

智能交通领域前沿研究论著

城市交通系统 运行可靠性分析方法



王云鹏 陈 鹏 鲁光泉 于 滨 李大庆◎著

CHENGSHI
JIAOTONG
XITONG YUNXING KEKAOXING FENXI FANGFA



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

智能交通领域前沿研究论著

Chengshi Jiaotong Xitong Yunxing Kekaoxing Fenxi Fangfa 城市交通系统运行可靠性分析方法

王云鹏 陈 鹏 鲁光泉 于 滨 李大庆 著



中国通信出版社
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书为国家“973”计划子课题《大城市综合交通系统的运行可靠性与应急策略》(2012CB725404)研究成果的整理与总结。

本书主要基于北京市六里桥区域浮动车的交通数据,依据复杂网络基础理论以及交通流理论,建立适用于评价路网状态的评价指标和计算模型,主要研究内容包括:城市路网结构特征及复杂性、城市路网运行随机性、常态下的城市路网可靠性、城市公共交通服务可靠性、城市路网拥堵传播与消散机理、基于路网可靠性的交通瓶颈识别、基于渗流理论的交通瓶颈识别、考虑路段重要性的城市道路网络修复策略、城市交通系统运行可靠性仿真平台。本书可为全方位、多层次、大范围、大数据化、高效运行的综合交通运输体系建设提供理论支持,也可综合交通运输系统运行监测与应急管理提供参考与借鉴。

本书适用于交通工程、智能交通、交通管理等专业的技术人员、管理人员、科研工作者、研究生、教师与高年级本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

城市交通系统运行可靠性分析方法/王云鹏等著

·一北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.1

ISBN 978-7-114-13456-2

I. ①城… II. ①王… III. ①城市交通系统—系统可靠性—可靠性理论 IV. ①U491.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 271495 号

书 名:城市交通系统运行可靠性分析方法

著 作 者:王云鹏 陈 鹏 鲁光泉 于 滨 李大庆

责任编辑:李 良

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:16.75

字 数:388 千

版 次:2017年1月 第1版

印 次:2017年1月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-13456-2

定 价:45.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)





王云鹏

王云鹏，长江学者特聘教授、国家万人计划科技创新领军人才，博士生导师，现任北京航空航天大学副校长，车路协同与安全控制北京市重点实验室主任，第七届中国青年科技奖获得者，入选首批

新世纪百千万人才工程国家级人选、交通运输部新世纪十百千人才工程第一层次人选和首批教育部新世纪优秀人才支持计划，长期从事交通信息工程及控制领域的基础理论与关键技术研究。作为“十一五”和“十二五”国家 863 计划现代交通技术领域专家，在我国开辟了车路协同与安全控制研究方向，创立了综合交通大数据应用技术国家工程实验室，建立了国内智能交通领域首个科技部重点领域创新团队——“智能交通技术创新团队”。担任“十三五”现代交通技术领域科技发展战略规划专家和“智能交通”领域召集人，中国智能交通协会交通安全专业委员会主任委员，车载信息服务产业应用联盟技术委员会主席等多项学术团体兼职。近些年，围绕从空、地、信融合和多学科交叉在综合交通网络运行可靠性、智能车路协同与控制、车联网与智能驾驶服务等方面取得多项创新性研究成果，以第一完成人获国家科技进步二等奖 1 项、省部级科技一等奖 4 项，出版中文专著 4 部，发表 SCI/EI 论文 108 篇，授权国家发明专利 33 项，主持制定国家标准 2 项。



陈鹏

北京航空航天大学交通科学与工程学院讲师、硕士生导师。主要围绕城市路网运行可靠性建模与评价、交通信号控制、交通流理论与仿真开展研究，主要学术成果包括：提出考虑多路段关联的城市主干道行程时间分布模型，实现干道行程时间实时估计与可靠性评价，拓展了路网可靠性理论的研究思路与方法；开发了能够再现不同交叉口几何构造、信号控制条件下交通流时空冲突特性的微观仿真模型，能够有效应用于交叉口安全性评价。发表SCI期刊收录论文20余篇，主持国家自然科学基金1项，省部级课题2项，参与国家级课题2项。



鲁光泉

北京航空航天大学交通科学与工程学院教授。近年来围绕驾驶行为、车车协同、交通系统可靠性开展研究。主要的学术成果包括：把风险动态平衡理论引入微观驾驶行为建模，提出了跟驰主观危险感的量化方法；提出基于主观危险感的跟驰模型和基于规则的交叉口冲突消解模型，并用于车车协同安全控制，实现了实车测试；提出考虑时空关联性特征的交通状态多步预测方法，以及考虑多级服务水平影响的主干道出行时间可靠性分析模型，提高了出行时间可靠度计算精度。



于滨

北京航空航天大学交通科学与工程学院教授、博士生导师。曾入选2012年教育部新世纪优秀人才计划及辽宁省优秀人才支持计划，获得国际SCI期刊《PROMET-Traffic & Transportation》的卓越贡献奖。曾主持国家级、省部级纵向项目9项。发表SCI检索论文45篇，其中一篇论文被评为2012年度中国百篇最具国际影响的学术论文之一。主要学术专长为城市公共交通、智能算法、交通大数据挖掘。



