

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2022.02.007

考虑 FFC 预约需求的动态活动 - 出行配流模型研究^①

李青^{1*}, 曹杰²

(1. 南京信息工程大学管理工程学院, 南京 210044; 2. 徐州工程学院管理工程学院, 徐州 221018)

摘要: 不依赖固定站点而更具有灵活性的浮动汽车共享 (free-floating car-sharing, FFC) 模式逐渐受到关注. 为了评估该新兴出行方式在多模式交通系统中的影响力, 基于融合浮动共享汽车的多状态超网络模型, 提出了考虑共享汽车预约需求的动态活动 - 出行配流模型, 刻画了预约/未预约共享汽车的需求与共享汽车供给之间的动态交互过程. 另外, 模型综合考虑了出行者的有限理性决策行为以及出行者在活动 - 出行选择集、时间与金钱价值方面的异质性. 通过算例分析, 结果表明浮动共享汽车在交通系统中的影响力受到其分布、规模与价格等供给因素以及出行者有限理性行为的影响.

关键词: 浮动汽车共享; 多状态超网络; 预约; 动态活动 - 出行配流模型; 有限理性

中图分类号: U491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2022)02-0116-11

0 引言

近年来, 随着共享理念的提倡, 共享汽车 (shared car, SC) 逐渐受到关注. 对交通管理者而言, SC 具有减缓城市交通问题的潜力. Kortum 和 Machemehl^[1] 与 Kopp 等^[2] 分析认为, SC 将会在城市交通系统中掀起一场变革, 城市规划部门与道路交通规划部门亟需估计 SC 对传统交通的影响力.

由于用户可从既定区域内的任意停车点租借和归还 SC^[3,4], 浮动汽车共享 (free-floating car-sharing, FFC) 模式比基于站点的汽车共享方式更为灵活, 但管理更为困难. 现有关于 FFC 需求层面的研究根据研究方法可分为实证与仿真研究两类, 主要围绕 FFC 对私家车购买意愿的影响, 车辆的使用意愿、使用模式与使用率等问题.

实证研究方面, 为了评估 FFC 对私家车购买意愿的影响, Becker 等^[5] 分析表明仅 6% 的 FFC 用户会降低购买意愿; Liao 等^[6] 调研发现 FFC 车

辆的可获得性会影响私家车购买意愿, 分析认为 FFC 使用意愿高并不意味着购买私家车的意愿低. Kopp 等^[2] 基于 GPS 数据对比分析了 FFC 会员与非会员的出行行为, 发现会员的出行方式选择更多样且换乘较多. 针对影响 SC 使用意愿的因素, Ciari 等^[7] 分析认为时间依赖的租车价格会影响出行者的活动 - 出行安排; Schmöller 等^[8] 按照时间范畴将影响因素分为短期因素 (比如天气条件) 与长期因素 (比如社会特征); Zoepf 和 Keith^[9] 发现 SC 的可得性对使用意愿与出行者的活动 - 出行安排具有影响. 基于深度学习理论, Zhang 等^[10] 研究了 FFC 车辆的使用模式, 分析表明在时间和使用数量上具有显著的双重模式. 通过分析租车数据, Sprei 等^[11] 发现 FFC 车辆的租用时长平均为 27 min, 且电动车被租用次数少于燃油车. 基于离散选择模型, De Luca 和 Di Pace^[12] 研究认为出行费用、SC 的可得性与出行者的出行目的对 SC 的需求影响较大; Carteni 等^[13] 进行了私家

① 收稿日期: 2018-06-20; 修订日期: 2020-12-03.

基金项目: 国家社会科学基金资助重大项目 (16ZDA054); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (71801134; 71801135; 72003098); 国家自然科学基金基金资助项目 (71974100).

通讯作者: 李青 (1988—), 女, 江苏如皋人, 博士, 副研究员. Email: liqing321@nuist.edu.cn

车换乘 SC 的意愿调查,结果显示出行成本是影响换乘的主要因素.由实证研究可知,租车价格、车辆的可得性和出行者的出行目的地等因素对 SC 的需求影响较大,且对出行者的活动 - 出行日程安排存在影响.

基于 MATSim (多 agent 仿真) 框架, Ciari 等^[3,14]研究了 FFC 出行需求在多模式交通系统中的分布情况,但未阐明 FFC 需求与供给的动态交互机理. Balac 等^[15]通过给定 3 种车辆规模情境研究了停车收费对 FFC 需求的影响;假设系统中存在两个 FFC 运营商, Balac 等^[16]研究了运营商在价格与调度策略方面的竞争对 FFC 需求的影响;基于 mobiTopp 仿真模型, Heilig 等^[17]研究了多个 FFC 运营商情境下 SC 的使用情况.

