

高等学校教材

专家系统及其在电力系统中的应用

华北电力学院 杨以涵
东南大学 唐国庆 合编
华北电力学院 高 曙

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书是高等学校电力系统及其自动化专业选修课教材。本书分 8 章介绍了人工智能的基本原理、语言和开发工具,知识的表示、获取和推理技术,专家系统的研制以及在电力系统中的应用。专家系统是基于知识的智能推理系统,在多种领域中显示出巨大的实用价值,在电力系统中的应用也显示出巨大潜力。本书除可作为教材供有关专业教师和学生使用外,对电力系统工程技术人员也大有裨益。

高等学校教材
专家系统及其在电力系统中的应用
华北电力学院 杨以涵
东南大学 唐国庆 合编
华北电力学院 高 曙

水利电力出版社出版
(北京三里河路 6 号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
北京市地矿局印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 230 千字
1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月北京第一次印刷
印数 0001—2470 册

ISBN 7-120-02350-0/TM·620

定价 8.10 元

前 言

专家系统是基于知识的智能推理系统，是人工智能领域中最活跃的一个分支。专家系统自 60 年代问世以来，发展异常迅速，在多种领域中显示出巨大的实用价值，成为人工智能科学从理论研究转向应用领域的里程碑。

专家系统在电力系统中应用研究起步较晚，但很快就显示出巨大应用潜力，受到国内外电力工作者的高度重视。如今，专家系统不仅理论成果非常丰硕，更重要的是很多成果已直接用于电力系统，为电力生产作出了贡献。

鉴于专家系统在电力系统中应用日益扩大，很多院校的“电力系统及其自动化”专业先后开设了这方面的选修课，并要求编写出版相应的教材。为了配合教学的需要，1989 年 10 月召开的电力系统教材编审会议上作出了编写本教材的决定，本书就是在该决定的基础上编写的。本书也可供电力系统工程技术人员参考。

本书共分八章。第一章由杨以涵编写，第二、三章及第八章的第一、二、三、五、六节由唐国庆编写，第四、五、六、七章及第八章的第四节由高曙编写。杨以涵对全书进行了审订。

西安交通大学孙启宏教授对初稿进行了极为细致的审阅，并提出许多宝贵意见。

由于编者的经验和水平有限，书中难免有不当和错误，恳请批评指正。

编 者

1993 年 10 月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 人工智能概念及发展简史	1
第二节 人工智能应用领域	4
第三节 专家系统及其在电力系统中的应用	7
第二章 人工智能基本原理	9
第一节 问题求解与问题表示	9
第二节 搜索策略	14
第三节 问题归约	20
小 结	28
第三章 人工智能语言	30
第一节 概述	30
第二节 LISP 语言	30
第三节 PROLOG 语言	49
小 结	63
第四章 专家系统基本原理与结构	64
第一节 专家系统的基本概念	64
第二节 一个专家系统的实例	66
第三节 专家系统的理想结构	75
第四节 专家系统与传统程序的区别	77
小 结	78
第五章 知识的表示和获取	79
第一节 知识表示方法的重要性	79
第二节 产生式表示法	82
第三节 谓词逻辑表示法	84
第四节 框架表示法	89
第五节 其它表示法	91
第六节 知识的获取	93
小 结	94
第六章 推理技术	96
第一节 精确推理	96
第二节 复杂系统中常用的控制策略	98
第三节 不精确推理	100
小 结	117
第七章 专家系统的研制	118

第一节	概述	118
第二节	专家系统的分类	119
第三节	研制专家系统的基本步骤	120
第四节	专家系统的评价	121
第五节	专家系统开发工具	123
	小结	125
第八章	专家系统在电力系统中的应用	126
第一节	应用的必要性和意义	126
第二节	应用的领域和现状	127
第三节	编制操作票专家系统	131
第四节	电力系统故障诊断和处理专家系统	138
第五节	电压-无功控制专家系统	149
第六节	专家系统在电力系统中应用的前景和途径	156
	小结	157
	参考文献	158

第一章 绪 论

人工智能 Artificial Intelligence (简称 AI) 是一门新兴的边缘学科, 其研究内容和应用领域极为广泛, 已引起许多学科人员的重视, 发展异常迅速。它与原子能和空间技术一起被誉为本世纪三大科学技术成就。

本章介绍人工智能的概念、研究和应用领域 (特别是专家系统) 及其发展历史。

第一节 人工智能概念及发展简史

一、人工智能概念

人工智能是一门研究如何使计算机具有认识问题与解决问题能力的新兴学科。它研究如何使机器具有感知功能 (如视、听、嗅)、思维功能 (如分析、综合、计算、推理、联想、判断、规划、决策)、行为功能 (如说、写、画) 及学习、记忆等功能。

人工智能的理论基础是: 离散数学和模糊数学等数学理论、认知心理学、逻辑或抽象思维学、形象或直感思维学等思维科学理论和软硬件等计算机工程技术。

人工智能研究的基本内容是: 知识表达与积累、知识的推理、知识的获取与学习以及利用知识求解问题等基本技术。

知识的表达技术是指知识的形式化、模型化方法 (如产生式规则、谓词逻辑、语义网络、框架等), 用以建立合适的符号逻辑系统。

知识推理技术包括启发推理和算法推理、归纳推理和演绎推理, 涉及专家系统、定理证明、机器博弈、自动程序设计等问题。

知识的获取技术是指机器感知器官如何直接或间接获得知识, 如模式识别及自然语言理解和生成、人机对话等工程技术方法。

知识的运用技术是指如何运用所获得的知识, 通过知识信息处理, 求得问题的解答并付诸行动, 以及各种智能系统的设计方法和工程实现技术, 如专家系统、智能控制与管理、第五代计算机、各种智能的计算机辅助设计。

