

第 1 章 绪论

40 多年来，人工智能（AI, Artificial Intelligence）获得很大的发展，引起众多学科的日益重视，已成为一门具有广泛应用的交叉学科和前沿学科。

1.1 人工智能及其发展

人工智能是计算机科学、控制论、信息论、神经生理学、语言学等多种学科互相渗透而发展起来的一门学科。人工智能的发展虽然已走过了 40 多年的历程，但是，人工智能至今尚无统一的定义。尽管学术界有各种各样的说法和定义，但就其本质而言，人工智能是研究、设计和应用智能机器或智能系统，来模拟人类智能活动的能力、以延伸人类智能的科学。人类智能活动的能力是指人类在认识世界和改造世界的活动中，经过脑力劳动表现出来的能力。一般地说，可概括为：

1) 通过视觉、听觉、触觉等感官活动，接受并理解文字、图像、声音、语言等各种外界信息，这就是认识和理解外界环境的能力。

2) 通过人脑的生理与心理活动以及有关的信息处理过程，将感性知识抽象为理性知识，并能对事物运行的规律进行分析、判断和推理，这就是提出概念、建立方法，进行演绎和归纳推理、作出决策的能力。

3) 通过教育、训练和学习过程，日益丰富自身的知识和技能，这就是学习的能力。

4) 对不断变化的外界环境条件（如干扰、刺激等外界作用）能灵活地作出正确地反应，这就是自适应能力。

不论从什么角度来研究人工智能，都是通过计算机等现代工具来实现的。计算机科学与技术飞速发展和计算机应用的日益普及，为人工智能的研究和应用奠定了良好的物质基础。人工智能的发展使计算机更聪明、更有效，与人更接近。

1. 人工智能的起源

自古以来，人类对人工智能就有持久的、狂热的追求，并凭借当时的认识水平和技术条件，设法用机器来代替人的部分脑力劳动，用机器来延伸和扩展人类的某种智能行为。例如，公元前 900 多年，我国就有歌舞机器人传说的记载。12 世纪末至 13 世纪初，西班牙的一位神学家和逻辑学家曾试图制造能解决各种问题的通用逻辑机。17 世纪，法国物理学家和数学家巴斯卡（B.Pascal）制成了世界第一台会演算的机械加法器并获得实际应用。随后，德国数学家和哲学家莱布尼兹（G.W.Leibniz）在这台加法器的基础上发展并制成了进行全部四则运算的计算器，他还提出了逻辑机的设计思想，即通过形式逻辑符号化，对思维进行推理计算。

这种“万能符号”和“基于符号的推理计算”的思想是“智能机器”的萌芽，因而他被誉为数理逻辑的第一个奠基人。进入 20 世纪后，人工智能相继出现若干开创性的工作。1936 年，年仅 24 岁的英国数学家图灵（A.M.Turing）在他的一篇“理想计算机”的论文中，提出了著名的图灵机模型。1945 年，他进一步论述了电子数字计算机的设计思想。1950 年，他又在“计算机能思维吗？”一文中提出了机器能够思维的论述。1938 年，德国工程师苏斯（Zuse）研制成第一台累计数字计算机 Z-1。1946 年，在美国诞生了世界上第一台电子数字计算机 ENIAC。在同一时代，控制论和信息论的创立，生物学家设计的脑模型等，都为人工智能学科的诞生作出了理论和实验工具的巨大贡献。

1956 年的一次历史性聚会被认为是人工智能学科诞生的标志。1956 年夏季，在美国达特莫斯（Dartmouth）大学，由当时的年轻数学助教、现任斯坦福大学教授的麦卡锡（J.McCarthy）联合他的三位朋友：哈佛大学年轻数学和神经学家、现任麻省理工学院教授的明斯基（M.L.Minsky）、IBM 公司信息研究中心负责人洛切斯特（N.Lochester）和贝尔实验室信息部数学研究员香农（C.E.Shannon）共同发起，邀请 IBM 公司的莫尔（T.Moore）和塞缪尔（A.L.Samuel）、麻省理工学院的塞尔夫利奇（O.Selfridge）和索罗莫夫（R.Solomonoff）、兰德（RAND）公司和卡内基工科大学的纽厄尔（A.Newell）和西蒙（H.A.Simon）等 10 名年轻学者，举办了为期两个月的学术讨论会，讨论机器智能问题。经麦卡锡提议，在会上正式决定使用“人工智能”（Artificial Intelligence）这一术语，从而开创了人工智能作为一门独立学科的研究方向。麦卡锡因而被称为人工智能之父。从此在美国开始形成了以人工智能为研究目标的几个研究组，如纽厄尔和西蒙的 Carnegie-RAND 协作组、明斯基和麦卡锡的 MIT 研究组，塞缪尔的 IBM 工程研究组等。

1956 年，人工智能的研究取得了两项重大突破。第一项是纽厄尔、肖（J.Shaw）和西蒙的研究组编制了一个逻辑理论程序 LT（The Logic Theory Machine），模拟人们用数理逻辑证明定理的思想，采用分解、代入、替换等规则，证明了怀特赫德（A.N.Whitehead）和罗素（B.A.W.Russell）合著的《数学原理》第二章中的 38 条定理。1963 年，修订的程序在大机器上终于完成了该章中全部 52 条定理的证明。一般认为，这是用计算机模拟人的高级思维活动的一个重大成果，是人工智能研究的真正开端。第二项是 IBM 工程研究组的塞缪尔研制的西洋跳棋程序。这个程序可以像一个优秀棋手那样，向前看几步来下棋。尤其是它具有自学习、自组织、自适应的能力，能在下棋过程中积累经验，不断提高棋艺。它能学习棋谱，在学习了 175000 多个棋局后，可以根据棋局猜测棋谱所有推荐的走步，准确度达 48%，这是机器模拟人类学习过程的一次极有意义的探索。1959 年，这个程序战胜了设计者本人，1962 年，它又击败了美国一个州的跳棋冠军。

1957 年，纽厄尔、肖和西蒙通过心理学实验，发现了人在问题求解时思维过程的一般规律，思维过程大致可分为三个阶段：

- 1) 先思考出大致的解题计划。
- 2) 根据记忆中的公理、定理和推理规则组织解题过程。

3) 进行方法和目的分析, 不断修正解题计划。

基于这一规律, 他们于 1960 年合作编制成功一种不依赖于具体领域的通用问题求解程序 GPS (General Problem Solver), 能求解 11 种不同类型的问题。

