



Automated Planning

Theory and Practice

自动规划：理论和实践

(法) Malik Ghallab (美) Dana Nau (意) Paolo Traverso 著
姜云飞 杨强 凌应标 等译



清华大学出版社



Automated Planning Theory and Practice

自动规划：理论和实践

(法) Malik Ghallab (美) Dana Nau (意) Paolo Traverso 著

姜云飞 杨强 凌应标 伍丽华
陈蔼祥 张学农 黄巍 译

清华大学出版社
北京

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动规划:理论和实践/(法)加拉卜(Ghallab, M.), (美)诺(Nau, D.), (意)特拉韦尔索(Traverso, P.)著;
姜云飞等译. —北京:清华大学出版社, 2008. 3

书名原文: Automated Planning: Theory and Practice

ISBN 978-7-302-16383-1

I. 自… II. ①加… ②诺… ③特… ④姜… III. 人工智能—研究 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 168759 号

责任编辑:薛 慧

责任校对:焦丽丽

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175

邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015

客户服务:010-62776969

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

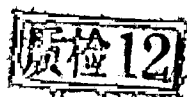
开 本:185×230 印 张:40.5 字 数:740 千字

版 次:2008 年 3 月第 1 版 印 次:2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~5000

定 价:75.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系
调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:019219-01



内 容 简 介

智能规划是人工智能的一个重要研究领域。其主要思想是：对周围环境进行认识与分析，根据预定实现的目标，对若干可供选择的动作及所提供的资源限制施行推理，综合制定出实现目标的动作序列——规划。由于智能规划在工厂的车间作业调度、现代物流管理中物资运输调度、智能机器人的动作规划以及宇航技术等领域中有广泛的应用，受到研究者的重视，现在已经成为人工智能研究的热点。本书在深入研究智能规划的基础上，以计算机科学与技术专业硕士研究生教材的方式，对智能规划做了全面、系统、完整的介绍。不但包括规划表示、规划产生、规划空间搜索等经典智能规划内容，还包括图规划、基于约束可满足的规划、启发式规划、不确定性规划、时态规划和资源规划等最新研究成果的系统整理与阐述。并且，本书还结合智能规划在机器人规划、CAD/CAM、应急疏散规划等上的应用介绍了实用的规划示例和系统。对推动智能规划的研究和应用具有重要作用。

本书是国际上第一本专门论述智能规划的教材。可以作为硕士研究生或博士生的教材，也可供研究人员和工程技术人员参考。

Automated Planning: Theory and Practice

Malik Ghallab, Dana Nau and Paolo Traverso

ISBN: 1-55860-856-7

Copyright © 2004 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Propretor.

ISBN: 981-259-601-1

Copyright © 2008 by Elsevier (Singapore) Pte. Ltd. All right reserved.

Printed in China by Tsinghua University Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由清华大学出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国内地合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港特别行政区及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2006-0567

译者的话

自动规划是近年来人工智能研究中发展十分迅速的一个领域,由于具有广泛的应用前景,受到研究者的普遍重视,现在已经成为人工智能的新的研究热点。*Automated Planning: Theory and Practice* 一书是该领域第一本系统地介绍智能规划的学术性著作,由在该领域长期从事研究的三名国际著名的计算机科学家编写,他们分别来自法国,美国和意大利,在国际人工智能界具有重要影响。为了在国内推动该领域的研究,我们翻译了这部著作,供大家学习和参考。

中山大学智能规划研究组从事该领域的研究已经有十年的历史,香港科技大学的杨强教授一直进行这方面的研究,他是本书美国作者 Nau 的学生,为原书的编写做了许多辅助性工作。参与本书工作的其他翻译者都是中山大学该领域研究的教师或博士研究生。对于本书的翻译工作来说,我们具有很好的基础和背景,并得到国家自然科学基金项目(60773201)的支持。在翻译之前,我们在讨论班上报告过整本书的内容。翻译工作完成后,我们又对译稿进行了认真的审查和修改。我们可以非常有信心地说,我们的翻译是十分准确和可靠的。

