

统计与数据科学丛书 1

STATISTICS AND DATA SCIENCE SERIES 1

智能计算中的算法、 原理和应用

沈世镒 著

Algorithm, Principle and
Application in Intelligent Computing



科学出版社

统计与数据科学丛书 1

智能计算中的算法、原理和应用

沈世镒 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

智能的概念和内容很多,其核心思想是模拟人或其他生物的神经系统,实现各种运算和操作过程,尤其是人的智能操作。

本书由四部分组成,第一部分是概论,讨论智能计算的类型、特征、发展过程和应用问题,并介绍和其他学科的关系问题。这些学科主要是生命科学、信息科学等。第二部分是算法篇,介绍智能计算中多种不同类型的算法,详细介绍它们的计算步骤、特征、原理等有关问题,重点是讨论它们的定位问题。第三部分讨论智能的智能化问题,即这些智能计算算法在计算机和神经网络系统中的实现问题。第四部分是附录,对本书常用的数学公式、符号、名称及所涉及的一些(如数学)学科的基础知识作简单介绍和说明。

本书可作为数学、统计、计算机专业的本科生、研究生的教材或教学参考书,也可为从事智能计算的有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能计算中的算法、原理和应用/沈世镒著. —北京:科学出版社,2020.4
(统计与数据科学丛书)

ISBN 978-7-03-063255-5

I. ①智… II. ①沈… III. ①人工智能-算法 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 250788 号

责任编辑:李欣 李香叶/责任校对:彭珍珍

责任印制:张伟/封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年4月第一版 开本:720×1000 B5

2020年4月第一次印刷 印张:29

字数:580 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



沈世镒，1956年进入南开大学学习，1961年考取南开大学数学系研究生（导师胡国定）。1977年由山西调入南开大学数学系任教。1986年国务院学位委员会聘任为南开大学博士生导师。1997年，任南开大学数学科学学院院长。1997年，任天津市数学会第八届理事会理事长。曾任康奈尔大学访问学者。

主要研究方向：代数编码；信息的度量及其应用；组合密码学；神经网络系统理论及其应用；近代密码学。

主要研究成果及获奖：出版著作12部；发表论文50多篇，其中SCI收录12篇。1993年，获“天津市自然科学技术领域中青年授衔专家”称号，天津市优秀教师。四次获天津市、教育部科技进步奖。

“统计与数据科学丛书”编委会

主 编：朱力行

副主编：郭建华 王兆军 王启华

编 委：（以姓氏拼音为序）

艾明要 林华珍 石 磊 宋学坤

唐年胜 王汉生 薛留根 杨立坚

张志华 朱宏图 朱利平 朱仲义

邹国华

“统计与数据科学丛书”序

统计学是一门集收集、处理、分析与解释量化的数据的科学。统计学也包含了一些实验科学的因素，例如通过设计收集数据的实验方案获取有价值的信息，为提供优化的决策以及推断问题中的因果关系提供依据。

统计学主要起源对国家经济以及人口的描述，那时统计研究基本上是经济学的范畴。之后，因心理学、医学、人体测量学、遗传学和农业的需要逐渐发展壮大，20世纪上半叶是统计学发展的辉煌时代。世界各国学者在共同努力下，逐渐建立了统计学的框架，并将其发展成为一个成熟的学科。随着科学技术的进步，作为信息处理的重要手段，统计学已经从政府决策机构收集数据的管理工具发展成为各行各业必备的基础知识。

从20世纪60年代开始，计算机技术的发展给统计学注入了新的发展动力。特别是近二十年来，社会生产活动与科学技术的数字化进程不断加快，人们越来越多地希望能够从大量的数据中总结出一些经验规律，对各行各业的发展提供数据科学的方法论，统计学在其中扮演了越来越重要的角色。从20世纪80年代开始，科学家就阐明了统计学与数据科学的紧密关系。进入21世纪，把统计学扩展到数据计算的前沿领域已经成为当前重要的研究方向。针对这一发展趋势，进一步提高我国的统计学与数据处理的研究水平，应用与数据分析有关的技术和理论服务社会，加快青年人才的培养，是我们当今面临的重要和紧迫的任务。“统计与数据科学丛书”因此应运而生。

