



连铸过程 控制理论与技术

郭戈 乔俊飞 著

7

冶金工业出版社

连铸过程控制理论与技术

郭 戈 乔俊飞 著

北 京

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了连铸过程的工艺、模型及智能控制和故障诊断理论与方法。全书共分5章,内容包括:连铸工艺及其自动化系统;结晶器液位控制系统的机理和控制方法;结晶器漏钢问题及预报漏钢的策略和措施;铸坯冷却系统的设计和控制方法;对连铸领域的发展前景和存在问题的展望与探讨。

本书可作为高等工科院校冶金工业自动化、钢铁冶金、系统工程和计算机应用等专业研究生和高年级本科生的教学参考书,也可供冶金领域的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

连铸过程控制理论与技术/郭戈等著. —北京:
冶金工业出版社, 2003.9
ISBN 7-5024-3333-3

I. 连… II. 郭… III. 连续铸造—过程控制
IV. TG249.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 066006 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)
责任编辑 戈 兰 美术编辑 王耀忠 责任校对 杨 力 责任印制 牛晓波
北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2003年9月第1版,2003年9月第1次印刷
850mm×1168mm 1/32; 4.75印张; 126千字; 142页; 1—2000册
15.00元
冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893
冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081
(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

本书以国家计委“九五”科技攻关项目子专题“合金钢连铸关键自动化技术的消化、吸收与开发”为背景,针对国内某钢铁公司合金钢四流小方坯连铸生产过程中的几个关键控制环节存在的问题,分别进行了相应的建模与控制策略研究,并探讨了其应用措施。

第1章绪论中简要讲述了连铸过程建模与控制的研究现状和存在的问题。第2章以某钢铁公司连铸机自动化系统的实施和调试为基础,简要介绍了该系统的总体设计和控制技术及其优缺点。第3章介绍了结晶器液位串级控制策略,对中间包重量和滑动水口非线性流量特性分别采取前馈补偿和非线性补偿,在结晶器液位控制回路采用一种规则自学习模糊预测控制方法,而在滑动水口及液压执行机构控制回路采用自整定控制方法。第4章分析了铸坯裂纹扩散规律并由此定量地指出合理的热电偶埋设方式,进而对传统结晶器监控热电偶系统提出了改进建议,并据此提出了两种分别基于模糊方法和神经网络的模式识别漏钢预报方法。第5章介绍了铸坯冷却控制系统,以铸坯表面温度控制回路为主回路,以冷却水量控制回路为副回路。其中,主回路采用一种运算简单的神经网络控制方法,温度设定值由一个根据铸坯凝固过程中的对

流和导热等热物理现象建立的铸坯表面温度设定模型给出;而副回路采用常规PID控制器,为了克服单纯根据拉坯速度设定冷却水量的不足,以中间包钢水温度和拉坯速度为基础建立了二次冷却水量设定模型,并针对目前中间包钢水温度断续测量的局限性,建立了中间包温度预测模型。

本书得到了东北大学柴天佑教授和大连理工大学王伟教授的热情支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,希望广大读者批评指正。

作 者

2003年3月于兰州

作者简介

郭戈,男,1972年生于甘肃省庄浪县。1990年考入东北大学自动控制系自动化仪表及其装置专业,1994年9月开始在东北大学国家冶金自动化研究中心攻读博士学位,1998年10月获博士学位。现为甘肃工业大学教授、甘肃省333科技人才、甘肃省高校跨世纪学术带头人、甘肃省555科技人才。曾参加国家“九五”科技攻关项目85-524-02-05和辽宁省优秀青年科研人才培养基金项目963007的科研工作。目前正主持国家科技攻关项目和省部级重大科研项目各1项,其他项目3项。主要研究领域为复杂工业过程建模与控制、智能控制理论及其应用等。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 连铸控制技术的现状	1
1.2 连铸控制方法研究现状	6
1.2.1 钢水液位控制	6
1.2.2 漏钢预报	13
1.2.3 二次冷却控制	16
1.2.4 连铸过程控制系统存在的问题	18
1.3 解决连铸过程控制的策略与 措施	20
第 2 章 连铸机控制技术的研究与 开发	22
2.1 连铸机自动化系统的总体结构	22
2.2 连铸机基础自动化系统	24
2.2.1 基础自动化系统的组成及其 分布	24
2.2.2 基础自动化系统的主要任务	26
2.2.3 基础自动化系统的工作方式	28
2.3 连铸机过程自动化系统	29
2.3.1 二级自动化系统的数据管理 功能	30
2.3.2 二级自动化系统的模型处理 功能	31
2.3.3 二级自动化系统的通讯功能	36
2.4 连铸过程的主要控制方法	37
2.4.1 钢包滑动水口控制	37

