DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260958

综合交通枢纽网约车上客区协同调度仿真与优化研究

刘　灿
[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘　要： 针对综合交通枢纽网约车接驳系统高峰客流下服务效率下降、人车冲突加剧及空间资源错配等问题,以某大型枢纽上客区为对象,构建多智能体建模与离散事件驱动的混合仿真框架,开展“人—车—场”协同调度分析。设置日常高峰、节假日大客流、极端高峰及突发事件四类场景,通过车流量梯度实验、压力测试与多维度策略评估,量化系统服务水平退化规律与承载阈值。结果表明:日常高峰与节假日大客流下分区运营可满足疏散需求;极端高峰下旅客平均等待时间突破 15 min 预警阈值,进入非线性恶化区间;客流分流、接驳效率提升及“车找人”模式优化均能显著改善服务水平。研究可为枢纽网约车接驳系统分级预案制定、动态管控优化及应急组织提供量化决策依据。

关键词： 综合交通枢纽;网约车;协同调度;多智能体仿真;服务水平
中图分类号： U491.1　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1009-7716(2026)11-0097-07

Collaborative Scheduling Simulation and Optimization of Ride-Hailing Pick-Up Areas in Integrated Transportation Hubs

LIU Can
[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To address declining service efficiency, intensified pedestrian-vehicle conflicts, and spatial resource mismatch in ride-hailing pick-up zones of large integrated transportation hubs during peak periods, this study develops a hybrid simulation framework combining Agent-Based Modeling (ABM) and Discrete Event Simulation (DES) to analyze collaborative “pedestrian-vehicle-facility” scheduling. Four scenarios are designed: routine peak, holiday mass passenger flow, extreme peak, and emergency events. Through vehicle-flow gradient experiments, stress tests, and multi-dimensional optimization strategy evaluation, the degradation patterns of service levels and critical carrying capacity thresholds are quantified. Results show that zonal operation meets evacuation demand under routine and holiday peak scenarios; under extreme peak conditions, average passenger waiting time exceeds the 15-minute warning threshold and enters a nonlinear deterioration phase. Passenger flow diversion, improved connection efficiency, and “vehicle-seeking-passenger” optimization significantly enhance service levels. This research provides quantitative decision support for tiered response planning, dynamic control optimization, and emergency management in hub ride-hailing connection systems.

Keywords: integrated transportation hub; ride-hailing; collaborative scheduling; multi-agent simulation; service level evaluation

0　引　言

随着我国高速铁路网络与城市轨道交通系统的快速发展,大型综合交通枢纽已从单一的对外交通节点,演化为城市群互联互通的核心锚点与站城融合发展的战略支点[1],其集疏散体系面临日趋复杂的客流冲击。在枢纽离站方式中,网约车已成为旅客占比最高的弹性出行方式之一,但高峰时段常出现旅客长时间排队候车、车辆在场站反复淤积、人车动线交织混乱等问题,节假日与极端大客流场景下矛盾尤为突出,甚至引发安全风险与服务品质的双重危机。然而,现有上客区设计多基于静态容量估算,缺乏对“人-车-场”动态耦合过程的精细化刻画,难以支撑分级预案制定与动态管控决策。为此,

收稿日期：2026-08-26
基金项目：上海市交通委员会科研项目(JT2024-KY-017)
作者简介：刘灿(1990—),女,硕士,高级工程师,从事智慧交通研究工作。

本文以典型大型综合交通枢纽网约车上客区为对象,构建“人-车-场”协同仿真模型,量化不同场景下的系统服务水平退化规律与承载临界阈值,为枢纽分级预案与动态管控提供决策依据。

针对枢纽交通系统的仿真研究,现有成果可大致归为两个层面[2-5]。在宏观路网层面,VISSIM 等微观交通仿真软件被广泛用于评价枢纽集疏运路网的通行能力与服务水平,通过车辆跟驰和换道模型模拟车流运行状态[6],但难以捕捉网约车”订单触发—泊位匹配—旅客上车”的离散事件逻辑,更无法反映旅客行为对车辆周转的反馈机制。在中微观场站设施层面,多智能体建模方法在行人疏散、公交换乘等领域取得了显著进展[7],但现有研究大多将乘客与车辆割裂分析,缺乏对"旅客下单—平台派单—车辆进场—泊位等待—旅客步行—上车驶离”完整闭环的耦合建模。

