

模糊-神经网络

控制原理与工程应用



张吉礼 编著

哈尔滨工业大学出版社

模糊－神经网络控制 原理与工程应用

张吉礼 编著

哈尔滨工业大学出版社

·哈尔滨·

内 容 简 介

本书介绍了模糊-神经网络控制原理与方法、单片机模糊控制开发技术和热工系统模糊-神经网络控制仿真、试验与工程应用。

全书共分11章,即绪论、动态系统数学模型、模糊控制的数学基础、基本模糊控制器设计与仿真、自适应模糊控制器设计与仿真、神经网络模型辨识基本原理、时滞系统神经网络多步预测模糊控制方法、单片机模糊控制器硬件系统设计方法、单片机模糊控制器软件系统设计方法、暖通空调系统模糊控制仿真与试验、粮食干燥过程模糊-神经网络控制仿真与工程应用。其中,“动态系统数学模型”一章主要考虑模糊-神经网络控制仿真对动态数学模型的需求而选编的。

本书特点是文献综述量大,体现了模糊-神经网络控制理论、控制技术和应用实践三者的有机结合。本书适合于高等学校过程和设备控制领域的高年级本科生、研究生、教师和科研人员阅读,特别适合于非自动控制类研究生、教师和科研人员阅读,也可以作为非自动控制类专业研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模糊-神经网络控制原理与工程应用/张吉礼编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2004.6

ISBN 7-5603-2039-2

I. 模… II. 张… III. 人工神经网络-智能控制
IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 049925 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 14.75 字数 350 千字
版 次 2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-2039-2/TP·202
印 数 1~3 000
定 价 20.00 元

前 言

1965年美国加州大学 L. A. Zadeh 教授提出了“模糊集”的概念,标志着模糊数学的诞生。1974年英国工程师 E. H. Mamdani 利用模糊数学的思想实现了蒸汽机的控制,标志着模糊控制的诞生。20世纪90年代,模糊控制与神经网络的结合,增强了模糊控制模型辨识和预测控制能力。目前,模糊-神经网络控制已经广泛地应用于航空航天、工业生产、城市交通、土木工程、暖通空调、热能工程和家用电器等诸多领域。

1992年,作者于哈尔滨建筑大学师从孙德兴教授攻读硕士学位,开始从事空调系统自动控制的研究。1994年,偶遇模糊控制,便立即将其引入暖通空调领域;随后,因此而结识了欧进萍院士,并于1995年成为其博士研究生,对模糊-神经网络控制理论和计算机控制技术进行深入研究;1999年,作者进入哈尔滨工业大学动力工程与工程热物理博士后流动站工作,跟随于达仁教授进一步从事该方向的研究,并用于热工过程控制领域。2001年博士后出站至今,“热工过程智能控制理论与应用”一直是作者重要研究方向之一。自2000年至今,作为项目负责人,作者先后完成了国家自然科学基金课题(59908001):建筑热工系统模糊-神经网络控制理论与技术开发;中国博士后科学基金课题(LRZ99004):结构可调式空调机组模糊神经网络控制的研究与开发;哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金课题(HIT.MD200030):模糊控制户式热泵中央空调系统研究与技术开发;黑龙江省博士后科研启动基金课题(LRB-KY01024):一类模糊控制器系统化设计方法及其在暖通空调中的应用;国家粮食储备局攻关项目:200亿斤烘干机专项·粮食水分在线检测与自动控制系统开发。与欧进萍院士、郭骏教授、陆亚俊教授、高甫生教授和孙德兴教授在模糊逻辑推理与模糊控制器优化设计(刘锋,硕士)、基于FFSI的模糊控制器硬件化实现方法(李爱国,硕士)、混流式粮食烘干热力过程多变量模糊控制方法(唐晓健,硕士)、结构可调式换热器模糊控制器开发与试验研究(张春杰,硕士)、时滞热工系统规则自组织模糊控制方法(刘辉,博士)等方面联合培养了4名硕士研究生和1名博士研究生。在上述科研课题和学位论文的基础上,作者根据暖通空调、工程力学、结构工程、市政工程和交通科学与工程等专业硕士研究生学位论文工作需求,自1999年至今,开设了“模糊-神经网络控制原理与应用”课程。经过多年的讲授,作者不断补充、完善讲稿内容;为便于讲授、学生学习及相关人员的参考使用,现整理出版。

本书以模糊-神经网络控制原理与方法、计算机模糊控制技术开发、热工系统模糊-神经网络控制仿真、试验与工程应用为主线编排内容。为便于学习和应用,本书简要介绍了模糊-神经网络控制所需要的动态系统数学模型建立与求解方法和模糊控制的数学基础。具体内容如下。

第1章主要介绍模糊-神经网络控制基本概念,述评模糊控制数学本质、模糊逻辑推理方法、模糊-神经网络控制及神经网络控制模型的研究与应用进展。

第2章简要介绍微分方程、传递函数和状态空间表达式3种数学模型建立和求解方法,为模糊-神经网络控制的研究和分析奠定基础。动态系统数学模型是进行模糊-神经网络控制仿真和设计的基础,本章内容在现有的模糊控制类书籍中很少介绍,但其对非控制类专业人员学习和研究模糊-神经网络控制非常重要。

