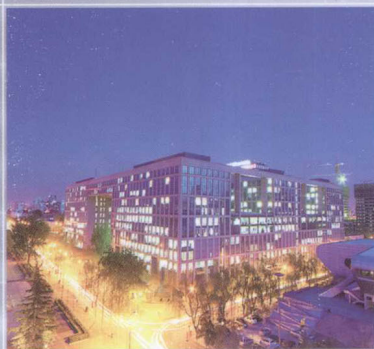




城市路网过饱和交通状态 感知与优化控制

王云鹏 吴新开 余贵珍 Henry X. Liu 著



科学出版社

城市路网过饱和交通状态 感知与优化控制

王云鹏 吴新开 余贵珍 Henry X. Liu 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结作者及研究团队在过饱和交通领域的研究成果。全书分4个部分共11章:第一部分(第1、2章)介绍过饱和和交通控制的背景、交通流参数概念和特性以及交通控制模型和方法;第二部分(第3、4章)介绍基于地感线圈的高精度信息采集系统和基于低空无人机的信息采集系统;第三部分(第5~10章)详细论述交叉口、干线和路网的过饱和和交通状态的识别、量化、估算以及控制策略;第四部分(第11章)介绍交通信号优化和仿真软件SYNCHRO、Q-PARAMICS和VISSIM的系统结构及相应的操作案例。

本书可供从事城市交通控制的研究者及工程技术人员参考,也可作为高等院校交通工程学科的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

城市路网过饱和和交通状态感知与优化控制/王云鹏等著. —北京:科学出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-03-051575-9

I. ①城… II. ①王… III. ①城市交通网—交通规划—研究
IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 010055 号

责任编辑:杨向萍 张晓娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:340 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

交通拥堵已成为制约现代城市智能化发展的重要瓶颈,它不仅影响人们的正常出行,降低了道路行车的安全性,而且造成巨大的能源浪费,加剧了环境污染。研究交通拥堵,特别是过饱和状态下的交通拥堵问题,对探索现代城市智能交通控制技术发展具有重要的理论意义和实用价值。

学者们对城市过饱和交通的研究关注良久,在过去的几十年里,出现了很多关于过饱和交通的文献和研究成果,但多数未能在实践中得到应用。一方面是由于很多研究成果是以对交通需求的准确估算与预测为前提,但在实践中难以精准获取相关信息;另一方面是由于信息采集手段的限制,过饱和的形成机理与评价指标长期未能得到很好的解决,导致控制算法的好坏难以评价。

这部由王云鹏等合著的《城市路网过饱和交通状态感知与优化控制》一书,从过饱和系统的评价指标入手,反推过饱和起源,通过交通信号的优化控制,创造性地解决了过饱和系统状态感知与控制难题,并在实践中得到了很好的应用。基于作者的长期研究成果,这本书涵盖了从交通状态信息采集的最新技术到城市路网点、线、面不同层次的过饱和状态识别和控制新方法,详细阐述了在时间维度和空间维度上来评估过饱和交通状态的基本原理,形成了系统性的成果体系,是我国第一部有关城市过饱和交通研究的原创型专著,对于城市交通控制的研究者及工程技术人员都有很好的参考价值。该书是我国城市过饱和交通研究成就的一个重要见证,著者对交通领域研究充满激情,深耕多年,收获了丰富的理论和技术成果,这些成果逐渐发展成熟,并最终构成了该书的重要内容。

展望未来,随着车联网与自动驾驶技术的发展,交通系统的状态感知及数据采集手段会进一步得到完善。同时,由于车辆行驶轨迹可控性,交通控制的手段也会从交通网络的交叉节点扩大到路段以及从起点到终点的路径选择,交通控制参数必将指数倍增加。这同时给我们的交通控制技术研究人员提出了新的研究课题。该书著者已经在这方面有了部分前瞻性研究成果,以此与广大读者共享。

