

复杂社会经济行为建模与管理研究丛书

基于风险认知的出行行为 建模与均衡分析

田丽君 黄海军 著



科学出版社

复杂社会经济行为建模与管理研究丛书

基于风险认知的出行行为 建模与均衡分析

田丽君 黄海军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

随着社会经济的高速发展,交通拥堵成为制约大中城市可持续发展的瓶颈。交通系统中存在着各种不确定性因素,这些因素往往是交通拥堵的罪魁祸首。作为实现城市交通出行效率的重要内容和手段,研究不确定情景下的出行行为对于理解交通拥堵的形成机理,从社会经济可持续发展的角度解决交通拥堵等诸多社会问题具有极强的社会背景和应用价值。

受行为科学理论的启发,本书将心理认知因素引入研究框架内,构建了基于风险认知的网络均衡模型,对均衡结果进行了全面分析和讨论,以期进一步丰富和发展交通行为理论,揭示城市交通网络动态特性和演变机理,从而为制定科学的城市交通规划管理手段和发展先进的交通管理与控制技术建言献策。

本书适合交通运输经济学、城市经济学、交通运输规划与管理、运筹学、系统科学与系统工程、行为经济学等专业的高年级本科生、研究生阅读,也可供高校教师以及工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于风险认知的出行行为建模与均衡分析/田丽君,黄海军著. —北京:科学出版社, 2012

(复杂社会经济行为建模与管理研究丛书)

ISBN 978-7-03-033201-1

I. ①基… II. ①田… ②黄… III. ①市区交通-交通网-系统建模②市区交通-交通网-网络分析 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 277227 号

责任编辑:马 跃 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2012 年 2 月第一次印刷 印张:8 3/4

字数:170 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书编委会成员

黄海军	任若恩	王惠文	张 宁
周 泓	刘志新	王 晶	柏满迎
田 琮	韩立岩	姚 忠	赵秋红

本书作者简介

田丽君 女, 1981 年生于山西。1999 年 9 月考入长沙理工大学汽车与机电工程学院交通运输专业攻读本科学位。2003 年 6 月毕业后进入浙江省乐清市长途汽车运输总公司工作。2006 年 9 月考入北京航空航天大学经济管理学院, 攻读企业管理专业硕士学位, 师从黄海军教授, 开展道路交通流研究。2008 年 9 月通过提前攻博方式免试进入北京航空航天大学经济管理学院, 攻读交通运输规划与管理专业博士学位, 继续师从黄海军教授, 开展基于风险认知的出行行为建模与均衡研究。2010 年 11 月至 2011 年 2 月在香港科技大学土木工程系任研究助理。现为福州大学管理学院讲师。

曾作为学术骨干参与国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题 1 项和国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金 1 项; 曾获得教育部资助的博士研究生“学术新人奖”。

黄海军 男, 1964 年生于湖南。1984 年于南京航空航天大学航空系本科毕业, 1986 年于北京航空航天大学经济管理学院研究生毕业, 1992 年获北京航空航天大学工学博士学位。1986 年在北京航空航天大学参加工作至今, 分别于 1992 年、1995 年、1997 年开始任副教授、教授、博士生导师。曾经分别在香港理工大学、香港科技大学、英国 Newcastle 大学的土木工程系工作一至两年。1998 年获国家杰出青年科学研究基金, 2004 年入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选, 2005 年和 2008 年带领团队分别获得国家自然科学基金委员会创新研究群体基金第一、第二期资助, 2006 年获第六届中国青年科学家奖提名奖(管理科学)、全国百篇优秀博士学位论文导师, 2008 年被评为长江学者特聘教授、TTT (transportation and traffic theory, 运输与交通理论) 国际顾问委员会委员。

研究领域: 交通运输系统建模与分析、交通行为经济学、道路交通流模型、生产运作管理。在国际刊物上发表论文 110 多篇, 其中, 在 *Transportation Research Part B* 上发表论文 13 篇, 在 *Transportation and Traffic Theory* 上发表论文 8 篇。

