

1932764

分类号_____密级_____

UDC_____

学 位 论 文

连铸机结晶器液位控制系统的设计与应用研究

作者姓名：李 刚

指导教师：郑 艳 副教授

东北大学信息科学与工程学院

申请学位级别：工程硕士 学 科 类 别：专业学位

学科专业名称：控制工程

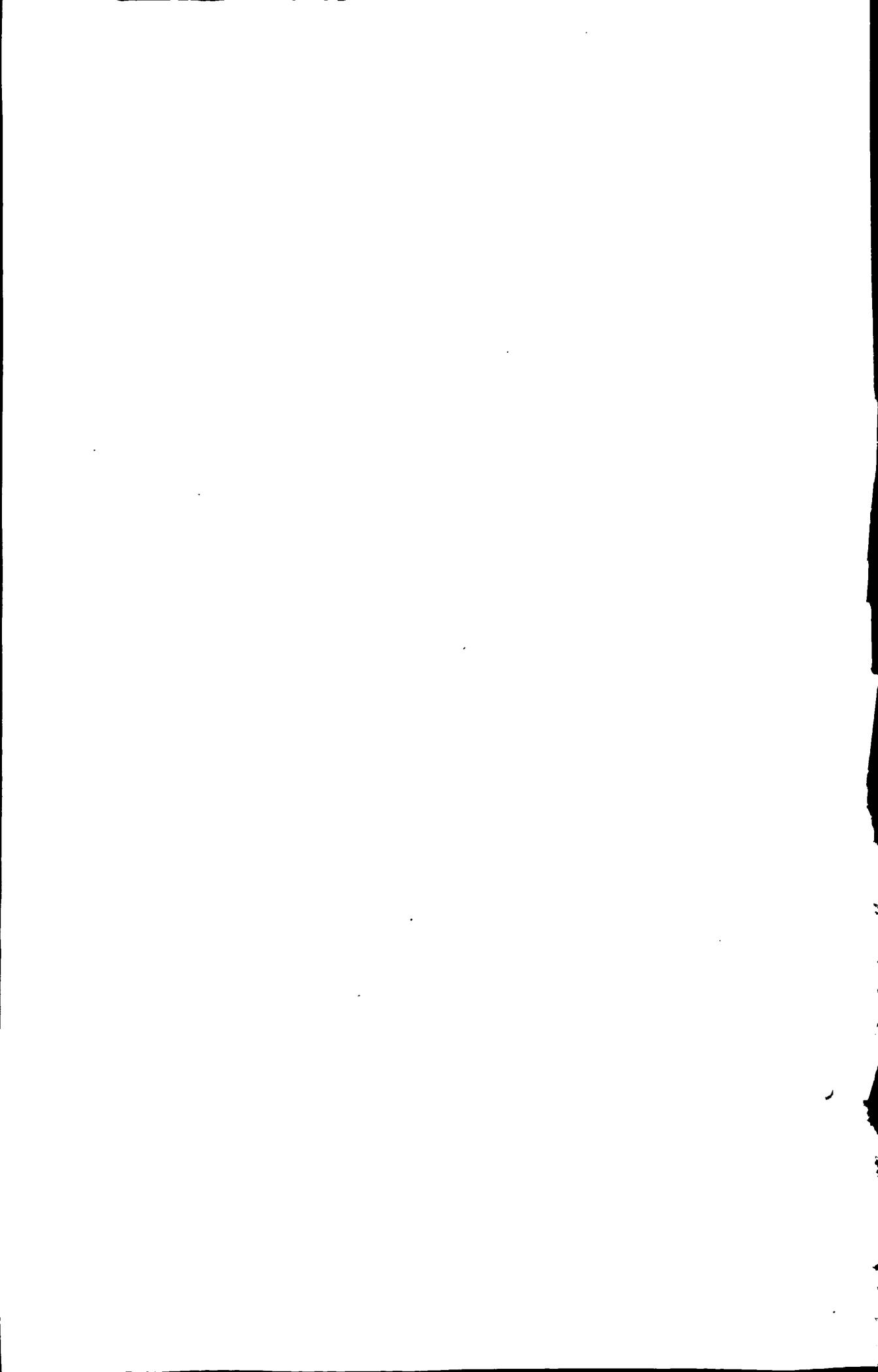
论文提交日期：2008年5月10日 论文答辩日期：2008年6月25日

学位授予日期：2008年 月 日 答辩委员会主席：井元伟 教授

评 阅 人：钱晓龙 副教授、袁 亮 高级工程师

东 北 大 学

2008年6月



A Thesis in Control Engineering



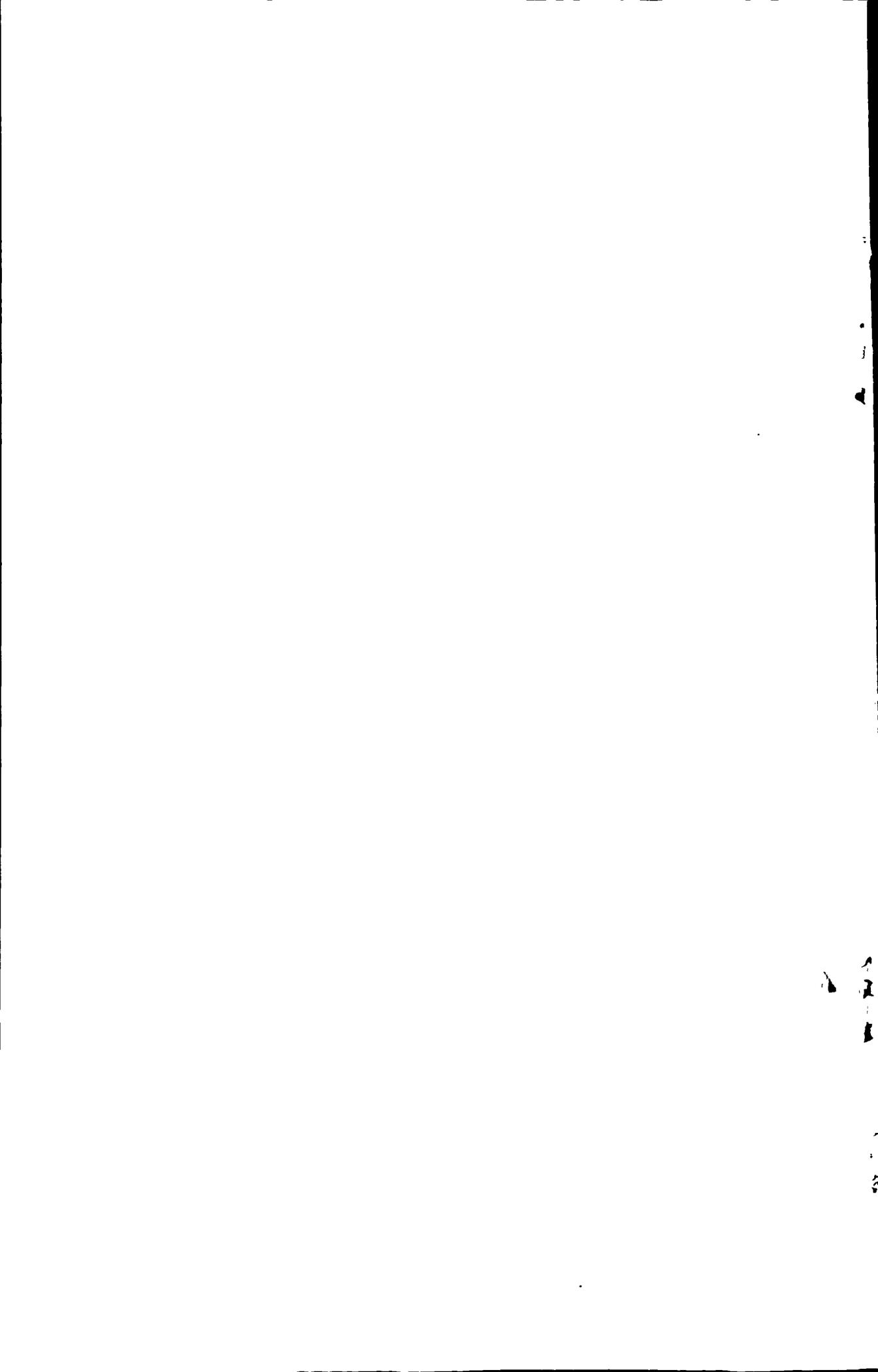
On Design and Application of Mold Level Control System for Continuous Caster

by Li Gang

Supervisor: Associate Professor Zheng Yan

Northeastern University

June 2008



独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人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：李刚

日期：2008.7

学位论文版权使用授权书

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

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 一年 一年半 两年

学位论文作者签名：李刚

签字日期：2008.7

导师签名：郑勃

签字日期：2008.7

连铸机结晶器液位控制系统的设计与应用研究

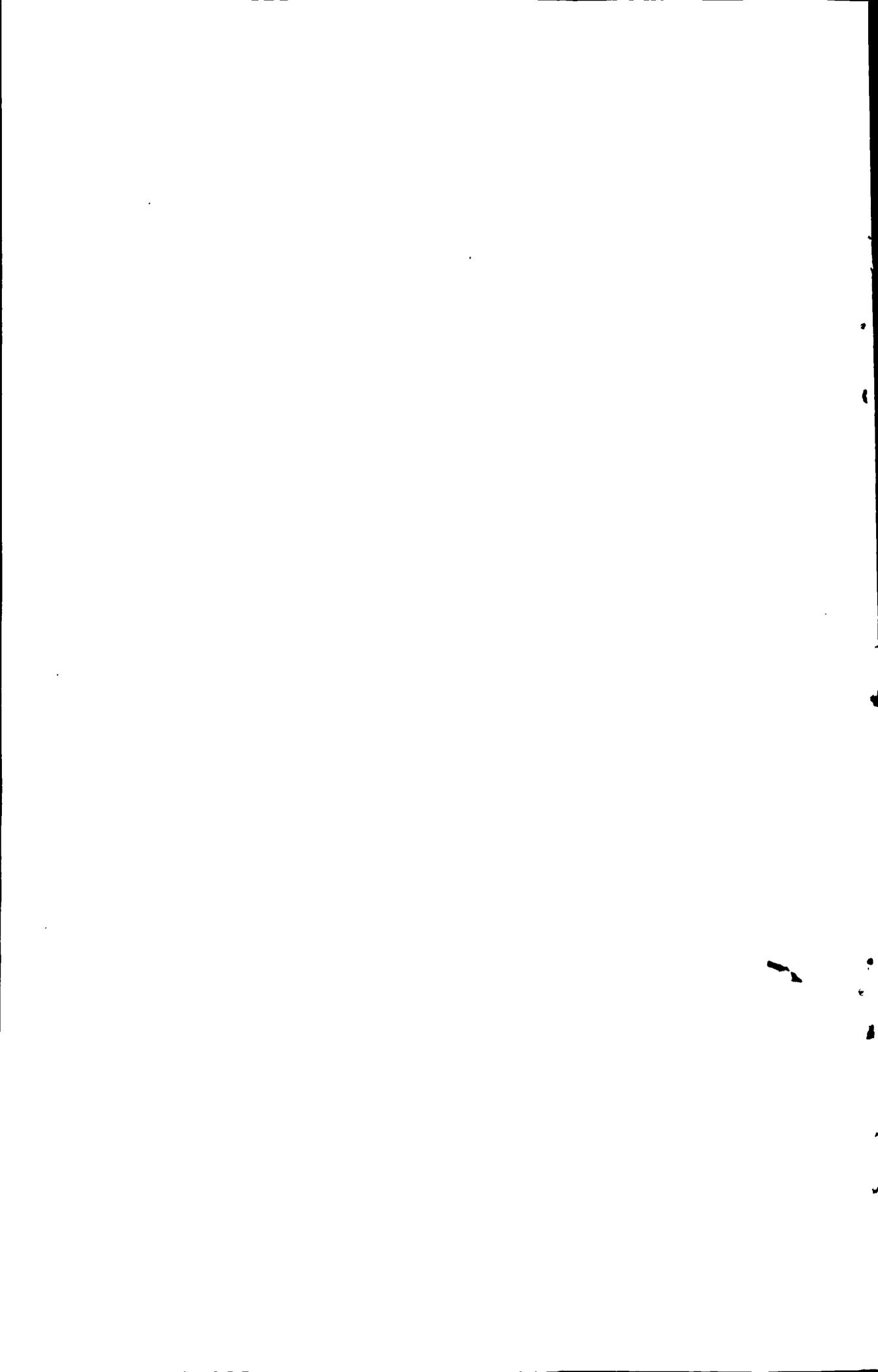
摘 要

结晶器液位自动控制已经成功应用在铸坯截面为 150 mm×150 mm 以上的板坯连铸机上,而在小方坯连铸机(铸坯截面为 130mm×130 mm)上的应用效果不佳。虽然首钢是国内领先的连铸大企业,但小方坯铸机还都是手动开浇,人工控制结晶器液面高度,自动控制技术远远落后于发达国家,钢坯质量很难得到改善。为了进一步提高小方坯的质量,同时也为了积累连铸机自动化改造经验,在消化吸收国内外其他钢铁厂连铸机结晶器液位控制理念的基础上,设计了适用于小方坯连铸机的结晶器液位自动控制系统。

本文首先根据液位控制的机理建立了各个环节的数学模型。并分析了模糊控制方法和PID控制方法各自的特点,将模糊控制和PID控制有机结合起来,设计了Fuzzy-PID复合控制器。该控制器综合了模糊和PID两种控制方式的优点,既具有模糊控制对非线性系统控制的有效性,又具有PID控制的精确性。在系统建模和控制器设计的基础上,采用Matlab仿真软件对PID控制和Fuzzy-PID复合控制两种控制算法进行仿真研究,仿真结果表明Fuzzy-PID复合控制较常规PID控制具有更好的稳定性和控制精度,该系统具有结构简单、抗干扰能力强,调整时间短等优点,可同时兼顾控制系统的动静态性能。

在理论研究的基础上,采用西门子S7-300系列PLC、STEP7编程软件和WinCC 4.0组态软件,对控制系统的上、下位机的软、硬件进行了设计、编程及调试,实现了结晶器液位的Fuzzy-PID复合控制。液位检测使用放射性同位素(Cs^{137})检测法;在塞棒执行机构上使用了高精度数字电动缸,将液位串级控制结构简化为一阶闭环控制,缩短了系统响应时间,将结晶器液位误差控制在±5mm之间,基本达到要求。应用表明,Fuzzy-PID复合控制器具有良好的动态、静态特性和一定的鲁棒性,而且控制算法简单,实现方便,有效地提高了铸坯质量。

关键词: 结晶器; 液位控制; 同位素检测; 可编程控制器; 电动缸; 模糊PID; PID



On design and application of mold level control system for continuous caster

Abstract

Mold level control has been successfully used in the slab continuous casting machine that cross sectional area is above $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, but effect is not good for the billet caster (the cross sectional area is $130\text{ mm} \times 130\text{ mm}$). Although Shougang is a large enterprises in output aspect of the continuous casting in domestic production, but automatic control technology of Shougang laggies far behind the developed countries. It is difficult to improve the product quality with artificial casting and liquid level control. On the basis of the digestion and absorption of ideas of continuous caster mold level control of other steel plants it had designed a mold level control system in suitable for billet caster, for further improving of the quality of billet and for building on experiences of automation of others continuous casters.

At first in this paper, it had established mathematical model of each constituent part according to the mechanism of mold level control system. Then it had analyzed the characteristics of the fuzzy and PID control and then combined them organically. A Fuzzy and PID Hybrid controller is designed in this paper. This controller synthesizes the advantages of both fuzzy and PID controlling modes, thus making the controller possess not only the simplicity and efficiency of the fuzzy in controlling over the non-linear system but also the accuracy of PID controlling. Based upon the system modeling and the design of controller it had carried on the simulation experiment for PID and Fuzzy-PID Hybrid algorithm by using the Matlab software. The simulation results show that this system has a better stability and a higher precision than conventional PID system. This method has the advantages of simple structure, stronger anti-jamming ability and quick response, and according to both dynamic and static characteristics of system.

Based on theoretical research, in this control system it had used the Siemens S7-300 PLC, programmed and debugged software with STEP7 and WinCC 4.0 configuration software for software and hardware of host computer and lower computer. Compound fuzzy-PID control of mold level was realized. The method of detection of level is method of radio isotopic detection (Cs^{137}); the implementing agencies for

stopper on the use of high-precision digital electric cylinder, which simplifies the mold level control structure from cascade control structure to one order closed-loop control and shortens to the response time of the implementing agencies. In the production process, error of the mold level in $\pm 5\text{mm}$, which meets the requirements basically. Application shows that the controller has good dynamic and static characteristics and a certain robustness. Control is simple and easy to achieve. In this way, product quality is improved effectively.

Key words: mold; level control; radio isotopic detection; programmable logic controller (PLC); electric cylinder; Fuzzy-PID ; PID

目 录

声明..... I

中文摘要..... II

ABSTRACT..... III

第 1 章 绪论.....1

 1.1 连铸工艺及控制技术发展概况.....1

 1.2 结晶器液位控制技术的现状和趋势.....5

 1.3 液位控制基本策略.....6

 1.4 液位控制基本方法和特点.....10

 1.5 结晶器液位检测基本方法.....11

 1.6 本论文的背景和主要工作.....13

第 2 章 结晶器液位控制系统总体方案设计.....15

 2.1 液位控制方法的选择.....15

 2.2 液位检测方法的选择.....16

 2.3 液位控制系统执行机构的选择.....17

 2.3.1 执行机构种类与选择.....17

 2.3.2 系统执行机构配置.....18

 2.4 小方坯连铸机结晶器液位控制系统方案设计.....20

 2.4.1 液位控制系统的设计要求.....20

 2.4.2 液位控制系统方案及控制原理.....21

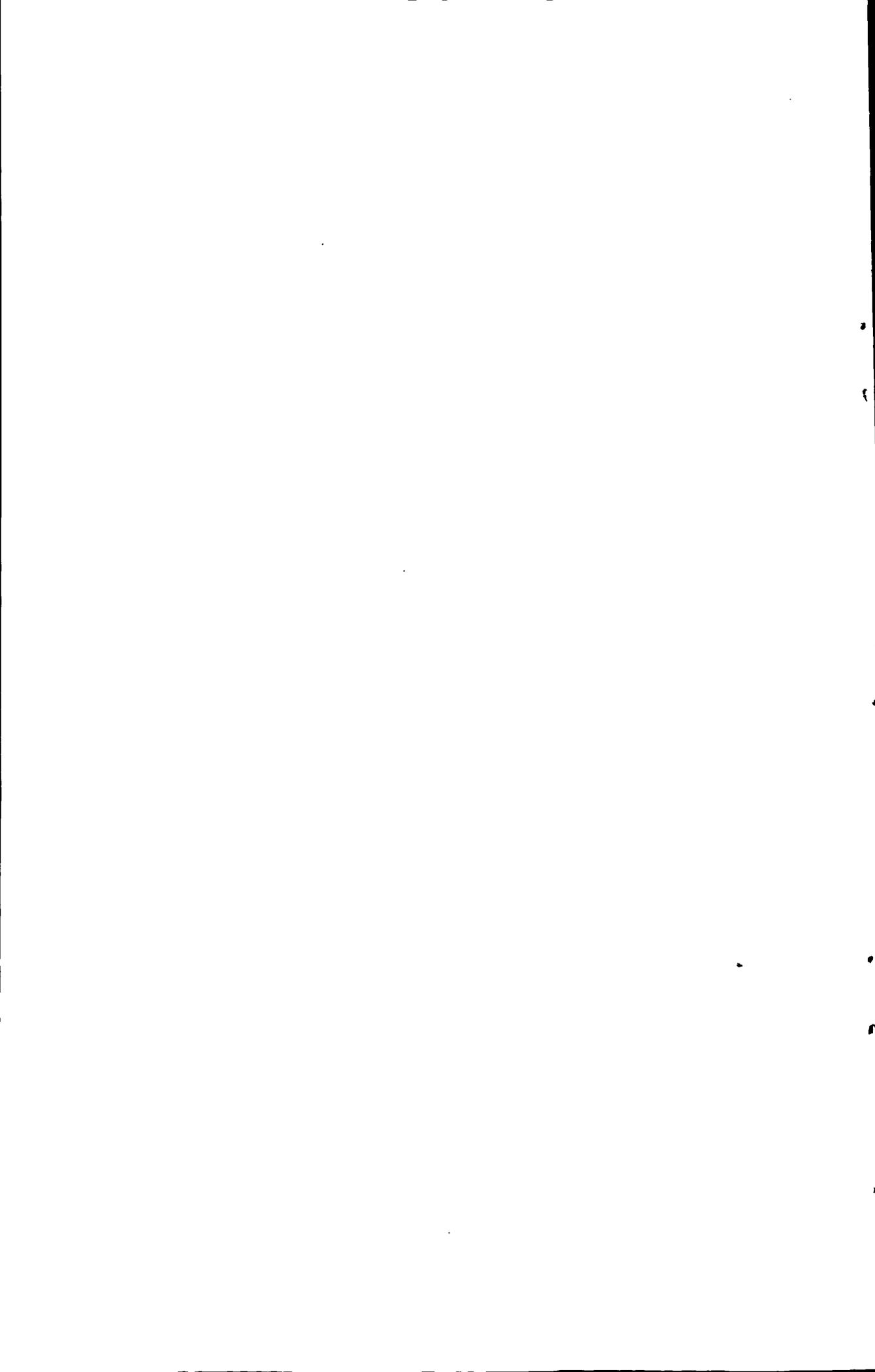
 2.4.3 液位控制系统工艺实现描述.....22

 2.5 小结.....23

第 3 章 结晶器液位控制系统控制器设计与仿真.....25

3.1 结晶器液位串级控制的简化	25
3.2 PID 控制方法简介	26
3.2.1 PID 控制液位原理	26
3.2.2 数字 PID 控制算法	27
3.2.3 PID 控制的特点	29
3.3 模糊控制算法	30
3.3.1 模糊控制的特点	30
3.3.2 结晶器液位 Fuzzy-PID 复合控制算法	31
3.4 液位控制系统建模	31
3.5 结晶器钢水液位控制时的难题	33
3.6 模糊控制器的设计	34
3.6.1 精确量模糊化	35
3.6.2 模糊控制规则及模糊推理	35
3.6.3 反模糊化处理	37
3.6.4 结晶器液位 Fuzzy-PID 复合控制器	38
3.7 结晶器液位控制系统仿真研究	39
3.8 小结	42
第 4 章 结晶器液位控制系统实现	43
4.1 控制系统硬件设计	43
4.1.1 上位机系统配置及功能	44
4.1.2 PLC 原理及系统选型	45
4.2 控制系统软件设计	49
4.2.1 STEP7 及下位机软件设计	49
4.2.2 WinCC 及上位机软件设计	56
4.3 系统实现及应用研究	61

4.4 小结.....	62
第 5 章 结论与展望.....	65
参考文献.....	67
致谢.....	71



第1章 绪 论

1.1 连铸工艺及控制技术发展概况

1856年英国冶金学家 Bessemer 提出了连铸的最初设想并做了反复的试验^[1], 但由于当时总的科学技术水平较低, 限制了连续铸钢的发展, 直到1933年德国科学家 Junghans 建设了第一台立式带振动结晶器的连铸机^[2, 3]。1943年浇铸钢水的连铸试验装置开发成功, 使得连铸技术在钢铁工业生产中得以应用成为了可能。20世纪50年代, 连铸工艺真正开始用于钢铁工业生产, 1950年 Junghans 和曼内斯曼(Mannesmann)公司合作, 建成世界上第一台能浇铸5吨钢水的连铸机。经过几十年的不断发展, 到20世纪80年代, 连铸进入完全成熟的全盛时期。这期间先后出现了一系列新技术、新设备。从20世纪末开始, 水平连铸、近终形连铸和高效连铸受到世界普遍关注, 各钢铁工业强国的连铸生产量已接近饱和, 连铸比已达95%以上, 最高铸机作业率达97%, 薄板坯连铸机拉速可达8m/min。进入二十一世纪, 薄板坯连铸连轧和薄带钢连铸等为主近终性连铸将作为钢铁生产的重大变革工艺技术, 必将会有很大发展。

