

分类号.....

密级.....

UDC.....

编号.....

中南大学

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕士学位论文

论文题目 砂状氧化铝连续碳酸化分解过程实时监控系统

学科、专业 控制理论与控制工程

研究生姓名 张 毅

导师姓名及
专业技术职称 桂 卫 华 教 授

摘 要

连续碳酸化分解是一个长流程、大滞后的复杂生产过程，工况很不稳定，容易出现突发性事故，存在严重的安全隐患，而且主要依靠工人经验手动调节阀门，劳动强度大，受人为因素影响大。因此，如何消除安全隐患、提高分解过程的自动化水平是连续碳酸化分解过程亟待解决的问题。本文运用软测量技术和专家系统方法，开发了连续碳酸化分解过程实时监控软件，解决分解过程的实时安全监控与分解梯度监控等问题，其主要研究内容如下：

1. 结合连续碳酸化分解过程的机理特征和经验知识，设计了基于专家系统的分解过程实时安全监控器，实现分解过程实时安全监控；
2. 针对进料量难以用常规检测仪表进行检测的特点，通过推导高位槽液位、阀门开度及进料量的函数关系，建立了进料量的软测量模型；
3. 基于连续碳酸化分解过程工艺特点，结合专家系统方法和软测量技术，提出了首槽进料量的报样控制和稳定控制，设计了首槽进料量混合控制模型；
4. 利用 Visual C++6.0 工具开发了连续碳酸化分解过程实时监控系统，实现了对 CO₂ 电动阀门和进料电动阀门的闭环调节。

应用结果表明：首槽、末槽分解率标准偏差分别减少 12.0%，7.9%，末槽分解率提高了 0.9%，稳定了分解过程，优化了分解梯度，提高了产量；同时监控软件对生产过程进行了有效报警，确保了生产安全，并实现了分解岗位数据的综合管理，减轻了工人劳动强度。

关键词：连续碳酸化分解，安全监控，分解梯度，专家系统，软测量

ABSTRACT

As a complex production process with long time-delay, the continuous carbonation decomposition process (CCDP) has the disadvantages of unsteady work condition and unexpected technique accident. More over, it mainly depends on human's experiences to handly adjust all of the valves which is easily affected by personal factors and has great labor intensity. So how to get rid of safe incipient fault and improve the automation level of decomposition process is a key problems to be resolved urgently. The real-time monitoring software of continuous carbonation decomposition process (RMSCCDP) is developed in this paper which realized the real-time safety monitoring and decomposition-gradient optimization in decomposition process. The main research work is as follows:

1. On the basis of the experiential knowledge and the mechanic characteristics of CCDP, the real-time monitor of CCDP is developed which is based on expert systems, to realize the real-time safe monitoring.
2. Being very difficult to measure flow by routine apparatus, a flow soft-sensing model is present in this paper by inducing the functional relationship of the liquid level of high tank, the angle of valve and the flow.
3. Based on the craft characteristic of CCDP and the technics of expert system and soft-sensing, two kinds of flow controls are proposed which named as sample control and stabilize control of first-tank. The flow hybrid control model of the first-tank is designed in this paper.
4. The software of real-time monitoring system of continuous carbonation decomposition process (SRMSCCDP) has been developed by using Microsoft Visual C++6.0. The closed-cycle control of CO₂ electric valve and flow electric valve is realized.

Practical results show that not only the standard errors of decomposition ratio of first-tank and last-tank are respectively reduced by 12% and 7.9%, the last-tank decomposition ratio is increased by 0.9%, but also steady decomposition process, optimized decomposition gradient and high productivity are realized. At the same time, the safety of process is ensured by effective precaution of production process and the integrated management of data in the decomposition process is also realized which relives workman's labor intensity.

Key words: continuous carbonation decomposition, safety monitoring, decomposition gradient, expert system, soft-sensing

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题来源与意义.....	1
1.2 氧化铝生产分解过程综合自动化现状.....	1
1.3 专家系统（ES）在复杂工业生产过程中的应用.....	3
1.4 研究内容与结构安排.....	4
1.4.1 连续碳酸化分解实时监控系統研究内容.....	4
1.4.2 论文结构安排.....	5
第二章 连续碳酸化分解实时监控系統总体设计.....	7
2.1 连续碳酸化分解工艺过程与分析.....	7
2.1.1 影响进料量调节的因素分析.....	8
2.1.2 影响安全生产的因素分析.....	9
2.2 连续碳酸化分解实时监控系統总体设计.....	10
2.3 小结.....	11
第三章 连续碳酸化分解过程安全监控模型.....	12
3.1 安全监控参数选择.....	12
3.2 基于专家系统方法的安全监控模型.....	13
3.2.1 分解过程数据采集与预处理.....	13
3.2.2 基于产生式规则的监控知识库.....	14
3.2.3 安全监控过程推理机的实现.....	23
3.2.4 分解过程安全监控结论解释.....	24
3.3 安全监控模型应用及结果分析.....	25
3.4 小结.....	26
第四章 首槽进料量控制.....	27
4.1 首槽进料量总体控制模型.....	27
4.2 进料量报样控制.....	28
4.2.1 进料调节专家控制器.....	28
4.2.2 基于液位的修正模型与基于其他成分的修正模型.....	30
4.2.3 进料量报样控制量的计算.....	30
4.3 进料量稳定控制.....	33
4.3.1 进料量软测量.....	33
4.3.2 进料量稳定控制.....	37
4.4 应用结果及分析.....	38
4.5 小结.....	41
第五章 系统功能及实现.....	42

5.1	连续碳酸化分解实时监控系统硬件结构.....	42
5.2	连续碳酸化分解监控系统软件功能模块介绍.....	43
5.2.1	软件结构图	43
5.2.2	功能模块介绍.....	43
5.3	通信模块的实现.....	47
5.3.1	远程数据读取技术.....	47
5.3.2	基于 OPC 规范的专家优化计算机与实时监控机的通信技术.....	48
5.4	小结.....	53
第六章	结论与下一步工作.....	54
6.1	结论.....	54
6.2	下一步工作.....	55
	参考文献.....	56
	致 谢.....	59
	攻研期间主要成果.....	LX

第一章 绪论

1.1 课题来源与意义

我国的铝土矿多为 1 水铝土矿，氧化铝生产主要采用混合法和烧结法，受矿石及生产条件的限制，我国氧化铝产品仍以粉状和中间状为主，强度差。为了降低能耗和保护环境，国内外电解铝厂逐渐采用大型中间自动点式下料预焙阳极电解槽及烟气干法净化技术，对原料氧化铝的物化性质提出了日益严格的要求，只有流动性好，吸附能力强、强度大的砂状氧化铝才能满足生产需要。因此，砂状氧化铝是当前世界氧化铝生产的发展趋势^[1~2]。

1999 年中国铝业集团中州分公司开发“强化烧结法生产砂状氧化铝的新工艺”，于 2003 年通过专家鉴定并开始投入工业生产。在新工艺中，80% 以上的砂状氧化铝通过连续碳酸化分解得到^[3]，其工艺过程将决定最终产品质量的优劣，是烧结法氧化铝生产过程中的“关节”工序。

中州分公司烧结法氧化铝厂连续碳酸化分解工序包括 2 个高位槽和 3 组分解槽（现场俗称 I 组、II 组、III 组），每组分解槽由 6 个分解槽组成。目前，分解工序每小时检测一次化学成分，操作工人根据成分结果手工调节 CO₂ 电动阀门和进料电动阀门，控制合适的进料量和 CO₂。受检测仪表限制，目前样品成分只能离线检测，成分结果一般滞后半小时，对分解过程各项参数的调节具有明显的滞后性，而且操作工人需跑到 20 米以外的现场调节两组分解槽（分解工序每次运行两组分解槽，另一组检修备用）相关阀门的开度，劳动强度大，人为因素影响大；分解工序上接脱硅工序、下联过滤过程，与外界具有强关联性，工况很不稳定，容易出现各种工艺故障，存在严重的安全隐患。因此，如何提高分解过程的自动化水平、消除安全隐患是连续碳酸化分解工序亟待解决的问题。

为此，中州分公司和中南大学信息科学与工程学院共同合作，研究开发“砂状氧化铝连续碳酸化分解过程优化控制系统”项目。该课题旨在运用先进测量技术和人工智能方法，综合冶金冶炼知识，解决连续碳酸化分解过程的实时安全监控与优化控制等问题，提高分解工序的自动化水平。

1.2 氧化铝生产分解过程综合自动化现状

氧化铝生产过程的分解工序主要有加晶种分解（简称种分）和碳酸化分解（简称碳分）两类，拜耳法生产氧化铝一般采用种分，而混合法与烧结法则两者都采用。分解工序的产出结果直接决定了氧化铝的质量与产量，其自动化水平的高低成为整个氧化铝厂提产增效的关键，因此许多氧化铝厂曾集中精力对分解工序的综合自动化进行研究与实践。

删除的内容: 1

早期国内外氧化铝厂主要通过安装模拟仪表（如机械压力表）、改进设备以及人工测量的方法（如通过分解槽顶小孔，人工测量分解槽液位）获得过程参数，为工人操作提供必要的信息。这一时期的工作主要集中在单个仪表或设备的改进与应用上，其典型的例子就是曾获日本专利^[4]的分解槽改造工作，他们在原分解槽机械搅拌的基础上，增加了同心管、挡板、锥形罩、垂直挡板、进出悬浊液管等装置，使得分解槽悬浊液密度可保持在一定范围内，为产品质量提供了有力的保证。

上世纪七十年代初集散系统（Distributed Control System, DCS）和可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）的出现^[5]，推动了工业过程自动化进程，DCS 和 PLC 逐渐取代模拟控制仪表完成过程控制。它们既综合了计算机数字技术、集中控制和模拟仪表经典控制方法的优点，同时又弥补了两者的不足，在更为安全可靠的基础上，完成更高水平的生产过程管理的工业自动化，在氧化铝行业中得到广泛应用。法国的彼施涅铝业公司和美国铝业公司的澳大利亚宾加拉（Pinjara）厂通过装备美国霍尼韦尔公司（Honeywell）的集散系统（DCS），提高了生产力水平。俄罗斯氧化铝厂的自动控制系统已从单工序的 ACTYII 系统向全工艺过程大规模集成电路控制系统过渡，并设计、掌握第三代电子计算机为基础的控制系系统，在生料制备、熟料溶出、赤泥沉降洗涤、碱液蒸发、碳酸化分解及氧化铝焙烧等工序中得到了应用^[6]。

国内对分解过程自动控制的研究起步较晚，但发展迅速。我国除平果铝厂外，其它铝厂都采用烧结法或混合法生产氧化铝，不能照搬国外拜耳法的经验与技术，而必须开发符合自身具体情况的先进控制系统。

国家曾将“中国长城铝业公司综合计算机控制——分解工序计算机控制系统”列为八五攻关项目，张石、蔡惠龙等^[7]人在此课题的基础上提出基于工控机与 PLC 氧化铝分解工序控制系统，对 1#~3# 液位运用传统的 PID 控制，并选用美国计算机技术公司的监控软件 Screen Ware2，对系统进行组态监控，最终实现种分分解率的控制，虽然构成了两级监控系统，但由于没有解决分解过程检测和控制的难题，仍然没有取得较好的效果。张平民，陈启元等人^[8]针对砂状氧化铝生产实践，基于热力学与动力学原理以及生产过程稳态运行等假设，推导出砂状氧化铝生产过程首槽温度控制预测的准理论模型，用于指导并控制砂状氧化铝生产，他们从分解机理出发，基于分解系统大滞后的特点，引入了先进的预测控制思想，但没有对整个分解过程建模，只是通过局部模型的修正，没有从根本上解决问题，在实际应用中还存在困难。陈湘辉、刘铸战等人^[9]采用两级计算机系统，控制层运用人机协调智能控制、固含模糊控制、自适应 PID 控制等技术，对种子提升量进行控制，管理层则完成数据处理，报警，报表显示等工作，构成种

删除的内容: 1

分工序的全面生产管理系统，具有较好的应用价值。

上述文献和资料有一个共同特点，即都是综合自动化在种分过程的应用与研究，对碳分过程的研究却很少，主要原因有二：第一，国外氧化铝厂基本采用拜耳法生产氧化铝，其分解工序采用种分方式；第二，国内在很长一段时间内将大部分精力放在连续碳酸化分解生产机理的研究与工艺改造上，使其综合自动化研究起步较晚。

山东分公司（山东铝厂）在 20 世纪 90 年代中期开始了连续碳酸化分解工业生产，装备了部分自动化设备，一度成为国内各大铝厂学习的典型，但因连续碳酸化分解过程复杂，涉及的仪表、设备多，最终没有实现系统的闭环调节。

目前，中州分公司连续碳酸化分解工序采用美国 AB 公司的可编程逻辑控制器（PLC）和戴尔（DELL）公司的工控机构成“两级控制系统”，对工艺过程参数进行组态监控，实时显示分解过程参数，为连续碳酸化分解操作提供依据。该“两级控制系统”实现了两个功能：①实现大部分过程参数的在线采集与显示，并利用组态软件显示相应的参数趋势图，便于操作工人查阅；②将部分手动执行器改为电动执行器，为实现整个工序的自动化奠定了基础。但由于没有引入先进控制的方法以及受仪器装备水平限制，出现“只装不用”的现象，仍存在如下问题：

1) 目前主要依靠操作工人根据成分检测结果，手动调节各项参数，自动化水平低，容易受人为因素影响。

2) 受现有分析仪器的限制，成分结果滞后采样半小时左右，导致对分解槽各项参数的调节具有明显的滞后性，经常无法为下游工序提供适量的分解母液，很难保证产品质量，给生产操作和指标控制带来困难。

3) 分解工序接纳上游脱硅工序的铝酸钠溶液，并向下游过滤过程提供分解母液，而且分解过程中需要的 CO_2 、提料风分别由石灰炉、低压电供应。因此，分解工序与外界具有强关联性，造成突发事件的因素多，存在严重的安全隐患。

连续碳酸化分解是一个长流程、大滞后、大惯性的复杂工业生产过程，很难对分解过程建立精确的数学模型，用传统方法对其进行控制显得很困难，而专家系统等人工智能方法的产生与发展为解决此类问题提供了新的途径。

1.3 专家系统在复杂工业生产过程中的应用

专家系统（Expert System, ES）是人工智能（Artificial Intelligence）研究的一个重要应用领域，在国外也被称为知识库专家系统，与自然语言理解、机器人一起并列为 AI 研究最活跃的三大领域^[11~14]。

专家系统^[15~17]是一种具有专家级水平，基于知识的智能化计算机程序。它吸取人工控制系统的经验，对复杂的难以用数学模型描述的非线性、时变性等工

删除的内容: 1

业过程，具有响应快、超调小、对参数变化不甚敏感等特点，因此在许多系统控制上得到应用，尤其在过程控制与监控^[18~21]、故障诊断领域^[22~24]专家系统已经取得实际成效。

桂卫华，刘晓颖等人在文献[18]中针对诊断领域的特点，将神经网络与专家系统技术相结合应用于铅锌冶炼过程故障诊断，建立了密闭鼓风机故障诊断集成系统。该系统充分利用专家诊断策略及神经网络学习算法，发挥两种技术的各自优势，成功应用于工业生产现场，为研究密闭鼓风炉的故障诊断提供新途径。林济群，江晖等人在文献[19]中针对国内电站锅炉煤种不稳定、负荷变动频繁、操作运行人员工作强度大等特点，提出用实时专家系统的方法实现锅炉运行管理的安全保护思想，并讨论了专家经验性知识和机理性领域知识相结合使用的方法、数据库的生成机制以及推理机的工作方式，是专家系统方法在过程监控方面的应用典范。文献[20]中，刘祥官，刘显著等人针对高炉炉况复杂的特点，着重探讨了如何建立将工艺语言转换为计算机可识别语言的模型，提出了基于专家知识系统的炉况诊断模型，提高了工长操作的智能化水平，实现了专家系统在操作、技术、管理“三位一体”的应用，有较强的借鉴意义。文献[21]提出基础自动化和过程自动化两模块，构成水泥回转窑实时专家控制系统，使控制系统适应水泥回转窑生产过程参数滞后大，非线性严重且检测困难的状况，并结合水泥回转窑控制系统的实际情况，论述了实时专家控制系统的知识表示方法和推理机的算法，为复杂工业过程如何应用专家系统思想提供了一种新的方法。此外，许颖原，俞金寿^[22]利用专家系统开发工具 **Eclipse**，开发了 DCS 故障诊断专家系统的通用结构，并给出该系统在石油化工行业的实际应用。易粟，徐用懋等^[23]总结了高炉领域专家的经验知识，运用 **Rexpert** 专家系统开发工具，开发了高炉异常炉况诊断专家系统。

综上所述，专家系统可以总结和利用人的知识和操作经验，对数学模型的依赖性小，能适用于难以建模、具有一定不确定性的复杂工业过程的控制^[24]。

1.4 研究内容与结构安排

1.4.1 连续碳酸化分解实时监控系统研究内容

砂状氧化铝连续碳酸化分解过程实时监控系统旨在解决分解过程的监控问题，实时监控在本文中有两层含义：

- 1) 实现连续碳酸化分解过程实时安全监控；
- 2) 实时监控连续碳酸化分解过程分解梯度并及时调节首槽进料量。

文献[1]将连续碳酸化分解过程分成四个阶段，为防止局部过分，各槽分解

删除的内容: 1

率要求控制在一定的范围内,该范围称作分解梯度,又称分解率梯度。分解梯度根据连续碳酸化分解机理和长期生产实践摸索确定,维持合适稳定的分解梯度,防止局部过分或欠分,是保证氧化铝质量与产量的关键。

连续碳酸化分解机理表明,只有掌握适宜的首槽分解率,才能控制好分解梯度;生产实践也证明,首槽的分解率和分解梯度控制不好,不仅影响产品粒度,还使产品硅含量升高,降低产品质量。因此,控制分解梯度关键在于控制首槽分解率。实际生产中,为了不打破碳酸化分解过程的自平衡,一般不调节首槽 CO_2 通气量和提料风,只通过维持合适、稳定的首槽进料量调节首槽分解率,达到控制分解梯度的目的,因此,本文着重介绍首槽进料量的调节问题。

鉴于专家系统具有灵活性、适应性^[25]的特点以及成功的工业应用,本文针对连续碳酸化分解的工业现状,基于碳酸化分解的机理特征和长期的操作经验知识,利用专家系统思想,设计了安全监控模型与首槽进料混合调节模型,实现连续碳酸化分解过程实时安全监控和分解梯度优化控制,其主要研究内容如下:

1) 基于专家系统方法,建立连续碳酸化分解过程实时安全监控模型,实现分解过程安全监控;安全生产是企业生产的前提与基础,连续碳酸化分解工序工况复杂,设备、仪表繁多,并伴有强腐蚀性的铝酸钠溶液及高浓度的 CO_2 气体,安全问题不容忽视,如何保证分解过程的安全性是氧化铝厂、分解车间的重点工作。

