

工程机械系列教材

# 智能控制技术概论

编著 宋胜利

ZHINENG KONGZHI JISHU GAILUN

国防工业出版社

工程机械系列教材

# 智能控制技术概论

编著 宋胜利  
参编 李焕良 王海涛 徐 锋 丛 伟  
审阅 张 琦 周建钊

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书从工程应用的角度出发,全面系统地介绍了智能控制的基本理论和设计方法及其在工程机械领域的应用。全书共分八章,主要内容包括:专家系统与专家控制系统的基本原理和应用、模糊控制的数学基础和模糊控制器的基本原理及设计方法、神经网络理论基础和神经网络控制、遗传算法的基本理论和遗传算法在控制工程中的应用等。

本书取材新颖,内容丰富,注重理论与实践相结合,论述力求深入浅出,层次分明,强调实用性。书中应用实例附有 MATLAB 代码,便于理解和验证智能控制的理论知识。

本书可作为工科院校相关专业的研究生、本科生、专科生的教材,亦可供从事相关专业的科研人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能控制技术概论 / 宋胜利编著. —北京:国防工业出版社,2008.6

工程机械系列教材

ISBN 978-7-118-05568-9

I. 智... II. 宋... III. 工程机械—智能控制 IV. TU6-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 010804 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京市李史山胶印厂

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16¼ 字数 373 千字

2008 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68427264

《工程机械系列教材》  
编写委员会成员

主任委员 王耀华 龚烈航

副主任委员 高亚明 苏凡圉 周建钊

委 员 (按姓氏笔划为序)

王占录 王 强 王新晴 李 钧

陈六海 陈明宏 宋胜利 张梅军

赵建民 姬慧勇 鲁冬林 储伟俊

程建辉

# 前 言

长期以来,人们把工程机械视为减轻体力劳动、替代人工作业、提高生产效率的工具。因此,人们在设计工程机械时,主要考虑解决机械的动力、传动和运动等问题,而没有从工程机械具有信息处理功能这一角度来进行设计。事实上,工程机械的操纵和控制是信息处理问题,是一个信息检测、信息分析和处理、控制信息输出的过程。随着工程机械的发展,对其功能和性能的要求越来越高,需要解决的信息处理和 control 问题也越来越多。

智能控制是自动控制技术的最新发展阶段,是用计算机模拟人类智能进行控制的研究领域。目前以微机或微处理器为核心的智能控制技术在现代工程机械中的应用已初现端倪,智能控制技术已逐渐深入到工程机械的许多领域,如挖掘机的电子功率优化、柴油机的电子调速、装载机和铲运机变速箱的自动控制、摊铺机自动找平和自动供料、拌和设备称重计量过程的自动控制、工程机械的状态监控与故障诊断等。

本书系统地介绍了智能控制的基本理论和设计方法及其在工程机械领域的应用。全书共分八章,第1章介绍了智能控制的基本概念、研究进展和研究内容;第2章介绍了专家系统的基本原理与组成和专家控制系统的设计方法;第3章为模糊控制中涉及的数学知识,是学习第4章的重要基础;第4章介绍了模糊控制的基本思想、基本原理和模糊控制系统的设计方法;第5章介绍了神经网络的基本概念,包括前馈神经网络、反馈神经网络和模糊神经网络等;第6章在第5章的基础上介绍了神经网络控制系统的设计方法,包括神经网络学习控制、神经网络自适应控制、神经网络PID控制、神经网络预测控制和模糊神经网络控制等;第7章介绍了遗传算法的基本概念和实现技术;第8章介绍了遗传算法在控制领域的应用实例;附录部分给出了模糊控制工具箱、神经网络控制工具箱和遗传算法工具箱(英国谢菲尔德大学开发)的函数使用说明。

参加本书编写的人员有宋胜利(绪论、第3章、第4章、第8章8.1节、8.2节)、徐锋(第2章)、李焕良(第5章)、王海涛(第6章、第8章8.3节)、丛伟(第7章、第8章8.4节)全书由宋胜利统稿,由张琦教授、周建钊教授审阅。

本书在总结多年教学、科研工作经验并吸收前人大量的研究成果的基础上编写而成,国防工业出版社为本书的出版提供了大量的支持,南京航空航天大学左敦稳教授、同济大学的周奇才教授和李万莉教授、镇江华晨华通的肖翀宇高级工程师等为

本书的出版给予了极大的指导和帮助,孙伟博士、刘雪霞博士、冯涛、易茜研究生为本书 MATLAB 程序调试、样稿校对付出了辛勤劳动,在此表示衷心感谢!对参考文献中引用的教材和其他被引用文献的作者,表示深深的谢意!

