



神经计算基础

CHAPTER 3

3.1 人工神经网络基础

早在计算机出现之前,人类就已经开始探索智能的秘密,并且期盼着有一天可以重新构造人脑,让其代替人类完成相应的工作。这种目标一直激励着人们不断努力。大体上讲,人类对人工智能的研究可以分成两种方式,这两种方式分别对应着两种不同的技术:传统的人工智能技术和基于人工神经网络的技术。实际上,这两种技术是分别从心理的角度和生理的角度对智能进行模拟的,因此,分别适应于认识和处理事物(务)的不同方面。目前,人们除了从不同的角度对这两种技术进行研究外,也已开始探讨如何能将这两种技术更好地结合起来,并且已取得了良好的效果。人们期待着,通过大家的不懈努力,在不久的将来,能在这两种技术的研究以及有机结合方面有所突破,也希望在方法上有新的进展,真正打开智能的大门。

人工神经网络是根据人们对生物神经网络的研究成果设计出来的,它由一系列的神经元及其连接构成,具有规范的数学描述,不仅可以用适当的电子线路来实现,而且可以方便地用计算机程序加以模拟。本章首先简要介绍智能和人工智能,然后简要介绍人工神经网络的发展过程及其基本特点,使读者对有关的概念有一个基本的了解。最后将介绍人工神经网络的基本知识,主要包括:基本的生物神经网络模型,人工神经元模型及其典型的激活函数,人工神经网络的基本拓扑特性,存储类型(CAM-LTM, AM-STM)及映象,有导师(supervised)训练与无导师(unsupervised)训练等基本概念。

3.1.1 人工神经网络的提出

人工神经网络(artificial neural networks, ANN)是对人类大脑系统一阶特性的一种描述。简单而言,它是一个数学模型,可以用电子线路来实现,也可以用计算机程序来模拟,是人工智能研究的一种方法。因此,需要先介绍人工智能的一些基本内容。

1. 智能与人工智能

1) 智能的含义

众所周知,人类是具有智能的。因为人类能记忆事物,能有目的地进行一些活动,能通过学习获得知识,并能在后续的学习中不断地丰富知识,还有一定的能力运用这些知识去探索未知的东西,去发现、去创新。那么,智能的含义究竟是什么?如何刻画它呢?粗略地讲,智能是个体有目的的行为、合理的思维以及有效的适应环境的综合能力。也可以说,智能是个体认识客观事物和运用知识解决问题的能力。

按照上述描述,人类个体的智能是一种综合能力。具体来讲,可以包含如下8个方面的能力:

(1) 感知与认识客观事物、客观世界和自我的能力。这是人类在自然界中生存的最基本的能力,是认识世界、推动社会发展的基础。人类首先必须感知客观世界,使客观世界中的事物在自己的头脑中有一个反映,并根据事物反映出来的不同特性将事物区分开来。这是一切活动的基础。“假物必以用者”,只有认识了事物,才能制造出支持生存、生活的工具,才有可能不断提高人类的生存能力,并不断改善人类的生活质量。因此可以说,感知是智能的基础。

(2) 通过学习取得经验与积累知识的能力。这是人类在自然界中能够不断发展的最基本的能力。通过学习不断地取得经验、不断地积累知识,又进一步增强了人类认识客观事物、客观世界和自我的能力,从而推动人类社会不断发展。而且,随着社会的发展,知识的积累不仅孤立发生在作为个体的人的身上,更重要的是这种积累能够代代相传。先辈们获取的经验、知识通过一定的形式传给下一代。正是这样,才使人类所掌握的知识越来越多,越来越丰富,以至于人们称现在是知识爆炸的时代。这表明,随着社会的进步,人类的知识积累速度不断加快。

