

高等工科院校控制类课程系列化教材

智能控制技术

易继锴 侯媛彬 编著

北京工业大学出版社

(修订版)

Intelligent
Control

高等工科院校控制类课程系列化教材

智能控制技术

易继锴 侯媛彬 编著

北京工业大学出版社

内 容 简 介

本书面向智能控制学科前沿,从工程应用的角度出发,比较全面地介绍了智能控制的基本概念、理论和系统设计方法及微机实现技术。全书共分十章,包括智能控制的知识工程基础、模糊控制、神经网络控制、遗传算法、递阶控制、专家系统和仿人智能控制等方面的内容,并给出了工程应用实例。

本书取材新颖,反映了当前国内外智能控制技术的核心内容,以计算机技术模拟智能、实现智能为主线贯穿全书。叙述上深入浅出,易读易懂,便于教学和自学。每章后附有习题和小结。本书可作为工科院校有关专业的研究生、本科生、专科生的教材,亦可供有关科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制技术/易继锴,侯媛彬编著. —修订本. —北京:北京工业大学出版社,2007.7

ISBN 978-7-5639-1773-0

I. 智… II. ①易… ②侯… III. 智能控制-高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第062676号

智能控制技术

易继锴 侯媛彬 编著

※

北京工业大学出版社出版发行

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

※

2007年7月第2版 2007年7月第1次印刷

787mm×1092mm 16开本 25.25印张 624千字

ISBN 978-7-5639-1773-0/T·300

定价:39.00元

前 言

智能控制是自动控制发展的高级阶段，是人工智能、控制论、系统论和信息论等多种学科的高度综合与集成，是一门新的交叉前沿学科。

现代科学技术的迅速发展和进步，对控制系统提出了新的更高的要求。由于各种实际工程系统的发展规模越来越大，复杂性越来越高，常规控制的理论和技术已无法满足工程技术对提高自动化水平和扩大自动化范围的要求，因此，科学技术的进步促使了智能控制技术的发展。

智能控制是一类无需人的干预就能够独立地驱动机器实现目标的自动控制技术。随着信息时代的到来，信息量不断增大，对信息分析工具的要求也越来越高，人们希望自动地从数据中获取其潜在的依赖模型，因而智能信息处理技术也成为当前信息科学理论和工程应用中的前沿性研究课题。

《智能控制技术》一书自1999年出版以来，主要作为高等学校本科学生的教学用书和研究生的参考用书，同时也作为工程应用的参考书，受到了各界读者的广泛关注。

为了适应21世纪科学技术新发展的需要，体现当代科学发展中多学科间的知识交叉，并结合高等学校人才培养的特点，决定对《智能控制技术》一书进行修订再版。本书再版时，在保持原有取材体系风格不变的同时，修改或补充了有关内容。在知识体系结构方面，包括智能控制的基础知识，智能控制器的设计技术，智能控制系统实现技术和智能信息处理方法等几个层次；在内容编排方面，深入浅出，易读易懂，便于自学。

全书内容安排如下：

第一章智能控制概述，阐明了智能控制的基本概念、特征、类型和智能控制系统产生的背景与过程。第二章智能控制的知识工程基础，涉及学科的基本理论，重点介绍了知识的概念、知识的表示、知识的获取和知识的运用与处理的原理和方法。第三章分级递阶智能控制系统，阐明了Saridis递阶控制的原理，它是智能控制的最早理论之一。第四章遗传算法，介绍了基于自然进化的优化技术原理、计算机实现方法。第五章神经网络控制，论述了人工神经网络的基本理论与技术，前向网络和反馈网络的结构与学习方法，神经网络模型辨识和神经网络控制技术。第六章模糊控制的数学基础，着重阐述了模糊逻辑的基本概念，如模糊集合、模糊关系、模糊推理等运算方法。第七章模糊控制技术，介绍了模糊控制系统理论、模糊控制器设计方法、自调整模糊控制技术，特别引入了由神经网络实现的模糊控制技术和基于遗传算法优化的模糊控制技术，以及它们的计算机实现方法。第八章专家控制，重点介绍了专家系统、专家式控制器、模糊专家系统以及人工智能的PROLOG程序设计语言。第九章基于粗糙集和含糊集理论的智能信息处理方法，介绍了粗糙集理论的基本概念、粗糙集理论的数值分析、基于粗糙集理论的规则知识获取及其在心电图波形识别方面的应用示例、建立基于输入输出数据的知识表达系统、基于粗糙集理论的图像拟合应用示例，介绍了Vague集理论的基本概念、近似推理方法、Vague-Rough集模型、Vague知识获取策略。第十章智能控制应用示例，给出了智能控制在过程控制等领域的应用实例。附录1改进的BP神经网络及

