

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.1220

考虑差异化到校时间需求的通学公交专线运营方案优化

——以宁波市镇海区实验小学为例

李捷^{1,2}, 李璇^{1*}, 张季康¹, 叶晓飞¹

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市公安交通管理保障服务中心, 浙江 宁波 315021)

摘要: 为了进一步提升通学公交专线的运营效率和服务水平, 针对小学不同年级学生的差异化到校时间需求, 从通学公交运营成本、学生出行时间和服务学生人数等方面, 构建了通学公交专线的路径、车型以及发车间隔的协同优化模型。设计结合多智能体仿真的遗传算法对模型进行求解, 借助 Python 软件进行算法实现, 并以宁波市镇海区实验小学为例进行了实证研究。结果表明: 所提出的通学公交专线运营方案具有可行性和有效性。

关键词: 通学公交; 差异化到校时间需求; 运营方案优化; 多智能体仿真

中图分类号: U121

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 03-0104-07

近年来, 我国许多大中城市开通了学生通学公交专线, 但是存在服务水平参差不齐、运行成本较高等问题。通学公交线路规划不合理, 致使学生出行需求无法得到满足。在部分地区, 由于线路设计不合理、班次安排不当等原因, 学生需要花费更多的时间等候公交车, 甚至无法乘到合适的公交车。这不仅影响了学生的正常学习和生活, 也增加了家长的接送负担。

根据教育部对学生到校时间的基本规定^[1], 各地学校需要因地制宜确定学生到校和离校时间。在同一学校内, 不同年级段的学生到校时间安排往往存在差异。以宁波地区为例, 高年级与低年级学生的到校时间普遍存在 20~30 min 的时间差, 部分学校甚至达到 40~60 min。这种时间差异给通学公交专线的运营带来了挑战, 促使公交专线运营在线路规划和班次安排等方面更加精细化, 以满足不同年级学生的出行需求。

通学公交专线属于校车范畴, 国内外对校车的路径优化研究已取得一些进展。校车根据服务范围的不同, 可以分为单校服务校车和多校服务校

车。前者针对单所学校, 结合该学校的时间窗、车载容量等实际约束, 构建优化模型对校车的行驶路线进行规划^[2-5]。如丁然^[2]针对单校校车路径的规划问题, 建立了最少化校车数量及最短校车行驶时间的混合整数规划模型, 并用设计改进后的蚁群算法进行求解; Farzadnia 等^[3]对单所学校的单条路线, 以最短所有学生的总步行距离为优化目标, 构建了车站选择及线路优化模型, 并提出用一种基于分层图的精确启发式算法进行求解。多校服务校车是同时考虑一个区域内多所学校的接送需求, 规划校车在不同学校之间的调度和路径, 优化目标包括校车运营成本最低^[6-8]、校车行驶时间(距离)最少(短)^[9-10]等。如 Miranda 等^[8]对农村地区多所学校的路径规划问题, 建立了最低运营总成本的数学模型, 并提出用迭代局部搜索与邻域结构相结合的算法进行求解; Wang 等^[9]对多所学校的路径规划问题, 同时优化到校时间和公交路线, 使公交车辆总数和总行驶时间最少。在模型构建的基础上, 相关研究者普遍采用启发式算法进行模型求解, 包括模拟退火算法^[9]、变邻域搜索算法^[11]、禁忌搜

收稿日期: 2024-12-30 宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY21E080008); 宁波市自然科学基金(202003N4146)

第一作者: 李捷, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。E-mail: 2112084064@nbu.edu.cn

*通信作者: 李璇, 博士/副教授, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。E-mail: lixuan@nbu.edu.cn

索算法^[12]、遗传算法^[13]、蚁群算法^[14-15]以及粒子群算法^[16]等。

综上可知,现有的研究普遍设定单所学校学生的到校时间相同,很少考虑不同年级段学生到校时间的差异性,以及由此产生的差异化需求。同时,多数研究在评估校车方案时,未能兼顾运营成本、学生出行时间以及服务学生的水平和质量,只侧重整体运营成本的控制,忽视了运营服务水平和学生的实际受益情况。通学公交专线服务作为一种公益性的社会服务,通常由政府补贴运营成本,过度强调运营成本而忽视服务水平和服务范围,偏离了设立通学公交专线服务的初衷。

