

1934620

分类号_____ 密级_____

UCD _____

学 位 论 文

首钢高炉布料控制系统的研究

作 者 姓 名： 缪明军

指 导 教 师： 刘建昌 教授

东北大学信息科学与工程学院

陈 志 高级工程师

北京首钢自动化信息技术有限公司

申请学位级别： 工程硕士 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 论文答辩日期： 2009 年 1 月

学位授予日期： 年 月 答辩委员会主席： 高宪文 教授

评 阅 人： 杨卫国 副教授 陈志 高级工程师

东 北 大 学

2008年12月



A Thesis for the Degree of master in Control Engineering

Research for Distribution Control System of Shougang Blast Furnace

By: Miao Mingjun

Supervisor: Professor Liu Jianchang

Vice Supervisor: Senior Engineer Chen Zhi

Northeastern University

December 2008

独创声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示诚挚的谢意。

学位论文作者签名：

签 字 日 期：

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：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

12-5
12-5

首钢高炉布料控制系统的研究

摘 要

高炉炼铁是整个钢铁生产流水线的龙头环节。它是一个多变量、大滞后、非线性、高温高压多变化、全封闭的复杂的物理化学反应过程。在现有的技术手段下,人还不能直接有效地观察高炉内部反应过程,运用有效的布料工艺合理控制炉况和处理炉内异常是十分重要的。

高炉布料是影响高炉冶炼控制的关键因素,溜槽和料流控制设备是高炉布料的关键设备,通过控制高炉物料料流和溜槽的动作,以达到高炉均匀布料的目的。

本文对首钢高炉布料控制系统进行了分析和研究,在此基础上设计了流量控制系统和布料溜槽控制系统,并在首钢高炉布料实际控制中加以验证。

(1) 本文首先介绍了高炉冶炼技术和高炉炉顶控制技术的发展历程,以及高炉布料的方式,高炉炉顶设备和高炉布料控制工艺。

(2) 研究了入炉炉料运动特性,建立了布料控制模型。并在现有的生产条件下,通过记录料重和节流开度的数据,得出二者之间的内在规律,建立了高炉布料料流控制实际操作方程,并应用于实际生产过程。

(3) 在分析了料流控制和布料溜槽运动控制的规律的基础上,设计了料流调节和溜槽旋转、倾动控制系统,并重点分析了“重量法”和“时间法”布料控制方法,使得恒料流布料控制法得以实现,达到均匀布料的目的。

(4) 在完成控制系统设计后,通过首钢3#高炉炉顶布料控制系统现场调试和系统优化,验证了本文控制系统的设计。控制系统自2006年投运以来:溜槽倾动 α 角控制系统响应速度快,响应速度为2度/秒;系统控制精度达到0.5度/秒,启动切换快速平稳无超调;溜槽旋转 β 角单圈时间基本稳定在6秒/圈,系统误差 $|\text{et}| \leq 0.2$ 秒/圈;料流 γ 角调节无超调。控制系统运行稳定可靠,没有因为控制系统故障影响高炉生产,完全满足生产要求。

本文对高炉布料料流控制和高炉溜槽控制系统设计,以及对指导高炉布料的操作,有一定借鉴作用。

关键词: 布料设备; 布料模型; 料流控制; 溜槽控制

Research for Distribution Control System of Shougang Blast Furnace

ABSTRACT

The blast furnace iron-making which is the main item of entire iron and steel -production assembly line, which is a complex physical and chemistry reaction process with multivariable, big lag, non-linear, the high temperature, high pressure and multiply changes, and entire seal. It is extremely important to reasonably control condition and handle abnormality in blast furnace by utilizing the effective distribution craft what with reaction process in furnace can not be observed effectively under existing technical method.

Distributing is the key fact to affect smelting controlling of blast furnace, whose key equipment is the chute and material flow control equipment. The goal of equably distributing can be carried by controlling the material flow and movement of the chute in blast furnace.

This paper is mainly focused on the following aspects:

(1) First, this paper introduces the developing course of smelting and roof controlling technology, distribution method, roof equipment and distribution control craft of blast furnace.

(2) Secondly, kinetic characteristic of material flow is researched, controlling model of distribution is built. The intrinsic rule of material flow weigh and throttle valve placket is obtained by collecting and recording them under the existing working condition. Then the practical operating function of distribution controlling of blast furnace is built and is applied in production process.

(3) Thirdly, the control systems of adjusting material flow and distribution chute are designed based on analysis the rule of material flow and distribution chute control. The goal of uniform distribution which is stable material flow distribution controlling method is reached by making use of "time-controlling method" and "weigh-controlling method" distribution method.

(4) Finally, The design of controlling system is validated by shakedown test and system optimization of the distribution controlling in No3 blast furnace of Shougang. Controlling system have been employed since 2006, thereinto, the

respond velocity of control system of angle α is $2^\circ/\text{s}$; accuracy of that reaches to $0.5^\circ/\text{s}$, smooth and without overshoot when switching. The velocity of angle β can be limited in $6\text{s}/\text{lap}$, system Error is $|\text{et}| \leq 0.2 \text{ sec}/\text{lap}$; γ angle regulator without overshoot. The production of blast furnace have not been affected because of the failure of controlling system. System operation is stable and reliable, and which entirely meets the requirement of production.

This paper has use for reference for designing control system of distribution material flow and chute and instructing manipulation of distribution in blast furnace.

Keywords: Equipmemts of distribution; Distributing model;
Material flow controlling; chute controlling.

目 录

独创声明	I
摘 要	II
ABSTRACT	III
第一章 绪 论	1
1.1 高炉冶炼技术及炉顶控制技术发展历程	1
1.2 无料钟炉顶主要布料方式	4
1.2.1 单环布料方式	4
1.2.2 双环及多环布料方式	5
1.2.3 螺旋布料方式	5
1.2.4 定点布料方式	5
1.2.5 扇型布料方式	5
1.3 本文的主要工作	6
第二章 炉顶布料设备和控制工艺	7
2.1 引 言	7
2.2 布料主体设备	7
2.2.1 无料钟布料主体设备	8
2.2.2 无料钟布料设备特点	11
2.3 布料主要控制设备	12
2.4 布料主要检测设备和检测原理	12
2.4.1 料罐料位检测	13
2.4.2 料罐重量检测	13
2.4.3 溜槽倾动 α 角、旋转 β 角度和节流阀开度 γ 角检测	15
2.4.4 料罐压力检测	17
2.5 布料工艺流程	18
2.5.1 装料流程	18
2.5.2 布料流程	19
2.6 布料设备控制功能和工作制度	19
2.6.1 料罐控制功能和工作制度	19
2.6.2 节流阀、布料溜槽控制功能和工作制度	20

2.6.3 探尺工作控制功能和制度	20
2.6.4 液压系统控制功能和工作制度	21
第三章 炉顶布料模型建立	23
3.1 引 言	23
3.2 炉顶布料料流控制	24
3.2.1 料流控制原理	24
3.2.2 节流阀料流计算	25
3.2.3 节流阀开度—截面积关系	25
3.2.4 料速的测量	26
3.2.5 恒料流控制	27
3.3 物料运动规律和布料模型建立	29
3.3.1 炉料在布料溜槽上的受力分析	30
3.3.2 炉料在布料溜槽上的运动规律	31
3.3.3 炉料在空区的运动分析	32
3.3.4 布料操作参数	34
3.3.5 布料模型在首钢高炉的应用规律	36
第四章 布料自动化控制系统实现	39
4.1 引 言	39
4.2 料流控制系统	39
4.2.1 料流控制系统硬件	41
4.2.2 料流控制系统软件	43
4.2.3 料流控制 PID 参数整定和运行分析	49
4.3 布料溜槽控制系统	52
4.3.1 控制设备选型	53
4.3.2 溜槽倾动定位和旋转控制	55
4.3.3 控制系统优化运行	58
4.3.4 控制系统运行分析	61
4.4 结 论	63
结 束 语	65
参考文献	67
致 谢	69

作者从事技术研究和学习经历的简历	71
附录 A 系统运行画面	73
附录 B 溜槽运动控制柜参数设置表	77
附录 C 溜槽控制程序流程图	79

第一章 绪 论

1.1 高炉冶炼技术及炉顶控制技术发展历程

现代钢铁工业的建立和发展是一个国家技术进步和综合国力的重要体现。20 世纪初,我国开始形成近代钢铁工业,1949 年,我国仅产生铁 25.2 万吨,产钢 15.8 万吨。新中国成立后,我国钢铁工业进入了一个崭新的历史时期,钢铁工业战线的广大工作者和科技人员艰苦奋斗、励精图治,使我们的钢铁工业得到了空前的发展壮大。2005 年,我国生铁和钢产量突破了 3 亿吨,居世界第一。新中国的钢铁工业的进步和发展是令人瞩目的,但同时,由于我们摊子大、底子薄,全国大部分冶金企业尤其是中小企业的冶炼工艺和冶炼设备还相当落后,同传统的冶金强国比,无论从产品的品种、质量还是从原燃料的能耗等经济技术指标上来讲,我们的差距是相当明显的,我们是钢铁大国,但现在还远不是钢铁强国,我们还有大量的实际工作要做^[1]。

近年来,我国炼铁生产技术处于快速发展阶段,生铁产量高速增长,炼铁装备在向大型化、自动化、高效化、长寿化、节能降耗、高效率方向发展。同时,一些炼铁企业已开始对环保治理方面投入,向清洁炼铁方向发展。应当指出,我国炼铁工业是产业集中度低,高炉平均炉容偏小(约在 500m^3 左右),处于多层次共同发展阶段。现在我国先进的炼铁技术装备与落后的装备并存。我国现有高炉约 900 多座,而大于 300m^3 容积的高炉仅为 362 座;在建设的高炉约 280 座,拟建的高炉约 30 座。

目前我国容积最大的高炉是宝钢 3 号高炉,容积为 4350m^3 ,也是国内装备最先进的高炉。该高炉设备总重量约 3.5 万 t,由重庆钢铁设计院设计,设备制造和成套设备的供应国产化率达 95%,现首钢拟将冶炼部分搬迁,计划在河北省曹妃甸建设 5500m^3 级的高炉。

因专利权问题, 1000m^3 容积以上高炉大多数在使用 PW 公司的无料钟炉顶设备。但是,首钢、包钢、攀钢等高炉也应用了其他类型的无料钟炉顶设备,如 BG 型、SS 型等。近年来我国一批中小高炉在积极采用国产无料钟炉顶,如 SS 型设备,结构简单、功能完善、易于操作维护、运行稳定、成本低,约为进口价的一半。杭钢、三明、邢钢等一批企业高炉利用系数均在 $3.0\text{t}/\text{m}^3\text{d}$ 以上。

高炉炼铁是现代钢铁生产过程的第一道工序,是非常重要的龙头环节,该工序的产品——生铁的产量和质量,对后工序的炼钢和轧钢有较大的影

响。高炉炼铁是一个多变量、大滞后、非线性的复杂的物理、化学反应过程，充满了动量、热量以及质量的传递。由于高炉冶炼是在一个全封闭的高温高压多变化的过程中进行的，在现有的技术手段下，人还不能直接有效地观察高炉内部反应过程，即使是间接的检测分析判断手段也不多，高炉冶炼的炉型、炉温、顺行及渣铁平衡等几个重要环节的控制基本上还完全依赖于工长的操作经验，通过合理有效的运用布料工艺，来有效控制处理炉内异常（管道、边缘气流、坐料、悬料、滑料等）^[1]，几乎是每一个有经验的工长经常运用的手段。

二十世纪七十年代以来，在逐步摒弃了落后的小车上料和料钟布料工艺后，高炉炼铁采用了目前先进的皮带上料和溜槽回旋往复布料，但是，由于受诸多因素的综合影响，布料过程的重要设备——炉顶料罐工艺秤存在较大的称量失真，人们不得不采用粗糙的“单位时间/圈”的布料控制。由于控制工艺及控制设备的精度不够，结果往往导致布料不够均匀，严重时甚至造成炉内偏料，影响炉内矿焦分布的合理层次，从而引起炉况波动，导致高炉操作失常^[2]。广大的炼铁工作者正在不断地探索布料新工艺新方法，寻求更精确、更细致、更可靠的上料手段，以期进一步优化布料，稳定炉况，合理有效的处理炉内异常，达到保持高炉长期平稳顺行的目的。

我国高容积由最初的 100 多立方米，发展到现在的最大容积 5500 立方米。高炉容积的变化带来的是工艺的进步。布料控制技术也随着高炉冶炼工艺的进步，控制技术越来越先进，控制系统也越来越复杂。随着计算机硬件和软件技术的不断发展，先进的计算机技术和网络技术在工业控制中的广泛应用，使得先进的工艺得以在生产实践中得到应用，这也推动了布料控制技术的进步。

二十世纪六十年代，我国高炉布料控制，大多都用继电器连锁控制，一些控制量采用气动仪表显示，高炉布料多是经验加实践控制^[3]。高炉开炉前，需做大量的试验，测得各种炉料在不同高炉料线面上的落点位置，取得大量的数据，以后高炉布料操作完全依靠这些数据。由于炉顶装料方式都是钟式装料，炉顶靠大钟套小钟密封装料和下料，料流不可控。布料控制一般采用气动装置带动布料溜槽动作，控制精度很差。

到了七十年代，随着国民经济的发展，国内对钢铁的需求增加。国内原来的小高炉，冶炼强度小和能耗高，已经不能适应发展的需要。国内高炉开始扩容，原来的有钟炉顶装料方式已经不适应大高炉的需要，此时国外无料钟炉顶技术已经成熟，国内开始引进国外无料钟炉顶装置，料流控制成为可

能。但是由于控制硬件技术没有太大发展，这时主要应用大量仪表，采用手动方式来对高炉布料的料流和溜槽控制，控制精度虽然有所提高，但只是一种粗放式控制。

七十年代末八十年代初，随着单片机技术的发展，单片机迅速应用到一些仪表中，传统 PID 控制技术固化到智能仪表中；随后。单回路、多回路 PID 调节仪表，发展为串级、前馈、后馈、滞后补偿控制方法，古典控制理论转化为现代控制理论，运用现代控制理论的自适应、卡尔曼滤波、自校整、最优、状态空间、多输入输出、协调控制等控制方法^[4]，在冶金过程控制得到广泛应用。高炉布料过程控制量可以通过仪表，实现连锁和调节控制。操作人员可以通过仪表设定一些参数，对布料过程加以精确控制。

九十年代，随着计算机技术进一步发展，小型计算机存储量加大、计算速度更快，再加上计算机网络技术的应用，运用人工智能与知识工程技术，汇集经验操作者的智慧和冶炼理论研究专家的成果，构成多种专家系统，模型可以有效地指导炉料合理分布，降低高炉焦比，改善冶炼状况，保证高炉稳顺生产。首钢高炉的控制系统采用了 PLC 系统，使用工业控制网络，通过 PLC 上网络接口模板与工程师站或监控站的网卡进行通讯。上位监控系统采用友好界面人机接口（HMI）软件，实现生产过程工业流程及各参数的采集显示、报警、回路控制画面，历史数据存储及趋势图，报表等监控功能。布料控制系统中探尺、 α 角、 β 角的控制采用了全数字直流调速装置，根据应用场合的不同，可以通过对装置的参数设定来实现其控制功能。全数字直流调速装置以其紧凑和节省空间的结构为特色，弥补了模拟直流调速系统的不足之处，使系统运行起来更加稳定可靠。全数字系统表现出了较多的优点，如查找故障快、调速精度高、保养与维护简单。高炉专家系统和高炉工长操作辅助决策系统的投入应用，使得该控制系统实现了分布处理与集中管理一体化，而且系统故障率低，自动化程度高，操作简便，控制精度更高。

目前，许多大型高炉采用无钟旋转溜槽布料装置，大多数高炉布料模型都是以模拟料面形状为主，有的借助辅助设备进行料面模拟，如红外摄像机、雷达、激光料面计等，其核心思路均是为了得到比较真实的料面形状，对于布料与煤气流分布之间的关系及控制方法考虑的较少。首钢布料模型中初步考虑的煤气流分布的控制思想，在试验中得到了验证，是可行的，整个布料调整过程的规范化操作，有利于实现对煤气流分布的自动控制^[5]。但是，国内高炉布料有随意发展的现象，有的高炉炉喉不分区，布料角度没有固定对应的环位，调整装料时一般用角度和圈数的变化来实现，由于角度变化多并

且与炉喉面积没有对应关系,增加了调整难度。基于布料模型的现状及规范化布料调整试验的过程和效果,首钢的相关专家提出布料模型今后的发展方向:“控制煤气流分布的布料专家系统”,即:不仅仅局限于模拟料面形状,更重要的是能针对煤气流的变化给出相应的布料调整方案,控制煤气流分布状况。

高炉专家系统开发应用历程表明,不同时期、不同阶段、不同水平、不同形式的开发应用,一直在促进着现代高炉炼铁技术的进步,现已步入闭环控制开发应用阶段,成为高炉冶炼实现“高效、节能、低耗、长寿”的重要途径之一。在高炉装备水平与原燃料客观条件存在明显差距条件下,借鉴国外经验,立足国内高炉条件,自主开发投资省、应用效益显著的实用型专家系统,使其在技术性能上适应国内操作者的传统操作习惯,在功能上满足高炉需求,以便在国内高炉上普遍推广应用。

随着计算机硬件、软件技术和网络通讯设备技术的发展,高炉布料控制系统自动化程度越来越高,控制越来越复杂,系统稳定性越来越高,这给高炉冶炼工艺升级,提供了可靠的保证,给高炉稳定顺行、稳产高产提供了强有力的基础。尤其高炉冶炼模型的开发应用,给高炉故障诊断和高炉实际操作提供了可靠的依据,大大减轻了操作人员的强度,给高炉稳定顺行提供了可靠的基础。随着炼铁新技术和新工艺不断升级和应用,高炉冶炼也将越来越智能化,高炉冶炼从一般小型高炉向大高炉方向发展,从原来粗狂冶炼到精细、节能、环保、能源循环利用方向发展,高炉利用系数和高炉寿命大大提高,综合成本下降,提高了企业市场竞争力。

1.2 无料钟炉顶主要布料方式

高炉由钟式装料发展到无料钟装料,与有钟炉顶相比,无料钟炉顶以密封阀代替料钟进行密封,以溜槽代替料钟完成布料。由于溜槽具有倾动和旋转两个功能,因而可实现多种布料方式。从1970年卢森堡PW公司最先推出无料钟布料设备技术以来,仅十几年的时间就在全世界得到了迅速的推广应用,目前高炉采用布料方式主要有:单环、双环及多环、螺旋、定点、扇型布料方式。

1.2.1 单环布料方式

单环布料与有钟布料的差别在于其角位是可以变化的,溜槽可以在 $0-55^{\circ}$ 范围内任意选定一个角位布料,从而可以使环堆尖从中心变化到边缘的任意一处。

单环布料的关键在于确定好角位与布料圈数及矿焦角差。角位可以根据高炉生产及煤气控制流曲线定好开度角，然后控制一定的下料角来实现。为避免布料过程中不整圈的叠加影响而造成的布料高度不均匀或布料空区的出现一般采取步进式方法来修正，每布完一批料，改变一次倾角，这样可基本消除布料不均所带来的影响^[6]。

1.2.2 双环及多环布料方式

一批料采用两个角位布完，称为双环布料；采用三个以上角位布完，称为多环布料。根据每个角位的卸料量均匀与否又分为均匀双环及多环和不均匀双环及多环。要对煤气流作某种控制时，可以采用非均匀的双环及多环布料。这时的布料程序除选定角位与布料圈数外，还应选好坏与坏之间的矿石角差（环角差）及溜槽的倾动速度与倾动方向。

1.2.3 螺旋布料方式

螺旋布料是溜槽在作旋转运动的同时作连续的倾动运动，为了形成真正的螺旋线，其倾动的速度不能太大，倾动速度过快，易出现不连续的跳动空区，螺旋布料的布料程序，在于确定定位角变化的起始范围、倾动速度和节流开度的配合，其中关键是选倾角变化范围的下限角，下限角过小，则容易造成中心堆积，不利于顺行。统计表明，在确保适当的下限角的前提下，螺旋布料的料面往往比较平坦，且有利于延长炉顶传动设备的使用寿命，从综合指标上要优于多环布料。但是实际运行中，由于传动系统的机械惯性，往往在溜槽圆周的动态调速中难于实现^[7]。

1.2.4 定点布料方式

多用于高炉炉况出现异常（如管道、塌料）之时。常用处理手段及步骤为：

- （1）根据炉喉十字温度分布和炉喉 CO 浓度分析，判断炉况异常点；
- （2）启动布料溜槽并调整至炉况圆周方位；
- （3）调整溜槽倾角至适当角度；
- （4）开下密封及节流阀，正常下料。

1.2.5 扇型布料方式

扇型布料是以一点为起始点，按设定的时间值，顺时针或逆时针旋转到某个位置，再回到起始点，扇型布料起始点必须是 0° , 60° , 120° , 180° , 240° , 360° 六个特定位置中的一个。从起始点计算为起始时间，沿一个方向旋转到设定时间后，再旋转到起始点，重新启动时间计时，重复上述过程。

1.3 本文的主要工作

本文首先总结了高炉布料控制技术发展历程，介绍了国内高炉布料方式、布料重要设备和控制流程，通过高炉布料物料（矿石、焦炭等）在布料溜槽上的运动规律，建立了布料模型，最后在首钢高炉布料实际控制中加以验证。

