

分类号：\_\_\_\_\_ U491.1

学校代号：10150

UDC：\_\_\_\_\_ 656 密级：\_\_\_\_\_ 公开

学 号：20203426

# 大连交通大学

## 专业硕士学位论文

基于出租车数据的定制公交  
路径规划研究

**Research on Route Planning of  
Customized Bus Based on Taxi Data**

学 生 姓 名：	朱文龙
校内导师及职称：	左忠义 教授
行业产业导师及职称：	康直 教授级高级工程师
专 业 名 称：	交通运输
研 究 方 向：	交通运输规划与管理
论 文 类 型：	规划设计
培 养 类 型：	全日制专业学位硕士
论文答辩日期：	2022 年 5 月 31 日
学位授予单位：	大连交通大学

## 摘 要

随着城市化进程的提高，越来越多的国家和地区面临着交通拥堵的难题，为了解决这个问题，国内外的专家学者都在不断的努力研究，随着研究的深入，已经取得了一个又一个的成果。关于城市交通领域的研究，大力发展公共交通的观念已经获得了众多专家学者们的普遍认可。

首先，本文对定制公交的研究背景及相关的国内外研究现状进行了分析，在前人的理论研究基础上，从出租车与定制公交的关系入手，在对相关的理论做出分析后，确定了影响定制公交系统制定的诸多因素，并对各影响因素进行分析，之后研究了二者的需求转换关系。通过对文献及相关理论的钻研，得出结论，利用出租车数据进行定制公交出行需求分析具有可行性。

其次，本文基于杭州市的出租车 GPS 数据，研究定制公交站点选址、站点时间窗的规划和路径规划问题。构建了定制公交站点选址模型，通过对出租车的数据的特点的分析，制定出行需求分析的流程和处理数据的方法，划分起讫区域。之后对于区域内的数据，本文选择了聚类分割算法对其进行需求聚类，结合乘客的出行意愿成本计算站点位置。站点选址模型确定之后，本文考虑了时间窗的特性，构建了站点时间窗的规划模型，选用遗传算法对其进行求解。之后分别考虑公交公司和乘客的各项利益组成，构建了一个以二者综合成本最低为目标函数的定制公交路径规划模型。

最后，本文基于对定制公交理论的研究，以杭州市的出租车的轨迹数据为例，依照本文已经确定的数据处理方法，利用 MATLAB 软件求解，挖掘出潜在的定制公交出行需求。得到出行需求数据之后，通过构建的站点选址模型求解出最优的站点选址方案，并利用模拟的乘客申请乘车信息，计算出最合理的站点时间窗的规划方案。最后根据求解结果，利用路径规划模型求解出总成本最低的定制公交运营方案。加深了对定制公交理论的研究，对该理论应用于实际提供了参考，为文中的研究区域在未来设置定制公交提供了可选择的方案。

**关键词：城市交通；定制公交；站点选址；站点时间窗；路径规划**

## Abstract

With the improvement of urbanization process, more and more countries and regions are facing the problem of traffic congestion. In order to solve this problem, experts and scholars at home and abroad are constantly making efforts to study it. With the deepening of research, one after another achievements have been achieved. In the field of urban transportation research, the concept of vigorously developing public transportation has been widely recognized by many experts and scholars.

First of all, in this paper the research background of custom bus and related research status at home and abroad are analyzed, on the basis of previous theoretical research, from the relationship between taxi and custom bus, after analyzing the related theory to make sure the all the factors that affect the custom bus system, formulate, and analyzes all the factors, then study the needs of both the conversion relations. Through the study of literature and related theories, it is concluded that it is feasible to use taxi data for customized bus travel demand analysis.

Secondly, based on the taxi GPS data of Hangzhou, this paper studies the selection of customized bus stations, the planning of time Windows and route planning. The customized bus site selection model is built, and the process of travel demand analysis and the method of data processing are developed through the analysis of the characteristics of taxi data, and the starting and ending areas are divided. Then for the data within the region, this paper chooses the clustering segmentation algorithm for demand clustering, and calculates the location of the station based on the passengers' travel intention cost. After the site selection model is determined, this paper considers the characteristics of the time window, constructs the planning model of the site time window, and uses genetic algorithm to solve it. Then a customized bus route planning model with the lowest comprehensive cost as the objective function is constructed by considering the benefits of bus companies and passengers respectively.

Finally, based on the research of customized bus theory, this paper takes the track data of taxis in Hangzhou as an example. According to the data processing method determined in this paper, MATLAB software is used to solve and the potential customized bus travel demand is mined. After obtaining the travel demand data, the optimal site selection scheme is solved through the constructed site selection model, and the most reasonable planning scheme of the station time window is calculated by using the simulated passenger application information. Finally, according to the solution results, the customized bus operation scheme with the lowest total cost is solved by using the path planning model. This paper deepens the research

on the customized bus theory, provides a reference for the application of the theory in practice, and provides an alternative plan for the study area to set up customized bus in the future.

**Key Words: Urban Traffic; Customized Shuttle Bus; Site Selection; Site Time Window; Path Optimization**

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 国外研究现状.....	1
1.2.2 国内研究现状.....	3
1.3 研究目的与意义.....	5
1.3.1 研究目的.....	5
1.3.2 研究意义.....	6
1.4 研究内容与方法.....	6
1.4.1 研究内容.....	6
1.4.2 研究的方法.....	8
1.5 研究的技术路线.....	8
本章小结.....	9
第二章 定制公交相关理论概述 .....	10
2.1 定制公交的概念及特点.....	10
2.2 定制公交系统构建的影响因素 .....	11
2.3 出租车数据作为定制公交出行需求分析的可行性 .....	12
2.3.1 定制公交与出租车的关系.....	12
2.3.2 出行需求获取方式.....	13
本章小结.....	14
第三章 合乘站点和站点时间窗的确定 .....	15
3.1 起讫区域的确定.....	15
3.2 合乘站点的选址规划模型 .....	16
3.2.1 站点选址模型思路与原则.....	16
3.2.2 方法及概念介绍.....	17
3.2.3 定制公交站点选址模型.....	18
3.3 站点时间窗的求解模型.....	24
3.3.1 上车站点时间窗的规划模型.....	25
3.3.2 模型算法.....	26
本章小结.....	27
第四章 定制公交路径规划模型 .....	28
4.1 路径规划模型问题描述.....	28
4.2 模型的思路.....	29
4.3 模型假设.....	29

4.4 模型构建.....	29
4.4.1 符号含义.....	29
4.4.2 设定目标函数.....	31
4.4.3 建立约束函数.....	34
4.5 模型算法.....	36
本章小结.....	38
第五章 实例分析 .....	39
5.1 定制公交起讫区域计算.....	39
5.2 定制公交站点选址规划.....	45
5.3 定制公交站点时间窗规划 .....	47
5.4 定制公交运行路径的规划 .....	53
本章小结.....	56
第六章 结论与展望 .....	57
6.1 结论.....	57
6.2 展望.....	57
参考文献.....	59

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

自改革开放以来，交通与经济的关系一直都是相互促进，相互提高。经过长时间的不断优化调整，我国的交通行业整体上已经取得了巨大的进步，其中城市公共交通行业进步尤为明显。例如，公交的线网覆盖率大大提升，地铁的服务区域也在快速增大。随着这些交通工具的不断发展以及低碳环保理念的宣传，使得公共交通已经成为了人们日常出行所选择的主要交通方式，因此减少私家车出行的次数，不仅响应了国家的节能减排的号召，同时也降低了道路的拥堵程度。在这种大环境下，提高公共交通的竞争力已经成为城市发展的主要目标。

但是当前的交通发展水平与经济发展水平并不是完全匹配的，在某些时间段，以当前的交通水平来承载城市的出行需求仍较为吃力。随着城市化进程的发展，城市居民的工作区域和居住区域分离开来，由此而形成的居民早晚高峰通勤，使得城市交通拥堵状况更加严峻。在城市的出行高峰时间段中，往往大量出发或到达会在相同时间段内集中在同一个区域中，这就非常考验公共交通的集散能力，而现实情况就是面对这种挑战，现有公共交通仍然无法很好的解决。

不止于此，经济提高之后，人们对于出行舒适度的要求也在提高，拥堵的道路以及公交车内部拥挤的状况明显不符合人们的要求，为了解决城市高峰期道路拥堵和公共交通工具满载率过高的问题，国内外专家学者研究了很多种解决方案，其中，考虑到当今社会的智能手机的高度推广程度和移动互联网的发展的背景，选取了定制公交的方案来解决当前问题。这种方案使得公交的服务更具有针对性，提供给乘客的服务介于常规公交和私人出行交通工具之间。在舒适度和经济性两种属性之间做到了一种平衡。定制公交的出现，补充了定点、定时段的城市公共客运服务，精准确定了出租车和公交车之间的市场供给的空白，方便了居民的出行，提高了居民的出行满意度。

### 1.2 国内外研究现状

近年来，许多国内外学者对定制公交系统开展了诸多研究，他们利用大量出行数据，制定出很多种类型的试验计划并实施，验证了很多有关定制公交的理论的合理性，并提出了很多新的研究思路。以下为国内外相关学者的研究总结。

#### 1.2.1 国外研究现状

Palmer<sup>[1]</sup>通过对美国大型公共交通系统的分析，评估了定制公交系统的成本和收益

的比例。结果表明,定制公交系统对乘客的吸引程度很高,是一种发展前景广阔、盈利能力强的出行方式。

Wang<sup>[2]</sup>首先建立了描述定制公交运营过程的多目标函数,并设计算法进行求解最终验证了模型的准确性。该运营方案既满足了乘客的出行需求,提升了乘客出行的满意度,降低了出行的成本,减少了出行的时间,又达到了提高公交公司收益的目的。

Lyu Y<sup>[3]</sup>提出了定制公交的线路规划框架,优化定制公交系统,提出了能够同时处理多个目标的模型,通过制定的启发式算法框架,使公交公司的利润最大化,提高公司的服务质量。最后通过对南京现有的出租车的运行轨迹进行实例分析,发现该研究不但能够令公交公司获得最高的利润,还可以使居民的出行时间最短,出行效率最高。

Liu<sup>[4]</sup>分析了在中国开展公交定制服务的城市中,公共交通服务模式创新的发展过程。通过对定制公交运营过程中乘客需求的调查与收集、运营路线规划、运营时间安排、车辆调度、票价与收益等方面的综合分析,证明新型定制公交理念能够满足乘客日益增长的出行需求。

Nikolic M<sup>[5]</sup>在规划定制公交路线和站点的过程中引入了蜂群优化算法。蜂群优化算法的优化过程基于群体智能算法,研究结果表明该方法能较好地解决规划问题。论文所述的方案及具体方法,对于居民的个性化出行请求,可以做出良好的应对。

DE LORIMIER A<sup>[6]</sup>在对加拿大某城市的定制公交系统进行分析的过程中,对影响定制公交使用效率的关键因素进行了多层次回归分析。该方法获得的有效信息为定制公交线网的规划提供了便利。

Kim M<sup>[7]</sup>构建了没有固定线路的区域模型,该模型可以有效地优化低人口密度区域的出行方式,从传统的公共汽车和出租车系统中,选择合理的运输方式,通过灵敏度分析,在所有的出行方式中,找到最便宜的一种。

Lu<sup>[8]</sup>构建了联合优化模型,解决了乘客在乘坐定制公共交通时遇到的困难,通过决策的灵活调整,提高乘客的乘车体验,适应性强。然后对公交线路和时刻表进行优化,以满足广大用户的个性化和多样化需求。

Chen<sup>[9]</sup>建立了一种混合优化方法。采用离散粒子群优化算法对带时间窗的运营线路规划模型进行求解。同时,采用模拟退火算法降低了得到局部最优解的概率。

Kang L J<sup>[10]</sup>讨论了带时间窗的单线的公交与司机调度问题,分别建立了三种规划模型:公交司机调度模型、公交车调度模型和带时间窗的公交司机调度模型。并设计了一种方法,将其与 CPLEX 相结合生成有效割集。通过对该方法的研究,证明了其具有较高的计算效率,并提出了一种自适应算法来确定驾驶人数和车队规模的取值范围。

WANG J<sup>[11]</sup>说明建立定制公交的目的在于减少传统公交和城市轨道交通在高峰时



段的拥挤程度,方便在传统公交服务强度薄弱的地区的乘客出行,定制公交服务既考虑了传统公交的运营成本的因素,也考虑了私家车以及出租车的舒适度的因素。通过建立 logit 模型,分析了定制公交需求量与其优点之间的关系,发现定制公交的优势越大,乘客的需求量就越大;相反,定制公交的劣势越大,乘客的需求量就越小。

LI D<sup>[12]</sup>以早高峰时段的刚性需求的客流为研究对象,通过对他们进行问卷调查,收集了通勤人员在设定的情景下对定制公交的个人偏好。通过对模型中六个显著的影响因素进行设置,建立了通勤方式选择模型。结果发现,定制公交的票价、车内花费的时间、出行的总时间与乘客的需求负相关。一般情况下,倾向于选择定制公交的人群文化程度较高或者年龄较大,而文化程度低或者年纪小的人群更倾向于选择传统公交出行。

### 1.2.2 国内研究现状

徐康明教授<sup>[13]</sup>对定制公交车的服务理念进行了分析和探讨,系统地研究了定制公交系统的关键要素、开通条件、各方面的运营意义和优势,并得出开发定制公交车具有一定的现实意义的结论,他认为多层次定制公交服务将是未来城市公交系统发展的主流趋势。

刘冬梅<sup>[14]</sup>分析了西安市特定区域的交通信息,结合定制公交的特点,规划了三条直达定制公交线路。此外,他还对定制公交车的运营规律和模式进行了进一步的分析和探讨,其结果可以对城市定制公交车的运营起到很好的指导作用。

江捷<sup>[15]</sup>运用了一种混合分析方法。他分析了定制公交的两种商业模式,计算了它们的成本,并比较了它们的效益。此外,他还进一步分析了两种模式的共性和差异。

王琳<sup>[16]</sup>在其研究中采用了模糊评价的方法。他在总结影响传统公交车站位置的因素的基础上,构建了一个评价公交车站具体位置优劣的函数。他的研究成果可以为公交车站选址过程提供理论指导。

李佳玲<sup>[17]</sup>在定制公交网络规划研究中,分析并优化了站点、路线和网络三个组成部分,提出了四种模式,即点模式、路线模式、线路网络模式和线路网络系统模式。

刘喜<sup>[18]</sup>使用模拟退火算法构造了相应的定制公交线路优化模型。该模型的优化目标函数为车辆总里程,约束条件考虑了满载率限制、最大载客容量限制、车辆行驶长度等。

卢小林<sup>[19]</sup>采用层次分析法建立了结合不同评价指标的灰色关联评价模型,其结果可以定量比较定制公交线路规划的效果。

陆百川<sup>[20]</sup>通过互联网后台监测到的预约出行的乘客数,确定非高峰时段的发车间隔,利用建立的模型求解出公交运行的最短路径,接着分别计算出乘客的广义出行费用和公交公司的运营成本。最后通过对实例的分析,得出结论,柔性发车不但能够减少乘

客出行的广义成本,还能够减少公交公司的运营成本。

雷永巍<sup>[21]</sup>采用 k-mean 聚类分析方法对乘客实时出行数据进行聚类分析,建立实时调度模型。该模型的优化目标是使服务需求率最大化,成本最小化。运用了基于 Hadoop 平台的蚁群算法计算。

孙春阳<sup>[22]</sup>构建了一种双目标的可变路线公交路径规划模型,该模型优先考虑特殊乘客的出行需求。此外,将遗传算法与插入算法相结合,设计了一种路径求解算法,为公交路径规划提供了一种新的方法。

胡郁葱<sup>[23]</sup>建立了一个定制公交的路线规划模型,考虑了多个开始、结束点和多个车辆类型,考虑了乘客的特点,改进了混合遗传算法的染色体编码方式,并通过一个实例验证了该模型具有良好的效果。

曹阳<sup>[24]</sup>提出了对居民出行高峰期的出行成本优化的实时调度模型,在此基础上,对乘客预订出行时间和预计到达时间设置不同的参数,如线路方案优化,通过平衡出行时间和出行成本等要素来保证人们的权益,采用分支定界算法来解决问题。

柳伍生<sup>[25]</sup>以杭州定制公交网为例,建立不同方案下不同车型的比例模型,构建算法求解得到总成本最优的路线方案,结论可以用于指导定制公交的路线规划。

付晓<sup>[26]</sup>提出了一个动态模型来模拟乘客的活动和出行规律,通过研究定制公交车的乘客容量约束和乘客预约行为,很好地模拟了乘客的日常学习和生活的过程。

邵文<sup>[27]</sup>在给定预约需求和车队规模的前提下,构建了基于遗传算法求解的混合模型和公交线路协同优化模型,并与单一车型优化模型进行了对比。结果表明,多车型优化模型的最优目标函数值高于单一车型优化模型,证明了多车型优化模型的可行性。

何民<sup>[28]</sup>建立了考虑公交运营商成本最小和满足乘客出行可靠性和舒适度要求的公交线路设计模型。并通过对算例的计算验证了模型是正确的。

周扬<sup>[29]</sup>设计了需求响应型社区公交系统框架,运用了排队模型,并计算了近似最优车辆发车间隔。通过算例得出了在不同的参数条件下的近似最优车头距离区间,并提出了系统的自适应范围。

张清善<sup>[30]</sup>在深入调查的基础上,结合问卷得出的数据,分析了中央商务区的乘客出行规律,以 logit 模型为基础,建立了中央商务区的公交乘客选择分析模型。通过对乘客出行规律的分析,建立了定制公交站点设计模型,得出了中央商务区的定制公交站点选址的实际方案。考虑定制公交与其他交通方式之间的竞争关系,建立了双层博弈模型,以公交收益最大化为目标制定票价。最后进行实例分析,表明方案是合理可行的。

孙博<sup>[31]</sup>针对现有需求响应型定制公交调度方式,在不涉及个性化出行时间对调度结果影响的情况下,建立了混合整数线性规划模型,并使用 CPLEX 进行算例求解。

简奕灿<sup>[32]</sup>建立了一个公共交通预约意向模型,量化城市居民选择公共交通出行的意愿,从而反映公共交通出行需求的本质,以及影响乘客出行意向的各个因素之间存在的关系。结果表明,小汽车的满意度与居民出行意愿呈负相关。

田万利<sup>[33]</sup>在对定制公交线路的规划过程中,考虑了私家车的保有量、小区所在的地理位置以及乘客需要通勤的距离三个方面,构建了选择定制公交服务区的初始方案,根据乘客手机发送到互联网后台的需求数据,建立了 Logit 模型,对于初选方案进一步确定,最后以成本分析法,对进一步确定出的方案进行经济分析,做出最终的选择。

李云伟<sup>[34]</sup>以乘客手机发送到互联网后台的需求数据为基础,结合现有的道路网络,提出了一种满足乘客提前预约的定制公交站点设计方案,通过运用层次聚类分析方法求出几个站点位置,然后通过模糊 C 均值法,算出最终的站点的位置。在建立模型的过程中,设置了车辆定员数、最长的运行时间、时间窗等约束,以降低公交公司的运营成本和提高对乘客的服务质量为上层规划目标,以乘客出行成本最低为下层规划目标。最后通过算例分析,表明了规划方案是科学合理的。

