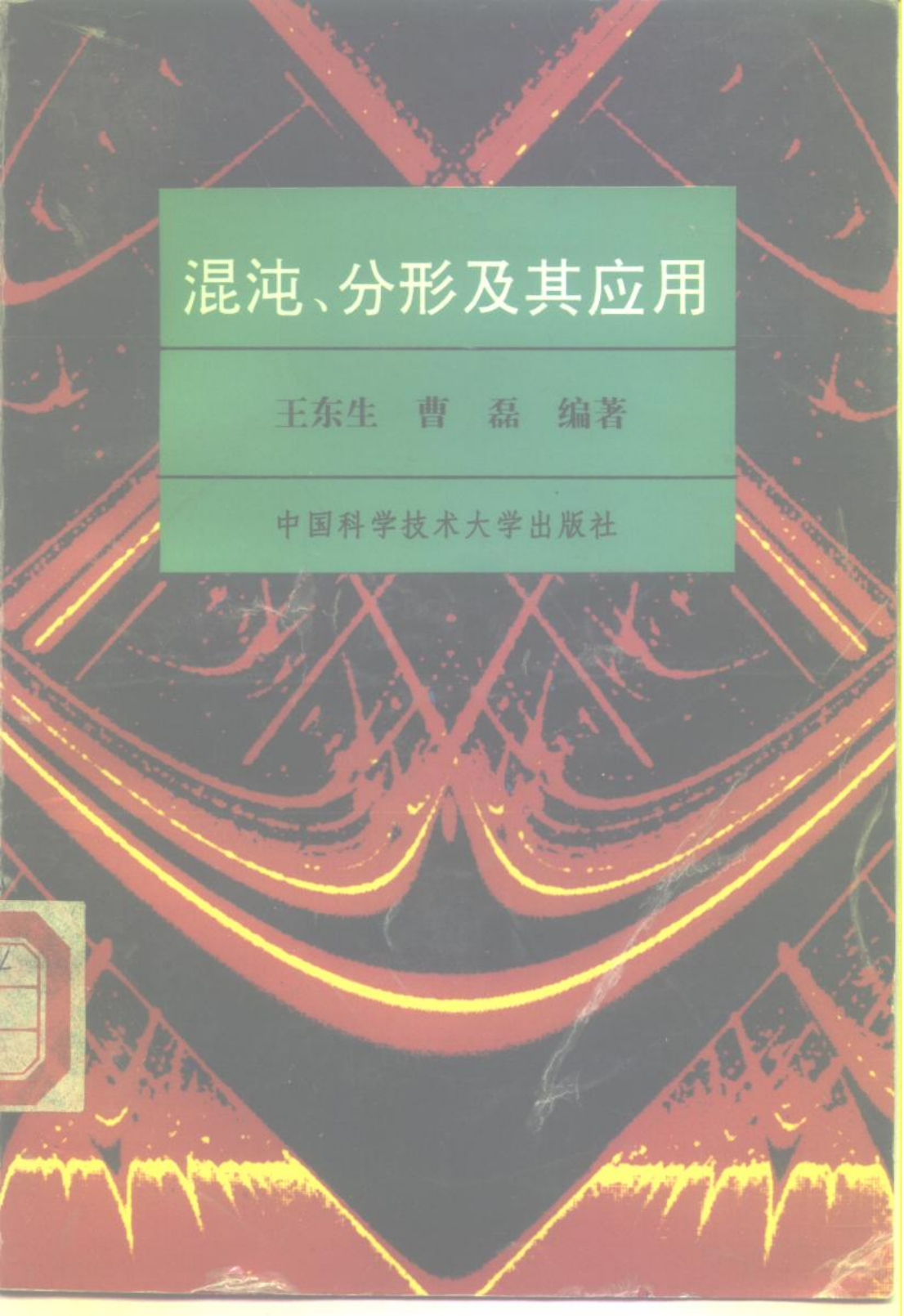




混沌、分形及其应用

王东生 曹 磊 编著

中国科学技术大学出版社



53-344
121

混沌、分形及其应用

王东生 曹 磊 编著



中国科学技术大学出版社

1995·合肥

9510038

图书在版编目(CIP)数据

混沌、分形及其应用/王东生 曹磊 编著.—合肥:中国科学技术大学出版社,1995年6月

ISBN7-312-00624-8

I 混……

Ⅰ ①王…… ②曹……

Ⅱ ①混沌 ②分形 ③计算机

Ⅳ O

凡购买中国科大版图书,如有白页、缺页、倒页者,由本社出版部负责调换。

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号,230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:15 字数:410千

