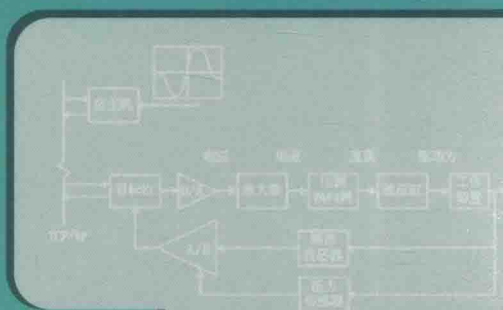
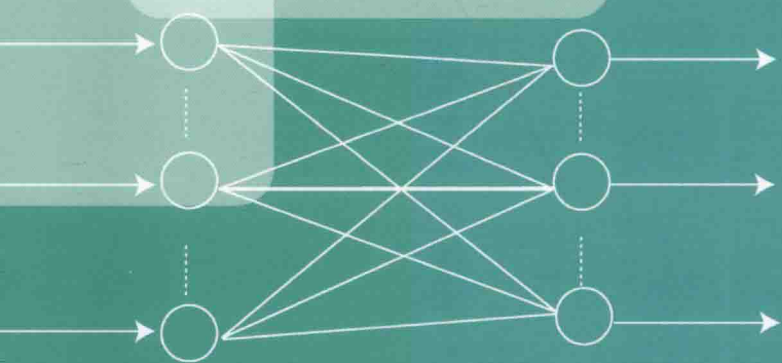


智能控制与 MATLAB实用技术

刘杰 李允公 刘宇 编著
李小号 戴丽 刘劲涛



科学出版社

智能控制与 MATLAB 实用技术

刘 杰 李允公 刘 宇
李小号 戴 丽 刘劲涛 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从机电一体化设备智能控制的实际应用出发,结合 MATLAB 仿真技术,以挖掘机器人开发为主要应用实例,对模糊控制、神经网络控制和遗传算法及其 MATLAB 仿真进行比较系统的论述,其中包含一些最新应用的研究成果。本书通俗易懂,注重理论联系实际,兼顾学术性与实用性,内容丰富,具有较高的参考价值。

本书可作为高等院校相关专业本科高年级学生及研究生的教材,也可供从事机电一体化设备的开发人员以及相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制与 MATLAB 实用技术/刘杰等编著. —北京:科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-052092-0

I. ①智… II. ①刘… III. ①智能控制—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 050251 号

责任编辑:余 江 张 帆/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟/封面设计:迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:14

字数:326 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

智能控制是自动控制的最新发展阶段,主要用来解决传统控制理论难以解决的问题。智能控制最重要的思想是模拟人类在完成控制任务时的生理、心理、思考和行动特点,并将其用于实际的自动控制中。

为了适应形势的发展,在机械工程及自动化专业的高年级开设了“智能控制实用技术”课程,基本上满足了教学的需要。这次在原讲稿的基础上,结合几年来本科生的教学经验和研究生的研究成果,从机电一体化设备智能控制的实际应用出发,结合 MATLAB 仿真技术,以挖掘机器人开发为主要应用,对模糊控制、神经网络控制和遗传算法及其 MATLAB 仿真进行了比较系统的论述,其中包含一些最新应用的研究成果。本书通俗易懂,注重理论联系实际,兼顾学术性与实用性,内容丰富,具有较高的参考价值。

本书可作为高等院校相关专业本科高年级学生及研究生的教材,也可供从事机电一体化设备的开发人员以及相关专业的工程技术人员参考。本书以“机械工程控制基础”及“MATLAB 基础教程”为先修课程。书中安排了适当的例题和习题,方便学生巩固所学的知识,提高理论联系实际解决工程问题的能力,本书可谓是本科生和研究生做课题的良师益友。

本书由刘杰负责整体策划和最后统稿,参加编写的有东北大学的刘杰、李允公、刘宇、李小号、戴丽和沈阳工程学院的刘劲涛等。感谢东北大学教务处对本书出版所给予的大力支持和资助,感谢东北大学机械工程与自动化学院以及所有关心、支持和帮助过本书出版的同事和朋友。

