

刘红波 罗运辉 蔡文剑 著

复杂过程单元与 整厂控制设计方法



科学出版社

复杂过程单元与整厂控制设计方法

刘红波 罗运辉 蔡文剑 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从基本原理、建模与控制方法的设计与分析、仿真、物理实验和工业应用等方面,对复杂过程单元与整厂控制设计方法分别进行了阐述。内容包括:面向控制的系统建模和局部 MIMO 模型参数鲁棒分散辨识方法、局部多变量控制结构选择方法和局部控制器设计和参数整定方法、多模型框架下监督优化层的设计方法、多模型优化控制在 HVAC 实验装置上的应用以及结合集散型控制系统的工程应用。整厂控制方法和工业应用的综述和分类,以生物柴油的生产过程为例,分别介绍了 Luyben 的启发式方法步骤和 Konda 等的整厂控制方法集成框架的具体应用,并给出了生物柴油过程的整厂控制研究结果,详细介绍了 Skogestad 提出的基于过程最优经济运行的整厂控制设计方法步骤。本书大部分内容取材于作者近年来的研究成果,理论密切联系实际,反映了这一领域近年来的新进展。

本书可作为控制科学与工程、计算机控制、系统工程、化学工程以及热能与动力工程等专业教师和研究生的教学用书,也可供上述专业的科研与工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂过程单元与整厂控制设计方法/刘红波,罗运辉,蔡文剑著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-040414-5

I. ①复… II. ①刘… ②罗… ③蔡… III. ①热力工程-过程控制
IV. ①TK32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 074029 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:韩 杨
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

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>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 4 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:330 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着工业过程的大型化,流程变得越来越复杂,过程控制在流程工业中起着越来越重要的作用。先进过程控制及其设计方法的应用直接关系到企业的经济效益、资源和能源的优化利用以及环境保护。本书分别以典型复杂过程单元和整个生产流程为研究对象,结合近年来作者的研究成果和国际上这一领域取得的新进展,从基本原理、多种建模与控制方法的设计与分析、仿真、物理实验和工业实际应用等方面,对复杂过程单元与整厂控制设计方法分别进行阐述。

本书分为两篇。第一篇共 7 章,以复杂过程单元(如球磨制粉、火力发电和 HVAC(供暖、通风与空调)等)为研究对象,结合作者近年来的研究工作,详实地论述了提出的系统有效地适于工业应用的非线性多变量过程单元多模型优化控制系统设计方法。内容包括:球磨制粉系统面向控制的建模方法,以及基于闭环阶跃响应的局部 MIMO 模型参数鲁棒分散辨识方法;依据已提出的正则化相对增益矩阵(RNGA)的概念及计算方法,通过对多变量过程耦合作用的分析,提出了从完全分散到完全集中控制的简便有效的局部多变量系统 PID 控制结构选择方法;在多模型局部控制器设计中针对五种基本的 PID 控制结构,给出了详细的控制器设计和参数整定方法;在过程具有大时滞情况下,局部预测 PID 控制器的设计和参数整定方法;提出了多模型框架下监督优化层的总体结构,结合火力发电机组和球磨制粉系统特性,给出了非线性多变量过程多模型控制中系统区域划分方法和相应的多模型模糊切换控制策略,以及基于性能监测以实现动态划分和增加局部模型的方法;结合球磨制粉系统特性提出一种基于稳态增益和在线寻优的设定值优化方法,利用火力发电机组控制仿真进行多模型监督优化控制结构的有效性验证;以 HVAC 为研究对象,论述了在物理实验装置上设计实现所提出的多模型优化控制系统的步骤和实验结果;最后根据热电厂球磨制粉系统工艺特点和控制要求,介绍了多模型优化控制方法结合由工控机和 PLC 构成的集散型控制系统的工程实际应用。

第二篇共 4 章,以典型化工过程为研究对象,结合近年来国际上整厂控制领域取得的新进展,对整厂控制设计方法进行了阐述。第 8 章按照 Luyben 的启发式方法步骤,简要介绍了整厂过程控制的基本概念和设计方法的基本步骤。这种方法步骤从本质上说是将整厂控制问题分解成不同的层次,并试图满足两个化学工程的基本原理,即总体能量和物质平衡。此设计方法步骤通过应用到包含大量控制回路的氯化乙烯单体(VCM)生产过程给予了说明。第 9 章对已有的整厂控制