魏长钦<sup>[35]</sup>以复杂网络理论为基础,对站点的重要程度进行了估计,把重要程度高的站点作为路径优化备用的站点,设置了考虑车辆定员数、最长的运行时间、时间窗等约束条件,以最优的服务质量和最小的出行时间为目标,建立定制公交路径优化模型。最后通过实例分析,表明优化方案是合理的,能够为解决实际问题提供理论依据。

## 1.3 研究目的与意义

### 1.3.1 研究目的

国外对定制公交的理论及概念的研究相比于中国更早一些,对于该领域中理论的分析及实践已经有了很多的经验。在这个领域里面的研究,可以参考借鉴国外的经验。我国将定制公交真正的应用到实际是在 2013 年于北京开通了第一条定制公交线路,对于该理论的应用有了一定的实践。但是需要注意的是,因为与国外的实际情况的不同,不能完全的照搬国外的运营方案,必须要根据我国的实际情况在理论的基础上灵活调整实施方案。

由于起步晚,当前我国的定制公交的理论及实践的发展状况仍然不够全面。对于由城市的高速发展所带来的新的乘客需求,不能做出快速的应对策略。对于乘客的出行需求的细化分析,还有所不足。由于这种运营方案应用的不够广泛以及对定制公交理论研究的不够深入,使得我国定制公交运营系统仍然存在很大的进步空间。

因此,立足于居民更为迫切的出行需求,制定出更为全面的定制公交运营方案,不管是理论研究还是实际应用方面,对当前我国的实际情况来说都是非常重要的。

### 1.3.2 研究意义

本论文针对城市公交系统中有关定制公交路径规划的问题，着眼于杭州市，系统性的提出一套针对高峰期出行密集区域的定制公交路径规划的方案。通过理论与实践的结合，解决当前杭州市居民高峰期出行困难的局面。同时也可以为定制公交未来的发展方向提供参考，主要研究的理论与学术意义具体表述如下：

#### (1) 完善城市交通组织优化设计理论，促进城市交通的可持续发展

论文通过“出行需求转换的分析—出行需求数据的处理—出行请求信息的处理—定制公交路径规划计算”的这一研究流程，提出了一个规划定制公交的新思路，是对城市交通组织优化设计理论体系的重要完善与补充，并且对促进城市交通的可持续发展具有重要意义。

#### (2) 形成一个完整的定制公交路径规划的理论方法

本文从居民出行密集区域的交通出行需求切入，分析需求转换的可行性，进而利用出租车 GPS 数据，确定定制公交出行需求并制定定制公交运行方案，从而解决居民出行困难的问题。

#### (3) 给其他地区的公交运营研究及实施提供借鉴

本论文对杭州市的实际情况进行了分析计算，并且论文构建的模型也有一定的通用性，对于其他有类似出行需求的地区，只需根据当地实际情况做出一些调整而无需更改主体思路，便可直接应用到实际，从而解决居民出行问题，为其他城市的定制公交方案制定提供了参考和依据。

## 1.4 研究内容与方法

### 1.4.1 研究内容

本文在分析并研究了国内外的定制公交的理论之后，调查了我国的定制公交的发展现状，针对于定制公交方案的应用方面，提出了一个更加细化的实施方案：首先是通过分析居民出行需求来确定定制公交设置的区域，本文在此选用了早高峰期间的出租车数据，通过对出租车出行的起讫点进行处理，确定了起讫区域。通过利用聚类算法对出行需求分类，并以此为基础，结合乘客的“出行意愿成本”确定站点位置。之后通过结合实际情况，模拟了乘客的乘车申请信息，对信息进行分析处理，规划出站点时间窗的设置方案，最后根据站点位置、站点时间窗的规划结果，计算出综合成本最低的多车型的定制公交车辆的运营方案。

论文共分为六章，具体结构如下。

第一章：绪论。本章首先调查了定制公交的研究背景，分析了国内外理论研究现状，调查了当前定制公交在我国的实际应用现状。基于理论研究及分析，本文确定了研究目的，并介绍了该研究的意义。然后详细介绍了论文主要的研究内容和研究的方法，为了表述更加清晰，设计了论文结构图和技术路线图。

第二章：定制公交相关理论概述。本章对定制公交的相关理论做出解释，并分析了构建定制公交系统的诸多影响因素。然后对于本文的数据来源进行比较分析，并从多方面论证了将出租车数据作为定制公交出行需求分析的数据的可行性。

第三章：合乘站点和站点时间窗的确定。本章首先介绍了起讫区域的概念以及区域选取的方法流程，并构建了定制公交合乘站点选址模型和站点时间窗的规划模型，对于定制公交合乘站点选址模型，选用聚类分割算法来对出行需求聚类分析，结合乘客的出行意愿成本来计算具体的站点位置。对于站点时间窗的规划模型，提出了一种加权的时间轴来形象的描述文中所述方法。并利用遗传算法来对其进行求解。

第四章：定制公交路径规划模型。本章依据前三章所研究的结果，以乘客和公司的综合成本最低为目标函数，设置了多个约束函数，构建了单一车场的区分车型的定制公交路径规划模型，并设计了遗传算法来对其进行求解。

第五章：实例分析。本文选择杭州市的出租车数据进行实例计算分析，并得到了最优路径规划结果，验证了论文所述模型的准确性。

第六章：结论与展望。本章总结概括了论文的研究内容，分析了研究的不足，并对未来的理论研究工作进行了展望。

论文各部分结构关系图如图 1.1 所示。

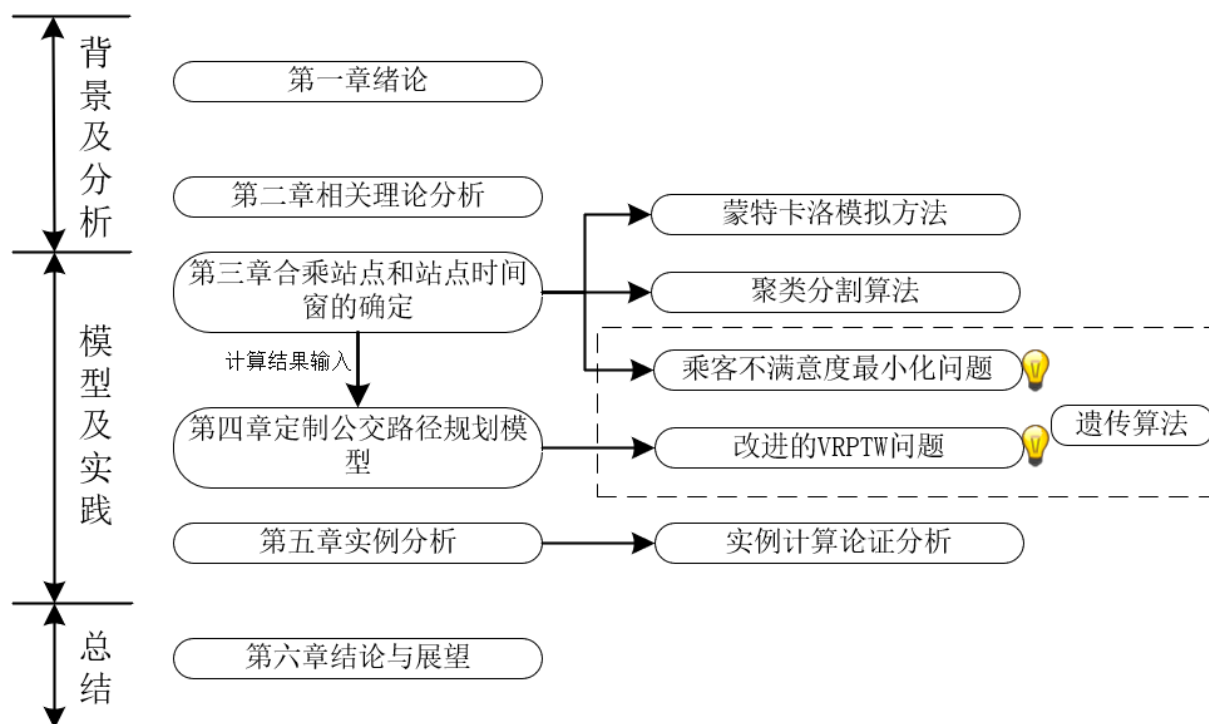


图 1.1 论文结构图

Fig. 1.1 Structure of the paper

#### 1.4.2 研究的方法

本论文研究对象为定制公交的运营方案的制定。因此，根据研究主题，拟采用理论与实践相结合的科学研究方法。论文在综合运用统计学、经济、地理、计算机应用等学科的相关知识的基础上，立足国内公交发展的实际，对论文的研究对象进行分析，并选取杭州市进行实例分析。

#### 1.5 研究的技术路线

论文的技术路线图如图 1.2 所示。

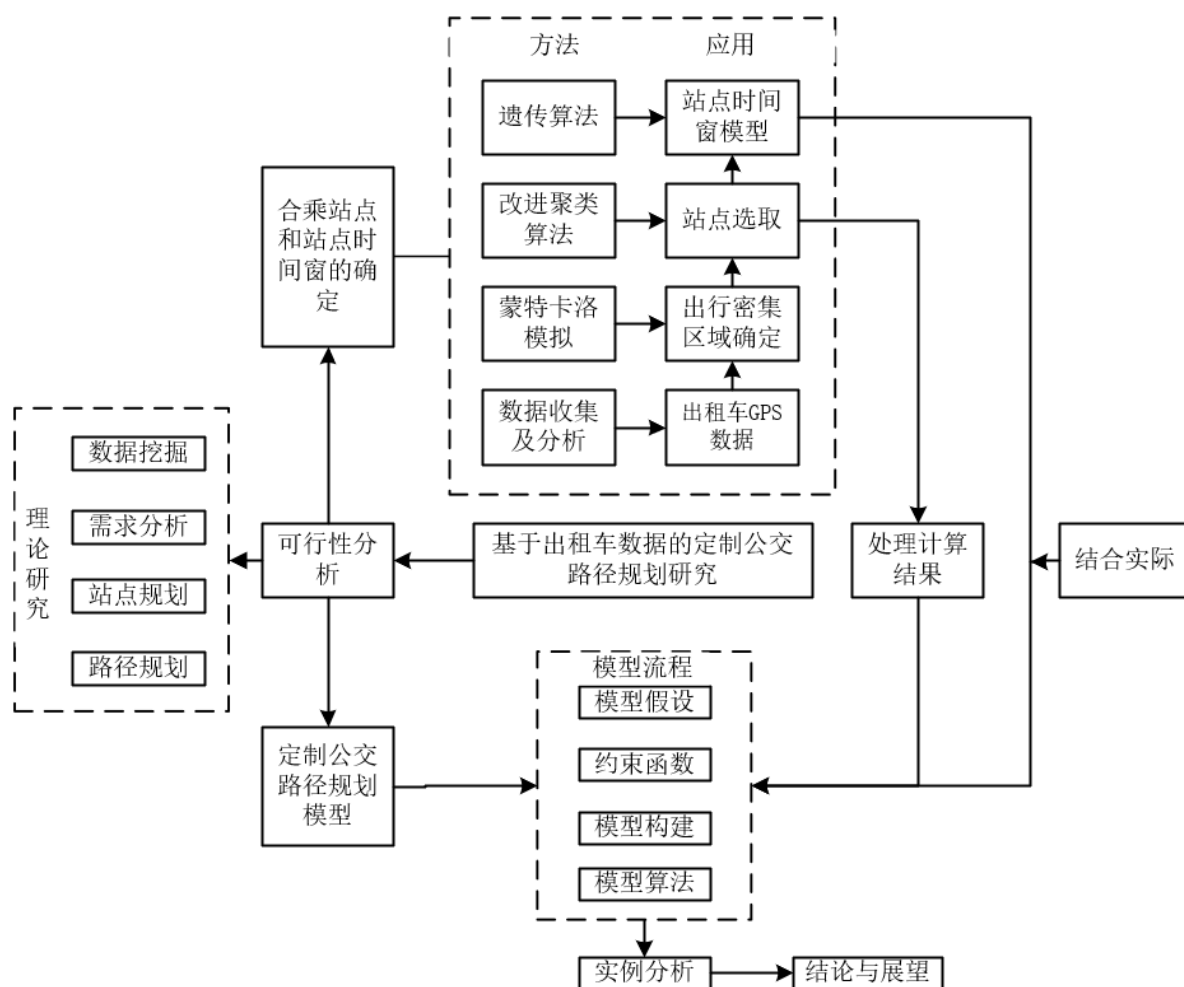


图 1.2 技术路线图

Fig. 1.2 Technology roadmap

## 本章小结

本章分析了定制公交的研究背景及现状，提出了当前交通行业存在的诸多问题，然后对定制公交领域的发展困境做出描述，并基于当前高峰期居民出行问题提出了一种开通定制公交系统的解决办法，之后介绍了本文所述定制公交的规划方案，绘制了文章的结构路线图和技术路线图以使表达更为清晰，使论文结构更加饱满。

## 第二章 定制公交相关理论概述

本文主要研究的是静态定制公交系统的站点、站点时间窗以及路线规划问题，本文依托于互联网以及智能手机等设备，构建一个具有“站点位置确定-上车时间申请-时间窗规划-信息反馈-公交运营”机制的定制公交系统。结合前文对文献的研究以及本文的主要目的，本章对定制公交的相关理论及概念进行论述。

### 2.1 定制公交的概念及特点

传统意义上，常规公交通常设置于居民出行需求较高的地区，在这些地区的居民的出行模式和出行需求量与常规公交的相对固定的时间和路线相适应，使得公交公司可以有足够的经济收益来维持运营。

定制化公共交通是对传统公共交通运营中体现出的缺陷的有效补充，是一种带有高度个性化的运营模式，属于新时期城市公共交通的范畴。定制公交是指根据单个个体的出行需求，为在起点、终点、时间、服务等方面有相似要求的乘客提供定制化公共交通服务的一种方式。定制公交服务站点、线路方向、线路网络、服务时间等都是针对服务对象的定制服务。是一种高效、便捷、灵活、舒适、经济的高品质公共交通方式，不仅拥有私家车“一人一车”的高品质出行体验，而且还具有公交车的经济性，这是其他形式的公共交通所没有的特征。结合现有研究的一些概念，可以将其定义为：在某一服务区域，根据对居民的出行需求信息的整理归类，将起点与终点相似、出行时间近似，舒适度要求适中的人群聚类到一起，从而为此类乘客提供量身定制的优质公共交通服务。

定制公交策略能够有效提升乘客的出行体验，达到直达、舒适的高品质出行目的。定制公交既不同于常规公交在既定线路运行时的到站停车，也不同于出租车的随时随地停车载客。它是一种新型的点对点式公交运营模式，即由公交公司根据客流量的具体情况设计出运行线路，实现在规划区域内由上车点到下车点的运输模式。

定制公交的上下车区域内可能存在一个或者多个站点，通过对上下车区域及站点的整合，从而达到不停车或者少停车的目的，减少乘客因公交车频繁停靠浪费的时间。同时可以为乘客提供“一人一座”的服务模式，相较于传统公交的混乱和拥挤，定制公交则有着更加舒适惬意的乘车环境。所以定制公交已经成为了更多人出行的选择，在缓解城市交通拥堵，最大化利用道路资源，响应绿色出行方面做出了巨大的贡献。而且从票价方面来说，针对用户个性化需求的定制公交服务虽然比传统公交和地铁的票价稍贵，但其票价仍然要远低于出租车或者网约车的费用。



## 2.2 定制公交系统构建的影响因素

定制公交的系统的建设是一个复杂的问题，受多种因素的影响，包括定制条件的局限性、车辆状况的影响、交通需求的影响、车站的影响等因素。

### (1) 定制条件的影响

定制公交成功运营的前提是线路满足定制需求，再考虑其他影响因素。通过对定制公交的特点分析，将定制条件总结如下：

#### ① 车站数量

将定制公交与常规公交区分开来的一个特性是速度。而设置的站点的数量会直接影响着公交运行的速度。

#### ② 线路与站点的匹配度

定制公交线路不存在没有乘客上下车的站点，这就使得定制公交线路与所有站点都有一个匹配的关系，即有一个乘客出行需求的起点，也必须有一个匹配的乘客出行需求的终点。线路与站点的合理匹配是产生有效线路的必要条件。

#### ③ 乘客数量

定制公交车的开通条件不同于传统公交车的开通条件，传统公交车以班次为基础进行运营。然而，定制公交车的开放条件需要满足乘客数量的限制。在一段时间内，如果收到的申请乘车的乘客数量达到规定的最小用户数量则开行定制公交，否则将无法开通。

#### ④ 定制公交信息交互平台

路线的设置与开通和乘客出行需求息息相关，乘客通过网络提出乘车申请，公交公司通过网络收集信息。因此，必须有一个信息交互平台才可以完成“乘车申请—信息反馈”这样一个流程。

### (2) 车辆条件的影响

车的额定载客量和公司拥有的车辆数量在一定程度上影响了公交路径的制定。二者体现了公交公司的运载能力，当运载能力严重不足的时候，简单的调整运营方案已经无法解决根本问题了。此时必须增大运载能力。

### (3) 交通需求的影响

客流量是影响定制公交线网优化的主要因素之一。一般来说，不应该单纯为了乘客的利益而在客流量较低的区域开放定制公交，这将不利于公司的正常经营。合理的定制化公交线网应满足大多数乘客的需求，并具有服务人数多、行程时间短的优点。

### (4) 站点的影响

定制公交线网一般是由“三站”组成，即起点站、中间站和终点站。在优化定制公交网络时，依据居民需求确定起点站、中间站和终点站的位置和覆盖区域。为了更合理地优化定制公交线网，应将起点站和终点站的规划作为约束条件放进公交线网优化方案中。

#### (5) 其他因素

除上述原因外，道路状况、公司调度能力、相关法律政策、当地文化、经济等因素以及城市居民出行习惯等都影响着定制公交网络的优化。此外，驾驶员的驾驶能力、运行速度、停车时间等也会影响整体行驶速度，从而影响整个路网体系。

## 2.3 出租车数据作为定制公交出行需求分析的可行性

### 2.3.1 定制公交与出租车的关系

为了验证出租车数据可以作为定制公交出行需求分析的数据，首先要探讨二者的关系问题。

首先，在乘坐公交和地铁都不够方便的区域内，没有私家车同时还具有一些经济能力的乘客通常会选择乘坐出租车出行。一般情况下，在这种环境中，由于定制公交具有灵活性的优势，会更受乘客欢迎。从其定位来说，定制公交是一种在舒适性和经济性之间达到平衡的一种交通方式，费用与公交车类似，舒适性与出租车类似。从这个思考角度出发，在这种区域范围内，部分乘客会从出租车出行转向定制公交出行，即乘客对出租车的需求可以转化为对定制公交车的需求。

其次，还要思考定制公交相比于出租车的优势，对于有通勤需求的乘客而言，定制公交不光有价格的优势，还兼具出行时间的保障。因为对于这类乘客而言，不能每天都保证可以及时的遇到可以搭乘的出租车，这种情况就有可能导致上班迟到。而定制公交因为对站点设置了时间窗，通过对路线的优化使得公交车辆可以最大限度的满足各个站点的时间窗要求，所以对于有通勤需求的乘客而言，定制公交更为合适。

同时，对于出租车数据的分析也可以得出出行热点区域和到达热点区域，可以得知该区域的常规公交覆盖程度不够，此时不仅有出租车，还会有其他出行方式承担居民出行任务，此时若对此区域增设定制公交，可有效缓解该区域交通压力。

