

ISBN 978-7-03-028353-5



熊中楷 等著

动态定价新视角

New Perspective
on Dynamic
Pricing



科学出版社

www.sciencep.com

动态定价新视角

熊中楷 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书运用鲁棒优化、博弈论、微分对策和贝叶斯方法等理论与方法,从模型不确定、竞争、策略性顾客、广告四个不同的视角对动态定价理论进行了研究。本书主要内容是作者主持的国家自然科学基金项目“竞争环境下考虑顾客理性行为的动态定价与生产/库存集成模型及应用研究”的部分研究成果。它包括了作者近年来在 *Asia-Pacific Journal of Operational Research*、*Applied Stochastic Models in Business and Industry*、《系统工程理论与实践》、《中国管理科学》、《管理工程学报》等国内外杂志公开发表的 20 余篇关于动态定价研究学术论文的主要成果。

本书可供高等院校管理科学、运筹学、工业工程、软件工程、应用数学专业师生研讨和教学,也是相关的软件研发人员必备的参考书,是一本具有一定理论价值和实践应用价值的著作。

图书在版编目(CIP)数据

动态定价新视角 / 熊中楷等著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-028353-5

I. 动… II. 熊… III. 制造业-价格-研究-中国②零售商业-价格-研究-中国 IV. ①F426.4②F724.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 138773 号

责任编辑:林 剑 / 责任校对:李 影

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 7 月第一次印刷 印张: 17 插页: 2

印数: 1—2 000 字数: 329 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

随着信息技术的快速发展和广泛应用,企业具备了动态调整价格的能力,动态定价技术也随之得到广泛应用。麦肯锡在对财富 1000 强企业 2001 年的成本结构的研究中发现,定价是比可变成本、固定成本及销售量更有力的提升收益的杠杆。在定价方面 1% 的改进可以平均提高 8.6% 的营业毛利。Elmaghraby 和 Keskinocak 认为促成动态定价得以广泛应用的因素主要有以下三个:①决策者拥有大量销售数据可以用于辅助决策;②新技术的采用使价格调整变得更容易;③辅助分析需求数据和动态定价决策支持工具逐渐增加。但是确定“正确”的价格仍然是一件非常复杂的事情,要求决策者不仅要了解自己的运营成本和库存水平,还要了解顾客的品味及对价格的反应。因此动态定价策略也受到越来越多学者的关注,他们提出大量价格优化方法。这些动态定价模型又被集成到各种收益优化软件中,应用到多个行业来指导决策者制定更合理的价格从而提高收益。

虽然动态定价已经受到学术界和企业界的关注和重视,国内从事这方面教学和科研的学者也越来越多,且在理论研究上取得了一些高水平的研究成果,但是这方面的专著并不多。本书运用鲁棒优化、博弈论、微分对策和贝叶斯方法等理论与方法,从四个不同的新视角对动态定价理论进行了系统的研究。本书主要内容是作者主持的国家自然科学基金项目“竞争环境下考虑顾客理性行为的动态定价与生产/库存集成模型及应用研究”的部分研究成果。它包括了作者近年来在 *Asia-Pacific Journal of Operational Research*、*Applied Stochastic Models in Business and Industry*、《系统工程理论与实践》、《中国管理科学》、《管理工程学报》等国内外杂志公开发表的 20 余篇关于动态定价研究学术论文的主要成果。

撰写本书的有主要著者熊中楷和他指导的四位博士。熊中楷负责全书结构策划和最后统稿,参与编写的有:熊中楷(第 1 章)、李根道(第 2 章~第 4 章)、李豪(第 5 章~第 7 章)、彭志强(第 8 章~第 10 章)、聂佳佳(第 11 章~第 13 章)。在本书写作过程中,作者参考了不少资料,已尽可能详细地在参考文献中列出,在此对这些专家学者们表示深深的谢意。也有可能引用了一些资料而由于疏忽没有指出资料出处,若有这类情况发生,在此表示万分歉意。

