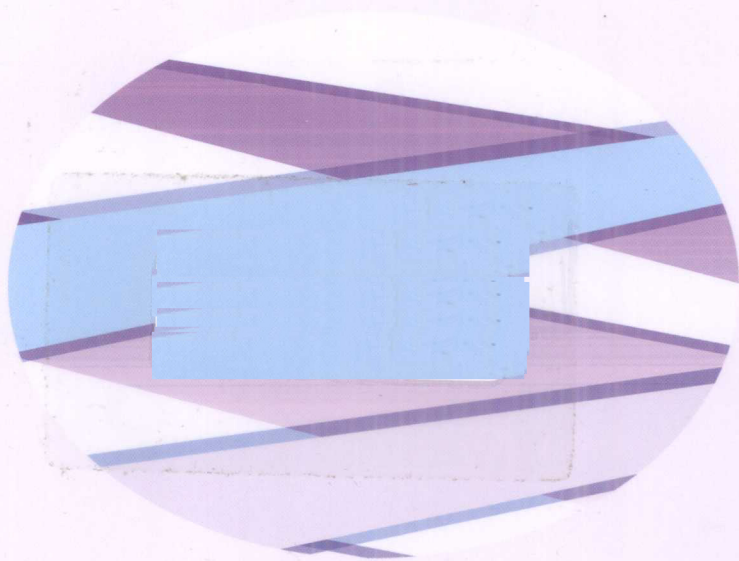


高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

冶金过程数学模型与 人工智能应用

龙红明 编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

冶金过程数学模型与 人工智能应用

龙红明 编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2010

内 容 提 要

本书是关于冶金过程数学模型与人工智能控制系统应用的教学用书。全书共分为5章,主要内容包括过程控制数学模型与人工智能基础、冶金主要流程的数学模型以及人工智能系统应用三大部分。

本书理论知识与应用相结合,书中既有建模、人工智能的基础理论与方法,又有控制模型与系统的实际应用,内容深入浅出,通俗易懂,突出冶金工艺技术与控制理论、计算机技术交叉融合的特点,对冶金工作者和控制系统研发人员都有参考价值。

本书可作为冶金工程专业本科生、研究生的教材,也可供冶金工程设计与开发人员、冶金生产现场技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冶金过程数学模型与人工智能应用 / 龙红明编. —北京:
冶金工业出版社, 2010. 6
高等学校规划教材
ISBN 978-7-5024-5135-6

I. ①冶… II. ①龙… III. ①冶金—过程—数学
模型—高等学校—教材 ②人工智能—应用—冶金—
过程—高等学校—教材 IV. ①TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 077486 号

出 版 人 曹胜利
地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009
电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn
责任编辑 马文欢 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞
责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波
ISBN 978-7-5024-5135-6

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2010 年 6 月第 1 版, 2010 年 6 月第 1 次印刷
787 mm × 1092 mm 1/16; 13 印张; 343 千字; 198 页

28.00 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
(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

钢铁工业属于混合型流程工业,兼有连续型和离散型工业流程的特点,其生产过程既包括物理过程,也包含化学过程,具有结构复杂性、参数不确定性等一系列特征。现代钢铁冶金工业生产的大型化和复杂化,对过程控制水平提出了越来越高的要求。传统的优化控制技术依赖于建立过程的精确数学模型,但是这对于实际生产过程来说往往难度很大,特别是生产过程控制参数与生产目标之间的关系受到种种不可预测因素的制约,在现场生产中一般依靠经验进行操作,过程参数、状态变量和生产目标之间的关系是不明确的。由于难以从生产机理上确定过程模型,许多工艺过程参数无法优化获取,仅靠操作人员的经验设定,结果造成生产过程的不良波动和生产指标不佳。

在信息化带动工业技术进步受到高度重视的今天,冶金行业正在努力地利用先进的控制理论、计算机技术改造传统产业。过程控制数学模型与人工智能控制系统是冶金信息化最直接、最有效的应用领域,它对提高冶金过程的经济技术指标,降低生产成本,提高生产效率有着重要的理论意义和巨大的经济价值,是广大冶金工作者迫切需要学习并掌握的一门关键技术。因此,有必要在高等学校专业教育中给予充分的体现。目前,安徽工业大学在冶金工程专业本科教学中设置了“冶金过程数学模型”、“冶金过程控制”、“冶金仿真软件应用”等课程,还包括相应的上机实践课,经过几年的实践,取得了较好的效果。

通常,冶金工程专业的学生对计算机建模、开发人工智能控制系统缺乏系统的学习,而计算机专业的学生缺乏对冶金工程专业知识的了解,因此,本书以作者多年从事冶金过程数学模型与人工智能系统开发的经验为基础,将两方面的知识融合在一起,系统地介绍了数学模型与人工智能的基础以及常用的模型算法,并结合冶金流程分别介绍了它们如何在这些流程中应用并解决现场实际问题。

在编写过程中,作者参考了攻读博士学位期间的导师及课题组的工作成果,还有很多从事冶金过程数学模型与控制系统开发与研究的同行们的工作成果。另外,编者还得到了目前所在课题组老师与研究生的帮助、家人的理解与鼓励,在此一并表示诚挚的谢意!

