



■ 李 健 著

匝道交通控制理论与方法

ZADAO JIAOTONG KONGZHI LILUN YU FANGFA



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.com.cn>

013067216

U412.35
04

内容摘要

匝道交通控制理论与方法

李 健 著



北京交通大学出版社

· 北京 ·



北航

C1674678

U412.35/04

818730810

内 容 简 介

本书是一本专门针对匝道交通控制理论方法研究的专著,从系统科学、控制科学与工程、复杂网络理论的角度对匝道交通控制进行了全新的提升,重点探讨了在城市结合部道路交通网络拥堵背景下的交通控制和拥堵缓解问题,主要以匝道协同控制为研究对象进行了相关理论和方法的研究,并以北京城市路网为案例初步完成了相关的实证分析。

本书适合于从事交通运输系统工程、交通控制工程和交通运输规划与管理等领域研究的学者、高校教师、工程技术人员和研究生等阅读和参考。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

匝道交通控制理论与方法 / 李健著. — 北京: 北京交通大学出版社, 2013. 7
ISBN 978 - 7 - 5121 - 1540 - 8

I. ① 匝… II. ① 李… III. ① 匝道 - 交通控制 IV. ① U412. 35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 168731 号

策划编辑: 王晓春

责任编辑: 王晓春

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010 - 51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京交大印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 × 260 印张: 12 字数: 300 千字

版 次: 2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 1540 - 8 / U · 142

印 数: 1 ~ 1 000 册 定价: 38.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010 - 51686043, 51686008; 传真: 010 - 62225406; E-mail: press@bjtu. edu. cn。

前言

城市道路拥堵是近年来的热点话题,引起了全社会的广泛关注和持续讨论。具体到我国城市的实际情况,从发生的地区看,道路交通拥堵已经不局限于北京、上海、武汉和广州等一些大城市,很多省会城市和地级城市的道路交通拥堵也已非常明显;从发生的时段看,城市道路交通拥堵不再仅集中在通勤高峰期,拥堵时间长度显著延长;从发生的形式看,城市道路拥堵也不再是局部道路路段或小区域路网内的问题,已呈现出在整个城市蔓延的态势;从发生的根源看,城市道路交通拥堵的主要原因虽然仍是巨大的通勤需求,但是诱因更加多元化,路网通行可靠性也更加脆弱。

应对和缓解城市道路拥堵是一项系统工程,策略的制定需要从多角度去综合考虑权衡,而具体措施的实行也需要考虑实际条件。纯粹为避免和缓解拥堵而采取强制的限行措施不是根本目的,应对道路拥堵的主导思想应该是有计划地引导和释放交通需求及控制和管理已形成的交通流,以较小的且合理的管理成本付出得到系统能力提升,包括实际通行能力的增加、行程延误时间的降低及燃油消耗的节约等。

按照城市道路交通拥堵发生的区域范围划分,可粗略归纳为城市市域内和城市外围周边结合部路网的交通拥堵两大类。为应对和缓解道路交通拥堵,在城市市域内部或中心区,比较现实的做法主要是通过多种交通方式的合理分担及有效管理具体实施。而在城市外围的结合部路网内,这些措施并不适用或者并不具备实现的基础条件。由于城市中心区和外围的路网结构条件和交通状态均存在非常明显的不同,需要区别对待:城市外围区域内公共交通网络覆盖度及道路密度显著降低,进出城仍以机动车为主且道路交通集中度提高,造成此区域内的城际高速公路联络线和城市快速路交通负荷长时段较高;另外,在结合部区域路网,大量不同性质的车流快速交汇和转换,也极易造成一些关键节点的阻塞并快速蔓延。因此,对这一特殊路网区域进行匝道交通控制极为必要且有非常强的现实意义。

根据这种思路,结合实际的需要,本书作者在匝道交通控制研究及相关的领域做了一些工作。本书即是作者依托北京交通大学优秀博士生科技创新基金项目及国家高技术研究发展计划项目所做的这一部分研究工作的初步总结,其中既包括了一些匝道交通控制理论和方法的探讨,也包括了以北京城市道路的结合部路网为主要研究对象所做的相关实证案例研究。

本书的研究中,应用系统工程相关理论,主要采取系统分解与系统的方法,首先将路网进行空间分解,将匝道控制归纳为关键点的控制,主线关联多匝道控制及互通式立交网络的控制等三种类型。对第一类,主要在于分析匝道控制中的基础问题,包括传统算法的实际应用、控制方程的设计及智能控制律算法的设计:对 ALINEA 算法,以两种思路对其在实际中的应用方法做了修正;针对部分匝道状态描述指标存在信息缺失和信息冗余的问题,设计了更符合实际的参数—冗余等待时间,并在控制方程建立中应用;应用了一种在机理上更优的 SVM 方法设计了匝道控制律的求解算法。