本书的写作和出版得到了重庆大学经济与工商管理学院院长刘星教授的大力支持、关心和帮助,在此表示深深的谢意。在此过程中,硕士研究生黄德斌做了

许多工作，在此致谢！

最后，感谢我妻子吴富玲对我工作的支持，让我没有了后顾之忧，长久以来保持了对研究的热情。更想借此机会感谢我的儿子熊榆博士，他在英国女王大学任终身教职，博士生导师，在工作之余指导我的研究生在国外期刊上发表论文。

本书的出版得到国家自然科学基金委项目（70571088）、英国 British Academy Grant（SG 090839）、重庆市科委项目（2006BB0188）、重庆大学经济与工商管理学院发展基金、吉林大学基本科研业务经费项目（2009JC046）资助。

最后需要指出，由于作者水平有限，本书中难以避免地存在不足和缺点，敬请专家和同行批评指正。

熊中楷

重庆大学经济与工商管理学院

2010年4月

目 录

序言

第 1 章 绪论	1
1.1 动态定价的研究背景	1
1.2 动态定价理论研究现状评述	2
1.2.1 基于收益管理的动态定价	3
1.2.2 考虑广告影响的动态定价	13
1.3 本书的主要内容	15

第 1 篇 动态定价新视角 I：模型不确定

第 2 章 基于需求学习的易逝品动态定价研究	19
2.1 引言	19
2.2 连续需求学习动态定价	20
2.2.1 完全信息下的动态定价	20
2.2.2 考虑需求学习的动态定价	25
2.2.3 模拟分析	30
2.2.4 模型扩展：考虑批量购买	33
2.3 周期性需求学习的动态定价	35
2.3.1 问题描述	35
2.3.2 状态空间降维	36
2.3.3 结构性质	39
2.4 本章小结	41
第 3 章 基于相对熵的易逝品鲁棒动态定价研究	43
3.1 引言	43
3.2 基于相对熵的单产品鲁棒动态定价	44

3.2.1 单周期定价模型	44
3.2.2 多周期定价模型	57
3.3 基于相对熵的多产品鲁棒动态定价	72
3.3.1 名义模型	73
3.3.2 单一模型不确定水平下的鲁棒动态定价	74
3.3.3 不同模型不确定水平下的鲁棒动态定价	87
3.4 本章小结	95
第4章 非易逝品鲁棒动态定价研究	96
4.1 引言	96
4.2 问题描述	97
4.3 名义模型	98
4.4 考虑模型不确定的动态定价模型	101
4.4.1 模型不确定的刻画	101
4.4.2 扩展的相对熵过程	103
4.4.3 鲁棒动态定价模型	104
4.4.4 验证定理	107
4.5 算例分析	112
4.6 本章小结	114
 第2篇 动态定价新视角 II：竞争	
第5章 竞争环境下易逝品直销动态定价策略研究	119
5.1 引言	120
5.2 问题描述	121
5.3 不考虑顾客退货的动态定价模型	122
5.4 模型扩展：考虑顾客退货的动态定价模型	127
5.5 算例分析	133
5.6 本章小结	135
第6章 考虑顾客策略行为的两厂商竞争动态定价策略	137
6.1 引言	138
6.2 问题描述	139
6.3 模型分析——供大于求	141