要使机器很好地模仿、延伸并扩展人的智能, 应加强人工智能的基础研究, 加强对智能与思维的规律性研究, 也即要加强对思维科学的研究。

人工智能是一门年轻的、正在发展的技术学科, 随着新的应用领域的开拓及基础理论研究的深入, 将不断增添新的内容, 对它的认识也将不断加深。

二、人工智能发展简史

人工智能学科的诞生是历史的产物, 它的产生和发展过程大致经历了以下几个阶段。

1. 孕育期 (1956 年以前)

很久以来, 人们就一直在探索如何用机器来代替人的部分脑力劳动, 模拟人的智能以

提高人类征服自然的能力。逻辑学的创始人，古希腊的哲学家亚里士多德是研究人类思维规律的鼻祖。12世纪末至13世纪初西班牙神学家和逻辑学家罗门·卢乐最早提出可以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帕斯卡制成了世界第一台机械式加法器，并得到广泛应用。以后，德国数学家和哲学家莱布尼茨进一步制成了可进行四则运算的计算器，并提出了现代“思维”机器设计思想萌芽——“万能符号”和“推理计算”的思想。19世纪英国数学家布尔（G·Boole，1815~1864）提出用符号语言描述思维活动中推理的基本法则，实现了莱布尼茨的理想，创立了逻辑代数（即布尔代数），英国数学家图灵（A·M·Turing，1912~1954）在1936年提出了理想计算机模型，创立了自动机理论，把计算机理论大大地向前推进了一步。1943年麦卡洛克（W·McCulloch）与匹茨（W·Pitts）研制了神经细胞模型——MP模型，开创了脑模型的研究工作。1946年美国数学家莫克利（J·W·Manochly）和他的研究生埃克特（J·P·Eckert）合作研制成了第一台通用电子数字计算机ENIAC。1948年美国数学家维纳（N·Wiener）创立了控制论，数学家香农（C·E·Shannon）创立了信息论，同期美籍奥地利生物学家贝塔朗菲创立了系统论。50年代初，各国更多的科学家和工程师投身到这项工作中来。这段时期，由于先后创立了数理逻辑、自动机理论、控制论、信息论和系统论，并发明了通用电子数字计算机，为人工智能的诞生准备了充足的思想、理论和物质技术条件。

2. 形成期（1956~1970年）

在这个时期现代人工智能技术正式诞生，并很快地在定理证明、问题求解、博弈和LISP语言及模式识别等关键领域取得了重大突破，人工智能作为一门新兴学科得到人们的关注。

1956年夏季，在美国达特茅斯（Dartmouth）大学，由青年数学教师麦卡赛（J·McCarthy）联合他的三个朋友哈佛大学数学家明斯基（M·L·Minsky），IBM信息研究中心负责人罗却斯特（N·Lochester）和香农并邀请了IBM公司的莫尔（T·More）和塞缪尔（A·L·Samuel），麻省理工学院（MIT）的赛尔夫利奇（O·Selfridge）和索罗孟夫（R·Solomonoff）以及兰德公司（RAND）和卡纳奇（Carnegie）工科大学的纽厄尔（A·Newell）和西蒙（H·A·Simon）等人，在一起聚会共同学习和探讨用机器模拟智能的各方面的问题和特征，历时两个月之久。在会上第一次正式使用了人工智能这一术语。这次具有历史意义的会议标志着人工智能学科的正式诞生。

在这一年，人工智能在实验研究上取得了两项重大突破：一个是美国的纽厄尔·肖（J·Shaw）和西蒙合作编制了名为逻辑理论机的程序系统，该程序模拟了人用数理逻辑证明定理时的思维规律，证明了“数学原理”书中38条定理，开始了利用计算机研究思维活动规律的工作。另一个重大突破是塞缪尔在1956年研制成功的具有自学习、自组织和自适应能力的跳棋程序，这个程序在1959年的博弈中击败了设计者，1962年又击败了美国一个州的冠军。1956年乔姆斯基（N·Chomsky）提出了语言文法，开创了用于思维与感知的形式语言研究。

纽厄尔·肖和西蒙等人通过心理学实验，发现人在解题时的思维过程大致可以分为三个阶段：

- （1）首先提出大致的解题计划；

(2) 根据记忆中的公理、定理和解题规则,按计划实施解题过程;

(3) 在解题过程中,不断进行方法和目的的分析,修订解题计划。

根据上述思维的三个阶段,他们在1960年编制了一个名为通用问题求解的程序。该程序可以解11种不同类型的课题,使启发式程序有了较大的适应性。

同年麦卡赛研制出LISP语言,它不仅能处理数值,而且可以更方便地处理符号,在人工智能的各个研究领域中得到广泛的应用。1961年明斯基发表了题为“走向人工智能的步骤”的论文,推动了人工智能学科的发展。1965年费根鲍姆从“知识律”的观点,研制了DENDRAL专家系统。

