

考虑年级需求差异的校车线路优化方法研究

徐成, 吴思琦, 戴志文, 黄海南

(福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 现有校车线路优化研究普遍忽略了不同年级学生的上课时间差异对调度效率的影响, 将其视为同质群体。针对这一不足, 提出一种基于遗传算法的校车线路优化方法, 设计了非混载和混载两种方案, 并以最小化学生出行成本和校车运营成本为目标进行建模求解。实证结果表明, 非混载方案在行程时间、行驶距离和公交运营企业成本控制方面更具优势; 而混载方案在学生成本控制与载客均衡性方面具有一定优势。本文进一步提出了差异化校车调度方案选择建议, 研究结果为差异化校车调度方案的制定提供了实证参考。

关键词: 校车路径优化; 年级需求差异; 遗传算法; 线路优化

中图分类号: U121

文献标识码: A

Study on School Bus Route Optimization Considering Grade-Level Demand Differences

XU Cheng, WU Siqi, DAI Zhiwen, HUANG Hainan

(School of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: Existing school bus routing studies often treat students of different grades as a homogeneous group, overlooking the impact of grade-based differences in class schedules on routing efficiency. To address this gap, this paper proposes a school bus route optimization method based on a genetic algorithm, designing both non-mixed and mixed loading schemes. The model aims to minimize both student travel costs and bus operating costs. Empirical results show that the non-mixed loading scheme outperforms in terms of travel time, distance, and operational cost, achieving improvements, respectively. In contrast, the mixed loading scheme demonstrates advantages in student cost control and passenger load balance. The findings provide empirical support for the development of differentiated school bus scheduling strategies.

Key words: school bus route optimization; grade-level demand differences; genetic algorithm; route optimization

在小城市及县域地区, 学校数量相对有限, 学生通学距离较长, 校车在保障学生安全、降低家长接送负担方面具有重要作用。由于同一学校内部不同年级学生的上课时间可能存在差异, 若仍按同质化需求组织校车线路, 容易造成低年级学生提前到校等待, 或增加车辆绕行与运营成本^[1]。因此, 如何在满足不同年级时间需求的基础上优化校车线路, 是提升校车服务质量与运营效率的重要问题^[2]。

校车路径问题 (school bus routing problem, SBRP) 最初由 Newton 等^[3]人提出, 相关研究主要围绕线路规划、站点设置、车辆调度与时间窗约束等展开。既有研究表明, 农村及县域地区校车运营成本较高^[4], 学校可达性、通勤时间和接送站点布设等因素均会影响学生通学体验^[5-7]。在算法方面, 深度学习、禁忌搜索、聚类分解等方法已被用于校车线路及时间窗优化^[8-9]。在运营策略方面, 既有研究通常区分常规专用线路与

收稿日期: 2025-09-17

作者简介: 徐成, 硕士研究生, 研究方向为道路交通运输、城乡交通规划与管理

基金项目: 福建省社会科学基金博士扶持项目 (编号: FJ2023BF115)

混合负载策略：前者强调单一学校或单一群体的稳定服务^[10]，后者通过不同学生群体共享车辆提高载客率，但也可能带来时间匹配问题^[11-13]。

总体来看，现有研究多将同一学校的学生视为同质群体，对不同年级上课时间差异及其引发的等待成本关注不足。基于此，本文针对单一学校、单一车型的校车路径优化问题，构建考虑年级需求差异的线路优化模型，设置非混载与混载两种方案，并通过实证案例比较其在学生出行成本、校车运营成本和资源利用效率方面的差异，为小城市校车差异化调度提供参考。

1 问题建模

1.1 问题描述

本文聚焦于单一学校、单一车型场景下的校车路径规划问题。在实际的县域或乡村校车运营中，同一所学校不同年级的上课时间需求通常有差异。传统的校车调度模式往往忽略了这一现实情况，采用同质化的管理方案。在非混载模式下，车辆仅服务单一时间窗需求；而在混载模式下，为确保车内所有学生均不迟到，校车到达学校的时刻必须由车内学生最早的上课时间决定。这意味着，上课时间较晚的低年级学生若乘坐混载车辆必须提前到校，从而产生非意愿的在校等待时间（involuntary waiting time）。因此，本文的优化目标是在满足车辆容量、最大行程时间及不同年级上课时间窗等硬约束的前提下，通过合理规划路径与调度规划，寻找非意愿等待成本、出行时间成本与运营成本之间的最佳平衡点。

