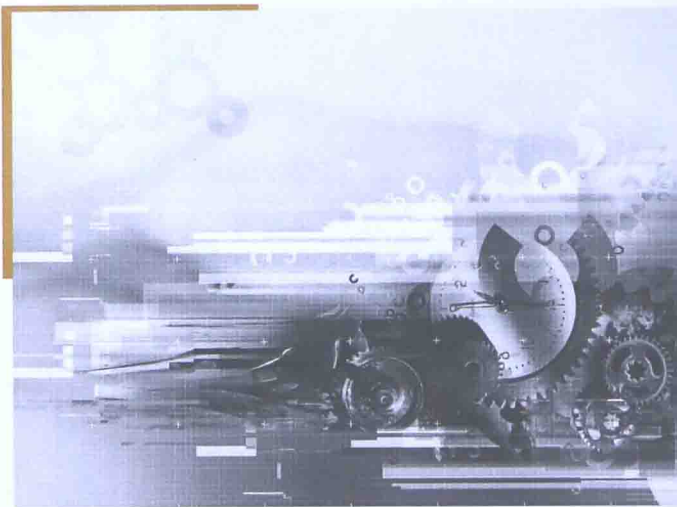


— 南京大学工程管理学院文库 —

城市交通流演化动力学研究 ——基于个体出行决策分析

陈星光 著



交通拥挤现象是巨大的微观离散个人决策结果，
转化为道路与网络上的宏观聚集现象。
因此，要根本解决城市交通拥挤问题，
就必须结合人的决策，
来刻画交通流量的网络分布，
揭示城市交通流的自组织演变规律与拥堵突现轨迹。
本书对此做出了具有理论价值和现实意义的探究。



南京大学出版社

— 南京大学工程管理学院文库 —

城市交通流演化动力学研究 ——基于个体出行决策分析

陈星光 著



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

城市交通流演化动力学研究：基于个体出行决策分析 / 陈星光著. — 南京：南京大学出版社，2015.3
(南京大学工程管理学院文库)
ISBN 978-7-305-14889-7

I. ①城… II. ①陈… III. ①城市交通—交通流—动力学—研究 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 058108 号

出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093
出 版 人 金鑫荣
丛 书 名 南京大学工程管理学院文库
书 名 城市交通流演化动力学研究——基于个体出行决策分析
著 者 陈星光
责任编辑 唐甜甜 编辑热线 025-83594087
照 排 南京南琳图文制作有限公司
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 710×1000 1/16 印张 12.75 字数 214 千
版 次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-305-14889-7
定 价 50.00 元

网址：<http://www.njupco.com>
官方微博：<http://weibo.com/njupco>
官方微信号：njupress
销售咨询热线：(025) 83594756