1969年在人工智能发展史上是一个重要的里程碑。这一年由国际上许多学术团体共同发起,成立了国际人工智能联合会议(International Joint Conferences on Artificial Intelligence 简称IJCAI)并决定每两年召开一次国际人工智能学术会议,报告论文,讨论和交流成果,探讨研究方向。1970年该会创办了国际性的人工智能杂志 *Artificial Intelligence*。

3. 成长期(1970年至今)

在这期间人工智能研究开始向纵深发展,在更多的领域里取得了重大成就,并开始走向实际应用阶段,在学科上也开始形成了自己的理论体系。

为了进一步搞清智能的基本机理,人工智能研究者继续在问题求解、博弈、自动定理证明、自动程序设计、模式识别、物景分析和自然语言理解等方面深入进行了研究,并在智能机器人和专家系统等应用领域进行了实际检验。美国的人工智能科学家在这期间出版了人工智能的专著、手册和文集。例如尼尔逊(N·J·Nilsson)著的《人工智能原理》,费根鲍姆(E·A·Feigenbaum)等编著的《人工智能手册》(*The Hand-Book of Artificial Intelligence*)等。

随着人工智能事业的发展和各种学术交流活动的兴起,许多国家都先后成立了人工智能学术团体。如美国人工智能学会(AAAI)、英国的AISB、意大利的GLIA、加拿大计算机智能研究会(CSCSI)联邦德国的KI以及中国人工智能学会(CAAI)等。

专门的人工智能杂志和文集有《IJCAI会议录》、《机器智能》, (*Machine Intelligence*, 英国)、《人工智能》(日本)、《计算机智能研究学会文集》(加拿大)和《认知科学》, (*Cognitive Science*, 美国)等。

此外,许多重要学术会议(如国际自动控制协会、国际工业机器人会议、国际信息处理联合会和国际模式识别会议等)和学术期刊(如ACM, AFIPS和IEEE等)也都把人工智能列为主要内容之一。

70年代以来,人工智能走向实用化,研究中最引人注目的是专家系统的出现,它已经成功地用于化学、医疗、地质、气象、数学、科研和军事等各方面,大大提高了工作效率和工作质量。在各种专家系统的基础上,目前正在开展知识工程的研究。另外关于智能机器人的研究也取得了不少可喜的成果。人工智能的思想正在为整个社会所理解和重视。

人工智能的出现不是偶然的。从思想基础上讲,它是人们长期以来探索能进行计算,推理和其他思维活动的智能机器的必然结果;从理论上讲是控制论、信息论、系统论、计算机科学、神经生理学、心理学、数学和哲学等多种学科互相渗透的结果;从物质技术基

础上讲，则是电子数字计算机的飞速发展和广泛应用的结果。

近 10 年来，人工智能已进入大学教育，世界上主要大学的有关专业都已开设了人工智能课程。

人工智能的研究在我国较早就受到重视，50 年代末 60 年代初我国就在计算机下棋和翻译等方面开展了不少工作，但后来由于种种原因，人工智能的研究停顿了下来，直到 70 年代后期才又开始活跃起来。1978 年我国政府在科学发展规划中正式将智能模拟列为计算机科学的四个重要课题之一。1986 年又将人工智能、模式识别、智能机器人等列入我国“七五”期间重大科研攻关项目，并列入了跟踪国际高科技计划。许多高等学校和科研单位建立了人工智能实验室，招收了人工智能研究生，逐渐形成了一支科研队伍，并在定理证明、医疗诊断、汉语理解和模式识别等方面取得了初步成果。

1981 年 9 月 20 日中国人工智能学会 (CAAI) 在长沙宣告成立。1985 年 11 月中国计算机学会下又成立了人工智能与模式识别专业委员会，并召开了全国第五代计算机学术研讨会。全国高等学校从 1980 年起，每年都召开人工智能学术讨论。

我国人工智能的研究正在兴起，正在走向世界，中华民族一定会在这门新兴学科中对世界作出应有的贡献。

第二节 人工智能应用领域

从当前的研究现状分析，人工智能具体研究领域主要有如下几方面。

一、模式识别

模式识别是人工智能最早的研究领域之一，它的狭义研究目标是为计算机配置各种感觉器官，以便计算机能直接接受外界的各种信息。目前模式识别主要集中在以下两方面进行研究。

(1) 图形识别。它主要是研究各种图形（如文字、符号、各种图像和照片等）的分类。目前已能识别各种印刷体字符、某些手写体字符。还能识别白血球癌细胞和指纹等。

(2) 语音识别。它主要是研究各种语言信号的分类。早期的系统只能识别 50~100 个孤立的字，现在已能识别按随意方式排列的复杂句子中的几百个字。

目前外界信息大都是用电视摄像机、送话器和其他传感器接受并把它转换成电信号序列。计算机则进一步对这个电信号序列进行各种变换和预处理，从中抽出有意义的特征，得到输入信号的模式，然后与机器中原有的各个标准模式进行比较，完成对输入信息的分类识别工作。

