

基于旅客出行需求数据的机场巴士 站点布局与路径优化研究

何佳, 赵小奇

(北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 基于城市公交和地铁刷卡数据, 分析了旅客的实际出行需求, 为机场巴士站点选址与线路优化提供了数据支持。首先, 通过对刷卡数据的分析, 识别出旅客的出行需求点, 应用 K-medoids 聚类算法对全市旅客的出行需求进行聚类, 并将聚类得到的出行需求中心与火车站等重要交通枢纽作为巴士站点, 为旅客提供便捷的接驳服务。其次, 利用路网分析和路径优化算法生成站点间的最优路径, 以提升机场巴士的服务覆盖率和运营效率。最后, 基于优化算法所得的路径推荐结果并结合人工校正, 形成了推荐路线方案。对比路线评价结果显示, 优化后的机场巴士路线能够显著缩短旅客的总步行距离。本研究以实际出行需求为导向, 优化机场巴士的站点布局与路径规划, 为机场接驳服务体系的完善提供了科学支持。

关键词: 机场出行需求; 需求中心识别; 机场巴士; 站点选址; 路径优化

中图分类号: U491; U8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4026(2025)06-0115-10

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Research on the layout and route optimization of airport shuttle bus stations based on passenger travel demand data

HE Jia, ZHAO Xiaoqi

(Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This study analyzed actual passenger travel demand based on city bus and subway card swipe data to provide data support for airport bus station selection and route optimization. First, travel demand centers were identified by analyzing card swipe data, and the K-medoids clustering algorithm was used to cluster city-wide travel demands. The resulting travel demand centers, along with major transportation hubs such as railway stations, were selected as shuttle bus stations to provide passengers with convenient transfer services. Second, optimal routes between stations were generated using network analysis and route optimization algorithms to improve the service coverage and operational efficiency of the airport shuttle. Finally, recommended routes were refined through manual adjustments of the optimal routes. A comparative analysis of route evaluation results revealed that the optimal airport shuttle routes significantly reduced the total walking distance of passengers. This study optimized airport bus station layout and route planning based on actual travel demand, providing scientific support for improving airport transfer services.

Key words: airport travel demand; demand center identification; airport shuttle bus; station selection; route optimization

收稿日期: 2024-11-12 修回日期: 2025-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(72371004, 72231001)

作者简介: 何佳(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为民航交通。E-mail: hejia@bjut.edu.cn, Tel: 15210966823

随着城市化进程的加速与航空运输业的蓬勃发展,机场正逐渐成为城市中重要的交通枢纽,其客流量也呈现出不断增长的趋势。机场巴士在衔接机场与城市各区域的旅客出行需求方面具有不可替代的作用,但目前的机场巴士路线规划往往难以充分满足旅客多样化的出行需求。现有规划多集中于火车站、商务区等人流密集区域,忽视了其他区域旅客的差异化需求。如何在复杂的交通环境中兼顾多样化的出行特征并实现机场巴士站点的合理布局,成为尚需解决的现实问题。

为了更好地应对此类多样化出行需求,学者们在公共交通站点布局及线路规划方面进行了大量研究。赵天天^[1]、王洪涛^[2]采用改进的 K-means 算法优化站点布局,陆炜等^[3]结合 Canopy 和 K-means 算法,针对微循环公交的站点布局进行了深入研究。以上研究在特定场景和局部区域内取得了较好的效果,但机场旅客的出行需求更为复杂,仍需从宏观层面上对机场巴士站点布局进行系统化的优化。因此,如何基于机场旅客实际的出行需求进行全面的站点布局优化,仍然是当前研究中的一个挑战。与此同时,针对旅客分布不均且需求各异的难题,K-medoids 聚类算法由于在处理异质性数据时的优势,也被广泛应用于公共交通站点选址中。田诗佳等^[4]通过 K-medoids 最大化需求点覆盖度,提升了机场巴士站点的均匀性分布;年光跃等^[5]、管新梅^[6]则结合机器学习与空间大数据技术,通过空间密度聚类和 GIS 分析方法,进一步提高了不同公共交通工具站点选址布局的合理性;邬群勇等^[7]则在多源客流数据的基础上,引入复杂网络理论,构建了大站快车公交站点的推荐方法。

在机场巴士线路规划与模型构建方面,也有诸多学者采用混合整数规划、双层规划模型以及启发式算法进行研究。例如,Zhao 等^[8]基于时间-空间网络模型优化了机场接驳服务的时刻表安排,陆学智等^[9]通过双层优化模型实现了机场大巴线路的选择与优化,李云伟^[10]借助静态线路规划与禁忌搜索算法优化线路以应对需求响应的挑战,马昌喜等^[11]则在特殊场景下的线路优化问题中引入了遗传算法和三段式混合编码方法以求解具有多重约束的优化问题。此外,成本最小化^[12]、节约能源^[13]、发展可持续化^[14],以及网络可靠度^[15]等也成为学者们关注的重点。以上研究在不同层面推动了公交系统站点布局与线路规划的理论与实践发展。