1959 年, 麻省理工学院研究组的麦卡锡发表了表处理语言 LISP。由于 LISP 语言可以方便地处理符号, 很快成为人工智能程序设计的主要语言。LISP 语言武装了一代人工智能科学家, 时至今日, 仍然是研究人工智能的重要工具。

一连串的研究成果使醉心于人工智能远景的学者们作出了过于乐观的预言。1958 年, 纽厄尔和西蒙曾充满自信地认为: 在 10 年内, 计算机将成为世界的象棋冠军; 计算机将要发现和证明重要的数学定理; 计算机将能谱写具有优秀作曲家水平的乐曲; 大多数心理学理论将在计算机上形成。有人甚至断言: 20 世纪 80 年代将是全面实现人工智能的年代, 到了 2000 年, 机器的智能可以超过人的智能。

但是, 事情的发展远非如此理想。塞缪尔的下棋程序在获得州的冠军之后, 再也没有当上全国冠军。自然语言的机器翻译是人工智能研究最早并取得实验性成果的研究方向之一。人们以为只要用一部双向互译字典和某些语法知识即可很快地解决自然语言之间的互译问题, 实际上, 由机器翻译出来的文字有时会出现十分荒谬的错误。例如, 英语句子 “The spirit is willing but the flesh is weak” (心有余而力不足), 翻译成俄语后再翻译成英语, 竟然成为 “The wine is good but the meat is spoiled” (酒是好的但肉变质了)。

自从人工智能形成一个学科之后, 许多学者遵循的指导思想是: 研究和总结人类思维的普遍规律, 并用计算机来模拟人类的思维活动。他们认为, 实现这种计算机智能模拟的关键是建立一种通用的符号逻辑运算体系。但是, 由于人类的认知和思维过程是一种非常复杂的行为, 至今仍未能被完全解释, 也由于现实世界的复杂性和问题的多样性, 老一辈人工智能科学家为之奋斗的通用逻辑推理体系至今也没有创造出来。他们早期的代表作通用问题求解程序 GPS 的通用性受到严格的限制, 只能对具有相当小的状态集和良定义的形式规则的问题有效。人工智能的早期研究只能停留在实验室里, 作为研究的实验系统或演示系统, 不能解决实际问题。科学家们开始对人工智能探索人类思维普遍规律的研究战略思想进行反思。

2. 人工智能的发展

20 世纪 60 年代中期以后, 人工智能由追求万能、通用的一般研究转入特定的具体研究, 通用的解题策略与特定领域的专业知识及实际经验结合, 产生了以专家系统 (ES, Expert System) 为代表的基于知识的各种人工智能系统, 使人工智能走向社会, 走向实际应用研究。斯坦福大学当时的年轻教授费根鲍姆 (E.A. Feigenbaum) 重新举起了英国 16 世纪的哲学家和自然科学家培根 (Francis Bacon) 的旗帜: “知识就是力量”, 于 1965 年开创了基于知识的专家系统这一人工智能研究的新领域。与通用问题求解程序 GPS 的系统不同, 专家系统并不试图发现很强有力的和很通用的问题求解方法, 而是把研究范围缩小在一个特定的相对狭小的专业领域中。人类专家之所以成为专家, 是因为他拥有解决自己专业领域问题的大量专门知识, 包括各种有用的经验。

在费根鲍姆的主持下，第一个专家系统课题 DENDRAL 化学分子结构分析系统于 1965 年在斯坦福大学开始研究，1968 年研制成功。该系统能根据质谱仪数据推断未知有机化合物的分子结构。它是一个启发式系统，把化学专家关于分子结构质谱测定法知识结合到控制搜索的规则中，从而能迅速消去不可能为真的分子结构，避免了搜索空间以指数级膨胀。通过产生全部可能为真的分子结构，它甚至可以找出那些人类专家可能漏掉的结构。DENDRAL 及附属的 CONGEN 系统商品化后，每天为上百个国际用户提供化学结构的解释。这一研究成果使人们看到，在某个专门领域里，以知识为基础的计算机系统完全可能相当于这个领域里的人类专家的作用。

MACSYMA 系统是麻省理工学院于 1968 年开始研制的大型符号数学专家系统。该系统从应用数学家获得了几百条关于一个表达式与另一等价表达式之间转换的规则，擅长于易引起组合爆炸的符号表达式的化简，能执行微分、积分、解方程、台劳级数展开、矩阵运算、向量代数等 600 多种不同的数学符号运算。1971 年研制成功后，由于它具有很强的与应用分析相结合的符号运算能力，很多数学和物理学研究人员以及各类工程师争相使用 MACSYMA 系统，遍及美国各地的很多用户每天都通过 ARPA 网与它联机工作达数小时。

在 DENDRAL 和 MACSYMA 的影响下，在化学、数学、医学、生物工程、地质探矿、石油勘探、气象预报、地震分析、过程控制、计算机配置、集成电路测试、电子线路分析、情报处理、法律咨询和军事决策等各方面出现了一大批专家系统。著名的 MYCIN 系统就是斯坦福大学人工智能研究所于 1973 年开始研制的一个诊断和治疗细菌感染性血液病的专家咨询系统。该系统可以看成是 DENDRAL 系统的直接后继者，并且具有更广泛的影响。MYCIN 拥有的知识包括约 450 条“前提-结论”型的关于细菌性血液感染的诊疗规则，系统根据提供的数据和主动向医生询问获得的数据，运用相应的规则进行推理，最终给出对患者诊断和治疗方面的咨询性建议。经专家小组对医学专家、实习医生以及 MYCIN 系统的行为进行正式测试评价，认为 MYCIN 的行为超过了临床医生助手的作用，尤其在诊断和治疗菌血症和脑膜炎方面有相当高的准确率。在 MYCIN 系统框架基础上建立的肺功能专家系统 PUFF 曾在旧金山太平洋医疗中心使用过相当长的一段时间。

由拉特格斯 (Rutgers) 大学于 20 世纪 70 年代中期开发的 CASNET 是一个诊断和治疗青光眼的专家咨询系统。CASNET 的知识不使用 MYCIN 的静态规则表示方式，而是按因果关系把疾病表示为与病理生理状态相连接的网络。系统共有 150 个状态、350 个测试、50 个分类表。系统利用因果网络推断疾病类型，预测治疗效果。此外，系统还包括广泛的医学参考资料，能对疾病作出相当完善的解释。经评价，该系统接近专家水平，曾被美国和日本一些学术团体用于疾病研究。