由于作者水平有限,并且所涉及的许多技术还处在不断发展之中,书中难免有缺点和疏漏之处,敬请广大读者给予批评指正。

作 者

2016 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 智能控制的产生背景	1
1.2 智能控制的概念与特点	2
1.3 智能控制的几个重要分支	3
1.4 MATLAB 与智能控制相结合	5
1.5 智能控制的应用	6
第 2 章 模糊控制	8
2.1 模糊及模糊控制概述	8
2.2 模糊集合及其运算	8
2.2.1 普通集合基本概念及运算	9
2.2.2 普通集合的特征函数	9
2.2.3 模糊集合的定义	10
2.2.4 隶属函数	12
2.2.5 模糊集合的运算和性质	14
2.3 模糊关系	16
2.3.1 笛卡儿积和普通关系	16
2.3.2 模糊关系的定义	17
2.4 模糊关系的合成	18
2.5 模糊变换	20
2.6 模糊条件语句	22
2.6.1 简单条件语句	23
2.6.2 多重简单条件语句	25
2.6.3 多维条件语句	26
2.6.4 多重多维条件语句	28
2.7 模糊推理	30
2.8 模糊控制系统的基本原理	32
2.9 模糊控制器的设计	34
2.9.1 输入模糊化	34
2.9.2 模糊控制规则的建立	37
2.9.3 模糊推理方法	39
2.9.4 逆模糊化方法	44
2.10 模糊控制库函数介绍、实例及 Simulink 仿真	45

2.10.1	模糊逻辑工具箱函数介绍	45
2.10.2	MATLAB 模糊控制工具箱函数应用实例	53
2.10.3	基于实例的模糊控制 MATLAB/Simulink 仿真介绍	66
2.11	习题	72
第 3 章	神经网络控制技术	73
3.1	神经网络基础	74
3.1.1	生物神经元简述	74
3.1.2	人工神经元基础	75
3.1.3	神经网络的结构	79
3.1.4	神经网络的表达	81
3.2	神经网络的学习方法	82
3.3	感知器网络	84
3.4	BP 网络	88
3.4.1	BP 网络模型	88
3.4.2	BP 网络学习算法	89
3.5	径向基网络	92
3.5.1	RBF 网络结构	92
3.5.2	RBF 网络的学习算法	95
3.6	神经网络控制	96
3.6.1	神经网络预测控制	96
3.6.2	神经模型参考控制	97
3.7	神经网络芯片	98
3.8	神经网络库函数介绍、实例及 Simulink 仿真	102
3.8.1	BP 神经网络工具箱函数介绍	102
3.8.2	BP 神经网络工具箱函数应用实例	104
3.8.3	基于实例的 BP 神经网络的 MATLAB/Simulink 仿真介绍	107
3.9	习题	113
第 4 章	遗传算法	114
4.1	概述	114
4.1.1	遗传与生物进化	114
4.1.2	遗传算法的发展与应用	114
4.1.3	遗传算法的编码方法	116
4.1.4	遗传算法的基本操作	117
4.2	遗传算法的模式理论	123
4.2.1	模式理论	123
4.2.2	积木块假设	127
4.2.3	遗传算法的欺骗问题	127
4.2.4	遗传算法的收敛性	128
4.3	遗传算法的改进	128

4.3.1	分层遗传算法	129
4.3.2	CHC 算法	129
4.3.3	Messy 遗传算法	130
4.3.4	自适应遗传算法	130
4.3.5	基于小生境技术的遗传算法	131
4.3.6	混合遗传算法	132
4.4	遗传算法应用举例	133
4.4.1	遗传算法的具体步骤	133
4.4.2	应用举例	134
4.5	遗传算法库函数介绍、实例及 Simulink 仿真	137
4.5.1	遗传算法工具箱函数介绍	137
4.5.2	遗传算法工具箱函数应用实例	140
4.5.3	基于实例的遗传算法 MATLAB/Simulink 仿真介绍	141
4.6	习题	143
第 5 章	综合实例：液压挖掘机器人	144
5.1	概述	144
5.2	液压挖掘机的机器人化改造	145
5.2.1	对液压挖掘机的电液比例改造	145
5.2.2	基于 MATLAB 的 xPC Target 控制平台	153
5.3	挖掘机器人挖掘臂的运动学建模及仿真	155
5.3.1	挖掘机器人挖掘臂的运动学建模	156
5.3.2	挖掘机器人运动学的 MATLAB 仿真	162
5.4	挖掘机器人电液驱动系统的建模	164
5.4.1	电液系统的数学模型	164
5.4.2	参数辨识模型的建立及其 MATLAB 求解	169
5.5	挖掘机器人挖掘臂的轨迹规划及模糊滑模控制	171
5.5.1	挖掘臂的轨迹规划插值计算及 MATLAB 求解	171
5.5.2	挖掘臂的单自由度和二自由度轨迹规划	177
5.5.3	挖掘臂运动轨迹模糊滑模控制的 MATLAB/Simulink 仿真及实验	180
5.6	挖掘行为和基本动作与 Stateflow 分解	189
5.6.1	行为控制与有限状态机	190
5.6.2	从挖掘目标到基本动作	192
5.6.3	挖掘目标与挖掘任务	192
5.6.4	挖掘任务与挖掘行为	194
5.6.5	挖掘行为与基本动作	194
5.6.6	基本动作与模糊逻辑	196
5.7	基于模糊行为的石块上表面挖掘操作	199
5.8	基于 BP 神经网络控制的自主挖掘系统	202

