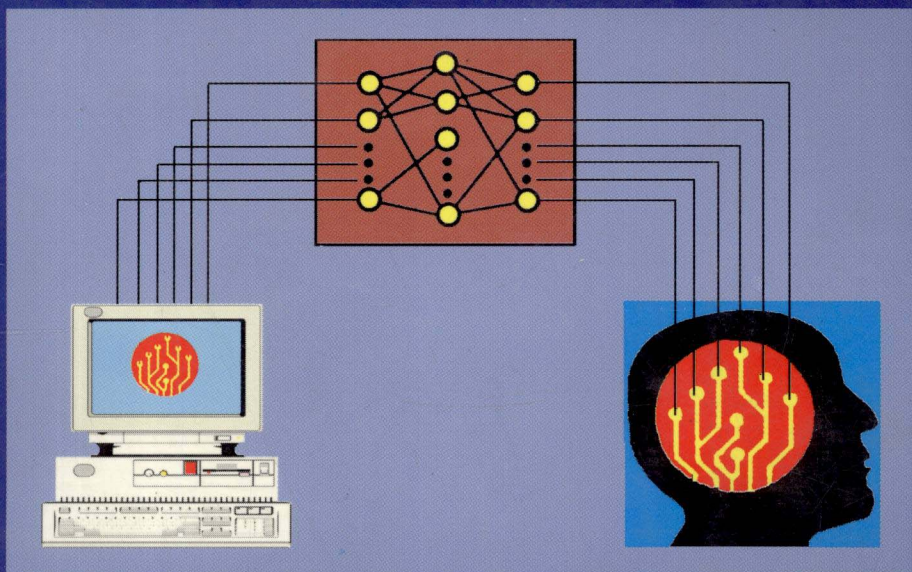


模糊控制·神经控制 和智能控制论

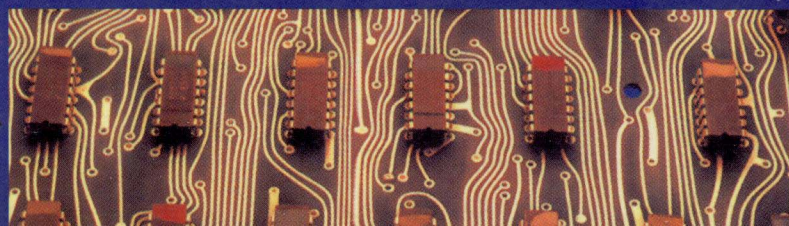
李士勇 编著



FUZZY CONTROL
NEUROCONTROL
AND

INTELLIGENT
CONTROL SYSTEMS

哈尔滨工业大学出版社



Fuzzy Control·Neurocontrol and Intelligent Cybernetics

Li Shiyong

模糊控制·神经控制和智能控制论

李士勇 编著

国家自然科学基金资助项目



哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 提 要

本书面向 21 世纪智能控制学科前沿,以微机模拟智能实现智能控制为主线,从智能控制论的高度全面系统深入地介绍了模糊控制、神经控制和智能控制的理论、方法、系统设计及其实现技术。突出反映了该领域作者近期的研究成果,并综合国内外的最新研究成果及其大量应用实例。

全书共四篇。一、智能控制的新学科基础:思维科学,智能模拟,模糊逻辑,粗糙集合,神经网络,遗传算法,人工生命,混沌理论及可拓集合;二、智能控制的知识工程和信息科学基础;三、智能控制理论与系统设计:多级递阶智能控制,专家控制,模糊控制,神经控制,仿人智能控制,基于模式识别的智能控制,多模变结构智能控制,学习控制,混沌控制及可拓控制;四、模糊控制、神经控制和智能控制在工业过程、运载工具、机器人及家电产品中 20 个内容翔实、新颖的应用实例。

本书涉及多个学科前沿,取材广泛,内容新颖,构思巧妙,结构严谨,深入浅出,启发思维,理论联系实际。可满足多种学科和不同层次教学和科研人员的需求,可作为高等学校自动控制、自动化、电子工程、机电工程、航天工程、机器人、计算机应用等相关专业高年级本科生、硕士生、博士生的教材,对于博士后人员、出国留学人员及广大科技人员也具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

模糊控制·神经控制和智能控制论/李士勇编著.

2 版.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.9

(2004.1 重印)

ISBN 7-5603-1179-2

I. 模… II. 李… III. ①模糊控制②智能控制

IV. ①TP13②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 089278 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 哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开 本 787×1092 1/16 印张 42 字数 1 019 千字

版 次 1998 年 9 月第 2 版 2004 年 1 月第 4 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1179-2/TP·88

印 数 12 001~15 000

定 价 42.00 元

本书荣获 1999 年“全国优秀科技图书奖”
暨“科技进步奖(科技著作)”三等奖

本书跻身于中国论文被引频次最高的
前 50 部专著与译著排行榜

上述排行榜是根据中国科学院文献情报中心出版的《中国科学计量指标:论文与引文统计》(2000 年卷、2001 年卷),对涉及数学、物理学、化学、地理科学、生物学、农林科学、医药卫生、工程技术、环境科学、管理科学十大领域中英文重要核心期刊 633 种 84 324 篇论文(1999 年度)及 644 种 96 123 篇论文(2000 年度)统计得出的。

控制论学家应该继续走向新的领域,应该把他的大部分注意力转到近十年的发展中新兴的思想上去。

——诺伯特·维纳(Norbert. Wiener)

前 言

从1948年维纳奠基性著作《控制论》发表至今半个世纪以来,伴随着科学技术的迅速发展,控制理论从经典控制理论发展到现代控制理论,从线性系统理论发展到非线性系统理论,然而这些基于精确模型的传统控制理论,面对现代日益复杂的被控对象的高度非线性、时变性及不确定性等控制问题,受到了严峻的挑战。

