能；监控机采用 WINCC 组态软件，用于显示设备运行状态，对重要工艺参数作实时和历史趋势，并实现故障报警，报表打印，进行数据设定和操作显示等功能。

通过试验机测试程序的运行，对于关键的控制功能进行研究测试，整理程序调用关系和各个功能块的作用。详细研究了蒸发冷却器的喷水控制，在程序设计当中采用两个 PID 控制器。第一个 PID 温度控制器是根据出口温度设定与实际出口温度的偏差计算出喷射水流量主给定值。第二个 PID 控制器是将主给定和计算出的补偿值相加后得出喷射水的流量给定值以控制喷射水调节。由于 PID 温度控制器参数调整不好，在温度急剧上升时，主给定不能跟随变化，经过在实际情况将比例和积分参数调整后，通过喷射水的调节将出口温度控制在规定范围内。

首自信负责维护首钢京唐炼钢厂的设备和程序，在日常工作中收集设备运行过程中的故障和处理方法，根据生产工艺和控制程序编写设备故障树，减少了故障处理时间。对主要设备蒸发冷却器、液压站、ID 风机重要设备的故障进行整理。在投产一段时间后，设计中和施工中的问题容易导致频繁的生产故障，结合现场实际工况，对输灰系统，煤气分析系统，煤气回收系统和急停系统进行优化，优化后效果明显，保障了转炉生产的正常运行。

通过对干法系统的研究，完成操作经验、工艺控制总结和转炉除尘技术特点的分析以及对关键设备操作与应用的总结。

6.2 展望

通过对干法除尘系统的研究，掌握生产工艺和工艺参数，理顺了控制程序和连锁条件，提高了维护队伍的技术水平，为工艺优化和设备改造创造了条件，为公司的技术输出打下基础。

转炉干法除尘技术在国际上已被认定为今后的发展方向，它可以部分或完全补偿转炉炼钢过程的全部能耗，有望实现转炉无能耗炼钢的目标。转炉煤气干法净化回收技术有着十分广阔的应用前景。随着该项技术在首钢京唐首钢炼钢厂、首钢迁安炼钢厂的应用，进一步的消化吸收、总结经验，通过更深入的试验研究、开发研制，我们相信，适应我国国情的转炉煤气干法净化技术将很快在我国各大、中型钢铁公司得到推广应用，使我国的转炉煤气净化回收技术提高到一个新的水平。

参考文献

1. 翟玉杰. 转炉煤气干法(LT)净化回收技术的国产化应用[J], 2009(5), 32-89.
2. 王社斌. 转炉炼钢生产技术[M], 北京: 工业出版社, 2008, 40-48.
3. 郭荣祥. PID级联控制器在转炉干法除尘系统中的应用与改进方案[J], 2009(5).
4. 祁君田. 现代烟气除尘技术[M], 北京: 化学工业出版社 2011, 110-120.
5. 郑金星, 王振光, 王庆春. 炼钢工艺及设备[M], 北京: 冶金工业出版社, 2010, 60-80.
6. 王新华. 钢铁冶金—炼钢学[M], 北京: 高等教育出版, 2007, 13-16.
7. 张芳. 转炉炼钢 500 问[M], 北京: 化学工业出版社, 2009, 138.
8. 张东丽. 转炉煤气干法除尘技术应用现状[J]., 2010,165-172.
9. 唐国山. 工业电除尘器应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, 32-80.
10. 向晓东. 现代除尘理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 10-50.
11. 胡满银 赵毅. 除尘技术[M].北京: 化学工业出版社, 2006, 56-60.
12. 余云进. 除尘技术问答/环境保护问答丛书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, 28.
13. 马竹语. 国外钢铁工业自动化的进展及展望(上) [J], 冶金自动化, 1997, 13-16.
14. 马竹语. 国外钢铁工业自动化的进展及展望(下) [J], 冶金自动化, 1997, 18-25.
15. 朱善君, 翁樟, 邓丽曼, 周桌伦. 可编程序控制系统—原理·应用·维护[M], 清华大学出版社, 1991: 5-6.
16. Siemens. Configuring Hard ware with STEP7, 2000.
17. Siemens. Progranuning with STEP7, 2000.
18. Siemens. Function Bloke Diagram for S7-300 and S7-400, 2000.
19. SIEMENS STEP7 V5.3, SIEMENS 公司编著出版, 2004.
20. 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 深入浅出西门子 STEP7. 北京: 北京航空航天大学出版社[M], 2005 年: 26-28.
21. 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 深入浅出西门子 Wincc. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005 年: 23-24.
22. 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. SIMATIC 产品概览, 2004, 78-90.
23. 崔坚, 李佳. 西门子工业网络通信指南[M]. 北京: 机械工业出版社 2006, 84-88.
24. 刘宝坤. 计算机过程控制系统. 北京[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001, 45-120.
25. 徐德, 孙同景. 可编程序控制器(PLC)应用技术[M], 济南: 山东科学技术出版社, 2001 年: 163-164.
26. 谢希仁. 计算机网络(第 2 版). 北京: 电子工业出版社[M], 2007: 10-12.
27. 马国华. 监控组态软件及其应用[M], 北京: 清华大学出版社 2001, 205-210.
28. 金以慧. 过程控制. 北京: 清华大学出版社, 1993 (2007.5 重印), 100-110.