最后，通过研究现有文献，如韩志玲<sup>[36]</sup>对定制公交的出行需求的研究中，在通过理论探索后，认为出租车和定制公交具有一定的相似性，是可以互相替代的，所以得出结论，将出租车数据作为定制公交出行需求分析的数据具有可行性。刘祺<sup>[37]</sup>分析了出租车的缺陷，认为有必要发展定制公交来取代一部分出租车。所以本文得出结论，将出租车数据作为定制公交的出行需求数据分析是可行的。

### 2.3.2 出行需求获取方式

目前,获取定制公交出行需求的方法有很多,每种方法都有自己的优缺点。对比分析现有的定制公交出行需求获取方法,如表2.1所示。

表 2.1 出行需求数据获取方式  
Table 2.1 Access to travel demand data

获取途径	数据类型	优点	缺点
人工调查	乘客出行需求	能够获得乘客的个性化出行数据	获取难度大
网络问卷调查	乘客出行需求	过程简单,结果容易统计并分析	数据可利用程度不高
公交运营公司提供	公交IC卡数据	数据量大,准确度高	乘客下车数据无法直接获取
网约车服务平台提供	网约车出行的脱敏数据	数据量大,准确度高	暂时没有数据开放平台
出租车公司提供	出租车GPS数据	数据量大,准确度高	暂时没有数据开放平台
数据统计平台购买	出租车GPS数据等	数据量大,对于数据调查真实性有保证	所需费用较多

(1) 人工调查:虽然可以获得乘客的个性化出行需求数据,但由于需要巨大的人力物力等成本,调查难度大,对于此方法本文不做过多考虑。

(2) 网络问卷调查:虽然方法简单,但既有研究认为采用网络调查的方法有以下缺点。

① 收集的调查结果中的有效的乘客出行需求数据不足,数据可靠性不足且缺乏代表性。

② 对于出行方式的临时变更无法做到及时统计。

(3) 公交运营公司提供:虽然通过这种方式获取的公交IC卡的数据量很大且准确度很高,但是没有直接反映下车站点的客流数据,所以无法获得准确的OD数据。

(4) 网约车服务平台提供:利用向平台申请的网约车出行的脱敏数据,作为定制公交的出行需求分析,具有数据量大、准确度高且可以免费获取的优点,但需要对数据进行处理,同时,现有数据平台如滴滴盖亚数据开放平台已关闭,其他平台也暂时无法获取数据。

(5) 出租车公司提供:出租车公司对于出租车的数据采集包括全天的车辆位置、载客状态以及时间等信息,这种量级的数据经过简单处理后,可以直接体现居民的出行需

求分布, 而且数据可靠性高, 但是目前无法从出租车公司获取这些数据。

(6) 数据统计平台购买: 其利用自身对数据的统计及处理能力, 联合政府或其他机构, 共同对数据进行获取并统计等操作。从这类平台上获取数据, 优点是数据准确, 数据量大, 获取较为容易, 但同时也需要对初始数据进行处理, 缺点就是需要购买, 并且对于定制化的数据采集, 所需费用较多。

通过以上分析, 发现前五种方法都存在着一些较大的弊端, 最后一种方法虽然花费较多但是相比较可行性更高。因此, 通过购买数据统计平台的出租车的数据用作定制公交出行需求分析最为合适且准确。经过调查, 选择拓端数据科技平台, 本文所研究的就是从该平台购得的2019年9月24日杭州市全市的出租车的轨迹数据。

综上所述, 确定了通过购买数据统计平台的数据进行需求分析是可行的, 为后续的数据分析提供了理论上的支持。为了使人们由出租车出行转为定制公交出行, 将乘客根据自身出行需求送达目的地, 选择合适的站点并规划出合理的站点的时间窗就显得尤为重要。而本章内容的研究也确认了这一环节的合理性。

## 本章小结

本章首先介绍了定制公交的基本概念及其特点, 之后通过定制条件的影响、车辆条件的影响、交通需求的影响、站点的影响和其他因素等几个方面展开叙述了定制公交系统规划的影响因素。在结尾处介绍了论文的数据来源, 并论证了将出租车数据作为定制公交的出行需求数据分析的可行性, 通过对出行需求数据获取的六种方式的比较, 得知前五种方法都不适合, 最后一种方法虽然花费较多但是相比较更为合适。通过本章的理论研究, 确定了论文主体思路的正确性, 支撑了后续的站点及站点时间窗的规划模型的构建。

### 第三章 合乘站点和站点时间窗的确定

本章重点是构建起讫区域的站点选址模型和站点时间窗的规划模型。首先本文研究了起讫区域的确定方法，再根据区域内的居民出行需求确定合乘站点，之后根据已确定的站点来接受居民的乘车申请信息。因此，在制定定制公交方案的过程中，首先就是公交站点的选址，这不仅会影响到公交公司制定公交车辆运行路线，也关系着居民乘车的便捷程度。

依照研究思路，考虑先确定起讫区域站点布局的问题。而要在一个城市中确定一些公交站点，首先就要根据城市居民的出行需求来确定出行需求密集区域的位置和范围，之后统计出该区域内的居民的出行需求，利用聚类算法划分出各个站点区域，并结合“出行意愿成本”的来确定各合乘站点的具体位置，根据实际道路情况来调整结果。然后构建定制公交上车站点时间窗的规划模型，根据乘客的乘车申请信息中的时间要求来规划上车站点的时间窗，通过设置乘客不满意度来评价时间窗的计算结果，并选择了遗传算法来求解时间窗的规划模型。

#### 3.1 起讫区域的确定

本文所描述的定制公交起讫区域，就是公交车接乘客的起点区域和送乘客的终点区域，且起点区域和终点区域均设定为圆形，合称为起讫区域。

在确定了论文的主体思路，并且分析了出租车的轨迹数据用作定制公交出行需求分析的可行性之后，本文首先对数据进行收集，并在收集之后做出整理和分析，步骤如下。

(1) 对收集到的杭州市出租车 GPS 数据进行初步处理。删除在收集过程出错而导致的错误数据或者空白数据。

(2) 乘客出行的起点和终点位置识别。利用出租车数据中的车辆载人情况信息、车辆代号信息以及经纬度和时间，设计确定起点和终点的逻辑，编制 MATLAB 脚本程序，来求解乘客的上车和下车位置。计算出起讫点位置数据后，在地图中标记出位置范围，并与本文研究范围相比较，之后删除多余部分数据。

(3) 分析研究范围内的居民的出行需求特征。将居民出行起讫点绘制成热力图、居民出行路线图、按时间分布的出行数量折线图等，在时间上和空间上对居民的出行需求特征进行分析。

(4) 根据出行需求时空上的特征，运用蒙特卡洛模拟方法，找出居民出行起点最多的区域，再根据该区域中的数据，确定相匹配的终点最多的区域，即定制公交起讫区域。

## 3.2 合乘站点的选址规划模型

在确定了定制公交起讫区域的位置之后,即可通过筛查数据了解到相应区域的居民的出行需求分布状况。由于集中起来的乘客需求才会有利于定制公交的站点选取,因此本文考虑将居民的出行需求通过聚类,在空间上进行归类合并。本小节将在起讫区域确定之后,构建出定制公交的合乘站点的选址模型,利用聚类算法划分出各个站点的区域,结合乘客的“出行意愿成本”进行加权计算求得最终的站点位置。

### 3.2.1 站点选址模型思路与原则

#### (1) 选址思路

为了给居民的日常出行提供更好的服务,提出了定制公交的思想,通过对居民出行时间和出行起讫点进行归类,为出行需求相同或者类似的居民提供定制公交的出行服务。本小节所述的选址规划,就是在分析出行时间规律之后,对出行起讫点相似或一致的乘客进行需求分析,灵活运用聚类的方法,对这个群体的出行地点归类整理,进而确定站点位置,方便居民乘车。为后续的定制公交路径规划做基础。

在聚类完成后,对站点位置进行计算的时候,本文考虑了乘客之间对步行距离的敏感度的不同,不仅利用空间距离,还通过加入乘客的“出行意愿成本”作为权重来计算站点位置,以此来求得易被更多乘客所接受的站点位置。具体计算步骤为通过查阅文献,确定乘客可接受步行距离的平均水平,再根据此距离的二倍值,利用聚类算法确定站点服务区域,之后,通过出租车的载客的轨迹点计算出乘客的出行路线,在按照调查得到的出租车载客费率计算出各个乘客的“出行意愿成本”,将“出行意愿成本”作为权重,结合聚类中心计算公式得到定制公交起讫区域的站点位置布局,最后根据实际路网调整站点位置。

#### (2) 定制公交站点设置原则及假设

本文制定的站点选址规划模型遵循以下原则及假设:

- ① 任意两个站点之间距离不会过近或过远。
- ② 站点的数量合理,避免数量过多增大公交车的运行时间,数量过少增大乘客的步行距离。
- ③ 本文所用出租车 GPS 数据假定每次出行为单人出行,即出租车中只有一人。
- ④ 对站点位置的规划,本文只考虑数据所体现出的结果。
- ⑤ 选定的站点的服务环境可以满足乘客正常上下车的需求。
- ⑥ 出租车费用计算,忽略其原有实际路线,仅使用乘客乘坐出租车的单次出行运行轨迹来计算。

3.2.2 方法及概念介绍

(1) 聚类方法的比较

本文首先对常用的聚类算法进行比较研究，以确定本文选用的对站点进行聚类的方法。

① 基于划分的算法：对于该方法，首先设定一个划分的类别数  $K$ ，之后对数据按照某一规律进行划分，最终结果为划分出  $K$  类。对于该类型聚类方法，常见算法有  $k$ -means、 $K$ -Mediods。

② 基于层次的算法：该算法分为两种，分别为凝聚式和分裂式，其中凝聚式是一种从下向上聚类的算法，首先将各个数据看作是单独的一类，然后通过提前定下的规则进行聚合归类，最终达到要求为止；而分裂式是一种从上向下拆分的算法，首先将数据统一作为一类，然后通过提前定下的规则进行拆分，最终达到要求为止。具有代表性的算法如  $BIRCH$  算法、 $CURE$  算法。

③ 基于密度的算法：根据预定的密度规则在低密度区域进行筛选，将其中高密度区域的样本点分割出来。具有代表性的算法有  $DBSCAN$  算法、 $OPTICS$  算法。

④ 基于网格的算法：利用网格对对象空间进行抽象化处理，并对其聚类，具有代表性的算法有  $STING$  算法。

⑤ 基于模型的算法：给定每一类的假定模型，利用数据来进行模型拟合。 $SOMS$  算法是其中的代表性算法。方法总结如表 3.1 所示。

表 3.1 聚类方法总结  
Table 3.1 Summary of clustering methods

算法类别	算法的优点	算法的缺点
基于划分的算法	简单高效、复杂度低	需预设初始值、对噪声和离散值敏感
基于层次的算法	可解释性好、不依赖初始值的选择	计算复杂度较高
基于密度的算法	对噪声不敏感、能发现各种聚类形状	结果受初始参数影响较大
基于网格的算法	速度快	对参数敏感、无法处理不规则数据
基于模型的算法	以概率形式展现类别的划分	运算效率低

方法之间没有绝对的优劣之分，不同的环境下有不同的最优的算法，所以在分类比较了各个聚类算法之后，通过各个方法之间的对比，考虑到本文在这一部分需要计算的数据量不多，且不能被初始设置的参数所影响。最终选择了最适合本文逻辑的凝聚式层

次聚类算法作为本文站点规划模型的聚类方法。相比较而言,该方法更能达到论文所述的站点规划目的。通过自底层向上层对数据进行聚类,通过二倍的乘客可接受的步行距离作为聚类分割阈值,再通过引入乘客的出行意愿成本作为权重进行计算,符合论文的计算要求。虽然该方法同样有缺点,但是相比于其他方法而言,可以忽略其缺点。故在此选用这种方法。

## (2) 出行意愿成本的概念及计算方式

在明确了选用何种聚类的算法之后,接下来对本文聚类过程中的关键因素“出行意愿成本”进行介绍。本文定义的“出行意愿成本”是指乘客可接受的为了自身的出行需求而支付的费用,由于原始数据是出租车轨迹点数据,因此假设乘客实际支付的费用为乘客愿意支付的费用,即“出行意愿成本”,然而原始数据中没有出行费用数据,故根据数据发生时间的杭州市出租车的计价规则和出租车轨迹数据,对行程费用即“出行意愿成本”进行计算。

### ① 运行距离的计算

在此进行简化计算,将出行的各个轨迹点之间的距离利用欧氏距离计算公式计算,并依次加和得到路程长度。对于点与点之间的距离计算的问题,更多情况下会选择欧式距离计算公式进行求解,例如, $p(x_m, y_m)$ 、 $p'(x_n, y_n)$ 两点的欧式距离如式 3.1 所示。

$$\text{dist}(p, p') = \sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2} \quad (3.1)$$

### ② 运行时间的计算

取终点的时间和起点的时间作差即可得到出租车单次载客运行时间。

### ③ 出租车计价规则

经过调查,数据记录时间,即 2019 年 9 月,杭州出租车 3 公里之内为 11 元;超过 3 公里且小于 10 公里的按每公里 2.5 元收费,行驶距离在超过 10 公里的部分额外收取 50% 的费用,作为空车返程补贴;如因道路通行不畅或乘客要求而停车,每停车 4 分钟按运行 1 公里计费。

### ④ 计算出行意愿成本

通过调查杭州市出租车计价规则,及统计出行起讫点路线数据,通过 MATLAB-2022a 编写脚本运算可得乘客的实际出行费用,本文将此费用表示为乘客愿意为了出行所承担的成本即出行意愿成本。

## 3.2.3 定制公交站点选址模型

经过前文的分析,确定了定制公交站点选址模型流程,流程图如图 3.1 所示。



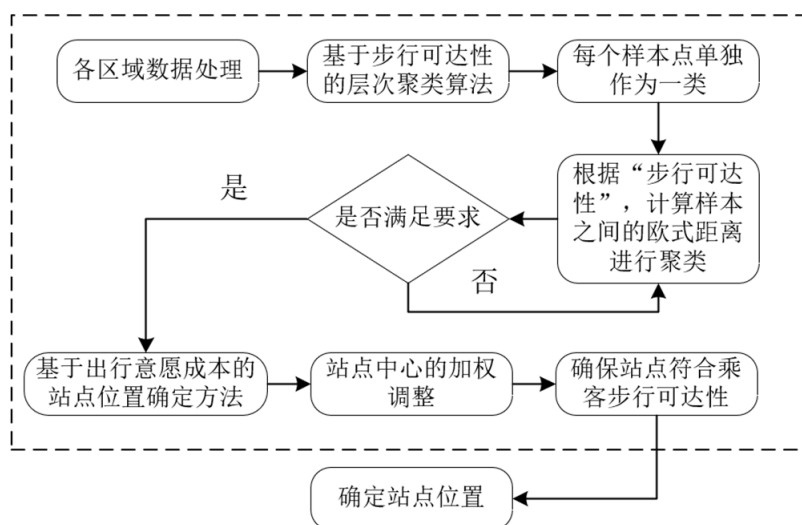


图 3.1 定制公交站点选址流程图

Fig. 3.1 Customized bus site selection process

### (1) 基于层次算法的出行需求聚类

根据前文所述，确定了出行需求聚类方法的示意图如图 3.2 所示。

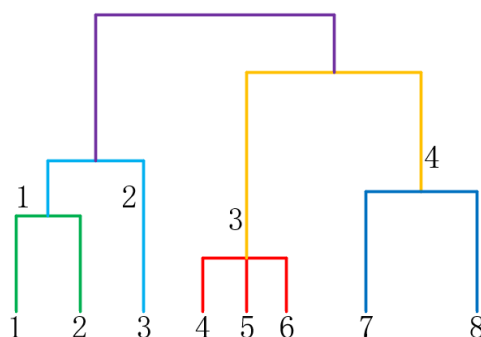


图 3.2 凝聚式层次聚类法示意图

Fig. 3.2 Schematic diagram of condensed hierarchical clustering method

在确定了聚类的方法之后，需要进一步地选定类别间距离的设立标准以及确定“聚类分割阈值”。此处选择公式 3.1 计算两点的距离。通过距离的形式来表示差异性大小。

类别间距离确定方法分为 4 种类型，对于给定的聚类簇  $C_i$  和  $C_j$ ， $dist(p, p')$  表示点  $p$  和点  $p'$  之间的距离， $n_i$  和  $n_j$  表示聚类簇  $C_i$  和  $C_j$  中个体数量。

① 平均距离法：将两类中所有个体两两之间距离的均值作为两类的距离。如公式 3.2 所示，平均距离法示意图如图 3.3 所示。

$$d_{avg}(C_i, C_j) = \sqrt{\frac{1}{n_i n_j} \sum_{p \in C_i} \sum_{p' \in C_j} dist^2(p, p')} \quad (3.2)$$

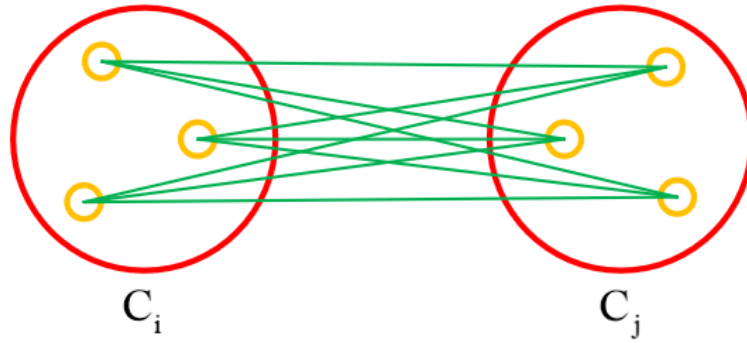


图 3.3 平均距离法示意图  
Fig. 3.3 Schematic diagram of mean distance method

② 最小距离法：将两类之间距离最小的个体间的距离作为两类之间的距离。如公式 3.3 所示，最小距离法示意图如图 3.4 所示。

$$d_{min}(C_i, C_j) = \min_{p \in C_i, p' \in C_j} dist(p, p') \quad (3.3)$$

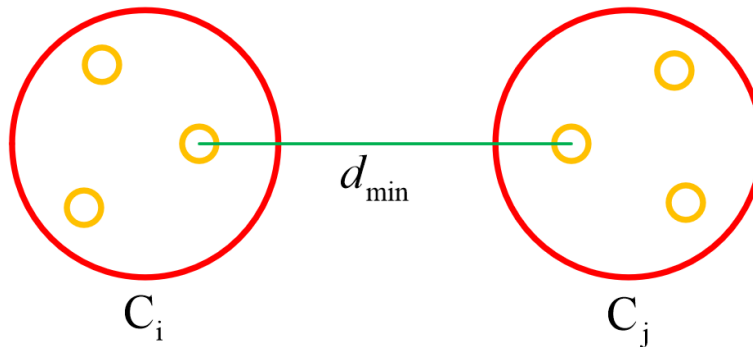


图 3.4 最小距离法示意图  
Fig. 3.4 Schematic diagram of minimum distance method

③ 最大距离法：将两类之间距离最大的两个个体间的距离作为两类之间的距离。如公式 3.4 所示，最大距离法示意图如图 3.5 所示。

$$d_{max}(C_i, C_j) = \max_{p \in C_i, p' \in C_j} dist(p, p') \quad (3.4)$$

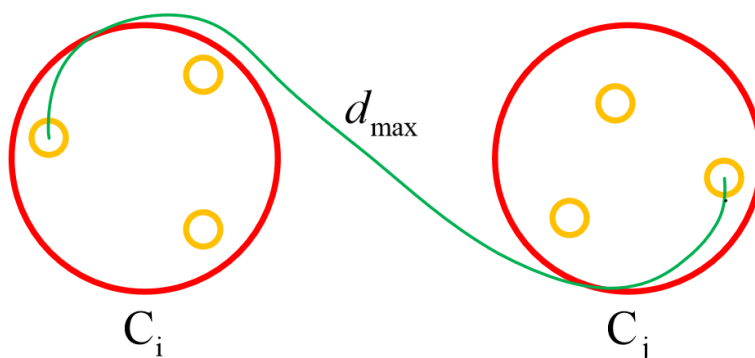


图 3.5 最大距离法示意图

Fig. 3.5 Schematic diagram of maximum distance method

④ 重心法：将两类的重心之间的距离作为两类之间的距离。如公式 3.5 所示，重心法示意图如图 3.6 所示。

$$\bar{d}(C_i, C_j) = \text{dist}(\bar{p}, \bar{p}') \quad (3.5)$$

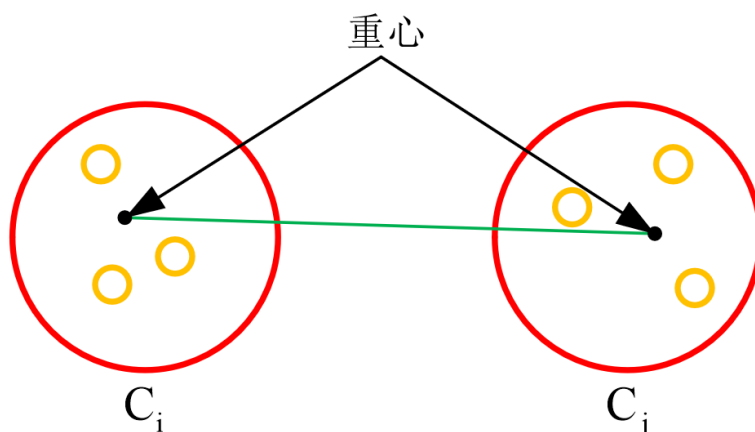


图 3.6 重心法示意图

Fig. 3.6 Schematic diagram of barycenter method

通过对以上四种方法的分析和比较。其中平均距离法是求解两类中的点之间的距离的均值。计算更为方便，且更为合理的考虑了所有的点。因此本文在此利用平均距离法来计算聚类算法中的两类间的距离。如图 3.7 展示了聚类合并的情况。对于二维空间中两点在凝聚式层次聚类开始时， $p$  和  $p'$  两点分别为独立的两类。然后计算两类之间的平均欧式距离，当其值小于乘客步行可达距离的二倍值时就对其进行合并。

