

带钢冷连轧生产系统的 动态智能质量控制

DAIGANG LENGLIANZHA SHENGCHAN XITONG DE
DONGTAI ZHINENG ZHILIANG KONGZHI

程 菲 任 飞 著



冶 金 工 业 出 版 社
Metallurgical Industry Press

带钢冷连轧生产系统的 动态智能质量控制

程 菲 任 飞 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社

内 容 提 要

针对带钢冷轧过程质量控制的特点,本书提出了一种基于模糊逻辑推理和神经网络的动态智能质量控制器 DIQC。本书介绍了在最大输出误差点添加新隶属函数的构造性动态结构的控制器以减轻偏差/方差两难问题、控制器的全局逼近性质、参数的局部性与线性化要求;为达到全局闭环稳定而需要的全局控制方案、激励持续条件、学习率的界定;对于泛化能力的可靠性、数据分布的优化策略、在线学习条件、控制器反馈结构;去模糊化方法的选定、 $T - \text{norm}$ 算子与隶属函数的选择、 $\varepsilon -$ 完备性要求以及模糊相似程度判定等内容。

本书可供从事自动化、连铸连轧等相关专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

带钢冷轧生产系统的动态智能质量控制/程菲,任飞著. —北京:冶金工业出版社,2014.7

ISBN 978-7-5024-6643-5

I. ①带… II. ①程… ②任… III. ①带钢—冷轧—质量控制
系统—智能控制—研究 IV. ①TG335.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 153045 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6643-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京慧美印刷有限公司印刷

2014 年 7 月第 1 版,2014 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 8.5 印张; 167 千字; 128 页

36.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

冷轧是带材生产的主要工序之一，所生产的冷轧板带属于高附加值钢材品种。冷轧的带钢、薄板产品由于具有表面质量好，尺寸精度高、工艺性能好等优点，被广泛地应用于航空、汽车、电子、化工、家电、造船、建筑、食品及民用五金等国民经济中的各个部门。

目前带钢冷轧机的主流是五机架冷连轧机，其生产线上还包括上料设备、开卷机、取卷机等众多配套设备。欲使这样一个复杂的生产系统间各设备密切配合，正常运转，必须要有基于计算机与通讯技术的现代自动控制技术作为保障。因此，编写一本深入介绍冷轧生产线智能控制原理及应用的书籍就显得非常必要。为了满足企业更多、更深入地学习和应用智能控制方法的要求，作者基于攀枝花钢铁公司带钢冷轧线生产与控制方面的工程实践，编写了本书。

本书由带钢冷连轧系统智能控制理论体系、支撑技术和实施过程三部分组成。以介绍基于模糊逻辑推理和神经网络的带钢冷连轧动态智能质量控制器 DIQC 为主线，详细介绍了冷连轧过程质量控制理论及其方法。全书共分 8 章，主要内容分别为带钢冷连轧系统概述、智能算法与工业控制、基于模糊神经网络的冷连轧动态智能质量控制、冷连轧过程数据处理、采集与跟踪、基于 DIQC 的冷连轧机轴扭振控制、基于 DIQC 的冷连轧偏心与硬度干扰控制、基于 DIQC 的冷连轧厚度控制等。

作者的初衷是试图寻找一种有效的控制方法，以解决带钢冷连轧生产系统的控制问题。该系统具有复杂性、非线性、因素间强耦合、

时变性等特点,且往往受干扰与噪声的影响,具有很强的不确定性。针对这些特点,本书提出基于模糊逻辑推理和神经网络的,具有自组织、自学习功能的动态智能质量控制器 DIQC 理论,并利用过程输入-输出的测量数据和可调结构与参数的参考模型来实现冷连轧生产的在线智能控制。

书中对智能控制器 DIQC 构建过程中涉及的多个具体问题,如采用在最大输出误差点添加新隶属函数的构造性动态结构的控制器以减轻偏差/方差两难问题,对控制器的全局逼近性质、参数的局部性与线性化要求等也进行了阐述。同时,还介绍了其他一些方法,如为达到全局闭环稳定而需要全局控制方案、激励持续条件、学习率的界定等。

