

基于自动驾驶模块化车辆主辅功能分配的 公交自适应调度方法

曲昭伟¹, 王铭阳¹, 王 喆², 宋现敏¹, 张云翔¹, 黄镜尘¹

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 大数据和网络管理中心, 长春 130022)

摘 要:为实现运力资源的灵活调配,缓解因系统供需失衡造成的资源浪费,同时减少因车辆在站点停靠及乘客车外换乘所产生的出行时间损耗,设计了一种基于 AMV 主辅功能分配的公交自适应调度方法。建立了考虑线路协同和站点功能划分的优化调度模型,将车辆运营成本最小化和乘客出行延误最小化作为联合优化目标,设计分层自适应升温粒子群-模拟退火算法对模型求解。为验证模型的有效性,基于佛山市公交运营数据进行实例检验,结果表明:相比于传统定容量公交和站点响应式模块公交,本文模型将系统总成本分别降低了 35.62% 和 6.54%,该研究成果有助于提升公交运营效率和服务质量。

关键词:交通运输系统工程; AMV 主辅功能分配; 调度优化; 线路协同; 分层自适应升温粒子群-模拟退火算法

中图分类号: U491.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)09-2946-12

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250457

Adaptive scheduling method for bus based on autonomous modular vehicles main-auxiliary function allocation

QU Zhao-wei¹, WANG Ming-yang¹, WANG Zhe², SONG Xian-min¹,
ZHANG Yun-xiang¹, HUANG Jing-cheng¹

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Center for Big Data and Network Management, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to achieve flexible allocation of capacity resources, alleviate the waste of resources due to the imbalance between system supply and demand, and reduce the travel time loss due to vehicle stopping at stations and passenger transferring outside the vehicle, an adaptive scheduling method for bus based on AMV main-auxiliary function allocation was designed. An optimized scheduling model considering route coordination and station function division was established, with minimizing vehicle operating costs and passenger travel delays as the joint optimization objectives. A hierarchical adaptive heating particle swarm-simulated annealing algorithm was designed to solve the model. To verify the effectiveness of the model, an example test was carried out based on the bus operation data in Foshan City,

收稿日期: 2025-05-25.

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(3A0223774417).

作者简介: 曲昭伟(1962-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 交通控制. E-mail: quzw@jlu.edu.cn

通信作者: 王喆(1979-), 男, 高级工程师, 硕士. 研究方向: 计算机网络与大数据分析. E-mail: wangzhe@jlu.edu.cn

and the results show that compared with the traditional fixed-capacity bus and station-responsive modular bus, the proposed model reduces the total cost of the system by about 35.62% and 6.54%, and the results of this research can help to improve the efficiency of bus operation and service quality.

Key words: engineering of communication and transportation system; AMV main-auxiliary function allocation; dispatch optimization; line coordination; hierarchical adaptive warming particle swarm-simulated annealing algorithm

0 引言

在城市交通需求时空波动特征加剧、结构复杂度显著提升的背景下,传统公交系统基于固定时刻表、固定容量的静态调度模式,已难以适配乘客多样化的出行需求和高效运输目标。由NEXT Future Transportation公司生产的自动驾驶模块化车辆(Autonomous modular vehicles, AMV)能够在运动中实现模块化单元的连接和分离,同时允许乘客在车辆行驶时从一个单元转移到另一个单元。

近年来,多位学者借助AMV工具,探索各类场景下的自主模块化公交(Autonomous modular bus, AMB)运营模式,以改善公交系统的服务频率^[1-3]、车辆分配^[4,5]以及路线策略^[6-8]。其中,部分研究尝试将集中于站点的复杂耗时流程转化为动态、连续的车内操作,以此减少公交频繁到站停靠产生的时间损耗。Tian等^[7]设定并优化了换乘站点,专用于磁悬浮模块化公交单元的动态耦合解耦操作。Khan等^[8]提出分流策略以优化车辆容量的时空分布,显著缩短了乘客平均出行时间。然而,针对公交线路沿线乘客空间分布显著不均所引发的车辆动态编组难题,即如何在取消停靠操作的同时实现车辆容量的精准适配和高效调度,尚未形成切实有效的解决方案。

AMB的灵活特性还体现在支持乘客在车辆单元间自由移动,实现乘客不下车即可完成跨线路换乘操作。而在现有研究中,针对模块化公交系统车厢单元在不同线路间跨线换乘与协同编组的相关研究较少。Shi等^[9]针对重叠公交路段提出了一个可变容量的共享使用走廊,但其操作模式限于乘客需求高的走廊区域,时间表优化时仅考虑几个需求密集的站点,导致模型适用性低且系统服务水平较差。Wu等^[10]未考虑公交单元供给不足情况下的应对策略,这会导致转向乘客的换乘失败,显著延长出行时间。岳昊等^[11]进一

步探究了在有限路段长度下公交重新编组和车内换乘的可能性,建立车内换乘次数和单元位置调整的优化模型。然而,该方法仅局限于局部换乘区段,未能充分考虑编组方案对整体公交系统运营的影响。故如何从公交线网整体构建协同单元的换乘运行机制,将来自不同线路但具有相同目标方向的乘客进行整合运输,是多线路模块公交系统调度优化亟待解决的问题。

针对上述问题,本文提出一种基于AMV主辅功能分配的公交自适应调度机制,车辆在运行时进行单元数量的动态调整和主辅单元的功能分配,在主公交不停车的情况下完成乘客的上下车操作,从而减少公交到站停靠的运行延误;同时,根据客流波动特性划分站点功能,解决车辆在相邻站点区段客流需求差异较大的编组难题,保证运输供给与乘客需求的动态平衡,最大限度地减小资源浪费。在线网间设定汇流机制,基于换乘转向人数精准分配转向单元数量,通过转向单元与前进单元的灵活组合,打破传统服务模式固定形态和固定行驶路线的限制,协同控制两条线路的发车时间,减少换乘延误,从而扩大模块公交服务的适用范围,提高服务质量。本文从系统最优和用户最优两方面出发,考虑车辆调度运营成本和用户出行延误时间(包括乘客换乘时间),构建了模块公交自适应调度优化模型,设计了分层自适应升温的粒子群-模拟退化算法进行求解,实现线路交叉换乘下模块单元动态编组方案及发车间隔的设计和优化,并利用实际案例对模型进行了有效性和效益分析。

1 基于AMV主辅功能分配的公交自适应调度机制

城市公共交通系统中,高峰拥挤与低峰空驶的矛盾长期存在。传统公交采用固定车辆编组及时刻表运行机制,难以适应客流时空动态变化。如图1(a)所示,高峰时段,受额定载客量和固定

发车频率限制,供需失衡致使车厢拥挤;低峰时段,因缺乏灵活运力调节,造成资源闲置和运营成本增加。而跳站机制作为缓解公交串车现象的常用策略之一,虽有助于提升线路整体运营效率,但易引发乘客过站、公交串车等问题。如图 1(b)所示,单纯依赖控制时刻表与停靠站点选择的方法难以实现车头时距的有效压缩,后行车辆因需应对沿途站点大量候车乘客,无法通过加速等方式快速弥补与前车的间距,使得车头时距调控目标难以达成。

面对以上问题,本文提出了一种新型的基于 AMV 主辅功能分配的公交自适应调度机制,利用模块化公交车厢间动态连接和分离技术,为乘客提供从上车站点到下车站点几乎无停靠的出行服务,以提高车辆利用率和乘客服务水平。

