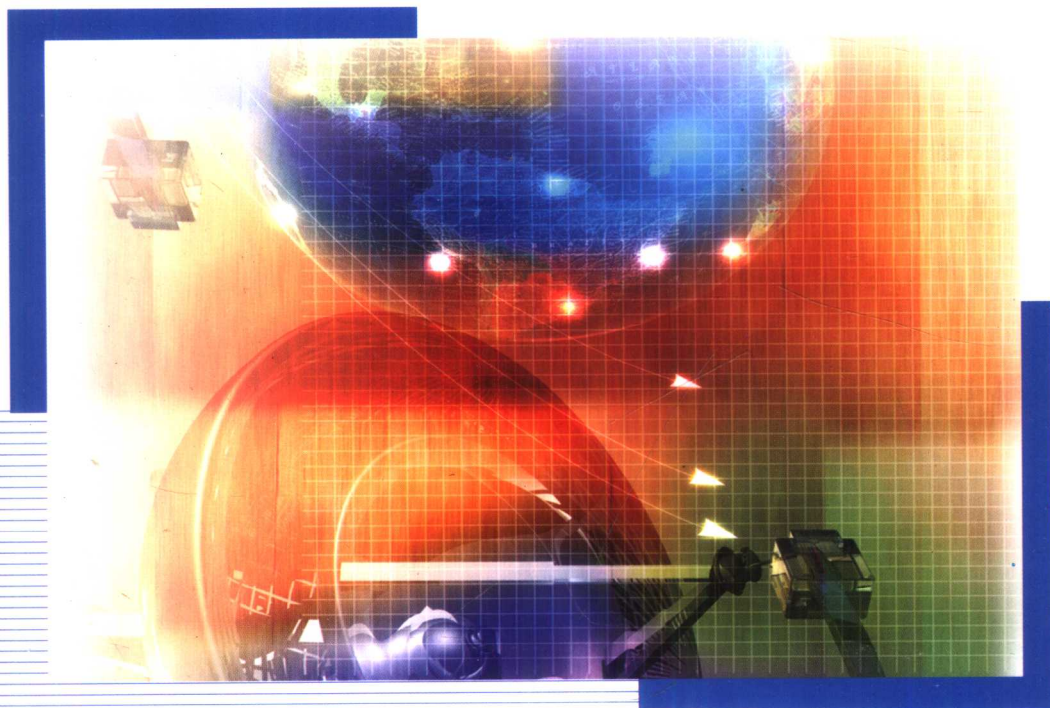




控制科学与工程研究生系列教材

智能控制与应用

姜长生 王从庆 编著
魏海坤 陈 谋



 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书系统地论述了智能控制理论的基本方法,以及最新的理论、技术和成果。全书分为9章,包括:智能控制概述,专家控制与仿人智能控制,学习控制,模糊控制数学基础,模糊控制原理,遗传算法,神经网络基本理论,神经网络控制方法与应用,神经网络的泛化理论。全书内容丰富,论述全面,便于理解。

本书可作为信息与控制领域,以及其他相关领域各专业高年级本科生、研究生的教材,也可供高等学校教师、广大科技工作者和工程技术工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制与应用/姜长生等编著. —北京:科学出版社,2007

(控制科学与工程研究生系列教材)

ISBN 978-7-03-019304-9

I. 智… II. 姜… III. 智能控制-研究生-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 099762 号

责任编辑:匡 敏 余 江 潘继敏/责任校对:包志虹

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 7 月 第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 7 月 第一次印刷 印张:28 3/4

印数:1—3 500

字数:549 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

科教兴国的伟大号召像春天的惊雷激励着中华民族的每一个炎黄子孙向着复兴民族、振兴中华的伟大目标奋勇前进,中华民族复兴的伟大潮流浩浩荡荡、勇往直前、势不可挡,必将成为 21 世纪世界历史上最伟大的壮举! 我们几位同志合作撰写的这本书就是在这伟大历史背景下诞生的,她是在伟大号召激励之下一点点微薄的努力和贡献。虽然只是这个伟大潮流中一朵小小的浪花,但我们相信,千千万万朵飞舞的浪花必将汇合成排山倒海的大潮,将中华民族推向新世纪发展潮流的最前头!