1.2 模型建立

校车线路方案在建模过程中同时考虑了两方面的需求目标：学生的出行需求应以尽可能缩短步行距离、减少站点停靠时间，提升直达性、降低非意愿在校等待时间为核心，以最大化满足学生从家到学校的往返需求、确保准时到达为基本前提；公交运营企业则希望在保障服务质量的前提下，尽可能降低运营成本。基于此，本研究将学生的出行成本与公交公司的运营成本最小化作为规划目标。设 $G = (V, E)$ 为校车网络图，其中 $V = \{0, 1, \dots, n\}$ 为节点集合，0 表示学校（车场）， $N = \{1, \dots, n\}$ 为学生站点集合； E 为边集； K 为可用校车集合。

1.2.1 目标函数

校车运行的总成本 C 由学生出行成本 C_1 和校车运营成本 C_2 构成，模型以最小化 C 为目标：

$$C = C_1 + C_2 \quad (1)$$

式中， C 为校车运行的总成本； C_1 为学生出行成本，包括由步行到站时间、站点候车时间及乘车时间等构成的加权时间成本； C_2 为公交运营企业的运营成本，包括车辆运行成本和司机工作时长费用。

(1) 学生出行成本（ C_1 ）。学生出行成本包含行程时间成本（步行 + 候车 + 乘车）与非意愿等待成本，可表示为：

$$C_1 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} y_{ik} \cdot q_i \cdot \alpha \cdot (T_{\text{journey},i} + T_{\text{invol},i}) \quad (2)$$

非意愿等待成本，指混载方案下因满足最早到校约束而产生的时间成本。

$$T_{\text{invol},i} = \max \{0, T_{\text{tar},i} - T_{\text{arr},k}\} \quad (3)$$

式中， α 为学生单位时间出行成本； q_i 为站点 i 的上车学生人数； $T_{\text{journey},i}$ 为通学耗时（含步行、站点候车及车内行驶时间）； $T_{\text{invol},i}$ 为非意愿等待时间； T_{tar} 为站点 i 所属年级的目标上课时间（低年级为 08:20，高年级为 08:00）； $T_{\text{arr},k}$ 为校车 k 到达学校的时刻； y_{ik} 为决策变量，若站点 i 由校车 k 服务，则为 1，否则为 0。

(2) 校车运营成本（ C_2 ）。该成本由车辆运行成本与司机工作时长费用两部分组成：

$$C_2 = \sum_{k \in K} \left(\beta_1 \cdot \sum_i \sum_j x_{ijk} d_{ij} + \beta_2 \cdot T_{\text{total},k} \right) \quad (4)$$

式中， β_1 为校车单位里程燃料成本； β_2 为校车单位运营时间成本； x_{ijk} 表示若校车 k 从节点 i 行驶至 j ，则为 1，否则为 0； d_{ij} 为节点 i 到 j 的行车距离； $T_{\text{total},k}$ 为校车 k 完成任务的总耗时。

1.2.2 约束条件

(1) 路径连续性与覆盖约束。保证每个站点有且仅有一辆车服务，且车辆路径连续闭合。

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1, \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{jik} = y_{ik}, \quad \forall i \in N, k \in K \quad (6)$$

(2) 最大行程时间约束。每辆校车完成任务的总行程时间不能超过时间限制。

$$T_{\text{total},k} \leq T_{\text{max}}, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

(3) 车辆载客量约束。任意时刻车辆上的乘客人数之和不能超过车辆的最大载客量，且达到最大载客量的校车应立刻返回总站。

$$\sum_{i \in N} y_{ik} \cdot q_i \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

(4) 混载时间同步硬约束。校车 k 的到达时

间必须早于或等于车内所有学生的最早上课时间,以确保无人迟到。

$$T_{arr,k} \leq T_{tar,i} + M(1 - y_{ik}), \quad \forall i \in N,$$
$$k \in K \tag{9}$$

$$T_{arr,k} = \min \{ T_{tar,i} \mid y_{ik} = 1 \}$$
$$\tag{10}$$

式中, Q 为校车最大载客量; M 为极大正数。

2 模型求解

2.1 算法的选取

校车路径优化属于典型的离散组合优化问题,涉及站点分配、路径排序、车辆载客量和时间窗等多类约束。常用于路径优化问题的智能算法包括模拟退火算法、粒子群优化算法和遗传算法。为明确本文算法选择依据,对三类算法与本文问题的适配性进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 不同算法与本文问题的适配性对比

