

武汉理工大学

(申请经济学硕士学位论文)

共享单车需求预测及调度研究

培 养 单 位： 经济学院
学 科 专 业： 应用经济学
研 究 生： 刘畅
指 导 老 师： 聂规划 教授

2018 年 5 月

分类号_____

密 级_____

UDC _____

学校代码_____10497

武汉理工大学

学 位 论 文

题 目 _____共享单车需求预测及调度研究_____

英 文 _____Research on the demand forecast and scheduling_____

题 目 _____of bike-sharing_____

研究生姓名_____刘畅_____

指导教师 姓名_____聂规划_____职称_____教授_____学位_____博士_____

单位名称_____经济学院_____邮编_____430070_____

申请学位级别_____硕士_____学科专业名称_____应用经济学_____

专业类型_____电子商务_____

论文提交日期_____2018.03_____论文答辩日期_____2018.05_____

学位授予单位_____武汉理工大学_____学位授予日期_____2018.06_____

答辩委员会主席_____评阅人_____教育部盲审专家_____

2018 年 5 月

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得武汉理工大学或其它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。

研究生签名： 刘中 日期： 2018.05.21

关于学位论文使用授权的声明

本学位论文作者完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权武汉理工大学可以将学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，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。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

研究生签名： 刘中 导师签名： 王 日期： 2018.05.21

摘要

在全球范围内，传统的公共自行车服务多有弊端，用户“最后一公里”的出行痛点一直难以得到较好解决。互联网共享单车由中国企业首创，经过短短数年的发展，为世界提出了解决“最后一公里”问题、改变城市出行方式的全新方案。共享单车符合创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，被社会广泛接受，硬件更新速度远超预期，已成为城市交通的主要组成方式之一，但共享单车运营与管理研究严重滞后于技术进步与市场需求，成为制约共享单车发展的瓶颈。

对共享单车需求预测及调度问题进行研究，有利于解决共享单车运营与管理中遇到的系列问题，助力共享单车持续、稳定、健康发展。通过查阅国内外文献资料，对现有出行需求预测、车辆调度相关研究进行分析，发现已有出行需求预测研究仅从单一时间维度或单一空间维度出发，不能反映出出行需求所特有的时空特征。此外，已有车辆调度研究多考虑调度问题本身特征，如动态性、时间窗等，而忽略了对存在多个调度主体、多种参与方式的调度问题的研究。

本文基于网格划分理论、时间序列预测方法，构建共享单车需求量预测模型，揭示共享单车需求分布的时空特征；基于共享单车需求量预测，构建以总调度成本最小为目标的车辆路径优化模型，研究以运营商为主体的共享单车调度问题；以红包车调度为基础，分析运营商诱导用户进行单车调度的机理，将诱导结果归纳为起点漂移与终点漂移现象，并建立以用户为主体的共享单车调度模型；考虑运营商和用户独立调度各有缺陷，本文设计运营商和用户协作式的调度机制，在设置诱导奖励时选择合适的奖励区域、奖励力度，可以在保证单车分布和预测的需求分布相匹配的基础上，实现总调度成本最低。

本文采用摩拜单车出行大数据，对上述“网格划分-需求预测-单一主体共享单车调度-双主体共享单车协作式调度”的研究作实证分析，结果表明在合理选择奖励区域和奖励力度时，文章提出的双主体共享单车协作式调度策略可以实现总调度成本和调度效率的双重最优。

关键词：共享单车；网格划分；需求预测；协作式调度

Abstract

In the world, the traditional public bicycle service has many disadvantages, and the pain point of the "last mile" is hard to be solved. The sharing bike which was initiated by Chinese enterprises, and has developed for several years, proposed a new solution for the world to solve the problem of "last mile" and changes the way of urban travel. Bike sharing is in line with the development concept of innovation, harmony, green, open, sharing, widely accepted by the society. The update speed of hardware is far beyond expectations, sharing bike has become one of the main forms of urban traffic. However, the research on the operation and management of sharing bike is lagging behind the technological progress and market demand, which has become a bottleneck of restricting the development of sharing bike.

The study of sharing bike demand forecasting and scheduling is beneficial to the series problems of the operation and management of sharing bike, and help to share continuous, stable and healthy development of sharing bike. Consulting the literature at home and abroad, analyzing the existing travel demand prediction and vehicle scheduling research, it is found that the existing travel demand prediction research is based on single time dimension or single spatial dimension, and cannot reflect the unique temporal and spatial characteristics of travel demand. Besides, the existing vehicle scheduling studies usually consider the characteristics of the scheduling problems, such as dynamics and time windows, ignoring the research of scheduling problems with multiple scheduling subjects and various participation modes.

The prediction method based on grid theory, time series, constructs a sharing bike demand prediction model, to reveal the spatial and temporal characteristics of bike sharing demand distribution; By forecasting sharing bike demand and construction of vehicle routing optimization model, in order to minimize the total cost of sharing bike scheduling, to study scheduling problems with operators as the main body. Based on the schedule of those cars that will send red packets, this paper analyzes the mechanism of sing-vehicle dispatch for what operators induce the user to do, what's more, this paper summarize the induction results into the starting point drift and the end drift phenomenon, and establish a sharing bike scheduling model for the users; considering operator and user independent scheduling have shortcomings,

this paper design the collaborative scheduling mechanism for operators and users, selecting the reward area, appropriate reward efforts in the setting of induced reward, which can guarantee the distribution and prediction of the bicycle demand distribution phase on the basis of matching, and realize the lowest total scheduling cost.

Using the v-mobile bicycle travel data, research on the “grid division - demand forecast - single subject sharing bike scheduling - multi subject sharing bike collaborative scheduling ”for empirical analysis, results show that the reasonable choice of regional reward and reward efforts, the multi-agent collaborative sharing scheduling strategy can achieve a dual optimal of the total scheduling cost and scheduling efficiency.

Key words: Bike-sharing; Grid division; Demand prediction; Collaborative scheduling

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景和意义.....	1
1.1.1 选题背景.....	1
1.1.2 选题意义.....	3
1.2 国内外研究评述.....	4
1.2.1 共享单车发展历程.....	4
1.2.2 网格划分.....	5
1.2.3 出行需求预测.....	5
1.2.4 资源调度研究.....	7
1.2.5 简要评述.....	7
1.3 研究内容与方法.....	8
1.3.1 研究内容.....	8
1.3.2 研究方法.....	10
1.3.3 技术路线.....	11
第 2 章 基于网格划分的共享单车需求量预测.....	12
2.1 需求预测方法.....	12
2.1.1 定性预测.....	13
2.1.2 定量预测.....	14
2.2 共享单车用户需求特征分析.....	15
2.2.1 区域土地利用性质.....	15
2.2.2 周期性需求.....	16
2.2.3 天气环境因素.....	17
2.2.4 工作日与非工作日.....	17
2.3 网格划分.....	18
2.3.1 地理网格划分方法.....	18
2.3.2 地理网格编码及赋值.....	19
2.4 共享单车需求量预测.....	20
2.4.1 共享单车需求量预测 ARIMA 模型	20
2.4.2 ARIMA 模型的检验	21

第 3 章 以运营商为主体的共享单车调度.....	22
3.1 共享单车调度介绍.....	22
3.1.1 调度周期.....	22
3.1.2 调度实施方式.....	23
3.2 以运营商为主体的共享单车调度模型.....	23
3.2.1 问题描述及相关假设.....	23
3.2.2 模型构建.....	24
3.3 模型求解.....	26
3.3.1 染色体编码与种群初始化.....	27
3.3.2 染色体解码.....	27
3.3.3 适应度函数.....	28
3.3.4 遗传操作.....	28
3.3.5 终止条件.....	28
第 4 章 以用户为主体的共享单车调度.....	29
4.1 用户参与共享单车调度的方式及优势.....	29
4.1.1 用户参与方式.....	29
4.1.2 用户参与优势.....	30
4.2 以用户为主体的共享单车调度模型.....	30
4.2.1 问题描述及相关假设.....	30
4.2.2 模型构建.....	31
4.3 模型求解.....	33
第 5 章 双主体的共享单车协作式调度.....	35
5.1 以运营商为主体调度的局限性.....	35
5.1.1 潮汐效应.....	35
5.1.2 城市黑洞效应.....	36
5.2 以用户为主体调度的局限性.....	36
5.3 双主体的共享单车协作式调度模型.....	37
5.4 共享单车协作式调度策略.....	38
第 6 章 实例分析.....	40
6.1 背景分析.....	40
6.2 数据来源.....	40
6.3 共享单车需求量预测.....	41
6.3.1 网格划分.....	41
6.3.2 共享单车需求量预测.....	42

6.4 共享单车调度.....	45
6.4.1 运营商为主体的共享单车调度.....	45
6.4.2 用户为主体的共享单车调度.....	47
6.4.3 共享单车协作式调度.....	48
第7章 总结与展望.....	51
7.1 全文总结.....	51
7.2 主要创新点.....	52
7.3 研究展望.....	52
参考文献.....	54
致谢.....	58
攻读学位期间获得与学位论文相关的科研成果目录.....	59

第 1 章 绪论

1.1 选题背景和意义

1.1.1 选题背景

城市化进程加快与汽车工业飞速发展给我国居民出行结构带来了巨大的改变，网约车的出现丰富了用户的出行选择^[1]，但仍未解决用户“最后一公里”的出行痛点。针对此痛点，政府公共自行车运营时间已久^[2]，然而在取还车便捷度等方面存在明显弊端。共享单车以无桩自行车切入市场空白点，解决用户痛点，受到用户青睐^[3]。

共享单车是指企业在校园、居民区、商业区、公交站、地铁站等区域提供自行车共享服务，本质上是一种分时租赁模式。2014 年以来，曾参与市场布局的共享单车品牌有 77 家，已在全国范围内投放共享单车。据国家信息中心分享经济研究中心发布的《共享单车行业就业研究报告》显示，截止 2017 年 9 月，国内共享单车企业累计投放约 1600 万辆共享单车（2018 年 2 月 9 日，交通运输部透漏，共享单车投放量已达到 2300 万辆），日均骑行订单达到 5000 万单，每辆车日均骑行频次超过 3 次，共享单车用户规模达到 1.06 亿，占全国网民的 14.11%。

据艾媒咨询调查数据显示，有 54.6%的用户将共享单车作为日常短距离出行的选择，有 49.3%的用户使用共享单车外出购物，有 47.2%的用户把共享单车作为上下班或者上下课的交通工具，而这也是共享单车排名前三的应用场景。此外，使用共享单车健身或社交的用户也不在少数，分别占比 36.2%和 21.0%。目前随着覆盖范围的扩大和投放量的增加，共享单车已成为人们日常出行方式之一。对于共享单车是否能提高通勤效率，55.9%的受访用户认为共享单车对通勤效率影响很大，能够显著提升通勤效率，39.3%的受访用户表示共享单车对通勤效率的影响不大，只是偶尔能够提升通勤效率。作为一种可供选择的出行方式，共享单车的出现弥补了城市公共交通在覆盖面和覆盖力度上的不足，既可以解决用户短距离出行需求，又可以搭配其他出行方式出行，极大程度丰富了用户的出行选择。

除了丰富用户的出行选择，共享单车在节能减排方面的贡献也获得了各方肯定。我国于 2016 年签署《巴黎协定》，并约定国内二氧化碳排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰、单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60% 至 65% 等自主行动目标。在数据层面，据济宁市公共自行车管理服务中心介绍，若按照平均每天 9 万人次的单车出行数据测算，全年可节约 770 吨汽油，同时减少 2500 吨左右的二氧化碳排放量。另外，共享单车是分享经济模式和低碳出行方式的有机结合，已越来越多地引起人们注意，极大提升了群众的环保意识。

然而，共享单车行业的火爆导致了共享单车投放量在一定程度上超出了市场的饱和量，大规模投放导致了共享单车资源闲置、扎堆停放、堆积占道等不良现象。据 2017 年艾媒咨询关于共享单车市场投放量的调查显示，39.7% 的网民认为共享单车投放量比较多，35.5% 的网民认为共享单车投放量非常多，累计占比超过七成。

为促进共享单车行业协调和可持续发展，倡导绿色出行，我国推出了一系列共享单车发展政策。2017 年 8 月，交通运输部等 10 部门联合出台了《关于鼓励和规范互联网租赁自行车发展的指导意见》，该意见指出各城市须引导有序投放车辆、完善自行车交通网络、推进自行车停车点位设置和建设、规范运营服务行为。2016 年 12 月 27 日，深圳市交通运输委发布《关于鼓励规范互联网自行车的若干意见(征求意见稿)》和《深圳市自行车停放区(路侧带)设置指引(试行)》，要求共享单车企业采取技术手段与运营手段，保证车辆规范停放。2017 年 1 月 9 日，成都市交委发布《成都市关于鼓励共享单车发展的试行意见》，要求共享单车企业组建专业运行维护队伍，加强共享单车停放秩序的管理。2017 年 2 月上海市交委关于规范未成年人骑行共享单车推出了相应举措。北京市于 2017 年 9 月推出了《北京市鼓励规范发展共享自行车的指导意见》，指出共享自行车发展规模与市民短距离出行需求、城市空间承受能力、道路资源与停放设施承载能力相匹配，需要进行动态平衡。2018 年 3 月 5 日，十三届人大一次会议开幕，会后交通运输部部长李小鹏在回应共享单车管理服务问题时指出，共享单车在发展过程中依然存在着乱停乱放、服务维护不及时等问题，社会各界需要共同治理与维护，让共享单车能够更好地服务大众。

我国在共享单车发展中推行的指导政策效果明显，部分投放量充足的城市开始暂停新增投放共享单车，共享单车企业开始转向其他城市，提升覆盖广度，努力开发新市场，同时共享单车的运营与管理问题越来越受到重视。共享单车投放量的不合理和资源配置不合理是共享单车受到诟病的重要原因，使得优点

众多、口碑良好的共享单车发展受阻。为解决共享单车发展中的这一难题，本文从共享单车需求特征分析入手，合理预测共享单车需求量；以平衡共享单车分布和需求分布为目标，研究单一调度主体下共享单车再配置问题；研究运营商和用户协作式的调度策略，有效保障共享单车调度效率、降低共享单车调度成本。

1.1.2 选题意义

共享单车是移动互联网和自行车租赁融合发展的新型服务模式，是分享经济理念的典型应用。共享单车的快速发展对于满足公众出行需求、缓解城市交通拥堵、构建绿色出行体系起到了重要作用，但同时由于过度投放也带来了车辆乱停乱放、扎堆占道、车辆运营维护不到位等问题。本文研究是共享单车运营与管理研究中的核心问题，理论与现实意义集中在以下几个方面。

理论意义：

(1) 现有自行车需求预测相关研究大多是基于站点的需求预测，而共享单车是无桩自行车，因此不能适用。本文基于网格划分方法，计算网格内共享单车需求量，并以此作为原始时间序列来预测共享单车未来的需求量，是对现有需求预测研究的有效补充。

(2) 本文在研究以运营商为主体的共享单车调度问题时，借鉴并改进了城市公共自行车领域的调度方法，将其抽象为允许存在局部路径重复的多旅行商问题（MTSP），并设计遗传算法进行求解，为共享单车这一新兴领域的车辆调度问题提供了研究思路。

(3) 设计了运营商与用户协作式的双层调度模型，考虑用户调度在前、集中调度在后，通过合理设置奖励区域与奖励力度，实现总调度成本最低。

现实意义：

(1) 文章研究的共享单车需求预测，打破了传统自行车租赁系统中桩站的局限，以区域需求代替站点需求，充分适应了共享单车作为无桩自行车的特性，为现实场景中的共享单车需求预测问题提供解决思路。

(2) 文章研究的以用户为主体的调度模型，充分解释了“红包车”现象的内在机理，并进一步深入，将用户调度行为归纳为起点漂移与终点漂移行为，在此基础上研究不同奖励方案带来的起点漂移和终点漂移发生量，并计算调度效率与调度成本，为运营商提供了一套操作性强且行之有效的诱导调度策略。

(3) 文章设计的运营商与用户协作式调度策略, 是符合当下共享单车运营与管理特点的有效机制, 说明了运营商与用户如何通过深入协作来达到比单纯运营商调度车辆更好的调度效果, 这为运营商在实际运营与管理共享单车时提供参考意见。

1.2 国内外研究评述

共享单车飞速发展, 为了尽快扩张市场, 早期的共享单车研究主要集中在绿色出行理念、政策配套、交通规划、单车硬件设计、市场竞争、资金监管等层面, 关于共享单车资源配置与运营管理的研究远远滞后于市场扩张的脚步。本文参考城市公共自行车、共享汽车等领域的部分研究成果, 对共享单车发展历程、网格划分研究、出行需求预测、资源调度四个方面的国内外相关文献进行总结, 为共享单车需求预测及调度研究奠定基础。

