



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY

福州大学哲学社会科学文库

考虑个体微观特征的 通勤行为建模与仿真

田丽君/著



科学出版社

福州大学哲学社会科学学术著作出版资助计划项目
福州大学哲学社会科学文库

考虑个体微观特征的 通勤行为建模与仿真

田丽君 著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

通勤出行是城市居民最基本和最重要的行为之一。如何清晰地刻画出行个体的路径选择决策行为和交通流量的动态调整过程一直都是交通领域关注的研究热点。作为实现城市日常出行高效有序的重要内容和手段,研究考虑个体微观特征的通勤行为有助于理解城市交通拥堵的形成机理,提出行之有效的解决措施和政策建议。本书分为建模篇和仿真篇,围绕个体微观特征对通勤行为的影响,通过模型构建和分析、仿真等方法,在多个场景下讨论个体微观特征在城市交通系统流量演化和均衡过程中所扮演的角色。

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、系统科学与系统工程、行为经济学等专业领域的高年级本科生、研究生、工程师和教师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

考虑个体微观特征的通勤行为建模与仿真 / 田丽君著. —北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-055016-3

I. ①考… II. ①田… III. ①城市交通-交通运输管理-系统建模
②城市交通-交通运输管理-仿真 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 264142 号

责任编辑: 李 莉 / 责任校对: 贾伟娟

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 11

字数: 220 000

定价: 72.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

田丽君，女，1981 年生于山西。2003 年本科毕业于长沙理工大学汽车与机电工程学院交通运输专业，2006 年考入北京航空航天大学经济管理学院企业管理专业，攻读硕士学位，师从黄海军教授从事道路交通流仿真研究。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从事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。2011 年在福州大学参加工作至今，现为福州大学经济与管理学院副教授。2010 年获得教育部设立的首届“博士研究生学术新人奖”，2014 年入选“福建省高校杰出青年科研人才培养计划”，并受聘为福州大学“旗山学者”。2015 年入选“福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划”，2016 年获得福建省杰出青年科学基金。近 5 年承担过 2 项国家自然科学基金和 1 项教育部人文社会科学基金的研究项目。

研究领域：交通运输系统建模与分析、交通行为经济学、道路交通流仿真、交通政策设计与分析。截至 2017 年 5 月，在国内外重要刊物上共发表学术期刊论文 23 篇，包括 *European Journal of Operational Research*、*Transportation Research Part E*、*Network and Spatial Economics*、*International Journal of Systems Science*、《管理科学学报》、《系统工程理论与实践》、《交通运输系统工程与信息》等运筹学与交通管理领域的权威杂志。2012 年在科学出版社出版论著 1 部。

前言

随着城市化进程的加剧和机动车数量的迅速增加，交通运输压力越来越大，城市道路拥堵也越来越严重，逐渐成为经济社会发展的瓶颈和备受关注的世界性问题，几乎所有的国家都在不同程度地经受着这一问题的困扰，我国也不例外。

近 20 年来，我国城市获得了前所未有的发展，然而交通基础设施增长速度明显低于机动车增长速度，经济的高速发展和城市化进程的加快，使我国城市交通基础设施承受着巨大压力，许多城市道路车辆通行时速不足 20 千米。日益严重的交通问题已经影响到城市经济建设和社会发展的运行效率，给人们的生活和工作带来了极大的不便和损害。交通堵塞，事故频发，成了众所周知的“都市顽症”。拥挤和阻塞在占用和消耗大量土地、燃油等资源的同时，不但没有完全满足交通需求，而且导致汽车尾气排放量剧增，不仅造成巨大经济损失，而且给环境带来恶劣影响。交通堵塞已成为衡量一个国家交通运输系统是否现代化、交通管理是否先进和现代化程度的重要标准，也是衡量市民生活水平高低的重要标准。加快现代化步伐的城市如何为自己疏通血脉是我们面临的历史性难题。21 世纪以来，如何解决城市道路交通堵塞及相应的环境污染问题，已受到众多科研工作者的关注，如何最大限度地利用现有的交通资源，以科学理论来指导交通规划、交通控制和交通管理是交通工作者的共同研究目标。

本书分为建模篇和仿真篇，考虑出行个体的微观特征。建模篇着重探讨合乘、停车换乘（park and ride, P&R）以及拥挤收费等不同情景下，微观个体如何比较不同的备选方案，并最终作出自己的选择，在此基础上考察出行个体的路径选择行为以及系统均衡的演化；仿真篇则是运用 NS 元胞自动机模型，针对不同的交通路网和出行背景，深入剖析出行个体的动态出行决策行为，揭示人们的路径选择规律和交通拥堵的本质。本书的创新点主要体现在如下方面。