(3) 理解知识,运用知识和经验分析、解决问题的能力。这一能力可以算作是智能的高级形式,是人类对世界进行适当的改造、推动社会不断发展的基本能力。有了知识以后,要使其发挥作用,必须运用这些知识和经验去分析和解决实际问题。所以,作为教育的重要目标,要努力培养学生认识问题、分析问题和解决问题的能力。培根说,知识就是力量。他指的是,当知识得到恰当的应用后,会发挥巨大的作用。所以,大师们一直在告诫人们,不要只读书,尤其不要死读书,要灵活运用书本上的知识去解决实际问题,并在应用中不断丰富知识。

(4) 联想、推理、判断、决策的能力。这是智能高级形式的又一方面。人类通过这种能力,去促进对未来甚至是未知东西的预测和认识,从而具有一定的判断未来、把握未来的能力,从而对未来的东西也能有所准备,进一步增强了在这个世界上生存并不断发展的能力。无论是学习、工作还是生活,都有主动和被动之分。联想、推理、判断、决策的能力是主动的

基础；同时，它也是主动采取策略去更有效解决问题的基础——因为较好地掌握了事物发展的趋势。

(5) 运用语言进行抽象、概括的能力。人类的语言是最为丰富的，它除了可以表达实际世界中的事物外，还可以表达出人类的情感以及一些直观不可见的东西，这些使得生活更加丰富多彩。抽象和概括已成为人类认识现实世界和未来世界的一个重要工具。从更高的形式来看，它是形式化描述的基础，而形式化描述则是计算机化、自动化的基础。正是有了语言，人类才有了交流，而且这种交流被广泛扩展到了人与机器之间，使得机器能更好地完成人类所交付的各项任务。丰富的语言抽象和概括能力，使得其他方面的能力可以更充分地发挥出来。

上述这 5 种能力，被认为是人类智能最基本的能力，从一定的意义上讲，后续的 3 种能力是这 5 种能力新的综合表现形式。

(6) 发现、发明、创造、创新的能力。这种能力主要是前面第三种能力的一种高级表现形式，这里强调更多的是创新能力。因为只有创新，才能有活力，才能不断发展。人类正是在不断有所发明、有所创造中前进的。

(7) 实时、迅速、合理地应付复杂环境的能力。这种实时反应能力表示人类对自己遇到的环境及事务可以做出适当的反应。因为世界上几乎所有的事务都将时间作为一个自变量而随其变化而变化，人类面对繁乱复杂的环境，必须有能力做出实时恰当的反映。从一定的意义上说，这也是人类生存的基本能力。

(8) 预测、洞察事物发展、变化的能力。根据历史的经验，根据现实的信息，判断事物的未来发展，以对将来将出现的事物做出必要的准备。那么，如何使类似计算机这样的设备去模拟人类的这些能力呢？这就是人工智能所研究的问题。

2) 人工智能

人工智能研究怎样让计算机模仿人脑从事推理、设计、思考、学习等思维活动，以解决和处理较复杂的问题。简单来说，人工智能就是研究如何让计算机模仿人脑进行工作。

可以将研究人工智能的目的归纳为两个方面：

(1) 增加人类探索世界、推动社会前进的能力。人类从一开始就注意到通过制造和使用工具来加强和延伸自己的生存能力。在初始阶段，这种工具多是用于扩展人类的体力，例如杠杆、拖拉机、各类机械等，它们主要致力于放大、聚集、集中、产生“力量”。后来，从考虑如何让工具帮助人类完成计算开始，人们致力于研究如何能使工具代替人类进行思维，哪怕是“部分的”代替。当计算机出现之后，更进一步促使人类探索如何使计算机模拟人感知、思维和行为的规律，进而设计出具有类似人类某些智能的计算机系统，从而达到延伸和扩展人类智能和能力的目的。