本书是在总结多年教学经验和科研成果的基础上编写成的,其中包含的基本内容有:专家系统控制、模糊控制、学习控制、神经网络控制以及遗传算法等。在内容的编排上,首先论述基本理论和方法,再论述其应用,两者有机结合、密切联系、前后呼应,构成一个系统的整体。为了使理论和实际能密切结合,达到学术性和应用性的一致,作者力求在阐述主要理论和方法的同时,注重设计方法、算法的介绍。全书内容丰富、论述由浅入深,深入浅出,语言流畅,便于理解和自学。读者只要具备经典控制方面的知识,就可以通过本书的学习,掌握智能控制的基本知识和技能。

本书作为一本全面反映智能控制研究领域最新研究成果的著作,可作为信息与控制领域,以及其他相关领域各专业高年级本科生、研究生的教材,也可供高等学校教师、广大科技工作者和工程技术工作者参考。

本书得到国家自然科学基金的资助(90405011)。

本书是南京航空航天大学 and 东南大学合作的成果。南京航空航天大学的姜长生同志编写第 1、2 章,王从庆同志编写第 3~6 章,陈谋同志编写第 8 章,东南大学的魏海坤同志编写第 7、9 章,全书由姜长生同志统稿、定稿。

在本书的编写过程中,我们得到了各方面朋友们的帮助,特别是科学出版社的同志们的支持和帮助,作者在此对他们表示衷心的感谢。

本书编写时还参阅了国内外的许多同类著作和相关文献,并引用了他们的成果和论述。作者在此对书中所引文献的所有作者们表示衷心的感谢。

最后,感谢所有支持和帮助过我们的人。

由于作者学识浅薄,水平有限,书中难免有错误和不当之处,热诚欢迎来自各方面的批评和指教,作者衷心地感谢提出批评和指教的每一个人。

作 者

2007 年 1 月于南京

目 录

前言

第 1 章 智能控制概述	1
1.1 智能控制的提出和发展	1
1.2 智能控制的概念和主要方法	2
1.3 智能控制的主要形式	5
1.4 智能自主控制	7
参考文献.....	9
第 2 章 专家控制与仿人智能控制	10
2.1 专家系统.....	10
2.1.1 专家系统的定义、特点和一般结构.....	10
2.1.2 专家系统中的知识表示	15
2.1.3 知识的获取	20
2.1.4 不精确推理	22
2.1.5 产生式系统	26
2.2 专家控制系统.....	29
2.2.1 一般专家控制系统的特点和结构	29
2.2.2 一般专家控制器的设计	32
2.2.3 专家控制系统的实时控制问题	34
2.3 仿人专家控制系统.....	35
2.3.1 仿人智能控制的基本思想.....	35
2.3.2 仿人智能控制行为的特征变量及识别	37
2.3.3 仿人智能控制的基本结构和工作原理	41
2.3.4 仿人智能控制器的设计与应用	42
参考文献	47
第 3 章 学习控制	48
3.1 学习控制的基本原理.....	48
3.1.1 学习控制的一般概念	48
3.1.2 学习控制的基本结构	49
3.1.3 学习控制的数学基础	50
3.2 线性定常连续系统的学习控制.....	51

3.3	非线性定常连续系统的学习控制	52
3.4	非线性连续时间系统的学习控制	54
3.5	线性离散时间系统的学习控制	56
3.6	一类线性离散系统的最优学习控制	57
3.7	闭环学习控制	60
3.8	鲁棒学习控制	63
3.9	学习控制在机器人中的应用	67
	参考文献	69
第4章	模糊控制数学基础	71
4.1	普通集合理论	71
4.1.1	集合的概念以及表示方法	71
4.1.2	集合的表示方法	71
4.1.3	子集、真子集、空集、全集、幂集的概念	72
4.1.4	集合的运算及运算性质	73
4.1.5	集合的直积	74
4.1.6	映射与关系	75
4.2	模糊集合	75
4.2.1	模糊子集的定义及表示	75
4.2.2	模糊集合的表示方法	76
4.2.3	模糊子集的基本运算及其性质	78
4.3	λ 水平截集	79
4.3.1	λ 水平截集的定义及性质	79
4.3.2	λ 水平截集的几个概念	80
4.4	分解定理和扩张原理	81
4.4.1	分解定理	81
4.4.2	扩张原理	82
4.5	隶属函数的确定方法	83
4.5.1	确定隶属函数的一般原则及方法	83
4.5.2	常见的隶属函数	84
4.6	模糊关系与模糊矩阵	87
4.6.1	模糊关系的定义及表示方法	87
4.6.2	模糊矩阵	88
4.6.3	模糊矩阵的合成运算及性质	89
4.6.4	模糊向量	90
4.7	模糊逻辑与模糊推理	92