总 序

“基于行为的若干复杂社会经济系统建模与管理”是国家自然科学基金委员会管理科学部在我国高等院校资助的第三个创新研究群体项目，于 2005 年获得第一期资助（项目编号：70521001），2008 年获得第二期资助（项目编号：70821061）。

北京航空航天大学经济管理学院拥有深厚的学术研究底蕴、扎实的学风和优秀的研究团队，其科研工作强调数理基础和学科交叉、理论与实践结合、定量与定性结合。学院已培养全国百篇优秀博士学位论文获得者 3 名、提名奖获得者 2 名、首届中金经济学/金融学优秀博士学位论文一等奖获得者 1 名，科研成果两次获得教育部自然科学一等奖和大量的省部级科技进步奖，每年在 SCI/SSCI 收录的国际学术刊物上发表论文 40 篇以上。

本创新群体致力于对复杂社会经济系统的运行机理和管理问题展开基于行为的建模理论研究，提出相应的优化管理措施，重点在三个既有特色又很典型的社会经济系统中展开实证研究，即交通系统的建模与管理、经济和金融系统的建模与管理、生产系统的建模与管理。虽然交通、经济金融和生产管理具有不同的行为发生和执行主体，但研究这些行为的方法是基本相同的。这是因为，这些系统虽然有一些共同且主要的特征，即个体行为都是理性的，但涌现出的整体表象确是难以预期的、甚至不合理的。本创新群体对这些演变的原因、过程、结果以及控制方法展开深入研究，采用系统科学的理论和方法，发现内在的演化规律，设计有效的干预措施，这既有科学价值、又有实践指导意义。本创新群体在四个领域的主要工作包括：

（1）交通行为建模与分析。对交通需求进入路网的过程进行剖析，包括路径、交通工具和出发时刻；混合交通网络中的出行分布与交通分配模型；交通网络中的动态行为模型；元胞自动机模型、格子模型等在交通行为模拟中的应用；信息技术对网络中的巨量行为的影响模型；公共场所逃生行为的动力学模型。

（2）经济金融行为建模与分析。中国 IGEM 模型，分析能源、环境、贸易、税收等对经济增长的影响；基于极值理论的货币危机识别模型与方法；多变量极

值模型研究；金融市场临界行为建模和突变的预警研究；金融市场的非线性复杂行为研究；基于行为的具有隐含期权的保险产品定价研究、公司投资行为研究、公司并购行为研究、公司融资行为研究、公司资本结构研究等。

(3) 生产管理行为建模与分析。On-line 计划与重调度；生产计划执行中的应急管理 with 干扰管理；基于需求信息管理的供应链稳定性研究；基于参与和体验的制造和服务混合系统管理研究。

(4) 统计与系统管理理论和技术。符号数据的多元分析代数理论体系；成分数据多元分析的整体建模技术；函数数据的多元分析建模方法；Hilbert 空间的多元分析方法；有关应用案例。

本创新群体的研究成果主要以论文形式发表，近年来在 *Transportation Research (Part B, Part E)*、*Operations Research Letters*、*Journal of Advanced Transportation*、*European Journal of Operational Research*、*Physical Review E*、*Physica A*、*Network and Spatial Economics*、*Review of Income and Wealth*、*Production Planning and Control*、*Inter J Production Economics*、*Computer & Industrial Engineering*、*Computer & Operations Research*、*Supply Chain Management: An International Journal*、*Quantitative Finance*、*International Journal of Finance & Economics*，以及《经济研究》、《经济学季刊》、《管理科学学报》等刊物上发表了大量学术论文。论文毕竟受篇幅限制，难以详细描述研究过程和全部结果，而书是最系统的发表方式之一，在科学出版社的大力支持下，我们将创新群体的研究成果以《复杂社会经济行为建模与管理研究丛书》的形式出版，让更多的读者受益。

本丛书的作者是本创新群体成员及其合作者，每本书重点研究一个问题，要求体现新、深、精，这也是本创新群体的一贯作风，即求真、务实、扎实。我们愿意将自己的成果奉献给大家，在共同分享研究心得的同时，更希望得到广大读者的宝贵意见，为繁荣学术、服务社会作出新的贡献。

