



刘 洪 马力宁 黄 桢 编著

集成化人工智能技术 及其在石油工程中的应用

JICHENGHUA RENGONG ZHINENG JISHU
JIQI ZAI SIYOU GONGCHENG ZHONG DE YINGYONG

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

集成化人工智能技术 及其在石油工程中的应用

刘 洪 马力宁 黄 桢 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

综合集成化人工智能技术已经成为人工智能发展的历史性的发展趋势。应用综合集成化人工智能技术来解决石油工程复杂大系统课题,在理论和实际应用上具有重要的意义。本书系统介绍了人工智能技术的基本原理与方法,分析论述了综合集成化人工智能技术的基本理论、研究方法和技术,并将综合集成化人工智能技术应用于油气田勘探工程、油气井工程、油气田开发工程和油气集输系统中的智能优化决策中,给出了集成化人工智能技术在石油工程系统中的模式识别、参数优选、系统优化及效果预测等方面的大量应用实例,汇集了综合集成化人工智能技术的最新进展和成果。

本书理论与实践相结合,介绍了一系列的新理论、新技术和新方法,可作为从事人工智能、石油工程系统等相关领域并具有一定理论基础的科研人员、工程技术人员以及高校师生学习、借鉴和参考。

图书在版编目(CIP)数据

集成化人工智能技术及其在石油工程中的应用 / 刘洪等编著.

北京:石油工业出版社,2008.10

ISBN 978-7-5021-6597-0

I. 集…

II. 刘…

III. 人工智能 - 应用 - 石油工程

IV. TE-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 164893 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:20

字数:506 千字 印数:1—1500 册

定价:80.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

21 世纪人类将进入智能工业时代,“智能化”是当前新技术、新产品、新产业的重要发展方向、开发策略和显著标志,例如:智能控制、智能自动化、智能搜索引擎、智能浏览器和网络智能体等。

由于对人类智能(AI)的模拟的常用方法各有特点,如人工神经网络善长于直接从数据中进行学习、演化计算对求解全局最优问题有很好的效果,而模糊逻辑则具有较强的描述和推理能力等。因此,综合集成化人工智能技术已经成为人工智能发展的历史性的发展趋势。

油气勘探开发的对象是在时间和空间上都呈动态发展的复杂的地质情况,所采集到的信息中大量是非结构化和不确定性的,用传统的数学方法很难对其进行处理和分析,有时甚至是不可能的。同时,随着石油业内人士对智能井、智能化油田、实时分析解释大量数据以实现工艺优化的热情和兴趣日益增长,油气工业对未来人类智能系统可能提供的巨大潜能已有了清晰的认识,对高效、稳定、耐用的智能工具的需求也大大增强。近年来,人工智能技术在油气工业的主流产业中发挥越来越重要的作用,如在石油工业资产评估、三维和四维地震资料解释、复杂多分支井钻井设计及实施、测井资料解释、地质模型建立、生产测试设计实施及解释和油藏建模及模拟等方面得到了广泛的应用和发展。但集成化人工智能技术在石油工程系统中的应用研究方面还需要进一步开展工作。

大量的现场实践证明,针对石油工程系统这种涉及多因素、多目标、多变量的综合性复杂大系统的特点,人工智能综合集成化方法应成为一种重要研究手段。

书中系统介绍了综合集成化人工智能技术的最新研究进展和成果及发展方向,给出了石油工程系统中集成化智能技术的大量应用实例,总结了著者近几年来在综合集成化人工智能技术及其在石油工程系统中的应用研究工作成果。

全书共分为 6 章:第 1 章系统介绍了人工智能技术的发展现状及发展趋势,概述了人工智能技术在石油工程系统中的应用;第 2 章简单介绍了人工智能技术的各个分支的基本理论与方法;第 3 章详细介绍了综合集成化人工智能技术的基本理论、研究方法和技术;第 4 章至第 6 章分别详细介绍了综合集成化人工智能技术在油气田勘探、油气井工程、油气田开发工程和油气集输系统中的应用。

本书第 1 章第 1 节和第 3 节、第 2 章、第 4 章、第 5 章由重庆科技学院刘洪编写,第 1 章第 2 节和第 3 章由青海油田分公司马力宁编写,第 6 章由黄桢编写。

本书涉及的内容属于学科发展的前沿,包括了很多的新技术和新方法体系,一些理论和技术还需要在大量的实践应用中进一步发展和完善,因此,编写中不可避免有不足之处,恳请读者提出宝贵的意见和建议。

刘 洪

2007 年 10 月于重庆科技学院

目 录

1	绪论	1
1.1	人工智能及其发展	1
1.2	人工智能技术现状与发展趋势	9
1.3	人工智能技术在石油工程中的应用概述	13
	参考文献	16
2	集成化人工智能技术	21
2.1	集成化人工智能技术与石油工程系统	21
2.2	模糊神经网络	23
2.3	神经网络专家系统	25
2.4	遗传神经网络	27
2.5	灰色系统与神经网络	29
2.6	粗神经网络	34
2.7	混沌神经网络	43
2.8	混沌遗传算法	53
2.9	基于支持向量机的集成化智能技术	57
2.10	基于人工免疫系统的集成化智能技术	65
	参考文献	71
3	集成化智能技术在油气勘探中的应用	73
3.1	地震解释中的集成化智能技术	73
3.2	沉积相识别中的集成化智能技术	81
3.3	基于灰色理论和 CP 网络的储层评价技术	90
3.4	油气水层识别中的集成化智能技术	97
3.5	基于遗传神经网络的测井储层参数预测	102
3.6	基于神经网络和模糊逻辑的裂缝识别技术	109
	参考文献	111
4	集成化智能技术在钻井工程中的应用	113
4.1	智能化钻井工程系统发展及应用	114
4.2	基于模糊自适应 Hamming 网络钻井过程岩性识别	119
4.3	基于神经网络的混合决策树及造斜点位置确定	126
4.4	钻柱系统故障智能诊断方法及应用	136
4.5	集成化智能钻井安全监控系统原理及应用	142
4.6	套管柱强度设计的遗传算法应用	152
	参考文献	158
5	集成化智能技术在油气田开发工程中的应用	160
5.1	油藏工程中的集成化智能技术及应用	160

