



复杂冶金过程智能控制

吴敏 曹卫华 陈鑫 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

复杂冶金过程智能控制

吴 敏 曹卫华 陈 鑫 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者多年来的研究工作和实践经验,系统阐述了复杂冶金过程智能控制与优化方法在生产实践中的应用。主要内容包括:复杂冶金过程建模、控制与优化方法以及一些经典的智能控制与智能优化方法;炼焦配煤和焦炉加热燃烧过程智能优化控制、焦炉作业计划与优化调度、炼焦生产全流程优化控制;烧结配料、混合制粒与偏析布料、烧节点火和烧结热状态过程智能优化控制;高炉布料模型、高炉料面温度场在线检测和炉况诊断、高炉热风炉智能优化控制和高炉顶压智能解耦控制;蓄热式加热炉和 CSP 加热炉混合建模和智能控制;煤气混合加压过程智能解耦控制、煤气平衡系统设计与应用。

本书可作为高等院校理工科研究生和高年级本科生的参考书,也可供自动化及冶金领域相关工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂冶金过程智能控制/吴敏,曹卫华,陈鑫著. —北京:科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-047537-4

I. ①复… II. ①吴…②曹…③陈… III. ①冶金-过程控制-智能控制
IV. ①TF0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 044368 号

责任编辑:裴育 陈婕 纪四稳/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张倩/封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:29

字数:572 000

定价:168.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

钢铁工业是国民经济和国防建设的基础,是保障国家高速发展的基础产业。据世界钢铁协会数据显示,2014年中国内地粗钢产量为8.23亿吨,占全球钢产量的49.5%,已连续19年位居世界首位。但是,我国钢铁工业污染严重,冶金过程控制水平与国际先进水平相比有较大差距,严重制约了钢铁工业的进一步发展。因此,需要进行工艺改造和产业技术升级,提高我国钢铁生产的效率,实现节能减排。

我国“十二五”规划中指出,钢铁行业要以“结构调整、转型升级”为主线,利用先进控制技术解决节能减排、环境保护、产业布局、生物制造等多方面存在的问题。目前,我国钢铁工业正面临着新的机遇与挑战。首先,随着国际铁矿石价格的波动,需要不断技术创新,将先进的智能化控制技术应用到钢铁冶金中,提高企业竞争力;其次,钢铁冶金是高耗能、高污染产业,在产业转型中,需要将“绿色制造”的概念贯彻到烧结、炼焦、炼铁、炼钢等各主要耗能环节中,利用先进控制技术提高生产效率,减少污染排放。

本书针对钢铁冶金过程控制问题,总结作者多年来的研究工作和体会,综合大量的国内外文献资料,系统阐述复杂冶金过程智能控制方法与技术以及在生产实践中的应用。本书可作为高等院校理工科研究生和高年级本科生的参考书,也可供自动化和冶金领域相关工程人员参考。

全书由6章组成。第1章是绪论,分别从建模、控制和优化三个角度阐述目前冶金行业的现状,并介绍一些经典的智能控制和智能优化算法。第2章针对炼焦过程,结合生产工艺,叙述炼焦生产过程全流程优化控制系统设计与实现。第3章以烧结过程中配料、混合制粒与偏析布料、点火和烧结热状态四个主要过程为研究对象,阐述针对不同对象的建模和智能优化控制方法,介绍智能优化控制系统在工业中的应用。第4章针对高炉生产过程,建立高炉布料模型,对高炉料面温度场和炉况进行检测和诊断,设计高炉热风炉智能优化控制系统和高炉顶压智能解耦控制系统。第5章以蓄热式加热炉和CSP加热炉为对象,提出混合建模和智能控制方法,设计加热炉智能优化控制系统。第6章主要论述煤气混合加压过程智能解耦控制和煤气平衡系统的技术方法与系统实现。

在撰写本书过程中,日本东京工科大学余锦华教授给予了支持和帮助;中国地质大学(武汉)熊永华教授、安剑奇副教授,中南大学雷琪副教授以及北京国能日新系统控制技术有限公司向婕博士进行了大量整理工作;湖南华菱涟源钢铁有限公司信息自动化中心刘建群、黄兆军、王桂芳、冯力力、陈奇福、张新建和龚伟平等

