

学校代码: 10004

密级: 公开

北京交通大学

BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY

硕士专业学位论文

基于浮动车数据的道路拥堵状态评价及
宏观基本图研究

作者姓名 李梦琦

工程领域 控制工程

指导教师 侯忠生 教授

培养院系 电子信息工程学院

二零一六年六月

北京交通大学

硕士专业学位论文

基于浮动车数据的道路拥堵状态评价及宏观基本图研究

Study on Road Congestion State Assessment and Macroscopic
Fundamental Diagrams Based on Floating Car Data

作者：李梦琦

导师：侯忠生


北京交通大学

2016年6月


学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，提供阅览服务，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：

签字日期：2016年5月26日

导师签名：

签字日期：2016年5月26日

学校代码：10004

密级：公开

北京交通大学

硕士专业学位论文

基于浮动车数据的道路拥堵状态评价及宏观基本图研究

Study on Road Congestion State Assessment and Macroscopic
Fundamental Diagrams Based on Floating Car Data

作者姓名：李梦琦

学 号：14125107

导师姓名：侯忠生

职 称：教授

工程硕士专业领域：控制工程

学位级别：硕士

北京交通大学

2016年6月

国家自然科学基金委重点项目“大数据环境下的复杂城市交通系统预测与控制”，2015-2019

致谢

时光荏苒，两年的研究生生活即将结束，在此期间，是老师的关怀、同学的帮助以及亲人的理解让我度过了欢乐及美满的两年的硕士学习生活。

首先要感谢我的导师侯忠生教授，从论文的开题到结束，侯老师给予了我大量的指导。在我攻读硕士研究生期间，通过侯老师的《大数据环境下的复杂城市交通系统预测与控制——南宁市城市交通大数据关键技术研究及示范应用项目》中学到了新的技术，拓宽了自己的思维。在此，谨向侯忠生老师表达我最诚挚的感谢和敬意！此外，感谢殷辰堃老师在研究生学习期间对我的帮助和指导，在进行论文研究的过程中，殷老师帮助我整理论文思路并对我的论文提出宝贵的意见和建议！另外还要感谢在我论文完成期间，智能交通大数据中心提供的浮动车数据。

感谢先进控制系统研究所内的师兄师姐们，你们严谨的求学态度深深地影响到我，感谢师弟师妹们的关心与帮助，感谢同级李保民同学在技术上给予我的指导，特别感谢刘世达师兄、雷霆师兄在学术上的指导及答疑解惑。同时感谢我的家人、朋友在我求学过程中在生活与精神上的支持和理解。

最后，再次对关心、帮助我的老师、同学、家人以及朋友表示由衷地谢意！

摘要

随着城市经济的快速发展，交通拥堵已经成为现代都市中常见的现象。交通拥堵不仅影响着居民的正常出行、城市环境的治理，也制约了城市经济的发展。如何快速地发现交通拥堵现象并及时采取有效的解决措施，是当代 ITS 领域的一个重要研究课题。

近些年来，随着各类采集技术的发展和广泛应用，ITS 进入了大数据时代。相对于传统的固定检测器技术，浮动车信息采集技术具有易于安装维护、数据准确度高、信息量大等特点，已逐渐成为城市交通状态分析的一种重要数据来源。

本文以北京市浮动车数据为基础，研究了路口最大排队长度的估计方法，对区域道路交通运行状态进行评价，并在此基础上，分析研究了区域的宏观基本图 (Macroscopic Fundamental Diagrams, MFD)。

首先，本文对实际采集的浮动车数据进行预处理。然后，根据浮动车低速点数据 (瞬时速度小于 5km/h) 在交叉口进口方向上的分布情况，给出了一种基于交叉口进口方向道路浮动车数量、进口方向道路等级和车道数的排队长度修正算法，得到在一定时间段内更贴合实际的路段最大排队长度。

其次，将估计得到的路段最大排队长度、路段车辆行驶速度及路段行程延误时间作为区域内拥堵状态评价参数，基于模糊综合评价算法，给出了一种在不同时间段内路段及区域的拥堵程度的评价方法。

最后，利用实际浮动车数据，基于路段最大排队长度估计提出了一种区域内车辆行驶总数的估计方法。在此基础上，得到了区域内车辆总数与车辆平均速度的关系曲线，并考察了区域内平均速度—平均密度—平均流量三者之间的关系，分析了宏观基本图在真实路网中的存在性。

关键词：浮动车数据；最大排队长度估计；拥堵程度评价；宏观基本图

ABSTRACT

With the rapid development of economy, the traffic congestion phenomenon is more and more common in city. However the traffic congestion problem not only affects the normal travel of people and the management of urban environment, but also restricts the development of urban economy. Therefore, how to quickly identify the traffic congestion and take effective solutions in time is an important research topic in the field of contemporary ITS.

In recent years, with the development and wide application of various types of capture technology, ITS is entering the era of big data. Compared with the fixed detectors technology, floating car devices have many advantages, such as easy install and maintenance, high accuracy for the uploading data, etc. For these reasons, the data collection technology based on the floating car has become the important source of urban traffic state data analysis.

In this work, the data of floating cars in Beijing are utilized. Based on these data, this paper research on the estimation of the maximum queue length of intersection and the evaluation of the traffic running state in study area. On this basis, the analysis of the MFD (Macroscopic Fundamental Diagrams) can be estimated.

Firstly, the data is pre-processed by using the methods of data pretreatment. Then, the estimation of the maximum queue length is giving by the distribution situation of the low-speed floating car data points (instantaneous speed is less than 5km/h) in the intersection. Meanwhile, a queue length correction algorithm is proposed, which utilizes the information about the number of floating car in the intersection import link, the import direction of the links and the number of links.

Next, the maximum queue length of the link, the link speed and the link travel delay time are defined as area congestion state evaluation parameters. Fuzzy comprehensive evaluation algorithm, gives a degree evaluation results of links and area congestion in different time periods.

Finally, the proportionality coefficients between the total number of running cars and floating cars are calculated by the maximum queue length proposed in chapter 3. Furthermore, the relationship between the total number and the running speed of cars in study area can be obtained, as well as the relationship between average speed, average density and average flow in weekday. As a result, this paper analysis the existence of

MFD in practical road net.

KEYWORDS: Floating Car Data; Maximum Queue length estimation; Congestion evaluation; Macroscopic Fundamental Diagrams

目录

摘要	v
ABSTRACT.....	vii
1 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 浮动车技术研究现状	2
1.2.2 交通信息采集技术现状	3
1.2.3 排队长度估算研究现状	5
1.2.4 道路拥堵状态研究现状	6
1.2.5 宏观基本图研究现状	7
1.3 论文的结构及主要内容	8
2 浮动车交通信息采集技术及数据处理	11
2.1 浮动车交通信息采集系统	11
2.2 浮动车 GPS 数据格式	12
2.3 浮动车 GPS 异常数据处理	13
2.3.1 车载设备异常数据	13
2.3.2 异常行驶浮动车 GPS 数据处理	14
2.4 浮动车 GPS 数据采样时间间隔的确定	16
2.5 研究区域的选择	17
2.6 小结	19
3 基于浮动车 GPS 数据的路段最大排队长度估算	21
3.1 城市道路分类及交通参数	21
3.2 排队长度估算方法简介	24
3.3 基于浮动车 GPS 数据的最大排队长度估算方法	25
3.4 实例分析	30
3.4.1 单条路段的最大排队长度估算	30
3.4.2 区域路段最大排队长度估算	34
3.5 小结	35
4 基于浮动车 GPS 数据的道路拥堵状态评价	37

4.1	交通拥堵分类及标准.....	37
4.2	模糊综合评价方法.....	38
4.2.1	模糊综合评价相关概念.....	38
4.2.2	模糊综合评价基本原理.....	39
4.3	模糊综合评价模型参数选取.....	41
4.4	实例分析.....	43
4.4.1	建立模糊综合评价模型.....	43
4.4.2	单条路段拥堵状态评价.....	48
4.4.3	区域拥堵状态评价.....	51
4.5	小结.....	52
5	基于浮动车 GPS 数据的宏观基本图估计.....	53
5.1	MFD 概述.....	53
5.2	基于浮动车 GPS 数据的 MFD 估计方法.....	54
5.2.1	浮动车 GPS 数据筛选.....	54
5.2.2	行车速度的估算.....	54
5.2.3	区域内行车车辆总数的估算.....	55
5.3	实例分析.....	56
5.4	小结.....	63
6	结论.....	65
6.1	论文主要结论.....	65
6.2	有待研究内容.....	66
	参考文献.....	67
	作者简历及攻读硕士/博士学位期间取得的研究成果.....	71
	独创性声明.....	73
	学位论文数据集.....	75

1 引言

1.1 研究背景及意义

目前，居民的生活水平随着城市化的不断推进、城市经济的快速发展日渐提升，城市汽车保有量也在不断增加。伴随着汽车保有量的增加，交通拥堵、交通安全、环境污染和能源短缺等问题逐渐凸显，这些现象成为国内外大中型城市共同面临的问题。北京市作为中国的首都，是国际化大都市，在政治经济等各方面迅速发展较为快速，随之产生的交通需求也在急剧膨胀，在实际中，城市内车辆增长的速度远远高于道路基础设施建设的速度，供求很难达到平衡，拥堵现象逐渐严重。

城市交通拥堵具体表现在：能源的浪费、空气及城市环境的污染、行程时间的增加、驾驶员负面情绪的影响等等。美国调查研究表明，在 1999-2005 年十年时间内，由城市交通拥堵而造成的旅行时间总延误高达 80 亿小时，造成的直接经济损失逾 880 亿美元[1]；在欧盟国家，因为城市内交通拥堵造成每年超过 5000 亿欧元的经济损失。交通拥堵在造成巨额经济损失的同时，会使城市路网发生瘫痪，可能造成不可预计的后果[2]。在我国，交通拥堵已经成为城市经济快速发展制约因素之一。交通运输作为石油消费的重点行业，是温室气体和大气污染排放的重要来源之一，机动车排放的污染物对多项大气污染指标的“贡献率”已达到 60% 以上[3]。在拥堵路段，车辆运行速度较低，耗油量增加，单位时间内汽车油耗成本高、尾气排放量大，使空气质量恶化，不利于城市环境的改善，对城市居民的身体健康产生不良影响。

针对城市内路网基础设施的建设，在一定程度上能够缓解道路通行压力，但不能解决交通拥堵问题。国内外实践表明，解决城市交通拥堵问题的行之有效的方法之一是通过科学合理的管理及控制手段。通过智能化的管理手段对城市内道路进行管理与控制能够限制交通需求，有效的解决道路交通运行中出现的问题。政府可以通过加强交通基础建设、大力发展公共交通系统、积极开展智能交通系统（Intelligent Transportation System, ITS）的建设等方式来缓解交通拥堵问题。

在现代交通工程技术中，道路交通状态的标量是利用交通参数来表示，它能够快速准确的发现路网道路上出现的通行问题，能够对实时交通进行监控，这种交通参数的检测有着重要的意义。目前交通参数的方法主要是固定点的交通参数检测，但是存在设备成本及维护费用高、改造及增设不方便、检测面积覆盖率小、

适用路面范围不宽、受天气影响较大等缺陷。

近年来，GPS 全球定位系统在各领域有着广泛的应用。基于 GPS 定位的浮动车采集技术的不断发展和成熟，利用 GPS 浮动车数据来反映城市道路、区域、路网的交通状态已经成为智能交通系统的新趋势。浮动车使用 GPS 定位技术，利用安装于车辆内的 GPS 车载设备，对车辆的位置和速度进行测量，通过无线通信技术，系统中心能够获取车辆牌照、实时位置、瞬时速度等多种类型数据。浮动车数据具有大面积覆盖、高精度定位、无天气条件影响、可靠性高、网络传输等[4]优点，能够对现有交通检测技术进行补充[5]。浮动车 GPS 数据能够通过快速、准确的计算从而获得道路交通参数并及时反映交通拥堵情况，在城市交通信息实时发布系统、车辆诱导以及交通管理部门快速监管等应用方面有着很大的发展空间。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 浮动车技术研究现状

目前，国内外对于基于浮动车的交通信息采集与处理技术进行了深入的思考与研究。国际上较为知名的有英国的 FCD 和 Traffic master 系统、日本的 IPCar 和 JARI 系统、美国的 RATH 和 ADVANCE 系统、德国的 XFCD 和 DDG 系统。

世界范围内最典型的基于 GPS 浮动车数据开发系统是英国的 FCD 系统，它对英国境界的主要路网进行了全覆盖。FCD 系统通过数据采集工具（Data Collector Unit，DCU）的安排，使实时上传的 GPS 数据实现连续 350 小时的存储，对配置数据的采集模式进行了优化，通过数据采集工具与数据中心之间的数据交互，可以实时获得浮动车车辆在路网中的运行轨迹。此外，日本的 JARI 系统能够为公众的日常出行提供天气预报、车辆运行和出行时间等服务。美国的 RATH 和 ADVANCE 系统主要对浮动车在交通信息中的可行性及车辆行程时间的分析研究

相对于发达国家，我国的浮动车辆信息采集技术研究起步较晚。北京交通大学在 2002 年开始利用少量浮动车信息对北京城市路网分析与评价开展项目研究；在 2005 年，由科技部立项国家 ITS 研究中心开展“动态交通信息采集系统关键技术研究”项目研究。北京市交委研发了一套浮动车数据采集发布系统，该系统由全市内一万多辆安装 GPS 车载终端的浮动车车辆提供数据支撑，并成功投入使用。目前，北京市浮动车数据采集发布系统作为国内最大的一套信息采集系统，它实现了在市区五环路网内具有较高（74.23%）覆盖率和路况信息准确率。在其他城市，如上海、深圳、杭州等城市也在积极建立类似的交通信息系统平台。然而，我国对浮动车的研究深度、系统性均较发达国家有所差距，因此国内在交通信息

的采集优化与信息处理方面的研究力度还需进一步加强。吴丹利用某一区域内的浮动车数据来分析周边的交通运行状况，探索了浮动车数据的应用价值[6]。

1.2.2 交通信息采集技术现状

城市路网交通运行状态是基于交通信息来进行分析的。根据交通检测器获取的交通数据经过存储、预处理、数据分析与挖掘得到的结果即可作为评价城市道路交通状态的评价标准，用来衡量当前的路网运行状态是否与交通需求相匹配。是交通管理者制定智能控制解决方案的重要依据，能够有效及良好的解决车辆增长速率同道路的基础设施建设两者之间存在的矛盾。

传统的交通采集方法是以固定型的采集器为主，这种方式需要在城市内的各条道路铺设多的铺设固定检测器，在确保获得数据的可靠性及有效性的条件下，尽可能减少采集器的数量，但是固定型数据采集器存在维护代价大、铺设成本高、对道路破坏性强、应用复杂程度高等问题。

动态交通信息采集方法是指能够不间断地获取路段中某一点或路段区间的交通信息，通常分为自动及非自动两种。通过人工干预完成交通流信息的采集方式称为非自动交通信息采集技术，如人工采集法、试验车移动调查法等；完全通过交通信息采集设备自动感知路段上的车辆占用方式，实现对交通流信息的实时、全方位技术称为自动采集技术[7]。将动态交通流信息自动采集技术根据交通检测器的设备安装位置分为两大类：固定型和移动型。

(1) 固定型采集技术

固定型采集技术主要有环型感应线圈检测器、磁力检测器、压电检测器、视频检测器、超声波检测器、红外检测器等，如表 1-1 所示。

表 1-1 固定型交通数据采集技术

Table 1-1 Traffic data from fixed technology

采集技术	工作原理	检测数据	特点
环型感应线圈检测器[8]	车辆通过或停在感应线圈上时, 根据线圈回路电感量的变化检测车辆	交通量、占有率、车速及车头时距	设备安装和维护不方便, 会影响车辆通行, 降低道路寿命
磁力检测器	当车辆进入并通过磁力传感器的探测区域时, 造成地磁场磁力异常	车流量、车道占有率及车速	磁力检测器可使用在损坏路面、不可埋线圈道路
压电检测器	在受压力施加、机械冲击或振动时压电材料产生电荷	车辆分类统计、动态称重、测量轴距、车速检测等	
视频检测器	通过摄像机拍摄到的交通图像, 传送到图像处理系统, 将模拟图像转换成离散数字图像, 识别车辆存在信息	交通量、占有率、车辆分类、车速、车头时距等	数据计算量大, 设备使用需要增加路侧设备、空间覆盖面范围有限
微波检测器	雷达探测器发射调频微波, 收集反射波束, 根据被检测目标的回波计算交通参数	车流量、车型、占有率及平均速度等	在拥堵或车型分布不均匀路段精度较低、安装路段会受限制
超声波检测器	超声波检测器的探头向路面发射超声波, 通过接收车辆的反射波来判断道路信息	交通量、车速及占有率	安装设备需增加道路设施, 容易受到天气影响
红外检测器	基于光学原理, 通过发射及接收红外线能量确定交通参数	交通量、车速、排队长度等	设备使用需增加路侧设备, 容易受到天气等因素影响

(2) 移动型采集技术

基于无线定位的动态交通信息采集技术主要有基于全球定位系统(GPS)的采集技术、基于手机网络的采集技术、基于电子标签的采集技术以及基于汽车牌照自动识别的采集技术。

表 1-2 移动型交通数据采集技术

Table 1-2 Traffic data from mobile technology

采集技术	工作原理	检测数据	特点
基于 GPS 的采集技术[9-11]	GPS 接收器同时接收颗卫星的信号,从而判断地面上物体的移动方向和速度等	交通流量、瞬时车速,可获得车辆行程时间、行程速度	可全天候工作,数据有很强的连续性,但易受到电磁干扰,检测精度受定位精度影响
基于手机的交通信息采集技术	通过检测手机和多个固定装置收发信机之间传播信号的特征参数估计手机的几何位置	车辆经纬度,经计算后可得车辆的行程时间、瞬时速度、行驶方向等	成本小、数据量大、范围广、连续性强、工作时段长,目前只应用于城市内交通状态估计
基于电子标签的采集技术	射频卡进入发射天线工作区域后射频卡被激活,接收天线接收载波信号并传送给阅读器,调制解调后传送给后台系统	交通量,可获得行程时间、行程速度	工作时段长、数据连续性强、可用于自动收费;但需有足够多的安装有电子标签的车辆运行,必有良好的滤波算法
基于车牌照自动识别的采集技术	通过车辆传感器检测是否有车辆通过,用摄像机抓拍车辆图像,使用计算机完成对车牌的识别	交通量,可获得行程时间、行程速度	工作时段长、数据连续性强、车辆不需要安装其他设备,但检测精度易受天气和光源影响

浮动车 GPS 车载设备是随着车辆的移动而移动,车辆无论是在快速路、主干道、次干道或支路上行驶,只要车载设备正常工作,后台系统中心就能够根据卫星定位获得车辆的位置、行驶方向、瞬时速度等信息,通过对信息的处理与分析,就可以得到车辆所在位置的道路交通实时通行状况。通过综合对比各种采集技术的特点,本文采用基于 GPS 浮动车的交通信息采集技术进行交通参数采集。

1.2.3 排队长度估算研究现状

随着城市内车辆的不断增加,在道路交叉口形成车辆排队的现象越来越多,最大排队长度是车辆排队过程中的一个临界值,通过对道路在一定时间段内的车辆排队长度以及其他道路参数的综合分析可以得到该路段的运行服务水平。国外有学者针对最大排队长度提出了解析表达式,还有学者探讨了排队长度的分布情况在无信号灯控制交叉口;在国内,在偶发性交通事故后或信号交叉口红灯末的最大排队长度的计算是通过应用冲击波理论方法,通常为最大排队长度的期望值。

在 1968 年 Longley 将交通拥堵分为以下两种情况：一是由于信号交叉口排队车辆累积而产生二次排队造成的拥堵；二是由于相邻交叉口排队车辆而产生的拥堵。在第一种情况不可避免的情况下，交通管理部门应该尽可能避免第二种情况的发生，Longley 提出根据所研究的交叉口的排队长度调信号配时，优化绿信比[12]。TANG-Hsien Chang 在 2000-2004 年之间在“bang-bang”模型的基础上改进了“bang-bang”模型，建立了“bang-bang like”模型，并提出了控制过饱和路网的动态方法[13, 14]。

王忠宇等人在经典模型的基础上，综合利用多源数据进行交叉口排队长度研究，克服了数据源单一的缺陷[15]。此外，姚荣涵提出 MAEQL 模型，该方法简单易懂，方便计算，但对于研究路段来说交通通行状态必须接近理想化，在实际情况中，交通流状态趋于理想化的路段并不是很多[16]。文献[17]提出了一种基于图像处理的车辆排队长度的自动检测方法。该方法首先将交通图像转换为纹理图像，突出显示无车辆行驶车道与有车辆行驶车道之间的纹理差异，通过最大方差阈值分割算法，分离出车道的两种通行状态，最终实现基于队尾空车道的区域特征来自动检测排队长度的算法。唐少虎等人利用集散波理论及视频检测技术对交叉口的状态进行判别并估计排队长度[18]。文献[19-21]用视频数据对交叉口排队长度进行估算。周学农通过实际测量的数据，对多个经典的排队模型算法进行计算结果分析，并建立了符合长沙市道路交通通行实际状况的排队长度优化模型[22]。何宁通过实际验证的研究算法，通过大量的交通数据，得出了特定区域内的拟合定量关系式[23]。荣建等人对比国内外排队长度计算模型，利用北京市交通实际数据，建立了符合北京市交通通行状况的动态计算模型[24]。

1.2.4 道路拥堵状态研究现状

城市交通拥堵是指某一时空由于交通需求和供给产生矛盾所引起的交通滞留现象，是道路交通设施所能提供的交通容量不能满足当前交通需求量而又得不到及时疏通的结果[25]。

由于世界各地的交通状况存在差异，国际上暂无统一的标准。目前，国际上主要存在四种交通拥堵的量化标准，如下表所示。

表 1-3 交通拥堵量化标准

Table 1-3 Traffic jams quantitative standards

国家	描述
美国	按照道路服务水平量化交通拥堵[26]，美国将其划分为 A-F 六个等级，交通拥堵一般与 E、F 级服务水平有关。在分析不同的交通设施服务水平时，所需要的交通参数不相同。
日本	城市高速公路的交通拥堵定义：以时速 40km/h 以下低速行驶或是反复停车、启动的车列连续 1km 以上并持续 15 分钟以上的交通状态。
美国芝加哥	道路拥堵定义：30%或更大的 5 分钟车道占有率所对应的交通状态。
美国德克萨斯州	道路交通拥堵的定义：当出行时间超过了在小交通流量或者自由流的出行环境下正常发生的出行时间，产生了较大的延误时的交通状态。

国际上，加利福尼亚 PeMS (Performance Measurement System) 系统通过对加州各高速公路交通数据的采集并处理得到其道路运行状态；佛罗里达 511 系统利用高速公路行驶速度判断实时交通运行状况；日本 VICS (Vehicle Information Communication System) 系统的信息由道路管理员及各县交通警察总部提供，VICS 中心对采集的数据进行处理和编辑，获得道路交通的实时状态。国内，北京市交通管理局对全市五环内的检测器获取的实时数据进行处理分析，并向公众发布[27]。

