

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2026.03.002

考虑司机工作强度的数智出行平台可持续服务运营模式优化^①

田 琮^{1,2}, 陈晓静^{1,3*}

(1. 北京航空航天大学经济管理学院、复杂系统分析与决策教育部重点实验室, 北京 100191;
2. 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院, 杭州 311100; 3. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029)

摘要: 本研究以强化出行平台社会责任,合理调控司机工作强度,保障出行服务的经济收益为导向,提出了以预约出行服务为主导,辅以即时出行服务的数智出行平台可持续运营模式. 构建了两阶段 0-1 混合整数规划模型,阶段 I 面向预约出行乘客,基于司机工作强度,定制了服务线路;阶段 II 考虑乘客失约现象,实现了即时出行需求匹配. 鉴于两阶段模型复杂度不同,针对阶段 I 模型,分别采用了基于列生成的启发式算法(CG-BH),以及基于自适应大邻域搜索及模拟退火的混合元启发式算法(ALNS-SA)进行求解;采用 Gurobi 对阶段 II 模型进行求解. 数值实验:验证了两阶段模型的合理性;对比 Gurobi 及 CG-BH 算法,指出了 ALNS-SA 算法在均衡求解质量及求解速率上的优越性;量化了司机数量及空车时长惩罚变化对实验结果的影响;表明了该方法不仅可以合理调控司机的工作强度,还可以为其匹配工作强度范围内的个性出行服务线路,且服务可行优质乘客的收益高于失约乘客的损失. 研究为数智出行平台可持续服务运营模式的发展提供了管理见解.

关键词: 数智出行平台; 社会责任; 司机工作强度; 经济收益; 可持续服务运营模式

中图分类号: U695 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2026)03-0016-17

0 引言

滴滴、高德、花小猪等出行平台的兴起,极大地提高了乘客出行的便利性. 从时间维度上,乘客的出行需求可以分为即时出行和预约出行两类^[1]. 即时出行是指乘客在短时间内需要获得平台提供的出行服务. 预约出行是指乘客提前制定出行计划,平台指派司机在预定的时间与地点,为乘客提供出行服务. 根据访谈结果可知:目前,即时出行服务仍是多数平台的核心业务,部分平台根据司机所获得的乘客好评程度,调整其被派遣

预约出行订单的概率. 因此,在即时出行服务结束时,司机通常会询问乘客是否可以给予服务好评,以期提高派单优先级,获得更多的预约出行订单.

《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》^[2]及美国联邦汽车运输安全管理局^[3],均规定了司机服务时长. 例如,我国机动车驾驶人不得连续驾驶机动车超过 4 h 未停车休息,或者停车休息时间少于 20 min;美国驾驶员在连续 8 h 休息后,最多可以驾驶 10 h. 然而,访谈结果显示,在目前即时出行服务为主导的运营模式下,出租车及网约车

① 收稿日期: 2025-07-31; 修订日期: 2025-11-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(72394374); 国家自然科学基金资助基础科学中心项目(72288101); 国家自然科学基金资助青年项目(72301014); 中国博士后科学基金资助项目(2023M730165); 国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20233370).

通讯作者: 陈晓静(1990—),女,山东烟台人,博士,副教授. Email: xjchen01101@126.com

② https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5468932.htm

③ <https://www.fmcsa.dot.gov/regulations/hours-of-service>

司机的工作强度仍较大. 仍有大量的司机, 例如, 北京的非京籍司机, 为了增加经济收益, 以减少休息时长为代价, 选择长时间在线接单, 其疲劳驾驶模式无法得到缓解. 这不仅危害了司机的身心健康, 也导致交通事故发生概率的上升^[2-4]. 此外, 在目前即时出行服务为主导的运营模式下, 司机在未接到平台派单或抢单失败时, 会陷入空载状态, 这增加了司机的无效(无法产生经济收益)工作时长.

不同于即时出行服务, 在预约出行服务中, 平台可基于乘客的出行信息, 提前制定考虑司机工作强度并减少空载时长的服务线路. 然而, 如何减少乘客失约现象带来的经济损失, 是预约出行服务中的管理难点. 基于此, 本研究提出了一种考虑司机工作强度的数智出行平台可持续服务运营模式(见图1), 主要创新点为: 在平台承担社会责任的驱动下, 以预约出行服务为主导, 兼顾即时出行服务, 主动调控了司机的工作强度; 考虑失约乘客的时空属性, 当即时出行乘客匹配成功时, 可缓解或对冲失约乘客引起的经济损失. 具体而言: 建立了两阶段0-1混合整数规划模型; 对比了Gurobi、基于列生成的启发式算法, 以及基于自适应大邻域搜索及模拟退火的混合元启发式算法, 提升了模型的求解性能; 通过一系列数值实验, 量化了司机数量及空载时长惩罚对出行服务经济收益、司机累计工作时长及其调度公平性等指标的影响; 分析了所提出的方法在优化司机连续驾车时长、休息及累计工作时长方面的性能; 指出了基于优化所得的出行服务线路, 可考虑司机的异质性, 为其匹配工作强度范围内的个性出行服务线路; 并基于失约乘客的出行属性, 拟合了即时出行服务经济收益函数, 评估了失约乘客产生的经济损失, 支撑了可行优质即时出行乘客的筛选, 促进了出行服务经济收益的可持续发展.

1 文献综述

近年来, 针对即时出行的研究较为丰富^[5-7], 与预约出行相关的研究多聚焦于公共交通领域^[8,9]. 本研究考虑出行平台的司机工作强度, 以预约出行服务为主导, 兼顾即时出行服务, 从而强化平台社会责任, 并保障出行服务经济收益的可

持续发展.

一些学者关注了预约出行研究. Zhao等^[10]提出了一种名为市中心空间预订系统的出行需求管理策略, 旨在通过预约机制缓解市中心警戒线区域的交通拥堵, 建立了整数规划模型, 优化了由车辆占用率、出发时间和行程长度等因素决定的车辆与行程组合, 并采用人工神经网络构建了实时决策的智能模块. Ma等^[11]提出了一个自动驾驶车辆共享和预订系统, 在该系统中出行者可提前预约自动驾驶汽车出行服务, 基于线性规划模型及共享和预订系统网络构建, 高效求解了自动驾驶汽车出行链及所需车队规模的最优解. Lu等^[12]针对服务预约乘客的油车和电动汽车的出租车队调度问题, 创新了多层出租车流时间-空间网络, 并基于时间-空间网络开发了一个最小化出租车队总运营成本的优化模型, 并采用基于分解的启发式算法进行求解. Xu等^[13]构建了一个智能出租车预约调度系统, 旨在缩短乘客等待时间和减少车辆空驶距离, 该系统基于两个独立的预测模型, 分别预测了出租车的需求和目的地的概率分布, 并将车辆调度问题构建为了一个混合整数规划模型. Masmoudi等^[14]研究了带有电动汽车和电池更换站的约车问题, 其在一定规划时间内, 安排一队车辆服务一组预先指定的运输请求, 并提出了三种进化变邻域搜索算法进行求解. Geržinić等^[15]通过对荷兰城市地区按需出行服务需求的调查和分析, 揭示了不同用户群体对按需出行服务的态度和潜在需求. 杨晓光等^[16]指出了预约出行对行程时间可靠性要求高, 交通控制需兼顾路网整体效益与预约车辆优先通行, 未来应推动交通控制与服务型交通管理技术融合, 助力预约出行高效落地.

一些学者从不同视角探讨了网约车与巡游车(出租车)平台的定价策略及其经济收益影响. 郭敏和李肖楠^[17]考虑了乘客取消订单行为, 构建供需不平衡状态下的定价模型, 发现通过设置合理违约机制和提升服务质量, 可降低取消率、提高利润. Wang等^[18]探索了网约车订单派遣与定价策略, 考虑了乘客取消行为的影响, 在假设平台对乘客服务估值和司机保底收益率了解有限的情况下, 建立了一个包含乘客、司机与平台三方动态决策的双周期随机规划模型, 并通过贪心近似方法

分析了不同定价机制对匹配概率、平台收益和派单决策的影响。姜依依等^[19]基于双边平台模型,分析了不同定价机制(双边定价、固定分成、最低工资)对司机福利与平台利润的影响,指出合理牺牲部分利润可显著提升司机与乘客福利,实现平台盈利与社会责任平衡。李想等^[20]提出了网约车竞争下巡游车的定价策略,采用 Stackelberg 博弈模型,指出巡游车应通过降低起步价和里程价,在短途和长途市场中形成竞争均衡,以维持其市场地位。

综上所述,目前关于预约出行的研究重点聚焦于系统优化、调度策略设计、车辆线路规划,以及交通控制等,也有部分学者关注了乘客行为、司机福利与平台定价研究。通过文献梳理可以发现,采用运筹优化方法,实现以出行平台承担社会责任为主导,合理调控司机工作强度,并保障出行服务经济收益可持续发展的研究仍待深入探索。

2 问题描述

本研究面向未来交通场景,即,针对网约车及出租车平台,探索了未来数智出行平台可持续服务运营模式的构建:预约出行服务为主导,兼顾即时出行服务的运营模式。在此运营模式下,司机以预约出行服务为主营业务,在预约出行服务累计时长低于其累计工作时长上限时,司机也可同时

承担即时出行服务。最终在平台调度下,优化调控司机的预约出行及即时出行服务的工作强度。此外,针对失约乘客,平台为司机匹配即时出行乘客,当即时出行乘客匹配成功时,可对冲或缓解失约乘客带来的经济损失。因此,预约出行服务为主导,兼顾即时出行服务的运营模式不仅可以调控司机的工作强度,也可以兼顾司机及平台经济收益的可持续发展,其运营模式机理如下。

