

# 智能控制系统

Intelligent Control System

第二版

王耀南 著

湖南大学出版社

2006年·长沙

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了智能控制系统的基本理论和设计方法及其应用。全书共分 12 章,内容包括模糊逻辑控制,专家系统和专家智能控制,神经网络系统辨识与控制,模糊神经网络智能控制,神经网络最优控制,智能预测控制,计算智能控制,综合集成智能控制系统,以及智能控制在工业过程控制、工业运动控制、机器人控制、复杂工业系统中的应用等。

本书涉及目前国内外智能控制的最新研究成果,特别是第一版出版以来作者的教学心得与科研成果,其中包括作者取得科研专利和发表在国内外学术刊物上的前沿科研成果。取材新颖,内容丰富,注重了内容的理论与实践相结合,论述深入浅出,力求使读者较快掌握和应用这门高新技术。本书可作为高等院校自动化、计算机应用、电子工程、机械工程、信息工程等专业研究生和本科高年级学生教材,也可供工程技术人员和科学研究工作者参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能控制系统/王耀南著.—2 版.—长沙:湖南大学

出版社,2006.5

ISBN 7 - 81113 - 063 - 7

. 智... . 王... . 智能控制—控制系统

. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 049464 号

### 智能控制系统(第二版)

Zhinen Kon zhi Xiton (Dierban)

作 者:王耀南 著

责任编辑:李继盛

责任校对:张建平

责任印制:陈 燕

封面设计:吴颖辉

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山

邮 编:410082

电 话:0731-8821691(发行部),8821315(编辑室),8821006(出版部)

传 真:0731-8649312(发行部),8822264(总编室)

电子邮箱:preeLijs@hnu.cn

网 址:<http://press.hnu.cn>

印 装:湖南大学印刷厂

开本:850×1168 16 开 印张:43

字数:994 千

版次:2006 年 7 月第 2 版

印次:2006 年 7 月第 1 次印刷

印数:1~3 700 册

书号:ISBN 7 - 81113 - 063 - 7/TP·50

定价:56.00 元

版权所有,盗版必究  
湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

# 第一版前言

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，导致了控制对象、控制器以及控制任务和目标的日益复杂化。另一方面，人类对自动化的要求也更加广泛，面对来自像电力系统、工业生产过程控制系统、智能机器人系统、计算机集成制造系统（CIMS）、核电站安全运行控制、航空航天及军事指挥系统等复杂性系统的挑战，传统的自动控制理论和方法显得难以适应于复杂系统的控制。能否建立新一代的控制理论方法来解决复杂系统的控制问题，已成为各国控制学术界所共同关心的热门研究课题。近年来人们开始认识到，在许多系统中，复杂性不仅仅表现在高维性上，更多表现在：（1）被控对象模型的不确定性；（2）系统信息的模糊性，复杂的信息模式；（3）高度非线性；（4）输入（传感器）信息的多样化；（5）多层次、多目标的控制要求；（6）计算复杂性和庞大的数据处理以及严格性能指标。自然，对于复杂系统需要在传统的控制理论上结合其他学科的知识，建立一种更有力的控制理论和方法，以解决上述提到的问题。智能控制就是在这种背景下提出和形成的。

智能控制系统是当今国内外自动化学科中一个十分活跃和具有挑战性的领域，又是一门新兴的交叉学科。它与人工智能、自动控制、运筹学、计算机科学、模糊数学、神经网络理论，进化论、模式识别、信息论、仿生学和认知心理学等有着密切的关系，是相关学科相互结合与渗透的产物，具有广阔的应用前景。目前已用于各种工业自动化，冶金和化工过程控制，电力系统与核电安全运行，航空航天飞行器对接，智能机器人，智能通信网络，智能化仪器仪表，家电行业等领域，并形成一门新的智能自动化学科。

为了适应科学技术的高速发展，作者根据近年来所进行的智能控制系统研究取得的成果和发表的论文以及对工业自动化专业研究生讲授的智能控制课程内容，写成这本《智能控制系统》专著。希望能够通过本书给读者提供有关的智能控制理论和实现方法，对所有感兴趣的读者有所裨益。

