

产业园区需求响应式公交智能调度系统研发与应用

蔡伟崙

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125]

摘要: 产业园区常规公交普遍存在平峰时段运力闲置、末端接驳供需不匹配的行业共性问题,难以适配园区碎片化、弹性化的员工出行需求。针对该现状,研发一套适配中小规模园区的需求响应式公交智能调度系统,搭建软硬件一体的协同服务体系,构建路径重叠率与时间匹配度双维度顺路拼车调度数学模型,形成高峰定线、平峰动态响应的双模式运营机制。依托实际产业园区开展工程示范应用,实测数据表明,该系统可有效提升公交百公里载客量、降低车辆空驶率,大幅压缩乘客候车时间,显著提升园区地铁接驳公交分担率。研究成果可有效破解产业园区公共交通末端出行难题,为国内同类工业园区公交智能化改造、精细化交通治理提供可落地的工程参考。

关键词: 需求响应;公交;智能调度;产业园区;顺路拼车算法

中图分类号: U492.2*2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0153-05

Research and Application of Demand-Responsive Intelligent Bus Dispatching System in Industrial Parks

CAI Weilun

[Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

Abstract: Conventional bus services in industrial parks commonly suffer from idle transport capacity during off-peak periods and mismatches between supply and demand in last-mile connections, making it difficult to accommodate the fragmented and flexible travel needs of employees. To address these issues, an intelligent dispatching system for demand-responsive bus services tailored to small-sized and medium-sized industrial parks is developed. An integrated software-hardware collaborative service framework is established, and a mathematical dispatching model for en-route ride sharing is formulated based on two dimensions of route overlap rate and temporal matching degree. A dual-mode operation mechanism is then developed, featuring fixed-route services during peak hours and dynamic demand-responsive services during off-peak hours. An engineering demonstration is conducted in a real industrial park. The measured results show that the system can effectively increase the passenger volume per 100 vehicle-kilometres, reduce the empty-running rate of vehicles, substantially shorten the waiting time of passenger, and significantly increase the share of the metro connection to the bus in the park. The research results can effectively solve the terminal travel problems of public transport in industrial parks, providing practical engineering references for the intelligent reconstruction of public transport and refined traffic management in similar industrial parks in China.

Keywords: demand-responsive; public transport; intelligent dispatching; industrial park; ride-sharing algorithm

0 引言

城市公共交通高质量发展是国内城市交通治理的核心方向。相关政策明确提出推进地面公交服务向“基本服务+响应式服务”多元化体系转型,探索需求响应式停站、定制公交等灵活运营方式,构建“骨

干线+接驳线+特色线”多层次公交线网,满足不同人群的差异化出行需求^[1]。

产业园区作为城市产业集聚的核心载体,普遍具有职住分离显著、客流时空分布极不均的特征。早晚高峰,通勤客流高度集中于地铁站点与企业之间,末端接驳需求旺盛。平峰时段出行需求零散碎片化,传统的常规公交长期存在“高峰运力不足、平峰车辆空驶”的供需不匹配问题。同时,受自然边界、路网建设进度限制,常规公交线路延伸覆盖难度大、运营成本高,公共交通“最后一公里”短板突出,难以支撑园区营商环境优化与产业人才集聚^[2]。

收稿日期: 2026-07-07

基金项目: 上海市促进产业高质量发展专项(2023-GZL-RGZN-01040)

作者简介: 蔡伟崙(1992—),男,学士,工程师,从事城市公共交通与智能交通工作。

在此背景下,需求响应式公交作为一种弹性公交服务模式,能够根据乘客实时需求动态调整线路、站点与班次,成为破解产业园区平峰公交低效问题的重要路径。但现有通用型系统多面向城市主城区大客流场景设计,存在架构复杂、建设成本高、适配性不足等问题,难以直接应用于中小规模产业园区^[3]。因此,针对产业园区出行特征,研发低成本、轻量化、高适配的智能调度系统,具有重要的现实意义与工程应用价值。

国内外学者围绕需求响应公交调度算法、运营模式开展大量研究:国内靳文舟等^[4]、赫雪婷等^[5]聚焦调度算法优化;尹婷婷^[6]梳理交通大数据调度应用逻辑;张文波等^[7]分析定制公交客流选择影响因素;李文勇等^[8]、张长隆^[9]针对园区微循环、定制公交开展线网评价研究。

