

梁士栋, 李雨佳, 何胜学. 面向城乡客货一体化运输的多车型公交混合调度研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(2): 1-9.  
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24101702

# 面向城乡客货一体化运输的多车型公交混合调度研究

梁士栋, 李雨佳, 何胜学

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 针对农村地区乘客出行需求密度低, 客运公交无法充分利用其运力, 在平峰期甚至出现空载现象, 将客运和货运结合, 以不同的客货比例形成多车型公交, 能有效利用空闲运力。本文基于超级时空网络提出多车型公交混合调度模型, 并设计了3M (Mixed creation, Mutation and Mature operators) 进化算法。以南里奥格兰德州阿雷格里港运输数据进行实例研究, 同时进行敏感性分析, 探究不同车型、折旧成本系数和种群数量对总成本与车队规模的影响。结果表明, 当车型偏向以乘客为主或以货物为主时, 总成本均保持在较低的水平; 进一步分析发现车型偏向以货物为主时, 整体车队数量减少。客运和货运相结合模式, 不仅有效提升了车辆利用率, 同时也降低近21.93%的运营成本。

**关键词:** 需求响应公交; 超级时空网络; 进化算法; 混合编队调度

中图分类号: U491 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2025)02-0001-09

## Research on multi vehicle transport with hybrid scheduling for urban-rural integrated passenger and freight transportation

LIANG Shidong, LI Yujia, HE Shengxue

(Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The density of passenger travel demand in rural areas is low, and passenger buses cannot fully utilize their capacity, even resulting in empty loads during off peak periods. Combining passenger and freight transportation to form multi vehicle buses with different passenger to freight ratios can effectively utilize idle capacity. A multi vehicle bus hybrid scheduling model based on super spatiotemporal network was proposed, and 3M (Mixed creation, Mutation and Mature operators) evolutionary algorithm was designed. Conducted a case study using transportation data from Porto Alegre, Rio Grande do Sul, and conducted sensitivity analysis to explore the impact of different vehicle types, depreciation cost coefficients, and population sizes on total costs and fleet size. The results indicated that when the vehicle model leans towards passengers or goods, the total cost remains at a relatively low level. Further analysis revealed that the overall fleet size decreases when the vehicle model leans towards goods. The combination of passenger and freight transportation effectively improves vehicle utilization while reducing operating costs by nearly 21.93%.

**Key words:** demand-responsive transport; super spatiotemporal network; evolution algorithm; mixed fleet scheduling

## 0 引言

农村地区的交通和物流具有需求分布稀疏、距离远、客货流量少的特点, 且城乡往返线路客流不均匀。为了减少空驶现象并提升车辆利用率, 采用多车型策略, 将公交的闲置运力用于短途运营的货运, 空驶的损失可以通过运输货物的盈利来抵消。此外, 基于需求驱动为乘客提供服务, 信息相对可靠,

并且可以处理城乡之间的分散需求。由于将客运和货运结合会提升系统的复杂性, 整体车队的灵活调度就变得至关重要。综上考虑, 城乡多车型公交混合调度显得尤为重要。

目前, 客货一体化主要包括人货共乘(SAR)、过境运输(FOT)和众包(Crowdshipping)等。当前, 关于FOT方面学者主要探讨公共交通工具和支援车辆的路线规划; 在公共交通工具的路线规划方面, 研

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(71801153); 教育部人文社会科学研究一般项目(23YJCZH120)。

**作者简介:** 梁士栋(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 车辆优化调度研究; 李雨佳(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 车辆调度。Email: lyj19921346002@163.com; 何胜学(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。

收稿日期: 2024-10-17

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

究涵盖定期和需求响应公共交通服务。在定期服务研究中, Li 等<sup>[1]</sup>设计了增加的货运列车应停靠的车站。在需求响应公共交通中, Fatnassi 等<sup>[2]</sup>设计了被动态匹配策略及积极的客运快速交通(PRT)和货运快速交通(FRT)两种策略。Chebbi 等<sup>[3]</sup>研究了空车再分配问题,可以最大限度地减少空车移动和使用车辆的数量。Peng 等<sup>[4]</sup>探索了在火车站提供乘客与包裹的拼车服务。在支援车辆方面,路线规划被制定为拾取和交付问题(PDP)的变体。Masson 等<sup>[5]</sup>对 PDP 进行建模,公共汽车从整合和配送中心(CDC)出发前往车站并卸载和转运货物,以此支持最后一英里的交付。Ye 等<sup>[6]</sup>不仅让公共汽车执行最后一英里的交付,其支援车辆还执行从整合和配送中心(CDC)到地铁站的第一英里交付。

在整合乘客和货物共同运输中,常提到路径规划中的取货和送货问题(PDP)<sup>[7]</sup>。Min<sup>[8]</sup>提出了同时取货和配送的车辆路线问题(VRSPD); Angelelli 等<sup>[9]</sup>在此基础上,提出了具有时间窗的变体,并通过 Branch-and-Price 求解。针对随机货运需求, Wang 等<sup>[10]</sup>提出引入随机 VRSPD,并设计了自适应交叉熵启发式算法; Qu 等<sup>[11]</sup>提出一个车辆具有不同容量的车队规划问题,并设计自适应大型邻域搜索算法。

