

东北大学

硕士学位论文

磨矿分级智能控制系统在焦家金矿的研究应用

姓名：王海波

申请学位级别：硕士

专业：控制工程

指导教师：高立群

20060801

# 磨矿分级智能控制系统在焦家金矿的研究应用

## 摘 要

论文以山东黄金集团焦家金矿磨矿分级测控自动化项目为对象,研究了冶金行业磨矿过程自动控制、参数优化和信息集成技术,提出了三层实现方案。

磨矿是选矿工艺的重要一环,其主要目标是在保证矿物粒度的基础上使得产量最大化。磨矿过程是一个复杂的多变量、非线性和大时滞过程。论文根据控制目标,在分析系统模型基础上,结合磨矿系统特点,提出了前馈、串级、死区控制在磨矿系统的应用。论文选取了与质量和产量密切相关的旋流器协调控制和磨机给矿及负荷模糊控制两个子系统作了重点分析,采用模糊控制算法,对球磨机的运行状态进行判断并提出优化控制策略,实际控制效果证明了算法的有效性。

本论文还研究了利用单纯形法进行控制器参数优化,并在实际中得到应用。

论文还研究了集散系统中以数据库为核心的信息集成、工业以太网及 Web 技术在 DCS 中的应用。

在充分研究磨矿过程自动控制、效益优化和信息集成技术基础上,提出了磨矿 DCS 的过程控制级、过程监控级和生产管理级三层实现方案。

实际运行表明,本文设计的磨矿过程优化控制系统有效、经济、可靠,不仅适用于冶金行业,同时对采用自动化和信息化改造传统行业都具有重要的借鉴意义。

**关键词:** 磨矿分级; 模糊控制; 参数优化; 信息集成; 集散控制系统

# Study and application on the intelligent control for grinding classification control system in jiaojia gold mine

## Abstract

The grinding process automatic control, Parameters optimization and information integration in metallurgical industry was studied in detail and a proper solution method was provided in the paper. The solution has been used in the integrative automation project of jiaojia Concentration Plant in Jiaojia Gold mine, Shandong Gold Group Co.ltd.

The grinding is an important process in mineral beneficiation, in which the main control objective can be stated as maximizing the throughput subject to maintaining the product size within an allowable range. Grinding system is a complex multi-variable, nonlinear and large time lag system. According to the control objective and the characters of the grinding system, a former fed control and cascade control and dead control was given out on the basis of analyzing system model. In the subsystems, the Coordination control in Hydrocyclone relating quality and mineral feeding control and relating throughput were discussed on emphasis. The fuzzy strategy was used in the subsystems. The complex control strategy worked well as the system shown in real running condition.

This paper had researched the use of simple algorithm for optimizing controller parameters.

The information integration basing on the database, the application of industrial Ethernet and Web technology in the distributed control system was studied also.

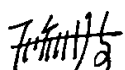
On the basis of fully study the grinding optimization control and information integration, the three levels solution in the grinding DCS was giving out , which was made up of Controlling Level, Supervisory Control Level and Management Level.

The realities show that the grinding process optimization control system runs well economically and robustiously, which not only can be adapted to the industry of metallurgical but also have great significance to the automation and information renovation of the other old industries.

**Keywords:** Grinding; Fuzzy control; Parameters optimization; Information integration; Distribution control system

## 独创性声明

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

学位论文作者签名： 

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。

（如作者和导师不同意网上交流，请在下方签名；否则视为同意。）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

# 第一章 绪论

## 1.1 选矿工艺简介

选矿是指从原矿石中除去所含的脉石及有害元素,使有用的矿物得到富集,或使共生的各种有用矿物彼此分离,得到一种或几种有用矿物的精品。从地下开采出来的原矿一般都由有用矿物和脉石组成。原矿的品位(有用矿物含量的百分比)一般都比较低,金矿石品位为几克/吨,如此低品位的矿石不能直接进行冶炼,因此需要先进行加工,除去大部分脉石和有害成分,得到品位较高的精矿,供下一步使用,对原矿的这一加工过程就叫选矿。

选矿选出的富集了有用矿物的产品称之为精矿,抛弃的无用产品称之为尾矿。多数矿石都需要进行选矿才能合理、经济地作为工业原料被加以利用,因此选矿是实现资源有效利用的一个非常重要的生产过程。

选矿方法也随着处理对象的变化而变化,常用的选矿方法有物理选矿法、化学选矿法、生物选矿法及组合选矿法,黄金常用的为重选法、浮选法等。重选法是根据矿物相对密度的差异来分选矿物的。浮选法是根据矿物表面的物理化学性质的差别,经浮选药剂处理,使有用矿物选择性地附在气泡上,达到分选的目的。

由于黄金在自然界含量普遍较低,所有的矿石都必须经过磨矿分级和选别才能获得利用,而浮选又是黄金回收最重要的手段之一,要使浮选获得理想的指标,磨矿分级过程必须稳定,产品粒度均匀、解离度高、又不过碎。

## 1.2 选矿自动化发展及现状

### 1.2.1 国外选矿自动化发展及现状

随着世界经济的飞速发展,使世界工业对金属的需求量逐年增加,金属采矿业也迎来了又一次发展得高峰,矿物资源却随着采矿业的蓬勃发展而而日益贫乏,使得具有较高价值的高品位矿石正在迅速减少,人们只能从遗留下来的贫、细、杂矿石中回收矿物资源。这使得选矿工艺越来越复杂,能耗和生产成本不断上升,对环境的污染也日趋严重,为迎接矿物加工业所面临的这一严峻考验,国内外都加强了选矿新工艺、新技术、新设备的研究和应用工作,并取得了很大进展。自动化技术在选矿过程中的研究和应用尤其令人瞩目,在选矿厂中采用先进的自动化技术,改造选矿产业,是降低选矿成本,改善选矿厂的技术指标,提高选矿厂的经济效益和增强企业竞争力的强有力手段。

选矿过程控制的发展始于 50 年代末,至今已有 40 多年的历史。由于选矿过程的复杂性和特殊性,限制了选矿过程控制技术的应用及发展,不仅与石油化工等行业比较相对落后,就是与冶金行业中的冶炼、加工等工序相比也落后得多。近年来,由于计算机、控制技术的发展,监控设备及元器件性能的提高与完善,加之选矿过程控制技术在提高选厂劳动生产率、提高产品质量和有色金属回收率、降低成本等方面的显著效果,推动了选矿过程控制技术的发展。一些矿业大国,如美国、南非、澳大利亚、加拿大、芬兰、智利等国的大中型选矿厂采用选矿自动化技术起步较早,有的已实现了全厂范围的自动控制。

选矿过程控制技术发展至今,其应用范围已覆盖了从碎矿到脱水的各个选矿作业环节,测控参数包括各阶段矿物的品位、粒度、浓度,以及从破碎机到浓密机各类设备的状态参数。在控制方案上也从以往的单参数、单机、单作业段控制向全流程,全车间,全厂范围的多级控制和管控一体化方向发展,特别是由于近年来计算机、网络、通讯技术的迅猛发展,为过程控制集成技术提供了良好的发展条件。控制技术在选矿过程控制中的应用也经历了参数检测与显示、二位控制、定值控制、最优控制及自适应控制等过程,逐步向更高级控制技术发展。近年来,计算机集成制造系统(CIMS)在选矿自动化领域方兴未艾,DCS 等计算机控制技术已在国外的大型选矿厂普遍采用;基于专家系统、模糊控制理论的先进控制策略也开始进入实用阶段。一些国外厂家先后推出了相关产品和系统,如霍尼维尔公司 TPS 系统、罗克韦尔 ProcessLogix5000 系统均属通用型 CIMS 产品。而芬兰奥托昆普、南非明太克以及瑞典的波立登和斯维达拉等一些著名的矿业公司,也特别推出了专门适用于选矿过程控制的计算机软硬件技术,如 Proscon 系统、OCR 系统,等等。

选矿过程的磨矿自动化是最难解决的课题,这是因为磨矿分级回路是一个多变量、非线性、时变的大滞后系统,受到干扰也较严重,因此问题比较复杂。而且影响磨矿很多因素在实际生产中无法实时准确的测量,这些过程描述的不确定性给优化控制带来了很大的难题。利用经典单输入单输出 PID 控制不能圆满解决根本问题。以现代控制论为依据,利用恩奎斯特逆矩阵法(能解决多控制环节相互耦合问题),研制多变量控制器,基于流程微观和宏观变量建立动态模型并对这种回路进行优化控制,最近几年 Alcoa 公司在自磨机上开发出多变量预知控制器(MPC),实现了磨机回路这种相互作用过程控制 and 最优化 MPC 利用 2 个输入和 2 个输出变量(给矿量、给水量、负荷、浓度)策略,磨机功率作为约束处理,为此研制出神经网络预知器,当磨机功率超过约束之时,它向 MPC 提供预先报警, MPC 将减少给矿量和给水量,使功率自动降下来。试验结果表明 MPC 与

PID 相比不但产品质量好且生产率提高 1%~2%。此后,霍尼韦尔(Honeywel)公司将神经网络和规律库技术与多变量预知控制技术相结合研制成功了先进的多变量预知控制器,在美国亚利桑那州的一个铜矿应用,其生产率提高 2%~5%。而磨矿产品粒度均匀且合格,降低了能源消耗。

未来选厂自动化发展有 2 个方向:一是不断用新理论和新技术武装各专业(破碎、磨矿、选矿)自动控制环节使其自动化水平更高,主要是把经典控制论、现代控制论以及各种新的控制技术(神经网络、模糊逻辑、层次控制、专家系统)结合起来,构成综合控制体系;二是利用 DCS 作为骨架将选厂生产经营全部活动以及其各专业的综合控制体系集成在一起,形成选厂全面管理信息系统。

### 1.2.2 国内选矿自动化发展现状

我国国内选矿厂生产过程自动控制起步较晚,直到 70 年代中、后期,才进行研究和开发工作。最早在 1976 年北京矿冶研究总院、中南工业大学与铜陵凤凰山铜矿合作,使用国产 JS-10 小型工业控制机在磨矿分级作业进行了 DDC 试验,提高磨矿效率 5%。但受当时技术所限,JS-10 质量较差,几乎不能长时间连续运行。1979 年凤凰山铜矿从芬兰奥托昆普公司引进了普罗斯康(proscon) 20/200 计算机系统用于选矿控制,系统还包括了 PSM-200 超声粒度仪、库卑厄(courier)-300X 荧光在线品位仪等先进的检测仪表,代表了当时选矿自动化的世界先进水平。

从 80 年代起,北京矿冶研究总院、马鞍山矿山研究院、昆明冶金研究院、长沙矿冶院、东北大学、北京有色设计研究总院先后进行了磨矿分级控制的研究和应用,并取得了一定的成功。但国内磨矿分级过程主要是依靠简单的检测仪表和控制装置,如核子秤、浓度计、流量计等对选矿过程进行检测,过程控制水平也以定值控制和稳定控制为主,同时也采用象电耳和输入功率等仪表对磨机内的参数进行定性的判断指导过程控制。近年来,又有一批新选矿厂投入使用,包括梅山铁矿、酒钢选矿厂、会泽铅锌矿等,均使用了先进的 PSI-200 粒度仪、courier-6 在线 X 荧光品位仪等先进的分析仪表,仪表检测水平较国内其他矿山选矿厂有了较大提高,但是真正能达到设计目标的也只是凤毛麟角。其主要原因除磨矿分级过程机理复杂,影响因素多,建模难度大以外,多数矿山人才缺乏、资金短缺再加上重视不足,致使高水平的优化或智能控制在选矿控制上无法实现。

### 1.3 课题背景

磨矿分级作业是整个选矿厂生产工艺流程中最关键的环节,它起着承上启下的作用。磨矿作业在选矿厂的基建投资和生产费用(主要是电耗、钢耗)中占有很大的比例,基建投资占 60%~80%。生产费用占选矿成本的 50%~70%,特别是电耗、钢耗占整个选矿厂的 70%~80%以上;因此改进磨矿分级设备、技术具有很大的经济和社会效益。同时,磨矿作业是整个选矿厂的瓶颈作业,直接关系到选矿生产的处理能力,磨矿产品的质量(粒度特性、单体解离度、磨矿产品的浓度等)对后续作业(特别是浮选作业)的指标乃至整个选矿厂的经济技术指标也有很大的影响。因此,提高球磨机的处理量和磨矿效率,可提高选矿厂的精矿产量、经济效益、降低能耗和钢耗。根据国外有关资料介绍,磨矿分级回路实现自动控制以后,可提高磨机处理能力 2~5%、节约能耗 2~5%,提高回收率 0.5~1%,提高精矿品位 0.4~1%,节约药剂用量 5~10%。

但由于磨矿分级过程的机理复杂、影响因素多,又是一个多变量输入、输出过程,生产过程缓慢,滞后时间长,同时具有非线性、时变性以及干扰因素多而严重等特点,所以给生产操作带来一定的困难。多年来,国内外选矿工作者和自动化科技工作者,一直在关注和潜心研究磨矿分级生产过程的自动控制问题。

总之,磨矿分级过程是选矿厂最重要的作业。为满足金矿日益贫化矿产资源开发的及选矿厂发展的需要,磨矿分级作业的操作和管理需要不断进行改进和提高,人工控制或定值控制已经很难满足需求,只有采用实施优化控制和智能控制,才能满足选矿厂不断发展的需求。

### 1.4 论文思路及内容

本课题着重对磨矿分级过程控制技术做出研究,建立可靠、开放、有效的控制和管理一体化磨矿 DCS 系统,并与已有系统集成。在分析磨矿机理,建立控制对象模型基础上,揭示了磨矿系统过程控制策略,重点对磨矿负荷优化提出了模糊智能控制方法;在系统实现上,重点阐述了控制网与管理网的信息集成方法及应用,最后给出了磨矿集散控制系统的实现。论文内容及思路如下:

第一章:介绍了国内外选矿厂自动化的发展及现状;介绍了本论文的课题背景,概括了论文所要做的工作。

第二章:介绍磨矿过程工艺流程,介绍选矿控制仪表的发展和现状。

第三章:提出系统控制目标,结合磨矿分级控制对象的理论研究和实践,揭示磨矿



分级系统内部参数之间的关系。

第四章：对磨矿过程控制做出研究，提出系统控制的整体控制方案。介绍了各子系统的控制方法。提出系统优化指标，给出参数优化方法。

第五章：主要讨论的磨矿分布式 DCS 系统的整体实现。从过程控制级、过程监控级和生产管理级三个层次，利用硬件集成技术、软件集成技术和信息集成技术加以实现。

第六章：对整个论文做出总结，同时提出仍需研究的工作。

## 第二章 焦家金矿磨矿过程控制概述

### 2.1 焦家金矿概况

焦家金矿位于山东省莱州市东北 35 公里处,是山东黄金矿业股份有限公司的核心企业,创建于 1975 年,1980 年建成投产。焦家金矿经过三期总体工程技术改造,由原来日处理矿量 500 吨的生产规模,发展成为日处理矿量 1600 吨的大型矿山。现矿山井下保有储量 593 万吨,黄金金属量 26 吨,可服务 15 年,原矿品位 3.4 克/吨,年产黄金 1.7 吨。焦家金矿选矿厂主要由碎矿、磨矿、浮选、氰化、尾矿 5 个主要工艺流程,实现了磨矿分级自动控制,并取得了很好的经济效益。

### 2.2 磨矿过程工艺流程简介

焦家金矿选矿厂的磨矿分级作业由一段闭路磨矿组成,主要的工艺设备有皮带给料机、格子型球磨机、渣浆泵、旋流器等。

粉矿经皮带给矿机和输送带给入球磨机进行磨矿,球磨机的溢流矿浆进入泵池,经给矿渣浆泵打到旋流器进行分级,旋流器的沉砂返回到磨机。这样,球磨机与旋流器就构成闭路磨矿回路。

旋流器溢流分级出的细矿浆一路去除屑筛,进入浮选系统,进行浮选作业工序;一路返回旋流器给矿泵池,调节泵池液面高度。

系统控制难点:焦家金矿球磨机为格子型,采用强制排矿,球磨机排矿中粗颗粒较多,且含有一部分碎钢球,尽管增加了格筛,但是仍有部分会进入泵池,这对泵及管路造成很大的影响。由于受安装位置的限制,旋流器沉砂量、浓度无法测量,只能通过流程试验进行测算。

主要工艺指标:

给矿水流量:  $28-37\text{m}^3/\text{h}$

排矿水流量:  $43-84\text{m}^3/\text{h}$

磨矿浓度: 75%

旋流器给矿浓度:  $55\%\pm 2$

旋流器给矿压力:  $0.08-0.1\text{Mpa}$

旋流器溢流浓度:  $33\%\pm 2$

旋流器返砂比: 300~350%

工艺图见图(2.1)所示。

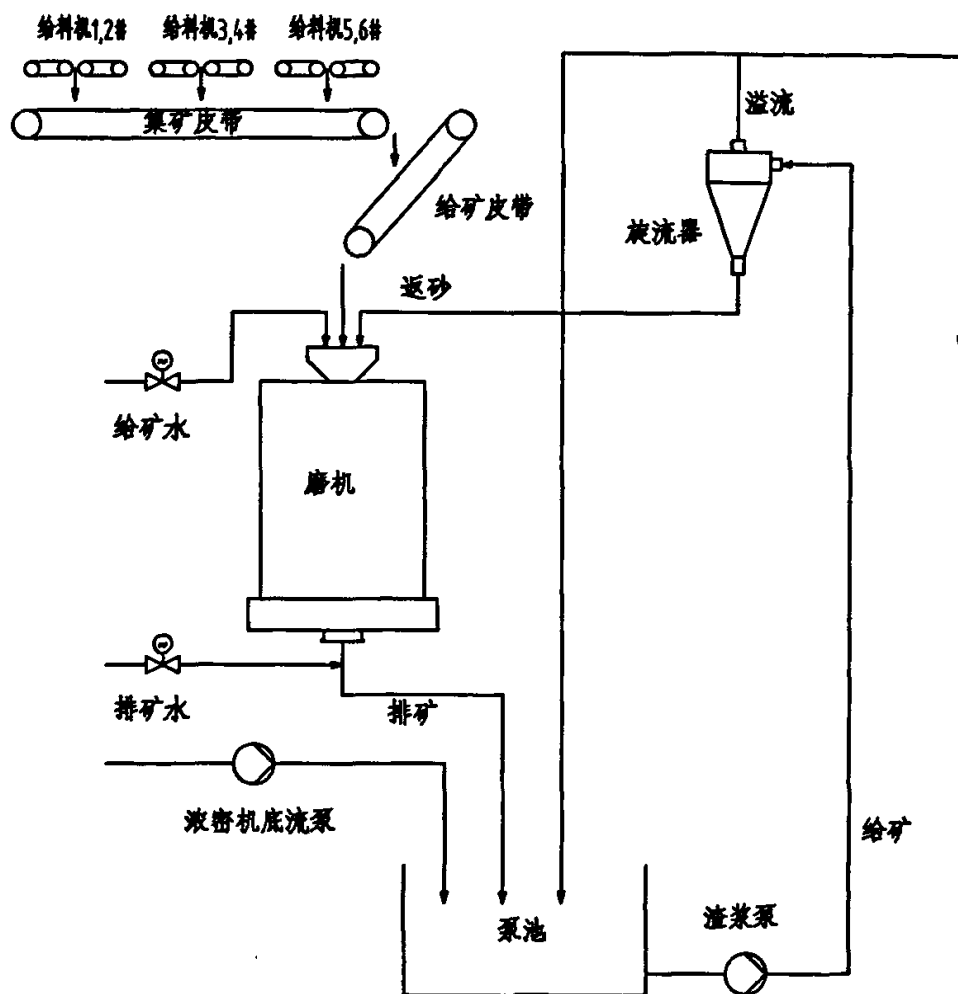


图 2.1 焦家金矿磨矿分级工艺图

Fig. 2.1 Process technics of grinding classification in jiaojia gold mine

## 2.3 选矿过程自动检测仪表

过程参数检测是磨矿分级过程控制的基础，而磨矿自动化的发展又对参数检测提出了更高的要求，为了使自动控制获得更好的效果，人们希望通过先进的检测技术更深入地了解选矿这一复杂过程的状态信息。

在线分析仪器能够快速、连续地监视选矿物料流的组分、品位和粒度等信息，反映产品质量的变化，在稳定生产性能指标和提高经济效益上有显著的作用，因此一直是国际上开发和研究的重点。

目前已经开发了粒度仪、矿浆浓度计、矿浆流量计、磨机负荷仪、电耳、皮带秤等

各种磨矿回路检测仪表。

### 2.3.1 粒度检测仪表

磨矿分级产品的粒度是考察整个磨矿分级效率最为关键的指标,因此粒度的检测也是尤为重要,在线粒度检测仪器目前使用比较广泛的有两种:一种是斯维达拉工业公司(Svedala Industries)全资控制的一家子公司美国的丹佛自动化公司(Denver Autometrics)生产的PSM-200或PSM-400,PSM系列的产品是利用超声波在矿浆内传输的衰减速度与粒度存在一定函数关系的范内斯特(Van Neste)原理进行测量,属间接测量方式。为了提高测量精度,采用超声波测量就必须消除矿浆中的气泡,同时解决矿浆浓度对测量的影响,因此PSM系列的仪器配置了机构消泡装置和双测量头。我国凡口铅锌矿引进了两套PSM-400,用于检测旋流器溢流粒度和浓度,检测范围为40~60%,粒度范围为-360目80~100%,相对误差<2%。

另外一种芬兰奥托昆普明太克公司(Outokumpu Mintex Oy)生产的PSI-200。PSI-200粒度仪采用机械及电磁感应原理进行测量,通过使柱塞上下垂直运动撞击矿浆流,带动差动变压器产生变化的电信号来测量撞击矿粒的粒度,属于直接测量方法。会泽铅锌矿2004年引进了1台PSI-200粒度仪,用于测量球磨机所对应的旋流器溢流粒度。经过一年多的运行,根据大量的数据统计,测量误差为2%左右,完全满足了生产的要求,磨矿效率有了明显的提高和改善。

PSI200粒度分析仪与PSM400超声波粒度分析仪比较具有以下优点,不受矿浆中气泡的影响,没有除气机械装置;不受矿浆浓度影响,不需要浓度检测和校正;不受矿浆磁效应影响,不需要去磁装置;直接测量,精度高;自动完成零校验,自动报警监护;显示功能强(共100个屏幕任选);容易标定;分析范围宽(0.03~0.589mm)应用范围广。但PSI-200粒度仪也存在一定缺点:采用线性回归方程工作,要求的标定数据多,范围广,高端和低端的数据采集不方便。采集的数据有限时,线性方程的确定有很大的偶然性<sup>[17]</sup>。

俄罗斯有色金属自动化公司也推出了一种在线粒度分析仪,型号为Π И К -074Π,采用了类似奥托昆普公司产品的机械-电磁感应原理,用于自动检测分析在球磨和分级工艺过程中通过输送管道或槽输送的矿浆成分的粒级组成。其跟奥托昆普公司PSI200最大不同为PSI-200可以分时测量3路矿浆,而俄罗斯产品只能测量一路。尽管降低了可利用性,但是可靠性得到了提高,由于没有换流装置,整个装置体积大大缩小,造价也大幅下降。

该产品测量粒度范围为 0.028~1mm，最多可以测量 2 个粒级组成，通常设为-200 目和-100 目，直接输出 4~20mA 的电流信号，用于自动化系统。

该产品经过山东黄金焦家金矿应用，取得了良好的效果，经过比对实验，误差小于 2%，性能优于奥托昆普公司的 PSI-200。

国内马鞍山矿研院及北京矿冶研究总院均研制出了国产化的在线粒度分析仪，其中马鞍山的检测范围-200 目占 60~90%，相对误差 2.5%，其原理均属于超声波原理。

### 2.3.2 矿浆浓度仪表

浓度是矿浆的主要物理性质之一，矿浆浓度影响磨矿效率、分级效率和选矿效率。浓度的测量方法有多种，常用的主要有放射性同位素、超声波、称重式，但应用最广的还数  $\gamma$  射线浓度计，质量较好的国外产品有澳大利亚 Gamma-Metrics 公司的 AM870 型，英国伯托 (Berthold) 公司的 LB444 型产品。国内的部分厂商产品质量也完全过关，主要有引进 Amdel 公司 (澳大利亚 Gamma-Metrics 前身) 的昆明冶金研究院，其产品至今还应用在焦家金矿选矿厂，质量较好。

### 2.3.3 矿量检测仪表

球磨机给矿量检测主要依靠皮带秤。皮带秤分为机械式、电子式及核辐射式。机械皮带秤由于维护麻烦，精度不高，已经基本淘汰。现在选矿厂一般选用电子皮带秤或核子皮带秤，这两种皮带秤各有千秋，电子皮带秤精度较高，但是维护量较大，而核子皮带秤精度不如电子皮带秤，但是后期基本不需维护，仅需要定期对其进行检验。质量较好的电子皮带秤主要有美国拉姆齐、斯托克、德国西门子精度可达到 0.25~0.5%，国产精度稍低。

### 2.3.4 流量检测仪表

矿浆流量的检测有两种方式，一种是采用电磁感应原理的电磁流量计，属于直接测量仪表，比较适用于粒度较小的矿浆流，但是也应该选用耐磨的陶瓷内衬，主要应用于分级后溢流矿浆流量的测量，其误差精度为 0.5%，国内较多厂家可以生产，质量较好的为科隆公司的 IFM4000 系列。另外一种为采用超声波原理的超声波流量计，属于间接测量仪表，适用于测量粒度稍大的矿浆流，精度为 1%，国内较多厂家可以生产。

电磁流量计测量精度较高但是电极和内衬须与矿浆进行接触，磨损较严重，须定期更换，运行费用较高；超声波流量计安装于管路外，测量单元不与矿浆接触，比较适于

测量粗颗粒的矿浆，但是容易受气泡影响，且精度低于电磁流量计。

### 2.3.5 磨机负荷检测仪表

球磨机负荷是指磨机中球负荷、物料负荷以及水量的总和，它是磨矿过程一个重要参数，直接影响到磨矿的效果。在实际生产过程中，由于矿石性质的波动以及一系列外界因素的干扰和操作水平的差异等，使球磨机的负荷难以维持在最佳水平，不能充分发挥球磨机的功效。因此，在磨矿过程自动控制中，球磨机负荷的检测和控制是球磨机自动控制最重要的内容。能否准确地检测出球磨机的负荷(包括球负荷、物料负荷以及水量的各自数值)是整个球磨机优化控制成败的关键。

磨机负荷的检测方法主要有功率法、电耳法、振动法、称重法、压力法等，并根据几种方法因素的组合形成单因素法、双因素法、三因素法<sup>[2-5]</sup>。

功率法通过功率变送器检测球磨机有功功率，来判断球磨机负荷，在山东焦家金矿选矿厂、铜陵凤凰山铜矿选矿厂、德兴铜矿等矿山得到了成功应用。有用功率法检测信号受周围环境的影响比较小，检测结果比较准确。但检测信号灵敏度不高，影响控制效果，而且影响有功功率的因素较多，因此单靠球磨机的有用功率信号既不能确切判断球磨机中介质充填率的水平，也不能确切判断球料比的水平。另外，由于 P-W 曲线有一极大值，功率降低时难以根据检测信号来判断球磨机负荷是增大还是减小。

通过电耳也可以定性判断球磨机负荷状况，该方法在金厂峪金矿、焦家金矿等选矿厂得到应用。声响法检测球磨机负荷既可以用于湿式磨矿又可以用于干式磨矿，可以提高磨矿处理能力及其产品的细度，并能节省钢耗和能耗；相对其它方法来说，测量信号比较灵敏。这种方法遇到的主要问题是其它磨机所产生的干扰，传感器的位置必须选择正确，以避免这种干扰现象。另外，声响法只能确定料球比，而不能确定介质充填率，也不能确定磨矿浓度。

振动法通过在球磨机轴瓦端盖处安装振动传感器来检测磨机装载量。振动法检测信号的灵敏度比较高，能随时显示球磨机内物料的变化。这对检测球磨机物料负荷非常有利，而且不受周围噪声源的影响，传感器密封好，能有效防水、防尘，因而可以适应选矿厂的恶劣工作环境。但是当电网电压特别是电网频率发生变化时，磨机转速的微小波动，或者磨机内研磨体的损耗等的影响会使物料负荷控制点产生漂移，影响检测和控制质量；不能检测出磨矿浓度的大小以及介质充填率。

利用一种负荷传感器安装在球磨机的给矿端和排矿端的轴承下连续对磨机称重，从而确定球磨机内球介质、矿石和水的总量，确定磨机的负荷。这种方法的优点是简单，

其缺点是检测精度不高,不能准确检测出球磨机中球介质、矿石和水各自的量。另外,球磨机衬板的磨损、矿石性质的变化、钢球添加前后质量的变化等都会对检测结果产生比较大的影响。国内河东金矿使用的是荷重传感器。

另外国外通过在球磨机筒体上安装应变压力传感器来测量球磨机负荷状况。南非某研究所通过在磨机内安装压力传感器的方法来测定磨机内负荷的情况,为确定磨机的负荷提供了一种新方法。该方法是在磨机内衬上安装了一个能测定径向压力和切向压力的传感器,由压力传感器测量得到的信息通过传导引入微机,微机可以将信号进行处理,得到频谱图。通过分析可以知道球负荷和物料负荷的比例。通过这个压力传感器的传递,掌握了大量磨机内运行的状态。但该检测系统的数据传递是一大难题。

### 2.3.6 在线品位检测仪表

在浮选流程各点对矿浆进行连续分析,可获得计算选矿经济效果所必需的原矿、精矿和尾矿品位以及回收率等数据。可以连续评价经济效果,并编制获得最大利润的控制方法。

国外在 70~80 年代初,较多地使用在线品位分析仪,主要是采用高功率 X 射线管,该仪器精度较高,分析元素较多,但取样过程复杂,体积庞大、价格昂贵。80 年代后期,芬兰的奥托昆普公司推出了低功率的的库里厄-30XI、库里厄-20 在线 X 荧光分析仪。澳大利亚 Gamma-Metrics 公司也推出了 ISA 荧光在流分析仪,取消了取样装置,使用方便。瑞典玻立登公司推出了 Boxray 载流 X 荧光分析仪(Boxray on-stream XRF Analyser)可以对矿流中 16 个不同元素进行分析,其优点是灵敏度高而且能迅速校正。但上述品位分析仪相对误差较大,一般应用在贱金属选矿业,比如,铜、铅、铁、锌等行业,而在金、铂等原矿、尾矿品位很低的贵金属行业则不适用。

英国 KX 工艺公司生产的金流黄金分析仪(Gold-stream gold analyser)是首台能够在线精确测定黄金提取过程效率的设备。KX 有限公司和英美研究试验室(Anglo American Research Laboratories)为选厂设计的金流系统把现有的分析金溶液的技术与 KX-荧光分析技术新创造结合起来,可以在线测定黄金提取过程各选择点的已溶解了的和未溶解的金,确保用户厂家在短时间内(小时)测出金提取效率的波动。金流系统样机目前安装在南非“深水平”金矿(Deep Level mine)。

### 2.3.7 检测技术新进展

选矿在线分析技术近年来最引人注目的就是图像处理技术的应用,浮选槽表面泡沫

的视频图像数据进行色谱分析,确定矿物组成,该技术可以用来进行浮选过程控制;另外利用图像技术监视旋流器底流喷射角也被用来改善旋流器的控制,因为底流喷射角是反映旋流器分级效果好坏的重要参数,可以用来估计给矿浓度和分级粒度;图像处理还被用来监测原矿破碎粒度,通过数字成像处理,可对球磨机给矿粒度进行测量,更好的对磨机控制进行优化。

频谱分析也被用来处理球磨机声音和机械振动信号,通过频谱分析能够揭示不同频谱模式和磨机工作参数(功率、给矿速度、矿浆粒度、密度)变化的对应关系,并据此辨识磨机的各种工作参数,从而对磨机进行优化控制。

作为对检测设备的有效补充,软测量技术也得到了重视,通过采用动态和静态模型对矿浆粒度进行软测量的研究也得到了一定结果。

在选矿的其他环节,特种选矿检测仪表也逐步发展,加拿大麦克兰(Markland)公司研制出了矿泥厚度计可以监控浓密机中沉降矿泥层的位置,用以控制絮凝剂的投加,澳大利亚 Gamma-Metrics 公司研制了核子浓密机界面仪,也取得了很好的效果;南非的明太克斯(Mintex)还生产旋流器专用的沉砂计及氰化控制仪表。

总之,检测技术的提高极大促进了选矿自动化技术的普及和提高,对于改进选矿工艺,提高选矿效率发挥了重要作用。



## 第三章 磨矿过程控制策略及实现

### 3.1 系统控制目标

磨机的基本任务是为选别作业准备好解离充分但粉碎轻的入选矿物。解离不充分，达不到分选目的；矿物过粉碎，难以有效回收较小微粒。磨矿产品的两个技术指标就是矿物的粒度和浓度。

磨矿作业费用在选矿厂中占很大比例，据统计，可达整个选矿厂全部费用的 40% 以上，而在这里面，磨机能耗又占磨矿费用的 60% 以上。所以，有效控制磨机功耗成为磨机作业又一基本目标。

综上所述，磨矿过程自动控制的目标为：

- 1) 矿浆二次分级溢流粒度均匀，同时浓度满足工艺要求，以利于后面的浮选作业。
- 2) 在粒度和浓度满足工艺要求的前提下，使磨机每小时的产量最高，能耗最低。

根据图 (3.1) 磨矿细度与尾渣品位的关系及图 (3.2) 回收率与磨矿细度的关系，可以很好的说明控制粒度对后续作业的益处。以黄金磨矿为例，在磨矿粒度较粗时，尾渣中金的品位迅速增加，因为金的颗粒尚未完全暴露出来。此外磨矿细度的上下波动也对尾渣有影响，很显然通过自动控制来达到恒定的细磨是十分必要的。

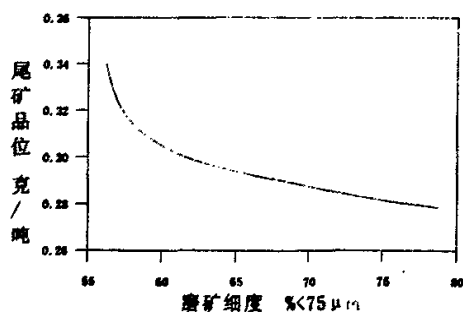


图 3.1 磨矿细度与尾渣品位的关系  
Fig.3.1 The relation of product size and tailing grade

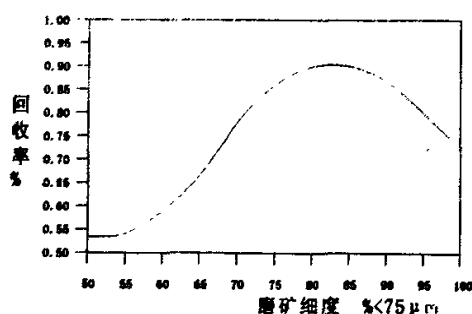


图 3.2 回收率与磨矿细度的关系  
Fig.3.2 The relation of recovery-rate of mineral-processing and product size

控制粒度对后续作业的益处更加明显。从图 3.2 可以看出，不仅在磨矿粒度较粗的情况下，回收率低，在磨矿粒度过细的情况下同样如此。而且，要尽量控制产品粒度问鼎在最佳点上，因为磨矿细度相对于最佳点的任何偏差都会导致回收率降低，即在最佳粒度周围产品粒度波动的标准偏差由 5% 降低到 3%，意味着增加 1% 回收率。

## 3.2 系统控制对象及建模

选矿数学模型的研究对于促进选矿工艺的发展,选矿流程的设计,探寻生产优化条件,以及应用自动控制都具有非常重要的作用,因此长期受到关注。

选矿数学模型的研究始于五、六十年代。其中破碎、磨矿、筛分和分级过程最受研究者重视,研究成果也比较多,相对较成熟。但由于选矿过程综合了物理、化学变化的复杂过程,影响因素众多,难以精确表达,许多模型依赖于各种经验常数,需要反复实验校正。即使模型比较准确,但也过于复杂,缺乏通用性。因此真正在实际中应用得很少。

近年来研究人员开始利用神经网络、遗传算法等智能方法辅助建模,取得了较好的结果。选矿数学模型的直接应用事选矿过程的仿真。通过仿真,可以了解选矿过程的状态变化,所得结果可用于指导工艺设计和过程控制。

### 3.2.1 球磨机数学模型

#### 3.2.1.1 球磨机模型

球磨机是选矿厂广泛使用的粒度减小设备,常见的有格子型球磨机和溢流型球磨机。它们规格均以筒体内径  $D$  和筒体长度  $L$  表示。

球磨机可以看作是在其中发生破碎作用的混合器。当连续磨矿体系处于平衡操作状态时,其給料速率和排料速率是不变的,同时磨机中粒度分布也是不变的。如果把磨机看作是理想混合器,则产品的粒度分布就是整个磨机物料的粒度分布。

