

基于优化遗传算法的网约车合乘模型^①



缪 格, 袁鹏程

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

通信作者: 缪 格, E-mail: miao_ge_gdd@163.com

摘 要: 随着城市居民绿色低碳出行思想的提高, 网约车合乘出行方式应运而生. 但由于合乘模式涉及到的行驶路线问题, 乘客与乘客、乘客与驾驶员之间容易产生分歧, 并且网约车合乘出行模式的相关成本不明确等诸多问题, 网约车合乘模式没有被大范围推广和应用. 针对网约车合乘出行模式存在的问题, 研究并构建了网约车合乘路径优化模型, 模型中考虑了车辆等待时间成本、行驶距离成本、收益、容量约束以及时间窗约束等. 针对网约车合乘模型的特点, 并基于遗传算法思想, 研究设计了满足合乘模型约束条件的求解遗传算法. 并使用 Matlab 软件运行算法程序对算例进行求解, 运行 44.08 s 得到最大利润 6 906.297 1 元及车辆详细行驶路线, 实验表明, 通过构建的网约车合乘模型和设计的遗传算法, 可以得到合乘路径近似最优解, 证明了模型和算法的可行性和有效性.

关键词: 城市交通; 网约车合乘模型; 遗传算法; 路径优化; 合乘出行

引用格式: 缪格, 袁鹏程. 基于优化遗传算法的网约车合乘模型. 计算机系统应用, 2022, 31(12): 287-293. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8873.html>

Ride-sharing Model of Online Car-hailing Based on Optimized Genetic Algorithm

MIAO Ge, YUAN Peng-Cheng

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

Abstract: With the improvement of urban residents' consciousness of green and low-carbon travel, ride-sharing travel of online car-hailing emerged at the historic moment. However, due to the driving route issue involved in the ride-sharing mode, differences between the passengers and between the passengers and the driver are highly likely to occur. Moreover, the costs of this ride-sharing travel mode remain to be clarified. For the above-mentioned and various other reasons, the ride-sharing mode has not been widely promoted and applied. To address the problems with this travel mode, this study constructs a route optimization model for online car-hailing ride-sharing, and the model takes into account the cost of waiting time, that of driving distance, benefit, capacity constraint, time window constraint, etc. According to the characteristics of the ride-sharing model, a solving genetic algorithm satisfying the constraints on the ride-sharing model is designed by drawing on the genetic algorithm. Matlab software is used to run the algorithm program and thereby solve the calculation example, and a maximum profit of 6 906.297 1 CNY and the detailed driving route for the vehicle are obtained after the program is run 44.08 s. The experiment shows that an approximate optimal solution for the ride-sharing route can be obtained by the ride-sharing model of online car-hailing constructed and the genetic algorithm designed, which proves the feasibility and effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words: urban traffic; ride-sharing model of online car-hailing; genetic algorithm; path optimization; ride-sharing travel

^① 收稿时间: 2022-04-18; 修改时间: 2022-05-22; 采用时间: 2022-06-13; csa 在线出版时间: 2022-08-12

随着经济文化的迅速发展,环境污染日益严重和双碳政策的实行,城市居民开始倾向于绿色出行的交通方式,网约车合乘出行模式也应运而生.使用网约车合乘出行,乘客可受门到门的出行服务,相较于出租车、传统网约车,网约车合乘出行成本更低,更环保;相较于公交地铁,网约车合乘出行更舒适、更快捷.但网约车合乘也存在着诸多问题,例如合乘路线的不确定性,容易造成乘客与乘客之间,乘客与驾驶员之间的纠纷;合乘成本的不确定性,因绕行造成的行驶成本,时间成本等一系列相关成本的承担责任不易界定等.因此研究网约车合乘模型及其启发式算法十分必要其意义深远.