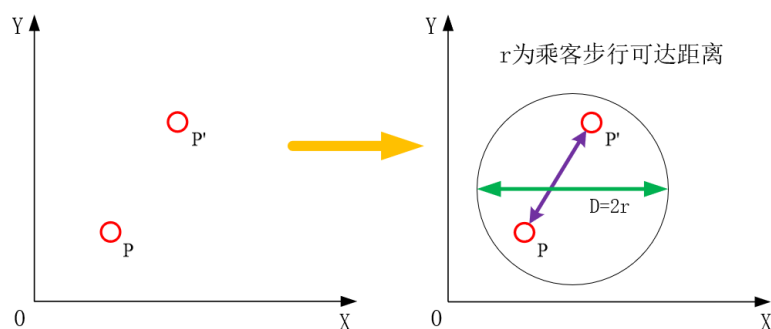


图 3.7 聚类合并示意图

Fig. 3.7 Clustering combination diagram

对于定制公交起讫区域的乘客需求，均采用以上的方式进行聚类，直至把起讫区域内的所有乘客需求都完成聚类，并得到层次聚类的树状图。然后对树状图进行切割分类的操作，考虑乘客步行距离的影响，以乘客可接受的步行距离的二倍值作为“聚类分割阈值”。通过“平均距离法”对类别中样本数据进行计算，当距离小于或等于“聚类分割阈值”时，则合并为一类，若大于“聚类分割阈值”，则成为独立的类。如图 3.8 所示为“聚类分割阈值”对树状图的切割。

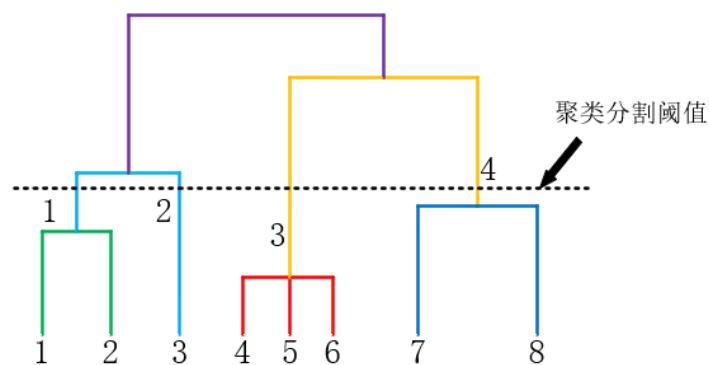


图 3.8 聚类分割阈值示意图

Fig. 3.8 Schematic diagram of clustering segmentation threshold

在对定制公交起讫区域乘客需求进行分析时，按照以上的方法进行处理，就可以得到乘客需求具体的分类情况以及各类的个数。

## (2) 基于“出行意愿成本”的站点位置确定方法

考虑到不同需求点“出行意愿成本”的不同，利用基于“出行意愿成本”的聚类中心确定方法对站点位置进行确定。

“出行意愿成本”表示乘客在基于对现有交通工具出行价格了解的基础上，愿意为

本次出行所花费的价格，基于“出行意愿成本”对站点位置进行加权处理的想法，主要是考虑到了乘客的差异性，具体体现在不同的乘客对于出行总成本的支付意愿的差异，对于乘客而言，出行会在步行距离和出行费用之间做出权衡，每个人都会在出行时基于自身情况确定二者的比重。通常情况下，对于一个群体而言，出行意愿成本高的人，对于步行的距离要求也会较高，这些人一般不会接受相对较长的步行距离，而出行意愿成本低的人，对于步行的距离要求就会稍低一些，相比于前者，会更容易因为更低的价格而接受相对更远一些的距离。

传统的需求聚类模型仅仅是考虑乘客需求在地理空间上的分布情况，属于二维层面的需求聚类模型，这也是本小节所做的主要工作内容；并且接下来在此基础上，加入第三维度的变量：“出行意愿成本”，对需求聚类的中心进行确定，这是考虑了不同乘客的出行需求对聚类问题的优化，二维层面的基于空间坐标距离的聚类仅仅是以减少乘客的总体上的步行距离为目标的聚类方法，而加入了“出行意愿成本”可以更好的考虑乘客对出行成本的重视程度的差异性，在站点位置确定时对“出行意愿成本”有所侧重。

在此将“出行意愿成本”作为除空间坐标位置以外的第三变量对定制公交站点位置进行调整。如图 3.9 所示，左图以传统的聚类方法进行聚类，只需要在空间位置上对站点进行聚类，所获得的聚类中心仅与各个需求点之间的空间距离有关，右图表示在传统的聚类中心确定方法中加入了“出行意愿成本”这一变量，将聚类中心由平面引入到了三维空间中，进一步调整聚类中心点，考虑的角度变得更多了，也必然会令结果更符合实际情况。

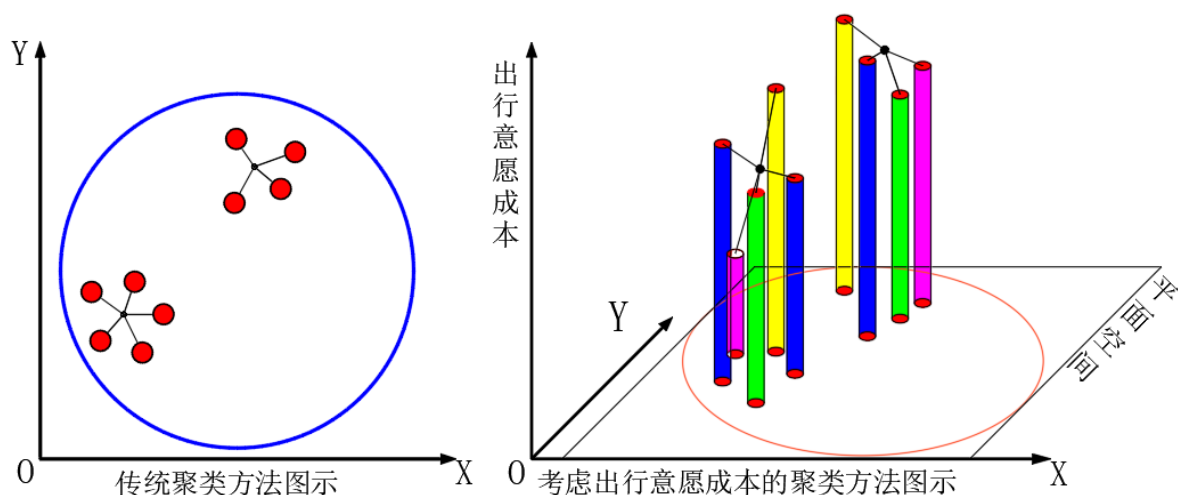


图 3.9 考虑出行意愿成本的聚类示意图

Fig. 3.9 Clustering diagram considering travel intention cost

为了实现图示的目标,需要选择合适的方式在“出行意愿成本”和空间位置坐标两者之间建立联系,在此采用加权的站点中心确定方法,在之前计算中确定的聚类数据的基础上,对聚类中心即合乘站点进行确定,计算公式如式 3.6 所示。

$$\begin{cases} \bar{x}_i = \sqrt{\frac{v_1^2 x_1^2 + v_2^2 x_2^2 + \cdots + v_n^2 x_n^2}{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2}} \\ \bar{y}_i = \sqrt{\frac{v_1^2 y_1^2 + v_2^2 y_2^2 + \cdots + v_n^2 y_n^2}{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2}} \end{cases} \quad (3.6)$$

其中  $\bar{x}_i$  表示站点中心位置的横坐标,  $\bar{y}_i$  表示站点中心位置的纵坐标,  $v_n$  表示聚类需求点  $n$  乘客的出行意愿成本,  $x_n$  表示聚类需求点  $n$  的横坐标,  $y_n$  表示聚类需求点  $n$  的纵坐标。

如图 3.10 所示,完成了传统聚类中心到考虑“出行意愿成本”的聚类中心的转变。

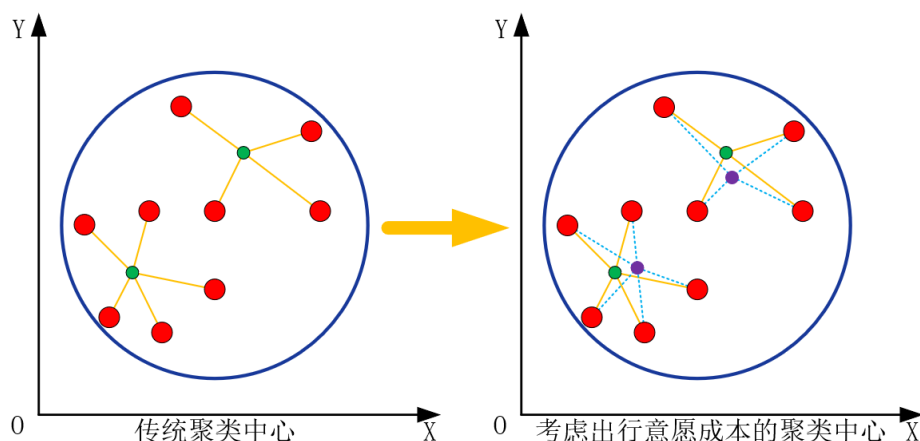


图 3.10 考虑出行意愿成本的聚类中心的转变情况

Fig. 3.10 The transformation of clustering centers considering the cost of travel intention

根据计算所得结果,代入实际情况中,对不适合建立公交站点的选址地点,进行适当合理的调整。本小节的站点选址模型作为定制公交运营模式的基础,保证了乘客的乘车的便捷性,提高了车辆运行效率,是不可或缺的一环,也为后文的时间窗的规划做了铺垫。

### 3.3 站点时间窗的求解模型

在确定了出行的起讫区域和区域内站点位置之后,就需要根据乘客的申请信息为每一个乘客申请乘车的站点设置时间窗以方便路径的规划和乘客乘车。本节所述模型就是为了求解上车站点的时间窗。考虑到所有的乘客在乘车过程中必定是希望自己尽早到达

下车站点的, 本文在此处选择不设置下车站点时间窗, 而是通过以公司和乘客综合成本最低为目标来为下车区域的运行规划路径。故本文只思考上车站点时间窗的规划而不考虑下车站点时间窗的设置。

### 3.3.1 上车站点时间窗的规划模型

为了说明对于上车站点时间窗的计算, 设计了以下较为形象的“时间轴示意法”, 方法介绍如下:

假设某个上车站点所设定的时间窗的数量是  $N$ , 则此时, 乘客的预约信息中的期望时间窗与站点设定的时间窗在时间轴上的分布情况如图 3.11 所示。

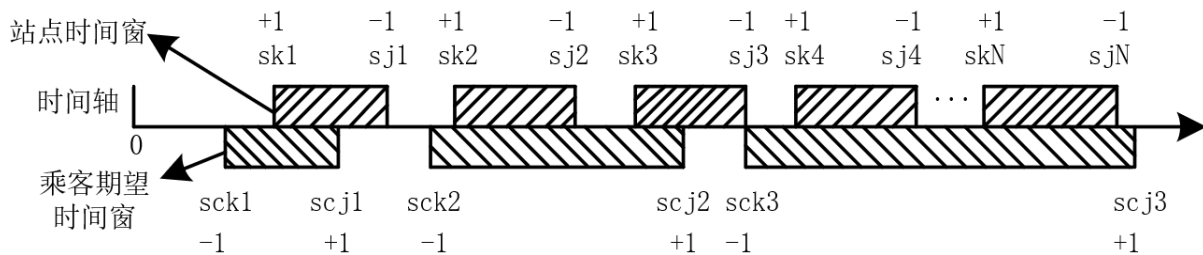


图 3.11 站点时间窗与乘客预约时间分布示意图

Fig. 3.11 Distribution diagram of station time window and passenger appointment time

在图 3.11 中, 时间轴上面的是某一上车站点根据乘客的申请信息设置的站点时间窗, 时间轴下面的是乘客的预期上车时间窗。

对于该时间轴, 零点位置的权值  $P_0$  定义为 0; 对于某一上车站点  $i$ , 每一个站点时间窗的开始时间为  $sk_i$ , 并将该时间点的权值  $P_{sk_i}$  定义为 +1, 每一个站点时间窗的结束时间为  $sj_i$ , 并将该时间点权值  $P_{sj_i}$  定义为 -1; 对于某一乘客  $j$ , 其期望上车时间窗的开始时间为  $sck_j$ , 并将该时间点权值  $P_{sck_j}$  定义为 -1, 其期望上车时间窗的结束时间为  $scj_j$ , 并将该时间点权值  $P_{scj_j}$  定义为 +1。除定义的点外, 所有时间轴上的点的原始权值均为零, 且对于单一乘客来说, 随着时间继续, 权值的大小不断叠加。乘客  $j$  对站点  $i$  的某一时间窗的设置的不满意度为  $CB_{ij}$ , 不满意度的大小等于乘客预约时间窗在时间轴上相对于站点设定的某一时间窗的权值小于零的时间长度。而乘客被分配进某一时间窗的依据为, 当乘客分配进某一时间窗时, 乘客的不满意度最小, 当站点出现两个均可以令乘客不满意度最小的时间窗时, 选择时间靠前的时间窗进行分配。

现将图中乘客 1 进行举例说明:  $sck_1$  之前的时间段的权值为零,  $sck_1$  至  $sk_1$  时间段的权值为 -1,  $sk_1$  至  $scj_1$  时间段的权值为零, 此时可以认为  $sck_1$  至  $sk_1$  时间长度为乘客的

不满意度，且此时该乘客被分配进第一个时间窗的不满意程度最低，所以乘客被分配进第一个时间窗。

设  $T_1$  为站点时间窗的最短时间， $T_2$  为站点时间窗的最长时间， $T_3$  为相邻两个站点时间窗之间的最短间隔时间， $T_4$  为相邻两个站点时间窗之间的最长间隔时间，依据已经预约的乘客的申请信息，为上车站点  $i$  制定一个将所有乘客的预期时间刚好包括在内的时间窗，对其命名为初始时间窗。将其表示成  $[sk_{\min}, sk_{\max}]$ 。如果某站点将要设定出  $N$  个时间窗，就需要在初始时间窗  $[sk_{\min}, sk_{\max}]$  内进行开设。则对于站点  $i$  来说，求解令  $M$  个乘客的总体不满意程度最小的模型如下。

$$\min CB = \sum_{j \in M} CB_{ij} \quad (3.7)$$

$$T_1 \leq sj_n - sk_n \leq T_2, n \in N \quad (3.8)$$

$$T_3 \leq sk_{n+1} - sj_n \leq T_4, n \in N, n+1 \in N, \text{当 } N \geq 2 \quad (3.9)$$

$$sk_{\min} \leq sk_n \leq sj_{\max}, n \in N \quad (3.10)$$

$$sk_{\min} \leq sj_n \leq sj_{\max}, n \in N \quad (3.11)$$

其中，

$T_1$ ：时间窗长度最小值；

$T_2$ ：时间窗长度的最大值；

$T_3$ ：相邻两个站点时间窗之间的最短间隔时间；

$T_4$ ：相邻两个站点时间窗之间的最长间隔时间；

公式 3.7 表示求解结果为乘客总的不满意程度最低；公式 3.8 表示为了保证乘客的乘车满意度，所设置的站点时间窗的长度限制；公式 3.9 为任意两个时间窗之间的最短和最长间隔限制；公式 3.10、公式 3.11 表示上车站点开设时间窗的范围。

### 3.3.2 模型算法

对于 3.3.1 小节中的关于站点时间窗的模型，将所有属于该站点的乘客的不满意程度最低设置为目标函数，将站点时间窗的间隔时间、时间窗的长度、初始时间窗设置为约束函数。考虑到该问题适合利用启发式算法求解，而在启发式算法中，遗传算法因为其结果的迭代天生具有优胜劣汰的规律，同时也不容易陷入局部最优。因此本文选择遗传算法作为上车站点时间窗的求解算法。由于求解时间窗的算法编码方式不是本文的重点研究内容，为了分清主次，突出重点，本文在此不做过多赘述。



## 本章小结

本章首先介绍了出行需求区域选取的流程及方法，对于数据的处理提出了一个明确的思路，构建了站点选址和时间窗的规划的模型，对于站点选址，采取加入了出行意愿成本的站点确定方法来求解，对于上车站点时间窗的规划，设计了带有权值的时间轴的方法来做出说明，并利用遗传算法求解，得到了令整体乘客满意度最高的时间窗的规划方案。并将求解出的结果作为第四章路径规划的数据支撑，为后文的模型构建以及计算做了铺垫。

## 第四章 定制公交路径规划模型

前文中构建了对出租车轨迹数据和乘客申请信息的处理和计算的模型。本章重点就是基于这些方法及模型所得出的结果，构建出定制公交运行路径规划模型。

### 4.1 路径规划模型问题描述

根据第三章所述，在已经确定了定制公交的运营区域之后，计算出了定制公交乘客的各个上车站点位置和下车站点位置以及各站点的时间窗。在此前提下，本章将构建一个以公交公司和乘客的综合成本最小化为目标函数的定制公交路径规划模型。