然而,对于机场巴士这一具有集中性与多样化需求特征的交通系统而言,现有研究仍较难兼顾异质化需求点的全面覆盖与线路规划的高效性。一方面,需求点布局往往存在部分区域被忽视或无法精确捕捉旅客真实分布的问题;另一方面,已有规划策略在应对多目标、多约束下的线路设计与运行优化时仍显不足。因此,针对机场巴士系统的出行需求特征,亟需一种基于实际出行数据、兼顾整体覆盖与高效运行的优化方法。

基于此,本文在借鉴已有研究的基础上,利用城市公交与地铁的实际刷卡数据识别出旅客的出行需求点,并采用 K-medoids 聚类算法对需求点进行聚类分析,结合火车站等重要交通枢纽,构建出更为合理的机场巴士站点布局方案。在路网分析的基础上构建站点间的距离矩阵,并采用贪心算法进行路径优化,最终生成了行驶合理的巴士路线。在路径生成后,通过人工校正的方式进一步优化方案,确保了路线的便捷性和高效性。

1 数据简述与预处理

1.1 所用数据描述

本文使用的数据集为 2019 年 5 月北京市全市范围的公交与地铁刷卡数据,来源于国家综合地球观测数据共享平台(<https://www.chinageoss.cn>)。数据涵盖常规公交和地铁两种出行方式,包含了旅客出行的轨迹特征。通过对该数据集的分析,可识别离港旅客的出行起始点(旅客出发需求点)和到港旅客的出行目的地(旅客终到需求点),从而基于实际出行需求优化机场巴士站点选址和路径规划,为科学化的交通管理和精准服务提供数据支撑。

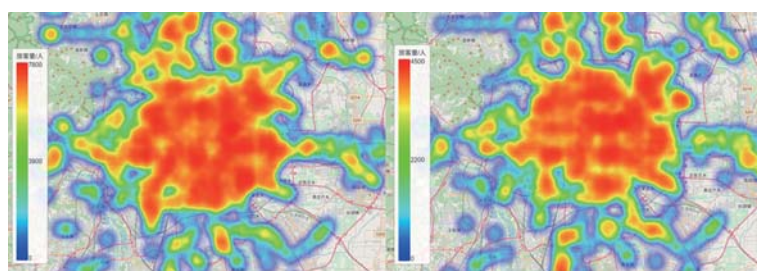
1.2 数据预处理

本文所使用的数据集中的地理坐标基准为 GCJ-02(火星坐标系),为确保数据与其他地理信息系统与地图的兼容性,将坐标系从 GCJ-02 转换为国际通用的 WGS-84 坐标系^[16]。由于原始数据集含有数千万条数据,其数据体量较大,因此在数据预处理时,需要进行有效地分割和筛选,具体如下:

首先,需对原始数据进行筛选。由于数据体量庞大,采用分表处理方式以减少内存占用,并聚焦于机场相关的旅客群体,提取出行起点或终点含有“T2 航站楼”或“T3 航站楼”的记录。然后,将每个符合条件的IC卡号的所有出行记录提取出来,合并为一个集中数据集,以便分析机场出行需求。

其次,进行旅客出行需求数据整理。为实现全过程的出行需求表达,根据每个卡号的刷卡记录,提取离港旅客的出发需求点和到港旅客的终到需求点。当卡号在当天仅有一条刷卡数据时,则该条记录的起点(终点)直接作为该旅客的出发(终到)需求点。当卡号包含多条记录时,由于首都机场线实行单独计费,为了还原旅客的出行全流程链条,采用以下方法提取旅客需求点:对于终点站名含有T2航站楼或T3航站楼的卡号,因该条记录为首都机场线的乘车记录,并且该记录独立于其他记录之外,故选取该条记录的上一条记录的起点站名作为该旅客的出发需求点;同理,对于起点站名含有T2航站楼或T3航站楼的卡号,选取该条记录的下一条记录的终点站名作为该旅客的终到需求点。此方法在多次刷卡的场景中捕捉了旅客的主要行程,保证了旅客需求点数据的准确性。

接下来进行需求量分析与聚类处理的环节。为了识别机场接驳出行的需求中心,首先统计每一需求点的出行量,通过计算各需求点中相同站名的出现频率,以此量化旅客的流量需求。绘制旅客需求点热力图(图1)。



(a) 出发需求

(b) 终到需求

图1 旅客需求点热力图

Fig.1 Heat map of passenger travel demand

由旅客的出发需求点和终到需求点热力图可知,旅客的出发需求点与终到需求点多位于城市中心与近郊区域,远郊区域的旅客需求较少。基于需求量分析的结果,进一步应用K-medoids聚类算法^[17]对这些需求点进行聚类。

