TURING 图灵数学 · 统计学丛书 28

PEARSON
Prentice Hall

Operations Research
An Introduction

运筹学导论
高级篇

（第 8 版）

[美] Hamdy A. Taha 著

薛毅 刘德刚 朱建明 侯思祥 译

韩继业 审校

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING 图灵数学·统计学丛书 28

PEARSON Prentice Hall

Operations Research An Introduction

运筹学导论

高级篇

（第8版）

[美] Hamdy A. Taha 著

薛毅 刘德刚 朱建明 侯思祥 译

韩继业 审校

人民邮电出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

运筹学导论：第 8 版，高级篇/(美)塔哈(Taha, H. A.)著；薛毅等译. —北京：人民邮电出版社，2008. 12
(图灵数学·统计学丛书)
书名原文：Operations Research: An Introduction
ISBN 978-7-115-18947-9
Ⅰ. 运…　Ⅱ. ①塔…　②薛…　Ⅲ. 运筹学　Ⅳ. O22
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 154117 号

内容提要

本书是运筹学方面的经典著作之一，为全球众多高校采用. 高级篇共 12 章，内容包括高级线性规划、概率论基础复习、随机库存模型、仿真模型、马尔可夫链、经典最优化理论、非线性规划算法、网络和线性规划算法进阶、预测模型、随机动态规划、马尔可夫决策过程、案例分析等，并附有统计表、部分习题答案、向量和矩阵复习，以及应用案例.

本书可作为高等院校经管类专业和数学专业的教材，也可供 MBA 及相关研究人员参考.

图灵数学·统计学丛书

运筹学导论：高级篇(第 8 版)

◆ 著　[美] Hamdy A. Taha
译　薛　毅　刘德刚　朱建明　侯思祥
审校　韩继业
责任编辑　明永玲
执行编辑　张继发

◆ 人民邮电出版社出版发行　北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061　电子函件 315@ptpress.com.cn
网址：http://www.ptpress.com.cn
北京铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本：700×1000　1/16
印张：24.5
字数：521 千字　2008 年 12 月第 1 版
印数：1–3 000 册　2008 年 12 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号　图字：01-2006-5778 号

ISBN 978-7-115-18947-9/O1

定价：59.00 元

读者服务热线：(010)88593802　印装质量热线：(010) 67129223

反盗版热线：(010)67171154

版 权 声 明

译 者 序

运筹学起源于 20 世纪二次大战期间, 是一门应用性很强的学科. 1938 年, 英国皇家空军部门在 Bawdsey 成立了一个从事作战研究的科学家小组, 小组的科学家把他们的研究工作称为 "operational research" ("operation" 在军事术语中意为 "作战"). 这是 "运筹学" 一词最早出现于文献的时间. "二战" 中英军每一个大的指挥部大都成立了这种运筹研究小组. 之后, 美国和加拿大的军事部门也成立了若干运筹研究小组 (美国称这种研究工作为 "operations research"). 他们广泛地研究有关战果评价、战术革新、技术援助、战略选择和战术计划等问题. "二战" 期间英、美、加等国军事部门的运筹研究小组的工作为同盟国战胜德、意、日等轴心国做出了卓越的贡献. 对于人类社会的科学进程而言, 这些科学家的集体工作和智慧开创了一门崭新的学科 —— 运筹学.

体现运筹学思想和方法的某些早期先驱性的研究工作, 可以追溯到 20 世纪初期. 例如, 1908 年丹麦工程师埃尔朗提出的电话话务理论是运筹学中排队论 (queueing theory) 的起源; 1916 年英国的兰彻斯特提出的战斗模型方程是军事运筹学早期的一项重要成果; 1939 年前苏联数学家坎托罗维奇在 *The Mathematical Method of Production Planning and Organization* 一书中, 开创性地提出线性规划, 并研究了工业生产的资源合理利用和计划等问题, 这一卓越贡献使他获得了 1975 年诺贝尔经济学奖; 基本的对策均衡的思想可追溯到 1838 年库尔诺的文章, 1913 年的德国策梅洛提出了抽象战略对策的数学模型, 1928 年冯 · 诺依曼提出了二人零和对策的解的一般理论, 这些是关于对策论的早期的研究. 上述这些先驱性成就对以后运筹学的发展有着深远的影响.

"二战" 以后, 美国等国家的军事部门保留和调整了运筹研究组, 人员编制得到了扩大, 运筹学有了新的发展. 1949 年美国成立了著名的兰德 (RAND) 公司. 与此同时, 许多运筹学工作者从军方转入企业、大学或政府部门. 在新的更宽阔的环境中, 运筹学的应用研究和理论研究得到了蓬勃发展, 多年来它已为欧美等国创造了数以亿计的社会财富.