5.2	智能抽油机综合采油控制系统	187
5.3	注水系统决策中的集成化智能技术	205
5.4	油气田增产稳产决策中的智能技术	223
5.5	水淹层识别与剩余油挖潜的智能决策	232
5.6	提高采收率中的集成化智能技术及其应用	241
5.7	试井解释中的集成化智能技术及应用	249
5.8	储层伤害预测与改造方案智能决策	258
5.9	稠油开采方式决策神经网络专家系统	263
5.10	基于混合遗传算法的新型防砂筛管优化设计	266
	参考文献	271
6	集成化智能技术在油气集输系统的应用	275
6.1	天然气负荷预测的集成化人工智能技术	275
6.2	油气集输系统优化设计的集成化智能技术	282
6.3	油气管道安全保障中的集成化人工智能技术	296
	参考文献	310

1 绪 论

1.1 人工智能及其发展

人工智能 (Artificial Intelligence, 简称 AI) 是 1956 年美国的 M. Minsky、H. Simon 以及 J. McCarthy 等人在 “Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence” 中首次提出的, 是一门综合了控制论、信息论、系统论、计算机科学、神经生理学、心理学、遗传学、数学及哲学等多种学科的交叉学科。专家系统、智能决策、智能机器人、自然语言理解以及机器学习、机器发现、机器证明等方面的成就均显示了人工智能的巨大威力, 人工智能研究带来的理论和洞察力指引了计算技术发展的未来方向, “智能化” 是当前新技术、新产品、新产业的重要发展方向、开发策略和显著标志。人工智能、空间技术与原子能利用被人们誉为现代科学技术在应用领域的三大重要标志。

美国 Stanford 大学人工智能研究中心的 Nissson 教授认为: “人工智能是关于知识的科学, 是怎样表示知识及怎样使用知识的科学”。MIT 的 Winston 教授指出: “人工智能就是研究如何使用计算机做过去才能做的智能的工作”。这些定义反映了人工智能学科的基本思想和基本范围。在广义上, 一般认为人工智能是用计算机模拟人类的智能行为, 使机器具有类似人类的智能行为, 使机器思维 (Making Machine “Think”), 并开发相应的理论与技术。在狭义上, 人工智能方法是指人工智能研究的一些核心内容, 如搜索技术、推理技术、知识表示、机器学习与人工智能语言等方面^[1]。

关于人工智能, 科学界存在各种各样的认识和看法, 这些看法可以归纳为技术观、模拟观、建模观、理论观: (1) 技术观将人工智能视为一门技术。技术观追求人工智能的工程目标, 即智能机的实现。技术观只注重智能机的外部功能, 不关心智能机的工作过程。技术观认为, 只要机器能做那些原来需要人的智能才能完成的工作, 机器便具有了智能。(2) 模拟观着眼于计算机程序复现人脑在完成同一任务时的内部状态和过程, 强调必须先了解人脑的活动机制, 才能通过模拟使机器表现出智能。建模观希望基于数学模型的理论和方法, 建立人脑的模型。(3) 建模观认为通过对人脑输入输出信号的观察, 即对人脑外部行为的观察, 可以建立人脑的数学模型, 这种模型与人脑在外部行为上的相似性将使机器表现出智能。(4) 理论观注重理解形成或产生智能的规律和原理。理论观追求人工智能的科学目标, 试图建立使智能成为现实的原理。

1.1.1 人工智能的主要学派及特点

对人类智能本质的不同认识导致了人工智能研究的不同途径, 并由此产生出符号主义、进化主义和连接主义三大学派^[2,3]。

1.1.1.1 符号主义学派 (Symbolism)

符号主义, 又称为逻辑主义、心理学派或计算机学派, 基本理论为物理符号系统 (即符号操作系统)、假设和有限合理性原理。学派的代表人物有 Newell、H. Simon 和 Nissson 等, 代表性成果有 Newell、H. Simon 的 “通用问题求解器的智能学习” 和 Nissson 的 “人工智能

中的问题求解方法”等。核心思想包括：(1) 人的认知基元是符号，认知过程为符号操作过程，因此，用计算机的符号操作可以模拟人的智能行为；(2) 知识是信息的一种形式，是构成智能的基础。人工智能的核心问题是知识表示、知识推理和知识运用。知识可用符号表示，也可用符号进行推理，因此，有可能建立起基于知识的人类智能和机器智能的同一理论体系。符号主义学派主张的人工智能研究方法为功能模拟法，即通过分析人类认知系统所具备的功能和机能，然后用计算机模拟这些功能，实现人工智能。符号主义在 20 世纪 80 年代取得很大发展，曾长期一枝独秀，为人工智能的发展作出了重要贡献，尤其是专家系统的成功开发与应用对促进人工智能走向工程应用具有特别重要的意义。

1.1.1.2 连接主义学派 (Connectionism)

连接主义，又称为仿生学派或生理学派，其原理主要为神经网络及神经网络间的连接机制与学习算法。其核心思想包括：(1) 人的思维基元是神经元，而不是符号处理过程，认为人脑不同于电脑，并提出了大脑工作模式；(2) 人工智能源于仿生学，应着重于结构模拟，即模拟人的生理神经网络结构，认为功能、结构和智能行为是密切相关的，不同的结构表现出不同的功能和行为。代表人物有生理学家 McCulloch、数理逻辑学家皮茨和 Hopfield，代表成果为 1943 年由 McCulloch 和皮茨创立的脑模型，即 MP 模型，开创了用电子装置模仿人脑结构和功能的新途径，它从神经元开始进而研究神经网络模型和脑模型，开辟了人工智能的又一发展道路。1986 年鲁梅尔哈特等人提出了多层网络中的反向传播 (BP) 算法，此后，连接主义从模型到算法、从理论分析到工程实现为神经网络计算机走向市场打下基础。