全书比较系统地论述了智能控制系统的概念、理论方法和实际应用，共分成十一章。第一章概述智能控制的发展过程及特点，综述了智能控制的基本设计方法，讨论了智能控制系统的现状与发展趋势。第二章介绍几种模糊控制器设计方法；第三章介绍专家系统和专家控制方法。第四章介绍神经网络基本理论；第五、六和七章分别介绍基于神经网络的系统辨识、自校正、自

适应和自学习控制器设计方法。第八章介绍了几种模糊神经网络模型，给出模糊神经网络自学习、自适应和自组织控制的设计和实现方法。第九章介绍神经网络最优控制和伺服鲁棒控制系统设计方法。第十章讨论遗传算法在智能控制中的应用和实例。第十一章给出综合智能控制系统在工程上应用的实际例子。附录给了本书的部分仿真程序。

本书得到了中国博士后科学基金、中科院模式识别与智能机器人国家重点实验室基金、国防科技大学国防预研项目基金和湖南省自然科学基金等多方面的资助。湖南大学电气工程系博士生导师童调生教授为本书的出版给予了极大的支持和指导，刘政权、宋明博士对本书提出了许多宝贵意见，在此深表感谢。最后，我要对湖南大学出版社，对孙炜、周海燕、刘小燕研究生帮助校对样稿，表示衷心的感谢。

由于智能控制系统是一门新兴学科，很多理论与应用性问题还待进一步深入研究和发 展，加上作者学识不深，写作时间又十分仓促，因而本书一定存在不足之处，敬请读者和专家们批评指正。

作 者

1995 年 3 月于长沙岳麓山

## 第二版前言

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，导致了控制对象、控制器以及控制任务和目标的日益复杂化。另一方面，人类对自动化的要求也更加广泛，面对来自像电力系统、工业生产过程控制系统、智能机器人系统、计算机集成制造系统(CIMS)、核电站安全运行控制、航空航天及军事指挥系统等复杂性系统的挑战，传统的自动控制理论和方法难以适应于复杂系统的控制。能否建立新一代的控制理论方法来解决复杂系统的控制问题，已成为各国控制学术界所共同关心的热门研究课题。近年来人们开始认识到，在许多系统中，复杂性不仅仅表现在高维性上，更多表现在：(1) 被控对象模型的不确定性；(2) 系统信息的模糊性，复杂的信息模式；(3) 高度非线性；(4) 输入(传感器)信息的多样化；(5) 多层次、多目标的控制要求；(6) 计算复杂性和庞大的数据处理以及严格性能指标。自然，对于复杂系统需要在传统的控制理论基础上结合其他学科的知识，建立一种更有力的控制理论和方法，以解决上述提到的问题。智能控制系统就是在这种背景下提出和形成的。

智能控制系统是当今国内外自动化学科中一个十分活跃和具有挑战性的领域，又是一门新兴的交叉学科。它与人工智能、自动控制、运筹学、计算机科学、模糊数学、神经网络理论，进化论、模式识别、信息论、仿生学和认知心理学等有着密切的关系，是相关学科相互结合与渗透的产物，具有广阔的应用背景。目前已用于各种工业自动化，冶金和化工过程控制，电力系统与核电安全运行，航空航天飞行器对接，智能机器人，智能通信网络，智能化仪器仪表，家电行业等领域，并形成一门新的智能自动化学科。

智能控制系统作为一门前沿交叉学科，在过去十年中已取得长足进展。承蒙广大读者厚爱，本书第一版已在 1996 年出版，受到了国内外科技教育界的许多专家们的好评，广大科技工作者和硕士博士研究生们也充分参考和引用本书。

部分专家和读者还对该书提出了不少有益的修改建议。十年前作者著的《智能控制系统——模糊逻辑·专家系统·神经网络控制》已不能适应本学科的发展和广大读者的需要。因此，作者对本书第一版进行了修改，增加了新的内容。希望第二版能够给读者提供有关智能控制新的理论方法和技术，对所有感兴趣的读者有所裨益。

本书第二版比较系统地论述了智能控制系统的概念、理论方法和实际应用，共分成 12 章。第 1 章概述智能控制的发展过程及特点，综述了智能控制的基本设计方法，讨论了智能控制系统的现状与发展趋势；第 2 章介绍几种模糊控制器设计方法；第 3 章介绍专家系统和专家控制方法。第 4 章介绍神经网络基本理论；第 5、第 6 和第 7 章分别介绍基于神经网络的系统辨识、自校正、自适应和自学习控制器设计方法；第 8 章介绍了几种模糊神经网络模型，给出模糊神经网络自学习、自适应和自组织控制的设计和实现方法；第 9 章介绍神经网络最优控制和伺服鲁棒控制系统设计方法；第 10 章介绍了智能预测控制系统；第 11 章讨论计算智能控制系统；第 12 章给出综合智能控制系统在工程上应用的实际例子；附录给出了本书的部分仿真程序。