(2) 进一步认识自己。到目前为止，虽然以生物神经科学家、医学解剖学家为首的各专业的科学家进行了数代大量艰苦的研究，人类对自身的大脑还是知之甚少，在很大程度上，大脑的运行机理还是一个未揭开的谜。研究人工智能，可以从已知的一些结论（不排除一些猜想）入手，从人的大脑以外来探讨它的活动机理。有人将这种做法叫做用物化了的智能去考察和研究人脑智能的物质过程和规律。这也许是人类揭开自身大脑之谜的一个有效途径。人们相信，这种探索可以为认识大脑提供帮助。

人类对自己的大脑确实知之甚少，自从人工智能一词诞生以来，人们从不同的出发点、

方法学以及不同的应用领域出发进行了大量的研究。正是由于存在这些不同,导致了人工智能不同的认识,也就形成了不同的学术流派。较有代表性的包括:符号主义(符号/逻辑主义)学派,连接主义(并行分布处理)学派,进化主义(行动/响应)学派。

2. 物理符号系统

人们常讲,计算机世界就是数据处理世界,而数据是对现实世界中抽象出来的信息进行的形式化描述。当然,这种形式化系统的不同,会导致数据世界的不同。所以,信息是现实在人脑中的反映,而数据则是信息的一种表现形式,如图 3.1 所示。信息不会随其载体的变化而变化,而数据则是随其载体的变化而变化的。例如,“2”在十进制中用阿拉伯数字表示成“2”,而在二进制中又被表示成“10”,在计算机内部,它又被用高、低电平表示出来。因此,信息需要在一定的载体上以某种规定的形式表达出来。习惯上,人们用一系列的基本符号以及组合这些符号的一些规则去表达一些信息和行为。这些基本符号以及组合这些符号的规则就是所谓的物理符号系统。

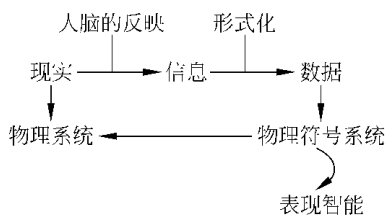


图 3.1 物理符号系统用于对物理系统的描述

物理符号系统是 Newell 和 Simon 在 1967 年提出的假说,该假说认为:一个物理系统表现智能行为的充要条件是它有一个物理符号系统。

这就是说,物理符号系统需要有一组称为符号的实体,它们都是物理模型,可以在另一类称为符号结构的实体中作为成分出现,以构成更高级别的系统。

在这里,人们希望通过抽象,用一系列物理符号及其相应的组成规则来表达一个物理系统的存在和运行,例如简单的整数及其运算系统、实数及其运算系统、数理逻辑符号系统。传统的人工智能技术就是以物理符号系统为基础的。在这里,问题必须经过形式化处理后才能被表达、处理。

在这里,人们希望通过抽象,用一系列物理符号及其相应的组成规则来表达一个物理系统的存在和运行,例如简单的整数及其运算系统、实数及其运算系统、数理逻辑符号系统。传统的人工智能技术就是以物理符号系统为基础的。在这里,问题必须经过形式化处理后才能被表达、处理。

要想实现对事务(物)的形式化描述,第一步必须对其进行适当的抽象。然而在抽象过程中,需要舍弃一些特性,同时保留一些特性。但是,世界的千差万别要求物理符号系统能较好地表达所要求的全部信息,在一定意义上讲,这与抽象又存在一定的矛盾。因为,为了形式化所进行的抽象有时需要舍弃大量的信息,而这将导致经过形式化处理后的系统难以表达出物理系统的完整面貌。更严重的是,抽象过程有时还会使其失去物理系统的本来面貌。在现实世界中,这种问题有许多。实际上,在某些情况下如果勉强对它们进行形式化处理,一方面会导致面目全非,另一方面可能会因为过于复杂等问题,使得系统难以具有良好的结构。这里称此类问题是难以形式化的,这是物理符号系统所面临的困难。

由此也可以看出,物理符号系统对全局性判断、模糊信息处理、多粒度的视觉信息处理等是非常困难的,这就导致了人们去探求此类问题的新的处理方法。

3. 连接主义观点

为了研究智能,在现代神经科学的研究成果基础上,人们提出了另一种观点,认为:智能的本质是连接机制。神经网络是一个由大量简单的处理单元组成的高度复杂的大规模非线性自适应系统。