但是,由于中英文表达上的差异,也有若干不尽如人意之处。例如,planning 表示规划过程,而 plan 表示经过规划后得到的结果,在英文中一看便知,但在中文中只能都译成“规划”,无法区别过程和结果了,我们相信读者结合前后文不难分辨它们。原书中有少量明显的印刷错误,在查阅了有关的参考文献之后,如果完全能肯定书上确实是错了,我们在翻译时做了更正。对于不能完全肯定的,我们把疑问保留了下来,读者在这些地方可能要费心思考一下,这样的地方仅有几处,不会造成太多的麻烦。

本书翻译工作的分工如下:

姜云飞: 作者简介,序言,第 1,2,3 章。全书译稿审查。

杨 强: 第 4,5 章。全书译稿审查。

伍丽华: 第 2 部分,第 6,7,8 章,索引。全书统一组织。

陈蔼祥: 第 3 部分,第 9,10,11,12 章,附录 A。

张学农: 第 4 部分,第 13,14,15 章,附录 B。

黄 巍: 第 5 部分, 第 16, 17, 18 章, 19 章(第 6 部分), 附录 C。

凌应标: 第 6 部分, 第 20, 21, 22, 23, 24 章。全书统一组织。

智能规划是近年来国际上的一个热门领域, 本书是以教材方式编写的, 内容全面, 易读易懂, 并配有练习。本书不但包括智能规划的经典内容, 还包括图规划, 基于模型检测规划, 不确定规划等十分活跃的分支领域的介绍, 附有最近的参考文献目录和评论, 有利于直接带领研究生进入研究前沿, 可以作为硕士研究生或博士研究生的教材或参考书, 也可供有关研究人员参考。

尽管我们做了大量的翻译, 探讨与推敲工作, 译本中也还可能存在问题, 我们欢迎同行们提出意见和建议, 我们也愿意就书中的疑难问题与大家展开讨论, 欢迎同行们与我们联系。

我们的 Email 是:

姜云飞: lncsri05@zsu.edu.cn

杨 强: qyang@cse.ust.hk

凌应标: isslyb@mail.sysu.edu.cn

伍丽华: wulihua@mail.sysu.edu.cn

陈葛祥: cax413@hotmail.com

张学农: zxnslq@163.com

黄 巍: huangbodao@yahoo.com.cn

最后, 我们衷心感谢清华大学出版社的大力支持。本书从立项、译稿的审定修正, 到最终的排版付印, 都离不开他们的热情帮助和辛勤劳动, 在此, 我们表示诚挚的谢意。

姜云飞

2006 年 9 月 26 日

序 言

我很高兴有这样一个机会为《自动规划：理论和实践》做序。在自动规划领域有建树的三位导师写了这样一本精彩的书，满足了人工智能界的长期需求。这是一本详细的综述性的书，配备有练习，既可以作为大学教材，也可以供研究者和实际应用者参考。最近几年，人们已经写了几本关于人工智能(AI)的其他领域的综述性专著，包括机器学习、自然语言处理、约束可满足处理，但是，直至现在，尽管规划研究在最近几十年取得了显著的进展并且已经相当成熟，可在规划领域还没有这样的书籍。Malik Ghallab, Dana Nau 和 Paolo Traverso 用这本写得特别清楚又非常好的书——《自动规划：理论和实践》填补了这一空白。

关于书的重点应该放在哪里的问题，作者做出了一个重要的决定。尽管如同作者在序言中所指出的那样“自动规划的大多数研究集中在经典规划”，但他们决定不把书的大部分放在这种受限的框架内，而是展现和强调经典规划以外的技术。他们也没有排斥经典规划，对经典规划也做了综述。但是他们用大量版面介绍时态规划、资源调度、不确定规划，并介绍了在规划的产生中利用很多现代技术的方法，包括命题可满足性方法、约束满足方法和模型检测方法。

正如本书的书名所示，本书包括了大量的人工智能规划实用部分，包括几个应用类别的案例研究，例如机器人规划、在太空 1 号远程代理(Deep Space 1 Remote Agent)和桥牌游戏等具体领域的应用。这些案例研究描述了如何把自动规划的相对一般的方法转换成强有力的领域相关工具的过程，并说明了作为这种转换的成果，自动规划十分有用——自动规划的作用要远远大于只是在桌子上堆砌木块。(现在要是我能这么有效地将自己的桥牌策略转换成实战技术该多么好啊！)

