普通高校本科计算机专业特色教材精选·算法与程序设计

计算智能

张　军　詹志辉　等　编著

学出版社

普通高校本科计算机专业特色教材精选·算法与程序设计

计算智能

张　军　詹志辉　陈伟能　钟竞辉
陈　霓　龚月姣　许瑞填　官　兆　编著

清华大学出版社
北京

内容简介

本书对计算智能领域的主要算法进行介绍，重点讨论各种算法的思想来源、流程结构、发展改进、参数设置和相关应用，内容包括绪论以及神经网络、模糊逻辑、遗传算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法、免疫算法、分布估计算法、Memetic 算法、模拟退火算法和禁忌搜索算法等计算智能领域的典型算法。本书通俗易懂，图文并茂，深入浅出，没有其他算法书中大量公式、定理、证明等难懂的内容，而是通过大量的图表示例对各个算法进行说明和介绍。本书不但提供了算法实现的流程图和伪代码，而且通过具体的应用举例对算法的使用方法和使用过程进行说明，同时提供了大量经典而重要的参考资料，为读者进一步深入学习和理解算法提供方便。

本书适合作为相关专业本科生和研究生的选修课教材，特别适合作为入门教材以满足算法初学者了解和学习计算智能算法的入门需求，同时还能够作为广大算法研究者和工程技术人员进一步学习的参考书和工具书。

图书在版编目(CIP)数据

计算智能/张军，詹志辉，陈伟能等编著．—北京：清华大学出版社，2009.11
（普通高校本科计算机专业特色教材精选·算法与程序设计）
ISBN 978-7-302-20844-0

Ⅰ．计…　Ⅱ．①张…　②詹…　③陈…　Ⅲ．人工智能－计算－高等学校－教材
Ⅳ．TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 157794 号

责任编辑：袁勤勇　李玮琪
责任校对：白　蕾
责任印制：王秀菊

出版发行：清华大学出版社　　**地　址**：北京清华大学学研大厦 A 座
http://www.tup.com.cn　　**邮　编**：100084
社 总 机：010-62770175　　**邮　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：北京国马印刷厂
经　销：全国新华书店
开　本：185×260　**印　张**：14.5　**字　数**：334 千字
版　次：2009 年 11 月第 1 版　**印　次**：2009 年 11 月第 1 次印刷
印　数：1～3000
定　价：23.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题，请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话：010-62770177 转 3103　　产品编号：030165-01

前言

PREFACE

自计算机问世以来，人工智能（Artificial Intelligence，AI）一直是计算机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（Computational Intelligence，CI）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，并且已经被广泛应用于各种领域，在科学研究和生产实践中发挥着重要的作用。

计算智能是受到大自然智慧和人类智慧的启发而设计出的一类算法的统称。随着技术的进步，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（Non- deterministic Polynomial）难问题，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算法。这些算法或模仿生物界的进化过程，或模仿生物的生理构造和身体机能，或模仿动物的群体行为，或模仿人类的思维、语言和记忆过程的特性，或模仿自然界的物理现象，希望通过模拟大自然和人类的智慧实现对问题的优化求解，在可接受的时间内求解出可以接受的解。这些算法共同组成了计算智能优化算法。

目前，计算智能算法在国内外得到广泛的关注，已经成为人工智能以及计算机科学的重要研究方向。计算智能还处于不断发展和完善的过程，目前还没有牢固的数学基础，国内外众多研究者也是在不断的探索中前进。计算智能技术在自身性能的提高和应用范围的拓展中不断完善。计算智能的研究、发展与应用，无论是研究队伍的规模、发表的论文数量，还是网上的信息资源，发展速度都很快，已经得到了国际学术界的广泛认可，并且在优化计算、模式识别、图像处理、自动控制、经济管理、机械工程、电气工程、通信网络和生物医学等多个领域取得了成功的应用，应用领域涉及国防、科技、经济、工业和农业等各个方面。