合乘最早是在1981年被Daganzo等人^[1]提出,并应于公共交通路网中的交通流均衡分配问题.但在此文章中应用的合乘需求均为假设,其构建的模型适应性有待考察.但合乘这一概念的提出为后续研究工作奠定了理论基础.2003年,Katzev^[2]提出了一种创新性概念汽车合乘方法,可以用于解决城市日益严重的交通运输问题.2007年,Shaheen等人^[3]指出合乘方式是一种灵活的替代方案,可以满足全球范围内的各种运输需求,采用出租车合乘可以有效缓解私家车数量的负担,并详细说明了合乘方式的必要性,此篇文章使得合乘问题被社会再次关注.2014年,Huang等人^[4]针对合乘问题提出了智能合乘系统,提出了一种基于遗传算法的多目标优化问题与模糊控制系统相结合,来进行合乘路径优化以及车辆匹配.随着信息通讯技术的不断发展,合乘逐渐与网约车相结合^[5-11],并越来越受到国内外学者的注意.

1 问题描述

网约车合乘问题可描述为:现有若干名乘客存在出行合乘需求,且乘客的上下车位置坐标已知,现派出一定数量的车辆为乘客提供合乘服务,且车辆的负载能力一定.每辆车均从起点出发,然后分别行至每位乘客提供上下车地点,以此来完成乘客的合乘出行.因此每位乘客相对应的上下车点只能被访问一次,每辆车在提供服务时所运送的合乘乘客数不能超出车辆的最大负载能力,车辆须在乘客要求的时间范围内到达乘客要求的上下车点,并以最小行驶距离成本、等待时间成本以及最大收益额使得司机以最大利润来完成乘客的合乘需求.

2 模型建立

2.1 模型假设

为便于网约车合乘模型的建立,提出以下基本假设:①提供合乘服务的车辆为同一车型,载重量一定;②提供合乘服务的车辆在服务时间窗内只进行从起点到目的点的运行,不存在中途折返等情况;③车辆在行驶过程中,每辆车正在服务的乘客总和不应大于车辆容量;④所有车辆状况良好,不存在行驶途中车辆抛锚、油量短缺、交通拥堵等特殊状况;⑤所有车辆在行驶过程中均以匀速行驶;⑥不考虑交叉口红绿灯等其他不可抗力因素的影响;⑦每位乘客最多只能被服务一次,且在被服务期间不存在换乘或取消行程的情况;⑧所有乘客的接送位置和车辆的起终点位置及其之间的距离、服务时间等都是已知的.

2.2 参数与决策变量的含义

设 H 为车辆集合,每个车辆 $h \in H, h = \{1, 2, \dots, n_H\}$, n_P 表示所有乘坐者的数量, n_H 表示待调度车辆的数量.有向量 $G = (V, A)$,其中 $V = V_O \cup V_P^O \cup V_P^D \cup V_T$, V_O 和 V_T 是虚拟节点,表示所有车辆都需要从 V_O 开始到达终点 $V_T, V_O = \{0\}, V_T = \{n_H = 2n_P + 1\}$; V_H 表示车辆当前位置节点, $V_H = \{1, 2, \dots, i, \dots, n_H\}$; m_h 为车辆 h 最大通行能力, q_i 为节点 i 的荷载, $q_{V_O} = q_{V_T} = 0, q_{V_O} = 1, q_{V_P^D} = -1$; Q_i^h 为访问点 i 后车辆 h 的荷载, Q_h 为车辆 h 的容量; $[e_i, l_i]$ 为时间窗口,表示节点 i 的最早和最晚服务时间, t_{ij} 为节点 i 到节点 j 的旅行时间; c 是车辆 h 从节点 i 到节点 j 的距离代价; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的距离; w_i 为节点 i 的等待时间; f 是服务每一个乘坐者所能获得的单位距离收益; δ 表示单位等待时间的费用.

对于每个乘坐者 $i \in V_P^O$,如果乘坐者 i 被服务,令 $s_i = 1$;如果乘坐者 i 没有被服务,则令 $s_i = 0$;对于每个弧 $(i, j) \in A$,每个车辆 $h \in H$,若车辆 h 从节点 i 到节点 j 旅行,令 $x_{ij}^h = 1$.对于每个节点 $i \in N$,每个车辆 $h \in H$,设 B_i^h 为车辆 h 在节点 i 开始的时间, Q_i^h 为车辆 h 访问节点 i 后的荷载, w_i 为节点 i 的等待时间.