中国工程院院士



2016年5月于北京航空航天大学

前言

随着我国社会经济的快速发展和城市化步伐的加快,城市人口以及机动车保有量急剧增加,城市特别是大城市面临的交通拥堵问题日益严峻。单纯地依靠增加道路供给已经不能满足日益增长的交通需求,人、车、路的矛盾日益激化。截至2015年年底,全国民用汽车保有量达到17228万辆(包括三轮汽车和低速货车955万辆),全国有35个城市的汽车数量超过100万辆,北京、成都、深圳、天津、上海、苏州、重庆、广州、杭州、郑州10个城市超过200万辆。近5年来,汽车占机动车的比例迅速提高,从47.06%提高到61.82%,居民机动化出行方式经历了由摩托车到汽车的转变,交通出行结构发生了根本性变化。但是与国外相比,虽然我国的城市化率、家庭汽车普及率并不高,但城市交通拥堵问题却十分严重,究其根源是我国城市人口密度过高造成的空间结构分布不合理。

交通拥堵致使延误增大,行车速度降低造成时间损失和燃料费用的增加。此外,车辆行驶缓慢增加了废气排放量,污染环境。交通拥堵、交通环境污染和交通事故并称为三大“城市病”,交通拥堵已经成为困扰城市发展的重要因素。为了不影响我国社会经济建设发展,必须找到行之有效的应对之道。

从根本上讲,交通需求、交通供给、交通参与者特征和交通管理水平是城市交通问题的四个核心要素,也是产生交通拥堵的基本要素。目前,国内大多数城市试图依靠大规模新建道路来解决交通拥挤问题,经验表明这并不可行。解决城市交通拥堵,特别是过饱和交通,是一个综合的系统工程,应从交通系统的科学控制管理出发,系统综合地考虑将人、车、路结合起来,并运用现代科学技术手段来探索解决交通拥堵的有效方法。

本书针对过饱和交通问题,系统探讨涵盖交叉口、干线和路网的三个不同层面的交通拥堵形成机理以及控制理论。书中大部分章节来源于著者所在团队的研究成果。全书主要分为4个部分:第一部分包括第1、2章,主要介绍过饱和交通控制的背景、交通流参数概念和特性以及交通控制模型和方法;第二部分包括第3、4章,主要介绍基于地感线圈的高精度信息采集系统和基于低空无人机的信息采集系统;第三部分包括第5~10章,主要介绍交叉口、干线和路网的过饱和交通状态的识别、量化、估算以及控制策略;第四部分为第11章,主要介绍交通信号优化和仿真软件SYNCHRO、Q-PARAMICS和VISSIM的系统结构及相应的操作案例。

在本书的撰写过程中,得到诸位老师和学生的帮助,谨此向他们表达深切的谢意。其中,王朋成协助编写了第1、2、8章,任毅龙协助编写了第3、7章,徐永正和马亚龙协助编写了第4章,李明协助编写了第5、9、10章,杨帅协助编写了第6章,孙伟力协助编写了第7、8、10章,李岳光协助编写了第11章。另外,李明和孙伟力协助完成了本书的最后校正和统稿。

同时,本书的编撰过程参阅了大量教材、网站资料及相关的国内外文献资料。因篇幅有限,未能将所有参考文献一一列出,在此谨向这些作者表示谢忱和歉意。

由于作者水平和学识有限,书中如有疏漏不当之处,恳请读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 交通拥堵现状	1
1.2 交通信号控制发展	3
1.3 研究内容及意义	6
第 2 章 交通流与交通信号控制基础理论	9
2.1 交通流模型	9
2.1.1 交通流基本参数及其相互关系	9
2.1.2 微观交通流模型	16
2.1.3 宏观交通流模型	19
2.1.4 车辆排队模型	25
2.2 交通信号控制理论	28
2.2.1 单点信号控制	29
2.2.2 干线信号协调控制	30
2.2.3 区域信号协调控制	33
2.2.4 过饱和和拥堵下的交通控制	34
2.3 本章小结	38
第 3 章 基于地感线圈的信号交叉口高精度交通信息采集	40
3.1 高精度交通数据采集系统	40
3.1.1 地感线圈检测器数据收集原理	40
3.1.2 高精度交通数据采集系统	42
3.2 交叉口基本交通状态参数提取	48
3.2.1 原始数据采集	48
3.2.2 原始数据处理	50
3.2.3 交通基本状态参数提取	50
3.3 本章小结	54
第 4 章 基于低空无人机的多模式交通信息采集	56
4.1 概述	56
4.2 无人机数据采集系统框架	57
4.2.1 六轴飞行器平台	57

