

高等院校规划教材

# 计算智能

主编 张昆龙 杨文光

高等院校规划教材

# 计 算 智 能

主编 张昆龙 杨文光

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

计算智能 / 张昆龙, 杨文光主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2015

高等院校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4774 - 0

I. ①计… II. ①张… ②杨… III. ①人工神经网络—  
计算—高等学校—教材 IV. ①TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 026580 号

计算智能 (高等院校规划教材)

---

主 编 张昆龙 杨文光  
责任编辑 李振祥  
编 辑 田小琴  
责任校对 李新荣  
封面设计 于春颖

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
电 话 010 - 84657898 (总编室)  
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京玥实印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 8<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 字数 199 千字

版 次 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 7629 定价 27.00 元

---

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

## 内 容 提 要

本书共分为7章内容，具体为绪论，简要叙述了计算智能的概况、发展与应用；第2章、第3章是关于人工智能方面的算法，包括模糊逻辑系统与神经网络，着重给出了模糊系统方面的两个典型应用案例以及神经网络的最新发展方向；第4章、第5章介绍了群体智能方面的两个代表性算法，分别是蚁群算法与蜂群算法，给出了相关算法的编程实现；第6章、第7章介绍了遗传算法及其理论基础与实现技术。

本书可作为信息与计算科学、数学与应用数学、统计学、计算机科学等相关专业的本科或研究生的教材，也可作为从事计算智能研究的相关教师和研究人員参考使用。

# 前 言

自计算机问世以来,人工智能就一直是科学家追求的目标之一。作为人工智能的一个重要领域,计算智能因其智能性、并行性和健壮性,具有很好的自适应能力和很强的全局搜索能力,得到了众多研究者的广泛关注,目前该学科已经在算法理论和算法性能方面取得了很多突破性的进展,并已广泛应用于不同领域,在科学研究和生产实践中发挥着重要的作用。

本书力求从计算智能科学发展的历史背景、主要技术方法与发展概况,重点介绍模糊系统与模糊插值控制、神经网络与权值直接确定的BP网络、遗传算法与蜂群算法等主要的计算智能方法与最新发展方向,结合计算智能的应用案例对不同算法加以解释,增强理论与实际的结合应用,增加计算智能的趣味性和科普易读性;利用鲜活的成功应用案例,实现教学手段、教学模式和教学效果的提高。全书通过三类计算智能算法的学习,做到启发学生心智,激发学习兴趣,拓展学习视野的目标,在学习基础知识的前提下详细介绍各种算法的典型应用案例和实现程序,循循善诱,可操作性强,极好地与培养学生的动手能力的专业发展目标相契合。

本书第1章由陈藏老师编写;第2章的2.1、2.2、2.3节由张昆龙教授编写;第2章的2.4、2.5、2.6节,第3~5章均由杨文光老师编写;第6~7章由李强丽老师编写。全书由杨文光统稿,由张昆龙教授定稿。

本书的编写得到了河北省高等学校科学技术研究项目(编号:QN20132005)、中央高校基本科研业务费资助项目(编号:3142013021,3142014127)与华北科技学院重点学科应用数学资助课题(编号:HKXJZD201402)的支持,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,编写时间较短,书中难免存在不足之处,恳请各位专家和读者提出宝贵意见和建议。

作 者

2015年1月

# 目 次

1 绪论 .....	1
1.1 计算智能概况 .....	1
1.2 发展与应用 .....	4
2 模糊逻辑系统 .....	9
2.1 模糊逻辑推理 .....	9
2.2 模糊逻辑推理系统 .....	25
2.3 基于 MATLAB 模糊逻辑工具箱的应用 .....	29
2.4 模糊插值控制 .....	34
2.5 模糊控制典型案例 .....	39
2.6 综采工作面上覆岩层垮落高度模糊综合决策预测模型 .....	47
3 神经网络与权值直接确定的 BP 神经网络 .....	54
3.1 神经网络的概述 .....	54
3.2 BP 神经网络 .....	57
3.3 BP 神经网络典型应用案例 .....	66
4 蚁群优化算法 .....	76
4.1 蚁群算法的基本原理 .....	77
4.2 基于蚁群算法 TSP 应用案例 .....	81
5 蜂群算法 .....	86
5.1 人工蜂群算法 (ABC) 简介 .....	86
5.2 基于人工蜂群算法的应用案例 .....	91
6 遗传算法及其理论基础 .....	97
6.1 遗传算法概要 .....	97
6.2 基本遗传算法 .....	99
6.3 遗传算法的数学基础 .....	102
7 遗传算法的实现技术 .....	110
7.1 编码 .....	110

7.2 群体设定 .....	113
7.3 适应度函数设定 .....	114
7.4 遗传操作 .....	117
7.5 遗传算法求解 TSP 问题 .....	123
参考文献.....	131