由于时间仓促,编著人员水平有限,对教材中存在的不足之处敬请读者批评指正。

编者

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 智能控制技术概述	1
1.2 智能控制技术研究的主要内容	3
1.3 智能控制在工程机械领域的应用	8
思考题与习题	9
第 2 章 专家系统与专家控制系统	10
2.1 概述	10
2.2 专家系统的基本结构与实现	20
2.3 专家控制系统的设计方法	28
2.4 设计实例	52
思考题与习题	59
第 3 章 模糊控制的数学基础	60
3.1 引言	60
3.2 模糊集合及其运算	60
3.3 模糊关系及其合成	69
3.4 模糊语言变量与模糊推理	72
思考题与习题	83
第 4 章 模糊控制器的基本原理及设计方法	84
4.1 引言	84
4.2 模糊控制系统概述	86
4.3 模糊控制系统的基本原理	93
4.4 模糊控制系统的设计方法	99
4.5 设计实例	100
思考题与习题	118
第 5 章 神经网络理论基础	119
5.1 神经网络的基本概念	119
5.2 前馈神经网络	125
5.3 反馈神经网络	134
5.4 模糊神经网络	141
思考题与习题	150
第 6 章 神经网络控制	151
6.1 引言	151

6.2	神经网络系统辨识 .....	152
6.3	神经网络自适应控制 .....	155
6.4	神经网络 PID 控制 .....	159
6.5	神经网络预测控制 .....	163
6.6	模糊神经网络控制 .....	167
6.7	示例 .....	170
	思考题与习题 .....	181
<b>第 7 章</b>	<b>遗传算法</b> .....	<b>182</b>
7.1	概述 .....	182
7.2	基本遗传算法 .....	191
7.3	遗传算法的实现技术 .....	194
	思考题与习题 .....	212
<b>第 8 章</b>	<b>遗传算法在控制工程中的应用</b> .....	<b>213</b>
8.1	引言 .....	213
8.2	基于遗传算法的 PID 控制器设计 .....	213
8.3	基于遗传算法的模糊控制器设计 .....	219
8.4	遗传算法在神经网络控制中的应用 .....	225
	思考题与习题 .....	233
<b>附录</b>	<b>MATLAB 简介</b> .....	<b>234</b>
附 1	MATLAB 概述 .....	234
附 2	模糊控制工具箱 .....	235
附 3	神经网络控制工具箱 .....	237
附 4	遗传算法工具箱 .....	239
<b>参考文献</b>	.....	<b>251</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 智能控制技术概述

### 1.1.1 智能控制技术问题的提出

自从 1932 年 H. Nyquist 发表反馈放大器的稳定性论文以来,控制理论学科的发展已有 70 多年的历史。从控制理论学科发展的历程来看,该学科的发展经历了三个主要阶段:经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论。

经典控制理论以反馈理论为基础,是一种单回路线性控制理论。主要研究单输入-单输出、线性定常系统的分析和设计,对非线性系统分析时采用的相平面法,一般也不超过两个变量。经典控制理论主要采用传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频域分析方法,这一时期的主要代表人物有 Bode 和 Nichols。1945 年 Bode 提出了简便而实用的伯德图法;1948 年 Nichols 提出了直观而又形象的根轨迹法。第二次世界大战期间,为了设计和制造飞机和船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用装备,大大地促进和完善了经典控制理论的发展。