对第二类主线关联匝道控制,首先对现有的研究对象形式进行了归纳,以优化控制理论

为基础，建立了多匝道的协同控制模型；同时，应用标准化数据拟合的方法比较简便地对交通状态做了划分；在仿真中，从排队长度分析入手，解释了理想的控制与实际状态之间的差距，提出了缩小控制周期的改进方法并以冗余等待时间为基础设计了冗余等待周期数指标，进一步做了对比。

对第三类，即互通式立交的拥堵控制，首先对其进行控制的必要性和思路进行了解释，依然以分解和协同的思路分析问题，将互通式立交的控制的基础工作分为静态的模型刻画和动态的特性推算：在静态模型刻画中，应用图论将立交展开为平面图形式；在动态特性推算中，结合参量网络方法求解互通式网络的最大流，以及对网络的动态流谱进行了计算并确定了网络的受控关键弧。在立交网络的协同控制策略设计中，改变了传统的匝道控制思路，结合网络流控制方法，将互通式立交的多匝道控制转化为以匝道为实施载体的网络流控制问题，在分析了网络控制的效率与公平问题之后，设计了以动态阻抗均衡为目标的协同控制方程，并以 Simulink 平台实现了相关的初步验证。

本书由北京交通大学优秀博士生科技创新基金项目（2009141052522）与北京交通大学优秀博士生国际化联合培养项目、国家高技术研究发展计划项目（“863”计划）（2007AA11Z213）联合资助。

匝道交通控制是一个新的研究方向，既属于控制科学与工程的一个分支，也是一个多学科交叉且具有一定难度和深度的研究领域，其中涉及控制理论和方法、系统工程及网络科学等多方面的内容。由于作者的知识水平和研究能力限制，书中难免存在许多的不足甚至是错误之处，敬请业内专家和广大读者批评指正并提出宝贵意见和建议，以作为作者后续修改和继续研究的指导。

著者

2013年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景分析与问题提出	1
1.1.2 匝道控制基本含义	7
1.1.3 匝道控制研究意义	10
1.2 国内外相关研究文献综述	11
1.2.1 几个基本问题说明	12
1.2.2 高速公路匝道交通控制相关研究综述	15
1.2.3 城市快速路匝道交通控制相关研究综述	23
1.2.4 匝道控制及相关研究说明	32
1.3 主要研究内容	33
1.3.1 主要研究内容和技术路线	33
1.3.2 主要研究内容说明	34
1.4 全书结构及章节安排	35
第2章 匝道控制基础理论、策略与模型	38
2.1 基本的匝道控制策略和方法	38
2.1.1 匝道控制分类总结	38
2.1.2 定时控制与感应控制	41
2.1.3 需求-容量控制与密度控制	41
2.1.4 匝道协调控制策略与方法	44
2.2 面向控制的道路宏观交通流模型	46
2.2.1 LWR 模型及离散化	46
2.2.2 META 基本模型及表现拥堵时的改进形式	47
2.3 匝道交通控制评价	50
2.3.1 基本统计指标	50
2.3.2 扩展统计指标	51
2.4 小结	52
第3章 匝道多目标实时协调控制	53
3.1 单匝道多目标实时协调控制的基础	53
3.1.1 匝道多目标协调控制的含义	53
3.1.2 单匝道模型及描述	54
3.2 连续交通流模型的简化及控制方程	55
3.2.1 LWR 及 METANET 的简化	55

3.2.2	匝道排队冗余等待时间模型的提出	56
3.2.3	控制方程及控制评价的改进	60
3.3	以 RBF 为核函数的 SVM 算法及流程设计	62
3.3.1	SVM 基本原理	62
3.3.2	以 RBF 为核函数的 SVM 控制律算法流程	64
3.4	单匝道多目标协调控制案例研究及技术总结	65
3.4.1	研究对象及参数识别	65
3.4.2	No Ctrl. 单匝道交通流状态	67
3.4.3	ALINEA 单匝道控制	67
3.4.4	RBF-ANN 单匝道控制	70
3.4.5	RBF-SVM 单匝道控制	71
3.4.6	单匝道多目标协调控制效果综合对比及总结	72
3.5	小结	77
第4章	路网单向主线关联多匝道协同控制	78
4.1	主线多匝道协同控制的基本问题说明	78
4.1.1	多匝道协同控制问题的性质	78
4.1.2	多匝道协同控制基本策略和方法说明	79
4.2	主线关联多匝道模型的刻画与描述	80
4.2.1	空间模型基本形式及其变形	80
4.2.2	主线关联多匝道空间形式及分解	82
4.3	主线关联多匝道控制策略及方法	84
4.3.1	主线关联多匝道系统协同控制基本思路	84
4.3.2	基于优化控制理论的策略与方法	89
4.3.3	主线关联多匝道协同控制系统建模	90
4.3.4	主线关联多匝道 OD 推算的说明	96
4.4	主线关联多匝道协同控制案例研究及技术总结	98
4.4.1	主线关联多匝道协同控制基本问题	98
4.4.2	No Ctrl. 主线关联多匝道交通流状态	105
4.4.3	主线关联多匝道控制效果对比分析及总结	112
4.5	小结	124
第5章	互通式立交网络流协同控制	126
5.1	ftf 网络控制的基本问题	126
5.1.1	互通式立交拥堵控制问题的提出	126
5.1.2	路网交通流分析与控制相关研究	128
5.1.3	路网多匝道协同控制的思路	129
5.2	ftf 路网结构模型的刻画和静态物理特性描述	131
5.2.1	路网结构空间解析模型	131
5.2.2	路网静态特性建模应用	136
5.3	ftf 互通式立交路网动态流谱推算	140