笔者针对单所学校,考虑不同年级学生的差异化到校时间的需求,提出以学生平均出行时间最短、车辆运行成本最低、满足出行需求的学生数量最多为核心的优化目标,以此构建通学公交线路、车型及发车间隔协同优化模型。该模型旨在实现学生出行效率的提升、运营成本的有效控制以及受益学生群体的扩大。通过结合遗传算法和多智能体仿真技术,对该模型进行求解,并通过具体案例验证该模型的可行性和有效性。

1 模型构建

1.1 模型假设

为便于模型的建立和求解,提出假设条件为

(1) 通学公交车始发于一个公交场站。

(2) 学生出行需求已知,包括起讫点(Origin Destination, OD)需求和时间需求。

(3) 通学公交车辆在站点之间的运行时间为已知定值,不考虑交通事故、天气状况等因素的影响,且每个学生的上、下车时间为已知定值。

(4) 不考虑学生在多条通学公交线路间的换乘。

1.2 备选线路约束

(1) 线路 l 总的停靠站点数量的限制为

$$x_{\min} \leq \sum_{s \in S} x_l^s \leq x_{\max}, x_l^s \in \{0, 1\}, \forall l \in L$$

式中: x_l^s 表示线路 l 是否停靠站点 s 的 0/1 变量,“是”取 1,“否”取 0; S 是站点的集合, $S = \{1, 2, \dots, s, \dots, |S|\}$; $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为线路 l 最小和最大停靠站数。

(2) 线路 l 的车辆运行时间应满足最长运行时

间的限制,公式为

$$\sum_{i \in S_l} t_{\text{run}}^{i,i+1} + \sum_{i \in S_l} t_{\text{dwell}}^i \leq t_{\max}^{\text{run}}, \forall l \in L$$

式中: $t_{\text{run}}^{i,i+1}$ 为车辆从站点 i 到站点 $(i+1)$ 的运行时间; t_{dwell}^i 为车辆在站点 i 的停靠时间; $t_{\max}^{\text{run}}$ 为每条线路的最长运行时间。

(3) 线路 l 在同一个小区的停靠站点不能超过 2 个,公式为

$$\sum_{s \in S_d} x_l^s \leq 2, x_l^s \in \{0, 1\}, \forall l \in L, d \in D$$

式中: D 为小区集合, $D = \{1, 2, \dots, d, \dots, |D|\}$; S_d 表示住宅小区 d 的站点集合。

1.3 备选线路集的生成

基于上文的约束,用穷举法生成备选线路的集合 $L(l \in L)$, $L = \{1, 2, \dots, l, \dots, |L|\}$ 。通学公交专线的起点为公交场站,终点为目标学校。首先基于约束(1)和(3),从备选站点中随机选取 n 个中间停靠站点,并通过排列组合生成这些中间站点的所有可能访问顺序,即对应中间站点集的所有可能线路;其次计算每条线路的行车时间,筛选出行车时间最短的线路,并判断其是否满足约束(2)的要求,若满足则将其加入备选线路集合;最后重复上述步骤,重新选取中间站点并生成新线路,直至所有可能的中间站点组合及其访问顺序均被穷举。

1.4 优化目标

综合考虑运营者及学生的利益,以车辆运行成本最低、学生平均出行时间最短、满足出行需求学生数量最多为优化目标,构建通学公交线路的多目标优化模型。采用归一化方法将多目标转化为综合的单目标,公式为

$$z = a \frac{z_1^{\max} - z_1}{z_1^{\max} - z_1^{\min}} + b \frac{z_2^{\max} - z_2}{z_2^{\max} - z_2^{\min}} + c \frac{z_3 - z_3^{\min}}{z_3^{\max} - z_3^{\min}}$$

式中: z_1 为所有车辆运营成本; z_2 为所有学生平均出行时间; z_3 为满足出行需求的学生数量; a 、 b 和 c 分别为 z_1 、 z_2 和 z_3 的权重系数; $z_i^{\max}$ 和 $z_i^{\min}$ ($i=1, 2, 3$) 分别表示目标的最大值和最小值。

z_1 包括车辆运行成本和固定成本。受到校时间的约束,通学公交车辆在分配线路上只进行从车场经沿途停靠站点,最后到达学校的单程运行,不考虑往返多次运行的情况,故车辆运营成本公式为

$$z_1 = \min \sum_{l \in L} \left\{ \gamma_l k_l \times \sum_{m \in M} \theta_m \left[e_m \left(\sum_{i \in S_l^i} t_{\text{run}}^{i,i+1} + \sum_{i \in S_l^i} t_{\text{dwell}}^i \right) + e_m^{\text{fixed cost}} \right] \right\}$$