本书采用仿真方法对 DIQC 控制器进行了有效性验证,并与 PID 控制方法及另一常用动态构造神经网络控制器 CCNC 进行对照比较。

本书由杭州电子科技大学讲师程菲与安徽省黄山市黄山区二中教师任飞共同编写完成。其中程菲完成全文构思与理论及算法部分,数据处理及仿真实现由任飞完成。感谢浙江省自然科学基金(LY13G010006)对本书出版的资助。感谢厦门大学自动化系罗键教授、何善君博士对本书理论与仿真实现过程中给予的指导与帮助。感谢攀枝花钢铁集团冷轧厂王承忠工程师在本书基础数据收集环节给予的大力协助。还有很多其他老师、同学以及攀钢有关部门的领导与技术人员的支持,在此不再一一列出。编撰过程中引用或参考了一些相关书籍的资料,在此对这些文献的创作者一并表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,诚请广大读者批评指正。

著 者

2014 年 5 月于杭州

目 录

1 绪论	1
1.1 冷连轧工艺流程简介	1
1.2 冷连轧计算机质量控制系统	2
1.2.1 带钢冷连轧计算机控制的发展与趋势	2
1.2.2 冷连轧计算机质量控制系统类别	4
1.3 攀钢冷连轧计算机控制系统的组成及其存在的问题	6
1.4 带钢冷连轧系统的智能化控制要求	9
1.5 智能控制在轧制工业领域的发展	10
1.5.1 国外发展情况	12
1.5.2 国内发展情况	13
1.6 本书所解决问题	15
2 智能算法与工业控制	17
2.1 概述	17
2.2 人工智能(AI)	17
2.3 神经网络与控制	17
2.4 模糊逻辑推理系统与控制	20
2.4.1 模糊推理机	23
2.4.2 模糊逼近计算	24
2.5 模糊神经网络	24
2.6 智能控制和学习控制	27
2.6.1 简介	27
2.6.2 智能控制与古典控制方法的联系	27
2.6.3 学习控制的分类	30
2.6.4 讨论	30
2.7 小结	31
3 基于模糊神经网络的冷连轧动态智能质量控制(DIQC)	32
3.1 控制问题简述	32

3.2 带钢冷连轧自动厚度控制(AGC)的理论基础	33
3.2.1 自动厚度控制(AGC)基本环节	33
3.2.2 轧机弹跳方程	34
3.2.3 轧件塑型曲线与 $F-h$ 图	34
3.2.4 解析法	35
3.2.5 流量 AGC 系统	36
3.3 动态智能质量控制(DIQC)思想及需要解决的问题	36
3.4 冷连轧质量控制系统函数逼近方法的选取	38
3.4.1 简介	38
3.4.2 参量与非参量方法	39
3.4.3 逼近方法	41
3.4.4 讨论	44
3.5 DIQC 泛化能力提高条件	45
3.5.1 泛化与激励	45
3.5.2 闭环控制中的激励	46
3.5.3 过程特点与泛化能力	46
3.5.4 小结与讨论	47
3.6 DIQC 优化方法的选用研究	48
3.7 DIQC 中 FNN 动态网络结构研究	49
3.7.1 简介	49
3.7.2 Pruning 算法的分类	50
3.7.3 构造算法的分类	51
3.7.4 DIQC 中 FNN 结构调整算法	53
3.7.5 DIQC 中“模糊与”乘积算子方法	54
3.7.6 DIQC 中 ε 完备性要求	55
3.7.7 讨论	56
3.7.8 小结	56
3.8 DIQC 输入域要求及局部性网络架构	56
3.9 DIQC 在线学习的必要性	59
3.10 DIQC 反馈结构的必要性	59
3.11 DIQC 的稳定性研究	60
3.11.1 简介	60
3.11.2 激励的持续	61
3.11.3 学习率边界	63
3.11.4 小结与讨论	65

