

Operational Feedback Control for Grinding Processes

磨矿过程运行反馈控制

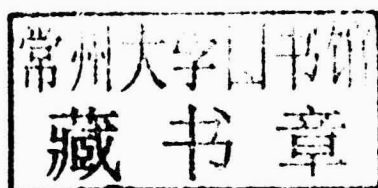
周 平/著



科学出版社

磨矿过程运行反馈控制

周 平 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从经济全球化背景下的现代选矿对提高产品质量与生产效率以及节能降耗的迫切需求出发,针对目前磨矿过程运行控制存在的关键科学问题,结合作者多年在该领域的研究工作积累,比较系统地探讨磨矿过程运行反馈控制方法及其应用的问题。内容包括运行控制的一般性介绍及磨矿运行控制问题描述、基于模型的磨矿运行反馈控制方法、基于数据与知识的磨矿智能运行反馈控制方法及工业应用、磨矿运行反馈控制半实物仿真实验系统等。

本书适合从事自动控制理论与技术、冶金选矿工程等领域的专业研究人员和工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业研究生及高年级本科生的教材参考书。

图书在版编目(CIP)数据

磨矿过程运行反馈控制/周平著. —北京:科学出版社, 2015.7
ISBN 978-7-03-045129-3

I. ①磨… II. ①周… III. ①磨矿—工业控制系统 IV. ①TD921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 133820 号

责任编辑:姜 红 张 震/责任校对:鲁 素
责任印制:徐晓晨/封面设计:无极书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015 年 7 月第一次印刷 印张: 17 7/8

字数 360 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

现代过程工业的发展和日趋激烈的国际市场竞争，对过程控制提出新的要求。过程控制不仅使被控过程的输出尽可能好地跟踪控制器设定值，而且要控制整个工业装置的运行，使反映产品在该装置加工过程中的质量、效率与消耗等指标，即运行指标，控制在目标值范围内，尽可能提高质量与效率指标，尽可能降低消耗指标，即实现工业过程运行优化。工业过程运行优化一直受到学术界和工业界的广泛关注。对于可以建立数学模型的化工过程，国际上广泛采用实时优化(RTO)静态开环优化方法来实现过程控制设定值优化。原材料工业是社会经济发展中不可取代的基础工业。中国已经成为世界门类最齐全、规模最庞大的原材料生产大国，为了充分利用资源，必须采用品质低、成分波动大的资源作为原材料工业生产的原料。中国的钢铁、电熔镁砂、氧化铝等原材料工业的产量不仅居世界第一位，而且是原料赤铁矿、菱镁矿、铝土矿等的资源大国。由于这类矿石资源品位低、成分波动大、难以选别，这使得处理这类矿石的生产过程的动态特性复杂，机理不清，难以建立数学模型，运行指标不能在线测量，加上生产边界条件变化频繁，难以采用已有的运行优化方法。因此，必须研究复杂工业过程的运行优化控制方法。

我和我的团队以及学生近 20 年在国家 973 计划项目、国家自然科学基金重点项目的资助下，结合企业重大自动化工程项目，一直致力于复杂工业过程运行优化控制的研究。该书作者，我的学生周平，从 2003 年硕士阶段开始就一直以冶金磨矿过程为研究背景，致力于磨矿过程运行优化控制的研究，取得较系统的研究成果，部分成果已在 *IEEE Trans. Contr. Sys. Techno.*、*IEEE Trans. Auto. Sci. Eng.* 等著名学术期刊发表 SCI 论文 10 余篇，授权国家发明专利 5 项，获得“中国自动化学会优秀博士学位论文”“辽宁省优秀硕士学位论文”等多项奖励。

该书是作者对上述研究成果的总结和提升。该书分析了冶金磨矿等复杂工业过程运行控制与优化的研究现状，介绍了磨矿过程运行优化控制问题的数学描述。以可以建立数学模型的磨矿过程为背景，介绍了针对表示质量、效率的多运行指标及其测量滞后等问题提出的改进两自由度解析解耦运行反馈控制方法；介绍了针对运行过程受未知随机干扰所提出的基于改进单变量干扰观测与模型预测控制