直到现在，对于人工神经网络的研究正方兴未艾。但是，一方面由于现有脑模型研究成果还不能精确反映人脑的实际模型；另一方面，大量的研究还是基于冯·诺依曼型串行机器来实现或模拟连接机制固有的大量并行操作，不能充分发挥连接机制的潜力。因此，不管在理论模型还是硬件技术上，对于连接机制都有待于进一步的研究。

1.1.1.3 进化主义学派 (Actionism)

进化主义，又称行为主义或控制论学派，其原理为控制论及感知—动作型控制系统。行为主义学派认为智能取决于感知和行动，提出了智能行为的“感知—动作”模式，认为智能不需要知识、不需要表示、不需要推理，人工智能可以像人类智能一样逐步进化，智能行为只能在现实世界中与周围环境交互作用才表现出来。行为主义学派认为人工智能源于控制论，控制论把神经系统的工作原理与信息理论、控制理论、逻辑以及计算机联系起来，到 20 世纪 60~70 年代，控制论系统的研究取得一定进展，播下了智能控制和智能机器人的种子，并在 20 世纪 80 年代诞生了智能控制和智能机器人系统。行为主义是近年来才以人工智能新学派的面孔出现的，引起许多人的兴趣与研究。这一学派的代表作首推布鲁克斯的六足机器人，它被看作新一代的“控制论动物”，是一个基于感知—动作模式的模拟昆虫行为的控制系统。

1.1.2 人工智能发展简史

人工智能从诞生发展到今天经历了一条漫长的路，许多科研人员为此而不懈努力，发展了众多的理论和原理，人工智能的概念也随之扩展，人工智能技术也从实验室研究进入日常生活，影响和促进到了其他技术的发展。

人工智能在 20 世纪经历了四个发展阶段^[1,4]：20 世纪 50 年代是神经网络时代，60 年代是弱方法时代，70 年代是知识工程时代，80~90 年代及以后是知识工业时代。

19 世纪以来，数理逻辑、控制论、信息论、仿生学、计算机等学科的发展为人工智能的诞生奠定了基础。1936 年，被称为人工智能之父的英国数学家 A. M. Turing 提出了理想计算机模型——图灵机，创立了自动计算机理论，证明了计算机可能以某种被理解为智能的方法工作。

20 世纪 50 年代，以游戏、搏奕为对象开始了人工智能的研究。其间以电子路线模拟神经元及人脑，但没有成功。Rosenblatt 研制的感知机是一种将神经元用于识别的系统，其学习功能引起了广泛的兴趣，推动了连接主义的研究。但是，人们很快发现了感知机不能解决复杂的识别问题的局限性，连接主义又转入低潮。

20 世纪 60 年代的前期以搜索法、一般问题求解的研究为主，后期人工智能的研究中心是智能机器人。机器定理证明取得了重大进展，对规划问题也作了研究，提出了归纳原理、语言网络的知识表示方法以及专家系统。

20 世纪 70 年代前期虽然人工智能受到责难，但是人工智能学者仍进行了有成效的研究。以自然语言理解、知识表示的研究为主，认识到仅靠推理是不够的，知识对于实现智能最为重要。后期以知识工程、认知科学的研究为主，符号主义的研究获取了很大发展，出现了专家系统开发工具并得到了广泛的应用，如股市预测、帮助医生诊断疾病、指示矿工确定矿藏位置等，人工智能产业日益兴起。同时，许多新方法用于人工智能开发，如 Minsky 的构造理论，David Marr 的机器视觉方面的新理论以及 1972 年提出 PROLOGE 语言等。

20 世纪 80 年代，以推理技术、知识获取、自然语言理解和机器视觉的研究为主，开始了确定推理、非单调推理、定理推理方法的研究。机器学习或知识获取已成为人工智能界的热门话题。连接主义有了突破性的进展，特别是 Hopfield 提出的网络模型和 Rumelhardt 等人提出的多层网络学习算法又把连接主义推向高潮。同时，人工智能技术开始进入市场，如机器视觉用于质量控制，到 1985 年美国有一百多个公司生产机器视觉系统，销售额共达八千万美元，1986 年，美国人工智能相关软硬件销售高达 4.25 亿美元。专家系统得到了广泛应用，如数字电气公司用 XCON 专家系统为 VAX 大型机编程，杜邦、通用汽车公司和波音公司也大量开始使用专家系统。

20 世纪 90 年代以后，在物理符号系统假设和基于知识的启发式求解方法指导下，在专家系统、机器系统、机器翻译、机器视觉、问题求解等方面的研究已有实际应用，对知识表示、常识推理、机器学习、分布式人工智能以及智能机器体系结构等基础性研究方面都取得了可喜的进展。但是，随着研究的深入，符号主义观点与方法的局限性也逐渐暴露出来，由于知识表示、知识获取的困难以及巨大的计算量等问题，使连接主义又重新成为研究热点。利用人工神经网络模仿人类智能的研究有了很大发展，可以进行自学习，有自适应功能，能更好地模仿人类智能。然而，神经网络虽然避开了知识表示带来的困难，但神经元间连接的权值选取又成了难题。进化算法开始崛起，并很快风靡全球，在很多领域广泛采用，形成了人工智能学科的一个新的强力分支，使人工智能研究得以持续高涨，人工智能的发展已进入了一个崭新的阶段。

1.1.3 人工智能的主要分支

近年来，由于人工智能技术的迅速发展，其研究对象进一步延伸，扩展到了所谓智能活动的外围过程，如视觉、听觉，语言识别及应用等，使人工智能的研究范围更全面，更接近于人的大脑。