20 世纪 60 年代前后,由于计算机技术的成熟、普及和现代应用数学成果的推出,促使控制理论由经典控制理论向现代控制理论过渡。现代控制理论主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数系统的最优控制问题。计算机的飞速发展,推动了空间技术的发展,经典控制理论中的高阶常微分方程可转化为一阶微分方程组,用以描述系统的动态过程,即所谓状态空间法。这种方法可以解决多输入多输出问题,系统既可以是线性定常的,也可以是非线性时变的。现代控制理论采用的方法包括状态空间法、Bellman 动态规划方法、Kalman 滤波理论和 Pontryagin 极大值原理等。这一时期的主要代表人物有 Bellman、Kalman 及 Pontryagin 等人。1957 年 Bellman 提出了动态规则;1959 年 Kalman 和布西发表了关于线性滤波器和估计器的论文,即著名的 Kalman 滤波;1961 年 Pontryagin 发表了极大值原理。与经典控制理论相比,现代控制理论更进一步地将控制系统的设计建立在某种最优化指标上,如航天飞行器的最少燃料控制或最短时间控制等。

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。由于现代控制理论过多地依赖对象的数学模型,其控制算法较为理想化,设计方法非常数学化,因此,在面对难以用数学模型描述或者具有时变、非线性、不确定性特征的复杂系统时,现代控制理论也显得无能为力。然而,我们在生产实践中看到,许多复杂的生产过程难以实现的目标控制,可以通过熟练的操作工、技术人员或专家的操作获得满意的控制效果。这就使研究人员受到启发,若能把这些熟练的操作工、技术人员或专家的经验知识与控制理论相结合,把它作为控制理论解决复杂生产过程的一个补充手段,那将使控制理论解决复杂生产过程的难题有一个突破性的进展。计算机控制技术的发展为这种设想

提供了有效的工具。计算机在处理逻辑运算、模糊信息、模式识别、知识与经验的积累等方面,完全可以取代人的操作。当把这种计算机控制技术应用到上述复杂的生产过程中,使之达到或超过人的操作水平时,这种由计算机实现的控制系统就具有了某些人的智能。

在 20 世纪 60 年代至 20 世纪 70 年代,人工智能的研究取得了初步成果。为了提高控制系统的品质和寻优能力,控制领域的研究人员开始考虑把人工智能技术用于控制系统。近年来,控制领域的研究人员把传统控制理论与模糊逻辑、神经网络、遗传算法等智能技术相结合,充分利用人类的经验知识对复杂系统进行控制,逐渐形成了智能控制这一新兴学科。

### 1.1.2 智能控制技术的研究进展

智能控制是一门新兴的交叉学科,是传统控制理论发展的高级阶段。智能控制理论的创立和发展是对人工智能、计算机科学、知识工程、模式识别、系统论、信息论、控制论、模糊集合论、人工神经网络、进化论等多种前沿学科、先进技术和科学方法的高度综合集成。

20 世纪 60 年代~70 年代,模拟人类智能的人工智能迅速发展起来。人工智能的研究取得了一些初步的成果,其研究内容涉及知识工程、自然语言理解等。同时,建立于严密数学理论上的控制理论的发展却受到挫折,面对呈现高维、非线性、分布参数、时变、不确定性等复杂特征的工业系统,控制工程人员很难深入理解,更谈不上设计出合适的控制算法,但是,对这些问题用工程控制专家经验来解决则往往是成功的。于是控制领域的研究人员开始考虑把人工智能技术用于控制系统,希望提高控制系统的品质和寻优能力。1965 年,美国普波大学的傅京荪教授首先提出了学习控制的概念,引入了人工智能的直觉推理,提出把人工智能的直觉推理规则方法用于学习控制系统。次年,Mendel 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”的新概念;同年,Beondes 和 Mendel 首次使用了“智能控制”(Intelligent Control)一词,并把记忆、目标分解等技术用于学习控制系统,这些反映了智能控制思想的早期萌芽,被称为智能控制的孕育期。