在控制系统设计与应用方面提供了协助和支持;曹原、余慧萍、刘博、夏志勇、李浩、王亚、黎许峰、胡学敏、张永月、朱露莎、陈娅、曹军清、黄冰、彭凯、李皇、潘芳芳、谢新鹏、张小杨、李蕾、伍成静和王静等研究生承担了本书的文字整理、录入与校对工作,在此对他们深表感谢。

由于作者水平有限,书中存在不妥和疏漏之处在所难免,望广大专家和读者批评指正。

作 者

2015 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂冶金过程及其控制问题	1
1.2 复杂冶金过程的建模、控制与优化方法	2
1.2.1 复杂冶金过程建模	2
1.2.2 复杂冶金过程控制	4
1.2.3 复杂冶金过程优化	5
1.3 智能控制与智能优化方法	6
1.3.1 神经网络控制	7
1.3.2 模糊控制	13
1.3.3 专家控制	17
1.3.4 解耦控制	20
1.3.5 预测控制与自适应控制	24
1.3.6 递阶智能控制	25
1.3.7 智能优化算法	26
1.4 本书内容	34
第 2 章 炼焦过程智能控制	36
2.1 炼焦生产过程及控制目标	36
2.1.1 炼焦生产工艺流程	36
2.1.2 炼焦过程生产目标与控制要求	39
2.2 炼焦配煤智能优化控制	42
2.2.1 配煤智能优化思想	42
2.2.2 配合煤质量预测模型	43
2.2.3 配比优化计算方法	45
2.3 焦炉加热燃烧过程智能优化控制	48
2.3.1 火道温度智能集成软测量模型	48
2.3.2 火道温度优化设定模型	58
2.3.3 火道温度优化控制模型	64
2.4 焦炉集气管压力智能解耦控制	74
2.4.1 集气过程及特性分析	74

2.4.2	基于耦合度分析的智能解耦控制系统	75
2.4.3	焦炉集气管压力智能控制算法	79
2.5	焦炉作业计划与优化调度	85
2.5.1	推焦作业计划优化调度分析	85
2.5.2	优化调度系统总体结构	86
2.5.3	炼焦生产过程多工况优化调度	87
2.6	炼焦生产全流程优化控制系统	95
2.6.1	综合生产目标智能预测模型	95
2.6.2	炼焦生产全流程优化控制	99
2.6.3	系统实现与工业应用	101
第 3 章	烧结过程智能控制	125
3.1	烧结过程建模与控制问题	125
3.1.1	烧结工艺及基本原理	125
3.1.2	烧结过程控制问题	126
3.1.3	烧结过程建模方法	127
3.2	烧结配料优化与控制	128
3.2.1	配料过程建模与优化	128
3.2.2	烧结配料多目标综合优化方法	132
3.3	混合制粒和偏析布料过程控制	143
3.3.1	混合制粒和偏析布料工艺机理分析	144
3.3.2	混合制粒过程建模与优化控制策略	146
3.3.3	偏析布料建模与优化控制策略	159
3.4	烧节点火过程控制	170
3.4.1	烧节点火工艺及特点分析	170
3.4.2	烧节点火燃烧过程控制分析	171
3.4.3	控制结构与控制原理	173
3.4.4	智能优化控制算法设计	174
3.5	烧结终点优化控制	175
3.5.1	烧结终点控制问题	175
3.5.2	智能优化控制系统结构	176
3.5.3	烧结终点预测方法	178
3.5.4	烧结终点混杂智能控制模型	181
3.5.5	基于满意度的智能优化协调模型	191
3.6	烧结综合料场作业管理与优化	198
3.6.1	综合料场工艺及存在问题	199