5.8.1 挖掘机器人的体系结构	202
5.8.2 BP 神经网络的建立	203
5.8.3 基于 BP 神经网络的挖掘机器人挖沟目标的实现	205
参考文献	213

第1章 绪 论

1.1 智能控制的产生背景

控制理论的发展经历了古典控制、现代控制和智能控制三个阶段。其中，古典控制理论主要解决单输入单输出问题，主要采用传递函数、频率特性、根轨迹法等频域方法；现代控制理论利用状态空间法描述系统的动态过程，主要解决多输入多输出的控制问题。习惯上，将古典控制和现代控制统称为传统控制理论，其共同特点是须建立被控对象的数学模型，用数学公式刻画被控对象的动态行为，以明确被控对象的输入量与输出量之间的数学关系，如古典控制理论中的传递函数、现代控制理论中的状态方程。现举一个简单的例子进行说明，如图 1-1 所示的 R-L-C 网络， u 为系统输入变量， u_C 为系统输出变量，即通过控制 u 来控制 u_C ，因此，需要知道 u 和 u_C 之间的数学关系，可列出方程：

$$\begin{cases} C \frac{du_C}{dt} = i \\ L \frac{di}{dt} + Ri + u_C = u \end{cases} \quad (1.1)$$

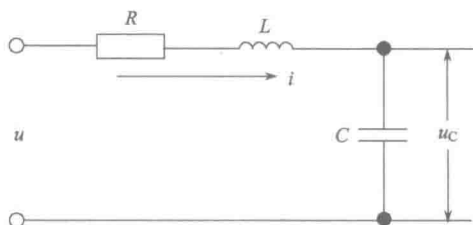


图 1-1 R-L-C 网络

根据式(1.1)，利用古典控制理论会得到传递函数：

$$\frac{u_C(s)}{u(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

利用现代控制理论则会得到状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_C \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_C \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} [u]$$

只要该系统的电流 i 、电压 u_C 的初始值已知，则对于给定的 u 均可求得系统输出电压 u_C 。由此可见，建立被控对象的数学模型是实现控制的一项重要工作内容，同时也说明，传统控制理论要求充分了解被控对象的内部特性，即被控对象应是已知的和确定的。

传统控制理论在相当长的一段时间内是解决控制问题的有力工具，时至今日也在工

业控制中发挥着重要作用。但随着科学技术的飞速发展,被控对象越来越多样化,控制任务越来越复杂,传统控制理论遇到了很多难以解决的问题,主要体现为对于不确定系统、高度非线性系统、高度复杂系统和复杂的控制任务难以建立起有效的数学模型,或数学模型十分复杂,无法满足实时性的要求,如航天、航海、复杂工业流程、机器人、带有生物化学变化的加工过程等。

模糊数学的创始人 Zadeh 教授曾提出一个有趣的停车控制问题,即控制车辆停入两辆车之间的空隙中。对于这一控制问题,传统控制理论首先会综合各种因素建立停车过程中的车辆运动学方程,即设车上的一个固定参考点为 ω , 车的方向为 θ , 则车的状态为 $X = (\omega, \theta)$ 。设 u_1 和 u_2 分别为车辆前轮的角度和速度, 则运动方程为 $\dot{X} = f(X, U)$, $U = (u_1, u_2)$, 另外, 设 Ω 为停着的两辆车确定的约束, Γ 为控制目标状态集。控制任务是确定一个 $U(t)$ 使车辆从初始状态 $X_0 = (\omega_0, \theta_0)$ 转移到目标状态, 且转移过程中满足各种约束条件。这个问题无精确解。且由于约束因素多, 计算十分复杂, 所以对控制器的性能要求较高。