式中: γ_l 表示是否选取线路 l 的 0/1 变量, “是”取 1, “否”取 0; k_l 表示分配给线路 l 的车辆数; θ_m 表示 m 车型是否被选择的 0/1 变量, “是”取 1, “否”取 0; e_m 表示 m 车型车辆运行中单位时间的支出成本; $e_m^{\text{fixed cost}}$ 表示 m 车型车辆的固定成本。

z_1 中 t_{dwell}^i 可以表示为

$$t_{\text{dwell}}^i = \begin{cases} t_{\text{board}}^i, t_{\text{board}}^i > t_{\text{dwell}}^{\min} \\ t_{\text{dwell}}^{\min}, \text{其他} \end{cases}$$

式中: t_{board}^i 为车辆在站点 i 的学生上车总时间; $t_{\text{dwell}}^{\min}$ 为车辆在站点的最短停靠时间。

z_2 包括所有学生从小区门口到站点的步行时间和车上乘坐时间。假定通学公交专线的运营方案会提前公布, 学生可以根据公布的到站时间合理安排出行。此外, 学生的出行行为具有较高的规律性和计划性, 会根据经验提前到达站点, 以避免错过班车。因此, 学生在站点的实际等待时间通常较短, 可以忽略不计。

$$z_2 = \min \sum_{n \in N} (t_{\text{walk}}^n + t_{\text{in-vehicle}}^n) / z_3$$

式中: t_{walk}^n 为第 n 个学生步行到站点的时间; $t_{\text{in-vehicle}}^n$ 为第 n 个学生的乘车时间。

z_3 中出行需求被满足是指 OD 需求和时间需求同时被满足。引入 0/1 变量 α_n 、 β_n 和 δ_n 分别表示学生的 OD 需求、时间需求及总出行需求是否被满足。其中学生的时间需求考虑不同年级段有不同到校时间要求(包括最早到校时间和最晚到校时间), 学生乘坐通学公交的到校时间早于其所处年级段的最早到校时间或晚于其所处年级段的最晚到校时间则被视为未满足时间需求。

$$z_3 = \max \sum_{n \in N} \delta_n, \delta_n = \alpha_n \beta_n$$

$$\alpha_n = \begin{cases} 1, F \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

$$\beta_n = \begin{cases} 1, T_{\text{reach-school}}^{\text{earliest, grade}} \leq T_{\text{reach-school}}^n \leq T_{\text{reach-school}}^{\text{latest, grade}} \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

式中: F 表示学生乘校车前往学校; $T_{\text{reach-school}}^{n, \text{grade}}$ 表示第 n 个学生到校时间; $T_{\text{reach-school}}^{\text{earliest, grade}}$ 表示年级段学生最早到校时间; $T_{\text{reach-school}}^{\text{latest, grade}}$ 表示年级段学生最晚到校时间。

1.5 约束条件

$$(I) \sum_{l \in L} \theta_m k_l \leq W_m, \forall m \in M \quad (1)$$

式中: W_m 表示 m 车型车辆的总数; M 表示车型集合, $M = \{1, 2, \dots, m, \dots, |M|\}$ 。

式(1)表示分配给各线路 m 车型车辆数之和不大大于 m 车型总车辆数。

$$(II) \eta_{\min}^m \leq \sum_{i \in S_l^i} N_{\text{board}}^i / C_m \leq \eta_{\max}^m, \forall l \in L \quad (2)$$

式中: $\eta_{\min}^m$ 和 $\eta_{\max}^m$ 表示 m 车型车辆的最小和最大载客系数; N_{board}^i 表示在站点 i 上车的学生数量; C_m 表示 m 车型的车容量。

式(2)表示对任意线路 $l (l \in L)$ 车辆满载率不能过高也不能过低。

$$(III) H_{\min} \leq h_l \leq H_{\max}, \forall l \in L \quad (3)$$

式中: h_l 为线路 l 的发车间隔; $H_{\min}$ 和 $H_{\max}$ 表示最小和最大发车间隔。

式(3)是对发车间隔的约束。

$$(IV) T_{\text{reach-school}}^l \leq T_{\text{reach-school}}^{\max}, \forall l \in L \quad (4)$$