1971 年,傅京荪在“学习控制与智能控制——人工智能与自动控制的交汇”一文中提出了智能控制就是人工智能与自动控制的交叉的“二元论”思想,并提出“智能控制系统”(Intelligent Control System)这一概念。傅京荪认为有三种系统可以认为是典型的智能控制系统:人作为控制器的控制系统、人机结合作为控制器的控制系统和无人参与的自主控制系统。1974 年,英国的 Mamdani 教授首次成功地将模糊逻辑用于蒸汽机控制,开创了模糊控制的新方向。1977 年,Saridis 出版了《随机系统自组织控制(Self - Organizing Control of Stochastic System)》一书,随后又于 1979 年发表了“向实现智能控制进军”(Toward the Realization of Intelligent Controls)这一具有很大影响的综述文章。在这两篇代表作中,Saridis 全面地论述了从反馈控制到最优控制,随机控制及自适应控制、自组织控制、学习控制,最终向智能控制发展的过程,第一次提出了典型的智能控制系统结构,即分层递阶智能控制。Saridis 在理论上以熵作为智能控制系统的性能量度准则和指标,对每一级都给出熵的计算方法,指出在执行级实现最优控制等价于令某熵最小的控制。Saridis 把傅京荪关于智能控制的二元示图发展为三元示图,认为智能控制是由人工智能、控制理论和

运筹学三者结合而成。

20世纪80年代,智能控制的研究进入了迅速发展时期。1985年8月,IEEE在美国召开了首届智能控制专题会议,会上讨论了智能控制的形成问题,对智能控制的原理和系统结构进行了专门的讨论,会后成立了控制系统学会下属的智能控制技术委员会。1986年,Astrom发表了“专家控制”(Expert Control)论文,在该论文中,Astrom把控制理论与人工智能中的专家系统相结合,提出了一种新型的基于专家控制的智能控制系统,在这种控制方式中,把专家系统技术和传统的PID控制、数字控制、现代控制方法有机地结合起来,根据环境和对象的不同,控制方式和控制精度的不同,采取专家型的控制策略,有效地解决了各种实际问题。与此同时,Hopfield提出的Hopfield网络及Rumelhald提出的BP算法为一直处于低潮的人工神经网络的研究注入了新的活力。继Kilmer和McCulloch提出KBM模型实现对“阿波罗”登月车的控制之后,人工神经网络再次被引入控制领域,并迅速得到了广泛的应用,从而开辟了神经网络控制。1987年1月,在美国费城由IEEE控制系统学会与计算机学会联合召开了第一届智能控制国际会议,会上提交讨论并发表论文60余篇。随后于1988年8月,在美国又召开了第二届智能控制国际会议。

在国内,涂序彦和郭荣江于1977年在《自动化学报》上发表“智能控制及其应用”一文,成为我国智能控制方面的第一篇论文。20世纪80年代初,重庆大学周其鉴教授提出并研究了仿人智能控制问题。1989年,我国第一届全国人工智能与智能控制的学术会议在重庆大学召开,会上成立了相应的学术团体。80年代末,蔡自兴教授从系统的整体性和目的性出发,又提出智能控制系统的四元结构,认为智能控制是人工智能、控制理论、系统理论和运筹学四种学科的交叉,进一步发展了Saridis的三元理论。1993年,清华大学组织召开了全球第一届智能控制学术会议,会上发表论文数百篇,内容之丰富为历来所罕见,反映了智能控制在我国的蓬勃发展。

进入21世纪,智能控制进入新的历史阶段,控制学科所面临的控制对象的复杂性、控制环境的复杂性和控制目标的复杂性日益突出,智能控制的研究成为解决这类问题的有效手段。

## 1.2 智能控制技术研究的主要内容

传统的控制方法建立在被控对象的精确数学模型之上,智能控制是针对系统的复杂性、非线性、不确定性等提出来的。智能控制是一个全新的控制概念,对智能控制的研究仍处于探索和发展阶段,到目前为止还没有一个统一的、公认严格定义。IEEE控制系统协会把智能控制归纳为:智能控制系统必须具有模拟人类学习和自适应的能力。一般来说,一个智能控制系统应具有下列一些特点:

(1) 能对复杂系统(如非线性、时变、多变量、环境扰动等)进行有效的全局控制,并具有较强的容错能力;

(2) 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,能根据被控动态过程特征辨识,采用开闭环控制和定性与定量控制相结合的多模态控制方式;

(3) 能对获取的信息进行实时处理并给出控制决策,通过不断优化参数和寻找控制器的最佳结构形式,以获得整体最优控制性能;