Liu 等人通过视频技术检测路段上行驶车辆的数目，获得车辆占有率及占有率方差，并根据算法评定城市道路的拥堵状态[28]；Yuan 等人综合线圈检测器数据、浮动车数据检测交通运行状态[29]；文献[30]使用嵌入式系统来实现道路交通拥堵状态的视觉自动化检测，从而得到道路的运行状态；姜桂艳等人运用优化的多层前馈神经网络模型对占有率、速度以及流量进行处理分析，来判断道路的运行状态[31]；于荣基建立了基于流量、速度及占有率的三维支持向量机空间模型，研究表明 SVM 核函数能够较为明确的区分道路运行状态[32]。

1.2.5 宏观基本图研究现状

宏观基本图 (Macroscopic Fundamental Diagrams, MFD) 是区域路网的基本固有属性，不同区域道路的运行条件对 MFD 的形状存在不同影响，通过 MFD 可以从宏观层面监测和预计区域路网的道路交通运行状态。

在文献[33]中，Geroliminis 和 Daganzo 等人通过观察日本横滨市中心商业区的交通实验数据，发现城市交通路网的平均车流量和车辆密度之间存在一个单峰、

低分散度的关系，并把它称为宏观基本图（macroscopic fundamental diagram，简称 MFD）。

MFD 的思想最早是由 Godfrey[34]于 1969 年提出，Herman and Prigogine 在文献[35]中，以及 Daganzo 在文献[36]中也都提出了相似的构想。而文献分别利用日本横滨商业区路段上的检测器获得的数据以及装有 GPS 的浮动车获得的数据，通过对工作日和周末、早晚高峰和平峰以及夜间低峰的大量数据进行处理，实地验证了 MFD 的存在，并给出了相应的误差分析。该论文研究发现，无论是在工作日还是周末，无论是在早晚高峰还是平峰以及夜间低峰，横滨的中心商业区总是存在着同一个 MFD，即 MFD 的存在不受区域路网交通状况的影响，而是路网的一个基本属性。在文献[33]由实际交通数据发现 MFD 之后，Daganzo 和 Geroliminis 等人对 MFD 进行了解析近似[37]。在此基础上，文献[38]对城市路网 MFD 的性质进行了相关分析。之后，文献[39]对 MFD 做了拓展，将城市路网中行驶的车辆分为公交车和小汽车两种，并且加入了运载乘客的数量考虑，通过仿真数据分析和处理，建立了城市路网的三维 MFD，并进行了相应的分析。文献[33]和文献[38]证实了 MFD 的普遍存在性。

Ji 指出，当路网车流量分布较为均匀时，路网的 MFD 的单峰性质比较好，且分散度较低。而如果路网的车流量分布非常不均匀，路网的 MFD 的性质会受到一定的影响，例如滞环特性、散点度高等等[40]。为此，Nikolas Geroliminis 等人在文献[40]中将非均匀的城市路网进行区域划分，使得划分之后的每个区域近似均匀，而每个划分合适的区域都会存在一个单峰、低分散度的 MFD（a well-defined MFD）。分区的时候既要考虑到区域内各个路段的车辆密度的均匀性，而且要考虑所划分区域的空间紧密性，同时也要考虑到所划分的区域的个数不能太多。该文献将路网的区域划分分为三个步骤：首先，用 Ncut 算法对城市交通路网进行初始的划分，然后在初始划分的基础上进行区域合并。该文献提出了一系列的评价指标用于评价区域划分的结果，估计最佳区域划分的个数。最后，还需要进行区域的边界调整，用于进一步改善区域划分的效果。将拥堵分布非均匀的城市交通路网划分为若干个均匀的区域之后，便可以进行区域边界控制。边界控制的主要思想是控制进入拥堵区域的车流量，并尽可能地放行从拥堵区域前往非拥堵区域的车辆，达到缓解城市路网拥堵的目的。

1.3 论文的结构及主要内容

论文总共分为六部分，具体研究思路和内容如下：

第一章：明确了选题背景，阐述了交通参数检测方式、城市区域的交通状态

判别、区域内路段最大排队长度估算以及交通宏观基本图的研究现状，并提出了论文的主要研究内容及思路。

第二章：介绍的 GPS 浮动车数据采集技术，阐述了对上传的 GPS 数据进行预处理过程，主要包括车辆数据的去重、剔除、排序，道路数据的筛选。数据的处理是后文的关键。

第三章：介绍了现有的几种交叉口排队长度的方法，通过对已有的 GPS 浮动车数据来进行最大排队长度预测，并提出了最大排队长度的修正方案，对区域内每条路段在每个统计时间间隔的最大排队长度进行估算，统计在高峰时间段内的路段最大排队长度与区域内总路段长度的比例。

第四章：了解了交通拥堵的含义，介绍了本文对区域交通拥堵状态分析的基于权重改进的模糊综合评价法，将交通状态分为四类，通过路段的速度、行程延误时间及路段最大排队长度作为道路状态的判断依据，进行实例分析。

第五章：由于本文仅使用浮动车 GPS 数据，提出了一种基于浮动车 GPS 数据的区域内车辆总数的估算方法，并研究区域内平均速度、平均密度及平均流量三个参数之间的变化关系。

第六章：对论文内容进行总结，并指出有待改进之处。

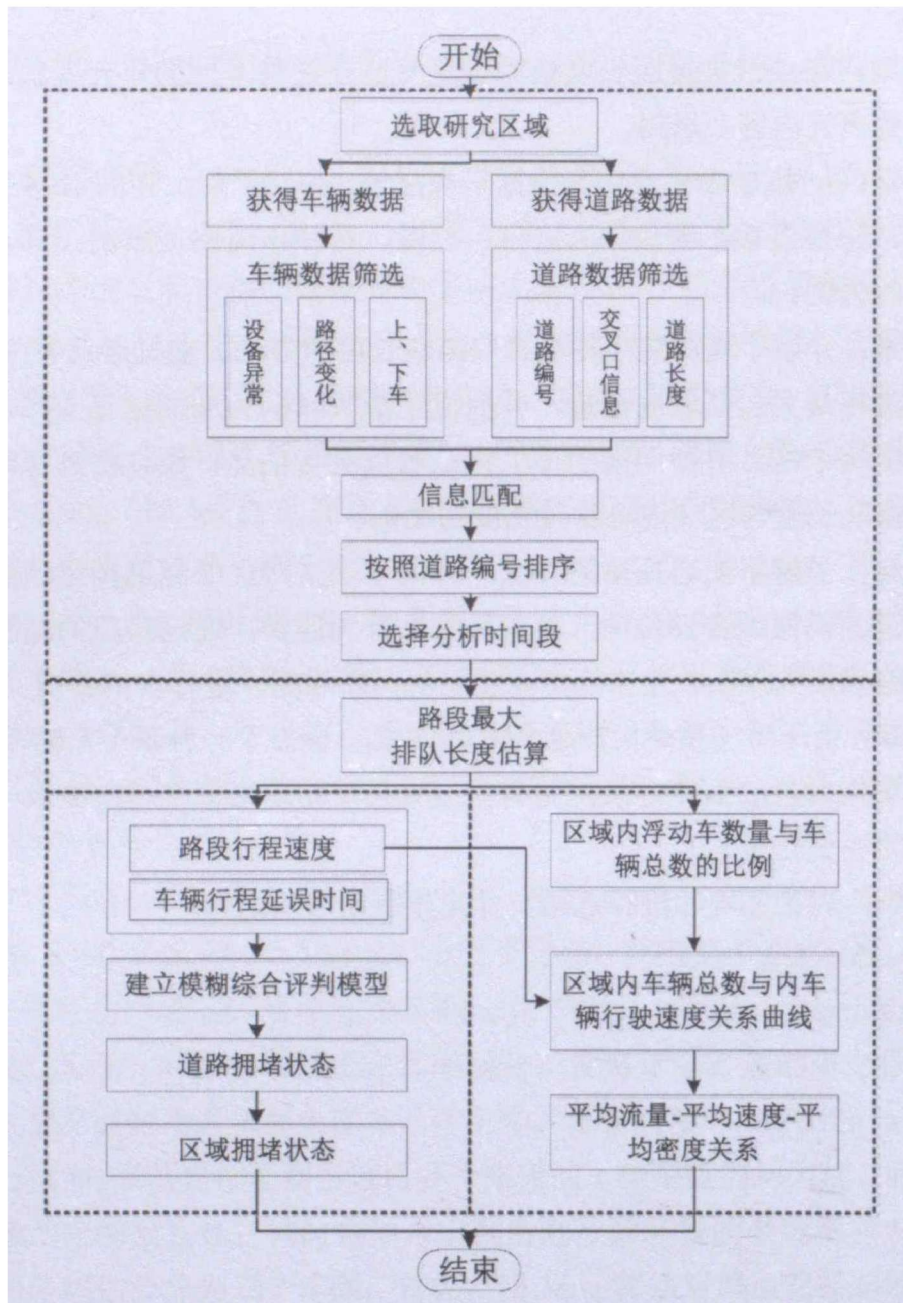


图 1-1 研究内容

Figure 1-1 Content of Study

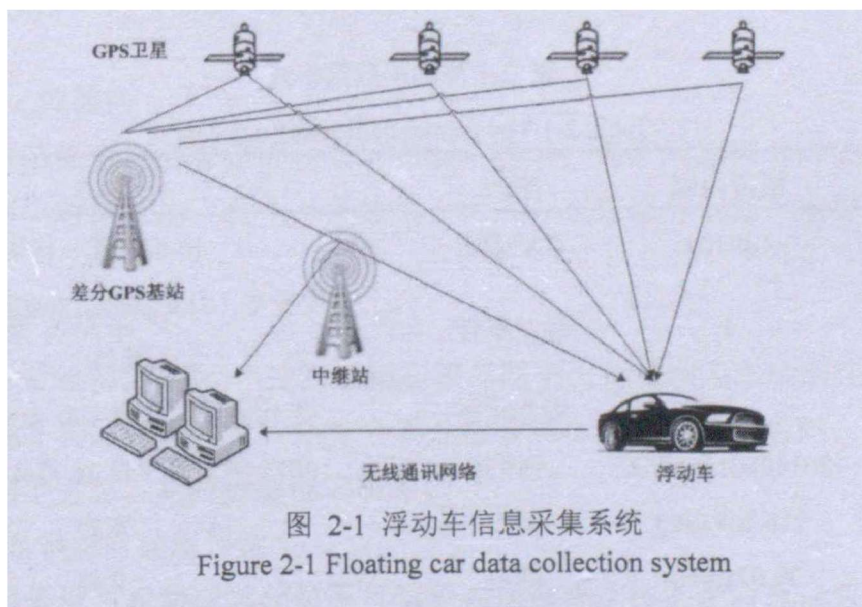
2 浮动车交通信息采集技术及数据处理

2.1 浮动车交通信息采集系统

浮动车作为运营车辆在城市道路上，与社会车辆无异。装有 GPS 车载设备的车辆行驶在城市道路上，将接收 GPS 卫星发出的信息存储在车载设备的存储器中，按照一定的周期通过无线网络将有关车辆的信息发送给系统中心。使用 GPS 信息不仅可以对城市道路交通运行状态进行判别，还可以用于交通评估，城市路径规划、车辆行驶导航等方面。

浮动车数据是交通管理部门了解并掌握城市道路交通通行状态的重要数据来源。相比于超声波检测器、线圈检测器、视频检测器等数据采集方式，浮动车系统具有高性价比投资、覆盖范围广、建设周期短、上传数据精度高、实时性强以及客观因素影响小等优点。

基于浮动车 GPS 数据采集系统主要由车载设备、无线网络、系统中心等部分组成，如下图所示。车载设备包括 GPS 定位模块、通信模块等，其中，GPS 定位模块通过接收卫星信号确定车辆的瞬时速度与车辆的地理坐标，车辆信息通过通信模块传输至系统中心，同时系统中心发送的指令与数据也通过通信模块传输给定位模块。通信网络运营商的通信基站和数据传输服务称为无线网络。



浮动车系统通过接入系统中心获取浮动车 GPS 实时数据，通过配置通信网络以及硬件设备来支撑浮动车 GPS 数据的处理。浮动车车载设备利用卫星定位技术来获取车辆信息，不依赖于固定检测设备器及人工调查法，通过城市道路上运行

的盈利性车辆的行驶状态来实现较大范围、全天候、覆盖面广的道路交通信息，对车辆上传的数据进行模型和算法的处理，将城市道路空间特性同浮动车位置数据相结合，得到车辆行驶道路的速度、时间延误、旅行时间的指标来评价该路段的通行状态。同时，通过长期的数据积累，合理使用浮动车 GPS 数据对城市内各个区域的实时道路通行状况进行分析，在城市道路科学规划、拥堵污染治理方面提供数据基础。

根据国家统计局数据可知，2014 年北京市出租车为 6.75 万辆，约占北京市机动车总量的 1.6% 左右。出租汽车是营利性车辆，工作时间较长、出行率高，因此出租车在北京交通流中占有很大的比例，大约占 20% 左右[41]。北京交通大学长江学者研究中心在 2010 年进行实际调研，得出浮动车与实际车辆的行驶速度值、速度差异特征基本一致。基本验证浮动车 GPS 数据与道路运行车辆的行驶特征基本一致，浮动车 GPS 数据可以认为是优质数据，能够合理、科学地描述城市道路通行状态[42]。

2.2 浮动车 GPS 数据格式

本文所选用的数据为智能交通大数据中心提供的 2014 年出租车数据。该数据包含有大约 1.4 万辆的出租车数据，大约十秒钟采集一次。源数据以文本(.txt)形式存储，每行记录代表出租车 GPS 的一次上传信息，源数据格式声明如所下所示。

表 2-1 浮动车数据格式

Table 2-1 The format of floating car data

符号	数据内容	字段	备注
<i>CN</i>	489309	车辆编号	出租车唯一标识
<i>A</i>	4	触发事件	0:变空车, 1:变载客, 2:设防, 3:撤防, 4:其他
<i>P</i>	1	运营状态	1 代表重车 (载客), 0 代表空车
<i>T</i>	20140801164753	时间	2014 年 8 月 1 日 16 点 47 分 53 秒
<i>LON</i>	116.2693863	经度	东经
<i>LAT</i>	39.9285698	纬度	北纬
<i>V</i>	27	速度	该点车辆的瞬时速度 (km/h)
<i>DA</i>	346	方向角	表示车辆行驶方向, 与正北方向的夹角
<i>ST</i>	1	GPS 状态	1 代表正常, 0 代表异常

北京市出租车上传的原始数据样例为：

```
489309,4,1,20140801164753,116.2693863,39.9285698,27,346,1  
154858,4,1,20140801084818,116.5092316,39.7901344,15,58,1  
492138,4,1,20140801084815,116.3691025,40.0216827,2,254,0  
035834,4,1,20140801084815,116.3768692,39.9862785,19,96,1  
068146,4,0,20140801084813,116.4244843,39.8958397,48,352,1
```

2.3 浮动车 GPS 异常数据处理

出租车与公交车作为城市公共交通系统的重要组成，出租汽车相对于城市公交而言，更加快捷、方便，且覆盖面积广、数量多，在快速路、主干道、次干道及支路上都会有出租车的行驶轨迹，另外，出租车在城市中是可全天运行，工作时段长，数据上传连续性强，对道路交通运行状态的估计提升了精确度。

通过对出租车的运行数据，可以得到车辆所在道路的交通状态，但是出租车上传的数据由于车载设备的损坏、定位系统的偏移、停车上下客及驾驶员的驾驶习惯会产生异常或者无用数据，因此，在数据分析之前，需要对已有的数据进行预处理。

2.3.1 车载设备异常数据

(1) 无效数据

在上传数据中，会存在因设备异常或不稳定，连续发送同一时间点的多条信息，或在不同时间点均上传同一条数据。因此，在数据分析前，需要将这类数据剔除。

(2) 错误数据

由于车载设备的损坏，GPS 数据在相邻两个上传周期内车辆所在经纬度跨度与实际不符，跨度较大。还有一类是在数据传回新消息中心时，在传输过程中造成数据不完整，此类数据也应剔除。

(3) 车辆瞬时速度过大

车辆由于设备异常或驾驶员不良驾驶习惯造成上传的瞬时速度过大，会影响到路段平均速度的计算，本文对超过道路的最大限速的车辆数据进行剔除。

(4) 数据重要属性缺失

在上传数据中，会出现数据记录的重要属性均为零，或仅有车牌号、时间等次要属性，或经纬度值为零，这些数据在会影响到本文的研究精确度，因剔除。

表 2-2 车载设备异常数据

Table 2-2 The equipment abnormal data

编号	数据类型	数据内容
1	无效数据	403377,4,0,20140801071040,116.4119175,39.94105282,32,268,1 403377,4,0,20140801071040,116.4119175,39.94105282,32,268,1
2	错误数据	204935,4,1,20140801070543,116.4209842,39.94094293,41,88,1 204935,4,0,20140801070550,116.412398,39.94096115,49,272,1 204935,4,0,20140801070559,116.4296881,39.94104329,45,88,1
3	车辆瞬时速度过大	453352,4,0,20140801071715,116.4290862,39.94099045,43,90,1 453352,4,0,20140801071727,116.4292842,39.94110087,80,272,1 453352,4,0,20140801071743,116.4180793,39.94076882,0,162,1
4	数据重要属性缺失	576604,0,0,20140801072947,116.4085839,39.94109884,0,0,1 492298,0,0,20140801072711,0,0,43,268,1

2.3.2 异常行驶浮动车 GPS 数据处理

(1) 进入支路车辆数据

对上传的 GPS 数据进行分析可发现，某些车辆的行驶轨迹会发生较大的偏离后回到与原行驶方向一致的路段上，这说明在车辆正常行驶过程中，车辆进入了次干道或者支路。在城市路网中，快速路、主干道、次干道及支路的设计拥堵速度讯在差异，使用数据判定交通状态时会有较大误差，应过滤车辆在未研究道路上的数据，保证判断的准确性。

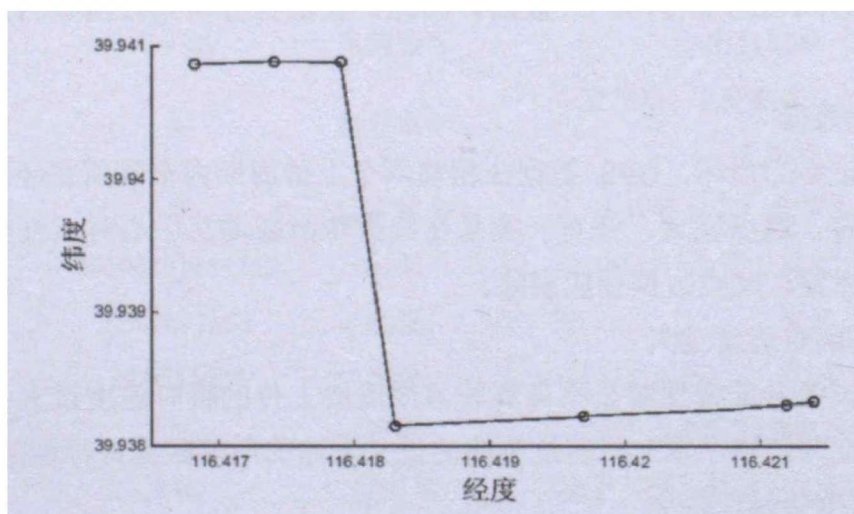


图 2-2 车辆行驶轨迹

Figure 2-2 The trajectory of car

本文先选取研究区域，提取区域内主干道道路信息，通过对北京市全部浮动车数据按照道路进行筛选，得到区域内道路上的 GPS 数据；在研究时段内对浮动车数据按照每辆车的编号、时间进行排序，发现车辆数据经纬度发生较大变化时，删除该条数据。

图 2-2 为编号是 93421 的浮动车在 08:00 至 08:20 时间段内的上传数据获得的车辆行驶轨迹图。可以判断，在该时间段内，该浮动车离开了主干道，将不在主干道上的数据删除。

(2) 上、下车停车数据

浮动车是为了盈利的运营车辆，因此，可将浮动车在道路上行驶的状态分为两种行驶过程，一类是载客状态下的行驶过程，另一类是空载状态下的行驶过程。当浮动车处于空载时，驾驶员可能会控制车速以方便寻找客人或停车休息，此时车辆行驶速度小于车道上行驶车辆的速度；当浮动车载客时，驾驶员同时兼顾自身利益与乘客安全，会以较高的车速行驶。从而，可以得到，浮动车在载客状态下的车辆运行速度大于空载状态下的车辆运行速度。

筛选速度小于 5km/h 的 GPS 数据，判断此条数据在当前时刻距离交叉口的距离，根据实际情况（即所在道路的长度），判断车辆是否是停车上下客，如果是，剔除该条数据。以车辆编号为 154931 的浮动车为例，在 07:00 至 07:10 运行时间段内的速度与到交叉口之间的关系如图 2-3 所示。

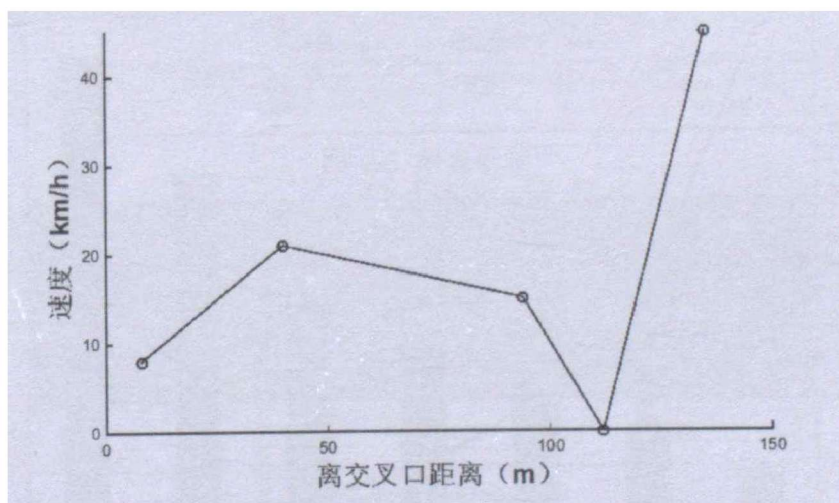


图 2-3 停车数据

Figure 2-3 Data of parking car

经计算可知，在速度为零时，车辆距离前方交叉口 112m，通过速度曲线可以得知在该点不会存在排队现象，对比车辆载客标志位由 1 变化到 0，因此，可以判断出车辆在该点是有乘客下车，需将停车点数据删除。