我国是连铸生产起步较早的国家, 早在20世纪50年代就已经开始探索性的工作。1957~1959年间先后建成三台立式连铸机。1964年在重钢三厂建成一台断面为180mm×1500mm的板坯弧形连铸机, 这是世界上工业应用最早的弧形连铸机之一。随后处于停滞状态。到1978年全国用于生产的连铸机只有21台, 连铸年产量112.70万吨, 连铸比仅为3.5%。改革开放后, 为了学习国外先进的技术和经验, 加速我国连铸技术的发展, 从20世纪70年代末开始, 我国的各大钢铁厂陆续引进了一批连铸技术和设备。近十几年来, 我国连铸发展的速度已达到世界主要产钢国连铸增长的水平, 并且在连铸技术及装备的研究方面取得了突破性进展。1990年, 我国第一台完全国产化的方坯连铸机在凌源钢铁厂问世, 1996年原冶金部将连铸机高效化改造作为“九五”重点攻关课题, 由此拉开了我国连铸高效化改造的序幕。到2003年底, 我国高效、较高效连铸机累计已达到75%以上, 而且我国在高效连铸技术小方坯领域已跻身世界先进行列。除此以外, 我国多家钢铁厂先后引进了近终形薄板坯连铸连轧生产线。马钢三炼钢异形坯(H型坯)连续机投产后, 创造了巨大的经济效益。我国连铸技术发展经历了起步、艰难发展、引进移植、自创体系、快速发展、高效化改造等阶段。目前, 我国已形成钢种多样、机型齐全、技术成熟的连铸生产体系。2006年初我国连铸坯产量为41077.75万吨, 连铸比达到98.57%。

大部分钢铁企业实现了全连铸。

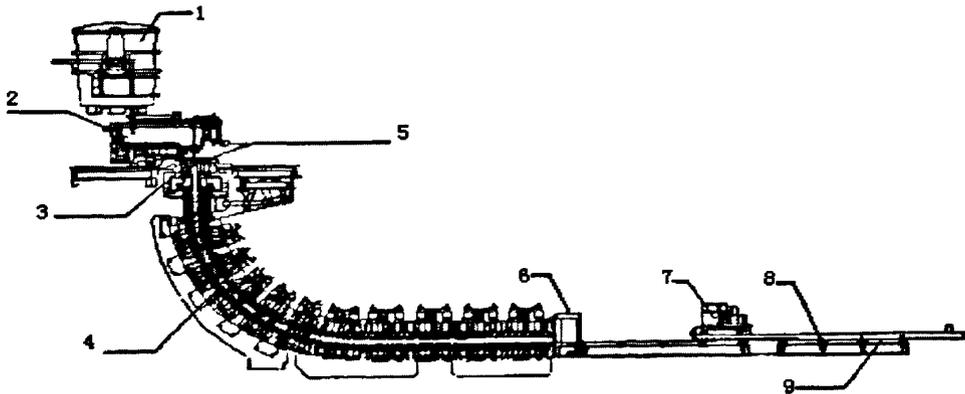
随着连铸技术的不断向前发展，高效连铸、近终形连铸、结晶器几何形状和振动的改进、电磁搅拌、轻压下、全连铸自动化等已经成为当今连铸技术发展的趋势^[2, 4, 5]。

1.1.1 连铸工艺原理和连铸设备概况

连铸是连续铸钢的简称，是使钢水不断地通过水冷结晶器，凝成硬壳后从结晶器下方出口连续拉出，经喷水冷却，全部凝固后切成坯料的铸造工艺。连铸的一般生产工艺流程，如图1.1所示。由炼钢炉炼出的合格钢水，经钢包运送到浇铸位置，通过中间包铸入强制水冷结晶器内。铸入结晶器的钢水在迅速冷却凝固形成铸坯的同时，其前部与伸入结晶器底部的引锭杆头部凝结在一起。当结晶器内钢水升到要求的高度后，开动拉坯机，以一定速度把引锭杆从结晶器中拉出。铸坯被拉出后，通过二次冷却区域，使其更快的散热冷却并继续逐渐凝固。然后经过矫直机矫直后，完全凝固的直铸坯由切割设备切成定尺，经运输辊道进入下道工序。

连铸生产所用的设备，实际上是包括在连铸作业线上的一整套机械电气及控制设备。其主要设备包括钢包及其运送设备、中间包、结晶器及其振动装置、二次冷却装置、拉坯矫直装置、铸坯切割装置、铸坯运输装置以及各部分电气和自动化控制装置等。

炼钢炉炼出的连铸用合格钢水装入钢包，经过炉外精炼设备处理后，由钢包运送设备运送到连铸机浇铸位置，供给中间包所必需的钢水。目前，生产上使用的主要有四种型的设备：专用起重机、固定式座架、浇铸车和旋转台。



1、钢包 2、中间包 3、结晶器及振动装置 4、二次冷却区及辊道
5、液位检测及控制装置 6、拉坯矫直机 7、切割装置 8、运输辊道 9、铸坯

图1.1 连铸工艺流程图

Fig. 1.1 Process chart of continuous casting

中间包是钢包与结晶器间的一个中间容器。钢包中的钢水先注入中间包，然后再通过中间包内的水口装置铸入结晶器中。中间包在连铸过程中起到减压、稳流、除渣、储钢、分流和中间包冶金等重要作用。

结晶器是连铸机非常重要的部件，是连铸设备的“心脏”。钢水在结晶器内冷却，初步凝固成一定坯壳厚度的铸坯外形，并被连续地从结晶器下口拉出，进入二冷区。结晶器按照其内壁形状分为弧形和直形两种；按铸坯规格和形状来分，有圆坯、矩形坯、方坯、板坯和异型坯结晶器；按其结构形式，可分为整体式、套管式及组合式等。结晶器振动装置的目的是，使结晶器内壁获得良好的润滑条件，防止钢水与结晶器内壁粘结，避免铸坯拉断或者拉漏。

二次冷却装置直接接受来自结晶器的高温薄壳(10mm~15mm)铸坯，但内部仍为液态钢水。设置它的目的是，可采用直接喷水冷却带有液芯的铸坯，使其迅速冷却至完全凝固，避免铸坯产生鼓肚变形。二冷装置的夹辊则起到支撑和导向铸坯和引锭杆的作用，防止其跑偏。

拉坯矫直机位于二次冷却区尾部，起到对铸坯拉出、矫直和脱引锭杆的作用。在连铸中，由于浇铸钢种不同，要求的浇铸的速度不同，拉坯矫直机的拉速也不同。

切割装置根据用户或下道工序的不同，将铸坯切成定尺或倍尺。由于铸坯在拉出过程中是不断运动的，要求切割装置在切割过程中要与铸坯实现严格的同步运动。连铸机采用的切割方法有火焰切割和机械切割两种。

铸坯运输装置的任务是把切成定尺的铸坯冷却、精整、出坯，以保证连铸机的连铸生产^[3, 6, 7]。

1.1.2 连铸自动化控制技术的发展

连铸自动化控制技术是随着连铸技术的发展而不断发展起来的，并与电子技术和计算机技术息息相关。自20世纪80年代以来，连铸自动化控制技术的可靠性、实用性、可操作性和可维护性都得到极大的改善。目前，连铸自动化控制系统基本上包括信息级、生产管理级、过程控制级和设备控制级。信息级的主要功能是搜集、统计生产数据供管理人员研究和做出决策；生产管理级主要是对生产计划进行管理和实施，指挥过程计算机执行生产任务；过程控制级则接收设备控制级提供的各类数据和设备状态，指导和优化设备控制过程；设备控制级指挥现场的各种设备(如塞棒、滑动水口、拉矫机、切割设备等)按照工艺要求完成相应的生产操作。其中，设备控制级和过程控制级自动化最为关键，直接关系到连铸机生产

是否顺畅和连铸坯的质量。

近年来,国内外加强了重要参量的检测技术研究,整个控制系统中普遍采用集散控制系统DCS和可编程控制器PLC,电气传动则采取交流调速和矢量控制技术。尤其是工业以太网的快速发展,实现了由计算机、电气、仪表的硬件设备组成的“三电一体化”多级自动化控制系统。系统具有网络层次简单、清晰,一般由现场总线(如Profibus、Interbus)、控制总线(工业以太网H1、以太网、Controlnet)、信息总线(快速以太网)组成,控制总线和信息总线多以标准、开放的TCP/IP为通信协议进行数据交换,联网非常方便,且传输速率为100Mb/s,目前正向传输速率1000Mb/s发展;采用交换式快速以太网技术,用“三层”交换机来实现路由和桥接功能,即可实现具有不同传输协议的网络而进行高速连接,又可保证系统间互不影响^[8]。使用多级自动化控制系统实现连铸生产自动化控制,代表了连铸机自动化控制技术的世界最高水平。

虽然有关连铸过程控制的研究近年来取得了长足的进步,但是其理论研究和实际应用水平仍然不能满足对连铸生产自动化程度和产品质量越来越高的要求,尤其在检测技术、建模技术、控制技术和优化技术领域关键性问题急待解决。这是由于连铸过程本身的复杂性决定的。其复杂性主要体现在以下几个方面^[9]: (1)存在着可测或不可测的扰动和未建模动态问题; (2)具有时变性和非线性特性; (3)过程本身和执行机构常有较大的滞后; (4)用于过程测量的传感器也常常受到高频测量噪声的影响; (5)连铸过程各环节之间相互耦合; (6)连铸与炼钢和连轧之间需要协调控制和调度。由于上述复杂性,传统的PID控制方法不能得到令人满意的控制效果。

因此,近些年以来国内外专家学者不但已经将自适应控制、预测控制、 H_{∞} 控制、模糊专家系统和神经元网络等智能控制方法用于连铸生产过程各环节控制的控制中去,而且较好地解决了各环节间的耦合控制及整个过程的优化和故障诊断与处理等问题。随着被越来越复杂的数学模型被开发出来,并且不断地被用于在线工艺控制和优化,连铸过程控制领域出现了很多重要进展。其中钢流夹渣检测技术、中间包连续测温技术、结晶器液位检测与自动控制技术、结晶器热流监测与漏钢预报技术、二冷水自动控制技术、铸坯表面缺陷自动检测技术、铸坯质量跟踪与判定技术、动态轻压下控制技术已经成为在国内外连铸机上成功应用的八大检测与自动化控制技术^[10]。

目前,我国的连铸机自动化水平与欧洲、美国、日本等发达国家相比还相当

落后。发达国家的连铸机正朝着全自动、智能化、无人浇铸的方向发展，连铸机的操作人员越来越少。国内除了少数引进和近年来新建的连铸机自动化水平较高以外，其它连铸机基本靠常规仪表和一般电气设备进行控制，计算机控制的项目较少，很多靠手动控制。因此，全自动化连铸技术是我国连铸自动化技术研发和普及的重要项目之一。

1.2 结晶器液位控制技术的现状和趋势

1.2.1 结晶器液位控制技术的重要性

精确的结晶器液位控制被认为是提高连铸坯质量的关键^[1]。连铸生产过程中，对于结晶器液位控制的一个基本要求是稳定生产操作，避免拉漏和溢钢。其次要尽可能的保持液位稳定，提高铸坯的质量，而能否满足这个要求是目前衡量连铸控制水平的一个重要标志。

结晶器液位波动是铸坯产生纵裂的重要原因，而结晶器液位的稳定性是与钢水流量、水口堵塞、水口结构、插入深度以及由钢水再循环引起的弯月面产生的波浪有关的，这是一个复杂的体系。法国Slomer工厂试验指出，结晶器液位波动大于10mm，发生纵裂的几率占30%；浸入式水口插入深度的变化大于40mm，发生纵裂的几率占20%。说明结晶器液位波动对铸坯质量的影响较大^[2]。

因此结晶器液位控制的重要性在于减少或避免漏钢、溢钢，稳定生产操作；防止浮在结晶器液面上的杂质卷入铸坯，避免铸坯表面和内部产生加渣缺陷；防止结晶器保护渣不均匀流入，避免产生裂纹、炉渣条痕等表面缺陷；使铸坯初期凝固稳定，保证在结晶器内产生均匀的凝固壳；改善操作人员的工作环境，减轻劳动强度；优化生产过程和生产计划，降低生产成本。特别是高效连铸时，拉速较高，如果不使用结晶器液位检测与控制装置控制浇铸过程，就不能保证连铸机正常生产。

1.2.2 结晶器液位控制技术的现状及趋势

结晶器液位自动控制技术是连铸基础自动化的一部分，控制部分可以是PLC或DCS，也可以是一个独立的工业计算机控制系统。其相关的硬件除结晶器、中间包等对象系统外，还应包括液位检测系统、执行机构、模型辨识、控制策略及控制器等几个方面。

结晶器液位检测系统是控制液位稳定的前提，也是制约我国连铸过程自动化和生产自动化的瓶颈之一。目前已经开发并得以应用的结晶器液位检测方法主要有^[13, 14]：热电偶法、涡流法、放射性同位素法、电磁感应法、浮子法、工业电视

摄像法、红外线法、超声波法、激光测量法等。目前世界上广泛采用的测量方法主要有放射性同位素法、涡流法等。目前,奥钢联、我国鞍钢、攀钢、马钢、济钢等都采用放射性同位素法检测结晶器液位,日本新日铁公司、我国宝钢、武钢、包钢等采用涡流检测法。本钢则根据检测方法的不同性能特点,在薄板坯铸机长漏斗H2型结晶器上将放射性同位素法和涡流法结合使用,其控制精度达到了国外先进检测水平^[15]。

关于模型辨识和控制方法,常用的阶跃信号激励的辨识方法并不适用于结晶器液位控制系统的模型辨识,传统的方法是在正弦信号激励下采用现场中的PID控制器进行闭环辨识。但这种辨识方法的鲁棒性能较差,同时,由于结晶器液位系统随即干扰因素多,非线性和时变性强,系统开环增益较大,无法满足越来越高的自动化生产要求和越来越高的对铸坯质量的要求。随着对结晶器液位控制系统的不断深入研究,智能PID控制、预测控制、自适应控制、模糊控制、 H_{∞} 控制、专家系统和神经网络等智能控制方法在结晶器液位控制上的应用^[16-17],使控制系统的鲁棒性大大加强并能够很好的克服了系统中有色噪声的影响。

结晶器液位控制系统的执行机构是用来控制塞棒或滑动水口的位置,最终控制结晶器中钢水的流入量。目前在国内外连铸机上应用的执行机构包括:液压执行机构、电气交流无刷伺服电机执行机构、高精度数字气动缸、低惯量交流无刷伺服电动缸^[18]以及高精度数字电动缸^[19],其中后两种由于抗干扰性能强和便于维护已得到越来越广泛的使用。

由于连铸车间工作环境恶劣,目前国内外的结晶器控制系统控制器几乎全部采用PLC,西门子公司S系列的PLC以其可靠的稳定性、强大的可扩展性、先进的控制软件在该领域占有绝对统治地位。

总之,结晶器液位控制系统涉及到传感检测技术、信息处理技术、机电设备制造技术、计算机控制技术、工业网络技术等多个领域。目前,国内外一些高拉速浇铸的连铸机可将钢液面波动控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内,最好的已达到了 $\pm 1\text{mm}$ ^[20]。作为连铸控制系统的重要组成部分,智能化和网络化已经成为结晶器液位控制系统发展的必然趋势。

1.3 液位控制基本策略

由于传统的PID控制策略只有在特定工艺条件下才能使实现较为有效的结晶器液位控制,因此控制策略是结晶器液位控制研究的热点。除了传统PID控制策略,还有以下其他策略^[21-22]:

1.3.1 基于PID的液位控制策略

(1) 高频抖动补偿

克服由塞棒磨擦及死区特性等引起的非平稳非线性的简单而有效的方法是在控制信号中引入高频抖动信号,从而使液位执行机构产生抖动以消除塞棒磨擦和死区,将液位偏差减小到满足要求的范围之内。直观地看,这种补偿很可取,但实质上它是一种开环高频补偿,因而很容易使整个回路的稳定性变差。而且由于高频抖动信号的作用,使得滑动水口的磨损较快,且液位波动频度较高,夹渣很易卷入钢液中。

(2) 线性串联补偿

实验结果显示,液压系统有明显的滞后特性,于是人们在不改变已有PID控制器的情况下在其中加入一个高频带线性补偿控制器。在控制信号的变化率发生变化时,该控制器能够对滞后引起的控制误差进行快速跟踪,使阀门很快达到指定的位置。与高频抖动补偿相比,这时结晶器液位波动的幅值虽没有改善,但波动的频度明显减少,且控制动作也大大减少。

(3) 非线性串联补偿

由于流量特性和滑动水口结构具有平稳非线性特性,使得结晶器液位与水口开度之间具有非线性关系。为了克服这一非线性的影响, Graebe^[23]在控制器中引入非线性环节来抵消水口的非线性和减小开环增益,使系统前向通道变为线性环节。这种非线性控制系统能用较少的控制动作把结晶器液位波动减小到要求的范围内,但是其设计比较困难,且无法克服拉速的扰动作用。

(4) 带死区变增益非线性控制

对于结晶器液位控制,人们不但希望液位误差较小时控制输出动作几乎不发生变化,以减少滑动水口的磨损,而且希望当偏差较大时控制调节作用又能使偏差很快减小。为此,可设计如下的变增益控制器^[24]。

$$u(t) = \begin{cases} 0 & |e(t)| < e_1 \\ k_1 e(t) & e_1 \leq |e(t)| < e_2 \\ k_2 e(t) & e_2 \leq |e(t)| < e_3 \end{cases} \quad (1.1)$$

对应于不同控制增益的误差区间分别称为死区、不灵敏区和灵敏区,当 $|e(t)| > e_3$ 时称为事故区,系统自动停止运行。现场使用表明,采用这种方法时执行机构动作幅度和频度明显改善,结晶器液位波动幅度和频度也很小。系统稳定时液位最大偏差1mm,而不采用这种方法,稳定时液位偏差高达6mm。

1.3.2 基于极点配置的液位控制策略

(1) 相角超前--滞后补偿控制

为满足系统的静态速度偏差系数指标,系统中必须增加一个放大器 K_c ,这使得液位开环系统的相角裕量和幅值裕量小于正常值。而单一的相角超前或滞后补偿无法使系统满足指标要求,因此,可采用如下相角超前--滞后补偿器^[25]

$$G_{LL}(s) = K_c \frac{(s + 1/T_1)(s + 1/T_2)}{(s + \beta/T_1)(s + 1/\beta T_2)} \quad (1.2)$$

适当选取参数之后,液位系统的相角裕量和幅值裕量就可达到要求的范围之内。

(2) 扰动补偿控制

结晶器液位系统中扰动的能量谱密度中有一些主要的频率成分。当干扰的幅值较大时,主要成分的频率在0.05~0.1Hz之间。为了克服扰动的影响,可采用如下形式的滤波器:

$$G_f(s) = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{(s^2 + 2\xi_1 \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\xi_2 \omega_2 s + \omega_2^2)} \quad (1.3)$$

这样虽能克服扰动,但带来的问题是系统的相角裕量和幅值裕量却大大减小,即使用相角超前--滞后补偿控制方法也无法使该系统稳定。为此,可根据内模控制原理引入扰动补偿控制器:

$$R_{DR}(s) = \frac{K_{DR} H(s)}{M(s)} \quad (1.4)$$

除此之外,还可以采用观测器对扰动(主要是钢水流量扰动)进行估计^[26],然后对PID控制输出信号做出修正以便可以抵消钢水流量扰动对结晶器液位的影响。

1.3.3 智能化液位控制策略

(1) 主--副回路自校正PID控制

这种控制策略的主回路为比例控制器,副回路为PID控制器。其中,副回路PID控制器的参数是采用一种有限脉冲响应自校正器^[27]获得的,唯一需要校正的参数是主回路比例控制器的比例增益。引入副回路控制器的作用一方面是为了部分减少过程增益的变化,另一方面是为了快速消除拉速扰动的影响。为了克服高频测量噪声的影响,副回路的反馈信号采用当前的液位输出和前一采样时刻的液位值之差。

值得注意的是,如果该控制器中不对噪声进行滤波,那么尽管结晶器液位偏

差较小,但控制信号的波动太剧烈,阀门的磨损将十分严重。因此,在主-副回路PID控制系统中引入了低通滤波器来消除高频噪声。但是在主-副回路PID控制参数自校正时,不能将滤波器当作液位系统的一部分,否则将起不到滤波作用。

(2) 预测液位控制

Thomas Jolly等^[28]1993年提出一种结晶器液位广义预测控制(GPC)方法,在模拟实验中发现即使拉速变化较大,这种方法也能使液面波动保持在给定值附近3mm左右,明显优于PID方法。De Keyser^[29]通过对结晶器液位单回路PI控制、双回路自校正PID控制和一种基于过程模型的预测方法的比较研究,采用EPSAC预测控制策略^[30]对液位进行控制,并已将其用于一个连铸机中,结果发现这种方法易于实现控制精度和鲁棒性两方面的性能要求,这比双回路PID策略有较大改善;郭戈等也设计了一种结晶器液位鲁棒预测控制器^[31],通过等效变换方法将包含有色噪声项的系统模型化为标准的GPC模型,并对输入输出数据进行低通滤波。仿真研究表明,这种方法能很好地克服结晶器液位系统中存在的有色噪声对液位的影响。

(3) 模糊液位控制

Omttra等^[32]于1990年之前就研制出一种结晶器液位在线实时诊断模糊专家系统,采用AI诊断工具IDMON作为推理的核心,该系统能用一个模糊隶属函数经过复杂的计算和推理,发现可能引起液位波动的异常数据,从而指导浇铸操作以尽量减少铸坯缺陷。这一技术已用于Kobe钢厂4号四流方坯连铸机作为液位诊断系统,配合一个PI控制器进行液位控制,在线实验证明这种方法具有很强的实用性。在此之前,Paiuk等^[33]于1989年研究出一种部分主要参数可调的模糊控制器。郭戈等也正在研究模糊液位控制方法^[34, 35]方面经取得了一定的进展。但最早将模糊方法用于实际连铸生产线中对结晶器液位进行控制的是Dussud^[36]等人,他们成功地解决了诸如喷嘴堵塞等过程扰动对液位的影响。

(4) 自适应液位控制

Hesketh等^[37]于1993年研制出一种自适应液位控制系统RTS,并已成功地将其用于方坯连铸中。他们所使用的模型具有如下形式:

$$(1 + A_f)(1 + A_i)y_t = B_f B_i \Delta u_t + E_f E_i \Delta d_t + (1 + C_f)(1 + C_i) \hat{e}_t \quad (1.5)$$

其中 d_t 是扰动序列, \hat{e}_t 是噪声序列,它在参数辨识时由估计得到, f 和 i 分别代表滤波项和辨识项。

该系统是在自1981年以来一直使用的自适应LQ液位控制系统基础上开发出来

的,其特点是在模型中引入了滤波器、噪声模型和其它用于克服液位系统的非线性、未建模动态等疑难问题的策略。现场实验证明该RTS系统的鲁棒性和参数跟踪能力较强,尤其适用于对执行机构的激励较弱且有噪声的情况。

(5) H_{∞} 液位控制

Kurokawa等^[38]于1991年将 H_{∞} 控制方法用于结晶器液位控制之中,他们根据连铸机的结构及工艺参数选择了一个可以覆盖扰动所在频带的频率加权函数,从而消除了扰动。并用类似的方法克服了过程模型的不确定性和测量噪音;通过设定增益上限等措施解决了参数变化问题,从而在有参数变化和模型不确定性的情况下消除了扰动,实现了液位系统的鲁棒稳定控制。现场实验表明,当扰动比较剧烈时,即使自适应控制方法可能无法准确辨识到过程参数而使闭环系统失稳,而用 H_{∞} 控制方法则能有效地克服扰动。