6.4	模型扩展——供小于求	146
6.5	算例分析	147
6.6	本章小结	152
第7章	基于顾客选择行为的厂商竞争动态定价策略	153
7.1	引言	154
7.2	问题描述	154
7.3	只有两个厂商竞争时的动态定价模型	155
7.4	模型扩展：多个厂商竞争	159
7.5	算例分析	162
7.6	本章小结	165
 第3篇 动态定价新视角Ⅲ：策略性顾客 		
第8章	退票机制下面向策略性消费者的动态定价研究	169
8.1	引言	169
8.2	问题描述和假设	171
8.3	模型及求解	172
8.3.1	基本模型	172
8.3.2	退票机制下服务提供商的动态定价模型	174
8.4	比较研究	177
8.5	算例分析	178
8.6	本章小结	180
第9章	差价补偿机制下考虑策略性消费者的动态定价研究	182
9.1	引言	182
9.2	问题描述和假设	184
9.3	模型建立及求解	185
9.3.1	基本模型	185
9.3.2	承诺差价补偿的动态定价模型	187
9.4	比较分析	188
9.5	扩展研究：双重异质性的策略性消费者	191
9.5.1	问题描述和假设	191
9.5.2	无差价补偿机制下零售商的决策和利润	193

9.5.3 差价补偿机制下零售商的决策和利润	195
9.5.4 比较分析	196
9.6 本章小结	198
第 10 章 基于消费者策略行为的易逝品价格、订货量决策与快速补货	200
10.1 引言	200
10.2 问题描述与假设	201
10.3 模型分析	204
10.3.1 基本模型	204
10.3.2 快速补货模型	206
10.4 比较分析	208
10.5 算例分析	209
10.6 本章小结	212
第 4 篇 动态定价新视角 IV：广告	
第 11 章 考虑广告影响下的新产品垄断动态定价研究	217
11.1 引言	217
11.2 模型	218
11.2.1 广告投入	218
11.2.2 需求模型	218
11.2.3 利润函数	219
11.3 模型分析	220
11.3.1 给定广告水平时的定价规律	220
11.3.2 广告水平为决策变量时的定价规律	223
11.4 算例分析	225
11.5 本章小结	227
第 12 章 广告影响需求下的新产品竞争性动态定价策略	229
12.1 引言	229
12.2 问题描述	230
12.3 模型分析	231
12.3.1 $\mu=0$ 时的动态定价策略	233
12.3.2 $\mu=1$ 时的动态定价策略	235

12.3.3 $0 < \mu < 1$ 时的动态定价策略	236
12.4 管理意义解释	238
12.5 本章小结	238
第 13 章 基于动态最优控制的新产品定价和广告联合决策模型	240
13.1 引言	240
13.2 问题描述	241
13.3 价格和广告联合决策	242
13.3.1 开环控制策略	242
13.3.2 闭环控制策略	245
13.4 模型的扩展	246
13.4.1 非线性状态方程	246
13.4.2 非线性需求函数	247
13.4.3 双非线性函数	249
13.5 管理意义及模型局限性	249
13.6 本章小结	251
主要参考文献	252

第 1 章 绪 论

定价作为现代企业最重要的决策问题之一,既常见又复杂,且对企业提高收益具有重要作用,因此改进定价是企业实现高投资回报的常用方法之一。动态定价是指企业根据市场需求和自身供应能力,以不同的价格将同一种产品适时地销售给不同顾客或不同细分市场以实现收益最大化的策略(周晶和杨慧,2009)。

近年来,随着信息技术在企业中的广泛应用,企业通过收集大量顾客信息而有能力动态调整价格,使动态定价成为可能。动态定价在企业中起着重要的战术作用。动态定价理论认为企业需要快速且经常改变价格,该理论同时指导价格应该如何改变。这使得它有别于战略定价,后者的目标通常是建立一个总体市场定位。战略定价关注的是一件产品相对于市场应该如何定价,而动态定价关注的则是如何确定适合明天和下周的价格,它在战略定价的约束下发挥作用(Phillips, 2005)。