一台磨机可以看作由若干横断所组成,每一横断都含有相同数量的物料。物料的整体运行方向是向着磨机的排料端的,一旦物料出现在磨机的产品段中,它就离开体系。一组颗粒在磨机中停留时间越长,发生的破碎作用也越强烈。如果停留的时间分布是已知的,则在磨机内已停留了各种已知时间而排除磨机的矿浆粒度的分数是可以计算的。总的产品粒度分布是各破碎后矿浆分数粒度分布的加权平均结果。

为了简化各种计算及分析问题的方便,我们假设磨机是一个单段的理想混合器,球磨的理想混合模型,可表示如下<sup>[25-29]</sup>:

$$\frac{dS_i}{dt} = F_i - P_i + \sum_j A_{ij} * R_j * S_j - R_i * S_i \quad (3.1)$$

$$P_i = D_i * S_i \quad (3.2)$$

$$D_i = D_i^* * 4 * V / (d^2 * l) \quad (3.3)$$

$F_i$ ——给矿中粒级  $i$  的质量流 (吨/小时),  $i=1,2,3\cdots n$ ,  $F_1$  为最粗的级别,  $F_n$  为最细的级别;

$P_i$ ——磨矿产品中第  $i$  个粒级的质量流 (吨/小时);

$S_i$ ——球磨机中第  $i$  个粒级的质量 (吨);

$D_i$ ——第  $i$  个级别的排矿比系数;

$D_i^*$ ——第  $i$  个级别的单位体积排矿比系数;

$R_i$ ——第  $i$  个级别的破碎比系数, 用于计算第  $i$  个粒级中被破碎的质量比;

$A_{ij}$ ——粒级  $j$  中的颗粒被破碎成粒级  $i$  的颗粒所占的比例;

$V$ ——给矿体积 (包括固体和水) ( $M^3$ );

$d$ ——球磨机直径 (米);

$L$ ——磨矿长度 (米);

$t$ ——时间;

$\Delta t$ ——时间增量。

微分方程 (3.1) 有如下数值解:

$$\int_i^{t+\Delta t} dS_i = (F_i^{t+\Delta t} - P_i^t + \sum_{j=1}^i A_{ij} * R_j^t * S_j^t - R_i^t * S_i^t) * \int_i^{t+\Delta t} dt \quad (3.4)$$

因此:

$$S_i^{t+\Delta t} - S_i^t = (F_i^{t+\Delta t} - P_i^t + \sum_{j=1}^i A_{ij} * R_j^t * S_j^t - R_i^t * S_i^t) * \Delta t \quad (3.5)$$

将式 (3.2) 式代入式 (3.5) 式则有

$$P_i^{t+\Delta t} = (D_i^{t+\Delta t} / D_i^t) * P_i^t + \Delta t * D_i^{t+\Delta t} [F_i^{t+\Delta t} - P_i^t + \sum_{j=1}^i A_{ij} * (R_j^t / D_j^t) * P_j^t - (R_i^t / D_i^t) * P_i^t] \quad (3.6)$$

讨论:

1) 式 (3.6) 表示出  $F_i^{t+\Delta t}$ 、 $P_i^{t+\Delta t}$  与  $P_i^t$  之间的函数关系, 采用迭代法可以用于动态磨矿过程模拟。

2) 由于球磨机是一个容性负载, 当给定磨机给矿一个阶跃变化时, 变量  $V$  (给矿体积)、 $D_i$  (排矿比系数) 会有一个较大的滞后过程。

3) 参数  $R_i / D_i^*$  可用流程考察数据算出。纯滞后时间和混合器模型系数  $a$  可以通过现场动态数据采样后求解。

4) 在这一模拟器中,球磨机沿轴向被划分为三等分。每一部分被视为理想混合器模型,但对于整个球磨机而言,而不是一个理想混合模型,因此这一动态模型的模拟结果会与静态模型的结果稍有不同。

但是,上述磨矿模型还只能用于动态仿真,由于实际生产中矿石性质、磨机内部参数都是时变的,确定系数的函数模型难以适应生产的变化,理想的磨矿模型应包括磨机功率、磨机充填率、磨机产品粒度分布、动力学参数、介质合理配比等方面的数学模型。

### 3.2.1.2 球磨机工作特性

在研究球磨机工作特性前先解释几个关键术语:

介质充填率:球磨机静止时磨矿介质(钢球)体积(包括介质中间空隙)占磨机桶体有效体积的百分比。

磨矿浓度:磨机内物料重量(物料+水)的百分比,即为重量浓度。

料球比:物料体积占静止时介质中空隙体积的比例。

处于动态平衡条件下的磨矿系统工作状态为稳定状态,此状态下的磨矿系统是一个典型的平稳随机过程,介质在沿磨机长度上的分布和磨内输入能量报纸均匀,物料分布梯度保持不变。因此,在输入(给水、给料量、给料粒度、可磨性)稳定的条件下,系统将有稳定的输出(产量、产品浓度、粒度分布)。

任何不稳定的外部输入都会造成系统状态的变化,如果系统输入波动量低于其处理能力时,系统状态的波动只会造成输出的波动(产量和粒度分布的变化),系统本身又自动达到新的平衡点。在外部输入大于系统处理能力时,介质不能及时地将物料磨细并排出,物料累积又进一步削弱了介质粉磨作用,使物料在磨内积累增加。这一自动增长的因果关系链使磨矿过程进入恶性“自繁殖状态”而失稳。“自繁殖”状态标志着系统原有稳定状态迅速瓦解,这就是球磨作业中是有的“涨肚”现象。从“自繁殖”过程共性来看,球磨系统存在一个临界条件,即磨机的最大处理能力(最大处理能力不是唯一值,而是由操作条件所决定的)。当系统输入超过这一临界条件时,才会有“自繁殖”现象的发生。而当系统其他条件(结构、转速、介质)稳定的条件下,磨机的最大处理能力是由矿石的性质决定的。即矿石硬度大,难磨,磨机的最大处理能力下降,当矿石硬度下降,易磨,磨机的最大处理能力会提高。因此根据矿石性质的变化,及时调整磨机给矿量,使磨机内物料适度,防止自繁殖现象的发生是优化磨矿效率的关键。

湿式球磨机的工作特性可以直接用消耗的有功功率来描述,如式(3.7)所示:

$$P = F(D, v, N, W) \quad (3.7)$$

其中:  $D$ ——磨机几何尺寸

$v$ ——磨机转速

$N$ ——矿石性质

$W$ ——矿石充填率

对于一定的磨机  $D$  和  $v$  是常数。对于某一种矿石，功率为充填率的函数，即：

$$P = F(W) \quad (3.8)$$

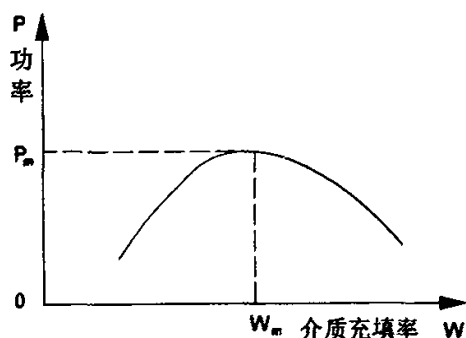


图 3.3 磨机工作特性

Fig.3.3 Characterization of grinding

$W$  与  $P$  的关系如图 3.3 所示。当  $W$  增加到  $W_m$  时，磨矿消耗的功率也增加到最大点；当  $W$  超过  $W_m$  时，功率开始减少，磨机的排矿量也下降，这时磨机的进矿大于排矿，持续一段时间就会导致“胀肚”，这无论是人工操作还是计算机控制都是必须避免的。手工操作时，为了避免“胀肚”，操作工不得不人为地降低给矿来使磨机经常处于欠载运行。计算机控制时，要保证处于极值点附近又不发生“胀肚”，控制效果取决于磨机工作特性及所采用的控制策略。图 3.3 中的磨机工作特性是特定条件下的理想曲线，它是具有一个单变量的极值特性曲线，

一般只适用于干式磨机；对于湿式球磨机而言，磨机工作特性曲线是一个多变量多极值的特性曲线，因此用式(3.7)来分析和控制湿式球磨机存在局限性。当充填率为常数时，磨矿浓度  $R$  的变化明显影响  $P$ ，式(3.8)不能成立，否则会导致错误的控制决策，必须进行修改：

$$P = F(W, R, N) \quad (3.9)$$

其中： $R$ ——磨矿浓度

显然，在式(3.9)中，影响功率的  $W$ ， $R$ ， $N$  三个变量在实际生产中都是随机变量，特别是矿石性质，实际上在设计控制系统时要达到好的控制效果，只考虑随机变量是不够的，还必须考虑另外一些变量的影响，例如磨机有效容积  $V$  是时间  $t$  的函数。

随着衬板消耗增大， $V$  增大；充填率  $W$  为常数时，磨机内的钢球、矿石和水的配比不同也影响  $P$  值。在大多数矿山中，钢球量的补加量是一个时变量，在两次加球之间，

球量有一个渐变过程，加球时往往发生突变。这种球量补加产生的突变性，在国内大多数选厂是普遍存在的。另外，钢球的粒级组成也是影响  $P$  值的一个重要因素。磨机工作特性是一个多变量多极值的动态曲线：

$$P = F(D, v, W, R, N, B, K, Q) \quad (3.10)$$

其中：  $B$ ——钢球质量  
 $K$ ——钢球配比  
 $Q$ ——磨机处理量

### 3.2.1.3 球磨机动态特性分析

(1) 当球磨机及钢球配比基本不变时， $P$ - $W$  曲线是随着矿石性质变化的一个曲线族，矿石的可磨性好则曲线向右移，反之左移，如图 (3.4) 所示。

(2) 当矿石性质不变时， $P$ - $W$  曲线是随着钢球量的增加从下往上移的一组曲线，如图 (3.5) 所示。

(3) 矿量不变时， $P$  是随着磨矿浓度而变化的一条曲线，对应于  $R_m$ ， $P$  有极值  $P_m$ ，如图 (3.6) 所示。

(4) 磨机充填率的变化是给矿量  $Q$ 、给矿水补加量  $S$  及返砂量  $F$  的变化之和。

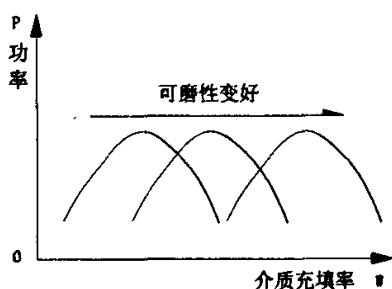


图 3.4 矿石可磨性与  $P$ - $W$  的关系  
 Fig.3.4 The relation of grindability and  $P$ - $W$

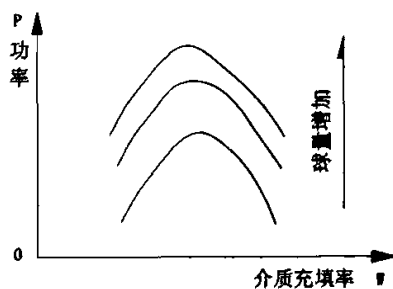


图 3.5 钢球量与  $P$ - $W$  的关系  
 Fig.3.5 The relation of Steel Ball quantity and  $P$ - $W$

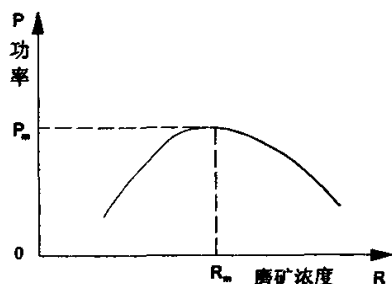


图 3.6 磨矿浓度与轴功率的关系  
 Fig.3.6 The relation of grinding consistence and shaft power

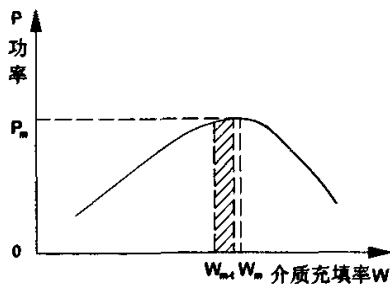


图 3.7 充填率与轴功率的关系  
 Fig.3.7 Relationship between Ball Change Ratio of Ball Mill and shaft power

(5) 最佳充填率  $W$  一般不等于  $W_m$ , 而是小于并接近  $W_m$  的值, 见图 (3.7)。

(6) 磨机衬板的消耗使得  $P-W$  曲线从左向右移动图 (3.8)。

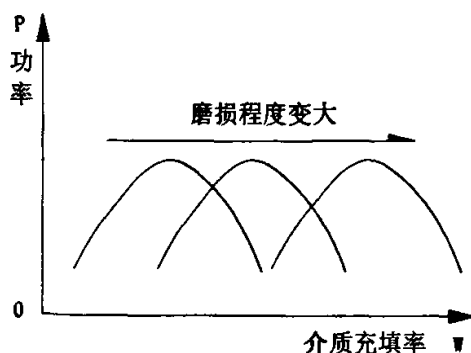


图 3.8 衬板磨损与  $P-W$  的关系

Fig.3.8 Relationship between abrasion of lining of the ball mill and  $P-W$

(7) 采用球磨机电耳检测磨机料球比时, 磨机声响越响, 料球比越小, 反之亦然。

(8) 磨机的循环负荷与旋流器特性及磨机磨矿粒级组成密切相关, 循环负荷的大小 (即旋流器返砂量的大小) 反映了矿石性质及钢球的变化情况。如钢球不变, 则循环负荷越大, 矿石可磨性越差。

(9) 溢流浓度、矿石性质、磨矿浓度不变时, 循环负荷及  $P_m$  值的变化可反映钢球量的变化。

### 3.2.2 旋流器数学模型

旋流器是一种应用广泛的离心分级设备。其结构简单, 本身无运动部件, 操作容易, 体积小处理量大, 分级效果好, 占地面积小, 矿浆在其内停留的数量和时间少, 维护方便。

旋流器的缺点是: 运输矿浆和矿砂泵消耗动力大, 而且泵的进口和出口等处磨损严重, 维护频繁。工作时要求给矿粒度、浓度和压力平衡, 否则会影响分级质量。

#### 3.2.2.1 旋流器工作原理

按照 Bradley 的定义。旋流器是一种利用流体压力产生旋转运动的装置。若流体以静压力  $P_0$ 、初速度  $V_0$  沿切向给入旋流器。按通常的研究方法, 在柱坐标系内, 旋流器的流体速度  $u$ , 可分解为径向速度  $u_r$ 、切向速度  $u_t$  及轴向速度  $u_z$ 。 [7,11]

$$u^2 = u_r^2 + u_t^2 + u_z^2 \quad (3.11)$$

沿切向输入的流体在不计损失的情况下, 其转动动量矩将保持不变, 由此可见, 随回转半径的减小, 切向速度增大, 流体的静压头转化为速度头 (动压头), 或者如 Bradley

所说，流体产生了旋转运动。

在旋转运动的矿浆流中，在离心力的作用下，其中的矿粒以速度  $u$ ，向着旋流器壁运动。同时受到向内运动的液流径向速度  $u_r$  的作用。粒度粗的矿粒，受到的离心力大， $u > u_r$ ，矿粒向着壁部运动，进入下降液流区域，被其带往沉砂口排出，为粗粒产物。 $u < u_r$  的矿粒，向着中心运动。被上升液流带往溢流管中排出，是细粒产物， $u = u_r$  的矿粒，将在距中心半径为  $r$  处作回旋运动。若  $r$  在下降液流区域，它们将成为沉砂；在上升液流区则进入溢流。如果恰好在轴向速度  $u = 0$  的包络面上，这些矿粒将有 50% 进入溢流，另有 50% 进入沉砂。这种颗粒的粒度就是分级的分离粒度  $d_{50}$ ，这就是旋流器分级的基本原理<sup>[10,12-16]</sup>。

### 3.2.2.2 旋流器模型

林奇-劳 (Lynch Rao) 建议用一条效率降低曲线来描述物料的分级性能，该曲线的形状如图 3.9 所示，用以表达的模型见式 (3.12)。

$$y = \frac{e^a - 1}{e^a + e^a - 2} \quad (3.12)$$

式中：  $x$ ——各粒级尺寸与分级粒度的比，所谓分级粒度即  $d_{50}$ ；

$a$ ——常数项，标志分级效率， $a$  值越大则分级效率越高；

$y$ —— $x$  粒级物料进入沉砂的百分含量。

上述表达式可用正态函数来表示：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta^2} e^{-(x-\mu)/2\delta^2} \quad (3.13)$$

期中， $\mu$  相当于  $d_{50}$ ， $\delta^2$  相当于  $a$ ， $f(x)$  相当于  $x$  粒级物料进入沉砂的百分比，即  $y$ 。

上述模型是通用模型，其反映相对粒度，即粒度与分级粒度之比 ( $x$ ) 与该粒级物料进入沉砂的百分含量的关系。

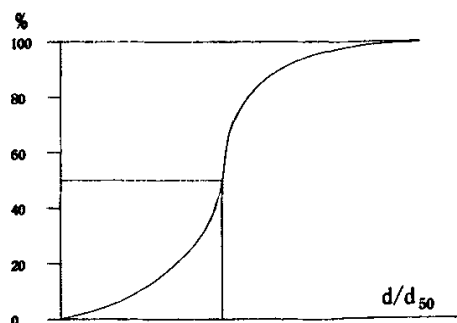


图 3.9 效率降低曲线

Fig.3.9 Curves of efficiency reduce



管直径、沉砂口直径、溢流管插入深度、柱体高度、锥角等，外部参数：矿石性质、给矿压力、矿浆浓度、给矿量等。这些参数均会影响到旋流器的分级效率。

关于旋流器各种操作因素及旋流器的几何尺寸与上述模型各参数的机理关系可以通过下述统计模型来揭示。

林奇分级粒度统计模型：

$$\lg d_{50} = k_1 d_{ov} - k_2 d_s + k_3 d_f + k_4 F_m - k_5 Q + k_6 \quad (3.14)$$

式中：  $d_{ov}$ ——旋流器溢流管的直径，cm

$d_s$ ——旋流器沉砂嘴的直径，cm

$d_f$ ——旋流器给料口直径，cm

$F_m$ ——给矿中固体的重量百分比

$Q$ ——旋流器的容积处理量，L/min

$k_1 \sim k_6$  为实验参数

林奇旋流器处理量与压力之间的关系：

$$Q = k \cdot d_s^{0.73} \cdot d_f^{0.88} \cdot P^{0.42} \quad (3.15)$$

式中：  $P$ ——旋流器给矿压力

$k$ ——实验系数

其他参数含义同式（3.14）。

### 3.2.2.3 旋流器参数及其影响规律

根据上述模型的分析得出，影响旋流器工作的各结构参数及操作参数对旋流器效率影响规律：

#### 1. 结构参数：

(1) 旋流器直径：旋流器的处理量随直径的增大而增大，但溢流的粒度会随直径的增大而变粗，在大直径下得到细粒的溢流，需要增大入流压力。

(2) 旋流器高度：旋流器高度增加，矿粒受作用时间长，分离越完善，分级效率越高。

(3) 沉砂口直径：沉砂口直径减小，溢流细度变粗，溢流矿粒产率升高，生产过程中，可通过调节沉砂口直径获得合适的循环负荷。

(4) 旋流器的入流口：旋流器的入流口的大小对处理量和分级粒度有影响。

(5) 溢流管直径及插入深度：溢流管直径增大，旋流器的处理量和溢流粒度将随之增大。溢流管插入深度太大，底部粗粒容易进入溢流，降低分级效率，溢流管插入深度太小，入流与溢流会形成短流，同样会降低分级效率。

## 2. 操作参数:

(1) 入流浓度: 入流浓度的大小, 是影响旋流器分级效率的关键因素之一, 浓度过高, 矿浆的浓度和粘度增大, 粗粒容易从溢流流出, 分级效率降低; 入流浓度降低, 矿粒相互之间的干涉程度小, 分级效率高。

(2) 入流压力: 入流压力是关系到旋流器工作的重要因素, 直接影响着旋流器的处理量和分级效率, 适当提高入流压力可以改善溢流粒度和提高沉矿浓度。入流压力升高会增大砂泵和管道的磨损, 以及增大能耗, 因此入流压力必须在一个合适的范围内。

(3) 入流粒度组成: 旋流器入流粗粒越多, 溢流跑粗越严重, 入流粒度稳定与否关系到旋流器分级效果的好坏。

(4) 入流流量: 保证合适的入流流量是旋流器正常工作的前提, 入流流量与入流压力有一正向对应关系, 一般两者选一作为实际操作量。

## 3.3 磨机功率、声响与内部参数关系

### 3.3.1 磨机声响与磨机工作状态的关系

在选矿厂实际生产操作过程中, 熟练的球磨机操作工人能通过听觉对球磨机工作状态进行较有效的控制。人耳的听觉功能是一个复杂的生理过程, 对球磨机工作状态的判断是建立在对球磨机噪声进行即精密又非量化频谱的分析基础上的, 其结果只可本人意会但难以用语言描述, 只能近似地说球磨机的声音沉闷和清脆。一般的电耳信号都是在中频(1~2kHz)范围内以某一频率为中心在较宽的频率内取得的反应声强大小的电流信号, 作为判断球磨机工作状态指标的好坏。电耳输出是反应一个较宽频带声压大小的单信号, 无法提取噪声特征, 不能模仿人耳在整个噪声频域内进行的频谱特征分析, 所以, 没有可靠的噪声特征与工作状态之间模糊对应关系作为判断依据, 因此它不能真实地反映球磨机的工作状态。

大量的研究探讨如何反映球磨机的工作状态, 也提出了很多检测状态的参数。然而, 在生产工艺上能实施检测的外部响应主要有球磨机的输入功率、噪声、振动等。尽管理论研究上通过三因素法甚至更多因素法能够就球磨机的工作状态给出合理的结果, 但在实际应用上, 较多采用的是功率——噪声双因素法。球磨机噪声的检测主要采用“电耳”来进行检测, 但是电耳不能充分反应球磨机噪声所包含的全部信息。国内有研究采用球磨机噪声频谱分析法对球磨机工作状态进行定性判断, 取得了良好的结果。

球磨机发出的噪声是磨机内介质、物料、筒壁等相互摩擦和碰撞时发出来的。当磨

球磨机发出的噪声是磨机内介质、物料、筒壁等相互摩擦和碰撞时发出来的。当磨机规格、衬板材质及形式一定时，磨机的噪声特性与介质特征（尺寸、大小、配比、充填率）、料球比、磨矿浓度、磨机转速等有关。

东北大学王泽红老师用频谱分析的方法，对球磨机噪声与工作状态的关系进行了深入的研究，实验中采用了频谱分析仪对球磨机噪音的全频率声级强度进行了检测，并得出了球磨机料球比、介质充填率及磨矿浓度对声响的影响关系<sup>[2]</sup>。

### 3.3.2 球磨机操作参数对声响的影响

#### 3.3.2.1 料球比对磨机声响的影响

湿式球磨机中物料和水是以矿浆的形式充填在介质的空隙中，矿浆的阻力及浮升作用将影响介质间相互冲击和摩擦作用的强度。从而影响了球磨机声强和频谱分布；矿浆中固体颗粒的存在对介质与介质、介质与磨机筒体之间直接作用的摩擦力发生变化，从而影响介质的运动轨迹，导致磨机声响和频谱的分布发生变化。

相关学者研究表明：随着料球比的增加，频谱分布曲线逐渐降低，而且幅度加大；另外，随着料球比的增加，高频部分中心频率声级比低频部分下降的幅度大。这与生产实践中球磨机操作是一致的，球磨机物料增加时，球磨机噪声发“闷”，即高频部分声级明显降低。球磨机内物料降低，噪声发“脆”，高频部分声级明显升高。

#### 3.3.2.2 磨矿浓度对磨机声响的影响

磨矿浓度是影响球磨机声响的重要因素之一，磨矿浓度的变化将导致固体颗粒在球磨机中的流动规律和分布特性的变化，从而影响球磨机声响的变化。

实验研究表明：高磨矿浓度（90%）时，部分矿浆由于粘性大和一些小磨矿介质粘在球磨机内壁上形成衬垫，阻碍了介质与球磨机内壁直接冲击作用。内壁的衬垫作用减小了介质的有效冲击能量，使球磨机声响降低；低磨矿浓度（50%）时，相对高磨矿浓度时矿浆体积量增加几倍，由于矿浆体积的增加缓解介质与介质、介质与衬板之间的冲击力，从而降低了球磨机声响。

### 3.3.3 球磨机操作参数对输入功率的影响

在球磨过程中，球磨机拖动电机的输入功率主要消耗在以下三个方面：

- （1）带动磨矿介质和物料在磨机筒体内运动所需的功率，即所谓的有用功率；
- （2）克服磨机枢轴空心轴颈与轴承之间的摩擦及传动装置的阻力所需的功率；
- （3）电机的损耗等。

在这三部分中，第一部分是主要的，为使磨矿介质从外界获得尽可能高的能量，以

多年来,国内外许多学者对球磨机的功率消耗与磨机的结构参数和工作参数之间的关系进行了多方面的研究,并提出了一些计算球磨机功率或有用功率的理论公式、经验公式及半经验公式。但是这些计算公式不但计算复杂,而且计算精度大多不高;同时,由于这些公式都只涉及介质充填率和磨机转速率两个工作参数,而没有考虑其他因素的影响,与实际尚存在一定的距离。

为了研究单因素对球磨机有用功率的影响,王泽红等人将其它因素固定在零水平,改变一个因素的水平,进行条件试验,得到单因素变化对球磨机有用功率的影响规律。

由实验可知:其它条件固定时,各单因素对球磨机有用功率的影响十分相似,都呈二次曲线形式。

### 3.3.3.1 料球比对磨机功率的影响

湿式磨矿时,适宜的料球比为 1.1,这时球磨机的有用功率最大,料球比增大或减小都会使球磨机有用功率降低。在磨矿过程中,矿石颗粒充填在介质的空隙内使载荷视比重增大,从而增大了磨机的有用功率;同时,矿石颗粒由于受到离心力作用会穿过空隙沿径向移动,从而对载荷的有效重心距产生影响。上述两种作用可能是影响有用功率变化的主要原因。

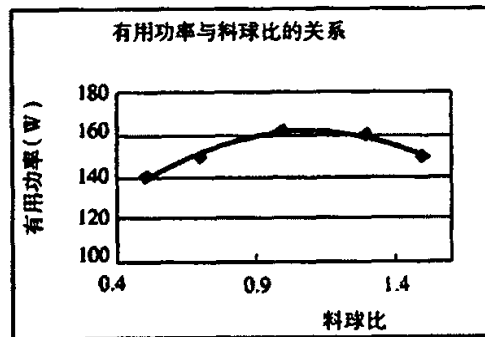


图 3.10 料球比与有用功率的关系

Fig.3.10 Relationship between rate of

### 3.3.3.2 介质充填率对磨机功率的影响

当介质充填率 $<47\%$ 时,球磨机的有用功率随介质充填率的增大而增大,这可以解释为介质充填率的增加使磨机转动所需要扭矩增大,球磨机的有用功率也随之增大;当介质充填率 $>47\%$ 时,球磨机有用功率随介质充填率的增大而减小,这是因为介质充填率大,载荷有效重心距离变小,而且球的滑动较弱,容易达到离心化运动状态,从而使球磨机的有用功率降低。

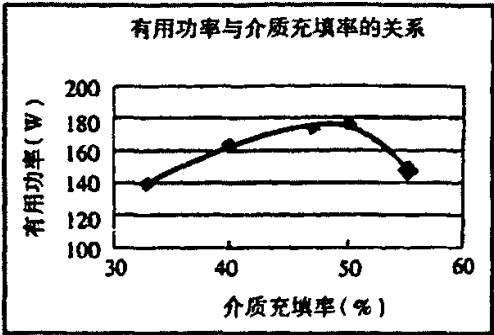


图 3.11 介质充填率与有功功率的关系

Fig.3.11 Relationship between Ball Charge Ratio of Ball Mill and power

3.3.3.3 磨矿浓度对磨机功率的影响

当磨矿浓度<76%时，球磨机有用功率随磨矿浓度的增大而增大；当磨矿浓度>76%时，球磨机有用功率则随磨矿浓度的增大而减小。当磨矿浓度较小时介质在上升过程中受矿浆的浮力作用，从而降低了介质在上升过程所消耗的功；同时，介质在下落过程中受矿浆的缓冲作用，从而降低了介质的下落高度。矿浆的浓度越小，其充填率越大，矿浆面越高，介质在矿浆中上升的高度越大，矿浆对介质的缓冲作用也越强，因而有用功率就越低；当矿浆浓度>76%时，随着矿浆浓度的增大，一方面矿浆对介质的浮升和阻力作用增大，降低了磨机功率，另一方面矿浆对介质的视比重影响增大，增大磨机功率，这两种作用相互消长，呈现出上述结论。

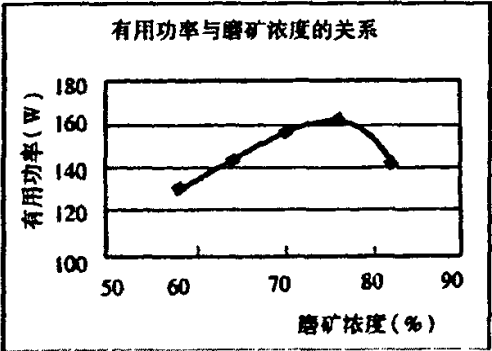


图 3.12 磨矿浓度与有功功率的关系

Fig.3.12 Relationship between grinding consistence and power

除上述试验因素外，球磨机转速率也是球磨机一个重要的操作因素，其对磨机功率的影响至关重要，但是一般来说球磨机的转速率一定，不能随便调节，因此本文对其没有进行深入讨论。

根据条件试验结果，分析了单因素对球磨机有用功率的影响。结果表明：磨矿浓度为 75%、料球比 1:1、介质充填率为 45%时最大；球磨机的介质充填率对有用功率的影

响最大，其次是磨矿浓度，最后是料球比；矿石加入量对球磨机有用功率也有影响。

根据上述分析可以看出，影响球磨机有用功率的因素除了球磨机内部工作参数（介质充填率、料球比、磨矿浓度）外，还有球磨机的转速率。只要球磨机的转速率已知（实际生产中球磨机的转速率也是已知的、固定不变的），其它影响因素就是球磨机的内部工作参数。要想准确预报球磨机的内部工作参数，单因素和双因素都无法获得满意的结果，只有检测参数达到三个才能进行有效判断。

### 3.4 磨矿系统控制方案

#### 3.4.1 磨矿控制系统总体方案

依据生产工艺特点，建立新的控制策略，对被控设备调整其检测点、控制点，对多点进行组合控制达到最优控制策略：例：我们加入如磨机噪音(音频)、磨机功率、旋流器溢流粒度、旋流器给矿浓度、旋流器给矿流量、旋流器溢流浓度等控制设计参数。通过对磨机噪音(音频)、磨机功率、旋流器几者的组合控制，而不是单一控制来更高效的对磨机进行控制，来减少原矿类型不同对系统的影响，提高矿石处理量，使产品粒度分布均匀使磨机达到最优工况。同时也要对上下游控制过程综合考虑，协调控制，达到全过程的控制最优化。

选矿厂磨矿控制系统包括磨机给矿、磨矿浓度、旋流器溢流粒度、磨机负荷优化控制四个部分，在控制上除了实现了上述回路控制外，还实现了对电气设备的起停、自动联锁，对因电气元件故障动作造成的电气设备停机给出准确及时的报警信号，进而保证生产流程安全稳定运行。

##### （1）磨机给矿控制：

根据磨机功率、噪声及旋流器工作状况，通过模糊控制的理论，确定最佳的给矿量值，并通过变频器控制给矿量的大小，保持最大处理能力。

##### （2）磨矿浓度控制：

稳定磨矿浓度在最佳范围，由于球磨机内部浓度无法直接测量，因此磨矿浓度可以通过新给矿量、返砂量等参数计算获得，磨矿浓度的调节通过调整给矿水电动调节阀实现磨机给矿水流量来控制磨矿浓度。

##### （3）旋流器溢流粒度控制：

根据旋流器工作原理，旋流器分级效率与旋流器给矿浓度、给矿流量、给矿压力有关，因此稳定旋流器给矿浓度、流量、压力在适合范围，能得到稳定的溢流粒度分级。

同时,旋流器分级溢流粒级组成直接反映出了整个磨矿系统的效果,本设计根据旋流器溢流粒度,结合旋流器泵池液位、给矿浓度之间的关系,通过模糊控制算法,得出球磨机工作状态并对负荷进行前馈控制。

旋流器给矿浓度通过调节球磨机排矿水调节阀进行调节；旋流器流量及压力通过调节给矿泵变频器频率进行调节。同时为解决泵池抽空影响旋流器稳定工作的问题，必须对泵池液位进行调节，避免泵池抽空，泵池液位通过调节旋流器溢流回流量及给矿泵转速实现调节。

上述系统采用了常规 PID 控制、串级控制、模糊控制、多变量控制等控制策略。焦家金矿磨矿分级测控系统工艺图见图 3.13。

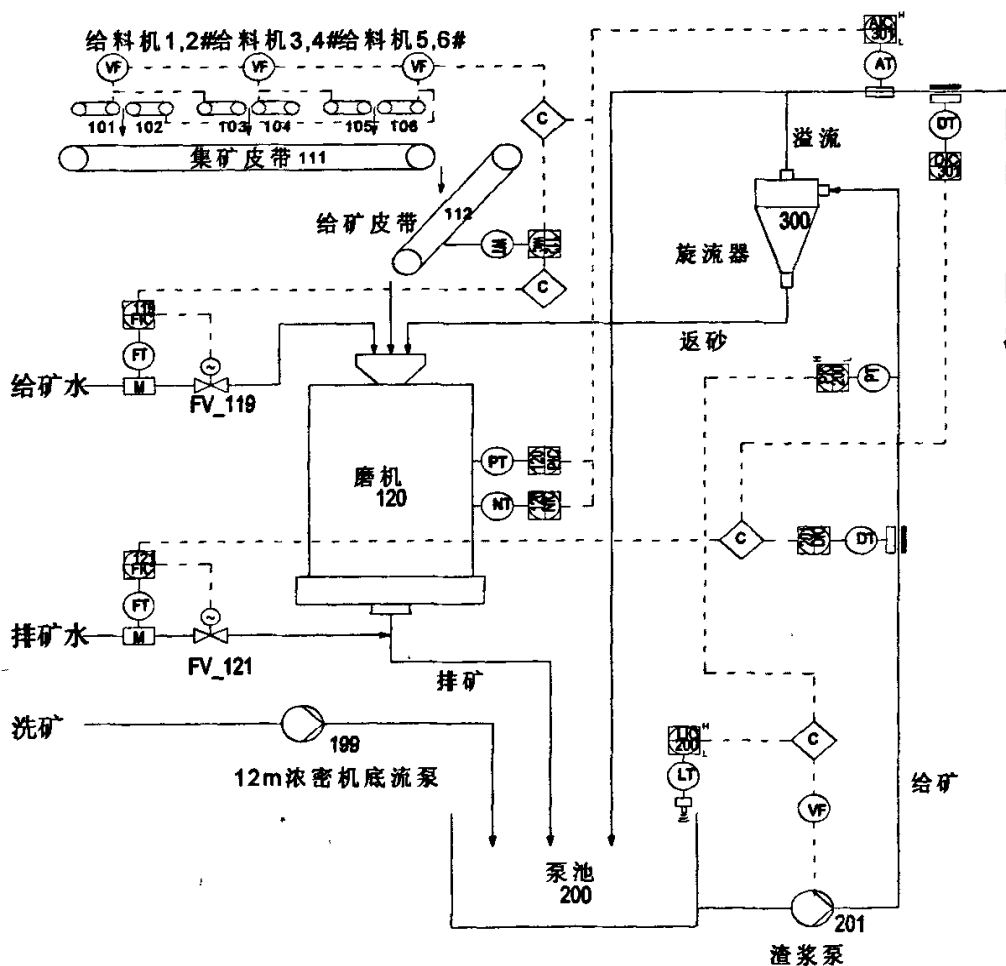


图 3.13 焦家金矿磨矿分级测控系统图

**Fig.3.13 Grinding classification Measurement and Control System**

3.4.2 磨矿子系统控制

3.4.2.1 磨机给矿控制

3.4.2.1.1 总体思路

在选矿厂，磨矿是决定整个选矿效率的关键工段。影响磨矿操作的因素很多，而给矿是影响磨矿操作的首要因素。高效率的磨矿对给矿提出了较高的要求：

- (1) 保证进入磨机的矿量快速，准确地跟踪给定值；
- (2) 保证给矿的持续稳定，尽可能减少对磨矿的干扰。

在选矿过程中，流程的稳定相当重要。对给矿量进行长期的有效控制，能使回路对矿石性质的变化得到满意的处理效果，同时提高磨矿系统处理量。基于这种思想，系统给矿量一般为：

$$Q = Q_0 + \Delta Q$$

式中  $Q$  为给矿量， $Q_0$  为恒定给矿量， $\Delta Q$  为时变给矿量。

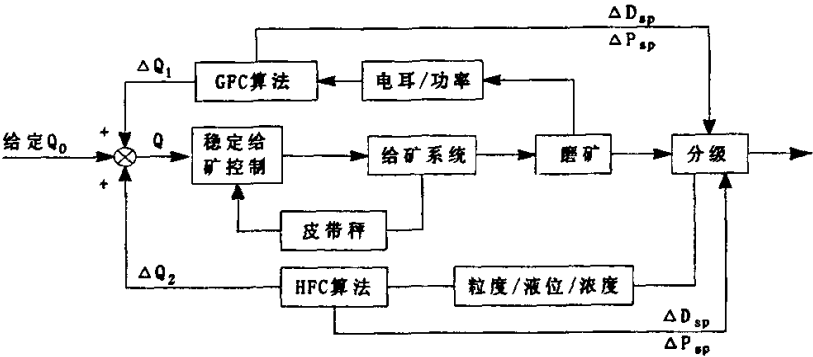


图 3.14 磨机优化给矿控制系统框图

Fig.3.14 Control system for ore optimization feeding to ball mill

给矿控制总体框图如图（3.14）所示。

$\Delta Q$  通过模糊专家系统得到，同人工智能领域的专家系统的结构组成相似，这里的专家系统由四部分组成：知识库、数据库、推理机、用户接口。

知识库有一些与磨矿控制问题有关的知识源组成。知识源所表达的是数值控制算法所设计的启发式逻辑，而不是算法本身的具体内容。包括控制其参数与受控对象的协调，控制器参数调整及各种监控方法等。一般根据工业控制的特点及实时性的要求，知识表达采用“IF，THEN”产生规则。

