

1931371

分类号_____ 密级_____

UDC _____

学 位 论 文

首钢高炉喷煤自动控制系统的设计与实现

作者姓名：周德谋

指导教师：高宪文 教授

东北大学信息科学与工程学院

申请学位级别：硕士 学科类别：专业学位

学科专业名称：控制工程

论文提交日期：2008年12月8日 论文答辩日期：2009年1月5日

学位授予日期： 年 月 日 答辩委员会主席：刘建昌 教授

评阅人：何大阔 副教授 王绪 高级工程师

东 北 大 学

2008年12月





A Thesis for the Degree of Master in Control Engineering

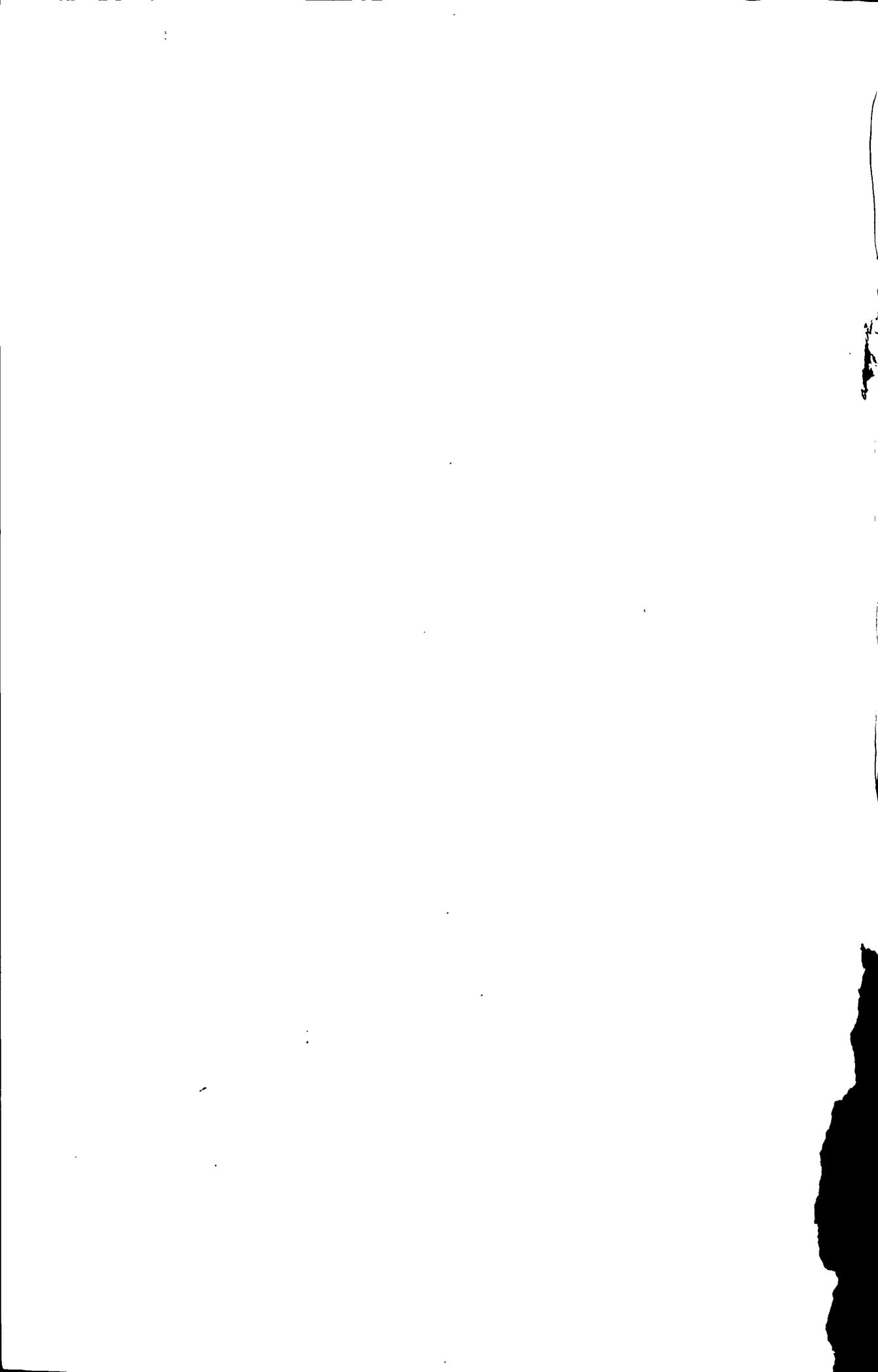
**Design and development of the pulverized coal
injection (PCI) automatic control system
in ShouGang BF**

by zhou demou

Supervisor : Professor Gao xianwen

Northeastern University

December 2008



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，也不包括本人获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示诚挚的谢意。

学位论文作者签名：周德谋

签字日期：2009.1.6

学位论文版权使用授权书

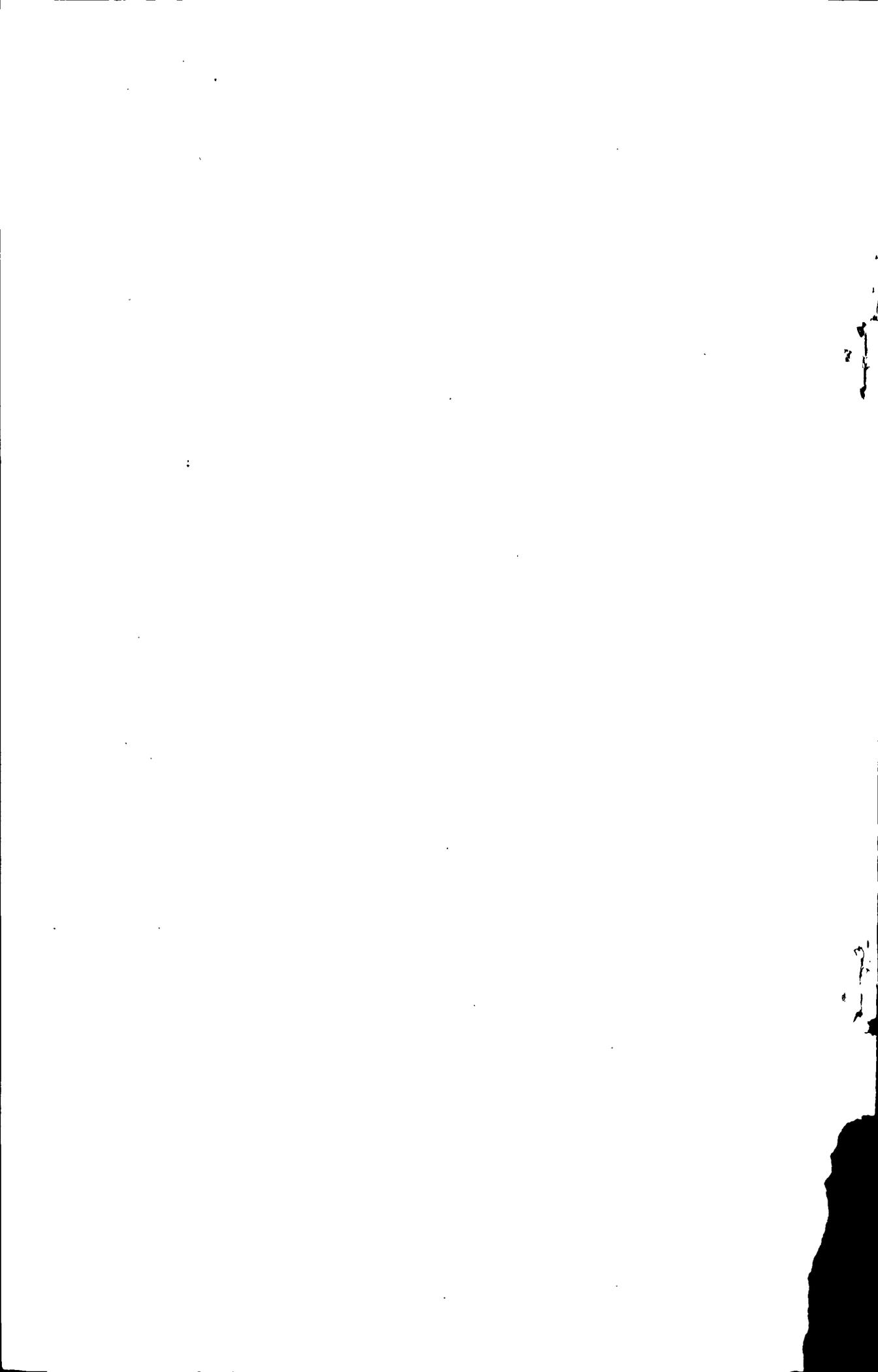
本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

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：周德谋 导师签名：李致

签字日期：2009.1.6 签字日期：



首钢高炉喷煤自动控制系统的设计与实现

摘 要

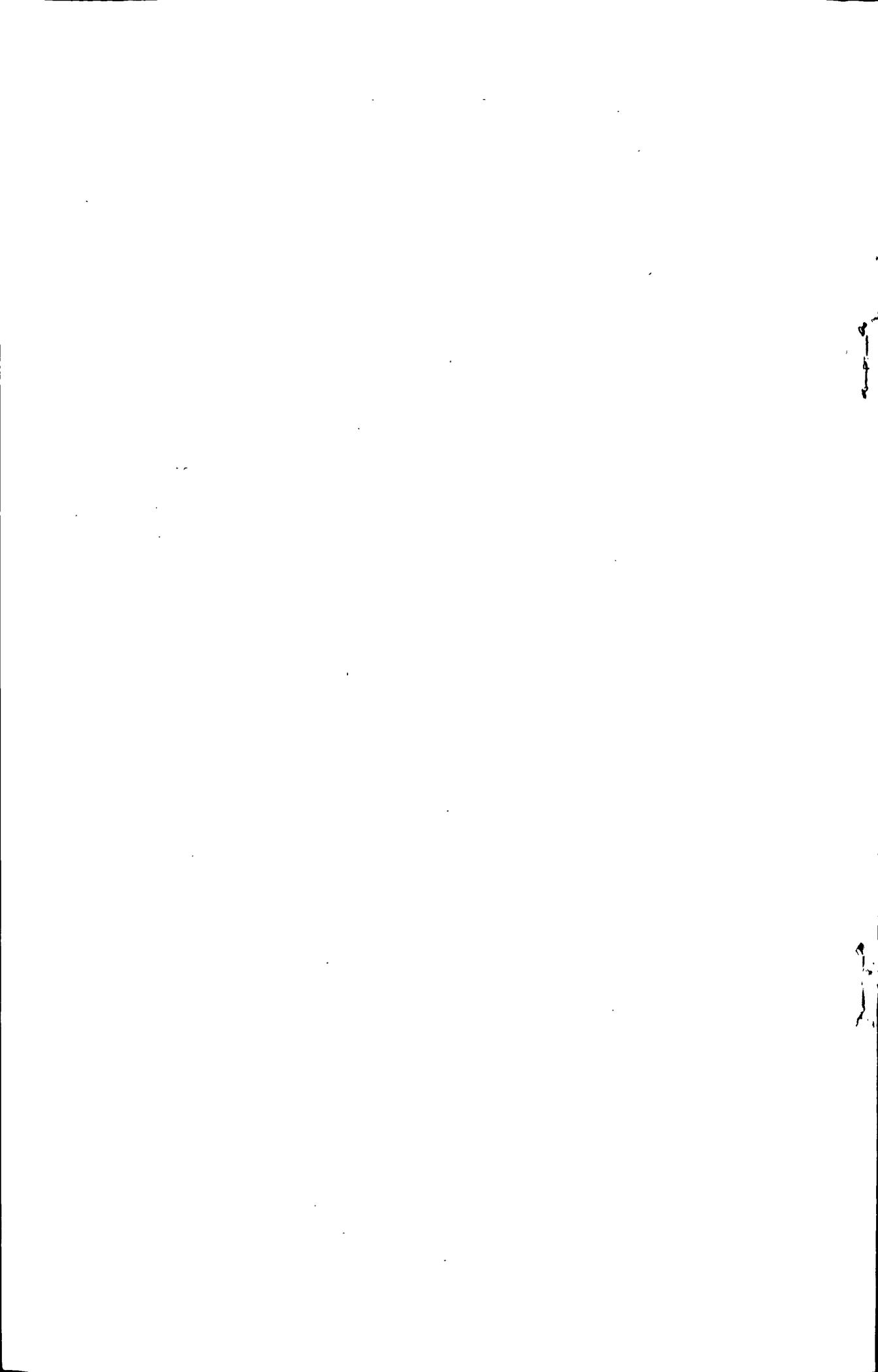
随着自动化水平的提高,我国的钢铁企业为了节约生产成本,探索了多种节能降耗的手段,而高炉喷煤是钢铁企业降焦比增效益的有效途径。我国对高炉喷煤技术的开发和应用尽管较早,但从近几年的发展情况来看,已不再处于领先地位,国外不少高炉的喷煤量越来越高,而且多数高炉是喷吹烟煤。目前,我国与日本和西欧一些喷煤先进国家相比,有多方面的差距,而自动控制水平低,是高炉喷煤系统不能正常工作主要瓶颈。而自动控制水平的高低,关键在于控制软件的设计与开发过程控制——也就是说,要依据系统原理,应用软件工程的思想进行控制软件系统的开发与管理,才能获得更好的控制效果。进一步完善和推广高炉喷煤自动控制软件系统工程,是喷煤系统能否正常运行,能否完成节能降耗重任的关键。论文结合首钢炼铁厂三高炉喷煤自动控制系统的开发项目,对高炉喷煤串罐工艺自动控制系统的设计和开发进行了研究。

本文在详细分析了传统喷煤自动控制软件系统特点的基础上,结合首钢炼铁厂三高炉喷煤自动控制系统应用环境,进行了深入的需求分析,针对传统喷煤控制软件系统没有按照系统工程的思想进行开发,以及煤量输送不稳定的问题,提出运用结构化分析工具,应用数学原理创建煤量计算模型,并利用该模型及 PLC 软件编程工具,应用面向对象方法和控件技术,在 VB 开发平台上开发完成了整个高炉喷煤自动控制软件系统。

基于软件工程思想设计的喷煤自动控制软件在投运后被证明具有良好的社会效益和经济效益:其中利用多元线性回归原理思想设计的煤量均匀稳定控制起到了关键作用。整个系统具有应用新型煤量计算模型、新型工艺控制方式、新型开发方法及遵循瀑布模型实现下位软件及上位监控界面的开发设计的特点。

系统调试及投运后,采集大量的现场实验数据,并利用分析工具 Matlab 进行理论分析研究,验证了基于软件工程思想设计的三高炉喷煤自动控制软件设计是成功的,效果良好,为将软件工程的思想融入到工业控制软件开发设计提供了一个交流的平台。

[关键词] 高炉喷煤; 串罐工艺; 煤量计算模型; 多元回归; 软件工程; 自动控制软件设计与开发



Design and development of the pulverized coal injection (PCI) automatic control system in ShouGang BF

Abstract

With the improving of the automation, the Iron & Steel Enterprises in our country has searched after lots methods of reducing energy and consumes in order to reduce the cost. Coal injection is an effective method of reducing coke ratio and increasing benefits. The technology of coal injection has been developed and applied early in our country, but not on top in recent years. The quantity of coal injection has become larger and larger outside country and majority soft coal. Now, we have difference in many aspects from Japan and advanced countries in West Europe, and have the main question of low automatic control level which is the bottle neck of the BF's coal injection system running. The key of the automatic control level is the process controlling of the control software design and develop ___ in another words, we will gain better effect only developing and managing the control software system utilizing the software engineering ideas and according to the system principle. The automatic control system engineering of blast furnace (BF) coal injection is a critical aspect which affects the normally running of coal injecting system and whether it can fulfill the important task of cost reducing and efficiency increasing. Combined with the project of the pulverized coal injection (PCI) automatic control system of 3# BF in SHOUGANG Iron Making Factory, this thesis researches the design and development of the series Bunker blast furnace PCI automatic control system.

Associating with the application environment of 3# BF PCI automatic control software system in ShouGang Iron Factory and analyzing the characteristics of the PCI automatic control system in detail, a model of pulverized coal measurement, which aiming at the solution of not according to the system engineering ideas and coal transportation instability of traditional PCI system and utilizing structured analyzing tools and Advanced Mathematics principles, is put forward in order to develop the whole system on Monitor VB platform with PLC program tool and Object-Oriented method and component technique.

Based on software engineering design thinking of pulverized coal injection in the automatic control software was put into operation proved to be a good social and economic benefits: the use of multiple linear regression in which the principle of the design thinking of

the amount of coal uniform stability control played a key role. The entire system with the application of new coal calculation model, the new process control methods, the development of new methods and follow the model falls under monitoring software and interface design features.

The PCI automatic control system based on software engineering was proved to be successful and effective through the analyzing and researching of a mass of experiments data by the tool of Matlab after the system put into running. This subject offers a proper intercommunion platform for bringing the application of software engineering ideas into designing of the industrial control software.

Keywords: blast furnace coal injection; the Series Bunker; a model of pulverized coal measurement; multiple linear regression; software engineering; automatic control software design and development

目 录

| | |
|----------------------------|-----|
| 独创性声明 | I |
| 摘 要 | II |
| ABSTRACT | III |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 课题研究背景 | 1 |
| 1.2 课题研究的意义 | 2 |
| 1.3 高炉喷煤技术的现状及发展趋势 | 5 |
| 1.4 本文主要工作 | 9 |
| 第二章 高炉喷煤工艺与控制 | 11 |
| 2.1 喷煤工艺介绍 | 11 |
| 2.1.1 喷煤系统的组成 | 11 |
| 2.1.2 喷煤工艺流程的分类及特点 | 13 |
| 2.2 首钢三高炉喷煤系统介绍 | 14 |
| 2.3 首钢三高炉喷煤系统目前存在的问题 | 15 |
| 第三章 高炉自动喷煤控制系统设计 | 17 |
| 3.1 引言 | 17 |
| 3.2 控制系统的总体设计 | 19 |
| 3.2.1 系统的需求分析 | 19 |
| 3.2.2 系统总体设计 | 20 |
| 3.3 控制系统的详细设计 | 21 |
| 3.3.1 系统硬件设计 | 21 |
| 3.3.2 系统软件设计 | 23 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 3.4 煤量计算和控制模型建立..... | 30 |
| 3.4.1 模型控制的提出..... | 30 |
| 3.4.2 模型的 IPO 分析..... | 31 |
| 3.4.3 几种算法思想的对比研究..... | 32 |
| 3.4.4 多元线性回归算法的应用..... | 33 |
| 3.4.5 煤量计算和控制模型建立..... | 37 |
| 3.5 数据库的设计..... | 39 |
| 第四章 高炉喷煤自动控制系统的实现..... | 41 |
| 4.1 硬件系统的实现..... | 41 |
| 4.2 软件系统的实现..... | 43 |
| 4.3 控制算法的实现..... | 47 |
| 4.4 系统运行效果..... | 54 |
| 第五章 结论与展望..... | 55 |
| 5.1 结论..... | 55 |
| 5.2 展望..... | 56 |
| 参考文献..... | 57 |
| 致 谢..... | 59 |

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

目前,高炉喷煤存在手动调节喷煤和自动喷煤两种方式。手动调节喷煤,喷煤量不均匀,造成高炉热制度经常性波动,不利于高炉炉况的稳定及煤比的进一步提高;采用自动喷煤技术可实现入炉煤粉量精准,喷吹均匀,达到稳定炉况的目的,进而为提高煤比创造条件。因此,国内企业结合自身特点,近几年正在逐步实施自动喷煤技术。

高炉喷煤系统布置形式大体分为并联罐和串联罐两种系列,并联罐布置形式比较容易实现自动喷吹,国内外都有相应技术,如采用国外技术的有:宝钢(除三高炉)、武钢、鞍钢等,采用的是荷兰的自动喷吹技术。首钢迁钢2高炉采用的是达涅利技术;采用国内天硕钢铁(福建)有限公司开发的自动喷吹技术的企业有:济钢、邯钢等。对于串联罐布置形式,国内均是手动喷吹,还未开发出成功的自动喷煤技术。

首钢炼铁厂和首秦公司炼铁部高炉的喷煤系统布置形式为串联罐,目前采用手动调节喷煤。由于人工调节喷煤量的误差,首钢炼铁厂喷吹量有时误差达到15%以上,带来高炉喷煤量的不均匀,严重影响了高炉热制度稳定,不利于高炉产量及煤比的进一步提高。这种影响在目前煤比150kg/t-160kg/t的情况下更加明显。因此,进行串联罐高炉自动喷煤技术与开发是非常有必要的。

如今,随着IT业总体水平的提升,软件的思想被融入到各种软件开发技术中。而20世纪60年代开始发展起来的计算机系统工程,是计算机硬件、软件、数据通信装置、数据存储设备、规章制度和有关人员的统一体。它广泛存在于医疗、机械、电力、钢铁冶金及制造业等领域内,在各个领域有着广泛的应用,如计算机辅助设计(CAD)系统、计算机辅助制造(CAM)系统、计算机辅助教学系统、计算机辅助医疗系统、军用的计算机指挥系统、通信软件工程、公用或专用的现代通信系统和信息服务系统都各具特色,管理软件是一类最具代表性的软件工程^[1]。

基于计算机的系统是“某些要素的一个集合,这些要素被组织起来以实现某种方法、过程或借助处理信息进行控制”^[2]。图1-1给出了基于计算机系统的系统

要素及相互之间关系。因此，基于计算机的自动控制软件系统设计，是“计算机系统工程”中的一个活动。它指与构造基于计算机系统有关的过程、方法和技术，它是一种问题求解活动，目的是揭示、分析所期望的功能，并把它们分配到各个单独的系统要求中去。