相关的国际会议和学术期刊为计算智能的研究提供了良好的学术环境和研究氛围。1994 年，IEEE 神经网络委员会主持召开了第一届进化计算国际会议，并成立了 IEEE 进化计算委员会，此会议每 2 年与 IEEE 神经网络国际会议、IEEE 模糊系统国际会议在同一地点先后连续举行，合称为 IEEE 计算智能国际会议。认识、了解和学习计算智能算法已经成为广大理工科大学生和研究生的迫切需要；掌握计算智能相关算法的基本知识，熟练地运用这些算法去解决实际应用中遇到的问题，也已经成为广大科学工作者和工程技术人员的必备技能。

本书介绍典型的计算智能方法，重点讨论各种算法的思想来源、流程结构、发展改进、参数设置和相关应用，内容共分 10 章。第 1 章是绪论，主要是对计算智能一些背景知识及其分类与理论、研究与发展、特征与应用等进行概要介绍；第 2 章介绍神经网络（Neural Network，NN）；第 3 章介绍模糊逻辑（Fuzzy Logic，FL）；第 4 章介绍遗传算法（Genetic Algorithm，GA）；第 5 章介绍蚁群优化算法（Ant Colony Optimization，ACO）；第 6 章介绍粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization，PSO）；第 7 章介绍免疫算法（Immune Algorithm，IA）；第 8 章介绍分布估计算法（Estimation of Distribution Algorithm，EDA）；第 9 章介绍 Memetic 算法（Memetic Algorithm，MA）；第 10 章介绍模拟退火（Simulated Annealing，SA）以及禁忌搜索（Tabu Search，TS）算法。

计算智能算法本身是对自然界智慧和人类智慧的模仿，其思想来源和基本原理本来就不是高深晦涩的理论，因此本书在对各种算法进行介绍的时候，力求做到通俗易懂，图文并茂，深入浅出。本书的每一章都以生动的图示开头，尝试用最直观、最通俗的形式去展示各种算法的思想原理和基本特征，有助于读者快速、形象、深刻地对算法进行认识和把握。在叙述的过程中，本书没有其他算法书中大量公式、定理、证明等难懂的内容，而是通过大量的图表示例对各个算法的思想来源、流程结构、发展改进、参数设置和相关应用等方面进行说明和介绍，不但提供了算法实现的流程图和伪代码，而且通过具体的应用举例对算法的使用方法和使用过程进行说明，同时提供了大量经典而重要的参考资料，为读者进一步深入学习和理解算法提供方便。本书的部分插图来源于网络的自由资源和 Microsoft Office 软件提供的剪贴板画，我们对此表示感谢。

本书编写的分工如下：中山大学的张军教授负责全书的编写与统稿工作，詹志辉参与编写了第 1、2、6、10 章，陈霓参与编写了第 3 章，许瑞填参与编写了第 4 章，龚月姣参与编写了第 5 章，官兆参与编写了第 7 章，钟竞辉参与编写了第 8 章，陈伟能参与编写了第 9 章。

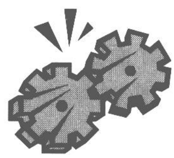
由于编者水平有限，书中难免存在错误或疏漏之处，希望广大读者批评指正。

张军
2009 年 6 月
于中山大学

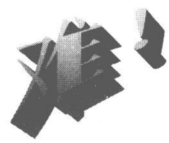
目录

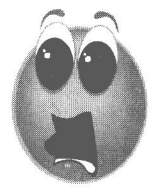
CONTENTS

第 1 章 绪　　论

在很多情况下，这些都是非常难解的问题。





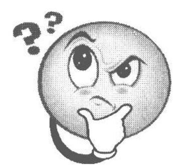
在生产实践、科学研究、经济管理、日常生活中，我们经常会遇到形形色色的最优化问题。

