

高等工科院校控制类课程系列化教材

智能控制技术

易继错 侯媛彬 编著

北京工业大学出版社

Intelligent
Control



TP273.5

Y52

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. —北京:北京工业大学出版社, 1999. 9

ISBN 7-5639-0808-0

I. 智… I. ①易… ②侯… III. 智能控制
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 33533 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

世界知识印刷厂印刷

※

1999年9月第1版 1999年9月第1次印刷

787mm×1092mm 16开本 21.25印张 509千字

印数: 1~3000册

ISBN 7-5639-0808-0/T·131

定价: 26.00元

地方工科院校控制类课程系列化教材

编辑委员会名单

主任委员	北京工业大学	冯国楠教授
委员	(排名不分先后)	
	内蒙古工业大学	常 信教授
	河北工业大学	王书田教授
	太原工业大学	谢克明教授
	山东工业大学	王效良教授
	上海大学	费敏锐教授
	北京工业大学	易继锴教授
	北京工业大学	黄涵洲教授
	北京工业大学	孙 亮副教授
顾问	河北科技大学	李友善教授
	北京科技大学	舒迪前教授

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上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建立和发展。

智能控制是一类无需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。目前，智能控制技术，如神经网络技术、模糊控制技术、遗传算法优化技术、专家控制系统、基于规则的仿人智能控制技术等已进入工程化和实用化的时代，并已有商品出售。

为了适应 21 世纪科学技术、经济、社会发展的趋势，把体现当代科学发展特征的多学科间的知识交叉与渗透的内容及最新成果反映到教学中来，结合地方普通高等工科大学的人才培养的特点，特编写了本教材。

本书从工程应用角度出发，注重理论联系实际。在取材方面，既包括了智能控制的基本概念、原理、方法，又包括了计算机实现技术和微机实现技术及其应用实例；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和智能控制系统实现技术等几个层次；在内容编排方面，深入浅出、易读易懂、便于自学。

为了实现上述宗旨，全书安排了十章内容。

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，是学科的基本理论，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的理论之一。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。第六章和第七章属于模糊控制技术，着重阐述了模糊逻辑的基本概念、模糊控制的数学基础、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。第九章基于规则的仿人智能控制，介绍了由计算机模拟人的控制行为功能、识别系统动态过程特征信息、进行启发直觉推理的原理和方法。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，包括电加热炉炉温智能控制、集装箱吊车的模糊控制、自调整温度模糊控制器、洗衣机的模糊控制和倒立摆的模糊神经网络控制等。

本书取材广泛，内容新颖，面向 21 世纪学科前沿，以计算机技术、微机技术模拟智能，以实现智能控制的主线贯穿全书，并采纳了作者多年的教学和科学研究成果。

宋健同志指出：“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”。本书的出版希望能为自动化技术的普及与发展做一定的贡献。