如图 2 所示,行驶中的模块主公交车辆由多个车厢单元组成,分为前进单元和辅助单元,前进单元在行驶过程中无须靠站停车,而辅助单元通过与主公交车辆的分离和连接服务上下车的乘客。通过这种模式,主公交实现“不停靠”的运行操作,消除了在车乘客的站点停留时间。

针对需求聚集或是上下车人数差值较大的站点,主公交难以保持“不停靠”模式下满足乘客的

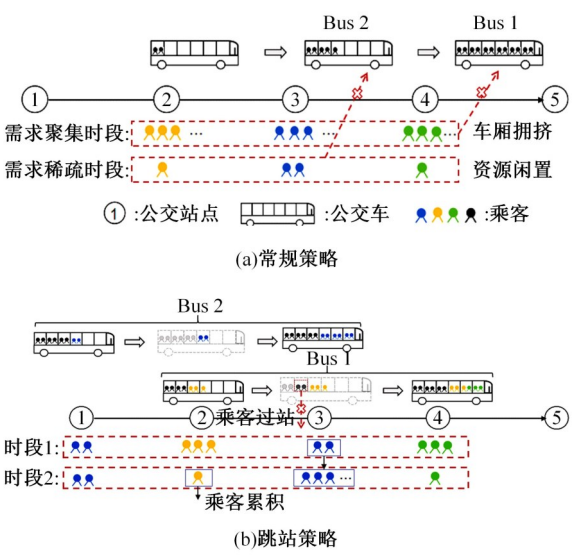


图 1 传统公交系统调度机制

Fig. 1 Scheduling mechanisms of conventional bus system

波动需求,则设置折合站点,允许辅助单元数目的大幅增减。将客流波动较小、具有相似上下车请求的站点区段处设为普通站点,主公交单元数目保持固定,模型则根据前进乘客和上下车乘客数目动态分配前进单元和辅助单元数目。通过站点类型的划分,使得模块公交车厢容量能够依据乘客到达的时空分布规律实现动态调整,节省停靠时间的同时最大限度提升车辆利用效率。

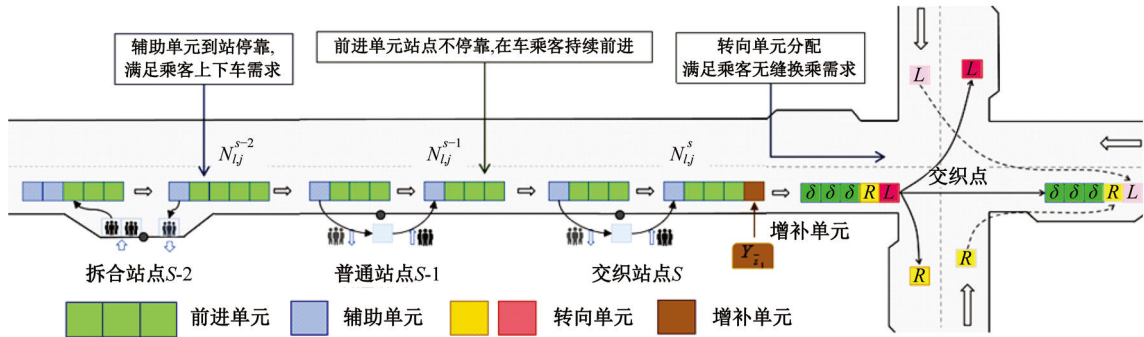


图 2 AMV 主辅功能分配的公交自适应调度机制示意图

Fig. 2 Diagram of adaptive scheduling mechanism for public bus with AMV main-auxiliary function allocation

基于上述服务模式,建立考虑线路协同换乘机制的模块公交调度模型,模型假设线路中各站点的乘客到站需求已知,以便更好地验证本文调度方法对系统资源调配及乘客服务的优化结果,模型所涉及的符号如表 1 所示。

表 1 模型符号说明

Table 1 Notation for the model

符号	定义
L	公交线路集合 $\{L = 1, 2, \dots, l, \dots, x, \dots, y, \dots, r\}$, l 为任意线路, r 为线路总数

续表	
符号	定义
J	发车车次集合 $\{J = 1, 2, \dots, j, \dots, n_l\}$, j 为任意车次, n_l 为线路 l 在优化周期内总发车次数
S	公交站点集合 $\{S = 1, 2, \dots, s, \dots, K\}$, s 为任意站点, K 为现网站点总数
$\hat{S}$	折合站点集合 $\hat{S} \in \{\hat{S} = \hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_{\hat{K}}\}$, $\hat{K}$ 为折合站点总数
	交织站点集合 $\bar{S} \in \bar{S}$, $\bar{K}$ 为交织站点总数
$\bar{S}$	$\{\bar{S} = \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_a, \dots, \bar{s}_b, \dots, \bar{s}_{\bar{K}}\}$; $\bar{s} + 1$ 为耦合站点, $\bar{s} + 1 \in \hat{S}$

续表

符号	定义
Y_s	站点 s 与站点 $s+1$ 间的距离
H_l^j	线路 l 第 j 辆车从始发站发车的时刻, H_l^1 为线路 l 的首发时刻
h_l^j	线路 l 发出的第 j 与 $j-1$ 辆车之间的发车间隔, $h_l^1=0$
T_l^s	s 与 $s+1$ 两站点间的行程时间
$t_{l,j}^{i,s}$	线路 l 第 j 辆车到达站点 s 的时间
$t_{l,j}^{i,s}$	站点 s 产生的站点延误时间
$t_{\bar{s}_a, \bar{s}_b+1}$	车辆从交织站点 $\bar{s}_a$ 行驶到耦合站点 $\bar{s}_b+1$ 的行程时间, $a, b=1, 2, \dots, \bar{K}$
$\phi_{l,j}^s$	普通站点处辅助单元追赶主公交的延误时间
E	每名乘客的上下车时间, s/人
τ	辅助单元与前进单元组合的铰接延误
$W_{\bar{s}}$	由交织站点 $\bar{s}$ 发出的公交驶过交织路口产生路口延误
B_s^j	站点 s 发出的第 j 辆车
$B_s^{j,d}$	交织站点 $\bar{s}$ 发出的第 j 辆公交车需要拆解到 d 方向的车厢单元, $d \in L, \delta, R$
$N_{l,j}^s$	站点 s 发出的第 j 辆车的车厢单元数目
$N_{l,j}^{\bar{s},d}$	交织站点 $\bar{s}$ 发出的第 j 辆公交车拆解到 d 方向的车厢单元数目
$B_{l,j}^{i,\downarrow}$	车辆到达拆合站点 $\hat{s}$ 时解离的辅助单元数目
$B_{l,j}^{i,\uparrow}$	车辆到达拆合站点 $\hat{s}$ 时耦合的辅助单元数目
$B_{l,j}^{i,c}$	车辆经过普通站点 s 时需要解离的辅助单元数目
$Q_{l,j}^{\bar{s}}$	在交织站点 $\bar{s}$ 的增补单元数目

续表

符号	定义
$F_{l,j}^s$	车辆 $j-1$ 和 j 到达站点 s 的时间间隔内乘客的累计到站人数
$A_{l,j}^s$	车辆 j 到达站点 s 时需要上车的乘客人数
$U_{l,j}^s, V_{l,j}^s$	线路 l 发出的第 j 辆车在站点 s 的实际上、下车人数
$O_{l,j}^s$	车辆 j 驶离站点 s 的主公交承载的实际在车人数
$P_j^{\bar{s},d}$	交织站点 $\bar{s}_i$ 发出的第 j 辆车中换乘到方向 d 的乘客数
$D_{l,j}^s$	站点 s 未成功乘坐车辆 j 产生的滞站等待人数
v	模块化公交车的平均行驶速度
C	一个车厢单元的载客容量
$N_{\max}$	模块化公交可悬挂的最大车厢单元数
F_N	模块数为 N 的车厢单位运营成本, 元/(km·节)