在不同车型的调度方面,主要涉及单车型和多车型问题。多车型调度中, Zhang 等<sup>[12]</sup>探讨了郊区需求响应式公交的路线优化问题,特点在于租用车辆与公交协调运营。Wu 等<sup>[13]</sup>研究了需求响应式公交的过境服务,并结合传统公共交通系统和拼车系统。之后, Wu 等<sup>[14]</sup>又引入常用的跳站策略、速度调整和公交车保持策略,以此提高公交系统灵活性和运行效率。Zhao 等<sup>[15]</sup>研究了常规和需求响应式公交的联合优化问题。王正武等<sup>[16]</sup>通过引入时间窗约束和准点率约束,提高了多车型调度系统的乘客满意度。张明业等<sup>[17]</sup>研究了大小车型协同调度问题,从一体化的角度考虑最优经济费用。何胜学<sup>[18-19]</sup>在超级时空网络下设计车辆调度,有效刻画公交车调度中各种对象之间的逻辑关系。研究了多班型公交调度,减少了车辆的空驶时间和在人车固定搭配模式下,实现了乘务组之间工作时间的平衡。

综上所述,关于客货一体化问题大多研究路径规划,不仅未考虑后续调度问题,且仅考虑单一车型,难以应对客流不均匀现象,容易造成高峰期车厢拥挤、平峰期空座率高等问题。城乡公共交通以乘客为服务对象,应更多考虑其出行需求。多车型公

交的合理调度能使车队中的车辆被充分利用。本文结合超级时空网络,提出了包含乘客容量及货物容量的车次分配问题,以满足乘客及货物多变需求下的调度。在此基础上,构建了多车型公交车混合调度模型,优化城乡客货一体化运输以及车队配置。并设计了一种改进的网络进化算法进行模型求解,以部分线路为例验证模型效果,实验结果验证了模型的有效性。

## 1 问题描述

本文研究对象是多车型公交车队,车队中包含两种车型,一种车型以乘客运输为主,另一种车型以货物运输为主,不同车型的公交车存在差异,如:乘客与货物分别所占车厢容量、折旧成本等。多车型公交车队在进行需求响应运输前,需要等待任务车次的产生,需求响应公交系统会在订单池中筛选出合适的订单创建运输任务,即一个运输任务将包含多个需求点;运输任务成功创建后,系统将分配车辆去执行任务;车辆成功完成一个运输任务被称为完成一个车次。两种车型的二维调度时空网络如图1所示。其中,  $t1(start)$  和  $t1(end)$  表示第一个车次对应的最早时间窗和最晚时间窗。图中共有5个车次,6条出场弧,3条入场弧和5条接续。为了使图形更加清晰,图1中车次起终点位置和车场的位置并未与这些对象的实际地理位置在图形的纵向存在关联关系。由于燃油车辆续航里程长,可以在中途不加油的情况下完成一天的车次任务,重点是如何合理地给不同车型分配车次任务,使其在二维调度时空网络图中,以乘客运输为主的车型能尽可能执行乘客需求多的车次,以货物运输为主的车型尽可能执行货物需求多的车次,并且还要使不同车次之间连接的距离最短。图中每个车次上方的数组为车辆内部乘客容量与货物容量,如第一个车次上方数组(20,50)表示该车型乘客容量为20,货物容量为50。不同车次之间的距离以两点间距离公式求解,每个车次的开始和结束节点都可在图中找到相对应的包含信息的坐标。其中  $x$  坐标为车次所包含的最早/最晚时间窗,  $y$  坐标为车辆内乘客容量。为便于模型求解,设定以下假设:

- (1) 发出和返回车场为同一车场,车辆在执行车次任务后返回到发出/返回车场;
- (2) 乘客按预约信息出行,不修改和取消订单;
- (3) 逆行不被允许,车辆只能沿当前前进方向运行。

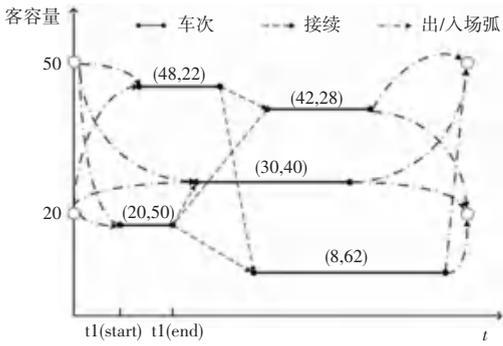


图 1 多车型调度的超级时空网络

Fig. 1 Super spatial-temporal network for multi vehicle scheduling

## 2 模型构建

多车型公交车队的调度模型, 需要利用有限的多车型车辆完成所有已知车次的执行, 其中车辆执

行的车次以及车次的开始和结束时间均已给定。本文使用超级时空网络框架进行了混合整数线性规划模型的构建。优化目标为使所有车次之间接续最短, 约束条件为车次、流量、车型等基本约束, 用于确保多车型需求响应公交的运行。