2.4.2	中间包塞棒控制	38
2.4.3	一次冷却控制	39
2.4.4	二次冷却控制	39
2.4.5	自动开浇	41
2.4.6	质量控制	41
2.4.7	炉次跟踪	42
2.5	连铸机自动化系统的局限性	42
第3章	结晶器钢水液位控制	44
3.1	引言	44
3.2	结晶器液位系统的模型	45
3.3	结晶器液位串级控制器设计	49
3.3.1	水口流量非线性补偿控制器	49
3.3.2	中间包重量前馈补偿控制器	50
3.3.3	滑动水口位移控制器	51
3.3.4	结晶器液位模糊预测控制器	54
3.4	仿真实验及结论	65
第4章	漏钢预报	77
4.1	引言	77
4.2	漏钢预报热电偶系统	80
4.2.1	断裂口的扩散	81
4.2.2	热电偶系统的改进	84
4.3	模糊漏钢预报方法	86
4.3.1	温度测量数据处理及模式识别方法简介	86
4.3.2	模糊温度模式识别方法	87
4.3.3	基于神经网络的温度模式分类方法	89
4.3.4	模糊决策及漏钢预报系统	91
4.4	仿真实验及结论	94
4.5	实施漏钢预报时应注意的事项	102
第5章	铸坯冷却控制	104
5.1	引言	104

5.2 铸坯冷却过程模型	105
5.2.1 传热模型	106
5.2.2 钢水流动模型	108
5.2.3 凝固壳生长模型	109
5.2.4 中间包温度模型	111
5.3 铸坯冷却模型仿真实验	114
5.4 铸坯冷却控制	119
5.4.1 铸坯冷却控制系统原理及其结构	119
5.4.2 铸坯冷却水量设定	121
5.4.3 铸坯冷却水量控制器设计	124
5.4.4 铸坯冷却温度神经网络控制	124
5.5 铸坯冷却控制仿真实验	130
结束语	135
参考文献	136
作者简介	

第 1 章 绪 论

1.1 连铸控制技术的现状

连铸是将液体金属经过一组特殊的冷却和支撑装置连续地浇铸成一定断面形状的铸坯的过程。连铸的最初设想是由英国转炉发明者 Henry Bessemer^[1] 于 1856 年提出来的,1930 年连铸技术开始用于铜、铝等有色金属的生产之中。由于钢的熔点高而导热性能较差,所以钢的连铸比有色金属更加困难。直到 1933 年 S. Junghans^[2,3] 的结晶器振动技术才取得突破,1943 年连续铸钢实验装置开发成功,使得在钢铁工业生产中采用连铸技术成为可能。连铸真正在钢铁工业中的应用开始于 20 世纪 60 年代,此后连铸技术不断改进,连铸工艺更是迅速完善。我国是较早开始研究连铸技术的国家之一,1957 年在上海建成一台高架立式方坯连铸实验机,次年在重钢三厂建成我国第一台用于工业生产的立式连铸机,1964 年又在该厂建成我国第一台也是世界最早的 R6 m 弧形连铸机。另外,在电磁搅拌技术、二次冷却水自动控制技术等研究方面也取得了较大进展,许多连铸机都配备有二级或三级自动化控制系统。

从 20 世纪 50 年代开始,经过几十年的发展,连铸技术已经发展成为一项很重要的冶金生产技术。与传统的模铸相比,连铸不但简化了生产工艺流程、提高了生产率和产品质量,而且金属收得率较高、能耗和生产成本也大大低于模铸。所以连铸在冶金工业中占有十分重要的位置。连铸机按照机型分为立式、立弯式、垂直多点弯曲式、弧形以及水平形等,其中弧形连铸机占 60% 以上。按照铸坯形状,连铸机又可分为板坯连铸机、大方坯连铸机和小方坯连铸机等,其中小方坯连铸机约占 50%。图 1-1 为小方坯弧形

连铸机的结构简图。随着计算机技术和自动化技术的迅速发展及在连铸生产中的广泛应用,以及诸如铸坯轻压下技术、电磁搅拌技术等不断涌现,使连铸开始向近终型连铸、多炉连浇、热送、热轧以及炼钢-连铸-连轧短流程的方向发展。由于连铸在钢铁工业生产中有着十分重要的作用,因此连铸过程的建模与控制已成为目前国内外自动控制领域的研究热点之一,连铸和炼钢、连轧一起构成了带动钢铁工业革新和进步的三驾马车。