3.6.2	综合料场作业管理与优化系统结构	200
3.6.3	综合料场储位选择优化方法	207
3.6.4	基于多模型集成的铁矿粉库存量预测方法	213
3.6.5	基于 GA-PSO 算法的烧结料场原料库存量优化	220
3.7	烧结过程控制系统实现与应用	222
3.7.1	配料过程控制系统实现与应用	223
3.7.2	混合制粒过程控制系统实现与应用	230
3.7.3	偏析布料过程控制系统实现与应用	234
3.7.4	烧结终点过程控制实现与应用	238
3.7.5	综合料场优化系统实现与应用	243
第 4 章	高炉生产过程建模与控制	250
4.1	高炉生产工艺及流程	250
4.2	无料钟高炉布料模型	252
4.2.1	炉顶布料设备	252
4.2.2	高炉布料模型设计	253
4.2.3	无料钟高炉布料过程建模	254
4.3	高炉料面温度场检测	274
4.3.1	高炉料面温度场检测方案设计	275
4.3.2	高炉料面温度场检测信息特征提取	281
4.3.3	基于信息融合的高炉料面温度场计算	298
4.4	高炉炉况智能诊断与预报	308
4.4.1	高炉炉况影响因素及关联性分析	309
4.4.2	基于支持向量机的双层结构炉况诊断	314
4.4.3	基于诊断判决的炉况预报	326
4.5	高炉热风炉燃烧过程智能控制	331
4.5.1	高炉热风炉工艺过程机理分析	331
4.5.2	燃烧过程控制设计思想	333
4.5.3	燃烧过程智能控制结构与策略	334
4.6	高炉炉顶压力智能解耦控制	343
4.6.1	高炉炉顶压力控制工艺	343
4.6.2	炉顶压力控制设计思想	344
4.6.3	高炉炉顶压力智能控制器设计	346
4.7	系统实现与工业应用	349
4.7.1	高炉布料模型工业应用	349
4.7.2	高炉料面温度场检测工业应用	351

4.7.3	高炉炉况智能诊断与预报工业应用	352
4.7.4	高炉热风炉燃烧过程智能控制工业应用	353
4.7.5	高炉炉顶压力智能控制工业应用	354
第 5 章	加热炉燃烧过程智能控制	356
5.1	加热炉燃烧过程	356
5.1.1	加热炉生产工艺过程	356
5.1.2	加热炉燃烧过程控制要求	359
5.2	基于回归神经网络的加热炉建模	361
5.2.1	回归神经网络模型	362
5.2.2	钢温预测集成模型	367
5.3	蓄热式加热炉燃烧过程智能控制系统	369
5.3.1	燃烧过程多模型控制	369
5.3.2	炉温优化设定	382
5.3.3	系统实现及工业应用	383
5.4	CSP 均热炉燃烧过程智能优化控制系统	389
5.4.1	模糊专家控制	391
5.4.2	系统实现及工业应用	396
第 6 章	公用工程系统智能控制与优化	401
6.1	煤气混合加压过程智能解耦控制	401
6.1.1	煤气混合加压工艺过程	401
6.1.2	智能解耦控制系统总体设计	406
6.1.3	热值、压力解耦控制回路	405
6.1.4	压力控制回路	418
6.1.5	系统实现与工业应用	419
6.2	煤气平衡认证系统	424
6.2.1	煤气计量与平衡	424
6.2.2	煤气平衡认证系统中的主要技术原理	424
6.2.3	系统实现与应用	442
	参考文献	450

第1章 绪 论

钢铁工业是指产生铁、钢、钢材和铁合金的工业，是发展国民经济的重要基础产业。钢铁工业的发展直接影响着与其相关的国防工业及建筑、机械、造船、汽车、家电等行业。钢铁工业在我国国民经济发展中持续占据重要地位，国内钢铁需求持续走高，我国自 1996 年以来粗钢产量一直位居世界第一，钢铁行业蓬勃发展。其中，冶金自动化技术在钢铁工业生产中发挥着越来越重要的作用。

1.1 复杂冶金过程及其控制问题

钢铁工业生产流程如图 1.1 所示。整个流程可以分为铁前炉料制备、高炉炼铁、炼钢、连铸和轧钢等过程，进一步可以细化为炼焦过程、烧结过程、高炉炼铁过程、加热炉燃烧过程、连铸连轧过程和公用工程系统等环节。