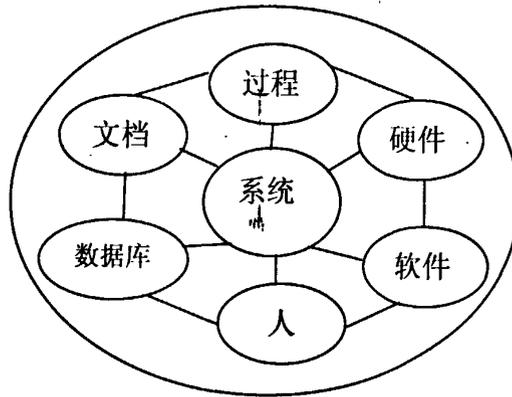


图 1-1 基于计算机系统的系统要素及相互之间的关系

Fig.1-1 Based on computer system's essential elements and relations

高炉喷煤自动控制系统是一个计算机系统工程，它来源于首钢炼铁公司炼铁厂，是由首钢公司炼铁厂自行开发设计的项目。它作为一个计算机系统工程，具有上述的几方面的要素，即喷煤工艺过程、计算机自动控制系统、相关人、硬件系统、控制软件、文档及实时数据库等，它是一个繁杂的大型控制系统，通过计算机系统，将控制软件、数据库及硬件系统等要求有机地结合起完成一定的工艺要求及生产控制过程。

在以往类似的高炉喷煤自动控制软件系统设计中，没有按照软件工程的思想将工程化应用于整个系统的设计过程，并且不能够有效地应用计算机科学、数学及管理科学等原理，构造模型与算法，为系统提供良好的控制功能，以达到提高质量，降低成本，对将来的生产运行过程产生指导性意义的目的，因此，在这种背景下，我们提出了本研究课题，它将对今后的基于计算机系统的工业自动控制软件系统设计发挥有效的促进作用。

1.2 课题研究的意义

当前，钢铁冶金行业遭遇到全球性的原料价格上涨，焦炭、矿石的价格涨幅

惊人，冶炼成本普遍提高，这给高炉炼铁业带来更大的困难。因此，降低冶炼成本成了高炉作业的重要目标。其中，降低焦比，尤其重要。同时国家产业政策对高能源消耗进行了限制，高炉要想在激烈的竞争环境中取得生存和发展，只有努力寻求技术创新和进步，着力降低能耗，提高经济效益，减少和控制污染。

焦炭在高炉内主要有三大作用：提供热量、还原剂和料柱骨架。焦炭生产过程相对复杂，对于原料有特殊要求，由于资源和设备投资方面的因素，这些年来焦炭价格不断上涨，成为炼铁成本上升的主要原因。从高炉风口向高炉的炉内喷吹煤粉，由于具有和焦炭同样的碳素，可以部分替代焦炭，且低廉许多，从而可以在很大程度上降低生铁生产成本。高炉喷煤后，除了焦比大幅度降低外，还给高炉操作增加了一个调剂手段，高炉操作人员可以利用控制喷煤量来控制高炉的热状态；喷煤后，由于煤比焦炭具有更多的挥发分，从而增加了煤气中氢的含量，煤气还原能力增强，有利于发展间接还原，这实际上也是降低焦比的原因之一。一般来说，喷煤会降低风口前理论燃烧温度，这样为进一步提高风温和富氧创造了条件，促进焦比进一步降低。

高炉喷煤就是从高炉风口向炉内直接吹磨细了的无烟煤粉、烟煤粉或两者的混合煤粉，以代替部分焦炭提供热量和还原剂。高炉喷煤后，可以扩展风口前的回旋区，缩小呆滞区；可以降低风口前的理论燃烧温度，有利于提高风温使用水平和富氧鼓风；可以改善高炉炉缸的工作状态，有利于高炉的稳定顺行^[3]。因此，高炉喷煤成为高炉炼铁系统结构优化的核心。

衡量高炉喷煤技术水平的高低，除了要看它的喷煤量高低之外，还要考察它的稳定性。影响高炉喷煤量高低的因素很多，除了喷煤罐罐内压力、输送煤粉的气量之外，还包括喷吹的煤种、喷煤罐内煤粉的温度、贮存时间、贮存量等诸多因素的影响。而喷煤工艺、装备水平、检测手段和自动控制模型则决定了喷煤量的稳定水平。而从某种意义上来说，自动控制软件及其控制模型的设计，在最大程度上制约了喷煤技术的发展水平，成为喷煤生产水平进一步提高的瓶颈。

我国对高炉喷煤技术的开发和应用尽管较早，但从近几年的发展情况来看，已不再处于领先地位，国外不少高炉的喷煤量越来越高，而且多数高炉是喷吹烟煤。目前，我国与日本和西欧一些喷煤先进国家相比，尚有如下几方面的差距：喷煤量和喷煤高炉少，煤焦置换比低，喷吹煤种单一，自动控制水平低，而烟煤

喷吹、浓相输送和单支管计量等虽已开发成功，但还有待于进一步完善和推广。

高炉喷煤技术对于我国钢铁工业乃至国民经济都具有十分重要的意义，而现阶段，我国的软件行业正在如火如荼地发展着，但是无论从规模还是从年限都无法和发达国家相比^[4]。就喷煤生产自动化控制方面而言，我国的大部分企业也都实现了控制功能，但是随着钢铁工业的迅猛发展，在现代喷煤技术中，煤粉喷吹稳定性、喷吹准确性是高炉喷煤量调节操作的基本要求，这对于高炉操作的优化及炉况的顺行有重要的意义^[5]。在高炉喷煤自动控制软件系统设计中，如何实现喷吹的稳定性和准确性，成为喷煤自动控制系统的因素。自动控制首先是基本控制功能的实现，即所控制设备的动作次序等符合工艺的要求；其次是控制模型的设计及应用；再者，是人机交互界面的方便与人性化。而要实现这一过程，最主要的便是控制模型的设计及应用，在欧洲、日本 1989 年已实现 200kg/t.Fe 的高喷煤示范作业，1991 年 5-6 月喷煤量增加到 300kg/t.Fe，目前，正在进行喷煤量目标值为 400kg/t.Fe 的探索试验，取得这些成果的关键因素是其自动化控制水平很高^[6]。目前，我们国内的一些大中型钢铁企业在喷煤生产自动控制方面也投入了大量的资金，但却收效甚微，总结原因，是没有采用一个较好的开发方法与控制模型来设计喷煤自动控制软件。实现一般的开关逻辑控制，不能成为一个成功的自动控制软件系统，目前，高炉喷煤最主要的一个参数，便是小时喷煤量，即每小时喷入高炉内的煤粉量，控制它的稳定性，就成为了喷煤自动控制的关键。

在三高炉喷煤自动控制软件系统的开发设计及调试投运过程中，我们本着先进性和适用性的原则，在实现基本控制功能的基础上，希望能够有效的利用喷煤自动控制模型，为我们的系统提供良好的控制功能，通过模块化的设计和所开发设计的煤量计算模型，使喷煤自动控制系统能够实现均匀、稳定、大喷吹，对将来的生产运行过程产生指导性意义。

本课提是在首钢三高炉喷煤自动控制软件系统开发之际，为了更好的建立高质量的控制程序而提出的。在对软件工程专业知识有了一定的学习和掌握之后，希望在工程项目的全过程中有意识的应用软件工程设计模式来建立高质量的控制系统，按照建立和使用一套合理的工程化原则，将系统化的，严格约束的可量化的方法应用于软件的开发、运行和维护，即将工程化应用于软件^[7]。有针对性地使用结构化方法与面向对象的方法来改善整个系统设计，为系统提供良好的系统架构。在项目进行过程中以及调试投运后，采集大量的实验数据，来分析研究应用

煤量计算模型的高炉喷煤自动控制系统的实际应用及效果。首钢三高炉喷煤自动控制系统设计与开发，为今后类似工程项目开发积累了经验，具有较好的推广应用价值。

1.3 高炉喷煤技术的现状及发展趋势

高炉喷煤是大幅度降低焦比和生铁成本的重大技术措施，是推动炼铁系统技术进步的核心力量。自 80 年代初高炉喷煤技术在世界范围内广泛开发应用以来，世界各国钢铁厂的高炉喷煤量不断地提高。其中西欧、日本等国发展尤其迅猛，在 1993 年左右就有部分高炉的喷煤比达到 200kg/t 铁，在世界处于领先地位，目前部分高炉年均喷煤比已达 160~200kg/t 铁，最高月平均喷煤比达到 210~250kg/t 铁。经过最近十年来的研究和实践，高炉喷煤技术水平日益提高，获得了一大批研究成果。

1) 富氧喷煤技术得到普遍应用。富氧鼓风不仅操作简单，而且还可以充分利用炼钢余氧资源，提高风口前理论燃烧温度，增加喷煤量和生铁产量^[8]。尤其是在目前风温水平难以进一步大幅度提高的情况下，富氧喷煤已成为许多高炉增铁节焦的重要手段，且技术成熟，操作简单，运行费用低，因而应用相当普遍。

2) 氧煤喷吹技术日益成熟。氧煤喷吹技术是 20 世纪 80 年代末期才开始开发并得到应用的一项新技术。通过氧煤喷吹可以显著地改善煤粉颗粒在风口前的燃烧条件，显著提高煤粉的燃烧率，大幅度增加喷煤量^[9]。因此发展氧煤喷吹已经成为喷煤技术的一个发展方向。

3) 喷煤工艺简化，便于监控。传统的制粉系统通常是采用一、二级旋风分离器加布袋除尘器，而最近设计的制粉系统多采用一级旋风分离器加布袋除尘器，或者干脆取消一、二级旋风分离器而采用一级布袋分离器，并应用新型流化技术减少排粉机的数目。

此外，广泛采用新型检测传感器和计算机控制等技术^[10]，不断提高煤粉监视的精确度和诸如温度、氧浓度、CO 浓度等参数的在线监测水平，这样既能实现喷煤量的均匀调节，也能增加系统的严密安全连锁控制。

4) 粒煤喷吹和配煤混合喷吹技术引人注目。粒煤通常是指粒径在 0.2~2mm 之间（平均粒度约 0.6mm）的颗粒煤^[11]。粒煤喷吹可以获得较好的经济效益，同煤粉制粉相比仅磨煤系统设备投资就可节约一半，且粒煤制备的成本也很

低。配煤混合喷吹是以煤种性能的互补性为基础,旨在改善喷吹煤粉特性如可燃性、可爆性等,以促进喷煤效果而采用的一种喷煤技术。迄今国内外许多学者都进行了配煤混合喷吹方面的基础研究,有些成果已在一些高炉喷吹实践中得到了应用,是一种具有推广价值的高炉喷吹新技术^[12]。

事实上,随着喷煤技术的不断发展,许多相关的或与喷煤并用的技术都取得了重大进展。这些技术涉及到了诸如煤粉的浓相输送技术、煤粉在高炉内气化燃烧及炉况调节等的基础研究、喷煤高炉数学模型及计算机控制等^[13]。

进入 21 世纪,随着各行业的高度发展,对能源需求将更加提高。高炉冶炼技术也要适应这种要求,朝着进一步节约能源和减少环境污染的方向发展。以上述要求为中心,对高炉喷煤技术提出了更新更高的要求,重点发展了以下几项技术:

1) 超量喷吹煤粉

近年来,国外一些先进高炉喷煤量已达到 200kg/t 以上,如荷兰霍高文高炉 1997 年月平均喷煤量 210kg/t,日本钢管福山厂 4 号高炉 (4288m³) 1994 年 10 月喷煤量达 218kg/t,日本神户制钢加工厂 1 号高炉 1998 年 3 月喷煤量已达到 254kg/t。我国高炉喷煤量近年来也有较大提高,1998 年重点企业高炉平均喷煤量已达到 109kg/t,宝钢三座高炉喷煤量已先后达到 200kg/t,其中一号高炉已达到 250kg/t。但绝大多数高炉喷煤量只有 100kg/t 左右,距世界先进水平尚有较大差距。按 21 世纪发展高炉喷煤技术的要求,大部分高炉喷煤量应达到 200kg/t,一些条件较好的先进高炉应达到 250kg/t 以上,使高炉喷煤量等于甚至超过焦炭使用量。达到上述要求,每年可少用焦炭 600-700 万吨(折合焦煤 1200~1400 万吨),相当于少建 15~20 座大型焦炉,将产生巨大的经济效益和环境效益。要达到这个水平,首先需要改进高炉原燃料质量,提高焦炭强度,降低焦炭灰分,提高入炉矿石品位,降低渣量,改善烧结,球团矿冶炼性能,其次提高喷煤装备和控制水平,改进喷吹工艺,等等。

2) 喷吹回收的废旧塑料

随着人们生活水平提高,生活垃圾产生量日益增加。我国仅北京、上海两市每年产生生活垃圾约 1000 万吨,其中废旧塑料约 80~100 万吨,如能从生活垃圾中分离出废塑料,经粉碎后喷入高炉,将为废塑料处理开辟一个新途径。

近年来,德国、日本开始向高炉喷吹废塑料。由于塑料基本上是 C-H 化合物,塑料中灰分含量<1%、比煤粉灰分(10%~15%)低得多。喷吹 1kg 废塑料,至少

相当于 1.2kg 煤粉，而且使高炉冶炼每吨铁的渣量降低，喷吹废塑料 100kg/t，可降低渣量 30~40kg/t。废塑料的发热值与煤粉比较约高 47%。

塑料与煤粉主要成分及发热值比较：

| % | C | H | O | A(灰分) | QM (J/kg) |
|----|------|------|-----|-------|-----------|
| 塑料 | 84.3 | 12.6 | 1.2 | 0.3 | 43.2 |
| 煤粉 | 74.1 | 4.7 | 8.5 | 10.4 | 29.3 |

大部分废塑料的主要成分为乙烯 (C₂H₄)，从风口喷入后，在热风 and 2000℃ 的高温下迅速分解，气化为 CO 和 H₂，参加高炉内的还原反应。由于高炉自身的热效率高达 80%，废塑料喷入高炉其热能利用率达 80%，而一般焚烧炉的热效率只有 30%~40%。另外，从环境保护方面看，高炉是一个密闭系统，废塑料在高炉内分解、气化和参加还原反应，从炉内排出，产生对环境有害的二恶烷 (Dioxine) 只有 <0.001Ng/m³，远远低于焚烧炉废气中二恶烷含量 0.1 Ng/m³。因此，将废塑料粉碎后喷入高炉，仅从北京、上海两市城市垃圾中回收废塑料 80~100 万吨，可代替煤粉 96~120 万吨，与焚烧炉处理比较，热效率更高，对环境产生的二次污染最小，可以说是处理废塑料的最佳途径。

1993 年以来，德国不来梅钢铁厂先后在两座高炉上试验喷吹废塑料粉，1996 年 8 月喷吹废塑料量已达到 5000t/m，德国环保部认为完全符合环保标准的要求。日本钢管公司 1996 年 10 月在京浜厂 4093m³ 高炉建成喷吹废塑料装置，喷吹废塑料成功。川崎、神户制钢也在建喷吹废塑料装置，并拟对部分含氯塑料先期处理，脱氯后再喷入高炉。日本钢铁联盟宣布，到 2010 年废塑料的喷吹量要达到 100 万吨。

3) 高炉喷吹粒煤

高炉喷吹粒度 2mm 左右的粒煤，与传统的喷吹粉煤 (<74μm 占 80%) 相比有许多优点。首先煤粉磨煤机的投资大，每台高达 200~300 万元以上，粒煤粉碎机则不会超过 100 万元，改为喷粒煤可节约大量投资；其次加工粒煤消耗电能比粉煤约低 30%~40%，另外，粒煤与粉煤相比，不如粉煤易燃、易爆，有利于安全喷吹。

近年来，法国的洛林厂也喷吹粒煤成功。1996 年美国伯利恒公司 C 高炉从英国引进技术，1998 年粒煤喷吹量已达到 136kg/t。因此，高炉喷吹粒煤应是高炉喷煤技术的发展方向之一。

4) 高炉喷吹含铁粉料

为适应 21 世纪冶炼纯净钢的需要,高炉应为炼钢提供低硅低硫铁水,要使铁水含硅量降低到 0.15%,只靠高炉操作人员用常规的调节操作方法难以达到。为此,日本等国已先后在高炉风口喷吹含铁粉料(如铁矿粉、烧结粉尘等)冶炼低硅铁成功。

高炉喷吹含铁粉料,抑制炉缸内硅的还原,以便在不降低铁水温度的条件下,冶炼出含硅 0.15% 以下的低硅铁水,为炼钢冶炼高级钢创造条件,另外,降低铁水含硅量还有利于炼钢降低造渣量消耗,延长转炉炉龄等好处。

近年来高炉喷煤系统采用高新技术有:

1) 风口喷煤量在线计量

在高炉喷煤系统中,煤粉输送是气流与煤粉两相流在管道中以较高速度流动,在线测量管道中煤粉的瞬时流量难度相当大,目前国内外已有的压差测量法,电容噪声法,相关电容法等,其测量误差都相当大,建议采用激光透射法,即在管道两侧分别装设激光发射及接收装置,测量激光通过管道内煤粉后不同煤粉浓度时激光强度的变化,以确定煤粉流量。

2) 微机自动控制喷煤量

在高炉喷煤量达到 200kg/t 甚至 250kg/t 以上时,煤粉在高炉燃料中所占的比例达 40%~50% 甚至更高。因此,实现微机自动控制喷煤量是大量喷吹煤粉所必需,也是进一步实现微机闭环控制高炉冶炼过程所必需。

微机控制作为一种通用技术,已是一种很成熟的控制方法,但是实现微机自动控制喷煤量,必须解决两个关键问题:一是连续和准确地计量煤粉喷吹总量,以便为微机控制提供准确的信号,尤其是对于串联罐系统的连续计量仍是一个有待解决的问题;二是连续和准确地调节煤粉喷吹量的调节装置,该装置并能及时接受微机的指令进行调节。

上面是指对喷吹总量的自动控制,如果在此基础上再对各风口的喷煤量进行控制,除了要具有前述风口喷煤量在线计量,还需要测定各风口的热风流量,高炉风温高达 1200℃ 以上在线计量有相当的难度。在实现各风口热风流量的在线计量和各风口喷煤量的在线计量,并将各自的测量信号输给微机、再由微机发出控制指令调节各风口的喷煤量。

3) 高炉风口图像显示系统

高炉风口是高炉唯一可以从外面窥视高炉内部的窗口, 历来高炉操作人员将其视为观察高炉冶炼状况的重要手段。在高炉喷吹煤粉的情况下, 观察风口还可以观察煤粉输送状况, 及时发现某个风口因管道堵塞而中断喷煤, 并及时处理。另外, 还可根据风口亮度等判断煤粉在风口内的燃烧状况。大型高炉风口数量多达 30~40 个, 为了及时了解风口的有关状况, 有必要研制高炉风口的图像显示系统。

1.4 本文主要工作

喷煤工艺系统中常常以每小时的喷煤量反映喷吹能力的大小及均匀性, 而传统的喷煤自动控制软件设计, 不能按照一定的开发模型进行系统的开发, 缺乏一个有效的数学模型控制喷煤量, 导致喷煤系统控制不能真正达到均匀、稳定。本文结合首钢三高炉喷煤自动控制软件系统的设计与开发项目, 应用软件工程的思想, 利用统计学多元回归原理, 采用结构化方法, 提出了一种新的煤量控制算法模型, 并完成了高炉喷煤自动控制软件系统的开发, 采用建模工具 MATLAB 对控制效果进行了测试。具体而言, 论文的研究内容主要有:

1) 针对高炉喷煤串罐工艺自动控制系统的特点, 实际应用领域和背景, 深入分析了传统的喷煤控制软件系统, 归纳总结出系统设计与开发的难点和特点, 并针对难点和特点, 结合系统工艺, 确定了本系统的难点和特点, 并针对难点和特点, 结合系统工艺, 确定了系统的软硬件平台。

2) 针对喷煤串罐工艺自动控制系统中的关键控制数据“喷煤量”, 即喷煤量的控制难题, 倒罐过程喷煤量的均匀性问题, 利用结构化分析技术, 建立了小时煤量计算模型, 应用输入——处理——输出 (IPO) 模型及数学分析原理提出实时煤量计算模型算法思路, 并在整个系统设计与开发中得到具体应用。

3) 采用多元线性回归分析方法建立喷煤量计算和控制模型, 解决多变量动态输入及多输出策略控制难题。

4) 自动控制系统的具体设计及实现。包括系统硬件工程及软件工程的设计及实现。整个系统按照瀑布模型进行开发, 并应用所设计的煤量计算模型, 解决了工艺系统中没有气固两相流测量元件的问题, 同时, 对喷煤量的均匀稳定控制起到了关键作用。系统针对新型工艺控制方式, 采用结构化方法进行下位程序设计, 模块化分减少耦合, 采用面向对象技术进行基于控件的人机监控画面的开发, 界