1.1 动态定价的研究背景

动态定价的一个显著特征是它使用了运筹学和管理科学的分析技术,在复杂动态的环境下制定价格,这种做法是比较新的(Phillips, 2005)。这种方法最初应用在 20 世纪 80 年代开发的针对民航客运业的收益管理系统。1978 年美国放松对民航管制后,美国民航客运业经历了空前的竞争,航空公司纷纷建立自己的收益管理系统以此来辅助价格决策,后来这些管理方法和系统不断向其他行业传播。实践证明,动态定价和收益管理确实能够显著提高企业的收益。据报道,动态定价和收益管理的应用和实施,使航空业提高了 3% ~ 5% 不等的收益(Belobaba, 1987; Smith et al., 1992),使美国联合汽车租赁公司免于清算而重新焕发生机(Geraghty and Johnson, 1997),使 Harrah 娱乐有限公司旗下 Cherokee 品牌的赌场和宾馆增加了高达 15% 的收益(Metters et al., 2008),使零售业提高 5% ~ 25% 不等的收益(Talluri and Van Ryzin, 2004; Sahay, 2007)等。现在,动态定价和收益管理技术已经被广泛应用于酒店、汽车租赁、电视广告、公路运输、电信和能源供应、旅游等行业,并向金融服务、零售业、制造业、互联网服务、广播广告、医疗服务、房地产、交通运输、体育比赛和娱乐事件管理等领域发展(Levin et al., 2008; 周晶和杨慧, 2009)。

如今,动态定价已经超出传统的收益管理的应用领域,得到越来越广泛的应用。贝恩公司(Bain)的一项调查表明,价格优化模型已经成为全球最流行的25种管理工具之一。动态定价得到广泛应用的原因主要有以下三点(Elmaghraby and Keskinocak, 2003):①随着信息技术的发展和广泛应用,管理者收集和处理有用信息(如需求、库存水平、竞争者的策略等)变得更容易,并且能够实时处理这些信息。这一新的现实允许甚至是迫使管理者通过调整任何可控变量(尤其是价格)来对变化的市场做出反应。②新技术的采用使价格调整变得更容易,调整价格的成本也更低。在传统的市场环境中,改变价格会引致巨大的菜单成本从而明显制约了价格的调整。而在电子商务环境中,同样的任务则简化为对一个数据库的简单更新,更新后的价格信息可以通过 Internet 很快地转换为买方的市场价格,厂商调整价格的菜单成本大大降低。③辅助分析需求数据和动态定价决策支持工具逐渐增加。据市场研究机构 AMR 市场调研公司(AMR Research)报告,价格优化应用软件市场价值在2002年为7500万美元,并预测到2005年该市场价值将达到至少5亿美元(Elmaghraby and Keskinocak, 2003)。而市场调研机构扬基集团(Yankee Group)的一份调查报告预计到2007年价格优化软件市场价值将会达到10亿美元。动态定价能力已经逐渐成为企业的核心竞争力。

随着应用范围的扩大,动态定价已经不仅仅只适用于易逝品销售,许多销售非易逝品的企业也开始采用收益管理动态定价策略。为了明确概念,本书沿用 Weatherford 和 Bodily (1992)的分类方法,将有固定销售期限、过期残值为零或很低的产品称为易逝品,将没有固定销售期限的产品称为非易逝品。技术的发展和市场环境的变化使得动态定价问题也变得越来越复杂,一些新的问题不断出现,如产品的推陈出新和消费者品味的快速变化使得企业越来越难得到准确的需求模型以及模型不确定问题越来越严重(Onatski, 2008),这影响了动态定价策略的实施;市场竞争越来越激烈,传统的单个企业的动态定价模型也不再适用;动态定价的实施不可避免地使顾客越来越具有策略性,不考虑顾客的这种策略性行为也会给企业带来一定的损失;由于广告也是一个重要的影响需求的要素,因此综合广告和动态定价决策对企业的收益也至关重要。本书将从以上这四个新视角来重新审视动态定价问题并对动态定价问题进行研究。

1.2 动态定价理论研究现状评述

定价研究涉及的领域众多,如运营管理、经济学、市场营销等,但动态定价的研究涉及大量的数学模型,因此它主要仍属于运营管理。具体来说本书的研究主要涉及与收益管理相关的动态定价和考虑广告影响的动态定价。下面,本节将从这

