



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

电气工程、自动化专业规划教材

智能控制 (第3版)

刘金琨 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

智能控制

(第3版)

刘金琨 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书较全面地叙述了智能控制的基本理论、方法和应用。全书共 11 章,主要内容为:专家控制的基本原理和应用;模糊控制的基本原理和应用;神经网络控制的基本原理和应用;智能算法及其应用;迭代学习控制方法及其应用。

本书系统性强,突出理论联系实际,叙述深入浅出,适合于初学者学习。书中给出了一些智能算法的 Matlab 仿真程序,并配有一定数量的习题和上机操作题。

本书可作为高等院校自动化、计算机应用、电子工程等专业的硕士研究生和高年级本科生的教材,也可供从事自动化领域的工程技术人员阅读和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制/刘金琨编著. — 3 版. — 北京:电子工业出版社, 2014. 1
电气工程、自动化专业规划教材
ISBN 978-7-121-21966-5

I. ①智… II. ①刘… III. ①智能控制—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 279466 号

策划编辑:凌毅

责任编辑:凌毅

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:19 字数:512 千字

印 次:2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第 3 版前言

智能控制是自动控制领域的前沿学科之一,它是一门综合性很强的多学科交叉的新兴学科,被称为自动控制理论发展的第三阶段。智能控制的发展为解决复杂非线性、不确定系统的控制问题开辟了新的途径。

本教材共 11 章。第 1 章是绪论,着重介绍智能控制的产生和发展背景、智能控制的基本概念;第 2 章介绍专家控制;第 3 章介绍模糊控制的理论基础;第 4 章介绍模糊控制的基本原理及模糊控制器的设计方法;第 5 章介绍模糊逼近的基本原理及自适应模糊控制的设计和分析方法;第 6 章介绍神经网络控制的理论基础;第 7 章介绍几种典型的神经网络,包括单神经元网络、BP 神经网络、RBF 神经网络;第 8 章介绍几种高级神经网络,包括模糊神经网络、 π - σ 神经网络、小脑模型神经网络和 Hopfield 网络;第 9 章介绍几种典型神经网络控制的设计和分析方法;第 10 章介绍了智能算法及其应用;第 11 章介绍了基本迭代学习控制原理及应用。

本书是在原“北京市高等教育精品教材”《智能控制》(电子工业出版社,2005 年)和《智能控制(第 2 版)》(电子工业出版社,2009 年)的基础上修订而成的。为了适合高年级本科生的教学需要,本书在选材上更加着重于基础性和实用性。为了加深读者的理解,并便于读者的进一步开发,书中给出了智能算法的 Matlab 仿真程序,这些程序是在 Matlab7. 12. 0. 635 环境下开发的,适用于其他更高级的 Matlab 版本。

本书提供免费的电子课件和 Matlab 仿真程序,读者可登录网站 ljk.buaa.edu.cn 下载;或登录电子工业出版社的华信教育资源网:www.hxedu.com.cn,注册后免费下载;或通过邮件与作者联系索取。

北京航空航天大学吴淮宁教授针对本书的修订工作提出了许多宝贵建议。作者的研究生卢宇、孔建、郑明慧等参与了本书部分算法的修正工作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足和错误之处,真诚欢迎广大读者批评指正。若读者有指正或需与作者探讨,或对控制算法及仿真程序有疑问,请通过电子邮件 ljk@buaa.edu.cn 与作者联系。