CADUCEUS (原名 INTERNIST) 系统也是 20 世纪 70 年代研制的医疗咨询专家系统，由匹兹堡大学的计算机专家和内科专家合作研制，用于内科疾病诊断。它的知识表示方式与 CASNET 类似，它的知识库是当前专家系统中最大的知识库之一，据称拥有比人类任何人都多的内科知识。它用疾病树表达疾病分类知识，知识库中包含 500 多种内科疾病以及 10 万

条疾病与症状的相关关系。它还采用了一些复杂的策略来区别和组合多种疾病。因此，它能正确地对人类专家感到棘手的复杂病案作出诊断。CADUCEUS 已用于医学教学和某些由美国国家健康研究机构赞助的医疗服务点。

HEARSAY I 和 II 是卡内基-梅隆大学于 20 世纪 70 年代先后研制的两个语音理解系统。HEARSAY II 通过称为“黑板”的全局数据库来组合专家的知识。它的语音理解能力可以和一个 10 岁的孩子接近，但离专家水平甚远。这是因为语音理解是一个更为困难的研究方向。

PROSPECTOR 是一个著名的地质勘探专家系统，由斯坦福大学人工智能研究所于 1976 年开始研制。它能帮助地质学家解释地质矿藏数据，提供硬岩石矿物勘探方面的咨询，包括勘探评价、区域资源估值、钻井井位选择等。该系统的知识来自地质学家的矿床模型，用似然推理网络表示知识，网络的节点为有关探测证据和重要地质假设的各种断言，有向弧表示所连接的节点之间的推理规则，用贝叶斯（Bayes）概率推理处理不确定的数据和知识。该系统拥有 12 种矿藏知识库，共有 1100 多条规则，另有 400 种岩石和地质术语。它的性能足以与地质学家相比较，并已在实际应用中取得巨大的经济效益，例如，它发现了一个铝矿，据说该系统在这个铝矿勘探与开采中的使用价值可能超过 1 亿美元。

XCON（原名 R1）是由卡内基-梅隆大学从 1978 年开始研制的一个 VAX 计算机配置专家系统，它能根据 DEC 公司的 VAX 机的用户对每一部件的需求订单，以及关于部件组合方面的上千条规则型约束知识，形成一个功能上可以接受的 VAX 系统配置。经评价小组的正式性能测试，认为该系统具有足够的专家水平。后来，系统又进行了多次改进和发展，最后成为一个成熟的系统，在 DEC 公司担负了日常的 VAX 计算机系统配置任务，每年为 DEC 公司可节省 1500 万美元的设计费用。

专家系统的一系列研究成果展示了人工智能应用的广阔前景，社会各界对人工智能的兴趣与应用需求与日俱增。卫生界因某些医学专家系统的成功而受到极大鼓舞；军界期望它能开辟军事决策和指挥自动化的新局面；工商企业界出自对新技术的厚望，对人工智能的热情迅速高涨起来，过去对人工智能研究的态度十分保守的 IBM 公司也很快改变了态度。20 世纪 70 年代后期，随着专家系统技术的逐渐成熟和应用领域的不断开拓，人们从各种不同类型的专家系统和知识处理系统中抽取共性，人工智能又从具体系统的研究逐渐回到一般研究。围绕知识这一核心问题，人们重新对人工智能的原理和方法进行探索，并在知识获取、知识表示和知识推理等方面开始出现新的原理、方法、技术和工具。在这一背景下，在国际人工智能联合会（IJCAI, International Joint Conference on Artificial Intelligence）于 1977 年召开的 IJCAI-77 会议上，费根鲍姆提出了“知识工程”（KE, Knowledge Engineering）的概念。费根鲍姆因而被称为知识工程之父。知识工程综合了科学、技术和方法论三方面的因素，研究专门知识的获取、形式化和计算机实现，为研制以知识为基础的各类人工智能应用系统提供一般方法和基本工具。知识工程的研究有利于缩短专家系统的研制周期，促进了专家系统从单学科专用型向多学科通用型的发展，出现了一批通用程度不等、类型不同的专家系统工具，包括骨架型工具、以及有更大通用性的语言型工具和知识处理系统环境。应该说，知识工程和专家系统是人工智能研究中最有

成就的分支领域之一，为推进人工智能研究起到了重要作用。

20 世纪 90 年代，计算机发展的主要趋势是小型化、并行化、网络化和智能化。人工智能技术逐渐与数据库技术、多媒体技术、网络技术相结合，旨在使计算机系统更聪明、更有效，与人更接近。计算机智能化技术的主要研究方向大体上可分为三个方面：一是并行与分布处理技术，包括大规模并行计算机和机群系统的体系结构、并行操作系统，并行编译系统与并行数据库系统，分布式 Client/Server 计算模型及其处理技术，多专家协同工作与知识共享技术等；二是知识的获取、表示、更新和推理的新方法与新技术，大型知识库的组织与维护，新一代逻辑处理机制等；三是多功能的感知技术，包括对语音、文字、图形和图像等多媒体信息的获取、压缩、识别与转化，以及虚拟现实技术等。

我国从 1978 年才开始设立人工智能的研究课题，主要在定理证明、汉语自然语言理解、机器人及专家系统方面，并取得一批研究成果。在我国的“863”高技术研究开发计划中，智能计算机系统和智能机器人被列入我国高技术的重点发展主题。自该计划实施以来，我国在人工智能与智能计算机领域已取得许多可喜成果。根据智能计算机系统的高技术研究开发计划，我国将研制可扩充大规模并行的、智能化的先进计算机系统，它们主要用于智能化的可视计算、事务处理、信息管理、信息分析与服务，它们将具有高速的和可视化计算的能力，具有对大量复杂信息进行存取与分析的能力，具有有效灵活的推理及机器学习的能力，具有以语音、文字、图形、图像为界面的和谐的人机交互的能力，具有方便有效的智能化的软件开发能力。我们相信，21 世纪初期，这种计算机系统将成为促进我国社会发展的重要基础。

3. 人工智能的主要学派

随着人工智能的发展，围绕人工智能的基本理论和方法等问题，诸如人工智能的定义、基础、核心、要素、认识过程、学科体系以及人工智能与人类智能的关系等，由于存在不同的观点而形成不同的学派。

1987 年，在美国波士顿由麻省理工学院人工智能研究所、美国国家科学基金（NSF）和美国人工智能学会（AAAI）联合主办了人工智能基础国际研讨会。许多在人工智能发展历史上作过重要贡献的各种学派的人工智能科学家应邀出席会议，并在会上报告了自己的论文。在报告中，他们阐明了各自的学术思想，讨论作为他们方法基础的各种原理，叙述各自方法取得成功的形式，解释这些方法的效用，探讨这些方法的适用性和局限性。这些报告已在国际杂志《人工智能》第 47 卷（1991）1~3 期合刊上发表。