虽然按此说法来刻画神经网络,未能将其所有的特性完全描述出来,但它却从以下 4 个方面出发,力图最大限度地体现人脑的一些基本特征,同时使得人工神经网络具有良好的可实现性。

(1) 物理结构。现代神经科学的研究结果认为,大脑皮层是一个广泛连接的巨型复杂系统,包含大约 10^{11} 个神经元,这些神经元通过 10^{15} 个连接构成一个大规模的神经网络系统。人工神经网络也将是由与生物神经元类似的人工神经元通过广泛的连接构成的。人工神经元将模拟生物神经元的功能。它们不仅具有一定的局部处理能力,同时还可以接受来自系统中其他神经元的信号,并可以将自己的“状态”按照一定的形式和方式传送给其他的神经元。

(2) 计算模拟。人脑中的神经元,既有局部的计算和存储功能,又通过连接构成一个统一的系统。人脑的计算就是建立在这个系统大规模并行模拟处理的基础上的。各个神经元可以接受系统中其他神经元通过连接传送过来的信号,通过局部的处理,产生一个结果,再通过连接将此结果发送出去。神经元接受和传送的信号被认为是模拟信号。所有这些,对大脑中的各个神经元来说,都是同时进行的。因此,该系统是一个大规模并行模拟处理系统。由于人工神经网络中存在大量的有局部处理能力的人工神经元,所以,该系统也将实现信息的大规模并行处理,以提高其性能。

(3) 存储与操作。研究认为,大脑对信息的记忆是通过改变突触(synapse)的连接强度来实现的。神经元之间的连接强度确定了它们之间所传递信号的强弱,而连接强度则由相应的突触决定。也就是说,除神经元的状态所表现出的信息外,其他信息以神经元之间连接强度的形式分布存放。存储区与操作区合二为一。这里的处理是按大规模、连续、模拟方式进行的。由于其信息是由神经元的状态和神经元之间实现连接的突触强弱所表达的,所以说信息的分布存放是它的另一个特点。这是人工神经网络模拟实现生物神经系统的第三大特点。信息的大规模分布存放为信息的充分并行处理提供了良好的基础。同时,这些特性又使系统具有了较强的容错能力和联想能力,也给概括、类比、推广提供了强有力的支持。

(4) 训练。生活实践的经验表明,人类大脑的功能除了受到先天因素的限制外,还被后天的训练所影响。先天因素和后天因素中,后天的训练更为重要。一个人的学习经历、工作经历都是他的宝贵财富。这些表明,人脑具有很强的自组织和自适应性。同可以见到的表象不同,从生理的角度来讲,人的许多智力活动并不是按逻辑方式进行的,而是通过训练形成的。因此,人工神经网络将根据自己的结构特性,使用不同的训练、学习过程,自动从“实践”中获取相关的知识,并将其存放在系统内。这里的“实践”就是训练样本。

实际上,虽然人类很早就开始了神经网络的研究,然而真正广泛地将其作为人工智能的一项新技术来研究只是近几十年的事。这种努力在 20 世纪 60 年代受到挫折后,停顿了近 20 年。后来,人们发现传统的人工智能技术要在近期取得大的突破还较为困难,同时人们在生物神经网络和人工神经网络方面的研究获得了进展,重新唤起了人们对用人工神经网络来实现人工智能的兴趣。希望通过共同的努力,尽快构造出一个较为理想的人工智能系统。

为此,许多方面的科学家分别从各自的学科入手,交叉联合,进行研究。所以说,人工神经网络理论是许多学科共同努力的结果。这些学科主要包括神经科学、生物学、计算机科学、生理学、数学、工程技术、心理学、哲学、语言学等。