4.7.1 模糊逻辑	92
4.7.2 模糊语言	94
4.7.3 模糊语言变量	99
4.7.4 模糊推理语句	100
4.8 模糊推理方法	103
4.8.1 似然推理	104
4.8.2 几种模糊推理方法	104
4.9 综合评判和模糊关系方程	113
4.9.1 综合评判的正问题	114
4.9.2 综合评判的逆问题和模糊关系方程	116
参考文献	118
第5章 模糊控制原理	119
5.1 模糊控制系统	119
5.1.1 模糊控制系统的基本概念	119
5.1.2 模糊控制系统的组成	120
5.1.3 模糊控制系统的基本原理	121
5.2 模糊控制器的设计	122
5.2.1 模糊控制器的结构设计	122
5.2.2 模糊控制规则的设计	123
5.2.3 精确量和模糊量的相互转换	129
5.2.4 论域、量化因子、比例因子的选择	133
5.2.5 一个简单的模糊控制器的设计	135
5.2.6 模糊控制算法的实现和采样周期的选择	141
5.3 基于规则修改的模糊控制	142
5.4 模糊控制系统的稳定性分析	147
5.4.1 描述函数分析法	147
5.4.2 相平面法	149
5.4.3 模糊控制器的代数模型	150
5.5 PID模糊控制器	151
5.5.1 PID控制原理	151
5.5.2 设计模糊自适应整定PID控制器	153
5.6 自组织模糊控制器	157
5.6.1 性能测量	158
5.6.2 控制量校正	159
5.6.3 控制规则的修正	161

5.7 模糊控制的应用实例	162
5.7.1 机械臂的模糊控制	162
5.7.2 麻醉中血压的模糊逻辑控制	164
参考文献	168
第6章 遗传算法	169
6.1 概述	169
6.1.1 遗传算法的特点	169
6.1.2 遗传算法的发展与应用	170
6.2 遗传算法的基本理论	171
6.2.1 遗传算法的基本操作	171
6.2.2 遗传算法的实现	175
6.2.3 遗传算法的改进	200
6.2.4 自适应遗传算法	206
6.3 遗传算法的数学基础	208
6.3.1 遗传算法的模式定理	208
6.3.2 遗传算法的收敛性分析	211
6.4 遗传算法在控制中的应用	214
6.4.1 基于遗传算法的 PID 控制参数整定	214
6.4.2 基于遗传算法的系统参数辨识方法	217
参考文献	220
第7章 神经网络基本理论	221
7.1 神经网络的基本概念	221
7.1.1 神经元模型	221
7.1.2 人工神经网络	225
7.1.3 神经网络结构与工作方式	226
7.1.4 神经网络学习方法与规则	229
7.2 前馈神经网络	232
7.2.1 线性阈值单元	232
7.2.2 感知器	235
7.2.3 BP 网络	238
7.2.4 BP 网络学习算法的改进	242
7.2.5 BP 算法应用例子	246
7.3 反馈神经网络	249
7.3.1 连续 Hopfield 网络	249
7.3.2 离散 Hopfield 网络	252

7.3.3 DHNN 学习规则	253
7.3.4 Boltzman 机	255
7.3.5 双向联想记忆	258
7.3.6 求 TSP 问题	260
7.4 径向基网络	263
7.4.1 径向基网络的结构	263
7.4.2 径向基网络的学习方法	265
7.4.3 径向基网络应用例子	269
7.5 Grossberg 网络	270
7.5.1 基本非线性模型	270
7.5.2 两层竞争网络	272
7.6 自组织神经网络	275
7.6.1 学习规则与学习算法	275
7.6.2 自组织特征映射	276
7.6.3 自适应共振理论	283
7.7 竞争网络	287
7.7.1 Hamming 网络	287
7.7.2 学习矢量量化	289
7.8 支持向量基网络	290
7.8.1 工作原理	290
7.8.2 支撑向量基求解 XOR 问题	292
参考文献	294
第 8 章 神经网络控制方法与应用	297
8.1 模糊神经网络控制	297
8.1.1 模糊神经网络结构	298
8.1.2 基于 T-S 模型的模糊神经网络控制	308
8.2 增强学习控制	316
8.2.1 基于神经网络的增强学习原理	317
8.2.2 自适应启发式评判	318
8.2.3 Q 学习方法及其应用	322
8.2.4 增强型学习控制	327
8.2.5 基于 GA 的增强学习控制	333
8.3 小脑模型神经网络控制	336
8.3.1 小脑模型 CMAC 网络	337
8.3.2 CMAC 网络的直接逆运动控制	339