1.2.1 共享单车发展历程

中国自行车租赁模式的发展大概经历了三个阶段。2007 年到 2010 年为第一阶段, 国外兴起的公共自行车模式开始进入国内, 分城市由政府主导并管理, 主要类别为有桩单车, 用户取车、还车需要到指定的站点, 使用还需要办理专用的 IC 卡^[4]。2010 年到 2014 年为第二阶段, 专门经营单车租赁业务的企业开始出现, 主要类别仍然是有桩单车, 只不过是由政府主导变成了政府和企业协同管理^[5]。2014 年至今为第三阶段, 随着移动互联网的快速发展, 共享经济理念的大热, 以 OFO、摩拜单车为首的互联网共享单车应运而生, 无桩单车开始取代有桩单车^[6]。

共享单车作为一种绿色、低碳、健康的出行方式, 以其智能解锁、移动支付、随取随还、定位精准等特征受到广大用户喜爱^[7]。中国为鼓励企业创新、推动城市慢行系统建设、缓解交通拥堵、减少能源消耗与环境污染, 制定了一系列政策, 为共享单车发展保驾护航。目前全国范围内累计投放共享单车数量已超过 2300 万辆, 日均骑行订单达 5000 万单。

然而各方关注导致共享单车市场已由蓝海变为红海, 大量资本进入使得企业通过不断增加投放量来获取市场份额, 这给共享单车带来了一系列运营和管理上的难题^[8]。

1.2.2 网格划分

共享单车由于无固定停车位，在研究其分布状态时可采用网格划分的形式，描述其区域分布数量或密度，并以此作进一步的研究。现有关于网格划分的研究主要集中在网格划分原则、网格划分方法、网格编码等方面。

在网格划分原则方面，张雅杰^[9]在研究网格划分对土地管理的影响时，认为对地理空间的划分要采用合适的比例尺，基于实际的地形测量数据进行，并尽量保证各元素（商业区、学校、医院、景区等）的完整性。张文瑞^[10]在研究城市社区网格化管理时，提出网格划分要同现有的行政管理体制相结合，才能使网格化管理、多元共治成为现实。

在网格划分方法方面，张会霞等^[11]在研究城市统计单元划分时，先根据网格层次构建出不规则网格，再采用渐进式的综合方法对网格进行聚合，得到需要的城市统计单元网格。郝传忠^[12]在研究自由曲面的网格划分问题时，提出了将曲面展开并与引导线法相结合的网格划分方法，该方法可将完整的自由曲面划分为大小均匀、杆件流畅的网格，并能控制自由曲面网格的走向。张章等^[13]提出了一种利用组织机构信息进行多级地理网格划分的方法，该方法是以现实地理网格为基础，考虑行政区划内组织机构信息的疏密程度，对地理网格进行逐级划分，使组织机构信息在网格中均匀分布。

在网格编码方面，余接情等^[14]提出了多层次退化 Z 曲线填充编码方法，并设计了相应的编码与解码算法，通过对比实验说明了该方法可以服务于基于 SDOG 的全球三维空间基础架构。Lu N 等^[15]、金安等^[16]研究了基于全球剖分网格（GeoSOT）的空间数据编码方法，该编码方法具有全球统一性和地学意义，且具有良好的图幅聚合关系，是目前应用广泛的地理网格编码方式。

1.2.3 出行需求预测

按照预测对象的不同，出行需求预测方法可以分为个体出行需求预测和群体出行需求预测。

（1）个体出行需求预测

Faghri 等人^[17]、Gulden 等人^[18]将出行生成预测理论与个体的活动出行分析研究紧密结合，从集计的、以交通小区为基础单元的预测方法发展至非集计的、以家庭或个体出行层次为研究单位的预测模型，并同时考虑社会经济、土地利用系统、人口等各类因素对交通吸引率的影响。Perrakis 等^[19]将传统的分布预测

方法与基于出行链的出行模型相结合,使结果更能满足更为复杂的居民出行需求预测要求。陈曦等^[20]考虑了个体微观水平上的异质性和可变交通情景对出行行为的影响,利用 Agent 对出行个体进行建模,对其在出行过程中的决策行为进行仿真,设计并执行大量的计算实验,对不同交通情境下的出行需求进行了预测。Yang 等^[21]通过提取深圳 IC 卡地铁出行数据,对个人出行规律与出行模式进行研究,比较分析了不同位置的行程时间分布与停留时间分布,并使用熵对用户进行分组,利用马尔科夫模型预测个人出行。

(2) 群体出行需求预测

根据预测维度的不同,群体出行需求预测可以分为出行时间预测和空间分布预测。

1) 出行时间预测

齐观德等^[22]使用出租车历史轨迹数据,考虑空车到达时间间隔符合一定概率分布,进而推断乘客等候时间的概率分布,从而预测乘客等候出租车的时间和位置信息。Yasmin 等^[23]考虑出行者的偏好呈现多样化,建立了基于活动的交通需求预测模型,该模型可以应用于城市总体或区域的出行预测,也可以应用于客货运需求预测。Zhang 等^[24]采用梯度提升回归树方法(GBM)来分析和模拟高速公路出行时间,以提高预测精度和模型可解释性。宗芳等^[25]运用 Ordered Probit 离散选择模型和 Hazard 连续选择模型相结合,构建离散-连续选择模型,对通勤者的通勤时间安排进行预测,结果表明模型对通勤者的活动时间安排有较高的预测精度。

2) 空间分布预测

Lv 等^[26]通过利用交通流数据,在深度学习的基础上,对未来短时交通流进行预测。Cai 等^[27]用改进的时空相关性的 K-近邻(K-Nearest Neighbor, KNN)和分段预测的方法来提高预测准确性。Zhao 等人^[28]把用户个人出行轨迹与群体基于活动的轨迹相结合,使用动态贝叶斯网络来预测群体出行轨迹。Veloso 等人^[29]在给定时间、天气以及下客点类型的条件下,基于出租车 GPS 数据,对下一个上客点进行预测。Chen 等人^[30]等采用了泊松分布与差分自回归滑动平均模型(ARIMA)对出租车乘客需求进行了 30 分钟时间间隔的短时预测,并用波尔图市的出租车历史运营数据进行了模型验证,其预测平均误差低于 26%。Bekhor 等人^[31]提出基于手机的追踪定位数据的 OD 出行矩阵预测方法。

1.2.4 资源调度研究

资源调度研究包括资源再配置和资源实时调度两个方面。

(1) 资源再配置

Nourinejad 等^[32]提出了一种动态优化-仿真模型，并构建了一个决策支持系统，来解决单程共享汽车运营中的汽车再配置问题，研究表明，增加车辆的预留时间可以降低车辆规模、减少车辆再配置成本。王喆等^[33]构建了客户需求服从非齐次泊松分布条件下的动态价格激励机制模型，通过向顾客提供实时变动的价格优惠来诱导用户改变停车地点，进而完成对租赁车辆的有效配置，进而提高车辆利用率，降低企业调度成本。Deng 等^[34]以总成本最小化为目标、一定的服务水平为保证，构建共享汽车再配置优化模型，并使用离散时间模拟（DES）、粒子群优化（PSO）和最优计算量分配（OCBA）来对模型进行求解，结果表明在调度策略的制定中，考虑汽车再配置问题是非常重要的。Bruglieri 等^[35]针对单程电动共享汽车分布失衡的情况，在考虑充电站的位置和容量的情况下，构建混合整数线性规划模型，研究发现车辆再配置对城市交通的影响很小。Nair 和 Miller-Hooks^[36]针对可能出现的随机出行需求，构建联合机会约束的随机混合整数线性规划模型来最优化再配置方案。也有学者提出运营实时价格激励机制来满足乘客需求以及减少重置次数，进而降低运营成本^{[37][38]}。

(2) 资源实时调度

Kaspi 等^[39]考虑用户在租车系统内付出的“excess time”，建立了 Markovian 模型，指导车辆调度；Xiao 等^[40]基于博弈论，考虑加工方和用户方，研究了基于加工时间视角多目标调度问题；Lu 等^[41]基于排队论研究了以最小提前期为目标资源调度；Chen 等^[42]设计多目标演化算法，研究以加工费用最小、用户满意度最大化以及资源利用率最高为目标的优化调度问题；NgC.T 等^[43]提出分枝定界算法实现最小化最大完工时间在双机流水车间的调度；Sayarshad 和 Chow^[44]基于排队论构建按需车辆调度模型，并运用拉格朗日分解启发式算法进行求解，与其他调度方法相比，这种具有预见性的方法可以减少高达 27% 的成本支出。Lu 等^[45]采用两阶段随机整数规划模型，解决共享汽车单程和往返需求不确定情况下的汽车调度问题。

1.2.5 简要评述

国内外学者在需求预测及车辆调度方面进行了较为深入的研究，但由于共

共享单车的应用场景和服务模式都有较大革新，所以现有研究并不能直接解决共享单车需求预测与调度问题。主要的不足表现在以下方面：（1）已有的基于个体的出行需求预测往往基于微观局部视角，不能反映个体需求对于群体出行需求的贡献度；（2）在共享单车实际运行场景中，出行需求分布具有显著时空特性，且在不同区域间动态转移，而已有群体出行预测研究大多从单一时间维度或者单一空间维度预测客户群体的出行时间和需求空间分布，无法再现共享单车用户出行需求的时空统计特征；（3）在共享单车调度中，存在运营商与用户这两个调度主体，运营商对共享单车的调度本质上属于资源再配置，用户对共享单车的调度一定程度上符合实时调度特征，现有的研究成果大多局限于资源配置或服务调度的单一视角，而较少涉及资源配置与服务调度并存视角，且缺乏对多主体协同调度机制方面的研究。

共享单车需求预测与调度问题可以参考现有需求预测与调度相关研究，通过网格划分和时间序列预测方法，准确预测共享单车的需求分布情况，分别研究以运营商和以用户为主体的调度模型，再讨论运营商和用户协作的调度机制，实现调度总成本最优。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

考虑到对于共享单车运营管理问题的研究远远滞后于其市场扩张的脚步，为提高共享单车调度效率、降低调度成本，文章对共享单车的需求预测及调度问题进行了深入研究，希望能为共享单车持续、稳定、健康发展保驾护航，主要内容如下：

第一章：绪论。从国内共享单车发展现状出发，讨论了共享单车需求预测及调度研究的背景及意义；在对共享单车发展过程中的相关问题进行叙述的同时，结合实际，提出了共享单车需求预测及调度研究的思路与方法。

第二章：基于网格划分的共享单车需求量预测。分析现有需求预测方法优缺点，结合共享单车用户需求特征，采用 ARIMA 模型预测共享单车需求量。先对各种定性分析和定量分析方法进行研究，分析其适用情形，为共享单车需求预测奠定基础；结合摩拜单车历史订单数据研究共享单车用户的需求特征，分析不同因素对共享单车用户出行的影响；采用规则网格划分方法进行地理网格划分，并编码；把网格内历史需求数据作为原始时间序列，利用 ARIMA 模型预

测共享单车需求量。

第三章：以运营商为主体的共享单车调度。对现实共享单车调度问题中的调度周期、调度实施方式进行分析；借鉴允许存在局部路径重复的多旅行商问题，以调度成本最小为优化目标，对以运营商为主体的调度行为进行建模，并用遗传算法进行求解。

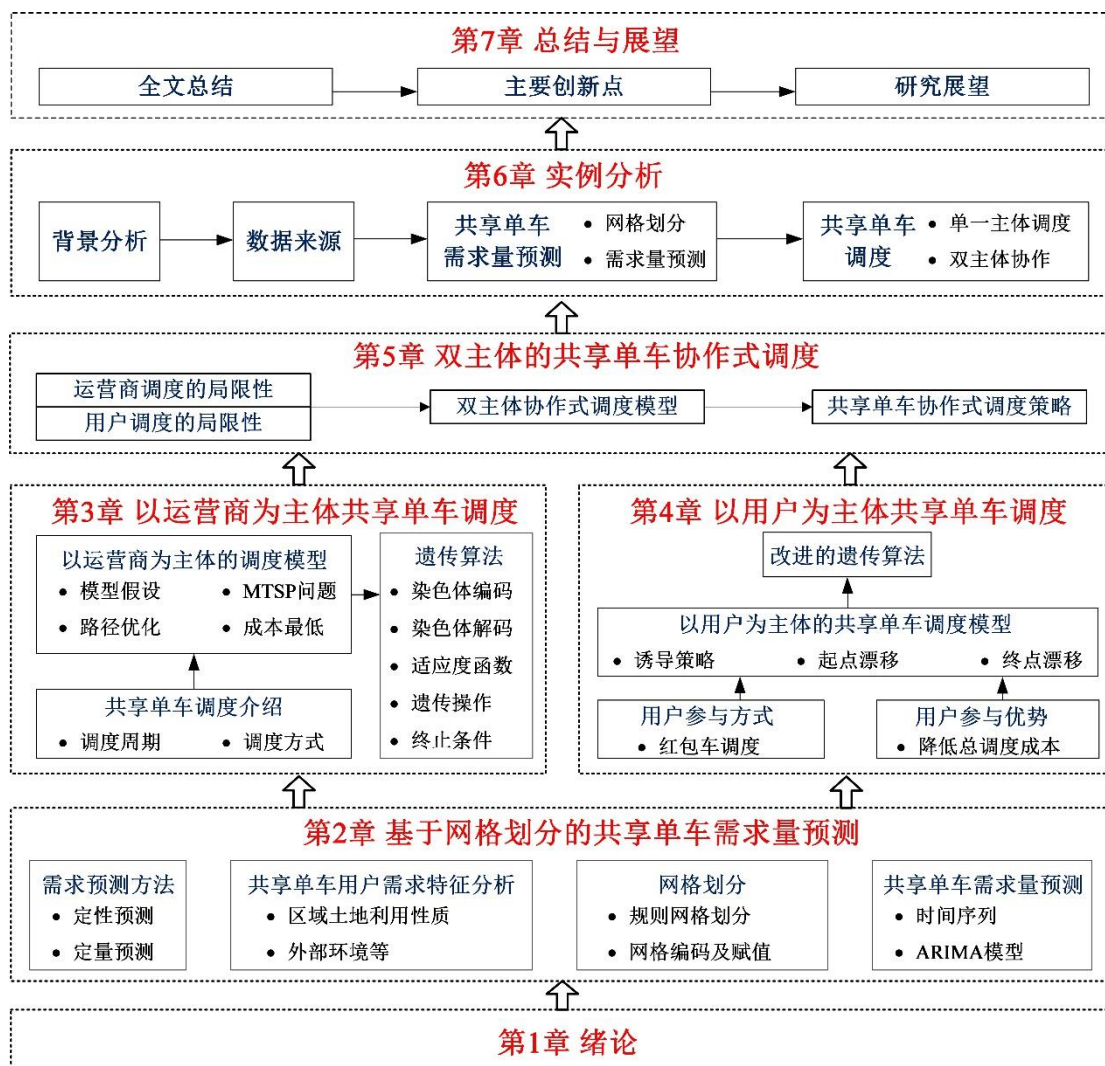


图 1-1 本文研究内容

第四章：以用户为主体的共享单车调度。从实际应用场景中的红包车调度出发，分析用户参与共享单车调度的方式和优势，建立以用户为主体的多目标调度模型；将多目标问题中调度效率目标转化为模型的约束条件，从而将多目

标问题转化为单目标问题，并设计改进的遗传算法进行求解。

第五章：双主体的共享单车协作式调度。分析由潮汐效应引起的单车分布不均和由城市黑洞引起的单车闲置问题，指出以运营商或用户为主体的调度都存在缺陷；借鉴双层调度相关理论，建立双主体的共享单车协作式调度模型，探索运营商与用户协作式的调度策略，提高调度效率、降低调度成本。

第六章：实例分析。基于北京地区摩拜单车历史订单数据，采用网格划分的方式，获得区域需求分布原始时间序列数据；基于原始时间序列数据，采用ARIMA模型对未来需求分布进行预测；基于预测结果，运用文中提出的调度模型对共享单车进行调度，结果表明，运营商和用户协作调度可以有效降低调度成本、提高调度效率。

第七章：结论与展望。针对实例分析的结果归纳文章研究的结论，并对全文进行总结；归纳文章研究过程中的创新点，同时针对研究过程中的不足之处进行分析展望，以期本文研究成果能有效解决共享单车运营与管理中存在的问题，推动共享单车持续、稳定、健康发展。

1.3.2 研究方法

（1）理论与实例分析相结合

本文在共享单车需求预测及调度问题的研究基础上，使用摩拜单车出行大数据分析共享单车用户出行需求特征；借鉴大数据分析、网格划分、出行需求预测相关方法，构建共享单车区域需求分布预测模型；借鉴车辆动态路径优化模型、多目标优化模型、双层调度模型的思想，研究运营商与用户协作式的调度策略；以北京市摩拜单车历史出行数据，验证了上述需求预测及调度研究的可行性。