4.2.2	可见光与红外热感图像采集设备	59
4.3	基于视频数据的改进 Viola-Jones 车辆检测方法	60
4.3.1	Viola-Jones 方法	60
4.3.2	道路方向矫正方法	62
4.3.3	车辆检测测试	66
4.4	基于多颜色直方图的车辆跟踪算法	68
4.4.1	车辆位置预测	68
4.4.2	基于颜色相似的目标匹配	70
4.5	行人及自行车检测与跟踪	71
4.5.1	基于梯度特征的精确 ROI 提取	72
4.5.2	红外行人检测	76
4.5.3	红外行人检测精度统计	82
4.5.4	基于 KLT 特征点跟踪的红外行人跟踪方法	84
4.6	本章小结	86
第 5 章	交叉口过饱和状态量化评估	88
5.1	过饱和状态定义概述	88
5.2	拥堵交叉口排队长度及滞留排队长度估算	90
5.2.1	信号交叉口 LWR 交通波动理论	90
5.2.2	转折点识别	93
5.2.3	交叉口排队长度估算	96
5.2.4	测试与结果	100
5.2.5	过饱和状态下滞留排队长度估算	102
5.3	拥堵交叉口溢流时间估算	103
5.4	过饱和状态量化	106
5.4.1	T-OSI	106
5.4.2	S-OSI	106
5.4.3	测试与分析	106
5.5	本章小结	111
第 6 章	城市干线过饱和交通状态描述	112
6.1	干线交通运行状态评价概述	112
6.2	过饱和干线车辆行程时间估算	112
6.2.1	问题阐述	113
6.2.2	基于虚拟浮动车行程时间预测的干线饱和和交通状态描述	113
6.2.3	模型验证	119
6.3	基于交通拥堵图谱的干线过饱和交通状态描述	123
6.3.1	图谱定义	123

6.3.2 图谱表达	123
6.3.3 图谱案例	125
6.4 干线基本图	127
6.4.1 绘制干线基本图	127
6.4.2 信号控制对干线基本图的影响	130
6.4.3 QOD 现象	131
6.4.4 稳定形式的干线基本图	136
6.5 本章小结	138
第 7 章 城市路网过饱和和交通状态评估	139
7.1 概述	139
7.2 基于 MFD 的过饱和路网状态评估	141
7.2.1 MFD 存在性	141
7.2.2 MFD 仿真验证	146
7.3 基于 T-OSI/S-OSI 的路网评估	148
7.3.1 基于 T-OSI/S-OSI 的路网评估	148
7.3.2 仿真示例	151
7.4 本章小结	155
第 8 章 过饱和和交叉口信号优化与控制	156
8.1 概述	156
8.2 自适应交叉口交通防锁死控制策略	158
8.2.1 溢流交通流特性	158
8.2.2 基于溢流检测器的过饱和和交叉口信号控制	159
8.2.3 单个交叉口防锁死控制策略仿真分析	164
8.3 城市过饱和瓶颈交叉口新型扩容渠化设计	169
8.3.1 CFI-Lite 设计	170
8.3.2 通行能力分析	171
8.4 本章小结	174
第 9 章 干线过饱和和交通信号优化与控制	175
9.1 干线信号优化与控制概述	175
9.2 基于排队数据的干线联控	176
9.2.1 高精度交通信号数据	177
9.2.2 相位差优化数学模型	181
9.2.3 优化结果	186
9.3 基于最大流方法的干线交通信号优化	188
9.3.1 单个交叉口的消散策略分析	188
9.3.2 数学模型	190

