

自然计算导论

吴启迪 康 琦 汪 镭 陆金山 著

本书紧跟国内外自然计算领域最新的研究动态，从自然辩证的哲学角度，对目前受到关注的各种自然计算模式及其应用领域进行系统的综述，提出基于群体智能理解的自然计算统一性理念……

上海科学技术出版社

自然计算导论

An Introduction To Nature-inspired Computation

吴启迪 康 琦 汪 镭 陆金山 著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

自然计算导论/吴启迪等著. —上海: 上海科学技术出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-5478-0567-1

I. ①自... II. ①吴... III. ①人工智能—计算
IV. ①TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 207010 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张:14

字数:300 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-0567-1/TP·10

定价:58.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书是作者在计算智能方向的系统性研究成果。它紧跟国内外自然计算领域最新的研究动态,从自然辩证的哲学角度,对目前受到关注的各种自然计算模式及其应用领域进行系统的综述,考虑到各类自然计算模式内在的群体协同“进化”(寻优)机制的普适性,提出基于群体智能理解的自然计算统一性理念,并以几种典型实现模式为例,分别进行具体的形式化描述和统一框架建模,使各类自然计算理念从宏观到微观再到宏观、从统一性到多样性再到统一性得到较为系统的展现,以期能为相关领域的研究和应用提供新的思路和方法。

本书可供智能科学、自动化、计算机科学、电子信息等相关领域的研究生、教师、科研人员以及工程技术人员参考使用,也可供高年级本科生作为开拓视野、增长知识的阅读材料。

本书系:

国家自然科学基金重点项目(61034004, 70531020)

国家自然科学基金重大研究计划(91024023)

国家自然科学基金项目(61005090, 70871091, 61075064)

教育部科学研究重大项目(306023)

上海市科委科研计划项目(09DZ1141300, 09DZ1141503)

同济大学青年优秀人才培养行动计划(2009KJ028)

研究成果。

前言

大自然经过亿万年物竞天择、优胜劣汰、继承创造的演化,形成了美轮美奂、复杂多样的生命现象和自然奇观,其间蕴含着丰富的信息处理机制,为人类社会的“智能化”进程提供不竭的智慧源泉。自然计算(Nature-inspired Computation)恰是这眼奇妙的“智能”之泉,她以自然界(包括生命、生态系统、物理与化学、经济以及社会系统等),特别是生物体的功能、特点和作用机理为基础,研究其中所蕴含的丰富的信息处理机制,抽取相应的计算模型,设计相应的算法,并在各相关领域加以应用。自然计算是继传统人工智能之后异军突起的一种全新的思维与智能计算模式,它海纳百川、集众之智,以其独特的思想魅力和广阔的应用前景,吸引着众多研究开发者投身于这一新领域的开拓,不断创新,开辟了智能科学最广阔的天地、最精彩的篇章、最激动人心的前沿!

目前在自然科学研究领域,生命科学与工程科学的相互交叉、相互渗透和相互促进是体现现代科学技术发展特征的显著特点之一,而自然计算的迅速发展正体现了科学领域发展的这一特征和趋势。在自然计算及智能科学相关的研究领域,各类算法模式层出不穷,主要包括进化计算、神经网络计算、群体智能、生物启发计算、生态计算、量子计算、社会认知与文化计算、情感计算及其他相关复杂自适应计算,等等,它们形态多样,理念各异,建模及分析工具各具特色,充分体现了自然计算丰富的内涵及其计算模式的多样性特征;但这些领域均以自然界中有益的信息处理机制为研究对象,具有师法于自然、作用于自然的统一性原理,通常具有自学习、自组织和自适应特征,能够为传统算法难以解决的各类复杂问题给出合理的解决方向,具有非常广阔的应用前景。