式中: $T_{\text{reach-school}}^l$ 表示线路 l 车辆的最晚到校时间; $T_{\text{reach-school}}^{\max}$ 表示学校规定学生最晚到校时间。

式(4)表示线路 $l (l \in L)$ 的车辆到达学校的最晚时间应早于学校规定学生的最晚到校时间, 其中线路 $l (l \in L)$ 的车辆最晚到校时间为最晚发出车辆的到校时间, 可用式(5)和式(6)计算。

$$T_{\text{reach-school}}^l = T_{\text{start}}^l + \sum_{i \in S_l^i} t_{\text{run}}^{i,i+1} + \sum_{i \in S_l^i} t_{\text{dwell}}^i \quad (5)$$

式中 T_{start}^l 为线路 l 最后一班车的始发时间。

$$T_{\text{start}}^l = T_{\text{start}}^0 + (k_l - 1)h_l \quad (6)$$

式中 T_{start}^0 为线路 l 最早班车的始发时间。

$$(V) \sum_{l \in L} \gamma_l \leq L_{\max} \quad (7)$$

式中 $L_{\max}$ 为路网中允许最大的线路数。

式(7)表示通学公交线路数量的限制。

$$(VI) \sum_{m \in M} \theta_m = 1, \theta_m \in \{0, 1\} \quad (8)$$

笔者采用单一车型, 不考虑混合车型, 故式(8)

为车型选择约束。

2 算法设计

2.1 遗传算法设计

采用遗传算法对优化模型进行求解。基于模型中的决策变量, 基因形式的表达如图1所示。通过编码、计算适应度、均匀交叉、反向变异等操作完成模型求解, 具体流程如图2所示。

3	1	320 240 120	32 45 56	622
实数类型基因 线路数量	公交类型1、2、 3分别对应小型 车、中型车、 大型车	数组类型基因, 代表公交发车 间隔, 单位秒。 长度根据线路 数量生成	数组类型基因, 代表公交选择 的线路序号。 长度根据线路 数量生成	数组类型基因, 代表对应线路 上分配的公交 数据。长度根据 线路数量生成

图1 遗传算法的基因形式

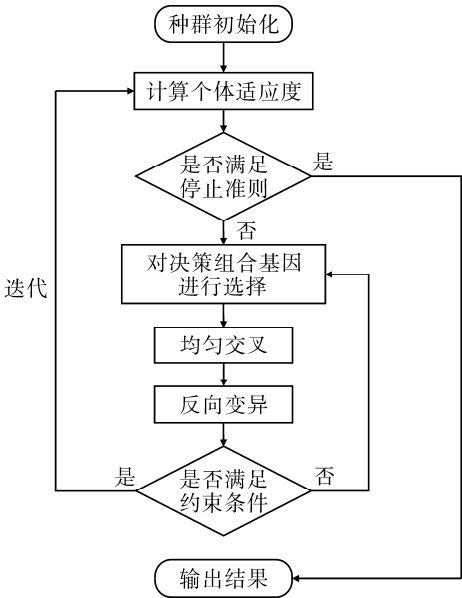


图2 遗传算法流程

2.2 多智能体仿真模块设计

引入多智能体仿真技术完成遗传算法中适应度函数的计算。通过构建学生智能体和公交智能体, 模拟公交系统运行情况, 并根据智能体的行为和交互来评估优化方案的性能, 其中学生智能体包含步行功能、上车功能、选择站点功能。步行功能主要实现学生从家出发行走走到站点的功能; 上车功能实现学生搭乘公交的一系列判断操作, 与公交智能体有交互; 站点选择功能是在多个可行站点可以选择时, 实现学生做出合理判断的功能。公交智能体包含发车功能、停车功能、启动功能、行驶功能、满载判断功能。发车功能是根据发车间隔

操作车辆从起始站发车; 停车功能即判断是否到达站点并且停车, 与学生智能体中的上下车功能有交互; 行驶功能完成车辆从一个站点行驶到另一个站点的操作; 启动功能即根据一定的条件解除车辆的停车状态; 满载判断功能实现当车辆为满载状态时直接改变路线开向终点站。

在多智能体仿真环境中, 学生智能体和公交智能体相互作用, 形成一个动态的通学公交运行系统。学生智能体的出行需求和选择行为会影响公交智能体的运行状态, 而公交智能体的运行也会影响学生智能体的出行决策。具体的仿真逻辑如图3所示。