例如要在最短的时间内完成最多的工作量；要用更少的资源完成更多的任务；要合理安排每一项工作使得效益最大……



面对这种组合爆炸的最优化问题，传统方法的求解速度太慢，怎么办？

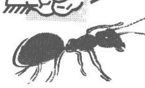
在这种情况下，我们可以尝试使用计算智能优化方法，对这些难解问题进行优化求解。以求在可以接受的时间内得到令人满意的求解结果。

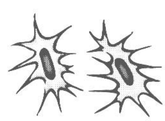


计算智能(Computational Intelligence, CI)方法主要包括：

- 神经网络(Neural Network, NN);
- 模糊逻辑(Fuzzy Logic, FL);
- 遗传算法(Genetic Algorithm, GA);
- 蚁群优化算法(Ant Colony Optimization , ACO);
- 粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization , PSO);
- 免疫算法(Immune Algorithm, IA);
- 分布估计算法(Estimation of Distribution Algorithm, EDA);
- Memetic算法(Memetic Algorithm, MA);
- 模拟退火(Simulated Annealing, SA);
- 禁忌搜索(Tabu Search,TS)。






随着技术的进步，在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(Non-deterministic Polynomial)难问题，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，计算机科学家们提出了很多具有启发式特征的计算智能方法。这些算法或模仿生物界的进化过程，或模仿生物的生理构造和身体机能，或模仿动物的群体行为，或模仿人类的思维、语言和记忆过程的特性，或模仿自然界的物理现象，希望通过模拟大自然和人类的智慧实现对问题的优化求解，在可接受的时间内求解出可以接受的解。这些算法共同组成了计算智能优化算法。计算智能因其智能性、并行性和健壮性，具有很好的自适应性和很强的全局搜索能力，得到了众多研究者的广泛关注，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，而且已经被广泛应用于各种领域，在科学研究和生产实践中发挥着重要的作用。

本章是绪论，目的是给读者展现计算智能算法的整体面貌。本章将从计算智能算法的分类与理论、研究与发展，以及特征与应用等几个方面进行介绍，使读者对整个计算智能领域有一个初步的认识和了解。计算智能算法主要包括模糊逻辑、神经网络、遗传算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法、免疫算法、分布估计算法、Memetic 算法、模拟退火算法和禁忌搜索算法等，我们将在后面的章节对每个算法进行深入学习。本章的具体内容如下。

(1) 最优化问题。

(2) 计算复杂性及 NP 理论。

(3) 智能优化计算方法：

- 计算智能方法；
- 计算智能的分类与理论；
- 计算智能的研究与发展；
- 计算智能的特征与应用。

1.1 最优化问题

最优化问题是人们在科学研究和生产实践中经常遇到的问题[1][2]。人类所从事的一切生产或社会活动均是有目的的，其行为总是在特定的价值观念或审美取向的支配下进行的，因此经常面临求解一个可行的甚至是最优的方案的决策问题，这就是所谓的**最优化问题**(Optimization Problem)。

最优化问题的求解模型如公式(1.1)所示。

$$\min f(X), \quad X \in D \tag{1.1}$$

其中 D 是问题的解空间，X 是 D 中的一个合法解。一般可将 X 表示为 $X=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$，表示一组决策变量。最优化问题就是在解空间中寻找一个合法的解 X(一组最佳的决策变量)，使得 X 对应的函数映射值 $f(X)$ 最小(最大)。

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。我们称决策变量均为连续变量的最优化问题为函数优化问题；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，如表 1.1 所示。

表 1.1　最优化问题的分类

分类标志	变量个数	变量性质	约束条件	极值个数	目标个数	函数关系	问题性质	时间变化
类型	单变量	连续	无约束	单峰	单目标	线性	确定性	静态
		离散					随机性	
	多变量	混合	有约束	多峰	多目标	非线性	模糊性	动态

