

- 国家自然科学基金项目
- 高校博士点基金项目
- 湖南省科技计划重点项目

免疫智能信息处理系统 及其应用

MIANYI ZHINENG XINXI CHULI
XITONG JIQI YINGYONG

徐雪松 ◎ 著



YZL10890146681

湖南大学出版社

- 国家自然科学基金项目
- 高校博士点基金项目
- 湖南省科技计划重点项目

免疫智能信息处理系统 及其应用

MIANYI ZHINENG XINXI CHULI
XITONG JIQI YINGYONG

徐雪松 著



YZLI0890145681

湖南大学出版社

内 容 简 介

本书从信息科学的角度出发,系统地介绍了基于人工免疫技术的智能信息处理的基本理念,各种处理技术和作者的最新研究成果。以各类免疫智能信息处理技术和算法为核心,以信息处理应用相关领域为主线,结合作者自身的研究和应用经验,为读者提供免疫智能信息处理领域相关算法、技术和问题解决过程的实践经验。

本书可以为信息工程、计算机科学、信息科学、人工智能和自动化等领域从事信息管理、信息处理研究的相关专业技术人员提供参考,也适合于信息管理、情报学、图书馆学、管理科学与工程、电子商务、计算机应用等专业的师生教学使用,又可供广大有关管理和科技工作者学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

免疫智能信息处理系统及其应用/徐雪松著.

—长沙:湖南大学出版社,2011.5

ISBN 978-7-81113-983-9

I. ①免… II. ①徐… III. ①免疫学—应用—人工智能—信息处理系统
IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 092787 号

免疫智能信息处理系统及其应用

Mianyi Zhineng Xinxi Chuli Xitong Jiqi Yingyong

编 者:徐雪松

责任编辑:韩 钦

责任校对:祝世英

出版发行:湖南大学出版社

责任印制:陈 燕

社 址:湖南·长沙·岳麓山邮 编:410082

电 话:0731-88822559(发行部),88821315(编辑室),88821006(出版部)

传 真:0731-88649312(发行部),88822264(总编室)

电子邮箱:presshang@hnu.cn

网 址: <http://www.hnupress.com>

印 装:长沙瑞和印务有限公司

开本:710×1000 16开

印张:13

字数:234千

版次:2011年11月第1版

印次:2011年11月第1次印刷

印数:1~1500册

书号:ISBN 978-7-81113-983-9/TP·68

定价:30.00元

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

前 言

当今社会正面临着一场信息革命,信息是 21 世纪最重要的商品,为了适应信息时代的信息处理要求,当前信息处理技术逐渐向智能化方向发展。从信息的载体到信息处理的各个环节,广泛地模拟人的智能来处理各种信息。人工智能科学与认知科学的结合,进一步促进了人类的自我了解和控制能力的发挥。因此研究具有认知机理的智能信息处理理论与方法,建立可实现的计算模型并发展应用,将会带来未来信息处理技术突破性的发展。

现阶段信息处理技术领域呈现两种发展趋势:一种是面向大规模、多介质的信息,使计算机系统具备处理更大范围信息的能力;另一种是与人工智能进一步结合,使计算机系统更智能化地处理信息。智能信息处理是计算机科学中的前沿交叉学科,是以应用为导向的综合性学科,其目标是处理海量和复杂信息,研究新的、先进的理论和技术。智能信息处理研究涵盖基础研究、应用基础研究、关键技术研究与应用研究等多个层次。它不仅有很高的理论研究价值,而且对于国家信息产业的发展乃至整个社会经济建设、发展都具有极为重要的意义。

智能信息处理就是模拟人或者自然界其他生物处理信息的行为,建立处理复杂系统的理论、算法和技术。它与人工智能、生命科学、自动控制、运筹学、计算机科学、信息论、应用数学、仿生学、非线性科学、脑科学、生物工程、认知心理学等有着密切的关系,是相关学科相互结合与渗透的产物。智能信息处理主要面对的是不确定性系统和不确定性现象信息处理问题,在复杂系统建模、系统分析、系统决策、系统控制、系统优化和系统设计等领域具有广阔的应用前景。它的研究内容十分广泛,是当今国内外信息工程、电子工程、自动化、计算机科学等领域研究的热门前沿课题之一。

