

控制与决策

Control and Decision

服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配模型

郑婷文, 姜艳萍, 苏华宇, 高展

引用本文:

郑婷文, 姜艳萍, 苏华宇, 等. 服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配模型[J]. *控制与决策*, 2025, 40(4): 1285-1292.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0238>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法](#)

A modeling and verification method of state reachable set for vehicle following control strategy
控制与决策. 2021, 36(7): 1679-1685 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1562>

[需求波动下考虑乘运供应能力的网约车平台动态定价](#)

Dynamic pricing for ride-hailing platform with demand fluctuation and supply capacity
控制与决策. 2021, 36(6): 1499-1508 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0881>

[基于混合整数规划的智能网联车冲突区时序优化模型](#)

Mixed integer programming model of scheduling for connected automated vehicles in a conflict zone
控制与决策. 2021, 36(3): 705-710 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0886>

[考虑主体心理行为的三边单向非循环稳定匹配](#)

Three-sided stable matching with one-way acyclic preference considering agent's psychological behavior
控制与决策. 2021, 36(3): 741-746 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1047>

[现货市场补充作用下基于总量折扣的运输服务采购问题研究](#)

Transportation service procurement based on total discount under complementary effect of spot market
控制与决策. 2021, 36(11): 2794-2802 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0274>

服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配模型

郑婷文, 姜艳萍[†], 苏华宇, 高展

(东北大学 工商管理学院, 沈阳 110167)

摘要: 共享经济的兴起推动了共享出行行业的迅速发展, 顺风车合乘成为移动出行的新趋势, 合乘中考虑司乘的服务模式偏好有助于满足多元化的消费需求. 针对服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题, 提出一种新的匹配方法. 首先, 针对服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题进行描述, 根据时间窗和最大绕路距离计算乘客和司机的满意度; 然后, 构建以匹配数量最大、司机平均满意度最大、乘客平均满意度最大为目标的多目标优化模型, 针对模型的 NP 难特性, 基于带精英策略的非支配排序遗传算法设计求解该模型的启发式算法; 最后, 通过算例表明所提出方法的可行性和有效性. 结果表明, 所提出方法能够有效求解服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题, 初始种群生成策略和局部搜索操作能够在一定程度上增强算法的全局搜索能力.

关键词: 顺风车; 合乘; 服务模式; 匹配; 偏好; 满意度

中图分类号: U491

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0238

引用格式: 郑婷文, 姜艳萍, 苏华宇, 等. 服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配模型 [J]. 控制与决策, 2025, 40(4): 1285-1292.

Driver-rider matching model for carpooling with service mode preference

ZHENG Ting-wen, JIANG Yan-ping[†], SU Hua-yu, GAO Zhan

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110167, China)

Abstract: The rise of the sharing economy has promoted the rapid development of the shared mobility industry. Carpooling has become a new trend in mobility. It is helpful to consider the service mode preference of drivers and riders in carpooling to meet diversified consumer demand. A new matching method is proposed to address the driver-rider matching problem for carpooling with service mode preference. First, the driver-rider matching problem for carpooling with service mode preference is described. Then, the satisfaction of riders and drivers is calculated based on the time window and maximum detour distance. Furthermore, a multi-objective optimization model is constructed with the objectives of maximizing the number of matches, maximizing the driver's average satisfaction and maximizing the rider's average satisfaction. Aiming at the NP-hard characteristic of the model, a heuristic algorithm for solving the model is designed based on an improved non-dominated sorting genetic algorithm II. Finally, we conduct numerical experiments to validate feasibility and effectiveness of the proposed method. The results show that the method can effectively solve the driver-rider matching problem for carpooling with service mode preference, and the initial population generation strategy and local search operation can enhance the global search capability of the algorithm to some extent.

Keywords: carpooling; ridesharing; service mode; match; preference; satisfaction

0 引言

随着共享经济渗透至各个行业领域, 顺风车合乘应运而生^[1]. 顺风车合乘是指行程安排相似的司机和乘客为分摊出行成本, 同乘一辆私家车完成行程. 顺风车合乘符合共享经济理念, 可以有效解决城市

尾气污染、出行难等问题^[2]. 随着互联网的快速发展, 顺风车合乘平台不断涌现, 顺风车合乘的市场需求持续上升. 据统计, 我国目前已开设 17 个顺风车合乘平台, 平台注册用户超过 3 亿人^[3].

目前顺风车合乘平台提供的服务模式分为独享

收稿日期: 2024-03-08; 录用日期: 2024-09-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72371065).

责任编委: 唐万生.

[†]通信作者. E-mail: ypjia@mail.neu.edu.cn.

模式和拼车模式. 独享模式要求顺风车司机一次只接受并服务一个乘客. 拼车模式则是将出行轨迹和时间相似的乘客合并起来一同被司机服务. 值得指出的是, 虽然顺风车合乘平台致力于持续优化服务, 但对不断升级的消费需求还不能有效满足. 例如, 大多顺风车合乘平台只提供了信息发布和搜索查询功能. 司机和乘客需自行寻找合乘伙伴, 并协商合乘路线. 这会导致全局资源无法达到最优配置, 造成私家车空座资源的浪费. 此外, 现有平台大多只提供独享模式或拼车模式. 这种单一服务模式无法保证司乘双方自由权衡成本和体验的机会. 目前, 虽然少数平台考虑了乘客的服务模式偏好, 但没有考虑司机的服务模式偏好, 这会打破司乘之间的平等互助关系, 降低司机的参与意愿, 进而减少平台匹配率^[4]. 因此, 顺风车合乘平台如何充分考虑双方服务模式偏好, 实现智能有效的司乘匹配是一个值得研究的问题.