剔除了因以上三种原因而产生的错误数据后，能够得到相对准确的数据，为后文的进一步研究奠定了数据基础。

2.4 浮动车 GPS 数据采样时间间隔的确定

在基于 GPS 浮动车的交通信息采集技术中，浮动车比例以及浮动车数据的采样时间间隔会影响到拥堵状态的判断的可靠性。

浮动车 GPS 数据的采样时间间隔是指 GPS 车载终端设备在相邻两次采集定位信息时的时间差。GPS 数据的准确度及系统中心的运行成本受到浮动车数据采样时间间隔的影响。一般而言，浮动车数据采样时间间隔越小，数据的精确度越高，车辆的运行状态能够更加全面的展现，但是，对于系统中心运行成本也会提高、数据处理任务将会加重。浮动车数据采样时间间隔越大，遗漏的信息就会越多，无法正常的判断车辆的运行状态。因此，采样时间间隔的确定对于满足数据精度要求和经济性要求十分重要。

对 GPS 数据最佳采样时间间隔的确定是考虑两方面因素，一是浮动车行驶轨迹道路网的匹配程度；二是车辆在路段上行驶时间的精度。文献[43]从数据精度以及系统成本角度出发，综合车辆-路段匹配精度、速度估计及行程时间等影响因素，确定 GPS 数据采样间隔。Yamane 使用 89203 辆车以 1s 为采集时间间隔的数据为样本，将数据处理分成不同时间间隔的数据，分析了不同采集时间间隔的影响，如图 2-4 所示，其中阴影部分代表的是在兼顾数据精度与成本费用情况下的最佳采样时间间隔。

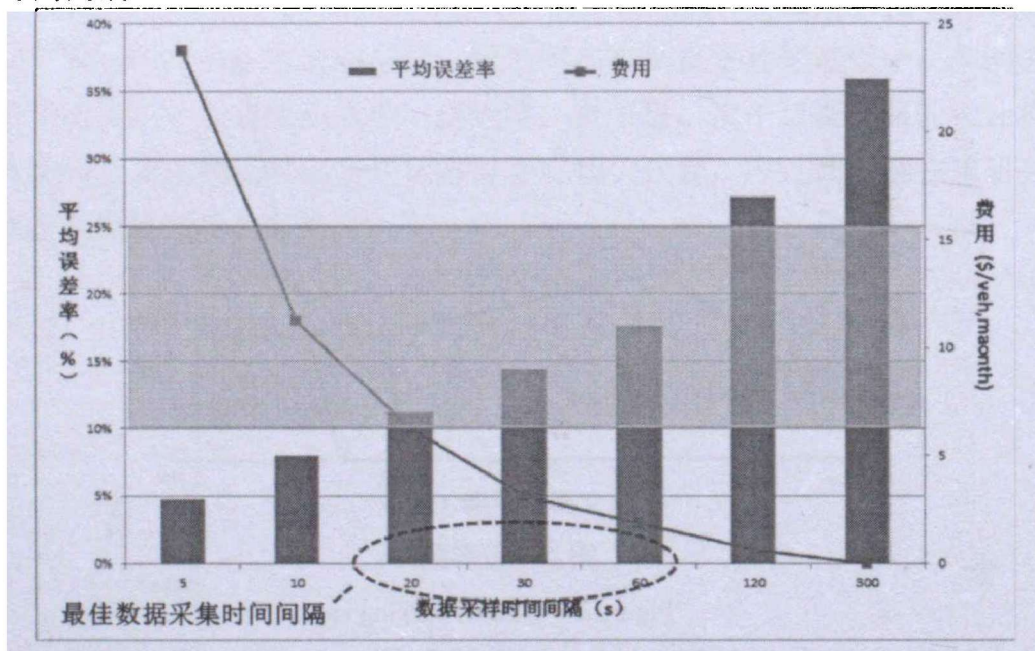


图 2-4 最佳采样时间间隔[43]

Figure 2-4 The best sampling time

因此，最佳数据采集间隔在 20s~60s 之间，平均误差率维持在 10%~25%之间。本文中使用的浮动车 GPS 数据采样时间间隔为基本为 10s，满足数据处理的精度要求。

2.5 研究区域的选择

基于 GPS 浮动车的路段最大排队长度估算、城市道路交通运行状态估计以及区域内宏观基本图的研究对象是对城市道路的交通状态进行分析。本文选取的研究区域位于北纬 39.933559 度至 39.9408751 度，东经 116.408374 度至 116.432128 度，区域总长 2.1km，宽 1.0km，该区域内有中国中医科学院、北京市文化局、东直门医院以及多个文化景点，同时该区域毗邻南锣鼓巷、东直门、东四十条、北京军区总医院等，是人群、车辆往来较密集的地点。

根据本文所选浮动车的特点，路段以道路的红绿灯为划分依据，结合本文研究的目的，将研究区域内主要道路的路口、红绿灯分布，单向车道数等情况进行调查统计，统计结果如图 2-5，表 2-3 所示。

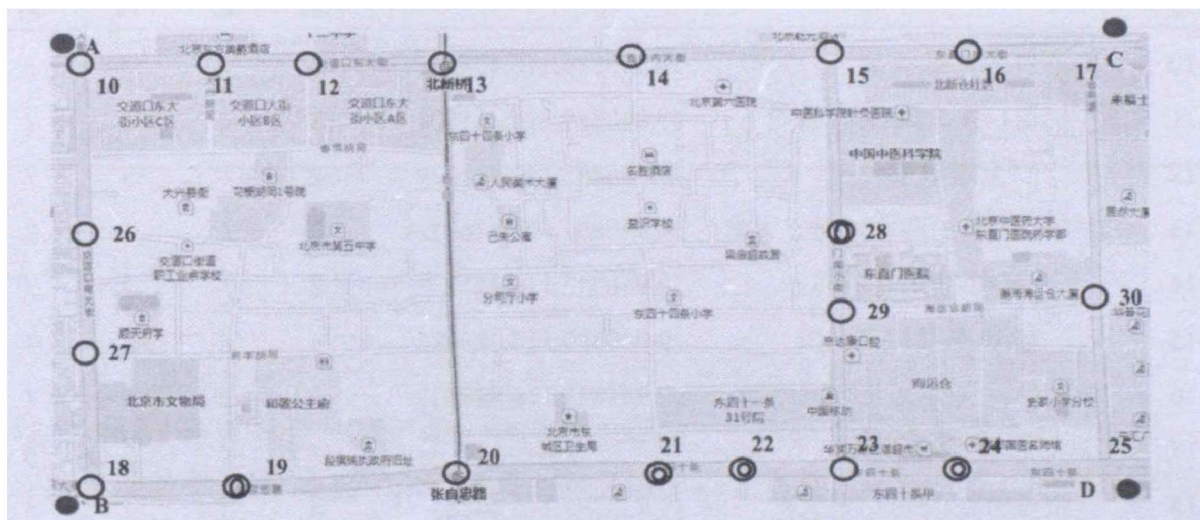


图 2-5 研究区域
Figure 2-5 Study area

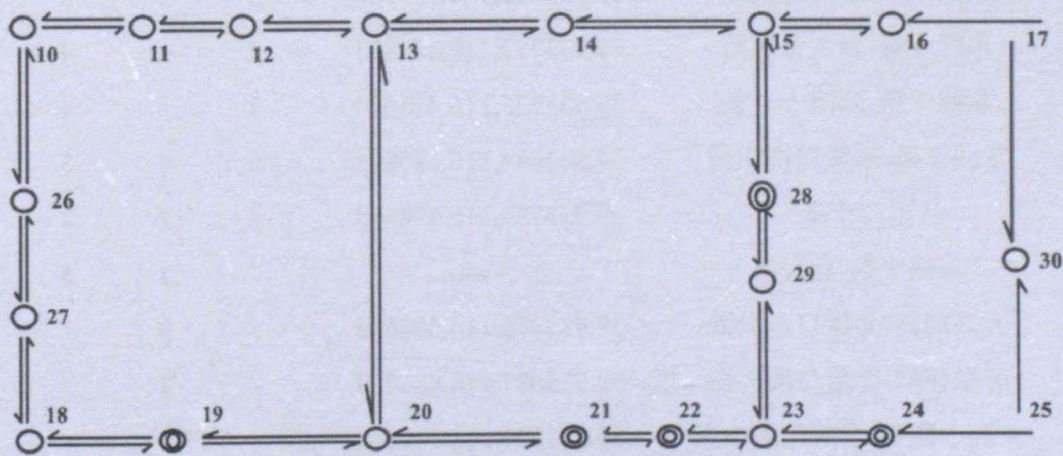


图 2-6 区域内研究路段行驶方向示意图

Figure 2-6 Links direction in study area

本文以路口作为路段的分界点，所选区域内有 20 个路口及 23 条路段，本文将无红绿灯管控的路口剔除并根据车辆行驶方向的不同将双向路段划分成两条路段，故所选区域范围内一共有 44 条单向行驶路段，如图 2-6。

其中，路段编号 1011 代表 10#路口与 11#路口之间的路段，其他路段同理。其中，A、B、C、D 为选择区域的顶点；11#代表路口编号（17#与 25#虽为路口，但无信号灯控制，因此本文对这两个路口不做探讨），单圈为十字路口或丁字路口，双圈为行人过街路口。

表 2-3 路口信息

Table 2-3 Intersection information

编号	路口名称及位置		进口道车道数			
			东	北	西	南
10	交道口东大街-安定门内大街	39.940816,116.408551	3	/	/	3
11	交道口东大街-大兴胡同	39.940849,116.411501	3	/	3	/
12	交道口东大街	39.940865,116.413679	2	/	3	/
13	篮街-东四北大街	39.940861,116.416818	3	/	4	2
14	篮街-新太仓胡同	39.940943,116.4212	3	/	2	/
15	篮街-东直门南小街	39.940989,116.425685	4	/	3	3
16	东直门内大街-东直门北中街	39.941013,116.428812	3	/	3	/
17	篮街-仓夹道	—	/	/	3	5
18	张自忠路-交道口南大街	39.933367,116.40883	6	3	/	/
19*	张自忠路-中剪子巷	39.933429,116.411941	3	/	3	/
20	东四十条-东四北大街	39.933626,116.417139	5	3	5	/
21*	东四十条-新太仓横街	39.933712,116.421823	3	/	4	/
22*	东四十条-东四十一条	39.933725,116.42362	3	/	4	/
23	东四十条-东直门南小街	39.933684,116.425878	5	4	5	/
24*	东四十条	39.933737,116.428555	3	/	4	/
25	东四十条-仓夹道	—	/	2	5	/
26	大兴胡同-交道口南大街	39.937772,116.408648	/	3	/	3
27	府学胡同-交道口南大街	39.935687,116.408723	/	3	/	2
28*	东四十四条-东直门南小街	39.937834,116.425739	/	1	/	2
29	海运仓胡同-东直门南小街	39.936423,116.425808	/	1	/	3

其中，带*的为行人过街路口。

表 2-4 路段信息说明表

Table 2-4 Links information

路段编号	路段长度(m)	路段编号	路段长度(m)
1011	218	1819	249
1026	309	1920	414
1112	173	2021	373
1213	250	2122	148
1314	356	2223	161
1320	768	2324	213
1415	363	2425	277
1516	239	2627	224
1528	316	1827	229
1617	219	2829	142
1730	481	2329	273

2.6 小结

本章主要介绍了本文使用的浮动车 GPS 数据格式并对浮动车数据进行预处理，剔除了车载设备异常数据、道路中上客及下客数据及进入支路车辆的数据。介绍了浮动车 GPS 数据的采样精度与设备成本以及误差之间的关系；并对选择区域内的道路数据进行处理，上述工作对下文最大排队长度的估算、交通状态估计及区域内宏观基本图的绘制提供了较为精确的数据。

3 基于浮动车 GPS 数据的路段最大排队长度估算

3.1 城市道路分类及交通参数

(1) 城市道路的分类

城市道路为城市内车辆、行人的往来提供便利，它是连接城市内各个区域交通往来的纽带。在我国，依据《城市道路设计规范》[44]可以将城市道路分为以下四类：

1) 快速路

快速路是大型城市交通的主动脉，其是专为城市内行程距离长、速度要求高的车辆能连续通行设置的城市重要道路。快速路的设置主要是为了方便城市出入口和城际高速公路之间的通行。特点：交通流特性与高速公路类似，要求设计有较高的通行能力和行车速度，其行车速度区间为 60 至 80km/h。

2) 主干道

城市主干道多以交通通行功能为主，是连接城市各个主要商业区、住宅区、科技园区等、车站、港口的交通纽带。它与快速路共同分担城市的主要交通流量，行程重要的交通走廊，其设计行车速度区间为 30 至 60km/h。

3) 次干道

次干道是连接主干道的辅助性道路，配合主干道组成城市道路网。它是城市内车流、人流的主要交通集散通道，并且设置有大量的公交线路，以便连接城市各个组成部分。次干道以混合交通为主，且行车交通量较大，车辆受到非机动车流和行人流的影响也较大，行车速度较慢，其行车速度区间为 20 至 50km/h。

4) 支路

支路是次干道与街区路的连接路段，是城市内车流、人流的主要集散通道。支路以混合交通为主，机动车流受非机动车流和人流的影响比次干道大，支路以服务功能为主，行车速度较慢，其行车速度区间为 20 至 40km/h。

城市道路网通过合理的等级分配来保障城市道路交通流由低一级道路向高一级道路有序汇集，反之疏散[45]。如果城市各类型道路间比例设计不均衡，则会影响到城市交通路网的运行，会引起突发事件，并造成拥堵现象。在我国大中型城市，在行车高峰期间，城市快速路和主干道上会集中大量车流，这些车流难以从次干道或支路上分流出去，就会在城市快速路或城市主干道上产生拥堵现象。

(2) 城市道路交通参数

城市道路是由路段和路口这两个基本交通单元组成，路段和路口各有其交通特性，通过路段的交通状态能表征道路或路网的交通状态。

城市交通状态的常用参数包括以下几种：

1) 流量 q

流量 q ，又称作交通流量，是指在一定时间段内通过道路上某一点（截面、车道，交叉口）的实际车辆数。流量参数可以通过交通检测器直接获取。在对道路交通状态进行判别时，同一流量可能对应两种不同的交通状态，如交通流量低的情况下，道路有可能十分拥堵，也有可能十分畅通。因此单一的流量参数是不能全面反映道路交通状态。

2) 饱和度 S

交叉口进口道的实际交通量与其通行能力之比称作饱和度。饱和度参数能够体现交叉口拥堵程度，其能直接反映交叉口进口道的交通供给与交通需求之间的关系，当比值小于 1 时，供小于求，车辆能正常行驶过交叉口；反之，供大于求，则会产生拥堵。

3) 车辆密度 K

在某一时刻，单位长度路段内所有的车辆数目。通过车辆密度可以得知机动车在道路上是否密集存在，它会随交通流量的变化而变化，但是当交通流处于强制流时，道路的车流量近似为零，交通密度呈最大值，因此，交通流量与车辆密度的共同使用能够弥补单独使用交通流量对交通状态进行评而产生的缺陷。

4) 占有率 O

在交通领域通过使用时间占有率和空间占有率来描述交通密度的时间、空间分布特性。

① 时间占有率 O_t

在观测时间间隔内，所有车辆的车身通过道路某截面所占用的时间之和同总观测时间之间的百分比称作时间占有率。

② 空间占有率 O_s

在某一时间点，道路上所有车辆的车身长度和与所在路段的长度的比称作空间占有率。

时间占有率不仅与交通流量有关，还与车辆的长度及瞬时速度有关，对于交通运行状态的变化比较敏感，通过车辆行驶时间的占用来反映道路的实际交通通行状况。空间占有率通过某一时间点车辆占用路段长度的百分比来直观反映研究道路的车辆负荷，但在实际情况中，空间占有率采集难度较大。

5) 速度

速度是交通理论研究中的重要参数，是对道路交通状态变化最敏感、最直观的参数之一[46]，是对交通通行状况的基本度量参数。由于道路与车辆之间关系，有以下几种速度的概念。

①瞬时速度 v

车辆行驶过某一点（截面、车道、交叉口）时的瞬间车速称作瞬时速度 v ，也称为地点车速或即时车速。

$$v = \frac{dl}{dt} = \lim_{t_2-t_1 \rightarrow 0} \frac{l_2-l_1}{t_2-t_1} \quad (3.1)$$

其中， l_1 与 l_2 分别为 t_1 与 t_2 时刻车辆所在的位置。

②平均行驶速度

车辆行驶某段路程所需的行程时间及该路段的长度之比为平均行驶速度，其中由于各种原因而造成的停车时间不包含在行程时间之中。由于该速度将停车时间延误剔除，因此，平均行驶速度不能准确描述车辆在道路上的运行特征。

③时间平均速度 \bar{v}_t

在一定时间间隔内测得通过某一点（截面、车道、交叉口）的车辆瞬时速度的算术平均值为时间平均速度[26]。

$$\bar{v}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3.2)$$

其中， v_i 为第 i 辆车的瞬时速度（km/h）， n 为在一定时间间隔内通过该点的车辆总数（vh）。

④区间平均速度 \bar{v}_s

在某一时刻，某段道路上一定长度范围内全部行驶车辆的车速的平均值。

$$\bar{v}_s = \frac{1}{m_j} \sum_{j=1}^m v_j \text{ 或 } \bar{v}_s = \frac{\text{行驶路程之和}}{\text{行程时间之和}} = \frac{\sum_{j=1}^m l_j}{\sum_{j=1}^m t_j} \quad (3.3)$$

其中， m 为全部行驶车辆总数（vh）， t_i 和 l_i 为一定长度范围内全部车辆行程时间（h）和行驶距离（km）。

⑤平均行程速度 \bar{v}

车辆通过路段时，路段长度与车辆通过该路段所用时间之比称作平均行程速度。

$$\bar{v} = (l \times n) / \sum_{i=1}^n t_i \quad (3.4)$$

其中， l 为路段长度（km）， n 为在一定时间间隔内路段的小时交通量（vh）， t_i 为时间间隔内通过路段的第 i 辆车所需的车辆行程时间（h）。

平均行程速度 \bar{v} 将停车延误时间加入考虑，能够体现在一定时间、空间内车辆

在路段上的运行情况，是反映拥堵状态的综合参数。

6) 排队长度

行驶车辆在道路上占用路段的长度称作排队长度。排队长度有以下五种定义。

①最大排队长度：绿灯开始时或者红灯开始时路段上的车辆长度；

②二次排队长度：到达交叉口的所有车辆中在本次绿灯间隔时间内无法通过交叉口而滞留的车辆产生的排队长度；

③排队消散长度：路段停车线距车辆排队最远点之间长度；

④平均排队长度：对研究时间段内的统计分析时间间隔内的最大排队长度计算平均值，平均排队长度反映交叉口进口道在一段时间内的排队情况。

7) 车辆行程延误时间

路段所有车辆在高峰时间段内在路段内实际行驶时间与该路段在畅通行驶时时间差的平均值称作车辆行程延误时间[47]。车辆通过交叉口过程中损失的时间通过行程延误时间来表示。

3.2 排队长度估算方法简介

在智能交通控制系统中，排队长度是路口通行效率的重要评价指标之一，其为交通信号的控制和管理提供了数据支撑[48]。目前，车辆排队长度的估算方法主要有四种：

(1) 视频检测技术

Higashiku 等人通过对视频拍摄图像进行预处理，将采样点预先设置在沿车道行驶方向的道路上，从而形成一系列的采样图像，通过车辆行驶到达预先设置的采样点位置对车辆最大排队长度进行计算[49]。这种方法的不足之处在于当摄像机的参数发生改变时，采样点的位置也要发生相应的变化，该方法不易推广。杨永辉等人[50]提出利用现有车道完成摄像机标定，仅需要知道车道宽度，通过三帧差法、边缘检测法来计算车辆最大排队长度。

(2) 交通波模型

交通波理论是交通流理论中的一个分支，Lighthill[51]和 Whitham 最早提出流体力学模拟理论，将交通流比拟为流体，并对密度流较大的交通流进行研究[52]。随后，Richards 假定了速度和密度的线性关系，在交通运输方面应用冲击波分析方法，交通波理论由此创建[53]。

交通波模型是通过道路密度和流量的变化来分析交通流的运动情况，从而得出两种交通通行状态的变化情况。对于经典交通波模型，由质量守恒定律与格林尔治线性速度—密度模型即可得出排队长度。

(3) 累计到达-离去模型

累计到达-离去模型[54]应用车辆到达率和离去率之间的关系,该方法通过累计到达的车辆数和累计离去的车辆数的差值来估算车辆的排队长度。在一定时间段内,如果车辆的驶离率大于车辆到达率,不会产生排队现象;如果车辆的到达率逐渐大于车辆的驶离率,车辆开始排队,并在某一时刻达到最大值,随着驶离车辆数的不断增加,排队长度开始缩短,随着时间推移,道路的车辆到达率与驶离率达到一致,排队逐渐消失。在有车辆排队时间段内,排队车辆的总数为该时刻车辆到达数与车辆驶离数之差。

(4) 浮动车数据的排队长度检测

近年来,随着 GPS 在交通领域的应用,国内外学者提出了利用浮动车数据来计算车辆的排队长度。Neumann 利用 GPS 点在交叉口前的聚集效应,假定排队长度是虚拟交通需求的函数[55];王东柱通过二次统计停车点密度变化来获得车辆排队长度[56];Comert 等提出了在给定浮动车比例及最后一辆浮动车的排队位置的情况下,通过数学期望对排队长度进行估算[57];熊英格提出了基于 GPS 点密度和加速度估算交叉口平均排队长度的方法[58]。相对于已有的排队长度检测方法,浮动车数据检测方法利用浮动车上传的 GPS 数据来估算交叉口排队长度,具有成本低、不受天气的其他因素的影响。

3.3 基于浮动车 GPS 数据的最大排队长度估算方法

已有的研究要求浮动车数据具有较高的采样率或者已经假定好已知的先验条件,但在实际应用中存在一些困难。针对国内外浮动车数量较城市汽车保有量较低的现状,本文采用浮动车 GPS 数据来估算车辆最大排队长度,采用固定时间间隔,对交叉口前正常停车的数量点进行统计[56, 59],在确定队尾浮动车后,提出了一种根据道路上浮动车数量对最大排队长度进行修正的方法,得到最终的交叉口最大排队长度。

基于浮动车数据的最大排队长度估算包含五个主要步骤,分别是浮动车数据处理、统计停车点个数、判定队尾浮动车、最大排队长度的修正、最大排队长度的计算。

针对交叉口最大排队长度的估算流程如下图所示:

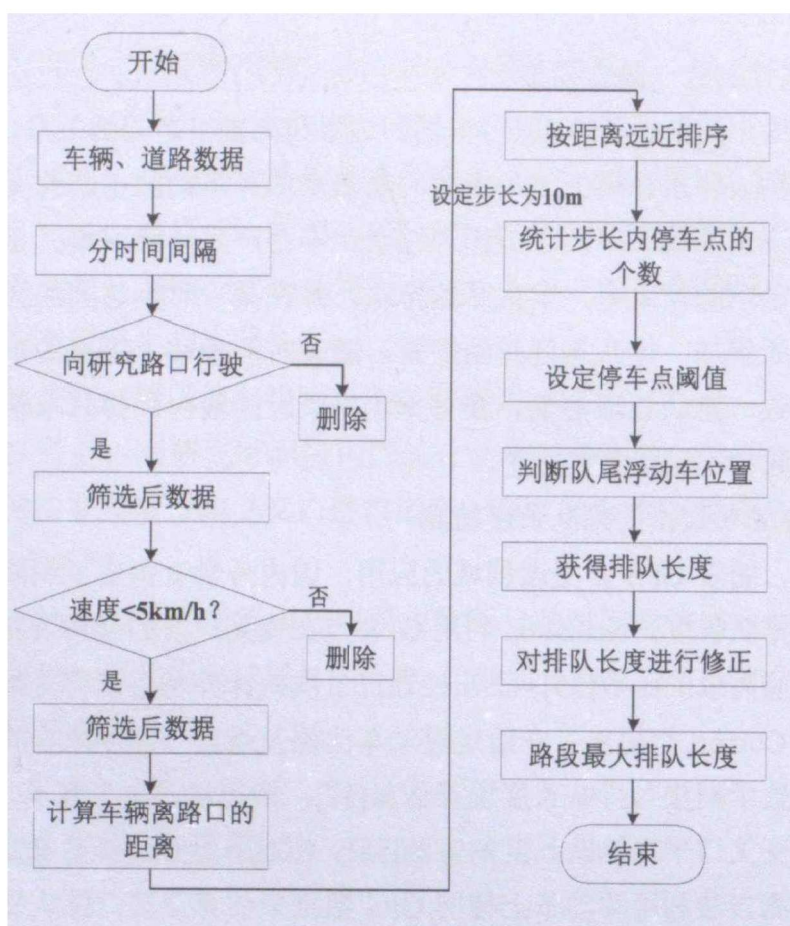


图 3-1 最大排队长度估算流程图

Figure 3-1 The estimation of maximum queue length

(1) 浮动车数据处理

浮动车数据按速度可以分为两大类，一是移动数据，即车辆处于行驶状态时上传的信息，车辆瞬时速度大于零；另一类是停止数据，即车辆处于停止状态时上传的信息，车辆瞬时速度为零。计算浮动车的最大排队长度需要获得速度为零的数据。本文根据实际拥堵情况，选取车辆瞬时速度小于 5km/h 的浮动车数据作为停止点进行计算。球面上任意两点之间的距离计算公式有两种，一种是 *Great-circle distance*，另外一种是 *Haversine formula*。

1) 大圆距离 *Great-circle distance*

根据 *Great-circle distance* 公式计算车辆距离交叉口的长度：

$$\theta = \arccos(\sin \phi_1 \cdot \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \cdot \cos(\Delta\lambda)) \quad (3.5)$$

$$d = R \times \theta \quad (3.6)$$

其中， R 为地球半径，取平均值 6371km， ϕ_1 、 ϕ_2 代表两点的纬度， $\Delta\lambda$ 代表两点经度的差值。

2) 半正矢函数 *Haversine formula*

根据 *Haversine* 公式计算车辆距离交叉口的长度：

$$\text{hav}\left(\frac{d}{R}\right) = \text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \text{hav}(\Delta\lambda) \quad (3.7)$$

其中,

$$\text{hav}(\theta) = \sin^2(\theta/2) = (1 - \cos(\theta))/2 \quad (3.8)$$

R 为地球半径, 取平均值 6371km, φ_1 、 φ_2 代表两点的纬度, $\Delta\lambda$ 代表两点经度的差值。

在 *Great-circle distance* 公式中用到的是余弦函数, 在实际情况中, 如果两点相距足够近, 余弦函数在近似是会产生较大的舍入误差。而 *Haversine* 公式采用的是正弦函数, 即使两点距离很小, 也能保持足够的有效数字, 因此, 本文在计算浮动车距离交叉口长度时使用 *Haversine* 公式。

(2) 根据浮动车的停车点, 对间隔时间内的停车点数目进行统计[59]

Step1: 确定进行排队估算的交叉口 *Point* 和对应的交叉口进口道 *PointID*, 确定统计的时间区间 M 和统计间隔 T_i , 其中 T_i 的选取受交叉口进口道的浮动车比例和数据上传频率的影响。

Step2: 根据 *Point*、*PointID*、 M 从浮动车数据中相应的数据, 对浮动车 GPS 数据进行道路匹配、行驶方向确定及距离计算后可以得到本章所需的数据, 对浮动车 GPS 数据进行处理, 添加三列数据包括: L_N 为车辆所在道路编号, ODA 为车辆行驶方向, L 为车辆距离交叉口的距离。并按照车辆排队停车点距交叉口距离从小到大进行排序。

Step3: 以停车线为起点等距离划分入口道。等距离长度的选取应当保证在统计间隔时间 T_i 内间隔长度内有一定数量的车辆。

Step4: 统计在时间间隔 T_i 内浮动车停车点的数量, 得到等间距步长下的停车点个数。

Step5: 根据交叉口该入口道的车道数, 计算每条车道上浮动车停车点的个数。

(3) 10min 内最大排队车辆队尾浮动车判定

本文的方法在于对排队车辆中队尾浮动车位置的确定。理想状态下, 车辆在一段道路上行驶时, 由于上游区域内车辆较少, 行驶车辆能以较高的速度通过, 车辆上传的 GPS 信息拥有较高的瞬时速度; 在到达交叉口区域时, 车辆开始减速排队, 因此, 车辆上传的 GPS 信息拥有较低或为零的瞬时速度。在这种情况下, 最大排队车辆后不会出现低速点。因此, 理论上, 以停车线为起点, 只要发现在路段长度内有停车点就应将车辆排队队尾向后延伸, 直到确定最后一辆浮动车为止。但在实际上传数据中, 由于车辆设备异常、错误匹配、非正常停车等现象导致在最大排队队尾之后有少量的低速点。

图 3-2 为交叉口 18#东进口方向在 08:00 至 09:00 一个小时内车辆速度与停车

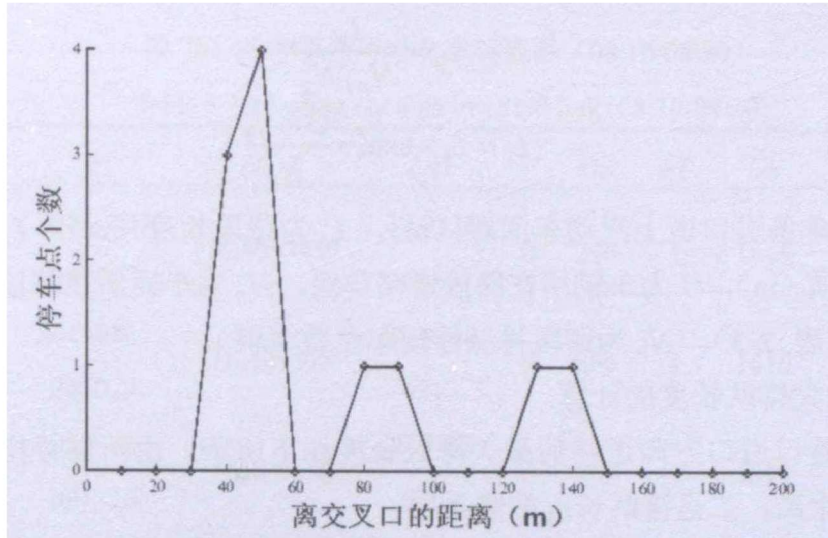


图 3-3 队尾浮动车位置判定

Figure 3-3 Determination of the last floating car position

文献[56]指出，通过两次统计步长内的浮动车停车点个数来确定最大排队长度，将判断队尾浮动车位置所在统计间隔内的步长中间值作为最大排队长度。在实际数据中，受浮动车数量及数据上传时间间隔因素的影响，计算到排队队伍中浮动车数量较少，利用文献[56]的方法会造成较大的误差。

本文通过对实际数据的分析，在已有方法的基础上提出了一种在时间间隔内估算路段最大排队长度的改进判断方法：在等间距步长统计中，选取停车点个数最大值 $M(1)$ 和次大值 $M(2)$ ，对最大值和次大值相加求最大和 S ，并与第一次步长内浮动车停车点的个数进行比较。判断对于次大值步长后面的连续两个步长内浮动车的停车点数量小于最大和的 $1/4$ [56]，则取该步长内最后一辆浮动车停车点离交叉口距离为最大排队长度的预估值。

(4) 最大排队长度的修正

文献[59]提出使用误差限来修正最大排队长度，其中误差限代表排队估计值（即队尾浮动车位置）与实际值的最大容许偏差，并根据理论概率误差分析来标定误差限。在实际情况中，浮动车在排队车流中的位置要小于实际的最大排队长度，所以根据队尾浮动车的位置得到的最大排队长度估计值要略小于实际最大排队长度。根据经验可以知道，如果道路上行驶的浮动车数量越多，利用浮动车数据估算路口最大排队长度的误差就越小；反之，误差越大。本文根据路段上排队车辆中浮动车的比例及浮动车排队间距来计算最大排队长度的修正项，修正距离与浮动车排队间距呈正比关系，与排队车辆中浮动车的比例呈指数型衰减关系。同时，最大排队长度的修正与车辆所在路口进口方向的路段道路等级与车道数也有关系。因此本文提出了一种基于浮动车数据的最大排队长度修正公式如式(3.10)所示。

$$L_0 = \frac{L_R}{N_F/N_R} \quad (3.9)$$

$$L_1 = L_0 \times \exp\left(-\frac{G \times N_R}{N_F}\right) \quad (3.10)$$

其中, L_0 为单条进口道上浮动车间距 (m), L_R 为路段长度 (m), L_1 为最大排队长度的修正项 (m), G 为车辆所在路段道路等级, N_R 为车辆所在路段进口道数目 (条) (参考表 2-3), N_F 为路段排队浮动车总数 (辆)。

(5) 最大排队长度的计算

车辆在路口进口方向道路的最大排队长度如下所示, 由两部分构成, 一是队尾浮动车的距离, 二是排队长度的修正项。

$$\tilde{L} = L_E + L_1 = L_E + \frac{L_R}{N_F/N_R} \times \exp\left(\frac{G \times N_R}{N_F}\right) \quad (3.11)$$

其中, \tilde{L} 为该路段的最大排队长度 (m), L_E 为车辆排队队尾浮动车所在点离路口的距离 (m), L_1 为最大排队长度的修正项 (m)。

3.4 实例分析

3.4.1 单条路段的最大排队长度估算

在本文中高峰时段最大排队长度的分析时间间隔 T_i 根据经验值选取为 10min, 由于文章篇幅原因, 选择 1819# 路段 (18# 路口至 19# 路口之间的路段) 向西方向行驶路段进行示例分析, 其他路段处理过程相同。

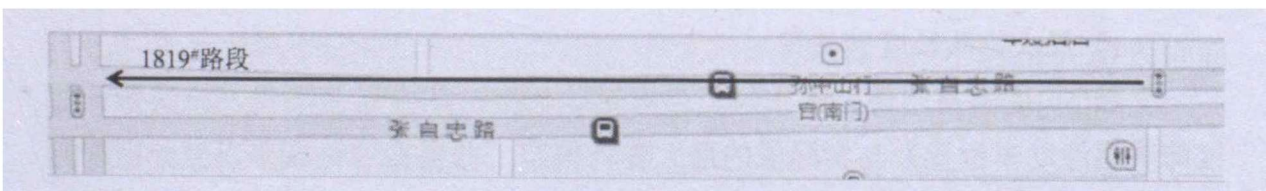


图 3-4 1819# 路段

Figure 3-4 1819# Link

(1) 浮动车数据筛选

筛选 2014 年 08 月 01 日 08:10 至 08:20 之间 10min 间隔内的车辆数据, 经过速度筛选 ($V < 5\text{km/h}$) 及计算离交叉口距离 (L_E) 后, 数据如表 3-1 所示。

表 3-1 1819#路段浮动车车辆数据 (08:10-08:20)

Table 3-1 Floating car data in 1819# link (08:10-08:20)

CN	A	P	T	LON	LAT	V	DA	ST	LN	ODA	L_E
489574	4	1	20140801 081000	116.4093459	39.9334 0042	0	260	1	1819	0	44.14
199449	4	1	20140801 081027	116.409178	39.9334 6913	0	266	1	1819	0	31.77
157424	4	1	20140801 081316	116.409178	39.9334 5003	0	270	1	1819	0	31.07
174920	4	1	20140801 081350	116.4103985	39.9334 0037	0	256	1	1819	0	133.78
174920	4	1	20140801 081454	116.4102994	39.9333 9658	0	262	1	1819	0	125.32
174920	4	1	20140801 081558	116.4098112	39.9333 8891	0	274	1	1819	0	83.69
174920	4	1	20140801 081659	116.4097272	39.9333 8131	0	266	1	1819	0	76.51
174920	4	1	20140801 081802	116.4092314	39.9333 7372	0	268	1	1819	0	34.23
153637	4	1	20140801 081827	116.4093306	39.9334 5003	0	256	1	1819	0	43.66
155461	4	0	20140801 081830	116.4093001	39.9334 3473	0	266	1	1819	0	40.78
153637	4	1	20140801 081841	116.4093306	39.9334 5003	0	256	1	1819	0	43.66

(2) 统计停车点个数

采用 10min 作为一个状态分析时段，以 10min 内路段最大排队长度的估算值来表征该进口道在分析时段内的最大排队长度。在本文中统计步长设定为 $L_s=10$ 米[56]。对 1819#路段在 2014 年 08 月 01 日 8:00-9:00 内的 6 个分析时段内的浮动车 GPS 数据进行分析。图 3-5 为 18#路口东进口方向道路段在六个时间间隔内排队停车点的统计图。

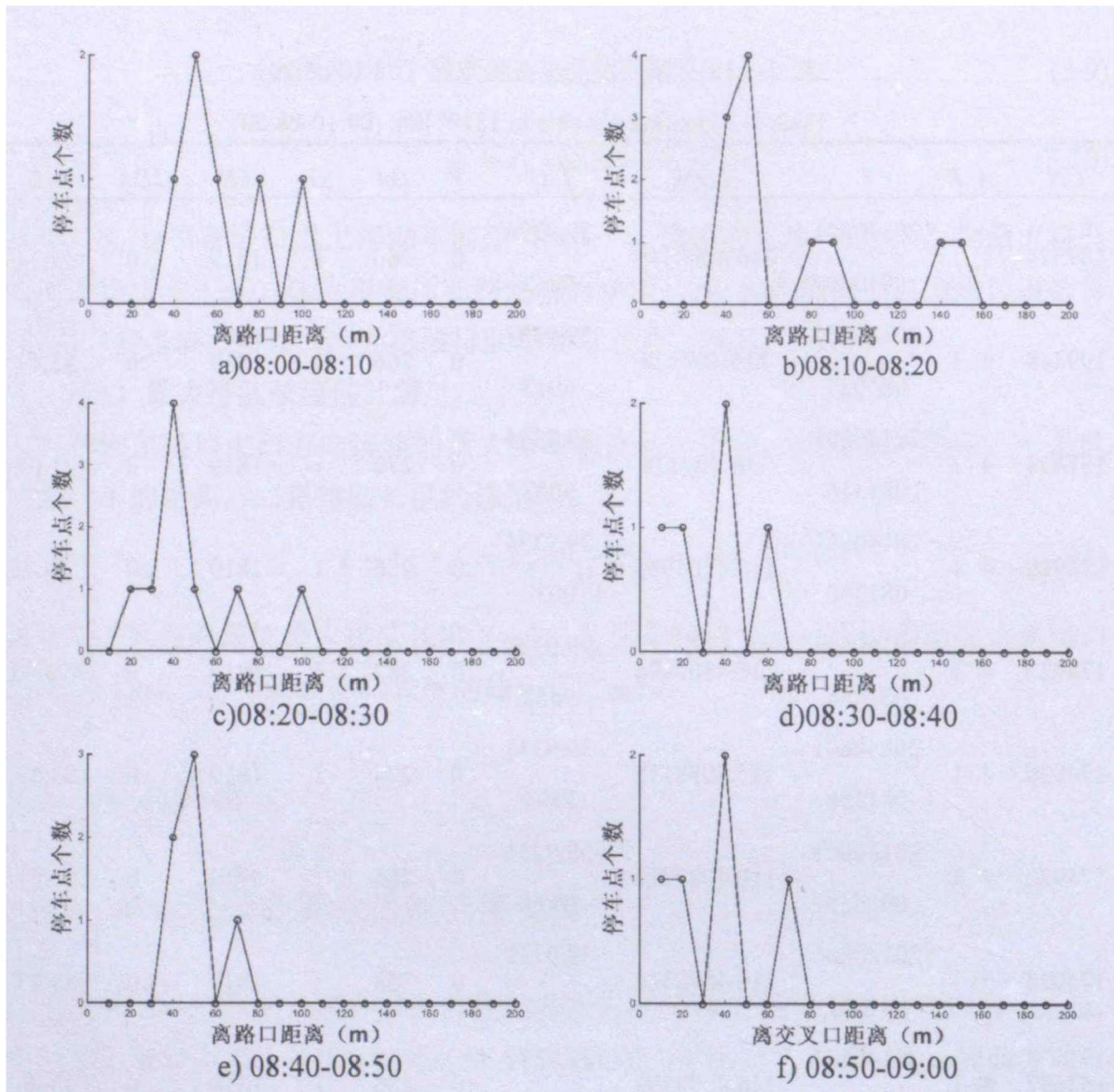


图 3-5 分时段停车点个数统计图

Figure 3-5 Number of parking spots statistical in different time periods

根据一小时内车辆在 1819#路段停车点个数与离交叉口的距离图像可以判断每个时间间隔内车辆排队队尾的浮动车位置。

表 3-2 分时段停车点个数统计表 (08:10-08:20)

Table 3-2 Stopping spots statistics in different time (08:10-08:20)

时间段	10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m	合计
08:00-08:10	0	0	0	1	2	1	0	1	0	1	6
08:10-08:20	0	0	0	3	4	0	0	1	1	0	7
08:20-08:30	0	1	1	4	1	0	1	0	0	1	9
08:30-08:40	1	1	0	2	0	1	0	0	0	0	5
08:40-08:50	0	0	0	2	3	0	1	0	0	0	6
08:50-09:00	1	1	0	2	0	0	1	0	0	0	5

(3) 最大排队长度估算

通过路段上排队车辆中浮动车的比例及浮动车排队间距可以计算出浮动车在单车道上平均间距 L_0 ，根据公式(3.10)及(3.11)可以估算出该路口在每段时间间隔内的最大排队长度，如表 3-3 所示。

表 3-3 1819#路段最大排队长度 (08:00-09:00) (单位: 米)

Table 3-3 The maximum queue length of link 1819# (08:00-09:00)

时间段	队尾浮动车离交叉口距离	修正项	路段最大排队长度
08:00-08:10	98.40	16.84	115.24
08:10-08:20	44.14	6.23	50.38
08:20-08:30	94.65	12.14	106.78
08:30-08:40	51.34	7.69	59.03
08:40-08:50	67.13	11.49	78.62
08:50-09:00	61.26	9.18	70.44

根据表 3-3 可以发现，利用队尾浮动车及最大排队长度修正项的计算，得到的最大排队长度结果综合考虑了浮动车行驶道路上的车流量情况，通过路段上排队浮动车的数量、道路等级等条件因素的修正，得到在一定时间间隔内路段较为精确的路口最大排队长度。

(4) 对比分析

参考文献[56]的统计方法，用每个时间间隔内第一次统计时间间隔内步长 (10m) 选取停车点个数最大值 $M(1)$ 和次大值 $M(2)$ ，对最大值和次大值相加求最大和 S ，将 S 与排队车辆第二次统计结果表中的停车点数量进行比较，当步长(20m)内的浮动车停车点数量小于 S 的 $1/4$ ，取该步长 (20m) 的中间值最大排队长度值，统计结果如表 3-4 所示。

表 3-4 排队车辆第二次统计结果表 (单位: 个)

Table 3-4 Stopping spots statistics by using method in [56]

时间段	0-20	10-30	20-40	30-50	40-60	50-70	60-80	70-90	80-100
08:00-08:10	0	0	1	2	4	3	2	1	1
08:10-08:20	0	0	3	7	7	4	1	2	0
08:20-08:30	1	2	6	6	5	2	1	1	1
08:30-08:40	2	2	3	2	3	1	1	0	0
08:40-08:50	0	0	2	5	5	4	1	1	0
08:50-09:00	2	2	3	2	2	1	1	1	0

由此可以判断在每个时间间隔内最大排队长度分别为 10m, 10m, 10m, 60m, 10m, 90m。

该方法与本文估计的车辆最大排队长度存在较大差异,可能是由于(1)统计分析时间及分析时间间隔不同,文献[56]分析时间段为 09:40-10:00,时间间隔 20min,本文的分析时间段为 08:00-09:00,时间间隔 10min;(2)数据量上传时间间隔不同;(3)文献[56]中一个统计步长中浮动车车辆信息上传较多,车辆存在比例较高;在本文中一个统计步长内浮动车上传数据较少,车辆存在比例较低,使用此方法时会导致在前几个步长内无浮动车停车点,故而产生较大的差异。

3.4.2 区域路段最大排队长度估算

本文选择区域如图 2-5 所示。本文以 08:00-09:00 为分析时间段,10min 为时间间隔,分别计算每条路段在时间间隔内的最大排队长度,结果如表 3-5 所示。

表 3-5 区域内路段最大排队长度统计表(08:00-09:00)

Table 3-5 Link queue length statistics in study area (08:00-09:00)

单位:米(m)

时间 路段	时间					
	08:00-08:10	08:10-08:20	08:20-08:30	08:30-08:40	08:40-08:50	08:50-09:00
1011_0	84.47	0	0	—	—	—
1011_1	0	0	0	—	—	84.97
1026_0	43.42	230.02	287.60	278.03	202.22	52.81
1026_1	282.09	317.55	397.27	273.76	127.07	139.6
1827_0	77.84	0	160.46	0	0	25.84
1827_1	126.31	0	103.44	163.34	62.93	183.60
...
...
2627_0	0	22.05	0	0	124.81	22.51
2627_1	164.81	176.80	47.43	177.15	53.25	100.74
2829_0	0	0	0	0	0	55.39
2829_1	0	157.42	173.37	153.55	178.0822	0

