

基于模块化车辆的跨区域需求响应式 公交动态调度优化研究

张艾霖, 贾顺平*

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要:为解决传统容量固定的需求响应式公交满载率较低的问题,引入模块车系统,提出一种基于模块化公交的跨区域通勤需求响应式公交动态调度优化方法,建立了以乘客出行成本和企业运营成本最小化的目标函数,引入耦合站点概念,设计了考虑耦合站点的模块化车队动态编组模型,实现了两条线路上的车队重组和乘客交换。使用大M法将模型线性化为混合整数线性规划(MILP)并进行求解,以北京市九棵树至王府井的两条通勤线路为案例进行验证。试验结果表明与传统固定容量的需求响应式公交相比,引入模块化公交能够有效增加车辆的满载率,降低企业运营成本,乘客出行成本也得到了一定的降低但是影响较小。由此可见,在城市通勤场景下,引入模块化公交系统可以为乘客出行企业运营提供更加灵活高效的模式。

关键词:城市交通;模块化公交系统;混合整数线性规划;需求响应式公交

中图分类号:U491.1 文献标志码:A 文章编号:1002-4026(2026)01-0077-11

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Cross-regional demand-responsive bus dynamic scheduling optimization based on modular vehicles

ZHANG Ailin, JIA Shunping*

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To address the issue of low load factors associated with conventional demand-responsive buses with fixed capacity, this study introduces a modular vehicle system and proposes a cross-regional demand-responsive bus dynamic scheduling optimization method based on modular vehicles. An objective function is established to minimize travel and operational costs for passengers and enterprises, respectively. The concept of coupling stations is introduced, and a dynamic fleet formation model considering coupling stations is designed, which allows for fleet reorganization and passenger transfer across two routes. Using the Big-M method, the model is linearized into a mixed-integer linear programming (MILP) problem for solutions, and the model is validated through a case study of two commuting routes

收稿日期:2025-04-24 修回日期:2025-08-08

作者简介:张艾霖(2000—),硕士生,研究方向为综合交通运输。E-mail:23120947@bjtu.edu.cn

*通信作者,贾顺平,教授,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:shpjia@bjtu.edu.cn, Tel: 13501202910

from Jiukeshu to Wangfujing in Beijing. The experimental results show that compared to the introduction of conventional demand-responsive buses with fixed capacity, the introduction of modular buses effectively increases vehicle load factors, reduces operational costs for enterprises, and slightly reduces passenger travel costs. This indicates that the introduction of modular bus systems in urban commuting scenarios can provide a more flexible and efficient operational model for passenger travel and enterprise operations.

Key words : urban transportation; modular bus system; mixed-integer nonlinear programming; demand-responsive bus

需求响应式公交(demand-responsive transit, DRT)是一种灵活的公共交通模式,其特点是根据乘客的需求和出行路线实时调整公交服务。现有研究中对于需求响应式公交的研究已经十分成熟,张文波等^[1]基于潜在定制公交的乘客对出行价格和时间的敏感度进行研究,得到选择定制公交的概率因素,为定制公交运营提供了理论基础。在定制公交线路优化上,现有研究依据不同目标、不同场景、不同需求进行研究,其中 Huang等^[2]以运营利润最大为目标,构建了需求响应式公交路径优化模型,采用模拟退火的遗传算法进行求解;孙继洋等^[3]进一步提出了多目标灵活公交调度模型,并引入动态需求响应机制,增强了模型的实用性;Sun等^[4]则针对多车厂、多车型且带时间窗约束的复杂场景进行研究并采用混合遗传算法进行求解;曹宏等^[5]从政策角度出发,构建了考虑碳税机制与社会福利最大化的双层规划模型,探讨了票价与站点设置对跨区域通勤系统的影响。

尽管 DRT 相较于传统公交灵活性有了一定提升,但仍受限于固定车辆容量,存在满载率偏低、资源利用率不足的问题。为突破这一瓶颈,近年来学者开始探索引入模块化车辆系统(modular vehicle system, MVS),通过车辆在运行过程中的动态编组与解编,实现运力与需求的精准匹配。Dai 等^[6]研究了自动驾驶模块车与人工驾驶车辆混合运营的可行性;Pei 等^[7]和 Liu 等^[8]分别针对固定公交线路和灵活公交线路场景研究了模块车系统的适配性和可行性,他们的研究为后续模块化系统研究提供了基础;高天洋等^[9]建立模块化车辆系统的区域灵活接驳公交线路优化模型,能够有效降低最终成本;Shi 等^[10]聚焦于 Y 型共享走廊,通过协同优化发车时刻、载客量及线路分离策略,进一步减少了运营开支,同时发现了模块车在站点的对接与重组,对系统成本控制具有关键作用;Chen 等^[11]和 Liu 等^[12]的研究都强调了模块车系统间模块组合与拆分策略对运力动态调配的重要性,后者还综合优化了车辆配置与发车间隔,提升了系统整体效能。而高虹等^[13]在已有研究基础上,引入电动模块车的充电调度与站点容量调整,建立了更为综合的重组调度模型;Qing 等^[14]则是在新加坡动态自主道路交通(DART)系统基础上进行研究,得到通过模块化单元的组装与拆卸能更高效相应多时段需求变化;易洪波等^[15]研究也发现模块化公交通过动态编组与解编能显著降低乘客成本和运营成本。

