

高等院校教材

# 计算智能

卢才武 唐晓灵 张志霞 顾清华 编著

陕西科学技术出版社

## 内 容 简 介

计算智能是以模型为基础,以分布并行计算为特征模拟人的智能求解问题的理论与方法。本书系统讲述计算智能的基本内容、基本理论与基本方法。本书包括一个“概述”以及“模拟退火算法”、“人工神经网络”、“进化计算”、“群智能算法”、“人工免疫算法”和“计算智能的未来发展”等七个部分,每章之后均附有应用案例和思考题以拓宽视野、培养自主学习的习惯。

本书叙述深入浅出、简明扼要,先从简单的示例介绍每种算法的原理,然后深入讨论它们的基本理论及应用技术。书中图文并茂,便于自学,可作为研究生教材或参考书,也可供其他有兴趣的读者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算智能/卢才武等编著. —西安:陕西科学技术出版社,2008.10  
ISBN 978-7-5369-4161-8

I. 计… II. 卢… III. 人工智能—神经网络—计算 IV. TP183

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第154386号

---

<b>出版者</b>	陕西科学技术出版社 西安北大街131号 邮编 710003 电话(029)87211894 传真(029)87218236 <a href="http://www.snstp.com">http://www.snstp.com</a>
<b>发行者</b>	陕西科学技术出版社 电话(029)87212206 87260001
<b>印刷</b>	西安建筑科技大学印刷厂
<b>规格</b>	787mm×1092mm 16开本
<b>印张</b>	10.75
<b>字数</b>	250千字
<b>印数</b>	1000册
<b>版次</b>	2008年10月第1版 2008年10月第1次印刷
<b>定价</b>	25.00元

---

版权所有 翻印必究

## 目 录

## 第1章 计算智能概论

1.1 智能理论及其相关术语.....	1
1.1.1 智能理论.....	1
1.1.2 智能科学的有关术语.....	2
1.2 传统人工智能.....	3
1.3 计算智能.....	4
1.4 计算智能的主要内容.....	5
1.6 计算智能的应用领域.....	8
思考题.....	9
参考文献.....	10

## 第2章 模拟退火算法

2.1 概述.....	11
2.1.1 什么是模拟退火算法.....	11
2.1.2 物理退火过程.....	11
2.1.3 组合优化与物理退火的相似性.....	11
2.2 模拟退火算法.....	13
2.2.1 模拟退火算法的主要思想.....	13
2.2.2 METROPOLIS 准则.....	13
2.2.3 冷却进度表.....	14
2.2.4 新解的产生和邻域结构.....	15
2.2.5 模拟退火算法描述及其结构.....	15
2.2.6 应用的一般要求.....	16
2.3 实例分析：货郎担问题.....	17
2.3.1 货郎担问题的数学模型.....	17
2.3.2 模型评价与分析.....	19
思考题.....	19
参考文献.....	20
附录：模拟退火算法的 MATLAB 程序.....	21

## 第3章 人工神经网络

3.1 概述.....	23
3.1.1 什么是人工神经网络.....	23
3.1.2 人工神经网络的发展简史.....	23
3.1.3 神经网络的特点.....	24

3.1.4 神经网络的研究内容.....	25
3.2 基本的神经元模型.....	25
3.2.1 生物神经元的结构.....	25
3.2.2 MP 模型.....	27
3.2.3 一般神经元模型.....	27
3.3 神经元的学习规则.....	31
3.3.1 神经元学习算法.....	31
3.3.2 神经网络的拓扑结构.....	34
3.4 人工神经网络模型.....	36
3.4.1 BP 误差反向传播神经网络.....	36
3.4.2 HOPFIELD 模型.....	40
3.5 实例分析：人工神经网络在铁矿石价格预测中的应用.....	42
3.5.1 MATLAB 中有关 BP 网络的重要函数.....	43
3.5.2 铁矿石价格预测模型.....	43
3.5.3 预测效果与结论.....	47
思考题.....	48
参考文献.....	49
附录：BP 神经网络的 MATLAB 程序.....	50

## 第 4 章 进化计算

4.1 进化计算概述.....	51
4.1.1 生物的进化和遗传.....	51
4.1.2 进化计算的产生和发展.....	51
4.1.3 进化计算的特征.....	53
4.1.4 进化计算的应用.....	54
4.2 遗传算法.....	55
4.2.1 简单遗传算法的基本原理.....	55
4.2.2 遗传算法的求解步骤.....	61
4.2.3 遗传算法的理论基础.....	63
4.2.4 遗传算法的改进技术.....	73
4.3 遗传规划.....	82
4.3.1 遗传规划的基本技术.....	83
4.3.2 遗传规划的基本流程.....	85
4.4 进化策略.....	86
4.4.1 二元进化策略.....	87
4.4.2 多元进化策略.....	88
4.4.3 进化策略的基本技术.....	88
4.4.4 进化策略的基本流程.....	90