1.4 液位控制基本方法和特点

基本的结晶器液面自动控制有三种方法^[18, 39]:

(1) 流量型:控制进入结晶器的钢水流量,以保持液位稳定,即控制塞棒或滑动水口的开口度以控制钢水流量,以达到液位稳定的目的。例如,宝钢1900mm板坯连铸机结晶器液位控制系统。

通常是控制滑动水口来保持液位稳定,但是当铸钢接近终了时,由于钢水减少,而拉速仍保持不变,易生旋涡,使表面钢渣带入结晶器。这种控制方式可以保证拉坯速度恒定,因此也就允许根据工艺要求选择合适的拉速,在液位的调节过程中把拉坯速度作为扰动,这种调节过程一般比较平稳,给系统的稳定运行带来很多方便,已经成为当今结晶器液位控制方式的主流。

(2) 速度型:控制拉坯速度以保持液面稳定。此方法是固定中间包流入到结晶器中的钢液量,根据液位变化修正拉坯控制系统的设定值,以使结晶器液位保持恒定。这种方法喷溅较少,在小方坯上应用较多。

通过改变拉速来控制液位,其控制特性曲线是线性的。因此,从理论上说其控制精度是很高的。拉速是连铸过程中的一个重要参数,应限制在一定范围内;同时为满足结晶器液位控制的精度要求,拉速应动态地跟踪液位进行调节。因此,拉速的调节范围应限制在一个较小的动态范围内。由于拉速的变化会引起铸坯凝固、二次冷却、定长切割系统等一系列环节的修正。而合适浇注温度与合适拉速的配合是连铸稳定生产和取得高质量铸坯的前提,拉速不应该成为控制手段而应该把拉速稳定作为工艺目标。因此,用调解拉速的方式保持结晶器液位稳定的这种方

法已经逐步被淘汰。

(3) 混合型：以控制拉速保持液面稳定，但是当拉速超过某一百分比仍不能保持给定液位时，则控制塞棒或滑动水口，或者两者均控制，以控制液位。这种方法也主要用于小方坯连铸。这种方法结合了上面两种方法的优点，在控制要求非常高的时候比较适合使用，控制上较为复杂。

1.5 结晶器液位检测基本方法

总的来说，对结晶器钢水液位检测的要求是安全、稳定、可靠、便于维护、耐高温、抗干扰，最好是保护渣对测量无影响。目前，结晶器钢水液位检测的方法有^[13, 39]放射法(Co^{60} 或 Cs^{137})、浮子法、热电偶法、电磁法、激光法、红外法、电视法、SERT BPZXY(法国)法和涡流法等。

最古老和最可靠的方法是放射法，对某些场合如薄板坯连铸是较好的方法。在欧美诸国，他们操作人员少，管理严格，多采用此方法。1992年，法国SERT公司开发出适合于小方坯连铸的结晶器液位测控系统BPZXY，已有数十家近200流在使用，它的测量元件是红外摄像CCD传感器。对于板坯连铸机，大多采用日本钢管公司开发的涡流液位计。对方坯连铸机，大多数采用放射性液位计。下面就几种常用的液面方法简要介绍其原理和特点：

1) 放射性同位素法

放射性同位素法是利用同位素放射源所产生的 γ 射线(粒子流)能够穿透物质层的性质，将一个能发出均匀、稳定射线强度的 γ 射线源和一个探测器安装在相对的结晶器铜板上。放射源装在专门的铅室中，射线从铅室的一个小孔或窄缝中射出。而射线在穿过介质层时一部分因克服阻力与碰撞使动能消耗而被吸收，另一部分则穿透介质被探测器所接收，如图1.2所示。结晶器内钢水液位的高度与探测器所接收到的射线强度之间的关系为：

$$I = I_0 e^{-\mu h} \quad (1.6)$$

式中： I —结晶器内钢水高度为 h 时探测器所接收到的射线强度；

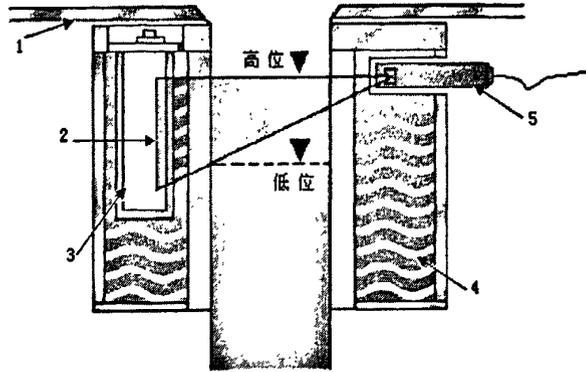
I_0 —结晶器内无钢水时探测器所接收到的射线强度；

h —结晶器内钢水的液位高度；

μ 和 e —分别为介质对射线的吸收系数和自然对数的底。

当放射源和被测介质一定时， I_0 和 μ 为常数，探测器将射线强度信号转换成电脉冲信号(4-20mA)，经前置放大进至显示仪表整形、计数，虽后显示成液位数

值。



1、结晶器 2、放射源 3、密封筒 4、冷却水 5、探测器

图1.2 放射性同位素法液面检测原理

Fig.1.2 Principle of mold level detection with radioisotope

这种方法测量精度较高，动态响应较灵敏，性能可靠稳定，使用范围广，使用寿命长，安装方便，免维护且检测元件(放射源)不与被测介质直接接触，放射源的辐射不受介质温度、压力等影响。奥钢联、日本住友、德国阿尔贝德—萨尔公司等都采用这种方法。

2) 涡流法

涡流法的测量原理是：将振荡器所产生的高频(50KHz)电压加在差动感应线圈的初级线圈上而产生磁场，该磁场在结晶器的钢水中产生涡流。受涡流的影响，差动感应线圈的两个次级线圈中分别产生感应电势，且感应电势的差值与线圈距钢液而的高度成比例关系。固可根据感应电势差的大小即可测得钢液面的高度。这种检测方法有测量范围较宽，适用范围广；受电磁搅拌影响小的优点，但检测计只能在连铸机进入稳定状态后方可使用，且涡流计中的线圈容易损坏。

3) 红外线法

红外线法是利用红外光寻找代表液面高度的黑点(钢水液面与结晶器内壁的接触点)，从而实现液面高度的测量。特点：抗干扰能力强，安装方便，图像直观，但仅适合于结晶器内不加保护渣的连铸机。

4) 电磁法

电磁法测量钢水液面是利用电磁感应原理，将发送线圈和接收线圈并排放置在电磁盒中，安装到结晶器铜板顶部。发送线圈产生高频电磁场，并在铜板表面和钢水靠近表面处感应出涡流，涡流的分布受钢水液面高度的影响，接收线圈中涡流感应出的电势也随之发生变化，从而可以测出钢水液面位置。这种方法测量精

度较高,测量结果不受保护渣影响。但检测结果受结晶器铜板温度及表面镀层的影响。

1.6 本论文的背景和主要工作

连铸的特点之一是易于实现自动化。实行自动化的目的在于改善操作人员的工作环境,减轻劳动强度,减少人为因素对生产过程的干扰,保证连铸生产和铸坯质量的稳定,优化生产过程和生产计划,从而降低成本。但目前在国内结晶器液位实现自动控制的连铸机还不是很多,而国外在连铸机结晶器钢水液面自动控制方面的技术已很成熟,但引进价格昂贵;在国内虽然也有这方面技术与控制系统的成功案例,但所设计出的控制系统一般应用在铸坯断面在 150 mm×150 mm 以上的板坯连铸机,而在小断面(130mm×130 mm)方坯连铸机上的应用效果不佳。首钢虽然是国内领先的连铸大户,但目前小方坯连铸机都是人工控制结晶器液面高度,自动控制技术远远落后于发达国家,钢坯质量很难得到改善。

首钢二炼钢厂 5# SG-8 型小方坯连铸机是专门浇铸品种钢的连铸机,浇铸断面为 130mm×130 mm。铸机改造后实现了全保护浇铸、大容量中间包、钢包在线底吹氩、结晶器电磁搅拌以及二冷自动配水等技术,具备了生产高附加值产品的条件。改造前 5#小方坯连铸机所生产的品种还只是中档或中高档产品,虽然产品质量基本满足用户要求,但并不是很稳定,轧材金相评级低于 2.5 级并未达到 100%。这与结晶器液位的波动大、易卷渣关系密切。为进一步改善钢水的内部质量,提高洁净度,提高铸坯质量,结晶器液位波动应当进行严格控制。因此我们在研究和吸收国外先进的连铸机控制思想和控制方式的基础上,结合首钢小方坯连铸机的生产工艺和实际情况,在第二炼钢厂 5#小方坯连铸机上进行了结晶器钢水液位控制的试验性改造。

本论文在上述背景的基础上完成如下工作:

(1)、根据液位控制系统的要求,确定了采用放射性同位素(Cs^{137})检测技术和先进的高精度数字电动缸来实现结晶器钢水液位的闭环控制。

(2)、以实际被控对象为背景,对控制系统机理进行建模,在此基础上对传统 PID控制和Fuzzy-PID复合控制两种控制算法进行仿真比较,为控制策略改进提供理论依据。

(3)、采用西门子S7-300系列PLC、STEP 7编程软件和WinCC 4.0组态软件,重新对上下位机的软硬件设计、编程及调试,实现液位的Fuzzy-PID复合控制,通过将实际控制曲线和仿真曲线进行比较,进一步证明Fuzzy-PID复合控制能够满足控

制要求。

第 2 章 结晶器液位控制系统总体方案设计

连铸机结晶器液位控制系统的结构如图2.1所示，主要由液位检测系统、液位控制系统、执行机构三部分组成；根据控制方法的不同可以采用通过调节滑动水口的开度、塞棒位置或拉坯速度来控制结晶器液位的稳定；其原理都是一样的，通过控制进出结晶器的钢水流量平衡来实现控制目的的。

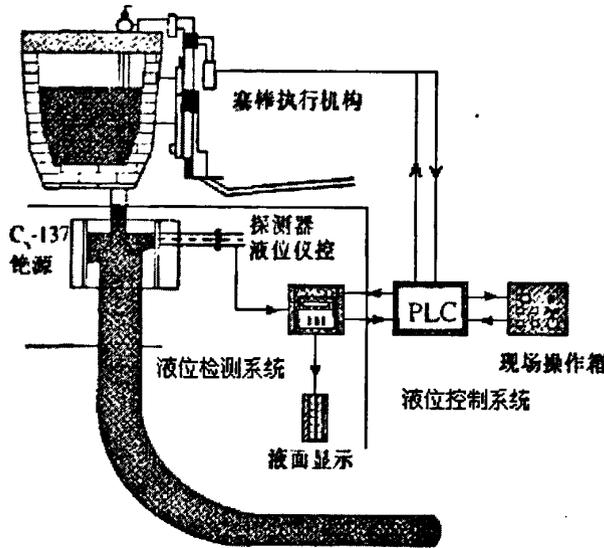


图2.1 连铸机结晶器液位控制系统结构图

Fig. 2.1 system structure diagram of the mold level control of continuous casting

2.1 液位控制方法的选择

文献[18]和[39]分别对三种液位控制方法的特点作了阐述，通过对流量控制和拉速控制结晶器液位的比较可以得出，当浇铸普通碳钢或对质量要求不高的钢种时，两种控制方法均可采用。拉速控制液位是线性的，但速度不稳定会影响铸坯的质量。目前在炼钢厂一般采用滑动水口或塞棒来调节中间包到结晶器的钢水流量，为了提高执行机构的快速性，这两种装置均采用液压系统来驱动。由于连铸生产是在一千多度的高温下进行的，不但结晶器液位系统中相关参数的检测和控制比较困难，而且诸如液压执行机构、阀门等元件和设备也易于腐蚀损坏，这使得结晶器液位控制存在诸多不利因素和较多的非线性影响，建模也极为困难。虽然存在着以上困难，但是恒拉速对铸坯质量的稳定起到很大作用。

在连铸结晶器液位控制中，由于流量型液位控制方法应用的比较多、比较成

熟, 所以在此系统中采用此法。其中流量控制有两种形式: 一种是通过调节滑动水口的开度来调节中包进入结晶器的流量, 另外一种是通过调节塞棒和浸入式水口之间的间隙来改变流量。此系统中是通过调节塞棒来改变流量的。

2.2 液位检测方法的选择

对于浇铸横截面积较小的小方坯结晶器, 使用放射性同位素液位检测法比使用其它检测方法更为方便准确。放射源有 Cs^{137} 和 Co^{60} 两种, 近年来在新设计的结晶器液位检测系统中多用 Cs^{137} 。 Cs^{137} 的辐射强度不大于 6mCi , 半衰期为30年, 熔点高达 2050°C 。它比 Co^{60} 的辐射强度小22倍, 使用寿命提高6倍, 熔点提高 575°C , 源罐重量轻 $3\sim 5$ 倍。 Cs^{137} 辐射强度低容易屏蔽, 50mm 厚铅皮可将 Cs^{137} 剂量降低200倍, 而 Co^{60} 只能降低12倍。同时结晶器液面与拉速建立自动连锁, 减少了人为控制液面的随意性和不稳定性, 显著提高了铸坯的质量。

这种方法具有测量精度较高、动态响应较灵敏、性能可靠稳定、安装方便, 免维护的优点, 且该方法使用范围广、寿命长。因此本系统采用放射性同位素(Cs^{137})液面检测法。

结晶器钢水液位检测系统由YWJ-1结晶器液位计构成。YWJ-1型液位计是一个以80C196微处理器为核心的液位测量仪表, 它使用高效闪烁体探测器LB6639及同位素(Cs^{137})源, 放射源的长度为 180mm , 辐射强度为 2mCi , $130\text{mm}\times 130\text{mm}$ 结晶器放射源中心线到闪烁探测器的距离为 247.5mm , $160\text{mm}\times 160\text{mm}$ 结晶器放射源中心线到闪烁探测器的距离为 393mm , 有效的校正了小方坯连铸液位计非线性失真的问题^[40]。闪烁探测器安装完成后使用软件五点四段法标定输出特性曲线, 使探测器内前置放大器输出标准电脉冲的测量计数率在 $2900\sim 29000$ 之间。闪烁探测器自身不带冷却水套, 靠结晶器水套内的冷却水冷却。探测器将 γ 射线粒子信号转化为电脉冲信号后, 经过液位计处理, 得到正比于钢水液面高度的 $4\sim 20\text{mA}$ 电流液位信号, 并实时把液位信号送给PLC处理机。其主要的技术指标如下:

检测形式:	Cs^{137} 放射源检测系统
检测范围:	$0\sim 150\text{mm}$
正常控制液面高度:	$110\pm 5\text{mm}$ (距结晶器铜板上口)
可检测到的最高液位:	90mm (距结晶器铜板上口)
可检测到的最低液位:	200mm (距结晶器铜板上口)
精度:	约为测量范围的 $\pm 3\%$, 正常的统计涨落除外。
滤波整定时间参数:	$0.05\sim 10\text{s}$

环境温度：液位计： 0~50℃
探测器： -20~+50℃

供电电源： AC 220V±10%、 50Hz

液位检测结果由液位计转换成数码显示。

YWJ-1 型连铸液位计系统组成：

- 线状源和屏蔽体一套。
- 10 米耐高温铠装电缆闪烁探测器一只(标准配置)。
- 中继箱一个。
- YWJ-1 型连铸液位计二次仪表一台。

2.3 液位控制系统执行机构的选择

2.3.1 执行机构种类与选择

在结晶器钢水液位自动控制系统中，执行器是很关键的一环，和其它控制系统一样，往往系统无法运行的原因全在执行器。由于连铸结晶器液位自动控制系统工作在温度高、环境恶劣的情况下，因此对执行器提出了更高的要求^[39]：

- 1) 能适应连铸的恶劣环境，包括粉尘与高温；
- 2) 易于安装、更换和维护；
- 3) 具有极小的死区，滞后时间要小，响应要快；
- 4) 具有较好的线性度。

目前，有5种执行器方式^[18, 19]：

1) 液压执行器方式

该方式的特点是速度快、线性好。国外及进口的连铸结晶器钢水液位控制系统，大多采用这种方式。由于中间包的移动，而油箱和油泵等在地面，虽然使用软管连接，但终究不方便。为了实现位置控制，需要位置传感器(一般为差动变压器)，且大都是模拟量，数字控制时需要变换，会带来误差。

2) 电气交流无刷伺服电机执行装置方式

它是近年来发展起来的，兰州钢厂薄板坯连铸的结晶器钢水液位自控系统就是采用这种方式。但由于有减速机，难以做到体积小、重量轻(也有使用低速交流电动机，VVVF变压变频装置，从而取消减速机的)，且会因卡堵而易损坏电动机。

3) 低惯量交流无刷伺服电动缸方式

这是一种由法国 SERT 公司开发的新型的电动缸，将交流伺服技术和气动缸技术用于连铸，目前国内已有很多钢厂采用这种方式，它机构简单，安装维护方便，

精度高。

4) 高精度数字气动缸方式

这是我国开发的一种新型连铸结晶器钢水液位自控执行器，它是将机床的数字气动缸技术用于连铸。它已成功地用于重钢的板坯连铸，液面控制精度已稳定在 $\pm(1\sim 2)\text{mm}$ 。

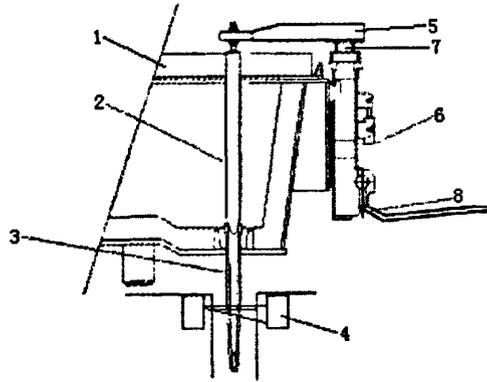
5) 高精度数字电动缸方式

近几年，由北京亿美博科技有限公司推出的数字电动缸结构上采用混合式高扭矩步进电机和丝杆等机构，接受“脉冲+方向控制”信号，其应用优点是全数字脉冲控制，精度高，不怕卡堵和损坏设备，并且是开环控制，因此速度快，无需位置测量装置，结构简单、便于维护。天津钢管集团有限公司六流圆坯连铸机结晶器钢水液位自动控制系统改造为高精度电动数字缸塞棒控制系统，有效地克服了液压伺服结晶器液面控制系统的缺陷，系统响应速度和控制精度大大提高，使结晶器液位控制精度稳定在 $\pm 2\text{mm}$ 。

在上述阐述的各执行机构方式特点的基础上，通过对比，确定此系统中执行机构采用高精度数字电动缸方式。

2.3.2 系统执行机构配置

在系统中，塞棒数字电动执行机构是由机械设备开坯器和数字电动缸等部分组成，机械开坯器主要由中间包安装底板、升降轴及气路等部分组成。如图 2.2 所示。



1、中间包 2、塞棒 3、保护水口 4、放射性同位素液位检测装置
5、塞棒开坯器 6、数字电动缸 7、升降丝杠 8、手动装置

图 2.2 塞棒执行机构图

Fig. 2.2 Structure diagram of stopper actuator

开坯器是塞棒控制系统中的重要环节，数字电动缸对塞棒的控制要通过开坯

器来实现，整个控制系统的精度会受到开坯器执行机构的影响。为能确保在高温情况下升降平滑，并保证长期工作不变形，该机构设有冷却气路对数字缸和升降轴进行冷却。另外加装防尘保护罩，可防止灰尘进入轴承内，更可靠的保证了使用的安全可靠，保证了液面控制精度。

开坯器主要技术参数及安装要求：

升降轴从零位上行：60mm

下行：40mm

轴与轴套的间隙： 0.4mm~0.45mm(上边)

0.35mm~0.4mm(下边)

冷却： 对数字缸、升降轴、横梁进行冷却

安装： 需保证升降轴部分轴线处于铅垂方向，并在原塞棒机构的位置。

数字电动缸采用免维护设计，采用混合式高扭矩步进电机，使得其在超过 2 亿次往复运动时，无需对机械系统添加任何润滑剂；数字电动缸接收数字信号，避免了模拟信号传输中造成的干扰，且在长期使用中不用进行参数的调整或修改。耐高温步进电机采用高温恒流设计，能够在 180℃的环境中长期正常工作。具有设备轻巧、反应迅速、微动性好、推力可调、节省能源的特点。数字电动缸的性能指标如表 2.1 所示。高精度高扭矩步进电机为四相八拍，其中两相间串联，接受 PLC “脉冲+方向控制” 信号，驱动并控制执行机构的升降，从而带动塞棒上下运动，完成塞棒对由水口流出的钢水流量的调节，具体参数如表 2.2 所示。

表 2.1 高精度数字电动缸传动性能指标

Table 2.1 Transmisson performance index of high-precision digital electric cylinder

指 标	参 数
能耗(W)	400
行程(mm)	120
微动精度(mm)	0.01
响应时间(ms)	<0.5
工作温度(℃)	180
运行速度(mm/s)	100

表 2.2 高精度步进电机性能指标

Table2.2 Performance index of high-precision stepping motor

指 标	参 数
电机类型	混合式高扭矩步进电机(四相八拍)
电机导通方式	A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A
密闭等级	IP65
最大速度(mm/s)	100(2000 转/秒)
响应时间(ms)	<0.5
最大驱动力(N)	500
最小工作温度(°C)	0
最大工作温度(°C)	180
内部工作温度(°C)	100-130
重量(kg)	22

2.4 小方坯连铸机结晶器液位控制系统方案设计

本文的控制对象是北京首钢第二炼钢厂 5[#] SG-8 型小方坯连铸机(130mm×130mm)。该机能同时拉出八流小方坯，结晶器液位控制系统能够同时控制八个结晶器的液位。

2.4.1 液位控制系统的设计要求

根据现场实际生产情况，液位控制系统的设计要求如下：

1) 系统技术指标：

塞棒最大行程：	120mm
控制精度：	±5mm
系统响应时间：	≤10ms
塞棒最大动作速度：	100mm/s
塞棒最大驱动力：	≥400N

2) 系统具备自动、半自动及手动操作功能，实现手动—自动无忧切换；

3) 手动开浇后，转自动连续浇铸，实现液面自动调节；

4) 系统稳定性好, 在更换钢包及水口或受到外界因素引起液位波动后, 能够迅速达到稳定状态;

5) 具有溢钢漏钢紧急关闭功能;

2.4.2 液位控制系统方案及控制原理

根据综合比较, SG-8 小方坯连铸机结晶器液位控制系统的设计, 采用放射性同位素检测技术与高精度数字电动缸技术相结合来实现结晶器钢水液位的闭环自动控制。控制系统控制方案如图 2.3 所示。