免疫系统是生命系统的主系统之一,免疫系统通过从不同种类的抗体结构中构造自己-非己非线性自适应网络,在处理动态变化环境中起着重要的作用。生物免疫系统是一个高度进化的系统,它具有高度自适应、分布性、自组织等特性,蕴含着丰富的信息处理机理。免疫智能信息系统正是借鉴生物免疫系统信息处理机制而发展起来的智能信息处理技术。由于免疫智能系统具备模式识别、学习和记忆的能力,因此它成为一种科学及工程领域中信息处理

的工具,由此也开辟了计算智能研究的新领域。充分挖掘和借鉴其资源,不断完善并开发新的计算模型和方法,并展开其理论及应用研究,已成为智能信息处理领域的重要内容。

基于免疫机理发展的免疫信息处理系统提供了噪声忍耐、无监督学习、知识、学习、记忆等进化学习机理。它吸取了分类器、神经网络等的优点,并且具有免疫自适应能力及强壮的鲁棒性,因而提供了一种解决复杂问题的新选择。从工程上讲,它具有结合先验知识和免疫系统的适应能力;从信息科学讲,它具有强壮的鲁棒性和预处理能力。应当指出的是,基于免疫系统的信息处理机制具有的多样性及其遗传机理,不仅可以用于全局进化的探索,改善已有进化算法中对局部探索不是很有效的问题,而且在避免早熟及处理多准则和约束问题方面显示出良好的潜力,同时免疫信息处理与其他计算智能方法的集成可用于解决其他智能系统等难以解决的复杂问题。

因此,向读者提供免疫智能信息处理领域相关算法、技术和问题解决过程中的实践经验,是本书撰写的宗旨。以各类免疫智能信息处理技术和算法为核心,以信息处理应用相关领域为主线,结合作者自身的研究和应用经验,从信息科学的角度出发,系统地介绍了基于人工免疫技术的智能信息处理的基础理论、各种处理技术和笔者最新研究成果。全书共分9章,内容包括智能信息处理系统概述及免疫智能信息处理的发展;免疫智能信息处理系统的生物学原理;免疫智能信息处理系统模型、方法和数学基础;免疫智能信息处理方法及算法分析;免疫智能信息处理与优化应用,包括了数值优化、组合优化、目标优化、决策优化等应用;免疫智能信息处理与机器学习方法;免疫智能信息处理与系统优化控制等技术和方法;最后一部分探讨了免疫智能信息系统的发展方向和面临的问题。

本书的撰写得到了国家自然科学基金项目、高校博士点基金项目、湖南省科技计划项目等多方面的资助。作者在科研和本书的撰写工作中得到了湖南大学章兢教授的大力支持和帮助,在此谨致以最诚挚的感谢。同时感谢湖南大学王耀南教授、湖南商学院王四春教授的指导和帮助;感谢国家自然科学基金委信息科学部的大力支持;感谢王炼红、龚固、何昭晖、何敏等专家学者所付出的辛勤劳动;感谢作者家人的大力支持和理解。

由于智能信息处理技术是一门新兴交叉学科,很多理论方法与应用技术问题还有待进一步深入探索和发展,加上作者学识所限,写作时间又十分仓促,因而书中一定存在不足之处,敬请专家和读者批评指正。