目前，人工智能的主要学派有下述 3 家：

1) 符号主义（Symbolicism）学派，又称为逻辑主义（Logicism）学派、心理学派（Psychologism）或计算机学派（Computerism）

2) 联结主义（Connectionism）学派，又称为仿生学派（Bionicsism）或生理学派（Physiologism）

3) 行为主义（Actionism）学派，又称为进化主义（Evolutionism）学派或控制论学派（Cyberneticsism）

人工智能各学派的起源以及进行人工智能研究所采用的基本理论和方法各不相同。

(1) 人工智能各学派的起源

符号主义认为人工智能源于数理逻辑。形式逻辑从 19 世纪末开始迅速发展，到 20 世纪 30 年代开始用于描述智能行为。计算机出现后，又在计算机上实现了逻辑演绎系统，其有代表性的成果是 1956 年研制的逻辑理论程序 LT 证明了 38 条数学定理，表明了可以应用计算机研究人的思维过程，模拟人类智能活动。正是这些符号主义者在 1956 年首先采用“人工智能”这个术语。后来又发展了启发式算法、专家系统、知识工程理论与技术，并在 20 世纪 80 年代取得很大的发展。符号主义曾长期一枝独秀，为人工智能发展作出了重要贡献，尤其是专家系统的成功开发与应用，为人工智能走向工程应用具有特别重要意义。在人工智能的其他学派出现之后，符号主义学派仍然是人工智能的主流。这个学派的代表人物有纽厄尔、肖、西蒙、尼尔逊（N.J.Nilsson）等。

联结主义认为人工智能源于仿生学，特别是人脑模型的研究。1943 年，由生理学专家麦卡洛克（McCulloch）和数理逻辑学家皮茨（Pitts）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，开辟了人工智能研究的新途径。20 世纪 60 年代至 70 年代，联结主义以感知器为代表的脑模型的研究曾出现过热潮，由于当时的理论模型、生物原型和技术条件的限制，脑模型研究在 70 年代后期至 80 年代初期落入低潮。1982 年，美国加州工学院物理学家荷伯维尔德（Hopfield）提出了人工神经网络（ANN, Artificial Neural Network）的 HNN 模型，有力地推动了人工神经网络的研究。他引入了“计算能量函数”的概念，给出了神经网络稳定性判据。HNN 模型电子电路实现为神经计算机的研究奠定了基础，同时开拓了神经网络用于联想记忆和优化计算的新途径。1985 年，赫顿（Hinton）和塞罗斯基（Sejnowski）借用统计物理学的概念和方法，提出了 Boltzman 机模型，首次采用了多层神经网络的学习算法，即在学习过程中用模拟退火技术保证神经网络趋于全局稳定。1986 年，鲁梅尔哈特（Rumelhart）和麦克勒兰德（McClelland）提出多层神经网络的反向传播（BP）学习算法，通过实例的学习改变多层神经网络的邻接权矩阵，从而达到学习的目的。这是至今为止使用最广泛的人工神经网络。荷兰德（Holland）提出的分类系统类似于以规则为基础的专家系统，他提出的发现和改进规则的学习算法是对专家系统的重要发展。至此，人工神经网络的研究再次出现热潮。神经网络的发展为认知科学、计算机科学及人工智能的发展开辟了一条崭新的途径。虽然有不少人对神经网络研究的前景存在疑虑，但最悲观的估计仍然认为它会带来重大的科学研究成果和广泛的应用，而最乐观的估计则称之为一种新主义——联结主义，它是一种能解决知识表示、推理、学习、联想记忆等复杂系统的统一模型。

行为主义是近几年来才被认为是人工智能的一个新的学派。行为主义源于控制论。在 20 世纪 50 年代，控制论的思想已对早期的人工智能工作者产生影响。早期的研究重点是模拟人在控制过程中的智能行为和作用，如对自寻优、自适应、自组织和自学习等控制系统的研究，并进行“控制论动物”的研制。在 20 世纪 60 年代至 70 年代，上述控制论系统的研究

取得一定的进展，产生了智能控制和智能机器人的萌芽，并在 80 年代诞生了智能控制和智能机器人系统。行为主义学派的代表作首推布鲁克斯（Brooks）的六足行走机器人（机器虫），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智能控制系统。

（2）人工智能学派的基本理论框架

人类的认知过程是非常复杂的行为，至今仍未能被完全解释，人工智能各学派从不同的角度对人的智能行为进行研究，从而形成各学派研究人工智能的不同的基本理论。

符号主义认为可以用一个符号系统在计算机上形式化地描述和模拟人的思维活动过程。符号主义还认为知识是智能的基础，人工智能的核心问题是知识表示与知识推理，知识是可以由一种符号系统来表示的，也可以用符号的操作进行知识推理。因此，有可能建立起基于知识的人类智能和机器智能的统一理论体系。

联结主义利用人工神经网络模仿人类智能，认为人的智能的基本单元是神经元，由许多人工神经元联接起来的人工神经网络可以具有自学习和自适应功能，能更好地模仿人类智能。人工神经网络并不是人脑的真实描写，只是人脑的某种抽象、简化与模拟。人工神经网络实际上是一种非线性自适应信息处理系统，信息处理由神经元之间的相互作用来实现，知识与信息的存储表现为网络各神经元之间的联系，学习则表现为网络各神经元连接权的动态变化过程。

行为主义认为智能取决于感知和表现为行动，智能行为只能在现实世界中与周围环境交互作用而表现出来，从而提出智能行为的“感知-动作”模式。

由于各学派对人工智能研究的基本理论框架不同，因此，各学派对人工智能的研究方法也不同。

符号主义认为人工智能的研究方法应是功能模拟方法，分析人类认知系统所具备的功能和机理，然后用计算机来模拟这些功能，从而实现人工智能。符号主义力图用数理逻辑方法来建立人工智能的统一理论体系。

联结主义认为人工智能应着重于结构模拟，即模拟人的生理神经网络结构，并认为功能与结构是密切相关的，不同的结构表现出不同的功能和智能行为。至今，已经提出多种人工神经网络结构和多种学习算法。

行为主义认为人工智能的研究方法应采用行为模拟方法，也认为功能、结构和智能行为是不可分开的，不同的行为需要不同的控制结构和表现出不同的功能。行为主义的研究方法受到其他学派的怀疑，认为行为主义最多只能创造出低智能的昆虫行为，无法创造出人的高智能行为。