《自动规划：理论和实践》是对人工智能学术文献的重要贡献，不仅规划领域的研究者可以广泛地使用它，愿意了解这一重要研究领域的高等院校的学生和同行也可以从中受益。

Martha E. Pollack
Michigan 大学

前言

研究自动规划的目的是非常实际的：人们需要价格不是很高但又有效的可以进行资源规划的信息处理工具。这样的工具在完成复杂多变的任务并且有安全和效率上的要求时是非常必要的。在复杂的人造系统中增加更多的自动功能和智能控制能力需要这样的工具。自动规划技术也能够用于各种各样的要求很高的应用领域中，从控制空间飞船、机器人，到部署应急行动和玩桥牌游戏。

自动规划研究的另一个目的是理论上的。规划是理性行为的一个重要组成部分。如果说人工智能(AI)的目的是掌握智能的计算方面，那么，作为动作推理的规划则无疑是这一目的的关键因素。

自动规划在理论和实践这两个方面的目的是互相促进的。当观察到在实践中哪些方法起作用后，有可能建立起更好的规划理论。这些更好的理论反过来可以指导研制更好的应用规划系统。

本书的目的是使读者掌握自动规划理论和自动规划实践以及它们之间的相互关系。本书既包括理论部分章节介绍自动规划的理论，也包括案例研究章节描述如何在各种应用领域中采用和结合自动规划技术。

本书包括的材料

在自动规划领域发表的文献很多，想用这样一本书对所有的文献给出详细的讨论是不可能的。本书在选材上基于如下考虑。

自动规划的大部分研究工作集中在称之为经典规划的受限形式。我们深切地感到自动规划领域的发展具有很大的潜力，其研究需要超越经典规划。因此，我们在把经典规划作为预备知识加以介绍的同时，把本书的大部分篇幅用于介绍自动规划的扩展部分，这些扩展是通过对经典规划放宽各种限制得到的。

我们也用了大量的篇幅描述面向应用的工作。这些章节主要是描述性案例研究。从应用的观点看，自动规划领域仍处于早期阶段，还没有建立起成熟

的工程方法使我们能把应用领域的特点与针对这些特点的规划技术对应起来。我们希望本书能对推进这种成熟技术做出贡献。

如何使用本书

本书既可以作为研究生教材,也可以供该领域的专业人员参考。我们假定读者已经了解搜索算法、数据结构、计算复杂性和程序设计语言等概念,学习过大学本科计算机科学系的课程。启发式搜索和一阶逻辑的预备知识对阅读本书是有帮助的,但是要求并不是十分严格,因为附录 A 和附录 B 提供了关于这些知识的概述。

本书包括 24 章,分为 7 个部分和 3 个附录(归为第 8 部分)。第 1 部分和第 2 部分介绍规划问题的受限模型和在该模型之内的规划算法;第 3 部分处理规划的启发式方法和控制策略;第 3 部分到第 5 部分讨论了几个扩展模型和规划算法。第 6 部分介绍 5 种案例研究和它们的应用。第 7 部分,也就是最后一章,简要讨论了与规划问题有关的其他问题和技术,例如规划和动作、规划和学习,我们不可能用一个整章分别讨论各个问题。

图 1 列出了各章之间的依赖关系。先行关系用实线标出。这个图也说明人们可以通过几个可能的途径学习这本书。特别是几个面向应用的章节可以提前处理。本书包含的材料比一个学期的教学材料要多。各章之间的先行关系可以帮助教师决定选用哪些章节^①。

网址

出版社的网址提供了与本书有关的附加材料。这些材料包括对有关研究工作的链接;用于下载规划程序的链接为 books.elsevier.com/mk/1558608567;利用本书进行教学时用过的幻灯片拷贝;以及附加说明、例子和练习的链接。

^① 作为一个学期可以讲授哪些内容的例子,美国马里兰大学最近一个学期的规划课程包括下列章节:第 1、2 章(略去了集合论表示),第 3、4、5、6 章和第 7 章的一个快速综述,第 9、10、11、14、15 章的大部分,第 16 章的大部分,第 17、20、22、23 章的大部分。该课程还包括一个学期设计,在学期设计中,学生按两三个人一组设计并实现与自动规划有关的搜索设计。