刘金琨

2013 年 12 月于北京航空航天大学

目 录

第 1 章 绪论	1	附录(程序代码)	28
1.1 智能控制的发展过程	1	第 4 章 模糊控制	31
1.2 智能控制的几个重要分支	3	4.1 模糊控制的基本原理	31
1.3 智能控制的特点、研究工具及 应用	4	4.1.1 模糊控制原理	31
思考题与习题	5	4.1.2 模糊控制器的组成	31
第 2 章 专家控制	6	4.1.3 模糊控制系统的工作原理	33
2.1 专家系统	6	4.1.4 模糊控制器的结构	37
2.1.1 专家系统概述	6	4.2 模糊控制系统分类	38
2.1.2 专家系统的构成	6	4.3 模糊控制器的设计	38
2.1.3 专家系统的建立	7	4.3.1 模糊控制器的设计步骤	38
2.2 专家控制	8	4.3.2 模糊控制器的 Matlab 仿真	40
2.2.1 专家控制概述	8	4.4 模糊控制应用实例——洗衣机的模糊控制	42
2.2.2 专家控制的基本原理	8	4.5 模糊自适应整定 PID 控制	47
2.2.3 专家控制的关键技术及特点	10	4.5.1 模糊自适应整定 PID 控制原理	47
2.3 专家 PID 控制	10	4.5.2 仿真实例	49
2.3.1 专家 PID 控制原理	10	4.6 Sugeno 模糊模型	52
2.3.2 仿真实例	12	4.7 基于极点配置的单级倒立摆 T-S 模糊控制	53
思考题与习题	12	4.7.1 T-S 模糊系统的设计	53
附录(程序代码)	13	4.7.2 单级倒立摆的 T-S 模型模糊控制	54
第 3 章 模糊控制的理论基础	15	4.8 模糊控制的应用	57
3.1 概述	15	4.9 模糊控制发展概况	58
3.2 模糊集合	15	4.9.1 模糊控制发展的几个转折点	58
3.2.1 模糊集合的概念	15	4.9.2 模糊控制的发展方向	59
3.2.2 模糊集合的运算	17	4.9.3 模糊控制面临的主要任务	59
3.3 隶属函数	19	思考题与习题	60
3.4 模糊关系及其运算	22	附录(程序代码)	61
3.4.1 模糊矩阵	22	第 5 章 自适应模糊控制	76
3.4.2 模糊矩阵的运算与模糊关系	23	5.1 模糊逼近	76
3.4.3 模糊关系的合成	23	5.1.1 模糊系统的设计	76
3.5 模糊推理	25	5.1.2 模糊系统的逼近精度	77
3.5.1 模糊语句	25	5.1.3 仿真实例	77
3.5.2 模糊推理	25		
3.5.3 模糊关系方程	26		
思考题与习题	27		

5.2 简单的自适应模糊控制·····	80	7.2.6 BP网络模式识别·····	130
5.2.1 问题描述·····	80	7.2.7 BP网络模式识别仿真实例·····	131
5.2.2 模糊逼近原理·····	80	7.3 RBF神经网络·····	132
5.2.3 控制算法设计与分析·····	81	7.3.1 RBF网络结构与算法·····	133
5.2.4 仿真实例·····	82	7.3.2 RBF网络设计实例·····	133
5.3 间接自适应模糊控制·····	83	7.3.3 RBF网络的逼近·····	135
5.3.1 问题描述·····	83	7.3.4 高斯基函数的参数对RBF网络逼近的影响·····	136
5.3.2 控制器的设计·····	83	7.3.5 隐含层节点数对RBF网络逼近的影响·····	139
5.3.3 仿真实例·····	86	7.3.6 控制系统设计中RBF网络的逼近·····	140
5.4 直接自适应模糊控制·····	88	思考题与习题·····	141
5.4.1 问题描述·····	88	附录(程序代码)·····	143
5.4.2 控制器的设计·····	88	第8章 高级神经网络 ·····	158
5.4.3 自适应律的设计·····	89	8.1 模糊RBF网络·····	158
5.4.4 仿真实例·····	91	8.1.1 网络结构·····	158
5.5 机器人关节数学模型·····	92	8.1.2 基于模糊RBF网络的逼近算法·····	159
5.6 基于模糊补偿的机械手自适应模糊控制·····	93	8.1.3 仿真实例·····	160
5.6.1 系统描述·····	93	8.2 pi-sigma神经网络·····	161
5.6.2 基于模糊补偿的控制·····	93	8.2.1 高木-关野模糊系统·····	161
5.6.3 基于摩擦补偿的控制·····	95	8.2.2 混合型pi-sigma神经网络·····	162
5.6.4 仿真实例·····	95	8.2.3 仿真实例·····	164
思考题与习题·····	96	8.3 小脑模型神经网络·····	165
附录(程序代码)·····	98	8.3.1 CMAC概述·····	165
第6章 神经网络的理论基础 ·····	120	8.3.2 一种典型CMAC算法·····	166
6.1 神经网络发展简史·····	120	8.3.3 仿真实例·····	167
6.2 神经网络原理·····	121	8.4 Hopfield网络·····	167
6.3 神经网络的分类·····	122	8.4.1 Hopfield网络原理·····	167
6.4 神经网络学习算法·····	123	8.4.2 基于Hopfield网络的路径优化·····	169
6.4.1 Hebb学习规则·····	123	思考题与习题·····	172
6.4.2 Delta(δ)学习规则·····	123	附录(程序代码)·····	173
6.5 神经网络的特征及要素·····	124	第9章 神经网络控制 ·····	182
6.6 神经网络控制的研究领域·····	124	9.1 概述·····	182
思考题与习题·····	125	9.2 神经网络控制的结构·····	183
第7章 典型神经网络 ·····	126	9.2.1 神经网络监督控制·····	183
7.1 单神经元网络·····	126	9.2.2 神经网络直接逆控制·····	183
7.2 BP神经网络·····	127	9.2.3 神经网络自适应控制·····	184
7.2.1 BP网络特点·····	127	9.2.4 神经网络内模控制·····	185
7.2.2 BP网络结构·····	127		
7.2.3 BP网络的逼近·····	127		
7.2.4 BP网络的优缺点·····	129		
7.2.5 BP网络逼近仿真实例·····	129		