维纳在创立控制论的初期,他参加了火炮自动控制系统的研究工作,通过将火炮自动瞄准飞机与狩猎行为作类比,他发现了反馈的重要概念。维纳等人认为:目的性行为可以用反馈来代替,从而突破了生命体与非生命体——机器控制的界限,把目的性行为这个生物所特有的概念赋予机器,这就为创立控制论奠定了重要基础。

国际控制界享有盛誉的瑞典奥斯特隆姆(K. J. Åström)教授指出:控制论是维纳在研究动物(包括人)和机器内部的通讯与控制时创立的,当时提出了许多新概念,目前,这一领域似乎又回到了发现新概念的时代;美国乔治(F. H. George)教授在《控制论基础》一书中指出:控制论的基本问题之一就是模拟和综合人类智能问题,这是控制论的焦点。

近十多年来,人工智能技术、微计算机技术、模糊逻辑、神经网络、进化算法、信息科学及非线性科学等新兴学科迅猛发展,促使广大科学工作者又在维纳控制论的思想指导下,在一个新的高度上进行控制理论、人工智能、计算机科学、神经生理学、信息科学等多种学科的密切合作,以期更有效地模拟和综合人类的智能,开创智能控制论的新篇章。

作者十余年来,一直从事模糊控制、神经控制和智能控制理论与应用方面的研究和教学工作,尤其是在日本研究期间的研究成果及近年来的研究方向受到了国内外同行专家、学者的关注,并得到了国家自然科学基金资助。本书及时反映了在这一领域作者近期的研究成果,并综合国内外的最新研究成果,以满足广大科研和教学人员对这一新兴学科领域知识的迫切需求。

本书根据维纳控制论的基本思想,提出了信息、反馈和控制是控制论的三要素的新观点,并提出了智能信息、智能反馈和智能决策是智能控制论三要素的新概念,旨在有利于将维纳控制论拓宽为面向21世纪的智能控制论。

本书把智能控制与思维科学联系起来,以微机模拟智能实现智能控制的基本思想作为贯穿全书的主线,尤其突出形象思维模拟在实现智能控制中的特殊地位和不可替代的重要作用,这样有助于显著提高设计智能控制系统的智能水平,使智能控制对于缺乏精确模型的复杂被控对象不至于同传统的模型论如出一辙而陷于困境。

本书将对复杂非线性、不确定性系统能进行卓有成效控制的智能控制系统视为一类复杂开放系统,并以耗散结构论、协同学、突变论和混沌学等非线性科学作为智能控制系统研究的理论基础,这样有助于深刻认识由简单控制规则的组合可以产生复杂智能控制行为的本质,又有利于深刻理解智能控制可以对诸如二级倒立摆之类非线性绝对不稳定系统稳定

有效控制的实质。

应该着重指出,研究模糊控制的目的是不是要把控制理论搞得模模糊糊,而是要通过引入模糊逻辑语言变量及其它们之间构成的模糊关系进行模糊推理,从而,使微机控制进入那些基于精确模型无法控制的禁区,以便获得基于精确模型控制所无法达到的精确的控制效果;研究神经控制的目的是不是要把控制理论变得神乎其神,而是要利用人工神经网络具有信息分布存贮和并行处理的特点及自组织、自学习的功能,以及具有极强的非线性函数逼近能力,使它对难以精确描述的复杂非线性对象进行建模,或充当控制器,或优化计算,或进行推理,或故障诊断等,从而实现对复杂非线性对象进行卓有成效的控制;研究智能控制的目的是不是要把控制理论倒退回只凭人的经验控制的境地,而是要进一步深刻认识、研究和利用专家的经验、知识、直觉推理等,在对难以建模的复杂对象的控制决策中所具有的重要作用,从而更好地利用微机模拟专家的智能决策行为,根据复杂被控动态过程的定性信息和定量信息,进行定性定量综合集成推理决策,以实现对复杂非线性不确定性系统的有效控制。

全书分四篇共 24 章,主要包括三部分内容:第一、二篇(1~8 章)是智能控制的新学科基础,包括思维科学,智能模拟,模糊逻辑,粗糙集合,神经网络,遗传算法,人工生命,耗散结构论,协同学,突变论及混沌学,可拓逻辑,知识工程及信息科学;第三篇(9~20 章)是模糊控制、神经控制和智能控制理论、系统设计及实现技术,包括多级递阶智能控制,基于知识的专家控制,模糊控制,神经控制,基于规则的仿人智能控制,基于模式识别的智能控制,多模变结构智能控制,学习控制,混沌控制,可拓控制以及智能控制系统的稳定性分析;第四篇(21~24 章)介绍了模糊控制、神经控制及智能控制的工程应用,包括从冶炼、轧钢及电力等工业过程控制,到高技术机翼、列车自动驾驶等运载工具控制;从工业机器人控制,到家电产品洗衣机、摄像机等 20 个应用实例。

本书视野开阔,立意新颖,内容广泛,层次分明,体系完整。它不仅将模糊控制、神经控制和其它多种智能控制方式在智能控制论的框架下统一起来,形成较为完整的体系,而且还将智能控制和传统控制有机结合,弥补了它们之间的巨大差距。同时,将智能控制的基础、理论与应用有机地联系在一起,在内容讲述上既注意深入浅出,理论联系实际,又注重辩证法,启发创新思维。各部分内容既相对独立,又有有机结合,可以满足多种学科不同层次广大教学、科研人员的需要。