* 版权所有，侵权必究

* 凡购买南大版图书，如有印装质量问题，请与所购
图书销售部门联系调换

本著作的出版得到了

国家自然科学基金“考虑内生信息的城市交通合作演化机理研究”（项目号：71471084）

教育部人文社会科学研究青年基金“基于个体出行决策分析的城市交通流演化动力学研究”（项目号：12YJCZH017）

江苏省基础 Research 计划（自然科学基金）“有限理性条件下群体决策行为建模与作用机制研究”（项目号：BK2012305）

资 助

南京大学工程管理学院文库

编委会

主 任 盛昭瀚

副主任 李心丹

委 员 李心丹 钱志新 周 晶 张旭革
周献中 沈厚才 肖条军 周跃进
朱华桂

序

城市交通系统是一个影响因素众多、多层次相互关联且错综复杂、目标功能多样、非线性动态演化的开放系统,产生交通拥堵的根本原因是城市交通供给和交通需求的失衡。城市交通系统供需失衡主要体现在交通供需的结构性失衡和耦合性失衡两个方面。交通供给的有限性和出行需求的无限性导致结构性失衡,而交通供给的刚性和出行需求的柔性导致耦合性失衡。结构性失衡问题可以通过明确城市功能定位、综合交通规划和结构调整等手段解决。交通出行需求的柔性本质上是数量巨大的、微观的个体出行决策的结果,也是出行者之间的博弈关系,以及交通系统的管理者和出行者之间动态博弈关系的反映。因此,解决耦合性失衡问题首先要研究微观个体出行行为以及交通参与主体(管理者、出行者)之间的博弈关系,探究与揭示城市交通流的自组织演变规律与拥堵突现轨迹,并在此基础上,借助计算仿真的手段,综合比较不同的交通管理措施的实施效果,进而提出科学合理有效的管理策略,实现城市交通供需的耦合性平衡。

本书作者针对交通供需耦合性失衡的两个关键问题,即动态交通配流和交通流的演化动力学问题展开了深入研究。作者运用博弈论、演化博弈论和交通配流理论,从出行者个体特征分析视角入手,将出行者个体特征和出行者出行行为决策分析相结合,研究出行者在主观感受、行为偏好、学习能力等方面的个体差异性及其对出行者出行选择行为的影响。在此基础上,针对多维出行选择行为的动态交通均衡配流模型和交通流演化的动力学问题展开了较为系统的理论研究和仿真分析。对交通流演化的动力学机理问题,提出了交通流演化动力学研究的一般框架,建立了多群体多准则出行选择下交通流演化的动力学模型,证明了交通流演化动力学模型平衡点与动态交通均衡配流模型均衡解之间的等价性。并通过数值模拟手段,进

一步研究了不同出行选择行为下交通流的演化过程,以及出行者的出行选择决策特征参数对流量演化过程的影响。研究成果对丰富和发展城市交通均衡理论具有积极意义。

作者在攻读博士期间,参与了国家自然科学基金项目“基于博弈模型的城市交通供需耦合平衡机理及控制研究”工作。工作期间主持了教育部人文社科青年基金项目“基于个体出行决策分析的城市交通流演化动力学研究”。本书是作者从攻读博士到毕业后工作几年期间从事交通科学领域研究的阶段性成果总结,反映了作者在该领域的积极探索、独立思考的学术精神和从事交通系统分析与优化的研究能力。作者今年又成功申请到一项国家自然科学基金面上项目“考虑内生信息的城市交通合作演化机理研究”,必将在城市交通领域展开更多有益的探索。

作为作者的博士生导师,很高兴看到该书问世。尽管尚存在不足,毕竟是一个良好的开端。期待作者再接再厉,以此为契机和动力,在科研学术的道路上取得更大的成绩。

是为序。

周 晶

2014 年 12 月

目 录

序	I
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 文献综述	4
1.3 已有研究的局限	15
1.4 本书研究内容	17
1.5 研究方法和技术路线	19
1.6 本书主要创新点	21
第 2 章 城市交通出行选择行为决策分析	23
2.1 决策科学理论简介	23
2.2 随机效用理论简介	25
2.3 出行选择行为决策机理分析	28
2.4 交通流演化过程影响因素分析	32
2.5 本章小结	35
第 3 章 多维动态交通网络均衡配流模型	36
3.1 多维出行问题的描述	36
3.2 多维动态用户最优出行选择的变分不等式模型	37
3.3 多维动态随机用户最优出行选择的变分不等式模型	47
3.4 本章小结	57
第 4 章 交通流演化动力学的理论分析	58
4.1 交通流演化动力学研究的一般框架	59
4.2 演化博弈理论概述	62
4.3 多群体多准则出行选择流量演化模型	67
4.4 均衡解的等价性证明	73