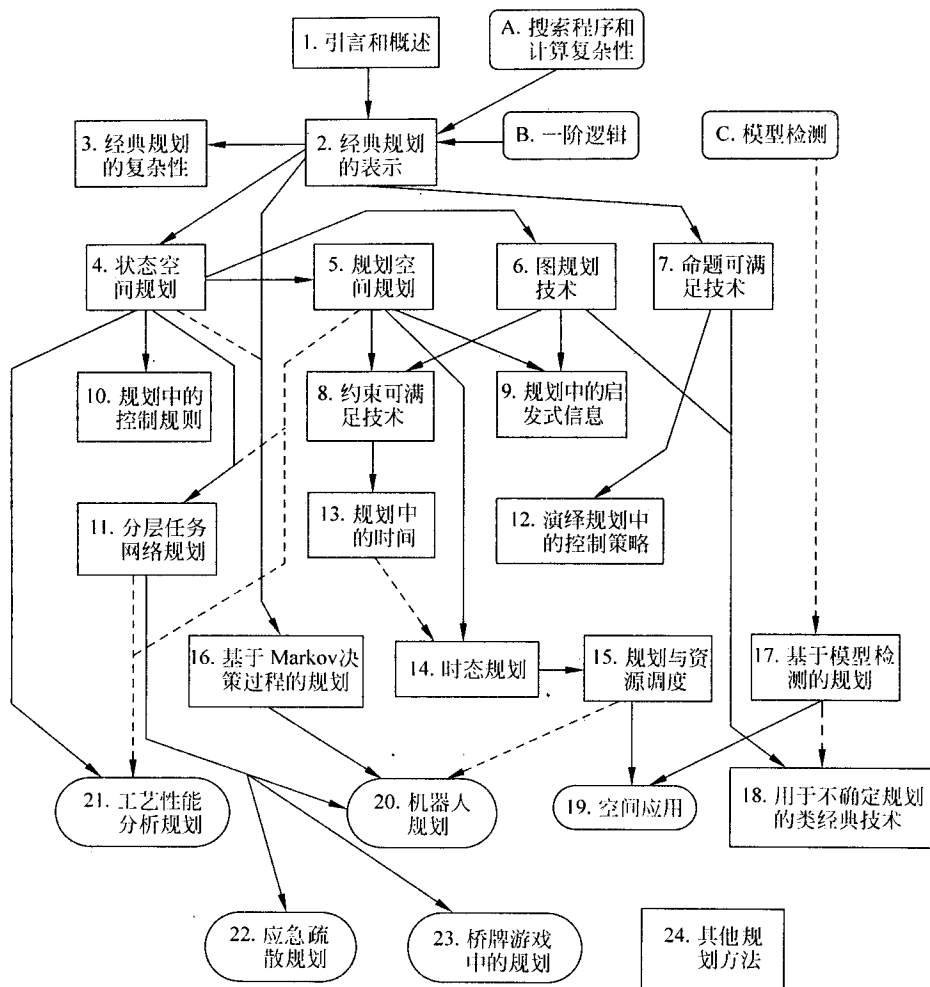


图1 各章之间的依赖关系,圆角方框表示附录,直角方框表示理论章,椭圆形框表示案例研究章,实线表示学习一章需要先行理解另外一章,虚线表示学习一章不是必须先行理解另外一章,但是那样做可以帮助读者深入理解。图中没有画出第24章与其他章的依赖关系,因为它的每一节与各章都有关联。