2.3 网约车合乘数学模型

基于上述假设、定义的参数和决策变量,将网约车合乘问题的数学模型表示为:

$$\max Z = f \sum_{i \in V_G^O \cup V_Y^O} s_i d_{i, n_P + 1} - c \sum_{h \in H} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ij}^h - \delta \sum_{i \in V} w_i \quad (1)$$

约束条件:

$$s_i = \sum_{h \in H} \sum_{j \in N} x_{ij}^h, \forall i \in V_G^O \cup V_Y^O \quad (2)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{j \in V} x_{ij}^h = 1, \forall i \in V_H \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i,V_T}^h = 1, \forall h \in H \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ji}^h - \sum_{j \in V} x_{ij}^h = 0, \forall i \in V_G^O \cup V_G^D \cup V_Y^O \cup V_Y^D, \forall h \in H \quad (5)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{j \in V} x_{ij}^h \leq 1, \forall i \in V_G^O \cup V_G^D \cup V_Y^O \cup V_Y^D \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} x_{i,j}^h - \sum_{j \in V} x_{n_p+i,j}^h = 0, \forall i \in V_G^O \cup V_Y^O, \forall h \in H \quad (7)$$

$$B_j^h = \sum_{i \in V} x_{ij}^h (B_i^h + w_i + t_{ij}), \forall j \in V, \forall h \in H \quad (8)$$

$$Q_j^h = \sum_{i \in V} x_{ij}^h (Q_i^h + q_j), \forall j \in V, \forall h \in H \quad (9)$$

$$B_{V_T}^h - B_{V_O}^h \leq T_h \quad (10)$$

$$e_i \leq B_i^h \leq l_i, \forall i \in V, \forall h \in H \quad (11)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i^h \leq \min\{Q_h, Q_h + q_i\}, \forall i \in V, \forall h \in H \quad (12)$$

$$x_{ij}^h \in \{0, 1\}, \forall i \in V, j \in V, \forall h \in H \quad (13)$$

$$s_i \in \{0, 1\}, \forall i \in V_G^O \cup V_Y^O \quad (14)$$

目标函数 (1) 以总利润最大化、成本和等待时间

最小为目标^[12-17]. 约束 (2) 确保送达的乘客被记录. 约束 (3) 和 (4) 保证每辆车辆 k 的路线从车辆起始位置开始, 并在目的地车辆段结束; 约束 (5)-(7) 保证任何乘坐者最多可送达一次, 送达的每一个乘坐者应在其起始节点处上车, 并在其下车节点处下车. 时间和负荷变量的一致性由约束 (8) 和 (9) 保证, 约束 (10) 对每条路径的持续时间进行约束; 约束 (11) 和 (12) 分别施加时间和容量窗口^[18-21]; 约束 (13) 和 (14) 是对决策变量 x_{ij}^h 、 s_i 的取值范围进行约束.

3 求解网约车合乘模型的遗传算法

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一种利用生物世界的自然规律 (即适者生存) 来寻找最优解空间的随机搜索算法. 该算法通过数学的方式^[22], 利用计算机仿真运算, 将问题的求解过程转换成类似生物进化中的染色体基因的交叉、变异等过程^[23].

3.1 染色体编码

车辆总路线编码使用整数编码方式^[24]. 一个染色体即为一个可行解, 染色体被编码为一个整数字符串, 其长度取决于车辆和乘客的数量大小. 每个字符串由几个子字符串组成, 每个子字符串是一个基因序列, 表示其中一辆车从终端开始到行驶结束的总路线. 随机生成染色体, 如图 1 所示, 其中包含 10 组乘客, 4 辆网约车, 1-10 分别为 10 组乘客的上车点, 11-20 分别对应乘客下车点, 并与上车点一一对应. 其中 0 基因代表区分车辆标记 (其数量为车辆数减 1).

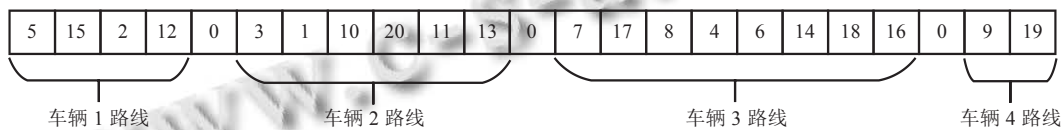


图 1 染色体表示

图 1 所示染色体为一可行解, 解码后表示为 4 辆车的行驶路线.

