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

北京密云华都印刷厂印装 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 2002 年 7 月第 1 次印刷 **印数**：1 500 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. Zaden 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

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 …… 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 H2 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 ΔACEN 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 6 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,依此类推。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)

其中 $N_i=\sum_{j=1}^{i-1}n_j\leqslant n$，$n_j$ 是第 j 级中出现的系统变量个数。

在多级结构中，第 1 级给出近似输出 y_1，随后 y_1 被第 2 层规则集修正为 y_2。2 级变量同时包括 1 级近似输出 y_1 及上式所示的系统变量，整个控制过程依次重复，系统构成如图 1.1 所示。显然，这种多层结构比文献[15]中的双层结构更加灵活，其高层规则集的作用不仅仅是状态判别，同时还给出控制器的近似输出。

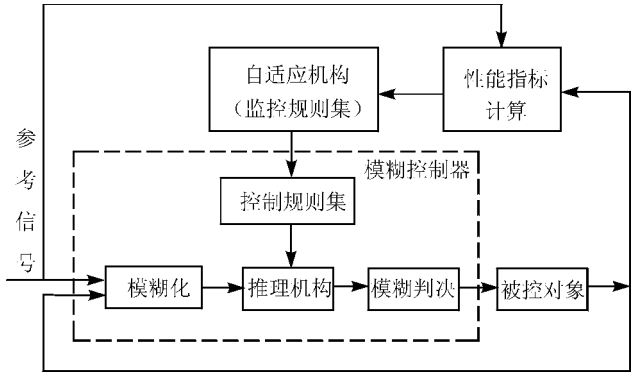


图 1.1　多级自适应模糊控制系统

为了说明这种结构的有效性，文献[16]中给出定理，证明分级结构能够大大减少控制器的规则条数，使其成为输入变量个数 n 的线性函数。值得一提的是，该控制系统在多级结构的基础上还引入了自适应机构，通过计算各项性能指标（拟衰减率、振荡度、残差、超调量），由监控规则集在线调整量化因子、加权因子、k_p 和 k_i 等控制器参数，实现自适应功能，大大提高了系统的鲁棒性。

而后，A. Gegov 又提出一类多级智能模糊控制器，并用于城市交通控制网络[18]。他在一般的多级结构基础上引入 Gupta 空间分解（decomposition）策略[19]和 DICS 系统（Distributed Intelligence Control Systems），从而将 Al-Khail，Stoilos 和 Gegov 提出的多级系统理论加以推广[20][21]。该设计首先是对模糊结构进行分解，将 MIMO 系统的模糊关系 R 分解成多个 2 维的子关系。以牺牲精确性为代价，使得模糊关系 R 中的相关元素个数显著降低，进而大大减少计算量。然后基于分解后的子系统，利用 Siljak 和 Sundershan 提出的处理方法[22]，将控制变量分为两大类：局部变量和全局变量。各局部变量只涉及到各子系统的内部状态，而全局变量则要考虑各子系统之间的关系。这样的结构有两大优点：①通过局部控制使得各子系统达到各自的性能要求；同时，全局控制又可对整个系统进行优化。②可用两级控制来实现，局部变量设置在较低一级，而全部变量则在高一级。

随后，J. Han 和 V. M. Murray 提出带反馈的双层多变量模糊控制器[23]。这种方法的特点是：引入带权值的多变量模糊控制器，各权值由模糊推理得到的系统参数决定。问题的焦点是如何改进模糊判决逻辑，以取得最佳控制效果。在第 1 层中，提供几种不同的模糊判决逻辑，将由模糊推理所得各模糊变量的加权和作为反馈。第 2 层中，由模糊推理以及系统参数决定各变量权值大小。将这种控制器应用于非线性的车轩控制系统，仿真结果显示，系统的响应依赖于各反馈变量权值的大小，若能适当选择各权值，将会得到满意的工作特性。