(4) 具有自学习、自适应、自组织的能力,能从系统的功能和整体优化的角度来分析和综合系统,以实现预期的控制目标。

智能控制是针对被控系统及其控制环境和任务不确定性而提出的,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,因此,智能控制系统应当对环境和任务的变化有快速应变能力,应能完成各种复杂多变的任务。目前,对智能控制的研究主要集中在专家控制技术、模糊控制技术、神经网络控制技术、遗传算法等方面。

### 1.2.1 专家控制技术

人工智能领域应用最多的是专家系统,20世纪80年代专家系统的概念和方法被引入到自动控制领域,促进了专家控制系统的研究和应用。由人工智能领域中发展起来的专家系统是一种基于知识的智能计算机程序系统。专家控制的实质是基于控制对象和控制规律的各种知识,并且要以智能的方式利用这些知识,以求得控制系统尽可能的优化和实用化。

从本质上来看,专家系统由许多收集的规则组成,它清楚地表示了知识和结果。一般的专家系统由知识库、推理机、解释机制和知识获取系统等组成。

(1) 知识库。知识库是以某种形式存储于计算机中的知识的集合,包括基本事实、规则和可行的操作等。知识库中的知识通常是按照知识的表示形式、性质、层次、内容来进行组织的。为了建立知识库,主要解决知识获取和知识表示问题。知识获取是指知识工程师如何从专家那里获得要纳入知识库的专门知识;知识表示要解决的问题则是如何使用计算机能够理解的形式表示和知识存储。知识库的管理由知识库管理系统实现,包括知识库的建立、删除、重组,知识的录入、编组、检索、维护、更新以及对知识的一致性、冗余性和完整性的检查等。

(2) 推理机。根据数据库的当前内容,从知识库中选择可匹配的规则,并通过规则来修改数据库中的内容,再通过不断地推理导出问题的结论。推理机包含如何从知识库中选择规则的策略和当有多个可用规则时如何消除规则中冲突的策略。推理机的性能与构造一般与知识的表示方式与组织形式有关,但与知识的内容无关,这样有利于推理机与知识库的相对独立性,当知识库中的知识有变化时,无需修改推理机就可以完成专家系统的修改工作。

(3) 解释机制。解释机制是专家系统区别于其他系统的重要特征之一。解释机制实现解释功能,专门负责向用户解释专家系统的行为和结果。在推理过程中它可向用户解释系统的行为,向用户回答为什么导出推理的结论,完成“why”之类的问题,推理结束后它可向用户解释推理结论是如何得出,完成“how”之类的问题。另外通过对自身行为的解释,还可帮助系统建造者发现知识库及推理机中的错误,有助于系统的调试及维护。解释机构由一组程序组成,它能跟踪并记录推理过程,当用户提出询问需要给出解释时,它将根据问题的要求分别做相应的处理。最后把解答用约定的形式通过人机界面输出给用户。

(4) 知识获取系统。知识获取系统的主要任务是把知识输入到知识库中,并负责维持知识的一致性及完整性,建立起性能良好的知识库。在不同的系统中,知识获取的功能

及实现方法差别较大,有的系统首先由知识工程师向领域专家获取知识,然后再通过相应的知识编辑软件把知识送入到知识库中;有的系统自身具有部分学习功能,由系统直接与领域专家对话获取知识,或者通过系统的运行归纳、总结出新的知识。

专家控制系统离不开知识的表示、运用、获取和更新等知识工程,因此,设计专家控制系统的过程实质上是有效地组织和运用知识的过程。一般的专家控制系统由三部分组成:①控制机制:它决定控制过程的策略,即控制哪一个规则被激活、什么时候被激活等;②推理机制:它实现知识之间的逻辑推理以及与知识库的匹配;③知识库:包括事实、判断、规则、经验以及数学模型。

专家控制系统主要有直接专家控制系统和间接专家控制系统两种结构形式。

(1) 直接专家控制系统。直接专家控制系统又称基于规则的专家控制系统,这种专家控制系统比较简单,专家系统直接包含在控制回路中,是用专家控制器代替原来传统的控制器而构成的专家控制系统。专家控制器的输出信号直接作为受控对象的输入量,实现控制作用,控制专家的控制经验与控制思想通过专家控制器来实现。这种控制对推理速度要求较高,因此,如何满足实时性要求是这类系统要解决的关键问题。