（2）定性分析与定量研究相结合

分析各类需求预测方法的优缺点，结合共享单车用户需求特征，选用最合适的时间序列预测方法；将现实场景中红包车调度抽象为诱导调度过程，提出起点漂移与终点漂移假设；结合实际共享单车出行数据，采用差分自回归移动平均、车辆路径优化、遗传算法、多目标优化等定量研究方法构建需求分布预测与协作式调度模型。

（3）合作研究与自主创新相结合

以本人导师及其团队在服务管理、大数据分析、用户需求建模、用户兴趣

预测、服务资源调度等领域的知识积累作为基础，充分借鉴国内外学者在出行需求预测、车辆调度方面的研究成果；依托摩拜算法大赛，获取共享单车出行大数据；在本人已有知识结构基础上，对共享单车需求预测与调度模型进行创新，解决关键科学问题。

1.3.3 技术路线

如图 1-2 所示，技术路线分为基础准备与数据获取、理论与技术研究、实例分析三个阶段。

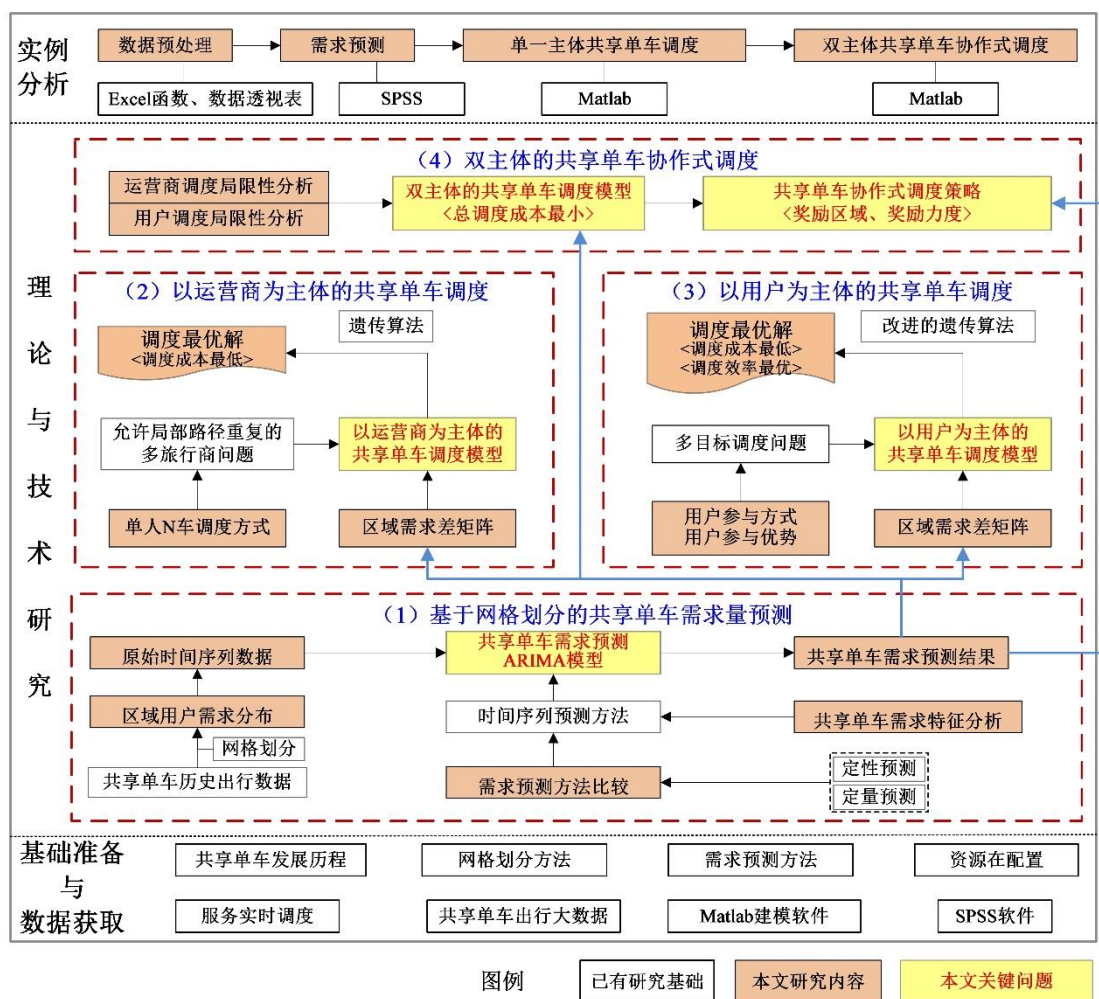


图 1-2 研究技术路线

第 2 章 基于网格划分的共享单车需求量预测

本章对共享单车出行需求分布预测的相关内容作了叙述。2.1 节从定性预测与定量预测两个方面系统分析了各类需求预测方法的优缺点；2.2 节分析了共享单车用户的需求特征，为选用合适的预测模型奠定了基础；2.3 节对地理网格进行划分、编码并赋值；2.4 节分析了常用的时间序列预测模型特点，构建了共享单车需求量预测 ARIMA 模型，同时给出了相关预测检验方法。

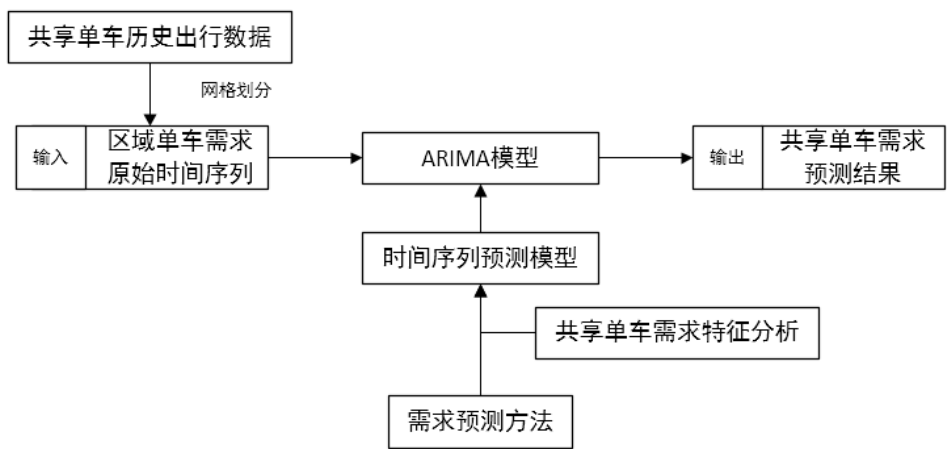


图 2-1 基于网格划分的共享单车需求量预测

2.1 需求预测方法

需求预测是利用历史信息对未来的需求进行分析推算，常见的预测方式有定性预测和定量预测，相关方法如图 2-2 所示。

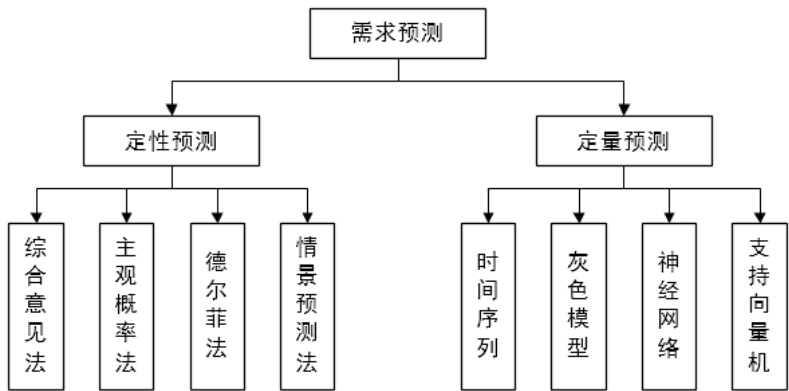


图 2-2 需求预测方法

2.1.1 定性预测

定性预测法也被称为经验判断法，通常由相关领域中具备较多经验和知识的专家根据现有资料，如：区域人口分布、客户出行规律、共享单车骑行活动及众多地理环境因素等，运用个人综合知识与经验预测出行需求的变化趋势，再综合各项历史数据，对未来某一时刻某一区域的出行需求做出大致判断。定性预测的优点是适用范围广、灵活快捷、节约成本，能发挥专家的主观能动性；缺点是往往由于主观性太强或研究者的综合素质受限导致无法对事物做出精确预测。常见定性预测方法有综合意见法、主观概率法、德尔非法和情境预测法。

综合意见法是指对于某一预测问题，先请多位相关领域专家分别做出预测，再综合全体成员的预测信息得出最终的预测结论。优点是能够集思广益，克服个人预测的局限性；缺点是预测者难以统一标准，过于激进或保守都会影响预测准确性。考虑到预测值将显著影响任务目标，预测者难免采取稳健态度，这也会影响预测准确性。改进的方法有会议综合意见法，即允许专家交换意见，起到相互启发、开拓思路的作用。

主观概率法是指凭借经验或预感进行预测的方法，其与客观概率不同，客观概率是根据事件发展的客观性统计出来的概率。在许多事件中，客观概率没有办法通过统计计算得到，因而只能通过主观概率法来进行预测。其优点是适用性极强，可以用于人类活动的各个领域；缺点是其只能反映未来事件发生的近似可能性，可能有较大误差。

德尔菲法是在专家综合意见法的基础上形成的一种预测方法，它以匿名的形式通过多轮函询征求专家们的意见，组织者对每轮的意见进行总结归纳，作为参考资料再供专家们参考，以提出新的预测意见和结果，如此反复多次，直到专家们的意见趋于一致。其优点是集思广益，充分发挥专家的主观能动性，达到强强联合的效果；缺点是专家对预测对象没有统一的分析标准，而且过程比较复杂，花费时间较长。

情境预测法把研究对象分为主题和环境，通过对环境的研究，识别影响主体发展的因素，模拟这些因素可能发生的多种交叉情境，以预测主题发展的各种可能性。其优点是适用范围很广，并且尽可能考虑未来可能出现的各类状况和各种不同环境因素，考虑较为全面；缺点是不能应对外部环境的急剧变化。

2.1.2 定量预测

定量预测是使用预测对象的历史数据，通过建立数学模型，运用一定的数学方法进行科学的加工整理，揭示预测对象与其影响因素间的关联关系，探究预测对象在未来的变化情况。定量预测的优点是受主观因素影响较少，且能做出变化程度在数量上的准确描述；缺点是对历史数据的要求较高，操作的复杂程度较高，处理难度较大，对不确定因素的考虑不充分。主要的定量预测方法有时间序列预测方法、灰色预测法、神经网络预测方法、支持向量机等。

时间序列预测方法是根据预测对象的历史数据，假设预测对象的发展具有时间延展性，分析预测对象在未来的变化趋势。时间序列将预测对象在历史时刻上的观测值按照顺序进行排列，再建立数学模型，分析观测变量根据时间变化的规律，进而预测下一阶段可能达到的数值。时间序列预测方法的优点是简化预测对象的影响因素，以线性模型衡量各因素与预测对象的关系，便于计算；缺点是不能识别预测对象跳跃式的变化，当外界发生较大变化时，其预测结果往往会有较大偏差。

灰色预测法是在没有大样本历史数据的前提下，分析预测对象影响因素间的关联关系，通过数据生成，来探究预测对象的变化逻辑，构建微分方程，对后续发展进行预测。优点是在随机小样本条件下有较强的适应度，并能得到有效结果；缺点是由于数据量小，预测误差往往与真实情况有较大偏差，且不适合做长期预测。

神经网络预测方法通过构建预测因子与预测目标之间的网络映射关系，将样本数据分成训练样本和测试样本，对预测样本进行学习，对照测试样本进行检测，能有效提高预测精度。神经网络预测方法的优点是具有处理非线性问题的能力，能够从大量未知模式的复杂数据中发现其规律；其最主要的缺点是无法解释预测过程及预测依据。

支持向量机预测方法通过构建核函数，将低维空间里难以解决的非线性问题转化到高维度空间，再在高维空间进行回归运算从而解决问题。支持向量机的优点在于泛化能力强、分类效果好，且对数据规模和分布的要求不高；其最主要的缺点是在对大样本数据进行操作时，支持向量容易受噪声数据的影响，并且算法的复杂度较高。

2.2 共享单车用户需求特征分析

2.2.1 区域土地利用性质

共享单车作为众多出行方式中的一种，其需求特征与城市交通特征及城市规划布局紧密相关。在城市中，同一种土地利用性质对地理空间的需求往往趋于一致，这使得同一类活动在城市空间上逐渐聚集，从而形成了各种功能区，承担着不同的城市职能，也引导着人类的出行行为。例如，在以办公用地为主的区域内，出行有着明显的通勤特征；在以商业用地为主的区域内，出行有着明显的休闲娱乐特征；而在以教育用地为主的区域内，几乎所有出行行为都与校园活动有关。

根据现有城市功能分区的研究成果，结合北京市现状，选取了 4 种具有代表性的土地利用类型对共享单车出行需求进行分析。4 种不同类型区域分别为学校周边区域、核心商业区域、科技办公区域、居住密集区域，其分布情况如下表 2-1 所示。

表 2-1 四类不同区域的位置信息

区域类型	区域代表	经度范围	纬度范围
学校周边区域	北京理工大学周边	116.30~116.31	39.95~39.96
核心商业区域	王府井周边	116.40~116.41	39.91~39.92
科技办公区域	中关村周边	116.30~116.31	39.98~39.99
居住密集区域	望京街道附近	116.48~116.49	39.99~40.00

四个区域某天的共享单车出行需求变化如图 2-3 所示。从图中可以看出 1) 望京、中关村和大学城的共享单车需求呈现出明显的早中晚高峰期现象，分别在 7:00~9:00 时间段、12:00~14:00 时间段和 18:00~20:00 时间段，其中晚高峰需求量最大；2) 8:00~21:00 时间段内，王府井的共享单车需求量维持在一个相对稳定的水平上，有所波动但高峰特征不明显；3) 在区域面积相同的情况下，望京、中关村和大学城的需求量明显高于王府井。

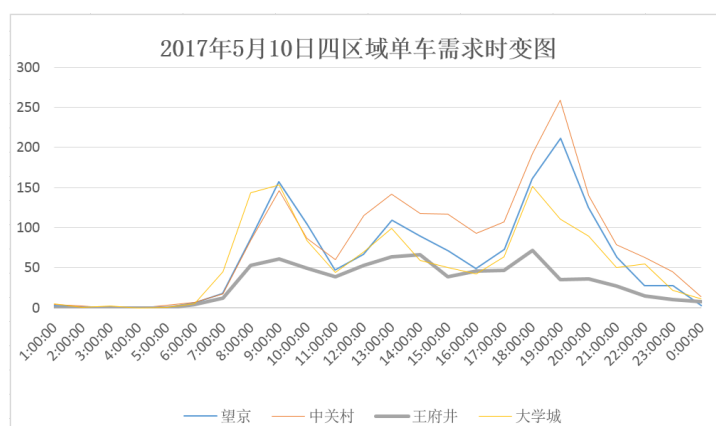


图 2-3 四区域单车需求时变图

望京属于居住密集区域，中关村属于科技办公区域，这两个区域用户的出行都是以通勤（2017 年 5 月 10 日为周三）为主要目的，因而产生了三个相对集中的上下班出行时间段。大学城属于学校周边区域，用户的出行路线通常是“宿舍-教室”、“教室-食堂”、“食堂-宿舍”，其时间特征也符合早中晚高峰现象。王府井属于核心商业区，在工作日的出行需求较少，故其需求量偏低。

2.2.2 周期性需求

选取 2017 年 5 月 10 日至 12 日四个区域的共享单车订单数据进行分析，如图 2-4 所示。从图中可以看出在连续的三个工作日里，四个区域的需求变化曲线相似度很高，出行需求变化趋势一致，不同日期同一时刻的需求量比较接近，反映了共享单车需求变化的周期性规律。

