



普通高等教育“十三五”规划教材

# 人工智能技术

修春波 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

# 人工智能技术

主编 修春波  
参编 卢少磊 苏雪苗 孟 博 王雅君  
夏琳琳 张继德 成 怡 陈奕梅  
田慧欣 李金义 王若思 潘肖楠



机械工业出版社

本书介绍了人工智能的发展历史、基本流派、研究领域,知识表示方法和推理技术、图搜索技术,专家系统及其开发工具的使用和设计方法,模糊理论及应用,机器学习和神经网络,卷积神经网络,混沌理论,智能优化算法原理和应用,多智能体技术等内容。

本书是作者在多年教学和科研实践的基础上,参阅了国内外现有教材和相关文献后编写的。全书注重理论与实践的结合,注重算法的实际应用与实现方法,注重创新思维的训练与培养。

本书可作为高等院校人工智能、自动化、电气工程及其自动化、计算机科学与技术、电子信息工程等专业学生“人工智能”课程的本科生、研究生教材,也可供从事人工智能研究与应用的科技工作者学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

人工智能技术/修春波主编. —北京:机械工业出版社, 2018. 8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-60409-9

I. ①人… II. ①修… III. ①人工智能-高等学校-教材 IV. ①TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第147242号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新 徐凡

责任校对:肖琳 封面设计:陈沛

责任印制:常天培

北京富博印刷有限公司印刷厂印刷

2018年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.5印张·424千字

标准书号:ISBN 978-7-111-60409-9

定价:44.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

# 前言

自古以来，人类一直幻想着能够制造出具有智能的机器，很多美丽的传说都蕴含着这样的思想。随着计算机技术的出现和发展，这种幻想终于逐渐得以实现。

从 1956 年的达特茅斯会议开始，人工智能历经 60 多年的坎坷发展，终于成为目前相对比较完善的学科，无数的科技工作者为人工智能的发展做出了大量不可磨灭的贡献。在此，我们怀着崇敬的心情对人工智能的先驱者们表示由衷的敬佩。

人工智能是一门涉及认知科学、神经生物学、心理学、计算机科学、数学、信息与控制科学等诸多学科的交叉性、前沿性学科。其研究内容包括知识工程、专家系统、机器学习、神经网络、模式识别、优化计算等多个应用领域，受到国内外研究学者的普遍重视。尤其是最近十年来，人工智能的成果大量地应用到人们的生活中，人工智能的神秘面纱也逐渐被大众揭开。

AlphaGo 的出现，促使深度学习、神经网络等人工智能专业词汇在大众人群中得到了普及。大量的人工智能技术及产品也随之涌现出来，人们突然意识到人工智能的快速崛起。

从 2015 年开始，我国积极鼓励、推动和支持人工智能技术的发展，并大力推动机器人技术的发展。2015 年 5 月 20 日，国务院印发《中国制造 2025》，部署全面推进实施制造强国战略。“智能制造”被定位为中国制造的主攻方向。2015 年 7 月 5 日，国务院印发《“互联网+”行动指导意见》，提出大力发展智能制造。以智能工厂为发展方向，开展智能制造试点示范，加快推动云计算、物联网、智能工业机器人、智能制造等技术在生产过程中的应用，推进生产装备智能化升级、工艺流程改造和基础数据共享，着力在工控系统、智能感知元器件、工业云平台、操作系统和工业软件等核心环节取得突破，加强工业大数据的开发与利用，有效支撑制造业智能化转型，构建开放、共享、协作的智能制造产业生态。2016 年 4 月，工信部、国家发改委、财政部联合发布《机器人产业发展规划（2016—2020 年）》，为“十三五”期间我国机器人产业发展描绘了清晰的蓝图。2016 年 5 月 23 日，发改委、科技部、工信部和网信办联合印发《“互联网+”人工智能三年行动实施方案》。方案中指出，到 2018 年，中国将基本建立人工智能产业体系、创新服务体系和标准化体系，培育若干全球领先的人工智能骨干企业，形成千亿级的人工智能市场应用规模。方案提出，为降低人工智能创新成本，中国将建设面向社会开放的文献、语音、图像、视频、地图及行业应用数据等多类型人工智能海量训练资源库和标准测试数据集。国家还将建设满足深度学习等智能计算需求的基础资源服务平台，包括新型计算集群共享平台、云端智能分析处理服务平台、算法与技术开放平台等。2016 年 7 月 28 日，国务院印发《“十三五”国家科技创新规划》。该规划在“新一代信息技术”中提到人工智能：重点发展大数据驱动的类人智能技术方法；突破以人为中心的人机物融合理论方法和关键技术，研制相关设备、工具和平台；在基于大数据分析的类人智能方向取得重要突破，实现类人视觉、类人听觉、类人语言和类人思维，支

撑智能产业的发展。2016年9月1日,《国家发展改革委办公厅关于请组织申报“互联网+”领域创新能力建设专项的通知》出台,其中提到了人工智能的发展应用问题。为构建“互联网+”领域创新网络,促进人工智能技术的发展,应将人工智能技术纳入专项建设内容。2016年12月19日,国务院印发《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》的通知,要求发展人工智能,培育人工智能产业生态,促进人工智能在经济社会重点领域推广应用,打造国际领先的技术体系。2017年3月“人工智能”首次写入政府工作报告。2017年7月,国务院印发《新一代人工智能发展规划》的通知,指出发展人工智能是一项事关全局的复杂系统工程,要按照“构建一个体系、把握双重属性、坚持三位一体、强化四大支撑”进行布局,形成人工智能健康持续发展的战略路径。2017年10月,人工智能写入十九大报告。2017年12月13日,工信部印发《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划(2018—2020年)》,明确了人工智能2018—2020年在推动战略性新兴产业总体突破、推进供给侧结构性改革、振兴实体经济、建设制造强国和网络强国方面的重大作用和具体目标。