模式识别和图形识别已广泛用于商业和银行的票据处理、邮电部门的信函分拣以及各种工业质量控制及工艺过程自动化中，还可用于疾病诊断、故障诊断和气象识别等方面。

二、物景分析

物景分析是模式识别的自然延伸，它的任务是用三维物景的二维投影图像（如照片）反推出三维视野中物体的特定身份和它们之间的空间关系。可见物景分析的研究内容是计算机视觉识别和理解过程，它要求计算机具有较多的知识。目前从简单积木世界分析中进行

复杂世界分析，并正在向景深分析方面发展。

三、自然语言理解

用机器处理自然语言一直是很吸引人的课题，但难度较大。然而计算机要广泛普及就必须能够使用自然语言而不是使用各种计算机语言。由于自然语言具有多义性，在人-机交换信息的过程中不得使用某些严格定义过的非自然语言，这给使用带来很多不便。起初人们只注意从语法方面来理解自然语言，后来发现这样做有片面性，于是开始注意交替使用语言、语义和推理规则，用语义来消除语法的混淆，用部分语法分析来防止句子意义的不确切，用推理来选择可能的意义和适当的分析等。

四、知识库的智能检索

20世纪以来各学科都发生信息爆炸，使得任何工作人员都无法记住工作中所需要全部信息，甚至根本不知道存在着某些有用的信息。计算机可以贮存大量的信息，但检索起来很不方便，因为人们要将所需要的信息描述得十分详尽计算机才能找到它。如果我们建立一个类似于人类联想记忆的数据库系统，人们只要用自然语言大致描述一下自己的问题，它就可以把有关的信息检索出来，那将是一个很大的飞跃。人工智能工作者正在研究这个问题。智能检索要求知识库具有以下能力：

- (1) 理解自然语言，可以用自然语言向数据库提问；
- (2) 具有一定的推理能力，可以从贮存的事实出发推出所需的答案；
- (3) 除了贮存某些专门知识外，还应贮存一些常识。

五、博弈

博弈就是对策或斗智，它不仅存在于下棋之中，而且存在于经济、政治、军事和生物竞争之中。在人工智能文献中大多数以下棋为例来研究博弈规律，这是因为：

- (1) 下棋规则很容易在计算机中表示；
- (2) 多数棋类比赛的规律是十分复杂的，没有一种简单的方法可以计算出正确的棋步。计算机必须用与人大致相似的方法来进行；
- (3) 人类有许多下棋专家，他们的经验可以帮助下棋程序不断改进提高；
- (4) 通过人、机之间的比赛可以直观地、方便地判定机器的智能水平。

著名的博弈程序有：塞缪尔的跳棋程序 (checkers)，1962年获得美国的州级冠军；格林布莱特 (R·Grenblatt) 等人设计的国际象棋 (chess) 程序，它在1967年赢得了美国一个州的D级业余比赛银杯；阿特金斯 (Atkins) 等人设计的国际象棋程序比前者更强，被美国列为第500名棋手。此外，围棋等棋类也有相应的博弈程序。

博弈为人工智能提供了一个很好的试验场所，人工智能的许多概念和方法都是从博弈程序中提炼出来的。

六、决策支持系统

决策支持系统是针对具体应用问题，根据实际与可能，确定行动目标，拟定多个行动方案，然后选用统一标准，选定最佳方案的过程。

决策支持系统由三个主要成分组成，即语言系统、知识系统和问题处理系统。

近些年来，国外计算机企业管理应用的重点已由事务处理转向管理控制、计划和分析

等高层的管理决策和策略的制定。

军事决策支持系统的研制工作也日益受到重视。

七、机器定理证明

机器定理证明就是把人证明定理的过程变成一系列能在计算机上自动实现的符号演算过程，也就是把表现智能特点的推理演绎过程机械化。

现代机器证明定理的基础是由赫尔勃兰特 (J·Herbrand) 奠定的，他在 1930 年就提出了一个一阶谓词的半判定算法。1965 年鲁宾逊 (J·A·Robinson) 在 Herbrand 定理的基础上总结出著名的“归结原理”。

近年来，我国对非归结原理的定理证明方法的研究也很活跃，1977 年我国数学家吴文俊提出的平面几何判定法，在机器上证明了不少难度相当大的几何定理，并已推广到初等微分几何中去，在国际上产生了很大的影响。

1976 年美国阿佩尔 (K·Appel) 等人利用机器作为证明定理的辅助手段，在计算机上证明了 100 多年来没有解决的四色难题，对世界的有关学术界是一个震动。

自动定理证明是人工智能的一个极端重要的研究领域，它在发展人工智能方法上起过重要作用，很多非数学领域的任务如医疗诊断、信息检索、规划制定和难题求解，都可以转化成一定理证明问题，所以机器定理证明的研究具有普遍的意义。

八、自动程序设计

编制和调试一个复杂的计算机程序是一个颇费时日的繁琐的工作，它往往需要数千“人·年”的工作量，而且很难做到完美无缺。但是软件失误带来的损失又常常是非常巨大的。解决的办法之一就是彻底摆脱目前的软件设计方式，用“做什么”型程序代替“如何做”型程序。这涉及到自动程序设计技术。自动程序设计是计算机科学中的重要研究领域，也是人工智能追求的目标。人工智能关心的是如下两个方面的自动化：