方法进行了综述和分类。首先就迄今为止已提出的整厂控制方法进行了系统的分类和简要的讨论。其次考虑到反应器—分离器—物料再循环(RSR)过程在整厂控制研究中的重要性以及受到的关注,特别对 RSR 过程的控制和研究状况进行了评述。然后讨论了用于确定控制自由度的各种方法,就已发表的整厂控制研究文献中涉及的工业过程进行了综合论述。最后简要回顾了用于整厂控制系统验证的不同性能评价标准。第 10 章以生物柴油生产过程为实例,给出了该过程的整厂控制研究结果。首先考虑通过碱作为催化剂,用植物油通过酯交换反应生产生物柴油不同的可供选择的设计方案,并从中选择适当的方案。然后采用 Konda 等提出的仿真与启发式方法相结合的整厂控制方法集成框架(IFSH),针对此过程设计完整的整厂控制结构。研究结果表明,所设计的整厂控制系统在存在期望的整厂干扰的情况下,仍能提供稳定并且满意的控制性能。第 11 章总结、扩展和探讨了 Skogestad 提出的整厂控制设计方法步骤。该方法步骤的重要特点是从过程最优经济运行出发,试图设计出一种控制结构来实现最优运行,同时也考虑到鲁棒性和稳定性这些基本的要求。该步骤分为两个部分:一是基于过程经济性的自顶向下设计;二是自底向上部分设计。自底向上的设计目标是找到一个简单且鲁棒的稳定化或校正控制结构,可应用于大部分经济运行工况的条件下。

本书由山东大学刘红波教授、齐鲁工业大学罗运辉副教授和新加坡南洋理工大学蔡文剑教授共同撰写。第 1、2、7、8 章由罗运辉副教授撰写,第 3、4、9~11 章由刘红波教授撰写,第 5、6 章由蔡文剑教授撰写。感谢本书参考文献中提到的作者及他们的合作者,是他们的成果奠定了本书的工作基础。感谢国家自然科学基金项目(61004005)、山东省自然科学基金项目(ZR2010FM018、Y2004G06)、宁夏回族自治区自然科学基金项目(NZ09209)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2007BS01009)以及山东省政府自筹经费资助出国留学项目等对本书研究工作的资助,并对课题组成员的通力合作和所进行的有益讨论表示感谢。

本书大部分内容取材于作者近年来在这一领域的研究成果,是作者近几年研究工作的结晶,希望本书的出版能对这一领域的研究和应用起到积极的推动作用。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

作者

2014 年 2 月

目 录

前言

第一篇 复杂过程单元控制设计方法

第 1 章 复杂过程单元控制设计方法概论	3
1.1 引言	3
1.2 非线性多变量系统控制的研究现状	4
1.3 多模型控制策略的研究进展	7
1.4 典型过程单元的建模与控制综述	10
1.4.1 球磨制粉系统	10
1.4.2 火力发电机组	12
1.5 多模型控制方法的框架	13
1.6 第一篇章节安排及主要内容	14
参考文献	15
第 2 章 面向控制的建模与局部多变量模型辨识	24
2.1 引言	24
2.2 面向控制的球磨制粉系统建模	24
2.2.1 面向控制的建模方法	24
2.2.2 球磨制粉系统的数学模型	25
2.2.3 模型参数的确定	30
2.2.4 模型验证	34
2.3 局部多变量模型辨识	36
2.3.1 基于频域的多变量系统辨识	36
2.3.2 仿真研究	43
2.4 本章小结	45
参考文献	45
第 3 章 局部控制结构的确定	47
3.1 引言	47
3.2 多变量 PID 控制的基本控制结构	47