其MATLAB 仿真,介绍了提高BP 神经网络收敛速度的方法、一种赋初值算法、网络训练技术、感知器分类MATLAB 仿真、具有噪音二阶系统辨识的MATLAB 程序仿真。附录2 模糊控制MATLAB 程序仿真示例。在附录3、附录4 分别给出了有关粗糙集理论的计算软件程序。

本书取材广泛,内容精练新颖,面向21 世纪智能自动化学科前沿。正如宋健同志所指出的:“智能控制学科是中国的急需,是增强知识界和人民群众创新能力和提高劳动生产力的关键技术”,“人智则国智,科技强则国强”。希望本书的再版能为智能化技术的普及与发展做出一定的贡献。

本书是北京市高等学校教育教学改革立项研究成果。对于本书的再版黄显明博士做了大量的技术准备工作,北京工业大学出版社提供了充分的支持,在此一并致以诚挚的谢意。

书中不足和失误之处,欢迎读者批评指正。

易继锴 侯媛彬

目 录

第一章 智能控制概述	(1)
1.1 智能控制的基本概念	(1)
1.1.1 什么是智能控制	(1)
1.1.2 智能控制的研究对象	(2)
1.2 智能控制系统的特征和性能	(2)
1.2.1 智能控制系统的一般结构	(2)
1.2.2 智能控制系统的主要功能特征	(3)
1.2.3 智能控制系统的特征模型	(3)
1.3 智能控制系统的类型	(5)
1.4 智能控制的发展概况	(9)
1.5 小结	(10)
习题	(10)
第二章 智能控制的知识工程基础	(11)
2.1 知识的基本概念	(11)
2.1.1 什么是知识	(11)
2.1.2 知识的分类	(12)
2.2 知识的表示	(12)
2.2.1 一阶谓词表示法	(13)
2.2.2 时序逻辑表示法	(15)
2.2.3 产生式表示法	(16)
2.2.4 语义网络知识表示法	(16)
2.2.5 框架知识表示法	(19)
2.2.6 Petri 网知识表示法	(23)
2.2.7 定性模型知识表示法	(26)
2.2.8 可视知识模型	(29)
2.3 知识的获取	(30)
2.3.1 非自动知识获取	(30)
2.3.2 自动知识获取	(31)
2.4 知识的处理	(35)
2.4.1 推理的方式与分类	(35)
2.4.2 推理控制策略	(37)
2.4.3 状态空间的搜索策略	(40)
2.5 小结	(49)
习题	(51)

第三章 分级递阶智能控制	(52)
3.1 递阶控制的一般原理	(52)
3.1.1 大系统递阶结构的描述	(52)
3.1.2 递阶控制的一般原理	(53)
3.2 分级递阶智能控制	(53)
3.2.1 分级递阶智能控制系统的结构	(53)
3.2.2 分级递阶智能控制原理	(54)
3.3 小结	(59)
习题	(59)
第四章 遗传算法	(60)
4.1 什么是遗传算法	(60)
4.1.1 遗传算法的生物遗传学基础	(60)
4.1.2 遗传算法的特点	(61)
4.1.3 遗传算法的基本操作	(62)
4.2 遗传算法的理论基础	(66)
4.2.1 遗传算法的模式理论	(66)
4.2.2 遗传算法实现中的一些基本问题	(72)
4.3 基于遗传的机器学习系统	(75)
4.3.1 分类器系统的结构	(75)
4.3.2 规则信息系统	(77)
4.3.3 信任分配系统	(77)
4.3.4 机器学习中的遗传算法	(78)
4.4 遗传算法的计算机实现	(79)
4.5 基于遗传算法的系统在线辨识	(90)
4.5.1 遗传算法在参数辨识中的应用	(91)
4.5.2 遗传算法参数辨识仿真示例	(92)
4.6 小结	(93)
习题	(94)
第五章 神经网络控制	(95)
5.1 神经网络的基本概念	(95)
5.1.1 生物神经元模型	(95)
5.1.2 人工神经元模型	(96)
5.1.3 人工神经网络模型	(98)
5.1.4 神经网络的学习方法	(99)
5.2 前向网络及其主要算法	(102)
5.2.1 感知器	(102)
5.2.2 BP 网络	(103)
5.2.3 RBF 网络	(108)
5.3 反馈网络	(108)