面具有通用性、方便性特点，并能够连入整个高炉控制系统局域网，实现重要数据信息的共享，通讯速率高，控制程序效果良好，符合工艺要求。

第二章 高炉喷煤工艺与控制

2.1 喷煤工艺介绍

2.1.1 喷煤系统的组成

高炉喷煤工艺流程包括原煤贮运系统、制粉系统、煤粉的输送、喷吹系统、供气系统、煤粉计量、控制系统等。工艺流程如图 2-1 所示。

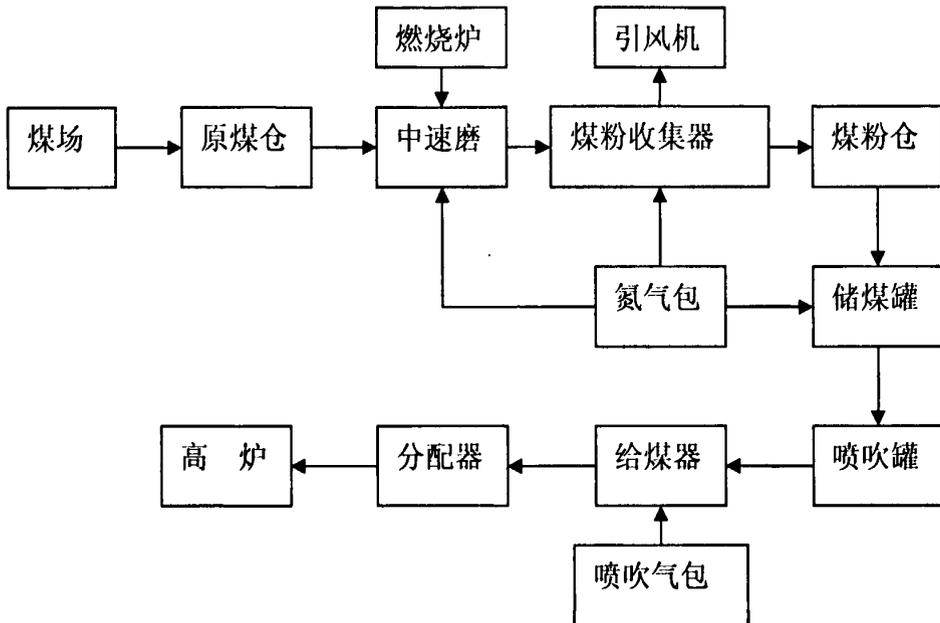


图 2-1 喷煤工艺流程框图

Fig.2-1 The flow diagram of the pulverized coal injection

1) 原煤贮运系统

该系统应包括综合煤场、煤棚、贮运方式。

综合煤场的设计,一般要充分考虑能分别堆放两种或两种以上原煤及其他喷吹物,并方便存取或按工艺需要进行配煤作业。

煤棚主要用于原煤的风干,以便于制粉,其设置应尽可能靠近制粉车间。

煤场与煤棚间的运输方式可以采用火车、汽车或皮带,而煤棚至制粉间通常采用皮带运输。

为控制原煤粒度和除去原煤中的杂物,在原煤贮运过程中还须设置筛分破碎装置和除铁器^[14]。

2) 制粉系统

煤粉制备是通过磨煤机将原煤加工成粒度和含水量均符合高炉喷吹需要的煤粉。

制粉系统主要由给料、干燥与研磨、收粉与除尘几部分组成。在烟煤制粉中，还必须设置相应的情化、防爆、抑爆及监测控制装置。

3) 煤粉的输送

煤粉的输送有两种方式可供选择，即采用煤粉罐装专用卡车或采用管道气力输送。依据粉气比的不同，管道气力输送又分为浓相输送($\mu > 50 \text{ kg / kg}$)和稀相输送($\mu = 10 \sim 30 \text{ kg / kg}$)。

4) 喷吹系统

喷吹系统由不同形式的喷吹罐组和相应的钟阀、流化装置等组成。

煤粉喷吹通常是在喷吹罐组内充以压缩空气，再自混合器引入二次压缩空气将煤粉经管道和喷枪喷入高炉风口。

喷吹罐组可以采用并列式布置或采用重叠式布置，底罐只做喷煤罐。

5) 供气系统

高炉喷煤工艺系统中主要涉及压缩空气、氮气、氧气和少量的蒸汽。

压缩空气主要用于煤的输送和喷吹，同时也为一些气动设备提供动力。

氮气和蒸汽主要用于维持系统的安全正常运行。

氧气则用于富氧鼓风或氧煤喷吹^[15]。

6) 煤粉计量

目前煤粉计量主要有喷吹罐计量和单支管计量两大类。

喷吹罐计量，尤其是重叠罐的计量，是高炉实现喷煤自动化的前提。

单支管计量技术则是实现风口均匀喷吹或根据炉况变化实施自动调节的重要保证。

7) 控制系统

高炉喷煤系统广泛采用了计算机控制和自动化操作。

控制系统可以将制粉与喷吹分开，形成两个相对独立的控制站，再经高炉中央控制中心用计算机加以分类控制；也可以将制粉和喷吹设计为一个操作控制站，集中在高炉中央控制中心，与高炉采用同一方式控制。

2.1.2 喷煤工艺流程的分类及特点

1) 按喷吹方式分:

直接喷吹和间接喷吹。

直接喷吹方式是将喷吹罐设置在制粉系统的煤仓下面,直接将煤粉喷入高炉风口,高炉附近无需喷吹站。其特点是节省喷吹站的投资及相应的操作维护费用。

间接喷吹则是将制备好的煤粉,经专用输煤管道或罐车送入高炉附近的喷吹站,再由喷吹站将煤粉喷入高炉。其特点是投资较大,设备配置复杂,除喷吹罐组外,还必须配制相应的收粉、除尘装置。

2) 按喷吹罐布置形式分:

并列式喷吹和串罐式喷吹。

为便于处理喷吹事故,通常并列罐数最好为3个。并列式喷吹若采用顺序倒罐,则对喷吹的稳定性会产生一定的影响;而采用交叉倒罐则可改善喷吹的稳定性,但必须配备精确的测量和控制手段。另外,并列式喷吹占地面积大,但喷吹罐称量简单,投资较重叠式的要小。因此,常用于小高炉直接喷吹流程系统。

串罐式喷吹是指将两个主体罐重叠设置而形成的喷吹系统。其中,下罐也称为喷吹罐,它总是处于向高炉喷煤的高压工作状态。而上罐也称为加料罐,它仅当向下罐装粉时才处于与下罐相连通的高压状态,而其本身在装粉称量时,则处于常压状态。装卸煤粉的倒罐操作须通过连接上下罐的均排压装置来实现。根据实际需要,串罐可以采用单系列,也可采用多系列,以满足大型高炉多风口喷煤的需要。串罐式喷吹装置占地小,喷吹距离短,喷吹稳定性好,但称量复杂,投资也较大。这种喷吹装置是目前国内外大型高炉采用较多的一种喷吹装置。

3) 按喷吹管路形式分:

多管式喷吹和单管路加分配器方式喷吹。

(1) 多管方式喷吹,是指喷吹罐直接与同风口数目相等的支管相连接而形成的喷吹系统。一般一根支管连接一个风口。其主要特点有:

① 每根支管均可装煤粉流量计,用以自动测量和调节每个风口的喷煤量。其调节手段灵活,误差小,有利于实现高炉均匀喷吹和大喷煤量的操作调节。

②喷吹距离受到限制, 一般要求不超过 200~300 m。这是因为在喷吹距离相同的条件下, 多管方式的管道管径小, 阻力损失大, 过长的喷吹距离将导致系统压力的增加, 从而使压力超过喷吹罐的允许罐压极限。

③单支管流量计数目多, 仪表和控制系统复杂, 因此投资亦较大。

④支管数目多, 需要转向的阀门太多, 因此多管喷吹仅适用于串罐方式, 而不适用于并列式。

(2) 单管加分配器方式, 是指每个喷吹罐内接出一根总管, 总管经设在高炉附近的煤粉分配器分成若干根支管, 每根支管分别接到每个风口上。其主要特点有:

①一般在分配器后的支管上不装流量计, 通过各风口的煤粉分配关系在安装试车时一次调整完毕, 因此不能进行生产过程中的自动调节。此外, 通过分配器对各支管煤粉量的控制精度不仅取决于分配器的结构设计, 而且还受运行过程中分配器的各个喷嘴不等量磨损的影响。因此, 需要经常加以检查和调整。

②系统的阻力损失较少, 喷吹距离可达 600 m。

③支管不必安装流量计, 控制系统相对简化, 投资较少。

④对喷吹罐的安装形式无特殊要求, 既适用于并列式, 又可用于串罐式。

2.2 首钢三高炉喷煤系统介绍

首钢是我国高炉喷煤的先行者, 早在1966年, 首钢1号高炉的月平均喷煤量就达到279 kg / t, 创造了当时的世界记录。但在后来的30年中, 首钢喷煤技术的发展停滞不前, 其工艺和装备已远远落后于国内外先进水平。1996年以前, 首钢喷煤全部采用球磨机集中制粉、仓式泵输送、串联罐多管路间接喷吹的工艺。喷吹煤种为单一无烟煤。由于喷煤的工艺及装备水平落后, 首钢喷煤比在过去30年中一直在100 kg / t以下徘徊。1997年, 首钢在5号高炉对一个喷煤系列进行技术改造, 采用了串联罐喷吹总管加分配器的喷吹技术, 并试用了可调煤粉给料机、盘式分配器等新设备。其后, 在喷煤系统中也陆续进行了如流化喷吹、高温合金喷煤枪、喷煤支管测温测堵等新技术的试验研究。2000年, 首钢2号和3号高炉建成中速磨制粉、一次布袋收粉、串联罐单管路喷吹、炉前分配器的新喷煤系统。该系统按喷吹烟煤设计, 设计喷煤比200 kg / t。喷吹总管长度分别达到358 m(3号)和452 m(2号)。投产后, 2号和3号高炉在不富氧的条件下, 最高月均喷煤量

达到170 kg / t，进入国内大型高炉的先进行列。

三高炉喷煤系统的主要工艺控制图如图 2-2所示，三高炉喷煤系统采用的串罐方式向高炉喷吹煤粉。主要由煤粉仓、储煤罐、喷煤罐、给料器及各控制阀组成。粉仓电子秤的量为 0~125t，不设定压力；储煤罐电子秤的量为 0~25t，储煤罐压力范围为 0~0.85MPa；喷煤罐电子秤的量为 0~30t，喷煤罐压力范围为 0~0.85MPa。

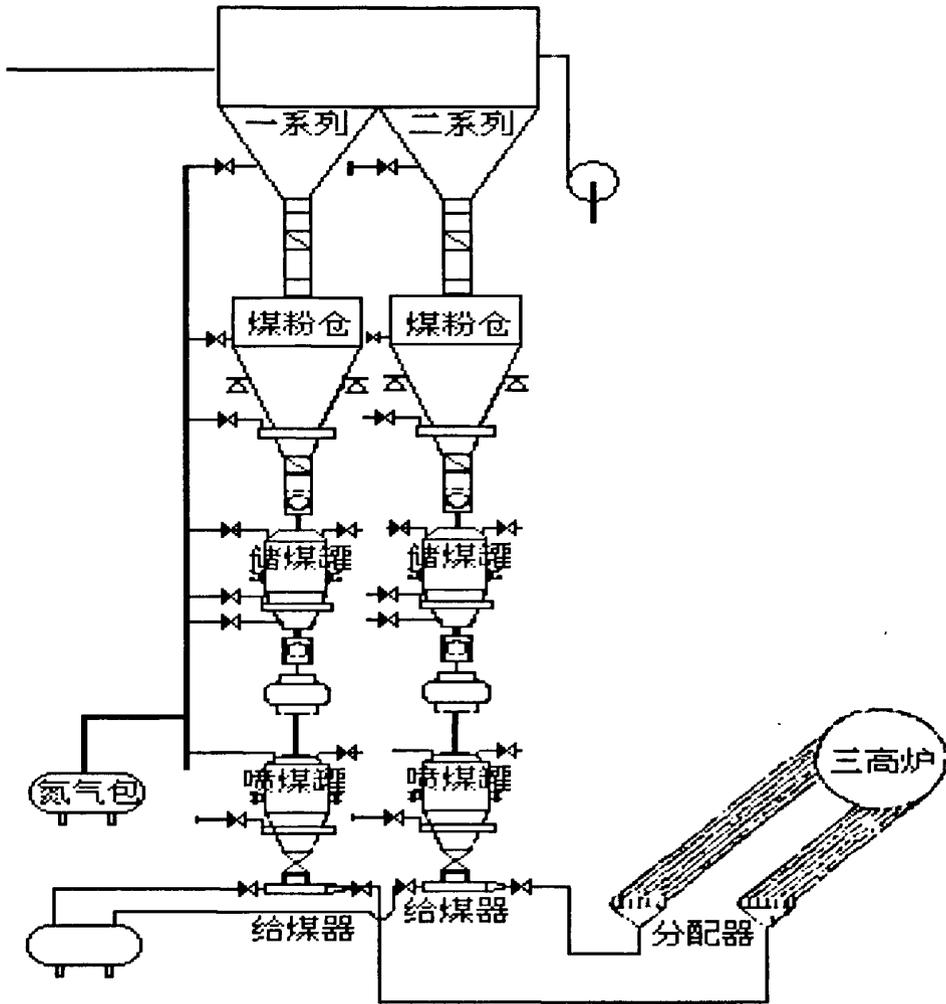


图 2-2 首钢三高炉喷煤主要工艺控制图

Fig.2-2 The main control diagram of the 3# BF pulverized coal injection in SHOUGANG

2.3 首钢三高炉喷煤系统目前存在的问题

首钢炼铁厂三高炉喷煤和二高炉喷煤是 2000 年底投运的，串罐两系列布置工艺，每个系列配置 125 立粉仓一个，25 立储煤罐一个，30 立喷煤罐一个，罐

与罐间采取软连接，输煤总管上装有给煤机，可调范围 2~40 吨/小时，带 15 个支管。设备使用至今，软连接已经不能起到应有的作用，所以在储煤罐充压和放散过程中，对储煤罐重量及喷煤罐重量都有影响，具体影响规律比较难找；粉仓中煤粉重量不同时，对储煤罐及喷煤罐重量均有影响，具体影响规律比较难找；喷煤罐不同压力对喷煤罐的重量影响规律也没有发现；另外，煤粉喷吹过程中，没有任何煤粉流量检测设备，因而，在整个喷煤过程中，各个罐的重量并不能完全反应煤粉在各个罐的实际重量，实际喷入高炉的煤粉量也没有一个完全准确的值。由于软连接存在硬化和充压时产生的浮力影响，造成储煤罐和粉仓称量值漂移，二系列比一系列漂移的尤为严重，同时给煤机实际开度跟踪给定值的误差也较大，一系列约 3~5%，二系列约 1~3%，所以一直手动向高炉喷煤。

目前喷煤控制系统主要存在以下问题：

- 1) 喷煤量没有在线计量设备，不能直接掌握喷煤量的大小；
- 2) 由于波纹器连接存在硬化情况以及充压时产生的浮力影响，造成储煤罐和粉仓称量值漂移，二系列比一系列漂移的尤为严重，造成计量不准确；
- 3) 系统手动控制，可调给煤器实际开度跟踪给定值的误差较大，一系列约 3~5%，二系列约 1~3%，不能实现准确控制；
- 4) 各种数据依靠手工抄表，没有连续趋势记录；
- 5) 系统不能获取炉况数据，所以只能通过对一段时间内炉况变化趋势，人为决定增减喷煤量并手动控制向高炉喷煤。

以上情况造成喷煤量不精确，喷煤过程中煤粉分配不均匀等，无法实现稳定、均匀、连续大喷吹的目标，并直接影响高炉的稳定运行。

第三章 高炉自动喷煤控制系统设计

3.1 引言

首钢炼铁厂三高炉于 1993 年投产，容量 2536m^3 ，日产铁水达到 6500 吨以上。2000 年，建成中速磨制粉、一次布袋收粉、串联罐单管路喷吹、炉前分配器的喷煤系统。该系统按喷吹烟煤设计，设计喷煤比 200 kg/t 。喷吹总管长度分别达到 358 米。投产后在不富氧的条件下，最高月均喷煤量达到 170 kg/t 。由于目前高炉的生产成本较高，为了使大高炉生产指标更上一个新台阶，迫切要求高炉喷煤自动控制系统的投入。

根据首钢炼铁厂三高炉喷煤系统电气设计，除贮运、制粉系统等具有相关工艺检测仪表参数，喷吹自动控制系统设有罐重、罐压、罐温、二次风压力、流量等仪表检测参数，没有设计主喷煤管道及各支管的煤粉测量装置。目前，煤粉计量主要有两类，即喷吹罐计量和单支管计量。单支管计量技术是实现风口均匀喷吹或根据炉况变化实施自动调节的主要保证；喷吹罐计量，是高炉实现喷煤自动化的前提。实现煤粉计量的连续化和提高煤粉计量的准确性是煤粉计量技术的发展方向。本课题中，煤粉计量通过小时喷煤量参数反映，它是高炉操作人员掌握和了解喷效果，并根据炉况变化实施调节的重要依据，小时喷煤量的高低及均匀性，直接反映了高炉喷煤技术的发展水平。

随着喷煤量的增加，喷煤系统的设备启动频率增高，操作间隙时间减少，喷吹操作周期缩短，手动操作已不能适应生产要求，尤其是当高炉喷吹烟煤或采用多煤种配煤混合喷吹时，高炉喷煤系统广泛采用计算机控制和自动化操作。根据首钢炼铁厂三高炉本体部分的自动控制系统设计，本课题所研究项目将采用一个 PLC 控制站，采用 C/S 结构，集中在喷煤控制系统中心，与高炉本体采用同一方式控制。

传统喷煤自动控制软件系统的设计，往往没有根据软件生命周期过程及遵循较好的开发模型来进行软件的开发设计，导致所设计的软件没有好的应用效果。而工业自动控制系统软件，与传统狭隘意义上的软件既有一定的相同之处，也存在一定的不同。工业自动控制系统软件是主要为完成一定的生产工艺要求而进行的程序设计，它属于基于计算机的系统工程。如果只是一个简单的功能实现过程，这样产生的软件系统勉强能满足生产的基本要求。而这次开发设计的高炉

喷煤自动控制软件系统,要实现无直接检测手段情况下的煤粉的计量,同时,应用此结果,参与PID回路控制模型,使其能够满足喷煤工艺系统的需求,另外,如何使设计的系统具有良好的软件架构,易维护、易理解,是应用一定开发技术实现控制系统软件设计的难点。

根据高炉喷煤工艺设计的要求,这次设计开发的控制软件系统与传统的控制软件系统具有很大的不同特点:

1) 工艺控制方式不同。首钢炼铁厂三高炉喷煤工艺与以往的喷煤工艺有很多的不同点,一是采用了串罐喷煤工艺。串罐工艺设备占地少,能实现连续、大喷吹,但设备相关性高,影响量多,控制复杂。二是其制粉系统采用的是中速磨,而以前的系统中采用的是球磨机,中速磨的控制很严格,需要考虑到多种情况的安全保护,以防止设备的损坏。三是新工艺中的贮运系统中采用了称重给料机,来进行多煤种的配比,配比比例控制是新系统的功能。四是新工艺中具有多个回路调节,如主排粉风机流量回路调节、炉膛温度回路调节、稳压回路调节、氮气包压力调节,给煤气开度调节回路等。

2) 采用的技术不同。首钢炼铁厂三高炉喷煤自动控制软件系统采用了结构化方法进行下位控制软件的设计,并且根据使用的软件特点,使用面向对象及基于控件的设计方法设计了上位机监控人机界面系统,由于采用了控件技术及类方法,使设计的工作量大大减轻。

3) 设计模式不同。首钢炼铁厂三高炉喷煤自动控制软件系统是基于计算机的系统工程,传统工业控制软件设计往往只是简单地根据工艺实现控制功能要求,在设计的过程中没有按照一定的设计模型进行设计,导致所设计的软件不能很好地满足工艺需求,而且在运行后产生很大的维护量。本次设计的首钢炼铁厂三高炉喷煤自动控制软件系统是严格按照变异的瀑布模型进行设计,在设计各个阶段均按照软件工程的思想进行,并按照基于计算机系统的软件开发周期进行系统开发^[16]。

4) 采用新型煤量计算模型。喷煤自动控制系统的最终目的是要实现均匀、稳定的煤粉喷吹。而如何实现煤粉的均匀与稳定,有多种因素,除了工艺设备的设计与安装外,最重要而最直接的是煤粉的计量,也就是小时煤量控制。小时煤量即每小时喷入高炉风口的煤粉总量,实现它的计量检测方法一般是采用煤粉流量计。而本系统采用多元线性回归的分析方法,构建喷煤量计算和控制模型,通过模型计算,得出准确的喷煤量以及实现目标喷煤量的控制策略,实现在没有

在线计量设备条件下,完成喷煤量准确控制。

3.2 控制系统的总体设计

3.2.1 系统的需求分析

一个没有明确目标的项目,是不可能明确地实现其目标的^[17]。首钢三高炉喷煤自动控制系统,其目标就是要完成三高炉喷煤系统自动控制,实现高炉喷煤均匀、稳定、大喷吹的目标。

信息的收集是需求分析的基础^[18]。在系统设计之前,通过以下方面掌握和收集相关信息:首先总结原系统存在的问题,将其改进方案纳入新系统中;其二,向操作人员咨询,掌握有关系统功能要求上的详细情况;其三,到宝钢、武钢等钢铁厂考察其高炉喷煤控制系统应用情况,对其中优缺点进行总结,做到扬长避短;其四,由炼铁厂技术部门提供的详细需求功能说明。在掌握相关需求信息的基础上,进行系统分析,并形成可行性研究报告及控制系统功能说明书。

对目前使用的喷煤设备进行改造,解决波纹管连接存在硬化状况;对可调给煤器开度进行调校,解决控制精度问题;对静态的煤粉仓、储煤罐、喷煤罐的称重检测装置进行调校,以满足准确计量要求;对动态的称重计量开发数字模型,解决入炉煤粉精确计量问题。最终实现自动喷吹。

为确保本项目具有推广价值,除了能够实现串联罐的自动喷吹之外,还要尽可能的提高喷吹的精度,计算出气固比。具体目标如下:

- 1) 上煤系统设备自动控制,包括上煤胶带机、上煤皮带机、犁式卸料器和原煤仓之间的连锁、煤粉收集器等。
- 2) 干燥气供应系统自动控制,包括干燥气温度调节、高炉煤气流量调节、助燃空气流量调节、燃烧炉点火、助燃风机连锁等。
- 3) 磨煤制粉系统自动控制,包括原料仓料空料满控制、给煤机给煤量自动调节、中速磨自动控制等。
- 4) 喷吹自动控制,包括自动装煤、自动倒罐、喷煤量计算及自动调节等。
- 5) 实现连续均匀喷吹,煤粉喷吹量实时误差(实际喷煤量与设定喷煤量之差)控制在 $\pm 100\text{kg}/\text{min}$ 范围内,力争达到 $\pm 50\text{kg}/\text{min}$ 范围内;
- 6) 根据高炉工长要求,由喷煤工输入设定值,通过模型计算后,由 PLC 控制调节给煤器开度,对喷煤量进行实时 PID 控制;
- 7) 对全参数、全数据进行存储,至少可以查询一周的数据。