第3章主要介绍模糊集合与隶属函数、模糊关系与模糊矩阵、模糊逻辑与模糊推理,上述内容是模糊控制的数学基础。通过本章的学习,即使读者没有学过模糊数学,也能顺利地学习模糊控制的内容。

第4章针对基本模糊控制器设计问题,介绍模糊控制器的基本结构、实测量模糊化方法、模糊控制基本推理方法、模糊控制性能仿真等内容。

第5章针对自适应和自组织模糊控制器设计问题,介绍论域自调整模糊控制器、基于平面轨迹特征的自适应模糊控制器、规则在线获取自组织模糊控制器的设计方法,介绍模型参考模糊控制规则在线获取方法。

第6章主要介绍神经网络的非线性逼近能力、BP网络模型及其算法、Elman网络模型及其算法、神经网络前馈建模基本原理与方法。

第7章在分析神经网络辨识模型动态特性的基础上,介绍时滞系统神经网络多步预测方法、时滞系统神经网络多步预测模糊控制模型、时滞系统BP网络和Elman网络多步预测模糊控制仿真等内容。

第8章和第9章主要介绍数字式单片机模糊控制器设计方法,包括二进制作用模糊子集推理方法、单片机模糊控制器硬件系统设计方法、软件系统设计方法、单片机模糊控制器可靠性设计和单片机模糊控制器仿真与调试等内容。

第10章主要介绍测试室动态热工系统试验模型、测试室动态热工系统仿真模型、仿真模型特性分析、测试室动态热工系统模糊控制仿真和模糊控制试验等内容。建筑热工是典型大滞后过程,传统控制方法难以实现有效的控制,本章内容为模糊控制理论应用于试验研究的具体案例。

第11章在介绍粮食干燥过程控制方法研究与应用进展的基础上,主要介绍粮食干燥系统神经网络模型辨识方法、模糊控制仿真、粮食干燥系统计算机的模糊控制系统的开发、粮食干燥系统计算机模糊控制工程应用等内容。本章内容为模糊-神经网络应用于实际工程的具体案例。

在本书编著过程中,刘辉博士、博士研究生李爱国、硕士研究生郑忠海、任晓东、张淑彦、刘洋、陈永攀和陈鹏飞等在有关章节的文字和图形处理方面做了大量辛苦的工作,这里表示衷心的感谢!

在本书撰写的初期和过程中,始终得到爱人李颖的鼓励和帮助,得到岳父岳母在生活上的关心和照顾,这里表示衷心的感谢!

感谢欧进萍院士、郭骏教授、陆亚俊教授、高甫生教授、孙德兴教授和于达仁教授等为本人的成长所付出的辛勤劳动,以及为本人所创造的良好科研工作环境,使得本人能够持续地从事该领域的研究工作。

感谢国家自然科学基金委员会、黑龙江省博士后管理办公室、哈尔滨工业大学科研基金委员会以及为作者提供科研经费的有关单位,感谢哈尔滨工业大学出版社为本书的出版所付出的辛勤工作。

因作者水平有限,不当和疏漏在所难免,欢迎读者批评指正。

张吉礼

2004年4月于哈尔滨

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.1.1 经典控制理论	1
1.1.2 现代控制理论	1
1.1.3 人工智能控制理论	2
1.2 模糊-神经网络控制基本概念	2
1.2.1 模糊系统	2
1.2.2 模糊控制	3
1.2.3 神经网络	4
1.3 模糊控制数学本质研究述评	5
1.3.1 模糊控制系统的非线性逼近能力	5
1.3.2 模糊控制器的数学本质	6
1.3.3 模糊控制器的解析结构	6
1.4 模糊逻辑推理方法研究述评	8
1.5 模糊-神经网络控制研究与应用述评	9
1.5.1 基于基本参数调整的自适应模糊控制器	10
1.5.2 基于模型参考的自适应模糊控制器	14
1.5.3 基于智能算法的自适应模糊控制器	16
1.5.4 大滞后过程自适应模糊控制器	18
1.5.5 神经网络控制模型	20
第2章 动态系统数学模型	24
2.1 引言	24
2.2 数学模型与动态系统	24
2.2.1 数学模型	24
2.2.2 线性和非线性系统	25
2.2.3 非线性系统的线性化	26
2.3 微分方程	26
2.3.1 微分方程表达式	26
2.3.2 微分方程的解及其特性分析	27
2.4 传递函数	28
2.4.1 传递函数	28
2.4.2 传递函数的方块图表示	29
2.4.3 闭环系统的传递函数	32
2.4.4 串并联系统的传递函数	34
2.5 状态空间模型	34
2.5.1 状态向量与状态空间	34