（1）研究了入炉炉料运动特性，建立料流控制方程；

（2）在分析节流阀开度与料流速度特性基础上，通过建立实际控制系统，通过对矿石、焦炭流速开度关系的分析，建立了布料实际控制方程；

（3）研究了影响高炉布料的关键控制设备——节流阀和溜槽的控制特性，设计了比例阀 PID 调节器，以及溜槽速度和电流控制调节器；

（4）本文重点分析了布料控制中的两种恒料流控制方法：时间控制法和重量控制法，时间控制成功应用于高炉布料操作实践中；对重量控制法提出改进建议，需进一步完善；

（5）对设计的布料控制系统，选择合适的软件、硬件平台，成功应用于首钢三高炉实际布料控制中，通过编程和调试，以及对控制系统运行分析，验证了控制系统的设计。

第二章 炉顶布料设备和控制工艺

2.1 引言

高炉布料设备是高炉布料控制的关键因素，随着高炉容积的提高，容积由 100 多立方米，发展到现在国内最大容积 5500 立方米，原来的装料设备已经不能适应高炉布料的要求，为了达到高炉均匀布料和冶炼控制的目的，装料方式也由钟式炉顶装料方式，向钟阀式装料方式、无料钟装料方式发展。布料设备是完成高炉布料的重要载体，布料设备的可靠性、稳定性，与高炉布料密切相关，布料设备也随着布料工艺的变化而改进，例如原来布料倾动控制传动变速箱密封氮气冷却密封改为由水冷密封，不仅节约了大量氮气，而且原来冷却效率低，齿轮经常出现卡阻现象，影响布料操作，改为冷却水后，基本消除了以上现象，为布料控制提供了设备上的保障。无料钟布料自动化设备和检测设备，越来越先进，系统稳定性可靠性增强。本章就炉顶对布料主体设备、控制设备和检测设备展开详细介绍。无料钟炉顶的设备主要包括：工艺主体设备、系统控制设备、检测设备和冷却设备，其设备结构框图如图 2.1 所示。

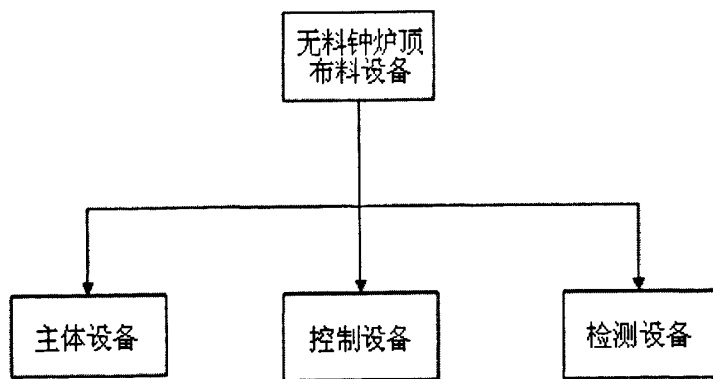


图 2.1 无料钟炉顶设备框图

Fig 2.1 The structure diagram of bellless-top equipments

2.2 布料主体设备

高炉布料控制主要控制炉料料流和布料溜槽，首钢高炉容积都在 2000 立方米以上，都采用无料钟炉顶装料方式，下面安装有节流阀，来控制炉料

料流，让炉料根据布料控制要求，调节料流速度。

2.2.2 无料钟布料主体设备

无料钟炉顶布料主体设备包括称量料罐、上下密封阀、料流节流阀等组成，这些设备在布料控制系统起到了关键作用。无料钟炉顶布料从料斗罐与称量罐的排列方式来看，无料钟炉顶装料设备分为并罐式和串罐式两种结构形式，PW公司早期推出的无料钟炉顶设备样机即是并罐式结构，目前首钢高炉多采用这种形式。并罐式无料钟装料设备主要由以下几个部分组成：

- 称量料罐
- 上下密封阀
- 料流调节阀
- 带有波纹补偿器
- 检修用眼镜阀
- 布料溜槽传动齿轮箱
- 气密箱
- 阀旋转布料溜槽
- 料线探尺

(1) 称量料罐

称量料罐是高炉布料过程中入炉原燃料在高炉炉顶的暂时存储地。首钢高炉炉顶有东、西两个球型料罐，为双罐并联式，单罐自重约 70 吨，有效装载重量为 150 吨，料罐的上部有 N1 皮带机头翻板，由 PLC 连锁控制盖东盖西，相应进行对西罐和东罐的装料过程。罐身上部有上密阀、均压阀、放散阀、料罐压力检测表、料空料满检测探头；中部有三只重量传感器；下部有节流阀、下密阀和料空检测探头。

称量料罐安装在皮带机头翻板和上部料闸的下部。用作炉料储存和称量，并配合上、下密封阀的操作，可实现装料功能。

(2) 上下密封阀

为保证高炉在高压（0.2MPa）下把原料顺利地装入炉内，料罐上、下口均装有密封阀，称为上下密封阀。

上密封阀安装在料罐的顶端，上部连接料罐的受料口，下部与料罐罐体相通，上密封阀的阀座安装在料罐上口内法兰上，其阀盖固定在传动轴上，工作在 0.2MPa 压力的料罐内，液压缸等传动装置在料罐外工作。在放散阀的协调动作下，料罐与炉外均压，上密封阀打开，向料罐内装料，一批料装完即关闭。

下密封阀安装在料罐下端的称量斗支架内，上部连接料罐出口的流量调节阀，下部与中间漏斗相通，当称量斗需要放料时，经过充压阀的协调动作，料罐与炉内均压，下密阀打开，炉料进入中间漏斗，在经过波纹管、短节、中心喉管、布料溜槽装入炉内。

(3) 料流调节阀

炉顶调节阀又称流量调节阀，安装在料罐下口的称量斗支架内，下部与下密封阀相通，当料罐需要放料时，下密封阀打开，料罐、中的炼铁原料在调节阀的控制下，以一定的流量在一定的时间内装入高炉。

料流调节阀是无料钟炉顶装料系统中调节排料速度或排料时间的唯一手段。阀门由液压缸操作，其开度调节由液压系统中的比例阀控制，由一套分辨率为 0.1 度的自整角机作为数字位置检测与位置设定系统。比例阀按可编程序控制器的指令工作，在实际工作中，可编程序控制器根据上批布料误差，发出修正下批炉料阀门开度的指令，实现闭环控制。

料流调节阀由左右两个液压缸、两个传动轴和阀板、摇臂、填料盒、油环、轴套、及密封圈等组成，其阀板及摇臂固定在左右两个传动轴上，靠左右两套传动装置驱动。其结构与上料闸门的基本结构相同，由两个半球型闸门构成，料流口呈方形。这种结构的特点是不论闸门的开度大小，料流总是对中心的，其安装位置在与称量料罐锥体下部相连的阀箱内下密封阀的上部。

(4) 多段波纹管

为吸收高炉在投产后由于温度的影响（当炉顶温度在 100℃ 时，炉顶设外封板的膨胀量为 10 mm）和装料时无料钟炉顶设备所承受的反复载荷（年约 17 万次）、风载荷（最大风速 22.4 km/h）、地震（基本烈度为 7 级设防）等所造成的布料溜槽传动齿轮箱与称量料罐间的相对位移，固定在下阀箱与布料溜槽传动齿轮箱间设置一个能吸收径向和轴向位移的波纹管（下阀箱下部、眼镜阀上部）。波纹管选用 9 波 2 段组合而成，最大允许轴向位移 ± 25 mm。

波纹管由上下法兰、下支撑板、中间螺杆、保护板、两段九波纹的波纹管及耐磨衬套组成。其中波纹管材质为 1Cr8NiTi，耐磨衬套可减少磨损。

(5) 眼镜阀

眼镜阀用于高炉休风时，把无料钟炉顶设备部分从布料溜槽传动齿轮箱上表面处与高炉内侧隔开，以确保在安全状态下实现对无料钟炉顶设备的检修和维护。其安装位置多在多段波纹管下法兰及布料溜槽传动齿轮箱上部法兰之间。

眼镜阀由带有密封阀的阀板、上下阀座、压紧装置及传动装置等组成。眼镜阀通过液压马达驱动销齿轮转动，销齿轮带动固定于阀板上的销齿，从而使阀板作往复运动。阀板具有通孔侧及盲板侧，构成眼镜形。

眼镜阀还有 4 个阀板用的单向油缸，当启动油缸时，则压紧装置首先将上部阀座与阀板分离 7.5 mm，随后通过导向齿轮把阀板从下部阀座上提升 8.5 mm，然后如前所述通过液压马达驱动阀板，将阀板通孔侧或盲板侧对准通道达到开启或关闭眼镜阀的目的。

(6) 气密箱

气密箱位于料罐下部，炉喉上部，是连接炉顶料罐和高炉本体的咽喉通道，也是布料溜槽齿轮传动部件的所在地，是整个高炉冶炼控制的几个焦点环节之一。因此，自第一台带有闭路循环水冷却系统的水冷却溜槽齿轮箱投入生产后，水冷传动齿轮箱变成了无料钟炉顶装料系统的一个标准装备，得到了广泛的应用。在我国也相继有宝钢、鞍钢、武钢及马钢引进了 PW 公司生产的水冷却传统齿轮箱。

1998 年 12 月，首钢首次在四高炉实验水冷氣密箱，但由于机械结构上存在一些不足，在实际运行中遇到了一些未曾意识到的问题。布料溜槽的圆周运动中，在固定的圆周径向上有机卡阻现象，导致拖动电机经常性地出现大电流堵转，造成电气控制柜及曳引直流电机的故障。在经过认真的故障原因分析和采取必要的改进措施后，99 年 11 月底，首钢在一高炉开始了第二套水冷氣密箱的实验性运行工作。从 12 月 3 日一高炉投产以来，新使用的水冷氣密箱工作基本稳定，节能效果明显，由于冷却水的投入，节约 N₂ 气量在 50% 以上，取得了较好的节能效果，一般气密箱温度控制在 50 度以内。

(7) 布料溜槽

布料溜槽在机械结构上相对简单，是一个长 3.5m 圆柱形空槽。正常工作时，布料溜槽同时进行两种方向的运动：圆周回旋运动 + 径向往复运动。两种运动的合成的理想效果为：在高炉内部的水平料面上形成一圈一圈的均匀的布料轨迹。

布料溜槽倾动齿轮箱安装在溜槽传动齿轮箱本体内部，在倾动耳轴上增加了循环水冷，避免由于与布料溜槽鹅头体连接的耳轴部分长期受高温烘烤，加之溜槽受热后的变形，造成倾动耳轴与布料溜槽卡死而使倾动电机过载。采用循环水冷却倾动耳轴，关键是进出水的密封，既要保证密封性能良好，又要保证工作可靠。耳轴冷却水管采用密封法兰、填料、密封加润滑，采

取冷却措施后,耳轴温度约为 -50°C 。布料溜槽悬挂并牢固地锁定在溜槽传动齿轮箱倾动耳轴上,并借助于溜槽传动齿轮箱实现溜槽的旋转和倾动运动,把高炉炉料均匀连续地分布到炉喉内需要的部位,以获得较好的炉料分布效果,减少炉料偏析。

(8) 料线探尺

对于现代高炉,保持稳定的料线是达到准确布料和高炉正常工作的重要条件之一,料线设备是用来探测料线位置的一项重要设备。首钢高炉的垂直料线检测设备包括3台6m探尺。

首钢1#高炉的三台垂直链子探尺安装在标高为43.05 m处,“尺”的升降分别由单独的直流电动机装置驱动。当炉顶装料设备开始向高炉内装料时,首先把链子探尺提到最高位置,一批或几批料装完后,链子探尺下降触到料面,由于冶炼过程的消耗,料面不断下降,链子探尺不需外力只靠其自重牵动驱动装置反转,自身也随着料面下降,从每个链子探尺下降的距离可以判断料线高度。

2.2.2 无料钟布料设备特点

无料钟布料设备,是70年代卢森堡 Paul-Wurth (简称PW公司)发明的第三代炉顶布料设备(亦称BLT设备),在其后的20多年里,高炉BLT布料设备在全世界范围内得到了广泛的采用,并在实际的操作中积累了大量的经验,成为大中型高炉炉顶布料设备发展的趋势。无料钟炉顶布料设备有如下优点:

- 布料手段灵活:无料钟炉顶可按环形、螺旋形、扇形和定点四种方式进行布料,控制精确,能够实现计算机模拟预测炉料分布并通过预选布料程序来达到炉喉煤气分布的最佳状态,从而减少高炉生产中的炉况变化,将炉料布到炉喉断面的任何区域,最大限度地满足高炉内部炉况调剂的要求,起到稳定炉况,保持高炉顺行,进而延长炉役期,提高产量的作用;

- 设备重量轻,投资省:由于取消了大小钟及大小料斗等笨重而又需要精密加工的零件,炉顶结构大大简化。从而减轻了炉顶钢结构,降低了炉顶总高度,减少了设备的投资,与钟阀式炉顶相比,无料钟炉顶设备的重量仅为钟阀式炉顶的40-50%,投资减少到钟阀式炉顶的50-60%;

- 密封性能好:由于密封阀尺寸较小,大大减少了密封面积,提高了密封性能,从而能够适应高炉长期的高压操作,且在密封件的使用寿命以及检修作业更换上也大大优于钟式炉顶;

- 运转费用低:无料钟炉顶设备的运转费用仅为钟阀式炉顶设备的

20% ;

● 维护维修工作量小、时间短：一般维护维修作业均能在高炉例行休风的 8 小时内完成；

2.3 布料主要控制设备

(1) 计算机控制设备

三高炉无料钟炉顶的计算机控制设备主要由两个部分构成：上位微机、监控人机界面软件和编程软件构成；现场过程控制采用 PLC 控制系统，二者间通过工业控制网络互联，完成数据通讯任务。

PLC 控制系统采用 MODICON 公司 984-785E 控制器，系统通过远程 I/O 适配器 S908 和 J890 分挂 4 个远程站。系统采集的参量主要有：炉顶各阀的控制及阀位状态采集、冶炼过程各模拟参量的采集显示连锁报警。通过 PLC 的梯形图编程，完成整个布料、料速等环节的自动控制。

上位监控系统包括一套编程器和 2 套监控计算机，用来对整个布料过程的工艺监视和联机在线操作。它具有重要工艺参量的自动声光报警、工艺流程状态监控等功能，是高炉布料操作不可或缺的重要工具。

(2) 传动控制设备

可控硅传动设备选用西门子全数字直流调速装置，装置内部集成控制软件，构成速度、电流双闭环控制器，完成布料溜槽控制系统速度和电流的双重调节。其控制对象有：溜槽倾角控制、溜槽圆周运动控制。

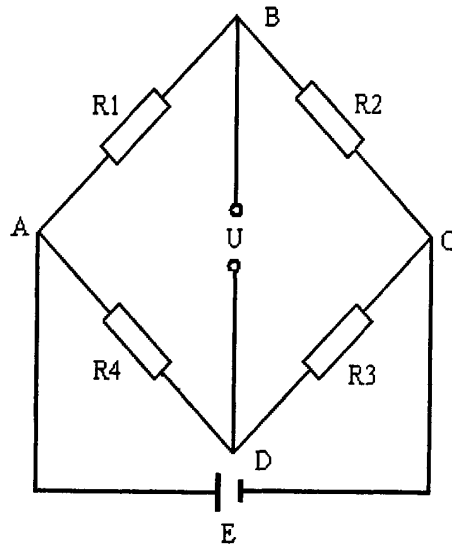
2.4 布料主要检测设备和检测原理

高炉冶炼是一个密闭、高温化学反应过程，炉顶布料结果，直接影响高炉冶炼强度。操作工根据炉况的变化，通过调整物料在炉内分布，调整高炉炉况。任何操作最终要靠布料操作来完成，而布料操作是根据实现测量或理论计算的模型，来控制布料操作。布料操作参数的设定和动作启停，要精确称量每批料的重量以及检测料空、料满信号来实现；要精确、均匀地把物料分布在炉内，在检测节流阀开度、溜槽倾动和水平旋转等信号的同时，也测定炉内料线的高度，因为料线的变化，直接影响物料在高炉水平面上落点，进而影响高炉的内炉料厚层变化，引起高炉内煤气流分布不均匀，使得高炉炉况不稳定，影响高炉产量。所以，高炉布料检测设备能间接真实反应高炉炉况的变化，对检测设备的精度、可靠性和稳定性提出了更高要求，检测设备必须满足工作在高温、粉尘、腐蚀性气体等恶劣环境下，而且同时满足长

(2) 测量电路原理

通过在物体上粘贴电阻应变片，可以将物体的应变转换为应变片的电阻变化，但是通常这种电阻变化是很小的。为了便于测量，需将应变片的电阻变化转换成电压（或电流）信号，再通过电子放大器将信号放大，将放大的电流或电压信号换算成重量值，完成重量测量。

压头中应变电桥如图2.3所示，电桥中各桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 可以全部是应变片（全桥式接法），测量电桥桥路AC端的供桥电压为 E ，则在桥路BD端的输出电压为：



2.3 压头测重原理图

Fig 2.3 The schematic diagram for weight measurement of load cell

$$U = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) E = \left(\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right) E$$

由上式可知，当桥臂电阻满足： $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 时，即压头没有重物压力时，电桥输出电压 $U=0$ ，称为电桥平衡，此时输出重量信号为零。

(3) 电桥输出电压

当压头上有重物压力时，起始处于平衡状态的电桥各桥臂（应变片）的电阻值都发生了变化，即：

$$R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R_1 \quad R_2 \rightarrow R_2 + \Delta R_2 \quad R_3 \rightarrow R_3 + \Delta R_3 \quad R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R_4$$

此时电桥输出电压的变化量为：

$$\Delta U \approx \frac{\partial U}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial U}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial U}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial U}{\partial R_4} \Delta R_4$$

期工作的要求。

2.4.1 料罐料位检测

料罐料位检测器分三部分组成：放射源和接收装置、信号处理，放射源采用同位素钴 60。工作原理是：钴 60 是一种连续发射 γ 光子的放射性元素，当 γ 光子穿过物质时与吸收物质的原子一旦发生光电效应、康普顿效应和电子对效应，原来的能量就消失，或散射后能量改变并偏离原来的入射方向。即 γ 射线穿过物质时，强度逐渐减弱，如果物料的厚度足够大时，就只有很少的 γ 光子穿过，工作原理如图 2.2 所示：



图 2.2 料位检测工作原理图

Fig 2.2 The schematic diagram of material level detection

接收装置由闪烁管、光电倍增器、前置放大电路组成。闪烁管接收放射源的 γ 射线，光电倍增管将微弱的光信号转化为电信号并放大，放大后的信号送前置放大器滤波放大，然后送到信号处理单元，信号处理单元设定高、低料位电压阈值，当电压信号大于阈值时，发出低电平信号；反之发出高电平信号。

料位测量装置是根据这一原理设计而成。当料仓内无料时，有一定量的 γ 光子穿过并被探测器接收送至主机处理显示料空；当料仓内有料时，探测器接受到的 γ 光子数量很少（接近天然本底）经主机处理后给出料满信号。

2.4.2 料罐重量检测

料罐重量检测系统分两部分组成：压头和信号变送器二次仪表。压头为应变片电阻电桥 MV 输出测量方式，一次检测元器件为 Philips 高精度的测量压头；二次仪表为首钢电子公司生产的 GB03 型称重变送器，它在为一次压头提供 12VDC 电桥回路的同时，输出 4-20MA 和 1-10VDC 标准信号，供计算机采集和数字显示表显示之用。

(1) 电阻电桥应变测量原理

电阻应变测量方法，是将电阻应变片粘贴在被测物体的表面，再根据应变—应力关系（即电阻—应变效应）确定物体表面应力状态的一种测量方法。这种方法是以前粘贴在被测物体表面上的电阻应变片作为传感元件。当物体变形时，电阻应变片的电阻值将发生相应的变化，并换算成应变值或输出与此应变值成正比的电压（或电流）信号，就可得到所测定的应变或应力。

该输出电压的变化可作进一步简化:

$$\Delta U \approx \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

在上述电桥中, 各桥臂上的应变片的初始电阻值全相等, 灵敏系数K也相同, 于是, 以 $\frac{\Delta R_n}{R_n} = K\varepsilon_n$ 代入上式, 得:

$$\Delta U \approx \frac{KE}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

由于 $\varepsilon \propto W$, 因而 $\Delta U \propto W$, 电桥输出电压变化反映了压头上重物的重量变化, 根据以上测量原理, 压头完成重量的检测。

2.4.3 溜槽倾动 α 角、旋转 β 角度和节流阀开度 γ 角检测

溜槽 α 、 β 角度和节流阀开度 γ 角检测, 都是由自整角机来测量。自整角机由发送机和接收机组成, 自整角机的工作原理如图 2.3 所示。

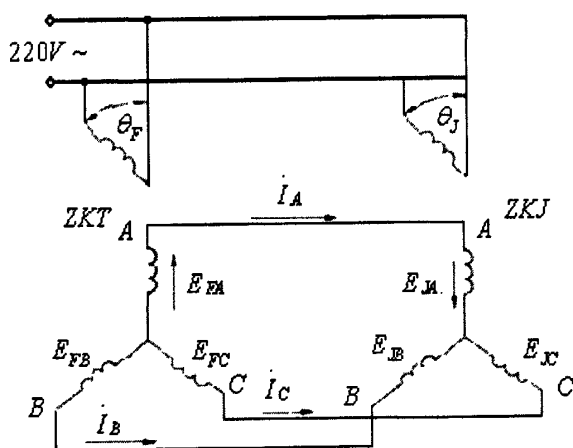


图 2.4 自整角机工作原理图

Fig 2.4 The operating schematic diagram of self-regulator angle

- 图中 θ_F —— 自整角机发射角;
 θ_J —— 自整角机接收角;
 ZKT —— 自整角机发射机;
 ZKJ —— 自整角机接收机;
 I_A —— A 相脉动电流;
 I_B —— B 相脉动电流;
 I_C —— C 相脉动电流;
 E_{FA} —— 发射机 A 相绕组感应电动势;