在已有的考虑模块化车辆系统的公交线路优化研究中,多是针对一条固定线路公交的中途站点进行容量重组,但针对多条线路上模块车耦合的研究相对较少,因此本文以跨区域需求响应式公交为对象,服务于高峰期通勤客流,构建基于通勤需求的模块化车辆跨区域需求响应式公交动态调度优化模型。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

模块化公交系统(modular public transport system)^[15]是一种创新的公共交通解决方案,该系统的核心在于其模块化公交单元(modular bus unit),单元车以相同速度前进实现相对静止,之后两车进行耦合,单元车之间形成通道,通过该通道实现乘客在不同模块车之间穿梭。图 1 展示了模块化公交单元内换乘的具体过程。

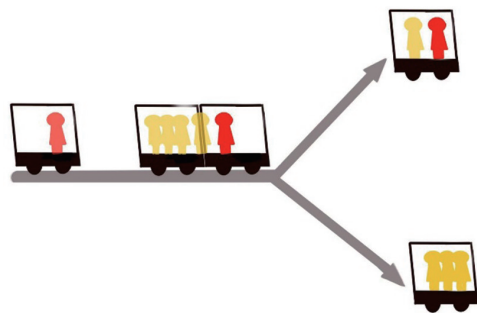


图 1 模块车示意图

Fig.1 Diagram of module car

现有的定制公交系统在通勤线路上车辆种类相对固定,无法根据乘客需求及时调整车辆容量,导致客车的满载率较低。为保证乘客高效出行,优化客运成本,本文要解决的问题可描述为:途径不同交通小区到达同一个交通小区临近的两条定制公交通勤线路,基于乘客的出行目的,提出假设乘客只会在目的地下车不会在中途站点下车,且两线在地理上存在交点及两线拥有一个或多个相同站点,并引入模块车系统,得到一个最优的两条线路上模块化公交的动态编组方案;设计方案的同时考虑两条线路相交情况,使得在不同线路驶向同一终点的模块车存在一个或多个交点耦合站点能进行乘客整合,通过重新调整模块车编组,提高乘客出行效率和模块化公交系统服务水平。

具体模块化公交服务乘客出行的全过程如图 2 所示。现有两条交通线路,每个站点之间距离相同,两线相交于站点 4,其余的站点互相独立互不影响,此时认定站点 4 为交点耦合站点,不同线路上的模块车在此站点进行耦合实现乘客交换,并且车队均能在耦合站点调度新的模块车,使其能满足后续两线站点的乘客需求。当站点 3 为耦合站点,判断车队是否存在满载模块车,如果出现满载模块车,则该车可以离开车队直接到达终点,另外站点 3 需要根据后续站点乘客需求,调度新的单元模块车进入车队。在这种情况下,与使用固定容量的定制公交的场景进行比较,运营成本出现降低;使用模块化公交也将减少总旅行时间。在传统的公交服务中,车辆必须在站点 3 和站点 4 停车,以便乘客上下车,而在模块化车辆运输服务中,乘客的上下车可以在模块化车辆的耦合过程中完成,不用在站点停靠,模块化车辆满载后在耦合站点脱离车队直达终点,有效的减少了总旅行时间,提高乘客出行效率。

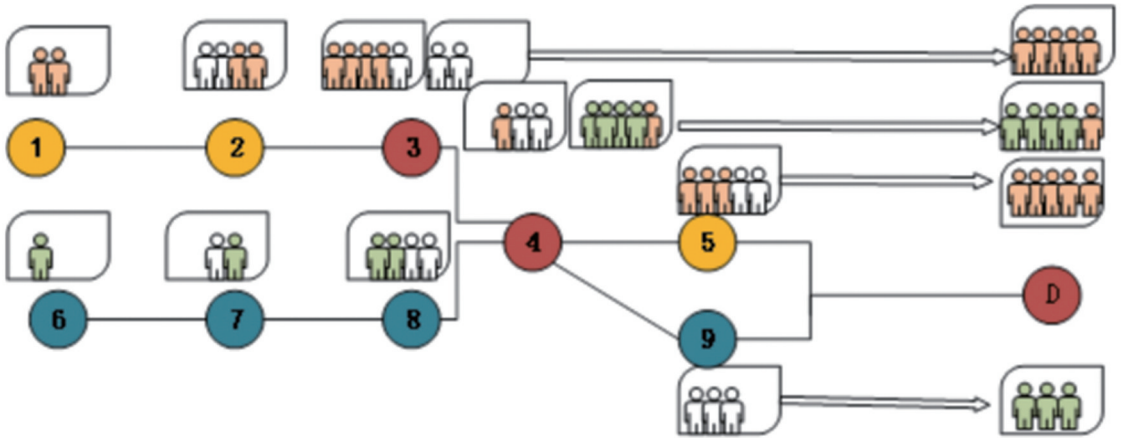


图 2 考虑模块化车辆的跨区域需求响应式公交线路调度优化问题示意图

Fig.2 Schematic of the cross-regional demand-responsive bus scheduling optimization considering modular vehicles

1.2 模型假设

本研究基于模块化车辆的跨区域需求响应式公交动态调度优化模型有如下基本假设:(1)乘客需在车辆发车前提交预约信息以确定所有站点的需求量;(2)各站点乘客需求由该站点上下车乘客数量决定;(3)各站点之间的车辆运行时间相同且车辆启动和停车制动损失时间保持恒定;(4)模块车的容量已知,存在乘客需求无法满足的情况,引入较高的惩罚成本表示未服务成本。