1.1.1　函数优化问题

函数优化问题对应的决策变量均为连续变量，如图 1.1 所示，优化问题 f 的目标函数值取决于其对应的连续变量 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的取值。

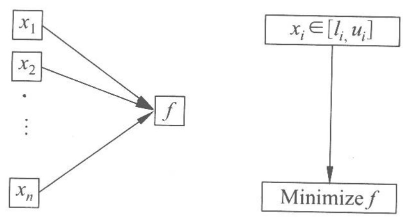


图 1.1　函数优化问题

很多科学实验参数配置和工农业生产实践都面临这种类型的最优化问题。例如在设计神经网络的过程中，需要确定神经元节点间的网络连接权重，从而使得网络性能达到最优。在这种问题中，需要优化的变量的取值是某个连续区间上的值，是一个实数。各个决策变量之间可能是独立的，也可能是相互关联、相互制约的，它们的取值组合构成了问题的一个解。由于决策变量是连续值，因此对每个变量进行枚举是不可能的。在这种情况下，必须借助最优化方法对问题进行求解。

1.1.2　组合优化问题

和函数优化问题不同，组合优化问题的决策变量是离散取值的，例如整数规划问题、0-1 规划问题等。很多离散组合优化问题都是从运筹学（Operations Research，OR）中演化出来的，其所研究的问题涉及信息技术、经济管理、工业工程、交通运输、通信网络等众多领域，在科学研究和生产实践中都起着重要的作用。

典型的组合优化问题包括**旅行商问题**（Traveling Salesman Problem，TSP）和 **0-1 背包问题**（Zero/One Knapsack Problem，ZKP/0-1KP/KP）。这两个问题分别是一种基于排序的组合优化问题和一种基于二进制取值的组合优化问题，代表了组合优化问题的两种重要类型。定义 1.1 和定义 1.2 分别给出了这两个问题的描述以及最优化模型。

定义 1.1　旅行商问题（Traveling Salesman Problem，TSP）

设有 n 个城市，任意两个城市之间的距离如矩阵 $\boldsymbol{D}=(d_{ij})_{n\times n}(i,j=1,2,\cdots,n)$ 所示，其中 d_{ij} 表示从城市 i 到城市 j 的距离。旅行商问题就是需要寻找这样的一种周游方案：周游路线从某个城市开始，经过每个城市一次且仅一次，最终回到出发城市，使得周游的

路线总长度最短。数学化之后就是求解如公式(1.2)所示的一个最小值问题。

$$f = \min \sum_{i=1}^{n} d_{\pi(i)\pi(i+1)} \tag{1.2}$$

其中 $\pi(i)$ 表示周游序列中第 i 个城市的编号，而且有 $\pi(n+1)=\pi(1)$。

一般的旅行商问题都是**对称旅行商问题**(Symmetrical TSP，STSP)，即对任意 i,j 有 $d_{ij}=d_{ji}$；反之，如果存在某组 i,j 使得 $d_{ij}\neq d_{ji}$ 而且 $i\neq j$，则称为**非对称旅行商问题**(Asymmetrical TSP，ATSP)。

定义 1.2　0-1 背包问题(Zero/One Knapsack Problem，ZKP/0-1KP/KP)

给定一个装载量为 c 的背包和 n 个重量与价值分别为 w_i 和 v_i 的物品($1\leqslant i\leqslant n$)。现要往背包放物品，在不超过背包装载量的条件下使装载物品的总价值最大。数学化之后就是求解如下的一个带约束条件的最大值问题。

$$\begin{gathered} z = \max \sum_{i=1}^{n} v_i x_i, \quad \text{其中 } x_i \in \{0,1\} \\ \text{且满足限制条件} \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \leqslant c \end{gathered} \tag{1.3}$$