E_{FB} —— 发射机 B 相绕组感应电动势；

E_{FC} —— 发射机 C 相绕组感应电动势；

E_{JA} —— 接收机 A 相绕组感应电动势；

E_{JB} —— 接收机 B 相绕组感应电动势；

E_{JC} —— 接收机 C 相绕组感应电动势。

图中由结构、参数均相同的两台自整角机构成自整角机组，一台用来发送转角信号，它的励磁绕组接到单相交流电源上，称为自整角发送机，用 ZKF 表示。另一台用来接收转角信号并将转角信号转换成励磁绕组中的感应电动势输出，称之为自整角接收机，用 ZKJ 表示。两台自整角机定子中的整步绕组均接成星形，三对相序相同的相绕组分别接成回路。

在自整角发送机的励磁绕组中通入单相交流电流时，两台自整角机的气隙中都将产生脉振磁场，其大小随时间按余弦规律变化。脉振磁场使自整角发送机整步绕组的各相绕组生成时间上同相位的感应电动势，电动势的大小取决于整步绕组中各相绕组的轴线与励磁绕组轴线之间的相对位置。当整步绕组中的某一相绕组轴线与励磁绕组轴线重合时，该相绕组中的感应电动势为最大值，用 E_{Fm} 表示电动势的最大值。

设发送机整步绕组中的 A 相绕组轴线与其对应的励磁绕组轴线的夹角为 θ_j ，接收机整步绕组中的 A 相绕组轴线与其对应的励磁绕组轴线的夹角为 θ_F ，发送机整步绕组中各相绕组的感应电动势有效值为：

$$E_{FA} = E_{Fm} \cos \theta_F$$

$$E_{FB} = E_{Fm} \cos(\theta_F - 120^\circ)$$

$$E_{FC} = E_{Fm} \cos(\theta_F - 240^\circ)$$

式中 E_{Fm} —— 感应电动势最大值。

可以证明：接收机励磁绕组的合成电动势，即输出电动势 E_0 为：

$$E_0 = E_{om} \cos \theta$$

式中 E_{om} —— 最大输出电动势有效值。

从上式看出，失调角 $\theta=0$ 时，接收机的输出电动势为最大，且与失调角 θ 有余弦关系的输出电动势不能反映发送机转子的偏转方向，故很不实用。实际的控制式自整角机是将接收机转子绕组轴线与发送机转子绕组轴线垂直时的位置作为计算 θ_F 的起始位置。此时，输出电动势表示为：

$$E_0 = E_{om} \cos(\theta - 90^\circ) = E_{om} \sin \theta$$

由于接收机转子不能转动，即是恒定的。自整角机的输出电动势的大小反映了发送机转子的偏转角度，输出电动势的极性反映了发送机转子的偏转

方向，从而实现了将转角转换成电信号。自整角机发送机与 α 、 β 角传动齿轮箱同轴相连，接收机与发送机同步转动，真实反映 α 、 β 的实际角度，完成角度检测。

2.4.4 料罐压力检测

压力检测表安装于料罐罐身上部，为传统的 1151 电容薄膜位移式检测仪表。材料技术的不断发展，极大地丰富了压力测量产品的种类，压力传感器的敏感原理不仅有电容式、压阻式、金属应变式、霍尔式、振动式等等，但仍以电容式、压阻式和金属应变式传感器最为多见。金属应变式压力变送器是一种历史较长的压力传感器，但由于它存在迟滞、蠕变及温度性能差等缺点，其应用场合受到了很大的限制。压阻式传感器是利用半导体压阻效应制造的一种新型的传感器，它具有制造方便，成本低廉等特点，但由于半导体材料对温度极为敏感，所以其性能受温度影响较大，产品的一致性较差。电容式压力变送器是应用最广泛的一种压力变送器，其原理十分简单，如图 2.5 所示。

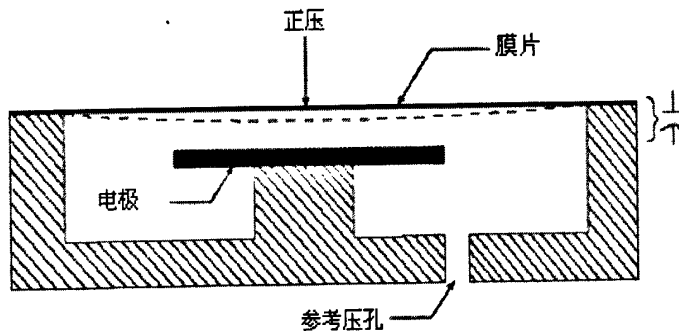


图 2.5 压力变送器工作原理图

Fig2.5 The operating schematic diagram of pressure transducer

一个无限大平行平板电容器的电容值可表示为： $C = \epsilon s/d$ （ ϵ 为平行平板间介质的介电常数， d 为极板的间距， s 为极板的覆盖面积）改变其中某个参数，即可改变电容量。由于结构简单，几乎所有电容式压力变送器均采用改变间隙的方法来获得可变电容。电容式压力变送器的初始电容值较小，一般为几十皮法，它极易受到导线电容和电路的分布电容的影响，因而必须采用先进的电子线路才能检测出电容的微小变化。

压力变送器采用了结构简单、坚固耐用且极稳定的可变电容形式，可变电容由压力腔上的膜片和固定在其上的绝缘电极所组成，当感受到压力变化时，膜片要产生微微的翘曲变形，从而改变了两极的间距，检测电路测电容

2.5 布料工艺流程

上料系统根据高炉操作制度或特殊要求，按设定程序选择料种。高炉炉料（烧结矿、球团矿或焦炭等）从仓下储料罐，经过放料闸门，开始放料。炉料落到料罐下面的振动筛上，经过筛分的合格炉料由运输皮带送至高炉炉顶料罐，不合格的炉料返回原料场。布料工艺流程如图 2.6 所示，布料工艺流程分为：装料流程和布料流程。

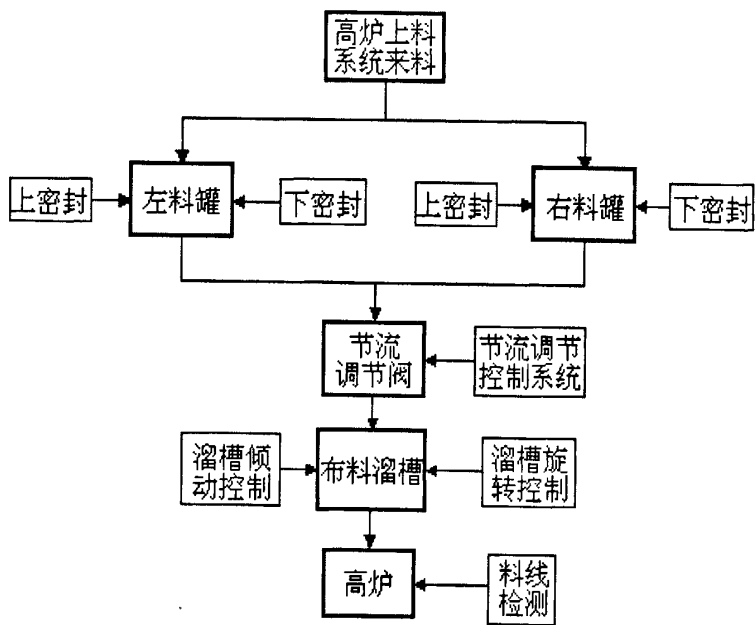


图 2.6 布料控制流程图

Fig 2.6 The flow process diagram of distribution control

2.5.1 装料流程

焦炭、烧结矿等入炉料，经皮带运输机输送至高炉炉顶料罐。由操作人员选择受料料罐，受料罐装料批数和最多装料批数由操作工设定。当每批炉料（矿批或焦批）的料头通过三检（料罐前最后料头检测信号）时，要检查所选料罐是否放空、上料阀和上密封阀是否打开，下密封阀是否关闭，当以上条件都满足，皮带继续运行将炉料送至料罐内。称量料罐放散阀打开，料罐开始放散。当料罐内压力等于大气压力时，放散完毕。此时系统打开上密封阀和上料闸门向料罐内加料，当料位检测或称量料罐重量检测达到设定值

时，装料完成。系统关闭上料闸门和上密封阀，此时料罐开始均压。一旦探尺到达设定料线就进行布料，发出布料信号，启动布料程序布料开始。首先系统打开下密封阀，并将料流调节阀打开至设定开度，料罐中的炉料通过料流调节阀落到布料溜槽上。在布料期间，控制系统通过 γ 射线料位计检测料罐料位，一旦检测到料空信号，系统马上关闭料流调节阀和下密封阀，打开放散阀进行放散，准备下一次放料。

2.5.2 布料流程

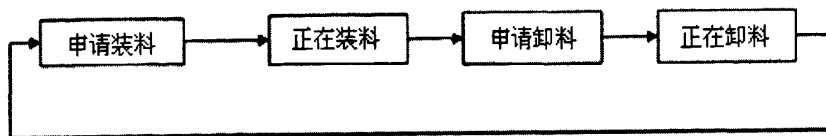
高炉在每一批炉料布料过程中，允许焦、矿设定两个不同的料线位置，当探尺到达设定的料线位置后，探尺自动提升，发出布料信号。此时，料罐均压阀打开，当料罐内压力与高炉内压力相等时，料罐下密封阀打开，布料溜槽倾动 α 角调整开始启动； β 角按设定速度旋转，并到达布料位置，再开启料流调节阀，按照批重和设定的布料程序，调节料流调节阀开度和设定的溜槽倾角，使每圈料流均匀、重量相等和首尾相连接的料流向高炉炉喉区任意布料。

2.6 布料设备控制功能和工作制度

高炉布料流程中关键设备控制和工作制度主要包括：料罐控制功能和工作制度、节流阀和布料溜槽控制功能和工作制度、探尺控制功能和工作制度、液压系统控制功能和工作制度。

2.6.1 料罐控制功能和工作制度

主要是按照冶炼工艺要求，控制炉顶两个料罐机械设备，同时，接收上料皮带系统传来的各种料种，并在放料时将其传送给布料溜槽。炉顶有两个料罐，可单独工作，也可同时工作。同时工作时，两罐装料料种常常不同，工艺要求在一定的时间内自动倒换一次。为达到此目的，程序设计了三个键和一个寄存器来控制两罐的倒用：1#罐工作键，2#罐工作键，倒罐控制键和倒罐计数器。操作人员通过操作这三个键和设定倒罐计数值达到调用不同程序的目的。两个料罐都按同样规律工作：



为了清晰的表达料罐工作过程，避免重料，程序设计了一个料罐状寄存器 R_5 ，用 1、2、3、4 分别记忆料罐的四个状态：

放料结束, 节流关, 下密关, $R_x=1$ 申请装料;

料头过一检, 上密开, 翻板到位, $R_x=2$ 正在装料;

料头过三检, 上密关, $R_x=3$ 申请放料;

下密开, 节流开, $R_x=4$ 正在放料。

在双罐工作方式时: 两罐交替工作, 为了两罐互不干扰, 彻底杜绝两罐上下密封同时开(重料)误动作发生, 程序设计了装料寄存器 R_z (装料权), 卸料寄存器 R_x (卸料权)。当 $R_z=1$ 时, 1#罐享有装料权。只有此时 1#罐的申请装料才能被响应。当 $R_z=2$ 时, 2#罐享有装料权。只有此时 2#罐的申请装料才能被响应。同样, 当 $R_x=1$ 时, 1#罐享有放料权, 只有此时 1#罐的申请放料才能被响应。当 $R_x=2$ 时, 2#罐享有放料权。只有此时 2#罐的申请放料才能被响应。1#、2#罐的工作过程是一样的, 1#、2#罐控制程序完全一样, 只是两罐的程序点号与执行条件不同(装料权, 卸料权)。

另外, 为了保证一个完整的装料或卸料过程, 在装料与放料过程中, 禁止中断程序, 因此程序对料罐工作键的退出加了限制, 严禁装料卸料过程中对料罐装料、卸料权改变。

2.6.2 节流阀、布料溜槽控制功能和工作制度

按照料罐内的料种及上位控制画面设定的多组控制数据, 对溜槽 α 角、 β 角、节流阀(γ 角)进行控制, 控制好下料的倾角和料流量, 进而更准确地控制好每批料的布料厚度、环数及布料的起点与终点, 即按照设定的布料方式和精度要求完成高炉内的多环布料。

无论是 1#罐, 还是 2#罐放料, 都要调用溜槽程序。然而, 料罐内的料种不同, 要求溜槽的控制参数不同。为此, 溜槽控制程序在结构上分为三个部分:

(1) 按不同料种取布料参数:

程序包括 K 参数表, J 参数表, 公用参数表。在溜槽布料时, 按照具有放料权的料罐内的料种, 将 K 参数表或者 J 参数表送入公用参数表。

(2) 按所取参数控制 α 角、 β 角、 γ 角:

从公用参数表中逐一取出各环参数, 控制 α 角、 β 、 γ 角。

(3) 放料结束时, 按原料种将需要保存的参数送回。

(4) 在放料结束时, 计算布料误差和 γ 参数修正值, 送回相应的参数表。

2.6.3 探尺工作控制功能和制度

探尺主要完成布料料面的探测的功能, 当料面到达设定值后发出允许加料信号。高炉有两个探尺, 可单独工作也可同时工作。它的选择由操作人员

根据设备情况在炉顶画面通过左尺工作、右尺工作键选择。

探尺有三种工作方式：点测、连测、强提：

点测：到设定料线即提尺。

连测：到达设定料线且炉顶具备放料条件提尺，放料结束后放尺。

强提：强制提尺到原位。

探尺控制程序按操作人员的不同选择，完成提放尺动作，发出允许加料信号，并在探尺发生故障时（上下超限、控制柜过流）报警，切断相应的探尺控制柜。

2.6.4 液压系统控制功能和工作制度

液压系统主要是按照布料要求完成炉顶液压站、稀油站、干油站的控制。炉顶液压站有两台液压泵，互为备用，为炉顶各阀提供液压动力。炉顶液压站控制程序就是要保证系统压力在一恒定范围内。程序主要包括：时间倒泵、压力监测、故障停泵报警。

第三章 炉顶布料模型建立

3.1 引言

现代化的高炉为了最大限度的提高冶炼效率,均采用了料流调节阀加布料溜槽的控制方式来实现矿、焦在炉内的精确布料。

高炉炉料(烧结矿、球团矿或焦炭等)经过槽下配料工艺,由皮带运输到炉顶的料罐,在高炉接到布料指令后,其料罐的下部的料流调节阀首先按工艺要求开到给定的开度(即 γ 角),这时炉料按一定的流量经布料滚筒后流到布料溜槽上,此时布料溜槽已经按工艺要求升到一定的倾动角度(即 α 角),同时布料溜槽还在水平面方向上按设定速度匀速旋转(即 β 角),炉料经过以上控制,就可以均匀地布到高炉的料面上。

从上面炉顶布料的基本要求出发,只要控制好 α 、 β 、 γ 三个角度,就可以把炉料按任意的形式布到炉内。一般来说高炉的布料方式有环形布料、扇形布料和定点布料等几种形式。最多使用的是环形布料,即一批料以不同的倾动角度布到炉内,形成以高炉中心为圆心的数个圆环,使炉料均匀的布在炉内^[7]。根据环形布料的环数的多少还分为单环布料和多环布料,最常用的为一环到四环布料。如果在冶炼过程中出现炉内料面不均匀的情况,则可以利用扇形布料或定点布料来弥补。或者炉长根据炉况需要,为改善透气性、保护炉壁使其温度不致过热等等原因,也需要采用扇形或定点布料的方法来改善炉内炉料的分布状态。

在炉顶布料控制中,料流调节阀的开度控制(即 γ 角的控制)是至关重要的,因为只有 γ 角控制的精确,才能有效地控制好炉料的料流量,进而更准确的控制好每批料布料的厚度、环数及布料的起点和终点^[8]。

随着高炉大型化及无料钟炉顶的普及,影响高炉布料的因素很多。其中炉料的下落高度和下落速度影响较大,炉料自身下落速度产生的潜体阻力不可忽略。但是,当炉料颗粒较小时,特别是小粒度的炉料所受的潜体阻力已与炉料所受重力接近,对炉料落到料面的位置和粒度偏析产生一定的影响。因此无料钟炉顶布料工艺参数选择是否合适,直接影响高炉顺行。本章根据国内外有关无料钟炉顶的资料,针对影响布料的诸多因素和炉料潜体阻力对高炉布料的影响进行分析,建立了布料模型。

3.2 炉顶布料料流控制

3.2.1 料流控制原理

料流是单位时间内通过节流阀物料的量，要控制料流，目前已知的控制量为节流阀开度，而节流阀开度和料速、节流阀开度截面积相关，只要建立节流阀开度和料速、截面积关系，就能精确计算出布料下料料流。其控制原理如图 3.1 所示：

实际布料控制中，料流是节流阀截面积和料速的函数，即：

$$Q_i = S * V * \rho = f(\gamma) * g(\gamma) * \rho$$
(3.1)

式中 $S = f(\gamma)$ ——截面积与节流阀开度关系；

$V = g(\gamma)$ ——料速与节流阀开度关系；

ρ ——物料密度。

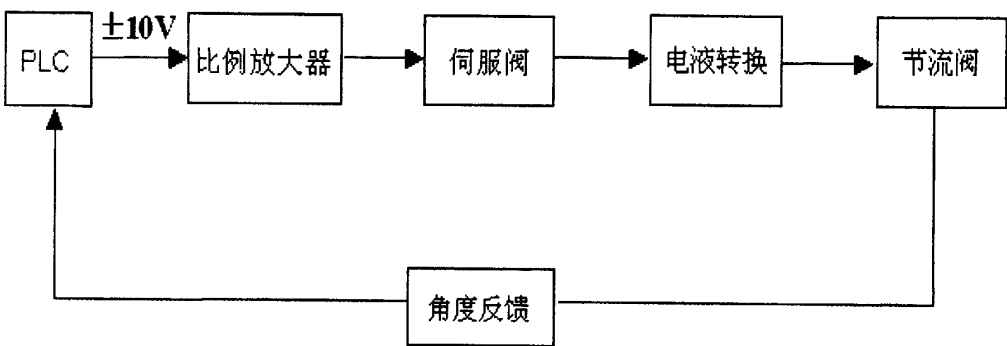


图 3.1 料流控制系统框图

Fig 3.1 The diagram of material flow controlling

由图 3.1 知，PLC 设定节流阀开度与实际反馈开度比较，差值通过 PLC 内置 PID 运算，输出电压信号，送到比例放大器驱动伺服阀，伺服阀驱动液压油缸，带动节流阀动作，通过调节节流阀开度，控制下料料流。

多环布料的基本原理为：设定批料重为 W 吨，要求布料溜槽旋转 N 圈，炉料正好散完。炉内料线断面上沿高炉直径方向设定多个环位，（一般 11 个），布料操作时，根据不同料种、不同炉况，在其中选定若干个环位，溜槽在旋转过程中，由外环向高炉中心倾动。每一个环位上布满 n 圈后，自动跳到另一个环位上，直到 N 圈布完为止，为实现上述过程，对下料流量提出了严格的控制要求，不仅要求下料流量均匀，而且对应不同批重，不同料种要确定不同下料流量，使溜槽旋转 N 圈后料头料尾相接。因此，实现自动控制料流调节阀开度，是实现多环布料的关键。

3.2.2 节流阀料流计算

为充分发挥无料钟炉顶布料的灵活性和多种布料手段，除常规的布料控制（调节溜槽倾角及转速）外，料流调节控制也是一种非常有效的手段。通过对料流调节阀 γ 角的调节，可以控制料流量的大小，以达到炉料在周向的均布和控制炉料在各环中的分配，来获得最佳料流效果^[5]。

高炉多环布料一般采用恒开度控制法，即对每批重量 W_i ，在满足布满 N 圈且料头、料尾正好相接的条件下，根据公式 (3.2) 和 (3.3) 找到对应的下料流量，再通过预先装入计算机内的流量—比例阀开度曲线，发出信号将比例调节阀迅速自动调整到对应开度。

$$Q_i = \frac{W_i}{t\rho} \quad (3.2)$$

$$t = \frac{N}{\omega} \quad (3.3)$$

式中 Q_i ——每次布料设定的料流量， m^3/s ；

W_i ——每批料，吨；

N ——每批料溜槽旋转圈数；

ω ——溜槽旋转角速度， r/min 。

在实际布料操作中，每批料的重量由料罐称量装置给出，炉料密度可以通过对原料抽样检测，求得原料密度的平均值，存入计算机中。每批料布料圈数由操作工根据炉况决定，在操作员界面上设定；节流阀面积与开度关系在下一节推导给出。所以只要建立料流与料流速度、节流阀开度的关系，就能根据公式(3.2)和(3.3)，计算出对应的比例调节阀的开度，以此达到控制下料速度。

3.2.3 节流阀开度—截面积关系

高炉的节流阀的开口截面是一个八面形，如图 3.2 示：

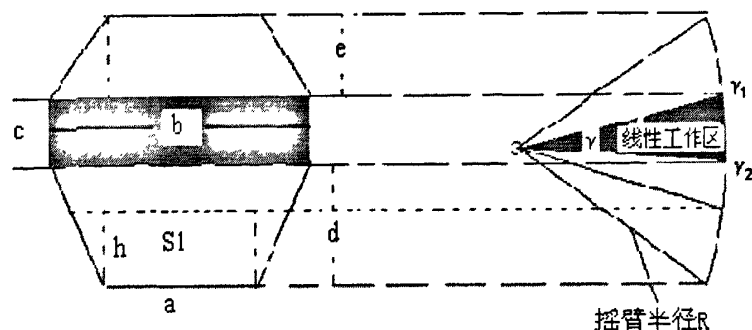


图 3.2 节流阀开口—截面关系

Fig 3.2 The cross-section relationship between area and opening of throttle

节流阀开度与截面积关系为：随着节流阀角度的增大，其截面增大，当节流阀开度达到一定值时，节流阀开度与截面积进入一个稳定线性工作区^[9]。首钢布料操作节流开度控制中，一般开度在 40° 左右，其值在线性工作区范围内，所以不用考虑节流阀非线性工作区。首钢高炉布料节流阀全开度为 75°，根据图中关系可以计算出：