9.2.5 神经网络预测控制	185	思考题与习题.....	208
9.2.6 神经网络自适应评判 控制	186	附录(程序代码)	210
9.2.7 神经网络混合控制	186	第 10 章 智能算法及其应用	236
9.3 单神经元自适应控制	186	10.1 遗传算法的基本原理.....	236
9.3.1 单神经元自适应控制算法.....	186	10.2 遗传算法的特点.....	237
9.3.2 仿真实例	187	10.3 遗传算法的发展及应用.....	238
9.4 RBF 网络监督控制	188	10.3.1 遗传算法的发展.....	238
9.4.1 RBF 网络监督控制算法	188	10.3.2 遗传算法的应用.....	238
9.4.2 仿真实例	188	10.4 遗传算法的设计.....	239
9.5 RBF 网络自校正控制	189	10.4.1 遗传算法的构成要素	239
9.5.1 神经网络自校正控制原理.....	189	10.4.2 遗传算法的应用步骤	240
9.5.2 自校正控制算法	189	10.5 遗传算法求函数极大值.....	241
9.5.3 RBF 网络自校正控制算法	190	10.5.1 二进制编码遗传算法求函数 极大值	241
9.5.4 仿真实例	191	10.5.2 实数编码遗传算法求函数 极大值	242
9.6 基于 RBF 网络直接模型参考 自适应控制	192	10.6 基于遗传算法优化的 RBF 网络逼近.....	243
9.6.1 基于 RBF 网络的控制器 设计	192	10.6.1 遗传算法优化原理	243
9.6.2 仿真实例	193	10.6.2 仿真实例	244
9.7 一种简单的 RBF 网络自适应 控制	194	10.7 基于遗传算法的 TSP 问题 优化.....	244
9.7.1 问题描述	194	10.7.1 TSP 问题的编码.....	245
9.7.2 RBF 网络原理	194	10.7.2 TSP 问题的遗传算法设计	245
9.7.3 控制算法设计与分析	195	10.7.3 仿真实例	247
9.7.4 仿真实例	195	10.8 差分进化算法.....	248
9.8 基于不确定逼近的 RBF 网络 自适应控制	196	10.8.1 标准差分进化算法	248
9.8.1 问题的提出	196	10.8.2 差分进化算法的基本流程	249
9.8.2 模型不确定部分的 RBF 网络 逼近	197	10.8.3 差分进化算法的参数设置	250
9.8.3 控制器的设计及分析	198	10.9 差分进化算法的函数优化与 参数辨识.....	251
9.8.4 仿真实例	201	10.9.1 基于差分进化算法的函数 优化	251
9.9 基于模型整体逼近的机器人 RBF 网络自适应控制	202	10.9.2 基于差分进化算法的参数 辨识	252
9.9.1 问题的提出	202	思考题与习题.....	252
9.9.2 针对 $f(x)$ 进行逼近的控制	203	附录(程序代码)	254
9.9.3 仿真实例	204	第 11 章 迭代学习控制	274
9.10 神经网络数字控制.....	206	11.1 基本原理.....	274
9.10.1 基本原理	206	11.2 基本迭代学习控制算法.....	275
9.10.2 仿真实例	207	11.3 迭代学习控制的关键技术.....	275

11.4	机械手轨迹跟踪迭代学习		11.5.2	控制器设计及收敛性分析	278
	控制仿真实例	276	11.5.3	仿真实例	281
11.4.1	控制器设计	276		思考题与习题	283
11.4.2	仿真实例	277		附录(程序代码)	284
11.5	线性时变连续系统迭代学习		附录 A		293
	控制	278	参考文献		295
11.5.1	系统描述	278			

第 1 章 绪 论

1.1 智能控制的发展过程

1. 智能控制的提出

传统控制方法包括经典控制和现代控制,是基于被控对象精确模型的控制方式,缺乏灵活性和应变能力,适于解决线性、时不变性等相对简单的控制问题。传统控制方法在实际应用中遇到很多难以解决的问题,主要表现在以下几点:

① 实际系统由于存在复杂性、非线性、时变性、不确定性和不完全性等,无法获得精确的数学模型;