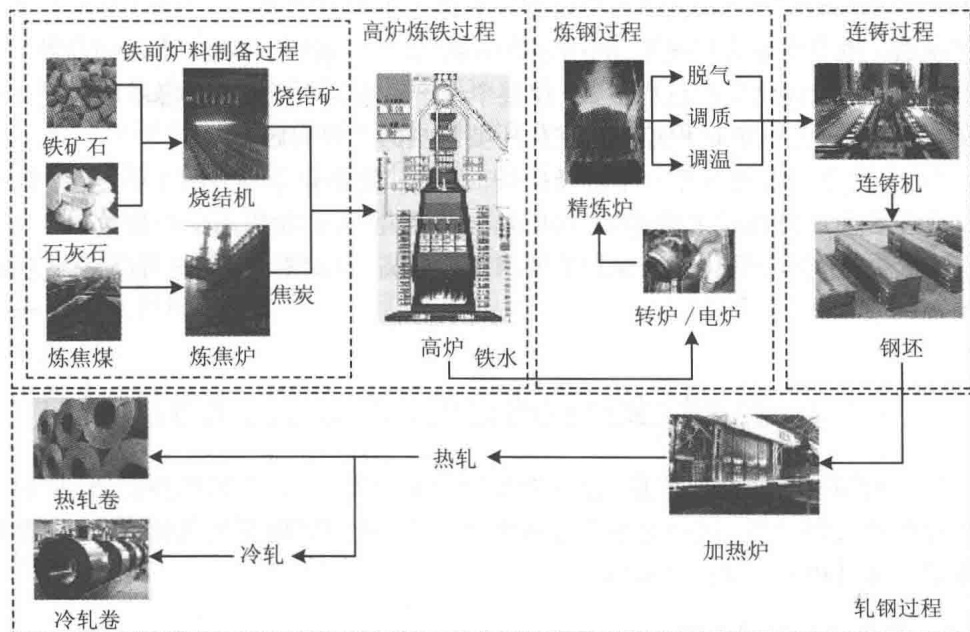


图 1.1 钢铁工业生产流程

首先，将铁矿石、石灰石、熔剂、燃料和烧结循环利用物等按照一定的比例，配成粒度合适的混合料并铺在烧结机台车上，在燃料燃烧供热、混合料不完全熔化的

状态下烧结成块。目标是生产出成分合适、还原性强、透气性良好、具有一定尺寸和机械强度的烧结矿,以满足高炉熔炼要求。另外,将不同种类的炼焦煤按照比例配合,将混合均匀的配合煤送往焦炉炼焦,通过加热燃烧、推焦等过程之后,得到符合生产需求的焦炭。然后,将烧结料、焦炭和石灰石等原料送往高炉。在高炉中,矿石料在下降过程中逐渐被还原,熔化成铁水和铁渣。高炉炼铁的目的是通过还原反应将矿石中的铁元素提取出来,主要产品为铁水。接下来,将铁水送入转炉和精炼炉,通过脱气、调质和调温等步骤,去除高炉铁水中硫等非金属杂质。转炉生产出来的钢水经过精炼炉精炼以后,需要将钢水铸造成不同类型、不同规格的钢坯。连铸过程就是将精炼后的钢水连续铸造成钢坯的生产工序。钢铁冶金的一道工序是轧钢过程,轧钢分为热轧和冷轧两种,其目的一方面是得到需要的形状,另一方面则是改善钢的内部质量。通过这一系列的生产过程,最终将铁矿石变成人们生活中各种各样的钢铁制品。公用工程系统为钢铁工业生产提供保障基础,包括供水、供气、供电和供热等,煤气供应就是复杂冶金过程中典型的公用工程系统。

本书将分别针对炼焦过程、烧结过程、高炉生产过程、加热炉燃烧过程以及公用工程系统中的建模、控制与优化问题进行陈述。

随着钢铁生产规模不断扩大,对产品质量的要求不断提高。为了实现安全、环保和高效的生产目标,对复杂冶金过程控制提出了更高的要求。因此,如何在现有工艺流程、生产设备的情况下,利用过程信息,以工艺指标、节能、降耗和高效益为目标,实时在线优化生产过程参数,使整个生产过程运行于最优状态,切实提高企业的经济效益,是目前过程控制与优化所要解决的主要问题。

总之,复杂冶金过程是一个涉及传质、传热和复杂化学反应的工业过程。随着现代化工业生产过程越来越复杂,规模越来越庞大,人们对提高生产效益和产品质量、降低生产成本、强化环境保护的要求越来越高,从而对冶金生产自动化也提出了更高的要求。

1.2 复杂冶金过程的建模、控制与优化方法

如何利用有效的过程信息,建立准确的对象模型,设计高效的控制器,实时在线优化生产过程参数,同时对生产过程进行评估,从而实现系统优化运行,这是目前复杂冶金过程所面临的主要问题。

1.2.1 复杂冶金过程建模

复杂冶金过程的先进控制、参数的软测量、过程优化、调度与管理等都以模型为基础。工业过程建模经历了传统建模和智能建模两大阶段,如表 1.1 所示。然而,随着冶金工业往大型化、综合化和复杂化方向发展,工业过程建模难度越来越大,