徐雪松

2011年3月

目 次

第 1 章 智能信息处理系统概述	1
1.1 引 言	1
1.2 智能信息处理技术概况	2
1.3 智能信息处理方法	5
1.3.1 人工神经网络	5
1.3.2 遗传算法	10
1.4 免疫智能信息处理系统	14
1.4.1 免疫信息处理系统概念	14
1.4.2 免疫信息处理系统模型	18
1.4.3 免疫智能信息处理方法	21
第 2 章 免疫智能信息系统的生物学基础	24
2.1 免疫学基本概念及原理	24
2.1.1 免疫学基本概念	24
2.1.2 生物免疫系统的结构及组成	26
2.1.3 免疫系统功能及机制	29
2.2 免疫信息处理系统原理	34
2.2.1 免疫信息处理系统基本术语	35
2.2.2 免疫信息处理系统基本原理及机制	37
2.3 免疫信息处理的优化方法	39
第 3 章 免疫智能信息处理系统模型	42
3.1 免疫信息系统的数学模型	42
3.1.1 形态空间模型	42
3.1.2 人工免疫网络二进制模型	44
3.2 基于阴性选择和耐受的免疫系统模型	46

3.2.1	模型的定义	46
3.2.2	检测器的生成与训练	47
3.2.3	记忆机制	48
3.2.4	协同刺激	49
3.2.5	检测器生命周期	49
3.2.6	表示法	50
3.3	基于克隆选择原理的免疫系统模型与免疫网络模型	51
3.3.1	基于克隆选择原理的免疫系统模型	51
3.3.2	基于克隆选择原理的免疫网络模型	56
第4章	免疫智能优化方法及原理	60
4.1	适应性免疫应答计算模型	61
4.1.1	适应性免疫应答计算模型	61
4.1.2	整体优化问题及分类	65
4.2	免疫优化计算方法	66
4.2.1	免疫算子构建	66
4.2.2	算法描述	72
4.3	算法收敛性分析	73
4.3.1	马尔可夫链	73
4.3.2	免疫算法的马尔可夫链模型	75
4.3.3	免疫算法收敛性分析	75
4.3.4	免疫算法的随机泛函分析	78
4.4	算法计算收敛速度及复杂性分析	81
第5章	免疫智能信息处理与数值优化	85
5.1	最优化问题	85
5.2	免疫智能信息处理算法与函数优化	86
5.3	基于聚类竞争免疫克隆优化算法	88
5.3.1	抗体聚类与竞争克隆	88
5.3.2	抗体编码及亲和力定义	90
5.3.3	混合变异算子的构造	92
5.4	免疫算法的实现及分析	93
5.4.1	算法实现流程	93

5.4.2 算法分析	95
5.5 函数优化仿真实例	96
5.5.1 测试函数基本性质	96
5.5.2 全局寻优能力比较	96
5.5.3 多模态函数寻优效果	98
5.5.4 算法参数选择	102
第6章 免疫智能信息处理与组合优化	104
6.1 背包问题	104
6.1.1 带受体编辑的免疫克隆选择算法	105
6.1.2 算法描述	106
6.1.3 求解0—1背包问题	107
6.2 广义最小生成树问题	110
6.2.1 广义最小生成树问题的描述和数学模型	110
6.2.2 免疫智能算法在广义最小生成树中的应用	111
6.3 物流配送车辆路径优化问题	115
6.3.1 物流配送车辆路径优化问题的描述和数学模型	115
6.3.2 免疫智能算法在路径选择优化中的应用	116
6.4 组播路由优化问题	120
6.4.1 组播概念	120
6.4.2 QoS的定义	122
6.4.3 QoS组播路由问题的数学模型	124
6.5 免疫智能信息处理在组播路由中的应用	125
6.5.1 时延受限组播路由问题的数学描述	126
6.5.2 时延受限组播路由免疫智能算法	126
6.5.3 基于RECSA的整体优化组播路由应用	132
第7章 免疫智能信息处理与机器学习	137
7.1 智能信息处理与机器学习	137
7.2 免疫智能信息处理与机器学习	141
7.3 免疫知识约简方法及应用	142
7.3.1 属性约简的免疫优化	145
7.3.2 免疫算法执行过程及收敛性	149