3.2.2 系统总体设计

根据功能和技术要求，首钢三高炉喷煤自动控制系统总体设计采用三级网络设计：

零级：Profibus-DP 网络，实现 PLC 与分布式 I/O 站之间快速数据交换；

一级：Profibus-FMS 网络，实现 PLC、上位监控机（HMI）之间数据交换；

二级：以太网，实现数据服务器与上位监控机（HMI）之间数据交换。

控制系统由若干西门子 S7-400、S7-300 控制器及 ET-200M 分布式 I/O，通过 DP 网络，以 1.5Mbps 的速率实现 PLC 与 ET-200M 的快速数据交换，完成现场数据采集和连锁控制功能；两台安装有 iFIX 3.5 监控软件的操作员站（其中一台装有西门子 STEP 7 V5.3 软件，调试是做工程师站用），分别用于喷煤系统、制粉系统监视控制；一台安装了 SQLserver 数据库的数据采集处理数据服务器，实现喷煤模型控制等几个部分组成。系统的基本组成示意如图 3-1 所示。

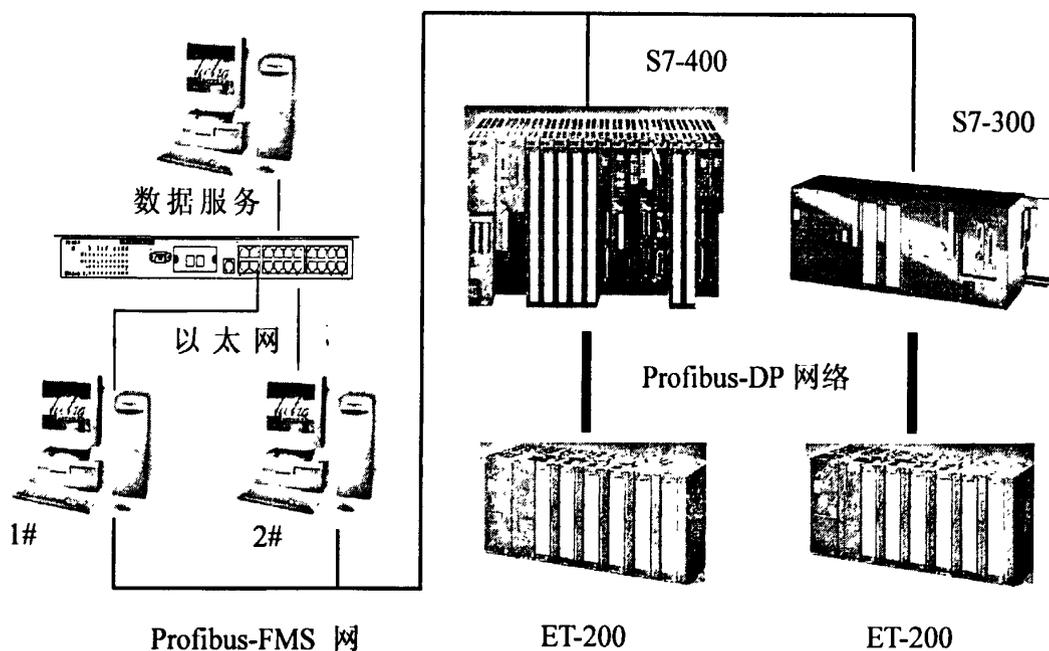


图 3-1 系统基本组成示意图

Fig.3-1 System basic composition schematic drawing

采用 Windows 2000 Professional 操作系统平台。

数据服务器使用 VB 系统开发工具软件，实现喷煤模型控制；安装了 SQL Server 2000 数据库软件，能够记录 IFIX 监控数据，并进行数据交换；并安装了 INTOUCH 相关软件，能够记录喷煤系统数据，形成历史趋势，便于观察数据。

下位控制程序设计工具采用西门子 STEP 7 V5.3; HMI 上位监控画面设计工具采用 Intellution iFIX 3.5 版监控软件。基本按照功能需求进行模块划分, 模块间尽量减少耦合。对于控制功能要求相同的设备, 利用软件重用技术, 简化程序设计。所有控制设备对象均设计三种控制方式: 现场就地控制、HMI 手动控制与自动模型控制。

实现全部过程检测信号的显示即, 重点信号的报警、连锁及历史趋势记录。

3.3 控制系统的详细设计

3.3.1 系统硬件设计

三高炉喷煤系统硬件采用西门子公司 S7 系列 PLC, CPU 采用 CPU 414-2 和 CPU 315-2, 分布式 I/O 采用 ET-200。三级网络及硬件设备配置如图 3-2 所示。

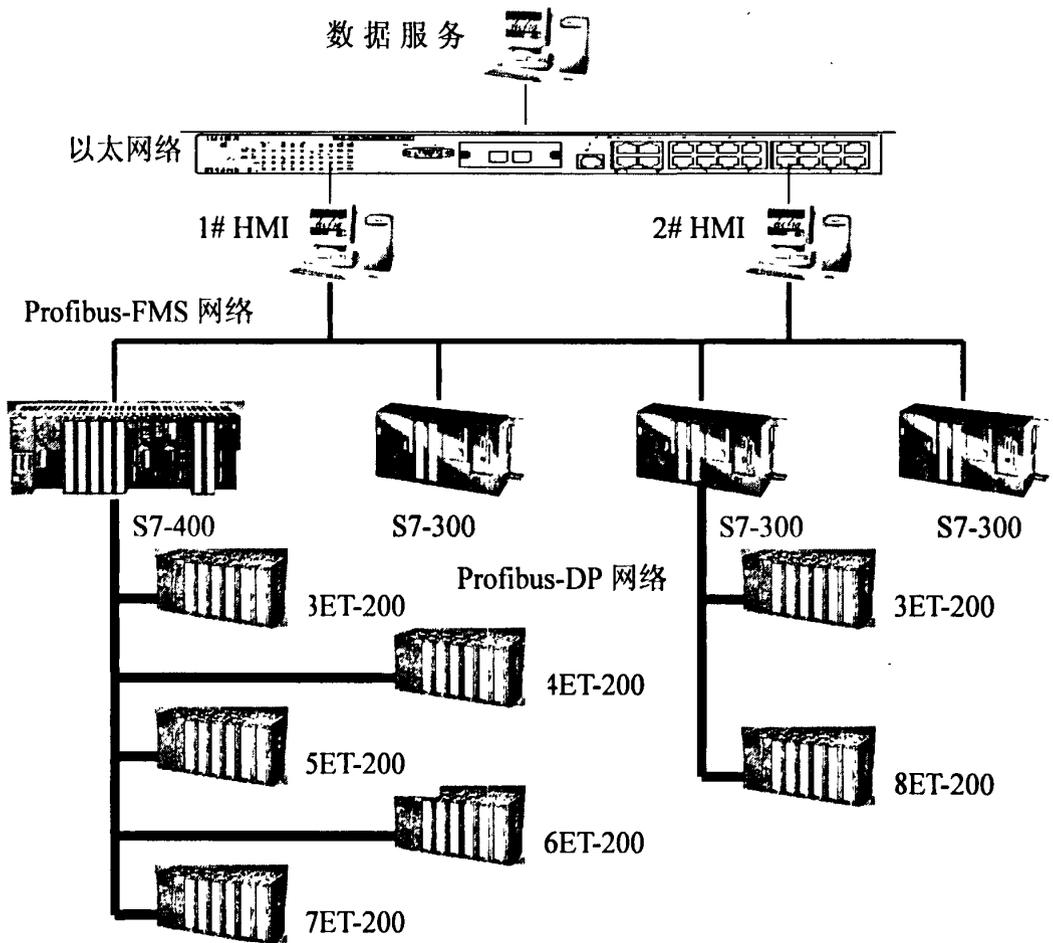


图 3-2 系统三级网络及硬件设备配置图

Fig.3-2 System third-level network and hardware equipment disposition chart

其中, S7-400 高炉喷煤控制系统主要控制器; S7-300 (1) 是 1#中速磨煤粉收集器控制系统的主要控制器, 它带有 5 个 ET-200M 分布式 I/O; S7-300 (2) 是公共系统 N2 压力、流量调节及从料厂到原煤仓的 5 条皮带控制系统的主要控制器, 它带有 2 个 ET-200M 分布式 I/O; S7-300 (3) 是 2#中速磨煤粉收集器控制系统的主要控制器。

考虑到喷煤系统煤粉易燃易爆的特点, 在硬件设备的选型上选用了防尘、防暴性能优良的设备。为满足系统安全可靠运行的要求, 开关量模块选用 24V 直流供电类型的模块, 并采用继电器隔离、安全栅等安全设计。

整个系统实际 I/O 点数为 610 点: 开关量 410 点, 模拟量 200 点。设计时考虑在机架模块配置上保留一定的余量, 以备将来扩充时使用。

首钢三高炉喷煤控制系统的 PLC 模块配置 S7-400 部分具体见表 3-1。

表 3-1 S7-400 模块配置表

Table 3-1 S7-400 module disposition table

| 槽号 | 模块类别 | 模块序列号 | 地址范围 | 模块说明 |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------|---------------------------------------|
| MPI=19 DP=2 | | | | |
| | UR1 | 6ES7 400-1TA01-0AA0 | | Universal rack, 18 slots |
| 1 | PS 407 10A | 6ES7 407-0KA01-0AA0 | | AC power supply 120/230 V / 10 A |
| 3 | CPU 414-2 DP | 6ES7 414-2XG03-0AB0 | | work memory 128KB code and 128KB data |
| 4 | CP 443-5 Basic | 6GK7 443-5FX01-0XE0 | DP=18 | S7 CP for PROFIBUS with FMS protocol |
| 5 | DI32xDC 24V | 6ES7 421-1BL00-0AA0 | I00-I03 | Digital input module DI32, 24 VDC |
| 6 | DI32xDC 24V | 6ES7 421-1BL00-0AA0 | I04-I07 | Digital input module DI32, 24 VDC |
| 7 | DI32xDC 24V | 6ES7 421-1BL00-0AA0 | I08-I11 | Digital input module DI32, 24 VDC |
| 8 | DI32xDC 24V | 6ES7 421-1BL00-0AA0 | I12-I15 | Digital input module DI32, 24 VDC |
| 9 | DI32xDC 24V | 6ES7 421-1BL00-0AA0 | I16-I19 | Digital input module DI32, 24 VDC |
| 10 | DO16xUC230V Rel | 6ES7 422-1HH00-0AA0 | Q00-Q01 | Digital output module DO16, relay |
| 11 | DO16xUC230V Rel | 6ES7 422-1HH00-0AA0 | Q02-Q03 | Digital output module DO16, relay |
| 12 | DO16xUC230V Rel | 6ES7 422-1HH00-0AA0 | Q04-Q05 | Digital output module DO16, relay |
| 13 | DO16xUC230V Rel | 6ES7 422-1HH00-0AA0 | Q06-Q07 | Digital output module DO16, relay |
| 14 | DO16xUC230V Rel | 6ES7 422-1HH00-0AA0 | Q08-Q09 | Digital output module DO16, relay |
| 15 | DO16xUC230V Rel | 6ES7 422-1HH00-0AA0 | Q10-Q11 | Digital output module DO16, relay |
| DP=3 | | | | |
| | IM 153-1 | 6ES7 153-1AA03-0XB0 | | ET 200M IM 153-1 |
| 4 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I512-I519 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 5 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I520-I527 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 6 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I528-I535 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 7 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I536-I543 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 8 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I544-I551 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |

| | | | | |
|----|---------------------|---------------------|-----------|--------------------------------------|
| 9 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I552-I559 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 10 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I560-I567 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 11 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I568-I575 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| | DP=4 | | | |
| | IM 153-1 | 6ES7 153-1AA03-0XB0 | | ET 200M IM 153-1 |
| 4 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I576-I583 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 5 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I584-I591 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 6 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I592-I599 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 7 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I600-I607 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 8 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I608-I615 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 9 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I616-I623 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 10 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I624-I631 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 11 | | | | |
| | DP=5 | | | |
| | IM 153-1 | 6ES7 153-1AA03-0XB0 | | ET 200M IM 153-1 |
| 4 | AI8xTC/4xRTD, Ex | 6ES7 331-7SF00-0AB0 | I632-I647 | Analog input module AI8xTC/4xRTD |
| 5 | AI8xTC/4xRTD, Ex | 6ES7 331-7SF00-0AB0 | I648-I663 | Analog input module AI8xTC/4xRTD |
| 6 | AI8xTC/4xRTD, Ex | 6ES7 331-7SF00-0AB0 | I664-I679 | Analog input module AI8xTC/4xRTD |
| 7 | AI8xTC/4xRTD, Ex | 6ES7 331-7SF00-0AB0 | I696-I711 | Analog input module AI8xTC/4xRTD |
| 8 | AI8xTC/4xRTD, Ex | 6ES7 331-7SF00-0AB0 | I712-I727 | Analog input module AI8xTC/4xRTD |
| 9 | AI8xTC/4xRTD, Ex | 6ES7 331-7SF00-0AB0 | I728-I743 | Analog input module AI8xTC/4xRTD |
| | DP=6 | | | |
| | IM 153-1 | 6ES7 153-1AA03-0XB0 | | ET 200M IM 153-1 |
| 4 | A04x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 332-5RD00-0AB0 | Q512-Q519 | Analog output module A04x0/4 to 20mA |
| 5 | A04x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 332-5RD00-0AB0 | Q520-Q527 | Analog output module A04x0/4 to 20mA |
| 6 | A04x0/4 to 20mA, Ex | 6ES4 332-5RD00-0AB0 | Q528-Q535 | Analog output module A04x0/4 to 20mA |
| | DP=7 | | | |
| | IM 153-1 | 6ES7 153-1AA03-0XB0 | | ET 200M IM 153-1 |
| 4 | AI4x0/4 to 20mA, Ex | 6ES7 331-7RD00-0AB0 | I680-I687 | Analog input module AI4x0/4 to 20 mA |
| 5 | A04x12Bit | 6ES7 332-5HD01-0AB0 | Q536-Q543 | Analog output module A04/12 bits |

设计中，设有专门的计算机系统地线，并将机架与配电柜柜体严格绝缘，模块底板与电源模块电源接地线接入计算机专用地。系统配置 UPS（不间断供电）电源，防止突然断电时控制设备不能正常工作而造成设备事故。

3.3.2 系统软件设计

结合首钢三高炉喷煤控制系统 PLC 硬件选型，选择 STEP 7 V5.3 及 Intellution iFIX V3.5 作为 PLC 控制程序及 HMI 人机界面开发的软件工具。

1) PLC 控制程序设计

根据系统总体设计安排，结合工艺情况，依照自上而下的功能设计，将控

制程序分为不同的子工艺及不同的功能模块。程序设计结构图如图 3-3。

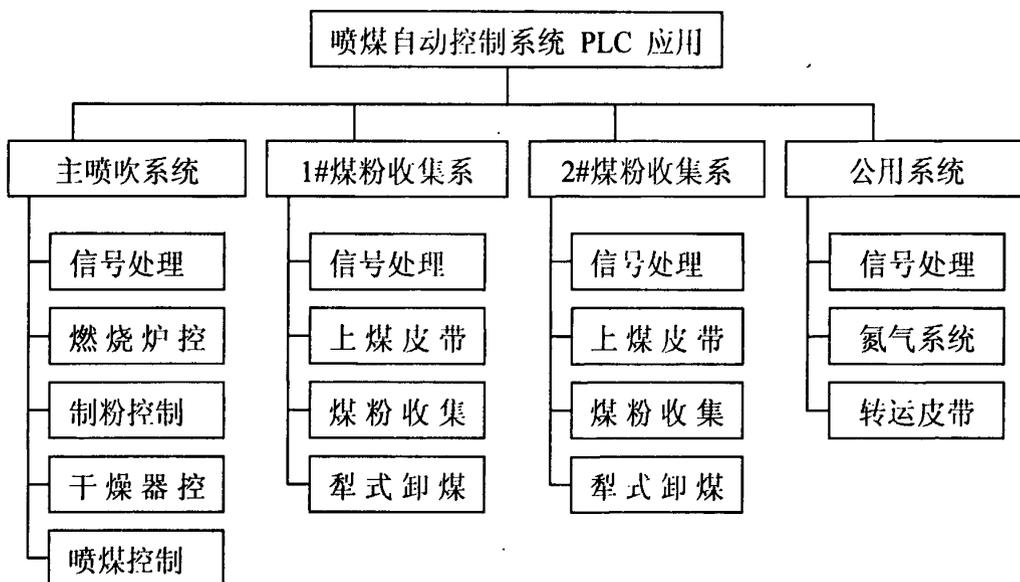


图 3-3 PLC 系统程序结构框图

Fig.3-3 PLC system program structure diagram

其中：主喷吹系统控制程序设计在 S7-400 中；1#煤粉收集系统控制程序设计在 S7-300（1）中；2#煤粉收集系统控制程序设计在 S7-300（2）中；公用系统控制程序设计在 S7-300（3）中。

STEP 7 标准软件包提供一系列的应用程序（工具），其中用于S7-300和 S7-400的编程语言有：梯形逻辑图（Ladder Logic）、语句表（Statement List）和功能块图（Function Block Diagram）都集成在一个标准软件包中。

STEP 7编程软件允许结构化你的用户程序，也就是说可以将程序分解为单个的、自成体系的程序部分。这样做有以下优势：大规模的程序更容易理解；可以对单个的程序部分进行标准化；程序组织简化；程序修改更容易；由于可以分别测试各个部分，查错更为简单；系统的调试更容易。结构化的用户程序的各个部分相应于这些单个的任务，就是大家所知的程序块。

在S7用户程序中有几种不同类型的块可以使用：组织块（OB），OB决定用户程序的结构；系统功能块（SFB）和系统功能（SFC）：SFB和SFC集成在S7 CPU 中可以让你访问一些重要的系统功能；功能块（FB），FB是带有“存储区域”的块，你可以自己编程这个存储区域；功能（FC）FC中包含经常使用的功能的例行程序；背景数据块（背景DB），当一个FB/SFB被调用时，背景DB与该块相关联，它们可在编译过程中自动生成；数据块（DB），DB是用于存储用户数据的数据区

域，除了指定给一个功能块的数据，还可以定义可以被任何块使用的共享数据。

S7-400 主喷吹系统控制程序流程图如图 3-4 到 3-7 所示。

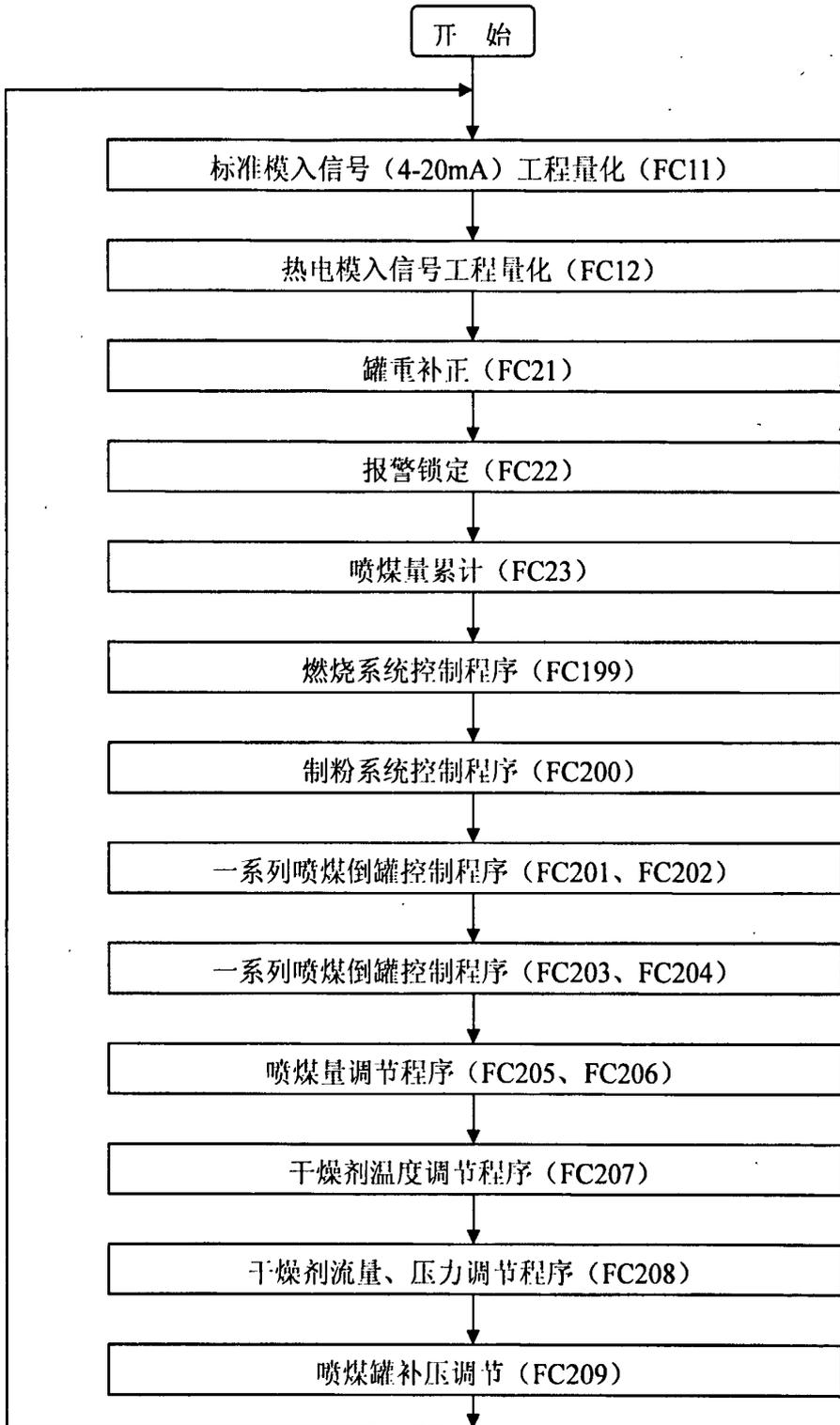


图 3-4 主喷吹系统主程序块 (组织块 OB1) 流程图

Fig.3-4 main injection system master routine block (organization block OB1) flow chart

