

李开雷¹ 白翰¹ 燕翔¹ 朱漫兮¹ 王修光¹

基于运营和出行成本的校车路径问题研究

摘要

为解决农村地区校车路网布局中校方运营成本过高,以及乘车站点分布散乱导致校车服务质量差的问题,建立混载与不混载场景下多目标校车路径规划问题(SBRP)模型.在不混载情景下,构建以学生出行成本和校方运营成本为优化目标的融合校车服务水平的SBRP数学模型;在混载情景下,构建考虑校车投入成本与运营成本的SBRP数学模型.通过对比多个启发式算法,确定基于模拟退火算法的求解流程和基于遗传算法求解结果的横向对比.最后,在国际基准案例上进行了测试,基于模拟退火算法引入不同搜索算子求解不同场景下构建的SBRP数学模型,应用于山东日照五莲县校车路径优化设计,结果表明不混载SBRP情景下,提出的方法较原校车运营方式,校车投入量、行驶里程、行程成本分别减少28.6%、37.8%、35.6%,考虑到学生的校车服务感知度,学生出行成本降低4.3%;由于混载情景的复杂性,难以有效兼顾出行成本,提出的方法较原校车运营方式的学生出行成本增加了0.5%,但校车投入量、行驶里程、行程成本分别减少37.5%、42.0%、35.8%,更好地验证了构建模型的有效性.模拟退火算法相较于遗传算法,能够更大程度提高农村地区校车服务质量和降低校方运营成本.

关键词

公路运输管理; 校车路径问题; 混载; 模拟退火算法; 多目标; 出行成本

中图分类号 U492.4

文献标志码 A

收稿日期 2022-04-20

资助项目 山东省自然科学基金(ZR2021QF110)

作者简介

李开雷,男,硕士生,主要研究方向为交通运输规划与管理.likaili2021@163.com

白翰(通信作者),男,博士,教授,主要从事交通控制与安全研究方面的工作.gushantraffic@163.com

0 引言

目前,我国农村交通发展总体上比较落后,校车服务在农村地区并不完善.与城市校车站点的短距离线路长度、高密度站点覆盖模式不同的是,农村校车站点多呈现为纵向延伸、分散布点的需求模式,农村校车路径规划有待改善.校车路径问题(School Bus Routing Problem, SBRP)是在满足校车容量、时间窗等约束条件下,合理地规划校车线路将学生从乘车站点送到学校(或从学校返回乘车站点),并达到特定目标的组合优化问题.自多校SBRP问题的提出者Newton等^[1]基于启发式算法的生成校车路线和时刻表,使用二次规划的方法规划校车路网以来,众多学者一直在探索相关的数学模型、优化算法及其应用.为解决校车路径问题,Jaradat等^[2]以校车容量、最大乘车时间和学校时间窗为目标,采用智能水滴算法(Intelligent Water Drops, IWD)优化求解.Calvete等^[3]提出一种局部分配局部搜索算法,求解带有停车位选择的校车路径问题.高巍等^[4]侧重于校车的最少运营数问题,对校车问题进行定义和描述,将问题分为极限情况和一般情况,针对不同情况设计了SBLS(School Bus Limit Situation)算法和SBGS(School Bus General Situation)算法.关于混载SBRP,Hargroves等^[5]指明了研究方向,但未构建相关模型与算法进行求解.Hou等^[6]构建了一种混合迭代局部搜索(ILS)元启发式算法,可用于具有多种规划场景的SBRP,包括同质或异构车队、单载或混载运行模式.Park等^[7]提出一种将多校SBRP问题分解为单校SBRP问题,使用扫描算法优化单校路线,再合并优化的单校线路结果的新型混载改进算法.Semba等^[8]运用模拟退火(Simulated Annealing, SA)、禁忌搜索(Tabu Search, TS)和蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)三种元启发式算法求解多校SBRP问题的模型,对三种算法性能进行了实证比较.

上述文献对多校SBRP进行了研究,但对农村地区校车服务过于重视校车运营方成本,而服务质量问题未能深度探讨.本文针对学生出行成本,即学生对校车服务的感知度,建立一种基于学生出行成本和服务协调的不混载校车路网布局模型,在保证校车服务质量的条件下,优化校车路径减少校车运营里程从而降低校方运营成本;混载情景下,则是从校车购置和运营成本两方面出发,建立混载优化模型.引入不同搜索算子的模拟退火算法(SA)和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)在国际基准案例上的测试结果表明,SA算法具有良好的适

1 山东交通学院 交通与物流工程学院, 济南, 250357

用性,两种情景下构建的模型能够提高农村地区校车服务质量、降低校方运营成本.

1 问题描述与数据介绍

1.1 问题描述

某学区内有若干学校,每所学校拥有一辆或多辆校车,学生只允许在本校站点上下车.学校、乘车站点、场站的数量与坐标已知,每个站点学生数量及该站点学生的目标学校已知,校车数量和校车容量已知.每个站点仅能由一辆校车进行服务且至少一名学生候车.在不混载情景下,同一校车上不能同时乘坐去往不同学校的学生,需要考虑校车到站点的上下车服务时间,以及所有学生在学校规定的时间窗内到达,保证学生出行成本最小,降低校方运营成本;在混载情景下,每辆校车为不同的学校提供服务,同样需要考虑上下车服务时间,设置学生的最大乘车时间.

1.2 数据介绍

Park 等^[7]于2012年提出了校车路网布局问题的通用数据测试集,并将校车站点与学校布局的共性总结为RSRB与CSCB两种类型,其中“R”与“C”分别意为随机和聚集,“S”与“B”分别表示学校与站点,即RSRB的学校与站点坐标的分布是随机的,而CSCB将去往不同学校的学生站点进行站点布置时,形成数个集群中心,且不同的学校也集中在同一区域中.

山东省日照市五莲县位于山东半岛中南部,总面积为1497 km²,常住人口49.98万.本文选取五莲县城区进行校车路网的布局实例研究.研究区道路众多,但部分道路过窄、路面质量不佳.研究区实例学校6所,在读学生共4522人,其中乘坐校车的学生795名.由图1可知,实例学区属于学校分散站点分散型案例,即RSRB.