5.3.1	Hopfield 网络	(108)
5.3.2	Boltzmann 机网络	(112)
5.3.3	自组织特征映射网络 (Kohonen 网络)	(114)
5.4	神经网络模型辨识	(115)
5.4.1	正向建模	(115)
5.4.2	逆模型	(118)
5.5	神经元自适应 PID 控制	(120)
5.5.1	神经控制的基本思想	(120)
5.5.2	单神经元自适应 PID 控制	(120)
5.6	神经元自适应 PSD 控制	(123)
5.6.1	自适应 PSD 控制算法	(123)
5.6.2	单神经元自适应 PSD 控制	(124)
5.7	神经网络内模控制	(126)
5.7.1	内模控制	(126)
5.7.2	神经网络内模控制	(127)
5.8	神经网络自适应控制	(127)
5.8.1	神经网络自校正控制	(128)
5.8.2	神经网络模型参考控制	(129)
5.9	神经网络 PID 控制	(130)
5.9.1	基于 BP 神经网络 K_P , K_I , K_D 参数自学习 PID 控制器	(130)
5.9.2	改进型 BP 神经网络 K_P , K_I , K_D 参数自学习 PID 控制器	(133)
5.10	小结	(137)
	习题	(138)
第六章	模糊控制的数学基础	(139)
6.1	概述	(139)
6.1.1	模糊概念	(139)
6.1.2	模糊性与随机性	(140)
6.2	模糊集合	(141)
6.2.1	普通集合	(141)
6.2.2	模糊集合	(143)
6.2.3	模糊集合与普通集合的联系	(148)
6.3	模糊关系与模糊关系合成	(150)
6.3.1	模糊关系的基本概念	(150)
6.3.2	模糊关系合成	(153)
6.3.3	模糊关系的性质	(154)
6.3.4	模糊变换	(155)
6.4	模糊推理	(157)
6.4.1	模糊语言与语言变量	(157)
6.4.2	模糊命题与模糊条件语句	(159)
6.4.3	模糊推理	(163)

6.5	小结	(174)
	习题	(174)
第七章	模糊控制	(177)
7.1	模糊控制系统原理	(177)
7.1.1	传统控制系统的特点	(177)
7.1.2	模糊控制系统的工作原理	(179)
7.1.3	模糊控制的系统结构	(181)
7.1.4	模糊控制器的结构与组成	(187)
7.2	模糊控制器设计	(192)
7.2.1	模糊控制器设计要求	(192)
7.2.2	清晰量的模糊化	(194)
7.2.3	模糊量的清晰化	(198)
7.2.4	模糊控制规则及控制算法	(200)
7.3	自调整模糊控制技术	(214)
7.3.1	带有自调整因子的模糊控制器	(215)
7.3.2	带有自调整函数的模糊控制器	(216)
7.4	神经网络实现的模糊控制	(218)
7.4.1	常规模糊系统的等价神经网络	(218)
7.4.2	模糊神经网络技术在温度控制过程中的应用	(224)
7.4.3	基于 T-S 模型的模糊神经网络	(229)
7.5	基于遗传算法优化的模糊控制	(230)
7.5.1	遗传算法和模糊逻辑、神经网络的融合	(230)
7.5.2	基于遗传算法优化的模糊控制器	(233)
7.5.3	基于遗传算法的模糊温度控制实验	(234)
7.6	小结	(235)
	习题	(236)
第八章	专家控制	(238)
8.1	专家系统概述	(238)
8.1.1	什么是专家系统	(238)
8.1.2	专家系统的基本组成	(239)
8.1.3	专家系统的特征及类型	(240)
8.2	专家控制系统	(241)
8.2.1	专家控制系统的特点	(241)
8.2.2	专家控制系统的工作原理	(242)
8.2.3	专家控制器	(246)
8.3	模糊专家系统	(247)
8.3.1	模糊专家系统的基本结构	(247)
8.3.2	可能性分布与模糊测度	(248)
8.3.3	模糊性知识的规则表示	(251)