算法	主要特征	本文适配性
模拟退火算法 ^[14]	单点搜索, 概率接受较差解	处理多约束问题时稳定性不足
粒子群优化算法 ^[15]	群体搜索, 收敛较快	更适合连续优化问题, 需离散化处理
遗传算法 ^[16]	种群搜索, 交叉变异	适合站点分配、路径排序与约束处理

由表 1 可知, 模拟退火算法结构较简单, 但以单点搜索为主, 在多车辆、多约束路径优化问题中稳定性相对不足。粒子群优化算法收敛速度较快, 但更适用于连续优化问题, 应用于校车站点排序时需要进行离散化转换。相比之下, 遗传算法能够通过染色体编码表达站点分配与访问顺序, 并可结合适应度函数处理车辆容量、最大行程时间和年级时间窗等约束条件, 适合本文所研究的校车路径优化问题。

因此, 本文选用遗传算法作为模型求解方法。算法求解过程主要包括初始种群生成、适应度计算、选择操作、交叉操作、变异操作和最优解输出等步骤。为降低初始种群随机性对结果的影响, 本文通过多次独立运行并保留最优解的方式提高求解稳定性。具体流程如图 1 所示。

2.2 算法中的关键环节

2.2.1 编码与解码

编码是遗传算法的第一步, 其重要性在于直接影响后续步骤的操作形式和计算内容。编码的方式有多种, 如二进制编码、浮点数编码等。本文采用嵌套列表结构对染色体进行编码。染色体

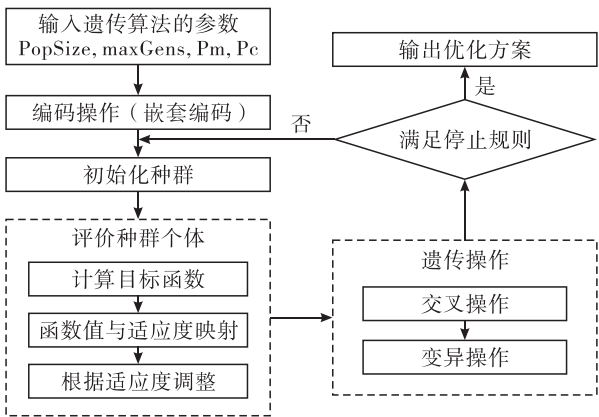


图 1 算法流程图

表示为一个二维列表, 外层列表的每个元素代表一辆校车, 内层列表记录该校车所服务的站点编号。

具体的编码操作如下: 首先定义所有站点编号的集合, 例如 $P = \{i, j \mid i, j = 1, 2, \dots, n\}$, 其中 n 为站点总数; 使用 rand 函数将站点编号顺序打乱, 以保证每个染色体的随机性和多样性; 将打乱后的站点编号按轮询方式分配给 m 辆校车, 最终生成嵌套列表形式的染色体。利用计算机随机生成一个染色体 $\{[1, 3, 5], [2, 4], [6, 7, 8]\}$ 。

解码操作将染色体转化为校车的具体行驶路线方案, 并计算该方案的目标函数, 将其转换为适应度, 解码结果见表 2。

表 2 解码结果

校车编码	上车站点
1	1—3—5
2	2—4
3	6—7—8

2.2.2 交叉操作

交叉操作用于重组父代染色体中的站点分配信息, 以生成新的子代个体。本文采用基于车辆序列的交叉方式, 即随机选择两条父代染色体中的部分车辆序列进行交换, 并对交换后产生的重复或遗漏站点进行修复。交叉过程示例见表 3。

表 3 交叉过程

交叉前	染色体 1	$\{[1, 3, 5], [2, 4], [6, 7, 8]\}$
	染色体 2	$\{[6, 4, 3], [1, 7], [5, 2, 8]\}$
交叉后	染色体 1	$\{[1, 3, 5], [1, 7], [6, 7, 8]\}$
	染色体 2	$\{[6, 4, 3], [2, 4], [5, 2, 8]\}$

2.2.3 变异操作

变异操作用于增加种群多样性，降低算法陷入局部最优的可能。本文采用站点交换变异方式，即从某一染色体中随机选择两辆校车，并分别选取一个站点进行交换，在保持站点总集合不变的前提下改变车辆服务范围。变异过程示例如表 4 所示。

表 4 变异过程

变异前	[1, 3, 5]	[2, 4]	[6, 7, 8]
变异后	[1, 2, 5]	[3, 4]	[6, 7, 8]