(MPC)的集成运行反馈控制方法和基于多变量干扰观测与 MPC 的集成运行反馈控制方法;介绍了针对难以建立数学模型的复杂赤铁矿两段全闭路磨矿提出的设定值闭环优化与回路控制构成的两层结构运行反馈控制方法,该控制方法包括基于案例推理(CBR)的控制回路预设定算法、基于动态神经网络(ANN)的粒度软测量算法、多变量模糊偏差补偿算法;介绍了针对赤铁矿闭路磨矿过负荷故障工况提出的复杂磨矿过程运行优化与安全的智能运行反馈控制方法,该控制方法包括基于自适应二次规划的回路设定值优化设定算法、基于 CBR-ANN 的磨矿粒度混合智能软测量算法、多变量模糊动态补偿算法以及基于统计过程控制与规则推理的过负荷工况诊断与自愈控制算法。同时,该书还介绍了采用所提出的运行优化控制方法的仿真实验,特别介绍了在大型赤铁矿选厂磨矿过程的成功工业应用案例。

该书对于从事工业过程控制与优化的研究人员有参考价值,特别是对以实际工业为背景从事研究的博士生如何从实际需求提炼科学问题进行深入研究并撰写高水平学术论文具有参考价值,也可作为从事选矿过程控制与优化的工程技术人员参考书。

作为导师,我衷心为周平出版他人生的第一部学术专著而感到高兴和欣慰。在该书出版之际,谨为之作序,寄望于作者能够在此方向上进行持续研究,取得解决工业实际难题并具有高水平学术价值的成果。

中国工程院院士

IEEE Fellow

IFAC Fellow

2015年4月7日

序 二

中国工业化进程已取得举世瞩目的成就，钢铁、水泥、煤炭、有色金属等的产量常年位居世界第一。但一直以来，中国工业的快速发展是建立在大量消耗能源、原材料的基础上，依靠规模总量取胜，产品附加值低。中国现有生产装置工艺技术基本从国外引进，但生产运行过程的操作水平以及控制与优化水平与国际先进水平相比仍差距明显，综合竞争能力不强，以致在关键运行指标，如能耗和物耗指标上与国际先进水平仍存在较大差距。如冶金、石化、电力、建材、轻工、纺织等行业主要产品单位能耗平均比国际先进水平高 40%，能源利用效率仅为 33%，比发达国家低 10% 左右。

2015 年 3 月 25 日，国务院常务会议强调“中国制造 2025”要以“信息化与工业化深度融合”为主线，要强化工业基础能力，提高工艺水平和产品质量，推进“智能制造、绿色制造”。实际上，“信息化与工业化深度融合”以及“智能制造、绿色制造”是今后一个历史时期里，实现中国工业产业结构优化升级的必由之路，也是经济全球化背景下提高中国现代工业竞争力的必然选择。信息技术中，工业控制是实现优化产品质量、提高生产效益和节能减排的重要手段，因而也是实现“信息化与工业化深度融合”和“智能制造、绿色制造”的关键之一。传统的过程控制假定可以获得控制器设定值的条件下，研究集中在如何设计控制器在保证闭环系统稳定的条件下，使被控对象的输出尽可能好地跟踪设定值。忽略偏离理想设定点的反馈控制不能实现系统的优化运行。现代过程工业的发展和日趋激烈的国际市场竞争使得工业界对过程控制提出了新的需求——过程控制不仅使被控过程的输出尽可能好地跟踪控制器设定值，而且要对整个工业装置的运行进行控制，使反映产品在该装置加工过程中的质量、效率与消耗等运行指标在目标值范围内，尽可能提高质量与效率指标，尽可能降低消耗指标，即实现工业过程运行控制。现代飞速发展的计算机技术和通信技术为实现工业过程运行控制提供了平台。

众多流程工业中，选矿是重要的金属原材料工业，在国民经济生产中占有重要地位。作为选矿过程最为关键的工序——磨矿，是任何一种金属选别的先决工序，其作用就是将大颗粒矿物原料粉碎到适宜粒度，使有用矿物与脉石单体解离或不同有用矿物相互解离，为后续金属选别提供原料。磨矿是典型的高能耗、低