8.3.4 不确定性推理模型	(254)
8.4 逻辑程序设计语言	(255)
8.4.1 Prolog 语言的特点	(255)
8.4.2 Prolog 语言的语法与数据结构	(255)
8.4.3 Prolog 程序的执行与控制	(257)
8.5 小结	(261)
习题	(262)
第九章 基于粗糙集和含糊集理论的智能信息处理方法	(263)
9.1 粗糙集理论的基本概念	(263)
9.1.1 粗糙集理论的数值分析	(263)
9.1.2 基于粗糙集理论的规则知识获取	(265)
9.1.3 粗糙集知识获取策略在心电图波形识别中的应用	(271)
9.2 基于粗糙集理论的模糊神经网络	(276)
9.2.1 建立基于输入输出数据的知识表达系统	(276)
9.2.2 基于粗糙集理论的模糊神经网络	(278)
9.2.3 二维非线性函数图像拟合应用	(280)
9.3 含糊集理论的基本概念	(284)
9.3.1 基本概念	(284)
9.3.2 含糊集的改进性质	(287)
9.3.3 实例分析	(288)
9.4 基于含糊集的近似推理方法	(288)
9.4.1 含糊集的合成推理	(288)
9.4.2 含糊集插值推理	(289)
9.4.3 几种含糊集近似推理方法的比较	(289)
9.5 一种含糊-粗糙集模型	(292)
9.6 含糊集知识获取策略	(292)
9.6.1 含糊集决策表知识表达系统	(293)
9.6.2 含糊集知识获取策略	(294)
9.7 小结	(301)
习题	(302)
第十章 智能控制应用示例	(307)
10.1 电加热炉炉温智能控制	(307)
10.1.1 电加热炉模型分析	(307)
10.1.2 电加热炉炉温智能控制	(310)
10.2 集装箱吊车的模糊控制	(320)
10.2.1 吊车模糊控制规则的建立	(320)
10.2.2 模糊逻辑吊车控制器的结构	(321)
10.2.3 模糊控制的可编程控制器实现	(324)
10.3 模糊控制技术的微机实现	(327)

10.3.1	MC68HC11E9 数字单片机的特性	(327)
10.3.2	温度模糊控制器的实现	(333)
10.4	模糊控制的洗衣机	(337)
10.4.1	模糊控制洗衣机系统电路结构	(337)
10.4.2	洗衣机的模糊推理	(340)
10.4.3	洗衣机物理量检测方法	(342)
10.4.4	布质、布量的模糊推理	(344)
10.5	倒立摆的模糊神经网络控制	(348)
10.5.1	再励学习的模糊神经网络	(348)
10.5.2	倒立摆的模糊神经网络自适应控制	(353)
附录 1	改进的 BP 神经网络及其 MATLAB 仿真	(356)
附 1.1	提高 BP 神经网络收敛速度的方法	(356)
附 1.2	提高神经网络收敛速度的一种赋初值算法	(357)
附 1.3	BP 网络训练技巧	(362)
附 1.4	感知器分类的 MATLAB 仿真	(363)
附 1.5	具有噪声二阶系统辨识的 MATLAB 程序仿真	(364)
附 1.6	多维非线性辨识的 MATLAB 程序剖析	(368)
附录 2	模糊控制 MATLAB 程序仿真示例	(372)
附录 3	基于粗糙集可辨识矩阵属性简约算法软件	(377)
附录 4	基于 Vague 集可辨识矩阵知识获取算法软件	(384)
参考文献	(391)

第一章 智能控制概述

智能控制是一门新兴的交叉前沿学科，它具有非常广泛的应用领域，例如智能机器人控制、智能过程控制、智能调度与规划、专家控制系统、智能故障诊断、智能仪器、医院监控、语音控制、飞行器控制及自动制造系统控制等。

目前，有关智能控制的定义、理论和结构等还没有统一的系统描述。本章主要从工程控制角度来介绍智能控制及其系统的基本概念，智能控制系统的基本结构、基本功能，智能控制系统的特征模型，智能控制系统的类型和智能控制系统的发展概况等。

1.1 智能控制的基本概念

1.1.1 什么是智能控制

从信息的角度来看，所谓智能，可具体地定义为：能有效地获取、传递、处理、再生和利用信息，从而在任意给定的环境下成功地达到预定目的的能力。可以看出，智能的核心是一种思维的活动。研究智能理论与技术的目的，是要设计制造出具有高度智能水平的人工系统（智能系统），以便在那些必要的场合能够用人工系统替代人去执行各种任务。