3 实证研究

3.1 数据采集

为验证本文所构建的校车路径优化模型及算法的有效性，本文选取某县实验小学作为实证研究对象。尽管样本总量有限，但其空间分布具有较强的代表性，覆盖了县城核心建成区、城乡接合部以及远郊村落等多种典型区域类型。从土地利用形态与居民点类型来看，样本点涵盖了从高密度城镇区域到低密度乡村区域的完整谱系，能够较好地反映不同区位学生的通学特征与路径需求。站点编号及空间分布如表 5 和图 2 所示。

表 5 实验小学校车站点编号

编号	年级	经度坐标	纬度坐标	出行需求/人	编号	年级	经度坐标	纬度坐标	出行需求/人
1	低年级	119.796 34	25.503 92	1	14	高年级	119.768 33	25.510 39	1
2	低年级	119.710 35	25.481 69	4	15	高年级	119.795 86	25.523 68	1
3	低年级	119.765 98	25.509 52	4	16	高年级	119.711 28	25.474 23	1
4	低年级	119.802 58	25.474 93	1	17	高年级	119.771 81	25.484 97	1
5	低年级	119.779 28	25.492 94	1	18	高年级	119.778 82	25.498 29	2
6	低年级	119.756 54	25.529 42	1	19	高年级	119.783 71	25.493 78	1
7	低年级	119.826 15	25.472 43	1	20	高年级	119.791 89	25.502 00	2
8	低年级	119.800 45	25.489 88	1	21	高年级	119.802 05	25.494 28	1
9	低年级	119.779 73	25.499 56	2	22	高年级	119.784 99	25.501 38	1
10	低年级	119.791 77	25.509 17	2	23	高年级	119.766 33	25.506 34	2
11	低年级	119.708 16	25.476 80	1	24	高年级	119.784 69	25.488 98	1
12	高年级	119.789 52	25.491 22	1	25	高年级	119.787 04	25.491 75	2
13	高年级	119.740 46	25.475 87	2					

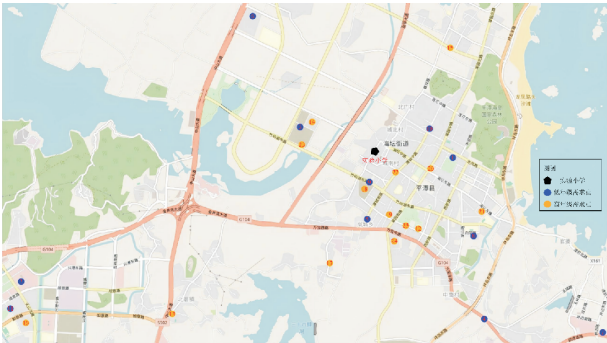


图 2 实验小学校车接送站点分布图

3.2 模型参数设定

为检验并比较分析本文所设计的混载校车路径问题模型中遗传算法的精确度、鲁棒性及计算复杂性，特进行相关验证，以保障结果的可比性与可重复性。所用计算机硬件配置为英特尔酷睿 i3-9100（主频 4.20 GHz）、16 GB 内存，搭载 Windows 10 操作系统；依托 PyCharm 2024 开发环境，通过编程完成案例模型求解。

在参数设定方面，模型充分考虑了实际运营约束与经济性要求。本案例遵循一人一座乘车原则，并基于实地调研数据，校车使用天然气燃料。根据天然气价格可以估算出其行驶每千米燃料的消耗费用 β_1 为 0.43 元^[17]，结合当地的交通状况设定校车的平均行驶速度 v_c 为 40 千米/小时，从而设定 β_2 值为 17.2 元/小时，以此确保模拟公交运营时的经济负担具有现实参考性。由于学生有特定的上课时间约束，因此在评估学生出行时间的影响时， α 设定为 15 元/（人·小时），以量化学生出行中的时间损失。

针对本文所研究的问题属于小规模路径优化问题这一特点，所采用的算法无需过多迭代即可有效探索优质解区域。预实验结果表明，对于此类小规模问题，过度迭代对解的质量提升极为有限，反而会显著增加不必要的计算开销。基于上述问题规模特征与预实验分析，本文将算法的终止条件设定为最大迭代次数 300 次。该设置既确

保证了算法拥有充足的迭代次数进行全局搜索, 避免出现早熟收敛现象, 又兼顾了求解效率, 使计算过程更为高效。此外, 将交叉概率设定为 0.8 以维持种群多样性, 变异概率设定为 0.15 以引入适当的随机扰动, 染色体长度则依据校车最大载客人数动态确定。其他参数的设定如表 6 所示。