由于作者的学识及水平所限,书中不妥之处,恳请同行与读者不吝赐教,并提出宝贵的批评意见。

编 者

2010年1月

目 录

1 概述	1
1.1 冶金生产过程简述.....	1
1.1.1 炼铁	1
1.1.2 炼钢	2
1.2 冶金过程的特点与控制方法	3
1.2.1 冶金过程的特点	3
1.2.2 冶金过程的控制方法	4
1.3 冶金过程数学模型与人工智能的研究进展	6
2 冶金过程检测和自动控制基础	9
2.1 冶金过程信息检测.....	9
2.1.1 冶金过程自动化体系结构	9
2.1.2 冶金过程检测	10
2.2 冶金过程基础自动化	19
2.2.1 可编程控制器(PLC)	19
2.2.2 基础自动化级通信	20
2.2.3 人机界面技术	21
2.2.4 分布式计算机控制系统	22
3 过程控制数学模型与人工智能基础	28
3.1 数学模型基础	28
3.1.1 数学模型及其特点	28
3.1.2 数学模型在冶金中的作用	29
3.1.3 数学模型的建立方法及步骤	29
3.2 人工智能基础	32
3.2.1 人工智能概述	32
3.2.2 专家系统	33
3.2.3 人工神经网络	35
3.2.4 模糊控制	39
3.3 过程控制常用模型及其算法	43
3.3.1 基于时间序列的预报模型	43
3.3.2 基于 BP 算法的预报模型	47
3.3.3 基于遗传算法的最优化模型	51

4 冶金过程数学模型	55
4.1 烧结过程数学模型	55
4.1.1 烧结配料模型	55
4.1.2 烧结工艺参数优化模型	59
4.1.3 烧结过程热状态模型	63
4.1.4 烧结矿性能预报模型	71
4.2 高炉数学模型	75
4.2.1 高炉无料钟布料模型	75
4.2.2 软熔带模型	84
4.2.3 高炉炉缸炉底侵蚀模型	86
4.2.4 铁水硅含量预报模型	94
4.2.5 热风炉蓄热室内温度场模型	98
4.3 转炉数学模型	100
4.3.1 静态控制模型	100
4.3.2 动态控制模型	101
4.3.3 合金模型	106
4.4 电炉数学模型	109
4.4.1 电弧炉炼钢合金成分控制模型	109
4.4.2 电弧炉冶炼能量结构模型	113
4.5 炉外精炼数学模型	115
4.5.1 LF 炉钢包精炼合金加料与钢水成分预报模型	116
4.5.2 LF 炉钢包精炼能量损耗预报模型	121
4.6 连铸数学模型	125
4.6.1 中间包钢液温度模型	126
4.6.2 结晶器温度场模型	129
4.6.3 板坯连铸二冷仿真模型	131
5 冶金过程人工智能控制系统	133
5.1 烧结人工智能控制系统	133
5.1.1 烧结配矿专家系统	133
5.1.2 烧结过程操作优化指导系统	136
5.1.3 烧结矿化学成分控制专家系统	144
5.2 高炉人工智能控制系统	148
5.2.1 高炉炉况诊断与报警专家系统	149
5.2.2 高炉综合智能控制专家系统	161
5.2.3 热风炉燃烧智能控制系统	164
5.3 转炉人工智能控制系统	170
5.3.1 基于辐射信息分析的转炉终点预测	171

5.3.2 转炉炼钢智能控制系统	174
5.4 电炉人工智能控制系统	176
5.4.1 交流电弧炉智能集成计算机控制系统	176
5.4.2 电炉炼钢专家系统.....	179
5.5 炉外精炼人工智能控制系统	183
5.5.1 基于故障树的 RH-KTB 大型真空系统智能故障诊断系统	183
5.5.2 智能 LF 控制系统	187
5.6 连铸人工智能控制系统	189
5.6.1 结晶器液位智能控制系统	190
5.6.2 连铸二次冷却动态智能优化控制系统	192
参考文献	197

1 概 述

1.1 冶金生产过程简述

冶金工业是国民经济建设的基础,是国家实力和工业发展水平的标志,它为机械、化工、交通、建筑、航空航天、国防军工等各行各业提供所需的材料产品。现代工业、农业、国防及科技的发展对冶金工业不断提出新的要求并推动着冶金学科和工程技术的发展,反过来,冶金的发展又不断为社会文明进步提供新的物质基础。

钢铁冶金是根据物理化学、热力学、动力学、传输学和反应工程学及金属学等基本原理,从矿石中提取金属,经精炼,再用各种加工方法制成具有一定性能的钢铁材料的过程。钢铁冶金从工艺角度可分为炼铁和炼钢两大领域。

1.1.1 炼铁

炼铁的本质是铁的还原过程,即使用焦炭作燃料和还原剂,在高温下将铁矿石或含铁原料中的铁从氧化物或矿物状态还原为液态生铁,其主要工艺环节有:

(1) 烧结。在烧结车间中,制备铁矿石。铁矿石被压碎碾成标准化的颗粒,被烧结或黏合在一起。烧结过程是在烧结炉里进行的,温度多在 1000°C 以上,但不超过 1300°C ,产品为块状或者是球状的铁矿,烧结的铁矿石随后经过冷却和整粒,并按一层焦炭、一层矿石的交替方式,被加入高炉中。

(2) 炼焦。焦炭是煤在炼焦炉中通过干馏(即将不需要的成分气化掉)得到的可燃物质。焦炭几乎是纯碳,其结构呈多孔状,且抗碾性能很强。焦炭在高炉中燃烧,提供了熔化和还原铁矿石所需的热量和气体。煤料从炉顶部的装煤孔或侧侧(捣固焦)装入炭化室,由两侧燃烧室传来的热量,将煤料在隔绝空气的条件下加热至高温。加热过程中,煤料熔融分解,所生成的气态产物由炭化室顶端部的上升管逸出,导入煤气净化处理系统,可得到化学产品及煤气;残留在炭化室内的煤料固化成焦炭。煤料分解固化过程完成后,将炭化室两侧的炉门打开,用推焦机将焦炭推出,落入熄焦车(或干法熄焦装置)。赤热的焦炭可用水熄灭,或用惰性气体将余热导走,冷却后即得到可使用的焦炭。