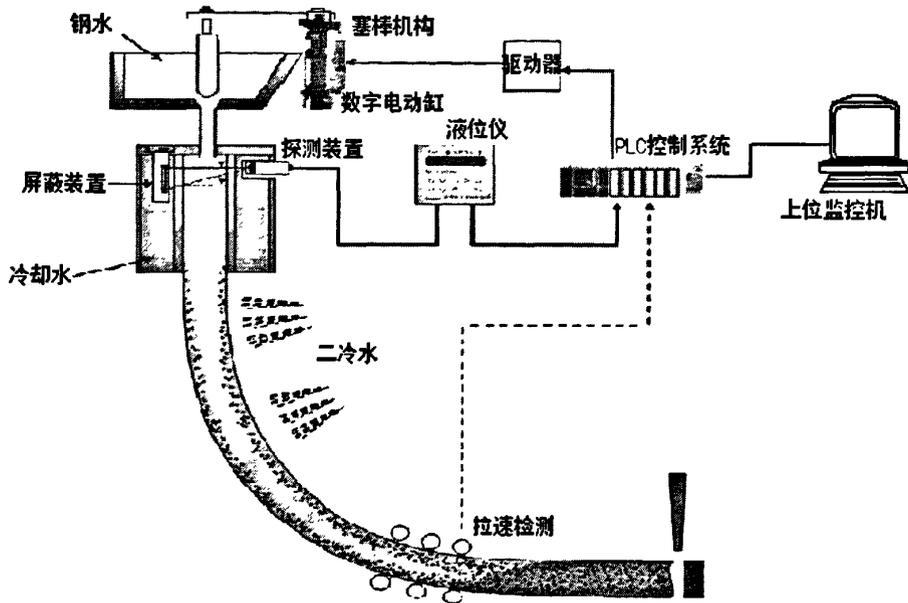


图 2.2 结晶器液位控制系统控制方案图

Fig. 2.2 Control assumption diagram of mold level control

该系统主要包括: 放射性同位素检测系统、PLC 控制器、塞棒驱动器、高精度数字电动缸执行器、塞棒机构、现场操作箱及实现数据采集和监视的上位机系统组成。

控制原理: 系统采用放射性同位素检测装置对结晶器液位进行检测, 通过 Cs^{137} 传感器能够测出结晶器内钢水液位的高度信号, 经液位计转换成 4~20mA 的电流信号, 实时地传送到 PLC 中央控制单元, PLC 读取液位测量值并经模/数转换和数字滤波处理, 将处理后的测量值与系统的设定值进行比较, 其差值经控制器运算后, 将输出的脉冲信号转换成控制数字电动缸的数字信号输出, 控制数字电动缸驱动中间包塞棒执行机构, 调节塞棒, 改变水口开度, 以实现钢水的流量控制, 保证结晶器内钢水液位稳定。

PLC 系统与上位机留有足够的通信接口,一方面接受来自上位机的相关信号,对结晶器液位控制系统进行调控;另一方面将系统工作状况及时反馈给上位机,在事故状态下发出紧急控制信号。

一旦当液位高度超出或低于允许的控制范围时,系统给出报警信号并且进行延时关闭塞棒,以避免溢钢或漏钢事故发生。当传感器在使用中损坏或检测信号不能正常传递时,系统默认设定值,维持正常生产浇铸,系统发出报警;当系统因外部原因突然掉电时,连锁全部断开,自动至于手动操作状态。

2.4.3 液位控制系统工艺实现描述

1) 系统工作模式

系统的工作模式由现场操作箱上的模式选择开关设定。

系统分为人工、点动(半自动)和自动三种操作模式:在任意模式下,系统均能实时反馈结晶器内的钢水液位值,检测液位上、下限越界(一般性异常报警),检测液位溢钢、漏钢(严重故障报警),并将液位的设定值和实际检测值显示在液位仪和上位机上。

A. 手动模式

模式选择开关设置在“手动”位置时,系统进入手动控制模式。在该模式下,塞棒的位置调节完全由人工通过撬杠实现控制。

B. 点动模式

模式选择开关设置在“点动”位置时,系统进入点动控制模式。在该模式下,塞棒的位置调节由现场操作箱上的“点动上升”和“点动下降”按钮控制;一般用来测试步进电机工作是否正常,也可以进行手持器人工控制。

C. 自动模式

模式选择开关设置在“自动”位置时,系统进入自动控制模式。在该模式下,塞棒的位置调节由系统根据液位的设定值及检测的实际值进行调节,自动给定塞棒的位置。

2) 液位上、下限报警

液位限制信号分为液位自动允许上、下限、液位报警上、下限、溢钢、漏钢;系统必须处于自动允许上下限范围内,同时液位检测仪和塞棒执行机构正常是才能进入自动模式;进入自动模式后,如果出现液位上下限报警,系统会继续工作,一旦出现溢钢信号,系统能够马上关闭塞棒,系统必须返回手动方式才能正常工作,此时可以由手动操作塞棒来进行控制。

3) 塞棒“点动”控制

当系统处于“点动模式”时,可以使用现场操作箱上的“点动上升”和“点动下降”按钮,直接控制塞棒升降,以调节塞棒的开度。其他模式下,这两个按钮无效;该模式通常用于对塞棒控制器的检测和调试,正常工作时慎用。

4) 液位设定

液位设定在上位机系统中进行,系统得电后自动给定液位的缺省设定值,它被作为液位控制调节的基准值,参与液位调节控制。使用该调节时,应保证液位的设定值不偏出液位控制的上下限位置,正常工作时慎用。

5) 自动允许

在现场操作箱上,设置了“自动允许”指示灯。系统开浇时,结晶器为空,液位检测值将低于下限和漏钢限值,此时,系统禁止进入自动模式。当液位高度接近设定值时,系统给出自动允许,此时,系统可以进入“自动”工作模式。

6) 急停

为了系统安全,如果系统出现溢钢信号,系统将自动关闭塞棒,操作人员也可以根据现场情况使用现场操作箱上的急停按钮来关闭塞棒;为了避免系统出现不工作的紧急情况,操作人员可以直接用现场操作箱上按钮关闭驱动器电源切换到人工控制。

2.5 小结

本章通过上一章介绍的结晶器液位控制系统的一般结构形式、液位控制算法,比较了不同的液位控制方法、液位检测方法和执行机构方式,进行了系统工艺实现的描述,在此基础上结合 5#连铸机结晶器液位控制系统的设计要求,确定小方坯连铸机结晶器液位控制系统采用放射性同位素检测技术与高精度数字电动缸技术相结合来实现结晶器钢水液位的单闭环自动控制。本章还阐述了液位控制系统的工作原理,采用这种结构形式小方坯连铸机结晶器液位控制比较稳定,响应速度快,为液位控制系统的软硬件设计及系统仿真奠定了基础。

第 3 章 结晶器液位控制系统控制器设计与仿真

结晶器液位的检测与控制是连铸过程控制的重要环节之一，自从结晶器液位控制系统采用自动控制以来，PID 控制方法就因原理简单，使用方便、鲁棒性强等特点而被广泛应用于结晶器控制系统。但是和其他冶炼过程一样，在结晶器液面控制过程中受到许多随机干扰和非线性时变特性的干扰，诸如不均匀的拉速、中间包出口通道中的不规则流动、结晶器中的紊流和波动、结晶器内熔池的振动、结晶器振荡、塞棒头的侵蚀等。常规的 PID 控制满足不了越来越高的自动化生产和高质量的要求。随着现代控制理论的飞速发展，在原来常规的 PID 控制的基础上发展了许多新的控制方法^[41]。本系统就是在原有常规 PID 控制的基础上，采用以数字 PID 控制为主模糊控制为辅的 Fuzzy-PID 复合控制。系统的特点为：

● 稳态时采用常规数字PID控制，消除静差，提高控制精度。出现干扰时采用模糊控制算法进行控制，使执行器快速动作，对干扰进行提前抑制，确保钢水液位快速进入稳态。

● 采用步进式数字电动缸作为执行机构，使控制算法由单闭环控制代替传统的双闭环控制，将系统优化为比较简单的一阶控制系统，更易于模型计算与判断，整个控制系统的响应速度和控制精度得到了很大的提高。

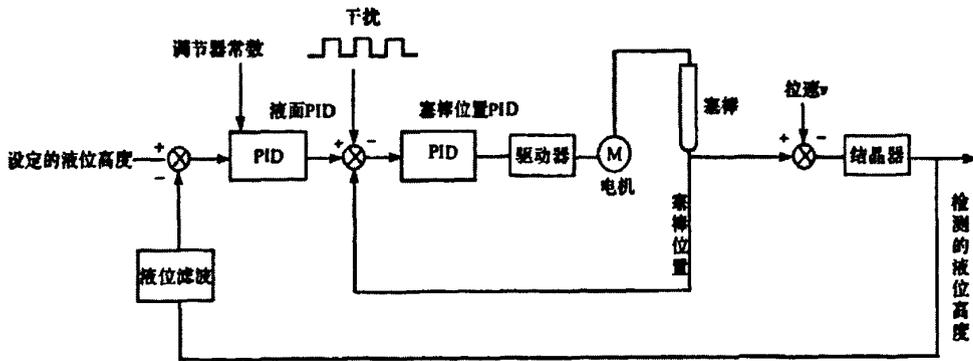


图3.1 结晶器液位串级控制

Fig. 3.1 Cascade control of mold level control

3.1 结晶器液位串级控制的简化

由文献[20]所设计的结晶器液位串级控制已经得已广泛的应用，该系统有两

个闭环控制回路，如图3.1所示。其中一个塞棒的位置控制(副回路)，电动缸位移偏差 ΔS 经过副回路PID控制器，控制中间包水口开度，调节钢水从中间包流入结晶器的流量，以维持钢水液面的稳定。一个是结晶器的液位控制(主回路)，液位偏差 ΔH 送主回路PID控制器，主回路PID控制器的输出作为电动缸的行程设定值，前者嵌套在后者内部。同时系统还会根据拉坯速度的变化调整结晶器液位高度，它是液位—塞棒—拉速结合在一起的控制方法^[38]。

本系统是在结晶器液位串级控制基础上，采用数字电动缸作为执行器，接受数字脉冲控制信号后，可以开环完成高精度的定位(控制系统根据液面误差送出的塞棒机构新位置)控制，因而能使整个系统实现直接液位单闭环控制。单闭环控制系统又被称为一阶控制系统，有极好的微动性和快速反应能力。因此简化了串级控制中塞棒位置控制回路(副回路)，只保留了结晶器液位控制回路(主回路)，如图3.2所示。

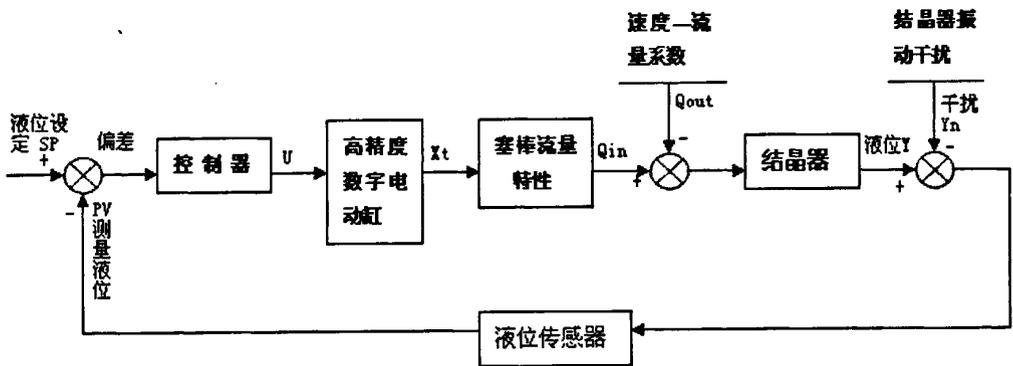


图3.2 简化后的结晶器液位控制框图

Fig. 3.2 Simplified control block diagram of mold level control

本系统主要包括：液位控制器、数字电动缸、塞棒流量特性、拉速特性、结晶器、同位素液位检测传感器及干扰等环节。液位控制器根据液位偏差信号输出电信号 U ；数字电动缸将 U 信号转换成塞棒的位置输出信号 X_t ；塞棒流量特性根据 X_t 转换成浸入式水口流入结晶器的流量 Q_{in} ，再结合拉速的流出流量 Q_{out} ，最后经结晶器特性输出液位信号 Y ；同位素液位检测传感器采集带有干扰的液位信号 PV 返回给控制器；从而实现结晶器钢水液位的闭环控制。

3.2 PID 控制方法简介

3.2.1 PID 控制液位原理

PID控制液位的原理是：液面高度 $h(t)$ 是流入结晶器钢水量与流出结晶器钢水

量的积分。

$$h(t) = \frac{1}{A} \int_0^t (q_{in}(\tau) - q_{out}(\tau)) d\tau = \frac{1}{A} \int_0^t (A \cdot v(t) - C_d \cdot F(\delta)) d\tau \quad (3.1)$$

其中

$h(t)$ ——结晶器内钢水实际液位, m;

$q_{in}(t)$ ——流入结晶器钢水量, m^3/s ;

$q_{out}(t)$ ——流出结晶器钢水量, m^3/s ;

A ——结晶器横断面积, m^2 ;

$v(t)$ ——拉坯速度, m/s;

C_d ——塞棒的流量系数;

$\delta(\tau)$ ——塞棒的开度, %

结晶器钢水液位PID控制是按设定液位值与实际测量的液位值偏差的比例、积分和微分线性组合的控制方式。

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt}] \quad (3.2)$$

式中 $e(t)$ ——位偏差值; $u(t)$ ——塞棒控制输入量; K_p ——比例系数; T_i ——积分时间常数; T_D ——微分时间常数。

或写成传递函数形式

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s) \quad (3.3)$$

在PID控制中, 设定 K_p , T_i , T_D 参数是关键。它与钢种、结晶器横断面尺寸、拉速等有关。首先建立控制系统数学模型, 通过Matlab进行仿真, 调整优化 K_p , T_i , T_D 等参数, 再依据仿真结果并结合现场实际进行微调。

3.2.2 数字PID控制算法

在模拟PID调节器基础上发展起来的数字PID控制算法, 广泛使用在简单回路计算机控制系统以及PLC控制系统中, 通常又分为位置式PID控制算法和增量式PID控制算法。

本结晶器钢水液位控制系统由PLC控制, 由于PLC控制是一种采样控制, 它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量, 因此位置式PID控制算法中的积分和微分项不能直接使用, 需要进行离散化处理。按模拟PID控制算法的算式, 现以一系列的采样时刻点 kT 代表连续时间 t , 以和式代替积分, 以增量代替微分, 则可作如下近似变换:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (3.4)$$

其中 k ——采样序列, $k=0, 1, 2, 3, \dots$;

$u(k)$ ——第 k 次采样时刻的计算机输出值;

$e(k)$ ——第 k 次采样时刻输入的的输出值;

$e(k-1)$ ——第 $(k-1)$ 次采样时刻输入的的输出值;

K_I ——积分系数, $K_I = K_p \frac{T}{T_I}$, T 为采样时间;

K_D ——微分系数, $K_D = K_p \frac{T_D}{T}$, T 为采样时间。

但是由于位置式PID控制算法是全量输出, 所以每次输出均与过去的状态有关, 计算时要对 $e(k)$ 进行累加, PLC运算工作量大。而且, 因为PLC输出的 $u(k)$ 对应的是执行机构的实际位置, 如PLC出现故障, $u(k)$ 的大幅度变化, 会引起执行机构位置的大幅度变化, 这种情况往往是生产实践中不允许的, 在某些场合, 还可能造成重大的生产事故, 因而产生了增量式PID控制的控制算法。所谓增量式PID是指数字控制器的输出只是控制量的增量 $\Delta u(k)$ 。

增量式PID控制算法, 当执行机构需要的是控制量的增量(例如驱动步进电动机)时, 如图3.3所示,

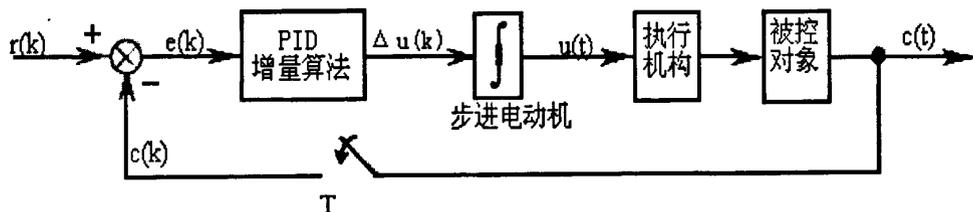


图 3.3 增量式 PID 控制算法框图

Fig. 3.3 Algorithm block diagram of increment PID control

可由上式(3.4)导出提供增量的PID控制算式。根据递推原理可得

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_I \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \quad (3.5)$$

式(3.4)与式(3.5)相减, 可得:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (3.6)$$

式中 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$;

$$\Delta e(k-1) = e(k-1) - e(k-2)。$$

可以将式(3.5)进一步改写为

$$\Delta u(k) = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (3.7)$$

$$\text{式中 } A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T}\right)$$

$$B = K_p \left(1 + 2\frac{T_D}{T}\right)$$

$$C = K_p \frac{T_D}{T}$$

它们都是与采样周期、比例系数、积分时间常数、微分时间常数有关的系数。

可以看出, 由于一般PLC控制系统采用恒定的采样周期 T , 一旦确定了 K_p , K_i , K_d , 只要使用前后3次测量值的偏差, 即可求出控制增量。采用增量式算法时, PLC输出的控制增量 $\Delta u(k)$ 对应的是本次执行机构位置的增量。对应执行机构实际位置的控制量, 即控制量增量的积累 $u(k) = \sum_{j=0}^k \Delta u(j)$ 需要采用一定的方法来解决, 例如用有积累作用的元件(如步进电动机)来实现; 而目前较多的是利用算式 $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ 通过执行软件来完成。

增量式PID控制虽然只是算法上作了一点改进, 却带来了不少优点:

(1) 由于PLC输出增量, 所以误动作时影响小, 必要时可用逻辑判断的方法去掉。

(2) 手动/自动切换时冲击小, 便于实现无扰动切换。

(3) 算式中不需要累加。控制增量 $\Delta u(k)$ 的确定仅与最近 k 次的采样值有关, 所以较容易通过加权处理而获得比较好的控制效果。

但增量式PID控制也有其不足之处: 积分截断效应大, 有静态误差; 溢出的影响大。因此, 在选择时不可一概而论, 一般以步进电动机或电动阀门作为执行器的系统中, 则可采用增量式PID控制算法, 而在以晶闸管作为执行器或在控制精度要求高的系统中, 可采用位置式PID控制算法^[42]。

本系统中是使用高精度步进电机来驱动塞棒执行机构的, 因此作为整个系统控制核心的PLC则使用增量式PID控制算法。

3.2.3 PID控制的特点

在PID控制算法中, 存在着比例、积分、微分三种控制作用。比例控制能迅速反应误差, 从而减小稳态误差。但是, 比例控制不能消除稳态误差。比例放大系数的加大, 会引起系统的不稳定。积分控制的作用是, 只要系统有误差存在, 积分控制器就不断地积累, 输出控制量, 以消除误差。因而, 只要有足够的时间, 积分控制将能完全消除误差, 使系统误差为零, 从而消除稳态误差。积分作用太

强会使系统超调加大,甚至使系统出现振荡。微分控制可以减小超调量,克服振荡,使系统的稳定性提高,同时加快系统的动态响应速度,减小调整时间,从而改善系统的动态性能。根据被控对象的不同,适当地调整PID参数,可以获得比较满意的控制效果。因为其算法简单,参数调整方便,并且有一定的控制精度,因此它已成为当前最为普遍采用的控制算法。

PID控制算法也有它的局限性和不足,由于PID算法只有在系统模型参数为非时变得情况下,才能获得理想的效果。当一个调好参数的PID控制器被应用到模型参数时变系统时,系统的性能会变差,甚至不稳定。另外,在对PID参数进行整定的过程中,PID参数的整定值是具有一定局域性的优化值,而不是全局性的最优值,因此这种控制作用无法从根本上解决动态品质和稳态精度的矛盾。

3.3 模糊控制算法

模糊控制理论是在美国自动控制理论专家L.A.Zadeh^[42]于1965年建立的模糊集合论的数学基础上发展起来的。它是用语言归纳操作人员的控制策略,运用语言变量和模糊集合理论形成控制算法的一种控制^[43]。把模糊逻辑应用于控制领域则始于1973年。1974年英国的E.H.Mamdani成功地将模糊控制应用于锅炉和蒸汽机的控制。此后20多年来,模糊控制不断发展并在许多领域中得到成功应用^[44]。

3.3.1 模糊控制的特点

从广义上讲,模糊控制是基于模糊推理,模仿人的思维方式,对难以建立精确数学模型的对象实施的一种策略。它是模糊数学同控制理论相结合的产物,同时也是智能控制的重要组成部分。模糊控制的突出特点在于:

(1)、控制系统的设计不要求知道被控对象精确数学模型,只需要提供现场操作人员的经验知识及操作数据。

(2)、控制系统的鲁棒性强,适应于解决常规控制难以解决的非线性、时变及大滞后等问题。

(3)、以语言变量代替常规的数学变量,易于形成专家的“知识”。

(4)、控制采用“不精确推理”(Approximate Reasoning)。推理过程模仿人的思维过程。由于介入了人类的经验,因而能够处理复杂甚至“病态”系统。

综上所述,模糊控制和常规控制(如PID调节)相比具有无须建立被控对象的数学模型,对被控对象的时滞、非线性和时变性具有一定的适应能力等优点,同时对噪声也具有较强的抑制能力,鲁棒性较好。但它也有一些需要进一步改进和提高的地方。模糊控制器本身消除系统稳态误差的性能比较差,在控制点附近的一

个控制上存在着盲区和死区，难以达到较高的控制精度^[44]。

3.3.2 结晶器液位Fuzzy-PID复合控制算法

通过对常规PID控制和模糊控制特点的分析，对于结晶器钢水液位这样的具有滞后性、非线性、时变性的控制对象，单纯采用常规PID控制或模糊控制都不会取得较好的控制效果。大量的理论研究和工程实践也充分证明的这一点。而采用Fuzzy-PID复合控制方法控制结晶器钢水液位高度是一个比较好的解决办法。此系统的控制思想是，当液位偏差较大时采用模糊控制，以加快系统响应的速度；当偏差较小进入稳态过程后，则由程序切换到常规PID控制，消除静差，提高控制精度。

系统以塞棒控制液位，将液位检测传感器检测到的液位信号与设定的液位信号进行比较，计算出液位偏差及偏差变化率，并进行模糊化、模糊推理和解模糊计算后，送给实际的塞棒位置控制器，其输出值为控制塞棒位置的高精度数字电动缸的脉冲值。就这样通过控制塞棒位置，控制流入结晶器的钢水流量，进而达到控制结晶器的液位。其控制框图如图3.4所示

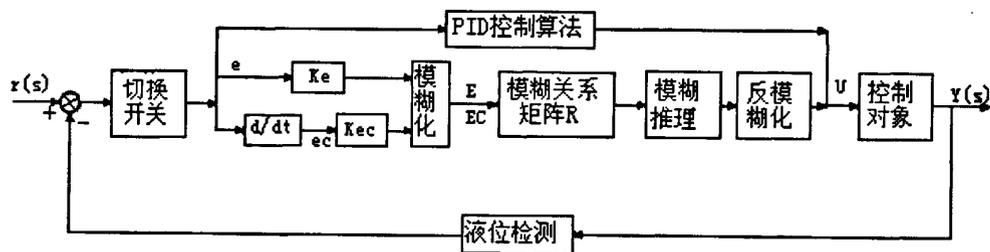


图 3.4 Fuzzy-PID 复合控制框图

Fig. 3.4 Control block diagram of Fuzzy-PID composite control

3.4 液位控制系统建模

在控制系统仿真之前，需要对控制系统中各个部分进行数学模型的建立。

1、高精度数字电动缸模型

本系统中高精度数字电动缸采用混合式高扭矩步进电机作为驱动装置。步进电机的传递函数是一个典型的二阶系统，它与电流、输出角位置、角速度、转动惯量、齿数及粘滞阻尼系数有关^[45]。根据文献[46]，可以简化为一阶惯性环节：

$$G_d(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1} \quad (3.8)$$

其中： $K_1 = 1$ ， T_1 为0.23s。

2、塞棒流量特性模型

(1)、静态流量特性

塞棒流量特性是指塞棒位置与结晶器钢水流入量之间的关系，即：

$$Q_{in} = f(X_t) \quad (3.9)$$

式中 Q_{in} 为结晶器钢水流入量。

中间包到结晶器之间的浸入式水口较长且之直径较小，必须考虑水口上的压力损失，塞棒的工作流量特性可用如下模型表示：

$$\frac{Q_{in}}{Q_{max}} = f\left(\frac{X_t}{X_{t,max}}\right) \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{P_v} - 1\right)\left[f\left(\frac{X_t}{X_{t,max}}\right)\right]^2 + 1}} \quad (3.10)$$

