



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化 两化融合

研究与应用

间歇过程的过程建模与 参数控制

高福荣 师 佳 著
杨 毅 杨 波

 科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化两化融合研究与应用

间歇过程的过程建模与参数控制

高福荣 师佳 杨毅 杨波 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

间歇式生产是现代工业的一种重要产品加工形式,特别适用于小批量、多品种、定制化、高附加值的产品生产。本书从间歇过程的特点出发,详细地介绍了近几年针对间歇过程建模和参数控制问题发展出的一些新思路、新理论和新方法。本书共分为三个部分。第一部分以注塑成型为例,对间歇过程的定义、特点、发展历程以及自动化控制等方面的内容进行了概览性的介绍。第二部分围绕间歇过程的建模问题,详细描述了机理建模和数据建模方法在间歇过程中的基本应用,特别介绍了符合间歇过程重复性和相似性特点的模型快速移植方法。第三部分围绕间歇过程的参数控制问题,阐述了从传统连续过程控制到迭代学习控制,再到二维时间控制的技术发展路线,并就二维时间控制理论和技术的一系列最新成果进行了详细的介绍。

本书兼顾理论和实际工业应用的结合,既适合作为该领域科研人员和研究生的参考书,同时也可作为间歇过程控制系统设计工程人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

间歇过程的过程建模与参数控制/高福荣等著. —北京:科学出版社,2016
(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978-7-03-047543-5

I. ①间… II. ①高… III. ①过程工业-过程控制 IV. ①T

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 044374 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:黄华斌

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 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:415 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然
吴宏鑫 席裕庚 郭雷 周康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）	张纪峰（中科院数学与系统科学研究院）
王龙（北京大学）	陈杰（北京理工大学）
王化祥（天津大学）	陈虹（吉林大学）
王红卫（华中科技大学）	范铠（上海工业自动化仪表研究院）
王耀南（湖南大学）	周东华（清华大学）
卢建刚（浙江大学）	荣冈（浙江大学）
朱群雄（北京化工大学）	段广仁（哈尔滨工业大学）
乔非（同济大学）	俞立（浙江工业大学）
刘飞（江南大学）	胥布工（华南理工大学）
刘德荣（中国科学院自动化研究所）	桂卫华（中南大学）
关新平（上海交通大学）	贾磊（山东大学）
许晓鸣（上海理工大学）	贾英民（北京航空航天大学）
孙长银（北京科技大学）	钱锋（华东理工大学）
孙彦广（冶金自动化研究设计院）	徐昕（国防科学技术大学）
李少远（上海交通大学）	唐涛（北京交通大学）
吴敏（中南大学）	曹建福（西安交通大学）
邹云（南京理工大学）	彭瑜（上海工业自动化仪表研究院）
张化光（东北大学）	薛安克（杭州电子科技大学）

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”,充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化。其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济。这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化

为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及丛书编委会的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为其出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '孙逸凡' (Sun Yifan). The signature is written in a cursive style with a long, sweeping horizontal stroke at the top.

中国工程院院士

2010年11月

前 言

间歇过程(也称批次过程)是指在有限的时间内将有限的原料输入转化为特定的产品输出,并通过过程的不断重复来获得更多数量同种产品或零部件的制造或加工过程。随着生产劳动社会化分工的不断深入和产品制造过程的日益复杂化,间歇过程已经成为现代制造业的一种重要生产过程。在现代工业中,典型的间歇过程涵盖了从机械零部件加工、电器电子产品制造、塑料制品生产、集成电路制作、食品加工、生化制药到各类精细化工产品的生产等诸多生产制造领域。可以说,除了传统的连续过程外,绝大多数现代工业都采用间歇过程进行产品的生产和加工。

不同于大型连续生产过程,小批量且不断重复的间歇型生产过程具有设备投资小、见效快且转产灵活等优点。近十几年,随着全球竞争日趋激烈,市场需求瞬息万变,批次型生产凭借灵活多变的特点在制造加工业中占有了越来越重要的地位。据统计,在化工生产领域,间歇过程在生产过程中所占的比例为40%~50%,在制药和电器制造行业则在80%以上,目前众多新兴技术密集型产业都主要采用间歇过程进行生产,典型的如大规模集成电路制作、高分子材料的生产与加工以及复杂的生化制药过程等。

对于我国这样的制造业大国来说,间歇过程占有举足轻重的地位。但统计资料表明,我国目前采用间歇过程加工的产品主要集中在产品制造链的中低端市场。造成这种现象的一个主要原因是我国的批次型生产加工设备技术含量低,特别是间歇过程的自动化程度和技术与发达国家相比还有较大差距,从而难以生产高质量、高附加值的产品。随着间歇过程产品由简单到复杂,生产过程从粗放型向节约型和技术密集型的不断转变,解决间歇过程工业中面临的各种关键科学技术问题已经成为目前提升我国制造业水平刻不容缓的研究任务。