2.1 预约出行服务为主导的运营模式

如图1所示,在预约出行服务为主导,兼顾即时出行服务的运营模式中,有足够的司机参与出行服务,平台将根据预约出行乘客生成离线调度,以司机始发地及预约出行服务线路始发地的就近匹配为原则,将司机与预约出行服务线路相匹配。例如,线路1和线路3分别与司机3和司机5匹配,同一线路中的乘客被标识了相同的颜色。此外,预约出行服务中需考虑四类基础弧:出发弧、到达弧、不包含休息时间的工作弧及包含休息时间的工作弧。基于不同的弧,可构建统计司机连续驾车及累计工作时间的约束条件。具体而言,预约出行服务线路需保障一个工作日内,司机的连续驾车时长不超过4h并至少休息20min,至少休息8h(累计工作时长不超过16h),预约出行服务线路中考虑空载时长惩罚,从而促进司机及平台经济收益的可持续发展。

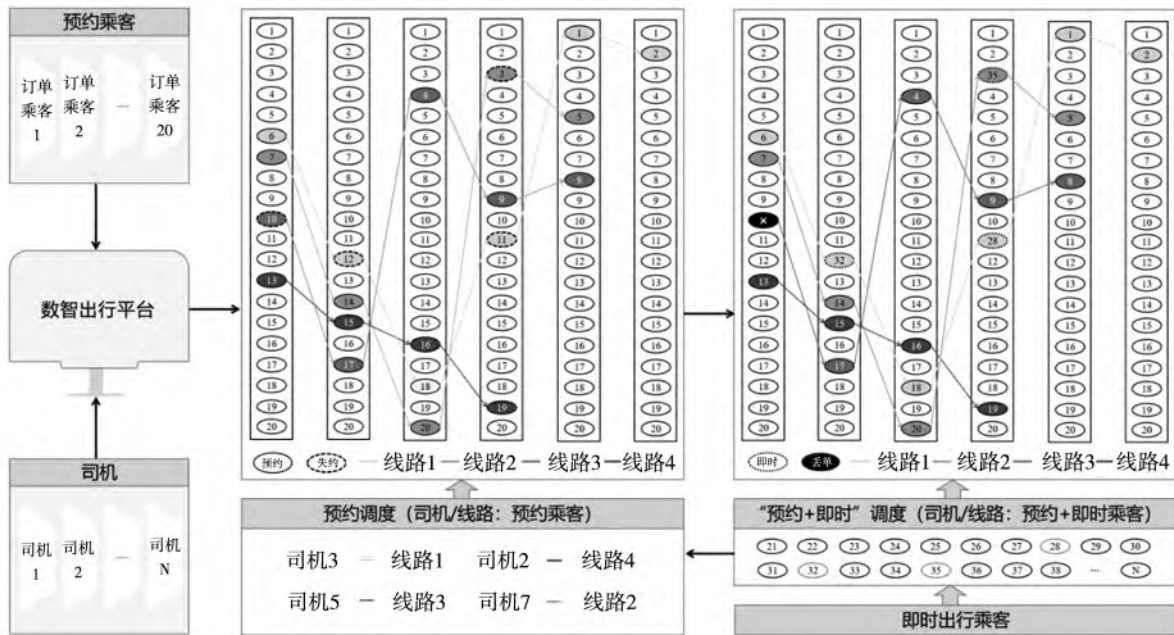


图1 考虑司机工作强度的数智出行平台可持续服务运营模式机理

Fig. 1 The mechanism of sustainable service operation mode for intelligent mobility platforms considering driver workload

2.2 兼顾即时出行服务的运营模式

在数智出行平台可持续服务运营模式中,当司机预约出行服务的累计工作时长远低于其可以承受的工作强度上限时,考虑到司机及平台的经济收益,提出了兼顾即时出行服务的运营模式,即,司机在完成预约出行服务的其他时段内,可兼顾即时出行服务

$$O(m) \Leftarrow \{d_{p,o} \leq \mathfrak{R}(\Delta); (\zeta_o(\cdot) - \zeta_p(\cdot)) \times \Theta_{p,j}^o \geq 0\} \quad (1)$$

此外,为了提升数智出行平台可持续服务运营模式的鲁棒性,进一步考虑乘客失约现象.假设 m 时刻,线路1、线路2、线路3的部分预约乘客失约(见图1).如式(1)所示,基于该失约乘客 p 及其后被续接服务的乘客 j 的预约出行时间、空间属性及其引起的经济损失属性,构建 m 时刻即时出行乘客候选集 $O(m)$ (相关符号说明如表1所示). $\Theta_{p,j}^o = 0$,从空间属性上约束了优质即时出行乘客候选集:即时出行乘客始发地到失约乘客始发地的距离在一定范围内. $\Theta_{p,j}^o = 1$,进一步从

经济收益属性上约束了优质即时出行乘客的候选集:优质即时出行乘客所产生的经济收益不低于失约乘客引起的经济损失.此外,即时或优质即时出行乘客是否可被匹配至预约线路中(是否可行),需从其出行时间属性上加以限制:即时出行乘客的出发时间不早于失约乘客的出发时间;即时出行乘客的到达时间小于续接服务乘客的出发时间.基于此,如图1所示,平台可在已有预约出行服务基础上,为缓解失约乘客造成的经济损失,兼顾即时出行需求的实时匹配,并考虑司机即时出行服务工作时长的优化,为线路1、线路2、线路3的司机更新服务线路.例如,线路1和线路2中,失约乘客的服务位置分别被匹配了可行的即时出行乘客,线路3中的失约乘客位置未被匹配可行的即时出行乘客.

3 模型构建

3.1 符号说明

符号说明如表1所示.

表1 符号说明
Table 1 Symbol description

类型	符号	含义
集合	\tilde{M}	即时出行时刻集合,由 m 索引, $\tilde{M} = \{0, 5, 10, \dots, m, \dots, \tilde{M} \}$
	V	预约出行乘客集合,由 i, j 和 p 索引, $V = \{1, 2, 3, \dots, i, j, p, \dots, V \}$
	E	司机集合,由 e 索引, $E = \{1, 2, 3, \dots, e, \dots, E \}$
	H	司机始发地(目的地)集合,每个司机 e 对应一个始发地 h (目的地 h'),由 h, i, j 和 h' 索引, $H = \{h, i, j, h' \mid i, j \notin V\}$
	$O(m)$	时刻 m 的即时出行乘客集合,由 o 索引, $O(m) = \{1, 2, 3, \dots, o, \dots, O_m \mid m \in \tilde{M}\}$
	AS	不包含休息时间的工作弧集合,由 $(h, i), (i, j)$ 和 (j, h) 索引, $AS = \{(h, i), (i, j), (j, h) \mid i, j \in V; h, h' \in H; 0 \leq k_{i,j} - \lambda_{i,j} < \sigma\}$
	AR	包含休息时间的工作弧集合,由 (i, j) 索引, $AR = \{(i, j) \mid i \in V; j \in V \cup H \setminus \{h\}; k_{i,j} - \lambda_{i,j} \geq \sigma\}$
	ASR	所有可行弧集合, $ASR = AS \cup AR$
	AD	出发弧集合, $AD \in AS$, 由 (i, j) 索引, $AD = \{(i, j) \mid i \in H \setminus \{h\}, j \in V\}$
	AA	到达弧集合, $AA \in ASR$, 由 (i, j) 索引, $AA = \{(i, j) \mid i \in V, j \in H \setminus \{h\}\}$
	AM	其他弧集合, $AM = ASR - AA$
	$V(m)$	时刻 m 失约的乘客集合, $V(m) \in V$, 由 i 和 p 索引
参数	$c_{i,j}$	可持续服务运营模式下,预约出行乘客 i, j 被服务产生的经济收益
	Γ	司机累计工作时长上限
	Π	司机连续驾车时长上限
	σ	达到司机连续驾车时长上限后,司机的最小休息时长
	$d_{p,o}$	预约出行乘客 p (失约) 与即时出行乘客 o 间的距离
	$t_p^d(t_o^d)$	预约出行乘客或即时出行乘客的出发时间
	$t_p^a(t_o^a)$	预约出行乘客或即时出行乘客的到达时间, $t_p^a > t_p^d(t_o^a > t_o^d)$
	$t_j(t_o)$	预约出行乘客或即时出行乘客被服务的时长

续表 1

Table 1 Continues

类型	符号	含义
参数	Y_e	司机 e 的预约出行服务时长
	τ	即时出行乘客可接受的延迟出行上限
	\tilde{c}	即时出行服务下的单位时长运营收益
	\hat{c}	即时出行服务下的单位时长空载驾驶成本
	$k_{i,j}$	预约出行乘客 i (结束服务时间) 和 j (开始服务时间) 间的工作时长
	$\lambda_{i,j}$	预约出行乘客 i (目的地) 和 j (始发地) 间的驾车时长
	$\lambda_{p,o}$	预约出行乘客 p (始发地) 和即时出行乘客 o (始发地) 间的驾车时长
	$\lambda_{o,j}$	即时出行乘客 o (目的地) 和预约出行乘客 j (始发地) 间的驾车时长
	$\zeta_o(\cdot)$	即时出行乘客 o 被服务时产生的经济收益
	$\zeta_p(\cdot)$	预约出行乘客 p 失约时产生的经济损失
	$\mathfrak{R}(\Delta)$	基于失约乘客 p 的即时出行乘客始发地匹配半径上限
	$\eta_{e,m}^p$	0-1 参数, 如果预约出行乘客 p 在时刻 m 失约, $\eta_{e,m}^p = 1$; 否则, $\eta_{e,m}^p = 0$
	$g_{i,j}$	0-1 参数, 服务完预约出行乘客 i 是否可以服务乘客 j , 如果 $k_{i,j} - \lambda_{i,j} \geq 0, g_{i,j} = 1$; 否则, $g_{i,j} = 0$
	$\Theta_{p,j}^o$	0-1 参数, 如果 $\zeta_o(\cdot) \geq \zeta_p(\cdot)$, $\Theta_{p,j}^o = 1$; 否则, $\Theta_{p,j}^o = 0$
	M	足够大的正数
变量	$x_{i,j,e}$	0-1 变量, 如果预约出行乘客 i 和 j 可以被司机 e 接续服务, $x_{i,j,e} = 1$; 否则, $x_{i,j,e} = 0$
	$\xi_{e,m}^o$	0-1 变量, 如果即时出行乘客 o 在时刻 m 被司机 e 服务, $\xi_{e,m}^o = 1$; 否则, $\xi_{e,m}^o = 0$
	$h_{j,e}$	连续变量, 司机 e 服务完预约出行乘客 j 的连续驾车时长
	$\ell_{j,e}$	连续变量, 司机 e 服务完预约出行乘客 j 的累计工作时长
	ϕ_e	连续变量, 除预约线路外司机 e 的即时出行服务时长