黄海军

2011 年 5 月 3 日

前 言

随着城市化的发展和生活水平的不断提高,越来越多的人成为“有车一族”。汽车在为出行者带来舒适和便捷的同时,也诱发了各种交通问题。出行难、行路难、出行消耗时间不断增加等问题变得日益突出,堵车成为世界各国的一种普遍社会现象,也成为时下最热门的话题之一。

交通拥堵对社会生活最直接的影响是增加了居民的出行时间和成本。出行成本的增加不仅影响人们的工作效率,而且也会抑制人们的日常活动,城市活力大打折扣,居民的生活质量也随之下降。交通拥堵还将导致车辆只能在低速状态行驶,频繁停车和启动不仅增加汽车的能源消耗,而且也增加尾气排放量,这将引发城市生存环境的持续恶化。根据伦敦 20 世纪 90 年代的检测报告,大气中 74% 的氮氧化物来自汽车尾气排放。每年因交通拥堵带来的经济损失更加触目惊心。因此,如何有效缓解交通拥堵问题已成为摆在世界各国政府及城市建设决策者面前的一道难题。

缓解交通拥堵的传统做法是加大基础设施投入,即通过拓展道路宽度、增加道路里程、疏通路网节点、加大路网密度来提高路网通行能力,然而,受制于道路和土地资源的稀缺性,这一做法并不具有持续性。因此,在改善城市交通“硬件”(交通基础设施)的同时,也要考虑“软件”(运营管理水平)的作用,即如何在现有设施的条件下最大限度提高交通系统的效率。相对于传统的适应需求的被动管理,交通需求管理是一种主动式管理,其实质是通过交通政策的导向作用,运用一定技术,通过收费、信息诱导等手段影响交通参与者对交通方式、时间、地点、路线等的选择,使需求时间、空间均衡化,以保持一定的供需平衡。

众所周知,交通行为是人在一定时空中由某些共同行为构成的一个微观环境。人的知觉、思维、记忆、动机、态度、情绪等内在心理活动都会在这一微观环境中体现出来。长期以来,传统经济学一直以“理性人”为假设前提,通过一个个精密的数学模型构筑起相应的理论体系。直到 20 世纪 70 年代,Kahneman 和 Tversky 从人自身的心理特质、行为特征出发,对行为经济学进行了广泛而系统的研究。“前景理论”把心理学研究和经济学研究有效地结合起来,揭示了在

不确定性条件下的决策机制,相对于“期望效用理论”,“前景理论”向精确描述不确定条件下的个人行为迈出了重要一步,因此,“前景理论”为出行者决策建模奠定了理论基础。

本书将心理认知因素引入研究框架,考察了出行者在面对不确定的出行环境时,如何比较不同的备选方案,并最终作出自己的选择;通过引入“前景理论”,考虑参考点效应,将传统的出行成本概念转化为感知价值,研究了不同背景下的网络均衡模型;对存在出行延误的两模式问题中的方式划分和出行时间均衡问题进行了探讨。本书的创新点主要体现在如下几个方面:

首先,假设出行者具有异质的参考点,针对两种情况(一是各类用户的风险偏好参数依赖于其参考点;二是各类用户的信息装置市场渗透率依赖于其参考点)分别建立了相应的均衡模型,研究了参考点具有异质性情形下的出行行为,并考察了各种交通政策对各类出行者感知价值的影响。在建设、经营和移交(简称 BOT)模式中,假设出行者具有异质的时间价值(简称 VOT),基于累积前景理论(简称 CPT),构建了多用户网络均衡模型并设计了求解算法。通过数值算例,在一个具有普通道路和 BOT 道路的网络中,进行了参数敏感性分析,讨论了各类用户的收益分配问题。

