



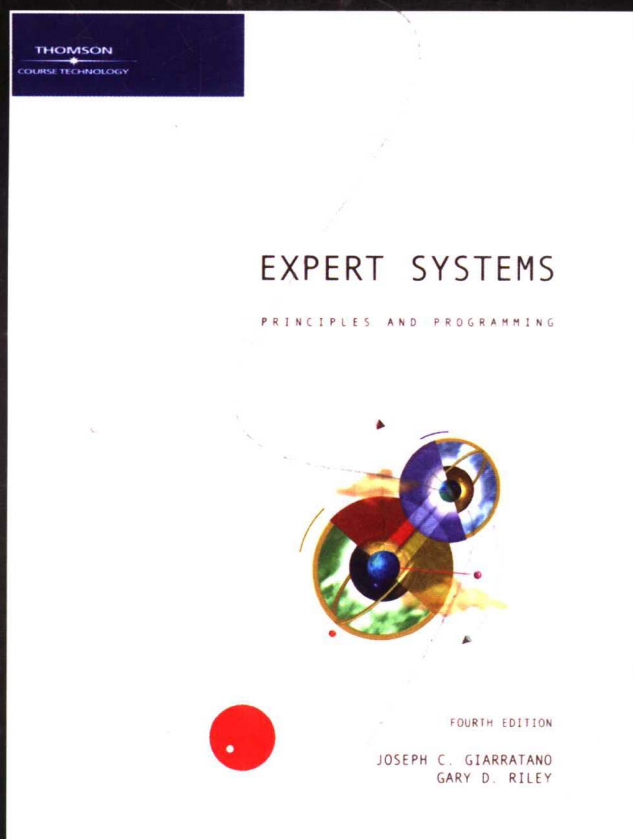
计 算 机 科 学 丛 书

原书第4版

专家系统

原理与编程

(美) Joseph C. Giarratano Gary D. Riley 著 印鉴 陈忆群 刘星成 译



Expert Systems
Principles and Programming
Fourth Edition



机械工业出版社
China Machine Press



计

算

机

和

人

书

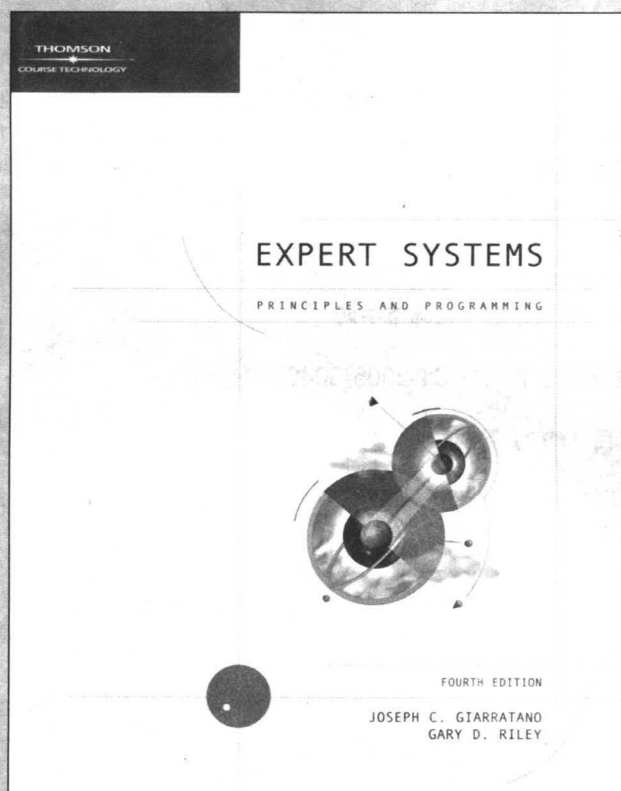
TP18
76D=2

原书第4版

专家系统

原理与编程

(美) Joseph C. Giarratano Gary D. Riley 著 印鉴 陈忆群 刘星成 译



Expert Systems

Principles and Programming

Fourth Edition



机械工业出版社
China Machine Press

本书是一本关于专家系统的著名教科书,全面介绍了专家系统原理,并通过 CLIPS 详细讨论了其实际应用。本书内容包括:知识表示、推理方法、不确定性推理、不精确推理、CLIPS、高级模式匹配、模块化设计、执行控制和规则效率、过程化程序设计、类、实例和消息处理程序等。

本书理论与实际相结合,内容由浅入深,为了解和设计专家系统提供了理论基础和编程指导。随书光盘包括 CLIPS 程序、源代码以及其他相关文档。

本书适合作为计算机科学相关专业本科生和研究生的教材,也可供相关专业人员参考。

Joseph C. Giarratano, Gary D. Riley: Expert Systems: Principles and Programming, Fourth Edition.
ISBN: 0-534-38447-1

Copyright © 2005 by Course Technology, a division of Thomson Learning, Inc.

Original language published by Thomson Learning (a division of Thomson Learning Asia Pte Ltd). All rights reserved.