(2) 间接专家控制系统。间接专家控制系统的控制器由专家控制器和其他控制器两部分构成,专家控制器的作用是监控系统的控制过程,动态调整其他控制器的结构或控制的参数,然后由其他控制器完成直接对受控对象的直接控制作用。因此间接专家控制系统又称为监控式专家控制系统或参数自适应控制系统。间接专家控制方法是专家系统技术和其他控制技术的紧密结合,二者密切合作,取长补短共同完成系统的优化控制。这里,其他控制器可以是传统的 PID 控制器、模糊控制器、神经网络控制器等。由于专家系统会遇到知识获取的“瓶颈”、“窄台阶”等困难,因此,单一依靠专家系统的控制无法满足实时性、灵活性、自适应性等的要求。一般认为,设计、研究诸如神经网络专家系统、专家模糊控制等这种紧密型的间接专家控制系统更具有重要的现实意义。

## 1.2.2 模糊控制技术

模糊控制是近代控制理论中建立在模糊集合论基础上的一种基于语言规则与模糊推理的控制理论,它不依赖控制对象的模型,是智能控制较早的一种形式,也是智能控制很有发展前途的一个重要分支。模糊控制系统依赖于行为规则库,其规则用自然语言表达,更接近于人的思维方法和推理习惯,便于现场操作人员的理解和使用。

模糊控制是应用二值逻辑的计算机来实现的,在模糊控制过程中,模糊规律经过计算机运算,最后再进行确定性的控制。因此,要设计一个模糊控制器,必须解决三个方面的问题,即精确量的模糊化、模糊推理和模糊量的清晰化。

(1) 精确量的模糊化。在模糊控制系统中,被观测量通常是确定的量,即测量得到的该确定量是在一定精度范围内的精确的数值量,由于在模糊控制中的操作是基于模糊集合理论的,一个实值输入必须表示为模糊集的形式,才能进行推理计算,因此,首先必须进行模糊化。用一个模糊集表示实值信号的过程称为模糊化。模糊化的基本思想是定义一个模糊语言映射作为从数值域至语言域(符号域)的模糊关系,从而在数值测量的基础上,将数值域中的数值信号映射到语言域上,为实现模糊推理奠定基础。语言值多用模糊集合描述,模糊集合一般由论域和隶属函数构成,因此,精确量模糊化的过程实质上就是

求取相应数值域的模糊集合隶属函数的过程。

(2) 模糊推理。模糊推理是建立在一系列模糊控制规则的基础上的,这些控制规则是人们对被控对象进行控制时的经验总结,是一些逻辑推理规则,其形式表现为模糊条件语句,一般表示为“if...then...”的形式。模糊控制规则可以通过相关领域的专家给出,也可以通过大量的试验数据给出。模糊推理是根据一些模糊前提条件运用模糊数学理论对模糊控制规则进行计算推理,推导出一个定性的用语言表示的决策输出量,即模糊输出量。在模糊控制系统中,模糊推理是核心,它能模仿人的模糊思维,运用模糊蕴涵运算和模糊逻辑推理规则进行推理决策。

(3) 模糊量的清晰化。通过模糊推理得到的结果是一个模糊集合,也可以说是一个模糊量,但实际模糊控制系统所需要的控制信号必须是精确量,要用一个确定的值才能去控制执行机构。因此,模糊控制器经过推理后的模糊输出量必须经过精确化处理,才能去控制被控对象。在模糊推理得到的模糊量中,求取一个相对最能代表这个模糊集合的单值的过程称为解模糊,即模糊量的清晰化。模糊量的清晰化与精确量的模糊化均是模糊控制器与被控对象之间的接口,模糊量的清晰化可以看做是精确量模糊化的反过程,它从模糊推理结果中产生控制数值,作为模糊控制器的输出。

一个模糊控制器的智能是以模糊控制规则来体现的。对于一个模糊控制器而言,模糊量集合和模糊控制规则集合统称为知识基,知识基是由专家的经验知识进行提取而得到的,专家所总结出来的知识基的完善程度直接影响到模糊控制器的智能化水平。当专家提供的知识基较粗糙时,应通过学习来改进知识基中的知识表示水平和知识完备水平。另外,在对精确量的模糊化过程中,对信息的简单模糊化会导致系统控制精度的下降。而为了提高精度,往往会在模糊化时增加模糊量的个数,或增大控制规则集,这样会导致控制规则搜索范围的扩大、搜索时间的增加,从而降低决策的速度、影响系统的动态品质。因此,模糊量即隶属函数的修正和模糊控制规则的优化是提高模糊控制水平的重要内容。