从过程控制角度出发,无论从过程的动态特性、运行方式还是控制目标上看,间歇过程与连续过程都存在显著区别。众所周知,为了保证生产过程平稳运行,绝大多数连续工业生产过程只要求过程运行于一个事先设定的稳态工作点附近,因此,过程在较长的时间范围内动态变化幅度一般较小。从系统的角度看,无论过程本质的动态多么复杂,在稳态工作点附近,过程动态都可以采用线性模型来近似描述,据此,传统的模型辨识方法和古典(现代)控制理论完全可以适用。但对于间歇过程来说,一批产品的生产一般分为多个加工阶段,不同的加工阶段因其加工的目的不同而具有不同的控制目标,当过程从一个加工阶段切换到另一个加工阶段时,不仅过程的动态特性会发生显著变化,控制的目标也会发生改变。同时,由于间歇

过程多为小批量生产,加工阶段的持续时间一般都较为短暂,为了保证较高的产品质量,还要求切换后过程能够实现快速高精度的调节控制。多阶段切换和大范围调节决定了间歇过程的动态呈现强非线性,而快速高精度的控制需求更增加了过程控制系统设计的难度,造成大多数传统的模型辨识方法以及相关的控制理论和技术难以适用。为此,如何从间歇过程的特点出发,研究并发展出适合于间歇过程特点的建模和控制理论与方法,已经成为决定间歇过程未来发展的关键环节之一。

本书在深入介绍间歇过程诸多特点的基础上,汇集了作者及其研究团队近十年来在间歇过程建模和参数控制方面的一些最新研究成果。主要的目标是向广大从事间歇过程系统研发的科研人员介绍一些符合间歇过程特点的建模与控制新思路、新理论和新方法。

本书在内容上分为三部分:第一部分着重于对间歇过程的定义、特点、发展历程以及相关顺序控制、约束控制等基础控制问题和方法进行概要介绍,同时也对间歇过程的建模和变量控制问题进行了简单介绍,在此基础上,以注塑成型这一典型的间歇过程为实例,向读者展示了间歇过程的诸多特性以及在建模和控制方面的难点问题,这一部分的主要目的是让读者对间歇过程及其相关的建模和控制问题有一个概貌性的了解;第二部分则主要介绍间歇过程的建模方法,既包括传统的机理建模和数据建模方法,同时也包括近五年最新发展出的模型移植建模方法,所有建模方法均以注塑成型过程为实际对象来加以验证;第三部分主要介绍间歇过程的参数控制问题,主要是以注射成型中的过程参数控制为例,通过对相关参数控制方法发展历程的回顾,引出了由传统反馈控制到先进控制,到迭代学习控制,再到二维时间反馈控制的发展思路和技术路线,然后以面向间歇过程的二维系统理论为主要内容,系统性地介绍了近几年发展出的完全符合间歇过程特点的一系列间歇过程参数控制新理论和新方法。

本书的主要特点是在介绍各种新理论和新方法时,始终围绕实际的间歇过程展开,特别是注塑成型这一典型的间歇型生产过程。这主要是因为这些理论和方法最初就是作者及其研究团队在围绕注塑成型这一工业过程的研究工作中发现、提炼并发展出来的。这保证了本书中所介绍的理论和方法不仅具有很高的理论价值,同时也是经过了实际应用检验的。因此,本书既适合于作为间歇过程研究领域科研人员和研究生的参考书,同时也可作为间歇过程控制系统设计工程人员的参考书。

本书第二部分和第三部分中汇集的大部分最新科研成果是由香港科技大学霍英东研究院高分子成型过程及系统中心主任高福荣教授领导的科研团队集体完成,这些研究成果得到了该研究中心科研平台的良好支撑。此外,相关研究工作也得到了国家自然科学基金重点项目(No. 61433005)以及面上项目(No. 61174093)、广东省引进创新创业团队计划(No. 2013G076)、深圳市技术创新计

划(No. JSGG20130624101448362)的资助,在此一并表示感谢!

