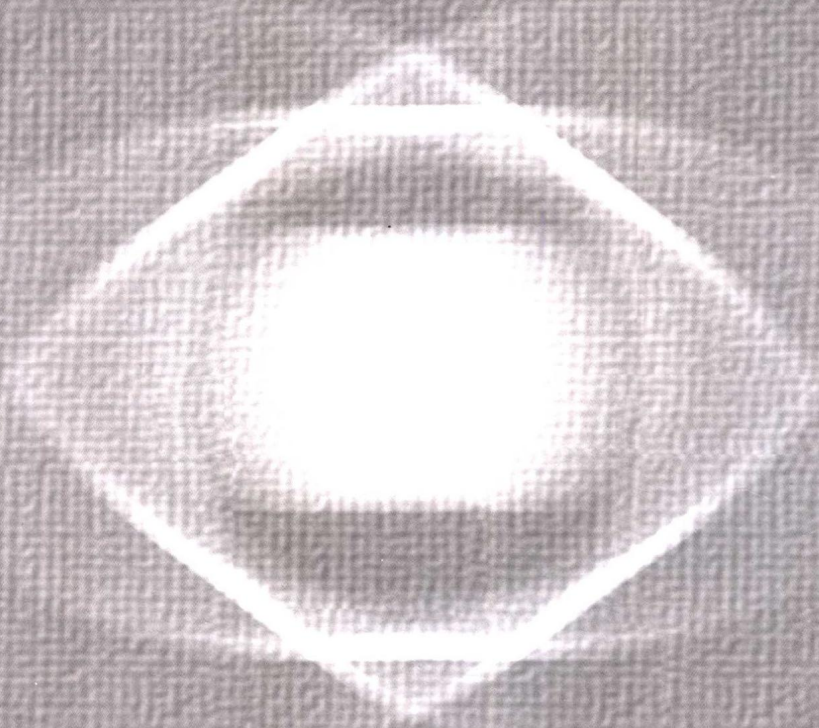


模糊自适应控制 理论及其应用



张化光 何希勤 等著



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>



ISBN 7-81077-119-1



9 787810 771191 >

ISBN 7-81077-119-1/TP·068

定价：50.00 元



模糊自适应控制 理论及其应用

张化光 何希勤 等著

北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

内 容 简 介

模糊自适应控制是一门新兴的交叉学科。本书系统地介绍了模糊自适应控制理论和主要技术内容,其中包括该领域当前的研究现状、阅读本书所需的主要数学基础、模糊控制中的主要模糊模型及其辨识方法、几种主要的模糊自适应(自校正)控制方法和模糊控制系统的稳定性设计以及模糊控制在一些工业过程中的应用。本书涉及的知识面较宽,除模糊集及其控制理论外,还涉及了粗糙集理论、模糊双曲正切模型理论、模糊基函数概念、滑模软切换控制、模糊聚类分析方法、模糊神经网络辨识方法等。全书共 18 章。每章的内容既自成体系,又互相联系,构成了模糊自适应控制的主要理论和技术框架。

本书可作为信息、自动化及计算机应用等专业的本科生及研究生的教材和参考书,也可供有关教师和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

模糊自适应控制理论及其应用/张化光等著. —北
京:北京航空航天大学出版社,2002. 7
ISBN 7-81077-119-1

I. 模… II. 张… III. 模糊控制:自适应控制
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 067053 号

模糊自适应控制理论及其应用

张化光 何希勤 等著

责任编辑 王 实

责任校对 陈 坤

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: pressell@publica.bj.cninfo.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:21 字数:538 千字

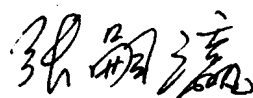
2002 年 7 月第 1 版 2003 年 6 月第 2 次印刷 印数:1 501-2 500 册