5.3.1	立交动态 OD 流量反推基本问题	140
5.3.2	立交网络动态 OD 流量反推的计算应用	145
5.4	ftf 互通式立交网络最大流问题	150
5.4.1	网络最大流的一般问题	150
5.4.2	网络最大流算法的一般方法	150
5.4.3	互通式立交网络的最大流计算	151
5.5	基于控制理论的 ftf 网络流协同控制问题	152
5.5.1	路网多匝道协同控制策略及方法	152
5.5.2	路网多匝道协同控制方程及评价	152
5.6	ftf 路网多匝道虚拟协同控制案例研究	154
5.6.1	ftf 路网多匝道虚拟协同控制仿真实现	154
5.6.2	立交虚拟协同控制效果对比分析及技术总结	155
5.7	小结	157
第 6 章	总结与展望	159
6.1	匝道控制相关研究简要总结	159
6.2	交通控制相关问题思考	160
6.2.1	交通控制研究复杂性	160
6.2.2	交通控制局限性	161
6.3	相关研究展望	162
参考文献		164
后记		180

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景分析与问题提出

常态的道路交通拥堵，是社会经济快速发展和城市建设所产生的交通需求与交通供给和有效管理之间长期失调产生的必然结果。同时，城市道路交通拥堵也已明显制约了城市运行效率和稳定性并在一些城市中呈现出局部路段拥堵加剧、全局性路网拥堵蔓延及网络整体通行可靠性降低的现象与趋势，而由此衍生的各种环境（尾气排放、噪声等）和社会问题（机动车之间及机非之间争道抢道引发冲突和安全问题、居民出行困难、主要由设计和乱停车导致的步行空间压缩、通勤无保证及交通事故等）也在严重消耗着有限的城市资源。

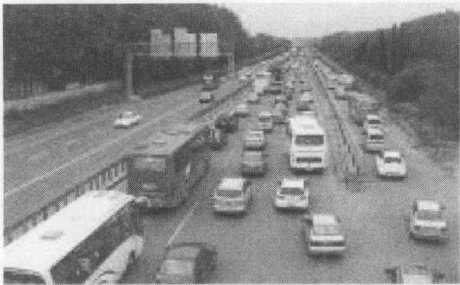
以我国北京为例，据 International Business Machines Corporation (IBM) 在 2010 年 6 月发布的第一份 Global Commuter Pain Study (IBM, 2010) 报告显示，以 10 项指标综合计算的“通勤困扰指数”对全球 6 大洲 20 个调查城市的交通状况进行排名，以北京为代表的发展中国家城市普遍较为靠前；在正常的工作日，交通拥堵程度加剧，高峰时间延长，尤其在进出城主干路段，比如 2010 年 8 月 14 日开始持续 10 余天的 G6 高速北京段大拥堵引起了社会广泛关注；而在节假日或出现不利天气时，道路交通拥堵更加快速的形成并蔓延，比如 2010 年 9 月 17 日，由于国庆和中秋的临近，北京市区早晚高峰期出现大面积、长时间拥堵，尤其晚高峰时拥堵路段超过 140 条，二环至五环全面拥堵且主要集中在快速环路与高速公路联络线的连接路口及互通式立交桥处，各条高速公路进城联络线全面拥堵，尤其环路匝道出入口处车辆排队严重，全天路网总体拥堵时段长达 11 h。

在道路交通拥堵中，除常见的城市中心城区拥堵之外，大城市城乡结合部路网常态交通拥堵也日益加剧，已经成为社会热点问题。在大城市结合部区域，每日进出城仍以道路交通方式为主并集中在放射型干道上，其中高速公路联络线和城市快速路负荷集中度较高；高速公路联络线和快速路与城市道路交通系统衔接、转换的重要空间节点上发生着大量的进出各自系统的交通流交换，而不同性质的车流快速交汇、转换和大流量对网络的冲击也更易造成阻塞失效并快速蔓延。

以北京周边城乡结合部路网交通为例，通勤等多种类型交通流的叠加在结合部路网的主



线和匝道处产生比较明显的拥堵,在高峰期尤为明显,部分路段、桥区和匝道处拥堵时间超过 2 h,严重影响进出城出行效率,如图 1-1 所示。



(a) 北京结合部路网高速公路主线拥堵



(b) 北京结合部路网互通式立交桥匝道拥堵

图 1-1 北京城市结合部路网交通拥堵现状

为应对道路交通拥堵,全球大部分城市均制定了一系列的积极措施付诸实施并取得了一定的成果。如通过对全美 439 个城市调查显示,交通拥堵指标,包括 Travel Time Index (TTI), Delay per Traveler (DT) 及 Total Delay (TD) 等在 2004—2007 年增长缓慢,个别指标有所下降,如 TTI 保持 1.25 不变;DT 由 36.5 h 减至 36.1 h;TD 由 3.97×10^9 h 虽增加至 4.16×10^9 h,但增速较前期明显减缓 (David Schrank 等, 2009);另外近期其他相关举措还有武汉在 2009 年面向全球征求交通拥堵解决方案,以及 IBM 在同年开始启动的“智慧的地球—智慧的交通”项目等。