近年来国内外学者在顺风车合乘领域研究成果丰硕. 一些研究解决了独享模式下顺风车合乘的司乘匹配问题. Tafreshian 等^[5] 构建了以最大化车辆行驶距离总节省为目标的整数规划模型. Zhao 等^[6] 考虑参与者的偏好和心理感知, 构建了稳定双边满意匹配模型. 马瑞民等^[7] 以最大化车辆行驶距离总节省为目标构建顺风车稳定匹配模型. Chau 等^[8] 构建了以最小化总匹配成本为目标的整数规划模型. Tafreshian 等^[9] 构建了以最大化系统社会福利与激励补贴总额之差为目标的混合整数非线性优化模型, 并提出了基于拉格朗日松弛的启发式算法. 还有一些研究解决了拼车模式下顺风车合乘的司乘匹配问题. Silva 等^[10] 构建了以最小化路线成本和惩罚费用为目标的优化模型, 旨在找到能够满足最低配额的合乘路线. Sun 等^[11] 构建了以最大化车辆路线成本总节省为目标的集合覆盖模型. Boysen 等^[12] 以 HOV 车道为背景, 分别以最小化司机到达时间和最大化服务乘客的加权数量为目标建立优化模型. Yao 等^[13] 提出了以最小化车辆总行驶距离为目标的数学模型和一种动态树算法. 郭羽含等^[14] 以司乘匹配对价值总和最大为目标, 构建了基于双模式协作匹配的数学模型.

综上, 已有研究大多单独考虑独享模式或拼车模式, 而现实中往往同时存在独享和拼车两种模式. 另一方面, 已有研究往往侧重于平台收益、社会福利等优化目标, 而忽略了司乘双方的满意度. 然而, 司乘双方的满意度是影响平台盈利能力和合乘参与者留存率的关键因素. 因此, 本文考虑司机和乘客的服

务模式偏好, 给出一种能提高匹配率和参与者满意度的顺风车合乘司乘匹配方法.

本文的创新之处在于: 1) 在顺风车合乘的司乘匹配问题中考虑司机和乘客的服务模式偏好, 更符合合乘参与者的实际需求; 2) 在匹配过程中考虑司乘双方满意度, 使匹配方案更容易被司机和乘客接受, 从而提升司机和乘客合乘体验, 进一步促进共享出行行业的发展; 3) 提出结合初始种群生成策略和局部搜索操作的带精英策略的非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II), 该算法能很好地解决现实中的大规模问题.

1 模型建立

1.1 问题描述

顺风车合乘平台提供两种服务模式: 独享模式和拼车模式. 司机和乘客向平台提交信息, 其中司机提交出发地、目的地、离开出发地的最早时间、到达目的地的理想时间窗和硬时间窗、可提供的座位数量、最大绕路距离、选择的服务模式; 乘客提交出发地、目的地、离开出发地的理想时间窗和硬时间窗、到达目的地的理想时间窗和硬时间窗、乘车人数、选择的服务模式. 平台根据上述信息决策: 独享和拼车模式的司乘匹配、接送顺序和上车时间.

1.2 模型假设与符号说明

根据本文研究问题的特点, 模型基本假设如下:

- 1) 车辆匀速行驶^[15];
- 2) 忽略乘客上下车时间和车辆停车启动时间^[9];
- 3) 未匹配成功的司机和乘客自行前往目的地^[7].

本文假设车辆匀速行驶, 原因如下: 一方面, 现实生活中除早晚高峰时段会发生道路拥堵, 其余时段可适当忽略道路拥堵对车辆行驶速度的影响; 另一方面, 即使车辆速度受到部分路况的影响, 但全程也可取速度的平均值, 从而近似看作车辆匀速行驶.

模型中符号说明如下: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_K\}$ 为司机集合; $R = \{R_1, R_2, \dots, R_J\}$ 为乘客集合; $A = V \cup R$ 为所有合乘参与者集合; O^V 和 O^R 为司机和乘客的出发地节点集合; D^V 和 D^R 为司机和乘客的目的地节点集合; $N = O^V \cup O^R \cup D^V \cup D^R$ 为所有节点的集合; O_p 和 D_p 为合乘参与者 A_p 的出发地和目的地节点; B_p 为合乘参与者 A_p 对服务模式的选择偏好, 即 A_p 选择独享模式时, $B_p = 1$, 选择拼车模式时, $B_p = 0$; L_r 为乘客 R_r 的乘车人数; Q_k 为司机 V_k 可提供的座位数量; δ_k 为司机 V_k 的最大绕路系数; E_k 为司机 V_k 离开出发地的最早时间; $[e_r, g_r]$ 和 $[E_r, G_r]$ 为乘客 R_r 离开出发地的理想时间窗和硬时间窗, 显然 $E_r < e_r < g_r < G_r$; $[h_p, f_p]$ 和 $[H_p, F_p]$ 为

合乘参与者 A_p 到达目的地的理想时间窗和硬时间窗, 显然 $H_p < h_p < f_p < F_p$; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的欧氏距离; s 为车辆速度.

1.3 乘客和司机的满意度计算

乘客的满意度主要取决于离开出发地的时间和实际到达目的地的时间与其理想时间的偏差. 令 T_i^k 为非负连续变量, 表示司机 V_k 到达节点 N_i 的时间. u_r^1 表示乘客 R_r 的出发时间满意度, u_r^2 表示乘客 R_r 的到达时间满意度, 有

$$u_r^1 = \begin{cases} \frac{T_{O_r}^k - E_r}{e_r - E_r}, & E_r \leq T_{O_r}^k < e_r; \\ 1, & e_r \leq T_{O_r}^k \leq g_r; \\ \frac{G_r - T_{O_r}^k}{G_r - g_r}, & g_r < T_{O_r}^k \leq G_r; \\ 0, & T_{O_r}^k < E_r, T_{O_r}^k > G_r. \end{cases} \quad (1)$$

由此可见 $0 \leq u_r^1 \leq 1$, 其中 $T_{O_r}^k$ 表示司机 V_k 到达乘客 R_r 出发地的时间, 即乘客 R_r 离开出发地的时间.

$$u_r^2 = \begin{cases} \frac{T_{D_r}^k - H_r}{h_r - H_r}, & H_r \leq T_{D_r}^k < h_r; \\ 1, & h_r \leq T_{D_r}^k \leq f_r; \\ \frac{F_r - T_{D_r}^k}{F_r - f_r}, & f_r < T_{D_r}^k \leq F_r; \\ 0, & T_{D_r}^k < H_r, T_{D_r}^k > F_r. \end{cases} \quad (2)$$

由此可见 $0 \leq u_r^2 \leq 1$, 其中 $T_{D_r}^k$ 表示司机 V_k 到达乘客 R_r 目的地的时间, 即乘客 R_r 到达目的地的时间.

