

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 31



ECR 长材连铸连轧生产线 连铸过程优化控制的研究

- 作者：陈志凌
- 专业：机械电子工程
- 导师：张国贤



上海大学出版社
2006年上海大学博士学



ECR 长材连铸连轧生产线 连铸过程优化控制的研究

- 作者：陈志凌
- 专业：机械电子工程
- 导师：张国贤



图书在版编目(CIP)数据

2006年上海大学博士学位论文. 第1辑/博士学位论文编辑部编. —上海:上海大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-81118-511-9

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第162521号

2006年上海大学博士学位论文

——第1辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路99号 邮政编码200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线66135110)

出版人:姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 264.75 字数 7 376 千

2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷

印数:1—400

ISBN 978-7-81118-511-9/G·513 定价:1000.00元(50册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

**Research on Optimizing Process
Control of Continuous Casting in
Endless Continuous Casting and
Rolling Line(ECR)**

Candidate: Chen Zhiling

Major: Mechanical and Electronic Engineering

Supervisor: Zhang Guoxian

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任:	冯正进	教授,上海交通大学	200030
委员:	朱立新	教授级高工,上海宝钢集团公司	201900
	费敏锐	教授,上海大学	200072
	乌建中	教授,同济大学	200080
	任忠鸣	教授,上海大学	200072
导师:	张园贤	教授,上海大学	200072

评阅人名单:

蔡开科	教授, 北京科技大学	100083
张家泉	教授, 北京科技大学	100083
张如斌	教授级高工, 中国冶金建设集团	100081

评议人名单:

费敏锐	教授, 上海大学	200072
肖子渊	教授, 同济大学	200080
胡寿根	教授, 上海理工大学	200093
冯正进	教授, 上海交通大学	200030

答辩委员会对论文的评语

“长材连铸连轧生产线”是国家科技部重大专项课题，生产线中 ECR 连铸机过程控制是关键技术之一。该选题具有重要的理论价值和实际应用前景。

论文取得以下创新：

(1) 采用智能 PID 模糊复合控制策略实现结晶器液位控制，对稳态浇注和非稳态浇注两种工况进行了模拟仿真实验，并在生产中进行了应用试验，取得了控制精度 $\leq \pm 3$ mm 的实际控制效果，是解决非稳态浇注液位控制难题的有效方法。

(2) 提出一种在冶金冷却约束条件下的启发式 GA 优化连铸矩形坯冷却工艺的方法，采用数值模拟技术与连铸冶金工艺、计算机控制技术相结合的方法，将智能技术应用于优化连铸生产工艺，为 ECR 连铸机冷却水量控制提供一个初始设计准则。

(3) 结合连铸机的实际，建立了具有自学习功能的神经网络二冷控制模型、目标温度控制模型、初始水量模型、连铸温度计算模型，构造二冷水智能 PID 控制系统。为解决二冷动态配水，实现 ECR 连铸机全程温度控制，提供了新的思路。

论文反映出作者在本学科具有宽广扎实的基础理论知识及丰富深入的专业知识，具有独立从事科研工作的能力。论文立论正确，论据充分，条理清楚，层次分明，实验数据可信。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过陈志凌同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席:**冯正进**

2006年3月18日

摘 要

本文是国家科技部重大专项课题“长材连铸连轧生产线”(课题号:2001BA306B03)的一部分。以国外某钢铁厂长材连铸连轧生产线为背景,针对长材连铸连轧生产线中 ECR 连铸机过程控制的若干关键技术做了以下研究工作。

1. 以实际连铸机为研究背景,建立了结晶器液位控制对象的数学模型,模型包括了钢包对中间包液位的影响,考虑了中间包多水口的相互影响。

2. 对结晶器钢水液位控制采用了基于专家知识的智能 PID 模糊复合控制策略。智能 PID 模糊控制系统继承了 PID 控制的优点,增加了人工智能的经验。仿真实验结果表明, PID 模糊复合控制策略可以实现稳态、非稳态工况下的结晶器液位稳定控制,控制系统对塞棒、水口结瘤、结瘤脱落等干扰具有很好的抑制作用。模糊控制规则可以在生产实践中不断积累、修改完善。PID 模糊复合控制器设计、调试简单,易于工程应用。

采用智能 PID 模糊控制的结晶器液位控制系统在实际连铸机上进行了生产现场试验,试验结果验证了仿真实验结果,结晶器液位控制精度 $\leq \pm 3$ mm,达到了引进设备的国际先进水平。

3. 结合 ECR 连铸机工艺特点,对一次冷却、二次冷却的影响因素、控制准则进行分析与研究。建立了连铸坯温度场数学模型,用有限差分法对温度场数学模型求解,对连铸坯凝固过