(1) 程序验证。它的任务是利用一个已验证过的程序系统来自动证明给定程序的正确性。

(2) 程序综合。它的任务是让计算机根据给定问题的原始描述自动生成满足要求的程序。

总的来讲自动程序设计还处于初级阶段。目前提出的各种方法对简单的子程序有效，而对实际工作中提出的大型程序仍无能为力，应进一步研究。

九、专家系统

它是人工智能的一个最活跃的研究领域，60 年代以来已经取得许多满意的结果。人们事先把某些专家的知识总结出来，分成事实和规则，以适当的形式存入计算机建立知识库。根据这些专门的知识，系统可以对输入的原始数据进行推理，做出判断和决策，因此能起到人类专家的作用。现已用于化学、医疗、地质、气象以及各个工程领域，取得许多重要成果。

十、自然语言生成

它研究人工智能系统的输出效应系统，目标是以自然语言形式向用户提供各种信息，以便实现人-机自然语言双向对话。研究内容包括书面自然语言的生成系统和语音合成系统。

目前已有不少研究成果，应用于各个方面，如菲利普斯兄弟公司最近做成一种语言合成器，它可以与汽车里的传感器配合，监视汽车的运行情况，当发现汽车机械性能有毛病时，可立即提醒司机“请注意油量”，“请检查刹车装置”。

十一、机器人

机器人是一种可再编程序的多功能的操作装置。研究机器人的目的：一个是技术上的，如提高工作质量和生产效率，降低成本，代替人从事有害环境中的危险工作等等；另一个是科学上的，机器人为人工智能提供了一个综合试验场所，它可以全面地检查人工智能各个领域的技术，研究它们之间的相互关系。计算机出现后，特别是60年代中期微处理机出现后，工业机器人已普遍应用，远距离操纵型机器人和智能机器人也已开始应用，如美国机器人“探测者3号”由阿波罗12号运上月球，在太空实验室操作人员的控制下，伸出1.5m的机械手在月球表面取岩石样品并把化验结果发回地球。其他国家，如前苏联、日本也研制成功类似的机器人。日本1967年从美国进口了第一个机器人，其机器人制造虽起步较晚，但目前产量已居世界之首。

第三节 专家系统及其在电力系统中的应用

专家系统是人工智能应用领域的一个重要分支。一方面它是人工智能的理论和方法（如知识表示、搜索策略）的应用环境，另一方面它的研究和发展又不断丰富和发展了人工智能学科。它和模式识别、智能机器人一起被列为人工智能发展的三大前沿课题。

专家系统产生于60年代中期，虽然至今仅有20多年的历史，但发展的速度是相当惊人的。1965年美国斯坦福大学的费根鲍姆（E·A·Feigenbaum）等1965~1968年研制的化学分子结构专家系统DENDRAL系统，能像化学专家那样进行质谱数据分析，推断化学分子结构。麻省理工学院（MIT）的英格曼（C·Engleman）等1965~1971年研制的数学专家系统MACSYMA，它能求解包括微分、积分、微分方程、级数展开、矩阵运算、向量代数、数量级分析等多种数学问题。尽管这些专家系统结构、功能还不完整，移植性差，且推理解释功能不很完善，但它标志着专家系统的诞生。1972年以后斯坦福大学的E·H·Shortliffe等1972~1974年研制了诊断血液细菌感染的医序诊断专家系统MYCIN；斯坦福国际人工智能研究中心（SRI）的R·O·Duda等1976~1981年设计了地质探矿专家系统PROSPECTOR，并用它成功地发现了美国华盛顿地区的钼矿；1976年D·B·Lanet等于斯坦福大学完成的数学发现专家系统AM，能进行概括、抽象和归纳推理，发现某些数论的概念和定理，以后他们又研制成诊断和治疗青光眼的专家系统SASNET，诊断内科疾病的专家系统INTERNIST等。这阶段开发的专家系统虽大多是单学科专业型的，但它们均属结构较完整，功能较全面（如具有解释功能，使用启发性知识和非精确推理等）的专家系统，它标志着专家系统技术已基本成熟。随着专家系统逐渐成熟，它的应用领域迅猛扩展，处理的问题难度也不断增加。70年代中期以前的专家系统，其数据信号大都属解释型和诊断型，处理的问题基本上是可分解的。70年代后期，在专家系统向纵深发展的实践中发现，开发一个专家系统需要许多人协同工作很长时间，其中知识获取是一个关键的瓶颈问题。为

了加快研制速度，需要对知识的自动获取、系统与知识的独立性、系统的通用性等方面做进一步研究。于是出现了一批专家系统开发工具，如EMYCIN（由MYCIN来）、EXPERT（由CASNET来）、OPS、HEARSAY-Ⅲ、AGE等，大大缩短了专家系统的研制周期，为专家系统向更多领域发展以及走向实用化提供了条件，是专家系统的又一重大进展。

目前虽然专家系统在数学、化学等方面的应用上取得了可喜的成果，但由于电力工业的特点及条件，直到70年代后期才开始应用到电力工业中来，这股研究热潮虽来得较晚，但来势凶猛。1988年8月在瑞典的斯德哥尔摩和芬兰的赫尔辛基召开了专家系统在电力工业中应用的首届学术会议，发表了近70篇反映最新动态的论文，1989年7月在美国的西雅图又召开了第二届会议，发表论文近90篇，接着1991年4月在日本东京召开了第三届会议，共发表论文近120篇。三届会议特别是一、二届之间间隔时间之短，发表文章之多，足以反映出电力专家对专家系统所抱的希望，也说明了专家系统在电力工业中的活力。