7.4 免疫智能信息处理的分类方法	155
7.4.1 aiNet 模型	155
7.4.2 AIRS 分类器	156
7.4.3 AINMC 分类器	159
7.5 免疫智能信息处理在分类中的应用	160
7.5.1 免疫分类器在 DNA 序列中的应用	165
第 8 章 免疫智能信息系统与控制决策	169
8.1 概 述	169
8.2 模糊控制原理及其优化设计	171
8.2.1 模糊控制器设计方法分析	172
8.2.2 基于免疫算法的模糊控制器优化设计方法	173
8.3 免疫控制原理及优化设计	176
8.3.1 免疫控制及免疫反馈控制器	176
8.3.2 模糊免疫控制设计及优化	178
8.4 免疫智能控制在回转窑过程控制中的应用	182
8.4.1 综合集成智能控制系统组成	184
8.4.2 回转窑炉烧结温度控制实验	192
第 9 章 免疫智能信息处理系统发展展望	194
参考文献	198

第 1 章 智能信息处理系统概述

1.1 引言

为了适应信息时代的信息处理要求,当前信息处理技术逐渐向智能化方向发展,从信息的载体到信息处理的各个环节,广泛地模拟人的智能来处理各种信息。人工智能学科与认知科学的结合,进一步促进了人类的自我了解和控制能力的发挥。研究具有认知机理的智能信息处理理论与方法,探索认知的机制,建立可实现的计算模型并发展应用,有可能带来未来信息处理技术突破性的发展。

现阶段信息处理技术领域呈现两种发展趋势:一种是面向大规模、多介质的信息,使计算机系统具备处理更大范围信息的能力;另一种是与人工智能进一步结合,使计算机系统更智能化地处理信息。智能信息处理是计算机科学中的前沿交叉学科,是应用导向的综合性学科,其目标是处理海量和复杂信息,研究新的、先进的理论和技术。智能信息处理研究涵盖基础研究、应用基础研究、关键技术与应用研究等多个层次。它不仅有很高的理论研究价值,而且对于国家信息产业的发展乃至整个社会经济建设、发展都具有极为重要的意义。

开展智能信息处理的基础理论研究,其内容包括信息和知识处理的数学理论、复杂系统的算法设计和分析、并行处理理论与算法、量子计算和生物计算等新型计算模式、机器学习理论和算法、生物信息和神经信息处理等。以因特网应用为主要背景的特定领域智能信息处理,包括大规模文本处理、图像视频信息检索与处理、基于 Web 的知识挖掘、提炼和集成等。另外还有商务和金融活动中的智能信息处理,包括电子政务、电子商务、电子金融等,推动智能信息技术在国民经济各领域的应用,努力实现并提高信息处理技术的社会效益和经济效益。

包括人类自身在内的自然界生物一直是科学家和工程师关注的焦点,也

是科学研究的重要内容。人们已经从许多角度开创不同学科来研究生物体系,其中一个重要领域就是生物信息处理系统,许多研究者已经在工程领域应用生物系统的信息处理功能。除了大脑神经网络和基因遗传,生物信息处理系统还包括免疫系统和内分泌系统。免疫系统是一种高度进化的生物信息处理系统,能够识别和消除病原体,具有学习、记忆和模式识别能力。近几年来,越来越多的研究人员研究借鉴其信息处理机制来解决工程和科学问题。

今天,世界上各种科学技术互相交叉、渗透,许多研究课题已经不能单靠一个领域的理论和方法来解决,许多边缘学科正是多个领域交叉发展的结果,许多研究领域的理论和方法也越来越复杂,在信息及控制科学领域尤为突出。人们开始寻求新的方法和手段,人工智能的研究及迅猛发展就是一种有益的尝试。这些研究有助于人类更好地理解自然和宇宙。事实上,生命现象和生物的智能行为一直为人工智能研究者所关注,尤其是近 10 年人工智能的成就与生物有着密切关系,不论是从结构模拟的人工神经网络,还是从功能模拟的模糊逻辑系统,还是着眼于生物进化微观机理和宏观行为的进化算法,都有仿生的痕迹。也正是模仿生物智能行为,借鉴其智能机理,许多解决复杂问题的新方法不断涌现,丰富了人工智能的研究领域。