国外层面,ALONSO-MORA等^[10]提出大规模动态拼车匹配框架;MULLEY等^[11]、MESHKANI等^[12]完成园区接驳绩效评估与十点验证。

1 研究目标与技术路线

1.1 研究目标与意义

本研究立足产业园区公交出行的共性特征,以解决平峰时段供需不匹配、提升末端接驳效率为核心目标,打造“按需预约、动态调度、智能拼车、精准接驳”的响应式公交服务体系,实现运力资源与出行需求的时空精准匹配,构建可复制、可推广的产业园区微循环公交智能化运营模式。

具体目标包括:

(1)服务覆盖目标:试点期覆盖园区核心产业片区与配套居住区,站点至企业、小区门口平均步行距离控制在200 m以内,实现重点企业与主要客流点全面覆盖;

(2)运营效率目标:平峰时段公交百公里载客数较传统常规公交提升150%以上,车辆空驶率降低40%以上,单位客流运营成本显著下降;

(3)服务体验目标:系统订单响应时长不超过30秒,乘客平均候车时间控制在15分钟以内,车辆到站时间预估误差不超过2分钟;

(4)成本控制目标:采用轻量化SaaS云部署模式,降低系统建设与运维门槛,适配中小园区的预算承受能力,实现低成本快速落地。

研究意义体现在3个层面:一是实践层面,构建“高峰定线通勤+平峰弹性响应”的全时段公交服务

体系,系统性弥补产业园区常规公交服务短板,提升企业员工出行便捷度与通勤幸福感;二是技术层面,优化适配碎片化客流的顺路拼车调度算法,形成低成本、可快速落地的智能公交技术方案,丰富需求响应式公交的场景化应用研究;三是行业层面,为国内各类工业园区、产业新城的公共交通高质量升级提供可复制的工程范式,助力公交运营企业降本增效,支撑园区交通精细化治理与绿色低碳发展。

1.2 研究内容与技术路线

本次研究主要围绕系统架构设计、算法模型优化、工程落地验证三部分核心内容开展推进;结合产业园区出行的普遍特征,明确系统的建设目标和功能边界,搭建完整的软硬件一体化总体架构;依托园区订单分散的核心特点,构建双维度顺路拼车的数学模型和标准化调度规则;通过实体园区示范应用的方式,量化评估系统的实际运营效果,梳理系统现存的各类不足并给出针对性优化方向。

整体研究可以遵循现状研判、架构设计、算法建模、系统部署、试点运营、总结优化的完整逻辑逐步推进,通过理论建模与工程实测相结合的方式,充分保障研究成果的实用性和落地性,具体流程见图1。

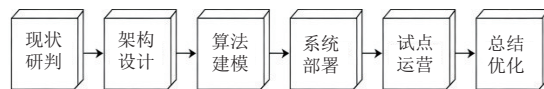


图1 研究技术路线图

2 需求响应式公交智能调度系统设计

2.1 系统核心功能

系统围绕乘客、司机、调度管理三类使用主体,构建全流程闭环功能体系,所有功能均基于产业园区出行场景需求设计。

2.1.1 乘客端功能

微信小程序可以实现轻量化接入,无需下载专属APP,能够支持即时预约、提前预约两种下单模式;用户可以自主选择预设站点的起点与终点,实时查看车辆位置、行驶轨迹与预计到达时间,同时可以实现扫码乘车、订单管理、取消退款、服务评价等全流程自助操作,简洁的操作流程可以适配园区员工高频短途的出行需求。

2.1.2 司机端功能

车载智能终端可以搭载各类核心功能,包含订单接收、动态路径导航、到站语音预警、乘客核销、异常工况上报等模块;系统能够根据实时订单动态更新行驶线路与停靠站点,支持扫码、手机号尾号双重

核销模式,可以适配园区弱网、设备轻微故障等复杂的现场运营场景。

2.1.3 调度管理端功能

整体分为实时调度监控与运营数据统计两大模块;调度模块可以实现车辆实时定位、订单智能撮合、线路动态调整、异常订单人工干预,数据模块能够自动统计订单量、空驶率、候车时长、客流 OD 分布

等核心指标,快速生成标准化运营报表,可以为运力调配、线路优化、服务考核提供充足的数据支撑。

2.2 系统总体架构

2.2.1 软件体系架构

系统采用分层式软件架构,基于公有云 SaaS 模式部署,自下而上分为四层,可以同时兼顾运行稳定性与功能拓展性,具体架构如图 2 所示。

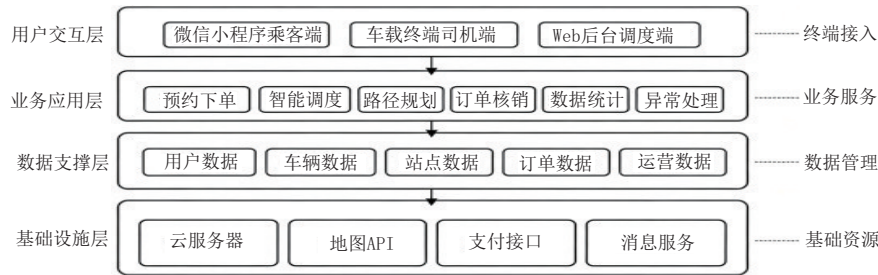


图 2 系统软件分层架构图

2.2.1.1 基础设施层

依托云服务器提供计算、存储、网络资源,统一接入第三方地图服务 API、支付接口与短信服务,为上层应用提供标准化基础支撑;