### 1.2.3 神经网络控制技术

神经网络的研究至今已有 60 多年的历史,其发展过程曲折起伏。自 20 世纪 80 年代中期以来,神经网络引起了国内机械工程领域广大科研人员的浓厚兴趣,并进行了大量研究工作。目前,神经网络的理论和应用研究工作方兴未艾,每年有大量研究成果问世,发表的论文数以千计,其应用领域极为广阔,几乎涉及到机械工程领域的各个方面。神经网络能够在机械工程领域获得广泛应用,是神经网络模仿人脑结构及智能行为,以及大规模并行处理、容错、自组织和自适应能力及联想功能等特性决定的。作为一种新颖的建模工具,神经网络不像专家系统那样需要事先建立知识库,知识的获取只需足够的训练样本,训练合格的网络将知识存储在权系数中;神经网络能够模拟现实系统复杂的输入输出关系,具有很强的非线性建模能力;神经网络具有良好的容错性能,在局部节点或连接失效、部分规则不掌握的情况下,仍能正常工作等等。所有这些特点,都是处理机械工程领域各种不同建模必须的特性。

神经元控制是模拟人脑神经中枢系统智能活动的一种控制方式。由于它具有适应能力和学习能力,因此适合作为智能控制的研究工具。从本质上看,神经网络是一种不依赖模型的自适应函数估计器,而通常的函数估计器则依赖于数学模型。当给定的输入并不

是原来训练的样本时,神经网络也能给出合适的输出,即它具有泛化功能。人工智能专家系统在一定意义上也可看作不依赖模型的估计器,这一点与神经网络有共同之处。但它采用的是符号处理方法而非数值方法,其硬件实现相对困难。在专家系统中,知识明显地表示为规则。而在神经网络中,知识是通过学习例子而分布地存储在网络中,因此神经网络有很好的容错能力。当个别处理单元损坏时,对神经网络整体行为只有很小的影响,而不会影响整个系统的正常工作。

神经网络同样也是一种可以训练的非线性动力学系统,因而呈现非线性动力学系统的许多特性,如李雅普诺夫稳定性、平衡点、极限环、混沌现象等,这些都是在用神经网络组成的智能控制系统时必须研究的问题。

神经元网络通过神经元以及相互连接的权值,初步实现了生物神经系统的部分功能。神经网络具有的非线性映射能力、并行计算能力、自学习能力以及强鲁棒性等优点已广泛地应用于控制领域,尤其是非线性系统领域。一般说来,按神经网络在系统中的作用划分,它有两种功能模式:神经网络建模和神经网络控制。神经网络具有可以逼近非线性函数的能力,因此它可以用来建立非线性系统的动态模型。神经网络建模主要是利用对象的先验知识(即输入输出数据),经过误差校正反馈,修正网络权值,最终得到一个具有输入输出对应关系的函数模型。虽然神经网络对非线性系统的建模起到重要的作用,但是还存在很多需进一步研究的问题。如:对不同的非线性对象神经网络模型的选取及其结构的确定问题、被辨识系统的充分激励问题、带噪声系统的辨识问题、辨识算法的快速性和收敛性问题等。神经网络控制就是利用神经网络这一工具而构成的控制系统。神经网络在控制系统中所起的作用可大致分为四大类;第一类是在基于模型的各种控制结构中充当对象的模型;第二类是充当控制器;第三类是在控制系统中起优化计算的作用;第四类是与其它智能控制如专家系统、模糊控制相结合为其提供非参数化对象模型、推理模型等。神经网络控制系统用于控制非线性对象时,神经网络的自学习、自适应性使其与线性系统的自适应控制系统有许多相同之处,有一些结论可以平移。但是由于从线性系统到非线性系统有着本质的差异,要解决非线性系统自适应控制的问题如稳定性问题、结构问题、鲁棒性问题等等都要比线性系统难得多。因此,在神经网络的控制中存在的潜在研究问题也相当多。无疑神经网络控制是一个挑战性很强的领域。由于它可能是处理非线性不确定系统的有效途径,因此,近年来受到了国内外学者们的高度重视。