本书绝大部分内容由李士勇教授编写,其中第 6 章与蔡文教授合写,第 7 章与李巍合写,第 16 章与柏建国教授合写,第 17 章与夏承光教授合写,第 19 章与王行愚教授合写。李研、李巍、沈理、管原研次等参加了第 12、13 章的编写或提供素材。此外,本书部分内容引用了国内外专家、学者的最新研究成果,在此向他们致以诚挚的谢意。

作者在编著本书过程中得到了黑龙江省新闻出版局、哈尔滨工业大学出版社有关领导的大力支持,在此也向他们表示感谢。

本书内容涉及多种学科前沿,知识面广且内容新,再加上作者学识有限,因此,难免存在不妥之处,诚请广大同行、读者及时给予指正。

作者 李士勇

1998 年 6 月于哈尔滨工业大学

目 录

序篇 智能控制论

0.1 控制理论的产生及其发展	1	0.4 智能控制论	6
0.2 智能控制的产生及其发展	2	0.5 智能控制的基础及学科范畴	6
0.3 传统控制和智能控制	4	0.6 本书学习指南	8

第一篇 智能控制的新学科基础

第 1 章 思维科学与智能模拟

1.1 信息社会与思维科学	10	1.3.2 智能模拟的哲学基础	18
1.1.1 思维与思维科学	10	1.3.3 智能模拟的基本途径	18
1.1.2 思维的类型	11	1.4 智能模拟中的科学方法论	20
1.2 思维的神经基础	16	1.4.1 结构主义方法	20
1.2.1 思维与智能	16	1.4.2 行为主义方法	21
1.2.2 思维的神经基础	16	1.4.3 演绎主义方法	21
1.3 智能模拟	17	1.4.4 信息科学方法	21
1.3.1 智能模拟的科学基础	17	1.5 智能控制与智能模拟	22

第 2 章 模糊逻辑与粗糙集合

2.1 模糊数学的创立及发展	23	2.6 模糊矩阵与模糊关系	41
2.2 经典集合及其运算	25	2.6.1 模糊矩阵	41
2.2.1 集合的概念及定义	25	2.6.2 模糊关系	45
2.2.2 集合的直积	26	2.6.3 模糊关系的合成	48
2.2.3 映射与关系	27	2.7 模糊向量	50
2.2.4 集合的运算性质	27	2.7.1 模糊向量	50
2.2.5 集合的表示及特征函数	28	2.7.2 模糊向量的笛卡尔乘积	50
2.3 模糊集合及其运算	29	2.7.3 模糊向量的内积与外积	51
2.3.1 模糊子集的定义及表示	29	2.8 模糊逻辑与模糊推理	52
2.3.2 模糊子集的运算	31	2.8.1 模糊逻辑	52
2.4 模糊集合与经典集合的联系	33	2.8.2 模糊语言	60
2.4.1 截集	33	2.8.3 模糊推理	66
2.4.2 分解定理	34	2.9 粗糙集合	72
2.4.3 扩张原则	35	2.9.1 粗糙集合的基本概念	72
2.5 隶属函数	35	2.9.2 粗糙度与粗糙隶属函数	73
2.5.1 隶属函数的确定方法	36	2.9.3 粗糙集合的特点及其应用	73
2.5.2 常用的隶属函数	39		

第3章 神经网络与计算智能

3.1 神经网络研究的概述	74	3.5.1 Hopfield 网络模型	101
3.1.1 神经网络研究简史	74	3.5.2 Hopfield 网络的联想记忆功能	102
3.1.2 神经网络的主要特点	76	3.5.3 Hopfield 网络的优化计算功能	103
3.2 脑与神经系统	76	3.6 小脑模型关联控制器——CMAC 网络	104
3.2.1 脑的宏观结构	76	3.6.1 CMAC 网络的基本思想	104
3.2.2 神经细胞的结构与功能	77	3.6.2 CMAC 网络的工作原理	105
3.2.3 神经元模型	79	3.6.3 小脑模型运算机	106
3.3 神经网络的结构和学习规则	85	3.7 大脑自组织特征映射模型	107
3.3.1 神经网络的联接形式	85	——Kohonen 网络	107
3.3.2 神经网络的学习和训练	87	3.7.1 Kohonen 网络原理	107
3.3.3 神经网络的学习规则	88	3.7.2 Kohonen 网络学习规则及算法	108
3.4 典型前向网络——BP 网络	91	3.8 基于概率式学习的 Boltzmann 机模型	109
3.4.1 感知器	91	3.8.1 模拟退火	109
3.4.2 前向多层网络的 BP 学习算法	91	3.8.2 Boltzmann 机模型	109
3.4.3 BP 算法的改进算法	94	3.8.3 Boltzmann 机的训练和学习规则	110
3.4.4 前向网络递推预报误差算法(RPE)	99	3.9 其它类型的神经网络	110
3.5 典型反馈网络——Hopfield 网络	101		

第4章 遗传算法与人工生命

4.1 遗传学和生物进化论	111	4.4.3 遗传算法中的方法论	121
4.1.1 遗传学的产生与发展	111	4.5 遗传算法和模糊逻辑、神经网络的融合	122
4.1.2 生物进化论	112	4.5.1 遗传算法在模糊推理中的应用	122
4.2 进化计算和遗传算法	113	4.5.2 遗传算法和神经网络的融合	123
4.2.1 进化计算	113	4.6 遗传算法的特点及研究方向	124
4.2.2 遗传算法	114	4.6.1 遗传算法的主要特点	124
4.3 遗传算法的结构和基本原理	115	4.6.2 遗传算法的研究课题	125
4.3.1 遗传算法的结构	115	4.7 遗传编程	126
4.3.2 选择、交叉和突然变异的方法	116	4.8 人工生命	126
4.3.3 遗传算法的实现步骤	118	4.8.1 人工生命与人工智能	127
4.4 遗传算法的理论与方法论	119	4.8.2 人工生命的研究领域	127
4.4.1 模式定理(Schema theorem)	119		
4.4.2 虚拟边界定理	120		

