

过程系统工程理论与实践丛书

PSE

过程系统人工智能技术

麻德贤 著

中国石化出版社

DV29/13

内 容 提 要

本书是《过程系统工程理论与实践丛书》之一。该丛书是普及型高科技系列读物，主要介绍过程系统工程这门新型学科，其应用领域包括化工、石油化工、冶金、轻工、建材等物流型工业。

该书共八章。内容包括专家系统与知识工程，人工神经网络模型及功能等，详细介绍了人工智能技术的发展以及在过程系统工程中的应用。

本丛书各分册都具有普及性、实用性和可操作的特点。适用于相关专业的技术人员、管理人员以及大、中专学校师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程系统人工智能技术/麻德贤著. - 北京: 中国石化出版社, 1996
(过程系统工程理论与实践丛书)
ISBN 7-80043-631-4

I. 过… II. 麻… III. 人工智能-应用-过程系统-普及读物 IV. N94

中国版本图书馆数据核字(96)第 10266 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外小黄庄 32 号

邮编:100013 电话:(010)64241850

社长:周培荣

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

787×1092 毫米 32 开本 4.5 印张 90 千字印 1-2000
1996 年 11 月北京第 1 版 1996 年 11 月北京第 1 次印刷
定价:8.50 元

主 编 成思危

编委会 (按姓氏笔划为序)

申同贺	许锡恩	成思危
陈丙珍	周瑞康	俞金寿
顾 炎	麻德贤	韩方煜
谭昌元	魏寿彭	

序

过程系统工程是在系统工程、化学工程、过程控制、计算数学、信息技术、计算机技术等学科的边缘上产生的一门综合性学科。它以处理物料—能量—信息流的过程系统为研究对象，其核心功能是过程系统的组织、计划、协调、控制和管理。它广泛地用于化学、冶金、建材、食品等过程工业中，目的是在总体上达到技术上及经济上的最优化。

过程系统工程大约是在 60 年代开始形成一门独立学科的，此后得到了迅速的发展，在各种期刊杂志上及三年一度的过程系统工程国际会议上发表了大量的文章，其中一些关键技术，如过程模拟、过程分析、过程综合、过程预测、过程评价、过程可靠性分析等日益成熟，应用领域也不断扩展，已经成为过程工业发展中不可缺少的一门高新技术。

二十多年来，我国学者及工程技术人员在努力学习国外先进技术的基础上，在实践中积累了不少经验，在技术上也有一些进展。但由于彼此之间缺乏联系及交流，在过程系统工程方面尚未能形成一支强大的人才队伍，有不少好的成果得不到应有的推广。有鉴于此，我国著名的系统工程专家钱学森教授在 1988 年 12 月 23 日给我的来信中，倡议成立一个全国性的学术团体。他在信中指出：“我想中国系统工程学会似尚缺少一个专门搞生产流程的委员会，而生产流程的系统工程对化学工业特别重要。您如同意，您可作为发起人向学会的秘书长或副秘书长建议成立这个委员会”。

在钱老的大力推动下，中国系统工程学会过程系统工程专业委员会于 1991 年宣告成立。在成立大会上，不少代表建议要大力普及过程系统工程的基本知识。因此在第一次理

事会上便决定要编辑出版一套《过程系统工程理论与实践丛书》，并为此组成了编辑委员会，确定了丛书的选题及作者。在中国石化出版社的大力支持下，这套丛书得以顺利地出版。在此我仅代表中国系统工程学会过程系统工程专业委员会向各位编委、各位作者，以及中国石化出版社的有关人员表示深切的感谢。

这套丛书共分 10 册，基本上覆盖了过程系统工程的主要领域。出版这套丛书的目的是宣传并普及过程系统工程的基本知识，以引起读者进一步学习的兴趣。其读者对象是过程工业领域内大专以上文化程度的中青年工程技术人员。我们希望这套丛书能达到以下三点基本要求：

1. **系统性**：框架完整，逻辑清晰，每本书相对独立，深度相近，彼此之间有联系而不重复。

2. **科普性**：深入浅出，定性叙述与定量分析相结合，尽量避免复杂的数学推导。

3. **实用性**：理论与实践相结合，有一定数量的实例及应用软件介绍。

由于这套丛书是我们在过程系统工程领域内编写高级科普读物的第一次尝试，是否真正达到了上述要求，还有待读者的检验。我们热诚地希望读者能将对本书的宝贵意见通过中国石化出版社告诉我们，以便再版时加以改进。