4. 两种模型的比较

物理符号系统和人工神经网络系统从不同的方面对人脑进行模拟,其差别见表 3.1。

表 3.1 物理符号系统和人工神经网络系统的差别

项 目	物理符号系统	人工神经网络
处理方式	逻辑运算	模拟运算
运行方式	串行	并行
动作	离散	连续
存储	局部操作	全局操作

可以说,物理符号系统是从人的心理学的特性出发,去模拟人类问题求解的心理过程。所以它擅长于模拟人的逻辑思维,可以将它看做是思维的高级形式。而在许多系统中,一些形象思维的处理需要用逻辑思维来实现,这就导致了系统对图像处理类问题的处理效率不高。

作为连接主义观点的人工神经网络,是从仿生学的观点出发,从生理模拟的角度去研究人的思维与智能,擅长于对人的形象思维进行模拟,这是人类思维的低级形式。从目前的研究结果看,因为这种系统的非精确性的特点,使得它处理以逻辑思维为主进行求解的问题较为困难。图 3.2 给出了两种系统与人类思维形式的对应比较。

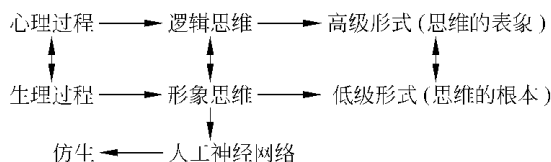


图 3.2 两种系统与人类思维形式的比较

这两种观点导致了两种不同的人工智能技术:基于物理符号系统的传统人工智能技术和基于连接主义观点的人工神经网络技术。这两种技术的比较见表 3.2。从表中可以看出,这两种技术导致处理问题方法的不同,使得相应系统的开发方法和适应的对象有着很大的差别。按照这一分析,传统的人工智能方法和人工神经网络并不是可以完全互相取代的,它们应该有着不同的应用领域。

表 3.2 两种人工智能技术的比较

项 目	基于物理符号系统的传统人工智能技术	基于连接主义观点的人工神经网络技术
基本实现方式	串行处理:由程序实现控制	并行处理:对样本数据进行多目标学习,并通过人工神经元之间的相互作用实现控制
基本开发方式	设计规则、框架、程序;用样本数据进行调试(由人根据已知的环境去构造一个模型)	定义神经网络的结构原型,通过样本数据依据基本的学习算法完成学习——自动从样本中抽取内涵(自动适应应用环境)
适应领域	精确计算:符号处理、数值计算	非精确计算:模拟处理、感受、大规模数据并行处理
模拟对象	左脑(逻辑思维)	右脑(形象思维)

3.1.2 神经网络的特点

信息的分布表示、运算的全局并行和局部操作、处理的非线性是人工神经网络的 3 大特点,其构造和处理均是围绕此 3 点进行的。

1. 神经网络的概念

人工神经网络是人脑及其活动的一个理论化的数学模型,它由大量的处理单元通过适当的方式互连构成,是一个大规模的非线性自适应系统。1988 年,Hecht-Nielsen 曾经给人工神经网络下了如下定义:

人工神经网络是一个并行、分布处理结构,它由处理单元及称为连接的无向信号通道互连而成。这些处理单元(processing element, PE)具有局部内存,并可以完成局部操作。每个处理单元有一个单一的输出连接,这个输出可以根据需要分支成多个并行连接,且这些并行连接都输出相同的信号,即相应处理单元的信号,信号的大小不因分支的多少而变化。处理单元的输出信号可以是任何需要的数学模型,每个处理单元中进行的操作必须是局部的。也就是说,它必须仅仅依赖于经过输入连接到达处理单元的所有输入信号的当前值和存储在处理单元局部内存中的值。

该定义主要强调了 4 个方面的内容:并行、分布处理结构;一个处理单元的输出被任意分支,且大小不变;输出信号可以是任意的数学模型;处理单元进行完全的局部操作。这里说的处理单元就是人工神经元(artificial neuron, AN)。