经过近几十年研究与实践,人工智能研究者开始认识到,要想仿效或逐步接近人类数百万年进化才达到的大脑高级智能行为,无论是传统智能,还是单独的模糊逻辑系统,或是人工神经网络都无法完成。计算智能不但是人工智能研究的新领域,也是其发展思路的新思考,更是方法论转变的新成果。随着模糊逻辑、神经网络、进化计算以及人工免疫系统等受进化论影响的新方法的不断完善,其仿生特点也日益突出。

1.2 智能信息处理技术概况

当今社会正面临着一场信息革命,信息是 21 世纪最重要的商品。在信息处理中,信息的获取、传输、存储、加工处理及其应用所采用的技术、理论、方法和系统都需要由计算机来完成。目前的电子计算机硬件虽有极强的算术和逻辑运算功能,但它的逻辑推理、判断、并行计算、联想记忆、自适应学习、模糊信息处理等能力仍有很大的局限性,要模拟人的信息处理能力还很困难。因此,人们需要研究一种新的“软计算”、“软处理”的理论方法和技术,来弥补电子计算机硬件系统的不足。多年来,人们一直在探索新一代的信息处理技术。自

20 世纪 90 年代以来,国际上掀起了一股强劲的研究模糊逻辑系统、神经网络、遗传算法、小波变换、粗集理论、数据挖掘、信息融合、混沌与分形理论和技术的热潮,推动了软计算、软处理技术的深入发展。

“人工智能”(Artificial Intelligence, AI)在 1956 年被正式提出前,其研究工作主要集中在探索智能及智能模拟的普适理论。但是经过近 50 年的发展,人工智能并未像人们所预料那样取得巨大的成功。许多研究者深感单从符合主义、连接主义及行为主义来进行研究有其局限性,甚至有些指导思想已被证明是错误的。许多学者认为,人工智能应该从生物学而不单是从物理学受到启示。在其他学科,尤其是生物技术的促进下,人工智能的研究随后进入了智能模拟的个性设计阶段。其主要特征是其研究不仅在方法上,而且在思想上呈现出多样性,发展了大量实用的方法,这一阶段是人工智能最具特色的发展阶段。

生物是自然智能的载体,因此生物学理所当然是人工智能研究灵感的重要来源。从信息处理的视角来看,生物体就是一部优秀的信息处理机,生命现象和生物智能行为引起了许多研究者的关注,不论是结构模拟的人工神经网络,或是功能模拟的模糊逻辑系统,还是着眼于生物进化宏观行为的遗传进化算法,都是模拟生物智能行为,借鉴了其智能机理。1994 年 6 月,IEEE 为促进多学科渗透与结合,把人工神经网络、模糊技术和进化计算三个年会合并举行,在美国奥兰多召开了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。此次会议是计算智能的第一次综合性大会,随后,计算智能成为众所关注的研究热点。

目前国际上提出的计算智能(Computational Intelligence, CI)就是以人工神经网络为主导,与模糊逻辑系统、进化计算以及信号与信息处理学科的综合集成。认为新一代的计算智能信息处理技术应是神经网络、模糊系统、进化计算、混沌动力学、分形理论、小波变换、人工生命等交叉学科的综合集成。

尽管对计算智能的定义、内容以及与其他智能学科分支的关系尚没有统一的想法,但计算智能的下列两个重要特征却是人们比较共同的认识:

一是计算智能与传统人工智能不同,主要依赖生产者提供的数字材料,而不是知识;主要借助数学计算方法的使用。这就是说,一方面,CI 的内容本身具有明显的数值计算信息处理特征;另一方面,CI 强调用“计算”的方法来研究和处理智能问题。需强调的是,CI 中计算的概念在内涵上已经拓宽和加深。一般地,在解空间进行搜索的过程都被称为计算。