(3) 高炉炼铁。在高炉中,从铁矿石中提取铁。固态的矿石和焦炭由顶部加入高炉,而高炉底部送来的高温气体(1200°C)致使几乎是 100% 含碳量的焦炭开始燃烧。这便产生了碳的氧化物,它通过除氧过程来减少氧化铁,从而分离出铁。由燃烧产生的热量将铁和脉石(矿石中矿物的集合)熔化成液体。脉石由于其密度较铁水的小,会漂浮至铁水表面,形成炉渣。炉渣是熔融脉石产生的残渣,可用于其他工业用途,比如用于铺设道路或生产水泥。整个炼铁过程分为如下几步:炉顶装入铁矿石、焦炭、造渣用熔剂(石灰石),从位于炉子下部沿炉周的风口吹入经预热的空气,在高温下焦炭(喷吹煤粉、重油、天然气等辅助燃料)中的碳同鼓入空气中的氧燃烧生成的 CO 和 H_2 ,在炉内上升过程中除去铁矿石中的氧,从而还原得到铁。炼出的铁水从铁口放出。铁矿石中不还原的杂质和石灰石等熔剂结合生成炉渣,从渣口排出。产生的煤气从炉顶导出,经除尘后,作为热风炉、加热炉、焦炉、锅炉等的燃料。20 世纪 80 年代以来,中国钢铁工业发展较快,高炉炼铁技术也有很大发展,主要表现在:1) 综合采用精料、上下部调剂、高压炉顶、高风温、

富氧鼓风、喷吹辅助燃料(煤粉和重油等)等强化冶炼和节约能耗新技术。2) 综合利用含钒钛的铁矿石取得了突破性进展,含稀土的铁矿石的利用也取得了较大的进展。

1.1.2 炼钢

炼钢用的原料主要是铁水和废钢。以铁水为原料的炼钢过程多使用转炉,而以废钢为原料的炼钢过程使用的是电弧炉。炼钢的基本任务有脱碳并将碳含量调整到一定范围,去除杂质,主要包括:脱磷(冷脆)、脱硫(热脆)、脱氧、去除气体(氢、氮)和非金属夹杂物(氧化物、硫化物、磷化物、氮化物等),调整钢液成分和温度,将钢液浇注成质量好的钢锭或钢坯。其主要工艺环节有:

(1) 转炉炼钢。在转炉中,生铁转换成钢铁。熔化的生铁会被倒在一层铁屑上。碳和残渣等不需要的物质都会通过喷吹纯净的氧气燃烧掉,从而生产出粗钢。然后,残渣或者炉渣就会被除去,粗钢(之所以称为粗钢,是因为它还必须经过进一步的精炼)被倒入钢包或其他精炼设备内进行精炼。常用的转炉炼钢方法有:

1) 氧气顶吹转炉炼钢法(LD法)。这是用纯氧从转炉顶部吹炼铁水成钢的转炉炼钢方法,在美国通常称BOF法,也称BOP法。炉子是一个直立的坩埚状容器,用直立的水冷却氧枪从顶部插入炉内供氧。炉身可倾动。炉料通常为铁水、废钢和造渣材料,也可加入少量冷生铁和铁矿石。通过氧枪从熔池上面向下吹入高压的纯氧(含 O_2 99.5%以上),氧化去除铁水中的硅、锰、碳和磷等元素,并通过造渣进行脱磷和脱硫。各种元素氧化所产生的热量,加热了熔池的液态金属,使钢水达到设定的化学成分和温度。它主要用于冶炼非合金钢和低合金钢,但通过精炼手段,也可用于冶炼不锈钢等合金钢。

2) 氧气底吹转炉炼钢法。这是通过转炉底部的氧气喷嘴把氧气吹入炉内熔池,使铁水冶炼成钢的转炉炼钢方法。其特点是:炉子的高度与直径比较小;炉底较平并能快速拆卸和更换;用风嘴、分配器系统和炉身上的供氧系统代替氧气顶吹转炉的氧枪系统。由于吹炼平稳、喷溅少、烟尘量少、渣中氧化铁含量低,氧气底吹转炉的金属收得率比氧气顶吹转炉的高1%~2%;采用粉状造渣料,由于颗粒细、比表面大,增大了反应界面,所以成渣快,有利于脱硫和脱磷。此法特别适用于吹炼中磷生铁,因此在西欧用得最广。

3) 顶底复合吹转炉炼钢法。这是在顶吹和底吹氧气转炉炼钢法的基础上,综合两者的优点并克服两者的缺点而发展起来的新炼钢方法,即在原有顶吹转炉底部吹入不同气体,以改善熔池搅拌。目前,世界上大多数国家用这种炼钢法,并发展了多种类型的复吹转炉炼钢技术,常见的如英国钢铁公司开发的以空气+氮气或氩气作底吹气体、以氮气作冷却气体的熔池搅拌复吹转炉炼钢法BSC-BAP法,德国克勒克纳-马克斯冶金厂开发的用天然保护底枪、从底部向熔池分别喷入煤和氧的KMS法,日本川崎钢铁公司开发的将占总氧量30%的氧气混合石灰粉一起从炉底吹入熔池的K-BOP法以及新日本钢铁公司开发的将占总氧量10%~20%的氧气从底部吹入,并用丙烷或天然气冷却炉底喷嘴的LD-OB法等。

(2) 电弧炉炼钢。这是利用电弧热效应熔炼金属和其他物料的一种炼钢方法。三相交流电弧炉是炼钢用最常见的直接加热的电弧炉。炼钢过程中,由于炉内无可燃气体,可根据工艺要求,形成氧化性或还原性气氛和条件,故此法可以用于冶炼优质非合金钢和合金钢。按电弧炉每吨炉容量的大小,可将电弧炉分为普通功率电弧炉、高功率电弧炉和超高功率电弧炉。电弧炉炼钢向高功率、超高功率发展的目的是为了缩短冶炼时间、降低电耗、提高生产率、降低成本。随着高功率和超高功率电弧炉的出现,电弧炉已成为熔化器,一切精炼工艺都在精炼装置内进行。近十年来直流电弧炉由于电极消耗低、电压波动小和噪声小而得到迅速发展,可用于冶炼优质钢和铁合金。加入电弧炉炉中的可以是经过选择的但未经处理的废铁(比如旧的机器零件),或者可以