# 1 绪 论

## 1.1 计算智能概况

计算智能 (Computational Intelligence, CI) 是人工智能发展的新阶段, 是受到大自然智慧和人类智慧的启发而设计出的一类解决复杂问题方法的统称。计算智能由美国学者 James C. Bezedek 于 1992 年首次给出其定义: 计算智能是依据工作者所提供的数值化数据来进行计算处理的。计算智能已成为一种新型人工智能研究领域, 为解决许多复杂问题提供了新的契机。随着科学与技术的不断进步, 在科学研究和工程实践中遇到的问题变得越来越复杂, 采用传统的计算方法来解决这些问题面临着计算复杂度高、计算时间长等问题, 特别是对于一些 NP 难问题 (Non-Deterministic Polynomial Hard), 传统算法根本无法在可以忍受的时间内求出精确的解。因此, 为了在求解时间和求解精度上取得平衡, 计算机科学家提出了很多具有启发式特征的计算智能方法。计算智能方法在人工神经网络、演化计算和模糊系统三个主要分支发展相对成熟的基础上, 通过相互之间的有机融合而形成的新的科学方法, 也是智能理论和技术发展的新阶段。

1994 年 6 月 IEEE 举办了首届计算智能世界大会, 这次大会第一次将神经网络、模糊集和进化计算 3 个领域联系起来, 形成了“计算智能”这个统一的学科范畴。计算智能展示了适应和处理新情况的能力, 使系统具有推理的属性 (如泛化、发现、联想和抽象), 即计算智能包含在复杂多变环境下产生智能行为的实用自适应概念、范例以及算法和实现。与传统人工智能相比, 计算智能的最大特点是它不需要建立问题本身的精确 (数学或逻辑) 模型, 一般也不依赖于知识表示, 而是在所观测的数据上直接对输入信息进行处理, 这非常适合于解决那些因为难以建立有效的形式化模型而用传统技术难以有效解决, 甚至无法解决的问题。计算智能系统的输出通常包括预测形势或决策方案。

群体智能是近年来飞速发展的人工智能学科领域, 将以群体智能为特征的仿生学算法归入进化计算的范畴, 如蚁群算法、粒子群优化算法等, 进化计算具有智能性和并行性两个主要特征。由于这些算法操作起来简单方便, 并具有很强的通用性, 因此它们得到了广泛的重视、研究及应用。

### 1.1.1 最优化问题

为了使系统达到最优的目标所提出的各种求解方法称为最优化方法。虽然最优化问题可以追溯到十分古老的极值问题, 但直到 1947 年 Dantzig 提出一般线性规划问题的单纯形法之后, 它才成为一门独立的学科。近年来, 最优化理论与方法在工程、国防、经济、管理等领域以及许多数学分支都有着直接或间接的应用。

一般来说, 最优化问题可归结为求解极小值问题。如给定目标函数满足不等式约束及等式约束, 则可记为

$$\min_{x \in \Omega} f(x)$$



$$\begin{aligned} \text{s. t. } & s_i(x) \geq 0 \quad (i=1,2,\dots,m) \\ & h_j(x) = 0 \quad (j=1,2,\dots,l(l < n)) \end{aligned}$$

其中,  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 。

满足所有约束的向量  $\bar{x}$  称为容许解或容许点, 容许点集合称为容许集。

从最优化问题的一般形式可以看出, 最优化要解决的问题就是在容许集中找一点  $x^*$ , 使目标函数  $f(x)$  在该点取极小。这样  $x^*$  称为问题的最优点, 而相应的目标函数值  $f(x^*)$  称为最优值。

根据决策变量  $x_i$  的取值类型, 可以将最优化问题分为函数优化问题和组合优化问题两大类: 决策变量均为连续变量的最优化问题称为函数优化问题; 若一个最优化问题的全部决策变量均离散取值, 则称为组合优化问题。当然, 也有许多应用问题的数学模型表现为混合类型, 即模型的部分决策变量为连续型, 部分决策变量为离散型。此外, 根据最优化问题中的变量、约束、目标、问题性质、时间因素和函数关系等不同情况, 最优化问题还可以分成多种类型。按变量个数可分为单变量的、多变量的; 按变量性质可分为连续的、离散的、混合的; 按约束条件可分为无约束的、有约束的; 按目标个数可分为单目标的、多目标的; 按时间变化可分为静态的、动态的。

在解决最优化问题时, 传统的方法就是枚举法, 它只能处理一些小规模的最优化问题; 对于大规模问题, 则通过借助智能优化计算方法, 可以在合理的时间内求解得到令人满意的解, 从而满足实践的需要。

### 1.1.2 计算智能算法

计算智能, 广义地讲就是借鉴仿生学思想, 基于生物体系的生物进化、细胞免疫、神经网络等机制, 用数学语言抽象描述的计算方法。它是基于数值计算和结构演化的智能, 是智能理论发展的高级阶段。