建模使用的基本变量和参数如下:

(1) 定义的集合包括车场集合  $D$ 、发车站点的集合  $S$ 、所有车辆的集合  $V$ 、所有车型的集合  $I$ 、所有车次的集合  $P$ 、所有连接的“接续”集合  $C$ 、以及出场弧构成的集合  $PO$  和入场弧构成的集合  $PI$ 。

(2) 主要参量:  $(p, q) \in P$  是车次  $p$  和  $q$  的一个可行接续;  $(d, p) \in PO$  是连接车场  $d$  和车次  $p$  的出场弧;  $(p, d) \in PI$  是连接车次  $p$  和车场  $d$  的入场弧。本文模型中的所有变量及其含义见表 1。

表 1 模型变量

Table 1 Variables of model

变量名	描述
$d \in D$	研究线路的关联车场, $D$ 是所有车场的集合
$s \in S$	车次的起终点, 一般是线路的起终点
$v \in V$	$v$ 为一辆公交车, $V$ 为所有车辆的集合
$i \in I$	人车固定搭配模式下车辆或乘务组的第 $i$ 类车型, $I$ 是所有车型的集合
$v_i \in V_i$	属于第 $i$ 类车型的一辆公交车, $V_i$ 是第 $i$ 类车型所有公交车的集合
$n_{v_i}$	第 $i$ 类车型所有公交车的总数
$r_{v_i}^h$	每个车次的乘客需求
$r_{v_i}^f$	每个车次的货物需求
$R_{v_i}^H$	第 $i$ 类公交车乘客容量限制
$R_{v_i}^F$	第 $i$ 类公交车货物容量限制
$L_{(p,q)}$	车次 $p$ 与车次 $q$ 在时空网络图中的距离以每个车次包含的属性作为其本身坐标, $x$ 坐标为车次最早 / 最晚时间窗, $y$ 坐标为车辆乘客容量。时空网络图中距离按两点之间的距离公式求解
$[0, T]$	公交线路运行的跨越时间段, 0 和 $T$ 分别是起止时刻
$[t_{i,start}, t_{i,end}]$	第 $i$ 类车型公交车的允许运行时段
$[t_{p,start}, t_{p,end}]$	车次 $p$ 的跨越时间段, $t_{p,start}$ 和 $t_{p,end}$ 分别为其起止时间点
$[t_{q,start}, t_{q,end}]$	车次 $q$ 的跨越时间段, $t_{q,start}$ 和 $t_{q,end}$ 分别为其起止时间点
$S_{p,start}, S_{p,end}$	车次 $p$ 的起、止站点
$S_{q,start}, S_{q,end}$	车次 $q$ 的起、止站点
$x_{v,(p,q)} \in \{0, 1\}$	决策变量, 当车辆 $v$ 将执行车次 $p$ 和 $q$ , 即利用接续 $(p, q)$ 时为 1
$x_{v,(d,q)} \in \{0, 1\}$	决策变量, 当车辆 $v$ 将利用出场弧 $(d, q)$ 时为 1
$x_{v,(p,d)} \in \{0, 1\}$	决策变量, 当车辆 $v$ 将利用入场弧 $(p, d)$ 时为 1

## 2.1 目标函数

依据上述的超级时空网络的各种参数和变量,构建以车次之间间接续最短为目标的多车型公交调度模型:

$$\min f(x) = \sum_{v \in V} \sum_{d \in D} \sum_{(p,d) \in c} x_{v,(p,q)} L_{(p,q)} \quad (1)$$

式中,优化目标 $f(x)$ 是所有车次间接续距离的和。

## 2.2 约束条件

1) 对应车次弧段流量守恒约束

$$\sum_{q \in I_p} x_{v,(p,q)} + x_{v,(d,p)} = \sum_{q \in O_p} x_{v,(p,q)} + x_{v,(p,d)}, \forall v \in V, p \in P \quad (2)$$

2) 车次唯一覆盖约束

$$\sum_{v \in V} \sum_{p \in I_q} x_{v,(p,q)} + \sum_{v \in V} x_{v,(d,q)} = 1, \forall q \in P \quad (3)$$

3) 车型不可混合

$$\sum_{v \in V_i} \sum_{p \in P} x_{v,(d,p)} = n_{v_i}, \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V_i} \sum_{p \in P} x_{v,(p,d)} = n_{v_i}, \forall i \in I \quad (5)$$

4) 容量限制

$$\sum_{v \in V_i} \sum_{p \in P} r_{v_i}^h x_{v,(p,q)} \leq R_{v_i}^H \quad (6)$$

$$\sum_{v \in V_i} \sum_{p \in P} r_{v_i}^f x_{v,(p,q)} \leq R_{v_i}^F \quad (7)$$