第5章 复杂开放系统的自组织理论

5.1 耗散结构论	129	5.2.2 突变论	135
5.1.1 非平衡热力学系统的基本概念	129	5.3 混沌学	139
5.1.2 自组织现象	131	5.3.1 混沌的基本概念	139
5.1.3 稳定性与分叉理论	132	5.3.2 开放系统的混沌动力学	141
5.1.4 耗散结构形成的条件	133	5.3.3 维数与李雅普诺夫指数	143
5.2 协同学与突变论	134	5.3.4 混沌的潜在应用领域	144
5.2.1 协同学	134	5.4 智能控制与非线性科学	146

第 6 章 物元分析与可拓集合

6.1 物元分析学科的创立与发展	147	6.4.3 物元可拓集	159
6.2 物元及其可拓性	148	6.4.4 可拓关系及其运算	160
6.2.1 物元的概念及其表示	148	6.5 关联函数	161
6.2.2 物元的可拓性	149	6.5.1 实域中的距、模及位值	161
6.3 物元变换	152	6.5.2 简单关联函数与初等关联函数	164
6.3.1 物元要素的基本变换	153	6.5.3 质度函数	167
6.3.2 物元的基本变换及其运算	153	6.6 物元方程与关联不等式	167
6.3.3 物元基本变换的性质	154	6.6.1 物元方程和蕴含方程	167
6.4 可拓集合	156	6.6.2 转换桥的基本概念	168
6.4.1 可拓集合的概念	156	6.6.3 问题的物元模型	169
6.4.2 可拓集合的关系和运算	158	6.6.4 关联不等式和不相容问题求解	170

第二篇 智能控制的知识工程和信息科学基础

第 7 章 智能控制的知识工程基础

7.1 专家系统基础	174	7.5.1 基于规则的推理	201
7.1.1 什么是专家系统	174	7.5.2 模糊逻辑推理	202
7.1.2 建立专家系统的目的和意义	175	7.5.3 基于神经网络的推理	204
7.2 专家系统的结构	175	7.5.4 定性推理	205
7.2.1 一般专家系统的结构	175	7.5.5 基于事例的推理	206
7.2.2 理想化的专家系统的结构	178	7.5.6 基于规则、事例和模型的综合推理	208
7.3 知识的表示	179	7.6 知识的获取	209
7.3.1 知识表示的重要性	179	7.6.1 知识获取的途径	209
7.3.2 谓词逻辑表示法	180	7.6.2 知识获取的步骤	210
7.3.3 时序逻辑表示法	182	7.7 产生式系统	212
7.3.4 语义网络表示法	182	7.7.1 产生式系统的结构及特点	212
7.3.5 产生式表示法	184	7.7.2 产生式系统的分类	213
7.3.6 框架表示法	184	7.7.3 产生式系统的应用	213
7.3.7 过程表示法	185	7.8 智能学习系统	214
7.3.8 定性模型知识表示法	185	7.8.1 学习系统	214
7.3.9 神经网络产生规则表示法	189	7.8.2 机器学习	215
7.3.10 Petri 网的知识表示法	190	7.8.3 智能学习系统	216
7.3.11 知识的综合集成表示	192	7.9 人机智能结合系统	217
7.4 专家系统中的推理方法	194	7.9.1 人的智能模型	218
7.4.1 不精确推理的一般描述	194	7.9.2 人-机智能结合的必要条件	218
7.4.2 不精确推理的方法	194	7.9.3 人-机交互作用	219
7.5 智能控制系统中的推理	201	7.9.4 计算机的智能结构	220

第 8 章 智能控制的信息科学基础

8.1 智能控制和信息科学	222	8.3.1 信息的概念	225
8.1.1 可能性空间	222	8.3.2 信息是知识的内涵	225
8.1.2 从可能性空间看信息	223	8.4 信息系统模型	226
8.2 信息论的产生及发展	223	8.5 熵和信息	227
8.3 信息是知识的内涵	225	8.6 负熵与广义信息论	228

第三篇 智能控制理论与系统设计

第 9 章 智能反馈控制理论基础

9.1 智能控制的基本概念	230	9.2.2 基于信息论的递阶智能控制结构	233
9.1.1 智能控制的定义	230	9.2.3 基于广义信息的智能控制系统结构	235
9.1.2 智能控制的基本要素	232	9.3 智能控制系统的类型	235
9.2 智能控制系统的结构	233	9.4 智能控制系统的理论基础及其本质	236
9.2.1 智能控制系统的基本结构	233		

第 10 章 多级递阶智能控制

10.1 复杂系统控制的基本形式	237	10.3 多级递阶智能控制	240
10.1.1 大系统控制的基本形式	237	10.3.1 多级递阶智能控制系统的组成	240
10.1.2 大系统递阶结构的描述	237	10.3.2 多级递阶智能控制的原理	240
10.2 递阶控制的一般原理	239	10.3.3 机器人递阶智能控制系统的结构	241
10.2.1 协调	239	10.4 人-机交互的多级递阶智能控制	242
10.2.2 协调的基本原则	239		

第 11 章 基于知识的专家控制

11.1 专家控制系统	245	11.3.1 专家控制器的一般结构	248
11.1.1 专家控制系统的特点	245	11.3.2 一种工业过程专家控制器	249
11.1.2 专家控制系统的结构	245	11.4 基于知识的智能过程控制	250
11.1.3 专家控制系统的原理	246	11.4.1 系统的观测矩阵	250
11.2 实时过程控制专家系统	247	11.4.2 基于知识系统的符号模型	251
11.3 专家控制器	248	11.4.3 基于知识的双容器液位控制	252