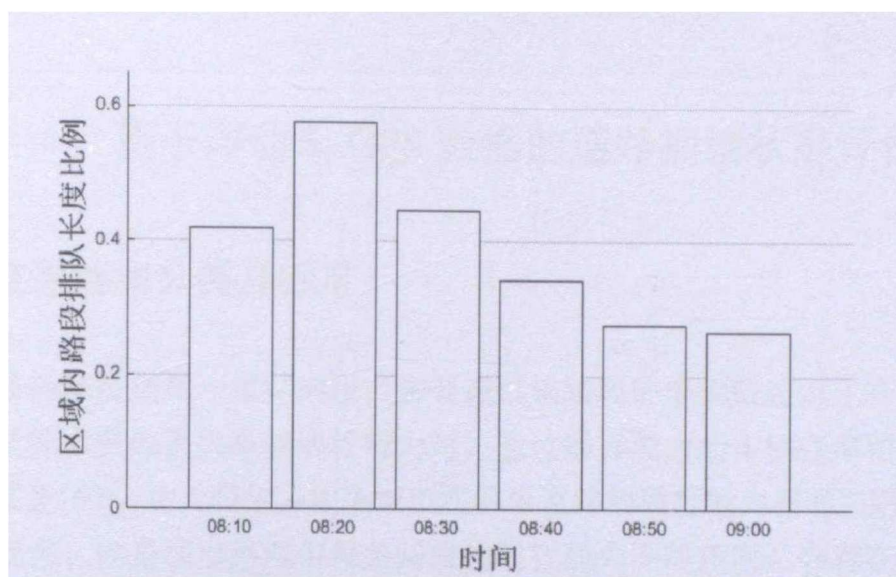


图 3-6 区域内路段最大排队长度百分比 (08:00-09:00)

Figure 3-6 The percentage of links queue length in study area (08:00-09:00)

该区域在高峰时间段 08:00-09:00 时间段内，最大排队长度占路段总长度的 28%以上，在 08:10-08:20 时间段内，车辆在路段上的最大排队长度比例为 58.7% 在 08:00-09:00 时间段内达到最高。由于该时间段为早高峰，该区域位于北京市二环内，是车辆行驶较为密集区域，因此车辆排队现象较为明显。

3.5 小结

本章主要介绍了基于浮动车 GPS 数据在计算交叉口最大排队长度估算上的应用。在现有的浮动车 GPS 数据估算路段最大排队长度的基础上，提出了一种基于排队车辆中浮动车比例的误差修正项，通过排队车辆中浮动车的比例、道路等级以及实际道路车道数来修正最大排队长度，并对选择区域内的北京市浮动车 GPS 数据进行单路段及区域内路段最大排队长度的分析。

4 基于浮动车 GPS 数据的道路拥堵状态评价

4.1 交通拥堵分类及标准

交通拥堵是指在一定时间段内想要通过该路段的车辆数超过了在该时间段内该路段所能承受的最大车辆通行能力时，超过通行能力的车辆会滞留在路段上造成排队现象[60]。由此可知，如果城市路网内道路的通行能力相同，则不会发生交通拥堵现象。但是城市路网中每条路段的通行能力不尽相同，会存在低通行能力的路段，一旦低通行路段的上游交通量大于该路段的通行能力时，就会产生拥堵现象。

(1) 交通拥堵分类

交通拥堵根据出现和结束的时间顺序可以将相邻路段的交通拥堵分为原发性交通拥堵 (Primary Congestion) 和继发性交通拥堵 (Secondary Congestion) [45]。在低通行路段处最初形成的交通阻塞为原发性交通拥堵；由原发性交通拥堵不断向周围路段扩散和蔓延形成的交通阻塞为继发性交通拥堵。

交通拥堵根据产生的原因可以分为两种，一种是常发性交通拥堵 (Recurrent Congestion)，一种是偶发性交通拥堵 (Non-Recurrent Congestion)。常发性交通拥堵产生的原因是由于交通需求超过路段上固定点的通行能力引发的交通阻塞，经常发生在特定的时间段和位置点，如上下班高峰、科技园区等；偶发性交通拥堵产生的原因是由于路段在空间或时间上由于随机因素而引发的交通阻塞，没有规律性和预见性，如突发交通事故、恶劣天气影响。

交通拥堵根据其可接受的程度可以分为可接受交通拥堵 (Acceptable Congestion) 和不可接受交通拥堵 (Unacceptable Congestion)。如果在发生交通拥堵时车辆行程时间或者延误时间超出的行程时间在人们可接受的范围之内称为可接受交通拥堵，否则为不可接受交通拥堵。

(2) 交通拥堵标准

根据车辆在路段上的运行特性、交通拥堵的程度，具体参考我国道路的服务水平等级划分，本文将城市道路的交通状态划分为畅通、缓行、拥堵、严重拥堵四类，如表 4-1。

表 4-1 交通状态划分

Table 4-1 Classification of traffic state

编号	运行状态	描述
1	畅通	交通流在自由流与稳定流范围之内，车辆能够自由顺畅行驶，交通参与者不受或者基本不受其他车辆的影响，驾驶自由度大。
2	缓行	交通流在稳定流范围之内，车辆开始受到其他车辆的影响，车辆间的相互作用开始变大，驾驶自由度明显下降。
3	拥堵	交通流进入不稳定流状态，车辆行驶不顺畅，速度受到很大约束，驾驶自由度低。
4	严重拥堵	交通流处于不稳定流或强制流范围内，车辆形成队列，车辆长时间处于低速行驶状态，在道路上停停走走。

4.2 模糊综合评价方法

模糊综合评价是模糊数学根据评价过程非线性的特点而提出的重要方法[61]。模糊综合评价是利用模糊数学中的模糊运算法则，通过对影响事物或现象的多种因素综合评价，将多方面评价转化为一个综合性指标来进行总目标决策的过程。模糊综合评价方法能将界限不确定等模糊评价问题转换成为定量评价指标，使得评价结果明确。

4.2.1 模糊综合评价相关概念

(1) 模糊集

对于任给 $x \in X$ ，都有唯一确定的隶属函数 $\mu_A(x) \in [0,1]$ 与之对应。类似于映射的表示方法，模糊集合 A 可表示为： $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ ，即 $\mu_A(x)$ 是从 X 到 $[0,1]$ 的一个映射，它唯一确定了模糊集合 A 。

(2) 模糊集的表达方式

模糊集合有三种不同的表达方式，一般可表示为 $A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\}$ 。如果 X 是有限集或可数集，则 A 可表示为 $A = \sum \mu_A(x_i)/x$ ；如果 X 是无限不可数集，则 A 可表示为 $A = \int_X \mu_A(x)/x$ ，其中， \sum 或 \int_X 并不表示求和或积分，而是表示各个元素与隶属度函数对应关系的一个总括。

(3) 模糊集合的基本运算

设 A 、 B 为论域 X 上的两个模糊集合，另 $A \cup B$ 、 $A \cap B$ 、 A^C 分别表示模糊集合 A 、 B 的并集、交集、补集，对应的隶属度函数分别为 $\mu_{A \cup B}(x)$ 、 $\mu_{A \cap B}(x)$ 、 $\mu_{A^C}(x)$ 。

$$\mu_{\bar{A} \cup \bar{B}}(x) \stackrel{def}{=} \mu_{\bar{A}}(x) \vee \mu_{\bar{B}}(x) \quad (4.1)$$

$$\mu_{\bar{A} \cap \bar{B}}(x) \stackrel{def}{=} \mu_{\bar{A}}(x) \wedge \mu_{\bar{B}}(x) \quad (4.2)$$

$$\mu_{\bar{A}^c}(x) \stackrel{def}{=} 1 - \mu_{\bar{A}}(x) \quad (4.3)$$

其中，“ \vee ”表示取大运算；“ \wedge ”表示取小运算，称为 Zadeh 算子。

(4) 模糊关系与模糊矩阵

集合 X 到集合 Y 的一个“二元模糊关系”， R 是给定论域 $X \times Y$ 中的模糊集合，并可记为 $X \xrightarrow{\bar{R}} Y$ ，模糊关系 R 的隶属度函数 $\mu_R(x)$ 是 $X \times Y$ 到实数区间 $[0,1]$ 的一个映射。特别地，当 $X=Y$ 时， R 称为论域 X 中的模糊关系。

如果 X 与 Y 都是有限集，则 X 到 Y 的模糊关系的隶属函数值可用一个矩阵表示。设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ， $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ ， R 是 X 到 Y 的模糊关系的一个模糊关系，另 $r_{ij} = \mu_R(x_i, y_j)$, ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)，若其所有元素满足 $r_{ij} \in [0,1]$ ，则称 R 为模糊矩阵。

4.2.2 模糊综合评价基本原理

模糊综合评价一般分为三个步骤：第一步是建立评价模型，包括评价指标的确定和权重因素集的建立；第二步是对每个评价因素进行单因素模糊评价；第三步是综合所有单因素评价结果，得到测评对象的总体评价[62]。

(1) 建立评价模型

1) 确定评价因素集和评价集

因素集 U ：有影响评价对象的因素组成，记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ，其中， u_i 代表影响评价对象的第 i 个因素， n 代表评价因素的数量。

评价集 F ：由对评价对象可能得出的所有评价结果组成，记 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ ，其中， f_i 代表对评价对象作出第 i 个评价结果， n 代表评价等级总数。模糊综合评价是在综合考虑所有评价因素的前提下，最终的综合评价结果为对应评价集的某一评价等级。

2) 建立多因素权重集

在进行评价的过程中，各因素对于评价结果的影响不同，并且不同的评价者对因素的侧重程度不相同，最终得到的评价结果也不一样，因此，需要提前明确各个因素的权重，确定每个评价因素的相对重要程度。

在因素集 U 的基础上定义一个模糊子集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ， A 为权重集，其中 a_i 表示每个评价因素的在综合评价中的影响程度，满足 $0 \leq a_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。

(2) 对单因素进行评价

单因素评价是对因素集 U 中的每个单一因素进行评价, 明确评价对象在评价集合 F 中每个因素隶属的重要程度。以 b_{ij} 表示评价因素集合 U 中第 i 个因素对评价集合 F 中第 j 个等级的隶属程度。 B_i 代表对单一因素 U_i 的模糊评价结果, B 为单因素模糊评价矩阵, 代表评价因素集 U 与评价集合 F 之间的模糊关系。

$B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}\}$, 其相对应的模糊评价矩阵为:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

(3) 模糊综合评价

单因素模糊评价只反映了一个因素对评价对象的影响, 综合所有因素对评价对象的影响, 以便能够得到对评价对象正确的评价。

在应用中, 选择适合的综合数学模型进行综合评价, 同时兼顾评价对象中所有因素的影响程度, 进而得到相对更加合理准确地评价结果。由权重集 A 和模糊评价矩阵 B , 对两者运用模糊关系合成运算, 进行综合评价后可得到评价向量 $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, 表示为:

$$P = A \odot B \quad (4.5)$$

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n) = (a_1, a_2, \dots, a_m) \odot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

其中, P 为模糊综合评价集, \odot 为一种模糊关系的合成运算方式, p_j 为评价对象对评价等级 F_j 的隶属程度。

在模糊综合评价数学模型中, 合成运算的方式主要包括以下几种类型:

1) $M(\wedge, \vee)$ 主因素决定型

$$p_j = \max((a_i \wedge b_{ij}), 1 \leq i \leq m), j = 1, 2, \dots, n \quad (4.7)$$

该方法的评价结果只取决于在总评价中起主要作用的因素, 其余因素对评价结果无作用。

2) $M(\cdot, \vee)$ 主因素突出型

$$p_j = \max((a_i \cdot b_{ij}), 1 \leq i \leq m), j = 1, 2, \dots, n \quad (4.8)$$

该类型与类型 $M(\wedge, \vee)$ 相近, 但比 $M(\wedge, \vee)$ 更为精细, 不仅突出了主要因素, 也兼顾了其他因素。此类型适用于类型 $M(\wedge, \vee)$ 失效 (不可区别), 需要更为精细判断的情况。

3) $M(\cdot, +)$ 加权平均型

$$p_j = \sum_{i=1}^m (a_i \cdot b_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.9)$$

该类型依据权重的大小兼顾所有因素均衡。

4) $M(\wedge, \oplus)$ 取小上界和型

$$p_j = \min(1, \sum_{i=1}^m (a_i \wedge b_{ij})), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.10)$$

在使用过程中, 各个 a_i 应适中, 否则可能出现 p_j 均为 1 或 p_j 均等于各个 a_i 之和的情形, 将会丢失有关单因素评价的信息。

5) $M(\wedge, +)$ 均衡平均型

$$p_j = \sum_{i=1}^m (a_i \wedge \frac{b_{ij}}{b_0}), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.11)$$

$$b_0 = \sum_{k=1}^n b_{kj} \quad (4.12)$$

该类型适用于 B 中元素 b_{ij} 偏大或偏小的情况。

4.3 模糊综合评价模型参数选取

评价参数的选择会直接影响到道路交通通行状态判别的稳定性和有效性。评价参数的选取要能对交通状态的变化有准确反映, 并且在实际中比较容易获取、参数数量要合理。本文依据仅有的浮动车数据来获取相关参数, 选取平均行程速度、车辆行程延误时间及路段最大排队长度作为道路交通通行状态的判别参数。这些参数便于人们的理解, 能够直观的获得道路交通通行状态的变化。

(1) 路段行程速度

路段行程速度是指在一定长度的道路上全部行驶车辆的车速平均值[63]。依据城市道路交通拥堵评价指标可以看出, 通过车辆速度的判别, 能较为直观、准确的判断道路的交通通行状态。路段行程速度会随着城市路段交通状况的变化而改变, 在特定路段上车辆行车速度越大, 车流运行越畅通, 交通通行状况良好; 反之, 行车速度越低, 车辆受阻情况越严重, 道路比较拥堵, 交通通行状况较差。

本文参考公式(3.3)平均区间速度作为路段行程速度。

(2) 车辆行程延误时间

行驶在城市道路上的车辆, 由于受到交通管理设施、其他车辆、不良天气状况或突发交通事故而造成的行程时间损失为时间延误。车辆行程延误时间是在一定时间段内通过在城市路网内的某条道路而引起的车辆时间总延误的平均值。其延误时间的确定受时间段内该条路行驶浮动车的数量影响。

车辆行程时间延误是评价道路通行状态的重要指标，是评价路网内路段交通运行效率的依据之一，能够反映路段的服务水平及畅通情况。

根据《公安部畅通工程评价指标》（2005年）中对行程时间延误的定义：车辆通过路段时的实际行程时间 T_{il} 和按该条路段设计车速通过该路段时理论行程时间 T'_{il} 的差值就是浮动车在时间段内通过路段的行程延误时间 ΔT_{il} [64]。

$$\Delta T_{il} = T_{il} - T'_{il} = \frac{L_{il}}{V_{il}} - \frac{L_{il}}{V'_{il}} = L_{il} \left(\frac{1}{V_{il}} - \frac{1}{V'_{il}} \right) \quad (4.13)$$

其中， $T_{il} = L_{il}/V_{il}$ ， L_{il} 为第 l 条路段的长度（km）， V_{il} 第 i 辆车通过第 l 条路段的路段实际行程速度（km/h）； $T'_{il} = L_{il}/V'_{il}$ ， V'_{il} 为第 l 条路段的设计行程速度； V_{il} 是通过 GPS 浮动车数据计算得到。由上述公式可知，车辆行程延误时间同选取的路段长度成正比关系。

影响道路设计行车速度界定的重要因素是车辆在道路上的运行状态，道路交通流畅通是城市道路服务水平最为理想的状态。确定道路设计行程速度大小的依据是车辆在道路上行驶是否处于畅通状态。

在交叉口延误模型的计算中，利用设计数据中的车辆畅通行驶的车速确定为道路设计行程速度。本文道路车速（如表 4-2），采用主干道二级水平，将高峰时间段道路设计行程速度设定为 40km/h。

表 4-2 城市道路设计车速

Table 4-2 Design speed for urban road

单位：千米/小时（km/h）

道路类别	快速路		主干道			次干道			支路	
道路等级	—	I	II	III	I	II	III	I	II	III
设计车速	80,60	60,50	50,40	40,30	50,40	40,30	30,20	40,30	30,20	20

（3） 路段最大排队长度

本文根据第三章的内容，使用浮动车 GPS 数据计算研究路段在一定时间间隔内的最大排队长度，并将其作为评价道路交通运行状态的参数之一。通过第三章使用浮动车 GPS 数据的处理，可以估算出该路段的最大排队长度。

（4） 权重集的确定

在评价权重集中权重系数代表某一因素在整个因素中的相对重要程度。通过分析评价因素集中的各个因素，依据因素在评价过程中的相对重要性、在整个因素集中对评价效果的影响，最终确定相应的权重大小。本文根据选择的三个因素的相对重要性，分别给出各自的权重系数，即权重。

常用的确定权重的方法有：主成分分析法、专家调查法、综合指数法、因子

分析法、AHP（层次分析）法[61]。其中最常采用的是专家调查法，它是有少数专家直接根据经验，并考虑某评价因素后确定相应因素的权重。

4.4 实例分析

本文选择图 2-5 的区域进行研究，研究路段如图 2-6 所示。首先建立模糊综合评价模型，对区域内单条路段进行状态评价，最后综合区域内所有路段的状态，对区域交通运行状态进行分析。

4.4.1 建立模糊综合评价模型

(1) 建立因素集及评价集

建立判别城市道路通行状态的因素集为： $U = [V, T, LE] = [$ 路段行程速度、车辆行程延误时间、路段最大排队长度 $]$ 。将交通状态划分为四类，城市道路交通状态的判断集为： $F = [f_1, f_2, f_3, f_4] = [$ 畅通、缓行、拥堵、严重拥堵 $]$ 。

(2) 建立评价参数隶属度函数

在对城市交通状态进行判别时，各个状态之间并没有严格的标准，具有一定的模糊性，因此，四种交通状态的评价参数对应的评价集的隶属函数十分重要。由于梯形隶属度函数性质较稳定、分辨度高、控制比较平缓，适用于本文的评价参数，因此选用梯形隶属度函数。

1) 路段行程速度隶属度函数

根据我国公安部交通管理局等单位制定的《城市道路交通管理评价指标体系》（2012年版）高峰时段建成区主干道平均车速分级表（表 4-3），设定路段行程速度分别对应于四种状态的阈值。本文根据 A 类城市评价标准等级建立的路段行程速度的隶属度函数如式(4.14)-(4.17)所示。

表 4-3 高峰时段建成区主干道平均车速分级表

Table 4-3 Rating of average speed on main road at peak hours

单位：千米/小时（km/h）

评价标准等级	一	二	三	四	五
A 类城市	≥ 25	[22, 25)	[19, 22)	[16, 19)	[0, 16)
B 类城市	≥ 28	[25, 28)	[22, 25)	[19, 22)	[0, 19)
C、D 类城市	≥ 30	[27, 30)	[24, 27)	[21, 24)	[0, 25)
指数	[90, 100)	[80, 90)	[70, 80)	[60, 70)	[0, 60)

$$u_1^1(v) = \begin{cases} 1 & v > 25 \\ v-24 & 24 \leq v \leq 25 \\ 0 & v < 24 \end{cases} \quad (4.14)$$

$$u_1^2(v) = \begin{cases} 0 & v > 25 \text{ 或 } v \leq 20 \\ 25-v & 24 < v \leq 25 \\ v-20 & 20 < v \leq 21 \\ 1 & 21 < v \leq 24 \end{cases} \quad (4.15)$$

$$u_1^3(v) = \begin{cases} 0 & v > 21 \text{ 或 } v \leq 16 \\ 21-v & 20 < v \leq 21 \\ v-16 & 16 < v \leq 17 \\ 1 & 17 < v \leq 21 \end{cases} \quad (4.16)$$

$$u_1^4(v) = \begin{cases} 0 & v > 17 \\ 17-x & 16 < v \leq 17 \\ 1 & v \leq 16 \end{cases} \quad (4.17)$$

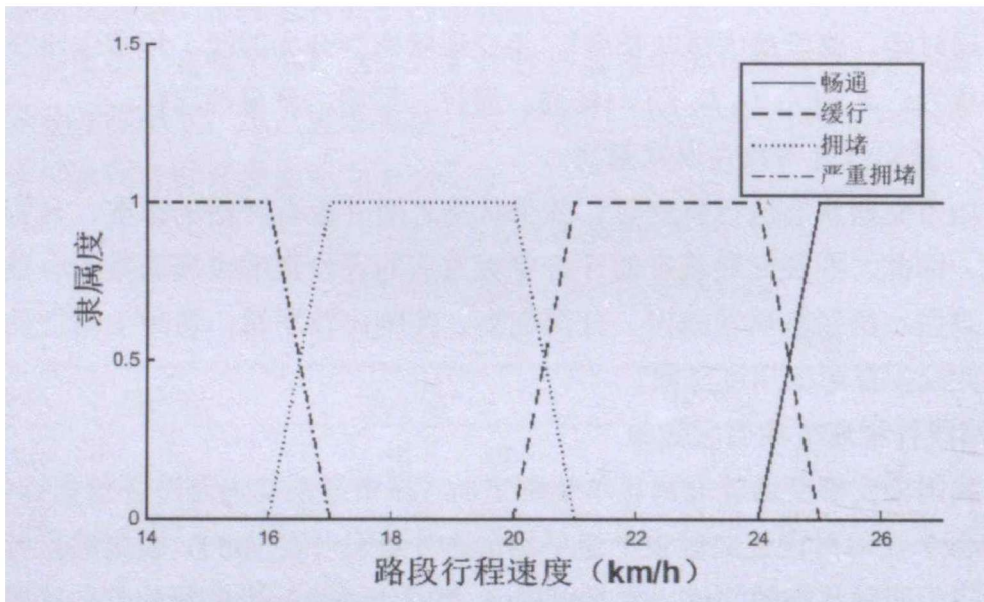


图 4-1 路段行程速度隶属度函数

Figure 4-1 Membership function of link travel speed

2) 车辆行程延误时间隶属度函数

车辆行程延误时间是在分析时间段内所有车辆在研究路段上行程时间延误的平均值，本文根据 GPS 浮动车数据来计算道路的行程延误时间。车辆行程延误时间能够反映城市道路交通通行的性能以及交通监管效率，直观的反映出道路的通行状况。车辆行程延误时间越大，道路通行状况越差，拥堵程度越严重，反之，交通越畅通。

本文参考文献[65]采用主次干道平均行程延误分级表（如表 4-4 所示），设定各个评价集等级的阈值。

表 4-4 平均行程延误分级表

Table 4-4 Rating of average trip delay

单位: 秒/千米 (s/km)

评价标准等级	一	二	三	四	五
特大型城市	[50, 30]	[60,50)	[70,60)	[80,70)	[140,80)
A 类城市	[40, 20]	[50,40)	[60,50)	[70,60)	[130,70)
B 类城市	[30, 10]	[40,30)	[50,40)	[60,50)	[120,60)
C、D 类城市	[20, 0]	[30,20)	[40,30)	[50,40)	[110,50)

据延误分级表中对大型城市的延误时间的相关规定, 结合北京市路段及交通特性, 定义车辆行程延误时间的隶属度函数如式(4.18)-(4.21)。

$$u_2^1(t) = \begin{cases} 1 & t \leq 30 \\ 4 - \frac{1}{10}t & 30 < t \leq 40 \\ 0 & t > 40 \end{cases} \quad (4.18)$$

$$u_2^2(t) = \begin{cases} 0 & t \geq 60 \text{ 或 } t \leq 30 \\ 6 - \frac{1}{10}t & 50 < t \leq 60 \\ \frac{1}{10}t - 3 & 30 < t \leq 40 \\ 1 & 40 < t \leq 50 \end{cases} \quad (4.19)$$

$$u_2^3(t) = \begin{cases} 0 & t > 80 \text{ 或 } t \leq 50 \\ 8 - \frac{1}{10}t & 70 < t \leq 80 \\ \frac{1}{10}t - 5 & 50 < t \leq 60 \\ 1 & 60 < t \leq 70 \end{cases} \quad (4.20)$$

$$u_2^4(t) = \begin{cases} 1 & 80 < t \\ \frac{1}{10}t - 7 & 70 < t \leq 80 \\ 0 & t \leq 70 \end{cases} \quad (4.21)$$