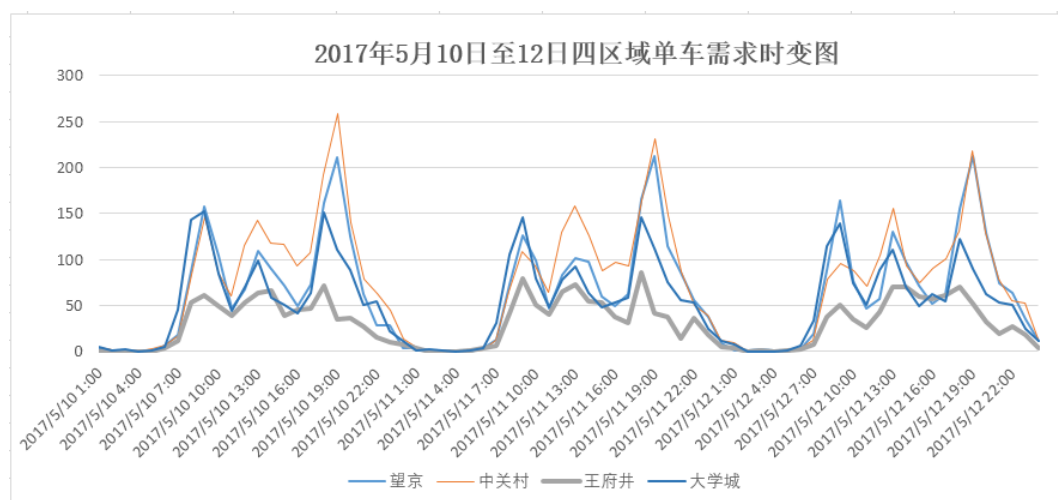


图 2-4 连续 3 天四区域单车需求时变图

2.2.3 天气环境因素

选取 2017 年 5 月 9 日（15~29℃，雨）和 10 日（15~29℃，晴）大学城的共享单车订单数据进行分析，如图 2-5 所示。从图中可以看出共享单车在雨天的需求量远低于正常水平。这是由于共享单车受天气环境的影响较大，除了降水之外，日照、气温、湿度、风力风向等因素对共享单车的需求影响也十分明显。因此后文在基于历史数据预测未来共享单车需求量时，避开了极端天气。

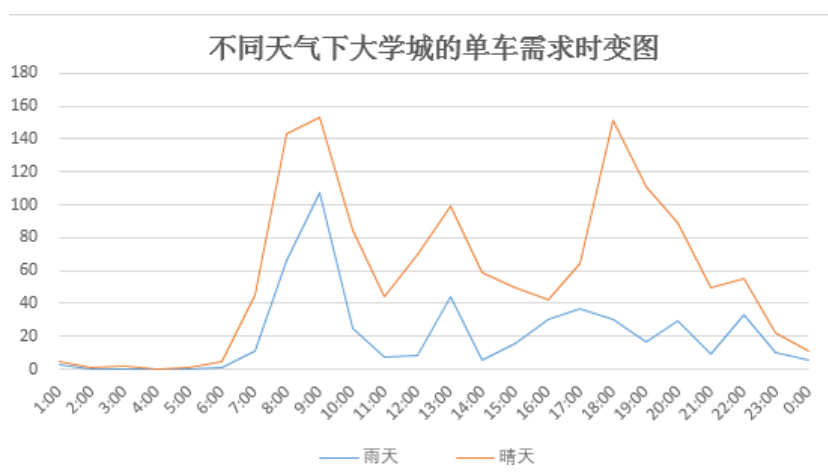


图 2-5 不同天气下大学城的单车需求时变图

2.2.4 工作日与非工作日

以四区域 2017 年 5 月 10 日（周三）至 13 日（周六）的共享单车需求数据为例，得到工作日和非工作日的需求分布。如图 2-6 所示，非工作日的共享单车需求量与工作日有所区别：1）非工作日的共享单车需求量低于工作日需求量；2）中关村和大学城的共享单车求分布存在较弱的早中晚高峰期现象。

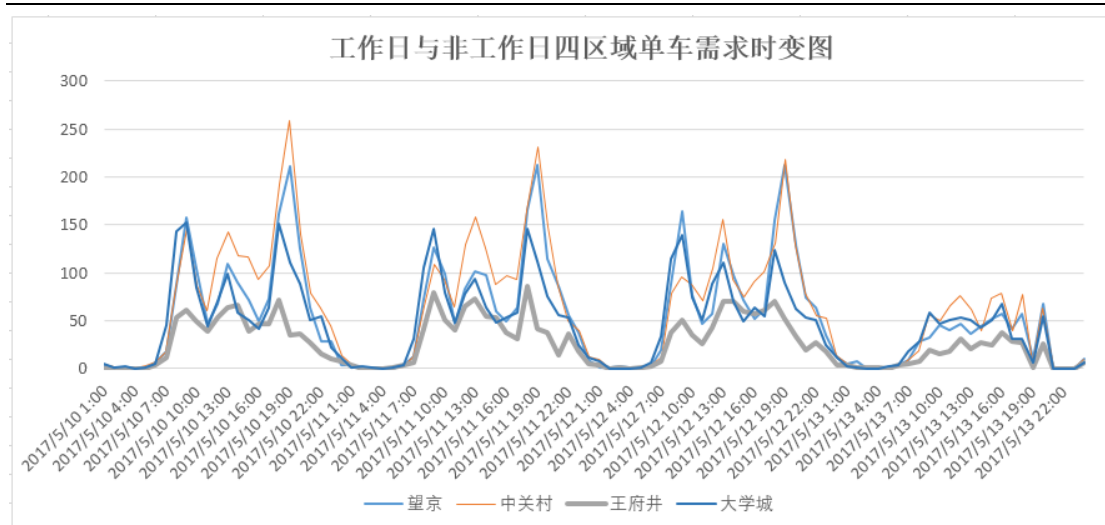


图 2-6 工作日与非工作日四区域单车需求时变图

科技办公区存在周六加班的情况，学校也通常在周六设有选修课，因此中关村和大学城的非工作日需求分布仍有一定程度的高峰期现象，但需求量已明显减少。

2.3 网格划分

共享单车的出行行为是单人单车的出行，短时间内不考虑单车重复骑行的情况下，单车的需求量等同于用户的需求量，因此分析用户需求分布是预测共享单车需求量的前提。本文拟采用规则网格划分的方法描述用户的需求分布。

2.3.1 地理网格划分方法

城市网格应该根据城市的地理空间形态、区域用地性质来划分。城市网格化分主要有两类划分方法：规则网格划分方法和不规则网格划分方法。

(1) 不规则网格划分方法

不规则网格划分方法充分考虑了地理空间形态、地理区域性质，通常按街道将城市划分成不同的片区。一般的做法是：以城市道路网为分界线，将城市划分成若干不规则的地理网络。在进行不规则网格划分时，要注意以下几个关键问题：

- 1) 根据地形的实际测量数据进行划分；
- 2) 尊重城市中院楼、街巷、广场、河流、山地、湖泊等自然元素；

- 3) 保持建筑物和功能分区的完整性;
- 4) 一般将道路作为片区分界线。

(2) 规则网格划分方法

规则网格划分方法简单地将地理区间分割成按行列排列的相同大小的网格单元,经纬网就是一类典型的规则网格划分方法。按照规则网格划分的地理区间是一种规则的形状,能够较为方便地进行地图匹配、网格插值。规则网格的主要缺点是某些地物可能被拆分到不同的网格中,无法保证地物的连续性,因此确定合适的网格大小尤为重要。

本文使用的地理网格划分方法是规则网格划分方法。

2.3.2 地理网格编码及赋值

科学的编码可以使网格插值、空间分析更加直观有效。本文使用规则网格划分方法,那么编码方式可以如图 2-7 所示。

1	2	3		...
				...
				...
				...
				n

图 2-7 地理网格编码

将城市划分为 n 个互不重叠的规则区域 $I = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。在进行网格赋值时主要考虑网格的位置信息和网格内共享单车需求。位置是地理网格的基本信息,通常可以用网格中心点的经纬度坐标代表该网格的位置, `grid_longti` 表示网格中心点的经度, `grid_lati` 表示网格中心点纬度,网格间距离可简化为中心点距离。网格内单车需求是地理网格的核心要素,也是本文研究的基础。利用 Excel 软件中 `countifs` 函数处理共享单车历史订单数据,得到区域内共享单车需求信息。

2.4 共享单车需求量预测

2.4.1 共享单车需求量预测 ARIMA 模型

在短时间内不考虑单车重复骑行时，单车的需求量等同于用户的需求量。根据用户需求特征分析发现，共享单车用户需求受工作日与非工作日、天气环境、区域土地利用性质等因素影响，并有较强的周期性规律。时间序列预测模型就是通过观测历史数据来建立数学模型以预测未来值，在经济预测和销量预测等领域得到了广泛应用。其中使用最为广泛的有自回归模型（AR）、移动平均模型（MA）和混合模型。在实际环境中，常用的混合模型有自回归移动平均模型（ARMA）和差分自回归移动平均模型（ARIMA）。

ARIMA 模型利用差分方法将非平稳时间序列转变为平稳时间序列，然后对因变量的滞后值、随机误差项的现值及滞后值进行回归而建立数学模型。ARIMA 模型涵盖了移动平均过程、自回归过程和自回归移动平均过程，在进行预测的时候既能考虑到自身变动规律，又能抵抗随机波动产生的干扰。因此本文采用 ARIMA 模型对共享单车需求量进行预测。

将共享单车历史需求数据作为原始时间序列 $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_t\}$ ，其中 y_t 表示时间段 t 内的共享单车需求量，为了使原始序列 Y 满足平稳性要求，对其作差分处理， $\Delta^d Y$ 表示 Y 经过 d 次差分转化之后的平稳序列，再利用 ARMA (p, q) 模型对该平稳序列 $\Delta^d Y$ 建模，最后经反差分变换得到原序列。上述过程就是 ARIMA 的建模过程，模型的数学表达式描述为：

$$\Delta^d y_t = \sum_{i=1}^p \alpha_i \Delta^d y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \beta_j \Delta^d y_{t-j} \quad (2-1)$$

这里 α_i 和 β_j 为模型的待估参数， α_i 表示自回归参数， β_j 表示移动平均参数， p 和 q 为模型的阶，上述模型可记为 ARIMA (p, d, q)。

ARIMA (p, d, q) 模型的建模与预测可以分为四个步骤：1) 原始序列的平稳化处理。即如果原始序列是非平稳序列，可以通过差分的方式将其变换成平稳序列；2) 模型阶数识别。即通过自相关系数和偏自相关系数来确定模型的阶数 p 和 q ；3) 模型的检验。即通过参数的显著性检验和残差的随机性检验来判断模型是否可取；4) 选用参数合适的模型预测未来共享单车的需求量。

2.4.2 ARIMA 模型的检验

为了科学描述 ARIMA (p, d, q) 模型对共享单车需求量的预测效果, 本文采用平均绝对误差百分比 ($MAPE$) 指标来衡量模型预测结果的好坏。 $MAPE$ 的定义为:

$$MAPE = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (2-2)$$

上式中 \hat{y}_t 表示预测值, y_t 表示实际值, T 是预测对象样本数量。显然 $MAPE$ 值越小, 说明模型的预测精度越高, 误差越小, 模型的效果也就更好。

第 3 章 以运营商为主体的共享单车调度

3.1 共享单车调度介绍

3.1.1 调度周期

共享单车系统中存在借车需求、还车需求等不确定因素。在一般情况下，人们的出行行为大多符合早出晚归特征，从地理位置上来说是一个闭合的回路，按理推断，共享单车系统可以保持一种长期稳定的自平衡状态。但是，共享单车系统所依存的外部环境往往是多变的，这就会导致系统不能长久保持自平衡的状态。例如，傍晚时刻的大雨会导致白天聚集在办公区的共享单车不能随着下班的人流返回至居住区；早晨的大雾也会使居民区的共享单车出行需求锐减，使共享单车系统流动性减弱。

因此，在共享单车被投入到城市后，其调度的核心问题是再配置问题，即如何周期性的调度共享单车，使其分布与用户需求分布更加吻合，使系统的运转效率更高，体现为更高的用户需求满足率、更高的车辆周转率和更低的车辆闲置率等。可以借鉴城市公共自行车、共享汽车、柔性生产车间等领域的再配置研究，对共享单车系统再配置问题进行研究。

本文对共享单车调度及调度周期的描述如下，共享单车系统在自然运行一段时间之后，系统内单车分布与用户需求分布不匹配，这时触发调度需求。称系统自然运行的时期为运行期，在连续的两个运行期之间存在一个调度期，如图 3-1 所示。

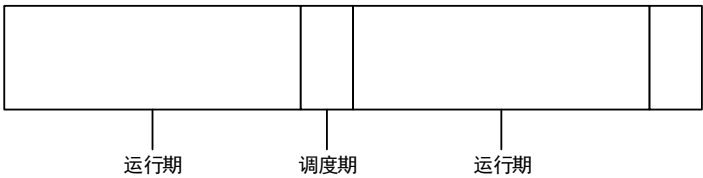


图 3-1 调度期示意图

3.1.2 调度实施方式

在共享单车系统中，运营商常见的自主调度实施手段列于表 3-1 中。在以运营商为主体的调度方式中，单人单车指一名工作人员作为一个调度单位，采用人力的方式将需要调动的车辆骑行至需求点，单人 N 车调度中指多名工作人员和一辆调度车作为一个调度单位，先将需要调动的单车集中放进调度车，然后批量运输至需求点。由于单人单车调度人力成本较高，且在大范围系统中效率低下，因此本文讨论的以运营商为主体的调度手段是单人 N 车的方式。

表 3-1 常见调度方式说明

调度主体	调度手段	人力需求	备注
运营商	单人单车	1	采用骑行的方式，一人同时只能调度一辆车
运营商	单人 N 车	>1	多人一组，利用拖车进行批量调度
用户	红包车	1	通过设置红包，引导用户的骑行行为，达到调度目的，类似于单人单车调度

3.2 以运营商为主体的共享单车调度模型

3.2.1 问题描述及相关假设

按照有无时间窗约束，车辆调度问题可以分为带时间窗的车辆调度和不带时间窗的车辆调度，其中带时间窗的车辆调度又可细分为硬时间窗问题和软时间窗问题；按照信息的不完备程度，车辆调度问题可以分为静态调度问题和动态调度问题；另外调度问题还可以分为基于历史数据的预测调度和未来需求已知的准确调度。考虑到共享单车调度期通常在订单较少的晚上，可以将该问题看成是不带时间窗的静态调度问题，该调度的目标是使整个区域恢复到供需更为合理的状态。

假设 $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 表示区域， A_i 表示在一个调度期开始时区域 i 内的单车数量， D_i 表示调度期结束后区域 i 应该保有的单车数量（即需求预测量），则区域 i 的需求差为：

$$gap_i = D_i - A_i \quad (3-1)$$

当 gap_i 等于 0，该区域处于自平衡状态，没有调度需求；

当 gap_i 大于 0，该区域需要调入车辆，处于需求正差状态；

当 gap_i 小于 0，该区域需要调出车辆，处于需求逆差状态。

共享单车调度问题可描述为：若干具有有限装载能力和最大工作量限制的调度车辆从某调度中心出发，调度车必须到 gap 值为正的区域进行自行车补给，然后自行车的补给与放置可以交替进行，直到整个调度中心所覆盖区域全部调度完成。

针对以上问题，有如下假设：

- (1) 以 13 号区域为调度中心，以 21 号区域为坐标原点对调度区域进行坐标化，以区域中心点表示该区域；
- (2) 调度中心、区域间的距离简化为曼哈顿距离；
- (3) 考虑调度期内订单极少，造成的单车移动对整个系统影响几乎为 0；
- (4) 调度车辆在到达某区域补给自行车时，必须把该区域需要调出的单车装完，或者将调度车装满；
- (5) 调度车辆在到达某区域放置自行车时，必须将该区域单车需求的单车数量完全满足，或者将调度车上车辆全部放置完。

3.2.2 模型构建

以运营商为主体的共享单车调度问题可以借鉴城市公共自行车调度研究，引入动态路径规划优化模型对问题进行描述，并利用遗传算法进行求解。模型主要考虑如何以最少调度车数量、最短的总运输里程实现总调度成本最小。

(1) 相关变量参数说明如下：

I ： i 为区域， $i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ ；

i_x, i_y 为区域 i 中心点的横纵坐标；

H ： h 为调度车辆， $h \in \{1, 2, 3, \dots, H\}$ ；

Q_h ：车辆 h 的容量；

T_h ：车辆 h 在某次调度期的最大工作量；

M_h ：车辆 h 的最大行驶距离；

C_h ：车辆 h 的单位距离行驶成本；

CF_h ：车辆 h 的固定成本（含驾驶及搬运等调度人力成本）；

d_{ij} ：区域中心点 i, j 之间的曼哈顿距离；

k_{hi} ：车辆 h 在区域 i 收回单车数量；

l_{hi} ：车辆 h 在区域 i 放置单车数量；

z_{hi} : 车辆 h 离开区域 i 时装载的单车数量;

gap_i : 为区域 i 需要收回或放置的车辆数;

x_{ijh} : 二进制变量, 若车辆 h 从 i 到 j , 则值为 1, 否则为 0。

(2) 决策变量说明:

模型的决策变量为调度车辆的路径 (以集合 R_h 表示, R_h 中元素为 i)、调度车辆在路径所经过区域上的行为 k_{hi} 或 l_{hi} 。

(3) 模型构建:

考虑到有多辆调度车辆, 同时可能存在某区域需求差太大超过车辆满载负荷, 因此该调度是一个允许局部路径重复的多旅行商问题 (MTSP)。以运营商为主体的共享单车调度模型的目标是保证运营商的调度成本最低, 因此建立车辆调度模型为:

$$\min \phi = \sum_{h=1}^H CF_h y_h + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^H x_{ijh} d_{ij} C_h \quad (3-2)$$

其中满足:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ijh} d_{ij} \leq M_h \quad (3-3)$$

$$0 \leq z_{hi} \leq Q_h \quad (3-4)$$

$$\sum_i^N k_{hi} \leq T_h \quad (3-5)$$

$$\sum_{i=1}^N k_{hi} = \sum_{i=1}^N l_{hi} \quad (3-6)$$

$$\sum_{h=1}^H k_{hi} = gap_i \quad (3-7)$$

$$\sum_{h=1}^H l_{hi} = gap_i \quad (3-8)$$

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (3-9)$$

式 (3-2) 表示调度成本 (车辆固定成本、行驶成本) 车辆固定成本、行驶

成本最小化；式(3-3)表示在一个调度期内，车辆行驶的最大距离有限；式(3-4)表示在调度过程中任意时刻的单车负载量不能超过调度车辆的容量，同时不能为负；式(3-5)表示在一个调度周期内，调度车辆有其最大工作量限制；式(3-6)表示调度车回收单车与放置单车的总量必须保持平衡；式(3-7)表示被 gap_i 值为负的区域，其溢出车辆需要被全部调走；式(3-8)表示 gap_i 值为正的区域，其车辆缺口需要被完全满足；式(3-9)表示车辆的行驶距离为曼哈顿距离。

3.3 模型求解

以运营商为主体的共享单车调度应用了动态路径规划优化模型的思想，是一个典型的 NP-hard 问题，运用精确求解算法难以解决。在现有的路径规划研究中，遗传算法^[46]的寻优能力较强。遗传算法基本思想是模仿自然界生物“优胜劣汰、适者生存”的规律，以数学化的染色体作为初始解，对其进行进化运算，因此具有相对突出的并行计算能力，全局搜索能力较强。本文设计遗传算法对以运营商为主体的共享单车调度问题进行求解，大致过程如下：

- (1) 将模型决策变量进行处理，并对染色体进行编码；
- (2) 根据目标函数设定恰当的适应度函数；
- (3) 为遗传算法设置相关参数，包括染色体长度、种群规模、交叉概率、变异概率、迭代次数等；
- (4) 计算种群中所有个体的适应度值；
- (5) 判断种群是否满足算法终止条件，若满足条件则输出适应度值最大的个体，若不满足条件则进行进化操作；
- (6) 对种群进行选择、交叉、变异操作，产生新的种群；
- (7) 重复上述步骤 5、6、7，直至满足算法终止条件。

上述遗传算法的示意图如图 3-2 所示。

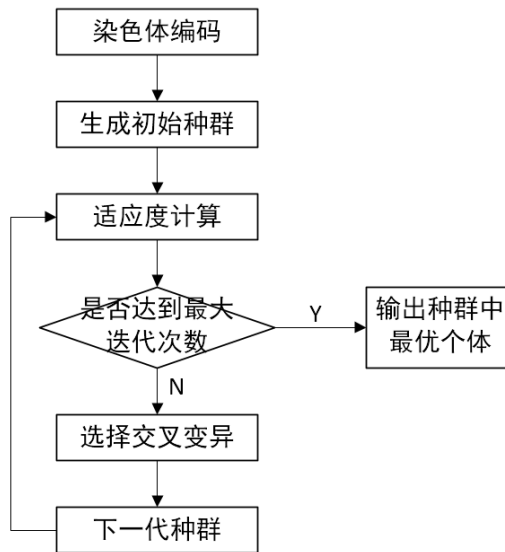


图 3-2 遗传算法流程图

3.3.1 染色体编码与种群初始化

由于遗传算法不能直接理解空间问题，因此在应用该算法对模型进行求解前，需要把模型的解转化成符合遗传算法染色体结构的形式，即对模型中车辆的调度路线进行染色体编码，染色体编码的选择对算法的性能有较大的影响，本文采用自然数编码，并与前文网格编码一致，如 $R_h(1, 2, 3, \dots, 25)$ 表示一条最简单的调度路径。

本文采用随机方式对 25 个区域进行全排列作为车辆路线，并生成一定数量的车辆路线作为初始种群。

3.3.2 染色体解码

在第一阶段编码时，用一条路线将所有调度车辆的路线表示在内，因此在最后需要考虑染色体解码的问题。首先分析在调度路径上，当调度车辆经过某区域 i 时，车辆存在 4 种可能的行为：一是装载区域 i 内所有需要被调走的单车 i ；二是装载区域 i 内需要被调走的单车直至调度车辆满负荷；三是将调度车辆上所有单车放置到区域 i ；四是在区域 i 内放置实际需要的单车数量。

调度车辆在进行上述四类调度行为时，若达到最大行驶距离或最大工作量限制时，此时需要对染色体进行拆分，表示此辆车回到调度中心，并由一辆新的调度车来进行调度。如对染色体 $R_h(1, 2, 3, \dots, 25)$ 进行拆分，得到 $R'_h(1, \dots, 7, 0, 8, \dots, 16, 0, 17, \dots, 25)$ ，表示的意义是该调度过程由三辆调

度车完成,第一辆车完成对区域 1-7 的调度,第二辆车完成对区域 8-16 的调度,第三辆车完成对剩下区域的调度。

3.3.3 适应度函数

遗传算法通过适应度函数判断个体的优劣程度,个体的适应度值越大,表示其被遗传至下一代的可能性越大。适应度函数具有非负性,其值越大越好。在以运营商为主体的共享单车调度模型中目标函数是调度总成本,其值越小越好,因此可以取目标函数 ϕ 的倒数作为适应度函数。

3.3.4 遗传操作

(1) 选择策略。利用适应度函数对种群中的个体进行选择,适应度大的有更大的机会遗传到下一代种群,适应度小的有可能被淘汰。本文采用“轮盘赌法”对种群进行筛选。

(2) 交叉操作。在种群中随机选择两个个体,以一定的概率对其进行部分基因段的交换,生成新的个体。在遗传算法中,不同的个体代表着不同的解,通过交叉操作不断产生新的个体,能保证算法在解空间内进行不断搜索进化。

(3) 变异操作。遗传算法在执行交叉操作的过程中,不断地选择优势个体、舍弃劣势个体,这导致算法可能会在部分优势个体之间往复循环,并不再出现更加优势的个体。此时可以采用变异操作来改善这一情况,变异操作能有效防止遗传算法过早收敛,提高算法的局部寻优能力。具体做法是通过互换、逆序、插入等方式改变个体的基因排列。

3.3.5 终止条件

遗传算法本质上是一种搜索算法,通常得到的结果不是严格意义上的最优解,而只是最优解的近似解。在进行遗传算法的设计时,为了避免算法进行无休止的运算,往往需要设计算法的终止条件。本文用最大迭代次数作为算法的终止条件,即在算法运算达到最大进化代数时,停止运算并输出到目前为止适应度值最优的个体,作为算法求解的结果。

第 4 章 以用户为主体的共享单车调度

4.1 用户参与共享单车调度的方式及优势

4.1.1 用户参与方式

为了应对城市黑洞、降低调度成本、增强用户粘性，摩拜单车官方率先推出了“红包车”功能。红包车具有双重奖励：1) 2 小时内骑行免费，超过免费时长的部分按正常计费；2) 有效骑行超过 10 分钟后可获得随机现金红包。每天摩拜会选择一些单车设置为红包车，红包车在地图上会有特殊标识。用户在地图上查找带有红包标识的车辆，扫码开锁并有效骑行超过 10 分钟，关锁即可获得随机现金红包。红包车的出现有效缓解了共享单车调度中的许多难点问题。

红包车最为显著的作用是解救“僵尸车”和缓解潮汐效应，提高车辆循环利用率和降低专职人员调度工作量。共享单车的基础盈利是车辆的骑行费用，运营商都希望单车能被更多的人使用，能得到有效的循环利用。但是由于用户不负责任的停车行为，导致许多车辆停在城市黑洞中默默吃灰，不能被有效利用。摩拜通过将其设置成红包车，让用户主动的去寻找并解救这些车辆，将其重新投入使用，相当于提高了车辆循环利用率，也降低了车辆运营团队的压力，毕竟对照着 GPS 找车是一件很费时的事情。因此红包车本质上是一类以用户为主体的调度手段。

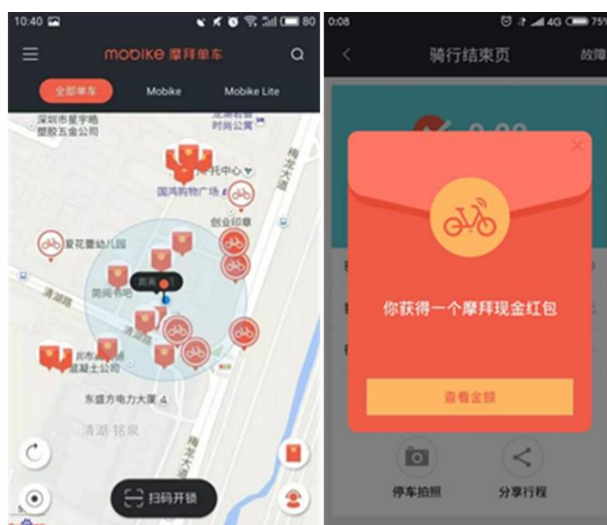


图 4-1 摩拜单车 APP 红包车功能

4.1.2 用户参与优势

共享单车单次骑行费用相对其他交通出行方式来说较低，甚至还屡屡推出免费骑行活动。在此基础上为用户设置骑行奖励无疑是一种倒贴钱的行为，但是从某些方面来看，让用户参与共享单车的调度确实是一个双赢的举措。

对于运营商来说，启用红包车功能，引导用户参与共享单车的调度，有以下几个方面的益处。

(1) 有效提升用户活跃度，并吸引新用户注册。

红包功能不仅在共享单车中存在，甚至早已成为互联网产品中的一个大众化功能。随着移动支付的快速发展，以“支付宝”、“微信支付”为首的第三方支付平台早已通过各类运营活动将抢红包观念植入了互联网用户的脑海中，从不少用户不愿意捡地上一分钱但是却很愿意抢一分钱红包的心态中就可以看出。

(2) 提高调度效率，降低运维成本。

共享单车系统中存在着严重的“潮汐效应”，常导致车辆局部供需失衡。运营商通过雇佣专职人员来对车辆进行调度，一定程度上可以缓解车辆分布不均的现象，但也存在着调度效率和调度成本方面的问题。红包车的推出，可以通过红包金额来诱导用户到车辆扎堆的区域骑车、到车辆稀疏的区域停车，一定程度上可以缓解单车分布不均现象，并有效降低调度成本。

对于用户来说，红包车的出现也有诸多益处，最为显著的是增加收入和提升骑行体验。

4.2 以用户为主体的共享单车调度模型

4.2.1 问题描述及相关假设

以用户为主体的共享单车调度本质是一种诱导调度，指的是运营商通过设置奖励来诱导用户进行单车调度。本文讨论两种典型的诱导调度：1) 运营商诱导用户到需求逆差的区域 $I'_i (\forall gap_i < 0, i \in I')$ 骑行车辆，并支付奖励；2) 运营商诱导用户到需求正差的区域 $I''_j (\forall gap_i > 0, i \in I'')$ 停放车辆，并支付奖励。运营商支付的奖励又称为诱导成本 (w)，在现实共享单车系统中，诱导成本通常与运营商奖励力度有关。

本文针对研究问题作以下假设：

(1) 运营商设置的奖励区域分为骑车奖励区域和停车奖励区域两类；

(2) 在所有设置奖励的区域中，奖励力度相同，且诱导成功率与奖励力度正相关；

(3) 终点漂移假设：若运营商在某需求正差的区域 i 设置奖励，该奖励会诱导在与 i 相邻区域内停车的用户将车停到区域 i 内，此诱导可能成功，也可能失败，如图 4-2 (a) 所示；

(4) 起点漂移假设：如若运营商在某需求逆差的区域 j 设置奖励，该奖励会诱导与 j 相邻区域用户到区域 j 来用车，此诱导可能成功，也可能失败，如图 4-2 (b) 所示；

(5) 所有诱导过程都是同时完成的，不具有先后关系。

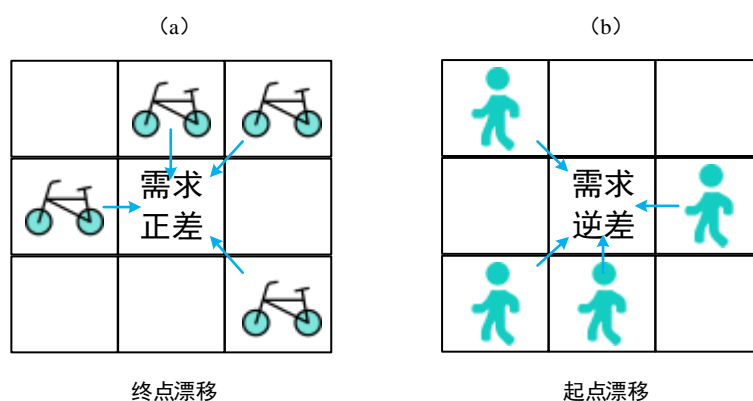


图 4-2 起点漂移与终点漂移示意图

以用户为主体的共享单车调度问题可描述为：运营商将某些区域设置成奖励区域，并以一定的奖励力度来诱导用户到该区域用车或停车。

4.2.2 模型构建

借鉴博弈论中相关知识，考虑运营商设置奖励诱导用户完成调度的过程是一个博弈的过程。博弈中，运营商的策略是选择一个合适的奖励方案，用户的策略是以一定概率选择接受诱导或拒绝诱导。

(1) 相关符号说明

A_i ：一个调度期开始时区域 i 内的单车数量；

I' ：所有需求逆差区域组成的集合，当 $(i \in I')$ ， $(\forall gap_i < 0)$ ；

I'' : 所有需求正差区域组成的集合, 当 $(i \in I'')$, $(\forall gap_i > 0)$;

Y_i : 区域 i 的所有相邻区域组成的集合;

$num(Y_i)$: 表示集合 Y_i 中元素的个数;

X_i : 区域 i 的所有相邻区域 (Y_i) 内总的单车数量;

$p(w)$: 在奖励为 w 时, 诱导成功的概率;

gap'_i : 调度完成后区域 i 的新需求差。

(2) 决策变量

w : 奖励力度, 即用户完成一次调度获得的奖励, 由运营商设置;

U : 设置奖励的区域集合。

(3) 模型构建

用户是否接受诱导具有不确定性, 以用户为主体的共享单车调度难以实现单车分布与需求分布之间的完全吻合 (即调度效果不可能达到 100%)。因此, 以用户为主体的共享单车调度模型需要同时考虑调度效率和调度成本, 是多目标优化问题, 目标是以相对较小的成本实现相对较高的效率调度。建模如下:

$$\max \varphi = 1 - \frac{\sum_{i \in I'} gap'_i}{\sum_j gap_j} \quad (\forall gap'_i < 0, \quad \forall gap_j < 0) \quad (4-1)$$

$$\min \gamma = \sum_{i \in U} X_i w p(w) \quad (4-2)$$

其中满足:

$$p(w) = \lambda w \quad (4-3)$$

$$i \in U \cap I' \rightarrow gap'_i = gap_i + X_i p(w) \quad (4-4)$$

$$i \in U \cap I'' \rightarrow gap'_i = gap_i - X_i p(w) \quad (4-5)$$

$$i \notin U \rightarrow gap'_i = gap_i - A_i p(w) [num(Y_i \cap U \cap I') - num(Y_i \cap U \cap I'')] \quad (4-6)$$

式(4-1)用调度前后总的需求差表示该调度的效率；式(4-2)表示该调度的总成本，即诱导调度发生次数与单次诱导成本的积；式(4-3)表示奖励与诱导概率之间的关系，当奖励确定时，诱导成功的概率也随之确定，二者呈正相关关系；式(4-4)表示当一个需求逆差区域被设置为奖励区域时，完成调度后该区域新的需求差；式(4-5)表示当一个需求正差区域被设置为奖励区域时，在完成调度后该区域新的需求差；式(4-6)表示当一个区域没有被设置成奖励区域时，在调度完成后该区域新的需求差。

4.3 模型求解

本文采用改进的遗传算法对该多目标调度问题进行求解，其关键是将多目标问题转化为单目标问题，本文将模型的目标函数 φ 转化为模型的约束，则原模型可以表述为：在调度效率满足一定值的情况下，求最低调度成本。