两条线路上的车队在交点耦合站点发生乘客交换,即两条线路上的车队需要在同一时间到达交点耦合站点,由于两线之间的行车时间和各站点间乘客需求量相对确定,因此为保证两车队在同一时间到达交点耦合站点,对两车队的出发时间进行限制。要求线路 1 上的车队在通勤时段内比该时段线路 2 上的车队早出发 323 s,由此保证在交点耦合站点 7,两车队能在相对接近的时间到达并顺利进行乘客交换。

1.3 符号说明

本文用到的符号及相关定义如表 1 所示。

表1 模型符号说明

Table 1 Notation for the model

符号	定义
L	该交通小区内开设的交通线路集合
集合	
J_l	在交通线路 l 上的站点集合
K	两线间交点耦合站点集合
j	线路上的节点
c	模块化单元的载容量
h	整个模块车队最多能容纳的模块车车辆数
δ	模块车上下车的加速度的常数参数
$t_{j,l}$	在站点 $j-1$ 和 j 之间的行程时间 $j = 2, 3, \dots, J$
$d_{j,l}$	站点 j 停车的固定停留时间
$P_{j,l}$	站点 j 乘客没有被服务的惩罚成本
$W_{j,l}$	站点 j 的候车人数
参数	
$e_{k,l}$	交点耦合站点乘客转移的方向, 固定值 $e_{k,1} = -1, e_{k,2} = 1$
C_k	交点耦合站点 k 乘客流通的人数
$U_{j,l}$	交通线路 l 上站点 j 时车队内乘客总数
$B_{j,l}$	交通线路 l 上在站点 j 上车人数
$A_{j,l}$	交通线路 l 上在站点 j 下车人数
$L_{j,l}$	交通线路 l 上未能在站点 j 上车的乘客数
$F_{j,l}$	交通线路 l 在站点 j 模块车队车辆数
$\tau_{j,l}$	交通线路 l 上, 站点 j 的停留总时间
$T_{j,l}$	在交通线路 l 上模块车从车厂出发到站点 j 花费的时间总和
决策变量	
$s_{j,l}$	交通线路 l 上在站点 j 加入模块车队的模块车数量
$x_{j,l}$	交通线路 l 上在站点 j 离开模块车队的模块车数量
b_l	交通线路 l 模块车队从车厂出发时间
$f_{k,l}$	交通线路 l 上的模块车队到达两线相交的耦合站点的时间
$y_{j,l}$	0-1 变量, 交通线路 l 上模块车经过耦合站点即该站点 j 可以进行模块的对接和分离, 经过耦合站点则为 1, 否则为 0

1.4 模型构建

模块化公交动态调度优化主要包含三部分: 一是耦合站点的选择, 二是耦合站点内模块车的变化, 三是交点耦合站点两线间乘客交换。为保障乘客高效出行, 模块车运行效率最大化, 本文建立如下模型。

$B_{j,l}$ 表示在交通线路 l 上站点 j 登上模块车队的人数, 在考虑模块车容量限制的基础上, 在站点 j 上车乘客人数应该是等待乘客人数和模块车剩余容量的最小值决定, 考虑两线相交的耦合站点的上车乘客不仅要满足耦合站点本身需求还应满足两线相交之后出现的模块车之间的流动人数, 所以上车人数应分为两种情况, 如式(1)~(4)。

$$B_{j,l} = \begin{cases} \min(W_{j,l}, c F_{j,l} - U_{j,l}), j \neq k \\ \min(W_{j,l}, c F_{j,l} - U_{j,l} + (-e_{k,l}) C_k), j = k \end{cases}, \quad (1)$$

$$0 < B_{j,l}, \quad (2)$$

$$B_{j,l} \leq W_{j,l}, \quad (3)$$

$$B_{j,l} \leq c F_{j,l} - U_{j,l}. \quad (4)$$

$A_{j,l}$ 表示在交通线路 l 上站点 j 离开模块车队的人数,由于设定情景为通勤出行,其出行特点为所有乘客自出发车站上车后终点站均为线路终点,乘客只会在终点站离开模块车辆。在运行过程中乘客所在模块车辆离开车队被视为乘客下车,共有两种情况,一种是在所有耦合站点当所在的模块车满载后脱离车队,即为从模块车队下车的表现,另一种是指在两线相交的特殊耦合站点,两个车队之间耦合进行成乘客间的交换,使得出现更多的满载模块车,然后脱离车队。如式(5)所示。

$$A_{j,l} = \begin{cases} y_{j,l} \left[\frac{U_{j,l} + B_{j,l}}{c} \right] c, j \neq k, \\ y_{j,l} \left[\frac{U_{j,l} + e_{k,l} C_k + B_{j,l}}{c} \right] c + e_{k,l} C_k, j = k. \end{cases} \quad (5)$$