目前，人工神经网络、模糊逻辑理论、专家系统和遗传算法等一起构成了人工智能的四大方向，得到了广泛的应用与发展。同时，也出现了一些新的发展方向 and 分支，如统计学习理论、人工免疫系统等。人工智能的主要分支包括^[1,5,6]：

1.1.3.1 专家系统

专家系统（Expert System，简称 ES）是人工智能技术中发展最早、应用最广泛的一种技术，它主要解决非结构化的问题，即尚未建立或无法建立精确数学模型的问题，并在信息不完整或含有轻度噪声的情况下仍能给出一个合理的结论。近 20 年来，专家系统的研究与发展十分迅速，各种专家系统已经逐步进入使用阶段，产生了巨大的社会效益和经济效益，目前已扩展到数学、物理、化学、医学、地质、农业、交通以及计算机科学本身，甚至包括政治、军事等重要的决策领域，广泛应用于解决如故障诊断、报警处理、系统恢复、负荷预测、检修计划安排、无功电压控制和规划设计等问题。

专家系统是以知识为基础的智能推理系统，与通用问题求解系统不同，专家系统强调在某一专业领域中积累大量的知识，包括实现范例以及该领域专家们所具有的经验 and 规律。当然，这些规律并不要求很严谨，但必须是有启发性的，这些知识构成数据库，系统在知识库的基础上发展其专门领域的知识，使系统达到模拟专家的程度。

专家系统主要特点有：（1）专家系统是解决很难用精确的数学语言描述也没有确定的算法去解决复杂而专门的问题。解决这些问题需要专家知识，包括理论知识和实际经验；（2）专家系统不同于传统的数据处理算法，而是突出知识的价值，推广和应用专家知识；（3）专家系统采用人工智能原理和技术，如符号表示、符号推理和启发搜索等。

1.1.3.1.1 专家系统的结构

专家系统是通过问题的形式化、求解过程的机械化和机械过程的自动化实现三个环节所对应的人工智能的知识表示技术、机械化、自动化推理技术和系统构成技术等三大技术所构成的。专家系统的具体结构主要有知识库、数据库、推理机、解释器、知识获取（学习系统）和人机界面组成，其中，知识库和推理机是专家系统的核心，如图 1-1 所示。

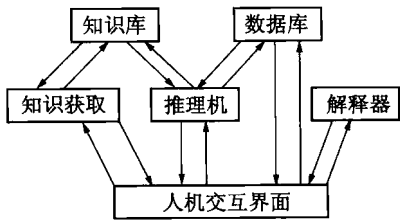


图 1-1 专家系统的基本结构

1.1.3.1.2 专家系统的局限性

（1）知识获取难。知识获取的主要途径是机器学习、机器感知和人工移植。目前，前两种知识获取途径的能力还很低，大部分专家系统的知识获取还需要人工移植，即知识工程师通过与专家交谈获取专家的经验知识。对于一些很难用语言描述的经验 and 知识、多个领域专家之间互相矛盾的知识，知识工程师往往会束手无策。因此，行业专家的局限性使专家系统的应用范围也有局限性，同时，至今尚无较好的方法使已建立的专家系统能自动获取知识来扩充专家的知识库和使用范围，这些问题已成为应用专家系统的一个“瓶颈”，亟需研究解决。

（2）处理复杂问题的时间长。对于一个复杂的系统，计算机要花费较长的时间一个一个地处理程序代码，限制了计算机执行高速运算的性能，难以适应实时系统的要求。

（3）容错能力差。计算机采用局部存储方式，不同的数据和知识存储时互不相关，程序中微小的错误都会引起严重的后果，系统表现出极大的脆弱性。

（4）基础理论还不完善。专家系统的本质特征是基于规则的逻辑推理思维，然而，迄今的逻辑理论仍然很不完善，现有的逻辑理论的表达能力和处理能力有很大的局限性，因此，

专家系统的知识表达和推理结果都过于粗糙。

1.1.3.2 模糊理论

模糊理论是 1965 年 L. A. Zadeh 提出模糊 (Fuzzy) 数学 (或集合论) 后发展起来的模糊推理理论和模糊聚类方法。Fuzzy 技术是近年来迅速发展的新技术, 模糊聚类方法吸取了模糊数学中很有用的概念, 大大增加了用智能方法进行识别聚类和分析时的有用信息, 可以提高分析和识别的准确性, 减少递归运算的次数, 提高分析、识别及聚类的速度, 在一定程度上解决了专家系统、模式识别和智能机器人中的一些问题。

人工智能主要是研究和模拟人的智能行为, 即人脑的思维方式, 而人脑的思维不像经典数学那样有精确性, 具有很大的不确定性、非单调性和模糊性。L. A. Zadeh 教授认为人工智能中需要逻辑, 但所需要的不是一阶逻辑, 而是模糊逻辑, 即作为不精确或近似推理基础的逻辑。模糊数学的产生为计算机更好地模拟人的智能行为作出了重要贡献, 在人工智能领域已得到广泛应用, 用它可以解决专家系统中因二值逻辑产生的知识表达过于粗糙的问题, 并用 Fuzzy 推理规则产生了非精确性推理方法, 如知识表示及推理、语言加工、故障诊断和机器人控制等。

1986 年, 世界上第一块基于模糊逻辑的人工智能芯片在著名的贝尔实验室研制成功。模糊数学的研究紧密联系着计算机科学的发展, 作为一种表现和加工模糊信息的数学工具, 它是人工智能研究中的一个不可缺少并极为有用的重要工具, 将模糊数学与人工智能相结合已成为人工智能研究的一个重要方向。

1.1.3.3 人工神经网络

人工神经网络 (Artificial Neural System, 简称 ANS) 是近几年来迅速发展的人工智能新技术, 比专家系统和模糊理论等具有更高的水平, 擅长于处理复杂的多维非线性问题, 既可以解决定性问题, 又可用于解决定量问题, 是计算机与人工智能、认知科学、神经生理学和非线性动力学等相关专业的热点, 是当今迅速发展的人工智能新技术, 也是与诸多学科相结合的世界性前沿学科。