3.2 模型构建

3.2.1 阶段 I 模型

$$\max \sum_{e \in E} \sum_{(i,j) \in ASR} x_{i,j,e} \times c_{i,j} \quad (2)$$

s. t.

$$x_{i,j,e} \leq g_{i,j} \quad \forall (i,j) \in ASR, e \in E \quad (3)$$

$$\sum_{(h,j) \in ASR} x_{h,j,e} \leq 1 \quad \forall e \in E \quad (4a)$$

$$\sum_{(h,j) \in ASR} x_{h,j,e} = \sum_{(i,h) \in ASR} x_{i,h,e} \quad \forall e \in E \quad (4b)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{(i,j) \in ASR} x_{i,j,e} \leq 1 \quad \forall j \in V \quad (4c)$$

$$\sum_{(i,j) \in ASR} x_{i,j,e} = \sum_{(j,i) \in ASR} x_{j,i,e} \quad \forall j \in V, e \in E \quad (4d)$$

$$h_{i,e} = 0 \quad \forall (i,j) \in AD, e \in E \quad (5a)$$

$$h_{j,e} - t_j \leq (1 - x_{i,j,e}) \times M \quad \forall (i,j) \in AR, e \in E \quad (5b)$$

$$h_{j,e} - t_j \geq -(1 - x_{i,j,e}) \times M \quad \forall (i,j) \in AR, e \in E \quad (5c)$$

$$h_{j,e} - \bar{h}_{i,e} - \lambda_{i,j} - t_j \leq (1 - x_{i,j,e}) \times M \quad \forall (i,j) \in AS, e \in E \quad (5d)$$

$$h_{j,e} - \bar{h}_{i,e} - \lambda_{i,j} - t_j \geq -(1 - x_{i,j,e}) \times M \quad \forall (i,j) \in AS, e \in E \quad (5e)$$

$$t_j \times x_{i,j,e} \leq h_{j,e} \quad \forall i,j \in V \cup H, e \in E \quad (5f)$$

$$h_{j,e} \leq \Pi \quad \forall j \in V \cup H, e \in E \quad (5g)$$

$$\ell_{i,e} = 0 \quad \forall (i,j) \in AD, e \in E \quad (6a)$$

$$\ell_{j,e} - \ell_{i,e} - \lambda_{i,j} \leq (1 - x_{i,j,e}) \times M \quad \forall (i,j) \in AA, e \in E \quad (6b)$$

$$\ell_{j,e} - \ell_{i,e} - \lambda_{i,j} \geq -(1 - x_{i,j,e}) \times M \quad \forall (i,j) \in AA, e \in E \quad (6c)$$

$$\ell_{j,e} - \ell_{i,e} - k_{i,j} - t_j \leq (1 - x_{i,j,e}) \times M \quad \forall (i,j) \in AM, e \in E \quad (6d)$$

$$\ell_{j,e} - \ell_{i,e} - k_{i,j} - t_j \geq -(1 - x_{i,j,e}) \times M \quad \forall (i,j) \in AM, e \in E \quad (6e)$$

$$t_j \times x_{i,j,e} \leq \ell_{j,e} \quad \forall i,j \in V \cup H, e \in E \quad (6f)$$

$$\ell_{j,e} \leq \Gamma \quad \forall j \in V \cup H, e \in E \quad (6g)$$

$$x_{i,j,e} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in V \cup H, e \in E \quad (7a)$$

$$h_{j,e} \geq 0, \ell_{j,e} \geq 0 \quad \forall j \in V \cup H, e \in E \quad (7b)$$

式(2)保障了可持续出行服务运营模式下(强化平台社会责任),服务预约出行乘客产生的经济收益,其中 $c_{i,j}$ 的取值与司机的驾车服务时长及空车时长相关. 约束(3)限制了不同预约出行乘客间断接服务的可行性,即只有当司机服务完预约出行乘客 i ,空车前往预约出行乘客 j 的始发地的

到达时间,不晚于预约出行乘客 j 的出发时间时,乘客 i 和乘客 j 才能被续接服务. 约束 (4) 保证每个司机所对应的每条出行服务路径的连通性,保障了从事预约出行服务的司机从家出发并返回家. 通过区分司机的工作弧段属性 (AD, AA, AS, AR), 约束 (5) 限制了一个工作日内司机的连续驾车时长不超过 4 h, 并至少休息 20 min; 约束 (6) 则限制了一个工作日内司机的累计工作时长, 确保其在结束预约出行服务后, 至少休息 8 h. 约束 (5) 及约束 (6) 通过决策变量 $x_{i,j,e}$ 与目标函数式 (2) 联动, 协同考虑了平台的社会责任及经济收益. 约束 (7) 限制了变量类型及其取值范围.

3.2.2 阶段 II 模型

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{e \in E} \phi_e \times \tilde{c} + \sum_{e \in E} \sum_{o \in O(m)} \sum_{p \in V(m)} (\zeta_o(\cdot) \times \\ & \Theta_{p,j}^o + (\zeta_o(\cdot) - (\lambda_{p,o} + \lambda_{o,j}) \times \tilde{c}) \times \\ & (1 - \Theta_{p,j}^o)) \times \eta_{e,m}^p \times \xi_{e,m}^o \mid \forall (p,j) \in ASR, \\ & m \in \tilde{M} \end{aligned} \quad (8)$$

s. t.

$$\phi_e \leq \Gamma - Y_e \quad \forall e \in E \quad (9)$$

$$\sum_{e \in E} \xi_{e,m}^o \leq 1 \quad \forall m \in \tilde{M}, o \in O(m) \quad (10a)$$

$$\sum_{o \in O(m)} \xi_{e,m}^o \leq 1 \quad \forall e \in E, m \in \tilde{M} \quad (10b)$$

$$\eta_{e,m}^p \times \xi_{e,m}^o \times (t_p^d + \lambda_{p,o}) \leq t_o^d + \tau \quad \forall e \in E, \\ p \in V(m), o \in O(m), m \in \tilde{M} \quad (11a)$$

$$\eta_{e,m}^p \times \xi_{e,m}^o \times (t_o^a + \lambda_{o,j}) \leq t_j^d \quad \forall e \in E, \\ p \in V(m), (p,j) \in ASR, o \in O(m),$$

$$m \in \tilde{M} \quad (11b)$$

$$\xi_{e,m}^o \in \{0,1\} \quad \forall e \in E, o \in O(m),$$

$$m \in \tilde{M} \quad (12a)$$

$$\phi_e \geq 0 \quad \forall e \in E \quad (12b)$$

在预约出行服务为主导, 兼顾即时出行服务的运营模式中, 式 (8) 旨在最大化即时出行服务的经济收益. 对司机及平台而言, 服务不同的可行即时出行乘客可以获得不同的经济收益, 当可行的优质即时出行乘客被服务时, $\Theta_{p,j}^o = 1$; 当可行的非优质即时出行乘客被服务时, $\Theta_{p,j}^o = 0$. 可行的非优质即时出行乘客是否被服务, 受限于经济收益 $\zeta_o(\cdot)$ 与空载驾驶成本损失 $(\lambda_{p,o} + \lambda_{o,j}) \times \tilde{c}$ 间的逻辑关系. 约束 (9) 确保了司机 e 的即时出

行服务时长及预约出行服务时长不超过其累计工作时长上限. 约束 (10a) 限制了 m 时刻, 任意一位即时出行乘客最多被一位司机服务; 约束 (10b) 限制了 m 时刻, 每位司机最多服务一位即时出行乘客. 约束 (11) 从时间属性上辨识了即时出行乘客是否可被匹配至预约线路中(是否可行): 约束 (11a) 限制了被匹配的即时出行乘客 o 的出发时间, 即, 从失约乘客始发地出发至即时出行乘客始发地间的驾车时长, 应减少对即时出行乘客出发时间的影响; 约束 (11b) 限制了被匹配的即时出行乘客 o 的到达时间, 即, 从即时出行乘客目的地出发至下一位预约出行乘客始发地间的驾时长, 需不影响预约出行乘客的出发时间. 约束 (12) 限制了变量类型及其取值范围.