在接驳模式与管控策略方面,既有研究对“车找人”(车辆就位后等待旅客)与“人找车”(旅客提前到达泊位区域等待车辆)两种模式的适用条件与效能差异缺乏系统量化比较。在分级预案评估方面,现有工作多停留在宏观策略层面,对日常、节假日、极端高峰等不同场景下空间资源弹性启闭的具体效果缺乏精细的仿真验证[8]。在突发事件敏感性分析方面,对人车交汇减速避让等典型干扰事件引发的连锁反应关注不足,难以为应急管理提供量化支撑。

在服务水平评价体系研究方面,赵永明等[9]构建了包含待疏导人数、等车时间与疏导时间的评价指标体系,采用 AHP 与熵权法相结合的双层混合评价模型实现了不同交通方式功能区的量化对比,但该框架面向宏观整体疏导效能,难以精细刻画网约车接驳区在极端客流冲击下的微观服务水平动态演化。吕慎等[10]通过模糊数学隶属度函数将公交候车时间划分为四个等级,但其阈值设定基于静态候车场景,未考虑网约车即时响应预期强、到达时间不确定性高的特征。

综上,现有研究在以下方面存在明显不足:一是缺乏面向网约车接驳全流程的“人-车-场”协同仿真建模方法,难以准确反映旅客与车辆之间的时空耦合互动;二是对不同场景分级预案下的空间弹性配置效果缺乏量化评估;三是尚未形成涵盖时间与空间维度的综合服务水平评价矩阵,无法为动态管控提供直观判定依据。为此,本文以某大型综合交通枢纽网约车上客区为研究对象,构建基于多智能体建模与离散事件驱动的混合仿真框架,建立包含时间与空间维度的评价指标体系,通过 400~1 500 车/h 全区间的承载力退化实验揭示系统失效规律,并从空间弹性、需求分流、流程重构 3 个维度评估优化策略的有效性,为枢纽分级预案制定与动态管控提供量化决策依据。

1　仿真模型构建

1.1　空间布局与设施配置

上客区空间布局如图 1 所示,网约车上客区仿真模型采用“中央空间视图+双侧指标面板”的一体化布局:中央区域实时呈现上客区平面布局及人-车动态,两侧面板集成供需匹配、等待时间、空间密度等多维运行指标,实现接驳系统态势的一屏总览与协同监控,为仿真观测、状态研判及策略评估提供直观支撑。

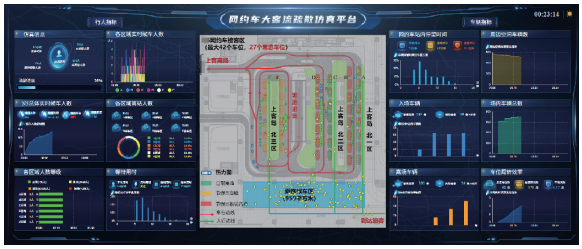


图 1　上客区仿真模型总体架构与运行界面

网约车上客区采用“分区管控、分级响应”的弹性空间设计,共设置 42 个接驳泊位,采用三级预案式分级启用机制:绿色车位 15 个为日常高峰标配,黄色车位 12 个为节假日高峰增设,红色车位 15 个为极端大客流备用。配套设置 95 m^2 集中乘客候车区,实现候车区与接驳区的物理分离与有序衔接。沿车辆进场方向将上客区划分为 A~F 共 6 个独立接驳子区域,各区域具备独立进场通道与泊位排队空间,支持单独启用或关闭[11]。

1.2　系统边界界定

仿真系统以网约车上客区的“人-车-场”协同接驳过程为核心研究对象,系统边界界定为旅客从进入候车区起至完成上车并随车辆离场的完整周期。核心交互逻辑为:旅客到达后组队发起用车订单,调度模块匹配空闲运力,车辆进场停靠指定泊位,旅客步行至泊位完成上车后车辆离场。仿真系统聚焦于上客区内部的运营效率与资源匹配问题。