2.5.2 状态空间表达式	35
2.5.3 状态空间模型的求解	37
2.6 数学模型的变换	38
2.6.1 微分方程变换为状态空间模型	39
2.6.2 状态空间模型变换为传递函数	42
第3章 模糊控制的数学基础	43
3.1 引言	43
3.2 模糊集合与隶属函数	43
3.2.1 经典集合与特征函数	43
3.2.2 模糊集合与隶属函数	44
3.2.3 模糊集合运算	47
3.2.4 实数域上的模糊分布	48
3.3 模糊关系与模糊矩阵	49
3.3.1 普通关系	50
3.3.2 模糊关系	51
3.3.3 模糊矩阵	51
3.4 模糊逻辑与模糊推理	52
3.4.1 模糊命题	52
3.4.2 模糊逻辑	53
3.4.3 模糊蕴涵关系	53
3.4.4 模糊关系的合成	54
3.4.5 模糊推理	56
3.4.6 模糊推理的性质	59
第4章 基本模糊控制器设计与仿真	61
4.1 引言	61
4.2 模糊控制器基本结构	61
4.2.1 模糊控制规则	62
4.2.2 隶属函数	63
4.2.3 反模糊化	64
4.3 实测量模糊化方法	64
4.3.1 单点模糊集法	65
4.3.2 就近取整法	65
4.3.3 隶属度线性插值法	66
4.3.4 单值隶属度法	66
4.3.5 模糊向量真值修正法	66
4.4 模糊控制基本推理方法	68
4.4.1 模糊关系合成法	68
4.4.2 特征展开近似推理法	69
4.4.3 真值流推理法	70
4.4.4 作用模糊子集推理法	71
4.4.5 不同推理方法推理效果分析	73

4.5 模糊控制性能仿真	75
4.5.1 模糊控制性能仿真基本方法	75
4.5.2 不同模糊推理方法的模糊控制性能仿真	76
4.5.3 模糊控制与 PID 控制性能比较	77
第 5 章 自适应模糊控制器设计与仿真	81
5.1 引言	81
5.2 论域自调整模糊控制器	81
5.2.1 论域伸缩和论域伸缩因子	82
5.2.2 论域自调整模糊控制器及其性能仿真	83
5.3 基于相平面轨迹特征的自适应模糊控制器设计方法	86
5.3.1 控制系统相平面即时特征向量	86
5.3.2 相平面即时特征向量夹角特性分析	88
5.3.3 规则后件模糊修正方法	88
5.3.4 基于相平面轨迹特征的自适应模糊控制方法	89
5.4 规则双阶段获取自组织模糊控制器设计方法	90
5.4.1 规则双阶段获取自组织模糊控制基本原理	91
5.4.2 模糊控制规则双阶段获取自组织实现方法	91
5.4.3 控制仿真与结果分析	93
5.4.4 基于模型参考的模糊控制规则在线获取方法	95
第 6 章 神经网络模型辨识基本原理	99
6.1 引言	99
6.2 神经网络基本原理	99
6.2.1 神经网络的逼近能力	99
6.2.2 神经元的基本组成要素	100
6.3 BP 网络模型	102
6.3.1 BP 网络模型	102
6.3.2 BP 网络学习算法	103
6.4 Elman 网络模型及其算法	105
6.4.1 Elman 网络的基本结构	105
6.4.2 Elman 网络的学习算法	106
6.4.3 改进的 Elman 网络学习算法	108
6.5 神经网络前馈建模基本原理与方法	109
6.5.1 神经网络前馈建模基本原理	109
6.5.2 基于神经网络的系统模型辨识方法	110
6.5.3 神经网络模型辨识算例分析	111
第 7 章 时滞系统神经网络多步预测模糊控制方法	114
7.1 引言	114
7.2 神经网络辨识模型动态特性分析	114
7.2.1 时滞系统动态响应特性分析	114
7.2.2 辨识模型的动态响应特性分析	116
7.3 时滞系统神经网络多步预测方法	118

7.3.1	多步预测模型及其算法	118
7.3.2	动态模型及 BP 网络辨识结果	119
7.3.3	多步预测仿真分析	120
7.3.4	神经网络多步预测误差放大问题	125
7.4	时滞系统神经网络多步预测模糊控制方法	125
7.4.1	多步预测模糊控制模型	126
7.4.2	多步预测模糊控制方法	127
7.5	时滞系统 BP 网络多步预测模糊控制仿真	127
7.5.1	定义动态时滞系统模型和模糊控制器	127
7.5.2	定设定值 BP 网络多步预测模糊控制仿真	128
7.5.3	变设定值 BP 网络多步预测模糊控制仿真	130
7.6	时滞系统 Elman 网络多步预测模糊控制仿真	132
7.6.1	定设定值 Elman 网络多步预测模糊控制仿真	132
7.6.2	变设定值 Elman 网络多步预测模糊控制仿真	133
7.6.3	Elman 网络多步预测模糊控制仿真结果分析	135
第 8 章	单片机模糊控制器硬件系统设计方法	136
8.1	引言	136
8.2	单片机模糊控制器系统功能及组成	136
8.2.1	单片机模糊控制器的系统功能	136
8.2.2	80C552 单片机性能	138
8.2.3	单片机模糊控制器的硬件系统组成	139
8.3	单片机模糊控制器系统扩展设计方法	140
8.3.1	80C552 型单片机的系统扩展能力	140
8.3.2	外部程序存储器扩展设计	140
8.3.3	外部数据存储器扩展设计	140
8.3.4	键盘中断及显示 I/O 口扩展设计	141
8.3.5	系统扩展时应注意的问题	142
8.4	单片机模糊控制器前向通道设计方法	143
8.4.1	信号采集和 I/V 转换设计	143
8.4.2	A/D 转换设计	143
8.5	单片机模糊控制器后向通道设计方法	144
8.5.1	后向通道	144
8.5.2	开关量控制通道设计	145
8.5.3	模拟量控制通道设计	146
8.5.4	D/A 转换	146
8.6	单片机模糊控制器人机交互功能设计方法	147
8.6.1	键盘与显示器接口芯片 8279 工作原理	147
8.6.2	键盘接口电路设计	149
8.6.3	显示器接口电路设计	149
8.7	单片机模糊控制器串行通讯功能设计	149
8.7.1	SIO ₀ 串行通讯逻辑电平转换及接口电路	149