现在，在人工智能的基本理论、研究方法和技术路线等方面存在几种不同的学派，说明人工智能已经从“一枝独秀”的符号主义发展到多学派“百花争艳”，必将促进人工智能的进一步发展，并肩开创人工智能的新纪元。

人工智能的近期研究目标是建造智能计算机，即使得现有的计算机更聪明更有用。正是

根据这一近期研究目标，我们才把人工智能理解为计算机科学的一个分支。人工智能的远期研究目标是研究人类智能和机器智能的基本原理，用智能机器来模拟人类的思维过程和智能行为。这个远期目标几乎涉及所有的自然科学学科和社会学科。

人类智能是人脑系统的整体效应，有着极为丰富的层次和侧面。符号主义、联结主义和行为主义都只抽象出人脑思维的部分特征来模仿人的智能和功能，人的认知过程和智能行为要比人们想象的复杂得多，因此，人工智能需要多学科长期协作研究，才能使人工智能达到一个更高的水平。

1.2 人工智能的研究与应用领域

目前，人工智能的研究更多的是结合具体应用领域来进行的。这里，介绍几个主要的应用研究领域。

1. 定理证明

数学领域中对臆测的定理寻求一个证明或反证，一直被认为是一项需要智能才能完成的工作。证明定理时，不仅需要具有根据假设进行演绎的能力，而且需要具有某些直觉的技巧。例如，为了求证一个定理时，数学家会熟练地运用他的丰富的专业知识，猜测需要先证明哪几个引理，精确判断出已有的哪些定理会在这个定理的证明过程中起作用，并可以把这个定理证明分解为若干子问题，对子问题可分别独立地进行求解。

定理证明的研究在人工智能方法的发展中曾经产生过重要的影响。例如，采用谓词逻辑语言的演绎过程的形式化，可以帮助人们更清楚地理解演绎推理过程。许多其他领域的问题，如医疗诊断、信息检索等也可以应用定理证明的方法，因此，机器定理证明的研究在人工智能研究中具有普遍意义。

2. 专家系统

一般地说，专家系统是一个具有大量专门知识与经验的程序系统。专家系统存储有某个专门领域中经过事先总结、分析并按某种模式表示的专家知识（组成知识库），以及拥有类似于领域专家解决实际问题的推理机制（构成推理机）。系统能对输入信息进行处理，并运用知识进行推理，做出决策和判断，其解决问题的水平达到或接近专家的水平，因此能起到专家或专家助手的作用。专家系统的开发和研究是人工智能中最活跃的一个应用研究领域，涉及到社会各个方面，可以说，需要有专家工作的场合，就可以开发专家系统。

开发专家系统的关键是表示和运用专家知识，即来自领域专家的已被证明对解决有关领域内的典型问题有用的事实和过程。目前，专家系统主要采用基于规则的知识表示和推理技术。由于领域的知识更多是不精确或不确定的，因此，不确定的知识表示与知识推理是专家系统开发与研究的重要课题。此外，专家系统开发工具的研制发展也很迅速，这对扩大专家系统的应用范围，加快专家系统的开发过程，将起到积极地促进作用。随着计算机科学技术整体水平的提高，分布式专家系统、协同式专家系统等新一代专家系统的研究也发展很快。

在新一代专家系统中，不但采用基于规则的推理方法，而且采用诸如人工神经网络的方法。

3. 机器学习

学习是人类智能的主要标志和获得知识的基本手段，学习能力无疑是人工智能研究的一个最重要的方面。学习是一个有特定目的的知识获取过程，其内部表现为新知识的不断建立和知识的更新，而外部表现为系统的性能得到改善。一个学习过程本质上是学习系统把导师或专家提供的学习实例或信息转换成能被学习系统理解并应用的形式存储在系统中。

传统的机器学习倾向于使用符号表示知识而不是数值表示知识；另一个倾向是使用归纳方法进行学习而不是演绎方法。近几年来，又发展了下述各种学习方法：基于解释的学习方法、基于事例的学习方法、基于人工神经网络的学习方法、基于遗传算法的学习方法等。

4. 自然语言理解

自然语言是人类之间信息交流的主要媒介，由于人类有很强的理解自然语言的能力，因此，人们相互间的信息交流轻松自如。但是，目前计算机系统和人类之间的交互几乎还只能使用严格限制的各种非自然语言，因此，解决计算机系统能理解自然语言的问题就是人工智能研究的一个十分重要的课题。在智能计算机的研究中，自然语言理解就是其中的重点研究课题之一。

一个独立的简单句子是比较容易理解它的含义的，但是，对于一段用自然语言表示的较长的文章或对话，要准确地理解其中每个句子的含义就不仅限于这个句子本身，这个句子的含义可能与它的上下文甚至背景知识有关。因此，自然语言理解涉及对上下文知识结构的表示和根据上下文知识进行推理的方法和技术。目前，在理解有限范围的自然语言对话和小段文章方面的程序系统研制已有一些进展。但是，实现功能较强的自然语言理解系统还是一个比较艰巨的任务。显然，在实现机器翻译时，如果机器系统能准确地理解每一个句子的含义，那么就能翻译出更准确更通顺的译文。

5. 智能检索

数据库系统是存储某学科大量事实的计算机系统，随着应用的发展，存储的信息量愈来愈庞大，研究智能检索系统具有重要的实际意义。

智能信息检索系统应具有下述功能：

- 1) 能理解自然语言，允许用户使用自然语言提出检索要求和询问。
- 2) 具有推理能力，能根据数据库存储的事实，推理产生用户要求和询问的答案。
- 3) 系统拥有一定的常识性知识，以补充数据库中学科范围的专业知识。系统根据这些常识性知识和专业知识能演绎推理出专业知识中没有包含的答案。例如，某单位的人事档案数据库中有下列事实：“张强是采购部工作人员”、“李明是采购部经理”。如果系统具有“部门经理是该部门工作人员的领导”这一常识性知识，就可以对询问“谁是张强的领导”演绎推理出答案“李明”。

6. 机器人学

随着工业自动化和计算机技术的发展，到 20 世纪 60 年代，机器人开始进入大量生产和

实际应用的阶段。后来，由于自动装配、海洋开发、空间探索等领域的需要，对机器人的智能水平提出了更高的要求。特别是危险环境和恶劣环境更迫切需要机器人代替人来工作，从而推动了智能机器人的研究。

智能机器人的运动规划分为高层规划和低层规划两个层次。高层规划是根据感知的环境信息和要求实现的目标可规划出机器人执行的动作命令序列，然后由低层规划将每一个动作命令转换成驱动机器人各关节运动的驱动电机的角速度或角位移，各关节驱动电机的协调运动将保证实现相应的动作命令。