第 12 章 模糊控制

12.1 模糊自动控制原理	254	12.2.3 精确量的模糊化方法	270
12.1.1 模糊控制的基本思想	254	12.2.4 模糊推理及其模糊量的非模糊化方法	271
12.1.2 模糊控制系统的组成	256	12.2.5 论域、量化因子、比例因子的选择	275
12.1.3 模糊控制的基本原理	257	12.2.6 模糊控制查询表及算法流程图	278
12.2 模糊控制器设计的基本方法	263	12.2.7 采样时间的选择	279
12.2.1 模糊控制器的结构设计	263	12.3 模糊控制器的设计举例	280
12.2.2 模糊控制规则的设计	265		

12.3.1 确定模糊控制器的结构	281	12.7.1 提高模糊控制稳态精度的方法	341
12.3.2 建立模糊控制规则	281	12.7.2 提高模糊控制滞后对象能力的方法	346
12.3.3 确定模糊变量的赋值表	282	12.7.3 用三维模糊控制提高控制高阶对象的能力	349
12.3.4 建立模糊控制表	282		
12.3.5 简单模糊控制器的控制特性	284		
12.4 解析描述控制规则可调整的模糊控制器	287	12.8 模糊控制器的模型结构及系统稳定性分析	351
12.4.1 控制规则的解析描述	287	12.8.1 模糊控制器的多值继电器模型	351
12.4.2 带有调整因子的控制规则	288	12.8.2 模糊控制器的代数模型	354
12.4.3 模糊控制规则的自调整与自寻优	290	12.8.3 模糊控制器的语言模型	357
12.4.4 带有自调整因子的模糊控制器	294	12.8.4 模糊控制器的颗粒模型、准线性模型和细胞模型	362
12.4.5 带自调整函数的模糊控制规则	295	12.8.5 双输入双输出模糊控制器的解析结构	368
12.5 模糊系统辨识与模糊预测	298	12.9 模糊控制系统稳定性分析的理论与方法	377
12.5.1 基于模糊关系模型的系统辨识	298	12.9.1 模糊控制系统稳定性分析理论的研究进展	377
12.5.2 基于模糊关系模型的建模举例	301	12.9.2 基于语言模糊状态模型的稳定性分析	378
12.5.3 自适应模糊预测模型	305		
12.5.4 基于 T-S 模型的模糊系统辨识	306	12.10 模糊控制软件开发工具与模糊控制芯片	384
12.5.5 基于“模糊控制系统”的模型预报	310	12.10.1 模糊控制软件的开发工具	385
12.6 自适应·自组织·自学习模糊控制	314	12.10.2 模糊控制芯片	391
12.6.1 自适应模糊控制器的结构	314		
12.6.2 自适应模糊控制器的原理	315		
12.6.3 模型参考模糊自适应控制系统	321		
12.6.4 自校正模糊控制器	331		
12.6.5 自适应递阶模糊控制	336		
12.7 提高模糊控制性能的多种方法	341		

第 13 章 神经控制

13.1 神经控制的基本原理	404	13.7.2 神经网络内模控制	419
13.1.1 神经控制的基本思想	404	13.8 神经元自适应 PSD 控制	420
13.1.2 神经网络在控制中的主要作用	405	13.8.1 PSD 控制	420
13.2 神经网络控制的分类	405	13.8.2 神经元自适应 PSD 控制算法	421
13.2.1 基于神经网络的智能控制	406	13.9 基于模糊神经网络的自组织控制	422
13.2.2 基于传统控制理论的神经控制	408	13.9.1 FNAOC 的结构	422
13.3 神经网络学习控制的结构	410	13.9.2 双向联想记忆网络及其产生模糊规则	423
13.3.1 间接学习神经控制	410	13.9.3 应用 LVQ 法产生 If 部分隶属函数	425
13.3.2 一般学习神经控制的结构	412	13.9.4 FNAOC 系统的应用	426
13.3.3 特殊学习神经控制的结构	412	13.10 多变量系统的模糊神经网络控制	429
13.3.4 一般和特殊相结合的学习结构	413	13.10.1 多变量系统的模糊控制模型	429
13.4 神经网络直接反馈控制	413	13.10.2 模糊神经网络控制模型	429
13.5 神经网络模型参考自适应控制	416	13.11 基于神经网络的模糊逻辑控制系统设计	431
13.6 神经网络自校正控制	417		
13.7 神经网络内模控制	419		
13.7.1 内模控制	419		

13.11.1 一般模糊控制的基本结构及其描述	432	13.12.2 神经网络的结构	442
13.11.2 基于神经网络的模糊控制和决策	433	13.12.3 导入算法	443
13.11.3 神经网络每层节点的函数功能	434	13.12.4 隶属函数和模糊规则的修改	444
13.11.4 混合学习算法	435	13.12.5 信念传播与导出算法	446
13.11.5 无人小车的神经网络模糊控制	439	13.12.6 从训练后的神经网络中提取规则 举例	446
13.12 基于模糊推理和神经网络建造专家系 统的一种方法	441	13.13 神经网络专家系统与故障诊断	447
13.12.1 设计的基本思想和步骤	442	13.13.1 神经网络专家系统	447
		13.13.2 基于神经网络的控制系统故障诊断	448