对于车辆的刹车控制问题, 看似较为简单, 但刹车系统是一种典型的不确定系统, 其不确定性主要来自于轮胎磨损情况的变化、刹车盘温度的变化、路面条件(如正常路面、积冰路面、积雪路面)的变化、周围车辆情况的变化。显然, 对于这种自身状态和外部环境处于复杂变化中的被控系统, 难以建立起完整、精确的数学模型, 从而使传统控制理论显得捉襟见肘。

然而, 值得思考的是, 熟练的车辆驾驶人员不依靠车辆运动的数学模型、不进行各种精确计算即可轻松完成这一任务, 他所依靠的只是经验和直觉而已。同样, 在很多传统控制理论难以发挥作用的控制场合中, 熟练的操作人员凭借经验和直觉即能胜任, 如电热炉温度控制、粮食烘干控制、机械臂的柔顺控制、港口集装箱吊车控制等。由此至少可以得出两点结论: 一是建立被控对象的数学模型不是解决所有控制问题的唯一途径; 二是以模拟人类智能的方式来实现控制任务既具有合理性, 又具有深远的理论研究和实际应用价值, 将具有这种特征的控制理论与方法统称为智能控制理论。

1.2 智能控制的概念与特点

智能控制是自动控制的最新发展阶段, 主要用来解决传统控制理论难以解决的问题。智能控制最重要的思想是模拟人类在完成控制任务时的生理、心理、思考和行动特点, 并将其用于实际的自动控制当中。

提到智能控制, 就不得不谈及人工智能这一学科。智能控制是典型的多学科交叉的产物, 智能控制涵盖了人工智能、自动控制、运筹学、信息论、系统论、心理学、计算机科学等众多学科。其中, 人工智能是智能控制产生和发展的重要基础。对于人工智能, 目前存在多种定义, 如“人工智能是研究怎样让电脑模拟人脑从事推理、规划、设计、思考、学习等思维活动, 解决专家才能处理的复杂问题”“人工智能是一门通过计算过程力图理解和模拟智能行为的学科”“人工智能的最终目的是建立关于自然智能试题行为的理论和指导创造具有智能行为的人工制品”, 通俗地理解, 人工智能是一门让计算

机具有人类的智能，能够像人一样自主地、创造性地去处理问题。目前，人工智能已能够实现数学定理证明、博弈、语言理解、医疗诊断等众多功能。因此，人工智能和智能控制在很多方面具有相同的目标，如模拟人类思考、解决只有专家才能处理的复杂问题等。所以，也可以说，智能控制是人工智能在自动控制领域中的具体应用。

和许多新兴的学科一样，智能控制尚没有统一的定义，常见的描述形式如下。

(1) 能够代替人在不确定性变化的环境中决策的能力、反复练习学习新功能的能力和在不允许有操作者的环境中智能操作的控制。

(2) 不需要人的干预，而又具有由人操作的控制系统那样的能力的控制，即由人操作的系统具有判断、决策和学习的能力，无论控制对象所处的环境怎么变化，其都具有识别、模型化和恰当解决问题的能力的能力的控制。

(3) 驱动智能机器自主实现目标的过程，是无需人的干预就能够独立驱动智能机器实现其目标的自动控制。

也有人提出，凡是传统控制理论难以解决的问题都属于智能控制问题。

无论从智能控制的各种定义，还是从实际控制中对智能控制系统的要求来看，智能控制一般具有如下功能特点：

(1) 学习功能。人类之所以能够逐步掌握某项技术并能熟练操作被控对象，是因为其具有学习能力。因此，智能控制系统也应具有很好的学习能力。控制系统应能够从外界环境中获取信息，并进行识别、记忆和学习，通过不断地积累知识和经验来逐步提高控制系统的性能。低层次的学习是对被控对象参数的学习，高层次的学习则是更新知识。

(2) 适应功能。控制系统能够在被控对象的动力学特性变化、外部环境变化、运行条件变化等情况下均能进行良好的控制，即使系统某一部分发生故障也能实现控制。

(3) 自组织功能。控制系统对于复杂的任务和多种传感器信息具有自行组织与协调的功能，当出现多目标时，可自行决策进行解决。

(4) 优化功能。控制系统能够不断优化控制参数和控制系统的结构形式，以获得最优的控制性能。

1.3 智能控制的几个重要分支

由于研究者对人类智能的认识和模拟的思路与方法各有不同，因此，与传统控制理论不同，智能控制不是一套独立的知识体系，而是对所有具有“智能”特点的控制理论的统称。智能控制包含了多个分支，如专家智能控制、分级递阶控制、模糊控制、神经网络控制、遗传算法等，各个分支之间没有明显的关联，但可以相互融合。下面简要介绍智能控制中的五个重要分支。