3.12 全局 DIQC 的构建设计	67
3.12.1 全局协调控制策略	67
3.12.2 子系统 FNN 结构及算法	69
3.13 FNN 的学习算法实现	71
3.14 小结	73
4 冷连轧过程数据处理、采集与跟踪	77
4.1 引言	77
4.2 钢卷原始数据处理	78
4.2.1 一级基础自动化需要请求钢卷原始数据的区域	78
4.2.2 钢卷原始数据	78
4.2.3 一级基础自动化的钢卷原始数据人机接口	78
4.2.4 钢卷缺陷数据	79
4.3 数据采集 (DAC)	79
4.3.1 概述	79
4.3.2 钢卷数据采集	79
4.3.3 故障状态下的过程数据采集	80
4.4 带钢跟踪 (STR)	81
4.4.1 概述	81
4.4.2 跟踪的信息	81
4.5 钢卷跟踪 (CTR)	82
4.5.1 自动方式和后备方式的转换	82
4.5.2 酸洗线的钢卷跟踪	83
4.5.3 后备方式下活套跟踪数据	84
4.5.4 出口钢卷跟踪 (钢卷数据跟踪 2 功能)	84
4.5.5 一级基础自动化与二级控制界面	84
4.6 基于 IBA 的冷连轧过程数据收集与跟踪系统	84
4.6.1 PDA 系统硬件	85
4.6.2 PDA 硬件配置及分析	86
4.6.3 PDA02 硬件配置及分析	89
4.6.4 PDA 的系统软件以及通道设置	91
4.6.5 PDA 过程数据采集及其分析系统的作用	92
4.7 小结	93
5 基于 DIQC 的冷连轧机轴扭振控制	94
5.1 引言	94

VI 目 录

5.2 问题描述	94
5.3 串联式冷连轧机双质量系统	95
5.4 仿真结果与讨论	98
5.5 小结	101
6 基于 DIQC 的冷连轧偏心与硬度干扰控制研究	102
6.1 问题描述	102
6.2 仿真模型	104
6.3 仿真结果与讨论	105
6.4 小结	107
7 基于 DIQC 的冷连轧厚度控制 (AGC) 研究	108
7.1 问题描述	108
7.2 仿真模型	109
7.3 仿真结果与讨论	111
7.4 小结	115
8 结论与展望	116
参考文献	117

1 绪 论

1.1 冷连轧工艺流程简介

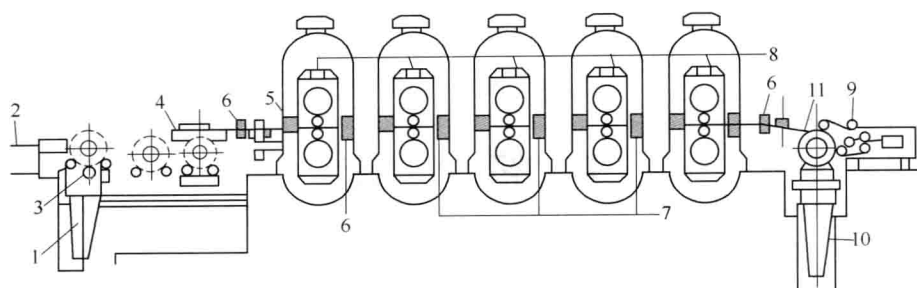
冷轧带钢是带材的主要成品工序，其所生产的冷轧薄板属于高附加值钢材品种。由于冷轧的带钢、薄板产品具有表面质量好，尺寸精度高和优良的机械、工艺性能等优点，因而被广泛应用于航空、汽车、电子、化工、家电、造船、建筑、食品及民用五金等国民经济各个部门。

钢铁冶金工业具有典型的生产流程。从炼铁开始到冷轧产品的主要生产工艺流程，根据各个工序间的紧密衔接程度，大致可分为四个主要工序：炼铁工序（iron - making）、炼钢工序（primary steel - making）、热轧工序（hot - rolling）和精加工冷轧工序（cold - rolling）。冷轧工序属于钢铁企业的尾部工序之一^[1]。

早期的冷轧带钢是在单机架上经多道次反复轧制成型的。这种单轧机的生产方式速度低，生产出的冷轧带钢质量差^[2]。后来大规模、高产量的冷轧带钢生产都采用连续式多机架冷轧机。目前的连续式冷轧机一般有四机架、五机架、六机架等几种配置形式。一般四机架冷轧机由于总变形量小，大都用于生产比较厚的带钢，成品的厚度在 0.35mm 以上^[3]。而五机架及六机架冷轧机主要用于生产薄规格产品，成品厚度最薄可达 0.15mm。而六机架冷连轧机不论是生产薄规格带钢的能力，或是实际生产速度的提升，并不比五机架冷连轧机具有太大的优越性，因此五机架冷连轧机便成为当今带钢冷连轧机的主流^[4]。典型的五机架冷连轧机组设备如图 1-1^[5]所示。