其中： $X_{t,max}$ 为塞棒的最大开度， Q_{max} 为塞棒处于最大开度时钢水的最大体积流量， P_v 表示塞棒全开时塞棒节流口处压降占总压降的百分比， $f(\bullet)$ 为塞棒节流口的理想流量特性（也称设计流量特性），可从产品手册中查到，一般为百分比或对数流量特性， P_v 可通过实验测定。

实际上节流元件的流量特性很难用一个公式精确表达，给出的结果主要用于固有流量特性的选择及近似补偿，建模时的流量特性应在产品手册的基础上经辨识修正^[47]。

(2)、动态流量特性

塞棒位置到结晶器钢水流入量之间的动态特性主要为延迟特性，由浸入式水口的流量传输引起，采用文献[48]中的结果，用一阶惯性环节代替：

$$G_s(s) = \frac{K_Q}{T_2s + 1} \quad (3.11)$$

其中： K_Q 取结晶器截面积 A_M ， T_2 一般取 0.4~0.8s，本系统取 0.5s。

3、拉速特性模型

拉速 V 决定了流出结晶器的钢水流量 Q_{out} ，其关系由拉速—流量转换系数 K 文献[18]给出如下关系：

$$Q_{out} = KV \quad (3.12)$$

其中 K 为结晶器截面积 A_M

4、结晶器模型

结晶器液位是一个典型的积分环节，由钢水输入流量、输出流量及增益共同决定，其关系如下：

$$Y = \frac{Q_{in} - Q_o}{A_M} \quad (3.13)$$

如果考虑到结晶器有很小的延时，故可用一阶惯性环节表示，文献[18]给出了数学模型：

$$G_j(s) = \frac{K_3}{T_3s + 1} \quad (3.14)$$

其中： K_3 为结晶器截面积 A_M 的倒数， T_3 取0.1s。

5、同位素液位检测传感器模型

文献[17]中指出同位素液位检测传感器的数学模型比较复杂，受到噪声等因素影响比较多，而且存在非线性和时滞性，因此液位检测传感器是一个时滞环节。对于时滞时间很小的时滞环节，可以简化成为惯性环节。结合文献[21]液位检测传感器具有如下一阶惯性环节的特性

$$G_c(s) = \frac{K_4}{1 + T_4s} \quad (3.15)$$

其中 $K_4 = 1$ ； T_4 取0.3s

6、结晶器振动参数

结晶器振动是液位检测的主要周期性干扰，用 Y_n 表示。振动主要有同步振动、负滑动振动和正弦振动三种，运动参数主要是振幅(S)和频率(f)。从工艺上看，频率高，铸坯处在一个运动状态中，这对防止粘结，脱模都有利；振幅小，结晶器内的钢液面波动小，浇注时容易控制又能减少拉裂。对于小方坯铸机， $f=75\sim 240$ 次/min(1.25~4Hz)； $S=3\text{mm}$ ^[12]。本系统中横截面130mm×130mm结晶器振动为正弦振动， $f=100$ 次/min(1.7Hz)， $S=8\text{mm}$ 。

3.5 结晶器钢水液位控制时的难题

上述的结晶器钢水液位控制各个环节模型仅描述了受控系统的基本特性，许多过程影响因素根本无法模型化，即使模型化，其精度也达不到控制要求。例如，在模型上有控制过程的时变性和许多不可测的干扰作用，使模型的精度达不到控制要求。下面阐述结晶器液位控制中的几个主要难题^[49]。

1、摩擦与后冲

塞棒通过一个开坯器连接在数字电动缸的升降丝杆上，这种机械连接可能包含摩擦和后冲，致使塞棒在任何情况下都无法准确定位，因此摩擦和后冲降低了受控系统的精度。

2、中间包水口和塞棒

中间包水口和塞棒的侵蚀，导致同样的塞棒位置，但是钢水流量不同。水口和塞棒粘上凝固钢液或突然脱落以及水口的堵塞和烧损，均会使塞棒特性曲线中的工作点发生突变和控制系统的特性变化。

3、沉积物的去除

除掉塞棒上和浸入式水口中的沉积物，可扩大流动横截面积，使流入结晶器的钢液量发生突变，液位升高。去除沉积物还会导致塞棒特性曲线的工作点发生突变和控制系统的特性变化。

4、钢种

钢水在塞棒和浸入式水口间的流动状态取决于钢种的黏度，因此钢种对塞棒特性曲线和受控系统特性均会产生影响。

5、结晶器液面波动

当热态连铸坯被拉出结晶器后，通过导向辊的振动会影响结晶器液位和拉坯速度。拉矫机电机电流也同样会产生振动。例如：在电机的驱动力矩中，振动发生的频率大约等于拉速与垂直辊间距的比值，可以视为受铸坯鼓肚的影响，铸坯鼓肚产生的振动是因为热态铸坯通过导向辊时，在辊间会发生周期性凸起，随后又被导向辊压辊。

6、结晶器振动

为了避免铸坯在结晶器内凝固并粘附于结晶器壁这种情况的发生，结晶器以一定的频率上下振动，从而影响结晶器液位的测量，结晶器液位的测量值PV(见图4.4)包含结晶器振幅，因此影响了结晶器液位控制的精度。结晶器振动频率是常量或随拉速变化的。

7、波动现象

观察表明，结晶器液面会产生波动，结晶器壁反射的表面波动形成驻波，前提是结晶器宽度必须是波长的整数倍，决定了波动的频率。因为结晶器的振动频率一定是波动频率的倍数，并且包含在结晶器液位测量中，结晶器振动也能引起控制过程中的波动。

上面难题中 1~4改变了受控系统的特性，5~7属于过程干扰。

由于以上几种原因，采用常规的PID控制很难达到令人满意的结果，必须开发其它方法。因此5#小方坯连铸机结晶器液位控制系统采用了Fuzzy-PID复合控制。

3.6 模糊控制器的设计

本系统采用的是Mamdani推理型模糊控制器。模糊控制器采用二维输入一维输出的结构^[50-53]，输入量选用设定的液位值与采样液位值之间的液位误差 e ，以及液位误差变化率 ec ，输出量选用控制量 u 。模糊控制器的设计是模糊控制的重点，它由模糊化、模糊规则及推理、反模糊化处理3部分组成。

3.6.1 精确量的模糊化

一般来说，结晶器液位控制过程通常要有很高的动态特性要求，综合实际生产要求，决定采用{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大} 7个元素的词集。同样，模糊输出也取为7档，这样形成的模糊关系矩阵将是一个方阵，有利于模糊推理计算。采用如下简记形式：

$$\{NL、NM、NS、ZO、PS、PM、PL\}$$

设液位误差 e 的论域为 X_e ，并将误差大小量化为13个等级，分别表示为-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6。则有：

$$X_e = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$$

同理液位误差变化率 ec 的论域为

$$X_{ec} = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$$

执行控制量 u 的论域为 Y_u ，并同输入量一样也把控制量的大小划分为13个等级，即：

$$Y_u = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$$

在系统中 e 的基本论域为 $[-80, +80]$ mm， ec 的基本论域为 $[-2, +2]$ mm/s，模糊集论域为 $[-6, +6]$ ，则 e 的模糊化因子 K_e 为： $\frac{6}{30} = 0.2$ ； ec 的模糊化因子 K_{ec} 为：

$$\frac{6}{2} = 3。$$

隶属度函数采用灵敏性较强的三角函数，如图3.5所示。

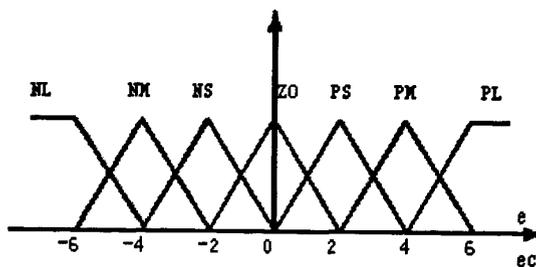


图 3.5 隶属度函数

Fig. 3.5 membership function

3.6.2 模糊控制规则及模糊推理

模糊控制的核心是模糊控制规则的建立，模糊自动控制规则的实质是把操作者的经验加以总结，并将在控制过程中由经验得来的相应措施总结成一条条控制规则。在得到输入误差 E 、偏差变化率 EC 和控制量 U 的模糊集后，对应二维模糊控

制器便可得到形如：if E=X and EC=Y then U=Z的一系列模糊控制规则语句，这种控制规则是总结人们的操作经验和思维过程，根据测得的液位误差和误差变化率，来判断应该施加的控制量。如：

If E =PL and EC=PS then U =NL;

If E =NS and EC=PS then U =ZO;

.....

通过经验共总结出49条这样的经验，将所有的经验总结为模糊状态表，如表3.1所示。

表 3.1 模糊状态表

Table 3.1 Table of fuzzy state

U \ E EC	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
PL	ZO	ZO	NS	NM	NL	NL	NL
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NL	NL
PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NL
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NL
NS	PL	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
NM	PL	PL	PM	PM	PS	ZO	ZO
NL	PL	PL	PL	PM	PS	ZO	ZO

模糊规则确定后，接着就进行模糊推理。模糊集合采用的是似然推理的方法，这种推理可以看成是一种模糊集合的变换和隶属度函数的演算。对三角分布隶属度函数，同时考虑工程运算的简便与快速性，拟采用Mamdani推理法。

此系统中具体的模糊推理运算的方法及步骤：

(1)根据总结出的模糊控制规则，确定并计算模糊关系，共49条。

$$R = \bigcup_{i=1}^{49} R_i = \bigcup_{i=1}^{49} E_i \times EC_j \times U_{ij} \tag{3.19}$$

则R的隶属函数为：

$$\mu_R(e, ec, u) = \bigvee_{i=1}^{49} \mu_{E_i}(e) \wedge \mu_{EC_j}(ec) \wedge \mu_{U_{ij}}(u) \tag{3.20}$$

(2)根据所求得的模糊关系，将输入的偏差和偏差变化率的模糊值矢量由合成

推理的方法求解输出量的模糊值矢量。

令输入量 e^* 和 ec^* 经输入量模糊化处理后得到输入量的模糊值矢量 E^* 和 EC^* ，对于每一条语句输出控制量为：

$$U_i = (E^* \times EC^*) \circ R_i \quad (3.21)$$

则控制器总的输出量为：

$$U = \bigcup_{i=1}^{49} U_i \quad (3.22)$$

综合上述，可得到对应模糊控制器的输出控制量的模糊值矢量为：

$$U = (E^* \times EC^*) \circ R \quad (3.23)$$

隶属函数为：

$$\mu_U(u) = \bigvee_{\substack{e \in E \\ ec \in EC}} \mu_E(e^*) \wedge \mu_{EC}(ec^*) \wedge \mu_R(e, ec, u) \quad (3.24)$$

3.6.3 反模糊化处理

通过模糊推理得到的结果是一个模糊集合，也可以说是一个模糊量；但实际模糊控制系统所需要的控制信号必须是精确量，要用一个确定的值才能去控制执行机构。因此，模糊控制器经过推理后的模糊输出量必须经过精确化处理，才能去控制被控对象。

此系统采用重心法解模糊，计算出模糊输出量 U 的精确值。其求解公式中 X 为各模糊标记值。由此可以得到控制变量的精确值 u^* ：

$$u^* = \frac{\sum_i \mu_U(u) \times X}{\sum_i \mu_U(u)} \quad (3.25)$$

此系统中的离散化形式的输出量模糊矢量而言，其输出模糊子集可表示为：

$$U = \frac{\mu_1}{-6} + \frac{\mu_2}{-5} + \frac{\mu_3}{-4} + \dots + \frac{\mu_{12}}{+5} + \frac{\mu_{13}}{+6} \quad (3.26)$$

则解模糊的计算方法可采用以下形式：

$$u^* = \frac{[\mu_1 \times (-6) + \mu_2 \times (-5) + \mu_3 \times (-4) + \dots + \mu_{12} \times (+5) + \mu_{13} \times (+6)]}{\sum_{i=1}^{13} \mu_i} \quad (3.27)$$

通过上述的具体计算过程，即可得到模糊控制器输入量 e^* 和 ec^* 所对应的精确输出 u^* ，由此建立起模糊控制器的查询表，如表3.2所示。

表 3.2 模糊控制查询表

Table 3.2 fuzzy control query table

U \ EC	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
E													
-6	0	0	0	5	5	5	5	5	5	4	4	4	-6
-5	0	0	0	3	3	3	4	4	4	4	4	4	-5
-4	0	0	0	2	2	3	4	4	4	4	4	4	-6
-3	5	4	4	3	2	3	3	3	3	3	4	4	-5
-2	6	4	4	3	2	2	2	2	2	3	4	4	-6
-1	5	4	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0	-5
0	6	4	4	3	2	1	0	0	-2	-3	-4	-4	-6
+1	5	4	4	1	0	0	-1	-1	-2	-3	-4	-4	-5
+2	6	4	4	1	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-6
+3	5	4	4	0	-3	-3	-3	-3	-2	-3	-4	-4	-5
+4	6	4	4	0	-4	-4	-4	-3	-2	-2	0	0	0
+5	5	4	4	0	-4	-1	-1	-1	-3	-3	0	0	0
+6	6	4	4	1	-5	0	5	0	-5	-5	0	0	0

3.6.4 结晶器液位Fuzzy-PID复合控制器

综上所述，此系统采用如下形式的Fuzzy-PID复合结晶器液位控制器：

$$u(t) = \begin{cases} u_{fuzzy}, e_2 < |y(t) - yr| \leq e_1 \\ u_{fuzzy}, e_3 < |y(t) - yr| \leq e_2 \\ u_{pid}, |y(t) - yr| \leq e_3 \end{cases} \quad (3.28)$$

式中， u_{fuzzy} 是根据模糊控制得到的控制量； u_{pid} 为PID控制量； yr 为液位设定值； $y(t)$ 为t时液位实际值。 $e_3 < |y(t) - yr| \leq e_2$ 为正常工作区， $|y(t) - yr| \leq e_3$ 为静态误差区，而 $e_2 < |y(t) - yr| \leq e_1$ 则为误差偏大区。此系统中 $e_1 = 30\text{mm}$ ， $e_2 = 10\text{mm}$ ， $e_3 = 5\text{mm}$ 。

在结晶器液位实际控制中，当液位误差5mm以内时，系统位于静态误差区，液位略有波动，系统采用PID控制，通过调节PID参数来消除静态误差，调节液位；当液位误差在5mm和10mm之间时，系统位于正常工作区，液位波动不大，系统采用模糊控制来调节液位；当液位误差在10mm和30mm之间时，系统位于误差偏大区，液位波动较大，此时系统继续使用模糊控制来调节液位，如果液位偏差在此范围内减小，系统继续进行自动调节，使液位趋于平稳；如果液位偏差连续增大

超过30mm,系统将输出液位报警,并将自动控制被转换成手动控制,此种状态大多数情况下是由于各种故障引起的,在实际应用很少会出现。

3.7 结晶器液位控制系统仿真研究

本系统使用Simulink作为系统仿真的工具。Simulink是一种基于Matlab的对于动态系统进行多域仿真和基于模型设计的平台,它增加了基于模型设计、系统级仿真和嵌入式系统实现的功能。它提供了一个互动式的图形环境以及可以自我定制的模块库,能够准确地设计、仿真、实现和测试控制系统、信号处理系统、通信系统和其他随时间变化的系统。另外Simulink还提供了分级建模、数据管理和子系统定制等工具,不管系统的复杂程度如何,都可以简便地创建并简明准确的表达出来。与其他仿真软件包用微分和差分方程建模相比。具有更直观、更方便、更灵活的特点^[54, 55]。

在结晶器液位控制系统各环节模型建立后,使用Simulink7.01工具箱对系统进行常规PID及Fuzzy-PID复合控制的仿真及研究。对于铸坯截面为 0.0169m^2 (130mm×130mm),结晶器振动频率为1.7Hz,振幅为8mm,拉速2.5m/min,设定液位100mm,仿真时间40s。对于常规PID仿真, $K_p=0.4$, $K_i=0.015$, $K_d=0.03$,采样周期 $T=0.45\text{s}$;对于Fuzzy-PID控制仿真,如果实际液位与设定液位的误差在5mm以内时,采用PID控制;液位误差在5mm和10mm之间以及液位误差大于10mm时,采用模糊控制。

针对上述被控对象,采用常规PID控制和Fuzzy-PID复合控制的仿真结果如下:

(1)采用两种控制曲线(无干扰)

采用常规PID控制算法,系统的响应曲线如图3.6所示。液位设定值为100mm,系统最大超调量 $\delta\%=5\%$,过度过程时间 $t_s=18\text{s}$ 。

采用Fuzzy-PID控制算法,系统的响应曲线如图3.7所示。液位设定值为100mm,系统系统基本没有最大超调量,过度过程时间 $t_s=12\text{s}$ 。

将两种控制曲线进行比较,Fuzzy-PID的最大超调量基本没有,过度过程时间比常规PID控制少6s。

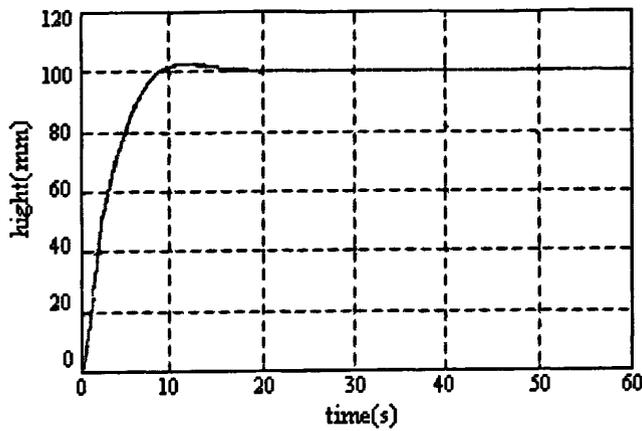


图 3.6 常规 PID 控制曲线仿真图

Fig. 3.6 Control simulation figure of conventional PID control

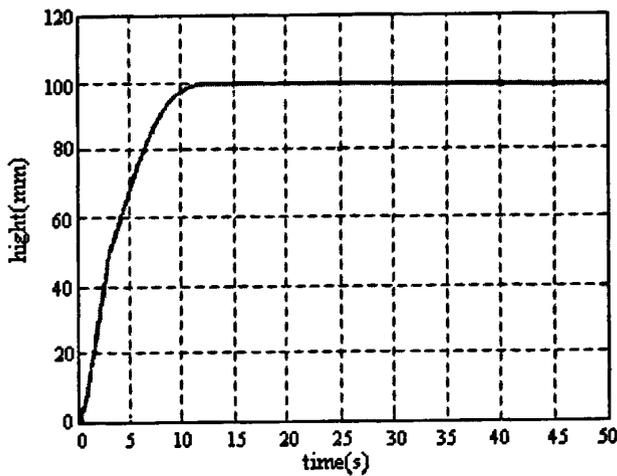


图 3.7 Fuzzy-PID 复合控制曲线仿真图

Fig. 3.7 Control simulation figure of Fuzzy-PID composite control

通过仿真，传统PID控制算法存在着过渡过程时间与超调量之间的矛盾，如图3.6所示，若要减小超调量，则过渡时间要增长；若要求过渡过程短，则必然出现较大的超调。这个矛盾无法通过调节PID参数得到解决。而Fuzzy-PID复合控制算法很好的解决了过渡过程时间与超调量之间的矛盾，如图3.7所示，过渡过程时间的长短几乎与超调量无关，因而可以方便灵活地改变参数，以很小的超调甚至无超调最快速的进入稳态。

(2)观察两种控制算法的抗干扰特性

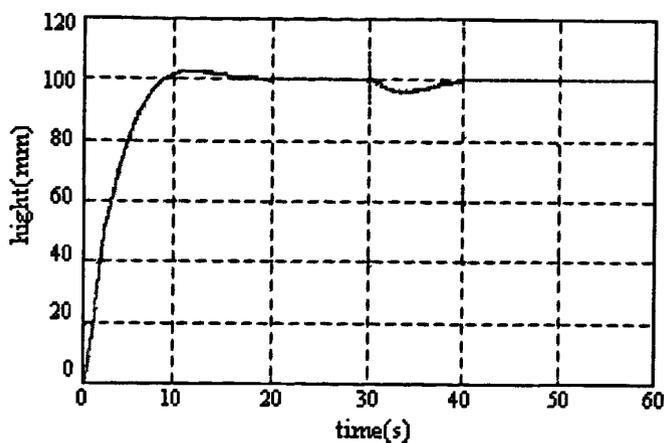


图 3.8 常规PID控制器抗干扰仿真曲线

Fig. 3.8 Antijamming simulation figure of conventional PID control

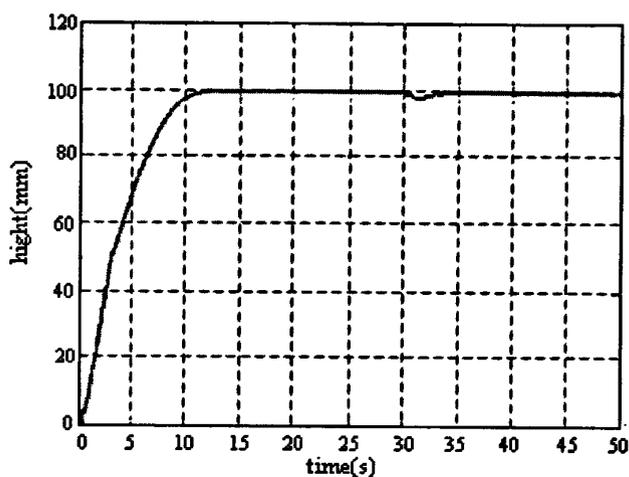


图 3.9 Fuzzy-PID 复合控制器抗干扰曲线

Fig. 3.9 Antijamming simulation figure of Fuzzy-PID composite control

液位设定值为100mm,当系统进入稳态工作点后,给系统加入一定量的扰动信号,拉速由2.5m/min增加到2.8m/min,观察两种控制算法的抗干扰特性。PID控制算法最大偏差为5mm,过渡过程时间为10s,其响应曲线如图3.8所示;而Fuzzy-PID控制算法的最大偏差为1mm,比常规PID控制受到干扰后的最大偏差小4mm;过渡过程时间为4s,比常规PID控制受到干扰后恢复的过度时间少用6s,其响应曲线如图3.9所示。

通过比较可知,Fuzzy-PID复合控制受到干扰后,系统恢复稳态的过渡时间小于常规PID控制,由于干扰信号所引起的系统振荡的最大偏差值同样小于常规PID控制。这说明Fuzzy-PID复合控制能够有效地抑制随机干扰,并在系统遇到各种干扰时及时对控制作用进行调解,并比常规PID控制有更小的偏差和更快的速度重新

进入稳态工作点，它的抗干扰性能要优于常规PID控制器。

3.8 小结

此系统采用了高精度数字电动缸，电动缸具有良好的开环性，因此可以将液位串级控制系统简化为单闭环控制系统。

本章对闭环系统中各环节建立了数学模型，并对结晶器液位控制系统中的核心部分—控制器进行了设计。通过对PID控制和模糊控制特点的分析，对于结晶器钢水液位这样的具有滞后性、非线性、时变性的控制对象，单纯采用PID控制或模糊控制都不会取得较好的控制效果。因此设计了Fuzzy-PID复合控制器。当液位偏差较大时采用模糊控制，以加快系统响应的速度；当偏差较小进入稳态过程后，则由程序切换到常规PID控制，消除静差，提高控制精度。

使用Matlab仿真软件的Simulink模块对结晶器液位控制系统控制器所采用的Fuzzy-PID控制算法进行了仿真，在控制曲线和抗干扰特性两方面与常规PID进行比较后得出：