到达站点 j 模块车队上的总乘客数如式(6)、(7)所示。

$$U_{j,l} = \sum_{i=1}^{j-1} (B_{i,l} - A_{i,l}), \quad (6)$$

$$0 < U_{j,l} < F_{j,l} c. \quad (7)$$

由于模块车的容量限制会导致一些乘客无法上车,于是存在等待上车人数和实际上车人数的差值,如式(8)所示。

$$L_{j,l} = W_{j,l} - B_{j,l}. \quad (8)$$

为了计算模块车的行驶时间,需要确定车辆在车站的停止时间。由于普通站点需要停车上客,而耦合站点可以去除停止时间,因此对任意车站的停留时间表示如式(9)、(10)所示。

$$\tau_{j,l} = d_{j,l} (1 - y_{j,l}), \quad (9)$$

$$d_{j,l} = \xi B_{j,l} + \kappa. \quad (10)$$

每个车站的停留时间与上车的人数相关, ξ 为单位上车时间, κ 为其他固定时间,如开门关门时间。

模块车只能在特定的耦合站点进行模块车的整合,加入或离开车队的模块车数量的决定表示如式(11)~(17)所示。

$$0 \leq x_{j,l} \leq M y_{j,l}, \quad (11)$$

$$y_{j,l} \leq s_{j,l} \leq h, \quad (12)$$

$$x_{j,l} + s_{j,l} > y_{j,l}, \quad (13)$$

$$F_{j,l} = F_{j-1,l} + s_{j,l} - x_{j,l}, \quad (14)$$

$$0 < F_{j,l} < h, \quad (15)$$

$$x_{j,l} = \left\lfloor \frac{U_{j,l}}{c} \right\rfloor, \quad (16)$$

$$c s_{j,l} \geq B_{j,l} - M(1 - y_{j,l}). \quad (17)$$

模块车在两线相交的交点耦合站点进行乘客交换,首先保证不同线路上的车队到达交点耦合站点的时间一致,因此对两线相交应对模块车到达该站点时间提出限制,两车到达该耦合站点的时间差为 Δ ,如式(18)~(21)所示。

$$t_{j,l} = \sum_{i=2}^{|J|} (t_{i,l} + \tau_{i,l} + \delta(1 - y_{i-1,l}) + \delta(1 - y_{i,l})), \quad (18)$$

$$f_{k,l} = b_l + t_{k,l}, \quad (19)$$

$$\Delta = |f_{k,1} - f_{k,2}|, \quad (20)$$

$$\Delta < M. \quad (21)$$

在交点耦合站点首先需要两线车队的乘客进行重组,使得出现更多的满载车辆,此时默认线路2模块车上的乘客到线路1的模块车上,并且该站点仍然满足一般耦合站的特点。如式(22)所示。

$$C_k = \min((F_{j-1,1} + 1)c - U_{j,1}, U_{j,2} - (F_{j-1,2} - 1)c)。 \quad (22)$$

目标函数如式(23)所示。

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4, \quad (23)$$

其中 Z_1 为两条线路上乘客成本,用所有乘客的总乘车时长表示乘客成本^[14],其中乘客总乘车时长为上车乘客的乘车时长加上未上车乘客的惩罚系数,其计算方法如式(24)所示。

$$Z_1 = \sum_{l=1}^2 \left[\varphi_l \sum_{j=2}^{|J|} ((t_{j,l} + \tau_{j,l} + \delta(1 - y_{j-1,l}) + \delta(1 - y_{j,l})) U_{j,l} + \sum_{j=1}^{|J|} p_{j,l} L_{j,l} \right]。 \quad (24)$$

Z_2 和 Z_3 之和为两条线路上模块车队的运营成本,用所有模块车的运行时长表征模块化公交系统的运营成本,其中 Z_2 表示模块化车队的运营成本^[14], Z_3 为模块车辆脱离车队后的运营成本,其计算方法如式(25)、(26)所示。

$$Z_2 = \varphi_0 \sum_{j=1}^{|J|-1} ((t_{j,l} + \tau_{j,l} + \delta(1 - y_{j+1,l}) + \delta(1 - y_{j,l})) (a_j F_{j,l}), \quad (25)$$

$$Z_3 = \sum_{l=1}^2 \left[\varphi_l \sum_{i=1}^{|J|} x_i c \sum_{j=i+1}^{|J|} t_{j,l} + \sum_{i=1}^{|J|} \sum_{j=i}^{|J|} t_{j,l} (a' x_i) \right]。 \quad (26)$$

Z_4 为其余固定成本^[14],与耦合站点数量和模块车固定运行成本相关的成本,其中模块车固定运行成本包含耦合站点耦合系统的固定成本和在该耦合站点模块车队进行耦合的成本。如式(27)所示。

$$Z_4 = \sum_{l=1}^2 \left[\sum_{j=2}^{|J|} \beta_j y_{j,l} + \alpha_j h \right] - (\beta_{k,1} y_{k,1} + \alpha_{k,1} h)。 \quad (27)$$

2 方法与结果

2.1 模型求解

在1.4节中,本研究构建了模块化公交调度优化问题的数学模型。由于目标函数中包含了非线性项,该模型应该被归类于混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)问题。鉴于MINLP问题的复杂性,现有的商业求解器如Gurobi、CPLEX等难以直接高效求解此类模型。为了提升模型的求解效率,本研究采用模型转化方法,将MINLP问题转化为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题,从而便于利用成熟的线性规划求解工具进行求解。

上车乘客数量定义为车队剩余容量和站点等车人数的最小值,为了将式(1)中上车乘客数量中的最小值转化为线性表达形式,引入辅助变量 $a_{j,l}$ 用于指示最小值的选择和大 M 常数。