带钢冷连轧机生产线上除了五机架冷轧机主体设备以外，还包括头部的上料设备、开卷机以及尾部的卷取机。在旧式无头轧制的连续冷轧带钢生产线上，轧制线头部还有矫直机、焊接机及活套等设备。这些设备不仅要与五机架冷连轧机密切配合，做到动作步调一致，而且必须保证五机架冷连轧机上位置控制、厚度控制、张力控制、速度控制以及板形控制的顺利进行。由此可见，五机架冷轧机生产线操作是极其复杂的，仅依靠人力操作很难完全胜任此项工作。因此，五机架冷连轧机的出现必须要有自动控制和计算机技术发展作为基础。

由于冷轧原料——热轧卷终轧温度高达 800 ~ 900℃，其表面生成的氧化铁皮层必须在冷轧前去除，因此目前冷连轧机组都配有连续酸洗机组。

图 1-1 五机架冷连轧机组设备示意图^[5]

- 1—钢卷小车；2—拆捆机；3—步进式梁；4—开卷机；5—辊式压紧器；6—同位素测厚仪；
7—电磁式测厚仪；8—液压压下装置；9—助卷机；10—钢卷小车；11—张力卷取机

图 1-1^[5]所示传统五机架冷连轧机组工作流程为：经过酸洗处理后的热轧带卷，用吊车吊到上料步进梁，送到钢卷小车以装到开卷机上，通过开卷刮刀、夹送辊将带头送到矫直辊准备进入轧机实现穿带过程，带钢以穿带速度逐架咬入各机架（逐架建立机架间张力），当带头进入卷取机卷筒并建立张力后，机组开始同步加速至轧制速度（20～35m/s），进入稳定轧制阶段，各自动控制系统相继投入，稳定轧制段占整个轧制过程的 95% 以上。在带钢即将轧完时轧机开始减速，以使带尾能以低速（2m/s 左右）离开各个机架，避免损坏轧辊及带尾跳动。带尾进入卷取机后自动停车，卸卷小车上升、卷筒收缩，以便卸卷小车将钢卷卸出并送往输出步进梁，最终由吊车吊至下一工序。四机架冷连轧机机组工作流程与其相仿，主要用于轧制中厚板^[6]。冷连轧生产流程如图 1-2 所示。本书讲述的主要内容是基于四机架酸轧联机机组的。

近年来随着一批新建热连轧机的投产，我国冷连轧建设的迫切性进一步加大。在今后的一段时间内，冷连轧机与其配套的镀层等处理线将是我国冶金工业的重点建设项目。

1.2 冷连轧计算机质量控制系统

1.2.1 带钢冷连轧计算机控制的发展与趋势

从 20 世纪 50 年代开始，随着电子技术和自动控制理论的发展，美国首先开始在轧钢生产中采用晶体管逻辑控制、厚度自动控制、卡片程序控制等新技术，使轧钢过程自动化程度有较大的提高^[7]。与此同时，轧钢过程的各主要参数，如温度、尺寸、速度、位置和轧制力等的检测仪表也相继研制成功，从而为在轧钢过程中采用电子计算机实现综合自动化创造了条件。