1.3　智能体行为建模

采用多智能体建模方法[12],将乘客与网约车抽象为两类具备独立决策能力的智能体主体。

旅客到达服从泊松分布,结伴规模按 1 人出行 80%、2 人出行 15%、3 人出行 5% 的比例设定,单车载客量期望值为 1.25 人/车。行为逻辑基于社会力模型计算,受场内人员密度、路径障碍物等因素动态调整。订单创建后,系统空闲状态下平均 1.5 min 完成匹配;携包旅客上车耗时 20 s,无包旅客 5 s。

网约车智能体的生命周期涵盖“场外蓄车—进场排队—订单匹配—前往泊位—上下客作业—离场行驶”6 大阶段。运力供给采用“近端+远端”两级蓄车场体系,初始配置近端 450 辆、远端 125 辆,仿真运行中按固定速率持续补充。车辆进场后遵循“区域择优、泊位靠前”的分配规则[13]。

1.4　离散事件流程与混合仿真框架

采用“离散事件驱动骨架+智能体行为承载+空间环境约束”的混合建模框架。乘客行为拆解为到达、排队等待、订单匹配、到达接驳区、上车完成 5 个核心离散事件;车辆行为拆解为进场、排队等待、订单分配、到达接客点、上下客完成 5 个核心事件。

采用 AnyLogic 内置事件调度引擎,基于事件列表实现仿真时间的跳跃式推进,订单匹配类事件优先级最高,资源释放类次之,排队溢出类最低。通过消息传递机制构建“乘客—调度中心—车辆”的双向异步通信链路,完成接驳闭环。

2　评价指标体系与系统承载力退化规律

2.1　评价指标体系

围绕空间承载能力、旅客出行体验、车辆运行效能 3 大维度,选取总疏散完成用时、最大滞留人数/密度、旅客平均等待时间、车辆平均滞留时间、车位周转率 5 项关键指标。其中,旅客平均等待时间作为主要评价指标,用于衡量服务效率和用户体验;候车区密度作为辅助安全指标,用于监测空间承载风险。二维评价矩阵综合判断的参考工具,在需要时空联合评估时使用。

2.2　候车区密度分级标准

候车区密度分级标准参考了以下依据:(1)《铁路旅客车站设计规范》(TB 10100—2018)[14]规定铁路旅客车站候车区人均使用面积不应小于 1.2 m^2/人(约 0.83 人/m^2),作为候车空间设计的法定下限基准;(2)赵紫琴、裴玉龙[15]研究基于综合客运枢纽功能区实测数据,提出不同候车空间的人均使用面积标准:贵宾候车室(3.59 m^2/人)和母婴候车室(3.33 m^2/人),代表高舒适度基准;软席候车室(2.22 m^2/人)和普通候车室(1.17 m^2/人),可取 0.6 人/m^2(1.67 m^2/人)作为“较舒适”与“较拥挤”的分界。

结合实际枢纽运营经验,在枢纽网约车上客区乘客携带行李、人车交互复杂的特殊场景下,其空间舒适度要求应高于普通铁路候车室(静态就坐为主),但低于贵宾/软席候车室(服务标准过高)。本文候车区密度分级依据 950 m^2 空间条件划分为五级:舒适(<0.3 人/m^2)、较舒适(0.3~0.6 人/m^2)、较拥挤(0.6~1.0 人/m^2)、拥挤(1.00~1.25 人/m^2)、严重拥挤(≥1.25 人/m^2),分级标准详如表 1 所示。

表 1　网约车候车区密度分级标准

等级	密度范围/(人·m^{-2})	状态描述	管控策略
舒适	<0.3	自由行走,无干扰	常规监控
较舒适	0.3~0.6	偶尔受限,可自由绕行	加强巡查
较拥挤	0.6~1.0	频繁受限,需侧身避让	启动关注预案
拥挤	1.0~1.25	无法自主超越,跟随人流	启动预警预案
严重拥挤	≥1.25	接触不可避免,存在安全风险	强制疏散/限流