8.3.3	CMAC 网络的常规控制	342
8.4	神经网络非线性控制	344
8.4.1	神经网络非线性控制结构	345
8.4.2	内模控制与神经网络内模控制	348
8.4.3	神经网络非线性预测控制	351
8.4.4	非线性系统的神经网络滑模控制	354
8.4.5	基于神经网络的非线性 H_∞ 控制	356
8.4.6	基于神经网络的非线性系统反馈递推控制	361
8.5	神经网络自适应控制	368
8.5.1	神经网络自校正控制	368
8.5.2	神经网络模型参考控制	370
8.6	神经网络 PID 控制	371
8.6.1	常规的神经网络 PID 控制	372
8.6.2	基于 BP 神经网络参数自学习 PID 控制器	375
8.6.3	基于神经网络的自调整 PID 控制	378
8.7	神经网络建模与辨识方法	383
8.7.1	正向建模	383
8.7.2	逆模型	385
8.7.3	基于小波神经网络的辨识方法	387
8.8	神经网络在飞行控制系统中的应用	395
8.8.1	新一代歼击机超机动飞行的非线性数学模型	396
8.8.2	基于在线神经网络的自适应逆飞行控制系统设计	402
	参考文献	410
第 9 章	神经网络的泛化理论	412
9.1	神经网络的泛化理论简介	412
9.2	泛化误差的偏差-方差分解	413
9.3	结构复杂性和样本复杂性对神经网络泛化能力的影响	414
9.3.1	线性阈值神经网络	415
9.3.2	函数逼近神经网络	416
9.4	正则化方法对泛化能力的影响	417
9.5	神经网络集成对泛化能力的影响	420
9.6	样本输入中加噪声对泛化能力的影响	421
9.7	其他因素对泛化能力的影响	422
9.7.1	样本质量	423
9.7.2	先验知识	423

9.7.3 初始权值	423
9.7.4 学习时间	424
参考文献.....	425
附录 A 用于三分类的 BP 算法程序	429
附录 B 用于函数逼近的 BP 算法程序	434
附录 C 连续 Hopfield 网解决 TSP 的程序	437
附录 D 基于聚类的 RBF 网设计算法	440
附录 E 基于梯度法的 RBF 网设计算法	443
附录 F 基于 OLS 的 RBF 网设计算法	446

第 1 章 智能控制概述

1.1 智能控制的提出和发展

智能控制最早源于美国。著名美籍华人科学家、普度大学教授傅京孙先生于 1965 年就提出了建立智能控制理论。1967 年, Leondes 等首次正式使用“智能控制”(intelligence control)一词。这一术语的出现要比“人工智能”晚 11 年, 比“机器人”晚 47 年。20 世纪 70 年代初, 傅京孙、Gloriso 和 Saridis 等又提出智能控制是人工智能、控制理论和计算机科学的结合和交叉等重要概念。1985 年 8 月在美国纽约, IEEE 召开了第一届智能控制学术讨论会。来自美国各地的 60 位从事自动控制、人工智能和运筹学研究的专家学者参加了这次讨论会, 会上围绕智能控制的原理和结构进行了热烈讨论。会后不久, 在 IEEE 控制系统学会内成立了 IEEE 智能控制专业委员会。1987 年 1 月, 在美国费城, 由 IEEE 控制系统学会和计算机学会联合召开了智能控制国际会议, 会上提交讨论和发表的论文达 60 多篇, 这次会议是一个划时代的里程碑, 它表明了智能控制经过蓬勃发展, 业已成为国际学术研究的一门新兴学科。在国内, 智能控制的第一篇学术论文是涂序彦和郭荣江撰写的“智能控制及其应用”, 发表在 1977 年自动化学报第一期上。重庆大学周其鉴教授 80 年代初提出并研究了仿人智能控制问题, 国家自然科学基金和航空科学研究基金的申请指南从 80 年代中期开始提出智能控制的研究方向, 并接受、批准了有关课题的申请。我国第一届全国人工智能与智能控制的学术年会 1989 年 4 月在重庆大学召开, 会上成立了相应的学术团体。1993 年, 清华大学组织召开了全球第一届智能控制学术交流会, 会上发表数百篇学术论文, 其范围之广、内容之丰富为历年之最, 这也反映了智能控制在我国的蓬勃发展和崛起。在航空技术方面, 南京航空航天大学首先提出并开展了智能飞行控制和智能火/飞综合控制的研究, 最早发表了有关这方面的学术论文, 并获得了航空科学技术进步奖。