是含铁量至少为 92% (质量分数) 的经过筛选的、破碎的、达到标准的废铁。废铁在电弧熔炉中被熔化。这就生产出了钢水, 然后进行与生铁同样的精炼和分级。废铁包括报废的钢制包装材料、建筑材料、机器和车辆零件或者从炼钢过程或由钢铁加工装置产生的废生铁和钢铁。针对每种不同钢种, 原材料都必须经过仔细的选择。这种选择取决于任何废铁中金属或矿石都可能含有的“杂质”的类型。电弧熔炉磁性“废钢桶”将原料送入熔炉中。冶炼过程由强大的电弧驱动, 这些电弧在电极和熔炉中的原料之间“跳动”。残渣或炉渣会从熔炉中回收。最终的产品是钢水, 现在正被送入钢包炉和分级设备。随着电弧炉设备的改进以及冶炼技术的提高、电力工业的发展, 电弧炉炼钢的成本不断下降, 现在电弧炉炼钢不但用于生产合金钢, 而且大量用来生产普通碳素钢, 其产量在主要工业国家钢总产量中的比重不断上升。

(3) 炉外精炼。这是将炼钢炉(转炉、电炉等)中初炼过的钢液移到另一个容器中进行精炼的炼钢过程, 也叫二次冶金。炼钢过程因此分为初炼和精炼两步进行。初炼: 炉料在氧化性气氛的炉内进行熔化、脱磷、脱碳和主合金化。精炼: 将初炼的钢液在真空、惰性气体或还原性气氛的容器中进行脱气、脱氧、脱硫, 去除夹杂物和进行成分微调等。将炼钢分两步进行的好处是: 可提高钢的质量, 缩短冶炼时间, 简化工艺过程并降低生产成本。炉外精炼的种类很多, 大致可分为常压下炉外精炼和真空下炉外精炼两类。按处理方式的不同, 炉外精炼又可分为钢包处理型炉外精炼及钢包精炼型炉外精炼等。

(4) 浇铸。目前在国内外广泛采用的是连续浇铸。连续浇铸和普通铸造法比较有下述优点:

- 1) 由于金属被迅速冷却, 结晶致密, 组织均匀, 力学性能较好;
- 2) 连续浇铸时, 铸件上没有浇注系统的冒口, 故连续铸锭在轧制时不用切头去尾, 节约了金属, 提高了收得率;
- 3) 简化了工序, 免除造型及其他工序, 因而减轻了劳动强度, 所需生产面积也大为减少;
- 4) 连续浇铸生产易于实现机械化和自动化, 铸锭时还能实现连铸连轧, 大大提高了生产效率。

以宝钢为例, 其钢铁冶金工艺流程如图 1-1 所示。

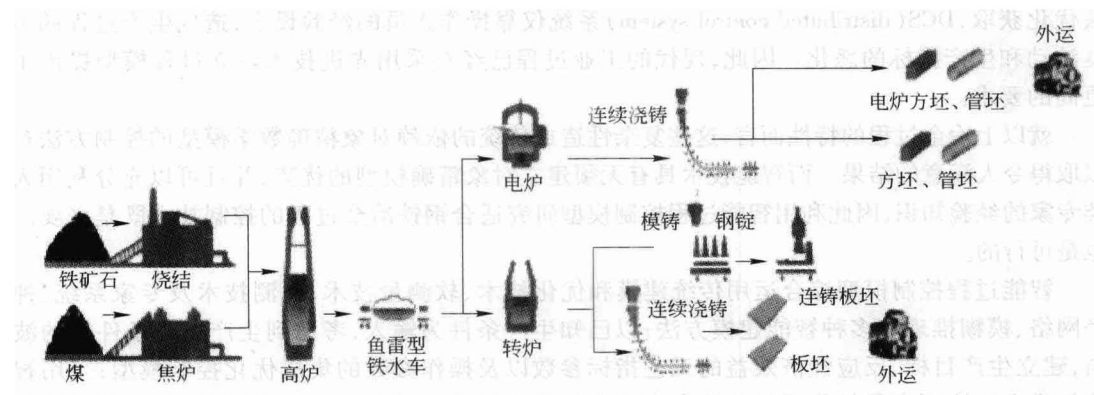


图 1-1 宝钢工艺流程图

1.2 冶金过程的特点与控制方法

1.2.1 冶金过程的特点

钢铁工业属于混合型流程工业, 兼有连续型和离散型工业流程的特点, 其生产过程既包括物

理过程也包含化学过程,具有结构复杂性、参数不确定性等一系列特征,具体体现在:

(1) 关系变量众多。冶炼过程生产规模大,工艺流程长,使得过程的影响因素繁多;随着检测仪表、集散控制系统的成熟和发展,工业过程可得信息量越来越多,从而为过程的模型化研究增加了难度。

(2) 过程复杂。复杂过程的反应机理复杂,常常伴随着物理化学反应、生化反应、相变反应及物质和能量的转化与传递过程固、液、气三相共存,而且存在不同程度的非线性和时滞等特性,难以建立精确的数学模型。

(3) 过程不确定性因素复杂。冶炼过程的生产环境和生产条件一般十分恶劣,如高温、高压、粉尘等,甚至是易燃易爆或存在有毒物质,导致生产过程中的一些工艺参数如温度、流量、成分等难以实时准确检测,并且在检测数据中往往有大量的噪声、干扰和误差;此外,环境的动态变化,如生产原料成分不稳定和生产边界条件剧烈波动等,以及一些过程重要的生产指标无法直接测量引起的过程信息未知性和不完全性等因素也造成了工业过程的不确定性。