9.3.3	前向后向求解算法	194
9.3.4	仿真验证	196
9.4	基于 CFI-Lite 新型交叉口设计的干线信号控制	199
9.4.1	基于 CFI-Lite 信号控制的帕累托改善问题	199
9.4.2	帕累托改善解存在的条件分析	202
9.4.3	求解方法	207
9.4.4	案例分析	208
9.5	本章小结	211
第 10 章	城市路网过饱和和交通控制	212
10.1	概述	212
10.2	基于 MFD 的路网子网划分控制	214
10.2.1	非均匀路网划分	214
10.2.2	基于 MFD 的路网控制策略	217
10.3	基于 OSI 的路网干线划分控制	222
10.3.1	基于 OSI 的过饱和干线联合控制回顾	222
10.3.2	过饱和干线路网	222
10.3.3	前向后向求解算法	224
10.4	基于排队的路网交叉口划分控制	225
10.4.1	问题描述	226
10.4.2	分布式准最优控制策略 QUEUE	227
10.4.3	仿真结果及分析	231
10.5	本章小结	236
第 11 章	交通信号控制仿真	238
11.1	交通信号控制仿真软件简介	238
11.2	信号交叉口硬件在环仿真平台	243
11.2.1	系统组成	243
11.2.2	控制效果评价	244
11.2.3	搭建硬件在环系统	245
11.3	交通仿真案例	245
11.3.1	瓶颈交叉口信号控制仿真及验证	245
11.3.2	主干道信号控制仿真及验证	249
11.3.3	路网信号控制仿真及验证	250
11.4	本章小结	251
参考文献		252

第 1 章 绪 论

1.1 交通拥堵现状

交通是城市经济活动的命脉,对提高城市经济发展、人民生活水平起着十分重要的作用。随着我国经济的快速发展,人民生活水平不断改善,出行需求量骤增,机动车保有量呈现迅猛增长的状态。据国家统计局数字显示,2015 年年末全国民用汽车保有量达到 17228 万辆(包括三轮汽车和低速货车 955 万辆),比 2014 年年末增长 11.5%^[1]。但是由于存在城市道路增长有限、道路设施建设滞后、交叉口渠化组织不科学、交通信号控制不协调等问题,我国大中城市普遍存在主干道交通拥塞现象,尤其在出行高峰期间,经常出现历时长、范围广、影响大的过饱和和交通状态,如图 1.1 所示。

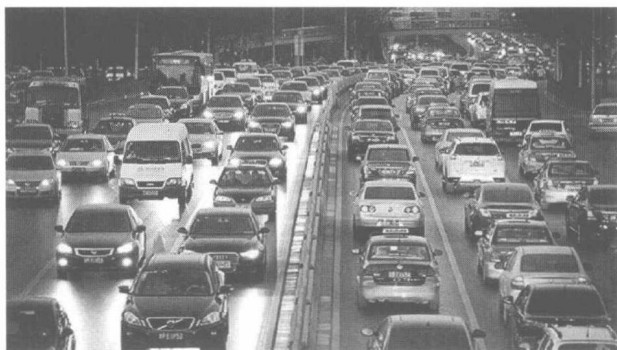


图 1.1 北京晚高峰道路拥堵^[2]

以北京为例,2015 年北京市工作日平均每天拥堵时间约 3h^[2]。这不仅直接给居民的出行造成了巨大的时间损失和燃油耗费,更严重恶化了城市居住环境,给居民健康及国家经济带来了严重的负面影响。同时,交通拥堵无形中浪费的能源和资源加重了公众出行的经济成本,据《中国智能出行 2015 大数据报告》显示,北京每年因交通拥堵造成的损失约为人均 7972 元^[3],其他各大城市的拥堵状况同样严峻(参见由高德地图软件公司发布的 2015 年第二季度的交通拥堵状况表 1.1^[4])。城市道路交通问题已经成为关系到我国民生的重大问题,治理拥堵刻不容缓。