国家政策的强有力支持,促进了人工智能产业的迅速发展。人工智能技术发展速度之快令人惊讶,新的研究内容以及理论方法更新之快令人目不暇接。

本书内容兼顾人工智能的经典知识和前沿技术,着重于基本理论与实际应用相结合,强调内容的新颖性、先进性、实用性和可读性。特别注重算法的编程实现和实际问题的分析与解决。为易于读者理解相关的理论知识,书中简化了相关理论证明,并给出了实际的应用案例分析,增加了学习的趣味性和直观性。

本书注重培养与训练学生的创新思维。在介绍完一个基本算法后,会给出一系列在其基础上的改进算法,一方面可加深学生对基本算法的理解,另一方面可培养学生独立思考与分析算法性能的能力,有利于学生寻找创新点,训练学生的创新思维。

考虑到现有的人工智能类书籍大多是针对计算机应用专业编写的,因此本书在选材方面适当加入了智能控制等方面的知识,可以满足自动化专业的教学要求。同时结合作者的研究经历并参考相关文献,增加了一些人工智能领域的最新研究成果,丰富了本书的内容。

本书共分为10章,第1章简述人工智能的发展历史、基本流派、研究领域;第2章介绍多种知识表示方法和推理技术;第3章介绍图搜索技术;第4章介绍专家系统的理论知识以及开发工具的使用和设计方法;第5章介绍模糊理论的基本知识以及模糊理论在控制和模式识别等方面的应用;第6章介绍机器学习的基础理论知识,重点介绍多种神经网络的学习理论和应用方法;第7章介绍卷积神经网络的原理及TensorFlow的应用;第8章介绍混沌的初步理论知识,并介绍混沌神经网络的相关内容;第9章介绍多种智能优化算法的原理和实际应用;第10章介绍智能体与多智能体系统的相关知识及应用。

本书由修春波主编并统稿,卢少磊、苏雪苗、孟博、王雅君、夏琳琳、张继德、成怡、陈奕梅、田慧欣、李金义、王若思、潘肖楠等多位老师参与了本书的编写工作。本书由北京理工大学张宇河教授主审。

由于编者能力和水平有限,书中不妥与错误之处在所难免,恳请各位专家和读者不吝指导和帮助。对此,我们深表感谢。

编者

# 目 录

## 前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 人工智能的起源与发展	1
1.2 人工智能学术流派	4
1.3 人工智能的研究与应用领域	6
习题	10
第 2 章 知识表示和推理	11
2.1 知识和知识表示的基本概念	11
2.2 命题逻辑	14
2.2.1 语法	14
2.2.2 语义 (Semantics)	15
2.2.3 命题演算 (Calculus) 形式系统	16
2.3 谓词逻辑	17
2.3.1 语法	18
2.3.2 语义	21
2.4 归结推理	25
2.4.1 子句集及其简化	26
2.4.2 海伯伦定理	29
2.4.3 Robinson 归结原理	33
2.4.4 利用 Robinson 归结原理实现定理证明	38
2.4.5 应用归结原理求解问题	42
2.5 产生式系统	43
2.5.1 产生式系统的组成部分	44
2.5.2 产生式系统的控制策略	45
2.5.3 产生式系统的推理方式	46
2.6 语义网络表示法	47
2.6.1 语义网络的结构	47
2.6.2 基本命题的语义网络表示	47
2.6.3 语义网络的知识表示方法	50
2.6.4 语义网络表示法的特点	54
2.7 框架表示法	54
2.8 状态空间表示法	56
2.9 与或图表示法	57
习题	58

第 3 章 图搜索技术	59
3.1 问题的提出	59
3.2 状态图搜索	61
3.2.1 状态图搜索分类	61
3.2.2 穷举式搜索	63
3.2.3 启发式搜索	66
3.2.4 A 算法及 A* 算法	69
3.3 与或图搜索	71
3.3.1 与或图	71
3.3.2 与或图搜索	72
3.4 博弈图搜索	76
3.4.1 博弈图	76
3.4.2 极大极小分析法	78
3.4.3 剪枝技术	80
习题	81
第 4 章 专家系统	82
4.1 专家系统的概述	82
4.1.1 专家系统的概念与特点	82
4.1.2 专家系统和传统程序的区别	83
4.1.3 专家系统的类型	83
4.2 专家系统的结构	84
4.3 专家系统的设计原则与开发过程	85
4.3.1 专家系统的设计原则	85
4.3.2 专家系统的开发过程	86
4.4 专家系统评价	87
4.5 MYCIN 专家系统实例分析	88
4.6 专家系统开发工具	90
4.6.1 骨架型开发工具	90
4.6.2 语言型开发工具	91
4.6.3 构造辅助工具	91
4.6.4 支撑环境	92
4.7 Prolog 语言	93
4.7.1 Prolog 语言的特点	93
4.7.2 基本 Prolog 的程序结构	94
4.7.3 Prolog 程序的运行机理	95