智能机器人是多学科交叉的综合课题，它涉及精密机械，视觉、触觉、力觉等信息传感技术，自动控制，人工智能的规划方法等。这一课题研究有利于促进各学科的相互结合和渗透，并将大大推动人工智能技术的发展。

7. 自动程序设计

自动程序设计是指：设计一个能自动生成程序的程序系统，这个程序系统只需要对其输入要求生成的程序的实现目标的非常高级的描述，就能自动生成能完成这个目标的程序。

从某种意义上来说，编译程序实际上就是做“自动程序设计”的工作，编译程序接受做某一件工作的源代码（源程序），然后生成目标代码（目标程序）去执行这件工作。这里所说的自动程序设计相当于“超级编译程序”，它要求不是给出完整的源代码来详细说明要做的工作，而只需要对要做的工作给出目标性的高级描述就可以生成完成这个工作的程序。

自动程序设计所涉及的基本问题与定理证明和机器人学涉及的问题有关，要求对高级的目标描述通过规划过程生成所需的程序。

8. 组合调度问题

有许多实际问题是属于最佳调度或最佳组合问题。例如，推销员旅行问题就属于这一类问题。推销员旅行问题是指：推销员从某个城市出发，遍访他所要访问的城市一次，回到他出发的城市，求推销员最短的旅行路线。该问题的一般化为：对若干节点组成的一个图，寻找一条最小耗费的路径，使这条路径对每个节点穿行一次。

在大多数组合调度问题中，随着求解问题规模的增大，求解程序都面临着组合爆炸问题。在推销员旅行问题中，问题规模可用需要穿行的城市数目来表示。随着求解问题规模的增大，问题求解程序的复杂性（用于求解程序运行所需的时间和空间或求解步数）可随问题规模按线性关系、多项式关系或指数关系增长。

组合调度问题中有一类问题称为 NP 完全问题，NP 完全问题是指：用目前知道的最好的方法求解，问题求解需要花费的时间（或称为问题求解的复杂性）是随问题规模增大以指数关系增长。推销员旅行问题就是一个 NP 完全问题。至今还不知道对 NP 完全问题是否有花费时间较少的求解方法。例如可使求解时间随问题规模按多项式关系增长。

组合调度问题的求解方法已经应用于交通运输调度、列车编组、空中交通管制和军事指挥自动化等系统。

9. 模式识别

“模式”（Pattern）一词的本意是指完整无缺的供模仿的标本或标识。模式识别就是识别出给定物体所模仿的标本或标识。计算机模式识别系统使一个计算机系统具有模拟人类通过感官接受外界信息、识别和理解周围环境的感知能力。

模式识别是一个不断发展的学科分支，它的理论基础和研究范围也在不断发展。在二维的文字、图形和图像的识别方面，已取得许多成果。三维景物和活动目标的识别和分析是目前研究的热点。语音的识别和合成技术也有很大的发展。基于人工神经网络的模式识别技术在手写字符的识别、汽车牌照的识别、指纹识别、语音识别等方面已经有许多成功的应用。模式识别技术是智能计算机和智能机器人研究的十分重要的基础。

10. 机器视觉

实验表明，人类接受外界信息的 80% 以上来自视觉，10% 左右来自听觉，其他来自嗅觉与味觉及触觉。在机器视觉方面，给计算机系统装上电视摄像输入装置就可以“看见”周围的东西。但是，视觉是一种感知，机器视觉的感知过程包含一系列的处理过程，例如，一个可见的景物由传感器编码输入，表示成一个灰度数值矩阵；图像的灰度数值由图像检测器进行处理，检测器检测出图像的主要成分，如组成景物的线段、简单曲线和角度等；这些成分又被处理，以便根据景物的表面特征和形状特征来推断有关景物的特征信息；最终目标是利用某个适当的模型来表示该景物。

视觉感知问题的要点是形成一个精练的表示来取代极其庞大的未经加工的输入信息，把庞大的视觉输入信息转化为一种易于处理和有感知意义的描述。

机器视觉可分为低层视觉和高层视觉两个层次。低层视觉主要是对视觉图像执行预处理，例如，边缘检测、运动目标检测、纹理分析等，另外还有立体造型、曲面色彩等，其目的是使看见的对象更突现出来，这时还谈不上对它的理解。高层视觉主要是理解对象，显然，实现高层视觉需要掌握与对象相关的知识。

机器视觉的前沿研究课题包括：实时图像的并行处理，实时图像的压缩、传输与复原，三维景物的建模识别，动态和时变视觉等。

习题一

- 1.1 何谓人工智能？人类智能主要包括哪些能力？
- 1.2 “知识工程”是在什么背景下提出的？知识工程对人工智能的发展有何重要作用？
- 1.3 当前计算机发展的主要趋势是什么？智能计算机的主要研究方向有哪些？
- 1.4 人工智能有哪几个主要学派？各学派的基本理论框架和研究方法有何不同？
- 1.5 人工智能的近期研究目标与远期研究目标分别是什么？
- 1.6 人工智能主要的研究应用领域有哪些？

第 2 章 知识表示

人类的智能活动过程主要是一个获得知识并运用知识的过程，知识是智能的基础。为了使计算机具有智能，使它能模拟人类的智能行为，就必须使它具有知识。但是，需要把人类拥有的知识采用适当的模式表示出来，才能存储到计算机中去，这就是用知识表示要解决的问题。知识表示是对知识的一种描述，或者说是一组约定，是一种计算机可以接受的、用于描述知识的数据结构，对知识进行表示就是把知识表示成便于计算机存储和利用的某种数据结构。知识表示方法又称为知识表示技术，其表示形式称为知识表示模式。

目前使用较多的知识表示方法主要有：一阶谓词逻辑表示法、产生式表示法、框架表示法、语义网络表示法、面向对象表示法等。本章将对这些基本的知识表示模式进行讨论，关于不确定性知识的表示和基于人工神经网络的知识表示将在后面的有关章节中讨论。

2.1 一阶谓词逻辑表示法

谓词逻辑是一种形式语言，也是目前能够表达人类思维活动的一种最精确的语言，它与人类的自然语言比较接近，又可以方便地存储到计算机中，并被计算机进行精确处理。因此，它成为最早应用于人工智能中表示知识的一种逻辑表示方法。