按照 K. S. Fu (傅京孙) 和 Saridis 提出的观点，可以把智能控制看作是人工智能、自动控制和运筹学三个主要学科相结合的产物。图 1-1 所示的结构，称之为智能控制的三元结构。

智能控制的三元结构可用交集形式表示如下：

$$IC = AI \cap AC \cap OR \quad (1-1)$$

式中各子集的含义为

IC——智能控制 (Intelligent Control)

AI——人工智能 (Artificial Intelligence)

AC——自动控制 (Automatic Control)

OR——运筹学 (Operations Research)

人工智能 (AI) 是一个知识处理系统，具有记忆、学习、信息处理、形式语言、启发式推理等功能。

自动控制 (AC) 描述系统的动力学特性，是一种动态反馈。

运筹学 (OR) 是一种定量优化方法，如线性规划、网络规划、调度、管理、优化决策和多目标优化方法等。

这种三元结构理论表明，智能控制就是应用人工智能的理论与技术和运筹学的优化方法，并将其同控制理论方法与技术相结合，在未知环境下，仿效人的智能，实现对系统的控制。这里所指的环境，是指广义的被控对象或过程及其外界条件。或者说，智能控制是一类无需（或仅需尽可能少的）人的干预就能够独立地驱动智能机器实现其目标的自动控制。可见，智

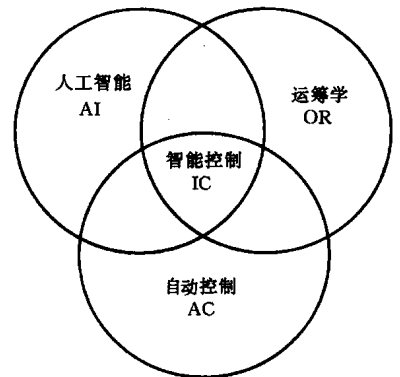


图 1-1 智能控制的三元结构

能控制代表着自动控制科学发展的最新进程。

智能控制的定义可以有多种不同的描述,但从工程控制角度看,它的三个基本要素是:智能信息-智能反馈-智能决策。从集合论的观点,可以把智能控制和它的三要素关系表示如下:

$$[\text{智能信息}] \cap [\text{智能反馈}] \cap [\text{智能决策}] \subseteq \text{智能控制}$$

智能控制是以知识为基础的系统,所以知识工程是研究智能控制的重要基础。

1.1.2 智能控制的研究对象

智能控制是自动控制的最新发展阶段,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。

传统控制包括经典反馈控制和现代控制理论控制,它们的主要特征是基于精确的系统数学模型的控制。在传统控制的实际应用中遇到不少难题,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,一般无法获得精确的数学模型。

2) 研究这些系统时,必须提出并遵循一些比较苛刻的线性化假设,而这些假设在应用中往往与实际不相吻合。

3) 对于某些复杂的和包含不确定性的控制过程,根本无法用传统数学模型来表示,即无法解决建模问题。

4) 为了提高控制性能,传统控制系统可能变得很复杂,从而增加了设备的投资,降低了系统的可靠性。

在这样复杂对象的控制问题面前,将人工智能的方法引入控制系统,实现了控制系统的智能化,即采用仿人智能控制决策,迫使控制系统朝着期望的目标逼近。

传统的控制方式是基于被控对象精确模型的控制方式,实际上往往是利用不精确的模型,又采用固定的控制算法,使整个控制系统置于模型框架下,缺乏灵活性和应变能力,因而很难胜任对复杂系统的控制,这种控制方式可称之为“模型论”。而智能控制是把控制理论的方法和人工智能的灵活框架结合起来,改变控制策略去适应对象的复杂性和不确定性,相对于“模型论”可称智能控制方式为“控制论”。可见传统控制和智能控制两种控制方式的基本出发点不同,导致了不同的控制效果。

传统的控制适于解决线性、时不变等相对简单的控制问题。这些问题用智能的方法同样也可以解决。智能控制是对传统控制理论的发展,传统控制是智能控制的一个组成部分,在这个意义下,两者可以统一在智能控制的框架下。