这套丛书旨在针对一些重要的统计学及其计算的相关领域与研究方向作较系统的介绍。既阐述该领域的基础知识，又反映其新发展，力求深入浅出，简明扼要，注重创新。丛书面向统计学、计算机科学、管理科学、经济金融等领域的高校师生、科研人员以及实际应用人员，也可以作为大学相关专业的高年级本科生、研究生的教材或参考书。

朱力行

2019年11月

前 言

在大数据、云计算、人工智能迅速发展和大量应用中,智能计算中的算法理论仍然是它的核心和关键内容。

智能计算的算法理论已形成一个庞大的学科理论体系,其中算法类型、方法和运算步骤等内容十分繁多。在它发展的 60 多年的时间内,经历了多次大起大落的过程。而且这些观点还在影响智能计算、人工智能的发展方向和应用范围。

国内外的许多学者^①都在对这些算法进行总结或小结,讨论它们的类型、意义和存在的问题。这也是本书的写作目的和内容。

本书的内容由以下四部分组成。

第一部分概论

内容由两部分组成,即

(1) 关于智能计算的类型、特征和发展历史的讨论。

(2) 介绍和讨论和其他学科的关系问题,主要是和生命科学、信息科学和其他学科的关系问题。

第二部分算法

这是智能计算中关于算法的理论体系。其中的内容包括算法的计算步骤、基本特征和类型,以及它们的应用和定位问题。

在这算法的理论体系中,分别讨论了几种重要算法,其中的重要类型有如 NNS 中的算法、机器学习中的算法等。其中每一类型的算法中又包含多种不同类型的算法。分别用五大特征、三个层次和二种类型来作说明和区别。

在对这些算法的讨论中,除了算法的一般模型和应用问题外,重点的问题是它们的定位问题。

所谓算法的定位问题,就是这些算法在整个人工智能、乃至其他学科在研究、发展和应用中的作用和意义的问题。

第三部分对智能的智能化问题的讨论

智能的概念是一个心理科学和神经科学中的术语,是知识和能力的总称。按霍华德·加德纳(Howard Gardner)的《多元智能理论》一书所述,人类的智能可以分成七个范畴:即语言(Verbal/Linguistic)、逻辑(Logical/Mathematical)、空间

^① 如智能计算的三位大师 Yann LeCun, Yoshua Bengio, Geoffrey Hinton 在 *Nature* 上发表了纪念人工智能发展 60 年的综述性论文: *Deep learning* (见 [1, 2] 文),又如国内的钟义信、张文修、徐宗本等教授在 [9-11, 13, 15, 16, 25-28, 37] 等文中的讨论,其中的一些内容我们在以后的章节中给出说明。

(Visual/Spatial)、肢体运作 (Bodily/Kinesthetic)、音乐 (Musical/Rhythmic)、人际 (Inter-personal/Social) 和内省 (Intra-personal/Introspective)。

而高级智能是指高级逻辑 (或高级思维) 的能力, 其中也包括对工具 (尤其是计算机的工具) 的创造和使用能力。

在讨论这种智能的智能化问题, 需要的数学工具有如张量、张量分析、集合论、逻辑学、NNS 理论。

智能化工程系统中, 除了要实现人的思维、语言、逻辑和神经网络系统运算的这种四位一体的等价关系外, 还要和大数据、云系统的结合。其中大数据和云系统是指各种不同类型的信息系统、网络移动通信和人工智能的结合。

第四部分附录

这部分包括一些基础知识和预备知识的介绍, 我们重点介绍和智能计算有关的数学和计算机科学的知识, 这些知识在正文中出现, 便不再详细叙述。

本书讨论的虽然是智能计算中的算法问题, 但涉及问题很多, 许多问题需要继续讨论。

首先是生命科学、神经科学中的问题, 这是智能计算形成的生物学背景和理论基础。但在生物、医学中, 对其中的结构、特征和功能性质的了解还很不够。尤其是许多定量化的性质了解更少。