本书第二版的研究工作和出版得到了国家“863”计划项目、国家自然科学基金、国家“九五”和“十五”攻关项目、德国洪堡杰出青年基金和 DFG 基金、中德国际合作重大项目、欧盟第五框架项目等资助。特别感谢国内外自动化专家们：中国科学院自动化研究所戴汝为院士、谭铁牛教授，湖南大学童调生教授，清华大学吴澄院士、孙增圻教授、孙元章教授、萧德云教授，浙江大学孙优贤院士、李平教授、曹一家教授，国防科技大学陈火旺院士、王正志教授、胡德文教授，东北大学柴天佑院士、张华光教授，同济大学吴启迪教授，中南大学蔡自兴教授、桂卫华教授，东华大学邵世煌教授，西安交通大学郑南宁院士、王兆安教授，上海交通大学施鹏飞教授，德国不来梅大学 Horst Selzer 教授和 Boris Lohmann 教授等给予的指导和帮助。最后对孙炜副教授，彭金柱、袁小芳、余洪山、吴亮红、陈正龙等博士研究生帮助校正样稿，表示衷心谢意。

由于智能控制系统是一门新兴学科，很多理论与应用性问题还待进一步深入研究和发展的，加上作者学识不深，写作时间又十分仓促，因而本书一定存在不足之处，敬请读者和专家们批评指正。

作 者

2006 年 5 月于长沙

# 目 次

## 前 言

## 第 1 章 绪 论

1.1 智能控制的发展过程及特点.....	1
1.2 智能控制的基本设计方法.....	3
1.2.1 模糊控制系统 .....	4
1.2.2 专家控制系统.....	5
1.2.3 分级递阶智能控制系统.....	6
1.2.4 神经网络控制系统.....	6
1.3 智能控制系统的现状与发展趋势.....	10

## 第 2 章 模糊控制系统

2.1 概述.....	12
2.2 模糊集合的基本概念.....	13
2.2.1 普通集合.....	13
2.2.2 模糊集合.....	15
2.2.3 模糊运算.....	16
2.3 模糊关系.....	19
2.3.1 普通关系.....	19
2.3.2 模糊关系.....	19
2.3.3 模糊变换.....	22
2.3.4 模糊决策.....	23
2.4 模糊推理 .....	24
2.4.1 模糊逻辑 .....	24
2.4.2 模糊语言算子.....	25
2.4.3 模糊推理.....	26
2.5 模糊控制器的基本原理与设计方法.....	27
2.5.1 模糊控制器的基本原理.....	27
2.5.2 基本模糊控制器的设计方法.....	29
2.6 Fuzzy 自整定 PID 参数控制器的设计.....	40
2.7 自校正模糊控制器的设计.....	42
2.8 模糊控制系统的稳定性分析.....	47
2.8.1 模糊控制系统的结构与稳定性.....	48

2.8.2	模糊系统的全局渐近稳定性判据.....	51
2.8.3	非线性系统的模糊稳定性判据.....	54
2.9	模糊模型参考学习控制及应用.....	57
2.9.1	模糊模型参考学习控制器的设计.....	57
2.9.2	仿真研究及其应用.....	61
2.10	模糊 PID 控制系统及其工业应用.....	63
<b>第 3 章 专家智能控制系统</b>		
3.1	专家系统的基本组成.....	69
3.2	专家系统的知识表示方法.....	70
3.2.1	产生式规则表示法.....	71
3.2.2	状态空间表示法.....	72
3.2.3	框架表示法.....	72
3.2.4	“与或图”表示法.....	73
3.2.5	黑板模型结构.....	74
3.2.6	神经网络知识表示.....	77
3.2.7	综合知识的表达方法.....	77
3.3	专家系统的自动推理机制.....	78
3.3.1	宽度优先搜索.....	82
3.3.2	深度优先搜索.....	83
3.3.3	不精确推理.....	84
3.3.4	模糊 Petri 网的不确定知识获取与推理.....	89
3.4	专家控制系统的基本原理与结构.....	94
3.5	直接专家控制.....	97
3.5.1	知识库建立.....	98
3.5.2	控制知识的获取.....	98
3.5.3	推理方法的选用.....	99
3.6	间接专家控制.....	99
3.7	仿人智能控制.....	105
3.7.1	仿人智能控制基本方法.....	106
3.7.2	仿人分层递阶智能控制器.....	108
3.8	专家模糊控制系统设计.....	110
3.8.1	基本控制级.....	110
3.8.2	专家智能协调级.....	110
3.8.3	智能协调级的知识获取.....	110
<b>第 4 章 神经网络基本理论</b>		
4.1	人工神经网络的基本特性.....	113
4.1.1	神经元的解剖.....	113