对于 $j \neq k$ 的情况,线性化后的约束如式(28)所示。

$$\begin{cases} B_{j,l} \geq W_{j,l} - M(1 - a_{j,l}), \\ B_{j,l} \geq c F_{j,l} - U_{j,l} - M a_{j,l}。 \end{cases} \quad (28)$$

对于 $j = k$ 的情况,线性化后的约束如式(29)所示。

$$\begin{cases} B_{j,l} \leq c F_{j,l} - U_{j,l} + (-e_{k,l}) C_k, \\ B_{j,l} \leq W_{j,l}, \\ B_{j,l} \geq W_{j,l} - M(1 - a_{j,l}), \\ B_{j,l} \geq c F_{j,l} - U_{j,l} + (-e_{k,l}) C_k - M a_{j,l}。 \end{cases} \quad (29)$$

同理,式(22)中交点耦合站点上乘客交换数量为线路1上空余位置和线路2未满载模块车载客人数的最小值,将其转化为先行表达形式,引入辅助变量 m_k 用于指示最小值的选择和大 M 常数,及线性化后的约束,如式(30)所示。

$$\begin{cases} C_k \leq (F_{j-1,1} + 1)c - U_{j,1} + M(1 - m_k), \\ C_k \geq U_{j,2} - (F_{j-1,2} - 1)c, \\ C_k \leq U_{j,2} - (F_{j-1,2} - 1)c + M m_k, \\ C_k \geq (F_{j-1,1} + 1)c - U_{j,1}. \end{cases} \quad (30)$$

为了将公式(5)中的非线性表达式 $A_{j,l}$ 线性化,消除其中的非线性项、取整函数和乘法项,引入辅助变量 $q_{j,l}$ 表示取整函数的结果。其中 $A_{j,l}$ 表示在交通线路 l 上站点 j 离开模块车队的人数,其原始表达式包含对车辆载客数 $U_{j,l}$ 和该站上车人数 $B_{j,l}$ 以及模块车容量 c 的非线性运算,及新增约束条件:

$$\begin{cases} q_{j,l} \leq \frac{U_{j,l} + B_{j,l}}{c} < q_{j,l}, j \neq k, \\ q_{j,l} \leq \frac{U_{j,l} + e_{k,l} C_k + B_{j,l}}{c} < q_{j,l}, j = k. \end{cases} \quad (31)$$

由于乘法项 $y_{j,l} q_{j,l}$ 是非线性的,引入辅助变量 $w_{j,l}$ 表示乘法项,新增约束条件:

$$\begin{cases} w_{j,l} \leq M y_{j,l}, \\ w_{j,l} \leq q_{j,l}, \\ w_{j,l} \geq q_{j,l} - M(1 - y_{j,l}). \end{cases} \quad (32)$$

将上述线性化步骤带入式(5),得到线性化表达式(33)。

$$\begin{cases} A_{j,l} = w_{j,l}c, j \neq k, \\ A_{j,l} = w_{j,l}c + e_{k,l} C_k, j = k. \end{cases} \quad (33)$$

同理,式(16)耦合站点离开车队的模块车数量是取整函数,为了使其线性化,引入辅助变量 $p_{j,l}$ 表示取整函数的结果,及新增约束条件:

$$\begin{cases} p_{j,l} \leq \frac{U_{j,l}}{c}, \\ p_{j,l} > \frac{U_{j,l}}{c} - 1, \\ x_{j,l} = p_{j,l}. \end{cases} \quad (34)$$

在对模型进行线性化过程中,多次使用大 M 法对非线性公式进行转化,大 M 法是通过引入一个大的常数 M ,将问题转化为标准的线性规划形式,而引入的大 M 通常都会带来一定的误差。当大 M 的取值过小则不能保证线性化后不等式的方向起到线性化的作用,当大 M 的取值过大会引起数值计算误差,使得精度下降。为了降低上述误差,通过多次尝试和实验来找到最合适的 M 值,进而减小误差。

2.2 案例分析

2.2.1 参数设置

本研究选择北京市九棵树到王府井的两条定制公交线路作为分析案例,该线路的特征如图 3 所示。定制公交线路 003001 早线为线路 1,线路包含阿尔法社区、大搞新村、旗舰凯旋小区、翠屏西路、格瑞雅居小区、翠屏北里、翠屏西路北口、科印小区 8 个站点,将阿尔法社区站设置为站点 $j = 1$,其余站点按照顺序分别设置为 $j = 2$ 至 $j = 8$ 。定制公交线路 003201 早线为线路 2,线路包含大方居北门、通州半壁店北、北探小区、怡乐中路北口、翠屏西路北口、科印小区、通州北苑路口南 7 个站点,将大方居北门站设置为站点 $j = 9$,其余站点按照顺序分别设置为 $j = 10$ 至 $j = 14$,其中翠屏西路北口,科印小区,为两条线路的重合站点,现将翠屏西路北口设置为交点耦合站点,即两线上翠屏西路北口站均设置为 $j = 7$,而科印小区站作为两线单独站点,互不干涉,则线路 1 上的科印小区站为 $j = 8$,线路 2 上的科印小区站为 $j = 13$ 。由于所选线路为通勤定制公交线路则乘车时间相对确定,只在定点时间开设一班,同时由于乘客出行目的为通勤,则各个站点乘客需求量相对