简略地说, 运筹学的研究对象是现实世界中的运行系统, 这些运行系统的设计和运转受到管理人员的决策的影响和作用. 运筹学创造出一些理论 (包括数学模型) 和方法, 用来描述与分析这些运行系统的现象、性质和变化, 以寻求影响和作用于运行系统的设计与运转的最有效 (最优) 的决策, 发挥有限资源的最大效益, 使得运行系统达到总体最优的目标.

半个世纪以来, 运筹学在研究与解决各种复杂的实际问题中不断地得到创新和发展, 新模型、新理论和新方法不断涌现, 至今它已成为一个庞大的学科, 包括线性的和非线性的、连续的和离散的、确定性的和不确定性的许多分支. 运筹学的基本方法中有数学方法、统计学方法、仿真 (模拟) 方法、计算机科学方法等, 其中各种优化方法处于非常重要的地位.

运筹学的非凡价值,使得在许多国家的大学里的运筹学系、管理科学系、经济学系、工业工程系、系统科学系、数学系、计算科学系等早已开设了关于运筹学及其一些分支学科的课程. 我国的情况也大致如此. 从适应于不同院系专业的学生学习运筹学来考虑,一本好的运筹学基础的教科书十分重要. 在国外关于运筹学基础的诸多教材中, Hamdy A. Taha 著的 *Operations Research, An Introduction* 是非常优秀的一本. Taha 是美国阿肯色大学工业学院工业工程教授,世界知名运筹学家. 他著的这本书最早出版于 1968 年. 多年来此书经过多次修改与扩增,今年已出版了第 8 版. 本书被世界上多所大学采用为运筹学基础教材,已有西班牙文、日文、俄文、土耳其文、印尼文等多种译本出版. 它有三大重要特色. 一是内容广泛,取材得当. 连同附带的光盘,共有 24 章和 5 个附录,内容涉及线性规划、运输问题、网络问题、目标规划、整数规划、动态规划、库存问题、非线性规划等确定性运筹分支,以及随机动态规划、随机库存问题、排队系统、马尔可夫决策过程、决策分析、对策论、模拟问题、预报问题等随机性运筹分支. 这些内容覆盖了迄今运筹学所研究的大部分重要问题. 该书在取材上首先重视对上述运筹问题的基本知识的讲解,但对某些问题也包括了较高深的内容,以满足不同读者的需要. 二是突出实用性. 书中各章总是通过若干实际问题的求解来引导出所要讲的运筹问题的数学模型. 这既凸显出这些运筹问题的实际背景,也可使读者学到如何进行建模. 第 24 章详细地介绍了 15 个实际应用案例,运用了多种运筹学技术进行建模、数据采集以及求解计算等. 附录 E 中还收录了近 50 个应用例子. 作者精心收集和分析的这些实例来源于工业、商业、金融、社会、体育、娱乐等许多行业,是很好的运筹学教学资料. 三是计算方法与软件相结合. 全书使用教学辅助软件 TORA、电子表格程序 Excel 及 AMPL 等. 读者可以利用这些软件工具对所学的模型和计算方法进行计算和检验.

在我国运筹学基础一类的图书拥有大量读者,这类图书的累计销售量有的已达几十万册. 但国内目前这类书籍只有很少几种. 2006 年人民邮电出版社图灵公司邀我们翻译新出版的《运筹学导论 (第 8 版)》,这体现了出版社对发展我国运筹学的重视. 由于书的篇幅宏大,有 1 000 多页,中译本分成上下两册出版,同时将附录 C 和索引拆分到了上下两册,其中附录 C 放在了图灵网站 (www.turingbook.com) 上供读者免费注册下载. 上册主要包括原书中属于基础部分的 12 章,以及附录 A; 下册主要包括属于提高部分的 12 章,以及附录 B, D, E. 每册均可用做一个学期的教材. 本书第 2, 3, 4, 13 章及附录 A 由薛毅教授翻译,第 5 章由侯思祥教授翻译,第 6, 7, 8, 16, 20 章及附录 C 由朱建明博士翻译,其余各章及附录 B, D, E 由刘德刚博士翻译,全部译稿由我校阅. 中译本难免有疏漏和翻译不妥之处,敬请读者给予指正.

韩继业
2007 年 5 月于中科院

前　言

本书第 8 版对教材内容作了很多的修订, 在教材的编排上突出反映运筹学中的应用问题和计算方法.