选择K-medoids算法的原因在于其鲁棒性较强,能够较好处理出行数据中的噪声。以现有的样本点为机场巴士预备站点,可进一步的降低机场巴士站点的建设成本。

给定数据点 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和预设定的簇数(为确保所选聚类中心的合理性,本文设定20个聚类类别,即希望旅客的出发需求点和终到需求点各划分出20个旅客需求点聚集中心),K-medoids算法通过最小化簇内的距离总和来确定每个簇的中心,其距离采用欧式距离^[18]衡量。对于地理空间中的任意两点 x_i 和 x_j ,其欧氏距离如公式(1)所示:

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{(x_i^{\text{lon}} - x_j^{\text{lon}})^2 + (x_i^{\text{lat}} - x_j^{\text{lat}})^2}, \quad (1)$$

式中, x_i^{lon} 和 x_j^{lat} 分别代表需求点 x_i 和 x_j 的经度和纬度。

算法通过最小化以下目标函数来确定聚类的中心点:

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} d(x, m_i), \quad (2)$$

式中, k 代表聚类的数量(在此为20个类别); C_i 表示第 i 个簇; m_i 表示第 i 个簇的中心点; $d(x, m_i)$ 为站点 x 与聚类中心的距离。

每次迭代的过程中,算法通过随机替换当前中心点候选,以求最小化簇内距离总和。最终的聚类中心点即为所有站点中最具代表性的实际站点,确保了中心点的可解释性。将K-medoids算法的聚类结果进行可视化,生成聚类分布图,以直观呈现出行需求的空间分布情况。同时,在站点聚类之后,本文对聚类结果进行人工微调,优先选择现有的地铁站作为机场巴士的设站,以便提升接驳效率并满足旅客对公共交通便捷性的需求。经分析,得到旅客的出发需求点(古城、东直门等20个站点);旅客的终到需求点(崇文门、高米店北等20个站点)。旅客需求点聚类结果如图2所示。

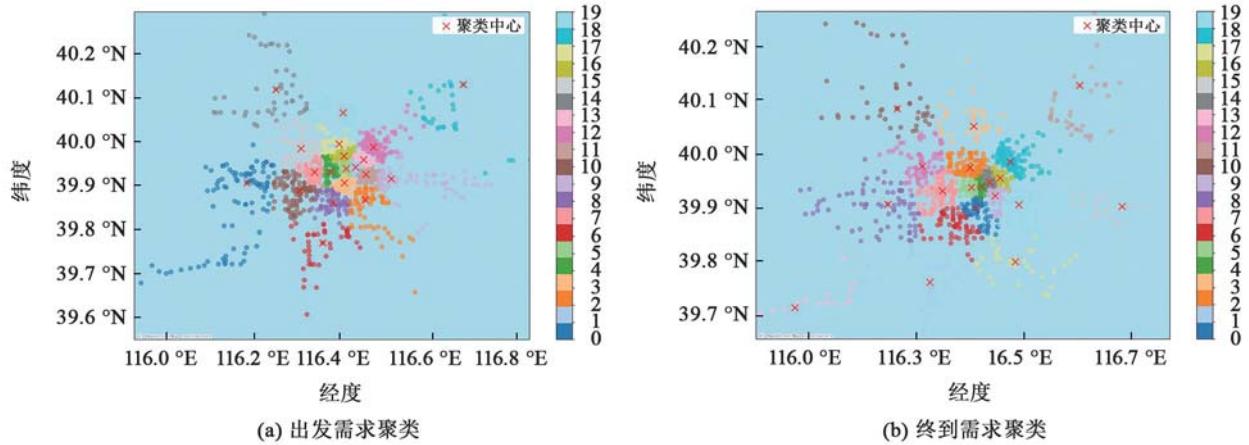


图2 旅客需求点聚类结果图

Fig.2 Clustering of passenger travel demand centers

这一图形化展示直观揭示了每个聚类中心的位置,提供了设置机场巴士站点的初步参考。通过上述的多步骤的数据预处理和科学的聚类分析,为后续机场巴士站点布局和路径优化打下了坚实的数据基础。

2 模型构建与算法求解

为优化机场巴士线路规划,使其贴合旅客实际需求,本文基于旅客出发需求点和终到需求点的相似性,首先选取了 23 个需求点,包括旅客出发需求点和 3 个重要交通枢纽^[19](北京站、北京南站、大兴机场),作为机场巴士站点的初始位置。加载机场周边的道路网络后,采用贪心算法^[20]对路径进行初步规划,并进行人工微调,以最小化总路径长度为优化目标,为机场巴士路线规划提供基于交通网络的初步方案。随后结合旅客终到需求点调整路径,生成推荐线路。

2.1 站点初始选址与路线分配

基于 1.2 节确定的旅客出发和终到需求点,本节进行路线的规划。为避免线路过于曲折,采用扇形^[21]聚类的方式对旅客出发需求点进行聚类,该方法可将同一方向上的出发需求点聚集在一起,使得路线避免频繁的路径迂回和绕行。通过以机场为圆心、在特定圆心角范围内聚类站点,将空间上靠近的需求点归为同一路线。这样既能缩短乘客的总行程时间,也有助于提高机场巴士的运行效率,减少行驶路径中的冗余部分。旅客出发需求点经过扇形聚类后的站点如图 3 所示。