程进行仿真。为 ECR 连铸机工艺设计,实现连铸坯过程温度控制,作了基础性的准备工作。

运用仿真技术研究了高拉速条件下钢水在结晶器内的凝固特性,提出了结晶器热流密度分布的设计准则,为高拉速条件下的结晶器设计提供理论基础。

4. 在冶金冷却约束条件的指导下,利用遗传算法(GA)全局优化能力,提出一种启发式 GA 优化连铸矩形坯冷却条件的方法,用尽可能少的冷却水量得到尽可能接近期望的目标温度,为 ECR 连铸机冷却水量控制提供一个初始设计准则。

5. 针对连铸二冷动态配水中在拉速变化范围大的情况下,系统不稳定,水量计算偏差大等实际应用中存在的问题,提出了一种连铸二次冷却动态控制方法。

二次冷却动态控制方法改变传统的单一目标温度的方法,采用冶金约束条件允许下的变化目标温度,变化温度控制精度,变化初始水量的方法。采用神经网络模型(TTANN)实现铸坯表面目标温度及控制精度的动态设定,采用神经网络模型(IWANN)实现铸坯温度控制初始水量的动态设定,构造智能 PID 控制器。由上述控制模块与连铸温度场计算模块构成连铸二冷动态控制系统,实现了连铸二冷动态优化控制。

关键词 连铸连轧,结晶器液位控制,智能 PID 控制,模糊控制,二次冷却控制,遗传算法,神经网络

Abstract

This dissertation is a part of the important and special project ‘long products continuous casting and rolling line’ (Item No. : 2001BA306B03) sponsored by Ministry of national science and technique. Based on a long products continuous casting and rolling line aboard, and focused on some key problems of process control, following research works have been done.

1 In the background of a real continuous casting machine, mathematical models of mold level control are set up, which include effects of ladle on tundish and mutual effects of multiple nozzles.

2 Comparison and research on strategy of mold level control are made. Intelligent hybrid PID and fuzzy control is a kind of control based on expert knowledge which inherits the advantage of PID and gets experience of artificial intelligence. Simulation tests show that intelligent hybrid PID and fuzzy controller can carry out mold level control at steady and unsteady situation. The system with intelligent controller can work very well at turbulence of clogging and unclogging. Rules of fuzzy control can be added and improved in practice continuously. Design and implement of fuzzy control is simple and easy.

The field test of the mold level control system with intelligent hybrid PID and fuzzy control has been done. The result of test shows that the accuracy of system control can reach less than ± 3 mm, equals to the result of an imported device.

3 From the view point of control, analysis and research on heat exchange and thermal balance, effects of the first cooling, the secondary cooling, rules of control are made. This is essential preparation for ECR caster design and temperature control.

Considering the characteristic of ECR caster, mathematical model of bloom temperature field is set up, and the equations are solved with finite difference method to simulate the process of bloom solidification.

Solidification characteristic of liquid steel in mold at high casting speed is studied with numerical simulation, and rule of heat flux distribution in mold is proposed.

4 In guide of technological and metallurgical constraints to bloom cooling, using the ability of GA to optimize in whole range, heuristic GA method to optimize cooling parameters in bloom casting is set up to reach setting target temperature as closely as possible with the most minimum water flow rate. This work sets up initial rules for ECR caster design of cooling water control.

5 A method of dynamic secondary cooling control in continuous casting is proposed. AI PID controller is designed, which adopts the model of neural networks (TTANN) to

realize dynamic setting of aimed bloom surface temperature and control accuracy, and introduces the model of neural networks (IWANN) to realize dynamic setting of initial water flow rate for temperature control. Optimal and dynamic control of temperature is implemented in secondary cooling system of continuous casting.

Key words continuous casting and rolling, mold level control, intelligent PID control, fuzzy control, secondary cooling control, genetic algorithm, neural networks

目 录

第一章 绪论	1
1.1 ECR 长材连铸连轧生产线连铸工艺简介	1
1.2 连铸控制技术的现状与发展	3
1.3 ECR 连铸过程控制系统中需要解决的问题	13
1.4 本文的主要内容	13
第二章 结晶器钢水液位控制	15
2.1 引言	15
2.2 结晶器钢水液位控制对象的数学模型	15
2.3 结晶器钢水液位控制策略	18
2.4 仿真实验及结果	24
2.5 本章总结	29
第三章 结晶器液位控制系统的实现	31
3.1 引言	31
3.2 液位控制系统性能指标	31
3.3 系统组成	32
3.4 控制策略及控制系统设计	35
3.5 试验及试验结果	37
3.6 本章总结	41
第四章 连铸温度场的建模与仿真	43
4.1 引言	43
4.2 连铸坯冷却过程模型	43