第一，以累积前景理论（cumulative prospect theory, CPT）为框架，在具有 HOV（high occupancy vehicle，车辆高占用率）车道及 P&R 交通走廊的交通路网中，分别构建考虑个体微观特征的出行决策模型，讨论停车收费、风险管理等交通政策对通勤者感知价值的提升作用，并就通勤个体偏好等微观特征参数进行敏

感性分析；此外，还探讨了用区间数表示通勤者对出行时间属性具有内在模糊感知的可行性，结合参考点依赖特性构建了累积前景理论决策框架下的择路模型，并通过出行场景进一步验证了理论模型的有效性。

第二，引入基于试错法（trial and error）的动态拥挤收费，将时间和费用作为两个维度分开考虑，提出了基于累积前景理论考虑时间和费用双参考点的动态网络均衡模型。当考虑出行者路径偏好这一微观特征时，以 Dogit 模型为基础，分析了个体路径偏好对日常路径流量演化轨迹的影响，对比了三种类型的感知出行时间学习模式（指数平滑学习更新以及峰终定理学习更新）下的不同选择结果，并探讨了拥挤收费下的择路偏好和流量演化，以及不同时间价值（value of time, VOT）用户的路径选择差异。

第三，在一个含重叠路段的交通路网中，借助元胞自动机仿真方法刻画微观个体的驾驶行为，研究信息反馈策略对通勤个体路径选择行为和系统特性的影响。在无信号控制方式下，对比分析时间反馈策略和平均速度反馈策略在提高系统利用效率和减少个体出行时间方面的效果；在信号控制方式下，进一步对四种反馈策略在提高系统利用效率和保证用户公平性方面的效果进行探讨和研究。此外，在一个具有 HOV 车道的交通路网中，模拟了信息反馈策略对出行者换道行为的影响。

第四，采用一个由两条路段构成的简单网络，利用元胞自动机模拟仿真方法，假设有装置通勤者与无装置通勤者分别采用不同的路径更新规则，在时间反馈策略和速度反馈策略下研究了 ATIS（advanced traveler information systems，先进的旅行者信息系统）市场渗透率、出行需求量和历史经验依赖性等因素对有装置通勤者与无装置通勤者出行效率的影响。

第五，考虑车辆为智能实体，细致地分析公交停靠站附近的微观停靠和换道行为，在一个公交停靠站和信号交叉口组合配置的双车道情景下，模拟分析交通需求和公交车比例等因素对整个交通系统的影响。

本书的出版得益于国家自然科学基金（71671044；71301028）、福州大学哲学社会科学学术著作出版基金和福州大学管理科学与工程高水平大学建设经费的资助，特此表示感谢！感谢我的硕士生吕成锐和江晓岚在本书建模部分所做的工作，感谢我的恩师黄海军教授和师兄刘天亮副教授对本书仿真部分的贡献。感谢所有参考文献的作者，感谢曾经或正在与我合作的学者！

田丽君

2017年6月23日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 出行行为研究的必要性	1
1.2 国内外关于交通均衡与出行行为的研究概述	3
1.3 本书的主要研究问题和思路	25
第一篇 建 模	
第 2 章 基于 CPT 的合乘行为建模与分析	31
2.1 合乘与 HOV 车道	32
2.2 累积前景理论	32
2.3 基于 CPT 考虑 HOV 车道的合乘出行模型	36
2.4 均衡结果与参数敏感性分析	38
2.5 本章小结	46
第 3 章 基于 CPT 的停车换乘行为建模与分析	47
3.1 基于 CPT 考虑停车换乘出行的模型	48
3.2 模型求解算法	52
3.3 均衡结果与参数敏感性分析	53
3.4 本章小结	59
第 4 章 考虑出行时间区间和参考点的择路模型	60
4.1 备选路径的累积前景值	60
4.2 最优路径选择与分析	66
4.3 本章小结	71
第 5 章 考虑动态双参考点的多用户网络均衡与演化	72
5.1 基于动态拥挤收费和双参考点的路径感知价值	72
5.2 day-to-day 多用户网络均衡以及求解算法	76
5.3 算例分析	78
5.4 本章小结	83