- 第 2 章通过城市规划、货币套利交易、投资、生产计划、混合配比、排序以及下料等实际问题的应用, 主要介绍了线性规划的建模. 新增加的节后习题也涉及从水质管理、交通控制到军事领域等多个运筹问题.
- 第 3 章以一种简单和直接的方式介绍了一般性的线性规划灵敏度分析, 包括对偶价格和简约费用, 作为单纯性表计算部分的直接扩充.
- 本版的第 4 章主要是基于对偶性进行线性规划后最优分析.
- 针对旅行商问题 (Traveling Salesperson Problem, TSP), 介绍了一个基于 Excel 的组合式最近邻点反向启发式算法.
- 新增的第 17 章扩充了马尔可夫链的处理方法.
- 在全新的第 24 章里, 详细介绍了 15 个实际应用案例. 对这些案例的分析通常涉及多种 OR 技术 (例如启发式算法和线性规划, 或者整数线性规划和排队论), 用来进行建模、数据采集以及问题的求解计算等. 这些应用问题在相关的各章里都有引用, 让读者能够充分了解在实际生活中如何运用运筹学技术.
- 新的附录 E 收录了按照章节排列的约 50 个小型实用问题的例子.
- 本书还包含了 1 000 多个节后习题, 其中题前标有星号 (*) 的表示附录 C 给出了相应的答案.
- 每章开头都有**本章导读**, 帮助读者了解教材内容, 有效利用附带的软件程序.
- 把教材与软件相结合可以让读者对需要深入介绍的概念进行实际检验.
  1. 全书都用到了 Excel 程序, 包括动态规划、旅行商问题、库存问题、层次分析法、贝叶斯概率、"电子化" 统计表、排队问题、模拟、马尔可夫链以及非线性规划等. 一些程序中的交互式用户输入功能有助于对相应方法的更好理解.
  2. 对 Excel 规划求解程序的使用扩展到了全书, 特别用在线性规划、网络规划、整数规划和非线性规划问题.
  3. AMPL® 是一种强大的商业化建模语言, 本书将 AMPL 结合在大量的例题中, 这些例子涉及线性、网络、整数和非线性规划问题. 附录 A 给出了 AMPL 的语句规则以及本书例题中所引用的语言素材.
  4. 本书中, TORA 仍然充当教学软件的重要角色.
- 所有与计算机相关的材料都相对独立, 有的作为单独的章节, 有的按照标题 AMPL/Excel/Solver/TORA 程序作为一小节, 以尽量不影响本书的主要内容的介绍.

为了限制本书的页数, 我们把一些小节、一部分整章以及两个附录都放在了附带的光盘里. 作者根据运筹学导论课程中不太经常用到的内容截选下来, 放在光盘里.①

致 谢

我首先要感谢新泽西理工学院的 Layek L. Abdel-Malek、路易斯安那州立大学的 Evangelos Triantaphyllou、俄克拉荷马州立大学的 Michael Branson、中央佛罗里达大学的 Charles H. Reilly 以及弗吉尼亚技术学院及州立大学的 Mazen Arafeh, 他们对本书的第 7 版提供了重要的修改意见. 我要特别感谢下面两位学者, 因为他们让我在第 8 版写作期间的思路受到了很大启迪: R. Michael Harnett (堪萨斯州立大学) 多年来在本书的组织和内容方面给我提供了许多宝贵的建议; Richard H. Bernhard (北卡罗来纳州立大学) 对第 7 版所提出的详细改进意见促使本版对前面若干章做了重新调整.

Robert Fourer (西北大学) 针对本版介绍的 AMPL 内容耐心地提出了宝贵的建议, 我衷心地感谢他对这些内容的编辑所提供的帮助, 并感谢他的修改建议, 使得这部分内容读起来更通畅. 我还要感谢他的帮忙, 让我们能在附带的光盘中包含 AMPL 学生版以及 CPLEX、KNITRO、LPSOLVE、LOQO 以及 MINOS 等求解程序.②

我一直对我的同事们以及很多的学生们深表感激, 感谢他们的建议和鼓励. 我这里要特别感谢 Yuh-Wen Chen (台湾大叶大学)、Miguel Crispin (得克萨斯大学 El Paso 分校)、David Elizandro (田纳西技术大学)、Rafael Gutiérrez (得克萨斯大学 El Paso 分校)、Yasser Hosni (中央佛罗里达大学)、Erhan Kutanoglu (得克萨斯大学奥斯汀分校)、Robert E. Lewis (美军管理工程学院)、Gino Lim (休斯顿大学)、Scott Mason (阿肯色大学)、Heather Nachtman (阿肯色大学)、Manuel Rossetti (阿肯色大学)、Tarek Taha (JB Hunt 公司), 以及 Nabeel Yousef (中央佛罗里达大学), 谢谢他们对我的支持和帮助.