(4) 过程关联耦合严重。复杂过程中含有许多相互耦合、交互作用严重的变量,一个操作变量的改变会同时引起多个被控变量的改变。

(5) 过程信息多样化。在实际复杂生产过程中,一方面由于自动控制系统的广泛应用,大量的实际生产数据得以保存;另一方面工程技术人员长期与生产过程接触获得了许多生产过程的经验性知识,因此在复杂过程中包含有大量的定量、半定量和定性等多种模式的信息。

1.2.2 冶金过程的控制方法

现代钢铁冶金工业生产的大型化和复杂化,对过程控制水平提出了越来越高的要求。传统的优化控制技术依赖于建立过程的精确数学模型,但是这对于实际生产过程来说往往难度很大,特别是生产过程控制参数与生产目标之间的关系受到种种不可预测因素的制约,在现场生产中一般依靠经验进行操作,过程参数、状态变量和生产目标之间的关系是不明确的。由于难以从生产机理上确定过程模型,传统的优化控制策略缺乏基础,许多工艺过程参数无法优化获取,DCS(distributed control system)系统仅靠操作人员的经验设定,造成生产过程的不稳定波动和生产指标的恶化。因此,现代的工业过程已经对采用先进技术建立过程模型提出了更高的要求。

就以上冶金过程的特性而言,这些复杂性造成传统的依赖对象精确数学模型的控制方法难以取得令人满意的结果。而智能技术具有无须建立对象精确模型的优势,并且可以充分利用人类专家的经验知识,因此利用智能过程控制模型研究适合钢铁冶金过程的控制技术既是必要的也是可行的。

智能过程控制模型综合运用传统建模和优化技术、软测量技术、预测技术及专家系统、神经网络、模糊推理等多种智能建模方法;以已知生产条件为输入,考虑到生产边界条件等的波动,建立生产目标、反应经济效益的工艺指标参数以及操作参数的集成优化控制模型;采用智能集成方法协调多种优化手段获得以成本最低或能耗最小等经济效益指标为目的、满足生产目标要求和生产约束条件的最优操作参数值;将最优操作参数值作为设定值送控制器,实现整个生产过程的在线闭环优化控制。整个过程控制系统的框图如图 1-2 所示,主要包括以下几方面的内容:

(1) 通过过程机理分析,确定工业生产过程中直接影响生产目标(如产量、质量等)并与经济效益指标(如原料消耗量、能源消耗量等)直接相关的工艺指标参数(如机速、产品组分、透气性、焦比等),并确定生产过程中影响这些工艺指标参数的操作参数。

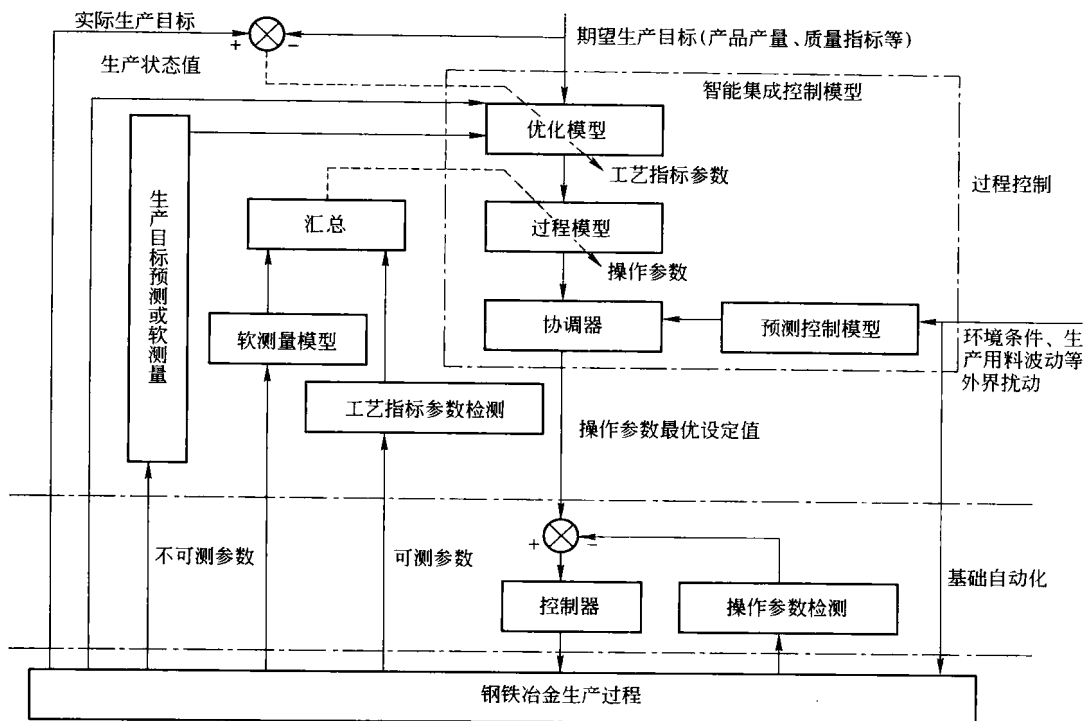


图 1-2 冶金过程控制系统框图

(2) 根据工艺知识、操作工人经验和生产过程数据,结合多种建模技术,建立以成本最低或者能耗最小或者产量最高等经济效益指标为目标的、满足生产要求的优化模型;建立反应生产边界条件、操作参数和工艺指标参数之间关系的过程模型;考虑到环境条件、生产用料变化、生产边界条件等外界扰动可能引起生产不稳定,生产无法控制,建立预测控制模型,采用前馈补偿予以克服;这些生产边界条件、操作参数和生产目标中的部分参数可能是不可测或者不易测的,对此应用机理建模、系统辨识等传统建模方法,神经网络、专家系统、模糊逻辑等智能建模方法及其集成方法建立软测量模型,实现这些参数的在线检测。