② 某些复杂的和包含不确定性的控制过程无法用传统的数学模型来描述,即无法解决建模问题;

③ 针对实际系统往往需要进行一些比较苛刻的线性化假设,而这些假设往往与实际系统不符合;

④ 实际控制任务复杂,而传统的控制任务要求低,对复杂的控制任务如智能机器人控制、CIMS、社会经济管理系统等无能为力。

在生产实践中,复杂控制问题可通过熟练操作人员的经验和控制理论相结合去解决,由此产生了智能控制。智能控制将控制理论的方法和人工智能技术灵活地结合起来,其控制方法适应对象的复杂性和不确定性。

智能控制是控制理论发展的高级阶段,它主要用来解决那些用传统控制方法难以解决的复杂系统的控制问题。智能控制研究对象具备以下一些特点:

① 不确定性的模型。智能控制适合于不确定性对象的控制,其不确定性包括两层意思:一是模型未知或知之甚少;二是模型的结构和参数可能在很大范围内变化。

② 高度的非线性。采用智能控制方法可以较好地解决非线性系统的控制问题。

③ 复杂的任务要求。例如,智能机器人要求控制系统对一个复杂的任务具有自行规划和决策的能力,有自动躲避障碍运动到期望目标位置的能力。又如,在复杂的工业过程控制系统中,除了要求各被控物理量实现定值调节外,还要求能实现整个系统的自动启/停、故障的自动诊断及紧急情况下的自动处理等功能。

2. 智能控制的概念

智能控制是一门交叉学科,著名美籍华人傅京逊教授 1971 年首先提出智能控制是人工智能与自动控制的交叉,即二元论。美国学者 G. N. Saridis 于 1977 年在此基础上引入运筹学,提出了三元论的智能控制概念,即

$$IC = AC \cap AI \cap OR$$

式中各子集的含义为:IC 为智能控制(Intelligent Control);AI 为人工智能(Artificial Intelligence);AC 为自动控制(Automatic Control);OR 为运筹学(Operational Research)。基于三元论的智能控制如图 1-1 所示。

人工智能(AI)是一个用来模拟人思维的知识处理系统,具有记忆、学习、信息处理、形式语言、启发推理等功能。

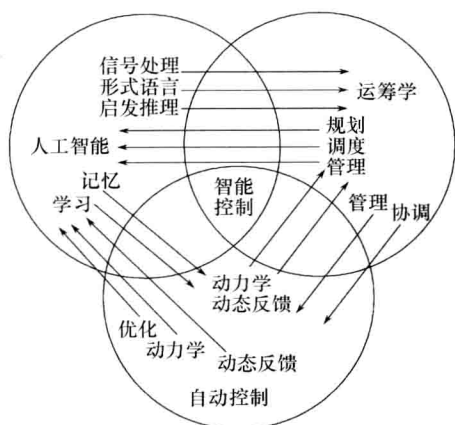


图 1-1 基于三元论的智能控制

3. 智能控制的发展

智能控制是自动控制发展的最新阶段,主要用于解决传统控制难以解决的复杂系统的控制问题。控制科学的发展过程如图 1-2 所示。

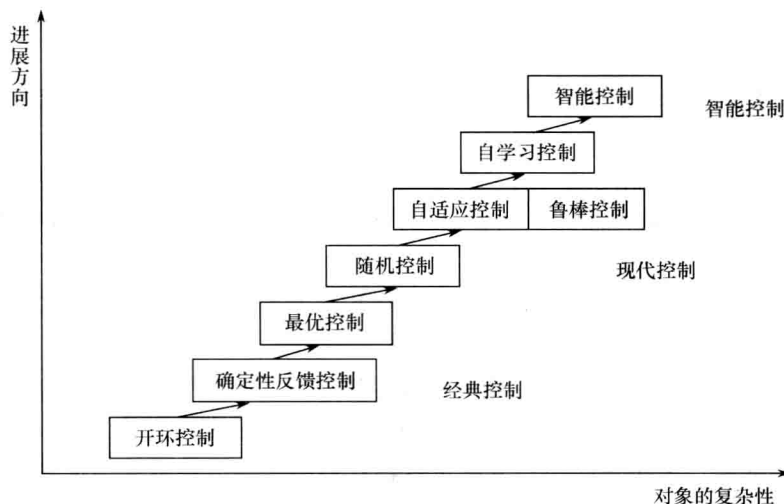


图 1-2 控制科学的发展过程

从 20 世纪 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中。

1966 年,J. M. Mendal 首先提出将人工智能技术应用于飞船控制系统的设计;1971 年,傅京逊首次提出智能控制这一概念,并归纳了 3 种类型的智能控制系统。