(1) Fuzzy-PID复合控制系统的超调量和调整时间都比常规PID控制系统低很多，很好的解决了过渡过程时间与超调量之间的矛盾，可以更快的进入稳定状态。

(2) Fuzzy-PID复合控制能够有效地抑制随机干扰，比常PID控制具有良好的抗干扰性。

第 4 章 结晶器液位控制系统实现

上一章对结晶器液位控制器进行了理论设计和仿真研究。本章将把上一章给出的控制器设计应用于实际，完成结晶器液位控制系统的实现。系统实现包括系统的硬件设计、软件设计及系统调试。

4.1 控制系统硬件设计

SG-8 连铸机是八流小方坯连铸机，铸坯断面为 130mm×130 mm，有两个浇铸位置，每个浇铸位置由一个中间包负责四个铸流的浇铸，因此连铸机上有八套相互独立的结晶器液位控制系统。

5#连铸机的主要技术参数如表 4.1 所示：

表 4.1 连铸机的主要技术参数

Table 4.1 Major technical parameters of continuous caster

指 标	参 数
机型	SG-8(首钢制造)
矫直方式	全弧型单点矫直
导向机构	板簧导向短臂四连杆机构
振动方式	正弦曲线
铸机流数	8 机 8 流
铸机半径(m)	8
冶金长度(m)	19.64
浇铸断面(mm×mm)	130×130, 160×160
工作拉速(m/min)	2.2~3.0, 1.6~2.4

该控制系统主要设备由五部分组成：放射性同位素(Cs^{137})液位检测系统，西门子 S7 300 PLC 及扩展模块，塞棒执行机构控制系统，现场操作 MOP 盘，一台上位机 WinCC 监控系统。

4.1.1 上位机系统配置及功能

上位机是指工业控制中位于较高层次的计算机，又被称为 HMI。它的作用是监控现场设备的运行状态，当现场设备出现问题在上位机上就能显示出各设备之间的状态(如正常、报警、故障等)。在计算机集散控制系统中，计算机分为各个级别，与现场设备发生直接关系的计算机属于下位机，用来控制下位机，或给下位机下达新任务的计算机是下位机的“上位机”。若集散控制系统(DCS)较大，计算机的级别可能不止两级，此时上位机还可能有级别更高的上位机对其进行控制或指派任务。在结晶器液位控制系统中的上位机就是连铸控制室里的工控机，工控机装有控制结晶器液位的专用软件系统，上位机系统配置如表 4.2；系统中的下位机是指 PLC。

表 4.2 上位机系统配置

Table 4.2 Upper computer system configurations

指 标	配 置
机 型	研华工控机
硬件系统配置:	
CPU	Inter Pentium IV
主频(Gb/s)	3.2
内存(Gb)	1
通信卡	CP5611
软件系统配置:	
操作系统	WINDOWS XP
控制开发软件	WinCC 6.5
通信协议	Profibus-DP

上位机系统功能:

(1) 通信功能: 该系统中上位机与PLC(下位机)的通信协议为Profibus-DP。上位机可与PLC及其它上位机通信, 实现PLC控制软件编程、参数修改、运行监视等

功能；同时控制数字电动缸测试，对数字电动缸进行参数优化和多种控制功能选择。

(2) 数据储存：对液位控制系统运行曲线实现自动保存，可以随时调用。

(3) 数据输出：对液位控制系统运行曲线可进行打印，也可以保存为电子文档，还可以通过网络上传道上一级信息系统。

4.1.2 PLC 原理及系统选型

由理论分析设计出的控制策略算法必须通过实际的物理元件实现，才能应用于实际工业生产过程。可编程控制器(PLC)正是目前应用最为普遍的控制策略物理实现设备，且可靠性能好。

可编程控制器(PLC)是微机技术与传统的继电接触控制技术相结合的产物，国际电工学会(IEC)对PLC下的定义为：可编程序控制器是一种数字运算操作电子系统，专为在工业环境下应用而设计。它采用了可编程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作的指令，并通过数字的、模拟的输入和输出，控制各种类型的机械或生产过程。可编程序控制器及其有关的外围设备，都应按着易于与工业控制系统形成一个整体、易于扩充其功能的原则来设计。

一台完整的 PLC 是由硬件系统和软件系统共同组成的。

PLC 的硬件系统是由 CPU、存储器、输入/输出通道、外围设备和电源等模块构成。其中输入/输出模块又分为开关量、模拟量和智能化输入/输出模块。外围设备主要由编程器、打印机等组成。

PLC 的软件系统由系统软件 and 用户程序两大部分组成。系统软件是由实时操作系统 RTOS 组成，可分为基本控制软件和编程器软件两部分，固化在 EPROM，以实现内部分配、调度管理和监控。用户程序是根据生产过程控制的要求由用户使用制造企业提供的编程语言自行编制的应用程序，它包括开关量逻辑控制程序、模拟量运算程序、闭环控制程序和操作系统应用程序等。

PLC 是采用“顺序扫描，不断循环”的方式工作的。既在 PLC 运行时，CPU 根据用户按控制要求编制好并存储于用户存储器中的程序，按指令序号(或地址号)作周期性循环扫描，如无跳转指令，则从第一条指令开始逐条顺序执行用户程序，直至程序结束。然后重新返回第一条指令。开始新一轮新的扫描。在每次扫描过程中，还要完成对输入信号的采样和对输出状态的刷新等工作。

由于 PLC 与继电控制器相比具有功能强、可靠性高、通用性好、体积小、耗

电少、价格便宜等特点，与计算机控制设备相比有抗干扰能力强、编程语言简单易懂、采用模块结构、电源要求不高等特点，因此被广泛引用在各行业的自动过程控制中^[57-59]。

此控制系统选用西门子 S7 300 PLC，SIMATIC S7 300 是模块化结构设计，各种单独模块之间可进行广泛组合和扩展，系统主要由中央处理单元、存储器、信号模块、通信处理器、功能模块以及其他辅助设备。系统中的 SIMATIC S7 300 的主要配置有^[60, 61]：S7 314C-2DP CPU，MMC 64K 存储器及 PS 307 专用电源等。SIMATIC S7 300 是一种通用型的 PLC，由于其模块化，无风扇结构，易于实现分布式配置等特点，使其在各种自动化工程场合得到广泛的应用。S7 314C-2DP CPU 是紧凑型 PLC，本身带有一个 MPI 接口和一个 DP 接口，24DI/DO，5AI/2AO，4 个计数器，1 个定位通道，可以方便的通过 MPI 接口或 DP 接口与上位机连接，这样可以不用扩展通信处理模块。图 4.1 为此系统的 PLC 控制网络拓扑图，此系统中，各流液位控制 PLC 通过 Profibus-DP 网络相互连接，并且与上位机通信。S7 300 中央控制器单流 I/O 端口地址分配及说明如表 4.1 所示。

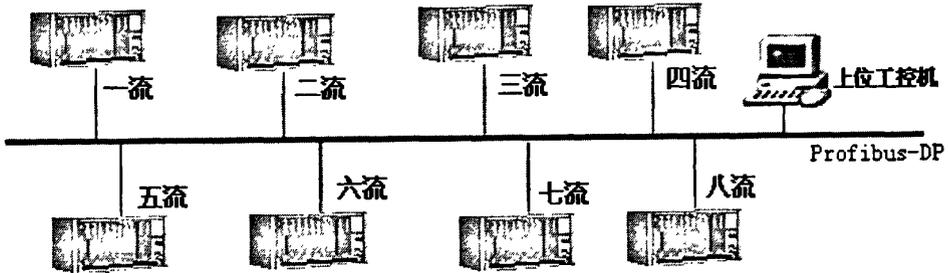


图 4.1 液位控制系统 PLC 网络拓扑图

Fig. 4.1 PLC network topology map of mold level control

PLC 系统硬件及扩展模块配置如下表：

表 4.3 PLC 模块配置

Table 4.3 PLC module configurations

模 块	配 置
电源模块	6ES7 307-1EA00-0AA0
CPU314C-2DP	6ES7 314-CF01-0AB0
数字量输入模块(DI)	6ES7 314-3XJ00-0AB0
数字量输出模块(DO)	6ES7 332-5HD01-0AB0
模拟量输入模块(AI)	6ES7 321-1BH02-0AB0
模拟量输出模块(AO)	6ES7 322-1BH01-0AA0

PLC 系统接口点数:

数字开关量输入点: 18 点 数字开关量输出点: 11 点

数字模拟量输入点: 4 点 数字模拟量输出点: 4 点

根据八流控制的需求每个 SIMATIC S7 300 PLC 扩展模块说明如下:

(1)、AI: 每流 4 路, 扩展 1 个 8 通道的 AD 模拟量输入模块, 模块型号: 6ES7321-1BH02-0AB0, 12 位+符号位($\pm 10V$ 或 $4\sim 20mA$)。

见表 4.4 所示。

表 4.4 AI 模块配置表

Table 4.4 Table of module AI configuration

序号	程序地址	点号名称	模块端子	本柜端子	量程	单位
01	PIW752	液位检测	03,04	JX1-03,04	-230,-80	mm
02	PIW754		06,07	JX1-06,07		
03	PIW756		09,10	JX1-08,10		
04	PIW758		12,13	JX1-11,13		
05	PIW760		14,15	JX1-14,15		
06	PQW752	塞棒位置显示	17,20	JX1-16,17		
07	PQW754		19,20	JX1-18,19		

(2)、AO: 每流 1 路, 扩展 1 个 4 通道的 AD 模拟量输出模块, 模块型号: 6ES7 322-1BH01-0AA0, 11 位+符号位($\pm 10V$ 或 $4\sim 20mA$)。

见表 4.5 所示。

表 4.5 AO 模块配置表

Table 4.5 Table of module AO configuration

序号	程序地址	点号名称	模块端子	本柜端子	量程	单位
01	PQW256	结晶器设定液位显示	03,06	JX1-61,64	-230,-80	mm
02	PQW258	结晶器实际液位显示	07,10	JX1-65,68	-230,-80	mm
03	PQW260		11,14			
04	PQW262		15,18			

(3)、DI: 每流 14 路, 扩展 1 个 32 通道的开关量输入模块, 模块型号: 6ES7314-3XJ00-0AB0。

见表 4.6 所示。

(4)、DO: 每流 12 路, 扩展 1 个 32 通道的开关量输出模块, 模块型号: 6ES7322-1BH01-0AA0

见表 4.7 所示。

表 4.6 DI 模块配置表

Table 4.6 Table of module DI configuration

序号	程序地址	点号名称	模块端子	本柜端子	量程	单位
01	I124.0	自动	02	JX1-31		
02	I124.1	手动	03	JX1-32		
03	I124.2	半自动	04	JX1-33		
04	I124.3	塞棒测试	05	JX1-34		
05	I124.4		06	JX1-35		
06	I124.5	紧急停车	07	JX1-36		
07	I124.6	液位仪表校零	08	JX1-37		
08	I124.7	试灯	09	JX1-38		
09	I125.0	塞棒上升	12	JX1-39		
10	I125.1	塞棒下降	13	JX1-40		
11	I125.2	液位计准备好	14	JX1-41		
12	I125.3	驱动器准备好	15	JX1-42		
13	I125.4		16	JX1-43		
14	I125.5		17	JX1-44		
15	I125.6	数字缸电缆连接好	18	JX1-45		

表 4.7 DO 模块配置表

Table 4.7 Table of module DO configuration

序号	程序地址	点号名称	模块端子	本柜端子	量程	单位
01	Q124.0	驱动器脉冲	22	JX1-50		
02	Q124.1	驱动器方向	23	JX1-52		
03	Q124.2	驱动器复位	24	JX1-54		
04	Q124.3	备用灯	25	JX1-56		
05	Q124.4	液面控制准备好指示	26	JX1-57		
06	Q124.5	液面控制故障指示	27	JX1-58		
07	Q124.6	液面控制运行指示	28	JX1-59		
08	Q124.7	备用灯	29	JX1-60		
09	Q125.0	液位计校零	32	JX1-61		
10	Q125.1	塞棒测试	33	JX1-62		
11	Q125.2	驱动电源控制	34	JX1-63		

4.2 控制系统软件设计

小方坯连铸机结晶器钢水液位控制的软件系统是由下位机软件系统和上位机软件系统组成。上位机软件系统是由 WinCC 开发而成。

4.2.1 STEP7 及下位机软件设计

下位机软件系统是由 STEP7 开发而成^[62, 63], 主要完成硬件组态、通信网络组态及结晶器钢水的液面控制算法的实现。

4.2.1.1 STEP7 简介

STEP7 是支持 SIMATIC S7 系列 PLC 用户开发应用程序的软件包, 它是一个用于 SIMATIC PLC 组态和编程的标准软件包, 是 SIMATIC 工业软件的组成部分。主要包括以下组件:

- (1)、SIMATIC 管理器, 用于集中管理所有工具以及自动化项目数据;
- (2)、程序编辑器, 用于 LAD、FBD、STL 语言生成用户程序;
- (3)、符号编辑器, 用于管理全局变量;
- (4)、精简组态, 用于组态和参数化硬件;
- (5)、硬件诊断, 用于诊断自动化系统的状态;
- (6)、NetPro, 用于组态 MPI 和 PROFIBUS 等网络连接。

此外还有可选组件 Engineer tool, 它面向特定功能, 有利于简化和增强自动化任务编程, 包括: S7-SCL, S7-GRAPH, S7-HiGraph, CFC 等。

在 S7 系列 PLC 的 CPU 中运行着两种程序, 即操作系统程序和用户程序。操作系统程序处理的是底层的系统级任务, 它为 PLC 应用功能搭建了一个平台, 提供了一套用户程序的调用机制; 而用户程序则在这个平台上, 完成用户自己的自动化任务。STEP7 创建一个自动化解决方案的主要步骤如下:

- (1)、先组态硬件然后编程块(也可先编程块而后组态硬件);
- (2)、创建一个项目结构;
- (3)、组态一个站;
- (4)、组态硬件;
- (5)、组态网络和通信连接;
- (6)、定义符号;
- (7)、创建程序;
- (8)、生成并评估参考数据;
- (9)、组态报文;

- (10)、组态操作员控制和监视变量;
- (11)、下载程序到可编程控制器;
- (12)、测试程序;
- (13)、监视操作, 诊断硬件;
- (14)、制作设备文档。

STEP7 标准软件包支持自动化任务创建过程的各个阶段, 可在 Windows 操作系统下运行并于 Windows 的图形和面向对象的操作原则相匹配。对于控制任务比较复杂的程序编制, STEP7 有 3 种方法可供选择: 线性编程、分布式编程和结构化编程, 其中结构化编程由于其结构层次清晰, 部分程序通用化、标准化、易于修改、简化调试等优点, 在程序设计中得到广泛的应用。

4.2.1.2 STEP7 模块程序设计

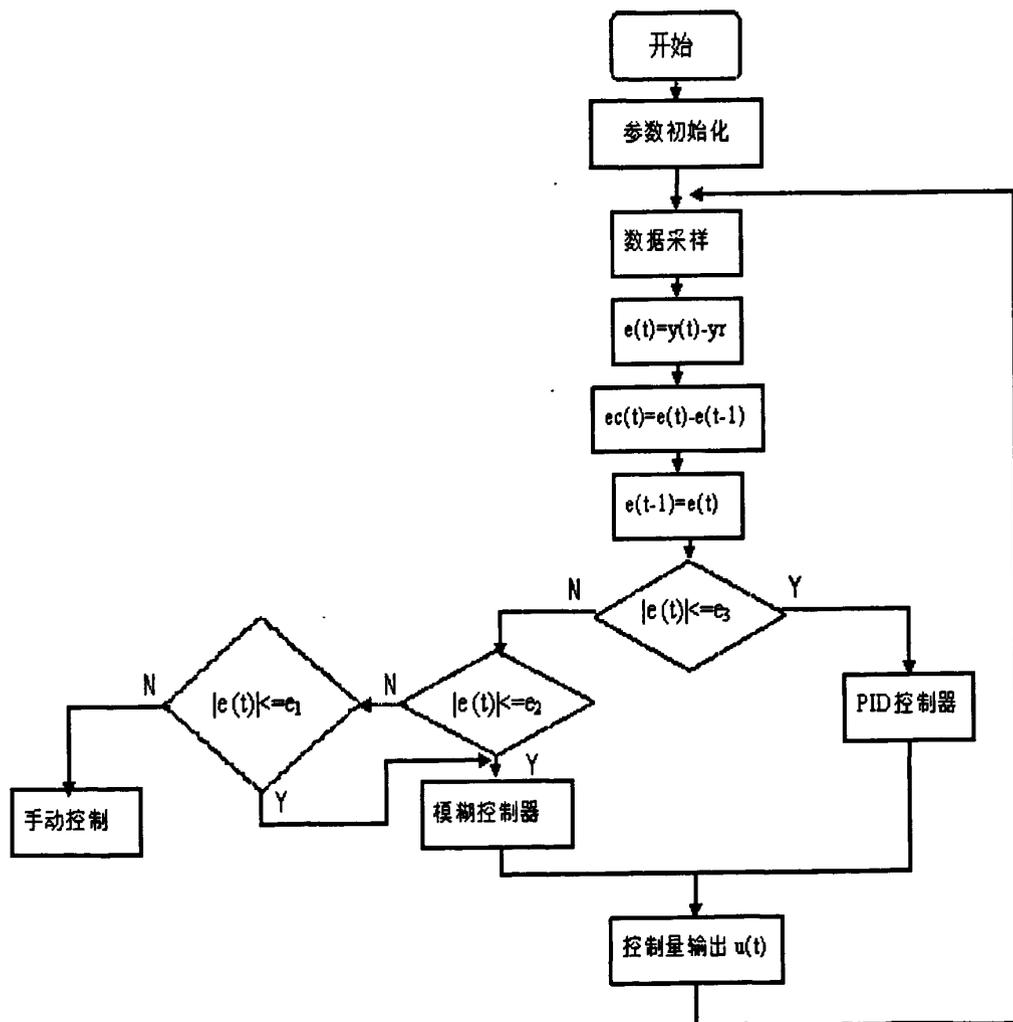


图 4.2 系统软件控制流程图

Fig. 4.2 system software control flow chart

利用 PLC 实现第三章公式(3.20)Fuzzy-PID 复合控制器的控制。由于 STEP7 中存在 PID 功能模块，因此对于 PID 控制器的实现只需要使用 STEP7 对 PID 功能模块进行选择 and 设置；对于模糊控制器的实现则需要使用 STEP7 进行软件编程。根据图 4.2 系统软件控制流程图所示，模糊控制器的软件实现是 PLC 软件编程的重点。

在对 PID 控制器进行设置和对模糊算法进行编程前，需要使用 STEP7 对系统的硬件及 Profibus-DP 网络通信进行组态。STEP7 软件进行 PLC 硬件组态就是模拟真实的 PLC 硬件系统，将 CPU、电源和扩展模块等设备安装到相应的机架上，并对 PLC 硬件模块的参数进行设置和修改。对 Profibus-DP 网络通信进行组态，是为了能够使上位机与 PLC 进行通信，并能够使 STEP7 编写的程序，通过 Profibus-DP 网络对 PLC 进行下装。

对 PLC 硬件和网络通信组态完后，即可开始对 PID 控制器进行设置以及编写模糊算法的程序。

(1)PID 控制器的选择与设置

PID 控制器在 STEP7 中的功能块有三种形式，它们是 SFB41/FB41 (CONT_C)、SFB42/FB42 (CONT_S)、SFB43/FB43 (PULSEGEN)，其中 SFB41/FB41 (CONT_C) 模块适用于连续控制方式，SFB42/FB42 (CONT_S) 模块适用于步进控制方式，SFB43/FB43 (PULSEGEN) 适用于脉冲宽度调制器。在此系统中，塞棒执行机构采用高精度步进电机作驱动器，因此 PID 控制器模块选用 SFB42/FB42 (CONT_S)。

在选择合适的 PID 控制器模块后，就可以使用 STEP7 自带的“PID Control Parameter Assignment”对系统中 PID 参数进行赋值，如图 4.3 所示。在此系统中 $K=0.4$, $T_I=12s$, $T_D=6s$ 。

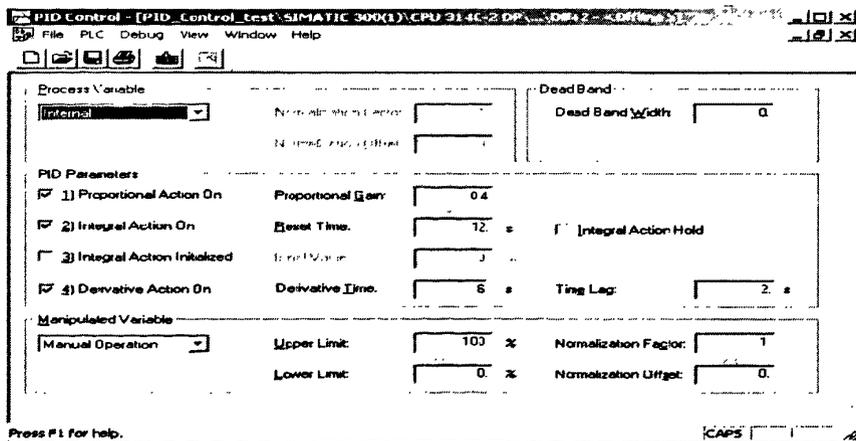


图 4.3 PID 控制器参数设置

Fig. 4.3 PID controller data setting

(2) 模糊控制编程与研究

第一是要将精确输入量模糊化。

此控制系统中的测量量是结晶器液位高度，模糊控制器输入量采用液位偏差 e 和偏差变化率 ec ，为了便于 PLC 实现，这里采用离散差分的表达方法，令 $e(k) = y(k) - y_r$ ， $ec(k) = e(k) - e(k-1)$ ，其中 y_r 为液位设定值，此系统中采样时间为 0.45s。图 4.4 为具体的梯形图程序。

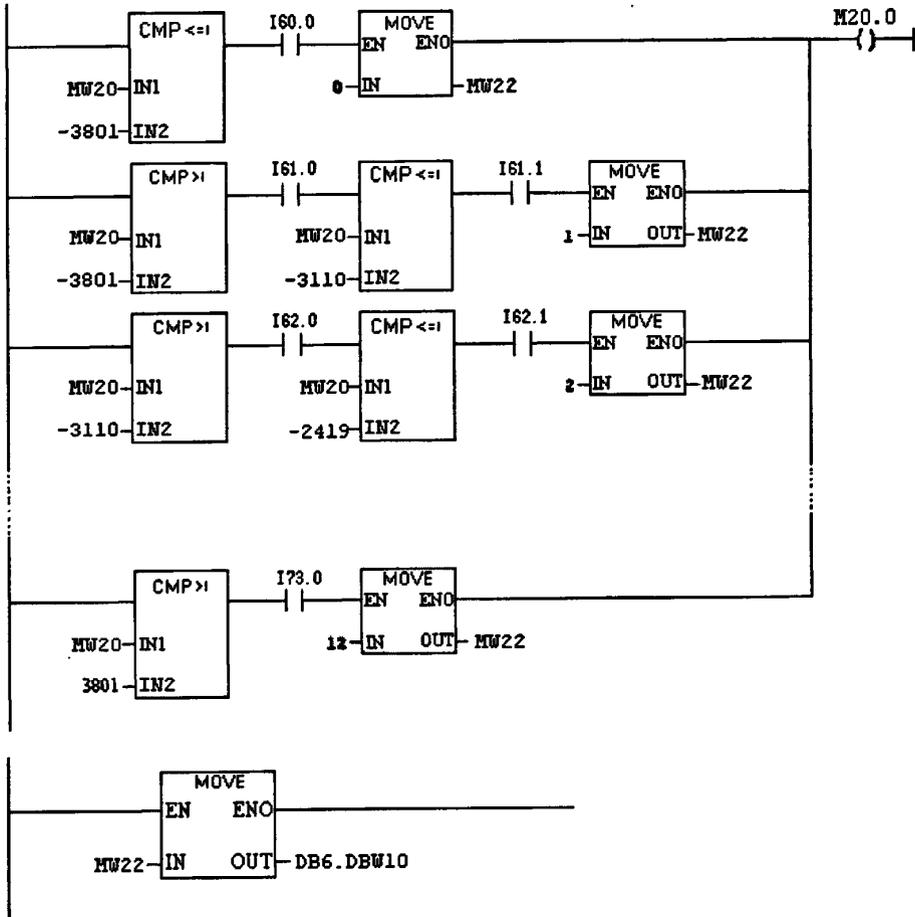


图 4.4 输入量模糊化梯形图程序

Fig. 4.4 Ladder diagram procedure of fuzzification of inputs

首先，建立数据块 DB1、DB2，其中 DB1 存放符号表中过程变量全局符号的模拟量输入的数值，此系统中为 YWJ-1 结晶器液位计所测结晶器液位值 $y(t)$ ；DB2 中存放模拟量输出的数值。液位设定值 y_r 及采样时间存放在 DB6 数据块中。