ISBN 7-81077-119-1/TP·068 定价:50.00 元

序

随着现代科学技术的迅速发展,生产系统的规模越来越大,形成了复杂的大系统,导致了被控对象、控制器以及控制目的的日益复杂化。事实上,在许多系统中,复杂性不仅仅表现在高维性上,更多地体现在:① 被控模型的不确定性;② 高度非线性;③ 系统信息的模糊性;④ 输入信息的多样性;⑤ 计算的复杂性以及庞大的数据处理;⑥ 高性能要求等。因此,在传统的控制理论基础上综合其他学科的知识,不失为解决复杂系统控制问题的一种新途径。智能控制理论正是在这种背景下提出和形成的,而这种理论的一个非常重要的分支——模糊控制理论是由美国著名控制论专家 L. A. Zadeh 教授 1965 年创立的。虽然从理论的诞生至今,在学术界存在着不同的观点,但其应用成果是有目共睹的。如采用模糊控制器的照相机、洗衣机、摄像机等在世界各地的市场上均能见到。另外,作为对理论的认同,世界最大的工程师协会 IEEE 从 1992 年起每年举办一届模糊系统年会,并于 1993 年起创办 IEEE 模糊系统会刊。

近十几年来,本书作者张化光教授、何希勤博士和课题组合作者们在模糊控制理论及应用研究方面取得了不少的研究成果,例如模糊模型辨识、模糊控制系统稳定性分析、电厂汽温过程的单变量模糊自校正控制、基于 PMV 空调系统的模糊自适应控制和电加热炉 Fuzzy-PID 控制等。这些成果分别发表在国内外有影响的期刊上,如:IEEE Trans. on Fuzzy Systems、IEEE Trans. on S. M. C.、Fuzzy Sets and Systems、《中国科学》、《自动化学报》等。本书既涵盖了作者近十几年来的学术研究成果,同时又有比较系统、完整的理论基础和应用实例,为该领域的进一步深入研究提供了极好的参考,是模糊控制理论及应用方面的一本好书。



2002 年 2 月 28 日于青岛

前 言

美国控制论专家 L. A. Zadeh 于 1965 年创立了模糊集理论,为描述、研究和处理模糊性现象提供了有力的数学工具。1974 年,英国的 E. H. Mamdani 把模糊语言逻辑用于工业过程控制并获成功,标志着模糊控制的诞生。

众所周知,经典控制理论解决线性定常系统的控制问题是很有效的。现代控制理论在军事科学、空间飞行等方面得到了成功的运用。但是,在工业生产中,却有相当数量的复杂过程难以实现自动控制,如那些非线性、大时延、强耦合、时变参数等复杂工业对象,以及那些难以获得数学模型或模型非常粗糙的工业系统等等,它们仍然以人工操作和人工控制为主。近年来的实践表明,上述难以实现自动控制的复杂的生产过程,如果采用模糊控制理论与计算机来实现自动控制,效果较好;若能采用基于过程状态模式识别的自校正(或自组织)控制策略或采用基于模糊模型辨识的自校正控制方法,效果更佳。

复杂系统的模糊自适应控制技术是近 10 多年来发展起来的新型学科,受到国内外过程控制工作者的广泛重视。为了满足广大科技工作者迫切需要学习和掌握该方面理论和方法的需要,著者草成此书,以期抛砖引玉。关于模糊自适应控制理论及其应用课题的研究受到国家教委骨干教师基金、国家教委博士点基金、沈阳市自然科学基金和鞍山钢铁学院博士启动基金的资助。

本书共分 18 章。第 1 章对模糊自适应控制领域当前的研究现状作了简单介绍;第 2 章为本书所需要的数学基础;第 3~7 章介绍模糊控制中的主要模糊模型及其辨识方法;第 8~13 章介绍几种主要的模糊自校正(自适应)控制方法,其中部分章节还介绍了模糊控制系统稳定性设计的一些方法;第 14~15 章着重介绍其他两种模糊控制系统的稳定性设计方法;第 16~17 章重点介绍模糊控制在两类空调机组系统的应用问题;第 18 章介绍模糊控制在电加热炉温度控制中的应用。

本书内容新颖充实,叙述清晰准确,并注重与实际应用相结合,弥补了当前模糊自适应控制理论及应用方面缺乏系统性书籍的不足。

本书由国防大学刘增良教授主审。刘教授对全书的各个章节进行了认真的评阅,在此表示感谢。中国科学院院士、著名控制理论家张嗣瀛教授对本书提出了许多宝贵的意见,并写了序,特此致谢。