1. 专家智能控制

专家智能控制是专家系统理论和控制技术相结合的产物。专家系统的实质是计算机软件程序，其中包含了人类专家的知识和经验，从而可以让计算机像人类专家那样去解决各种问题，目前可以处理预测、诊断、设计、规划等诸多工程问题。专家控制系统可分为直接专家控制系统和间接专家控制系统。在直接专家控制系统中，专家系统处于内

环或执行级，由其直接给出控制信号；而在间接专家控制系统中，专家系统处于外环或监控级中，专家系统只是通过调整控制器的结构和参数来参与控制。在实际应用中多采用间接专家控制系统。

专家控制不需要被控对象的数学模型，因此，是解决不确定性系统控制的一种有效方法。

2. 分级递阶控制

分级递阶控制建立在自适应控制和自组织控制的基础上，属于最早的智能控制理论之一。分级递阶控制遵循“精度随智能降低而提高”的原则，将控制系统分为组织级、协调级和执行级。其中，组织级通过人机接口和用户进行交互，执行最高决策的控制功能，监视并指导协调级和执行级的所有行为，其智能程度最高；协调级在组织级和执行级之间起连接作用，其工作包括人工智能和运筹学；执行级通常是执行一个确定的动作，其精度较高，但智能程度较低。

3. 模糊控制

模糊控制的理论基础是模糊集理论，这一理论由 Zadeh 教授首先提出，这一理论使用数学方法表达如“比较好”“非常大”等这类日常生活中对事物的模糊描述。模糊控制的基本出发点是人在操控某一系统时依靠的是经验，并且人在实际控制过程中不进行精确计算，而是使用模糊化的推理，如“如果温度很高，则降低电压”。因此，模糊控制的核心是对经验的有效总结，并将经验转化为相应的模糊控制规则。由于依靠的是人类经验，所以模糊控制方法十分适合于无法建立被控对象数学模型的场合，也是目前最活跃、实际应用最多的一种智能控制理论。

4. 神经网络控制

神经网络是一种很有特色的人工智能方法，这一方法试图通过模拟人的神经系统的结构和运行机制来解决各种工程问题。神经网络的功能主要是对输入数据进行映射，从而得到输出，如三层 BP(Back Propagation)网络可实现任意的非线性映射。而控制问题实质上也是映射问题，即对被控系统的输出数据进行映射，从而得到控制系统的输出，因此，神经网络方法很自然地应用到智能控制领域，用于解决强非线性系统、无法建立数学模型的系统的控制问题。目前，神经网络控制的研究十分活跃，但实际应用较少。

5. 遗传算法

遗传算法是一种寻优方法，常用于模糊控制规则的优化和神经网络的权阈值寻优。这一算法充分体现了人工智能的特色和思想，它模拟生物遗传原理，并遵循自然界中“适者生存，不适者淘汰”的生物繁衍规律。算法向寻优目标逐步靠近的过程相当于生物通过多代遗传产生最优个体的过程。遗传算法是处理非线性、高维、多极值寻优问题的有力工具。

1.4 MATLAB 与智能控制相结合

MATLAB 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件, 是用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境, 主要包括 MATLAB 和 Simulink 两大部分。

MATLAB 是 Matrix&Laboratory 两个词的组合, 意为矩阵工厂(矩阵实验室)。是由美国 MathWorks 公司发布的主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。它将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中, 为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案, 并在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言(如 C、FORTRAN)的编辑模式, 代表了当今国际科学计算软件的先进水平。

MATLAB 和 Mathematica、Maple 并称为三大数学软件。它在数学类科技应用软件中以及数值计算方面首屈一指。MATLAB 可以进行矩阵运算、绘制函数和数据、实现算法、创建用户界面、连接其他编程语言的程序等, 主要应用于工程计算、控制设计、信号处理与通信、图像处理、信号检测等领域。

MATLAB 的基本数据单位是矩阵, 它的指令表达式与数学、工程中常用的形式十分相似, 故用 MATLAB 来解算问题要比用 C、FORTRAN 等语言完成相同的事情简捷得多, 并且 MATLAB 也吸收了 Maple 等软件的优点, 使其成为一个强大的数学软件。在新的版本中也加入了对 C、FORTRAN、C++、JAVA 的支持。