4.5	出行方式选择流量演化动力学分析	77
4.6	出发时间选择流量演化动力学分析	84
4.7	出行路径选择流量演化动力学分析	92
4.8	多维出行选择流量演化动力学分析	99
4.9	本章小结	105
第5章	交通流演化动力学的数值模拟	107
5.1	Trafres 流量演化软件设计	107
5.2	出行方式选择的流量演化动力学模拟	124
5.3	出发时间选择的流量演化动力学模拟	130
5.4	出行路径选择的流量演化动力学模拟	135
5.5	多维联合出行选择的流量演化动力学模拟	144
5.6	本章小结	154
第6章	总结和展望	156
6.1	总结	156
6.2	展望	158
附录	交通研究模拟软件 Trafres	161
A.1	Trafres 体系结构介绍	161
A.2	交通流演化模拟模块(MOFE)数据结构	162
参考文献		171
后记		188

图目录

图 1-1 研究内容和研究方法逻辑结构图	21
图 2-1 出行活动策略结构图	29
图 2-2 出行策略选择集制定的流程图	30
图 2-3 出行决策处理流程图	32
图 2-4 出行者个体特征对流量演化的影响关系图	35
图 3-1 算例示意图	45
图 3-2 Papageorgiou 网络图	55
图 4-1 交通流演化动力学研究框架	60
图 4-2 等价性证明的逻辑关系图	61
图 5-1 MOFE 功能示意图	109
图 5-2 MOFE 模拟软件结构逻辑图	109
图 5-3 MOFE 处理流程图	110
图 5-4 模拟迭代器算法	114
图 5-5 选择概率数组算法	115
图 5-6 流量计算核心算法	116
图 5-7 Trafres 软件程序主界面	117
图 5-8 编辑局中人对话框窗口	118
图 5-9 编辑策略集对话框窗口	118
图 5-10 建立模拟环境对话框窗口	119
图 5-11 模拟运行控制界面	120
图 5-12 模拟结果回放界面	121
图 5-13 算例网络图	121
图 5-14 特征参数组 1 流量演化走势图	125
图 5-15 特征参数组 2 流量演化走势图	126
图 5-16 特征参数组 3 流量演化走势图	127
图 5-17 特征参数组 4 流量演化走势图	128
图 5-18 特征参数组 5 流量演化走势图	129

图 5-19	特征参数组 1 流量演化走势图	131
图 5-20	特征参数组 2 流量演化走势图	131
图 5-21	特征参数组 3 流量演化走势图	132
图 5-22	特征参数组 4 流量演化走势图	133
图 5-23	特征参数组 5 流量演化走势图	134
图 5-24	特征参数组 1 流量演化走势图	136
图 5-25	特征参数组 2 流量演化走势图	137
图 5-26	特征参数组 3 流量演化走势图	138
图 5-27	特征参数组 4 流量演化走势图	139
图 5-28	特征参数组 5 流量演化走势图	140
图 5-29	特征参数组 6 流量演化走势图	141
图 5-30	特征参数组 7 流量演化走势图	141
图 5-31	特征参数组 8 流量演化走势图	142
图 5-32	特征参数组 9 流量演化走势图	143
图 5-33	特征参数组 10 流量演化走势图	143
图 5-34	特征参数组 1 流量演化走势图	145
图 5-35	特征参数组 2 流量演化走势图	146
图 5-36	特征参数组 3 流量演化走势图	147
图 5-37	特征参数组 4 流量演化走势图	148
图 5-38	特征参数组 5 流量演化走势图	149
图 5-39	特征参数组 6 流量演化走势图	150
图 5-40	特征参数组 7 流量演化走势图	151
图 5-41	特征参数组 8 流量演化走势图	152
图 5-42	特征参数组 9 流量演化走势图	153
图 5-43	特征参数组 10 流量演化走势图	154
图 A-1	交通研究模拟软件 Trafres 体系结构	161
图 A-2	数据结构逻辑关系图	163