全书由张化光、何希勤等著。参加本书部分内容编写或提供素材(以出现章节为序)的还有:全永兵、黎明、孟祥萍、朴营国、赵庆杞、郝万君。全书由张化光统稿。

由于水平有限,书中会出现错误和不妥之处,欢迎读者批评指教。

作 者

2002 年 1 月于东北大学



张化光 1959年5月生。1991年于东南大学热工自动化专业获博士学位,尔后到东北大学自动控制博士后流动站作2年的博士后科研工作。自1994年起在东北大学控制理论与控制工程专业任教授、博士生导师及电气自动化研究所所长。曾在美国、韩国和香港地区长期从事合作科研工作及任访问学者。

近年来主要从事模糊系统理论、模糊控制与智能控制、自适应控制、混沌控制、电力系统自动化、新型电机和拖动系统的设计及其自动化的理论研究和工程开发工作。曾在“IEEE Trans. on SMC”、“IEEE Trans. on FS”、“IEEE Trans. on CST”、“FSS”、《中国科学》、《自动化学报》等国内外权威杂志和重要会议上发表论文100余篇。曾获得国家自然科学基金、归国留学人员基金等资助。曾主持或作为主要科研人员完成了30多项国内外的相关科研项目。3项研究成果分别获国家能源部、辽宁省和国家教委(甲类)科技进步一、二等奖。享受国务院政府特殊津贴。



何希勤 1965年12月生于安徽怀宁。1987年毕业于东北大学数学系应用数学专业。1994年在东北大学攻读控制理论与控制工程专业硕—博连读研究生,其间于1999年7月晋升为副教授,2000年3月获工学博士学位。攻读博士学位期间,发表学术论文20余篇,其中5篇被EI收录、1篇被SCI收录、1篇被ISTP收录。工作期间参加了国家自然科学基金资助项目“涉及两种不确定性之复杂系统的模糊自适应控制方法研究”、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目“多变量模糊推理自适应控制器及其应用”、鞍山钢铁学院董事会基金资助项目“复杂系统的模糊自适应控制方法研究”等的研究工作。现任鞍山钢铁学院应用数学研究所所长、硕士研究生导师。

目 录

第 1 章 模糊自适应控制概述	1
1.1 多变量模糊控制理论	1
1.1.1 分层多变量模糊控制器	2
1.1.2 自学习模糊控制器	4
1.1.3 基于模型的多变量模糊控制方法	5
1.1.4 多变量模糊解耦控制	8
1.1.5 基于神经网络的模糊控制	10
1.2 模糊控制器的结构分析	12
1.2.1 模糊控制器是时变参数 PID 控制器	12
1.2.2 模糊控制器作为滑模变结构控制器	13
1.2.3 模糊控制器与多值继电控制器的关系	14
1.2.4 模糊控制器的极限结构理论	14
1.2.5 MIMO 模糊控制器的结构分解	14
1.3 模糊控制系统的稳定性分析	15
1.4 其他复合模糊控制方法	17
第 2 章 模糊控制理论基础	18
2.1 引 言	18
2.2 普通集合及其运算	18
2.2.1 集合的概念及定义	18
2.2.2 集合的直积	19
2.2.3 关系与映射	20
2.2.4 集合的运算性质	20
2.2.5 集合的表示法	21
2.3 模糊集合及其运算规则	22
2.3.1 模糊集合的定义	22
2.3.2 模糊集合的表示法	23
2.3.3 模糊集合的运算	24
2.4 隶属函数	26
2.4.1 隶属函数的确定方法	27
2.4.2 常用的隶属函数	27
2.5 模糊矩阵与模糊关系	29
2.5.1 模糊矩阵	29