2 建立数学模型

2.1 参数和决策变量

校车路网布局问题中,主要从场站、学生、站点、校车等4个方面对模型中使用到的参数与变量进行符号定义.由于场站设定在某个学区内,若校车全部停放在一个已知场站,场站作为一个站点,用0表示;若校车停放在不同的场站,则可以设置一个场站的集合 D .通常使用 P^+ 与 P^- 分别表示学生、学校站点的集合,且 P 指学生与学校站点的并集,表示为

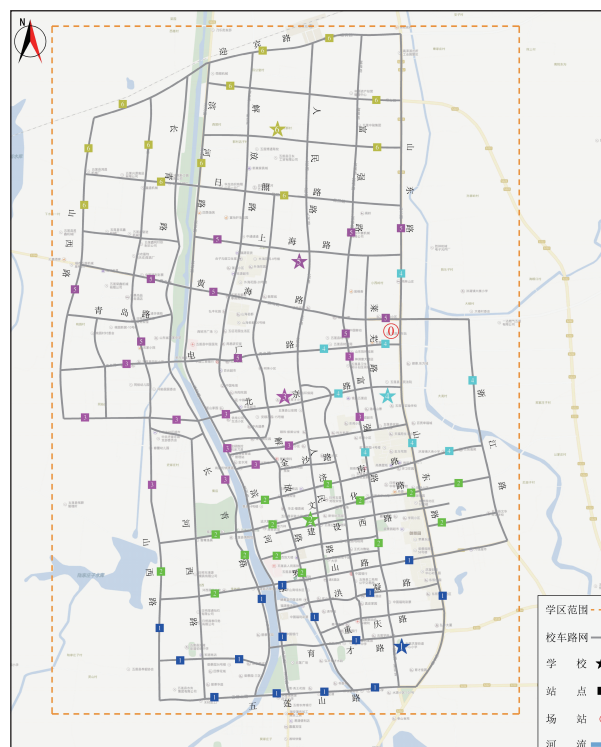


图1 实例站点布局

Fig. 1 Example site layout

$P = P^+ \cup P^-$.场站、学生的站点、学校的站点的集合为 V ,以单一场站0为例,集合可表示为 $V = P \cup \{0\}$.每个站点对应需要到达的学校 $s(i)$ 已知.当服务于不同学校时,学校有自身的时间窗,对最早到校时间 e_i 和最晚到校时间 l_i 做出描述.在校车运营中使用的校车 k 的集合为 K ,即 $k \in K$.

考虑到校车路网布局模型构建的抽象性,将校车从站点 i 至站点 j 行驶路径表示为 c_{ij} ,每个站点的候车人数 $i \geq 1$.每个站点的学生人数因实例的不同而不同,因此站点 i 的学生人数为 n_i ,根据站点 i 性质的不同,分别表示搭乘校车或者从校车上下车的学生人数.学生上下车需要消耗一定的服务时间, t_i 为校车在站点 i 的停滞服务时间,根据学生数量的变化而变化.另外,在不同校车路网布局模型建设中,由于优化目标的不同,所选用的决策变量也存在差异,一般模型通常选取的决策变量如 x_{ijk}, T_{ik}, L_{ik} 等.

综上,将校车路网布局问题模型中常用的参数与决策变量整理,如表1所示.

2.2 构建模型

2.2.1 不混载情景下线性规划数学模型

模型构建时,选取从校方和学生(乘客)两个角度出发,以校方运营成本和学生出行成本最低为优

表1 常用符号说明

Table 1 Description of common symbols

参数	意义说明
P^+	学生站点集合
P^-	学校站点集合
P	学生站点和学校站点的并集, $P = P^+ \cup P^-$
V	所有站点集合, $V = P \cup \{0\}$
$s(i)$	学生站点 i 所对应的学校站点
K	车辆集合
Q	车辆的容量
c_{ij}	站点 i 到站点 j 的行驶距离, $i, j \in V$
e_i, l_i	站点 i 所对应学校的最早到达时间和最晚到达时间, $i, j \in V$
n_i	站点 i 上(下)车的学生人数, $i \in P$
t_i	站点 i 所需要的服务时间, $i \in P$
v	校车的运营时的平均行驶速度
α_1	单位校车的价格
α_2	单位里程的行驶成本
α_3	单位时间的停滞成本
$t_{\max}$	学生的最大乘车时间
决策变量	
x_{ijk}	如果第 k 辆车经过站点 i 到 j 则为 1, 否则为 0
T_{ik}	第 k 辆车到达站点 i 的时间
L_{ik}	第 k 辆车访问站点 i 后车上的人数
y_{ik}	如果第 k 辆校车服务站点 i 则为 1, 否则为 0

化目标.校方只考虑车辆运营中的变动成本和因购置校车投入的固定成本.车辆运营中的变动成本为校车的行驶成本和校车到达站点时学生上下车产生的停滞服务成本之和;由于不考虑校车的维护、场站的建设等投入,固定成本变化的主导因素为校车的数量,因此校方运营成本 F_1 可表达为

$$F_1 = \alpha_1 \sum_{i \in P^+} \sum_{j \in P^-} x_{0jk} + \alpha_2 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \cdot c_{ij} + \alpha_3 \left(\sum_{i \in P^+} |n_i| \cdot t_i - \sum_{i \in P^-} |n_i| \cdot t_i \right). \quad (1)$$

校车 k 到达站点 i 后的服务时间 t_i 与该站点的 n_i 和站点 i 的服务性质有关,其中 t_i 依据已开发的回归模型进行定义^[9].

为保证 n_i 符合定义域,候车站点的 n_i 表示上车人数, n'_i 为正数,此时学生上车停滞时间 $t_i = 19 + 2.6 \cdot n'_i$;学校站点的 n_i 表示下车人数, n'_i 为负数,此时学生下车停滞时间 $t_i = 29 - 1.9 \cdot n'_i$.即:

$$\begin{cases} i \in P^+, n'_i = |n_i|, t_i = 19 + 2.6 \cdot n'_i, \\ i \in P^-, n'_i = -|n_i|, t_i = 29 - 1.9 \cdot n'_i. \end{cases} \quad (2)$$

从作为乘客的学生角度分析时,考虑到学生对校车服务水平的满意程度,而服务水平受各种因素影响难以确定,文中从校车与公交的相似性中获得

启发,将广义出行成本概念引入校车路网布局^[10-11],选取时间与票价作为评价指标,将学生对服务的满意程度简化为对时间和票价的感知反应.