3.2.1	完全分散控制结构	48
3.2.2	完全集中控制结构	48
3.2.3	稀疏控制结构	49
3.2.4	完全解耦控制结构	50
3.2.5	稀疏解耦控制结构	51
3.3	基于系统耦合特性的控制结构选择	52
3.3.1	耦合特性指标	52
3.3.2	控制结构的选择算法	56
3.3.3	仿真研究	57
3.4	含积分特性系统的控制结构选择	59
3.4.1	控制结构的选择算法	59
3.4.2	仿真研究	60
3.5	非方系统的控制结构选择	63
3.5.1	控制结构的选择算法	63
3.5.2	仿真研究	64
3.6	本章小结	66
	参考文献	66
第 4 章	局部控制器设计与参数整定	68
4.1	引言	68
4.2	完全分散、完全集中和稀疏 PID 控制	68
4.2.1	等效传递函数	68
4.2.2	基于等效传递函数的 PID 参数整定	70
4.2.3	完全分散、完全集中和稀疏 PID 控制器设计	73
4.2.4	仿真研究	74
4.3	完全解耦和稀疏解耦 PID 控制	76
4.3.1	解耦补偿矩阵的设计	76
4.3.2	双自由度 PID 参数整定	80
4.3.3	完全解耦和稀疏解耦控制器设计	81
4.3.4	仿真研究	82
4.4	含积分特性的多变量系统控制——分离积分	87
4.4.1	对积分环节的处理	87
4.4.2	仿真研究	88
4.5	含大时滞特性的多变量系统控制——预测补偿	90
4.5.1	基于 DMC 的预测 PID 结构	91
4.5.2	预测 PID 控制器设计	94

4.5.3 仿真研究	94
4.6 本章小结	96
参考文献	97
第5章 多模型控制结构的监督优化层设计方法	99
5.1 引言	99
5.2 总体结构	99
5.3 局部区域划分及切换策略	100
5.3.1 局部区域划分	100
5.3.2 模糊切换策略	104
5.4 性能监测	105
5.5 设定值优化	108
5.6 仿真研究	112
5.6.1 球磨制粉系统	113
5.6.2 火力发电机组	115
5.7 本章小结	122
参考文献	122
第6章 多模型控制设计方法在 HVAC 物理实验装置上的应用	124
6.1 引言	124
6.2 单区域空气温度和湿度控制系统	125
6.2.1 系统组成及描述	125
6.2.2 多模型控制应用实验和结果分析	127
6.3 两区域空气温度控制系统	133
6.3.1 系统组成及描述	133
6.3.2 多模型控制应用实验和结果分析	134
6.4 本章小结	139
参考文献	139
第7章 球磨制粉系统工程应用	141
7.1 工程概况	141
7.2 硬件设计	143
7.2.1 系统的设计原则	143
7.2.2 系统的硬件配置	143
7.3 软件实现	146
7.3.1 软件平台	146
7.3.2 控制方案工程设计	147
7.3.3 软件设计与开发	149

7.4 工程实施与控制效果	156
7.4.1 实施过程	156
7.4.2 投运效果	156
7.5 本章小结	163
参考文献	163

第二篇 整厂控制设计方法

第8章 整厂过程控制概论	167
8.1 整厂控制的基础知识	167
8.1.1 物料再循环	168
8.1.2 能量集成	169
8.1.3 化学成分存量	169
8.2 整厂控制设计步骤	172
8.3 第二篇章节安排及主要内容	176
参考文献	177
第9章 整厂控制的方法与应用综述	178
9.1 引言	178
9.2 整厂控制方法的综述与分类方法	179
9.2.1 基于启发式方法的整厂控制方法	180
9.2.2 基于最优化技术的整厂控制方法	181
9.2.3 基于数学方法的整厂控制方法	182
9.2.4 基于数学和最优化工具的混合类方法	184
9.2.5 基于启发式、数学和最优化工具的混合类方法	185
9.2.6 基于结构的整厂控制方法分类	187
9.2.7 各种整厂控制方法的评论性分析	187
9.3 基于 RSR 过程的控制方法综述	189
9.3.1 具有液相 CSTR 的 RSR 过程控制研究	190
9.3.2 具有气相推流式反应器的 RSR 过程控制研究	193
9.3.3 关于 RSR 过程控制研究的一些评述性见解	193
9.4 控制自由度	194
9.5 整厂控制应用中研究的工业过程	195
9.5.1 关于 TE 过程的整厂控制研究	195
9.5.2 关于 HDA 过程的整厂控制研究	196