科学技术和生产的迅速发展是智能控制学科发展的动力。以往以单纯数学解析结构为基础的控制理论, 其局限性日益明显。它的局限性主要体现在以下几方面: 其一, 在航空、航天、航海及各种工业部门, 受控对象日益复杂。受控对象不仅规模大, 运动学结构复杂, 而且各运动变量之间严重耦合, 同时还带有严重的不确定性(包括结构和参数两个方面的不确定性)和非线性。这样复杂的受控对象使得以确定模型和数学解析方法为基础的传统控制理论遇到了困难和挑战。其二, 控制任务和目标的复杂化, 也使传统的控制理论难于胜任。例如, 一架性能优良的攻

击机必须具备对空、地多目标自动攻击的能力,必须具备自动地形跟踪、回避的能力,必须具备自动导航和高品质自动飞行的能力。这样复杂的控制任务和控制指标要求,对于传统的控制理论来说是很困难的。其三,系统工作环境的复杂化,也使传统的控制理论产生麻烦。例如,在空战条件下,战场敌我态势的突变,气象条件的突变,敌方对我方系统的破坏和干扰,驾驶员的疲劳和意外失误,或者系统处于不利的化学物质环境中工作等。上述复杂受控对象,复杂的控制任务和控制目的,复杂的系统运行环境都促使人们研究新的控制方式去实现对它们的有效控制。这就是智能控制产生和发展的背景和动力。

另一方面,近代迅速发展的人工智能技术和计算机技术又为智能控制的发展提供了条件。诸如符号、语言的知识表达,状态特征的辨识,定性与定量,精确与模糊信号的处理,分析推理,逻辑运算,判断决策,自然语言理解和视觉系统等一系列拟人思维和功能均可通过计算机来实现。可以说,人工智能和计算机技术为智能控制的发展提供了物质条件。因此,智能控制不仅是科学技术和生产发展的推动和需要,也是科学技术发展的必然趋势;不仅是控制科学的继承、发展和提高,也是多学科相结合、共同迸发出的新的科学技术的火花。

1.2 智能控制的概念和主要方法

1. 智能控制的定义和层次

智能控制至今仍没有一个统一和明确的定义,学术界还在探讨和研究之中。下面提出的定义仅供参考。

定义 智能控制是能够模仿人的智能行为的一种控制技术,它是由多学科相结合,并利用计算机技术实现的一门技术科学。

智能控制按智能水平的高低,可分为如下三个层次:

(1) 初级智能控制。能将系统运行特征的知识表达(包括语言和符号形式)、辨识、人的经验、技巧、分析推理以及故障诊断等人工智能技术与传统的控制理论相结合的控制称为初级智能控制。这种智能控制系统具有先验的知识库、规则库,以及按事先规划的程序可进行协调和组合的多种策略库。这种智能控制系统能根据运行情况,按事先设计的逻辑和数学公式进行控制器的修正,以使系统运行达到最优或期望的性能指标,对一般故障能诊断并有一定的容错能力。这种智能控制系统具有较强的适应性和鲁棒性。这是现阶段已能实现,并正在完善使用的智能控制。如智能 PID、专家系统控制(仿人智能控制)和分级递阶智能控制等。

(2) 中级智能控制。除了具有初级智能控制水平之外,还具有对新知识学习、生成和在线修改知识库及控制的功能,这种智能控制称为中级智能控制。

中级智能控制系统最大的特点是具有在线学习和生成新知识的能力,具有很

强的自适应和自学习能力。这种智能控制正处在研究并取得进展之中。

(3) 高级智能控制。它除了具有初、中级智能控制水平之外,同时还具有仿人的组织、协商和决策的能力。尤其是在系统运行中出现异常变化时,能临场决策控制什么和调用什么控制策略,在故障产生时,能进行系统重组。这种控制是自适应、自学习和自组织的更高发展。