现阶段预防及应对城市交通拥堵的策略和方法基本可以归为以下四种类型。

- (1) 容量调节: 目的在于通过道路及相关配套设施建设增加交通供给总量。
- (2) 需求控制: 控制交通需求的产生,减少出行,降低道路绝对流量;主要的方法可以分为经济杠杆调节策略(诱导分流)以及行政干预政策(管制出行)。
- (3) 系统分担: 通过多种交通方式分担减少机动车出行,降低道路出行压力。
- (4) 管理与控制: 通过调节或控制交通流的状态,优化特定区域内的交通流时空分布;大体上可分为交通信号控制策略和交通信息诱导策略及二者的结合。

其中(1)可以归结为 Traffic Management Planning (TMP), (2) 为 Traffic Demand Management (TDM), (3) 和 (4) 为 Traffic Management Technique (TMT)。从城市规划和建设及其他角度,预防和应对拥堵还有城市功能区合理布局、组团规划等方法,可与以上具体的策略结合形成从宏观、中观和微观多层次进行系统研究。

以系统工程的思路和分析方法,对现今世界各地应对城市道路交通拥堵所制定和采取的主要策略和方法进行归纳和总结,如表 1-1 所示。

表 1-1 城市道路交通拥堵预防和缓解策略及方法总结

说明 类型	目的	策略	方法	典型应用城市/区域/ 应用系统/相应法律法规等
供给 容量 调节	增加道路 交通供给	道路建设/ 线路改造	(a) 新修及改扩建道路/路网改造 (包括新建立交桥、路口改造等)	—
		停车设施建设	(b) 城市各种停车设施建设	London /Curitiba



续表

说明 类型	目的	策略	方法	典型应用城市/区域/ 应用系统/相应法律法规等
交通 需求 管理	减少 机动车 交通 绝对量	经济杠杆	(c) 公共交通补贴/建设投资补助	台北/Urban Mass Transportation Act in U. S. A.
			(d) 交通堵塞税/燃油税	Stockholm/London
			(e) 牌照税/拥车证费	Singapore
		行政干预	(f) 限号出行	北京/Seoul
		道路资源 使用管理	(g) 设置高载客率车辆车道	Atlanta/Brisbane
			(h) 错峰通勤出行	Houston
		多种出行	(i) 自行车通勤	Copenhagen/Amsterdam
出行 分担 分配 优化		公共交通 建设与优化	(j) 客运轨道(网络)建设运营	London/Munich/Tokyo/Moscow
			(k) 地面公交网络建设	Berlin/Brussel/Birmingham
			(l) 常规公交专用线设置/快速公交等	Curitiba/Bogota/Boston
			(m) 常规公交网络(路线/发车)优化	Advanced Public Transportation Systems in U. S. A.
			(n) 换乘枢纽及线路衔接优化	Paris/Washington
交通 控制 调节	调整 交通流 时空分布	交通流 控制、调节 与诱导	(o) 车辆控制/停车诱导/车辆调度	Cologne/上海
			(p) 交叉口信号控制—单路口控制	New York
			(q) 交叉口信号控制—绿波带控制	ACTRA in Salt Lake City
			(r) 交叉口信号控制—区域面控	Toronto/Scoot in London
			(s) 进出匝道调节控制	Chicago/Los Angeles/Seattle /Washington/Southampton Twin City Metro. area
			(t) 道路系统转换匝道调节控制	Detroit San Antonio/San Diego
			(u) 道路主线速度控制	Ottawa
			(v) 区域通道控制	—
			(w) 交通出行信息发布与诱导	—
			(x) 法律法规规范驾驶行为	—

城市道路交通出行以服务于社会和经济发 展为目标,因此纯粹为避免和缓解拥堵而采取强制的限行措施并不是根本目的,应对道路拥堵的主导思想应该是有计划地引导和释放交通需求及控制和管理已形成的交通流,以较小的且合理的管理成本付出得到系统能力提升,包括实际通行能力的增加、行程延误时间的降低及燃油消耗的节约等。

根据这种思想,结合系统工程分析问题的方法,对表 1-1 中所总结的各种道路交通拥堵应对措施的优点及存在的不足进行逐条分析。



(a) 道路建设与线路改造针对动态交通问题,新修道路及路网改造需要大规模投资,而且新的交通供给也会促进新的道路交通需求产生。

(b) 各种停车设施的修建主要针对静态交通问题,但是停车设施建设,既需要考虑与道路设施配套的需要,也需要考虑其建设的目的和管理方式等问题,此处可借鉴 London 与 Curitiba 的思路,即停车设施不再追求与私人小汽车的出行相适应,更重要的是与公共交通体系协同。