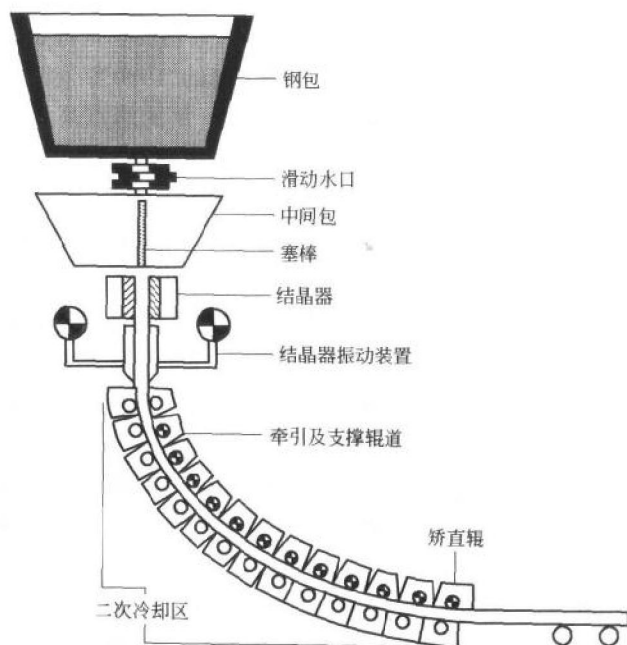


图 1-1 弧形连铸机的结构简图

连铸过程控制的复杂性体现在:(1)存在着可测或不可测的扰动和未建模动态;(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,目前对连铸过程从建模和控制角度进行的研究还很少,而常用的 PID 控制方法不能得到令人满意的控制效果。因此,国内外的学者和专家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到连铸生产过程各环节的控制之中,而且较好地解决了各环节之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。同时,在连铸计划的编制、最优浇次的分配以及炼钢-连铸-连轧一体化生产的管理和调度策略等方面进行了许多富有成效的研究工作。本章以结晶器液位控制、漏钢预报、二次冷却控制等为主,论述了国内外连铸过程建模、控制、监测和优化调度与管理等方面的理论研究和应用现状、存在的问题及其发展方向。

近十余年来,连铸技术取得了显著的进步,其中包括中间包钢水加热技术、结晶器钢水流控制技术、铸坯轻压下技术和高温铸坯制造技术等。下面分别加以叙述。

连铸过程中钢水温度对铸坯质量影响很大。为了将钢水温度降低幅度控制在较小的范围之内,有必要对中间包实行加热。中间包加热有感应加热和等离子加热两种方式。日本新日铁公司的八幡厂和室兰厂采用的是感应式,名古屋厂和我国的抚钢等厂家则采用等离子加热方式。中间包加热技术可以大幅减少由于非正常浇铸时的温度变化所造成的浸入式水口堵塞和铸坯质量降低等不利影响。

最先发展起来的结晶器内钢水流控制是钢水电磁搅拌技术,它使得铸坯表层下的夹杂物和气泡明显减少,使初期铸坯凝固壳厚度均匀,铸坯表层的偏析也减少,从而使纵裂等铸坯裂纹大大减少。甚至,原来无法采用连铸的一些半镇静钢也可以采用连铸了。但是,当进行高速浇铸时,单位时间内流入结晶器的钢水量很大,即使稍微出现紊流都会导致铸坯凝固壳的生成不稳定,而且夹杂物难于上浮,容易使保护渣卷入钢水。为了确保高速浇铸时的铸坯质量和使操作稳定,有的钢厂采用静止磁场、局部磁场等措施

对由浸入式水口流入结晶器的钢水流进行控制,使结晶器内的钢水流动始终处在最佳状态。

为了克服铸坯中心偏析和缩孔等缺陷,铸坯轻压下技术从 20 世纪 80 年代就开始用于连铸之中。在此之前,无论方坯连铸还是板坯连铸一直都采用低温浇铸和电磁搅拌技术,虽然对于改善宏观偏析起到了很好的作用,但无法改善半宏观偏析和微孔隙。在采用铸坯轻压下技术后,通过抑制凝固收缩引起的钢水流动,基本补偿或抵消了铸坯凝固收缩量,从而改善了板坯半宏观偏析、微孔率甚至微观偏析。与板坯相比,方坯的最终未凝固区变小。这种技术已在日本新日铁公司的八幡厂、室兰厂和君津厂得到实际应用。