---

---

4.5 进化规划 .....	91
4.5.1 进化规划的几种表达方式 .....	91
4.5.2 进化规划的基本技术 .....	93
4.5.3 进化规划的基本流程 .....	94
4.6 案例分析：露天矿床开拓系统结构优化 .....	95
4.6.1 系统分析 .....	96
4.6.2 实现技术 .....	97
4.6.3 模型评价与分析 .....	99
思考题 .....	101
参考文献 .....	102
附录：简单遗传算法的 MATLAB 程序 .....	103
<b>第 5 章 群智能算法</b>	
5.1 群智能算法概述 .....	104
5.1.1 群智能的起源 .....	104
5.1.2 群智能算法发展 .....	105
5.1.3 群智能算法与进化计算 .....	106
5.1.4 群智能算法的典型应用 .....	107
5.2 蚁群算法 .....	109
5.2.1 蚁群算法的发展简史 .....	109
5.2.2 简化的蚂蚁寻食模型 .....	110
5.2.3 基本蚁群算法的原理 .....	112
5.2.4 蚁群算法求解步骤 .....	115
5.2.5 蚁群算法算子分析 .....	117
5.2.6 蚁群算法的改进 .....	118
5.2.7 蚁群算法的应用领域 .....	122
5.3 实例分析：改进蚁群算法在运输调度规划中的应用 .....	123
5.3.1 改进的蚁群算法 .....	124
5.3.2 运输调度问题数学模型 .....	125
5.3.3 模型效果检验与结论 .....	125
5.4 粒子群算法 .....	126
5.4.1 PSO 算法的基本原理 .....	127
5.4.2 加入惯性权重因子的 PSO 算法 .....	129
5.4.3 PSO 算法关键参数控制 .....	131
5.4.4 基于 MATLAB 的 PSO 程序设计 .....	132
5.5 实例分析：POS 算法在函数优化中的应用 .....	134
思考题 .....	136
参考文献 .....	137

---

---

附录：求解旅行商问题的简单蚁群算法 MATLAB 程序.....	139
<b>第 6 章 人工免疫计算</b>	
6.1 概述 .....	142
6.1.1 什么是人工免疫系统.....	142
6.1.2 人工免疫系统的发展.....	142
6.1.3 人工免疫系统的研究内容和范围 .....	143
6.2 生物免疫系统.....	145
6.3 人工免疫系统.....	146
6.3.1 人工免疫机理.....	146
6.3.2 人工免疫算法.....	147
6.4 人工免疫系统的应用领域.....	150
6.5 实例分析：人工免疫算法在车辆路径优化中的应用.....	152
6.5.1 车辆路径问题的数学模型.....	152
6.5.2 车辆路径问题的免疫算法实现.....	152
6.5.3 模型效果检验与结论.....	155
思考题 .....	156
参考文献 .....	157
附录：免疫算法的 MATLAB 程序 .....	158
<b>第 7 章 计算智能的未来发展</b>	
7.1 计算智能的主要研究成果.....	159
7.2 计算智能的发展动力.....	163
7.3 未来的发展方向.....	163
参考文献 .....	165

# 第1章 计算智能概论

生命在长期进化过程中，积累了很多新奇的功能，人类很早就从中得到启发而改进自己的工具，如史书中记载“见蓬转而做车辑”，传说鲁班被茅苇划破，而发明锯子……也许早先的发明，只是偶然的模仿和发现，后来人们已有意识地进行这方面的研究，这就是“仿生学”。

仿生学顾名思义就是模仿生物的某些功能的学问。有名的例子很多，如模仿海豚皮而构造的“海豚皮游泳衣”；科学家研究鲸鱼的皮肤时，发现其上有沟槽的结构，于是有个科学家就依照鲸鱼皮构造，造成一个薄膜蒙在飞机的表面。又如有科学家研究蜘蛛，发现蜘蛛的腿上没有肌肉，有脚的动物会走，主要是靠肌肉的收缩，现在蜘蛛没有肌肉为什么会走路？经研究蜘蛛不是靠肌肉的收缩进行走路的，而是靠其中的“液压”的结构进行走路，据此人们发明了液压步行机……总之，从自然界得到启迪，模仿其结构进行发明创造，这就是仿生学。这是我们向自然界学习的一个方面。另一方面，我们还可以从自然的规律中得到启迪，利用其原理进行设计(包括设计算法)，这就是计算智能(computational intelligence)的思想。