其次,假设出行时间是随机变量,服从某个连续分布函数,那么对应的到达时间也是随机变量。在 CPT 框架下,提出到达时间感知价值和累积感知价值这两个新的概念。其中,累积感知价值是由出行收益、出行负效用和到达时间感知价值这三个部分构成的,并分别针对静态问题和动态问题,构建了网络均衡模型。出行者通过最大化自己的累积感知价值进行路径选择或出发时间选择。在均衡状态下,没有人能够通过单方面改变自己的选择而使结果变得更好。算例结果表明,在 CPT 框架下获得的出发模式确实不同于以往模型,它能够更加真实地再现现实情景。

再次,将研究内容进一步延伸到两模式问题中,假设道路网络存在两种平行的出行模式,即地铁模式和公路模式。公路上存在随机延误,地铁上存在拥挤成本。出行者将通过权衡两种方式的期望出行成本,进行方式划分和出发时间选择,以最终达到均衡状态。为获得直观的认识,笔者借助一个数值算例,对各类参数进行了敏感性分析。

最后,我们还分别在“期望效用理论”和“前景理论”的基础上对比分析了出行者进行路径选择的结果,并通过问卷调查的方式,进一步论证了“前景理论”对研究我国出行者出行决策行为的适用性。

本书适合交通运输经济学、城市经济学、交通运输规划与管理、运筹学、系统科学与系统工程、行为经济学等专业的高年级本科生、研究生，以及相关学科的教师阅读，也可供从事交通运输规划与管理的工作人员参考。

本书的出版得到国家自然科学基金委员会、国家重点基础研究发展计划（973 计划）的支持。另外，要感谢参考文献的提供者，以及参与研究的所有人员，特别是杨茜提供的实证内容，为本书添色不少。

田丽君 黄海军

2011 年 12 月 16 日

目 录

总序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 基于风险认知的出行行为研究的重要性	1
1.1.1 城市交通问题及对策	1
1.1.2 不确定环境下的交通行为与交通拥堵关系	3
1.2 国内外关于出行行为和 risk 认知研究的概述	3
1.2.1 国内外研究概况	3
1.2.2 基于 risk 认知的出行行为研究所遇到的问题	12
1.3 本书的主要研究问题和思路	13
1.3.1 研究目标	13
1.3.2 研究内容	13
第 2 章 具有异质参考点的多用户网络均衡模型	16
2.1 基于 CPT 的感知价值	16
2.1.1 前景理论和 CPT	16
2.1.2 基于 CPT 的感知价值的推导	18
2.2 用户异质性定义	19
2.3 基于 CPT 的多用户网络均衡模型	20
2.4 数值算例	21
2.5 本章小结	28
第 3 章 具有内生市场渗透率的混合多用户网络均衡模型	29
3.1 基于 CPT 的混合多用户网络均衡模型	29
3.1.1 用户异质性定义	29
3.1.2 网络均衡模型	30
3.2 求解算法	31
3.3 数值算例	32

3.4	本章小结	37
第4章	前景理论框架下 BOT 模式中的收益分配	38
4.1	基于感知价值的多用户网络均衡模型	38
4.2	求解算法	40
4.3	网络模型	41
4.4	数值结果讨论	43
4.5	本章小结	49
第5章	考虑出行者到达时间感知价值的网络均衡模型	50
5.1	符号定义和模型描述	50
5.1.1	符号定义	50
5.1.2	累积感知价值	51
5.2	网络均衡模型	55
5.2.1	均衡解的存在性	55
5.2.2	均衡解的唯一性分析	56
5.3	求解算法	56
5.4	数值算例	57
5.4.1	两条路段的网络	57
5.4.2	五条路段的网络	59
5.5	本章小结	61
第6章	基于累积感知价值的动态用户均衡模型	62
6.1	符号定义和基本假设	62
6.2	路段通行能力退化情形下的路段和路径出行时间	64
6.3	基于 CPV 的动态用户均衡模型	67
6.3.1	CPV	67
6.3.2	基于 CPV 的动态用户均衡条件	68
6.3.3	均衡解的存在性	69
6.3.4	求解算法	69
6.4	数值算例	70
6.4.1	不考虑通行能力退化的情形	70
6.4.2	考虑通行能力退化的情形	72
6.5	本章小结	73