第 6 章 基于 Dogit 模型考虑路径偏好的日常出行行为	84
6.1 基于 Dogit 模型的出行个体择路机制	85
6.2 感知出行时间学习模式	86
6.3 个体路径偏好动态更新规则	88
6.4 日常动态拥挤收费设计	88
6.5 算例分析	89
6.6 本章小结	96
第二篇 仿 真	
第 7 章 信息反馈策略对个体行为及系统特性影响研究	101
7.1 模型假设与信息反馈策略	102
7.2 无信号控制方式下的仿真结果	106
7.3 信号控制方式下的仿真结果	112
7.4 本章小结	118
第 8 章 信息反馈策略对出行者微观换道行为影响研究	119
8.1 网络模型	120
8.2 动态收费策略和信息反馈策略	122
8.3 仿真结果	124
8.4 本章小结	128
第 9 章 基于个体学习和信息作用的日常出行决策	129
9.1 网络模型	130
9.2 路径更新规则	131
9.3 仿真结果	132
9.4 本章小结	137
第 10 章 考虑局部微观停靠行为的交通流模拟研究	138
10.1 模型	139
10.2 车辆运行、换道和停靠规则	139
10.3 模拟结果	141
10.4 本章小结	146
第 11 章 结论与展望	147
11.1 主要研究结论	147
11.2 研究展望	150
参考文献	152

第1章 绪 论

1.1 出行行为研究的必要性

交通出行问题事关民生利益。随着居民收入水平的提高,城市小汽车保有量和使用量疯狂拔高,不断攀升的城市交通需求无法得到满足,加上天气及事故等不确定因素的影响,交通拥堵问题日益突出。北京、广州和西安因交通拥挤导致的人均经济损失更是分别高达8 717元、7 207元和6 960元,如图1-1所示,国内一线城市因交通拥挤导致的人均经济损失大幅高于二线主要城市,损失数字触目惊心^①。同时,道路拥挤在一定程度上降低了行驶车速,甚至使整个高速公路系统陷入“瘫痪”状态,车辆“寸步难行”。根据高德地图发布的《2016 年度中国主要城市交通分析报告》,全国最拥堵城市前十位如图1-2所示。前四名的城市:济南、哈尔滨、北京、重庆的高峰拥堵延时系数(高峰拥堵时期所花费的时间与畅通时期所花费的时间的比值)都超过了2,即这四个城市的上班族的日常通勤需要花费畅通情形下两倍多的时间。

对于缓解拥挤,政府部门一直以来都提倡供给和需求两方面双管齐下。在交通供给方面的解决方案主要是通过修建和拓宽道路来提高道路通行能力,但由于早期规划的城市土地面积以及高昂的经济成本的制约,供给并不能无限增加。而且,增加供给会反向刺激需求的增长,长期“疗效”一般。从交通需求管理着手,通过开设HOV车道,提供P&R设施和实行拥挤收费等手段来“治堵”,在国外许多城市已经取得了相当成功的经验,而在我国则尚处于起步阶段。最近几年,北京、上海、广州等大城市也鼓励居民P&R出行,2014年12月,广州市交通委员会公示将在未来5年规划提供25个P&R停车场,累计有10 000个停车位。2014年5月,无锡市开通了国内首条HOV车道,取得了良好的治堵效

^① 仅统计10个大城市:北京、广州、西安、深圳、上海、重庆、武汉、成都、大连、青岛;拥堵损失=各城市平均时薪×因拥堵造成的延时×人均全年通勤次数(按每月22个工作日,每个工作日早晚高峰通勤1次,每次通勤平均时间为1小时计算)。



图 1-1 交通拥挤人均经济损失城市排行

资料来源:滴滴媒体研究院和第一财经商业数据中心(2017)