我们将着重讲述一些数学建模中常用的算法，包括神经网络算法、遗传算法和模拟退火算法等。用这些算法可以较容易地解决一些很复杂的，常规算法很难解决的问题。由于这些算法都有着很深的理论背景，因此，本书中不可能也没有必要详细地讨论这些算法的理论，我们的目标在于应用，大家只需大概了解这些算法的原理，知道能用这些算法解决一类什么样的问题，并能应用这些算法解决数学建模中的一些问题即可。

## 1.1 智能理论及其相关术语

### 1.1.1 智能理论

“智能(intelligence)”一词可以用作名词，也可以用作形容词。如果用作名词，它是指人类所能进行的脑力劳动，包括感觉、认知、记忆、学习、联想、计算、推理、判断、决策、抽象、概括……如果用作形容词，它的意义是：人一样的、聪明的、灵活的、柔性的、自学习的、自组织的、自适应的、自治的……

智能理论的研究也分为两个方面，一方面是研究智能的产生、形成和工作机制；另一方面是研究如何用人工的方法模拟、延伸和扩展智能。前者称为自然智能理论，主要是生理学和心理学研究者所从事的工作；而后者称为人工智能(artificial intelligence)理论，主要是理工学研究者所从事的工作。在前者的领域中，“智能”多取名词的用法，因为研究的是“脑力劳动”本身的机制；在后者的领域中，“智能”多取形容词的用法，因为人们主要考察人工智能的功能与自然智能的功能相比，像不像、高不高、强不强？

按道理讲，人工智能理论应以自然智能理论为基础。如果搞清了各种自然智能的工

作机制及其各个功能部件的结构关系，那么就可以通过已经高度发达的电子的、光学的和生物的器件构筑类似的结构对其进行模拟、延伸和扩展，从而实现人工智能。但遗憾的是，由于人类的头脑结构高度复杂，也由于实验这一现代科学的锐利武器在研究人脑机制和结构时不能随意使用，直到今天，自然智能理论并没有搞清一些基本智能活动的机制和结构，总体进展十分有限。因而人工智能理论的主流已经从结构模拟的道路走向了功能实现的道路。所谓功能实现就是将自然智能的结构看作黑箱，而只控制黑箱的输入输出关系，只要从输入输出关系上看实现了所要模拟的功能即可。功能实现的道路使人工智能理论摆脱了自然智能理论进展缓慢的束缚，通过几十年的发展，已经形成了较为系统的理论体系，包含了极为丰富的内容，并在实际中得到了广泛的应用，发挥了显著的作用。

### 1.1.2 智能科学的有关术语

#### 1) 智能与智能信息处理

从认识论层面上看，信息是认识主体所感受的事物状态及其变化的方式，是用来消除观察者认识上的不确定性的度量。知识则是人类实践经验的总结和提炼，具有抽象性和普遍性，属于认识论范畴的概念。知识是信息加工的产物，是抽象化和广义化的信息。在现有人工智能的文献中知识与信息是同义词，知识的概念完全等同于信息的概念。

从神经生理学、神经解剖学的角度来看，人类智能的核心是思维（thought），思维的器官是大脑。大脑活动的主要内容是处理信息。人工智能则是对人类智能的一种模拟和扩展，其核心是思维模拟。

我们通常把思维定义为人的大脑活动，主要是指处理和再生信息的能力。有时，人们也把思维能力看作是一种狭义的智能。从这种意义上讲，如果没有思维能力，则被认为非智能。智能是指在给定任务或目的下，能根据环境条件制定正确的策略和决策，并能有效地实现其目的的过程或能力。也有人把智能定义为有效地获取、传递、处理、再生和利用信息，使其在任意环境下成功地达到预定目标的能力。可见，对于同样的环境和目标下，具有更强的“获取、处理、再生和利用”信息的能力，就更容易或有效地实现目标，从而表现出具有更高的智能水平。

我们通常所说的智能信息处理是一种利用各种智能手段进行信息变换的过程，这里的各种智能手段包括人工智能、机器智能和计算智能等。

#### 2) 计算智能

计算智能，也有人称之为“智能算法”、“智能计算”或“软计算”，虽然至今没有一个统一的定义，但我们可以这样来概括它。智能计算就是借用现代计算工具和自然界（生物界）规律的启迪，根据其原理，模仿设计求解问题（或处理信息）的理论与方法。它是人工智能的深化与发展。如果说人工智能是以知识库（专家规则库）为基础，以顺序离散符号推理为特征的，计算智能则是以模型（计算模型、数学模型）为基础，以分布、并行计算为特征。前者强调规则的作用与形成，而后者强调模型的建立与构成；前者依赖专家个人知识，而后者强调自组织、自学习与自适应。