从方法论的角度和现在的研究现状来看, 计算智能的主要算法有模拟退火算法、人工神经网络、模糊系统、进化计算、群智能算法、免疫算法等。

#### 1.1.2.1 模拟退火算法 (Simulated Annealing, 简称 SA)

模拟退火算法是一种全局优化方法。早在 1965 年, Khas 就提出了这一想法, 不过并未受到计算机科学与优化应用领域的足够重视。直到 1983 年, Kirk Patlick 提出模拟退火算法, 才引起了优化应用领域的重视, 成为研究的热点。

SA 算法的特点主要有以下几个方面:

(1) 以一定的概率接受恶化解, SA 算法在迭代过程中以一定的可能容忍退化状态出现。

(2) 引进算法控制参数  $t$ , 它将优化过程分成若干个阶段, 并决定每个阶段随机状态的取舍标准, 接受概率随温度的下降而逐渐减小。

(3) 使用对象函数值 (即适应度) 进行搜索, SA 算法仅使用由目标函数变换来的适应度函数值, 就可在无其他辅助信息下确定进一步搜索方向和搜索范围。

#### 1.1.2.2 人工神经网络 (Artificial Neural Networks, 简称 ANN)

人工神经网络是一种应用类似于大脑神经突触连接的结构进行信息处理的数学模型。在工程与学术界简称为神经网络或类神经网络。神经网络是一种运算模型, 由大量的节点 (或称神经元) 之间相互连接构成。每个节点代表一种特定的输出函数, 称为激励函数

(Activation Function)。每两个节点间的连接都代表一个对于通过该连接信号的加权值，称之为权重，这相当于人工神经网络的记忆。网络的输出则依网络的连接方式、权重值和激励函数的不同而不同。

ANN 通过众多神经元联结，从结构和实现机理方面逼近生物智能，并通过学习、识别和控制等功能模拟弥补对生物智能认识的局限性。其并行和分布式的结构和处理问题的方法，使其在许多实际应用领域取得了显著的成效，解决了一些传统方法无法求解或解决效果较差的问题。

神经网络的特点和优越性，主要表现在三个方面：

(1) 具有自学习功能。自学习功能对于预测有特别重要的意义。预期未来的人工神经网络计算机将为人类提供经济预测、市场预测、效益预测，其应用前途是很远大的。例如实现图像识别时，先把许多不同的图像样板和对应的识别结果输入人工神经网络，网络就会通过自学习功能，慢慢学会识别类似的图像。

(2) 具有联想存储功能。用人工神经网络的反馈网络就可以实现这种联想。

(3) 具有高速寻找优化解的能力。

#### 1.1.2.3 模糊系统 (Fuzzy System, 简称 FS)

模糊系统理论是把含于系统的“模糊性”运用“模糊集合”等模糊数学理论进行表述、研究和处理的一门新学科。“模糊集合”等模糊数学理论是由美国控制论专家 L. A 扎德教授于 1965 年创立，他第一个指出必须数学地分析和处理模糊现象，同时又提供了一个相对合理可行的处理方法——用精确性经典数学手段去处理模糊现象方法。

模糊系统的特点和优越性，主要表现在三个方面：

(1) 构建系统时可以使用自然语言方法，不需要过程的精确数学模型。

(2) 适于解决过程控制中的非线性、强耦合时变、滞后等问题。

(3) 有较强的容错能力。具有适应受控对象动力学特征变化、环境特征变化的能力。

#### 1.1.2.4 进化计算 (Evolutionary Algorithm, 简称 EA)

进化计算是遗传算法、遗传规划、进化策略、进化规划的通称，它们都是模拟生物在自然环境中遗传和进化的原理而形成的。遗传算法是一个群体优化过程，为了得到目标函数的最小（大）值，从一组初始值出发进行优化。这一组初始值好比一个生物群体，优化的过程就是这个群体繁衍、竞争和遗传及变异的过程。

遗传算法主要步骤为：

(1) 设置初值。

(2) 竞争。选择初始群体中的若干个个体来产生下一代。例如可以根据目标函数值的大小决定个体被选中的概率，并按这个概率选择初始群体中的个体，以体现优生原则。

(3) 繁衍。它包括演化、杂交和变异。

(4) 以子代代替其父代，反复进行步骤 (2) 与 (3)，不断产生后代直至目标函数在整个群体中的最小（大）值不能再继续优化。

遗传算法是对每个个体进行评价，按照概率选择高适应度的个体，进行交叉和变异从而产生新的个体。进化策略基于变异与选择的原理，对于每一个父代通过变异产生一个子代，两者通过竞争获得生存，通过选择以消除低劣解从而进化。进化规划近似进化策略，不同之处在于个体选择采用概率分布选择机制，且每一子代变异次数也满足概率分布，从