2 模型建立

2.1 拆合站点

当模块化公交行驶至拆合站点时, 站点处等待的辅助单元 $B_{l,j}^{i,\uparrow}$ 承载有上车需求的乘客与主公交耦合, 车内乘客进行移动, 有下车需求的乘客移动至队尾处即将解离的辅助单元 $B_{l,j}^{i,\downarrow}$, 随后辅助单元 $B_{l,j}^{i,\downarrow}$ 承载下车乘客与主公交分离并靠站停靠, 整个过程主公交保持匀速前进。其车厢具体拆合过程如图 3 所示。

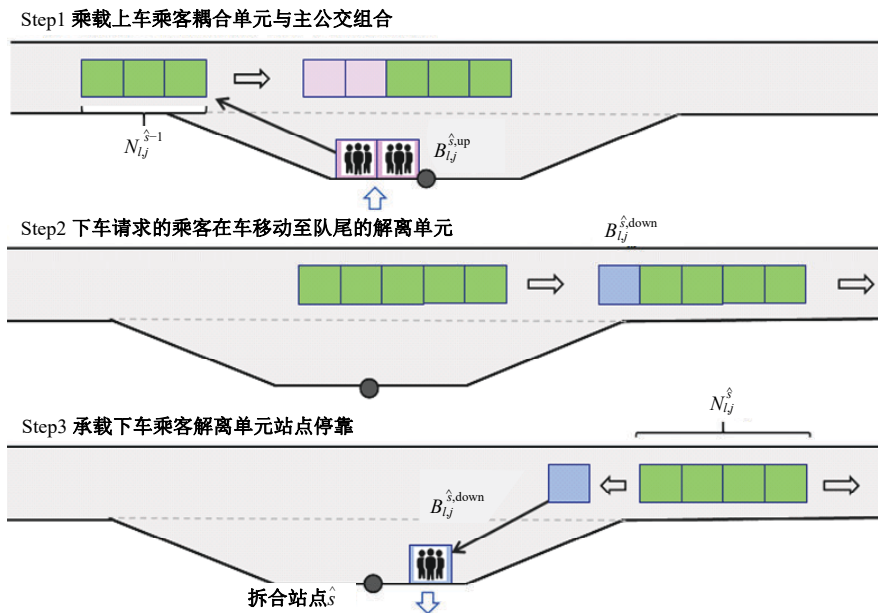


图 3 拆合站点的车厢运行示意图

Fig. 3 Diagram of operation of carriages at split site

$$N_{l,j}^{\hat{s}} = (B_{l,j}^{i,\uparrow} - B_{l,j}^{i,\downarrow}) + N_{l,j}^{\hat{s}-1} \quad (1) \quad V_{l,j}^{\hat{s}} > C \times B_{l,j}^{i,\downarrow} \quad (6)$$

$$F_{l,j}^s = \int_{t_{l,j}^{i,s-1}}^{t_{l,j}^{i,s}} f_{ls}(t) dt \quad (2) \quad C \times N_{l,j}^s > O_{l,j}^s, O_{l,j}^s = \sum_{z=1}^s (U_{l,j}^z - V_{l,j}^z) \quad (7)$$

$$A_{l,j}^s = F_{l,j}^s + D_{l,j-1}^s \quad (3)$$

$$D_{l,j}^s = \max \{ A_{l,j}^s - C \times B_{l,j}^{i,\uparrow}, 0 \} \quad (4)$$

$$U_{l,j}^s = \min \{ A_{l,j}^s, C \times B_{l,j}^{i,\uparrow} \} \quad (5)$$

式(1)表示车辆经过拆合站点后的单元数量变化; 式(2)中, $f_{ls}(t)$ 表示线路 l , 站点 s 的乘客到达密度函数; 式(3)~(5)表示模型考虑车辆过饱

和,即存在因公交容量不足导致乘客滞留在站点等待的情况;式(6)表示解离单元的容量约束;式(7)表示前进单元容量约束,耦合、拆分辅助单元后的主公交容量需大于在车的乘客人数 $O_{l,j}^s$ 。

2.2 普通站点

当模块化公交行驶至普通站点时,需要下车

的乘客提前移动至对尾处即将解离的辅助单元,辅助单元 $B_{l,j}^{s,c}$ 停留在站点处完成乘客的上下车操作,主公交持续前进。在上下车操作结束后,辅助单元 $B_{l,j}^{s,c}$ 立即以速度 $\bar{v}$ 追赶主公交,直至组装两者完毕。其普通站点的车厢运行示意图如图4所示。

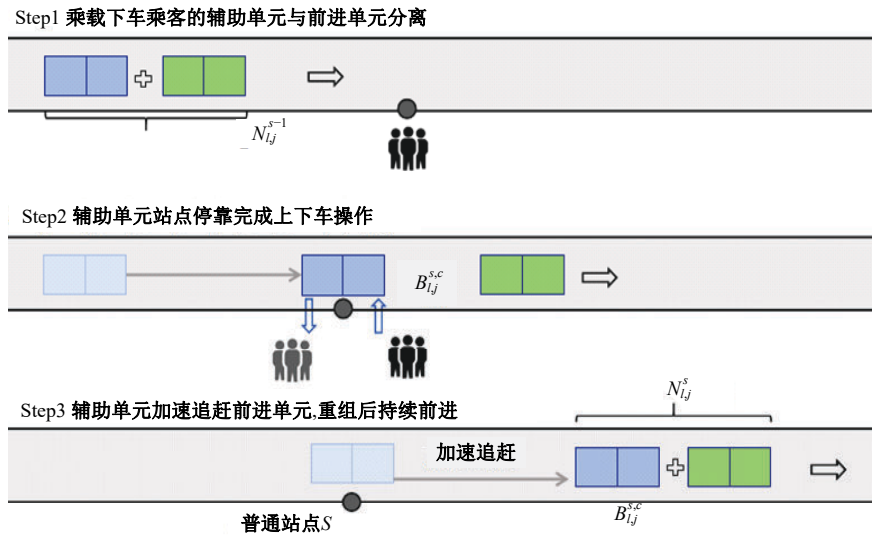


图4 普通站点的车厢运行示意图

Fig. 4 Diagram of operation of carriages at general site

$$N_{l,j}^s = N_{l,j}^{s-1} \quad (8)$$

$$D_{l,j}^s = \max \{ A_{l,j}^s - [C \times N_{l,j}^{s-1} - O_{l,j}^{s-1} + V_{l,j}^s], 0 \} \quad (9)$$

$$\Delta t_j^s = \max (U_{l,j}^s, V_{l,j}^s) \times E \quad (10)$$

$$\phi_{l,j}^s = \max \left\{ \left[\left(\frac{Y_s}{v} + \Delta t_j^s + \Delta t_{\text{move}} \right) - \frac{Y_s}{v} \right], 0 \right\} \quad (11)$$

式中: Δt_{move} 为主公交与辅助单元在站点 $s-1$ 重组之前给乘客留有的车内移动时间。

$$C \cdot B_{l,j}^{s,c} \geq V_{l,j}^s \quad (12)$$

$$N_{l,j}^s - B_{l,j}^{s,c} \geq 1 \quad (13)$$

式(8)表示车辆经过普通站点后的单元数量不变;式(9)表示因车厢容量不足需滞站等待的乘客数;式(10)表示辅助单元停留在站点 s 时乘客上下车的时间;式(11)表示追击延误;式(12)表示追赶单元的容量约束,其必须满足下车乘客需求;式(13)表示主公交单元数目约束,保证线路上至少存在一个车厢单元在持续前进。