稳定,各站点乘客需求参照 OSID 中各站点乘客需求量表,案例分析中各点的乘客需求为收集数据的平均值。

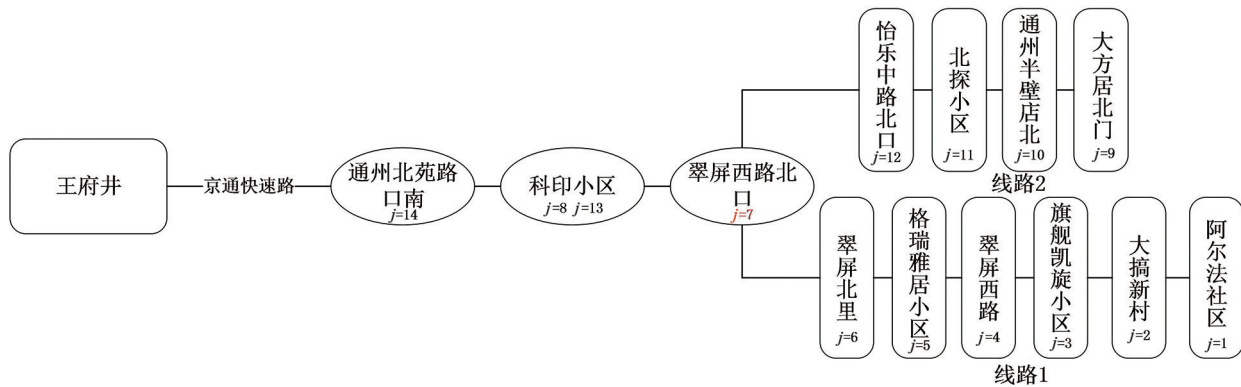


图3 案例分析所选定制公交线路

Fig.3 Customized bus routes selected for the case study

2.2.2 基础案例结果

模块化公交动态调度方案优化问题被描述为一个 MILP 模型,可采用常用的商业求解器进行求解。使用 Gurobi 11.0.2 商业求解器进行本问题的求解。求解时间为 15.8 s,求解时间和结果如图 4 和表 2 所示。

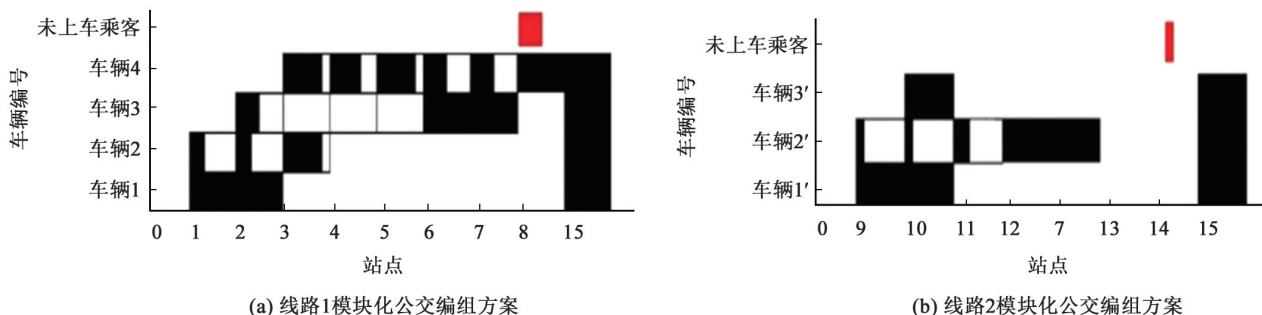


图4 模块化公交动态编组方案

Fig.4 Dynamic fleet formation scheme for modular buses

表2 各线路上不同成本

Table 2 Different costs on each line

线路	乘客成本/元	运营成本/元	总和/元
线路 1	539.82	702.26	1 242.08
线路 2	401.27	506.56	907.83
线路 1+线路 2	941.09	1 208.82	2 149.91

表 2 展现了各线路的运行成本,从表 2 中可以看出车队运行成本由两部分构成:一部分是乘客运营成本,包括乘客在运行过程中所产生的时间成本以及因未能上车而导致的惩罚成本;另一部分是运营成本,涵盖模块车的运行时间成本以及在耦合车站进行模块单元耦合操作所产生的耦合成本。线路 1 上站点设置如图 4(a)所示,站点 2 和站点 3 为耦合站点,其中车辆 1 在站点 2 脱离车队直达终点,车辆 2 在耦合站点 3 通过和车辆 3 进行耦合进行乘客重组达到满载,脱离车队直达终点,而在固定交点耦合站点 7,车辆 3 已经满载故脱离车队直达终点,只有车辆 4 经停站点 8,但是由于车辆容量出现未上车乘客,车辆在站点 8 达到满载并通过快速路到达终点。同理,图 4(b)为线路 2 上站点设置状况,站点 10 为耦合站点,其中车辆 1'和车辆 3'由于满载在站点 10 脱离车队直达终点,车辆 2'继续沿着当前线路前进,到达交点耦合站点达到满载,故不在后续站点停留直达终点。

将模块化公交系统与传统定制公交进行对比,在考虑定制公交的情境下,定制公交容量设置为 60 人/车,公交运营成本系数设置为 15 元/s^[15]。对定制公交与模块化公交的成本进行对比,具体结果如表 3 所示,模块化公交的应用显著降低了乘客成本和运营成本。乘客成本减少了 3.8%,运营成本下降了 19.59%,系统总成本降低了 13.36%,其次在车辆满载率方面,模块化公交系统车辆满载率为 100%,相较于定制公交系统 38.3%的满载率有了显著提高。这主要得益于两个方面,一是模块车较小的容量和灵活的特性使得模块车拥有较高的满载率,有效的减少了单个车辆的运营成本;二是基于通勤特征乘客拥有相同的终点,当模块车满载后,模块车可在耦合站点脱离车队不再后续站点停留,有效的减少了乘客出行时间,进而减少乘客出行成本。