4 算法设计

4.1 CG-BH 算法

在一定的时间及空间范围约束下, 针对预约出行服务线路中的失约乘客, 可被作为失约乘客补位的即时出行乘客集为有限集, 并且在阶段 II 模型中仅涉及一个 0-1 变量及连续变量. 因此, 针对阶段 II 模型, 基于 Gurobi 可在短时间内获得最优解. 相比于阶段 II 模型, 阶段 I 模型的复杂度较高. 考虑阶段 I 模型特点, 根据 Dantzig-Wolfe 原理, 定义可行线路集 \mathcal{P} (每条可行线路由 ASR 集中的 (i,j) 弧组成), 并基于 α_j^r (0-1 参数, 如果出行乘客 j 属于线路 r , $\alpha_j^r = 1$; 否则, $\alpha_j^r = 0$), c_r (线路 r 的收益, $c_r = \sum_{(i,j) \in ASR(\mathcal{P})} c_{ij}$), 以及 \mathcal{D}_r^e (0-1 变量, 线路 r 被司机 e 服务, $\mathcal{D}_r^e = 1$; 否则, $\mathcal{D}_r^e = 0$), 可将阶段 I 模型进行重构. 重构模型的主问题如式 (13) ~ 式 (16) 所示, 进而可形成其松弛主问题 ($\mathcal{D}_r^e \geq 0$), 对偶问题 (对偶变量 π_j 及 μ_e), 以及定价子问题 ($\max c_r - \sum_{j \in V} \pi_j \times \alpha_j^r - \mu_e$), 并根据阶段 I 模型约束含义, 形成相关线路约束, 以及线路节点时长资源限制等约束

$$\max \sum_{r \in \mathcal{P}} \sum_{e \in E} c_r \times \mathcal{D}_r^e \quad (13)$$

s. t.

$$\sum_{r \in \mathcal{P}} \sum_{e \in E} \alpha_j^r \times \mathcal{D}_r^e \leq 1 \quad \forall j \in V \quad (14)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{P}} \mathcal{D}_r^e \leq 1 \quad \forall e \in E \quad (15)$$

$$\mathcal{D}_r^e \in \{0, 1\} \quad \forall r \in \mathcal{P}, e \in E \quad (16)$$

针对重构后的模型,采用基于列生成的启发式算法(CG-BH)进行求解:求解线性松弛主问题;通过嵌套式深度优先搜索算法生成可行服务线路;若子问题的检验数为正,则将对对应线路加入主问题中以扩充列集;若不存在检验数为正的线路,则已获得主问题的线性松弛最优解;基于Div-ing启发式机制^[21],构建综合评分函数(在线性松弛解中,变量越接近0.5越优先固定;对有助于提升目标函数值的变量赋予更高权重),以线性松弛解为指引逐步固定线路决策变量;同时,通过冲

突消除机制(司机与线路匹配的唯一性,乘客被服务唯一性)进一步收缩可行域,提高解的可行性与质量;最终,获得整数解。

4.2 ALNS-SA 算法

为兼顾阶段 I 模型的求解质量与计算效率,本文提出一种基于自适应大邻域搜索与模拟退火相结合的混合元启发式算法(ALNS-SA)。在该算法框架中,模拟退火机制通过以一定概率接受劣解,有效避免搜索过程陷入局部最优;而自适应大邻域搜索则根据算子历史表现动态调整破坏与修复算子的选择概率,从而保持搜索的多样性并实现对解空间的高效探索。

输入:乘客节点集 V ; 司机数量 m ; 参数 $P(C_{ij}, t_j, \lambda_{ij}, k_{ij})$ 及弧集合 AD, AA, AR, AS, ASR 等; 约束上限 $\varphi_{\max}, \psi_{\max}$; 最大迭代次数 N_{\max} ; 初始温度 T_0 , 冷却系数 α 。

Procedure ALNS-SA 主过程 ($V, m', P, N_{\max}, T_0, \alpha$)

```

 $S_0 \leftarrow$  初始解构造( $V, m', P$ ) ▷ 子过程
 $S_{\text{current}} \leftarrow S_0, S_{\text{best}} \leftarrow S_{\text{current}}$ 
 $f_{\text{current}} \leftarrow$  解评估( $S_{\text{current}}, P$ ),  $f_{\text{best}} \leftarrow f_{\text{current}}$ 
 $T \leftarrow T_0$ 
for iteration = 1 to  $N_{\max}$  do
     $S', V_{\text{removed}} \leftarrow$  Destroy Random( $S_{\text{current}}$ ) ▷ 随机破坏
     $S_{\text{new}} \leftarrow$  Repair Regret( $S', V_{\text{removed}}, P$ ) ▷ 基于增益/后悔插入的修复
     $f_{\text{new}} \leftarrow$  Evaluate( $S_{\text{new}}, P$ )
     $\Delta \leftarrow f_{\text{new}} - f_{\text{current}}$ 
    if  $\Delta \geq 0$  or Rand() <  $e^{\Delta/T}$  then ▷ SA 接受准则
         $S_{\text{current}} \leftarrow S_{\text{new}}, f_{\text{current}} \leftarrow f_{\text{new}}$ 
        if  $f_{\text{current}} > f_{\text{best}}$  then
             $S_{\text{best}} \leftarrow S_{\text{current}}, f_{\text{best}} \leftarrow f_{\text{current}}$ 
        end if
    end if
     $T \leftarrow \alpha \times T$  ▷ 降温
end for
return  $S_{\text{best}}$  (最优服务线路)

```

end Procedure

初始解构造(生成可行解):构造集合 $\Omega = \{0, n+1\}$, $PA = V \setminus \Omega$; 为 m' 个司机生成初始线路 S_0 ; 对每个乘客 $c' (c' \in PA)$ 尝试插入不同位置,若满足可行性(每条线路可行性检查(R', P) = True),则保留该插入;否则继续尝试;得到最优初始解。

解评估(计算给定解的目标函数值):初始化总收益, $TP = 0, PE = 0$, 定义线路 R 的最大连续驾车时长 h_R 及累计工作时长 ℓ_R , 惩罚权重 γ_φ 及 γ_ψ ; 遍历每条线路,基于阶段 I 模型的弧约束,更新其连续驾车及累计工作时长;针对线路 R 的每条弧

(u, v) , 收益累加 $TP \leftarrow TP + C_{uv}$; 遍历完成后, 若违反连续驾车或累计工作时长约束, 计算惩罚,

$$PE(S) = \sum_{R \in S} [\gamma_{\varphi} \times \max(0, \bar{h}_R - \varphi_{\max}) / \varphi_{\max} + \gamma_{\psi} \times \max(0, \bar{\ell}_R - \psi_{\max}) / \psi_{\max}],$$

$$S = \{R_1, R_2, \dots, R_m\};$$

目标函数为 $\max f(S) = TP(S) - PE(S)$.

随机破坏(随机移除部分乘客以增加解的多样性): 收集所有乘客节点, $V_{\text{all}} = \text{乘客集合}(S_{\text{current}})$; 按破坏率 d 计算移除数目, $n_{\text{remove}} = \lceil d \times |V_{\text{all}}| \rceil$; 随机选择移除集合, $V_{\text{remove}} \subset V_{\text{all}}, |V_{\text{remove}}| = n_{\text{remove}}$; 更新 S' , 并返回 (V_{removed}, P) .

基于增益/后悔插入的修复(将移除的乘客重新插入解中): 对每个待插入乘客 c' , 遍历所有线路 R 和插入位置 p' , 若 (u, c') 及 $(c', v) \in ASR$, 计算插入增益, $GA = C_{uc'} + C_{c'v} - C_{uv}$, 插入点的前后节点为 u, v ; 若每条线路可行性检查 $(R', P) = \text{True}$ 且 GA 更优, 则记录插入位置, 将 c' 作为最优插入位置; 更新 S' .

每条线路可行性检查(判断线路 R 是否满足约束条件): 连续驾车及累计工作时长初始化; 检查相邻节点, 若 $(u, v) \notin ASR$, 则线路不可行; 若超过 φ_{\max} 或 ψ_{\max} , 则施加惩罚; 基于解评估更新连续驾车及累计工作时长.

5 数值实验

5.1 模型合理性验证

5.1.1 阶段 I 模型合理性验证

表 2 给出了数值实验 I 算例 1 ~ 算例 4 的参数设置. 一个工作日内, 司机(D)的连续驾车时长上限为 4 h, 连续驾车 4 h 后, 需至少休息 20 min; 司机的累计工作时长为 16 h, 累计工作 16 h 后, 需至少休息 8 h. 每个算例中, 预约出行乘客(1 至 14) 的出发时间、到达时间、出发地、目的地, 以及预约出行乘客间的距离矩阵均为随机生成, 见图 2(a). 其中, 基于预约出行乘客的出发时间, 以及历史速度及路况, 可预估乘客到达时间.

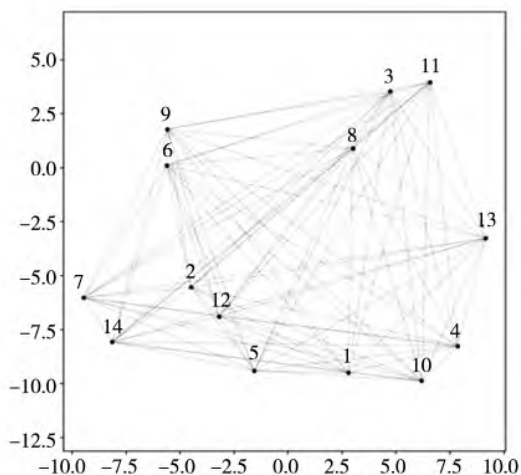
表 2 数值实验 I 参数

Table 2 Parameters of numerical experiment-I

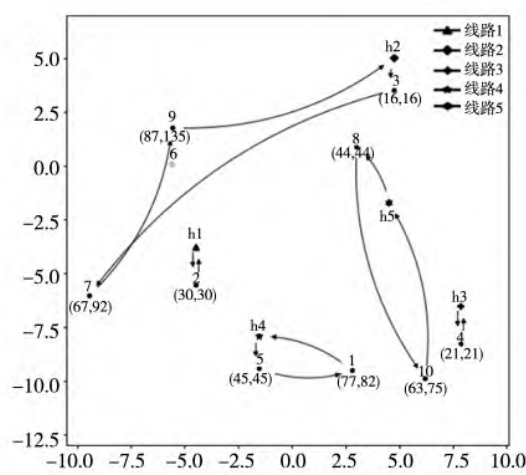
算例	D	DT&AT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	5	DT	21	187	66	184	106	50	158	5						
		AT	32	205	91	200	139	87	176	16						
2	5	DT	73	103	54	105	23	86	105	47	159	103				
		AT	105	133	70	126	68	102	146	91	189	122				
3	5	DT	3	178	146	4	52	137	161	192	141	12	65	183		
		AT	50	201	176	42	83	180	198	221	156	38	86	219		
4	5	DT	3	182	167	175	24	145	112	79	182	128	187	87	184	16
		AT	44	222	190	191	61	188	131	109	192	152	213	121	202	57

图 2(a) 给出了算例 1 ~ 算例 4 中预约出行乘客的位置分布, 即, 每位预约出行乘客的始发地、目的地、预约出发时间(DT)及预计到达时间(AT)不同, 将导致司机被配置不同的预约出行服务线路, 并产生不同的驾车及工作时长. 图 2(b) 可视化了算例 2 中每位司机的服务线路. 5 位司机与其预约出行服务线路的匹配, 遵循司机始发地及其预约出行服务线路始发地就近匹配规则 ($h1 \rightarrow 2 \rightarrow h1$; $h2 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow h2$; $h3 \rightarrow 4 \rightarrow h3$; $h4$

$\rightarrow 5 \rightarrow 1 \rightarrow h4$; $h5 \rightarrow 8 \rightarrow 10 \rightarrow h5$). 基于阶段 I 模型可获得每条服务线路司机的连续驾车及累计工作时长. 例如, 线路 4 的司机在完成预约乘客 1 的出行服务后, 其连续驾车时长为 77 min, 累计工作时长为 82 min. 此外, 因乘客的始发地、目的地、出发时间及抵达时间具有差异性, 加之受司机数量、连续驾车及累计工作时长限制, 在算例 2 中, 预约乘客 6 未获得出行服务(司机投入量足够大时, 可保障预约乘客均获得出行服务).