李大庆

北京航空航天大学可靠性与系统工程学院副教授，博士生导师，北航“卓越百人”、北航“青年拔尖人才”。主要围绕复杂网络的可靠性与脆弱性，基于相变理论和渗流理论，结合网络的结构和故障等实证数据挖掘，建立了复杂空间网络的维度度量，发现了复杂空间网络的故障传播规律，提出了对网络故障传播的缓解方法。参与出版英文专著1部，发表高水平论文30余篇，其中包括作为第一作者或通讯作者在Nature Physics、Nature Communications、PNAS、Phys. Rev. Lett.等国际著名期刊发表的研究成果，对理解复杂系统的故障过程、建立复杂系统的故障预测和缓解方法有一定的理论和应用价值。

序

随着城镇化进程的不断加快,以北京、上海为代表,特大城市的中心地位和区域主导作用持续增强。交通是城市发展的命脉。近十年来,我国进入了机动车高速增长的时期,快速扩张的城市交通规模与快速增长的机动车保有量叠加,常态化交通拥堵已经成为大城市,尤其是特大城市发展的新特征,城市交通系统的运行可靠性面临着前所未有的挑战。

向着更安全、更高效、更绿色的方向不断演进,始终是城市交通发展的需求与动力。随着通信和信息技术的快速发展,网联化、协同化、智慧化将成为城市交通系统的新常态。城市交通的供需平衡机制、交通行为与交通系统的交互作用规律、系统可靠运行与决策优化方法等科学问题是实现网联化、协同化、智慧化交通系统的基础与关键。

王云鹏教授等人从解决制约城市交通系统运行可靠性提升的基础科学问题和关键技术出发,经过多年的研究积累,对城市交通系统运行可靠性的科学规律进行了深入而细致的解析。

全书从出行者与管理者两个视角来研究城市交通系统的运行可靠性。出行者关注的是如何可靠地估计出行时间,合理规划出发时刻。这部专著以出行时间可靠性预测为中心,对与之相关的交通状态预测、公共交通系统可靠性分析、不同服务水平下的出行时间可靠性估算等方面进行了深入的研究与系统总结。城市交通管理者关注的重点是如何保障城市交通系统运行过程中的抗干扰能力与抗毁能力,进而提升城市交通系统可靠性。这部专著在解析城市交通网络特征及复杂性、城市路网运行随机性的基础上,系统研究了城市路网拥堵传播与消散机理、交通瓶颈识别、城市道路网络修复策略等管理者关注的科学问题与关键技术。

这部专著展示了城市交通系统可靠性的最新研究成果。书中考虑时空关联性特征的交通状态预测、多种服务水平作用下的快速路出行时间可靠性计算、复杂路网拥堵传播模型与基于渗流理论的路网瓶颈识别等具有创新性的成果,无疑将成为相关研究者重要的学术参考。

中国工程院副院长
中国工程院院士

田红旗

前言

城市交通系统运行可靠性是交通管理者追寻的目标。建设高效、安全、绿色的城市交通网络体系是实现城市交通系统可靠运转和协调发展的有力保障。随着国民经济的快速发展与交通需求的飞速增长,我国不少城市的路网冗余通行能力满足不了快速增长的交通量,使得城市交通系统易受内外各种因素的干扰,丧失了原有的平衡,滋生拥堵瓶颈点,降低了城市交通路网的可靠性水平。因此,一方面,需要明晰城市网络交通流的演化规律,识别城市交通网络瓶颈,制订不同时间跨度干预措施,调节城市网络交通流的演化进程,进而提高系统的运行效率;另一方面,在路网遭受破坏时,需要制订相应的交通管控策略,优化管理配置方案,对拥堵瘫痪或有潜在拥堵发生的路网,进行及时的调控,避免经济损失,增强城市交通系统的鲁棒性。

城市交通拥堵的蔓延对出行者的出行品质产生了严重影响。如何降低出行时间的不确定性成为广大市民关注的问题。通过交通状态的准确预测和出行时间的精准估算,为出行者的出行安排提供精准的信息服务,对提升出行品质和交通信息服务品质都具有十分积极的意义。城市交通系统运行可靠性分析理论的完善,是充分发挥智能交通系统效能、提升城市交通运行可靠性、节约时间与经济成本的基础。

本书是国家 973 计划项目《大城市综合交通系统的基础理论与实证研究》课题《大城市综合交通系统的运行可靠性与应急策略》(课题编号:2012CB725404)的主要研究成果汇聚与凝练。本书从管理者和出行者的需求出发,根据交通系统运行可靠性和出行时间可靠性两条主线,分别从路网可靠性、公交系统可靠性、出行时间可靠性三个角度系统探讨了可靠性估算方法、交通系统失效(拥堵)传播与修复、影响交通系统可靠性的瓶颈识别等问题。希望本书能给更多致力于交通系统可靠性研究的科研人员提供参考,促进交通系统可靠性理论的发展。