出行时间包括学生在站点候车时的等待时间以及学生乘坐校车至学校的车内时间.为达到简化模型的目的,把车内时间近似为校车行驶总里程与速度之比,校车的服务时间等于校车到达站点后的停滞时间.对于学生而言,等待时间和车内时间二者在时间消耗上所产生的时间价值是不同的,因此对乘车时间和等车时间的处理上增加时间权重,等待时间权重为车内时间权重的 3 倍.综上,为使学生出行成本最低,考虑乘客车内时间成本、等车时间成本和票价成本,则学生出行成本 F_2 可表达为

$$\begin{cases} F_2 = (z\mu_1/v) \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \cdot c_{ij} + \\ 3z\mu_1 \left(\sum_{i \in P^+} |n_i| \cdot t_i - \sum_{i \in P^-} |n_i| \cdot t_i \right) + \\ M\mu_2 \sum_{i \in P^+} |n_i|, \\ z = (m \times \eta)/3\ 600, \\ 0 < \mu_1, \mu_2 < 1, \mu_1 + \mu_2 = 1, \end{cases} \quad (3)$$

式中: z 为学生的单位时间价值; m 为当地人均小时收入; η 为不同出行目的价值比值,取 0.15; M 为单位学生的票价,为定值; μ_1, μ_2 分别为出行时间成本和票价成本权重系数^[12].

函数约束则从站点、时间窗、容量、场站 4 个角度进行.

1) 站点约束:每个站点仅由 1 辆校车进行服务,保证当校车 k 驶入站点完成服务后驶离站点,且校车 k 对学生提供服务时考虑对学生的接送顺序,保证校车 k 在运营中先服务站点,再驶向站点相对应的学校站点,最后是对决策变量 x_{ijk} 的约束.

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} &= 1, \forall j \in P^+, \\ \sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} &= 0, i \in P, \\ T_{ik} + t_i + T_{is(i)} &\leq T_{s(i)k}, i \in P^+, s(i) \in P^-, k \in K, \\ x_{ijk} &\in \{0, 1\}, i, j \in P, k \in K. \end{aligned} \quad (4)$$

2) 时间窗约束:在校车 k 服务范围内,保证所有校车将学生在学校规定的最早到达时间 e_i 与最晚到达时间 l_i 内送达.

$$e_i \leq T_{ik} \leq l_i, i \in P^-, k \in K. \quad (5)$$

3) 容量约束:确保当校车 k 行至服务站点完成服务后,车上的学生总人数大于等于站点的上车人数且小于等于校车规定容量 Q .

$$|n_i| \leq L_{ik} \leq Q, i \in P^+, k \in K. \quad (6)$$

4) 场站约束: 保证校车 k 从场站 0 出发完成学生接送服务后回到原场站, 形成一个闭合的回路.

$$\sum_{j \in P} x_{d(k)j} - \sum_{j \in P} x_{jd(k)} = 1, k \in K. \quad (7)$$

综上所述, 不混载情景下校车路径规划数学模型为

$$\begin{aligned} \min F = & \alpha_1 \sum_{i \in P^+} \sum_{k \in K} x_{0ik} + (\alpha_2 + z\mu_1/v) \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \cdot c_{ij} + \\ & (\alpha_3 + 3z\mu_1) \left(\sum_{i \in P^+} |n_i| \cdot t_i - \sum_{i \in P^-} |n_i| \cdot t_i \right) + \\ & M\mu_2 \sum_{i \in P^+} |n_i|, \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1, \forall j \in P^+, \\ \sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0, i \in P, \\ T_{ik} + t_i + T_{is(i)} \leq T_{s(i)k}, i \in P^+, \\ s(i) \in P^-, k \in K, \\ x_{ijk} \in \{0, 1\}, i, j \in P, k \in K, \\ e_i \leq T_{ik} \leq l_i, i \in P^-, k \in K, \\ |n_i| \leq L_{ik} \leq Q, i \in P^+, k \in K, \\ \sum_{j \in P} x_{d(k)j} - \sum_{j \in P} x_{jd(k)} = 1, k \in K. \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

2.2.2 混载情景下线性规划数学模型

混载情景下校车路网布局优化模型受约束的复杂性限制, 模型构建时引入的出行成本最小优化目标无法实现, 因此以校车购置成本与运营花费为优化目标进行构建. 其中, 校车购置成本与校车投入量有关, 校车数量与校车的单位价格 α_1 相乘即为购置成本, 而校方运营成本受总运营行驶里程影响, 总里程与单位里程行驶成本 α_2 之积即为校方运营成本:

$$F_3 = \alpha_1 \sum_{j \in P^+} \sum_{k \in K} x_{0jk} + \alpha_2 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \cdot c_{ij}. \quad (9)$$

函数约束则从站点、时间、容量、场站 4 个角度进行.

1) 站点约束: 保证的是每个站点有且仅有一辆校车服务, 且当校车 k 驶入站点结束服务后离开. 由于校车在进行服务的过程中, 校车 k 可以同时接送去往不同学校的学生, 需要对校车运营中一些动态变化进行约束, 确保当校车 k 服务站点 i 后需要经过站点 i 对应的学校, 最后是对决策变量 x_{ijk}, y_{ik} 的约束.

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} y_{ik} &= 1, i \in P^+, \\ \sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} &= 0, i \in P, k \in K, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in V} x_{jik} - \sum_{j \in V} x_{js(i)k} &= 0, i \in P^+, k \in K, \\ T_{ik} + t_i + T_{is(i)} &\leq T_{s(i)k}, i \in P^+, s(i) \in P^-, k \in K, \\ x_{ijk} &\in \{0, 1\}, i, j \in P, k \in K, \\ y_{ik} &\in \{0, 1\}, i \in P, k \in K. \end{aligned} \quad (10)$$

2) 时间约束: 考虑到不同学校之间校铃的差异, 确保所有校车将学生在校规定的最早到达时间 e_i 与最晚到达时间 l_i 内送达. 确定一个最大乘车时间 $t_{\max}$ 避免学生的车内时间过长, 出现校车服务水平过低的情况.

$$\begin{aligned} e_i &\leq T_{ik} \leq l_i, i \in P^-, k \in K, \\ T_{s(i)k} - T_{ik} &\leq t_{\max}, i \in P^+, k \in K. \end{aligned} \quad (11)$$

3) 容量约束: 保证在任何时间节点车上人数都在容量 Q 之内及不同站点之间车内容量的变化进行约束.

$$\begin{aligned} |n_i| &\leq L_{ik} \leq Q, i \in P^+, k \in K, \\ x_{ijk}(L_{ik} + |n_i| - L_{jk}) &= 0, i, j \in P, k \in K, \\ 0 &\leq L_{s(i)k} \leq Q + |n_i|, i \in P^+, k \in K. \end{aligned} \quad (12)$$

4) 场站约束: 保证校车 k 从场站出发时车内无学生, 完成学生接送服务后又回到原场站.