(a) 预约出行乘客位置分布



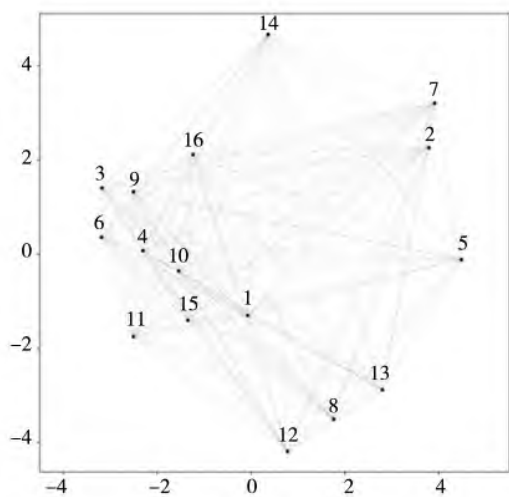
(b) 算例2中每位司机的服务线路

图2 数值实验 I

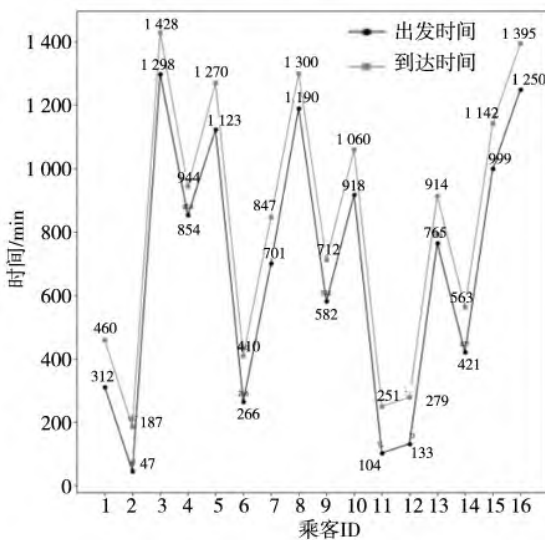
Fig. 2 Numerical experiment-I

基于数值实验 II,进一步验证阶段 I 模型对合理调控司机工作强度的有效性.图 3 给出了数

值实验 II 中预约乘客的位置分布及出行时间属性.



(a) 预约乘客的位置分布



(b) 预约乘客的出行时间分布

图3 数值实验 II

Fig. 3 Numerical experiment-II

图 4 给出了预约出行服务中非强制休息(司机连续驾车时长达到 4 h 前,未进行充分休息)与强制休息(司机连续驾车时长达到 4 h 前,进行充分休息)两种条件下,司机的工作情况,即,其所服务的乘客与工作强度差异.司机始发地位于乘客 11 与乘客 12 附近.从图 4 (a) 可以发现,非强制休息条件下的预约出行服务中,司机累计工作时长为 810 min,其依次服务了乘客 11、乘客 6、乘客 14、乘客 9、乘客 13.在此服务线路下,司机疲

劳驾驶现象严重,其服务完乘客 9 后,连续驾车约 9.4 h 未充分休息,仅在服务乘客 13 前进行了 45 min 的休息.而基于阶段 I 模型优化后的预约出行服务线路中,即,强制休息条件下(图 4 (b)),司机累计工作时长为 781 min,其依次服务的乘客更改为了乘客 12、乘客 1、乘客 9、乘客 13.在此服务线路下,司机未产生疲劳驾驶,其在连续驾车超过 4 h 前,均得到了充分休息,休息时长不小于 20 min.

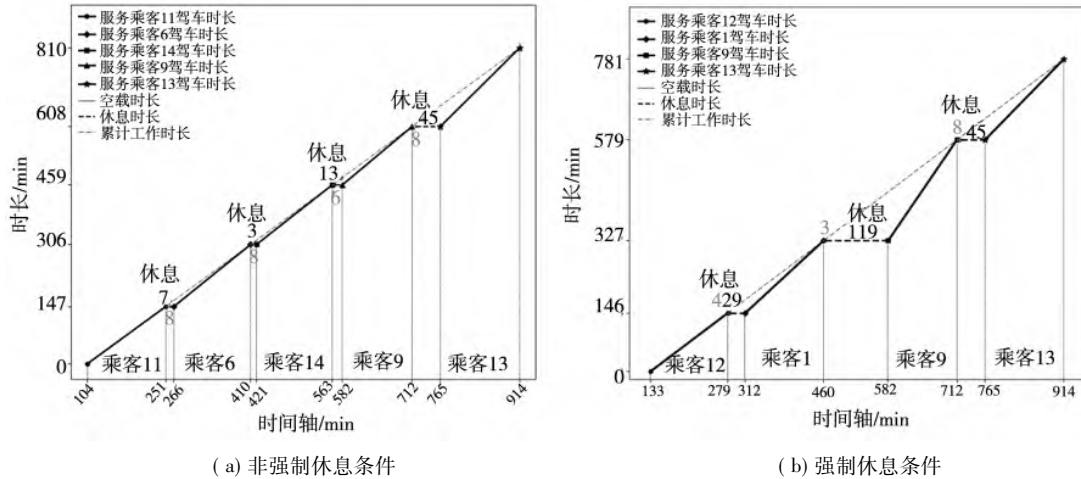


图 4 预约出行服务: 非强制休息与强制休息条件下司机的工作情况(所服务的乘客与工作强度差异)

Fig. 4 Reservation mobility service: A driver's working situations under non-mandatory and mandatory rest conditions

5.1.2 阶段 II 模型合理性验证

图 5 给出了数值实验 III 的参数设置及实验结果的可视化. 选取数值实验 I 中的算例 2, 将其阶段 I 的求解结果作为阶段 II 的输入. 预约出行乘客的失约具有随机性, 当所有预约出行乘客均失约时, 所提出的预约出行服务为主, 即时出行服务为辅的运营模式, 转化为了典型的即时出行服务模式. 假设 9 位预约出行乘客均失约, 且即时出行乘客的匹配集合为{1', 2', 3', 4', 5', 6', 7', 8', 9'}, 其出发时间(DT, DT') 及到达时间(AT, AT') 属性如图 5 所示. 经阶段 II 模型优化后, 可以发现, 在即时出行的匹配乘客集合中, 即时出行乘客 9' 未获得出行服务, 其他 8 位即时出行乘客被 5 位司机(D1 至 D5) 的

服务情况为(原有的预约出行服务线路依次更新为): $h1 \rightarrow 2(8') \rightarrow h1$; $h2 \rightarrow 3(4') \rightarrow 7(1') \rightarrow 9(3') \rightarrow h2$; $h3 \rightarrow 4(2') \rightarrow h3$; $h4 \rightarrow 5(7') \rightarrow 1(6') \rightarrow h4$; $h5 \rightarrow 8(5') \rightarrow 10(-) \rightarrow h5$. 受模型约束(10)的限制, 原有预约出行乘客 10 失约后, 并未成功为其匹配即时出行乘客. 例如, 虽然出行乘客 9' 未获得出行服务, 但其并未被 $h5 \rightarrow 8(5') \rightarrow 10(-) \rightarrow h5$ 覆盖, 即, $h5 \rightarrow 8(5') \rightarrow 10(9') \rightarrow h5$ 不可行. 其原因在于, 即时出行乘客 9' 与预约出行乘客 10 的出行时刻不匹配. 从图 5 可以发现, 预约出行乘客 10 失约后, 即时出行乘客 8' 可补位. 然而, 受经济收益影响, 即时出行乘客 8' 被配置在了线路 $h1 \rightarrow 2(8') \rightarrow h1$ 中.

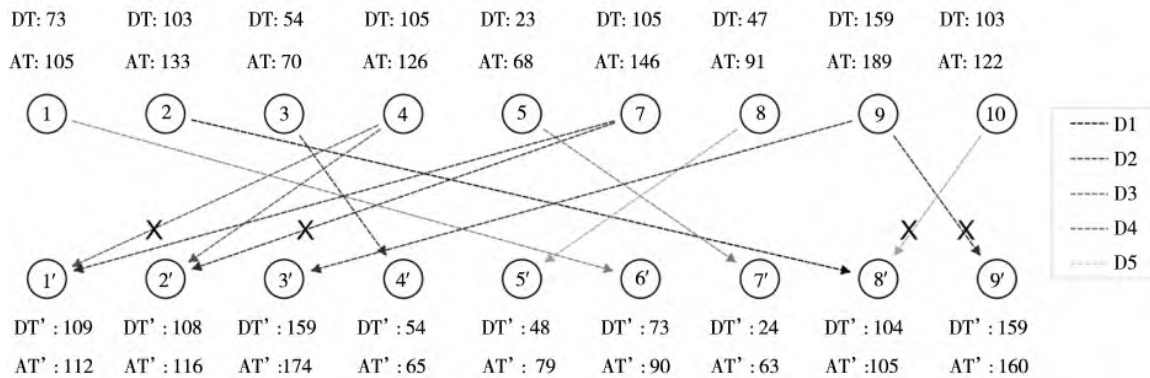


图 5 数值实验 III: 参数及结果可视化

Fig. 5 Numerical experiment-III: The visualization of parameters and results

5.2 算法有效性验证

表 3 给出了采用 Gurobi、CG-BH 及 ALNS-SA 算法, 求解数值实验 I 中的算例 1 ~ 算例 6 的目标函数及求解时长. 可以发现, 在阶段 I 模型或者基

于 Dantzig-Wolfe 原理重构的模型中, 随着司机及乘客(P)数量的增加, Gurobi 及 CG-BH 算法的求解速率(t)均受到限制. 主要原因在于 Gurobi 及 CG-BH 算法在处理考虑司机工作强度(累计工作

及连续驾车时长) 约束时的求解速率并不理想. 而 ALNS-SA 算法则在均衡求解质量($f_{ALNS-SA}$) 及求解速率上展现出了优越性. 例如, 在算例 6 中, CG-BH 算法在 5 h 内未迭代完第一轮, 而 ALNS-

SA 算法的求解速率较 Gurobi 高出了 71.5 倍, 与此同时, Gap 值被控制在了 0.83%. 基于此, 本研究采用 ALNS-SA 算法对所提出的方法的实用性作进一步验证.