8.7.2 单片机模糊控制器串行通讯方式及波特率的确定	150
第9章 单片机模糊控制器软件系统设计方法	152
9.1 引言	152
9.2 基于二进制数的作用模糊子集推理方法	152
9.2.1 定义变量的论域	152
9.2.2 隶属函数的确定	153
9.2.3 模糊子集编码及模糊控制规则编码	154
9.2.4 实测量的预处理及其隶属度计算	154
9.2.5 基于二进制数的 FFSI 法推理过程	155
9.2.6 模糊推理程序的编制	156
9.3 单片机模糊控制器主程序结构	157
9.3.1 系统初始化程序设计	158
9.3.2 键功能程序设计	158
9.3.3 系统内存规划	158
9.3.4 系统主程序设计有关说明	159
9.4 单片机模糊控制器数据采集与显示程序设计	159
9.4.1 数据采集子程序设计	160
9.4.2 线性标度变换子程序设计	160
9.4.3 数据显示子程序设计	161
9.5 单片机模糊控制器串行通讯程序设计	161
9.5.1 命令字节和通讯协议	161
9.5.2 串行通讯中数据交换控制方式	163
9.5.3 波特率对串行通讯的影响	163
9.6 单片机模糊控制器可靠性设计	164
9.6.1 硬件措施	164
9.6.2 软件措施	165
9.7 单片机模糊控制器仿真与调试	165
9.7.1 单片机仿真器	165
9.7.2 单片机模糊控制器硬件系统检测与调试	166
9.7.3 单片机模糊控制器软件系统调试	167
9.7.4 单片机模糊控制器联机运行调试	168
9.7.5 单片机模糊控制器脱机运行调试	169
第10章 暖通空调系统模糊控制仿真与试验	171
10.1 引言	171
10.2 暖通空调系统控制研究与应用评述	171
10.2.1 传统控制在暖通空调中的应用	171
10.2.2 模糊-神经网络控制在暖通空调中的应用	172
10.3 测试室动态热工系统试验模型	173
10.3.1 散热器热工性能试验台简介	173
10.3.2 测试室动态热工系统试验模型	174
10.4 测试室动态热工系统仿真模型	175

10.4.1 试验模型的简化	175
10.4.2 仿真模型的建立	176
10.4.3 仿真模型的求解	180
10.5 测试室动态热工系统仿真模型特性分析	181
10.5.1 不同调节方式下测试室动态热工系统模型特性分析	181
10.5.2 仿真模型动态响应特性分析	182
10.6 测试室动态热工系统模糊控制仿真	183
10.6.1 模糊控制仿真原理	183
10.6.2 变水量调节时模糊控制仿真	184
10.6.3 变风量调节时模糊控制仿真	185
10.7 测试室动态热工系统测控仪表的标定	186
10.7.1 铂电阻温度传感器的标定	187
10.7.2 转子流量计的标定	187
10.7.2 电动调节阀工作流量特性的标定	188
10.8 测试室室内温度动态响应特性试验	189
10.8.1 调节阀开度的变化对室内温度的影响试验	189
10.8.2 送风参数的变化对室内温度的影响试验	190
10.9 测试室动态热工系统模糊控制试验	191
10.9.1 基本 FFSI 的模糊控制试验	191
10.9.2 论域自调整 FFSI 模糊控制试验	193
10.9.3 PID 控制试验	193
10.9.4 试验结果与影响因素分析	194
第 11 章 粮食干燥过程模糊-神经网络控制仿真与工程应用	196
11.1 引言	196
11.2 粮食干燥过程自动控制研究与应用述评	196
11.2.1 传统控制在粮食干燥过程中的应用	197
11.2.2 模糊-神经网络控制在粮食干燥过程中的应用	198
11.3 粮食干燥过程模糊-神经网络控制仿真	199
11.3.1 粮食干燥塔信号系统分析与简化	199
11.3.2 粮食干燥热力过程神经网络模型辨识	202
11.3.3 粮食干燥过程模糊-神经网络控制仿真	202
11.4 粮食干燥过程计算机模糊控制系统开发	204
11.4.1 计算机模糊控制系统原理	204
11.4.2 计算机测控系统构成	204
11.4.3 计算机模糊控制软件系统	206
11.5 粮食干燥过程模糊控制工程应用	208
11.5.1 传感器测量范围现场校核	208
11.5.2 变频器输入/输出频率信号现场校核	209
11.5.3 模糊控制工程应用与分析	210
参考文献	213