效率过程，磨矿运行指标即磨矿产品粒度、磨矿生产效率等决定着选矿精矿品位的好坏和生产能力的高低，并与选厂经济技术指标密切相关。因此，必须研究将复杂磨矿生产与各个磨矿设备作为紧密联系的整体，建立磨矿整体运行控制的分层控制结构，实现控制指标、运行指标以及经济性能指标的集成控制与优化。我想这也是该书作者周平多年一直致力于磨矿过程运行反馈控制以及撰写该书的最主要目的。

该书从现代选矿对提高产品质量与生产效率以及节能降耗的迫切需求出发，针对磨矿过程运行控制存在的几个关键科学问题，结合作者多年在该领域的研究工作积累，系统地阐述了磨矿运行反馈控制方法及其应用的研究内容，具体包括：运行控制的一般性介绍及运行控制问题描述、几种基于模型的磨矿运行反馈控制方法、几种基于数据与知识的磨矿智能运行反馈控制方法及工业应用、磨矿运行反馈控制的半实物仿真实验系统的研制等。全书工作饱满，深入浅出、融会贯通，既有深入的方法研究和理论推导，也有精彩的工业试验与应用，以及独特的运行反馈控制半实物仿真实验平台设计。因此该书是一本难得的控制技术与应用方面的学术专著。

中国正在经历着应用信息技术改造传统工业产业、实现跨越式发展的新型工业化进程。该书阐述的“复杂工业过程运行反馈控制方法”正是这一进程中的一项研究成果。对于希望深入掌握工业过程运行反馈控制方法与技术这一控制领域前沿方向的读者，该书非常值得一读。对于受困于某个特定工业过程运行反馈控制问题以及其他相关技术问题的工程技术人员，也可将其作为参考书。对于高等院校的控制专业以及选矿工程专业的研究生，也可选择其中某些章节进行阅读，开阔视野。

我相信，该书的出版能对中国流程工业过程自动化的研究、应用和教学有所帮助。

中组部千人计划教授

教育部长江讲座教授

英国曼彻斯特大学教授



王 宏

2015年3月30日

前 言

过程控制与自动化作为工业生产不可缺少的组成部分，一直是实现安全、平稳、优质、高效生产的重要保证。在过去很长一段时间，模拟控制器被当做唯一的控制器广泛应用于工业过程控制。20 世纪 60 年代初，数字计算机开始代替老旧的模拟控制器，这就是沿用至今的直接数字控制。然后就是 Rockwell、Siemens、Honeywell 等专用控制系统，如可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）和分布式控制系统（distributed control system, DCS）的出现，使得工业过程控制越来越简易化和集中化。借助 PLC、DCS 等专用控制装置对生产过程的基础回路控制和顺序逻辑控制，即可使工业生产按一定的工况条件连续运行。然而，运行环境的变化、原料成分的波动、工艺设备的磨损和老化等因素形成了对过程运行的持续扰动。这种情况下，之前设定的过程运行工作点不再与当前工况条件相匹配。为此，需要根据运行工况和过程干扰的变化，通过上层系统自动修改和调整各底层 PLC 或 DCS 系统的设定值和相关参数，使工业过程能长时间保持在最优运行状态，从而达到提高产品质量与生产效率，减少原材料和能源消耗的控制目标。这就是工业过程运行反馈控制，它与传统的过程控制有着本质的不同。传统过程控制假定可以获得控制器设定值的条件下，研究集中在如何设计控制器使被控对象输出尽可能好的跟踪设定值，完成特定的稳定性、鲁棒性等过程控制指标。传统过程控制通常忽略偏离理想设定点的反馈控制，不能实现工业系统的整体优化运行。而运行反馈控制被控对象包含基础控制层和运行控制层两层动态系统，需要控制整个运行过程以实现产品质量、生产效率与能耗等运行指标的优化，并最终提高经济效益。

众多流程工业中，选矿是重要的金属原材料工业，在国民经济中占有重要地位。选矿作业中，磨矿是任何一种金属选别的先决工序，其作用就是将大颗粒矿物原料粉碎到适宜粒度，使有用矿物与脉石单体解离或将不同的有用矿物相互解离，为后续选别提供原料。磨矿是典型的高能耗、低效率过程，其电能消耗占整个选厂的 45%~70%，生产成本占选矿总成本的 40%~60%。磨矿运行指标，即磨矿产品粒度、磨矿生产效率等，决定着选矿精矿品位的好坏和生产能力的高低，并与选厂经济技术指标密切相关。长期以来，磨矿过程控制与优化被认为是提高磨矿产品质量与生产效率以及整个选厂经济利润的关键，一直受到国内外学者的