1960 年以来，美国又率先在轧钢生产中采用电子计算机进行过程控制和生

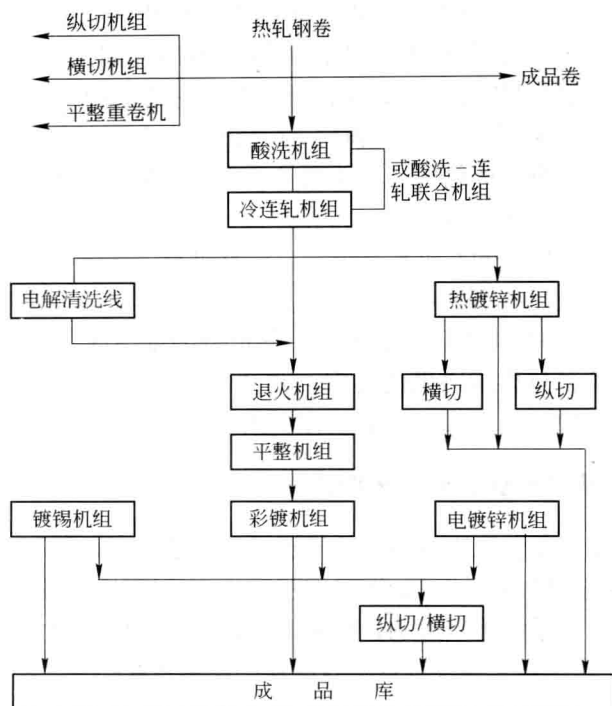


图 1-2 冷连轧生产流程图

产管理，并取得显著成效^[8]。电子计算机最初是在带钢热连轧机上成功获得应用的，在取得实用经验的基础上，于 1968 年以后逐步在带钢冷连轧机上也实现了计算机控制^[9]。在这阶段中出现的计算机都以磁芯作为内存储器，存储容量一般为 8 ~ 64K，以磁鼓作为外存储器，存储容量一般为 16 ~ 256K。计算机的输入设备主要为纸带阅读器、纸带穿孔机、卡片阅读器和卡片穿孔机。从计算机控制系统结构上看，代表当时轧钢领域最高技术水平的冷连轧机的控制系统主要是采用一台中小型计算机对生产过程进行集中控制。采用集中控制有两大缺点：一是一旦控制机出现故障，必将造成整条连轧生产线停产，使轧制作业率降低；二是过分集中的计算机控制系统，由于功能范围广泛，从实时控制到生产管理，从生产调度到故障处理，要建立一个统一的有效的数学模型是相当困难的。

冷连轧机的计算机控制水平是由低级到高级、由局部到全局逐步提高的。自 20 世纪 70 年代末期以后，随着微型计算机工业的崛起，新建的连轧机几乎全部采用分级控制或分散控制。即由几台微型机分别承担冷连轧机的部分控制功能，并代替部分或全部模拟调节器直接对冷轧生产过程进行数字控制，即实行直接数字控制（DDC）。另由一台或两台计算机向各 DDC 发出指令或设定值，实行监督

控制（SCC）。在此阶段，用于控制的计算机装备水平有了极大的提高，冷连轧机上用的控制计算机一般都用半导体存储器作为内存储器，内存容量达 64 ~ 256M 或更高，用硬磁盘作为外存储器，硬盘容量达 2 ~ 8.6G。计算机输入则用键盘或网络，使用起来更为方便。同时，计算机在生产管理方面的应用范围也逐渐扩大，除积累和分析生产数据、事故记录、产品分类、打印报表外，还可以用于生产调度和安排生产计划等。

由于对冷轧薄板质量的要求越来越严，计算机控制系统已是冷连轧不可缺少的组成部分。随着液压控制系统的广泛应用（液压压下、液压弯辊、液压窜辊机构），加上全部控制都将作用于轧辊 - 轧件形成的变形区，因此冷连轧控制系统需要满足高速控制与高速通讯的要求，此“二高”特点决定了冷连轧控制系统的发展趋势是“快速”分布式计算机控制系统。

1.2.2 冷连轧计算机质量控制系统类别

计算机控制系统是保证带钢冷连轧机正确而有条不紊运行不可缺少的中心环节。冷连轧机的质量控制系统自始至终伴随着冷连轧机的发展逐步走向成熟。虽然冷连轧机质量控制系统千差万别，但从体系结构上大体可分为以下三类^[10]。