首先，需要确定本文的模型中可利用的车场和车辆条件，其中车场为单车场，且车场内停放着多辆不同车型的可用于担任定制公交任务的公交车。供乘客上车的站点全部位于起点区域，供乘客下车的站点全部位于终点区域。

其次，公交公司会提前将站点位置信息公布出去供乘客选择，在收到乘客的申请信息之后，制定站点时间窗，并根据本章所述模型及方法制定公交运行路线，并将公交运行时间及路线反馈给乘客。按计划时间及路线完成载客任务。

最后，关于公交车的调度方面，公交车的运行顺序是从车场出发后，先去起点区域的站点接人，再去终点区域的站点送人，并在运输完成之后返回车场重新等待调度命令。定制公交路径方案示意图如图 4.1 所示。

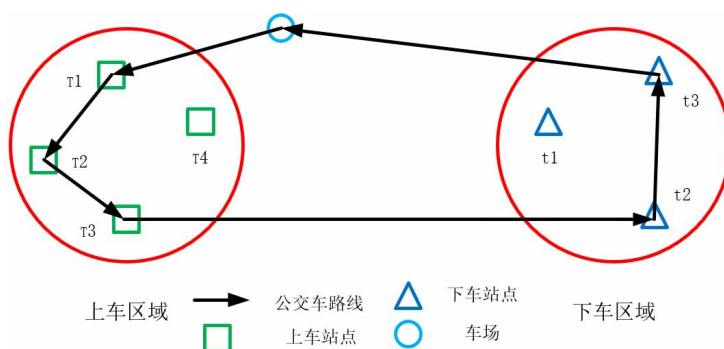


图 4.1 定制公交路径方案示意图

Fig. 4.1 Schematic diagram of customized bus route scheme

## 4.2 模型的思路

通过第二章对现有的国内外文献中所述的理论的研究,大多数的文献在这种定制公交的路线规划模型中,关于时间窗这一部分,给终点区域的站点设置了包含开始时间和结束时间的时间窗,对违反时间窗的运营车辆采取提高成本作为惩罚的方式。但是,在现实生活中,对于大多数人来说,这种情况都是不符合实际的,因为通常情况下居民乘坐公交车会希望更快到站,而不会去向公交公司提交一个包含最早到达时间的申请信息。所以本文考虑从起点区域出发去终点区域的过程以及在终点区域运行过程采取综合成本最低的方式规划路线。同时本文的定制公交系统,对于乘客的申请会全部接受,所以无需再考虑公司因票价而产生的盈利问题,而只需要考虑公交公司的成本和乘客的出行时间成本即可。所以本文构建的模型的思路是通过规划公交的运行方案,令公交公司和乘客的综合总成本达到最低。所求得方案,在长期来看,可以更好的满足划定范围内的居民的出行需求。

## 4.3 模型假设

(1) 乘客对于站点的时间窗没有过于严格的要求,如果公交车在站点的到达及停站时间没有符合自身的要求,不会放弃乘坐公交车,会选择继续等待,但是对于模型而言,由于没有满足乘客所在站点的时间窗要求,将会提高总体综合成本。

(2) 乘客的申请信息包括上车站点、下车站点、最早及最晚上车时间。

(3) 公交行驶区域内道路通畅无阻碍,车况良好,不会出现影响公交车运行的意外事件。

(4) 定制公交在站点间的运行速度平稳不变。

(5) 乘客按照公司反馈的站点时间窗的开始时间到站候车。

(6) 由于区域范围不大,所以假定从起点区域任意站点至终点区域任意站点的票价相等。而系统设定对于符合申请乘车条件的乘客,公司都会提供服务。

## 4.4 模型构建

### 4.4.1 符号含义

$U$  : 包括公交车车场在内的研究区域中的所有站点,即  $U = \{0, 1, 2, 3, \dots, n, n+1, n+2, \dots, n+m\}$ , 0 表示车场;  $BS^+ = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  表示上车区域中上车站点集合,  $BS^- = \{n+1, n+2, \dots, n+m\}$  表示下车区域中下车站点集合,  $BS = \{1, 2, 3, \dots, n, n+1, n+2, \dots, n+m\}$  表示所有上下车站点集合;

- $d_{ij}$ : 站点  $i$  和站点  $j$  的距离;
- $L_{jk}^r$ :  $r$  车型中的第  $k$  辆车在到达站点  $j$  前车上的乘客人数;
- $q_{ij}$ : 从站点  $i$  到站点  $j$  的  $OD$  对;
- $f_r$ : 车型为  $r$  的车辆单位时间行驶成本;
- $\omega$ : 居民的单位出行时间成本;
- $\omega_2$ : 一辆车在车场的闲置成本;
- $\theta_r$ :  $r$  车型公交车从车场中发出的费用;
- $\mu_1$ : 车辆到达上车站点时间早于时间窗的惩罚成本;
- $\mu_2$ : 车辆到达上车站点时间晚于时间窗的惩罚成本;
- $ET_i$ : 站点  $i$  的时间窗下限;
- $LT_i$ : 站点  $i$  的时间窗上限;
- $AT_{ik}^r$ :  $r$  车型中的第  $k$  辆车到达站点  $i$  的时刻;
- $T_a$ : 单个乘客上车或者下车的固定时间;
- $T_{\min}$ : 允许单辆车运行的最短时间;
- $T_{\max}$ : 允许单辆车运行的最长时间;
- $v$ : 车辆的运行速度;
- $\alpha$ : 允许发车的最低满载率;
- $\beta$ : 允许车辆的最高满载率;
- $R$ : 起始条件下, 站场中各车型的集合,  $R = \{1, 2, 3, \dots, r\}$ ;
- $K_r$ : 车型为  $r$  的定制公交车辆集合,  $K_r = \{1, 2, 3, \dots, k\}$ ;
- $Q_r$ : 车型为  $r$  的车辆最大容量;
- $\delta_{ijk}^r = \begin{cases} 1, & \text{车型为 } r \text{ 的第 } k \text{ 辆车从站点 } i \text{ 行驶到站点 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases};$
- $y_{ijk}^r = \begin{cases} 1, & \text{车型为 } r \text{ 的第 } k \text{ 辆车被指派运载 } q_{ij} \\ 0, & \text{其他} \end{cases};$
- $x_{ik}^r = \begin{cases} 1, & \text{车型为 } r \text{ 的第 } k \text{ 辆车在 } i \text{ 站点停靠} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}。$

#### 4.4.2 设定目标函数

本文的路径规划模型同时考虑了公交公司和乘客二者的利益，在定制公交运营期间，对于上车区域，公交车早于站点时间窗到达站点和晚于站点时间窗到达站点都会损害到公交公司和乘客群体的利益。本文将以时间成本的形式来表示各部分费用，同时，由于软时间窗对于定制公交路径规划的要求更为宽松一些，无需考虑乘客流失的问题，使得模型更容易求解。

考虑到公交公司为了运营定制公交服务，在开通初期就需要投入大量的经济成本来保证该方案的顺利实施，因此公交公司通常更希望能够在投入最低的成本的情况下，高质量的服务最多的定制公交的乘客，并以优质的服务来吸引更多的居民选择定制公交出行。至此，就会达到一个良性的循环，既减轻了公交公司的经济压力，又极大的提高了定制公交的市场竞争力。

##### (1) 考虑公交公司的成本

本章所构建的模型中对于公交公司的运营成本的设定，考虑到了公交车的行驶费用、车辆未满足站点时间窗的惩罚费用、从车场发车费用和停在车场中的公交车因闲置产生的费用。

##### ① 公交车的行驶费用

公交车被指派担任定制公交车辆的任务，车辆在道路行驶和在站点等待乘客上下车的过程中，都是需要付出成本的，本文将此部分的成本以时间成本的形式来表示，车辆的行驶成本表示如式 4.1 所示。

$$Z_3 = f_r \cdot \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_r} \left[ \sum_{i \in U} \sum_{j \in U} \delta_{ijk}^r \frac{d_{ij}}{v} + 2T_a \sum_{i \in BS^+} \left( x_{ik}^r \sum_{j \in BS^-} y_{ijk}^r q_{ij} \right) \right] \quad (4.1)$$

##### ② 车辆未满足站点时间窗的惩罚费用

公交车在上车区域运行过程中，无论是早于还是晚于站点时间窗到达车站，都会令公交公司的社会效益受损。此时虽然道路不阻碍通行，车辆状况良好，但是却由于调度计划的问题导致了这一损失，此时该损失成本表示如式 4.2 所示。

$$Z_4 = \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_r} \left[ \mu_1 \sum_{i \in BS^+} \max(ET_i - AT_{ik}^r, 0) + \mu_2 \sum_{i \in BS^+} \max(AT_{ik}^r - LT_i, 0) \right] \quad (4.2)$$

##### ③ 从车场发车的费用和停在车场中的公交车因闲置产生的费用

当公司为定制公交运营方案所配的车的总体运量不大于乘客的乘车请求时，车辆资源得到了充分利用，此时从车场中发出的每一辆车都需要有司机来驾驶，包括聘用司机的费用等。

当公司为定制公交运营方案所配的车的总体运量大于乘客的乘车请求时，对于停在

车场未发出的车辆，虽然不需要司机驾驶，但是却需要支出保养、维护等费用。此时该费用以闲置成本来表示，闲置成本与发车成本的和就是该部分的总成本。如式 4.3 所示。

$$Z_5 = \sum_{r \in R} \left[ \theta_r \sum_{k \in K_r} \sum_{j \in BS} \delta_{ojk}^r + \omega_2 \left( K_r - \sum_{k \in K_r} \sum_{j \in BS} \delta_{ojk}^r \right) \right] \quad (4.3)$$

## (2) 考虑乘客的成本

### ① 车辆早于站点时间窗到达

公交车依照时间表发车并依计划去各站点服务乘客，但是出现了到达站点时间早于站点时间窗的情况，此时该站点要乘车的乘客还没来，所以公交车到站后要在站点等待乘客到站上车，此时，对于已经在车上的乘客来说，同样需要等待。

所以在起点区域，因为公交车在时间窗的开始时间之前到达站点，令车上乘客增加的等待时间转换为时间成本表示如式 4.4 所示。

$$Z_6 = \omega_1 \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_r} \left[ \sum_{j \in BS^+} L_{jk}^r \max(ET_j - AT_{jk}^r, 0) \right] \quad (4.4)$$

### ② 车辆晚于站点时间窗到达

在起点区域，公交车依照时间表发车并依计划去各站点服务乘客，但是出现了到达站点时间晚于站点时间窗的情况，站点的乘客需要在站点等待车辆的到达。

由此引起的乘客多付出的时间，转换为时间成本的形式，如式 4.5 所示。

$$Z_7 = \omega_1 \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_r} \left\{ \sum_{i \in BS^+} [x_{ik}^r \sum_{j \in BS^-} y_{ijk}^r q_{ij} \max(AT_{ik}^r - LT_i, 0)] \right\} \quad (4.5)$$

根据上述分析，将代表乘客时间成本的表达式汇总加和，如式 4.6 所示，将代表公交公司成本的表达式汇总加和，如式 4.7 所示。

$$Z_2 = Z_6 + Z_7 = \omega_1 \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_r} \left\{ \sum_{j \in BS^+} L_{jk}^r \max(ET_j - AT_{jk}^r, 0) + \sum_{i \in BS^+} [x_{ik}^r \sum_{j \in BS^-} y_{ijk}^r q_{ij} \max(AT_{ik}^r - LT_i, 0)] \right\} \quad (4.6)$$

$$Z_1 = Z_3 + Z_4 + Z_5 = \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_r} \left[ \frac{f_r}{v} \left[ \sum_{i \in U} \sum_{j \in U} \delta_{ijk}^r \frac{d_{ij}}{v} + 2T_a \sum_{i \in BS^+} \left( x_{ik}^r \sum_{j \in BS^-} y_{ijk}^r q_{ij} \right) \right] + \mu_1 \sum_{i \in BS^+} \max(ET_i - AT_{ik}^r, 0) + \mu_2 \sum_{i \in BS^+} \max(AT_{ik}^r - LT_i, 0) \right] + \sum_{r \in R} \left[ \theta_r \sum_{k \in K_r} \sum_{j \in BS} \delta_{ojk}^r + \omega_2 \left( K_r - \sum_{k \in K_r} \sum_{j \in BS} \delta_{ojk}^r \right) \right] \quad (4.7)$$

## (3) 双目标转化为单目标

上述模型中各式同时考虑了公交公司和乘客的成本，目的就是寻求一个令二者的综合成本最低的路径规划方案。为了方便评价公交运行路径的优劣，本文将公交公司的利

益和乘客的利益由双目标转为单目标。以下是常用的方法。

① 主目标法：判断好各个目标的重要性之后，对其排序，并从其中选出一个重要性恰当的作为主要的目标函数，将剩下的目标函数看作是约束函数进行处理。

② 线性加权法：根据每个目标的重要性，给每个目标定一个权重，再将其乘以该权重，形成目标函数。

③ 理想点法：先求解各目标函数的最优值，再求解各目标函数的最优值与其期望值的差值，将差值加权求和后形成单目标函数。

#### (4) 目标函数标准化

本文在分析了各个方法的优点和缺点之后，选择利用线性加权法来合并两个目标函数，将其合为单目标函数。但是该方法的缺陷就是当各个目标的数值差距过大时候，会出现不合理的结果。因此为了方便各目标之间的比较，从而使公交路径方案更加合理，需要对求解的公交公司和乘客的利益进行标准化处理。

常见的标准化方法有：离差标准化、标准差标准化和归一化等，如下文所述。

##### ① 离差标准化

这种方式是通过线性转换，使原始数据缩进 $[0,1]$ 区间。设原始数据为某数列 $\{X_n\}$ ，则转换函数公式如式 4.8 所示。

$$y_i = \frac{x_i - \min\{x_i\}}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}} \quad (4.8)$$

##### ② 标准差标准化

通过该方法的利用，原始数据的均值变为 0，标准差变为 1。对于某数列 $\{X_n\}$ ，转换公式如式 4.9 所示。

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}, \text{其中 } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.9)$$

##### ③ 归一化

该方法是将不小于 0 的原始数据中的每一个数除以所有数据的总和来进行转换，转换值落于 $[0,1]$ 区间，设不小于 0 的数列 $\{X_n\}$ ，则转换公式如式 4.10 所示。

$$y_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (4.10)$$

综合评价这三种数据标准化的方法，结合本文数据特征，本文考虑在模型中选用离差标准化来对公交公司的成本和乘客的利益进行标准化处理，在通过算法求出多个路径方案之后设路径方案有 $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，各方案所对应的成本用 $Y$ 表示，则标准化公式如

式 4.11 和式 4.12 所示，构建的单目标函数如式 4.13 所示。其中  $staZ_1$  表示将  $Z_1$  进行离差标准化处理， $staZ_2$  表示将  $Z_2$  进行离差标准化处理， $\lambda_1$  表示运营公司成本的权重系数， $\lambda_2$  表示乘客利益的权重系数，同时令  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

$$staZ_1(Y_i) = \frac{Z_1(X_i) - \min_{1 \leq i \leq n} \{Z_1(X_i)\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{Z_1(X_i)\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{Z_1(X_i)\}} \quad (4.11)$$

$$staZ_2(Y_i) = \frac{Z_2(X_i) - \min_{1 \leq i \leq n} \{Z_2(X_i)\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{Z_2(X_i)\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{Z_2(X_i)\}} \quad (4.12)$$

$$\min Z = \lambda_1 staZ_1 + \lambda_2 staZ_2 \quad (4.13)$$

#### 4.4.3 建立约束函数

##### (1) 车辆到达上车和下车站点的时间约束

乘客的上车站点和下车站点分别位于上车区域和下车区域，公交车需要先去上车站点再去下车站点，顺序不能颠倒，所以对车辆的到站点的先后顺序做出约束。针对某一车型中的某一辆车，在其运行路线中的上车区域的到站时间早于下车区域的到站时间。约束条件如式 4.14 所示。

$$AT_{ik}^r \leq AT_{jk}^r, \forall i \in BS^+, j \in BS^-, r \in R, k \in K_r \quad (4.14)$$

##### (2) 关于公交车进出车场的约束

关于定制公交的车场，考虑仅有一个车场的情况，定制公交根据计划从车场出发，先到上车区域接人后去下车区域送人，最终又回到车场。因此，关于公交车进出车场的约束表示如式 4.15、4.16 所示。

$$\sum_{j \in BS} \delta_{ojk}^r = 1, \forall r \in R, k \in K_r \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in BS} \delta_{io k}^r = 1, \forall r \in R, k \in K_r \quad (4.16)$$

##### (3) 车辆到达和驶离上车和下车站点的约束

车辆的运行路线是一条从车场出发连接着上车和下车站点的有向曲线。公交车在运行过程中始终是从一个站点出来再进入另一个站点，表述如式 4.17 所示。

$$\sum_{j \in U} \delta_{jik}^r - \sum_{j \in U} \delta_{ijk}^r = 0, \forall i \in BS, r \in R, k \in K_r \quad (4.17)$$

##### (4) 关于公交车辆的运行时间的约束

为避免出现歧义，做出如下定义：公交车从车场出来，前往上车区域接人，之后去下车区域送人再返回车场，且不包括乘客上下车的时间，这样一个循环的时间，称为运行时间。



为了避免因为公交车辆的运行时间过长而导致乘客的乘车时间过长,耽误了乘客的时间,因此需要做出规定限制公交车的运行时间最大值。此外为了确保公交车辆能够有充足的时间为乘客提供服务,本方案需要限制车辆的运行时间最小值。所以车辆的单次运行时间约束表述如式 4.18 所示。

$$T_{\min} \leq \sum_{i \in BS} \sum_{j \in BS} \delta_{ijk}^r \frac{d_{ij}}{v} \leq T_{\max}, \forall r \in R, k \in K_r \quad (4.18)$$

#### (5) 车辆服务站点次数的约束

在本方案中,针对于任意站点,同一辆公交车只能进出一次,为了避免同一辆车在运行中对同一站点经过并服务大于一次,从而使该方案中,增加了很多没有意义的行驶时间。因此必须要确保同一辆车对同一站点只进行一次服务,约束表述如式 4.19 所示。

$$\sum_{i \in BS} x_{ik}^r - 1 = \sum_{i \in BS} \sum_{j \in BS} \delta_{ijk}^r, \forall r \in R, k \in K_r \quad (4.19)$$

#### (6) 公交车辆满载率的约束

运营公司为了不亏本且能够可持续发展,需要为开通定制公交服务设置一个阈值,当申请乘车的乘客数量达到阈值时,才会开通服务。同时为了提高乘客舒适度,车辆必须保证“一人一座”,也就是说,一辆车所能承载的乘客数量不可以超过该车辆的标定载客量。故定制公交的开行约束和最大载客率的约束如式 4.20 所示。

$$a \leq \frac{\sum_{i \in BS^+} \left( x_{ik}^r \sum_{j \in BS^-} y_{ijk}^r q_{ij} \right)}{Q_r} \leq \beta, \forall r \in R, k \in K_r \quad (4.20)$$

#### (7) 车辆数量的约束

运营公司会指派若干辆型号不同的公交车来执行此任务,具体数量会根据乘客数量而定。因此参与运营的车辆数不大于该类型总车数,因此,车场内某一类型车辆数量的约束表达式如式 4.21 所示。

$$\sum_{k \in K_r} \sum_{j \in BS} \delta_{ojk}^r \leq K_r, \forall r \in R \quad (4.21)$$