表目录

表 1-1	本书主要研究内容	18
表 3-1	网络 OD 需求	45
表 3-2	满足 DUO 条件的模型解	46
表 3-3	网络路段数据	55
表 3-4	网络 OD 数据	55
表 3-5	满足 DSUO 条件的模型解	56
表 4-1	演化博弈理论与传统博弈论的比较	64
表 4-2	出行方式 3×2 非对称博弈支付矩阵	78
表 4-3	出发时间 $2 \times 2 \times 2$ 非对称博弈支付表	85
表 4-4	出行路径 $2 \times 2 \times 2$ 非对称博弈支付表	93
表 4-5	多维出行选择 $m_1 k_1 l_1 \times \cdots \times m_n k_n l_n$ 非对称博弈支付表	101
表 5-1	MOFE 模块交通出行环境说明	109
表 5-2	编辑环境数据文件实现功能说明	111
表 5-3	路段参数数据表	122
表 5-4	路径计算数据表	122
表 5-5	出行选择行为决策特征参数	123
表 5-6	特征参数组 1 流量演化数据结果	125
表 5-7	特征参数组 2 流量演化数据结果	125
表 5-8	特征参数组 3 流量演化数据结果	126
表 5-9	特征参数组 4 流量演化数据结果	127
表 5-10	特征参数组 5 流量演化数据结果	128
表 5-11	特征参数组 1 流量演化数据结果	130
表 5-12	特征参数组 2 流量演化数据结果	131
表 5-13	特征参数组 3 流量演化数据结果	132
表 5-14	特征参数组 4 流量演化数据结果	133
表 5-15	特征参数组 5 流量演化数据结果	134
表 5-16	特征参数组 1 流量演化数据结果	136

表 5-17	特征参数组 2 流量演化数据结果	136
表 5-18	特征参数组 3 流量演化数据结果	137
表 5-19	特征参数组 4 流量演化数据结果	138
表 5-20	特征参数组 5 流量演化数据结果	139
表 5-21	特征参数组 6 流量演化数据结果	140
表 5-22	特征参数组 7 流量演化数据结果	141
表 5-23	特征参数组 8 流量演化数据结果	142
表 5-24	特征参数组 9 流量演化数据结果	142
表 5-25	特征参数组 10 流量演化数据结果	143
表 5-26	特征参数组 1 流量演化数据结果	145
表 5-27	特征参数组 2 流量演化数据结果	146
表 5-28	特征参数组 3 流量演化数据结果	147
表 5-29	特征参数组 4 流量演化数据结果	148
表 5-30	特征参数组 5 流量演化数据结果	149
表 5-31	特征参数组 6 流量演化数据结果	150
表 5-32	特征参数组 7 流量演化数据结果	151
表 5-33	特征参数组 8 流量演化数据结果	151
表 5-34	特征参数组 9 流量演化数据结果	152
表 5-35	特征参数组 10 流量演化数据结果	153
表 A-1	人机界面系统接口控制数据结构	162
表 A-2	出行者自定义模拟数据结构	162

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着我国国民经济的飞速发展,城市居民生活水平大幅提高,城市机动车数量大幅度增长,交通拥挤、交通事故频繁发生,不仅降低了人们的出行质量,也带来一系列的社会、经济和环境问题。交通问题已成为政府、市民以及学者们关注的一个热点问题。为了解决城市交通拥挤问题,人们从管理实践和理论研究两个方面进行了许多探索。近十年来,城市交通基础设施的建设成绩令人瞩目,但交通拥堵现象不但没有好转,反而愈演愈烈。这一现象使交通管理者逐渐认识到:城市交通问题是一个复杂的系统工程,单靠修路不能根本解决城市交通拥堵问题。学者们也越来越清醒地认识到,城市交通系统是一个影响因素众多、多层次相互关联,且错综复杂、目标功能多样、非线性动态演化的开放系统,而交通拥挤现象是作为交通需求结果的交通流在特定时间、空间下所表现的一种状态。所谓交通流,是交通需求在有限的时间和空间上的实现结果,是将巨大的微观离散个人决策结果转化为道路与网络上的宏观聚集现象。因此,要解决城市交通拥挤问题就必须结合人的决策,用数学、物理模型刻画交通流量的网络分布,揭示与解释城市交通流的自组织演变规律与拥堵突现轨迹,这也是现代交通科学研究的核心内容之一。