根据乘客对两个指标给出的权重 w_r^1, w_r^2 , 得到乘客 R_r 对司乘匹配的满意度 u_r 为

$$u_r = w_r^1 u_r^1 + w_r^2 u_r^2, \quad (3)$$

其中 $0 \leq w_r^1, w_r^2 \leq 1$ 且 $w_r^1 + w_r^2 = 1$.

司机的满意度由绕路距离和到达目的地的实际时间与其理想时间的偏差决定. 令 x_{ij}^k 为 0-1 型决策变量, $x_{ij}^k = 1$ 表示司机 V_k 依次经过节点 N_i 和节点 N_j , 否则 $x_{ij}^k = 0$. u_k^1 表示司机 V_k 的绕路距离满意度, 有

$$u_k^1 = 1 - \frac{\sum_{i \in N \setminus DV} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij}^k - d_{O_k, D_k}}{d_{O_k, D_k} (1 + \delta_k)}. \quad (4)$$

令 u_k^2 表示司机 V_k 的到达时间满意度, 计算为

$$u_k^2 = \begin{cases} \frac{T_{D_k}^k - H_k}{h_k - H_k}, & H_k \leq T_{D_k}^k < h_k; \\ 1, & h_k \leq T_{D_k}^k \leq f_k; \\ \frac{F_k - T_{D_k}^k}{F_k - f_k}, & f_k < T_{D_k}^k \leq F_k; \\ 0, & T_{D_k}^k < H_k, T_{D_k}^k > F_k. \end{cases} \quad (5)$$

由此可见 $0 \leq u_k^2 \leq 1$, 其中 $T_{D_k}^k$ 表示司机 V_k 到达其目的地的时间.

根据司机对两个指标给出的权重 w_k^1, w_k^2 , 司机 V_k 对司乘匹配的满意度 u_k 为

$$u_k = w_k^1 u_k^1 + w_k^2 u_k^2, \quad (6)$$

其中 $0 \leq w_k^1, w_k^2 \leq 1$ 且 $w_k^1 + w_k^2 = 1$.

1.4 模型构建

令 y_r^k 为 0-1 型决策变量, $y_r^k = 1$ 表示司机 V_k 与乘客 R_r 形成合乘匹配, 否则 $y_r^k = 0$; 令 x_{ij}^k 为 0-1 型决策变量, $x_{ij}^k = 1$ 表示司机 V_k 依次经过节点 N_i 和 N_j , 否则 $x_{ij}^k = 0$; 令 T_i^k 为非负连续变量, 表示司机 V_k 到达节点 N_i 的时间. 构建如下优化模型:

$$\max Z_1 = \sum_{k \in V} \sum_{r \in R} y_r^k, \quad (7)$$

$$\max Z_2 = \sum_{k \in V} \sum_{r \in R} u_k y_r^k / \left(K - \sum_{k \in V} \left(1 - \sum_{r \in R} y_r^k \right)^+ \right), \quad (8)$$

$$\max Z_3 = \sum_{k \in V} \sum_{r \in R} u_r y_r^k / \left(J - \sum_{r \in R} \left(1 - \sum_{k \in V} y_r^k \right)^+ \right). \quad (9)$$

s.t.

$$\sum_{j \in OR} x_{O_r, j}^k + \sum_{j \in OR} x_{j, O_r}^k \leq M(1 - B_r y_r^k), \quad r \in R, k \in V, j \neq O_r; \quad (10)$$

$$\sum_{j \in OR} x_{O_r, j}^k + \sum_{j \in OR} x_{j, O_r}^k \leq M(1 - B_k y_r^k), \quad k \in V, r \in R, j \neq O_r; \quad (11)$$

$$\sum_{j \in OR} x_{O_r, j}^k + \sum_{j \in OR} x_{j, O_r}^k - y_r^k \geq -B_r y_r^k M, \quad r \in R, k \in V, j \neq O_r; \quad (12)$$

$$\sum_{j \in OR} x_{O_r, j}^k + \sum_{j \in OR} x_{j, O_r}^k - y_r^k \geq -B_k y_r^k M, \quad k \in V, r \in R, j \neq O_r; \quad (13)$$

$$\sum_{k \in V} y_r^k \leq 1, \quad r \in R; \quad (14)$$

$$\sum_{i \in N \setminus DV} x_{il}^k - \sum_{j \in N \setminus OV} x_{lj}^k = 0, \quad k \in V, l = O^R \cup D^R; \quad (15)$$

$$\sum_{j \in OR} x_{O_k, j}^k = 1, \quad k \in V; \quad (16)$$

$$\sum_{i \in DR} x_{i, D_k}^k = 1, \quad k \in V; \quad (17)$$

$$\sum_{j \in O^V \cup O^R} x_{j,O_r}^k = y_r^k, k \in V, M, r \in R, j \neq O_r; \quad (18)$$

$$\sum_{j \in O^V \cup O^R} x_{j,O_r}^k - \sum_{i \in O^R \cup D^R} x_{i,D_r}^k = 0, \quad k \in V, r \in R, i \neq D_r, j \neq O_r; \quad (19)$$