它不仅涉及对象的非线性、不确定性、大时滞、参数分布性和时变性等内在的复杂机理问题,而且涉及客观环境和人为的作用因素。

表 1.1 复杂冶金过程建模发展

阶段	建模理论	建模方法	建模要求	模型形式
第一阶段	传统建模	机理建模、系统辨识	简单、准确	较为单一
第二阶段	智能建模	智能化技术与理论	智能、集成、高效	多样化

传统的冶金过程建模方法包括机理建模和系统辨识两种建模方法。机理建模是在工艺机理分析的基础上,依据物料平衡、热量平衡、动力学和热力学等理论建立的类似于方程式的模型。采用机理建模对过程进行描述,在很大程度上依赖于科研和工程开发人员对实际工业过程的理论和化学、物理过程原理的认识。由于实际过程的复杂性和不确定性,对于工业过程的认知总是有限的,所以建立严格的机理模型十分困难,所花费的时间和资金很多。

系统辨识通过对所研究工业过程输入与输出关系的观测,基于一组给定的模型类,用参数估计方法确定与所测过程等价的模型。系统辨识的关键是模型类的确定以及参数估计方法。已成功应用于系统辨识中的参数估计方法主要包括极大似然法、最小二乘法、互相关法、辅助变量法和随机逼近法等。

随着计算机水平的不断发展,复杂冶金过程建模也逐渐由传统建模向智能建模发展。智能建模方法指将神经网络、模糊逻辑、模式识别等智能化技术和理论用于工业过程建模中。目前智能化建模技术已广泛应用于实际的复杂冶金过程中,而且取得了很好的应用效果,其中神经网络和模糊建模技术应用最为广泛。

人工神经网络可任意逼近非线性,且具有大规模并行处理、知识分布存储、自学习能力强和容错性好等特点,在复杂冶金工业过程建模中备受青睐。例如,针对烧结制粒过程粒度参数定量化问题,利用烧结热状态参数和操作参数,建立粒级参数的 BP(back propagation)神经网络模型^[1],对不同的粒级参数进行有效的定量评估。但是,神经网络是一种基于生产数据的黑箱模型,模型不具透明性,不能揭示过程的机理。另外,神经网络对训练样本的选择和需求量大,当输入较多时,存在网络结构复杂、网络训练耗时和收敛速度慢的缺点。因此,可以利用粒子群、蚁群等优化算法对神经网络进行优化以克服这些问题。例如,将粒子群优化算法与 BP神经网络结合,建立钢水终点温度预报模型。这种方法改善了神经网络收敛性能,提高了预测速度和精度,为钢水的冷却和轧制提供了精确的模型基础^[2]。

模糊建模技术根据经验知识对过程进行描述,它采用模糊推理方法,能很好地处理生产过程中存在的大量不确定性信息。有学者针对铅锌烧结烧穿点温度无法直接检测问题,利用 T-S 模糊建模方法建立了烧穿点预测模型,有效地预测了烧穿点位置和温度^[3]。但是模糊建模技术也存在难以获取知识的问题,同时这种方法

在确定规则数和模糊隶属度函数时需要有效数据的附加信息或先验知识,而这些信息有时并不容易得到。大部分情况下,将模糊技术和神经网络结合,构成模糊神经网络建模方法。这样既可以处理和描述模糊信息,又可以提高推理速度和模型精度。在复杂冶金过程建模中,模糊神经网络技术也得到了广泛的应用。例如,针对钢坯热轧过程中的能耗问题,建立基于轧制信息反馈的模糊神经网络热轧生产过程模型,可以解决神经网络容易陷入局部最小值的问题^[4]。

复杂冶金工业过程存在多变量、非线性、强耦合、时变时滞以及不确定等复杂特性。这些复杂性导致传统的建模方法难以适用于复杂冶金过程建模。因此,利用智能建模方法来提高模型性能显得尤为重要。综合利用已知的过程机理知识、实际操作经验和历史生产数据等,将不同的建模方法集成运用,是解决复杂冶金工业过程建模的有效途径。

1.2.2 复杂冶金过程控制

复杂冶金过程控制的发展和控制理论、仪表、计算机、计算机通信与网络以及相关学科的发展紧密相关。复杂冶金过程控制发展大致经历了简单控制系统、先进控制系统和综合自动化系统三个发展阶段,如表 1.2 所示。