1995年6月第1版 1995年6月第1次印刷

印数:1-4 000册

ISBN 7-312-00624-8/O·167 定价:17.50元

DS85/10

内 容 简 介

本书从信息科学的角度,介绍了混沌动力学与分形的基本原理,并着重讨论了它们在智能信息处理中的应用。

主要内容包括混沌与分形的基本原理及其国内外发展概况和主要研究成果,奇异吸引子,复分析动力系统,模拟自然,混沌神经网络,分形图象压缩,混沌与时间序列的预测等。

为了帮助读者理解混沌与分形的基本原理及其应用,我们结合自己的科研成果设计了 18 个模拟程序,全部程序清单在附录中给出,并附有 1 张软盘与书配套出版。

本书可作为高等院校各相关专业的研究生或高年级本科生的教材或参考书,也可供从事人工智能、信息处理、混沌与分形和应用等研究的科技人员学习参考。

8E0612E

序

当前,自然科学正面临着深刻的变化。学科之间的相互渗透,正在推动着许多交叉和综合性科学的产生。突飞猛进地发展的非线性科学就是影响深远的综合性科学之一。非线性科学是国内外科学研究的热点。在非线性科学的研究中,涉及到对确定论与随机性,有序和无序,简单性和复杂性,量变与质变,整体与局部等范畴和概念的认识上的深化,对整个自然科学的发展,有着重大的影响。

混沌动力学和分形理论是非线性科学中的两个重要组成部分。目前,关于混沌和分形方面的著作的出版,日益增多,各具特色。本书的特点在于:从混沌动力学和分形理论有机结合的基础上,阐述了它们在智能信息科学中的应用,并且结合本书内容设计了部分关于混沌和分形的计算机模拟程序,从而使本书明显地有别于在这个领域中已出版的纯理论性和科普性的两类著作。这也正是值得推荐之所在。另外,年青人历来是科技队伍中最活跃、最富有创造

性的生力军,他们的教学和科研成果是学科发展的重要的推动力,应该给予更多的机会和渠道,反映他们的成果。这也是我愿为此书写这样一个简单的序的原因。同时,我深信本书一定会给广大的读者以新的启示和收获,为促进非线性科学理论研究及其应用的普及发挥出积极的作用。

辛厚文

中国科学技术大学
教授、博士生导师

1995年5月

前 言

客观存在是不以人的意志为转移的,人们在苦苦地思考与探索:为什么天气变化存在着不可预测性?在商品价格的长期变化与短期变化之间有什么关系?气体和流体在从平稳向湍流变化过程中存在着哪些中间步骤?为什么两个形式与意义极不相同的方程迭代所出现的倍周期参数收敛比率却完全相同?这些深奥的问题,极可能揭示大自然更深一层的规律。的确,正是对这些问题的研究,诞生了一门崭新的科学——混沌学。

随着人们对混沌学的深入研究,无论是在生物学、数学、物理学、化学、信息科学,还是在天文学、经济学,甚至在音乐、艺术等领域,混沌学都得到了越来越广泛的应用。使得混沌学在现代科学技术中起着十分重要的作用。正如混沌科学的倡导者之一的 M. Shlesinger 所说:“20 世纪科学将永远铭记的只有三件事,那就是相对论,量子力学与混沌。”

与混沌学有着分不开的渊源的另一门学科则是分形。分形用以描述自然界广泛存在的一大类 Euclidean 几何无法表述的奇异结构,它体现了自然界无限细分的思想。今天,混沌与分形的结合日益紧密。事实上,混沌吸引子就是分形集。如果说混沌主要在于研究过程的行为特征,则分形更侧重于吸引子本身结构的研究。同时,混沌与分形的研究都极大地依赖于计算机技术的发展。计算机技术为这两门学科的研究提供了有力的工具。计算机极具直观的表述能力,也促使这些学科从纯粹的基础科学拓展到应用科学的范畴。

目前,国外已有一些关于混沌和分形的著作,但绝大多数是理论上的探讨。在国内,对混沌与分形的研究虽已逐渐受到重视,但这方面的著作则是寥寥无几。为了介绍混沌和分形科学的基本理论、最新发展动态及其在智能信息处理中的应用,我们撰写了这部