智能控制的水平也可按神经系统所对应的高级中枢、低级中枢和外围神经的映射关系来划分高、中和低三个层次。

2. 智能控制与传统控制的主要区别

智能控制和传统控制的主要区别表现在如下三点:

其一,智能控制研究的对象是整个任务和整个系统的运行。研究系统运行状态特征与整个系统结构的关系及控制实现,必须采用信息处理、启发式程序设计、知识表达、识别以及自动推理和决策等相关技术,这些问题的求解过程和人脑的思维过程具有一定的相似性,即具有一定的“智能”,所以称智能控制。如萨里迪斯(G. N. Saridis)提出的三级递阶智能控制、Astrom 的智能 PID 和周其鉴教授的仿人智能控制,其共同点都着眼于整个任务和系统的运行。也就是说,智能控制不必确知受控对象的结构和参数。而传统的控制理论必须根据受控对象的数学模型、性能指标设计相应的解析控制律,这显然仅仅是整个任务和整个系统运行中的一部分。

其二,智能控制方法是人工智能技术、传统控制理论以及运筹学和信息论相结合的控制方法。对于信息量的描述除数学公式的表达、数值计算和处理外,还必须应用语言和符号、精确和模糊的逻辑描述;对于问题的处理除数学推导外,还应有经验、技巧以及模拟人的思维方法。

其三,智能控制是控制理论、人工智能、运筹学、信息论等学科的交叉,并利用计算机作为手段向工程实用全面深入的发展。

智能控制系统的设计是先验和后验,静态和动态,经验和理论相结合的全面设计,而传统控制理论的设计仅仅是静态和先验的设计。

3. 智能控制的理论框架

智能控制具有明显的跨学科的结构特点,人们随着研究的不断深入,对于这一结构的特点逐步有了深刻的理解和认识。

(1) 二元结构论。著名学者傅京孙教授最早提出智能控制是人工智能和控制理论的结合,即二元结构。它可表示成

$$IC = AI \cap AC \quad (1.2.1)$$

其中,IC(intelligent control)表示智能控制,AI(artificial intelligence)表示人工智

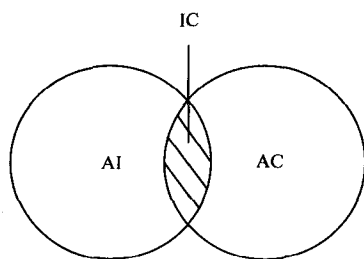


图 1-1 两元结构

能, AC (automatic control) 表示自动控制。也可以用图 1-1 表示 AI 和 AC 两者的交集。

任何智能控制系统, 必须将人的认识、经验以及技巧用人工智能的方法表示并加以利用, 使控制系统具有拟人的控制能力。这是人工智能和控制理论自然的巧妙的结合, 两者缺一不可。这也是傅京孙教授最早提出二元结构的原因。

(2) 三元结构。萨里迪斯 (Saridis) 在研究傅京孙二元结构的基础上, 1977 年提出了三元结构理论。他认为除傅京孙的二元结构外, 还应加上运筹学, 即

$$IC = AI \cap AC \cap OR \quad (1.2.2)$$

其中 OR (operation research) 表示运筹学。用图形表示如图 1-2 所示。萨里迪斯认为二元结构中的二元互相支配, 无助于智能控制的有效和成功运用, 必须引入运筹学的概念, 使智能控制成为三元结构的交集。这种三元结构论后来成为 IEEE 第一次智能控制讨论会 (1985 年, 纽约) 的主题之一。在 IEEE 第一次智能控制国际讨论会上 (1987 年 1 月, 费城) 这一讨论达到了高潮, 促进了智能控制的形成和发展。