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

目前,自动控制已经在航空航天、机器人、工业生产、农产品深加工、土木工程、能源生产和利用等领域得到了广泛的应用,并发挥着重要的作用。对具有多输入多输出(Multi-input and Multi-output, MIMO)、非线性、大滞后、参数强耦合特性的现代设备和被控过程的控制要求,不断地将自动控制理论和技术由经典控制向现代控制、向人工智能控制方向推进和发展(任和生 1992; Katsuhiko Ogata 2000; 孙增圻, 张再兴, 邓志东 1997; 汪培庄, 李洪兴 1996)。

1.1.1 经典控制理论

18 世纪, Watt 设计的蒸汽机速度控制离心调节器, 开辟了自动控制用于实际的先河。1922 年, Minorsky 研制出船舶操纵自动控制系统, 并利用微分方程研究了该系统的稳定性; 1932 年, Nyquist 根据稳态正弦输入的开环响应, 研究了闭环系统的稳定性。20 世纪 40 年代, 频率响应法已经成为工程技术人员设计线性闭环控制系统的重要方法; 到 20 世纪 50 年代初, Evans 完善了根轨迹法。至此, 以频率响应法和根轨迹法为核心的经典控制理论逐步成熟。

经典控制理论所研究的主要对象是具有单输入单输出(Single Input and Single Output, SISO)的单变量线性系统, 数学模型主要采用传递函数; 系统的动态性能主要决定于传递函数所对应的零点和极点的分布特性; 系统分析和综合主要采用频率法, 属于频域分析的范畴; 常用的数学工具为微分方程(连续系统)、差分方程(离散系统)、傅里叶变换、拉普拉斯变换和 z 变换等。

1.1.2 现代控制理论

20 世纪 60 年代, MIMO 控制问题的出现和计算机在控制领域的应用给利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论的诞生和发展提供了广阔的空间。现代控制理论不仅适应了现代设备日益增加的复杂性的控制要求, 而且满足了军事、空间技术和工业过程领域对精度和成本等方面的严格要求。从 1960 ~ 1980 年的 20 年间, 面向确定性系统和随机系统的最佳控制、面向复杂系统的自适应和自学习控制、面向庞大工业过程的大系统理论都得到了迅速的发展; 1980 年以后, 现代控制理论的研究主要集中在鲁棒控制、 H_∞ 控制及相关问题上。

现代控制所研究的对象主要是 MIMO 的多变量系统, 可以是线性的、也可以是非线性的, 可以是定常的、也可以是时变的。系统的数学模型主要采用状态方程, 系统的动态特性主要决定于状态方程的解, 系统的分析和综合主要采用状态空间分析法, 属于时域分析的范畴。现代控制理论的数学工具极为广泛, 但就其数学基础而言, 主要是线性代数、矩阵分析、古典变分、概率论和随机过程理论等。

1.1.3 人工智能控制理论

人工智能控制理论最早可追溯到 20 世纪 40 年代。1943 年, McCulloch 和 Pitts 开始研究神经元模型的连接结构问题, 1944 年, Hebb 提出了神经元连接强度的修改规则, 这些成果为神经网络技术的发展及其在控制领域中的应用奠定了理论基础。1965 年美国加州大学 L. A. Zadeh 教授创立了模糊集合论, 成为模糊控制的数学基础。1973 年, L. A. Zadeh 教授提出了利用模糊语言进行系统描述的方法, 为模糊控制的实施提供了有效的手段; 1974 年, 英国工程师 E. H. Mamdani 首次实现了蒸汽发动机的模糊控制试验研究, 标志着模糊控制的诞生。1975 年, 美国密执安大学的 Holland 和 Kenneth 提出了遗传算法, 并将其用于优化问题的研究。20 世纪 90 年代, 模糊控制与神经网络结合, 不仅为模糊控制解决了自学习和 MIMO 等控制问题, 而且促进了模糊神经网络的研究和发展, 为神经网络的应用提供了广阔的空间; 随后, 模糊控制又与遗传算法结合, 既解决了模糊控制隶属函数优化和模糊控制模型进化等问题, 又促进了基于模糊逻辑的自适应遗传算法的研究和发展。模糊控制、神经网络和遗传算法三者相互结合, 互为补充, 都得到了充分的发展, 并成为人工智能控制理论和技术的核心构成。

1.2 模糊-神经网络控制基本概念

1.2.1 模糊系统

在客观世界中, 系统可分为确定性系统和模糊性系统, 前者可用精确数学模型加以描述, 而后者则不能。对确定性系统, 若其输入具有模糊性, 则输出也将明显地具有模糊性; 对模糊性系统, 即使输入是确定性的, 其输出也同样具有模糊性, 于是便有图 1.1 所示的系统输入输出类型。