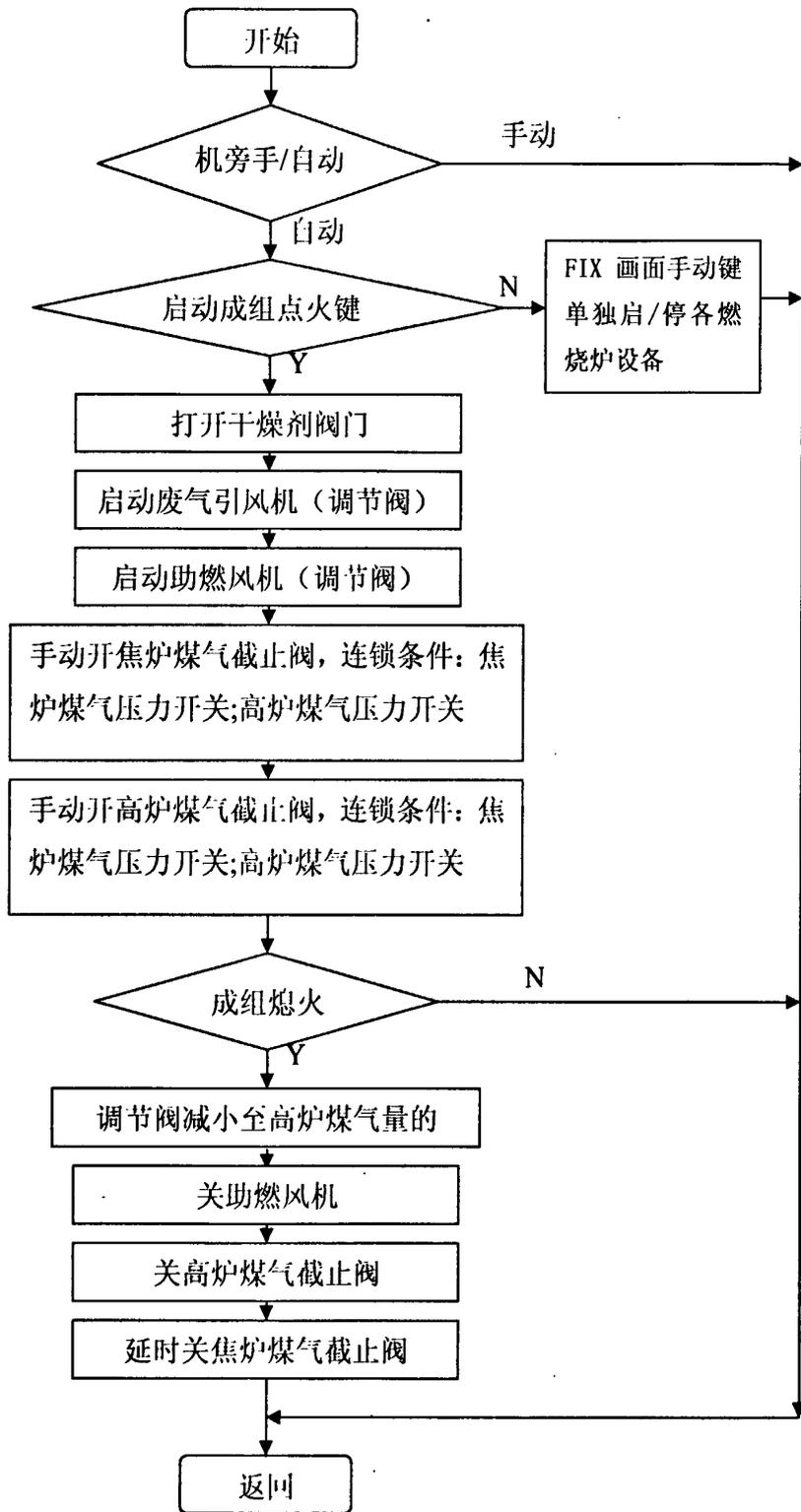


图 3-5 燃烧系统控制程序 (功能块 FC199) 流程图

Figure 3-5 combustion system control procedure (function block FC199) flow chart

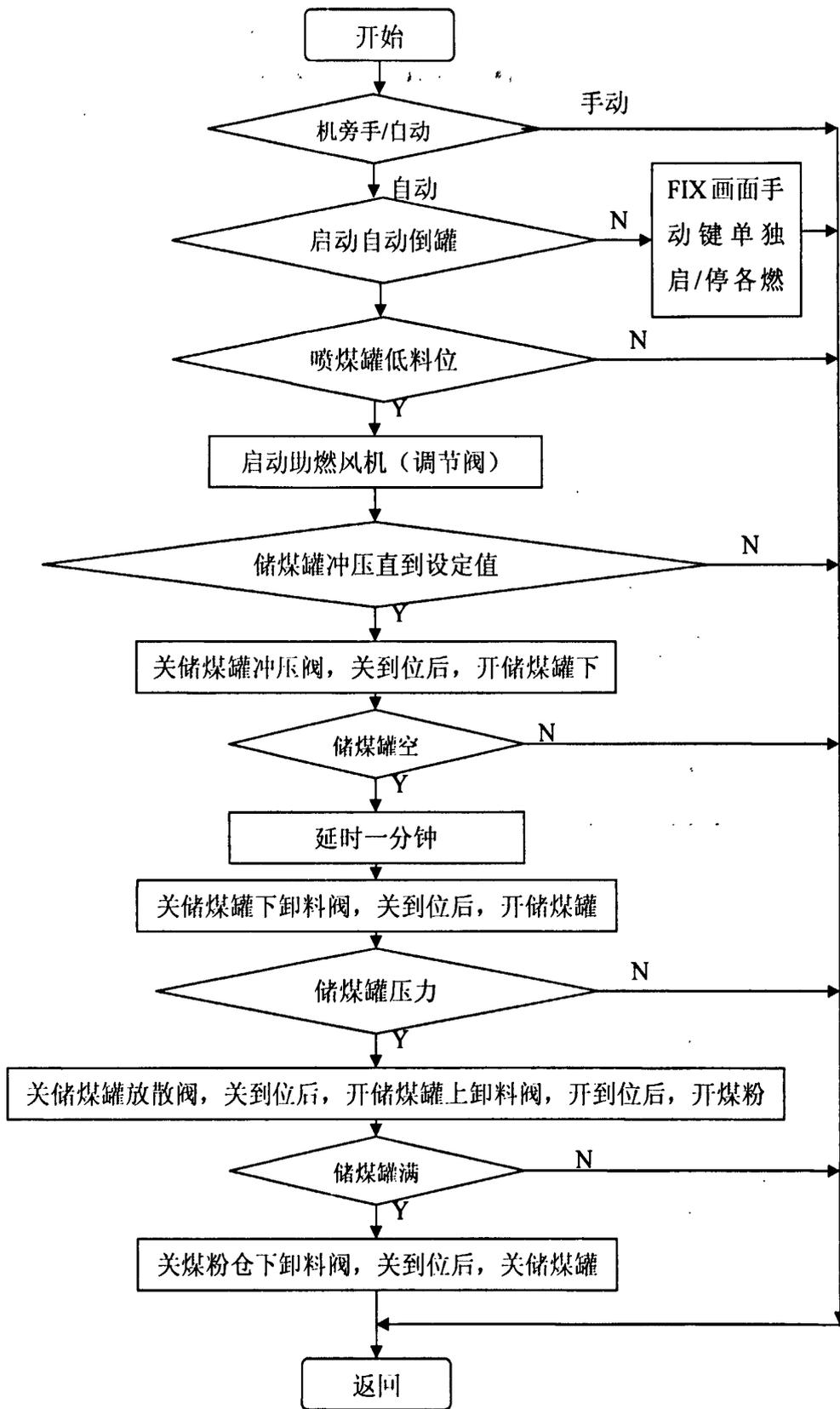


图 3-6 喷煤倒罐控制程序 (功能块 FC201) 流程图

Figure 3-6 spurts the coal tank switching control procedure (function block FC201) flow chart

2) 人机监控界面设计

监控画面是人机交互的界面，一个软件系统是否成功，最终的检验标准是它能否使用户感到满意。由于人机界面是系统与用户直接接触的部分，它给予用户的影响和感受最明显，所以人机界面质量的优劣对于一个软件系统能否获得成功具有至关重要的作用。

人机交互包括两个方面，一方面是对系统的输入，包括向系统下达的命令，提供的命令参数和系统所需的其他输入信息；另一方面是系统向人提供信息，即输出。交互的内容是客观的，主要是由系统的功能需求决定的，与人的主观意识没有太大关系，但是，交互过程和交互方式则可以根据人的主观因素做不同的决策。

人对机器输入的每一条信息都是为了表达某种意图，其语义应该是确定的。所以，在人机交互时输入的信息一定要是为了得到与生产相关的数据反馈，或是达到一定的生产控制过程。输入包括了输入设备的选择，输入信息表现形式的选择等，输入设备可以选择键盘、鼠标等，例如，在操作工输入一些设定值时，为了方便，可以使用鼠标拖动指示条输入数字信息。输入信息表现形式一般选择按使用者的习惯和爱好，并符合常规。

输出信息一般可以分三种，一是提示信息，是根据输入的要求设置的，旨在告诉用户应该进行何种输入以及如何输入；二是系统向人报告的计算或处理结果；三是系统对输入操作的反馈信息。在本课题监控画面设计中，主要进行的是、三类输出，第一类主要有系统的帮助说明等，如输入范围、格式等，第三类主要指所操作设备的状态反馈等。

本着使用简单、界面一致、及时反馈与美观等原则，结合 IFIX 的功能，应用面向对象的方法进行了喷煤自动化控制系统的人机界面设计。首先设计窗口菜单模板，并应用它生成不同的功能菜单，再依据下位程序功能模块及操作要求，采用下拉菜单设计，将监控画面分为四个部分：登录画面、喷吹工艺画面、辅助画面和趋势画面。流程画面中又分为总工艺流程画面、喷吹工艺流程画面、制粉及烟气系统画面、储运系统画面。辅助画面中有喷吹参数画面、制粉等系统参数画面、公用部分画面、分配器画面等。趋势画面分两个，对主要参数记录历史趋势。

3.4 煤量计算和控制模型建立

3.4.1 模型控制的提出

软件工程应用计算机科学、数学及管理科学等原理,借鉴传统工程的原则、方法,创建软件以达到提高质量,降低成本的目的。其中,计算机科学、数学用于构造模型与算法,工程科学用于制定规范设计模型、评估成本及确定权衡,管理科学用于计划、资源、质量、成本等管理。而煤量计算模型的实现,集中地体现了计算机科学与数学思想在工程设计的具体应用。

首钢炼铁厂三高炉喷煤工艺属于串罐直接喷吹工艺,喷吹管路是单管路加分配高炉喷煤。“凡是不可测量的,便是不能对其进行控制的”^[19],由于本课题项目工艺中在喷煤总管及各支管处均没有设置检测气固两相流流量的仪表——检测元件,所以实现工艺标的稳定大喷吹的前提,便是要实现分钟、小时实际喷煤量的计量。如何将不可测量转化为可测量的量,是控制的前提。

主要工艺流程包括两部分:一部分是煤粉的倒罐过程,另一部分是煤粉喷吹过程;第一部分,煤粉的倒罐过程是由中速磨磨煤直接给煤粉仓,煤粉仓的煤粉经过粉仓下煤阀和储煤罐上煤阀后,靠自重落入没有压力的储煤罐,当储煤罐的重量达到 20t 左右(根据实际操作),关闭粉仓下煤阀及储煤罐上煤阀;然后打开充压阀对储煤罐进行充压,当储煤罐的压力与喷煤罐的实际工作压力大致相同时,关闭充压阀;然后打开储煤罐的下卸料阀,向喷煤罐里放料,放料过程不顺利时,用喷煤罐的流化阀流化,使下料速度比较顺畅;当储煤罐重量基本不变化时(因为设备使用时间比较长,储煤罐和喷煤罐中间的软连接已经不能起到应有的作用,因而充压对储煤罐的重量有影响),认为储煤罐的煤粉已经全部下到喷煤罐,关闭储煤罐下卸料阀;然后打开储煤罐的放散阀,将储煤罐的压力放散到压力为 0 的状态;然后重复粉仓向储煤罐下料过程。第二部分,煤粉喷吹过程是控制喷煤罐的压力及给煤器的开度,调节向高炉喷吹的煤粉量,满足高炉生产需要。煤粉喷吹是连续不间断的,倒灌过程也要始终保证煤粉喷吹的连续性和稳定性。

工长在操作高炉时,根据炉况调节小时要煤量_通知喷煤车间操作工,调节喷煤控制软件系统的要煤量的设定值,而控制软件系统应根据设定煤量的值,经过内部的运算,输出调节罐压设定值或给煤器开度的设定值,以达到调节煤粉的

固气比，从而影响实际喷煤量。但实际喷煤量是否增大或减小，要通过工艺现有检测点间接得到，而能够间接得到喷煤量的参数，只有罐的重量，为了构造煤量计算和控制模型，需要对工艺条件作需求分析。

3.4.2 模型的 IPO 分析

根据喷煤的工艺流程，煤量计算和控制模型的需求可以采用 IPO 模型（输入-处理-输出）来表示。IPO 模型是用来描述一个系统中数据输入和输出的模型，同时也被应用于描述一个系统与外界的信息交换。一个基于计算机的系统模块可以用输入—处理—输出（Input-Process-Output）模型来表示。其中，软件要素在这个模型的各个方面都起着一定的作用。

1) 软件从系统的外部系统接收信息。这里要接收煤粉罐、储煤罐、喷吹风的压力，喷煤罐压力，给煤器开度，混合气压力，目标喷煤量等实时电流信号。

2) 软件实现系统功能所需要的计算方法。在这里要实现分钟、小时实时喷煤量的计量及已喷煤量的计算和达到设定目标采取的控制策略。

3) 在实际使用中，软件必须产生输出，把数据转换成某种能适合于输出介质的格式，或适合于输出设备接口的格式。在这里要产生实时喷煤量的显示输出，并产生 8 小时的喷煤量报表；输出喷煤罐压调节设定值和给煤器开度设定值。

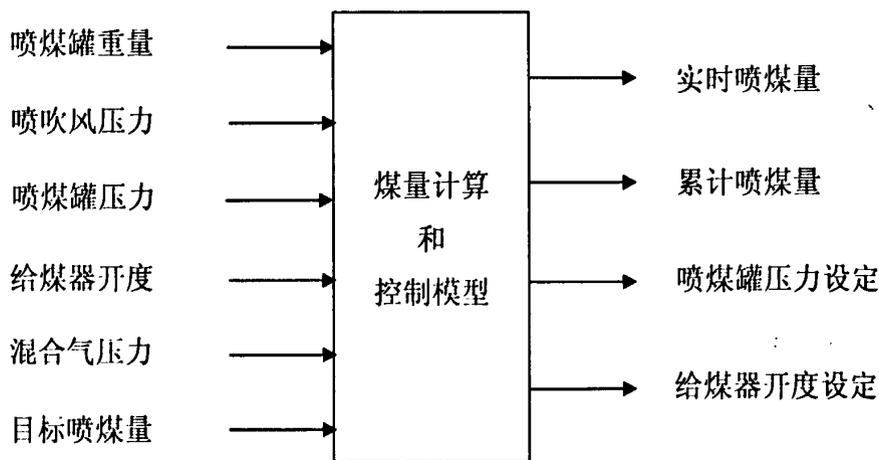


图 3-8 煤量计算和控制的 IPO 模型图

Figure 3-8 coal amount computation and control IPO molded relief map

构造此处法模型，难点在于如何实现连续喷吹、倒罐过程中重量的自动计算和控制策略，也就是说，在连续喷吹、倒灌过程中，考虑各种动作因素，利用模型动态计算出准确的平均喷煤量，作为 PV 值，与操作设定的平均喷吹量进行比

较, 然后通过控制策略, 计算出给煤器开度和氮气压力自动设定值, 在 PLC 中通过 PID 控制, 达到控制平均喷吹量的目标。

3.4.3 几种算法思想的对比研究

1) 煤量计算的三种算法模型构造思路

针对三高炉喷吹系统工艺, 结合需求的 IPO 模型, 在进行煤量计算模型构造中, 确立了三种思路:

其一, 模拟人工, 在任意整点时记下罐重值, 在倒罐时产生触发脉冲, 记忆在喷罐重值及待喷罐的装粉罐重值, 如此循环, 可得到 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4 \dots$, 在下一整点信号到来时将 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4 \dots$ 求和, 即可得到本小时的喷煤量 Δ_n , 瞬时喷煤量采用取半分钟内平均下煤量的值, 并以此作为煤量自动控制的 PV 参数。

其二, 这种算法的思路来自高等数学中的微积分算法, 就是将其任意一小时内的喷煤量的减少值平均分割为 N 个时间等份, 求出在这 N 个时间等份中罐重的差值, 并在整个小时区间内积分, 就可以得到小时煤量, 同时可以在任意整点至当前时间区间内的积分, 除以在任意整点至当前所用时间, 得到一个煤量的瞬时平均值, 以它来代替算法一中的瞬时煤量, 作为煤量自动控制的 PV 参数。

其三, 采用多元线性回归分析法, 将喷煤量作为因变量, 将影响喷煤量的多个因素作为自变量, 构造线性回归函数, 记录较多组样本, 用最小二乘法估计回归参数, 建立回归方程。通过回归方程, 代入当前样本, 计算出实时喷煤量, 作为煤量自动控制的 PV 参数。

2) 三种算法模型比较

一个好的算法, 要求实现简单, 计算准确, 使用方便^[20], 特别是对生产要有一定的指导效果, 前面设计的两种算法思路, 在应用 PLC 编程软件实现及生产使用过程中, 具有各自的优缺点: ①算法一因为是模拟人工的工作过程, 具有计算比较精确的优点, 能基本上消除在喷吹过程中煤量计量的干扰, 但是缺点是不易取任意小时中间点的喷煤量, 而且只有采用即时煤量作业煤量自动控制回路的 PID 参数调节的输入, 这样得到的回路控制, 扰动大, 必须加入滤波, 但滤波时间短, 起不到作用, 滤波时间长, 则滞后时间长, 控制失去了作用, 因此在生产控制中参数不易调整, 应用效果不太好。②算法二的优点是计算简单, 易于

实现,可以得到任意时间点的喷煤量,便于操作工指导生产,同时可以采用瞬时平均喷煤量作为煤量自动控制回路的输入,对算法一中干扰大的缺点有一些改进,多被应用在并罐喷煤控制中,但无法解决串罐喷煤控制中,动态连续喷吹、倒灌得多干扰因素对煤量计算的影响。第三种算法,能成功解决多变量动态干扰问题,但因需要大量记录分析样本数据,存储和处理信息量巨大,在 PLC 中很难实现,需要专门的数据服务器。

3.4.4 多元线性回归算法的应用

假设依变数 Y 对一个自变数 X 的回归,称为一元回归。如果依变数有两个或两个以上自变数的回归,称为多元回归或复回归(multiple regression)。

一、多元回归方程

(一)、多元回归的线性模型和多元回归方程式

若依变数 Y 同时受到 m 个自变数 X_1, X_2, \dots, X_m 的影响,且这 m 个自变数皆与 Y 成线性关系,则这 $m+1$ 个变数的关系就形成 m 元线性回归。因此,一个 m 元线性回归总体的线性模型为:

$$Y_j = \beta_0 X_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \dots + \beta_m X_{mj} + \varepsilon_j \quad (3 \cdot 1)$$

其中, $\varepsilon_j \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 。相应的,一个 m 元线性回归的样本观察值组成为:

$$y_j = b_0 + b_1 x_{1j} + b_2 x_{2j} + \dots + b_m x_{mj} + e_j \quad (3 \cdot 2)$$

在一个具有 n 组观察值的样本中,第 j 组观察值($j=1, 2, \dots, n$)可表示为 $(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}, y_j)$,便是 $M=(m+1)$ 维空间中的一个点。

同理,一个 m 元线性回归方程可给定为:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m \quad (3 \cdot 3)$$

(3·3)中, b_0 是 x_1, x_2, \dots, x_m 都为 0 时 y 的点估计值; b_1 是 $b_{y_1 \cdot 23 \dots m}$ 的简写,它是在 x_2, x_3, \dots, x_m 皆保持一定时, x_1 每增加一个单位对 y 的效应,称为 x_2, x_3, \dots, x_m 不变(取常量)时 x_1 对 y 的偏回归系数(partial regression coefficient); b_2 是 $b_{y_2 \cdot 13 \dots m}$ 的简写,它是在 x_1, x_3, \dots, x_m 皆保持一定时, x_2 每增加一个单位对 y 的效应,称为 x_1, x_3, \dots, x_m 不变(取常量)时 x_2 对 y 的偏回归系数;依此类推, b_3 是 x_3 对 y 的偏回归系数; \dots ; b_m 是 x_m 对 y 的偏回归系数。

在多元回归系统中, b_0 一般很难确定其专业意义,它仅是调节回归响应面的

一个参数; $b_i (i=1, 2, \dots, m)$ 表示了各个自变数 x_i 对依变数 y 的各自效应, 而 \hat{y} 则是这些各自效应的集合, 代表着所有自变数对依变数的综合效应。

(二)、多元回归统计数的计算

由 n 组观察值求解 m 元线性回归方程, 可按“直线回归的矩阵求解”的方法进行。

n 组观察值按(3·2)形成 n 个等式, 用矩阵表示则为:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{m1} \\ 1 & x_{12} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}$$

即

$$Y = Xb + e \tag{3·4}$$

由最小二乘法求 b , 结果为:

$$b = (X'X)^{-1} X'Y \tag{3·5}$$

用矩阵方法求解多元回归方程的难点是逆矩阵的计算。可以采用的是行列式解法, 也可用求解求逆紧凑变换法等。由于几乎所有统计软件都采用矩阵算法, 部分统计软件或编程语言(如 SAS、MATLAB、True Basic 等)还设置了矩阵函数, 可供直接调用, 故在计算工具日渐先进的今天, 矩阵求逆已不成问题。