经过多年的研究，电力系统的大量问题已具备相应的数学模型和数值算法，这是专家系统发展的早期对电力部门吸引力不大的主要原因。

专家系统应用的巨大成功启发电力系统研究人员去尝试，很快发现专家系统在电力系统应用潜力也是很大的。当前，电力系统中尚有不少问题难以建立数学模型只能靠专家经验求解。例如正常运行的操作指导，发生故障时的事故判断和事故处理，主要靠运行人员凭经验进行处理。又如电力设备的故障诊断，主要是根据监视数据与经验数据进行综合比较后，得出故障的性质和部位。这类难以建立数学模型、主要靠经验求解的问题恰好是专家系统的优势，这也是迄今开发的系统以操作指导、故障诊断、分析、事故处理专家系统占比例最大的原因。

有些问题如电压-无功控制，电力系统规划等，虽也有数学模型，但由于规模过于庞大，问题过于复杂，难以单独靠数值计算求解，要把数值计算和专家经验结合起来，才能加快求解过程，得到满意的解答，这也是专家系统可以发挥重要作用的领域。

总之，专家系统的引入弥补了电力系统单靠数值计算求解的不足，把人类专家特有的推理、判断和决策功能赋予计算机，增加了计算机的智能，大大扩大了计算机的应用范围，使计算机在电力系统中的应用又上一个新台阶。

由于计算技术的引入，人们在电力系统数值计算和分析控制方面已做了大量的有成效的工作，世界各国的调度中心也都配置了能量管理系统(EMS)，因此除了一些不需要数值计算的纯启发性任务可用独立的专家系统解决外，大多数问题都是将专家系统和原有的数值分析结合起来，组成混合型专家系统。根据这个特点，需要研究知识库的分层、分布，多推理机的并行处理，智能语言和数值语言接口。此外，为了提高工作效率，加快专家系统在电力系统中应用的进程，研制适合于电力系统的专家系统开发工具也将势在必行。

第二章 人工智能基本原理

第一节 问题求解与问题表示

人工智能各个领域的许多研究都集中到一个课题上，即问题求解。许多人工智能程序系统都可以看作是一个智能的问题求解系统。问题求解的许多核心概念在诸如自然语言处理、机器人学、专家系统、定理证明等方面都得到了应用。因此，从问题求解入手来理解人工智能的基本原理与方法对于掌握人工智能、专家系统及其应用是重要的。任何一个问题求解系统，都包括了两个方面的内容：首先是问题的表示方法，即问题的描述，其次是问题求解的策略，即求解的方法。正是基于上述认识，本章围绕着问题求解，通过两方面的讨论建立起人工智能的基本概念、原理和方法。

一、问题表示的三要素

所谓问题表示就是把所要解决的问题用一个恰当的方式来表示与描述。一切问题都由三个要素构成，或者说有三个重要的共同特征：问题的状态、操作（或称算符、走步）和目标。

1. 状态

有初始状态、当前状态以及可能出现的状态。一旦明确了问题的状态，就可以用恰当的方式来描述，进而在计算机中用相应的数据结构，即用符号、字符串、向量、数组、树和表等来表达。

2. 操作

操作是使问题从一个状态转换成另一个状态。一个问题求解系统可以有一组操作，根据求解的需要，可以选择适合于当前状态的操作（一个或几个），进而执行它，使这一状态转移到需要的状态（一个或几个）。这种操作在许多场合下以一种规则的形式出现，即满足一定条件时就对当前状态作用以达到新的状态。

3. 目标

即目标状态，也就是问题求解需达到的最终状态。问题表示就是要确定三件事：确定状态描述的方式，特别是初始状态的描述；确定操作的集合及它们对状态的作用；确定目标状态以及目标状态描述的特性以便于进行目标测试。而问题求解过程就是要找出一组操作序列，使问题从初始状态最终达到目标状态。

二、状态空间表示法

1. 图的概念与术语

(1) 图。一个图是由节点的集合（有限个，甚至无限个）构成。节点与节点之间可以由弧线连接。当图中所有弧线有指向时，即从一个节点指向另一个节点，则此图称为有向图，如图 2-1 所示。

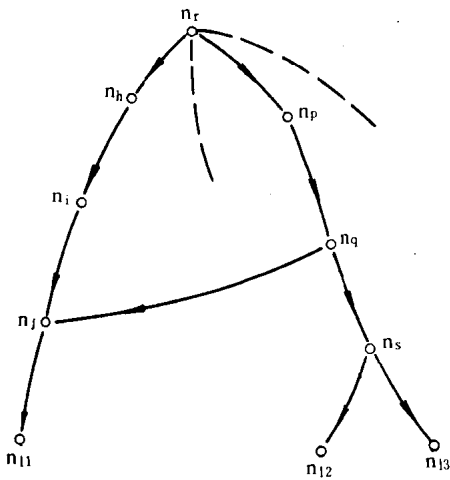


图 2-1 图的结构

(2) 父辈节点与后继节点。如果一条弧线从节点 n_i 指向 n_j 那么节点 n_i 称为节点 n_j 的父辈节点，而 n_j 叫做 n_i 的后继节点。没有父辈的节点称根节点，如图 2-1 中的 n_r ，而没有后继的节点叫做叶节点，如图 2-1 中的 n_{i1} , n_{i2} , n_{i3} 。