4.3	数学模型的离散化	49
4.4	差分方程的稳定性	53
4.5	连铸机工艺参数	54
4.6	仿真步骤	55
4.7	仿真及结果	57
4.8	本章总结	65
第五章	连铸坯温度场的优化	66
5.1	引言	66
5.2	遗传算法的基本原理	66
5.3	启发式 GA 数值模拟优化连铸冷却条件和拉速	69
5.4	计算结果及分析	74
5.5	本章总结	77
第六章	连铸二次冷却的智能优化控制	78
6.1	引言	78
6.2	连铸坯二冷控制及目标温度的确定	79
6.3	连铸二冷区智能控制系统	92
6.4	仿真结果及分析	109
6.5	本章总结	119
第七章	全文总结	121
7.1	引言	121
7.2	主要成果	122
7.3	展望	123
	参考文献	124
	致谢	136

第一章 绪 论

1.1 ECR 长材连铸连轧生产线连铸工艺简介

1.1.1 ECR 长材连铸连轧工艺特点

十几年来薄板坯连铸连轧、铸坯热送、热装技术使连铸成为最活跃的领域,这些技术的发展与实践大幅度地降低了设备投入及生产成本,提高了产品的竞争力。同板材相比,长材生产在这些方面的进展则没有板坯那么明显。长材产品在钢材的总产量中占有相当的比重,长材生产推广高效连铸、铸坯热送、热装技术以及连铸连轧技术潜力巨大。2000年8月,世界上第一台 ECR 无头连铸连轧生产线在意大利 ABS 厂投产。ECR 无头连铸连轧工艺是小型钢厂生产特钢和普钢长材产品的一项创新技术。方坯生产方面的现代连铸技术在 ECR 生产线上得到了充分体现。

ECR 无头连铸连轧工艺生产实践表明,采用先进合理的连铸工艺及其配套的装备,浇注 160×200 mm 规格的连铸坯,普碳钢浇铸速度最大可以达到 6 m/min,合金钢浇铸速度最大可以达到 3.5m/min 以上,实了无漏钢连铸。经连铸机生产的连铸坯通过隧道式加热炉直接供给轧机,不间断地直接轧制。

同现有的其他生产工艺相比,ECR 无头连铸连轧生产线特殊钢生产成本平均降低 44~50 美元/吨,普通钢生产成本平均降低 12~14 美元/吨。

ECR 无头连铸连轧生产线提高了生产的灵活性,缩短供货周期,可以按用户订单需求仅用数天时间完成交货。

棒线材实现无头连铸连轧的优点是:能源消耗下降;原料收得率提高;工艺流程简化,生产费用下降;由于减少了工序,缩短了生产周

期,设备生产率和设备利用率更高;在线采用无缺陷铸坯轧制,提高了产品质量,产品的力学性能、尺寸公差、表面质量更佳;节约生产厂房面积和劳动力^[1]。

1.1.2 ECR 长材连铸连轧工艺中高效连铸的核心技术

ECR 无头连铸连轧工艺实现的核心是高效连铸机的工艺革新和先进设计。

(1) ECR 连铸机基本参数

ECR 无头连铸连轧生产线的高速连铸机基本弧半径为 9 m, 2 流。结晶器采用直弧形, 上段为直段, 下段为半径很大的弧形段。由于高拉速连铸机冶金长度较长, 采用多点弯曲、带液心的多点矫直。

(2) 结晶器技术

ECR 连铸机为了适应高拉速需要, 采用长结晶器。结晶器内腔形状设计是将铜管设计成倒锥度, 补偿铸坯凝固收缩, 减少气隙。结晶器锥度是按照浇注的主要钢种凝固收缩数据设计的。

连铸机漏钢预报系统实时监控坯壳在结晶器内的状态, 根据情况自动采取措施, 实现了“零漏钢率”。

(3) 结晶器液面控制技术

ECR 高速连铸机液面控制的特点是可以控制钢水微小流量来保证很高的液位控制精度。塞棒以适当的频率振动, 通过振动避免水口区域结瘤, 保证钢水流的正常。机构设计保证设备维修量最低。当出现事故时, 即使没有动力的情况下, 塞棒自动复位, 关闭水口。

(4) 结晶器振动

结晶器振动装置采用液压伺服驱动, 振动波形、振幅、频率可以在线调整。可以在线实现正弦、非正弦振动。

(5) 支撑导向及二次冷却

ECR 连铸机的特点是扇形段可以自动离开铸流位置, 便于例行和非正常检修和维护, 不影响车间吊车的正常工作。二次冷却区分成 11 个区域, 每个区域由自动控制系统独立控制。这样设计目的是