数据库由静态和动态数据组成，按数据性质放在不同的数据平面上，构成系统运行知识源。其中最重要的数据平面是数据表。根据进入事件表的事件特征，在监督程序的指引下，提出合适的动作。



当矿石可磨性好时,球磨机负荷减小,或者在粒度满足要求的前提下,磨机并没满负荷,这时可以增加磨机给矿量。当矿石可磨性变差时,磨机负荷将增大,通过其它方式又不能调节,这时可以减少给矿量。给矿量的优化将在后续章节中详细讨论。当通过优化得到给矿设定值 $\Delta Q$ 后,主要考虑的问题就是设计稳定的给矿系统。稳定给矿控制的目标是通过改变皮带给矿机给矿电机频率,使入磨台时量按设定值的要求变化。

#### 3.4.2.1.2 恒定给矿控制

焦家金矿选矿厂给矿系统有 6 台给矿机。正常情况下只有 2 台运行,矿石井给矿皮带机下矿到集矿皮带,再由集矿皮带送至给矿皮带,最后由给矿皮带送到球磨机进行处理。给矿量的大小由给矿机运行台数及频率大小决定<sup>[20]</sup>。

恒定给矿自动控制系统结构图如图 (3.15) 所示,对每台皮带给矿机进行变频调节,正常情况下,开启两台皮带给矿机以同一频率运行。根据皮带秤反馈矿量进行频率调节,保持矿量稳定的给定值。

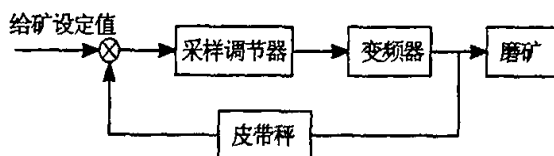


图3.15 恒定给矿自控系统结构图

Fig.3.15 Automatic Control System for Stable Ore Feeding to ball mill

#### (1) 给矿机的逻辑控制

集矿皮带运行后,则启动满足启动条件的两台给矿机。

当发生变频故障、给矿机机械故障、人为禁止等非正常情况时,在提前设定有备用给矿机的情况下,则自动启动另一台给矿机。

在给矿过程中,若两台或两台以上给矿机运行、给矿频率均达 50Hz 以上而矿量不足目标矿量的 85%,这种状况维持 3 分钟,我们称之为“断矿”。发生“断矿”时,发出报警,系统自动启动一台备用给矿机;“断矿”消失后停止报警。

在没有发生“断矿”条件下,若存在可切换的备用机,当给矿机运行达到 4 小时(该时间可以通过上位机自由设定),自动切换到备用机。

上述功能流程图如图 (3.16) 所示

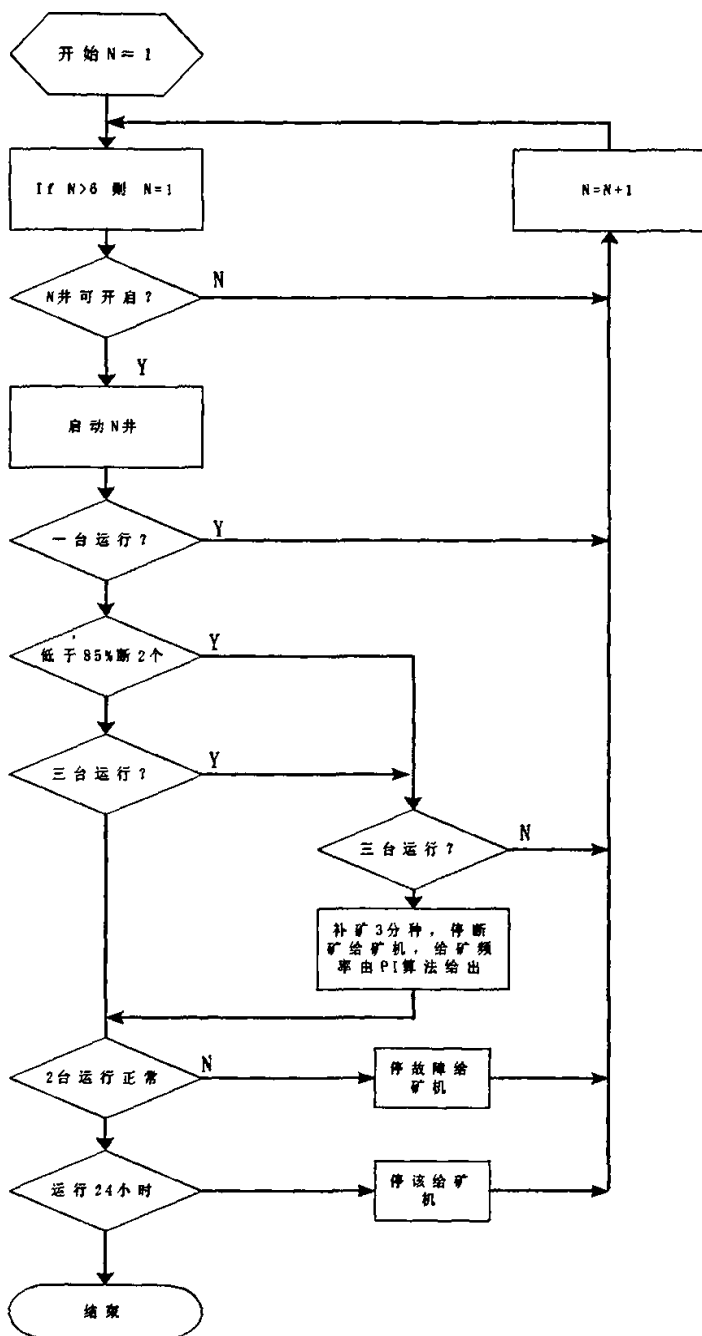


图 3.16 恒定给矿逻辑切换流程

Fig.3.16 Flow of logic change for Stable Ore Feeding to ball mill

## (2) 矿量采样控制算法

为使给矿量稳定需对给矿量进行自动控制。据现场测算，从开始调节频率到检测到矿量变化需 1 分钟，系统滞后时间  $\tau$  较长，若采用常规 PID 算法，由于被控量在一段

滞后时间后才有反应，而调节器对被控参数偏差的控制作用又不能实时反映出来，以致造成控制超调、甚至发生振荡。故考虑采用采样控制方式，即按偏差进行周期性断续控制的方式。

采样控制方式基本控制思路是：当调节器输出一值后，保持该值不变，直至经滞后时间后控制作用在被控量变化中反映出来为止，然后根据偏差大小决定下一步动作。

调节器动态特性：当给矿量出现偏差时，在控制周期 $T_c$ （选择 $T_c \geq \tau$ ）时间内，输出保持不变，调节器只在采样点输出发生变化。按照这种方式减小甚至消除偏差。

为实现无静差，使用 PI 算法进行控制。为了减小超调量，缩短调整时间，采用积分分离对 PI 算法进行优化，即当只有误差减小到一定范围时积分项才起作用。

其算法公式如下：

$$u_i = K_p(e_i + K_i \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^i e_j) \quad (3.16)$$

$$K_i = \begin{cases} 1 & e_j \leq \varepsilon \\ 0 & e_j > \varepsilon \end{cases} \quad (3.17)$$

式中 $K_i$ 是引入的分离系数， $e_i$ 、 $e_j$ 为给定矿量与实际矿量的偏差， $\varepsilon$ 为进行积分分离的临界偏差。

发生断矿进行补矿时，进行 PI 算法输出与给定输出的切换，实现调节和补矿。

### 3.4.2.2 磨机浓度控制

磨矿浓度是指在磨机内，矿石的重量（干重）占整个矿浆（矿石+水）重量百分比。磨机磨矿浓度的大小影响矿粒在钢球周围的粘着程度，矿浆的比重及其流动性，直接影响到排矿合格粒度的比率，对避免矿石过粉碎，提高选别指标至关重要。为保证磨机工作效率，应该将磨矿浓度控制在给定指标范围内。

根据磨机内物料有效破碎范围与矿浆浓度的关系，磨矿浓度较低，粘度也较小，介质在矿浆中的有效比重增大，介质下落时的冲击力和研磨力均较强，磨机产量变化不大，由于浓度低介质周围粘着的矿粒较少，因此矿粒受研磨的效率降低。

矿浆粘度适当增大，介质周围粘着的矿粒增加，磨矿效率提高，磨机产量也增加。

矿浆浓度过高，矿浆流动性差，磨矿介质的冲击作用减弱，磨机产量会下降。对于格子型球磨机可能产生胀肚现象，从而降低磨机生产率。

因此，选择合适的磨矿浓度对于提高磨矿效率是至关重要的。根据焦家金矿选矿厂的工艺流程和矿石性质，确定磨机理想磨矿浓度为 75%。

影响磨机浓度的因素有给矿量、旋流器返砂量、旋流器返砂浓度。要控制磨机内部

矿浆浓度关键是控制好磨机入口矿浆浓度。在闭路磨矿条件下，磨机给矿是由新给矿和旋流器返砂量组成的，要控制磨矿浓度，必须控制给矿水量并准确测量旋流器返砂量。

但是由于焦家金矿现场条件所限，旋流器沉砂量不能通过仪表测出，根据生产实践，在给矿和分级溢流粒度稳定的情况下，返砂量的波动不大，因此，只要根据本厂的原矿粒度和矿石特性，标定出正常的返砂比，即可由给矿量的多少及返砂比，按磨矿浓度的要求计算出所需给矿水量，计算公式如下：

$$K_m = \frac{Q_k + Q_f}{Q_k + Q_f + W_k + W_f + W_h} \quad (3.18)$$

$$\text{根据标定的返砂比 } C, \text{ 可知 } Q_f = C \cdot Q_k \quad (3.19)$$

通过流程实验知道新给矿浓度  $K_k$  和旋流器返砂浓度  $K_f$ ，则可以得出：

$$W_k = Q(1 - K_k) / K_k, \quad W_f = Q_f(1 - K_f) / K_f \quad (3.20)$$

将式 (3.19) 及式 (3.20) 代入式 (3.18) 中，可以求得：

$$\begin{aligned} W_h &= Q_k(1 + C)(1 - K_m) - Q_k K_m \left( \frac{1 - K_k}{K_k} + C \frac{1 - K_f}{K_f} \right) \\ &= Q_k \cdot N \end{aligned} \quad (3.21)$$

上述式中： $W_h$  为需要的补加的给矿水量， $Q_k$ 、 $Q_f$  分别为磨机新给矿量、旋流器返砂量， $K_m$ 、 $K_k$ 、 $K_f$ 、 $C$  分别为磨机浓度、新给矿浓度、旋流器返砂浓度、旋流器返砂比。最佳磨矿浓度值由磨机分级过程的工艺指标分析得到，几个参数均认为是常数，计算出的  $N$  值也为常数，因此，如果给矿量恒定，则给矿水量也恒定，可由给矿量直接按比例计算出给定返矿水量。

由于新给矿中含水量的变化会改变磨机入口矿浆浓度，因此引入反馈控制是必要的。但磨矿浓度无法在线检测，考虑到矿石含水量的变化不是经常的。因此我们采用定时取样的方法来检测磨机内矿浆的浓度，并根据采样值作为反馈量来调整磨机入口矿浆的浓度，达到改变磨矿浓度目的。

磨矿浓度控制采用串级控制方法，外回路采用比值控制器确定磨机入口给矿水量，内回路由 PID 控制器抑制水压变化等造成的干扰，保证实际给水量快速无静差跟踪设定值。磨矿浓度控制系统结构如图 3.17：

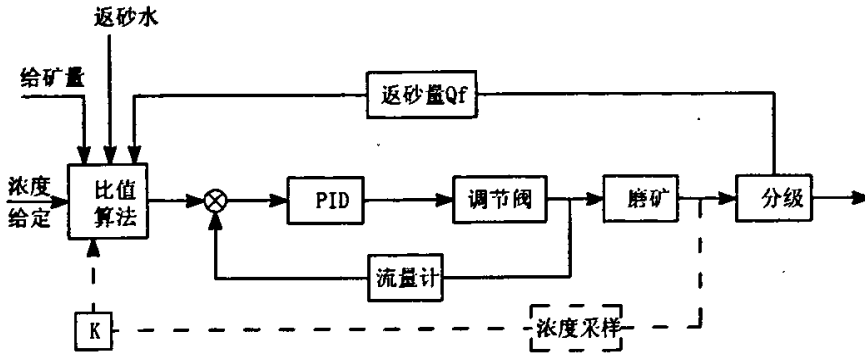


图3.17 磨矿浓度控制系统图

Fig.3.17 Control system of grinding consistence

在现场，因为皮带秤测得的给矿量时刻波动的，如果严格按照比例对给矿水量进行控制，则电动调节阀将不停地工作，严重时电动阀将关闭或超出调节范围，故返矿水量 PID 调节器采用具有死区的 PID 算法，以达到稳定返矿水量，有效控制一次磨机浓度的目的。算法公式如下：

$$u_i = \begin{cases} u_i & e_i \leq \varepsilon \\ K_p(e_i + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^i e_j + \frac{T_d}{T}(e_i - e_{i-1})) & e_i > \varepsilon \end{cases} \quad (3.22)$$

磨矿系统采用串级控制，能获得较为明显的效果。主要表现在以下几个方面：

(1) 系统内存在一些变化激烈，幅值很大的干扰，将这些干扰纳入副回路，采用串级调节系统能显著提高系统的抗干扰能力。如磨矿过程中生产用水的水压往往变化很大，此时若采用简单调节系统对浓度进行控制，调节质量一般较差，若采用如图 3.17 所示的串级调节系统，把激烈变化的水压纳入副回路，就能显著改善调节质量。

(2) 磨机回路中，球磨机具有容量滞后，且整个过程的滞后时间较长。对于这种容量滞后较大的对象，若采用简单调节系统，则调节时间长，超调量大，调节质量不能满足要求。采用串级系统，选择一个滞后时间较小的辅助参数组成副回路，就能缩小等效对象的时间常数，提高系统灵敏度，改善调节质量。

(3) 采用串级调节系统可以克服对象的非线性的影响。在磨矿系统中对象的输出（被控变量）和输入（调节变量）之间存在较大的非线性关系，且该非线性又随负荷及负荷特性（如矿石性质）的变化而变化，若采用简单调节系统，不能得到满意的调节质量。因为调节器参数的整定值应与对象的动态特性相适应，在非线性对象中，当负荷变化时，对象的动态特性也发生变化，此时调节器的参数也应作相应的改变才能使调节变量适应对象的非线性变化。但简单的调节系统不能做到这点，当负荷变化频繁时，采用

简单调节系统调节质量不稳定（当负荷处在参数的整定范围内时，调节质量较好；负荷超出此范围后，效果不佳）。若采用串级调节系统，由于它具有一定的自适应能力，再配合高级控制算法，在负荷变化引起工作点改变时，主回路的输出会重新调整副回路的给定值，使得调节变量与被调量之间的关系随对象非线性变化而变化，所以即使负荷变化较大时，调节质量也会比较稳定。

### 3.4.2.3 旋流器溢流粒度控制

人工操作的选矿厂旋流器生产，由于没有有效的调控手段，加上生产作业过程流动较大，致使旋流器难以正常稳定工作，从而影响分级效率。存在问题主要表现在：

（1）由于焦家金矿球磨机为格子型，属于强制排矿球磨机，这样就造成球磨机排矿中含有碎钢球和大的矿石颗粒，尽管排矿口安装有格筛，仍旧有不少的碎钢球混入泵池中，这就给泵和管路及仪表测量带来了很大的影响，设备磨损严重。

（2）由于砂泵容量比实际需要的要大，导致泵池经常出现“拉空”现象，旋流器入流时断时续，严重影响旋流器分级。特别在入流流量小于某一值时，入流全部从沉砂口输出，根本没有分级作用。

影响旋流器工作的因素很多，结构参数只能作为控制系统一个技术参考因素，而不便作控制参数。旋流器的操作参数主要有：入流浓度、入流压力、入流流量、入流粒度组成。

合格的溢流细度是旋流器控制的最终目标，而旋流器必须工作于规定的操作参数范围内，才能正常运行。通过调节泵速获得恒定的旋流器入流压力，还要有稳定的旋流器入流浓度和入流粒度，才能保证旋流器的稳定运行；一般认为，入流粒度是由磨机工作状况决定的，对溢流粒度影响较小且无法通过旋流器进行调节。因此，为了获得理想的溢流细度，旋流器操作参数控制回路应包括入口浓度闭环和入口压强闭环。

由 3.3.2 旋流器数学模型部分中，由式 (3.15) 分析可得出以下结论：

（1）在矿石的可磨性基本稳定的条件下，上述各旋流器模型的系数取决于旋流器结构的几何尺寸，在工程选型确定后，旋流器结构的几何尺寸基本上是不变的；

（2）旋流器组的几何尺寸确定后，旋流器的分级质量的控制因素是旋流器给矿浓度及单台旋流器的给矿流量；

（3）旋流器组的几何尺寸确定后，对每台旋流器来说其给矿流量与给矿压力的 0.42 次方成正比。详见式如下：

$$p = 0.42 \sqrt[0.42]{k d_{uv}^{0.73} d_f^{0.88} / q} \quad (3.23)$$

如何正确处理好浓度、压力、液位、粒度的关系，将浓度、压力、液位、粒度同时

控制在工艺要求范围内，是确保旋流器正常稳定运行的关键。液位偏高时，可以提高压力或提高浓度，以增大出量或减小进量；液位偏低时可以通过减小压力或减小浓度，以减小出量或增大进量；粒度大、液位高、浓度高时可以减少矿量，粒度小、液位低、浓度低时可以增大矿量，为了协调好浓度、压力、液位、粒度四者之间的关系，本控制系统专门设计一个“协调控制器（HFC）”，该控制器能根据流程情况，调整好浓度和压力控制，自动将四个操作参数控制在工艺要求范围内。同样为了抑制水压变化给系统带来的扰动，旋流器给矿浓度控制回路依然采用了串级控制，控制系统原理图如图 3.18 所示<sup>[16]</sup>。

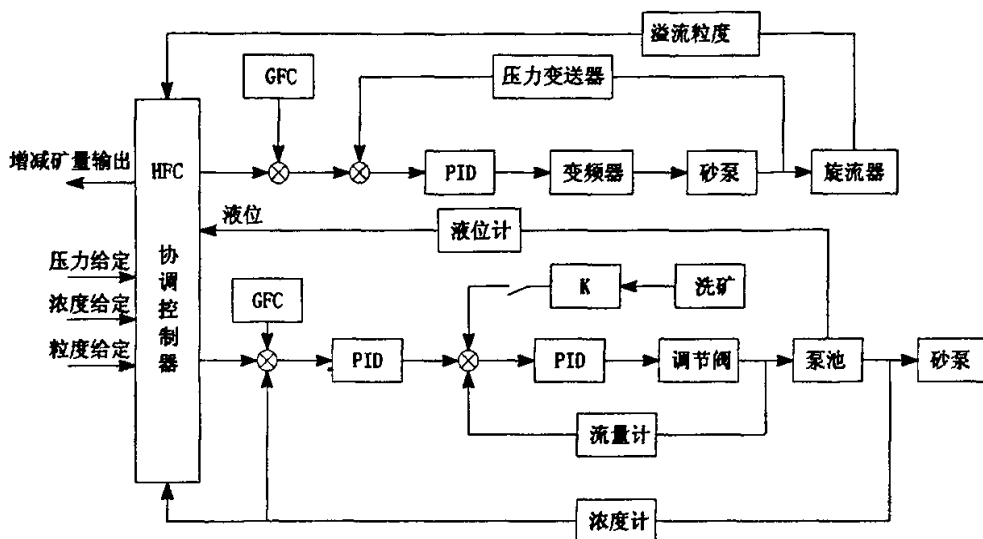


图 3.18 协调控制原理框图

Fig.3.18 Coordination Control theory

控制系统将检测到的旋流器给矿浓度、给矿压力、矿浆池液位及旋流器溢流粒度的信号作为旋流器模糊控制器输入，协调控制器经过模糊运算和模糊推理，并根据推理结果，给出一种适合此时旋流器工作的控制方案。

在旋流器的自动控制系统中，选择旋流器的给矿压力、给矿浓度、泵池液位、旋流器溢流粒度作为模糊控制器的输入。模糊控制器的最后输出是矿浆泵转速、泵池补加水和加减小量。这些输出值经限幅处理后作为 PID 控制器的输入、PID 控制器的输出控制系统中的执行机构进行生产。

“协调控制器 HFC”是本控制系统的关键部分，协调控制器由控制规则构成，而控制规则的逻辑运算和数据运算，则通过系统调试确定。控制系统两个主要操作参数是人流压力和人流浓度，两个操作参数的变化都会对泵池液位有影响，而将泵池液位控制在

安全范围内是生产正常运行的前提，本协调控制器以泵池液位为主要目标控制参数，当液位在安全范围内时，确保合适的压力和浓度，当液位超出安全范围时，在工艺允许的前提下适当调整压力和浓度，并根据液位、浓度和流量的情况适当调整新给矿量。根据前面介绍的旋流器工作机理，压力升高有利于提高分级效率，浓度降低也有利于提高分级效率，因此控制方法是：在压力控制方面，在确保压力在工艺要求内的前提下，以提高压力手段控制为原则；在浓度控制方面，在确保浓度在工艺要求内的前提下，以降低浓度手段控制为原则。在一般情况下，控制系统主要通过压力手段来调整，当压力达到工艺要求的极限还无法达到要求时，再采用浓度手段来调整。协调控制器的控制框图如图 3.19 所示：

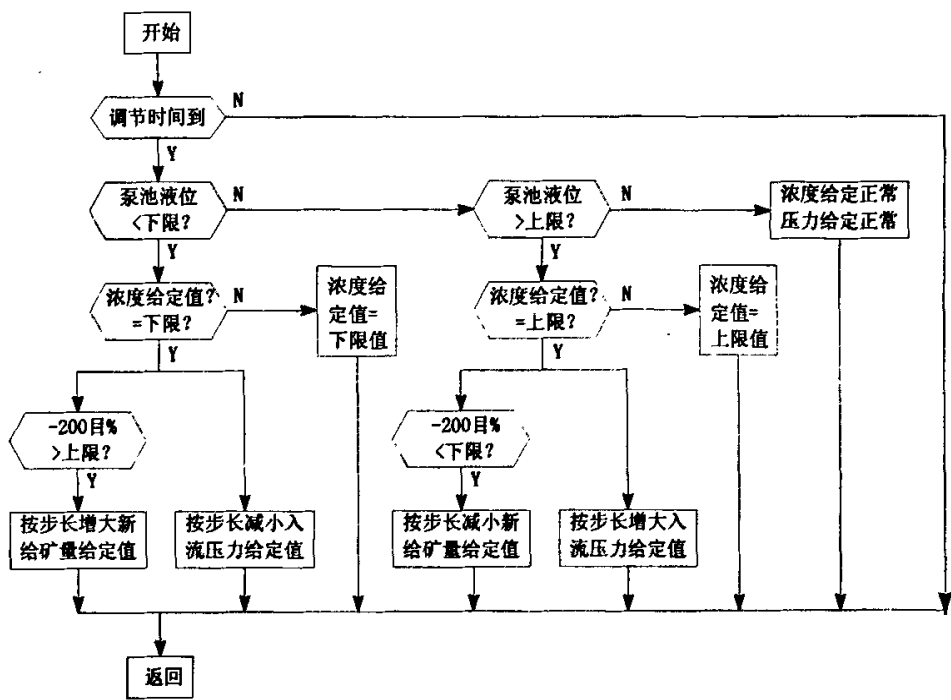


图 3.19 协调控制器原理框图  
Fig.3.19 Theory of Coordination Controller

3.4.2.4 磨机负荷优化控制

提高磨机处理量，充分发挥磨矿回路的作业效率，是磨矿作业重要的生产目标。实现这一目标的操作手段就是通过调节给矿量保持磨机的装载量处于最佳工况。

磨机的最大处理能力是由矿石性质决定的。即矿石硬度大，难磨磨机的最大处理能力下降，而当矿石硬度下降，易磨，磨机的最大处理能力提高。因此根据矿石性质的变化，及时调整入矿量，是优化磨矿效率的关键。

湿式球磨机的工作特性可以直接由磨机功率来描述，如下式所示：



$$P = F(D, v, N, W, R, B, K, Q) \quad (3.24)$$

其中：  $P$ —磨机电流

$D$ —磨机几何尺寸

$v$ —磨机转速

$W$ —磨机介质充填率

$R$ —磨矿浓度

$B$ —钢球质量

$K$ —钢球配比

$N$ —矿石性质

$Q$ —磨机处理量

显然磨机的工作特性是一个受多种因素影响的复杂对象，还没有一个精确描述其内部特征的数学模型可供实际生产过程控制使用。

磨矿介质 ( $W, B, K$ ) 是影响磨矿效率高低的主要因素，通常实际工业生产中一般有合理的钢球添加制度，因此在磨机结构  $D$ 、磨机转速  $v$  确定和钢球添加制度合理的情况下，影响磨机功率的主要因素是矿石性质和磨机处理量。

根据操作经验，球磨机在正常负荷下，磨机功率基本保持稳定，当磨机负荷过大时，磨机功率会逐渐降低，并随着磨机过负荷程度的加剧而大幅下降，最终导致磨机“胀肚”事故的发生。

因此，磨机功率可以反映磨机内负荷的变化情况，通过对磨机功率的控制可以有效调节磨内负荷，增加磨机处理量，发挥磨机最大处理能力，提高磨矿效率。

由图 (3.3) 可以确定磨机功率控制的指标函数为：

$$J = \int (P - P_0) dt$$

$$\dot{P} = \begin{cases} 0, & H \leq H_0 \\ \Gamma(H), & H > H_0 \end{cases} \quad (3.25)$$

其中，  $P_0$  为一个常数（正常磨机功率值），  $H_0$  球磨机临界负荷，  $\Gamma(H)$  为一非线性函数。控制磨机功率就是要通过对磨机给矿量的调节，使指标函数  $J$  最小。

由于磨矿过程的复杂性，无法建立磨机功率  $P$  和磨机负荷  $H$  的数学模型。我们采用智能优化控制方法—模糊控制算法来进行模糊求解。

通常，模糊控制是以受控量的偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$ （偏差的导数）作为输入来组成二维控制器，但对于球磨机来讲，由于球磨机运行过程的不均运行，使检测到的功率值受到随机噪声的严重污染，无法得到功率的速度变化信息。为此我们必须通过模拟量滤波及程序数字滤波的方法，得到稳定的受控量，通过计算得到功率偏差变化  $EC$ 。

通过对球磨机特性的分析可知，在其他条件稳定时，影响磨机负荷的主要因素是矿石性质。根据第三章磨矿声音与磨机工作状态关系的研究，可知球磨机声响与磨机内料球比有一定关系，能通过磨机声响准确的反映出料球比的基本状况。由于焦家金矿选矿

厂没有实现自动加球，而是采用根据流程试验的吨矿钢球消耗量每个班集中进行加球，每班新加钢球 700~800kg，尽管新加钢球量远小于磨机内介质质量，从总量上可以认为磨机磨矿介质总量相对稳定，但是在加球时系统应该考虑由于加球给系统带来的干扰。

这里我们按照磨机内介质充填率保持相对恒定来进行磨矿控制系统的设计。即认为磨机声响能反映出磨机内负荷的大小。为此我们用功率的偏差  $E$  及功率的偏差变化率  $EC$ 、磨机声响值构成智能模糊控制器 (GFC)<sup>[24]</sup>。

(GFC)模糊控制器的实现如下：

### 1) 精确输入量的模糊化

输入量的模糊化首先需确定精确输入量的基本论域，基本论域确定后可以由事先确定的隶属函数计算输入值的隶属度。隶属函数以三角形给出(见图 3.20)。

根据以上确定的隶属函数，就可以在程序中计算每个输入量对应的隶属度，这样就完成了对精确输入量的模糊化。

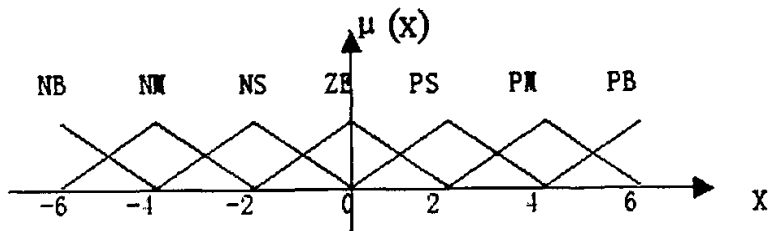


图 3.20 隶属函数

Fig.3.20 Membership function

### 2) 模糊规则及模糊推理

模糊规则的确定是基于现场操作工人的经验和控制工程师的专业知识。一般应考虑以下几方面的问题：

① 选择描述输入量模糊状态的语言变量。显然选择较多的词汇，对每个变量用较多的状态来描述，制订规则时就比较灵活，控制精度也比较高。但规则多就会大大增加程序量及计算量，控制系统的响应时间也会相应增长，从而会造成系统的滞后响应。一般每个变量宜选用 2~10 个状态来描述。这里选用 5 个状态：最低、较低、一般、高、最高。

② 定义代表各模糊状态的模糊集。确定了各变量的模糊状态就可以定义此状态的模糊集。在确定描述某一变量的模糊集时，要考虑它们对论域的覆盖程度。在定义这些模糊集时应使论域中的任何一点对这些模糊集的隶属度的最大值都不能太小，否则在这样的点就会出现“空档”，从而引起失控。

另外，在确定模糊集时还应考虑各个模糊集之间的相互影响。通常用这些模糊集中的任意两个模糊集交集的隶属度的最大值  $\beta$  来描述这一影响，较小时控制较灵敏， $\beta$  较大时模糊控制对于对象参数变化的适应性较强，即鲁棒性较好。一般取  $\beta=0.4\sim0.7$ ，这里取 0.5。

③确定模糊控制规则。在模糊控制中，模糊控制规则通常是由模糊条件语句来描述的。根据以上确定的模糊语言变量，可以制订诸如以下的模糊控制规则：

$$\text{if } E_i \text{ and } C_j \text{ then } U_j \quad i \in I, j \in J$$

制订了模糊规则以后就可以根据这些规则进行模糊推理。

假如，我们的模糊控制系统是二维系统的话，由于每个参数对应 5 个子库，像上面所说的最低、低、正常、高、最高，也就是每种参数都有对应于 5 个子库的隶属度，那么在其规则库的结构中就需定义 25 种组合。如增加任何一个具有 5 个子库的变量，则“需要在规则库中定义的状况”的数量就会上升为 125。

然而，依据于生产过程中各因素交互作用的关联程度大小，有时“对所有变量的各种组合都进行定义”显得并没有什么意义，事实上并非所有的变量都需要结合在一起来统筹考虑，整套的逻辑集合通常可以被打散细分成更多的逻辑子集或仅需要考虑一些有可能发生的规则。

### 3) 解模糊判决

模糊控制器的输出是模糊量，它包含了控制量的各种信息，需要把这些模糊量转变成被控对象能够接受的精确的控制量。为了充分利用控制器输出模糊集的所有信息，可以采用加权平均判决方法，其中的加权系数选择隶属函数。则判决结果可表示为：

$$u(k) = \frac{\sum_n \mu(n) \times U(n)}{\sum_n \mu(n)} \quad (3.26)$$

上式中， $U(n)$  为第  $n$  条规则结论部分隶属函数的特征值（对三角形的隶属函数， $U(n)$  为隶属函数的中心值）， $\mu(n)$  是相对第  $n$  条规则输出控制量模糊子集的隶属度，将其作为加权系数。

由于磨矿系统的时变性、大滞后，基于偏差和偏差变化率的二维模糊控制器，不能适应磨矿系统控制的需求，因此我们选择了功率偏差、功率偏差变化率、磨机声响构成三维模糊控制器，对磨矿分级进行控制。

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} |e| \leq e_0 \text{ and } ec > ec_0 > 0 \text{ and } c > c_2, \Delta u = K_1 f_1(ec, c); \\ |e| \leq e_0 \text{ and } |ec| \leq ec_0 \text{ and } c < c_2, \Delta u = 0; \\ |e| \leq e_0 \text{ and } ec < -ec_0 < 0 \text{ and } c < c_1, \Delta u = K_2 f_1(ec, c); \\ e > e_0 \text{ and } c > c_2, \Delta u = K_3 f_2(e, ec); \end{array} \right. \quad (1) \\
 & \quad \quad \quad (2) \\
 & \quad \quad \quad (3) \\
 & \quad \quad \quad (4) \\
 GFC: & \left\{ \begin{array}{l} e_0 < e < e_1 \text{ and } ec < -ec_0 < 0 \text{ and } c < c_1, \begin{cases} \Delta u = K_4 f_2(e, ec) \\ \Delta D_{sp} = K_5 f_3(e, ec) \end{cases} \\ e_0 < e < e_1 \text{ and } |ec| \leq ec_0 \text{ and } c_1 < c < c_2, \Delta u = 0; \\ e > e_1 \text{ and } c < c_1, \begin{cases} \Delta u = K_6 f_4(e) \\ \Delta D_{sp} = K_7 f_5(e) \\ \Delta P_{sp} = K_8 f_6(e) \end{cases} \end{array} \right. \quad (5) \\
 & \quad \quad \quad (6) \\
 & \quad \quad \quad (7)
 \end{aligned}$$

其中,  $e$  为磨机额定功率  $J_0$  与磨机瞬时功率  $J$  之差:  $e = J_0 - J$ ,  $e_0$  为调节死区;  $c$  为磨机声响,  $ec$  为功率变化率  $ec = (J_{t-1} - J_t)/T$ ,  $T$  为计算周期,  $ec_1 > ec_0 > 0$ ;  $\Delta u$  为磨机处理量的增量,  $\Delta D_{sp}$  为泵池给矿浓度设定值增量,  $\Delta P_{sp}$  为给矿压力设定值增量;  $f_1(ec, c)$ ,  $f_2(e, ec)$ ,  $f_4(e)$  等为模糊控制器。  $K_1, K_2, K_3$  等为模糊控制器放大系数,  $K_6 < K_4 < K_2 < 0$ ,  $K_3 > K_1 > 0$ ,  $K_5 > K_7 > 0$ ,  $K_8 < 0$ 。

1) 由于磨机运行过程的不均运性, 磨机功率信号上下波动, 通过  $|e| \leq e_0$  设置调节死区; 同时磨机声响  $c$  较高, 磨机功率变化率  $ec > ec_0 > 0$  表明磨机以较低负荷工作, 应该变给矿方式, 增加给矿,  $\Delta u = K_1 f_1(ec, c)$ , 增加磨机负荷。