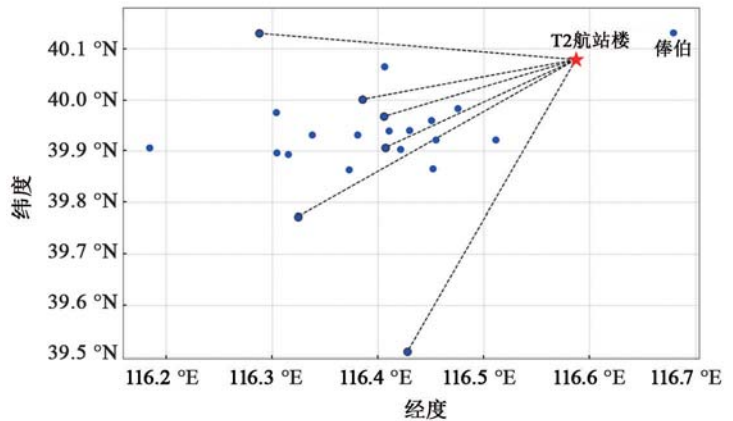


图3 旅客出发需求点扇形聚类

Fig.3 Fan-shaped clustering of passenger departure demand centers

与此同时,在聚类的过程中发现,俸伯站点位于机场的东北侧,与其余各站点均距离较远。拟通过采用开行到顺义方向的常规地铁接驳线路的形式方便该区域的旅客出行。

2.2 路线优化目标与约束条件

为保证规划线路能够真实反映实际交通情况,本文首先通过 python 软件中的 OSMnx 库,从 OpenStreetMap (OSM)平台加载了北京首都机场 T2 航站楼周围 100 km 范围内的完整且可供行车的路网数据^[22]。生成的路网图以图模型表示,包含了节点和边,节点代表路口、交叉点等重要地理位置,边则表示可通行的路段。同时,结合 OSM 提供的动态更新数据,确保了本文所使用路网的实际性和准确性。

同时,为了最大程度降低各个线路的站点分配不均匀的问题,本文采用基于扇形聚类的方式,基于从旅客实际需求数据中识别出的旅客出发需求点为基础,进一步进行机场巴士路线的设计。本文以机场巴士路线的行驶总距离最小化作为主要优化目标,同时,为了规划合理的巴士线路以满足各区域对机场出行的服务需求,设计了一定的约束条件。

目标函数如公式(3)所示:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} d(T_2, S_{i,j}), \quad (3)$$

式中, N 代表规划的总线路数(本文中为5条线路); n_i 代表第 i 条线路上的站点数量; $S_{i,j}$ 代表第 i 条线路上的第 j 个站点; $d(T_2, S_{i,j})$ 代表从 T2 航站楼到站点 $S_{i,j}$ 的路网中最短路径距离。

约束条件设定如下:首先是最小站点数约束,每条线路至少包含两个站点,保证每条线路的覆盖范围和接驳需求(如式(4)所示);其次是最大距离约束,每条线路的总行驶距离不超过设定的阈值,以确保行驶时间和成本的合理性。在本文,该阈值限定为 100 km。该阈值的设置综合考虑了避免线路因绕路而导致单程行驶距离过长的问题(如式(5)所示);最后是线路数量约束,限制总线路数为5条,以均衡资源分配并保证巴士线路覆盖整个服务区域(如式(6)所示)。

$$n_i \geq 2, \forall i = \{1, \dots, N\}, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i-1} d(S_{i,j}, S_{i,j+1}) \leq L_{\max}, \forall i = \{1, \dots, N\}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N n_i = M, \quad (6)$$

式中, L_{\max} 代表线路最大长度阈值; M 代表所有备选站点的总数。

2.3 距离矩阵构建与路线生成

为优化机场巴士的行驶路径,首先基于路网图生成各站点间的路网距离矩阵,再在此基础上进行初始线路分配。在前一节确定的23个需求点中,俸伯站点由于其地理位置较为偏远,与其他站点的距离差距显著且方位不同,因此决定采用开行到顺义方向的常规地铁接驳线路形式单独服务该区域旅客。由此,距离矩阵的构建基于剩余的22个需求点及T2航站楼。使用代码计算各站点之间的最短路径距离,从而构建了完整的距离矩阵,为后续的路径生成和优化提供依据。

在构建距离矩阵时,依据每个站点的经纬度信息,利用 python 中的 OSMnx 库将站点映射到实际道路网络的最近节点,确保站点位置准确反映在路网中。随后,采用 Dijkstra 算法在网络图中计算所有节点对之间的最短路径,以路径长度作为权重。这一过程确保了距离矩阵中每对站点的路径均为最短行驶距离,避免了路网复杂性可能带来的误差。具体地,采用最短路径算法逐步获取每对节点的最短路径距离,确保最终的距离矩阵能够真实反映各站点的实际交通网络距离。这一距离矩阵的行和列分别对应需求点和 T2 航站楼节点,为初始路径分配提供了关键支持。