9.5.3 针对其他过程的整厂控制研究	196
9.5.4 关于整厂控制应用的评述	197
9.6 整厂控制系统的性能评估	197
9.7 本章小结	198
参考文献	199
第 10 章 生物柴油生产过程设计和整厂控制方法	206
10.1 引言	206
10.2 稳态过程设计和仿真	207
10.2.1 过程设计	207
10.2.2 过程工艺流程图与 HYSYS 仿真	211
10.3 过程运行的最优化	213
10.4 整厂控制设计集成框架应用于生物柴油生产过程	216
10.5 整厂控制结构的验证	225
10.6 本章小结	229
参考文献	229
第 11 章 基于过程最优经济运行的整厂控制设计方法	233
11.1 引言	233
11.2 控制层和时标分离	234
11.3 整厂控制设计步骤概述	237
11.4 用于操作的自由度	238
11.5 稳态自由度	238
11.5.1 阀计数法	238
11.5.2 潜在稳态自由度法	239
11.6 自顶向下的整厂控制设计步骤	240
11.7 自底向上的整厂控制设计步骤	248
11.8 讨论	251
11.9 本章小结	252
参考文献	252

第一篇 复杂过程单元控制设计方法

第 1 章 复杂过程单元控制设计方法概论

1.1 引言

随着社会的发展,生产过程的运行条件及运行模式的大范围变化,设备之间的相互影响,以及为了减少能源和原材料的消耗,使生产过程越来越复杂,呈现出强非线性、时变和高维数特性。由于被控过程的非线性和相互耦合会随着工作点的变化而变化,宽范围运行的增益和动态特性也会发生变化,因此对非线性多变量过程的建模和控制是一项具有挑战性的工作。问题的关键和难点在于建立一个较好的强非线性系统的模型,并且控制决策的实施往往还需要很大的计算量。近几十年里,人们付出了很大努力,对非线性多变量系统进行研究,并提出了一些控制方法,如线性化方法、自适应控制、基于模型的非线性控制、神经网络控制、模糊控制、神经-模糊控制及多模型控制等,然而,这些方法大多难以用于解决实际控制问题。在线性化控制方法中,线性控制理论对复杂过程近似线性模型的应用提供了有力工具,但问题在于控制对象在宽范围运行时,表现出的强非线性难以用单一的近似模型表示,因此,该方法的使用受到了限制。虽然非线性输入-输出模型,如神经网络和模糊逻辑方法,不需要了解生产过程的具体物理机理知识,但需要大量的运行数据对控制系统进行训练,使之能够描述系统的大范围运行特性^[1]。除了非线性特性,另一个需要解决的问题是多变量控制问题。与单输入-单输出(SISO)系统相比,多输入-多输出(MIMO)系统的多个输入和输出变量之间的相互作用和耦合,也增加了 MIMO 系统的控制难度^[2,3]。尽管人们付出了很大努力来解决 MIMO 系统的控制问题,但是由于缺乏系统的解决方法,MIMO 系统的控制问题仍然是一项具有挑战性的工作,还有许多问题有待进一步的研究。

多模型方法是利用一定的分割策略^[4],将系统分成几个小的区域,在不同的运行条件下,使用不同的模型和控制器进行控制。为了描述整个系统多个参数之间的关系,构造出的全局模型非常复杂,难以用于实际;另一方面,局部模型可能大为简化,局部模型参数之间的耦合也相对简单,易于处理,这就是利用多模型方法解决复杂问题的初衷。多模型控制方法为解决复杂非线性 MIMO 系统的控制问题提供了一种可行的途径,有望成为解决实际工业过程的非线性多变量控制问题的一种有效方法。多模型控制已经成为一个研究热点,并已提出多种不同的解决方案^[5-12]。即使如此,目前仍缺乏有效的直接数据驱动的而无需对象过多假设条件的多模型控制系统设计方法。本书第 1~7 章,以复杂过程单元(如球磨制粉、火力