China Machine Press is authorized by Thomson Learning to publish and distribute exclusively this simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书原版由汤姆森学习出版集团出版。版权所有,盗印必究。

本书中文简体字翻译版由汤姆森学习出版集团授权机械工业出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

978-981-4195-37-9

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2005-3046

图书在版编目(CIP)数据

专家系统:原理与编程(原书第4版)/(美)吉奥克(Giarratano, J.)等著;印鉴等译. - 北京:机械工业出版社, 2006.8

(计算机科学丛书)

书名原文:Expert Systems:Principles and Programming, Fourth Edition

ISBN 7-111-19203-6

I. 专… II. ①吉… ②印… III. 专家系统 IV. TP319

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 052081 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李东震

北京京北制版印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·34 印张

定价:65.00 元(附光盘)

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换

本社购书热线:(010)68326294

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭橥了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短、从业人员较少的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章图文信息有限公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，华章公司就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过几年的不懈努力，我们与Prentice Hall, Addison-Wesley, McGraw-Hill, Morgan Kaufmann等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从它们现有的数百种教材中甄选出Tanenbaum, Stroustrup, Kernighan, Jim Gray等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及收藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力襄助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专程为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近百个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍，为进一步推广与发展打下了坚实的基础。

随着学科建设的初步完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都步入一个新的阶段。为此，华章公司将加大引进教材的力度，在“华章教育”的总规划之下出版三个系列的计算机教材：除“计算机科学丛书”之外，对影印版的教材，则单独开辟出“经典原版书库”；同时，引进全美通行的教学辅导书“Schaum's Outlines”系列组成“全美经典学习指导系列”。为了保证这三套丛书的权威性，同时也为了更好地为学校和老师服务，华章公司聘请了中国科学院、北京大学、清华大学、国防科技大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、中国科技大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、中国

人民大学、北京航空航天大学、北京邮电大学、中山大学、解放军理工大学、郑州大学、湖北工学院、中国国家信息安全测评认证中心等国内重点大学和科研机构在计算机的各个领域的著名学者组成“专家指导委员会”，为我们提供选题意见和出版监督。

这三套丛书是响应教育部提出的使用外版教材的号召，为国内高校的计算机及相关专业的教学度身订造的。其中许多教材均已为 M. I. T., Stanford, U.C. Berkeley, C. M. U. 等世界名牌大学所采用。不仅涵盖了程序设计、数据结构、操作系统、计算机体系结构、数据库、编译原理、软件工程、图形学、通信与网络、离散数学等国内大学计算机专业普遍开设的核心课程，而且各具特色——有的出自语言设计者之手、有的历经三十年而不衰、有的已被全世界的几百所高校采用。在这些圆熟通博的名师大作的指引之下，读者必将在计算机科学的宫殿中由登堂而入室。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证，但我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。教材的出版只是我们的后续服务的起点。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010) 68995264

联系地址：北京市西城区百万庄南街 1 号

邮政编码：100037

专家指导委员会

(按姓氏笔画顺序)

尤晋元
石教英
张立昂
邵维忠
周克定
郑国梁
高传善
裘宗燕

王 珊
吕 建
李伟琴
陆丽娜
周傲英
施伯乐
梅 宏
戴 葵

冯博琴
孙玉芳
李师贤
陆鑫达
孟小峰
钟玉琢
程 旭

史忠植
吴世忠
李建中
陈向群
岳丽华
唐世渭
程时端

史美林
吴时霖
杨冬青
周伯生
范 明
袁崇义
谢希仁

译者序

人工智能学科诞生于 20 世纪 50 年代，旨在研究如何利用计算机等工具来模仿人类的智能行为。自诞生以来，人工智能就一直是一个富有挑战性的领域，它以其诱人的目标和略显神秘的面纱，吸引了人类持久和狂热的追求，在众多的人工智能领域中，专家系统是一个最富有代表性和最重要的应用分支。

人工智能和专家系统曾取得过许多令人瞩目的成果，也走过不少弯路、经历过不少挫折。近几年来，随着计算机网络、通信等技术的发展，特别是 Internet 和 World Wide Web 的普及，人工智能与专家系统的研究再度活跃起来，并正向更为广泛的领域发展。

本书是一本关于专家系统的著名教科书。本书全面介绍了专家系统原理，并通过 CLIPS 详细讨论了其实际应用。内容涉及知识表示、推理方法、不确定性推理、不精确推理以及开发专家系统的一系列实用技术。本书还附送 1 张包括 CLIPS 程序、源代码以及其他相关文档的光盘。

本书理论与实际相结合，内容由浅入深，适用于计算机科学、管理信息系统、软件工程专业高年级本科生和研究生及相关专业人员，为其了解和设计专家系统提供了理论基础和编程指导。

本书前言及第 1~5 章、附录 A~C 由印鉴翻译，第 6、10~12 章及附录 D~G 由陈忆群翻译，第 7~9 章由刘星成翻译，全书由印鉴组织、校阅和统稿，中山大学胡菁同志也给予很多帮助，参加了文字校对工作。

限于译者水平，书中疏漏之处，敬请读者批评指正。

译者简介

印鉴：男，博士，教授，博士生导师，1968年生。1994年毕业于武汉大学计算机科学系，获工学博士学位。现任中山大学信息科学与技术学院计算机科学系副主任和计算机基础教育中心主任。1993年，曾在美国洛杉矶 ALPHA OMEGA 公司从事合作科研。1997年、2000年曾在香港浸会大学电脑学系作访问学者。2005年在美国东华盛顿大学（Eastern Washington University）作访问学者。目前主要从事数据挖掘、人工智能、知识工程等方面的研究工作。