表 6 案例参数设定

参数	取值/单位
最大载客量约束 (Q)	8 人/车
最大行程时间 ($T_{\max}$)	45 分钟
学生单位时间价值系数 (α)	15.0 元/(人·小时)
校车单位里程燃料成本 (β_1)	0.43 元/千米
校车单位运营时间成本 (β_2)	17.2 元/小时
校车平均行驶速度 (v_e)	40 千米/小时
学生平均步行速度 (v_p)	1.0 米/秒
校车平均停靠站时间 (t_s)	2 分钟

3.3 求解结果

为比较不同组织方式下的校车运行效果, 本文设置非混载方案和混载方案两种情景, 并通过

Python 编写的遗传算法程序分别进行求解, 结果如下。

3.3.1 非混载方案校车线路规划

在非混载方案中, 系统严格遵循年级分流原则, 即不同年级的学生必须乘坐专属于该年级时间窗口的车辆。求解结果显示, 该方案共需投入校车 6 辆, 规划生成了 6 条独立的定制线路。具体路径信息详见图 3 与表 7。

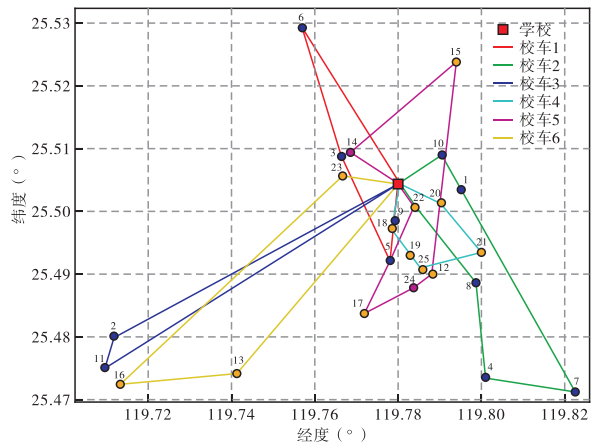


图 3 非混载方案校车线路规划图

表 7 非混载方案求解结果

编号	服务对象	线路走向	总行程时间/分钟	公交行驶总里程/千米	学生出行成本/元	公交运营成本/元	载客数/人
校车 1	低年级	0—6—3—5—9—0	22.6	9.7	39.9	10.6	8
校车 2	低年级	0—8—4—7—1—10—0	29.8	13.2	38.2	14.2	6
校车 3	低年级	0—2—11—0	28.2	16.1	30.2	15.0	6
校车 4	高年级	0—18—19—25—21—20—0	18.9	5.9	41.0	8.0	8
校车 5	高年级	0—14—15—12—24—17—22—0	31.4	12.9	37.6	14.6	6
校车 6	高年级	0—13—16—23—0	30.3	16.2	15.7	15.6	4
总计			161.2	74.0	202.6	78.0	38

由上表可知, 非混载方案的校车系统总行驶距离为 74.0 千米, 总行驶时间为 161.2 分钟。由于车辆到达时刻仅需满足特定年级的需求, 所有学生均能精准匹配其所属年级的最佳上课时间, 不存在额外的等待损耗。因此, 该方案的学生广义出行成本被有效控制在 202.6 元, 系统总成本为 280.6 元。此外, 各车辆的单次运行时间均控制在 32 分钟以内, 远低于 45 分钟的约束上限, 且单车平均行驶距离仅为 12.3 千米。总体而言, 非混载方案虽然占用的车辆资源较多, 但凭借紧凑的路径规划和“零等待”的时间匹配, 实现了服务质量与运营成本的双重优化, 特别适用于对学生出行体验要求较高的场景。