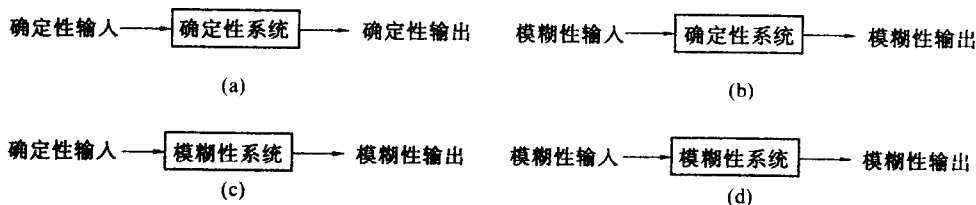


图 1.1 系统及系统的输入输出类型

对于模糊控制器而言, 类似地有图 1.2 所示的结构类型, 其中图 1.2(b) 的模糊性输出可通过反模糊化转换成图 1.2(a) 的形式, 这样, 就有两种类型的模糊控制器, 即具有确定性输入输出的模糊控制器和具有模糊性输入输出的模糊控制器。前者是针对复杂的系统, 将其确定性的输入进行模糊化处理, 最后得到确定性结果; 后者就是针对客观世界中的模糊性输入, 采用模糊处理方法, 得到模糊性输出结果, 其过程没有模糊性和确定性的转换。本书主要针对具有确定性输入输出的模糊控制器进行讨论。

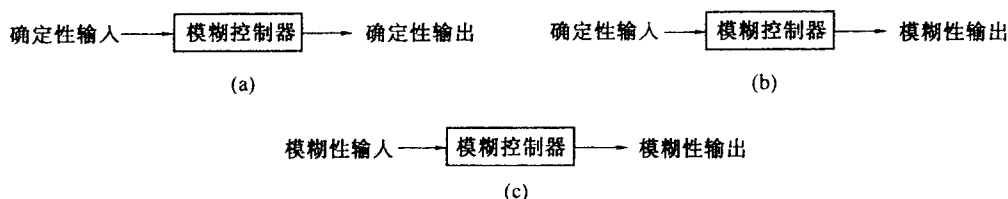


图 1.2 模糊控制器输入输出类型

1.2.2 模糊控制

模糊控制不需要被控对象的精确数学模型,而是基于专家的操作者的经验建立模糊控制模型,通过模糊逻辑推理完成控制决策过程,最后实现对被控对象的调节控制。模糊控制的过程可通过图 1.3 的例子来进行描述。

图 1.3 为某一空调房间,其中,1 为冷气机,2 为温度传感器,3 为温度指示器,4 为空调房间。管理人员通过温度指示器的指针位置,即可判断室内温度的高低,根据最近一段时间内室温的变化,即可判断室内温度未来的变化趋势。然后,根据其掌握的对冷气机调节控制经验,即可做出对冷气机的调节控制策略,增大或减小冷气机的冷量,使室内温度保持在设定值范围内。

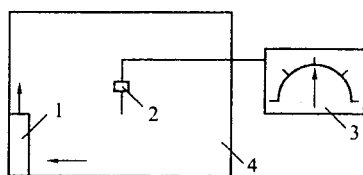


图 1.3 空调房间测温调控系统

在上述过程中,管理人员观察温度指示器的过程,即为检测过程;根据经验判断如何调节冷气机的过程,即为模糊推理和模糊决策过程(在该过程中,管理人员并没有对室内温度变化与冷气调节量之间的关系进行精确计算,而是根据经验推断其调节量);调节冷气机的过程即为实施控制动作的过程。上述过程即为室内温度模糊控制的全部过程。

根据上述过程,便有图 1.4 所示的基本模糊控制系统,其中 T 为采样周期; r 为设定值; y 为被控过程的输出。图 1.5 为模糊控制器的基本结构模型,其中 e^* 、 ec^* 和 Δu^* 分别为偏差、偏差变化和控制增量的精确量; A^* 、 B^* 和 C^* 分别为 e^* 、 ec^* 和 Δu^* 的模糊量; q_e 、 q_{ec} 和 q_u 分别为 e^* 、 ec^* 和 Δu^* 的量化因子和比例因子。

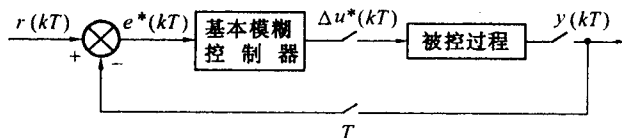


图 1.4 基本模糊控制系统

对图 1.3 所示的房间空调测控系统,管理人员可以总结出以下室内温度控制调节规则:

若“室内温度高”,则“开大冷气”;

若“室内温度低”,则“关小冷气”;

若“室内温度适中”,则“不需要调节冷量”。

上述调节经验即为上述模糊控制过程的模糊控制规则。模糊控制规则是模糊控制的数学模型,模糊控制规则的优劣直接关系到模糊控制性能的好坏。

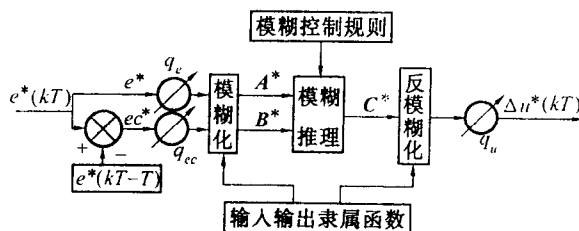


图 1.5 基本模糊控制器

通过上述例子,可以看出模糊控制具有以下优点:

- 1) 模糊控制不依赖被控对象的精确数学模型,仅依赖专家知识和操作者的经验;
- 2) 模糊控制具有较强的知识表达能力,可以将专家知识和操作者经验以规则的形式加以描述和提炼;
- 3) 模糊控制具有较强的推理功能,经过模糊逻辑推理可以实现类似于人的决策过程。

1.2.3 神经网络

人工神经网络是利用物理器件来模拟生物神经网络的某些结构和功能。图 1.6 为生物神经元模型,其中,1 为细胞核,2 为树突,3 为轴突,4 为轴突末梢。树突完成信息接受,轴突实现信息传递,即将信息由轴突起点传到轴突末梢,再与其它神经元相连,构成信息传递网络。典型的人工神经元模型如图 1.7 所示,不同的神经元即构成了人工神经网络,如图 1.8 所示。

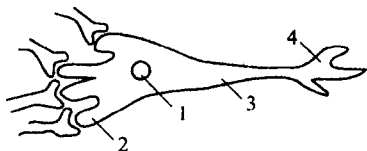


图 1.6 生物神经元模型

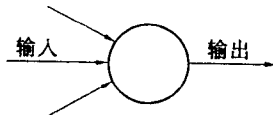


图 1.7 人工神经元模型

人工神经网络是一个并行和分布式的信息处理网络结构,由许多个神经元组成,每个神经元有一个单一的输出,可以连接到很多其它神经元,其输入有多个连接通路,每个连接通路对应一个连接权系数。人工神经网络对生物神经网络的模拟包括两个方面,一是在结构和实现机理上进行模拟,二是从功能上进行模拟,即尽可能使人工神经网络具有生物神经网络的某些功能特性,如学习、识别和控制等。在控制领域主要利用人工神经网络的第二类模拟功能。

神经网络具有以下特性:

- 1) 神经网络具有非线性逼近能力,由于神经网络具有任意逼近非线性映射的能力,因此,神经网络在用于非线性系统的过程控制时,具有更大的发展前途;

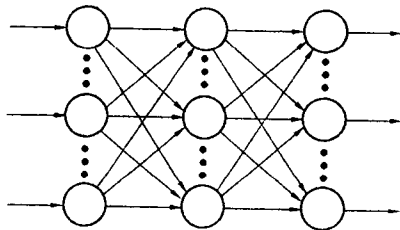


图 1.8 人工神经网络模型

2) 神经网络具有并行分布处理能力,神经网络具有高效并行结构,可以对信息进行高速并行处理;

3) 神经网络具有学习和自适应功能,能够根据系统过去的记录,找出输入输出之间的内在联系,从而求得问题的答案;这一处理过程不依靠对问题的先验知识和规则,因此,神经网络具有较好的自适应性;

4) 神经网络具有数据融合能力,可以同时对待性数据和定量数据进行操作;

5) 神经网络具有多输入和多输出网络结构,可以处理多变量问题;

6) 神经网络的并行结构便于硬件实现。

在上述诸多特性中,对于控制系统,其中最有意义的是神经网络的非线性逼近能力。

1.3 模糊控制数学本质研究述评

1.3.1 模糊控制系统的非线性逼近能力

模糊控制系统的非线性逼近能力主要表现在它能够以任意精度逼近任一非线性控制曲线,这是模糊控制得以实现的理论基础。但是,这一问题是在模糊控制已经取得极大成功之后才引起人们重视的,这时已是 20 世纪 90 年代。

1992 年, Buckley 首先针对一类三维模糊控制系统,利用 Stone-Weierstrass 定理证明了该类系统的逼近特性,指出该类模糊控制器是通用模糊控制器(Buckley 1992)。随后, Wang 利用 Stone-Weierstrass 定理证明了一类 Mamdani 模糊系统能够以任意精度逼近任意闭子集上的实连续函数,该模糊系统采用 Gauss 型隶属函数和“积”运算模糊推理,利用重心法反模糊化,输出为单点模糊集(Wang 1992)。同年, Kosko 也证明了一类 Mamdani 模糊系统能够以任意精度逼近紧致集上的任意实连续函数(Kosko 1992)。上述研究成果初步证明了 Mamdani 模糊系统的通用逼近性,但这些成果都是在对 Mamdani 模糊系统进行不同程度限制的基础上完成的,如规则后件为单点模糊集等,同时对模糊系统的非线性逼近能力的充分性研究不够。为此, Zeng 针对具有梯形隶属函数的 Mamdani 模糊系统,首先研究了 SISO 和 MIMO 模糊系统在紧致集上一致逼近任意实连续函数的特性(Zeng, Singh 1994, 1995),然后给出其非线性逼近的充分条件(Zeng, Singh 1996)。Ying 相继给出了一般模糊系统作为万能逼近器的充分条件和一些典型模糊系统作为通用逼近器的充分条件(Ying 1994a, 1997)。近几年,国内学者在此方面的研究成果也相继出现。1998 年,李峰和钱清泉利用 Stone-Weierstrass 定理证明了基本模糊系统能够以任意精度逼近任意实连续函数(李峰,钱清泉 1998),该模糊系统为通用的 MISO 模糊系统,具有三角形隶属函数、“max-min”算子组合和重心法反模糊化,且规则后件不再是单点模糊集。2000 年,曾珂等证明了特定 Mamdani 模糊系统是通用逼近器(曾珂,徐文立,张乃尧 2000),该系统采用模糊单点作为规则后件,可有任意输入变量和任意形状隶属函数的模糊子集,利用重心法反模糊化;同时,作者给出了特定 Mamdani 模糊系统一致逼近紧致集上任意实连续函数的充分条件。2001 年,曾珂等进一步证明了典型 MISO Takagi-Sugeno 模糊系统也是通用逼近器(曾珂,张乃尧,徐文立 2001)。模糊系统非线性逼近能力的研究,从数学上为模糊控制的实际应用奠定了理论基础。