车辆 1 路线: 5→15→2→12 (车辆 1→乘客 5 上车点→乘客 5 下车点 15→乘客 2 上车点→乘客 2 下车点 12).

车辆 2 路线: 3→1→10→20→11→13 (车辆 2→乘客 3 上车点→乘客 1 上车点→乘客 10 上车点→乘客 10 下车点 20→乘客 1 下车点 11→乘客 3 下车点 13).

车辆 3 路线: 7→17→8→4→6→14→18→16 (车辆 3→乘客 7 上车点→乘客 7 下车点 17→乘客 8 上车点→乘客 4 上车点→乘客 6 上车点→乘客 4 下车点 14→乘客 8 下车点 18→乘客 6 下车点 16).

车辆 4 路线: 9→19 (车辆 4→乘客 9 上车点→乘客 9 下车点 19).

3.2 适应度函数

模型的目标函数为利润最大, 其组成部分为收

益、行驶成本和等待时间成本,为达到利润最大,要在符合约束条件的情况下尽可能满足最大收益、最小行驶成本和等待时间成本.设置适应度函数为:

$$F = Length$$

其中, F 为 F 适应度值, $Length$ 为每辆车运送每位乘客行驶的距离和. 适应度值越大代表可行解在满足时间窗和车辆载重的情况下所有车辆运送每位乘客行驶的距离和越大,对应的收益也越大,从而目标函数值也越大.

3.3 初始解的生成

初始解首先通过将乘客上车点和 0 基因进行随机排列,将乘客随机与车辆进行匹配,生成初始基因片段,

而后按照顺序依次将乘客下车点插入. 因乘客上车点与下车点一一对应且车辆只有在上车点接到乘客才能行至对应的乘客下车点,所以限制了下车点插入的位置. 根据要求下车点只能位于上车点之后,并且与上车点在同一车辆. 初始解的生成如图 2 所示, 1-10 代表乘客上车点, 11-20 代表乘客下车点, 并与上车点一一对应. 第 1 阶段将上车点和 0 基因随机排列. 第 2 阶段按序插入下车点, 首先插入乘客 1 的下车点 11, 可插入位置有 3 处 (箭头处), 随机选择一处插入, 再插入乘客 2 的下车点 12, 可插入位置有一处, 以此类推将下车点按照要求全部插入, 生成初始解.

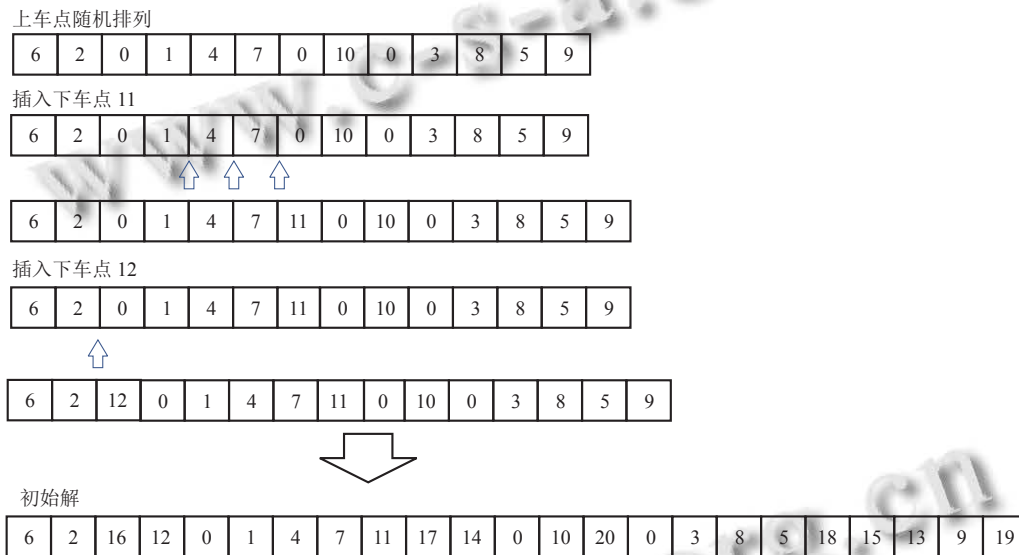


图 2 生成初始解

初始解表示 4 辆车的行驶路线:

车辆 1 路线: 6→2→16→12 (车辆 1→乘客 6 上车点→乘客 2 上车点→乘客 6 下车点 16→乘客 2 下车点 12).