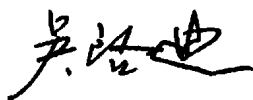
笔者长期从事计算智能方向的研究工作,曾先后撰写和出版了《反馈式神经网络智能控制》、《智能蚁群算法及应用》、《智能微粒群算法及应用》等专著,分别对计算智能的三种典型的实现模式——人工神经网络、蚁群算法和微粒群算法进行了较为详尽的论述;随后在专著《群体智能计算模式及应用》和《群体智能的多样性研究与典型实现》中构建了群体智能的统一框架描述。本书在以上工作基础上,紧跟国内外自然计算领域最新的研究动态,试图作进一步的思考和系统的总结。首先对自然计算模式和应用领域进行系统、全面的综述,基本涉及目前自然计算领域受到关注的各种计算模式;然后考虑到各类自然计算模式内在的群体协同“进化”(寻优)机制的普适性,对自然计算的总体模式进行基于群体智能理解的形式化描述(伪方程+框图描述),并提出自然计算的统一模式理念,得到自然计算总体分层框架模型。本书并

不试图(也不可能)把所有的算法都纳为本书内容,而是以少数几种得到普遍关注的典型自然计算模式——进化计算(Evolutionary Computation)、分布估计算法(Estimation of Distribution Algorithm)、神经网络计算(Neural Computing)、群体智能(Swarm Intelligence)、免疫计算(Immune Computing)和人工内分泌系统(Artificial Endocrine System)等为例进行具体描述和介绍,以显示它们之间的不同,分别进行形式化描述和统一框架建模,来说明它们之间所存在的统一性,使各类自然计算理念从宏观到微观再到宏观、从统一性到多样性再到统一性得到较为系统的展现。

作者希望藉此不但能为相关领域的研究、技术及教学人员提供参考,并期待国内相关领域的研究能在此基础上更进一步,从而尽可能为自然计算及智能控制理论的发展和应用提供新的方法和思路。本书可供智能科学、自动化、计算机科学、电子信息等相关领域的研究生、教师、科研人员以及工程技术人员参考使用,也可供高年级本科生作为开拓视野、增长知识的读物。

在本书的编写过程中,康琦博士、陆金山高级工程师等做了大量实质性的工作以及相关的组织工作,汪镭教授自始至终为本书的撰写和编著把关,衷心地感谢他们;也感谢课题组的雷鸣、杨东升、安静、仇一鸣、李文启等博士生参与了大量的具体工作。没有他们的齐心协力,本书不会这么快就面世。当然,我们都应该感谢各相关国家基金,没有各基金委的资助,我们也就不会有这些科研成果。在此,谨向他们表示由衷的感谢!

由于本书涉及多个学科前沿、知识面广、作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大同行、读者给予批评指正。



目 录

第 1 章 绪论

1.1 从仿生学人工智能到自然计算	1
1.2 自然计算	4
1.3 自然计算的主要研究分支	6
1.3.1 进化计算	7
1.3.2 群体智能	8
1.3.3 生物启发计算	10
1.3.4 生态计算	11
1.3.5 复杂自适应计算	11

第 2 章 自然计算的研究综述与统一模型

2.1 自然计算的实现模式总览	13
2.2 自然计算模式综述	16
2.2.1 元胞自动机	16
2.2.2 模拟退火算法	17
2.2.3 人工蜂群算法	19
2.2.4 人工鱼群算法	21
2.2.5 群搜索优化	22
2.2.6 细菌觅食算法	23
2.2.7 细菌趋药性算法	24
2.2.8 差分进化	25
2.2.9 DNA 计算	26
2.2.10 量子计算	28
2.2.11 复杂自适应系统	30
2.2.12 混沌优化	32
2.2.13 生物地理学优化	33
2.2.14 自组织迁移算法	35
2.2.15 膜计算	36

2.2.16	文化基因算法	38
2.2.17	文化算法	40
2.2.18	情感计算	41
2.2.19	社会认知优化	42
2.3	自然计算的应用与发展趋势	42
2.3.1	自然计算应用领域综述	42
2.3.2	应用分析与展望	46
2.4	自然计算的统一模型	47
2.4.1	自然计算模式的总体形式化描述	48
2.4.2	自然计算模式的统一框架理念	50