在信息科学中, 有关 3C 和 4C 的理论, 它们和智能计算中的算法都有密切关系。尤其是在大数据、网络技术的发展中, 它们是如何结合的需进一步研究。

这种多学科相结合问题的研究, 还都是十分初步的, 需要继续讨论和解决。

由于作者的水平所限, 许多内容又涉及多学科的领域和专门性的课题, 因此不当之处在所难免。有的论述或结论可能与他人重复, 在此也未能全部进行说明, 对此务请原谅。也请有关作者或读者给以批评、指正, 并希望能作进一步的讨论。

感谢我的妻子郭锡娟, 对我的支持和照顾, 使本书能得以顺利完成。

本书由南开大学统计与数据科学学院、数学科学学院资助出版, 特此表示感谢。

沈世铨

2018 年 10 月于南开园

和本书有关的理论、模型和缩写记号

为了简单起见,在本书中出现的有关的理论、模型、名称和它们的简称、缩写记号说明如下.

1. 神经网络系统: Neural Network Systems (NNS).
2. 随机 NNS : Random NNS (RNNS).
3. 生物 NNS : Biological NNS (BNNS).
4. 人体 NNS : Human boby NNS (HBNNS).
5. 人工 NNS : Artificial NNS (ANNS).
6. 人工智能: Artificial Intelligence (AI).
7. 机器学习: Machine Learning (ML).

机器学习中的算法有统计智能计算法、生物智能计算 (如遗传算法、蚁群算法、细胞 NNS 等).

8. Hopfield NNS (HNNS).
9. 具有时空结构的 NNS : Times - Space NNS (T-SNNS).

在本书中,我们提出 T-SNNS 理论,并利用该理论来讨论智能的智能化中的问题.

10. Expectation - Maximization 算法 (EM 算法) .

11. Yin-Yang Bayes 算法 (YYB 算法) . 这是由香港中文大学徐雷教授提出的算法,是 EM 算法的推广. 对此算法,徐雷教授并有大量论文发表^[85,87].

12. 通信理论、控制论和计算机科学: Communication, Control, Computer (3C 理论).

13. 密码学(Cryptology)也是信息科学中的重要组成部分,在本书中我们把 3C 理论 + 密码学合称为 4C 理论.

14. 4Q 理论: 这就是
量子物理学中的量子力学(Quantum Mechanics).
量子化学(Quantum Chemistry).
量子统计学(quantum Statistics).
量子场论(Quantum Quantum Field Theory).
它们合称为量子 4 论 (4Q 理论).

15. 4C 理论的量子化(Quantum Theory) 形成量子 4C 理论 (4QC 理论), 或新 4Q 理论 (N4Q 理论).

更多的缩写符号在本书的附录 (表 A.1.2) 中还有说明.

目 录

“统计与数据科学丛书”序

前言

第一部分 概 论

第 1 章 智能计算概述	3
1.1 智能计算的总体情况	3
1.1.1 智能计算的两大类型、三个层次和五个特征	3
1.1.2 有关智能计算算法的类型表	4
1.2 智能计算的发展历史	7
1.2.1 智能计算的几个发展阶段	7
1.2.2 大数据、云计算智能计算阶段	10
1.3 关于智能计算算法的分析和定位问题	11
1.3.1 什么是智能计算算法的定位问题	12
1.3.2 关于感知器系列算法的分析和定位	12
1.3.3 对 HNNS 系列模型和理论的定位	15
1.4 由 NNS 的定位对各学科产生的影响	16
1.4.1 对生命科学与神经科学的影响	16
1.4.2 逻辑学、计算机科学的意义和影响	17
1.4.3 对第四次科技和产业革命的预测	19
第 2 章 智能计算和其他学科的关系	20
2.1 和生命科学、神经科学的关系	20
2.1.1 生物神经系统的结构特征	20
2.1.2 生物神经系统中的数字化表达	23
2.1.3 数字化的表示和意义的分析	26
2.1.4 关于 NNS 的综合分析	27
2.2 和 3C、4C 理论的关系	28
2.2.1 3C 理论概述	29
2.2.2 和计算机科学的关系问题	31
2.3 和信息论、控制论与其他学科的关系	33
2.3.1 信息论的基本内容	34