$\gamma_1 = d \cdot 75(\text{全开度}) / (c + d + e)$ ， $\gamma_2 = (c + d) \cdot 75(\text{全开度}) / (c + d + e)$ ；

节流阀开度截面积关系为：

$$s = s_1 + \frac{b \cdot 2\pi R(\gamma - \gamma_1)}{360} \quad (\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2) \tag{3.4}$$

式中 s_1 ——梯形固定面积 $s_1 = \frac{(a + b) \cdot h}{2}$ ；

R ——节流阀摇臂半径；

γ_1 ——节流阀线性工作区初始值；

γ_2 ——节流阀线性工作区初始值。

3.2.4 料速的测量

料速计算比较复杂，影响料速的因数很多，料速的计算与实际值差别很大，所以料速的确定一般采用实际测量的方法确定。料速的测定可以通过同时记录料重、节流阀开度、放料时间，通过多次放料（改变节流阀开度）和重复放料（固定节流阀开度）的方法，按计算机自动记录的数据，平均统计出矿焦不同角度的料速值，并绘制如图 3.3 所示。

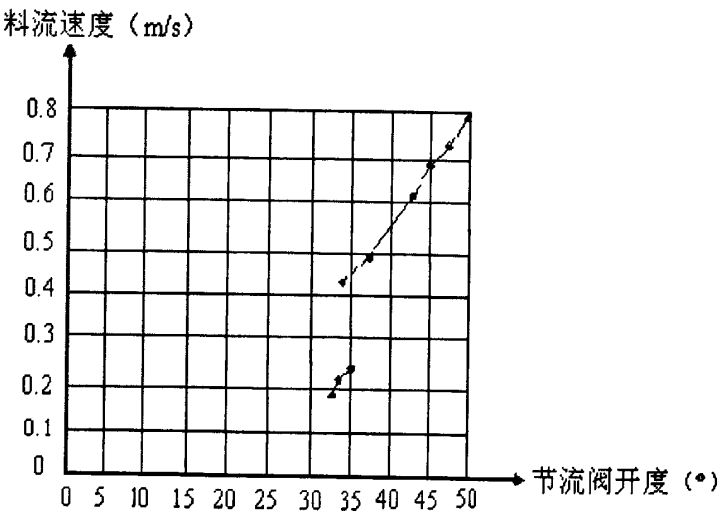


图 3.3 节流开度—料流特性曲线

Fig 3.3 The characteristic between opening angle and material flow of throttle

按节流开度—料流特性曲线，计算得到矿、焦流速和开度特性方程：

$$V_k = 0.01435\gamma + 0.02906 \quad (3.5)$$

$$V_j = 0.0225\gamma - 0.5473 \quad (3.6)$$

式中 V_k ——矿石料速；

V_j ——焦炭料速。

将实测矿焦料速曲线：公式(3.5)和(3.6)和节流阀开口面积与开口大小关系(3.4)，存入计算机中，根据公式(3.1)，就能精确计算出每批料的放料的节流阀设定角度(γ)：

$$Q_i = S * V * \rho = \left[\frac{(a+b) * h}{2} + \frac{2b\pi R(\gamma - \gamma_1)}{360} \right] * V * \rho$$

$$\text{即} \quad Q_i = Kf(\gamma) \quad (3.7)$$

式中 V ——炉料料速；

K ——常数。

根据公式(3.7)，可以找到料流与节流阀开度对应关系。因而通过控制节流阀开度，可以达到控制料流的目的。

3.2.5 恒料流控制

在高炉布料实际操作过程中，由于实际测得的料流速度与开度曲线数据有限，实际布料结果和理想布料有一定的差距，恒开度控制并不等于恒料流控制，因而在实际布料过程中存在料头料尾不相接现象。为了克服以上现象，必须采用动态修正布料角度方法，消除上述误差，目前国内高炉布料常用时间法和重量法来控制恒料流。

(1) 时间控制法

在布料之前，先设定批料布料时间，由 PLC 控制布料器布料并开始自动计时，当 PLC 控制器接到料空信号后，统计计算实际布料时间，以一罐炉料为控制周期，经过设定布料时间与实际布料时间的偏差运算处理，动态步进地修正设定值，向电液伺服阀发出开度控制信号，调节开度，逐步使料流接近理想值，其系统控制原理如图 3.4 示：

由图 3.5 知，人工设定节流阀开度与实际测量的节流阀开度反馈值比较，差值经计算机 PID 调节器运算后，转换为电信号驱动液压比例阀，控制节流阀开度，恒料流控制的设定公式如下：

$$\gamma = f(t)$$

每次布料后：

$$\Delta\gamma = f(t_{sd}) - f(t_{sj})$$

$$\gamma_{sd} = \gamma_{sc} + \Delta\gamma = f(t_{sc}) + f(t_{sd}) - f(t_{sj}) \quad (3.8)$$

式中 t_{sd} ——设定下料时间；
 t_{sj} ——实际下料时间；
 γ_{sd} ——节流开度设定值；
 γ_{sj} ——节流开度实际测量值；
 $\Delta\gamma$ ——节流开度误差。



图 3.4 时间—开度法控制框图

Fig 3.4 The diagram of time—opening degree of material invariable control

图中 γ_{sd} ——节流阀开度设定值；
 γ_{sj} ——节流阀开度实际值；
 $\Delta\gamma$ ——开度差。

根据式 (3.8) 关系，通过 PLC 运算控制，并根据实际下料时间，不断修正调节开度 γ ，使得每次布料设定时间和实际布料时间逼近，以获得紧接恒料流控制。

在料尾的处理上，需要动态检测排料过程中的料重，由料重信号和料空信号作为双重检测点来进行料尾的处理。具体如下：料空来，关节流 10° ， β 继续旋转，当重量基本不变时（放空），延时 5S 后停 β 角。

(2) 重量控制法

该控制的前提条件：准确检测料重连续变化信号及顶压波动信号。布料前，确定好每圈的设定重量，按料流特性规律转化为相应的节流开度大小；布料过程中，动态检测每圈实际布料重量，并通过对设定重量与实际重量的误差分析处理，动态地将偏差重量转化为节流开度偏差量，在同一倾角的剩余布料圈中进行误差开度的纠偏。

动态检测布料重量，能较好的解决料尾问题。其控制思路为：PLC 实时分析实际重量与设定重量，在最后一个圆周布料环即将来临之际，若 PLC 发现实际剩余炉料少于设定炉料时，立即调整减少节流开度，将原来的最后单环单圈的布料延长为单环多圈，最大可能的避免料尾断料。

调整控制过程为：根据重量偏差，PLC 经过逻辑运算，输出 0~10VDC 的模拟电压信号控制比例放大板，通过液压伺服阀，动态控制料流开度大小。其系统控制原理如图 3.5 示：

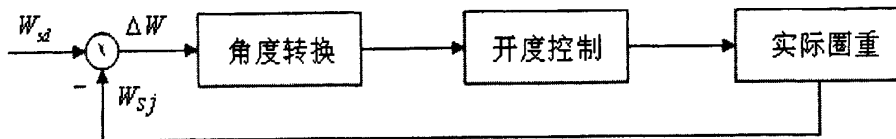


图 3.5 圈重—开度法控制框图

Fig 3.5 The method of unit weight-opening of material flow invariable control

图中 W_{sd} ——单圈布料重量设定值；

W_{sj} ——单圈布料重量实际值；

ΔW ——重量差。

该系统是一个包含称量系统在内的闭环控制系统，因此对电子秤的连续性 & 稳定性要求较高。在 PLC 的每一个扫描周期内，完成对该闭环控制系统数据更新和运算处理，对电液伺服阀进行一次新的开度控制调整过程，动态满足下料开度要求，以期达到最理想的布料效果。

采用恒料流控制，使得料头、料尾相连。通过改变调节阀开度保证下料流量恒定。首先设定理想料流，每隔一定时间用实际瞬时料流与理想料流比较，用差值来调整下流闸门开度，从而是实际料流接近理想值。这种方法，使得布料精度更高，更有利于炉内煤气分布情况。

3.3 物料运动规律和布料模型建立

高炉布料过程,实质是炉料运动过程。该过程是受力学法则支配的，为了定量的分析炉料分布，首先要建立布料方程^[1-2]。

以高炉中心线为 Z 坐标，垂直与 Z 轴的平面为 XY 平面，它是平行与风口中心线构成的平面。旋转布料溜槽与 XY 平面构成 β 角，溜槽绕 Z 轴以 ω （圈/秒）的角速度旋转。规定溜槽的动坐标系为 $OX'Y'Z$ ，原点和 OXYZ 坐标重合，即 OX' 坐标轴与溜槽长度方向一致， OY' 坐标垂直于 OX' 坐标轴， OX 、 OY 、 OX' 、 OY' 四坐标轴均在同一平面上。在炉料到达溜槽末端的瞬间，两坐标系重合。溜槽布料器的工作示意如图 3.6 所示。

溜槽布料器随布料器角度不同，其溜槽末端到料面的距离也不同。溜槽处于垂直位置时（ $\beta=90^\circ$ ），溜槽与 Z 轴（高炉中心线）重合，其末端到料面的距离 h 为料线深度。

炉料的摩擦角一般为 30° 左右。为了保证炉料能快速通过溜槽，溜槽的工作 β 角应大于 40° ，即最小工作角度 $\beta_{\min} = 40^\circ$ 。

溜槽布料器随布料角度不同，其溜槽末端到炉墙之间的距离也不同，因此以 $\beta_{\min} = 40^\circ$ 时的溜槽末端和炉墙之间的距离定义为炉喉间隙。

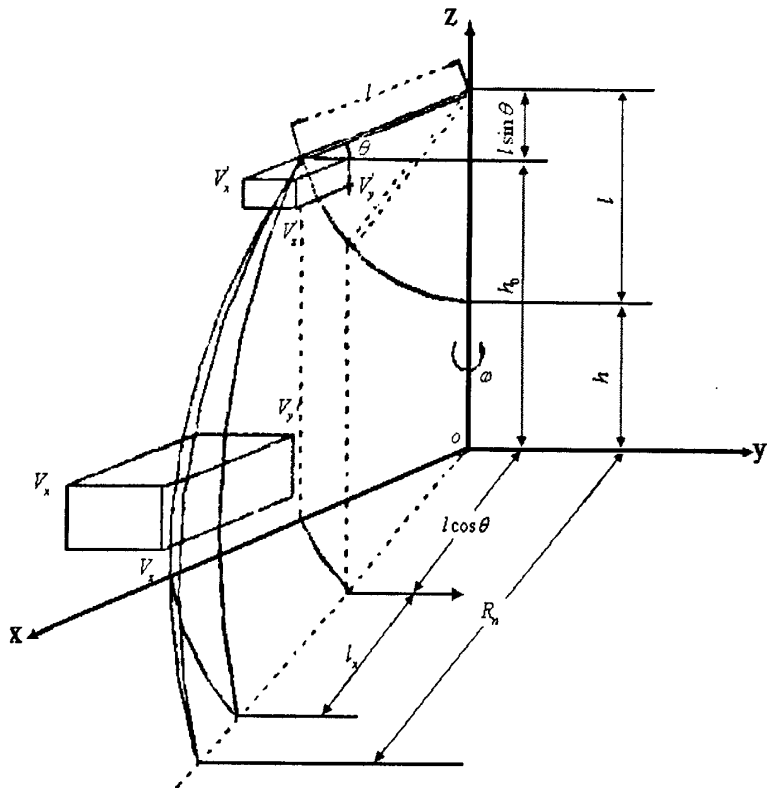


图 3.6 布料溜槽工作示意图
Fig 3.6 The operating diagram of distuibution chute

3.3.1 炉料在布料溜槽上的受力分析

设炉料从导料管落入以 ω 速度旋转的溜槽，一块炉料质量为 m 、重量为 G 、进入溜槽时沿溜槽方向的初速度为 V_0 、炉料在溜槽某点的速度速度为 V （米/秒），炉料在溜槽末端的速度 V_1 （米/秒），炉料与溜槽的摩擦系数为 μ ，则炉料在溜槽上所受的力有重力、离心力、摩擦力等，受力情况分析如图 3.7 所示：

- 重力：
$$G = mg \tag{3.9}$$
- 惯性离心力：
$$F = 4m\pi^2 l \cos \beta \tag{3.10}$$

式中 l ——溜槽长度；

β ——溜槽倾角。

- 溜槽对炉料的反作用力：

$$N = mg \cos \beta - 4m\pi^2 \omega^2 l \sin \beta \cos \beta \quad (3.11)$$

式中 ω ——溜槽旋转角速度。

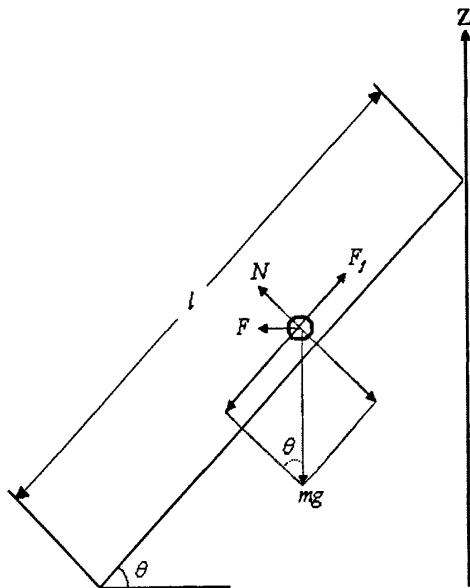


图 3.7 炉料在溜槽上受力分析图

Fig 3.7 The diagram of force analysis about material on chute

- 炉料与溜槽之间的摩擦力 F_f :

$$\begin{aligned} F_f &= \mu(mg \cos \beta - 4m\pi^2 \omega^2 l \sin \beta \cos \beta) \\ &= \mu m \cos \beta (g - 4\pi^2 \omega^2 l \sin \beta) \end{aligned} \quad (3.12)$$

- 惯性科氏 (Coriolis) 力:

$$F_k = 4m\pi\omega Cl \cos^2 \beta \quad (3.13)$$

式中 C ——科氏常数。

因溜槽旋转而产生的炉料与溜槽侧向的摩擦力和溜槽侧向对炉料的作用力, 因布料过程转速不高, 炉料在溜槽上的侧向摩擦力和溜槽对炉料的作用力可忽略不计。在溜槽上, 沿溜槽方向上炉料所受力的总和为:

$$\sum F = mg \sin \beta - \mu(mg \cos \beta - 4\pi^2 \omega^2 l \sin \beta \cos \beta) + 4m\pi Cl \cos^2 \beta \quad (3.14)$$

3.3.2 炉料在布料溜槽上的运动规律

根据炉料在溜槽上的受力情况, 按牛顿定律: 沿溜槽方向炉料的运动规律可用运动方程描述如下:

$$\begin{aligned} m \frac{dv}{dt} &= \sum F = mg \sin \beta - \mu(mg \cos \beta - 4\pi^2 \omega^2 l \sin \beta \cos \beta) + 4m\pi Cl \cos^2 \beta \\ &= mg(\sin \beta - \mu \cos \beta) + 4m^2 \pi \omega^2 l \cos \beta (\cos \beta + \mu \sin \beta) \end{aligned} \quad (3.15)$$

式中 t ——炉料运动时间，秒。

又知：

$$m \frac{dv}{dt} = m \left(\frac{dv}{dl} \right) * \left(\frac{dl}{dt} \right) = mv \frac{dv}{dl}$$

代入式 3.15， 则：

$$mv dv = m[g(\sin \beta - \mu \cos \beta) + 4m^2 \pi \omega^2 l \cos \beta (\cos \beta + \mu \sin \beta)] dl \quad (3.16)$$

以 l 表示溜槽长度，对上式两边同时积分求解可得：

$$V_1 = \sqrt{2g(\sin \beta - \mu \cos \beta)l + 4m^2 \pi \omega^2 l \cos \beta (\cos \beta + \mu \sin \beta) + V_0^2} \quad (3.17)$$

炉料在溜槽上运动，即在动坐标系 $OX'Y'$ 中运动，各方向的运动速度分别为：

$$V'_x = V_1 \cos \beta \quad (3.18)$$

$$V'_y = 2\pi \omega l \cos \beta \quad (3.19)$$

$$V'_z = V_1 \sin \beta \quad (3.20)$$

上述分析表明：炉料在溜槽上最主要的作用力是重力 G 、溜槽的反作用力 N 、摩擦力 F ^[10]。炉料在溜槽上的运动速度可分别由式 (3.18) — (3.20) 求出，其速度大小主要与溜槽转速 ω 、溜槽长度 l 、溜槽倾角 β 有关。

3.3.3 炉料在空区的运动分析

按统一习惯定义，一般认为从溜槽下缘起至料面间的高炉空间称为空区。炉料离开溜槽后落入空区，除受重力继续作用外，还受上升的煤气的阻力作用。设上升的煤气阻力为 P ，根据流体力学原理，可写成：

$$P = ks \frac{\gamma V^2}{2g} \quad (3.21)$$

式中： k ——阻力系数；

γ ——气体密度， kg/m^3 ；

s ——炉料最大横断面积， m^2 ；

μ ——煤气速度， m/s 。

煤气阻力系数 k 与煤气流动特性有关，它是流动煤气的雷诺函数。设料线深度为 h ，炉料离开溜槽到料面的时间（炉料在空区运动时间）为 t_1 ，在空区 $OXYZ$ 固定坐标系中，炉料各方向的运动速度分别为： V_x 、 V_y 、 V_z ，则：

$$V_x = V_z + \frac{(Q-P)t_2}{m} \quad (3.22)$$

设炉料从溜槽末端到料面的路程为 h_0 ，则：

$$h_0 = V_x t_1 = [V_z + \frac{(Q-P)t_2}{m}]t_1 = V_1 \sin \beta t_1 + \frac{(Q-P)}{m} t_1^2 \quad (3.23)$$

根据图 3.6 的关系有：

$$h_0 + l \sin \beta = l + h \quad (3.24)$$

所以：

$$h_0 = l(1 - \sin \beta) + h \quad (3.25)$$

$$V_x = V_z = V_1 \cos \beta \quad (3.26)$$

$$V_y = V_z = 2\pi\omega l \cos \beta \quad (3.27)$$

设炉料从溜槽末端落到料面在空区沿 X 方向移动 l_x 米，炉料在空区的下落时间为 t_1 ，则：

$$l_x = V_x t_1 = V_1 \cos \beta t_1 \quad (3.28)$$

$$\text{故：} \quad t_1 = \frac{l_x}{V_1 \cos \beta} \quad (3.29)$$

联立上述各方程求解得：

$$h = l_x \tan \beta + \frac{Q-P}{2mV_1} l_x^2 - l(1 - \sin \beta) \quad (3.30)$$

式(3.30)表明了料线深度和炉料堆尖，在 X 方向水平位置的关系。变换上式得：

$$l_x = \frac{mV_1^2 \cos^2 \beta}{Q-P} \left(\sqrt{\tan^2 \beta + \frac{2(Q-P)}{mV_1^2 \cos^2 \beta} (l(1 - \sin \beta) + h) - \tan \beta} \right) \quad (3.31)$$

炉料在 X 方向移动 l_x 的同时，在 Y 方向移动 l_y ，则：

$$l_y = V_y t_1 = 2\pi\omega l_0 \cos \beta t_1 \quad (3.32)$$

$$= \frac{2\pi\omega m V_1^2 \cos^2 \beta}{Q-P} \left(\sqrt{\tan^2 \beta + \frac{2(Q-P)}{mV_1^2 \cos^2 \beta} (l(1 - \sin \beta) + h) - \tan \beta} \right)$$

炉料在 XY 平面上的分布，是以 Z 轴为中心，以 R_n 为半径的一个圆周，如图 3.9 所示，则有：

$$\begin{aligned} R_n^2 &= (l_x + l \cos \beta)^2 + l_y^2 \\ \Rightarrow R_n &= \sqrt{l^2 \cos^2 \beta + 2l \cos \beta l_x + (1 + \frac{4\pi^2 \omega^2 l^2}{V_1^2}) l_x^2} \end{aligned} \quad (3.33)$$

式 (3.33) 为统一布料方程^[6]，它表明了溜槽长度 l 、溜槽倾角 β 、摩擦系数

μ 、炉料初速度 V_0 、炉料重量 Q 、炉料形状和炉料粒度、煤气重度 γ 、煤气速度 V 、料线深度 h 和溜槽转速 ω 等变量对炉料分布的影响关系。任何一个变量或几个变量的改变，理论上都会引起炉料分布的变动。

根据上述理论分析，结合首钢的生产实际，可以得出如下规律：

- 炉料初速度 V_0 、摩擦系数 μ 对炉料分布的影响较小；
- 正常工况下，溜槽圆周转速 ω 基本恒定，对炉料分布的影响不大；
- 料线深度和溜槽倾角对炉料的堆尖分布影响大。