而产生下一子代，三者的差异通过随机变换类型和选择机制来刻画，研究较多的是遗传算法。它们都是一种全局优化技术，可以解决现实生活中各种优化问题，应用领域主要是 CIMS 和 CIPS 中的生产调度、规划，机器人、网络通信的路径规划，多参数优化，企业资源规划等；且能够与模糊逻辑、神经网络结合，解决它们中所有参数的快速学习问题。

#### 1.1.2.5 群智能算法 (Swarm Intelligence, 简称 SI)

群智能算法作为一种新兴的演化计算技术，已成为越来越多研究者的关注焦点，它与人工生命，特别是进化策略以及遗传算法有着极为特殊的联系。群智能理论研究领域主要有蚁群算法和粒子群优化算法两种算法：蚁群算法是对蚂蚁群落食物采集过程的模拟，已成功应用于许多离散优化问题；粒子群优化算法也是起源于对简单社会系统的模拟，最初是模拟鸟群觅食的过程，但后来发现它是一种很好的优化工具。

群体智能的概念源于对蜜蜂、蚂蚁等群居生物群体行为的观察和研究。群体智能是指简单智能的主体通过合作表现出复杂智能行为的特性，该智能模式需要以相当数目的智能个体来实现对某类问题的求解功能。作为智能个体本身，在没有得到智能群体的总体信息反馈时，它在解空间中的行进方式完全是没有规律的，只有受到整个智能群体在解空间中进行效果的影响之后，智能个体在解空间中才能体现出具有合理寻优特征的行进模式。

群体智能研究主要是对生物群体协作产生出来的复杂行为进行模拟，并在此基础上探讨解决和解释一些复杂系统、复杂行为的新思路和新算法。群体智能计算是群体智能研究中的一个分支。

#### 1.1.2.6 免疫算法 (Immune Algorithm, 简称 IA)

20 世纪 80 年代中期，美国 Michigan 大学的 Hollan 教授不仅对以前的学者们提出的遗传概念进行了总结与推广，而且给出了简明清晰的算法描述，并由此形成目前一般意义上的遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)。由于遗传算法较以往传统的搜索算法具有使用方便、鲁棒性强、便于并行处理等特点，因而广泛应用于组合优化、结构设计、人工智能等领域。遗传算法是一种具有生成 + 检测 (Generate and Test) 的迭代过程的搜索算法。从理论上分析，迭代过程中在保留上一代最佳个体的前提下，遗传算法是全局收敛的。

免疫算法是抽取和反映生物机体免疫系统的特点，结合工程应用而描述的一个计算模型。抗原对应于待求解的问题，抗体则对应于问题的一个解。抗原识别模块及初始抗体的产生针对待求解的特征判别系统是否曾求解过此类问题，若有则从记忆细胞库中搜寻该类问题的记忆抗体，否则随机产生初始抗体群。

免疫算法的流程：

- (1) 随机产生初始父代种群  $A_1$ ，根据先验知识抽取疫苗。
- (2) 若当前群体中包含最佳个体，则算法停止运行并输出结果，否则，继续。
- (3) 对当前第  $k$  代父本种群  $A_k$  进行交叉操作，得到种群  $B_k$ 。
- (4) 对  $B_k$  进行变异操作，得到种群  $C_k$ 。
- (5) 对  $C_k$  进行接种疫苗操作，得到种群  $D_k$ 。
- (6) 对  $D_k$  进行免疫选择操作，得到新一代父本  $A_{k+1}$ ，转至流程 (2)。

## 1.2 发展与应用

### 1.2.1 发展现状与今后研究方向

计算智能的理论与技术方法研究已经得到国际社会的普遍关注，成为当前智能科学技术的一个主要研究领域，而且计算智能已经引起智能、计算机、控制、自动化、通信、信息安全、经济、管理等相关学科研究人员的高度关注，并在这些领域中取得了良好的应用效果，逐渐形成了与这些学科领域交叉的态势。

纵观国际模糊集理论研究的进展，近期主要集中在对模糊集理论、模糊集应用和模糊集理论与其他学科的交叉融合技术等，具体如下：

(1) 在模糊集的理论研究方面主要涉及模糊拓扑学、模糊群论、模糊图论、模糊概率、模糊语言学、模糊逻辑学、分支区间值模糊集、直觉模糊集和 2-型模糊集等。

(2) 在模糊集的应用研究方面主要涉及模糊控制、模糊识别、模糊聚类分析、模糊决策、模糊评判、模糊系统理论和模糊信息检索等方面。模糊逻辑应用几乎覆盖了嵌入式控制领域的各个方面，如家用电器、汽车工业、医学诊断、导航和财政金融等相关领域。

(3) 在模糊集与其他理论交叉融合方面主要涉及模糊神经网络与软件计算技术、模糊决策分析、模糊随机分析、模糊微分方程、模糊粗糙集及模糊形式概念分析等。模糊集理论与其他学科的融合与渗透已经成为现代计算智能技术发展的一个重要特征。