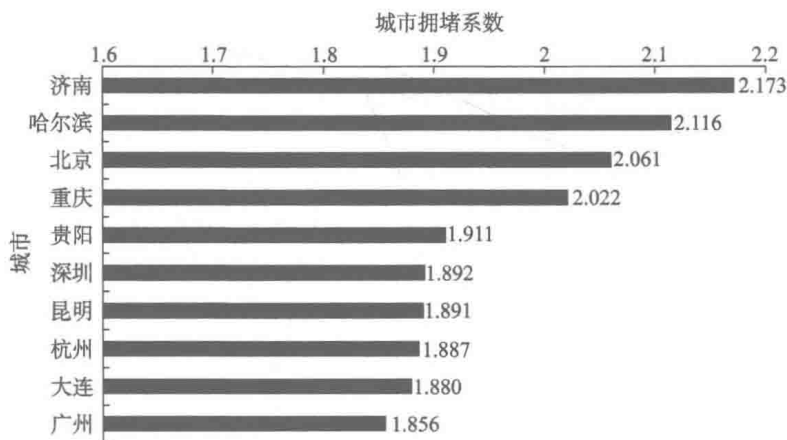


图 1-2 城市拥堵系数排名

果;2016年,深圳市也相继开通了HOV车道。而拥挤收费自2010年在北京征询民意以来,在2016年的两会中再一次引发了热议。

由于雨雪天气、道路施工、意外事故以及其他突发事件等客观因素,交通系统存在极大的不确定性。面对不确定的出行环境,作为交通需求主体的出行者需要把握各类交通信息并根据个人经验,不断地学习和更新对路况的感知,从而进行路径选择。在此过程中,个体微观特征,如出行者的偏好习惯、风险态度和价值衡量等,在很大程度上影响其最终的出行选择,即出行者决策行为亦存在不确定性。交通系统供需两方面不确定性的存在给交通管理部门“治堵”和引导出行者合理出行带来了极大的挑战。因此,为有效解决城市交通问题,需要研究影响出行方式或路径选择的各类因素及实现路径,把握出行者的决策规律,不断地修正和完善模型,才能为管理部门提供理论支持和决策依据。

1.2 国内外关于交通均衡与出行行为的研究概述

1.2.1 国内外研究概况

1. 交通系统均衡研究

出行者个体大量涌现形成特定的交通流,经长时间演化将达到某种系统均衡状态。交通均衡理论的研究是交通管理与控制的重要环节。1952年, Wardrop 提出经典的均衡理论,认为交通系统均衡分为两种:用户均衡 (user equilibrium, UM) 和系统均衡。出行者之间没有协议,各自最小化出行成本或最大化出行效用,当没有人能单方面通过改变路径选择使个人变得“更好”,即达到用户均衡时,并不一定是系统最优,即总成本最小化。系统均衡表示总的出行成本最小或效用最大,前提是所有出行者之间互相合作。

1) 确定性交通系统均衡和随机性交通系统均衡

确定性均衡假定交通需求和交通供给是确定的常数,并假设出行者在路径选择中,完全了解当前的交通状态,能精确计算出行成本,根据效用最大化原则作出决策。显然,这与现实情况不符。Daganzo 和 Sheffi (1977) 首次提出随机用户均衡的概念,将出行者的认知误差引入均衡模型。解决随机均衡问题,常用的方法有 Logit 模型和 Probit 模型,两者都假定出行者选择某一出行方案的随机效用可表示为确定效用与随机误差项之和,当随机误差项服从多维正态分布时推导出的是 Probit 模型,当随机误差项服从 Gumbel 分布时推导出的是 Logit 模型。

Gaudry 和 Dagenais (1979) 在 MNL 模型 (Multinomial Logit Model, 多项 Logit 模型) 的基础上进一步提出 Dogit 模型,将选择分为必需选择集合和自由选择集合两部分,以消费者市场为例,必需选择集合代表收入中支付生活必需品的部分,而自由选择集合代表扣除生活必需品后的可支配收入部分,选择概率中有一部分是“强制性”的。模型中增加的参数可以解释为偏好、忠诚度等,基于此构建的个体决策模型,有利于分析随机用户的行为特征对决策行为的影响。

2) 静态交通系统均衡和动态交通系统均衡

静态交通系统均衡是交通流经过长时间演化后达到的相对稳定的状态,注重交通配流的结果。1956年, Beckmann 等提出非线性交通分配数学规划模型。Smith (1979a) 和 Dafermos (1980) 建立了交通均衡问题等价变分不等式,并应

用于随机用户均衡模型。Yang 和 Huang (2004) 研究了不同时间价值的出行者, 在时间和费用双项准则下的用户网络均衡和交通系统网络均衡问题。以上都是建立在静态路径选择均衡原理的基础之上的。