模型具体求解方法的主要步骤如下：

(1) 染色体编码

模型的决策变量 U 代表奖励区域的集合，可以对其进行二进制编码，如表4-1所示，1表示将该区域设置为奖励区域，0表示不将该区域设置为奖励区域。

表 4-1 染色体编码示意图

区域	1	2	3	...	i	...	25
编码	0	1	0	...	1	...	0

(2) 初始种群生成

将以用户为主体的共享单车调度模型转化为单目标规划模型之后，调度效率成为一个较难处理的约束条件，本文根据经验设置最低的调度效率($\varphi > \eta$)，再判断个体是否满足该约束。若满足则将其作为初始种群中的一个个体，如不满足则重新随机生成个体再行判断，直至种群达到相应规模。

(3) 适应度函数

遗传算法中适应度函数用来衡量解的优劣，个体的适应度值越大，其解越好，该个体也越容易遗传到下一代。在将以用户为主体的共享单车调度模型转化为单目标模型之后，目标函数为调度总成本，总成本值越小越好，所以本文

采用目标函数总成本的倒数来表示适应度函数。

(4) 遗传操作

从初始种群中选择一些适应度值高的个体，对其进行交叉和变异操作，生成新的个体，判断其是否满足模型约束，若满足则进入下一代种群，如不满足则淘汰。

(5) 终止进化

若进化代数达到设定的最大迭代次数，算法结束，并输出目前为止适应度值最优的个体，作为算法求解的结果。

该改进的遗传算法流程如图 4-3 所示。

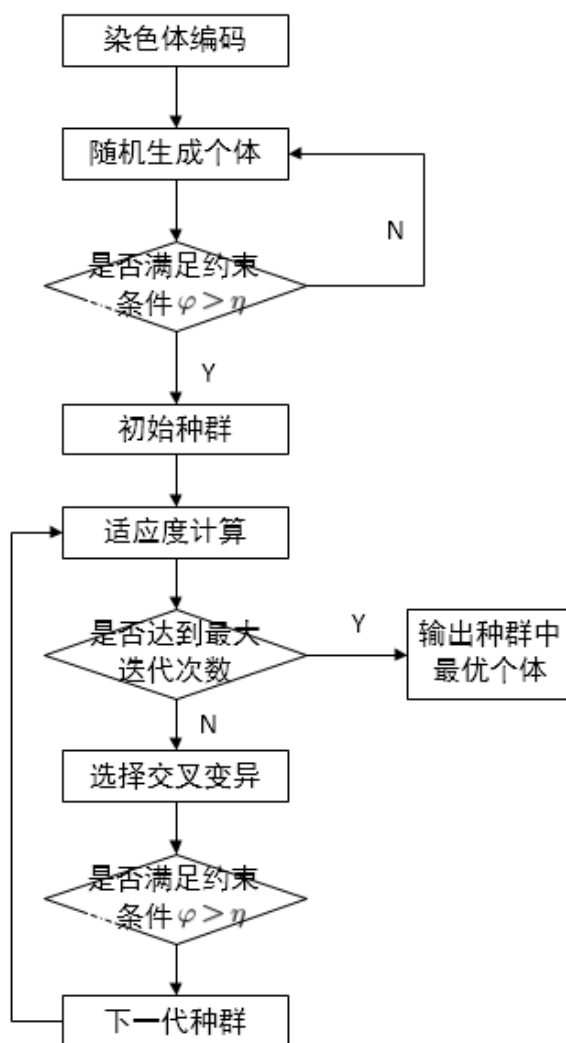


图 4-3 改进的遗传算法流程图

第5章 双主体的共享单车协作式调度

为降低共享单车系统调度成本，本章在上述研究的基础上，研究双主体的共享单车协作式调度问题。根据共享单车系统当前和预测的状态，识别区域供需平衡状态，为用户设计诱导奖励方案，鼓励他们参与共享单车调度，从而降低使用专职人员重新配置车辆的成本。研究结果表明，通过合理分配调度任务、设置激励措施，运营商和用户协作式的共享单车调度可以实现所需服务水平下的调度成本最低。

5.1 以运营商为主体调度的局限性

5.1.1 潮汐效应

尽管共享单车的使用场景十分广泛，但助力上班族通勤和学生党上课仍然是共享单车的主要任务。在城市环境下，早高峰期共享单车大量涌入地铁站、公交站等交通枢纽区域，工作时间共享单车在 CBD 区域大量聚集，晚高峰共享单车又往居民区大量迁移；在校园环境下上课期间共享单车在教学区域大量聚集，下课后又在食堂和宿舍区域大量聚集，这是典型的共享单车潮汐现象。共享单车系统出现潮汐现象的直接原因是共享单车允许用户的取还车地点不一致，间接原因可以分为三类：（1）区域人口密度不同，地区间的人口密度不同导致了共享单车需求量不均衡，往往运营商在无法准确预测需求量的情况下随机或均匀投放共享单车就会导致潮汐现象；（2）区域功能属性不同，城市中典型的几类地区其功能属性不同，如写字楼区域在下班时段需求量猛增、商业圈在晚间时段及周末需求量较大、居民区在上班时段需求量较大等，这也是引发潮汐现象的原因；（3）用户需求不同但存在群体方向性，每一个用户的出行的起始点都不同且随机，但对于群体来说，往往在某些特定时间会向某个地区聚集，使得该区域内单车密度急剧上升，而其他区域单车数量减少。

潮汐现象导致的共享单车迁移与聚集通常是大范围内的，要解决这类大范围的单车分布不均衡问题，往往需要由运营商雇佣专职调度人员进行集中调度，但是对于小范围共享单车迁移触发的调度需求，使用专职人员调度就不是最优的选择了。

5.1.2 城市黑洞效应

城市黑洞对共享单车的负面影响是巨大的，它会降低车辆的重复使用率，使车辆得不到有效流通，甚至时间长了还会对车辆硬件造成毁伤。城市黑洞效应的原因往往是多方面的，有城市建设的复杂性（比如城中村、城市改造工程等），也有用户的不文明行为（比如加锁私占，随意弃置破坏等），还有 GPS 精度不够等。由于城市黑洞的分布通常是不确定性的、分散的，运营商雇佣专职人员寻找城市黑洞里的共享单车的人力成本和时间成本较高。

城市黑洞效应导致的共享单车使用受限是不确定的、分散的，而且只凭借 GPS 往往难以找到这些被弃置在城市黑洞里的共享单车，如果考虑运营商通常在夜间集中调度车辆，那就进一步加大了调度的难度。要解决这类单车的调度问题，以运营商为主体的调度方式有着明显的弊端。

5.2 以用户为主体调度的局限性

（1）用户是否接受引导具有不确定性

平台具有引导用户参与调度的能力，但这类参与行为不具有强约束，存在一定的潜在风险。用户是平台服务的对象，平台采用激励机制对用户加以引导，使用户一定程度上按照平台意愿使用或停放车辆。这种引导不同于专人调度的核心在于，用户可能不接受引导，这也是以用户为主体调度的风险所在。

（2）用户的大体出行路线不可能被改变

平台在设置奖励对用户进行引导时，只能通过引导机制控制共享汽车的调入或调出，即若某区域的车辆需要调出，此时设置调出区域，通过用户引导机制激励用户使用调出区的车，用户接受引导后使用了调出区的车，但平台无法控制车辆的去向。同样的，若某区域需要调入车辆，此时设置调入区域，通过用户引导机制激励用户将车停放至调入区，用户接受引导后将车停放至调入区，但平台无法控制车辆的来源。

（3）极端天气对用户调度有极大阻碍

在极端天气下，用户引导机制的效果会大打折扣，平台使用同样的甚至高出几倍的奖励也很难有用户响应，即用户调度受天气影响较大，并非所有情况都适用。

（4）用户体验下降的可能性

平台根据实时调度需求设置奖励区域，用户根据平台引导改变自身的出发

地或目的地，在找车、还车过程中可能会遇到路途太远，或地方太偏僻，以致找不到车辆，导致用户体验的降低。共享单车是短途出行的选择，方便是其核心优势，所以不宜引导用户寻找太远或太偏僻的车辆。

5.3 双主体的共享单车协作式调度模型

考虑以运营商为主体的调度和以用户为主体的调度各有优缺点，建立双主体的共享单车协作式调度模型，将两类调度方式进行有机结合，寻找最优的共享单车调度策略。

(1) 问题描述

在共享单车调度系统中，用户对共享单车的调度本质上是一类实时调度问题，而运营商对共享单车的调度是再配置问题。用户对共享单车的调度发生在系统运行期内，而运营商对共享单车的调度发生在调度期内，二者具有先后关系。根据前文定义，自然状态下的区域需求差为 gap_i ，经过用户调度后的区域需求差为 gap'_i ，再经过运营商调度后区域需求差归零。考虑此特征，双主体的共享单车协作式调度问题属于双层调度问题，即下层调度（以用户为主体）的结果是上层调度（以运营商为主体）的约束条件。

(2) 模型构建

在该双层调度模型中，下层为以用户为主体的调度模型，其决策变量是奖励区域 U 和奖励力度 w ，优化目标为调度成本 γ 和调度效率 φ ，上层为以运营商为主体的调度模型，其决策变量是调度车辆路线 R_h ，优化目标为调度成本 ϕ ，约束条件为车辆容量 Q_h 、车辆最大行驶里程 M_h 等。

下层调度需要以尽可能低的调度成本完成更多的调度任务，模型的目标函数可表示为：

$$F_1 = \min \gamma = \sum_{i \in U} X_i w p(w) \quad (5-1)$$

$$F_2 = \max \varphi \quad (5-2)$$

上层调度需要使整个共享单车系统中所有区域供需差归零，模型的目标函数可表示为：

$$F_3 = \min \phi = \sum_{h=1}^H C F_h y_h + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{h=1}^H x_{ijh} d_{ij} C_h \quad (5-3)$$

该双层调度模型的总优化目标为：

$$F = \min(\gamma + \phi) \quad (5-4)$$

(3) 问题求解

在上述上层调度问题中，如果需要考虑所有目标的取值情况，往往会有很多解在成本目标函数上表现优异，而在效率目标函数上的表现不佳。也往往会有很多解在效率目标函数上表现优异，而在成本效率函数上表现不佳。在上述解中，没有一个解是完全优于其他解的。选择哪一个解，要依据选择该解后，运营商支付给用户的奖励是否会更大程度上降低运营商用于雇佣专职人员进行调度的成本，即选择该解后双层调度模型的总成本是否更低。

因此可以通过枚举的方式，考虑运营商在设置奖励区域和奖励力度时的几类典型策略，给出这几类典型情况下下层模型的解，步骤如下：

Step1: 运营商以一定梯度设置调度阈值，如 $Gap_{高}$ 、 $Gap_{中}$ 和 $Gap_{低}$ ，只有当区域需求差的绝对值满足 $|gap_i| > Gap$ 时，运营商才在此区域设置奖励；

Step2: 针对每一个调度阈值，运营商设置不同力度奖励，如 $w_{高}$ 、 $w_{中}$ 和 $w_{低}$ ，此时诱导成功率也随之确定；

Step3: 计算每一种奖励力度下，起点漂移和终点漂移的发生量，并计算用户调度总成本；

Step4: 计算发生起点漂移和终点漂移后各区域新的需求差 gap' ；

Step5: 将新需求差作为上层模型的约束条件，求得对应的运营商调度成本；

Step6: 计算双层调度模型的总成本。

5.4 共享单车协作式调度策略

运营商与用户协作式调度如图 5-1 所示，其中红色表示需求逆差，蓝色表示需求正差，进度条的长度表示需求差的绝对值大小。

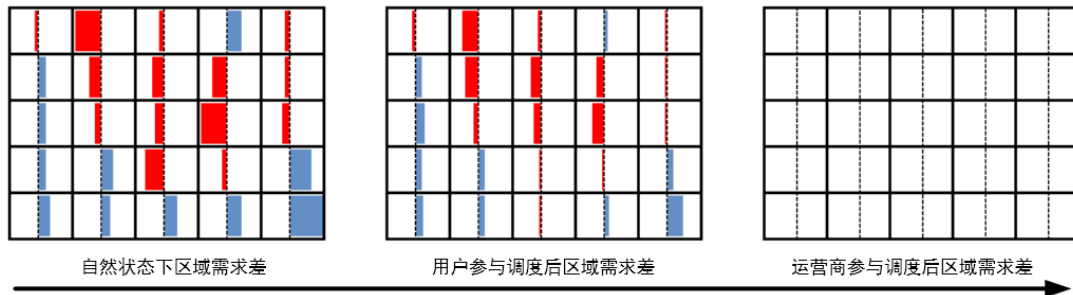


图 5-1 协作式调度示意图

从图中可以看出,用户参与下的共享单车调度不能完全满足调度需要,调度效率不可能达到 100%,但是其一定程度上能够缓解单车分布的不合理,并减少运营商的调度工作量,因此在用户参与调度之后,需要由运营商对整个系统进行再配置,以满足调度需要。双主体的共享单车协作式调度步骤如下:

Step1: 区域划分与网格插值。对共享单车用户骑行习惯进行调研,了解共享单车用户平均出行距离,进而设置合理的网格大小;利用共享单车历史出行订单数据,按时段统计网格内共享单车需求量,得到原始时间序列数据 Y 。

Step2: 基于 ARIMA 模型的共享单车需求量预测。分析共享单车用户需求特征,比较各类定量预测与定性预测方法的适用性,选择时间序列预测模型对共享单车需求量进行预测;考虑原始时间序列是非平稳时间序列,并呈现一定周期性特征,选取 ARIMA 模型作为最终的预测模型。

Step3: 区域需求差计算。结合现实共享单车分布和上一步预测得到的共享单车未来需求量,计算区域需求差值 gap ;如果 $gap < 0$,该区域需要调出车辆,如果 $gap > 0$,说明该区域需要调入车辆。

Step4: 运营商设置奖励阈值与奖励力度。结合 Step3 得到的区域需求差,运营商通过设置阈值 Gap ,将一部分需求差较大($|gap| > Gap$)的区域设置为奖励区域,并设置一定的奖励力度 w 来引导用户参与调度。

Step5: 计算诱导成本。根据奖励阈值 Gap 和奖励力度 w 确定起点漂移和终点漂移的发生量,从而计算诱导用户所发生的成本。

Step6: 重新计算区域需求差并评价用户调度效率。根据起点漂移和终点漂移的发生量,重新计算区域需求差 gap' ,并评价用户参与调度的效率。

Step7: 以运营商为主体的共享单车调度。以新需求差 gap' 为约束,设计车辆动态路径优化算法,在考虑完全平衡需求差的基础上,求得最低调度成本。

Step8: 计算总调度成本。计算用于诱导用户所发生的成本和用于雇佣专职人员所发生的成本之和。

Step9: 重复(4-8)过程。运营商通过控制奖励阈值和奖励力度,以总成本最小为目标,探究运营商和用户最优的协作方式。

第 6 章 实例分析

6.1 背景分析

北京市是中国的科技创新中心，是国内共享单车商业模式发源地，共享单车行业领军企业摩拜和 OFO 都先后在北京投放并运营共享单车。据交通运输部科学研究院发布的《2017 年第一季度中国主要城市骑行报告》显示，北京以 84.3 分的城市骑行指数高居全国榜首，其中城市骑行指数包含了对单车使用水平、节能减排水平、健康贡献水平、停车设施水平、服务环境水平和社会文明水平等的综合评价。北京市共享单车行业在高速发展的同时也面临着更加艰巨的任务。据北京市交通委相关数据显示，截止 2017 年 9 月，全市投放运营车辆总数达 235 万辆。

北京市交通委指示，共享单车有利于推广低碳环保理念、缓解交通拥堵，但也存在过度投放和停放无序的问题，尤其是在地铁站、公交车站、交通枢纽、大型商圈等区域，大量共享单车扎堆停放、堆积占道，给市容市貌和市民生活带来了不利影响，为此，研究决定暂停全市范围内新增投放共享单车。摩拜、OFO 等共享单车运营商均表示理解并支持北京市暂停新增投放的决定，同时将会通过多种技术手段和运维手段提升现有单车规模下的运营效率、平衡区域供需关系、彻底解决乱停乱放问题。