2) 磨机功率基本稳定, 同时磨机声响较低, 表明磨机以较高的负荷工作, 不改变磨机给矿,  $\Delta u = 0$ , 维持磨机稳定运行。

3) 磨机功率处在下降沿, 而磨机声响  $c$  较低,  $|e| \leq e_0$  and  $c < c_1$ , 表明此时磨机过负荷, 超过了磨机最大处理能力, 需要减矿,  $\Delta u = K_2 f_1(ec, c)$ , 逐步降低磨机负荷。

4) 磨机负荷较低, 并且磨机声响  $c$  较高, 表明磨机以较低负荷工作, 应该变给矿方式, 增加给矿,  $\Delta u = K_3 f_2(e, ec)$ , 增加磨机负荷。

5) 磨机负荷偏小, 磨机功率处在下降阶段  $ec < -ec_0 < 0$ , 且磨机声响  $c$  较低, 则磨机属于较重过负荷, 需要继续降低矿量,  $\Delta u = K_4 f_2(ec, c)$ , 并且适当增加旋流器给矿浓度, 减低旋流器返砂量,  $\Delta D_{sp} = K_5 f_3(ec, c)$ 。

6) 尽管磨机负荷较低, 但是磨机负荷基本平稳, 同时磨机声音在适合的范围, 不改变磨机给矿,  $\Delta u = 0$ , 维持磨机稳定运行, 此时磨机负荷有可能上升。

7) 磨机负荷低于限定值,  $e < e_1$ , 同时磨机声响  $c$  较低,  $c < c_1$ , 则说明磨机过负荷严重, 需要大幅降低矿量, 并增加旋流器给矿浓度,  $\Delta u = K_6 f_4(e)$ , 降低旋流器返砂量,  $\Delta D_{sp} = K_7 f_5(e)$ , 降低泵给矿压力设定值,  $\Delta P_{sp} = K_8 f_6(e)$ 。

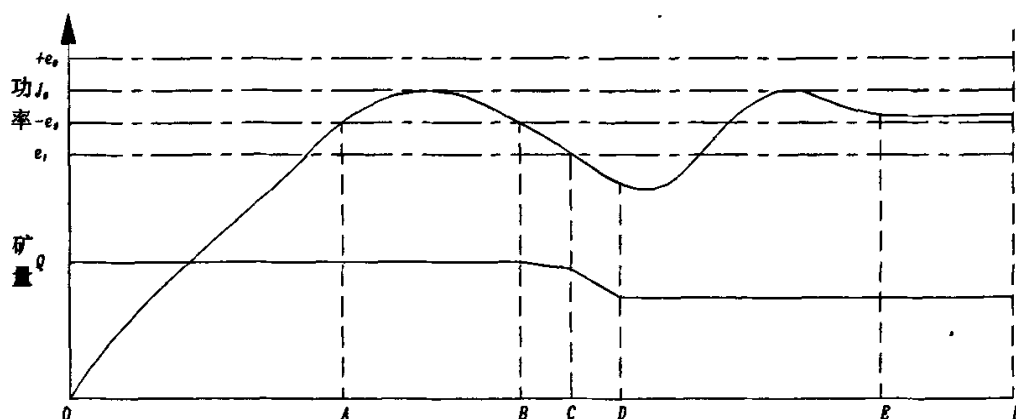


图 3.21 球磨机涨肚期间矿量调节图

Fig.3.21 Ore feeding control in swell of ball mill

BC 段为轻度过负荷，逐步降低矿量，CD 段为重度过负荷，大幅降矿量。DE 段为振荡恢复期，建立新的稳定。

#### 3.4.2.5 现有控制方法的局限性

现有的磨矿过程控制方法能够在一定程度上稳定磨矿过程的操作：

1. 保证给矿量快速准确跟踪设定值变化，减少了因给矿不稳定对磨矿过程造成的扰动。
2. 控制磨机入口补加水量，实现了对磨矿浓度的设定值调节。
3. 调节旋流器泵池补加水量，控制旋流器溢流浓度、给矿浓度、压力稳定在设定点上，保证了旋流器分级的稳定。
4. 通过对球磨机负荷的有效控制，在保证磨机稳定运行的条件下，保证磨机负荷处于优化状态，达到增加处理量的目的。

但是其中也存在一定不足：

1. 由于受现场技术条件限制，有几个关键参数不能直接测量得出，如系统循环负荷，将对系统造成较大的影响，使本系统实现不了优化的最高目标，针对磨矿处理量、钢耗、产品粒度分布的全面优化。

2. 尽管本系统较多使用了前馈、串级、模糊等控制，但由于磨矿系统的复杂性和耦合性，致使系统较长时间得不到稳定。

要解决上述问题，必须在以下方面作进一步研究：

1. 增加旋流器沉砂流量测量装置。
2. 改进优化算法和多变量控制算法。

### 3.5 磨矿过程控制参数优化

磨矿自动化控制系统主要由给矿量控制子系统、给矿水量控制子系统、溢流浓度、排矿水控制子系统和泵池液位控制子系统构成，控制参数较多，系统间干扰、耦合因素复杂，只靠人工经验达到理想的控制效果是非常困难的，必须基于先进优化算法对各控制子系统进行局部优化及控制系统全局优化才能够保证控制效果，为此我们设计了基于运筹学中的单纯型算法的自动控制系统优化整定思想。

#### 3.5.1 基于优化算法的控制器参数整定

控制器参数的整定，工程上主要借助于积累的调试经验。但是当控制回路较多时，需要整定的参数成倍增加，导致过程法整定十分麻烦、复杂，甚至不可能实现。

另一方面，当过程对象特性或参数随着时间、工况改变时，原整定好的控制器参数会由于不适应变化了的过程特性和参数，导致使控制性能变差。为使控制器参数整定方便快捷，可以利用计算机技术，结合相关优化算法实现这一目标。

性能指标选择：

为了直接、客观的达到控制器寻优参数的目的，所选的性能指标应当既反映动态性能，又包含稳态特性，选择积分指标才能满足此条件。由于绝对误差积分指标相对容易处理，尤其是误差绝对值乘以时间的积分在计算机中数据容易处理，因此可以选用如下指标：

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.27)$$

将其离散化得到

$$J = \sum_{j=0}^k |e(jT)| jT^2 \quad (3.28)$$

采样时间固定时，上式简化为

$$J = \sum_{j=0}^k |e(jT)| j \quad (3.29)$$

对于一般的控制系统，J 经常是极值型函数。最优化理论表明：具有极值特性的函数，在经过有限步搜索以后，一定能够找到极值点。

而为了求得 $|e(jT)|$ ，从控制系统仿真方式上来看，可以将使用输出值曲线和给定值（一般是一条水平直线）之间阴影部分的面积作为考察的性能指标是合理的；但从实现

的角度来讲，计算阴影部分的面积并不容易，所以改为使用每一个时刻的输出值和给定值之间的绝对误差的和来充当性能指标，如图 3.22 所示。

另外，除了考虑以任一时刻的输出值和给定值之间的绝对误差之外，还要考虑到控制器的输出，这个值关系到执行器的执行效果，执行器如果不断大幅度振荡显然是不可取的。在具体实现的时候，与前面方法类似，可以将每一时刻执行器的位置差（其实就是  $PID$  输出差值）也加入到性能指标里面，达到控制系统性能与执行机构输出性能均最优。

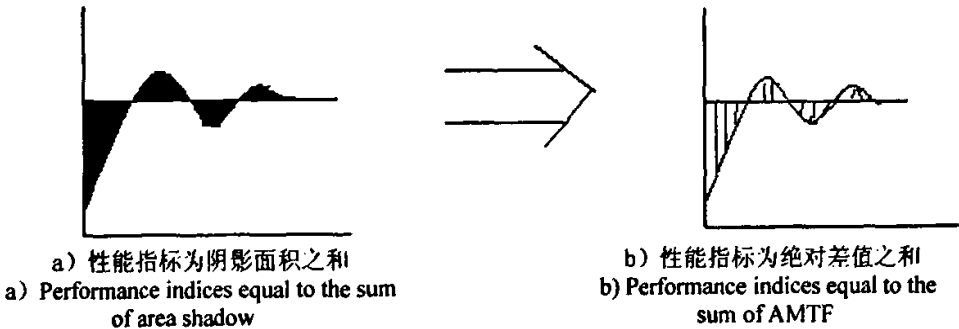


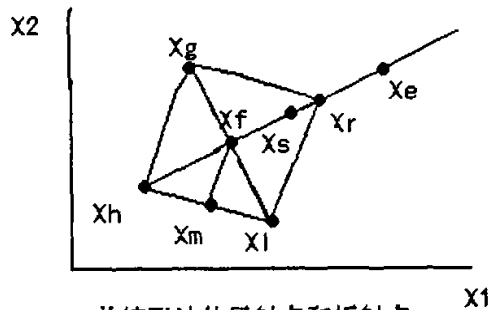
图 3.22 性能指标选择示意图  
Fig.3.22 performance indices of choice

3.5.2 单纯形优化算法

多参数寻优算法很多，有黄金分割法、插值法、坐标轮换法、步长加速法、方向加速法、单纯形寻优方法和随机搜索法等。这其中单纯形寻优方法有控制参数收敛快，计算工作量小，简单实用的特点，因此建议使用单纯形寻优方法。

所谓单纯形就是在一定的空间中的最简单的图形。 $N$  维的单纯形，就是  $N+1$  个顶点组成的图形。如二维空间，单纯性就是三角形。设二元函数  $J(X1,X2)$  构成二维空间，有不在一条直线上的三个点  $Xh, Xg, Xl$  构成另外一个单纯形。由三个顶点计算出相应的函数值  $Jh, Jg, Jl$ 。若  $Jh>Jg>Jl$ ，对于求极小值问题来说，当然是  $Jh$  最差， $Jg$  次之， $Jl$  最好。

函数变化的趋势是：一般情况下，好点在差点对称位置的可能性比较大，因此将  $XgXl$  的中点  $Xf$  与  $Xh$  连接，并在  $XhXf$  的射线方向上取  $Xr$ ，使  $XhXf=XfXr$ 。如图 3.23 所示。



单纯形法的反射点和折射点

图 3.23 单纯形算法原理图

Fig.3.23 Theory of simple algorithm

以  $X_r$  作为计算点，计算  $X_r$  的函数  $J_r$  步骤：

1) 当  $J_r \geq J_g$  时，说明步长太大，以致  $X_r$  并不比  $X_h$  好多少，因此需要压缩步长，可在  $X_r$  与  $X_h$  间另选新点  $X_s$ 。

2) 当  $J_r < J_g$  时，说明情况好转，而且可以加大步长，可以在  $X_h X_r$  的延长线上取到新点  $X_e$ 。再计算  $J_e$ ，若  $J_e < J_r$ ，取  $X_e$  为新点  $X_s$ ；否则，选  $X_r$  作为新点  $X_s$ 。

3) 通过 1)、2) 计算后可以得到新点  $X_s$ 。若  $J_s < J_g$ ，说明情况确有改善，可舍弃原来的  $X_h$  点，而以  $X_g, X_l, X_s$  三点构成新的单纯形 ( $X_g X_l X_s$ )，称作单纯形扩张，然后重复上述步骤。若  $J_s \geq J_g$ ，说明  $X_s$  代替  $X_h$  改善并不大，可把原来的单纯形 ( $X_g X_l X_m$ ) 按照一定的比例缩小，例如边长都缩小到原来的一半，构成新的单纯形 ( $X_g X_l X_m$ )，称为单纯形收缩。同样重复以上步骤，直到满足给定的收敛条件为止。根据以上的单纯形算法原理及实现步骤，就可以通过软件编程实现其具体应用。

### 3.5.3 优化控制方法主要内容

- 1.各种控制子系统控制器参数最优化整定。
- 2.子系统被控对象的模型辨识
- 3.模型降阶和转换：
- 4.时变参数及大时延系统的优化控制策略

这个优化控制方法针对不确定性被控对象特性（时变参数系统）的控制器参数进行优化整定：在未知被控对象特性情况下，我们的整定方法是基于系统的时间尺度，即按照系统的采样周期确定积分时间，按照黄金分割法进行系统优化，达到满意的品质指标。

利用单纯型优化算法与 Powell 优化法相结合，不仅对控制系统稳定性品质进行优化，而且对执行机构的动作频率与幅度也进行相应优化，达到系统的全局优化的目标。



## 第四章 磨矿集散控制系统实现

### 4.1 总体方案

#### 4.1.1 集散系统一般结构

集散控制系统（DCS）是一种以分散数据采集、控制和集中监视管理为主要特征的计算机控制系统。系统一般由四部分组成：系统网络、现场控制站、操作员站和工程师站。

系统网络是 DCS 的骨架，它是 DCS 的基础和核心。对于整个系统实时性、可靠性和可扩充性起着决定性的作用。对于一个 DCS 系统首先要满足系统的实时性要求，即在确定的时间限度内完成信息的传递；另外，系统网络必须可靠，在任何情况下，系统网络不能中断，大多数 DCS 系统均采用双总线型、环型或双重星型来增强系统冗余、提高可靠性；而且，网络一般都具有开放性，使系统可按实际需求进行拓展。

现场 I/O 控制站是一种完成对过程现场 I/O 处理并实现直接数字控制功能的网络节点。其主要功能有三个：一是对现场的过程量进行数字化，形成与现场一致的过程量的实时映像。二是将实时数据通过网络送到操作员站、工程师站及其它 I/O 控制站，以便实现全系统范围内的监督和控制。三是在本站实现局部自动控制、顺序控制和闭环控制。

操作员站是处理一切与运行操作有关的人机界面功能的网络节点，同时，该节点具有历史数据处理能力。

工程师站是对 DCS 进行离散的配置、组态工作和在线的系统监督、控制维护的网络节点。主要提供系统组态和对系统的监控功能。

#### 4.1.2 信息技术在集散系统中的应用

##### 4.1.2.1 以太网技术

计算机和网络技术的发展，引发了控制领域深刻的技术变革。控制系统结构向网络化、开放性方向发展将是控制系统技术发展的主要潮流。以太网作为目前应用最广泛的局域网技术，在工业自动化和过程控制领域得到了越来越多的应用。同时，随着 Internet 遍及世界的每一个角落，人们已经进入了一个崭新的现代通信技术的时代。依靠以太网和 Internet 技术实现信息共享，对企业实施管控一体化必将产生深远的影响。

一般来讲，控制系统网络可分为 3 层：信息层、控制层和设备层（传感/执行层）。

传统的控制系统在信息层大都采用以太网，而在控制层和设备层一般采用不同的现场总线或其他专用网络。目前，以太网已经渗透到了控制层和设备层，几乎所有的 PLC 和远程 I/O 供应商都能提供支持 TCP/IP 的以太网接口的产品。以太网之所以给自动化市场带来风暴式的革命，主要有 3 个原因：<sup>[32]</sup>

### 1) 低成本的刺激和速度的提高。

以太网适配器的价格大幅度下跌以及各种产品和标准对以太网的支持是其成功的重要因素。现在 100Mb/s 的网卡售价仅为几十元左右，而且很多 PC 机已经集成有以太网接口。而且以太网的速度提高到了 100Mb/s。1998 年，千兆位以太网标准的发布将其速度提高到最初速度的 100 倍。现代以太网标准，比如交换、全双工传输、实时数据的优先级、带宽由 10Mb/s 到 100Mb/s 乃至 1000Mb/s 的升级，使以太网成为工业自动化网络中首选的传输方式。

### 2) 现代企业对实时生产信息有越来越多的要求。

当前，人类已经进入了以互联网为基础的知识经济时代、企业活动也已扩展到全球范围，生产系统中最主要的三大要素：物质、能源和信息之间的关系发生了巨大变化，信息已成为最活跃的主导性因素。为了提高生产的效率和效益，人们迫切需要了解生产过程的实时数据，将实时生产信息与企业的 ERP 系统结合起来。而企业的信息层大多数采用了以太网的解决方案，当控制层和设备层都采用以太网时，则可实现各层之间信息的无缝连接，而且整个网络系统将是透明的。

### 3) 以太网开放性和兼容性。

现场总线从 1984 年开始提出到现在，共产生了 60 多个数字通信网络标准，有 5000 多种支持这些网络的产品。这些标准分别为不同的公司所拥有，并与他们的产品捆绑在一起，相互之间兼容性很差。这给那些使用多家产品的大型系统的集成和维护带来了很大的麻烦，因此迫切需要建立一个统一、开放的通信标准。工业以太网因为采用由 IEEE802.3 所定义的数据传输协议，它是一个开放的标准，从而为 PLC 和 DCS 厂家广泛接受。与现场总线相比，以太网还具有向下兼容性。快速以太网是在双绞线连接的传统以太网标准(10Base-T)的基础上发展起来的，但它的传输速度从 10Mb/s 提升到了 100Mb/s。在大多数场合，它还可以使用现有的布线。此外，以太网还允许逐步采用新技术。也就是说，没必要一下子改变整个网络，可以一步步将整个网络升级。

AB 提供了具有内置以太网通信能力的 PLC-5E 系列处理器和 SLC5/05 处理器，并提供了以太网接口模块(1785-ENET)，使 PLC-5 其它系列的处理器通过即插方式也能够与以太网相连。这些以太网可编程序控制器模块可以无需特殊硬件而连接到以太网上。

并且,用户可以在装有以太网网卡的个人计算机上借助 RSLinx 软件,通过使用罗克韦尔 RSLogix5、RSLogix500 系列编程软件在线修改各处理器的数据表文件和程序文件。同时,使用标准 PLC-5 处理器的信息传送指令,可以在以太网处理器之间实现点对点通信。因此,通过使用 RSView、RSLinx 以及其它罗克韦尔软件,具有以太网网卡的工作站能够通过以太网网络来监控采集数据。

#### 4.1.2.2 WEB 技术

随着以太网技术的飞速发展,基于 TCP/IP 和 Browser/Server 架构的网络分布式监控技术正日趋成熟,远程监控不再需要通过拨号连接而完全可以通过 Web 方式来实现。Web 技术可跨越诸多设备和系统在硬件和软件产品间做到即连即用,只须用网上浏览器经由以太网和 TCP/IP 便可访问各种信息。与传统的 Client/Server 结构的监控系统相比,B/S 模式使界面软件更加图像化,并具有互动性,数据信息的存取和处理都由 Web 服务器完成,瘦客户机只须通过浏览器提出信息要求并接受、显示信息。瘦客户机可任意设置,只要能连上 Internet 并有权访问 Web 服务器,便可查阅现场有关生产信息,给维护和管理工作带来很大的方便。

### 4.1.3 磨矿分级集散信息集成方案

#### 4.1.3.1 网络结构

磨矿系统信息集成网络结构可化分为三个层次,即:现场控制层、过程监控层和上位管理层。现场控制层主要由生产设备、仪器仪表、控制站、I/O 子站组成,实现对生产过程的测控,控制站作为数据服务器,为数据存贮、统计、报表和整合提供数据支持。过程监控层由操作站组成。操作站对生产现场进行监控。管理站通过管理软件实现对上位机系统的管理。以过程监控层数据服务器为基础,建立 Web 服务器,在生产管理层实现与 Internet 相连,真正达到瘦客户服务,仅用通用的浏览器就可查看实际生产过程。

#### 4.1.3.2 通讯组件技术——OPC 技术

以太网作为一项比较成熟的技术正向自动化领域逐步渗透,从企业决策层、生产管理调度层向现场控制层延伸。

以太网由于采取冲突竞争的传输方式,具有传输不确定性的特点。但随着带宽的增加、冗余措施的加强和自诊断程序的完善,以太网完全可以满足中小型控制系统实时性的要求。同时以太网具有相关网络产品价格低廉,开放性好、技术成熟等优点。目前,Profibus、DeviceNET、ControlNET 等都使用以太网传送它们的报文,制定现场装置与以太网通信的标准,使以太网进入工业自动化的现场级。当现场智能设备将现场信息通

过工业以太网传至监控计算机后,存在着信息共享与交互的问题。又由于软件的重复开发,软件不能够重用,资源不能共享,造成大量人力与物力资源的浪费。现在我们有了一个标准——OPC,这个标准为过程控制和工厂自动化提供真正的即插即用软件技术。有了这样一个标准,使得控制层与接口层、数据层、应用层之间完全无缝地、真正开放和方便地进行企业级的通信成为可能。

OPC 定义了一个开放的接口,在这个接口上,基于 PC 的软件组件能交换数据。它是基于 Windows 的 OLE——对象连接和嵌入 (Object Linking and Embedding)、COM——部件对象模型(Component Object Model)和 DCOM——分布式 COM (Distibuted COM) 技术。OLE/COM 是一种客户/服务器模式,具有语言无关性、代码重用性、易于集成性等优点。OPC 规范了接口函数,不管现场设备以何种形式存在,客户都以统一的方式去访问,从而保证软件对客户的透明性,使得用户完全从低层的开发中脱离出来。

Windows 程序的标准接口的引入,使得硬件制造商为其部件所开发的接口程序的数量减少到一个,只需开发一个针对 OPC 服务器的接口程序,同样,软件开发商也只需要开发唯一的通讯接口程序——OPC 客户机接口<sup>[38-43]</sup>。

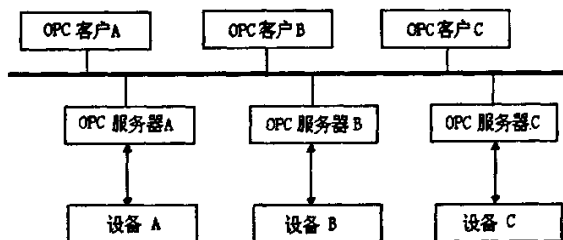


图 4.1 OPC 软件结构

Fig.4.1 Software structure of OPC

采用 OPC 规范,可使过程控制的硬件、软件配置时,只要硬件制造商采用符合 OPC 规范的驱动程序(即服务器),就能使所有支持 OPC 标准的客户软件所用。彻底克服了不同厂商的工控微机不能与商业软件相互通信,必需有一个专门的驱动程序和具体的应用软件相配,使传统的复杂的配置变为简单。如图 4.1 所示。

#### 1. OPC (OLE for Process Control) 技术规范与意义<sup>[33-34]</sup>:

OPC 技术是以 Microsoft 的 OLE/DCOM 技术为基础建立的一项技术规范与标准,它采用客户/服务器 (Client/Server) 模型,定义了一组 COM 对象及其双接口。

OPC 对象主要包括服务器 (Server)、组 (Group) 和项 (Item)。OPC 服务器对象除了维护自身信息外,还作为组对象的容器,可动态地创建或释放组对象;而组对象相对于项而言也是一个包容器,它提供一套管理项的机制;OPC 项则表示了与 OPC 服务器中数据的连接,包括值 (Value)、品质 (Quality)、时间戳 (Time Stamp) 3 个基本属

性。

OPC 对象双接口由 OPC 自动化接口和定制接口组成。在 C/S 工作模式下，客户程序通过接口与 OPC 服务器连接，调用 OPC 对象的方法。一般来说自动化接口能为高级语言客户程序提供极大的便利，但数据传输效率较低，而定制接口则为用 C/C++ 语言编写的客户程序带来灵活高效的调用手段。

OPC 技术建立了一组符合工业控制要求的接口规范，将现场信号按照统一的标准与 DCS、HMI 等软件无缝连接起来，同时将硬件和应用软件有效地分离开。只要硬件开发商提供带有 OPC 接口的服务器，任何支持 OPC 接口的客户程序均可采用统一的方式存取这些设备，无须重复开发驱动程序。这样大大提高了控制系统的互操作性和适应性。

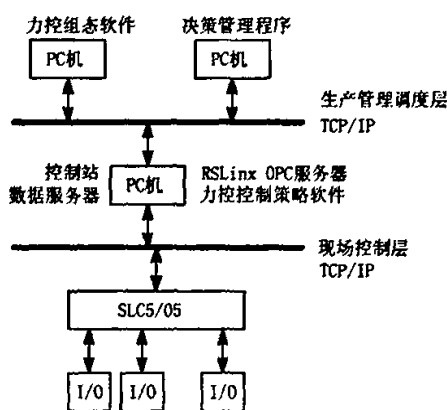


图 4.2 以太网控制系统总体结构

Fig.4.2 An overall structure of Industrial Ethernet Control System

## 2. OPC 数据存取服务器在以太网控制系统的层次结构

图 4.2 示意了以太网控制系统的总体层次结构。在现场控制层，以 SLC5/05PLC 系统作为现场智能节点，其外接模拟量输入输出、开关信号输入输出等 I/O 卡，主要作用是执行各种控制功能及进行数据采集，进行状态监测和报警，并将采集的数据上传；控制计算机则采用 PC 机，装有两块网卡，利用其中一块与 SLC5/05 通信，而通过另一块网卡与监视计算机组成局域网。控制计算机中运行 OPC 数据存取服务器程序，将现场智能节点传上来的数据通过 OPC 接口送到监控软件进行监控，并利用组态软件进行复杂的组态工作，将组态信息下载到 SLC5/05 上，调整其控制算法和参数。而其他管理调度层的计算机 OPC 客户程序则通过 DCOM 的方式访问 OPC 服务器程序，进行信息交互。

由此可见，OPC 服务器在以太网控制系统中将企业现场控制层与生产管理调度层有机地连接起来，组成一个开放性好、可靠性高的分布式控制系统，发挥了重要的桥梁作用。

### 3. OPC 数据存取服务器的设计与实现

OPC 数据存取服务器可按图 4.3 的系统结构设计。它主要由服务器对象、组对象、项对象、数据存储区和 TCP/IP 通信接口组成。

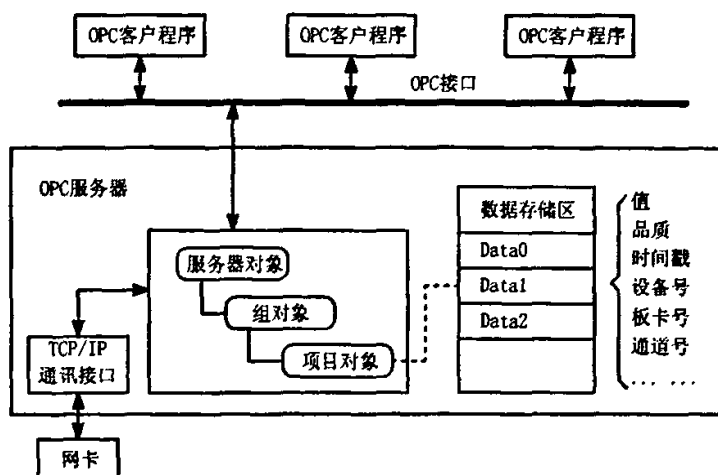


图 4.3 OPC 数据存取服务器结构

Fig.4.3 Structure of OPC Data Access Server

由于 OPC 数据存取服务器既要通过网卡与现场设备进行通信，又要通过 OPC 接口与客户程序进行交互，所以采用多线程模型以保证数据存取的效率。为避免不同线程同时对数据区中的数据进行操作，还需要考虑对临界区的互斥控制。OPC 技术是以微软的 COM 技术为基础，同时需要直接与底层硬件打交道，所以采用 VC 实现比较灵活方便。OPC 数据存取服务器主要分为 OPC 通用接口、硬件接口以及数据存储区的实现，在本系统中硬件接口的实现主要是实现以太网通信接口。

### 4. OPC 通用接口的实现

首先定义 OPC 数据存取服务器的名称 (ProgID) 和类标识 (CLSID)，实现 OPC 数据存取服务器类厂对象。然后由 OPC 规范中定义的 OPCServer 类、OPCGroup 类和 OPCItem 类，分别派生出装置(Device)、板卡(Board)、通道(Channel)三个新类。

#### 4.1.4 磨矿集散系统总体方案

依照 DCS 的基本结构、控制思想精髓，我们设计磨矿集散控制系统。磨矿自动化结构按功能可化分为三个层次，即：现场控制层、上位监控层和上位管理层。如图 4.4 所示。

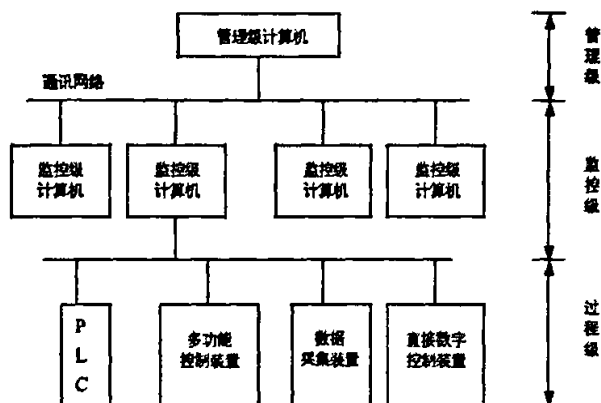


图 4.4 三层构架结构图

Fig.4.4 Structure of architecture in Three-layer

现场控制层是整个自动化系统的控制核心，通过对现场设备及仪表的监控，主要实现磨矿系统给矿自动控制、磨机磨矿粒度及浓度的自动控制。现场控制层运用先进的自动化技术，采用基于可编程序控制器（PLC）的集散控制系统方案，确保系统的高可靠性。

上位监控层采用先进的计算机网络技术，主要实现磨矿系统所有现场设备运行状态检测、工艺参数调整及报表查询功能。

上位管理层主要是管理人员可以通过 Web 方式浏览生产过程画面，根据当前的生产画面和设备运行情况，便于指导生产、合理调度、加强管理。

## 4.2 过程控制级

### 4.2.1 过程控制级总体实现方案

由前面几章分析可见，磨矿过程自控系统有以下特点：

1. 数据量大且分散。根据工厂实际布局，需设计多个站点。
2. 控制算法复杂。为达到良好的控制效果，需采用有效的控制结构（如串级控制结构）和控制策略（如常规控制+智能控制）。
3. 系统设备复杂，不仅有大量开关控制、检测量，系统还含有很多模拟控制、检测

量。

基于上述原因,考虑集散控制系统特点,拟采用 TCP/IP+分布式 I/O 子站 (PLC) 实现底层控制、检测功能。由于前期选矿自动化前期投入较大,本次改造为尽量降低停产时间,保护投资,尽可能利用前期投入设备,因此对于前期投入的 AB 1746 I/O 进行了保留,将 SLC5/04 PLC 更换为具备以太网接口的 SLC5/05。

因此本系统就构成了基于 PC-based 的 TCP/IP 子站系统。

#### 4.2.2 罗克韦尔 SLC500 I/O 特点

SLC500 系列是一个不断充实的小型可编程控制器系列。该系列有两种硬件结构:固定式控制器与模块式控制器。所有控制器都可挂在 DH-485 链路上。

固定式 SLC500 控制器将电源、输入与输出以及处理器集中在一个单元,并提供一个 2 槽的扩展框架以增加其灵活性。最大可配置 104 个 I/O 点。

模块式控制器分 SLC5/01、5/02、5/03、5/04 及 5/05,是安装于 1746 机架上的单槽处理器。它们具有更大的灵活性,具有更强的处理能力以及 I/O 容量,这使得我们能够按应用的需要来设计和建立控制系统。除组态灵活之外,可编程控制器之间可以通过内置的网口进行通信,以进行编程和监控。SLC5/03 以上的处理器中还有一个 RS-232 通信口,它支持终端设备之间的异步串行数据通信。此外,不同的处理器具有相应的内置网络接口,如 SLC5/04 提供 DH+网口,使得处理器能够无须额外的网络接口硬件而直接与 DH+网上的 PLC-5 处理器进行通信。特别值得一提的是 SLC5/05 处理器,可通过其内置的支持 TCP/IP 通信协议的 10Base-T 以太网接口,将控制系统和监视及信息管理系统集成在一起<sup>[36-37]</sup>。

#### 4.2.3 控制站软件

目前有关基于 PC-based 的成熟的控制功能软件模块还很少,一般将控制功能模块称为“软 PLC 或 Soft PLC”,也有的称“软逻辑”,但这些叫法都不能准确地反映监控组态软件基于 PC-based 的控制功能模块的含义。在此,我们引入“策略 (Strategy)”的概念来描述组态软件的控制功能,策略相当于计算机语言中的函数,是在编译后可以解释执行的功能体。力控的控制策略生成器 Strategy Builder 是一个既可以运行在 Windows 98/2000/NT 环境,它采用功能框图的方式为编程者提供编程界面,并具备与实时数据库、图形界面系统通讯的功能。其工作桌面如图所示。

我们引入的三维力控的控制策略生成器以过程控制算法为主,是国内第一个商品化



的控制策略生成器,能够使不同厂家、不同类型的设备同时参与一个对象的计算与控制。另外可以弥补一些设备控制能力和容量的不足

与传统的 DCS、PLC 控制系统相比,控制策略生成器 (Strategy Builder) 充分体现了控制功能丰富、系统组建灵活、扩展方便的特点。在控制策略生成器中有变量、数学运算、逻辑功能、程序控制和控制算法等类别的近 70 个功能块,运用这些功能块可搭建出各种功能强大的控制策略。

#### 4.2.4 通讯软件 RSLinx

Rockwell 公司的 RSLinx 软件是在 Microsoft Win98、Win2000 以及 WinXP 操作系统下建立工厂所有通信方案的工具。RSLinx 提供 OPC/DDE 并可利用 C/C++ 以其他方式进行数据联接,与各种 Rockwell Software 及 A-B 应用软件和其他第三 HMI 软件,如 RSLogix500、RSLogix5000、RSView32、RSViewSE、组态王、力控等之间建立通信联系<sup>[44]</sup>。

利用 RSLinx 可以把实时采集的工厂数据(通常由网络采集而来)在 windows 的支持软件中进行分析、存储、显示。

RSLinx 可同时与上述软件组合运行。其主要功能如下:

1. 兼容由 Rockwell software、AB 及第三方软件产品的 OPC 通讯方式或由用户利用 RSLinx 的开放 C API 或 Advance DDE 开发的软件产品。
2. 支持多个通讯设备的并列运行。
3. 直观的用户界面。
4. 利用复制/粘贴功能易于建立 OPC 或 DDE 热联接。
5. 利用网络 OPC 或 DDE 与其它计算机实现数据共享。
6. 优化 DDE 读操作实现对系统资源的有效利用,减少网络阻塞。
7. 块读写获取了最快通讯速度,减少了网络负荷。
8. 图形功能以及易于理解的诊断功能使系统观察更直观。

RsLinx 软件 4 中版本:分别是 lite, single node, Professional, Gateway, 其实它们全一样,安装不同的授权就变成了不同的版本。

在本系统中,采用的 RsLinx Gateway 是功能最完全的版本,它支持 Remote OPC 和网关功能,就是说你可以把一台安装有 RSLINX 的计算机当作一个网关从而访问到你的 PLC 的必备软件。

## 4.3 过程监控级

过程监控级是焦家金矿磨矿过程集散控制系统的重要组成部分，它与过程控制级有机结合，共同实现对磨矿过程的监控。

过程监控级软件通过现场总线接收过程控制级传递的生产过程状态和控制信息后，以图形、图像、动画等方式显示给用户，使用户可以实时监视生产过程和设备各种参数的状态(如报警、正常或报警恢复)，以达到监视的目的；同时重要的生产和运行数据将保存到数据库中，用于将来的事故追忆和趋势分析，或其他系统（如 MIS）结合形成功能更为强大的管控一体化系统；此外，过程监控级软件还可以接受操作人员的指示，将控制信息发送到过程控制级，以达到控制的目的。

由此可见，过程监控级软件是自动化系统的数据采集处理中心、数据存储中心、远程监控中心和数据转发中心。处于运行状态的过程监控级软件与过程控制级共同构成快速响应/控制中心。

过程监控级软件具有强大的实时多任务处理能力。例如，进行数据采集和交换，数据存储和检索，实时报警显示和报表查询，实时通信等多个任务可在同一计算机上同时进行。

过程监控级软件具有高可靠性。甚至可以利用冗余技术构成的双机互备系统，在硬件出现故障时会自动进行故障切换，可提高系统的可靠性，并能保证存储数据的一致性和有效性。

过程监控级软件主要实现的功能有：流程画面监控、参数调整、历史曲线查询、报表查询、实时报警、用户登录、在线帮助、权限分配和系统维护。

### 4.3.1 过程监控级硬件结构及配置

焦家金矿磨矿过程集散控制系统过程监控级由一台操作站和一台控制站组成。系统配置如下：

软件配置：

操作系统：操作站安装 Windows2000 Professional；服务器安装 Windows2000 Server

数据库系统：Microsoft SQL Server2000

硬件配置：控制站采用 HP 工作站 VAL430, P4 3.0GHZ CPU, 1024MB 内存，操作站采用 HP 工作站 TC2110, P4 3.0GHZ CPU, 1024MB 内存

### 4.3.2 监控站软件

计算机控制系统通常可以分为设备层、控制层、监控层、管理层四个层次结构，构成了一个分布式的工业网络控制系统。其中设备层负责将物理信号转换成数字或标准的模拟信号，控制层完成对现场工艺过程的实时监测与控制，监控层通过对多个控制设备的集中管理，来完成监控生产运行过程的目的，管理层实现对生产数据进行管理、统计和查询。监控组态软件一般是位于监控层的专用软件，负责对下集中管理控制层，向上连接管理层，是企业生产信息化的重要组成部分。