车辆 2 路线: 1→4→7→11→17→14 (车辆 2→乘客 1 上车点→乘客 4 上车点→乘客 7 上车点→乘客 1 下车点 11→乘客 7 下车点 17→乘客 4 下车点 14).

车辆 3 路线: 10→20 (车辆 3→乘客 10 上车点→乘客 10 下车点 20).

车辆 4 路线: 3→8→5→18→15→13→9→19 (车辆 4→乘客 3 上车点→乘客 8 上车点→乘客 5 上车点→乘客 8 下车点 18→乘客 5 下车点 15→乘客 3 下车点 13→乘客 9 上车点→乘客 9 下车点 19).

3.4 遗传操作

3.4.1 选择操作

采用锦标赛法进行选择操作, 首先从种群中随机选择一定数量的染色体, 而后在这些染色体中选取适应度最高的染色体进行遗传操作, 对这一过程进行重复操作, 直至子代种群与父代种群的规模相同. 通过这一过程, 可以极大的保持种群的多样性.

3.4.2 交叉操作

交叉操作应用了随机两点交叉的思想, 根据配对和约束原则进行了修改, 其过程如图 3 所示. 第 1 阶段, 选择父代染色体中第一辆车的基因片段 (用绿色标记的基因) 进行交叉操作. 第 2 阶段, 选中的基因片段交叉在父代染色体前端, 而后全部遗传至子代染色体. 第

3 阶段, 将子代染色体中重复的基因片段 (用蓝色标记的基因) 进行删除, 即完成交叉操作。

3.4.3 变异操作

变异操作应用了随机两点突变的思想, 其过程如

第 1 阶段

父代 1

8	9	7	17	19	18	0	3	13	0	4	5	1	14	10	11	2	15	20	12	0	6	16
---	---	---	----	----	----	---	---	----	---	---	---	---	----	----	----	---	----	----	----	---	---	----

父代 2

10	20	0	2	12	9	1	11	7	8	17	5	18	15	19	0	4	3	14	6	13	16	0
----	----	---	---	----	---	---	----	---	---	----	---	----	----	----	---	---	---	----	---	----	----	---

第 2 阶段

子代 1

10	20	8	9	7	17	19	18	0	3	13	0	4	5	1	14	10	11	2	15	20	12	0	6	16
----	----	---	---	---	----	----	----	---	---	----	---	---	---	---	----	----	----	---	----	----	----	---	---	----

子代 2

8	9	7	17	19	18	10	20	0	2	12	9	1	11	7	8	17	5	18	15	19	0	4	3	14	6	13	16	0
---	---	---	----	----	----	----	----	---	---	----	---	---	----	---	---	----	---	----	----	----	---	---	---	----	---	----	----	---

第 3 阶段

子代 1

10	20	8	9	7	17	19	18	0	3	13	0	4	5	1	14	11	2	15	12	0	6	16
----	----	---	---	---	----	----	----	---	---	----	---	---	---	---	----	----	---	----	----	---	---	----

子代 2

8	9	7	17	19	18	10	20	0	2	12	1	11	5	15	0	4	3	14	6	13	16	0
---	---	---	----	----	----	----	----	---	---	----	---	----	---	----	---	---	---	----	---	----	----	---