(3) 路径。如图 2-1 中，从 n_r 到 n_h , n_i , n_j , ..., n_{i1} ，顺次都有有向弧线相连，构成了一个节点的序列，那么就构成一条从节点 n_r 到 n_{i1} 的路径。在一条路径上，任一节点 n_i 其后继节点、以及后继的后继统称为节点 n_i 的后裔；反之，前者是后者的祖先。

(4) 树。如果在图中，除根节点外，所有的节点都只有一个父辈节点，那么这是图的特殊情况，称为树。如图 2-1 中，若 n_q 与 n_j 之间没有弧线相连，就构成了树。

2. 状态空间表示

一个问题求解系统，问题的状态可以由图中的节点来代表，它的所有可能的状态就成一个节点的集合，构成了状态空间，或称状态图。状态图中的有向弧线相应地代表了操作，反映了状态之间转移的关系。这就是状态空间表示法。它能完整地反映与表达问题表示的三要素，且问题求解过程就相当于在状态图上从根节点（起始节点）寻找一条路径（即一组操作序列）最终达到目标节点（叶节点）。

三、实例简介

1. “八数码难题”

如图 2-2，有数码 1~8 的 8 个棋子，放在 3×3 的井字棋盘上，其中有一空格。左图为其初始状态。现在要移动棋子，最后达到如右图的目标状态。对于这样一个问题，其棋局的不同状态完全可以在计算机中用数组来表示。它

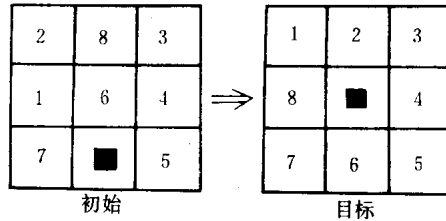


图 2-2 “八数码难题”

总共有 362880 (9!) 种状态。在状态图中可分别用节点来代表。但对于这里提出的具体问题仅仅要求从确定的初始状态通过棋子的移动达到给定的目标状态。

移动棋子就可使状态转移。这里棋子的移动可看作是空格的移动。所以空格的移动就是这问题的操作（走步）。具体说，它有四种操作：①如果空格能左移，则左移一格；②如果空格能上移，就上移一格；③如果空格能右移，就右移一格；④如果空格能下移，就下移一格。对任一种状态，不是所有的操作都能适用的，例如在初始状态下，空格在底层，因此第④种操作就不适用。而对于几种操作都适用的状态，则选择操作的次序就决定了它的状态转移。

根据上面的介绍，“八数码难题”的状态图就能确切地表示出来。图 2-3 表示了其状态图的一小部分，反映了从初始状态到目标状态的路径；同时也得到了达到目标状态的一组

操作序列。

2. 推销员旅行问题

图 2-4 为一旅行地图，其中标明了五个城市 A, B, C, D, E 的地理位置分布，城市间的直线代表了它们之间的唯一的交通途径，并用数字标出了它们之间的距离。现有一推销员要从城市 A 出发，并访问每一个城市，且不得重复访问任一城市，最终回到城市 A，要求一条最短旅行距离的路径。

这一问题的状态描述在计算机中可用字符串来表示。例如用 ABC 表示已先后访问过城市 A, B, C，字符的顺序反映了访问的先后次序。因此，字符 A 代表了初始状态，即从城市 A 出发，而目标状态则有六个字符 $A \times \times \times \times A$ 代表，头尾的字符均为 A 表示从 A 出发必须回到 A。 $\times \times \times \times$ 可分别用 B, C, D, E 来表示，次序的不同代表不同的旅行路线，但它们只能出现一次。目标的另一个要求是使该次序达到最短旅行距离。

图 2-5 是该问题的状态搜索图（树）。其弧线表示从一个城市到另一城市的操作。弧线旁的数字表示了相应城市间的距离。图上这条最短距离的路径用粗弧线表达出来，其访问的次序为 ACDEBA。这个例子还说明，达到目标有时还有一个优化的要求，这也是许多问题求解中经常碰到的。