关注和重视。本书从经济全球化背景下的现代选矿企业对提高产品质量与生产效率以及节能降耗的迫切需求出发,针对目前磨矿过程运行控制与优化存在的几个共性问题,以冶金选矿的两类典型磨矿过程为研究对象,开展复杂磨矿过程的运行反馈控制方法及其应用的研究。

全书共分 8 章:第 1 章为绪论,主要介绍本书工作的背景和研究意义,以及运行反馈控制的相关基本概念;第 2 章介绍冶金磨矿过程及其运行反馈控制问题的数学描述以及难点分析;第 3、4 章研究基于模型的工业过程运行反馈控制方法和在国际通用的可建模磨矿过程的仿真应用及比较研究;第 5、6 章为基于数据与知识的磨矿过程智能运行反馈控制方法,其中第 5 章研究基于数据与知识的两段全闭路赤铁矿磨矿过程运行反馈控制方法,第 6 章在第 5 章的基础上研究面向运行优化与安全的球磨机-螺旋分级机闭路磨矿过程智能运行反馈控制方法;第 7 章为磨矿过程运行反馈控制的半实物仿真实验系统的设计及实验研究;第 8 章对全书工作进行总结,并对潜在的研究问题进行概述。

作者一直从事复杂工业过程运行反馈控制及工业应用的研究。本书一方面是对作者近几年从事磨矿过程运行反馈控制研究的阶段性工作和心得体会进行总结;另一方面,对工业过程运行优化与控制的基本概念、内涵、研究现状以及一些挑战性的问题作一个较为全面的介绍和探讨。

本书涉及的研究工作得到了众多科研项目及机构的支持和资助。这里要特别感谢国家自然科学基金项目(项目编号 61473064, 61104084, 61290323, 61333007)、中央高校基本科研业务费项目(项目编号 N130508002, N130108001)以及国家 973 计划项目(项目编号 2009CB320601)的资助。

本书的研究工作都是在作者的导师柴天佑院士的精心指导下完成的,本书的撰写也得到柴老师的大力支持。同时,作者多年的科研工作和本书的撰写也得到了英国曼彻斯特大学王宏教授的热心帮助和指导。本书的责任编辑也为提高本书质量付出了辛勤劳动,在此一并表示感谢!

最后,要特别感谢作者的家人尤其是妻子张琼女士,是他们在工作和生活上一如既往的支持、鼓励和默默奉献,才使作者能够顺利完成各项科研工作和本书的撰写工作。

本书某些观点属个人见解,由于作者理论水平和技术经验有限,因而书中难免存在不完善或不妥之处,敬请各位读者批评指正。

作 者

2015 年 4 月 8 日于沈阳

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及研究意义	1
1.2 工业过程运行反馈控制的含义及特点	4
1.2.1 过程控制指标与运行控制指标	4
1.2.2 工业过程运行反馈控制的含义	5
1.2.3 工业过程运行反馈控制的特点	6
1.3 工业过程运行优化与控制的研究现状	8
1.3.1 调节优化或自优化控制	8
1.3.2 实时优化控制	11
1.3.3 RTO 与 MPC 集成优化与控制方法	13
1.3.4 基于智能技术的工业过程运行控制方法	16
1.4 磨矿过程运行反馈控制的必要性及研究现状	18
1.4.1 磨矿过程的重要性及其运行控制研究的必要性	18
1.4.2 基于模型的磨矿过程运行控制与优化方法及技术	22
1.4.3 基于智能的磨矿过程运行控制与优化方法及技术	26
1.5 存在的问题及本书主要工作	30
1.5.1 存在的问题	30
1.5.2 主要工作及内容概述	32
第 2 章 冶金磨矿过程及其运行反馈控制问题描述	35
2.1 冶金磨矿过程工艺描述	36
2.1.1 磨矿过程简介	36
2.1.2 磨矿过程关键工艺设备	36
2.2 闭路磨矿回路流程以及两类典型闭路磨矿过程描述	40