目前这方面的内容很多，如：人工神经网络技术、遗传算法、进化规划、模拟退火

技术和群集智能技术等。

## 1.2 传统人工智能

人工智能是研究利用计算机来模拟人的某些思维过程和智能行为（如学习、推理、思考、规划等）的学科，主要包括计算机实现智能的原理、制造类似于人脑智能的计算机，使计算机能实现更高层次的应用。人工智能涉及计算机科学、心理学、哲学和语言学等学科，可以说几乎涵盖了自然科学和社会科学的所有学科，其范围已远远超出了计算机科学的范畴，人工智能与思维科学的关系是实践和理论的关系，人工智能是处于思维科学的技术应用层次，是它的一个应用分支。从思维观点看，人工智能不仅限于逻辑思维，要考虑形象思维、灵感思维才能促进人工智能的突破性的发展。数学常被认为是多种学科的基础科学，人工智能学科也必须借用数学工具，数学不仅在标准逻辑、模糊数学等范围发挥作用，也进入语言、思维领域。数学进入人工智能学科，它们将互相促进而更快地发展。

传统人工智能的研究开始于 1956 年，是由“人工智能之父”McCarthy 及一批数学家、信息学家、心理学家、神经生理学家、计算机科学家在 Dartmouth 大学召开的会议上首次提出。传统人工智能是符号主义，它以 Newell 和 Simon 提出的物理符号系统假设为基础，主要目标是应用符号逻辑的方法模拟人的问题求解、推理、学习等方面的能力。问题求解是传统人工智能的核心问题，当机器有了对某些问题的求解能力以后，在应用场合遇到这类问题时，便会自动找出正确的解决策略。这种问题求解能力是基于规则的，是能够举一反三的。有了问题求解能力的机器就能比普通机器更灵巧地分析问题和处理问题，从而适用于更加复杂多变的应用场合。

推理是人的思维的一个重要方面，推理的三种主要形式是归纳推理、演绎推理和模糊推理。传统人工智能中推理的研究就是要模拟这三种推理形式，实现诸如故障诊断、数学定理证明、模糊问题判断等功能。

在传统人工智能中，“学习”一词有多种含义。在专家系统等应用中，它指的是知识的自动积累；在问题求解中，它指的是根据执行情况修改计划；在数学推理系统中，它指的是根据一些简单的数学概念和公理形成较复杂的概念，作出数学猜想，等等。

人工智能在其发展过程中逐渐形成了三个学派：

(1) 符号主义学派 (symbolicism) — 传统人工智能 (认知和逻辑学派)，传统人工智能的研究始于 20 世纪 50 年代，以知识为基础，通过推理来进行问题求解。它的研究方法为功能模拟方法 (计算机模拟人类认知系统功能)。代表人物有 Simon, Minsky 和 Newell, McCarthy, Nillsson 等。

(2) 联接主义学派 (connectionism) — 仿生学派—计算智能，始于 1943 年的 M-P 模型 (McCulloch, Pitts)。到了 1982 年，Hopfield 又提出了用硬件模拟神经网络。1986 年，鲁梅尔哈特 (Rumelhart) 等人提出多层网络中的反向传播算法 (BP) 算法并得到广泛使用。计算智能研究方法为结构 - 功能模拟方法，代表人物有 McCulloch, Pitts, Hopfield, Rumelhart 等。

(3) 行为主义学派 (actionism) — 进化主义或控制论学派，始于 20 世纪 60~70 年

代，早期的研究工作重点是模拟人在控制过程中的智能行为和作用，如对自寻优、自适应、自镇定、自组织和自学习等控制论系统的研究。到 20 世纪 60~70 年代，上述这些控制论系统的研究取得一定进展，播下智能控制和智能机器人的种子，并在 20 世纪 80 年代诞生了智能控制和智能机器人系统，其智能行为是基于“感知-动作”模式的控制系统。它的研究方法为行为模拟方法，代表人物为 R.A. Brooks。