表 1.1 我国主要拥堵城市排名及各项指标

拥堵 排名	城市	高峰拥堵 延时指数	延迟时间 /(min/h)	当地工资 /(元/月)	因拥堵花费的 时间成本/(元/h)	高峰平均速 度/(km/h)	自由流速度 /(km/h)
1	北京市	2.10	32	6463	19	22.25	46.82
2	杭州市	2.00	30	5767	16	21.14	42.15
3	广州市	1.99	30	6187	17	22.12	43.95
4	济南市	1.98	30	4376	12	22.13	43.83
5	大连市	1.97	30	4922	14	21.11	41.61
6	哈尔滨市	1.96	29	4296	12	23.43	45.92
7	深圳市	1.92	29	6054	16	24.53	47.09
8	上海市	1.86	28	5451	14	24.98	46.49
9	重庆市	1.85	28	4738	12	24.81	46.15
10	成都市	1.84	27	4307	11	24.91	45.95

注:高峰延时拥堵指数是指早晚交通高峰时花的时间与正常不堵车情况下的时间之比。指数越大,表示越拥堵。

交通拥堵并不是一个新的问题,在古罗马、18 世纪的伦敦和 19 世纪的纽约就已经出现了拥堵,时至今日,拥堵现象变得更加普遍和严峻^[5]。长期以来,缓解交通拥堵主要依赖于提高交通供给,通过大规模的道路建设来满足日益增长的交通需求。据交通运输部统计显示,截至 2015 年底,我国公路通车里程数达到 457.73 万公里^[6],仅次于美国。然而,这种依靠大规模新建道路的方法仍然无法解决交通拥挤问题。当斯定理(Downs Law)^[7]指出:新建的道路会诱发新的交通量,促进原先不必要的出行从而增加出行总量,且交通流量会从其他道路转移到新建道路,诱发的交通量会快速占据新增的道路,最终又出现交通需求大于供给的现象。因此,解决交通拥堵更需要从交通系统的科学控制管理出发,系统综合地考虑将人、车辆和道路基础设施结合起来,并运用现代科学技术手段探索拥堵交通状况,特别是过饱和状态下的交通问题。

鉴于此,本书着重于对城市过饱和的交叉口、主干道和路网通行能力的深度挖掘和分析,对城市道路上高精度及其他交通数据采集技术进行总结和剖析,介绍交叉口、主干道和路网过饱和状态的识别和估算的方法,最后针对过饱和状态下的交叉口、主干道和路网提出相应的优化控制策略和方法。此外,本书还给出过饱和状态下的单一交叉口、主干道和路网下的仿真案例和验证分析,总结城市交通拥堵的规律,揭示潜在的拥堵机理,通过对整个过饱和道路通行能力的深度

挖掘和优化控制来达到缓解城市交通拥堵的目的,其成果在理论和实践中都有着重要意义。

1.2 交通信号控制发展

交通信号通常设置在道路交叉口上无法实现交通分离的地方,是一种用来在时间上给交通流分配通行权的交通指挥措施。交通信号灯通过轮流显示不同的灯色来指挥交通的通行或停止,其主要目的是使各类、各向交通有秩序、高效率的通行^[8]。

19世纪中期,随着城市道路网络的不断扩大,交通安全以及交通拥堵问题逐渐引起了社会的关注。1858年,英国伦敦主要街头安装了红、蓝两色的机械扳手式燃气信号灯,用以指挥马车通行,这是世界上最早的交通信号灯。1868年,在伦敦威斯敏斯特地区安装了一种手动旋转的红绿两色煤气提灯(红色表示“停止”,绿色表示“通行”),在这盏灯下需要站立一名手持长杆的警察,通过皮带拉拽提灯进行颜色的转换,其对缓解拥堵、减少马车轧人事故的发生起到了很大的作用,虽然后期这种信号灯由于爆炸事故而停止了使用,但却激起了人们研发信号灯的热情。