本书由王云鹏、陈鹏、鲁光泉、于滨和李大庆撰写,其中王云鹏主要撰写了第一、二、三、四章,陈鹏主要撰写了第六、十章,鲁光泉主要撰写了第七、九章,于滨主要撰写了第五章,李大庆主要撰写了第八章。研究生张俊杰、雷方舒、蔡品隆、张亚男、王馨、熊莹、潘日佩、杨刚等参与了撰写工作,在此一并表示感谢。

本书的出版还得到中国工程院“中国工程科技 2035 发展战略研究”项目的支持。感谢国家科技部与中国工程院为本书出版给予的大力资助。

著者

2016 年 9 月于北京

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	2
1.3 国内外研究现状	2
1.4 本书主要内容	8
1.5 章节结构	10
本章参考文献	10
第2章 城市路网结构特征及复杂性	16
2.1 城市交通网络的统计特征	16
2.2 复杂网络可靠性下的瓶颈识别特征参量	17
2.3 典型网络拓扑特性及演化模型	18
2.4 城市交通网络复杂性研究现状	19
2.5 城市快速路交通流特性分析	20
本章参考文献	23
第3章 城市路网运行随机性	24
3.1 城市路网运行随机性分布分析	24
3.2 城市路网供需侧失衡分析	27
第4章 常态下的城市路网可靠性	31
4.1 路网可靠性定义	31
4.2 常态下路网可靠性测算	31
4.3 出行时间可靠性模型	33
4.4 出行时间分布检验数据基础	36

4.5	城市快速路出行时间可靠性分析	40
4.6	基于短时交通预测的路网出行时间分布研究	59
	本章参考文献	79
第5章	城市公共交通服务可靠性	82
5.1	公交运营可靠性评价指标分析	83
5.2	公交服务静态可靠性评价方法	86
5.3	公交服务实时可靠性评价方法	92
5.4	公交服务预测可靠性评价方法	97
5.5	公交服务可靠性评价案例	105
	本章参考文献	118
第6章	城市路网拥堵传播与消散机理	119
6.1	路网拥堵的定义	119
6.2	路网拥堵传播与消散模型	119
6.3	基于路网仿真模型的可靠性单网络案例	123
6.4	大型路网可靠性复合网络耦合案例	140
	本章参考文献	144
第7章	基于路网可靠性的交通瓶颈识别	145
7.1	城市路网动态交通瓶颈	145
7.2	基于路网可靠性的交通瓶颈识别方法	147
7.3	交通瓶颈分析与实证数据基础	150
7.4	基于路网可靠性的交通瓶颈识别	154
7.5	路网交通瓶颈识别案例	165
	本章参考文献	175
第8章	基于渗流理论的交通瓶颈识别	178
8.1	城市交通的渗流组织概述	178
8.2	基于渗流方法的交通瓶颈识别指标	180
8.3	基于渗流方法的交通瓶颈识别	184
8.4	交通渗流的仿真分析	192

本章参考文献	197
第9章 考虑路段重要性的城市道路网络修复策略	201
9.1 道路网络修复策略概述	201
9.2 交通拥堵评价指标	201
9.3 路段重要性评价算法分析	202
9.4 考虑路段重要性的修复策略	208
本章参考文献	232
第10章 城市交通系统运行可靠性仿真平台	233
10.1 城市综合交通运行仿真平台	233
10.2 用户交互与仿真管理模块	234
10.3 交通网络可靠性与脆弱性的可视化平台	238
10.4 出行时间可靠性的可视化平台设计与实现	247
本章参考文献	258

第1章 绪 论

1.1 研究背景

近年来,我国经济环境一直处于飞速发展的阶段,GDP 增长率一直保持在 10% 左右。依据国家统计局的数据,我国的民用汽车保有量从 2010 年的 7801.83 万辆一直增长到 2013 年的 12670.14 万辆,短短 3 年之内增加了近 5000 万辆^[1]。如此高的机动车保有量,一方面体现出人民生活水平的提高,另一方面给城市功能的正常运行带来了很大的挑战。机动车的行驶需要道路的支撑,而机动车保有量越大,则对道路资源的占用要求也越高。但是,由于城市规划、经济、政策等诸多因素使得城市不能够轻易地大幅度加大道路的建设,因此,供需不平衡必然会带来一系列潜在的城市交通问题。

其中,最严重的问题就是交通拥堵。一般拥堵容易发生在早晚高峰,交通拥堵使得驾驶人和乘客不得不在道路上花费更多的时间,如果遇到严重的拥堵,机动车的平均行驶速度基本在 10~20km/h,极大地降低了机动车的便捷性和人们的出行效率。其次,机动车缓慢的行驶给驾驶人带来很大的焦虑情绪,不良的情绪很容易影响驾驶人的判断,增大了事故发生的概率。同时,交通拥堵会造成尾气排放的增加并对环境造成不良影响,如现在国内大城市随处可见的雾霾也与机动车尾气排放量的增加有关。交通拥堵存在不同的影响程度,多数情况下,当一个或者少数路段发生了拥堵,拥堵可能会传播到其他路段,最后导致多个路段乃至区域路网拥堵,给城市交通运行带来严峻挑战。