(c) 公共交通补贴措施则充分利用了经济弹性理论,目的在于吸引客流转移,平衡城市交通各子系统的压力,同时也为推动公交系统服务能力的提升创造了空间。

(d) 与 (e) 目的相似。新加坡在 20 世纪 80 年代前就已开始征收拥挤费,Stockholm 和 London 在 2000 年后也陆续实施,但对此项措施的制定和实施一直存在较大争议,主要的争议集中在措施的合理性和实施是否有效果两个方面。

首先,在拥挤收费的合理性方面,许光清(2006)从经济学外部性的角度提出通过提高汽车的使用成本将汽车交通的外部成本内部化的思路,通过适当提高汽油价格,增加汽油消费税,对机动车采取合理的收费机制,即在不同时段、不同路段和地区实行不同的行驶和停车收费等经济手段,从而使理性的驾车者选择合适方式出行,将机动车的出行率控制在合理的水平上。

我国的交通法学专家张柱庭,对于拥堵收费的合理性与合法性问题有过深入的论证,这些观点在处理城市道路拥堵收费等一系列问题中非常值得借鉴。

其次,在实施效果方面,如要通过征收拥堵费改善交通,则必须首先有能够替代的高效率公共交通系统。

第三,按照需求弹性来判断,以拥挤收费为代表的这些经济杠杆策略仅能限制部分私家车的出行。从源头来看,以行政措施限制城市机动车的增长与社会经济的发展会产生矛盾,而且机动车购买主要集中在城市;以经济杠杆征收或提高通行、停车等费用从本质上来讲又与道路交通的公共服务性质矛盾,也只可作为一种短期的管理手段。

另外,需要注意的是,虽然征收拥堵费在国外一些城市是一项行之有效的交通管理举措,但是具体到我国的实际国情,在公交系统等不发达或根本无法满足基本的通勤需要的前提条件下,征收拥堵费需要避免治堵的负面影响,尤其是不能产生“鼓励用交税置换使用权”的社会公众印象。

从现阶段对机动车的拥堵费手段限制回溯到城市综合交通体系的设计和资源配置来讲,城市公共空间的设计规划和使用是一个严肃的社会问题,我们的城市与欧美城市不同,交通需求的规模和公众可以支付的成本都不在一个等级上,差别巨大。因此,我国城市的交通资源配置需要以满足城市主体交通需求为基本原则和目标,现阶段主要以平民化的硬性通勤需求为设计和规划的根据。

(f) 限号出行可以在特定时期内采用,效果明显。

(g) 设置高载客率车辆车道(High Occupancy Vehicle, HOV)等目的在于提高单车使用效率,是非常行之有效的充分利用道路资源的管理措施,在欧美等国应用较广,如图 1-2 中(a)所示。我国城市中,机动车出行的低满载率是一个普遍现象,产生了两个方面的问题,一是交通资源的浪费,二是道路交通拥堵的假象。以北京为例,虽然环路每天车水马龙、川流不息、拥堵不堪,车流量很大,但是因为满载率非常低,实际上换算成的人



流量并不大。为了充分利用宝贵和有限的交通基础设施,非常有必要在我国部分城市中实施HOV管理。但是,HOV在我国城市实行存在两个方面难题,一是管理规则,二是驾驶者素质。公交专用道是一种特殊的HOV形式,也是HOV在我国城市中实施的一条可行之路,应该在保持现有成果的基础上适当扩大范围。

(h) 错峰通勤的实施受到多方面限制,且由于出行时滞、路网复杂性等因素影响,效果并不明显。

(i) 自行车通勤替代机动车是非常有效的措施,在欧洲城市较为流行;但自行车通勤对路径阻抗更为敏感,受天气影响较大,更需要相应道路设施的支持。在我国大部分城市中,自行车出行的环境普遍较差,不安全因素较多,随着机动车的增加,很多道路两侧开辟为停车场,自行车出行空间被明显压缩。

从我国这十几年来年的发展来看,城市设计的理念、交通规划的思路及道路建设的实施均以机动车交通为主导,行人、自行车等非机动车的交通空间被挤占,短期内很难恢复。

(j) 客运轨道建设。轨道交通虽然是城市发展到一定规模以后应对交通拥堵问题的必然选择,但是需有长远计划,如果仅仅为了解决暂时的拥堵或处于展示城市形象等目的而大规模地建设,则日后的养护管理等又成了问题。道路交通与轨道交通虽同属于交通运输服务业,但是两个系统在物理构成、技术特点及管理方式等诸方面几乎没有共同点,不能采用统一化的管理体制和机制。