力控监控组态软件是对现场生产数据进行采集与过程控制的专用软件，最大的特点是能以灵活多样的“组态方式”而不是编程方式来进行系统集成，它提供了良好的用户开发界面和简捷的工程实现方法，只要将其预设置的各种软件模块进行简单的“组态”，便可以非常容易地实现和完成监控层的各项功能，缩短了自动化工程师的系统集成的时间，大大的提高了集成效率。

力控监控组态软件是在自动控制系统监控层一级的软件平台，它能同时和国内外各种工业控制厂家的设备进行网络通讯，它可以与高可靠的工控计算机和网络系统结合，便可以达到集中管理和监控的目的，同时还可以方便的向控制层和管理层提供软、硬件的全部接口，来实现与“第三方”的软、硬件系统来进行集成。

力控是运行在 Windows98/NT/2000/XP 操作系统上的一种监控组态软件。使用力控用户可以方便、快速地构造不同需求的数据采集与监控系统。

力控软件包括：工程管理器、人机界面 VIEW、实时数据库 DB、I/O 驱动程序、控制策略生成器以及各种网络服务组件等。

1. 力控软件由以下几个主要部分组成：

#### 1) 工程管理器 (Project Manager)

工程管理器用于创建工程、工程管理等用于创建、删除、备份、恢复、选择当前工程等。

#### 2) 开发系统 (Draw)

开发系统是一个集成环境，可以创建工程画面，配置各种系统参数，启动力控其它程序组件等。

#### 3) 界面运行系统 (View)

界面运行系统用来运行由开发系统 Draw 创建的画面，脚本、动画连接等工程。

#### 4) 实时数据库 (DB)

实时数据库是力控软件系统的数据处理核心，构建分布式应用系统的基础。它负责

实时数据处理、历史数据存储、统计数据处理、报警处理、数据服务请求处理等。

#### 5) I/O 驱动程序 (I/O SERVER)

I/O 驱动程序负责力控与 I/O 设备的通信。它将设备寄存器中的数据读出后, 传送到力控的数据库, 然后在界面运行系统的画面上动态显示。

#### 6) 网络通信程序 (NetClient/NetServer)

网络通信程序采用 TCP/IP 通信协议, 可利用 Intranet/Internet 实现不同网络结点上力控之间的数据通信。

#### 7) 通信程序 (PortServer)

通信程序支持串口、电台、拨号、移动网络通信。通过力控在两台计算机之间, 使用 RS232C 接口, 可实现一对一的通信; 如果使用 RS485 总线, 还可实现一对多台计算机的通信, 同时也可以通过电台、MODEM、移动网络的方式进行通信。

#### 8) Web 服务器程序 (Web Server)

Web 服务器程序可为处在世界各地的远程用户实现在台式机或便携机上用标准浏览器实时监控现场生产过程。

#### 9) 控制策略生成器 (StrategyBuilder)

控制策略生成器是面向控制的新一代软件逻辑自动化控制软件, 采用符合 IEC1131-3 标准的图形化编程方式, 提供包括: 变量、数学运算、逻辑功能、程序控制、常规功能、控制回路、数字点处理等在内的十几类基本运算块, 内置常规 PID、比值控制、开关控制、斜坡控制等丰富的控制算法。同时提供开放的算法接口, 可以嵌入用户自己的控制程序。控制策略生成器与力控的其它程序组件可以无缝连接。

### 2. 监控软件具备以下功能模块:

#### 1) 工艺流程图

工艺流程图是指根据磨矿过程的工艺流程, 在上位监控软件中以多种形式 (如图形、动画、声音等) 动态模拟生产和设备运行实际情况的监控画面。工艺流程图包括: 总工艺流程画面 (显示浮选车间所有系列磨矿设备运行状态、主要工艺参数), 各系列流程画面 (各系列磨矿设备运行状态、工艺参数、状态信号、报警)。见图 4.5 所示。

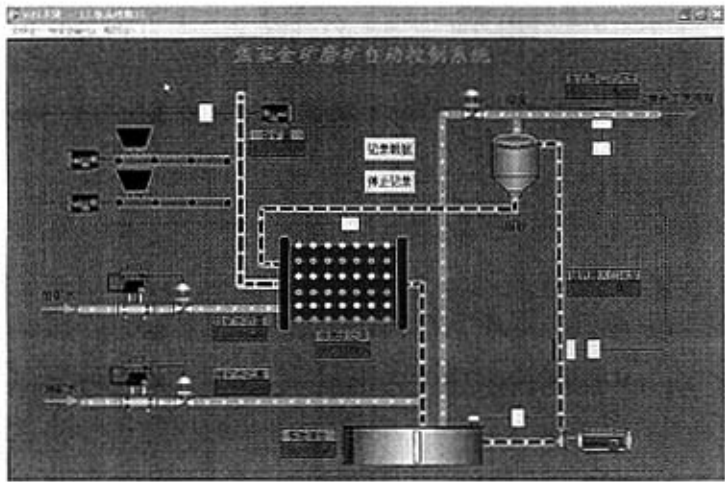


图 4.5 磨矿分级工艺流程图  
Fig.4.5 Flowsheet of grinding classification

2) 实时数据

实时显示所有过程控制数据包含所有模拟量（如电流、矿量、水量、粒度、浓度、温度、压力、阀开度等）及重要开关量（如设备状态信号等）。

3) 历史曲线

借助于曲线图用户可以很方便直观观察历史数据的变化趋势和数据间的影响关系，有助于工艺参数的优化和设备的合理调度。

历史曲线具有前后翻页、时间轴长度可变、上、下限显示功能。如图 4.6 所示。

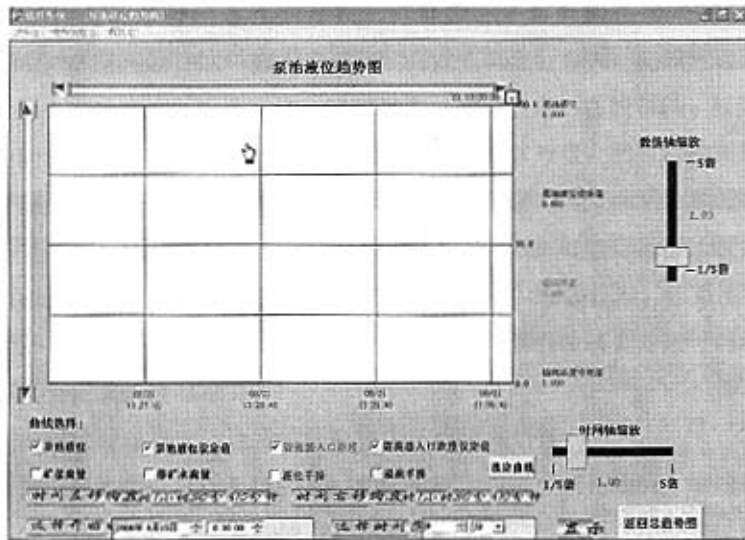


图 4.6 历史曲线图  
Fig.4.6 Historical curve

#### 4) 参数设置

上位监控层可对现场控制层 PLC 的控制参数、工艺参数进行在线设置。

#### 5) 报表查询

包括主要设备运行情况的报表。这些报表可满足用户对设备运行状况评价,亦可为确定设备的安全、经济运行提供定量依据。

包括统计量日报表、月报表和年报表。

在统计量日报表中分别以图表、数据的形式显示每小时统计量,并列出每日的统计值。同样,在月报表、年报表中分别以图表、数据的形式显示每日、每月统计量,并列出每月、每年的统计值。

将统计量的日统计数据写入 SQL Server 数据库的基本表中,然后创建对应于用矿量日报表、月报表和年报表的视图,通过 ODBC 接口读取相应的视图访问数据库。

#### 6) 报警查询

对现场设备的各种异常状态提供各种形式(如声音、颜色)的报警查询方式,方便用户进行紧急故障处理,保证安全高效生产。

在报警画面上显示到当前时刻为止已发生的所有报警数目,显示已确认和未确认的报警数量。

#### 7) 用户登录

提供用户登录和注销操作,以防止非法操作,保证系统安全。们对每个用户都设有访问权限,用户登录后才能获取相应的访问权限,执行相应的操作。

#### 8) 系统帮助

提供上位监控层软件使用说明,常见故障与排除方法,方便用户有效的使用本系统。

### 4.4 生产管理级

将 Web 技术应用于 DCS,促成了集散控制系统与 Internet 的集成,从而使 DCS 变得更加开放。用户可以在浏览器上进行查询数据和修改参数等操作,简化了客户端要求,大大突出了 DCS 的交互性和实时性。

磨矿过程集散控制系统生产管理级硬件环境:用过程监控级服务器同时作为 Web 服务器,进行网页发布。

运用先进的 Web 技术,把过程控制数据和实时的工艺生产画面发布到网上,实现了实时控制系统和企业 MIS 系统的无缝连结,管理者及相关人员可通过 Internet,异地查看和诊断一线生产状况,可达到远程诊断目的。

上层管理者根据当前的生产画面和设备运行情况,便于指导生产、合理调度、加强管理。

## 第五章 总结

本论文从磨矿过程优化控制和信息集成两方面作出研究,目的是探索建立适合对我国传统企业进行自动化、信息化改造的新型集散控制系统。

磨矿分级系统是选矿工艺流程中的关键环节,其主要控制目标是将出矿的粒度和浓度稳定在工艺要求范围内,并在此基础上实现系统的最优化工作。对磨矿系统实施有效控制一直是选矿厂自动化的一个热点。但磨矿分级过程是一个典型的复杂系统,

论文首先根据控制目标,对系统控制模型进行分析,在磨矿系统的机理模型基础上提出动态模拟模型,得出对系统进行控制的依据。根据磨矿系统特点,提出了前馈、串级、死区控制在磨矿系统的应用。在讨论各子系统控制方式中,重点介绍了磨矿负荷的模糊智能控制(使产量最大化)和旋流器的协调控制(稳定旋流器分级指标)。

磨矿自动化控制系统控制参数较多,系统间干扰、耦合因素复杂,只靠人工经验达到理想的控制效果是非常困难的,必须基于先进优化算法对各控制子系统进行局部优化及控制系统全局优化才能够保证控制效果,为此我们设计了基于运筹学中的单纯型算法的自动控制系统优化整定思想并在实践中得到应用

在信息集成上,我们重点研究了 DCS 中以数据库为核心的信息集成和工业以太网及 Web 技术在集散系统中应用,在此基础上提出了磨矿集散系统信息集成方案。

在充分研究磨矿过程优化控制及信息集成技术的基础上,最后提出了磨矿集散控制系统的实现。过程控制级利用 AB SLC500 TCP/IP I/O 模块,采用上位机+TCP/IP+分布式 IO 结构实现对磨矿过程的有效、可靠控制。过程监控级采用三维力控公司的 PCAUTO3.62 组态软件这一强大监控层的开发工具进行开发,完成流程画面监控、参数调整、历史曲线查询、报表查询、实时报警、用户登录、在线帮助、权限分配和系统维护等功能。同时该集散控制系统开发了简单的生产管理级,把过程控制数据和实时的工艺生产画面发布到网上,实现了实时控制系统和企业 MIS 系统的无缝连结,管理者及相关人员可通过 Internet, 异地查看和诊断一线生产状况,可达到远程诊断并根据当前的生产画面和设备运行情况,便于指导生产、合理调度、加强管理。该系统控制效果明显,同时经济、可靠,不仅适应于选矿行业,同时在对其它传统企业进行自动化、信息化改造中都具有很大的借鉴意义。

在做该课题过程中,也发现还有很大工作值得研究:

首先,对于磨矿过程系统模型的建模问题上有很多值得研究。制约磨机过程控制水平发展的一个重要因素是系统模型难以建立。目前,神经网络建模和模糊建模的研究已

取得了很大进展，但要应用于磨矿系统还有很多问题有待研究。

另外，先进控制策略在磨矿过程中的应用也有待研究。智能控制理论是解决系统信息的模糊性、不确定性、偶然性和不完全性的有力工具，主要包括：模糊控制、神经网络控制和专家控制等。本论文虽然就模糊控制在磨矿过程中的应用进行了初步的探索和实践，但对于先进控制策略在磨矿过程控制系统中的应用仍有大量工作要做。



## 致谢

几年的硕士生活转瞬即逝。回首这几年的学习生活，感慨万千。在为自己即将顺利完成学业而欣喜的同时，无不对这几年给予我大力支持、关心和帮助的老师、朋友、亲人、同事充满敬意和感激。没有他们的教导、鼓励和支持，就不能有这篇论文的顺利完成，也不可能在这几年的时间里取得学业上的成长与进步。

本文的研究工作始终是在导师高立群教授的指导下完成的。在我整个研究生学习期间和论文完成过程中，在学习、工作上，高老师都给予了精心指导和极大的支持和鼓励；生活上给予我的无微不至的关怀和帮助。高老师渊博的知识、严谨的工作作风热忱向上的工作态度和对我在人生道理和做事方法的谆谆教导令我受益终生。

在此，谨向我的导师高立群教授表示衷心的感谢和崇高的敬意！

感谢华北电力大学自动化系路会明教授对我的帮助。在参与实际项目和撰写论文过程中，路会明教授给过我很多指导。他严谨、热忱的工作态度给我留下了深刻的印象。

在读硕士期间，作者得到了管理学院孙新波副教授、信息学院王明顺副教授和其他一些老师同学的热情支持和帮助，在此一并感谢。

最后对焦家金矿王德煜副矿长、张之科主任、许敬平高工、孙维家副主任的帮助，表示衷心的感谢。

在此，将本论文献给我亲爱的妻子季智英和我心爱的儿子王昱斐，是他们给了我理解、关心、支持和信心，才使我取得了今天的成绩。

感谢所有关心和帮助过我的人们，他们在未来的岁月里生活幸福！

## 参考文献

1. N.弗里曼. 通过过程控制达到磨矿回路的最高产量--Honeywell 高性能控制方案[J], 国外金属矿山, 2001, 3: 46-51
2. 王泽红、陈炳辰. 球磨机负荷检测的现状与发展趋势[J], 中国粉体技术, 2001, 2: 19-23
3. 王泽红、陈炳辰. 磨矿分级过程控制策略的研究及进展[J], 金属矿山, 2000, 9: 28-31
4. 李明东、范德日. 红矿磨选中旋流器自动控制系统的设计[J], 矿业快报, 2005, 12: 22-24
5. 芮桂芳、凌永发. 磨机载荷新型自动检测技术研究[J], 金属矿山, 2002, 309 (3): 34-36
6. 刘 怀、钱 鑫. 磨矿分级的学习智能控制系统的研究[J], 金属矿山, 1999, 282 (12): 44-46
7. 罗放明. 球磨机人工智能自动寻优控制策略与技术[J], 金属矿山, 1995, 11: 29-32
8. 毛益平、高继森、陈炳辰. 磨矿分级过程智能控制方案研究[J], 金属矿山, 总第 276 期, 1999, 276 (6): 35-39
9. 于军琪, 吴 涛, 黄永宣, 胡保生. 磨矿分级系统溢流浓度的模糊智能控制[J], 西安交通大学学报, 1999, 33 (9): 30-34
10. T·尼 瑟. 磨矿回路中的旋流器控制[J], 国外金属矿选矿, 2005, 7: 20-22
11. 王泽红、陈炳辰. 球磨机有用功率与其工作参数关系的研究[J], 中国矿业, 2001, 10 (4): 54-57
12. 兰 岚, 徐文立, 姜偕富. 水力旋流器控制方法的研究与应用[J], 矿冶, 2003, 12 (4): 19-22
13. Addie G R. Design, selection, sizing and control corrsidearations for cyclone feed slurry pumps[J]. POWDER TECHNOLOGY, 1999(104), 233-239.
14. 孙玉波. 浅谈水力旋流器的工作原理和影响参数[J]. 矿业快报, 2003, 1: 5-8
15. 陈俊文. 旋流器组粒度分级原理及粒度控制技术[J], 基础自动化, 1999, 6 (5): 39-41
16. 李金标. 旋流器分级磨矿回路测控系统[J], 矿产综合利用, 2001, 3: 44-46
17. 胡志平. PSI-200 粒度仪的简介与应用[J], 有色金属(选矿部分), 2003, 2: 30-32
18. 任金霞. 改进型单神经元自适应 PID 控制在磨矿分级控制中的应用[J], 有色金属(选矿部分), 2005, 2: 32-34
19. 章晓林、张文彬. MCGS 在选矿厂磨矿分级自动化中的应用[J], 矿业工程, 2004, 2 (6): 29-32
20. 赵嘉赞, 涂忆洪、廖乐光. 金矿选矿过程自动化系统设计[J], 控制工程, 2005, 12 (3): 270-272
21. 赵书玲, 王晓燕. 磨矿分级模糊仿人智能控制系统的研究[J], 有色设备 2004, 2: 8-9
22. 程利民. 磨矿先进控制软件的应用与实践[J], 矿冶, 第 14 卷第 4 期, 2005, 12: 93-95
23. 田 亮, 曾德良, 刘鑫屏, 刘吉臻. 基于数据融合的球磨机最佳负荷工作点判断[J], 热能动力工程, 2004, 19 (2): 198-201
24. 毛益平, 高继森, 陈丙辰. 基于神经网络的球磨专家系统研究[J], 金属矿山, 2000, 8: 25-27

25. 选矿手册[M], 第六卷, 北京: 冶金工业出版社, 1991
26. 陈炳辰. 磨矿原理[M], 北京: 冶金工业出版社, 1989
27. 褚良银. 水力旋流器[M], 北京: 化学工业出版社, 1998
28. 苏震. 选矿自动化[M], 北京: 冶金工业出版社, 1995
29. 李启衡. 碎矿与磨矿[M], 北京: 冶金工业出版社, 1980
30. 符曦. 系统最优化及控制[M], 北京: 机械工业出版社, 1995
31. 蔡善华. 先进控制系统结构和数据接口[J], 炼油设计, 2000, 2: 28-29
32. 胡俊. 工业以太网和基于 Internet 的远程监控系统[J], 世界仪表与自动化, 2002.2: 19-20
33. 刑建春等. 工业控制软件互操作标准 OPC 综述[J], 工业控制计算机, 2000.1: 23-25
34. 李国厚. OPC 技术与系统集成[J], 计算机自动测量与控制, 2001.9: 22-23
35. 浙江大学罗克韦尔自动化技术中心, 可编程控制器系统[M], 杭州: 浙江大学出版社, 2003, 3
36. 罗克韦尔公司, NetLinx 选型指南
37. 罗克韦尔公司, SLC500 选型指南
38. OPC Task Force. OPC Overview Version 1.0. October 27,1998
39. OPC Task Force.OPC Common Definitions and Interfaces Version 1.0. October 27,1998
40. OPC Foundation.OPC Data Access Custom Interface Specification Version 3.0. March 4,2003
41. Metzner.G Multivariable and Optimal Mill Control -The South African Experience. Proceedings of 18th International Mineral Processing Congress. Sydney, Australia, May 1993
42. Craig,I.K,Hulbert,D.G Optimized Multivariable Control of an Industrial run-of-mine Milling Circuit Journal of South African inst. Of Min and Metal,Vol92 No6 Jun 1992
43. Thompson L and Mertz G. Real-time System Implementation at Monsanto-Krummich.Automatic,Vol29 No5 1993
44. Rockwell Automation. RSLinx Getting Results Guide, 1999



上海交通大学

硕士学位论文

应用田口方法减少推板质量特征值的波动

姓名：张宗刚

申请学位级别：硕士

专业：项目管理

指导教师：奚立峰;唐式豹

20080601

## 应用田口方法减少推板质量特征值的波动

### 摘 要

铁氧体磁芯是在推板窑中经过高温、设定的窑炉气氛和保温时间下烧制而成，推板窑中使用的最重要的窑炉道具就是推板。推板在窑炉中要长时间连续承受高温、荷重（上下荷重，水平压力）、恶劣的烧成气氛及骤冷骤热的热冲击等恶劣的工况，窑炉中的推板哪怕有一枚品质异常，都有可能发生掉块或开裂，从而引起拱窑事故，一旦发生拱窑事故往往就会产生很大的经济损失。因此对推板的品质稳定性提出了很高的要求。本论文提出了运用田口方法来优化控制参数，从而使产品对生产过程中的干扰因子具有鲁棒性，达到降低推板品质特征值波动的目的。

本论文首先对田口方法产生的时代背景、田口方法在国外的发展和应用，及在国内和行业内的应用进行了总结和概括，接着详细介绍的田口方法的的概念和内容及田口方法应用中的一些细节问题。然后对本公司推板的具体生产过程中的干扰因子进行详细分析，确定出干扰因子和控制因子，按照田口方法参数设计的程序确定出控制因子的最佳水准，再通过确认实验来验证前面确定的水准和假设的正确性，从而最终完成对这种控制因子的优化。

论文最后对全文进行了总结，并对未来的研究方向和研究领域进行了展望。

关键词：田口方法，信噪比，S/N 比，稳健设计，参数设计

The reducing of quality characteristic value  
fluctuation of pusher kiln furniture  
(slab) by Taguchi Method

ABSTRACT

The ferrite magnetic core is cranked out in “pusher kiln” under high temperature, setting kiln ambience and heat preservation time. The most important kiln using in “pusher kiln” is “slab”.

In kiln, “slab” will continuously endured high temperature, weight(vertical and horizontal), execrable firing ambience and sudden cold & heat impact. Even if any single piece out of its way, split will happen, thereby engendering kiln accident. Kiln accident usually gives birth to a big loss. So quality stability of “slab” is highly required.

This paper brings forward that using Taguchi Method to optimize controls parameter. Thereby, productions can have “robustness” to face interferential factors in production process and reduce the eigenvalue fluctuating.

This paper firstly sum up the Taguchi Method’s background, development and application overseas, development in our country and in industry.

Secondly, particularize its conception, content and some details in application. Then aim at our own factory’s production process and analysis the interferential factors at length,

recognize the interferential factors and controlling factors, confirm the best level of controlling factors by using Taguchi Method parameter setting program. And validate aforesaid level and validity of the hypothesis by validated experiment. Then finish the optimization of controls parameter.

Finally, the paper made a Summary, and prospect the direction and domain of future research.

KEY WORDS Taguchi method, signal to noise ratio ( SNR), N/S ratio, Sound design, Parameters design



## 图目录

图 1 窑炉拱窑事故示意图.....	5
图 2 本论文的机构.....	10
图 3 品质损失函数示意图.....	13
图 4 产品或制造系统输入输出示意图.....	15
图 5 强交互作用与弱交互作用示意图.....	17
图 6 混练机设备.....	26
图 7 混炼子系统示意图.....	26
图 8 压机压制过程示意图.....	27
图 9 自动成型机填料系统示意图.....	27
图 10 偏析形成示意图.....	28
图 11 夹层形成示意图.....	28
图 12 成型子系统示意图.....	29
图 13 干燥室早片.....	30
图 14 干燥子系统示意图.....	30
图 15 烧成窑炉图.....	31
图 16 窑炉的水平温差示意图.....	32
图 17 烧成子系统示意图.....	32
图 18 影响因子鱼刺图.....	33
图 19 主要要素系统图.....	35
图 20 产品过烧示意图.....	37
图 21 烧成温度和保温时间交互作用图.....	38
图 22 原料氧化铝成分的波动 ,而引起的抗压强度波动变大图.....	39
图 23 因子对 S/N 比的示意图.....	49
图 24 因子对品质特性的反应图.....	50
图 25 “ F ” 分布示意图.....	52
图 26 两阶段化工作示意图.....	56

## 表目录

表 1 :干扰因子的分类.....	16
表 2 :推版的质量特这个值及其理想状态.....	24
表 3 : 不同烧成温度下保温时间不同实验的数据.....	38
表 4 :干扰因子水准一览表.....	42
表 5 :原来控制因子的水准表.....	42
表 6 :各控制因子的水准.....	42
表 7 :控制因子说明表.....	43
表 8 :本次田口实验的直交表( 包括内表和外表 )......	44
表 9 :实验的结果.....	46
表 10 :本次实验结果的计算.....	48
表 11 :因子对 S/N 比的反应表.....	48
表 12 因子对品质特性的反应表.....	49
表 13 :重要性计算汇总表.....	53
表 14 :因子对 S/N 比的初步分析表.....	54
表 15 :因子 A 被统合后的 计算表.....	55
表 16 :依据因子对 S/N 比和品质特性的影响程度分类表.....	56
表 17 :确认实验和预测结果的比较表.....	58

## 上海交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：张宗刚

日期：      年    月    日

## 上海交通大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

**保密**，在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

**不保密**。

（请在以上方框内打“ ”）

学位论文作者签名：张宗刚

指导教师签名：奚立峰

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

## 第一章 绪论

### 1.1 课题提出的背景和意义

耐火材料在金属冶炼、铁氧体磁芯生产、卫生陶瓷生产领域有着广泛的应用，优质的耐火材料可以起到降低能耗和生产成本、保护产品、提高产品品质的作用；反之劣质的耐火材料不但能耗高、影响产品品质，而且还会引起生产事故，从而造成很大的经济损失。

在铁氧体磁芯生产行业，要使用大量的耐火材料，其中在推板窑中使用推板，更加由于严酷的工况——高温、荷重（垂直方向和水平方向等）、酸性或碱性的窑炉气氛、骤冷骤热的热冲击等，对品质提出了更高的要求。因为在高温下连续运转的窑炉，哪怕有一枚推板出现品质异常而发生断裂，就有可能造成堵窑或拱窑（示意图见图1），不但整窑的产品大部分报废、而且发生堵窑的窑炉部分需拆开来维修和恢复，如果堵窑严重，还会对窑炉造成损伤。窑炉的维修需要由1400℃左右的高温降到室温才有可能进行，维修完毕后再升到1400℃左右的工作温度需要几天的时间，这不但需要浪费大量的能源，而且有可能耽误生产订单的交货期。这以上各种损失加在一起的十分惊人。对于一些规模小的企业，发生一次堵窑事故就有可能破产。对于耐火材料客户来说由于发生事故的损失特别巨大。因此对推板的品质的稳定性提出了特别高的要求。

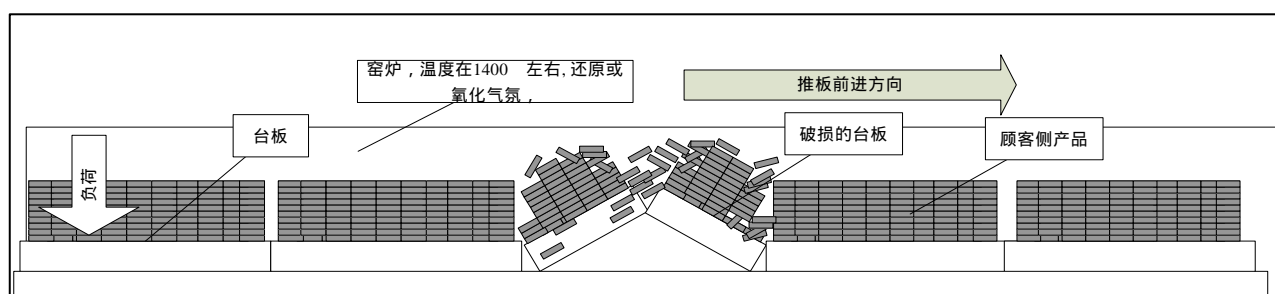


图1 窑炉拱窑事故示意图

Fig.1 The chart of kiln accident

本公司是一家日本独资企业，在耐火材料行业具有很高的知名度。2003年开始在苏州设立工厂，设立工厂之初，由于所有的原材料全部日本进口，虽然也偶尔发生一些品质问题，但是还能够接受。2005年以后，迫于成本压力，开始进行一些主

要的原料的国产化，国产化以后，发生顾客抱怨的频率较以前明显增多。针对顾客抱怨增多，赔偿率增加等问题，公司技术部和品证部进行过原因分析，确认主要原因就是推板的质量特征值波动变大，超出规格范围的产品增多。公司针对产品质量特征值偏大，采取了很多措施：诸如加强原料的品质控制、加强人员培训、设备的维护和管理、现场管理，及数据分析等各种质量改进方法，但是效果不明显，顾客抱怨率没有达到有效降低。到底如何解决推板品质特征值波动偏大的问题？为何目前的采取的措施没有效果？对于推板的生产过程，我进行了调查和总结，发现推板类的耐火材料具有以下特点，使得的仅依靠在线品质控制效果事倍功半：

品质特性的检验只能通过破坏性实验来实现，品质特性的好坏无法通过最终的检查来判断。

生产过程存在众多[特殊过程]，控制起来非常的困难。

小批量，多品种的生产方式。

原材料为天然的矿物，其化学成分虽然在一定程度上具有相对的稳定性，但是相对于一般的在工厂中生产的原料，品质波动较大，而且粉状原材料的品质检查和控制本身就是一个难题。特别是原材料国产化后，原料的品质波动较以前增大。

由于以上一些特点，导致仅依靠传统在线品质控制来减小质量特征的波动效果不明显，没有针对性。国内大多数企业耐火材料企业的品质控制还停留在此阶段——加强原材料的检验、严格控制各个过程的参数、加强设备的精度投资、大量数据分析等，但是大量的质量事故依旧频繁出现，而耐火材料的品质不良分析又相当的耗时，耗资，常常由于影响因子众多，而找不到真正的原因，只能维持原状，质量水平原地踏步。结果是由于品质事故的频发而的不到根本解决，而导致客户的大量流失。

对于特殊过程，在 ISO9000：2000 3.4.1 注 3 中这样定义的：对形成的产品是否合格不易或不能经济地进行验证的过程，通常称之为“特殊过程”。在 ISO9001 标准中 7.5.2 也有过专门的论述：“当生产和服务提供过程的输出不能由后续的监视或测量加以验证时，组织应对任何这样的过程实施确认。这包括仅在产品使用或服务已交付之后问题才显现的过程”。无非是通过形式实验，来确定控制参数（人、机、料、法、环等方面的参数），并对人员的能力，设备的能力，原材料的品质，生成过程参数和方法，甚至环境参数进行确认，然后对这些因子进行严格控制，但是由于影响因子众多，有些控制参数本身的波动难以控制，导致这种方法往往并不是那么

有效果。

SPC (统计过程控制) 作为一种减少生产过程品质波动的有效方法, 被很多公司大量应用, 并且产生了很好的效果, 但是这种方法一般适用于以下生产过程: 1. 大批量的生产方式。2. 连续性生产过程。推板的生产方式既不是连续生产, 又不是大批量的生产, 过程数据的采集有困难 (破坏性实验), 分析的的数据无法起到预防控制作用。针对这种情况, 本人提出运用田口方法来通过在设计阶段就对产品的控制因子进行优化, 使得产品的品质特征值对于生产过程的各种干扰因子具有鲁棒性, 即使由于一些不可控制原因, 一些控制因子发生波动, 也能保证产品的最终品质特征值具有很小的波动, 即使使用比较差 (品质波动比较大) 成本低原材料, 也能达到提高品质, 减低顾客抱怨率, 达到提高顾客满意度和公司效益的效果。

## 1.2 田口方法的由来及研究现状

田口方法源自品质设计之实验设计, 实验设计是一门探讨实验进行方式及其实验观测值解析法以提高信息获得率、使实验成本最低的一门科学。这一利用事先的、有计划的, 考虑周详的科学 1920 年由 Fisher 所创始的。实验设计进入美国后, 开始大部分时用于农作物和生物实验方面。直到第二次世界大战发生, 工业制品的品质管理开始被重视后, 实验设计才成为品质管理上一个重要方法。

1950 年田口玄一博士倡导使用直交表的实验设计, 并领导一群研究人员开发各种直交表、点线图应用技巧及解析方法。此方法由于对实验结果的再现性高, 配置实验的伸缩性大, 实验次数少, 实验配置容易与解析方法简便等优点, 而在日本迅速普及。日本将田口博士的工程方法称为品质工程, 欧美各国在 1980 年开始接受此方法而称之为田口方法。

1984 年田口博士发展出其实验计划法, 主要目的是在于如何利用小规模实验, 以最经济、最有效率的方法, 找出在大规模生产最佳设计。之前田口博士为美国 AT&T 公司贝尔实验室改善机体电路不良率由原来的 70% 降为 30%, 掀起了 [田口震撼], 日本天皇于 1989 年颁发 MIFI 紫带奖, 表彰他对日本工业界所做出的贡献。田口认为从产品研究转换为技术研究, 实为未来高科技时代企业生存之道。为达此目的, 企业应摒弃先企划后作产品设计的做法, 改为技术研究先于企划才行。其目的就在于研究以何种最有效率的方式, 使竞争对手不能很快仿效其品质, 并在成本上具有竞争力。

### 1.2.1 田口方法产生的时代背景

二战后，日本进行战后复建时，面临高品质原料，生产设备和技术工程师等严重短缺问题，在此恶劣条件下，生产高品质产品与不断改善品质便成为一项极具挑战且急需解决的问题。

1947 年，日本为了解决通信品质低落的问题，成立了电器通信实验室，初步编制 1400 人，规模仅为美国贝尔实验室的 1/3，且预算更是不到 1/50，在预算、人力不足，缺少高品质机器的条件下，只是靠着调整机器参数来提升交换机生产的品质。1949 年，田口玄一博士于日本在电信实验室工作时，发现传统实验设计方法在实务上并不适用，逐渐发展了他所谓的[品质工程]的基本原理。利用田口方法，日本电器通讯实验室生产了高品质的交换机。

田口博士所发展的是一个通过实验进行统计参数最佳化设计的方法，具有实际的应用性，而非以困难的统计为依据，田口所发展的方法，是一种用来改善品质的工程方法。稳健设计是一种通过工程最佳化的方式来进行品质改善的方法，所谓[稳健]一词是指所设计产品品质受到周围环境影响的敏感度为最小。田口方法就是一种稳健设计的实验方法。

田口方法作为一种工程方法，使得高品质、低成本的产品快速生产出来。就操作成本而言，田口方法是要降低产品对于环境的影响；就制造成本而言，田口方法使用低等级原料，不昂贵的设备而能维持一定的品质水准；就研发成本而言，田口方法可以缩短开发时间及减少资源的使用。

### 1.2.2 田口方法在国内的现状

在我国，兵器工业质量管理协会从 80 年以来，一直致力于田口方法的引进、研究和推广工作，从邀请田口博士亲自来华讲学，进行现场指导。并培养了一批应用田口方法的骨干力量，取得了不小的成绩。

但同时也必须清醒地看到，我国在田口方法理论研究和实践探讨中仍处于初期阶段，同日本的研究和普及规模来比较，差距还很大，各种相关书籍和期刊文章中很少能看到关于田口方法的论述。而国外关于田口方法的新理论，新成果层出不穷，国内相关的研究却很少。在应用方面，很多企业还停留在经验设计阶段，产品开发设计独立于质量管理之外。80 年代初以来，少数企业引进日本式的优化设计，但规范化不够，故障分析多在事后阶段。在质量管理体系上，产品开发设计过程独立于质量管理体系以外。质量管理人员无权参与设计过程，而设计人员质量管理知识又有限，因而很难从质量管理角度推广该方法。同时先进管理在引进后消化吸收不



够，尚未很好结合中国企业的特色。至今尚无一套完整的适合中国国情的应用理论和手段，以指导我国企业应用。

田口方法在 90 年代传入我国，当时只是在一些大型国有企业得到应用，并取得了一些成绩。90 年代后大批外资企业进入中国，给中国带来了大量的先进的管理经验，同时也培养了一大批具有现代化品质管理理念的人才。使得田口方法在我国进一步得到了推广。但是从目前的总体情况来看，田口方法还是远远没有发挥与之相应得作用。其中一个重要原因：一般工业界认为[田口方法]深奥难懂。或者是虽然基本理解田口方法的意义，但是无法广泛的有效的应用。

### 1.2.3 田口方法在耐火材料行业的现状

中国耐火材料行业相对来说比较落后，落后的原因主要有：

- 1 缺乏先进的管理方式，目前国内耐火材料行业不论大小，基本上都停留在依靠经验的传统的生产和管理方式上。
- 2 相关基础和配套产业落后。例如日本 NGK 公司，生产耐火材料用的原材料，有专门的原材料生产企业提供高水平的品质稳定的原料。
- 3 缺乏资金的投入。

以上几个原因导致了，国内耐火材料的水平和国外有较大的差距。特别是和日本企业。所以目前高水平的耐火材料行业仍旧被一些日本，韩国企业所垄断。现日本 NGK 公司大概在 20 年以前就已经使用田口方法提高产品品质了，但是在国内企业，很多企业根本就没听说过田口方法。更不要说有效的应用了。其实针对目前国内的现状，田口方法却是一个适合中国国情的品质改善方法。