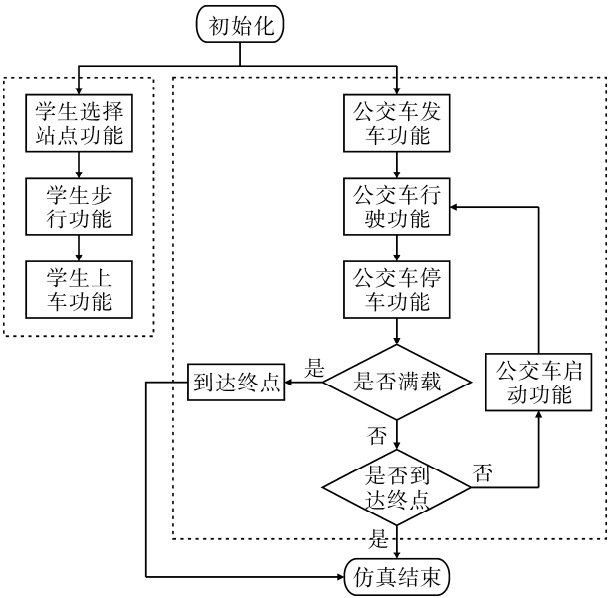


图3 多智能体仿真逻辑

3 算例分析

3.1 算例说明

以宁波市镇海区庄市街道镇海区实验小学为研究对象, 对模型及算法进行实证研究。学区内共有15个居住小区, 根据各小区的出入口, 设置16个通学公交停靠站点, 其中学校邻近的5个小区不设置停靠站点。小区、站点和路网分布如图4所示。

镇海区实验小学的到校时间安排如下: 一、二年级规定到校时间为8:00至8:10, 三、四年级规定到校时间为7:50至8:00, 五、六年级规定到校时间为7:40至7:50。同时, 学校允许学生在公布的到校时间基础上提前10 min到校。根据对宁波市公共

交通集团有限公司的实际调研，选择 3 种车型参与计算，模型中各项参数的设置见表 1。



图 4 学区路网站点分布

表 1 模型参数赋值

参数	取值	参数	取值
$W_1/\text{辆}$	8	$T^{\text{earliest,grade}(1,2)}_{\text{reach-school}}$	7:50
$W_2/\text{辆}$	6	$T^{\text{earliest,grade}(3,4)}_{\text{reach-school}}$	7:40
$W_3/\text{辆}$	4	$T^{\text{earliest,grade}(5,6)}_{\text{reach-school}}$	7:30
$L_{\text{max}}/\text{条}$	5	$T^{\text{latest,grade}(1,2)}_{\text{reach-school}}$	8:10
$L_{\text{min}}/\text{条}$	2	$T^{\text{latest,grade}(3,4)}_{\text{reach-school}}$	8:00
$x_{\text{min}}/\text{个}$	2	$T^{\text{latest,grade}(5,6)}_{\text{reach-school}}$	7:50
$x_{\text{max}}/\text{个}$	5	$t_{\text{dwell}}^{\text{min}}/\text{s}$	60
H_{min}/s	120	$e_1^{\text{fixed cost}}/\text{元}$	30.29
H_{max}/s	600	$e_2^{\text{fixed cost}}/\text{元}$	35.04
$C_1/\text{人}$	41	$e_3^{\text{fixed cost}}/\text{元}$	41.86
$C_2/\text{人}$	64	$e_1/(\text{元}\cdot\text{min}^{-1})$	0.196
$C_3/\text{人}$	83	$e_2/(\text{元}\cdot\text{min}^{-1})$	0.239
η_{min}^m	0.1	$e_3/(\text{元}\cdot\text{min}^{-1})$	0.435
η_{max}^m	0.9		

注：参数上标(1,2)表示一、二年级；(3,4)表示三、四年级；(5,6)表示五、六年级。

3.2 优化结果分析

利用 Python 软件生成备选线路集，采用遗传

算法进行编程实现。设置种群数 50 个，迭代次数 200 次，收敛情况如图 5 所示。优化方案见表 2。车型选择国产车型 2，选择的最优线路为备选线路集中编号 631 和 1088，具体线路走向如图 6 所示，各线路的发车间隔及车辆数分配见表 2。