发电和 HVAC(供暖、通风与空调)等)为对象,详实地论述了所提出的系统有效地适于工业应用的非线性多变量过程多模型优化控制系统设计方法。本章对这个领域的建模与控制方法的研究进展进行综述,对其发展方向进行分析,并对其应用前景提出见解,为提出和研究适合于工业应用的非线性多变量过程多模型优化控制系统提供参考和依据。

1.2 非线性多变量系统控制的研究现状

由于工业过程复杂程度和控制要求的提高,被控对象在大工况范围运行时表现出的特性难以用单一的近似线性模型表示越来越不能忽视,非线性过程控制策略的研究受到大量的关注。这些控制策略有各自的优点和劣势。

(1) 线性化方法。由于很多非线性过程仅是表现出温和的(较弱的)非线性动态行为,可以通过传统的线性系统分析和设计方法进行处理。线性理论的运用提供了控制的解析解,因此一般情况下能提供更严格的稳定性和性能的保证。而且线性系统仿真和实施的计算量要求与非线性控制器相比要低得多。实际应用中,总是可以采用一些方法获取非线性系统的近似模型^[13,14]。在实际应用中也会遇到非常复杂的线性控制器,例如,基于高阶卡尔曼滤波器和二次型校正器(LQR)设计的控制器,这类控制器设计方法涉及模型的线性化和在工作点附近设计线性控制器。经典的线性化方法及线性化后线性控制系统的设计,可以成功应用于弱非线性情况,以及对标称稳定工作点偏离很小的情况。然而,当控制器远离线性化工作点时,控制器性能将会恶化。对于 MIMO 过程,由于在不同的工作区域,耦合特性呈现不同的变化,因此基于某个工作点线性化的控制器性能可能会更加糟糕。对于呈强非线性强耦合的 MIMO 过程,系统的特性只能由全局工况范围内的非线性模型充分描述,而不能由在特定的工作点线性化后得到的线性模型表征。在这种情况下,线性控制器的设计是不能达到控制要求的,必须考虑设计更复杂的控制器。

(2) 自适应控制方法。自适应控制也提供了处理非线性的途径。它通过识别存在的非线性,从而使控制器系统适应非线性。自适应控制方法中,控制器参数值跟随着过程动态和扰动的变化而持续地调整。通常,有两类自适应控制策略,即直接法和间接法^[15]。在直接法中,控制器参数直接根据闭环系统运行中获取的数据进行调整。而间接法中,过程模型参数则是通过递推参数估计在线更新。对于直接法和间接法,现已出现很多具体的方法,例如,模型参考控制和自整定校正器分别是典型的直接自适应和间接自适应控制。增益调度控制也可归类属于直接自适应控制策略^[16]。如果设计得当,自适应控制策略比一些经典的控制策略性能更显著,但在过程控制领域缺少有效的实际应用。这些自适应控制方法的主要不足是常常需要巨大的计算需求、先验的过程信息,且很难在大工况范围内保持系统稳定。

(3) 基于模型的非线性控制方法。自1980年以来,基于非线性模型的控制方法吸引了持续不断的研究兴趣。微分几何法^[17]的出现,被认为是提供了一种非线性控制系统分析和设计的有效工具。和拉普拉斯变换相似,线性代数被用于线性系统分析和设计,非线性系统结构特征通过使用微分几何相关概念而得以阐释。参考系统综合(RSS)是另一种非线性控制策略,它运用过程模型和期望的过程响应确定反馈控制律。Lee和Sullivan提出一种基于RSS技术的通用模型控制(GMC)方法。Henson和Seborg后来指出GMC和内模解耦都是基于微分几何概念的。几种其他的非线性控制技术,如滑模控制、极小-极大优化、反馈线性化、反步(back stepping)等,也得到了关注。尽管基于模型的非线性控制技术能对非线性过程提供期望的解决方案,但仍缺乏通用的设计方法和评估被控系统性能的方法。而且,仅当非线性模型非常精确时,稳定性才能保证。因此,精确的非线性数学模型难以获取以及求解非线性问题困难制约着基于模型的非线性控制的广泛应用。近年来,非线性预测控制(NMPC)突破了这两点束缚,使得基于模型的非线性控制技术应用性能显著改善^[18,19]。非线性预测控制技术是线性模型预测控制(MPC)的扩展,而线性MPC在多变量过程工业中已有数十年的应用基础。MPC技术能处理操作量的约束,状态量和输出量的约束也一样能处理。这些基于模型的非线性控制方法直观,易于工业技术人员理解。主要的缺点是对于鲁棒性和稳定性不能保证。