二是计算智能这个概念的提出显然远不止具有科学研究分类学的意义,

其积极意义在于促进基于计算的或基于与符号物理相结合的各种智能理论、模型、方法的综合集成,以便产生思想更先进、功能更强大、能够解决更复杂问题的智能科学成果。

由此看来,当前计算智能发展的重要方向之一就是不断引进深入的数学理论和方法,以“计算”和“集成”作为学术指导思想,进行更高层次的综合集成研究。这种综合集成研究不仅不局限在模型及算法层次的综合集成的范畴,而且还进入了感知层次及认知层次的综合集成。

由于生物是自然智能的载体,因此生物物理学所当然是人工智能研究灵感的重要来源。从信息处理的角度来看,生物个体本身就是一台优秀的信息处理机,而其所具有的完美解决问题的能力让目前最好的计算机也相形见绌。

现在人们已经从许多角度开创不同的学科来研究生物体系。其中一个重要领域就是生物信息处理系统,许多研究人员已经在工程领域应用生物系统的信息处理功能。如后来出现的人工神经网络、模糊逻辑以及进化计算就是模拟生物个体的某些特征而发展起来的智能算法,由于这些算法具有高度并行性,并且具有自组织、自适应、自学习等智能特征,通过“拟物”与“仿生”使问题得到解决,它们为解决某些复杂问题提供了新的启示。因此借鉴生物学理论解决实际问题是一种非常有效的方法,目前已形成一个专门的分支——仿生学。

仿生智能信息处理是指以自然界,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,抽取出相应的计算模型,设计出相应的算法并应用于各个领域。仿生计算包含了进化计算、神经计算、生态计算、量子计算和复杂自适应系统等在内的众多以自然界机理为算法设计基础的研究领域,具有模仿自然界的特点,通常是一类具有自适应、自组织、自学习能力的算法,能够解决传统计算方法难以解决的各种复杂问题,在大规模复杂系统的最优化设计、优化控制、计算机网络安全、创造性设计等领域具有很好的用途。

从学科发展的角度来看,仿生智能信息处理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。目前其在经典智能算法的理论及应用基础上,已逐步发展出许多较有潜力的研究分支:DNA 计算、蚁群系统、遗传算法、人工免疫系统、神经网络计算、模糊计算等。这些研究结果表明智能算法已朝着多极化发展,生物智能的应用越来越广,研究学派越来越多,研究气氛越来越活跃。智能优化算法作为智能算法的重要研究内容,研究者们已开

发了较多的新智能工具,如免疫算法、蚁群算法、变邻域搜索、进化算法、混合优化算法等。这些算法的出现显示了模拟或借鉴生物智能,开发具有较高智能的信息处理系统并对其进行理论及应用研究具有重要的理论和现实意义。

目前智能信息处理技术的研究呈现出三大趋势:

一是对经典智能算法的改进和广泛应用,以及对其理论的深入、广泛研究;

二是开发新的智能信息处理工具,拓宽其应用领域,并对其寻求理论基础;

三是经典信息处理技术与新智能信息方法的结合建立混合智能信息处理方法。

至今新智能算法不断涌现,涉及的应用领域不断增多,如最优化、模式识别、智能控制、计算机安全、计算机网络、投资组合等。因此开发新智能工具处理工程问题,以及对其进行理论研究便成为当前智能算法研究的首要任务,也是智能算法研究的热点。

1.3 智能信息处理方法

目前的信息处理中的智能化计算方法,实际上是不以精确解为目标的快速搜索较好解的计算方法。是利用不精确性、不确定性的一个聚合体,它们结合起来比单独使用效果更好。用此方法得到的结果具有易处理性、鲁棒性及与现实相一致性,且这些结果常常好于只用传统的信息处理计算方法得到的结果。高精度对于实际应用有时是没有意义的,大部分情况下可用牺牲精度来换取速度,提高效率。智能信息处理不是单一方法,而是具有合作关系的多种方法的集成。这些方法主要包括模糊逻辑、神经网络、遗传算法和粗糙集理论等,它们是相互补充而不是相互竞争的。