$$\sum_{r \in R} L_r y_r^k \leq Q_k, k \in V; \quad (20)$$

$$T_j^k \geq T_i^k + \frac{d_{ij}}{s} - M(1 - x_{ij}^k), \quad k \in V, i \in N \setminus D^V, j \in N, j \neq i; \quad (21)$$

$$T_{O_k}^k \geq E_k, k \in V; \quad (22)$$

$$E_r \leq T_{O_r}^k \leq G_r, k \in V, r \in R; \quad (23)$$

$$H_p \leq T_{D_p}^k \leq F_p, k \in V, p \in A; \quad (24)$$

$$\sum_{i \in N \setminus D^V} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij}^k \leq d_{O_k, D_k} (1 + \delta_k), k \in V; \quad (25)$$

$$y_r^k \in \{0, 1\}, k \in V, r \in R; \quad (26)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, k \in V, i \in N, j \in N, j \neq i. \quad (27)$$

其中: 式 (7) 表示匹配数量最大化; 式 (8) 表示司机平均满意度最大化; 式 (9) 表示乘客平均满意度最大化; 式 (10) 和 (11) 满足乘客和司机的独享模式要求; 式 (12) 和 (13) 满足乘客和司机的拼车模式要求; 式 (14) 表示每个乘客最多由一个司机服务; 式 (15) 表示乘客出发地和目的地节点的流守恒约束; 式 (16) 和 (17) 确保司机从其出发地出发, 并到达其目的地; 式 (18) 表示如果司机被分配给乘客, 则司机一定会到达乘客出发地; 式 (19) 表示如果司机到达乘客出发地, 则一定到达乘客目的地; 式 (20) 表示司机可提供的座位数量约束; 式 (21) 表示各节点的到达时间之间的关系; 式 (22) 和 (23) 表示司机和乘客的最早出发时间约束; 式 (24) 表示司机和乘客的最晚到达时间约束; 式 (25) 表示司机的最大绕路距离约束; 式 (26) 和 (27) 表示决策变量的取值范围.

2 算法设计

因为拼车模式的顺风车合乘问题属于 NP 难问题^[12], 且是服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题在不考虑独享模式和司乘双方服务模式偏好时的一种特殊情况, 所以本文提出的服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题属于 NP 难问题.

随着司机和乘客数量的增加, 问题的求解难度大大增加, 一般采用启发式算法求解. 考虑到模型 (7) ~ (27) 只有 3 个目标, 而 NSGA-II 在低纬度优化问题的求解中具有良好的速度和效率表现^[16], 因此

选择 NSGA-II 算法求解该模型. 本文对 NSGA-II 算法的相关步骤进行重新设计: 首先, 根据问题特点, 设计个体的编码方式; 其次, 为提高 NSGA-II 的搜索效率, 提出启发式规则构造初始种群; 最后, 为避免算法陷入局部最优, 在交叉、变异操作后加入局部搜索操作. 所设计的混合 NSGA-II 算法 (MNSGA-II) 的主要流程如图 1 所示.

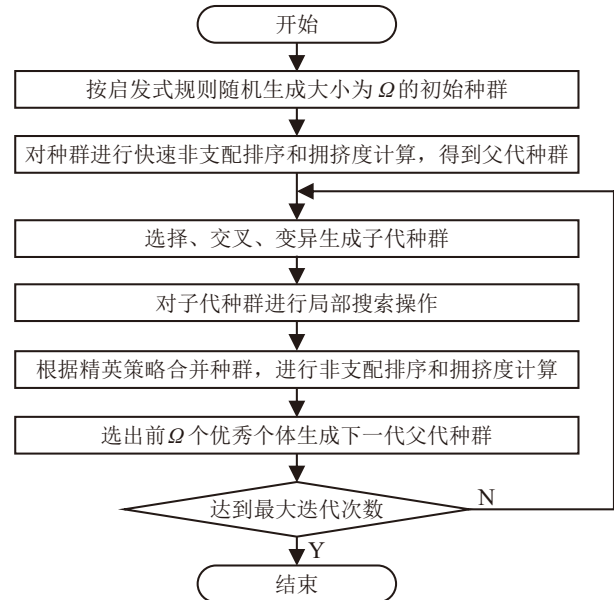


图1 算法流程

2.1 染色体编码

服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题有两个关键决策: 确定司乘匹配和规划司机接送顺序. 每条染色体由 5 个基因片段组成: 司机片段、匹配片段、搭载片段、运送片段和目标函数值片段. 司机片段采用二进制编码方式, 表示司机是否成功匹配, 片段长度为司机数量 K . 匹配片段、搭载片段和运送片段采用整数编码方式, 片段长度为乘客数量 J . 匹配片段的基因位取值范围为 $[1, K]$, 表示乘客匹配的司机. 搭载片段和运送片段是对乘客编号随机排列, 分别表示司机搭载和运送乘客的顺序. 目标函数值片段是合乘方案对应的各目标函数值, 片段长度为目标函数个数 3. 染色体长度为 $K + 3J + 3$.

2.2 初始种群生成

服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题的复杂约束导致可行解空间稀疏, 降低求解速度和质量. 因此, 本节设计生成初始种群的启发式规则如下.

step 1: 初始化未匹配司机集合 V^u 和未匹配乘客集合 R^u , 转至 step 2.

step 2: 随机从 V^u 中选择一个司机 V_k , 筛选满足 Q_k 和 B_k 的乘客, 进而找到符合 $E_r \geq E_k$ 且 $F_r \leq F_k$ 的乘客列表 $list_k$, $V^u \leftarrow V^u \setminus \{V_k\}$, 转至 step 3.

step 3: 判断 $list_k$ 是否为空集, 若 $list_k \neq \emptyset$, 则根据 Q_k 和 B_k 随机选择若干乘客 $R^k \in list_k$, $R^u \leftarrow R^u \setminus R^k$, 分别按 E_r 和 F_r 升序排列作为搭载和运送顺序, 更新染色体相应片段, 转至 step 4; 否则转至 step 2.

step 4: 判断 V^u 是否为空集, 若 $V^u \neq \emptyset$, 则转至 step 2, 否则转至 step 5.

step 5: 判断 R^u 是否为空集, 若 $R^u \neq \emptyset$, 则分配给匹配片段中未匹配的司机, 并按照要求随机生成染色体的相应基因位, 转至 step 6.

step 6: 计算目标函数值片段, 整合染色体, 结束.