6.2 数据来源

本文选取北京市内摩拜单车 300 多万条订单数据（包含 2017 年 5 月 10 日至 2017 年 5 月 16 日全市范围内的出行订单），以此研究共享单车的需求预测问题和调度问题。截取部分数据如下：

orderid	userid	bikeid	starttime	end_loc_longti	end_loc_lati	start_loc_longti	start_loc_lati
163020	378959	22541	2017/5/10 0:00	116.5	39.77	116.5	39.77
3428602	140756	354271	2017/5/10 0:00	116.36	39.95	116.37	39.95
4580017	693933	459074	2017/5/10 0:00	116.35	39.97	116.35	39.97
4117589	482046	420604	2017/5/10 0:00	116.33	39.75	116.31	39.76
2851526	895961	300008	2017/5/10 0:00	116.48	39.86	116.48	39.87
1421519	84838	165558	2017/5/10 0:00	116.43	39.96	116.44	39.95
2780838	1018307	293542	2017/5/10 0:00	116.36	40	116.37	39.99
2567012	503506	273844	2017/5/10 0:00	116.58	39.77	116.59	39.77
2866932	824842	301409	2017/5/10 0:00	116.22	39.86	116.22	39.86
3332866	881368	345126	2017/5/10 0:00	116.35	40	116.35	40
2613197	801959	278195	2017/5/10 0:00	116.53	39.92	116.53	39.92
1423784	282412	165792	2017/5/10 0:00	116.48	39.93	116.47	39.94
4278271	868826	435269	2017/5/10 0:00	116.43	39.85	116.43	39.84
285635	958222	39987	2017/5/10 0:00	116.42	39.79	116.42	39.8
532060	837440	72191	2017/5/10 0:00	116.32	39.95	116.32	39.96
5201191	912572	514852	2017/5/10 0:00	116.24	39.9	116.24	39.9
4387137	529955	443899	2017/5/10 0:01	116.43	39.85	116.41	39.85
4953446	1043428	489393	2017/5/10 0:01	116.44	39.94	116.44	39.93
3744654	69590	384605	2017/5/10 0:01	116.35	39.93	116.35	39.93
3852120	587620	395116	2017/5/10 0:01	116.37	39.93	116.38	39.93
664525	495770	89333	2017/5/10 0:01	116.37	39.83	116.37	39.83
4824670	831858	479406	2017/5/10 0:01	116.34	39.99	116.32	39.99
3010460	881770	314927	2017/5/10 0:01	116.5	39.93	116.5	39.94
2761381	192528	291723	2017/5/10 0:01	116.29	39.92	116.3	39.91

图 6-1 北京市共享单车订单原始数据

对图 6-1 中相关字段的说明如下：

orderid：订单编号；

userid：用户编号；

bikeid：车辆编号；

starttime：骑行开始时间；

end_loc_longti：目的地经度；

end_loc_lati：目的地纬度；

start_loc_longt：始发地经度；

start_loc_lati：始发地纬度。

6.3 共享单车需求量预测

6.3.1 网格划分

据摩拜发布的共享单车骑行报告显示，用户每人单次骑行平均距离约为 2.3km。经过计算发现，北京地区经度每相差 0.01 度，距离约为 853 米，纬度每相差 0.01 度，距离约为 1111 米。本文以规则网格划分方法划分出规则地理区域

25 个（区域经度跨度 0.02 度，纬度跨度 0.01 度，区域对角线长度约为 2000 米）并编号，如图 6-2 所示。

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

图 6-2 网格划分示意图

图 6-2 中各区域对应的经纬度区间如表 6-1 所示。

表 6-1 各区域对应的经纬度区间

区域	经度区间	纬度区间	区域	经度区间	纬度区间
1	[116.30,116.32)	[39.85,39.86)	14	[116.36,116.38)	[39.83,39.84)
2	[116.32,116.34)	[39.85,39.86)	15	[116.38,116.40)	[39.83,39.84)
3	[116.34,116.36)	[39.85,39.86)	16	[116.30,116.32)	[39.82,39.83)
4	[116.36,116.38)	[39.85,39.86)	17	[116.32,116.34)	[39.82,39.83)
5	[116.38,116.40)	[39.85,39.86)	18	[116.34,116.36)	[39.82,39.83)
6	[116.30,116.32)	[39.84,39.85)	19	[116.36,116.38)	[39.82,39.83)
7	[116.32,116.34)	[39.84,39.85)	20	[116.38,116.40)	[39.82,39.83)
8	[116.34,116.36)	[39.84,39.85)	21	[116.30,116.32)	[39.81,39.82)
9	[116.36,116.38)	[39.84,39.85)	22	[116.32,116.34)	[39.81,39.82)
10	[116.38,116.40)	[39.84,39.85)	23	[116.34,116.36)	[39.81,39.82)
11	[116.30,116.32)	[39.83,39.84)	24	[116.36,116.38)	[39.81,39.82)
12	[116.32,116.34)	[39.83,39.84)	25	[116.38,116.40)	[39.81,39.82)
13	[116.34,116.36)	[39.83,39.84)			

6.3.2 共享单车需求量预测

下面利用 ARIMA 模型对区域 1 的共享单车需求量进行预测。根据北京市摩

拜单车历史订单数据，运用 Excel 软件进行如下数据处理：

Step1: 对条件 start_loc_longt 进行筛选，区间为[116.30, 116.32)；

Step2: 对条件 start_loc_lati 进行筛选，区间为[39.81, 39.82)，得到区域 1 内历史订单信息；

Step3: 按时段（间隔为 1 小时）对区域 1 内历史订单信息进行统计。

可得到区域 1 内连续 72 小时的出行需求数据，作为原始时间序列，如表 6-2 所示。

表 6-2 需求预测原始时间序列数据

时段	需求量		
	10 日	11 日	12 日
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	2	3	2
7	14	13	14
8	21	24	19
9	40	37	39
10	11	12	18
11	14	13	11
12	77	76	89
13	15	16	16
14	6	10	8
15	6	11	6
16	3	17	5
17	8	17	10
18	16	26	44
19	51	45	39
20	12	21	18
21	2	10	9
22	3	6	9
23	3	2	2
24	0	1	2

将上述 2017 年 5 月 10 日至 12 日连续 72 小时的出行需求数据作为共享单车需求量预测的原始时间序列数据，运用 SPSS 软件中的时间序列建模器构建 ARIMA 模型，通过变换模型参数进行分析，得到如图 6-3 所示的拟合曲线。结合曲线分析，不难发现共享单车的需求量具有明显的高峰期现象和周期性现象。

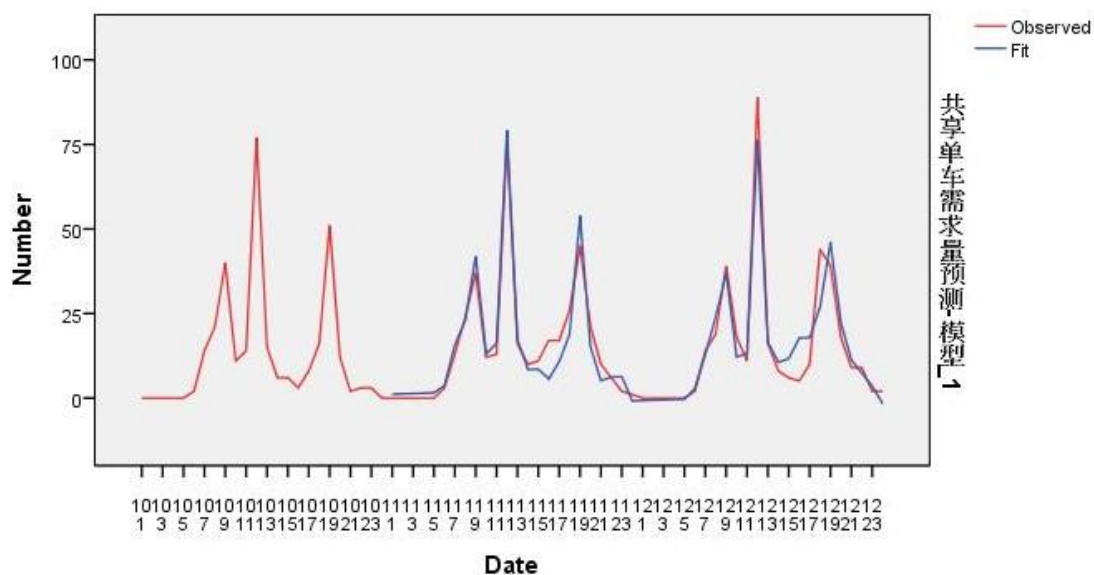


图 6-3 共享单车需求量预测模型拟合曲线

用相同方式对另外 24 个区域的共享单车需求量进行预测，得到共享单车需求分布，如图 6-4（各区域内数值表示预测的下一个运行期第一个早高峰之前的区域总需求，即 D_i ）：

76	9	57	258	35
203	53	90	106	30
129	95	107	26	33
160	190	86	243	320
158	224	200	296	610

图 6-4 需求预测结果

6.4 共享单车调度

6.4.1 运营商为主体的共享单车调度

基于对共享单车需求量预测的结果，结合从原始数据中提取的共享单车实际分布情况 A_i ，计算各区域的需求差 gap_i （即需要调入或者调出的单车数量）。其中负数表示需要调出的单车数量，正数表示需要调入的单车数量，如图 6-5。

-24	-221	-32	118	-43
61	-100	-97	-124	-37
66	-54	-80	-230	-68
68	101	-156	-35	190
104	74	111	118	290

图 6-5 各区域需求差

为研究方便，本文对各区域位置进行坐标化，其中，以各区域中心点坐标代替该区域，以区域 21 为坐标原点，选用的比例尺为 1:1000m。

表 6-3 区域坐标

区域	横坐标	纵坐标	区域	横坐标	纵坐标
1	0	4.4	14	5.1	2.2
2	1.7	4.4	15	6.8	2.2
3	3.4	4.4	16	0	1.1
4	5.1	4.4	17	1.7	1.1
5	6.8	4.4	18	3.4	1.1
6	0	3.3	19	5.1	1.1
7	1.7	3.3	20	6.8	1.1
8	3.4	3.3	21	0	0
9	5.1	3.3	22	1.7	0
10	6.8	3.3	23	3.4	0
11	0	2.2	24	5.1	0
12	1.7	2.2	25	6.8	0
13	3.4	2.2			

在 Matlab 环境下，采用遗传算法对第 3 章构建的以运营商为主体的共享单车调度模型进行求解。实验过程中，对相关参数的设置如下：

（1）模型参数设置

主要针对以运营商为主体的共享单车调度模型的基本参数进行取值，包括车辆的固定成本（含驾驶及搬运等调度人力成本）、容量、最大工作量、最大行驶距离、单位距离行驶成本。

表 6-4 模型参数

参数	意义	取值
D	调度车辆的固定成本（元/辆）	1500
Q	调度车辆的最大容量	200
T	调度车辆的最大工作量	500
M	调度车辆的最大行驶距离（公里）	500
C	调度的单位距离成本（元/公里）	10

（2）遗传算法参数设置

针对第 3 章设计的遗传算法的相关参数进行设置，便于算法的运行与收敛，主要有染色体长度、种群规模、交叉概率、变异概率、迭代次数，具体数字如表 6-5 所示。

表 6-5 模型参数

参数	意义	取值
chrom	染色体长度	25
popsiz	种群规模	200
Pc	交叉概率	0.9
Pm	变异概率	0.05
gen	终止进化代数	1000

在上述参数设置基础上，用 Matlab 进行多次实验，经过筛选得到车辆调度的最优结果如表 6-6 所示。在多次实验结果中最优解为 5190 元，总共需要 3 辆调度车参与单车调度，该调度方案可描述如下：

车辆 1 调度路线及调度数量，从区域 13 出发→区域 8（收回单车 97 辆）→区域 1（收回单车 24 辆）→区域 21（放置单车 104 辆）→区域 18（收回单车

156 辆) → 区域 23 (放置单车 111 辆) → 区域 15 (收回单车 68 辆) → 区域 24 (放置单车 118 辆) → 区域 15 (收回单车 155 辆) → 区域 20 (放置单车 167 辆) → 回到区域 13。

车辆 2 调度路线及调度数量, 从区域 13 出发 (收回单车 80 辆) → 区域 12 (收回单车 54 辆) → 区域 16 (放置单车 68 辆) → 区域 11 (放置单车 66 辆) → 区域 2 (收回单车 200 辆) → 区域 20 (放置单车 23 辆) → 区域 25 (放置单车 177 辆) → 区域 2 (收回单车 21 辆) → 区域 14 (收回单车 75 辆) → 区域 25 (放置单车 96 辆) → 回到区域 13。

车辆 3 调度路线及调度数量, 从区域 13 出发 → 区域 10 (收回单车 37 辆) → 区域 9 (收回单车 124 辆) → 区域 22 (放置单车 74 辆) → 区域 7 (收回单车 100 辆) → 区域 17 (放置单车 101 辆) → 区域 6 (放置单车 61 辆) → 区域 3 (收回单车 32 辆) → 区域 5 (收回单车 43 辆) → 区域 19 (收回单车 35 辆) → 区域 4 (放置单车 118 辆) → 区域 25 (放置单车 17 辆) → 回到区域 13。

表 6-6 最优解和最优路径

	最优解	车辆数	达到最优解代数
计算结果	5190 元	3 辆	430
车辆编号	调度路线及调度数量		
1	13-8-1-21-18-23-15-24-15-20 (0, 97, 24, -104, 156, -111, 68, -118, 155, -167)		
2	13-12-16-11-2-20-25-2-14-25 (80, 54, -68, -66, 200, -23, -177, 21, 75, -96)		
3	13-10-9-22-7-17-6-3-5-19-4-25 (0, 37, 124, -74, 100, -101, -61, 32, 43, 35, -118, -17)		

6.4.2 用户为主体的共享单车调度

在 Matlab 环境下, 应用第 4 章设计的改进的遗传算法对模型进行求解。在考虑调度效率作为约束条件时($\varphi > \eta$), 取三组 η 值, 分别为 0.2、0.25 和 0.3, 并令 $\lambda = 0.1$, 求得以用户为主体的调度模型结果如下。

表 6-7 以用户为主体调度模型的解

调度效率	最优个体	奖励区域个数	奖励力度	调度成本
0.2	0001010000100000100000100	5	1	393
0.25	0001010000100000110100001	7	1	609
0.3	0001010000100100100101110	9	1	811

从结果中可以看出：运营商在设置奖励区域时，适当增加奖励区域的数量，能有效扩大诱导调度的诱导范围，提升调度效率；在设置奖励力度时不宜设置过大，否则高奖励所诱发的用户大面积参与调度行为将可能导致新一轮的单车分布不均。

6.4.3 共享单车协作式调度

在实际共享单车应用场景中，运营商在观察到区域内需求差过大时，会将该区域设置为奖励区域，当用户从该点出发或到达该点时，可以获得一定的奖励。因此可以将奖励区域分为奖励出发区域、奖励到达区域。运营商对奖励区域的设置可能存在以下几种情况。

表 6-8 奖励区域设置

阈值	需求差绝对值	奖励出发区域	奖励到达区域
高	200	2, 14	25
中	150	2, 14, 18	20, 25
低	100	2, 6, 8, 14, 18	4, 17, 20, 21, 23, 24, 25

在 4.2.2 所建立的以用户为主体的共享单车调度模型中，有约束条件： $p(w) = \lambda w$ ，表明诱导成功率与奖励力度成正比。在实验中，选取了三种可能的奖励力度（高奖励、中奖励、低奖励），并令 $\lambda = 0.1$ ，相应取值如下表。

表 6-9 奖励力度及诱导成功率

奖励力度	对应的奖励额度（元）	诱导成功率
高	3	0.3
中	2	0.2
低	1	0.1

在上述奖励区域和奖励力度设置下，用公式（5-1）计算起点漂移发生量、终点漂移发生量和调度成本，用公式（5-2）计算该调度过程的效率。

表 6-10 下层调度模型结果

阈值	奖励	起点漂移	终点漂移	调度效率	成本
200	3	146	176	5.23%	966
	2	97	117	4.38%	428
	1	49	59	2.74%	108
150	3	218	516	7.69%	2202
	2	146	344	10.91%	980
	1	73	172	7.69%	245
100	3	333	1717	9.30%	6150
	2	222	1145	26.36%	2734
	1	111	572	24.75%	683

按照运营商与用户协作式调度模型原理，运营商调度行为在用户调度结束之后，运营商需要对共享单车系统内诱导之后还存在的需求差进行平衡，使需求差全部变为 0。在下层调度模型结果中，当阈值取为 100，奖励力度设置为 1 元时，诱导效果相对最好，可以根据公式（4-4）（4-5）（4-6）计算新的区域需求差，结果如图 6-6 所示。

-30	-174	-32	50	-38
55	-89	-91	-81	-37
71	-44	-72	-165	-64
86	13	-62	70	100
76	116	32	62	248