$$\begin{aligned} L_{0k} &= 0, k \in K, \\ \sum_{j \in P} x_{d(k)j} &= \sum_{j \in P} x_{jd(k)} = 1, k \in K. \end{aligned} \quad (13)$$

综上所述, 混载情景下校车路径规划数学模型可以表达为

$$\begin{aligned} \min F_3 = & \alpha_1 \sum_{j \in P^+} \sum_{k \in K} x_{0jk} + \alpha_2 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \cdot c_{ij}, \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{k \in K} y_{ik} = 1, i \in P^+, \\ \sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0, i \in P, k \in K, \\ \sum_{j \in V} x_{jik} - \sum_{j \in V} x_{js(i)k} = 0, i \in P^+, k \in K, \\ T_{ik} + t_i + T_{is(i)} \leq T_{s(i)k}, i \in P^+, \\ s(i) \in P^-, k \in K, \\ x_{ijk} \in \{0, 1\}, i, j \in P, k \in K, \\ y_{ik} \in \{0, 1\}, i \in P, k \in K, \\ e_i \leq T_{ik} \leq l_i, i \in P^-, k \in K, \\ T_{s(i)k} - T_{ik} \leq t_{\max}, i \in P^+, k \in K, \\ |n_i| \leq L_{ik} \leq Q, i \in P^+, k \in K, \\ x_{ijk}(L_{ik} + |n_i| - L_{jk}) = 0, i, j \in P, k \in K, \\ 0 \leq L_{s(i)k} \leq Q + |n_i|, i \in P^+, k \in K, \\ L_{0k} = 0, k \in K, \\ \sum_{j \in P} x_{d(k)j} = \sum_{j \in P} x_{jd(k)} = 1, k \in K. \end{cases} \quad (14) \end{aligned}$$

3 求解算法

3.1 算法框架选取

遗传算法是校车问题中最常用的,因为遗传算法将目标函数定为搜索信息,故求解多目标函数具有优势.遗传算法在搜索时遵循概率,全局性较强,具有一定的随机性和灵活性,能大大减少参数对结果的干扰,但存在容易陷入过早收敛、对约束条件的表达不全面、对初始种群依赖性较强等缺点,影响多校问题结果的准确性^[13-14].蚁群算法(ACO)虽然在使用上更加灵活,还可通过和其他启发式算法结合提升算法的求解能力,但是计算量大、求解时间长,无法适应大规模问题,而且在进行搜索时,容易因所有个体得出的解一致性造成运算终止,不利于得出最优解^[15].模拟退火算法相较于上述两种算法具有更高的运算效率、更短的运算时间,且不受初始解的影响,并且该算法可以使模型中复杂的约束直观明了地展示在算法结构中^[16-18].当然,模拟退火算法在搜索过程中容易陷入局部最优,很难保证一次输出最优解,但可以通过多次代入求解取最优解决这一问题.综合考虑研究数据量大、模型约束条件多、计算复杂等因素,故不混载与混载情景下构建的模型均以基于模拟退火算法为框架,并引入不同邻域搜索算子求解模型.为了更好地验证文中构建模型采用模拟退火算法的优越性,将求解结果与遗传算法求解模型结果进行横向对比.

3.2 邻域搜索算子

不混载情景下采用 shift、swap、2-opt 三种常规搜索算子,而混载情景下算法求解时路径间以及路径内的邻域搜索算子都是成对移动的.因此,结合问题特性引入 PD-Shift、PD-Exchange、PD-Rearrange 三种邻域算子^[19],其主要描述如下:

1) PD-Shift:将一对点“P”与“D”从路线 1 移动至路线 2,在移动时需要受到优化目标模型中所有约束的限制,并禁止不可行的移动,其操作示意如图 2 所示.

2) PD-Exchange:交换两条线路中的“P”与“D”点对.如图 3 所示,“P1”与“D1”是线路 1 中的点对,“P2”与“D2”是线路 2 中的点对,首先从线路 1 与线路 2 中将这两组点对删除,继而将“P1”与“D1”插入线路 2 中的可行位置,“P2”与“D2”插入线路 1 的可行位置.

3) PD-Rearrange:在相同的路径中,通过重新排列,将“P”与“D”点对放置到最佳位置,从而最大限

度地降低目标函数的值.如图 4 所示,“P”与“D”是某线路的一组点对,通过 PD-Rearrange 操作,将其在线路中删除,然后将它们插入到同一路径中新的可行位置.

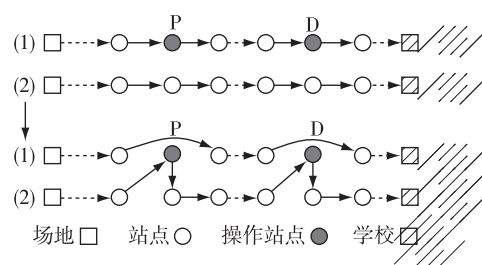


图 2 PD-Shift 操作

Fig. 2 PD-Shift

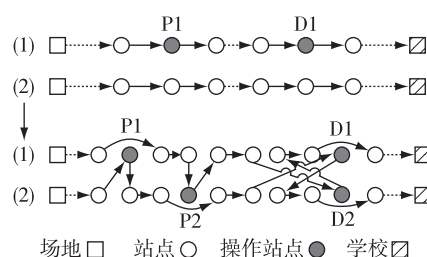


图 3 PD-Exchange 操作

Fig. 3 PD-Exchange

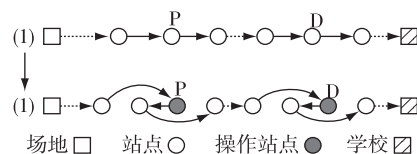


图 4 PD-Rearrange 操作

Fig. 4 PD-Rearrange

邻域搜索的最终结果往往过度关注总里程^[20],与校车行驶路径优化相比,校车的投入数目才是影响校方运营成本的首要因素.因此每个局部搜索算子完成搜索产生新的邻域解后,实现 Metropolis 判断准则^[21],评价函数为

$$C(R) = \alpha |R| + \beta \left(- \sum_{r \in R} |r|^2 \right) + \gamma \sum_{r \in R} c(r), \quad (15)$$

式中, $C(R)$ 为路网的校车运营总成本, $|R|$ 为解中路径的数量, $|r|^2$ 为解中路径 r 上校车停靠的站点个数, $c(r)$ 为路径 r 的里程.其中 $\alpha \gg \beta \gg \lambda$, 即三个量按照字典序依次进行评价.随着 $|r|^2$ 增大,优化方案中某些路径正向服务更多的站点的方向发展,更有利于路径的合并减少.