---

4.1.2 神经网络的基本特性.....	114
4.2 感知器模型.....	115
4.3 多层感知机模型.....	117
4.4 前向多层神经网络的 BP 学习算法.....	120
4.4.1 单样本学习法.....	120
4.4.2 随机学习法.....	123
4.4.3 集中学习法.....	123
4.4.4 加快反传算法的收敛速度.....	124
4.5 Hopfield 神经网络.....	124
4.5.1 离散型 Hopfield 神经网络.....	125
4.5.2 连续型 Hopfield 神经网络.....	126
4.6 动态反馈控制网络.....	128
4.7 自组织神经网络.....	132
4.8 自适应线性元件.....	133
4.8.1 线性可分性.....	133
4.8.2 非线性可分性——非线性输入函数.....	134
4.8.3 MADALINES 网络.....	135
4.8.4 Widrow-Hoff 规则.....	135
4.9 玻耳兹曼机模型.....	136
4.10 双向联想记忆网络.....	137
第 5 章 神经网络系统辨识	
5.1 系统辨识的基础.....	141
5.2 神经网络系统辨识的可行性分析.....	143
5.2.1 可行性分析.....	143
5.2.2 ANN 学习算法的收敛性分析.....	145
5.3 多层前馈神经网络用于系统辨识.....	148
5.4 基于单层神经网络的线性系统辨识方法.....	153
5.4.1 动态系统与误差函数的构造.....	154
5.4.2 基于梯度学习方法的动态系统参数估计.....	156
5.5 Hopfield 网络的动态系统辨识.....	157
5.5.1 Hopfield 网络模型.....	157
5.5.2 Hopfield 网络实现系统辨识.....	158
5.5.3 模拟结果.....	160
5.5.4 辨率响应辨识.....	161
5.6 几种神经网络辨识算法的比较.....	162
第 6 章 神经网络智能控制系统	
6.1 几种典型的神经网络控制系统结构.....	168

6.1.1	直接自校正控制.....	168
6.1.2	间接自校正控制.....	169
6.1.3	神经网络模型参考自适应控制.....	169
6.1.4	NN 与常规控制方法的结合.....	169
6.1.5	神经网络内模控制.....	170
6.1.6	神经网络非线性预测控制.....	170
6.1.7	神经网络专家系统控制.....	170
6.1.8	神经网络模糊控制.....	171
6.1.9	基于 CMAC 网络的学习控制系统.....	171
6.1.10	神经网络与其他控制方法.....	173
6.2	ANN 智能控制系统的可控性与稳定性分析.....	173
6.2.1	智能控制的可控性.....	173
6.2.2	智能控制的稳定性分析.....	174
6.3	ANN 学习控制器设计.....	176
6.4	基于高斯基函数网络(GPFN)的智能控制系统.....	180
6.4.1	引言.....	180
6.4.2	GPFN 网络特点与结构.....	180
6.4.3	广义 GRLS 网络学习算法及系统辨识.....	181
6.4.4	基于 GPFN 网络的智能 PID 控制器设计.....	184
6.4.5	神经网络 PID 控制系统的收敛性和稳定性分析.....	187
6.4.6	仿真实验结果.....	189
6.5	基于自适应神经网络的智能控制.....	190
6.5.1	自适应神经网络结构.....	190
6.5.2	单层自适应 Adaline 网络的智能控制器设计.....	196
6.5.3	基于多层自适应网络的自学习控制.....	199
6.6	神经网络 PID 控制系统及其应用.....	201
6.6.1	基于 RBF 神经网络的 PID 控制器设计.....	201
6.6.2	神经网络 PID 控制器与史密斯预估器的结合.....	203
6.6.3	仿真研究.....	204
<b>第 7 章 神经网络自适应控制系统</b>		
7.1	神经网络自适应控制方法.....	206
7.1.1	自适应控制系统.....	206
7.1.2	神经网络自适应控制系统的类型.....	208
7.2	基于单层感知器的自适应控制器设计.....	210
7.2.1	逆动态建模与学习规则.....	210
7.2.2	神经网络控制器.....	211
7.2.3	噪声序列的估计.....	212