19世纪末期,电灯的出现为电动化红绿灯的发明提供了条件。1912年,美国盐湖城一名叫做 Lester Wire 的警员发明了第一盏电动交通信号灯,使用的依然是红、绿两种颜色。在此基础上,美国交通信号灯公司于1914年对其进行了改进,在顶部安装了一个蜂鸣器,在信号灯进行切换之前,蜂鸣器会先行报警,提醒人们信号灯颜色即将变化,并将这一装置安装在了美国克里夫兰街口。随后,美国许多地区都开始在此基础上对交通信号灯进行不同程度的升级,如1917年,盐湖城街道上首次出现了相互关联的交通信号系统,即在6条街道的路口设立了电动交通信号灯,并将它们互相连接,由一个岗亭内的警员统一控制颜色的转换。1920年,美国密歇根州底特律一位名叫 William Potts 的警官研制出了一种多功能交通信号灯,这种信号灯共分为四面,每面均竖立排列三盏灯,当时它的排列形式和功能与现在的信号灯大同小异,红灯与绿灯表示“停止”与“通过”,黄灯则表示“谨慎”。1936年,在澳大利亚墨尔本的道路上出现了一种名为 Marshalite 的交通信号指示系统,它由两个互相呈 90° 竖立的圆盘组成,每个圆盘上均有红、黄、绿三个颜色区域,其中红、绿区域长度相近,黄色区域相对较短,圆盘中间固定着白色指针,以电力驱动指针进行旋转,当指针旋转至红色区域时,表示停止前进,旋转至绿色区域时,则表示允许通行,旋转至黄色区域时,则提醒人们需要做好停车的准备。

但是由于技术方面的限制,此后几十年内,交通信号灯的切换一直沿用人工

控制的方式,直到 1946 年,第一台计算机的诞生为实现自动化信号灯的产生提供了基础。1963 年,多伦多市的街道上第一次出现了由电脑芯片控制的交通信号系统,这套系统摆放在路口中间,并与其他几个路口的信号灯相连,警察只需在控制室观察某个地区所有信号灯的工作状况。随着 20 世纪 70 年代微软公司的成立,交通信号灯才有了统一的处理系统,此后的交通信号灯大都使用微软公司提供的系统进行红、黄、绿之间的逻辑切换控制,彻底告别了人工控制的年代。90 年代,美国部分地区开始引进带有计时器的交通信号灯,这种信号灯不仅能够指挥行人与车辆正常行驶,还能够预先告知红灯或绿灯所剩的时间,帮助人们判断何时起步、何时停车。同时,世界各地出现了各式各样的交通信号灯,它们根据地域及交通管理需求的不同有各自的含义,而所有这些信号灯都有一个共同的作用,那就是让道路交通变得更顺畅、更安全^[9]。

与此同时,交通信号控制技术也取得了快速的发展。奠基于 Webster 和 Miller 的以车辆平均延误最小为目标的信号配时模型及计算方法^[10],一系列研究算法和信号控制系统被开发并得到了实际应用。1966 年,英国的交通与道路研究所设计了一种离线定周期的区域交通信号控制系统优化程序(traffic network study tool, TRANSYT),并在伦敦和格拉斯哥市设立了区域交通控制实验系统^[11,12]。目前在全球范围广泛采用的交通信号控制系统包括澳大利亚的 SCATS (Sydney coordinated adaptive traffic system) 和英国的 SCOOT (split cycle offset optimizing technique)。SCATS 属于方案选择式控制系统,每个交叉口配时方案根据子系统的整体需要进行选择;SCOOT 属于方案生成式实时自适应控制系统,采用小步长渐进寻优的方法,连续实时地调整绿信比、周期和时差 3 个参数。

此外,美国的 OPAC (optimization policies for adaptive control) 是一个分布式实时交通信号控制系统,该方法适用于较拥挤的交通干线,曾在美国新泽西公路上进行测试;意大利的 SPOT/UTOPIA (signal progression optimization technology/urban traffic optimization by integrated automation) 系统属于分布式实时交通控制系统,适合于公共交通比较发达的欧洲国家,目前在意大利、挪威、荷兰、瑞典、芬兰和丹麦等国有较多应用;法国的 PROLYN (dynamic programming) 是一种实时交通控制系统,但实际应用的不多;美国的 RHODES (real-time hierarchical optimized distributed effective system) 是实时、递阶、最优化的分布式系统;西班牙的 ITACA (internet traffic and control analyser) 基于线圈实时收集数据,在计算机模型中仿真实时优化运行,并实时下达交通控制指令,该系统在世界多个城市成功运行,在我国北京和武汉等城市也有小规模应用。常见的信号控制系统对比情况如表 1.2 所示^[13]。