2) 应用专家系统方法和软测量技术,提出了首槽进料量的报样控制和稳定控制,设计了基于时序控制的首槽进料量混合控制模型,实现分解梯度的优化控制;

3) 开发连续碳酸化分解过程实时监控软件,实现了分解率梯度优化控制、生产过程安全监控以及分解工序数据的综合管理,完成数据自动录入、计算、生成报表和趋势图等功能,为车间管理提供帮助,供现场操作人员参考分析。

1.4.2 论文结构安排

本文主要通过采用专家系统、软测量方法,利用冶金和化工原理等领域知识对氧化铝连续碳酸化分解过程进行机理分析,确定了影响连续碳酸化分解过程的关键参数,通过多种学科理论与技术的集成融合,建立首槽进料量混合控制模型及实时安全监控专家系统,实现连续碳酸化分解过程实时监控。

文章首先阐述课题来源和研究该课题的深远意义,简要综述氧化铝分解工序的综合自动化现状;介绍专家系统方法在复杂工业生产中的应用,并概括出文章的研究内容和方法。

第二章介绍砂状氧化铝连续碳酸化分解工艺过程,分析影响进料调节与安全生产的因素,提出实时监控系统的设计方案。

第三章针对连续碳酸化分解过程强关联、大惯性、复杂的特点，开发分解过程实时安全监控模型。首先将碳酸化分解过程的机理特征和经验知识进行分类，然后采用面向对象的产生式规则表示知识，设计基于规则的监控知识库，最后描述基于启发式搜索的监控推理机，并对现场运行结果加以分析，表明系统的可靠性与适用性。

第四章主要阐述首槽进料量控制方案，提出基于专家系统的整点报样控制和基于软测量模型的稳定控制，重点阐述了进料量的软测量模型，并对模型进行实验验证。

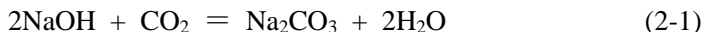
第五章介绍系统功能与实现，包括连续碳酸化分解实时监控系统硬件结构，软件结构与功能，重点阐述远程数据导入、基于 OPC 规范的双机（专家优化机与实时监控机）通信等关键技术的实现。

第六章为结束语，对连续碳酸化分解监控系统的研究与应用予以总结，结合发展要求和趋势，指出下一步的工作重点。

第二章 连续碳酸化分解实时监控系統总体设计

2.1 连续碳酸化分解工艺过程与分析

连续碳酸化分解过程是一个有气、液、固三相参加的复杂多相反应，其任务是生产较高纯度、较大硬度和较大形状的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ ，并为下游工序提供合格的碳酸化分解母液。一般认为，在铝酸钠溶液中通入 CO_2 气体，中和溶液中的苛性碱，使溶液的分子比降低，从而降低溶液的稳定性，引起溶液的分解^[26]，化学反应如式（2-1）和（2-2）。



氢氧化铝晶体析出过程可分为以下四个阶段^[26]：（1）诱导期；（2）晶核形成期；（3）晶体长大期；（4） SiO_2 析出期。晶核形成期，吸附能力强，容易吸附 SiO_2 和 Na_2O ，要适当控制 CO_2 通气速度；晶体长大期，结晶过快，会使 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 晶体形状不规则，结构疏松，易于破碎，该时期要适当控制 CO_2 通气量； SiO_2 析出期要适当控制分解率，减少 SiO_2 析出。

为了缩短烧结法与拜耳法在产品质量上的差距，进一步提高烧结法产品质量，人们对连续碳酸化分解机理及分解工艺的研究不断深入，使连续碳酸化分解工艺得到不断改进，由最初的间断分解（单槽分解、双槽分解、三槽分解）发展到连续分解，特别是连续碳酸化分解技术投入工业生产，在提高设备产能、减轻劳动强度、改善产品质量等方面成效显著，很快在烧结法氧化铝生产中得到推广。

中州分公司依据分解理论，积极开展连续碳酸化分解的工艺改进工作，通过实验室实验和生产实践摸索，逐渐将连续碳酸化分解工艺由单槽间断分解发展到四槽连续分解、五槽连续分解，最后形成现在的六槽连续分解^[10]，并积极装备电气设备、推进自动化控制。

目前六槽连续碳酸化分解工艺流程如图 2-1 所示。经脱硅送来的合格精液首先进入起稳定作用的高位槽，从高位槽底部自压进入 1# 分解槽，用低压风提料进 2# 分解槽，同样的方法依次将料提入后面槽子。前 5 台槽子根据分解率要求通入一定量 CO_2 气进行分解，6# 槽作为出料槽，检测合格后由出料泵打到沉降槽，沉降底流送往氢氧化铝过滤机过滤，得到氢氧化铝产品。

实际生产中，提料风一般情况下不做调节，以免打破系统的自平衡，1# 槽处于诱导期、2#、3# 槽处于晶核形成期，需要大量的 CO_2 气体，一般将 1#~3# CO_2 阀门置于全开状态，让其充分分解；6# 槽为 SiO_2 析出期要适当控制分解率，为防止大量的 SiO_2 析出，避免产品不合格，一般不通 CO_2 气体。在整个优

删除的内容: 1

化控制系统中, 只有 4#、5# CO_2 及进料量可供调节, 而在连续碳酸化分解监控系统中, 主要是控制首槽分解率, 只要调节首槽进料量即可。

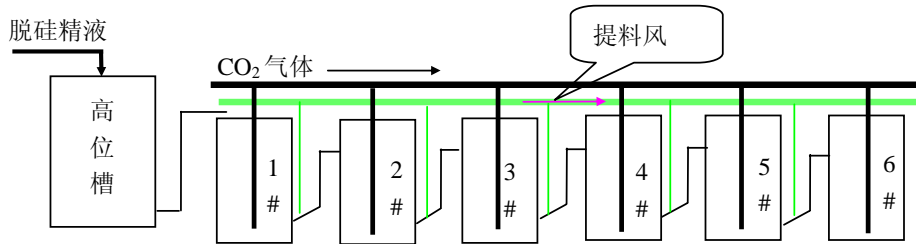


图 2-1 连续碳酸化分解工艺流程图

2.1.1 影响进料量调节的因素分析

连续碳酸化分解过程是氧化铝生产中一个承前启后的环节, 接受上游车间的精液, 并向下游车间提供连续碳酸化分解母液, 具有强关联性与强耦合性, 进料量的调节受众多因素的影响, 主要有:

1) 末槽分解率控制目标

根据总厂不同时期的生产任务, 连续碳酸化分解岗位有不同的末槽分解率控制目标。正常情况下, 末槽分解率一般要求控制在 92%~94%之间, 对应的首槽分解率优化设定在 27%左右; 当需要提高产量时, 因为末槽分解率较高 (94%~96%), 首槽分解率的设定值也应适当增加, 一般在 29%左右。可见, 末槽分解率控制目标 (简称末槽控制目标) 是影响进料量调节的关键因素之一。

2) 首槽实际分解率

通入相同的 CO_2 , 首槽进料量多, 则分解率低; 进料量少, 则分解率高, 即进料量的多少直接影响首槽实际分解率。反过来, 首槽实际分解率直接反映了首槽进料量的多少, 因此, 实际生产中, 根据成分计算得到的首槽实际分解率是操作工人调节进料量的主要依据。

3) 1# 分解槽氧化铝含量 (氧化铝含量以下简称 AO) 变化与 2# AO 变化

因为 1#~2# 槽的 CO_2 通气量是一定的, 进料量的多少直接影响 1# AO 变化与 2# AO 变化。换言之, 后者直接反映前者的变化, 对前者的调节有重要的指导作用。

4) 高位槽液位及其变化

维持进料量稳定, 是保证连续碳酸化分解过程生产优化稳定的关键, 而高位槽液位因工况变化经常波动, 导致进料量不稳定, 因此当高位槽液位发生变化时, 要及时调节进料阀门开度, 维持进料量稳定。

5) CO_2 浓度和压力

删除的内容: 1

由连续碳酸化分解机理可知, CO_2 是连续碳酸化分解过程中的一类必不可少的“原料”, CO_2 浓度升高或压力上升, 则需适当加大进料量; 相反, 如果 CO_2 浓度下降或压力减小, 则要适当减小进料量。但 CO_2 浓度和压力是由石灰炉控制, 其变化具有偶然性与随机性, 操作工应根据监控界面提供的参数变化及时与石灰炉联系, 采取相应的修正措施。

6) 出料情况

出料是否畅通对进料量调节有一定影响, 6# 出料槽的液位不能太高, 超过某个警戒值(工艺上规定上限为 10 米), 则要加大出料量。但有时下游工序的碳酸化分解母液不能及时排出, 末槽不能顺畅出料, 此时要采取减小进料和 CO_2 排空措施, 防止过分现象。

7) 3#~6# 的 AO 变化以及 2#~6# 的分解率

目前操作工人在调节进料量时, 一般参照 2#~6# AO 及分解率的变化趋势, 如果变化不大, 则不考虑其影响; 如果变化较大, 出现普遍过分或者普遍欠分的现象, 则要考虑其修正作用。

8) 原液 AO

连续碳酸化分解是一个长流程工艺过程, 与上游工序联系紧密, 通常上游原液 AO 的波动不大, 若出现波动很大的情况, 则要适当加大或减小进料, 减少成分变化带来的影响。

综上所述: 末槽控制目标、首槽分解率、1# AO 变化和 2# AO 变化是影响进料量调节的关键因素, 本文以上述四个关键因素建立了首槽进料量调节专家知识库, 设计了进料量优化控制模块, 完成进料量调节。

2.1.2 影响安全生产的因素分析

安全生产是一切工作的中心, 而连续碳酸化分解生产工况复杂, 一旦操作失误, 不但会陷于运行的被动局面, 且容易酿成事故, 危及人身安全, 影响安全生产的主要因素有:

1) 现场工况恶劣

上游来的铝酸钠溶液经常带有大量浮游物, 使得高位槽液位计经常失灵; 铝酸钠溶液与 CO_2 发生放热反应后会形成大量泡沫, 导致分解槽液位计经常失灵, 操作人员经常被误导, 不能及时采取措施, 容易发生冒槽事故。

2) 涉及的机械设备多且复杂

连续碳酸化分解过程涉及到 2 个高位槽、18 个分解槽、3 个进料电动阀门、18 个 CO_2 阀门和 18 个提料风电动阀门、18 台搅拌机以及若干管道等, 机械设

删除的内容: 1

备多，且复杂程度不一，任何一个环节出现故障，都会使分解过程受到影响。

3) 连续碳酸化分解过程与外界的关联紧密

它容纳上游来的铝酸钠溶液，又向下游工序（过滤车间）提供合格的分解母液，高位槽和末槽经常出现空槽和冒槽等事故，如不及时发现并采取措施，则会危及人身安全。另外，作为反应物质的 CO_2 以及提供分解槽过料动力的提料风都由外界提供，若波动较大，则会打破整个分解工序自平衡，使整个分解系统失控。

4) 铝酸钠溶液的强腐蚀性

铝酸钠溶液具有较强的腐蚀性，容易灼伤人体、危及生命安全。

2.2 连续碳酸化分解实时监控系统总体设计

连续碳酸化分解实时监控系统安装在专家优化计算机上，要实现专家优化机替代槽上岗位的操作工人对连续碳酸化分解的监控，实现分解过程的自动控制，系统就必须具备模拟操作工人智力劳动过程的能力。有鉴于此，本文依照“优质、低耗、高产”的连续碳酸化分解目标和冶金过程中主操作业的内容和步骤，提出连续碳酸化分解监控系统总体设计，如图 2-2 所示。

该系统包含 7 大模块：数据库模块、设备仪表诊断模块、槽况监控模块、进料量软测量模块、进料量控制模块、系统优化设置模块和报表管理生成模块。各个模块在专家优化机内部的工作主要分为两类：

一类是安全监控、生产管理与优化设置。当最新的自动采集数据或分析检测数据进入数据库后，系统自动运行设备仪表诊断模块、槽况监控模块，按照满足设定的时间或条件要求，专家优化机自动在人机会话界面显示模型运算结果，给出操作的智能化提示，对异常情况及时报警，岗位主操根据提示进行决策，采取相应的操作措施。而系统优化设置模块、报表管理生成模块则由主操根据实际生产的需要，通过人机会话界面点击各项子菜单得到。

另一类是进料量调节模块，主要包括进料量软测量模块、流量稳定控制器、分解率计算模型、进料调节专家控制器等部分。流量稳定控制器和进料调节专家控制器两者的控制量由时序控制器协调输出给控制对象——进料阀门，实现进料量的合理调节。同时，用户（岗位主操）也可以根据实际情况，通过人机界面设定进料阀门开度，达到调节进料量的目的。

在该系统中，各模块功能如下：

数据库模块包括基础数据库、优化参数库以及专家知识库三个部分。基础数据库保存现场 PLC 实时采集的工艺过程参数（如液位、压力等），定时从分析检测数据管理系统读取分解槽的成分检测结果，供实时监控模块和进料量控制模块

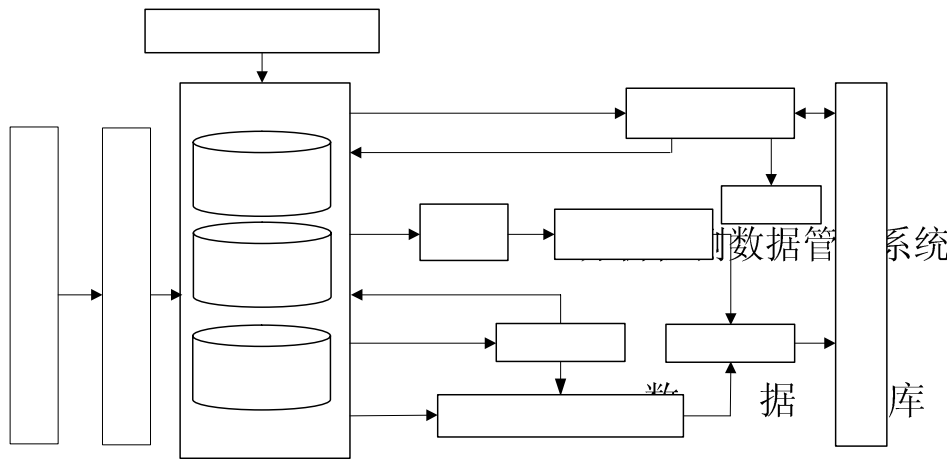


图 2-2 连续碳酸化分解监控系统总体设计

调用；优化参数库保存系统优化设置的各项指标，如分解梯度、进出料流量幅值等；专家知识库是连续碳酸化分解监控系统的核心，是实现进料调节和连续碳酸化分解过程实时安全监控的前提与基础，主要包括进料量调节专家知识库、安全监控专家知识库两部分。

设备仪表诊断模块与槽液监控模块构成安全监控子系统，定时从基础数据库中读取相关数据，经安全监控推理机计算推理，实时监控连续碳酸化分解过程的各项参数，对异常信息给出报警和安全操作提示。

进料量软测量模块则是为了解决进料量难以用常规检测仪表进行测量的问题，综合流体力学、化工原理等领域的相关知识，建立进料量专家知识库，该模型反映了进料量与高位槽液位、阀门开度之间的关系。

报表管理生成模块完成连续碳酸化分解工艺数据的统计、查询、曲线显示与报表生成，实现连续碳酸化分解工艺操作数据综合管理。

系统优化设置模块是用户根据不同时期的生产任务和工艺生产的实际情况，通过相关菜单设置报警幅值、分解梯度等系统参数，便于系统维护。

进料量控制模块包括流量稳定控制器、进料调节专家调节器、时序控制器及进料阀门调节等几部分，实现进料量的合理调节，维持稳定的进料量。

2.3 小结

本章从氧化铝连续碳酸化分解工艺过程出发，简单介绍连续碳酸化分解工艺，讨论影响进料调节和安全生产的主要因素，提出了连续碳酸化分解实时监控系统的整体设计方案，并阐述了各模块的主要功能。

删除的内容: 1

第三章 连续碳酸化分解过程安全监控模型

分解过程的安全事故主要包括冒槽、空槽、电机突然跳停等现象。冒槽包括高位槽冒槽和分解槽冒槽两种情况, 铝酸钠溶液具有强腐蚀性, 冒槽时大量铝酸钠溶液外溢, 严重危及人身安全, 而且造成周围地面环境污染, 浪费生产原料、增加生产成本。空槽主要指高位槽液位太低甚至没有脱硅精液(铝酸钠溶液)的情况, 空槽导致分解槽进料严重不足, 不仅要及时请求上游工序加大供料, 而且还要采取 CO_2 排空措施, 避免分解槽中的铝酸钠溶液局部过分, 甚至需要调节提料风压力, 严重打破分解过程的自平衡体系, 影响分解过程后续十几个小时的正常生产。搅拌电机跳停, 若不及时排除, 溶液得不到充分搅拌, 导致局部过分现象, 严重影响产品质量。

操作工人根据仪表显示的参数, 对分解过程状态作出综合判断, 因此, 仪表准确与否关系到分解过程能否安全生产。分解过程涉及的仪表众多, 包括雷达液位计、 CO_2 压力计、提料风压力计、 CO_2 浓度分析仪、出料流量计等, 生产过程必须保证仪表准确, 出现故障时应及时报警并通知操作工人采取相关措施排除故障, 避免根据错误的参数信息对分解过程的安全状态作出错误判断。

综上所述, 判断仪表状态, 避免冒槽、空槽等安全事故是分解过程安全监控的重点内容。

3.1 安全监控参数选择

高位槽接收五车间送来的脱硅精液, 同时向分解槽供料。高位槽槽高 9.3 米, 这就要求液位要维持在合适的范围。液位过高, 容易出现冒槽事故; 液位过低则会导致分解槽进料不足, 甚至使高位槽出现空槽事故。

每个分解槽高 13.7 米, 除 6# 分解槽外, 每个分解槽从底部通入适量 CO_2 气体与铝酸钠溶液发生放热反应, 产生大量泡沫, 使得雷达液位计经常失灵; 如果液位较高, 大量泡沫在 CO_2 气体吹鼓作用下可能会冒槽, 影响生产。

CO_2 与提料风分别由 CO_2 站与低压站提供, 受外界影响较大, 具有强关联性、强耦合性, CO_2 压力与提料风压力是影响分解过程安全生产的重要参数。 CO_2 压力过高, 分解槽容易冒槽; 提料风压力过高, 提料速度过快, 一方面使得铝酸钠溶液不能充分分解, 另一方面则会出现首槽液位下降, 末槽液位上升, 严重时导致首槽空槽、末槽冒槽的事故。

出料量直接反应分解过程的产量, 是分解过程的一个重要参数, 一般通过调节出料量来调节 6# 分解槽液位, 避免冒槽空槽等事故。

删除的内容:

删除的内容:

删除的内容: 系统

删除的内容: 知识

因此，本文选择 1#~6# 分解槽液位、1#~2# 高位槽液位、CO₂ 压力、提料风压力及末槽出料流量等参数作为仪表状态综合判断、分解过程安全监控的依据。

3.2 基于专家系统方法的安全监控模型

长期从事连续碳酸化分解生产运行的工艺工程师和岗位主副操对于解决安全问题有丰富的经验，他们能够根据各槽液位变化和风压变化等情况，将分解过程的机理特征与丰富的经验知识有效结合，综合分析各项过程参数，做出恰当的判断。这种经验具有非机理性、非系统性、近似性、分散性等特点，一般方法无法很好的表达和使用此类专家们才具有的经验性专家知识，而专家系统方法则是最合适的方法。

基于以上分析，本文设计了基于专家系统方法的安全监控模型，其结构如图 3-1 所示，由数据采集与预处理、数据库、专家监控器以及监控结论与解释、人机接口等五部分组成，专家监控器包括监控知识库与监控推理机两部分。高位槽、分解槽液位、CO₂ 压力等分解过程参数由数据采集模块采集，经过数字预处理，获取相应的征兆并保存到数据库中，然后由监控推理机在监控知识库中寻找符合条件的结论，通过人机接口向用户给出监控结论与解释；同时分解领域专家通过知识库管理模块完成监控知识库的维护与管理。

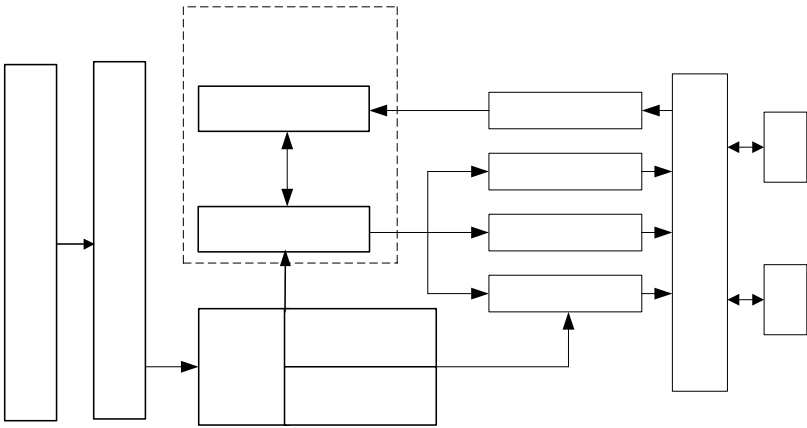


图 3-1 基于专家系统方法的分解过程安全监控模型

3.2.1 分解过程数据采集与预处理

连续碳酸化分解生产现场，通过安装雷达液位计、压力计、CO₂ 浓度分析仪以及流量计等仪表实时检测分解过程重要参数，由 PLC 的 A/D 转换模块完成数据采集和信号转换。

数据预处理主要包括三方面内容：(1)平滑过程参数；(2)对某些参数求梯度和波动值，以判断其动态特征；(3)对复合参数进行计算，如进料量软测量等。在此

删除的内容: 1

只介绍过程参数平滑问题。

连续碳酸化分解现场工况非常恶劣,放热反应产生的泡沫使液位计等仪表经常失灵,一些监控参数容易出现跳变值,为避免误报警和误诊断,需用相应的数字滤波算法对过程参数进行平滑。本文结合使用“极大比较滤波法”、“极小比较滤波法”和移动滤波法对参数进行平滑处理:根据经验确定相邻两次采样值的最大偏差值 ΔT_{\max} ,若相邻两次采样值的偏差大于 ΔT_{\max} ,”极大比较滤波法”认为本次采样是跳变值,应将其彻底剔除,用上一时刻的采样值替代;若相邻两次采样值偏差小于某个允许的偏差 ΔT_{\min} 时,”极小比较滤波法”认为本次采样真实可靠。当两次采样偏差在【 ΔT_{\min} , ΔT_{\max} 】之间时,采用移动滤波法中的算术平均值求解,公式表示如下:

$$T = \begin{cases} T_{n-1}, & |T_n - T_{n-1}| > \Delta T_{\max} \\ (\sum_{i=n-5}^n T_i) / 6, & \Delta T_{\min} < |T_n - T_{n-1}| \leq \Delta T_{\max} \\ T_n, & |T_n - T_{n-1}| \leq \Delta T_{\min} \end{cases}$$

式中: ΔT_{\max} 为最大偏差经验值; ΔT_{\min} 为允许的偏差值,部分阈值如表 3-1 所示。

表 3-1 部分过程参数经验阈值表

过程参数	最大经验偏差 ΔT_{\max}	最小经验偏差 ΔT_{\min}
1#高位槽液位(m)	0.2	0.05
2#高位槽液位(m)	0.4	0.05
1#分解槽液位(m)	0.2	0.05
2#分解槽液位(m)	0.2	0.05
3#分解槽液位(m)	0.2	0.05
4#分解槽液位(m)	0.2	0.05
5#分解槽液位(m)	0.2	0.05
6#分解槽液位(m)	0.2	0.05
CO ₂ 压力(MPa)	0.03	0.007
提料风压力(MPa)	0.04	0.008

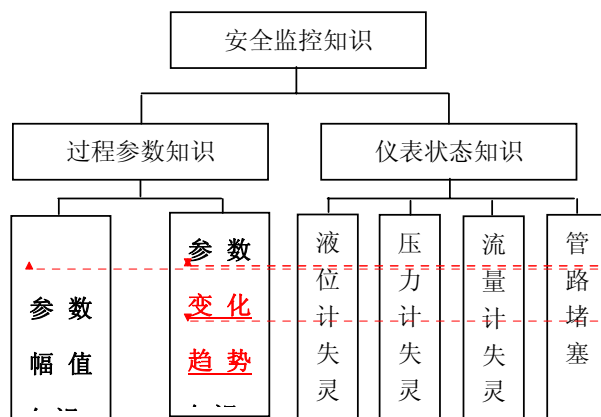
3.2.2 基于产生式规则的监控知识库

监控知识库是安全监控模型的核心。监控知识库的构建包括监控知识分类、监控知识表示以及监控知识库实现三个部分。

1) 监控知识分类

根据连续碳酸化分解生产现场实际情况,结合工艺专家经验,本文将安全运行监控知识分为过程参数知识和仪表状态知识两类,如图 3-3 所示。

删除的内容:
删除的内容:
删除的内容: 系统
删除的内容: 知识



删除的内容:
带格式的
带格式的
删除的内容: 幅值
带格式的

图 3-3 安全监控知识分层结构图

(1) 过程参数知识

根据考虑过程参数特征的着重点不同，参数知识分为参数幅值知识和参数变化趋势知识两类。

根据分解机理和生产经验，各项过程参数（如液位、压力等）需维持在一定的范围，本文称此类知识为**参数幅值知识**。例如高位槽液位一般要求在 6~9 米，高于 9 米容易冒槽，危及人身安全，低于 6 米则不能给分解槽提供足够的碳酸化分解原液。

连续碳酸化分解是一个长流程过程，各项参数信息具有连续时变性和诊断复杂性的特征，实时安全监控专家系统在进行判断推理时需要同一参数多个不同时刻的数据进行综合判断推理，本文称此类体现相应数据变化的知识为**参数变化趋势知识**。例如，某时刻高位槽液位 8 米，且仍以 0.5m/minute 的速度上升，则系统应该给出相应提示，这也是安全监控系统实时性的重要体现。

通过调研，本文整理了如下过程参数知识：

➤ 对高位槽液位

- 2# 高位槽液位高于 8.9 米，且仍然上升，因为高位槽只有 9.2 米，极有可能出现冒槽事故，所以紧急操作，提醒五车间减少进料，并加大进料量；
- 2# 高位槽液位高于 8.7 米，小于 8.9 米，且上升速度较快，为避免液位过高，提醒五车间减少进料；
- 2# 高位槽液位小于 7.5 米，并继续下降，而 1# 高位槽也小于 7.5 米，则进料量过小，提醒五车间加大进料流量；
- 1# 高位槽液位大于 9.1 米，仍然上升，则提醒五车间减少进料，并加大进料量；

删除的内容: 1

- 1# 高位槽液位高于 8.8 米, 小于 9.1 米, 且上升速度较快时, 为避免液位过高, 提醒五车间减少进料;
- 1# 高位槽液位低于 6 米, 且继续下降, 2# 高位槽液位也继续下降, 提醒五车间加大进料流量;
- 对分解槽液位
 - 6# 分解槽液位高于 9.5 米, 小于 10.5 米, 加大出料量;
 - 6# 分解槽液位高于 10.5 米, 提示加大出料量, 若不能调节, 则采取排空措施;
 - 1# 分解槽液位低于 10 米, 提示加大进料;
 - 1# 分解槽液位高于 13.5 米, 提示快冒槽, 紧急操作;
 - 2# 分解槽液位低于 10 米, 提示加大进料;
 - 2# 分解槽液位高于 13.5 米, 提示快冒槽, 紧急操作;
 - 3# 分解槽液位低于 10 米, 提示加大进料;
 - 3# 分解槽液位高于 13.5 米, 提示快冒槽, 紧急操作;
 - 4# 分解槽液位低于 8.5 米, 提示加大进料;
 - 4# 分解槽液位高于 13.5 米, 提示快冒槽, 紧急操作;
 - 5# 分解槽液位低于 8.5 米, 提示加大进料;
 - 5# 分解槽液位高于 13.5 米, 提示快冒槽, 紧急操作;
- 对 CO₂ 与提料风
 - CO₂ 浓度小于 34%, 提示浓度太低, 石灰炉是否出现故障?
 - CO₂ 浓度高于 39%, 且继续上升, 提示“当心, CO₂ 浓度很高,”
 - CO₂ 浓度高于 42%, 提示石灰炉可能故障, 加大进料量;
 - CO₂ 压力小于 0.08MPa, 提示压力太低;
 - CO₂ 压力小于 0.10MPa, 且继续下降, 请 CO₂ 站加压;
 - CO₂ 压力大于 0.14MPa, 提示压力太高, 排空或请 CO₂ 站减压;
 - 提料风压力小于 0.14MPa, 且下降较快, 请低压站加压, 同时关小 4#、5# CO₂ 通气阀门, 减少进料;
 - 提料风压力高于 0.22MPa, 且继续上升, 请低压站减压;

(2) 仪表状态知识

此类知识指通过相关参数, 识别过程仪表、设备状态的经验知识和机理知识, 主要包括检测仪表失灵、管路堵塞等知识。

结合分解过程的特点, 本文总结了相关仪表状态知识, 其具体形式如下:

➤ 雷达液位计状态、压力计状态

- 1# 高位槽液位高于 8.3 米, 且继续上升, 2# 高位槽液位小于

8.2 米, 则 2# 高位槽液位计可能失灵;

- 1# 高位槽液位下降较快, 2# 高位槽液位高于 8.4 米, 且继续上升, 则 1# 高位槽液位计可能失灵;
- 1# 分解槽液位高于 12.5 米, 2#、3# 液位低于 11 米, 4# 液位 10.5 左右, 则 1# 分解槽液位计可能失灵;
- 2# 分解槽液位高于 12.5 米, 1#、3# 液位低于 11 米, 4# 液位 10.5 米左右, 则 2# 分解槽液位计可能失灵;
- 3# 分解槽液位高于 12.5 米, 1#、2# 液位低于 11 米, 4# 液位 10.5 米左右, 则 3# 分解槽液位计可能失灵;
- 4# 分解槽液位高于 12.5 米, 1#、2#、3# 液位低于 11 米, 5# 液位 10.5 米左右, 则 4# 分解槽液位计可能失灵;
- 如果某个槽液位明显较其他槽液位低 2 米, 则该槽液位计可能失灵;
- 如果某槽由正常液位, 突然上升至 13.5 米以上, 则该槽液位计可能失灵;
- 如果进料量变化不大、出料量变化不大, 6# 分解槽液位上升较快, 提料风压力下降, 则提料风压力计失灵;
- 如果进料量变化不大、出料量变化不大, 6# 分解槽液位下降较快, 提料风压力上升, 则提料风压力计失灵;

➤ 管路状态等

- 出料量很小, 6# 分解槽液位上升很快, 则出料管道可能堵塞
- 1# 高位槽液位上升较快, 2# 高位槽液位上升很快, 1#~2# 分解槽液位下降很快, 则进料管道可能堵塞

2) 监控知识表示

专家系统模型中知识表示的方法较多, 常用的有一阶谓词、语义网络、黑板模型、产生式规则等形式^[27~29], 连续碳酸化分解实时安全监控专家系统属于数据驱动型, 在知识表示上最适合用产生式规则表示, 并以规则集的形式存储。

产生式规则^[30~35]的一般形式是 **if<前提>then<结论>**, 它表示当<前提>成立时, 得出<结论>, 其中<前提>是事实或断言的合取形式, 本文中规则模型如图 3-4 所示。

删除的内容:
删除的内容:
删除的内容: 系统
删除的内容: 知识

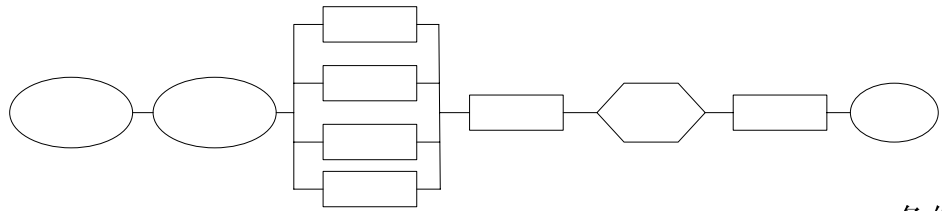


图 3-4 监控知识规则模型图

条件单元1

上述模型用 BNF 范式^[36-39]表示如下:

<产生式规则>::=<规则编号><规则类别>IF<规则前件>THEN<规则结论>

条件单元2

<规则编号>::=<整数>
规则编号

规则类别

前件

<规则类别>::=<字符>

条件单元3

<规则前件>::=<条件集>

<条件集>::=<条件单元>{<条件单元>}

条件单元4

<条件单元>::=<过程参数><标识符>

<过程参数>::=<对象><属性值区间>

<对象>::=<字符串>

<属性值区间>::=[最小属性值,最大属性值]

<最小属性值>::=<整数>|<小数>

<最大属性值>::=<整数>|<小数>

<标识符>::=<布尔类型数>

<规则结论>::=<字符串>

现对上述表示进行几点说明:

(1) 规则类别

本文将分解过程监控知识分成参数超限知识和仪表、设备故障识别知识两类,规则集中用类型标识“P”表示参数知识,用“I”表示仪表知识,目的是方便推理机推理时快速寻找,避免穷尽式搜索。

(2) 条件集

每条规则的条件集由 i ($i \leq 4$) 个条件单元组成,即本系统中任意一条规则前件最多有 4 个条件单元,如图 3-4 所示。

(3) 标识符

本文一些规则的条件单元比较多,每个条件单元需通过标志符与其他条件单元连接,如果标识符“0”表示当前条件单元是本条规则的最后一个条件单元,匹配完毕;如果标识符为“1”表示当前条件单元后面还有其他条件单元,推理时需要继续匹配。例如若某条规则的第 i ($i=1,2,3,4$) 个条件单元的标识符为“1”,则表示本条规则至少还有第 $i+1$ 个条件单元,在进行数据匹配推理时需要继续匹

删除的内容: 1

配后续条件；若第 i ($i=1,2,3,4$) 个条件单元的标识符为“0”，则表示本条规则只有 i 个条件，在进行数据匹配推理时表示匹配本条规则前件完毕，得出结论。

(4) 过程参数

过程参数在本文是指与连续碳酸化分解有关的各种变量，用对象—属性最小值—属性最大值类似三元组 ($O-V_{\min}-V_{\max}$) 的形式表示。例如对于“高位槽液位”可以用 (高位槽液位, h_{\min} , h_{\max}) 的形式表示，其中 h_{\max} , h_{\min} 分别表示对象“高位槽液位”属性值的上下区间。

3) 监控知识库实现

知识库与数据库的结构较为相似，存在着许多共同之处，例如数据库能对大规模的数据进行存储和管理，并实现数据的共享，这些能力也是知识库的主要功能，且数据库的操作包括数据的添加、删除、查询等，与知识库系统的操作也完全相同，故本文采用数据库技术设计监控知识库。数据库软件品种很多，大型数据库有 ORACLE、SYBASE 等，普通的有 Access、Foxbase、Visual FoxPro 等，由于本安全监控知识库的规则集不是太大，故选用 Microsoft Access 数据库管理软件构造监控知识库。

用.mdb 文件构造监控知识库，即表示成规则集的形式，需要考虑以下两点：第一点是监控知识库的结构，即字段数，类型，宽度等；第二点是监控知识库中每条规则的排列顺序。

(1) 监控知识库结构设计

根据需求分析，用来构造监控知识库的.mdb 文件定义 19 个字段：一个规则编号 (ID)，整型；一个规则类别标识 (RuleClass)，字符串型；一个结论，字符串型；四个条件单元，每个条件单元包括 4 个字段，在知识库规则集中如表 3-2 (a) 所示，其中对象为字符串型，最小属性值、最大属性值为实型，标识符为布尔型。

表 3-2 (a) 规则前件条件单元结构示意图

对象	属性最小值	属性最大值	标识符
----	-------	-------	-----

例如，某规则“1# 高位槽液位很高，且上升，2# 高位槽液位低于 8.2 米”，将第一个条件“1# 高位槽液位很高”转换成条件单元的形式，则对象值为“1# 高位槽液位”；属性“很高”用区间[8.4, 9.0] (单位：米) 表示；而后面还有其他的条件，标识符为“1”；所以其条件单元的具体实现形式如表 3-2 (b) 所示：

表 3-2 (b) 规则前件条件单元结构示意图

1# 高位槽液位	8.4	9.0	1
----------	-----	-----	---

(2) 规则排列

首先按知识分类原则将相同类型的规则排列成规则块,同类规则则根据异常情况的出现频率排列。由于上游工序不稳定,高位槽液位经常波动,最容易出现冒槽等安全事故,所以将与高位槽液位相关的信息排在参数超限类知识的最前面。根据上述原则,监控知识库规则集结构如表 3-3 所示,表中:

ID——规则编号;

RuC——规则类别标识;

FirDb——第一个条件单元对象;

Fmin——第一个对象的最小值;

Fmax——第一个对象最大值;

FirB——第一个条件单元的标识符;

SecDb——第二个条件单元对象;

Smin——第二个对象的最小值;

Smax——第二个对象最大值;

SecB——第二个条件单元的标识符;

ThiDb——第三个条件单元对象;

Tmin——第三个对象的最小值;

Tmax——第三个对象最大值;

ThiB——第三个条件单元的标识符;