著作。

本书的研究将沿着这样一条思路,从基本理论到实际应用,把混沌学与分形技术结合起来研分形的基本理论以后,第4章介绍混沌动力学系统中最重要的几种奇异吸引子。第5章介绍了最重要的两种分形集:Julia集和Mandelbrot集,并讨论了复分析动力系统的分析方法。第6章介绍了利用分形技术对自然界的模拟方法,如植物模拟、地貌模拟等。第7章至第9章着重介绍混沌与分形在信息处理领域的应用。其中第7章介绍混沌神经网络与动态记忆、自适应搜索等。第8章介绍图象数据的分形压缩技术。第9章介绍了混沌时间序列的预测方法,如全局法、局域法和基于神经网络的时间序列预测方法等。

我们还结合本书内容设计了部分有关混沌和分形的计算机模拟程序。本书附录1给出了这些源程序清单,并开发出了相应的配套软件供读者参考使用。

本书第1、2、4、7章由王东生撰写,第3、5、6、8、9章由曹磊撰写。附录中的程序由王东生和曹磊共同编写,全书由王东生统稿。

本书承蒙中国科学技术大学博士生导师辛厚文教授审阅全稿,提出了许多宝贵意见,并亲笔作序。在此表示深深的谢意。

中国科学技术大学的谢振宇同志积极参与了本书附录中程序的调试工作,在此谨表谢意。

由于我们的学识水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者给予批评指正。

作 者

1995年1月

中国科学技术大学

目 次

序	辛厚文 (I)
前言	(III)
1 绪论	(1)
1.1 混沌的起源与发展	(1)
1.2 神经、模糊和混沌	(5)
1.3 混沌与智能信息处理	(12)
1.4 混沌工程学	(20)
2 混沌动力学	(25)
2.1 Logistic 映射	(25)
2.2 圆周映射	(35)
2.3 混沌与有序	(44)
2.4 分支	(55)
2.5 Lyapunov 指数	(80)
3 分形	(93)
3.1 分形的引出及其哲理	(93)
3.2 迭代函数系统	(103)
3.3 分形的混沌动力学系统	(125)
3.4 分数维	(138)
4 奇异吸引子	(156)
4.1 Lorenz 吸引子	(157)
4.2 Rossler 吸引子	(176)
4.3 Henon 吸引子	(180)
4.4 其它产生奇异吸引子的系统	(181)
4.5 简短小言	(190)
5 复分析动力系统	(193)
5.1 复分析初步	(193)

5.2	Julia 集	(203)
5.3	Mandelbrot 集	(214)
5.4	复多项式方程求解的牛顿法	(226)
6	模拟自然	(231)
6.1	L 系统与植物模拟	(232)
6.2	分形布朗运动与地貌模拟	(245)
6.3	函数迭代与其它	(267)
7	混沌神经网络	(279)
7.1	引言	(279)
7.2	混沌神经元模型	(280)
7.3	混沌神经网络模型	(295)
7.4	离散混沌神经网络模型	(302)
8	分形图象压缩	(321)
8.1	基于 IFS 的图象模型	(323)
8.2	交互的分形图象压缩	(337)
8.3	自动的分形图象压缩	(347)
8.4	分形在视频图象压缩中的应用	(362)
8.5	再归迭代函数系统	(367)
9	混沌与非线性时间序列的预测	(379)
9.1	混沌时间序列的相空间重构	(379)
9.2	全局法及局域法	(389)
9.3	基于神经网络的时间序列预测	(403)
	名词简释	(412)
	参考文献	(418)
	附录 1 程序清单	(423)
	附录 2 软件索取说明	(470)

1 绪 论

1.1 混沌的起源与发展

科学家的天职就是探索大自然的规律。数学家可能会研究诸如“哥德巴赫猜想”之类的数学难题，物理学家要搞清楚基本粒子的自旋、色与味，化学家则研究物质的构成、探索新的化学元素，天文学家探索宇宙的奥秘，生物学家研究生物的演变与进化……。所有这些都是顺理成章，理所当然的。然而还有许多更为复杂的问题在困扰着人们。人们在苦苦地思考与探索，为什么天气变化存在着不可预测性？气体和流体在从平稳向湍流变化过程中存在着哪些中间步骤？为什么两个形式与意义极不相同的方程迭代所出现的倍周期参数收敛比率却完全相同？人们预感到，这些深奥的问题极可能揭示大自然更深一层的规律。的确，这就是混沌。正是人们对混沌的研究才逐步弄清了上述深奥问题。