2.5.2 模糊关系	32
2.6 模糊向量	36
2.6.1 模糊向量的笛卡尔乘积	36
2.6.2 模糊向量的内积与外积	37
2.7 模糊逻辑与模糊推理	38
2.7.1 模糊逻辑	38
2.7.2 模糊语言	43
2.7.3 模糊推理	48
第3章 T-S模型的模糊辨识方法	53
3.1 引言	53
3.2 模糊模型的构成	53
3.3 模糊辨识方法	56
3.3.1 结论参数的辨识	56
3.3.2 前提参数的辨识	57
3.3.3 前提结构的辨识	59
3.4 辨识精度的考核	70
3.5 提高模糊辨识速度的一种方法	73
3.5.1 第2种形式的模糊模型	74
3.5.2 前提参数辨识的快速算法	74
3.5.3 结论结构和结论参数的辨识	79
3.6 采用遗传算法的广义T-S模糊模型的辨识	87
3.6.1 问题的引出	87
3.6.2 广义T-S模糊模型及逼近性理论分析	87
3.6.3 几种改进型遗传算法的比较分析	91
3.6.4 一种快速综合性的遗传算法	92
3.6.5 基于快速综合性遗传算法的广义T-S模型辨识方法	95
3.6.6 仿真示例	96
3.7 小结	98
第4章 关系模型的模糊辨识方法	99
4.1 模糊关系模型的描述	99
4.2 模糊关系模型的建立方法	100
4.3 模糊关系模型辨识的进一步改进	102
4.4 多变量模糊关系模型的动态辨识	104
4.4.1 问题的提法	104
4.4.2 参考模糊集合的确定	105
4.4.3 辨识算法A1——确定R	106
4.4.4 使用模糊模型	106

4.4.5 模糊模型的自学习	107
4.4.6 举 例	109
4.5 采用模糊聚类分析方法辨识关系模型	110
第 5 章 采用神经网络技术的模糊辨识方法	115
5.1 模糊神经网络	115
5.1.1 推理合成方法	115
5.1.2 学习算法	120
5.2 利用模糊神经网络的模糊建模	121
5.3 仿 真	122
第 6 章 模糊双曲正切模型的建模方法	127
6.1 引 言	127
6.2 双曲正切模型及其建模过程	128
6.3 模糊双曲正切模型神经网络实现及模型参数辨识方法	132
6.3.1 模糊双曲正切模型神经网络实现	132
6.3.2 反向传播算法模糊双曲正切模型参数辨识方法	132
第 7 章 基于粗糙集的模糊模型辨识方法	136
7.1 粗糙集理论的基本概念	136
7.1.1 粗糙集中对知识的理解	136
7.1.2 粗糙集的下逼近、上逼近、边界区	136
7.1.3 粗糙集数据分析、不可分辨关系、依赖关系和简约	137
7.2 模糊模型辨识	139
7.3 辨识步骤	140
7.4 仿真研究	140
7.5 小 结	143
第 8 章 基于 T-S 模型的多变量模糊自校正控制方法	144
8.1 多变量自校正控制系统的设计思想	144
8.2 单元机组负荷系统的辨识	145
8.3 模糊模型的等价转换	150
8.4 多变量模糊自校正控制系统及性能分析	152
8.4.1 多变量过程的最优输出预测	152
8.4.2 多变量广义预测控制规律	153
8.4.3 多变量模糊自校正控制系统的闭环稳态分析	154
8.4.4 多变量模糊自校正控制系统的闭环稳定性分析	156
8.5 单元机组负荷系统的模糊自校正控制	156
8.5.1 模糊自校正控制系统及其动态响应	156