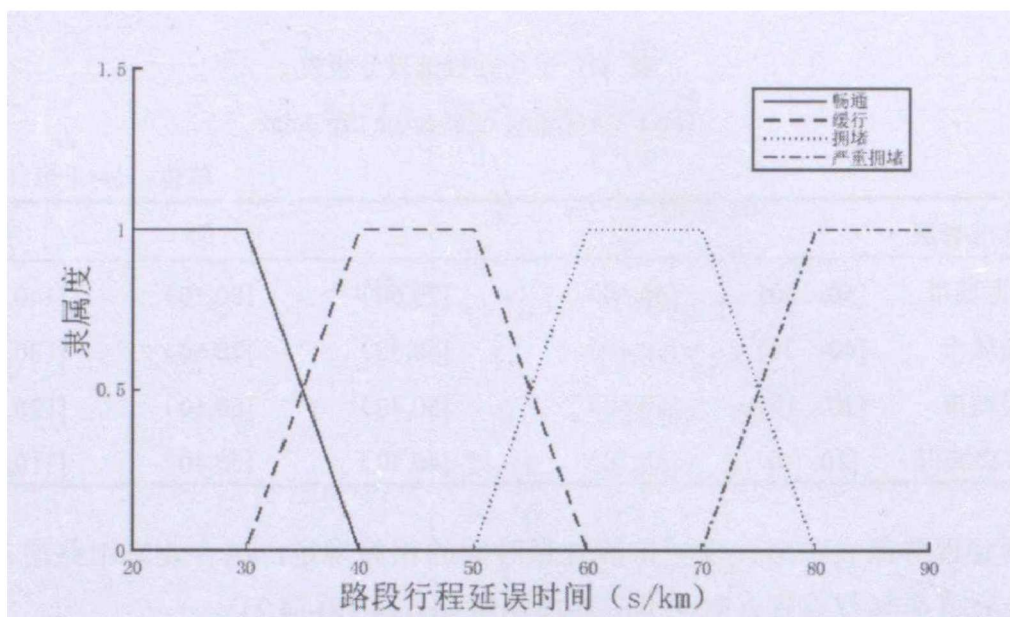


图 4-2 车辆行程延误时间隶属度函数

Figure 4-2 Membership function of car delay time

3) 路段最大排队长度隶属度函数

车辆在交叉口范围内因受阻而造成车辆无法正常行驶通过交叉口，并形成排队现象，通过路段最大排队长度来反映。本文参考文献[66]给出的建议服务水平分级标准中车辆在交叉口前路段排队长度的标准，对车辆在时间段内的最大排队长度设定隶属度函数，如式(4.22)-(4.25)所示。

表 4-5 信号交叉口建议的服务水平等级标准

Table 4-5 Rating of service level on signal controlled intersection

单位：米 (m)

服务水平	一	二	三	四	五
排队长度 (m)	<30	30~60	60~80	80~100	>100

$$u_3^1(l) = \begin{cases} 1 & l \leq 30 \\ 4 - \frac{1}{10}l & 30 < l \leq 40 \\ 0 & l > 40 \end{cases} \quad (4.22)$$

$$u_3^2(l) = \begin{cases} 0 & l > 70 \text{ 或 } l \leq 30 \\ 7 - \frac{1}{10}l & 60 < l \leq 70 \\ \frac{1}{10}l - 3 & 30 < l \leq 40 \\ 1 & 40 < l \leq 60 \end{cases} \quad (4.23)$$

$$u_3^3(l) = \begin{cases} 0 & l > 100 \text{ 或 } l \leq 60 \\ 10 - \frac{1}{10}l & 90 < l \leq 100 \\ \frac{1}{10}l - 6 & 60 < l \leq 70 \\ 1 & 70 < l \leq 90 \end{cases} \quad (4.24)$$

$$u_3^4(l) = \begin{cases} 1 & l > 100 \\ \frac{1}{10}l - 9 & 90 < l \leq 100 \\ 0 & l \leq 90 \end{cases} \quad (4.25)$$

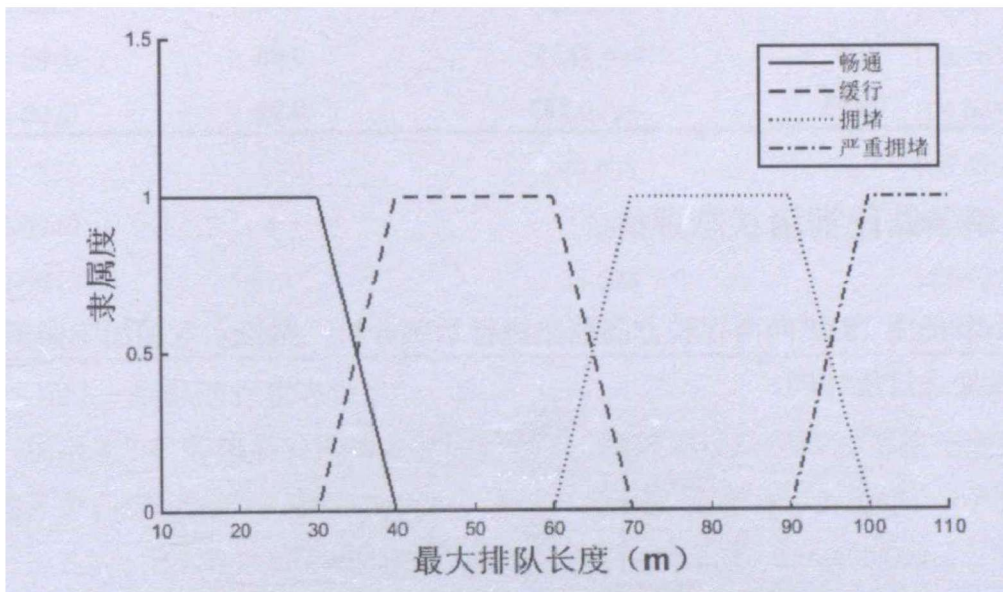


图 4-3 路段最大排队长度隶属度函数

Figure 4-3 Membership function of link maximum queue length

(3) 评价参数权重的确定

本文通过专家调查法[67]，通过六位在城市交通数据分析经验丰富、理论知识底蕴丰厚的专家根据评价因素的重要性对相应的因素进行权重系数的确定。处理后各因素权重系数如表 4-6 所示。

对每个因素专家确定权重系数进行加权平均，得到三个评价因素相对评价等级的权重为表的平均值，路段行程速度的权重为 0.493，行车延误时间的权重为 0.287，路段最大排队长度的权重为 0.22，即 $A = (0.493, 0.287, 0.22)$ 。

表 4-6 专家给定的评价参数权重

Table 4-6 Weight value given by experts

专家 \ 因素	路段行程速度	行车延误时间	交叉口最大排队长度	合计
A	0.48	0.26	0.36	1.00
B	0.43	0.27	0.30	1.00
C	0.55	0.16	0.29	1.00
D	0.50	0.30	0.20	1.00
E	0.4	0.38	0.22	1.00
F	0.6	0.35	0.05	1.00
平均值	0.493	0.287	0.22	1.00

4.4.2 单条路段拥堵状态评价

本小节使用 1827# 向南行驶方向路段进行示例分析，路段示意图如下图所示，其他路段处理过程相同。

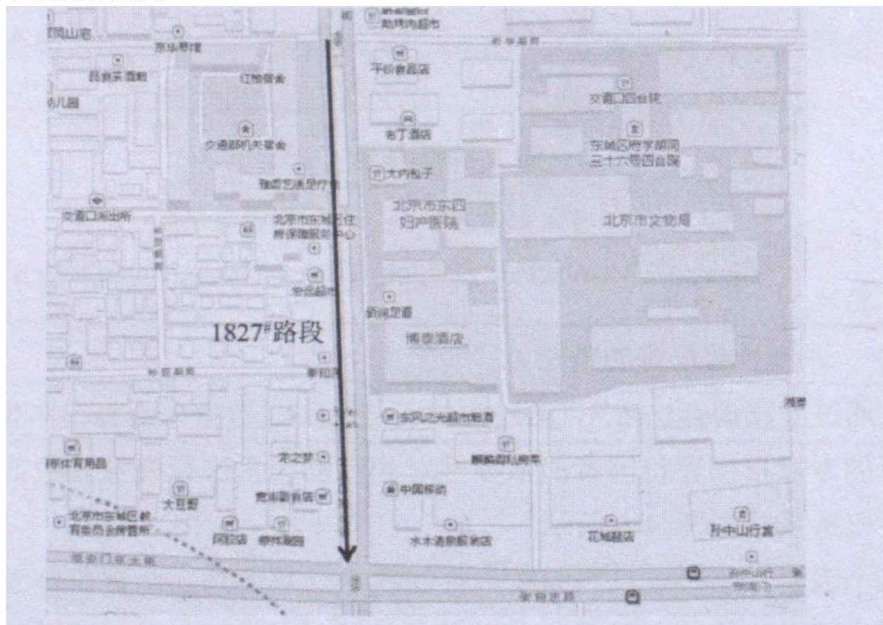


图 4-4 1827# 路段

Figure 4-4 1827# Link

(1) 浮动车数据处理

本文采用时间间隔为 10min 作为一个状态分析时段，以 10min 内区域内路段的交通参数作为选择区域内路段的交通评价参数。

表 4-7 显示的是 1827# 路段向南行驶路段在选取时间段内的 10min 时间经处理过后的数据，得出每个分析时间段的评价参数数值。

表 4-7 基于浮动车 GPS 数据的评价值 (1827#路段, 07:00-09:00)

Table 4-7 Floating car GPS data evaluation (1827#link, 07:00-09:00)

时间段	路段行程速度 (km/h)	路段行程延误时间 (s)	路段最大排队长度 (m)
0700-0710	9.733	19.711	120.901
0710-0720	4.885	43.065	40.540
0720-0730	5.452	38.189	89.571
0730-0740	7.571	24.520	45.791
0740-0750	6.539	28.941	47.630
0750-0800	1	223.275	51.164
0800-0810	0.947	235.997	178.165
0810-0820	2.857	74.425	109.045
0820-0830	5	40.075	186.675
0830-0840	1.4	157.846	59.322
0840-0850	5.813	33.673	159.427
0850-0900	1.231	180.338	174.107

(2) 道路通行状态评价

利用 4.3 小节建立的模糊中和评价模型, 对处理过后的浮动车数据进行相应的模糊评价, 评价结果如表 4-8 所示, 其中 1-畅通, 2-缓行, 3-拥堵, 4-严重拥堵。

表 4-8 路段通行状态评价结果 (1827#路段, 07:00-09:00)

Table 4-8 Assessment of link traffic condition evaluation results (1827#link, 07:00-09:00)

路段编号	行驶方向	时间段	畅通	缓行	拥堵	严重拥堵	状态
1827	1	0700-0710	0.493	0.287	0	0.22	1
1827	1	0710-0720	0	0.507	0	0.493	2
1827	1	0720-0730	0.052	0.493	0.235	0.22	2
1827	1	0730-0740	0.287	0.22	0	0.493	4
1827	1	0740-0750	0	0	0.507	0.493	3
1827	1	0750-0800	0	0.220	0	0.780	4
1827	1	0800-0810	0	0	0	1	4
1827	1	0810-0820	0	0	0.160	0.840	4
1827	1	0820-0830	0.287	0	0	0.713	4
1827	1	0830-0840	0	0.220	0	0.780	4
1827	1	0840-0850	0.182	0.105	0	0.713	4
1827	1	0850-0900	0	0	0	1	4

图 4-5 为 1827 路段向南行驶路段在 2014 年 08 月 01 日 06:00 至 11:00 五个小时路段的通行状态图。

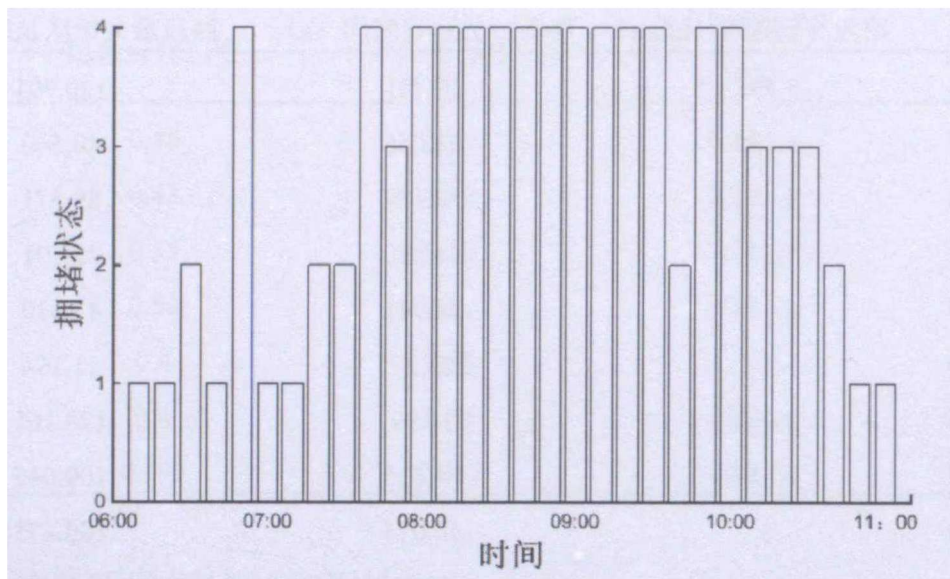


图 4-5 1827#路段交通拥堵状态 (06:00-11:00)

Figure 4-5 1827#link traffic congestion state evaluation (06:00-11:00)

1827#路段为张自忠路-交道口南大街路口与府学胡同-交道口南大街路口之间朝南向行驶的路段,该路段在 07:30-10:30 时间段内处于交通拥堵或严重拥堵状态。该路段毗邻南锣鼓巷、北京中医医院与北京市文物局,在早高峰时段,车流量较大,容易形成拥堵,并且交通拥堵持续的时间相对于区域内其他路段较久。

(3) 对比评价

选择不同的评价参数并对处理过后的浮动车数据进行相应的模糊评价,评价结果如下表所示,其中 1-畅通, 2-缓行, 3-拥堵, 4-严重拥堵。

通过下表可以看出,使用两种参数(任意两种)进行道路交通状态评价结果变化趋势不明显,不能很好的反映道路在研究时间段的运行状态。因此,本文通过使用路段行程速度、路段行程延误时间以及路段最大排队长度三个评价参数能较好的对道路运行状态进行评价,具有较高的准确性。

表 4-9 不同参数状态对比

Figure 4-6 Comparison of different parameters state

路段 编号	行驶 方向	时间段	路段行程速度	路段行程速度	路段行程延误时间
			路段行程延误时间	路段最大排队长度	路段最大排队长度
			状态	状态	状态
1827	1	0700-0710	1	4	3
1827	1	0710-0720	1	4	1
1827	1	0720-0730	4	4	1
1827	1	0730-0740	4	4	2
1827	1	0740-0750	4	4	1
1827	1	0750-0800	4	4	1
1827	1	0800-0810	4	4	1
1827	1	0810-0820	4	4	1
1827	1	0820-0830	4	4	2
1827	1	0830-0840	4	4	2
1827	1	0840-0850	4	4	4
1827	1	0850-0900	4	4	4

4.4.3 区域拥堵状态评价

本文选择图 2-5 研究区域所示的区域，针对时间段 06:30 至 09:30 时间间隔内的道路交通拥堵状态进行分析。

针对高峰时间段，对区域内道路的通行状态进行评价，表 4-10 为 07:00-08:00 时间段内区域内处于拥堵及严重拥堵路段的个数。

图 4-6 展示了在不同时间段内拥堵路段占区域内全部路段的比例变化图，该图能够反映在一定时间范围内区域内拥堵路段的比例变化。可以发现，在早高峰时段，区域内处于拥堵及严重拥堵的路段占总路段的 40%以上，在 07:40 左右有近 70%的路段拥堵较为严重。

表 4-10 区域内拥堵路段个数统计表 (07:00-09:00)

Table 4-9 The number of congested links in study area (07:00-09:00)

单位: 条

时间段	拥堵路段数量	时间段	拥堵路段数量
07:00-07:10	20	08:00-08:10	16
07:10-07:20	23	08:10-08:20	15
07:20-07:30	24	08:20-08:30	16
07:30-07:40	29	08:30-08:40	13
07:40-07:50	19	08:40-08:50	13
07:50-08:00	21	08:50-09:00	13

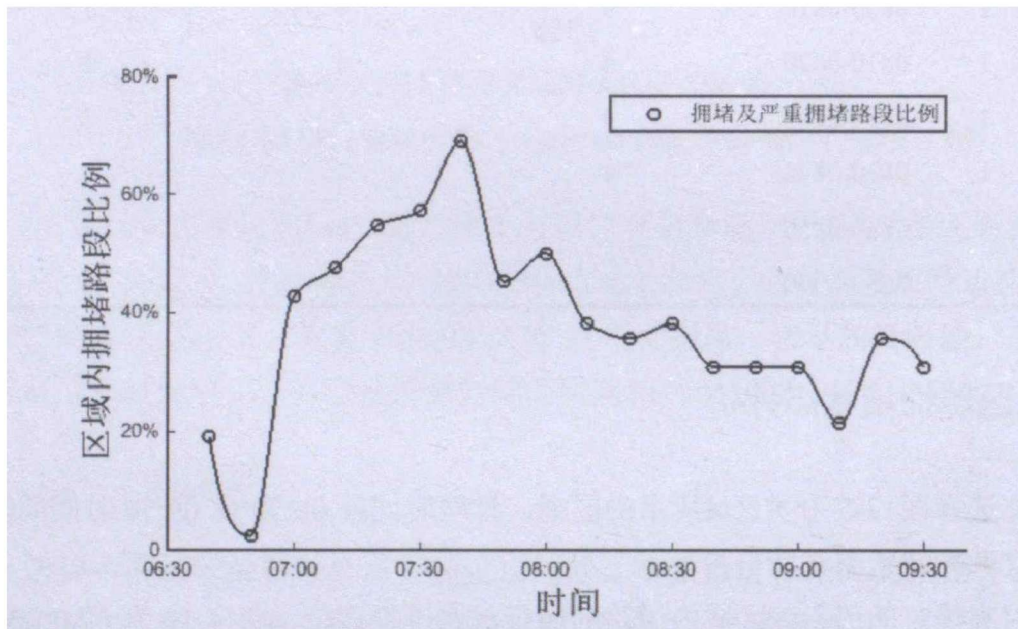


图 4-6 区域内拥堵路段比例图 (06:00-11:00)

Figure 4-7 The proportion of congested links in study area(07:00-09:00)

4.5 小结

本章主要建立了基于浮动车 GPS 数据的模糊综合评价模型。将路段行程速度、车辆行程延误时间以及路段最大排队长度作为合适的交通状态评价因素；结合路段的特点，将道路通行状态评价等级定义为畅通、缓行、拥堵、严重拥堵四个等级；利用专家调查法确定各个评价因素的权重；采用梯形函数构造各个评价因素的隶属度函数，获得模糊综合评价结果。最后，使用北京市高峰时段的浮动车 GPS 数据对区域内的路段以及区域交通进行状态评价。

5 基于浮动车 GPS 数据的宏观基本图估计

5.1 MFD 概述

传统的交通流模型也被称为交通流基本图模型，它是对历史数据进行统计分析得到参数之间的关系而建立的模型，通常包括流量-密度模型、流量-速度模型及速度-密度模型。传统的交通流模型用来描述单个断面或路段的交通流特征。Daganzo 等人分析路网整体结构特征，研究道路多个路段截面或城市区域内多条道路平均交通流量与空间密度、区域内速度之间的关系[33]，同时文献[33]还发现，城市交通路网的完成车流量与平均车流量之间存在着非常强的线性关系，而路网的车辆密度与路网中的行驶车辆数之间显然也是线性关系，所以路网的完成车流量和路网中的行驶车辆数之间也存在着单峰、低分散度的 MFD。MFD 的提出为城市交通系统的分析和控制提供了很大的便利。

文献[33, 36, 37]阐述了 MFD 的三个主要性质：（1）城市区域路网普遍近似存在着路网内行驶车辆数与路网内空间平均车速（以及空间平均车流量）之间的 MFD；（2）路网内的平均流量和流出量（完成车流量，即到达目的地的车流量）之间存在非常强的线性关系；（3）MFD 是路网的固有属性，至于路网基础设施和控制策略有关，与交通需求无关。性质（1）主要用于建模方面，因为个别路段的细节问题不影响路网 MFD 的存在；性质（2）主要用于交通监测方面，因为完成车流量较难检测，而路网内的平均流量比较容易获取；性质（3）主要用于控制方面，因为利用 MFD 不需要知道详细的 OD（交通起止点）需求即可采取有效的控制策略，降低了分析和使用的难度。

它可以用于城市交通宏观建模、交通路网服务水平评价以及区域内交通管制。由于城市内不同区域的路网运行条件得出的 MFD 图形存在差异，在将 MFD 理论研究应用于城市区域交通运行规律研究之前，需要对不同区域的道路交通运行条件进行分析。

此外，MFD 还可以用来评价城市交通区域路网的运行状态。根据实时采集到的交通状态数据，结合区域路网的 MFD，可以评估区域路网的状况，并采取合理措施，使交通状况得到改善。

5.2 基于浮动车 GPS 数据的 MFD 估计方法

车流量、速度及密度是交通流理论中十分重要的因素，可以通过两两之间的关系来研究城市的道路的状态。文献[33]通过流量检测器及浮动车数据绘制工作日及周末的流量变化曲线、区域内车辆流量-速度-密度两两之间的 MFD 图形及区域内车辆运行总数与车辆速度之间的关系图，分析了区域内存在 MFD。在本文中仅通过浮动车数据来计算相关参数值。首先，利用第三章计算的每个时间段内路段最大排队长度计算排队车辆中汽车数量与浮动车数量之间的比例系数，利用该比例系数估算区域内行驶车辆总数；然后，利用将路段平均速度作为区域内车辆运行速度；随后，根据速度-密度公式，利用平均速度和平均密度可以计算出平均流量；最后，绘制区域内车辆运行总数与车辆运行速度、平均速度—平均密度—平均流量三者的关系曲线。

5.2.1 浮动车 GPS 数据筛选

城市内的浮动车是运营性质的车辆，具有全天候运行、获取数据较全等特点，因此用浮动车 GPS 数据可以获得在某一时段内的行车速度，通过数据对区域内车辆总数进行预估，得到区域内车辆总数与行车速度之间的关系图。