图 3.8 为炉料堆尖位置、料线深度和溜槽倾角三者关系图。

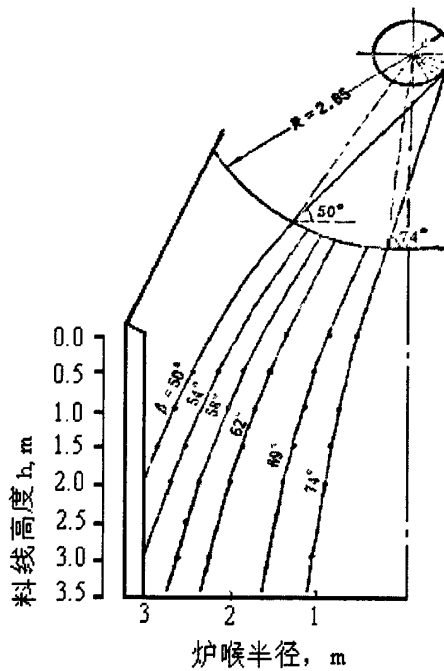


图 3.8 堆尖、料线和倾角关系图

Fig 3.8 The relationship among top of heap, material level and obliquity

3.3.4 布料操作参数

在无料钟炉顶的 4 种布料方式上，定点布料一般只用于异常状态的手动处理过程。单环布料控制简单，但不能充分发挥无料钟炉顶的优势。因此，研究合理有效的多环操作控制方式，是很有意义的。多环布料的一般控制思路为：按等面积原理，将一批或几批炉料均匀的分配到面积相等的圆环里，使炉料在炉内的厚度基本接近或成倍的差别，以便于控制^[11]。依炉喉直径的不同，一般将炉喉断面分成均匀的 8-11 等份，并同溜槽倾角一一对应。设炉喉半径为 R ，将炉喉面积分成 N 等份，第 i 圈的直径为 R_i （从炉墙至中心， i 从 1 增大），则依据面积关系有：

$$S_i = [1 - (i-1)/N] * S \quad (3.34)$$

即：

$$\pi R_i^2 = [1 - (i-1)/N] * \pi R^2$$

$$R_i = \sqrt{[1 - (i-1)/N]} * R \quad (3.35)$$

则第 i 环和 $i+1$ 环间的布料半径 R_n 为：

$$R_n = R_i + \frac{1}{2}(R_{i+1} - R_i) = \frac{1}{2}(R_i + R_{i+1}) = \frac{1}{4}(D_i + D_{i+1})$$

$$R_n = 0.25(D_i + D_{i+1}) \quad (3.36)$$

求出布料半径后，在依据布料方程，求取相应的布料溜槽倾角 β ，在布料过程中，通过调整 β ，达到环间均匀布料的目标，布料轨迹如图 3.9 所示。

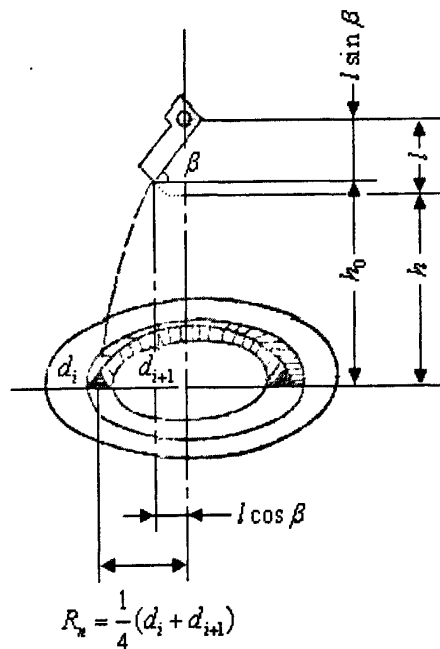


图 3.9 布料轨迹示意图

Fig 3.9 The diagram of trajectory of distribution

为了简化布料操作过程，国内高炉多环布料一般以炉喉为等分面，以炉喉中心点为基准点，由外向里沿直径方向平均分为 10 等分，形成 10 个等分环。首钢三高炉炉喉直径 $D=6.1$ 米，炉喉端面 10 等份分布的多环布料的系统中，存在如表 3.1 的布料参数关系：

表 3.1 布料参数关系表

Table 3.1 Relation table of ditribution parameter

等分面积 Ni	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
等分环直径 D	6.1	5.79	5.46	5.1	4.73	4.31	3.83	3.34	2.73	1.93
溜槽倾角 β°	48.5	51	53	55	57.5	60	62.8	66	70	77.5

3.3.5 布料模型在首钢高炉的应用规律

高炉布料规律一直是高炉工作者研究的课题，首钢炼铁工作者经常利用开炉装料等机会，不断地观察、测定炉料在炉喉的分布情况，随着设计和修造技术的不断改进，布料及控制技术得到了长足发展，并归纳总结出了一些规律：溜槽布料圆周方向上的每一点，布料是间断的，每圈炉料滚动形成薄层，产生以下结果：中心堆角比钟式布料大 4—5°，接近定值。边缘堆角随溜槽倾角 α 的加大，逐渐趋于 0°；此后，边缘台阶渐窄，直至 V 形料面出现。多环布料可以获得大致平坦的料面。提供了利用料面形状变化，调节径向 K/J 比分布，控制煤气流的可能。多环布料可以获得粒度接近的分布。提供了利用粒度偏析调节径向粒度分布，控制煤气流的可能性。

理论上，无料钟炉顶可以把炉料按任意粒度比和重量比，布到炉喉断面的任意区域。国内外的生产实践也一致认为：无钟布料对控制煤气气流分布是灵活而有效的。为把高炉的操作实践转化为计算机可执行的控制逻辑，现将首钢无料钟炉顶布料的基本规律概括如下：

- (1) 采用两罐轮流倒用，消除料罐内装料的影响
- 并罐式无料钟炉顶布料，堆尖有偏析，为保证圆周布料均匀，必须定期倒罐，且倒罐周期不大于 4 小时。
- (2) 采用多环布料，使得布料均匀平坦，改变炉内气流分布
- 按炉喉端面半径设定 11 个站位，选取相应的 α 角；
 - 布料时 α 角从大到小运动，按站位变动角度；
 - 按指定的站位和环数进行布料，并按煤气分布进行提调整；
 - 矿石站位往外移和外环布料圈数增加，加重边缘，反之加重中心；焦炭站位往外移和外环圈数增加，疏导边缘，反之疏导中心；
 - 多环布料时要保证布料宽度，矿石站位要大于或等于 2 站，焦炭站位不小于 4 站；

(3) 调整 α 角，弥补料线升降带来的气流扰动。

● α 角一定时，升降料线同样能导致堆尖的移动。影响与料线升降值成正比。提高料线相当于减少 α 角；降低料线则相当于加大 α 角，矿、焦不等料线时，依同样原则具体分析。亏料线作业时，为避免料流冲砸炉墙并保持气流的稳定，应随料面下降而减少 α 角，其比例约为：1 度/0.2 米料线。

● α 和料线一定时，批重增减，除改变层厚均匀度外，层厚也变了，类似于升降料线，其影响与批重增减成正比。

4.7

第四章 布料自动化控制系统实现

4.1 引言

高炉布料操作直接影响高炉的运行,所以布料控制系统选择必须采用先进的技术、方法和设备,使系统既反映当今技术的先进水平,又具有发展潜力。同时,在控制系统的生命周期内,设备、技术和方案的成熟性,是保证系统的顺利实施和稳定运行基础。所以控制系统选择必须从体系结构、设备选型以及厂商的后备支持和维护能力等多方面考虑,采用必要的技术措施,保证系统的可靠性和安全性;为了保证整个系统中不同厂商的各种设备能协同运行,且考虑到系统投资的长期效应,系统的设计与选型必须注重开放性,以满足系统的可扩展性、可移植性和互操作性的要求;从用户角度出发,注重系统的实用综合能力和总体性能。最重要的是必须具有实用的故障诊断和设备监控能力,便于现场人员使用及今后技术人员对系统的日常管理和维护。由于程序的执行不仅有先后次序而且有时间限制关系,故本系统为一个与实时处理密切相关的计算机系统,需要在规定的时间内对外部发生的异步随机事件给予响应、处理。

高炉布料自动化控制系统一般分为三大部分:料流控制系统 γ 角控制、布料溜槽水平旋转控制 (β 控制)、布料溜槽倾动控制 (α 角控制)。只要控制好 α 、 β 、 γ 角,就能将炉料精确布到高炉的任何一点,其过程控制如图 4.1 所示:控制系统由 1 台 PLC 主站和 4 台远程站组成,采用施耐德公司昆腾 140 系列硬件,PLC 主机通过 Modbus plus 网络与操作员站和工程师站通讯^[13],并通过网络连接至高炉其它控制系统;上位监控系统硬件采用 2 台工业 PC,运行 Windows 操作系统,操作员站运行监控软件,采用 GE IFIX 过程监控 MMI,工程师站同时还运行施耐 CONCEPT 编程软件,对 PLC 进行编程控制。现场信号通过仪表、变送器接到 PLC 模块,处理后对系统进行控制。溜槽倾动和旋转控制采用直流传动控制装置,并通过 RS422 接口与工程师站通讯,工程师通过远程通讯装置进行设定、调试、监控运行。

4.2 料流控制系统

无料钟高炉炉顶,其料流调节阀的控制基本有三种:

(1) 普通电机加齿轮减速机构来控制料流调节阀的开度。这种方式控制设备简单,但精度很难提高,系统的动作时间也较长,不利于提高高炉生产的节

奏^[12]。另外，齿轮减速机构中的机械间隙对 γ 角精度的影响也很难消除^[14]，因此在大型高炉上基本不使用这种控制方式。

布料过程控制系统图

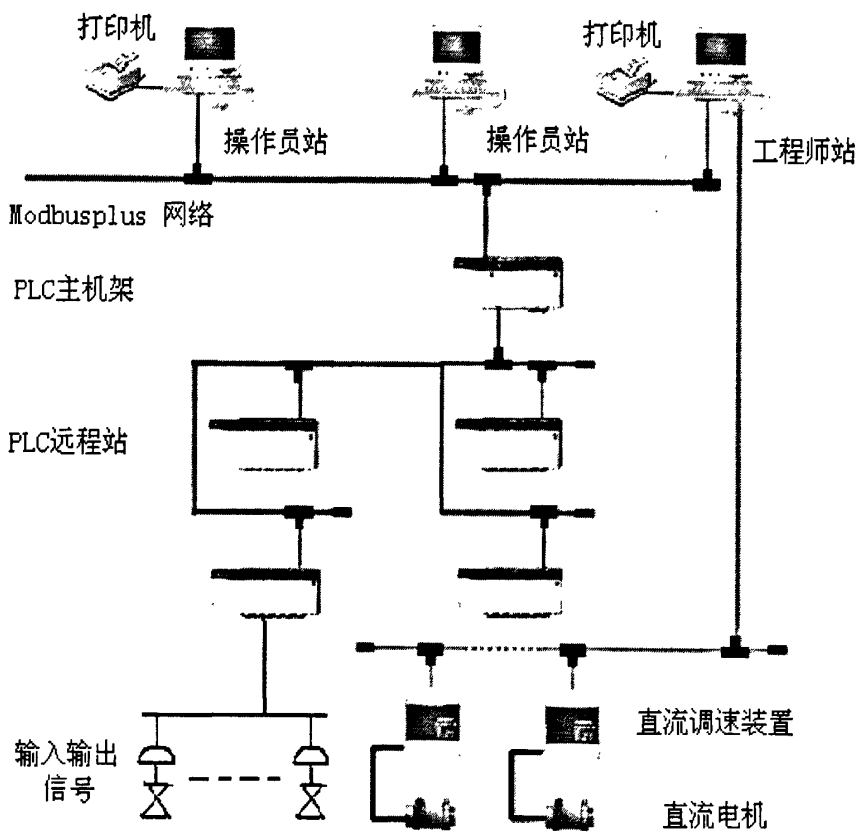


图 4.1 布料控制系统配置图

Fig 4.1 The configuration diagram of distribution control syst

(2) 使用伺服电机驱动料流调节阀。这种驱动方式能较好的保证 γ 角的精度，但驱动力矩受到一定的限制^[15]。另外其动作时间也比较长，不利于提高生产节奏，一般在 450m^3 及以下的高炉上应用较多。

(3) 采用液压系统来驱动料流调节阀。用这种方式最大的优点是驱动力矩较大，可以使系统的动作时间大幅缩短，另外其控制也比较简单，即使用两个常规的液控单向阀来控制液压缸的开度，进而达到控制 γ 角开度的目的，一般大型高炉大都采用这种方式^[16]。但这种方式的缺点也很明显，其一是普通液压系统控制的液压缸，其推力受系统压力的影响比较大，容易形成冲击，对料流阀

的寿命有着一定的影响;其次也是比较重要的,就是其精度很难控制,误差比较大,一般在 $1.5^{\circ}-2.0^{\circ}$,有时竟达到 $2.5^{\circ}-3.5^{\circ}$ 。这样的精度在高炉布大粒度料(例如 20mm 以上的烧结矿或焦炭)的时候可能影响不是太严重,但是在需要布小粒度料的时候,尤其是小于 5mm 的碎矿或碎焦时,就很难控制甚至无法控制了。

4.2.1 料流控制系统硬件

(1) 系统硬件功能

MODICON 984 系统同时提供了 IEC 要求的全部 5 种编程方式: LD、FBD、SFC、IL、ST, 将传统 DCS 与 PLC 的优势完美地结合于一体, 同时具备了强大的过程控制功能和离散控制功能^[17]。

- CPU 单元: 可选 586 的控制器, 单机支持超过 300 个回路和 65000 点 I/O, 背板总线速率高达 80 兆;
- I/O 单元: 具有本地 I/O, 远程 I/O, 分布式 I/O;
- 网络通讯系统: 支持工业以太网、MOBUS PLUS 工业网络;
- 冗余热备: 提供包括 CPU、电源、远程 I/O、工业控制网络 (Modbus Plus) 的冗余热备解决方案;
- I/O 模块包括 4—20ma, 0-5V 等标准信号、热电偶、热电阻、高速计数模拟量模块; 数字量模块包括各种电压等级隔离或干节点模块等;
- 通讯模块包括本地通讯模块 S908 和远程通讯模块 J890;

(2) 硬件选取原则

1) 确定 I/O 设备

统计炉顶布料系统检测与控制设备; 确定输入输出点数, 信号类型; 根据 I/O 点数类型, 选择 I/O 模块类型与数量, 模块配置根据实际 I/O 点数的 1.1—1.15 倍选取, 然后确定机架类型和数量。

2) 规划系统

根据设备安放地点, 确定网络结构和本地架和远程机架位置; 确定所需通信模块的数目与类型。

3) 控制器要求

根据模块类型与数量和应用程序的复杂程度, 按公式估算控制器所需存储器的大小。

控制器字节总数 = 控制任务数 * 8000 + 数字 I/O 点数 * 400 + 模拟 I/O 点数 * 2600 + 通讯模块 * 2000。

根据 CPU 和模块合计所需电源消耗, 选择供电电源模块, 确保足够的功率, 一般按照电源总量 / 0.75 倍选择电源模块。

(3) 系统硬件配置

1) PLC 硬件结构框如图 4.2 所示：

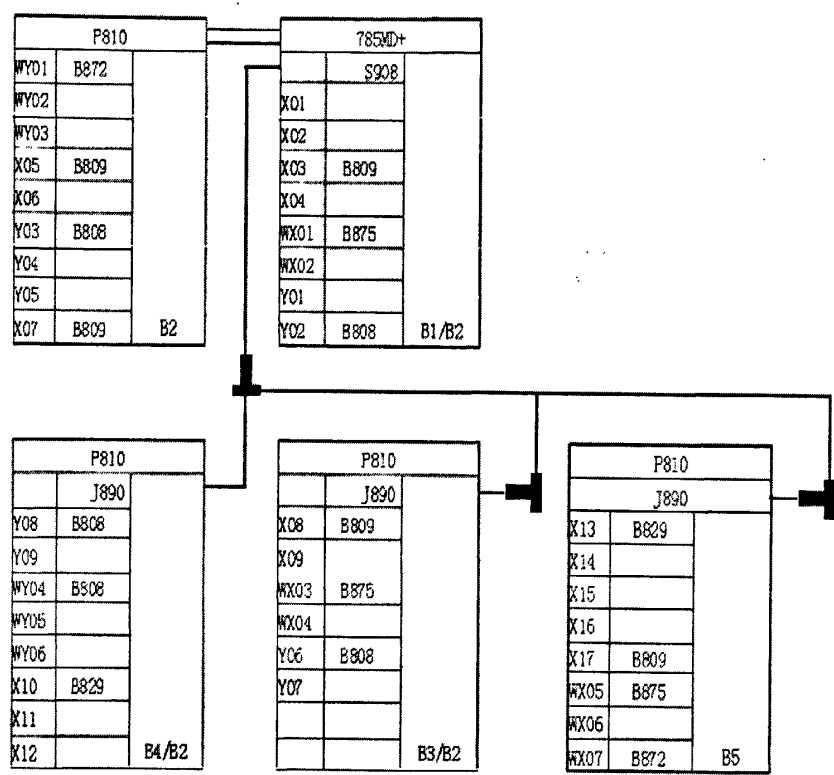


图 4.2 PLC 硬件结构框图

Fig 4.2 The diagram of PLC hardware configuration

2) 系统硬件配置表：

表 4.1 PLC 系统硬件配置表

Table 4.1 Configuration table of PLC hardware

名 称	型 号	数 量	名 称	型 号	数 量
CPU 模块	PC-0984-785	1 台	5VTTL 输入模块	AS-B829-016	6 块
内存插件	AS-M780-048	1 台	模拟量输出模块	AS-B872-011	1 块
执行插件	AS-E785-904	1 台	模拟量输出模块	AS-B872-100	6 块
远程 I/O 处理器	AS-S908-110	1 块	模拟量输入模块	AS-B875-111	5 块
S908 执行插件	AS-E908-031	1 块	热电偶输入模块	AS-B883-200	1 块
远程 I/O 适配器	AS-J890-001	3 块	高速计数模块	AS-B883-101	2 块
辅助电源	AS-P810-000	4 块	主机架	AS-H827-209	1 个
DI 模块	AS-B809-016	10 块	主机架	AS-H829-100	2 个
DO 模块	AS-B808-016	8 块	主机架	AS-H827-103	2 个

4.2.2 料流控制系统软件

(1) 逻辑控制和 PID 软件选择

施耐德 CONCEPT 编程软件具有丰富的软件编程功能,除了一般的逻辑和模拟量控制外,还集成了 PID 编程功能^[18],其特点是:

- 实时控制 PID, 独立 PID 参数设定等功能;
- 独立 PID 调节功能, P, I, D 功能分别投入;
- 手动控制与自动控制之间无扰动切换;
- 多种控制方式: 手动、自动和暂停控制三种方式供用户选择;
- 自动方式下, 具有用户控制参数限制功能;
- 微分参数可切换作用与过程值和偏差值。

PID 内部原理图如下:

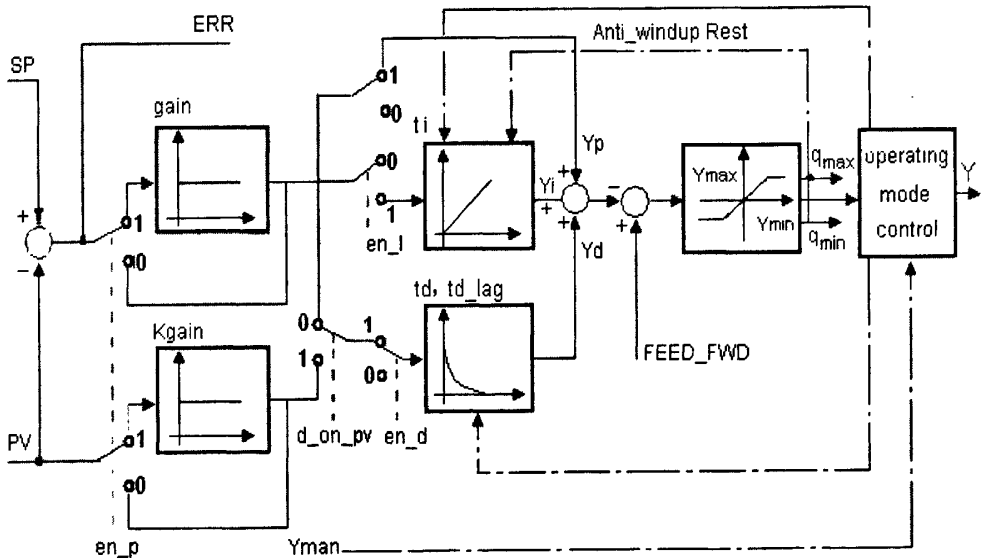


图 4.3 PID 内部结构框图

Fig 4.3 The structure diagram of PID block

- 其中 SP——设定值;
 PV——过程值;
 ERR——偏差值 ($SP - PV$);
 Gain——系统增益;
 Kgain——放大倍数;
 Td——微分作用变量;
 Ti——积分作用变量;
 Yman——手动方式控制。

在施耐德 PLC 控制系统编程软件 CONCEPT 中，PID 程序功能是预先定义好的，用户只要定义 PID 功能块首寄存器地址（如 400509），后续连续 20 个寄存器自动被 PID 功能块占用，不能用作它用。其功能定义和设定值范围如表 4.2 所示：

表 4.2 concept PID 功能定义
Table 4.2 Function definition of concept PID

序号	寄存器	功能	设定值范围
1	400509	过程值	0~4095
2	400510	设定值	0~4095
3	400511	输出	0~4095
4	400512	上限报警	0~4095
5	400513	下限报警	0~4095
6	400514	P	0~4095
7	400515	I	0~4095
8	400516	D	0~4095
9	400517	偏置	0~4095
10	400518	积分上限	0~4095
11	400519	积分下限	0~4095
12	400520	工程上限	0~4095
13	400521	工程下限	0~4095
14	400522	过程值原始值	0~4095
15	400523	回路数	1~2
16	400524	复位	0~4095
17	400525	输出上限	0~4095
18	400526	输出下限	0~4095
19	400527	积分滤波常数	0~4095
20	400528	跟踪输入指针	0~4095

(2) 料流控制人机界面（MMI）软件

1) 人机界面软件选择

人机界面软件选择美国 Intellution 公司的 IFIX 监控软件。IFIX 是运行于 Microsoft Windows2000 和 XP 下的 Windows 控制中心，已发展成为全世界工控市场中的领导者。IFIX 能使设备和机器最优化运行，最大程度地提高工厂的可