8.5.2 模糊自校正控制系统与常规的锅炉跟随系统的比较	158
8.5.3 模糊自校正控制系统的鲁棒性	160
8.6 模糊广义预测控制系统的稳定性分析	161
8.7 基于手动控制数据的自适应控制方法	162
8.7.1 基于控制作用模型的单元机组负荷系统的控制	163
8.7.2 仿真研究	165
第9章 单变量模糊自校正控制方法	167
9.1 简单模糊控制器的设计	167
9.1.1 精确量的模糊化	167
9.1.2 模糊推理算法	169
9.1.3 输出信息的模糊判决	172
9.2 简单模糊控制器参数与控制系统响应特性关系	172
9.2.1 EK 对系统性能的影响	173
9.2.2 CEK 对系统性能的影响	173
9.2.3 UK 对系统性能的影响	173
9.3 模糊自校正控制方法	174
9.3.1 一组模糊子集的隶属函数的定义	175
9.3.2 模糊自校正控制器的粗调部分	177
9.3.3 模糊自校正控制器的微调部分	178
9.4 仿真研究	179
9.4.1 系统抗扰动 II 性能比较	180
9.4.2 系统抗扰动 I 性能比较	180
9.4.3 扰动 I 和扰动 II 同时作用时性能比较	181
9.5 模糊自校正控制系统的鲁棒性	181
9.6 模糊状态作用表或查询表的自动生成	183
第10章 两种不确定性的模糊推理及控制方法	189
10.1 问题的提出	189
10.2 几个基本概念的定义和计算方法	190
10.2.1 贴近测度 S_M	190
10.2.2 知识表示的模式匹配	191
10.2.3 修正函数 M_F	193
10.3 置信度 C_F 的作用和整体推理方法	193
10.4 合成规则的模糊推理	195
10.5 THFDP 的应用示例	195
10.6 考虑两种不确定性的模糊控制方法	197
第11章 基于模糊双曲正切模型的稳定控制器的设计	202
11.1 引言	202

11.2 控制器的设计	202
11.2.1 极点配置法	202
11.2.2 H ₂ 控制器的设计	205
11.2.3 鲁棒控制器的设计	208
11.3 模糊 Lyapunov 分析	211
11.4 小 结	213
第 12 章 基于模糊基函数的多变量鲁棒自适应控制器	214
12.1 引 言	214
12.2 一种 MIMO 非线性系统模型及控制问题	214
12.3 模糊系统描述	216
12.4 鲁棒控制器的设计及稳定性分析	218
12.5 仿真研究	220
12.6 热泵空调系统中的应用	222
12.6.1 热泵空调控制的现状分析	222
12.6.2 热泵空调控制模型描述	222
12.6.3 热泵空调系统的控制研究	227
12.7 小 结	231
第 13 章 改进的模糊滑模软切换控制及其应用	232
13.1 引 言	232
13.2 模糊切换控制	232
13.2.1 利用模糊规则表的切换控制	232
13.2.2 自适应模糊切换控制	234
13.3 自适应模糊增益调节的等效控制	235
13.3.1 基于系统在线信息的模糊增益调节	236
13.3.2 基于 ACEN 和 Δ ACEN 的模糊增益调节	237
13.3.3 基于 GA 的模糊增益调节	238
13.4 软切换控制	239
13.5 仿真实验及结果分析	240
13.6 小 结	243
第 14 章 基于 T-S 模糊模型的分散控制器设计	244
14.1 引 言	244
14.2 连续非线性系统的模糊控制系统的结构与稳定性	244
14.2.1 平衡态	244
14.2.2 平衡态的稳定性	245
14.2.3 模糊控制器设计	247
14.3 非线性离散系统的模糊控制器设计与稳定性	248

14.4 仿真研究.....	250
第 15 章 一类多变量模糊系统全局稳定性分析	254
15.1 引 言.....	254
15.2 T-S 模糊系统的一种定性分析方法	255
15.2.1 模糊控制系统描述.....	255
15.2.2 控制器设计.....	255
15.2.3 稳定性分析.....	256
15.2.4 仿真研究.....	257
15.3 多变量离散模糊控制系统描述与控制器设计.....	260
15.3.1 多变量离散模糊控制系统描述.....	260
15.3.2 控制器设计.....	260
15.3.3 稳定性分析.....	261
15.3.4 多变量离散模糊控制系统 D 稳定性分析	264
15.3.5 仿真研究.....	266
15.4 小 结.....	267
第 16 章 模糊直接自适应控制及其应用	268
16.1 问题的描述.....	268
16.2 基于模糊逻辑的直接自适应控制器的设计.....	270
16.3 鲁棒性和稳定性分析.....	273
16.4 新风机组空调控制的仿真研究.....	275
16.4.1 新风机组空调控制问题及系统模型描述.....	275
16.4.2 某游泳馆的新风机组模糊自适应控制.....	277
第 17 章 基于 PMV 的空调系统模糊自适应控制	283
17.1 引 言.....	283
17.2 人体舒适度指标 PMV 及其室内温度设定	283
17.3 基于 PMV 的空调模糊自适应控制	286
17.3.1 空调控制系统描述.....	286
17.3.2 空调系统模糊模型的建立.....	288
17.3.3 空调控制系统的模糊控制模型的建立.....	291
17.3.4 基于模糊模型的空调系统自适应控制及仿真研究.....	292
17.4 小 结.....	296
第 18 章 电加热炉 Fuzzy-PID 控制器设计.....	297
18.1 引 言.....	297
18.2 PID 和 Fuzzy 控制策略剖析与方案选择	297
18.2.1 PID 控制的特点.....	297