随着研究的深入, 形成均衡的过程也逐渐受到关注。实际上, 出行者是逐日调整路径选择, 渐渐演化到某一均衡状态。即使达到某一均衡状态, 由于路段交通属性变化, 交通管理与控制政策改变, 以及天气事故等不确定因素的影响, 也会扰动原有均衡, 逐渐达到另一均衡状态。因此, 考虑交通均衡演化的 day-to-day 动态性十分必要。Smith (1984) 基于 Lyapunov 稳定性, 以比例调整过程 (proportional-switch adjustment process) 描述交通流演化, 将同一起讫点的出行者按比例分配到费用较低的路径上, 调整比例与路径费用绝对值差有关。Nagurney 和 Zhang (1997) 提出投影动态系统 (projected dynamical system), 将动态系统中的连续调整过程转化为离散问题, 并用欧拉方程求解。Yang 和 Zhang (2009) 深入拓展 Zhang 等 (2001) 关于 day-to-day 路段均衡的研究, 提出了基于路段流量的有限理性调整过程模型 (rational behavior adjustment process, RBAP), 表示路段交通流相较于路径交通流更易观察, 且绝大多数交通流动态演化模型都是其模型的特例。He 等 (2010) 指出了基于路径流量的动态交通分配模型的两个缺点: 路径重叠和路径初始流量不可识别性。为避免以上问题, 他们提出了基于路段流量的动态交通分配模型, 表明路段流量随着成本改变, 满足古典 Wardrop 均衡条件。Guo 等 (2013) 基于路段流量变化, 提出离散的有限理性调整过程, 并证明了演化的收敛性、均衡唯一性等。杨文娟等 (2015) 考虑到出行者的决策更多考虑自身的满意度, 具有随机性, 提出了基于随机用户均衡的交通流动态演化模型, 并分析了模型的收敛性、稳定性和唯一性等特性。

2. 出行行为特征与经验学习研究现状

影响路径选择最关键的因素是出行行驶时间, 那么对出行者的感知时间学习机制的研究就至关重要。学习是人们总结过去的经验, 结合当前的信息作出决策的过程。在日常通勤路径选择中, 出行者根据以往的出行时间以及当前的天气、路况、收费等信息, 更新自身对出行行驶时间的判断, 并作出决策。除此之外, 通勤者的认知偏差、习惯偏好、风险态度等行为特征因素, 也会影响最终的路径选择决策。

1) 感知出行时间更新学习机制研究

多个领域提出了各种不同的学习理论, 如机器学习、博弈论及行为学习理论。其中, 行为学习理论更加侧重于微观个体的信息获得与结合。出行路径选

择的研究更多是基于行为学习理论,主要研究个体感知出行行驶时间的更新学习机制。

Horowitz (1984) 提出感知时间为过去实际行驶时间的加权平均数。徐红利等采用这一学习模式,考虑了不确定性影响下的路段容量退化情形,构建了在诱导信息下的随机网络流量演化模型。Cantarella 和 Cascetta (1995) 表明感知出行行驶时间期望值的更新是过去期望值和实际出行时间的加权平均,据此提出了感知时间指数平滑更新模式,在其他研究中被广泛使用。黄海军等 (2005) 运用此模式研究 ATIS 的应用对随机网络用户均衡的影响,在实例中分析了期望值与实际值不同权重下的流量演化均衡。田丽君等 (2010) 在指数平滑学习机制的框架下,根据是否装有 ATIS 交通诱导系统将用户分为两类,建立了基于动态信息反馈的日常出行决策模型。

以上的权重更新模型为贝叶斯学习模型的一种,除此之外还有 Erev 等 (1999) 提出的强化学习模型,模型假设决策者的行为符合 Thorndike 的效果律,即选择某一策略的概率会随着这一策略带来的积极回报而增强,反之则减弱;Zhao 和 Huang (2014) 基于西蒙的满意原则理论提出的学习模型,表明出行者对路径出行成本拥有不同的满意度,并通过行为实验验证,当出行成本未超过满意度时,路径是可接受的,即出行者表现为有限理性,而非理性的效用最大化。

与以上逐日累积平滑的离散学习更新不同,针对决策者的遗忘性,Kahneman 等 (1993) 探索了另一种基于经验的学习模型——峰终定理。研究指出,对经历的学习不是一种日复一日的累积效应,而是几个突出阶段的组合,如峰值和就近经历的记忆的联合作用。在路径选择领域,则表示感知出行时间为过去经历的最大或最小出行时间和最近出行行驶时间的加权平均。不同于指数平滑更新模式,峰终定理突出了极端情况对决策者的影响。

2) 出行者习惯偏好对路径选择影响研究

出行者的习惯偏好在路径选择决策中,也扮演了重要的角色。惯性即决策者重复某一选择或长久处于某些熟悉的策略集合中,在路径选择中则表现为,即使客观上存在更好的选择,出行者也只重复选择某条或某几条固定的路径。Gärling 等 (2001)、Verplanken 和 Aarts (2011) 通过行为实验证实了习惯对路径选择的影响,实验中,被试者重复选择某一路径并获得满意的结果,久而久之惯性思维形成,其后往往会疏于寻找更好的路径。Gärling 和 Axhausen (2003) 全面地总结了习惯在路径选择中的影响,表示习惯形成的过程,就是深思熟虑逐渐减少的过程。