陈忆群：女，硕士，助教，1979年生。2005年毕业于中山大学计算机科学系，获工学硕士学位。现任广东教育学院计算机科学系教师。2004年，曾在新加坡国立大学计算机学院访问学习。目前主要从事信息处理、数据挖掘、知识工程等方面的研究工作。

刘星成：男，博士，副教授。1964年生于江西安福。1989年毕业于华中理工大学（现华中科技大学）自动化专业，获硕士学位。2001年毕业于中山大学无线电物理专业，获博士学位。2002年~2003年，在英国 Southampton 大学作博士后研究；2004年~2005年，在美国俄勒冈州立大学（Oregon State University）作访问学者。现于中山大学信息科学与技术学院电子与通信工程系任教。目前主要从事智能信息处理、无线通信及安全等方面的研究工作。

前言

如何有效地使用本书

本书第4版是对这本全球使用的专家系统与 CLIPS 专家系统工具编程课本的一个主要修订本。自从 20 世纪 80 年代进入商业应用以来,专家系统得到了巨大的发展。今天,专家系统已被广泛地运用到商业、科学、工程、农业、制造、医药、视频游戏以及实质上其他每一个领域。事实上,现在已很难举出一个没有应用专家系统的领域。

本书主要介绍专家系统原理与编程,适用于计算机科学、管理信息系统、软件工程专业以及其他一些对专家系统有兴趣的高年级本科生或研究生。一些新出现的术语用黑体字表示并给出了解释。书中还给出了大量的实例和参考资料帮助理解并指导更深层次的阅读。在新的第4版中,许多新的软件工具的免费和试用版本可以作为额外练习的基础和学习材料,它们的链接都在附录 G 中。

对新材料的讨论一般从其历史背景开始,这样便于学生理解为什么要开发它们,而不仅仅是学会如何使用它们。教育的核心应聚焦在为什么要创造新技术来解决问题,而不是简单地教授如何去应用。

本书分为两部分:第1~6章介绍原理,第7~12章介绍 CLIPS 专家系统工具编程。第一部分包括了专家系统所涉及的理论以及专家系统如何适合计算机科学范畴。

学过人工智能的有关课程会对学习本书帮助较大,在本书中,对与专家系统有关的一些人工智能知识也在第1章作了一个自我完备的介绍。单独一章自然无法涵盖人工智能的所有内容,但已足够概观人工智能以及专家系统所扮演的角色。本书第一部分包括了逻辑、概率、数据结构、人工智能概念和其他形成专家系统理论的内容。

我们尝试通过对专家系统理论的介绍来使学生学会对专家系统技术的运用。这里,要强调一点,专家系统和其他工具一样,既有优点,也有缺点。在理论部分还介绍了专家系统与其他编程方法的关系,如传统程序设计。另外,也希望对理论的介绍使学生能够阅读有关专家系统的现行研究文章,但由于专家系统涉及面很广,对初学者来说,仅凭了解就阅读是非常困难的。

本书第二部分介绍了 CLIPS 专家系统工具。这部分是专家系统编程的一个实例,可以补充和阐释第一部分的理论知识。有了第一部分的理论知识后,编程部分只要具有高级语言的编程经验就可以看懂。学生可以通过 CLIPS 这个功能强大的现代专家系统工具来了解专家系统开发中的一些实际问题。

在本版中讨论的一个新特性是 COOL,即 CLIPS 面向对象语言。COOL 允许完全使用对象,或者使用规则和对象的混合方法来开发专家系统。面向对象方法的优点在于知识集可以方便地组织成比单独规则大的集合。所有对象的一般性质(例如多继承)使得用更多专门知识来扩展对象变得更加容易,而不用像纯规则系统一样,每次都从头开始编写。本版还讨论了 CLIPS 的过程化编程功能,包括全局变量、函数和类属函数。

CLIPS 最初是由 Johnson 太空中心 NASA 开发的。Gary Riley 是开发基于规则组件的首席程序员。Joseph C. Giarratano 作为顾问编写了 NASA CLIPS 的官方用户指南。现在,CLIPS 已用于开发政府、商业、工业以及事实上任何部门的实际项目。使用因特网的任何搜索引擎都能返回成千上万个链接指向使用 CLIPS 编写的专家系统和采用了 CLIPS 的世界上很多大学的课程。

由于 CLIPS 代码是可移植的,它实质上可运行在任何支持 ANSI C 或 C++ 编译器的机器或操作系统上。本书附带的光盘内容包括:CLIPS 在 Windows 以及 MacOS 上的可执行程序;CLIPS 参考手册和 CLIPS 用户指南;文档齐备的完整 CLIPS C 源程序代码。

有些专家系统课程包含一个课程设计,课程设计是提高专家系统开发技能的一个极好方法。学生们常常选择完成一个具有 50~150 条规则的小型专家系统作为一学期的课程设计。基于这本书已开发了成千上

万个课程设计,包括医疗、汽车维修、的士调度、个人安排、计算机网络管理、天气预报、股市预测、购物咨询等。使用因特网搜索引擎将得到由世界各地的大学开发的很多课程设计与资源,如 PowerPoint 幻灯片、提纲和作业等。

本书作为一学期的课程可安排如下:

1. 第 1 章简要介绍专家系统,习题 1、2、3 可作为练习。
2. 第 7~10 章介绍 CLIPS 基本编程。这部分内容对学生重新编写第 1 章习题 2 的程序,并比较专家系统方法与最初在第 1 章中所使用的语言方法非常有帮助。通过比较,可使学生发现基于规则的语言如 CLIPS、LISP、PROLOG 与在习题 2 中使用的其他语言的差别。可选地,讲授完第 10 章后,教师可返回到理论章节。如果学生具有较强的逻辑和 PROLOG 知识,可以跳过第 2、3 章的多数内容。对没有和只有一点人工智能课程中关于 LISP 简单知识的学生,如果希望重点加强逻辑和专家系统基础理论,则将从第 2、3 章得到很大提高。如果学生具有较强的概率和统计知识,则从第 4 章开始到第 4.11 节可以跳过。
3. 第 4 章和第 5 章讨论对不确定性的处理。这些非常重要,因为人类始终都在处理不确定性,如果没有它,专家系统并不比简单的判定树强多少。不确定性包括概率和贝叶斯推理、确定性因子、Dempster-Shafer 理论以及模糊理论。如果学生想阅读相关方面的现行文章或从事此领域研究工作,他们必须掌握好这些内容。
4. 第 6 章讨论专家系统中的知识获取和软件工程问题,这部分内容主要针对那些想开发大型专家系统的学生。在布置课程设计前,可以不学此章。事实上,可以最后讲述此章,以使学生更好地熟悉建造一个高质量专家系统的所有因素。

补充资源

在出版社的网站<http://www.course.com>上可以下载具有单号习题和部分双号习题解答的手册,并有完整的 PowerPoint 幻灯片。另外,很多软件和其他资源的网址在本书中也随处可见。这些资源经过了筛选,学生使用软件可以对习题的关键部分进行实验,而不只是书面求解,这样能更好地理解书中的内容,例如逻辑和概率。大量有关人工智能、逻辑、概率、贝叶斯推理、模糊逻辑和其他主题的资源也都包含在内,以便学生对国际上人工智能和专家系统群体有更广泛的了解。(需要教辅资源的教师,可填写书后的教学支持服务表,并与原出版商联系。——编辑注)

感谢对 CLIPS 有贡献者

感谢所有对 CLIPS 的成功开发有贡献者。作为一个大的项目,CLIPS 凝聚了许多人的心血。其中,主要有:Robert Savely, JSC 高级软件技术首席科学家,是他构思出此项目,并自始至终给予指导与支持;Chris Culbert,软件技术分部主管,是他负责此项目并起草了 CLIPS 参考手册初稿;Gary Riley,设计开发了 CLIPS 中基于规则部分,合写了 CLIPS 参考手册、CLIPS 结构手册,开发了 Macintosh 上的 CLIPS 界面,并维护 CLIPS 的官方网站<http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html>;Brian Donnell,开发了 CLIPS 中面向对象的语言(COOL),合写了 CLIPS 参考手册、CLIPS 结构手册;Bebe Ly,开发了 CLIPS 的 X Window 界面;Chris Ortiz,开发了 CLIPS 的 Windows 3.1 界面,Houston-clear Lake 大学的 Joseph Giarratano 博士,编写了 NASA 的每个 CLIPS 版本的官方用户指南;特别是, Frank Lopez,编写了 CLIPS 的最初原型版本。

致谢

在写作本书的过程中,很多人给予了大量的帮助,包括: Ted Leibfried, Jeanne Leslie, Mac Umphrey, Terry Feagin, Dennis Murphy, Jenna Giarratano 和 Melissa Giarratano。我们还要感谢反馈了信息的第 4 版审稿者: Akron 大学的 Chien-Chung Chan; Ohio 大学的 Constantine Vassiliadis; 加拿大 Concordia 大学的 Jenny Scott; Villanova 大学的 Anthony Zygmunt。

我们还要感谢许多从 1985 年 CLIPS 第一版发布起,20 年来一直致力于提高 CLIPS 的人们。通过提供免费的 CLIPS 完整源代码,开源组织极有效地提高了 CLIPS 的功能及影响力。这一切在我们 1985 年刚开

发 CLIPS 时是不可想像的。那时候专家系统只是新的未经试验的技术，没有人知道它能否经得起时间的考验。在过去的 20 年中，CLIPS 从 NASA 的最初谨慎开始，发展成为在世界各地有成千上万的人们使用，并证明了各个领域都从中受益。我们特别要感谢这些扩展了 CLIPS 功能和能力的开发者，是他们使 CLIPS 一开始在 NASA 中仅作为人工智能技术简单试验的充满风险的小项目发展成为世界范围的潮流。

Ernest Friedman-Hill，对专家系统的推广做出了重要的贡献，他独自开发了具有新特性的 CLIPS Java 版本，称为 JESS。他还写了一本关于 JESS 的书：《Jess in Action: Rule-Based Systems in Java》，里面有很多有趣的项目。

JESS: (<http://herzberg.ca.sandia.gov/jess/>) 和 KAPICLIPS 1.0: (<http://www.cs.umbc.edu/kqml/software/kapiclips.shtml>) 更加完备了 CLIPS。

CLIPS 的其他后代版本

PerlCLIPS (<http://www.discomsys.com/~mps/dnld/clips-stuff/>)

Protégé: CLIPS 的一个本体和基于知识的编辑器

(<http://protege.stanford.edu/index.html>)

Python-CLIPS interface (<http://www.yodanet.com/portal/Products/download/clips-python.tar.gz/view>)