18.2.2 模糊控制的特点	298
18.2.3 电加热炉温度 Fuzzy - PID 控制算法	298
18.3 Fuzzy - PID 控制器的设计	298
18.3.1 模糊自整定 PID 参数控制器的结构及工作原理	299
18.3.2 模糊自整定 PID 参数控制算法	299
18.3.3 PID 控制算法	302
18.4 控制算法仿真及在温度控制系统中的应用	303
18.5 电加热炉模型辨识与 Smith 预估	306
18.5.1 Smith 预估器的设计思想	307
18.5.2 模糊辨识	308
18.5.3 仿真研究	311
参 考 文 献	312

第1章 模糊自适应控制概述

1.1 多变量模糊控制理论

自从1965年美国加利福尼亚大学控制论专家 L. A. Zadeh 教授提出模糊数学以来^[1],吸引了众多的学者对其进行研究,使其理论与方法日臻完善,并且广泛地应用于自然科学和社会科学的各个领域,尤其是在第5代计算机研制和知识工程开发等领域占有特殊重要的地位^[2]。把模糊逻辑应用于控制领域则始于1973年^[3]。1974年英国的 E. H. Mamdani 成功地将模糊控制应用于锅炉和蒸汽机控制^[4]。此后20多年来,模糊控制不断发展并在许多领域中得到成功应用^{[5][6]}。由于模糊逻辑本身提供了由专家构造语言信息并将其转化为控制策略的一种系统的推理方法,因而能够解决许多复杂而无法建立精确数学模型系统的控制问题,所以它是处理推理系统和控制系统中不精确和不确定性的一种有效方法。从广义上讲,模糊控制是基于模糊推理,模仿人的思维方式,对难以建立精确数学模型的对象实施的一种控制策略。它是模糊数学同控制理论相结合的产物,同时也是智能控制的重要组成部分。模糊控制的突出特点在于:

- ① 控制系统的设计不要求知道被控对象的精确数学模型,只需要提供现场操作人员的经验知识及操作数据。
- ② 控制系统的鲁棒性强,适应于解决常规控制难以解决的非线性、时变及大纯滞后等问题。
- ③ 以语言变量代替常规的数学变量,易于形成专家的“知识”。
- ④ 控制推理采用“不精确推理”(Approximate Reasoning)。推理过程模仿人的思维过程。由于介入了人类的经验,因而能够处理复杂甚至“病态”系统。

模糊控制在理论上突飞猛进的同时,也越来越多地、成功地应用于现实世界中。然而相对于传统的控制方法,应用于实时控制中的模糊控制到底有什么优势?许多学者在研究证明采用启发式规则的模糊控制器性能优于常规控制器性能时,是否进行了平等的比较?

传统的控制理论(包括经典控制理论和现代控制理论)是利用受控对象的数学模型(即传递函数模型或状态空间模型)对系统进行定量分析,而后设计控制策略^[7]。这种方法由于其本质的不相容性^[8],当系统变得复杂时,难以对其工作特性进行精确描述。而且,这样的数学模型结构也不利于表达和处理有关受控对象的一些不确定信息,更不便于利用人的经验、知识、技巧和直觉推理,所以难以对复杂系统进行有效控制^[9]。

经典的模糊控制器利用模糊集合理论将专家知识或操作人员经验形成的语言规则直接转化为自动控制策略(通常是模糊规则查询表)^[9],其设计不依靠对象精确数学模型,而是利用其语言知识模型进行设计和修正控制算法。文献[5][6]给出了一些应用实例,仿真结果显示其性能优于常规PID控制^[10]。