按照 Rumelhart, McClelland, Hinton 等人提出的并行分布处理(parallel distributed processing, PDP)理论框架(简称为 PDP 模型),人工神经网络由 8 个方面的要素组成:

- (1) 一组处理单元(PE 或 AN);
- (2) 处理单元的激活状态(a_i);
- (3) 每个处理单元的输出函数(f_i);
- (4) 处理单元之间的连接模式;
- (5) 传递规则 ($\sum w_{ij} o_j$);
- (6) 把处理单元的输入及当前状态结合起来产生激活值的激活规则(F_i);
- (7) 通过经验修改连接强度的学习规则;
- (8) 系统运行的环境(样本集合)。

可以将 PDP 模型表示成图 3.3 的形式。

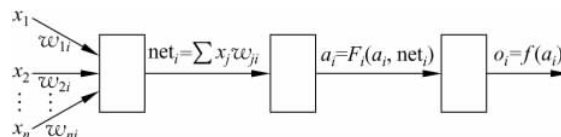


图 3.3 PDP 模型下的人工神经元网络模型

以上这两种定义都比较复杂。为了使用方便,1987 年,Simpson 从人工神经网络的拓扑结构出发,给出了一个虽然不太严格但是却简明扼要的定义,它对一般的应用来说是足以

说明问题的：人工神经网络是一个非线性的有向图，图 3.3 中含有可以通过改变权重大小来存放模式的加权边，并且可以从不完整的或未知的输入找到匹配的模式。

人工神经网络除了可以叫做并行分布处理系统外，还可以叫做人工神经系统 (artificial neural system)、神经网络 (neural network)、自适应系统 (adaptive systems)、自适应网 (adaptive networks)、连接模型 (connectionism)、神经计算机 (neuro computer) 等。

人工神经网络不仅在形式上模拟了生物神经系统，它也确实具有大脑的一些基本特征：

(1) 神经元及其连接。从系统构成的形式上看，由于人工神经网络是受生物神经系统的启发构成的，因此从神经元本身到连接模式，基本上都是以与生物神经系统相似的方式工作的。这里的人工神经元与生物神经元相对应，可以改变强度的连接则与突触相对应。

(2) 信息的存储与处理。从表现特征上来看，人工神经网络也力求模拟生物神经系统的基本运行方式。例如，可以通过相应的学习/训练算法，将蕴含在一个较大数据集中的数据联系抽象出来。就像人们可以不断摸索规律、总结经验一样，可以从先前得到的例子按要要求产生出新的实例，在一定程度上实现“举一反三”的功能。

2. 学习能力

人工神经网络可以根据所在的环境去改变它的行为。也就是说，人工神经网络可以接受用户提交的样本集合，依照系统给定的算法，不断修正用来确定系统行为的神经元之间的连接强度，而且在网络的基本构成确定之后，这种改变是根据其接受的样本集合自然进行的。一般来说，用户不需要再根据所遇到的样本集合去对网络的学习算法做相应的调整。也就是说，人工神经网络具有良好的学习功能。由于在传统的人工智能系统的研究中，虽然人们对“机器学习”问题给予了足够的重视并倾注了极大的努力，但是，系统的自学习能力差依然是其获得广泛应用的障碍。而人工神经网络具有良好的学习功能的这一性能，使得人们对它产生了极大的兴趣。人工神经网络的这一特性称为自然具有的学习功能，以与传统的人工智能系统总要花较大的力气去研究系统的学习问题形成对照。

在学习过程中，人工神经网络不断从所接受的样本集合中提取该集合所蕴含的基本内容，并将其以神经元之间的连接权重的形式存放于系统中。例如，可以构造一个异相连的网络，它在接受样本集合 A 时，可以抽取集合 A 中输入数据与输出数据之间的映射关系。如果样本集合变成了 B ，它同样可以抽取集合 B 中输入数据与输出数据之间的映射关系。再例如，对于某一模式，可以用它的含有不同噪声的数据去训练一个网络，在这些数据选择得比较恰当的前提下，可以使得网络今后在遇到类似的含有一定缺陷的数据时，仍然能够得到它对应的完整的模式。也可以说，这表明人工神经网络可以学会按要要求产生它从未遇到过的模式。有时候，又将人工神经网络的这一功能叫做抽象功能。