5) 决策变量

$$x_{v,(p,q)} \in \{0,1\}, \forall v \in V, p \in P, q \in P \quad (8)$$

$$x_{v,(d,q)} \in \{0,1\}, \forall v \in V, d \in D, q \in P \quad (9)$$

$$x_{v,(p,d)} \in \{0,1\}, \forall v \in V, p \in P, d \in D \quad (10)$$

其中,约束1)中的集合 $I_p$ ,代表所有能够与车次 $q$ 形成前向可行接续的车次集合;而 $O_p$ 则代表所有能够与车次 $p$ 形成后向可行接续的车次集合;约束1)指对于特定的流量类别 $v \in V$ ,对于任何一个指定的车次,流入该车次对应时空弧段的流量应等于流出该弧段的流量;约束2)规定,所有流入任意车次 $q \in P$ 的流量之和必须等于1。结合约束1),可以得出满足约束2)的流量 $x$ 将涵盖全部车次,且每个车次只能被单一类别的网络流所覆盖。约束3)确保了不同车型的车辆之间不能相互替换或混合使用;约束4)分别对每个车次在乘客和货物容量上设定了限制,以确保遵守不同车型的容量规定;约束5)则涉及不同的决策变量,其具体含义见表1。

## 3 算法设计

### 3.1 关联性分析

本文所构建的公交调度模型为混合整数线性规

划模型,当乘客及货物需求较多时,行驶车次和调度方案的数量呈指数性增长,解空间的维度灾难使问题难以求解。当前,车辆调度这类大规模问题主要以启发式算法特别是元启发式算法为主。为了能在解空间中进行全局搜索,找到全局最优或近似最优的调度方案,而不仅仅是局部最优,元启发式算法中的遗传算法是很好的选择。然而,本文构建了超级时空网络来描述问题,由于车次链在网络中具有拓扑特征,在传统的遗传算法中直接将两个可行解进行简单交叉,很容易违背模型构建中的约束,变异和进化等操作会产生类似的影响,导致较多不可行车次链的产生,减少可行解的数量,从而使遗传算法求解效率降低,难以获得最优解。因此,借鉴传统遗传算法的思想,本文使用一种3M进化算法使模型得以高效求解。

### 3.2 改进依据

类似于遗传算法,3M进化算法中包含可行解的生成、混生、变异、成长等步骤。首先,生成一定的可行解。在讨论公交车辆调度问题时,可以将满足所有约束的决策向量 $x$ 的值,构成潜在的可行解集。这些向量通过前文规定的约束条件1)到5)来达到。具体来讲,每个合理的解决方案都对应一个覆盖了全部车次且确保每个车次只被覆盖一次的车次链集。在这些车次链中,连续的车次以及其与车辆之间的关系都与特定的决策变量有所对应。从这个角度出发,模型可行解的生成可以等同于创造出一系列覆盖所有车次的车次链。

由于在公交车辆调度问题中,使用遗传算法通过简单的交叉两个可行解,往往会导致违反约束条件2)、3)。因此,设计一种新的操作来利用现有解的特性,以生成具备原有解特征的新可行解是非常必要的。类似于遗传算法的交叉操作,3M算法提出了一种融合了问题网络特性的“混生”算子。通过标记已知可行解对应的已选择接续,出场弧或入场弧,优先选择这些元素生成一般可行解,则“混生”算子在不违反约束前提下既保留了部分原有解的特性,也创造出新的解。

同样,由于车次在时间上存在先后顺序,遗传算法的变异部分也会导致较多不可行解的产生。因此,3M算法针对这一问题进行改进,其“变异”操作是对确定的车次链采用特定的变更,以便对其遗传结构进行合理地优化。例如,假设选择图2中的特定车次接续(1,4),会在此链集所没涵盖的其他车次中寻找,以实现有效的变异,并确保操作后的新车次链仍满足所有可行性条件,以减少不可行解的生成。

在遗传算法中,通常强调选择、交叉和变异操作,而不涉及可行解成长。为改善当前可行解,使其对应目标函数能得到持续优化,在3M算法中提出了“成长”操作。“成长”操作是一种优化当前可行解的机制,通过邻域搜索的方式持续改进目标函数值。此方法能够更加灵活地搜索解空间,在已有解的基础上进行局部优化,使得每个个体能够不断地朝着更优的方向发展,并且能提高算法的收敛性和解的质量,使得最终找到的解决方案更具竞争力,能够有效应对更复杂的优化问题。通过不断提升可行解的质量,加速整个进化过程,使得算法在优化过程中更具实用性和有效性。