4 实验验证及数据测试

4.1 测试案例及参数设定

参数设置为校车容量 Q 为 66 人,校车平均行驶速度 v 约 32 km/h,考虑到服务水平,规定学生在校车上允许的最大乘车时间为 2 700 s,最后设置一个位于中心位置的校车场站 0.数据集提供学校坐标、站点坐标以及站点需求等,如表 2 所示.

表 2 部分实验数据
Table 2 Some experimental data

实例	站点数量/ 个	学校数量/ 所	学生总数/ 名	最大乘车 时间/s
RSRB01	250	6	3 409	2 700
RSRB02	250	12	3 670	2 700
RSRB03	500	12	6 794	2 700
RSRB04	500	25	6 805	2 700
CSCB01	250	6	3 907	2 700
CSCB02	250	12	3 204	2 700
CSCB03	500	25	6 813	2 700
CSCB04	500	25	7 541	2 700

考虑到模拟退火算法具有随机性,测试结果取 10 次结果中最优值.算法使用 MATLAB2016a 版本进行编程,实验电脑配置为 Intel Core i5-7360U, CPU2.3 GHz,系统为 Windows10.

各项参数设置如下:单位校车的购入价格 α_1 为 20 万/辆,校车单位距离行驶成本 α_2 为 0.001 95 元/m,单位时间停滞成本 α_3 为 0.010 5 元/s,时间价值 z 为 0.000 27 元/s.全区域乘坐校车的收费标准为 150 元/月,单程的车票价格为 1.25 元,校车平均车速 40 km/h,每辆校车的最大行驶时间设定为 40 min,学生出行成本权重系数 μ_1 取 0.37,票价成本权重系数 μ_2 取 0.63.

4.2 不混载情景下实验结果分析

由于现有文献无同情景下不混载、站点需求不拆分的闭合回路服务模式使用测试集计算的数据,因此构建模型的求解结果对比数据为不混载情景下仅选取运营里程为优化目标的一般模型所得出的结果,如表 3 所示.其中 $N_1, D_{m1}, D_{c1}, T_{c1}$ 分别表示一般模型求解结果的校车数量、行驶里程、行驶和学生出行成本, $N_2, D_{m2}, D_{c2}, T_{c2}$ 分别表示构建模型求解结果的校车数量、行驶里程、行驶和学生出行成本.

由表 3 可知,构建的模型综合考虑了校车运营时的行驶成本与学生出行成本情况,校车的投入数量平均减少 14.1%,行驶里程平均降低 14.4%,行驶成本平均降低 14.2%,校方运营成本大部分来源于校车的购入,因此校车投入量的减少也从根本上降低了校方的投入成本.考虑使学生出行成本尽可能地达到最优,但到校模式下每辆校车服务具有很强的针对性,故学生出行成本平均降低 0.26%.

4.3 混载情景下模型实验结果分析

多校混载情景下构建模型求解结果的对比数据选择测试集在同情景下单一模型求解结果,如表 4 所示.其中 $N_i, D_{mi}, D_{ci}, T_{ci} (i=1,2)$ 含义同上.

从表 4 可知,以校车数量与运行里程为目标优化后的模型比单一目标模型总体上更具有优势,以及 PD 三种搜索算子的加入使站点之间实现更多的可行交换,对路线的优化明显提升,因此校车的平均投入量减少 7.9%,校车行驶里程平均下降 7.6%,行程成本平均下降 7.5%,学生出行成本平均上升 0.11%.

4.4 实例验证:五莲县校车路径优化设计

经过实地调研获得实例区域内路网情况、站点信息数据,如表 5 所示.“现有路径”列下,0 代表

表 3 不混载情景下一般模型与构建模型求解结果对比

Table 3 Comparison of solving results between general model and the proposed model in non-mixed-load scenario

案例	N_1 /辆	N_2 /辆	D_{m1} /m	D_{m2} /m	D_{c1} /元	D_{c2} /元	T_{c1} /元	T_{c2} /元
RSRB01	50	44	5 070 122	4 616 358	14 864.76	13 548.04	2 733.55	2 729.60
RSRB02	57	47	5 340 931	5 008 415	15 664.64	14 696.93	2 941.87	2 938.91
RSRB03	81	68	12 592 608	9 753 674	36 818.63	28 593.10	5 469.20	5 444.50
RSRB04	87	79	12 738 576	10 472 738	37 244.77	30 680.92	5 479.25	5 459.55
CSCB01	52	46	4 994 927	4 528 193	14 671.60	13 317.34	3 125.77	3 121.68
CSCB02	53	46	5 515 893	5 205 749	16 147.13	15 245.71	2 575.78	2 573.02
CSCB03	76	65	11 386 935	9 446 182	33 326.47	27 702.26	5 473.70	5 456.78
CSCB04	89	73	12 546 379	11 074 925	36 724.12	32 456.06	6 058.15	6 045.24

表 4 混载情景下一般模型与构建模型求解结果对比

Table 4 Comparison of solving results between general model and the proposed model in mixed-load scenario

案例	N_1 /辆	N_2 /辆	D_{m1} /m	D_{m2} /m	D_{c1} /元	D_{c2} /元	T_{c1} /元	T_{c2} /元
RSRB01	32	29	4 414 207	3 806 322	12 956.75	11 195.35	2 727.68	2 722.375
RSRB02	29	27	4 897 815	4 816 728	14 367.66	14 131.90	2 937.70	2 936.973
RSRB03	61	55	8 922 373	8 319 293	26 182.87	24 433.88	5 437.20	5 431.896
RSRB04	65	58	9 382 672	8 657 549	27 518.02	25 415.19	5 449.92	5 443.543
CSCB01	33	30	4 358 148	4 149 746	12 818.49	12 213.63	3 120.03	3 118.184
CSCB02	29	28	5 049 424	4 419 578	14 784.56	12 960.60	2 571.44	2 565.967
CSCB03	55	53	8 502 611	7 662 908	24 965.50	22 533.47	5 448.47	5 441.172
CSCB04	64	59	10 849 938	10 270 998	31 800.16	30 121.56	6 043.17	6 038.084