出行者面对的是一个不确定的、复杂的交通环境,出行者的决策是一个复杂的序列决策过程,为了更好地刻画网络交通流的分布形态,揭示城市交通流的演变规律,我们需要对交通流的源头——城市交通出行行为进行更细致的分析。如果我们从交通出行行为的角度理解,各种各样的交通流形态实质上是大量出行者采用不同出行策略在道路网络上执行的结果。根据交通出行选择行为决策理论,一般而言,出行者的出行行为是一个包含以下

几项内容的选择过程:① 是否出行;② 出行目的地;③ 中途是否换乘;④ 采用何种交通方式出行(出行方式);⑤ 什么时间出行(出发时间);⑥ 出行中采用何种行动路线(出行路径)。如果从出行决策的实现阶段看,前面三项内容是属于出行决策实施前的内容,后面三项是在出行决策实施中进行的内容。本书主要的关注对象是实际中已经存在于道路网络上的动态交通流,对于已经形成于路网上的随时间变化的交通流而言,可以认为前面三项内容是已经被确定的,因而网络上的交通流,确切地说是出行者对出行交通方式、出发时间和出行路径进行不断动态选择执行的结果。这些出行策略的执行结果,会呈现出两种截然不同的交通流状态:一种是交通流的非均衡状态,另一种是交通流的均衡状态。

本书将重点研究两方面的内容:一是交通流的动态均衡;二是交通流演化的动力学。交通流的均衡是交通流演化过程中出现的一种特殊状态,每一个均衡状态对应于某个时刻交通流的一幅快照,现实中的交通流是依时间动态变化的,均衡只是暂时的,交通流总是经历从不均衡趋向均衡又到不均衡这样一种循环往复的过程。因此,我们研究交通流的演化,既要考察交通流均衡分布的结果,也要分析交通流动态均衡的演化过程,只有这样才能更好地认识交通流各种形态发展变化的内在规律。

对于第一个问题,其实质就是动态的交通均衡配流问题,之所以是动态的均衡配流,这是相对于静态均衡配流而言的。众所周知,对于交通配流模型,通常把交通分配方法分为平衡模型与非平衡模型两大类。满足 Wardrop^[1]平衡原理的网络交通配流属于平衡模型,平衡模型又可以分为静态网络交通配流模型和动态网络交通配流模型,两者之间最本质的区别在于静态模型不考虑时间因素,而动态模型则考虑到时间因素。静态网络交通配流模型主要用于较长时间的交通规划,但是,对于路网上特定时间段的交通流,特别是高峰期的交通网络流量分配研究,静态配流模型往往难以有效解决问题。而动态网络交通配流考虑了交通需求随时间变化的特性,可以更广泛、更确切地再现包括交通拥挤在内的许多交通现象,要深入认识拥挤的形成、发展、消失的机理,必须注重动态分析方法,动态网络均衡配流理论又是 ITS(智能交通系统)中最重要的关键核心技术基础之一,因此越来越多的学者把目光投向动态网络均衡配流模型的研究。^[2]

对于动态的交通均衡配流问题的研究,在交通领域的权威期刊如

Transportation Science, *Transportation Research* 系列, 及很多运筹学的学术期刊, 如 *European Journal of Operational Research*, *Operations Research* 等著名杂志上, 每年都登载大量的研究文献, 它一直是交通科学邻域中的一个研究热点。正如本书前面所述, 如果从交通流的形成源头考虑, 出行者的出行行为的选择是最终流量分布形态的决定性因素, 而出行者的出行行为又是相当主观和带有不确定性的, 可以说, 正是出行者在出行过程中, 按照某种价值判断准则, 不断地对自己的出行方式、出发时间、出行路径进行选择、决策、实施, 从而形成了现实中多种多样的交通流分布结果。而现有的对于动态交通均衡配流问题的研究成果, 主要集中于对出行路径进行选择, 或者对出发时间和出行路径同时选择这两类问题进行建模分析, 还没有把出行方式、出发时间、出行路径这三者的选择同时进行考虑的动态配流模型。针对这一现状, 本书采用数理模型分析的方法, 对同时考虑出行方式、出发时间和出行路径选择情形下的动态均衡配流问题展开研究。