① 人作为控制器的控制系统:人作为控制器的控制系统具有自学习、自适应和自组织的功能。

② 人机结合作为控制器的控制系统:机器完成需要连续进行的并需快速计算的常规控制任务,人则完成任务分配、决策、监控等任务。

③ 无人参与的自主控制系统:为多层的智能控制系统,需要完成问题求解和规划、环境建模、传感器信息分析和低层的反馈控制任务,如自主机器人。

1985年8月,IEEE在美国纽约召开了第一届智能控制学术讨论会,随后成立了IEEE智能控制专业委员会;1987年1月,在美国举行第一次国际智能控制大会,标志着智能控制领域的形成。

近年来,神经网络、模糊数学、专家系统、进化论等各门学科的发展给智能控制注入了巨大的活力,由此产生了各种智能控制方法。智能控制的几个重要分支为专家控制、模糊控制、神经网络控制和遗传算法。

1.2 智能控制的几个重要分支

1. 模糊控制

以往的各种传统控制方法均是建立在被控对象精确数学模型的基础上,然而,随着系统复杂程度的提高,将难以建立系统的精确数学模型。

在工程实践中,人们发现,一个复杂的控制系统可由一个操作人员凭着丰富的实践经验得到满意的控制效果。这说明,如果通过模拟人脑的思维方法设计控制器,可实现复杂系统的控制,由此产生了模糊控制。

1965年美国加州大学自动控制系L. A. Zedeh提出模糊集合理论,奠定了模糊控制的基础;1974年伦敦大学的Mamdani博士利用模糊逻辑,开发了世界上第一台模糊控制的蒸汽机,从而开创了模糊控制的历史;1983年日本富士电机开创了模糊控制在日本的第一项应用——水净化处理,之后,富士电机致力于模糊逻辑元件的开发与研究,并于1987年在仙台地铁线上采用了模糊控制技术,1989年将模糊控制消费品推向高潮,使日本成为模糊控制技术的主导国家。模糊控制的发展可分为3个阶段:

- ① 1965—1974年,为模糊控制发展的第一阶段,即模糊数学发展和形成阶段;
- ② 1974—1979年,为模糊控制发展的第二阶段,产生了简单的模糊控制器;
- ③ 1979年至现在,为模糊控制发展的第三阶段,即高性能模糊控制阶段。

2. 神经网络控制

神经网络的研究已经有几十年的历史了。1943年McCulloch和Pitts提出了神经元数学模型;1950—1980年为神经网络的形成期,有少量成果,如1975年Albus提出了人脑记忆模型CMAC网络,1976年Grossberg提出了用于无导师指导下模式分类的自组织网络;1980年以后为神经网络的发展期,1982年Hopfield提出了Hopfield网络,解决了回归网络的学习问题,1986年美国的PDP研究小组提出了BP网络,实现了有导师指导下的网络学习,为神经网络的应用开辟了广阔的发展前景。

将神经网络引入控制领域就形成了神经网络控制。神经网络控制是从机理上对人脑生理系统进行简单结构模拟的一种新兴智能控制方法。神经网络具有并行机制、模式识别、记忆和自学能力的特点,它能充分逼近任意复杂的非线性系统,能够学习与适应不确定系统的动态特性,有很强的鲁棒性和容错性。神经网络控制在控制领域有着广泛的应用。

3. 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm,GA)是人工智能的一个重要分支,是基于自然选择和基因遗传学原理的搜索算法,是基于达尔文进化论,在计算机上模拟生命进化论机制而发展起来的一门学科。遗传算法由美国的J. H. Holland教授在1975年提出,20世纪80年代中期开始逐步成熟。从1985年起,国际上开始举行遗传算法国际会议。目前遗传算法已经被广泛应用于许多实际问题,成为用来解决高度复杂问题的新思路和新方法。