1.2 智能控制系统的特征和性能

1.2.1 智能控制系统的一般结构

智能控制系统是实现某种控制任务的一种智能系统,其一般结构如图 1-2 所示。这是一种多层次结构的系统,图中广义对象表示通常意义下的控制对象和所处的外部环境。感知信息处理部分将传感器递送的分级和不完全的信息加以处理,并要在学习过程中不断加以辨识、整理和更新,以获得有用的信息。认知部分主要接受和储存知识、经验和数据,并对它们进行分析推理,做出行动的决策并送至规划和控制部分。规划和控制部分是整个系统的核心,它

根据给定任务的要求、反馈信息及经验知识,进行自动搜索、推理决策、动作规划,最终产生具体的控制作用,经常规控制器和执行机构作用于控制对象。

对于不同用途的智能控制系统,以上各部分的形式和功能可能存在较大的差异。

1.2.2 智能控制系统的主要功能特征

智能控制的概念主要是针对被控系统的高度复杂性、高度不确定性及人们要求越来越高的控制性能提出来的。面对这样的要求,一个理想的智能控制系统应具备如下性能:

- 1) 学习能力 系统对一个未知环境提供的信息进行识别、记忆、学习,并利用积累的经验进一步改善自身性能的能力,即在经历某种变化后,变化后的系统性能应优于变化前的系统性能,这种功能类似于人的学习过程。
- 2) 适应性 系统应具有适应受控对象动力学特性变化、环境变化和运行条件变化的能力。这种智能行为实质上是一种从输入到输出之间的映射关系,可看成是不依赖模型的自适应估计,较传统的自适应控制中的适应功能具有更广泛的意义。
- 3) 容错性 系统对各类故障应具有自诊断、屏蔽和自恢复的功能。
- 4) 鲁棒性 系统性能应对环境干扰和不确定性因素不敏感。
- 5) 组织功能 对于复杂任务和分散的传感信息具有自组织和协调功能,使系统具有主动性和灵活性。即智能控制器可以在任务要求的范围内自行决策,主动采取行动。当出现多目标冲突时,在一定限制下,各控制器可在一定范围内自行解决,使系统能满足多目标、高标准的要求。
- 6) 实时性 系统应具有相当的在线实时响应能力。
- 7) 人-机协作 系统应具有友好的人-机界面,以保证人-机通信,人-机互助和人-机协同工作。

1.2.3 智能控制系统的特征模型

智能控制系统的本质是在宏观结构上和行为功能上对人控制器进行模拟。在人参与过程控制中,经验丰富的操作者不是依据数学模型,而是根据积累的经验 and 知识进行在线推理,确定或变换控制策略,而这些经验和知识反映系统运动状态所有动态特征信息。

1. 特征模型

智能控制系统的特征模型 f 是对系统动态特性的一种定性定量相结合的描述。它是针对问题求解和控制指标的不同要求,对系统动态信息空间 \sum 的一种划分。如此划分出的每一个区域分别表示系统的一种特征状态 f_i , 特征模型为所有特征状态的集合,即

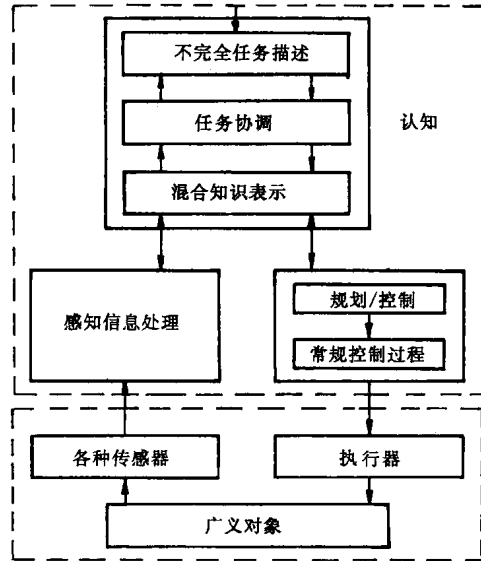


图 1-2 智能控制系统的结构

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}, \quad f_i \in \Sigma \quad (1-2)$$

在图 1-3 (a) 表示的系统动态信息空间 Σ 中, 每一块区域都对应于图 1-3 (b) 中系统偏差曲线的一段, 表明系统正处于某种特征运动状态。例如特征状态

$$f_i = \{e \cdot \dot{e} \geq 0 \cap |\dot{e}/e| > \alpha \cap |e| > \delta_1 \cap |\dot{e}| > \delta_2\} \quad (1-3)$$