---

7.2.4 仿真实例.....	215
7.3 非线性神经网络自校正控制.....	217
7.3.1 非线性神经网络逼近描述.....	217
7.3.2 自校正自适应神经控制.....	217
7.4 非线性系统的自适应神经控制.....	220
7.4.1 最小相位性质.....	220
7.4.2 自适应神经控制.....	220
7.5 基于动态递归神经网络的模型参考自适应控制.....	225
7.5.1 动态递归神经网络.....	225
7.5.2 基于 RNM(递归网络模型)的系统建模.....	225
7.5.3 基于 RNC(动态递归网络控制)的自适应控制.....	227
7.5.4 动态网络控制系统的收敛性分析.....	229
7.5.5 基于模糊逻辑推理的自适应学习率.....	231
7.5.6 系统仿真结果.....	232
7.6 神经网络自适应控制在机器人控制中的应用.....	233
7.6.1 神经网络的机器人逆模学习控制.....	234
7.6.2 基于神经网络的机器人模型参考自适应控制.....	243
第8章 模糊神经网络智能控制系统	
8.1 模糊控制与神经网络的融合.....	252
8.2 模糊神经网络控制模型.....	255
8.2.1 模糊联想存储器.....	255
8.2.2 模糊控制网络.....	259
8.3 神经模糊推理系统.....	260
8.3.1 神经模糊网络推理.....	260
8.3.2 模糊神经网络的直接推理模型.....	266
8.4 模糊神经网络自学习控制系统.....	270
8.4.1 基本模糊逻辑控制.....	270
8.4.2 模糊神经网络自学习控制.....	271
8.5 模糊神经网络自适应控制系统.....	273
8.5.1 模糊逻辑推理控制器.....	273
8.5.2 模糊高斯基函数网络推理控制器设计.....	277
8.5.3 神经网络动态系统辨识.....	282
8.5.4 系统仿真结果与控制实例.....	284
8.6 模糊神经网络自组织控制系统.....	287
8.6.1 自组织模糊控制器.....	287
8.6.2 模糊神经网络自组织控制系统.....	290
8.6.3 仿真实验结果及应用分析.....	301

8.7 高阶模糊 CMAC 自适应控制系统.....	304
8.7.1 CMAC 的原理 .....	304
8.7.2 高阶模糊 CMAC 的模型.....	305
8.7.3 高阶模糊 CMAC 的自适应控制系统.....	308
8.7.4 仿真应用研究.....	310
8.8 混沌系统的模糊自适应控制系统.....	310
8.8.1 基于模糊系统的建模.....	311
8.8.2 模糊自适应控制器设计.....	313
<b>第 9 章 神经网络最优控制系统</b>	
9.1 最优控制系统.....	317
9.1.1 目标函数及最优控制问题.....	317
9.1.2 线性二次型最优控制问题的一般解.....	319
9.2 基于神经网络的最优控制问题的求解.....	323
9.2.1 线性离散系统的最优控制问题.....	324
9.2.2 人工神经网络模型.....	324
9.2.3 用神经网络解最优控制问题.....	325
9.3 神经网络伺服最优鲁棒控制系统.....	327
9.3.1 伺服系统的离散最优鲁棒控制.....	327
9.3.2 神经网络控制器设计.....	330
<b>第 10 章 智能预测控制系统</b>	
10.1 基本预测控制系统.....	337
10.2 基于神经网络模型的模糊预测控制.....	342
10.2.1 模糊预测控制的工作原理.....	342
10.2.2 基于 RBF 网络的神经网络模型.....	345
10.2.3 基于神经网络模型的模糊预测控制器的设计.....	346
10.2.4 仿真实验研究.....	349
10.3 基于模糊关系模型的自适应预测控制系统.....	352
10.3.1 模糊关系处理模型描述.....	352
10.3.2 模糊关系模型的辨识.....	352
10.3.3 基于模糊系统的预测控制.....	357
<b>第 11 章 计算智能控制系统</b>	
11.1 遗传算法基本原理.....	361
11.1.1 基本遗传算法.....	361
11.1.2 遗传算法的数学基础.....	361
11.1.3 非线性优化问题的遗传算法.....	366
11.2 遗传算法在智能控制中的应用.....	370
11.2.1 用遗传算法辨识系统参数.....	370