最近，S. J. Wu 和 C. T. Lin 在文献[24]中将 MIMO 模糊系统按输出可控规范型进行分

解,在子区间上建立局域模糊模型,通过整体二次型最优化的动态优化方法,获得全局稳定的最优控制。K. Y. Tu[25]等人提出了多层模糊控制器结构,利用滑动超平面来连接多个单变量的 FLC,并提出了闭环系统的稳定性条件。但是这些方法的计算量偏大。

另外一种改进方法是自学习的方法。显然,将分层结构与自学习相结合不失为一条捷径,可以在各层控制规则集中引入自学习机构,通过自学习得到最优的规则库。

1.1.2 自学习模糊控制器

通常,对 MIMO 系统规则库的建立问题,有两种解决方法:一种是利用被控对象动态特性进行模糊模型在线辨识;一种是自学习方法。前者类似于传统的系统辨识和自适应控制策略,后者则更接近于自学习与智能型机构。

基于模型的模糊控制方法是用一组 if-then 语句(T-S model)或关系方程(Pedrycz model)来表达输入输出变量之间的关系,在此模型基础上设计控制策略。与此相反,基于学习的模糊控制方法则是通过重复操作过程来模仿人的学习能力,因此可以不考虑被控对象的特性。

Procyk 于 1979 年提出一种所谓的语言自组织模糊控制器(SOC)[26],在基本的模糊控制器基础上构成闭环自调整控制,以提高系统性能。通过计算系统的性能指标来建立、修改规则库。Scharf 和 Mandic[27],Shao[28],Dalay[29]等人在算法上作了一些改进,并应用到实际中。另外,Rhee 和 Vander 等人[30]提出由定量过程获得定性控制规则的方法对控制器的结构作了一些改进,采用类似细胞的知识结构来表征以时间与量值作为自变量的系统输入输出关系。在学习阶段建立系统结构,随后在两组推理规则基础上控制该系统。

Linkens 和 Nie 在文献[31]中提出一种通过自学习建立多变量模糊控制规则库的方法。考虑被控对象是多变量强耦合过程,并且存在纯滞后时间,通过引入参考模型和重复学习控制结构,寻求最佳控制行为。同时,在观察、记录以及适当处理学习动作的基础上,建立对应于各控制环节的独立的、解耦的规则库。在该系统中,通过对系统进行反复操作和自学习,可逐渐获得正确的操作动作。很明显,这与人的学习过程非常相似,它包括 4 个功能块:参考模型、学习算法、规则库的建立机构以及被控过程。文中还对该系统的收敛性进行了分析,证明在适当的约束条件下,这种学习过程是可以收敛的,同时还给出了该方法的仿真结果[32]。尽管仿真效果很好,但尚没有在理论上对学习算法的鲁棒性进行分析讨论,也没有考虑噪声对学习信号和学习增益参数的影响。

Yong-Tae Kim 和 Z. Bien[33]针对传统的自组织模糊控制器对外部扰动敏感的问题,采用变结构控制思想设计了鲁棒自学习控制器,并应用于双关节倒立摆的控制,效果良好,但是控制作用有抖振现象。

Layne 等人提出的模糊模型参考学习控制(FMRLC)[34]是在常规的模型参考自适应控制(MRAC)设计思想基础上发展起来的。与 MRAC 相比,FMRLC 方法有几条突出的优点:①收敛速度快;②设计简单;③抗干扰性强;④无须建立系统数学模型。值得一提的是,J. R. Layne 通过对 FMRLC 与 MRAC 的仿真结果进行了分析比较,在不失一般性的情况下,指出在已经形成的常规自适应控制理论的基础上发展模糊学习控制技术,能够得到优于常规自适应控制的效果。这种思想的提出,无疑为今后自学习模糊控制器的发展提供了一个很好的研究方向。

1.1.3　基于模型的多变量模糊控制方法

通常建立模糊控制规则的启发式方法有两大类，即前面已经介绍的自学习方法和本节将要介绍的基于对象模型的多变量模糊控制方法。

模糊模型的辨识是设计基于模型的模糊控制器的前提条件[35]。在过去的十几年中，系统的模糊模型的辨识已经取得了丰硕成果。比较著名的有 Pedrycz 提出的基于参考模糊集的建模方法，Takagi 与 Sugeno 提出的 T-S 模型辨识算法以及贾利民等人提出的基于模糊穴映射的多变量模糊系统辨识方法。