两个方面对国内外的研究现状进行综述。

1.2.1 基于收益管理的动态定价

1.2.1.1 单产品动态定价

Kincaid 和 Darling (1963)是最早开始研究易逝品连续时间动态定价问题的学者。他们假定顾客到达服从强度为 λ 的泊松过程,在 t 时刻到达的顾客的保留价格为 r_t , 其分布函数为 $F(r_t)$ 。他们考虑了标价和顾客报价两种情况,导出了这两种情况下最优解满足的条件,并在保留价格分布为指数分布时得到了闭解。Gallego 和 Van Ryzin (1994)利用强度控制理论系统地研究了易逝品动态定价问题,并开创性地利用动态定价理论解释了传统的收益管理实践,从而将动态定价与收益管理联系起来。他们导出了最优值函数满足的 Hamilton-Jacobi 方程,并证明:①如果需求函数是规则的,则导出的 Hamilton-Jacobi 方程存在唯一解;②最优值函数是库存 n 和时间 t 的严格递增凹函数,并且最优价格策略随库存数量的增加而减小、随剩余时间的增加而增加。当需求函数为指数形式时,他们解出了闭解。利用相应的确定性问题,他们得到了随机动态定价问题的上界,并证明在一定条件下固定价格是渐近最优的。他们的研究被称为 GVR 模型,后来的许多关于收益管理的研究都以此为发展基础。

以上研究关于价格的连续变化只是理论上的,由于现实生活中价格改变次数有限,所以学者们开始研究有限次价格改变的动态定价问题。基于 Gallego 和 Van Ryzin (1994)的研究中的一个结论——随着销售数量的增加最多改变一次价格的策略是渐近最优的,Feng 和 Gallego (1995)研究了最优降价/涨价时点的问题,得到了一个关于剩余库存递增的阈值策略,即只要剩余销售时间小于(大于)相应的时间阈值就应该降价(涨价)。Bitran 和 Mondschein (1997)研究了最多只能调整 K 次价格的周期性定价,并且证明价格策略是随时间非增的,顾客到达率和顾客保留价格是随时间变化的。他们将此问题构造为一个动态规划问题,每个周期的最优价格都是通过一个非线性规划来求解(利用 Fibonacci 算法求解)。他们证明当库存无限多并且顾客的保留价格分布不随时间变化时,固定价格是最优的。Bitran 和 Mondschein (1997)还考虑了宣布折扣的定价策略,这个策略包括一个初始价格和每个周期固定的价格折扣,并利用数值计算方法对四次价格更新和一个非时变顾客保留价格分布的问题进行了检验。Bitran 等(1998)将上述单个零售店的定价模型扩展到多个零售店连锁零售的情况,而且各连锁店中产品价格相同,但不同地点的商店面临着各自的泊松需求过程。现实中向各店分配库存有以下几种方式:①期初分配一次以后不进行再分配;②期初分配一次,在销售过程中根据需求和销

售的不平衡进行再分配;③从一个中心仓库根据销售类型进行周期性配送。Bitran 等(1998)针对前两种模式研究了清仓销售的定价策略,利用动态规划对没有库存转移和有库存转移两种情况进行建模,导出了最优解满足的条件。由于状态空间很大,难以求得最优解,作者提出一种启发式算法来得到近似解,并利用数值模拟和 Chilean 零售连锁店的八家店的真实数据对算法进行检验,结果显示该算法得到的价格策略明显好于现在应用的价格策略。Feng 和 Gallego (2000)将 Feng 和 Gallego (1995)扩展到时变需求率的情况,得到了最优策略满足的条件,并进一步扩展到多个价格的情况。Feng 和 Xiao (2000a)在 Feng 和 Gallego (1995)两个价格的基础上进行了扩展,研究了多个价格并且价格变化只能是单调的情况,得到了解析解。Feng 和 Xiao (2000b)研究了离散的可行价格集合条件下的连续时间最优动态定价问题,证明任何不属于给定价格集合最大凹包络的价格都不会最优,并导出了最优解的闭解,证明了价格策略的单调性和改变价格的最大次数。Chatwin (2000)独立地研究了与 Feng 和 Xiao (2000b)相同的问题,得出了类似的结论。罗利等(2006)研究了新产品对老产品需求有转移作用下的老产品最优动态定价策略,并应用最大凹向包络理论给出了简化计算的方法。官振中(2006)研究了易逝性高科技产品的收益管理动态定价问题。