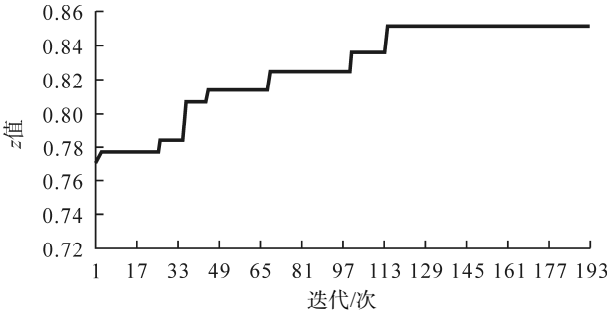


图 5 求解收敛情况

表 2 原方案与优化方案对比

方案	车辆数/辆	线路选择	车辆类型	发车间隔/min
原方案	4	0	3	1
优化方案	3, 3	631, 1088	2, 2	6

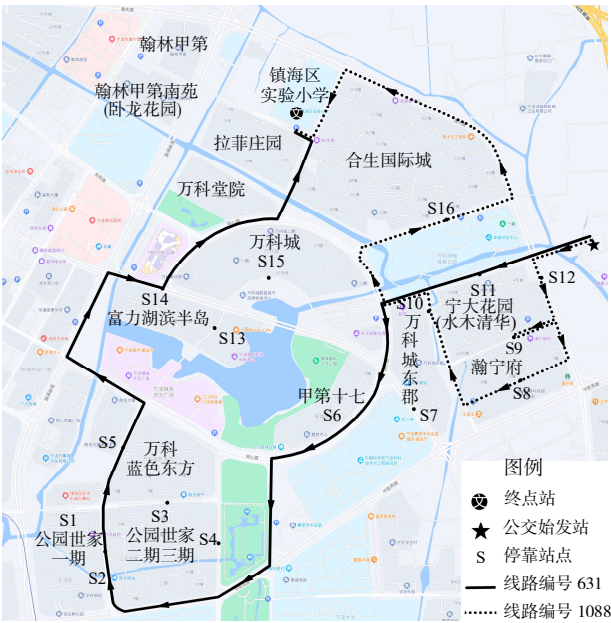


图 6 通学公交线路走向

表 3 展示了原方案与优化方案下，各目标函数值的对比。从表 3 可见，与原方案相比，笔者提出的优化方案可使学生平均出行时间缩短 20.14%，满足出行需求的学生人数增加 35.64%，但车辆运营成本上升了 12.03%，最终总目标提升了 10.09%。表明优化方案由于考虑了学生到校时间需求的差异，在满足学生出行需求方面效果明显，而原方案

按既定路线以较小间隔时间发车,线路走向单一,不能很好满足学生的出行需求。

表3 原方案与优化方案的目标函数值对比

方案	z	z_1	z_2	z_3
原方案	0.773	209.635	9.974	202
优化方案	0.851	234.857	7.965	274

表4对比了原方案和优化方案下子目标组成部分的结果。从表4可见,车辆固定成本比原方案增加了25.56%,原因是优化方案使用6辆国产车型2的车辆,而原方案为4辆国产车型3的车辆。但在车辆日常运行成本上,优化方案比原方案降低了41.66%。

表4 原方案与优化方案的细化结果对比

方案	运行成本/元	固定成本/元	乘车时间/min	步行时间/min	OD需求/人	时间需求/人
原方案	42.195	167.44	9.848	0.125 6	237	202
优化方案	24.617	210.24	7.840	0.124 4	376	274

在学生出行时间上,学生平均乘车时间比原方案减少了20.39%,平均步行时间减少了0.96%。在满足学生出行需求上,优化方案OD需求和时间需求的满足率都明显高于原方案,分别提高了58.65%和35.64%。因此,采用优化方案,通过调整车辆类型、发车间隔、停靠站点,以及优化线路走向,可以更好地满足学生的OD需求及不同年级学生的差异化到校时间需求。

4 结论

通过研究差异化到校时间需求下的通学公交线路优化问题,得到结论如下:

(1) 构建了以最短乘客平均出行时间、最低车辆运行成本以及最多满足出行需求的学生人数为目标的综合优化模型。

(2) 设计了结合多智能体仿真的遗传算法,并对优化模型进行了求解,算法收敛效果良好。

(3) 以镇海区实验小学为例,验证了模型和算法的可行性和有效性。通过对比结果发现,与原方案相比,笔者提出的优化方案可使学生平均出行时间缩短20.14%,满足出行需求的学生人数增加35.64%,最终总目标提升10.09%。由于车型的变更,车辆固定成本比原方案增加了25.56%,但日常运