表 3 数值实验 I: Gurobi、CG-BH 及 ALNS-SA 算法求解结果

Table 3 Numerical experiment-I: The solution results of Gurobi, CG-BH, and ALNS-SA

算例	D	P	Gurobi		CG-BH		ALNS-SA		
			f_{Gurobi} /min	t /s	f_{CG-BH} /min	t /s	$f_{ALNS-SA}$ /min	t /s	Gap / %
1	5	8	167.90	0.03	167.90	0.01	167.90	0.46	0
2	5	10	275.90	0.03	275.90	0.01	275.90	0.36	0
3	5	12	357.00	0.06	357.00	0.01	357.00	0.02	0
4	5	14	361.70	0.10	361.70	0.01	361.70	1.15	0
5	20	50	1 489.00	17.00	1 489.00	10.27	1 488.20	84.38	0.05
6	20	120	8 217.60	282 463	—	>18 000	8 149.50	3 896.30	0.83

注: $Gap = (f_{Gurobi} - f_{ALNS-SA}) / f_{Gurobi}$.

5.3 灵敏度分析

数值实验 IV 设置: 假设某日, 某出行平台共

需服务预约出行乘客人数为 120 人; 预约出行的人数分布服从双峰(早晚高峰)分布, 见图 6.

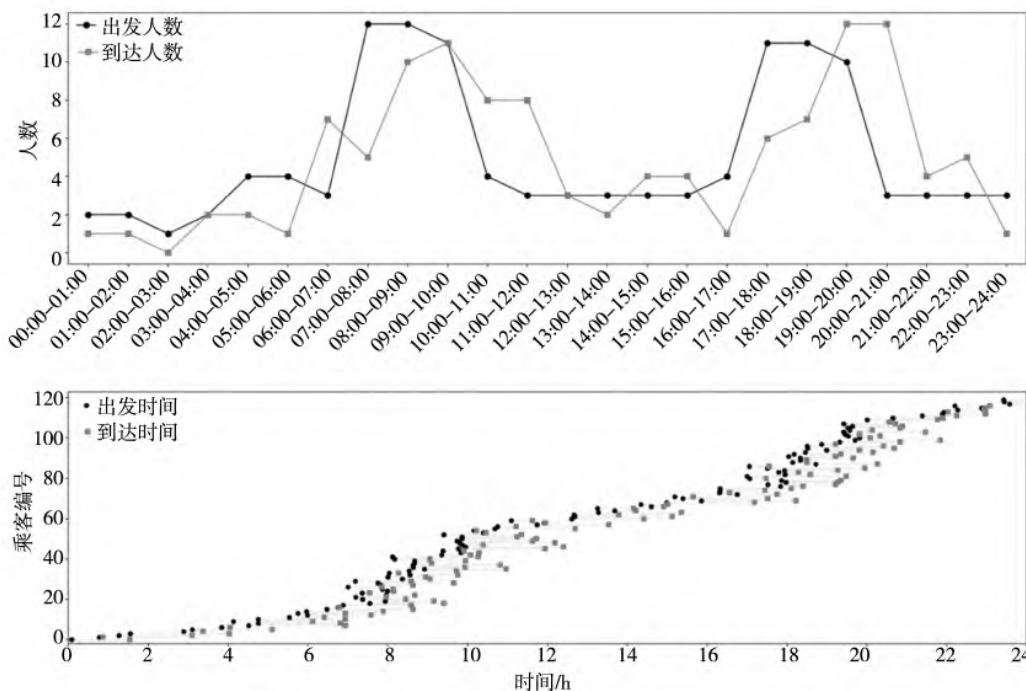


图 6 数值实验 IV: 不同时段预约出行乘客人数分布; 乘客出发时间及到达时间

Fig.6 Numerical experiment-IV: The distribution of reservation passenger numbers at different time periods; The departure and arrival times of passengers

5.3.1 司机数量变化分析

基于数值实验 IV, 图 7(a) 给出了司机数量变化对阶段 I 目标函数值(预约出行服务经济收益) 及乘客服务度(预约出行乘客被服务的数量) 的影响. 可以发现, 随着司机数量的增加, 阶段 I 目标函数值呈上升趋势, 与此同时, 未被服务的预约出行乘客数量呈递减趋势, 且在司机数量足够

时, 所有预约乘客均可获得出行服务. 这表明足够多的司机数量不仅可以形成优质的出行服务线路, 也可保证乘客服务度的提升. 此外, 从图 7(b) 中可以发现, 随着司机数量的增加, 司机的平均累计工作时长或其中位数均呈现下降趋势, 这表明所提出的方法可以确保所有司机都尽可能地分配预约出行服务任务.

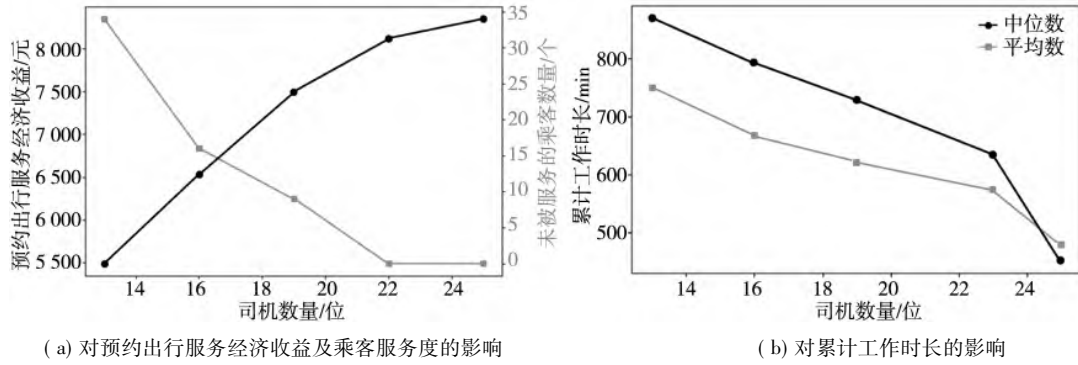


图 7 司机数量变化对实验结果的影响

Fig. 7 The impact of changes in the number of drivers on experimental results

5.3.2 空车时长惩罚变化分析

参数 $c_{i,j}$ 中不同空车时长惩罚系数(PC) 的取值,会导致出行服务经济收益(RE)、司机调度公平性(FA) 及其累计空车时长(SET) 产生变化. 其中,FA 的衡量方法为,所有司机累计空车时长中的最大值与每个司机累计空车时长差的均值. 基于数值实验 IV,设置 PC 集合的元素均为小于 1 的非负数,即, {0.1,0.3,0.5,0.7,0.9}, 司机数

量为 22 人.

从图 8 的实验结果可以发现: 不同的惩罚系数会导致出行服务的经济收益有所不同,在本实验中,PC=0.1 时,经济收益最高; 较低或较高的空车时长惩罚并不等价于“RE + FA + SET”综合性能最优,在司机数量给定的情况下,合理的空车时长惩罚系数的设定(在此实验中,PC=0.7),可使“RE + FA + SET”的综合性能得到保障.

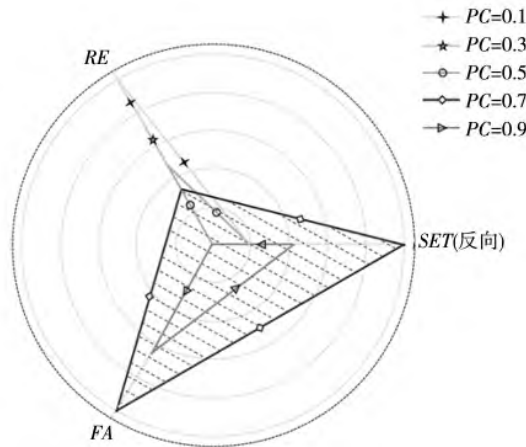


图 8 空车时长惩罚对出行服务经济收益、司机调度公平性及其累计空车时长的影响

Fig. 8 The effects of empty vehicle duration punishment on the mobility service economic revenue, the fairness of driver scheduling, and the cumulative empty vehicle duration

5.4 方法实用性分析

为验证所提出的方法的实用性,基于数值实验 IV,分别分析司机工作强度,考虑司机异质性的最优累计工作时长及即时出行服务经济收益.

5.4.1 司机工作强度分析

表 4 给出了空车时长惩罚系数取值为 0.1

时,基于阶段 I 模型及 ALNS-SA 算法获得的部分司机预约出行服务线路及其累计工作时长(W-T). 可以发现,司机的最大累计工作时长为 958 min (线路 10),其未违反累计工作时间的上限,保障了在一个工作日内,司机可获得至少 8 h 的休息时间.