致谢

本书草稿的各种不同的版本曾在一些课程中使用过,我们非常感谢使用本书草稿的学生,特别是马里兰大学、Toulouse 大学和 Trento 大学的学生,以及

ESSLLI 2002 暑期班的学员,他们对本书提出了很好的反馈意见。特别感谢本书的审稿者,我们依据他们的意见对本书做了重要修改。我们也非常感谢我们的同行和朋友,他们对本书的部分章节给出了非常有价值的意见。这些同行和朋友是:University of Ulm 的 S. Biundo;California Institute of Technology 的 S. Chien;Mindlore Inc. 的 K. Erol;University of Strathclyde 的 M. Fox;University of Sherbrooke 的 F. Kabanza;Schindler Lifts 的 J. Koehler;LAAS-CNRS(Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, Centre National de la Recherche Scientifique) 的 J. P. Laumond;University of California 的 D. Long;马里兰大学的 Santa Cruz、A. Lotem 和 H. Munoz-Avila;Istituto per la Ricerca Scientifica e Tecnologica/Istituto Trend di Culture 的 M. Pistore;New Mexico State University 的 A. Pogel;Great Game Productions 的 S. J. J. Smith;Australia National University 的 S. Thiebaut;SRI International 的 D. Wilkins;Simon Fraser University 的 Q. Yang(杨强)。还要感谢 M. Herrb 和 R. Prajoux,他们帮助我们建立了分布式 CVS 服务器和 Latex 环境。我们还感谢各自单位所给予的帮助,这些单位提供的方便条件成就了本书。这些单位是:在法国 Toulouse 的 LAAS-CNRS,在美国马里兰州 College Park 的马里兰大学,在意大利 Trento 的 ITC-IRST。

符号表

符 号	含 义
a, A	动作
A	动作集
c	约束
$C, \mathcal{C}$	约束集
$\delta(u, m, \sigma)$	在置换 σ 下, 用方法 m 分解 u 所产生的任务网络
$\delta(w, u, m, \sigma)$	在置换 σ 下, 对 w 用方法 m 分解 u 产生的任务网络
$\text{effects}(o)$	操作或动作的效果
$\text{effects}^+(o)$	操作或动作的正效果
$\text{effects}^-(o)$	操作或动作的负效果
$\mathcal{F}$	时态量化表示或时态约束集
g	目标公式
g^+, g^-	g 的正文字集和负文字集
$\gamma(s, a)$	前向计算, 即把动作 a 应用于状态 s 产生的状态或状态集
$\gamma^{-1}(s, a)$	后向计算
$\Gamma(s)$	s 的所有直接后继状态集
$\hat{\Gamma}(s)$	$\Gamma(s)$ 的传递闭包
$\Gamma^{-1}(g)$	满足 g 的所有直接后继状态集
$\hat{\Gamma}^{-1}(g)$	$\Gamma^{-1}(g)$ 的传递闭包
h	启发函数, 历史记录
m, M	HTN 方法, 方法集
$\text{name}(o)$	操作名或动作名
$\text{network}(m)$	方法 m 的子任务网络
o, O	操作, 操作集
$P = (O, s_0, g)$	经典规划问题描述
$P_a(s' s)$	在状态 s 中执行动作 a 得到 s' 的概率
$\mathcal{P}$	规划问题

续表

符 号	含 义
$\mathcal{P}=(\Sigma, s_0, S_g)$	集合论或经典规划问题
$\Phi=(\mathcal{F}, \mathcal{C})$	年代记或时态数据库
π, Π	规划, 规划集
$\text{precond}(o)$	操作或动作的前提条件
$\text{precond}^+(o)$	操作或动作的正前提条件
$\text{precond}^-(o)$	操作或动作的负前提条件
s, S	状态, 状态集
s_0, S_0	初始状态, 初始状态集
S_g	目标状态集
σ	置换
$\Sigma=(S, A, \gamma)$	状态转换系统, 集合论规划领域或经典规划领域
$\text{subtasks}(m)$	方法 m 的子任务
t_u	与任务节点 u 相关的任务
τ	分解树
$\theta(e/\mathcal{F})$	使能条件集
u	任务节点
w	任务网络
$\cdot$	联结符, 例如, $e, E, E.e$ 或 $E.E'$, 其中 e 为一个表示, E 和 E' 为序列
$\cdot$	两个关系的组合运算, 例如, $r_1 \cdot r_2$
$\langle a_1, \dots, a_k \rangle$	k 元组 (其中 k 是固定的)
$\langle a_1, \dots, a_n \rangle$	序列 (其中 n 是可变的)