早在公元前 560 年左右，中国古代思想家老子就有了关于“道可道非常道”之说，并初步提出了关于宇宙起源于混沌的哲学思想。公元前 450 年左右，中国古代哲学家庄子也曾说过“南海之帝为倏。北海之帝为忽。中央之帝为混沌”。庄子所说的倏、忽，就是迅速灵敏，混沌有无知愚昧的意思，分别代表三个皇帝。而混沌竟在中央。应当说，庄子说的是政治，隐喻的是哲学。因此，是庄子最早把混沌的思想引入政治学的研究之中。他的“中央之

帝为混沌”的思想则是对人类行为的混沌性态的最早的哲学观点。本世纪初的 1903 年，美国数学家 J. H. Poincare 在《科学与方法》一书中提出了 Poincare 猜想。他把动力学系统和拓扑学两大领域结合起来，指出了混沌存在的可能性，从而成为世界上最先了解存在混沌可能性的人。1954 年，前苏联概率论大师 A. N. Kolmogorov 在探索概率起源过程中注意到了哈密尔顿函数中微小变化时条件周期运动的保持。该思想为如下结论奠定了基础，即不仅耗散系统有混沌，而且保守系统也有混沌。

从 60 年代开始，人们开始探索科学上的那些莫测之谜，使混沌科学得到了飞速的发展。美国气象学家 E. Lorenz 取得了很大的成功。他使用一台原始计算机研究气候的变化。1963 年，Lorenz 在《大气科学》杂志上发表了“决定性的非周期流”一文，指出在气候不能精确重演与长期天气预报者无能为力之间必然存在着一种联系，这就是非周期性 with 不可预见性之间的联系。他还认为一串事件可能有一个临界点，在这一点上，小的变化可以放大为大的变化。而混沌的意思就是这些点无处不在。这些研究清楚地描述了“对初始条件的敏感性”这一混沌的基本性态。这就是著名的蝴蝶效应。因此，可以说，是天气预报和气象学的研究叩开了混沌科学的大门，反过来，混沌学的研究，又为气象学研究提供了崭新的方法。

70 年代，科学家们开始考虑在许许多多不同种类的不规则之间有何联系。生理学家发现，在人类的心脏中存在着混沌现象，这其中有着惊人的有序性。生态学家在探索着树蛾群体的减少与增多的规律。经济学家研究股票价格上升下降的数据，尝试求出一种全新的分析方法。对于事物发展的内部规律的探求，则直接把人们引向自然界——云彩的形状，雷电的径迹，血管在显微镜下所见的交叉缠绕，星星在银河中的集簇等等。

因此，70 年代是混沌科学发展史上光辉灿烂的年代。在这一时期，作为一门新的科学——混沌学正式诞生。科学家们对混沌

作了大量的研究与发展。1970年,美国科学史家 T.S. Kuhn 的《科学革命的结构》一书出版,对混沌理论的发展起到了推波助澜的作用。1975年,中国学者李天岩和美国数学家 J. Yorke 在《America Mathematics》杂志上发表了“周期三意味着混沌”的著名文章,深刻揭示了从有序到混沌的演变过程。1976年,美国生物学家 R. May 在《自然》杂志上发表了“具有极复杂的动力学的简单数学模型”一文,它向人们表明了混沌理论的惊人信息:简单的确定论数学模型竟然也可以产生看似随机的行为。1977年,第一次国际混沌会议在意大利召开,标志着混沌科学的诞生。1978年,美国物理学家 M. J. Feigenbaum 在《统计物理学杂志》上发表了关于普适性的文章“一类非线性变换的定量的普适性”,轰动世界。正是普适性的研究使混沌科学确定起自己坚固的地位。