### 1.3 计算智能

20 世纪 90 年代以来，在智能信息处理研究的纵深发展过程中，人们特别关注到精确处理与非精确处理的双重性，强调符号物理机制与联接机制的综合，倾向于冲破“物理学式”框架的“进化论”新路，一门称为计算智能的新学科分支被概括地提出来了，并以更加明确的目标蓬勃发展。1994 年 IEEE 为了促进多学科渗透和结合，把模糊系统(fuzzy system)、神经网络(neural network)和进化计算(evolutionary computation)三个年会合并举行，于 1994 年 6 月 25 日至 7 月 3 日在美国佛罗里达州的奥兰多召开全球第一届计算智能大会(WCCI)，出版了《计算智能、模仿生命》的论文集。大会决定计算智能会议每三年召开一次。此次会议是计算智能的第一次综合性大会，共收集了来自世界各国学者的约 1600 篇论文，大会的主题是计算智能。人们会提出这样的问题：人工智能和计算智能有什么不同，又有什么关系呢？

首次给出计算智能定义的是美国学者 James C. Bezdek。1992 年，他在近似推理的国际杂志上发表文章指出：计算智能依靠生产者提供的数字材料，而不是依赖于知识，而人工智能使用的是知识精华。Bezdek 还说：人工神经网络应称为计算神经网络，即“人工”两字应改为“计算”。在人工智能 AI 和计算智能 CI 的关系上，Bezdek 认为 CI 是 AI 的子集，即  $CI \in AI$ 。而这次大会主席 Jacek M. Zurada 却认为  $CI \notin AI$ ，两者只有部分重合。James C. Bezdek 在题为《什么是计算智能》的报告中讲到：智能有三个层次，第一层是生物智能(biological intelligence, 简称 BI)，它是由人脑的物理化学过程反映出来的，人脑是有机物，它是智能的物质基础；第二层是人工智能(artificial intelligence, 简称 AI)，它是非生物的，是人造的，常用符号表示，AI 的来源是人的知识精华和传感器数据。第三层是计算智能(computational intelligence, 简称 CI)，它是由数学方法和计算机实现的，CI 的来源是数值计算和传感器。以上三者第一个英文字符取出来称之为 ABC。显然，从复杂性看有三个层次，即 B(有机)、A(符号)、C(数值)，而且 BI 包含了 AI，AI 又包含了 CI。

按 Bezdek 的看法，AI 是 BI 的中间过渡，因为 AI 中除了计算算法外，还包含符号表示和数值信息处理。模糊集和模糊逻辑是  $CI \rightarrow AI$  的平滑过渡，因为它包含了数值信息和语义信息。他还认为：计算神经网络 CNN 是一个最底层最基本的环节，也是 CI 的一个重要基石，主要用于模式识别。CNN 由以下四个点决定：功能、结构(连接拓扑和更新策略)、形式(集成和传递的节点函数式)、数据(用于训练和测试的数据)。按以上几点，CNN 有多种形式，如前馈、自组织以及与 fuzzy 结合的模糊神经网络等。