近年来,习惯偏好等个体心理特征也逐渐被加入交通系统均衡的模型中。Xie 和 Liu (2014) 在随机路网均衡中考虑了决策惯性,分析了不同的惯性程度

和情境认知程度对出行者路径选择的影响。He 等 (2014) 研究了出行者习惯形成对 day-to-day 路径选择的影响, 通过实验表明, 一旦习惯形成, 出行者对路径时间差异敏感性将逐步降低。Zhang 和 Yang (2015) 进一步深入定义路径选择惯性是出行决策者对唯一或固定的选择集的黏性, 即重复选择熟悉的策略, 不随意考虑并转换选择集之外的路径, 并探讨了不同的惯性形式对交通流量均衡的影响以及信息提供对打破习惯的作用。

3) 基于期望效用理论和随机效用理论的出行行为研究

现实中出行者面对的交通网络往往具有不确定性, 国内外学者也一直致力于在具有不确定性的道路网络中开展出行行为研究, 使用期望效用理论 (expected utility theory, EUT) 和随机效用理论 (random utility theory, RUT) 来“解读”出行者行为。Yang 等 (2004) 研究了多类用户 (时间价值不同且离散分布) 多标准 (以货币成本或时间来衡量出行负效用) 的道路网络用户均衡和系统最优问题, 探讨了用户均衡流量与不同标准下出行负效用的关系。马寿峰等 (2005) 采用博弈论的思想, 在用户均衡与系统最优互相协调的规则下, 研究了交通管理控制者与受到交通诱导的出行者之间的博弈行为。黄海军等 (1998) 针对两种交通出行方式——公路和地铁出行, 在两方式均衡模型中发现地铁车厢内的拥挤成本和常态出行时间差异会对出行者的方式选择行为产生影响, 指出提高地铁公司的服务质量能带来更多的乘客流量。之后, Huang (2000) 将两方式均衡模型扩展至两类用户的情形, 结合公路是否收费和地铁定价研究了三种组合方案: 公路不收费且票价基于边际成本、公路不收费且票价基于平均成本、对公路实施统一收费以补贴地铁公司固定成本保证其盈亏平衡且票价基于边际成本, 并辅以算例分析实施各种组合方案对两类通勤者方式选择行为的影响。黄海军等 (2005) 针对公交出行方式, 研究了乘客出行均衡行为, 模型中考虑了身体接触拥挤成本和时间延误成本, 研究发现公交公司垄断制度下的高票价会抑制出行需求的增加, 而寡头竞争情形下则会致使票价降低, 公交出行需求增加。

ATIS 在具有不确定性的交通环境中为出行者提供免费开放的交通信息或有偿出行诱导信息, 影响出行者的出行选择。李志纯和黄海军 (2005) 综合研究了 ATIS 对出行者的目的地、出行方式、路径等多重选择的影响。考虑装有和没有 ATIS 的两类出行者, 基于层次结构选择模型和随机均衡 Logit 模型构建混合随机网络模型, 利用算例分析了市场渗透率 (装有 ATIS 的出行者比率) 对出行负效用、(两个) 目的地需求、(三种) 方式分担的影响。侯立文和谭家美 (2006) 在假设 ATIS 提供出行信息的背景下, 基于统计学数字特征计算路段近似行驶时间, 基于 Logit 模型计算路段选择概率, 构建了出行时间可靠性的计算模型。刘天亮和黄海军 (2007) 在多智能体仿真环境中研究发现: 当信息开放时, 路网路径流量能更快地演化至 Logit 随机用户均衡配流状态, 但是对信息依赖过度会使

系统发生振荡现象；不开放信息而靠出行者自己的出行经验则演化效率较低。之后，刘天亮等（2008）在日常择路行为演化模型中，考虑出行者具有“风险规避”特征，基于个人经历和 ATIS 发布的信息更新对路径的认知，构建了路径选择 Logit 模型，在简单道路网络中验证了模型可演化到稳定随机用户均衡态。刘天亮等（2013）还研究了非社交网络信息（如朋友圈信息）交互对出行路径、出发时间选择的影响，设计实验情景、道路网络、朋友圈和实验者得分规则等开展有偿实验，在不同的朋友圈信息交互率下获得了系统最优或用户最优状态。吴文静等（2010）考虑 ATIS 提供信息条件下，对吉林市居民出行开展 SP（stated preference，意向偏好）调查，构建了二元 Probit 模型，基于调查数据分析发现居民的出行方式决策和出行路径选择具有相关性。