2.3 交织站点

如图5(a)所示,模块公交到达上游交织站点 $\bar{s}_1$,进而行驶至下游耦合站点 $\bar{s}_1+1$ 组装,这一过程主要经过了单元方向分配、增补单元数目、各转向单元耦合3个部分。

$$P_j^{\bar{s}_1,d} = \sum_{d \in L, \delta, R} \sum_{m=1}^M p_{m,j}^{\bar{s}_1,d} \quad (14)$$

$$N_{l,j}^{\bar{s}_1,d} = [P_j^{\bar{s}_1,d} / C], d \in L, \delta, R \quad (15)$$

$$N_{l,j}^{\bar{s}_1} = N_{l,j}^{\bar{s}_1,L} + N_{l,j}^{\bar{s}_1,\delta} + N_{l,j}^{\bar{s}_1,R} \quad (16)$$

$$Q_{l,j}^{\bar{s}_1} = \max (N_{l,j}^{\bar{s}_1} - M, 0) \quad (17)$$

$$\sum_{d \in L, \delta, R} g_{o,j}^{\bar{s}_1,d} = 1, \forall o \in M + Q_{l,j}^{\bar{s}_1} \quad (18)$$

式中:将到达交织站点 $\bar{s}_1$ 的主公交单元从车头1到车尾 M 进行编号, $M = N_{l,j}^{\bar{s}_1-1}$; $[P_j^{\bar{s}_1,d} / C]$ 表示将 $P_j^{\bar{s}_1,d}$ 与车厢单元容量 C 的比值向上取整; $g_{o,j}^{\bar{s}_1,d}$ 为0-1变量,其为1时表示车厢单元 o 分配到方向 d 上,通过方向分配约束保证每个车厢单元仅被分配到一个方向。

2.4 自适应调度优化模型

本文模型以系统运营效能与乘客服务水平两者综合最优为核心目标。从系统角度和用户角度建立系统成本和乘客延误两项关键指标,构建车辆运营成本最小化和乘客出行延误最小化的双目标联合优化函数,进而通过寻优算法,获得兼顾运营效率和服务质量的最佳调度方案。

2.4.1 系统车辆运营成本

由于客流在线路上的时空分布不均性,在需求聚集或是需求稀疏的站点处不可避免地会产生

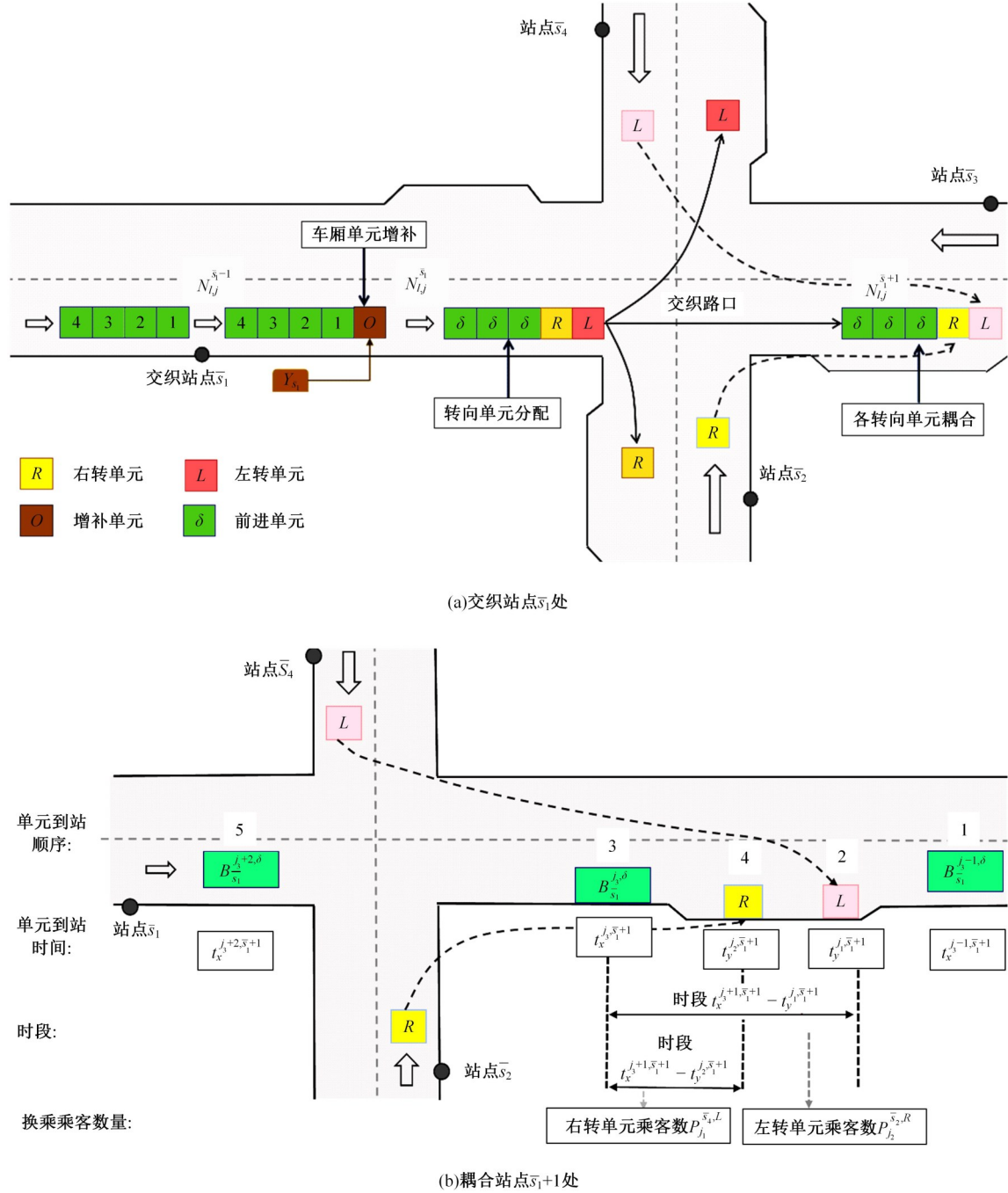


图5 交织换乘的车辆运行示意图

Fig. 5 Schematic diagram of intermodal vehicle operation

供力资源的浪费。在满足乘客需求的基础上,公交运营模式应该最大限度地利用车厢容量以便系统获取更多收入。因此,从系统最优的角度以车辆运营成本最小化为目标,建立如下目标函数:

$$\min \omega_1 = \sum_{l=1}^r \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^K N_{l,j}^s \times F_N \times T_l^s \times V \quad (19)$$

$$N_{l,j}^s = \beta_s N_{l,j}^{\bar{s}} + \beta_{s-1} N_{l,j}^{\bar{s}+1} + \alpha_s (1 - \beta_{s-1}) N_{l,j}^{\bar{s}} + (1 - \beta_s)(1 - \alpha_s)(1 - \beta_{s-1}) N_{l,j}^{\bar{s}-1} \quad (20)$$