第 14 章 基于规则的仿人智能控制

14.1 从 PID 控制看仿人智能控制	451	14.5.2 仿人智能积分控制算法	463
14.1.1 常规 PID 控制	451	14.6 仿人智能采样控制	464
14.1.2 对常规 PID 控制的剖析	452	14.6.1 采样周期对数字控制的影响	464
14.1.3 从 PID 控制得到的启发	453	14.6.2 滞后过程的仿人智能采样控制	464
14.2 仿人智能控制的原理与结构	454	14.7 仿人智能控制周期的自选择	466
14.2.1 仿人智能控制的基本思想	454	14.7.1 采样周期与控制周期的差异	466
14.2.2 仿人智能控制行为的特征变量	455	14.7.2 仿人智能控制周期	467
14.2.3 仿人智能控制器的结构	457	14.7.3 仿人智能控制周期的在线自选择	467
14.2.4 仿人智能控制的多种模式	458	14.8 基于极值采样的仿人智能控制	467
14.3 仿人智能开关控制器	459	14.8.1 仿人智能控制器的静特性及运行机理	468
14.3.1 智能开关控制	459	14.8.2 仿人智能控制算法及其特点	468
14.3.2 一个智能开关控制器的设计实例	459	14.9 基于过程补余量的仿人智能控制	469
14.4 仿人比例控制器	460	14.9.1 过程的能量储存特性及其控制	469
14.4.1 仿人比例控制的原理	460	14.9.2 基于过程补入量的仿人智能控制规则	470
14.4.2 仿人比例控制算法	461	14.9.3 目标补入量 J 的递推算法	471
14.5 仿人智能积分控制	461		
14.5.1 仿人智能积分原理	461		

第 15 章 基于模式识别的智能控制

15.1 模式识别与智能控制	472	15.3 基于模式识别的智能控制	478
15.1.1 模式识别的基本概念	472	15.3.1 特征信息、特征状态与特征模式	478
15.1.2 模式识别与形象思维	474	15.3.2 基于模式识别的智能控制器的结构	479
15.1.3 模式识别与智能控制	474	15.3.3 基于模式识别的智能控制器的设计	480
15.2 系统动态特性的模式识别	475	15.3.4 基于模式识别的智能控制器的工业 应用	481
15.2.1 系统瞬态响应特征的模式分类	475		
15.2.2 相平面 $e-\dot{e}$ 上特征模式类的划分	475		
15.2.3 误差相空间的特征模式集	477		

第 16 章 多模变结构智能控制

16.1 变结构控制的基本原理	483	16.1.1 变结构控制的基本原理	483
------------------------------	------------	-------------------------	-----

16.1.2 变结构控制的应用	484	16.4.1 多模变结构智能控制的基本思想	488
16.2 变结构控制是一种双模控制	486	16.4.2 多模变结构智能控制器设计	488
16.2.1 VSC 可视作为一种规则控制	486	16.4.3 多模变结构智能控制规则	489
16.2.2 VSC 是一种双模控制方式	486	16.5 模糊滑动模态控制	489
16.3 变结构控制的剖析	487	16.5.1 滑动模态控制的系统描述	489
16.3.1 变结构控制思想的启迪	487	16.5.2 模糊滑动模态控制	491
16.3.2 变结构控制的不足	487	16.5.3 基于模糊逻辑的连续滑模控制	492
16.4 多模变结构智能控制的原理	488		

第 17 章 学习控制与自学习控制

17.1 学习控制系统	495	17.3 自学习控制系统	510
17.1.1 学习控制的基本概念	495	17.3.1 自学习控制系统的结构	510
17.1.2 学习控制律	495	17.3.2 基于规则的自学习控制系统	511
17.1.3 学习控制的收敛性	497	17.4 基于规则的自学习模糊控制	512
17.2 伺服系统的学习控制	501	17.4.1 建立模糊控制规则	512
17.2.1 位置伺服系统的学习控制	501	17.4.2 自学习模糊控制算法	514
17.2.2 位置伺服系统的模糊学习控制	506	17.4.3 自学习控制算法举例	515

第 18 章 混沌控制与混沌预测

18.1 混沌与控制系统	517	18.2.1 混沌的短期预测功能	520
18.1.1 由输入 r 所引起的混沌	517	18.2.2 混沌短期预测的方法	521
18.1.2 由采样周期所引起的混沌	519	18.3 混沌模糊控制器	522
18.1.3 混沌和周期解的共存	519	18.3.1 混沌芯片	522
18.2 混沌预测	520	18.3.2 混沌模糊控制器	523

第 19 章 基于可拓逻辑的智能控制

19.1 可拓控制的基本概念	525	19.3.4 测度模式的划分	530
19.2 可拓控制的基本结构和原理	526	19.3.5 确定控制模式和计算控制器输出	530
19.3 可拓控制器的设计方法	528	19.4 可拓专家系统的结构及原理	532
19.3.1 可拓控制器的结构	528	19.4.1 可拓专家系统的结构	532
19.3.2 特征量的选取和特征模式的确定	528	19.4.2 可拓知识库	532
19.3.3 特征状态关联度的计算	529	19.4.3 评价机构与组织机构原理	533

第 20 章 智能控制系统的稳定性分析

20.1 李雅普诺夫稳定性理论	535	20.3.1 智能控制系统的智能性	542
20.1.1 李雅普诺夫意义下的稳定性	535	20.3.2 智能控制系统的能控性	544
20.1.2 李雅普诺夫稳定性理论	536	20.4 智能控制系统的稳定性分析	545
20.2 绝对稳定性理论	538	20.4.1 智能控制系统稳定性的定性分析	545
20.2.1 大范围稳定与绝对稳定的概念	538	20.4.2 智能控制规律的统一描述形式	545
20.2.2 波波夫的稳定性分析方法	540	20.4.3 基于 Lyapunov 函数智能控制闭环系 统稳定性分析	546
20.2.3 圆判据	541	20.4.4 基于非线性科学的稳定性分析	548
20.3 智能控制系统的智能性与能控性	542		