人工神经网络是模仿生物脑结构和功能的一种信息处理系统，其理论基础是巨量信息处理和大规模并行计算。它既是高度非线性动力学系统也是自适应自组织系统，可用来描述认知、决策及控制的智能行为，其中心问题是智能的认知和模拟。在理论上，神经网络正在向更复杂的神经网络系统方向发展。表现在神经网络与认知科学的结合，神经网络与量子理论的结合，神经网络与模糊、进化算法的结合，神经网络与生物医学的结合以及与多种智能技术融合的各种混合神经网络的出现。

神经网络与多种智能技术的有效融合，人工神经网络与其他智能方法、技术取长补短，融合为应用效果更好的混合方法和混合系统，是近年我国的研究热点之一。目前这方面的工作主要有神经网络与遗传算法的融合、神经网络与灰色系统的融合、神经网络与专家系统的融合、神经网络与模糊技术的融合、神经网络与小波分析的融合等。

演化计算 (Evolutionary Computation, EC) 是一类模拟生物进化过程与机制来求解问题的自适应人工智能技术，主要包括遗传算法 (GA)、演化规划 (EP)、演化策略 (ES)、演化编程 (GP)。虽然这几个分支在算法实现方面具有一些细微的差别，但它们具有一个共同的特点，即都是借助生物进化的思想和原理来设计算法并解决实际问题。

自 20 世纪 60 年代 Holland、Rochenberg、Schwefel、Fogel 等人的开创性工作以来，演化计算的研究引起了国内外学者的广泛关注。演化计算的研究已相对成熟，基本算法设计、基本理论研究方面趋于完善，然而一些基于演化原理的、为更好解决实际问题的算法 (如多目标演化算法、协同演化算法、约束优化演化算法等) 以及将演化计算与其他智能方法、相关技术相结合 (如演化神经网络、演化硬件) 引起了研究者们极大的兴趣，掀起了一股世界范围内的研究热潮。

(1) 多目标演化算法。演化算法作为一类启发式搜索算法，已被成功应用于多目标优化领域，发展成为一个相对较热的研究方向——多目标演化算法。近年来，多目标演化算法领域在算法设计、算法时间复杂度分析、分布性保持、性能比较、高维目标、偏好、收敛分析、鲁棒性、MOEA 应用等方面都取得了大量的研究成果。我国研究者主要从事算法设计、非支配集构造、收敛分析、高维目标、性能评价等方面的研究。

(2) 协同演化算法。协同演化是近十年在协同演化论基础上提出的一类新的演化算法，它考虑了种群与环境之间、种群与种群之间在演化过程中的协调。根据算法采用的生物模型不同，协同进化算法可以分为基于种群竞争机制的协同进化算法、基于捕食—猎物机制的协同进化算法、基于共生机制的协同进化算法三类。

(3) 约束优化演化算法。该算法为约束处理技术与演化算法的结合，大体可以划分为惩罚函数法、多目标法以及其他方法。Yao、Rasheed、Coello、Michalewicz 等分别在惩罚函数法、多目标法、其他方法方面进行了大量的研究工作，取得了显著的成果。

(4) 演化神经网络。演化算法与神经网络结合已经越来越受到人们的关注，并已形成了一个研究方向。近几年，该方向的研究非常活跃，主要集中在用演化计算的方法实现神经网络的连接权值训练、网络结构的进化、学习规则的进化、网络输入特征的选择、初始权值的选择和神经网络分析等。

(5) 演化硬件。它是一种结合演化计算与现代可编程逻辑器件技术，能够改变自身结构和功能以适应其当前环境的自适应电子器件。近 10 年来，国内外学者针对演化硬件自身结构及其在电路设计、模式识别、演化机器人、容错及可修复系统、信息处理和航空航天等领域的应用进行了大量的工作，取得了诸多成果。

演化计算是一个非常具有挑战性的研究方向，今后的研究趋势主要有三个方面：

(1) 演化计算的基础理论。演化计算的基础理论研究依然是重要的研究课题，包括进一步发展演化计算的数学基础，从理论和实验研究它们的计算复杂性；演化算法中控制参数的选择研究；演化算法的过早收敛问题等。

(2) 演化计算方法和技术。新的演化计算方法和技术研究将是该领域进一步发展的动力和源泉，如群体多样性保持、重组算子设计、EA 性能评估（特别是 MOEA 性能评价）、EA 鲁棒优化、演化环境以及其他基于生物激励机制的技术等都是演化计算重要的研究方向。

(3) 面向应用的演化算法设计。面向应用的演化算法设计永远是演化计算研究的重点，因为应用既是演化计算研究的出发点，也是演化计算研究的最终目标。例如，演化计算在图像处理、分类系统中的应用以及演化硬件技术在航空航天、生物信息处理、智能机器人领域的应用等。