#### (8) 车辆完成接送服务的约束

对于申请乘车的乘客,定制公交为乘客服务可以根据申请使乘客正常上下车。因此本文中定制公交的接送服务的约束表述如式 4.22 所示。

$$y_{ijk}^r \left[ \left( \sum_{e \in BS} \delta_{iek}^r \right) \left( \sum_{e \in BS} \delta_{ejk}^r \right) - 1 \right] = 0, \forall i \in BS^+, j \in BS^-, r \in R, k \in K_r \quad (4.22)$$

#### (9) 车辆载客数量的约束

车辆在运营中的任何时间都必须保证车上载客人数不大于额定载客数。此约束表述

如式 4.23 所示。

$$0 \leq L_{ik}^r + x_{ik}^r \sum_{e \in BS^-} y_{iek}^r q_{ie} \leq Q_r, \forall i \in BS^+, r \in R, k \in K_r \quad (4.23)$$

## 4.5 模型算法

本文的定制公交路径规划模型的求解算法，本质上是从经典交通问题 VRPTW 问题的解法变化而来的。参考 VRPTW 问题的求解思路，本文同样选用遗传算法来求解。

设群体的规模为 pop-size, 算法设计过程如下。

### (1) 编码设计

根据本文构建的模型，考虑按照实数编码的形式，将一个个体视为一种发车方案，人与车、车与路径合并在同一编码中，编码如表 4.1 所示。

表 4.1 编码结构示意图

Table 4.1 Code structure diagram

发出的公交车辆	车辆服务的乘客	发出的公交车辆	车辆的运行路径
---------	---------	---------	---------

### (2) 函数值标准化处理

利用前文所述的离差标准化方法对  $Z_1$  和  $Z_2$  目标函数值进行标准化处理，如式 4.24、4.25 所示。

$$staZ_1(Y_s) = \frac{Z_1(X_s) - \min_{1 \leq s \leq pop-size} \{Z_1(X_s)\}}{\max_{1 \leq s \leq pop-size} \{Z_1(X_s)\} - \min_{1 \leq s \leq pop-size} \{Z_1(X_s)\}} \quad (4.24)$$

$$staZ_2(Y_s) = \frac{Z_2(X_s) - \min_{1 \leq s \leq pop-size} \{Z_2(X_s)\}}{\max_{1 \leq s \leq pop-size} \{Z_2(X_s)\} - \min_{1 \leq s \leq pop-size} \{Z_2(X_s)\}} \quad (4.25)$$

### (3) 适应函数构建

将论文里的目标函数  $Z$  表示成倒数形式作为适应函数，当个体结果越趋近目标函数要求，个体的适应函数值就会越大。构建的适应函数如式 4.26 所示。

$$fitness = \frac{1}{Z} \quad (4.26)$$

### (4) 遗传算子操作

依照遗传算法传统流程方法，其中，交叉和变异中加入了精英保留策略，即将群体中出现的最好个体直接复制到下一代中而不再对其进行遗传操作。

#### ① 选择算子

本论文的选择算子采用轮盘赌方法进行选择，先分别计算每个个体  $X_s$  的适应函数值  $fitness(x_s)$  ( $1 \leq s \leq pop\_size$ )，然后利用式 4.27 计算求和所有个体适应函数值，则个体  $X_s$  被选择的概率可以表示为式 4.28。

$$FIN = \sum_{x=1}^{pop-size} fitness(x_s) \quad (4.27)$$

$$P(X_s) = \frac{fitness(X_s)}{FIN} = \frac{fitness(X_s)}{\sum_{s=1}^{pop-size} fitness(X_s)} \quad (4.28)$$

## ② 交叉算子与变异算子

本论文的交叉算子方法选择了单亲遗传法，即选定一个单亲，随机选择两个基因位置，将这两个位置的基因进行交换，交叉示意图如图 4.2 所示。



图 4.2 交叉示意图

Fig. 4.2 Schematic diagram of crossing

本论文的变异方法是：先随机选出两个基因位置，然后对这两个基因位置之间的基因序列进行左右翻转，从而产生新个体，变异示意图如图 4.3 所示。



图 4.3 变异示意图

Fig. 4.3 Schematic diagram of variation

## (5) 算法停止准则

算法在达到设定的迭代次数后，终止运算。输出结果。算法流程图如图 4.4 所示。

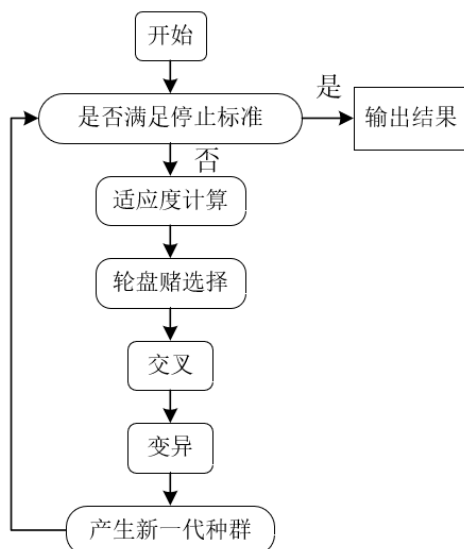


图 4.4 算法流程图

Fig. 4.4 Algorithm flow chart

## 本章小结

本章在站点和时间窗已经确定的情况下，考虑车辆型号问题，以公交公司和乘客的综合利益最大化为目标函数，结合了相关约束函数构建了定制公交的路径规划模型，以求解最优的定制公交运营方案，并设定参数运用遗传算法进行运算求解。

第五章 实例分析

经过第三章和第四章对定制公交的起点和终点区域范围及位置、站点位置、站点时间窗以及路径规划模型及方法的研究之后，本章对杭州市实际数据进行实例分析。文中所述的模型及方法的参数，参照现有文献及理论并根据实际情况进行选取，通过软件 MATLAB-2022a 运行代码进行方案求解，最终得到一个最优的定制公交运行方案来服务居民出行。

5.1 定制公交起讫区域计算

(1) 数据来源

本文所用出租车数据购于拓端数据科技平台，具体为 2019 年 9 月 24 日 24 小时的杭州市出租车 GPS 数据，压缩包解压后共有 38650579 条包含出租车位置、时间和载人状态等信息的数据，文件名称为“190924.CSV”，文件大小为 2.53G，文件格式为 CSV。选取部分初始数据作为样例，如表 5.1 所示。

表 5.1 初始数据样例  
Table 5.1 Sample of initial data

车辆 代号	时间	经度	纬度	速度 (km/h)	顺时针与 正北角度	1 载人 0 空载
1075	23:50:14	120.395200	30.217987	84	68	0
1075	23:03:50	120.164466	30.173616	45.5	88	0
1075	23:00:06	120.161098	30.17364	45.9	270	1
1075	22:55:26	120.188058	30.189842	59.6	168	1
1075	23:03:10	120.159331	30.173606	38.1	88	0
1075	23:32:06	120.277329	30.223064	45.1	104	1
1075	23:16:26	120.188106	30.181495	0	90	1
1075	23:36:45	120.296174	30.220723	18.1	16	1
1075	23:06:31	120.170947	30.183642	0	354	0
1075	23:30:26	120.269094	30.223961	44	76	1
1075	23:21:46	120.204377	30.202479	0	60	1
1075	23:16:46	120.188106	30.181495	0	90	1
1075	22:57:26	120.185538	30.173174	63.3	270	1
1075	23:12:51	120.196440	30.183053	31.8	174	0
1075	23:51:15	120.408798	30.222877	80.7	62	0

## (2) 删除缺失及异常数据

在数据统计及上传过程中会出现部分数据缺失以及极小部分 GPS 数据定位错误或者定位偏差过大。因为数据量庞大，所以先将这些错误数据删除也不会影响结果准确性。所以需要先将研究范围内部分缺失和异常的数据进行筛选并删除。

## (3) 切割数据

全部数据近四千万行，数据量过大，为方便电脑运行，先利用 Emeditor(64-bit)软件将原始数据文件“190924.CSV”按照车辆代号进行排序，然后使用文件切割功能，将文件切割为 39 份，切割后的文件名称从“190924\_1”排至“190924\_39”。此时文件可用 Excel 软件打开并操作，便于对数据的处理。

## (4) 按需对数据进行自定义排序

对每个数据文件都利用 Excel 进行自定义排序，主要条件选为车辆代号列，次要条件选为时间列。这样就得到了每一个出租车的按时间排列的 GPS 数据。

## (5) 编写选取起讫点的 MATLAB 脚本文件

因为数据中对于出租车是否载人是用 0 和 1 来表示的，0 为空载状态，1 就是载客状态，通过利用 MATLAB-2022a 软件编码，制作脚本，其中逻辑为：在标为是否有人这一列，寻找连续为 1 的一段，取首尾是两个 1 的这两行，分别在第一个 1 和第二个 1 右面一列标记为 1 和 2，其中标记为 1 的这一行是起点信息，标记为 2 的这一行是终点信息，然后按照时间顺序确定所有起点都有终点，所有终点都有起点。

## (6) 起讫点汇总

在脚本编写完成后，通过 MATLAB-2022a 分别对这 39 个文件进行运算得到所有出行起点和终点。并在汇总之后按车辆代号和时间顺序进行排列，剔除异常结果，使起点和终点数据两两对应。

## (7) 剔除研究区域外的数据

本文主要研究城区范围的交通状况，所以首先剔除非城区范围的数据。经过对数据初步处理，选择东经 120.05 度至东经 120.25 度，北纬 30.15 度至北纬 30.45 度的范围作为研究对象，删除不在此范围的数据。选取之后的区域范围如图 5.1 所示。



图 5.1 研究区域范围图

Fig. 5.1 Study area scope map

#### (8) 出行时间及空间分布分析

在统计出出行数据之后，将出行数据绘制成折线图，如图 5.2 所示，通过对该折线图的分析，在这一天中，有很明显的早晚两个高峰期，分别是早七点至早九点，和晚四点至晚七点。本文在此只选取早高峰时段，七点至九点的数据进行分析计算。

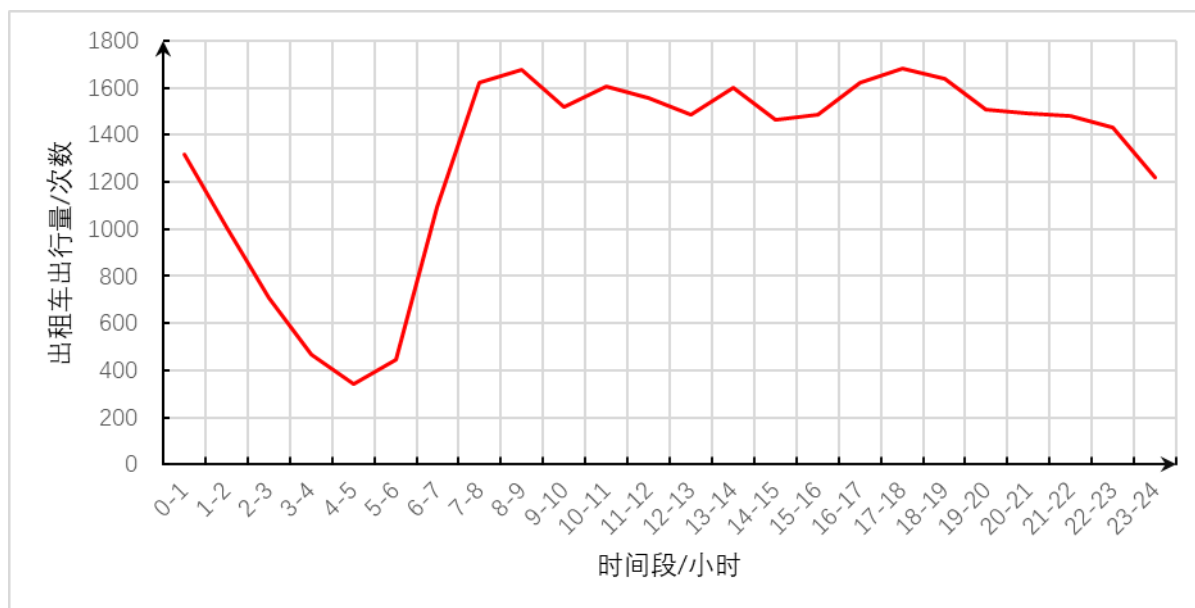


图 5.2 出行需求时间分布图

Fig. 5.2 Time distribution of all-day travel behavior

为了得到出行需求的区域分布情况，将所得到的出行起讫点的数据利用 MATLAB 软件处理后，生成出租车出行需求热力图，如图 5.3 所示，通过图片的形式可以直观的看出出行需求的区域分布状况。之后将每次出行的轨迹都刻画出来生成路线图，如图 5.4 所示。

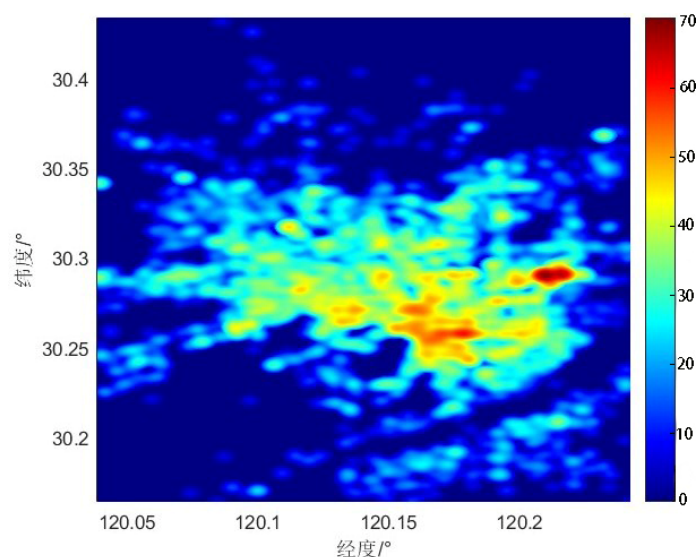


图 5.3 出租车出行需求热力图

Fig. 5.3 Heat map of taxi travel demand



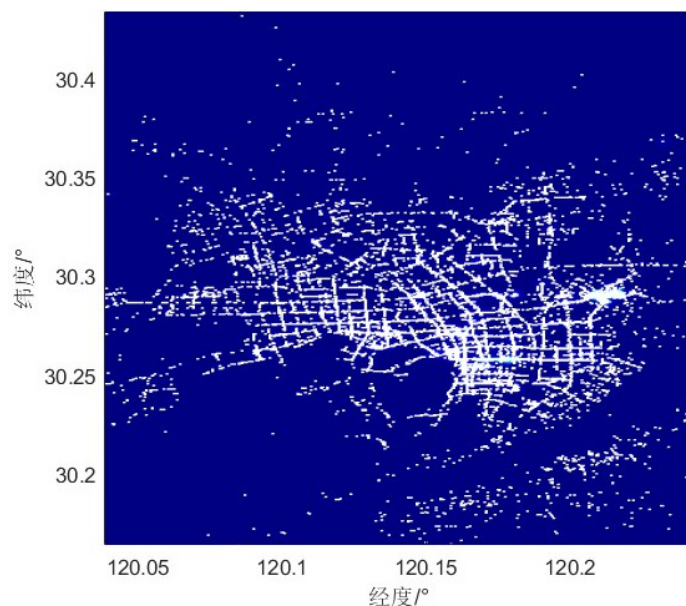


图 5.4 运行路线分布图

Fig. 5.4 Distribution of running routes

#### (9) 确定定制公交起点和终点区域

利用蒙特卡洛模拟的方法，向前文确定的研究区域输入随机分布点，以随机分布点为圆心，做半径不断变大的圆，并且将随机分布点的数量同步增多，直到首次得到包含出行需求点最多的圆形区域。并在之后通过多次运行程序以验算结果，各次结果大致相等，且包含的需求点数量保持不变。此时即可得出结论：已经找到了该时段中选择出租车出行的居民最多的区域。之后论文考虑将该区域中所有出发点所对应的终点标记在图上，同样利用该方法，确定一个相同大小的圆形范围作为终点区域。最终找到的结果如表 5.2 所示。

表 5.2 起点和终点区域边界经纬度坐标

Table 5.2 Longitude and latitude coordinates of boundary of starting and ending regions

位置	经度	纬度
起点区域中心坐标	120.206557	30.288208
起点区域西部坐标	120.194556	30.288208
起点区域东部坐标	120.218558	30.288208
起点区域北部坐标	120.206557	30.300209
起点区域南部坐标	120.206557	30.276207
终点区域中心坐标	120.180673	30.258171
终点区域西部坐标	120.168798	30.258171
终点区域东部坐标	120.192548	30.258171
终点区域北部坐标	120.180673	30.269033
终点区域南部坐标	120.180673	30.247309

利用 CAD 软件，绘画出杭州市研究区域的路网图，之后通过坐标对比，将起讫区域范围在图中展示出来，如图 5.5 所示。

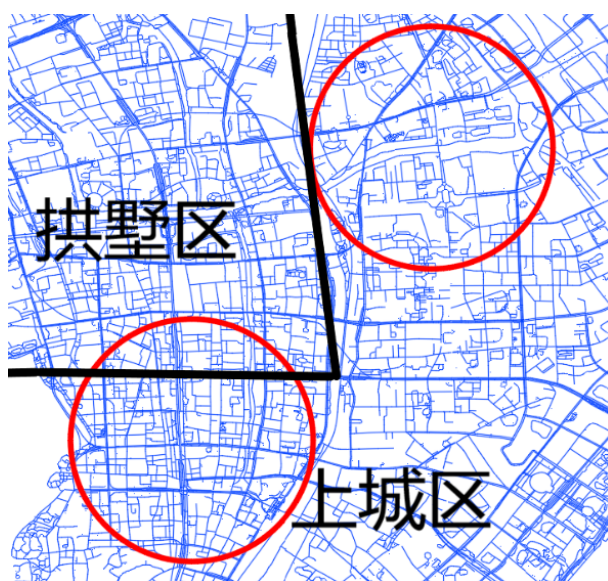


图 5.5 起讫区域路网示意图

Fig. 5.5 Schematic diagram of road network of departure and destination areas

## 5.2 定制公交站点选址规划

### (1) 需求聚类

以东经 120.171331 度，北纬 30.246503 度这一点为原点，将各个坐标点转换为平面坐标，且坐标系中单位长度为一米。再将乘客的出行需求数据导入到 MATLAB 中并按照前文所述方法，运用凝聚式的层次聚类算法，将各个出行需求聚类计算。

先算出任意两个出行需求点的“平均欧式距离”，然后根据求得的距离远近，由小到大合并各个出行需求点。便可以将各个出行需求点的位置按照不同分类标准合并为一类。

### (2) 确定聚类分割阈值

在分别计算出所有乘客出行起点以及出行终点位置的层次聚类结果之后，需要确定一个合适的“聚类分割阈值”对结果进行切割。在前文中，通过对文献的研究，可以得知乘客可接受的步行距离为 400 米，此时本文选择此数值的二倍即 800 米，作为本文所述的聚类分割阈值。对分类结果做适当取舍，剔除需求过少的分类。