目前国内外提出的计算智能一般是以人工神经网络为主导，与模糊逻辑系统、进化计算以及信息学科的综合集成。图 1.1 是计算智能与其他学科之间的关系图。

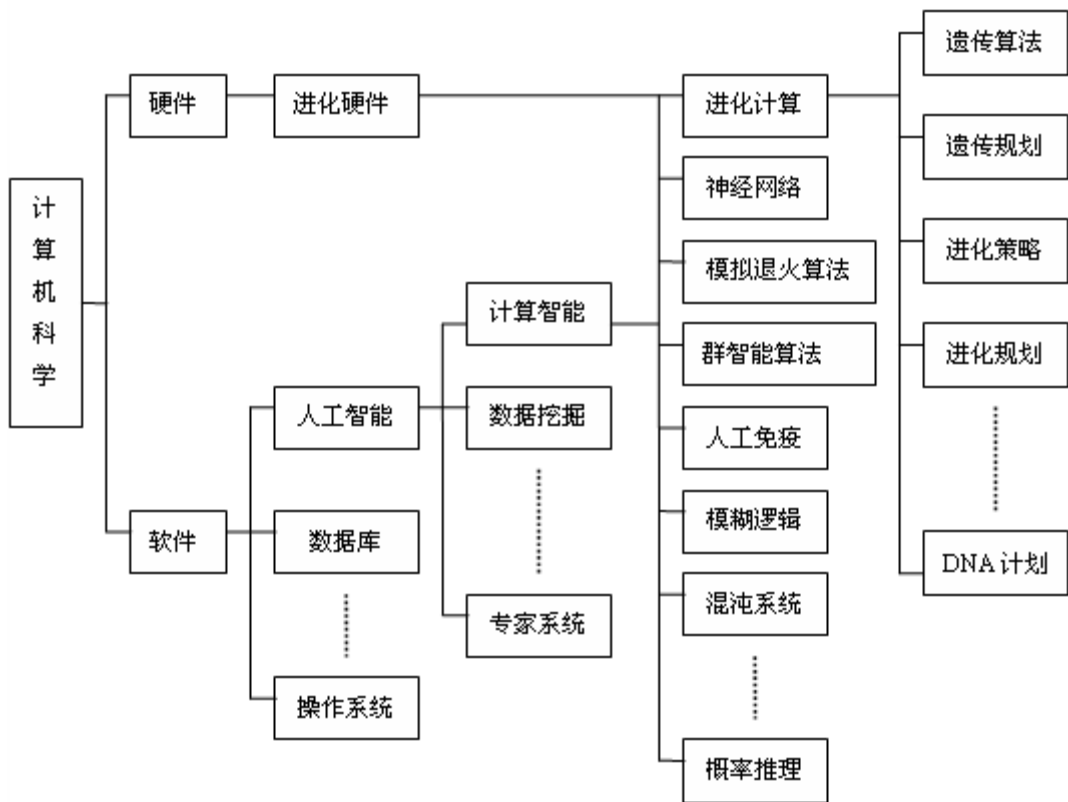


图 1.1 计算智能与其他学科之间的关系

## 1.4 计算智能的主要内容

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、神经细胞网络等机制，用数学语言抽象描述的计算方法。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。计算智能有着传统的人工智能无法比拟的优越性，它的最大特点就是不需要建立问题本身的精确模型，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的人工智能技术难以有效解决，甚至无法解决的问题。

计算智能研究的主要问题包括：

- 学习：学习是一个有特定目的的知识获取过程，并通过这一过程逐渐形成、修改新的知识结构或改善行为性能。获取知识的过程包括积累经验、发现规律、改进性能和适应环境。机器学习则是利用机器来完成学习这一过程，从而达到或部分达到学习的目的。
- 搜索：是对问题的一种求解方法、技术和过程。搜索是面向问题的，不同的问题有不同的搜索方法、技术和过程。
- 推理：是人类基于逻辑的一种思维形式，也是计算机基于知识表示的一种知识利用。即根据一定的规则，从已知的断言或知识得出另一个新的断言或知识的过程。

计算智能研究的主要方法包括：

- 模型：具有生物背景知识并描述某一智能行为的数学模型。
- 算法：以计算理论、技术和工具研究对象模型的核心，它具有数值构造性、迭代性、收敛性、稳定性和实效性。
- 实验：对许多复杂问题，难以进行理论分析，数值实验和实验模拟成为越来越重要的研究手段，并获得了很大的成功（分叉、混沌、孤波等）。

从方法论的角度和现在的研究现状来看，计算智能的主要方法有：模拟退火算法、人工神经网络、群智能算法、模糊系统、进化计算、免疫算法、DNA 计算以及交叉融合的模糊神经网络、进化神经网络、模糊进化计算、进化模糊系统、神经模糊系统、进化模糊神经网络和模糊进化神经网络等。

### 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 算法在迭代过程中不仅接受使目标函数变“好”的试探点, 而且还能以一定的概率接受使目标函数值变“差”的试探点。迭代中状态是随机产生的, 并且不强求后一个状态一定优于前一个状态, 即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, 就可确定进一步搜索方向和搜索范围, 无需其他辅助信息。

### 2) 人工神经网络 (artificial neural networks, 简称 ANN)

神经网络是模仿和延伸人脑智能、思维、意识等功能的非线性自适应动力学系统, 神经网络所具有的学习算法能使其对事物和环境具有很强的自学习、自适应和自组织能力, 它的知识积累是自动的, 无瓶颈效应存在。因此, 神经网络信息处理系统是一种全新计算结构的新型智能信息处理系统。它可以模仿人脑处理不完整的、不准确的, 甚至处理非常模糊的信息, 并能联想记忆, 从部分信息中获得全部信息。

神经网络 (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。

### 3) 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, 我们不是从一个初始值出发, 而是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、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。

事实上，上述优化方法并不能保证达到全局优化，仍然可能陷入局部极值的陷阱，但遗传算法通过引入多个自变量，使得陷入局部极值陷阱的机会相对变小，优化效果会有所改进。此外，人们又提出了在父代和子代间也引入竞争，即不是简单地用子代代替父代，而是选取它们中较优者作为下一步的父代。在遗传算法中还可以引入变异，即在优化过程中以小概率不按局部优化的方向进行。从局部看，这种演化似乎反而“劣化”了目标函数，但正是这种演化才为逃出局部极值的陷阱提供了可能性。由于控制“劣化”的变异只以很小的概率发生，在计算了很多步后，总趋势是向优化发展的。