由此可见,一个稳定且高效的交通系统对城市而言至关重要。城市交通系统在运行过程中受到拥堵等常态因素以及恶劣天气、事故等随机因素的威胁与干扰,降低了系统的可靠性和承载能力,增加了出行者实现出行目的的不确定性。在全球大城市拥堵加剧的背景下,交通网络效率和可靠性研究的重要性更加凸显。一方面,城市规划的相关政策有利于以更紧凑的发展模式振兴城市中心和限制城市扩张,通过密度和边界增长控制以减少效率损失,在此情况下适当的网络设计参数的选择和网络性能的评估至关重要。另一方面,交通网络往往在供应上涉及规划和管理策略的设计问题,在需求上则直接影响着交通控制实施力度,尾气污染、网络拥堵、出行可靠性低等问题所反映出城市路网在性能上的不完善直接限制了交通运行的效率。基于上述问题,目前学者们根据网络和图论研究技术,利用有效的建模方法对城市交通进行网络瓶颈的识别,既是网络研究技术在城市交通中的一大应用点,又是交通研究发展的重要突破点。在当前的发展方向上,交通瓶颈识别的相关研究始终属于交通与网络科学交叉的热点议题,其研究成果对于控制和治理城市交通拥堵、指导交通规划与城市路网改造、提高城市路网在不确定需求环境下的应急疏散及抗毁能力等,具有极大的创新意义和实践价值。伴随着智能交通技术的飞速前进^[2],浮动车交通信息采集技术因其准确

性高、覆盖面广、可实时传输特性等优点而被广泛应用。通过先进的设备采集路网中人、车、路的相关信息,利用海量数据处理、融合等手段建立一个高效、准确、实时的交通运输管理系统,更能全方位地服务于解决一系列交通问题。

然而,城市交通系统运行可靠性研究尚处于发展阶段,仍有许多需要解决的理论与实践问题,针对交通系统运行可靠性分析方法的深入研究必将给城市交通规划和管控体系带来广泛的影响。2012 年国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目《大城市综合交通系统的基础理论与实证研究》课题《大城市综合交通系统的运行可靠性与应急策略分析》正式启动实施,紧密结合我国大城市交通系统状况,深入研究城市交通系统运行可靠性演化规律及管控策略,并将理论研究成果用于指导交通实践,能够有效减少我国城市交通规划、设计、建设和管理中的盲目性,提高整个城市交通系统的运行可靠性。

1.2 研究意义

目前,与日俱增的机动车保有量以及为满足交通需求而建立的错综复杂的城市交通网络是现今国内外各大城市的共同特点。提高城市交通系统运行可靠性,是缓解交通供需矛盾、节约时间及经济成本的有效措施。对于出行者而言,及时了解拥堵状态下的城市路网出行时间可靠性特征,可以最大限度地减少拥堵带来的损失。对于道路管理者而言,通过分析城市路网可靠性,识别路网易失效的节点或路段,及时采取治理措施,可以优化管理配置,预防交通拥堵的发生,亦可辅助制订城市紧急事件应急预案,增强城市道路交通网络抵抗多方面风险的能力。

众所周知,公共交通作为出行者的主要出行方式,在研究城市道路交通网络可靠性的同时,势必要分析公交服务可靠性,从而保证公交车辆的准点率,提高公交服务水平、公交运营状况、企业服务竞争力,增强乘客公交出行便利性,进而保留已有乘客不向其他交通出行方式转化,同时吸引更多潜在乘客选择公交出行,实现其他交通出行方式向公交出行的转化,鼓励社会范围内更多地使用公交出行,达到公交优先的目的。这样亦可以减少道路交通流量来缓解交通堵塞现象,以此改善路网运行状态,提高路网运行效率。此外,路网交通瓶颈的研究也是路网可靠性理论的重要内容之一。识别城市道路网络交通瓶颈有利于增强对城市路网结构特征的重新认识,基于科学判据辨识网络在各类风险下的薄弱环节,对于优化路网规划、拥堵防控、应急管理等都具有重要现实意义。从实践与控制的角度,改善路网瓶颈和关键节点亦成为解决城市交通问题最为“必要和可行”的管控方法。

因此,将可靠性的概念引入到交通与城市建设之中,了解城市交通系统运行可靠性特征、掌握可靠性演变机理、建立完善的可靠性指标与评价体系、实时准确地评价运行可靠性,是建立高效、经济、智慧型交通系统的必然要求。