现实生活中,需求往往是随时间变化的。因此,Zhao 和 Zheng (2000)扩展了 GVR 模型,研究了需求为非时齐泊松过程的动态定价问题,证明最优价格在给定时刻随库存数量的增加而减小的性质依然成立,但最优价格策略随时间的单调性不再成立。他们给出了最优价格策略随时间单调的充分条件:对任何价格 $p_1 > p_2$, 给定顾客在 p_2 购买条件下该顾客愿意支付 p_1 条件的概率是时间 t 的增函数。这个条件适用于时令性商品,但对于航空公司等运输服务则不适用。魏轶华和胡奇英(2002)扩展了 GVR 模型,研究了顾客有最大和最小保留价格时的动态定价问题。熊中楷等(2007a)将动态定价的思想应用到供应链中,分析了考虑动态定价的渠道协调问题。熊中楷等(2007b)研究了单个按订单生产的企业的动态定价问题。

以上研究都假定需求只受价格影响,与剩余库存水平无关,但对一些产品来说(如时装、食品等),需求不仅受价格的影响还受当前库存水平的影响。Smith 和 Achabal (1998)利用时装业的零售数据对库存水平对需求的影响进行了实证分析,得出了两种带阈值(当库存低于某一水平时才会影响需求)的需求函数,并首次在零售商的清仓定价决策中考虑了库存数量的影响,利用最优控制理论研究了在需求关系确定情况下的零售商最优定价策略。李根道等(2009)研究了随机环境下库存和价格同时影响需求的动态定价问题。Chatwin (2000)分析了需求依赖于库存水平下的动态定价策略,利用反例说明最优价格策略不再具有单调性。

由于单产品动态定价相对比较简单,研究也比较成熟,因而本节没有对其进行详细综述,更多相关文献请参考其他综述,如 Bitran 和 Caldentey (2003)、Elmaghraby 和 Keskinocak (2003)、Yano 和 Gilbert (2003)、Chan 等 (2004)、罗利和萧柏春 (2004)、Heching 和 Leung (2005)、Chiang 等 (2007)、李根道等 (2010)。下面主要对最近几年发展起来的关于动态定价最新研究方向的研究现状进行综述。

1.2.1.2 多产品动态定价

多产品动态定价问题又称为网络收益管理,即企业拥有多种资源、生产多种产品并销售给多类顾客。基于库存分配的网络收益管理的研究相对较多,但基于价格决策的网络收益管理的文献相对较少。Gallego 和 van Ryzin (1997) 将 Gallego 和 Van Ryzin (1994) 的研究扩展到了多产品的情况,假定需求过程服从时齐的泊松过程,将多产品动态定价问题构造为一个强度控制问题,导出了相应的 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程。类似于单产品问题,该研究利用流体近似 (fluid approximation) 方法证明确定性问题是对应的随机问题的上界。根据确定性问题的不同解法,Gallego 和 Ryzin 提出了执行确定性解的两种方法并证明这两种方法是渐近最优的。虽然用相应的确定问题的解来解近似随机问题是渐近最优的,但其前提条件是需求和库存都非常大,这在易逝品销售中是很难达到的。多产品随机动态定价问题的难点在于动态规划的状态空间很大,产生了所谓的“维数灾难”。Bertsimas 和 Boer (2005) 研究了离散时间多产品最优动态定价和库存分配统一模型,他们假设每种产品的需求只依赖于自己的价格,提出了基于线性规划的动态规划算法来求解最优策略。Maglaras 和 Meissner (2006) 提出一种状态空间约减的方法:首先,在每个时刻企业确定一个所有产品的总的消费率;其次在以消费率为约束的条件下计算需求率向量使即时收益最大。第二步类似于微观经济学中的在一定预算约束下的资源分配问题。利用这种方法 Maglaras 和 Meissner 将动态定价和动态库存控制统一在一个框架下。这样该问题的计算复杂度就只与资源的数量有关。因此当资源数量很大时,如下面讲的多个并列航班,就会产生维数灾难。