4.7.4 Turbo Prolog 程序结构 .....	97	6.6.2 网络学习算法 .....	164
4.7.5 Turbo Prolog 的数据与表达式 .....	98	6.6.3 CMAC 网络的特点 .....	166
4.7.6 Visual Prolog 介绍 .....	103	6.7 Hopfield 神经网络 .....	166
4.7.7 PIE: Prolog 的推理机 .....	107	6.7.1 离散型 Hopfield 网络 .....	167
习题 .....	109	6.7.2 连续型 Hopfield 网络 .....	168
<b>第 5 章 模糊理论及应用 .....</b>	<b>110</b>	6.8 Elman 神经网络 .....	171
5.1 模糊理论的产生与发展 .....	110	6.8.1 Elman 神经网络结构 .....	171
5.2 模糊理论的数学基础 .....	111	6.8.2 Elman 神经网络学习算法 .....	172
5.2.1 经典集合论的基本概念 .....	111	6.9 模糊神经网络 .....	172
5.2.2 模糊集合的基本概念 .....	112	6.9.1 网络结构 .....	173
5.2.3 模糊关系与复合运算 .....	115	6.9.2 学习过程 .....	174
5.3 模糊推理 .....	117	6.10 其他类型的神经网络介绍 .....	175
5.3.1 模糊条件语句 .....	117	习题 .....	178
5.3.2 模糊推理 .....	120	<b>第 7 章 卷积神经网络及 TensorFlow</b>	
5.4 模糊控制系统及模糊控制器 .....	122	<b>应用实践 .....</b>	<b>179</b>
5.4.1 模糊控制系统的基本结构 .....	122	7.1 卷积神经网络发展简介 .....	179
5.4.2 模糊控制器 .....	123	7.2 卷积神经网络工作原理 .....	179
5.4.3 模糊控制器的设计 .....	124	7.3 TensorFlow 学习 .....	185
5.4.4 模糊 PID 控制器的设计 .....	130	7.3.1 TensorFlow 简介 .....	185
5.5 模糊聚类分析与模糊模式识别 .....	133	7.3.2 TensorFlow 中的函数和相关	
5.5.1 模糊聚类分析 .....	134	运算 .....	190
5.5.2 模糊模式识别 .....	137	7.3.3 卷积函数 .....	194
5.6 模糊聚类应用案例分析 .....	138	7.3.4 池化函数 .....	196
习题 .....	143	7.4 利用 TensorFlow 进行图像处理 .....	197
<b>第 6 章 机器学习和神经网络 .....</b>	<b>144</b>	7.4.1 图像的读取与存储 .....	197
6.1 机器学习的基本概念和发展史 .....	144	7.4.2 图像处理常用函数 .....	197
6.2 经典机器学习方法 .....	145	7.5 卷积神经网络在 MNIST 的应用	
6.3 基于神经网络的学习 .....	148	实例 .....	201
6.3.1 神经网络概述 .....	148	习题 .....	212
6.3.2 人工神经网络模型 .....	149	<b>第 8 章 混沌理论与混沌神经网络 .....</b>	<b>213</b>
6.4 BP 神经网络 .....	153	8.1 混沌研究的起源与发展 .....	213
6.4.1 网络结构 .....	153	8.2 混沌的基本特性 .....	215
6.4.2 网络学习算法 .....	154	8.3 通往混沌的道路 .....	216
6.4.3 BP 网络的改进算法 .....	156	8.4 混沌的识别 .....	217
6.4.4 BP 神经网络的特点 .....	157	8.4.1 定性分析法 .....	217
6.4.5 神经网络应用实例解析 .....	158	8.4.2 定量分析法 .....	218
6.5 RBF 神经网络 .....	160	8.5 混沌应用 .....	219
6.5.1 径向基函数 .....	160	8.6 混沌神经网络 .....	222
6.5.2 径向基函数网络结构 .....	162	8.6.1 暂态混沌神经网络 .....	222
6.5.3 网络学习算法 .....	162	8.6.2 其他类型的混沌神经网络* .....	223
6.5.4 RBF 网与 BP 网的对比 .....	163	8.6.3 G-S 混沌神经网络应用实例 .....	224
6.6 CMAC 神经网络 .....	164	习题 .....	228
6.6.1 CMAC 网络结构 .....	164		

<b>第 9 章 智能优化计算</b> .....	229	9.8.1 基本粒子群优化算法 .....	252
9.1 优化问题的分类 .....	229	9.8.2 粒子群优化算法的拓扑结构 .....	255
9.2 优化算法分类 .....	230	9.9 鱼群算法简介 .....	257
9.3 梯度优化计算 .....	231	9.10 混合优化计算方法简介 .....	258
9.4 混沌优化 .....	231	习题 .....	259
9.5 模拟退火算法 .....	234	<b>第 10 章 智能体与多智能体系统</b> .....	260
9.6 遗传算法 .....	235	10.1 智能体的概念与结构 .....	260
9.6.1 遗传算法中的关键参数与操作 ..	235	10.1.1 智能体的概念 .....	260
9.6.2 遗传算法中的基本流程 .....	243	10.1.2 智能体的结构 .....	261
9.6.3 遗传算法的改进 .....	243	10.2 多智能体系统 .....	263
9.6.4 遗传算法的实现 .....	245	10.2.1 多智能体系统的特征 .....	263
9.7 蚁群算法 .....	248	10.2.2 多智能体系统的类型 .....	264
9.7.1 蚁群算法的研究现状 .....	248	10.2.3 多智能体系统的应用 .....	265
9.7.2 基本蚁群算法的工作原理 .....	249	习题 .....	267
9.8 粒子群算法及应用 .....	251	<b>参考文献</b> .....	268