2.3　旅客等待时间分级标准

旅客等待时间分级参考了公交候车时间服务等级划分的研究成果[10],该研究通过模糊数学隶属度函数将候车时间划分为四个等级,详如表 2 所示。同时给出候车时间价值模型,Ⅰ~Ⅳ级候车时间价值分别为 3.5、5.3、13.6、22.9 元/h,Ⅲ级较Ⅱ级跃升 157%,证实 14 min 是价值突变点,本文取 15 min 作为“预警”和“拥堵”的临界阈值。网约车接驳与公交候车差异在于:即时响应预期更强、到达时间不确定性更高、改选其他方式成本更大。据此对文献阈值进行场景适配,将网约车上客区等待时间划分为优质(0~5 min)、正常(5~10 min)、关注(10~15 min)、预警(15~25 min)、拥堵(>25 min)5 个等级,详如表 3 所示。

表 2　公交候车时间四级标准

服务等级	时间范围/min	心理状态	行为倾向
Ⅰ级	0~6	心情平静,毫无焦急感	继续等待
Ⅱ级	6~14	稍有焦急感,但还想继续等车	犹豫但继续
Ⅲ级	14~35	感到非常焦急、烦躁,想换其他交通方式	强烈换乘意愿
Ⅳ级	35~60	绝望,决定不坐公交车	放弃等待

2.4　二维协同评价矩阵

为避免单一时间指标与空间状态的割裂判断,同时建立“时间-空间”二维评价参考矩阵,详见表 4。矩阵设计遵循两条原则。

表 3　网约车旅客等待时间分级标准

等级	等待时间	状态描述	响应策略
优质	0~5 min	即时响应,体验接近随到随走	常规监控
正常	5~10 min	可接受范围,符合集疏运服务预期	常规监控
关注	10~15 min	等待偏长,需关注运力匹配效率	加强巡查,预备干预
预警	15~25 min	明显超标,旅客焦虑感上升	启动预案,分流/增加运力
拥堵	>25 min	严重超标,服务水平崩溃	强制管控,紧急疏散

2.4.1　空间风险优先原则

候车区密度超过 1.0 人/m² 时,无论等待时间长短,管控优先级均以空间疏散为首要任务;因为空间拥挤涉及踩踏、推搡等物理安全风险,其紧急程度优先于单纯的时间延误。

2.4.2　时间累积效应原则

当等待时间超过 25 min 时,即使空间舒适,系统服务也已实质崩溃,应强制管控、紧急疏散。

时间≤10 min 且密度≤0.6 人/m²,两项指标均处于可接受范围,为正常运营;时间正常但空间拥挤(>0.6 人/m²),空间安全风险已凸显,需立即启动引流限流或物理隔离,而非等待时间恶化后再行动;空间正常但时间预警(15~25 min),此时核心矛盾是运力匹配效率,应优先增派运力、优化派单,而非紧急疏散。当密度突破 1.0 人/m² 时,空间安全指标具有一票否决权,管控策略需发生质变。双重阈值突破:时间>25 min 且空间>1.0 人/m² 同时触发时,系统失效,全面接管。

表 4　二维协同评价矩阵

空间密度等待时间/min	(较舒适)<0.6/(人·m⁻²)	(较拥挤)0.6~1.0/(人·m⁻²)	(拥挤/严重拥挤)>1.0/(人·m⁻²)
≤10(正常)	正常运营	安全预警(空间趋饱和,加强引流)	紧急疏散(空间安全红线,立即限流)
10~15(关注)	服务关注(预备增能)	双重关注(监控时空匹配)	紧急疏散(空间风险优先处置)
15~25(预警)	服务干预(全力增援运力)	高度预警(疏散与增能并重)	紧急疏散(双红,启动最高应急)
>25(拥堵)	服务崩溃(强制分流)	严重恶化(强制分流+空间管控)	紧急疏散(系统失效,全面接管)

2.2　系统承载力退化规律

为识别无干预条件下系统服务水平随车流量的退化规律及关键拐点,实验覆盖 400~1 500/h 的连续车流量区间(400~1 000/h 为梯度区间,1 000~1 500/h 为极限压力区间),各梯度工况下的旅客平均等待时间与其他核心指标如表 5 所示。