MATLAB 具有良好的编程环境, 该软件由一系列工具组成。这些工具方便用户使用 MATLAB 的函数和文件, 其中许多工具采用的是图形用户界面, 包括 MATLAB 桌面和命令窗口、历史命令窗口、编辑器和调试器、路径搜索和用于用户浏览帮助、工作空间、文件的浏览器。随着 MATLAB 的商业化以及软件本身的不断升级, MATLAB 的用户界面也越来越精致, 更加接近 Windows 的标准界面, 人机交互性更强, 操作更简单。而且新版本的 MATLAB 提供了完整的联机查询、帮助系统, 极大地方便了用户的使用。简单的编程环境提供了比较完备的调试系统, 程序不必经过编译就可以直接运行, 而且能够及时地报告出现的错误及进行出错原因分析。

新版本的 MATLAB 可以利用 MATLAB 编译器和 C/C++ 数学库与图形库, 将自己的 MATLAB 程序自动转换为独立于 MATLAB 运行的 C 和 C++ 代码。允许用户编写可以和 MATLAB 进行交互的 C 或 C++ 语言程序。另外, MATLAB 网页服务程序还容许在 Web 应用中使用自己的 MATLAB 数学和图形程序。MATLAB 的一个重要特色就是具有一套程序扩展系统和一组称为工具箱的特殊应用子程序。工具箱是 MATLAB 函数的子程序库, 每一个工具箱都是为某一类学科专业和应用而定制的, 主要包括信号处理、控制系统、神经网络、模糊逻辑、小波分析和系统仿真等方面的应用。

xPC target 是 MathWorks 公司开发的一个基于 RTW 体系框架的附加产品, 可以将 Intel80x86/Pentium 计算机或 PC 兼容机转变为一个实时系统, 是产品原型开发、测试和配置实时系统的有效途径。xPC target 采用“宿主机-目标机(host PC-target PC)”双机模

式。宿主机和目标机可以是不同类型的计算机。宿主机上运行控制器的 Simulink 模型，目标机用于执行从宿主机下载的实时代码。宿主机和目标机可以通过以太网接口 (TCP/IP) 或串口进行通信。依靠处理器的高性能，采样速率可以达到 100kHz。用户只需安装 MATLAB 软件、C 编译器和 I/O 设备板，就可将工控机作为实时系统，实现控制系统的硬件在环测试和快速原型化等功能。

1.5 智能控制的应用

智能控制现有和潜在的应用领域众多，如机器人、计算机集成制造、航天航空、农业生产、社会经济管理、交通运输管理、环保、家用电器等。现举几例进行说明。

1. 复杂工业过程的智能控制

在石油、化工、冶金等生产过程中，难免会存在大量的非线性和不确定性，如原材料的变化及其自身的非线性、生产设备的非线性、生产任务的不同、不正常工况的干扰等。同时，生产过程也需要优化调度。目前，神经网络已应用于炼油厂的生产过程控制中，专家系统已应用于轧钢控制和高炉控制中，模糊控制已应用于粮食烘干过程控制中，模糊专家系统已应用于啤酒发酵生产中。

2. 机器人智能控制

可以说，机器人是机械技术和智能控制理论的完美结合，虽然目前机器人的智能化程度还未达到人类的智能水平，但已在很多方面有所突破，如机器人的避障控制、寻迹和跟踪控制、机器臂的柔顺控制等。另外，国外已开发出能够在各种路面上行走的机器狗、能够自如动作的舞蹈机器人、能够直立行走并能完成跳跃的双足机器人、能够进行管道缺陷检测和修复的机器人等。

3. 工程机械智能控制

在矿山、建筑工地、垃圾清理场和道路工程中，总是有大量的挖掘和铲土作业。要完成这些工作，经常使用像挖掘机、装载机、两头忙这样一些既复杂又昂贵的机器。为了让驾驶员脱离恶劣的工作环境，提高劳动生产率、改善机器的使用状况、降低机器的使用费用，对这类机器的自主作业的控制，已引起普遍的重视。但在实际工地上，实现对挖掘铲装这类工作的自动控制，很难用经典的自动控制技术来实现。例如，对铲斗动作的控制，只是把土堆分成若干的部分，每一部分恰巧等于铲斗的容量，这种思路就不能奏效。如果铲斗的切入是在散装物料里，铲斗的运动阻力是可以预先确定的，那这样的规划就是可能的。正相反，在上述的环境里，预测阻力是不可能的，因为在岩石堆里，石块的大小是不规则的。