上述几篇论文研究的是多个产品共享资源的情况,官振中和史本山 (2007) 研究了有替代关系的产品面临缺货时,应用多项 logit 选择模型研究了考虑顾客的选择行为下零售商的最优订购量和最优定价联合策略。肖勇波等 (2008) 研究了两个航班联合动态定价模型。Zhang 和 Cooper (2009) 研究了多个并列航班的动态定价问题。Zhang 和 Cooper (2009) 将此问题构造为一个马尔科夫决策过程,并基于三种不同汇总 (pooling) (库存汇总、价格汇总及库存和价格同时汇总) 提出计算值函数和价格策略的近似算法。数值实验表明:对于对称问题 (顾客对不同航班的选择是无差异的,并且航班座位数相同) 基于汇总的策略效果很好,但对非对称情

况效果不好;而由可分界得到的策略对不同情况效果都比较好,可以用于解决大规模的问题。

通过以上几篇文献可以看出,尽管多产品动态定价的研究起步较早,但进展缓慢。虽然近几年多产品动态定价问题得到一定的重视,但仍有很多问题需要解决。首先,最优价格策略的求解算法仍需进一步研究;其次,当面临多种替代性产品时,消费者如何进行选择以及在动态定价时考虑到这种选择也是需要深入研究的问题;最后,Zhang 和 Cooper(2009)只研究了由价格引起的替代性问题,实际中由于库存数量有限,由库存不足而产生的替代性还缺乏研究。

1.2.1.3 竞争环境下的动态定价

企业的定价行为往往会受到竞争对手的影响,因此企业在制定价格策略的时候不仅要考虑消费者的反应,还要考虑竞争对手的反应。Friesz 等(2005)利用进化博弈理论研究了基于价格决策的网络收益管理问题。Friesz 假定需求变化率受竞争对手以往价格的移动平均值和企业当前价格的影响,将这个博弈问题构造为一个可微变分不等式问题,证明可微变分不等式的解就是博弈的 Nash 均衡,并证明了可微变分不等式解的存在性(Nash 均衡的存在性),最后作者提出一种不动点算法来求解可微变分不等式组的解。罗利(2005)系统研究了平行航班的动态定价问题,分别研究了可替代性航班的动态定价和竞争航班的动态定价。

Xu 和 Hopp(2006)在假定顾客到达服从几何布朗运动、顾客是同质的并且需求弹性是固定的情况下,首先研究了单个企业的动态定价问题,得到了最优价格策略的闭解;其次研究了多个企业竞争的情况,证明了价格和库存博弈的弱完美贝叶斯均衡,发现即使在非合作环境下价格均衡也是合作性的,但库存竞争会导致过多的库存并损害收益。Perakis 和 Sood(2006)利用鲁棒优化的方法研究了竞争环境下的动态定价问题。Perakis 和 Sood(2006)没有假设具体的需求分布函数,而是假设不确定参数在一个给定的闭的凸集内取值,并定义鲁棒策略为最差情况下使收益最大的价格策略。首先给定其他企业的价格策略,企业的最优反应问题是一个鲁棒优化问题,他们进一步将此问题转化为变分不等式问题,并证明了变分不等式解的唯一性。其次他们将市场均衡问题构造为一个联合拟变分不等式问题,并证明了联合拟变分不等式解的存在性。最后他们提出一种迭代算法来计算均衡策略。Gallego 和 Hu(2006)研究了连续时间的动态定价竞争问题。由于求解随机问题的复杂性,Gallego 和 Hu 转而分析相应的确定性问题,证明了该微分博弈开环 Nash 均衡的存在性和唯一性。他们进一步证明了由开环均衡得到的价格策略是随机微分博弈的渐近 Nash 均衡。Hu(2007)将 Feng 和 Xiao(2000a)的研究扩展到了竞争环境,研究了可行价格集为离散集合的竞争性动态定价问题,解出了每个