表 5　全车流量区间系统性能核心指标

车流量/(veh·h⁻¹)	疏散用时/min	峰值人数/人	候车区峰值密度/(人·m⁻²)	旅客等待时间/min	车辆滞留时间/min	车位周转率/次
400	70.63	56	0.06	7.5	5.3	9.6
500	69.95	81	0.09	8	6.3	11.4
600	100.65	138	0.15	10.8	10.8	13.8
700	111.67	275	0.29	17.7	18.1	16.5
800	116.82	385	0.41	22.8	23.5	18.7
900	123.65	475	0.5	23.8	24.1	20.7
1 000	133.48	613	0.65	31.7	32.4	23.1
1 100	142.35	725	0.76	36.2	37.8	25.4
1 200	151.72	842	0.89	41.5	43.2	27.7
1 300	160.98	958	1.01	46.8	48.5	30.1
1 400	170.25	1075	1.13	52.1	53.8	32.4
1 500	179.52	1192	1.25	60.1	59.1	34.7

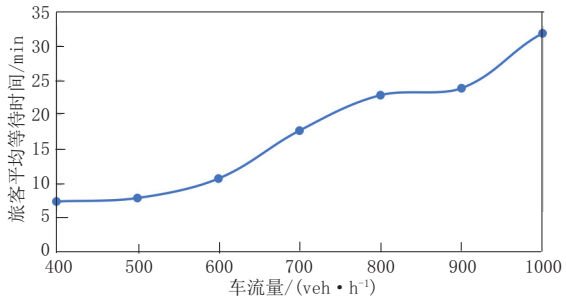


图 2　旅客等待时间变化趋势

表 5 及图 2 结果表明,旅客平均等待时间随车流量提升呈非线性加速增长特征。400~500 车/h 区间增长平缓,等待时间维持在 10 min 以内,密度低于 0.15 人/m²,二维矩阵判定为正常运营;系统运力匹配与空间容量均充足。

600 车/h 为第一个拐点,进入非线性增长区;700 车/h(极端高峰)较 500 车/ h 车流量仅提升 40%,等待时间激增 78.8%,系统自然承载能力已达上限;此阶段

密度始终低于0.3 人/m²(舒适区间),说明瓶颈在于运力匹配效率而非候车区容量。二维协同判定矩阵在此发挥了关键的纠偏功能:若仅看等待时间(17.7 min 已达“预警”),管理者可能误判需紧急限流;但密度指标提示空间远未饱和,矩阵综合判定为“服务干预”,指向的正确策略是优化运力匹配效率而非限流。

1 000 车/ h 为第二个拐点,等待时间突破 25 min,且空间密度突破 0.6 人/m²进入较拥挤区间,矩阵判定跃升为“严重恶化”。1 300 车/h 时密度突破 1.0 人/m²(“拥挤”安全红线),矩阵判定进入“紧急疏散”等级。至 1 500 车/h 极限工况,等待时间达约 1 h,密度达 1.25 人/m²(“严重拥挤”),存在踩踏安全风险。此阶段单纯增加运力投放已产生负边际效益,必须配合限流、分流等强力空间管控措施。

上述退化规律揭示了一个关键事实:系统失效遵循“先服务失效(时间)、后安全失效(空间)”的两阶段路径。600~900 车/h 区间,问题表现为“运力效率不足”;1 000 车/h 以上,空间瓶颈才真正显现。这为后文优化策略的针对性设计提供了依据——低区段应优先优化效率,高区段需时空协同干预。

4　优化策略与效果评估

从 3 个维度构建优化策略工具箱——空间弹性策略(分级分区运营,应对日常至极端各类场景)、需求分流策略(削减峰值负荷)、流程重构策略(“车找人”模式消除无效等待),并逐一评估其效果。

4.1　分级分区运营策略评估

实验采用分级分区启用策略:400 车/h 对应日常高峰配置(启用 A、C 两区,14 个绿色泊位),500 车/h 对应节假日大客流配置(启用 A、C、E、F 四区,27 个绿色+黄色泊位),600 车/h 及以上对应极端高峰全量开放配置(启用 A~F 六区,42 个泊位全启)。

4.1.1　日常高峰场景

日常高峰工况(400 车/h)下仅开启 A、C 两区,仿真显示旅客平均等待时间 9.4 min(正常等级),峰值密度仅 0.12 人/m²(舒适等级),车辆平均滞留时间 9.2 min,车位周转率 9.3 次。该空间配置完全满足日常疏散需求,验证了最小化空间资源投入的可行性,可有效降低运维成本。