第四篇 智能控制的工程应用

第 21 章 智能控制在工业过程控制中的应用

21.1 蒸汽发动机的模糊控制系统	549	21.4.4 控制系统的组成	569
21.1.1 概述	549	21.4.5 小结	570
21.1.2 控制器的结构	549	21.5 智能控制在造纸过程中的应用	570
21.1.3 模糊变量的论域及其隶属函数	550	21.5.1 概述	570
21.1.4 控制规则	552	21.5.2 造纸过程分析及其控制	571
21.1.5 模糊控制的结果	553	21.5.3 造纸过程的专家智能控制	572
21.2 模糊控制在退火炉燃烧过程控制中的应用	553	21.5.4 实际运行结果	577
21.2.1 概述	553	21.5.5 小结	578
21.2.2 模糊控制系统的组成	554	21.6 仿人智能温度控制器	578
21.2.3 模糊控制器和模糊自寻优控制器	555	21.6.1 概述	578
21.2.4 应用效果与结论	557	21.6.2 整机简介	579
21.3 气炼机的自适应模糊控制系统	558	21.6.3 仿人智能控制算法	579
21.3.1 概述	558	21.6.4 性能对比及结论	581
21.3.2 自动气炼机的结构及其工艺流程	559	21.7 神经网络自组织模糊控制器及其在电力系统中的应用	582
21.3.3 气炼机控制系统的硬件设计	559	21.7.1 神经自组织模糊控制系统的结构	582
21.3.4 气炼机控制系统的软件设计	560	21.7.2 各部分功能及作用	583
21.3.5 自动气炼机的模糊控制器	562	21.7.3 自组织模糊控制系统工作原理	586
21.3.6 自动气炼机透烧、预烧延时的自适应模糊控制	563	21.7.4 在电力系统频繁控制中的应用	588
21.3.7 小结	566	21.7.5 总结	589
21.4 电弧冶炼炉的模糊控制	566	21.8 轧钢机钢板厚度的非线性神经控制	589
21.4.1 概述	566	21.8.1 轧钢机模型与控制问题	590
21.4.2 模糊聚类分析	566	21.8.2 用神经网络进行对象建模	592
21.4.3 模糊控制规则	568	21.8.3 应用神经网络模型的非线性控制	592
		21.8.4 结果	595

第 22 章 智能控制在运载工具控制中的应用

22.1 高技术机翼的倾斜和力矩的模糊逻辑控制	596	22.2.1 列车自动驾驶系统	602
22.1.1 概述	596	22.2.2 地铁列车的预测模糊控制系统	603
22.1.2 高技术机翼 ATW	596	22.2.3 应用实例及其效果	605
22.1.3 ATW 的模糊控制	597	22.3 汽车喷油系统的神经网络控制	607
22.1.4 鲁棒性测试及结论	601	22.3.1 排放量数小化	607
22.2 预测模糊控制在列车自动驾驶系统中的应用	602	22.3.2 CMAC 神经网络基础	608
		22.3.3 CMAC 神经网络喷油控制	610
		22.3.4 CMAC 控制器实验结果与结论	611

第 23 章 智能控制在机器人控制中的应用

23.1 机器人的模糊控制	614	23.1.1 概述	614
---------------	-----	-----------	-----

23.1.2 模糊指令与模糊算法	614	23.3.2 应用神经网络补偿误差方式	623
23.1.3 模糊指令的解释	615	23.3.3 实验结果	624
23.1.4 机器人的模糊控制	616	23.4 应用学习控制抑制机器人的振动	626
23.1.5 机器人的控制过程	620	23.4.1 问题的提出	626
23.2 基于神经网络的机器人控制	620	23.4.2 学习控制的构成	626
23.2.1 机器人及其控制	620	23.4.3 有弹性轴的机器人模型	627
23.2.2 神经网络控制的机器人	621	23.4.4 工业机器人的学习控制的应用实验	629
23.3 工业机器人的神经网络高精度控制	623		
23.3.1 基于模型的误差补偿方式	623		

第 24 章 智能控制在家电产品中的应用

24.1 模糊全自动洗衣机	631	24.3.1 手抖修正原理	639
24.1.1 洗净度传感器	631	24.3.2 模糊识别和模糊推理	639
24.1.2 布量、布质传感器	632	24.4 基于神经网络的冰柜温度智能控制系统	641
24.1.3 基于洗净度的模糊推理	633	24.4.1 系统组成及工作原理	641
24.1.4 基于布量、布质的模糊控制	634	24.4.2 人工神经网络的培训	641
24.1.5 模糊全自动洗衣机的特点	635	24.4.3 性能测试与分析	643
24.2 模糊控制吸尘器	636	24.5 混沌控制煤油暖风器	644
24.2.1 模糊吸尘器设计的基本要求	636	24.5.1 混沌仿真器的构成	644
24.2.2 灰尘传感器	637	24.5.2 混沌产生舒适暖风的机理	646
24.2.3 模糊控制吸尘器	637	24.5.3 混沌暖风器的运行效果	646
24.3 模糊控制摄像机	639		
参考文献	648		

序篇 智能控制论

本篇简要回顾控制理论的产生、发展及智能控制产生的背景,智能控制及其系统的基本概况。首先,指出了传统控制和智能控制之间的区别与联系,然后,从智能控制论的高度阐述智能控制的特征,概述了智能控制的基础及学科范畴。最后,给出了本书学习指南。