2.2.1 磨矿回路流程	40
2.2.2 两类典型磨矿过程介绍	40
2.3 磨矿过程运行指标及其影响因素分析	42
2.3.1 磨矿过程运行指标	42
2.3.2 影响磨矿过程运行性能的因素分析	46
2.4 磨矿过程运行反馈控制的问题描述及其复杂性分析	52
2.4.1 磨矿过程运行反馈控制的问题描述	52
2.4.2 磨矿过程运行反馈控制难点及其复杂性分析	56
2.5 人工监督的复杂赤铁矿磨矿运行控制过程描述	59
2.6 本章小结	63
第3章 基于改进 2-DOF 解析解耦与模型近似的磨矿过程运行 反馈控制方法	64
3.1 基于多点阶跃响应匹配的复杂高阶多时滞系统的低阶单时滞 模型近似	65
3.1.1 模型近似在基于模型的运行反馈控制设计中的重要性	65
3.1.2 多点阶跃响应匹配模型近似问题描述	67
3.1.3 模型近似参数搜索算法	69
3.1.4 模型近似求解步骤	74
3.1.5 仿真实验与结果	76
3.2 基于改进 2-DOF 解析解耦与模型近似的工业过程运行反馈控制方法	84
3.2.1 基于改进 2-DOF 解析解耦的工业过程运行反馈控制策略	84
3.2.2 基于改进 2-DOF 解耦与模型近似的运行反馈控制	87
3.2.3 稳定性分析	93
3.3 基于改进 2-DOF 解耦的磨矿过程运行反馈控制设计及仿真比较	95
3.3.1 棒磨开路、球磨-旋流器闭路磨矿及控制问题	95
3.3.2 基于改进 2-DOF 的闭路磨矿运行反馈控制系统设计	97
3.3.3 仿真实验与结果	101
3.4 本章小结	108
第4章 基于 DOB 与 MPC 的磨矿过程集成运行反馈控制方法	110
4.1 基于 DOB 与 MPC 的集成运行反馈控制策略	112
4.2 基于 IDOB-MPC 的集成运行反馈控制方法及在磨矿过程的仿真实验	115
4.2.1 改进的单变量干扰观测器设计	115
4.2.2 基于 IDOB-MPC 的集成反馈控制设计及性能分析	118

4.2.3 基于 IDOB-MPC 的磨矿过程集成运行反馈控制设计及仿真实验	123
4.3 基于 MDOB-MPC 的集成运行反馈控制方法及在磨矿过程的 仿真实验	129
4.3.1 基于 MIMO 系统近似逆的 MDOB 设计	130
4.3.2 基于 MDOB-MPC 的集成运行反馈控制设计及性能分析	134
4.3.3 基于 MDOB-MPC 的磨矿过程集成运行反馈控制设计及仿真比较	140
4.4 本章小结	149
第 5 章 数据驱动两段全闭路磨矿智能运行反馈控制及工业应用研究	150
5.1 两段球磨全闭路复杂赤铁矿磨矿系统及其运行控制问题	151
5.1.1 赤铁矿两段全闭路复杂磨矿过程简介	151
5.1.2 两段全闭路磨矿过程的综合复杂动态特性分析	151
5.1.3 两段全闭路磨矿过程运行控制问题及现状	154
5.2 数据驱动的赤铁矿两段球磨全闭路复杂磨矿智能运行反馈控制策略	157
5.2.1 智能运行反馈控制策略	157
5.2.2 几点说明及一般性推广	159
5.3 数据驱动的两段全闭路磨矿智能运行反馈控制实现算法	162
5.3.1 PPS 神经网络在线动态软测量	162
5.3.2 控制系统预设定值的案例推理求解	165
5.3.3 控制系统设定值多变量模糊动态调节	169
5.4 工业实验及应用	173
5.4.1 工业试验	174
5.4.2 工业应用	179
5.4.3 经济效益分析	181
5.5 本章小结	182
第 6 章 面向运行优化与安全的闭路磨矿智能运行反馈控制及工业应用	184
6.1 球磨机-螺旋分级机闭路磨矿过程及其运行控制问题	184
6.1.1 球磨机-螺旋分级机闭路磨矿过程简介	184
6.1.2 球磨机-螺旋分级机闭路磨矿过程运行控制问题及其动态特性分析	186
6.1.3 人工监督操作的球磨机-螺旋分级机闭路磨矿运行控制现状	187
6.2 面向闭路磨矿过程运行优化与安全的智能运行反馈控制策略	190
6.2.1 磨矿过程运行优化与安全的智能运行反馈控制策略	190
6.2.2 几点说明及一般性推广	192
6.3 面向闭路磨矿运行优化与安全的智能运行反馈控制实现算法	195