人工智能 (Artificial intelligence, AI) 是指研究如何用计算机去模拟、延伸和扩展人的智能, 如何使计算机变得更聪敏、更能干, 如何设计和制造具有更高智能水平的计算机的理论、方法、技术及应用系统的一门新兴的科学技术。它是涉及认知科学、神经生物学、心理学、计算机科学、数学、信息与控制科学等诸多学科的交叉性、前沿性学科。由于其近年的迅速发展和在诸多领域中的广泛应用, 被誉为 20 世纪 70 年代以来世界三大尖端技术 (空间技术、能源技术、人工智能) 之一, 也被称为 21 世纪的三大尖端技术 (基因工程、纳米科学、人工智能) 之一。

### 1.1 人工智能的起源与发展

#### 1. 萌芽期

自古以来, 人们就不断地探索制造和使用各种机器来代替人的部分脑力劳动, 以提高人们在自然环境中的生存能力。《列子·汤问》中, 记载了有关西周时期的巧匠偃师制造的能歌舞的机器人的传说故事。公元 850 年, 古希腊传说中有关于利用制造的机器人帮助人们劳动的故事记载。在近代史上, 关于制造具有智能行为机器人的记载更是层出不穷。这说明, 在人类历史的发展过程中, 人们从未间断过对人工智能的探索和研究。

古希腊哲学家亚里士多德 (Aristotle) 是逻辑学的创始人, 他所提出的三段论 (大前提、小前提和结论) 奠定了演绎推理的基础。

17 世纪世界上第一台会演算的机械加法器由法国物理学家、数学家帕斯卡 (B. Pascal) 研制成功。在此基础上, 德国数学家、哲学家莱布尼兹 (G. W. Leibniz) 研制了能进行四则运算的计算器, 并提出了“万能符号”和“推理计算”的思想, 成为现代“思考”机器的设计思想萌芽。

进入 20 世纪后, 人工智能领域相继出现若干开创性的工作。其中, 英国数学家、计算机逻辑的奠基者图灵 (A. M. Turing) 对人工智能的发展做出了杰出的贡献。

1936 年, 年仅 24 岁的图灵发表了著名的《论数字计算在决断难题中的应用》一文, 提出了著名的图灵机的设想。图灵机是一种抽象计算模型, 用来精确定义可计算函数。图灵在设计了该模型后提出: 凡可计算的函数都可用这样的机器来实现。这就是著名的图灵论题。半个多世纪以来, 数学家提出的各种各样的计算模型都被证明是和图灵机等价的。现在图灵论题已被当成公理一样在使用着。

1950 年, 图灵发表了《计算机能思考吗?》的论文, 这篇划时代之作为他赢得了“人工

智能之父”的桂冠。为了证明机器是否真的能够思考，他又提出了“图灵测试”。

所谓图灵测试，是一种测试机器是不是具备智能的方法。被测试者中有一个人，另一个是声称具有智能的机器。测试时，测试人与被测试者分开，测试人通过一些装置（如键盘等）向被测试者进行提问。经过一段时间的提问后，如果测试人无法分辨出人和机器，则该机器就通过了图灵测试，可认为该机器具有智能。图灵测试至今仍被沿用。可惜到目前为止，还没有一台机器能够通过图灵测试。不过有些软件可以通过图灵测试的子测试。

1946年，第一台通用电子数字计算机 ENIAC 由美国数学家莫克利（J. W. Mauchly）和埃克特（J. P. Eckert）合作研制成功。

1947年，美国数学家维纳（N. Wiener）创立了控制论，揭示了机器中的通信和控制机能与人的神经、感觉机能的共同规律，为现代科学技术研究提供了崭新的科学方法。

1948年，美国贝尔实验室的数学家香农（C. E. Shannon）创立了信息论，信息论是运用概率论与数理统计的方法研究信息、信息熵、通信系统、数据传输、密码学、数据压缩等问题的应用数学学科。

1952年，美籍奥地利生物学家贝塔朗菲（L. V. Bertalanffy）创立了系统论。系统论是研究系统的一般模式、结构和规律的学问，它研究各种系统的共同特征，用数学方法定量地描述其功能，寻求并确立适用于一切系统的原理、原则和数学模型，是具有逻辑和数学性质的一门新兴的科学。

这一时期的主要成就是创立数理逻辑、自动机理论、控制论、信息论和系统论，以及通用电子数字计算机的发明。这些成就为人工智能的诞生和迅速发展提供了充足的思想、理论和实验工具等物质技术条件。

## 2. 形成期

1956年，达特茅斯会议的召开标志着人工智能学科의正式诞生。该会议由麦卡锡（John McCarthy，1971年的图灵奖获得者）、明斯基（Marvin L. Minsky，1969年图灵奖获得者）、香农（Claude Elwood Shannon）、罗切斯特（Nathaniel Rochester）4个年轻人发起，普林斯顿大学的莫尔（Trenchard More）、IBM公司的塞缪尔（Arthur Samuel）、麻省理工的索罗蒙夫（Ray Solomonoff）和塞尔夫里奇（Oliver Selfridge）、卡内基梅隆大学的纽厄尔（A. Newell，1975年图灵奖获得者）和西蒙（Simon，1975年图灵奖获得者）等共10人参加，探讨了用机器模拟智能的各种相关问题，并正式提出了人工智能这一术语。

东道主麦卡锡有一个宏伟的目标：组织十来个人，用两个月的时间共同努力设计出一台具有真正智能的机器。虽然他们没有实现这个目标，但是他们却创立了一个崭新的学科——人工智能。麦卡锡也被誉为人工智能之父。