用性和生产效率^[19]。

iFIX 是 Intellution Dynamics 自动化软件产品家族中的 HMI/SCADA 最重要的组件,它是基于 WindowsNT/2000 平台上的功能强大的自动化监视与控制的软件解决方案. iFIX 可以帮助您精确地监视、控制生产过程,并优化生产设备和企业资源管理。它能够对生产事件快速反应,减少原材料消耗,提高生产率,从而加快产品对市场反应速度。生产的关键信息可以通过 iFIX 贯穿从生产现场到企业经理的桌面的全厂管理体系,以方便管理者做出更快速更高效的决策,从而获得更高的经济效益,基本功能:

- 支持终端服务器 Terminal Server
- 嵌入式 VBA
- 实时和历史趋势
- VisiconX - 免编程关系数据库访问工具
- 数据采集和管理
- 报警和报警管理: 报警计数器
- 网络功能: 节点级安全
- 在线组态
- 过程可视化
- 支持企业实施历史数据库平台 iHistorian
- 全面支持 OPC 服务器和 OPC 客户端
- 支持 ActiveX 控件和控件安全容器功能
- 权限管理和控制
- 面向对象的图形界面开发
- 即插即解决 Plug and Solve 的架构
- 工作台 Workspace 集中式开发环境
- 先进的报警和信息管理, 提供无限制的报警区域选择、报警过滤和远程报警管理等功能
- 冗余选项提供了 SCADA Server 和 LAN 间的自动切换, 实现 SCADA Server 间的报警同步
- 增强 Windows 2000/NT 用户级安全系统历史数据采集
- VisiconX : 功能强大的 ActiveX 数据连接控件
- 强大的图表对象和趋势显示工具
- 图表组向导功能

2) 人机界面软件实现功能

在监控计算机上以 Windows2000 为操作系统, GE Intellution 公司 iFix 32 软件为开发平台, 利用其内部控件和内嵌的 VB 功能开发人机界面系统, 以实现工艺过程的监视与控制。人机界面系统主要的监控画面包括上料主画面、数据设定画面、程序选择画面、溜槽监控画面、探尺控制画面、炉顶设备监控画面、曲线显示等。实现的功能主要包括: 根据布料角度设定、节流阀开度设定显示、探尺柜启动状态监控、布料 α 和 β 角设定显示、控制方式的选择和显示、炉顶压力等信号的趋势曲线等。

3) VBA 程序设计

VB 特点:

Visual Basic 是一种可视化的编程语言, 利用这种可视化技术进行编程, 能使编程工作变得轻松快捷, 摆脱了面向过程语言的许多细节, 而将主要精力集中在解决实际问题 and 设计友好界面上。Visual 的英文原意是“可视的”。在这里是指开发图形用户界面 (GUI) 的方法, 即“可视化程序设计”。这种方法不需要编写大量代码去描述界面外观和位置, 而只要把预先建立的控件, 像使用“画图”之类的绘图程序那样“画”到屏幕上即可。

Visual Basic 就是以 BASIC 语言为基础, 在加入许多 Windows GUI 有关的功能。Visual Basic 除了具有传统 BASIC 的优点外, 还具传统 BASIC 所没有的功能。例如基于控件(Object-Based)的程序设计; 输入输出界面设计简单; 用来制作多媒体软件; 多任务处理; 提供友好的人机界面; 动态连接程序库 (DLL); 与数据库连接; 数据可以互通; 友好的人机界面; 提供设计 ActiveX 控件的功能等等。

通用自动化语言 VBA:

Visual Basic for Applications(简称 VBA)是新一代标准宏语言, 它与传统的宏语言不同, 传统的宏语言不具有高级语言的特征, 没有面向对象的程序设计概念和方法; 而 VBA 提供了面向对象的程序设计方法, 提供了相当完整的程序设计语言。VBA 是基于 Visual Basic 发展而来的, VBA 是 Visual Basic 的子集, 不但继承了 VB 的开发机制, 而且还具有相似的语言结构, 它们的集成开发环境 IDE(Integrated Development Environment)也几乎相同。

利用 iFIX 的 VBA 编程:

设计中选用的 iFIX 软件也内嵌了 VBA 功能, 利用其提供的 Visual Basic 编辑器建立和管理 VBA 项目(VBA Project)。在 Visual Basic 编辑器中, 提供了工程资源管理器、代码窗口、属性窗口, 以帮助用户建立和管理应用程序, 常用的 iFIX 子程序, 如表 4.3 所示。

表 4.3 iFIX 子程序

Table 4.3 Subroutine of iFIX

子程序	描述
AcknowledgeAllAlarms	确认指定画面中的所有报警
AcknowledgeAnAlarm	确认指定块的报警
DisableAlarm	屏蔽指定数据块的报警
EnableAlarm	启用指定数据块的报警
CloseDigitalPoint	关闭指定的数字量标签或对该标签置1
OpenDigitalPoint	打开指定的数字量标签或对该标签置0
ToggleDigitalPoint	切换数字量标签的状态（打开和关闭）
ClosePicture	关闭指定的画面
OpenPicture	打开指定的画面
ReplacePicture	关闭指定的画面并用其他画面代替
OffScan	停止指定标签扫描
OnScan	置指定标签扫描
ToggleScan	切换指定标签的扫描状态
SetAuto	设置指定标签为自动模式
SetManual	设置指定标签为手动模式
ToggleManual	切换指定标签的手/自动模式
ReadValue	读指定标签的值
WriteValue	设置指定数据标签的当前值
RampValue	为指定标签的当前值增加或减小该标签 EGU（工程单位）百分比值
LocateObject	在画面中查找指定对象或所选对象
LogIn LogIn	子程序，执行标准的注册程序
PictureAlias	给当前画面定义别名

VBA 编程应用：

点击图标，打开“高炉上料主画面”：

Private Sub RoundRect1 Click ()

OpenPicture “高炉上料主画面”

End Sub

点击图标，设定“上料.炉顶.顶压调节输出.f_cv”=30

```
Private Sub Rect1_Click ()
WriteValue 30, "上料.炉顶.顶压调节输.f_cv"
End Sub
```

双击图标，确认“报警画面”所有报警

```
Private Sub Oval1_Rect1_DbClick ()
AcknowledgeAllAlarms "报警画面"
End Sub
```

选定画面，双击图标，画面旋转20度

```
Private Sub Rect2_Click ()
Rect2.RotationAngle = Rect2.RotationAngle + 20
End Sub
```

关闭“上料主画面”，打开“布料操作画面”

```
Private Sub Rect2_Click ()
ReplacePicture "上料主画面", "布料操作画面"
End Sub
```

(3) 料流控制程序设计

1) 程序结构与主要内容

利用 CONCEPT 梯形图编程软件对 AS-P685 控制器编写控制程序。CONCEPT 的程序结构包括：连续任务、周期性任务、硬件配置表等。连续任务是顺序执行的，在控制器的一个扫描周期内顺序执行一次，连续任务包括主程序及被主程序调用的子程序。

主程序内容：

控制方式选择；

子程序调用。

子程序

节流阀 γ 角控制角度计算

PID 调节控制程序；

α 角计算程序；

β 角计算程序。

PID 无扰动切换程序

2) 控制方式的选择

施耐德 CONCEPT 控制器灵活的数字 PID 功能块与强大的逻辑控制相结合，可适应各种回路控制。所以利用其梯形图编程语言很容易实现节流阀角度的各种控制方式。

手动方式：允许操作人员直接控制节流调节阀的开度。

半自动方式：允许操作人员手动输入设定值，控制系统将根据过程反馈，自动计算比例阀的输出开度。

自动方式：计算机根据布料方程和料流控制计算程序，得到设定值。

3) 节流阀开度控制程序流程图

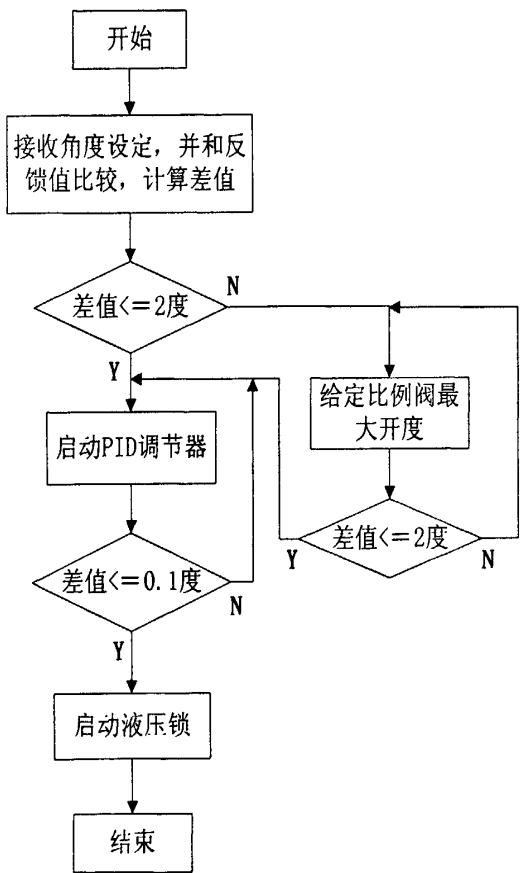


图 4.4 节流阀开度控制程序流程图

Fig 4.4 The controlling program flow chart of throttle opening degree

4.2.3 料流控制 PID 参数整定和运行分析

(1) PID 参数整定

简单控制系统是由广义对象和调节器构成的，其控制质量的决定性因素是

被控对象的动态特性。控制回路的参数整定就是调整参数到最佳值，使它与被控过程特性配合好、获得满意的系统静态与动态特性。通常称这种整定为最佳整定。衡量调节参数是否最佳，需要规定一个明确的反映控制系统质量的性能指标，大致分为单项性能指标与误差积分性能指标^[20]。

单项性能指标中常用的有衰减率、最大动态偏差，调节时间。其中应用最广的是衰减率，0.75 的衰减率是对偏差和调节时间的一个合理折衷；误差积分性能指标是基于时间 $t=0$ 直到稳定为止整个响应曲线的形态定义的，使用比较麻烦^[13]。

参数的整定方法很多，归纳为两大类。理论计算整定法：如根轨迹法、频率特性法，这些整定方法基于被控对象数学模型（如传递函数、频率特性）通过计算方法直接求得整定参数。另一类为工程整定法：常用的整定方法为动态特性参数法、稳定边界法、阻尼震荡法、现场经验整定法（凑试法）、极限环整定法^[21]。

根据以往的工作经验，认为此系统采用凑试法比较简单。按先比例、再积分、最后微分的顺序，置入某些经验数值后，把系统闭环起来，然后再经给定值扰动、观察系统过程曲线，若曲线不够理想，则改变 P、I、D 值，进行反复凑试，直到控制质量符合要求为止^[22]。

PID 调节程序由 concept 软件编制，根据网络速度和模块采样周期把回路更新时间设为 1 秒。在 PID 调节中需要注意的有两点，即过程值对设定值跟踪的快速性和准确性。但是，快速性需要加大比例常数减小积分常数，准确性却需要减小比例常数加大积分常数，因此如何调整比例常数和积分常数尤为重要。

在 PID 调节中，采用了一种简单实用的凑试方法^[23]，就是首先在开始阶段设置很小的比例系数(0.01)和很大的积分时间(180 秒)，保证当设定值和过程值之间有差别时调节阀的输出变化是每秒钟 1 度，然后逐步加大比例系数减小积分常数，同时比较设定值和过程值的曲线，直到调节曲线的响应满足快速性和准确性，最后把取得的比例常数和积分常数写进 PLC 的内存中。经过这种方法实现的 PID 调节真正做到了响应快速余差极小，而且这种方法操作起来很简单，较快就能完成全部参数的调整。

根据表 4.2 并计算出相应 PID 的整定参数。在工业过程计算机上对 PLC 得 PID 各参数变量设定、运行，并观察控制效果。现场调试中，经过反复试验实，炉顶控制实际的 PID 调节器的具体参数设置如表 4.4 所示，表中 P、I、D 数值越大，作用越小。

表 4.4 PID 参数设定表

Table 4.4 Setpings parameters of PID

序号	寄存器	功能	实际设定值
1	40509	过程值	752
2	400510	设定值	4600
3	400511	输出	100
4	400512	上限报警	4000
5	400513	下限报警	50
6	400514	P	40
7	400515	I	466
8	400516	D	3375
9	400517	偏置	0
10	400518	积分上限	2190
11	400519	积分下限	400
12	400520	工程上限	4095
13	400521	工程下限	0
14	400522	过程值原始值	823
15	400523	回路数	400
16	400524	复位	0
17	400525	输出上限	4095
18	400526	输出下限	0
19	400527	积分滤波常数	0
20	400528	跟踪输入指针	0

(2) PID 调节器运行分析

在实际调试过程中,为了避免液压系统对设备造成冲击,PID 调节器一般设置为临界阻尼状态,目的使系统既有较快的相应速度,又有很好的稳定性^[24]。

γ 角开度控制是一个恒值调节系统,当 γ 角度变化时, γ 角 PID 调节器输出量变化,PID 输出值作为比例阀给定值,经过比例放大板,驱动比例阀电磁铁芯,改变油缸的进油量大小,使油缸随 PID 的输出变化,作快速、慢速运动,使实际 γ 角=设定值。在下图中,当 γ 角度变化时,控制系统的响应曲线,无静差调节,静差为零;过渡过程时间 $t \approx 3s$ 。

0~t₁ 时刻,PID 不投入,此时比例阀设定值为手动最大,使得节流阀角度快

速达到 $\gamma_{\text{实际}} = \gamma_{\text{设定值}} - 2^\circ$ (t_1 时刻)，此时，切断手动设定值，投入 PID 调节器，使 γ 角控制值平稳无超调过渡到设定值。当设定值 = 实际值时，启动液压锁，切断油缸供油回路，保持 γ 角度。PID 调节器运行效果如图 4.5 所示：

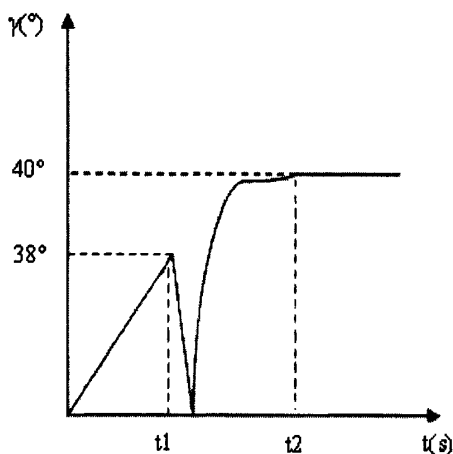


图 4.5 不带无扰切换料流 PID 调节器运行效果

Fig 4.5 The effect figure of material PID regulator without bumpless switchin

(3) PID 无扰动切换控制

节流阀手自动切换控制以及比例阀调节初始阶段，PID 调节实际是不投入的。当由手动切换到自动 PID 调节时，PID 初始化运行时，输出瞬间为零，随后根据设定与实际反馈值之差进行调节，这就造成对机械设备的冲击^[25]。为了克服手动自动方式切换给设备带来冲击，程序设计了无扰动切换程序：即 PID 投入以后，PID 输出值不直接控制比例阀，比例阀保持现有手动输出状态，此时系统程序先作判断，只有当 PID 输出值 $\geq$ 实际角度反馈值时，PID 输出直接控制比例阀，然后切断手动设定值，控制系统完全处于 PID 自动调节过程中，消除了由于切换给设备造成的冲击，如图 4.6 所示：

4.3 布料溜槽控制系统

为了让物料均匀分布在高炉内，须精确控制布料溜槽的运动和定位。溜槽控制主要分为溜槽的水平方向旋转 (β 角控制) 和垂直方向倾动控制 (α 角控制)。为保证均匀布料，缩短布料时间，控制系统要求响应快，过渡时间小，无超调，保证物料均匀分布到高炉水平面上。

布料溜槽的合理运动是实现炉况有效控制的重要调节，因此溜槽的控制是整个无料钟炉顶布料环节的关键。对溜槽的运动除了“快速、准确和可靠”的一般要求外，还有如下具体指标：

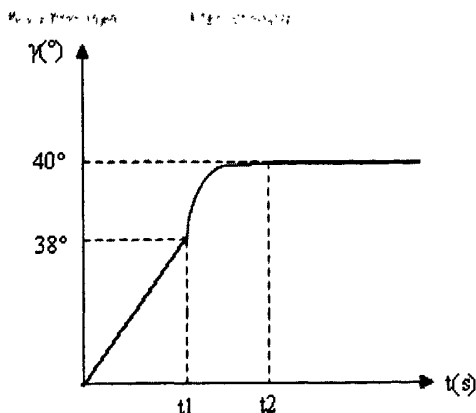


图 4.6 带无扰切换料流 PID 调节器运行效果

Fig 4.6 The effect figure of material PID regulator with bumpless switching

- 圆周固定角速度运转，6 秒/圈；
- 倾角快速正反向运动，响应速度不低于 1.7 度/秒；
- 准确停车，无超调振荡现象；

4.3.1 控制设备选型

目前国内溜槽控制多采用直流电机通过齿轮变速箱，驱动溜槽控制。直流电机具有宽广的调速范围和优良的负载-电流特性，响应迅速，易于调节，在工业界得到了广泛的应用^[26]。长期以来的实践证明，直流电机在溜槽布料运动控制中的应用是成功的。

由于布料溜槽工作环境比较恶劣，齿轮箱由于长期工作在高温、粉尘、潮湿环境，齿轮箱由于锈蚀或密封不好，经常出现卡阻现象。且由于高炉冶炼是一个稳定、连续的化学反映过程，不能随意停风检修；另外高炉布料操作需要动态反映迅速，定位精，一般系统不能满足控制要求。目前国内高炉布料控制大多采用直流电机和模拟或数字直流传动装置组合，或交流电机加变频装置组合。如果平时设备维护保养条件较好，两种方式都能满足控制要求。由于直流电机具有调速范围宽、调速精度高的特点，且机械特性比交流电机好，过载能力强的特点，一般都选用直流电机加直流数字传动装置组合方式，对高炉布料进行控制。目前通用的直流调速装置很多，例如，西门子、ABB、AB 等等，一些国内厂家近几年生产的调速系统，多能满足控制要求。由于西门子直流调速装置开发较早，系统稳定，控制软件功能较强，一般工业控制都能满足。无论是手动设定或联机编程调试，都非常方便，尤其是装置本身附带的故障诊断功能，给用户提供包括装置本身、控制系统外围设备等详细的诊断功能，用户可以根据故障代码迅速判断找故障，处理问题，减少了由于故障给生产带来的影

响；西门子直流装置还具有过载自动保护，这不仅保护了系统本身，对外围设备也起到了保护作用，避免了人身和设备事故。

按设备“过载特性”和动态性能原则，溜槽控制选用 SIEMENS 公司的 SIMOREG K 6RA2475-6GS22 型号的全数字直流装置作为溜槽 α 、 β 的控制设备。该装置负载特性好，额定电流为 200A，短时最大过载达 300A，调速性能稳定，动态响应快，系统参数调整简单，自诊断能力强，抗干扰能力强，同时具有完善的通讯功能，能方便的与其它设备构成自动化程度较高的控制系统，是布料溜槽较为理想的控制设备^[27]。其系统功能如图 4.7 所示：

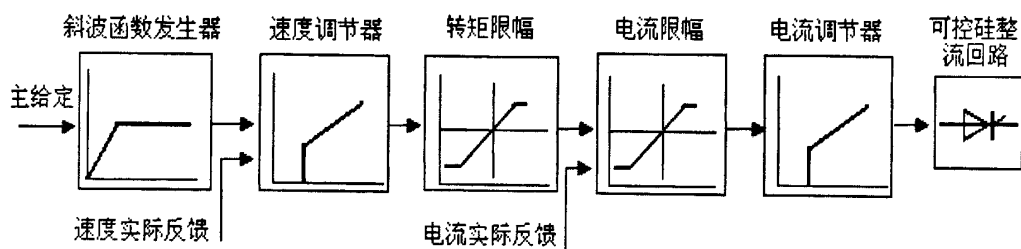


图 4.7 装置系统功能图

Fig 4.7 The function diagram of DC driver device

SIMOREG K 6RA24 是一种紧凑式全数字直流调速装置，具有较高的技术水平，主要应用于中、小功率的直流调速传动领域。其额定电压 400~750V，额定电流 15~1200A，通过并联 SITOP 晶闸管功率单元可以将额定电流扩展至 3600A。小容量的 SIMOREG K 6RA24 还可以附带最大励磁电流为 30A 的励磁控制装置，构成集电枢控制与励磁控制于一体的完整的直流调速传动控制系统^[7]。

(1) 主要技术性能指标特点：

- 主回路额定电源电压：3 相 AC 500V (+10% / -10%)；
- 装置额定工作电源电压：2 相 AC 500V (+15% / -25%)；
- 励磁额定电源电压：2 相 AC 500V (+15% / -25%)；
- 额定电源频率： 45-65HZ 范围内自适应；
- 额定直流电压：600VDC；
- 额定直流电流：200A；
- 过载能力：最大为额定的 150%；
- 强大丰富的过载、过压、过热等功能；
- 额定电流时的功耗： 650W；
- 控制精度： $\Delta n=0.1\%$ ；
- 可以实现控制性能的自动优化：在调试过程中，SIMOREG K 6RA24 可

以自动进行相关调节器的优化运行、控制系统参数的匹配及偏差补偿,以确保直流调速传动控制系统具有最佳的控制性能。

- 灵活的参数组态:通过输入不同的控制参数即可方便、灵活地组态直流调速传动控制系统的控制功能,构成各种型式的直流调速传动控制系统,简化了工程设计、系统调试及运行过程,提高了工作效率。这也是 SIMOREG K 6RA24 最主要的特点。