城市交通拥堵反映的是深层次上城市资源的透支和过度的承载压力。由于经济发展的过度集中,尤其是第二产业发展的滞后和衰退,人口将会越来越集中到极为有限的几个大城市寻找工作机会,北京、上海等大城市的人口膨胀及由此带来的一系列问题就会出现,而交通拥堵仅是其中的一个表象,但是交通拥堵的另一面就是大规模的出行需求。在这种大环境中,也仅有北京、上海等极其有限的几个城市有这种强烈的出行需求。所以,对大多数城市来说,在客运轨道交通的规划建设论证中,一定要考虑轨道交通的出行需求。如果没有足够客流的支撑,那么轨道建设则必然造成大量浪费,不同的城市修建轨道交通,一定要量力、量需而行。

(k) ~ (l) 包括基本的公交网络建设及在特定线路上设置的快速公交等。

(m) 公交线路和网络的优化,包括发车间隔和具体路线的优化是一项技术上和实际中均可行的方法,但是前期需要对各条公交线进行比较详尽的调查,在此基础上制定具体的区间车、快车开行及动态发车间隔优化方案;其次,公交线路应该减少主干道的重复长线路并改成短距离的支线线路,从而节约时间,提高运营效率。由于公交网络受OD出行路径和流量、道路布局等影响,优化较为复杂。我国昆明规划实施的“一路一线,分层成网”公交线路布局模式提供了一种简化的方法,可以借鉴。

(n) 公交枢纽内部针对行人走行和换乘的流线设计和优化容易被忽略,使行人走行时间比重较高;另外,在立体层面上,公交枢纽的优化还包括了轨道交通和地面公交等多种方式之间的衔接设计问题。

其中(j) ~ (n)项措施可归总为公共交通的系统建设。在城市规划领域,学术界近期提出的“公共交通引导城市发展”的理念和方法(Transit-Oriented Development, TOD)也非常值得关注,但是真正的落实和实践也一定要结合我国城市的具体情况进行。

以上(a) ~ (n)项措施主要从中宏观角度对城市道路交通拥堵的各项措施进行了分



析,与此相对应,各种交通控制调节措施则可以视为微观技术手段。从道路网络与交通流的相互关系来看,城市交通需求与交通供给失衡为主要因素,道路交通流大面积和长时间持续的高负荷运行,使道路交通流处于弱稳定状态;城市道路交通流状态失稳成为诱发因素,易造成局部路段的交通阻塞。以调整交通流时空分布为目的的交通控制和调节手段也是多种多样。

以美国城市实施交通控制的一系列方法为例,由于美国各城市基本上均普遍以私家车交通为主,常规公交和轨道交通等作用较小,因此道路交通拥堵的现象十分明显,各种道路交通控制和管理措施也是多种多样。以 Atlanta, GA 为例,虽然道路网极为发达,但由于交通需求非常大,因此主要道路 I-75, I-85, I-285 及 I-20 等高峰期拥堵严重,采取的相应的道路交通管理措施包括设置高占有率车道、信息诱导及入口匝道控制等,如图 1-2 中各图所示。

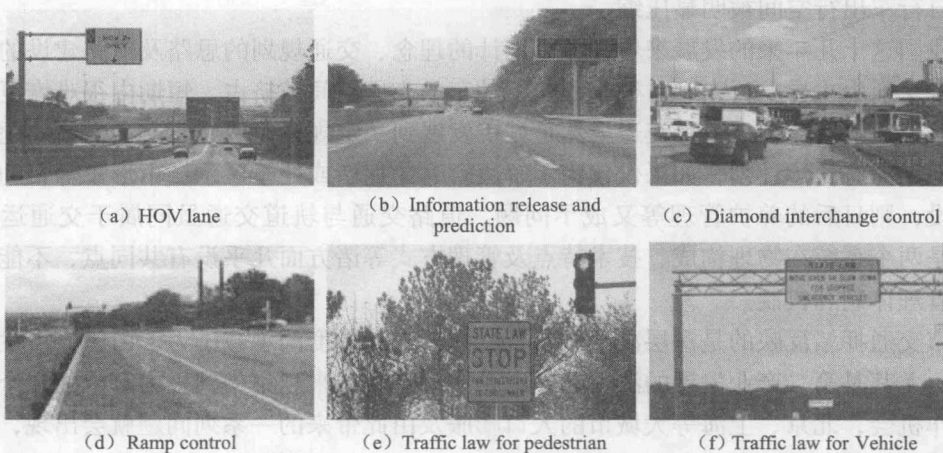


图 1-2 亚特兰大城市道路交通控制实施图示

承接以上内容,继续对一般的交通控制和调节措施进行分析。

(o) 此项措施的目的在于减少交通巡游量及降低干扰,如上海实行的针对出租车的调度取得了一定的积极效果。

(p) 信号灯控制是最为常见的交通控制形式,主要用在道路交叉口以提高通行能力及安全性。

(q) ~ (r) 属于各种不同的信号周期控制协同形式,典型的代表系统包括 Salt Lake City 等城市实施的基于感应控制的 Advanced Control & Traffic Responsive Algorithm (ACTRA) 及 London 等实施的基于周期相位优化的 Split Cycle Offset Optimization Technique (SCOOT) 等。