2.1.1 谓词逻辑

谓词逻辑是在命题逻辑的基础上发展起来的，对于知识的形式化表示，特别是在定理的自动证明中发挥了重要作用，在人工智能发展史中占有重要地位。

1. 命题

命题是具有真假意义的语句。命题代表人们进行思维时的一种判断，或者是肯定，或者是否定，只有这两种情况。若命题的意义为真，则称它的真值为真，记为 T ；若命题的意义为假，则称它的真值为假，记为 F 。一个命题不能同时既为真又为假，但在一定条件下为真，在另一种条件下为假。没有真假意义的语句（如感叹句、疑问句等）不是命题。例如，“中华人民共和国的首都是北京”，“ $3 < 4$ ”都是真值为 T 的命题；“太阳从西边升起”是真值为 F 的命题；“ $1+1=10$ ”在二进制情况下是真值为 T 的命题，但在十进制情况下是真值为 F 的命题。

命题逻辑的这种表示有较大的局限性，它无法描述客观事物的结构及逻辑特征，也不能把不同事物间的共同特征表述出来。例如，对于“杨青是教师”和“李文是教师”这两个命题，用命题逻辑表示时，无法把两人都是教师这一共同特征表示出来。

2. 谓词

在谓词逻辑中，命题是用谓词表示的。一个谓词可分为谓词名与个体两个部分，个体表示某个独立存在的事物或者某个抽象的概念，谓词名用于刻画个体的性质、状态或个体间的关系。例如，对于“老张是教师”这个命题，用谓词可表示为 $\text{Teacher}(\text{Zhang})$ 其中， Teacher 是谓词名， Zhang 是个体，“ Teacher ”刻画了“ Zhang ”是教师的职业特征，又如，“ $5>3$ ”这个命题可用谓词表示为 $\text{Greater}(5, 3)$ ，“ Greater ”刻画了两个个体“5”与“3”之间的“大于”关系。

谓词的一般形式为：

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

其中， P 是谓词名， x_1, x_2, \dots, x_n 是个体。谓词名通常用大写英文字母表示，个体通常用小写英文字母表示。谓词中包含的个体数目称为谓词的元数，例如， $P(x)$ 是一元谓词， $P(x, y)$ 是二元谓词， $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 n 元谓词。

谓词中的个体可以是常量，也可以是变元，还可以是一个函数。例如，对于“小王的父亲是教师”，可以表示为 $\text{Teacher}(\text{father}(\text{Wang}))$ ，其中， $\text{father}(\text{Wang})$ 是一个函数，表示“小王的父亲”，它是谓词 Teacher 的个体。又如，对于“ $x<5$ ”可以表示为 $\text{Less}(x, 5)$ ，其中 x 是变元， 5 是常量。显然，当谓词中的变元都用特定的个体取代时，谓词就具有一个确定的真值： T 或 F 。

个体变元的取值范围称为个体域。个体域可以是有限的，也可以是无限制的。例如，若用 $I(x)$ 表示“ x 是整数”，则变元 x 的个体域是所有整数，它是无限的。

谓词与函数表面上很相似，容易混淆，其实这是两个完全不同的概念。谓词的真值是“真”或“假”，而函数的值是个体域中的某个个体，函数只是从一个个体到另一个个体的映射，函数无真值可言。例如 $\text{father}(\text{Wang})$ 是把个体“小王”映射到“小王的父亲”。为了便于区别函数与谓词，函数用小写英文字母表示。

个体常量、个体变元、函数统称为“项”。

在谓词 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 中，若 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 都是个体常量、变元或函数，则称它为一阶谓词。若某个 x_i 本身又是一个一阶谓词，则称 P 为二阶谓词。余者类推。本书中用到的都是一阶谓词。

3. 谓词公式

在谓词逻辑中，可以用连词来连接若干个谓词组成一个谓词公式，以表示一个比较复杂的含义。在谓词公式中还可以引入量词来刻画谓词与个体间的关系。

(1) 连词

在谓词逻辑中，有下述连词：

1) 非连词 \neg ：其作用是否定位于后面的命题。当命题 P 为真时， $\neg P$ 为假；当 P 为假时， $\neg P$ 为真。

2) 或连词 \vee ：它表示被它连接的两个命题有“或”关系。用 \vee 连接两个命题称为析取。

3) 与连词 \wedge ：它表示被它连接的两个命题有“与”关系。用 \wedge 连接两个命题称为合取。

4) 蕴含连词 \rightarrow ：它表示被它连接的两个命题的“蕴含”关系。 $P \rightarrow Q$ 表示“ P 蕴含 Q ”即“如果 P ,则 Q ”，其中 P 称为前件， Q 称为后件。

以上连词的逻辑真值表由表 2.1 给出。

表 2.1 谓词逻辑真值表

P	Q	$\neg P$	$P \vee Q$	$P \wedge Q$	$P \rightarrow Q$
T	T	F	T	T	T
T	F	F	T	F	F
F	T	T	T	F	T
F	F	T	F	F	T

(2) 量词

在谓词逻辑中，有下述两个量词：

1) 全称量词 ($\forall x$)：它表示对个体域中的所有 (或任一个) 个体 x 。

2) 存在量词 ($\exists x$)：它表示在个体域中存在个体 x 。

例如，若谓词 $P(x)$ 表示 x 是正数， $F(x,y)$ 表示 x 与 y 是朋友，则：

$(\forall x)P(x)$ 表示个体域中的所有个体 x 都是正数。

$(\forall x)(\exists y)F(x,y)$ 表示对于个体域中的任何个体 x ，都存在个体 y ， x 与 y 是朋友。

$(\exists x)(\forall y)F(x,y)$ 表示在个体域中存在个体 x ，他与个体域中的任何个体 y 都是朋友。

$(\exists x)(\exists y)F(x,y)$ 表示在个体域中存在个体 x 和个体 y ， x 与 y 是朋友。

(3) 谓词公式

由下述规则得到的谓词公式称为合式公式：

1) 单个谓词是合式公式，称为原子谓词公式。

2) 若 A 是合式公式，则 $\neg A$ 也是合式公式。

3) 若 A 、 B 都是合式公式，则 $A \vee B$ 、 $A \wedge B$ 、 $A \rightarrow B$ 也都是合式公式。

4) 若 A 是合式公式， x 是任一个体变元，则 $(\forall x)A$ 和 $(\exists x)A$ 也都是合式公式。

在合式公式中，连词的优先级别依序为： \neg 、 \wedge 、 \vee 、 \rightarrow 。

位于量词后面的单个谓词或者用括弧括起来的合式公式称为该量词的辖域，辖域内与量词变元同名的变元称为约束变元，不受约束的变元称为自由变元。例如

$$(\exists x)(P(x,y) \rightarrow Q(x,y)) \vee R(x,y)$$

其中， $(P(x,y) \rightarrow Q(x,y))$ 是量词 $(\exists x)$ 的辖域，辖域内的变元 x 是受 $(\exists x)$ 约束的变元，而 $R(x,y)$ 中的 x 是自由变元，公式中所有的 y 都是自由变元。