随着连铸技术的不断进步,热连轧 HCR、热送直接轧制 HDR 以及连铸-直接热轧 CC-HDR 等短流程生产已经具备了基本的技术基础,并已逐渐成为钢铁工业中的一个主要生产流程。这种技术不但简化了工艺、缩短了生产周期,而且由于不经过加热炉,所以减少了鳞落量,提高了金属收得率。近来,有些钢厂为了进一步节能和提高金属收得率,正在推行小方坯连铸的棒、线材铸态化生产,即省略开坯轧制。这一技术 1991 年在新日铁公司室兰厂的连铸机上开始投入实际应用,一些质量指标基本达到了要求。

目前,许多先进工业国家的连铸比已经达到 80% 以上,少数国家已实现了全连铸。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,电气传动控制则采用交流调速和矢量控制技术,并采用二级或三级自动化系统实现连铸生产自动化。下面讲述代表着目前世界上自动化技术最高水平的一些连铸机自动化系统。

新日铁公司君津 4 号二流板坯连铸机通过二级计算机系统自动控制结晶器冷却水量和结晶器振动参数,配备了一些必要的控制仪表和检测元件,如钢包钢水流量控制仪表、结晶器保护渣喂送仪表、结晶器液位涡流传感器和热电偶等。连铸机的中心控制室与切割控制室互相结合,由遥控割锯完成铸坯切割,通过电视监视

器进行生产监督。在保证最佳收得率的情况下,由过程计算机给出最佳切割长度,而且在线切除切头并用遥控车运走,定尺铸坯则在计算机控制系统控制下由出坯辊道运走。采用该系统后,连铸车间的工作人员数量大大减少。

二级控制系统虽然比较先进,但目前已有许多厂家采用了更为先进的三级自动化系统。如德国东方钢铁公司的连铸机采用的便是一个典型的三级自动化控制和信息处理系统,其中第一级和第二级分别由 Jeumont-Schneider 可编程控制器和西门子 Teleperm-MMSR 基础自动化系统构成,第三级为单独的一个计算机系统。还有一台故障计算机与所有生产设备相连,负责连铸生产过程的故障诊断。该控制系统主要包括生产计划编制系统、转炉炼钢控制系统、板坯连铸控制系统、大方坯连铸控制系统、铸坯清理控制系统等。此外还有一个用于离线分析和软件开发的备用控制系统,采用放射性液位仪完成结晶器液位的检测和控制。另外,美国国家钢铁公司 2 号连铸机控制系统也采用了三级计算机控制系统,其中第一级为由可编程控制器 PLC 构成的集散控制系统 DCS;第二级为 VAX-11/785 型数字计算机构成的设备监控系统,它对第一级控制系统进行信息跟踪、存储和为其提供给定值,并同第三级交换信息;第三级为一个负责炼钢和连铸生产调度的计算机系统。该系统可以根据质量控制系统提供的数据做出关于质量状况、生产数据、收得率等的详细报表,并为操作员提供操作指导。

在优化生产工艺方面,该控制系统能够在线计算转炉区的装炉料和合金添加料以及连铸区的最优拉速和最优冷却水量,并可显示每个设备的运行状况。此外,中间包配备有称重仪表,结晶器配有一台数控坐标位置测量仪和放射式液位仪,它们分别用于中间包重量控制、校准结晶器位置以及结晶器液位控制。并用一台微机来收集自动开浇所需的有关数据,实践证明采用这种自动开浇技术,即使在浇铸小方坯时也能保证良好的浇铸效果。另外,美国国家钢铁公司大湖分公司新建的 2 号一机双流连铸机的二级自

动化系统还可以完成拉速优化计算;根据第三级自动化系统提供的订货信息计算最佳切割长度;为一级系统提供水雾冷却参数和切割长度设定值;显示和记录与结晶器液位、拉坯速度以及铸坯温度等相关的操作条件。还有一些连铸车间采用了能够对工艺流程进行优化的控制系统。如德国阿尔贝德·萨尔公司伏克林根厂的四台连铸机采用相同的分级控制系统实现生产记录、过程控制、物料跟踪等功能,控制从转炉装料到铸坯切割的整个生产过程中的各项工序。

除此之外,国外有些厂家的连铸机已经采用了四级自动化系统。美国内陆钢铁公司 2 号和 3 号连铸机都配备了四级自动化信息系统。其中第一级为显示控制系统,由集散控制系统 DCS、可编程控制器 PLC 和 CRT 显示器组成;第二级由过程计算机和 CRT 组成,用于设备监控;第三级为用于协调和监视连铸车间各生产设备的操作的计算机系统;第四级为中心数据处理计算机系统,用来管理和调度连铸及其相关工序,使各工序协调生产,并保存连铸车间的历史数据。该厂的二次冷却控制系统采用动态冷却控制模型进行控制,铸坯引锭杆上安装有辊缝检测装置和用于辊缝监视的脉冲发生器,以便校准夹辊辊缝和进行夹辊维修。