1. 关系模型的辨识以及基于关系模型的多变量模糊控制器

模糊关系模型是描述系统非线性时变动态特性的有力工具之一。它具有 m 个输入的 MISO 系统，可表达为

$$y(t)=x_1(t)\circ x_2(t)\circ\cdots\circ x_m(t)\circ R \tag{1.5}$$

其中：$R\in F(x_1\times x_2\times\cdots\times x_m\times Y)$ 是基于参考模糊集合的模糊关系；$F(\cdot)$ 代表定义在论域上的一组参考模糊集，记为

$$A_{i1},A_{i2},\cdots,A_{ir}\in F(x_i)\qquad i=1,\cdots,n$$
$$B_1,B_2,\cdots,B_r\in F(Y)$$

为保证模糊模型的性能，要求各参考模糊集为正规凸集。

自从 1965 年 Zadeh 首次提出模糊关系模型以来，许多专家学者对动态系统的模糊关系模型问题进行了有益的探讨，并提出很多有效的辨识方法。辨识的目的是在性能指标 J 给定的情况下，从系统的 I/O 数据中按极小化 J 的原则确定：①各参考模糊集合；②模糊关系 R；③模型的结构参数。其中，结构辨识可仿照线性系统的辨识方法，在一定范围内寻找结构参数的某一组合，使给定的指标 J 极小化。

Tong 首先提出了用模糊集理论辨识系统模糊模型的方法[36]。李宝绥等[37]改进了文献[36]的方法，针对 SISO 系统提出了关系模型的辨识方法，但没有考虑噪声对系统性能的影响。Pedrycz 等人研究了模糊关系的迭代算法[38][39]，在隶属函数的构造上引入了模糊聚类方法[40]，结果显示算法具有很好的收敛性。Hirota，Civanlar 等人分别讨论了隶属函数的构造和模型参数的辨识方法[41][42]，但其算法的前提条件为已知系统变量概率密度的分布特性，在实际情况下该条件难以满足。于静江等人提出了一种基于参考模糊集的模型辨识方法[43]，该方法直接从试验数据中辨识出系统的模糊模型，不需要系统变量分布方面的先验知识，较好地克服了文献[41][42]中的缺陷。Dennis Singer 和 P. G. Singer 在文献[44]中利用模糊关系方程和对一类选定的隶属函数适用的模糊代数方法，设计出辨识模糊模型的实用算法。徐承伟等人设计了系统模糊模型的辨识算法[45]，并且为使模型具备跟踪系统时变特性的能力，给出了相应的自学习算法。系统结构如图 1.2 所示，图中，$y(k)$ 为系统的实际输出，$\hat{y}(k)$ 为模糊模型的输出，预报误差为 $e(k)=y(k)-\hat{y}(k)$，$e(k)$ 是自学习机构的推动力。该方法可以将参考模糊集固定下来，通过修改模糊关系 R 来修改模糊规则。

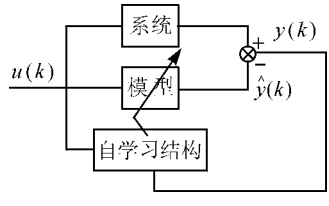


图 1.2　自学习辨识机构

辨识系统模型的同时，对系统实施控制的思想是由 Czogola 和 Pedrycz 首先提出的，后来发展成为优于常规模糊控制的基于关系模型的自适应控制方法。B. P. Graham 与 R. B. Newell