第 7 章 存在出行风险的方式划分和出行时间安排均衡模型	74
7.1 模型构建	74
7.2 小汽车模式	75
7.3 地铁模式	77
7.4 均衡解的性质	79
7.5 数值算例	80
7.6 本章小结	86
第 8 章 路径选择理论结果和实证数据分析	88
8.1 路径选择成本函数构建	89
8.1.1 基于 EU 理论的出行成本函数	89
8.1.2 基于前景理论的出行成本函数	89
8.2 数值算例	90
8.2.1 场景一下的比较结果	91
8.2.2 场景二下的比较结果	92
8.2.3 场景三下的比较结果	92
8.3 问卷调查	94
8.3.1 调查目的	94
8.3.2 调查对象、资料收集、分析方法	95
8.3.3 调查结果分析	95
8.4 时间价值对路径选择的影响	96
8.4.1 不考虑时间价值对均衡结果的影响	97
8.4.2 考虑时间价值对均衡结果的影响	99
8.5 本章小结	101
第 9 章 结论与展望	103
9.1 主要研究结论	103
9.2 未来研究展望	105
参考文献	107
附录 出行时间分布函数已知的情况下 ATPV 的推导过程	119

第 1 章 绪 论

1.1 基于风险认知的出行行为研究的重要性

1.1.1 城市交通问题及对策

作为城市繁荣、有序和快速发展的基本条件，城市交通已经成为人们生活中必不可少的一部分。随着城市化、现代化、机动化进程的加快，城市不断延伸，人们的活动范围随之扩大，对机动车的依赖日益增强，行车难、停车难等问题日益突显，这些对城市交通管理造成的冲击和压力越来越大。交通拥堵、安全事故、环境污染和能源短缺等交通问题，已成为制约大中城市可持续发展的瓶颈，严重影响着城市居民的生活质量。据统计，截至 2011 年 2 月，全国机动车保有量、机动车驾驶人数量双双突破 2.1 亿，私人汽车保有量较去年同期增长 25.3%（锦龙，2011）。在全国 667 个城市中，约有 2/3 的城市交通在“高峰”时段出现拥堵。在我国一些大城市的市区，机动车平均时速已经下降到 12 千米，而在市中心，机动车时速更是只有 8~10 千米。普通自行车时速约为 15 千米，开车不如骑车快，这已不是笑话，而是生活中的真实一幕，也给城市居民带来了无尽的烦恼。与此相伴的是，因交通拥堵和管理问题，中国 15 座城市每天损失近 10 亿元的财富（戴蕾蕾，2010）。

以北京为例，最新数据显示，北京机动车保有量已近 490 万辆，预计 2011 年年底前北京将迈入 500 万辆机动车时代。抛开管制、节假日、天气等特殊情况，日常拥堵已经成为北京市民生活的常态。每天堵车时间也由 2008 年的 3.5 小时增至现在的 5 小时，居全国之首。例如，2010 年 9 月 17 日，多种原因导致北京绝大部分环线道路、主要大街、交通枢纽出现不同程度的拥堵，市区晚高峰拥堵路段峰值达到创纪录的 143 条，电子拥堵路段图几乎全线“飘红”。为了解日益严重的交通拥堵问题，政府陆续出台一系列的疏堵措施，如一再延期的限行政策、提高热点地带的停车费、错峰上下班等。但从实际效果来看，这些限制性的措施在刚刚施行时似乎有一点作用，然而时间一长，拥堵依旧。面对日渐恶化的交通拥堵局面，2010 年 12 月 23 日，北京市宣布实施小客车数量调控措施，以摇号方式分配车辆指标以控制小汽车增长速度。同时，也积极加大轨道交通建