在生成的距离矩阵上,应用贪心算法逐步构建初始路径。贪心算法的核心思想是通过“最短距离优先”策略,在每一轮选择当前节点到未访问站点中距离最小的一个,逐步构建路线。初始设置中,以 T2 航站楼为起点,将其映射到最近的网络节点,并作为算法的起始点。随后,贪心算法计算当前节点到所有未访问站点的最短路径距离,选择距离最小的站点并将其标记为已访问,如公式(7)所示:

$$N_s = \min_{s \in U} d(N_c, s) \quad (7)$$

式中, N_s 表示下一站点; s 表示未访问站点; U 表示未访问站点的集合; N_c 表示当前站点; $d(N_c, s)$ 表示当前节点和未访问站点之间的距离。

在找到下一个最近站点后,将该站点标记为已访问,并加入列表,更新 $current_node$ 为当前选定的站点。重复该过程,直到所有站点均被访问。当已访问站点的集合包含所有站点后,算法终止,并生成线路的

顺序。最终生成的站点路径经过最小化的距离优化处理,确保机场巴士路线尽量缩短,为最终的路径推荐提供合理依据。具体算法如表 1 所示。

表 1 初始路径算法

Table 1 Initial-route-generating algorithm

初始路径算法
输入: station_points, G, T2_lat, T2_lon
输出: route
1.从 T2_lat, T2_lon 获取 T2 的最近节点 T2_node
2.对于每个站点 (station_name, lon, lat): 计算其最近的路网节点 station_node
3.对于每个站点,计算从 T2_node 到 station_node 的最短路径 distance
4.使用贪心算法进行路线规划:
1.初始化 visited = {} 和 route = []
2.将 N_c 设置为 T2_node
3.重复直到所有站点都被访问:
a.对于每个未访问的站点,计算从 N_c 到该站点的路径长度
b.选择最短路径对应的站点 closest_station
c.将 closest_station 加入 route
d.将该站点标记为已访问
e.更新 N_c 为 closest_station 的节点
5.更新站点数据中“站点顺序”列
6.保存结果到输出文件

2.4 路线算例

在经过上述方法操作后,应用实际数据构建算例,得到路线初步规划结果,如图 4 所示。

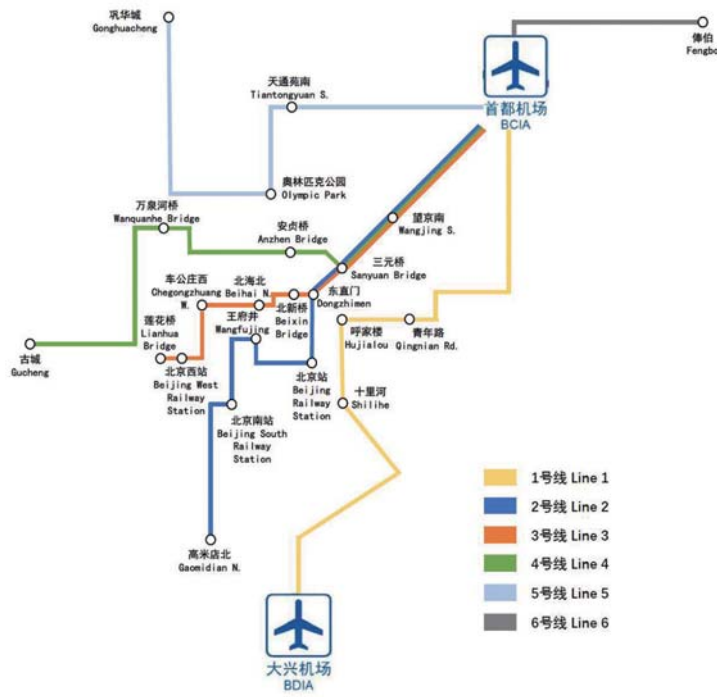


图 4 机场巴士初始路线规划图

Fig.4 Initial-route planning map for the airport shuttle bus

在生成机场巴士初始路线的基础上,将旅客终到需求点纳入线网中进行统筹考虑,以获得综合考虑旅客出发与终到需求点的机场巴士路线规划方案。对旅客每一个终到需求点进行处理,如下表 2 所示。

表 2 旅客终到需求点的处理方式

Table 2 Processing method for passenger arrival demand centers

站名	处理方式
崇文门	保留,结合走向纳入 2 号线
高米店北	初始路线已覆盖
安贞桥	初始路线已覆盖
立水桥	优化线路里程,将原 5 号线天通苑南修改为该站点
东直门	初始路线已覆盖
北新桥	初始路线已覆盖
北京南站	初始路线已覆盖
车公庄	优化线路走向,原 3 号线改走西二环,将车公庄西修改为该站点
玉泉路	新增站点,并入 4 号线
呼家楼	初始路线已覆盖
生命科学园	新增站点,并入 5 号线
南法信	新增站点,并入接驳线
海淀黄庄	新增站点,并入 4 号线
阎村	距离现有线路过远,删除处理
三元桥	初始路线已覆盖
通州北关	新增站点,并入 2 号线
亦庄桥	新增站点,并入 1 号线
望京南	初始路线已覆盖
四惠	新增站点,并入 2 号线