6.3.1	过程控制系统设定值优化	195
6.3.2	分级机溢流矿浆粒度智能在线预测	197
6.3.3	正常工况下的控制系统设定值多变量动态反馈调节	206
6.3.4	磨机过负荷智能监测与过负荷故障工况多变量反馈调节	210
6.4	工业应用	214
6.5	本章小结	222
第 7 章	磨矿过程运行反馈控制半实物仿真实验系统的设计及实验	223
7.1	磨矿过程运行反馈控制半实物仿真实验系统总体设计	224
7.1.1	仿真实验系统的总体架构	224
7.1.2	仿真实验系统的总体功能	225
7.1.3	仿真实验系统软硬件结构设计	226
7.2	磨矿过程运行反馈控制半实物仿真实验系统设计与开发	230
7.2.1	磨矿过程虚拟层系统以及过程控制层系统的设计与开发	230
7.2.2	运行反馈控制系统软件平台的设计	236
7.2.3	运行反馈控制系统软件平台的开发	240
7.3	磨矿过程运行反馈控制系统软件及半实物仿真实验研究	243
7.3.1	系统搭建及主要界面	243
7.3.2	半实物仿真实验研究	245
7.4	本章小结	251
第 8 章	结语与展望	253
8.1	结束语	253
8.2	研究展望	253
附录 A	基于模糊相似粗糙集的案例特征权值确定	256
参考文献		260

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及研究意义

改革开放以来,我国 30 多年工业化的进程取得了举世瞩目的成就。目前,我国已成为全球制造业大国,其钢铁、水泥、煤炭、有色金属、石化、纺织和电子等主要生产制造产业均取得了跨越式发展^[1]。以钢铁生产为例,我国的钢铁产量自 1996 年已连续 17 年排名世界第一,并且领先优势越来越大,其总量已超过排名世界前几位的其他国家钢铁产量的总和。据中国社会科学院发布的《产业蓝皮书:中国产业竞争力报告(2010)》报道,2009 年我国粗钢产量达 56800 万吨,居世界第一位,是排在第二到第五位的日本、俄罗斯、美国和印度粗钢产量总和的 2.2 倍^[2]。另据统计,2010 年,我国国内生产总值(gross domestic product, GDP)为 408903.0 亿元,首次超过日本,成为世界第二大经济体。其中,以石化加工与制造、黑色与有色金属冶炼、装备制造业、电子及相关产业为主体的工业生产总值为 162376.4 亿元,占到 GDP 的 39.71%。因此,我国工业企业的经济效益和市场竞争能力在我国国民经济和社会发展中占有重要地位并具有重大影响。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》指出:“我国是世界制造大国,但还不是制造强国;制造技术基础薄弱,创新能力不强;产品以低端为主;制造过程资源、能源消耗大,污染严重^[3]。”与发达国家相比,我国工业生产与制造普遍存在能耗高、资源消耗大、生产效率低、产品质量差的问题。据不完全统计,在我国国民经济体系中,以金属冶炼、石油化工等行业工业能耗为主体的我国工业生产能耗占我国总能耗的 71.4%左右,工业单位能源消耗比发达国家高 30%以上,其中比重较大的石化行业(占全国总能耗的 15%,2007 年数据)、钢铁行业(占全国总能耗的 6%,2007 年数据)的工业单位能耗尤其高^[4,5]。除此之外,我国工业生产整体起步较晚、基础薄弱,并面临着复杂多变的原料供应、日新月异的技术创新、瞬息万变的市场需求,处于更加激烈的国际竞争之中。