(三)、多元回归方程的估计标准误差

由(3·5)解得的 b 代入(3·3)后得到的多元回归方程, 满足 $Q = \sum (y - \hat{y})^2 =$ 最小。这里的 Q 叫做多元离回归平方和或多元回归剩余平方和, 它反映了回归估计值 \hat{y} 和实测值 y 之间的差异, 记作 $Q_{y/12\dots m}$ 。由于在计算多元回归方程时用掉了 b_1 、 b_2 、 \dots 、 b_m 和 b_0 等 $m+1$ 个统计数, 故 $Q_{y/12\dots m}$ 的 $\nu = n - (m+1)$ 。因此, 定义多元回归方程的估计标准误 $S_{y/12\dots m}$ 为:

$$S_{y/12\dots m} = \sqrt{\frac{Q_{y/12\dots m}}{n - (m + 1)}} \tag{3·6}$$

$Q_{y/12\dots m}$ 的计算涉及到平方和的分解。在多元回归分析中, Y 变数的总平方和 (SS) 仍然可分解为回归平方和(记作 $U_{y/12\dots m}$)和离回归平方和($Q_{y/12\dots m}$)两部分, 相应的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} SS_y &= Y'Y - (I'Y)^2/n \\ Q_{y/12\dots m} &= Y'Y - b'X'Y \\ U_{y/12\dots m} &= b'X'Y - (I'Y)^2/n = SS_y - Q_{y/12\dots m} \end{aligned} \right\} \quad (3 \cdot 7)$$

二、多元回归的假设测验

(一)、多元回归关系的假设测验

多元回归关系的假设测验,就是测验 m 个自变数的综合对 Y 的效应是否显著。若令回归方程中 b_1, b_2, \dots, b_m 的总体回归系数为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$, 则这一测验所对应的假设为 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0$ 对 $H_1: \beta_i$ 不全为 0。

由于多元回归下 SS_y 可分解为 $U_{y/12\dots m}$ 和 $Q_{y/12\dots m}$ 两部分, $U_{y/12\dots m}$ 由 x_1, x_2, \dots, x_m 的不同所引起, 具有 $\nu=m$; $Q_{y/12\dots m}$ 与 x_1, x_2, \dots, x_m 的不同无关, 具有 $\nu=n-(m+1)$, 由之构成的 F 值:

$$F = \frac{U_{y/12\dots m} / m}{Q_{y/12\dots m} / [n - (m + 1)]} \quad (3 \cdot 8)$$

即可测验多元回归关系的显著性。

(二)、偏回归关系的假设测验

上述多元回归关系的假设测验只是一个综合性的测验, 它的显著表明自变数的集合和 y 有回归关系, 但这并不排除个别乃至部分自变数和 y 没有回归关系的可能性。因此, 要准确地评定各个自变数对 y 是否有真实回归关系, 还必须对偏回归系数的显著性作出假设测验。

偏回归系数的假设测验, 就是测验各个偏回归系数 $b_i (i=1, 2, \dots, m)$ 来自 $\beta_i=0$ 的总体的概率, 所作的假设为 $H_0: \beta_i=0$ 对 $H_1: \beta_i \neq 0$, 测验方法有两种。

1. t 测验 关于 b 向量的方差, 同样适用于多元回归的情况,

$$V(b) = \begin{pmatrix} \hat{\sigma}_{b_0}^2 & \hat{\sigma}_{b_0 b_1} & \hat{\sigma}_{b_0 b_2} \\ \hat{\sigma}_{b_1 b_0} & \hat{\sigma}_{b_1}^2 & \hat{\sigma}_{b_1 b_2} \\ \hat{\sigma}_{b_2 b_0} & \hat{\sigma}_{b_2 b_1} & \hat{\sigma}_{b_2}^2 \end{pmatrix} = (X'X)^{-1} S_{y/x}^2 = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} S_{y/123}^2 \quad (3 \cdot 9)$$

因而

$$s_{b_i} = S_{y/12\dots m} \sqrt{c_{(i+1)(i+1)}} \quad (3 \cdot 10)$$

此时

$$t = \frac{b_i - \beta_i}{s_{b_i}} \quad (3 \cdot 11)$$

服从 $\nu = n - (m + 1)$ 的 t 分布，因而可测验 b_i 的显著性。

2. F 测验 在包含 m 个自变数的多元回归中，由于最小平方法的作用， m 愈大，回归平方和 $U_{y/12\dots m}$ 亦必然愈大。如果取消一个自变数 X_i ，则回归平方和将减少 U_{P_i} ，而

$$U_{P_i} = \frac{b_i^2}{c_{(i+1)(i+1)}} \quad (3 \cdot 12)$$

显然，这个 U_{P_i} 就是 y 对 x_i 的偏回归平方和，也就是在 y 的变异中由 x_i 的变异所决定的那一部分平方和，它具有 $\nu = 1$ 。因此，由

$$F = \frac{U_{P_i}}{Q_{y/12\dots m} / [n - (m + 1)]} \quad (3 \cdot 13)$$

可测验 b_i 来自 $\beta_i = 0$ 的总体的概率。

三、最优多元线性回归方程的统计选择

一个实际的多变数资料，往往既含有对 Y 有显著效应的自变数，又含有没有显著效应的自变数。因此，在偏回归关系的假设测验中，通常是一些 b_i 显著，另一些 b_i 并不显著；自变数都对 Y 有显著作用的情况并不多见。在多元线性回归分析时，必须剔除没有显著效应的自变数，以使所得的多元回归方程比较简化而又能较准确地分析和预测 Y 的反应。剔除不显著自变数的过程称为自变数的统计选择，所得的仅包含显著自变数的多元回归方程，叫做最优的（在被研究的自变数范围内）多元线性回归方程。

由于自变数间可能存在相关，当 m 元线性回归中不显著的自变数有几个时，并不能肯定这些自变数对 Y 的线性效应都不显著，而只能肯定偏回归平方和最小的那一个自变数不显著。当剔除了这个不显著且偏回归平方和最小的自变数后，其余原来不显著的自变数可能变为显著，而原来显著的自变数也可能变为不显著。因此，为了获得最优方程，回归计算就要一步一步做下去，直至所有不显著的自变数皆被剔除为止。这一统计选择自变数的过程也称为逐步回归 (stepwise regression)。

自变数统计选择的具体步骤为：

第一步： m 个自变数的回归分析，一直进行到偏回归的假设测验。若各自变数的偏回归皆显著，则分析结束，所得方程就是最优多元回归方程；若有一个或

一个以上自变数的偏回归不显著，则剔除那个偏回归平方最小的自变数(设为 X_p)，进入第二步分析。

第二步： $m-1$ 个自变数的回归分析，也是一直进行到偏回归的假设测验。这一步的计算程序是将矩阵 X 中 X_p 所占有的那一列(第 $p+1$ 列)划去，再由新 X 计算 $X'X$ 、 $(X'X)^{-1}$ 和 b 等，从而获得新的 Q 和 U_p 。如果这一步仍有一个以上自变数的偏回归不显著，则再将偏回归平方和最小的那个变数(设为 X_q)剔除，进入第三步分析。若第一步中有二个或更多个自变数的偏回归不显著，这一步可轮流试剔，直到找到最需剔除的一个，再进入第三步。

第三步： $m-2$ 个自变数的回归分析，又一直进行到偏回归的假设测验。这一步的计算是在 X 中划去 X_q 所占的一行，其余过程同第二步。

……如此重复进行，直至留下的所有自变数的偏回归都显著，即得最优多元线性回归方程。

四、自变数的相对重要性

最优多元线性回归方程中包含的自变数 X_i 都对依变数 Y 有显著作用，偏回归系数 b_i 表示了 X_i 对 Y 的具体效应。但实践中还需评定这些显著自变数的相对重要性，以利于抓住关键因素，达到调整和控制依变数反应量的目的。

偏回归系数 b_i 本身并不能反映自变数的相对重要性，其原因有二：① b_i 是带有具体单位的，单位不同则无从比较；②即使单位相同，若 X_i 的变异度不同，也不能比较。但如果我们对 b_i 进行标准化，即在分子和分母分别除以 Y 和 X_i 的标准差，就可消除单位和变异度不同的影响，获得一个表示 X_i 对 Y 相对重要性的统计数—通径系数(path coefficient, 记作 p_i)：

$$p_i = b_i \frac{1/\sqrt{SS_y/(n-1)}}{1/\sqrt{SS_{x_i}/(n-1)}} = b_i \sqrt{\frac{SS_{x_i}}{SS_y}} \quad (3 \cdot 14)$$

通径系数 p_i 又称标准偏回归系数，其统计意义是：若 X_i 增加一个标准差单位， Y 将增加 ($p_i > 0$) 或减少 ($p_i < 0$) p_i 个标准差单位。

3.4.5 煤量计算和控制模型建立

1) 煤量计算模型的设计

确定影响喷煤量 (PML) 因素：喷煤罐重量 (PMW)；喷煤罐压力 (PMP)；喷

吹风压力 (PPF); 给煤器开度 (KGM); 混合气压力 (HFYL)。

构建四元回归函数:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

其中: Y---喷煤量 (PML);

x_1 --- 喷煤罐压力 (PMP);

x_2 --- 喷吹风压力 (PPF);

x_3 --- 给煤器开度 (KGM);

x_4 --- 混合气压力 (HFYL);

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 为未知参数; ε 为误差值。

在数据库中读取样本组 $(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, y_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$), 其中 y_i 用前一刻喷煤罐重量与当前时刻喷煤罐重量的增量, 用 MATLAB 软件计算出 β 的最小二乘估计参数 $\hat{\beta}$: $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \hat{\beta}_4$, 得出回归方程:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_4 x_4$$

读取当前实时数据 (x_1, x_2, x_3, x_4) , 用回归方程计算出 \hat{y} , 即为实时喷煤量估计值。

定时调用 MATLAB 可执行文件, 动态更新估计参数 $\hat{\beta}$, 动态修正回归方程。

2) 煤量控制模型设计

根据大量样本分析, 对可调节因素: 喷煤罐压力 (PMP) 和给煤器开度 (KGM), 采用以下控制策略: 给煤器开度 (KGM) 作为范围量 (粗调量), 以 5% 为步长调节; 喷煤罐压力 (PMP) 作为主调量 (精调量), 在设定给煤器开度 (KGM) 基准范围内调节; 利用回归方程, 代入目标喷煤量, 返算喷煤罐压力设定值和给煤器开度设定值。

喷煤罐压力设定值和给煤器开度设定值计算步骤为:

- ①判断输入目标喷煤量合理性, 不合理跳出并提示;
- ②目标喷煤量与实际喷煤量差值不超阈值则跳出, 否则继续;
- ③将目标喷煤量代入回归方程, 以当前的样本为基准, 计算出喷煤罐压力设定值;
- ④当喷煤罐压力设定值大于压力可调节范围的 80% 时, 将当前样本中给煤器开度增加 5%, 返回②;

⑤当喷煤罐压力设定值小于压力可调节范围的 20%时, 将当前样本中给煤器开度减少 5%, 返回②;

⑥记录喷煤罐压力设定值和给煤器开度设定值。

3.5 数据库的设计

1) 一级数据流的建立

一级数据流在 iFIX 中完成建立和设置。一级数据流结构图如图 3-9 所示。

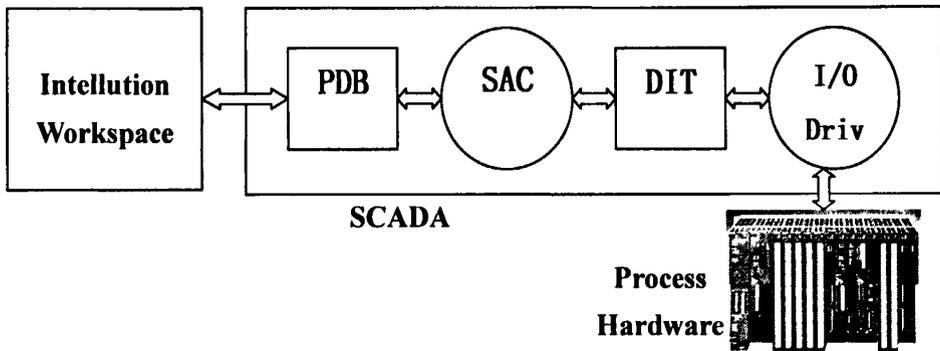


图 2-9 一级数据流结构图

Figure 2-9 first-level data stream structure drawing

A. 过程数据。是 iFIX 用于连接工厂中的过程硬件 (Process Hardware) 的。传感器和控制器数据送入过程硬件中的寄存器, 过程硬件包括: PLC; DCS; 简单 I/O 设备等; iFIX 软件从过程硬件中获取源数据。

B. I/O 驱动器 (I/O Driver)。是 iFIX 与 PLC 之间的接口。它用来从 I/O 设备中读 (写) 数据 (称为轮询 Polling), 并将数据传送到驱动器映像表中的地址中。I/O 驱动器以 Poll 记录的格式收集数据, 用 PLC 寄存器中的地址轮询 (Poll) 记录。

C. DIT (驱动映像表-Driver Image Table)。是在 SCADA 服务器内存中, 存储 I/O 驱动器存储轮询记录数据的区域。DIT 中的记录由 I/O 驱动器来刷新, 每一个轮询记录有一个刷新率 (即 Poll 时间)。

D. SAC (扫描、报警和控制)。从 DIT 中读取数据, 将数据传至数据库 PDB, 数据超过报警设定值, 则报警。SAC 从 DIT 中读取数据的速率成为扫描时间。

E. PDB (过程数据库)。代表由标签变量组成的一个过程。标签是一个完成某个过程功能的指令单元, 完成将过程值与报警限进行比较、基于特殊的过程数

据进行计算、将数据写入过程硬件等功能。一系列标签可以连接在一起，形成链（Chain），完成监视或控制回路功能。

F. 操作显示平台。一旦数据进入 PDB，就可以用图形方式进行显示和操作。Intellution Workspace 以运行模式提供 HMI 功能。一个从硬件中获取数据的节点成为一个 SCADA（监视、控制和数据采集）服务器。

数据在以上各部分之间双向传递形成数据流，实现对硬件的读写功能。

2) 模型数据库的设计

系统中的模型数据库在数据服务器中由 SQL server 来建立和设置。为完成系统模型控制功能，根据模型设计要求，对模型数据库作如下设计：

在 SQL server 中建立 PM3HG 数据库，作为系统模型数据库。

在 PM3HG 中建立以下表用于模型计算和控制：

XL-M（动态数据表）：从 PDB 中读取，用于存放实时采样数据；

XL-YB（模型样本表）：从 XL-M 中筛选，用于存放模型计算样本；

XL-CS（模型参数表）：用于存放模型计算出的当前回归参数；

XL-CSH（模型参数历史记录表）：用于存放模型计算出的历史回归参数；

XL-TJ（模型调节量表）：用于存放模型计算出的当前调节设定值；

XL-TJH（模型调节量历史记录表）：用于存模型计算出的历史调节设定值。

SQL server 数据库通过 Windows 2000 Porfessional 操作系统 ODBC 设置与 SCADA 实现数据交换；通过 VB 编程软件实现对数据库中数据表的操作。

对数据库的具体操作过程如下：

①通过 ODBC 从 PDB 中读取需要的数据写入 XL-M（动态数据表）；

②经过样本限制从 XL-M（动态数据表）中筛选出模型样本，写入 XL-YB（模型样本表），并定时更新；

③定时调用 Matlab 可执行文件，读入样本，计算出回归参数，写入 XL-CS（模型参数表）和 XL-CSH（模型参数历史记录表）；

④从 XL-CS（模型参数表）读入当前回归参数并从 XL-M（动态数据表）读入最近三条记录，计算出实时喷煤量和累计喷煤量；

⑤目标喷煤量与实时喷煤量进行比较，计算出系统调节设定值，写入 XL-TJ（模型调节量表）和 XL-TJH（模型调节量历史记录表）；

⑥将设定值通过 ODBC 写到 PDB 中，由 SCADA 写入硬件设备，完成调节动作。

第四章 高炉喷煤自动控制系统的实现

4.1 硬件系统的实现

根据系统硬件设计，硬件系统的具体实现步骤如下：

- 1) 按照硬件设计的 PLC 模块的选取，安装各 PLC 底板及模块，组成机架；
- 2) 安装 ET-200M 分布式 I/O；
- 3) 制作 Profibus-DP 网线，按设计连接 PLC 和各自的 ET-200M 站，组成 Profibus-DP 网；
- 4) 制作 Profibus-FMS 网线，按设计连接 HMI 和各 PLC，组成 Profibus-FMS 网；
- 5) 按照设计和施工图纸，将现场设备通过导线和端子接入 PLC 的 I/O 模块；
- 6) 用以太网线将交换机与两台 HMI 及数据服务器连接，构成以太网；
- 7) 设置两台 HMI 和数据服务器的 IP 地址，用网络命令 ping 系统各 IP 地址，有响应则以以太网连通。

系统分步硬件组态及其截图如下：

用 STEP 7 中 “Netpro” 选项进行网络节点配置，配置图如下：

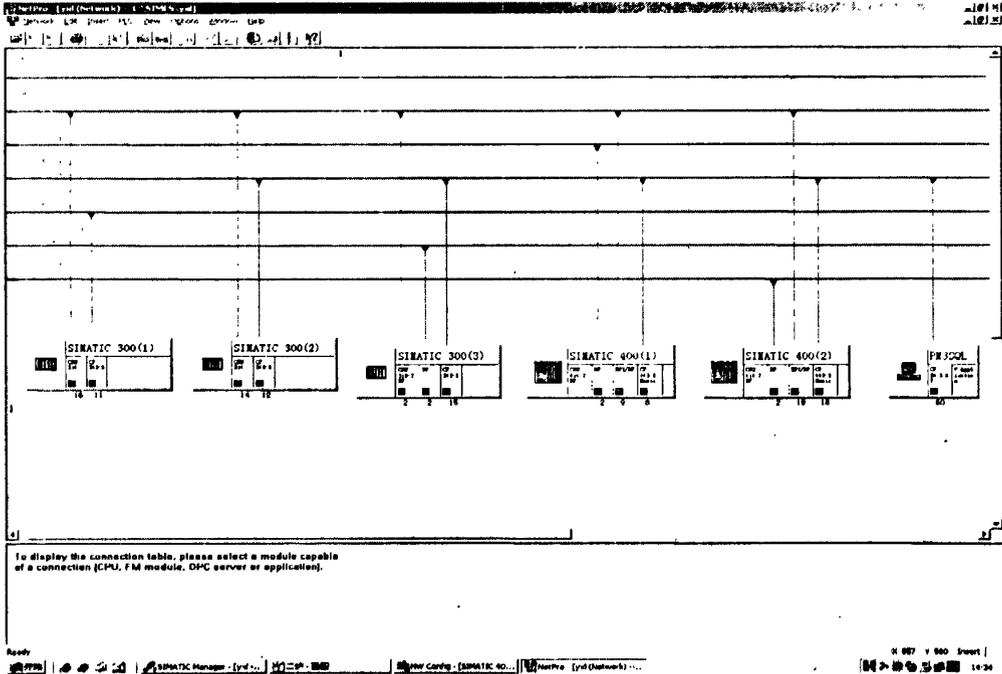


图 4-1 PLC 网络配置图

Fig.4-1 PLC network configuration chart

②用 STEP 7 中“HW-Config”选项进行 S7-400、S7-300 控制器及分布式 I/O 站组态，组态图如下：

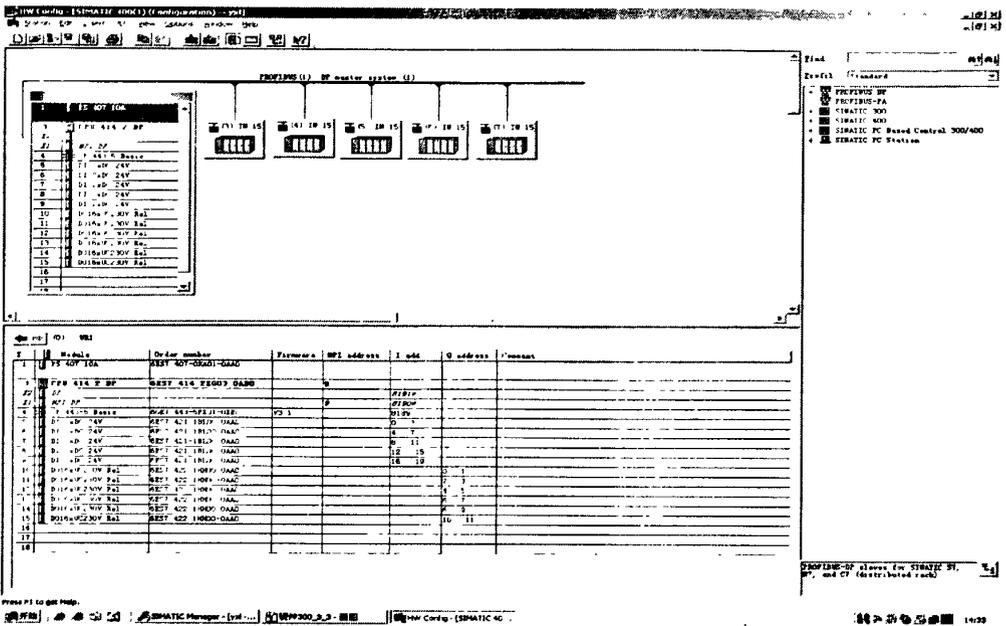


图 4-2 S7-400 硬件组态图

Figure 4-2 S7-400 hardware disposition chart

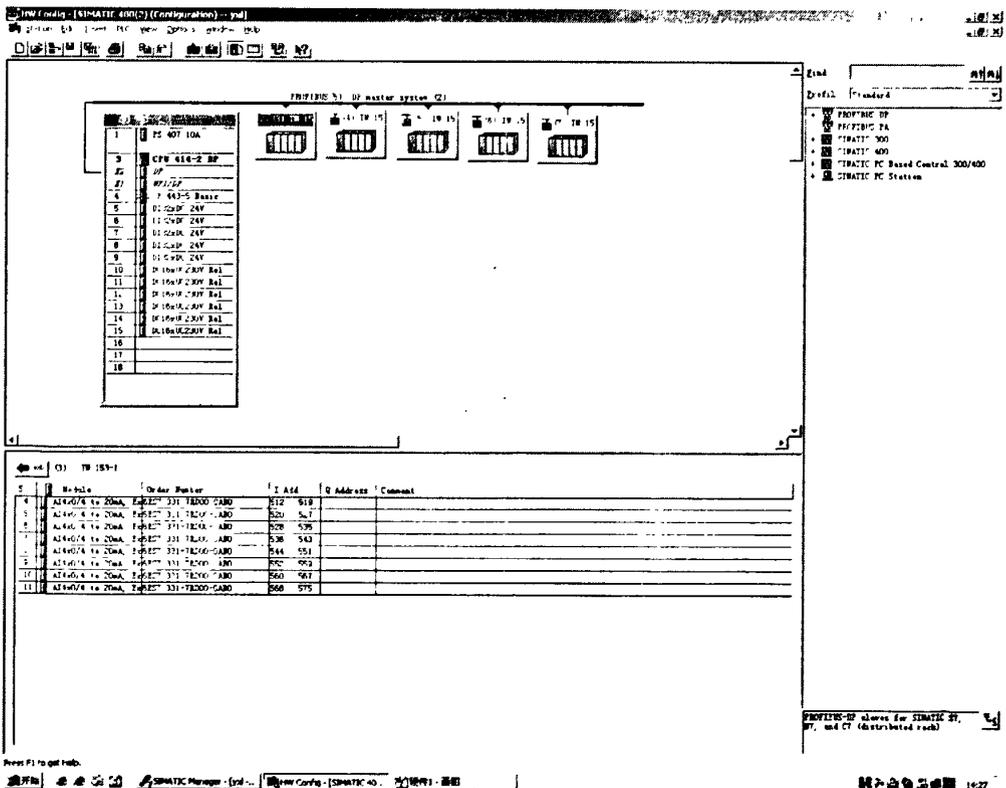


图 4-3 S7-400 3ET-200M 硬件组态图

Figure 4-2 S7-400 3ET-200M hardware disposition chart

4.2 软件系统的实现

1) PLC 主要模块的实现

根据软件设计，按结构化方法进行PLC程序编制。设计一个自动化项目的方法有很多。可用于任何项目的基本步骤有：①将过程分割为各个任务；②说明每个区域；③定义安全要求；④说明所需要的操作员显示和控制；⑤生成你的可编程控制器的组态图。