表 4 数值实验 IV: 部分司机的预约出行服务线路及其累计工作时长(不小于 700 min)

Table 4 Numerical experiment-IV: The reservation mobility service routes of some drivers and their cumulative working hours (not less than 700 min)

#	预约出行服务线路	W - T/min
1	* → 13 → 41 → 46 → 84 → 97 → *	866
2	* → 16 → 53 → 62 → 81 → 79 → 100 → *	922
3	* → 20 → 50 → 59 → 66 → 67 → 74 → 73 → 108 → *	767
4	* → 29 → 48 → 57 → 58 → 72 → 76 → 90 → 95 → 110 → 114 → 115 → *	911
5	* → 15 → 33 → 47 → 86 → *	839
6	* → 11 → 28 → 36 → 60 → 63 → 68 → 71 → 94 → *	924
7	* → 23 → 51 → 70 → 99 → *	773
8	* → 14 → 21 → 39 → 49 → 69 → 78 → 107 → *	908
9	* → 26 → 40 → 55 → 54 → 56 → 64 → 87 → 92 → 106 → *	778
10	* → 27 → 34 → 35 → 52 → 61 → 80 → 105 → 109 → 112 → 116 → *	958

5.4.2 考虑司机异质性的最优累计工作时长分析

累计工作时长是影响司机是否结束工作的重要指标^[22]. 在经济学中, 劳动效用体现在随着劳动量的增加, 收入也随之增加, 而劳动量到了一定程度, 则会产生一些影响. 例如, 劳动者的身体健康水平下降、劳动效率降低等^[23]. Bick 等^[24] 基于大规模微观数据, 证实了收入与工作时长之间存在显著非线性关系, 表现为“先增后减”的倒 U 型 (即二次凸函数特征). 基于此, 在本研究中, 定义司机的工作压力或健康损失成本为累计工作时长 h 的凸函数 $C(h) = \gamma \times h^\kappa (0 < \gamma < 1; \kappa \geq 2)$, 其表示每增加 1 h 的工作, 司机的工作压力或健康损耗的增长速度会加快^[25]. 此外, 司机进行出行服务的经济收益函数表述为 $R(h) = \rho \times h - \beta \times h^\kappa (\rho > 1; 0 < \beta < 1)$, 其中 $\rho \times h$ 表示随着工作时长的增加, 经济收益呈线性增长; $\rho > 1$ 表示每增加 1 h 工作时间所带来的初始收益的提升, 即, 司机初始投入工作时的精力充沛, 其可创造较高的经济收益; $-\beta \times h^\kappa$ 表示随着工作时长的增加, 司机的疲劳积累, 注意力降低, 进而边际收益产生递减^[24]. 综上, 司机随累计工作时长变化产生的效用函数可表述为

$$U(h) = \rho \times h - (\beta + \gamma) \times h^\kappa (\rho > 1; 0 < \beta < 1; 0 < \gamma < 1; \kappa \geq 2) \quad (17)$$

对应的最优累计工作时长为

$$h^* = \left(\frac{\rho}{\kappa \times (\beta + \gamma)} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (18)$$

在 $\rho = 20, \kappa = 2$ 条件下, 司机 1 ~ 司机 4 (特征组合) 的 $[\beta, \gamma]$ 参数分别设置为: $[0.23, 0.40]$, $[0.40, 0.35]$, $[0.30, 0.50]$, $[0.25, 0.45]$. 图 9 可视化了随着司机累计工作时长的增加, 不同司机 (特征组合) 的工作效用变化情况.

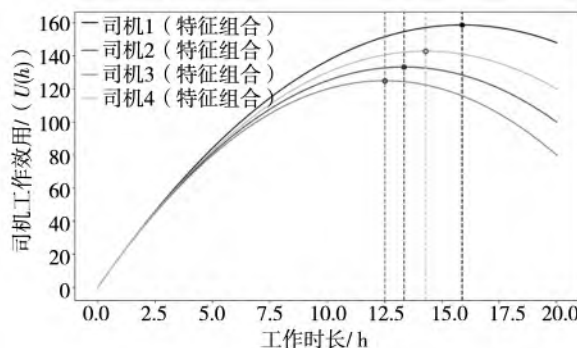


图 9 不同司机 (特征组合) 的工作效用随累计工作时长的变化情况
Fig. 9 The work utility of different drivers (feature combinations) with the variation of cumulative working hours

可以发现, 由于不同司机个体对工作压力的抵抗程度, 以及由疲劳积累导致的注意力降低程度不同, 其对应的最优工作时长也存在差异. 例如, 司机 1 的最优工作时长为 15.87 h, 而司机 3 的最优工作时长为 12.50 h. 基于此, 以本研究所提出的数智出行平台可持续服务运营模式为基础, 可结合每条预约出行线路的累计工作时长上限, 以及司机最优工作时长的异质性, 将预约出行线路与司机进行个性化匹配. 例如, 具备特征组合 1 的司机可与线路 6 相匹配 (表 4).

5.4.3 即时出行经济收益分析

无乘客失约时,平台可基于阶段 II 模型获得每条线路司机即时出行服务时长的上限. 以表 4 线路 3、线路 7 及线路 9 为例,假设一个工作日内,3 位司机预约出行服务的累计工作时长低于其可以承受的工作强度. 在此条件下,考虑司机及平台经济收益,司机在完成预约出行服务的其他时段内,兼顾即时出行服务. 这种可持续服务运营模式,既可以保障司机的即时出行服务时长及预约出行服务时长的总和不超过其累计工作时长,又可以促进司机及平台经济收益的可持续发展.

此外,平台可基于失约乘客的出行属性,拟合临近时段内服务即时出行乘客出行产生的经济收益,并估计失约乘客产生的经济损失,进而基于拟合函数及阶段 II 模型,匹配优质即时出行乘客. 例如,线路 3 中的乘客 66 失约,其计划出发时间和预计到达时间分别为 13:15 及 14:09(图 6),出发地及目的地分别为北京航空航天大学及七孔桥花海,行程约为 39.2km. 图 10 基于该失约乘客的出行属性,拟合了同日 9:00~11:00 时间段内,无堵车或堵车程度低(可忽略)的情景下,某平台及司机服务 30 位即时出行乘客获得的经济收益(乘客产生的出行费用).

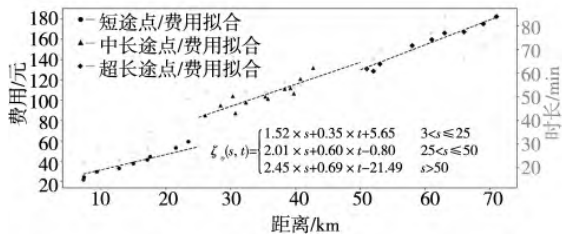


图 10 基于乘客即时出行服务的经济收益拟合 (2025 年 7 月 23 日 9:00~11:00, 北京)

Fig. 10 The economic revenue fitting based on the instant mobility service (July 23, 2025, 9:00 ~ 11:00, Beijing)

该日期及该时段内,经济收益 $\zeta_0(s, t)$ 与出行距离 s km 以及出行时间 t min 之间的函数关系被拟合为了分段函数. 基于该分段函数,可估计失约乘客 66 产生的经济损失约为 110.4 元.

平台可优先匹配经济收益不小于 110.4 元的优质即时出行乘客. 如图 12 所示,预约出行服务

线路 3 中,失约乘客 66 后的续接乘客 67 的计划出发时间为 14:36,始发地为昌平地铁站. 图 11 给出了失约乘客 66 始发地附近的即时出行乘客信息. 考虑即时出行乘客的匹配,“北京航空航天大学→清华大学→蟒山国家森林公园→昌平地铁站”为不可行线路(图 12),其违背了约束(11b). 在不违背约束(11b)的条件下,最优及可行线路所对应的乘客均为可行优质即时出行乘客,基于拟合函数可获得二者产生的经济收益分别为 129.8 元及 121.6 元(均大于 110.4 元). 由于,阶段 II 模型旨在最大化出行服务所产生的经济收益. 因此,最优线路所对应的可行优质即时出行乘客被服务. 原始预约出行服务线路中的“北京航空航天大学→七孔桥花海→昌平地铁站”被更新为“北京航空航天大学→北京大学→七孔桥花海→昌平地铁站”. 更新后的预约出行服务线路兼顾了即时出行服务,其经济收益被提升了 17.57%.

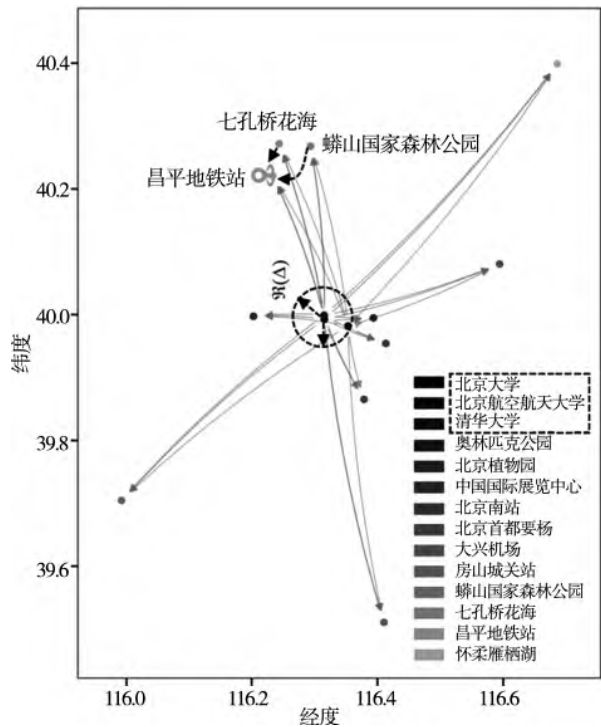


图 11 失约乘客始发地附近的即时出行乘客信息

Fig. 11 The information of instant mobility passenger near the departure point of the defaulting passenger