表 1.2 常见信号控制系统对比

控制方案	交通资料和数据	信号设置方法	信号周期	国家	优化目标	随机系统机制
SCATS	停车线下游检测器检测到的在线数据	预先计算选择信号方案	循环	澳大利亚	通行能力	集中式
SCOOT	上游检测器检测到的在线数据	调整整个信号方案	循环	英国	停车、延误和拥挤	集中式
OPAC	上游检测器检测到的在线数据	向前滚动以改变现有的信号设置	非循环	美国	延误	分散式
UTOPIA	上游检测器检测到的在线数据	绿灯开始时间、持续时间、延长时间	循环	意大利	停车次数和延误	集中式
PRODYN	一对上游检测器检测到的在线数据	改变现有的信号设置	非循环	法国	总延误	分散式
DYPIC	离线原理和完整信息	完成信号设置	非循环	英国	延误	分散式
ITACA	检测线圈实时检测数据	调整整个信号方案	循环	西班牙	延误和停车	集中式

我国城市交通信号的研究工作起步较晚,直到 20 世纪 70 年代北京市才开始采用 DJS-130 型计算机对干线协调控制进行研究。随着我国城市道路交通问题越来越严重,政府一方面进行以改善城市中心交通为核心的 UTSM(urban traffic simulation model)技术研究,另一方面采取引进与开发相结合的方针在部分城市建立了道路交通控制系统。80 年代末,我国自行研制开发了第一个实时自适应城市交通信号控制系统,即南京城市交通控制系统(Nanjing urban traffic control system, NUTCS),该系统结合了 SCOOT 与 SCATS 的优点,设置了实时自适应控制、固定配时和联机线控三种模式,并配置了交通疏散广播、可变情报分析,为车辆提供道路交通信息。整个系统采用三级控制结构:中心控制级、区域控制级、路口控制级,构成三级分布式递阶控制结构,该系统适合我国混合交通、路网密度低、路口间距大的城市道路条件。此外,国内还有很多研究所、大学及公司开发了微机化、模块化的信号控制系统。例如,2003 年,海信公司自主研发的 HiCon 自适应交通信号控制系统,其针对混合交通现状建立了机动车与非机动车混合控制模型,采用多层次分布式控制结构,分为控制平台层、控制中心层、通信层和路口层四层,具有完整的算法体系,包括区域协调控制算法、感应式协调控制算法等,广泛应用于北京、福州、厦门、烟台等城市^[14]。

随着城市拥堵的进一步加剧,近年来的交通控制研究更加关注在过度拥挤

(过饱和)状态下的城市信号控制的优化。虽然早在 20 世纪 60 年代, Gazis^[15] 就已经开始了对过饱和的研究, 但到现在为止, 对过饱和和城市交通的理解及控制仍然是一个亟待解决的问题, 而这也是本书的主要研究目的。

同时, 随着信息技术的发展, 城市交通控制也向信息化、智能化方向发展。现代城市交通控制系统也已不单是对交叉口信号灯进行控制, 而是集交叉口信号灯控制和现代城市高速公路交通控制于一体的混合型交通, 实现区域信号控制和城市高速公路集成控制。控制思想上由被动控制向主动自适应控制发展; 控制技术上借助于现代科学技术向智能化、集成化发展; 控制模式上由静态控制向动态诱导控制发展。概而言之, 要充分利用系统工程的思想和方法, 加强对城市先进交通管理系统的硬件技术和软件技术研发^[16]。因此, 在技术上寻求大幅度提高信号机智能水平的理论和方法, 提高交通路网的运行效率, 将有利于局部拥堵交通流的快速疏导^[17]。

1.3 研究内容及意义

本书以过饱和状态下的城市道路交通为研究对象, 分别从过饱和的交叉口、干线和路网三方面进行分析, 旨在建立过饱和的交叉口、干线和路网的识别技术以及提出相应的优化控制方法。本书的主要研究内容安排如下。