ForDb——第四个条件单元对象;

Formin——第四个对象的最小值;

Formax——第四个对象最大值;

ForB——第四个条件单元的标识符;

Conclusion——结论;

删除的内容:

删除的内容:

删除的内容: 系统

删除的内容: 知识

表 3-3 监控知识库规则集结构

ID	RuC	FirOb	Fmin	Fmax	FirB	SecOb	Smin	Smax	SecB	TirOb	Tmin	Tmax	ThiB	ForOb	Formin	Formax	ForB	Conclusion
1	P	2# 高位槽液位	8.9	9.5	1	2# 高位槽液位的变化	0.05	10	0									加大进料，通知五车间减少精液流量
2	P	2# 高位槽液位	8.7	8.9	1	2# 高位槽液位的变化	0.1	1	0									通知五车间减少精液流量
3	P	2# 高位槽液位	0	7.5	1	2# 高位槽液位的变化	-10	-0.05	1	1# 高位槽液位	0	7.5	0					通知五车间加大精液流量！
4	P	1# 高位槽液位	9.3	11	1	1# 高位槽液位的变化	0.05	10	0									加大进料，通知五车间减少精液流量
5	P	1# 高位槽液位	8.8	9.3	1	1# 高位槽液位的变化	0.05	10	0									通知五车间减少精液流量！
6	P	1# 高位槽液位	0	6	1	1# 高位槽液位的变化	-10	-0.05	1	2# 高位槽液位的变化	-10	-0.01	0					通知五车间加大精液流量！
7	P	6# 出料槽液位	9.5	10	1	6# 出料槽液位的变化	0.05	10	0									调节出料量，若不能调节出料则采取排空措施
8	P	6# 出料槽液位	10.5	14	0													请联系风站减压！
9	P	1# 分解槽液位	13.5	14	0													快冒槽了，请紧急操作！
10	P	CO ₂ 浓度	0	34	0													石灰炉可能出现故障？
11	P	CO ₂ 浓度	30	35	1	CO ₂ 浓度的变化	0.1	10	0									CO ₂ 浓度上升，是否加大进料！
12	P	CO ₂ 浓度	39	40	0													当心！ CO ₂ 浓度较高！
13	P	CO ₂ 浓度	40	100	0													请联系 CO ₂ 站！

删除的内容: 1

删除的内容:

删除的内容:

删除的内容: 系统

删除的内容: 知识

14	P	CO ₂ 压力	0.14	0.4	0													请联系 C02 站减压!
						C02 压力的变												
15	P	CO ₂ 压力	0.08	0.1	1	化	-10	-0.05	0									C02 压力较低, 且在下降!
16	P	CO ₂ 压力	0	0.08	0													请联系 C02 站加压!
...
						提料风压力												
30	I	提料风压力	0	0.14	1	的变化	-1	-0.02	0									液位计可能失灵?
										6# 出料槽			提料风					
						出料量的变				液位的变			压力的					
31	I	进料量的变化	-10	10	1	化	-10	10	1	化	0.5	10	1	变化	-10	-0.05	0	低压风压力计可能失灵
										6# 出料槽			提料风					
						出料量的变				液位的变			压力的					
32	I	进料量的变化	-10	10	1	化	-10	10	1	化	-10	-0.5	1	变化	0.05	10	0	低压风压力计可能失灵
						6# 出料槽液												
33	I	出料量	0	40	1	位的变化	1.5	10	0									出料管可能堵塞
34	I	出料电机电流	0	7	0													出料电机可能烧坏
						2# 分解槽液				3# 分解槽								
35	I	1# 分解槽液位	8	14	1	位	8	14	1	液位	0	7	0					3# 分解槽液位计可能失灵
						3# 分解槽液				1# 分解槽								
36	I	2# 分解槽液位	8	14	1	位	8	14	1	液位	0	7	0					2# 分解槽液位计可能失灵
										1# 分解槽								
		1# 高位槽液位				2# 高位槽液				液位的变								
37	I	的变化	0.05	10	1	位的变化	0.5	10	1	化	-10	-0.5	0					进料管道可能堵塞
...

删除的内容: 1

3.2.3 安全监控过程推理机的实现

推理机利用程序实现知识的匹配与选择,其实质是一种知识搜索^[40~42],其主要功能是协调控制整个系统,决定如何选用知识库中的知识,对系统预处理后的特征进行推理,主要有三种推理方式:正向推理,逆向推理和正反向混合推理。

启发式搜索^[27~28]是利用某些具体问题领域的特征信息,对将要进行的搜索预先进行路径选择,例如在上述的知识库模型中将“规则类别标识”作为特定的启发性信息,推理时利用搜索引擎直接找到符合条件的规则块,实现对不同规则块的启发式搜索。

本文采用启发式搜索策略和正向推理相结合的方法实现监控推理机,具体工作原理如下:推理机根据信息特征预处理结果,判断该信息的类别(P或者I),然后用 SQL 语句进行定位搜索,即实现前向启发式搜索,找到该类别的规则块(例如,若特征信息表示是仪表知识,则利用 SQL 语句直接指向规则类型为 I 的规则块),再采用数据驱动的正向推理方法搜索余下规则,避免每次搜索时遍

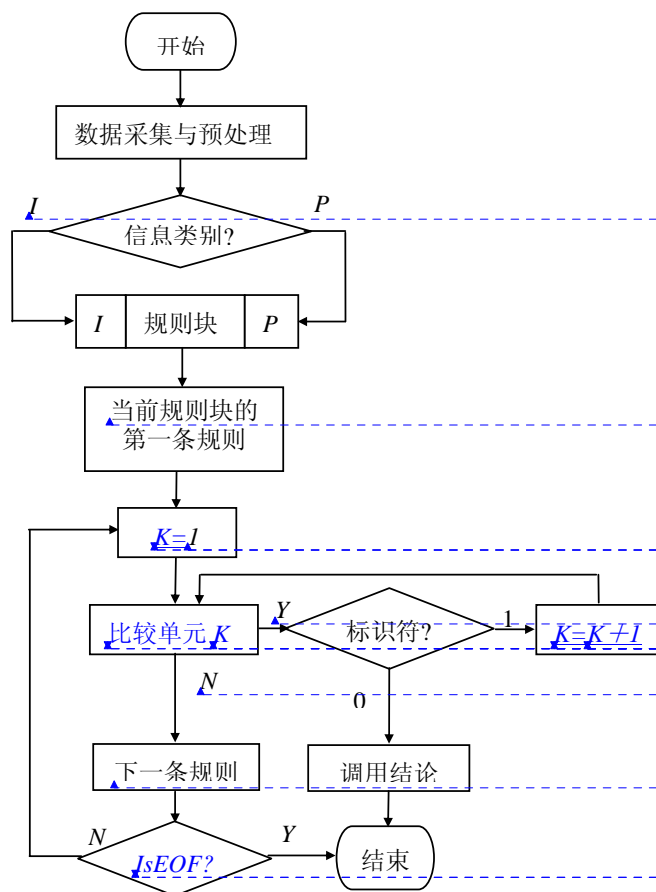


图 3-5 推理机实现流程

带格式的

带格式的

删除的内容: 条件

带格式的

带格式的

带格式的

删除的内容: 条件

删除的内容: I

删除的内容: 条件

带格式的

删除的内容: I

带格式的

带格式的

带格式的

带格式的

带格式的

删除的内容: End

带格式的

删除的内容: 1

历整个规则集, 提高推理速度, 满足系统实时性的要求, 推理步骤如图 3-5 所示:

- 1) 对实时数据进行预处理与分类, 并转换为监控知识库中以规则为单位的表示形式;
- 2) 判断信息类别, 即该信息属于参数知识 (P) 还是仪表知识 (I);
- 3) 根据信息类别, 利用 SQL 语句将搜索引擎移动到某规则块的第一条规则;
- 4) 对当前规则的第一个条件的比较单元进行比较, 匹配不成功, 则忽略后面的比较单元, 转 Step 5); 匹配成功则检查标志符, 标志符为 0 则转 Step 6); 标志符为 1, 则继续比较下一个比较单元, 如此反复循环比较, 直至匹配成功;
- 5) 移到下一条规则, 判断是否为最后一条记录, 是, 则表示没有匹配成功, 系统安全正常, 推理结束; 如果不是最后一条, 转 Step 4);
- 6) 匹配成功, 调用结论, 推理结束。

3.2.4 分解过程安全监控结论解释

监控结论与解释模块是实时监控专家系统“表达”监控结果的部分, 主要由三部分组成: 报警条、结论框及解释框。报警条标识某参数以及相应仪表的四种不同状态 (过高、正常、过低及仪表失灵); 结论框显示推理结果, 供操作人员

表 3-4 参数阈值

参数	单位	过低	较低	正常	较高	过高
1# 高位槽液位	m	<6	6-7.5	7.5-8.5	8.5-8.9	>8.9
2# 高位槽液位	m	<6	6-7.5	7.5-8.5	8.5-8.9	>8.9
1# 分解槽液位	m	<8	8-10	10-12	12-13	>13
2# 分解槽液位	m	<8	8-10	10-12	12-13	>13
3# 分解槽液位	m	<7	7-9	9-11.5	11.5-12.5	>12.5
4# 分解槽液位	m	<7	7-9	9-11.5	11.5-12.5	>12.5
5# 分解槽液位	m	<7	7-9	9-11.5	11.5-12	>12
6# 分解槽液位	m	<6	6-8	8-10	10-11	>11
CO ₂ 压力	MPa	<0.08	0.08-0.1	0.1-0.14	0.14-0.16	>0.16
提料风压力	MPa	<0.15	0.15-0.17	0.17-0.21	0.21-0.23	>0.23

决策参考; 解释框显示推理过程, 便于用户理解判断。一般专家系统的解释器是对每条规则事先设计好相应的解释字段, 推理成功时直接调用该解释字段, 本文采用动态保存的方法, 构成自动解释器。具体方法是: 将推理过程用到的参数进

删除的内容:
删除的内容:
删除的内容: 系统
删除的内容: 知识

行分段表示，部分参数阈值如表 3-4 所示，推理过程中，按规则编号将每步推理所依据的条件单元及变量匹配的情况记录下来，形成不断延伸的“链条”，如果推理不成功，则自动清除推理记录；如果推理成功，则解释器对该链条适当组织，将推理过程显示给用户，并存入监控结果表。这种自动生成记录的解释器避免因修改规则导致必须修改规则解释字段的问题，增加了系统的灵活性与通用性。

3.3 安全监控模型应用及结果分析

安全监控模型以中州分公司连续碳酸化分解工序 II 组为研究对象，开发了安全监控软件，于 2004 年 10 月 20 日正式投入运行，对分解过程故障进行了有效报警，部分监控结果如表 3-5 所示。

表 3-5 部分监控结果表

编号	监控时间	征兆	监控结论与报警
1	10-21 20:49:39	1#、2# 高位槽液位都低（分别为 6.6m、7.6m）且 2# 液位下降	通知五车间加大精液流量！
2	10-21 21:16:29	CO ₂ 压力过高（0.145Mpa），且上升	请 CO ₂ 站降压
3	10-22 11:54:29	1#、2# 分解槽液位过高（13.5m，13.2m）	快冒槽了，请紧急操作！
4	10-24 18:05:19	5#、6# 槽液位低（7.0m，6.9m）	调节出料量，若不能调节出料则采取排空措施！

对于第 1 条监控信息，工艺要求 1#、2# 高位槽液位要在 8 米以上，而此刻液位只有 7 米左右，且继续下降，系统提示通知五车间加大精液流量。

对于第 2 条监控信息，工艺上一般要求压力在 0.12Mpa~0.14Mpa 之间，而此时压力为 0.145 Mpa，并继续上升，所以提示请 CO₂ 站降压。

对于第 3 条监控信息，分解槽只有 13.7 米高，工艺要求，1#、2# 分解槽液位不能超过 12.5 米，而此时都过高（分别为 13.5m，13.4m），容易冒槽，系统提示快冒槽了，请紧急操作！

对于第 4 条监控信息，5#、6# 槽液位过低，溶液过少，容易出现过分现象，严重影响产品质量，必须及时调节出料量；而下游工序不能容纳多余的分解母液，

删除的内容: 1

删除的内容:

删除的内容:

删除的内容: 系统

删除的内容: 知识

此时只有将 CO₂ 排出分解系统，工艺上俗称排空。

2004 年 10 月 20 日系统正式投入运行，截至 2004 年 11 月 3 日实时安全监控软件共有效报警 408 次。运行结果表明，基于专家系统的实时安全监控系统通过实时监控连续碳酸化分解过程各项工艺参数，及时发现异常情况，有效地避免人为失误，从而减小了安全事故的发生，提高了生产的安全性。

3.4 小结

本章从连续碳酸化分解生产实际出发，提出了基于专家系统方法的分解过程安全监控模型的总体设计，介绍了数据采集与预处理模块、数据库模块、监控知识库模块、推理机以及解释器等几部分的具体实现过程，最后分析了实时安全监控专家系统的应用情况，结果表明该系统避免了人为因素影响，提高了整个生产流程运行的安全性，具有较大的应用价值。

删除的内容: 1

第四章 首槽进料量控制

目前操作工人一般根据每小时 1~6# 槽成分检测结果（每小时化验室检测一次）、生产过程参数（如 CO_2 压力、浓度等）调节进料量大小，本文称此类进料量调节为**进料量报样控制**。

在相邻两次进料量报样控制的时间间隔内，由于上游供料工序的变化，两个高位槽液位经常波动，引起进料量不稳定，这是连续碳酸化分解过程的主要扰动，导致氢氧化铝颗粒不合格，故维持合适稳定的进料量是连续碳酸化分解过程控制的关键。为减小进料量波动对分解梯度的影响，系统根据高位槽液位变化情况，每隔一段时间调节一次进料阀门开度，维持进料量稳定，本文称此类进料量调节为**进料量稳定控制**。

但是，由于进料管较短、管径比较大且容易结疤，首槽进料量难以用常规过程检测仪表进行测量，为此本文拟采用软测量技术，通过寻找高位槽液位、阀门开度与进料量的函数关系，建立软测量模型，间接测量进料量，为首槽进料量调节提供依据。

4.1 首槽进料量总体控制模型

连续碳酸化分解过程具有复杂性、时滞性及强关联性等特点，很难用常规方法对其建立准确的数学模型，目前操作工人的操作主要依靠个人经验，这种经验称之为专家知识，为此本文采用基于专家系统方法的“进料量报样控制”与基于机理的“进料量稳定控制”相结合的混合控制方法，实现进料量合理调节，控制原理如图 4-1 所示。

图中， z_1, z_2 —1#、2# 高位槽报样控制时刻液位； Δz_2 —相邻两报样时刻 2# 高位槽液位的差值； z_{1s}, z_{2s} —1#、2# 高位槽的实时液位； u_s —进料阀门实时开度； Q —报样控制时刻由软测量模型计算得到的进料量； Q' —由软测量模型计算的实时进料量。

其基本原理是：每小时连续碳酸化分解样品成分检测结果出来后，根据分解率计算模型得到首槽实际分解率、高位槽实时液位及其变化，启动专家控制器、基于高位槽液位的修正模型与基于其他成分的修正模型，得到控制量 u_m ，同时启动进料量软测量模型，计算进料量 Q ，并作为稳定控制的流量设定值。在相邻两次报样控制间隔内，系统每隔一段时间启动一次软测量模型，得到实时流量 Q' ，再通过流量控制器得到控制量 u_k 。时序控制器的作用是协调 u_m 和 u_k ，当进行报样控制时，关闭稳定控制模型，稳定控制时关闭报样控制模型，

保证每次只有一个控制量输出到进料阀门。

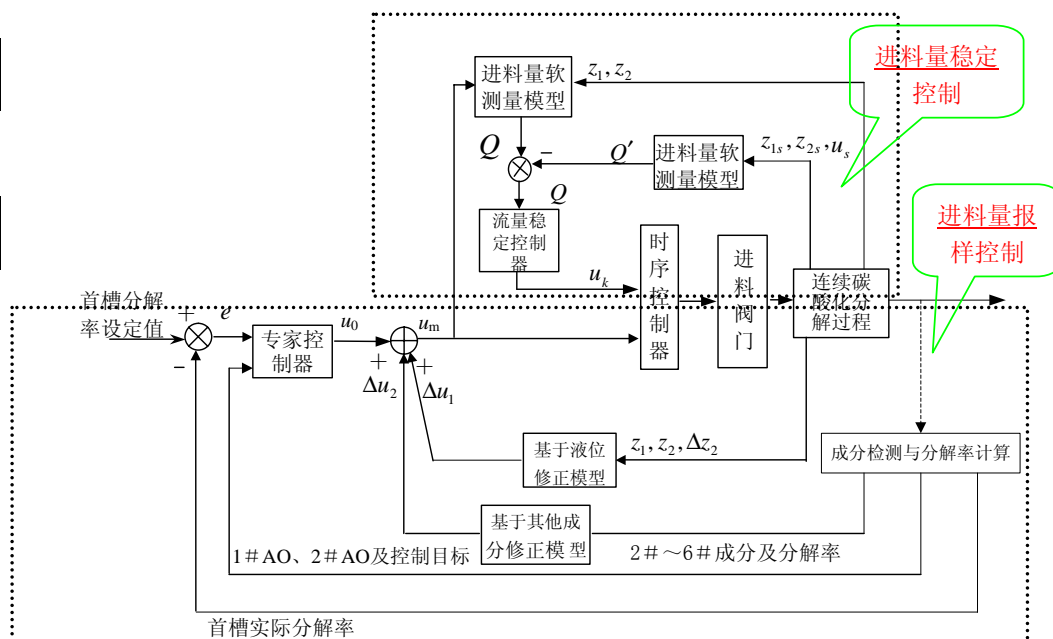


图 4-1 首槽进料量混合控制原理框图

4.2 进料量报样控制

由图 4-1 可知, 进料量报样控制主要包括进料专家控制、基于高位槽液位的修正和基于其他成分的修正三部分, 现介绍各部分的具体实现。

4.2.1 进料调节专家控制器

进料调节专家控制器主要由特征识别与信息处理、进料调节知识库、推理机、数据库、控制决策等模块组成,结构如图 4-2 所示。

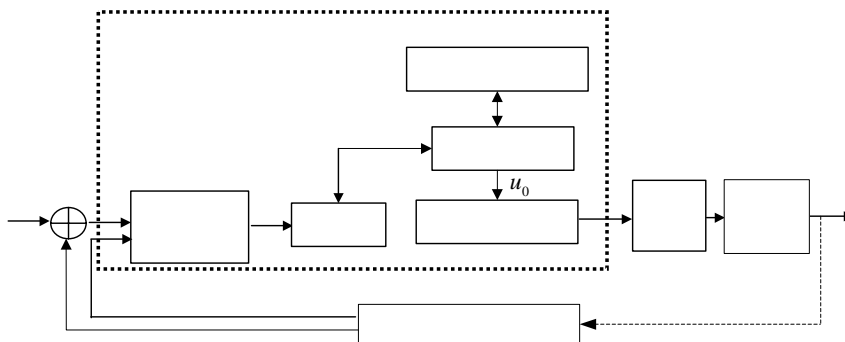


图 4-2 首槽进料量专家控制器结构

进料专家控制器的输入为首槽分解率偏差、1#AO、2#AO及末槽分解率控制目标等四个因素,经特征识别与信息处理后送到综合数据库保存,供推理机推理调用,推理机与进料调节知识库中的规则进行匹配得出结论(控制量),再将控制量输出给控制决策单元,同时保存到数据库中,供用户管理查询。