中国系统工程学会过程系统工程
专业委员会主任委员

成思危

1994年4月6日

目 录

第一章 人工智能技术的概述	1
第一节 人工智能技术的发展.....	1
第二节 人工智能与第五代、第六代计算机.....	3
第三节 人工智能技术在过程系统工程中的应用.....	5
第二章 专家系统与知识工程	9
第一节 专家系统的组成.....	9
第二节 知识工程与知识库	11
第三节 知识的获取与表达	12
第四节 推理机制	20
第五节 专家系统用语言	26
第六节 早期开发的实用专家系统	35
第三章 专家系统开发环境	45
第一节 专家系统外壳及其类型	45
第二节 专家系统开发工具的选用	46
第三节 已经开发成功的专家系统外壳	47
第四章 过程系统工程专家系统	54
第一节 过程综合专家系统	54
第二节 故障诊断专家系统	59
第三节 物性检索与估算专家系统	65
第五章 模拟人脑神经网络技术的兴起	71
第一节 对人脑生理神经的认识	72

第二节	神经网络研究的发展过程	75
第三节	神经网络计算机	78
第六章	人工神经网络模型	84
第一节	人工神经元模型	84
第二节	人工神经网络模型	87
第三节	人工神经网络的训练	88
第四节	学习或训练规则	90
第五节	常用的神经网络模型	93
第七章	人工神经网络的功能	101
第一节	识别与分类	102
第二节	联想与记忆	106
第三节	最优化问题求解	111
第八章	人工神经网络在过程系统中的应用	115
第一节	过程系统人工神经网络模拟	116
第二节	过程系统操作人工神经网络调优	127
第三节	人工神经网络在过程系统工程中的应用 ——乙苯脱氢反应器的优化	129

第一章 人工智能技术概述

第一节 人工智能技术的发展

人类在其生存、发展的历史长河中，一直在孜孜不倦地探索、研究和改造着大自然，其中也包括对自己本身的认识。研究人的智能活动，一直是历代哲学家、心理学家所热衷的话题。

为了弄清人类思维活动的奥秘，早在 19 世纪末叶，弗雷治 (Frege)、怀特赫德 (Whitehead)、罗素 (Russell)、塔斯基 (Tarski) 等人就开始对人的思维推理过程结构的形式化进行了研究，并建立了逻辑推理数学公式。更有意义的是，这些设想在其后问世的计算机上都得到了实现。从而使人们在计算与智能之间，建立了新的关系概念。

人的大脑并不是善于进行数值计算的器官，它远远赶不上电子计算机的运算速度。例如，美国 Cray Research 公司 1991 年推出的 Y-MP·C90 巨型计算机，其运算速度是每秒 240 亿次。该公司计划于 1995 年推出的 Triton 计算机，其运算速度是每秒 640 亿次。这些巨型计算机都是为了适应气象分析、天气预报、超高速飞机设计、超高集成电路设计等需要而开发的。其运算速度是人脑所不能及的。但是人脑非常善于进行符号处理。从而具有图像识别、理解、学习、

判断等复杂功能。

1946年由美国宾夕法尼亚大学开发成功第一台电子计算机 ENIAC。其研制目的是为了适应美国奥伯丁武器试验场计算弹道轨迹的需要。但在计算机应用的不长的时间里，人们便发现计算机的工作内容不仅是数字的各种计算，计算机也能用于符号处理。从而为应用计算机实现模仿人脑思维的设想开拓了前景。正像图灵（Turing）曾经指出的，计算机可能将以某种被理解为智能的方式进行工作。