TixClips: 使用 Tix 的 CLIPS 专家系统集成开发环境 (<http://tix.sourceforge.net/>)

TclClips (www.eolas.net/tcl/clips), SWIG (<http://www.swig.org/>) wrapping

(<http://starship.python.net/crew/mike/TixClips/>)

WebCLIPS: 作为 CGI 应用程序的 CLIPS 实现。

WebCLIPS: (<http://www.monmouth.com/~km2580/wchome.htm>)

wxCLIPS, 一个使用图形用户界面的开发知识库系统应用程序的环境:

(<http://www.anthemion.co.uk/wxclips/wxclips2.htm>)

ZClips 0.1 允许 Zope 和 CLIPS 交互:

(<http://www.zope.org/Members/raystream/zZCLIPS0.1>)

CLIPS/R2, Production Systems Technologies 公司的:

(http://www.pst.com/clips_r2.htm)

可获取的其他 CLIPS 版本，如加拿大国家研究委员会的 FuzzyClips:

(http://ai.iit.nrc.ca/IR_public/fuzzy/fuzzyClips/fuzzyCLIPSIndex.html)

Togai InfraLogic 公司的 FuzzyClips:

(<http://www.ortech-engr.com/fuzzy/fzyclips.html>)

AdaCLIPS: (<http://www.telepath.com/~dennison/Ted/AdaClips/AdaClips.html>)

CLIPS 与 Perl 的扩展: (<http://cape.sourceforge.net/>)

许多其他基于 CLIPS 的工具版本列在:

(<http://www.ghg.net/clips/OtherWeb.html>)

目 录

出版者的话	
专家指导委员会	
译者序	
译者简介	
前言	

第 1 章 专家系统导论	1
1.1 概述	1
1.2 专家系统的定义	1
1.3 专家系统的优点	5
1.4 专家系统的基本概念	5
1.5 专家系统的特点	7
1.6 专家系统技术的发展	8
1.7 专家系统的应用与领域	12
1.8 语言、外壳、工具	15
1.9 专家系统要素	16
1.10 产生式系统	20
1.11 过程化程序规范	23
1.12 非过程化程序规范	27
1.13 人工神经网络	30
1.14 专家系统与归纳学习的关系	34
1.15 人工智能的发展状况	34
1.16 小结	37
习题	38
参考文献	38
第 2 章 知识的表示	41
2.1 概述	41
2.2 知识的含义	42
2.3 产生式	45
2.4 语义网	47
2.5 对象-属性-值三元组	50
2.6 PROLOG 和语义网	50
2.7 语义网的困难之处	53
2.8 模式	54
2.9 框架	55
2.10 框架的困难之处	57
2.11 逻辑与集合	58
2.12 命题逻辑	60

2.13 一阶谓词逻辑	63
2.14 全称量词	63
2.15 存在量词	64
2.16 量词与集合	65
2.17 谓词逻辑的局限性	66
2.18 小结	66
习题	67
参考文献	68
第 3 章 推理方法	71
3.1 概述	71
3.2 树、格、图	71
3.3 状态与问题空间	74
3.4 与或树和目标	77
3.5 演绎逻辑与三段论	79
3.6 推理规则	83
3.7 命题逻辑的局限性	89
3.8 一阶谓词逻辑	90
3.9 逻辑系统	91
3.10 归结	93
3.11 归结系统与演绎	95
3.12 浅推理和因果推理	97
3.13 归结与一阶谓词逻辑	99
3.14 正向链和反向链	103
3.15 其他推理方法	107
3.16 元知识	112
3.17 隐马尔可夫模型	113
3.18 小结	114
习题	114
参考文献	117
第 4 章 不确定性推理	119
4.1 概述	119
4.2 不确定性	119
4.3 误差种类	121
4.4 误差与归纳	122
4.5 经典概率	124
4.6 经验主观概率	127
4.7 复合概率	128
4.8 条件概率	129

4.9 假设推理与反向归纳	133	7.10 自定义事实结构	245
4.10 时间推理与马尔可夫链	135	7.11 规则的组成	246
4.11 信任几率	138	7.12 议程与执行	247
4.12 充分性与必然性	139	7.13 结构处理命令	250
4.13 推论链中的不确定性	141	7.14 打印输出命令	252
4.14 证据组合	144	7.15 使用复合规则	252
4.15 推理网	148	7.16 设置断点命令	253
4.16 概率的传播	155	7.17 调入和保存结构	254
4.17 小结	158	7.18 注释结构	255
习题	158	7.19 变量	256
参考文献	161	7.20 变量的复合用法	257
第 5 章 不精确推理	163	7.21 事实地址	257
5.1 概述	163	7.22 单字段通配符	259
5.2 不确定性与规则	163	7.23 块世界	260
5.3 确定性因子	167	7.24 多字段通配符和变量	263
5.4 Dempster-Shafer 理论	174	7.25 小结	267
5.5 近似推理	182	习题	267
5.6 不确定性的现状	210	参考文献	271
5.7 模糊逻辑的一些商业应用	211	第 8 章 高级模式匹配	273
5.8 小结	212	8.1 概述	273
习题	212	8.2 字段约束	273
参考文献	215	8.3 函数和表达式	275
第 6 章 专家系统设计	217	8.4 使用规则求和	277
6.1 概述	217	8.5 BIND 函数	279
6.2 选择合适的问题	217	8.6 I/O 函数	279
6.3 开发专家系统的步骤	220	8.7 棍子游戏	283
6.4 开发过程中的误区	222	8.8 谓词函数	284
6.5 软件工程与专家系统	225	8.9 测试条件元素	285
6.6 专家系统生命周期	226	8.10 谓词字段约束	286
6.7 详细生命周期模型	229	8.11 返回值字段约束	287
6.8 小结	232	8.12 棍子游戏程序	288
习题	232	8.13 OR 条件元素	288
参考文献	233	8.14 AND 条件元素	290
第 7 章 CLIPS 介绍	235	8.15 NOT 条件元素	291
7.1 概述	235	8.16 EXISTS 条件元素	292
7.2 CLIPS	235	8.17 FORALL 条件元素	294
7.3 记号	236	8.18 LOGICAL 条件元素	295
7.4 字段	237	8.19 小结	298
7.5 进入和退出 CLIPS	239	习题	298
7.6 事实	240	第 9 章 模块化设计、执行控制和 规则效率	305
7.7 增加和删除事实	242	9.1 概述	305
7.8 修改和复制事实	243	9.2 自定义模板属性	305
7.9 监视命令	244		