1.3.2 模糊控制器的数学本质

到 20 世纪 80 年代末,模糊控制在诸多领域都取得了巨大的成功,但是,模糊控制器的设计仍然停留在根据被控对象黑箱式的输入输出来建立控制模型的状态,无法进行系统化的设计和分析;同时,很难利用经典控制论和现代控制论中广泛采用的方法来分析模糊控制系统的稳定性和鲁棒性。1994 年,美国加州大学的 Elkan 博士提出“模糊逻辑是似是而非的成功”(Elkan 1994),由此引起一场关于“模糊控制本质”的全球大讨论(Berenji 1994;李洪兴 1995;吴望名 1997),于是,“模糊控制本质”问题就成为必须且急需回答的问题。从此,人们展开了模糊控制器数学本质及其解析结构的研究,并取得了可喜的成果。

模糊控制器到底是什么?该问题早在 1978 年,Kichert 和 Mamdani 就分析了模糊控制器和多值继电器的关系,指出一类简单的模糊控制器可看做多值继电器(Kichert, Mamdani 1978),从而初步为人们利用经典控制论中描述函数的方法分析和设计模糊控制系统提供了理论依据。此后,直到 20 世纪 80 年代末,人们才真正重视对模糊控制器数学本质的研究。Siler, Ying 和 Buckley 首先探索了具有线性规则的模糊控制器数学本质(Siler, Ying 1989; Buckley and Ying 1989),接着他们证明了具有两个线性输入模糊子集、四条规则、Zadeh“AND-OR”算子组合及重心法反模糊化的简单 Mamdani 模糊控制器是非线性 PI 控制器(Ying, Siler, Buckley 1990),并将结果推广到其它推理方法的各类 Mamdani 模糊控制器,指出基于不同推理方法的简单模糊控制器是不同的具有可变增益的非线性 PI 控制器(Ying 1993)。

在国内,针对 Elkan 提出的“模糊逻辑是似是而非的成功”,李洪兴首先分析了具有三角形隶属函数、真值流推理和重心法反模糊化的模糊控制器的数学本质(李洪兴 1995),指出模糊控制器就是插值器,SISO 模糊控制器是分段线性插值器,双输入单输出(Double Input and Single Input, DISO)模糊控制器是乘积型分片线性插值器,模糊控制规则中的隶属函数即为插值的基函数。接着,李洪兴又证明了具有 Mamdani 型控制规则、采用“max-min”蕴涵关系和合成算法、采用单点模糊化和重心法反模糊化的常用模糊推理算法均可视为某种插值器(李洪兴 1998),并指出模糊控制方法相当于数学物理中的有限元法,是经典控制论或现代控制论中的一种直接方法或数值方法。

上述研究不仅回答了“模糊控制本质”问题,而且推动了模糊控制理论的发展,并为模糊控制器的解析结构和模糊控制器设计分析奠定了理论基础。

1.3.3 模糊控制器的解析结构

研究模糊控制器的解析结构就是寻找式(1.1)的解析表达式。严格地讲,模糊控制器的解析结构与其数学本质没有区别,只不过由于模糊控制器的结构模型与 PID 控制器具有很大的相似性,因此,研究模糊控制器的解析结构就是主要分析模糊控制器与 PID 控制器的关系,在此基础上,再研究不同算法下模糊控制器的解析结构特征。

$$\Delta u^* = f(e^*, ec^*) \quad (1.1)$$

1985 年,徐承伟就指出在 Δu^* 和被控对象之间存在着积分作用(徐承伟 1985);1987 年,胡家耀在此基础上提出了 Fuzzy-PI 调节器(胡家耀,吴植翅,宋寿山 1987),并用于退火炉燃烧过程控制中(胡家耀,吴植翅,宋寿山 1989)。Tang 通过对常规模糊控制器机理的分析,最早指出了一般模糊控制器和 PI 控制器的相似性(Tang 1987);Ying 最先提出模糊 PID 控制