图 3 交叉操作

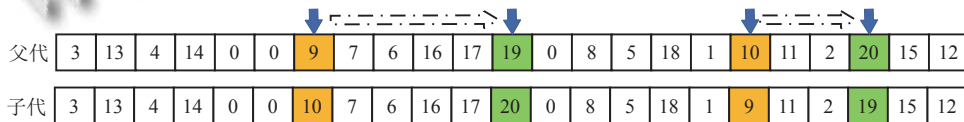


图 4 变异操作

4 算例分析

4.1 算例描述

现有可提供合乘服务的车辆 4 辆, 10 组乘客有合乘出行需求, 位置坐标 (坐标借鉴使用北京 Q 汽车制造企业物流园区位置及其 4S 店位置) 如表 1 所示。序号 0 为车辆所在位置, 序号 1-10 为乘客上车点, 序号 11-20 为乘客下车点, 上下车点一一对应, 即序号 1 对应序号 11, 序号 2 对应序号 12, 以此类推。车辆在序号 0 位置时载重量为 0, 经过一个上车点搭载一名乘客, 经过一个下车点车内减少一名乘客。表 1 中的最早、最晚时间窗数据均以车辆开始提供服务的时间为基础, 例如乘客 1 上车点的时间窗为 [0, 0.5], 下车点的时间窗 [0, 2], 若车辆从 8:00 开始提供服务, 那须在 8:00-8:30 到达乘客 1 的上车点, 在 8:00-10:00 送乘客 1 到达下车点位置。车辆在每个站点接送乘客上下车所用停车时间为 0.01 小时。

4.2 参数设置

遗传算法参数的合理设置对算法的有效性和计算效率有着重要影响, 算法中的参数种群大小、迭代次

图 4 所示。在父代染色体中, 随机选择两个上车点的基因 (例如, 用橙色标记的 9, 10), 以及相对应的下车点基因 (例如, 用绿色标记的 19 和 20)。子染色体的其余基因从父染色体继承。

数、交叉概率、变异概率、代沟以及各惩罚系数都需要进行合理设置。参数调优和参数控制是启发式算法中确定参数值的两种常用方法。参数调优是将其他参数固定, 仅变化需要测试的参数, 找到求解效果最好的参数值; 参数控制是将几种参数的值进行变化组合, 找到最优组合方式。本文使用这参数调优的方法确定各参数值, 如表 2 所示。

4.3 运行结果

通过上述遗传算法操作及参数设置, 对算例进行求解分析。实验环境为 Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60 GHz 1.80 GHz, 操作系统为 64 位 Windows 11, 使用 Matlab R2018a 进行编程。求解得到目标函数最大利润为 6 906.297 1 元, 运行时间为 44.08 s, 车辆行驶总距离为 542.648 6 km, 如表 3 所示。图 5 为 Matlab 运行算例后的迭代图和车辆行驶路线图, 从图 5(a) 可以看出根据模型所设计的遗传算法在收敛速度和跳出局部最优的能力上表现的十分出色, 根据图 5(b) 可以看出使用的 3 辆车的行驶路线, 分别用红、绿、蓝 3 种颜色表示。

表1 算例数据

序号	X坐标	Y坐标	载重	最早时间窗	最晚时间窗	站点停车时间(h)
0	40	50	0	0	10	0
1	25	85	1	0	0.5	0.01
2	22	75	1	0	0.4	0.01
3	22	85	1	0	0.2	0.01
4	20	80	1	0	0.5	0.01
5	20	85	1	0	0.3	0.01
6	18	75	1	0	0.5	0.01
7	15	75	1	0	0.7	0.01
8	15	80	1	0	0.6	0.01
9	10	35	1	0	0.1	0.01
10	10	40	1	0	0.5	0.01
11	8	40	-1	0	2	0.01
12	8	45	-1	0	2	0.01
13	5	35	-1	0	2	0.01
14	5	45	-1	0	2	0.01
15	2	40	-1	0	2	0.01
16	0	40	-1	0	2	0.01
17	0	45	-1	0	2	0.01
18	44	5	-1	0	2	0.01
19	42	10	-1	0	2	0.01
20	42	15	-1	0	2	0.01