2.2.1.2 数据支撑层

统一存储用户信息、车辆信息、站点信息、订单数据、运营数据等核心数据,采用关系型数据库保障数据安全与调用效率,预留数据接口支持后续功能拓展;

2.2.1.3 业务应用层

集成预约下单、智能调度、路径规划、订单管理、支付核销、数据统计六大核心服务,实现全业务流程数字化管控,支撑多端协同运行;

2.2.1.4 用户交互层

面向不同用户主体提供微信小程序乘客端、车载安卓司机端、Web 端调度管理后台,覆盖全部使用场景,适配不同终端操作习惯。

2.2.2 硬件体系构成

硬件设备面向车辆、站点、调度中心三大场景完成轻量化配置,有效控制整体落地成本,可以完全适配园区小规模运营场景:

(1) 车载终端设备:每台运营车辆配置 1 台工业级车载平板与 1 台扫码核销设备,实现订单接收、导航指引、乘客核验功能;

(2) 站点服务设施:既有公交站点增设系统标识与预约二维码,新增虚拟站点采用简易站牌形式,标注站点名称与乘车操作指引,大幅降低站点建设成本;

(3) 调度管控设备:调度室配置调度终端与显示

设备,实时监控车辆运行状态与订单处理进度,支持异常情况语音预警与人工干预操作。

2.3 智能调度算法设计

2.3.1 问题描述与模型假设

产业园区需求响应式公交调度属于带时间窗的动态车辆路径优化问题,核心目标可以在有限运力的条件下,完成车辆空驶成本与乘客出行体验的平衡,实现整体运营效益的最大化。本次建模工作结合园区实际运营场景设定基础假设,所有订单的起终点都会限定在预设服务站点的范围内;车辆额定载客量保持固定,行驶速度可以依托实时路况数据完成修正;乘客预约时间为可接受时间窗的中点,允许存在小幅的时间偏差;单台车辆可以承接多笔顺路订单,按照最优路径依次完成站点停靠。

2.3.2 目标函数与约束条件

本次研究搭建多目标优化模型,以最小的车辆空驶里程、最短的乘客候车时长、最少路径绕行增量作为核心优化目标,可以实现运营成本与服务质量的综合权衡,具体计算方式见式(1)。

$$\min Z = \alpha \cdot \sum_{i=1}^m d_i + \beta \cdot \sum_{j=1}^n w_j + \gamma \cdot \sum_{k=1}^p e_k \quad (1)$$

式中: m 为运营车辆总数; d_i 为第 i 辆车空驶里程, km; n 为有效订单总数; w_j 为第 j 位乘客候车时长, min; p 为规划路径总数; e_k 为路径绕行增量, km; α, β, γ 为权重系数,结合园区场景分别取值 0.4、0.4、0.2。

模型设置三项核心约束条件,第一项为车辆容量约束,可以保障单车载客量不会超出额定标准,具体计算方式见式(2);第二项为系统响应时间约束,可以稳定保障服务响应效率,具体计算方式见式

(3);第三项为服务范围约束,所有订单的起终点都需要落在预设的园区服务边界内,不支持跨区域调度工作。

$$\sum_{j \in S_i} p_j \leq C_i \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中: S_i 为第*i*辆车承接订单集合; p_j 为单笔订单乘客数量; C_i 为车辆额定载客量。

$$t_r^j \leq T_{\max} \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: t_r^j 为订单系统响应时长; s ; $T_{\max}$ 为最大允许响应时长,取值30 s。

2.3.3 顺路拼车调度算法

针对园区动态零散的订单特征,本次研究设计改进型贪心调度算法,通过双维度顺路度计算完成订单的智能撮合,能够精准匹配最优的运营车辆,具体计算方式见式(4)。

$$\text{Sim}(o, v) = \omega_1 \cdot \frac{L_{\text{overlap}}}{L_o} + \omega_2 \cdot \left(1 - \frac{|\Delta t|}{T_0}\right) \quad (4)$$