4.1.2　节假日大客流场景

节假日工况(500 车/ h)下启用 A、C、E、F 四区,旅客平均等待时间 9.9 min(正常等级),峰值密度 0.11 人/m²(舒适等级),车辆平均滞留时间 9.2 min,车位周转率 11.6 次。四区开放预案有效消化客流增量,满足节假日疏散需求,服务水平稳定,表明分级预案在中等负荷下具有充分的有效性。

4.1.3　极端高峰场景

极端工况(700 车/h)下 A~F 全量开放,旅客平均等待时间达 17.7 min,突破 15 min 预警阈值;峰值密度 0.29 人/m²仍处舒适等级,但车辆平均滞留时间升至 18.1 min。空间资源(泊位数量与候车区面积)并非瓶颈,核心制约在于运力匹配效率与车辆周转速率(“泊位占着等旅客”的低效占用)。系统在全量开放空间资源后仍无法保障基本服务,必须启动管控措施。

4.1.4　突发事件场景

以节假日大客流为基准,模拟人车交互节点减速避让事件。旅客平均等待时间从 9.9 min 升至 12.8 min,由正常升为关注等级;峰值密度上升 27.3% 但仍处舒适区间;车辆平均滞留时间增幅达 38.0%。人车冲突事件会引发“通行效率下降—车辆滞留—旅客等待延长”的连锁效应。需通过物理隔离、优化动线、配置引导人员等方式降低冲突概率。

4.2　客流分流与接驳效率提升策略

针对极端高峰(700 车/h)暴露的“运力效率瓶颈”问题,从供需两侧分别评估优化效果。该基准工况下,旅客平均等待时间 17.7 min(预警等级),总疏散用时约 112 min,车辆平均滞留时间 18.1 min。由于候车区密度始终处于舒适区间(<0.3 人/m²),空间维度不构成约束,因此分析聚焦等待时间维度的服务水平变化;当优化后等待时间降至正常等级(<10 min)时,根据二维评价矩阵,系统整体恢复至“正常运营”状态。

4.2.1　客流分流措施

以极端高峰(875 人,700 车/h)为基准,设置 0~600 人梯度分流方案,分流至南区或其他交通方式。不同分流规模下核心指标变化详如表 6 所示。

分流 200 人是恢复“正常"服务水平的关键临界点,此时等待时间降至 9.51 min;分流 400 人是跃升至“优质"服务的关键阈值,等待时间降至 4.14 min,总疏散用时从 92.87 min 大幅压缩至 66.87 min,降幅 27.9%。继续增加分流规模,边际效益递减(500 人后总疏散用时下降趋缓),建议将 400 人作为现场管控的预设分流目标。

表6　不同分流规模下核心指标

分流人数/人	旅客等待时间/min	服务水平	总疏散用时/min	车辆滞留时间/min	车位周转率/次
0	17.70	预警	92.87	12.9	15.76
100	11.60	关注	81.58	8.9	14.55
200	9.51	正常	74.75	8.8	12.79
300	5.30	正常	73.12	5.6	10.90
400	4.14	优质(临界)	66.87	4.9	8.71
500	3.90	优质	66.93	4.8	7.14
600	3.43	优质	66.35	4.3	5.17

4.2.2　接驳效率提升措施

通过增设现场引导员、优化上下客动线、预开行李车门等手段,压缩人车接驳作业时长。设置0~80%梯度效率提升方案,模拟不同干预强度下的系统响应。不同效率提升幅度下核心指标变化详如表7所示。

表7　不同效率提升幅度下核心指标

效率提升幅度/%	旅客等待时间/min	服务水平	总疏散用时/min	车辆滞留时间/min	车位周转率/次
0	17.70	预警	118.47	21.3	16.14
10	12.42	关注	90.28	14.7	16.50
20	10.15	关注	89.05	14.3	16.83
30	8.21	正常	82.53	9.3	16.38
40	7.00	正常	77.85	7.2	16.26
50	5.60	正常	73.87	5.2	16.67
60	5.14	正常(临界)	70.32	4.4	17.00
70	4.86	优质	66.52	3.9	15.98
80	4.67	优质	68.03	3.7	16.62