(2) 控制设备软件特点

SIMOREG K 6RA24 的控制软件采用功能模块组合方式,与控制单元的硬件相配合,可以实现各种开/闭环控制、监视及辅助功能,各功能模块的有机组合,即构成了直流调速传动控制系统的控制模式,而各功能模块的性能及采用与否要由输入的控制参数来决定,即所谓的参数组态。

SIMOREG K 6RA24 的基本控制模式为速度及电流闭环的双环控制系统,根据需要可以附加高级工艺控制功能模块作为直流调速传动控制系统的外环。

电枢闭环控制主要包括给定值、工艺调节器、斜坡函数发生器、速度实际值、速度调节器、转矩限幅、电流限幅、电流实际值、电流调节器、电流预控制器、逻辑无环流自动反向控制、触发单元等功能模块。其中各调节器均为 PI 调节器,用于实现各种闭环控制功能。

在电枢闭环控制中,用工艺调节器作为直流调速传动控制系统的外环,与 PT10 高级工艺控制板选件相配合,实现张力、比率、位置、功率或压力等工艺过程的闭环控制;用速度调节器实现速度的闭环控制,通过将转矩给定值加到速度调节器的输出上,可以实现速度环的前馈控制,以改善速度环的动态响应;用电流调节器实现电流的闭环控制,通过将电流预控制器与电流调节器并联,可以实现电流环的前馈控制,以改善电流环的动态响应,确保触发单元无论在电流连续/断续,甚至在转矩反向时都能迅速、准确地发出触发脉冲。

用户只要简单设置一些必要参数,通过装置运行优化功能,达到控制目的。优化分为手动和自动两种方式。用户还可以通过手动优化,对系统进行细调,以达到精确控制的目的。通常用户只要设置电机电压、电流、功率、励磁电流等参数,通过速度、电枢优化和励磁优化设定主回路控制,系统便可以启动运行,再通过设定手动调整内部 PID 参数,满足系统响应时间、系统稳定等要求,完成系统精调功能。

4.3.2 溜槽倾动定位和旋转控制

溜槽控制系统分为两部分:溜槽水平旋转控制和溜槽垂直方向倾动控制。溜槽倾动和旋转控制都采用双闭环直流调速控制,如图 4.8 所示。

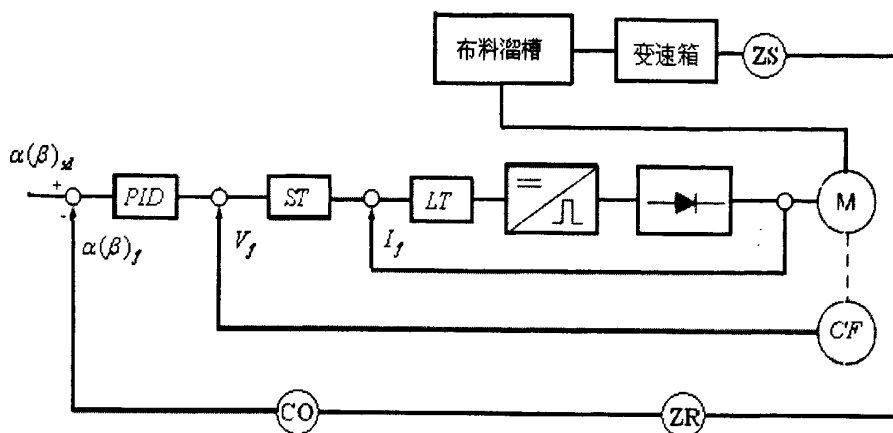


图 4.8 溜槽控制系统示意图

Fig 4.8 The sketch diagram of chute control system

图中 $\alpha(\beta)_{sd}$ —— $\alpha(\beta)$ 设定值;

ST ——速度调节器;

LT ——电流调节器;

V_f ——速度反馈值;

$\alpha(\beta)_f$ —— $\alpha(\beta)$ 反馈值;

I_f ——电流反馈值;

CF ——速度检测其;

M ——直流电动机;

ZS ——自整角机发送机;

ZR ——自整角机接收机;

CO ——编码器。

控制系统中设置了两个调节器，转速调节器的输出当作电流调节器的输入，电流调节器的输出控制晶闸管整流器的触发装置。电流调节器在里面称作内环，转速调节器在外面称作外环，这样就形成转速、电流双闭环调速系统^[28]。为了获得良好的静、动态性能，转速和电流两个调节器都采用 PI 调节器。转速调节器是调速系统的主导调节器，它使转速跟随其给定电压变化，稳态时实现转速无静差，对负载变化起抗扰作用，其输出限幅值决定电机允许的最大电流^[29]。电流调节器使电流紧紧跟随其给定电压变化，对电网电压的波动起及时抗扰作用，在转速动态过程中能够获得电动机允许的最大电流，从而加快动态过程，当电机过载甚至堵转时，限制电枢电流的最大值，起快速的自动保护作用。一旦故障消失，系统立即自动恢复正常^[30]。

由图 4.8 知，系统工作开始时，由操作人员设定或控制系统根据布料模型自动计算结果设定 α 、 β 值， α (β) 角设定值与反馈值比较，经过 PID 运算，输出值送至速度调节器。当差值比较大时，速度调节器接收的给定值较大，此时电机快速启动，高速转动，使得 α (β) 角的实际值与设定值之差越来越小；当实际值接近设定值时，差值变小，电机减速，使得实际值无超调逼近设定值。

在实际控制系统中，速度调节器和电流调节器，由直流控制装置内部控制软件固定，PID 调节器由 PLC 软件编制。自整角机发送机与炉顶布料溜槽传动变速箱连接，测得布料溜槽的位置，经主电室自整角机接收机同步接收，与连轴的编码器直接转换为数字信号，送至 PLC 控制系统，对溜槽进行控制。

由于溜槽倾角的定位要求准确无超调，要求系统既响应快，又要能快速停车，因此控制装置在停车前，采用了减速指令，才能准确停车^[31]。另外，为了防止溜槽倾角回溜，采用了抱闸装置。溜槽动作过程曲线如图 4.9 所示：

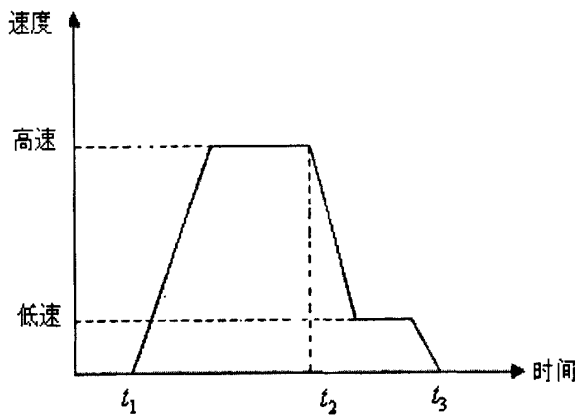


图 4.9 布料溜槽倾角动作过程

Fig 4.9 The action procedure of chute angle controlling

图中 t_1 ——倾动开始；
 t_2 ——减速点；
 t_3 ——倾动到位。

倾动控制传动装置随溜槽动作，装置电流变化如图 4.10 所示。由图可以看出， t_1 时刻电机以大电流启动，克服设备惯性，使得倾角以最快速度接近设定值； t_2 时刻开始减速，可以有效防止速度超调。

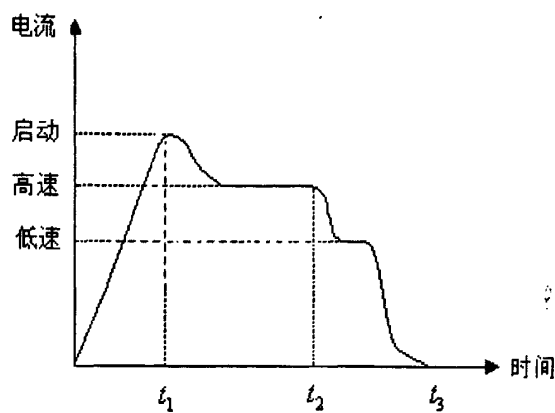


图 4.10 装置电流变化示意图

Fig 4.10 The transformation of current in device

图中 t_1 ——电机启动段；
 t_2 ——电机正常工作段；
 t_3 ——电机减速段；

4.3.3 控制系统优化运行

布料溜槽的圆周运动及倾角运动均由直流电机提供原动力，经过星型减速箱后拖动溜槽进行 α 、 β 两个方向的运动，现场直流电机的大小分别为 17KW 和 12KW，有关的电气技术参数如表 4.5：

表 4.5 溜槽驱动直流电机电气参数表

Table 4.5 The parameter of chute drive DC motor			
旋转运动 β		倾角运动 α	
回转速度	10r/min	回转速度	0.278r/min
电动机型号	ZZY-32-H	电动机型号	ZZY-31-H
额定功率	17KW	励磁电流	12KW
额定电压	220V	额定电压	220V
额定电流	93A	额定电流	64A

(1) 控制方式选择

SIMOREG K 6RA2475 全数字直流调速装置有自动和手动两种参数优化方式。将电机基本参数（电压、电流、励磁电流、功率）输入传动装置，进行优化，优化分为自动和手动两种方式：

自动方式：选择 P052 的参数分别为 25、26、和 27，可分别执行对电流控制、速度控制和励磁控制的优化，在以上三个过程中，由全数字装置自动识别并调整最佳控制参数。

手动方式：根据电机的铭牌参数，依次将电枢回路电阻 R、电枢回路电感 L、励磁电阻 Rf 等相关参数手动输入 P100、P111、P112 等相关参数块中。

(2) 控制系统优化

电流控制器优化：检查电机参数 P100、P101、P102（额定电流、电压、磁场电流）已正确设置，电流优化时将去掉励磁，为防止意外飞车设 P354=20（速度限幅为 20%，检查 P171、P172 电流正负限幅为 100、快开电动分合正常。电流优化参数为 P52=25 设好后按手持操作面板“P”键，系统提示 Yes/No=Up/Down 按“↑”键确认，再按“I”键启动开始优化。优化后 P110（电机电枢电阻）、P111（电机电枢电感）、P112（电机磁场电阻）、P155（电流环 P 增益）、P156（电流环积分时间）、P255（励磁电流调节器 P 增益）、P256（励磁电流调节器积分时间）将被自动设置。注意优化时应使电机堵转，否则参数优化出来的值可能不准确。整个过程大约 40S，电流限幅将不起作用电流峰值与电机额定电流有关。电流环优化前设定 P159=0.01 P160=0(缺省值)，优化结束后，重新定义 P159，P160 的数值，保证 SCR 正反桥可靠换向。以后电流环优化前需将两个参数恢复工厂缺省值，P159=0.2 电枢自动翻转的转换阈值% P160=0.02 附加的无转矩时间间隔。

速度控制器优化：设 P051=40，将 P354 设成 100，确认 P083=2、码盘参数 P140、P141、P143 设置正确、码盘接线正确；设定速度优化参数为 P052=26，设好后按“P”键，系统提示 Yes/No=Up/Down 按“↑”键确认，再按“I”键启动开始优化。整个过程大约 6S。电机以 45%的额定电枢电流加速达到 20%的最大电机速度，优化后参数 P225（速度环比例值）、P226（速度环积分时间）将被自动设置。优化过程中如报 F38（测速机故障）可能码盘 A、B 信号接反可对换数字箱 28#、30#端子线。

(3) 控制系统启动运行

系统优化完成后，装置上电，系统自检。通过自检，装置使能（Eabled），输出允许合闸信号，主回路自动合闸，系统处于等待运行状态，下面具体分析电机启动过程。

启动启动过程(以正桥起动为例)：旋转速度给定电位器给出速度给定值，此时正桥投入整流工作，驱动电机起动，在起动初期 $U_{gn} > U_{fn}$ ，速度调节器输出很快变为负限幅值，达最大电流给定值。在电流闭环作用下，电枢电流很快

升至载流值，并使电机在此载流下，恒流加速起动。当电机转速升至大于速度给定时，由于速度微分反馈作用，速调很快退出限幅值，进入线性放大区，电流给定值减小，在电流闭环作用下，电枢 I_d 减小，当 $I_d < I_{fn}$ 时 (I_{fn} 负载电流) 电

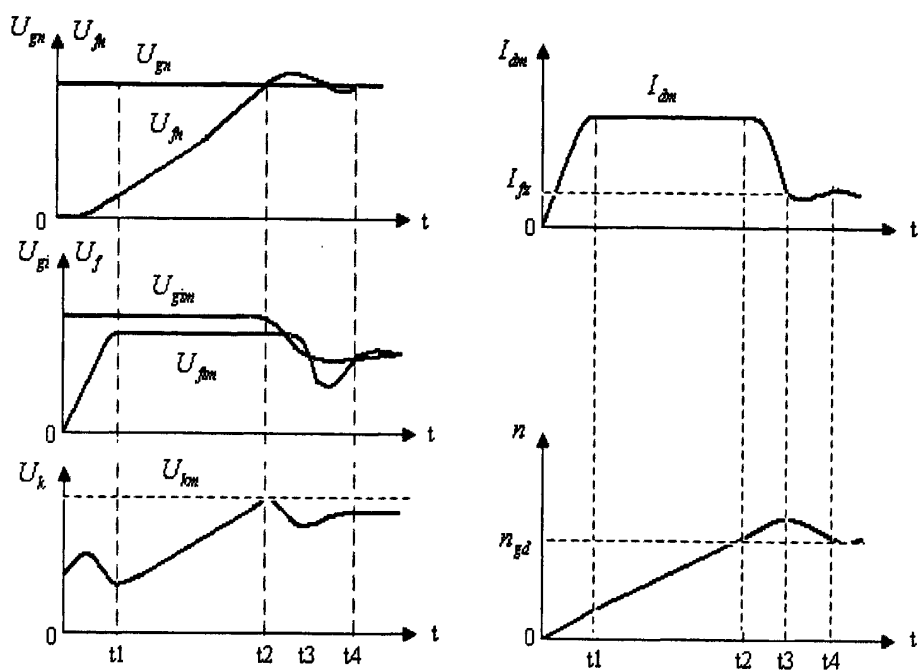


图 4.11 系统起动过程
Fig 4.11 The diagram of system start-up procedure

机开始在负载阻力下减速，直至稳定，即 $U_{gn}=U_{fn}$ 、 $I_d= I_{fn}$ 。

制动过程(以正转运行制动为例): 电机正转运行时，速度给定回零，由于电机仍在运行， U_{fn} 使速度调节器输出很快变为正限幅值，在正极性 I_g 与 I_f 作用下流调输出由负极性(整流极性)很快变成正极性(逆变极性)，系统通过正桥进行逆变，向电网回馈电机电磁能，至使 I_d 下降至零，在换向逻辑的作用下，将电流调节器及触发器的电子开关切换至反桥，在切换过程中，通过可控单元的作用将脉冲推至 β 限。反桥在 β 限投入工作，(这样可以防止投入时造成电流冲击)，在 U_{fn} 及电流闭环的作用下，反桥的恒电流将电机电势 E 的动能逆变回馈电网，直至电机电势降为零：即速度为零，电机制动。

反转过程(由正转至反转过程): 电机在正转运行时，将极性选择开关，由正极性搬至负极性，此时 U_{gn} 与 U_{fn} 同极性，速调输出由负值很快变成正限幅输出， I_g 与 I_f 同时为正极性，流调输出由负极性(整流极性)很快变为正极性(逆变极性)系统通过正桥进行逆变，向电网回馈电机电磁能，至 I_d 下降至零，然后，在换向逻辑单元作用下，将流调及触发器电子门由正桥切换至反桥，在切换过程中，

在运转控制单元作用下,将脉冲推至 β 限,反桥在 β 限投入工作,在负极性 U_{gn} ,速度反馈 U_{fn} 及电流闭环的作用下,反桥以恒电流迅速地电机正转反电势动能逆变电网,使电机正转速度迅速下降至零,电机正转速度下降至零后,在负极性速度给定作用下,速度将正限幅输出,经反相器后流调得到最大电流给定,在电流闭环作用下,电机恒流反向起动至反向速度给定值,过程同正向起动。

4.3.4 控制系统运行分析

溜槽控制分为倾动和水平旋转控制两步分,水平旋转控制比较简单,系统优化后,设定根据布料要求设定好旋转速度,一般不用改变优化参数,就能满足旋转控制要求,下面就溜槽倾动定位控制加以分析。

电机启动过程动性能如图 4.12 所示,电流峰值和静态值都是 92.2A,振荡一次,调整时间为 0.043 秒, $\frac{di}{dt} \geq 2000$,系统相应很快,使得溜槽能够快速启动,满足了溜槽启动时克服机械大惯性的电流上升率要求^[31]。

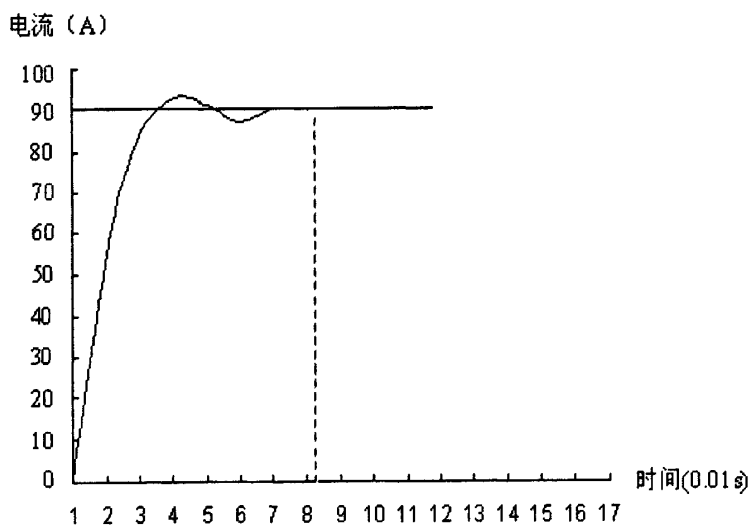


图 4.12 电流调节器运行效果

Fig 4.12 The effectiveness diagram of current regulator

速度调节器运行效果如图 4.13 所示,速度调节器静态值 1500r/min,无静差,超调量为 0,调整时间为 0.92 秒,使得溜槽倾角控制快速接近设定值,而且满足一次找角成功,完全满足布料溜槽倾角的控制工艺要求。

控制系统没有优化前,系统启动电流很大,达到额定电流的 1.5 倍,启动电流大对机械设备冲击很大(如图 4.10 所示),使得机械设备寿命大大降低。为了避免以上现象,需对控制装置进行优化,控制优化后,启动电流下降,减少的设备磨损,系统运行效果如图 4.14 所示:

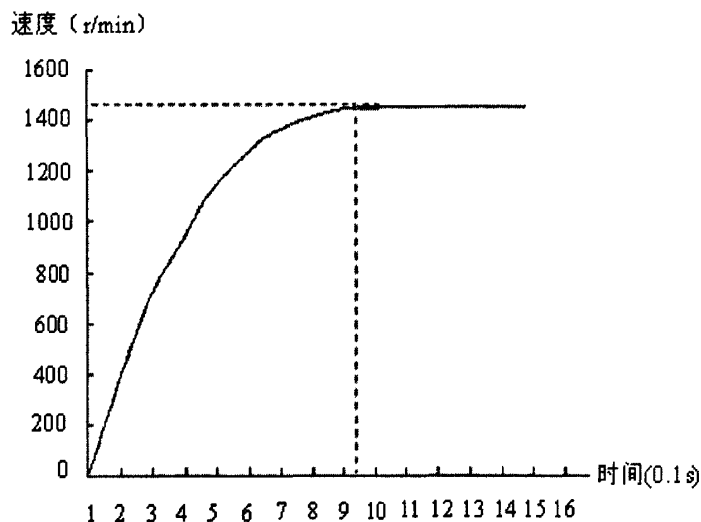


图 4.13 速度调节器运行效果

Fig 4.13 The effectiveness diagram of velocity regulator

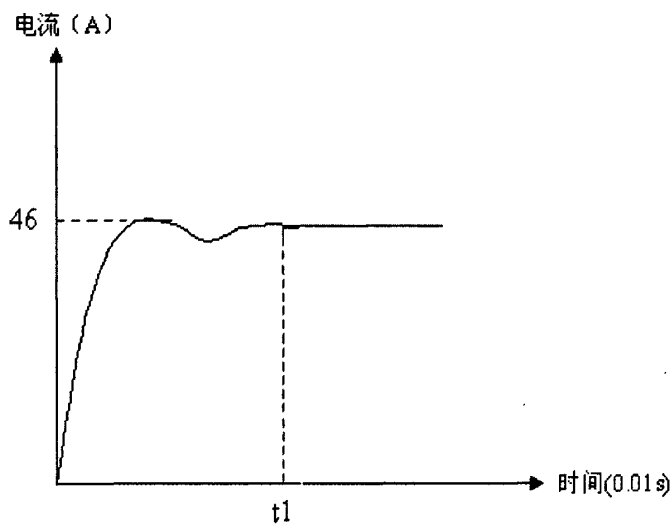


图 4.14 装置优化后电流波形

Fig 4.14 The current line graph of device optimization

流槽倾动 α 角控制速度限制为 0.278n/min, α 角电机自带减速机传动比 4: 1, 气密箱传动变速箱变速比为 100: 1, 速度设定为: $0.278 \times 100 \times 4 = 111.2\text{n/min}$, 溜槽长度 3.75 米, 角速度: $\omega = 2\pi n = 2 \times 3.14 \times 0.278 = 1.746$, 假设 α 角调整 40° , 调整时间为: $t = (40/360) \div \omega = 3.82$ 秒。实际调整时间为 3.7 秒, 满足系统设计要 求, 运行效果如图 4.15 所示;