人们用计算机去模拟人类智能的最初尝试，是试图用于进行证明定理、下棋和语言文本翻译。

这种以分析、研究人脑思维行为为基础，应用计算机重现智能活动的技术就是人工智能。当前，人工智能研究已经成为一门相当活跃的新兴学科。

人工智能一词缩写为 AI。这是英文 Artificial（人工的）Intelligence（智力）两个字的字头。

自从 60 年代中期以来，人工智能技术在建立专家系统方面取得了显著的进展。近年来人工神经网络的理论与实践，呈现了非常活跃的局面。

人工智能研究的一个重要分支是机器人学。机器人研究的历史虽然还不太长，但当前已有相当多的机器人投入了工业生产应用。它们都是按预先编好的程序执行某些重复作业。机器人是一组复杂的装置，它们即便是在执行一些较为简单的动作时，也要求解许多有关智能方面的问题。机器人研究至少涉及三个方面的内容。

第一，对于感觉系统的认识以及对感受器的开发，特别是对视觉检测器的开发。

其次，操作机器人装置程序的研究，包括对这些系统的

控制问题。

第三，对于面向目标和面向空间环境问题的规划求解。机器人学的研究促进了人工智能的发展。

第二节 人工智能与第五代、 第六代计算机

本分册将只介绍在工程技术中使用的模拟人脑思维功能的人工智能，而不涉及机器人特别是机器人操作等方面的问题。

当代人工智能技术发展中，用计算机模拟人脑的思维过程，有两种不同的成功途径。一种是宏观的模拟，另一种是微观的模拟。

宏观模拟由人在思维时的心理活动出发。分析、研究人是如何运用知识、逻辑推理而解释问题的，从而掌握人脑的逻辑思维规律。运用计算机模拟这个过程，得出与人的思维过程相一致的结果。这就是专家系统 (Expert System)，简称 ES。专家系统的关键组成是知识库和推理机制程序。专家系统适用于求解那些非数值的、不确定的或模糊的问题。美国的一些大学在 70 年代就开发了一些成功的专家系统，它们求解问题的能力在一定范围内已经达到了人类专家的水平。

微观模拟则是从人脑的生理结构出发，模拟人脑在思维过程中的生理活动，从而得出和人脑思维过程相一致的结果，这种微观模拟包括建立神经元 (脑细胞) 模型，以及它们相互间传递信息的网络结构模型。这就是人工神经网络 (Artificial Neural Networks) 简称 ANN。人工神经网络特别

善于模拟人脑处理信息分类、识别、联想等功能，这些都是—般只进行数值运算的计算机所难于完成的。

1965年美国斯坦福大学研制出可根据化合物分子式及其质谱数据来推断分子结构的计算机程序系统 DENDRAL。该系统的出现标志着人工智能领域专家系统的诞生。70年代先后出现了一批成功的专家系统，如1974年开发成功的用于诊断和治疗感染性疾病的 MYCIN；用于诊断和治疗青光眼疾病的 CASNET；用于诊断内科疾病的 INTERNIST，1976年开发成功的 PROSPECTOR 等等。这些专家系统解答问题的能力，在一定范围内达到了人类专家的水平。70年代中期以前开发的专家系统多属于解释型（如 DENDRAL、PROSPECTOR）和诊断型（如 MYCIN、CASNET、INTERNIST 等），70年代后期又出现了其它类型的专家系统，如设计型、规划型、控制型等等。

近年来人工神经网络的应用无论在广度还是深度上都取得了迅速发展，应用领域涉及医学、国防、运输、通讯、工业生产、电子、航空航天以及金融管理等许多方面。例如：医疗上的心肌梗塞早期诊断、心电图分类；气象方面的防震控制系统、闪电预测系统；通讯信息方面的通讯业务量控制、通讯网动态路径选择、信息库自动检索；军事方面的多目标跟踪、战斗机飞行控制、声源定位；金融管理方面的支票及票据验收、股票行情分析 等等。

当前市场上推出的各种计算机，虽然在其元器件上已经历了四代的更新，但其体系结构仍然沿袭冯·诺伊曼计算机的模式。为了适应当代人工智能发展的要求，日本信息处理技术开发中心于1981年提出了开发具有智能功能的第五代计算机的设想。1982年日本政府宣布投资开发第五代计算

机 FGCS (Fifth Generation Computer System)。FGCS 是在发展专家系统的基础上提出设计的，其主要结构由知识库机 (KBM) 和并行推理机 (PIM) 组成。要求 FGCS 有宽广的适用领域，能方便的处理图形、图像、语言、文字等。既能进行数值计算又具备推理、学习机制和判断、决策等智能功能。