北京科技大学舒迪前教授审阅了全书，并提出了许多宝贵意见；陈双叶、孙宏涛、张蔚蔚、黄显明、郭晋等为本书的出版做了大量工作，在此一并致以衷心的感谢。

同时，感谢北京市教育委员会科研计划发展项目给予的资助。项目的研究成果已纳入本教材有关章节。

本书是北京市高等学校教育教学改革立项研究成果，由北京工业大学教材出版基金资助出版。

由于编者的水平所限，书中尚有不足和错误之处，欢迎读者批评指正。

易继锴 侯媛彬

1999. 6. 30

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	(15)
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 基于规则的仿人智能控制	(263)
9.1 仿人智能控制的原理	(263)
9.1.1 仿人智能控制的基本思想	(263)
9.1.2 仿人智能行为的特征变量	(264)
9.2 仿人智能开关控制	(266)
9.2.1 智能开关控制	(266)
9.2.2 智能开关控制器设计示例	(266)
9.3 仿人比例控制	(267)
9.3.1 仿人比例控制原理	(267)
9.3.2 仿人比例控制算法	(268)
9.4 仿人智能积分控制	(269)
9.4.1 仿人智能积分原理	(269)
9.4.2 仿人智能控制算法	(270)
9.5 基于特征辨识的多模态智能控制	(271)
9.5.1 系统动态特征模式类	(271)
9.5.2 基于特征辨识的智能控制	(273)
9.6 小结	(274)
习题	(275)
第十章 智能控制应用示例	(276)
10.1 电加热炉炉温智能控制	(276)
10.1.1 电加热炉模型分析	(276)
10.1.2 电加热炉炉温智能控制	(279)
10.2 集装箱吊车的模糊控制	(289)
10.2.1 吊车模糊控制规则的建立	(289)
10.2.2 模糊逻辑吊车控制器的结构	(290)
10.2.3 模糊控制的可编程控制器实现	(293)
10.3 模糊控制技术的微机实现	(296)
10.3.1 MC68HC11E9 数字单片机的特性	(296)
10.3.2 温度模糊控制器的实现	(302)
10.4 模糊控制的洗衣机	(306)
10.4.1 模糊控制洗衣机系统电路结构	(306)
10.4.2 洗衣机的模糊推理	(309)

10.4.3	洗衣机物理量检测方法	(311)
10.4.4	布质、布量的模糊推理	(313)
10.5	倒立摆的模糊神经网络控制	(317)
10.5.1	再励学习的模糊神经网络	(317)
10.5.2	倒立摆的模糊神经网络自适应控制	(322)
参考文献		(325)

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

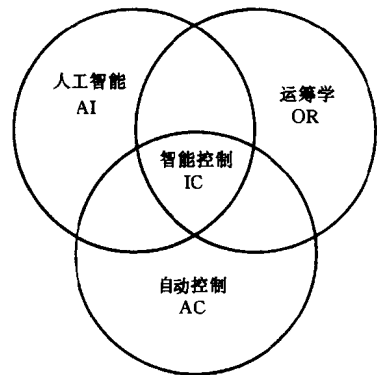


图 1-1 智能控制的三元结构

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的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与定量相结合的描述。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 Σ 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

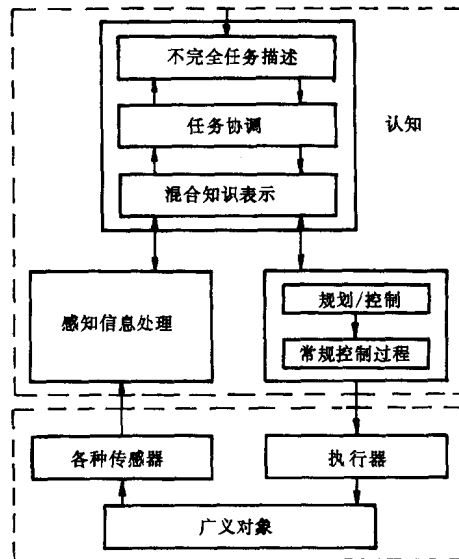


图 1-2 智能控制系统的结构

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

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。

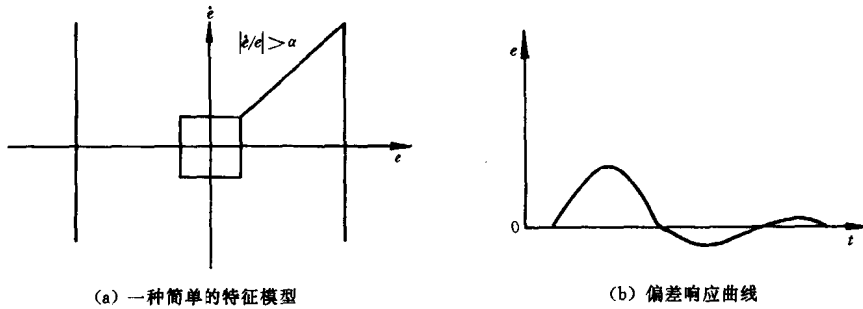


图 1-3 特征状态划分示例

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

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

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