3.3.2 混载方案校车线路规划

混载方案允许不同年级学生共享车辆资源,

旨在通过空间上的运力整合提升车辆利用率。具体路径信息详见图 4 与表 8。

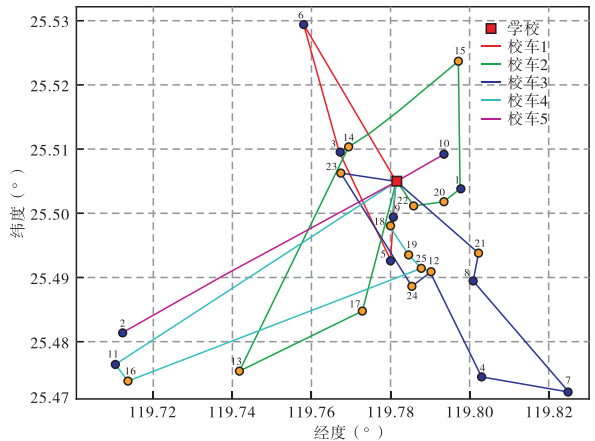


图 4 混载方案校车线路规划图

表 8 混载方案线路求解结果

编号	服务对象	线路走向	总行程时间 /分钟	公交行驶总 里程/千米	学生出行 成本/元	公交运营 成本/元	载客数/人
校车 1	低年级	0—6—3—5—9—0	22.6	9.7	39.9	10.6	8—
校车 2	混载	0—17—13—14—15—1—20—22—0	40.4	17.6	62.8	19.1	8
校车 3	混载	0—23—24—12—4—7—8—21—0	37.3	15.5	82.9	17.3	8
校车 4	混载	0—18—19—25—16—11—0	37.2	18.1	78.5	18.4	8
校车 5	低年级	0—2—10—0	30.3	17.5	34.0	16.2	6
总计			167.8	78.4	298.1	81.6	38

由上表可知，该方案成功将车辆投入数量从 6 辆减少至 5 辆，平均满载率提升至 95.0%，体现了显著的资源集约效应。然而，深入的成本结构分析揭示了一个关键问题：混载方案的系统总成本并未随车辆减少而降低，反而上升至 379.7 元。造成这一“反直觉”现象的核心原因在于模型中引入的硬时间窗约束机制。根据混载规则，车辆必须以车内最早的上课时间（即高年级 08：00）为基准到达学校，这导致同车的低年级学生（原定 08：20 上课）不得不提前 20 分钟到

校。模型计算显示，这部分因配合拼车而产生的非意愿等待成本高达 95.4 元，直接将学生广义出行成本推高至 298.1 元，抵消并超过了因减少一辆校车所带来的运营成本节省。这一结果验证了混载方案本质上是一种以牺牲部分低年级学生时间效用为代价，换取运力资源集约化的调度方案。

3.3.3 方案分析

表 9 更清晰地呈现非混载方案与混载方案的绩效差异，具体指标对比如表所示。

表 9 非混载方案与混载方案综合对比分析表

对比指标	非混载方案	混载方案	绝对差异	相对差异	优势方案
总行程时间/分钟	161.2	167.8	-6.5	-3.88%	非混载方案
公交行驶总里程/千米	74.0	78.4	-4.3	-5.54%	非混载方案
学生出行成本/元	202.6	298.1	-95.4	-32.03%	非混载方案
公交运营成本/元	78.0	81.6	-3.7	-4.57%	非混载方案
总成本/元	280.6	379.7	-99.1	-26.12%	非混载方案
平均每人出行成本/元	5.3	7.8	-2.5	-32.02%	非混载方案
单车平均运营成本/元	13.0	16.3	-3.3	-20.45%	非混载方案

非混载方案在广义成本控制与服务质量方面表现出显著优势。数据显示，该方案的总行程时间比混载方案减少 3.88%，总行驶里程缩短 5.54%，反映出在单一时间窗约束下路径规划更为紧凑高效。在经济性方面，非混载方案的系统总成本降低了 99.1 元，其中学生人均出行成本降低 2.5 元。这一差异主要源于非混载方案避免了因年级时间差导致的“非意愿等待成本”，从而在满足学生个性化需求方面表现更佳。

混载方案的优势则集中体现在资源集约利用上。尽管其运营成本上升 4.57%，但通过空间整合成功减少了 16.7% 的车辆投入，平均满载率高达 95.0%。从管理实践看，非混载方案适用于运力充足且对服务质量敏感的场景，是提升服务体验的最优解；而混载方案则适用于车辆资源受限的刚性约束环境，通过牺牲部分时间效用换取运力保障。

3.3.4 多情景敏感性分析

为进一步检验模型的适应性，本文设计了多情景对比实验，系统评估关键参数波动对优化结果的影响。敏感性分析主要针对校车运营中实际可能面临的不确定性因素展开，重点关注影响学生出行体验的两个核心维度：运营成本波动和时间约束变化。基于基准情景参数：燃料成本为 0.43 元/千米，校车行驶速度为 40 千米/小时。分别设置以下测试情景：一是燃料成本波动，模拟燃料价格上调对运营成本的影响，设置成本上浮 20%（0.516 元/千米）和 40%（0.602 元/千米）两种情景；二是运行效率变化，为考察行驶效率提升对路径规划的影响，将校车行驶速度分别提升 25%（50 千米/小时）和 50%（60 千米/小时）。