29. 吴丰顺. PID 控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社 2011, 146-60.
30. KATSUHKO OGATA. Modern Control Engineering. 清华大学出版社, 58-60.
31. Gene F.Franklin,J.David Powell. Feedback Control of Dynamic System. 人民邮电出版社, 107-109.
32. Sung,SuWhan, LeeJietae. Process Indetification and PID control. In-Beum Wiley-IEEE press(2009-04), 140-158.
33. Yu,C,C. Autotuning of pid controllers:Relay Feedback Apprach.
34. Katsuhiko Ogata. Mordern Control Engineering. prentice hall, 26-27.
35. Owens,D.H.,feedback and Multivariable Control Systems,Peter Peregrines,London . 1978.
36. 陶永华. 新型 PID 控制及其应用 (第 2 版) [M]. 机械工业出版社, 1998, 45-57.
37. 夏泽中, 施三宝.主蒸汽温度预测 PID 串级控制应用研究[C].
38. 付爱彬.串级过热汽温控制系统分析[J].科技情报开发与经济, 2007, 17 (8) .
39. 张泉灵, 王树清.控制理论及应用, 2001, 18(4).
40. 刘春胜, 王邵伯.串级 PID 控制在锅炉主蒸汽温度控制中的应用, 2006, 19(9).

附 录

攻读学位期间发表的论著

文章名	书（期刊）名称	年（期次）	作者
京唐板坯二级混钢模型介绍	第十届北京冶金青年科技优秀论文集	2010	张红军

参加过的课题项目

2009年-2010年 完成京唐炼钢作业部设备动态系统的方案设计，项目管理及项目的实施工作。

2009年-2010年 参加首自信科研项目管理工作。负责干法除尘消化吸收项目和套筒窑项目消化吸收。

致 谢

本课题的研究是在东北大学石海彬老师的指导下完成的。从选题到成稿，石老师一直给予我重要的指导和帮助。导师渊博的学识、敏锐的思想、严谨的治学态度、不倦的工作精神深深地感染着我，使我终生受益。在论文选题、设计和完成期间，导师都给予了极大的关心和支持，在此，向他致以最衷心的感谢

这里，要感谢我的单位首钢自动化信息技术有限公司，她给了我这次学习的机会。我会将所学的知识应用在以后的工作中，为首钢贡献自己的力量，以此来感谢厂对我的栽培。

同时，感谢将给予我的论文评阅和将参加我的论文答辩的专家教授。

最后，我还要感谢我的妻子，在我学习期间，是她承担了家庭的重担，是她的理解、支持及默默奉献和帮助使我能胜利完成了学业。亲人的鼓励与支持永远是我前进的动力。

论文的完成是上述及许多未提及的人们共同支持的结果，在论文完成之际特向他们表示感谢。