就表明系统正处于受扰动的作用以较大的速度偏离目标值的状态, 其中 $\alpha, \delta_1, \delta_2$ 为阈值。

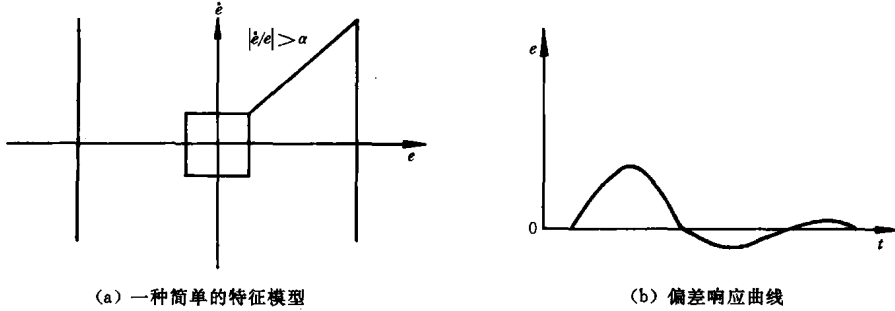


图 1-3 特征状态划分示例

随着问题求解目标的不同, 在同一信息空间的特征模型 F 将各不相同。从式 (1-3) 可以看出, 特征状态由一些特征基元 q_i 的组合来表述, 设特征基元集为

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\} \quad (1-4)$$

例如基元 q_i 的常用表示设为

$$\begin{array}{ll} q_1: & e \cdot \dot{e} \geq 0; \\ q_2: & |\dot{e}/e| > \alpha_1 \\ q_3: & |e| < \delta_1; \\ q_4: & |e| > M_1 \\ q_5: & |\dot{e}| < \delta_2; \\ q_6: & |\dot{e}| > M_2 \\ q_7: & |e_{m-1} \cdot e_m| > 0; \\ q_8: & |e_{m-1} \cdot e_m| \geq 1 \\ & \dots\dots \end{array}$$

其中 $\alpha_1, \delta_1, \delta_2, M_1, M_2$ 均为阈值, e_m 为误差的第 i 次极值。若特征模型和特征基元分别以向量表示为

$$\begin{aligned} F &= (f_1, f_2, \dots, f_n) \\ Q &= (q_1, q_2, \dots, q_m) \end{aligned}$$

则二者的关系可以表示为

$$F = P \odot Q^T \quad (1-5)$$

式中 P 为 $n \times m$ 阶关系矩阵, $P = [p_{ij}]_{n \times m}$, p_{ij} 取值为 $-1, 0, +1$; 符号 \odot 表示“与”矩阵的相乘关系, 则

$$f_i = [(p_{i1} \cdot q_1) \cap (p_{i2} \cdot q_2) \cap \dots \cap (p_{im} \cdot q_m)] \quad (1-6)$$

总之, 反映系统运动状态的所有特征信息构成了系统特征模型, 成为控制器应有的先验知识。

建立了特征模型后, 智能控制系统根据特征模型 F , 对采样得到的信息进行特征识别处理, 以确定系统当前处于什么样的特征状态, 控制器将它记录下来以确定相应的控制决策状态。

2. 特征记忆

特征记忆是指智能控制器对一些特征信息的记忆，这些特征信息或者集中地表示了控制器前期决策与控制的效果，或者集中地反映了控制任务的要求以及被控对象的性质。所记忆的信息称为特征记忆量，其集合记为

$$\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\}, \quad \lambda_i \in \Sigma \quad (1-7)$$

特征记忆量的常用表示设为

- λ_1 : 误差的第 i 次极值为 e_{mi} ;
- λ_2 : 控制器前期输出保持值 u_{H} ;
- λ_3 : 误差第 i 次过零速度;
- λ_4 : 误差极值之间的时间间隔 t_{em} ;
-

特征记忆的引入，可使控制器接受大量的信息得到精炼，消除冗余，有效地利用控制器的储存容量。同时，这些特征记忆状态也构成了判断系统稳定性的特征模型，以此来作为智能控制系统稳定性监控的依据。

3. 控制决策模态

控制决策模态是指智能控制器的输入信息，即当前特征状态和特征记忆量与输出信息之间的某种定量或定性的映射关系。控制决策模态的集合记为

$$\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_r\} \quad (1-8)$$

其中定量映射关系 ψ_i 可表示为

$$\psi_i: u_i = R_i(e, \dot{e}, \lambda_i, \dots), \quad u_i \in U(\text{输出信息集}) \quad (1-9)$$