2.3 选择操作

采用二元锦标赛方法作为选择策略, 每次随机选择两个染色体, 然后选择其中更好的一个进入下一代种群, 评价规则为: 优先选择非支配排序等级高的染色体; 如果排序等级一样, 则优先选择拥挤度大的染色体. 重复该操作, 直到下一代种群规模达到 Ω .

2.4 交叉操作

司机片段使用单点交叉, 匹配片段使用多点交叉, 搭载片段和运送片段使用部分匹配交叉.

2.5 变异操作

司机片段和匹配片段使用单点变异, 搭载片段和运送片段使用换位变异.

2.6 局部搜索操作

局部搜索操作是基于大规模邻域搜索算法^[17]中的破坏和修复思想, 具体步骤如下.

step 1: 令移除乘客数量为 α^R , 当前染色体 Θ 已匹配乘客集合 R^m . 判断 Θ 是否满足 $|R^m| \geq \alpha^R$, 若满足, 则随机移除一个乘客 $R_r \in R^m$, $R^m = R^m \setminus \{R_r\}$, $\alpha^R = \alpha^R - 1$, 转至 step 2, 否则转至 step 5.

step 2: 计算乘客 R_r 与 R^m 中所有乘客的相关性, 具体计算公式如下:

$$C_{rq} = \frac{1}{d_{D_r, D_q} / \max\{d_{D_r, D_q}\} + A_{rq}} \quad (28)$$

其中: $\forall q \in R^m$; A_{rq} 表示乘客 R_r 与 R_q 是否同乘一辆车, $A_{rq} = 1$ 表示二者同乘一辆车, 否则 $A_{rq} = 0$. 然后移除 R^m 中与 R_r 相关性最大的前 α^R 个乘客, 形成被破坏的合乘方案 $\bar{\Theta}$, 转至 step 3.

step 3: 在 $\bar{\Theta}$ 中找出每个被移除乘客的所有合理插入点, 即满足服务模式偏好、时间窗和司机可提供的座位数的基础上, 插入到哪条路径? 第几个被搭载? 若合理插入点个数不为 0, 则找出使乘客平均满意度增加最多的最优插入点, 转至 step 4; 否则转至 step 5.

step 4: 根据最优插入点将所有移除的乘客插回到 $\bar{\Theta}$ 中, 从而形成新合乘方案 Θ' , 计算 Θ' 的目标函数值并与 Θ 进行比较. 若 Θ' 的 3 个目标函数值均优于 Θ , 则按照 Θ' 对 Θ 进行更新, 否则转至 step 5.

step 5: 不对 Θ 进行更新, 结束.

3 数值实验

本文采用随机数据生成方法设计不同规模的测试实例. 所有节点分布在 50×50 km 范围内. 最早出发时间 E_p 在 $[7:00, 7:30]$ 范围内生成. 为符合现实, 令最早到达时间 $H_p = E_p + d_{O_p, D_p} / s$, 设置 $h_p = H_p + 10 \text{ min}$, $f_p = H_p + 30 \text{ min}$, $F_p = H_p + 40 \text{ min}$, $s = 50 \text{ km/h}$. 司机可提供座位数量 Q_k 和乘客乘车人数 L_r 在 $[1, 4]$ 范围内生成, 司机最大绕路系数 δ_k 在 $[0, 0.5]$ 范围内生成. 司机和乘客的服务模式偏好 B_p 在 $[0, 1]$ 范围内生成, 指标权重在 $[0, 1]$ 范围内生成. 所有测试以 Matlab 2020b 为编程环境, 在 AMD Ryzen 7 5800H 处理器, 内存 16 G 的 Windows 11 计算机上进行. 为避免单次实验的误差, 每个测试单独运行 10 次. 经过多次独立重复实验, 确定 MNSGA-II 算法参数设置如下: 种群规模 $\Omega = 80$, 最大迭代次数 $\varpi = 150$, 交叉概率 $p_c = 0.8$, 变异概率 $p_m = 0.15$, 惩罚值 $\Delta = 10\,000$, $\alpha^R = 2$.

3.1 算例分析

假设 10 个乘客和 10 个司机向顺风车合乘平台提交信息, 具体如表 1 和表 2 所示.

如图 2 所示, 由 MNSGA-II 求解模型 (7) ~ (27) 得到 10 组 Pareto 解. 各 Pareto 解对应的司乘匹配方案和目标函数值如表 3 所示.

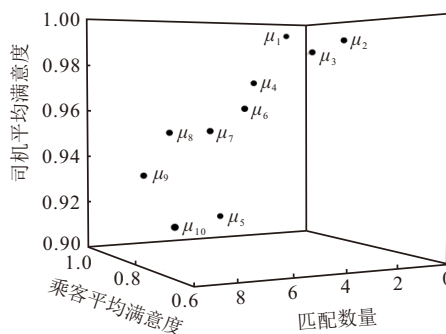


图2 Pareto 解分布散点图

由表 3 可见, 如果平台只考虑匹配数量最大化, 则应选择方案 μ_{10} , 从而会导致司机和乘客的满意度都比较低. 如果平台只考虑司机或乘客平均满意度最大化, 则应选择方案 μ_1 , 这会影响到匹配成功的合乘参与者数量和另一方参与者的满意度. 显然, 这两种选择匹配方案的角度都存在缺陷. 因此, 平台在制定最优司乘匹配方案时, 既要保障成功匹配的合乘参