就是说，在不能预测的、非结构化的、动态的岩土挖掘与铲装工作环境里，由于存在不规则的石块，铲斗阻力的预测是不可能的、不可行的，原因是现在还没有一种办法来预先确定铲斗的底面和料堆之间的相互作用，铲斗的运动只能依靠在当前状态下数据的反馈来做出在线的决策。

在完全自主的岩土挖掘与铲装作业中,采用的控制结构遵循了基于行为的控制概念。也就是说,解决岩土挖掘与铲装的控制问题,是通过把一项复杂的工作任务分解成很多简单的组成部分,这些组成部分分别由一些铲装行为来实现。

这种控制方法提出了新的结构和运算模式,与传统的基于行为的控制并不相同。其工作任务的规划结合了驾驶员的工作经验,利用模糊的情形判断来完成行为的选择;工作任务的排序通过有限状态机结合神经网络做出决策。这样的控制结构能够包容多项工作目标;通过学习能适应不同的环境;一项挖掘行为是通过一系列基本的、机器可以执行的具体动作来实现的。

通过观察、分析驾驶员的操作,提取基本的铲斗动作,针对不同的工作环境里各种各样的动作或动作排序,做出明确的定义。利用模糊规则表达驾驶员的工作经验;利用模糊逻辑,依靠来自传感器的、并不充分也不精确的数据,选择每一个挖掘动作。

4. 家用电器的智能控制

家用电器是智能控制的一个重要应用场合。各种家用电器都工作在非线性、时变、不确定的环境中。例如,在空调控制中,空调所处的环境条件是时变的、不确定的,空调控制器输出的控制信号所产生的作用在一段时间之后才会体现出来,因此又具有时滞性;在洗衣机控制中,每一次洗涤衣物的多少、衣物的材质、衣物的干净程度均不一样,从而它也是一种非线性不确定系统。所以,传统控制理论在家电控制方面效果甚微。目前,应用了智能控制的家用电器为数众多,如洗衣机、空调、冰箱、电饭锅等。

另外,智能控制还在农田灌溉、城市污水处理、石油开采、飞行器控制等多个领域中获得成功应用,并表现出了较强的灵活性和实用性。可以说,凡是传统控制理论能够解决的问题,智能控制也能够解决,而传统控制理论不能够解决的问题,智能控制往往会获得良好的效果。究其原因,传统控制理论过于强调数学模型的作用,过于依赖解析的数学方法。而各种智能控制方法几乎完全跳出这一固有的思维模式,从不同的角度模拟人类智能,如基于知识的专家系统、基于规则和推理的模糊控制、基于神经结构和运行机制的神经网络,这些均不依赖于严格的数学模型,却能够实现准确的控制。正是因为有新的解决问题的思想,智能控制才成为新一代的控制方法,并具有十分广阔和诱人的应用前景。

第2章 模糊控制

2.1 模糊及模糊控制概述

绝大多数控制问题都涉及对系统的判别和控制决策的推理，其实质均是数学问题，且均需要系统的各种信息，如机械系统的尺寸、刚度、力、力矩、运动速度、传动比等，这就涉及对系统信息的描述问题。在传统控制理论中，由于要对被控系统建立精确的数学模型，所以对系统信息的描述是明确的和定量的，如转轴直径为 10mm。

智能控制理论的核心思想是模拟各种自然规律和人类的生理、心理和思维特点，即向自然和人类自身学习。对于人类而言，若不采用能够提供精确数值信息的测量仪器，则大脑的各种判别和推理工作所使用的信息均依赖于主观判断，如电机转速很快、负载力矩非常大、设备振动幅度特别小等。由于人类的这种信息描述方法是非明确的和非数值的，所以将其称为“模糊”的。显然，“模糊”广泛存在于人类的日常生产生活当中，而且人们在描述某一事物时更习惯于使用模糊性的语言，如描述天气时常说“今天真热(冷)”。

人类对信息描述的模糊性体现在两个方面：一是对单个事物某方面性质的模糊描述，如描述某人身高时会说“这个人真高”，描述电机转速时会说“电机转速太快了”等；二是对两个事物间某方面关系的模糊描述，如描述甲和乙两个人的相貌相似程度可能会说“甲和乙长得太像了”，描述 100 与 1 的大小关系会说“100 比 1 大很多”。