麦卡锡的主要研究方向是计算机下棋，并发明了著名的 $\alpha$ - $\beta$ 搜索算法。在该算法中，麦卡锡巧妙地将结点的产生与求评价函数值结合起来，从而使得某些子树节点根本不必产生和搜索。该算法至今仍是人工智能领域中一种高效常用的求解方法。

卡内基梅隆大学的西蒙和纽厄尔在大会上展示了启发式程序“逻辑理论家”，它可以证明数学名著《数学原理》一书第2章52个定理中的38个定理。该程序模拟了人类用数理逻辑证明定理时的思维特点，把认知理论、人机交互等结合起来，建立了一个“智能问题解决和学习”模型，只要事先在机器中存储一组公理和推理规则，该程序就可自己去探索解决方案。这是利用机器对人的高级思维活动实现模拟的第一个重大成果。另外，在开发

“逻辑理论家”的过程中，他们首次提出并成功应用了“链表”（list）作为基本的数据结构，并设计和实现了表处理语言 IPL。IPL 是最早的表处理语言，也是最早使用递归子程序的语言。

明斯基在会议上展示了名为 Snarc 的学习机的雏形。Snarc 是世界上第一个神经网络模拟器，主要用于学习如何穿过迷宫。其组成包括 40 个智能体（agent）和 1 个对成功给予奖励的系统。在 Snarc 的基础上，明斯基解决了如何让机器利用过去的知识实现对当前行为结果的预测这一问题。

塞缪尔在 1952 年运用博弈理论和状态空间搜索技术研制了世界上第一个跳棋程序，经过不断完善，1959 年该程序击败了它的设计者塞缪尔本人，1962 年击败了美国的一个州冠军。该程序具有自学习、自组织和自适应能力，可以像一个真正的棋手那样学习棋谱和积累下棋经验。这是模拟人类学习过程的一次有效尝试。

1956 年，乔姆斯基（N. Chomsky）发表了用形式语言方法研究自然语言的第一篇论文，创立了形式语言。形式语言与自动机结合，用来描述和研究思维过程。在自然语言理解和翻译、计算机语言的描述和编译、社会和自然现象的模拟、语法制导的模式识别等方面有着广泛的应用。

1960 年，西蒙夫妇通过一个有趣的心理学实验表明，人类解决问题的过程是一个搜索的过程，其效率取决于启发式函数。在这个实验的基础上，西蒙、纽厄尔和肖（J·Shaw）等人成功地开发了“通用问题求解系统”GPS（General Problem Solver）。GPS 是根据人在解题中的共同思维规律编制而成的，可以求解 11 种不同类型的问题，从而使启发式程序有了更普遍的意义。

1959 年，麦卡锡开发了著名的表处理语言 LISP，LISP 是一种函数式的符号处理语言，其程序由一些函数子程序组成。LISP 语言还具有自编译能力。该语言成为人工智能界第一个最广泛流行的语言。

这一时期的主要成就是人工智能学科的正式诞生，并在定理证明、问题求解、博弈和 LISP 语言以及模式识别等许多领域取得众多突破成果，人工智能作为一门新兴学科迅速受到人们的关注。

### 3. 发展期

20 世纪 60 年代以来，人工智能的研究活动越来越受到国内外专家学者的重视。其不但在问题求解、博弈、定理证明、程序设计、机器视觉、自然语言理解等领域的研究取得深入进展，而且开始走向实用化的应用研究。人工智能的理论和成果广泛地被应用于化学、医疗、气象、地质、军事、教学等诸多领域中。

1972 年，法国马赛大学的科麦瑞尔（A. Comerauer）提出并实现了逻辑程序设计语言 PROLOG。同年，斯坦福大学的肖特利夫（E. H. Shortliffe）等人开始研制 MYCIN 专家系统。该专家系统是用于诊断和治疗细菌感染性疾病的系统，该系统能够识别 51 种病菌，处理 23 种抗菌素，能够为患者提供最佳处方。

1991 年 8 月在悉尼召开的第 12 届国际人工智能联合会议上，IBM 公司研制的“深蓝”（Deep Thought）计算机系统与澳大利亚国际象棋冠军翰森（D. Johansen）举行了一场人机大战，最终以 1：1 平局结束。1996 年 2 月，IBM 公司邀请国际象棋棋王卡斯帕罗夫（Kasparov）与“深蓝”计算机系统进行人机大战，不过最终棋王卡斯帕罗夫以 4：2 赢得了比赛。

但一年后，1997年5月，深蓝再次挑战卡斯帕罗夫，并以3.5：2.5的成绩击败了卡斯帕罗夫。

2016年3月，AlphaGo以4：1的战绩战胜了韩国棋手李世石。2017年5月，则以3：0的战绩击败了围棋排名世界第一的柯杰。

在我国，类人性机器人的研究受到机械和自动控制工作者的重视。中国科学技术大学一直从事两足步行机器人、类人性机器人的研究开发，在1990年成功研制出我国第一台两足步行机器人。同时，经过10年的辛苦钻研，于2000年11月，又成功研制出我国第一类人形机器人，并使其具备了一定的语言能力。它的行走频率从过去的每6秒一步，加快到每秒2步；从只能平静地静态步行，到能快速自如地动态步行；从只能在已知的环境中步行，到可在小偏差、不确定环境中行走，取得了机器人神经网络系统、生理视觉系统、双手协调系统、手指控制系统等多项重大研究成果。