目 录

译者的话	1
序言	3
前言	5
符号表	9
第 1 章 引言和概述	1
1.1 规划的直观含义	1
1.2 规划的形式分类	2
1.3 领域无关规划	3
1.4 智能规划的概念模型	5
1.5 受限的模型	8
1.6 扩展模型	10
1.7 一个运行的例子：码头工机器人	12
第 1 部分 经典规划	15
第 2 章 经典规划的代表	17
2.1 引言	17
2.2 集合论表示	18
2.2.1 规划领域、规划问题和规划解	18
2.2.2 状态可达性	20
2.2.3 规划问题的表述	21
2.2.4 集合表示的性质	22
2.3 经典规划表示	24
2.3.1 状态	24
2.3.2 操作与动作	25
2.3.3 计划、规划问题和解	27

2.3.4	经典规划表示的语义	29
2.4	经典规划表示的扩展	30
2.4.1	简单的语法扩展	30
2.4.2	条件规划操作	31
2.4.3	定量表示	32
2.4.4	析取前提条件	33
2.4.5	利用公理推理	34
2.4.6	函数符号	35
2.4.7	附加程序	35
2.4.8	扩展的目标	35
2.5	状态变量表示	37
2.5.1	状态变量	37
2.5.2	操作和动作	39
2.5.3	领域和问题	40
2.5.4	性质	42
2.6	比较	43
2.7	讨论和有关历史的评论	44
2.8	练习	46
第3章	经典规划的复杂性	49
3.1	引言	49
3.2	预备知识	50
3.3	判定性和不可判定性结果	51
3.4	复杂性结果	52
3.4.1	二元计数器	54
3.4.2	无限制的经典规划	55
3.4.3	其他结果	57
3.5	局限性	59
3.6	讨论和关于历史的评论	59
3.7	练习	60
第4章	状态空间规划	61
4.1	引言	61
4.2	正向搜索	61
4.2.1	几个性质	62
4.2.2	确定的执行	64

4.3	反向搜索	65
4.4	STRIPS 算法	67
4.5	特定领域的状态空间规划	69
4.5.1	集装箱堆放领域	70
4.5.2	规划算法	70
4.6	讨论和有关历史的评论	72
4.7	练习	72
第 5 章	规划空间规划	75
5.1	引言	75
5.2	部分规划的搜索空间	75
5.3	解规划	80
5.4	规划空间规划的算法	83
5.4.1	PSP 算法	83
5.4.2	PoP 算法	88
5.5	扩展	89
5.6	规划空间和状态空间规划的对比	90
5.7	讨论和有关历史的评论	92
5.8	练习	93
第 2 部分	类经典规划	99
第 6 章	图规划技术	101
6.1	引言	101
6.2	规划图	102
6.2.1	可达树	102
6.2.2	基于规划图的可达性分析	104
6.2.3	独立动作与分层规划	107
6.2.4	互斥关系	108
6.3	Graphplan 规划器	110
6.3.1	扩展规划图	110
6.3.2	搜索规划图	112
6.3.3	Graphplan 分析	116

6.4	Graphplan 的扩展和改进	118
6.4.1	语言的扩展	118
6.4.2	规划器的改进	119
6.4.3	独立关系的扩充	121
6.5	讨论和有关历史的评论	123
6.6	练习	125
第 7 章	命题可满足技术	128
7.1	引言	128
7.2	规划问题表示为可满足问题	128
7.2.1	状态表示为命题公式	129
7.2.2	状态转换表示为命题公式	130
7.2.3	规划问题表示为命题公式	131
7.3	用可满足过程求解规划	135
7.3.1	Davis-Putnam 过程	135
7.3.2	随机过程	140
7.4	其他编码方法	143
7.4.1	动作的表示	144
7.4.2	框架公理	145
7.5	讨论和有关历史的评论	147
7.6	练习	148
第 8 章	约束可满足技术	149
8.1	引言	149
8.2	约束可满足问题	150
8.3	规划问题表示为 CSP	153
8.3.1	规划问题编码为 CSP	155
8.3.2	CSP 编码的分析	158
8.4	CSP 技术和算法	159
8.4.1	求解 CSP 的搜索算法	159
8.4.2	过滤技术	161
8.4.3	局部搜索技术和混合方法	165
8.5	扩展的 CSP 模型	165
8.5.1	活动的 CSP	166
8.5.2	带值的 CSP	167
8.6	规划中的 CSP 技术	167