(s) 匝道控制通过调节匝道入口流量维持主线交通流稳定,主要用在城市路网结合部,以及城市快速路、高速公路联络线的出入口,在北美和欧洲地区使用较为普遍,有代表性的城市包括美国的 Phoenix, AZ; Fresno, Sacramento, San Francisco, San Diego, CA; Denver, CO; Atlanta, GA; Twin Cities, MN; Las Vegas, NV; Long Island, New York, NY; Cleveland, OH; Lehigh Valley area, Philadelphia, PA; Houston, TX; Arlington, VA; Milwaukee, WI; Seattle, WA; 加拿大的 Toronto; 法国的 Paris; 英国的 Birmingham 和 Southampton; 其他还有澳大利亚的 Non-US Cities, Sydney; 以及日本的 Kobe 等 (L. Zhang 等, 2004)。

(t) 为确保主干道交叉时的交通流平稳转换匝道控制系统,一般在城市内的菱形立交桥



(diamond interchange) 区域以信号计时控制的形式采用,而在互通式立交桥 (grade-separated interchanges) 区域则较少,实际上是高速公路或快速路与主干道关联路口的信号控制。

(u) 这里的主线速度控制目的在于平衡道路主线交通流的分布,使主线的速度值维持在一定设定区间范围之内,或根据上下游交通状态及匝道进出情况进行调节,预防或避免拥堵的形成和加剧。

1.1.2 匝道控制基本含义

目前,我国大城市的进出城地面常规交通还是以高速公路为主,并且大多数高速公路都与放射型或环形的城市快速路直接或间接连接,这种在空间上有关联并在功能上有差异的特殊的路网结构本书称之为城市道路网结合部。在莫斯科、洛杉矶等国际大都市及我国的北京、上海等地,这种形态的路网广泛存在。

从空间形态、位置分布、结构组成和管理模式等几方面来说,结合部路网一般具有以下特点。

(1) 结合部路网包含了若干种不同性质和等级的道路,比如城市快速路、主干道、高速公路等。

(2) 规模较大,延伸里程较长,或者覆盖区域面积较大,其中包含了若干交叉口(平交或立交形式)、匝道等。

(3) 分布不均,表现形态各异,或者以环形状分布于城市道路网与城际公路网之间,或者以若干条块状分布于城市边缘。

(4) 结合部路网中包含的各种道路的交通特征,控制方式和手段差别较大。

在城市内部或中心区,可以主要通过多种交通方式分担及管理缓解拥堵。在城市外围,这些措施并不适用或者并不具备实现的现实条件。由于城市中心区和外围的交通结构存在非常明显的不同,需要区别对待:城市外围区域公共交通网络覆盖度及道路密度显著降低,进出城仍以机动车为主且道路集中度提高,城际高速公路联络线和城市快速路负荷较高,如 M. Medina 等(2010)对美国的 Laredo area 的道路交通状况的研究数据显示,该地区 27% 的高速公路里程(以分车道里程计算)承担了 37% 的周转量(pcu·mile),虽然现在对快速路和高速公路在道路交通系统中的应承担的负荷判断标准仍无定论,但现实中快速路和高速公路承担了远高于其通行里程比例的交通量确是一个普遍的事实。

在结合部区域路网,这种状况表现得更为明显。作为区域交通主骨架的高速公路和作为城市地面主通道的快速路系统都应该具有畅通、快速、舒适的特点,但是城市规模的扩展导致城际及市郊交通量出现大幅增长,在结合部路网中,高峰期交通量逐步增大,高峰时段逐渐延长,导致路网整体服务水平降低。虽然结合部是由不同性质道路组成的复合网络,但是作为一个路网整体,大量不同性质车流快速交汇、转换,极易造成某些路段和匝道处的阻塞并快速蔓延,形成网络形态的拥堵。比如北京城区北部的 G6、西南部的 G4,以及东南部的 G2 及关联的快速路等,这种情况在高峰时段内非常普遍。这种情况不仅影响高速公路功能的发挥,也妨碍城区内部交通正常运行,因此采取有效控制与管理方法迫在眉睫。

现有的交通流和控制研究大多针对信号交叉口、公路或城市道路的基本路段,而专门针



对结合部路网的研究还较少。结合部路网中的高速公路容量大、车速高，而城市快速路受出入口车流及市区内其他道路车辆影响，车速较高速公路低，且早晚高峰车流量非常大。这样在结合部路网中就会产生不同特性车流的交汇，交通特性复杂，呈现出新的特征。面对新的对象和问题，需要研究和采取不同的交通控制方式，采用匝道控制已被证明最为可行。

根据 The Minnesota Department of Transportation (Mn/DOT) 在 2001 年完成的 Twin Cities Ramp Meter Evaluation Final Report (Mn/DOT, 2001) 的相关研究结论，通过对 Twin Cities Metropolitan Region 的 I-94、I-494 及 I-35 等实施匝道控制的状况对比显示：匝道关闭期间，通行能力方面，高峰期主线流量降低 14%；交通安全方面，事故较实施控制时增加 26%，超过预期正常年份的变化，追尾和侧撞事故则分别增加了 15% 和 200%；通行稳定性方面，行程时间增加 22%，速度降低 14%，行程时间不确定性增加 91%，在控制期间，全道路系统年均节省时间 25 121 h。总体比较，匝道控制系统的运行效益与维护成本比为 15:1，较其他管理系统平均的成效比为 5:1，这表明匝道控制系统更富成效。