4.3.1	布尔函数在感知器模型下的表达	92
4.3.2	几种特殊布尔函数在感知器模型下的表达	94
4.3.3	关于布尔集合线性可分性的讨论	96
第 5 章	支持向量机	100
5.1	支持向量机的模型和学习目标	100
5.1.1	支持向量机的目标分类	100
5.1.2	支持向量机的学习目标和算法	101
5.1.3	支持向量机的求解问题	102
5.2	支持向量机的求解问题	103
5.2.1	感知器的解	104
5.3	支持向量机的智能计算算法	107
5.3.1	关于集合 $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{A,B}$ 的拓扑空间结构问题	107
5.3.2	关于集合 $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{A,B}$ 的构造	107
5.3.3	计算算法中的等价关系	109
5.3.4	支持向量机的计算算法	110
第 6 章	多层次、多输出感知器及其深度学习算法	112
6.1	多输出感知器	112
6.1.1	二输出的感知器模型	112
6.1.2	二输出、四目标感知器的学习算法	114
6.2	一般多输出感知器系统	115
6.2.1	多输出感知器的模型构造	115
6.2.2	多输出感知器的学习、分类问题	117
6.2.3	关于多层次、多输出感知器的学习算法	119
6.3	多输出模糊感知器理论和图像识别问题	120
6.3.1	图像和图像分类、识别系统	121
6.3.2	关于学习算法的说明	122
6.3.3	关于学习、训练样本和检测样本的讨论	123
6.3.4	布尔函数在多层次、多输出感知器模型运算下的实现问题	125
第 7 章	零知识条件下的优化和分类算法	126
7.1	关于零知识问题的讨论	126
7.1.1	有关零知识和信息特征的基本概念	126
7.1.2	信号中有的信息特征	127
7.1.3	信号的其他辅助特征	129
7.1.4	信号集合的聚类问题	130
7.2	聚类分析中的计算算法	131

7.3	对聚类分析中有关问题的讨论	133
7.3.1	图像之间的距离选择	134
7.3.2	聚类分析在感知器模型下的讨论	135
第 8 章	布尔函数和多层感知器的基本关系定理	137
8.1	布尔函数在多层感知器模型中的表达	137
8.1.1	多层感知器的数学模型	137
8.1.2	对基本方程组的讨论	139
8.2	布尔函数在多层感知器模型中表达的基本定理	140
8.2.1	关于线性不可分集合的信息处理	140
8.2.2	布尔函数和多层感知器关系的一个基本定理	143
8.3	多层感知器的学习、训练算法	145
8.3.1	布尔函数和多层次、多输出感知器	145
8.3.2	布尔函数或布尔集合的性质	146
8.3.3	一般布尔函数的多层次、多输出感知器表达算法	147
8.3.4	关于算法步骤的改进和讨论	149
第 9 章	Hopfield NNS	151
9.1	对 HNNS 的介绍和讨论	151
9.1.1	有关 HNNS 的模型和记号	151
9.1.2	HNNS 的能量函数	154
9.1.3	关于 HNNS 理论的讨论	156
9.2	玻尔兹曼机与它的学习理论	158
9.2.1	玻尔兹曼机的运动模型	158
9.2.2	B-机的学习理论	161
9.2.3	对 B-机的讨论和分析	163
9.3	正向和反向的 HNNS	164
第 10 章	遗传算法和 DNA 计算	168
10.1	概述	168
10.1.1	发展历史、基因结构和基因操作	168
10.1.2	点线图和 Hamilton 回路问题	171
10.1.3	有关 HPP 问题中的 DNA 操作问题	175
10.2	有关 DNA 操作的讨论	176
10.2.1	基因的突变和比对问题	176
10.3	广义纠错码理论及其应用	179
10.3.1	广义纠错码的定义及其构造	179
10.3.2	广义纠错码在 DNA 计算中的应用	181