0.1 控制理论的产生及其发展

自动控制理论作为一门科学,它的产生可追溯到18世纪中叶英国的第一次技术革命。1765年,瓦特(Jams Wate, 1736~1819)发明了蒸汽机,进而应用离心式飞锤调速器原理控制蒸汽机,标志着人类以蒸汽为动力的机械化时代的开始。后来,工程界用自动控制理论讨论调速系统的稳定性问题。1868年发表的“关于调节器”一文中指出,控制系统的品质可用微分方程来描述,系统的稳定性可用特征方程根的位置和形式来研究。1872年劳斯(E. J. Routh, 1831~1907)和1890年赫尔维茨(Hurwitz)先后找到了系统稳定性的代数判据,即系统特征方程根具有负实部的充分必要条件。1892年俄国学者李雅普诺夫(A. M. Ляпунов, 1857~1918)发表了“论运动稳定性的一般问题”的博士论文,提出了用适当的能量函数——李雅普诺夫函数的正定性及其导数的负定性来鉴别系统的稳定性准则,从而总结和发展的系统的经典时域分析法。

随着通讯及信息处理技术的迅速发展,电气工程师们发展了以实验为基础的频率响应分析法,1932年美国贝尔实验室工程师奈奎斯特(H. Nyquist)发表了反馈放大器稳定性的著名论文,给出了系统稳定性的奈奎斯特判据。后来,苏联学者米哈依洛夫(A. B. Михайлов)又把奈奎斯特判据推广到条件稳定和开环不稳定系统的一般情况。

在二次大战期间,由于军事上的需要,雷达及火力控制系统有较大发展,频率法被推广到离散系统、随机过程和非线性系统中。美国著名的控制论创始人维纳(N. Wiener, 1894~1964)系统地总结了前人的成果,1948年发表了《控制论——或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》著作,书中论述了控制理论的一般方法,推广了反馈的概念,为控制理论这门学科的产生奠定了基础。

随着生产的发展,控制技术也在不断地发展,尤其是计算机的更新换代,更加推动了控制理论不断地向前发展。控制理论的发展过程一般可分为三个阶段:

第一阶段 时间为本世纪40~60年代,称为“古典控制理论”时期。古典控制理论主要是解决单输入单输出问题。主要采用传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频域分析方法。所研究的系统多半是线性定常系统,对非线性系统,分析时采用的相平面法一般也不超过两个变量,古典控制理论能够较好地解决生产过程中的单输入单输出问题。

这一时期的主要代表人物有伯德(H. W. Bode, 1905~)和伊文思(W. R. Evans)。伯德于1945年提出了简便而实用的伯德图法。1948年,伊文思提出了直观而又形象的根轨迹法。

第二阶段 时间为本世纪 60~70 年代,称为“现代控制理论”时期。这个时期,由于计算机的飞速发展,推动了空间技术的发展。古典控制理论中的高阶常微分方程可转化为一阶微分方程组,用以描述系统的动态过程,即所谓状态空间法。这种方法可以解决多输入多输出问题,系统既可以是线性的、定常的,也可以是非线性的、时变的。

这一时期的主要代表人物有庞特里亚金(Л. С. Понтрягин)、贝尔曼(Bellman)及卡尔曼(R. E. Kalman, 1930~)等人。庞特里亚金于 1961 年发表了极大值原理;贝尔曼在 1957 年提出了动态规则;1959 年,卡尔曼和布西发表了关于线性滤波器和估计器的论文,即所谓著名的卡尔曼滤波。

70 年代初,瑞典的奥斯特隆姆(K. J. Åström)和法国的朗道(L. D. Landau)教授在自适应控制理论和应用方面做出了贡献。

第三阶段 时间为本世纪 70 年代末至今。70 年代末,控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”方向发展,前者是控制理论在广度上的开拓,后者是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点,研究各种大系统的结构方案、总体设计中的分解方法和协调等技术基础理论。而“智能控制”是研究与模拟人类智能活动及其控制与信息传递过程的规律,研制具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统。

目前,人工智能中一个广为重视的问题就是用自然语言进行人机对话的研究,而初步应用的典型智能控制系统就是智能机器人。随着社会和生产的发展,控制理论也在不断发展和完善,随着自动控制技术和计算机技术的迅速发展,人们不仅从繁重的体力劳动中解放出来,而且也不断地从复杂的脑力劳动中“解脱”出来。已经深入到家庭生活中的机器人的出现,就是一个有力的说明。

回顾控制理论的发展历程可以看出,它的发展过程反映了人类由机械化时代进入电气化时代,并走向自动化、信息化、智能自动化时代。

0.2 智能控制的产生及其发展

从 60 年代起,由于空间技术、计算机技术及人工智能技术的发展,控制界学者在研究自组织、自学习控制的基础上,为了提高控制系统的自学习能力,开始注意将人工智能技术与方法应用于控制系统。

60 年代初期,F. W. Smith 提出采用性能模式识别器来学习最优控制方法的新思想,试图利用模式识别技术来解决复杂系统的控制问题。Smith 采用线性判别器作为控制器的核心,先对控制器进行开路训练,确定线性判别函数的系数,即可用来工作。他在研究报告中指出,当模拟元件损坏 20%后,性能仅有稍许差别。

1965 年,美国著名控制论专家 Zadeh 创立了模糊集合论,为解决复杂系统的控制问题提供了强有力的数学工具;同年,美国著名科学家 Feigenbaum 着手研制世界上第一个专家系统;就在同年,傅京孙首先提出把人工智能中的直觉推理方法用于学习控制系统。1966 年,Mendel 进一步在空间飞行器的学习控制系统中应用了人工智能技术,并提出了“人工智能控制”的概念。直到 1967 年,Leondes 和 Mendel 才首先正式使用“智能控制”一词,并把记忆、目标分解等一些简单的人工智能技术用于学习控制系统,提高了系统处理不确定性问题的能力。这就标志着智能控制的思想已经萌芽。