特征识别与信息处理部分实现对连续碳酸化分解过程工艺参数信息的提取和加工,为推理和学习模块提供依据,主要包括提取动态过程的特征信息,识别系统的特征状态,处理成推理机能够识别的格式并保存在数据库中,供推理机调用。例如,由于人为因素或其他客观原因,分解槽样品的检测数据可能出现明显过大、过小,甚至可能没有样品的异常现象,在进行信息处理时根据经验对各参数设置相应的阈值,用来判断该分析检测结果是否可信,剔除明显的错误(如点错小数点、没有样品)。

进料调节知识库是专家控制器的基础,存储经归纳总结的工艺工程师和熟练操作人员的经验知识,包括事实库与控制规则集。事实库保存经验事实,使知识工程师或专家很方便的抽象出控制规则,便于对规则进行解释,包括事实库事实和参数量化两部分。事实库事实是一些文字表述的信息,这些信息和规则集中的规则相对应。如在事实库事实中有“1#AO上升太大”、“1#分解率太低”、“中限控制”等事实。参数量化主要是对事实进行分段表示而设置的相关参数集合。连续碳酸化分解进料调节的经验事实一部分是明确的、清晰的,或者说能用数值直接表示,但大部分却具有不确定性和不精确性,需要根据实际生产具体量化,如“1#AO上升太大”、“1#分解率太低”等事实就需要量化参数范围。控制规则集保存由事实库抽象得到的产生式规则,相关内容与3.2.2节所述类似,不作累述。

推理机采用启发式搜索与正向推理相结合的方式进行推理。

不同时期的生产任务与需求,控制目标(即原液AS在700~800之间的预控分解率,以下简称预控分解率)可能不同,工艺上一般有以下三种情况:中下限控制、中限控制和中上限控制,对应的预控分解率分别为[91.5, 93.5]、[92, 94]、[92.5, 94.5]。

本文根据预控分解率的三种情况将规则分为三大类,根据3.2.4节推理机原理,以预控分解率为对象建立启发式搜索估价函数 $WR(k)$ ^[46~47],根据 $WR(k)$ 的值,首先查找符合预控分解率条件的规则块。例如,若 $WR(k)_{\min} = 92$, $WR(k)_{\max} = 94$,则利用SQL搜索引擎找到中限控制规则块,再在该规则块内采用正向推理,逐一匹配规则,得到控制量,并保存到数据库中,然后经控制决策部分输出控制量到进料阀门。

数据库主要保存过程数据,包括经过特征识别与信息处理的数据和经推理

机得出的控制量，供生产管理查询。

进料控制决策模块协调进料控制与两个修正模型的关系，将两个修正模型的控制量与进料专家控制器的控制量进行叠加，输出到控制对象——进料阀门。

4.2.2 基于液位的修正模型与基于其他成分的修正模型

高位槽液位变化导致进料量波动，进料量波动直接影响首槽分解率和分解率梯度，因此，高位槽液位及其变化是影响首槽进料量调节的重要因素，为此系统建立了基于高位槽液位的修正模型，重点考虑高位槽液位及其变化对进料调节的影响。工业现场首槽进料大部分由 2# 高位槽提供，在修正模型中忽略 1# 高位槽液位变化的作用，只考虑 2# 高位槽液位变化、1# 和 2# 高位槽当前液位等等三个因素的影响。

实际生产中，操作工人在调节首槽进料量时会考虑 2#~6# 分解率和 AO 变化的影响，尤其出现普遍过分或普遍欠分时，系统要对进料及时调整。根据工艺工程师和现场工人的经验，结合对三个月现场跟班操作记录的分析，本文建立了基于其他成分（即 2#~6# 分解率和 AO 变化）的修正模型，最大限度的减小系统滞后性的影响。

以上两个修正模型的设计思想与进料调节专家控制器一样，采用专家系统方法，具体过程从略。

4.2.3 进料量报样控制量的计算

1) 控制量计算步骤

综合上述三个模型，可以得到首槽进料量的控制量，其计算步骤如下：

- (1) 系统根据预控分解率和分解率梯度，优化设定首槽分解率；
- (2) 由成分检测结果计算当前时刻首槽实际分解率，并作为反馈值与设定值比较，得到首槽分解率偏差 e ；
- (3) 1# AO 和 2# AO 实际值、末槽分解率控制目标及偏差 e 作为专家控制器的输入，经推理机推理得出控制量 u_0 ；
- (4) 1# 和 2# 高位槽的液位 z_1, z_2 以及 2# 高位槽液位变化 Δz_2 作为基于液位修正模型的输入，推理得到控制量 Δu_1 ；
- (5) 2#~6# AO 以及分解率等作为基于其他成分的修正模型的输入，得出结论 Δu_2 ；
- (6) 首槽进料报样控制量

$$u_m = u_0 + \alpha \Delta u_1 + \beta_i \Delta u_2 \quad (4-1)$$

其中， α ， β_i 为修正系数。

2) 确定修正系数 α , β_i

(1) 确定液位模型修正系数 α

实际操作经验表明, 2# 高位槽液位 z_2 与进料流量不是简单的线性关系, 当液位下降到某特定阈值后, 2# 高位槽液位对进料量的影响也变得很小。不妨假设修正系数 α 与液位 z_2 成二次函数关系, 如式(4-2)所示。

$$\alpha = a_1 \left(\frac{z_2}{z_c} \right)^2 + a_2 \frac{z_2}{z_c} + a_3 \quad (4-2)$$

其中:

α_i , $i=1,2,3$ 为常数;

z_2 —— 2# 高位槽实时液位;

z_c —— 2# 高位槽高度, 为定常数;

取 m 个 2# 高位槽液位样本 z_{2i} , ($i=1,2,\dots,m$) 由工艺专家给出一组对应的修正系数 α_i , 通过一元二次回归得到系数 α_i , $i=1,2,3$, 这样在已知高位槽实时液位 z_2 的情况下由式(4-2)求得修正系数 α 。

(2) 确定基于其他成分的修正系数 β_i

基于其他成分的修正模型主要考虑普遍过分和普遍欠分两种特殊情况对连续碳酸化分解过程的影响, 修正系数 β_i 根据普遍过分或普遍欠分的程度由专家打分得出。

首先评判普遍“过分”或普遍“欠分”的程度^[43~44]。

分解率超过预控分解率的最大值称为过分, 同理分解率小于预控分解率的最小值称为欠分; 普遍过分或普遍欠分指各分解槽普遍超过分解梯度最大值或低于分解梯度最小值的现象。实际生产中, 工艺工程师或操作工人在得到成分检测结果后, 根据“经验”和“感觉”判断, 再作出调节决定。此类“经验”、“感觉”难以用语言简单表述, 但他们的判断会考虑两点: ①各槽实际分解率是否超出分解梯度范围; ②各槽实际分解率与分解梯度的偏离程度;

为此, 本文采用综合权重法, 对普遍过分和普遍欠分问题进行模糊评判。

Step1: 设标志变量 b_i , $i=1,2,\dots,6$, 表示第 i 槽分解率是否过分或欠分; $b_i=1$ 表示过分, $b_i=-1$ 表示欠分, $b_i=0$ 表示在分解梯度范围内;

Step2: 设影响因子 k_i , $i=1,2,\dots,6$, 表示第 i 槽分解率对普遍过分或普遍欠分现象的影响, 影响因子 k_i 根据偏离程度动态变化。

Step3: 对各槽分解率与分解梯度的偏离程度进行评判, 其评判因素集定为:

$V_s = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\} = \{1\# \text{ 偏离}, 2\# \text{ 偏离}, 3\# \text{ 偏离}, 4\# \text{ 偏离}, 5\# \text{ 偏离}, 6\# \text{ 偏离}, \}$

评判的评语集定为:

$U_s = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\} = \{\text{欠分很大, 欠分较大, 欠分较小, 正常, 过分较小, 过分较大, 过分很大}\}$

领域专家对上述评判给出一个影响因子 k_{ij} , $j=1,2,\dots,7$, 表示第 i 槽的实际分解率在第 j 个偏差情况下对系统普遍过分或普遍欠分的影响系数为 k_{ij} 。

即构成影响因子指标矩阵 $K \in F(V \times U)$, 记为:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & k_{17} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} & k_{27} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} & k_{37} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} & k_{47} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} & k_{57} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} & k_{67} \end{bmatrix}$$

分解率正常时, 影响因子为零, 即 $k_{i4} = 0$, 为简单起见, 认为某槽相同程度的过分或欠分, 对分解梯度的影响因子相同, 即 $k_{i1} = k_{i7}$, $k_{i2} = k_{i6}$, $k_{i3} = k_{i5}$, $i=1,2,\dots,6$ 。通过对历史数据的统计分析, 得到一个如下的影响因子矩阵:

$$K = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 0.2 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.6 \\ 0.2 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.6 \\ 0.3 & 0.5 & 0.6 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.6 \\ 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.7 \\ 0.4 & 0.5 & 0.8 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0.8 \end{bmatrix}$$

Step4: 计算特殊情况综合评估参数 $P = \sum_{i=1}^6 b_i k_{ij}$;

Step5: 根据经验, 对 P 进行模糊评判, 以“普遍过分”为例, 评语集定:

$W_s = \{w_1, w_2, w_3, w_4\} = \{\text{没有过分; 过分较小; 过分较大; 过分很大}\}$

由领域专家给定对应的一组修正系数:

$\beta_i = \{0, 0.2, 0.6, 1.0\}$

Step6: 采用能较好反映连续碳酸化分解过程的梯形隶属度函数描述上述模糊评判, 如图 4-3 所示, 图中横坐标 P 为综合评估参数量化的界限值, 通过对历史数据统计给定。

Step7: 将由 Step4 得到的综合评估参数 P 经模糊推理得到模糊评判结果, 每个模糊评判结果对应一个修正系数 β_i , 如 Step5 所示。例如, 若对六个槽分

解梯度综合评估参数 P 的模糊评判结果为“没有过分”，则 $\beta_i = 0$ 。

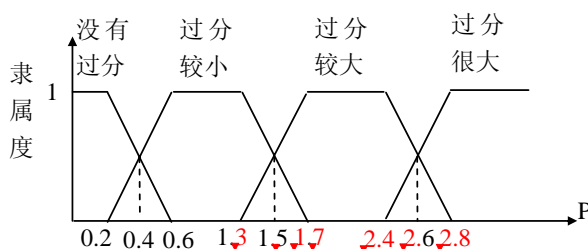


图 4-3 综合评判的隶属度函数

实例: 中州分公司规定原液铝硅比 A/S 在 700~800 之间的分解梯度为 27 ± 3 、 60 ± 3 、 76 ± 3 、 86 ± 3 、 90 ± 2 、合格，如果某次 1#~6# 分解槽的分解率分别为 30.5、67.7、78.5、90.2、91.3、95.6，现利用上述评判方法来计算修正系数。

对照分解梯度与分解率，上述实例的分解梯度有普遍过分的现象。

第一步: 因为只有 3# 和 5# 分解槽的分解率在分解梯度的范围内，所以标志变量 $b_i = 1$ ，其中 $i = 1, 2, 4, 6$ ， $b_3 = b_5 = 0$ ；

第二步: 评估各槽普遍过分的程度，在实际应用时每个槽的评语也是通过模糊评判求解的，本例为了简化求解过程，由“领域专家”直接给出评语，分别为：

$V_s = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\} = \{\text{过分较小; 过分较大; 没有过分; 过分较小; 没有过分; 过分很大}\}$

对照上述影响因子矩阵，各槽分解率影响因子分别为

$$K = \{k_{15}, k_{26}, k_{34}, k_{45}, k_{54}, k_{67}\} = \{0.1, 0.4, 0, 0.3, 0, 0.8\}$$

第三步: 求出综合评估参数：

$$P = \sum_{i=1}^6 b_i k_{ij} = 1 \times 0.1 + 1 \times 0.4 + 0 \times 0 + 1 \times 0.3 + 0 \times 0 + 1 \times 0.8 = 1.6$$

第四步: 利用图 4-3 所示的隶属度函数得出评语为“过分较大”；

第五步: 对应的查出修正系数 $\beta_i = \beta_3 = 0.6$ 。

本评估方法的优点是综合考虑了连续碳酸化分解各槽分解率的整体水平及趋势，避免以点概面，符合工业实际生产情况。

4.3 进料量稳定控制

4.3.1 进料量软测量

软测量技术 (Soft-Sensing Technique) 的发展为解决此类难测对象和难测参数的测量问题提供了一种新方法^[45]，它选择与被测参数有关的一组可测参数，构造某种以可测参数（二次变量）为输入、被测参数（主导变量）为输出的数

删除的内容: 8

删除的内容: 2

删除的内容: 2

删除的内容: 3.2

删除的内容: 3.6

删除的内容: 8

删除的内容: 3.2

删除的内容: 1

学模型, 用计算机软件进行计算从而得到被测参数的估计值, 又称“软仪表”技术^[46]。胡燕瑜, 桂卫华等人在文献[47]中采用大平面的伯努利方程, 推导出锌液流量的计算公式, 然后对锌液流量进行控制, 但其物理模型比连续碳酸化分解过程要简单。

本文以 1#、2# 高位槽液位、阀门开度为输入变量, 建立基于汇流的伯努利方程, 总结出进料阀门局部阻力系数与开度的关系, 推导出高位槽液位、进料阀门及进料量的函数关系, 建立了进料量软测量模型, 并设计了进料量稳定控制器, 维持进料量稳定。

1) 进料量软测量模型

连续碳酸化分解工艺一般采用两个高位槽联合向分解槽供料, 示意图

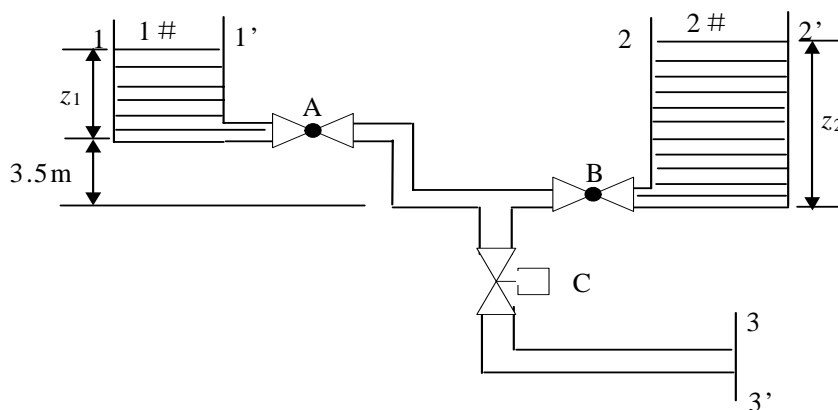


图 4-4 碳酸化分解高位槽联合供料示意图

如图 4-4 所示。图中, z_1 、 z_2 分别为 1# 高位槽和 2# 高位槽的液位, 阀门 A 和阀门 B 分别为出料手动控制阀门。为了便于进料流量软测量, 实现流量的自动控制, 将阀门 A 和 B 置于全开状态, 安装电动阀门 C, 通过控制阀门 C 的开度来实现平面 3-3 的流量控制。

2) 阻力系数计算

根据流体力学及化工原理相关知识, 系统的阻力损失主要包括直管损失与局部损失两大类。

直管损失与管长、管径以及摩擦系数有关, 其沿程阻力系数 $\lambda = \varphi\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$ 是液体流速 u 、密度 ρ 、粘度 μ 、管径 d 以及管壁粗糙度 ε 有关的值, 一般取 0.036~0.039^[48]; 局部阻力损失包括管路收缩损失、阀门损失及弯路损失三部分。管路突然收缩的损失和弯路损失可直接从文献中查找, 阀门损失则需根据阀门开度计算。

现场阀门均为螺旋型球形阀, 设 h 为阀门的上升高度, D 为阀座的直径, 开度 $k = h/D$, 损失系数 ξ_c 和开度 k 是一个复杂函数关系。为方便计算, 本文对

文献[55]提供的实验数据进行分段线性化, 推导出 ξ_c 与 k 的函数关系如下:

$$\text{当 } k \in (0, 0.25], \quad \xi_c = -534.8(k - 0) + 150 \quad (4-3)$$

$$\text{当 } k \in (0.25, 0.5], \quad \xi_c = -24(k - 0.25) + 16.3 \quad (4-4)$$

$$\text{当 } k \in (0.5, 0.75], \quad \xi_c = -10.48(k - 0.5) + 10.3 \quad (4-5)$$

$$\text{当 } k \in (0.75, 1], \quad \xi_c = -6.36(k - 0.75) + 7.68 \quad (4-6)$$

同理, 已知 ξ_c 时, 开度 k 与 ξ_c 的对应关系如下:

$$\text{当 } \xi_c \in [6.09, 7.68], \quad k = -0.157(\xi_c - 6.09) + 1.0 \quad (4-7)$$

$$\text{当 } \xi_c \in [7.68, 10.3], \quad k = -0.095(\xi_c - 7.68) + 0.75 \quad (4-8)$$

$$\text{当 } \xi_c \in [10.3, 16.3], \quad k = -0.042(\xi_c - 10.3) + 0.5 \quad (4-9)$$

$$\text{当 } \xi_c \in [16.3, 150], \quad k = -0.002(\xi_c - 16.3) + 0.25 \quad (4-10)$$

阀门全开时 $\xi_c = 6.09$, 阀门全闭时, 理论上讲阻力系数 ξ_c 将趋向于无穷大, 但通过计算发现当 $\xi_c = 150$ 时 k 趋近于零, 即阀门趋向于全闭。

3) 进料流量 Q 的计算

设阀门 C 开度为 k 时, 铝酸钠溶液在 A、B、C 三管中的流速分别为 V_a 、 V_b 、 V_c , 文献[48]认为三通管直管损失和侧管损失相同, 均为 $\xi_{\text{三}} = 0.4$ 。图 4-4 中的流量计算模型为一个汇流模型, 分别对 1-1' 截面、3-3' 截面以及 2-2' 截面、3-3' 截面列流体伯努利方程, 得到式 (4-11~4-12):

$$z_1 g = \frac{1}{2}(\xi_{ab} + \xi_{\text{管}} + 2\xi_{\text{弯}} + \lambda_a / d) V_a^2 + \frac{1}{2}(1 + \xi_c + \xi_{\text{弯}} + \xi_{\text{三}} + \lambda_c / d) V_c^2 \quad (4-11)$$

$$z_2 g = \frac{1}{2}(\xi_{ab} + \xi_{\text{管}} + \lambda_b / d) V_b^2 + \frac{1}{2}(1 + \xi_c + \xi_{\text{弯}} + \xi_{\text{三}} + \lambda_c / d) V_c^2 \quad (4-12)$$