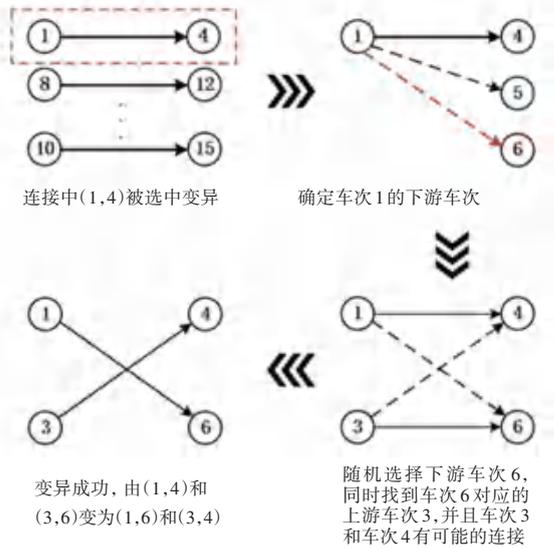


图2 “变异”操作示意图  
Fig. 2 Mutation process

### 3.3 算法步骤

#### 步骤1 生成可行解

首先,所有车次根据出发时间从低到高依次排序;随后,逐个检查这些车次,从目前可用的车辆中选择一辆来覆盖相应的车次,同时更新该车辆的状态。这一系列操作会一直进行,直到所有的车次都得到覆盖。于是,从这些形成的车次链中,便可以得出模型的可行解。车辆状态的更新不仅涉及其空闲和运行状态,还包括与车辆相关的车次链的变更。

#### 步骤2 “混生”操作

将一定数量的已知可行解中选择的接续、出场弧和入场弧标示为有优先选择权的网络元素;在生成可行解时,会按照一定的概率,优先选择这些标记过的网络元素;最后,检查新生成的解是否与已知解不同,如果相同则需重复前述步骤;否则,生成新的可行解。

#### 步骤3 “变异”操作

以图2为例,圆圈内部数字表示对应车次,实线表示采用的接续,虚线表示未被采用的接续。图中有(1,4)、(8,12)、(10,15)...等接续,随机选中(1,4)接续进行变异。先找出与车次1相接的后向车次,包括车次5和车次6,任选其中一个,此处选中车次6,在当前可行的车次链中寻找与车次6相连的前向车次3,然后确认可行的接续是否存在于车次6与车次1之间,例子中存在接续(1,6),即可结束搜索有回路特征的接续,此时变异过程完成,原有的接续(1,4)和(3,6)被替换为(1,6)和(3,4)。但是,如果车次6与车次3之间不存在可行接续,则应返回确定下游车次的步骤,选择车次5进行后续操作。

#### 步骤4 “成长”操作

“成长”操作涵盖了3个主要环节,即指派网络构建、指派连接费用计算和指派问题的匈牙利算法求解。以图3为例,线段上方表示对应车次,有向线段表示车次之间的接续,实线表示被可行解采用的接续,虚线表示接续没有被可行解采用。首先,确定与当前选中的接续(2,6)的尾车次2后向相接的所有车次,车次6,7,8为上游车次的集合;之后确定这些上游车次中利用当前可行车次链前向相接的所有车次,由此构成了车次2,3,4的下游车次集合。检验下游车次集合中的车次是否至少存在两个和上游车次集合中的车次相连的可行接续,如果不存在,需将对应车次和上游车次集合中相连的车次删除,并且在其余的上下游车次集合之间添加可行接续。

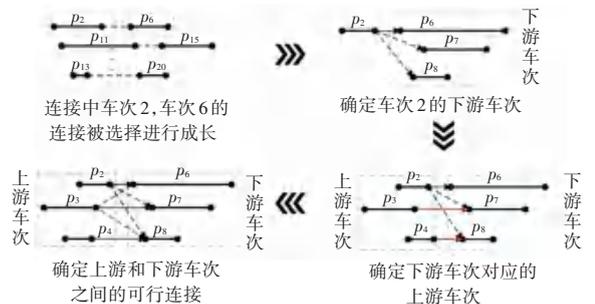


图3 “成长”操作示意图  
Fig. 3 Mature operators

## 4 实例分析

### 4.1 数据集

鉴于获取实际需求响应公交出行数据存在较大难度,本文采用 Sartori 等<sup>[20]</sup>创建的数据集,此数据集是在对真实地点和行程时间进行脱敏处理后创建的标准数据集,众多学者将其用于带时间窗口的接送问题(PDPTW)算例验证,数据的可靠性颇高,数

据集规模在 50 个订单 ( $n=100$ ) 至 2 500 个订单 ( $n=5\ 000$ ) 之间不等。数据集中,不仅涵盖了订单编号、坐标、时间以及接送配对等信息,同时还包含每

两个坐标点之间距离形成的距离矩阵,部分数据见表 2。为模拟全天的出行需求,依据实际的出行特点进行调整。

表 2 实验数据 ( $n=400$ )

Table 2 Experimental data ( $n=400$ )

序号	X 坐标	Y 坐标	乘客需求	货物需求	上车识别号	下车识别号
0	30.112 095 0	51.161 768 7	1	0	0	0
1	30.144 686 1	51.219 076 9	6	156	0	201
2	30.027 402 6	51.217 332 0	4	95	0	202
3	30.155 225 3	51.144 383 8	0	165	0	203
398	30.108 814 0	51.140 648 8	-8	-160	198	0
399	30.114 582 6	51.182 739 9	-8	-53	199	0
400	30.031 971 7	51.169 689 2	-9	-134	200	0