表1 乘客的合乘需求信息

NO.	O_r	D_r	E_r	e_r	g_r	G_r	H_r	h_r	f_r	F_r	L_r	B_r	w_r^1	w_r^2
R_1	(40,6)	(38,16)	7:14	7:24	7:44	7:54	7:23	7:33	7:53	8:03	1	1	0.4	0.6
R_2	(3,20)	(21,27)	7:11	7:21	7:41	7:51	7:28	7:38	7:58	8:08	1	0	0.3	0.7
R_3	(28,11)	(15,25)	7:06	7:16	7:36	7:46	7:22	7:32	7:52	8:02	2	1	0.5	0.5
R_4	(10,38)	(26,23)	7:25	7:35	7:55	8:05	7:43	7:53	8:13	8:23	2	0	0.7	0.3
R_5	(32,35)	(31,17)	7:30	7:40	8:00	8:10	7:46	7:56	8:16	8:26	1	1	0.8	0.2
R_6	(7,18)	(30,36)	7:09	7:19	7:39	7:49	7:34	7:44	8:04	8:14	1	0	0.4	0.6
R_7	(13,19)	(22,17)	7:23	7:33	7:53	8:03	7:31	7:41	8:01	8:11	1	0	0.9	0.1
R_8	(22,38)	(37,22)	7:30	7:40	8:00	8:10	7:48	7:58	8:18	8:28	2	0	0.1	0.9
R_9	(24,7)	(49,28)	7:20	7:30	7:50	8:00	7:48	7:58	8:18	8:28	4	1	0.2	0.8
R_{10}	(12,48)	(15,45)	7:12	7:22	7:42	7:52	7:16	7:26	7:46	7:56	3	1	0.8	0.2

表2 司机的合乘供给信息

NO.	O_k	D_k	E_k	H_k	h_k	f_k	F_k	δ_k	Q_k	B_k	w_k^1	w_k^2
V_1	(39,6)	(14,30)	7:19	7:48	7:58	8:18	8:28	0.3	4	1	0.7	0.3
V_2	(44,8)	(7,17)	7:16	7:49	7:59	8:19	8:29	0.2	3	1	0.8	0.2
V_3	(4,50)	(26,43)	7:03	7:23	7:33	7:53	8:03	0.5	3	1	0.3	0.7
V_4	(50,25)	(5,48)	7:26	8:09	8:19	8:39	8:49	0.2	1	0	0.8	0.2
V_5	(7,20)	(4,11)	7:10	7:18	7:28	7:48	7:58	0.1	3	0	0.1	0.9
V_6	(1,22)	(39,31)	7:09	7:43	7:53	8:13	8:23	0.5	2	0	0.4	0.6
V_7	(38,48)	(24,6)	7:29	8:07	8:17	8:37	8:47	0.3	2	1	0.3	0.7
V_8	(43,15)	(3,27)	7:25	8:00	8:10	8:30	8:40	0.5	1	0	0.5	0.5
V_9	(0,43)	(40,13)	7:14	7:57	8:07	8:27	8:37	0.4	4	0	0.8	0.2
V_{10}	(34,0)	(50,43)	7:08	7:48	7:58	8:18	8:28	0.1	3	1	0.3	0.7

表3 司乘匹配方案和目标函数值

NO.	Z_1	Z_2	Z_3	司乘匹配方案
1	1	0.994	1	$\mu_1 = \{(V_7, \{R_5\})\}$
2	2	0.990	0.747	$\mu_2 = \{(V_7, \{R_5\}), (V_{10}, \{R_1\})\}$
3	3	0.985	0.769	$\mu_3 = \{(V_1, \{R_3\}), (V_7, \{R_5\}), (V_{10}, \{R_1\})\}$
4	4	0.972	0.878	$\mu_4 = \{(V_1, \{R_3\}), (V_6, \{R_2, R_6\}), (V_7, \{R_5\})\}$
5	5	0.913	0.912	$\mu_5 = \{(V_1, \{R_3\}), (V_2, \{R_1\}), (V_6, \{R_2, R_6\}), (V_7, \{R_5\})\}$
6	5	0.962	0.745	$\mu_6 = \{(V_1, \{R_3\}), (V_7, \{R_5\}), (V_9, \{R_4, R_8\}), (V_{10}, \{R_1\})\}$
7	5	0.953	0.772	$\mu_7 = \{(V_1, \{R_3\}), (V_3, \{R_{10}\}), (V_6, \{R_2, R_6\}), (V_7, \{R_5\})\}$
8	6	0.952	0.822	$\mu_8 = \{(V_1, \{R_3\}), (V_6, \{R_2, R_6\}), (V_7, \{R_5\}), (V_9, \{R_4, R_8\})\}$
9	7	0.935	0.819	$\mu_9 = \{(V_1, \{R_3\}), (V_2, \{R_1\}), (V_6, \{R_2, R_6\}), (V_7, \{R_5\}), (V_9, \{R_4, R_8\})\}$
10	8	0.921	0.612	$\mu_{10} = \{(V_1, \{R_3\}), (V_2, \{R_1\}), (V_3, \{R_{10}\}), (V_6, \{R_2, R_6\}), (V_7, \{R_5\}), (V_9, \{R_4, R_8\})\}$

与者数量, 还要兼顾司乘双方满意度. 另一方面, 如表3所示, 部分司机和乘客未成功参与顺风车合乘. 例如, 司机 V_5 由于合乘路线超过其最大绕路距离未匹配到乘客; 乘客 R_2 由于合乘路线不满足其时间窗未匹配到司机. 若在匹配方案中强行给这些司机和乘客匹配合乘对象, 则由于不满足其个性化偏好反而会对平台失去信任, 导致平台面临用户流失风险.