9.3 优先级	310	11.5 自定义实例结构	386
9.4 阶段和控制事实	312	11.6 类与继承	386
9.5 优先级属性的误用	314	11.7 对象模式匹配	392
9.6 自定义模块结构	316	11.8 用户定义消息处理程序	399
9.7 输入、输出事实	318	11.9 槽存取和处理程序创建	403
9.8 模块与执行控制	320	11.10 BEFORE、AFTER 和 AROUND 消息 处理程序	405
9.9 Rete 模式匹配算法	326	11.11 实例创建、初始化和删除消息 处理程序	416
9.10 模式网络	327	11.12 修改和复制实例	418
9.11 连接网络	329	11.13 类和类属函数	420
9.12 模式顺序的重要性	331	11.14 实例集合查询函数	421
9.13 排列模式以求高效	335	11.15 多继承	424
9.14 多字段变量与效率	335	11.16 自定义类和自定义模块	429
9.15 测试条件元素与效率	336	11.17 调入和保存实例	430
9.16 内置的模式匹配约束	337	11.18 小结	431
9.17 通用规则与专用规则	337	习题	431
9.18 简单规则与复杂规则	339	第 12 章 专家系统设计实例	433
9.19 小结	340	12.1 概述	433
习题	341	12.2 确定性因子	433
参考文献	346	12.3 判定树	436
第 10 章 过程化程序设计	347	12.4 反向链	445
10.1 概述	347	12.5 监视问题	453
10.2 过程化函数	347	12.6 小结	464
10.3 自定义函数结构	352	习题	465
10.4 自定义全局变量结构	358	参考文献	466
10.5 自定义类属和自定义方法结构	363	附录 A 一些有用的等式	467
10.6 过程化结构和自定义模块	374	附录 B 一些基本量词公式及其含义	468
10.7 有用的命令和函数	375	附录 C 一些集合性质	469
10.8 小结	379	附录 D CLIPS 支持信息	470
习题	380	附录 E CLIPS 命令与函数概要	471
第 11 章 类、实例和消息处理程序	383	附录 F CLIPS BNF 范式	492
11.1 概述	383	附录 G 软件资源	498
11.2 自定义类结构	383		
11.3 创建实例	384		
11.4 系统定义消息处理程序	384		

第 1 章 专家系统导论

1.1 概述

本章是对专家系统的一个概略介绍，主要介绍专家系统的基本原理。在本章中，将讨论专家系统的优缺点，描述专家系统应用的适用范围，并讨论专家系统与其他编程方法的关系。

1.2 专家系统的定义

20 世纪人们提出了很多种人工智能 (artificial intelligence, AI) 的定义，其中一个最早的定义之一“使计算机像人类一样思考”至今仍在被使用。许多科幻电影验证了这一观点。事实上这种定义是基于英国数学家与计算机先驱 Alan Turing 的著名的“图灵测试”。在这个测试中，一个人试图判断与之通过远程键盘交谈的对象是人类还是计算机程序。如果计算机能在测试中顺利回答问题而不被发现是计算机，则说明计算机已经具有了强人工智能 (Strong AI)。“强人工智能”被人们定义为基于严格逻辑基础，以区别于基于人工神经网络、遗传算法和进化方法的弱人工智能 (Weak AI)。在今天，很明显没有一种人工智能技术能成功解决所有问题，而一些组合的方法会更有效一点。

第一个通过图灵测试的程序是 Steven Weizenbaum 在 1967 年写的心理测试程序。从那以后，人类知识和交互的研究得到很大发展，并举办了一个名为 Loebner 的奖金高达 100 000 美元的竞赛 (<http://www.loebner.net/Prize/loebner-prize.html>)。当然，今天的交互多数用的是声音识别而不是旧式的电传打字机或键盘。如果你曾与人通过电话交谈但对方不理解你的话，也许该问问他是否通过了图灵测试。