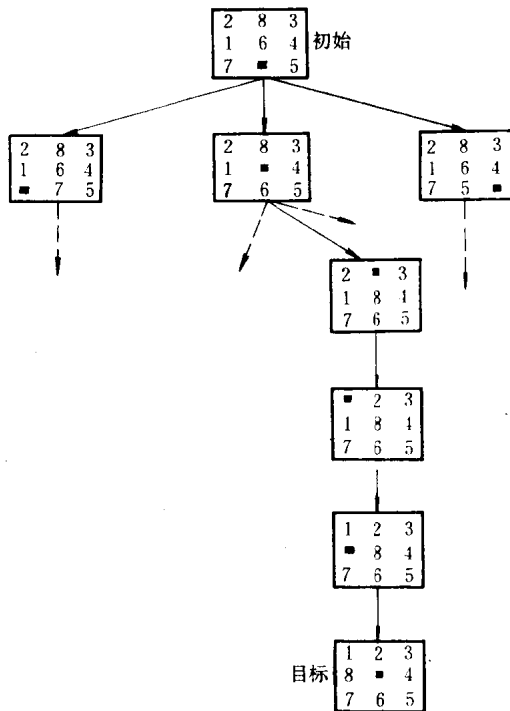


图 2-3 “八数码难题” 的状态图

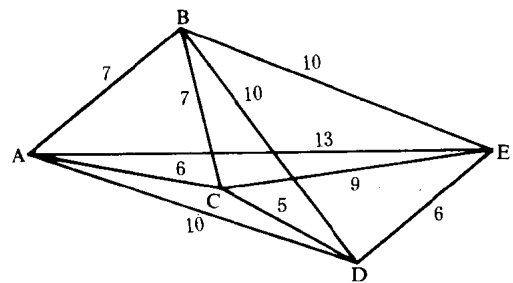


图 2-4 推销员旅行问题地理图

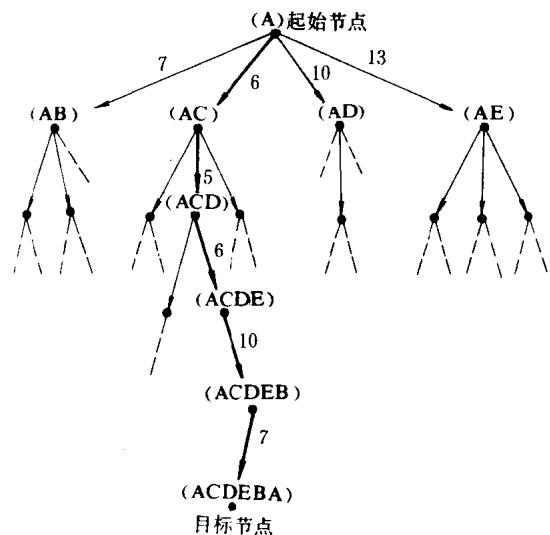


图 2-5 推销员旅行状态搜索树

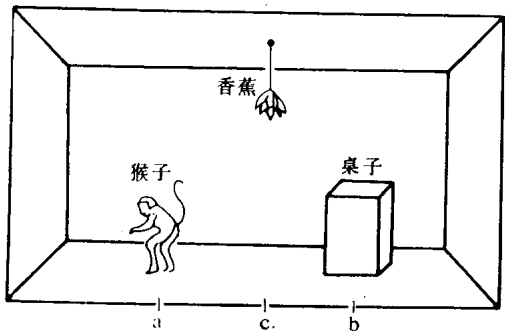


图 2-6 猴子和香蕉问题

3. 猴子和香蕉问题

如图 2-6, 在一个房间内有一只猴子和一张桌子分别在位置 a 与 b, 另有一串香蕉悬挂在房顶, 其位置为 c。猴子只有在香蕉下面、站在桌子上才能摘到香蕉。现在问题就是要找到一个行动步骤, 使猴子达到目的。如若把猴子看成机器人, 那么这一类问题实际上就是一个简单的机器人问题求解系统。

这个问题的状态可以用一张由 4 个元素构成的表来表示。而且表中的元素可以用变

量来代表。变量的不同值反映了问题的不同状态。

表: (M, T, X, Y)

其中 M, T, X, Y 均为变量。

M——猴子所在的水平位置;

T——桌子的水平位置;

X——特征量, 当猴子在桌子上时, $X=1$, 否则 $X=0$;

Y——特征量, 当猴子摘到香蕉时 $Y=1$, 否则取 $Y=0$ 。

由上面这些规定, 就可以得出问题的初始状态为 (a, b, 0, 0), 而其目标状态则为 (c, c, 1, 1)。

问题的操作有下列四个:

(1) goto (U)。这一操作代表猴子走到水平位置 U。它的作用可用以下形式表示

$$(M, T, 0, Y) \xrightarrow{\text{goto}(U)} (U, T, 0, Y)$$

应用操作 goto (U) 使状态从猴子在位置 M 移到某一位置 U。显然, 此操作只能当猴子不在桌子上时, 即 $X=0$ 时才能实现。

(2) push table (V)。这代表猴子推动桌子到某一位置 V。使状态转移的作用如下

$$(T, T, 0, Y) \xrightarrow{\text{pushtable}(V)} (V, V, 0, Y)$$

这里操作 pushtable (V) 的适用条件是猴子同桌子在同一水平位置, 且猴子在桌子旁边, 即 $M=T$, 且 $X=0$ 。

(3) climb table。代表猴子爬到桌子上, 其作用表示为

$$(T, T, 0, Y) \xrightarrow{\text{climtable}} (T, T, 1, Y)$$

它的作用条件与 pushtable (V) 的条件是一样的。经作用后, 从 $X=0$ 变为 $X=1$ 。

(4) grasp。它代表了猴子摘香蕉。作用形式是

$$(c, c, 1, 0) \xrightarrow{\text{grasp}} (c, c, 1, 1)$$

显然, 它的作用条件是猴子与桌子都必须在香蕉的水平位置 c 上, 且猴子在桌子上, 即 $X=1$ 。经状态转换, $Y=0$ 变为 $Y=1$ 。

图 2-7 表示了这一问题的状态图。图中每一状态由节点代表, 并用四元素表的变量值反