在浮动车 GPS 数据的选取上应该包括低峰——高峰——平峰之间的变化过程，因此，选取的时间段必须为连续且包含有三个阶段的交通状态的变化过程。同时，分析时间段的时间间隔也十分重要，不同的时间间隔，产生的结果图会存在差异，如果时间间隔选取的过大，会造成时间跨度较大，预估结果不准确；时间间隔的选取过小，精度会有所提高，但数据处理任务重。本文根据经验，在 06:00 至 24:00 时间段内由于路段上行驶浮动车数量较多，选取分析时间间隔为 10min；在 00:00 至 05:59 时间段内由于路段上行驶的浮动车相比于白天较少，选取分析时间间隔为 30min。

5.2.2 行车速度的估算

行车速度是衡量城市道路交通运行状态的重要指标之一，区域内行车速度的快慢受到区域道路路面情况的限制，最重要的是区域内的车辆数目直接影响车辆在区域内的行驶速度，如果区域内车辆数目较少，车流较稀疏，行车速度较大；反之，随着车辆数目的不断增加，区域内道路车流密度增大，车辆之间的相互影响作用较强，行车速度逐渐下降。

(1) 车辆平均瞬时速度

利用在时间间隔内, 对行驶在区域内所有浮动车的瞬时速度求平均值, 如式(5.1)所示。

$$\bar{V}_A = \sum_{j=1}^k V_{A_j} / k \quad (5.1)$$

其中, V_{A_j} 为区域内时间间隔中在道路上行驶的浮动车的瞬时速度 (km/h), k 为浮动车的数量 (辆)。

(2) 路段行程速度

利用在时间间隔内区域内所有道路的平均路段行程速度作为研究区域在某一时间段内区域的行车速度。

$$\bar{V}_L = \sum_{i=1}^n b_i V_{L_i} / n \quad (5.2)$$

其中, a_i 为各路段在区域内的权重系数, $0 \leq b_i < 1$ 且 $\sum b_i = 1$, V_{L_i} 为区域内道路的路段行程速度, n 为区域内研究路段的个数 (条)。

通过式(5.1)和式(5.2)可以发现, 利用路段行程速度计算区域内行车速度相比于利用浮动车瞬时速度计算区域内行车速度综合考虑了道路对车辆速度的影响。

5.2.3 区域内行车车辆总数的估算

文献[33]利用道路流量检测器数据与浮动车数据进行对比, 获得区域内浮动车与所有行驶车辆的百分比, 从而估算出区域内车辆总数。在本文中只有浮动车数据, 因此, 本文提出了一种基于路段最大排队长度估算区域内行驶车辆总数的方法, 利用排队长度计算时间段内路段排队车辆中的小汽车数量, 从而获得排队车辆中小汽车与浮动车的比例系统, 通过区域内在该时间段内全部运行的浮动车数量与比例系数的乘积得到区域内车辆的运行总数。

(1) 根据本文第三章内容, 式(3.11)可以确定在各个时间段、时间间隔内每条路段的最大排队长度 \tilde{L} 。

(2) 车辆总数与浮动车的比例系数

$$p = \sum_{i=1}^n N_i / \sum_{i=1}^n N_{Fi} \quad (5.3)$$

$$N_i = \tilde{L}_i / \tilde{D} \quad (5.4)$$

其中, p 为区域内行驶车辆总数与浮动车之间的比例系数, N_{Fi} 为区域内路段 i 上排队浮动车的总数 (辆), N_i 为区域内路段 i 上的排队车辆个数 (辆), \tilde{L}_i 为路段 i 的最大排队长度 (m), \tilde{D} 为车辆间距, 本文中取车辆间距为 5.5m[33]。

(3) 区域内车辆总数的估算

由式(3.11)可以计算在时间间隔 k 区域内车辆总数与区域内行驶浮动车数量之间的关系。

$$N(k) = N_F(k) \cdot p = N_F(k) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\sum_{i=1}^n N_{F_i}} = N_F(k) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\tilde{L}_i}{\tilde{D}}}{\sum_{i=1}^n N_{F_i}} \quad (5.5)$$

其中, p 为区域内行驶车辆总数与浮动车之间的比例, $N_F(k)$ 为时间间隔内区域浮动车的总数 (辆), $N(k)$ 为时间间隔内区域运行车辆的总数 (辆)。

5.3 实例分析

(1) 浮动车 GPS 数据处理

本文选择的区域如图 2-5 所示, 在选取的区域中有 44 条单向路段, 对 2014 年 8 月 1 日全天数据进行处理, 满足区域内三个交通状态的变化。图 5-1 显示的是工作日内区域内车辆运行速度 a)、区域内车辆密度 b) 及随时间的变化曲线。

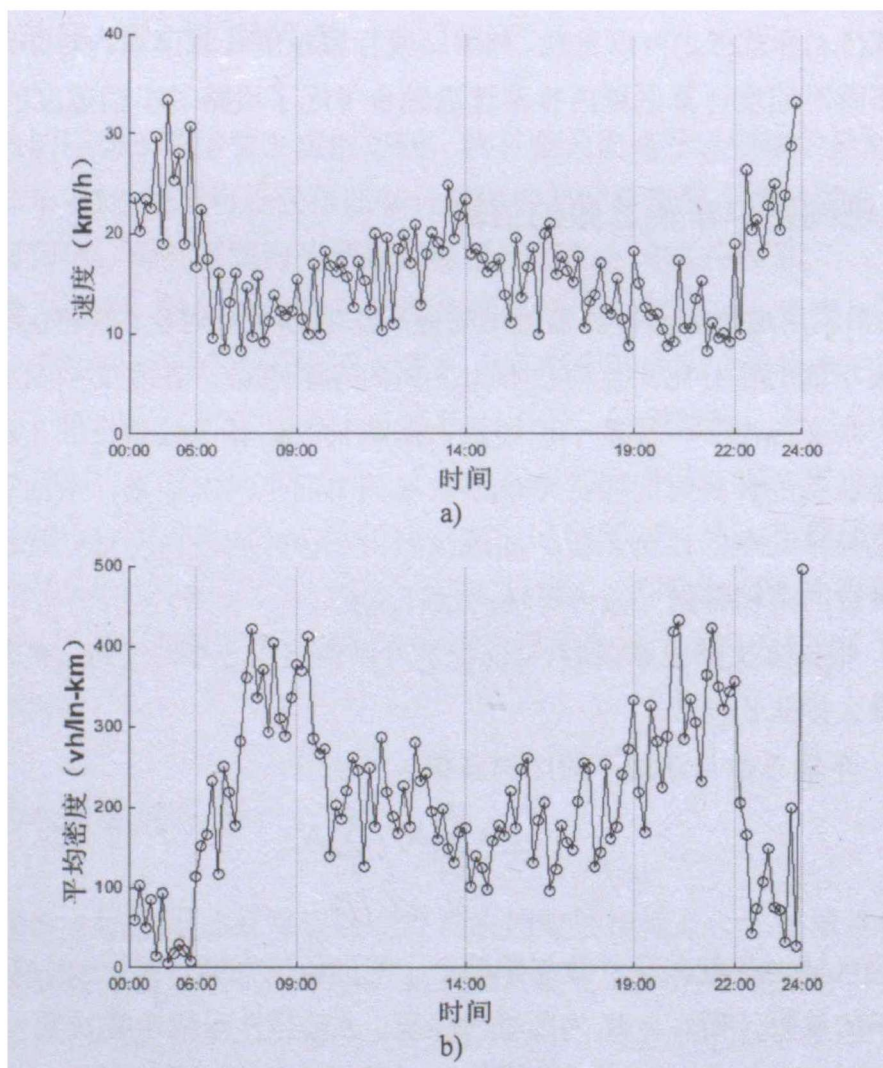


图 5-1 a)平均速度及 b)平均密度一天内变化曲线

Figure 5-1 The profile of curve within a day: a) average speed; b) average density

(2) 比例系数的确定

通过对区域内 00:00 至 24:00 的浮动车上传 GPS 数据进行处理,可以得到在全天各个小时内的不同时间间隔内,路段排队范围内的车辆总数与浮动车个数的比值,即比例系数。图 5-2a)显示了在工作日比例系数随时间的变化曲线,可以发现实际曲线(蓝线)在早晚高峰时间段波动较大,比例系数在早晚高峰时间段内的值明显大于其他时间段,峰值较为突出,在计算比例系数时会存在较大误差,因此利用移动平均滤波法来消除峰值对计算结果的影响,得到滤波后的曲线(红线)。在本文中,利用滤波后数据来计算高峰时间段和平峰时间段内的比例系数平均值,即

$$p(k) = \begin{cases} 15.33 & k \in [06:30, 09:00] \cup [19:30, 22:00] \\ 9.90 & otherwise \end{cases} \quad (5.6)$$

其中, $p(k)$ 代表在时间点 k 时刻区域内运行车辆总数与浮动车辆数之间的比例。全市的浮动车总数在一天内基本保持不变,早晚高峰时间段,随着路段上的私人车辆增多,比例系数 p 逐渐增大;在其他时间段,道路上行驶的私人车辆数目远小于高峰时间段的私人车辆总数,会在一定的范围内变化,但不会有明显差异,因此该时间段的比例系数 p 值小于高峰时间段的比例系数。

图 5-2b)显示了在非工作日一天内比例系数随时间的变化曲线图,可以发现比例系数在 08:00 至 10:00 时间段内逐渐上升,在 10:00 至 22:00 时间段内均波动较小,在 22:00 至 24:00 时间段内开始下降,其变化符合人们在周末的出行习惯。

图 5-2c)显示了在工作日与非工作日两天内比例系数的变化曲线图,可以得出如下结论: 1) 由于本文选择区域内有较多景点,因此该区域是本地居民及外来游客参观游玩、休闲娱乐的区域,加之北京市周末不限号等因素,使得全天内非工作日比例系数的平均值(14.9703)略高于工作日比例系数的平均值(11.2778); 2) 在工作日,比例系数的变化基本与早晚高峰时间段相符合,在非工作日,比例系数在 10:00 至 22:00 时间段内均维持较高值,符合公众在周末的出行习惯。

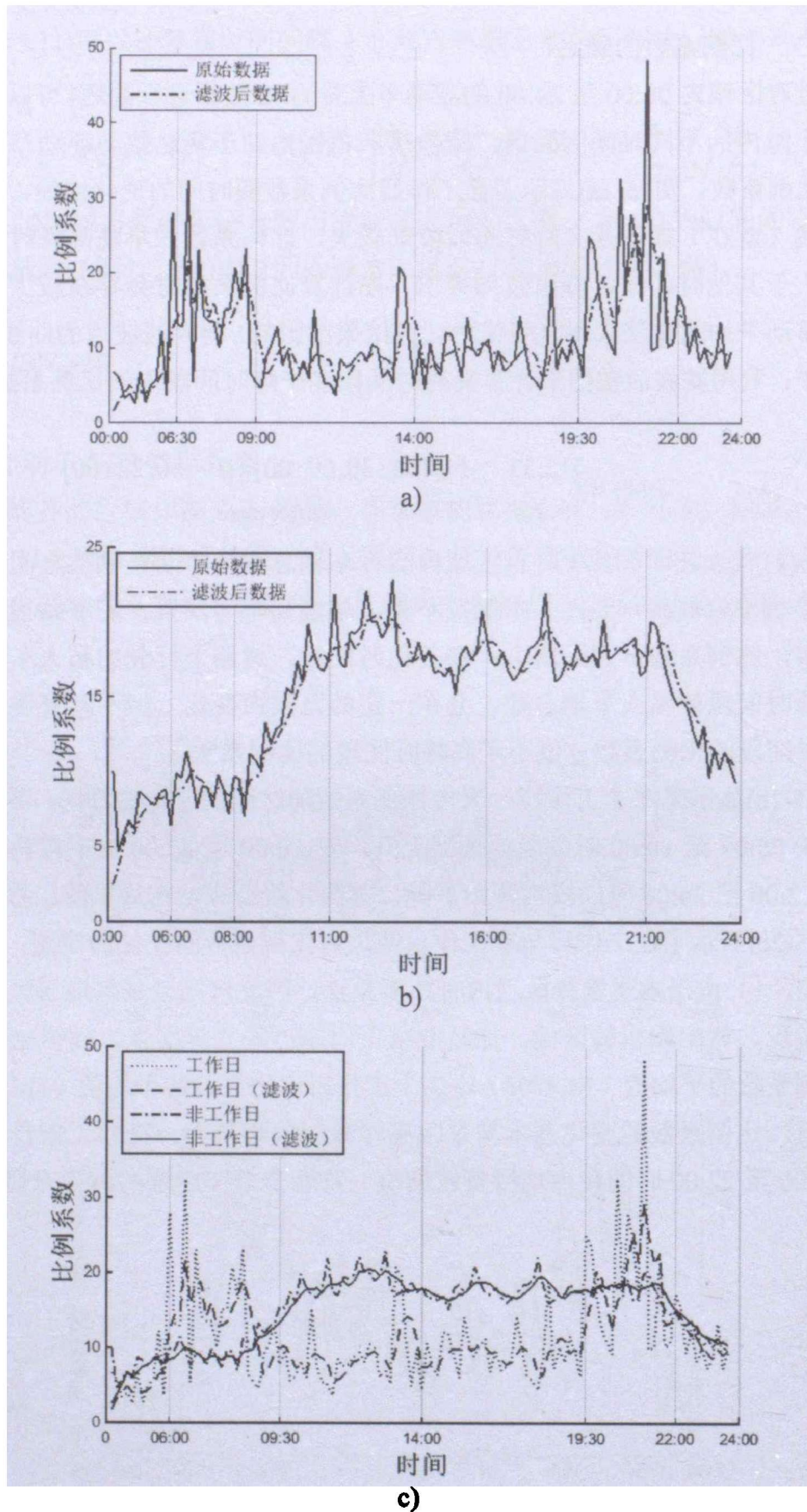


图 5-2 比例系数变化曲线: a)工作日; b)非工作日; c)工作日及非工作日

Figure 5-2 Proportional coefficient curve: a)weekday; b)weekend day; c) weekday vs. weekend day

(3) 区域内车辆总数的估算

根据公式(5.5)与(5.6)，可以估算出在不同时间段内的运行车辆总数。

(4) 区域内 MFD 绘制

1) 图形绘制

图 5-3 绘制的为区域内的车辆平均速度 $\bar{V}(k)$ 与区域内的行驶车辆数 $N(k)$ 之间的关系图。在 00:00 至 06:00 时间段内分析时间间隔为 30min，其他时间段的分析时间间隔为 10min。

图 5-3 a)显示了由滤波后的比例系数平均值计算得到的数据点(三角形)和由滤波后的比例系数实际值计算得到的数据点(圆点)，虽然两种计算方式得到的数据点变化趋势一致，但由滤波后的比例系数平均值计算得到的点离散程度较大，因此本文使用由滤波后的实际比例系数计算得到的车辆总数来进行后续研究。

图 5-3 b)中共有全天 120 个数据点，其中三角形为 00:00 至 13:00 时间段内的数据点，圆形为 13:00 至 24:00 时间段内的数据点。通过数据点的变化曲线，该图能够清楚地表明，在一天 24 小时中两个较大时间段区域内的车辆行车速度与车辆总数存在变化关系。

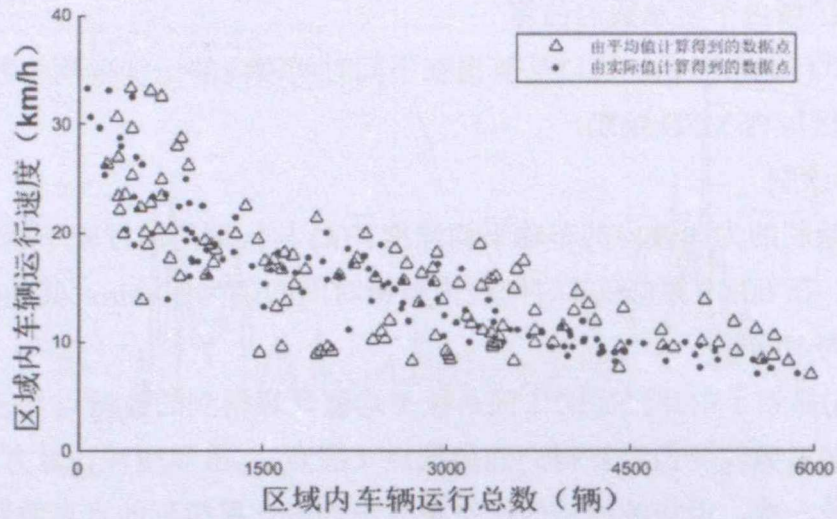
图 5-3 c)中绘制的是高峰时间段及其他时间段的数据点变化曲线，其中三角形为 06:30 至 09:00 及 19:30 至 22:00 时间段内的数据点，圆形为其他时间段内的数据点。通过两类点的变化趋势，可以发现，区域内的车辆平均速度与区域内行驶车辆数之间的关系不受高峰及平峰时间段的影响，在两种时间段内都满足图 5-3 b)的变化趋势。

路段上浮动车数量的比例会影响到区域内车辆行车速度与车辆总数的计算，因此会产生一些比较离散的点。在利用式(5.2)及式(5.5)进行近似估算时，会产生偏差。

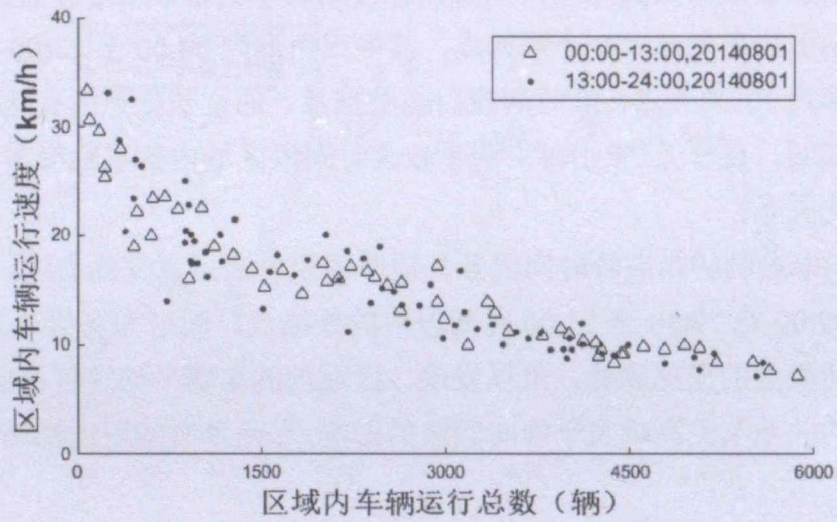
通过计算的车辆总数获得区域内的车辆密度，根据速度—密度—流量三者之间的关系式

$$Q = \rho \times \bar{V}_L$$

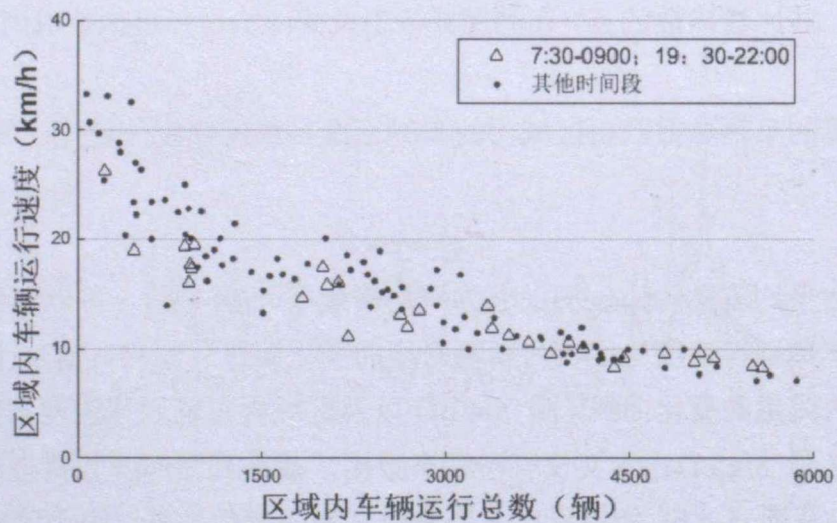
其中 Q 为平均流量(vh/sec)， ρ 为平均密度(vh/ln-km)。可以得到如图 5-4 所示区域内车辆运行速度与区域内车辆密度的变化曲线(图 5-4 a)、区域内车辆密度与区域内流量的变化曲线(图 5-4 b)以及区域内车辆运行速度与区域内流量的变化曲线(图 5-4 c)。本文仅有浮动车数据，故得到图 5-4 点离散程度较大。通过图 5-4 a)及图 5-4 b)能够看出三个参数之间的变化关系。由于区域内流量的计算是通过速度与密度公式得到，因此流量的计算存在较大的误差，图 5-4 c)数据点离散程度大，仅能看出随着区域内行车速度的增大流量呈下降趋势。



a)



b)



c)

图 5-3 区域车辆总数与速度宏观基本图

Figure 5-3 Total number of vehicles vs. velocity MFD

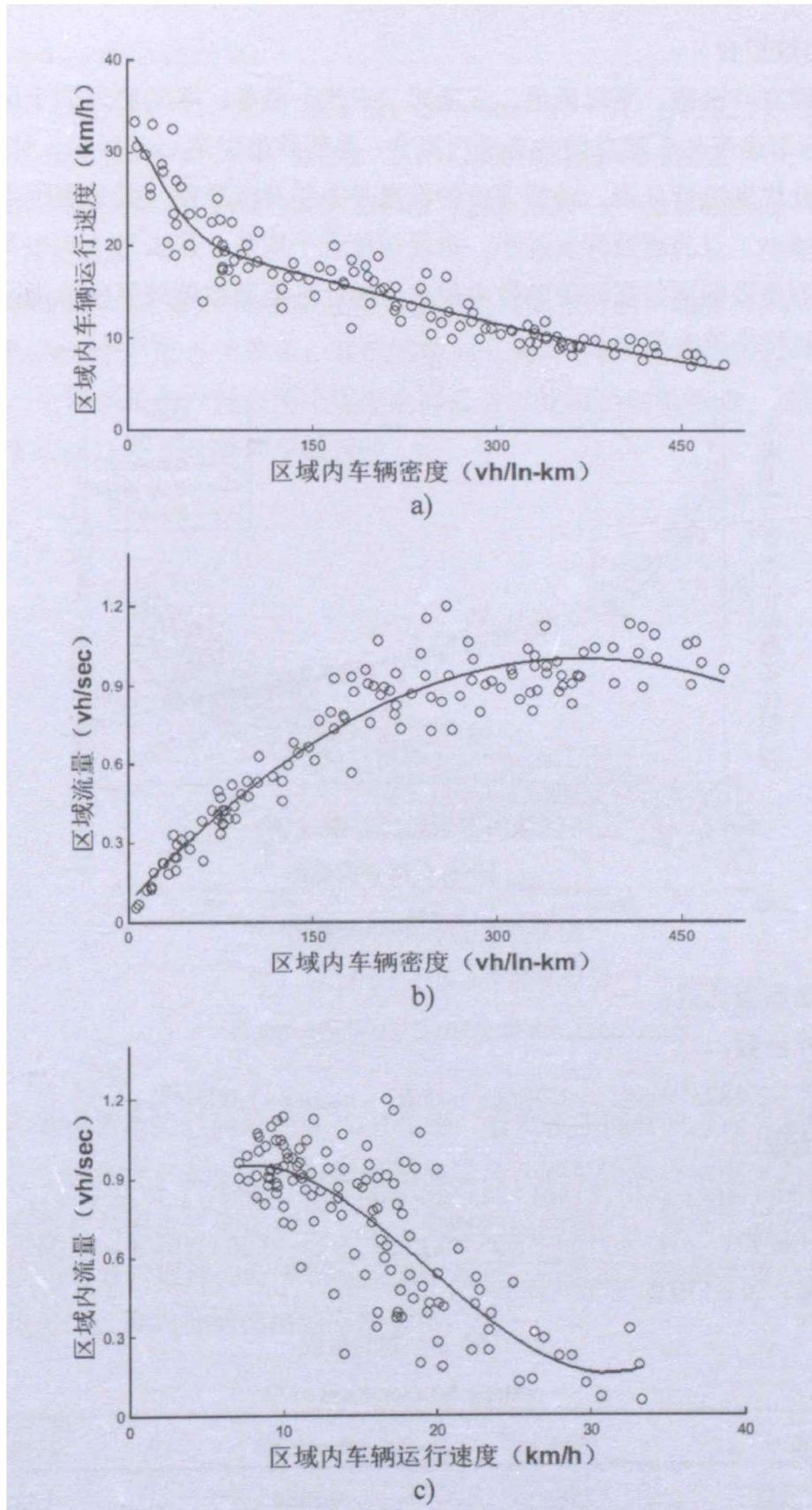


图 5-4 平均速度—平均密度—平均流量宏观基本图

Figure 5-4 MFD of a) average density—; b) average density—average flow; c) average speed—average flow in study area