1.2 连铸控制方法研究现状

1.2.1 钢水液位控制

连铸过程中的液位控制包括结晶器中的钢水液位控制和中间包中的钢水液位控制,其中后者是通过控制中间包内钢水的重量而间接实现的。中间包重量控制系统和结晶器液位控制系统中都采用液压伺服机构作为执行机构,在中间包重量和结晶器液位发生变化时,通过该执行机构来调节滑动水口或塞棒水口的开度,从而使系统输出稳定在设定值。由于两者具有相似性,所以这里以结晶器液位控制问题为例进行讨论。

结晶器液位的检测是制约我国连铸过程控制和生产自动化的瓶颈之一。常见的结晶器液位检测方法主要有放射性同位素法、热电偶法、涡流法以及超声波法等。目前,日本新日铁公司、我国武钢三炼厂以及陕西钢厂二炼厂的部分连铸机采用涡流法,德国阿尔贝德·萨尔公司伏克林根厂及陕西钢厂采用放射性同位素法,日本新日铁公司君津4号板坯连铸机采用热电偶法,我国宝钢也采用过这种方法。另外,还有电磁感应法、激光法、红外线法以及工业电视摄影法等,它们各有特点,在国内外使用效果也都较好。这些结晶器液位检测方法中最为成熟的是放射性同位素法,其精确度可达5 mm,性能稳定可靠而使用寿命较长,且便于安装而又经济实用,适用于绝大多数连铸机,尤其是小方坯连铸机。但是,由于放射线对人体有害,目前几乎已不再使用这种方法了。如宝钢曾经采用放射性同位素法,现在已改用热电偶法和电磁感应法检测结晶器液位。国内目前只有东北大学和核工业部261厂分别研制成超声波液位计和用 Co^{60} 作为放射源的结晶器液位测量仪,但还不曾有厂家正式使用。除此之外,还没有研制生产结晶器液位检测仪器的厂家,一旦需要只好引进。

关于模型辨识,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,因为阶跃响应实验是基于开环系统进行的,由于结晶器的积分作用,液位可能会偏离设定值很远,甚至发生溢钢或漏钢等危险。另外,液位系统中的扰动比较剧烈,要想得到理想的信噪比,就必须选择幅值比较大的阶跃信号,而这样会导致液位的剧烈波动。而当阶跃信号减小到满足过程操作要求的幅度时,液位输出就几乎被高频噪音湮没了。

考虑到操作安全性和稳定性,较为有效的方法是在正弦信号激励下采用现场中的PI(D)控制器进行闭环辨识。但这种辨识方法的噪声性能和鲁棒性较差,要求过程中无噪声或噪声很小。而结晶器液位控制系统中存在着较强的噪声扰动,因此用这种方法所得到的模型可能存在着偶然性干扰因素的影响。同时,由于结晶器液位系统具有非线性和时变特性,固定不变的过程模型必然得

不到理想的控制效果。为此,我们在研究结晶器液位控制系统时建立了一个 CARIMA 模型,并用扩展递推最小二乘法对开环系统进行了辨识。在实时辨识时对输入输出数据进行低通滤波,从而消除了噪声扰动,确保了辨识的稳定性和鲁棒性。

另外,T.Hesketh 等^[18]在某板坯连铸机结晶器液位控制系统参数辨识时采用了顺序预测误差法,将辨识所得参数向量用于控制器设计之前,先对其进行低通滤波,从而使这种参数辨识方法能够跟踪液位系统的参数变化,使辨识对于参数变化具有鲁棒稳定性。

传统的 PID 控制策略只有在特定工艺条件下才能实现较为有效的结晶器液位控制。其不足之处在于:(1)系统开环增益较大,即使很小的扰动也会引起较大的偏差;(2)无法克服系统因滑动水口等存在死区或摩擦而具有的非线性特性;(3)由于拉速等的扰动作用,系统的鲁棒性较差。

1.2.1.1 基于 PI(D)的液位控制策略

A 高频抖动补偿

克服由塞棒摩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,从而使液压执行机构产生抖动以消除塞棒摩擦和死区,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。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,夹渣极易被卷入钢液中。

B 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 PI(D)控制器的情况下在其中加入一个高频带线性补偿控制器。在控制信号的导数发生变化时,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。