本书的作者均来自于一个长期专注于高分子成型及其先进控制理论与应用技术的科研团队。经二十多年的不懈努力,本研究团队在面向间歇过程的先进控制理论及应用研究领域取得并积累了丰富的研究成果。本书中所涉及的所有理论成果和相关应用结果均取材于本团队过去十多年的研究成果,可以看做是本团队部分核心研究成果的一个总结。

本书的内容安排和具体写作是在香港科技大学化工系高福荣教授的统一规划、协调组织下完成的。其中第一部分的内容主要由浙江大学控制系的杨波撰写,第二部分内容主要由群达模具(深圳)有限公司的杨毅博士撰写,第三部分内容主要由厦门大学化学化工学院的师佳副教授撰写。

由于作者水平所限,本书难免存在不妥之处,欢迎阅读、使用和参考本书的读者批评指正。

作 者

2015年11月14日

目 录

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

前言

第一部分 间歇过程介绍

第 1 章 间歇过程	3
1.1 间歇过程概述	3
1.1.1 间歇过程定义	3
1.1.2 间歇生产的要求和特点	5
1.1.3 间歇生产过程系统框架	7
1.2 间歇过程控制系统	17
1.3 小结	21
第 2 章 间歇过程控制的发展历程	22
2.1 早期的间歇过程控制工具	22
2.1.1 手工操作间歇过程	22
2.1.2 早期的顺序控制器	23
2.2 基于微处理器的间歇控制系统	26
2.2.1 集散控制系统	26
2.2.2 可编程逻辑控制器	27
2.2.3 个人计算机	30
2.2.4 嵌入式系统	30
2.3 小结	32
第 3 章 间歇过程的顺序控制	33
3.1 过程分析	34
3.2 顺序图示	34
3.2.1 流程图	35
3.2.2 状态图	35
3.2.3 过程时间图	36
3.2.4 状态转移图	37
3.2.5 Petri 网	38

3.2.6	顺序功能图	39
3.2.7	顺序图示方法的选择准则	41
3.3	间歇过程顺序控制的实现	42
3.4	小结	43
第4章	间歇过程的约束控制	44
4.1	警报	44
4.2	过载	45
4.3	连锁系统	45
4.3.1	过程连锁	46
4.3.2	安全连锁	46
4.4	小结	47
第5章	间歇过程关键变量的建模与控制简介	48
5.1	间歇过程建模	49
5.1.1	机理模型	49
5.1.2	数据模型	49
5.1.3	模型移植	50
5.2	间歇过程变量控制	51
5.2.1	开环控制与闭环控制	51
5.2.2	PID控制	53
5.2.3	串级控制	54
5.2.4	自适应控制	54
5.2.5	模型预测控制	56
5.2.6	模糊控制及神经网络控制	59
5.2.7	学习控制	62
5.2.8	2D控制	65
5.2.9	混杂控制	68
5.3	小结	69
第6章	典型间歇过程实例——注塑成型过程	71
6.1	注塑机	71
6.2	注塑过程	73
6.3	注塑机控制器	75
6.4	注塑机过程控制	77
6.5	小结	81

第二部分 间歇过程建模

第 7 章 间歇过程建模概述	85
第 8 章 典型间歇过程机理建模	87
8.1 间歇过程机理建模范例	87
8.1.1 间歇反应釜机理建模	87
8.1.2 注塑成型过程机理建模	93
8.2 小结	102
第 9 章 间歇过程数据建模	103
9.1 基于实验设计的建模	103
9.1.1 实验设计的简要介绍	104
9.1.2 正交实验设计	105
9.1.3 方差分析基础	107
9.1.4 注塑过程实验建模范例	112
9.2 基于数据辨识的建模	115
9.3 注塑过程保压压力辨识建模	118
9.4 小结	122
第 10 章 模型移植建模方法	123
10.1 模型移植方法介绍	123
10.2 过程相似性的分类	127
10.3 比例相似性实例分析	131
10.4 包含相似性实例分析	134
10.4.1 原模型	134
10.4.2 生成训练集	135
10.4.3 集合成员的建模	136
10.4.4 联合集合成员建立新模型	136
10.4.5 实验结果分析	136
10.5 家族相似性实例分析	137
10.5.1 原模型	138
10.5.2 模型移植	139
10.6 小结	140

第三部分 间歇过程参数控制

第 11 章 间歇过程控制概论	143
11.1 引言	143

11.2	间歇过程的特性	143
11.3	间歇过程控制系统概述	144
11.3.1	间歇过程控制系统模型	144
11.3.2	间歇控制系统分类	145
11.4	典型间歇过程参数控制问题——以注塑成型为例	146
11.5	发展间歇过程先进控制技术的目的和意义	148
11.6	间歇过程控制技术的发展历程	149
11.6.1	传统反馈控制	150
11.6.2	先进反馈控制策略	150
11.6.3	学习控制策略	152
11.6.4	二维反馈控制策略	155
11.7	小结	157
第 12 章	面向间歇过程特点的二维系统理论	158
12.1	引言	158
12.2	迭代学习控制	158
12.2.1	迭代学习控制系统的一般描述	159
12.2.2	迭代学习控制发展现状及存在的问题	162
12.3	二维系统及其发展	164
12.4	迭代学习控制系统的二维本质特性	165
12.5	预备知识:线性矩阵不等式	168
12.5.1	符号说明	168
12.5.2	几个重要引理	169
12.5.3	一类非线性矩阵不等式的迭代求解算法	169
12.6	基于 LMI 的二维系统鲁棒控制理论	170
12.6.1	基于二维 R 模型的鲁棒稳定性与鲁棒控制	170
12.6.2	基于二维 FM 模型的鲁棒稳定性和鲁棒控制	180
12.7	二维 FM 系统的线性二次型最优控制理论	192
12.7.1	问题的描述	193
12.7.2	二维 LQ 最优控制算法	195
12.7.3	沿周期方向的稳定性分析	202
12.7.4	沿周期方向的鲁棒性分析	207
12.7.5	仿真例子	211
12.8	小结	216
第 13 章	基于二维系统理论的间歇过程参数控制方案	217
13.1	引言	217