(3) 由优化模型、过程模型和预测模型组成反应生产目标、工艺指标参数以及操作参数之间关系的集成优化控制模型。由于过程异常复杂,所建立的智能集成优化控制模型已不是传统意义上的优化模型,经典的优化方法不再适用,只有针对所建优化模型的特点采用不同的优化方法并进行有效的集成才能得到满意的结果。在过程模型中,主要考虑可控操作参数与工艺指标参数的关系,而对于那些不可控(或不易控制)操作参数对生产目标的影响,可通过补偿的方法加到可控操作参数上,专家推理可用来对最优值和补偿值进行协调。因此,一个智能控制系统往往由多个模型有机结合而成。

(4) 采用专家系统集成多种模型,对优化和前馈控制获得的操作参数进行协调,并针对操作参数变量多于控制目标变量的特点,利用统计学中的主元分析法或其他技术,确定影响生产目标的主要操作参数和次要操作参数及其相互间的关系,获得直接控制器操作参数的优化设定值。

(5) 优化获得的操作参数通过控制器进行稳定化控制。对于简单参数的直接控制,最常用的办法是采用经典 PID 控制器,而对于一些复杂对象的直接控制,可通过分散控制技术(集散控

制系统),采用先进控制算法,如引入模糊控制、专家控制等智能控制算法实现参数的稳定化控制。

(6) 冶炼过程从期望生产目标的输入到实际生产目标的反馈在时间上是有一段滞后的,为实现生产目标的实时在线控制,通过生产目标预测模型实时反馈生产目标值,不断修订优化参数设定值,实现生产目标的在线闭环优化控制,从而保证生产过程运行在满足生产目标前提下的最优生产状态。此外根据实际生产目标与期望生产目标的偏差在线校正优化模型,确保模型精度。在实际工业应用中,智能集成优化控制一般框架中的每一步并不是都必须完成,而是根据具体工业过程特点,有针对性地进行建模方法和优化控制技术研究。

1.3 冶金过程数学模型与人工智能的研究进展

近年来,冶金自动化得到了多方面的应用,仅日本应用的实例就超过百件,其中用于设定与控制的占45.2%,用于计划的占32.3%,用于诊断的占14.5%,用于检测的占6.4%,用于学习的占1.6%。又如德国 Krupp-Hoesch 钢铁公司的 Westinfairen 钢厂在轧制过程中应用神经网络改进数学模型,尺寸偏差减少了12%,并取得了明显的经济效益。焦化、烧结、炼铁、炼钢各个工艺流程同轧制过程相比,物理化学变化更为复杂,连续有效的直接检测仪表也不如轧制过程的检测齐全,在这些流程方面应用人工智能就显得更加必要和迫切,据报道,西门子公司钢铁冶金项目负责人认为,利用智能化的设备理念和解决方案以及创新的维护观念支持,在现存的条件下,钢铁生产能力将提高10%,成本也将大大降低。因此开发类似的技术,对于加强我国钢铁工业的国际竞争力,使我国不仅是钢铁大国,而且成为钢铁强国,显得尤为重要。

日本、英国、奥地利、芬兰、瑞典、澳大利亚、韩国、美国、加拿大等先进的工业化国家迄今为止已开发了钢铁工业人工智能应用的各种系统,其中针对高炉炼铁的智能控制在高炉炉况诊断、热金属的硅含量预报、高炉操作优化指导专家系统等方面均取得成功,还有在国际上已经采用的或广泛采用的具有实用性的炼铁过程人工智能控制技术,如高炉贮矿槽的堆积状况将影响下一道工序,过去只有原料在库管理和定时装入,新的智能控制方法包括超静态装入方式和超动态装入方式。超静态装入方式主要针对烧结矿,采用连续慢行装入方式,当卸料车到料槽时,慢行卸料,从而大大减少停车定点卸料的偏析和放料时粗粒集中而影响下一作业;超动态装入方式主要是针对块矿,过去是矿槽到最低料位才装入,由于落差大而粉化率加大,本方式可以控制料位差,使之保持最佳料位而抑制粉化率。

关于矿层混矿均匀控制,国外早就运用了新的控制理论,如采样数字PID控制、STC(自校正控制)和自学习控制,采用智能控制将会取得更好的效果。国内宝钢烧结分厂自行开发并成功运用的智能模型,其原理也可以应用到高炉配料过程的矿焦切出、排出控制。

在炉顶装料时,采用智能算法提高FCG的控制水平对于改善炉内料的分布和冶炼也是非常重要的。通过对FCG流量特性的测定与补正、对前次控制误差进行反馈和前馈补正并按炉料是矿石、焦炭、干料、湿料的区别或按粒度施以不同的控制,可以消除装入开始点和结束点不一致而导致圆周方向装料的不均匀。

对高炉煤粉喷吹系统各个环节工作特性以及煤粉喷吹量各种调节方式的分析,对喷煤量调节的新途径进行了探讨,国内外研究表明采用智能技术来实现喷煤量自动控制以达到更好的水平是可行的。

在炼钢方面,日本新日铁和日本钢管均开发了转炉吹炼控制专家系统,川崎制铁开发了熔剂冷却剂转入控制专家系统。日本钢管福山厂转炉在原有静态、动态和排气模型的基础上,根据操作人员的经验,找出了渣化喷溅模式用以确定吹炼控制模式。专家系统根据铁水

温度、成分等静吹炼初始数据,评价渣化情况和喷溅可能,指导操作人员修改氧枪上吹模式;根据吹炼中传感器数据和排气模型计算结果,评价动态渣化情况和喷溅可能,确定氧枪吹氧量、副枪原料投入量、矿石投入速度和炉罩高度等,根据吹炼中副枪测定的数据和动态模型计算结果,判定有无必要在止吹前调整吹炼,止吹后用副枪测定,判定终点出钢。系统在实际应用中,提高了吹炼水平,降低了吹溅发生率,即使含硅量处于峰值时,也能抑制吹溅发生,吹炼时间缩短,钢水含磷量稳定。