---

11.2.2	基于遗传算法的控制参数在线优化方法.....	373
11.3	遗传算法在神经网络学习中的应用.....	375
11.3.1	遗传神经网络结构.....	376
11.3.2	用遗传算法训练神经网络权值.....	377
11.3.3	用遗传算法学习的神经网络控制器.....	379
11.4	基于遗传算法的模糊神经网络控制系统.....	382
11.4.1	模糊推理控制器.....	382
11.4.2	模糊神经推理网络的学习算法.....	383
11.4.3	仿真实例.....	385
11.5	基于支持向量机的智能控制系统.....	387
11.5.1	概述.....	387
11.5.2	支持向量机回归介绍.....	387
11.5.3	模糊支持向量机控制系统结构.....	388
11.5.4	模糊支持向量机学习算法.....	389
11.5.5	仿真研究.....	391
11.6	基于混沌优化的非线性系统参数估计.....	392
11.6.1	引言.....	392
11.6.2	并行混沌搜索.....	393
11.6.3	混合优化算法.....	394
11.6.4	仿真研究.....	395
11.7	基于支持向量机的模糊自学习控制系统.....	397
11.7.1	引言.....	397
11.7.2	支持向量机 - 模糊推理系统.....	397
11.7.3	自学习控制器的结构.....	398
11.7.4	自学习控制器的学习算法.....	399
11.7.5	仿真研究.....	402
11.8	微粒群优化算法及应用.....	403
11.8.1	基本 PSO 算法.....	403
11.8.2	PSO 算法的两种基本进化模型.....	404
11.8.3	PSO 算法的伪码描述.....	405
11.8.4	复合最优模型 PSO 算法.....	406
11.8.5	基于 HMP SO 算法的非线性系统模型参考估计.....	410
第 12 章	综合集成智能控制系统的工程应用	
12.1	智能机器人的模糊控制系统.....	414
12.1.1	机器人的控制系统.....	414
12.1.2	机器人的模糊控制.....	417
12.2	实时专家智能控制系统及其工程应用.....	425

12.2.1 REICS 组成与功能模块.....	426
12.2.2 REICS 知识表示方法.....	427
12.2.3 REICS 的推理机制.....	434
12.2.4 REICS 的知识获取与知识库管理.....	445
12.2.5 人机接口与解释机制.....	447
12.2.6 REICS 的工程应用.....	450
12.3 伺服调速的智能协调控制系统.....	450
12.3.1 神经网络专家智能协调控制.....	451
12.3.2 智能协调控制系统的仿真与计算机软硬件实现.....	457
12.4 大型工业熟料窑炉的综合集成智能控制系统.....	460
12.4.1 综合集成智能控制系统设计.....	460
12.4.2 综合集成智能控制的计算机软硬件实现.....	474
12.4.3 系统实时控制实验结果.....	475
12.5 复杂工业系统的综合智能控制及其工程应用.....	476
12.5.1 复杂工业系统的广义知识模型描述与智能建模方法.....	478
12.5.2 复杂工业系统的多传感器信息融合技术.....	487
12.5.3 复杂工业系统的分布式递阶智能控制工程.....	492
参考文献.....	500
附录 本书的部分仿真程序清单.....	512
一、前馈网络的模拟程序.....	513
二、面向方程的数值积分法模糊神经网络仿真程序.....	521
三、面向结构图的离散相似法智能控制系统仿真程序.....	530
四、工业过程二阶被控对象的模糊神经网络控制系统仿真程序.....	543
五、基于 BP 网络的系统辨识仿真程序.....	549
六、非线性系统的神经网络自适应、自学习、自组织控制系统仿真程序 .....	555
七、二关节机器人控制仿真程序.....	588
八、屏幕图形打印程序.....	598
九、屏幕绘图程序.....	606
十、模糊逻辑倒立摆控制程序.....	612
十一、基于模糊逻辑的二关节机器人控制仿真程序.....	636
十二、遗传算法模拟仿真程序.....	642
十三、三关节机器人实时模糊控制系统仿真程序.....	660