13.2 基于二维 R 模型鲁棒控制理论的间歇过程参数控制方案	217
13.2.1 迭代学习控制系统的描述及其等价二维 R 模型表达	218
13.2.2 基于二维状态反馈的间歇过程参数迭代学习控制系统设计方案	221
13.2.3 基于二维输入输出反馈的间歇过程参数迭代学习控制系统 设计方案	226
13.2.4 仿真实例	229
13.3 基于二维 FM 模型鲁棒控制理论的间歇过程参数控制方案	234
13.3.1 迭代学习控制系统及其二维 FM 模型表达	234
13.3.2 基于二维动态输出反馈的间歇过程参数迭代学习控制系统 设计方案	236
13.3.3 仿真实例	240
13.4 基于二维系统最优控制理论的参数控制方案	248
13.4.1 迭代学习控制系统及等价二维表达	248
13.4.2 基于二维 LQ 最优控制的 ILC 策略	250
13.4.3 收敛性与鲁棒性分析	254
13.4.4 系统结构分析与实现	255
13.4.5 仿真实例	260
13.5 广义二维模型预测迭代学习控制策略	268
13.5.1 问题描述	268
13.5.2 广义二维模型预测迭代学习控制	271
13.5.3 控制系统结构分析	275
13.5.4 稳态性能分析与设计参数的选择	278
13.5.5 多周期广义二维模型预测迭代学习控制	281
13.5.6 数值仿真	285
13.5.7 在注塑成型过程控制中的应用	296
13.6 小结	300
参考文献	301
索引	312

第一部分
间歇过程介绍

第1章 间歇过程

间歇化工过程是一个古老的加工过程。20世纪30年代以前,绝大多数化工过程采用间歇操作。那时,生产过程主要依靠操作工人的技艺和判断,不仅自动化水平低、劳动强度大,而且产品质量还不稳定。因此,化学工程师们集中注意力将间歇生产改为连续生产。此后,化工过程一直朝着连续加工过程发展,大规模的化工过程更是如此。

然而,间歇化工过程却始终没有被连续化工过程取代,反而在如今的市场中占据着极大的份额。在过去的几十年中,化学过程工业发生了巨大的变化。其主要趋势表现为从商用化学品生产转向专用的功能化学品生产;从大规模过程转向小规模的具有柔性的过程;从连续加工转向间歇加工;从过去靠价格竞争转向靠质量竞争;从过去靠投资来推动发展转向靠信息来推动发展等。这是因为间歇过程具有灵活多变的特性,即它可以用同一套多用途、多功能的设备生产多类型的产品。这种转变的内在动力反映在化学过程工业方面,则是精细化工、生物化工等高度技术密集和知识密集的新型产业的蓬勃发展。

精细化学品的生产有以下特点:小批量、多品种、高附加值、系列化、合成步骤复杂、技术密集,有时还存在一定的季节性,并要求不断更新产品等。由于这些特点,某些产品,至少从时间和资源上看,开发连续加工过程是不合理的。有的产品尽管可用连续方法生产,但事实上在间歇厂中分批制造可能更经济。间歇生产不仅能适应上述特点和要求,并且更容易将实验室数据工业化。由于有着以上的特点,过去几十年,研究人员对间歇过程展示了极大的兴趣,经过不断努力,在间歇过程的各个子领域都取得了极大的进展,也进一步促进了间歇工业的发展^[1]。

1.1 间歇过程概述

1.1.1 间歇过程定义

过程是一系列用于物质或能量转换、输送或存储的物理、化学或生物活动。一般来说,间歇生产过程生产有限量的产品,理想情况下,这种产品由一个配方确定,配方中包含了使用的原材量、过程的执行顺序、过程条件以及需要使用的设备。

烹饪的过程是经常用来形象地介绍间歇过程的例子,虽然大多数情况下是手动操作和控制的,但是这个过程仍然包含了以下的特点:

- (1) 探测和测量:如通过观察、触摸、品尝等;