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，二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、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。但目前进化算法研究较多是解决“早熟”和提高效率问题，存在的问题是数学理论基础，应用中主要是控制参数的选择和自适应问题，要真正形成基于进化算法的上述领域的真正实用化产品还有许多工作要做。

#### 4) 群智能算法 (swarm intelligence, 简称 SI)

群体智能是在自然界生物群体行为的启发下提出的一种人工智能实现模式，也是计算智能领域的关键技术之一。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行进效果的影响之后，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。

群体智能计算是在群体智能领域中计算智能研究的逐步深入而产生的一种新兴的计算智能模式，它是群体智能研究中的一个重要分支，在对某些群体行为的观察和研究的基础上，运用一定的数学工具和计算机工具，提出相应的群体智能算法，并用来解决那些因为难以建立有效的形式化模型而用传统优化方法又难以有效解决甚至无法解决的问题。

目前,在群体智能计算领域中,蚁群算法和微粒群优化算法作为群体智能计算的两种典型实现模式,受到了普遍关注,两种算法模式都是基于种群寻优的启发式随机搜索算法。在这两种模式的群体智能中,蚁群算法更擅长于离散空间中的优化问题求解,而微粒群算法则更多地用于连续空间内的优化问题求解。

#### 5) 免疫算法 (immune algorithm, 简称 IA)

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。这里,抗原对应于待求解的问题,而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。抗体产生在免疫反应过程中,由于抗原的刺激、抗体产生细胞(B细胞)不断分化、增殖,形成大量的抗体。这些抗体的来源主要有:①免疫细胞的新陈代谢作用。即抗体维持着一定数量的自然死亡和不断对骨髓中新产生的B细胞中得到补充;②基于交叉与变异的新抗体的产生。在免疫调节机制下,抗体群体不断更新进化,最终排除抗原,即搜索到问题的解。抗体间产生的刺激与抑制采用一种基于浓度的抗体产生调节机制。抗体的浓度 $C_1$ 是指群体中相似抗体所占的比率,即: $C_1 = \frac{\text{具有相近适应度的抗体数}}{\text{抗体总数 } N}$ 。在群体更新中,适应度高的抗体的浓度不断提高,而浓度达到一定值时,则抑制这种抗体的产生,反之则相应提高浓度低的抗体的产生和选择概率。这种机制保证了抗体群体更新中的抗体多样性,一定程度上避免了未成熟收敛。

## 1.6 计算智能的应用领域

计算智能理论技术的应用主要可以分为以下几个方面:智能建模、智能控制、智能优化、智能管理、智能仿真、智能设计和制造等。

### 1) 智能建模

智能建模是应用计算智能的理论和方法,针对系统实测输入输出数据、专家知识和操作经验来建模。智能建模可分为智能分类、智能辨识、智能测量、智能预测、智能决策、智能评价、智能诊断、智能信息处理等。

### 2) 智能控制

智能控制包括模糊控制、神经网络控制和混合智能控制。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、进化模糊控制等。智能控制要求具有一定程度的自适应、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。智能控制的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,其中,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、大系统理论中静态优化、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因素、多目标、局部解、不确定、未确知等新问题的新途径。具体有①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；②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；③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；④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；⑤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等。

#### 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“三化”——智能化、集成化、协调化。智能管理是一门综合管理学科，包括智能分析、智能预测、智能规划、智能优化、智能决策、智能指挥、智能信息处理、智能组织、智能评审、智能协调，它们都是在原有方法基础上引入专家系统、模糊逻辑、协同论、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。主要用于①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；②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；③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。目前前者研究较多，后者研究较少。

#### 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。

### 思考题

- 1.1 什么是智能？人工智能分为哪几个学派？
- 1.2 传统人工智能的核心问题是什么？
- 1.3 简述人工智能与计算智能的区别。
- 1.4 计算智能的主要研究内容是什么？
- 1.5 计算智能有哪些应用领域？