#### 1.2.4 遗传算法

遗传算法是一种模拟自然界中适者生存、优胜劣态的计算模型,简称 GAs (Genetic Algorithms),1962年由美国 Michigan 大学的 Holland 教授提出。该计算模型的基本思想是将求解问题转化成由个体组成的演化群体,并对该群体进行一系列遗传操作,直到求得最优解。

遗传算法的主要特点为以下几点:

(1) 遗传算法是群体寻优,从许多点开始进行并行操作,而非局限于一点,因而可以防止搜索过程收敛于局部最优解,有可能寻找到全局最优解;

(2) 遗传算法通过适应度函数选择优秀群种,而不需要其他推导和辅助信息,从而对问题的依赖性小,求解的鲁棒性好;

(3) 遗传算法对寻优的函数基本无限制,既不要求函数连续,也不要求函数可微,既可以是数学解析式所表示的显函数,也可以是映射矩阵甚至是神经网络所表示的隐函数,因而应用范围较广;

(4) 遗传算法在解空间进行高效启发式搜索,而非盲目地穷举或完全随机搜索,因而搜索效率高;

(5) 遗传算法具有并行计算的特点,可通过大规模并行计算来提高计算速度;

(6) 遗传算法是对参数的编码进行操作,而非对参数本身;

(7) 遗传算法的寻优规则是由概率确定的,而非确定性的;

(8) 遗传算法特别适用于大规模复杂问题的优化。

遗传算法包括三个基本遗传算子:选择、交换和变异,该算法的寻优过程如下:

(1) 编码,随机产生初始群体;

(2) 计算个体适应度;

(3) 根据个体适应度,对个体进行复制,适应度越大,复制率越高;

(4) 对(3)产生的个体进行交叉、变异操作,形成新的种群;

(5) 计算个体适应度;

(6) 若未满足终止条件,转至(3);

(7) 计算出最优个体;

(8) 结束。

可见,遗传算法给出了一个用来解决高度复杂问题的新思路和新方法。目前遗传算法被广泛应用于许多实际问题,如函数优化、自动控制、图象识别、机器学习、优化调度等。遗传算法与专家系统、模糊逻辑、神经网络等结合是智能控制设计的有效途径之一。

### 1.3 智能控制技术在工程机械领域的应用

工程机械在作业过程中动作频繁,作业环境复杂多变,其控制问题往往不能通过简单的PID控制方式来解决。工程机械结构复杂,其机械液压系统具有很大的惯性质量,又包含着许多非线性因素,加之控制系统动态特性变化大且不稳定,这就需要应用更先进更现代的控制技术。尽管智能控制是一门新兴的交叉学科,它的发展不过是几十年的历史,但是它已经渗透到多领域学科,应用范围日益扩大。在工程机械领域,已有许多智能控制方面的研究成果。如在专家控制技术方面,有液压挖掘机PID专家节能控制系统研究;在模糊控制技术方面,有推土铲刀的模糊自适应PID控制、推土机的模糊换挡系统、模糊控制在液压挖掘机节能中的应用等研究;在神经网络控制技术方面,有推土机工作装置CMAC神经网络控制、挖掘机节能用变量泵BP神经网络控制、基于BP神经网络的装载机自动换挡控制等研究;在遗传算法方面,有基于遗传算法的挖掘机运动学方程反解分析研究、遗传算法在工程机械传动轴优化设计中的应用等研究;在智能控制技术综合应用方面,有工程机械模糊神经网络挡位决策方法、装载机液压系统的神经模糊控制方法、基于遗传神经网络的推土机变量泵控制系统、工程机械自动变速挡位决策的遗传径向基神经网络方法等研究。



## 思考题与习题

1. 什么是智能控制？试比较智能控制和经典控制、现代控制的异同。
2. 智能控制系统具有哪些特点？
3. 智能控制主要研究哪些内容？各自的特点是什么？
4. 智能控制在工程机械领域已有那些应用？试举出一个应用实例，并说明其工作原理和控制性能。