表 5 区域相关数据

Table 5 Related regional data

站点属性	学生总数/名	校车数量/辆	对应站点	现有路径	站点人数/名
场站 0					
				0→1.1→1.3→1.2→1→1.15→1.6→1.4→1→0	61
学校 1	156	3	1.1,1.2,⋯,1.15	0→1.7→1.10→1.8→1.5→1→0	45
				0→1.13→1.11→1.9→1→1.14→1.12→1→0	50
学校 2	144	2	2.1,2.2,⋯,2.14	0→2.14→2.1→2.2→2.4→2→2.3→2.6→2.7→2→0	72
				0→2.9→2.11→2.13→2.12→2→2.5→2.10→2.8→2→0	72
学校 3	123	2	3.1,3.2,⋯,3.11	0→3.1→3.2→3.3→3→3.7→3.6→3.4→3→0	69
				0→3.8→3.9→3.5→3→3.11→3.10→3→0	54
学校 4	108	2	4.1,4.2,⋯,4.8	0→4.7→4.4→4.5→4→0	44
				0→4.8→4.6→4→4.1→4.2→4.3→4→0	64
学校 5	129	2	5.1,5.2,⋯,5.10	0→5.1→5.2→5.6→5→5.8→5.5→5→0	64
				0→5.3→5.4→5.7→5→5.9→5.10→5→0	65
学校 6	135	3	6.1,6.2,⋯,6.12	0→6.7→6.8→6.12→6→0	33
				0→6.6→6.9→6.5→6→0	32
				0→6.1→6.11→6.10→6→6.2→6.3→6.4→6→0	70
总计	795	14	70		795

场站,1,2,⋯,6 表示不同学校,1.1,1.2,⋯,2.1,⋯,6.12 表示校车服务站点.现有校车服务模式为单校,6 所学校共配有校车 14 辆,每辆校车均安排有一条线路进行接送学生服务,共有线路共 14 条,行驶里程 265.224 km,行驶成本为 587.85 元,出行成本为 630.301 元.实例区域有校车停放场站一处,所有校车均从场站 0 出发,服务结束后回到原场站.每个站点均有固定数量的学生前往指定的学校,站点上所有学生均上车,无学生滞留现象.另外,各项参数设置除校车标准容量为 46 人,其余均与测试案例相同.

4.4.1 横向对比结果

不混载情景下遗传算法和模拟退火算法求解规划结果如表 6 所示,混载情景下遗传算法和模拟退火算法求解规划结果如表 7 所示.

将模拟退火算法求解模型结果和求解结果横向

对比,不混载情景下,模拟退火算法比遗传算法的校车数量、行驶里程、行驶成本、出行成本分别平均下降 14.28%、19.67%、20.96%、3.60%;混载情景下,模拟退火算法比遗传算法的校车数量、行驶里程、行驶成本、出行成本分别平均下降 7.14%、15.17%、17.14%、2.72%.虽然遗传算法相对于原校车服务模式不论是混载和不混载情景下校车数量、行驶里程、行驶成本均有所改善,但是相较于模拟退火算法求解结果的优势略显不足.

4.4.2 纵向对比结果

不混载和混载情景下校车路网布局结果分别如图 5 和图 6 所示,输出的路网布局站点与站点之间为直线连接,需要与实例区域的现状可通行路网相结合,在输出的路网布局结果为基础进行调整,排除无法通行的站点连接路段.

表 6 不混载情景下遗传算法和模拟退火算法求解规划结果
Table 6 Planning results solved by GA and SA in non-mixed-load scenario

GA						SA					
编号	路径长度/m	行驶时间/s	服务时间/s	行驶成本/元	出行成本/元	编号	路径长度/m	行驶时间/s	服务时间/s	行驶成本/元	出行成本/元
1	17 452.12	1 571	969	51.65	62.853	1	14 051.76	1 265	780	35.59	91.670
2	19 235.41	1 731	450	42.23	59.132	2	18 022.23	1 622	422	39.57	55.403
3	18 841.27	1 696	426	41.20	46.246	3	17 755.94	1 598	401	38.83	43.582
4	18 642.97	1 678	565	42.29	62.584	4	17 921.61	1 613	543	40.65	60.162
5	17 884.90	1 610	734	42.57	48.818	5	17 594.48	1 584	722	41.88	81.473
6	15 671.45	1 411	472	35.52	51.378	6	14 971.90	1 348	451	33.93	49.085
7	17 642.35	1 588	550	40.18	59.727	7	16 835.98	1 515	525	38.34	56.997
8	17 854.61	1 608	447	39.51	42.776	8	15 882.64	1 430	398	35.15	38.052
9	19 876.71	1 789	617	52.95	63.085	9	15 469.35	1 392	480	35.21	49.097
10	16 678.92	1 501	685	39.71	41.066	10	16 561.25	1 491	680	39.43	77.515
11	18 518.11	1 666	561	32.55	45.568						
12	18 933.02	1 704	777	41.43	42.496						
合计	217 231.83	19 552	7 253	501.79	625.729	合计	165 067.14	14 858	5 402	378.59	603.063

表 7 混载情景下遗传算法和模拟退火算法求解规划结果
Table 7 Planning results solved by GA and SA in mixed-load scenario

GA						SA					
编号	路径长度/m	行驶时间/s	服务时间/s	行驶成本/元	出行成本/元	编号	路径长度/m	行驶时间/s	服务时间/s	行驶成本/元	出行成本/元
1	19 880.37	1 789	1 158	50.93	61.593	1	16 167.90	1 455	942	41.42	72.862
2	19 256.63	1 733	1 049	48.56	56.783	2	16 563.68	1 491	902	41.77	72.066
3	22 306.73	2 008	1 187	55.96	67.261	3	16 481.91	1 484	877	41.35	68.908
4	18 608.66	1 675	917	45.92	76.947	4	16 661.14	1 500	821	41.11	68.894
5	16 973.05	1 528	739	40.87	65.692	5	16 571.92	1 492	722	39.90	64.139
6	19 114.06	1 721	865	46.36	79.303	6	17 172.60	1 546	777	41.65	71.248
7	18 259.33	1 644	592	41.82	63.426	7	18 937.25	1 705	614	43.37	72.004
8	19 813.22	1 784	870	47.76	66.706	8	17 359.96	1 563	762	41.85	75.970
9	20 680.73	1 676	1 085	51.73	59.588	9	17 951.56	1 455	942	44.90	67.349
10	19 211.06	1 730	1 022	48.20	53.318						
合计	194 103.84	17 289	9 484	478.10	650.616	合计	153 867.92	13 689	7 361	377.32	633.441

不混载情景下的校车路网布局较原校车服务模式纵向对比,校车的投入数量减少 28.6%,而校车运营的成本很大部分都来源于校车的购入,因此校车投入量的减少也从根本上降低了校车投入成本.在运营里程上,不混载情景下优化不同学校服务路径之间的衔接,使校车行驶里程降低 37.8%,行驶成本降低 35.6%.考虑使学生出行成本尽可能达到最优,使学生获得更好的乘车体验,但到校模式下每辆校车服务具有很强的针对性,故学生出行成本降低 4.3%.