(4) 神经网络控制方法。人工神经网络(ANN)技术被看做一种非常有前途的处理复杂非线性问题的方法^[20]。在控制系统中应用ANN主要因为其两个特征:基于多层拓扑结构的非线性函数的映射特性和学习机制。ANN理论上具有估计任意非线性映射的能力,因而可用于非线性系统的建模。利用从非线性过程中获得的输入输出数据,基于ANN提出了很多相关的控制策略,比较典型的有:①监督控制,其中ANN用于切换控制,和专家系统类似,用以根据过程知识实现切换调度;②直接逆控制,其中ANN用来实现系统的直接逆模型^[21];③模型参考控制,其中对象输出和模型输出的偏差用来训练ANN控制器,用以达到期望的闭环性能;④内模控制(IMC),其中ANN模型代替过程模型(系统前向模型)和控制器(逆模型),用来模仿经典的IMC方法;⑤MPC,其中ANN模型用于提供在指定的时域内预测将来对象的响应,并通过数值优化方法在最小化一个特定的性能评价判据的情况下计算合适的控制信号。尽管具有很多不同的ANN结构,但仍缺乏系统化的方法对不同的应用选择恰当的ANN结构,且能实现快速的ANN算法的收敛。

(5) 模糊控制方法。自模糊集理论1965年由Zadeh创立以来,模糊控制得到了快速的发展和各方面广泛的应用^[22],如数据库管理、决策支持、信号处理、数据分类、计算机视觉等。模糊系统利用人类专家经验知识,执行模糊推理推断出全局输出数值,在逻辑领域很有优势。模糊控制系统早期的工作是试图在控制器中将

有经验的人类操作人员的控制行为直接表达出来,即模仿人类行为,获得离散控制器输出的平滑插值。后来,模糊控制的应用得到充分的拓展。模糊控制器的特征在于它能表现由一种模糊推理系统确定的静态非线性映射关系^[22]。基于规则基的表达是直观的,且易于工程人员理解。每条规则代表的含义为控制信号是如何根据输入信号来选择过程知识的。大多数情况下,模糊控制器用于直接反馈控制。然而,也能用于监督层,如对常规的 PID 控制器自整定参数^[22]。模糊控制器确定一种输入/输出的非线性映射,和非线性控制联系紧密,有时用来设计实现反馈补偿和反馈线性化。

(6) 神经模糊控制方法。模糊逻辑和 ANN 的结合有较强的基础,因为在设计智能决策系统时它们常常是互补的。ANN 提供低层知识的能力,有强大的处理大规模数据的计算能力,而模糊逻辑具有高层的、语言或语义上的推理能力,构建了一种利用和解释来自 ANN 的低层的结果结构框架。这种特性使得两者的综合在非线性的动态系统的建模和控制方面比单纯的模糊系统或 ANN 会更加强大。将 ANN 和模糊逻辑结合在一起的工作从 20 世纪 80 年代后期出现,20 世纪 90 年代有了长足的发展,出现了各种各样的结构和算法^[23]。神经-模糊控制器的目的是寻找一种结构,有效地处理两种数据和信息:定性的和定量的数据。这两种数据在复杂系统的控制中常用来描述决策过程。模糊-神经网络以三种方式结合 ANN 和模糊逻辑^[24]:合作、协作、融合。最常用的结构是融合的神经-模糊方法,它利用神经网络学习固定结构的内部参数^[25]。自适应神经模糊推理系统(ANFIS)属于这一类^[22],它能逼近任意线性或非线性函数。然而,神经-模糊控制器仍没能在复杂过程控制工业的应用上产生大的影响。这可能是由于两个原因:建立复杂的模型较困难,模型效果也不令人满意,与传统控制器相比性能的改善并不显著。