近年来,国外电弧炉采用了超高功率废钢预热等新的工艺技术,以强化冶炼、节能降耗和提高钢的质量。电弧炉目前普遍采用计算机控制并配以智能控制模型,如在线检测各种工艺参数实现对冶炼过程的连续监视和合理操作,根据炉子的热平衡和能量平衡实现最佳功率输入、优化装料计算实现各种炉料的最经济配比等。在此基础上,日本的大同特钢采用计算机系统实现了两座 70 t 电弧炉交互出钢联合操作,使两座炉子合理匹配且控制到最佳操作条件,生产率提高了 70% 左右。精炼炉有许多种工艺,如 LF/LHF、RH、RH-KTB/RPB 等,但无论哪一种具体工艺,对于自动控制尤其是过程计算机控制有很多共同之处,如过程级计算机上配的钢水成分调整模型和温度、碳、氧浓度控制模型。钢水成分调整模型可用线性规划求解,而温度、碳、氧浓度控制模型由于三个变量互相关联,传统上通过联立方程求解得到最佳控制策略。随着控制理论和技术的发展,新的算法不断提出并得到应用,如协调控制算法彻底解决了多变量的耦合问题,将相互关联的子系统化解为独立的能控子系统,并可进一步从连续系统推广到采样——数字系统和信息不完全的灰色系统,如果能在温度、碳、氧浓度控制中采用,有望获得更好的效果。

连铸具有能提高金属收得率、钢材质量、劳动生产率和降低能耗、成本等显著优点,我国近几年已将连铸比大幅度提高,连铸技术之所以发展如此迅速,也得益于自动化技术、计算机技术与工艺的配合发展,目前连铸正在向多炉连浇、热送等方向发展。

结晶器液位控制是连铸过程中重要控制环节之一。法国 SERT 公司用模糊控制器与 PID 并联控制板坯连铸结晶器液位,稳态时用 PID 调节,当浸入水口沉积物突然去除时 PID 调节需要 10 min 才能恢复常态,此时应用模糊控制可减少恢复时间 80%,液位升高减少 4%。日本新日铁八幡厂用人工神经网络进行结晶器拉漏预报,提前 3 ~ 14 s 预报拉漏,实现了 100% 预报命中率。日本川崎制铁用神经网络进行连铸坯喷印文字质量判定,用摄像头接受喷印信息,经过抽取字符和预处理后,作为神经网络输入,其输出用于评价文字喷印质量。

奥钢联公司开发了 Mold EXPERT 结晶器专家系统,将其广泛运用在世界各地 150 多台连铸机;奥钢联用于连铸质量判断的软件系统 VAI-Q 包括物理模型和来自生产设备的经验模型,VAI-Q 能确定必要的工艺设定值,跟踪与质量相关的工艺参数,预测连铸坯的质量,并自动决定随后的铸坯处理。该系统通过应用特殊的冶金评估系统 VAI-Q Discovery,生产工艺诀窍知识库可以得到不断补充,其知识库是连续改善质量预测精度的基础。VAI-Q 也有助于提高操作人员的质量意识,系统还具有质量报警和质量反馈功能,并已在世界各地 60 多个样板厂运行。

国内的研究从 20 世纪 90 年代以来发展也很快,一些高校和科研院所开始针对钢铁冶金各流程展开自主开发,各种数学模型和人工智能系统陆续得到现场应用。随着冶金过程智能控制技术不断发展成熟,利用现代信息技术,特别是智能控制技术对钢铁工业工况复杂的设备和工艺过程进行改造是一个节能降耗显著、产品产量质量提高、投资省见效快的信息化带动工业化的有效途径。

当然,对于智能控制的项目,一定要结合硬件装置来开发,软件要实用化、产品化。冶金工厂

在基本建设时投入较大,结合建设项目上一些高水平的智能控制时机比较恰当,但是基建项目竣工时往往为了抢进度,同时智能控制需要一定的数据积累,因而常常造成在投产时只考核基础自动化功能,等到经过一定的生产时间之后,一些数据采集的传感器会失灵,一线生产也就对此失去兴趣,不能将智能控制的作用充分发挥出来。因此,采用智能控制技术,首先是起点要高,研究开发要与工程应用相结合,对于智能控制装置或项目,实用、工程化、产品化是关键,必须注意到成功的智能控制需要现场的配合,而且必须建立在完好的自动化设备基础之上。

总之,钢铁生产过程智能控制,无论是高炉工艺过程若干环节的智能控制、高炉冶炼的各种智能模型、转炉炼钢的各种智能模型、电炉炼钢的各种智能模型、连铸的结晶器液位控制模型、二次冷却水模型,还是轧钢用各种智能模型、涂镀层过程的智能化控制,以及设备的智能诊断和预防性维修等,广泛采用人工智能技术对于提高产品质量,持续、稳定地开展生产,增强企业竞争力均具有至关重要的意义。

2 冶金过程检测和自动控制基础

2.1 冶金过程信息检测

2.1.1 冶金过程自动化体系结构

1989 年美国普渡大学 Williams 教授提出 Purdue 模型,将流程工业自动化系统自下而上分为过程控制、过程优化、生产调度、企业管理和经营决策等五个层次;国际标准化组织 ISO 在其技术报告中将冶金企业自动化系统分为 L0 ~ L5 级结构,如图 2-1 所示,其中 L1 ~ L5 级为冶金企业信息化建设的主要内容。