第3章 进化计算

3.1	遗传算法概述	54
3.1.1	遗传算法的产生	54
3.1.2	遗传算法的基本思想	55
3.1.3	遗传算法基本操作	55
3.1.4	遗传算法的特点	57
3.2	遗传算法研究进展	58
3.2.1	基本操作方法的改进研究	58
3.2.2	编码方法的改进研究	59
3.2.3	保持群体多样性方法的研究	60
3.3	遗传算法的收敛性研究	62
3.3.1	遗传算法的一般收敛性理论	62
3.3.2	遗传算法的马尔可夫链模型	63
3.3.3	遗传算法的收敛性分析	64
3.4	遗传算法的基本流程	64
3.5	遗传算法的形式化描述	65
3.6	遗传算法的自然计算框架模型	69
3.7	小结	71

第4章 分布估计算法

4.1	分布估计算法概述	72
4.1.1	分布估计算法起源	72
4.1.2	分布估计算法的基本思想	73
4.2	分布估计算法的基本流程	73

4.3	分布估计算法的研究进展	75
4.3.1	离散的分布估计算法	76
4.3.2	连续的分布估计算法	79
4.3.3	分布估计算法的理论研究	80
4.3.4	分布估计算法的研究热点	81
4.4	分布估计算法的形式化描述	83
4.5	分布估计算法的自然计算框架模型	86
4.6	小结	88

第5章 神经网络计算

5.1	人工神经网络概述	89
5.1.1	人工神经元模型	89
5.1.2	人工神经网络模型	91
5.1.3	神经网络学习(训练)方法	92
5.1.4	人工神经网络的特点	92
5.2	人工神经网络的总体形式化描述	93
5.3	Hopfield 神经网络的自然计算框架描述	96
5.3.1	Hopfield 神经网络	96
5.3.2	Hopfield 神经网络的形式化描述	97
5.3.3	Hopfield 神经网络的自然计算框架模型	99
5.4	RBF 神经网络的自然计算框架描述	106
5.4.1	径向基函数(RBF)神经网络	106
5.4.2	RBF 神经网络的形式化描述	110
5.4.3	RBF 神经网络的自然计算框架模型	113
5.5	小结	117

第6章 群体智能——蚁群算法

6.1	蚁群算法概述	119
6.1.1	蚁群算法的起源	119
6.1.2	蚁群个体的运动规则	119
6.1.3	实例说明及应用状况	120
6.2	蚁群算法的研究进展	122
6.2.1	蚁群算法的改进	122
6.2.2	蚁群算法的收敛性研究	123
6.2.3	蚁群算法的仿真和实现	126

6.2.4 蚁群算法的应用	126
6.3 蚁群算法描述	127
6.3.1 用于求解 TSP 问题的蚁群算法定义	127
6.3.2 蚁群算法的形式化描述	130
6.4 蚁群算法的自然计算框架模型	133
6.5 小结	136

第 7 章 群体智能——微粒群算法

7.1 微粒群算法概述	137
7.2 微粒群算法描述	138
7.2.1 微粒群算法的基本原理	138
7.2.2 微粒群算法的数学描述	139
7.2.3 微粒群算法流程	140
7.3 微粒群算法研究进展	140
7.3.1 微粒群算法的改进研究	140
7.3.2 微粒群算法的应用	141
7.3.3 微粒群算法的收敛性研究	142
7.3.4 微粒群算法的参数效能分析	149
7.4 微粒群算法的形式化描述	150
7.5 微粒群算法的自然计算框架模型	153
7.6 小结	155

第 8 章 免疫计算

8.1 人工免疫系统概述	156
8.1.1 人工免疫系统	156
8.1.2 人工免疫系统的研究概况	157
8.1.3 人工免疫系统的应用	159
8.2 人工免疫算法	160
8.2.1 概述	160
8.2.2 典型的人工免疫算法	160
8.2.3 人工免疫算法的收敛性分析	162
8.2.4 人工免疫算法的工程应用	163
8.3 标准人工免疫算法描述	166
8.4 人工免疫算法的形式化描述	169
8.5 人工免疫算法的自然计算框架模型	172