我还要对 Pearson Prentice Hall 出版社的编辑出版组的 Dee Bernhard (副总编)、David George (生产经理)、Bob Lentz (文字编辑)、Craig Little (技术编辑), 以及 Holly Stark (高级组稿编辑) 表达我的衷心谢意, 感谢他们在本书出版期间的出色工作.

HAMDY A. TAHA

hat@uark.edu

http://ineg.uark.edu/TahaORbook/

① 光盘中的这些内容已放在本书的高级篇中. —— 编者注

② 这些内容可到图灵网站 www.turingbook.com 下载. —— 编者注

目　录

① 附录 A 在本书的初级篇中. —— 编者注
② 附录 C(上) 属本书初级篇. 读者均可到图灵网站免费注册下载. —— 编者注

(初级篇) 目 录

第 13 章　高级线性规划

本章导读　本章介绍线性规划与对偶理论的数学基础, 讲述许多简洁高效的算法, 包括修正单纯形法、有界变量和参数规划. 第 20 章将介绍处理大规模线性规划的两种附加算法: 分解算法和 Karmarkar 内点算法.

本章的内容用到了很多矩阵代数的知识. 附录 D 复习了矩阵代数的内容.

本章应该特别注意的 3 个要点是: 修正单纯形法、有界变量算法和参数规划. 在修正单纯形法中, 矩阵代数用来很好地控制机器舍入误差, 这个问题在第 3 章介绍的行运算方法中曾经提到过. 有界变量算法在整数规划的分支定界算法 (见第 8 章) 中起着重要的作用. 参数规划在线性规划模型上添加了动态参数, 从而能够得出模型的参数连续变化后所带来的最优解的变化结果.

总结第 3 章中的以简单易懂的单纯形表形式所表示的矩阵运算结果, 将有助于深入理解修正单纯形算法、有界变量算法、分解算法以及参数规划的细节内容. 尽管采用矩阵运算使算法显得似乎不同, 但其理论与第 3 章的内容完全一致.

本章共包括 1 个实际问题的应用、8 个例题、58 个节后习题和 4 个章后综合问题. 综合问题汇总在附录 E 中. AMPL/Excel/Solver/TORA 程序在文件夹 ch13Files 中.

实际应用——泰国海军运送新兵最优行船路线与人员指派

泰国海军每年征兵 4 次. 招募的新兵到全国 34 个征兵中心报到, 然后由汽车运送到 4 个海军分基地. 从那里, 再用船将新兵们送到海军总基地. 分基地的码头对靠岸的船型有一定的限制. 分基地的运送能力是有限的, 但就整体而言, 4 个分基地有充分的能力运送所有的应征者. 在 1983 年夏季, 共有 2 929 名新兵从征兵中心被送到 4 个分基地, 最终被送到总基地. 问题是要确定运送新兵的最优计划安排, 首先从征兵中心到分基地, 然后从分基地到总基地. 这项研究综合运用了线性规划与整数规划. 其具体细节见第 24 章的案例 5.

13.1　单纯形法的基本原理

在线性规划中, 如果连接任意两个不同可行点所形成的线段还落在可行集合内, 则称可行解空间构成一个**凸集**(convex set). 凸集的**极点** (extreme point) 是一个可行点, 但不能位于连接可行集合中任意两个不同可行点的线段上. 实际上, 极

点与角点是相同的, 但角点用于第 2 章至第 4 章更为合适.

图 13.1 画出了两个集合. 集合 (a), 线性规划解空间的典型形式, 是一个 (具有 6 个极点的) 凸集, 而集合 (b) 不是凸集.

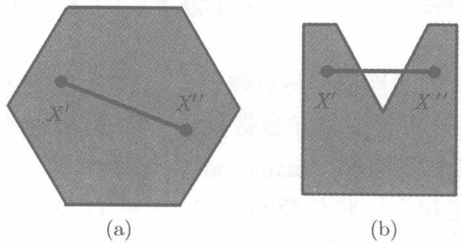

图 13.1　凸集与非凸集的例子

在 2.3 节介绍的线性规划的图解法中, 我们说明了, 最优解总是与解空间中某个可行的极点 (角点) 相关. 这个结果有着直观的意义, 因为在线性规划解空间中, 每个可行点能够由其可行极点的函数来确定. 例如, 在图 13.1 的凸集 (a) 中, 可行点 X 可以表示成其极点 X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6 的**凸组合** (convex combination), 其表达式为

$$X = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 X_5 + \alpha_6 X_6$$

其中

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 = 1$$
$$\alpha_i \geqslant 0, \quad i = 1, 2, \cdots, 6$$

这个观察结果说明, 解空间是完全可以由极点来确定的.