目前，人工智能技术发展十分迅速，在人脸识别、语音识别、图像理解、步态识别、自动控制等领域得到了成功应用。2017年8月中央电视台综合频道播出了科技挑战类节目——《机智过人》，该节目是由中央电视台和中国科学院共同主办、中央电视台综合频道和北京长江文化股份有限公司联合制作的人工智能现象级节目，该节目向大众展示了我国科技人员在人工智能领域所取得的部分科技成果，既具有良好的趣味性，又具有很好的科普性。在2017中国综艺峰会匠心盛典中，《机智过人》获“年度匠心视效节目”奖。

## 1.2 人工智能学术流派

近年来，对人类智能的理解形成了3个学派，分别为符号主义学派、联结主义学派和行为主义学派。

### 1. 符号主义 (Symbolicism)

符号主义又称逻辑主义 (Logicism)、心理学派 (Psychologist) 或计算机主义 (Computorism)，认为知识的基本元素是符号，智能的基础依赖于知识。该理论倡导以符号形式的知识和信息为基础，主要通过逻辑推理，运用知识进行问题求解。

该学派的代表人物有：纽厄尔和西蒙、费根鲍姆 (Feigenbaum)、肖特里菲 (Shortliffe) 等人。纽厄尔和西蒙提出了著名的物理符号系统假说 (Physical Symbol System Hypothesis)，提出“a physical system is a machine that is capable of manipulating symbolic data”，认为任何一个物理符号系统如果是有智能的，则肯定能执行对符号的输入、输出、存储、复制、条件转移和建立符号结构这样6种操作。反之，能执行这6种操作的任何系统，也就一定能够表现出智能。

根据这个假设，我们可以推出以下结论：人是具有智能的，因此人是一个物理符号系统；计算机是一个物理符号系统，因此它必具有智能；计算机能模拟人，或者说能模拟人的大脑功能。

费根鲍姆 (Stanford 大学，1994 年图灵奖获得者) 曾师从于西蒙教授，其最大的贡献在于最早倡导并率先实践了“知识工程 (Knowledge Engineering)”，使之成为 AI 领域中取得实际成果最为丰富、影响也最为深远的的一个分支。同时，作为专家系统的创始人，费根鲍姆于 1968 年成功地研制出第一个专家系统 DENDRAL，这是一个化学分析专家系统，其中保

存有著名化学家的知识和质谱仪的知识，可以根据给定的有机化合物的分子式和质谱图，从几千种可能的分子结构中挑选出一个正确的分子结构。这次有益的探索，有力地证明了知识工程学说的正确性，其意义远远超过了系统本身在实用上所创造的价值。

随后，大量研究成果不断涌现。1972年，Stanford大学的肖特里菲（E. H. Shortliffe）等人成功开发并应用了医疗专家系统MYCIN，对人工智能从理论分析走向工程实践产生了深刻的影响。

目前，符号主义遇到不少暂时无法解决的困难，如仍然无法用数理逻辑建立一个人工智能的统一理论体系、专家系统热衷于自成体系的封闭式研究，脱离了主流计算（软硬件）环境等。知识工程学派的困境动摇了传统人工智能物理符号系统对于智能行为是必要的也是充分的基本假设，促进了联结主义学派和行为主义学派的兴起。尽管如此，科学界普遍认为，在联结主义学派和行为主义学派出现以后，符号主义仍然是人工智能的主流。

## 2. 联结主义（Connectionism）

联结主义又称为仿生学学派（Bionicsism）或生理学派（physiologism），是基于生物进化论的人工智能学派，主张人工智能可以通过模拟人脑结构来实现，主要内容就是人工神经网络（ANN）。联结主义认为人工智能源于仿生学，特别是对人脑模型的研究，认为人的思维基元是神经元，而不是符号处理过程，人脑不同于计算机；提出联结主义的大脑工作模式，否定基于符号操作的计算机工作模式。

该学派的代表人物有罗森布莱特（Rosenblatt）、威德罗（Widrow）和霍夫（Hoff）、鲁梅尔哈特（Rumelhart）和麦克莱兰（McClelland）、霍普菲尔德（Hopfield）等人。

1943年，美国神经生理学家麦克洛奇（W. McCulloch）和数学家皮兹（W. Pitts）提出了著名的单神经元M-P模型，开创了神经网络研究的时代，人类从此开始探索大脑智能的奥秘。

1958年，罗森布莱特提出并描述了信息在人脑中存储记忆的数学模型，即著名的感知机模型Perceptron；威德罗和霍夫于1962年首次提出了网络学习训练的算法—— $\delta$ （Delta）学习规则（又称LMS或Widrow-Hoff算法），该方法借用梯度下降（又称最速下降）法来实现网络权值矢量的调整，与Hebb学习规则一起，并称为ANN两种基本的学习方法。鲁梅尔哈特和麦克莱兰对ANN的突出贡献在于结合早期韦伯斯（Werbos）的误差反向传播理论，提出了著名的BP神经网络，实现了Minsky关于多层网络的设想，至今仍是ANN中最为重要的网络模型。以发明者命名的Hopfield网络是无监督、反馈型网络的典型代表，其明显特征在于与电子线路有一个明显的对应关系，首次实现了硬件对网络结构的模拟。