8.6 小结	175
--------------	-----

第 9 章 人工内分泌系统

9.1 人工内分泌系统概述	176
9.1.1 内分泌系统	176
9.1.2 人工内分泌系统研究现状	177
9.2 人工内分泌系统描述	180
9.2.1 人工内分泌网络模型定义	180
9.2.2 人工内分泌网络的动力学描述	183
9.2.3 网络模型的自适应调节	184
9.3 基于人工内分泌网络模型的行为控制算法	184
9.4 人工内分泌网络的形式化描述	185
9.5 人工内分泌系统的自然计算框架模型	188
9.6 小结	190

后记	192
----------	-----

参考文献	194
------------	-----

第 1 章

绪 论

1.1 从仿生学人工智能到自然计算

自然(nature)来自拉丁文 *natura*, 意即“天地万物之道”(the course of things, natural character)。 *natura* 是希腊文 *physis* 的拉丁文翻译, 原意为植物、动物及其他世界面貌自身发展出来的内在特色, 水、空气、山脉、河流、微生物、植物、动物、地球、宇宙等, 都属于大自然的范畴。广义的自然界指包括人类社会在内的整个客观物质世界。

大自然鬼斧神工、美轮美奂, 处处以神奇彰显其无穷魅力! 巨大的峡谷、雄伟的山脉、无际的沙漠、浩瀚的洋流; 芸芸众生、星罗棋布、四季变迁、昼夜更替; 复杂精美的蜂巢、有序高效的蚁群、和谐优美的雁队、机智灵活的鱼群; 竞争协作、优胜劣汰、继承创造、奔流不息!

特别是在一些动物社会里, 群体现象十分普遍, 如图 1.1 所示。个体微不足道, 群体却充满智慧; 没有领导, 没有组织者, 所有的分工却秩序井然。不论是天空中的鸟群, 还是海洋中的鱼群, 陆地上的动物, 它们的群体协调能力都令人瞠目结舌。一些鱼类或陆生动物经常要成群

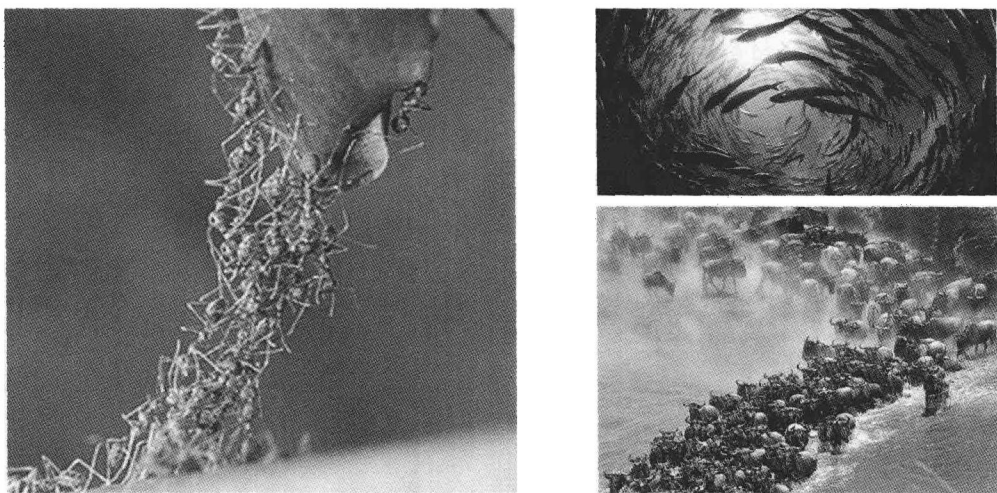


图 1.1 自然界群体现象

结队地迁徙,沿途会遭到捕食者的攻击,这对这些动物而言,能否协调行动关系着生死存亡。北美驯鹿长途跋涉迁徙时,看起来很像一片云影掠过田野,或者像一堆多米诺骨牌顷刻倒塌。