人工神经网络除了具有与专家系统、模糊推论所具有的推理功能外, 还具有专家系统、模糊理论所不具备的很多智能功能, 可以说它具有更接近于人的大脑的识别及思维能力, 具有较强的形象思维能力、更强的逻辑推理和归纳能力、并行处理、分布式存储、联想记忆、大规模协同作用及集体效应等一系列类似人的大脑作用机理的特点, 并且已经在人工视觉系统、模式识别、语音识别、图像识别及处理、智能控制等诸多领域得到了广泛应用, 提高了人工智能的水平。

人工神经网络的主要特点有:

(1) 由于神经网络模仿人的大脑, 采用自适应算法, 使其比专家系统的固定的推理方式及传统计算机的指令程序方式更能够适应环境的变化、总结规律、完成某种运算、推理、识别及控制任务。因此, 人工神经网络智能水平更高, 更接近人的大脑。

(2) 较强的容错能力。如将神经网络和人工视觉系统—光电扫描读入器有机结合, 能够像人一样根据对象的主要特征去识别对象。

(3) 自学习、自组织功能及归纳能力。人工神经网络的自学习、自组织功能及归纳能力使其能够对不确定的、非结构化的信息以及图像进行识别、处理。石油工程中的大量信息就具有这种性质, 因此, 人工神经网络是非常适合石油工程中的信息处理, 如美国国防部 DARPA 专家组论证表明石油勘探的信息处理是人工神经网络最有前景、最可能取得突破性

进展的领域之一。

(4) 分布存储、联想记忆和并行处理。

人的大脑细胞的数目为 $10^{10} \sim 10^{11}$ 数量级, 脑细胞之间的联系和处理信息的方式就是分布存储——联想记忆和并行与串行组合处理的。它既可对客观事物在几毫秒内做出判断、决策和处理, 还可在部分脑细胞失效甚至死亡时不影响大脑的功能, 当大脑局部损伤时也只会引起功能衰退, 但不会使大脑突然丧失功能。

然而, 由于神经网络是运用归纳的方法在原始数据上建立内部知识库, 各单个神经元不存储信息, 网络的知识是编码在整个网络连接权的模式中, 知识表达不明确; 此外, 虽然神经网络一旦学习完成就能迅速地求解, 具有良好的并行性, 但是知识的积累是以网络的重新学习为代价, 时间开销较大。

1.1.3.4 遗传算法—进化算法 (Evolutionary Algorithms, 简称 EA)

近代科学技术发展的显著特点之一是生命科学与工程科学的相互交叉、相互渗透和相互影响, 遗传算法的蓬勃发展正体现了学科发展的这一特征和趋势。遗传算法^[7,8]是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化搜索算法, 是由美国 Michigan 大学的 J. Holland 教授于 1975 年首先提出的。遗传算法的主要特点是群体搜索策略和群体中的个体之间的信息交换, 搜索不依赖于梯度信息。遗传算法作为一种模仿生物进化过程的高效、并行、全局优化方法, 由于其极强的鲁棒性与广泛的适应性, 尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂的非线性问题, 可广泛用于组合优化、机器学习、自适应控制、规划设计和人工生命等科学领域, 是 21 世纪有关智能计算中的关键技术之一。

经过近 40 年的发展, 遗传算法的理论研究和应用在许多领域都取得了丰硕的成果, 特别是近年来世界范围的进化计算研究热潮, 智能计算已成为许多应用学科研究的重要方向。从 1985 年在美国卡耐基梅隆大学召开的第一届国际遗传算法会议 (International Conference on Genetic Algorithms: ICGA' 85) 到 1997 年 5 月 IEEE 的 “Transactions on Evolutionary Computation” 创刊, 遗传算法作为具有系统优化、适应和学习的高性能计算和建模方法的研究渐趋成熟。近年来, 许多冠以 “遗传算法” 的研究与最初提出的算法已少有雷同之处, 不同遗传基因表达方式, 不同的交叉和变异算子, 特殊算子的引进以及不同的再生和选择方法, 但这些改进方法产生的灵感都来自大自然的生物进化, 于是人们就用进化计算包容其所有内容。

进化计算基本分为四个分支: 遗传算法、进化规划、进化策略和遗传程序设计。有些学者已经将遗传算法与人工智能结合, 认为进化计算是人工智能的未来。目前, 进化计算与人工神经网络、模糊系统理论一起已形成一个新的研究方向——计算智能。

1.1.3.4.1 遗传算法的特点

(1) 遗传算法的处理对象不是参数本身, 而是以决策变量的编码作为运算对象。传统优化算法直接利用决策变量进行计算, 而遗传算法是对决策变量进行编码处理, 并借鉴生物的遗传和进化等机理进行优化计算。

(2) 遗传算法搜索过程中基本不用其他辅助信息, 直接以目标函数值作为搜索信息。传统优化算法需要目标函数值及其导数才能确定搜索方向, 而对那些多目标问题及导数难以确定的问题, 遗传算法就非常方便, 避开了求导的障碍, 直接利用目标函数的适应度的值, 提高搜索效率。

(3) 遗传算法使用多个搜索点的搜索信息, 是从一个点的群体进行概率搜索。传统的方

法迭代的搜索形式是以单个点出发，搜索信息比较少，搜索效率低。遗传算法是从多个个体组成的群体中进行搜索，再对群体进行选择、交叉和变异，产生新的群体搜索，从而搜索到更多的点。