以下简要介绍智能信息处理系统中常见的人工神经网络和遗传算法两种方法。

1.3.1 人工神经网络

神经网络学习方法对于逼近实数值、离散值或者向量值的目标函数提供了一种健壮性很强的方法,对于某些类型的问题,如学习解释复杂的现实世界

中的传感器数据,人工神经网络是目前最有效的学习方法。

神经网络的结构和性能是由神经元、网络结构和学习规则三方面共同决定的,因此在描述神经网络的时候就要涉及以下概念。

1. 人工神经元模型

人工神经元可以有多种模型,常用的人工神经元模型如图 1.1 所示。

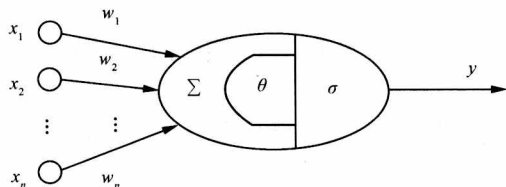


图 1.1 神经元模型

图 1.1 中, $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为神经元的输入信号。 w_i 为相应的连接权系数,它代表输入 x_i 的传递强度的比例。 Σ 表示输入信号加权求和。 θ 表示神经元阈值。 σ 表示神经元的激励函数。该模型的数学表达式为:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta \quad (1.1)$$

$$y = \sigma(s) \quad (1.2)$$

神经网络的激励函数是一个重要的概念,激励函数的不同,就会形成不同的网络,具有不同的性能。常用的激励函数有:

$$(1) \text{ 阈值函数: } \sigma(s) = \begin{cases} 0 & s < 0 \\ 1 & s \geq 0 \end{cases}$$

$$(2) \text{ 线性函数: } \sigma(s) = as + b$$

$$(3) \text{ 非线性函数: } \sigma(s) = 1/(1 + e^{-s})$$

2. 神经网络的典型结构

单个神经元的功能非常有限,只有通过神经元的互连,构成神经网络,才具有处理复杂非线性映射的能力。神经元之间采取不同的连接方式可得到不同的神经网络。神经网络主要有以下几种连接方式:

(1) 前向连接。网络中的神经元分层排列,每个神经元只与前一层神经元连接。最上一层为输出层,隐层可以是一层或多层,前向网络在神经网络中最为常见,应用广泛。

(2) 反馈连接。唯一与前向连接不同的是输出到输入之间有反馈回路。

(3) 层内互连前向网络。与前向网络不同的是同一层神经元之间有互连连接。

(4) 互连网络。互连网络有局部互连和全互连两种。任何两个神经元都有连接是全互连,有些神经元之间没有连接是局部互连。

3. 神经网络的学习方法

神经网络的学习方法也就是网络连接权的调整方法。不同的网络结构存在不同的学习方法,不同的学习方法具有不同的功能。学习方法是多种多样的,但最基本的学习规则有以下几种:

(1) Hebb 学习规则。它是最早被提出的一种学习规则,可以表述为,若两个神经元同时兴奋,则它们之间的连接加强。如果 v_i 和 v_j 表示神经元 i 和 j 的输出值, w_{ij} 表示两神经元之间的连接权值,则 Hebb 学习规则可以用公式 (1.3) 表示:

$$\Delta w_{ij} = \alpha v_i v_j \quad (1.3)$$

其中, α 表示学习速率, Δw_{ij} 是权值 w_{ij} 的变化量。Hebb 学习规则是最基本的学习规则,其他学习规则可以说都基于 Hebb 学习规则的思想,由 Hebb 学习规则衍生而来。