很多专门地和有组织地研究自然的科学家亦都有自然是美的信念。法国数学家庞加莱(1854—1912)指出:“科学家研究自然是因为自然使他高兴。如果自然不美的话,就不值得去认识,而如果自然不值得去认识,生命就不值得去认识。显然我在此说的不是冲击感官的美,即质素与外表的美;我并不是低估以上的美,一点也不,但是那些美与科学毫无关系;我的意思是这种来自各个部分的和谐排列,以及一种纯粹的智慧能够领会的深刻的美”。

大自然经过亿万年物竞天择、优胜劣汰的演化,形成了复杂多样的生命现象,其间蕴含着丰富的信息处理机制,自然智能现象(机制)给人类无尽的智慧启迪。人类对自然智能最初的学习与利用应该是仿生学。人类仿生由来已久,鱼儿在水中自由来去,人们就模仿鱼类的形体造船,以木桨仿鳍。相传早在大禹时期,我国古代劳动人民观察鱼在水中用尾巴的摇摆而游动、转弯,就在船尾上架置木桨,通过反复观察、模仿和实践,逐渐改成橹和舵,增加了船的动力,掌握了使船转弯的手段,即使在波涛滚滚的江河中,人们也能让船只航行自如。鸟儿展翅可在空中自由飞翔,据《韩非子》记载,鲁班用竹木作鸟“成而飞之,三日不下”;然而人们更希望仿制鸟儿的双翅使自己也能飞翔在空中。早在400多年前,意大利人利奥那多·达·芬奇和他的助手对鸟类进行仔细的解剖,研究鸟的身体结构并认真观察鸟类的飞行,设计和制造了一架扑翼机,这是世界上第一架人造飞行器。以上这些模仿生物构造和功能的发明与尝试,可以认为是人类仿生学的先驱,也是仿生学的萌芽。

仿生学(bionics)是指模仿生物建造技术装置的科学,它是在20世纪中期才出现的一门新的边缘科学,是连接生物与技术的桥梁。仿生学研究生物体的结构、功能和工作原理,并将这些原理移植于工程技术之中,发明性能优越的仪器、装置和机器,创造新技术。仿生学的问世开辟了独特的技术发展道路——向生物界索取蓝图,大大开阔了人们的眼界,显示了极强的生命力。

系统生物工程(systems bio-engineering)将仿生学与遗传学进行整合,是一种发展遗传工程的仿生学。人工基因重组、转基因技术是自然重组、基因转移的模仿,天然药物分子、生物高分子的人工合成是分子水平的仿生,人工神经元、神经网络、细胞自动机是细胞系统水平的仿生。从单基因遗传学、单基因转移发展到多基因系统调控研究的系统遗传学(system genetics)、多基因转基因的合成生物学(synthetic biology),以及纳米生物技术(nano-biotechnology)、生物计算(bio-computation)、DNA计算机技术的系统生物工程,仿生学已经全面发展到一个从分子、细胞到器官的人工生物系统(artificial biosystem)开发的时代。

数学、工程控制、心理学、医学和神经生理学等学科的发展,揭示了机器、生物界和人类社会共同的信息传递与运动的控制规律,用统一的科学规律把机器系统、生物界和人类社会联系在一起。在计算机科学、仿生学和其他相关技术科学的共同推动下,“人工智能”(Artificial Intelligence, AI)于20世纪50年代产生并成为独立学科和研究领域。1956年,在美国达特茅斯(Dartmouth)大学举办的夏季论坛中,“人工智能大师”麦卡锡(J. McCarthy)及一批科学家提出了“人工智能”这一术语,开始了具有真正意义的人工智能研究。

人工智能是指给定问题、约束、目标和知识库,系统通过学习(获取信息、完善知识、创建策略)解决问题的能力。人工智能以模拟自然计算为基础,利用人工机器模拟人的智能。有如下一些权威的人工智能定义:人工智能是用计算模型研究智力行为(Charniak 和 McDermott,