效率提升10%即可使等待时间脱离预警等级,30%进入正常等级,70%恢复优质等级。总疏散用时从118.47 min降至66.52 min,提升43.8%。与客流分流策略相比,接驳效率提升在同等改善幅度下对总疏散用时的压缩效果略缓,但其优势在于无需转移旅客,实施成本较低,适合作为常规预案快速启动。

4.3　“车找人”模式优化

传统“人找车”模式中车辆先行停靠泊位等待旅客步行前往。“车找人”模式重构流程:旅客提前分散至上客岛就位,车辆精准驶向旅客所在泊位,实现“车到即上”。两种接驳模式核心指标对比详如表8所示。

表8　两种接驳模式核心指标对比

指标	人找车模式	车找人模式	变化幅度(%)
旅客平均等待时间	17.7 min	4.6 min	−74.0
总疏散用时	104.57 min	64.67 min	−38.20
候车区峰值人数	324人	75人	−76.90
候车区峰值密度	0.34人/㎡	0.08人/㎡	−76.50
车辆平均滞留时间	21.0 min	2.2 min	−89.5
车位周转率	16.96次	16.50次	−2.70

车找人模式消除了“车辆到站→旅客步行→泊位等待”的无效时间窗口,实现“人到即车来、车到即上客”的精准衔接。车辆滞留时间降幅达89.5%,为所有措施中最显著,从根源破解了“泊位占着等旅客、后面车辆进不来”的恶性循环。尽管单位时间内泊位周转次数受总车流量约束未发生变化,但车辆有效作业时间大幅压缩,系统整体吞吐效率获得结构性提升。该模式将二维评价矩阵中的时间与空间指标同步拉回到正常运营区间(4.6 min + 0.08人/m^2),是效能最优策略。

5　结论与展望

5.1　主要结论

本文基于多智能体建模与离散事件仿真方法,构建了大型综合交通枢纽网约车上客区“人-车-场”协同仿真模型,通过系统化仿真实验得出以下主要结论。

(1)系统失效遵循“先服务、后安全”的两阶段路径。基于全车流量区间(400~1 500车/h)的承载力退化实验表明:600~900车/h区间为“服务失效段”,瓶颈在于运力匹配效率而非空间容量,二维矩阵判定为“服务关注”至“服务干预”;1 000车/h以上为“时

空双饱和段”，空间密度同步突破安全红线，矩阵判定进入“严重恶化”至“紧急疏散”。两个拐点分别位于600车/h和1 000车/h。

（2）分级分区运营的可行性与边界：日常高峰（400车/h）仅开放A、C两区即可维持“正常运营”；节假日大客流（500车/h）启用四区即可满足需求；极端高峰（700车/h）即便全量开放，旅客等待时间仍突破预警阈值，空间资源全启无法弥补运力效率缺陷。

（3）量化了优化策略的临界阈值与边际效益：分流200人可使极端高峰从“服务干预”恢复至“正常运营”；接驳效率提升70%可将等待时间压缩至5 min以内；车找人模式可使旅客等待时间降低74.0%、车辆滞留时间降低89.5%，为效能最优策略，从根源上破解了泊位低效占用的恶性循环。

5.2　研究展望

未来研究可进一步纳入平台派单算法优化（如基于强化学习的动态定价与区域调度）、以及面向实时运营的数字化孪生系统构建，实现从离线仿真预案到在线实时管控的跃升。此外，本文二维协同判定矩阵的阈值（如15 min、1.0人/m²）基于既有文献与枢纽运营经验设定，后续可进一步结合实地调研数据对阈值进行标定与修正。本文仿真基于典型枢纽上客区的参数标定与场景假设，后续将结合虹桥等枢纽的实地运营情况，对仿真输出与实际服务水平开展对比验证，进一步校核模型可靠性与阈值适用性。

参考文献：

[1] 马士江，陈小鸿，张天然，等. 站城融合导向下超大城市综合客运枢纽体系优化——以上海市为例[J]. 城市交通，2026，24（3）：20-32.

[2] 蒋阳升，张俊，胡路. 大规模场景下网约车与城市交通拥堵交互影响仿真研究[J]. 系统工程理论与实践，2022，42（11）：3079-3089.

[3] 王江锋，宋之凡，李云飞，等. 面向集中供给与稀疏需求场景的网约车调度优化算法[J]. 交通运输系统工程与信息，2025，25（5）：280-290.