1.2.2.1 计算机监督和模拟调节器组成的控制系统

该控制系统原理图如图 1-3 所示。

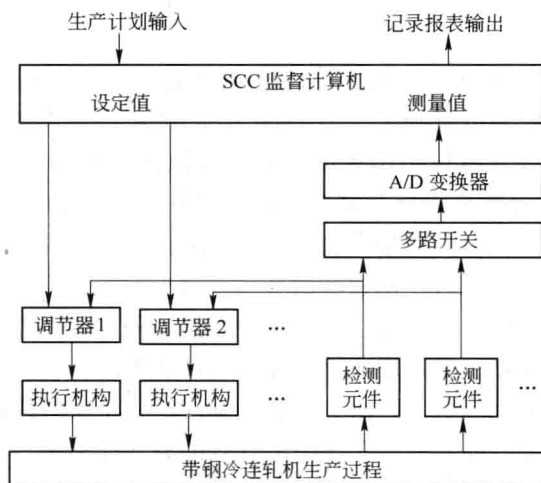


图 1-3 计算机监督和模拟调节器组成的控制系统控制原理图

在这种控制系统中，上一级为监督计算机（SCC），下一级为模拟调节器。监督计算机的作用是接收生产管理计算机发来的信息，对轧制线上的带钢进行跟

踪, 选择最佳的轧制规程, 按照数学模型计算设定值, 输出设定值到下一级的模拟调节器。此设定值在模拟调节器中与检测值进行比较后, 其偏差值经模拟调节器计算后输出到执行机构, 以达到调节生产过程的目的。这样, 控制系统就可以根据轧制过程中参数的变化, 不断地改变设定值, 以达到实现最优控制的目的。

模拟调节器是以集成运算放大器为基础构成的硬件模块。由监督计算机提供被控制量的设定值, 通过模拟调节器进行比例、积分或比例积分调节, 以完成对辊缝位置、轧制力、张力等参数的调节。

1.2.2.2 计算机监督和数字控制器组成的控制系统

该系统控制原理如图 1-4 所示。

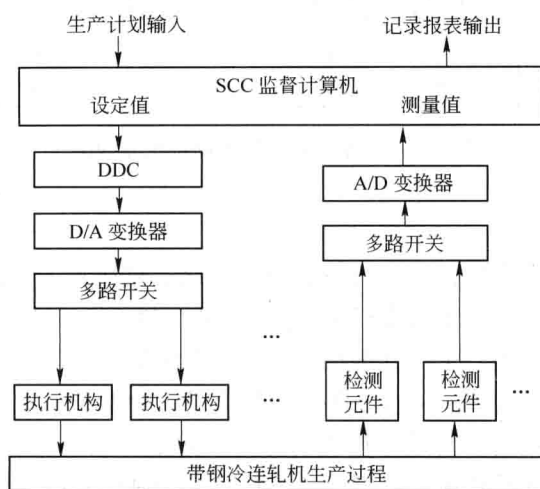


图 1-4 计算机监督和数字控制器组成的控制系统控制原理图

本系统为两级计算机控制系统。上一级为监督计算机, 其功能与计算机监督与模拟调节器组成的控制系统中的监督计算机一样, 完成轧制策略和预设定值计算。直接数字控制在测量值传送到监督计算机的同时, 将其送到直接数字控制器中与监督计算机发送的设定值进行比较, 其偏差由直接数字控制器进行数字控制计算, 然后经 D/A 转换器控制执行机构对轧制过程进行调节。这种控制系统具有许多优点: 控制规律可以改变, 控制精度高, 使用灵活方便, 而且系统比较简单。

1.2.2.3 分布式计算机控制系统

所谓“分布式计算机控制系统”(见图 1-5), 就是将冷连轧机生产过程控制与企业生产管理结合起来, 由几级计算机来实现全面控制。而分布式计算机系统的各级是按并行方式工作的, 很多轧制参数采集和控制功能都分散到各个