在 80 年代,混沌科学又得到进一步发展。特别是在美国,混沌会议一场接一场召开,混沌杂志一种接一种出版,美国政府也为混沌研究大量拨款。在许多大学和研究机构纷纷成立了非线性科学研究中心来协调混沌以及与混沌有关的一切研究工作。1980年,美国数学家 B. Mandelbrot 用计算机绘出了第一张 Mandelbrot 集的图象,这是一张五彩缤纷,绚丽无比的混沌图象。后来,德国的 P. Richter 教授和 H. Peitgen 教授共同研究分形流域的边界,作出了精美绝伦的混沌图象,使混沌图象成为精致的艺术品,拓展了混沌科学的一个重要应用领域。从那时起, Mandelbrot 集成了混沌的一种公认标志。1983年,加拿大物理学家 L. Glass 在《物理学》杂志上发表著名文章“计算奇异吸引子的奇异程度”,开创了全世界计算时间序列维数的热潮。1984年,中国著名的混沌科学家郝柏林编辑的《混沌》一书在新加坡出版,为混沌科学的发展起到了一定的推动作用。1986年,中国第一届混沌会议在桂林召开。中国科学家徐京华在全世界第一个提出三种神经细胞的复合网络,并证明它存在混沌。人脑可以看成是复杂的多层次的混沌动力系统,脑功能的物理基础是混沌性质的过程,这既有利于

扫描各个轨线（主观上就是记忆与回想），又有利于拓扑传递（主观上就是人格的完整性与逻辑上的自洽性与完备性），既有利于初始条件的敏感性（主观上就是童年行为经历对一生的巨大影响），又有利于轨道的密集性（主观上对应于人的行为的高度适应性）。既然脑的工作是混沌的，人的行为必然也是混沌的。混沌不是病态，混沌萌生信息。人的行为可以按混沌动力规律来演化。徐京华所提出的复合神经网络活动规律所绘的图形与人的脑电图极为相似，一旦脑混沌破坏，人将病死。1989年，中国科学家卢侃、林雅谷、卢火把混沌科学应用于气功研究。气功具有浓郁的中国特色，并带有许多神秘的色彩。但卢侃等人用徐京华提供的程序成功地计算出气功师的脑电分维数，找出了具有统计特性的气功瞬时规律与长时间规律，并把计算出的分维数带入回归方程算出了气功师的功龄，这个方程就是林雅谷功龄方程式。这为分维数的应用找出了可行的方式，使人类客观地用脑电图检查人的行为史（气功史）成为可能。

到了90年代，混沌科学与其它科学相互渗透。无论是在生物学、生理学、心理学、数学、物理学、化学、电子学、信息科学，还是天文学、气象学、经济学，甚至在音乐、艺术等领域，混沌都得到了广泛的应用。混沌在现代科学技术中起着十分重要的作用，正如混沌科学的倡导者之一，美国海军部官员 M. Shlesinger 所说，“20世纪科学将永远铭记的只有三件事，那就是相对论，量子力学与混沌”。第一次混沌国际会议主持人之一，物理学家 J. Ford 认为混沌就是20世纪物理学第三次最大的革命。与前两次革命相似，混沌也与相对论及量子力学一样冲破了牛顿力学的教规。他说：“相对论消除了关于绝对空间与时间的幻象；量子力学则消除了关于可控测量过程的牛顿式的梦；而混沌则消除了拉普拉斯关于决定论式可预测性的幻想。”

从本质上讲，混沌是直接研究我们所看得见摸得着的宇宙，以及在人类本身的尺度大小差不多的对象中发生的过程，所有日常

生活经验与这个世界的真实图象都是我们研究混沌时所探索的目标。因此,混沌是一种关于过程的科学而不是关于状态的科学,是关于演化的科学而不是关于存在的科学。今天的科学认为,混沌无处不在。一支上翘的香烟,烟纹袅袅涡卷;在风中旗帜前后拍动;滴水的自来水龙头,水滴的花样由稳态变为随机;在气候的变化中,在飞行中的飞机的性态中,在高速公路上汽车拥挤的性态中,在地下油管内油的流动性态中,都会出现混沌。这些性态都遵循着同一条新发现的定律或同一类新发现的定律。

混沌中蕴含着有序,有序的过程也可能出现混沌。大自然就是如此纵横交错,如此复杂,包含着无穷的奥妙。因此,对混沌科学的进一步研究将使我们対大自然增加更深刻的理解。

1.2 神经、模糊和混沌

正如第 1.1 节所述,混沌科学已经与其它许多学科领域相互渗透,发展成为一门新的边缘科学。作为对混沌学最新发展动态的探索,本节从信息科学的角度,研究神经网络和模糊理论的机理与特征,探索混沌动力学与神经网络和模糊信息处理之间的相互交叉和融合。