1985);人工智能研究那些使理解、推理和行为成为可能的计算(Winston, 1992);人工智能是一门通过计算过程力图理解和模仿智能行为的学科(Schalkoff, 1990)。

人工智能(AI)的诞生,形成了计算机科学的新领域,开拓了计算机研究与发展的一些新思维、新方法,形成了符号主义(symbolicism)、联结主义(connectionism)和行为主义(actionism)三大流派。其致力于专家系统、自然语言处理、机器学习、逻辑推理与自动定理证明、机器人、模式识别、博弈、计算机视觉、智能控制和人工生命等领域,取得了丰硕的成果,推动了科技发展,并影响着人类科学、教育、工业和生活。从进化论的观点看,人工智能的产生是生物进化与机器进化的统一。

然而,传统人工智能致力于以语言或符号规则的形式来表达和模拟人类的智能行为。自1956年在达特茅斯(Dartmouth)会议上提出“人工智能”这个概念以来,在其后的大部分时间里,人工智能主要是在符号主义,特别是在“物理符号系统”假设的背景下,通过对计算机的编程来实现的。1976年,纽厄尔(A. Newel)和西蒙(H. A. Simon)在《计算机协会通信》杂志上发表著名论文《作为经验探索的计算机科学:符号和搜索》,从符号语义的观点出发,对智能的本质进行了深入分析。他们一致认为,计算机之所以能表现智能的特征,是因为它具有存储和处理符号的能力,“我们衡量一个系统的智能水平,是看它在面临任务环境所设置的种种变动、困难和复杂性时,达到规定目的的能力”。智能水平取决于系统处理符号的能力。

在某些很窄的问题领域,不可否认,如果存在明显的知识,“物理符号系统”假设将具有重要的意义,如专家系统,可谓成功的传统人工智能成果的典范。但是,“物理符号系统”假设的实现本身依赖于十分苛刻的条件,即如果把计算机看成是符号系统的物理实现,那么,就必须要把被求解的问题形式化,也就是把对象用统一的抽象符号和固定规则精确地表示出来。对“物理符号系统”假设的依赖,使传统人工智能在20世纪80年代陷入了困境。

进入20世纪90年代,以不确定性、非线性、时间不可逆性为内涵,以复杂的问题为对象的科学新范式得到学术界的普遍认同。1994年,关于神经网络、演化程序设计、模糊系统的三个国际学术会议在美国佛罗里达州奥兰多市联合举行了“首届计算智能世界大会”,进行了题为“计算智能:模仿生命(computational intelligence: imitating the life)”的主题讨论会,取得了关于计算智能(computational intelligence)的共识。继传统人工智能之后,计算智能犹如异军突起,吸引着众多研究开发者投身于这一新领域的开拓。其中,自然计算(nature-inspired computation)以其独特的魅力备受瞩目。

研究自然现象尤其是生命体的功能、特点和作用机理,建立相应的计算模型,服务于人类社会的工程应用,是自然计算的宗旨(师法与自然,作用于自然)。自然计算的研究有利于揭示生命现象,增进人们对自然界的认识。与此同时,来源于自然界的计算模型也能很好地服务于人类的生产实践活动,在优化、控制、网络安全、创造性设计等领域具有很好的用途,对推动社会发展有着积极的意义。

Leiden自然计算研究中心的研究者们认为,自然计算是一种表示由自然启发的计算的一般性术语,而自然计算的研究就包括从理论上和经验上对由自然启发的计算的理解。自然计算的特征就是比喻性地使用自然系统潜在的概念、原理和机制。因此,进化算法使用生物学中变异、基因重组和自然选择的概念;而神经网络由大脑和神经系统中相互高度连接的神经结构启发而来;分子计算使用DNA分子和酶来设计算法并实现生物硬件,等等。自然计算是信息科学中最令人兴奋的分支之一,它将成为21世纪的一个重要研究领域。