其中 x_i 表示物品的选择情况，$x_i=1$ 代表选择第 i 个物品，$x_i=0$ 表示不选择。

从定义 1.1 可以看出，对于一个 n 城市的对称 TSP，如果通过枚举的方法，将会产生 $(n-1)!$ 个可能解；而定义 1.2 则反映了面对一个需要处理 n 个物品的背包问题，如果采用枚举的方法确定对某个物品的取舍，那将会产生 2^n 个解。无论是 $(n-1)!$ 还是 2^n，它们都可以看作是规模 n 的指数函数，当 n 比较大的时候，我们所面对的将是非常庞大的解空间。因此，枚举的方法只能处理一些小规模的组合优化问题。对于大规模问题，我们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。

1.2　计算复杂性及 NP 理论

1.2.1　计算复杂性

一般而言，最优化问题都是一些“难解”的问题。以前面给出的旅行商问题和 0-1 背包问题为例，虽然它们的定义非常简单易懂，但是需要为它们寻找到一个全局最优解并不是一件容易的事情。直观地看，旅行商问题就是 n 个城市的一个排序问题，如果使用蛮力法去枚举，我们需要进行 $(n-1)!$ 次的枚举；0-1 背包问题就是一个 n 位二进制的 0、1 取值问题，0 表示不选择，1 表示选择，因此有 2^n 种可能。可见，仅当问题的规模比较小(n 较小)的时候，枚举的方法才是可能的。由于问题的解空间随着规模的增大而呈指数级增长，因此，我们需要寻找其他有效而且高效的算法去解决这类问题的大规模实例。

在计算机科学中，我们常用**计算复杂性**(Computational Complexity)这个概念来描述问题的难易程度或者算法的执行效率[3]。对于算法的计算复杂性，我们一般很容易进行判断，例如使用蛮力法去枚举旅行商问题或者 0-1 背包问题的算法，就是具有指数

计算复杂性的算法。但是，要对一个问题的计算复杂性进行判断就不是一件简单的事情了。

问题的计算复杂性是问题规模的函数，故需要首先定义问题的规模。例如对于矩阵运算，矩阵的阶数可被定义为问题的规模。如果求解一个问题需要的运算次数或步骤数是问题规模 n 的指数函数，则称该问题有指数时间复杂性；如果所需的运算次数是 n 的多项式函数，则称它有多项式时间复杂性。对于某个具体问题，其复杂性上界是已知求解该问题的最快算法的复杂性，而复杂性下界只能通过理论证明来建立。证明一个问题的复杂性下界需要证明不存在任何复杂性低于下界的算法。显然，建立下界要比确定上界困难得多。

例如，蛮力枚举算法作为求解旅行商问题和0-1背包问题的一种算法，算法是指数复杂性的(阶乘往往比指数的复杂性更高)，因此，这两个问题的复杂性上界都是指数的。那么，是否存在一种多项式复杂性的算法对这两个问题进行求解呢？到目前为止，还没有找到，但是还不能证明其不存在。大多数计算机科学家都认为，这些问题是不存在多项式复杂性的求解算法的。对于这些问题，习惯称为 **NP 难**(Non-deterministic Polynomial Hard，NPH)问题，或者 **NP 完全**(Non-deterministic Polynomial Complete，NPC)问题。

从发展趋势来看，计算复杂性理论将深入到计算机科学的各个分支中去。计算机科学的发展，特别是新一代计算机系统和人工智能的研究，又会给计算复杂性理论提出许多新的课题。计算复杂性理论、描述复杂性理论、信息论、数理逻辑等学科将有可能更紧密地结合，得到有关信息加工或信息活动的一些深刻结论。

1.2.2 NP 理论

为了更好地研究问题的计算复杂性，计算机科学家提出了有关 NP 的理论[3]。下面对 P 类问题、NP 类问题、NP 难问题和 NP 完全问题进行定义和解释。

为了简化问题，我们只考虑一类简单的问题——判定性问题，即提出一个问题，只需要回答"是"或者"否"的问题。任何一般的最优化问题都可以转化为一系列判定性问题，例如求某个图中从 A 到 B 的最短路径，可以转化成：从 A 到 B 是否有长度为 1 的路径？从 A 到 B 是否有长度为 2 的路径？一直问到从 A 到 B 是否有长度为 k 的路径？如果问到了 k 的时候回答了"是"，则停止发问，我们可以说从 A 到 B 的最短路径就是 k。