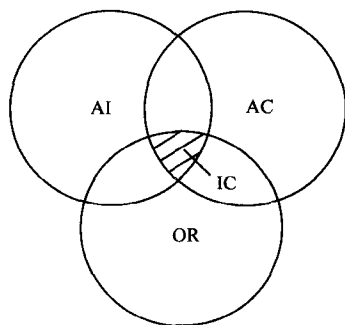


图 1-2 三元结构

(3) 四元结构。蔡自兴教授在研究前者二元、三元结构的基础上, 提出了所谓四元结构, 即除了上述三元结构外, 还加上了信息论。即

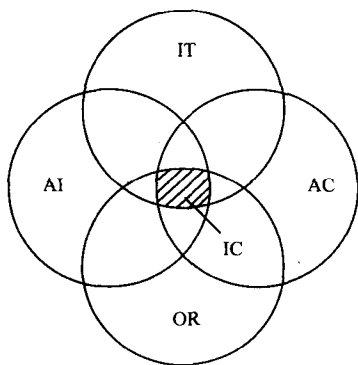


图 1-3 四元结构

$$IC = AI \cap AC \cap OR \cap IT \quad (1.2.3)$$

其中 IT (information theory) 表示信息论。用图形表示如图 1-3 所示。蔡自兴教授认为:

① 三论缺一不可。无论是人工智能 (包括知识工程)、自动控制 (包括工程控制论和生物控制论) 或系统论 (包含运筹学), 都与信息论息息相关。今天, 作为前沿科学的系统论、信息论、控制论 (简称三论), 无论从哪一方面来看, 都是相互作用和相互靠拢的, 并给人们以鲜明的印象。例如, 一台具有高度自主制导能力的

智能机器人(实际上为一智能控制系统),它的主体和各部分之间、各控制层级之间,以及各子系统之间的控制与通讯,它对环境的感受,对信号的存储、处理,以及为适应各种情况而作出的优化、决策和运动,都需要系统论、信息论和控制论的参与作用,并互为渗透。信息观点已成为现代科学领域各学科必不可少的东西。有些人把人类正在发展中的社会叫做信息社会,这绝不是偶然的。

② 知识是信息的一种形式。智能控制系统,实质上是以知识和经验为基础的拟人控制系统。知识是什么?知识就是对信息收集、分析、处理和优化而形成的一种“制品”,是结构信息的一种形式。智能控制的经验源于信息,又可能被加工、处理为新的信息,如指令、决策方案和计划等,再用于控制系统或装置的活动。在人工智能中,也把盲目搜索称为无信息搜索,而把启发式搜索称为有信息搜索。由此可见,无论在人工智能或智能控制中,都离不开信息论的参与作用。

③ 人体器官的控制具有信息论的功能。智能控制系统,无论是基于知识的系统,还是基于神经网络的系统,或是将来出现的别的什么系统,都是力图模仿人体活动功能,尤其是人脑的思维和决策过程。那么人体器官的构造功能是否也反映“三论”的关系与作用呢?回答是肯定的。例如,当人遇到危险并试图逃离危险环境时,心脏跳动的加急就明显地显示了人对信息的感受、处理、决策、传递、控制等一系列过程,这中间,信息的感受、处理、传递(信息论)、决策(运筹和人工智能)和控制形象地反映了智能控制的四元结构。

④ 智能控制以信息熵为测度。熵函数(entropy function)是现代信息论的重要概念和基础。把熵函数和智能控制中的信息流(信息传递)引入智能控制系统,使智能控制系统的总熵(总代价,或系统消耗的总能量)最小,是智能控制系统设计的重要准则。这正表明,信息论是组成智能控制的不可缺少的部分之一。

应当指出,在构成智能控制的四元结构中,傅京孙教授提出的二元结构是最基本和最重要的,没有这两者的结合,就谈不上什么智能控制。而三元结构和四元结构是智能控制发展的更好、更完善和更高级的形式。

1.3 智能控制的主要形式

智能控制这一学科正在蓬勃发展,智能控制的形式也日新月异。目前正在兴起和研究的形式很多,其中主要的有如下几种。

1. 分级递阶智能控制

分级递阶智能控制(hierarchical intelligent control)是从系统工程出发,总结了人工智能与自适应控制、自学习控制和自组织控制的关系之后逐渐形成的,是智能控制最早的理论之一。

分级递阶智能控制有两种比较重要的理论:

(1) 知识基/解析混合多层智能控制 (knowledge-based/analytical hybrid multi-layer intelligence control) 理论, 该理论是由意大利学者 A. Villa 提出的, 可用于解决复杂离散事件系统的控制设计问题。