1.2 自然计算

一般而言,自然计算(Nature-inspired Computation, NIC)是指以自然界(包括生命、生物及生态系统、物理、化学、经济以及社会文化系统等),特别是生物体的功能、特点和作用机理为基础,研究其中所蕴含的丰富的信息处理机制,抽取相应的计算模型,设计相应的算法,并在各相关领域加以应用。当以计算过程的角度分析复杂自然现象时,可使人们对于自然界及计算的本质有更深刻的理解。从自然界得到启发而拟定的计算方法是对隐含在自然界中的概念、原理以及机制的类比应用。

计算是自然的一种固有机制,是智能的基础。深入探究计算问题,可发现计算模式早已从科学计算的公式变换模式拓展到符号计算,以及生物机制的模拟,甚至自然发展规律的模拟。自然计算奇妙的研究思路和广阔的应用领域吸引了大量的研究人员不断探索,不断创新,是目前国际上非常热门的研究领域。自然计算涉及面非常广,几乎可以涵盖目前智能科学研究的方方面面。从学科发展的角度来看,自然计算的研究是各类自然科学(特别是生命科学)和计算机科学相交叉而产生的研究领域,它的发展完全顺应于当前多交叉学科不断产生和发展的潮流。在近年来的发展中,其内涵与外延不断扩展,国内外学术论文与专著层出不穷,实际应用也愈加广泛。

自然计算内涵丰富,涉及技术多样(涵盖多个学科及近百种算法与计算框架),并且不断有新的算法和计算机制涌现。目前,自然计算模式的研究主要包括:进化计算、神经网络计算、群体智能(蚁群算法、微粒群算法、蜂群算法等)、生物启发式计算、量子计算、光子计算、自组织迁移算法、差分进化、分布估计算法、生态计算、分子计算、DNA 计算、元胞自动机、免疫计算(人工免疫系统、克隆选择等)、模拟退火算法、化学计算、人工内分泌系统、文化算法、社会认知算法、Memetic 计算、混沌优化、情感计算及其他相关复杂自适应系统等,这些领域均以自然界中有益的信息处理机制为研究对象,具有模仿自然界的特点,并且通常具有自学习、自组织和自适应特征,能够为传统算法难以解决的各类复杂问题给出合理的解决方向,具有很好的应用前景。

从自然计算要素角度看,每种自然计算方法都要对应一种实际的启发源,无论是自然的还是社会的,要将启发源中所包含的内在的特殊规律,如生物进化规律、离子进出细胞膜的规律等,利用数学或逻辑符号建模描述成一种特殊计算过程,如进化计算、膜计算等。

表 1.1 所列为自然计算启发源与要素。

表 1.1 自然计算启发源与要素

启发源属性		自然计算模式	对应的自然系统	要素
物质 层次	物理	模拟退火算法	退火	原子
		量子计算	原子	量子
		光子计算	光	光子
		混沌优化	混沌系统(物理现象)	物质
		云计算	大气	云
	化学	化学(反应)计算	化学反应过程	分子
		分子计算	分子体系	分子

续 表

启发源属性		自然计算模式	对应的自然系统	要 素
生命 层次	生命 系统	进化计算	遗传系统	基因积木块(染色体)
		差分进化	生物进化系统	种群个体
		神经计算	神经网络	神经元
		免疫计算	免疫系统	抗体
		内分泌计算	内分泌系统	分子
		元胞自动机	元胞动态系统	细胞
		膜计算	细胞膜	分子
		DNA 计算	DNA 双螺旋	分子
		蛋白质计算	蛋白质	分子
		进化计算	遗传系统	基因积木块(染色体)
		差分进化	生物进化系统	种群个体
	生物(群)	蚁群算法	蚁群	蚂蚁
		微粒群算法	鸟群	鸟
		蜂群算法	蜂群	蜜蜂
		鱼群算法	鱼群	鱼
		细菌觅食算法	菌群	细菌
		群搜索优化	生物群	鸟、鱼、狮子
		细菌(群)趋药性算法	细菌(群)	细菌
		搜索者优化	人群	人
	生态 系统	生物地理学优化	物种、种群	生物
		自组织迁移算法	种群	生物
		人口迁移算法	人群	人口
文化 层次	社会、 文化、 语言、 情感等	形式语言	自然语言	字符
		模糊计算	推理	语言(名词)
		计算动词理论	推理	语言(动词)
		文化算法	社会、文化	文化符号、知识
		Memetic 计算	社会、文化	文化基因
		多主体系统	社会相互作用	主体
		社会认知算法	社会	认知
		情感计算	社会、文化、情感	人类情感