SIMATIC 管理器是STEP 7 的中央窗口，在STEP 7 启动时激活。缺省设置启动STEP 7 向导，它可以在您创建STEP 7 项目时提供支持。用项目结构来按顺序存储和排列所有的数据和程序。

在SIMATIC 管理器中，建立喷煤项目，将分割的任务分配到分别设置的CPU 中，在各个CPU下级建立所需的程序功能块。

喷煤项目的总体软件配置图如图 4-6。

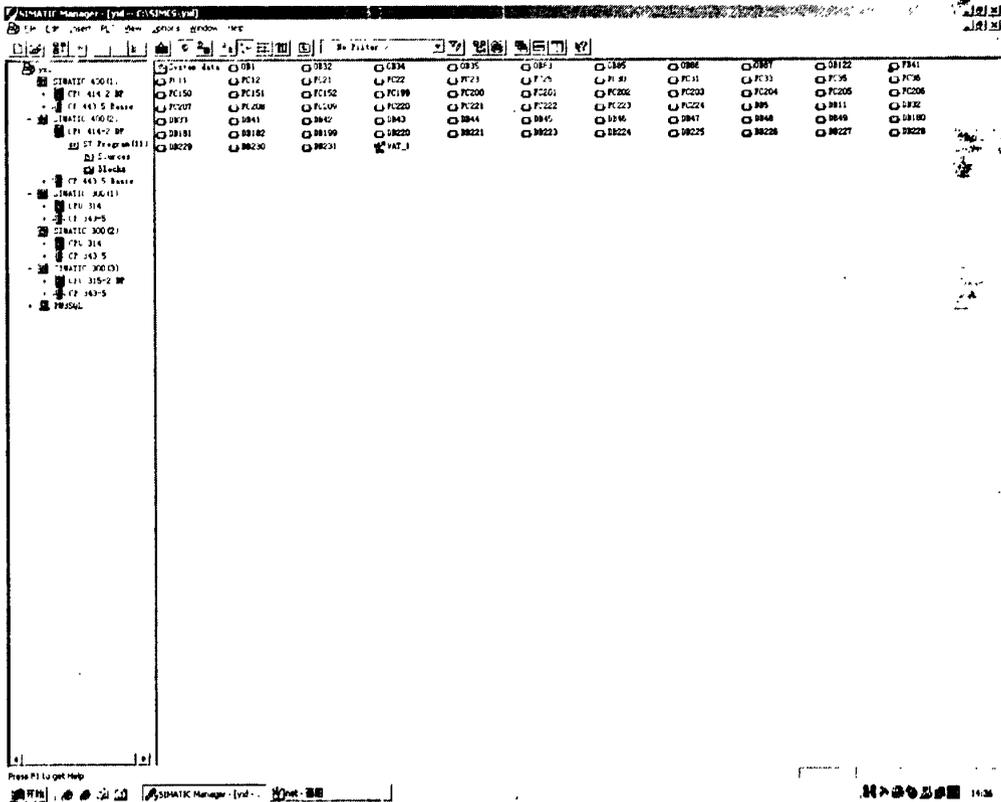


图 4-6 喷煤项目的总体软件配置图

Figure 4-6 spurts the coal project the overall software disposition chart

以 S7-400 为例，介绍部分主要程序功能模块如下：

①组织块 OB1

OB1是用于循环程序处理的组织块。循环程序处理是在可编程逻辑控制器上执行程序的“正常”类型。操作系统循环调用OB1，并通过绍调用，启动循环执行用户程序。

在STEP 7 中，CPU 循环处理OB1。CPU 逐行地读取并执行程序命令。当CPU 返回到第一个程序行时，它已经完成一个循环。所需要的时间即所说的扫描循环时间。

在STEP 7 中，可以用标准语言梯形图(LAD)、语句表(STL)或功能块图(FBD)创建 S7 程序。在实际使用时，您必须决定使用哪种语言。

所有块都在LAD/STL/FBD 编程窗口中进行编辑。这里，您可以看到梯形图的视图。

喷煤项目中S7-400组织块OB1的梯形图的视图如图4-7。

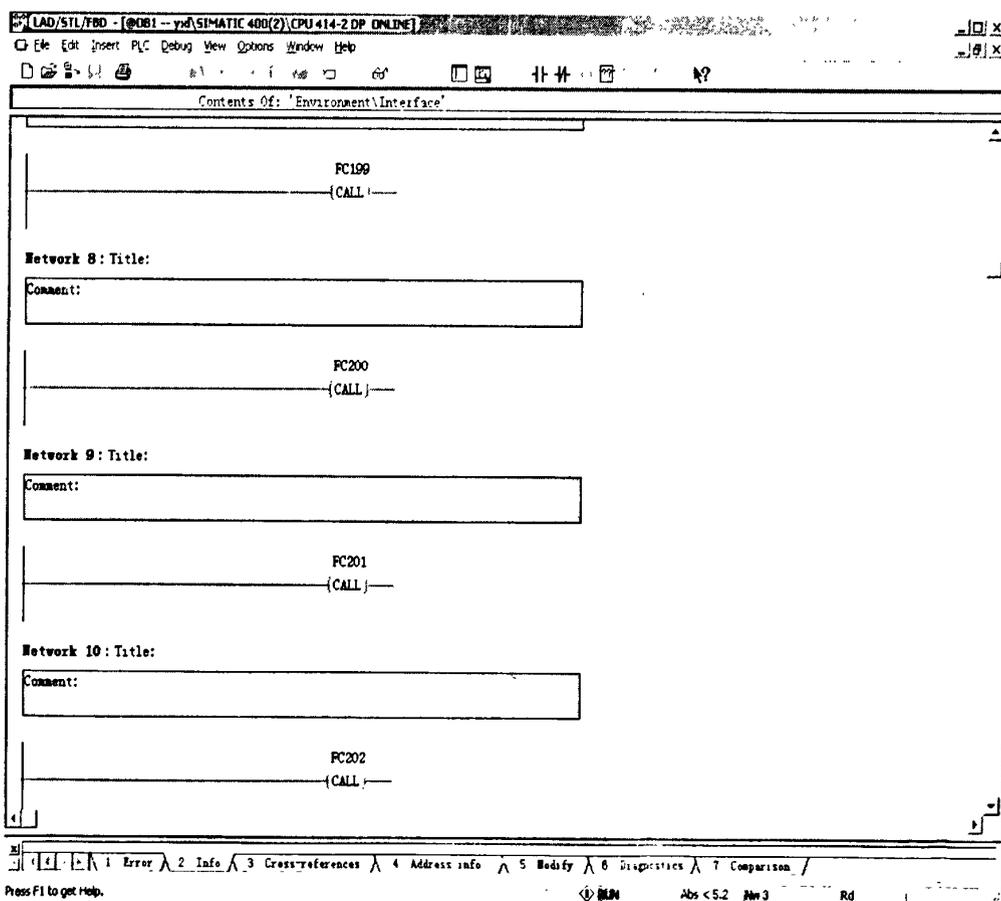


图 4-7 S7-400 组织块 OB1 图

Figure 4-7 S7-400 organization block OB1 chart

在 S7-400 组织块 OB1 种，通过循环调用各子功能块来完成所有被分配到 S7-400 中的各个系统功能。

②功能 (FC)

功能 (FC) 属于你自己编程的块。功能是“无存储区”的逻辑块。FC的临时变量存储在局域数据堆栈中。当FC执行结束后，这些数据就丢失了。要将这些数据永久存储，功能也可以使用共享数据块。由于FC没有它自己的存储区，所以你必须为它指定实际参数。不能够为一个FC的局域数据分配初始值。一个FC包含一个程序部分，当FC被不同的逻辑块调用时，这些程序总会被执行。

在功能块中，当访问参数时使用背景数据块中的实际参数的拷贝参数。当调用FB时，如果没有传送输入参数或没有写输出参数，则背景数据块中将始终使用以前的值。功能没有存储器，与FB对比，不可以选择对FC的形参赋值。通过寻址来访问FC的参数。当数据块的一个地址或调用块的局部变量作为实际参数时，则将一个复制的实际参数存储到调用块的局部数据区，用它来传送数据。

图4-8是喷煤系统燃烧控制功能块的LAD/STL/FBD 编程窗口视图。

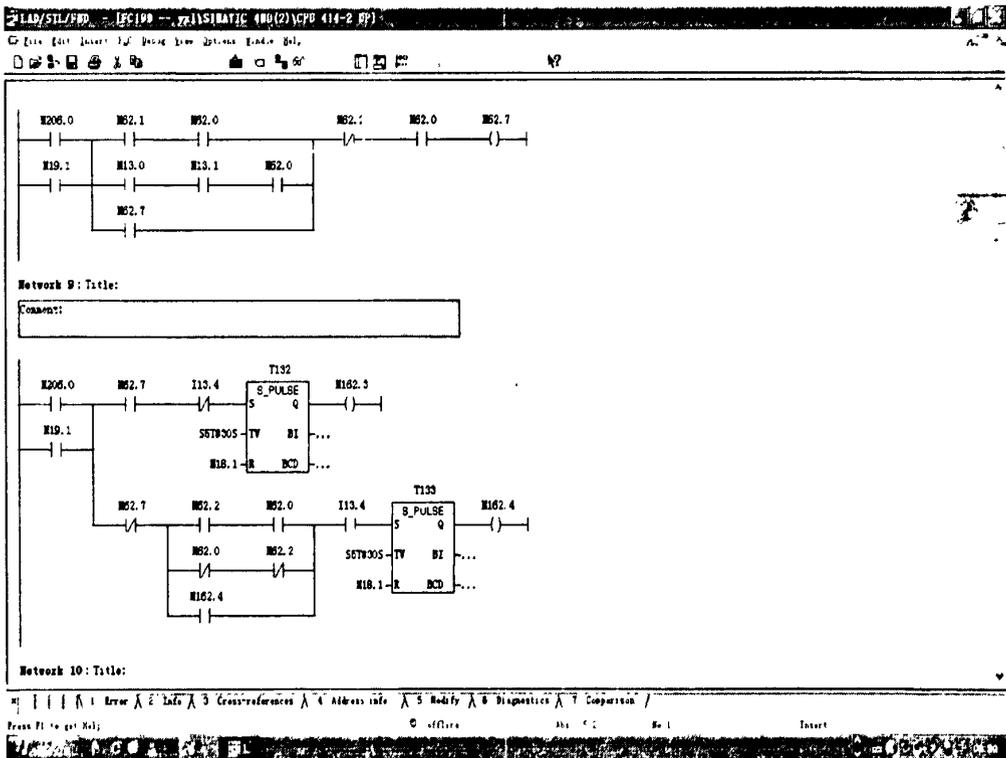


图 4-8 S7-400 功能块 FC199 图

Figure 4-8 S7-400 function block FC199 chart

2) 主要人机界面实现:

整个人机界面的设计采用了可视化的面向对象的设计方法,应用控件技术,画面中所有按钮、阀门均采用了控件化设计,这大大减轻了设计的工作量。而且,在设计中,对控制功能相同的对象,建立不同的对象类,通过使用通用组件和类的方法,实现了软件重用技术。通过抽象化、参数化、模块化等手段,采用面向对象的合成技术,将所设计类对象合成至当前的监控软件系统之中,提高了整个软件的生产率,改进了整个控制软件系统的质量。系统主要人机界面图如图4-10、图4-11所示。

①系统检控流程图画面:

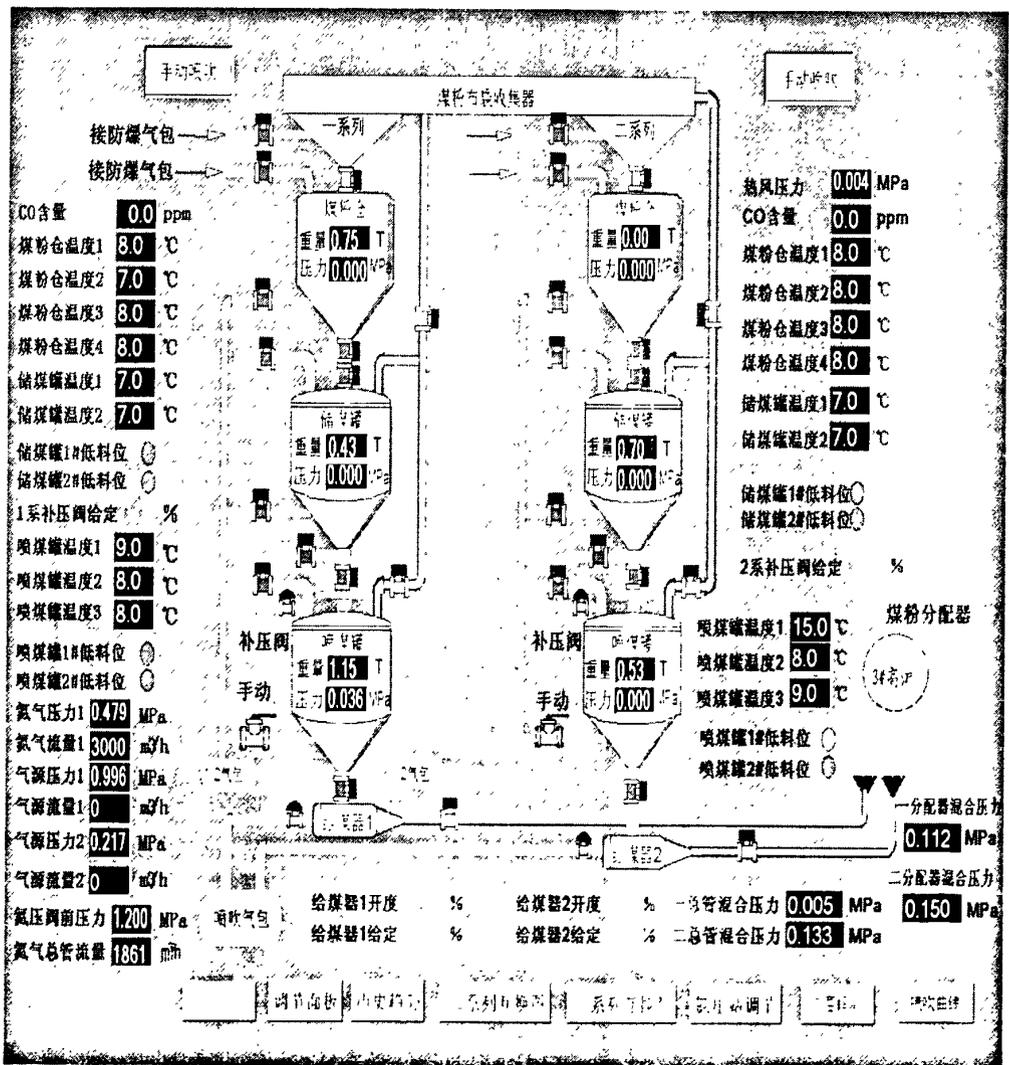


图 4-10 系统检控流程图

Figure 4-10 system prosecution flow chart

②喷煤调节控制画面:

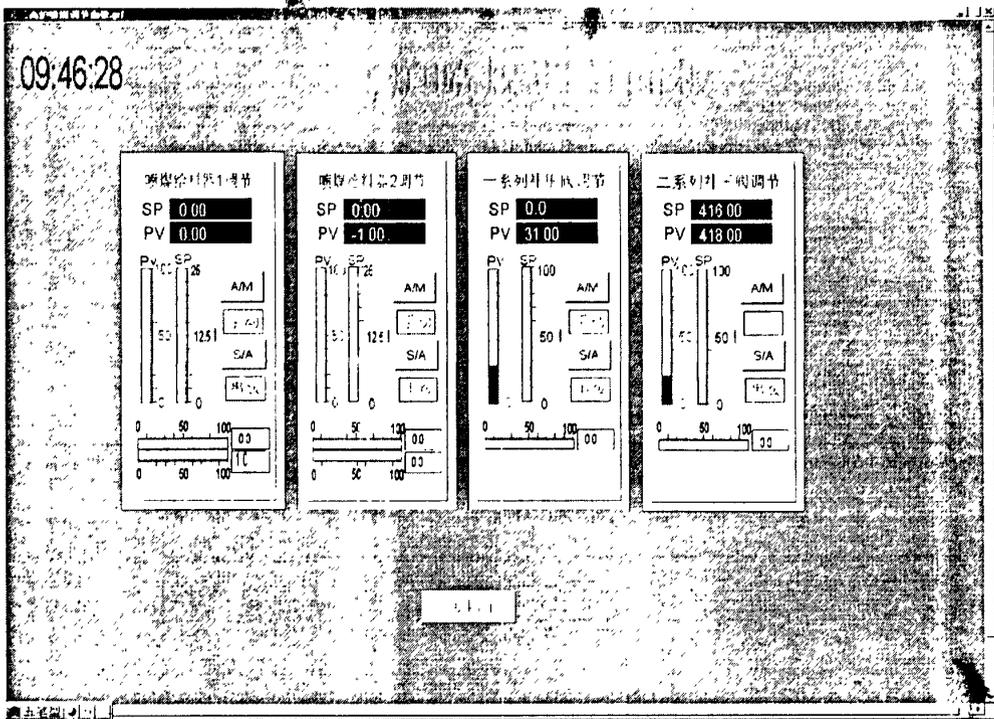


图 4-11 喷煤调节控制画面

Figure 4-11 spurts the coal regulating control picture

4.3 控制算法的实现

1) 数据库的建立

在 SQL server 中建立 PM3HG 数据库, 数据库配置图如下:

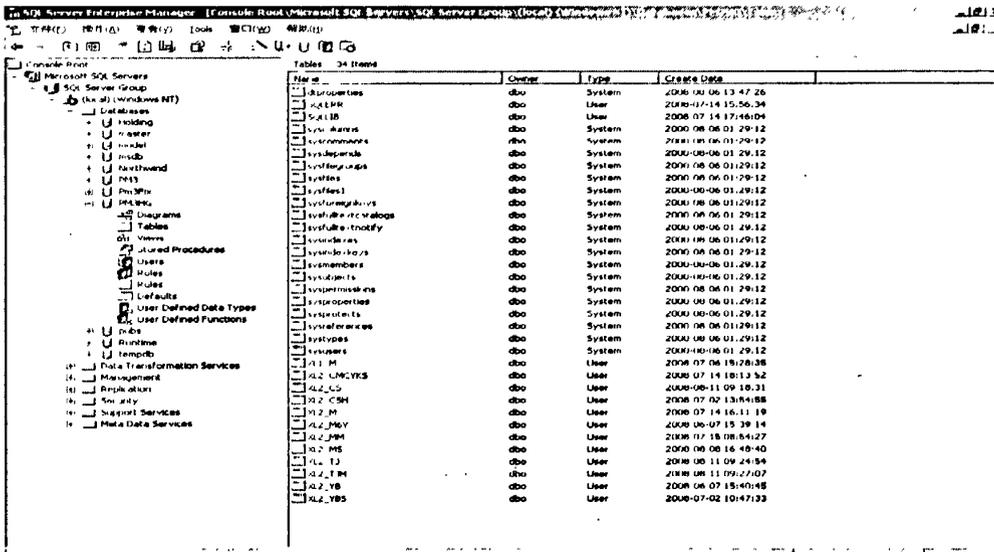


图 4-12 数据库配置图

Figure 4-12 database disposition chart

建立模型数据表，部分主要数据表如下：

| Column Name | Data Type | Length | Allow Nulls |
|-------------|-----------|--------|-------------|
| RQSW | datetime | 8 | ✓ |
| FCW2 | float | 8 | ✓ |
| CMW2 | float | 8 | ✓ |
| FMW2 | float | 8 | ✓ |
| CMP2 | float | 8 | ✓ |
| PMP2 | float | 8 | ✓ |
| PPF2 | float | 8 | ✓ |
| KGM2 | float | 8 | ✓ |
| FSP2 | float | 8 | ✓ |
| HFYL2 | float | 8 | ✓ |
| RFYL2 | float | 8 | ✓ |
| FCXL2 | int | 4 | ✓ |
| CMSL2 | int | 4 | ✓ |
| CMXL2 | int | 4 | ✓ |
| CMCY2 | int | 4 | ✓ |
| CMFS2 | int | 4 | ✓ |
| CMLH2 | int | 4 | ✓ |
| PMFS2 | int | 4 | ✓ |