表 1.2 复杂冶金过程控制发展阶段

阶段	控制理论	控制工具	控制要求	控制水平
第一阶段	经典控制理论	常规仪表	安全、平稳	低下
第二阶段	现代控制理论	分布式控制系统	优质、高产、低耗	一般
第三阶段	多学科集成技术	计算机网络	智能、集成、高效	先进

第一阶段是 20 世纪 70 年代以前的简单控制系统。这一时期采用的控制理论为经典控制理论,控制工具为气动、液动、电动等常规仪表,控制目标只能保证生产安全、平稳和少出事故。

第二阶段是 20 世纪 70~90 年代的先进控制系统。在这一时期,由于计算机技术的发展,分布式工业控制计算机系统的出现与成熟,为复杂冶金过程实施先进控制创造了技术基础。模型预测启发式控制、动态矩阵控制以及多变量预测控制系统的应用,使得过程控制达到了一个新水平,在实现优质、高产和低消耗的控制目标方面前进了一大步。这一时期的控制理论在深度和广度上有了许多进展,鲁棒控制、非线性控制、预测控制在理论上都有重大突破。但是,控制理论与实际过程控制的应用依然存在不小差距,控制理论的发展仍不能完全满足实际的需要。

第三阶段是从 20 世纪 90 年代后期开始的综合自动化系统随着多学科如控制论、信息论、系统论、人工智能、管理科学和工程学等学科的交叉与渗透,同时信号处理、数据库、计算机网络与通信技术的迅猛发展为实现高水平的自动控制提供

了强有力的技术工具, 复杂冶金过程控制的发展进入了第三阶段。在这一阶段, 过程控制的目标已从保持安全平稳进入提高产品质量、降耗节能、降低成本、减少污染, 最终以效益为驱动力来重新组织整个生产系统, 最大限度地满足动态多变的市场需求, 提高产品的市场竞争力。在该阶段, 复杂冶金过程控制发展的主要特点如下。

(1) 先进控制成为发展的主流。20 世纪 70 年代以后, 许多生产装置采用了分布式控制系统 (distributed control system, DCS)。但由于当时的理论和技术, 控制水平仍停留在单回路 PID 控制、联锁保护等。随着企业提出高柔性、高效益的要求, 上述控制方案已经不能适应。先进控制策略提出并且成功应用于实际生产之后, 受到了过程工业界的普遍关注。先进控制策略主要有多变量预测控制、自适应控制、解耦控制、推理控制、专家控制、模糊推理和神经网络控制等, 这些控制策略在复杂冶金生产过程中都得到了广泛的应用。根据集气管压力耦合关系的不同, 应用智能解耦算法, 设计出组内解耦控制器和组间解耦控制器, 用以消除三座焦炉在并联生产时集气管相互耦合对生产带来的影响^[5]; 利用模糊控制方法, 设计点火温度模糊控制器, 对点火燃烧过程进行优化控制, 可有效提高点火燃烧质量和煤气利用率^[6]。

(2) 控制系统向开放式系统发展。随着综合自动化的潮流和计算机科学与技术的发展, 各 DCS 生产厂家的产品大多不能兼容的局面已被打破。一些主要的 DCS 生产商经过激烈竞争, 最后终于联手共同推出一种国际标准的现场总线 (fieldbus) 控制系统。它的主要特点在于开放性、彻底的分散性, 以及智能化现场仪表和现场数字信号传输, 因此被公认为具有时代特点的新一代分布式计算机控制系统。目前, 在高炉、焦炉、烧结等复杂冶金生产中, 现场总线控制系统因其可靠性、扩展性、开放性、功能的完备性、系统的可维护性等特点得到越来越广泛的应用。

(3) 综合自动化系统是未来发展方向。国内外企业在国际市场剧烈竞争的刺激和要求加强环境保护的社会压力下, 节能降耗, 少投入、多产出的高效生产和减少污染的洁净生产成为企业的生产模式, 企业把提高综合自动化水平作为挖潜增效、提高竞争能力的重要途径。集常规控制、先进控制、过程优化、生产调度、企业管理、经营决策等功能于一体的综合自动化成为当前过程控制发展的趋势。综合自动化就是在计算机通信与网络和分布式数据库支持下, 实现信息与功能的集成, 进而充分调动以人为主要因素的经营系统、技术系统及组织系统的集成, 最终形成一个能适应生产环境不确定性和市场需求多变性的全局优化的高质量、高效益、高柔性的智能生产系统。