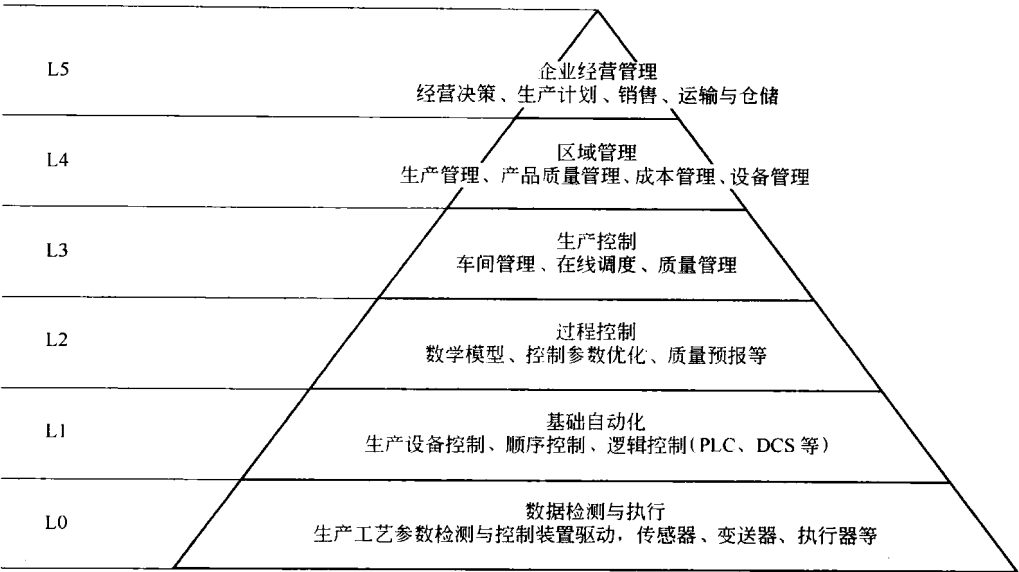


图 2-1 冶金自动化体系结构及分级

图 2-1 中, L1 ~ L3 级面向生产过程控制,强调的是信息的时效性和准确性; L4 ~ L5 级面向业务管理,强调的是信息的关联性和可管理性。

企业经营管理级 L5 主要完成销售、研究和开发管理等,负责制定企业的长远发展规划、技术改造规划和年度综合计划等。

区域管理级 L4 负责实施企业的职能、计划和调度生产,主要功能有生产管理、物料管理、设备管理、质量管理、成本消耗和维修管理等,其主要任务是按部门落实综合计划的内容,并负责日常的管理业务。

生产控制级 L3 负责协调工序或车间的生产,合理分配资源,执行并负责完成企业管理级下达的生产任务,针对实际生产中出现的进行生产计划调度,并进行产品质量管理和控制。

过程控制级 L2 主要负责控制和协调生产设备能力,实现对生产的直接控制,针对生产控制

级下达的生产目标,通过数学模型、人工智能控制系统等优化生产工艺参数、预测产品质量等,从而实现高效率、低成本的冶炼过程。过程控制的原理、方法、设计及其应用就是本书介绍的主要内容。

基础自动化级 L1 主要实现对设备的顺序控制、逻辑控制及简单的数学模型计算,并按照过程控制级的控制命令对设备进行相关参数的闭环控制。

数据检测与执行级 I0 主要负责检测设备运行过程中的工艺参数,并根据基础自动化级指令对设备进行操作。执行级根据执行器工作能源的不同可分为电动执行机构、液压执行机构和气动执行机构,如交直流电动机、液压缸、气缸等。

2.1.2 冶金过程检测

冶金过程工艺参数检测是建立数学模型、开发智能控制系统的前提,特别是一些重要的在线参数,其准确与否直接决定着控制模型的效果。

2.1.2.1 炼铁参数检测仪表

炼铁区检测仪表所在的环境恶劣,烧结、高炉炉内的温度以及铁水温度达 1300 ~ 1700℃,高温不仅容易损坏传感器,而且测量也困难。此外,铁区环境或炉内含有大量粉尘,容易附着在传感器上,烧坏传感器或阻塞其管道。随着生产操作强化、设备大型化和要求高的技术经济指标,需要测量更多的数据和开发更多的专用传感器。炼铁区现有如下一些主要检测仪表。

A 电子皮带秤与定量给料装置

此设备在原料、烧结、高炉的配料和称量系统中广泛应用。电子皮带秤的称量与一般秤不同,它属动态称重计量方式,需要测量皮带运输机在单位时间内所输送的物料重量,其称重原理可表示为:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} q dt \quad (2-1)$$

$$q = Wv$$

式中, Q 为单位时间的物料输送量; q 为瞬时物料输送量; t_1 、 t_2 为时间; W 为单位长度上物料重量; v 为皮带输送速度。

这样,只要测得单位皮带长度上的物料重量 W 和皮带速度 v ,便能得到单位时间所输送物料的重量。电子皮带秤由机械杠杆系统(称量机本体)和电子仪表两大部分组成,其称量装置设置在现场,而电子仪表装在称量仪表盘上。

定量给料装置也叫配料秤,是一个称量与控制一体化的装置,它可由计算机定值控制。

B 烧结混合料水分检测

水分的检测和控制是烧结操作中的一个难点,严格控制混合料水分的标准值和误差范围,可提高混合料透气性和抑制过湿带过宽。常用的检测方法有热干燥法、中子测定法、快速失重法、红外线测定法和电导法。其中热干燥法和快速失重法是间歇式测定法,而中子法、红外线和电导法可实现水分的快速在线连续测定。现场采用较多的是中子水分计和红外线水分仪。

目前有两种测量方式的中子水分计(见图 2-2):一种是插入式,其探头装在料槽内,所用射源强度较低(约为 $3.7 \times 10^9 \text{ Bq}$);另一种是表面式(或称反射器式),在料槽外壁安装,所用放射强度较高(约 $1.85 \times 10^{10} \text{ Bq}$)。射线源大多采用镭 - 铍($^{226} \text{ Ra} - ^9 \text{ Be}$)或镅 - 铍($^{241} \text{ Am} - ^9 \text{ Be}$)。