10.4 遗传算法	182
10.4.1 遗传算法中的基本结构和基本原理	182
10.4.2 基因操作中的运算符	184
10.4.3 基因的选择性原理和随机系统	185
10.5 遗传算法中的优化问题	188
10.5.1 优化问题的表述	188
10.5.2 遗传算法中的基本思路和技术算法步骤	189
第 11 章 计算数学和统计计算中的有关算法和理论	191
11.1 EM 算法及其理论分析	191
11.1.1 统计估计问题	191
11.1.2 EM 算法简介	192
11.1.3 EM 算法的实例计算	193
11.2 最优组合投资决策的统计计算	195
11.2.1 最优组合投资决策问题	195
11.2.2 最优组合投资决策的递推算法	197
11.2.3 YYB 算法	197
11.3 数值计算中的算法	198
11.3.1 线性方程组及其算法	199
11.3.2 线性方程组的迭代算法	202
11.3.3 有关矩阵、行列式的算法	204
11.3.4 矩阵的其他计算	208
11.4 数值分析中的有关理论和算法	209
11.4.1 误差和对误差的分析	209
11.4.2 插值和拟合	211
11.4.3 牛顿插值法	214
11.4.4 插值法中的样条理论	216
11.5 函数逼近和数据拟合	217
11.5.1 正交多项式	217
11.5.2 重要的正交多项式函数系	220
11.5.3 最优逼近理论	223
11.5.4 一些特殊的最优逼近问题	224
11.6 数值计算	225
11.6.1 非线性函数的数值计算	225
11.6.2 数值积分和微分中的计算算法	227
11.6.3 常微分方程的数值解	230

第三部分 智能的智能化问题

第 12 章 张量和张量分析	235
12.1 张量的类型和运算	235
12.1.1 张量的定义和记号	235
12.1.2 张量的运算	238
12.2 张量空间	243
12.2.1 张量空间的表述	243
12.2.2 张量内积空间	245
12.3 张量空间中一些特殊的张量	246
12.3.1 非负张量和正定张量	247
12.3.2 总能量、最大和最小值问题	248
第 13 章 集合论和逻辑学	251
13.1 布尔代数和布尔逻辑	251
13.1.1 布尔代数的定义和性质	251
13.1.2 布尔逻辑	252
13.1.3 逻辑运算和规则	253
13.1.4 布尔代数的补充定义和性质	254
13.1.5 布尔函数	255
13.1.6 逻辑代数	256
13.1.7 基本逻辑关系 (逻辑恒等式和基本逻辑规则)	257
第 14 章 神经网络系统的时空结构理论	259
14.1 T-SNNS 的结构模型	259
14.1.1 NNS 中的指标体系	259
14.1.2 T-SNNS 中的空间区域和功能指标	260
14.1.3 关于区域和功能的讨论	264
14.1.4 T-SNNS 中的能量函数	265
14.1.5 多重 T-SNNS	266
14.2 复合网络	268
14.2.1 复合图论	269
14.2.2 复合图的一些实例分析	270
14.2.3 复合图在 T-SNNS 中的表达	272
14.2.4 一般多层感知器的复合网络图	273
14.3 逻辑运算及其表示法	275
14.3.1 逻辑运算和它们的表示	275

14.3.2	不同表示法的对应关系和等价关系	276
第 15 章	智能化工程系统	278
15.1	命题和命题系统	278
15.1.1	命题和命题系统的产生与定义	278
15.1.2	命题的结构关系和命题系统的图表示	280
15.1.3	命题的赋值系统	281
15.1.4	知识、知识系统和认知系统	283
15.2	数的表达、分析和计算的基本定理	285
15.2.1	数的表达和分析	285
15.2.2	数在表达和分析中的基本定理	286
15.2.3	四则运算和它在逻辑学中的表达	286
15.2.4	四则运算在逻辑运算中的表达	288
15.2.5	除法运算	289
15.2.6	四则运算和数值计算的基本定理	291
15.3	NNS 计算构造中的基本定理	291
15.3.1	逻辑运算和 NNS 计算关系的小结	291

第四部分 附 录

附录 1	重要符号的说明	295
A.1	不同类型符号的说明	295
A.1.1	英文大、小写字母表示	295
A.1.2	希腊字母表示	296
A.1.3	字母与数字的联用表示	298
A.2	有关数学公式的表示	300
A.2.1	r.v. 的 p.d. 与特征数	300
A.2.2	一些数学公式与符号	301
A.2.3	空间多面体与图的记号	302
A.3	常见的物理量记号、量纲与度量单位	303
A.3.1	物理量的量纲和单位	303
A.3.2	量子物理中的一些记号	305
附录 2	重要参数与度量指标	307
B.1	基本常数、参数与单位	307
B.1.1	基本常数与 SI 词头	307
B.1.2	能量单位与换算表	308