ANN在过去的20年间获得了重要进展，涉及该领域的专著、期刊和会议论文数量迅速增长，对推动这一思潮起到了重要作用。但是必须看到，尽管对ANN的多数研究均集中于网络结构、学习算法、硬件实现和实际应用领域，并且在许多工程领域，如非线性系统方面取得了不错的研究成果，但ANN技术本身也有若干问题亟待解决。首先，网络达不到开发多种多样知识的要求，单靠联结机制方法很难解决人工智能中的全部问题。其次，Hebb学习规则缺少降低权值的调整机制、Delta学习规则具有容易陷入局部极小等严重缺陷，缺少可操作的理论来保证学习过程的收敛性。不过仍可以确信的是，ANN是个很有希望的发展方向，计算机技术为其发展提供了坚实的技术基础，ANN自身也有很多适合于控制的突出特性，特别是大规模人工神经网络硬件也取得了较大的进展。

### 3. 行为主义 (Actionism)

行为主义又称为进化主义 (Evolutionism) 或控制论学派 (Cyberneticsism)。目前, 人工智能界对行为主义的研究方兴未艾。该学派源于控制论, 倡导智能取决于感知和行为, 不需要知识, 不需要表示, 亦不需要推理, 即智能行为只能通过现实世界中与周围环境交互作用而表现出来。

该学派的代表人物是 MIT 的罗德尼·布鲁克斯 (Rodney A. Brooks), 他于 1991 年、1992 年分别提出了“没有表达的智能”“没有推理的智能”, 颠覆了符号→知识工程→专家系统, 或节点→结构→神经网络智能脉络。行为主义甚至认为: 符号主义和联结主义对真实世界客观事物的描述及其智能行为工作模式是过于简化的抽象, 因而是不能真实地反映客观存在的。目前, 布鲁克斯创建了一系列著名的机器人昆虫和类人机器人, 不断诠释着反应式 Agent 的特性——对环境主动进行监视 (所谓感知), 并做出必要的反应 (所谓动作)。

诚然, 这一学派尚未形成完整的理论体系, 有待进一步研究, 但它与人们的传统看法完全相左, 引起了人工智能界的注意。同时, 行为主义学派的兴起, 也表明了控制论、系统工程的思想将进一步影响人工智能的发展。

同其他学科的不同流派一样, 符号主义、联结主义和行为主义在理论方法和技术路线等方面的争论, 从来也没有停止过。

在理论方法方面, 符号主义着重于功能模拟, 提倡用计算机模拟人类认知系统所具备的功能和机能; 联结主义着重于结构模拟, 通过模拟人的生理网络来实现智能; 行为主义着重于行为模拟, 依赖感知和行为来实现智能。

在技术路线方面, 符号主义依赖于软件路线, 通过启发性程序设计, 实现知识工程和各种智能算法; 联结主义依赖于硬件设计, 如 VLSI (超大规模集成电路)、脑模型和智能机器人等; 行为主义利用一些相对独立的功能单元, 组成分层异步分布式网络, 为机器人的研究开创了新的方法。

以上三个学派将长期共存。人工智能界普遍认为, 未来的发展应立足于各学派之间求同存异、相互融合。同时, 还要有效地集成数学、生物学、心理学、哲学、计算机学、机器人学、控制科学以及信息学等, 促进人工智能从软件到硬件、从理论分析到工程应用的完备统一。

## 1.3 人工智能的研究与应用领域

目前, 随着人工智能技术的迅猛发展, 几乎各种技术领域的发展都涉及人工智能技术, 可以说人工智能已经广泛应用到许多实际领域中。其典型的应用包括: 专家知识系统、机器学习、模式识别、自动定理证明、自然语言理解、智能决策支持系统、人工神经网络及博弈等。

### 1. 专家系统 (Expert Systems)

通常, 专家系统是指一个智能程序, 它能够对某些需要专家知识才能解决的应用问题给出具有专家水平的解答。

20 世纪 60 年代, 专家系统逐渐发展起来, 它是人工智能研究中开展较早、最活跃、成效最多的领域。1977 年, 费根鲍姆提出“知识工程”, 把实用的人工智能称为知识工程, 标

志着人工智能研究进入实际应用的阶段。之后，雨后春笋般地出现了一大批应用于各领域的专家系统，涉及医学、化学、法律、农业、商业、生物、工程、教育、军事等领域，产生了很好的社会与经济效益。

专家系统是依靠人类专家已有的知识建立起来的知识系统，是一种具有特定领域内大量知识与经验的程序系统。

与传统的计算机程序相比，专家系统是以知识为中心，注重知识本身而不是确定的算法。根据专家的理论知识和实际经验，对人们还没有进行精确描述和严格分析的问题，在不确定或不精确的信息基础上做出判断。标准的计算机程序能精确地区分出每一任务应该如何完成，而专家系统则是告诉计算机做什么。它应用人工智能技术、模拟人类专家解决问题时的思维过程，来求解特定领域内的各种问题，达到或接近专家的水平。

专家系统突出了知识的价值，大大减少了知识传授和应用的代价，使专家的知识迅速变成社会的财富。另外，专家系统采用的是人工智能的原理和技术，如符号表示、符号推理、启发式搜索等，与一般的数据处理系统不同。

随着人工智能的不断发展和提高，各种新型的高级专家系统正在积极地开发应用中。所谓的高级专家系统是指为了克服传统专家系统的缺陷，不仅采用基于规则的方法，而且还采用基于框架的技术和基于模型的原理的新型专家系统。它包括分布式专家系统、协同式专家系统、模糊专家系统、神经网络专家系统和基于 Web 的专家系统等。