1.3 国内外研究现状

城市交通系统是一个典型开放与复杂的“巨系统”^[3]。如何改善城市交通系统的运行可靠性是管理者长期为之奋斗的目标。起初,学者们从网络的结构、动态特征等多角度对可

靠性进行探究,形成网络复杂性、连通性、可达性、明确瓶颈等具有具体含义的评价及测度指标。利用这些指标衡量路网状况,有利于管理者为交通参与者提供更好的出行服务。

然而,从根本上描述网络运行特征、掌握网络演化规律,则需要从时间与空间、宏观与微观多维度考虑,从而更加深入地识别影响网络交通流运行可靠性的诸多因素,进而利用总体与局部结合、动态与静态交汇的网络可靠性建模分析方法,实现对交通系统运行内在规律的认知和把握。因此,围绕道路网络的物理结构特征,对常规性与偶发性拥堵的可靠性机理分析逐渐成为学者们的研究热点,并主要从交通瓶颈、交通网络瓶颈点识别以及交通网络可靠性与拥堵评价等研究体系和相关领域的交叉学科进行剖析。

首先,在交通瓶颈问题研究方面,包含瓶颈定义、拥堵状态判别技术和瓶颈点预测技术三个方面。在研究的维度和深入程度上,早期的国外研究主要侧重于微观路口、关键路段的识别,并通过交通流参数对瓶颈处的微观特性进行分析。近年来,交通瓶颈识别相关的研究重心逐渐拓展至网络层面,结合网络配流以及可靠性理论,综合动态时空分析和仿真手段开展研究;其次,关于复杂网络瓶颈节点的研究成果表明,网络中存在一部分瓶颈节点显著影响整个网络的性能,其地位为局部网络乃至整个网络的核心,是网络中最为关键的点的集合,其余节点在功能发挥上的作用与瓶颈节点具有显著的量级差别;另外,由于同一网络在不同时间、空间维度的差异,和不同网络其信息载体的特性不同,针对网络特征差异乃至不同的网络类型,瓶颈点的测度意义并不完全一致。在交通网络可靠性与拥堵评价方面的研究主要集中在运用复杂网络理论,分析城市道路网络结构、交通流及相关因素的影响;在交通拥堵评价方面的各类研究集中于对城市交通拥堵评价模型与算法的讨论,以及信息处理与控制算法协调下新的拥堵评价手段与相关控制模型的研究,如表 1-1 所示。

网络可靠性研究中的主要测度、研究手段及案例应用

表 1-1

研究学者	网络可靠性测度	交通网络研究手段	案例研究和应用程度
Taylor, Susilawati (2012) ^[4]	网络可达性随着网络状态的变化	交通网络可达性模型	澳大利亚东南部网络上的实测交通数据
Ip, Wang (2011) ^[5]	节点的旅行者加权平均参数	计算机算法实现的最优化模型	抽象网络算例,中国高速铁路网的应用
Matisziw, Murray (2009) ^[6]	重要路径	最优化模型	俄亥俄州的州内公路系统网络数据
Ash, Newth (2007) ^[7]	路段容量	演化算法	仿真数据

随着交通需求的增长,交通网络瓶颈必定会导致交通拥堵的发生。目前,在城市交通网络拥堵传播与消散方面,很多学者做了大量的理论研究与应用工作,他们的研究方向主要包括交通流、智能交通、交通规划与管理、交通控制等。其中在拥堵传播与消散的研究中,由 Lighthill、Whitham 和 Richards 彼此独立提出的连续交通流模型,即 LWR 模型,是最常用的一种模型,该模型为后续学者研究交通拥堵传播提供了理论基础。后来 Pierre-Emmanuel Mazaré 等人提出一种求解 LWR 交通流模型的简便算法,并且提出了一种新的可以控制固定

或者移动的交通瓶颈的方法^[8]。而在微观交通流层面,CAM模型(元胞自动机)是另一种典型的模型,由 Nagel、Schreckenbers 和 Biham 在 1992 年提出,并成为微观交通流研究中的主流模型。2005 年,Sven Maerivoet 和 Bart De Moor 将 CAM 模型应用于道路交通,并提供了参数的设置和应用的案例^[9]。应用微观交通流研究拥堵传播与消散的另一个重要模型是车辆跟驰模型,它被用来确定在连续交通流中不进行车道变更的个体驾驶行为^[10]。车辆跟驰模型在 20 世纪 50 年代首次被提出,随后学者们从不同角度建立了很多模型,包括 1958 年由 Chandler 提出的刺激—反应跟驰模型^[11]、由 Kometani 和 Sasaki 提出的安全行为模型^[12]、由 Michaels 提出的基于心理及生理跟驰模型^[13]以及用模糊逻辑构建的跟驰模型^[14]等。但是,宏观交通流层面的交通分配模型仍是研究交通拥堵与传播的主要方法,其研究方向主要集中于交通网络的均衡分析。虽然 Wardrop 提出适用范围广的用户均衡理论,但具体应用到交通网络层面就会出现算法不好求解等问题。直到后来 Beckmann 等人提出基于 Wardrop 准则的数学模型,由 Leblanc 等人利用 Frank-Wolfe 算法对其进行求解成功后,宏观交通流问题才真正具有实际应用价值^[15]。刘景星等人针对静态交通分配模型提出了相应的解决途径,给该领域的研究带来较高的应用价值^[16]。