式中: α_s 为 0-1 变量, 当其为 1 时, 表示 s 为拆合站

点; β_s 为 0-1 变量, 当其为 1 时, 表示 s 为交织站点。

2.4.2 乘客出行延误时间

如图 5(b) 所示, 线路 y 上的左转单元 $B_{\bar{s}_1}^{j_1, L}$ 和线路 x 上的直行单元 $B_{\bar{s}_1}^{j_2, \delta}$ 行驶至耦合站点 $\bar{s}_1+1$ 的时刻分别为:

$$t_y^{j_1, \bar{s}_1+1} = H_y^1 + \sum_{j=1}^{j_1} h_y^j + \sum_{s=1}^{\bar{s}_1-1} T_y^s + \sum_{s=\bar{s}_y}^{\bar{s}_1} t_D^{j_1, s} + t_{\bar{s}_1, \bar{s}_1+1} \quad (21)$$

$$t_{x,y}^{j_s, \bar{s}_1+1} = H_x^1 + \sum_{j=1}^{j_s} h_x^j + \sum_{s=1}^{\bar{s}_1-1} T_y^s + \sum_{s=s_x}^{\bar{s}_1} t_{D,y}^{j_s, s} + t_{\bar{s}_1, \bar{s}_1+1} \quad (22)$$

$$t_D^{j_s} = \alpha_s \times 2\tau + \beta_s \times \tau + (\beta_s - 1) \cdot (\alpha_s - 1)(\tau + W_{\bar{s}}) \quad (23)$$

考虑左转单元和直行单元到达耦合站点的顺序, 左转乘客在站点 $\bar{s}_1 + 1$ 的换乘延误时间为:

$$T_{x,y}^{\bar{s}_1+1, L} = \sum_{j_1}^{n_y} \sum_{j_3}^{n_x} \gamma_{x,y}^{j_1, j_3, \bar{s}_1+1} P_{j_1}^{\bar{s}_1+1, L} (t_{x,y}^{j_1, \bar{s}_1+1} - t_y^{j_1, \bar{s}_1+1}) + \sum_{j_1}^{n_y} \sum_{j_3}^{n_x-1} \gamma_{x,y}^{j_1, j_3, \bar{s}_1+1} P_{j_1}^{\bar{s}_1+1, L} (t_{x,y}^{j_1+1, \bar{s}_1+1} - t_y^{j_1, \bar{s}_1+1}) \quad (24)$$

式中: $\gamma_{x,y}^{j_1, j_3, \bar{s}_1+1}$ 和 $\gamma_{x,y}^{j_1+1, j_3, \bar{s}_1+1}$ 为逻辑变量, 当 $0 < (t_{x,y}^{j_1, \bar{s}_1+1} - t_y^{j_1, \bar{s}_1+1}) \leq \min(h_x^{j_1+1}, h_y^{j_1+1})$ 时 $\gamma_{x,y}^{j_1, j_3, \bar{s}_1+1}$ 取 1, 当 $0 < (t_{x,y}^{j_1+1, \bar{s}_1+1} - t_y^{j_1, \bar{s}_1+1}) \leq \min(h_x^{j_1+2}, h_y^{j_1+1})$ 时, $\gamma_{x,y}^{j_1+1, j_3, \bar{s}_1+1}$ 取 0。

同理, 可求网络的乘客总换乘延误时间为:

$$T_F = \sum_{z=1}^{\bar{K}} \sum_{x=1}^r \sum_{y>x}^r (T_{x,y}^{\bar{s}_1+1, R} + T_{x,y}^{\bar{s}_1+1, L}) \quad (25)$$

模块公交在各站点的运营操作将会对乘客产生站点延误时间 T_D :

$$T_D = T_{\text{拆}} + T_{\text{交}} + T_{\text{普}} = \sum_{l=1}^r \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^K \{ 2\tau \times O_{l,j}^s \times \alpha_s + [\max(U_{l,j}^s, V_{l,j}^s) \times E + (t_{\text{制}} + t_{\text{启}}) + \tau \times O_{l,j}^s] \times [\beta_s + (\beta_s - 1)(\alpha_s - 1)] \} \quad (26)$$

乘客到站候车时间 T_w 与到站人数以及两车次的到站时刻有关:

$$T_w = \sum_{l=1}^r T_l = \sum_{l=1}^r \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^K \int_{t_l^{s-1}}^{t_l^s} (t_l^s - t) f_{ls}(t) dt \quad (27)$$

当公交容量不足时, 乘客将滞留在站点等待乘坐下一辆公交车, 所产生的滞站等待延误 T_P 与滞站人数和两车次到站时刻有关:

$$T_P = \sum_{l=1}^r \sum_{s=1}^K \sum_{j=1}^{n-1} (t_{l,j+1}^s - t_{l,j}^s) \times D_{l,j}^s \quad (28)$$

从乘客角度出发, 乘客通常对公共交通出行的旅行时间和车下换乘距离最为敏感。在自适应调度模式中, 乘客可以实现不下车步行而在车厢内移动换乘, 故将线网间因单元协同汇流产生的换乘延误时间作为目标之一, 连同站点延误时间 T_D 、到站候车时间 T_w 、滞站等待延误 T_P , 共同构成最小化延误时间目标函数:

$$\min \omega_2 = T_w + T_F + T_D + T_P \quad (29)$$

综上, 模型追求系统运营成本与乘客出行时间综合最优, 因此, 将车辆运营成本最小和乘客出

行延误最小作为联合优化目标:

$$Z = \min(\omega_1, \omega_2) \quad (30)$$

3 分层自适应升温粒子群-模拟退火求解算法

本文研究的 AMV 主辅功能分配的公交自适应调度模型属于较为复杂的组合优化问题, 模型中各线路车辆的发车时序与车辆编组方案相互影响, 换乘单元的数量与汇流时间相互制约, 因此, 基于粒子群算法与模拟退火算法设计分层嵌套式自适应升温的启发式方法进行求解。

算法设计了分层协同的优化结构, 上层粒子群聚焦发车间隔的全局调度优化, 下层粒子群-模拟退火算法精调站点车厢单元数的微观编组方案, 通过上下层迭代交互提升解的全局最优性。加入自适应模拟退火机制, 根据 Metropolis 准则以一定的概率接收下层解的新位置。突破传统退火算法单向降温局限, 利用动态升温策略, 当全局最优解停滞时触发温度重启, 增强算法跳出局部最优的鲁棒性^[12]。

$$\begin{cases} F_{\text{low}}^{r^{i+1}} < F_{\text{low}}^{r^i}, \text{接收 } x_{s \times j}^{r^{i+1}} \\ F_{\text{low}}^{r^{i+1}} > F_{\text{low}}^{r^i}, \text{以概率 } e^{-(F_{\text{low}}^{r^{i+1}} - F_{\text{low}}^{r^i})/T^{r^i}} \text{接收 } x_{s \times j}^{r^{i+1}} \end{cases} \quad (31)$$

$$T_{\text{new}} = \gamma \cdot T_{\text{now}} \quad (32)$$

$$T_{\text{adp}} = \gamma' \cdot T_{\text{now}} \quad (33)$$

式中: $x_{s \times j}^{r^{i+1}}$ 为新的粒子解位置; $F_{\text{low}}^{r^{i+1}}$ 为新的适应度函数; T^{r^i} 为在求解 k_{down} 周期的调度模型时粒子 r 第 i 次迭代时的退火温度。

式(32)(33)分别代表升温、降温操作。当经过 Γ 次降温操作后, 全局最优解的适应度值没有明显改善(即变化量小于升温阈值 Δf), 则进行升温操作, 将当前温度 T_{now} 更新为 T_{adp} , 其中, γ, γ' 分别为降温、升温系数。

同时, 鉴于本文所构建的优化调度模型属于双目标组合优化问题, 采用运筹学中的理想点法将上层适应度函数转化为单目标:

$$\varphi(\omega) = \sqrt{(\omega_1 - \tilde{\omega}_1)^2 + (\omega_2 - \tilde{\omega}_2)^2} \quad (34)$$

$$F_{\text{low}}^{r^i} = \sqrt{(\omega_1^k - \tilde{\omega}_1^k)^2 + (\omega_2^k - \tilde{\omega}_2^k)^2} \quad (35)$$