群体智能在理论和应用研究方面都取得了长足的发展，但远未达到成熟的阶段。近两年国内外 SI 领域出现了如下一些新的研究动向，主要有以下几个方面：

(1) 观察和发现生物群体中新的行为模式，对其进行建模和分析，以进一步改进现有算法和开发新的 SI 算法。对 SI 系统的自组织、间接通信及“涌现”等底层机制的研究也是一个重要的发展方向。

(2) 群智能算法的数学理论基础相对薄弱，缺乏具备普遍意义的理论性分析。虽然对算法收敛性方面做了大量的工作，但是对群智能算法的工作原理和收敛速度的分析还是刚刚起步，这方面还需要大量的工作。

(3) 与最新的计算机软硬件技术相结合，并行且高效地实现本身具有强并行性的 SI 算法，缩短其运行时间，更好地服务于实际应用。目前已经诞生了许多研究成果，其中包括将 PSO 在 GPU 上并行加速实现、硬件加速并改进 PSO 等。

(4) 群智能算法与其他技术的融合是提高算法性能的一个重要研究方向，如柱搜索、

极值优化算法及多水平框架。

(5) 同其他的自适应问题处理方法一样, 群智能也不具备绝对的可靠性。当处理突发事件时, 系统的反应可能是不可测的, 这在一定程度上增加了其应用风险。将来的工作对群体中个体的学习能力和推理能力需要进一步研究。

尽管计算智能在理论和应用方面都取得了长足发展, 然而它作为一种新兴的智能处理技术, 还不能说达到了成熟和完善的地步, 还有一些理论和应用问题有待进一步研究和解决:

(1) 作为计算智能各种智能模拟算法基石的理论研究应更加深入。对各种算法的工作机理、数学基础和动力学特性等的深入研究和认识, 不仅可以使我们更好地分析算法的性质, 而且可以帮助设计新的算法、改进已有的算法。

(2) 新的智能模拟算法将成为重要的研究方向。随着人工智能研究的深入和应用的日益广泛, 在研究和改进现有算法的基础上, 在各学科不断交叉发展的大背景下, 新的智能模拟算法必将成为研究热点。

(3) 计算智能各种智能算法的综合集成将是研究的一个热点。各种不同的算法, 各有其特长与局限, 如果我们把不同的算法结合起来, 构成一个优势互补、复合协同的综合集成系统, 那么计算智能就会有更强大的解决问题能力并可能拥有意想不到的效果。

从社会需求和科技发展层面来看, 计算智能研究的下述几个方向会受到特别的关注:

(1) 人们清醒地认识到, 揭示大脑智能之谜的道路比十几年前设想的要漫长得多。大脑的一些特性(如容错性、鲁棒性等)有其内在的、尚未被揭示和深入了解的生物机制, 未被目前的人工神经网络模型所解决。

(2) 个性化的倾向越来越浓, 目的性变得日益明确。一方面, 工具主义者不再将自己禁锢于生物学约束之中, 而仅将生物学的发现看做是开阔视野的一种途径; 另一方面, 以探索智能形成机制为目标的 AI 研究者, 会越来越强调生物学约束的重要性。新的生物学发现会越来越多地作为原始素材被用于构建新的人工神经网络和遗传算法模型, 即 AI 研究者会将自己的努力更多地用于建立新的范式, 而不是一味地证明旧有范式的合理性。

(3) 人工神经网络和遗传算法的应用领域会越来越宽, 最成功的应用领域估计会在生物信息学领域和各类智能诊断系统的研制方面。同时, 数学证明将结合具体的算法有目的、有针对性地进行。

### 1.2.2 研究应用简述

计算智能理论技术的应用主要可以分为智能建模、智能控制、智能优化、智能管理、智能仿真及智能设计和制造等。

(1) 智能建模。抛开原来的数学模型和物理模型建模方法, 应用上述计算智能技术, 利用系统实测输入输出数据、专家知识和操作经验来建模, 特别解决了复杂系统的建模问题, 使得模型更准确、更自然, 有定性模型、定量模型、混合模型。智能建模具体又可分为智能分类、智能辨识、智能测量、智能预测、智能决策、智能评价、智能诊断、智能信息处理及被控对象智能建模等, 它们都需要建立智能模型, 以达到实现各自的目标, 神经网络和模糊模型及其融合模型均可应用于此。

(2) 智能控制。智能控制包括模糊控制、神经网络控制及其混合智能控制。混合智能控制包括模糊神经网络控制、进化神经网络控制、神经模糊控制和进化模糊控制等。智

能技术与低层次智能、传统方法交叉的有：智能 PID 控制、模糊变结构控制、模糊滑模控制、分层递阶智能控制、分布式智能控制等。这些控制技术均一定程度上具有自适应、自学习、自组织的智能行为，以实现适应环境变化、减少波动、保证高的控制精度，这是智能控制技术的关键，其核心是高效的控制算法，保证控制的实时性和快速性。目前各类模糊控制技术和应用研究较多，实际应用也不错。神经控制在前馈控制中应用较好，反馈控制实用化还需深入研究。