### 1.3 课题研究的目标和主要工作

NGK 公司是一家国际知名的耐火材料生产企业，对于田口方法的利用，早在 20 年前就已经开始。2002 年在苏州建立工厂，由于仅仅是生产工厂，没有研发机构，在 2005 年原材料国产化后，发生年了一系列的问题。针对这种情况，我考虑利用田口方法来优化生产控制要素，使得产品具有对生产过程影响要素的稳健性。达到提高产品品质的目标。同时力争把田口方法的运用的几个关键问题论述清楚，使田口方法在国内特别是在耐火材料行业得以发扬光大。

### 1.4 本章小结

本小结首先简要介绍了本论文提出的背景和意义，概括了本公司的生产方式和特点，论述了目前存在的问题，以及利用传统的在线品质控制的局限性和利用田口方法进行品质改善的可行性和必要性。接下来则概括了田口方法的由来及目前的研究现状，田口方法产生的时代背景，及在我国的利用研究现状进而说明了在耐火材料行业的发展现状，最后对本论文的研究目标和主要工作进行了说明。

## 1.5 论文的架构

本研究的流程结果如下图 2 所示。首先确认研究主体和范围，然后收集探索相关的文献及田口理论；然后依据田口方法的基本程序：1. 确定理想机能，实验方法，各因子选定，直交表选择设计。通过田口实验的结果，分析各因子的影响，找出个要素的最优组合，进行确认实验。实验的成果在成本及品质方面与原来进行比较。最后提出本研究的结论和建议。

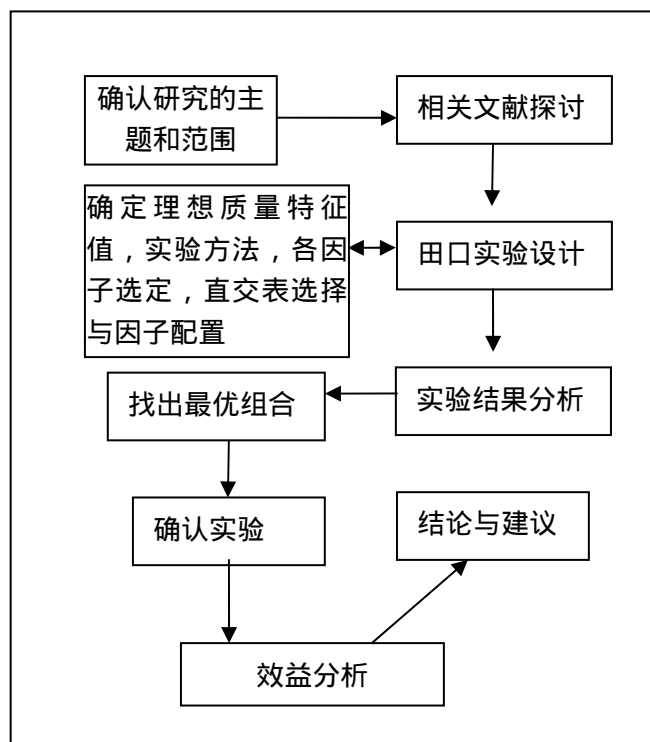


图 2 本论文的结构

Fig2 Frame of the papers

## 第二章 相关文献探讨

### 2.1 田口方法简介

田口方法简单的说就是“缩小变异的方法”。田口方法追求以最低的成本，制造最高品质的产品为目标。强调理想机能， $S/N$  比及  $S$  比的运用，既能缩小变异，又能调节中心值的落点，使得各行业追求百万分之一等级（PPM）的品质水平成为可能。同时强调再现性、先行性和广泛性的稳健设计。使得产品品质一经改善后，就能在日后的生产中不断重复出现相同的好结果。

本论文要解决的问题为“减少推板质量特征值的波动”，对于推板的一些生产特性前面已经进行说明：即小批量、多品种的生产方式，且生产过程的品质无法通过检验来确认等一些特点。针对这些特点，仅仅采用在线品质控制，难以保证产品的品质。从田口方法的主要作用来看，只有从源头上从设计开始就考虑产品的品质的提高，同时做好在线品质控制，才能从根本上改善品质。

### 2.2 品质特征值的变异与其损失

以社会整体的价值来考察品质，我们常常碰到品质与成本是哪一个重要比较重要的难题。田口博士把质量定义为产品出厂后，「对社会之损失」，并利用“损失函数”来衡量一个产品的“品质特征值”偏离目标时所可能造成的损失大小，并以金钱来表示。产品或者零件的公差，做为生产管理与质量管理的依据，以使质量与成本取得平衡而达到最商品化。为何产品“品质特征值”符合工厂的“公差规格”，出厂后还会造成偏离目标呢？这是由于当初开发设计此一产品时，没有把一些生产上无法控制的误差因子也列入考虑，因此造成机能的变异(机能是以品质特征值来量测)。

这些因子有下列三种：

杂音 Noise(即环境的差别)：有某些产品在某种条件下可发挥机能，在高温、高湿等环境下，就无法发挥机能，这是环境的变异。

劣化 Noise：同样的产品，初期的机能良好，可是几年以后机能无法发挥，这就是由于劣化所造成的变异。

变异 Noise：同样规格产品，有些能够正确地发挥机能，有些就不能，这是由于制造工程中产品间的变异所造成。

为了减少这些误差因子对变异影响，因此在开发、设计、生产这些产品时，均

必须加以考虑，将来卖到市场才可减少损失，也就是所卖产品有较好“稳健性”。我们日常购买产品，当然希望买到的是好产品，而对于好产品，如果忽略价钱问题，我们对质量的要求通常是：

希望所买到的产品，其性能能够达到说明书上面所示的，该产品在各种环境条件下使用，均能达到其性能，而不会因环境条件而有所变异。

就是产品的性能要能够耐久、寿命越长越好。

产品间的变异小，即产品间的质量特性要均匀。

要达到上述三个好产品所应具备的条件，就必须克服下列三种影响产品性能的杂音(Noise)：外部杂音(外部环境等)、内部杂音(控制因子本身的劣化)和产品间的杂音(生产过程造成的变异)。

### 2.3 田口方法中“品质”“损失”的定义

田口博士认为一个产品的品质可以定义为：此产品在它的生命周期内，整个社会(包括制造商、消费者、及其所有其他相关人)对它所付出的总代价，并称之为[品质损失]，越少的[品质损失]代表着越高的品质。上述的[代价]或[品质损失]包括：

消费者购买商品时支付的费用，这包括了制造商的成本；

产品对消费者造成的不便，这通常是因为产品的性能与消费者的期待有落差而造成的；

产品对环境的侵害，譬如污染或噪音；

维修或更换费用，当产品的性能(包括产品对环境的侵害程度)与消费者的期待之间的落差达到一定忍耐限度时，消费者要求维修或更换，无论其费用是有制造商支付还是有消费者支付，都是这个社会的损失。

随着消费者意识越来越强烈，越来越清晰，消费者对于这些[品质损失]越来越在意，他们把对[品质损失]的[满意度]反应在市场上——品质差的产品会逐渐失去市场，于是品质差的制造商最终还是要自食[品质损失]的后果，而且这个社会也在这个过程中蒙受了损失。

上述[品质]或[损失]的观念被认为是田口博士的重要创举，是对品质工程最重要的贡献之一。它和现代品质专家的共识[消费者是品质的最终决定者]观念是一致的，只不过这个在其他国家是[近代]的品质观念在日本已被倡导、沿用了将近半个世纪了。

## 2.4 品质损失函数

当品质特性与消费者的期待值（目标值）一致时，消费者的不满意程度最低，换句话说，品质损失最小。当品质特性开始偏离目标值时，消费者的不满意程度也开始提高——品质损失开始增加。对于望小品质特性的问题而言，目标值可视为 0；对于望大品质特性的问题而言，目标值可视为无穷大。为了要将品质损失量化，我们需要探索品质损失和品质特性之间的关系。田口博士假设：当产品的品质特性  $y$  开始偏离目标值  $m$  时，品质损失  $L$  是以二次曲线的速度增加，亦即 2.1 式

$$L(y) = k(y-m)^2 \dots\dots 2.1 \text{ 式}$$

——式中： $m$  为目标值

此品质损失是相对于最低的品质损失而言，换句话说，设定  $y=m$  时，品质损失为零，亦即  $L(y)=0$ ，2.1 式即为有名的[品质损失函数]；以图象表示为如图 3：

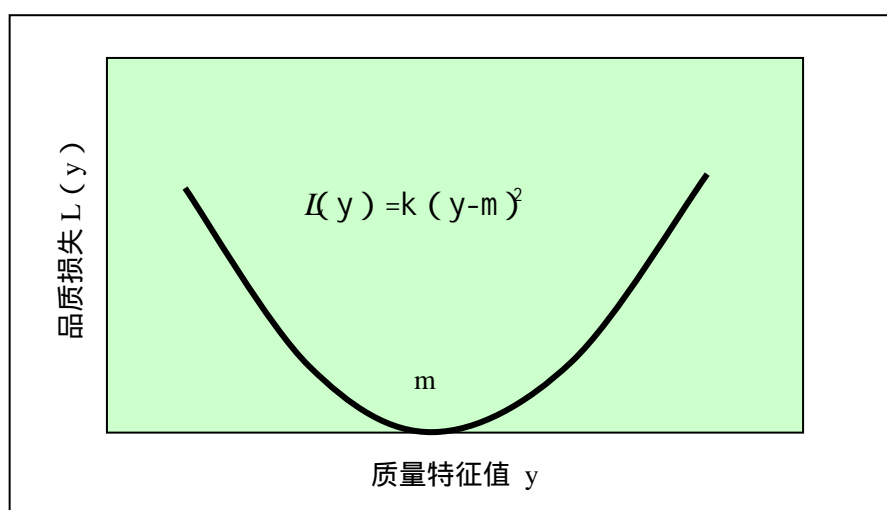


图 3 品质损失函数示意图

Fig.3 The chart of quality lose

若有  $n$  个 产品，则其总品质损失为 2.2 式：

$$\text{总品质损失} = \sum_{i=1}^n k(y_i - m)^2 \dots\dots 2.2 \text{ 式}$$

而平均品质损失  $Q$  为式 2.3

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n k(y_i - m)^2}{n} = k \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} \right] = k[MSD] \dots\dots 2.3 \text{式}$$

MSD : mean square deviation

又

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} = (\bar{y} - m)^2 + S^2 \dots\dots 2.4 \text{式}$$

则平均损失可改写为 2.5 式：

$$Q = k \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} = k \left[ (\bar{y} - m)^2 + S^2 \right] \dots\dots 2.5 \text{式}$$

此式代表平均损失 Q 和产品平均底偏心值  $(\bar{y} - m)^2$  及标准差  $S^2$  的和成正比。因此可以以  $MSD = (\bar{y} - m)^2 + S^2$  做为品质的特性。而品质特性又可分为三种形式：

望目型

品质特性逼近目标值 m,  $MSD = (\bar{y} - m)^2 + S^2 \dots\dots 2.6 \text{式}$

望小型

品质特性越小越好, 亦即  $m=0$ ;  $MSD = \bar{y}^2 + S^2 \dots\dots 2.7 \text{式}$

望大型

品质特性越大越好, 相当于求  $1/y$  望小型特性, 因此  $m=0$ , 亦即

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i} - m\right)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n_i}\right)^2}{n} \dots\dots 2.8 \text{式}$$

将 MSD 转换为讯号处处理中 S/N 比形式, 亦即

$$S/N = -10 \log[MSD] \dots\dots 2.9 \text{式}$$

可将  $MSD = (\bar{y} - m)^2 + S^2$  中,  $\bar{y} - m$  视为品质接近目标值,  $S^2$  视为变异小, 将使 MSD 减小, 亦即品质损失越小, 当取对数时其值越小, 再乘以负号, 相当于 S/N 比越大越好。

## 2.5 干扰的分类

要彻底了解[田口方法] (或稳健品质设计) 的原理及其基本概念, 必须弄清楚以下概念:

干扰有那些? 稳健品质设计得基本原理式什么? 在这些原理中, [干扰]扮演了什么角色? 实验直交表中如何安排干扰条件?

由于田口方法强调其高效率(与全因子实验比较), 在应用时, 我们一般选择“饱和直交表”, 以至于所有因子效应或多或少混淆着交互作用的效应, 背后有什么基础, 让我们大胆地采用这种做法, 而似乎忽略交互作用得存在, 这个将在下面讨论

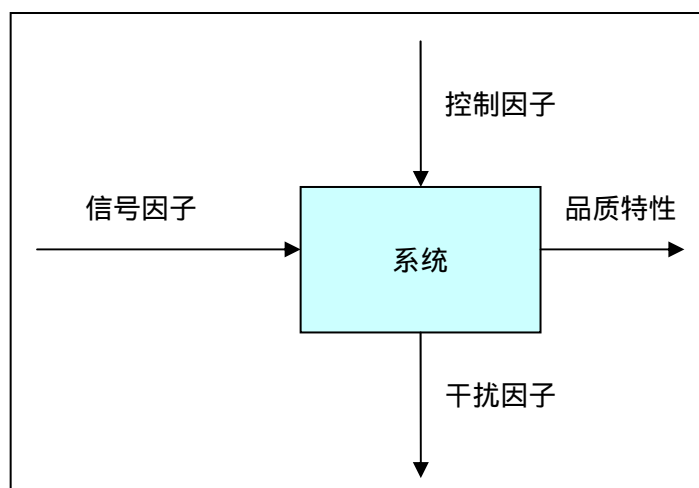


图 4 产品或制造系统之输入输出示意图

Fig.4 The chart of producing system ' input & output

### 干扰因子的分类

图 4 中代表的是一个系统, 可能是一个产品、零件、或一个制造系统等。理想上, 在特定的控制因子下, 输入特定的信号因子, 会输出一个特定值的品质特性 (若是静态问题, 则没有信号因子, 输出的品质特性理想上永远是一定值) 但是由于有干扰因子的作用, 使得输出的品质特性每次都不一样, 就会有变异。

对一个产品或零件而言, 干扰因子可以区分为 (表 1):

产品使用时的干扰因子。

产品制造时的干扰因子

品质特性测量时的干扰因子。

前两类各又区分为外部干扰因子和内部干扰因子。外部干扰因子是指环境（温度、湿度、甚至使用者）的变异，而内部干扰因子是指控制因子（产品设计参数或制造过程设计参数）本身的变异。第三类，品质特性测量时的干扰因子是指不同的位置测量可能又不同的品质特性（例如一根水管的直径，可能在不同的位置测量会有不同）或在不同的时间测量可能有不同的品质特性。

表 1：干扰因子的分类

干扰因子类别		例子
使用阶段的干扰因子	外部干扰因子	使用环境（温度、湿度）使用者等
	内部干扰因子	材料磨损、老化等
制造阶段的干扰因子	外部干扰因子	制造环境（温度、湿度）使用者等
	内部干扰因子	材料变异、制造过程参数变异
品质特性测量时的干扰因子		测量干扰因子
		测量的位置、时间等

## 2.6 稳健设计的基本原理

稳健品质设计的目标是决定控制因子的设定水平，使得品质特性达到理想的机能。包括不因干扰因子的变异而有过大的品质特性变异，换句话说，品质特性对于干扰因子的敏感性减至最低，或者说品质特性对于干扰因子时稳健的。

稳健品质设计的原理是利用了存在与产品或制造系统中的两个性质：

利用品质特性与控制因子间的非线性关系去降低内部干扰因子的影响。

利用干扰因子与控制因子间的交互作用去降低外部干扰因子或测量干扰因子的影响，

## 2.7 实验直交表中的干扰策略

因为  $S/N$  比等同于（或包含）品质特性的变异（ $S/N$  越大，变异越小），所以在一个实验直交表中每一组实验都必须要有两个或两个以上的实验数据，否则  $S/N$  比就没有很大的意义了。每一组实验需要两个或两个以上的实验数据，是为了要评估干扰因子所引起的变异。那么，如何安排干扰因子去[干扰]品质特性呢？我们常用的[干扰策略]有下列三种：

随机实验，因为有些干扰因子的变动太困难或太昂贵----比如去调节室内的



湿度或者去调节车间的温度(外部干扰因子的调节不是不能,而是太昂贵).  
干扰因子以内直表来配置。

先进行一系列的干扰实验,将许多干扰因子复合成为单一个干扰因子。

干扰策略虽然分为以上三种,但是在实际应用时,常常时两个以上的策略同时应用。以下对干扰因子的复合进行说明。

## 2.8 关于交互作用

田口方法中对于处理交互作用的基本态度是这样子的:

为了实验效率,可以使用[饱和]的直交表实验;

可以的话尽量使用田口方法中的[高度推荐的直交表];

经由慎重选择品质特性及控制因子去尽量降低交互作用至可接受的范围。

将交互作用看成实验误差的一部分。

所有控制因子效应必须要和实验误差来做比较;若和[实验误差]比起来足够大,此因子效应才被认为是[有意义的]或重要的。否则此因子效应应被认为是没有意义的,或不重要的,(而是实验误差造成的偶发现象)。

采取上述的做法,事实上也有其必要性:当实验室中小规模的实验结论要能够推广到大规模的生产线时,常常必须有一个先决条件,及交互作用必须足够小,因为交互作用在实验室和大规模的生产线的效应常常是有一段距离的。

前面所提到的[降低交互作用至可以接受的范围],通常的准则是:[弱交互作用]是可以接受的,而[强交互作用]是必须避免的。所谓[强交互作用]是直在交互作用图中,两条线有交叉的现象(图5中的左图),而所有[若交互作用]是指两直线虽然没有平行,但是也不至于交叉(图5中的右图)

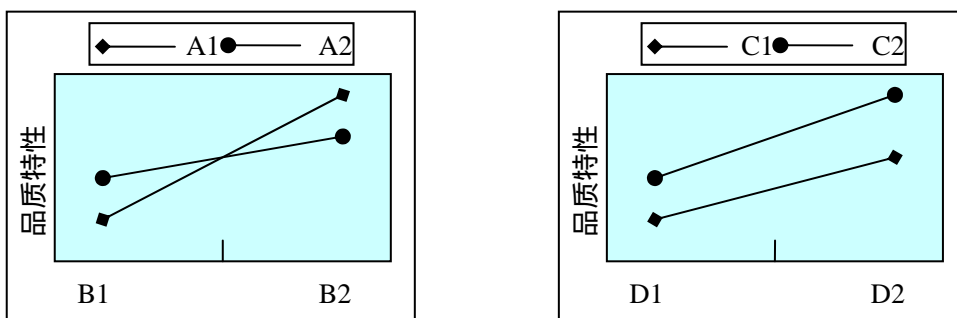


图5 强交互作用与弱交互作用示意图

Fig.5 strong interaction & feeble interaction

## 2.9 关于直交表因子效应混淆

所谓因子效应混淆，是指因子效应和交互作用之间或交互作用之间的效应无法分辨出来，是作为一个总效应体现，在直交表实验的术语中，我们说二者的效应混淆在一起了。

事实上，除非进行全因子实验，否则因子效应的混淆是无法避免的。但是全因子实验所花费的成本太高，需要的时间也太多。正是因为这个原因才有了田口方法的直交表。在田口方法中的直交表虽然因子效应的混淆无法避免，但是如果深思熟虑的来配置因子，因子效应的混淆是可以减至最小的。这里涉及到直交表实验的解析度的概念，下面来进行详细说明。

## 2.10 关于直交表实验的解析度

直交表实验的解析度如下：当所有二因子交互作用都没有和其他二因子交互作用或任何主因子效应混淆时，我们说，此直交表实验具有[五级解析度]；当有些二因子交互作用有和其他二因子交互作用混淆，但是所有的二因子交互作用都没有和任何主因子效应混淆时，我们说，此直交表实验具有[四级解析度]；有些二因子交互作用和主因子效应混淆时，我们说，此直交表实验具有[三级解析度]，从理论上分析，我们希望解析度越高越好，因为我们越清楚其对应的数学模型。

很明显，五级解析度的直交表实验使我们可以计算主因子效应和二因子交互作用，而四级解析度的直交表实验只能让我们计算主因子效应而无法计算二因子交互作用。在田口方法中，我们通常假设线性模式，换句话说，我们关心的使主因子效应，故尽可能的要求直交表实验至少具有四级解析度，否则主因子效应必然或多或少和二因子交互作用混淆在一起。

点线图可以帮助我们构件四级解析度的直交表实验：在[点]的位置上填上控制因子，[线]的位置上不要放任何控制因子，即是一个具有四级解析度的直交表实验。

在田口方法中，为了提高实验的效率，我们常常使用饱和的直交表，在这种情况下，所有主因子效应必然或多或少和二因子交互作用混淆在一起，但是若小心地配置因子，还是有可能将混淆的情形降低，譬如先配置主要的因子，使直交表实验达到四级解析度，再将其他次要的因子配置在其他各行，让次要因子的效应和交互作用混淆在一起，而主要因子的效应不会和交互作用混淆。在实际的工程问题中，越高阶的交互作用通常越小，所有在一般的讨论中，我们只讨论二因子的交互作用。

在田口方法中，我们常常使用饱和的直交表，饱和的直交表，其因子混淆情况是

非常严重的，除非各因子间的交互作用都很小，否则用一个饱和直交表来评价主因子效应，其精度是很难把握的。但是在田口方法中一些高度推荐的饱和直交表： $L_{12}(2^{11})$ 、 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 、 $L_{32}(2^1 \times 4^9)$ 、 $L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$  及  $L_{54}(2^3 \times 2^5)$  -----在这些直交表实验中，交互作用或多或少均匀地分布到各行中，使得我们可以较合理地来评价主因子效应。其实正是因为这个原因，这些直交表才成为最受推荐的直交表。

## 2.11 直交表选择及因子配置的主要步骤

总的来说，直交表的选择及表头的设计的主要步骤如下：

**确定列数** 根据实验目的，选择处理因子与不可忽略的交互作用，明确其共有多少个，如果与研究中的某些问题尚不太了解，列可多一些，但一般不宜过多。当每个实验号无重复，只有一个实验数据时，可设 2 个或多个空白列，作为计算误差项之用。

**确定因子的水平数** 根据研究目的，一般二水平可做因子筛选用；也可适用于实验次数少、分批进行的研究。三水平可观察变化趋势，选择最佳搭配；多水平能以一次满足实验要求。

**选定正交表** 根据确定的列数和水平数选择相应的正交表。例如观察 5 个因子 8 个一级交互作用，留两个空白列，其每个因子去 2 水平，则适宜选  $L_{16}(2^{15})$  表。由于同水平的正交表有多个，如  $L_8(2^7)$ 、 $L_{12}(2^{11})$ 、 $L_{16}(2^{15})$ ，一般只要表中列数比考虑需要观察的个数稍多一点即可，这样可以省工省时。

**表头安排** 应优先考虑交互作用不可忽略的处理因子，按照不可混杂的原则，将他们及相互作用首先在表头排妥，而后再将剩余因子任意安排在各列上。

例如某项目考察 4 个因子 A、B、C、D 及 A×B 相互作用，各因子均为 2 水平，现选取  $L_8(2^7)$  表，由于 AB 两因子需要考察其交互作用，故将二者优先安排在第 1、2 列，根据交互作用表查得 A×B 应排在第三列，于是 C 排在第 4 列，由于 A×C 交互作用在第 5 列，B×C 交互作用在第 6 列，虽然未考察 A×C 与 B×C，为避免混杂之嫌，D 就排在第 7 列。

**组织实施方案** 根据选定正交表中各因子占有列的水平数列，构成实施方案表，按实验号依次进行，共做 n 次实验，每次实验按表中横行的个水平组合进行。

## 2.12 本章小结

田口方法在 50 年代由田口玄一博士创始于日本,到 80 年代成功地被推广至美国,至今已经广泛盛行于欧美及亚洲等各国的数万家公司,成效显著。企业生产除致力于新产品、技术的开发和过程的改善外,更应重视品质意识的推广,事先预防品质问题的发生,以免造成企业因品质不良而导致难以估量的损失。而田口方法正是针对有效开发产品及改良过程的最佳品质工程技术,它的特点在于:低成本、高效率及数据化的指标,帮助企业做好品质管理和改善。田口方法最大的特性在于把品质定义为对社会的损失,因为品质是损失的函数,品质可以用金钱来衡量,所以有关品质的活动可以作为经济上的评价。

在产品开发和工程设计过程中,产品或过程的控制参数的确定和优化一直是令工程师最头疼的问题之一。欧美传统的做法是利用高深的统计学为基础的实验设计来解答。但自从田口方法的实验设计问世以来,此技术立即获得各国企业的广泛采用。至今,田口方法已经相当成熟,并被视为寻找产品和过程参数最节约成本和时间的方法。

田口方法的品质哲学主要有以下几个重要观点:

用社会损失来定义品质:产品出厂时所造成的社会损失愈小,表示品质愈高;  
用线外品质管理来改进品质:田口把产品发展分为产品设计、制作过程设计及制造过程 3 阶段,而产品波动的来源为,环境的波动、产品损坏及制造过程波动,只有在产品设计阶段能控制三种波动,所以在产品设计阶段考虑所有的波动,把产品设计好,才能事半功倍。

用直交表实验设计改善品质:田口将设计细分为系统设计、参数设计及容差设计三个阶段,基本上是由统计学的科学方法设计实验,以最少的实验次数获得最多的信息,达到最高的经济效益。

## 第三章 田口方法实验设计

### 3.1 设计理念

推板窑用推板的生产是一种小批量，多品种的生产方式，且其质量特征值的检验是破坏性的检查，并且天然的原材料和一般工厂生产的原材料相比，具有一定波动性，这些特点决定只采取在线品质控制，具有很大的难度，实践也证明，仅依靠在线品质控制，效果不明显。

推板的生产过程并不复杂，但是影响因子较多。因此，作者考虑运用田口方法，分析推板生产过程中控制因子及干扰因子，利用控制因子与质量特征值之间的非线性关系，及控制因子与干扰因子间的交互作用，通过正交试验来寻求最适宜的控制水准的组合，使得产品具达到以下目的：

- 稳健性---质量特征值波动小，抗干扰能力强。
- 调整型---当质量特性均值偏离目标值时，可以较方便地利用调整因子进行调整。
- 经济性---产品成本低，价格便宜。

下面的实验就是综合考虑推板生产系统的各种控制因子和干扰因子，根据因子的间的关系，设计合理的实验，求取得到控制因子的最佳水准组合，使得质量特征值对制造过程中的各种干扰因子不敏感，从而达到减少推板品质特征值波动的目的。

质量特征值分为计量和计数两大类，计数特性又分为计件特性、计点特性、和计数特性三种类型，而计量特性又可以分为以下三种类型，他们的 S/N 计算公式分贝如下：

望目特性

A) 望目特性第一型，用于必须同时考虑品质特性的波动及平均值的偏心值时：

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n} = -10 \log \left[ \left( \bar{y} - m \right)^2 + S^2 \right] \dots\dots 3.1 \text{式}$$

B) 望目特性第二型，用于存在一个或以上的【调整因子】，可以将平均值调至目标值，而使得偏心值可以不必计入，亦即只考虑品质特性的变异时：

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} = -10 \log(S^2) \dots\dots 3.2 \text{式}$$

C) 望目特性第三型，用于与上述望目第二型相同的情况，但是因为各组资料的平均值大小相差很大，所以比较【相对变异】会更加合理时：

$$S/N = -10 \log \left( \frac{S^2}{\bar{y}^2} \right) \dots\dots 3.3 \text{式}$$

大部分的望目特性第二型的情况可以以 3.3 式来计算品质，而不失其合理性，除非平均值很接近 0（这是还是使用 3.2 式）

望小特性的情况：

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} = -10 \log(\bar{y}^2 + S^2) \dots\dots 3.4 \text{式}$$

望大特性的情况

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \dots\dots 3.5 \text{式}$$

原点直线型

A) 原点直线型第一型，考虑品质特性的变异：

$$S/N = -10 \log(S^2) \dots\dots 3.6 \text{式}$$

B) 原点直线型第二型，用于与上述原点直线型第一型相同的情况，但是因为

各组资料的 值相差很大，所以将 放在分母（亦即考虑相对变异）会更合理时：

$$S / N = -10\log(\frac{S^2}{2}).....3.7式$$

大部分的原点直线型第一型的情况可以以 3.7 式来计算品质而不是其合理性，除非 很接近 0，这时还是要使用 3.6 式。

同时质量特性还可分为动态特性和静态特性两大类。

根据下面 3.2 小节分析，可以确定本问题属于一个静态的，望目特性的优化问题。

3.2 品质特征值及其理想的机能

经过多年的经验，已经证明，对于耐火材料推板来说最理想的质量特征值及其理想状态如下：

（属于望目特性，静态特性参数设计）

抗压强度：85（标准方差越小越好）

以上数值太小，推板的强度不够，就无法承受水平方向和垂直方向上的应力，容易超出负荷而发生掉块或断裂；抗折强度太大则使得推板的抗热冲击性能降低，会在升温或降温速度稍快的时候发生断裂，同时还会减低产品的使用寿命。至于理想数值何是以上数值，属于专业知识领域，这里不再详细论述。不属于本论文的论述范畴。

理想的质量特征值如下表 2

表 2 推板的质量特征值及其理想状态

质量特征植	理想状态（望目特性）	备注
抗压强度	85	标准方差越小越好

因此本实验的目的是：通过实验来寻找控制因子的最佳水准的组合，使的推板的

抗压强度处于目标值，且对于各种生产中的干扰因子不敏感，而达到减少品质特征值波动的目的。

### 3.3 实验过程

#### 3.3.1 生产过程详细说明及因子辨析：

我们公司是一家日本独资的企业，主要生产各种电子陶瓷烧成用耐火材料，包括以下几大系列：推板类。棚板类。匣钵类。三明治类。氧化锆垫板类等五大类。作为耐火材料，其主要作用就是“耐火”。电子陶瓷烧成用耐火材料的使用条件苛刻：烧成温度往往在 1200℃ 以上；酸性或还原性气氛的烧成气氛；高温荷重，比如推板的高温荷重有时超过 50KG；骤冷骤热的热冲击性；特别是推板还要在高温负荷下在窑炉内做往复运动，承受剪切和磨损的双重作用下，品质稍有不良的产品就容易发生断裂或开裂等问题，极易发生拱窑或堵窑现象，从而造成很大的经济损失。因此，目前推板的使用厂家在选择供应商时格外慎重，推板的生产厂家对推板的品质控制也特别的严格。

推板的生产过程并不复杂，但是其大多数工序的品质无法通过后续产品进行测量，或者测量的代价太高，导致整个过程的质量难以保证和控制。工艺流程如下：

原料混练 → 成型 → 干燥 → 烧成 → 最终检查

原料混炼：把各种原材料按照设定的比例，投入到混炼机中进行充分混合和搅拌，同时加入合适数量的水和其他一些添加剂，使混炼后的坯土具有一定的水分和颗粒级配，以便于成型。设备的图片如图 6 所示





图 6 混练机设备

Fig. 6 mixer

这个过程的控制因子：

- 各种原料及水分和黏合剂的配合比例
- 混练时间。

主要干扰因子：

- 内部干扰因子：原材料的化学成分的波动
- 内部干扰因子：原材料粒度的波动

过程的质量特性及理想状态：符合成型要求的坯土（包括水分、颗粒级配等）

用系统图示意如下图 7

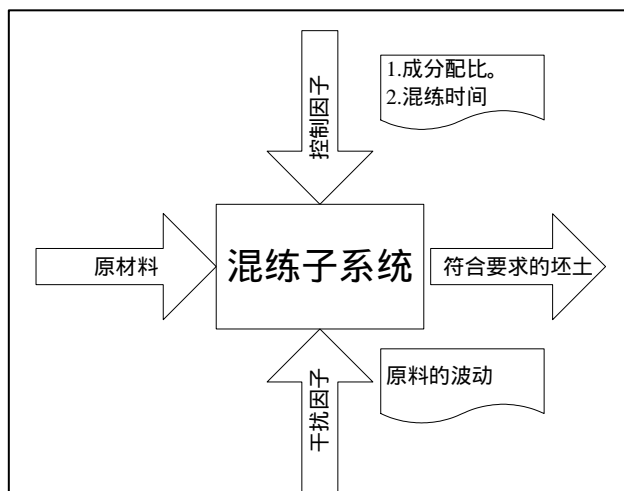


图 7 混练子系统示意图

Fig.7 The chart of mixing subsystem

成型：混炼后的坯土，经过大型压机的自动填料系统把坯料填充在模具中，然后在 1600 吨左右的压力下压制，成为具有一定水分和形状的坯体。生产设备如图 8 所示：



图 8 压机压制过程照片

Fig.8 The presser

质量特性：

- 偏析的有无
- 夹层的有无

### ■ 合乎图纸要图纸要求的厚度和其他尺寸

偏析和夹层的定义如下：

偏析——经过混炼的坯土在自然的状态下，应该是粒度混合均一的（熵最大）粉体。

但是在成型时，由于填料的过程如下图 9：

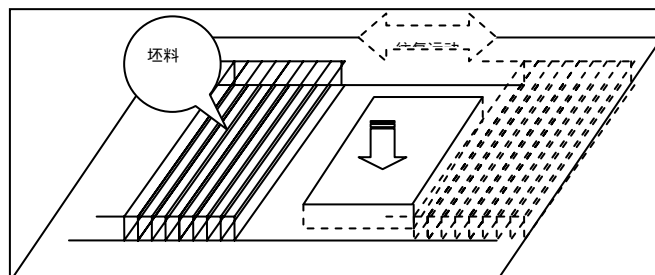
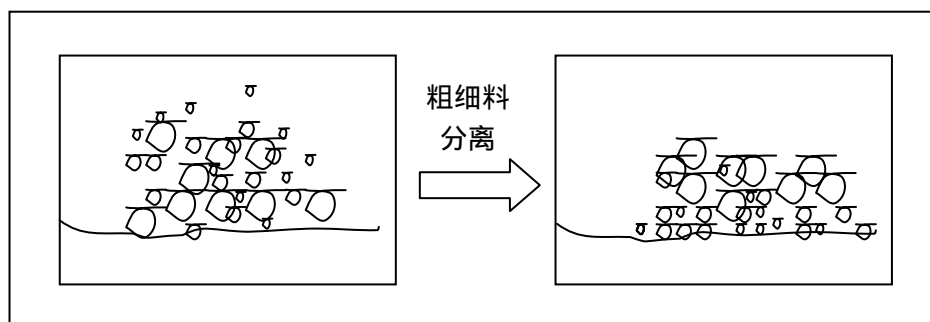


图 9 自动成型机填料过程示意图

Fig.9 The chart of auto-presser charging

在往复运动过程中，原本混合均一的坯料会发生大粒度和小粒度分离的现象，



一般是前部颗粒比较细，后部颗粒比较粗的情况。如图 10：

图 10 偏析形成示意图

Fig.10 The chart of segregate

偏析情况的出现会导致，同一枚推板上不同位置最终质量特征值的差异。

夹层：所谓夹层就是在成型过程中，坯土中的空气没有完全排尽，导致推板的质量特征值劣化，如图 11：

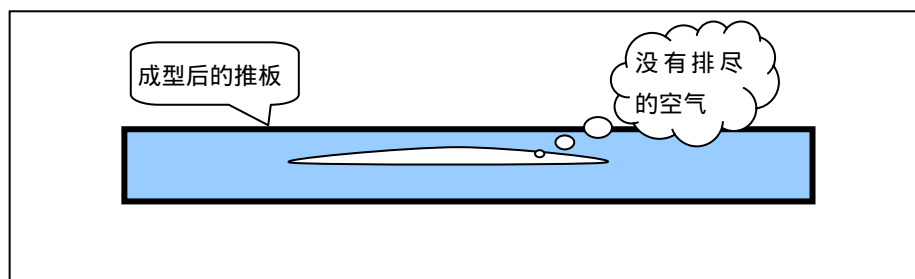


图 11 夹层形成示意图

Fig.11 The chart of architecture

质量特征值的理想状态：

- 没有偏析
- 没有夹层

控制因子：

- 成型压力
- 成型次数
- 填料系统得速度

主要干扰因子：

- 内部干扰因子：坯料的水分的波动
- 内部干扰因子：坯土的颗粒级配波动
- 外部干扰因子：模具的使用次数
- 外部干扰因子：天气，季节等

用系统图表现如下图 12：

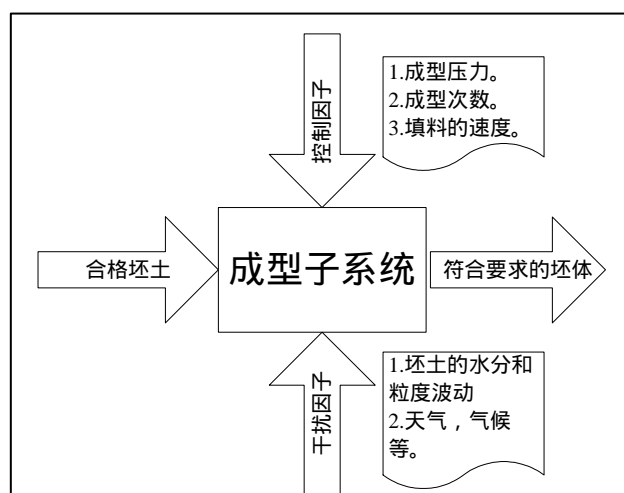


图 12 成型子系统示意图

Fig.12 The chart of pressing subsystem

干燥过程：干燥过程比较简单，其目的是为了快速烧成，而把坯体的在温度控制 100 度左右的干燥室中加热一定时间，使得坯体的水分下降到 0.3%以下，这样在烧成时可以快速烧成。如果干燥时间足够长（一般在 8 小时以上就足够了），左右的产品都可以达到此要求。干燥室如图 13