式中: $\tilde{\omega} = (\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2)$ 为值域中的一个理想点, 即 $\min \omega_1 = \tilde{\omega}_1, \min \omega_2 = \tilde{\omega}_2$; 在值域中找到一个距离理想点最近的值, 即求解 $\min \varphi[\omega(\tilde{h}_{l \times j}, \tilde{x}_{s \times j})]$, 并

将其最优解发车间隔 $\tilde{h}_{l \times j}$ 和车厢编组 $\tilde{x}_{s \times j}$ 作为这种意义下的“最优解”; ω_1^k 为在 k_{up} 周期下层粒子在最优位置 X_{best}^k 时目标 1 的取值, ω_2^k 为在 k_{up} 周期上层粒子在位置 $h_{l \times j}^k$ 时目标 2 的取值, F_{up}^k 为在求解 k 周期的调度模型时的适应度值。

根据以上分析,设计分层自适应升温粒子群-模拟退火求解算法的基本求解流程如下所示。

输入: $K, Z, Y_s, h_l^{\min}/h_l^{\max}, constraints$ 等;

输出: 最优编组方案 $X_{S \times J}^{best}$ 、最优发车间隔方案 $H_{L \times J}^{best}$ 。

Step1 设定: SA 参数 θ, g_1, g_2 ; PSO 参数 $T_0, \gamma, \gamma', \Delta f$ 及最大迭代次数 $\max gen$

Step2 初始化粒子群: 粒子群规模 PN , 初始粒子位置 $x_{s \times j}^{r_0}, h_{l \times j}^{r_0}$, 速度 $V_{low}^{r_0}, V_{up}^{r_0}$ 等粒子群参数

Step3 初始最优位置及适应度: $G_{low-best}^k$ 和 $G_{up-best}^k$; $\hat{F}_{low}^{ki}$ 和 $\hat{F}_{up}^{ki}$

Step4 $gen_{up} = 1$

Step5 下层粒子群-模拟退火进行自适应升温迭代求解

Step6 将下层最优位置 $G_{low-best}^k$ 返回上层粒子交叉变异, 更新

最优适应度和最优位置

Step7 如果 $gen_{up} \in [1, \max gen]$ 则

Step8 $gen_{up} = gen_{up} + 1$ 返回步骤 6 继续迭代

Step9 否则终止判断

Step10 结束循环

Step11 输出全局最优位置 $G_{low-best}^k, G_{up-best}^k$ 和适应度 $\hat{F}_{low}^k, \hat{F}_{up}^k$

4 实例验证及结果分析

4.1 实例验证

本实验以佛山市 116 路(罗村十八庙-新三中交通枢纽站)和 120 路(地铁金融高新区站-城际张槎交通枢纽站)两条公交线路为实证研究对象。两线路均配有额定载客量 45 人的公交车 22 辆, 其运营里程分别为 24.85 km 和 19.73 km, 公交站点数目为 40 个和 37 个, 两线路相交于东建世纪广场站, 两线路地理位置关系及相交站点位置如图 6 所示。



图 6 公交路线和站点示意图

Fig. 6 Diagram of bus routes and stops

实例数据覆盖时间为 2022 年 10 月 01 日~12 月 31 日, 该时段内线路各站点的客流需求如图 7 所示。在高峰时段, 案例线路中需求最大与需求最小站点间的客流量差值为 380 人/h, 可见公交沿线乘客需求的空间分布具有显著差异; 在平峰时段, 乘客断面客流需求低且沿线波动程度较小。案例客流数据在空间维度与时间维度上呈现双重不均衡性特征, 能够有力验证本文模型在高客流和低客流不同站点需求水平下调度方案的灵活性和普适性。

实例涉及的车辆运营参数见表 2^[13-15]。

4.2 结果分析

4.2.1 算法收敛性与迭代结果

为测试本文模型和算法的有效性, 采用上文公交运营的实际算例进行测试。算法编程采用 Python 3.8 在内存为 16 G, CPU 为 3.0 GHz 的 PC 机上求解模型。经多次寻优求解, 算法参数取值如表 3 所示, 算法的收敛过程如图 8 所示, 算法可以在较少迭代次数内收敛。

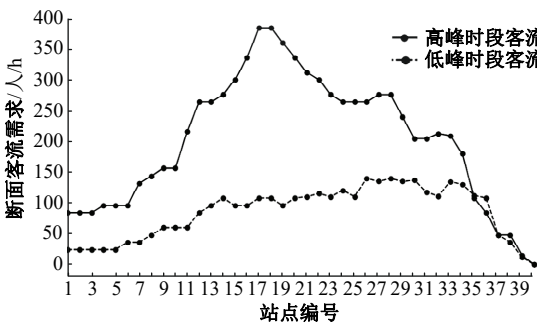


图 7 站点客流需求

Fig. 7 Passenger demand of Station

表 2 实验车辆运营参数

Table 2 Operating parameters of experimental vehicle

参数名称	参数取值
单元载客容量 $C/(\text{人} \cdot \text{节}^{-1})$	6
最大悬挂单元 $N_{\max}/\text{个}$	8
平均行驶速度 $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	30
单位运营成本 $F_N/[\text{元} \cdot (\text{千米节})^{-1}]$	1.312 5
上车/下车时间 $E/(\text{s} \cdot \text{pax}^{-1})$	3
制动启动时间 η/s	5
单位时间成本 $A/(\text{元} \cdot \text{min}^{-1})$	0.83
乘客步行速度 $v_p/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	4.5
换乘步行距离 $L_{\text{换}}/\text{km}$	0.17

表 3 求解算法系数取值

Table 3 Coefficients of the solution algorithm

参数含义	数值	参数含义	数值
初始种群规模	50	最大迭代次数	200
变异概率	0.05	交叉概率	0.5
加速因子 g_1, g_2	1.4	惯性权重	0.7
降温系数	0.9	升温系数	1.1

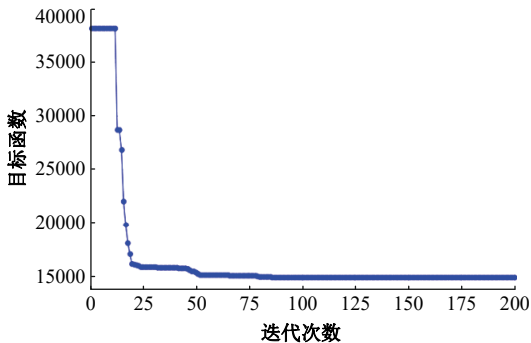


图 8 算法迭代寻优过程

Fig. 8 Process of iterative algorithmic optimization

4. 2. 2 模块公交变容特性优势分析

图 9 为模型求解的模块公交自适应服务的详细调度方案(部分展示 116 路 11 月 1 日 7:00~11:00 运营时段), x 轴表示站点编号, y 轴表示模块公交离站时刻, z 轴表示折线色彩编码对应各站点的模块单元配置数量。结果显示,模块化公

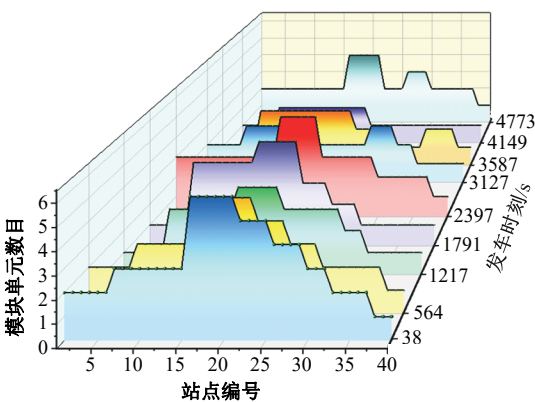


图 9 模块公交自适应服务调度方案的迭代算法优化过程

Fig. 9 Adaptive scheduling solution of modular bus process of iterative algorithmic optimization