为比较非混载方案与混载方案在不同参数扰动下的响应特征，本文进一步测算各情景下的总

成本变化率、总行程时间及敏感性系数。其中, 敏感性系数 S 用于反映输出指标对输入参数变化的响应程度, 其计算公式如式 (11) 所示。不同情景下两种方案的测算结果如表 10 所示。

$$S = \frac{|\Delta Y/Y|}{|\Delta X/X|}$$

(11)

表 10 多情景敏感性分析结果

测试情景	总成本变化率		总行程时间/分钟		敏感性系数	
	非混载方案	混载方案	非混载方案	混载方案	非混载方案	混载方案
基准情景	—	—	161.2	167.8	—	—
燃料成本上涨 20%	2.27	1.78	161.2	167.8	0.11	0.09
燃料成本上涨 40%	4.54	3.55	161.2	167.8	0.11	0.09
行驶速度上涨 25%	-7.23	-7.44	138.8	144.0	0.29	0.25
行驶速度上涨 50%	-12.04	-12.39	124.0	128.3	0.24	0.21

对成本波动和行驶速度变化的多情景测试结果表明, 本文构建的校车路径优化模型具有良好的适应性。对比敏感性系数可知, 模型对行驶速度变化表现出较高的敏感性, 而对燃料成本变化则呈现低敏感性, 这提示了改善通行效率比单纯关注燃料成本对系统总成本的影响更为显著。

在成本波动情景下, 混载方案展现出更强的经济鲁棒性。当燃料成本上浮 20% 和 40% 时, 混载方案的总成本增幅仅为 1.78% 和 3.55%, 均显著低于非混载方案的 2.27% 和 4.54%。这得益于混载方案较高的满载率和被“非意愿等待成本”稀释后的成本基数, 使其能更有效地缓冲燃料成本上涨的冲击。

在时间约束变化情景下, 两种方案均表现出显著的成本削减与时间压缩效果。当行驶速度提升 50% 时, 混载方案的总行驶时间从 167.8 分钟缩减至 128.3 分钟, 降幅达 23.4%, 有效提升了系统的周转效率。敏感性系数分析进一步验证了混载方案的稳定性: 在各测试情景下, 混载方案的敏感性系数始终低于非混载方案。特别是在速度提升 25% 时, 混载方案的敏感性系数为 0.25, 表明其在面对外部环境参数变化时, 系统性能波动更小, 表现出更为卓越的抗干扰能力与稳定性。

综上所述, 混载方案不仅在应对燃料成本风险时表现更优, 在交通条件改善时也能保持系统的平稳运行, 验证了该模型在实际动态运营环境中的实用价值。

4 结论

本文聚焦小县城背景下小学生通学出行的实际需求, 针对不同年级上课时间存在显著差异这

式中, X 为输入参数变化率, Y 为输出指标变化率。根据敏感性系数大小将响应强度分为三个等级: $S < 0.5$ 为不敏感, $0.5 \leq S \leq 1.0$ 为中等敏感, $S > 1.0$ 为高度敏感。

一现实问题, 提出了一种考虑非意愿等待成本的校车路径优化模型。本文通过构建以学生广义出行成本和校车运营成本最小化为目标的数学规划模型, 并通过设计改进的遗传算法进行求解, 同时结合某县实验小学的实证分析与多情景测试, 得出以下主要结论:

(1) 考虑年级时间差异的非混载方案在服务质量与系统总成本控制上表现最优。实证结果表明, 非混载方案能够实现车辆到达时刻与学生上课时间窗的精准匹配, 消除年级差异导致的在校等待损耗。相比混载方案, 非混载方案虽然多投入一辆校车, 但其系统总成本降低了 35.36%, 且在行程时间与行驶里程方面均更具优势。这说明在运力资源相对充足的情况下, 实施精细化的年级分流调度是提升校车服务水平、降低社会总成本的首选方案。

(2) 混载方案表现出显著的“资源集约”特征。该方案通过空间整合成功减少了 16.7% 的车辆投入, 极大地提升了满载率。然而, 受限于硬时间窗约束, 混载方案导致低年级学生产生了高额的非意愿等待成本, 致使系统广义总成本反超非混载方案。这一结论揭示了混载方案是一种以牺牲部分时间效用换取固定资产集约化的手段, 更适用于车辆资源受限的刚性约束环境。