将旅客终到需求点纳入路线考虑范畴后,可进一步得出考虑旅客出发需求点与终到需求点的机场巴士路线综合规划图。巴士线网涵盖五个机场巴士路线和一个地铁接驳线,如图 5 所示。

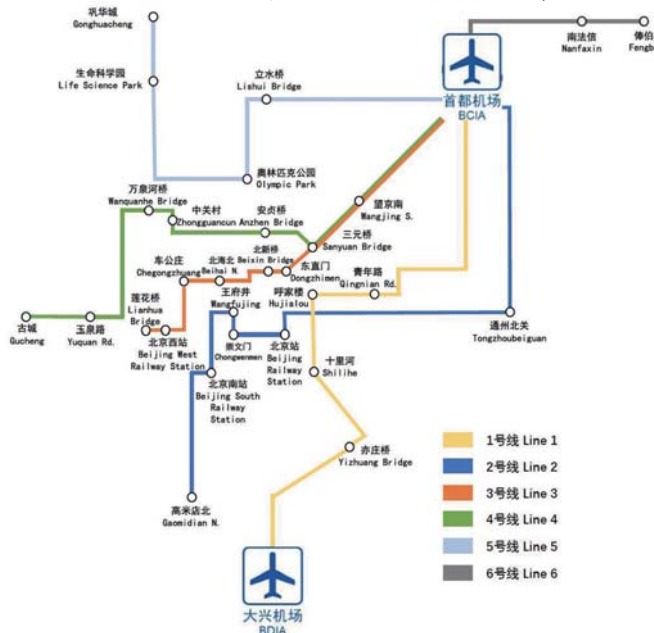


图 5 机场巴士路线规划图

Fig.5 Route planning map for the airport shuttle bus

3 路线评价

3.1 现有机场巴士路线简述

北京首都国际机场目前运行的机场巴士连接了市区多个重要区域,为进出北京的旅客提供便捷的接驳服务。其机场巴士路线主要覆盖市区的东部、北部及西部的核心区域,连接主要铁路枢纽以及商业和居住区。具体路线图如图6和图7所示。

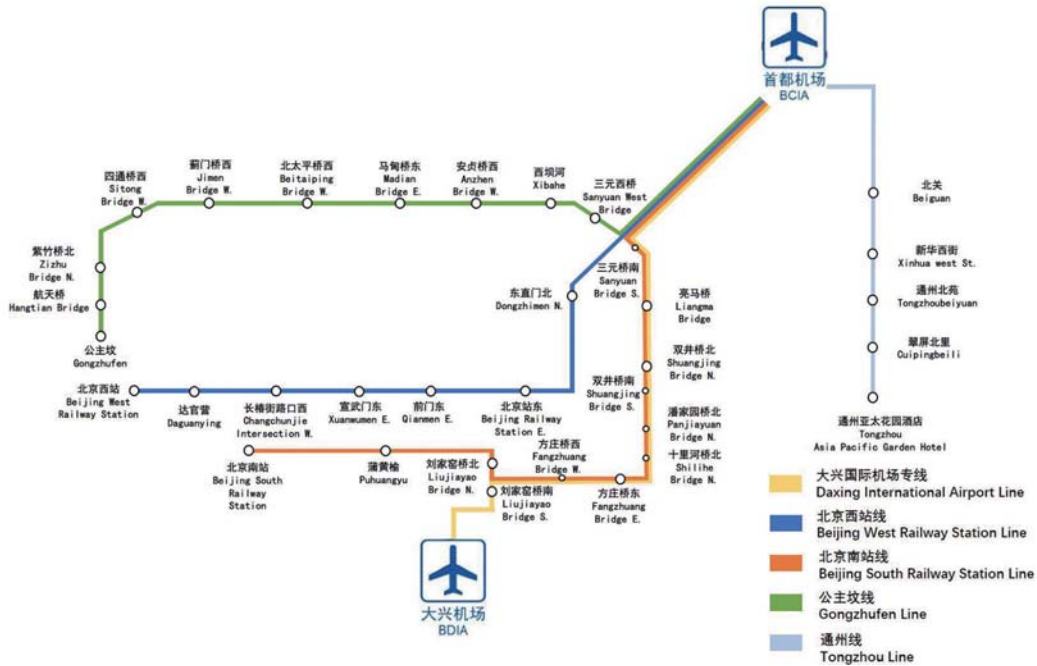


图6 机场巴士路线图(首都国际机场通往市区方向)

Fig.6 Route map for the airport shuttle bus (from Capital International Airport to downtown)