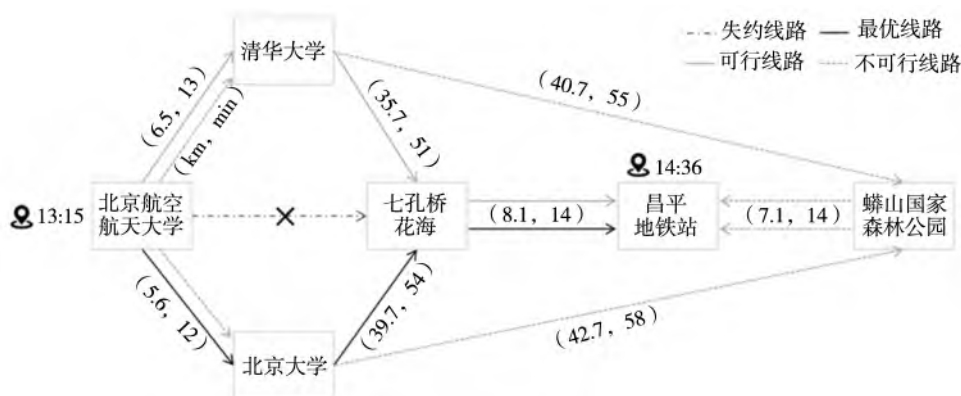


图 12 考虑经济收益的即时出行乘客(线路)匹配

Fig. 12 The instant mobility passenger (route) matching considering economic revenue

6 结束语

本研究创新了数智出行平台可持续服务运营模式,其以预约出行服务为主导,辅以即时出行服务,兼顾了司机工作强度及出行服务经济收益的可持续发展.构建了两阶段 0-1 混合整数规划模型,在阶段 I 模型中定制了司机出行服务线路;考虑乘客失约现象,阶段 II 模型实现了即时出行需求匹配,并优化了司机即时出行服务的工作时长.采用了 CG-BH 算法及 ALNS-SA 算法对阶段 I 模型进行了求解;基于 Gurobi 对阶段 II 模型进行了求解.数值实验验证了模型的合理性,并通过对比 Gurobi 及 CG-BH 算法,指出了 ALNS-SA 算法在求解大规模算例时的有效性.量化分析了司机数量及空车时长惩罚对出行服务经济收益、司机累计工作时长及其调度公平性等指标的影响,为平台出行服务管理提供了多角度的决策依据.在方法

实用性分析中,基于司机的连续驾车、休息及累计工作时长变化,指出了所提出的方法在控制司机工作强度方面的优越性;进一步考虑了司机异质性,分析了不同司机最优累计工作时长差异性的,为司机与出行服务线路间的个性化匹配提供了方法支撑;最终,基于失约乘客出行属性,拟合了即时出行服务经济收益函数,通过数值实验评估了失约乘客及优质即时出行乘客对应的经济损益,为平台匹配优质即时出行乘客提供了理论参考.

综上,本研究可实现以出行平台承担社会责任为主导,合理地调控司机的工作强度,并保障出行服务的经济收益,其为数智出行平台可持续服务运营模式的发展路径奠定了理论基础,提供了技术支撑.在本研究基础上,未来可进一步纳入多平台竞争、动态定价,以及碳排放约束等关键因素,在数智平台赋能导向下,构建可持续性的出行服务运营生态系统.

参考文献:

- [1] Lu C C, Yan S, Huang Y W. Optimal scheduling of a taxi fleet with mixed electric and gasoline vehicles to service advance reservations [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, (93): 479-500.
- [2] Wang Y, Li L, Prato C G. The relation between working conditions, aberrant driving behaviour and crash propensity among taxi drivers in China [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, (126): 17-24.
- [3] Chu H C. Risky behaviors of older taxi drivers and suggested requirements for renewing their professional driver's licenses [J]. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2020, (8): 100272.
- [4] Jaydarifard S, Behara K, Baker D, et al. Driver fatigue in taxi, ride-hailing, and ridesharing services: A systematic review [J]. *Transport Reviews*, 2024, 44(3): 572-590.

- [5] Wang S, Li L, Ma W, et al. Trajectory analysis for on-demand services: A survey focusing on spatial-temporal demand and supply patterns [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, (108): 74 – 99.
- [6] Tirachini A. Ride-hailing, travel behaviour and sustainable mobility: An international review [J]. *Transportation*, 2020, 47 (4): 2011 – 2047.
- [7] Khavarian-Garmsir A R, Sharifi A, Hajian Hossein Abadi M. The social, economic, and environmental impacts of ride-sourcing services: A literature review [J]. *Future Transportation*, 2021, 1(2): 268 – 289.
- [8] 马昌喜, 郝 威, 沈金星, 等. 定制公交线路优化综述 [J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(5): 30 – 41.
Ma Changxi, Hao Wei, Shen Jinxing, et al. Review on customized bus route optimization [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(5): 30 – 41. (in Chinese)
- [9] Liu T, Ceder A A. Analysis of a new public-transport-service concept: Customized bus in China [J]. *Transport Policy*, 2015, (39): 63 – 76.
- [10] Zhao Y, Triantis K, Teodorovic D, et al. A travel demand management strategy: The downtown space reservation system [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(3): 584 – 594.
- [11] Ma J, Li X, Zhou F, et al. Designing optimal autonomous vehicle sharing and reservation systems: A linear programming approach [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, (84): 124 – 141.
- [12] Lu C C, Yan S, Huang Y W. Optimal scheduling of a taxi fleet with mixed electric and gasoline vehicles to service advance reservations [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, (93): 479 – 500.
- [13] Xu J, Rahmatizadeh R, Bölöni L, et al. A taxi dispatch system based on prediction of demand and destination [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2021, (157): 269 – 279.
- [14] Masmoudi M A, Hosny M, Demir E, et al. The dial-a-ride problem with electric vehicles and battery swapping stations [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, (118): 392 – 420.
- [15] Gerzinič N, van Oort N, Hoogendoorn-Lanser S, et al. Potential of on-demand services for urban travel [J]. *Transportation*, 2023, 50(4): 1289 – 1321.
- [16] 杨晓光, 朱际宸, 彭 晴, 等. 面向预约出行的车路联网与协同交通控制: 前沿与展望 [J]. *上海理工大学学报*, 2023, 45(4): 307 – 320, 331.
Yang Xiaoguang, Zhu Jichen, Peng Qing, et al. Research on vehicle-infrastructure cooperative traffic control for urban road travel reservation: Frontiers and prospects [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2023, 45 (4): 307 – 320, 331. (in Chinese)
- [17] 郭 敏, 李肖楠. 考虑乘客取消订单的网约车平台定价策略 [J]. *运筹与管理*, 2022, 31(1): 149 – 154.
Guo Min, Li Xiaonan. Pricing strategies for online car-hailing platforms with order cancellations [J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(1): 149 – 154. (in Chinese)
- [18] Wang J P, Wang H, Liu P, et al. Order dispatching strategy and pricing scheme in ride-sourcing markets with consideration of service cancellation [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2025, (199): 103266.
- [19] 姜依依, 胡 晨, 肖勇波, 等. 考虑司机福利的网约车平台定价策略研究 [EB/OL]. *中国管理科学*, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2024.1927>, 1 – 18 [2026-01-27].
Jiang Yiyi, Hu Chen, Xiao Yongbo, et al. Pricing strategy of a ride-hailing platform with concern on driver welfare [EB/OL]. *Chinese Journal of Management Science*, <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2024.1927>, 1 – 18 [2026-01-27]. (in Chinese)
- [20] 李 想, 聂发鹏, 张 艺. 竞争视角下考虑长短途乘客的巡游车定价策略 [J]. *管理科学学报*, 2025, 28(1): 17 – 28.
Li Xiang, Nie Fapeng, Zhang Yi. Cruise taxi pricing strategies for long and short-distance passengers: A competitive perspective [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2025, 28(1): 17 – 28. (in Chinese)
- [21] Xiao F, Guo S, Huang L, et al. Integrated aircraft tail assignment and cargo routing problem with through cargo considera-

- tion [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2022, (162) : 328 – 351.
- [22] Farber H S. Is tomorrow another day? The labor supply of New York City cabdrivers [J]. *Journal of political Economy*, 2005, 113(1) : 46 – 82.
- [23] Pencavel J H. *Diminishing Returns at Work: The Consequences of Long Working Hours* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [24] Bick A, Blandin A, Rogerson R. Hours and wages [J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2022, 137 (3) : 1901 – 1962.
- [25] Cette G, Chang S, Konte M. The decreasing returns on working time: An empirical analysis on panel country data [J]. *Applied Economics Letters*, 2011, 18(17) : 1677 – 1682.

Optimization of a sustainable service operation mode for intelligent mobility platforms considering driver workload

TIAN Qiong^{1, 2}, CHEN Xiao-jing^{1, 3*}

1. School of Economics and Management, MoE Key Laboratory of Complex System Analysis and Management Decision, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Hangzhou International Innovation Institute of Beihang University, Hangzhou 311100, China;
3. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

Abstract: This research, oriented toward strengthening the social responsibility of mobility platforms, regulating driver workload, and ensuring economic revenue, proposes a sustainable service operation mode for intelligent mobility platforms led by reservation services and supplemented by instant services. A two-stage 0-1 mixed integer programming model is constructed. The stage I customizes service routes for reservation passengers based on driver workload, while stage II achieves on-demand matching considering passenger absenteeism. Given the different complexities of the two models, stage I is solved using a column generation-based heuristic algorithm (CG-BH) and a hybrid meta-heuristic algorithm based on adaptive large neighborhood search and simulated annealing (ALNS-SA), while stage II is solved using Gurobi. Numerical experiments verify the rationality of the two-stage model and highlights the superiority of the ALNS-SA algorithm in balancing solution quality and computational efficiency. Furthermore, the study quantifies the impact of the number of drivers and empty vehicle duration penalties on experimental results, demonstrating that the proposed method can reasonably regulate driver workload and match them with personalized service routes within their workload capacity. It also reveals that the revenue generated by serving high-quality instant passengers is higher than the losses incurred by defaulting passengers. This research provides management insights for the development of sustainable service operation mode for intelligent mobility platforms.

Key words: intelligent mobility platforms; social responsibility; driver workload; economic revenue; sustainable service operation mode