表 3 定制公交系统与模块化公交系统成本对比

Table 3 Cost comparison between customized and modular bus systems

成本项	定制公交/元	模块化公交/元	成本降低率
乘客成本	978.27	941.09	3.8%
运营成本	1 503.25	1 208.82	19.59%
总成本	2 481.52	2 149.91	13.36%

2.3 敏感性分析

2.3.1 乘客需求对系统成本的影响

就乘客需求量影响模块车系统成本为目标进行敏感性分析,在现有乘客需求量的基础之上进行增加,以现有调查乘客需求量为 1 倍量,逐步增长 0.2 倍,直至乘客需求量到达原有需求量的 2 倍。对各个需求量进行求解,得到各倍数下系统总成本、运营总成本、乘客总成本。如图 5(b)所示,由图可知,随着乘客的需求量增加各项成本也随之增加,但从人均各项成本来看,如图 5(a)所示,在需求增长的情况下各项人均成本相对平稳,其中人均乘客成本和人均系统成本成微弱的下降趋势。

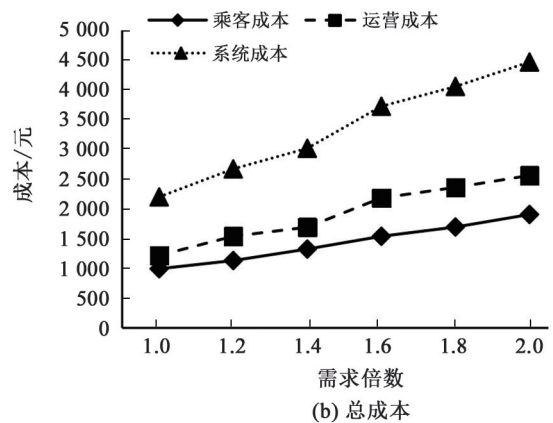
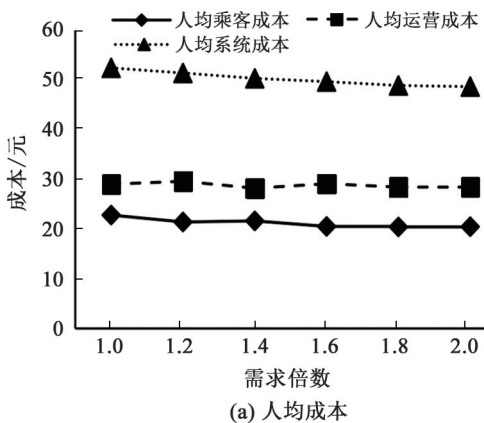


图 5 不同需求强度

Fig.5 Varied costs at different levels of demand intensity

2.3.2 交点耦合站点对系统成本的影响

当乘客需求量到达 1.6 倍时,交点耦合站点会出现两线之间乘客交互,使得线路 1 在交点耦合站点新增一辆满载模块车可以从站点 7 直达终点,具体成本如表 4 所示。在交点耦合站点出现两线乘客交换的情境下,由于更多模块车在上快速路之前的站点达到满载后续所在模块不再后续站点停留,省下了相应的时间,由此可以有效的减少人均行程时间,同时能够减少乘客成本,并且随着乘客的调整使得单元车辆允许上车人数发生改变,进而减少未上车乘客数量。但是由于承载乘客总量增加,为了满足乘客需求使得模块车数量增加,导致运营成本增加,进而增加系统总成本。由此可以看出交点耦合站点的设立可以有效减少乘客出行时间,但是根据后续站点乘客需求增减模块车可能会使得运营成本增加。

表4 有无交点耦合站点成本对比

Table 4 Cost comparison between scenarios with coupling stations and without coupling stations

站点性质	乘客成本/元	人均行程时间/min	运营成本/元	系统成本/元	车队载客数量/人
有交点耦合站点	1 539.25	20.523 33	2 183.9	3 723.15	75
无交点耦合站点	1 571.83	20.857 08	2 070.15	3 641.98	72

2.3.3 模块化公交单元容量对系统成本的影响

根据文献[16],实际应用的模块化公交单元通常设有4个座位,并支持站立乘客。本研究通过调整基础案例中的公交单元容量,探讨了容量变化对系统成本的影响,结果如图6所示。提高单个模块化公交单元的载客量能够显著减少运营成本,但对乘客成本的影响较小。这主要是因为模块车根据各站点需求进行了动态编组,有效缩短了乘客的旅行时间并最大程度的减少未上车乘客的数量,因此通过增加单个模块车的载客容量是无法对乘客成本进行进一步的缩减。然而通过牺牲乘客舒适度,允许乘客在车内站立增加单个模块车容量,容量的增加可以有效地降低模块车的运营成本进而降低系统总成本。