最后, 模型的多情景敏感性分析验证了系统对行驶速度的敏感性显著高于燃料成本。研究发现, 提升通行效率所带来的成本节约效应远大于燃料成本波动的影响。同时, 混载方案在面对外部环境变化时表现出更低的敏感性系数与更强的鲁棒性, 说明其成本结构具有较好的抗干扰能力。

(下转第 40 页)

- (S2):1-5.
- [4] 朱合华,禹海涛,韩富强,等. 穿越活动断层隧道抗震韧性设计理念与关键问题[J]. 中国公路学报,2023,36(11):193-204.
- [5] 潘小虎,孙永震,陈荣. 隧道穿越活动断层震害机理及抗震措施研究[J]. 建筑施工,2023,45(6):1161-1164,1168.
- [6] TAO Z G, FENG Y X, ZHAO Y, et al. Shaking table test on anti-seismic characteristics of NPR anchor cable support system for tunnel crossing faults[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(4):939-949.
- [7] 李亚东,周金雯,单毅,等. P波入射下考虑基槽回填材料的沉管隧道抗震分析[J]. 岩土工程学报,2023,45(6):1190-1199.
- [8] 何应道,王稼祥,李沛松,等. 考虑行波效应的盾构隧道纵向抗震分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(S1):42-49.
- [9] ZHANG J H, XU P, SUN W C, et al. Seismic reliability analysis of shield tunnel faces under multiple failure modes by pseudo-dynamic method and response surface method[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(5):1553-1564.
- [10] JIA H, ZHANG B. Reliability analysis for seismic stability of tunnel faces in soft rock masses based on a 3D stochastic collapse model[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7):1706-1718.
- [11] 耿萍,何悦,何川,等. 穿越断层破碎带隧道合理抗震设防长度研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):358-365.
- [12] 殷允腾,李廷春. 土岩软硬结合部隧道结构的震害机理分析及抗震研究[J]. 现代隧道技术,2013,50(4):84-91.

~~~~~  
(上接第19页)

#### 参考文献:

- [1] 李得伟,吕佳晰,黄悦,等. 旅客“门到门”城际出行路径规划研究综述[J]. 铁道运输与经济,2025,47(1):1-12,52.
- [2] 余柳,刘莹. 北京市小学生通学交通特征分析及校车开行建议[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(5):193-199.
- [3] NEWTON R, THOMAS W. Design of school bus routes by computer[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 1969,3(1):75-85.
- [4] ELLEGOOD W, RILEY J, BERG M. The many costs of operating school buses in America[J]. Research in Transportation Economics,2024,103:101401.
- [5] FENG R, ZHANG J, WU Y, et al. School accessibility evaluation under mixed-load school bus routing problem strategies[J]. Transport Policy,2023,131:75-86.
- [6] BANERJEE D, SMILOWITZ K. Incorporating equity into the school bus scheduling problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019,131:228-46.
- [7] FARZADNIA F, LYSGAARD J. Solving the service-oriented single-route school bus routing problem: Exact and heuristic solutions[J]. EURO Journal on Transportation and Logistics,2021,10:100054.
- [8] QIAN L, MELACHRINOUDIS E. An integrated neural combinatorial Tabu Search for optimizing school bus scheduling with bell time[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,2024,164:104662.
- [9] GUO X, SAMARANAYAKE S. Shareability network based decomposition approach for solving large-scale single school routing problems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,2022,140:103691.
- [10] 李开雷,白翰,燕翔,等. 基于运营和出行成本的校车路径问题研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2023,15(3):293-303.
- [11] LÓPEZ SANTANA E R, ROMERO CARVAJAL J D J. A hybrid column generation and clustering approach to the school bus routing problem with time windows[J]. Ingeniería,2015,20(1):101-17.
- [12] SHAFABI A, WANG Z, HAGHANI A. SpeedRoute: Fast, efficient solutions for school bus routing problems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018,117:473-93.
- [13] ELLEGOOD W, CAMPBELL J, NORTH J. Continuous approximation models for mixed load school bus routing[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015,77:182-98.
- [14] 丁兆辉,朱晓宁,康柳江. 大型居住区模块化公交线路与时刻表协同优化[J]. 清华大学学报(自然科学版),2026,66(3):627-637.
- [15] 易虹雨. 基于GPS数据的公交车辆站点停靠与站间行驶时间预测研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2024.
- [16] 宫月红,张少君,王明雨,等. 基于遗传-粒子群优化算法的USV路径规划方法[J]. 山东交通学院学报, 2022,30(1):29-34.
- [17] 蔡皓,谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版),2010,46(3):319-326.