在第三章中，液位偏差 e 和液位偏差率 ec 的模糊论域均取为 $[-6, +6]$ 的离散区间，共 13 档，在 PLC 实现的输入量模糊化梯形图程序部分，必须先对其进行量化变换成相应论域的元素。此系统中 $y(t)$ 由液位计测得，通过液位计主机转换为 4~

20mA 电流信号传送至 PLC AI 模块进行采集, 其中液位变化的变送规则是取 90~200mm 线性对应 4~20mA 信号。根据 SIEMENS 硬件手册可知, 模拟量用一个二进制补码定点数表示, 宽度为 16 位。若一个模拟量模块的精度少于 16 位, 则左移调整。故电流测量范围为 4~20mA 的模拟量系统值转换规则为: 22.96mA 达到上溢, 对应十进制数 32767; 正常范围内 4~20mA 对应系统十进制数为 0~27648。因此, 偏差值 e 经过 A/D 转换后的数值范围为 -27648~+27648, 实际上仅有很少的几个点能够达到较大的取值, 一般 e 的取值要比上述范围小得多, 约对应为 -4147~+4147 范围, e 具体量化取值对应表 4.8 所示, 为了使量化后的论域元素便于用无符号数字表示, 在量化后的论域元素上加一个偏移量 $(13-1)/2 = 6$, 使得模糊论域元素对应 [0, 12] 的离散数存储, 这样便于梯形图的编制。

表 4.8 输入量模糊量化对应元素表

Table 4.8 corresponding relation table of fuzzification of inputs

e	≤ -3801	-3801~	-3110~	-2419~	-1782~	-1037~	-346~+346
		-3110	-2419	-1782	-1037	-346	
模糊论域	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
存储偏移	0	1	2	3	4	5	6
e	+346~	+1037~	+1782~	+2419~	+3110~) 3801	
	+1037	+1782	+2419	+3110	+3801		
模糊论域	1	2	3	4	5	6	
存储偏移	7	8	9	10	11	12	

输入量模糊化梯形图是采用逐项比较赋值的方法, 将 e 数值赋到位存储区的存储字 MW20 中。若 $e \leq -3801$, 则将 e 量化为 -6, 加上偏移量 6, 以 0 存放到位存储字 MW22 中; 若 $-3801 < e \leq -3110$, 则将 e 量化为 -5, 加上偏移量 6, 以 1 存放到位存储字 MW22 中; 以此类推, 若 $e > 3801$, 则将 e 量化为 6, 加上偏移量 6, 以 12 存放到位存储字 MW22 中。之后 MW22 中量化的 e 的数值赋值到 DB6.DBW10 中存储, 并转入后续程序执行。

ec 的模糊量化梯形图与 e 相似。

第二是编制模糊控制查询表查询的梯形图程序。

模糊控制查询表的查询程序是整个程序设计中的核心程序段, PLC 根据此程序算法, 对表 3.2 进行查询, 实现模糊控制功能。具体梯形图程序如图 4.5 所示。

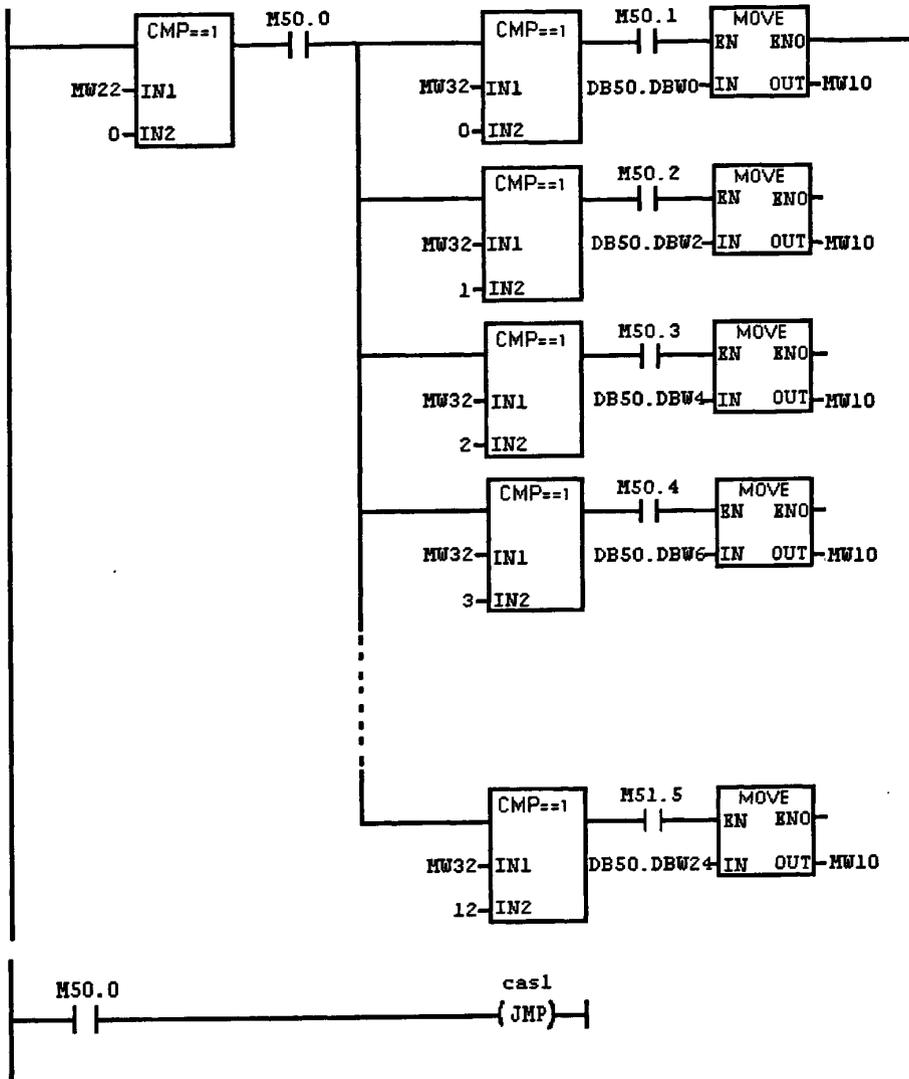


图 4.5 模糊控制查询表查询梯形图程序

Fig. 4.5 Ladder diagram procedure of fuzzy control query table

根据输入量模糊化程序所得到的 e_i 和 ec_j 的值，查询模糊控制查询表3.2，得到相应的控制量值 u_{ij} ，表3.2为一个二维13×13矩阵，其中控制量 u 的论域为[-6, +6]的离散区间，同样，为了便于用无符号数字处理，对表3.2中的控制量加一个偏移量6，转化到[0, 12]的离散区间处理，并将其按照先后列的顺序依次存储在DB50数据块中，再按先 i 后 j 的顺序定位 u_{ij} 。

为了主程序(OB1)循环简明合理，对模糊查询表的查询程序使用功能模块嵌套的程序设计方法。定义一个功能块FB50来实现模糊查询功能。FB50功能块由主程序(OB1)调用。图4.4给出的梯形图程序是偏差量为-6，偏移存储为0的查询成序。由输入量模糊量化程序可知，MW22中存储的是 ec 的量化制值，首先确定 u_{ij} 在表3.2

中的所在行，然后调用对应行的列查找程序，即对对应行的列元素进行比较运算赋值确定 u_{ij} 在控制查询表3.2中的确切位置并赋值到位存储区的存储字MW10中。在每一行的查询程序结束后，执行一次有条件跳转动作，即若位存储区的存储位M50.0上电，表示完成 u_{ij} 的查询工作。同时程序跳转到CAS1,CAS1为控制量输出赋值程序，此跳转动作大大减少了PLC的查询时间。

第三是编制控制量输出的梯形图程序

在得到查询结果后，需要将MW10中的数据通过相应运算变换为可直接作用于执行机构的输出变量。由于此系统的塞棒执行机构采用的是高精度步进电机驱动的数字电动缸，只需要输出控制脉冲，因此控制数据不需要D/A转换，就能通过PLC DO模块的脉冲量输出点输出到塞棒执行机构上。

此梯形图程序(图4.6)是将MW10中存放的范围为[0, 12]的输出量数据转换到0~27648，即乘以一个量化系数2304，结果赋值到MW16中，并存储到数据块DB6中的DB6.DBW16，最后将其赋值给直接外设输出Q124.0位置的步进电机控制量 $u(t)$ ，实现对液位的控制。

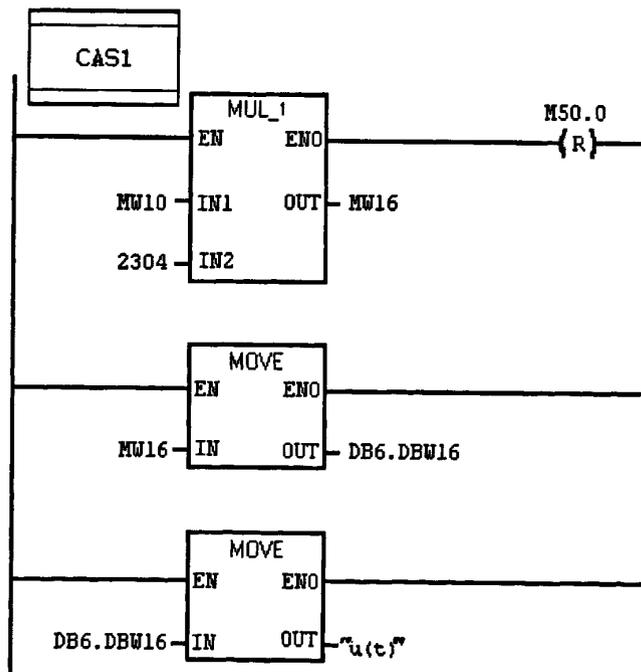


图 4.6 控制量输出梯形图程序

Fig. 4.6 Ladder diagram procedure of output of control variable

以上即为实现结晶器液位模糊控制的主要STEP7程序。此程序实现了模糊控制的离线计算与在线查询，在模糊查询表不大的情况下，大大提高了PLC程序执行效

率,有利于增强控制的实时性。

4.2.2 WinCC 及上位机软件设计

系统上位机软件系统是数据采集监控系统 SCADA(Supervisory Control Data Acquisition)的软件平台工具,是工业应用软件的一个组成部分。考虑到 WinCC 为 SIMATIC 全集成自动化系统(TIA)的重要组成部分,可确保和 SIMATIC S7 PLC 的方便连接和高效通信,STEP7 的变量甚至可以被 WinCC 直接引用进行变量组态,而且 WinCC 还有对 SIMATIC PLC 进行系统诊断的功能,方便硬件维护,因此结晶器钢水液位控制系统上位机软件系统采用西门子 WinCC 软件开发而成。

4.2.2.1 WinCC 简介

西门子视窗控制中心SIMATIC WinCC(Windows Control Center)是1996年进入世界工控组态软件市场的HMI/SCADA软件。作为SIMATIC系列产品的重要组成部分,WinCC确保与SIMATIC S5、S7和505系列的PLC连接的方便和通信的高效,与STEP7编程软件的紧密结合有利于缩短项目开发的周期。

(1) WinCC主要性能特点

WinCC是基于SIEMENS和Microsoft公司合作之下的最新发展的软件技术,因此其技术在不断的创新中,该软件主要的性能特点简要列举如下^[64, 65]:

- 1)、包括所有SCADA功能在内的客户机/服务器系统;
- 2)、可通过灵活剪切,由简单任务扩展到复杂任务;
- 3)、可选用各种选件和附加件扩展基本功能;
- 4)、使用Microsoft SQL Server 2000作为其组态数据和归档数据的存储数据库,使得ODBC、DAO、OLE DB、WinCC OLE DB和ADO方便地访问归档数据;
- 5)、拥有强大的标准接口,如ActiveX、OPC等,可方便的与其他应用程序交换数据;
- 6)、有使用方便的脚本语言,如ANSI-C和VB等;
- 7)、开放API编程接口可以访问WinCC的模块;
- 8)、组态过程简易,并支持多语言切换;
- 9)、提供所有主要的PLC通信通道,如SIMATIC S5/S7/505控制器的通信通道,及DDE、OPC等非特定控制器的通信通道。

(2) WinCC系统的构成

WinCC作为一个完整的软件体系,主要由以下几大部件构成:

- 1)、变量管理器,用于管理WinCC中所有使用的外部变量、内部变量和通信驱动程序;

- 2)、图形编辑器, 用于设计各种图形组态界面;
- 3)、报警纪录, 负责采集和归档报警信息;
- 4)、变量归档, 负责处理测量值, 并长期存储所有记录的过程值;
- 5)、报表编辑器, 提供许多标准的报表, 也可自行设计报表进行打印;
- 6)、全局脚本, 这部分是系统设计人员用ANSI-C或VB编写的代码, 以满足项目的需要;
- 7)、文本库, 用于编辑不同语言版本下的文本信息;
- 8)、用户管理器, 用来分配、管理和监控用户对组态和运行系统的访问权限;
- 9)、交叉引用表, 负责搜索在界面、函数、归档和消息中使用的变量、函数、OLE对象和ActiveX控件。

4.2.2.2 驱动程序及变量组态

在上位机软件设计之前, 需要使用WinCC对系统中的通信驱动及变量进行组态。此系统中基于WinCC实现控制系统监控功能的核心工作就是在于解决控制系统与WinCC间的通信和数据交换问题。WinCC使用变量管理器来组态变量, 变量管理器对项目所使用的变量和通信驱动程序进行管理。驱动程序实现WinCC和控制系统间的通信, 而WinCC监控软件与控制系统间的数据交换则通过过程变量来完成。

一般而言工业通信网络分为4个等级, 即执行器级、现场级、单元级和管理级。此系统中使用现场级的Profibus-DP通信网络连接上位机WinCC监控软件与SIMATIC S7 PLC进行通信, 同过Profibus电缆和接头, 将PLC CPU的DP编程口相互连接以及与上位机网卡的MPI/DP编程口连接即可实现。

在此系统中WinCC是通过在变量管理器中添加一个SIMATIC S7 Protocol Suite的通信驱动程序, 构成WinCC和过程处理之间的通道单元, 来实现它与PLC间的通信。建立通信的通道单元后, 就可对变量进行组态, 在此系统中WinCC与STEP7紧密结合, WinCC中的过程变量直接引用PLC中STEP7所定义的变量地址。

4.2.2.3 系统监控界面设计

在此控制系统中WinCC监控系统设计主要完成对PLC的数据采集和监视任务, 方便对PLC的监视和优化管理, 同时可以把数据保存打印以便分析改进系统性能。同时也可以方便的把生产数据与管理网络连接, 系统的开放性和扩展性能优越。

(1)、WinCC结晶器钢水液位控制系统组成

WinCC结晶器钢水液位控制系统由《启动》界面、《1-8流结晶器液位调节》界面、《数据设置》界面、《历史趋势》界面、《报警消息》界面、《报表打印》界面

组成；分别完成主要参数的采集显示、趋势曲线显示、报警信息显示、控制器参数设置及显示、各种数据报表生成及打印功能。软件结构示意图如图4.7所示。

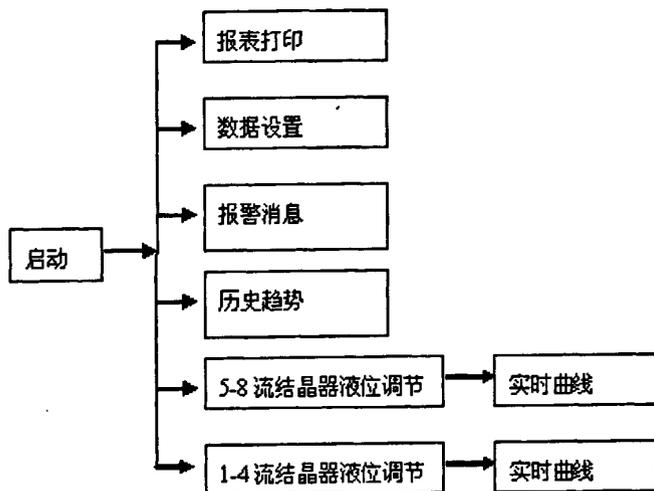


图 4.7 软件结构示意图

Fig. 4.7 Structural diagram of software

(2)、WinCC结晶器钢水液位控制系统各界面及功能开发

1)、《启动》界面主要调出系统欢迎界面，显示系统名称、软件版本和开发单位名称以及登陆、退出系统按钮。

2)、《1-8流结晶器液位调节》界面分为两个，分别为《一至四流结晶器液位调节》和《五至八流结晶器液位调节》界面，用来显示结晶器液位和塞棒位置并检测线路及数字缸的状态是否完好。在主数据区显示各流的液位调节参数，包括结晶器液位高度、液位设定值、塞棒位置、拉速和控制方式；液位调节系统的工作状态包括运行、暂停、故障等。“实时曲线”按钮可以直接调入当前结晶器钢水液位高度、设定高度、塞棒位置及PID输出的实时曲线图；界面下方显示最近一次设备报警情况。图4.8所示为一至四流结晶器液位调节界面，图4.9所示为五至八流结晶器液位实时曲线。

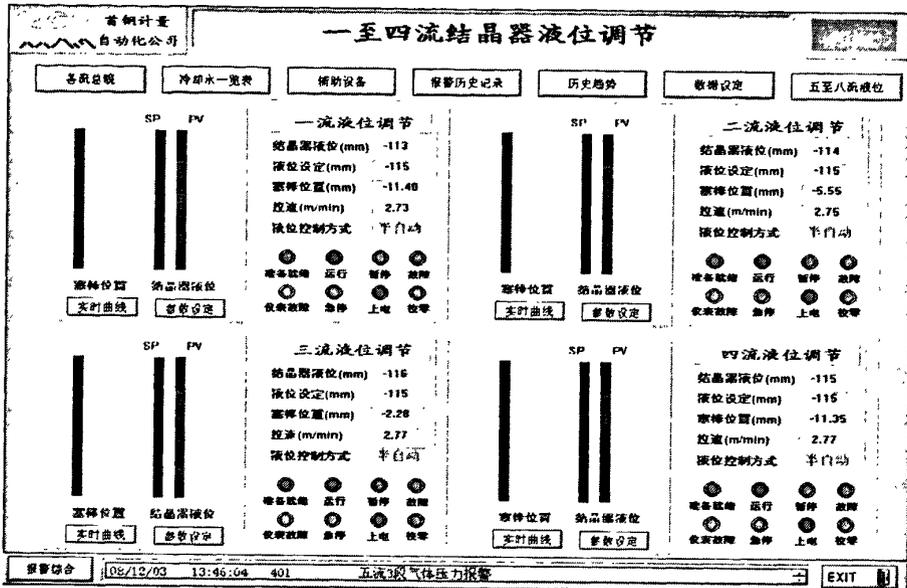


图 4.8 一至四流结晶器液位调节界面

Fig. 4.8 Picture of mold level control of 1-4 strands

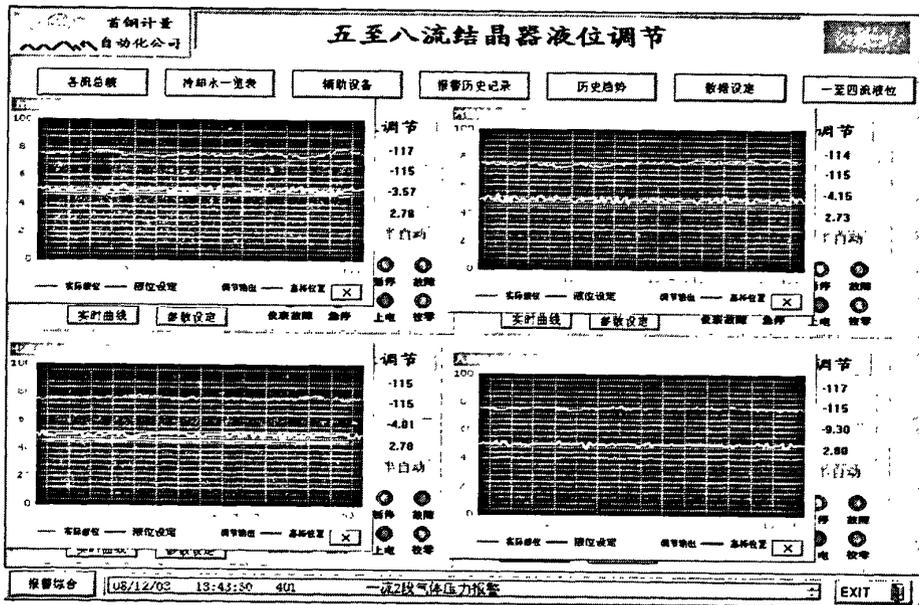


图 4.9 五至八流结晶器液位实时曲线

Fig. 4.9 Real-time curve of mold level control of 5-8 strands

3)、《历史趋势》界面用来观察重要数据的历史趋势曲线，可以用来作为分析系统的依据及评价系统的性能；在界面中可以方便的对结晶器液位控制系统的历史曲线进行切换以便显示八流结晶器的历史实时钢水液位曲线和塞棒位置曲线。如图4.10所示。

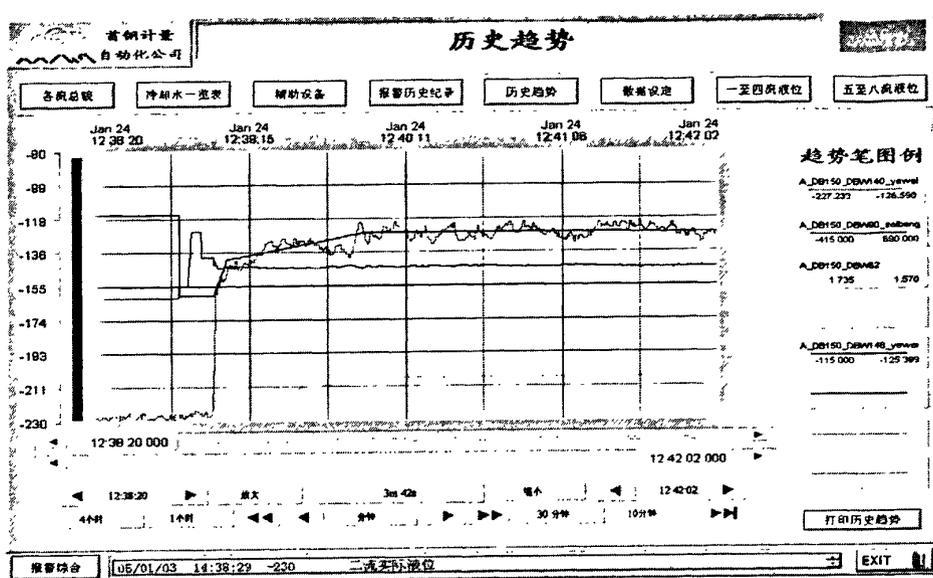


图 4.10 历史趋势界面

Fig. 4.10 Picture of history trend

4)、《报警消息》界面用来显示已经组态的报警消息，包括液位上限、液位下限、急停、液位仪表故障、系统综合故障报警。可以对报警消息进行确认、选择等操作，同时还可以切换报警顺序窗口到短期归档或者长期归档窗口，同时也可以对报警消息进行打印输出。