遗传算法可用于模糊控制规则的优化及神经网络参数及权值的学习,在智能控制领域有广泛的应用。

1.3 智能控制的特点、研究工具及应用

1. 智能控制的特点

(1) 学习功能

智能控制器能通过从外界环境所获得的信息进行学习,不断积累知识,使系统的控制性能得到改善。

(2) 适应功能

智能控制器具有从输入到输出的映射关系,可实现不依赖于模型的自适应控制,当系统某一部分出现故障时,也能进行控制。

(3) 自组织功能

智能控制器对复杂的分布式信息具有自组织和协调的功能,当出现多目标冲突时,它可以在任务要求的范围内自行决策,主动采取行动。

(4) 优化能力

智能控制器能够通过不断优化控制参数和寻找控制器的最佳结构形式获得整体最优的控制性能。

2. 智能控制的研究工具

(1) 符号推理与数值计算的结合

例如专家控制,它的上层是专家系统,采用人工智能中的符号推理方法;下层是传统意义上的控制系统,采用数值计算方法。

(2) 模糊集理论

模糊集理论是模糊控制的基础,其核心是采用模糊规则进行逻辑推理,其逻辑取值可在 0 与 1 之间连续变化,其处理的方法是基于数值的而不是基于符号的。

(3) 神经网络理论

神经网络通过许多简单的关系来实现复杂的函数,其本质是一个非线性动力学系统,但它不依赖数学模型,是一种介于逻辑推理和数值计算之间的工具和方法。

(4) 遗传算法

遗传算法(GA)根据适者生存、优胜劣汰等自然进化规则来进行搜索计算和问题求解。对许多传统数学难以解决或明显失效的复杂问题,特别是优化问题,GA 提供了一个行之有效的途径。

(5) 离散事件与连续时间系统的结合

它主要用于计算机集成制造系统(CIMS)和智能机器人的智能控制。以 CIMS 为例,上层任务的分配和调度、零件的加工和传输等可用离散事件系统理论进行分析和设计;下层的控制,如机床及机器人的控制,则采用常规的连续时间系统方法。

3. 智能控制的应用

作为智能控制发展的高级阶段,智能控制主要解决那些用传统控制方法难以解决的复杂系统的控制问题,其中包括智能机器人控制、计算机集成制造系统(CIMS)、工业过程控制、航空航天控制、社会经济管理系统、交通运输系统、环保及能源系统等。下面以智能控制在机器人控制和在过程控制中的应用为例进行说明。

(1) 在机器人控制中的应用

智能机器人是目前机器人研究中的热门课题。E. H. Mamdan 于 20 世纪 80 年代初首次将模糊控制应用于一台实际机器人的操作臂控制。J. S. Albus 于 1975 年提出小脑模型关节控制器(Cerebellar Model Articulation Controller, CMAC),它是仿照小脑如何控制肢体运动的原理而建立的神经网络模型,采用 CMAC,可实现机器人的关节控制,这是神经网络在机器人控制中的一个典型应用。

目前工业上用的 90%以上的机器人都不具有智能。随着机器人技术的迅速发展,需要各种具有不同程度智能的机器人。

(2) 在过程控制中的应用

过程控制是指石油、化工、冶金、轻工、纺织、制药、建材等工业生产过程的自动控制,它是自动化技术的一个极其重要的方面。智能控制在过程控制中有着广泛的应用。在石油化工方面,1994 年美国的 Gensym 公司和 Neuralware 公司联合将神经网络用于炼油厂的非线性工艺过程。在冶金方面,日本的新日铁公司于 1990 年将专家控制系统应用于轧钢生产过程。在化工方面,日本的三菱化学合成公司研制出用于乙烯工程的模糊控制系统。

将智能控制应用于过程控制领域,是过程控制发展新的方向。

思考题与习题

- 1-1 简述智能控制的概念。
- 1-2 智能控制由哪几部分组成?各自的特点是什么?
- 1-3 比较智能控制和传统控制的特点。
- 1-4 智能控制有哪些应用领域?试各举出一个应用实例。

第2章 专家控制

在传统控制系统中,系统的运行排斥了人为的干预,人机之间缺乏交互,控制器对被控对象在环境中的参数、结构的变化缺乏应变能力。传统控制理论的不足,在于它必须依赖于被控对象严格的数学模型,试图对精确模型来求取最优的控制效果,而实际的被控对象存在着许多难以建模的因素。

20世纪80年代初,人工智能中专家系统的思想和方法开始被引入控制系统的研究和工程应用中。专家系统主要面临的是各种非结构化的问题,它能处理定性的、启发式或不确定的知识信息,经过各种推理来达到系统的任务目标。专家系统这一特点为解决传统控制理论的局限性提供了重要的启示,两者的结合导致了专家控制这一方法。

2.1 专家系统

2.1.1 专家系统概述

1. 定义

专家系统是一类包含知识和推理的智能计算机程序,其内部包含某领域专家水平的知识和经验,具有解决专门问题的能力。

2. 发展历史

专家系统的发展分为3个时期。

(1) 初创期(1965—1971年)

第一代专家系统 DENLDRA 和 MACSMA 的出现,标志着专家系统的诞生。其中, DENLDRA 为推断化学分子结构的专家系统,由专家系统的奠基人、Stanford 大学计算机系的 Feigenbaum 教授及其研究小组研制。MACSMA 为用于数学运算的数学专家系统,由麻省理工学院完成。