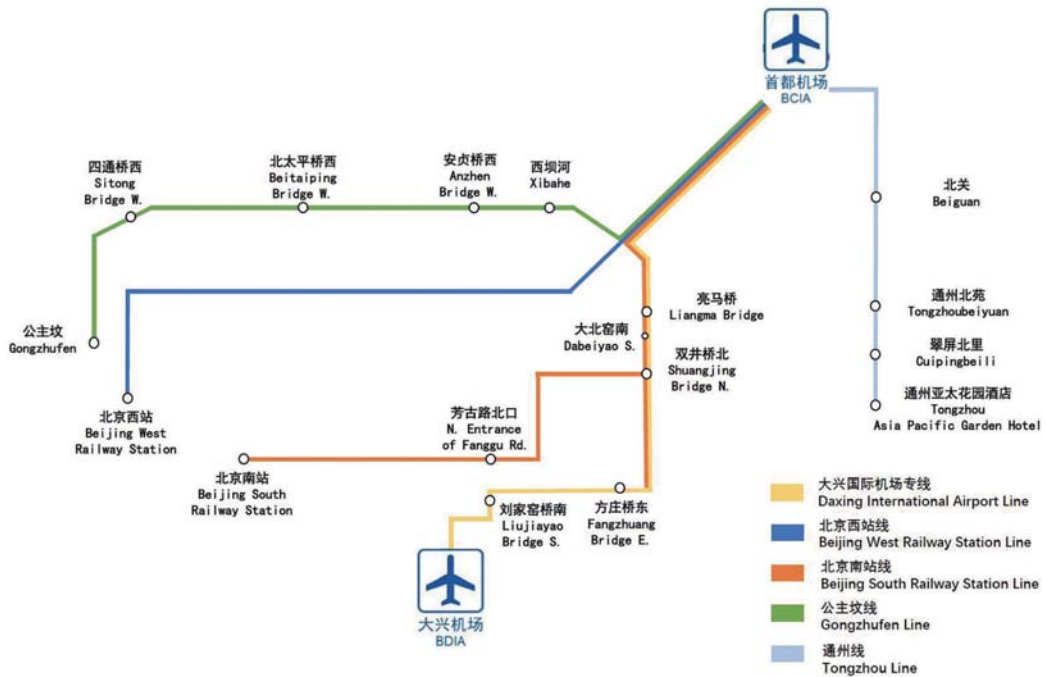


图7 机场巴士路线图(市区通往首都国际机场方向)

Fig.7 Route map for the airport shuttle bus (from downtown to Capital International Airport)

现有机场巴士大多采用少量站点的直达模式,以提供快捷的点对点服务为主。例如,部分路线仅在机场和市区中心区域之间设置1至3个停靠站,以减少旅客的通勤时间;而部分跨区域的线路则增加了沿途站点,以满足沿线旅客需求。

尽管北京机场巴士的覆盖区域广泛,但仍存在覆盖不足及站点密度不均的问题,部分需求较大的区域未被充分覆盖。例如,当前的线路设计未完全涵盖到部分高需求区域,尤其在非核心地段的服务较为薄弱。此外,现有路线较少结合地铁站作为机场巴士站点,增加了旅客换乘的不便。

3.2 路线评价方法与结果分析

为评价推荐路线相较有机场巴士路线在乘客实际出行需求中的优化效果,本文通过计算乘客需求点到达路线停靠站的最小距离来比较原路线与推荐路线的服务覆盖性与便捷性。

在根据经纬度,计算两点间距离的过程中,本文使用了 Haversine 距离算法,该算法基于经纬度计算两点间的球面距离,适用于地理坐标下的距离评估^[23-26],如公式(8)所示:

$$d = 2r \cdot \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right), \quad (8)$$

式中, φ_1 和 φ_2 分别代表两个站点的纬度; λ_1 和 λ_2 分别代表两个站点的经度; $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$; r 为地球半径(约6 371 km)。

在进行路线评价的过程中,需要从乘客的实际需求点出发,对比现有路线与推荐路线在每个需求点最近的停靠站点及对应距离,以此衡量路线的服务覆盖性。再将每位旅客的距离进行求和,以此得出整个城市内机场巴士路线的覆盖效果。对每个乘客需求点,计算其到推荐路线和原有路线的各停靠站点的 Haversine 距离,以此为依据为每个需求点找到与其距离最小的巴士停靠站,并记录对应的距离。最后,将两套路线方案的最小距离进行对比,得出推荐路线和现有路线对各需求点的覆盖距离。全月的旅客总数为319 381人,采用现有路线计算需求点到站点的总距离为10 340.767 km,采用本文的推荐路线,其需求点到站点的总距离为7 203.46 km,降低了30.34%。因此,本文的推荐路线具有一定的可行性与意义。

4 结语

本文围绕机场巴士站点布局与线网优化问题,提出了一种基于旅客实际出行需求的优化方法,并对模型进行了有效求解与验证。通过对旅客出行需求的分析,设计了合理的站点布局,并基于此构建了线路规划模型。实验结果表明,优化后的推荐路线在服务距离上更贴合旅客的实际需求,有效减少了乘客的步行距离,从而显著提升了旅客的整体出行体验。