定性映射关系 ψ_j 可表示为

$$\psi_j: R_j \rightarrow \text{IF(条件) THEN(操作)} \quad (1-10)$$

不难看出，特征模型 F 表征了智能控制系统当前运行状态，并由此可以确定多模态控制策略，使智能控制系统达到目标控制。

例如，系统当前特征模型为

$$f_i = [p_{i1} \cdot q_1 \cap p_{i2} \cdot q_2 \cap p_{i3} \cdot q_3]$$

令
$$p_{i1}=1, p_{i2}=1, p_{i3}=1, q_1=e>0, q_2=e \cdot \dot{e}<0, q_3=\dot{e}<0$$

则
$$f_i = [e \cap -e \cdot \dot{e} \cap -\dot{e}] \quad (1-11)$$

式 (1-11) 表明，当偏差为正，偏差变化为负，偏差和偏差变化的乘积为负时，系统将向消除偏差的方向运动，应对系统施加“奖励”，说明原来的控制策略有效，但应防止输出产生回调过冲。由此可见，当系统参数变化时，特征模型也随之改变，这将导致智能控制系统控制策略的改变。

1.3 智能控制系统的类型

基于智能理论和技术已有的研究成果，以及当前的智能控制系统的研究现状，可把智能

控制系统分为以下几类。

1. 分级递阶智能控制系统

分级递阶智能控制系统 (Hierarchically Intelligent Control System) 是在研究早期学习控制系统的基础上, 并从工程控制论的角度总结人工智能与自适应、自学习和自组织控制的关系之后而逐渐形成的, 是智能控制的最早理论之一。

已经提出两种分级递阶控制理论, 即基于知识/解析混合多层智能控制理论和“精度递增伴随智能递减”的分级递阶智能控制理论。后者又称为 Saridis 分级递阶智能控制理论。

三级分级递阶智能控制系统是由 G. N. Saridis 于 1977 年提出的。该系统由组织级、协调级和执行级组成, 并遵循“精度递增伴随智能递减”的原则。组织级起主导作用, 涉及知识的表示与处理, 主要应用人工智能; 协调级在组织级和执行级间起连接作用, 涉及决策方式及其表示, 采用人工智能及运筹学实现控制; 执行级是底层, 具有很高的控制精度, 采用常规自动控制。

2. 专家控制系统

专家控制系统 (Expert Control System, ECS) 是一种已广泛应用于故障诊断、各种工业过程控制和工业设计的智能控制系统。工程控制论与专家系统的结合形成了专家控制系统。

专家控制系统有专家控制系统和专家式控制器两种主要形式。前者采用黑板等结构, 较为复杂, 造价较高, 因而目前用得较少; 后者多为工业专家控制器, 结构较为简单, 又能满足工业过程控制的要求, 因而应用日益广泛。

3. 模糊控制系统

模糊逻辑理论在控制领域的应用称为模糊控制 (Fuzzy Control, FC)。模糊控制是一种正在兴起的能够提高工业自动化能力的控制技术。模糊控制系统是智能控制的一个十分活跃的研究领域。凡是无法建立数学模型或难以建立数学模型的场合都可以采用模糊控制技术。

模糊控制的特点是: 一方面, 模糊控制提供了一种实现基于自然语言描述规则的控制规律的新机制; 另一方面, 模糊控制器提供了一种改进非线性控制器的替代方法, 这些非线性控制器一般用于控制含有不确定性和难以用传统非线性理论来处理的装置。

模糊控制单元的基本功能结构如图 1-4 所示。它由规则库、模糊化、模糊推理和清晰化四

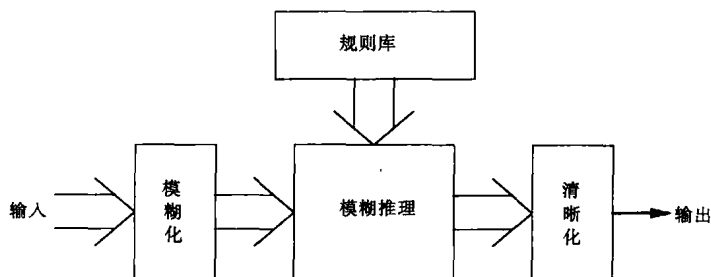


图 1-4 模糊控制单元基本功能结构图