## 2. 机器学习 (Machine Learning)

人类具有智能的一个重要标志就是人类拥有学习能力。同样，机器的智能性也可通过机器学习来体现。作为人工智能的一个重要研究领域，机器学习就是研究如何使计算机模拟或实现人类的学习行为，以获得新的知识或技能，从而实现自身的不断完善。

机器学习的研究与认知科学、神经心理学、逻辑学等学科都有着密切的联系，并对人工智能的其他分支，如专家系统、自然语言理解、自动推理、智能机器人、计算机视觉、计算机听觉等方面，起到重要的推动作用。

机器学习根据生理学、认知科学等对人的学习机理的理解，建立人类学习过程的计算模型，发展各种学习理论和学习方法，开发通用的学习算法，建立面向任务的具有一定应用性的学习系统。

机器学习经过多年的发展，已经形成了许多学习方法，如：监督学习、非监督学习、传授学习、机械学习、发现学习、类比学习、事例学习、连接学习、遗传学习等。而目前，人工智能领域最热门的科目之一是深度学习。深度学习已在笔迹识别、面部识别、语音识别、自动驾驶、自然语言处理、生物信息数据分析等方面取得成功应用。AlphaGo 中也应用了深度学习。AlphaGo 的优势之一就是能够进行自我学习，也就是说，AlphaGo 能够和不同版本的“自己”进行下棋，从而每次都可以获得一点小小的进步，由此，AlphaGo 获得了“思维”能力。具体来说，AlphaGo 具有一套针对围棋而设计的深度学习系统，将增强学习、深度神经网络、策略网络、快速走子、估值网络和蒙特卡洛树搜索进行整合，同时利用 Google 强大的硬件支撑和云计算资源，依靠 CPU+GPU 运算，通过增强学习和自我博弈学习不断提高自身水平。因此，AlphaGo 也可看做机器学习的一个成功案例。

## 3. 模式识别 (Pattern Recognition)

模式识别是根据研究对象的特征或属性，利用以计算机为中心的机器系统运用一定的分析

算法认定它的类别，系统应使分类识别的结果尽可能地符合真实。模式识别是一门综合性、交叉性学科。在理论上涉及代数、矩阵论、概率论、图论、模糊数学、最优化理论等众多学科的知识，在应用上又与其他许多领域的工程技术密切相关，其内涵可以概括为信息处理、分析与决策，它既是人工智能研究领域的重要分支，又是实现机器智能必不可少的技术手段。

目前，模式识别理论和技术已成功地应用于工业、农业、国防、科研、公安、生物医学、气象、天文学等许多领域，如信件自动分检、指纹识别、生物医学的细胞或组织分析、遥感图片的机器判读、系统的故障诊断以及文字与语言的识别等，并且正不断扩展到许多其他领域。

尽管现在机器识别的水平还远不如人脑，但随着模式识别理论以及其他相关学科的发展，可以预言，它的功能将会越来越强，应用也会越来越广泛。

#### 4. 自动定理证明 (Automatic Theorem Proving)

定理证明是最典型的逻辑推理问题，它对人工智能的发展曾经产生过重要影响。在数学领域中对已测得定理寻求一个证明或者反证，是一项艰巨的智能任务。定理证明过程中，不仅要根据假设进行演绎，还需要某些直觉的技巧。例如，为了证明一个定理，数学家要设想需要先证明哪些引理，并运用他的判断力推测出已证明的哪些结论会在这个定理的证明中起作用，并把主要问题分解成若干子问题，然后再对各个子问题进行求解。

自动定理证明是让计算机自动地进行推理和证明数学定理，自动模拟人类证明非数值符号的演算过程。很多非数值领域的任务如医疗诊断、信息检索、规划制度和难题求解等方面都可以转化成自动定理证明的问题，因此自动定理证明的研究在人工智能领域具有普遍意义。

#### 5. 自然语言理解 (Natural Language Understanding)

自然语言是人类相互之间进行信息交流的主要媒介，人们之所以能够轻松自如地进行交流，是因为人类有很强的自然语言理解能力。自然语言充满歧义、结构复杂多样、语义表达千变万化、结构和语义之间有着千丝万缕、错综复杂的联系，这使得计算机系统与人类的交互只能限制在各种非自然语言上。

自然语言理解研究用计算机模拟人的语言交际过程，使计算机能理解和运用人类社会的自然语言如汉语、英语等，实现人机之间的自然语言通信，以代替人的部分脑力劳动，包括查询资料、解答问题、摘录文献、汇编资料以及一切有关自然语言信息的加工处理。这在当前新技术革命的浪潮中占有十分重要的地位。研制第5代计算机的主要目标之一，就是要使计算机具有理解和运用自然语言的功能。

与自然语言理解密切相关的另一个领域是机器翻译，即用计算机把一种语言翻译成另一种语言。20世纪60年代，国外对机器翻译曾有大规模的研究工作，耗费了巨额费用，但人们当时显然是低估了自然语言的复杂性，语言处理的理论和技术均不成熟，所以进展不大。

近年来，尽管自然语言理解和机器翻译都已取得一定进展，但要真正建立一个能够生成和理解自然语言的计算机处理系统是相当困难的，这离计算机完全理解人类自然语言的目标还相差甚远。因此，对自然语言理解的研究就成为人工智能研究的一个非常重要的课题。

#### 6. 人工神经网络 (Artificial Neural Network)

人工神经网络是指用大量的简单计算单元（即神经元）构成的非线性系统，在一定程度上模仿了人脑神经系统的信息处理、存储及检索功能，因而具有学习、记忆和计算等智能处理功能。