为了在全球化经济大环境下提高企业竞争力,我国流程工业企业也逐渐由过去的单纯追求大型化、高速化、连续化,转向注重提高产品质量、降低生产成本、减少资

源消耗和环境污染、可持续发展的轨道上来。中共十六大^[6]、中共十七大^[7]及中共十八大^[8]报告均指出：信息化与工业化融合是提高我国流程过程工业以及制造业竞争力的必然选择，其关键是工业过程自动化^[9-13]。如今，过程自动化的前沿核心技术是流程工业的过程运行优化与控制，其内涵是采用信息技术，围绕生产过程的知识与数据进行集成，通过过程运行控制与优化的智能化与集成化，在保证过程安全运行的条件下，不仅使过程基础反馈控制系统输出很好地跟踪设定值，而且控制整个运行过程，使其在生产条件约束下尽可能提高产品在加工过程的质量与效率的运行指标，尽可能降低反映产品在加工过程中消耗的运行指标，实现工业过程的优化运行^[9,10]。

采用先进、可靠的自动化技术，可以改善流程工业生产设备的运营状况、提高运行效率与产品质量、降低消耗、延长设备运行周期，从而最终提高企业竞争力，实现可持续发展。1994 年，美国 SimSci 公司基于其 DMC 软件应用绘制了先进控制与优化的投资收益图，如图 1.1 所示。用 DCS 实现常规基础反馈的多回路 PID 控制，其投资占总投资的 70%，但取得的经济效益仅占总效益的 15%；实现比值、串级和前馈等传统先进控制，投资额增加 10%的同时效益也会提高 10%；如果再增加 10% 的投入实现 DMC 先进控制，便可使经济效益增加 35%；若进一步增加成本 10%，实施工业过程的闭环实时优化，可再使经济效益大大提高 40%^[14]。又据国外某权威机构分析，流程工业生产过程采用先进控制技术，可提高产值 3%~5%；实现优化调度与优化运行，质量提高 19.2%，生产效率提高 13.5%，产量提高 11.5%。

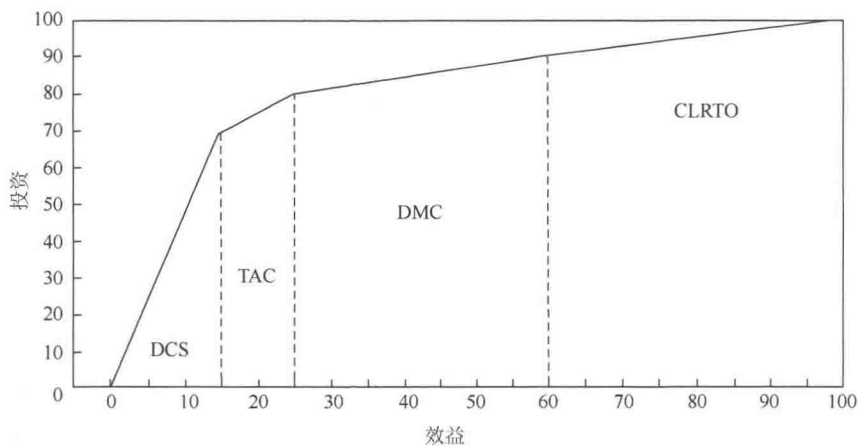


图 1.1 文献[14]绘制的先进控制及过程优化的投资效益图

CLRTO（closed-loop real-time optimization）表示闭环实时优化；DMC（dynamic matrix control）表示动态矩阵控制；TAC（traditional advanced control）表示常规先进控制；DCS（distributed control system）表示分散控制系统

流程工业中,选矿是极为重要的金属原材料工业。特别是在我国,由于矿石品位低、成分复杂、嵌布粒度细等原因,97%的铁矿石需要经过选矿处理以得到有用成分含量高的精矿,然后才能再进行金属的冶炼及相关处理。一个完整的选矿作业流程包括破碎、磨矿和选别三个典型过程。其中,磨矿是最为关键的工序,起着承上启下的作用,其任务就是将破碎后的矿物原料粉碎到适宜的粒度,使有用矿物与脉石单体解离,或使不同有用矿物相互解离,为后续选别作业提供原料。另外,磨矿不但用于冶金选矿,在国民经济的其他工业领域,如水泥与硅酸盐及陶瓷制造、新型建筑材料、火力发电以及国防等均具有非常重要的作用。磨矿是典型的高耗能、低效率过程,其电能消耗占整个选厂的45%~70%,生产成本占选矿总成本的40%~60%。磨矿产品粒度(质量指标)、磨矿生产效率等决定着选厂精矿品位的好坏和生产能力的高低,并与整个选矿的经济技术指标密切相关。长期以来,磨矿过程控制与优化被认为是提高磨矿产品质量与生产效率以及整个选厂经济利润的重要手段,因而一直受到国内外学者的关注和重视。以多回路PI/PID和多变量预测控制为主的控制技术均一定程度达到了调控磨矿设备,使其按照期望目标运行的目的。然而,从过程工程层次控制的角度来看,这些控制方法仅限于底层局部单元的基础反馈控制,因而对磨矿过程整体运行性能即磨矿产品质量、磨矿运行效率等的改进和提高非常有限。