例 13.1-1

证明: 集合

$$C = \{(x_1, x_2) \mid x_1 \leqslant 2, x_2 \leqslant 3, x_1 \geqslant 0, x_2 \geqslant 0\}$$

是凸集.

令 $X_1 = (x_1', x_2')$ 和 $X_2 = (x_1'', x_2'')$ 是 C 中任意两个不同的点. 如果 C 是凸集, 则 $X = (x_1, x_2) = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, $\alpha_1, \alpha_2 \geqslant 0$ 必属于 C. 为了证明这是对的, 需要证明线段 X 满足 C 的所有约束, 即

$$x_1 = \alpha_1 x_1' + \alpha_2 x_1'' \leqslant \alpha_1(2) + \alpha_2(2) = 2$$
$$x_2 = \alpha_1 x_2' + \alpha_2 x_2'' \leqslant \alpha_1(3) + \alpha_2(3) = 3$$

因此, $x_1 \leqslant 2$ 且 $x_2 \leqslant 3$. 此外, 非负条件满足, 因为 α_1 和 α_2 都是非负的.

习题 13.1A

1. 证明: 集合 $Q = \{(x_1, x_2) \mid x_1 + x_2 \leqslant 1, x_1 \geqslant 0, x_2 \geqslant 0\}$ 是凸集. 非负条件是证明所必需的吗?

***2.** 证明：集合 $Q=\{(x_1,x_2)\mid x_1\geqslant 1 \text{ 或 } x_2\geqslant 2\}$ 不是凸集.

3. 用图形确定下面凸集的极点：

$$Q=\{(x_1,x_2)\mid x_1+x_2\leqslant 2, x_1\geqslant 0, x_2\geqslant 0\}$$

证明：整个解空间能够由其极点的凸组合来确定. 因此可知, 一旦解空间的极点已知, 任意凸的 (有界) 解空间就被完全确定.

4. 在图 13.2(画有刻度) 的解空间中, 将内点 (3,1) 表示成极点 A,B,C, D 的凸组合, 而且每个极点的权数都严格为正.

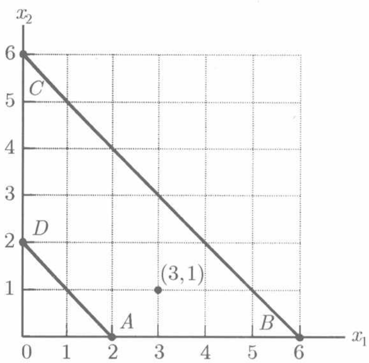

图 13.2　习题 13.1A 第 4 题的解空间

13.1.1　从极点到基本解

用矩阵记号表达具有等式形式的一般线性规划问题 (见 3.1 节) 是很方便的. 定义 $\boldsymbol{X}$ 为 n 维向量, 表示问题的变量; $\boldsymbol{A}$ 是 $m\times n$ 阶矩阵, 表示约束的系数; $\boldsymbol{b}$ 为列向量, 表示约束的右端项; $\boldsymbol{C}$ 是 n 维向量, 表示目标函数系数. 则线性规划可写成

$$\begin{aligned}\max \text{或} \min\quad & z=\boldsymbol{CX}\\ \text{s.t.}\quad & \boldsymbol{AX}=\boldsymbol{b}\\ & \boldsymbol{X}\geqslant \boldsymbol{0}\end{aligned}$$

用第 3 章的格式 (见图 4.1), 通过适当排列初始基本解中相应的松弛变量或人工变量, 总可以使矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最右边 m 列构成单位矩阵 $\boldsymbol{I}$.

$\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{b}$ 的**基本解** (basic solution) 的定义如下：令方程中的 $n-m$ 个变量等于零, 然后求解其余具有 m 个未知量的 m 个方程, 倘若得到的解是唯一的, 则其解为基本解. 有了这个定义, 线性规划的理论建立了极点的几何定义与基本解的代数定义之间的关系：

$$\{\boldsymbol{X}|\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{b}\}\text{的极点} \Leftrightarrow \boldsymbol{AX}=\boldsymbol{b} \text{ 的基本解}$$