我们不仅关注交通流在动态条件下均衡的分布形态, 还要探求交通流在网络上随时间的变化规律, 实质上是要研究交通流演化的动力学机制, 也就是要研究: 出行者在不同出行选择行为下的交通流的演化规律是怎样的, 演化最终能否达到一个稳定的均衡状态, 演化的稳定性受到哪些因素的影响? 从博弈论的观点来看, 网络上交通流的形成和演化, 可以看作是大量个体间不断进行的动态的非合作博弈的结果。实际上, 城市交通流的形成演化不仅与出行者本人的决策过程有关, 而且与整个出行系统中其他出行者的策略选择紧密相关。虽然出行者本人在进行出行决策的时候可能不需要考虑其他出行者的选择过程, 但城市道路不是供出行者一个人使用的, 它是一个社会公共资源, 每个置身其中的出行者在出行活动中付出的成本与其他出行个体采取的出行策略息息相关。出行者选择某个出行策略的结果会受到交通系统中其他出行者出行策略的影响, 出行者下次出行策略的选择又会受到自己历史出行经验的影响, 从这个角度理解, 网络交通流的形成是一个动态反复的博弈过程。

实际情况中, 出行者选择出行工具或出行道路时, 通常会综合考虑时间、费用、距离、可达性、安全性、舒适性等多种因素, 在此基础上形成多个不同的选择准则。由于出行者的收入、年龄、性别及出行目的等差异, 出行者对这些因素的关心程度各不相同, 对各准则重要性程度的度量并不一致, 而

出行者是根据出行策略所产生的某种效用(如期望效用、前景效用等)进行出行方案的选择的,出行策略所产生的期望效用跟出行者选择准则密切相关。因此,出行者的个体特征会影响出行策略的选择,从而在宏观上影响交通流的分布状态。因此交通流量的演化与出行者的个体特征密切相关。为了深入分析交通流的演化过程,更好地理解交通流从不均衡到均衡又到不均衡这一过程是如何实现的,我们将从宏观的数理模型和微观的数值模拟两个角度出发,对交通流的演化动力学进行深入研究。

本书的出版得到国家自然科学基金项目“考虑内生信息的城市交通合作演化机理研究(项目编号:71471084)”,教育部人文社科青年基金项目“基于个体出行决策分析的城市交通流演化动力学研究(项目编号:12YJCZH017)”,江苏省自然科学基金项目“有限理性条件下群体决策行为建模与作用机制研究(项目编号:BK2012305)”资助。作者认为,通过对城市交通流的动态均衡以及交通流演化动力学的研究,可以充分发挥动态网络均衡配流模型的应用价值,提高我们对城市网络交通流形成变化规律的认识,增强我们对动态交通流的控制管理能力,为城市交通管理和控制策略的制定提供科学依据,对诱导和管理交通流、优化交通系统资源使用、科学规划交通网络,改善我国城市交通现状,缓解日趋严峻的城市交通拥堵问题,合理地预见和规划未来的交通运输系统,从而保障并促进经济的可持续性发展有着重要的理论价值和现实意义。

1.2 文献综述

1.2.1 出行选择行为决策机理的研究

出行者面对的是一个不确定的、复杂的交通环境,因此出行者的出行行为实质上是一个复杂的动态调整过程,具有相当大的主观性和随意性。为了准确把握动态交通流的形成演变规律,我们需要从交通流产生的源头——出行行为的决策机理进行分析。对出行行为的决策机理进行研究,不仅是建立各类交通流量分配模型和进行交通流演化动力学分析的重要基础,而且是开发交通模拟与仿真系统的重要理论依据。对出行选择行为的分析需要综合运用管理学、行为经济学、认知心理学、交通科学等学科的知