目前,工业过程运行反馈控制已然成为信息领域中用于解决国家绿色生产、节能降耗目标的重要手段,受到国家相关部门以及工业界和学术界的密切关注。2009年,以东北大学柴天佑院士为首席科学家的国家973计划项目“复杂生产制造过程一体化控制系统理论和技术基础研究”,将复杂生产制造过程的运行控制作为最为重要的子课题(课题1)进行专项研究。2012年,国家自然科学基金委员会将“复杂工业系统运行控制”作为当时中国自动化领域唯一的国家自然科学基金重大项目“一类复杂工业系统高性能运行控制的基础理论与关键技术”进行立项,并授予由浙江大学、中南大学、东北大学、清华大学、上海交通大学等中国控制学科实力最强的几所高校联合参与的研究团队。另外,近年关于复杂工业过程运行优化与控制的国家自然科学基金重点项目、面上项目、青年基金也越来越多地被申请立项。例如,2013年东北大学千人计划教授王宏联合华南理工大学和浙江大学获得国家自然科学基金重点项目“面向节能降耗和纤维形态分布的制浆过程运行优化控制”。作者近年也以运行控制为主题连续获得了两项国家自然科学基金项目。

本书从现代选矿企业对提高产品质量与生产效率以及节能降耗的迫切需求出

发, 依托国家自然科学基金项目(项目编号 61104084, 61290323, 61333007, 614730646)、国家 973 计划项目(项目编号 2009CB320601)以及中央高校基本科研业务费项目(项目编号 N130508002, N130108001), 以冶金选矿的两类典型磨矿过程(一类为国际通用的可建模一段棒磨开路、二段球磨-旋流器闭路磨矿, 另一类为具有中国特色的难建模赤铁矿磨矿)为研究对象, 开展以提高产品质量和生产效率为目标的磨矿过程运行反馈控制方法及应用研究。

1.2 工业过程运行反馈控制的含义及特点

1.2.1 过程控制指标与运行控制指标

对每一个工业过程的全局优化与控制来说, 存在过程控制指标和过程运行指标两方面的优化与控制问题。过程控制指标通常是要求过程或装置局部单元中的某个或一些变量稳定在一个范围之内, 一般由基础反馈控制系统的控制回路来完成; 过程运行指标问题一般包括反映过程整体运行性能的产品质量、产量以及能耗大小等, 它的实现一般遵循这样的原则, 首先由设定系统或操作人员给出基础反馈控制回路的设定值或操作值, 然后基础反馈控制回路按此设定值进行动作, 通过上层设定或运行控制系统及底层基础反馈控制系统的共同作用实现过程运行指标。

(1) 过程控制指标。对每一个具体复杂工业过程或系统来说, 可以从长期的生产运行中总结出若干人工手动操作的经验, 并结合机理分析法从中找出影响过程运行指标好坏而需要基础回路控制的关键过程变量。过程优化与控制的目的就是保证关键过程变量被控制在人们希望的范围之内或者跟踪某设定值的变化, 达到预期的控制指标, 如响应速度、稳定性、收敛性、干扰抑制能力等。而这些关键过程变量的控制往往与生产运行指标的实现有着不可分割的联系, 所以在控制系统的实现中需要考虑运行指标的要求。

(2) 过程运行指标(简称运行指标)。在实际工业过程中, 往往有一些表征过程整体运行性能的工艺指标, 包括工业生产在加工过程的产品质量、生产效率以及能源消耗等。此时需要分析出衡量产品质量好坏的质量指标以及决定单位时间产量的主要因素。在此基础上, 还要分析出影响能源消耗的主要原因。只有从工业过程运行的全局优化与控制角度出发, 即从考虑工业生产中的运行指标出发, 才能抓住主要矛盾, 真正达到生产过程的优化控制与优化运行。