在文献[46]中提出一类典型的 FMAC(Fuzzy Model-based Adaptive Controller),其结构如图 1.3 所示。该方案中,首先,利用新老数据基于参考模糊集对过程进行辨识,更新系统关系模型,并对有噪声的情况下算法的鲁棒性进行分析,引入加权因子以改进鲁棒性。然后,由 $k-1$ 时刻的模糊关系 R_{k-1} 及当前数据集合推理合成得到的 R' 计算当前时刻的模糊关系 R_k,$R_k = R' \bigcup R_{k-1}$。将这类具有自适应功能的模糊控制器用于增益与时间常数随时间改变的一阶系统。仿真表明,它能够很好地控制这类复杂系统,且具有较强的抗干扰性。

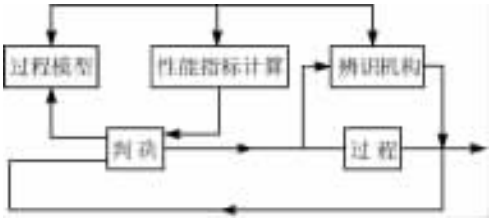


图 1.3 基于关系模型的模糊自适应控制系统

文献[47]中,陈建勤等人在 Pedrycz 工作的基础上,提出了在线模糊模型辨识方法,能够克服由于不准确的测量数据对模糊关系产生的不良影响。并且结合在线模糊模型辨识与基于模型的模糊控制算法,得到了自适应模糊控制系统。

徐征明等[48]考虑在有白噪声干扰和无噪声干扰两种情况下,根据系统模糊模型设计非线性慢时变系统的自校正调节器。胡少华等[49]提出了由被控对象的 I/O 数据建立被控对象的规则模型,并在此模型的基础上自动生成控制器的规则模型。

2. T-S 模型的辨识及基于 T-S 模型的多变量模糊自适应控制方法

T-S 模糊模型是一种本质非线性模型,适宜表达复杂系统的动态特性。m 个输入、单个输出的 MISO 系统可由如下形式的 n 条模糊规则组成的集合来表示:

$$R^i: \text{if } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \cdots, x_m \text{ is } A_m^i, \text{then } y^i = p_0^i + p_1^i x_1 + p_2^i x_2 + \cdots + p_m^i x_m \tag{1.6}$$

由于其结论是采用线性方程式描述的,因此便于用传统的控制策略设计相关的控制器。模糊模型及辨识算法首先由 Takagi 与 Sugeno 在文献[50]中提出,通常包括前提结构的辨识、前提参数的辨识、结论参数的辨识等内容。

上述辨识算法的突出优点是辨识精度高。但是,由于计算量偏大,对于快速的动态过程,难以在线实施。不久,Sugeno 和 Kang 提出了前提结构和结论结构的辨识算法[51],前提参数的辨识采用了复合型方法(Complex Method)。复合型方法是解决非线性规划问题的一种有效方法,其特点是不需要已知对象的数学模型,适用面广,目标函数容易建立。缺点是计算量大,收敛速度慢。针对这个问题,文献[52]中利用梯度法的概念,提出了新的前提参数快速辨识方法,使辨识速度有了很大的提高,并且具有足够高的辨识精度。S. D. Wang 和 C. H. Lee[53]提出了采用高斯函数的 T-S 模糊模型,并提出了线性距离的概念,这样可以最优化分解前提子空间,但是计算复杂,控制器难以设计。

随后,Sugeno 和 Tanaka 又提出了 T-S 模型的连续辨识算法[54]。该方法将辨识分为两级,一是监控级,一是调整级。监控级用模糊调整规则集来确定参数调整策略。调整规则由模糊模型的模糊隐含推理以及 Zadeh 的对比强度概念推广而得到。参数调整级执行调整规则所决定的调整策略,其中包括前提参数和结论参数的调整,皆由加权循环最小二乘法实现。该连续辨识方法可以快速调整 MIMO 系统的 T-S 模糊模型,便于控制快速且复杂的实际过程,并且通过连续调整,得到较为精确的系统模型,用于时变系统的控制。以上所介绍的几种辨识算法都是将 T-S 模型的结构辨识与参数辨识分开,即是在柯西线性模糊模型(QLFM)的意义上简化了辨识问题,但却不能保证所得模型结构都是最佳的。R. R. Yager 和 D. P. Filer 引入采