式中: g 为重力加速度, 取 $g = 9.8 \text{ m}^2/\text{s}$; z_1, z_2 分别为 1#、2# 高位槽液位; 根据文献[48~49], ξ_{ab} 为螺旋型球形阀全开时的阀门损失系数, 取 $\xi_{ab} = 6.09$; $\xi_{\text{管}}$ 为从高位槽流入 A、B 管的损失系数, 因为没有倒角, 取 $\xi_{\text{管}} = 0.5$; $\xi_{\text{弯}}$ 为 90° 弯头损失, 取 $\xi_{\text{弯}} = 1.2$; $\xi_{\text{三}}$ 为三通管损失系数, 取 $\xi_{\text{三}} = 0.4$; ξ_c 为阀门 C 在不同开度时的损失系数; l_a, l_b, l_c 为 A、B、C 三管管长, 现场实际管长分别为 3.5 米, 1.0 米, 12.0 米; λ 为沿程阻力系数, 取 $\lambda = 0.039$ 。

将上述损失系数代入式 (4-11~4-12), 简化为:

$$9.8z_1 = 4.84V_a^2 + 0.5(14.3 + \xi_c)V_c^2 \quad (4-13)$$

$$9.8z_2 = 3.4V_b^2 + 0.5(14.3 + \xi_c)V_c^2 \quad (4-14)$$

由流体连续性方程可得:

$$V_a S + V_b S = V_c S \quad (4-15)$$

式中: $S = \pi \frac{d^2}{4}$, 为 A、B、C 管截面面积 (实际中三管管径相同, 都为 d)。

由式 (4-13~4-15) 解出 V_a, V_b :

$$V_b = \sqrt{\frac{(k_1 z_1 + k_2 z_2) - \sqrt{k_3 z_1^2 + k_4 z_1 z_2 + k_5 z_2^2}}{k_6}} \quad (4-16)$$

$$V_a = \sqrt{2.02(z_1 - z_2) + 0.7u_b^2} \quad (4-17)$$

式中: $k_i, i=1,2,\dots,6$ 为中间变量, 与损失系数 ξ_c 的函数关系如下:

$$k_1 = 0.34\xi_c^2 + 24.2\xi_c + 279.5$$

$$k_2 = -0.34\xi_c^2 - 7.4\xi_c - 189.3$$

$$k_3 = -0.4\xi_c^4 + 33\xi_c^3 + 2459\xi_c^2 + 38652\xi_c + 197400$$

$$k_4 = -0.9\xi_c^4 + 27\xi_c^3 + 3480\xi_c^2 - 538\xi_c + 294054$$

$$k_5 = 0.1\xi_c^4 + 4.2\xi_c^3 + 228\xi_c^2 + 6050\xi_c + 66442$$

$$k_6 = 0.26\xi_c^2 - 22\xi_c - 284$$

则进料量的体积流量 Q 为:

$$Q = 3600\gamma V_c S = 900\gamma \pi d^2 V_c = 900\gamma \pi d^2 (V_a + V_b) \quad (4-18)$$

式中, γ 为修正因子, 根据理论计算与实验记录 (系统平稳时的出料流量) 用一元线性回归得到 $\gamma \approx 0.655$ 。

在已知 1#、2# 高位槽液位 z_1 、 z_2 以及阀门开度 k 的情况下, 根据式 (4-3~4-6) 和 (4-16~4-18) 计算出进料量 Q 。

4) 进料量软测量模型实验验证

稳态时连续碳酸化分解周期一般为 5 小时, 现以 2003 年 11 月 21 日某段时间的出料量作为 5 小时之前的进料量, 即下表中的实际流量 Q' , 对应时刻 (5 小时之前) 的阀门为半开状态, 即 $k = 0.5$ 、 $\xi_c = 10.3$, 对应高位槽液位以及上述软测量模型计算的模型流量 Q 如表 4-1 所示。

表 4-1 不同液位和损失系数下的流量值

z_1 (m)	z_2 (m)	Q (m ³ /h)	Q' (m ³ /h)	e (m ³ /h)	η (%)
4.27	8.32	228.187	233.0	4.813	2.06
4.10	8.32	226.972	226	0.972	0.43
3.95	8.46	226.100	223.8	2.3	1.02
3.92	8.36	225.944	224.7	1.244	0.55

由上表可知: 模型最大绝对误差 $e = 4.813$, 对应相对误差 $\eta = 2.06\%$, 说明该模型较好的反映实际流量, 可靠性高。

4.3.2 进料量稳定控制

目前连续碳酸化分解一般根据成分结果每小时调节一次, 在两次报样时间间隔内, 高位槽液位经常因为上游工序不稳定而波动, 导致进料量不稳定, 这是连续碳酸化分解过程的主要扰动。本文以上述软测量模型为基础, 设计了流量稳定控制器, 实时调节进料阀门开度, 维持进料量稳定。

1) 进料量稳定控制原理

进料量稳定控制原理如图 4-5 所示, 每小时成分检测结果出来后, 系统根据高位槽液位以及报样控制输出的阀门开度, 启动软测量模型计算进料量 Q , 并作为流量稳定控制设定值。在相邻两个报样时间间隔内, 系统每 15 分钟启动一次稳定控制模型, 根据高位槽液位的变化, 采集 1# 和 2# 高位槽实际液位 z_{1s}, z_{2s} 及阀门 C 实际开度 u_s , 启动进料量软测量模型 f 算出实际流量 Q' , 与设定值 Q 比较, 经过进料阀门控制器 f' 得到控制量 u_k , 调节进料阀门 C, 实现进料量的稳定控制。

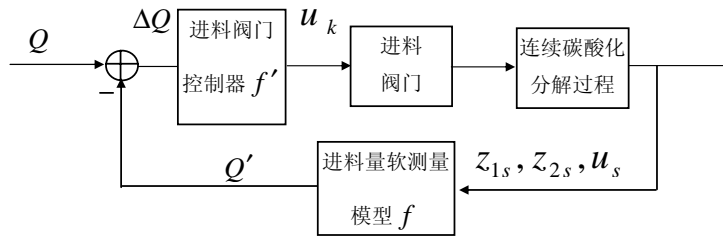


图 4-5 进料量稳定控制原理图

2) 计算控制量 u_k

显然, 控制量 u_k 与实时高位槽液位 z_{1s}, z_{2s} , 阀门实时开度 u_s , 流量设定值 Q 有关, 计算步骤如下:

令: $S_m = 900\pi d^2$, 由式 (4-17~4-18) 推出

$$V_b = \frac{Q - \sqrt{Q^2 - 0.3(Q^2 - 2.02(z_1 - z_2)S_m^2)}}{0.3S_m} \quad (4-19)$$

与式 (4-16) 比较, 解出损失系数 ξ_c , 为方便表达, 设中间变量 x_1, x_2, x_3 得:

$$\xi_c = \frac{-x_2 - \sqrt{x_2^2 - 4x_1x_3}}{x_1} \quad (4-20)$$

其中: x_1, x_2, x_3 只与流速 V_b 、高位槽液位 z_{1s}, z_{2s} 有关

$$x_1 = 0.1V_b^4 - 1.2(z_{1s} - z_{2s})V_b^2 + 4.1(z_{1s} - z_{2s})^2$$

$$x_2 = -1.8V_b^4 + (47.8z_{1s} - 81.2z_{2s})V_b^2 - 80z_{1s}z_{2s} + 60z_{2s}^2 + 20.2z_{1s}^2$$

$$x_3 = 40.7V_b^4 + (26.7z_{1s} - 175.7z_{2s})V_b^2 + (14.8z_{2s} - 5z_{1s})^2$$

在已知流量设定值 Q 、液位 z_{1s}, z_{2s} 的情况下算出阻力系数 ξ_c 。将 ξ_c 代入 (4-7) ~ (4-10) 式, 即可算出下一时刻对应的阀门开度, 即控制量 u_k 。

3) 进料量稳定控制仿真

系统在流量 Q 恒定、液位不同时用稳定控制模型进行仿真, 得到不同的损失系数和阀门开度, 结果如表 4-2 所示。

表 4-2 流量相同, 液位不同时对应的损失系数和阀门开度

z_1 (m)	z_2 (m)	Q (m ³ /h)	ξ_c	k
6	9.5	400	8.35703	0.68568
6	9	400	7.88294	0.73072
6	8.5	400	7.37196	0.79873
6	8	400	6.82551	0.88452

由表 4-2 可知, 当一个槽液位不变, 另一个槽液位发生改变时, 液位越高, 阀门开度越小, 如当 $z_2 = 9.5\text{m}$, 开度 $k = 0.68568$ 。液位越低, 阀门开度越大, 如当 $z_2 = 8\text{m}$, 开度 $k = 0.88452$, 以上情况与生产实际基本相符合, 说明该模型是可行的。

4.4 应用结果及分析

进料电动阀门改装完毕后于 10 月初开始调试运行, 期间全部按监控系统给定的控制量对进料量进行调节, 直至 10 月 29 日连续碳酸化分解 II 组向 I 组工艺倒组为止。

考虑倒组前后分解系统波动较大, 为了更好检验系统的性能, 现取倒组前 8 天 (即 2004 年 10 月 21 日~2004 年 10 月 28 日) II 组、III 组同期生产数据进行对比分析。

为更好的进行比较, 先定义几个参数:

定义 1: 设 r_1, r_2, \dots, r_n 为某分解槽某段抽样时间内的分解率样本, 则其平均分

解率 \bar{r} 可表示如下:

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (4-21)$$

定义 2: 设 r_1, r_2, \dots, r_n 为某分解槽某段抽样时间内的分解率样本, 平均分解率为 \bar{r} , 则该段时间内的分解率标准偏差 σ 为:

$$\sigma = \frac{(\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2)^{\frac{1}{2}}}{n-1} \quad (4-22)$$

分解率标准偏差本文又简称标准偏差, 表示各样本与样本均值之间的偏差程度, σ 越大, 表明样本波动越大, σ 越小, 说明系统越平稳。

定义 3: 设 II 组第 i ($i=1, 2, \dots, 6$) 槽的分解率标准偏差为 σ_{iII} , III 组第 i ($i=1, 2, \dots, 6$) 槽的分解率标准偏差为 σ_{iIII} , 则 II 组第 i 槽分解率相对 III 组第 i 槽分解率的相对标准偏差 η_i 为:

$$\eta_i = \frac{\sigma_{iIII} - \sigma_{iII}}{\sigma_{iIII}} \times 100\% \quad (4-23)$$

η_i 为正, 表示 II 组的标准偏差比 III 组标准偏差少 η_i , II 组比 III 稳定; 相反亦然。

先观察同期 II 组、III 组 1#、2# 槽分解梯度对比曲线, 如图 4-6 和图 4-7 所示。

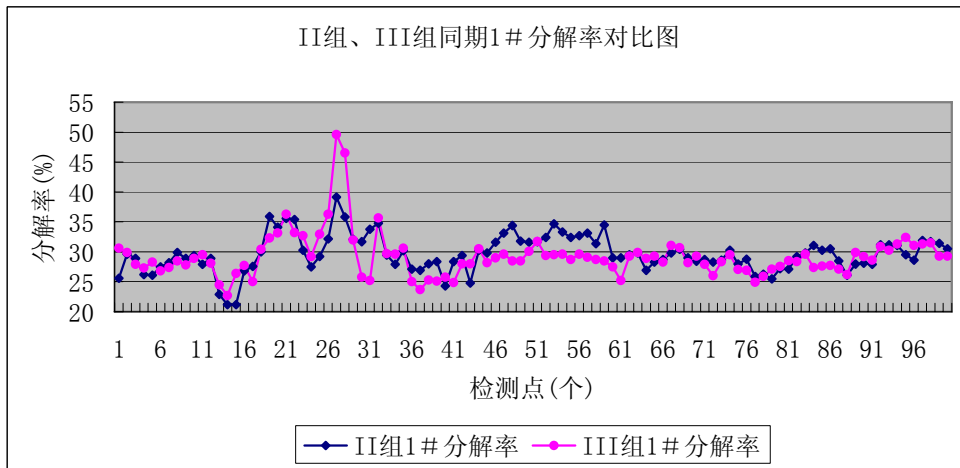


图 4-6 运行期间 II 组、III 组同期 1# 分解率对比曲线

由图可知: II 组 1# 分解率最大值 $FRII_{max}=39.14$, 最小值 $FRII_{min}=21.2$, 平均值 $FRII_{meaning}=29.6793$, 标准偏差 $\sigma_{iII}=0.2429$; 而 III 组 1# 分解率最大值

FRIII_{max}=49.6, 最小值 FRIII_{min}=22.7, 平均值 FRIII_{meaning}=29.202, 标准偏差 σ_{III} =0.2760; II 组 1# 的标准偏差比 III 组 1# 的标准偏差少 12.0%。

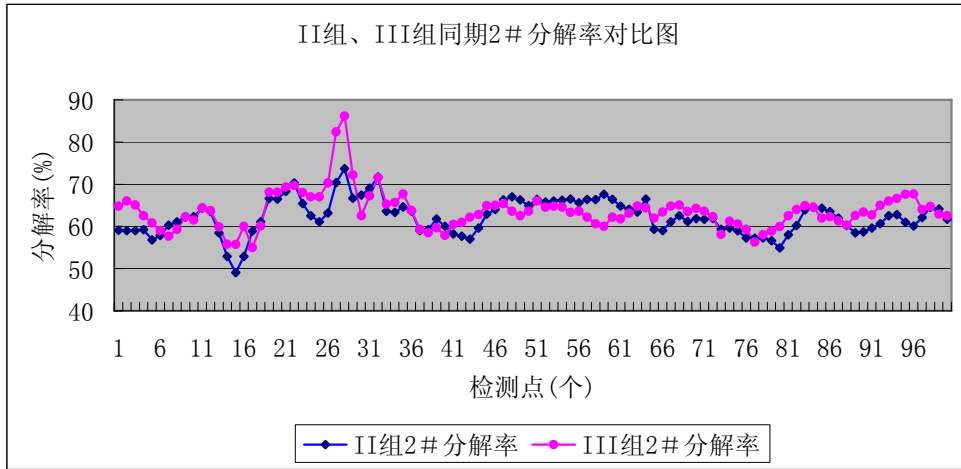


图 4-7 运行期间 II 组、III 组同期 2# 分解率对比曲线

同理可得: II 组 2# 分解率最大值 SRII_{max}=73.8, 最小值 SRII_{min}=49.1, 平均值 SRII_{meaning}=62.243, 标准偏差 σ_{2II} =0.4136; 而 III 组 2# 分解率最大值 SRIII_{max}=86.2, 最小值 SRIII_{min}=55, 平均值 SRIII_{meaning}=63.5728, 标准偏差 σ_{2III} =0.452; II 组 2# 的标准偏差比 III 组 2# 的标准偏差少 8.5%。

再对 II 组、III 组各槽分解率偏差, 最大值、最小值以及平均值统计分析, 结果如表 4-3 所示。

表 4-3 II 组、III 组各槽分解率指标对比表

槽号	标准偏差 σ			最大值		最小值		平均值	
	II 组	III 组	η_i (%)	II 组	III 组	II 组	III 组	II 组	III 组
1#	0.2429	0.2760	12.0	39.14	49.6	21.2	22.7	29.6793	29.2017
2#	0.4136	0.4520	8.5	73.8	86.2	49.1	55	62.2431	63.5728
3#	0.3568	0.3697	3.5	91.8	98.2	71.9	76.8	84.2331	84.0369
4#	0.1379	0.1538	10.33	95.5	97.8	86.8	87.8	91.1604	91.7759
5#	0.1118	0.1203	7.1	96.5	97.8	91	91.1	93.2851	93.5613
6#	0.0784	0.0851	7.9	96.7	96.2	92.6	92	94.5374	93.6942

试运行期间, II 组采用监控系统的优化值控制进料, III 组采用操作工人工调节进料。由图 4-6 和图 4-7 以及表 4-3 可以看出, 同期 III 组各槽分解率的标准偏差都比 II 组相应槽子的标准偏差大, 说明 III 组波动较大, II 组分解率分布更集中, 波动更少, 稳定性更好。从分解率平均值看, III 组 2#、5# 分解率较高, 容易产生局部过分现象, 而 II 组末槽分解率比 III 组高 0.9%, 说明 II 组不

仅分解梯度得到优化, 而且提高了产量, 达到提产增效的目的。

4.5 小结

根据连续碳酸化分解生产实际情况, 本章首先定义了首槽进料量的报样控制与稳定控制两种方式, 提出了进料量混合优化控制方案, 然后介绍进料专家控制器的设计, 重点阐述了进料专家控制器的结构以及控制量计算的详细步骤。最后根据化工原理和流体力学的相关知识, 建立了进料量软测量模型, 设计了进料流量控制器, 维持稳定的进料流量。

第五章 系统功能及实现

5.1 连续碳酸化分解实时监控系统硬件结构

连续碳酸化分解实时监控系统是连续碳酸化分解过程优化控制系统的子系统，以专家优化计算机 EOC、实时监控计算机 RMC、现场可编程控制器 PLC 形成两级控制结构，通过企业内部网与分公司的分析检测数据管理系统相连。专家优化机与实时监控机通过以太网连接，实现检测数据和操作信息的实时交换；现场可编程控制器通过 DH+ 与实时监控机相连；PLC 通过输入模块（A/D、DI）实时采集连续碳酸化分解生产过程的检测信息，又通过输出模块（D/A、DO）自动调节进料量电动阀门，总体结构如图 5-1 所示。

现场可编程控制器 PLC 采用美国 AB 公司的 SLC 500 系列，具有价格较低，编程容易，可靠性高等特点。

实时监控计算机主要安装美国罗克韦尔公司的组态软件 Rsvision，与底层 PLC 组态后实现对分解过程参数显示，生成关键参数趋势图，并实现与底层 PLC 通信。