式中: $\text{Sim}(o, v)$ 为订单与车辆顺路度,取值区间 $[0, 1]$; L_{overlap} 为订单路径与车辆当前行驶路径重叠长度, km; L_o 为订单全程路径长度, km; Δt 为预约时间与车辆预计到达时间差值, min; T_0 为时间偏差阈值,取值10 min; ω_1 、 ω_2 为权重系数,均取值0.5。

算法运行流程具备清晰的可控性,系统接收新订单后可以批量筛选服务范围内的所有运营车辆,逐一完成顺路度的计算;系统会优先匹配顺路度 ≥ 0.6 的在途车辆,动态插入停靠站点并更新整体行驶路径;没有适配在途车辆的情况下,系统会匹配距离最近的空闲车辆;没有空闲车辆的情况下,订单会进入排队序列,车辆完成现有任务后可以自动匹配最优订单,具体流程如图3所示。

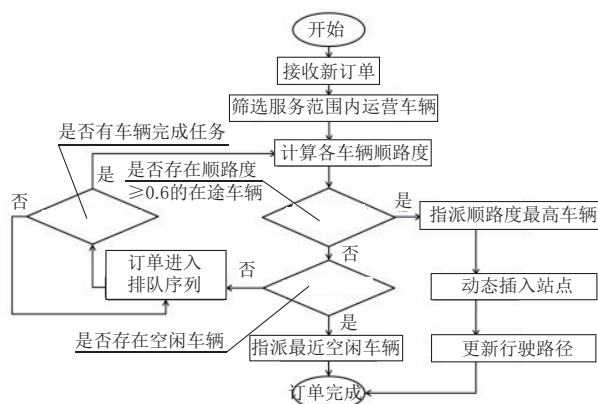


图3 顺路拼车调度算法执行流程图

3 示范应用与效果分析

3.1 试点区域概况

本次工程试点选址于上海市工业综合开发区,

园区整体总面积可以达到21 km²,内部主干路网布局规整,但保税边界、水系、高速的多重阻隔,会造成场地内部路网断点偏多、支路通行条件有限的问题;轨道交通5号线的两座站点分别布置在园区南北边界,与核心企业片区可以形成2~3 km的间距,超70%的地铁出站客流存在步行接驳距离超标的问题,园区末端交通的短板表现得较为突出。

园区的公交覆盖存在明显薄弱环节;部分常规公交线路的日均客流不足30人次、发车间隔可以达到50 min以上,平峰时段的运力闲置、服务低效问题表现得十分典型,和国内多数产业园区的公交运营痛点高度契合,试点区域可以具备极强的行业代表性。

本次试点的服务范围锁定在园区西侧核心片区,整体面积为4.2 km²,可以覆盖35家重点生产企业以及多处居住小区;试点配置2台50~60座公交车辆,总共布设49个站点,包含31处既有公交站、18处新增招呼站,用户的平均步行接驳距离仅为60 m,可以充分满足园区各类日常出行需求,站点设置详如图4所示。

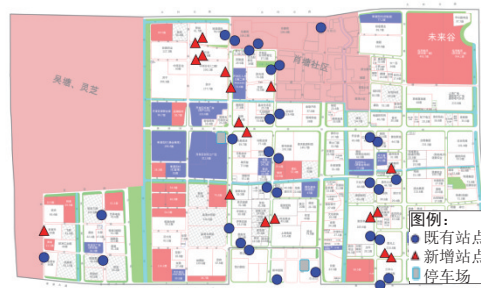


图4 上海市工业综合开发区需求响应公交站点设置

3.2 试点实施方案

3.2.1 运营模式

采用“高峰定制+平峰响应”双模式运营:早高峰7:00—9:00、晚高峰16:30—18:30执行定线定班定制公交,服务地铁通勤客流;平峰工作日9:30—16:00切换为需求响应模式,无固定线路与班次,乘客通过微信小程序预约,系统智能调度车辆接送。

3.2.2 票务与规则

试运营阶段实行免费乘车,培育用户使用习惯。派车前乘客可自由取消订单;派车后不可取消;若车辆未在预估时间内到达,乘客可取消订单。

3.2.3 保障机制

由属地交通管理部门牵头,园区管委会、公交运营企业、技术团队协同推进。

3.3 应用效果评估

结合试点连续周期的运营台账与系统后台实测数据,本次研究从运营效率、服务体验、综合效益三个维度完成量化评估,基础数据均来源于项目实际运营数据。

运营效率层面,系统落地应用之后,客流在震荡中稳步上升,现状日均客流为初期的4倍,市场接受度、满意度较好,从每日32人次客流上升至150人次左右,客流统计详如图5所示;系统仅2.3 s的平均订单响应时长,会远低于30 s的设计阈值,可以大幅提升运力资源的整体利用率,彻底改善平峰时段的空驶浪费问题。