自然计算的应用涉及领域很广,主要包括复杂优化问题求解、调度优化控制与故障诊断、

智能控制与机器人控制、智能交通、智能建筑、计算机集成制造、智能电网(电力系统优化)、数据挖掘、模式识别、网络通信与信息安全、工业设计优化、社会经济、金融与管理、生态环境、生物医学医药、新能源与新材料、航空航天与军事等领域。可以预见,未来的网络将在环境感知的基础上,通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合和实施交互,即一种信息物理系统(Cyber-physical System, CPS);越来越复杂的网络交互行为逐渐表现出自然界生物网络特性,这必将为自然计算提供展示其无穷魅力的舞台和更为广阔的发展空间。

自然计算海纳百川、集众之智,正开辟智能科学最广阔的天地,最精彩的篇章,最激动人心的前沿!

1.3 自然计算的主要研究分支

自然计算其本质是借鉴自然界的功能与作用机理抽象出的计算模型,其研究必然涉及现代自然科学的方方面面,相关领域非常广泛。正是由于自然计算模式的多样性,其外延和内涵互相交织,相互包含,研究范畴常常被混淆,难以对其研究范畴进行准确而细致的划分,例如,作为自然计算的主要研究领域之一,进化计算研究内容丰富,形成了系统的研究体系和方法,通常被看作是一个独立的分支,但由于遗传算法以染色体构成的种群为基础,又可以划分为群体智能的一个分支;神经网络计算由于其鲜明的生物学特点,常常被认为是生物启发计算的重要代表,但究其内部作用机理,神经网络由可以作为自组织理论研究的一部分处理,而且由神经元构成的神经网络还具有群体智能信息处理的特征,也可以归为群体智能范畴。究其本质发现,群体智能具有普适性,笔者已在专著《群体智能的多样性研究与典型实现》中提出“广义群体智能”的概念和范畴。本书对自然计算的描述也将沿用广义群体智能表达的理念。

为了明确学科内涵,尽可能以各分支研究领域最显著的特点为依据,将自然计算划分为五个主要研究分支领域,它们相互交叉融合,如图 1.2 所示。

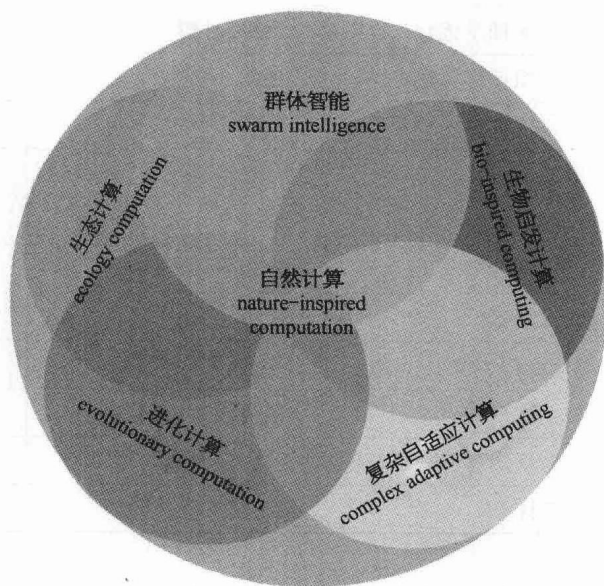


图 1.2 自然计算内涵