(4) 遗传算法不是采用确定的规则进行搜索，而是使用全局概率搜索技术。自适应的概率搜索技术突破了传统的确定规则的搜索方法，使得搜索过程更加灵活。

1.1.3.4.2 遗传算法的应用

遗传算法不依赖于问题的具体领域，具有自适应性、全局优化性和隐含并行性，体现出很强的解决问题的能力，已经广泛应用于很多学科。

(1) 函数优化和组合优化。通过对各种几何特性不同的函数的计算结果表明遗传算法具有较好的性能。对于一些非线性、多模型、多目标的函数优化问题，遗传算法也能得到较好的结果。同时，对于大规模的组合优化问题，传统的枚举法很难得到其精确最优解，而遗传算法则是寻求这种满意解的最佳工具之一。实践证明，遗传算法对于组合优化问题的 NP 完全问题非常有效，如遗传算法已经在求解旅行商问题、背包问题、装箱问题和图形划分问题等方面得到成功的应用。

(2) 生产调度问题。生成调度问题在许多情况下所建立起来的数学模型难以精确求解，虽然经过一些简化之后可以进行求解，但却因为简化太多而使得求解结果与实际相差甚远。遗传算法已成为解决复杂调度问题的有效工具，在单件生产车间调度、流水线生产车间调度、生产规划和任务分配等方面遗传算法都得到了有效的应用。如 Cartwright 关于化工厂生产计划的优先安排、Syswerda 关于飞行支持设备调度问题、Hilliard 关于运输军队及其装备多目标通路的作业调度、Gabbert 关于铁路网络复杂运输调度等问题，采用遗传算法均取得了明显的效果。

(3) 自动控制。在自动控制领域中有许多与优化相关的问题需要求解，遗传算法的应用日益增加并显示了良好的效果，如遗传算法进行航空控制系统的优化、基于遗传算法的模糊控制器优化设计、Maclay 等人用遗传算法求解电车模型参数辨识问题、Freeman 等人提出应用遗传算法精调控制中的由人定义的模糊逻辑集合概念等都显示了遗传算法在这些领域的应用，取得了显著的效果。

(4) 人工智能与计算机科学。人工智能是计算机等人工媒体模拟或构造出具有自然生物系统特有行为的人造系统。人工智能与遗传算法有着密切的关系，基于遗传算法的进化模拟是研究人工智能的重要理论基础。遗传算法在人工智能与计算机科学中的应用包括数据挖掘与知识获取、数据库查询优化、人工神经网络结构与参数优化、模式识别和专家系统等。

遗传算法的特点决定其适合求解组合优化问题，多变量、多目标优化问题，结构复杂问题等。但是如何根据具体的问题设计有效的遗传算法以提高计算速度及解决约束优化问题等方面还有许多工作要做，而且其本身还有一些问题尚未解决，如种群规模的确定、杂交和变异的概率等控制参数的确定等。为此，人们对传统的遗传算法作了诸多的改进，如将遗传算法与模拟退火等其他算法结合形成混合遗传算法，使用多群体遗传策略，采用自适应变异算子等。

1.1.3.5 统计学习理论与支持向量机

统计学习理论^[9,10] (Statistical Learning Theory 或 SLT) 是一种专门研究小样本情况下机器学习规律的理论，是建立在一套较坚实的新的理论基础之上的，为解决有限样本学习问题提供了一个统一的框架，在这种体系下的统计推理规则不仅考虑了对渐近性能的要求，而

且追求在现有有限信息的条件下得到最优结果。统计学习理论能将很多现有方法纳入其中,有望帮助解决许多原来难以解决的问题(比如神经网络结构选择问题和局部极小点问题等)。V. Vapnik 等人从 20 世纪六七十年代开始致力于此方面研究,到 90 年代中期,随着其理论的不断发展和成熟,也由于神经网络等学习方法在理论上缺乏实质性进展,统计学习理论开始受到越来越广泛的重视。统计学习理论的一个核心概念就是 VC 维(VC Dimension)概念,它是描述函数集或机器学习的复杂性或者说是学习能力的一个重要指标,在此概念基础上发展出了一系列关于统计学习的一致性、收敛速度、推广性能等的重要结论。

支持向量机(Support Vector Machine,简称 SVM)是在统计学习理论的 VC 维理论和结构风险最小原理基础上发展起来的新一代学习算法,是统计学习理论的一大杰出部分。支持向量机方法根据有限的样本信息在模型的复杂性(即对特定训练样本的学习精度)和学习能力(即无错误地识别任意样本的能力)之间寻求最佳折中,以期获得最好的推广能力,已初步表现出很多优于已有方法的性能,在模式识别、回归估计、概率密度函数估计等很多领域得到了成功的应用,如在模式识别方面,对于手写数字识别、语音识别、人脸图像识别、文章分类等问题,SVM 算法在精度上已经超过传统的学习算法或与之不相上下。一些学者认为,SLT 和 SVM 正在成为继神经网络研究之后新的研究热点,并将推动机器学习理论和技术有重大的发展。

支持向量机方法的主要优点有:

(1) 支持向量机方法是专门针对有限样本情况的,其目标是得到现有信息下的最优解而不仅仅是样本数趋于无穷大时的最优值;

(2) 算法最终将转化成为一个二次型寻优问题,从理论上说,得到的将是全局最优点,解决了神经网络方法中无法避免的局部极值问题;

(3) 算法将实际问题通过非线性变换转换到高维的特征空间,在高维空间中构造线性判别函数来实现原空间中的非线性判别函数,从而保证机器有较好的推广能力,同时,它巧妙地解决了维数问题,其算法复杂度与样本维数无关。

在 SVM 方法中,只要定义不同的内积函数,就可以实现多项式逼近、贝叶斯分类器、径向基函数(RBF)方法、多层感知器网络等许多现有的学习算法。

1.1.3.6 人工免疫系统

人工免疫系统(Artificial Immune System,简称 AIS)是对生物免疫系统的模拟,是借鉴和利用生物免疫系统的信息处理机制而发展的各类信息处理技术、计算技术以及在科学工程领域中应用而产生的各种智能系统的统称。