设力度,平衡多种交通运输方式。

就北京而言,主要经历了三个阶段的治堵历程,从上世纪末以“大修大建”为主导思路的第一轮治堵方案开始,到2004年转向为大规模增加轨道交通建设与公交服务供给的第二轮治堵措施,再到2010年12月13日,《北京市关于进一步推进首都交通科学发展加大力度缓解交通拥堵工作的意见(征求意见稿)》公开征求意见,标志着北京开始了历史上的第三轮治堵行动。从宏观角度分析,迅速增长的交通需求与有限的道路供给之间的矛盾是导致交通拥堵的内在原因;从微观角度分析,交通管理水平不高,不能合理有效地疏导交通流量是导致交通拥堵的直接原因。多年的实践经验表明,受制于土地等不可再生因素的影响,单纯依靠增加交通供给或限制道路使用的传统思路只是治标不治本的办法,不能从根本上解决交通拥堵问题。众多专家认为,要让城市交通拥堵问题得到真正解决,根本措施还在于发展完善的公共交通系统,同时改善自行车和步行等非机动车的出行环境,为相关利益受损者提供更多的出行选择。如果我们国家的公交出行水平能够达到像伦敦一样的水平,即70%以上的水平,那么城市的拥堵状况就会得到相应的缓解。然而,公共交通的发展是一个长远规划,需要政策的大力支持,其发展是循序渐进的。目前很多城市公交服务尚未跟上,公交线网的建设还没有达到相应水平。就现阶段而言,对现有道路通行能力进行挖潜和科学管理是更为直接的方式。众所周知,城市交通系统是一个由路、车、人组成的复杂大系统,具有复杂性、动态性和随机性。那么,建立能够描述现实的数学模型,对于正确理解出行者的行为特征,挖掘有效的交通管理措施具有非常重要的现实意义。

近年来,许多不同领域的研究者都投入到解决交通拥堵问题的研究之中,其中包括数学、物理学、经济学和工程方面的专家。他们从不同的角度入手,建立了多种数学模型。事实上,交通网络属于载流网络,网络上的交通流状况会受到许多主客观因素的影响,如雨雪天气、道路维护、交通事故及其他突发事件等,这些因素造成出行环境的不确定性,也是恶性交通拥堵的罪魁祸首(Iida et al., 2003)。交通问题之所以棘手,根本原因就在于它的不确定性。不论是交通规划、交通管理与控制,还是对交通问题的需求分析或交通问题的工程设计,都避不开不确定性这一话题。一般来说,造成交通网络不确定性的因素可以归结为交通供给的不确定性和交通需求的不确定性。由于各种主客观因素的影响,出行者通常面对的出行环境是不确定的,这就意味着出行者不仅要把握各种确定因素,而且还必须结合出行目的和自身的风险认知,对各种潜在的风险因素进行判断,在此基础上作出最终的出行决策。这就要求在建模过程中必须考虑交通环境的不确定性和出行者的风险认知,忽略这些因素,将会使探讨的问题变得面目全非,最终

背离我们的初衷。近几年交通领域对于不确定性的研究刚刚起步。一方面是因为交通网络可靠性的重要性日益突出,而可靠性研究的基础是不确定性条件下的用户出行路径选择行为。另一方面,智能交通系统(ITS)的发展也迫切需要建立更加符合现实的出行模型。随着社会经济的发展和科学技术的进步,借助先进的旅行者信息系统(advanced traveler information system, ATIS)发布实时交通信息,从而诱导出行行为已经非常普遍。因此,我们需要考虑各种因素,不断完善和修正模型,准确掌握人们的出行规律,正确指导实践工作,为管理部门提供重要的理论参考和决策依据。

1.1.2 不确定环境下的交通行为与交通拥堵关系

交通系统是一个存在大量不确定性因素的复杂系统,为了求解和分析方便,人们往往习惯于将它当做确定性问题来处理,显而易见,其理论结果与现实情景往往存在较大的差距,因此并不能实现直接用于指导现实的预期目标。作为实现城市交通出行效率的重要内容和手段,研究不确定情景下交通个体基于风险认知的出行行为对于理解交通拥堵的形成机理,从社会经济可持续发展的角度解决交通拥堵等诸多社会问题具有极强的社会背景和应用价值。