# 第1章 绪论

本章简要地回顾了智能控制的发展过程，讨论了现有的智能控制系统方法，并分析了它们的特点及不足，对智能控制系统的现状及发展趋势进行了介绍。

## 1.1 智能控制的发展过程及特点

自动控制理论是与人类社会发展密切联系的一门学科。自从19世纪J.C.Maxwell对具有调速器的蒸汽发动机系统进行线性常微分方程描述及稳定性分析以来，经过20世纪初Bode、Nichols、Nyquist等人的杰出贡献，才形成经典反馈控制的理论基础。第二次世界大战期间军事上的需要以及随后工业大发展的要求又使自动控制理论取得了重大进展。这期间的控制理论主要是采用频率法对控制系统进行描述、分析和设计，其中有很多有效的设计方法，如Nyquist图法和根轨迹法等。经典控制理论目前仍然在工业过程控制中发挥着重要的作用，解决了许多控制问题。但对于解决大规模的复杂控制问题仍远远不够。

随着电子计算机的出现和迅速发展，计算和信息处理的不断提高，促使控制理论向着更复杂更严密的方向发展，60年代出现了以状态空间分析为基础的现代控制理论。现代控制理论主要采用时域的状态空间方法，包括线性系统理论、最优控制理论、系统辨识和随机控制理论等几个主要分支。由于现代控制理论所采用的各种控制系统分析综合方法都是在取得控制对象数学模型基础上进行的，而数学模型的精确程度对控制系统性能的影响很大，往往由于某种原因对象参数发生变化使数学模型不能准确地反映对象特性，无法达到期望的控制指标。为解决这个问题，自适应控制、鲁棒控制的研究便成为控制理论的研究热点。自适应控制是在控制系统运行中根据对象或扰动的动态性能改变自动控制律的参数或结构，以保证控制质量。主要有模型参考自适应控制和自校正控制器等。而鲁棒控制则是在控制系统设计中就考虑对象参数的变化，使所设计的控制器不改变自己的参数或结构就能够在对象参数有一定范围内的变化，保证控制系统的控制质量不变。80年代由加拿大Zames等人创立的H<sub>∞</sub>设计理论，是鲁棒性设计的重要发展，目前仍然是控制界研究的热门课题，这些方法原则上还是没有摆脱基于数学模型的定量化思想，理论上远非完善。

现代控制理论从理论上解决了系统的可观、可控、稳定性以及许多复杂系统的控制问题。但仍存在不少遗留问题和实际应用中的困难，如：

- (1) 对大多数被控对象，难以建立精确的数学模型。
- (2) 对于高维、强耦合，时变、非线性及分布参数等系统，仍然缺乏实用、简便及有效的分析和综合方法。

(3) 传统的控制策略单一，不能适应高层决策问题。

(4) 随着科学技术的不断进步，人们所面临的问题越来越多，需要加以控制的对象和过程变得越来越复杂，对控制质量的要求也变得日益严格，如机器人学、人-机系统、大系统、离散事件系统等一些大型、复杂和具有强烈非线性和不确定性的系统进行有效而精确的控制就非常困难。在这种情况下，现代控制理论也显得软弱无力，其局限性就日益突出。

造成现代控制理论和成果很少实际应用的主要原因是：

(1) 现代控制理论依赖理想化的精确的对象数学模型；

(2) 控制算法较为理想化；

(3) 设计方法越来越数学化；

(4) 实际生产过程中有很多需要靠操作人员的知识和逻辑思维来解决的问题，而现代控制理论显得无能为力。

正当人们为寻找一种新理论费尽心机时，人工智能由于得益于计算机科学技术的飞速发展，已经形成一门学科，并在实际应用中显示出很强的生命力。与此同时，控制界人们开始认识到，在许多系统中，复杂性不仅仅表现在高维性上，更多的则是表现在系统信息的模糊性、不确定性、偶然性和不完全性上，是否可以改变一下思路，不要完全以控制对象为研究主体，而是以控制器为研究主体呢？能否用人工智能的逻辑推理、启发式知识、专家系统等解决难以建立精确的数学模型的控制问题呢？可以说智能控制的出现就体现了这样一种思想。