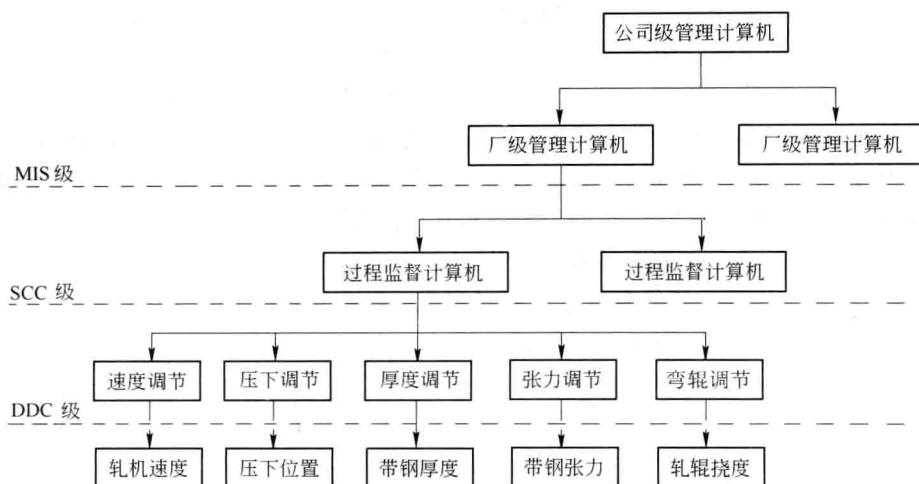


图 1-5 分布式计算机控制系统原理图

“子系统”中。

冷连轧分布式计算机控制系统一般分为三级，即生产管理级（MIS 级）、监督控制级（SCC 级）以及直接数字控制级（DDC 级）^[11]。大型企业中生产管理级还可分为公司管理级、工厂管理级与车间管理级等。通常管理计算机都采用数据处理和科学计算能力强、内存及外存容量大的大中型计算机。监督控制级的主要任务是实现最优控制和自适应控制的计算，向下一级 DDC 发送设定值，通常监督计算机选用小型计算机或微型机。直接数字控制级对冷连轧生产过程中的单个设备或装置进行直接闭环控制，通常这一级可以采用微型机、工业控制机或可编程序控制器^[12]。

在这类计算机控制系统中，计算机之间采用网络进行互连。

1.3 攀钢冷连轧计算机控制系统的组成及其存在的问题

酸轧联机控制流程如图 1-6 所示，酸轧联机工艺如图 1-7 所示。

计算机控制系统由三级组成：生产管理级、过程控制级和基础自动化。如图 1-8 所示。

酸洗连轧过程计算机系统采取客户机/服务器方式，包括 3 台服务器、数台 PC 机及打印机。服务器分别为数据库服务器、应用系统服务器和模型服务器。整个系统可以在四种方式下工作：自动、半自动、备份、测试^[13]。自动方式为正常生产方式，在自动方式下，过程控制计算机系统在线投入，接收一级系统的所有生产信号，一级自动化系统自动请求生产数据。基本生产数据由二级控制系

统下发后,不允许操作工在一级系统上修改。半自动方式下则允许操作工在一级系统上修改基本生产数据。备份方式即离线方式,这时系统的全部功能可以随着来自轧线的实时信号进行工作,即接收来自轧线的各种信号,跟踪轧件位置,确定轧线各设备应有的设定值等。但是一级自动化系统所需的生产数据不能由二级控制系统下传,需由操作工在一级手动输入。测试方式只用于测试和调试阶段,在不连接一级系统的情况下,通过画面操作,由过程模拟模块模拟一级所有生产信号,测试应用控制系统的所有功能。

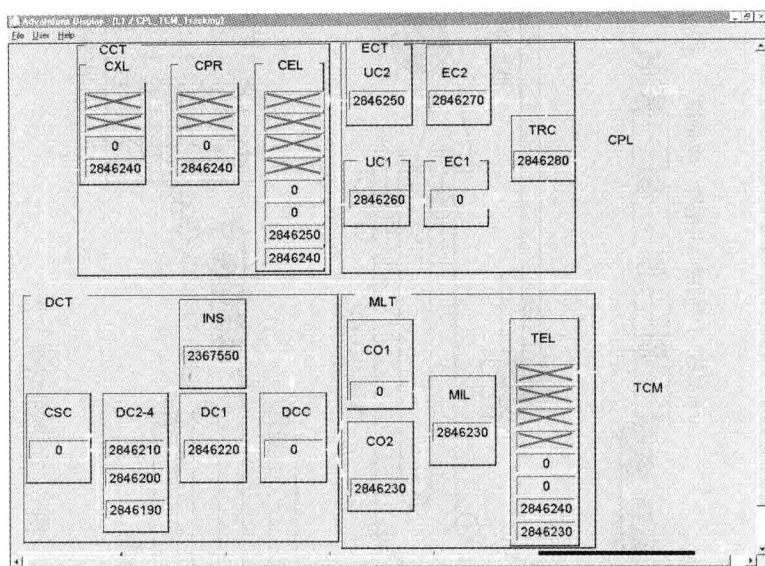


图 1-6 酸轧联机控制流程

系统功能:

(1) 数据通信:实现二级计算机系统与一级自动化系统之间的数据交换,即接收来自一级系统的信号和向一级系统发送预设数据和生产数据。

(2) 物料跟踪:负责生产过程的跟踪。根据一级系统传送的跟踪信号,跟踪钢卷在生产线上的移动,监视钢卷在生产线中的位置,保持与一级的实际生产同步,并根据钢卷移动的信息,随时更新跟踪数据,启动相应的轧机控制功能。

(3) HMI 画面和报表显示。

现有系统中,在过程控制级中通过轧制程序计算程序和自适应计算程序,对预设值进行计算,并通过优化,提高预设值的计算精度。系统运行以来稳定性较好,但也存在一些问题,主要表现在以下几个方面:

(1) 抗干扰能力不够。多次出现轧制过程中因电压波动或来料硬度变化等原因造成的断带、停机现象,严重时造成了轧机损坏。

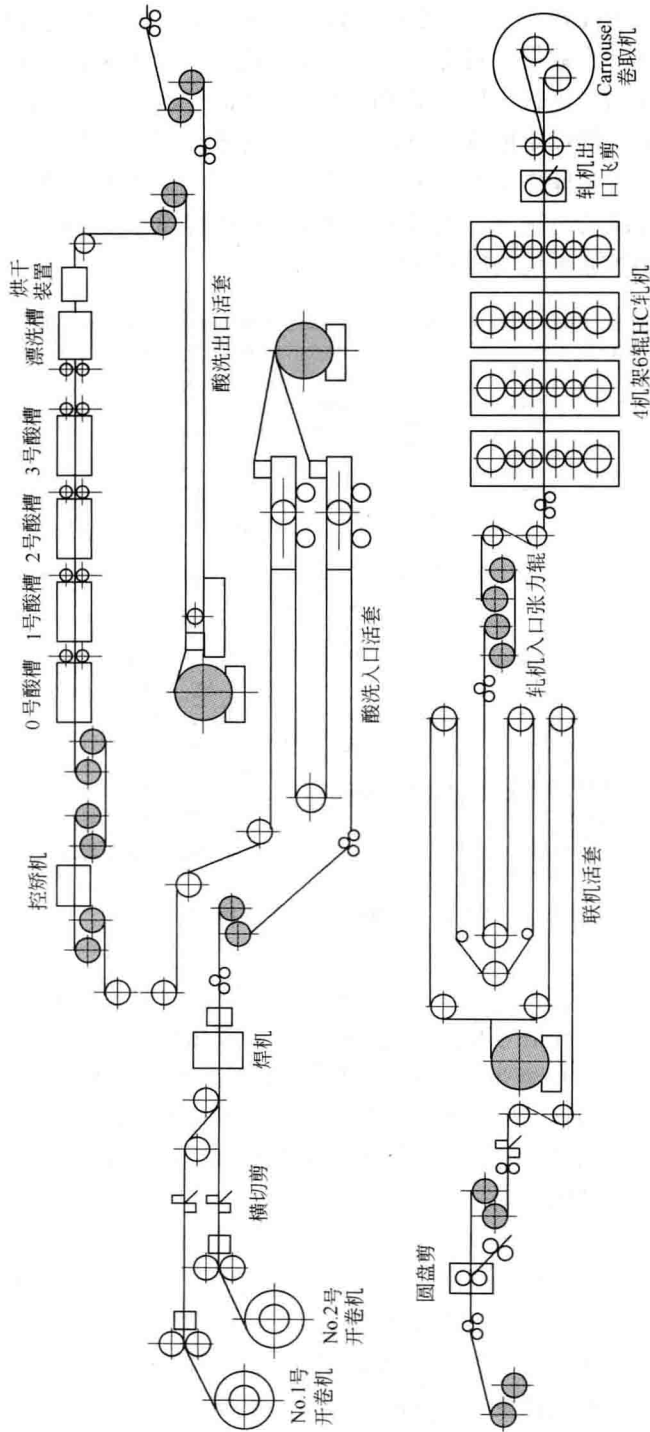


图 1-7 酸轧联机工艺