企业最优价格策略(阈值策略)的闭解,并根据每个企业的价格策略构造出了随机博弈的 Nash 均衡。Hu 用反例说明 Feng 和 Xiao (2000a)的结论中价格策略的单调性在竞争环境下不再成立。Granot 等(2010)用收益管理思想建立了两个提供相同易逝品的零售商动态定价博弈模型。

Currie 等(2008)研究了两个航空公司竞争的情况。Currie 等假设潜在顾客到达服从非时齐泊松过程,到达率依赖于剩余销售时间,顾客以一定的概率在两个航空公司之间选择购票,这个概率依赖于剩余销售时间和两个航空公司的价格。他们将各航空公司的定价问题构造为一个最优控制问题,给出了存在唯一 Nash 均衡的条件,并利用变分法来求解均衡解。Kachani 等(2007)研究了竞争环境下联合动态定价和需求学习问题。价格和需求之间的关系对各企业来说都是事先未知的,企业在销售过程中既要制定价格又要计算需求函数,同时还要考虑竞争对手可能的行动。Kachani 等将每个企业每个周期面临的决策问题构造为一个带均衡约束的数学规划问题,利用变分不等式组来刻画博弈均衡问题。罗利和彭际华(2007)应用随机控制理论和博弈论,研究了竞争市场环境下两家航空公司的两个航班两级价格动态定价问题,给出了均衡解满足的条件,并分析了模型求解的方法及相关性质。杨慧和周晶(2006,2007)基于 GVR 中的两级价格策略,构建了两种竞争性产品降价时点设定问题的博弈模型,根据竞争对手地位的不同,分别研究了 Cournot 博弈与 Stackelberg 博弈。杨慧和周晶(2008)指出了收益管理定价面临的三类竞争威胁,对收益管理竞争定价问题的基本要素进行了分析,归纳了收益管理竞争定价决策的一般性机理。

Lin 和 Sibdari(2009)假设顾客到达服从贝努利过程,利用多项 logit 模型来刻画顾客的选择行为,证明了 Nash 均衡的存在性。他们用算例说明在定价时考虑竞争的好处,并提出一种启发式算法计算价格策略,这种算法不需要知道竞争对手的实时库存。Dasci 和 Karakul(2009)研究了竞争环境下动态和静态定价策略对企业利润和均衡价格的影响。他们假设两个企业库存数量相等,产品完全替代,销售期为两个周期并且两个周期的潜在顾客数是相同的,第一周期和第二周期顾客愿意支付的价格分别为 r_1 和 r_2 。Dasci 和 Karakul 分别将动态定价问题和静态定价问题构造为动态博弈和静态博弈,解出了子博弈精炼均衡。研究发现:尽管动态定价策略更复杂,但可能会使企业受益也有可能使企业受害,只有当供给严重不足并且第二周期能够产生足够的利润时,才能保证使用动态定价策略能够使企业受益;在均衡中,两个企业尽量使第二周期的库存不同,从而弱化第二周期的竞争。Li 和 Xiong(2008)将 GVR 模型扩展到两个企业竞争的情况,证明了 Nash 均衡的存在性。李豪和熊中楷(2009)以提供同一航线的两个航空公司为研究对象,应用 Hamilton-Jacobi 方程建立了竞争环境下航空公司动态定价的数学模型,并证明了