1.2.3 复杂冶金过程优化

优化的问题就是讨论在众多的方案中寻找最优方案, 并为问题的解决提供理论

基础和求解方法,它是一门应用广泛、实用性很强的科学。对于复杂冶金过程优化问题,目前的研究热点主要集中于以下几点。

(1) 工况区域优化理论与技术。传统的优化理论中,如线性规划 (linear programming, LP)、梯度方法,是要在各种约束条件下,求取目标函数的全局最优值。在实际的复杂冶金过程中,一方面由于系统的复杂性,求全局最优值十分困难;另一方面,许多过程并非一定要求最优值,而只要求得优化区域就能满足要求。区域优化在实际应用中具有重大的使用价值。当前,主要研究内容集中为:区域优化问题的评价函数的确定;根据实际问题,确定优化区域;区域优化算法研究,包括传统优化算法、基于规则的搜索方法、遗传算法等;区域优化算法的收敛性分析。

(2) 随机搜索优化方法。在复杂冶金过程中,最受关注的几种方法是模拟退火算法 (simulated annealing algorithm, SAA)、遗传算法、进化计算 (evolution computing, EC) 和趋化性算法 (chemotaxis algorithm, CA)。这些优化算法的主要推动力来自要寻找全局最优解的难题,如运用模拟退火算法对配煤比进行优化计算,实现对配煤过程的控制 [7]。在求全局最优解的方法中,一类是确定性方法,如非线性规划 (nonlinear programming, NP);一类是随机性方法,如模拟退火算法、遗传算法和进化计算等。近年来,利用混沌运动的遍历性、随机性和规律性等特点,有关学者研究了混沌优化算法 (chaos optimization algorithm, COA),取得了一些成果,但混沌优化算法的内在机制、收敛性以及计算量尚待进一步研究。因此,学者将遗传算法、趋化性算法和模拟退火算法等与传统优化算法有机结合,探索有较快收敛速度,保证全局最优解的优良算法。

(3) 智能优化。对于复杂冶金过程,优化目标不一,约束条件各异。用一般优化方法会遇到“组合爆炸”问题。智能优化方法的思想来源于模仿人脑在处理优化问题时的活动和自然界生物群体所表现出的智能现象。目前已达到应用阶段的技术有神经网络技术、遗传算法和粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 等。遗传算法在复杂冶金过程控制领域中得到了不少的应用,例如,用遗传算法对焦炉煤气量的模糊控制器参数进行寻优,利用遗传算法对烧结终点的人工神经网络的结构进行优化设计和权值学习等 [8];还有就是将传统人工智能技术与神经网络相结合,例如,通过提出基于模糊控制规则提取和神经网络技术相结合的钢坯加热过程综合优化控制策略,实现对加热炉炉温预设定值波动的动态优化补偿 [9]。

1.3 智能控制与智能优化方法

工业过程日趋复杂化、大型化,使得对过程控制提出了越来越高的要求。但是,由于一些过程存在严重的不确定性,以经典控制和现代控制理论指导的、基于被控对象数学模型的传统控制方法已经显示出不适应性。以知识工程为指导的智能控

制理论和方法,在处理高复杂性和不确定性方面表现出了其灵活性的决策方式和应变能力而受到高度重视。

1.3.1 神经网络控制

人工神经网络是模仿脑细胞结构和功能、脑神经结构以及思维处理问题等脑功能的新型信息处理系统。由于人工神经网络具有复杂的动力学特性、并行处理机制、学习、联想和记忆等功能,以及它的高度自组织、自适应能力和灵活性,因而受到自然科学领域学者广泛重视。

神经网络是由大量神经元广泛互连而成的网络,每个神经元在网络中构成一个节点,它接收多个节点的输出信号,并将自己的状态输出到其他节点。可以从不同的角度对人工神经网络进行分类。

- (1) 根据所构成拓扑结构的不同,神经网络可分为前馈型网络和反馈型网络。
- (2) 根据网络性能的差异,可分为连续型与离散型网络、确定性与随机性网络。
- (3) 根据学习方式的角度,可分为有导师学习网络和无导师学习网络。
- (4) 根据连接突触的性质,可分为一阶线性关联网络和高阶非线性关联网络。