(3) 智能优化。智能优化技术是运用人工智能、思维科学、启发推理、联想识别、学习训练、模糊逻辑、进化算法等技术与运筹学、控制理论及大系统理论中的静态优化、动态优化、多级优化等方法相结合，寻求解决现有优化方法存在的人的因素、多目标、局部解、不确定、未确知、维数灾难等新途径。具体有启发式线性、非线性规划，将专家工作经验、模糊逻辑思维启发信息引入到线性、非线性问题求解的推理和搜索过程，提高求解的速度和效率；学习式动态规划，在动态规划中引入机器学习、神经网络自学习机制，解决多步决策、多阶段动态过程优化的动态适应问题；进化式非线性规划，应用遗传算法、进化策略等进化算法进行非线性问题的优化；联想式多目标优化，利用 Hopfield 神经网络建立智能优化模型，实现最优选择；模糊多级优化，应用模糊逻辑实现模糊目标分解、模糊约束分解和模糊协调算法，解决大系统的模糊全局优化。

(4) 智能管理。应用管理学科、信息技术、运筹学和人工智能等新技术进行科学管理，提高管理系统的智能化、集成化、协调化。智能管理是一门综合管理学科，具体有智能分析、智能预测、智能规划、智能优化及智能决策等，它们都是在原有方法基础上引入专家系统、模糊逻辑、多媒体人机接口、定性与定量集成等智能技术，使得管理更有效、更全面、更科学。目前这方面研究深度还不够，应用更少。

(5) 智能仿真。智能仿真技术是现代计算机管理领域中的重要方法和手段。其主要用于系统仿真：分析系统的动态和稳态特性，系统的定性、定量评价和估算；方案仿真：对系统待选的决策方案、规划方案、设计方案模拟其实现过程，分析其效果；预测仿真：对系统未来的发展进行动态分析，预估其发展前景。智能仿真是智能技术（如专家系统、知识工程、模式识别、神经网络等）渗透到仿真技术（如仿真模型、仿真算法、仿真语言、仿真软件等）中，建立智能控制方案以及发展规划方案的智能仿真平台。

(6) 智能设计和制造。在设计系统和产品制造过程中，利用神经网络、模糊系统建立模型，实现虚拟设计和制造；建立智能设计和制造工具包，提高设计和制造的效率，保证产品的性能，降低开发成本。计算智能作为人工智能的新篇章，是当代高新技术之一，是实现各行各业系统、设备自动化、智能化的核心理论和技术。然而计算智能理论需要不断地发展和完善，需要研究更实用的计算智能应用技术，体现真正的智能化，让我们面对这些新的挑战，开创计算智能理论和技术的新篇章。无论怎样，智能技术的最高层次是在结构和功能上接近人的大脑，未来的人工智能理论和技术是人的大脑的真实反映，高级智能、全面智能的理论和技术是我们研究的方向，建立未来高智能地球是我们长远的目标。

## 2 模糊逻辑系统

### 2.1 模糊逻辑推理

1965年,美国控制论专家 L. A. Zadeh 教授提出了模糊集理论,从此开创了一个崭新的研究领域——模糊数学,同时也为模糊逻辑的诞生与发展开拓了一条宽阔的道路。模糊逻辑控制系统 (FLCS) 得以迅猛的发展,日趋完善,备受青睐。一大批科技工作者把很多时间和精力奉献给了“模糊论”的研究,积极投身于模糊逻辑技术的开发和应用事业上。尽管常规的控制技术譬如:PID 控制、柔韧的控制、适应的控制等,它们都在各自不同的服务领域中发挥着巨大的作用,可是它们都显著地依靠一个动态的系统的模型而控制,这样“建模”工作在控制领域中成为一项首要任务,因此在控制系统传统设计中,都需要了解被控制对象的数学模型。但是,对于一些生产过程,要获得既有足够的精确性,又便于系统分析的数学模型是相当困难的,这就使现代控制理论的应用受到了限制。然而,一个熟练的操作人员却能够对系统中的各种参量(如温度、压力,以至颜色、气味等)作出响应和判断,最终获得良好的人工控制效果,这种控制方式仅依赖于人的经验积累、感觉和逻辑判断。由此得到启发,将头脑中的经验加以总结,把凭经验所采取的相应措施总结成一条条控制规则,进而构筑一个控制器去代替人对复杂的生产过程进行控制,这种控制就是泛模糊控制。扎德提出的模糊思想及向控制领域的渗透,在理论上和实践上为控制理论开辟了新的发展方向,提供了新的系统设计方法,即模糊控制方法。