3.2 算法对比

为分析 MNSGA-II 的求解质量和计算效率, 将其与经典 NSGA-II^[16]、多目标粒子群算法 (MOPSO)^[18] 进行仿真对比. 与经典 NSGA-II 比较, 可验证生成初

始种群的启发式规则和局部搜索操作的有效性. 此外, MOPSO 因收敛快、易实现等特点, 被广泛应用且效果显著, 因此本文选择 MOPSO 作为对比算法. 经典 NSGA-II 相关参数设置与 MNSGA-II 相同. MOPSO 相关参数为 $w = 0.4, c_1 = 2, c_2 = 2$.

本文选择解集覆盖率^[19]、世代距离^[18]和空间评价方法^[16]作为指标, 对比分析 3 种算法求得解集的广泛性、收敛性、分布均匀性. 令 $\psi_i \in \{\text{MNSGAII}, \text{NSGA-II}, \text{MOPSO}\}$, ϕ_{ψ_i} 表示算法 ψ_i 得到的非支配解集, P^* 表示帕累托前沿, $|P^*|$ 表示 P^* 中解的个数. 由于帕累托前沿难以确定, 本文将 3 种算法求得的

解集进行组合, 筛选出该组合解集的帕累托前沿作为 P^* . 3 个指标表达式如下:

$$C(\phi_{\psi_i}, P^*) = \frac{|\{x \in P^* | \exists y \in \phi_{\psi_i} : y \succeq x\}|}{|P^*|}, \quad (29)$$

其中 $C(\phi_{\psi_i}, P^*) \in [0, 1]$. 解集覆盖率 $C(\phi_{\psi_i}, P^*)$ 越大, 解集 ϕ_{ψ_i} 的质量越高.

$$GD(\phi_{\psi_i}, P^*) = \frac{\sum_{x \in \phi_{\psi_i}} d(x, P^*)}{|\phi_{\psi_i}|}, \quad (30)$$

其中 $d(x, P^*)$ 是点 $x \in \phi_{\psi_i}$ 到 P^* 的最小欧氏距离. 世代距离 $GD(\phi_{\psi_i}, P^*)$ 越小, 解集 ϕ_{ψ_i} 越接近 P^* .

$$S(\phi_{\psi_i}) = \sqrt{\frac{1}{|\phi_{\psi_i}| - 1} \sum_{i=1}^{|\phi_{\psi_i}|} (\bar{d} - d_i)^2}. \quad (31)$$

其中: d_i 为解集 ϕ_{ψ_i} 中第 i 个点到其他点的最小欧氏距离, \bar{d} 为所有 d_i 的均值. 空间评价指标 $S(\phi_{\psi_i})$ 越小, 解集 ϕ_{ψ_i} 越均匀.

表 4 展示了算法性能对比结果. 结果显示: 1) 对比非支配解数量可知, MNSGA-II 在 7 种规模实例中搜索的 Pareto 解个数均多于 NSGA-II 和 MOPSO, 表明 MNSGA-II 具有更强的寻优能力; 2) 从解集覆盖率的角度分析, MNSGA-II 的解集覆盖率明显大于其他算法, 表明 MNSGA-II 求得的非支配解集在支配性方面优于对比算法; 3) 在世代距离方面, MNSGA-II 的世代距离在 7 种规模实例上均小于其他算法, 表明 MNSGA-II 具有更好的收敛性; 4) 在空间评价方法方面, MNSGA-II 的空间评价指标明显小于 NSGA-II 和 MOPSO, 表明 MNSGA-II 非支配解集的分布均匀性较好; 5) 在运行时间方面, MOPSO 和 NSGA-II 略有优势, 但 3 种算法差别不大. 综上所述, 本文提出的 MNSGA-II 算法与其他方法相比能够有效地求解服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题.

3.3 最大绕路系数的影响

本节使用规模为 20×20 的数据集测试最大绕路系数 δ_k 对匹配结果的影响. 将最大绕路系数设置为 0.1、0.3、0.5, 求得的帕累托解集如图 3 所示. 结果

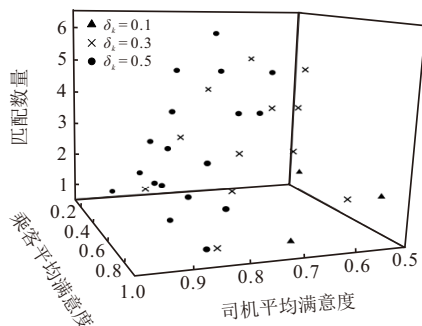


图3 最大绕路距离的影响

表4 算法性能对比结果

评价指标	规模	MNSGA-II	NSGA-II	MOPSO
非支配解数量	10×10	9	7	4
	20×20	14	11	7
	30×30	22	19	9
	40×40	28	24	12
	50×50	31	27	14
	75×75	65	53	29
	100×100	89	68	35
解集覆盖率	10×10	0.76	0.16	0.08
	20×20	0.72	0.19	0.09
	30×30	0.69	0.22	0.09
	40×40	0.73	0.18	0.09
	50×50	0.67	0.22	0.10
	75×75	0.71	0.21	0.08
	100×100	0.74	0.19	0.07
世代距离	10×10	1.33e-04	3.89e-03	3.57e-03
	20×20	1.45e-04	4.14e-03	3.90e-03
	30×30	1.26e-04	4.49e-03	3.23e-03
	40×40	1.61e-04	5.36e-03	3.48e-03
	50×50	1.58e-04	4.72e-03	3.36e-03
	75×75	1.87e-04	5.52e-03	3.40e-03
	100×100	1.79e-04	3.52e-03	3.21e-03
空间评价方法	10×10	3.99e-01	6.73e-01	7.96e-01
	20×20	4.75e-01	5.81e-01	7.89e-01
	30×30	5.37e-01	6.47e-01	7.46e-01
	40×40	5.21e-01	7.36e-01	8.28e-01
	50×50	4.81e-01	7.22e-01	8.52e-01
	75×75	5.45e-01	7.93e-01	9.08e-01
	100×100	4.36e-01	7.87e-01	8.80e-01
运行时间/s	10×10	2.63	2.14	1.68
	20×20	3.57	2.83	1.95
	30×30	4.01	3.26	2.20
	40×40	5.86	4.69	3.32
	50×50	6.69	5.87	3.86
	75×75	11.94	10.57	6.73
	100×100	19.45	18.07	12.47

显示, 随 δ_k 增加, 合乘方案的表现更好. 这是由于 δ_k 增加导致可行匹配数量的增加, 进而对匹配数量、司机平均满意度和乘客平均满意度产生积极作用.