### (3) 标记聚类中心

在完成了分类切割后，将得到的聚类中心标记在路网图中，如图 5.6 所示，其中图 a 的红色圆点表示起点区域的聚类中心。图 b 的红色圆点表示终点区域的聚类中心。

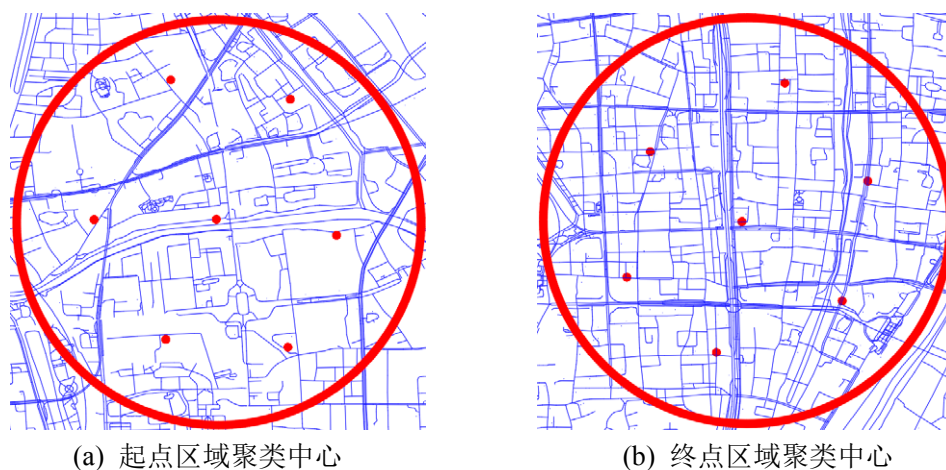


图 5.6 聚类中心分布图

Fig. 5.6 Distribution map of cluster centers

### (4) 代入“出行意愿成本”加权计算

在得到起点和终点区域的乘客需求的分类情况后，根据乘客的出行起讫点间的定位数据，结合出行路线数据以及调查得到的杭州市出租车价格，可以求得各个乘客的出行

费用, 将其作为出行意愿成本, 并作为权重代入计算之后, 得到了考虑出行意愿成本的站点坐标数据, 之后根据实际地理位置, 调整公交站点位置, 最后将站点位置在路线图中标记出来, 如图 5.7 所示, 图 a 中红色点表示起点区域的上车站点, 图 b 中红色点表示终点区域的下车站点。同时, 车场位置定位在平面坐标系中的 (6000, 6000), 站点坐标位置如表 5.3 所示, 平面坐标示意图如图 5.8 所示。

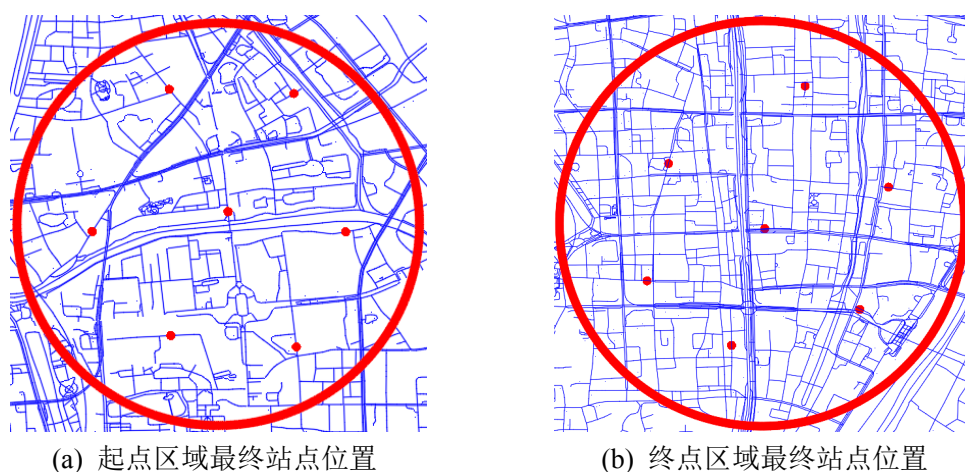


图 5.7 起讫区域站点位置图

Fig. 5.7 Starting and ending area site location map

表 5.3 站点相对坐标位置

Table 5.3 The relative coordinate position of the site

站点代号	横坐标	纵坐标	站点代号	横坐标	纵坐标
车场	6000	6000	8	921	1476
1	3744	3833	9	1513	1061
2	4022	3204	10	1490	366
3	3677	2584	11	623	157
4	2860	2674	12	115	536
5	2502	3237	13	154	1176
6	2913	3916	14	755	868
7	3168	3326			

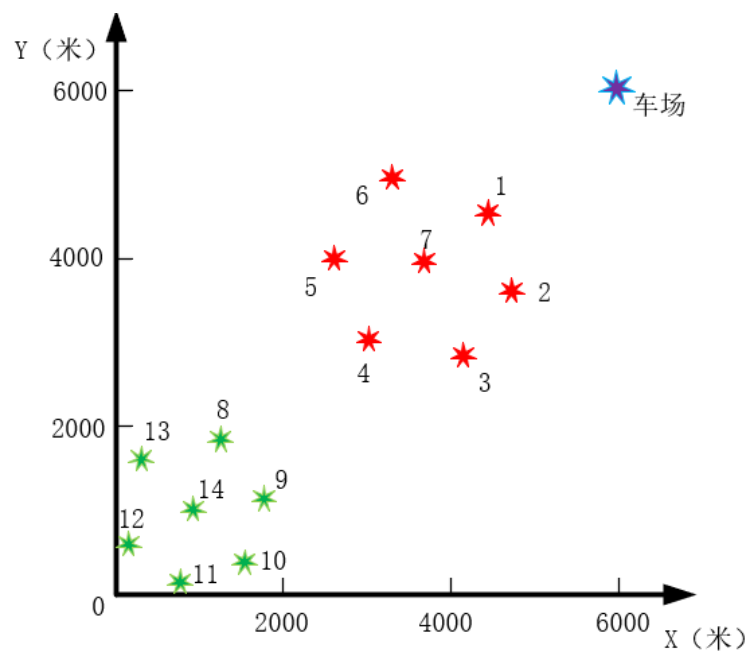


图 5.8 平面坐标示意图  
Fig. 5.8 Plane coordinate diagram

5.3 定制公交站点时间窗规划

(1) 现根据前文研究中拟确定的站点位置，结合公交公司的车辆资源等情况，假设已经将该定制公交系统投放运营，且已经收到了居民乘车的申请信息，其中包括人员编号、上下车站点代号、期望最早上车时间和期望最晚上车时间，七点至九点预约乘车的乘客共 1068 人。展示的部分申请信息如表 5.4 所示。

表 5.4 部分用户出行需求申请信息  
Table 5.4 Travel demand application information of some users

序号	上车站点	下车站点	期望最早上车时间	期望最晚上车时间
1	1	10	8:46	8:51
2	2	8	7:40	7:43
3	5	14	7:18	7:23
4	2	14	7:55	8:00
5	1	9	8:33	8:36
6	4	14	7:05	7:08
7	2	8	7:18	7:24

在数据经过整理之后，得到了站点间的 *OD* 关系表，如表 5.5 所示。

表 5.5 站点用户需求 *OD* 对  
Table 5.5 Site user requirements *OD* pair

站点	8	9	10	11	12	13	14	加和
1	21	24	25	11	16	29	17	143
2	28	17	27	21	22	25	20	160
3	31	19	13	22	18	20	26	149
4	23	18	16	27	18	22	16	140
5	22	20	27	19	24	28	16	156
6	26	20	20	23	26	25	29	169
7	22	13	23	24	26	20	23	151
加和	173	131	151	147	150	169	147	1068

(2) 现根据申请信息，将申请信息中各个乘客的期望最早上车时间相比较，按照时间顺序排序，最早的时间作为初始时间窗的开始时间。之后将期望最晚上车时间相比较，按照时间顺序排序，最晚的时间作为初始时间窗的结束时间。如表 5.6 所示。

表 5.6 站点初始时间窗  
Table 5.6 Site initial time window

站点	开始时间	结束时间
1	7:02	9:00
2	7:02	9:00
3	7:00	9:00
4	7:00	9:00
5	7:00	9:00
6	7:00	9:00
7	7:00	9:00

(3) 计算最优的上车站点的时间窗。设置参数为 $T_1=300$ ,  $T_2=900$ ,  $T_3=180$ ,  $T_4=420$ , 单位为秒, 依据设计的遗传算法确定上车站点时间窗的开设情况, 并统计每个上车站点各个时间窗内服务的乘客的不满意度情况。通过分析可以得知, 各个站点制定的时间窗的数量与乘客不满意度的关系如表 5.7 所示。

表 5.7 时间窗的数量与乘客不满意度的关系  
Table 5.7 The relationship between the number of time windows and passenger dissatisfaction

站点 不满意度 (min) 数量 (个)	1	2	3	4	5	6	7
5	167	175	173	182	145	153	164
6	124	143	132	153	125	147	136
7	128	119	115	131	123	135	122
8	109	102	110	103	113	119	105
9	95	89	104	97	104	103	99
10	53	45	52	60	57	56	55
11	68	70	75	79	80	75	76
12	75	63	84	75	63	78	64
13	94	105	127	94	89	96	96
14	135	157	164	129	149	142	128
15	161	159	164	172	173	183	163

通过对表 5.7 中数据的分析, 容易看出令乘客总体满意度最高的时间窗的数量为 10 个, 故各站点选取的时间窗的数量是 10。考虑到由于站点开设了多个时间窗, 对路径规划有了新的要求, 而路径规划模型中的第五个约束条件不允许同一车辆服务相同站点, 二者之间产生了矛盾, 所以无法直接运用模型计算。因此本文在此加入虚拟站点的概念, 以时间窗为依据, 将原有的单一站点分割出若干虚拟站点, 并将各个虚拟站点进行编号, 此时各虚拟站点时间窗的计算结果如表 5.8 所示。

表 5.8 虚拟站点时间窗

Table 5.8 Virtual site time window

原编号	虚拟 站点	开始 时间	结束 时间	乘客 数量	原编号	虚拟 站点	开始 时间	结束 时间	乘客 数量
1	1	7:02	7:10	16	4	36	8:04	8:15	9
1	2	7:15	7:20	13	4	37	8:19	8:28	28
1	3	7:24	7:35	14	4	38	8:32	8:39	19
1	4	7:38	7:46	11	4	39	8:42	8:49	12
1	5	7:50	8:00	15	4	40	8:52	9:00	9
1	6	8:04	8:10	18	5	41	7:00	7:15	22
1	7	8:14	8:19	13	5	42	7:18	7:30	14
1	8	8:23	8:28	17	5	43	7:33	7:42	18
1	9	8:31	8:44	14	5	44	7:45	7:58	11
1	10	8:49	9:00	12	5	45	8:04	8:11	9
2	11	7:02	7:09	15	5	46	8:14	8:20	12
2	12	7:14	7:21	18	5	47	8:23	8:32	16
2	13	7:24	7:36	20	5	48	8:35	8:40	19
2	14	7:40	7:46	11	5	49	8:43	8:49	18
2	15	7:50	8:00	19	5	50	8:52	9:00	17
2	16	8:03	8:09	22	6	51	7:00	7:10	16
2	17	8:14	8:20	13	6	52	7:13	7:24	17
2	18	8:23	8:28	17	6	53	7:28	7:39	19
2	19	8:31	8:42	12	6	54	7:42	7:54	18
2	20	8:49	9:00	13	6	55	7:57	8:05	15
3	21	7:00	7:07	19	6	56	8:09	8:17	16
3	22	7:10	7:15	13	6	57	8:20	8:30	20
3	23	7:19	7:30	15	6	58	8:33	8:40	9
3	24	7:35	7:46	11	6	59	8:43	8:50	18
3	25	7:50	8:02	14	6	60	8:53	9:00	21
3	26	8:08	8:20	18	7	61	7:00	7:10	15
3	27	8:24	8:30	16	7	62	7:13	7:20	18
3	28	8:35	8:41	17	7	63	7:24	7:31	17
3	29	8:44	8:50	14	7	64	7:35	7:44	13
3	30	8:53	9:00	12	7	65	7:47	8:00	16
4	31	7:00	7:08	13	7	66	8:04	8:13	14
4	32	7:11	7:20	17	7	67	8:16	8:26	12
4	33	7:24	7:35	12	7	68	8:30	8:37	14
4	34	7:39	7:50	11	7	69	8:40	8:47	18
4	35	7:53	8:00	10	7	70	8:50	9:00	14



(4) 本文所设立的虚拟站点对应着原有的站点，只是利用该站点的各个时间窗来区分开来，所以这些虚拟站点的时间窗不一样，但是位置坐标均一致，且各虚拟站点有着不同的出行需求的乘客，同时根据编号之间的关系重新确定 OD 对之间的出行关系，结果如表 5.9 所示。

表 5.9 虚拟站点用户出行需求分布  
Table 5.9 Travel demand distribution of virtual site users

虚拟站点	71	72	73	74	75	76	77	汇总
1	0	3	5	4	3	1	0	16
2	1	4	3	5	0	0	0	13
3	6	3	4	0	0	0	1	14
4	2	3	1	3	1	1	0	11
5	3	2	5	0	1	3	1	15
6	2	4	1	2	5	2	2	18
7	2	2	3	4	1	0	1	13
8	1	1	1	3	2	4	5	17
9	2	2	4	2	4	0	0	14
10	1	4	3	0	4	0	0	12
11	2	2	3	0	2	3	3	15
12	2	5	4	3	0	3	1	18
13	5	3	5	3	0	4	0	20
14	4	4	1	2	0	0	0	11
15	2	2	7	2	4	0	2	19
16	1	2	5	2	3	5	4	22
17	0	0	3	1	2	4	3	13
18	1	2	8	3	1	2	0	17
19	0	0	1	1	3	4	3	12
20	2	3	5	1	1	0	1	13
21	4	4	3	0	1	3	4	19
22	3	1	3	2	1	0	3	13
23	0	2	4	2	0	3	4	15
24	0	2	1	3	4	1	0	11
25	2	0	3	2	1	1	5	14
26	3	4	2	0	6	3	0	18
27	1	2	3	2	3	5	0	16
28	2	3	7	5	0	0	0	17
29	0	0	4	3	0	3	4	14
30	5	0	2	3	2	0	0	12
31	0	0	7	0	0	2	4	13
32	3	4	1	0	6	3	0	17

续表 5.9

33	0	0	4	0	1	4	3	12
34	2	3	3	1	0	2	0	11
35	1	3	4	2	0	0	0	10
36	0	1	2	1	3	0	2	9
37	3	7	9	6	1	0	2	28
38	2	2	7	0	2	3	3	19
39	2	3	4	3	0	0	0	12
40	0	0	3	0	0	4	2	9
41	2	0	2	5	4	2	7	22
42	2	2	1	0	3	4	2	14
43	2	3	7	1	2	0	3	18
44	0	0	6	0	3	2	0	11
45	0	2	1	3	2	1	0	9
46	0	2	4	1	0	3	2	12
47	1	3	2	4	2	4	0	16
48	1	1	7	1	4	3	2	19
49	2	3	3	4	2	2	2	18
50	0	0	7	2	3	3	2	17
51	3	2	2	4	2	1	2	16
52	2	1	2	2	5	3	2	17
53	2	3	5	1	3	2	3	19
54	0	1	6	2	4	2	3	18
55	3	4	2	5	1	0	0	15
56	0	0	5	2	4	3	2	16
57	2	3	2	4	5	3	1	20
58	0	0	6	3	0	0	0	9
59	0	0	2	4	5	3	4	18
60	2	3	3	5	4	2	2	21
61	1	1	5	1	4	2	1	15
62	1	3	4	5	2	1	2	18
63	0	2	1	5	3	2	4	17
64	2	3	6	1	0	1	0	13
65	0	0	5	2	4	3	2	16
66	2	3	3	1	2	2	1	14
67	0	0	5	1	1	3	2	12
68	2	3	3	1	3	2	0	14
69	0	5	3	1	2	3	4	18
70	3	1	4	4	2	0	0	14
汇总	107	146	262	151	149	135	118	1068

5.4 定制公交运行路径的规划

假定公交公司可以投放使用两种车型的公交车，这两种型号的公交车的相关信息见表 5.10。且车辆的最长运行时间不大于三十分钟，最短运行时间不小于五分钟。根据浙江政务服务网的数据显示，2019 年杭州市全市居民人均可支配收入为 59261 元，以全年工作 2000 小时计算，得出  $\omega = 0.49$  元/min。为了体现公交公司的公益性，令  $\lambda_1 = 0.4, \lambda_2 = 0.6$ 。

表 5.10 发车费用、车载容量和车数量等相关信息  
Table 5.10 Departure fee, vehicle capacity, vehicle quantity and other relevant information

r	$f_r$	$\omega_2$	$\theta_r$	$\mu_1$	$\mu_2$	$K_r$	$Q_r$	v ( km/h )	a	$\beta$
1	0.6	200	400	8	24	7	30	30	0.5	1
2	0.8	200	480	8	24	7	40	30	0.5	1

在 windows 10 系统，16GB 内存，处理器为 R7 4800H 的电脑上，本文利用 MATLAB 软件运行已经编写的遗传算法脚本文件，参数取自上文中所设定的数值，其中种群规模设置为 200，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.1，遗传迭代次数为 10000 次，求解模型的最优解。

最终运算结果为  $Z_1 = 5942$  元， $Z_2 = 1623$  元。得出的容量为 40 的车型路径规划方案如表 5.11 所示，容量为 30 的车型路径规划方案如表 5.12 所示。表中所记录的第四列 O 和第五列 D 为居民出行 OD 对，以表 5.11 中第一行第四列第一个数字 25 和第一行第五列第一个数字 73 为例做出说明：表示虚拟站点 25 至虚拟站点 73 的 OD 客流。