定义 1.3　P 类问题(Polynomial Problem)

P 类问题是指一类能够用确定性算法在多项式时间内求解的判定问题。其实，在非正式的定义中，可以把那些在多项式时间内求解的问题当做 P 类问题。

为了定义 NP 类问题，首先要引入一个不确定性算法(Non-deterministic Algorithm)的概念。

定义 1.4　不确定性算法(Non-deterministic Algorithm)

一个不确定性算法包含两个阶段，它把一个判定问题的实例 l 作为它的输入，并进行如下的两步操作。

(1) 非确定("猜测")阶段：生产一个任意串 S，把它当做给定实例 l 的一个候选解。

(2) 确定("验证")阶段：确定算法将 l 和 S 作为它的输入，如果 S 是 l 的一个解的话，则输出"是"。

如果一个不确定算法在验证阶段的时间复杂度是多项式级别的，我们称它为**不确定性多项式算法**。

现在，可以定义 NP 类问题了，如定义 1.5 所示。

定义 1.5 NP 类问题(Non-deterministic Polynomial Problem)

NP 类问题是指一类可以用不确定性多项式算法求解的判定问题。例如旅行商问题的判定版本就是一个 NP 类问题。虽然还不能找到一个多项式的确定性算法求解最小的周游路线，但是可以在一个多项式时间内对任意生成的一条"路线"判定是否合法(经过每个城市一次且仅仅一次)。

比较 P 类问题和 NP 类问题的定义，我们很容易得到一个结论：P⊆NP。但是，P＝NP 是否成立，至今还是计算机科学中的一个未解之谜。不过，由于类似旅行商问题和 0-1 背包问题这种难度很高的组合判定问题的存在，人们更倾向于相信 P 是不等于 NP 的，也就是说，NP 类问题除了 P 类问题之外，还包含一种问题，我们称之为 NP 完全问题，如定义 1.6 所示。

定义 1.6 NP 完全问题(NP Complete Problem)

一个判定问题 D 是 NP 完全问题的条件是：

(1) D 属于 NP 类；

(2) NP 中的任何问题都能够在多项式时间内转化为 D。

另外，在定义 1.6 中，一个满足条件(2)但不满足条件(1)的问题被称为 NP 难问题。也就是说，NP 难问题不一定是 NP 类问题，例如图灵停机问题。正式地说，一个 NP 难问题至少跟 NP 完全问题一样难，也许更难！例如在某些任意大的棋盘游戏走出必胜的下法，就是一个 NP 难的问题，这个问题甚至比那些 NP 完全问题还难。

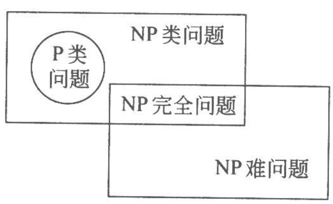


图 1.2 问题分类的关系示意图

图 1.2 给出了以上这些问题分类的关系示意图，该图反映了 NP 类问题是包含 P 类问题的(当然 NP 是否等于 P，这是一个至今还不能证明的难题)。NP 完全问题一定属于 NP 类问题，而且属于 NP 难问题，但 NP 难问题不一定是 NP 类问题。

1.3 智能优化计算方法：计算智能算法

随着技术的进步，工程实践问题变得越来越复杂，传统的计算方法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 难和 NP 完全问题，设计用于求解这些问题的精确算法往往由于其指数级的计算复杂性而令人无法接受。对于这些难解问题，传统的精确算法根本无法在可以忍受的时间内求出解，因此，为了在求解时间和求解精度上取得平衡，计算机科学家们提出了形形色色具有启发式特征的计算方法，这些算法或模仿生物界的进化过程，或模仿生物的生理构造和身体机能，或模仿动物的