在发展、研究第五代计算机和人工神经网络的基础上，1988年日本通产省 (MITI) 提出了人类尖端科学计划 (Human Frontier Science Program)，即第六代计算机的研究计划。其后美国、欧洲共同体等发达国家及组织都相继提出了以神经网络为核心的第六代计算机的研究计划。为此各国都投入了大量的资金和人力。

第五代计算机的核心是人工智能 AI。第六代计算机则包括人工智能 AI，脑一行为智能 BBI 和分子智能 MI。

第五代计算机的研究核心是知识工程。第六代计算机涉及的范围更广，它包括了生理、神经、智能和知识工程。第六代计算机的研究，预计将会导致对人类科学、社会以及人类自身认识上的重大变革。

第三节 人工智能技术在过程 系统工程中的应用

众所周知，过程系统工程研究离不开计算机应用。在过程系统工程研究中，通常总是要先针对研究对象建立相应的数学模型，然后才能在计算机上实现过程系统的模拟、分析、优化、控制等问题的研究、开发、设计。自 60 年代以来，在这些方面确是已经取得了显著的成功。然而在过程系统的研究、开发、设计和生产实际中，经常会遇到很多非数

值型的离散的、或是不确定性的、模糊性的问题。诸如，原料工艺路线选择、工艺过程系统综合、过程控制方案设计以及过程工艺生产中的故障诊断、事故处理、开停车过程等等。类似这样一些问题对象都难以建立数学模型，无法得出算法解，因而也就不能在计算机上进行相应的数值计算。通常，这类问题都是由各方面的专家凭借长期工作积累的经验进行分析、推理、判断得以解决的。能不能用计算机代替专家求解这类问题，成了非常吸引过程系统工程界人们关切的课题。70年代，用于谱图分析、医疗、探矿、计算机组装规划等专家系统的开发成功，引起过程系统工程界的极大兴趣。80年代，相继开发成功了一些过程系统工程专用的专家系统，如下所列：

名 称	开发日期	开 发 单 位	用 途
HEATEX	1982	Carnegie - Mellon 大学 (美)	换热网络综合
PICON	1984	Lisp Machine (美)	过程在线控制
CONPHYDE	1985	Carnegie - Mellon 大学 (美)	汽液平衡估算模型选择
IDEA	1985	Massachusetts 大学 (美)	系统结构初步设计
CAPS	1985	Washington 大学 (美)	系统结构开发
LHASA	1985	Leeds 大学 (英)	反应路径合成
CONSULTANT	1985	Fa. Foxboro (德)	设备选型
REKPET	1986	Dortmund 大学 (德)	分离序列综合
DECADE	1987	Carnegie - Mellon 大学 (美)	催化剂筛选
MODEX	1987	Columbia 大学 (美)	故障诊断
DEsign - KIT	1987	MIT (美)	过程综合、生产操作 分析与规划
PIP	1988	Massachusetts 大学 (美)	过程综合
MODEX2	1988	Columbia 大学 (美)	诊断
KNOD	1988	Washington 大学 (美)	过程设计
STILL	1988	Ohio 大学 (美)	精馏塔设计
DICODE	1988	Maryland 大学 (美)	精馏塔控制设计
EMC	1988	Lehigh 大学 (美)	过程控制
BIOEXPERT	1989	Sherbrooke 大学 (加)	事故诊断

国内的一些大学，80年代末90年代初也开始建成了一些过程系统领域的专家系统，如下所列：

名 称	开发日期	开 发 单 位	用 途
SEPSSES	1990	北京化工大学	分离过程的综合
ORDEES	1990	石油大学（北京）	面向对象的炼油蒸馏工程
SPHEN	1989	清华大学	换热网络的综合
SELEX	1988	大连理工大学	分离装置的选择

近年来过程系统工程界的信息分类、识别以及实时响应模型等方面，开发应用人工神经网络的研究非常活跃。曾见有关应用人工神经网络研究的报道，有如在农、医药物开发方面，关于分子结构与药物活性关系的研究；红外光谱官能团的识别与分类；芳香族单取代物亲电取代反应时生成邻、对位产物与间位产物比例的预测；搅拌槽式反应器的故障诊断；正庚烷催化转化反应生产甲苯过程的故障诊断等等。国内亦有一些大学、研究单位在80年代末开始起步人工神经网络的研究。如北京化工大学研究应用人工神经网络进行化工物性的定量预测；乙苯脱氢反应过程的模型化、模拟与分析；液体空气精馏塔的操作仿真；旋转机械的故障诊断和智能控制系统等等。