模糊逻辑控制系统是由模糊规则库、模糊推理机、模糊产生器和解模糊器等部分组成,其基本结构如图 2-1 所示。

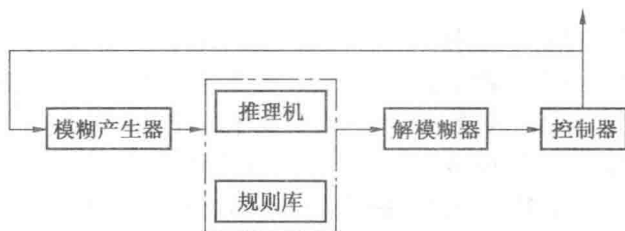


图 2-1 模糊逻辑控制系统基本结构

我国模糊控制理论及其应用研究工作是从 1979 年开始的。1979—1980 年我国的李宝缓、刘志使等人设计了一类缺乏数学模型的控制器,对模糊控制器的特性进行了仿真,与 PI 控制器进行了比较,结果表明模糊控制器对单位阶跃响应具有速度较快、精度较高以及对参数变化不敏感等优点。此后,汪培庄、楼世博、龙照升、陈国权、宋大鹤等人在模糊控制理论和控制算法方面做了大量的研究工作,在模糊理论上取得了可喜的成果,为模糊控制技术在工业控制领域的应用打下了理论基础。近年来,在工业中应用模糊控制已取



得了许多成果。电子伸缩自动加工装置是精加工和超精加工领域里一种先进的加工装置，由于加工系统本身存在有滞环效应，属于非线性系统，因此，现在采用一种模糊式调节器解决了加工精度问题。在机器人电液位置伺服系统中，由于液压驱动的有关式机器人工作速度较高，并且随着运动位置的不同，各动力器件所受到的负载和反馈量的变化范围较大，非线性严重，在这样的工作条件下要在较大的工作范围内达到较高的位置控制精度和良好的动态性能是比较困难的。针对这一问题，一种机器人模糊控制器取得了较好的控制效果。

值得一提的是：在2002年8月，国际数学家大会在北京召开之际，我国学者李洪兴教授在题为变论域自适应模糊控制的报告中公布并演示了由他领导的模糊系统与模糊信息研究中心的最新的研究成果“四级倒立摆控制仿真实验”，这是迄今为止国际上首次成功地实现四级倒立摆控制仿真实验。变论域自适应模糊控制是李洪兴教授于1995年提出的原创性的控制理论，变论域自适应模糊控制囊括了通常所说的模型自适应、规划自组织与自调整、隶属函数自生成等优点，极大地提高了控制品质，如它的精度很高、无震荡、几乎无超调；特别是，其调整时间相对常规模糊控制或经典控制缩短200~500倍。倒立摆仿真或实物控制实验是控制领域中用来检验某种控制理论或方法的典型方案。

模糊控制除上述应用外，还应用于发动机管理系统、核电站控制系统、水泥强度报警系统、卷烟厂香精微流量控制系统以及新一代的地铁服务、智能电梯和家电控制等。可以预言，模糊技术将很快渗透到人们生活的各个方面。

传统的自动控制（包括经典理论和现代控制理论）中有一个共同的特点，即控制器的综合设计都要建立在被控对象准确的数学模型的基础上，但是在实际工业生产中，很多系统的影响因素很多，建立精确的数学模型特别困难，甚至是不可能的，这种情况下模糊控制的诞生就显得意义重大。因为模糊控制不用建立数学模型，根据实际系统的输入、输出结果数据，参考现场操作人员的运行经验，就可对系统进行实时控制。模糊控制实际上是一种非线性控制，从属于智能控制的范畴。模糊控制获得巨大成功的主要原因在于它具有如下一些突出特点：

(1) 模糊控制是一种基于规则的控制，它直接采用语言型控制规则，其依据是现场操作人员的控制经验或相关专家的知识，在设计中不需要建立被控对象的精确数学模型，因而使得控制机理和策略易于接受与理解，设计简单，便于应用。

(2) 由工业过程的定性认识出发，比较容易建立语言控制规则，因而模糊控制对那些数学模型难以获取，动态特性不易掌握或变化非常显著的对象非常适用。

(3) 基于模型的控制算法及系统设计方法，由于出发点和性能指标的不同，容易导致较大差异；但一个系统语言控制规则却具有相对的独立性，利用这些控制规律间的横向连接，容易找到折中的选择，使控制效果优于常规控制器。

(4) 模糊控制是基于启发性知识及语言决策规则设计的，这有利于模拟人工控制的过程和方法，增强控制系统的适应能力，使之具有一定的智能水平。

(5) 模糊控制系统的鲁棒性强，干扰和参数变化对控制效果的影响被大大减弱，尤其适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制。

随着模糊理论的发展，模糊语句也可包含非线性函数，并证明出模糊系统可近似任一复杂的非线性系统。建构于此模式及观点，Tanaka等于1992年提出著名的T-S模式的模