本文的主要贡献在于,通过利用真实的公交与地铁刷卡数据,精确反映了旅客的实际出行需求,优化了传统的基于需求预测的模型,避免了对未来需求预测误差的依赖。与已有研究相比,本文研究方法具有一定的现实适用性,为机场巴士系统的规划提供了新的视角。

参考文献:

- [1] 赵天天. 改进的 K-means 算法在校车站点布局中的应用[J]. 地理空间信息, 2021, 19(1): 116-118. DOI:10.3969/j.issn.1672-4623.2021.01.031.
- [2] 王洪涛. 校车站点布局的仿真模拟[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(13): 43-48. DOI:10.3969/j.issn.1003-9767.2021.13.014.
- [3] 陆炜, 郑浩南, 王富. 基于街区制的微循环公交系统规划方法研究[J]. 交通与运输, 2024, 40(2): 88-93. DOI:10.3969/j.issn.1671-3400.2024.02.018.
- [4] 田诗佳, 包丹文, 程昊. 城市辖区机场巴士站点需求度评价及选址方法[J]. 交通运输研究, 2023, 9(2): 22-32. DOI:10.

- 16503/j.cnki.2095-9931.2023.02.003.
- [5] 年光跃, 黄建云, 潘海啸. 基于机器学习空间聚类的出租车停靠站点布局规划[J]. 交通运输研究, 2024, 10(1): 10-17. DOI:10.16503/j.cnki.2095-9931.2024.01.002.
- [6] 管新梅. 连云区公共自行车租赁点的布局优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019. DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2019.000446.
- [7] 邬群勇, 万云鹏. 基于多指标协同的公交大站快车站点推荐方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 162-168. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.01.025.
- [8] ZHAO R Q, LIU W, ZHANG F N, et al. Passenger shuttle service network design in an airport[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2022, 10(1): 1099-1125. DOI:10.1080/21680566.2021.2008279.
- [9] 陆学智, 文浩. 机场大巴营运网络设计模型和算法研究[J]. 公路与汽运, 2017(1): 44-49. DOI:10.3969/j.issn.1671-2668.2017.01.011.
- [10] 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. DOI:10.26944/d.cnki.gbjfu.2019.001237.
- [11] 马昌喜, 王超, 郝威, 等. 突发公共卫生事件下应急定制公交线路优化[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(03): 89-99. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.03.008.
- [12] 郭亚然, 周和平, 彭巍. 基于区间路网信息的机场定制巴士路径优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(3): 21-26. DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2018.03.005.
- [13] SIGLER D, WANG Q C, LIU Z C, et al. Route optimization for energy efficient airport shuttle operations: A case study from Dallas Fort worth International Airport[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2021, 94: 102077. DOI:10.1016/j.jairtraman.2021.102077.
- [14] 胡启洲, 邓卫, 田新现. 基于四维消耗的公交线网优化模型及蚁群算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 304-308. DOI:10.3321/j.issn.1001-0505.2008.02.024.
- [15] 戴帅, 陆化普, 胡启洲. 基于一体化的多层次公交线网优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(1): 85-93.
- [16] 李士强, 张云鹏, 田崇新. 基于 Python 的网络地图坐标转换方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(7): 46-48. DOI:10.3969/j.issn.1672-5867.2019.07.013.
- [17] 余洋. K-Medoids 聚类算法的计算机信息处理技术研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2024, 36(11): 23-25.
- [18] 吴松涛. 欧氏距离聚类在点位优化中的应用[J]. 环境与发展, 2020, 32(11): 144-145. DOI:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2020.11.067.
- [19] 文浩. 机场大巴营运网络设计模型与算法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [20] 孔钦, 刘晨, 顾永鑫. 基于贪心算法的常态化防疫交通路线智能推荐系统[J]. 现代信息技术, 2022, 6(17): 33-37. DOI: 10.19850/j.cnki.2096-4706.2022.17.008.
- [21] 申焱, 赵泽钰, 袁明新, 等. 基于四叉树扇形层值聚类的无人船障碍物检测[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5427-5435. DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2304084.
- [22] 连晓燕. 机场巴士网络优化设计问题研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2020.
- [23] 樊东卫, 何勃亮, 李长华, 等. 球面距离计算方法及精度比较[J]. 天文研究与技术, 2019, 16(1): 69-76. DOI:10.3969/j.issn.1672-7673.2019.01.009.
- [24] SENTHILKUMAR S R, JABAK V H, VIDYASHANKAR G, et al. Optimized bus route finder for educational institutes using haversine formula [C]//2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Kamard: IEEE, 2024: 1-4. DOI: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10725509.
- [25] ANDREOU A, MAVROMOUSTAKIS C X, BATALLA J M, et al. UAV trajectory optimisation in smart cities using modified A* algorithm combined with haversine and vincenty formulas[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(8): 9757-9769. DOI: 10.1109/TVT.2023.3254604.
- [26] PRASETYA D A, NGUYEN P T, FAIZULLIN R, et al. Resolving the shortest path problem using the haversine algorithm[J]. *Journal of critical reviews*, 2020, 7(1): 62-64.