从 20 世纪 60 年代开始，专家系统就作为一种研究工具而被开发，作为人工智能的一个特定部分，它可以成功解决某些领域如医疗诊断的复杂问题。但建立一个通用的人工智能程序解决一切问题难以实现，因为缺乏问题领域的专家知识，比如医疗诊断。自从 20 世纪 80 年代早期，专家系统展现了其商业用途之后，就越来越受到欢迎并得到发展。今天，专家系统已用于商业、科学、工程、制造和其他许多具有良定义问题的领域。实际上，如果你在为使用普通的支付手段还是使用信用卡而犹豫，专家系统可以帮你做出决定。

前面提到的术语“良定义”会在后面章节中做更多详细讨论。其最基本的含义是如果人类专家可以确定解决一个问题的推理步骤，那么专家系统也可以做到。如果不能确定推理，则可能只得靠运气。

作为一个反例，很多人尝试写一个专家系统来预测股票市场。事实上，华尔街一直在使用这些系统。然而，如果考察股票的变化，你不能发现明显的趋势，而专家系统也不比开发它的人强多少。这些系统的最大好处是，在现实交易中，一毫秒的延迟就会带来损失，竞争者的专家系统可以和你一样注意到股票趋势或下单买卖上亿美元价值的股票，但可以比人类快得多。但它不一定工作得好，1987 年声名狼藉的股市崩盘导致了一系列新的限制规定的出台，这些规定限制计算机不能仅为获得几百元的收益而销售上亿支股票，因为这类行为可能导致股市崩溃。

专家系统在人工智能技术领域有非常成功的应用。许多方法使其他技术与专家系统结合，例如遗传算法、人工神经网络等。使用了人工智能的系统通常称为智能系统 (intelligent system) 或自动系统 (Hopgood 01)。

一般，解决任何问题的第一步是先划定要解决问题的范围或领域 (domain)。不论是传统编程领域还是人工智能领域这一点都是相同的。然而，出于以前对人工智能感到神秘的缘故，人们往往相信这样一句过时的说法：“所谓人工智能问题就是该问题还没有解决”。另外一种流行的定义则是“人工智能就是使计算机像他们在电影中所做的一样行动起来”。在 20 世纪 70 年代，当人工智能仍处在研究阶

段时,这种想法就已经广为人知了。但是,今天人工智能已解决了许多现实问题,并且已应用到商业领域。在线杂志 PCAI.com 以及会议如 AAAI (<http://aaai.org/conferences/conferences.htm>) 还有其他许多书籍 (Luger 02) 都有相关内容讨论,更详细的资料可参看附录 G。

在更详细地讨论人工智能之前,让我们回头看看它是如何符合生命模式的。什么是生命?对于生命有很多不同的定义 (Adami 98),从生理学、新陈代谢、基因和热力学等不同角度。哪一个是正确的呢?这要看你对生命的哪个角度感兴趣。也许最简单的是 Shakespeare 的定义“生命就是由傻瓜讲述的充满声音、愤怒而没有任何含义的故事。”

从计算机的角度来说,生命就如同软件一样。在 Adami 的书所附带的光盘中包含一个软件,用户可以创造人工的生命模式进行体验。也有抽象定义,如电影《黑客帝国》(Matrix) 中描述的一样,代表人类的“行”生活在巨大的计算机程序中。其他数字计算机中的生命描述可以在 Helmreich 的书 (Helmreich 98) 中找到,这本书详细描述了计算机人工生命的生理学甚至精神细节。

从生理学的角度看,我们不再局限于从计算机系统中寻求人工生命模式。从 20 世纪 90 年代开始,已经可以成功地克隆动物,例如绵羊多利 (Dolly),公司像销售母牛一样为失去宠物的主人克隆他们的宠物。但是通过克隆得到一个活的生物的复制品只是“改进”生命的第一步。例如,有一些研究人员正在尝试创造带有萤火虫基因的兔子,以便使它能在黑暗中生存。这种形式的生命模式在自然界没有祖先,是真正的人工生命。同时,因为这些生物是智能的,它们也就具有了人工智能,尽管这并不是用计算机的形式来表现的。

人工生命的扩展新领域是创造进化系统 (creative evolutionary system),在这个系统里人工生命系统可以根据进化压力改变自己的程序 (Bentley 02)。许多不同的技术,例如遗传算法等在实际应用中得到描述,例如音乐、艺术、电路设计、建筑、战斗机设计等。同样, Bentley 书中所附带的光盘允许用户体验创造进化系统。注意这本书是关于这些系统的计算机表现,而不是未来的新的设计者们所梦想的生物生命模式,例如一只成年兔子在黑暗中照顾小孩,或者一只比人更能胜任飞机驾驶的猴子。

de Silva 的书给出了智能的另一个定义:“智能就是学习、获取、适应、修正和扩展知识以便解决问题的能力” (de Silva 00)。从这个角度来说,我们的目标是通过机器人、工厂、工具和其他硬件建立能和现实世界交互的智能机器。其中的挑战是把现实世界中复杂的人类思维融合到机器中,例如歧义、含糊、一般、不精确、不确定、模糊、信任以及似然等。在这本书第 4 章和第 5 章中将有更多的讨论。注意前面这句话本身就带有歧义。“这本书”是指 de Silva 的书还是本书?作为高级生物,我们早已习惯于处理这些问题,但是对于机器和计算机来说,如果只使用传统的逻辑将会遇到很多困扰。