图 6-6 用户调度后区域需求差值

通过对比用户调度前后的各区域需求差值，可以直观发现，经用户参与调度后，共享单车系统中单车分布与需求分布不匹配的情况已经有所好转，如图 6-7 所示。

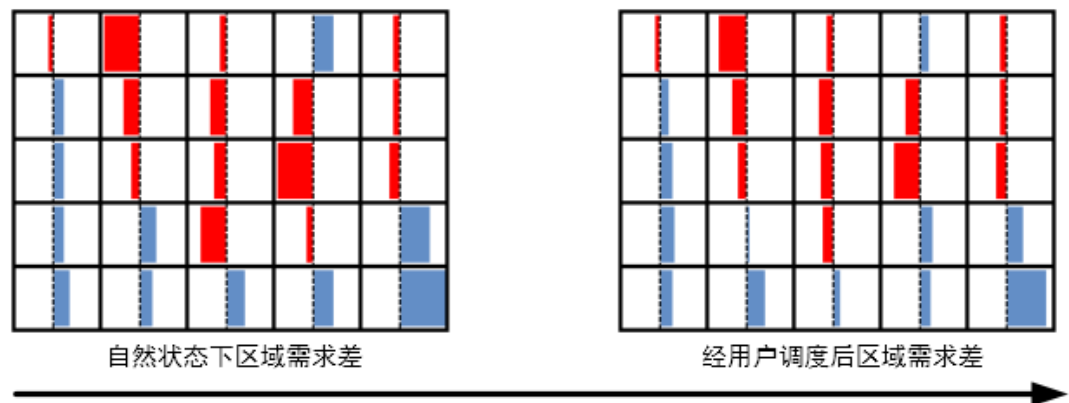


图 6-7 用户参与调度的效果示意图

在上述基础上，应用上层调度模型对新的需求差进行调度，并比较单一主体下调度成本与双主体下的调度成本，如表 6-11 所示。

表 6-11 不同调度方式成本比较

调度方式	用户调度成本	运营商调度成本	调度效率	总成本
以运营商为主体	0	5190	100%	5190
以用户为主体	811	0	30%	811
双主体协作式调度	683	3670	100%	4353

结果表明，文章设计的运营商与用户协作式的调度机制能在满足调度需要的基础上，有效降低总调度成本。为实现总成本最低的运行效果，需要准确识别区域供需平衡状态、合理设计奖励方案、寻找最优的车辆调度路径。

第7章 总结与展望

7.1 全文总结

共享单车是分时租赁营运非机动车，是城市绿色交通系统的重要组成部分，通过提供方便、优惠的共享自行车服务，极大程度方便了公众短距离出行和公共交通接驳换乘。在当前城市道路交通越来越拥挤的情况下，共享单车的出现一方面缓解了城市交通拥堵现象，但另一方面由于投放过度、分布不合理又给城市交通环境带来新的问题，因此基于共享单车历史骑行数据对共享单车系统进行改进，提高共享单车运营与管理水平，显得意义十分重大。

本文借鉴网格划分、出行需求预测、资源再配置、服务实时调度等方面的研究成果，探讨共享单车的需求预测及调度问题，对文章研究内容的总结如下：

（1）构建共享单车需求量预测模型。考虑共享单车无固定桩站的特点，采用网格划分方法，描述共享单车空间分布情况；结合摩拜单车历史出行大数据，生成网格内共享单车需求时变图，作为原始时间序列数据；分析共享单车需求变化的周期性特征，选择差分自回归移动平均模型对共享单车需求量进行预测，并将需求预测结果应用于共享单车调度模型中。

（2）构建以运营商为主体的共享单车调度模型。从现实出发，分析共享单车调度周期及具体的调度实施手段，在此基础上提出相关理论假设；借鉴旅行商问题的相关研究，考虑运营商对共享单车的调度是允许存在局部路径重复的多旅行商问题，建立以调度成本最小为目标的优化模型，并设计遗传算法对模型进行求解。

（3）构建以用户为主体的共享单车调度模型。研究“红包车”现象的内在机理，将诱导结果归纳为起点漂移与终点漂移现象，在此基础上研究不同奖励方案带来的起点漂移和终点漂移发生量，并计算调度效率与调度成本，寻找最优的诱导策略。

（4）研究运营商与用户协作的共享单车调度策略。考虑以用户为主体的共享单车调度具有实时调度的特征、以运营商为主体的调度是一种周期性的再配置，因此设计用户调度在前、运营商调度在后的协作调度机制，通过设置不同的奖励区域及奖励额度，寻找总调度成本最优的调度策略。

(5) 共享单车需求预测及调度研究的实例分析。本文利用摩拜发布的共享单车出行大数据,沿着本文“网格划分—需求预测—单一主体共享单车调度—双主体共享单车协作式调度”的思路进行实例分析,发现时间序列预测方法在共享单车需求量预测中具有良好的效果,同时,通过对比单一主体和双主体协作时的调度成本,发现本文提出的运营商与用户协作式的调度能有效降低调度成本。

7.2 主要创新点

(1) 建立共享单车需求分布预测模型,揭示共享单车需求分布的时空特征。已有出行需求预测研究或从时间维度出发,或从空间维度出发,不能反映出行需求所特有的时空特征。本论文利用摩拜单车出行大数据,借鉴网格划分理论、时间序列预测方法,构建共享单车需求量预测模型,实现了基于大数据的客户出行需求分布预测,揭示了共享单车需求分布的时空特征。

(2) 建立以用户为主体的共享单车调度模型,将红包车调度这一现象理论化。已有车辆调度研究多考虑调度问题本身特征(动态性、时间窗等),而忽略了对调度主体的研究。本文借鉴实践中的经验,研究了用户参与下的共享单车调度问题,从起点漂移和终点漂移两方面揭示运营商诱导用户对共享单车进行调度的原理。

(3) 研究双主体的共享单车调度问题,设计了运营商与用户协作的调度机制。基于共享单车用户行为特点,分析了共享单车分布不均、车辆闲置的主要原因,指出单一调度主体下共享单车调度不可能同时达到调度成本最低、调度效率最高。针对此问题,文章设计运营商与用户协作式调度机制,通过合理设置区域奖励阈值与奖励力度,实现了指定调度目标下的调度成本最低。

7.3 研究展望

共享单车的运营管理是一个非常有价值的研究方向,本文从需求预测及单车调度的角度切入,提出了相应的解决方案,具有十分重要的意义。但是在论文不断深入的过程中,也发现在许多问题上可以进行更深入的研究。

(1) 本文在进行网格划分时采用的是规则网格划分方法,根据经纬度将研究区域划分成相同大小的矩形区域,这种方式可能会导致某些地物被拆分到不同的网格之中。在后续的研究中,如果能获得更高精度的共享单车位置数据,

可以考虑采用不规则网格划分方法，结合现实中区域土地性质或道路规划进行分区，这样的处理会更加贴合现实，更具有实践意义。

（2）本文在对共享单车需求量进行预测时，原始时间序列数据的时间跨度较短，且拥有相同的外部环境，获得的预测结果也只能代表相同条件下的单车需求量。在后续的研究中，可以采用时间跨度更长、外部环境多变的共享单车历史需求数据作为训练集，利用机器学习方法对共享单车需求量做出更加精准的预测。

（3）在以用户为主体的调度问题中，文章仅考虑了奖励这一个诱因，并将诱导效果考虑为起点漂移和终点漂移现象。实际中，运营商可以通过其他各类运营活动来诱导用户参与调度，在今后的研究中可以多发掘此类诱因，并将其理论化，讨论用户参与度、诱导成本、调度效率等问题。

参考文献

- [1] 王静. 中国网约车的监管困境及解决[J].行政法学研究, 2016, No.96(2):49-59.
- [2] 周杨, 张冰琦, 李强. 公共自行车系统的研究进展与展望[J]. 城市发展研究, 2014, 21(9):118-124.
- [3] Lathia N, Ahmed S, Capra L. Measuring the impact of opening the London sharing bike scheme to casual users[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2012, 22(5):88-102.
- [4] 王法硕. 制度设计、治理能力与自我更新:地方政府创新扩散效果研究——以城市公共自行车项目为例[J]. 中国行政管理, 2016(6):109-114.
- [5] 王欢明, 李鹏. 城市公共自行车服务民营化供给模式比较研究[J]. 中国软科学, 2015(6):56-66.
- [6] Wu Y, Zhu D. Bicycle Sharing Based on PSS-EPR Coupling Model: Exemplified by Bicycle Sharing in China[J]. 2017, 64:423-428.
- [7] 秦铮, 王钦. 分享经济演绎的三方协同机制:例证共享单车[J]. 改革, 2017(5):124-134.
- [8] 郭鹏, 林祥枝, 黄艺. 共享单车:互联网技术与公共服务中的协同治理[J]. 公共管理学报, 2017(3):1-10.
- [9] 张雅杰. 基于城市公共网格的土地信息应用研究[D]. 武汉大学, 2011.
- [10] 张文瑞. 城市社区网格化管理模式分析及其完善路径研究[D]. 重庆大学, 2016.
- [11] 张会霞, 张锦, 何宗宜. 城市地理国情监测统计单元网格划分方法研究[J]. 测绘通报, 2014(6):48-50.
- [12] 郝传忠. 自由曲面网格结构的网格划分方法研究[D]. 浙江大学, 2017.
- [13] 张章, 张福浩, 陶坤旺,等. 一种组织机构信息多级地理网格划分的方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(3):000052-20.
- [14] 余接情, 吴立新. 球体退化八叉树网格编码与解石码研究[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1):5-9.
- [15] Lu N, Cheng C, Jin A. An index and retrieval method of spatial data based on GeoSOT global discrete grid system[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2014:4519-4522.
- [16] 金安, 程承旗. 基于全球剖分网格的空间数据编码方法[J]. 测绘科学技术学报, 2013,

- 30(3):284-287.
- [17] Faghri A, Venigalla M. Measuring Travel Behavior and Transit Trip Generation Characteristics of Transit-Oriented Developments[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2397(-1):72-79.
- [18] Gulden J, Goates J P, Ewing R. Mixed-Use Development Trip Generation Model[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2344(-1):98-106.
- [19] Perrakis K, Karlis D, Cools M, et al. A Bayesian Approach for Modeling Origin-Destination Matrices[J]. Transportation Research Part A, 2011, 46(1):200-212.
- [20] 陈曦, 彭蕾, 李炜. 基于计算实验的公共交通需求预测方法[J]. 自动化学报, 2017, 43(1):60-71.
- [21] Yang C, Yan F, Ukkusuri S V. Unraveling Traveler Mobility Patterns and Predicting User Behavior in Shenzhen Metro System[C].TRB.Proceedings of the 95th Annual Meeting the Transportation Research Board.Washington DC:TRB,2016.
- [22] 齐观德, 潘遥, 李石坚,等. 基于出租车轨迹数据挖掘的乘客候车时间预测[J]. 软件学报, 2013(11):15-23.
- [23] Yasmin F, Morency C, Roorda M J. Assessment of spatial transferability of an activity-based model, TASHA[J]. Transportation Research Part A Policy & Practice, 2015, 78:200-213.
- [24] Zhang Y, Haghani A. A gradient boosting method to improve travel time prediction[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2015, 58:308-324.
- [25] 宗芳, 隗志才, 贾广辉. 基于离散-连续选择模型的通勤出行时间预测[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10):2679-2684.
- [26] Lv Y, Duan Y, Kang W, et al. Traffic Flow Prediction With Big Data: A Deep Learning Approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2):865-873.
- [27] Cai P, Wang Y, Lu G, et al. A spatiotemporal correlative k -nearest neighbor model for short-term traffic multistep forecasting[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2016, 62:21-34.
- [28] Zhao N, Huang W, Song G, et al. Discrete Trajectory Prediction on Mobile Data[M]// Web Technologies and Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2011:77-88.
- [29] Veloso M, Phithakkitnukoon S, Bento C. Urban mobility study using taxi traces[C]// International Workshop on Trajectory Data Mining and Analysis. ACM, 2011:23-30.
- [30] Chen J. Research on development of urban taxi supply based on influence factors

- classification[J]. Journal of Southeast University, 2013, 29(2):194-198.
- [31] Bekhor S, Cohen Y, Solomon C. Evaluating long - distance travel patterns in Israel by tracking cellular phone positions[J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 47(4):435-446.
- [32] Nourinejad M, Roorda M J. A dynamic carsharing decision support system[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2014, 66(3):36-50.
- [33] 王喆, 苗瑞, 顾希垚,等. 基于动态价格激励机制的租赁车辆配置研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(4):80-85.
- [34] Deng Y, Cardin M A. Integrating operational decisions into the planning of one-way vehicle-sharing systems under uncertainty[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 86: 407-424.
- [35] Bruglieri M, Colorni A, Lu è A. The Vehicle Relocation Problem for the One-way Electric Vehicle Sharing: An Application to the Milan Case[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2014, 111:18-27.
- [36] Nair R, Miller-Hooks E. Equilibrium network design of shared-vehicle systems[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(1):47-61.
- [37] Bruglieri M, Colorni A, Lu è A. The Vehicle Relocation Problem for the One-way Electric Vehicle Sharing: An Application to the Milan Case[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2014, 111:18-27.
- [38] Pfrommer J, Warrington J, Schildbach G, et al. Dynamic Vehicle Redistribution and Online Price Incentives in Shared Mobility Systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 15(4):1567-1578.
- [39] Kaspi M, Raviv T, Tzur M. Parking reservation policies in one-way vehicle sharing systems[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2014, 62(2):35-50.
- [40] Xiao M, Shao X, Gao L & Luo Z. A new methodology for multi-objective multidisciplinary design optimization problems based on game theory[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(3): 1602-1612.
- [41] Lu X, Liu Z. Semi-online scheduling problems on two uniform machines under a grade of service provision[J]. Theoretical Computer Science, 2013, 489: 58-66.
- [42] Chen W, Li T, Yang T. Intelligent control of cognitive radio parameter adaption: Using evolutionary multi-objective algorithm based on user preference[J]. Ad Hoc Networks 26 (2015) 3-16.

- [43] Ng C T, Wang J B, Cheng T C E & Liu L L. A branch-and-bound algorithm for solving a two-machine flow shop problem with deteriorating jobs[J].Computers & Operations Research, 2010, 37(1): 83-90.
- [44] Sayarshad H R, Chow J Y J. Non-myopic relocation of idle mobility-on-demand vehicles as a dynamic location-allocation-queueing problem[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2017, 106:60-77.
- [45] Lu M, Chen Z, Shen S. Optimizing the Profitability and Quality of Service in Carshare Systems Under Demand Uncertainty[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2017, DOI:org/10.1287/msom.2017.0644. Online.
- [46] 葛显龙, 许茂增, 王伟鑫. 多车型车辆路径问题的量子遗传算法研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(1):125-133.

致谢

光阴似箭，日月如梭，转眼间已是在武汉理工大学度过的第七个春天，再三个月我就要离开这个生活了七年，充满美好回忆的地方，回望过去，满心不舍，更多的却是深深的感激。

首先，我要感谢我的导师聂规划教授，从本科到研究生、从为人到处事、从科研到工作、从学习到生活，事无巨细，悉心教导，耐心培养，为师亦为父。毕业论文的顺利完成离不开聂老师的精心指导，从研究方向到论文选题、从文章架构到内容安排、从理论研究到实证分析、从初稿撰写到修改定稿，层层把关，无一遗漏。作为聂老师的学生，我感到十分幸运，老师是校训“厚德博学、追求卓越”的真实写照，是我一生学习的榜样。

其次，我要感谢电子商务与智能服务研究中心这个平台，给我提供了良好的资源和学术交流机会；感谢中心的陈冬林教授、刘平峰副教授、傅魁副教授、曹洪江副教授、李冰副教授、危小超副教授、杨爱明老师、徐尚英老师在学习成长、论文写作等方面给予我的关心和帮助；感谢中心的代四广学姐、余其平学姐、姚梦迪学姐、郭萌学长在论文写作遇到难关时给予的启发和建议；感谢中心的何李凯学弟、陈川学弟、杨珈惠学妹在论文排版及纠错时给与的帮助。

最后，我要感谢我的父母，感谢你们对我义无反顾的支持和鼓励，在此献上我诚挚的谢意。

不久之后，我将离开校园，踏入社会，我会秉持初心，笃然前行。

刘畅

2018.03

于武汉理工大学

攻读学位期间获得与学位论文相关的科研成果目录

发表论文

[1] Liu Chang, Nie Guihua. Signaling game of intangible assets pledge loan[C].Proceedings of the 14th International Conference on Innovation & Management, 2017:1090-1904

[2] 聂规划,刘畅,郭萌. 电动汽车充换电服务模式研究[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版), 2018. (已录用)

软件著作权

[1] 聂规划,郭萌,刘畅.服务资源检索系统. (软件著作权, 证件登记号: 2015SR187469)

[2] 聂规划,刘畅,夏琪.支持小额透支的校园一卡通系统. (软件著作权, 证件登记号: 2017SR024529)

参与项目

[1] 2017.12-2018.03, 国家自然科学基金“无人驾驶汽车服务双层竞争性选址与并行稳健调度”项目申报.

[2] 2015.12-2016.03, 国家自然科学基金“O2O 汽车后服务联盟委托代理机制及资源优化配置与调度研究”项目申报.