## 参考文献

- [1] Andries P. Engelbrecht, Computational Intelligence: An Introduction, Wiley, New York, 2002
- [2] 丁永生编著. 计算智能—理论、技术与应用. 科学出版社, 2004
- [3] 褚蕾蕾, 陈绥阳, 周梦编著. 计算智能的数学基础. 科学出版社, 2002
- [4] 徐宗本, 张讲社, 郑亚林编著. 计算智能中的仿生学: 理论与算法, 科学出版社, 2003
- [5] 徐宗本编著. 计算智能 (第一册): 模拟进化计算. 高等教育出版社, 2004
- [6] 王国俊编著. 计算智能 (第二册): 词语计算与 Fuzzy 集. 高等教育出版社, 2005
- [7] 罗四维著. 大规模人工神经网络理论基础. 清华大学出版社, 北方交通大学出版社, 2004
- [8] Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan, IEEE Press, 1994.
- [9] 张乃尧, 阎平凡编著. 神经网络与模糊控制. 清华大学出版社, 2002
- [10] 王小平, 曹立明编著. 遗传算法—理论、应用与软件实现, 西安交通大学出版社, 2002
- [11] 张颖, 刘艳秋等编著. 软计算方法. 科学出版社, 2002
- [12] 谷荻隆嗣等编著. 人工神经网络与模糊信号处理. 科学出版社, 2003
- [13] 李士勇等编著. 蚁群算法及其应用. 哈尔滨工业大学出版社, 2004
- [14] 陈国良, 王煦法, 庄镇权等. 遗传算法及其应用. 人民邮电出版社, 1995
- [15] 史忠植编著. 知识发现. 清华大学出版社, 2002
- [16] 傅京孙等编著. 人工智能及其应用. 清华大学出版社, 1987
- [17] 蔡自兴, 徐光佑编著. 人工智能及其应用. 清华大学出版社, 1996
- [18] 云庆夏等编著. 遗传算法. 冶金工业出版社, 1999
- [19] 云庆夏等编著. 进化算法. 冶金工业出版社, 2002
- [20] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. Springer-Verlag, 2001
- [21] T. Mitchell, Machine Learning. McGraw Hill, 1997
- [22] C. M. Bishop. Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford University Press, 1995
- [23] C. Burges. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. Knowledge Discovery and Data Mining, 1998, 2(2)
- [24] N. Cristianini, J. Shawe-Taylor. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods. Cambridge University Press, 2002
- [25] K. M. Passino, S. Yurkovich. Fuzzy Control. Prentice Hall/Pearson. 2001. J. Han and M. Kamber. Data Mining: Concepts and Techniques. Morgan Kaufmann, 2001

## 第2章 模拟退火算法

### 2.1 概述

#### 2.1.1 什么是模拟退火算法

模拟退火算法 (simulated annealing, SA) 是源于固体退火原理的一种拟物智能算法。其出发点是受物理退火过程启发, 模拟固体加温、等温、冷却等物理过程, 结合 Metropolis 抽样准则进行科学计算的一种启发式随机寻优算法。该算法已得到成功应用, 研究成果涉及管理科学、计算机科学、分子物理学、生物学以及图像处理等科技领域。

模拟退火算法的主要特点有:

- 1) 与局部搜索算法相比, 模拟退火算法可望在较短时间内求得最优近似。
- 2) 模拟退火算法允许任意选取初始解和随机数序列, 又能得出最优近似解。因此该求解优化算法的前期工作量大大减少。
- 3) 模拟退火算法能应用于多种组合优化问题, 为一个问题编制的程序可以有效地应用于其他问题的求解。

#### 2.1.2 物理退火过程

在对固体物质进行退火处理时, 通常是先对它加温, 使其熔化, 让其中的粒子可以自由运动, 然后随着温度缓慢下降, 粒子逐渐形成低能态的晶格。若在凝结点附近的温度下降速率过快, 则不能达到这个能量最低态, 而是以一种多晶的或者以一种非晶的具有高能量的亚稳态结束。因此, 这个过程本质是慢速冷却, 让粒子有充分的时间失去可动性, 进行重新分布, 确保粒子达到低能态势。

简单而言, 物理退火过程由以下三部分组成:

- 1) 加温过程。其目的是增强粒子的热运动, 使其偏离平衡位置。当温度足够高时, 固体将熔化为液体, 从而消除系统原先可能存在的非均匀态, 使随后进行的冷却过程以某一平衡态为起点。熔解过程与系统的熵增过程相联系, 系统能量也随温度的升高而增大。
- 2) 等温过程。物理学的知识告诉我们, 对于与周围环境交换热量而温度不变的封闭系统, 系统状态的自发变化总是朝自由能减少的方向进行, 当自由能达到最小时, 系统达到平衡状态。
- 3) 冷却过程。其目的是使粒子的热运动减弱并逐渐趋于有序, 系统能量逐渐下降, 从而得到低能的晶体结构。

#### 2.1.3 组合优化与物理退火的相似性

模拟退火算法求解组合优化问题与物理中晶体物质的退火过程具有相似性。对于组