4 结论

近年来, 顺风车合乘的司乘匹配问题相关研究已初具规模, 但兼顾平台、司机、乘客的研究并不多, 关于独享和拼车两种模式同时存在情形下考虑司机和乘客具有服务模式偏好的研究更是所见甚少. 因此, 本文针对服务模式偏好下顺风车合乘的司乘匹配问题, 提出了一种基于优化建模的司乘匹配方法. 与已有研究成果相比, 所提出的方法考虑了司机和乘客对不同服务模式的偏好, 在保证平台匹配率的同时, 兼顾司乘双方的个性化需求, 以弥补以往研究中没有考虑司机和乘客满意度的不足. 所提出的方

法可嵌入到实际的顺风车合乘平台中,如滴滴顺风车、嘀嗒出行等,为平台的司乘匹配决策支持系统提供模型及算法支持,对促进共享出行行业的发展具有一定参考价值.但研究也存在一定的局限性,例如仅考虑了车辆匀速行驶,未来将进一步研究车辆速度不同、高峰通勤时段道路拥堵等情形,还可以进一步基于实际数据进行司乘匹配的研究.

参考文献 (References)

- [1] Guo Y H, Zhang Y, Boulaksil Y, et al. Modelling and analysis of online ride-sharing platforms — A sustainability perspective[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 304(2): 577-595.
- [2] 肖玲玲, 吴玉雪, 郭名. 基于活动的拼车通勤行为及效用均衡分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(6): 1496-1506.
(Xiao L L, Wu Y X, Guo M. Activity-based carpool commuting behavior and utility equilibrium analysis[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2021, 41(6): 1496-1506.)
- [3] 人民数据. 2014-2020 年中国顺风车行业发展蓝皮书 [EB/OL]. (2020-06-09)[2024-03-08]. <http://h5.ppj.io/DXGdtbri/index.html?v=2>.
- [4] 汪佳禾, 张雨彤, 王锦诚, 等. 基于 Kano-QFD 模型的顺风车平台优化设计研究[J]. *交通运输研究*, 2022, 8(3): 85-93.
(Wang J H, Zhang Y T, Wang J C, et al. Optimization design of ride-sharing platform based on Kano-QFD model[J]. *Transport Research*, 2022, 8(3): 85-93.)
- [5] Tafreshian A, Masoud N. Trip-based graph partitioning in dynamic ridesharing[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 532-553.
- [6] Zhao R, Jin M Z, Ren P Y, et al. Stable two-sided satisfied matching for ridesharing system based on preference orders[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2020, 76(2): 1063-1081.
- [7] 马瑞民, 姚立飞. 基于双边理论的顺风车稳定匹配优化[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(4): 131-141.
(Ma R M, Yao L F. Optimization of ride-sharing stable matching based on two-side theory[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(4): 131-141.)
- [8] Chau S C K, Shen S N, Zhou Y. Decentralized ride-sharing and vehicle-pooling based on fair cost-sharing mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(3): 1936-1946.
- [9] Tafreshian A, Masoud N. A traveler incentive program for promoting community-based ridesharing[J]. *Transportation Science*, 2022, 56(4): 827-847.
- [10] Silva B C H, Fernandes I F C, Goldbarg M C, et al. Quota travelling salesman problem with passengers, incomplete ride and collection time optimization by ant-based algorithms[J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 120: 104950.
- [11] Sun Y S, Chen Z L, Zhang L. Nonprofit peer-to-peer ridesharing optimization[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 142: 102053.
- [12] Boysen N, Briskorn D, Schwerdfeger S, et al. Optimizing carpool formation along high-occupancy vehicle lanes[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 293(3): 1097-1112.
- [13] Yao R, Bekhor S. A dynamic tree algorithm for peer-to-peer ridesharing matching[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2021, 21(4): 801-837.
- [14] 郭羽含, 刘永武. 动态车辆共乘问题的双模式协作匹配算法[J]. *计算机研究与发展*, 2022, 59(7): 1533-1552.
(Guo Y H, Liu Y W. Bimodal cooperative matching algorithm for the dynamic ride-sharing problem[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2022, 59(7): 1533-1552.)
- [15] 董纪阳, 何万里. 集中通勤接送服务的最小化成本模型及算法[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(12): 28-34.
(Dong J Y, He W L. Minimizing costs model and algorithm of centralized commute[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(12): 28-34.)
- [16] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [17] Wu G H, Li B J, Yuan Y F, et al. Multi-platform collaborative firepower allocation method based on task decomposition and reinforcement learning[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(5): 1727-1735.
- [18] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 256-279.
- [19] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 257-271.

作者简介

郑婷文 (1997-), 女, 博士生, 主要研究方向为服务系统设计与优化, E-mail: tw.zheng@outlook.com;

姜艳萍 (1968-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为服务系统设计与优化, E-mail: ypjiang@mail.neu.edu.cn;

苏华宇 (1996-), 女, 硕士生, 主要研究方向为服务系统设计与优化, E-mail: 1163590845@qq.com;

高展 (1996-), 女, 博士生, 主要研究方向为服务系统设计与优化, E-mail: 2010454@stu.neu.edu.cn.