基于生物免疫机理开发的人工免疫系统具有强大的鲁棒性信息处理和解决复杂问题的能力。从工程角度上讲,人工免疫系统具有许多有意义的特性。免疫计算系统结合先验知识和免疫系统的适应能力给当前智能控制提供了一种强大的选择,因此,具有新颖的解决复杂问题的能力。从信息科学角度来讲,人工免疫系统是一个杰出的并联和分布式的自适应系统,它使用学习、记忆和关联检索来完成识别和分类任务,具有强大的鲁棒性信息处理能力,被认为是一个非常重要且非常有意义的研究方法。从生物角度来看,开发基于生物免疫系统的计算机模型有助于人们进一步认识和发展生物免疫学,将会带给人类社会更大的进步^[11]。

人工免疫系统是一个跨学科的研究领域,是与生物免疫系统相对应的工程概念。目前,人工免疫系统已发展成为计算智能研究中一个崭新的分支,其应用领域已经逐渐扩展到了模式识别、智能优化、机器学习、数据挖掘、自动控制^[12~14]、机器人^[15]、信息安全^[16]和故障

诊断^[17]等诸多领域，显示出人工免疫系统强大的信息处理和问题求解能力，具有广阔的研究前景。

1.2 人工智能技术现状与发展趋势

21 世纪人类将进入智能工业时代，“智能化”是当前新技术、新产品、新产业的重要发展方向、开发策略和显著标志，例如：智能控制、智能自动化、智能搜索引擎、智能浏览器和网络智能体等。

1.2.1 人工智能技术现状

近年来，国内外在人工智能领域研究出现了一批重要成果，它们从一个侧面反映出人工智能领域当前的发展水平和动向^[18~20]。

(1) 通用智能体系结构 Soar。20 世纪 80 年代，以 Newell A 为代表的研究学者总结了专家系统的成功经验，吸收了认知科学研究的最新成果，提出了作为通用智能基础的体系结构 Soar。目前的 Soar 已经显示出强大的问题求解能力。在 Soar 中已实现了 30 多种搜索方法，实现了若干知识密集型任务（专家系统），如 RI 等。Soar 体系结构具有以下特点：所有的任务都形式化为问题空间的启发式搜索、自动寻子目标（subgoalings）机制、通用弱方法体系结构、统一的知识表示和统一的学习机制等。

(2) IBM 公司研制的“深蓝”系统是以“深思”为基础的。“深思”是由 C. B. Hsu 和 Thomas Anantharaman 在卡耐基梅隆大学开发的第一个得到特级大师称号的国际象棋对弈系统。在 1996 年 ACM 比赛中，深蓝第一次向 Gary Kasparov 挑战并赢得首场比赛胜利。当时的“深蓝”运行在带有 256 个处理单元的 IBM SP-2 处理器上，每秒能分析 1 亿步以上。

(3) 无需符号表示的智能。Brooks 提出了人工智能的一种新的途径，认为无需概念或者说无需符号表示，智能系统的能力可以逐步进化。其研究中突出 4 个概念：①所处的境遇（Situatedness）。机器人不涉及抽象的描述，而是处在直接影响系统的行为的境地。②具体化（Embodiment）。机器人有躯干，有直接来自周围世界的经验，他们的感官起作用后立立即会有反馈。③智能（Intelligence）。智能的来源不仅仅是限于计算装置，也是由于与周围进行交互的动态决定。④浮现（Emergence）。从系统与周围世界的交互以及有时候系统的部件间的交互浮现出智能。

(4) Hewitt 的开放信息系统的设想。Hewitt 的开放信息系统其核心在“开放”。无论是学习过程还是问题求解过程，“矛盾”是允许的。Hewitt 的贡献在于从一个更广泛的意义下讨论这个问题，即从社会学角度来看人工智能系统。Hewitt 认为智能行为不仅仅体现在构成世界的每个个体的活动，而更应该体现在各个个体之间的相互依存的活动中。因此，他认为新人工智能系统应由一系列“自力”的个体组成。在问题求解时，可以发生争论，争论的目的是为了找到问题更准确的答案，同时在争论的过程中发生学习过程。Hewitt “开放”意义的基础不仅是在一个体系中允许存在矛盾，而且又加入了一个更复杂的因素，即新知识是在这个矛盾的体系中发生争论后产生信息交换的结果。Hewitt 的工作目前应该说还停留在概念讨论上，主要原因是还未找到一个合适的数学基础来描述这样的一个过程。

(5) 知识的阈值理论。美国的人工智能专家 D. B. Lenat, Feigenbaum EA 提出的知识

的阈值理论是逻辑主义学派的典型代表。知识的阈值理论由知识原理、宽度假设、实验验证假设和困难问题假设等组成，强调知识量有一个从量变到质变的进程，认为脱离广泛的背景知识的系统对智能是无能为力的，并反对过分追求一般化形式化方法。

目前，人工智能技术在美国、欧洲和日本依然飞速发展。在人工智能技术领域十分活跃的 IBM 公司已经为加利福尼亚州劳伦斯·利佛摩尔国家实验室制造了 ASCI White 电脑，号称具有人脑的千分之一的智力能力，而正在开发的更为强大的新超级电脑——“蓝色牛仔”（Blue Jean），预计其智力水平将大致与人脑相当。麻省理工学院的 AI 实验室进行一个代号为 cog 项目，cog 计划意图赋予机器人以人类的行为。该实验的一个项目是让机器人捕捉眼睛的移动和面部表情，另一个项目是让机器人抓住从它眼前经过的东西，还有一个项目则是让机器人学会聆听音乐的节奏并将其在鼓上演奏出来。IBM 正在研究一项称为自由信息管理架构（UIMA）的新技术，UIMA 通过把将人工智能的各种学派的思想结合在一起，极大地改善访问计算机和使用数据的方式。UIMA 技术一旦应用到系统中，汽车能够在行驶中实时获得和显示交通状况，工厂能够调节自己的耗油量和优化日程安排。UIMA 技术也可用于自动语言翻译和自然语言处理。UIMA 技术的理论是“混合假设”，认为统计式机器查询（如搜索网站 Google 使用的数据排列智能方法）、句法人工智能和其他技术在不久的将来会结合在一起。