图 4-13 数据表“XL2-M”配置图

Figure 4-13 data sheet “XL2-M” disposition chart

| Column Name | Data Type | Length | Allow Nulls |
|-------------|---------------|--------|-------------|
| RQSJ | smalldatetime | 4 | ✓ |
| PMP | float | 8 | ✓ |
| PPF | float | 8 | ✓ |
| KGM | float | 8 | ✓ |
| HFYL | float | 8 | ✓ |
| PML | float | 8 | ✓ |

图 4-14 数据表“XL2-YB”配置图

Figure 4-13 data sheet “XL2-YB” disposition chart

2) MATLAB 编程

Matlab 程序是模型计算的核心部分,主要有:数据读入并转换、调用 Matlab 函数计算和计算结果输出三部分。经过编译形成 EXE 可执行文件,通过 VB 调用,实现回归计算功能。具体程序如下:

```
function reg_ana
clear all;
timeoutA=logintimeout(5);
conn=database('odbc_hg','','');
ping(conn);
cursorA=exec(conn,'select * from XL2_YB');
cursorA=fetch(cursorA);
AA=cursorA.Data;
close(cursorA);
close(conn);
[n,m]=size(AA);
X1=cell2mat(AA(:,2));
X2=cell2mat(AA(:,3));
X3=cell2mat(AA(:,4));
X4=cell2mat(AA(:,5));
Y=cell2mat(AA(:,6));
T=ones(800,1);
%save link_data X1 X2 X3 X4 Y
%load link_data
X=[T,X1,X2,X3,X4];
[b,bint,r,rint,stats]=regress(Y,X);
b
bint
stats
timeoutA=logintimeout(5);
conn=database('odbc_hg','','');
ping(conn);
b1=b(1);
b2=b(2);
b3=b(3);
b4=b(4);
b5=b(5);
update(conn,'XL2_CS',{ 'CanShu1' },b1,'where id=1');
update(conn,'XL2_CS',{ 'CanShu2' },b2,'where id=1');
update(conn,'XL2_CS',{ 'CanShu3' },b3,'where id=1');
```

```

update(conn, 'XL2_CS', {'CanShu4'}, b4, 'where id=1');
update(conn, 'XL2_CS', {'CanShu5'}, b5, 'where id=1');
bb=b'
ss=stats
close(conn);
timeoutA=logintimeout(5);
conn=database('odbc_hg','','');
ping(conn);

insert(conn, 'XL2_CSH', {'CanShu1', 'CanShu2', 'CanShu3', 'CanShu4', 'CanShu5'}, bb);
insert(conn, 'XL2_CSJY', {'R', 'F', 'P', 'W'}, ss);
close(conn);

```

计算结果画面:

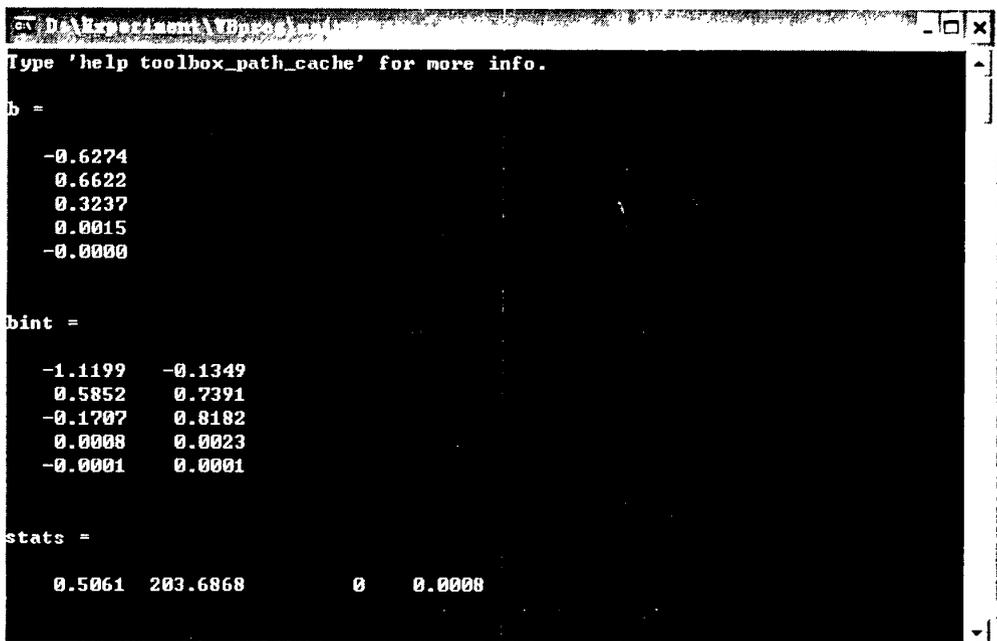


图 4-17 Matlab 程序计算结果画面图

Figure 4-17 Matlab routine calculation result picture chart

其中：**b** 回归系数；**bint** 回归系数的区间估计；**stats** 用于检验回归模型的统计量，有四个数值：相关系数 R^2 、F 值、与 F 对应的概率 p 、误差的方差值，相关系数 R^2 越接近 1，说明回归方程越显著； $F > F_{1-\alpha}(k, n-k-1)$ 时拒绝 H_0 ，F 越大，说明回归方程越显著；与 F 对应的概率 p ，当 $P < \alpha$ 时拒绝 H_0 ，回归模型成立。

3) 模型控制程序:

喷煤量计算和控制数学模型通过 VB 编程实现。主要包括: 人机界面、数据输入处理、喷煤量计算、控制计算、数据处理输出等部分。下面仅列举控制计算程序如下:

```
Private Sub Command4_Click()
    On Error GoTo QueryErr
        ~~~~~不同开度下样本限制~~~~~
        Select Case cc(2)
            Case Is <= 5
                YLKDS = 0.7
                YLKDX = 0.62
            Case Is <= 10
                YLKDS = 0.75
                YLKDX = 0.62
            Case Is <= 15
                YLKDS = 0.76
                YLKDX = 0.65
            Case Is <= 20
                YLKDS = 0.75
                YLKDX = 0.7
            Case Is <= 25
                YLKDS = 0.78
                YLKDX = 0.7
            Case Else
                YLKDS = 0.8
                YLKDX = 0.72
        End Select
        ##### 压力低于限制值时, 调整压力 #####
        If c(2) < 0.8 And c(2) > 0.6 Then
            If c(2) < YLKDS And c(2) > YLKDX Then
                Select Case cha
                    Case Is >= 0.025
                        PSPS = c(5)
                        Label23.Caption = "压力设定不变, 请调节开度 "
                        MsgBox "误差较大, 需要调节开度", 64, "警告"
                    Case Is >= 0.02
                        PSPS = c(5) - 40
                        Label23.Caption = "调节压力设定 -40 "
                    Case Is >= 0.015
                        PSPS = c(5) - 30
                        Label23.Caption = "调节压力设定 -30 "
```

```

        Case Is >= 0.01
            PSPS = c(5) - 20
        Label23.Caption = "调节压力设定 -20 "
        Case Is >= 0.005
            PSPS = c(5) - 10
        Label23.Caption = "调节压力设定 -10 "
        Case Is > -0.005
            PSPS = c(5)
        Label23.Caption = "压力设定正常"
        Case Is <= -0.025
            PSPS = c(5)
        Label23.Caption = "压力设定不变, 请调节开度 "
        MsgBox "误差较大, 需要调节开度", 64, "警告"
        Case Is <= -0.02
            PSPS = c(5) + 40
        Label23.Caption = "调节压力设定 +40 "
        Case Is <= -0.015
            PSPS = c(5) + 30
        Label23.Caption = "调节压力设定 +30 "
        Case Is <= -0.01
            PSPS = c(5) + 20
        Label23.Caption = "调节压力设定 +20 "
        Case Is <= -0.005
            PSPS = c(5) + 10
        Label23.Caption = "调节压力设定 +10 "
        Case Else
            PSPS = c(5)
        Label23.Caption = "压力设定不变, 请调节开度 "
    End Select
    ~~判断修改后的设定压力是否在调节范围内~~
    Select Case PSPS
        Case Is > 800
            PSPS = c(5)
            MsgBox
"调节设定压力高于设定压力要求范围, 需要调节开度", 64, "警告"
        Case Is < 600
            PSPS = c(5)
            MsgBox
"调节设定压力低于设定压力要求范围, 需要调节开度", 64, "警告"
        Case Else
    End Select

    Text7.Text = PSPS
Else
    PSPS = c(5)

```

```

Text7.Text = PPS
Label23.Caption = "压力超过正常调节范围"
End If
Else
MsgBox "压力已经超过设定要求,请调节开度!", 64, "警告"
End If
If cha < 0.005 And cha > -0.005 Then
Else
Timer4.Enabled = False
Timer5.Enabled = True
Label34.Visible = False
Label37.Visible = True
Label37.Caption = "COMMAND4"
End If
Exit Sub

```

4) 模型控制界面:

模型界面主要实现喷煤量目标值输入、相关数据显示、报警提示等功能。实现后的喷煤系统模型控制界面如图 4-18。

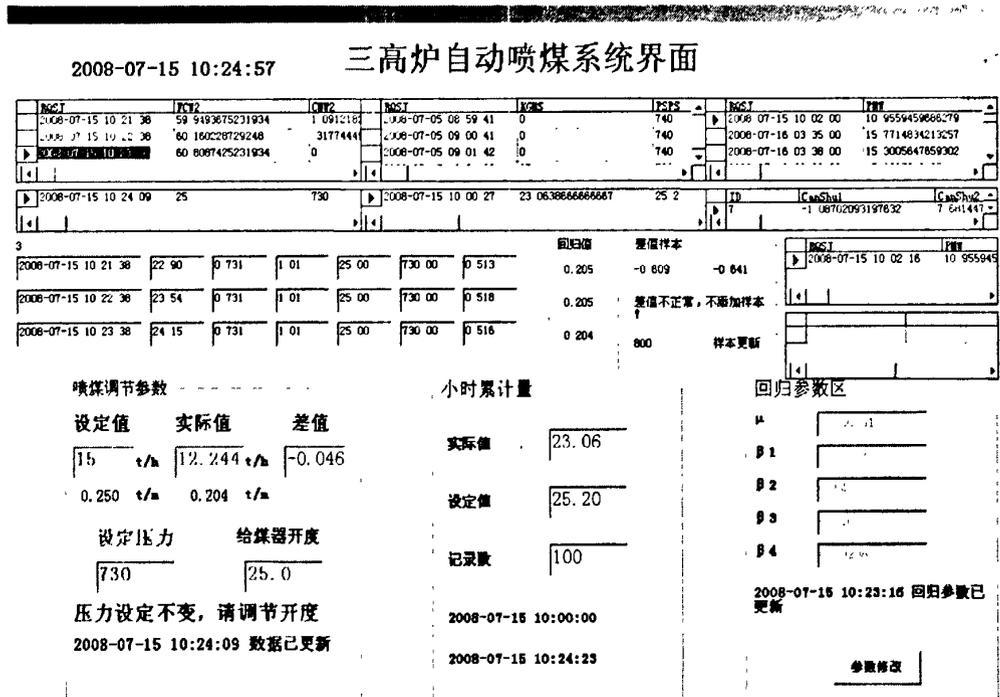


图 4-18 喷煤系统模型控制界面图

Figure 4-18 spurts the coal system model control interface chart

4.4 系统运行效果

高炉喷煤控制系统分两个阶段投入运行：第一个阶段，仅投入喷煤量计算模型，不参与控制。利用三个月运行时间，对比分析计算值与实际值、自动调节设定与操作工手动设定的差别，进行模型完善和修改。期间对多元回归元数进行比较分析，最后确定用四元回归；在控制策略上对比分程控制与范围计算控制对比，选择效果较好的范围计算控制策略。第二阶段，系统控制投入。完全按模型计算控制设定进行控制，操作工仅需输入目标喷煤量，不对系统进行其它操作。从运行情况看，除个别主体设备或自动化设备故障影响外，系统运行平稳。因界面友好、操作简便、控制平稳深受用户满意。运行效果达到预期需求，其中给煤器开度控制偏差率低于 1%，提高 300%；喷煤量控制偏差率达到 $\pm 40\text{kg}/\text{min}$ ，提高 300%，实现了均匀、稳定、大喷吹的总体目标。

第五章 结论与展望

5.1 结论

论文针对以往高炉喷煤控制系统的设计不足,提出三种煤量计算模型算法思想,并择优利用编程工具实现,同时,应用其进行了整个系统的设计与开发。高炉喷煤自动控制系统设计,是高炉能否实现真正意义的均匀、稳定、大喷吹,节焦降耗的关键。本文指出了传统工业控制软件系统设计的不足,并针对以往高炉喷煤控制软件的设计,提出实现控制系统中喷煤量的稳定的关键是要有一个良好的喷煤量计算与控制模型。针对这个问题,利用数学分析方法构建了煤量计算模型,并结合首钢三高炉喷煤工艺,依照一定的开发模型和开发方法,完成了高炉喷煤自动控制系统的设计与开发,并运用建模工具对其应用效果进行了测试,证明其有效性。本文研究工作的主要亮点如下:

1) 结合高炉喷煤串罐工艺过程及对传统喷煤自动控制系统的设计分析,提出高炉喷煤自动控制系统设计的关键是要实现喷煤量的均匀性、稳定性,也就是要实现喷煤量——小时喷煤量的稳定控制。煤粉的计量是实现控制的前提,而工艺系统中未设计煤粉流量计量仪表元件,本文利用结构化分析工具,提出三种煤量计算模型思路,并根据实际采用了多元线性回归分析方法设计了煤量计算模型,应用此模型输出作为PID模块的控制依据,完成整个系统的开发,使控制系统具有良好的性能。

2) 应用软件工程的思想,按照一定的开发模型,依据基于计算机系统的开发周期,进行整个系统的开发,使设计系统具有控制方式不同、采用的技术不同、采用新型煤量计算模型等特点。其中硬件工程设计具有良好的扩展性架构,结合新工艺进行结构化的下位软件设计,应用面向对象及控件技术,实现上位人机监控界面设计,借助软件工具,实现功能相似的对象建立一般类的设计,实现软件重用,大大减少了工作量。

3) 一个好的计算机控制系统,应该能够很好地实现其问题域的求解,即自动控制系统是否成功,关键在于设计功能及模型的应用效果。在系统设计及投运后,采集大量的实验数据,利用matlab来分析研究煤量计算模型的具体应用及效果,通过测试说明在流化风量一定的情况下,喷煤量的大小取决于给喷吹罐

压、喷吹风压力、煤器开度和混合气压力的大小，计算相关度值不断升高，证明了所设计的系统的正确性及实用性。

本系统投产至今，高炉喷煤自动控制软件系统运行平稳，从未出现“空喷”、堵煤、喷煤量偏差过大等不良现象。高炉喷煤自动控制软件系统的设计为今后基于计算机的控制软件系统中软件工程思想的应用提供了有益的借鉴，同时为高炉炉况的稳定顺行创造了条件。

5.2 展望

由于设计研究时间和相关条件的限制，本系统仍有许多后继工作需要探讨：

1) 煤量计量因为是以罐重信号为基础的，所以当罐重信号受到干扰时，会影响计量的准确性，另外，中间罐装煤、充压过程中，过渡状态，也会影响计量的准确性。因此，如何让它既能反应出实际喷煤量，又具有生产适用性是今后有待改进的。

2) 由于系统设计及投运时间比较仓促，所以在一些功能上还有待优化。特别煤量计算模型的应用，和没有考虑到流化风量的影响，这是今后研究努力的方向。

3) 喷吹风压力不能调节，对高炉气压波动影响作用没有及时响应手段。

由于作者水平有限和相关条件的局限，论文中难免存在这样和那样的错误，请各位老师批评指正。

参考文献

1. 周苏, 王文. 软件工程教程 北京 科学出版社, 2002. 10~50.
2. Karlj.Astrom Bjorn Wittenmark. 计算机控制系统理论与设计 北京: 清华大学出版社, 2002. 12~63.
3. 王国雄, 王铁, 沈峰满, 杨仕龙. 《现代高炉粉煤喷吹》 北京: 冶金工业出版社, 1997. 234~235.
4. 谢建民. 安钢1#高炉喷煤自动控制系统研究 [硕士论文]. 北京科技大学, 2002.
5. 梁福臣, 孙昭光. 模糊控制理论在高炉喷煤控制中的应用 钢铁 2005 (1): 131~132.
6. 杨天钧, 刘应书, 杨 珉等. 高炉富氧喷煤- 氧煤混合与燃烧 [M] 北京: 科学出版社, 1998. 54~56.
7. 张志伟. J2EE 构建企业系统专家级解决方案 北京: 清华大学出版社, 2001: 50~230.
8. 刘言金. 我国高炉喷吹烟煤的现状儿点改进意见. 炼铁, 1991 (4): 37~50.
9. 安云沛, 何大华. 13m³高炉喷吹粒煤工业试验研究. 钢铁, 1994, 13 (4): 10~13.
10. Druckenthaner H. Steel Times Internation, 1997(1): 16~18.
11. Druckenthaner H. 钢铁, 200, 35 (8): 13~17.
12. 谢建民, 楚清华, 张志军. 安阳高炉喷煤工业改进. 质量与标准2001 (1) : 23~24.
13. 毕学工. 高炉过程数学模型及计算机控制. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 113~115.
14. 程素森, 刘应书. 我国高炉喷煤工艺及技术分析. 钢铁增刊, 2001: 32~36.
15. 赵正清, 郭永强. 安钢炼铁厂1#高炉富氧喷煤工业试验. 钢铁研究, 2005 (2) 28~30.
16. Sakthidaran R. Software engineering revolution. Computer 2006, 39(5): 6~7.
17. Kathy Schwalbe. Information Technology Project Management, China Machine Press, 2004. 23~25.
18. Basili V.R, Weiss D.M.. A method for collecting valid software engineering data. IEEE Transactions on software Engineering, 1984, 14(6): 728~738.
19. Rorbert L. Glass, Ross Coland, Antonia Bertolino et al. Software Testing and Industry Needs, IEEE Software, 2006, 23(4): 55~57.
20. John W. Satzinger Robert, Jackson Stephen D. Burd, System Analysis and Design in a Changing World. Course Technology, a division of Thomson Learning, 2000. 125~165.
21. C. Larose, S. Guerette, F. Guay, A. Nolet, T. Yamamoto, H. Enomoto, Y. Kono, Y. Hasegawa, H. Taoka. A fully digital real-time power system simulator based on PC-cluster. Mathematics and Computers in Simulation. 2003, 63 : 151~159.

22. Bley, H.Oltermann, R.Wuttke, C. C. Distributed model management system for material flow simulation .Journal of Materials Processing Technology, 2000:107 1-3,478-484.
23. Gou Xiaolong, He Zuwei, Liu Shi. DCS Management System Design For Simulation .Asian Simulation Conf./the 5th int. Conf. On System Simulation and Scientific Computing. Shanghai. Nov.3-6 2002:313-315.
24. D.R.Land. Select the Right Distributed Control System[M], Measurement and Control, 1995, 16-17.
25. 姜鹏, 王哲, 余亮。基于模糊控制的高炉并联罐流化喷煤系统[J] 安徽工业大学学报, 2001, 18 (3): 249~250。
26. 何立音。高炉煤粉喷吹量的自动控制[J] 中国仪器仪表, 2001(2)。
27. 杨婷, 王时胜, 杨剑。系统工程理论在企业经济模型中的应用及计算机仿真。南昌航空工业学院学报, 2002 (4)。
28. 李丹。软件过程度量技术实施策略及其应用研究: [硕士论文]。武汉: 华中科技大学, 2005。
29. 刘维。精通MATLAB 与C++ 混合程序设计[M] 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005。
30. 费业泰。《误差分析与数据处理》北京: 机械工业出版社, 2001。
31. 刘克星, 王玉涛, 魏 颖等。高炉煤粉喷吹控制系统述评[J] 东北大学学报 2001 , 66 (3): 253~255。
32. 刘克显, 王玉涛, 陆增喜。高炉煤粉喷吹量调节系统智能控制的仿真研究[J] 钢铁, 2001, 36 (12) : 11~13。
33. Ian Sommerville. Software Engineering. Addison-Wesley, 1992.
34. 周纪芾。《回归分析》上海:华东师范大学出版社,1991。
35. Chen Gordon. International PLC standard. INTECH,2004,51(4)。
36. 王杰文。可编程控制器。北京: 兵器工业出版社, 2003。
37. 何江。并行计算机I/O子系统结构分析。计算机工程与科学, 2000 (5)。
38. 熊光楞。控制系统仿真与模型处理。北京: 科学出版社, 1993。
39. 陈智勇。计算机系统结构。西安: 电子科技大学出版社, 2004。
40. 袁著祉。现代控制理论在工程中的应用。北京: 科学出版社, 1985。
41. 松本吉弘。计算机控制系统。北京: 冶金工业出版社, 2002。
42. 邹铁鹏。高炉喷吹系统中煤粉流量的模糊控制[J]。山东电力高等专科学校学报, 1998。 1 (1) : 28~30。

致 谢

首先向我的导师高宪文教授致以深深的谢意!感谢导师对我在学业上的悉心指导,使我顺利完成硕士阶段的学习。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。

我还要感谢同事王绪、马利友、隋海杰,在本论文的设计和完成期间,他们用其丰富的学识和实践经验,给予了我极大的帮助与支持,使我受益匪浅。

我最后要感激我的妻儿,正是他们始终如一地支持和理解,才使我有足够的耐心和勇气去迎接未来的挑战。