针对出行方式选择问题，Huang（2002）在两方面扩展了 Tabuchi 的两模式均衡模型：一是考虑了车厢内拥挤成本；二是考虑了弹性外部需求的情况。基于随机用户均衡 Logit 模型解析公路收费固定、使系统最优和次优等三种方案的实现条件。最近，Tian 等（2015）同样考虑了两模式用户均衡问题，考虑公路出行具有不确定的出行时间，而且地铁多班次发车，建立了两模式用户的出行费用表达式，当且仅当两模式的用户期望成本相等时达到用户均衡状态，算例分析表明不确定的公路出行时间对流量分配、期望成本等有重要影响，对地铁发车间隔、班次和票价也进行了敏感性分析。肖玲玲等（2014）考虑公路瓶颈具有随机通行能力，小汽车出行的通勤者具有异质时间价值，构建了通勤者期望出行成本相等条件下的用户均衡模型。

4）基于（累积）前景理论的出行行为研究

期望效用理论假设个体完全理性，总是从备选方案中选择具有最大期望效用的方案作为最终选择。然而实际情况往往与其背离，如 20 世纪 80 年代著名的阿莱悖论。Kahneman 和 Tversky（1979）通过大量心理学和社会学的实验，对有限理性进行归纳总结，提出了著名的前景理论（prospect theory，PT）。前景理论具有以下几个观点：①相较于收益与损失的绝对值，决策者对其与参考点的偏离程度更为敏感；②决策者对收益表现为风险规避，对损失则表现为风险寻求，并且对损失的规避程度会大于对同等收益的寻求；③越接近参考点，个体对收益与损失变化愈加敏感，呈现出“边际递减规律”；④决策者总是表现为高估小概率事件，低估中大概率事件。Tversky 和 Kahneman（1992）结合等级依赖效用理论，改进了前景理论，提出了累积前景理论。此后，前景理论和累积前景理论被广泛运用于金融、消费者经济、交通等领域。

Katsikopoulos 等（2002）在行为实验中发现：当作为参考点的一条路径的出行时间是确定的且大于另一条路径的平均出行时间时，实验者表现出“风险规避”；反之，实验者表现出“风险寻求”，这与 Kahneman 和 Tversky 的研究结

论相一致。Avineri 和 Prashker (2003) 开展了路径选择实验以评估不确定条件下信息反馈机制对日常路径决策的影响。通过考察两个实验情景中的两条路径, 其中一条路径的出行时间方差在两个情景中都没有变化, 而另一条路径的方差则在第二个情景中被扩大了, 借助计算机设备, 在首次选择时不对实验对象提供先验信息, 而后的选择均可获得之前做选择后发生的结果 (路径出行时间), 检验 RUT、CPT、FL、REL、CPTL^① 等模型与实验结果的拟合度, 结果发现应用学习强化模型如 FL、REL、CPTL 等与实验结果较为接近。之后, Avineri 和 Prashker (2003) 再次设计了两个实验情景以开展 SP 调查, 发现 71 个受验者中有超过一半的个体的路径选择行为违反了期望效用最大化理论, 大部分受验者表现出确定性效应 (更偏好确定性的前景), 并有高估小概率事件的倾向。Ben-Elia 等 (2008) 考虑 ATIS 提供信息和基于信息反馈的经验积累, 针对两条路径具有不同出行时间方差的三个情景开展行为实验, 研究了信息和经验对出行者路径选择的综合影响。此外, Avineri (2004) 还运用累积前景理论研究的不确定出行时间条件下乘客的公交路线选择行为, 调查研究结果发现: 基于累积前景理论的路线选择结果与期望效用理论不相符合, 参考点的选取对两条路线的累积前景值 (cumulative prospect value, CPV) 有重要影响; 当以发车间隔时间来显示路线信息时, 提高发车间隔时间的均值和方差在某些情况下会使乘客感知的等待时间减少, 也就意味着发车间隔时间均值和方差较高的路线可能更受乘客青睐。Jou 等 (2008) 则研究了不确定条件下出行者的日常通勤出发时间选择, 提出了新的价值函数模型, 他们以电话调查的方式获得 152 个通勤者的样本数据, 基于调查数据和利用统计分析方法对参考点等模型参数作了估计, 研究结果表明出发时间决策行为与前景理论描述的一致。