图 13 干燥室照片

Fig.13 The chart of drying room

质量特性：干燥坯体的水分

质量特征值理想状态：干燥坯体的水分在 0.3%以下。

干扰因子：无

用系统图表现如下图 14：

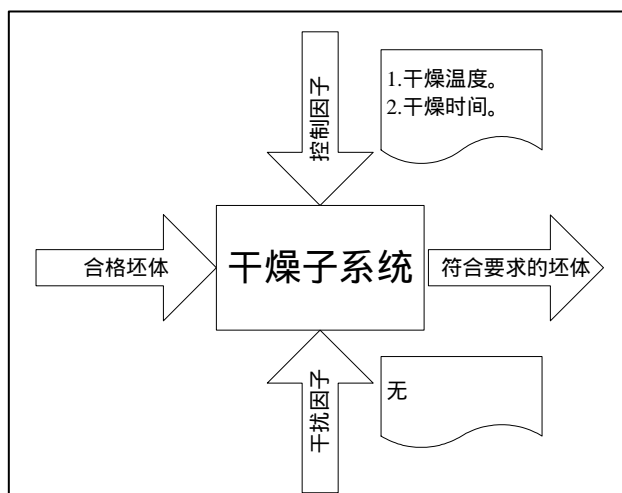


图 14 干燥子系统示意图

Fig.14 The chart of drying subsystem

烧成：烧成过程是一个复杂的过程，在这个过程中，成型好的坯体在梭式窑中保持一定温度和烧成时间及在一定的气氛下发生复杂的物理化学反映，使的烧成好



的产品具有一定的强度和需要的内部化学结构。烧成设备窑炉见如图 15

图 15 烧成窑炉图

Fig.15 The chart of kiln

此过程的质量特性即产品的最终质量特性：

- 推板的抗压强度
- 质量特征值的理想状态：
- 推板的常温抗压强度：85

控制因子：

- 保温时间
- 最高烧成温度
- 保温阶段的气氛

干扰因子：

- 内部干扰因子：窑炉烧成气氛的波动
- 测量干扰因子：窑炉的水平温差和上下温差。（在窑炉的上下，左右不同位置，有温差而造成产品的最终质量特征值不同。）如图 16 所示。

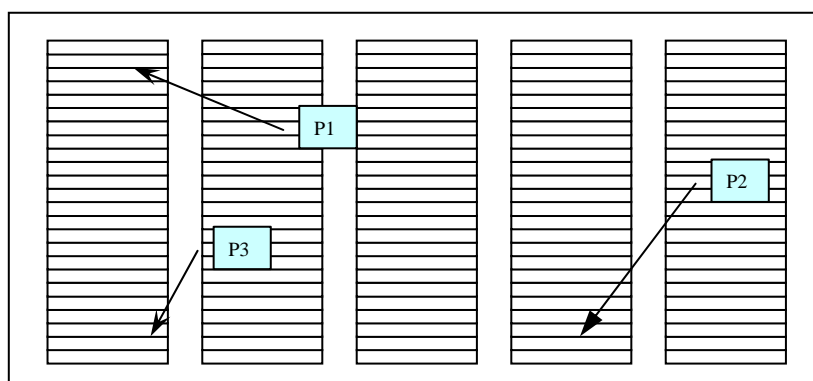


图 16 窑炉的水平温差示意图

Fig.16 Horizontal distribution of kiln temperature

用系统图表现如下图 17

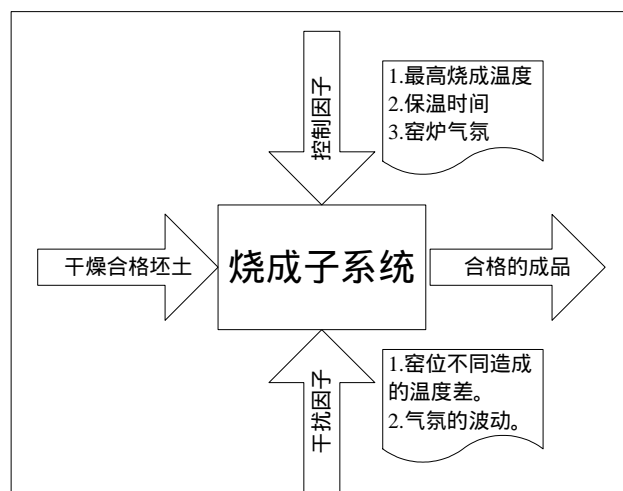


图 17 烧成子系统示意图

Fig.17 The chart of kiln subsystem

整个过程的自动化程度较高，因此人的影响因子较少。根据以上说明，各个影响因子可以用鱼刺图表达如下图 18：



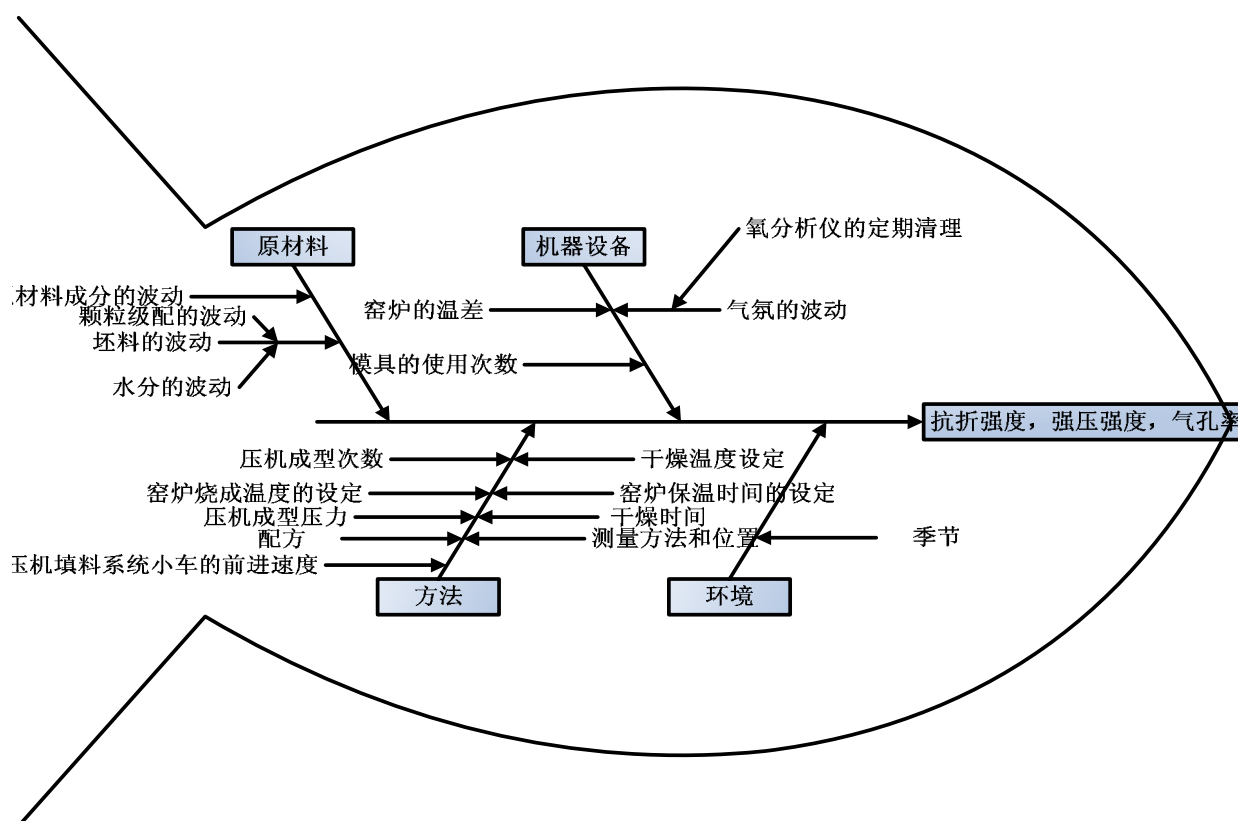


图 18 影响因子鱼刺图

Fig.18 The fishbones chart of effect facts

### 3.3.2 因子选定及可能的交互作用分析

#### 3.3.2.1 因子分析及选定

##### 3.3.2.1.1 过程中所有的控制因子和干扰因子

根据以上的分析，整个生产过程包含以下可能的控制因子和干扰因子：

控制因子：

- 烧成温度
- 配方
  - CAD-01 比例

- FS-02 比例
- 水分
- 压机成型次数
- 压机成型压力
- 压机填料系统填料小车前进速度
- 保温时间
- 干燥时间
- 干燥温度
- 窑炉的气氛（氧气浓度）

干扰因子：

内部干扰因子（控制因子的波动干扰）

- 原材料成分的波动
  - CAD-01 的波动
  - FS-01 的波动
- 颗粒级配的波动
- 水分的波动
- 窑炉的温度波动
- 气氛的波动

外部干扰因子的波动：

- 季节（引起的温度变）
- 模具使用次数（模具的磨损）

测量干扰因子：

- 测量位置（的差异）

所有可能的控制因子和干扰因子组成的整个生产系统如下图 19:

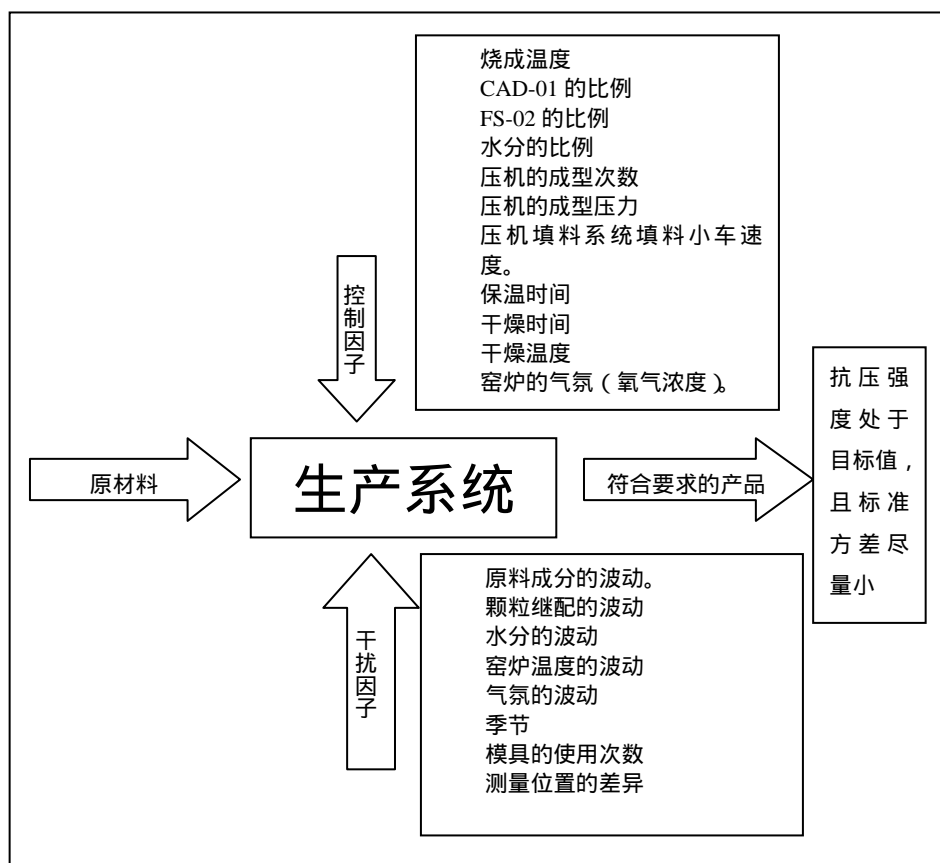


图 19 主要要素系统图

Fig.19 The chart of main facts system

### 3.3.2.1.2 实验因子选定和分析

#### 3.3.2.1.2.1 控制因子的选定和分析：

根据以往的数据及经验，选定以下因子作为本次田口实验窑考察的控制因子：

- A. 烧成温度
- B. 保温时间
- C. CAD-1 的比例
- D. FS-02 的比例
- E. 填料系统填料小车的速度
- F. 窑炉的气氛（氧气浓度）

选定的理由及分析：

- 烧成温度的高低会影响产品内部的物理化学变化，直接决定产品的抗压强度，是对抗压强度影响最大的控制因子；
- 保温时间（最高温度）对内部的物理化学变化也有重要影响，而且估计会和烧成温度会有交互作用，至于交互作用的大小，需要确认；
- CAD-1 的含量直接影响烧成产品的强度，氧化铝含量高，一般则烧成温度高一些；
- FS-02 的含量根据以往的数据推断，也是影响产品强度的主要因子之一；
- 填料系统小车的速度会影响量产品的强度的均一性，对产品不同位置的强度差异有很大影响，故选为控制因子；
- 窑炉的气氛影响，以往的历史数据表明：在还原气氛和在氧化气氛下，窑炉中发生的物理化学反应过程会受到一定影响，从而对产品的强度造成影响。

而压机的成形次数和成形压力的设定，对于成型过程来说是重要的控制因子之一，压机成形次数和成形压力的设定不合适会造成，在成形过程中产生夹层，夹层的产生是绝对不允许的。一旦产生夹层，在中间检查发现时，是作为不良品来处置，不会让它流入的下一个工序。但是就对成形合格的产品而言，即使不同的成形次数和成形压力，对最终产品的强度的影响很小。同样颗粒级配也是主要影响成形过程的品质，对最终的产品的强度有一定的影响，但是由于颗粒级配不容易控制——在生产过程中，由于来自国外的原料颗粒级配波动比较大，在使用过程中，无法根据需要进行控制，因此不作为控制因子。（虽然颗粒级配由于波动大，而难以控制，没有最为控制因子来评价，但是其波动程度的大小对于产品的强度还是一定的影响的。在干扰因子选择时，会选定原料的粗细作为干扰因子的。）干燥温度和干燥时间的设定会影响干燥后产品的水分，如果水分太高，在烧成过程中会造成产品的开裂。但是只要干燥时间和干燥温度合适，水分控制的好，一般不会出现开裂。而对产品的最终轻度则没有影响。坯料的水分同样也仅仅会影响成形过程的品质，对最终产品的品质则没有影响。

烧成温度和保温时间的交互作用分析：

从理论上来分析，烧成温度过高，会造成过烧，反而会降低产品的强度。如图 3.8 所示；但是目前的实际情况是窑炉的最高烧成温度在 1430 左右，再高的温度

难以生高上去。所以从显示情况来看，不会出现如图 20 所示的情况，可以保证质量特征值的单调性。

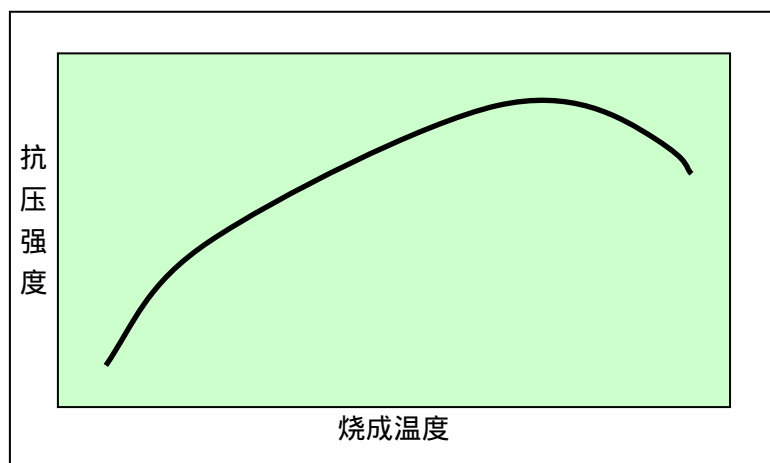


图 20 产品过烧示意图

Fig.20 Over-firing of product

一般来说在温度不变的情况下，耐火材料的化学反应会随时间的推移，逐步趋于完全，同时产品的强度也会随之发生与上图 3.8 同样的变化。但是由于保持温度延长会多消耗天然气，而且在达到最高点之前，已经可以达到我们的目标强度，所以我们在设定保温时间时，不论出于节约能源考虑，还是出于达到实验的目的，都会让品质特性-抗压强度在设定的保温时间内，保持单调增长。

关于烧成温度和保温时间的之间的交互作用，估计二者之间存在着交互作用，至于作用的强弱，并不清楚。如果二者是强交互作用，则需要考虑单独交互作用的影响，如果仅仅是若交互作用，则可以忽略。因此二者的交互作用的强弱决定着是否需要考虑二者之间的交互作用。下面通过实验来确认二者之间的交互作用的强弱。实验的方法如下：

- 在目前的控制条件下，烧成温度 1410℃，保温时间分别控制在 2 小时、4 小时、6 小时，分别测量放在窑炉中相同位置的台板的抗压强度。（为了避免其他因子的影响，而保持相同的实验条件）
- 在目前的控制条件下，烧成温度控制在 1430℃，分别保温 2 小时、4 小时、6 小时，分别测量放置在窑炉相同位置的台板的抗压强度。（为了避免其他因子的干扰，而保持相同的实验条件）

得到的检测数据如下表 3

表 3 不同烧成温度下保温时间不同实验的数据

EXP		烧成温度 1410	烧成温度 1430
1	保温 2 小时	82	88
2	保温 4 小时	83	92
3	保温 6 小时	86	97

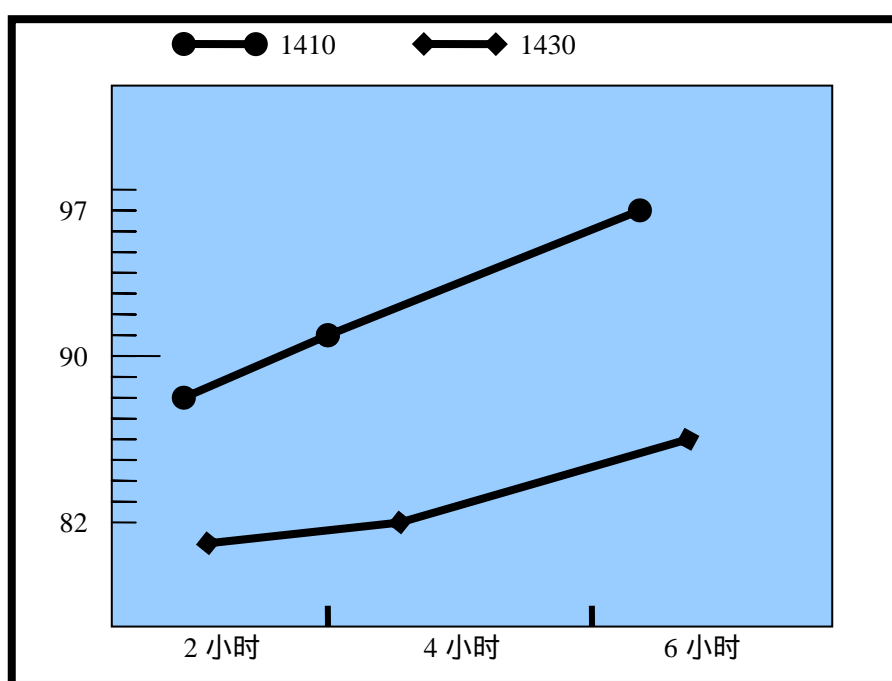


图 21 烧成温度和保温时间交互作用图

Fig.21 The interact of firing temperature & keeping time

从烧成温度和保温时间的交互作用图(图 21)上可以看出,虽然两者存在着交互作用,但是二者基本平行,在控制范围内不会相交,属于弱交互作用,根据田口方法对交互作用处理的原则:该交互作用可以忽略。

### 3.3.2.1.2.2 干扰因子的选定与分析：

根据各种干扰因子对质量特性的影响程度不同，确定以下因子作为本次实验评考察的干扰因子：

- p. CAD-01 原料成分的波动
- q. 窑炉中放置位置的不同（引起的温度偏差）
- r. 原料颗粒级配偏差
- s. 测量位置的不同

干扰因子选定的理由和分析：

- 公司原来是使用日本朝和公司的 CAD-01 原料，品质非常稳定，主要是日本方面对品质的稳定性控制的非常好——由于采用了予混合技术（在原料出厂前，对一大批原料进行充分混合，即使是开采时有较大差别的原料，通过予混合后，也能确保出厂时具有均一稳定的成分。）和其他控制技术，所以日本的原料非常的稳定均一。而由于成本压力，采用国产原料之后，原料的均一性就变的非常差了，经常是一批原料氧化铝含量高一点、一批低一点造成了产品抗压强度的波动明显变大。如下数据对比数据图 22：

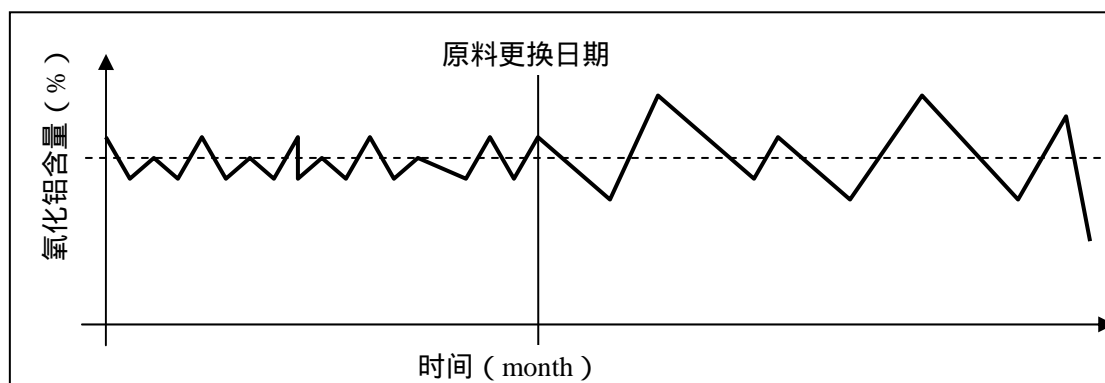


图 22 原料氧化铝成分的波动，而引起的抗压强度波动变大图

Fig. 22 The trends chart of material components fluctuations

因此把 CAD-01 原料氧化铝含量的波动作为干扰因子之一。

- 窑炉中放置位置的不同（引起的偏差）在前面已经进行详细说明过，数

据表明这个因子是主要的干扰因子之一。

- 原材料颗粒继配的波动，除了会影响成型性能外，也会由于颗粒继配的波动，而影响成型产品的密实程度，从而影响推板的抗压强度，因此此因子也作为主要的干扰因子之一。
- 由于成型过程中，原料填充系统填充小车在来回往复运动，造成的偏析及其他一些原因，造成产品的强度在不同位置差别交大，一般来说后面要大一些，而前面则小一些。因此测量位置的不同也是重要的干扰因子。

至于其他没有定为干扰因子的因子的分析，在此也简要说明一下：

- FS-01 的波动，FS-01 由于品质原因，目前国内还没有找到替代品，起品质的一直十分的稳定；而且其轻微的波动对质量特征值影响较小，远不象对 CAD-01 那么敏感，因此没有把 FS-01 成分的波动作为要评价的干扰因子。
- 水分的波动虽然会对成型过程的性能有一些影响，但是对于产品的最终质量特性几乎没有影响，这个也可以理解——在烧成过程中，水分基本上全部要挥发掉。并不参与化学反映，因此其波动对质量特征值没有影响。
- 窑炉的温度波动——是指窑炉按照设定的程序进行烧成时，实际温度与设定温度之间的差别。由于各种热电偶的偏差等设备误差等原因，设定温度和实际温度总是有一些差别。但是由于所采用的窑炉是进口的设备，温度的波动十分小。用测温块检测到的数据表明，这种温度波动和窑炉中上下位置所造成的温度差相比较很小，可以忽略不计或在误差范围内。故在本实验中选定窑炉中位置不动（所引起的温差）作为干扰因子，而忽略了窑炉的温度波动。
- 气氛的波动是指窑炉中的气氛并不是均匀的，有的地方氧气浓度高一些，有的地方氧气浓度低一些，这个会对产品特征值有一定影响，但是影响不大，而且这个因子不好进行控制。另外在本实验中选取窑炉中放置位置的不同，就包含有气氛波动的贡献。故不再选取本因子作为干扰因子。
- 季节---指季节的不同，造成的环境温度的差异，这个因子的确会对产品的成形性能造成一些影响，但对最终的质量特征值则影响有限，又由于环境温度的变化在现实生产中成本太高。故不作为考察的干扰因子。



- 模具的使用次数和氧分析仪的等干扰因子，对品质特征值的影响很小，故不再考察。

### 3.3.3 干扰策略的选定及说明：

选择何种干扰策略去干扰控制因子，以评价干扰因子所引起的变异和波动，需要根据各种干扰因子的具体情况来确定。常用的干扰策略有三种：随机实验、内外表实验、干扰实验，一般在应用是三种干扰策略联合使用。本次实验的干扰因子确定如下：

- p. CAD-01 原料成分的波动
- q. 窑炉中放置位置的不同（引起的温度偏差）
- r. 原料颗粒级配偏差
- s. 测量位置的不同

干扰因子选择理由：

- CAD-01 原料成分的波动，主要是氧化铝含量的波动，虽然成分波动是随机的，但是由以往的数据可以表明，产品的品质特征是随氧化铝含量单调递增的，因此在进行干扰实验时，确定其水准时，可以参考以往的历史数据，在可以接受的范围内（CAD-01 的验收标准范围内），分别取两边的极端水准。
- 窑炉中放置位置的不同（因子的温度偏差），在窑炉中，由于热空气密度小的原因，热量具有向上流动的趋势。因此在窑炉中，一般上部温度高一些，而下部温度低一些，而品质特征值在实验的范围内是单调递增的，因此在确定水准时，分别选取窑炉的顶部和底部。如果质量特征值对此干扰具有鲁棒性，相信对于实际的窑炉中放置位置的不同具有鲁棒性。
- 原料颗粒级配偏差：原料颗粒级配的波动也一直是困扰台板品质的一个重要因子，颗粒级配虽然难以得到稳定控制，但是其波动还是有一定规律的：粗细之分；
- 测量位置的不同，分别取台板的前部和后部作为其水准，这两个方位差别最大。

根据以上分析，干扰因子采取以内直交表来设置的方式来干扰控制因子，以评

价干扰因子的波动。

3.3.4 因子水准确定

而干扰因子的水准决定如下表 4：

表 4 干扰因子水准一览表

干扰因子	干扰因子水准 1	干扰因子水准 2
CAD-01 原料成分的波动	氧化铝含量高的批次 1	氧化铝含量低的批次 2
窑炉中放置位置的不同	放置在窑炉的顶部	放置在窑炉的底部
原料颗粒级配偏差	颗粒级配粗的批次	颗粒级配细的批次
测量位置的不同	台板的前部取样测量	台板的后部取样测量

控制因子水准的确定：

原控制因子水准见下表 5：

表 5 原来控制的因子的水准表

因子符号	说明	原设计值
A	烧成温度	1430
B	保温时间	4HRS
C	CAD-01	33%
D	FS-02	25%
E	填料系统速度	40%
F	窑炉气氛(O <sub>2</sub> 浓度)	-2.50%

各控制因子的水准确定如下表 6

表 6 各控制因子的水准

因子	说明	LEVEL1	LEVEL2	LEVEL3
A	烧成温度	1410	1430	
B	保温时间	2 小时	4 小时	6 小时
C	CAD-01	28%	33%	36%
D	FS-02	35%	25%	10%
E	填料系统速度	40%	50%	60%
F	窑炉气氛(O <sub>2</sub> 浓度)	-4.50%	-2.50%	2.0%

各控制因子的详细说明如下表 7：

控制因子说明表 7

控制因子	说明
A . 烧成温度	烧成温度不同，会影响其中的化学反映和物理反映，直接影响产品的抗压强度。
B . 保温时间	保温时间对产品中化学反应的程度有直接的影响，反应时间的长短，决定其中的化学成分的不同，不同保温时间，对应不同的抗压强度。
C . CAD-01 比例	CAD-01 是构成产品的主要成分和原料，其比例的多少，对烧成时发生的化学反应有重要的影响，烧成后的化学成分则对产品的抗压强度有重要影响。
D . FS-02 比例	FS-02 也是构成产品的另外一种重要成分，对产品的物理和化学组分都有重要的影响，因此对最终的产品的抗压强度有重要影响。
E . 填料系统小车速度	填料系统小车速度是决定每块台板不同位置均一性最重要的因子。
F . 窑炉气分	窑炉的气氛是氧化还是还原气氛对产品的强度也有重要影响。

### 3.3.5 直交表的选定与因子配置

根据控制因子的数量，及各个控制因子之间的交互作用情况，外表决定选用  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ ，内表决定选择  $L_8(2^4)$ ，直交表如下表 8，其中 A-F 为控制因子；P-S 为干扰因子。

表 8 本次田口实验的直交表（包括内表和外表）

							p	1	1	1	1	2	2	2	2
							q	1	1	2	2	1	1	2	2
							r	1	2	1	2	1	2	1	2
							s	1	2	2	1	2	1	1	2
EXP	A	B	C	D	E	F	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	1	1	1	1	1									
2	1	1	2	2	2	2									
3	1	1	3	3	3	3									
4	1	2	1	1	2	2									
5	1	2	2	2	3	3									
6	1	2	3	3	1	1									
7	1	3	1	2	1	3									
8	1	3	2	3	2	1									
9	1	3	3	1	3	2									
10	2	1	1	3	3	2									
11	2	1	2	1	1	3									
12	2	1	3	2	2	1									
13	2	2	1	2	3	1									
14	2	2	2	3	1	2									
15	2	2	3	1	2	3									
16	2	3	1	3	2	3									
17	2	3	2	1	3	1									
18	2	3	3	2	1	2									

### 3.4 本章小节

本章首先介绍了本试验的设计理念：品质特征值根据不同的用途，具有不同的分类；通过辨析，本设计属于望目特性的静态特性参数设计（计量特性）。田口设计分为：系统设计，参数设计和容差设计三个阶段。其核心是参数设计，本论文只

是对参数设计进行了论述，对其他两阶段没有涉及。从整体上弄清楚本论文的设计理念和定位，有利于对本论文的理解。

在第三小节，本论文对本公司的生产流程进行了详细的说明，对生产过程中的各个过程的所有各种可能的因子（包括控制因子，内部干扰因子，外部干扰因子及测量因子）通过系统图和鱼刺图进行了说明，然后依据自己的经验、历史数据、实验等方法，通过这些因子对质量特征值的影响程度的分析，选出本实验的要评价的控制因子和干扰因子。然后根据所选定干扰因子的特性和实际情况确定干扰策略；最后依据控制因子的数量和水准选择合适的直交表外表（也可以通过 MINTAB 直接查处合适的直交表），依据干扰因子的数量和特性选择合适的直交表内表，通过合适的干扰策略对控制因子的干扰来评价各个实验方案的  $S/N$  比的大小，从而确定控制因子的最佳水准。

第四章 结果分析与讨论

4.1 实验结果及计算结果

4.1.1 实验结果

实验结果如下图 9

表 9 试验的结果

							p	1	1	1	1	2	2	2	2
							q	1	1	2	2	1	1	2	2
							r	1	2	1	2	1	2	1	2
							s	1	2	2	1	2	1	1	2
EXP	A	B	C	D	E	F	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	1	1	1	1	1	94.2	87.56	104.65	94.83	85.36	85.41	81.16	95.83	
2	1	1	2	2	2	2	97.56	99.2	110.58	94.03	91.28	97.23	80.01	89.85	
3	1	1	3	3	3	3	87.25	89.56	108.65	91.53	82.79	95.62	86.98	95.32	
4	1	2	1	1	2	2	82.25	89.56	108.65	91.53	82.79	72.52	76.5	73.95	
5	1	2	2	2	3	3	85.62	87.58	98.54	95.32	94.25	94.65	93.87	92.94	
6	1	2	3	3	1	1	94.39	92.68	91.86	92.45	92.87	95.62	97.65	95.24	
7	1	3	1	2	1	3	96.32	92.54	97.54	85.62	92.53	96.32	94.64	92.35	
8	1	3	2	3	2	1	94.28	98.23	99.65	94.83	101.06	89.41	85.65	95.84	
9	1	3	3	1	3	2	94.65	95.65	99.65	92.65	89.56	97.25	80.01	88.65	
10	2	1	1	3	3	2	87.25	99.65	99.87	93.21	89.52	95.23	93.25	94.25	
11	2	1	2	1	1	3	79.65	85.65	95.21	98.32	92.65	88.56	87.65	89.65	
12	2	1	3	2	2	1	99.65	98.65	97.25	96.25	94.25	93.28	91.69	92.85	
13	2	2	1	2	3	1	86.25	84.25	86.35	82.65	89.65	81.52	91.25	84.52	
14	2	2	2	3	1	2	95.65	78.65	95.65	88.52	84.25	83.58	89.65	87.65	
15	2	2	3	1	2	3	99.65	88.65	89.65	94.65	92.65	91.65	95.12	93.25	
16	2	3	1	3	2	3	88.65	89.32	86.53	86.65	87.62	83.21	81.89	84.95	
17	2	3	2	1	3	1	79.65	87.21	81.25	83.25	94.52	96.32	89.21	87.21	
18	2	3	3	2	1	2	97.98	85.62	86.65	85.21	84.32	75.23	87.92	89.3	

4.1.2 计算结果：

对于试验 1，计算过程如下：

假设本实验存在调节因子，可以通过调节因子使得质量特性平均值达到目标值，则适用于望目特性第三型，即 4.1 式

$$S/N = -10 \log \left( \frac{S^2}{\bar{y}^2} \right) \dots\dots 4.1 \text{式}$$

求得：

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{8} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) \\ &= \frac{1}{8} (94.2 + 87.56 + 104.65 + 94.83 + 85.36 + 85.41 + 81.16 + 95.63) \\ &= 91.13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{(94.2-91.13)^2 + (87.56-91.13)^2 + (104.65-91.13)^2 + (94.83-91.13)^2 + (85.36-91.13)^2 + (85.41-91.13)^2 + (81.16-91.13)^2 + (95.63-91.13)^2}{8-1}} \\ &= 7.62 \end{aligned}$$

然后由 4.1 式可求：

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left( \frac{S^2}{\bar{y}^2} \right) \\ &= -10 \log \left( \frac{7.62^2}{91.13^2} \right) \\ &= 21.56 \end{aligned}$$

同理可以求出其他各行的 AVE 和 S/N, 实验结果及计算结果如下表 10

表 10 本次的实验结果的计算

							p	1	1	1	1	2	2	2	2			
							q	1	1	2	2	1	1	2	2			
							r	1	2	1	2	1	2	1	2			
							s	1	2	2	1	2	1	1	2			
EXP	A	B	C	D	E	F	1	2	3	4	5	6	7	8	ave	s	s/n	
1	1	1	1	1	1	1	94.2	87.56	104.65	94.83	85.36	85.41	81.16	95.83	91.13	7.62	21.56	
2	1	1	2	2	2	2	97.56	99.2	110.58	94.03	91.28	97.23	80.01	89.85	94.97	8.77	20.70	
3	1	1	3	3	3	3	87.25	89.56	108.65	91.53	82.79	95.62	86.98	95.32	92.21	7.93	21.31	
4	1	2	1	1	2	2	82.25	89.56	108.65	91.53	82.79	72.52	76.5	73.95	84.72	4.39	25.71	
5	1	2	2	2	3	3	85.62	87.58	98.54	95.32	94.25	94.65	93.87	92.94	92.85	4.22	26.85	
6	1	2	3	3	1	1	94.39	92.68	91.86	92.45	92.87	95.62	97.65	95.24	94.10	1.98	33.52	
7	1	3	1	2	1	3	96.32	92.54	97.54	85.62	92.53	96.32	94.64	92.35	93.48	3.76	27.92	
8	1	3	2	3	2	1	94.28	98.23	99.65	94.83	101.06	89.41	85.65	95.84	94.87	5.19	25.24	
9	1	3	3	1	3	2	94.65	95.65	99.65	92.65	89.56	97.25	80.01	88.65	92.26	6.18	23.48	
10	2	1	1	3	3	2	87.25	99.65	99.87	93.21	89.52	95.23	93.25	94.25	94.03	11.86	17.98	
11	2	1	2	1	1	3	79.65	85.65	95.21	98.32	92.65	88.56	87.65	89.65	89.67	5.81	23.77	
12	2	1	3	2	2	1	99.65	98.65	97.25	96.25	94.25	93.28	91.69	92.85	95.48	2.90	30.36	
13	2	2	1	2	3	1	86.25	84.25	86.35	82.65	89.65	81.52	91.25	84.52	85.81	3.32	28.24	
14	2	2	2	3	1	2	95.65	78.65	95.65	88.52	84.25	83.58	89.65	87.65	87.95	5.87	23.51	
15	2	2	3	1	2	3	99.65	88.65	89.65	94.65	92.65	91.65	95.12	93.25	93.16	3.45	28.62	
16	2	3	1	3	2	3	88.65	89.32	86.53	86.65	87.62	83.21	81.89	84.95	86.10	2.59	30.42	
17	2	3	2	1	3	1	79.65	87.21	81.25	83.25	94.52	96.32	89.21	87.21	87.33	5.96	23.32	
18	2	3	3	2	1	2	97.98	85.62	86.65	85.21	84.32	75.23	87.92	89.3	86.53	6.28	22.79	
aver=																25.29		