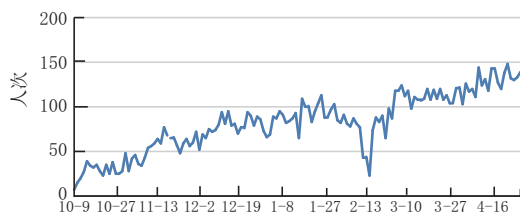


图5 上海市工业综合开发区需求响应公交系统上线后每日客流统计图

服务体验层面,原有50 min的用户平均候车时长可以压缩至10 min以内,能够实现出行效率提升;核心区域的全覆盖站点布局,可以缩短80%以上的用户步行接驳距离,彻底打通园区末端的出行壁垒。

综合效益层面,需求响应公交能够有效引导绿色出行、减少非机动车与私家车的通行压力;系统可以替代企业的部分自有班车服务,单家企业每年可以节省大量班车运营成本;多层次公交服务体系的搭建,能够有效优化园区营商环境,提升产业园区的人才吸引力与品牌竞争力。

4 结 语

本研究针对产业园区公交时空供需不匹配、末端接驳薄弱、平峰运力闲置的共性难题,研发了一套轻量化需求响应式公交智能调度系统,搭建起高峰定班+平峰响应的双模式运营体系,依托双维度顺路拼车算法完成订单的智能匹配与路径的动态优化。

本研究的创新体现在三个维度:一是模式创新:双模式一体化协同运营。同一套系统、同一批运力可以实现时段化的运营模式切换;早晚高峰可以运行定线定班的定制通勤服务,承接园区集中的通勤客流;平峰时段可以切换为动态响应模式,适配各类分散的弹性需求,能够最大限度提升车辆的整体利用率,避免运力的重复投入。二是算法创新:双维度

顺路拼车调度模型。针对产业园区平峰订单碎片化、单订单客流规模小的特征,依托路径重叠度与时间匹配度双维度指标完成订单顺路度的计算,能够精准适配园区小体量、碎片化的订单特征,在保障乘客出行时效的基础上,有效提升车辆拼车率、降低整体空驶率,更加贴合小规模运力配置场景。三是应用创新:轻量化快速落地方案。采用SaaS云部署+微信小程序入口的轻量化方案,无需园区搭建专属服务器与机房设备,无需用户下载专用软件,较短的部署周期、偏低的运维成本,可以实现系统在各类中小规模产业园区的快速复制推广,整体落地门槛会远低于传统智能公交系统。

上海工业综合开发区的试点应用结果可以表明,这套系统能够大幅提升公交运营效率与资源利用率,缩短用户候车时长、降低整体出行成本,有效补齐产业园区公共交通的末端服务短板。轻量化SaaS架构与场景化调度算法,可以适配中小产业园区的低成本落地需求,具备极强的工程实用性与行业复制推广价值。

经过阶段性的试点运营,系统暴露出两处问题。一个是极端低峰时段会存在偏高占比的单人零散订单,少量行程的拼车适配性不足,车辆空驶率依旧存在优化空间。另一个是园区部分支路的信号覆盖偏弱,会偶尔出现定位延迟、导航偏差等问题,能够小幅影响整体的运营稳定性。针对上述现存问题,后续可以从算法与系统两个维度开展迭代优化。一方面可以优化权重适配策略,对单人短途订单优先采用就近派车模式,引入客流预判模型完成前置运力调配。另一方面可以新增离线定位与缓存导航功能,适配园区弱网运行场景,进一步提升系统的运行稳定性与服务精准度。

本次研究依旧存在一定的局限性,研究场景仅覆盖园区日常通勤的短途出行需求。后续可以进一步拓展商务出行、夜间出行、应急接驳等多元化场景,融入大数据客流预测、自动驾驶协同等先进技术,持续优化调度精准度,打造全场景、智能化、精细化的园区微循环公交服务体系,助力产业园区交通的高质量发展。

参考文献:

- [1] 上海市交通委员会,上海市发展和改革委员会,上海市财政局,等.推进本市公共交通高质量发展的指导意见(沪交研〔2025〕64号)[Z].上海:上海市交通委员会,上海市发展和改革委员会,上海市财政局,2025.
- [2] 詹静.低需求区域发展需求响应式公交运营模式及适应性研究[D].

(下转第184页)