5)、《数据设定》界面可以用来对下位机PID控制器参数、报警限制参数、液位参数进行设定。如图4.11所示。

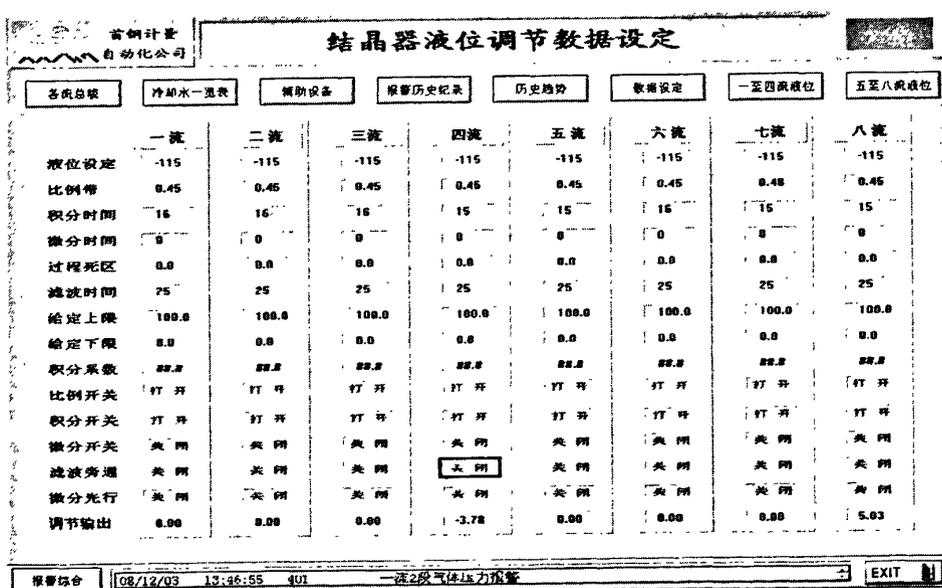


图 4.11 数据设定界面

Fig. 4.11 Picture of data setting

6)、《报表打印》界面的“打印报表内容选择区”可以选择想要打印的报表内容,如趋势、表格或者报警等;“打印报表时间选择区”可以选择要输出的报表的时间范围,可以实现班报表、日报表和周报表;“打印报表预览区”用来预览报表,然后把报表存储或者打印输出。

4.3 系统实现及应用研究

此结晶器液位控制系统在第二炼钢厂5#小方坯连铸机上投入了应用,选取2008年5月20日的开浇后单流结晶器液位控制曲线图,如图4.12所示。连铸机开浇时间为15:54:53(红色竖线),当液位趋于平稳后的时间为15:55:44(蓝色竖线),整个开浇过程为51s,液位控制曲线没有超调,与仿真曲线图3.7相符合。

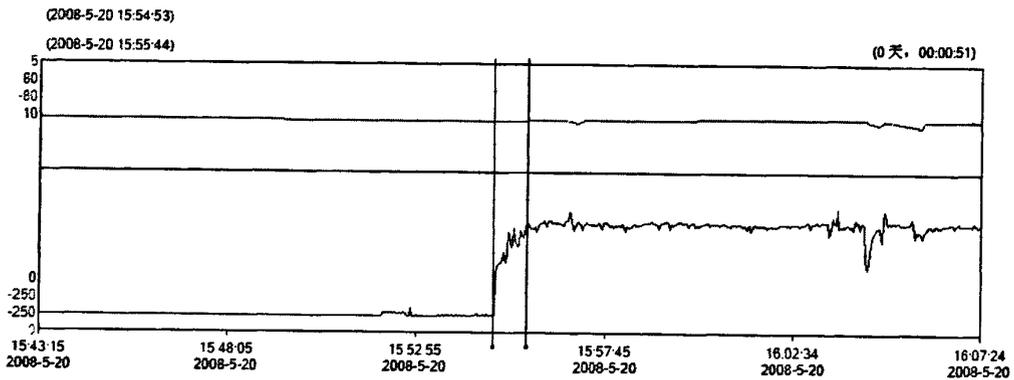


图 4.12 连铸机开浇结晶器液位控制曲线图

Fig. 4.12 Curve of mold level control at start casting

在连铸机生产过程中,各种干扰和噪声是时时刻刻存在的。图4.13所示为液位控制系统在突然产生的干扰下,Fuzzy-PID控制发挥作用,使液位快速恢复到稳定状态。干扰最大偏差为30mm,此时系统处在误差偏大区,系统继续使用模糊控制来调节液位,使液位误差减小,趋于平稳,过渡过程时间为20s,其实际液位控制曲线与仿真曲线图3.9的控制特性项符合。这说明Fuzzy-PID复合控制能够有效地抑制随机干扰,并在系统遇到各种干扰时及时对控制作用进行调解,并比常规PID控制有更小的偏差和更快的速度重新进入稳态工作点。

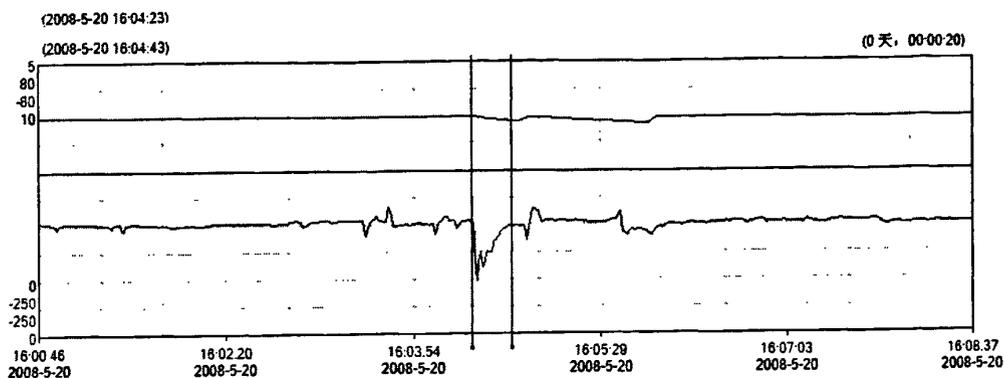


图 4.13 干扰状态下结晶器液位控制曲线图

Fig. 4.13 Curve of mold level control under the interference state

在一个连铸机生产时间段内，结晶器液位控制的曲线如图4.14所示。由图可见，结晶器液位控制总体比较平稳，即使系统受到较大干扰，控制器也能迅速的抑制误差，调节液位趋向平稳。从此图观察液位误差总体控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，能够满足生产的要求。

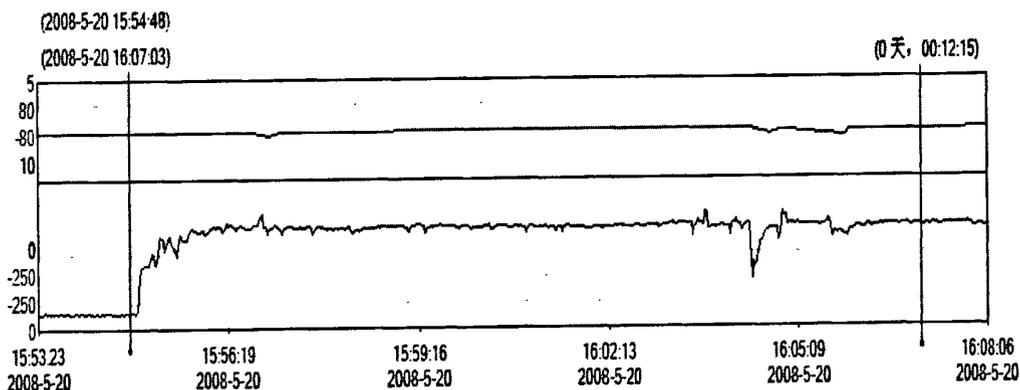


图 4.14 结晶器液位控制曲线图

Fig. 4.14 Curve of mold level control under the practical state

4.4 小结

本章对使用到的STEP7编程软件和WinCC组态软件进行了简要介绍，并且对SG-8型小方坯连铸机结晶器液位控制系统软硬件进行了设计，系统应用于实际生产后，将液位控制实际曲线和控制器仿真曲线作了比较。

硬件设计主要包括：PLC控制系统的构成、CPU的选型、扩展模块具体配置。
软件设计主要包括：下位机软件设计和上位机软件设计。

(1)、下位机软件设计

根据Fuzzy_PID控制流程图,下位机软件设计重点在模糊控制算法的编程,本章采用STEP7设计了精确量模糊化梯形图程序、模糊查询表查询梯形图程序、控制量输出梯形图程序。同时对PLC硬件和网络通信进行组态,对PID参数进行设置。

(2)、上位机软件设计

本章采用WinCC设计结晶器钢水液位控制系统的监控界面,实现了液位控制系统的在线检测、参数设置、历史趋势存储、报警信息及据报表打印等功能。同时对网络通信驱动程序和系统变量进行组态。

本章通过液位实际控制曲线和控制器仿真曲线比较,发现实际曲线与仿真曲线相符合,从而进一步验证了Fuzzy_PID复合控制策略的有效性。

第五章 结论与展望

液位是连铸过程一个重要的过程控制参数,因此,对结晶器液位的控制广泛地出现于连铸自动化系统中。以往在实际生产中,控制系统较多采用PID控制,生产实践表明常规PID控制对具有非线性、时变性、大时滞、难以建立精确数学模型等特点的过程对象,难以获得较理想的控制品质。本文基于小方坯(130mm×130mm)连铸过程中结晶器钢水液位为被控对象,通过Fuzzy-PID复合控制器与常规PID控制器的仿真比较,研究结晶器钢水液位在不依赖其精确数学模型的条件下,利用Fuzzy-PID复合控制策略实现对其进行控制,并给出的一套PLC实现的具体方案,即对液位控制进行二次开发,利用SIMATIC S7-300 PLC通过软件编程、组态开发一套较为完备的Fuzzy-PID复合控制系统。本文具体的研究工作可以概括为以下几点:

(1)、对连铸工艺及控制技术的发展以及结晶器液位控制技术的现状和趋势进行概述,重点介绍了液位控制的控制策略、检测方法和控制方法;

(2)、介绍了结晶器液位控制原理,并根据系统设计的要求,设计了结晶器液位控制系统的总体方案。在方案中,确定了液位控制的方法、液位的检测方法以及执行机构的形式和配置;

(3)、将结晶器液位串级控制简化成单反馈闭环控制,在简化的基础上,对系统中各环节进行了数学模型的建立。阐述了液位控制中存在的各种困难,在对常规PID和模糊控制的特点对比后,提出了建立Fuzzy-PID复合控制策略,并进行了具体的设计和仿真研究,建立了模糊控制查询表;

(4)、对SIMATIC S7-300 PLC的硬件组成及工作原理进行了简要介绍,并重点详细介绍了SIMATIC S7-300 PLC编程软件STEP 7及监控组态软件WinCC;

(5)、研究讨论了PLC控制系统设计的一般方法,并基于SIMATIC S7-300 PLC对Fuzzy-PID复合控制策略的实现进行了分析,给出了使用STEP 7设置PID参数和模糊控制程序设计方法,并具体给出了关键部分的梯形图程序;

(6)、基于WinCC软件,针对液位的Fuzzy-PID复合控制策略,研究开发了上位机监控系统,从而完成了一套较为完善的结晶器钢水液位控制系统;

(7)、通过现场实现研究结晶器钢水液位Fuzzy-PID复合控制的控制性能,并与仿真进行比较分析,验证了液位Fuzzy-PID复合控制及其PLC实现的可行性和适用性。

在结晶器液位实际控制过程中,还存在着以下两点不足:

(1)、塞棒通过一个开坯器连接在数字电动缸的升降丝杆上,一方面开坯器在

安装的过程存在着安装间隙；另一方面开坯器升降丝杆动作过程中,零件之间的摩擦使传递到塞棒的动作也存在着一个机械间隙。塞棒的间隙最小为0.1mm,最大为3.4mm。因此塞棒执行机构的机械特性还不完美,存在着一定的动作死区。

(2)、由于钢水中存在着浮渣等加杂物,在浇铸过程中加杂物容易附着在塞棒的表面或堆积在中间包水口周围,加杂物长时间附着和堆积很容易对塞棒和水口形成结瘤,结瘤的突然脱落使液位产生非线性波动。虽然在系统中加入塞棒抖动和冲洗功能,但塞棒抖动和冲洗次数过多,会造成系统震荡剧烈,使液位自动控制失败。

(3)、系统控制器不是真正意义上的三段控制器,在误差偏大区与正常控制区采用相同的模糊控制,其模糊隶属度函数、模糊关系和模糊查询表相同。

下一步继续对Fuzzy-PID复合控制器进行优化,尤其是对误差偏大区模糊控制的优化,重新设置该区域模糊控制隶属度函数、模糊关系和模糊查询表。

参考文献

- 1.姜永林.连铸生产概论[M].沈阳:东北工学院出版社,1992:45-107
- 2.冯捷,史学红.连续铸钢生产[M].北京:冶金工业出版社,2005
- 3.朱苗勇.现代冶金学(钢铁冶金卷)[M].北京:冶金工业出版社,2005
- 4.吴长寿,夏祥生.谈中国钢铁连铸的发展[J].江西冶金,2002,22(6):1-4
- 5.B.V.R.Raja,N.Pal,N.P.Jayaswal. Recent trends in continuous casting technology. Steel Times International[J], 2005, 29(4): 41-44
- 6.罗振才.炼钢机械(第2版)[M].北京:冶金工业出版社,1989:140-225
- 7.时彦林,李鹏飞.冶炼设备维护与检修[M].北京:冶金工业出版社,2005:238-298
- 8.曾祥宁.板坯连铸控制系统浅析[J].钢铁技术,2003(5):29-33
- 9.郭戈,王伟,柴天佑.连铸过程自动化技术综述[J].冶金自动化,2002(2):10-14
- 10.余轶峰.连铸检测和控制八大技术[J].柳钢科技,2004(2):56-57
- 11.G.Bocher, R.obermann, B.Winkler, G.Kruger, P.Patte. Slab quality Improvement by means of advanced mold level control[C]. 1st European Conference on Continuous Casting, Florence, Italy, 2001:90-98
- 12.崔海京.结晶器液位控制器的设计[D].鞍山科技大学,2006:5-6
- 13.徐红,茅洪祥.连铸过程中结晶器液位检测技术[J].河南冶金,2000,36(1):3-6
- 14.曹召亭,刘艳芹等.结晶器液面自动控制系统在连铸生产中的应用[J].莱钢科技.2000,90(6)专刊:16-18
- 15.丁祥辉.本钢薄板坯连铸机长漏斗形H²结晶器应用浅析[J].辽宁科技学院学报,2007,9(2):25-26
- 16.S.F.Graebe, G.C.Goodwin, G.Elsley. Control Design and Implementation in Continuous Steel Casting[J]. IEEE Control Systems, 1995, 15(4): 64-71
- 17.J.Schuurmans, A.Kamperman, B.Middel, P.F.A van den Bosch. Robust Mould Level Control[C]. 2005 American Control Conference, Portland, OR, USA. 2005:2040-2045
- 18.柳林林.连铸机结晶器液位控制系统的设计[D].南昌大学,2006
- 19.周继志,翟希达.电动数字缸在结晶器液位控制系统中的应用[J].冶金自动化,2006年增刊(S2):246-247

- 20.蔡开科.连铸技术的进展(续完)[J], 炼钢, 2001, 17(3): 6-9
- 21.郭戈, 乔俊飞.连铸过程控制理论与技术[M], 北京: 冶金工业出版社.2003
- 22.郭戈, 乔俊飞, 王伟, 柴天佑. 结晶器液位检测及控制的现状和发展方向[M]. 冶金自动化, 1998, 22(2):1-4,12
- 23.S.F.Graeba, G.C.Goodwin, M.R.West, et al. An application of advanced control to steel casting[J]. IEEE Control Systems, 1994, 15(4): 64-71
- 24.杨川. 引进连铸机结晶器液面控制系统分析与改进[C]. 炼钢及连铸自动化. 冶金部自动化研究院, 1994: 225-230
- 25.FanJin Kong, Robin De Keyser. Identification and control of the mould Level in a continuous casting machine[C]. Proceeding 2nd IEEE Conference on Control Applications, Vancouver, B.C., 1993:53-58
- 26.Kazuya Asano, Takayuki Kaji and Hidemi Aoki, et al. Robust molten steel level control for continuous casting[C]. Proceedings 35th Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, 1996:1245-1250
- 27.R.M.C.De Keyser. Improved mould-level control in a continuous steel casting line[J]. Control Eng. Practice, 1997, 5{2}: 231-237
- 28.Thomas Jolly,Joseph Bentsman.Generalized predictive control with dynamic filtering for process control applications[C]. Preceedings the American Control Conference,San Francisco,Callifornia,1993:1741-1745
- 29.Robin De Keyser. Predictive mould level control in a continuous steel casting line[C]. Preprims IFAC 13th Triennial World Congress, San Francisco , Callifornia, 1996:487-492
- 30.R.M.C.De Keyser. Basic Principles of model based predictive control[C]. Proceedings European Control Conference ECC'91, 1991:1753-1758
- 31.Guo Ge, Qiao Junfei, Wang Wei, et al. A robust predictive mould level control method[C]. Proceedings International Workshop on Automation in the Steel Industry: Current Practice and Future Developments, Korea, 1997: 17-21
- 32.Kayako Omura, Yoshihisa Otsuka, Masami Konishi. Diagnostic expert system for mould level control equipment in continuous caster[C]. Proceedings the 6th International Iron and Steel Congress, 1990:62-68
33. J.Paiuk, A.Zanimi, M.Remorino, et al. The automatic mould level control for a

- continuous caster and practical implementation of different control algorithms[C]. Dept.of Automatization. SIDERCA, Campana, Argentina.1989
- 34.Guo Ge, Qiao junfei, Wang Wei, et al. Fuzzy predictive mould level control continuous casting[C]. Proceedings 2nd Asian Control Conference, 1997:735-738
- 35.郭戈, 王伟, 柴天佑. 一种模糊方法在结晶器液位控制中的应用[C]. 中国控制与决策学术年会论文集, 1997: 519-524
- 36.M.Dussud, P.Simonin, S.Galichet, et al. Fuzzy logic control of continuous casting installations[C]. Preprints IFAC 13th Triennial World Congress, San Francisco, Callifornia, 1996:469-474
- 37.T.Hesketh, D.J.Clememts, R.Williams. Adaptive mould level control for continuous steel slab easting[J], Automatica, 1993, 29(4):851-864
- 38.T.Kurokawa, T.Kondo, T.Mita, et al. Adaptive mould level control in continous casting by H_{∞} control theory[C]. Preprints of Second IEEE Conference on Control Applications, Vancouver, B.C., 1993:865-871
- 39.王保安, 马竹梧. 连续铸钢结晶器钢水液位自动控制及其实践[J]. 冶金自动化, 2001(4): 5-8
- 40.杨其京. 连铸液位计非线性失真的研究及解决方案[J]. 冶金自动化, 2006年增刊(S2): 553-556
- 41.赵万峰. 一种PID参数模糊自整定控制器在结晶器液位控制中的应用研究[D]. 武汉科技大学. 2003
- 42.陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型的PID控制及其应用(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社. 1998
- 43.顾树生, 王建辉. 控制工程发展概论(东北大学讲义)[M]. 东北大学. 2005
- 44.张化光. 模糊自适应控制理论及其应用(东北大学讲义)(第三版)[M]. 东北大学. 2005
- 45.姜德美, 谢守勇, 甘露萍. 步进电机启动控制算法设计[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(5): 128-132
- 46.房启超, 徐林, 王建辉, 顾树生. 改进的PSO及其在结晶器液位控制中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11):1399-1402
- 47.刘全利. 结晶器液位建模与控制方法研究[D]. 东北大学. 2000
- 48.M.Dussud, S.Galichet, and L.P.Foulloy, Application of fuzzy logic control for

- continuous casting mold level control[J], IEEE Transaction on Control Systems Technology, 1998 6(2):246-256
- 49.张逸君. 连铸结晶器液位模糊PID控制方法研究[D]. 天津大学. 2006
- 50.de Wit C, Olsson H, Astron K, et al. A new model for control of systems with friction[J], IEEE Trans Autom Control, 1995, 40(3):419-425
- 51.Keyser R D. Improved mould level control in a continuous steel casting line[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(2):231-237
- 52.Lee C C. Fuzzy logic in control systems:fuzzy logic controller[J]. IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990, 20(2):419-435
- 53.Gupto M M, Kiszka J B, Trojan G M. Multivariable structure of fuzzy control systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1986, 16(5) :638-656
- 54.丛秋波. The MathWorks: 提供科学计算和基于模型的设计技术[J]. EDN电子设计技术. 2007, 7:40-41
- 55.李伯虎, 柴旭东, 朱文海等. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9):1871-1878
- 57.虞鹤松. 可编程序控制器原理与应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1995
- 58.周万珍, 高鸿斌. PLC分析与设计应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2004
- 59.黄海. 可编程控制器(PLC)的应用及维护[J]. 特钢技术, 2006, 49(4): 44-46
- 60.Siemens AG A&D. SIMATIC S7-300 Programmable Controller Hardware and Install Manual[M]. 2002
- 61.Siemens AG A&D. SIMATIC S7-300 Automation System CPU31xC Technological Functions Manual[M]. 2002
- 62.Siemens AG. SIMATIC S7 System, Service and Programming Course[M]. 2008
- 63.西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 深入浅出西门子S7-300 PLC[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005
- 64.西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 深入浅出西门子WinCC V6[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004
- 65.Siemens AG. WinCC Configuration Manual (Volume 1) [M]. 1999

致 谢

本论文是在我的导师郑艳副教授的悉心指导和热情关怀下完成的。从论文题目的选定到研究工作的每一步进展，郑老师给我提出了许多宝贵而有益的建议，使我受益匪浅，并能够顺利地完成工程硕士课题的研究工作和最终论文的撰写。郑老师那渊博深广的学术知识和严谨求实的治学态度，给我留下了极为深刻的印象。郑老师那孜孜不倦的工作作风和平易近人的师者风范，是我今后工作树立了典范。在此，特别向郑老师致以最诚挚的敬意和最衷心的感谢！

我衷心地感谢东北大学信息科学与工程学院的各位教授、老师。他们在专业课上的悉心教导使我获得丰富的基础理论知识，为写好论文打下了坚实的基础。感谢首钢工学院的宋书华老师对我在学业和生活上的关心和帮助。

我们的班级是一个团结协作、积极进取和充满学术氛围的集体，也是一个有着深厚研究基础和实际工作经验的团队。能够在这样的环境下学习和工作，我感到非常荣幸和自豪。在我的课题研究和论文写作过程中，班级的同学为我提供了许多的帮助，从中学到了很多颇有价值的东西，使我有有了很大的进步和提高，我要向他们表示衷心感谢，其中包括张琳同学、郝占勇同学、孟凡祝同学、唐和林同学等。

衷心感谢首钢设备维检中心领导给我在工作的同时能够继续学习深造的宝贵机会，并在工作和学习上给我很大的支持。他们是：陈涛书记、汪兵副主任、陈刚副主任、韩雪超科长、宋广林科长等。

感谢我的父母、岳父母和妻子董鑫。多少年来，无论是工作还是学习，他们给予了我无限的关心、支持和鼓励。我所取得的任何成绩都有他们的一份功劳。特别向他们表示感谢！

最后，感谢所有关心、支持和帮助我的朋友们！

李 刚
2008年6月