到目前为止,经典模糊控制系统所控制的对象通常是SISO系统,因为操作者大多数只能给出一组形如下式的2维模糊控制规则:

if(偏差 is E_i , 偏差变化率 is E_{Ci}) then (控制量 is u_i) (1.1)

若直接推广到多变量系统,会遇到很多困难。

首先,难以建立一组比较完善的多维(≥ 4 维)模糊控制规则。以两输入两输出对象为例,其控制规则通常为如下形式的一组 4 维模糊条件语句:

if(偏差₁ is E_{1i} , 偏差变化率₁ is E_{C1i} , 偏差₂ is E_{2i} , 偏差变化率₂ is E_{C2i}) then (控制量 is u_i) (1.2)

其次,由操作人员对受控对象认识的模糊信息的归纳和操作经验的总结来建立这样一组模糊控制规则会很困难,甚至难以办到。因为人对某一具体事物的逻辑思维通常不超过 3 维^[11]。即使能凑成这样一组不完整的粗糙的模糊控制规则,其控制效果也难以保证。另外,用于多变量控制的模糊查询表及关系矩阵将占据大量计算机内存空间和计算时间,甚至难以用计算机实现。

由于单变量系统是多变量系统的特殊情况,在工程实践中所遇到的很多控制对象都是多变量系统,因此对 MIMO 系统模糊控制方法的研究具有很重要的实际意义。目前,国内外对多变量模糊控制系统的研究方兴未艾,逐渐成为模糊控制领域研究的热点课题^{[8][11][12]}。

可以说每一种新的技术与方法在体现其优越性能的同时,也必定存在其局限性。应当承认,在对客观对象进行观察和认识时,模糊控制毕竟不如人的认识全面深刻,若要达到真正仿人智能的效果,仍然需要其自身在工程应用中不断地朝着自适应、自组织、自学习方向发展。

下面从 5 个方面来讨论多变量模糊控制方法的研究现状。

1.1.1 分层多变量模糊控制器

常规模糊控制器的设计方法^[13]有很大的局限性,控制器的输入只有被控量的误差及其变化率,实质上相当于一个可变参数的单输入 PD 调节器。而在复杂的工业过程中,常常遇到强耦合的多变量系统,外界干扰因素也很多,控制器的设计应该采用多个输入量。另外,在处理确定值与模糊量的变换时,模糊化的量化因子与判决时的比例因子在整个控制过程中是固定不变的,因此,当受控对象运行工况变化而引起对象特性发生大幅度变化时,控制器的鲁棒性欠佳^[14]。

针对以上问题,戴忠达等人提出一种改进的模糊控制器^[15]。当具有多个输入变量时,将其中一个或几个作为辅助输入量,由其变化来代表不同的过程状态。在不同的过程状态下,再根据被调量的偏差 E 及偏差变化率 E_C 定出模糊控制规则。它比常规模糊控制器能更好地适应生产过程状态的变化,能更全面地反应人工操作的经验。该方法用于南京钟山化工厂乳化剂车间半间歇式聚合釜生产过程中的温度控制,其现场运行效果良好。

在戴忠达等人的算法基础上,G. V. S Raju 和 Jun Zhou 又提出一类自适应多级模糊控制器^{[16][17]}。他们对戴忠达等人文中的一些设想做了证明,指出 MIMO 系统模糊规则的条数是系统变量的指数函数^[17]。当 n 很大时,要构造常规的基于规则的模糊控制器几乎是不可能的。为了解决这个问题,引入多级模糊控制结构,将对系统性能影响最大的变量选为 1 级变量,次之的选作 2 级变量,以此类推。其中,1 级规则具有如下形式:

if(x_1 is $a_{1,1}$, x_2 is $a_{1,2}$, ..., x_{n_1} is a_{1,n_1}) then (output y_1 is b_1) (1.3)

第 i 级($i > 1$): if (x_{N_i+1} is a_{N_i+1} , ..., $x_{N_i+n_i}$ is $a_{N_i+n_i}$) and (y_{i-1} is b_{i-1}) then (output y_i is b_i) (1.4)