交编组方案随沿线客流分布特征发生动态调整,空间维度上,车队普遍在乘客需求较大的站点,如 $s=16$ 至 $s=21$ 站点区段具有较大的单元数量;在时间维度上,需求聚集时段发车间隔显著缩短,稀疏时段则适当延长,有效实现运力资源与需求的动态匹配。

为评估模块公交自适应调度模式的适用性,本文随机选取方案中某一车次的车厢编组情况展开分析。如图 10 所示,以图 10(a)中拆合站点 $s=21$ 为例,到达站点时车上乘客共计 21 人,其中下车需求为 10 人。为满足此下车需求,主公交拆解 2 个容量为 12 人的辅助单元于站点停靠,同时将主公交单元数量从 4 个调整为 2 个,继续承载剩余 11 名乘客前行;在普通站点,模型会对乘客流量进行动态管理,对于无法在当前车次上车的乘客,安排其滞留站点等待后续车次,如图 10(b)所示。这一策略在有效降低站点区段座位空置率的同时,提升了车辆整体运营效率,是综合考量乘客出行时间与车辆运行成本后所确定的优化方法。

4. 2. 3 线路协同换乘的优势分析

为验证线路协同换乘机制的运行效能,对本文优化方案和现行运营方案的各转向乘客的换乘延误进行量化对比分析。如图 11 所示,自适应方案对应的换乘延误时间明显短于现有方案,平均节省换乘延误 26.75%,最高节省 58.3%,可见自适应模式能显著降低乘客换乘时等待的时间成本,其他车次均能以较高比例减少乘客换乘延误,提升出行效率。

4. 2. 4 出行时间与系统成本分析

为探究模块化公交在出行时间和系统成本优

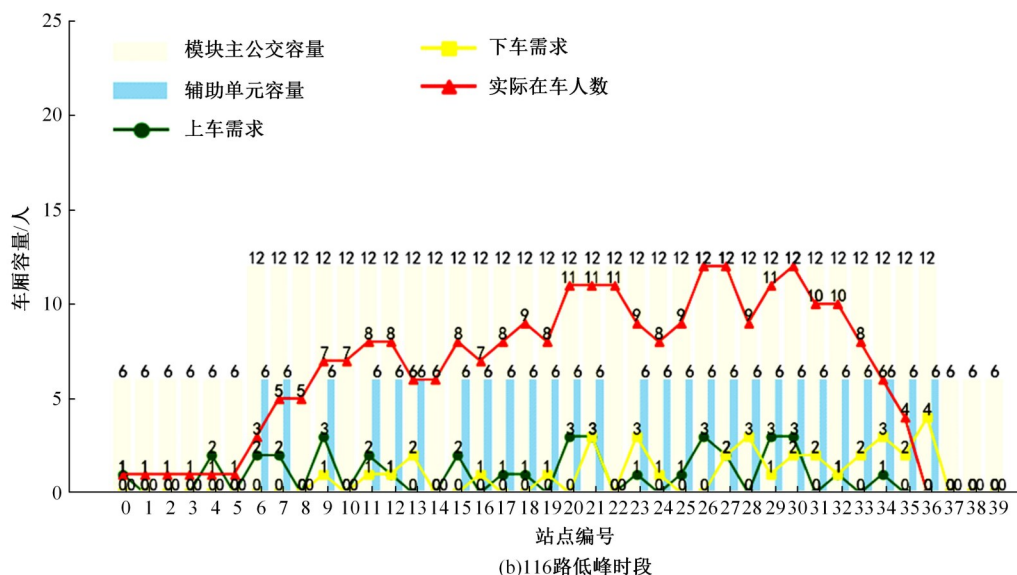
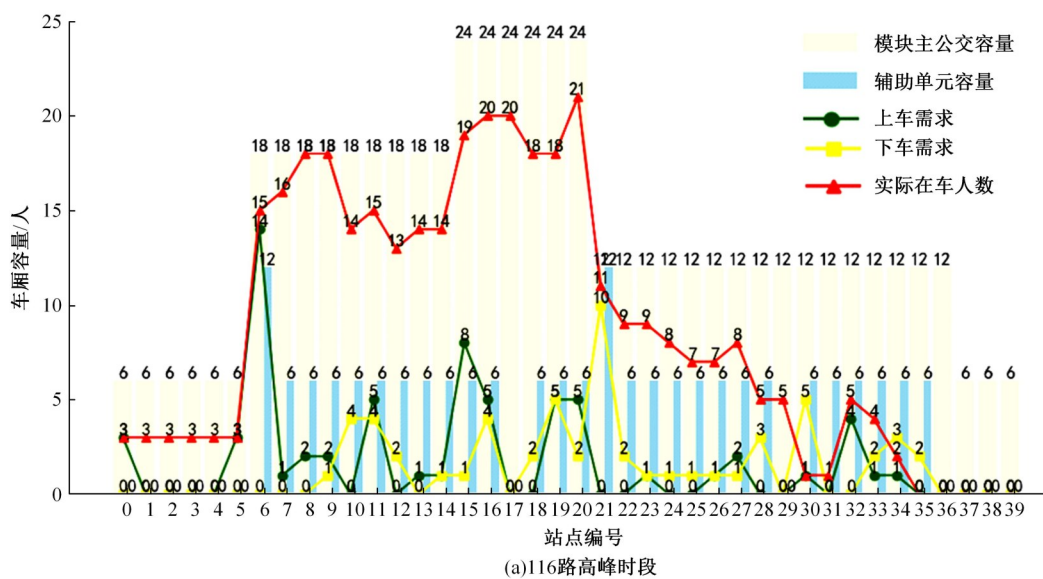


图 10 模块公交自适应车厢编组方案

Fig. 10 Program of carriage grouping

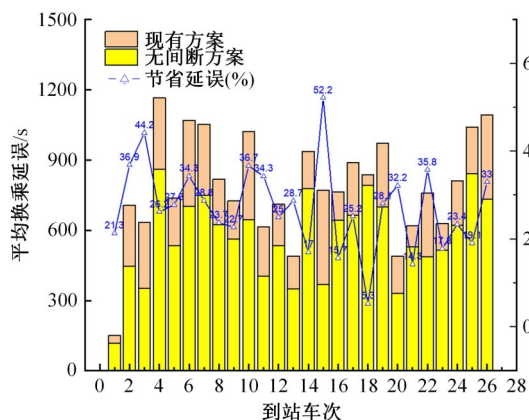


图 11 优化前、后换乘延误对比结果

Fig. 11 Comparison of interchange delays before and after optimization

化中的优势,本文以传统定容量公交和站点响应式模块公交^[16]为基准对比模型,对站点平均延误时间进行研究。图 12 显示,模块公交自适应调度在削减站点停靠延误方面效能显著,定容量公交与站点响应式公交的停靠延误在沿线站点波动较大,而自适应模式的停靠延误水平更趋稳定,表明其能在不同客流分布下维持运营效率,为公交时刻表精准调配提供支撑。

进一步探索模块公交自适应模式在不同需求下的运行效果,结果如图 13 所示,可见在不同的系统需求下自适应模式都能够有效缩短乘客出行时间。如图 13(a)所示,与传统定容量公交模式相比,自适应模式将平均到站等待时间缩短了