第二章 专家系统与知识工程

自从1956年人工智能诞生以来，专家系统作为其主要的研究和应用领域得到了迅速发展，目前，专家系统已广泛应用于诊断、监视、分析、解释、预测、规划、设计、优化、调优、教学及控制等方面。取得了极大的经济效益。

第一节 专家系统的组成

简单地说，专家系统就是一种计算机程序，它在各特定领域中所达到的成效具有人类专家的水平。它基于以某种形式存贮的特定领域问题的知识库，以推理方式从已给出的事实、数据中推断出新的成果。

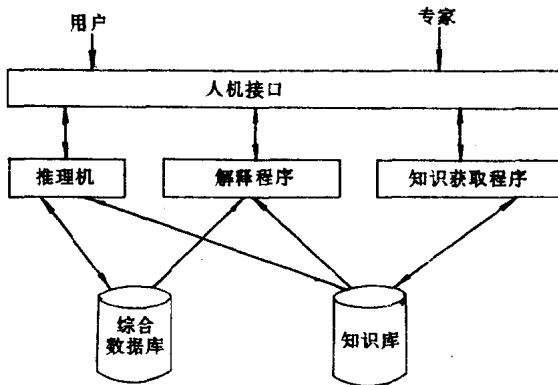


图 2-1 专家系统的一般结构

通常，一个专家系统应具有六个组成部分：知识库、推理机、综合数据库、解释程序、知识获取程序和人机接口（见图2-1）。

一、知识库

知识库用来存贮和管理求解问题所需要的专家知识。主要有两类：领域的事实知识和专家的启发式知识。

知识的表示方法和知识的组织结构是设计知识库的重要问题。知识表示方法应简单易懂并能清晰、明确地表达某领域专家的知识，知识的组织结构应能增强知识的模块性，使得对于某一知识的增删或修改不致于波及知识库中其它知识，以便于知识库的维护，同时，知识的结构应能尽量体现知识之间有意义的联系，便于推理机检索某些相关的知识。目前常用的知识表示方法有谓词、产生式规则、语义网、框架以及过程等等。

二、推理机

推理机实际上是一组程序，它用来协调控制整个系统以决定如何使用知识库中的知识。推理机的设计与实现一般与知识的表示方法及组织结构有关，但应注意使推理机的实现与知识的具体内容无关，以免知识的变更引起推理机的修改。目前主要有三种类型的推理机：正向推理、反向推理和正反向混合推理。这三种推理方式中又可进行精确推理和不精确推理。

正向推理是由原始数据出发，按一定策略推断出结论。反向推理是先提出结论（假设），然后去找支持这个结论的证据。正反向混合推理则是首先根据综合数据库中的原始数

据，通过正向推理帮助系统提出假设，然后运用反向推理，进一步寻找支持该假设的证据，如此循环反复。现实世界的知识大多是不精确的，基于这种不精确的知识的推理就称为不精确推理。

三、综合数据库

它用于存贮领域内的初始数据、证据、推理过程中得到的中间结果等等。所有这些内容表示了专家系统当前要处理对象的主要状态和特征。

四、解释程序

它是一个人机交互程序。用来对推理路线和提问的含义给出必要的、清晰的解释，为用户了解推理过程和系统维护提供方便的手段。

关于推理的解释，目前已有许多方法，这些方法各具特色，但从基本方面来讲，专家系统必须能解释以下三类问题：

1. 为什么要问当前这个问题 (why)
2. 如何得到这个结论 (how)
3. 为什么得不出结论 (why not)

五、知识获取程序

负责管理知识库中的知识。从人类专家那里获取知识并且为修改和扩充知识库提供手段。知识获取程序是实现系统灵活性的主要部件，它使领域专家可以修改知识库而不必了解知识库中知识表示方法、知识库的组织结构等细节问题，这大大提高了系统的可扩充性。目前专家系统中的知识获取