## 4.2 实验结果分析

本文模型以上述数据集为依据,利用 Python 进行求解。实验在一台采用 i5-13500H 处理器,16 G

内存的电脑上完成,总用时 30.27 s,最低总费用为 7 081 元。不同车型运行任务见表 3,图 4 为一天之中车辆的调度过程。

表 3 部分实验结果

Table 3 Partial experimental results

车辆编号	车辆类型	服务车次数量	服务需求点个数	燃油费用/元	折旧成本/元	总费用/元
1	以乘客为主	2	8	189.0	72	261.0
3	以乘客为主	4	14	233.1	144	377.1
4	以乘客为主	6	28	346.5	216	562.5
5	以乘客为主	6	23	302.4	216	518.4
6	以乘客为主	7	32	384.3	252	636.3
17	以货物为主	3	11	220.5	72	292.5
21	以货物为主	2	4	117.6	48	165.6
22	以货物为主	2	7	176.4	48	224.4

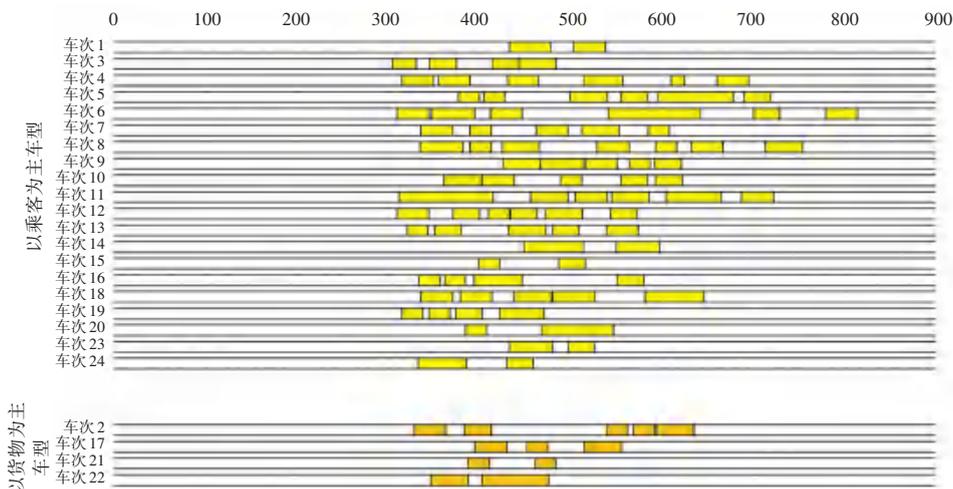


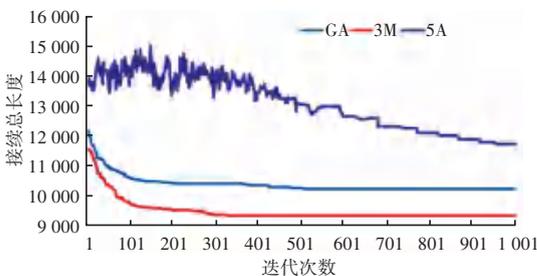
图 4 公交运营调度表

Fig. 4 Bus operation schedule

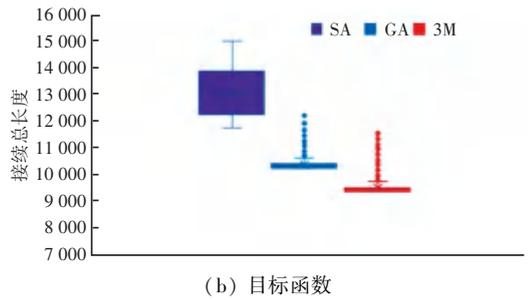
根据表 3 可知,400 个需求点的运输任务共由 24 辆车完成,编号为 2、17、21、和 22 的车辆为以货物为主的车辆,其余是以乘客为主的车辆。从费用角度分析,货物为主车型折旧成本较低,且由于服务需求点个数较少,能有效减少燃油成本,使得总体费用显著降低,以货物为主的车型所需费用比以乘客为主车型平均降低 37.45%。为同时满足城乡乘客与货物运输需求,并且限制整体车队的总费用,在车队中保留一定数量的以货物为主的车型是必要的。

由图 4 可以看出,以乘客为主车型共运行 20 个车次,以货物为主车型共运行 4 个车次。相比于以货物为主车型,以乘客为主车型单次的运营频次更高。对此分析,以货物为主车型是对以乘客为主车型的补充,分派以货物为主车型服务乘客需求少的车次,能在乘客较少时运输货物进行补充,有效提升城乡公交的利用率。