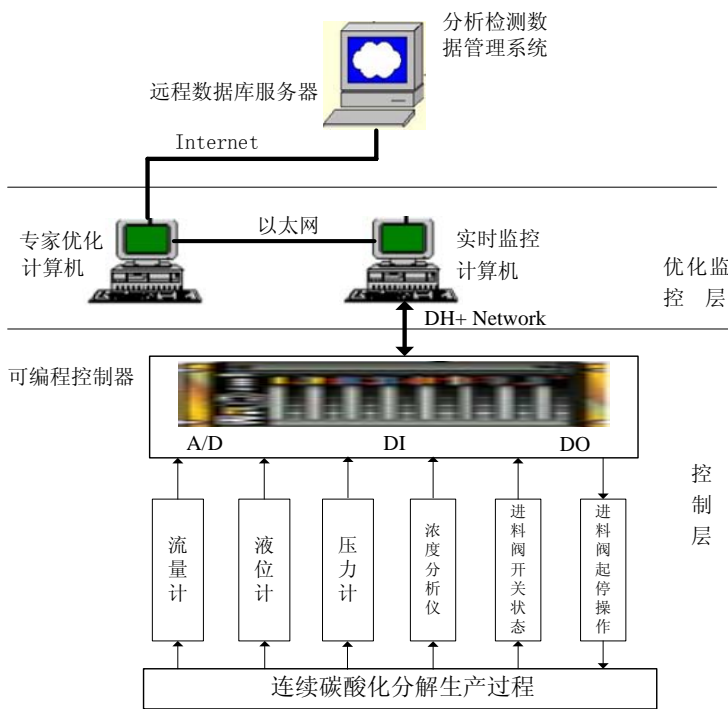


图 5-1 连续碳酸化分解监控系统硬件结构图

专家优化计算机主要安装优化控制软件，实现连续碳酸化分解过程的实时

安全监控与分解率优化控制。

5.2 连续碳酸化分解监控系统软件功能模块介绍

5.2.1 软件结构图

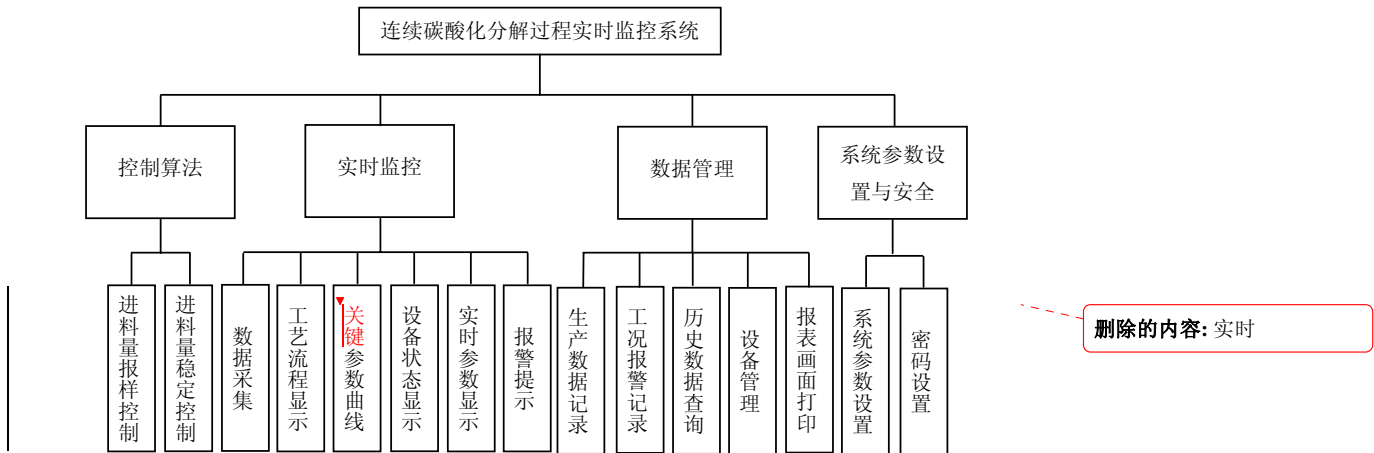


图 5-2 连续碳酸化分解过程实时监控系统软件结构图

连续碳酸化分解过程实时监控系统采用模块化设计，利用 Microsoft Visual C++6.0 开发。系统以实现工况监测和实时控制为主，主要包括过程状态实时监控模块、数据管理模块、控制算法模块、系统参数设置与安全等四大模块，其结构如图 5-2 所示。

5.2.2 功能模块介绍

1) 实时监视模块

实时监视模块主要包括工艺流程图画面、系统实时数据显示、主要参数的实时趋势图显示、设备状态显示、异常报警显示及结论解释等，给用户提



图 5-3 系统主监视界面

好易用的操作信息，图 5-3 为系统主监视界面。

2) 数据管理模块

数据管理模块包括生产数据记录、工况报警记录、历史记录查询、设备管理及报表打印等五部分。

生产数据记录部分主要完成连续碳酸化分解过程分析检测数据的自动读取、分解率计算与保存,为分解岗位提供快速准确的信息服务。



图 5-4 成分数据输入与查询界面

工况报警记录完成两部分功能:

- 1) 自动记录系统的报警信息及当时的各项参数,供操作员分析参考。
- 2) 自动记录系统的各项操作,包括自动调节和人工调节,并形成操作曲线,供管理人员、操作人员比较、分析。

历史记录查询实现参数某时间段生产数据的查询并自动生成曲线;设备管理模块列出所有设备的状态,并可在该界面实现对设备状态的确认与设置;报表打印则完成用户所需参数的打印。



图 5-5 设备管理界面

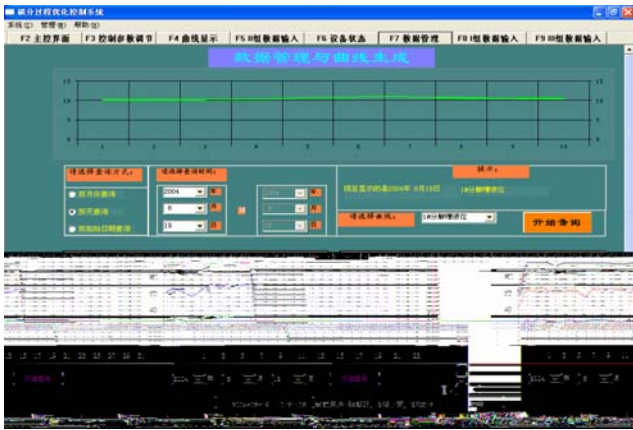


图 5-6 数据管理界面

3) 系统参数设置与安全模块

系统参数设置完成专家知识库的人工维护与管理、优化参数的设置，主要包括专家规则的检查、修改、删除等操作，如图 5-7~图 5-8 所示。



图 5-7 专家系统维护界面



图 5-8 专家规则编辑界面

安全模块是从安全、稳定运行的角度考虑，进入各子模块的用户必须进行权限登陆。系统设置了两级操作：操作工级别和工艺工程师级别。操作工只允许操作工查看系统运行状况、报警信息等，不能作任何修改；工艺工程师除允许作上述查阅外，还可以对一些常见工艺参数进行修改和设定，并对数据、曲线进行分析。任何一个用户切换都需要进行用户登录，确保系统安全。



图 5-9 用户登陆界面

4) 控制算法模块

控制算法模块完成连续碳酸化分解系统进料量的优化控制。该模块通过访问实时数据库，通过对这些信息进行比较分析，依据控制算法计算出控制量，进行外围设备（阀门）的调节。



图 5-10 控制参数调节界面

5) 通信模块

通信模块主要完成两大任务：(1)、实现与远程分析检测管理系统的通信，自动导入每小时的分析数据，计算相关结果并保存；(2)、利用 OPC 规范采集工艺现场的实时数据。

5.3 通信模块的实现

5.3.1 远程数据读取技术

目前中州分公司样品分析检测的数据流程是：分析站检测出化学成分数值后，直接通过分析检测管理系统输入到远程数据库服务器，连续碳酸化分解过程所需的成分数据必须从远程数据库服务器读取。

远程数据库服务器采用 Oracle 数据源（简称远程数据库），实时监控系统采用 Access 数据源（简称本地数据库），两者的通信是实现分析检测数据导入的关键，其基本流程如图 5-11 所示。

连续碳酸化分解实时监控系统中，分析检测数据的读取设有自动和手动两种方式，自动状态下监控系统在一个预定的时间段内，每隔一定时间自动访问远程数据库，待有新的数据后自动读取新数据；而手动状态下则用户根据需要，随时读取所需数据。因为连续碳酸化分解共有三组，每组分析检测数据在远程数据库、本地数据库有不同的编号，因此需设置组号以及所需数据的取样时间等基本信息，然后访问远程数据库，查找有无符合条件的数据，如果没有找到，则提示用户“暂时没有符合条件的数据”。

受分析检测仪器的客观条件限制，连续碳酸化分解槽的分析样品结果经常是分批提交到远程服务器，因为 SiO_2 的检测总比其他成分慢一段时间，所以经常出现补录 SiO_2 成分的现象。整点左右，实时监控系统会访问远程服务器，如果发现远程服务器中有符合条件的数据，则需要进一步判断本地 Access 数据库中是否已经存在符合条件的数据，如果存在，则表示已经导入先前出来的一批结果，只需要更新（Update）数据；若不存在，则表示优化系统还没有导入本采样点的最新数据，需要将远程数据源中的数据插入（WriteInto）本地数据源，实现分析检测数据的读取，同时自动计算分解率，避免了以前电话报送分析检测数据的繁琐，提高信息传送速度，并将工人从复杂的数字计算中解脱出来，减轻了劳动强度。

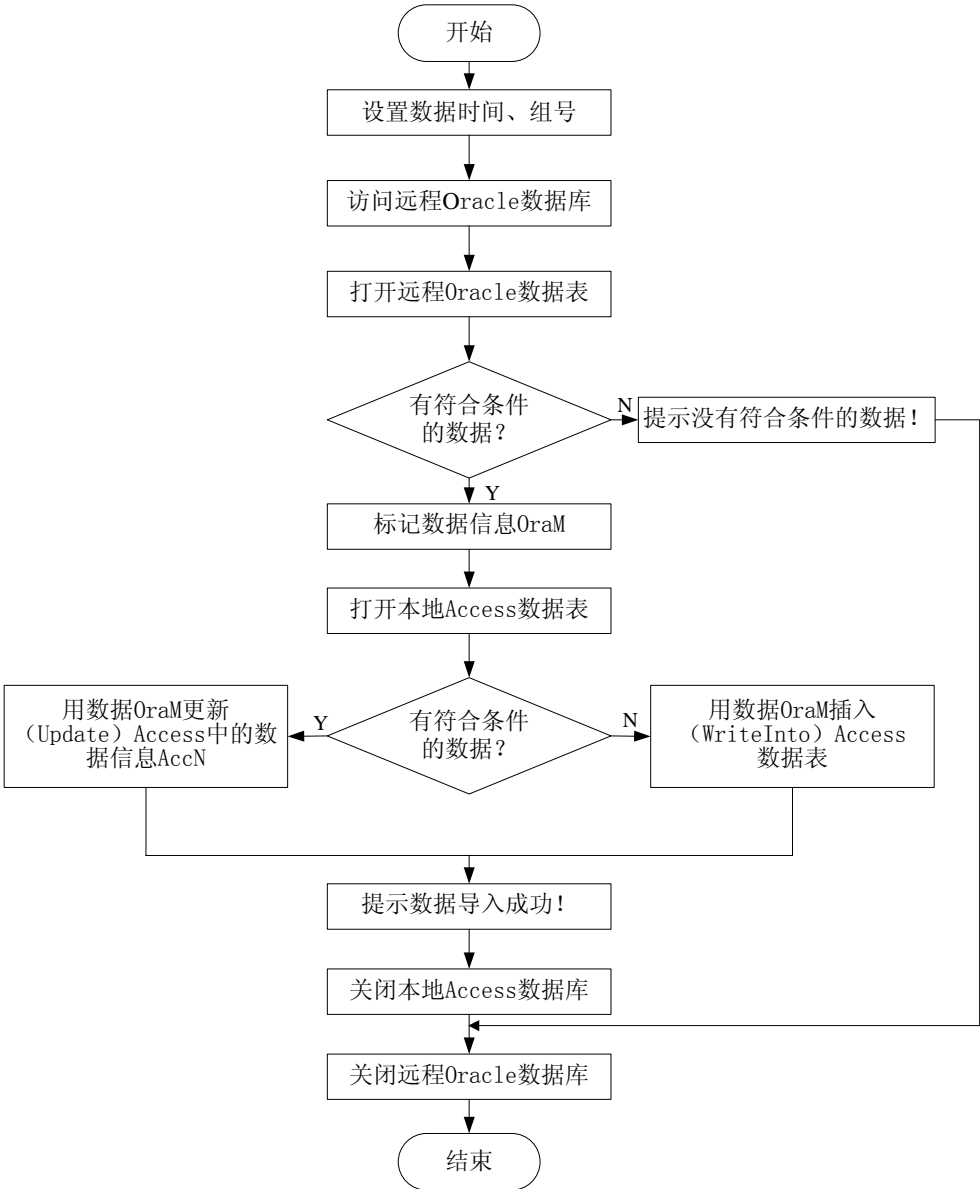


图 5-11 数据导入流程图

5.3.2 基于 OPC 规范的专家优化计算机与实时监控机的通信技术

1) OPC 简介

OPC (OLE for Process Control)是基于 Microsoft 公司的 Distributed internet Application (DNA)构架和 Component Object Model (COM) 技术, 根据易扩展性而设计的。OPC 规范定义了一个工业标准接口, 该标准使得 COM 技术适用与过程控制和制造自动化等应用领域。OLE 原意即对象链接与嵌入, 而现在的 OLE 包含了许多新的特征, 如统一数据传输、结构化存储和自动化, 已经成为

独立于计算机语言、操作系统甚至硬件平台的一种规范。

OPC 由两套接口组成:客户端和服务器程序员使用的 OPC 自定义接口(OPC COM Custom Interfaces);支持用高端商业应用开发的客户程序的 OPC 自动化接口 (OPC OLE Autamation Interfaces)。COM 接口效率高,通过该接口,客户能够发挥 OPC 服务器的最佳性能,采用 C++语言的客户一般采用 COM 接口方案;自动化接口使解释性语言和宏访问 OPC 服务器成为可能,采用 VB 语言的客户一般采用自动化接口。自动化接口简化客户应用程序的实现,但运行时需要进行类型检查,牺牲了程序的运行速度。OPC 自定义接口是服务器必须提供的,而自动化接口则不一定提供。典型的 OPC 体系结构如图 5-12 所示。

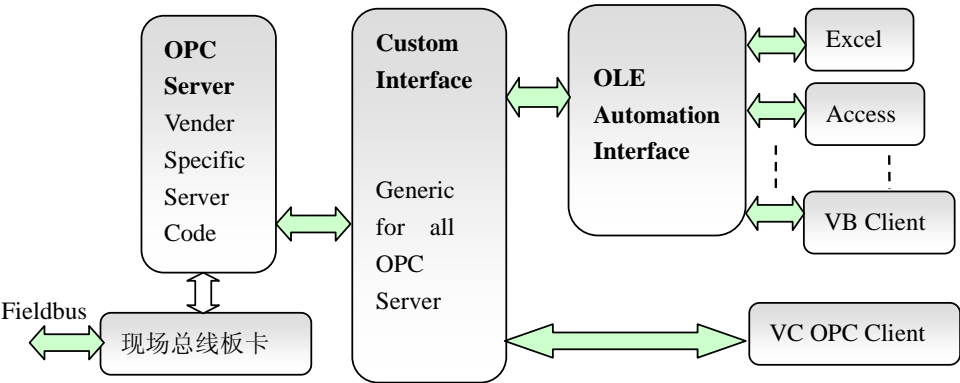


图 5-12 典型的 OPC 体系结构图

删除的内容: 27

2) 过程参数通信流程

优化控制软件与现场控制器的数据通信流程如图 5-13 所示。监控机通过罗克韦尔公司提供的通信软件 Rslink 直接与现场控制器的 A/D 模块进行数据交换;优化机与监控机通过以太网相连,两者都安装了组态软件 Rsview,优化机通过组态软件 Rsview 的 OPC 规范向监控机读写数据,实时监控软件同样利用 OPC 规范向优化机的 Rsview 读写数据,最终实现实时监控软件对现场参数的读取,同时可以调节 CO₂、进料量以及提料风等电动阀门的开度,实现过程参数调节。



图 5-13 优化软件与现场可编程逻辑控制器数据通信示意图

删除的内容: 1

- ① 需要从现场读取的数据如下：
1#、2# 高位槽液位、1#~6# 分解槽液位、1#~6# 搅拌电机电流、CO₂ 浓度与压力、提料风压力、出料流量、1#~5# CO₂ 电动阀门的开度以及提料风电动阀门的开度。
- ② 需要向现场控制写入的数据如下：
4#、5# CO₂ 电动阀门的开度、首槽进料量电动阀门起停时间。

3) 实时监控机设置
设置监控机作为 OPC 服务器：打开 Rsview 工程，首先设置节点类型。在编辑模式下点击“系统”→“节点”；节点设置时将数据源设置成“直接驱动”的方式，节点名为 Rsview 的项目工程名，如“tf.rsv”；其它为缺省项。



图 5-14 命令行选择对话框 (a)

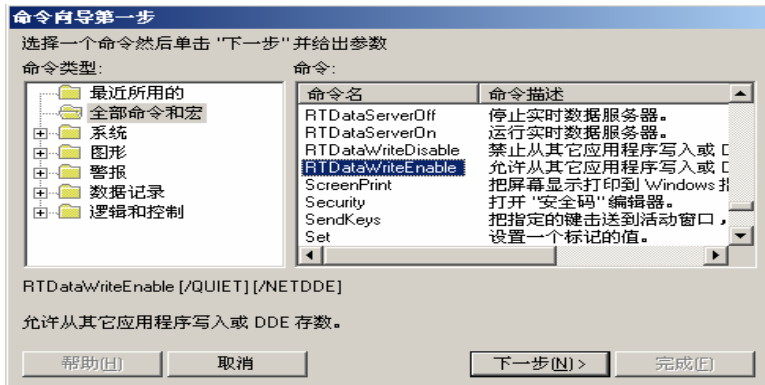


图 5-15 命令行选择对话框 (b)

然后设置允许数据读取命令：在“编辑模式”下选择“系统”选项，双击“系统”选项，双击“命令行”选项，选择系统命令，弹出图 5-14 所示对话框。拉动图 5-14 右边滑动条，找到“RTDataWriteEnbale”命令，如图 5-15 所示。点击“下一步”按钮。选择“宁静—不显示对话框 (Q)”选项，再单击“完成

(F)”命令，完成参数设置。

4) 专家优化机设置

设置优化机作为 OPC 客户端：打开 Rsview 工程，在编辑模式下点击“系统”→“节点”；节点设置时将数据源设置成“远程”的方式；节点名为 Rsview 项目工程名，服务器名为 RSI.RSView32OPCTagServer，服务计算机名或地址填服务器的网络名，如在连续碳酸化分解系统中，服务计算机名或地址为“USER”，其它为缺省项。