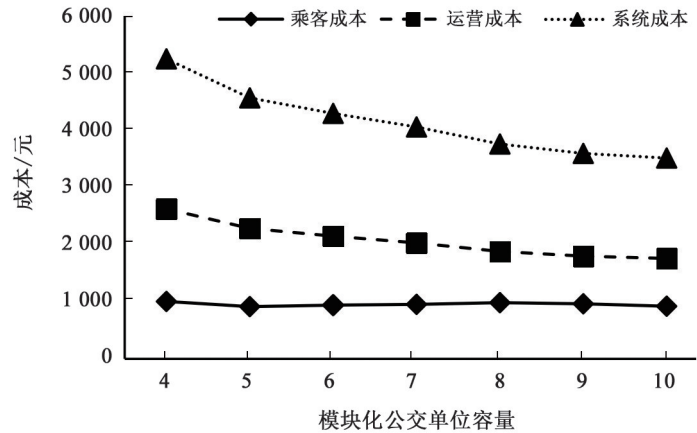


图6 模块化公交单元容量对系统成本的影响

Fig.6 Impact of modular bus unit capacity on system cost

3 结论

本文研究了基于通勤需求的模块化车辆跨区域需求响应式公交动态调度优化方法,主要研究结果如下:

(1)根据模块化车辆和乘客通勤特点,构建了一个优化 MINLP 模型,用于描述模块化公交的动态调度方案。该模型以乘客出行成本和企业运营成本为最小化的目标函数考虑耦合站点的选择和每个模块化公交单元的运行方案。

(2)通过大 M 法将建立的模型转化为 MILP 模型进行求解,通过通州到北京市区的两条实际定制公交线路及乘客需求数据进行案例分析。

(3)模块化公交的使用更加贴合乘客需求,能够有效的减少乘客成本和系统成本,与乘客灵活上车的固定容量的定制化公交相比,模块化公交相较于定制公交能使乘客成本降低 3.8%,运营成本降低 19.59%,最终系统总成本降低 13.36%。

(4)对于交点耦合站点的设立能够在一定程度上减少乘客的出行时间,并且保证更多的乘客上车减少了未上车乘客数量。

(5)基于敏感性分解结果得到模块化公交系统随着乘客需求增加能够一定程度的降低人均出行成本但效果甚微,而增加单个模块车容量能够有效降低运营成本从而降低系统成本。

下一步研究可以从两个方面开展:一是开展多线路网络上多交点耦合站点的模块化公交运行调度优化;二是考虑多时段多班次的模块化公交运行调度优化。

参考文献:

[1]张文波,左珂璠,王岳平,等.定制公交居民出行方式选择的影响因素[J].山东科学,2021,34(6):97-105. DOI:10.

3976/j.issn.1002-4026.2021.06.013

- [2] HUANG A L, DOU Z Q, QI L Z, et al. Flexible route optimization for demand-responsive public transit service[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2020, 146(12): 04020132. DOI: 10.1061/jtepbs.0000448.
- [3] 孙继洋, 黄建玲, 陈艳艳, 等. 面向多目标站的灵活型公交路径优化调度模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(6): 105-111. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2019.06.016.
- [4] SUN Q, CHIEN S, HU D W, et al. Optimizing multi-terminal customized bus service with mixed fleet[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 156456-156469.
- [5] 曹宏, 任华玲. 双模式下考虑碳税的定制公交站点位置与票价优化研究[J]. *山东科学*, 2023, 36(4): 69-79. DOI: 10.3976/j.issn.1002-4026.2023.04.009
- [6] DAI Z, LIU X C, CHEN X, et al. Joint optimization of scheduling and capacity for mixed traffic with autonomous and human-driven buses: A dynamic programming approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 598-619. DOI: 10.1016/j.trc.2020.03.001.
- [7] PEI M Y, LIN P Q, DU J, et al. Vehicle dispatching in modular transit networks: A mixed-integer nonlinear programming model [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 147: 102240. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102240.
- [8] LIU X H, QU X B, MA X L. Improving flex-route transit services with modular autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 149: 102331. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102331.
- [9] 高天洋, 胡大伟, 姜瑞森, 等. 基于模块化车辆的区域灵活接驳公交线路优化[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2025, 55(2): 537-545. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230515.
- [10] SHI X W, CHEN Z W, PEI M Y, et al. Variable-capacity operations with modular transits for shared-use corridors [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2020, 2674(9): 230-244. DOI: 10.1177/0361198120928077.
- [11] CHEN Z W, LI X P. Designing corridor systems with modular autonomous vehicles enabling station-wise docking: Discrete modeling method[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 152: 102388. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102388.
- [12] LIU Z K, HOMEM DE ALMEIDA CORREIA G, MA Z L, et al. Integrated optimization of timetable, bus formation, and vehicle scheduling in autonomous modular public transport systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 155: 104306. DOI: 10.1016/j.trc.2023.104306.
- [13] 高虹, 刘锴, 姚恩建. 站点需求响应的电动模块公交车重组调度优化[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(4): 24-36. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.04.003.
- [14] TIAN Q Y, LIN Y H, WANG D Z W, et al. Planning for modular-vehicle transit service system: Model formulation and solution methods[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 138: 103627. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103627.
- [15] 易洪波, 刘昱岗, 王童语. 考虑空间需求不均的模块化公交线路运行方案优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(4): 166-175. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2024.04.016.
- [16] YI H B, LIU Y G, MENÉNDEZ M, et al. Charging scheduling and route planning for modular bus systems considering non-linear charging profile[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2025, 179: 105292. DOI: 10.1016/j.trc.2025.105292.