(2) 成熟期(1972—1977年)

在此期间 Stanford 大学研究开发了最著名的专家系统——血液感染病诊断专家系统 MYCIN,标志着专家系统从理论走向应用。另一个著名的专家系统——语音识别专家系统 HEARSAY 的出现,标志着专家系统从理论走向成熟。

(3) 发展期(1978年至现在)

在此期间,专家系统走向应用领域,专家系统的数量增加,仅1987年研制成功的专家系统就有1000多种。

专家系统可以解决的问题一般包括解释、预测、设计、规划、监视、修理、指导和控制等。目前,专家系统已经广泛地应用于医疗诊断、语音识别、图像处理、金融决策、地质勘探、石油化工、教学、军事、计算机设计等领域。

2.1.2 专家系统的构成

专家系统主要由知识库和推理机构成,专家系统的结构如图2-1所示。

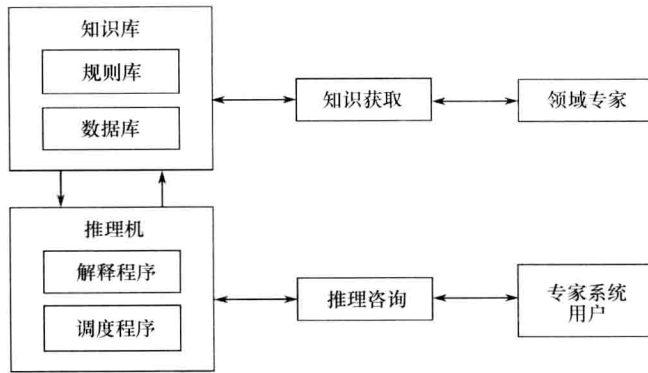


图 2-1 专家系统的结构

2.1.3 专家系统的建立

1. 知识库

知识库包含 3 类知识：

- ① 基于专家经验的判断性规则；
- ② 用于推理、问题求解的控制性规则；
- ③ 用于说明问题的状态、事实和概念及当前的条件和常识等的数据库。

知识库包含多种功能模块，主要有知识查询、检索、增删、修改和扩充等。知识库通过人机接口与领域专家相沟通，从而实现知识的获取。

2. 推理机

推理机是用于对知识库中的知识进行推理来得到结论的“思维”机构。推理机包括 3 种推理方式。

- ① 正向推理：从原始数据和已知条件得到结论。
- ② 反向推理：先提出假设的结论，然后寻找支持的证据，若证据存在，则假设成立。
- ③ 双向推理：运用正向推理提出假设的结论，运用反向推理来证实假设。

3. 知识的表示

常用的知识表示方法为：产生式规则、框架、语义网络、过程。其中，产生式规则是专家系统最流行的表达方法。由产生式规则表示的专家系统又称为基于规则的系统或产生式系统。

产生式规则的表达方式为

$$\text{IF } E \text{ THEN } H \text{ WITH } CF(E, H)$$

式中，E 表示规则的前提条件，即证据，它可以是单独命题，也可以是复合命题；H 表示规则的结论部分，即假设，也是命题；CF(Certainty Factor)为规则的强度，反映当前提为真时，规则对结论的影响程度，即可信度。

4. 专家系统开发语言

- ① C 语言，人工智能语言(如 Prolog, Lisp 等)。
- ② 专家系统开发工具：已经建好的专家系统框架，包括知识表达和推理机。在运用专家系统开发工具开发专家系统时，只需要加入领域知识。

5. 专家系统建立步骤

(1) 知识库的设计

- ① 确定知识类型：叙述性知识、过程性知识、控制性知识。

- ② 确定知识表达方法。
- ③ 知识库管理系统的设计:实现规则的保存、编辑、删除、增加、搜索等功能。
- (2)推理机的设计
 - ① 选择推理方式。
 - ② 选择推理算法:选择各种搜索算法,如深度优先搜索、广度优先搜索、启发式优先搜索等。
- (3)人机接口的设计
 - ① 设计“用户-专家系统接口”:用于咨询理解和结论解释。
 - ② 设计“专家-专家系统接口”:用于知识库扩充及系统维护。

2.2 专家控制

2.2.1 专家控制概述

瑞典学者 K. J. Astrom 于 1983 年首先把人工智能中的专家系统引入智能控制领域,于 1986 年提出“专家控制”的概念,构成一种智能控制方法。

专家控制(Expert Control)是智能控制的一个重要分支,又称专家智能控制。所谓专家控制,是将专家系统的理论和技术同控制理论、方法与技术相结合,在未知环境下,仿效专家的经验,实现对系统的控制。