2) 函数拟合

利用傅立叶函数、高斯函数、多项式（三次）函数、幂函数这四个函数对对图 5-3b)行车速度与车辆总数散点进行拟合,得到结果如图 5-5 所示。对四种拟合曲线的拟合优度进行分析,选择评价的标准是方差及标准差,其是表现点的离散程度,值越小,点的离散程度越小,也就越接近平均值。从表 5-1 可以得出,高斯函数的方差及标准差在四种函数中最小,因此高斯函数能较好的体现区域内的车辆总数与行车速度的关系。

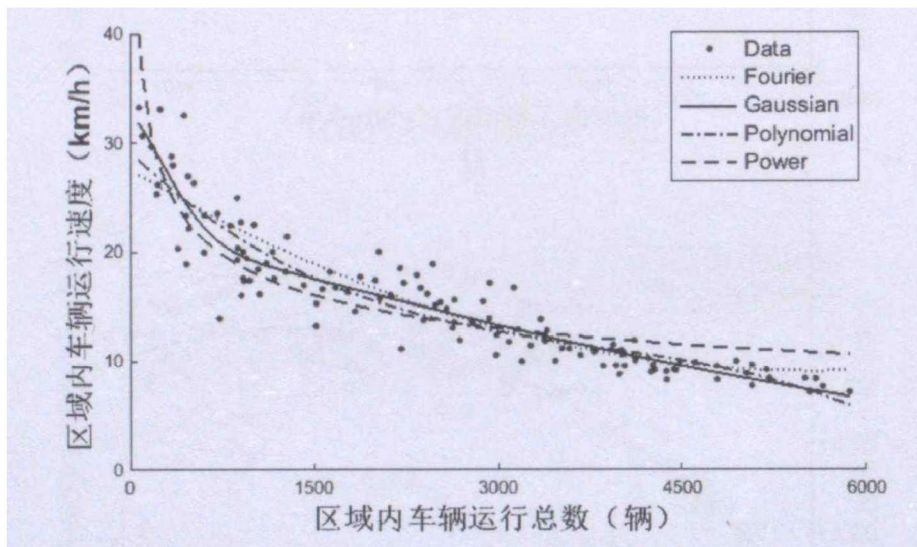


图 5-5 拟合曲线图

Figure 5-5 The fitting curves

拟合函数表达式:

傅立叶函数:

$$y = 2.482e^9 - 2.482e^9 \times \cos(x \times 1.095e^{-8}) - 3.03e^5 \times \sin(x \times 1.095e^{-8});$$

高斯函数:

$$y = 11.68 \times \exp(-((x + 290)/1146)^2) + 30 \times \exp(-((x + 9952)/1.772e^4)^2);$$

多项式函数: $y = -2.716e^{-11} \times x^3 + 6.136e^{-7} \times x^2 - 0.003319 \times x + 29.24;$

幂函数: $y = 179.8 \times x^{-0.3015}。$

表 5-1 拟合优度

Table 5-1 Goodness of fit

函数名称	SSE	R-square	RMSE
傅立叶函数	758.5	0.8334	2.557
高斯函数	561.3	0.8768	2.219
多项式函数	689.5	0.8446	2.438
幂函数	914	0.7993	2.783

图 5-4 a) 拟合函数为:

$$y = 11.68 \times \exp(-((x+11.99)/47.35)^2) + 30 \times \exp(-((x+411.1)/732.2)^2);$$

图 5-4 b) 拟合函数为: $y = -6.822e^{-6} \times x^2 + 0.005033 \times x + 0.07676$;

图 5-4 c) 拟合函数为: $y = 0.0001254 \times x^3 - 0.007339 \times x^2 + 0.09201 \times x + 0.6213$ 。

3) 误差分析

将高斯函数作为拟合曲线, 并对数据点进行误差分析, 如图 5-6, 其中带有斜线的阴影为一个标准差误差带, 其他阴影部分为两个标准差误差带。数据点大部分落在一个误差带中, 但在两个误差之外还会存在极少的数据点, 这些数据点可能是由于式(5.1)-(5.5)计算产生的误差。

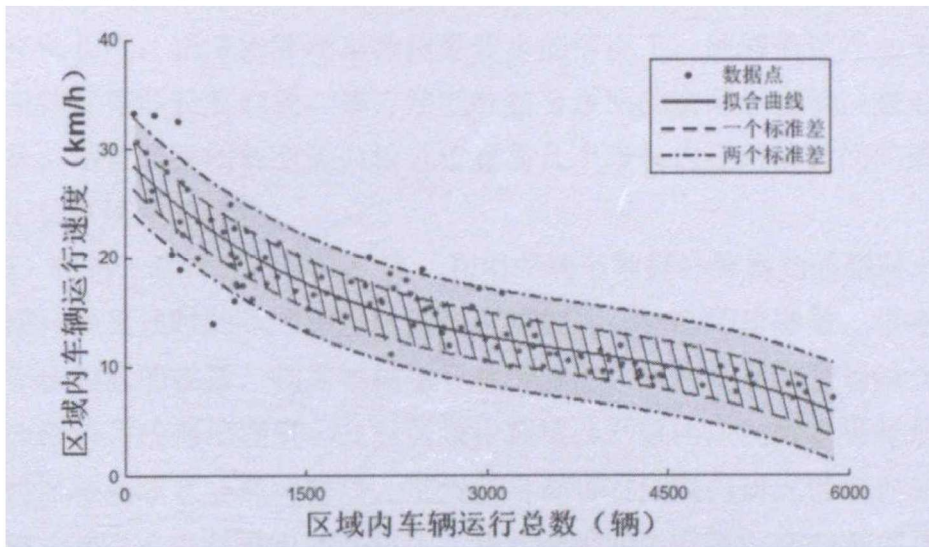


图 5-6 1 个和 2 个标准差带

Figure 5-6 1- and 2-standard deviation bands

通过对城市内区域的浮动车 GPS 数据, 计算在不同时间段内区域车辆总数与区域内行车速度之间的关系, 可以绘制区域内行驶车辆总数与速度之间的曲线关系, 车辆总数与速度之间的曲线关系不受时间段的影响。通过交通宏观基本图的绘制可以为交通管理部门管辖该区域提供指导, 能够有效缓解区域内因车辆总数增大而造成的区域内交通拥堵状态严重化。

5.4 小结

本章对 MFD 进行了概述, 阐述了 MFD 的三个主要性质, 主要完成了以下几点工作: 1) 基于路段最大排队长度来获得工作日及非工作日内区域行驶的车辆总数与浮动车之间的比例系数; 2) 利用实际比例系数估计在全天内区域中行驶车辆

总数；3) 获得了区域车辆总数与速度宏观基本图；4) 通过实际数据的处理与应用，考察了区域内平均速度—平均密度—平均流量之间的变化关系。

6 结论

6.1 论文主要结论

本文的研究成果和结论主要有：

(1) 本文通过计算浮动车 GPS 低速点与交叉口之间的距离确定排队长度的预估值，利用本文提出的一种利用浮动车在路段中的数量以及行驶路段的道路等级、车道数的排队长度修正算法，综合考虑三种因素的影响，得到较为准确的估算路段最大排队长度；在路段浮动车数据量较少的情况下，能够通过浮车间距及存在数量来计算排队长度修正。该方法能够结合道路的实际运行状况来对排队长度进行估算，避免了因距离交叉口较近位置前几个步长内在统计时间间隔内无数据点而产生估算误差的现象。

(2) 将第三章计算的排队长度、利用浮动车数据计算得到的路段车辆行驶速度及路段行程延误时间作为评价区域内道路的运行状态评价参数，根据专家调查法得到评价因素的权重，利用模糊综合评价算法，对选择参数进行综合评价，分时间段判断路段的拥堵程度。并对区域内拥堵及严重路段的数目进行统计，获得分时间段区域拥堵状态变化曲线，发现在早高峰时间段内研究区域内处于拥堵及严重拥堵的路段占总路段的 40% 以上，在几个时间段中有近 70% 的路段拥堵较为严重。利用浮动车数据对交通状态进行评价，其结果可为交通监管部门的决策提供依据。

(3) 宏观基本图是区域路网的基本固有属性，不同区域道路的运行条件对 MFD 的形状存在不同影响，通过 MFD 可以从宏观层面监测和预计区域路网的道路交通运行状态。本文通过实际浮动车 GPS 数据建立区域内道路交通宏观基本图模型，利用浮动车数据验证了宏观基本图在真实路网中的存在性。1) 基于路段最大排队长度来获得工作日及非工作日内区域行驶的车辆总数与浮动车之间的比例系数，工作日的比例系数在早晚高峰时间段内高于其他时间段，非工作日的比例系数在白天时间段高于其他时间段；2) 利用实际比例系数估计在全天内区域中行驶车辆总数；3) 根据浮动车 GPS 数据绘制了区域车辆总数与速度宏观基本图，可以发现，随着区域内车辆总数的不断增加，区域内的行车速度逐渐下降且变化趋势逐渐变缓，对该趋势进行拟合后发现高斯函数能够较为准确的表现区域内行车速度随区域内车辆总数变化的趋势；4) 通过以上工作，考察了区域内平均速度—平均密度—平均流量之间的变化关系，并对变化趋势进行了曲线拟合。

6.2 有待研究内容

虽然本文的研究取得一些初步成果和结论，但在许多方面还有不足，在以后的研究中，还需要对以下几方面进行后续研究：

(1) 为了简化研究问题，本文以图 2-5 内的主要干道为研究对象，但城市路网是一个复杂、多变以及相互影响的系统，因此在研究中需要通过科学的计算模型选取研究路网的区域范围；

(2) 在无其他交通数据的情况下，只利用浮动车 GPS 数据进行本文的研究，如果能够获得其他交通数据（如路段流量检测器数据、占有率等），并进行综合分析，得到的结论会更加准确。

参考文献

- [1] 代磊磊. 城市主干路交通拥挤的扩散规律及其模型研究 [D]; 吉林大学, 2006.
- [2] WIRASINGHE S C. Determination of traffic delays from shock-wave analysis [J]. *Transportation Research*, 1978, 12(5): 343-8.
- [3] 王博瑾. 以机动车污染防治推进 PM2.5 治理问题探讨[J]. *新材料新装饰*, 2014, 4):
- [4] BOYCE D E, KIRSON A, SCHOFER J L. Design and implementation of ADVANCE: The Illinois dynamic navigation and route guidance demonstration program [C].// *proceedings of the Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, 1991, F, 1991.
- [5] DAILEY D J, MACLEAN S, CATHEY F W. A self-describing data transfer model for ITS applications [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2003, 3(4): 293-300.
- [6] 吴丹, 颜韬. 浮动车数据在城市交通研究中的应用探索 [J]. *科技创新与应用*, 2014, 21): 55-6.
- [7] 杨兆升, 蹇峰, 胡坚明. 城市交通流诱导系统理论模型和实施技术研究——智能运输系统重要研究内容 [J]. *道路交通与安全*, 2003, 6): 9-14.
- [8] KLEIN L. Sensor Technologies and Data requirements for ITS [J]. *Data Communications*, 2001,
- [9] FOULADVAND M E, DAROONEH A H. Statistical analysis of floating-car data: an empirical study [J]. *Physics of Condensed Matter*, 2005, 47(2): 319-28.
- [10] SARVI M, Horiguchi R, KUWAHARA M. A methodology to identify traffic condition using intelligent probe vehicles [C].// *proceedings of the Proceedings of 10th ITS World Congress, Madrid, F*, 2003.
- [11] 张晓春, 吕北岳, 杜清运. 基于车载 GPS 技术的交通浮动车检测系统设计研究 [J]. *Its 通讯*, 2004, 3): 12-6.
- [12] LONGLEY D. A control strategy for a congested computer-controlled traffic network [J]. *Transportation Research*, 1968, 2(4): 391-408.
- [13] CHANG T H, LIN J T. Optimal signal timing for an oversaturated intersection [J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2000, 34(6): 471-91.
- [14] CHANG T H, SUN G Y. Modeling and optimization of an oversaturated signalized network [J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 2004, 38(8): 687-707.
- [15] 王忠宇, 蔡青, 吴兵. 多源数据条件下信号交叉口排队长度估算方法 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2015, 45(4): 1088-94.
- [16] 姚荣涵, 王殿海, 曲昭伟. 基于二流理论的拥挤交通流当量排队长度模型 [J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2007, 37(3): 521-6.
- [17] 王伟智, 刘秉瀚. 车辆排队长度自动检测新方法 [J]. *中国体视学与图像分析*, 2006, 11(3): 216-21.
- [18] 唐少虎, 刘小明, 陈兆盟. 基于视频数据的交叉口状态判别及排队长度估计 [J]. *道路交通与安全*, 2015, 1): 58-64.
- [19] 秦钟, 王法胜. 交叉口排队长度的视频检测 [C].// *proceedings of the 中国控制会议*, F, 2010.

- [20] 孙文兵, 杨立君. 基于视频数据的道路通行能力分析 & 车辆排队长度模型 [J]. 邵阳学院学报: 自然科学版, 2014, 3(1): 6-13.
- [21] 陶万杰. 基于视频处理的车辆排队长度检测算法的研究与应用 [D]; 北京邮电大学, 2015.
- [22] 周学农. 排队长度模型比较及动态方法研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(1): 91-5.
- [23] 何宁, 杨涛, 李朝阳. 信号交叉口延误及排队长度的实证研究和应用 [J]. 公路交通科技, 2002, 19(5): 106-9.
- [24] 荣建, 何民. 信号交叉口排除长度动态计算方法研究 [J]. 中国公路学报, 2002, 15(3): 101-3.
- [25] 陆化普. 解析城市交通 [M]. 中国水利水电出版社, 2001.
- [26] 李淑庆. 交通工程导论 [M]. 人民交通出版社, 2010.
- [27] 时幸飞. 城市道路交通状况实时监测关键技术研究 [D]; 东南大学, 2011.
- [28] WEINING L, HENG Z, DIHUA S. Video-based discriminant model of traffic congestion [J]. Research on Application of Computer, 2010, 27(8): 3006-8.
- [29] YUAN Y, VAN LINT H, VAN WAGENINGENKESSELS F. Network-Wide Traffic State Estimation Using Loop Detector and Floating Car Data [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2014, 18(2): 41-50.
- [30] 黄磊磊, 汤一平, 孟焱. 基于机器视觉的道路拥堵状态检测的研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(01): 148-53.
- [31] 姜桂艳, 江龙晖, 王江锋. 城市快速路交通拥挤识别方法 [J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 87-91.
- [32] 罗小强, 陈宽民, 张同芬. 城市快速路交通拥挤事件检测与程度辨识 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 3(1): 71-5.
- [33] GEROLIMINIS N, DAGANZO C F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings [J]. Institute of Transportation Studies Research Reports Working Papers Proceedings, 2007, 42(9): 759-70.
- [34] GODFREY J W. The mechanism of a road network [J]. Traffic Engineering & Control, 1969, 8(323-7).
- [35] HERMAN R, PRIGOGINE I. A two-fluid approach to town traffic [J]. Science, 1979, 204(4389): 148-51.
- [36] DAGANZO C F. Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2007, 41(1): 49-62.
- [37] DAGANZO C F, GEROLIMINIS N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2008, 42(9): 771-81.
- [38] GEROLIMINIS N, SUN J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2011, 45(3): 605-17.
- [39] GEROLIMINIS N, ZHENG N, AMOUNTOLAS K. A three-dimensional macroscopic fundamental diagram for mixed bi-modal urban networks [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2014, 42(42): 168-81.
- [40] JI Y, GEROLIMINIS N. On the spatial partitioning of urban transportation networks [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2012, 46(10): 1639-56.

- [41] WADA K, FUJII H. Research, development and field testing of the probe car information system (ii) [C].// proceedings of the 9th World Congress on Intelligent Transport Systems, F, 2002.
- [42] 何巍楠. 基于浮动车数据的城市常发性交通拥堵时空分布特征研究 [D]; 北京交通大学, 2012.
- [43] 陈青. 基于 GPS 浮动车的城市道路交通状态判别技术研究 [D]; 长安大学, 2009.
- [44] 城市道路设计规范 [M]. 中国建筑工业出版社, 2012.
- [45] 刘梦涵. 面向特大城市的分层次交通拥堵评价模型及算法 [D]; 北京交通大学, 2008.
- [46] 阴丽娜. 基于节点可达性的城市路网交通状态判别方法研究 [D]; 长安大学, 2011.
- [47] 陈义华, 晏承玲. 基于 FAHP 和模糊综合评价的交通状态判别模型 [J]. 重庆理工大学学报:自然科学, 2012, 26(11): 109-14.
- [48] 李作敏, 杜颖. 交通工程学 [M]. 人民交通出版社, 2000.
- [49] HIGASHIKUBO M, HINENOYA T, TAKEUCHI K. Traffic queue length measurement using an image processing sensor [C].// proceedings of the Intelligent Transportation: Realizing the Future Abstracts of the Third World Congress on Intelligent Transport Systems, F, 1996.
- [50] 杨永辉, 黄磊, 刘昌平. 基于视频分析的车辆排队长度检测 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 1037-41.
- [51] LIGHTHILL M J, WHITHAM G B. On Kinematic Waves. I. Flood Movement in Long Rivers [J]. Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1955, 229(1178): 281-316.
- [52] NEWELL G F. A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part I: General theory [J]. Transportation Research Part B Methodological, 1993, 27(4): 281-7.
- [53] RICHARDS P I. Shock waves on highway [J]. Operations Research, 1956, 4(42-51).
- [54] 程昊, 李梦梅, 杨光. 车道被占用对城市道路通行的影响分析 [J]. 南阳理工学院学报, 2014, 6(6): 124-8.
- [55] CHEN Y, BELL M, WANG D. Risk-Averse Time-Dependent Route Guidance by Constrained Dynamic A Search in Decentralized System Architecture [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1944(1): 51-7.
- [56] 王东柱, 陈艳艳, 李亚檬. 基于浮动车停车点数据交叉口车辆排队长度计算方法 [J]. 公路交通科技, 2012, 29(12):
- [57] COMERT G, CETIN M. Analytical evaluation of the error in queue length estimation at traffic signals from probe vehicle data [J]. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 2011, 12(2): 563-73.
- [58] 熊英格, 徐卓立, 刘好德. 基于浮动车数据的交叉口范围动态划分方法 [J]. 交通信息与安全, 2009, 27(5): 38-43.
- [59] 庄立坚, 何兆成, 叶伟佳. 基于浮动车数据的排队长度检测方法研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(3): 78-84.
- [60] 迟骋. 北京市路段交通拥堵评价体系研究 [D]; 北京交通大学, 2007.
- [61] 王春娥. 基于数据融合的城市道路交通状态判别算法研究 [D]; 吉林大学, 2008.
- [62] 李良群, 谢维信, 李鹏飞. 模糊目标跟踪理论与方法 [M]. 科学出版社, 2015.
- [63] 张和生, 张毅, 温慧敏. 利用 GPS 数据估计路段的平均行程时间 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(3): 533-7.

- [64] 孙玲. 基于浮动车调查方法的信号交叉口延误估计研究 [D]; 北京工业大学, 2007.
- [65] 田世艳. 基于 GPS 的城市道路交通状态实时判别技术研究 [D]; 华南理工大学, 2012.
- [66] 任福田. 新编交通工程学导论 [M]. 中国建筑工业出版社, 2011.
- [67] JIANG G Y, WANG J F, ZHANG X D. The study on the application of fuzzy clustering analysis in the dynamic identification of road traffic state [C]// proceedings of the Intelligent Transportation Systems, 2003 Proceedings 2003 IEEE, F, 2003.

作者简历及攻读硕士/博士学位期间取得的研究成果

一、作者简历

李梦琦，1992年出生。2010年9月至2014年7月就读于北京交通大学电子信息工程学院，获自动化专业学士学位；2014年9月考入北京交通大学电子信息工程学院，攻读硕士学位。


二、参与科研项目

[1] 2015年3月至今，国家自然科学基金项目《大数据环境下的复杂城市交通系统预测与控制》——南宁市城市交通大数据关键技术研究及示范应用项目，研究人员；

[2] 2015年3月至今，中国航天系统工程有限公司智能交通研发中心实习。

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 签字日期：2016 年 5 月 26 日

学位论文数据集

表 1.1: 数据集页

关键词*	密级*	中图分类号	UDC	论文资助
浮动车数据; 最大排队长度估计; 拥堵程度评价; 宏观基本图	公开			
学位授予单位名称*		学位授予单位代码*	学位类别*	学位级别*
北京交通大学		10004	工程硕士	硕士
论文题名*		并列题名		论文语种*
基于浮动车数据的道路拥堵状态评价及宏观基本图研究				中文
作者姓名*	李梦琦		学号*	14125107
培养单位名称*		培养单位代码*	培养单位地址	邮编
北京交通大学		10004	北京市海淀区西直门外上园村 3 号	100044
工程领域*		研究方向*	学制*	学位授予年*
控制工程		智能交通	两年	2016 年
论文提交日期*	2016 年 6 月 27 日			
导师姓名*	侯忠生		职称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*		答辩委员会成员	
	张严心			
电子版论文提交格式 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 () 推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版 (发布) 者		电子版论文出版 (发布) 地		权限声明
论文总页数*	75			
共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 21 项。				