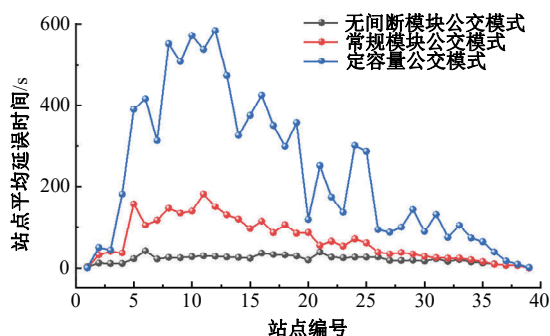


图12 站点平均延误时间

Fig. 12 Average delay of stations

22.23%，将平均换乘延误时间缩短了41.2%；相较于站点响应式公交模式，平均到站候车时间节省了11.78%，平均换乘延误时间减少了34.7%。这一显著优势得益于本文构建的协同汇流换乘机制，通过对两条公交线路的时刻表进行联合优化，减少了乘客到站候车的延误时间，也有效缩短了乘客跨线换乘的操作时长。

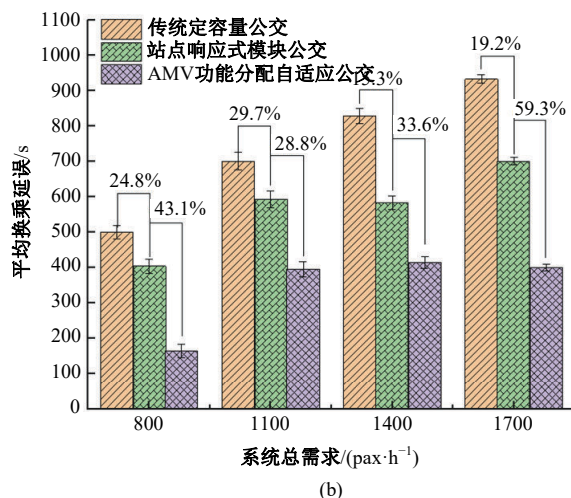
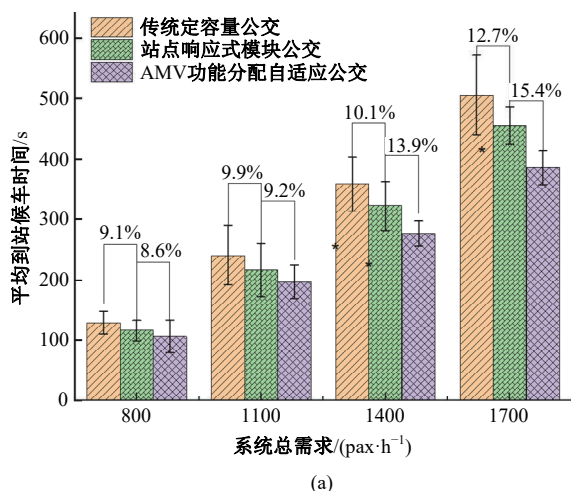


图13 延误时间对比分析结果

Fig. 13 Comparative analysis of delays

图14为3种模式在不同系统需求下的成本数据，数据显示，自适应模块公交模式的总成本较定容量公交模式降低了35.62%，较站点响应式模块公交模式降低了6.54%。总体来看，自适应机制相较于其他两种模式在不同时段上的成本波动更小，系统稳定性更高。这验证了基于AMV主辅功能分配的自适应公交模式在优化公交系统成本结构、提升整体运营效益方面的优势明显。

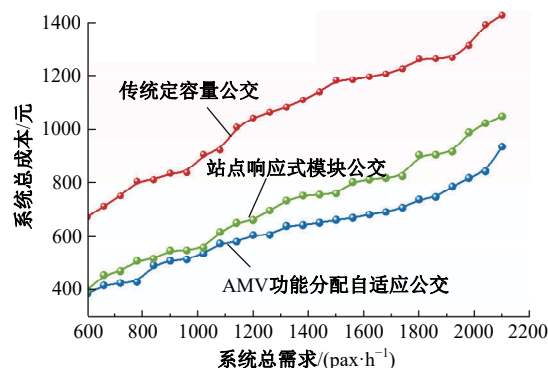


图14 总成本对比分析结果

Fig. 14 Comparative analysis of total costs

5 结束语

本文提出了基于AMV的模块公交主辅单元自适应站点调度机制，通过动态调整主辅单元数量、匹配站点功能分区及线网汇流策略，实现运力与客流的时空动态平衡。本文模型能够实现在高峰时段加密发车、低峰时段延长间隔，动态调控主公交单元数量，使座位空置率降低且停靠延误稳定。线路汇流机制显著减少了乘客换乘延误，系统成本也在不同需求场景下表现更趋稳定，波动更小。本文模型有效提升了换乘效率与成本控制能力，展现出相较于传统模式的显著优势。

参考文献：

- [1] Ji Y, Liu B, Shen Y, et al. Scheduling strategy for transit routes with modular autonomous vehicles[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2021, 10(2): 121-135.
- [2] Li Q, Li X. Trajectory optimization for autonomous modular vehicle or platooned autonomous vehicle split operations[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 176: No. 103115.
- [3] Chow A H F, Li G, Ying C. Adaptive scheduling of mixed bus services with flexible fleet size assignment

- under demand uncertainty[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 158: No. 104452.
- [4] Gong M, Hu Y, Chen Z, et al. Transfer-based customized modular bus system design with passenger-route assignment optimization[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 153: No. 102422.
- [5] Hatzenbühler J, Jenelius E, Gidófalvi G, et al. Modular vehicle routing for combined passenger and freight transport[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2023, 173: No. 103688.
- [6] Liu X, Qu X, Ma X. Improving flex-route transit services with modular autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 149: No. 102331.
- [7] Tian Q, Lin Y H, Wang D Z W. Joint scheduling and formation design for modular-vehicle transit service with time-dependent demand[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 147: No. 103986.
- [8] Khan Z S, Menéndez M. A seamless bus network without external transfers using autonomous modular vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 168: No. 104822.
- [9] Shi X, Chen Z, Pei M, et al. Variable-capacity operations with modular transits for shared-use corridors[J]. *Transportation research record*, 2020, 2674(9): 230-244.
- [10] Wu J, Kulcsár B, Qu X. A modular, adaptive, and autonomous transit system (MAATS): an in-motion transfer strategy and performance evaluation in urban grid transit networks[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2021, 151: 81-98.
- [11] 岳昊, 董显龙, 王力, 等. 模块化公交系统车辆单元动态编组方案优化[J]. *交通运输系统工程与息*, 2024, 24(5): 160-172.
- [12] Jiang J J, Wei W X, Shao W L, et al. Research on large-scale bi-level particle swarm optimization algorithm[J]. *Ieee Access*, 2021, 9: 56364-56375.
- [13] Wu D W, Peng Y, Tian Q, et al. Scheduling optimization for responsive feeder transit based on the stop location[J]. *Highway Engineering*, 2021, 46(5): 176-182.
- [14] 裴明阳. 灵活公共交通系统营运调度模型与方法研究[D]. 广州: 华南理工大学土木与交通学院, 2020. Pei Ming-yang. Research on operation scheduling models and methods of flexible public transportation system[D]. Guangzhou: School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 2020.
- [15] Satish C, Bharti A K. Speed distribution curves for pedestrians during walking and crossing[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, 104: 660-667.
- [16] Chen Z, Li X, Zhou X. Operational design for shuttle systems with modular vehicles under oversaturated traffic: discrete modeling method[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 122: 1-19.