4.2 因子效果分析

4.2.1 因子对 S/N 比的分析

由表 9 可以计算因子反应，计算因子对 S/N 比的反应如下表 11：

表 11 因子对 S/N 比的反应表

	A	B	C	D	E	F
Level 1	25.14	22.61	21.75	24.41	25.51	27.04
Level 2	25.45	27.74	23.90	26.14	26.84	22.36
Level 3		25.53	26.68	25.33	23.53	26.48
Effect	0.30	5.13	4.93	1.73	3.31	4.68
Rank	6	1	2	5	4	3



由表 11 作出因子对 S/N 比的反应图 23

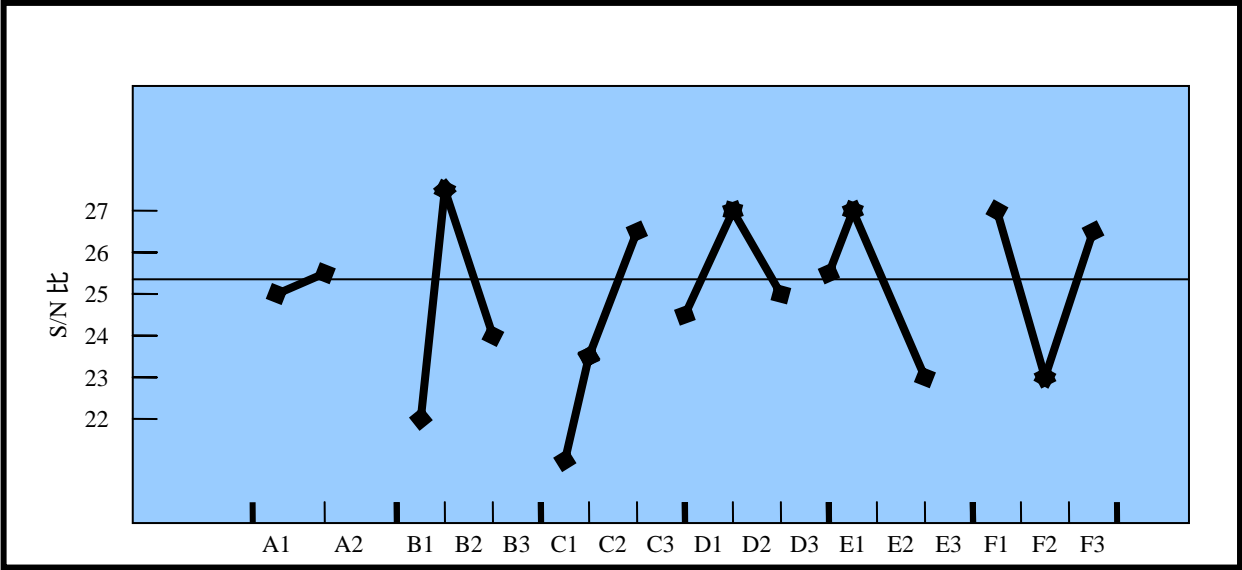


图 23 因子对 S/N 比的反应图

Fig.23 The facts action to S/N

4.2.2 因子对质量特征值的分析

由表 11 作出因子对品质特性的反应表 12

表 12 因子对品质特性的反应表：

	A	B	C	D	E	F
Level 1	92.29	92.91	89.21	89.71	90.47	91.45
Level 2	89.56	89.76	91.27	91.52	91.55	90.08
Level 3		90.09	92.29	91.54	90.75	91.25
Effect	2.72	3.15	3.08	1.83	1.08	1.38
Rank	3	2	1	4	6	5

由表 12 因子对品质特性的反应表可以做出因子对品质特性的反应图 24

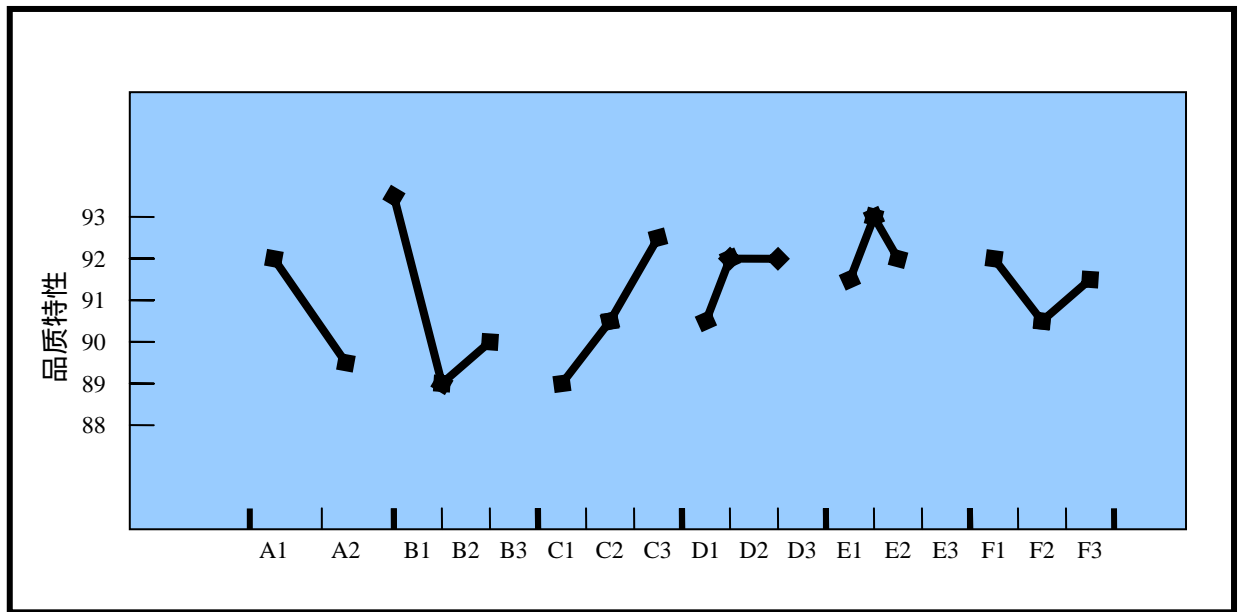


图 24 因子对品质特性的反应图

Fig.24 The facts action to quality characteristic

#### 4.2.3 因子效应的重要性分析

##### 4.2.3.1 因子效应分析的原理介绍：

变异分析的目的是评价试验误差，在田口方法中，某一个因子水准的变化，带来的质量特征值的变化，一方面是因子效应，一方面是试验的误差造成的，我们在计算预测质量特征值时，是否要考虑此因子的因子效应，依赖于此因此的效应是否重要，是否有意义的，只有其重要性达到某一程度的因子效应才会被用在预测的公式中，其他重要性不足以达到该程度的因子效应则被视为可能只是试验误差造成的偶发效应。而这个重要性的测试就是通过[重要性测试]来完成。

##### A) 中心极限定理和 F 分布：

中心极限定理：假设  $y$  代表从某一个样本空间所随机抽取的数据，而  $z$  则代表从同一个样本空间所随机抽样的  $m$  个数据的平均值，假设有无限多个样本，则  $z$  的格律分布具有以下特点：

无论  $y$  是否正态分布， $z$  呈现正态分布。

z 的品均值和 y 的平均值相等。  
z 的标准偏差是 y 的标准变差的  $\frac{1}{\sqrt{m}}$

当 m 值接近无穷大时，其概率分布集中在中间极限值。

B) F 分布：

假设我们将 n 个数字球放在一个袋子里，这些数字 y 的平均值为  $\bar{y}$ ，标准偏差为  $S_y$ ；现在我们从袋子中抽取 m 个数字，取其平均值，并重复这个动作，直到数字球抽取完为止，我们称这些样本平均值为 z。注意，y 和 z 来自同一个样本空间；y 的自由度  $D0F_y = n$ ，而 z 的自由度  $D0F_z = n/m$ 。根据中心极限定理，我们可以由 z 的标准偏差来估计 y 的标准偏差：

$$\sqrt{m}S_z \rightarrow S_y \dots\dots 4.2 \text{式}$$

上式可以写成如下形式：

$$\frac{mS_z^2}{S_y^2} \rightarrow 1 \dots\dots 4.3 \text{式}$$

上式当样本空间趋向于无穷大时，其值为 1，但是当有限的样本空间时，则：

$$F = \frac{mS_z^2}{S_y^2} \dots\dots 4.4 \text{式}$$

上式中 F 值的分子代表由样本平均值所估计的原样本的变异数（定义为标准偏差的平方），而分母所代表直接有原样本估计的变异数。当样本空间无穷大时，F 为 1，即上述两个估计值相等。当为有限的样本时，则 F 值就变成了概率问题，F 值的概率密度曲线示意图如下图 25：

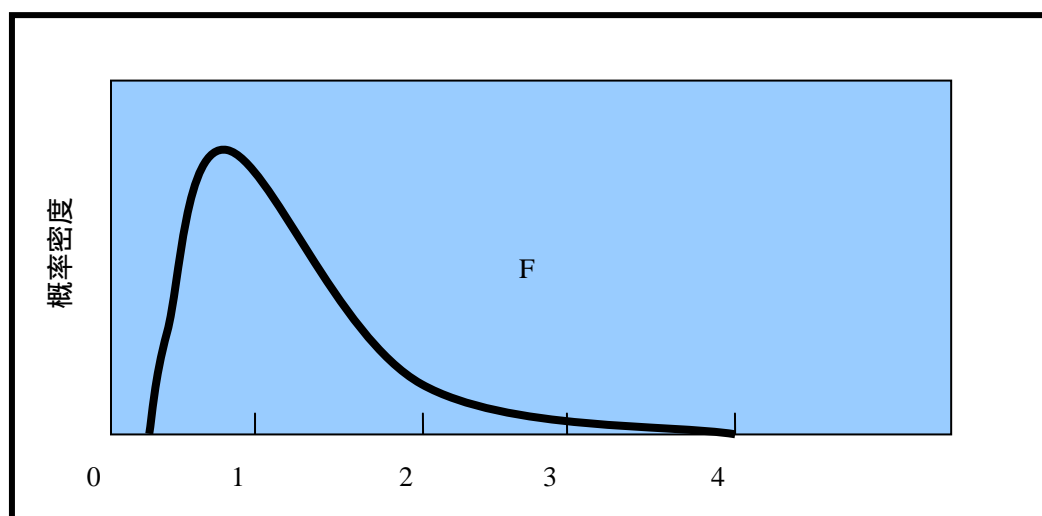


图 25 “F” 分布示意图

Fig. 25 The chart of “F”

F 分布曲线的形状和  $DOF_y$  即  $DOF_z$  有关，下列的 Microsoft Excel 函数可以计算在  $y$  与  $z$  的自由度分别为  $DOF_y$  及  $DOF_z$  的情形下， $F$  大于  $x$  的概率（亦即 F 分布曲线下，横坐标大于  $F$  的面积）：

$$FDIST(x, DOF_z, DOF_y) \dots\dots 4.5 \text{ 式}$$

我们可以利用 F 分布来测试两个估计的变异数 ( $MS^2$  与  $S^2$ ) 是否来自与同一个样本空间：二者的比值 ( $F$  值) 越大，则他们来自与同一样本空间的可能性越小，换句话说两者的估计值来自同一个样本空间的概率很小，另一种说法：我们有很强的信心相信，这个变异数估计值不是来自完全一样的样本空间——在直交表试验的应用上，很有可能是某一个因子效应改变了样本空间，我们说这个因子效应是重要的或者或是有意义的。

#### 4.2.3.2 因子对质量特征值的重要性分析：

分析因子 A 的重要性：

计算 A 因子的平方和：

$$\begin{aligned}
 SS_A &= \frac{n * r}{L} \sum_{k=1}^n (\bar{y}_k - \bar{y})^2 \\
 &= 18 * 8 / 2 * [(25.14 - 25.29)^2 + (25.45 - 25.29)^2] \\
 &= 72 * (0.023 + 0.026) \\
 &= 3.31
 \end{aligned}$$

计算 A 因子的自由度：

$$DOF_A = 2 - 1 = 1$$

计算变异数：

$$\begin{aligned}
 VAR &= SS_A / DOF_A \\
 &= 267.27
 \end{aligned}$$

计算误差的平方和：

$$\begin{aligned}
 SS_{ERROR} &= \sum_{i=1}^n S_i^2 * (r - 1) \\
 &= (8 - 1) * [7.62^2 + 8.77^2 + 7.93^2 + 4.39^2 + 4.22^2 + 1.98^2 + 3.76^2 + 5.19^2 + 6.18^2 \\
 &\quad + 11.86^2 + 5.81^2 + 2.90^2 + 3.32^2 + 5.87^2 + 3.45^2 + 2.59^2 + 5.96^2 + 6.28^2] \\
 &= 4478.73
 \end{aligned}$$

计算误差的自由度：

$$DOF_{ERROR} = 18 * (8 - 1) = 126$$

计算误差的变异数：

$$VAR = SS_{ERROR} / DOF_{ERROR} = 35.55$$

计算 F 值：

$$F = 367.27 / 35.55 = 7.52$$

则可以利用 EXCEL 查出对应的概率：

$$FDIST(7.52, 1, 126) = 0.71\%$$

计算属因子重要性的信赖性：1 - 0.71% = 99.30%

同理可以求出其他，B, C, D, E, F 的重要性，总计如下表 13：

表 13：重要性计算汇总表

FACTOR	SS	DOF	VAR	F	probability	confidence	significant
A	267.27	1.00	267.27	7.52	0.70%	99.30%	YES
B	431.85	2.00	215.92	6.07	0.30%	99.70%	YES
C	354.37	2.00	177.18	4.98	0.83%	99.17%	YES
D	159.29	2.00	79.64	2.24	7.05%	92.95%	YES
E	45.01	2.00	22.51	0.63	53.26%	46.74%	NO
F	79.25	2.00	39.62	1.11	33.13%	66.87%	NO
ERROR	4478.7348	126	35.55	*Note: At least 90% confidence			

结论：对于质量特征值的影响来说，A, B, C, D 具有意义，而 E, F 没有意义，看做误差来处理。

#### 4.2.3.3 各因子对 S/N 比的重要性分析

使用误差统合法分析因子 A 对 S/N 比的重要性：

$$\begin{aligned}
 SS_A &= \frac{n \cdot r}{L} \sum_{k=1}^n (\bar{y}_k - \bar{y})^2 \\
 &= 18 \cdot 8 / 2 \cdot [(25.14 - 25.29)^2 + (25.45 - 25.29)^2] \\
 &= 72 \cdot (0.023 + 0.026) \\
 &= 3.31
 \end{aligned}$$

$$DOF_A = 2 - 1 = 1$$

$$VAR = SS_A / DOF_A$$

$$= 267.27$$

同理可以求出其他的因子 B, C, D, E, F 的相关数值如下表初步分析表 14：

14：因子对 S/N 比的初步分析表

FACTOR	SS	DOF	VAR
A	3.31	1.00	3.31
B	953.19	2.00	476.60
C	1182.75	2.00	591.37
D	107.80	2.00	53.90
E	399.94	2.00	199.97
F	939.39	2.00	469.70

从 14 表可以看出，因子 A 的变异数最小，故将之统合到误差（假设 C 因子为不具重要性的因子），第一次统合的结果如下表 15：

15 因子 A 被统合后的计算表

FACTOR	SS	DOF	VAR	F	probability	confidence	significant
A	POOLED						
B	953.19	2.00	476.60	143.942	5.88%	94.12%	YES
C	1182.75	2.00	591.37	178.607	5.28%	94.72%	YES
D	107.80	2.00	53.90	16.2793	27.26%	72.74%	NO
E	399.94	2.00	199.97	60.395	6.06%	93.94%	YES
F	939.39	2.00	469.70	141.858	5.93%	94.07%	YES
ERROR	3.31	1.00	3.31	*Note: At least 90% confidence			

得出结论：对于 S/N 来说，B，C，E，F 视为重要的，而 A, D, 则视为误差对待。

### 4.3 因子最佳水准分析和选定

实验假设属于田口方法望目特性第三型，即存在调节因子，总是可以使得质量特征值达到目标值。对于望目特性第三型，调整 S/N 比只能得到最小的变异，必须另外调整品质特性，也就是说必须作“两阶段最佳化”的工作：

先调整那些只对 S/N 有影响的因子，使得 S/N 变得最大，亦即品质特性得变异变得最小。

然后再调整那些只对品质特性有影响, 对 S/N 没有影响得因子，使得品质特性得平均值移至目标值变异维持不变。

经过两阶段得最佳化工作可以使得整体最佳。两阶段化工作式示意图见图 26

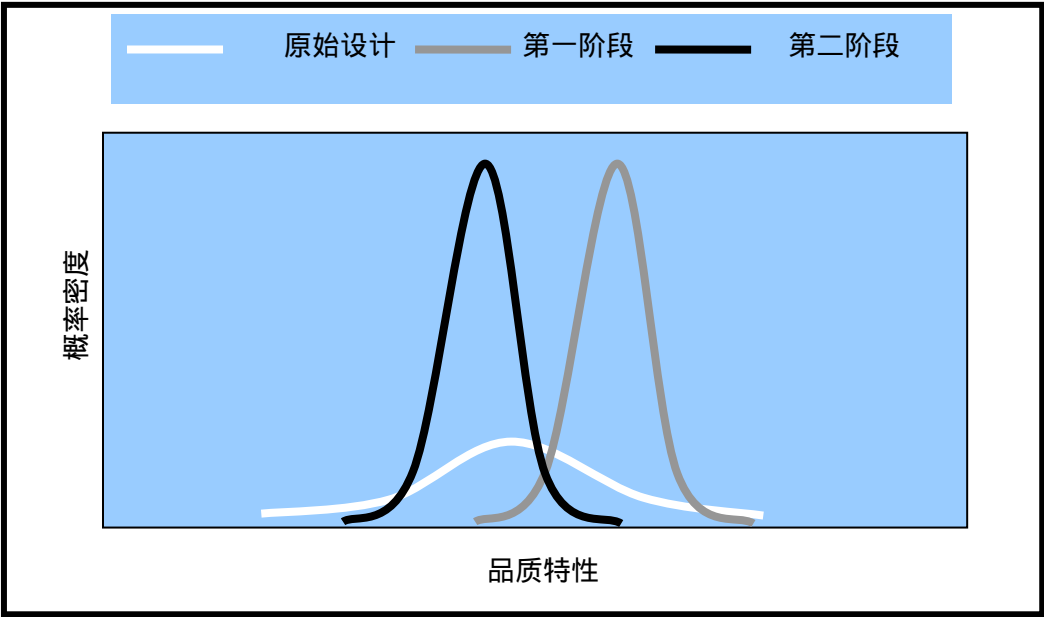


图 26 两阶段化工作示意图

Fig.26 The chart of two-second

在进行“两阶段最佳化”工作之前，将所有得控制因子分以下四类：

第一类：对 S/N 和品质特性都有影响得控制因子。

第二类：对 S/N 没有影响但对品质特性有影响得控制因子。（亦即“调节因子”）

第三类：对 S/N 有影响但对品质特性没有影响的控制因子。

第四类：对 S/N 和品质特性都没有影响的控制因子。

这样可以得到下表 16，将控制因子分为四类：

表 16 依据因子对 S/N 比和品质特性的影响程度分类表

类别	有影响	有影响	控制因子
	S/N 比?	品质特性?	
1	是	是	B、C
2	否	是	A、D
3	是	否	E、F
4	否	否	



#### 4.3.1 第一阶段工作：调整只对 S/N 有影响的因子，使得 S/N 比最大化

第一阶段工作是首先调整只对 S/N 比有影响的因子，使得 S/N 比最大。根据两阶段佳化的程序，及以表 16 的信息，可以确定有以下因子对 S/N 比有影响：

B, C, E, F

根据表 11 因子对 S/N 比的反应表，可知得 S/N 比最大的控制因子的水准如下：

B2, C3, E2, F3

#### 4.3.2 第二阶段工作：通过调节调节因子使得品质特性平均值和目标值重合

第二阶段工作是通过调节因子（所谓调节因子是指，此因子的变化不会对 S/N 比造成影响，只会对质量特征值造成变化）使得品质特性的平均值移到和目标值重合。根据表 4.8 的数据可以判断，因子 A, D 属于调节因子。对于他们进行变化和调节不会影响质量特征值的波动。

A: 烧成温度水准的确定，根据表 4.8 的数据，烧成温度定在水准二，这样可以使的质量特征值更加接近目标值。

D: FS-02 的含量水准的确定，根据和现场讨论的结果，打算将 D (FS-02 的含量) 留给现场工程师根据经验作机动的调节用，以维持抗压强度在目标在 85。这样经过第二阶段最佳化的结果如下：

A2、B2、C3、D ?、E2、F3

其中 D 给现场工程师作机动调整用。这样所有的控制的因子的水准已经确定下来。

实际应用中，可能还要考虑，二者之间成本的比较，因子 A 在水准二时，温度较高，在较高的温度下，保持温度，需要更多的能源；而且会产生跟多的废气和 CO<sub>2</sub>，不论从公司效益还是从社会效益来看，维持较高的温度，都不划算，因此需要在保证质量特征值移到目标值的情况下，综合考虑二者之间的成本计较，来进行取舍。比如如果因子 A 维持在水准一，而通过调节 D——FS-02 的含量达到目的，则效果更好，这里不再详细讨论。

### 4.4 确认实验：

#### 4.4.1 预测及确认试验

首先预测原始设计的 S/N 比，(原始设计为: A2, B2, C2, D2, E2, F2): (只考虑, B、C、F、E)，

$$\begin{aligned}
S/N &= \bar{y} + (B - \bar{y}) + (C - \bar{y}) + (E - \bar{y}) + (F - \bar{y}) \\
&= 25.29 + (27.74 - 25.29) + (23.90 - 25.29) + (22.36 - 25.29) \\
&= 25.29 + 2.45 - 1.39 - 2.93 \\
&= 23.96
\end{aligned}$$

优化后，控制因子的最佳组合为：A ?、B2、C3、D ?、E2、F3（只考虑 B、C、E、F；? 表示未定），预测 S/N 如下：

$$\begin{aligned}
S/N &= \bar{y} + (B - \bar{y}) + (C - \bar{y}) + (E - \bar{y}) + (F - \bar{y}) \\
&= 25.29 + (27.74 - 25.29) + (26.68 - 25.29) + (27.04 - 25.29) \\
&= 25.29 + 2.45 + 1.39 + 1.75 \\
&= 30.88
\end{aligned}$$

确认实验的结果数据见表 17。

表 17 确认实验和预测结果比较表

F	1	2	3	4	5	6	7	8	计算值		预测值	
									ave	s	s/n	S/N
原始的	95.62	86.32	97.56	94.32	85.64	84.99	82.1	97.62	90.52	6.36	23.06	23.96
优化后	85.23	87.23	86.32	87.65	87.65	80.23	84.23	84.84	85.42	2.47	30.77	30.88

由于以上分析和试验过程中存在着很多的假设和误差，这些假设是否成立，需要经过确认实验来确认。确实试验的目的是通过试验来确认预测是否合理：若果预测值和试验值比较靠近则，认为预测是合理的。以下进行确认比较是否足够靠近。

#### 4.4.2 预测值与试验计算值的靠近评价

在评价预测值与试验值是否靠近的问题上，遇到一个问题，就是预测值和试验值达到什么程度的一致，才能认为是二者是靠近的，从而认为预测是合理的呢？

这里要涉及到信心区间的概念，对于二者是否靠近，可以这样考虑：分别求出在一定（较高的信心，比如 95%）信心下，预测值的信心区间和确认试验计算值的信心区间，如果二者的信心区间有重合的部分，我们认为二者足够靠近，从而认为预测值是合理的。下面分别来说明预测值的信心区间和确认值的信心区间的求取方法。

A) 预测值的信心区间：

$$CI = \left| N_{\sigma/2} * \frac{S}{\sqrt{m}} \right| = \left| N_{\sigma/2} * \frac{S}{\sqrt{\frac{r * n}{l}}} \right| \dots\dots 4.6$$

利用此公式来计算信心区间，但是其中的样本大小  $m$  在此处没有具体意义，我们可以采取以下一个有效的计算方法来求取样本大小  $m$ ：

$$m_e = \frac{\text{总试验数据个数}}{\text{计算预测值式中的总自由度}} \dots\dots 4.7 \text{式}$$

总试验数据个数为： $18 * 8 = 144$

预测值式中总自由度： $= 2 + 2 + 2 + 2 + 2 = 8$

故  $m = 144 / 8 = 18$

则在 95% 的信心下可以求取预测值的信心区间：

$$\begin{aligned} CI &= \left| N_{\sigma/2} * \frac{S}{\sqrt{m_e}} \right| \\ &= \left| N_{\sigma/2} * 5.96 / 4.24 \right| \\ &= \left| N_{\sigma/2} * 1.41 \right| \end{aligned}$$

上式通过 EXCEL 可以求： $ABS(NORMSINV(0.025 * 1.41)) = 2.76$

则在 95% 信心下预测值的区间为 (28.12 33.64)。<sup>[11]</sup>

B) 确认试验计算值的信心区间

在最佳组合下做确认试验，得到总共 8 个数据，其 S/N 比计算值为 30.77；我们延伸 4.6 的观念来估算计算值的信心区间。假设确认试验计算值的信心区间最少只能和预测值的信心区间一样（亦即其精度顶多和预测值一样）而随着确认数据个数的减少，其信心区间增大（亦即精度越小），依次假设，则可以利用以下一个比较合理的公式估算信心区间：

$$CI = \left| N_{\sigma/2} * S * \left( \sqrt{\frac{1}{m_e} + \frac{1}{r}} \right) \right| \dots\dots 4.9$$

r 为总数据数

则可以计算：

$$CI = \left| N_{\sigma/2} * S \left( \sqrt{\frac{1}{m_e} + \frac{1}{r}} \right) \right|$$

$$= |N_{\sigma/2} * 5.96 * 0.4|$$

$$= |N_{\sigma/2} * 2.38|$$

上式通过 EXCEL 可以求：ABS(NORMSINV(0.025\*2.38))=4.66

则在 95%信心下预测值的区间为(26.11 35.43)

二者是有重合的部分，因此认为二者足够接近。故认为预测值是合理的。因此认为，以上控制因子的最佳组合可以应用在批量生产上。

#### 4.5. 成果与讨论：

改善前后对比：

S/N 比的提高：30.88-23.96=6.92 前后对比 S/N 提高 6.92

根据 4.3 式的计算结果，

$$Q_{\text{Original}}/Q_{\text{Optimal}} = k(\text{MSD}_{\text{Optimal}})/k(\text{MSD}_{\text{Original}})$$

$$= \text{MSD}_{\text{Optimal}}/\text{MSD}_{\text{Original}}$$

$$= 0.1^{(S/\text{Noptimal} - S/\text{Noriginal})/10}$$

$$= 0.2041$$

质量损失差不多减少为原来的 1/5 左右。

根据 4.4 式计算的结果，标准偏差减少了一倍多。

$$S_{\text{Original}}/S_{\text{Optimal}} = 0.45 \dots \dots 4.4 \text{ 式}$$

由此可以得出结论，运用田口方法进行优化控制因子后，无论在经济还是在标准偏差上，都有很大的改进和提高。

## 第五章 总结与展望

### 5.1 总结

论文首先介绍了本论文要解决的问题及问题的特点——本论文要解决的问题为：“由于原材料的品质波动及生产过程中一些控制要素的变动，使得推板的质量特征值的波动过大，导致顾客抱怨率升高，赔偿增加。”；

要解决的品质问题的具有以下特点：

品质特性的检验只能通过破坏性实验来实现，品质特性的好坏无法通过最终的检查来判断。

生产过程存在众多特殊过程，控制起来非常的困难。

小批量，多品种的生产方式。

原材料为天然的矿物，其化学成分虽然在一定程度上具有相对的稳定性，但是相对于一般的在工厂中生产的原料，品质波动较大，而且粉状原材料的品质检查和控制本身就是一个难题。特别是原材料国产化后，原料的品质波动较以前增大。

然后阐述了利用在线品质管理效果不明显的原因和事实，接着分析说明使用田口方法解决本课题的可能性和适宜性。接着对田口方法的发展和历史及产生的历史背景进行了说明，然后详细说明了使用田口方法需要弄清楚的几个关键问题：

田口方法的原理。

田口方法使用的程序和步骤。

田口方法质量损失的定义。

田口方法品质特征值的选定原则及各种要素的分类。

田口方法质量特征值的分类及 S/N 计算方法和公式。

直交表的原理及直交表因子的配置。

对于交互作用的处理原则。

等等

对于以上田口方法应用的一些主要概念和细节问题，如果能够清楚的理解，则田口方法的应用没有太大问题。

然后在本文的中心部分首先对本公司的各个生产过程进行了详细的分析和介绍，

通过头脑风暴的方法，列出了各个工序的所有控制因子和干扰因子，并对各个因子进行了说明和解释，然后通过分析和以往的历史数据为依据选定了本次田口实验要评价的控制因子，及干扰因子，并对可能的交互作用进行了分析和说明。然后根据因子的数量和水准数量选择合适的直交表，决定合适的干扰策略，来干扰实验，得出数据，经过分析和确认实验后确定了各个控制因子的最佳水准。

从整个实验过程来看，本论文实现了以下的突破和创新：以往的田口实验一般都是针对一个过程的控制因子水准的优化，而本次田口方法则是通过对整个推板生产流程的各个工序进行分析，选定各个工序中对推板品质特征值有影响的控制因子和干扰因子，然后通过实验来确定出对品质特征值有影响的各个控制因子的最佳水准，使得整体最优。

在实验的结果上，本次实验取得了非常成功的成果：

S/N 比的提高： $30.88-23.96=6.92$  前后对比 S/N 提高 6.92。

质量损失差不多减少为原来的 1/5 左右。

标准偏差减少了一倍多。

成本上比原来有降低。

另外本论文不仅适用于推板窑用推板的品质改进，同时也为耐火材料类的品质提高提供了一个很好的示范和思路。对于小批量多品种且过程质量不容易监控类的产品的品质改进都有很好的借鉴作用。

## 5.2 展望

本论文在考虑干扰因子时，只考虑了生产过程中、测量过程中的干扰因子，没有考虑使用过程中的因子，其实使用过程的因子干扰可能对于品质特征值的改善可能更有意义。但是由于使用过程中的干扰因子的难以进行模拟和控制，故没有考虑。作者打算下一步的进一步来考虑如何对使用过程的干扰因素进行模拟实验，达到进一步提高产品品质的目的。

## 参考文献

- [1] 田口玄一, 开发设计阶段的质量工程, 日本规格协会, 2001. 2
- [2] 何桢, 张生虎, 齐二石, 结合 RSM 和田口方法改进产品/过程质量, 管理工程学报, 2001, 1: 22-25
- [3] Aker, T. B., Quality Engineering by Design: Taguchi's Philosophy, Quality Progress, 1986.
- [4] 丘建华, 应用田口方法语电子薄膜配方之最佳制程条件之探讨, [学位论文], 台北, 国立中央大学图书馆, 2002
- [5] 戴心雨, 影响铸件产品质量的多因素分析及改进方法研究, [学位论文], 上海, 上海交通大学, 2005. 1
- [6] 张嘉隆等周至宏, 姚文隆, 田口方法在凸轮轴颈研磨之最佳化参数, 第十七届中国机械学术研讨会, 2000
- [7] Kackar, R. N., "Off-Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method," Journal of Quality Technology, Vol. 17, No. 4, 1985, p. 176-188.
- [8] 奚立峰. 宋玉红. 潘尔顺等, 零缺陷质量管理思想的应用与实践. 工业, 工程与管理, 2003. 01
- [9] 栾军, 现代试验设计优化方法, 上海上海交通大学出版社, 1995. 3
- [10] 陈首峰, 基于田口法的质量管理及控制系统的研究, [学文论文], 西安, 西安电子科技大学
- [11] 李辉煌, 田口方法原理, 台湾, 国立成功大学, 2005. 2, 225-272,
- [12] Forrest W. Breyfogle, 实施 6 西格玛 (Implementing Six Sigma), 北京, 机械工业出版社, 2005. 9, 292-352
- [13] 朱兰研究院, 六西格玛基础教材 (绿带读本), 北京, 中国财政经济出版社, 2007. 3, 162-175
- [14] 王灿乔, 潘尔顺, 产品质量改善的六西格玛思维模式应用研究, 工业工程与管理, 2005 年增刊, 143-147

- [15] 伍爱, 质量管理学, 第二版, 湛江, 暨南大学出版社, 2004. 2, 269-299
- [16] 黄卫伟, 生产与作业管理, 北京, 中国人民大学出版社, 2005. , 443-456
- [17] 苗瑞等, 基于小批量多品种生产环境的统计过程质量控制研究, 高技术通讯, 2003. 11
- [18] 杨旭等, 基于小批量生产的统计质量控制, 计算机集成制造系统-CIMS, 2001. 12, 第七卷第 12 期
- [19] 徐洪江等, “多品种、小批量”企业生产问题初探, 工业工程与管理, 2004 年第 4 期
- [20] 张黎, 小批量过程多变异控制图技术研究, 现代制造工程, 2005 (5)
- [21] 陈炜等, 面向小批量生产的统计过程控制的研究, 工业工程与管理, 2005 (1)
- [22] 殷建军, 面向多品种, 小批量制造环境的过程质量监控方法及嵌入式系统的研究[博士论文], 2004. 11
- [23] 陈立周, 稳健设计, 机械工业出版社, 1999. 12
- [24] K. F. Ritchie, 吴玉印等, 田口方法指南, 北京, 北京克劳士质量管理研究所《质量书苑》编辑部, 1999. 5
- [25] 王振宇, 6 西格玛管理研究, [硕士论文], 2003. 3
- [26] 王荣, 六西格玛管理方法及实施研究, [硕士论文], 2004. 6
- [27] 禹艳阳, 六西格玛在客户关系管理中的应用, [硕士论文], 2005. 4
- [28] 刘德智, 基于田口理论的装备部件质量设计研究, [学文论文], 西北工业大学, 2003. 3
- [29] 刘文卿, 六西格玛管理与 FMEA 技术, 统计工具
- [30] 徐辉等, 产品质量检验中概率计算的改进, 华东地质学院学报, 1995. 6 第 18 卷第 2 期



## 致 谢

本文是在奚立峰教授和唐式豹高级工程师的精心指导下完成的，本文从起始选题、研究论证、论文撰写到系统的开发都得到两位导师悉心的指导和周到的帮助。两位导师的博大的知识面、精深的专业研究、仔细严谨的治学态度给学生留下了深刻的印象，并将是学生终身学习的榜样。谨在此时向两位导师表达学生真诚的感谢和崇高的敬意！

在课题的研究过程中，实验的实施和完成的到了公司技术部李桂兰科长，张好婕副系长，及品质保证科章永明科长和夏干荣系长的大力帮助，在此表示诚恳的感谢！

衷心感谢明嘉、崔恩辉，张启兰同学，是他们在论文开题，中期考核等方面给了我很多帮助，也正是我们大家的共同探讨、相互启发，使课题研究得以最终完成。非常感谢李桂兰，张好婕等同事在论文撰写和实验过程中给予的无私帮助。

最后，谨向百忙之中抽出宝贵时间评审本论文的专家、学者致以最诚挚的谢意！

## 攻读学位期间发表的学术论文

1. 张宗刚 应用田口方法减少推板质量特征值的波动,《现代管理科学》2008 年增刊 (国内统一刊号:CN32-1281/C, 国际标准刊号:ISSN1007-368X)  
署各单位为上海交通大学