综上所述,宏观与微观交通流研究均受到自身方法理论的局限,存在顾此失彼的缺点。很多学者认为如果将宏观与微观交通流层面的方法结合起来进行研究能够相互弥补缺点。其中,代表性研究是 Lo^[17]和 Szeto^[18]尝试将宏观与微观交通流结合起来,并取得了较好的研究成果。虽然从网络交通流与道路交通流结合层面去研究交通拥堵的传播与消散具有创新性和实用性,并且可以更好地表达网络拥堵情况下的物理排队,以及探究出行者路径选择与交通拥堵传播与消散之间的关系,但是这些研究仅局限于利用交通流理论或者数值模拟的方法,难以对诸交通因素进行全面的考虑,并相应地从网络结构和交通特征方面找到交通拥堵问题的症结并提出解决方法。因此,从复杂网络层面研究交通网络拥堵与扩散的机理特征是现阶段研究的另一热点。

基于网络的拓扑结构,当交通拥堵形成时,如何利用有限的资源去控制交通拥堵的传播成为交通管理者亟须解决的问题,在此背景下,Troutbeck 等^[19]、Harwood 等^[20]、AL-madani^[21]提出了局部控制方法,即以路网的一部分为控制对象,通过优化利用局部的一切条件,来提高局部的交通性能。目前学者们主要从以下三个方面来控制,即静态预防、动态控制和动态预防控制。静态预防的措施有:根据需求合理设计道路渠化区域长度,合理分配渠化区域内直行与转向车道,合理设置停止线宽度,适当延长相邻交叉口之间的道路长度。静态预防最主要的作用是降低拥堵产生的可能性,延缓拥堵的传播,其缺点是不灵活。动态控制策略主要有三类:交叉口信号控制^[22]、转弯禁限^[23-24]和交通诱导^[25-26]。动态预防控制实质就是通过预测未来,提前采取一些措施避免预测的拥堵,或者减轻预测的拥堵对交通的影响。动态控制策略的优点是灵活性好,主要适用于非重复性拥堵。其中,Roberg 等人^[27-32]在交通事件的临时禁行方面做了很多的研究工作,他们的研究对象为单行道格子网络,他们的研究证实了临时禁行能够促进拥堵的消散,解开拥堵闭环,但是在我国的道路网络中基本没有单行道路网,所以他们的方法不适用于我国的道路状况。龙建成提出了菱形禁行规则,并证实这是一个较优的规则,但是禁行的菱形区域的确定,以及禁行时间长短的确定采用的模型并不是优化模型,当路网的情况发生改变时,需要重新计算、重新设计制订方案^[33]。张敖木翰

等建立双层规划模型,以实现临时性车辆禁行的设计,从而降低突发事件造成交通拥堵带来的影响^[34]。研究表明拥堵产生后,受交通诱导的车辆可以比未受诱导的车辆在出行时间上节约3%~9%;而且拥堵程度越大,受诱导车辆获得的效益就越大^[35]。David Levinson 通过仿真研究得出对于偶发性交通拥堵,诱导信息的作用更大^[36]。而针对偶发性交通拥堵的交通信号控制技术,较为著名的是1995年法国巴黎实施的名为CLARIE的人工智能控制模块,它的最大优点是能与其他信号控制系统结合起来应用,能够实现在线拥堵管理^[37]。2000年,英国的SCOOT系统3.0版本推出了一个交通事件管理的模块(包含对交通事件引起的交通拥挤的管理内容),它是与INGRID事件自动检测系统以及VAMPIRE计算机程序集成运行的^[38]。Sheu等利用随机最优控制理论建立了一个非线性的实时离散模型,并利用仿真数据对该模型进行了验证^[39]。Logi等人以典型区域路网拥挤状态为研究背景,研究了实时管理与控制问题,开发了一个基于知识的交通拥挤管理系统。目前,在信号控制方面,能够解决由交通事件导致的交通拥挤,也就是偶发性交通拥挤的信号控制技术还有待发展,前面提到的CLARIE系统对于交通事件导致的交通拥挤,其适应性还有待进一步的研究和测试。英国的SCOOT系统3.0版本推出的交通事件管理模块还有许多实际问题未解决,目前还不能应用于实际。因此,针对偶发性交通拥堵,结合复杂网络的修复理论,来研究交通拥堵控制策略和道路网络修复策略是缓解交通拥堵,实现交通网络连通性、可达性的关键。

但是,随着人们的时间观念逐渐增强,对于交通出行的要求也越来越高,已不仅仅满足于“可达”的标准,更需要出行质量的提高。Bogers^[40]等人研究表明,在出行时间变动的情况下,相对于更快的出行,人们更倾向于出行时间的稳定性,即“可靠”的出行。但大量的随机因素均影响着交通的网络性能,如交通事故、交通拥堵、道路维修等,这些因素都将导致不稳定的交通流状态,引起人们出行时间的“不可靠”。因而,近年来,出行时间可靠性问题越来越受到研究领域的关注,学者们纷纷构造不同的出行时间可靠性模型,并提出了若干改善方法,以使出行时间在“质”与“量”上得到双重提高。