专家控制试图在传统控制的基础上“加入”一个富有经验的控制工程师,实现控制的功能,它由知识库和推理机构成主体框架,通过对控制领域知识(先验经验、动态信息、目标等)的获取与组织,按某种策略及时地选用恰当的规则进行推理输出,实现对实际对象的控制。

2.2.2 专家控制的基本原理

1. 结构

专家控制的基本结构如图 2-2 所示。

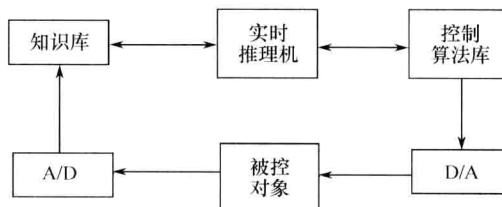


图 2-2 专家控制的基本结构

2. 功能

- ① 能够满足任意动态过程的控制需要,尤其适用于带有时变、非线性和强干扰的控制;
- ② 控制过程可以利用对象的先验知识;
- ③ 通过修改、增加控制规则,可不断积累知识,改进控制性能;
- ④ 可以定性地描述控制系统的性能,如超调小、偏差增大等;
- ⑤ 对控制性能可进行解释;
- ⑥ 可通过对控制闭环中的单元进行故障检测来获取经验规则。

3. 与专家系统的区别

专家控制引入了专家系统的思想,但与专家系统存在以下区别。

① 专家系统能完成专门领域的功能,辅助用户决策;专家控制能进行独立的、实时的自动决策。专家控制比专家系统对可靠性和抗干扰性有着更高的要求。

② 专家系统处于离线工作方式,而专家控制要求在线获取反馈信息,即要求在线工作方式。

4. 知识表示

专家控制将系统视为基于知识的系统,控制系统的知识表示如下:

(1)受控过程的知识

① 先验知识:包括问题的类型及开环特性。

② 动态知识:包括中间状态及特性变化。

(2)控制、辨识、诊断知识

① 定量知识:各种算法。

② 定性知识:各种经验、逻辑、直观判断。

按照专家系统知识库的结构,有关知识可以分类组织,形成数据库和规则库,从而构成专家控制系统的知识源。

数据库包括:① 事实:知识的静态数据,如传感器测量误差、运行阈值、报警阈值、操作序列的约束条件、受控过程的单元组态等。② 证据:测量到的动态数据,如传感器的输出值、仪器仪表的测试结果等。证据的类型是各异的,常常带有噪声、延迟,也可能是不完整的,甚至相互之间有冲突。③ 假设:由事实和证据推导的中间结果,作为当前事实集合的补充,如通过各种参数估计算法推得的状态估计等。④ 目标:系统的性能指标,如对稳定性的要求、对静态工作点的寻优、对现有控制规律是否需要改进的判断等。目标既可以是预定的,也可以是根据外部命令或内部运行状况在线动态建立的。

专家控制的规则库一般采用产生式规则表示,即

IF 控制局势(事实和数据) THEN 操作结论

由多条产生式规则构成规则库。

5. 分类

按专家控制在控制系统中的作用和功能,可将专家控制器分为以下两种类型。

(1)直接型专家控制器

直接型专家控制器用于取代常规控制器,直接控制生产过程或被控对象。具有模拟(或延伸、扩展)操作工人智能的功能。该控制器的任务和功能相对比较简单,但需要在线、实时控制。因此,其知识表达和知识库也较简单,通常由几十条产生式规则构成,以便于增删和修改。

直接型专家控制器的结构如图 2-3 中的虚线所示。

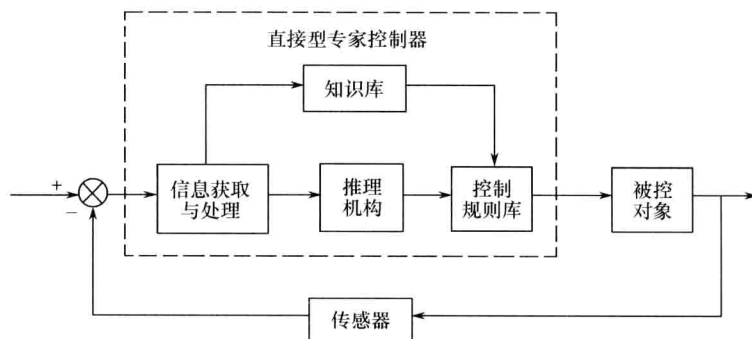


图 2-3 直接型专家控制器的结构

(2)间接型专家控制器

间接型专家控制器用于和常规控制器相结合,组成对生产过程或被控对象进行间接控制的