(2) 萨里迪斯三级智能控制理论, 按照这种理论设计的智能控制系统是由组织级(最高级)、协调级(中间级)和执行级(最下级)三级组成的, 并用熵函数来衡量每一级的执行代价和效果, 用熵进行最优决策。这一方法为现代工业、空间探测、核处理和医学领域应用自主控制系统提供了一个有效的方法。总之, 分级递阶智能控制是为求解大系统, 复杂系统的寻优、决策和有效控制而提出来的, 是研究多级自寻优控制、多级模糊控制、多级专家控制、递阶智能多目标预测控制以及大型空间运动结构系统的三级递阶智能控制的有效方法。

2. 专家系统控制

专家系统控制(包括仿人智能控制和智能 PID 控制), 是工程控制论和专家系统相结合的产物。这类智能控制的特点是专家的知识与经验与传统的 PID 控制器的结合, 它所设计产生的控制规则简单易于实现, 如飞行控制过程、化工 PH 过程的智能控制。在这一类智能控制中, 还应指出的一种形式是实时监督控制专家系统, 由故障检测、故障诊断和故障处理三部分组成, 这种形式在航天、航空和化工等领域都有大量应用。

3. 模糊控制

该控制方法最早提出者之一是美国著名控制论专家 L. A. Zadeh, 1965 他发表了模糊集合论。模糊控制理论主要以模糊数学和规则表组成控制决策。它适用于难以建模的受控对象, 但很难做到高精度。

4. 人工神经网络控制

20 世纪 50 年代末就已问世的人工神经网络模仿生物神经系统, 主要模仿人的大脑的神经网络模型和信息处理机能, 如信息处理、判断、决策、联想、记忆、学习等功能, 以实现仿人行为的智能控制。

5. 各种智能控制方法的交叉和结合

为了发挥各种不同智能控制方法的优点, 克服它们各自的缺点和不足, 各种组合、结合、互相交叉渗透的智能控制方法不断被提出和研究, 例如, 专家模糊控制 (expert fuzzy control)、模糊神经网络控制 (fuzzy neural network control)、专家神经网络控制 (expert neural network control)、模糊 PID 控制 (fuzzy PID control)、

专家 PID 控制(expert PID control)和模糊学习控制(fuzzy learning control)等。

6. 各种智能控制方法与传统控制理论方法的交叉和结合

它们既能发挥智能控制的优点,也能发挥传统控制方法的优点,在工程实际中可获得完美的控制效果。它不仅是方法研究的交叉,而且也是多学科研究的交叉和发展。这些交叉和结合有模糊变结构控制(fuzzy variation structure control)、自适应模糊控制(adaptive fuzzy control)、自适应神经网络控制(adaptive neural network control)、神经网络变结构控制(neural network variation structure control)和专家模糊 PID 控制(expert fuzzy PID control)等。

上述交叉和结合还可以举出一些,这些控制有的学者又称为综合控制理论和方法。

1.4 智能自主控制

随着科学技术发展和生产的需要,自主控制,特别是用智能化的方法实现自主控制成为当今的热门研究课题。智能自主控制也是智能控制的一种形式。什么是智能自主控制,至今没有统一的定义,根据普遍的理解,给出如下说明。

1. 智能自主控制的含义

智能自主控制系统应该具有如下功能:

(1) 系统能自动接受控制任务、控制要求和目标,并能对任务、目标和要求自主进行分析、判断、规划和决策。

(2) 系统能自主感知、检测自身所处的状态信息、环境信息和干扰信息,并能自主进行融合、分析、识别、判断和决策;同时能作出能否执行任务的决策。

(3) 系统能根据控制任务、目标要求,结合系统所处的当前自身状态信息、环境信息、干扰信息,自主地进行分析、综合,并作出执行任务和如何完成任务的控制决策。

(4) 系统能根据上述决策自主形成控制指令,自主操控系统状态的行为,并朝着完成控制任务和目标的方向运动。

(5) 在上述运动过程中,如果出现任务改变,出现事先未预见的环境变化和自身状态变化,或出现系统自身损伤,系统能根据任务改变、新的环境(干扰属环境变化)信息和自身状态信息的改变,自主地作出分析、判断,并作出改变系统状态行为的指令,使系统改变自身的状态。或自主进行系统重组,以适应外界环境的变化;或自主进行系统的故障诊断、自修复,以适应完成控制任务和目标的要求,最终自主完成控制任务,达到控制的目标。