



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

赵靖 杨晓光 著

提升道路通行能力 时空协同优化控制理论与方法

Urban Streets Capacity Enhancement by Coordination
Optimization of Lane Reorganization and Signal Control



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

赵靖 杨晓光 著

提升道路通行能力 时空协同优化控制理论与方法

Urban Streets Capacity Enhancement by Coordination
Optimization of Lane Reorganization and Signal Control

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书基于车道控制理论,自下而上逐步提出空间结构与信号控制相结合的协同优化控制方法,分别形成车道功能动态控制、出口车道动态控制和基于中央分隔带掉头的交叉口流向控制三种时空协同优化控制方法,并分别建立了(非)线性混合整数规划模型。通过算例及仿真分析,对其交通运行效益及适用条件分别进行了评价。

本书适合道路交通相关专业的研究者、高校师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

提升道路通行能力时空协同优化控制理论与方法/
赵靖,杨晓光著. —上海:同济大学出版社,2018.9

(同济博士论丛/伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-7829-4

I. ①提… II. ①赵… ②杨… III. ①交通通过能力
—研究 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 088015 号

提升道路通行能力时空协同优化控制理论与方法

赵 靖 杨晓光 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 王有文 熊磊丽

责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 12.75

字 数 255000

版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7829-4

定 价 98.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

城市交通拥堵被认为是世界性的难题,并日趋严重。与此同时,由于城市土地资源十分有限,诸多城市,特别是大城市的道路基础设施建设已接近饱和。因此,如何通过科学的道路交通控制管理措施,挖掘现有道路交通资源的潜力,适应人们日益增长的出行需求,是交通研究人员面对的严峻挑战。本书基于时空协同优化的思想,从节点、连线、通道和网络等不同层面,深入探讨了信号控制和道路空间的交通流通行权控制理论,建立了一系列提升道路通行能力的方法。

道路空间条件与交通控制条件是相互影响的,互为条件,在优化过程中有着极强的相关性。但由于道路空间条件在整个道路交通系统中是一个相对稳定的部分(慢变量),而信号控制相对而言是一种更易改变的参数(快变量),因此,以往主要在设计阶段优化道路的空间布置,在控制管理阶段则将其作为输入条件,主要注重对交通流通行权在时间上的调整。但从系统角度分析,若将道路空间条件也纳入优化控制体系中,能使信号控制取得更好的效果。本书将交通流在道路空间和时间上的通行权分配问题纳入统一的研究框架内,针对提升道路通行能力这一目标,研究其协同优化控制问题。

在节点层面,传统的优化步骤一般依次确定允许及禁止流向、进出口车道、各进口车道功能和信号配时参数。本书基于车道控制理论,针对上述步骤,自下而上逐步提出空间结构与信号控制相结合的协同优化控制方法,分

别形成车道功能动态控制、出口车道动态控制和基于中央分隔带掉头的交叉口流向控制三种时空协同优化控制方法,并分别建立了(非)线性混合整数规划模型。通过算例及仿真分析,对其交通运行效益及适用条件分别进行了评价。

在连线和通道层面,由于增加了路段要素,因此,除了考虑沿线交叉口的流向管理、车道方向、车道功能和信号配时之外,重点研究了路段车道的优化布置。从可逆车道的动态使用和可逆车道与其他交通管理措施的组合使用两个角度,分别针对交叉口连线和通道,形成基于动态可逆车道的连线交通控制和基于可逆车道的干道交通优化控制两项时空协同优化控制方法,并分别建立了(非)线性混合整数规划模型。通过算例及仿真分析,评价了交通运行效益及适用条件。

在网络层面,由于研究范围的扩展,诸如转向禁止、冲突点消除、可逆车道和单向交通等交通组织策略的组合更为多样,相互关系也更为复杂。本书从多种交通组织策略的组合优化和针对转向交通的动态控制两个角度,形成两项时空协同优化控制方法,并分别建立了双层规划模型和线性混合整数规划模型。通过算例分析,评价了交通运行效益及适用条件。

从中微观层面,建立了空间变量(路段各方向车道数量、交叉口转向禁止、车道功能)和时间变量(信号相位、相序、周期、绿信比、相位差)的组合优化模型,并基于算例、仿真及驾驶模拟实验评价,构筑了提升通行能力的道路交通流通行权时空协同优化控制理论与方法。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 现实背景	1
1.1.2 理论背景	2
1.2 课题来源	3
1.3 研究目的与意义	4
1.3.1 研究目的	4
1.3.2 研究意义	4
1.4 文献综述	5
1.4.1 道路交通设计	6
1.4.2 交通信号控制	14
1.4.3 组合优化	17
1.4.4 综合评述	18
1.5 研究定位、内容和技术路线	19
1.5.1 研究定位	19
1.5.2 研究内容	19
1.5.3 技术路线	20
1.6 本章小结	20

第2章 时空协同优化控制基础问题	23
2.1 优化基本目标	23
2.2 控制基本对象	24
2.3 优化建模方法	26
2.4 本章小结	28
第3章 节点时空协同优化控制	29
3.1 概述	29
3.2 动态车道功能优化	30
3.2.1 基本概念	30
3.2.2 优化模型	31
3.2.3 算例分析	41
3.2.4 小结	44
3.3 出口车道动态控制	45
3.3.1 基本概念	45
3.3.2 优化模型	47
3.3.3 算例分析	52
3.3.4 驾驶模拟分析	57
3.3.5 实际应用讨论	67
3.3.6 小结	68
3.4 基于中央分隔带掉头的交叉口流向控制	69
3.4.1 基本概念	69
3.4.2 优化模型	70
3.4.3 算例分析	78
3.4.4 小结	84
3.5 本章小结	84
第4章 连线和通道时空协同优化控制	86
4.1 概述	86
4.2 基于可逆车道动态控制的连线交通优化	87
4.2.1 基本概念	87
4.2.2 优化模型	91