根据有无隐含层,前馈型网络又分为单层前馈型网络和多层前馈型网络,分别如图 1.2(a) 和 (b) 所示。前馈型网络中每一层的神经元只接收前一层神经元的输出。这种网络结构简单,属静态非线性映射系统,通过简单非线性处理单元的复合映射,可获得复杂的非线性处理能力。典型的前馈型网络有感知器网络、BP 神经网络和径向基函数 (radical basis function, RBF) 神经网络等。反馈型网络是指在网络中至少含有一个反馈回路的神经网络。在该网络中,多个神经元互连以组织成一个互连神经网络,如图 1.3 所示。其中,有些神经元的输出被反馈至同层或前层神经元,因此信号能从正向和反向流通。Hopfield 神经网络和 Elman 神经网络是典型的反馈型神经网络。

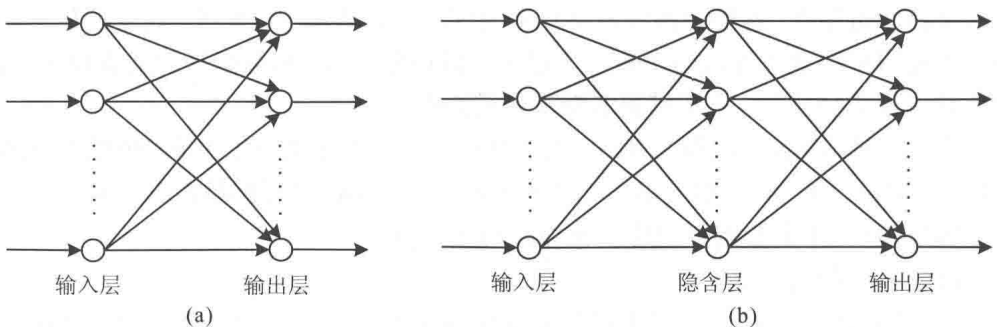


图 1.2 前馈型网络

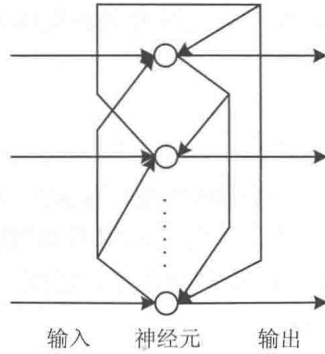


图 1.3 反馈型网络

从作用效果看，前馈型网络主要是函数映射，可用于模式识别和函数逼近。反馈型网络按对能量函数极小点的利用来分类有两种：第一类是能量函数的所有极小点都起作用，这一类主要用作各种联想存储器；第二类只利用全局极小点，它主要用于求解最优化问题。

神经网络系统是一个高度复杂的非线性动力学系统，不但具有一般非线性系统的共性，更主要的是它还具有自己的特性。一般来说，神经网络具有以下基本特点。

(1) 并行分布处理。神经网络具有高度的并行结构和并行实现能力，因此大大加快了信息处理的速度，适用于实时控制和动态控制。

(2) 非线性映射。任意连续的非线性函数映射关系可由多层神经网络以任意精度逼近，利用这一特性，神经网络可以有效地解决非线性系统的建模问题。这一特性在后续章节中广泛应用。

(3) 通过训练进行学习。神经网络通过基于过去的数据和经验进行训练，具有归纳全部数据的能力，因此能够解决那些由于数学模型或描述规则难以处理的控制过程问题。

(4) 自适应与集成。神经元之间的连接具有多样性，并且各神经元之间的连接权值又具有可塑性，这使得神经网络具有很强的自适应能力。此外，具有的信息融合能力使得网络过程可以同时输入大量不同的控制信号，实现信息的集成和融合。这些特点很适合复杂、大规模和多变量系统的控制。

在人工神经网络的实际应用中，人工神经网络模型多采用 BP 神经网络及其改进形式。除了 BP 神经网络，RBF 神经网络和 Hopfield 神经网络也是经常采用的神经网络模型，本节分别介绍这三种神经网络模型。

1) BP 神经网络

BP 神经网络就是一种采用误差反向传播学习方法的单向传播多层次前馈型网络，以三层神经网络为例，其结构如图 1.4 所示。

BP 神经网络学习是有导师学习，其学习过程由正向传播和反向传播组成。在