一个更具挑战性的问题是开发具有人工智能同时具有意识的系统。关于人脑我们已经了解了很多 (Cotterill 98),但我们仍然不清楚意识体现在哪个部位,或者说,是什么让你具有了自己的特性。但是随着新的工具例如功能磁性共振图像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 的使用,大脑可动态映像以查出本能反应时是激发了哪个部位。当然,如果我们使用人造克隆动物模型,那么我们早已成功了,因为克隆的绵羊、猫当然是具有意识的。然而,我们还是不知道如何使一台机器具有意识。更重要的是,当我们看过《终结者》(Terminator) 或者 Matrix 等电影以后,想要一个智能机器的想法可能不是一个好的念头。毕竟,无论是人类还是机器,都不喜欢被毁灭掉。

尽管经典的人工智能问题,如:自然语言翻译、语音理解、视觉识别等仍未完美解决,但如果限制问题的范围则可能会找到一个有效的解决方法。例如,如果限定句子形式为主、谓、宾,那么建立简单的自然语言系统就不会很困难。目前,这类系统在为众多软件产品,如数据库系统和电子表格系统等提供友好的用户界面上做得很成功。与说话人无关的声音识别系统在今天也有了很高的精确率,不像以前的系统需要先用某个用户的语音做训练学习。与专家系统结合,这些智能系统一旦通过了图灵测试,将最终取代许多电话中心以记录用户订单 (Luger 02)。

目前已有许多商用的声音识别系统可以在标准的个人电脑上运行,并且其价格也合理。有很多声音识别系统也广泛应用在汽车的免提电话中,只要问题领域限定在阿拉伯数字而不是所有单词,它就

有很好的识别能力。事实上，目前流行的计算机文字冒险游戏中的解析器展现了一种令人惊讶的自然语言理解能力，而这种能力正是局域网多人游戏所必需的，因为输入文字会使游戏速度减慢。

专家系统已与类似人类模式识别及自动决策等系统的数据库相结合，以便通过**数据挖掘**（data mining）来进行知识发现，这导致了**智能数据库**（intelligent database）的产生（Bramer 99）。一个重要的应用是在飞机安全系统中，使用可疑人士的人脸识别作为专家系统的前端，以决定是否需要向上级汇报。

另一个令人激动的人工智能领域和**人工发现系统**（discovery system）有关。这是一些能够真正发现某问题领域中的知识的计算机程序。例如，Automatic Mathematician（AM）程序发现新的数学定理，并再次发现了已经由人类归纳出来的如素数的特点等知识。BACON 3 系统发现新的科学知识，例如开普勒第三行星运动定理的一个版本，在 Wagman 的书汇总了许多发现系统（Wagman 99）。

尽管人工智能最初在 20 世纪是作为计算机科学的一个分支被提出来的，它现在已经成为一个应用于许多领域，如计算机科学、心理学、生物学、神经系统科学等的基础学科。事实上，越来越多的大学设置了人工智能学位。

人工智能有许多备受关注的领域，如图 1.1 所示。**专家系统**（expert system）就是对传统人工智能问题中智能程序设计的一个非常成功的近似解决方法。专家系统早期先导者之一，斯坦福大学的 Edward Feigenbaum 教授，把专家系统定义为“一种智能的计算机程序，它运用知识和推理过程来解决只有专家才能解决的复杂问题”。也就是说，专家系统是一种**模拟**（emulate）专家决策能力的计算机系统，“模拟”一词表明专家系统要在所有方面都做得像专家一样。模拟比模仿（Simulation）更进一步，模仿只要求在某些方面做得像真正的事物一样。

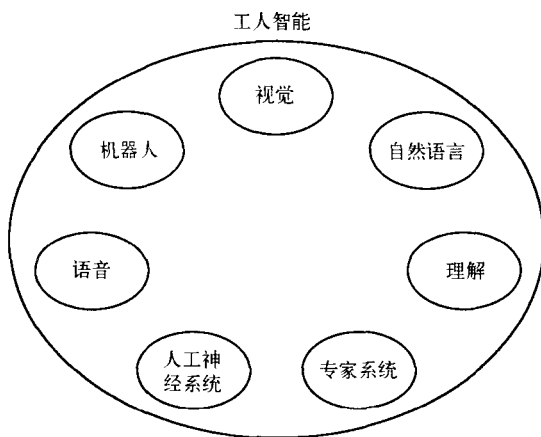


图 1.1 人工智能的一些领域

虽然我们仍未找到一种通用的解决问题的方法，然而专家系统在其限定的领域里做得很成功。你可以从附录 G 列出的书籍、期刊、会议、产品以及专家系统在商业、医学、科学、工程等领域的应用例子看到专家系统的成功应用。

专家系统大量利用专业知识以解决只有**专家**（expert）才能解决的问题。专家是一个在特定领域里具有专门知识的人。亦即，专家具有不为大多数人所知或所利用的专门技能或知识。专家能够解决大多数人所不能解决或是不能高效地（而不是低劣的）解决的问题。在最初发展起来时，专家系统特指包含专家知识。然而“专家系统”这一术语在今天适用于任何应用专家系统技术的系统。专家系统技术包括专门的专家系统语言、程序和为了辅助专家系统开发和执行而设计的硬件。

专家系统中的知识可以是专门知识或是从书籍、杂志、有学问的人处可获得的知识。从这个角度上说，知识也代表比更罕见的专家知识更低层次的内容。专家系统、**基于知识的系统**（knowledge-