混载情景下的校车路网布局较原校车服务模式纵向对比,无论是校车的投入还是校车运营过程中

的资金投入都具有较大优势,校车的投入数量和行驶里程分别减少 37.5%、42.0%.而且此情景下校车调用更加灵活,路径方案之间的交替变换也产生更多的可能,行驶成本下降 35.8%.但由于混载情景的复杂性,难以同时兼顾出行成本,也产生了最多的出行时间,在一定程度上降低了校车的服务水平,因此学生出行成本上略微高于原校车服务模式,增加了 0.5%.

在不混载与混载两种情景下,基于模拟退火算法和遗传算法的校车路网布局结果与原校车服务模式纵向向差异性对比,如图 7 所示.

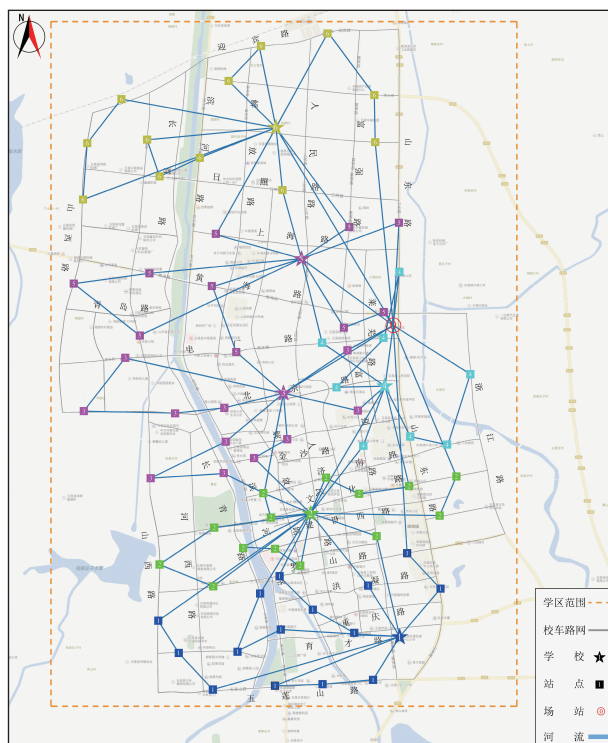


图5 不混载情景校车路网布局
Fig. 5 Road network layout of school bus in non-mixed-load scenario

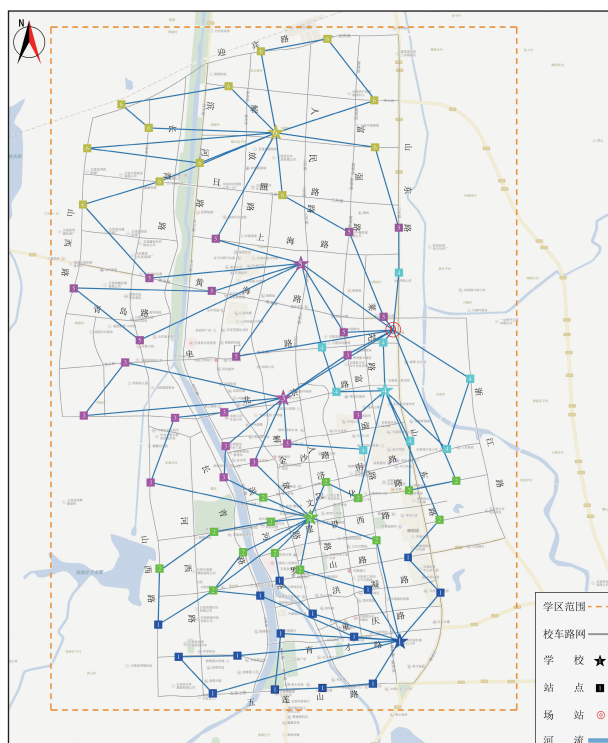


图6 混载情景校车路网布局
Fig. 6 Road network layout of school bus in mixed-load scenario

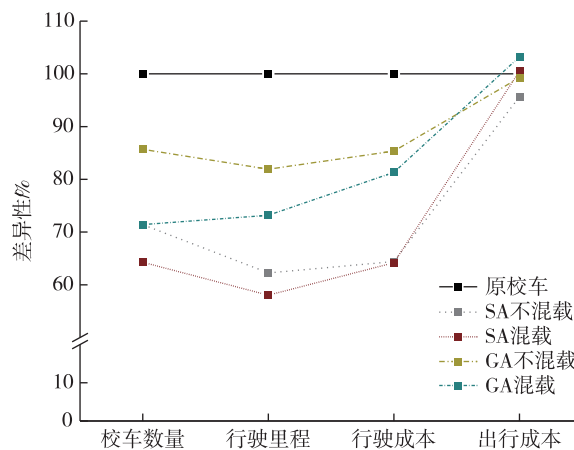


图7 纵横向差异性对比
Fig. 7 Vertical and horizontal comparisons

5 结论

文中以农村地区多校 SBRP 为研究对象,考虑不同情景和优化目标,建立了基于校方运营成本和学生出行成本的不混载 SBRP 数学模型;考虑校方运营成本,建立了以校方运营成本和投入成本最低为目标的混载 SBRP 数学模型.利用模拟退火算法和遗传算法在国际基准测试案例和国内实例进行分析,得出以下结论:

1) 横向对比分析,无论是不混载情景还是混载情景下,模拟退火算法比遗传算法的校车数量、行驶里程、行驶成本、出行成本均有所下降,引入不同搜索算子的模拟退火算法求解构建模型的结果较遗传算法求解结果更具有优势,对文中构建考虑多种优化目标的模型具有更强的针对性.

2) 纵向对比分析,文中建立的不混载 SBRP 模型在兼容降低运营成本的同时可以有效提高农村校车的服务水平,保证优化校车的投入和总里程,平均降低行驶里程 37.8%,降低校方运营成本分别为 28.6%、35.6%,同时考虑学生的出行感知度,减少学生出行成本为 4.3%,学生获得更好的乘车体验.建立的混载 SBRP 模型能够最大程度缩减运营成本分别为 37.5%、35.8%,行驶里程降低了 42.0%,且校车调用更加灵活,路径方案之间的交替变换产生更多的可能,更有利于校方运营.