[4] 程龙，王宇轩，肖光涵，等. 网约车协同服务下综合客运枢纽定制公交接驳线路优化方法[J]. 交通运输工程学报，2026，26（2）：125-139.

[5] 甘黎萍. 大型交通枢纽网约车运营管理经验与启示[J]. 交通与运输，2024，40（1）：76-82.

[6] 吴跃，邢明帅，刘帅，等. 智能引导分流方法在综合交通枢纽站的应用研究[J]. 中国交通信息化，2025（20）：148-150.

[7] 孟令鋆. 基于交通行为与乘车体验的高铁站节能研究[D]. 北京交通大学，2025.DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2025.002040.

[8] 李晓蓉. 虹桥枢纽大客流疏散应急预案数字化建设探究[J]. 中国交通信息化，2023（5）：131-135.

[9] 赵永明，饶畅，刘星良，等. 基于混合模型的综合客运枢纽离站客流疏导效果评价研究[J]. 重庆理工大学学报（自然科学），2022，36（9）：279-287.

[10] 吕慎，陶流洋，莫一魁. 通勤出行公交候车时间的服务等级划分和度量[J]. 深圳大学学报（理工版），2015，32（3）：289-296.

[11] 王文卿，田劲杰，马刘听，等. 杭州西站出租车网约车接驳系统智慧化提升[J]. 交通科技与经济，2024，26（3）：55-61.

[12] 邓宏钟. 基于多智能体的整体建模仿真方法及其应用研究[D]. 国防科学技术大学，2002.

[13] 郭羽含，刘雨希，刘秋月. 动态约束与松弛分割的多目标上车点推荐[J]. 计算机工程与应用，2023，59（11）：320-328.

[14] TB 10100—2018 铁路旅客车站设计规范 [S].

[15] 赵紫琴，裴玉龙. 客运综合枢纽功能区布设与人性化设计研究[J]. 哈尔滨工业大学学报，2011，43（增刊）：366-370.

（上接第67页）

险，建议采用约4 kN的中等冲击能级以优化检测可靠性。

参考文献：

[1] 郑海源，缪易辰，潘文，等. 桩基检测技术研究进展[J]. 施工技术（中英文），2024，53（1）：4-10.

[2] 程志和，邓友生，孙雅妮，等. 桩基检测技术的发展与应用研究[J]. 混凝土与水泥制品，2019（3）：80-84.

[3] 杨文强，刘启林，邓桂萍，等. 既有桥梁基桩的低应变反射波曲线分析[J]. 公路交通科技，2023，40（增刊1）：300-307.

[4] 罗军，万文恺，张睿君，等. 低应变法在桩基工程加固检测中的应用[J]. 施工技术（中英文），2025，54（9）：30-36.

[5] 赵爽，吴君涛，邱欣晨，等. 基于水平低应变法的高承台桩缺陷检测研究[J]. 浙江大学学报（工学版），2021，55（10）：1867-1876；1902.

[6] 焦兴鹏，高子杰. 低应变反射波法测桩的数值模拟与验证[J]. 中外公路，2015，35（5）：58-62.

[7] Wu C S, Ge M, Qi L L, et al. Multi-defect identification of concrete piles based on low strain integrity test and two-channel convolutional neural network[J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3530.

[8] Jiang Z Y, Wang Z P, Feng K, et al. Low-strain damage imaging detection experiment for model pile integrity based on HHT[J]. Structural Durability Health Monit, 2023, 17(6): 557 - 569.

[9] 黄东炼. 低应变法和声波透射法在桩基检测中的综合应用研究[J]. 广东建材，2024，40（12）：64-67.

[10] 喻永明. 建筑桩基检测中低应变反射波法的探究[J]. 江西建材，2022（10）：103-104；107.

[11] 丁玮，柴华友，刘思浩，等. 低应变检测中振源及桩土相互作用的影响分析[J]. 土木与环境工程学报（中英文），2020，42（2）：73-79.

[12] 肖偲，王奎华，张日红，等. 静钻根植桩低应变动力响应的现场试验和数值模拟[J]. 上海交通大学学报，2020，54（4）：406-412.

[13] 黄东炼. 桩基完整性低应变检测与数值模拟研究[J]. 广东建材，2024，40（11）：78-81.