表2 参数设置

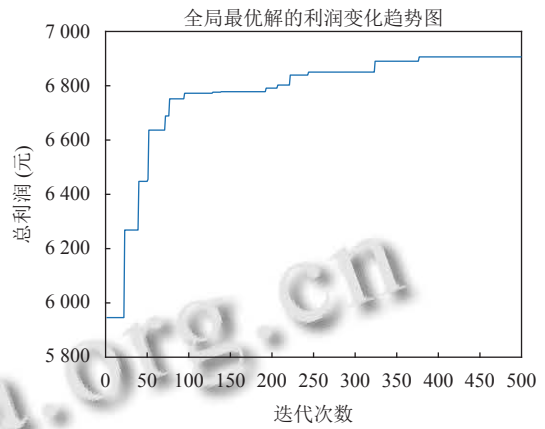
参数名称	符号	数值
种群大小	NIND	200
迭代次数	MAXGEN	500
交叉概率	Pc	0.9
变异概率	Pm	0.05
代沟	GGAP	0.9
染色体长度	N	2×顾客数+车辆数-1
容量惩罚系数	alph	10 000

表3 输出数据

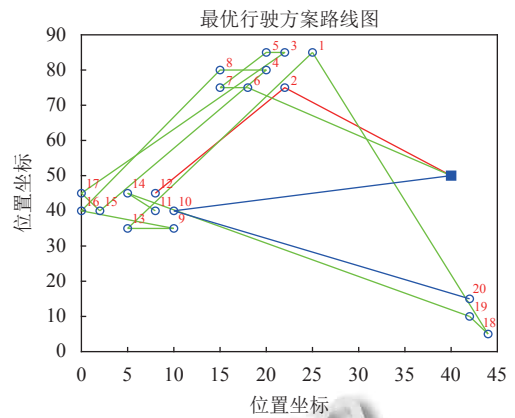
数据名称	数值
目标函数(元)	6 906.297 1
运行时间(s)	44.08
车辆使用数(辆)	3
车辆行驶总距离(km)	542.648 6

基于乘客合乘需求的节点数据、提供服务的车辆数据以及乘客的时间窗要求,应用设计的遗传算法求解网约车合乘模型,得出最优合乘路线有3条如表4所示,分别为:车辆1 起点→乘客2 上车点→乘客2 下车点 12;车辆2 起点→乘客6 上车点→乘客7 上车点→乘客5 上车点→乘客3 上车点→乘客7 下车点 17→乘客5 下车点 15→乘客4 上车点→乘客8 上车点→乘客6 下车点 16→乘客9 上车点→乘客3 下车点 13→乘客1 上车点→乘客8 下车点 18→乘客9 下车点

19→乘客4 下车点 14→乘客1 下车点 11;车辆3 起点→乘客10 上车点→乘客10 下车点 20.



(a) 迭代曲线



(b) 车辆运送路线

图5 全局最优解的利润变化趋势图和最优行驶方案路线图

表4 车辆行驶路线

车辆编号	车辆行驶路径
1	0→2→12
2	0→6→7→5→3→17→15→4→8→16→9→13→1→18→19→14→11
3	0→10→20

5 结论与展望

本文就网约车合乘出行模式,建立了一般合乘的数学模型,并根据合乘模型的特点和约束条件,设计了所对应的遗传算法对算例进行了求解,从而验证了模型和算法的可行性和有效性.在算法中设计了交叉算子和变异算子,使种群保持多样性,尽可能跳出局部最优解,获得更优的可行解.模型未考虑不同车型的情况,下一步研究可考虑不同载重的车型车辆.自2019年国内外新冠肺炎病毒的爆发,疫情不断影响和改变着城

市居民的日常生活. 在疫情时代的大背景下, 下一步的研究方向也可将模型与疫情相结合, 考虑乘客的风险等级, 车辆是否进行消毒等情况.