(2) δ 学习规则。这是一种有监督的学习规则,采用已知样本作为教师信号对网络进行学习,也称误差校正规则。设 (X^k, Y^k) 为输入、输出样本对。 $X^k = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$, $Y^k = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。把 X^k 作为输入,在网络连接权值的作用下,得到的实际输出为 $\bar{Y}^k = [\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_n]^T$, 则神经元 i 和 j 之间的权值 w_{ij} 的调整量为:

$$\Delta w_{ij} = \alpha \delta_j v_i \quad (1.4)$$

$$\delta_j = F(y_j - \bar{y}_j) \quad (1.5)$$

其中 α 为学习速率, $y_j - \bar{y}_j$ 为期望输出与实际输出之差。 v_i 为第 i 个神经元的输出。函数 $F(\cdot)$ 根据具体问题而定,可以是线性的,也可以是非线性的。

δ 学习规则实际上是一种梯度方法,在许多网络中得到了应用,比如 BP 算法。

(3) 相近学习规则。设 w_{ij} 为神经元 i 到 j 的连接权, v_i 为第 i 个神经元的输出,则权值调整量为: $\Delta w_{ij} = \alpha(v_i - w_{ij})$ 。当 $v_i = w_{ij}$ 时, $\Delta w_{ij} = 0$, 这种学习是使 w_{ij} 趋近于 v_i 值。

在传统计算机中所进行的计算都是建立在一种算法结构基础之上的,问题的求解都是将相应算法映射为传统计算机所能执行的机器指令序列来完

成。而神经网络的计算则是一种非编程的信息处理方式,在不确定的条件下,只要我们能准确地描述所要求的计算功能,并能给出体现该功能的大量例子,那么神经网络就可以通过这些例子来进行自我调节,直到达到所要求的计算能力;有时甚至在没有例子可寻时,神经网络也可以根据一些输入信号通过自组织来达到某种计算能力。这种非编程的自适应信息处理方式我们称之为神经计算。神经计算也是传统信息处理方式的一个有力补充。如果把神经网络看成由大量子系统组成的大系统,那么神经计算就是该系统状态的转换,其计算过程可以认为是状态的转换过程。神经计算主要有以下特点:

(1)大规模并行性、集团运算和容错能力。在大规模的神经网络系统中,有许多能同时进行运算的处理单元,信息处理是在大量处理单元中并行而又有层次的进行,运算速度快。另外神经网络系统并不是执行一串单独的指令,神经网络系统中的所有单元都是一起协同解决某一问题,这是一种集团运算能力,所以信息的处理能力是由整个神经网络系统所决定。在神经网络中,一个处理单元的失效并不能引起整个系统的失效,只不过是导致整个系统的性能降低。因此,神经网络有较好的容错能力。

(2)信息的分布式处理。与传统计算机不同,神经网络系统中信息的存储和处理是合二为一的。即信息的存储体现在神经元互连的分布上,信息在整个网络中作为一种连接的模式被存储起来,并以大规模并行分布式方式处理。

(3)学习和自组织能力。神经网络可以自动调节其结构来适应学习新的模式,这种变结构体系表现出了很强的对环境的适应性,以及对事物的学习能力。学习和适应体现在状态变化过程中神经网络系统内部结构和连接方式的改变,如 Hebb 学习规则,假设了两个处理单元若同时兴奋则引起他们之间连接强度的变化,这种变化最终会导致在外界输入作用下网络系统内部有的信息通路增强,有的信息通路变弱甚至阻断,客观上造成网络系统内部结构和状态的变化。神经网络的学习能力,使它在一定的程度中类似于大脑的学习功能,这种能力使之有广泛应用的可能性。

(4)多层神经网络系统有强大的解算能力和处理实际问题的能力。它可以处理一些环境信息十分复杂、知识背景不清楚、推理规则不明确的问题。在实际问题中,所提供的模式丰富多变,甚至相互矛盾,而制定决策又无法可循,对这些问题,神经网络系统通过学习,可以学会处理具体实例,给出满意的答案。

神经网络的典型代表 BP 神经网络又称误差反向传播神经网络,在 BP 神经网络模型中,引入了中间隐含神经元层。故标准的 BP 模型由三个神经元