徐红利等 (2007) 基于路径效用度量规则, 分析了问卷调查所得相关数据, 发现有限理性出行者的路径选择行为与前景理论框架下的一般效用度量体系描述相似。Xu 等 (2011) 考虑完成一次有效出行的概率和出行时间预算来设置参考点, 基于实验数据对路径决策模型参数作了估计, 利用模型参数估计值进行路径选择预测, 最后通过一个算例以应用所提出的路径决策规则。张杨等 (2007) 在成都市某汽车维修点通过实证调查, 发现出行者的路径选择行为随出行约束时间、出行重要性、路径熟悉程度和出行时间不确定程度等而变化, 验证了出行者在城市路网中的路径选择行为符合前景理论。例如, 面临收益时表现出“风险规避”, 面临损失时表现出“风险寻求”, 出行者对损失更为敏感, 等等。张杨 (2010) 之后推导了考虑不确定性规避和贝叶斯动态更新的出行者路径选择模

① FL 是两个人名首字母缩写; REL、CPTL 分别译为强化学习 (reinforcement learning)、累积前景理论学习 (cumulative prospect theory learning)。

型,通过问卷调查方式开展实证研究,结果表明出行者在择路时有规避不确定性的倾向,路径熟悉程度和出行时间不确定性会影响出行者的出行时间预算。夏金娇等(2012)在路径选择模型中考虑早到和晚到损失,接着通过调查问卷数据拟合参考点取值,在实例研究中发现通勤者表现出“风险规避”和“风险寻求”,而且出发时间会影响通勤者的路径选择。近期,Jou和Chen(2013)在中国台湾高速公路系统 Taian 和 Chingshui 服务区借助计算机辅助设备,对 539 个有效用户开展行为实验调查以获取数据并进行了统计分析。

上述工作均是通过行为实验或问卷调查的方式对出行个体的决策行为进行验证,除此之外,也有一些研究工作是从模型的角度去论证的。Avineri(2006)将累积前景理论应用于不确定交通环境下的路径均衡配流,假设路段出行时间随机项服从离散分布,设定参考点并演算了 CPV,阐述了基于累积前景理论的用户均衡条件。借助算例他发现参考点的选取影响流量分配结果。Connors 和 Sumalee(2009)沿着 Avineri 的工作,假定路网中的路段出行时间服从正态随机分布,出行者了解与出行时间分布有关的感知成本,并通过累积前景理论中的价值函数和指数型概率权重函数分别对实际效用和客观发生概率进行非线性转化,当且仅当出行个体不再单方面改变其路径选择来提高感知价值时达到用户均衡状态,提出了基于累积前景理论的用户均衡条件。赵凛和张星臣(2006)考虑为出行者提供先验信息,分析了出行者在日常路径选择方面的学习更新过程,基于前景理论建立了出行路径选择的理论模型。Wang 和 Xu(2011)基于累积前景理论建立用户均衡模型研究路段通行能力退化情况下的出行者路径选择行为,假定路网中的路段行驶时间为随机变量,根据准时到达概率设置内生参考点,在算例分析中发现累积前景理论更适合用于描述有限理性出行者的路径选择行为。Tian 等(2012)在假设路段通行能力退化的情形下基于累积感知价值研究了用户均衡动态配流问题。根据可接受的最早到达时刻、工作开始时刻和最佳到达时刻,与实际到达时刻比较以衡量“收益”和“损失”,借助算例分析了通行能力是否退化的两种用户均衡情形。甘佐贤等(2014)在路径选择模型中引入到达时间感知价值的概念,搭建到达时刻与出行者感知价值的关系,在算例分析中验证了设置可变信息情报板(variable message signs, VMS)可以提高出行可靠性。

根据前景理论的描述,参考点在其对备选方案的评价过程中扮演着重要的角色。基于这一点,国内外的许多学者把参考点的设置问题和参考依赖的特性引入研究当中。范文博等(2009)将参考点依赖法引入出行者的日常路径选择调整行为,提出路径出行负效用概念,建立了基于 Logit 模型的不动点均衡模型,使用相继平均算法(method of successive average, MSA)和 Logit 配流算法对模型进行了求解,在算例分析中发现期望效用模型会低估路网用户总成本,高估交通政策如扩大路段通行能力带来的收益。徐红利等(2010)同样考虑参考点依赖建立