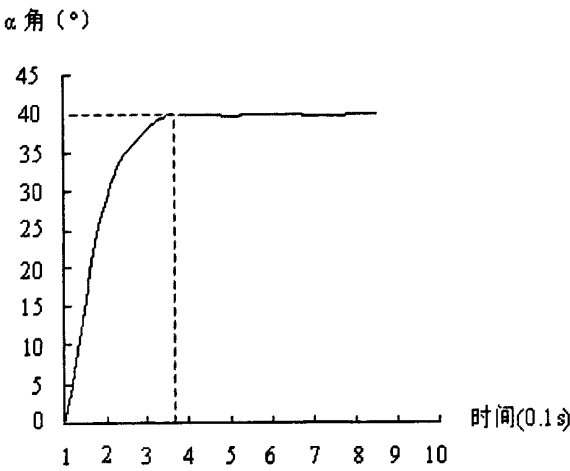


图 4.15 溜槽倾动动作曲线

Fig 4.15 The action line graph of chute rotation

溜槽旋转控制电机自带变速箱，传动比 1：1，溜槽旋转速度为 6 秒/圈，即 10n/min，则 β 角速度设定值为： $10 \times 1 \times 100 = 1000\text{n/min}$ ，系统调节时间为 4.13 秒，满足 β 角速速度调节要求实际运行效果如图 4.16 所示：

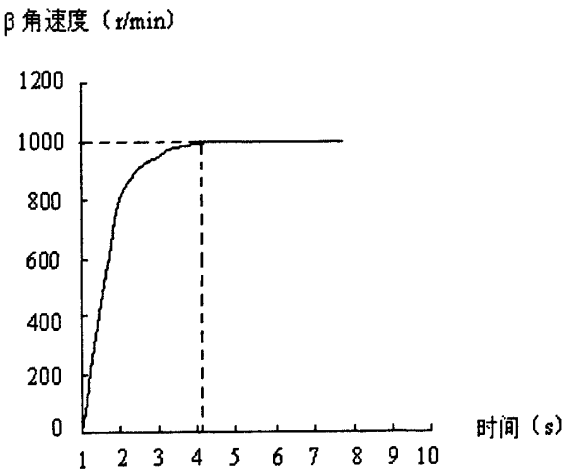


图 4.16 溜槽旋转运行曲线

Fig 4.16 The action line graph of chute rounding

4.4 结论

系统投入运行以来，与以前模拟控制系统相比，有如下明显效果：

- (1) 系统响应速度更快

主要体现在 α 控制柜，模拟柜响应速度为：1 度/秒，数字柜为 2 度/秒以上；

(2) 控制精度更高

模拟柜： α 控制柜在角度定位时经常超调震荡， β 角运行的单圈时间 6 秒/圈得不到保证，最长时间为 10 秒/圈；

数字柜： α 角启动切换快速平稳无超调， β 角单圈时间基本稳定在 6 秒/圈， $|\text{et}| \leq 0.2$ 秒/圈；

(3) 系统运行更加稳定可靠

模拟控制柜的月平均故障率为：2 次/月，累计 1 个小时以上，数字控制系统故障率为 0。

(4) 控制系统的应用，使烧结矿布料 α 角度设定值精确到 0.25° ，从而使布料精度大大提高。

(5) 节流阀系统控制性能良好，实现了找角一次到位，避免了反复找角带来机械设备损伤现象。

结 束 语

高炉冶炼是一个复杂变化过程，高炉布料的结果好坏，直接影响高炉炉况，而高炉炉况的调整，只能通过改变炉内炉料的分布达到改变炉况的目的。而炉料只有通过布料操作，才能根据工艺要求分布到炉内指定位置。高炉布料操作作为高炉冶炼的最重要环节，其控制技术的改进，一直是高炉高炉冶炼关注的课题。首钢作为冶金行业的大型企业，在大型高炉操作方面积累了丰富的经验，也一直致力于布料操作的研究，取得了不少成果。本课题以首钢炼铁厂三高炉布料操作控制系统设计和集成为依托，研究并解决了高炉布料控制过程中的控制难点，实现了对高炉布料过程中的料流、溜槽的控制。本文完成了如下主要工作：

(1) 针对高炉布料工艺进行了深入学习和研究，对高炉布料过程中炉料在高炉内运动轨迹和节流阀料流控制特性进行了分析，建立了高炉布料模型。

(2) 考虑影响节流阀的各种因素，包括液压缸、电气控制回路因素，为了快速、准确使节流阀开到设定位置，节流阀调节采用分段调节方法，即：当设定角度-实际角度 $\geq 2^\circ$ 时，PID 不投入，比例阀实际输出由人工设定的最大值控制，使得节流阀快速打开，接近设定角度，当设定角度-实际角度 $< 2^\circ$ 时，切断最大设定值，投入 PID 调节器，通过调整 PID 参数，使得节流开度快速无超调达到预定位置，使料速很快达到恒定控制值。

(3) 根据首钢布料工艺要求，设计了时间法和重量法恒料流控制系统，时间法恒料流控制系统已经应用到高炉实际操作中，此方法使布料更精确，操作更灵活，更有利于炉内煤气分布状况，使高炉生产稳定顺行。

(4) 针对高炉布料工艺对控制系统的要求，合理进行 PLC 的选型，配置硬件和软件系统，完成系统编程和调试任务，控制系统稳定运行。

(5) 对于重量法恒料流控制，还有很多不足之处。由于料罐称量受到压力影响，称量不准确，影响料流的计算。目前还有待改进，需解决重量的压力补偿问题。

参考文献

1. 刘云彩. 高炉布料规律[M], 北京冶金工业出版社, 1984, 20—45.
2. 刘云彩. 无料钟布料计算公式的简化[J], 钢铁, 1995, 30(5): 5.
3. 马竹梧. 钢铁生产自动化技术[J], 冶金工业出版社, 2005, 15—16.
4. 顾树生, 王建辉, 杨自厚. 自动控制原理[M], 冶金工业出版社, 2002, 4, 78—80.
5. Sato Takesh, Nouchi Taihei, Takeda Kanji, Kamano Hideyuki, Development of burden distribution control with an advanced bell-less top at Chiba No.6 blast furnace[J], Nippon Tekko Kyokai, 2000, vol. 86, no10, pp. 648-653.
6. 胡丕俊. 高炉布料规律研究[D], 北京科技大学硕士论文, 2000, 3.
7. 于成忠, 金昕. 无料钟布料器布料规律研究[J], 冶金设备, 2007 (8): 15—18.
8. 李旭红. 无料钟布料规律及其预测模型开发进展[J], 包钢科技, 2000(4): 12—14.
9. 杜鹤桂. 高炉无料钟炉顶节流阀料流特性[J], 首钢文献, 1989 (3): 10—13.
10. 石来润. 高炉布料倾动变频控制系统[J], 机械管理开发, 2002 增刊: 37—39.
11. 丁金发, 毕学工. 无钟炉顶布料模型发展现状及有关问题[J], 河南冶金, 2005, vol.13(6): 7—10.
12. 经文波, 陈小雷. 无料钟高炉布料数学模型研究[J], 冶金自动化, 2003, 27(1): 29-31.
13. BM85 Bridge Multiplexer User's Guide[J], Schnelider Automation, 1995, 8.
14. 韦东. 液压比例系统在高炉布料控制过程中的应用[J], 自动控制, 2006 (6): 60—63.
15. Bugaev, Nikitin, Portnov, Kolyaka, Dolinskii. Aspects of the control of charge distribution in a blast furnace with additional regulators[J]. Joint commission perspectives, July 2008, vol. 28, no.27 pp34-38.
16. Frank Pettersson, Jan Hinnelä, Henrik Saxén. Evolutionary Neural Network

- Modeling of Blast Furnace Burden Distributio, Materials and Manufacturing Processes, January 2003, Volume 18, pages 385 – 399.
17. Modicon PC-E984-785 Programmable controller[J], Schnelider Automation, 1993, 8.
18. CONCEPT 2.6 User's Programming instructor [J], Schnelider Automation, 2003.
19. FIX The user's instruction [J], Intellution cooperation Ltd. 2001, 3.
20. 胡寿松. 自动控制原理(第四版)[M], 北京: 科学出版社, 2001, 1-15.
21. 夏德铃, 翁贻方编著. 自动控制理论[M], 北京: 机械工业出版社, 2004, 1-5.
22. 邹伯敏主编. 自动控制理论[M], 北京: 机械工业出版社, 2003, 8-10.
23. 张国范, 顾树生. 微型计算机控制技术[M], 东北大学出版社 2002, 9, 118—119.
24. 俞金寿主编. 工业过程先进控制[M], 北京: 中国石化出版社, 2002, 6-10.
25. 阎坤主编. 自动化设备及生产线调试与维护[M], 北京高等教育出版社, 2002, 105-112.
26. 赵舰, 田军. 通用变频器在高炉无料钟溜槽机构控制重的应用[J], 本钢技术, 2003 (5): 13—15.
27. SIMOREG K 6RA24 DCspeed Regulation device instruction [J], Siemens Electric Drive Co.Ltd. 1997, 3.
28. 陈群. 双闭环直流调速系统及其动态与仿真[J], 科技情报开发与经济, 2007, vol.17(22) : 162
29. Yingda Dai, Masami Konishi, Jun Imai, Temperature Distribution Control in Blast Furnace, [J] Joint commission perspectives July 2008, vol(28), no.28 pp8-18.
30. 谢辉, 黄震. 新余钢铁公司 7#高炉 PLC 应用[J], 冶金自动化, 2005 (2): 69.
31. 王涛, 赵玉明, 严文瑞. 全数字直流调速系统的现场应用与调试[J], 电机与控制应用, 2007 (34): 40—43.

致 谢

本论文是在导师东北大学信息学院刘建昌教授的悉心指导下完成的。在他们的指引和帮助下，本人不但顺利地完成了学业，而且还培养了独立开展科研的能力，提高了个人综合素质。刘教授渊博的知识、严谨的作风、正直的为人以及细致的关心为我留下了深刻的印象，在此论文完成之际，谨表示衷心感谢。

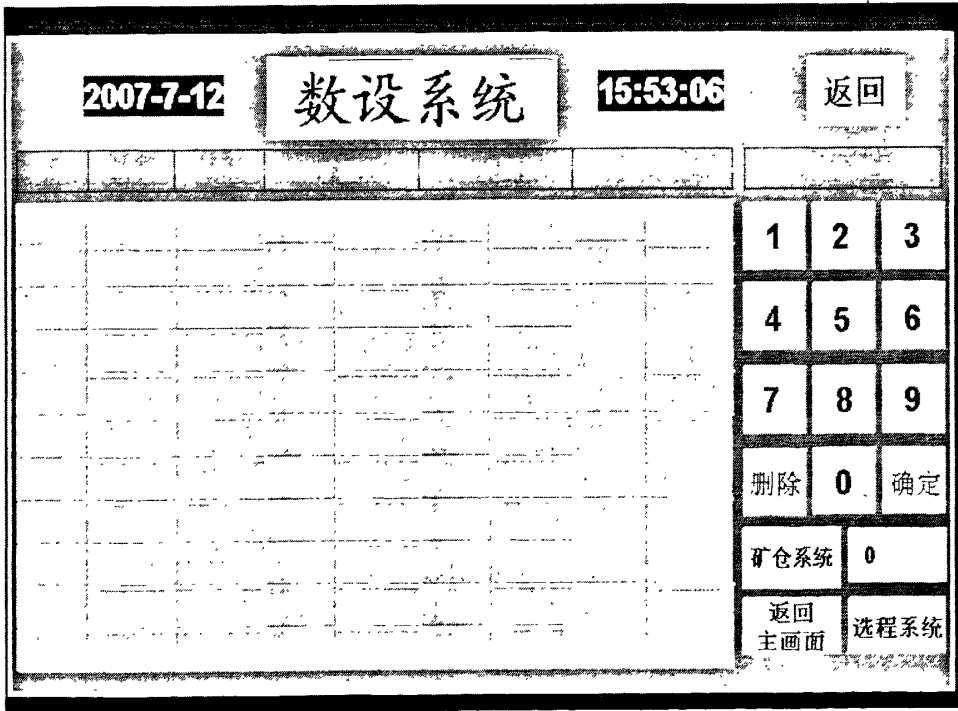
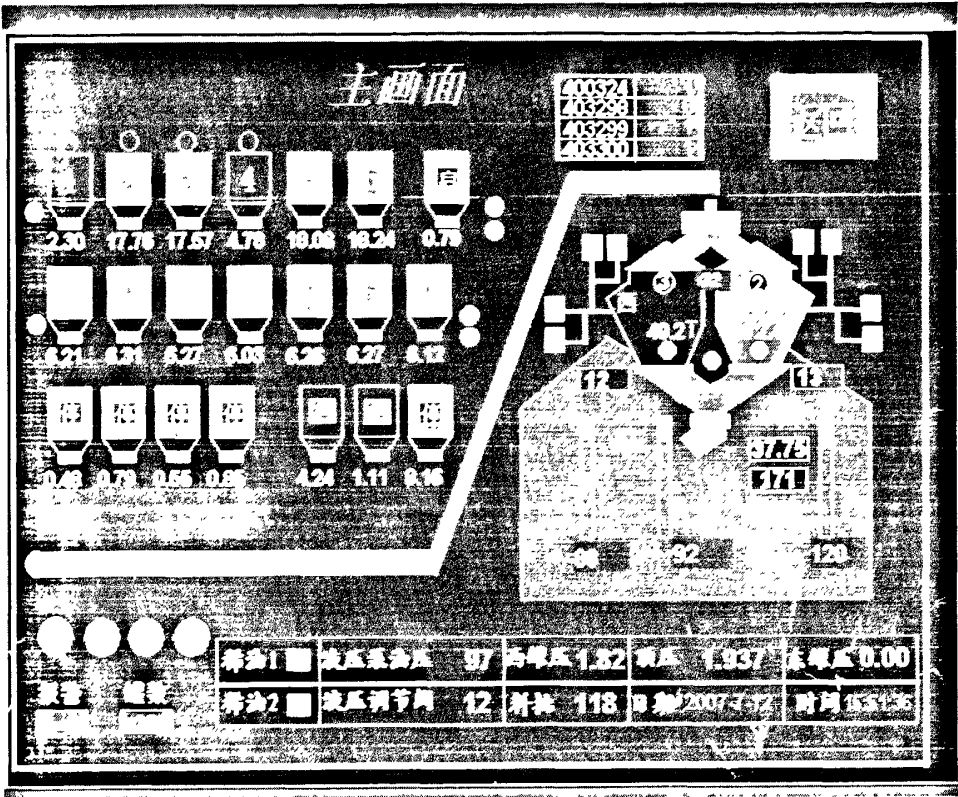
在课题进展的每一个环节，在项目实施过程中，首钢炼铁厂积极配合，在程序的编制、设计、调试过程中，得到了北京首钢自动化信息技术公司胡丕俊、陈国宏和王会全工程师，首钢炼铁厂周保界、董至宝高级技师，首钢信息部王景和、刘京和许小昱工程师的鼎力协助，在此一并表示衷心感谢！

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。

作者从事技术研究和学习经历的简历

1. 参加首钢中板厂炉卷轧机自动控制的编程调试
2. 参加首钢冷轧轧机自动化控制系统的编程调试
3. 完成首钢三焦炉自动控制系统编程调试
4. 组织完成了首钢第三线材自动控制系统编程调试
5. 组织完成了首钢 4#高炉自动控制系统编程调试
6. 组织完成了首钢 1#-3#高炉自动控制系统编程调试
7. 参加首钢 2160 轧机自动控制系统联合设计编程调试工作
8. 完成承德钢厂 4#高炉自动控制系统设计及编程调试
9. 完成承德钢厂 5#高炉自动控制系统设计及编程调试
10. 完成承德钢厂焊管厂主转动系统设计及调试
11. 组织完成首钢第三炼钢厂 LF 炉自动化控制系编程调试工作
12. 组织完成首钢第二炼钢厂板坯技改工程调试
13. 组织完成首钢型材厂自动化控制系统改造工作
14. 组织完成了首钢秦皇岛板技改项目的编程调试

附录 A 系统运行画面



探尺系统

溜槽系统返矿皮带返焦皮带2007-07-1211:12:12

西探尺	北探尺	东探尺
深度+96原位 自流通 直流通 工作键启动停止	深度+52原位 自流通 直流通 工作键启动停止	深度+56原位 自流通 直流通 工作键启动停止
短上超 短下超	短上超 短下超	短上超 短下超

连/点测

总启停启动停止

07-7-1214:14:47炉顶设备状态

a角工作柜交流通吸返●	B角硅整流柜直流通吸返●	探尺备用柜抱闸左输出吸返●
a角工作柜直流通吸返●	B角硅整流磁场投吸返●	探尺备用柜抱闸右输出吸返●
a角工作柜磁场投返回●	左尺工作柜交流通吸返●	探尺备用柜励磁左输出吸返●
a角备用柜交流通吸返●	左尺工作柜直流通吸返●	探尺备用柜励磁右输出吸返●
a角备用柜直流通吸返●	左尺工作柜磁场投吸返●	a角工作柜电柜电流74A
a角备用柜磁场投返回●	左尺上超切柜返回●	a角备用柜电柜电流0A
a角上超切柜返回●	左尺下超切柜返回●	B角工作柜电柜电流116A
a角下超切柜返回●	右尺工作柜交流通吸返●	B角备用柜电柜电流0A
B角工作柜交流通吸返●	右尺工作柜直流通吸返●	左尺工作柜电柜电流0A
B角工作柜直流通吸返●	右尺工作柜磁场投吸返●	右尺工作柜电柜电流0A
B角工作柜磁场投返回●	右尺上超切柜返回●	探尺备用柜电柜电流0A
B角备用柜交流通吸返●	右尺下超切柜返回●	
B角备用柜直流通吸返●	探尺备用柜交流通吸返●	煤气上升温度
B角备用柜磁场投返回●	探尺备用柜左直流通吸返●	煤气总管温度36℃1#203℃
a角39.C B角返回●	探尺备用柜右直流通吸返●	料量支架温度327℃2#179℃
B角硅整流柜交流通吸返●	探尺备用柜磁场投返回●	327℃3#202℃
		4#206℃
		煤气总管压力114kPa
		气密箱压力183kPa

主画面炉顶N1皮带数设选程N2_N4N3皮带焦丁画面选择

附录 B 溜槽运动控制柜参数设置表

表 B.1 高炉 α 角数字柜参数设置表
Table B.1 Parameters of Digital Control System For α

参数号	工作柜参数	备用柜参数	含义说明
P071	250	250	整流器额定电源电压
P072	200.0	200.0	整流器额定电枢电流
P073	5.00	5.00	整流器额定励磁电流
P082	002	002	励磁方式
P083	3	3	实际速度值的选择
P100	92.2	92.2	电机电枢额定电流
P101	220	220	电机电枢额定电压
P102	1.77	1.77	电机励磁额定电流
P103	0.60	0.60	电机励磁最小电流
P110	0.0867	0.0867	电枢回路电阻
P111	3.79	3.79	电枢回路电感
P112	90.23	90.23	磁场电阻
P156	0.400	0.400	电流调节器,积分作用时间
P171	200	200	转矩方向 I 的系统电流限幅
P172	-200	-200	转矩方向 II 的系统电流限幅
P225	1.00	1.00	速度调节器的 P 增益
P226	1.500	1.500	速度调节器的积分作用时间
P303	1.20	1.20	
P304	0.25	0.25	
P307	1.20	1.20	
P308	0.40	0.40	
P311	1.20	1.20	
P312	0.40	0.40	
P391	85.00	85.00	电枢电流阈值
P394	10.00	10.00	励磁电流阈值
P740	292	292	端子 14 的功能选择(模拟量输出 1)
P745	266	266	端子 16 的功能选择(模拟量输出 2)
P746	2	2	模拟量输出选择 2(端子 16)的控制字
P761	45	45	端子 39 的功能选择(开关量输入 1)
P766	43	43	端子 36 的功能选择(开关量输入 6)
P770	0110	0110	开关量选择输出的确控制字
P771	15	15	端子 46 的功能选择(开关量输出 1)
P772	8	8	端子 48 的功能选择(开关量输出 2)
P773	28	28	端子 50 的功能选择(模拟量输出 3)

表 B.2 高炉 β 角数字柜参数设置表
Table B.2 Parameters of Digital Control System For β

参数号	工作柜参数	备用柜参数	含义说明
P071	250	250	整流器额定电源电压
P072	200.0	200.0	整流器额定电枢电流
P073	5.00	5.00	整流器额定励磁电流
P082	002	002	励磁方式
P083	3	3	实际速度值的选择
P100	92.2	92.2	电机电枢额定电流
P101	220	220	电机电枢额定电压
P102	1.77	1.77	电机励磁额定电流
P103	0.60	0.60	电机励磁最小电流
P110	0.0867	0.0867	电枢回路电阻
P111	3.79	3.79	电枢回路电感
P112	90.23	90.23	磁场电阻
P156	0.400	0.400	电流调节器,积分作用时间
P171	200	200	转矩方向 I 的系统电流限幅
P172	-200	-200	转矩方向 II 的系统电流限幅
P225	1.00	1.00	速度调节器的 P 增益
P226	1.500	1.500	速度调节器的积分作用时间
P303	1.20	1.20	
P304	0.25	0.25	
P307	1.20	1.20	
P308	0.40	0.40	
P311	1.20	1.20	
P312	0.40	0.40	
P391	85.00	85.00	电枢电流阈值
P394	10.00	10.00	励磁电流阈值
P740	292	292	端子 14 的功能选择(模拟量输出 1)
P745	266	266	端子 16 的功能选择(模拟量输出 2)
P746	2	2	模拟量输出选择 2(端子 16)的控制字
P761	45	45	端子 39 的功能选择(开关量输入 1)
P766	43	43	端子 36 的功能选择(开关量输入 6)
P770	0110	0110	开关量选择输出的确控制字
P771	15	15	端子 46 的功能选择(开关量输出 1)
P772	8	8	端子 48 的功能选择(开关量输出 2)
P773	28	28	端子 50 的功能选择(模拟量输出 3)

附录 C 溜槽控制程序流程图