从20世纪80年代开始,可靠性理论在道路交通网络方面的研究迅速发展,主要包括连通可靠性^[41]、行程时间可靠性^[42]、运行准点可靠性^[43]以及候车时间可靠性^[44]、换乘可靠性^[45-46]等,理论成果逐步走向成熟。而公交作为道路交通网络中的重要组成,对其可靠性的研究也尤为重要。国外关于公交可靠性的研究始于20世纪70年代,最初的研究主要以定性研究为主。随着研究的深入,相关研究开始逐步向量化发展。最初对公交可靠性的定义是从运营者的角度出发,Turnquist M. A. 将公交可靠性定义为运营的公交车辆能够按照行车计划运行的能力^[47]。后续的研究逐渐将公交可靠性的定义细化,普遍将公交车辆到达站点的准点率作为衡量公交可靠性的指标。Bates^[43]对公交线路准点性能进行了定义;Yin^[48]等通过模拟从公交系统运行时间的角度评价了系统的可靠性;在可靠性的评价方法方面,美国公共交通通行能力与服务质量手册(TCQSM2004)给出了评价公共交通可靠性的方法,并且提出了公交运行准点率的六个评价等级,该评价方法和评价等级被美国各个公交企业广泛用于公交可靠性的评价。另外一些学者指出,系统运营的可靠性并不能反映系统整体的服务水平。因此,这些学者从乘客的等车时间入手,分析了公交系统的可靠性。

Ehsan 与 Deniel^[49]从不同角度分析指出,以营运企业而非接受服务的乘客为评价主体的可靠性评价,有悖于公交可靠性评价的初衷。随着可靠性研究的逐步发展,对公交可靠性

的研究逐渐从运营者的角度转向乘客。国外的公交公司的企业性质是商业机构,公司的主要目标是盈利,从乘客的角度出发所研究的公交可靠性偏重于服务而非运营,因此,用服务来描述公交可靠性更能够从量化的角度体现公交运行的准点性和稳定性。Abkowitz^[50]定义的公交服务可靠性是指在设备可用的情况下,对公交需求者和公交提供者的决策产生影响的公交服务属性的变动性。

然而,随着生活节奏的加快,人们物质生活水平不断提高,乘客在出行时为了实现尽快到达目的地,对公交系统的可靠性具有越来越高的要求。因此,如何保障并提高公共交通出行方式的可靠性越来越受到人们的重视。毛林繁^[51]结合图论建立了双层规划模型以及求解算法,对城市公交网络的连通可靠性做出分析。范海雁等人^[52]对公交线路运行时间可靠性进行了定义,并对公交运行时间可靠性的蒙特卡洛算法进行了完善。戴帅等人^[45]从不同角度分析了公交系统运行时间可靠性、等候时间可靠性以及服务质量可靠性,并建立了相应的模型。陆奇志^[53]研究了不同公交线路之间的运行时间可靠性问题,并应用 Matlab-Simulink 仿真给出了公交运行时间可靠性的分析和评价方法。宋晓梅和于雷^[54]对公交运行可靠性进行定义,即在一定条件下,公交车辆在规定时间内将乘客安全、舒适的运送到目的地的概率。在公交服务可靠性方面,魏华^[55]构建了公交服务水平评价体系,并在此基础上对公交服务可靠性做出定义以及其度量指标,通过建立系统效能模型对公交服务可靠性进行了综合评价。赵航和宋瑞^[56]在系统工程理论的基础上建立了公交服务可靠性模型,并结合大型活动的特点应用蒙特卡洛仿真技术对大型活动期间如何改善公交服务的途径做出了分析。关于公交服务可靠性考核指标的研究有很多,虽然体系各异,但无外乎行程时间、等待时间、服务频率等公交运行特性以及车内舒适度(拥挤程度、车内温度等)、驾驶人态度等公交服务特性两类。高桂凤等人^[57]从公交服务质量的角度出发,将公交车辆运行的发车间隔可靠性、运行时间可靠性、运行准点可靠性等纳入公交服务可靠性评价体系,建立了公交服务质量可靠性评价 ADC 模型,以西安市两条公交线路为背景进行了实例分析。张凡等人^[58]研究了在信息条件下单条线路公交车交通服务水平评价指标及方法。安健等人^[59]在对服务客体对于服务系统的感知及其行为进行演化的基础上,提出了公交服务可靠性测度模型和方法,并以上海 49 路公交线路为例对公交服务可靠性进行分析评价。以此来提高公交系统出行时间的可靠性。从而提高道路网络出行时间可靠性。