(7) 多模型控制。解决复杂工程问题时,一种常用的方法是运用分解-合成策略^[26]。将这种思维应用到复杂非线性系统,将系统分成几个小的区域,在不同的运行条件下,分解得到一系列简单的线性系统,继而针对各简单线性系统设计局部模型控制器,通过一定的合成法则(如模糊加权)得到整体控制器输出,获得原复杂非线性系统良好的建模和控制效果^[26-32]。一般情况下,为了描述整个系统的多个参数之间关系的,构造出的全局模型可能非常复杂,难以用于实际;而另一方面,采用多模型方法局部模型可能非常简洁,局部模型参数之间的耦合也相对简单,易于处理^[33],这就是利用多模型方法解决复杂问题的初衷。通常,在划分系统时,需要知道系统的整个运行范围,在此范围内,将复杂系统划分为小的区域,以简化建模和控制策略设计。依据各区域的运行条件,定义表征相应区域运行特性的主要参数,并进行局部建模和控制器设计^[34,35]。建立的局部模型和控制器的作用范围可能存在区域的重叠,通过将局部模型组合及修正,得到全局结构的集成模型和控制器。

多模型控制方法为解决复杂非线性 MIMO 系统的控制问题提供了一种可行的途径,有望成为解决实际工业过程的非线性多变量控制问题的一种有效方法。

1.3 多模型控制策略的研究进展

工业被控对象呈现的非线性、时变性、不确定性、大范围工况等使得多模型控制策略越来越受关注^[26-39]。多模型方法基于分解合成策略,核心是构造模型集(分解)以及局部模型/控制器的调度(合成)。因而多模型控制涉及局部模型的获取、局部控制器的设计、运行区域的划分及整体控制的加权输出等问题,相关的研究现状概括如下。

(1) 局部模型参数辨识。由于阶跃响应方法操作简单且不需要过多先验知识,在过程控制建模中是一种最常用的测试方法。对单回路系统,已经出现一些利用阶跃响应求取未知过程的动态特性的辨识方法。文献[40]中,Bi 等提出了一种利用阶跃响应求取线性系统 FOPDT 模型的辨识方法,该方法简便可行且鲁棒性强,并已成功用于暖通空调(HVAC)系统的自整定 PID 控制器的设计^[41]。文献[42]、[43]中,Wang 等提出利用阶跃响应进行时域和频域辨识的方法。对于多变量闭环系统的辨识,最直接的方法是继电器反馈测试法^[44,45]。然而与单回路不同,在用于多变量系统辨识时,这些方法存在一定缺陷。在闭环 P 或者 PID 控制中,基于设定值变化进行闭环辨识也进行了一些有意义的尝试^[46]。但不幸的是,大多数工作难以推广到多变量系统中去。文献[46]中提出一种多变量系统的闭环频率辨识方法,在闭环 PID 控制中进行辨识,但需要控制器动态特性的先验知识,也没有给出传递函数矩阵。文献[47]、[48]中,提出了一种利用继电器或者阶跃响应进行多变量过程辨识的通用方法,但在工程应用中存在一定的缺陷。文献[49]中提出了一种闭环系统的辨识方法,利用施加阶跃控制信号产生的输出直接进行模型的拟合。一些基于阶跃和分散继电器反馈实现辨识传递函数矩阵的方法近来被提出,较大程度地提高了模型估计精度,减少了计算工作量^[48-54]。

(2) 局部控制结构选择。参数辨识完成后的主要任务是进行控制结构的选择,从完全集中系统到完全分散系统,通常有几种不同的选择。本质上,全集中控制更多地利用了系统信息,与分散控制相比,全集中控制实施难度大,同时易受硬件故障影响。反之,全分散系统由于受结构限制,忽略了一些结构之间相互影响的因素,导致全分散系统的耦合程度提高。如果需要更好的控制性能,可以选用成块分散控制结构。随着系统规模的增大,块的划分数目及成块分散控制的选择数量迅速增加,对每一种选择进行设计并比较它们的性能是不现实的。因此,寻求一种有效的工具,对各控制回路之间的相互作用进行评价,以寻找出最优的控制结构,就显得非常迫切。1960 年以来,提出了许多分散控制结构选择的方法^[55],例如,