常见的信号灯控制包括在城市道路交叉口的红绿灯控制及高速公路主线上的速度限制信号灯，其中红绿灯通过确定不同相位和周期来控制各方向的通行。而匝道控制是将道路主线交通流作为控制对象，以速度、密度（或占有率）、流量、排队作为状态变量，匝道和主线流量作为系统的输入（控制）量，通过寻求匝道控制律，使交通流某种形式的性能指标函数达到优化。与城市道路信号灯控制相比，匝道控制包括周期长度和流量调节两部分，属于一种计量控制。

入口匝道流量控制一是防止出入口匝道处车辆的无序汇入，尤其在城市快速路与高速公路的联络线区域实施，以减少大量车流转换时的干扰。

另外，在实际条件受限而无法实施信号灯控制时，通过在匝道汇入主线处设置适当的标识以起到提示作用，如图 1-3 所示，驾驶者可以通过自我调节有序进入主线，这种方式非常简单、经济，但是需要以群体的良好驾驶习惯和较高的素质为前提。



(a) Stop and waiting of on-ramp

(b) Yield of on-ramp

(c) Merge notice of on-ramp

图 1-3 美国高速公路匝道入口汇流导引标示

现阶段在我国部分城市的快速路上实际应用的多是匝道的开关控制，基本思想是以设定的主线交通状态阈值决定匝道的开放或关闭，如图 1-4 所示。

从系统工程、控制理论和网络流控制等学科的观点分析，本书将匝道控制的相关问题总结和归纳如下。

1. 匝道控制的思路

匝道控制的思路是充分地利用匝道的有限容量作为缓冲和调节器，通过有计划地控制和调节入口流量，最大限度地利用主线通行能力，维持系统（匝道与关联主线组成的路网系统）整体稳定。



(a) 北京三环路交通拥堵

(b) 入口匝道开放

(c) 入口匝道关闭

图 1-4 北京城市道路交通拥堵及匝道控制应用

2. 匝道控制的本质

从网络流理论观点分析,匝道控制的本质是以匝道或主线相应路段为载体而进行的道路流或网络流的缓冲调节控制,实施对象可以是单匝道及其关联的路段和区间,也可以是多匝道及其关联的连续路段、通道,甚至是整体路网;除匝道定时控制外,在感应式控制领域,即使是相对简单的匝道控制,比如单匝道控制,也属于路段控制的范畴,也有一个特定的数据采集和控制实施的范围,并不是一个点控制的概念。

3. 匝道控制的原理

从控制理论观点分析,匝道控制的原理是以主线密度和匝道排队等为状态量,以匝道需求为输入量,通过寻求匝道控制律,并以信号控制的方式实施,在满足约束条件下维持交通流在设定目标区间内运行 (M. Papageorgiou, 1990b, 2002),优化交通流某种形式的性能指标。控制发布的信息包括周期长度和流量调节两部分,属于计量控制。

4. 匝道控制的目标和作用

实施匝道控制在于通过调节达到车流均匀分布的目标,提高通行稳定性,抑制震荡,减少入口匝道处的驾驶者仅根据目测及自身的经验汇入主线判断的局限性,同时也以信号控制的强制方式约束入口流量,减少驾驶者之间由于判断和行为的不一致而可能出现的冲突,预防交通拥堵的产生和降低拥堵程度。这种作用在主线上下游出现拥堵时表现明显。但是道路交通的控制效果不仅决定于控制系统本身的性能,更受控制对象特性的影响,是一个由人一车一路及管理系统共同构成的复杂系统工程。一般的,交通流密度特别小时无需调节;而在长时间道路超负荷状态下,任何形式的交通控制或调节也无效 (H. M. Zhang 等, 1999; A. Kotsialos 等, 2004; A. Hegyi 等, 2005), 这种情况下,可以将匝道关闭。

5. 匝道控制实施的技术问题

匝道控制的工程设计及现场应用中主要包含以下几个关键问题。

(1) 匝道控制应充分利用道路交通流检测数据,获得一定范围内的交通流数据并可以在短时间限制内完成处理,以此作为控制计算的依据。

(2) 匝道控制应有预设的实际可行的控制策略和具体的实施方式,包括匝道开放、关闭和调节等各种状态的转换,以及调目标标和调节方法的实施等。

(3) 匝道控制应充分地利用匝道或主线相应路段的有限容量作为缓冲。

(4) 除了控制策略之外,匝道控制的另外一个核心在于利用有效的算法得到最优的控制律 (即特定控制时段内最合适的匝道入口机动车调节量) 并有计划地实施控制或调节入口流量。

6. 对匝道控制作用的正确认识

对匝道控制的认识及其作用等方面,需要说明的问题还包括以下几个。