参考文献

- 1 Daganzo CF. Equilibrium Model for Carpools on an Urban Network. Washington DC: Transportation Research Board, 1981.
- 2 Katzev R. Car sharing: A new approach to urban transportation problems. *Analyses of Social Issues and Public Policy*, 2003, 3(1): 65–86. [doi: [10.1111/j.1530-2415.2003.00015.x](https://doi.org/10.1111/j.1530-2415.2003.00015.x)]
- 3 Shaheen SA, Cohen AP. Growth in worldwide carsharing: An international comparison. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, 1992(1): 81–89. [doi: [10.3141/1992-10](https://doi.org/10.3141/1992-10)]
- 4 Huang SC, Jiau MK, Lin CH. A genetic-algorithm-based approach to solve carpool service problems in cloud computing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(1): 352–364. [doi: [10.1109/TITS.2014.2334597](https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2334597)]
- 5 覃运梅, 石琴. 出租车合乘模式的探讨. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2006, 29(1): 77–79, 101.
- 6 周和平, 钟璧楠, 彭霞花, 等. 出租车合乘路径选择与费率优化模型. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 8(1): 20–24.
- 7 肖强, 何瑞春, 张薇, 等. 基于模糊聚类和识别的出租车合乘算法研究. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(5): 119–125. [doi: [10.3969/j.issn.1009-6744.2014.05.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6744.2014.05.018)]
- 8 赵飞杰. 考虑双边等待时间的网约车合乘问题研究 [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2017.
- 9 何彦刚. 网约车合乘路径鲁棒优化 [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- 10 邵子函. 基于实时需求响应的网约车动态合乘匹配模型与算法 [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- 11 Ghannadpour SF, Noori S, Tavakkoli-Moghaddam R, *et al.* A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy time windows: Model, solution and application. *Applied Soft Computing*, 2014, 14: 504–527. [doi: [10.1016/j.asoc.2013.08.015](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.08.015)]
- 12 Melachrinoudis E, Ilhan AB, Min H. A dial-a-ride problem for client transportation in a health-care organization. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(3): 742–759.
- 13 Liu MY, Luo ZX, Lim A. A branch-and-cut algorithm for a realistic dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 81: 267–288. [doi: [10.1016/j.trb.2015.05.009](https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.05.009)]
- 14 Schouwenaars T, de Moor B, Feron E, *et al.* Mixed integer programming for multi-vehicle path planning. 2001 European Control Conference (ECC). Porto: IEEE, 2001. 2603–2608.
- 15 Cordeau JF. A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. *Operations Research*, 2006, 54(3): 573–586. [doi: [10.1287/opre.1060.0283](https://doi.org/10.1287/opre.1060.0283)]
- 16 Braekers K, Kovacs AA. A multi-period dial-a-ride problem with driver consistency. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 94: 355–377. [doi: [10.1016/j.trb.2016.09.010](https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.09.010)]
- 17 Hu TY, Chang CP. A revised branch-and-price algorithm for dial-a-ride problems with the consideration of time-dependent travel cost. *Journal of Advanced Transportation*, 2014, 49(6): 700–723.
- 18 Badeau P, Guertin F, Gendreau M, *et al.* A parallel tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1997, 5(2): 109–122. [doi: [10.1016/S0968-090X\(97\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(97)00005-3)]
- 19 Desrosiers J, Dumas Y, Soumis F. A dynamic programming solution of the large-scale single-vehicle dial-a-ride problem with time windows. *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 1986, 6(3–4): 301–325. [doi: [10.1080/01966324.1986.10737198](https://doi.org/10.1080/01966324.1986.10737198)]
- 20 Créput JC, Koukam A, Kozlak J, *et al.* An evolutionary approach to pickup and delivery problem with time windows. *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Science*. Kraków: Springer, 2004. 1102–1108.
- 21 苏永云, 晏克非, 杨晓光, 等. VNS 中动态行程时间与多端动态最短路算法. *中国公路学报*, 2001, 14(1): 97–99, 103. [doi: [10.3321/j.issn:1001-7372.2001.01.022](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-7372.2001.01.022)]
- 22 Thangiah SR, Nygard KE, Juell PL. GIDEON: A genetic algorithm system for vehicle routing with time windows. *Proceedings of the 7th IEEE Conference on Artificial Intelligence Application*. Miami Beach: IEEE, 1991. 322–328.
- 23 宾松, 符卓. 求解带软时间窗的车辆路径问题的改进遗传算法. *系统工程*, 2003, 21(6): 12–15. [doi: [10.3969/j.issn.1001-4098.2003.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4098.2003.06.002)]
- 24 张玉琨, 樊建华, 徐建刚, 等. 车辆路径问题的改进遗传算法研究. *天津理工大学学报*, 2006, 22(5): 79–82. [doi: [10.3969/j.issn.1673-095X.2006.05.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-095X.2006.05.024)]

(校对责编: 孙君艳)