图 5 对比分析了传统遗传算法、模拟退火算法和本文提出的 3M 进化算法。图 5(a)展示了 3 种算法迭代收敛的效果。可以看出,在开始阶段 3M 进化算法的目标函数初始值更低,优于传统遗传算法和模拟退火算法,并且 3M 算法的迭代曲线下降趋势更快,表明可以更快地接近最优解,3M 算法中利用网络局部的邻域搜索优化形成的“成长操作”能有效提升算法的效率。与此相反,传统遗传算法处理车次链顺序问题会导致生成大量不可行车次链,污染群体,从而影响收敛速度。模拟退火算法依赖随机过程探索解空间,在复杂的搜索空间中会导致收敛较慢。总体来看,3M 算法的收敛速度更快,优化效果更强。图 5(b)中,目标函数的箱型图显示了 3 种算法的目标函数值的分布情况。3M 算法的目标函数值不仅箱体小,而且分布也更集中。3M 算法最差目标函数值与遗传算法最优目标函数值仅相差 11.3%,并且比模拟退火算法最优目标函数值还小 1.7%,表明 3M 算法在迭代中能产生更稳定且优越的结果。



(a) 迭代图



(b) 目标函数

图 5 算法对比

Fig. 5 Algorithm comparison

为验证模型的有效性,本文将多车型混合调度方案与常规客运公交和货车结合使用调度方案进行对比。两种方案对比结果见表 4。

表 4 公交调度方案对比

Table 4 Comparison of bus schedule plans

	运行成本/ 元	折旧成本/ 元	总成本/ 元	变化 幅度
多车型	4 287	2 496	6 783	
客运公交+货车	6 048	2 640	8 688	+21.93%

由表 4 可知,与分别单独采用客运公交和货车的运输方案相比,多车型调度方案运行成本降低 29.12%,折旧成本降低 5.45%,总成本则下降了 21.93%。实验结果证明,本文构建的多车次混合调度模型能更好地结合客运与货运,节省运力的同时降低总运输成本。

### 4.3 敏感性分析

为分析不同变量对车队规模及总成本的影响,以上述实验为基础,改变车型配置及折旧成本系数重新求解模型。

图 6 展示了在不同车型和折旧成本系数条件下,以乘客为主和以货物为主车辆混合调度的结果。从总成本分析,车型配置和折旧成本系数造成了一定程度的影响。当折旧成本系数保持不变时,观察乘客容量和总成本的关系可以看出:总成本随着乘客容量的增加,趋势为先下降后上升再下降。当乘客容量在 25~30 人的范围之间或在 45~50 人之间时,总成本处于较低值,大约为 6 500 元。由于不同的乘客容量代表着不同的车型配置,可以明显看出,在乘客容量趋近于 10 和 60 人时,车型分别接近于货车和纯客运公交车,此时总成本均有上升。这一结果与之前的有效性分析结果保持一致,再次证明了以乘客为主和以货物为主的车型混合调度方案与乘客和货物单独运输调度方案相比,能够有效节省成本。

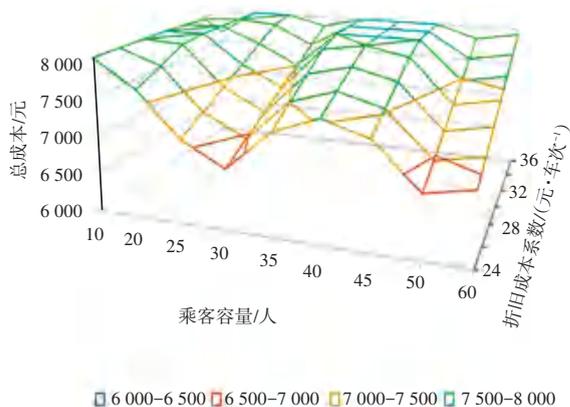
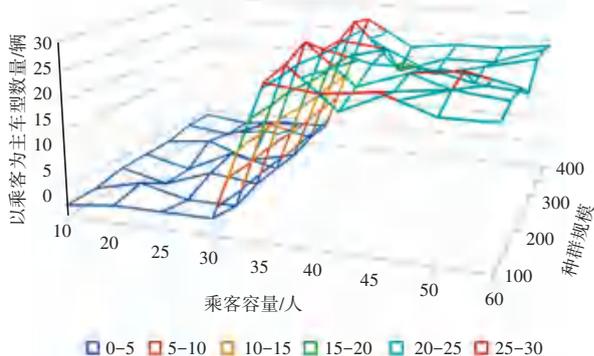
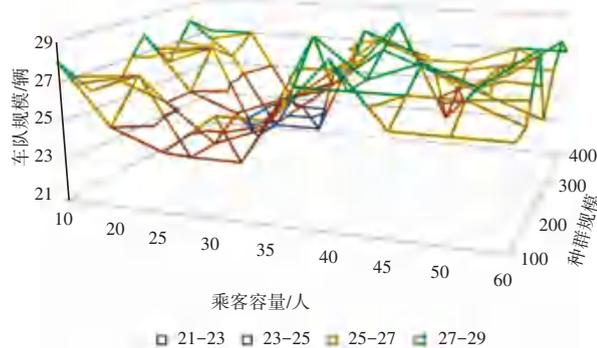


图6 车型和折旧成本系数对总成本的影响

Fig. 6 Impact of vehicle models and depreciation cost coefficients on total costs