目前，对应不同的人工神经网络模型，有不同的学习/训练算法，有时，同种结构的网络拥有不同的算法，以适应不同的应用要求。对一个网络模型来说，其学习/训练算法是非常重要的。例如，作为一般的多级网络学习/训练算法的 BP 算法，虽然已被发现并应用多年，今天仍然有许多人在研究如何提高它的训练速度和性能。

3. 泛化能力

由于人工神经网络运算的不精确性，其在被训练后，对输入的微小变化是不作反应的。

与事物的两面性相对应,虽然在要求高精度计算时,这种不精确性是一个缺陷,但是,有些场合又可以利用这一点获取系统的良好性能。例如,可以使这种不精确性表现成“去噪声、容残缺”的能力,而这对模式识别有时恰好是非常重要的。还可以利用这种不精确性,比较自然地实现模式的自动分类。

尤其值得注意的是,人工神经网络的这种特性不是通过隐含在专门设计的计算机程序中的人类智能来实现的,而是由其自身结构所固有的特性所给定的。

4. 信息的分布存放

信息的分布存放给人工神经网络提供了另一种特殊的功能。由于一个信息被分布存放在几乎整个网络中,所以,当其中的某一个点或者某几个点被破坏时,信息仍然可以被存取。这能够保证系统在受到一定的损伤时还可以正常工作。但是,这并不是说,可以任意对完成学习的网络进行修改。也正是由于信息的分布存放,对一类网络来说,当它完成学习后,如果再让它学习新的东西,就会破坏原来已学会的东西,BP 网就是这类网络。

5. 适用性问题

人工神经网络并不是可以解决所有问题的,它应该有自己的适用面。人脑既能进行形象思维又能进行逻辑思维,传统的人工智能技术模拟的是逻辑思维,人工神经网络模拟的是形象思维,而这两者适用的方面是不同的,所以,人工神经网络擅长于处理适用形象思维的问题。主要包括两个方面:

- (1) 对大量的数据进行分类,并且只有较少的几种情况;
- (2) 学习一个复杂的非线性映射。

这两个方面对传统的人工智能技术来说都是比较困难的。目前,人们主要将其用于语音、视觉、知识处理、辅助决策等方面。此外,在数据压缩、模式匹配、系统建模、模糊控制、求组合优化问题最佳解的近似解(不是最佳近似解)等方面也有较好的应用。

3.1.3 历史回顾

人工神经网络的发展是曲折的,从萌芽期到目前,几经兴衰。可以将其发展历史大体上分成如下 5 个时期。

1. 萌芽期

人工神经网络的研究最早可以追溯到人类开始研究自己的智能的时期,这一时期截止到 1949 年。开始时,人类对自身的思维感到非常奇妙,从而也就有了许许多多关于思维的推测,这些推测既有解剖学方面的,也有精神方面的。一直到了神经解剖学家和神经生理学家提出人脑的通信连接机制,才对大脑有了一点了解。到了 20 世纪 40 年代初期,对神经元的功能及其功能模式的研究结果才足以使研究人员通过建立起一个数学模型来检验他们提出的各种猜想。在此期间,产生了两个重大成果,它们构成了人工神经网络萌芽期的标志。

1943 年,心理学家 McCulloch 和数学家 Pitts 建立起了著名的阈值加权和模型,简称为 M-P 模型。1943 年,McCulloch 和 Pitts 总结了生物神经元的一些基本生理特征,对其一阶特性进行形式化描述,提出了一种简单的数学模型与构造方法,这一结果发表在数学生物物