人工智能广大的发展前景及其巨大的发展市场已经被各国和各公司所看好。除了 IBM 等公司继续在人工智能技术上大量投入以保证其的领先地位外，其他公司在人工智能的分支研究方面也保持着一定的投入。微软公司总裁比尔·盖茨在美国华盛顿召开的人工智能国际会议上进行了主题演讲，公开了微软在人工智能方面的研究进展情况，微软研究院目前正致力于人工智能的基础技术与应用技术的研究，其对象包括自我决定、表达知识与信息、信息检索、机械学习、数据采集、自然语言和语音/笔迹识别等。

我国人工智能研究开始于“863 计划”，正值全世界的人工智能热潮。“863-306”主题的名称是“智能计算机系统”，其任务就是在充分发掘现有计算机潜力的基础上，分析现有计算机在应用中的缺陷和“瓶颈”，用人工智能技术克服这些问题，建立起更为和谐的人—机环境。近年来，我国人工智能研究已经从学习国外为主进入自主研究为主的时期，形成了自主研究重大科学前沿和转化科技成果的新局面，在人工智能领域的研究取得了突破进展。例如，在人工智能的理论方法研究方面，提出了机器定理证明的吴氏方法、广义智能信息系统论、信息—知识—智能转换理论、全信息论、泛逻辑学和可拓学等具有创新特色的理论和方法，为人工智能理论的发展提供了新的理论体系。在人工智能的应用技术开发方面，开发了中医专家系统、农业专家系统、汉字识别系统、汉英识别系统和汉英机译系统等具有中国特色的人工智能应用技术和产品。中国科学院院士、清华大学信息科学技术学院院长李衍达教授提出的“知识表达的情感适应模型”独创了“信息建模”的新方法，由计算机提供候选模型，人进行情感选择，人机合作，可以在复杂情况下通过学习有效建立满意的信息模型。中国科学院院士、中科院半导体研究所王守觉的“高维几何与神经网络”独辟蹊径，创造了用高维几何学来描述和设计人工神经网络的新方法，在神经网络计算机理论研究、设计和转化等各个方面都获得了很大成功。中国工程院院士李德毅教授开展的“知识发现的机理研究”，提出了能够统一表示处理随机不定性和模糊不定性的“云模型”，并把这一创新的模型应用于数据挖掘和知识发现等新领域，取得了出色的效果。此外，我国学者自己创建的具有综合特色的人工智能理论格外引人注目，其中，北京科技大学涂序彦教授的“广义人工智

能”阐明和建构了广义人工智能的体系结构。北京邮电大学钟义信教授的“智能论”创建了信息科学方法论和由信息提炼知识、由知识创建智能的信息转换机制。西北工业大学何华灿教授则创建了泛逻辑学。

迄今，对于人工智能的理论研究与应用虽已取得了许多重要的成果，然而，人工智能的发展还面临着如下困难^[20]：

(1) 人类思维的分布/并行性、随机性、不确定性，决定了利用机器的冯·诺依曼型体系结构来模拟人的智能行为不尽合理。

(2) 现有的脑模型与机制还不能确切地反映人类实际思维机理。

(3) 人类思维模式应该和社会/团体的运作机理存在一定的相似性，但研究很少。

(4) 人类思维的机理研究未能在自然发展（特别是生物进化）中汲取足够的营养。

(5) 人工智能的各个学派间的观点和方法间的交叉、渗透和综合程度不够。

(6) 采用独立解决针对单一问题的模式，未能反映出人类思维与自然社会活动的内在联系。

(7) 智能问题常常包涵着并行性与巨大的计算量，必须为此提供相适应的高性能计算资源环境（包括机器本身的性能、资源间的通信、计算模式与系统结构等）。

(8) 解决大型智能问题时，为程序员所提供的资源透明度不够。

上述问题的核心是与人类思维相适应的思维模型及其软/硬件体系结构、通信环境等方面的研究和实现。

1.2.2 人工智能的发展趋势

针对人工智能技术发展所面临的困难和求解大型智能问题的实际需要，人工智能技术研究应在传统理论与实践基础上采取新的观点和方法，综合运用各种技术，开辟新的研究与实验途径，争取人工智能技术研究的新突破。因此，人工智能技术研究出现了多种学科（如脑科学、心理学、生理学、生物化学、认知科学、社会学等）间相互交叉与渗透、与计算机网络技术（如高性能计算机网络，HPCN）相结合、建立适应于人类思维的分布式并行处理模型、构造合适的人工智能技术与实验平台的新趋势^[4,21~26]。

(1) 开展思维科学的研究。人类之所以具有智能是因为人类会思考问题，即人具有思维能力，所以人工智能的基础研究课题应该是思维科学。我国著名科学家钱学森早在 20 世纪 80 年代就提出要开展思维科学研究，尤其要重视形象思维的研究。要想使计算机具有人的智能，必须使计算机具有形象思维能力。钱学森提倡开展思维科学研究，实际上是给人工智能理论研究指明了方向。正如数学家马希文所说：“应该研究思维活动的更深入更具体的规律，提出新的概念、新的方法和新的机制，比信息处理和图灵机更广泛、更深刻地描述思维的某些功能，并把这与某种理论的机器模型联系起来，以期最终得到工程实现。一句话，要研究思维科学。”

(2) 从整体上把握人工智能，多学科协同研究。人工智能的研究目标是认识与模拟人类智能行为。传统的人工智能研究往往将研究重点集中于对人类单个智能品质如计算能力、推理能力、记忆能力、搜索能力、直觉能力等的研究与模拟。然而，由于人类智能行为是各种单个智能品质的综合体现，所以把人类看成有多种智能品质构成的有机整体——智能体（AGENT），综合考察智能体的各种智能行为与特征是当前人工智能研究者共同的愿望。因此，要从整体上把握人工智能。近年来，从整体把握人工智能的 agent 的研究课题已成为人