1) 交通流与信号控制基础理论

简要叙述基本交通流参数以及基本参数之间的相互关系; 介绍了跟驰模型、元胞自动传播模型等微观交通模型的运行理论; 对连续交通流模型、元胞传输模型以及交通波曲线模型等宏观模型以及车辆排队模型进行了概述; 介绍点控、线控、面控等常用的交通控制方法, 并揭示了过饱和和拥堵条件下的交通控制机理。

2) 交通信息采集技术

分别从高精度信息技术和无人机技术两方面阐述了不同的交通信息采集方法。前者基于地感线圈, 介绍了高精度交通数据采集的组成结构和运行原理, 利用此技术获取交通状态信息并提取基本交叉口的状态数据; 后者基于无人机的大范围及多模式交通信息采集技术, 介绍了无人机数据采集系统的系统组成框架, 形成了一套特有的基于无人机技术的车辆检测跟踪以及行人检测方法。

3) 过饱和状态估算

分别从交叉口、干线、路网的几何拓扑特性和道路空间特性及控制特性, 识别和量化过饱和状态。

(1) 交叉口过饱和状态估算。

分析到达率和通行能力关系, 给出了饱和状态的界定和识别方法; 运用交通波理论, 建立估算模型, 对排队长度进行有效估算; 从时间和空间维度上量化过饱

和状态,建立对滞留和溢流车辆估算算法。

(2) 干线过饱和和交通状态估算。

量化交叉口过饱和指标,建立交通干线拥堵时空图谱,分析寻找干线时空通行瓶颈点,进行相应的信号优化和车道组织优化。对交通过饱和度量及拥堵时空图谱的研究主要以交通流理论、交通波特性分析图、时空关联性分析、数据分析与挖掘技术为理论基础。

(3) 路网过饱和和状态评估。

基于宏观基本图(macroscopic fundamental diagram, MFD),建立宏观交通网络运作的基本框架,评价城市交通规划、管理及控制措施实施效果评价,根据分析结果了解控制措施的优劣。建立路网过饱和评估模型,基于案例分析,建立区域过饱和的估算模型。

4) 过饱和和交通信号优化与控制

分别从交叉口、干线、路网三个层面的过饱和和交通状态分析交通信号的优化与控制方法,根据不同的优化控制目标和控制结构建立不同层面的交通控制策略。

(1) 过饱和和交叉口信号优化与控制。

对交叉口防“堵死”的信号控制方法进行研究,通过计算最佳检测位置,在交叉口布设溢流检测器;当交叉口发生溢流时,可以有效地对交叉口的溢流状态进行识别,并对交叉口当前的信号配时进行优化,从而缓解交叉口的交通溢流,防止交叉口的“堵死”,维护交叉口的通行效率。

(2) 干线过饱和和交通信号优化与控制。

对于过饱和干线的信号控制问题,主要的任务是平衡各个道路的排队长度,提高车辆在多个交叉口的连续通行效率。建立基于排队数据的干线联控模型,考虑了现场交通状况的随机特征和交通驱动与信号配时的内在联系;建立基于最大流方法的干线交通信号优化模型,实现道路通行能力最大化的目的。

(3) 城市路网过饱和和交通控制。

依据粒度划分,将大路网被分解成小的子网或是干线或是交叉口。按照路网的几何及交通特性,将路网依照其干线宽度、连接关系、流量、转弯比例以及管理者所关心的其他特性,对路网进行划分;然后,提出基于子网、干线和单独的交叉口的不同控制方法。

5) 交通信号控制仿真及案例

过饱和和交通状态下的城市道路系统是一个十分复杂的网络系统,用理论模型进行精确预测是很困难的,因此常常采用计算机模拟的方法。随着计算机的发展以及并行计算方法的出现,微观交通流模拟仿真研究发展迅速,其中以 Synchro、Q-Paramics、VISSIM 等微观仿真软件较为出名,本书详细介绍这三种仿真软件的