群体行为，或模仿人类的思维、语言和记忆过程的特性，或模仿自然界的物理现象，希望通过模拟大自然和人类的智慧实现对问题的优化求解，在可接受的时间内求解得到可接受的解。这些算法就是智能优化计算方法，也叫**计算智能**（Computational Intelligence，CI）算法[4]。

计算智能是借助自然界（生物界）规律的启示，根据其规律，设计出求解问题的算法。物理学、化学、数学、生物学、心理学、生理学、神经科学和计算机科学等学科的现象与规律都可能成为计算智能算法的基础和思想来源。从关系上说，计算智能属于**人工智能**（Artificial Intelligence，AI）的一个分支[5][6]。如图 1.3 所示，不同的学者根据其对人工智能理解的不同，形成了**逻辑主义**、**行为主义**和**联结主义**三大学派。逻辑主义，又称为符号主义、心理学派或计算机学派，其原理主要为物理符号系统假设和有限合理性原理。这一学派认为人工智能源于数理逻辑，认为人工智能的研究方法应为功能模拟方法，通过分析人类认知系统所具备的功能和机能，然后用计算机模拟这些功能，实现人工智能。行为主义，又称控制论学派，其原理为控制论及感知—动作型控制系统。这一学派认为人工智能源于控制论，认为智能取决于感知和行动（所以被称为行为主义），提出智能行为的“感知—动作”模式。联结主义，又称为仿生学派或生理学派，其原理主要为神经网络及神经网络间的连接机制与学习算法。这一学派认为人工智能源于仿生学，特别是人脑模型的研究，包括神经网络[7]和模糊逻辑[8]等研究。此外，仿生学方面出现了进化计算[9][10]，群体智能[11][12]等多种计算智能优化算法。

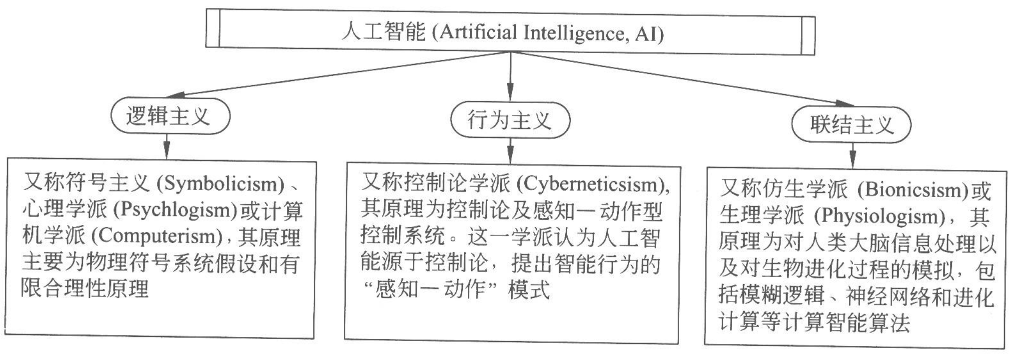


图 1.3　人工智能和计算智能的关系

本书将重点介绍其中的联结主义，也就是所谓的智能优化计算方法，或者称为计算智能算法。在这一节，首先对计算智能算法的分类与理论、研究与发展、特征与应用等方面进行一个概要的介绍，后面的章节将分别对各种典型的计算智能算法进行介绍。

1.3.1　计算智能的分类与理论

计算智能方法在模拟人脑的联想、记忆、发散思维、非线性推理、模糊概念等传统人工智能难以胜任的方面表现优异，并受到人们的广泛关注。计算智能方法也得到越来越多学者的研究和完善，并与传统的人工智能技术互相交叉、取长补短，使得人工智能研究与