智能控制的思想最早来自傅京孙教授<sup>[1,2]</sup>，他通过人-机控制器和机器人方面的研究，首先提出把人工智能的直觉推理方法用于学习控制系统，将智能控制概括为自动控制和人工智能的结合。他认为低层次控制中用常规的基本控制器，而在高层次的智能决策，应具有拟人化功能。J.M.Mendel 教授进一步在空间飞行器的学习控制中应用了人工智能技术，并提出了“人工智能控制”的概念。1967年，Leondes 和 Mendel 首次正式使用“智能控制”一词。从70年代开始，傅京孙、Glorioso 和 Saridi 等人从控制理论的角度总结了人工智能技术与自适应、自学习和自组织控制的关系，正式提出了建立智能控制理论的构想。1985年8月在美国纽约PRI、IEEE召开的智能控制专题讨论会，标志着智能控制作为一个新的学科分支正式被控制界公认。从1987年开始，每年都举行一次智能控制国际研讨会，形成了智能控制的研究热潮。

80年代以来，微计算机的高速发展为实用的智能控制器的研制及智能控制系统的开发提供了技术基础。人工智能技术中关于知识表达、推理技术以及专家系统的设计与建造方面的技术进展也为智能控制系统的研究和开发准备了新的条件和途径，出现了专家控制系统<sup>[4]</sup>并在工业过程控制、航空航天技术和军事决策等方面实际应用，取得了引人注目的应用成果。

智能控制不同于经典控制理论和现代控制理论的处理方法。它研究的主要目标不再是被控对象，而是控制器本身。控制器不再是单一的数学模型解析型，而是数学解析和知识系统相结合的广义模型，是多种学科知识控制系统。

智能控制具有以下基本特点<sup>[5,6,7]</sup>：

(1) 控制系统应体现“智能递增，精度递降”的一般组织结构的基本原理，即协调层次越高，所体现的智能越高；

(2) 开、闭环控制结合和定性决策与定量控制结合的多模态控制；

(3) 智能控制的基本目的是从系统的功能和整体优化的角度来分析和综合系统，以实现预定的目标，智能控制应具备学习功能、适应功能和组织功能；

(4) 同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程，即在信息处理方法上，既有数学运算，又有符号运算的逻辑推理。

(5) 智能控制是一门边缘交叉学科。

目前智能控制还缺少一种比较适合的数学工具和理论体系来描述和处理智能控制问题。因此，智能控制的理论基础还需要广大数学工作者，控制理论、计算机科学、生物工程工作者的努力工作。尽管智能控制的理论基础尚有待建立，但智能控制是传统控制理论和方法的扩充和发展。事实上，已产生了一系列有效的应用方法。本章 1.2 节将对这些方法进行讨论。

智能控制系统的智能可归纳为以下几个方面：

(1) 先验智能：有关控制对象及干扰的先验知识，可以从一开始就考虑在控制系统的设计中；

(2) 反应性智能：在实时监控、辨识及诊断基础上对系统及环境变化的正确反应能力；

(3) 优化智能：包括对系统性能的先验性优化及反应性优化；

(4) 组织与协调智能：表现为对并行耦合任务或子系统之间的有效管理与协调。

智能控制的概念是针对系统及其控制环境和任务的不确定性而提出来的。智能控制过程是含有复杂性、不确定性、模糊性且一般不存在已知算法的非传统数学公式化的过程。在智能控制过程中，以知识信息为基础进行推理和学习，用启发式方法来引导求解过程，从而得以在大范围内实现快速自组织的目标。因此，就智能控制过程而言，系统应当设计成为对环境和任务的变化有快速的应变能力，而且要能完成各种难以用传统的分析数学和/或统计数学方法定义得清楚的任务。

## 1.2 智能控制的基本设计方法

智能控制是针对系统的复杂性、非线性、不确定性而提出来的。目前智能控制设计的途径有：

(1) 基于专家系统的专家智能控制；

(2) 基于模糊推理和计算的模型控制器；

(3) 基于人工神经网络的神经网络控制器；

(4) 基于信息论、遗传算法和以上三种方法的集成型智能控制；

(5) 基于多传感信息融合的智能控制系统。