在谓词公式中，可以把一个变元的名字换成另一个名字。但必须注意，当对量词辖域内的约束变元更名时，必须把辖域内同名的约束变元都统一改成相同的名字，且不能与辖域内

的自由变元同名；当对辖域内的自由变元改名时，不能改成与约束变元相同的名字。例如，对于公式 $\forall x P(x,y)$ ，可以改名为 $\forall z P(z,t)$ ，这里，把约束变元 x 更名为 z ，把自由变元 y 更名为 t 。

4. 谓词公式的解释

在命题逻辑中，对命题公式中各个命题的一次真值指派称为命题公式的一个解释。一旦解释确定后，根据各连词的定义就可求出命题公式的真值（T 或 F）。在谓词逻辑中，由于公式中可能有个体常量、个体变元和函数，因此不能像命题公式那样直接通过真值指派给出解释，必须首先考虑个体常量和函数在个体域中的取值，然后才能针对常量与函数的具体取值为谓词分别指派真值。由于存在多种组合情况，所以一个谓词公式的解释可能有很多个。对于每一个解释，谓词公式都可求出一个真值（T 或 F）。

下面首先给出谓词公式的解释的定义，然后用例子说明如何构造一个解释以及如何根据解释求出谓词公式的真值。

定义 2.1 设 D 为谓词公式 P 的个体域，若对 P 中的个体常量、函数和谓词按如下规定赋值：

为每个个体常量指派 D 中的一个元素。

为每个 n 元函数指派一个从 D^n 到 D 的映射，其中

$$D^n = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_1, x_2, \dots, x_n \in D\}$$

为每个 n 元谓词指派一个从 D^n 到 $\{F, T\}$ 的映射。

则称这些指派为公式 P 在 D 上的一个解释。

例 2.1 设个体域 $D = \{1, 2\}$ ，求公式 $A = (\forall x)(\exists y)P(x,y)$ 在 D 上的解释，并指出在每一种解释下公式 A 的真值。

解 由于在公式 A 中没有包括个体常量和函数，所以可直接为谓词指派真值。设对谓词 $P(x,y)$ 在个体域 D 上的真值指派为：

$$P(1,1)=T, P(1,2)=F, P(2,1)=T, P(2,2)=F$$

这就是公式 A 在 D 上的一个解释。在此解释下，因为 $x=1$ 时有 $y=1$ 使 $P(x,y)$ 的真值为 T ， $x=2$ 时也有 $y=1$ 使 $P(x,y)$ 的真值为 T ，即 x 对于 D 中的所有取值，都存在 $y=1$ ，使 $P(x,y)$ 的真值为 T ，所以在此解释下公式 A 的真值为 T 。

还可以为公式 A 中的谓词指派另外一组真值，设为：

$$P(1,1)=T, P(1,2)=T, P(2,1)=F, P(2,2)=F$$

这是对公式 A 的另一个解释。在此解释下，对 D 中的所有 x （即 $x=1$ 与 $x=2$ ）不存在一个 y 使得公式 A 的真值为 T ，所以在此解释下公式 A 的真值为 F 。

公式 A 在 D 上共有 16 种解释，这里不再一一列出。

例 2.2 设个体域 $D = \{1, 2\}$ ，求公式 $B = (\forall x)(P(x) \rightarrow Q(f(x), b))$ 在 D 上的某一个解释，并指出公式 B 在此解释下的真值。

解 设对个体常量 b 指派 D 中的一个元素为 $b=1$ ，对函数 $f(x)$ 指派到 D 的映射为： $f(1)=2$ ，

$f(2)=1$ 。对谓词指派的真值为：

$$P(1)=F, P(2)=T, Q(1,1)=T, Q(2,1)=F$$

这里，由于已对个体常量 b 指派 $b=1$ ，所以 $Q(1,2)$ 与 $Q(2,2)$ 不可能出现，故没有给它们指派真值。

上述指派就是对公式 B 的一个解释。在此解释下，由于当 $x=1$ 时，有

$$P(1)=F, Q(f(1),1)=Q(2,1)=F$$

所以 $P(1) \rightarrow Q(f(1),1)$ 的真值为 T 。当 $x=2$ 时，有

$$P(2)=T, Q(f(2),1)=Q(1,1)=T$$

所以 $P(2) \rightarrow Q(f(2),1)$ 的真值也为 T 。即对个体域 D 中的所有 x 都有

$$P(x) \rightarrow Q(f(x),b)$$

的真值为 T 。所以公式 B 在此解释下的真值为 T 。

由上述的例子可见，谓词公式的真值是针对某一个解释而言的，它可能在某一个解释下的真值为 T ，在另一个解释下的真值为 F 。

若公式 P 在解释 I 下其真值为 T ，则称 I 为公式 P 的一个模型。

5. 谓词公式的永真性、可满足性、不可满足性

定义 2.2 如果谓词公式 P 对个体域 D 上的任何一个解释都取得真值 T ，则称公式 P 在 D 上是永真的。如果 P 在每个非空个体域上均永真，则称 P 是永真的。

由此定义可以看出，为了判定某个公式永真，必须对每个个体域上的每一个解释逐一判定公式的真值。当解释的个数为有限时，尽管工作量较大，总还是可以判定的，但当解释的个数为无限时，公式的永真性就难以判定了。

定义 2.3 对于谓词公式 P ，如果至少存在一个解释使得公式 P 在此解释下的真值为 T ，则称公式 P 是可满足的。

谓词公式的可满足性又称为相容性。

定义 2.4 如果谓词公式 P 对于个体域 D 上的任何一个解释都取得真值 F ，则称公式 P 在 D 上是永假的。如果 P 在每个非空个体域上均永假，则称 P 是永假的。

谓词公式的永假性又称为不可满足性或不相容性。

6. 谓词公式的等价性

定义 2.5 设 P 与 Q 是两个谓词公式， D 是它们共同的个体域，若对 D 上的任何一个解释， P 与 Q 都有相同的真值，则称公式 P 和 Q 在 D 上是等价的。如果 D 是任意的个体域，则称 P 和 Q 是等价的。记为 $P \Leftrightarrow Q$ 。

下面列出今后要用到一些主要的等价式。

(1) 交换律

$$P \vee Q \Leftrightarrow Q \vee P$$

$$P \wedge Q \Leftrightarrow Q \wedge P$$