3) 值得指出的是,对于站点需求拆分及校车多车型的情景、求解模型的算法的进一步改进,以及混载情景下,不同的校车路网布局对学生等车时间的影响等,这将是下一步的研究方向.

参考文献

References

- [1] Newton R M, Thomas W H. Bus routing in a multi-school system[J]. Computers & Operations Research, 1974, 1 (2): 213-222
- [2] Jaradat A S, Shatnawi M Q. Solving school bus routing problem by intelligent water drops algorithm[J]. Journal of Computer Science, 2020, 16(1): 25-34
- [3] Calvete H I, Galé C, Iranzo J A, et al. A partial allocation local search matheuristic for solving the school bus routing problem with bus stop selection[J]. Mathematics, 2020, 8(8): 1214
- [4] 高巍, 陈泽颖, 李大舟. 基于校车数量的无混载校车路线问题模型优化实现[J]. 沈阳化工大学学报, 2021, 35(1): 82-89
GAO Wei, CHEN Zeying, LI Dazhou. Optimization of the model of unmixed school bus route based on the number of school bus [J]. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2021, 35(1): 82-89
- [5] Hargroves B T, Demetsky M J. A computer assisted school bus routing strategy: a case study [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 1981, 15(6): 341-345
- [6] Hou Y, Zhao N, Dang L, et al. A hybrid metaheuristic algorithm for the school bus routing problem with multi-school planning scenarios[J]. Engineering Letters, 2021, 29(4): 1-10
- [7] Park J, Tae H, Kim B I. A post-improvement procedure for the mixed load school bus routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 217(1): 204-213
- [8] Semba S, Mujuni E. An empirical performance comparison of meta-heuristic algorithms for school bus routing problem[J]. Tanzania Journal of Science, 2019, 45(1): 81-92
- [9] Braca J, Bramel J, Posner B, et al. A computerized approach to the New York City school bus routing problem[J]. IIE Transactions, 1997, 29(8): 693-702
- [10] 刘梦琪, 瞿何舟. 基于轨道交通与常规公交组合的出行路径选择研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(4): 63-68
LIU Mengqi, QU Hezhou. Study on the route choice using the combination of rail and bus transit[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2018, 16(4): 63-68
- [11] 冯焕焕, 邓建华. 基于前景值和乘客最优理论的居民公交出行选择模型[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 307-311
FENG Huanhuan, DENG Jianhua. Model of public transport choice based on prospect value and passenger optimal theory[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 307-311
- [12] Levin M W, Boyles S D. Practice summary: improving bus routing for KIPP charter schools[J]. Interfaces, 2016, 46(2): 196-199
- [13] 洪越, 殷利平. 基于遗传算法的非高斯系统随机分布控制[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(4): 504-509
HONG Yue, YIN Liping. Genetic algorithm-based stochastic distribution control for non-Gaussian systems [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2020, 12(4): 504-509
- [14] Minocha B, Tripathi S. Solving school bus routing problem using hybrid genetic algorithm: a case study [M].// Advances in Intelligent Systems and Computing. New Delhi: Springer India, 2014: 93-103
- [15] 李燕, 季建楠, 沈葭栋, 等. 基于改进蚁群算法的机器人路径规划方法[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2021, 13(3): 298-303
LI Yan, JI Jiannan, SHEN Jiali, et al. Mobile robot path planning based on improved ant colony algorithm [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2021, 13(3): 298-303
- [16] 邓绍强, 郭宗建, 李芳, 等. 基于 Metropolis 准则的自适应模拟退火粒子群优化[J]. 软件导刊, 2022, 21(6): 85-91
DENG Shaoqiang, GUO Zongjian, LI Fang, et al. Adaptive simulated annealing particle swarm optimization algorithm based on metropolis [J]. Software Guide, 2022, 21(6): 85-91
- [17] 李朝迁, 裴建朝. 新型模拟退火遗传算法在路径优化的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(3): 52-55
LI Chaoqian, PEI Jianchao. Application of new simulated annealing genetic algorithm in path optimization[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(3): 52-55
- [18] Yu V F, Jewpanya P, Redi A A N P, et al. Adaptive neighborhood simulated annealing for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with multiple cross-docks [J]. Computers & Operations Research, 2021, 129: 105205
- [19] Li H B, Lim A. A metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows[J]. Proceedings 13th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2001). November 7-9, 2001, Dallas, TX, USA. IEEE, 2001: 160-167
- [20] Bent R, Hentenryck P V. A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(4): 875-893
- [21] Liu W W, Li X, Qin X N, et al. A metropolis criterion based fuzzy Q-learning flow controller for high-speed networks[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 241/242/243/244: 2327-2330

李开雷, 等. 基于运营和出行成本的校车路径问题研究.

LI Kailei, et al. School bus routing considering operation and travel costs.

School bus routing considering operation and travel costs

LI Kailei¹ BAI Han¹ YAN Xiang¹ ZHU Manxi¹ WANG Xiuguang¹

¹ School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357

Abstract In order to solve the problems of high operating cost and poor service quality of school bus due to the scattered distribution of bus stops in rural areas, multi-objective SBRP (School Bus Routing Problem) models were developed for the mixed-load and non-mixed-load scenarios. In the non-mixed-load scenario, a model of the SBRP was developed to optimize the students' travel cost and school operating cost, while in the mixed-load scenario, another model of the SBRP was developed to consider the input cost and operation cost of the school bus. Several heuristic algorithms were compared, based on which the simulated annealing algorithm was selected to solve the models, and the horizontal comparison of the solution results based on genetic algorithm were determined. Tests were conducted on an international bench mark case and the constructed models were solved by introducing different search operators into the simulated annealing algorithm, then the proposed approach was applied to the optimal design of school bus routes in Wulian county, Rizhao, Shandong province. The results showed that in the non-mixed-load scenario, compared with the original school bus operation mode, the school bus input, mileage and travel cost were reduced by 28.6%, 37.8% and 35.6%, respectively, and students' travel cost was reduced by 4.3% considering the students' perception of school bus service. While in the mixed-load scenario, the proposed approach reduced the school bus input, mileage and travel cost by 37.5%, 42.0% and 35.8%, respectively; due to the complexity of the mixed-load scenario, it is difficult to take the travel cost into account, thus the students' travel cost was increased by 0.5%. The proposed SBRP models were verified to be effective and the simulated annealing approach can optimize service quality and reduce operation cost of rural school bus to a greater extent than the genetic algorithm.

Key words highway transportation management; school bus routing problem (SBRP); mixed-load; simulated annealing; multi-objective; travel cost