模糊控制理论认为，人类对自身和设备的控制是基于规则的。例如，在储水池水位控制当中，操作人员经过长期的操作，会总结出“如水位过高，则阀门调节量为向排水方向大幅调节的可能性最大；如水位过低，则阀门调节量为向注水方向大幅调节的可能性最大；如水位合适，则阀门调节量保持不动的可能性最大”等控制经验，即控制规则。可见，在这些控制规则中，涉及三种模糊描述，即对被控系统的输出量(水位)的模糊描述，对被控系统的输入量(阀门调节量)的模糊描述，以及对被控系统输出量与输入量之间关系的模糊描述。而恰恰是依据由各种模糊描述表征的控制规则，人类才可以轻易完成传统控制理论难以有效解决的控制任务，如各类窑炉的燃烧过程控制、有机物的发酵过程控制、具有非线性强耦合大滞后的复杂系统控制等。模糊控制理论模拟的便是人类这种基于规则的控制方法，显然，其关键之处便是将操作人员的操作经验总结和提炼为一系列控制规则，所以模糊控制理论中的内容均是围绕控制规则的建立、表达和应用而展开的。

2.2 模糊集合及其运算

模糊控制理论的基础是模糊数学，模糊数学的出发点是模糊集合。为了说明知识的

延续性, 首先简要回顾已经很熟悉的普通集合论中的基本概念及运算。

2.2.1 普通集合基本概念及运算

在普通集合中, 有如下基本概念及运算。

- (1) 论域。被考虑对象的全体, 也称全域、全集。通常用大写字母表示, 如 X 、 V 。这一定义同样适用于模糊集合。
- (2) 元素。论域中的每个对象称为元素, 通常用小写字母表示, 如论域 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ 。
- (3) 集合。在论域 X 中, 给定一个性质 p , 则论域中具有性质 p 的元素的全体称为集合, 表示为 $A = \{x | p(x)\}$ 。
- (4) 空集。不含论域中任何元素的集合称为空集, 记为 \emptyset , 则 $\emptyset = \{x | x \neq x\}$ 。
- (5) 包含。 A 和 B 是论域 X 上的两个集合, 则对任意 $x \in X$, 若有 $x \in A \Rightarrow x \in B$, 则称 B 包含 A , 记为 $A \subseteq B$ 或 $B \supseteq A$ 。
- (6) 相等。如果 $A \subseteq B$ 且 $A \supseteq B$, 则称集合 A 和 B 相等, 记为 $A = B$ 。
- (7) 子集。若 $A \subseteq B$, 则 A 是 B 的子集。
- (8) 并集。集合 A 和 B 的并集运算表示为

$$A \cup B = \{x | x \in A \vee x \in B\} \quad (2.1)$$

其中, 符号 \vee 表示析取, 在逻辑运算中表示取大。

- (9) 交集。集合 A 和 B 的交集运算表示为

$$A \cap B = \{x | x \in A \wedge x \in B\} \quad (2.2)$$

其中, 符号 \wedge 表示合取, 在逻辑运算中表示取小。

- (10) 补集。定义集合 A 的补集为

$$A^C = \{x | x \notin A\} \quad (2.3)$$

2.2.2 普通集合的特征函数

设 A 是论域 X 上的集合, 其特征函数记为

$$G_A(x) = \begin{cases} 1 & (x \in A) \\ 0 & (x \notin A) \end{cases} \quad (2.4)$$

特征函数的目的是定量地描述某一元素对集合的隶属程度, 用 1 表示元素属于集合, 用 0 表示元素不属于集合, 即特征函数是一个二值函数。

例 2-1 设有论域 $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, A 为论域 X 上奇数的集合, 则各元素的特征函数值分别为

$$G_A(0) = 0, G_A(1) = 1, G_A(2) = 0, G_A(3) = 1, G_A(4) = 0, G_A(5) = 1$$

也可表示为 $G_A(x) = \{0, 1, 0, 1, 0, 1\}$ 。

可见, 特征函数是集合的另一种表示方法, 而且对于并集、交集和补集运算, 同样可以利用特征函数完成。

例 2-2 设有论域 $X = \{1, 2, 3, 6, 8, 9\}$, X 上的集合 A 和 B 分别为 $A = \{1, 3, 6, 9\}$ 、 $B = \{2, 9\}$,