行成本比原方案降低了41.66%。

文中不足在于忽略了随机因素对通学公交车路段行车时间的影响,将其设置为常数,而实际运营中影响因素众多,如交通拥堵、天气状况、突发事件等,都会导致行车时间的波动。后续研究拟利用蒙特卡罗方法模拟随机因素对行车时间的影响,通过模拟不同随机场景下的行车时间分布,更全面地评估优化方案的鲁棒性,进一步提高模型的实用性和可靠性。此外,将研究拓展至学区内多所学校之间通学公交线路的优化问题,有助于更全面地优化学区内的公共交通系统,提高整体运营效率。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国教育部. 教育部办公厅关于进一步加强中小学生睡眠管理工作的通知(教基厅函〔2021〕11号)[EB/OL]. [2024-10-31]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A06/s3321/202104/t20210401_523901.html.
- [2] 丁然. 基于改进蚁群算法的单校校车路径规划问题研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2016.
- [3] 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.
- [4] LEWIS R, SMITH-MILES K. A heuristic algorithm for finding cost-effective solutions to real-world school bus routing problems[J]. Journal of discrete algorithms, 2018, 52:2-17.
- [5] 侯彦娥, 孔云峰, 党兰学, 等. 车辆数限制的多车型校车路径问题模型及算法研究[J]. 计算机科学, 2016, 43(12):234-240.
- [6] MIRANDA D M, DE CAMARGO R S, CONCEIÇÃO S V, et al. A metaheuristic for the rural school bus routing problem with bell adjustment[J]. Expert systems with applications, 2021, 180:115086.
- [7] FENG R, ZHANG J, WU Y L, et al. School accessibility evaluation under mixed-load school bus routing problem strategies[J]. Transport policy, 2023, 131:75-86.
- [8] MIRANDA D M, DE CAMARGO R S, CONCEIÇÃO S V, et al. A multi-loading school bus routing problem[J]. Expert systems with applications, 2018, 101:228-242.
- [9] WANG Z X, HAGHANI A. Column generation-based stochastic school bell time and bus scheduling optimization [J]. European journal of operational research, 2020, 286(3):1087-1102.

- [10] ELLEGOOD W A, CAMPBELL J F, NORTH J. Continuous approximation models for mixed load school bus routing[J]. *Transportation research part B: methodological*, 2015, 77:182-198.
- [11] LIU Z S, GANG L H, YU B, et al. The routing problem for school buses considering accessibility and equity[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2022, 107:103299.
- [12] SHAFahi A, WANG Z X, HAGHANI A. SpeedRoute: fast, efficient solutions for school bus routing problems [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2018, 117:473-493.
- [13] 楚香香. 基于碳排放的校车路径优化研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2024.
- [14] 牛宁. 改进蚁群算法求解多目标校车路径优化问题[D]. 开封: 河南大学, 2015.
- [15] MOKHTARI N A, GHEZAVATI V. Integration of efficient multi-objective ant-colony and a heuristic method to solve a novel multi-objective mixed load school bus routing model[J]. *Applied soft computing*, 2018, 68:92-109.
- [16] KOKSAL E, HEGDE A R, PANDIARAJAN H P, et al. Performance characterization of reinforcement learning-enabled evolutionary algorithms for integrated school bus routing and scheduling problem[J]. *International journal of cognitive computing in engineering*, 2021, 2:47-56.

Optimization of school bus operation plan considering differentiated time requirements: taking Zhenhai Experimental Primary School in Ningbo as an example

LI Jie^{1,2}, LI Xuan¹, ZHANG Jikang¹, YE Xiaofei¹

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Public Security Traffic Management and Support Service Center, Ningbo 315021, China)

Abstract: In order to further upgrade the operational efficiency and service level of school bus, this paper focused on the optimization of school bus operation plan, with consideration of differentiated arrival time requirements of students in different grades of a primary school. A collaborative optimization model for school bus's dedicated routes, vehicle types, and departure intervals was constructed, with the objectives being minimizing operating costs and students' travel time and maximizing the number of students serviced. A genetic algorithm combined with multi-agent simulation was designed to solve the model, with Python being employed for its implementation. Finally, the effectiveness of the proposed model and algorithm was verified through a case study on Zhenhai Experimental Primary School in Ningbo city.

Keywords: school bus; differentiated school arrival time requirements; operation plan optimization; multi-agent simulation

(责任编辑 史小丽)