除此之外,基于可靠性的研究,很多研究者将可靠性理论应用在路径选择问题上,进行了考虑路网可靠性的路径选择研究。在一般的路径选择问题中,考虑到不同路径的通行能力,有用户均衡与随机用户均衡模型。但当路网受到自然因素、道路维护或交通事故的影响后,会产生不同程度的降级,可靠性降低,出行者在出行者进行路径选择时,通常保留一个安全余量,以避免出行时间的变化(即路网的不可靠性)带来的影响。基于这种路径选择行为,研究者通过加入与可靠性相关的 Gumbel 分布随机项、建立“最稳固路径选择”、从可靠性角度考虑 Wardrop 平衡模型拓展等不同研究思路,在经典的用户随机模型基础上加入了对可靠性因素的分析。同时,考虑到出行是未来某时刻的行为,而道路交通状态随机波动,因此,交通网络交通流的预测结果将为出行者提供的状态信息,为出行者提供更可靠的出行路径选择。其中,Williams^[60]最早将交通流序列的季节性考虑到模型中,提出了季节性 ARIMA 模型,季节性 ARIMA 模型有一个简单的结构形式,季节项提供了交通流系列历史平均水平

的指数平滑,季节性 ARIMA 的提出大大提高了 ARIMA 的预测精度。Smith 等人进行了单点短时交通流预测中参数回归模型与非参数回归模型的对比,检查非参数回归的理论基础,试图提高非参数回归模型的预测性能^[61]。Yiannis 等人^[62]用线圈检测器数据比较了时间序列的四种模型:历史平均、ARIMA、VARMA 和 STARIMA,分别提出了在不同条件下模型的优劣性。Xue 等人^[63]提出了混沌时间序列理论的交通流预测方法。通过两步优化选择方法,考虑相邻点与预测点之间的欧几里得距离与平等系数,提出与局部多项式方法结合来接近相邻点的方法。Stathopoulos^[64]基于重点城市区域的线圈检测器数据,建立了灵活、明确的多元时间序列的状态空间模型。模型结果显示,不同时间段应用不同的模型可以提高预测精度。Dia^[65]通过面向对象的神经网络模型,预测 5min 交通速度和 15min 出行时间。并用此方法预测澳大利亚高速公路路段。结果显示,5min 速度预测准确度高达 90%~94%,15min 时间预测高达 93%~95%,验证了模型的准确性。Zhang 等人^[66]用主成分分析的方法进行数据处理,用联合神经网络的方法进行短期交通流预测。Abdi 等人^[67]提出了改进神经网络模型,提高了预测的精确性,降低了预测计算时间,符合预测算法的多对象性。Vlahogianni 等人^[68]提出了先进的基于遗传算法的多层结构优化策略,拓展了神经网络模型,这种策略可以更好地描述交通流的时空分布特性,从而有助于准确的神经网络结构的选择。Manoel^[69]进行了针对突发事件下交通流的短期预测,提出了在线支持向量机回归模型 OL-SVR,预测典型、非典型情况下的短期交通流,实验结果证明,OL-SVR 模型比高斯最大似然法、霍尔特指数平滑法、人工神经网络模型更适合于突发情况。Wei 提出了支持向量回归的交通流预测模型,采用混合遗传算法,模拟退火算法等确定参数组合^[70],经比较,所提出模型比季节性自回归综合性移动平均,反向传播神经网络等模型更优。同时,他还提出将连续蚁群优化算法与支持向量回归模型相结合预测城市交通流,预测结果比季节性自回归综合性移动平均的时间序列模型更精确。

各种交通流预测模型均在发展,而各种模型又有其各自的优劣性,所以很多学者将几种模型进行了组合,提出了精确度更高的组合模型进行预测。1969 年,Bates 最早提出了运用组合模型进行预测的方法,组合模型可以结合各模型之所长,达到更好的预测效果^[71]。在组合模型中,Mascha Van Der 等人^[72]提出的神经网络与基于统计理论模型的组合方法,KARIMA 方法取得了较好的效果。2010 年,夏英等人考虑交通流的时空关联特征,改进以往预测模型中预测因子选取的方法,在支持向量机模型中引入空间权重矩阵和时间延迟来定义时空相关因子^[73]。2011 年,高为等人在使用 RBF 神经网络研究交通流量预测时,选取的训练样本中包括预测路段及其相邻路段的交通流量数据的时间序列^[74];Min 和 Wynter 在预测算法中考虑许多有参数,例如路段间的距离和路段的平均速度等,然后利用路段之间时间和空间的关联特征来估计参数,从而使模型能够在一段时间内保持较高预测精度^[75]。2012 年,曾嵘^[76]考虑多个路段的时间序列,提出基于时空关联特征的多断面交通流量预测模型,用卡尔曼滤波的方法递推得到预测时间段内的交通流量,最后将所提出的模型与只考虑单断面的模型预测结果对比,结果表明考虑时空关联性的模型预测精度更高。2014 年,Zhang 等人^[77]分析了异构道路网络系统连接点的交通流量特征,然后利用特定路段与其他路段流量数值之间的关系,建立带有动态的相关系数的 RBF 神经网络模型,论文中预测模型的相对误差在 15% 左右,说明考虑异构道路网络系统连接点特征因素的重要性。然而,大部分的