(a) 车型和种群规模对以乘客为主车辆规模的影响



(b) 车型和种群规模对车队规模的影响

图7 车型和种群规模对以乘客为主车辆规模和车队总规模的影响

Fig. 7 Impact of vehicle type and population size on passenger dominated vehicle size and total fleet size

## 5 结束语

本文在城乡运输的背景下,考虑结合客运与货运的多车型混合调度,在超级时空网络框架的基础上构建了多车型公交车队的调度模型,并提出一种改进的3M进化算法。经对本文提出的模型与算法进行实例验证结果表明:以客运车型为主、货运车型为辅的编队策略,能够更好地节省成本并提升运营效益。相比于乘客与货物分开运输的方案,本文提出的客货一体化运输思想能有效避免城乡客货运输需求较少时出现的空载现象,由此提升现有车队的运力,节省成本。同时,客货结合运输为运营增加了货运部分的收益。

本文的局限性在于车队中并未考虑电动车型,由于电动公交续航里程较短,且在运输过程中电池容量易受环境的影响,这对多车型混合调度将是新的挑战,有待后续研究。

如图7所示,对车队总规模和以乘客为主车型规模进行分析可以看到,乘客容量较小、较大或是处于居中水平时,车队若不增加规模则难以满足运营需求。整体规模处于27~29辆之间,才能同时保证总接续最短并且满足总体需求;乘客容量在25~30和45~50的区间时整体车队规模较小;相比之下,25~30区间车队规模更低。由于图6中总成本中并未包含车辆购置成本,结合车队规模来看,选择乘客容量在25~30之间的改造方式,能以最小的车队规模满足运输需求并控制成本;而对于以乘客为主的车型,在车辆的乘客容量超过35之后在车队中才占主导作用。

## 参考文献

- [1] LI Z, SHALABY A, ROORDA M J, et al. Urban rail service design for collaborative passenger and freight transport [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 147: 102205.
- [2] FATNASSI E, CHAOUACHI J, KLIBI W. Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 81: 440-460.
- [3] CHEBBI O, CHAOUACHI J. Reducing the wasted transportation capacity of personal rapid transit systems: An integrated model and multi-objective optimization approach [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 89: 236-258.
- [4] PENG Z, FENG R, WANG C, et al. Online bus-pooling service at the railway station for passengers and parcels sharing buses: A case in Dalian [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 169: 114354.
- [5] MASSON R, TRENTINI A, LEHUEDE F, et al. Optimization of a city logistics transportation system with mixed passengers and goods [J]. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2017,

- 6(1): 81-109.
- [6] YE Y, GUO J, YAN L. A mixed decision strategy for freight and passenger transportation in metro systems [J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021, 2021(1): 5412016.
- [7] ZHANG R, DAI Y, YANG F, et al. A cooperative vehicle routing problem with delivery options for simultaneous pickup and delivery services in rural areas [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2024, 93: 101871.
- [8] MIN H. The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points [J]. *Transportation Research Part A: General*, 1989, 23(5): 377-386.
- [9] ANGELELLI E, MANSINI R. The vehicle routing problem with time windows and simultaneous pick-up and delivery [C]// *Proceedings of Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management*. Cham: Springer, 2002: 249-267.
- [10] WANG C, QIU Y. Vehicle routing problem with stochastic demands and simultaneous delivery and pickup based on the cross-entropy method [C]// *Proceedings of the 2011 International Conference on Automation and Robotics (ICAR 2011)*. Cham: Springer, 2012: 55-60.
- [11] QU Y, BARD J F. The heterogeneous pickup and delivery problem with configurable vehicle capacity [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 32: 1-20.
- [12] ZHANG L, CHEN T, YU B, et al. Suburban demand responsive transit service with rental vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(4): 2391-2403.
- [13] WU M, YU C, MA W, et al. Reinforcement Learning Based Demand-Responsive Public Transit Dispatching [C]// *Proceedings of the CICTP 2021*. 2021: 387-398.
- [14] WU M, YU C, MA W, et al. Joint optimization of timetabling, vehicle scheduling, and ride-matching in a flexible multi-type shuttle bus system [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 139: 103657.
- [15] ZHAO J, SUN S, CATS O. Joint optimisation of regular and demand-responsive transit services [J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2023, 19(2): 1987580.
- [16] 王正武, 易童翔, 高志波. 响应型接驳公交运行路径与车辆调度的协调优化 [J]. *交通科学与工程*, 2018, 34(1): 68-73.
- [17] 张明业, 杨敏, 黎彧, 等. 考虑有序充电策略的多车型电动公交调度优化 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2024, 54(5): 1293-1301.
- [18] 何胜学. 基于超级时空网络的公交车辆调度模型及3M进化算法 [J]. *运筹学学报*, 2023, 27(3): 68-82.
- [19] 何胜学. 多班型公交调度的超级时空网络模型及双层邻域搜索算法 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40(2): 162-170.
- [20] SARTORI C S, BURIOL L. Instances for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows based on open data [DB]. *Mendeley Data*, 2020. DOI: 10.17632/wr2ct4r22f.2