表 5.11 容量 40 人的车型路径规划方案

Table 5.11 Capacity 40 vehicle path planning scheme

车辆 编号	车辆 容量	发车 时刻	O	D	虚拟站点路径	实际站点路 径
1	40	7:00	25、35、4、30、6、4、 62、57、8、3、70	73、73、73、74、72、 73、76、72、71、75、 73	3-4-6-8-25-30-35-57-62 -70-71-72-73-74-75-76	0-1-3-4-6-7-8-9 -10-11-12-13-0
2	40	7:02	37、12、13、37、16、 10、51、7	72、75、77、73、76、 77、73、71	7-10-12-13-16-37-51-71 -72-73-75-76-77	0-1-2-4-6-8-9-1 0-12-13-14-0
3	40	7:05	36、44、47、49、43、 55、60、33	73、74、76、75、76、 75、74、77	33-36-43-44-47-49-55-6 0-73-74-75-76-77	0-4-5-6-10-11- 12-13-14-0
4	40	7:08	22、43、54、54、6、13	75、71、74、71、73、 75	6-13-22-43-54-71-73-74 -75	0-1-2-3-5-6-8-1 0-11-12-0
5	40	7:13	48、61、20、6、7、42、 61、48、17	76、76、77、73、71、 73、71、72、75	6-7-17-20-42-48-61-71- 72-73-75-76-77	0-1-2-5-7-8-9-1 0-12-13-14-0
6	40	7:15	41、28、38、29、33	71、76、71、75、77	28-29-33-38-41-71-75-7 6-77	0-3-4-5-8-12-1 3-14-0
7	40	7:18	25、21、28、58、36	75、71、77、74、72	21-25-28-36-58-71-72-7 4-75-77	0-3-4-6-8-9-11- 12-14-0
1	40	7:25	38、11、37、50、53、 63、52、50、31	77、77、76、76、73、 75、73、76、75	11-31-37-38-50-52-53-6 3-73-75-76-77	0-2-4-5-6-7-10- 12-13-14-0
3	40	7:28	37、1、15、22、63、8、 21、27、60	75、77、72、73、77、 72、75、77、77	1-8-15-21-22-27-60-63- 72-73-75-77	0-1-2-3-4-6-7-9 -10-12-14-0
2	40	7:33	47、67、38、26、24、 46	75、75、74、72、73、 74	24-26-38-46-47-67-72-7 3-74-75	0-3-4-5-7-9-10- 11-12-0
4	40	7:38	7、11、47、21、8、70、 46、4	72、73、72、75、71、 75、71、72	4-7-8-11-21-46-47-70-7 1-72-73-75	0-1-2-3-5-7-8-9 -10-12-0
5	40	7:43	48、54、46、63、38、 19、42、11、16	76、76、72、73、76、 71、73、75、72	11-16-19-38-42-46-48-5 4-63-71-72-73-75-76	0-2-4-5-6-7-8-9 -10-12-13-0
6	40	7:53	3、43、18、25、45、39、 17、54	77、76、75、72、73、 72、77、71	3-17-18-25-39-43-45-54 -71-72-73-75-76-77	0-1-2-3-4-5-6-8 -9-10-12-13-14 -0
7	40	8:01	50、49、41、68、21、 11、23、56、23	74、71、76、73、77、 73、74、73、71	11-21-23-41-49-50-56-6 8-71-73-74-76-77	0-2-3-5-6-7-8-1 0-11-13-14-0
1	40	8:04	41、32、5、67、40、39、 55、60、50	76、72、77、77、72、 72、74、71、76	5-32-39-40-41-50-55-60 -67-71-72-74-76-77	0-1-4-5-6-7-8-9 -11-13-14-0
3	40	8:04	66、62、8、26、22、61、 45、39、35、49、28	76、75、73、72、74、 74、77、75、74、74、 71	8-22-26-28-35-39-45-49 -61-62-66-71-72-73-74- 75-76-77	0-3-4-5-7-8-11- 12-14-0
4	40	8:05	8、25、8、6、47、31、 43、44、10、43	77、76、75、73、72、 75、76、74、74、77	6-8-10-25-31-43-44-47- 72-73-74-75-76-77	0-1-3-4-5-9-10- 11-12-13-14-0
5	40	8:13	16、24、19、25、26、 16、17、64、64、27、 20	71、71、76、71、72、 74、77、77、71、72、 76	16-17-19-20-24-25-26-2 7-64-71-72-74-76-77	0-2-3-7-8-9-11- 13-14-0
2	40	8:17	4、9、13、15、56、44、 49、2	71、72、77、75、76、 76、72、71	2-4-9-13-15-44-49-56-7 1-72-75-76-77	0-1-2-5-6-8-9-1 2-13-14-0
6	40	8:22	21、16、9、7、4、45	73、74、77、73、76、 76	4-7-9-16-21-45-73-74-7 6-77	0-1-2-3-5-10-1 1-13-14-0
7	40	8:25	69、56、65、48、60、 51、45、59	73、72、73、72、72、 76、73、71	45-48-51-56-59-60-65-6 9-71-72-73-76	0-5-6-7-8-9-10- 13-0
2	40	8:27	22、15、11、41、62	73、71、75、72、75	11-15-22-41-62-71-72-7 3-75	0-2-3-5-7-8-9-1 0-12-0
1	40	8:32	35、22、67、9、59、52、 63、53	71、72、72、77、77、 74、75、77	9-22-35-52-53-59-63-67 -71-72-74-75-77	0-1-3-4-6-7-8-9 -11-12-14-0
3	40	8:35	59、45、36、49、68、 40	73、71、73、76、74、 72	36-40-45-49-59-68-71-7 2-73-74-76	0-4-5-6-7-8-9-1 0-11-13-0
5	40	8:45	1、29、37、17、18、42	73、73、74、75、76、 72	1-17-18-29-37-42-72-73 -74-75-76	0-1-2-3-4-5-9-1 0-11-12-13-0

表 5.12 容量 30 人的车型路径规划方案

Table 5.12 Capacity 30 vehicle path planning scheme

车辆 编号	车辆 容量	发车 时刻	O	D	虚拟站点路径	实际站点路 径
1	30	7:01	61、33、18、70、15、 65、13	75、73、75、73、74、 74、73	13-15-18-33-61-65-70- 73-74-75	0-2-4-7-10-11- 12-0
2	30	7:03	12、51、17、70、32、 27、22	74、75、72、72、74、 73、71	12-17-22-27-32-51-70- 71-72-73-74-75	0-2-3-4-6-7-8- 9-10-11-12-0
3	30	7:03	2、7、50、5、46、51、 60、1	73、77、71、75、76、 76、75、76	1-2-5-7-46-50-51-60-71 -73-75-76-77	0-1-5-6-8-10-1 2-13-14-0
4	30	7:04	42、14、29、14、32、 20、43、33	74、73、75、73、77、 76、76、71	14-20-29-32-33-42-43- 71-73-74-75-76-77	0-2-3-4-5-8-10 -11-12-13-14-0
5	30	7:05	9、9、63、7、64	74、74、74、71、77	7-9-63-64-71-74-77	0-1-7-8-11-14- 0
6	30	7:16	6、57、48、57、57、 57、49	75、75、72、76、77、 73、77	6-48-49-57-72-73-75-7 6-77	0-1-5-6-9-10-1 2-13-14-0
7	30	7:19	60、42、47、46、48、 61	74、73、74、74、77、 72	42-46-47-48-60-61-72- 73-74-77	0-5-6-7-9-10-1 1-14-0
1	30	7:23	19、28、20、25、55、 67、18、24、23	75、72、71、73、74、 76、75、73、71	18-19-20-23-24-25-28- 55-67-71-72-73-74-75- 76	0-2-3-6-7-8-9- 10-11-12-13-0
2	30	7:32	18、2、27、20、55、 68、52、47、66、59	74、74、74、71、73、 74、72、73、75、76	2-18-20-27-47-52-55-5 9-66-68-71-72-73-74-7 5-76	0-1-2-3-5-6-7- 8-9-10-11-12-1 3-0
3	30	7:35	66、51、2、6、5、53、 57、59、63、66	72、77、77、73、74、 73、73、74、75、76	2-5-6-51-53-57-59-63-6 6-72-73-74-75-76-77	0-1-6-7-9-10-1 1-12-13-14-0
4	30	7:46	66、12、1、62、23、 10、61、14	72、71、76、75、74、 76、71、73	1-10-12-14-23-61-62-6 6-71-72-73-74-75-76	0-1-2-3-7-8-9- 10-11-12-13-0
5	30	7:56	6、60、3、39、37、38	71、73、73、73、74、 71	3-6-37-38-39-60-71-73- 74	0-1-4-6-8-10-1 1-0
6	30	7:59	70、69、68、62、66、 48、68	76、71、74、74、73、 71、72	48-62-66-68-69-70-71- 72-73-74-76	0-5-7-8-9-10-1 1-13-0
7	30	8:03	29、69、64、26、69、 36	74、77、75、77、75、 72	26-29-36-64-69-72-74- 75-77	0-3-4-7-9-11-1 2-14-0
1	30	8:07	49、23、34、34、35、 1	77、74、74、73、75、 73	1-23-34-35-49-73-74-7 5-77	0-1-3-4-5-10-1 1-12-14-0
2	30	8:15	32、38、34、57、69、 69、53、53、66、34	72、75、76、73、72、 74、76、77、76、72	32-34-38-53-57-66-69- 72-73-74-75-76-77	0-4-6-7-9-10-1 1-12-13-14-0
3	30	8:21	19、13、52、11、31、 40、15	75、75、73、72、76、 75、73	11-13-15-19-31-40-52- 72-73-75-76	0-2-4-6-9-10-1 2-13-0
4	30	8:23	27、21、12、16、62、 30	72、73、71、74、74、 72	12-16-21-27-30-62-71- 72-73-74	0-2-3-7-8-9-10 -11-0
5	30	8:26	34、41、19、8、4	71、74、71、72、76	4-8-19-34-41-71-72-74- 76	0-1-2-4-5-8-9- 11-13-0
6	30	8:33	15、30、5、5、65、27、 65	77、73、75、74、73、 74、72	5-15-27-30-65-72-73-7 4-75-77	0-1-2-3-7-9-10 -11-12-14-0
7	30	8:37	12、3、42、41、56、5、 52、10、55	73、72、75、77、72、 75、75、71、75	3-5-10-12-41-42-52-55- 56-71-72-73-75-77	0-1-2-5-6-8-9- 10-12-14-0
1	30	8:43	18、52、12、16、20、 53、67	71、71、75、71、76、 77、73	12-16-18-20-52-53-67- 71-73-75-76-77	0-2-6-7-8-10-1 2-13-14-0
2	30	8:48	65、30、26、24、68、 56、54、62	74、77、74、76、77、 76、74、74	24-26-30-54-56-62-65- 68-74-76-77	0-3-6-7-11-13- 14-0
3	30	8:55	24、32、14、36、61、 58、51、53、51、54、 52、64	72、73、76、73、73、 74、72、71、73、76、 77、73	14-24-32-36-51-52-53- 54-58-61-64-71-72-73- 74-76-77	0-2-3-4-6-7-8- 9-10-11-13-14- 0

## 本章小结

本章依据前文所述的理论基础，利用本文确定的数据处理流程及方法、起讫区域确定方法、站点选址模型、站点时间窗的规划模型、路径规划模型对实际数据进行计算。通过对出行起讫点进行分析，确定了出行及到达的密集区域，并对该区域进行聚类分析，结合乘客的出行意愿成本计算出了公交站点位置，利用遗传算法求解出了最优的路径规划方案。验证了本文的研究理论及模型。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

为了解决高峰期的居民出行问题,提高居民的出行舒适度,本文构建了兼顾公交公司的成本和乘客利益的一种定制公交路径规划模型。本文的主要研究结论如下:

(1) 通过观察现实中的诸多交通问题,并查阅国内外的相关文献,研究相关的理论,最终确定了本文的研究方向以及思路。论文介绍了定制公交的概念以及构建定制公交系统的诸多影响因素。并就定制公交出行需求分析展开讨论。论证了利用出租车数据作为定制公交出行需求分析的可行性。

(2) 本文选择了杭州市出租车 2019 年 9 月 24 日早七点至九点的数据,经过处理得到了出行起讫点数据,利用蒙特卡洛算法,通过输入随机点的方式求解出行和到达区域,本文最终确定的起讫区域为两个自杭州东站至西湖方向的圆形区域,并对区域内的出行需求点通过聚类分割算法进行划分,之后结合数据中的出租车出行费用作为乘客的出行意愿成本,将其作为权重代入聚类中心求取公式中,得到最终确定的站点位置。

(3) 利用已经确定的起讫区域的上下车站点位置,结合实际,模拟收到的乘客的申请信息,设计了更为直观的表述站点时间窗与乘客申请信息关系的方法,对信息中的预约上车时间部分构建了时间窗的规划模型,并运用遗传算法计算出令乘客满意度最高的时间窗的规划结果。

(4) 最后本文构建了平衡公交公司和乘客双方利益的路径规划模型,利用遗传算法对模型进行求解。得到了最优的路径规划结果后,验证了模型的正确性。

### 6.2 展望

经过多年的发展,定制公交这种运营模式在我国已经生根发芽,与我国的国情也非常匹配。定制公交的开通,有效的缓解了我国当前面临的交通拥堵的问题。已经获得了很多人的认可,运营过程中对客流的吸引也是非常显著的,通过吸引选择出租车、私家车和网约车等出行方式的人群来乘坐定制公交,减少了很多碳排放,定制公交在方便居民出行的同时也在节能减排等方面做出了巨大贡献。

因此,本文在定制公交方面的研究,对于解决我国交通领域的诸多现实问题具有重要的参考价值。但是也不可避免的由于现有条件和自身水平的约束,使得本论文还有待提高,这主要表现在以下几方面。

(1) 由于论文针对早高峰期间居民出行进行规划,车辆拥堵状况较为严重,即便有公交专用道,车辆也不能完全保证运行速度稳定,在未来研究中,规划路径的时候,还

需要考虑道路通行能力的问题。

(2) 本文的思路是先确定了站点的位置,再通过乘客的申请信息去确定站点时间窗,之后才对车辆的路径做出规划,对站点时间窗和路径的协同规划方面做的还不够,所以接下来要研究的主要方向就是路径和时间窗协同规划的方法理论,以达到更加优化的效果。

(3) 受疫情期间封校的影响,相关数据收集难度大,故本文利用购买的杭州市出租车数据进行研究,虽然可以分析出行需求,但是只有一天的数据,对于分析长期的居民出行规律仍然缺乏有力的数据支撑,所以接下来会寻求更为全面的数据进行研究。



## 参考文献

- [1] Palmer K, Dessouky M, Zhou Z. Factors influencing productivity and operating cost of demand responsive transit[J]. Transportation Research Part A Policy and Practice, 2008, 42(3): 503-523.
- [2] Wang C, MA C, XU X D. Multi-objective optimization of real-time customized bus routes based on two-stage method[J]. Physica A-statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 537: 122774.
- [3] Lyu Y, Chow C Y, Lee V C S, et al. CB-planner: A bus line planning framework for customized bus systems[J]. Transportation Research, 2019, 101(APR): 233-253.
- [4] Liu T, Ceder A A. Analysis of a new public-transport-service concept: Customized bus in China[J]. Transport Policy, 2015(39): 63-76.
- [5] Nikolic M, Teodorovic D. Transit network design by bee colony optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(15): 5945-5955.
- [6] DE LORIMIER A, EI-GENEIDY A M. Understanding the factors affecting vehicle usage and availability in carsharing networks: a case study of communauto carsharing system from montreal, canada [J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2013, 7(1):35-51.
- [7] KIM M, SCHONFELD P. Integration of conventional and flexible bus services with timed transfers [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2014, 68 (68):76-97.
- [8] LU(CAROZ) TONG, LEI SHAN ZHOU, JIANGTAOLIU, et al. Customized bus service design for jointly optimizing passenger-to-vehicle assignment and vehicle routing [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 85(10):51-475.
- [9] CHEN, L. Logistics distribution vehicle routing problem with time windows [J]. Advanced Materials Research, 2012, 468-471:2047-2051.
- [10] Kang L J, Chen S K, Meng Q. Bus and driver scheduling with mealtime windows for a single public bus route [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 101: 145-160.
- [11] WANG J, YAMAMOTO T, LIU K. Role of customized bus services in the transportation system: insight from actual performance[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 2019: 1-14.
- [12] LI D, Ye X, MA J. Empirical analysis of factors influencing potential demand of customized buses in Shanghai, China[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2019, 145(2): 5019006.
- [13] 徐康明, 李佳玲, 冯浚等. 定制公交服务初探[J]. 城市交通, 2013, 11(05): 24-27.
- [14] 刘冬梅. 西安市定制公交运行方案研究[D]. 长安大学, 2014.
- [15] 江捷. 深圳市定制公交经营模式与发展路径[C]. 中国城市规划学会城市交通规划学术委员会. 2017 年中国城市交通规划年会论文集. 中国城市规划学会城市交通规划学术委员会: 中国城市规划设计研究院城市交通专业研究院, 2017: 1375-1382.
- [16] 王琳, 陈大鹏. 公交站点选址的分析与模糊评判[J]. 交通科技与经济, 2009, 11(06): 47-49.
- [17] 李佳玲. 定制公交服务的规划方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014:35550-80.
- [18] 刘喜. 城市定制公交线路设计研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015: 35-50.
- [19] 卢小林, 张娴, 俞洁. 灵活型定制公交系统综合评价方法研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(05): 135-140.
- [20] 陆百川, 何相曦, 胡松, 等. 城市外围非高峰时段公交柔性调度系统研究[J]. 重庆交通大学学报(自

- 然科学版), 2020, 39(2): 8-15.
- [21] 雷永巍,林培群,姚凯斌.互联网定制公交的网络调度模型及其求解算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(01): 157-163.
- [22] 孙春洋. 可变线路公交车辆路径规划研究[D]. 东南大学, 2018: 21-89.
- [23] 胡郁葱, 陈栩, 罗嘉陵. 多起终点多车型混载的定制公交线路规划模型[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(04): 1-11.
- [24] 曹阳. 基于出行需求分析的定制公交调度优化方法[D]. 哈尔滨工业大学, 2018: 50-110.
- [25] 柳伍生, 周向栋, 贺剑. 基于多需求响应的定制公交绿色线网优化[J]. 公路交通科技, 2018, 35(03): 132-142.
- [26] 付晓, 顾宇, 刘志远. 多模式公交网络中考虑定制公交的活动与出行建模[J]. 交通运输系统工程 与信息, 2019(04): 20-27.
- [27] 邵文, 贾顺平, 曹文娟. 基于混合车型的灵活型接驳公交路径协同优化研究[J]. 山东科学, 2019, 32(04): 64-73.
- [28] 何民,李沐轩,税文兵,等. 可靠性和舒适性对响应式定制公交线路设计的影响 [J]. 公路交通科技, 2019, (5): 145-151.
- [29] 周扬. 需求响应型的社区巴士发车间隔优化研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [30] 张清善. 北京 CBD 定制公交站点规划与票价研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [31] 孙博, 杨春风, 魏明, 等. 考虑乘客个性化出行的需求响应型接驳公交调度模型[J]. 昆明理工大学学报 (自然科学版),2019,44(01):122-126+137.
- [32] 简奕灿, 张瑾, 晋松. 居民定制公交出行意愿影响因素分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(2): 247-252.
- [33] 田万利. 基于手机信令数据的通勤定制公交设置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [34] 李云伟. 响应预约需求的定制公交站线规划方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019
- [35] 魏长钦, 王伟智. 随机需求下定制公交站点及路径动态优化模型[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 98-104.
- [36] 韩志玲. 基于出行数据的定制公交线网规划与线路设计研究[D]. 北京: 北京工业的大学,2020.
- [37] 刘祺. 基于出租车需求的定制公交站点选址与线路规划研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [38] 郑汉, 张星臣, 王志美. 混合车型需求响应公交服务定制问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018,18 (02): 157-163.
- [39] 蒋蕊, 卓健. 定制公交竞争力分析与规划应对[J]. 规划师, 2018,34 (8): 113-119.
- [40] 郭曼. 基于多点对多点开行模式的定制公交线路规划研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [41] 赵伟忠. 随机用户需求下实时定制公交线路生成模型研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [42] Guo R, Guan W, Zhang W, et al. Customized bus routing problem with time window restrictions: model and case study[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2019, 15(2): 1804-1824.
- [43] 王健. 需求响应交通服务之理论探讨[J]. 运输经理世界, 2015(Z1):38-39.
- [44] Spielberg F. Traveler Response to Transportation Cooperative Research (TCRP). Report 95 Chapter 6: Demand-Responsive/ADA [R]. Washington, D.C.: 2004.

- [45] Han J, Kamber M, Tung A K H. Spatial clustering methods in data mining[J]. Geographic data mining and knowledge discovery, 2001: 188-217.
- [46] 陈瑞. 基于多源 POI 数据的匹配融合方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2014.
- [47] 杨瑞杰. 基于互联网的地理实体信息获取关键技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2017.
- [48] Boukouvala F, Misener R, Floudas C A. Global Optimization Advances in Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP, and Constrained Derivative-Free Optimization, CDFO[J]. European Journal of Operational Research, 2015: S037722171501142X.