1.2.1 脑神经系统与神经网络

脑神经系统是以离子电流机构为基础的由神经细胞组成的非线性的 (Nonlinear)、适应的 (Adaptive)、并行的 (Parallel) 和模拟的 (Analog) 网络 (Network), 简称 NAPAN。在脑神经系统中,信息的收集、处理和传送都在细胞上进行。各个细胞基本上只有兴奋与抑制两种状态。神经细胞的响应速度是毫秒级,比半导体器件要慢得多。神经细胞主要依靠网络的超并行性来实现高度的

实时信息处理和信息表现的多样性。神经细胞上的突触机构具有很好的可塑性。这种可塑性使神经网络具有记忆和学习功能。突触结合的连接形成了自组织特性，并随学习而变化，使神经网络具有强大的自适应功能。

由于脑神经系统的复杂性，至今还没有可用于分析和设计 NAPAN 的理论。尽管人们早已经知道在人的大脑中存在着 NAPAN，但由于研究 NAPAN 的难度很大，而且电子计算机的功能已经十分强大，因而人们一直未能对它进行深入的研究。只有在开始注重到数字计算机的局限性的今天，人们才感到必须研究 NAPAN，希望通过它能实现崭新的超并行模拟计算机。

的确，由于神经科学的进展，从分子水平到细胞水平的详细构造和功能开始得到了了解，对脑神经系统所实现的信息处理的基本性质的理解也逐步深入。然而，即使细胞的结构，以及生理的和物理的机理都弄清楚了，但对涉及 140 亿个神经细胞所组成的脑神经系统的超并行性，层次和分布式构造所形成的系统本质特性，人们还知之甚少。目前，需要从系统论的立场出发来研究复杂的 NAPAN。在网络层次上弄清其功能和信息处理原理，确定使其体系化的理论。

在这种趋势中，神经网络模型和学习算法的研究，独具魅力。这种研究把许多简单的神经细胞模型，并行地、分层地相互结合成网络模型，提供了实现新的信息处理的一种手段，为建立 NAPAN 理论提供了一种途径。例如对于颜色等这类感觉信息，在脑内的表现是多重而广泛的多样体，只有采用新的信息处理方法，才能对它进行描述。也就是说，原先靠生理心理实验难以分析高级中枢中的信息处理行为，采用神经网络理论与技术，使之成为可能。这里所说的神经网络指的是人工神经网络，它是对真实脑神经系统构造和功能予以极端简化的模型。对神经网络的研究，有助于人类对 NAPAN 的理解，有助于探明大脑的信息处理方式，建立脑的模型，进一步弄清脑的并行信息处理的基本原理，并从应用

角度寻求其工程实现的方法。

神经网络的主要特征是，大规模的并行处理，分布式的信息存贮，良好的自适应性，自组织性，以及很强的学习功能，联想功能和容错功能。与冯·诺曼计算机相比，神经网络更加接近人脑的信息处理模式；主要表现在以下几个方面：

- 能够处理连续的模拟信号，例如连续变换的图象信号。
- 能够处理不精确的、不完全的、模糊信息。
- 冯·诺曼计算机给出的是精确解，神经网络给出的是次最优的逼近解。

• 神经网络并行分布工作，各组成部分同时参与运算，单个神经元的动作速度不快，但网络总体的处理速度极快。

• 神经网络具有鲁棒性 (Robustness)，即信息分布于整个网络各个权重变换之中，某些单元的障碍不会影响网络的整体信息处理功能。

• 神经网络具有较好的容错性，即在只有部分输入条件，甚至包含了错误输入条件的情况下，网络也能给出正确的解。

• 神经网络在处理自然语言理解、图象识别、智能机器人控制等疑难问题方面具有独到的优势。

神经网络的上述特点，是否反映了人脑神经系统的所有特征和功能呢？事实上，神经网络以联接主义为基础，是人工智能研究领域的一个分支。它从微观出发，认为符号是不存在的，认知的基本元素就是神经细胞。认知过程是大量神经细胞的联接引起神经细胞不同兴奋状态和系统表现出的总体行为。传统的符号主义与其不同。符号主义认为，认知的基本元素是符号，认知过程是对符号表示的运算。人类的语言、文字、思维均可用符号来描述，而且思维过程只不过是这些符号的存贮、变换和输入、输出而已。以这种方法实现的系统具有串行、线性、准确、易于表达的特点，体现了逻辑思维的基本特性。70年代的专家系统和80年代日本的第五代计算机研制计划就体现了典型的符号主义思想。