5) 客户端应用程序的实现

在 Visual C++环境中实现 OPC 客户应用程序，首先必须从 OPC 国际基金会官方网站下载 OPC 头文件（"opcda_i.c"、"opcda.h"、"opccomm_i.c"、"opccomm.h"），并在 Visual C++工程的“Tool”→“Options”→“Directories”加载头文件。然后再进行登陆 COM、连接服务器、数据读写等操作，其实现流程如图 5-16 所示。

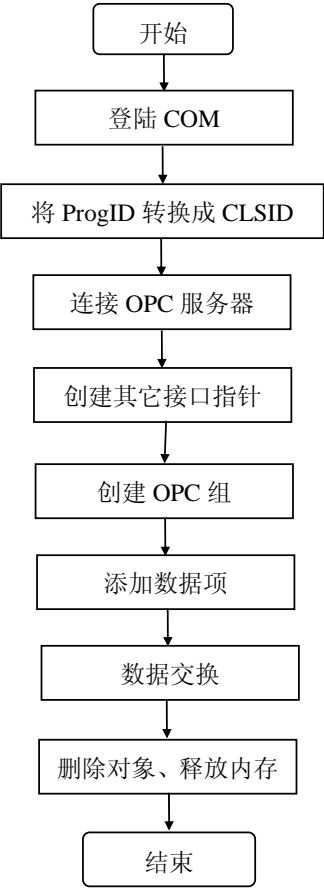


图 5-16 基 OPC 规范的客户端应用程序的实现流程

第一步: 登录 COM。函数 CoInitislize() 可以完成此功能。从函数 CoGetMalloc() 得到一个指向 COM 内存管理接口的指针。

```
HRESULT rl;  
rl = CoInitialize(NULL);  
rl = CoGetMalloc(MEMCTX_TASK, &g_pIMalloc);
```

第二步: 将 ProgID 变换成 CLSID。用 CLSIDFromProgID() 实现这个转换。ProgID 用变量 szName 进行参数传递。

```
rl = CLSIDFromProgID(szName, &clsid); // 每 COM 服务器都有一 CLSID, 通过该函数可以将字符串 ProgID 转换成一个全球唯一 CLSID, 这 ProgID 的值是“RSI.RSView32OPCTagServer”。
```

第三步: 建立与 OPC 服务器的连接。CoCreateInstance() 函数创建一个 OPC Server 类实例, 其 CLSID 值设定如下。

```
r2 = CoCreateInstance(clsid, NULL, CLSCTX_LOCAL_SERVER, IID_Iunkown, (void**) &punk); // 得到一个指向服务器对象 Iunkown 接口的指针。
```

第四步: 请求其它接口指针。从 Unnkown 接口, 通过 QueryInerface() 方法得到其它接口的指针。

```
HRESULT r3;  
r3 = punk->QueryInerface(IID_IOPCServer, (void**) &m_pOPC); // 得到一个指向服务器对象 IOPCServer 接口的指针(变量 m_pOPC)。
```

第五步: 创建 OPC 组。IOPCServer 接口的 AddGroup() 方法创建 OPC 组。

```
HRESULT r1;  
r1 = m_pOPC->AddGroup(szName, TRUE, 500, &TimeBias, &PercDeadband, dwLCID, &m_GrpsrverHandle, &RevUpRate, IID_IOPCItemMgt, (LPUNKNOWN*) &m_pItemMgt); // 创建一个有指向名称和属性的组。在返回的参数中, 有一个指向所需要的进程组对象 IOPCItemMgt 接口的指针(变量 m_pItemMgt)。
```

第六步: 添加项。IOPCItemMgt 接口的 AddItem() 方法得到添加 OPC 项。

```
HRSULT rl;  
rl = m_pItemMgt->AddItem(NumItems, pItems, &m_pItResult, &pErrors); // 添加具有特殊属性的指定数量的项。除此之外, 事件结构变量 m_pItResult(服务器句
```

柄，目标系统上的项数据类型等)也被赋值。

第七步：用 OPC 项执行所需的操作。用于执行所需操作的指针需要通过现有的指向 IOPCItemMgt 接口的指针得到。如：如果用户要进行异步通信，就需要指向 IOPCAsyncI()接口的指针。

```
HRSULT r1;
```

```
r1=m_pItemMgt->QueryInterface(IID_IOPCAsyncI(),(void**)&pAsyncI());
```

通过该接口的 Read()和 Write()两个方法，就可以读写项的数值。

```
HRSULT r2;
```

```
r2=pAsyncI()->Read(m_dwConnection,OPC_DS_CACHE,dwNumItems,phServer,&m_TransactionID,&pErrors);
```

//OPC 项的数据被送到客户程序的 IadviseSink 接口。

```
HRSULT r3;
```

```
r3=pAsyncI()->Write(m_dwConnection,dwNumItems,phServer,pItemValues,&m_TransactionID,&pErrors);
```

//将 OPC 服务器代替 OPC 客户刷新物理设备的数据。

第八步：删除对象，释放内存。在程序停止运行之前，必须删除已创建的 OPC 对象并释放内存。

```
r1=m_pItemMgt->RemoveItems(dwNumItems,phServer,&pErrors);
```

```
r1=m_pOPC->RemoveGroup(m_GrpServerHandle,TRUE);
```

```
m_pItemMgt->Release();
```

```
m_pOPC->Release();
```

5.4 小结

本章首先简要介绍了实时监控系统的硬件结构，然后主要阐述连续碳酸化分解过程实时监控软件的功能，重点介绍系统两类通信技术，即远程生产数据读取技术与基于 OPC 规范的双机过程参数通信等技术。

第六章 结论与下一步工作

6.1 结论

近年来, PLC 控制系统与监控系统在我国氧化铝生产连续碳酸化分解过程监控领域得到广泛使用, 为应用先进控制策略和监控方法创造了良好的外部条件。由于连续碳酸化分解过程环境恶劣、料浆易于结疤、仪器仪表难以正常运行以及很多过程参数不可实时检测, 分解工序的 PLC 控制系统在大部分铝厂没有实现闭环调节, 或难以达到满意的控制效果, 仍然需要操作工人根据具体生产情况进行调节, 劳动强度高, 效率低; 一些组态监控系统中也只对一些参数幅值做了简单的设置, 没有满足系统实时性的要求。本文所述的连续碳酸化分解实时监控在不改变系统硬件结构的前提下, 利用专家系统方法以及 PLC 系统提供的强大功能来满足分解过程的监控要求。

本文紧密结合中州分公司连续碳酸化分解生产过程的实际情况, 以解决现场实际运行中存在的进料调节和安全监控问题为出发点, 从连续碳酸化分解系统普遍存在的大时滞、强耦合等特点着手, 力图解决大滞后、大惯性对象控制系统品质差以及复杂、强关联性对象监控效果不佳的难题, 并进行了一系列探索性工作, 归纳如下:

- 1) 结合连续碳酸化分解过程的机理特征和经验知识, 设计了基于专家系统方法的实时安全监控模型, 实现对分解过程的实时安全监控;
- 2) 针对连续碳酸化分解过程工艺特点, 应用专家系统方法和软测量技术, 提出了首槽进料量的报样控制和稳定控制, 设计了基于时序控制的首槽进料量混合控制模型;
- 3) 在收集和总结连续碳酸化分解过程操作经验的基础上, 设计了首槽进料量专家控制器, 建立了基于高位槽液位的修正模型和基于其它成分(3#~6#成分)的修正模型, 实现首槽进料量报样控制;
- 4) 针对进料量难以用常规流量检测仪表进行检测的特点, 总结出进料阀门的局部阻力系数与开度的关系, 推导出高位槽液位、进料阀门及进料量的函数关系, 建立了进料量的软测量模型;
- 5) 设计了流量稳定控制器, 在相邻两个报样控制之间实时调节进料量, 最大限度地减少进料量波动对分解梯度的影响;
- 6) 利用 Visual C++6.0 开发了连续碳酸化分解过程实时监控软件, 已于 2004 年 7 月投入中州分公司连续碳酸化分解工序 II 组试运行。运行结果表

明:应用本系统的 II 组分解率标准偏差比同期采用人工控制的 III 组的标准偏差少 3.5%~12%, II 组末槽分解率比 III 组高 0.9%, 说明本软件优化了解析梯度, 提高了产量; 同时监控软件对生产过程进行了有效报警, 确保生产安全, 并实现了分解岗位数据的综合管理, 减轻了工人劳动强度。

6.2 下一步工作

连续碳酸化分解过程是一个有固、液、气三相反应的复杂生产过程, 具有大滞后、大惯性、强关联的特点, 连续碳酸化分解过程的综合自动化研究虽然取得一些成果, 但仍有待于从以下几方面改进:

1) 更新检测仪表、改进检测方法

目前连续碳酸化分解工艺上虽然装备了部分自动化仪表, 但由于分解过程本身的特点, 如铝酸钠溶液的强腐蚀性、管道易结疤等使得连续碳酸化分解过程很多重要参数无法检测, 而每小时分析一次连续碳酸化分解溶液成分的传统模式也不适应自动化实时调节的要求, 因此有必要对一些重要仪表进行更新、升级, 使系统能及时获得准确的过程参数, 方便调节。

2) 预测分解梯度

虽然在进料量调节的过程中, 已建立软测量模型、基于高位槽液位的修正模型和基于其它成分的修正模型等, 体现了前馈控制的思想, 但系统还可以从预测这一思想出发, 建立相关的预测模型, 对分解梯度进行合理预测, 减少滞后性的影响。

3) 改善专家知识的模糊表达、推理及在线学习功能

在安全监控系统中, 本文采用了专家系统的思想, 但不可避免地存在一些自身的局限性, 如知识的脆弱性、推理的单调性、自动获取知识能力差等问题, 可以利用神经网络、模糊推理等相关知识, 改进“经验知识”的模糊表示, 努力实现专家知识的线学习, 提高系统的适应性与灵活性。

参考文献

- [1] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M], 北京: 冶金工业出版社, 1982.
- [2] 李小斌, 刘祥民, 刘桂华等. 强化烧结法生产氧化铝新工艺的研究与实践[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14 (6): 1031~1036
- [3] 董增芬, 胡国清. 优化连续碳酸化分解工艺 提高产品质量的探讨与实践[J]. 中州铝科技, 2004, 20 (3): 7~11
- [4] 日本专利特开昭 51-126999
- [5] Multifunction Controller TDC 2000 Honeywell 1983
- [6] 李永芳, 刘祥民, 刘桂华等. 氧化铝生产中的计算机仿真与自动控制[J]. 轻金属, 2002, 1 (14~16)
- [7] 张石, 蔡惠龙, 王家纯等. 氧化铝分解过程计算机控制系统的设计[J]. 工业控制计算机, 1996, 2 (23~26)
- [8] 张平民, 陈金清, 尹周澜等. 砂状氧化铝生产过程首槽温度控制预测的准理论模型[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11 (5): 886~889
- [9] 陈湘辉, 刘铸战. 氧化铝分解工序的自动检测与控制系统[J]. 电气传动自动化, 2000, 22 (10): 34~35.
- [10] 刘家瑞, 王建峰. 应用连续碳酸化分解提高产品质量[J]. 轻金属, 2001, 12: 24~26.
- [11] 汪光阳, 胡伟莉, 张雷等. 专家系统及其相关技术的发展[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2004, 21 (3): 215~219
- [12] Efraim Turban. Expert systems and applied artificial intelligence[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1992
- [13] Katsuno H, Mendelzon A O. Propositional Knowledge base revision and minimal change, Artificial intelligence 1991, 52(3): 263~294
- [14] Michell T., Machine learning, New York: McGraw-Hill, 1997.
- [15] 林济群, 江晖, 柳一松等. 火电厂实时专家系统的框架设计[J]. 工业控制计算机, 1999, 12 (6): 55~60
- [16] 刘宝赋, 廖志忠, 李言俊. 故障诊断专家系统知识库编辑和维护系统[J]. 计算机工程与应用, 2002, 21: 36~38
- [17] 阳春华, 沈德耀等. 焦炉配煤专家系统的定性定量综合设计方法[J]. 自动化学报, 2000, 26 (2): 226~232
- [18] 刘晓颖, 桂卫华, 朱爽. 铅锌冶炼过程的故障诊断神经网络专家系统[J].

删除的内容: 1

- 上海海运学院学报, 2001, 22 (3) 90~91, 97
- [19] 林济群, 江晖, 柳一松等. 火电厂实时专家系统的框架设计[J]. 工业控制计算机, 1999, 12 (6): 55~60
- [20] 刘祥官, 刘显著, 蒋美华等. 智能控制专家系统在莱钢高炉的应用[J]. 冶金自动化, 2002, 6: 15~18, 39
- [21] 张学东, 姜宏洲, 寇晓军. 水泥回转窑实时专家控制系统[J]. 中国矿业, 2000, 9 (3): 82~84
- [22] 许颖原, 俞金寿. DCS 故障诊断专家系统的开发[J]. 华东理工大学学报, 2001, 27 (5) 10: 580~584
- [23] 易粟, 徐用懋, 马竹梧. 高炉异常炉况诊断专家系统[J]. 冶金自动化, 2002, 1: 15~17
- [24] 黄席樾, 熊庆宇, 石为人等. 冶金连铸工业过程实时专家控制系统的设计于实现[J]. 自动化学报, 1998, 24 (3): 405~409
- [25] 方蕾. 一种具有干扰修正功能的专家控制器[J]. 自动化仪表, 1996, 17 (5): 12~14
- [26] 王志, 杨毅宏等. 铝酸钠溶液碳酸化分解过程的影响因素[J]. 有色金属, 2002, 54 (1) :43~45
- [27] 蔡自兴, 徐光佑. 人工智能及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003
- [28] 蔡自兴著. 智能控制基础与应用. 国防工业出版社, 1998.
- [29] 张忠华, 吴春龙. 航天测量船中心计算机实时监控专家系统设计[J]. 计算机工程与应用, 2001, 22:129~131
- [30] 卢学军, 缪思恩, 王一欧等. 故障诊断专家系统知识处理及知识库管理方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2001, 24: 167~169
- [31] 刘宝赋, 廖志忠, 李言俊. 故障诊断专家系统知识库编辑和维护系统[J]. 计算机工程与应用, 2002, 21: 36~38.
- [32] Yang Weimin,Zhong Hongxun,Zhang Baoli. Computer Monitor And Control System for rotary cement kiln , shenyang: MGGM93,1993
- [33] Frank, P. M. Application of Fuzzy Logic to Process Supervision and Fault Diagnosis. Preprints of IFAC Sym. On Fault Detection. Supervision and Safety for Technical Process, 1994.531~538
- [34] Carlsen S. Conceptual Modeling and Composition of Flexible Work-flow Models[D]. Ph D Thesis. Trondheim, Norway: NTNU-Norwegian University of Science and Technology, 1997
- [35] Michael zur Muehlen, Joerg Becker. Workflow Process Definition

- Language-Development and Direction of a Meta-Language for Workflow Process[C].In: Bading Lothar,Pettkoff Boris, Scher August-Wilhelmeds., Proceedings of the KnowTechFormn 99,Potsdam,1999
- [36] Leymann F,Altenhuber W. Managing Business Process as an Information Resource[J].IBM System Journal,1994,33:326~348
- [37] Media-Moura R,Winogral T,Flores R etc. The Action Workflow Approach to Workflow Management Technology[C].In: CSCW 92,Proceedings of the Conference on Computer Supported Cooperative Work,ACM Publishers, New York,1992:281~288
- [38] Glance N S,Pagani D S,Pareschi R.Generalized Process Structure Grammars(GPSG) for flexible representation of work[C].In M Ackerman ed.,CSCW'96,Proceedings of the Conference on Computer Supported Cooperative Work,Boston,MA,1996:180~189
- [39] L.G LOCK LEE. Rapid Prototyping Tools for Real-time Expert Systems in Steel Industry. ISIJ,1990,30(2)
- [40] 王兵, 莫建军, 王玉莹. 实时监控与发射决策专家系统推理机设计[J]. 系统仿真学报, 2003, 15 (6): 820~822.
- [41] 马平, 王琳, 王华春. 燃烧控制系统智能控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14 (3): 55~59
- [42] 王明成, 李自帛, 王玉成. 专家控制系统在重油加氢裂化装置中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2003, 30 (3): 21~22, 32
- [43] 诸静等著. 模糊控制原理与应用. 机械工业出版社, 1995.
- [44] 李瑞娟. 基于锌产量预测模型的密闭鼓风炉炉况优化研究: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2003
- [45] 李海青, 黄志饶等. 软测量技术原理及应用[M], 北京: 化学工业出版社, 1999. 1~10
- [46] 杨欣荣, 凌玉华. 软测量技术及其在铝电解槽温度测量中的应用. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 35(5): 551~554
- [47] 胡燕瑜, 桂卫华, 唐朝晖, 高温金属流体的测量与控制系统, 冶金自动化, 2004, 2: 44~47
- [48] 陈敏恒等. 化工原理. 北京: 化学工业出版社, 1999
- [49] 张远君, 王平等译. 流体力学大全. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991

致 谢

在本项目课题的研究、设计、调试和论文撰写过程中，我得到了导师桂卫华教授的悉心指导和亲切关怀。导师一丝不苟的工作作风、广博的知识、严谨的治学态度和永不懈怠的工作作风使我受益匪浅。导师的教导和精神将指导和激励我整个未来的科学探索生涯，在此对导师的关心和指导表示衷心的感谢。

非常感谢阳春华教授、胡志坤博士、王雅琳副教授、谢永芳副教授的指导和帮助，特别是胡志坤博士从课题研发，到论文撰写对我给予了很大的指导与启发，倾注了大量的心血，他们的渊博知识、敬业精神将对我今后的学习和工作将产生巨大的影响。

在这三年共同学习、工作和生活过程中，还得到了同学们的宝贵支持，感谢一起进行连续碳酸化分解优化控制项目的卢宏燕硕士以及在中州分公司共同进行相关项目开发的段小刚硕士、孔令爽硕士、徐洁硕士，他们在科研工作中给了我极大的帮助。

感谢中州分公司六车间的有关领导和技术人员，以及连续碳酸化分解岗位默默无闻的工人师傅们，没有他们的帮助，我不可能完成课题。

最后，衷心感谢我的家人在我漫长的求学生涯中所给予的支持、鼓励与爱护。感谢所有关心、帮助过我的老师、同学和朋友们！

张毅

2005 年 4 月

民主楼

攻研期间主要成果

- 1 张毅, 桂卫华, 田世锋. 基于 PLC 的叉车自动称重系统的设计. 仪器仪表用户, 2004, 11 (2): 28~29
- 2 张毅, 桂卫华, 胡志坤. 铝水叉车自动称重系统. 吉林大学学报 (工学版), 2004, 34 (7): 343~345
- 3 张毅, 桂卫华, 胡志坤, 阳春华. 连续碳酸化分解进料流量的软测量与控制. 自动化与仪表, 已录用
- 4 张毅, 桂卫华, 胡志坤, 阳春华. 连续碳酸化分解首槽进料量软测量. 工业仪表与自动化装置, 已录用