4.2.3	算例分析	96
4.2.4	小结	102
4.3	基于可逆车道的干道交通优化控制	103
4.3.1	基本概念	103
4.3.2	优化模型	104
4.3.3	算例分析	112
4.3.4	小结	123
4.4	本章小结	124
第5章	网络时空协同优化控制	125
5.1	概述	125
5.2	基于多种交通组织策略组合的网络交通优化	126
5.2.1	网络描述	126
5.2.2	优化模型	127
5.2.3	算例分析	135
5.2.4	小结	138
5.3	基于转向禁止动态控制的网络交通优化	140
5.3.1	基本概念	140
5.3.2	优化模型	143
5.3.3	算例分析	149
5.3.4	小结	163
5.4	本章小结	164
第6章	结论与展望	165
6.1	结论	165
6.1.1	主要研究成果	165
6.1.2	主要创新点	166
6.2	进一步工作的方向	166
	参考文献	168
	后记	184

第 1 章

引 言

1.1 研究背景

城市交通拥挤问题被认为是世界性的难题,并随着城市机动车数量的增长而日趋严重。与此同时,由于城市土地资源十分有限,诸多城市,特别是大城市的道路基础设施建设已接近饱和。鉴于城市道路交通是城市综合交通体系最为关键的基础,支撑着人和物的门到门移动和多方式交通的换乘,故本书试图通过科学的道路交通控制管理措施,挖掘现有道路交通资源的潜力,适应人们日益增长的出行需求。

1.1.1 现实背景

城市交通拥挤问题产生的根源是交通供给与交通需求的不平衡。随着经济与社会的高速发展,城市交通机动化速度迅速加快,然而交通土地资源相对紧张。在这种条件下,科学合理地规划、建设和管理城市道路交通系统是缓解交通拥挤的关键。

长期以来,对城市道路交通系统的建立是按规划(空间布局)-设计(空间优化)-管理控制(时间优化)这个流程进行的。首先通过道路基础设施的调整和完善建立合理的路网结构;然后对现有交通系统及其设施加以优化设计,针对特定问题,寻求改善交通的最佳方案,精细化地确定交通系统及其构成要素;最后确定交通的通行权、通行时间与空间及其管理方案。在此过程中,道路几何条件是交通控制的一项必要的输入参数。

然而,在实际操作中,难以保证提供给交通控制的道路空间设计是最合理的,传统的城市道路交通优化方法往往基于大量的经验和反复的尝试,优化成果

一般仅仅是一个可行的方案。并且各种交通管理策略(可逆车道、单行线、流向禁止等)之间,以及其与交通控制都存在相互影响关系,忽略它们之间的关联性也将导致优化结果为非最优方案。

此外,道路交通系统中随机因素的扰动(如大型活动、交通事故、紧急救援交通等),可能造成交通需求的激增或设施通行能力的衰减,显著改变相关区域交通供需关系,使原本就脆弱的道路交通系统运行状况进一步恶化。这种交通供需的结构性不匹配仅仅通过信号控制等时间优化措施常难以有效快速应对。

为了充分利用现有的道路交通资源,同时快速应对交通需求的随机性,有必要引入时空协同优化的概念,即对道路交通系统进行的优化控制不局限于通过信号控制来调整时间资源的分配,道路空间结构也作为可优化参数,同时从空间和时间两个角度综合考虑,基于交通供需条件,对交通流的通行权进行系统优化和调整,实现网络时空资源的最佳利用。这也是本书研究着重提出以通行能力为目标,对城市道路交通进行时空协同优化的出发点。

1.1.2 理论背景

道路交通系统优化问题是一个资源(通行权)分配优化问题,供分配的资源包括空间资源和时间资源,前者主要体现为道路几何条件,后者主要体现为交通控制条件。因此,城市道路交通系统优化理论研究本身可分为道路交通设计和道路交通控制两大部分。

交通设计的学术思想在形成之初主要体现在道路几何设计之中,随着理论体系的不断完善,现已作为一个独立概念被提出,并成为一项被高度重视的改善城市交通的方法和技术。特别是在我国其创新性、科学性及体系性得到了长足的发展(杨晓光,2003;杨晓光等,2010)。城市道路交通设计作为其中一项重要组成部分,其研究内容主要包括交通网络设计与优化、节点及接入交通设计、公交优先设计、交通语言系统设计、动静交通协调设计、慢行交通系统设计等方面。设计方案一般包括车道位置、车道数、车道功能、车道长度、车道宽度等空间参数,且不断向精细化设计方向发展。道路交通设计的研究成果对于揭示交通系统要素、优化目标和约束条件之间的有机关系,分析道路空间要素的高效利用方法,起到了十分重要的作用。

交通控制,这里主要指交通信号控制,早在19世纪,人们就开始对其进行研究,用信号灯指挥道路上的车辆交通,控制车辆出入交叉口的次序(全永荣,