本书将以数学规划理论、交通均衡原理及心理学、行为科学、离散选择理论等相关知识为基础,深入分析不确定出行环境下的出行行为,构建基于风险认知的网络均衡模型,科学地“诊治”城市交通“病”,从本质上发现和解释交通拥挤的产生原因和规律,从而进一步揭示城市交通网络动态特性和演变机理,为制定科学的城市交通规划管理手段和发展先进的交通管理与控制技术建言献策。

1.2 国内外关于出行行为和风险认知研究的概述

1.2.1 国内外研究概况

1. 交通网络均衡配流研究概述

经济学家 Knight (1924) 最早应用“均衡”一词来表达交通流形态。在网络均衡配流的文献中,最著名的路径选择理论就是 Wardrop (1952) 第一原则(用户均衡原则)和 Wardrop (1952) 第二原则(系统最优原则)。用户均衡(user equilibrium, UE)状态,即每位出行者从自身利益出发,力图寻找具有最小阻抗的路径,出行者之间互不协调,经过不断的内部调整所,达成的一种均衡状态。此时,对于任何一个交通个体来说,都不能通过单方面改变自己的选择来降低其出行成本。然而这种状态所对应的系统总成本却不一定最小,从整个交通

系统控制者的角度来说,更希望使系统的总成本最小,系统最优(system optimum)就是这样一种状态。它假设所有交通个体都能接受统一的调度和指挥,使得最终形成的交通状态所对应的系统总成本最小。尽管 Wardrop 提出了用户均衡和系统最优这两个均衡概念,但并没有给出具体的数学模型,直到 Beckmann 等(1956)实现的著名的“Beckmann 魔鬼变换”,将 UE 均衡问题转化为一个等价的数学规划模型,才使得交通网络均衡的数学分析成为可能。之后,英国学者 Smith(1979)又将交通分配问题以有限维的变分不等式形式给出,并详细讨论了 UE 解的存在性和唯一性。Dafermos(1980, 1982)进一步将其扩展到具有可变需求的交通分配问题。

上述提到的 UE 均衡,是假设所有的交通个体都是完全理性的,能够随时掌握整个网络的客观信息,并能精确计算出每条路径的阻抗,从而可以准确无误地作出对自己最有利的择路决策。很显然,这一假设过于苛刻,在过去的几十年间,通过逐步放松假设,学者们做了大量的扩展工作(Leurent, 1998)。考虑到交通个体对出行时间具有理解误差,Daganzo 等(1977)首次提出了基于 Probit 的随机用户均衡(stochastic user equilibrium, SUE)的概念。在 SUE 均衡状态,所有路径的理解出行成本都是相等的,没有任何一个交通个体可以通过单方面改变自己的出行路径来降低自己的理解出行成本(Watling, 2002)。假设理解误差函数服从 Gumbel 概率分布,Fisk(1980)进一步给出了与之等价的 Logit 数学规划模型。

此外,传统静态交通分配模型主要着眼于对交通流的静态描述,这类模型只适用于长期的交通规划,不能直接用于动态交通规划和管理(黄海军, 1994; Heydecker et al., 2005; Jauffred et al., 1996; Peeta, et al., 2001)。动态交通配流(dynamic traffic assignment)模型通过引入时间维度,能够估计和预测给定交通网络在短时间内的动态交通流特性,克服了静态模型的缺陷(Ben-akiva et al., 1991; Lim et al., 2005; Nie et al., 2010; Chen et al., 2001)。DTA 问题是交通科学中最具挑战性的领域之一,这一方面是由于交通流动态特性(如交通量在时间和空间上的移动和演进)的复杂性,另一方面是由于对交通行为(如出行者的路径选择)建模的困难性(Luque et al., 1980)。目前用于研究 DTA 的建模理论和方法主要有五大类:瓶颈模型、数学规划、最优控制理论、变分不等式、计算机模拟。

最早考虑时间维的动态交通模型是 1969 年由诺贝尔经济学奖得主 Vickrey(1969)提出的著名的瓶颈模型(bottleneck model),他运用确定性排队理论建立了第一个具有内生出发时间的高峰期动态均衡模型,通勤者的成本由行驶时间成本、瓶颈处排队等待时间成本和延误成本组成。瓶颈模型出现以后,引发了一