但是,上述基于活动的微观仿真模型研究通常假设出行者实时选择后续活动与出行方式,弱化了活动 - 出行链的连贯性.基于活动的均衡模型能够弥补这一问题,故可用来研究活动需要下出行需求的时空分布机理^[18-26].其中, Li 等^[21]基于可接受规则提出了考虑 FFC 的动态活动 - 出行配流模型;基于该模型,针对融合 FFC 与自动驾驶汽车的共享无人驾驶汽车, Li 和 Liao^[22]提出了以动态活动 - 出行配流模型为下层的供给优化模型.但是,上述模型均假设 FFC 系统不具备预约服务.即,在停车处所有出行者根据先来先服务的原则使用 SC.该假设已与当下信息时代背景不相符,存在使用移动应用预约 SC 的用户,也存在不预约的用户.基于此,本文提出预约与未预约 SC 的需求同时存在情境下的动态活动 - 出行配流模型,阐明在活动地点处 SC 的供给与预约/未预约需求的动态交互过程,分析 SC 的分布、规模、价格等供给因素对车辆使用率以及需求的影响.

1 基本假设与符号定义

所提出的模型基于以下假设条件:

假设 1 时间范围 $[0, T]$ 平均分为由有限个时间段组成的集合 $t \in \{1, 2, \dots, \bar{T}\}$. Δ 为时间间隔长度, 则 $\Delta \times \bar{T} = T$.

假设 2 仅考虑私家车 (private car, PC)、公

共交通 (public transport, PT) 与 SC 3 种出行方式,且仅存在 1 家 FFC 运营者.

假设 3 根据活动集、出行方式集、时间与金钱价值等将出行者进行分类.

假设 4 PT 遵循固定的日程表,不考虑道路供给或需求的随机性对 PT 出行时间的影响.

假设 5 出行者具有完全信息.出行负效用与等待时间、在途时间、在途费用和停车费用等有关.参与活动的负效用与理想效用、活动地点和活动时长等有关.一条活动 - 出行路径的负效用等于组成该条路径的各路段负效用之和.出行者以“可接受”规则选择活动 - 出行路径.

假设 6 考虑到社会公平性,预约 SC 的出行者具有优先使用权,但需要支付一定的费用.即,若预约者与未预约者同时到达停车处,预约者优先使用 SC.

假设 7 所有活动地点均可租借和停泊 SC,且没有容量限制.

表 1 为本文模型所使用的相关变量及其定义.

表 1 相关变量及其定义

Table 1 Related variables and their definitions

变量符号	变量定义
ε	可接受阈值
a, a', a''	出行或者活动路段
p	包含活动与出行路段的活动 - 出行路径
m	出行者类别, $m = 1, 2, \dots$
R	预约会员集合
$Q^{(m)}, Q^{SC}$	m 类出行者的数量, SC 的规模
L	活动地点集合
h	家 (p 的起讫点), 表示 1 个 OD 对
l, \hat{l}	地点, $l, \hat{l} \in L$
A	路段集合
$A^{(v)}, A^{(a)}$	出行路段与活动路段集合, $A = A^{(v)} \cup A^{(a)}$
$A_c^{(v)}, A_t^{(v)}, A_s^{(v)}$	乘坐 PC, PT, SC 的出行路段集合 $A^{(v)} = A_c^{(v)} \cup A_t^{(v)} \cup A_s^{(v)}$
$u_a^{(m\hat{l})}(t)$	t 时段到达路段 a 的 m 类出行者; l 与 \hat{l} 分别表示路段 a 的流入与流出地点
$r_a^{(m\hat{l})}(t)$	t 时段实际流入路段 a 的 m 类出行者
$v_a^{(m\hat{l})}(t)$	t 时段流出路段 a 的 m 类出行者
$x_{y(a)}^{(\hat{l})}(t)$	t 时段在 a 的实际路段 $y(a)$ 上的流量
$S_l(t)$	t 时段 l 处 SC 的供给量
$D_l(t)$	t 时段 l 处 SC 的总需求
$D_l^i(t)$	t 时段 l 处 SC 的预约需求量

续表 1
Table 1 Continues

变量符号	变量定义
$D_l^r(t)$	t 时段 l 处 SC 的未预约需求量
$sk_l(t)$	t 时段 l 处 SC 的库存量
$sg_l(t)$	t 时段 l 处未满足的需求量*
$sg_l^r(t)$	t 时段 l 处未满足的预约需求量
$sg_l^r(t)$	t 时段 l 处未满足的未预约需求量
$\lambda_0^{(m)}, \lambda_1^{(m)}, \lambda_2^{(m)}, \lambda_3^{(m)}$	预约成本, 等待时间, 在途时间与费用的价值系数
$t_a^{(0)}$	$a \in A^{(r)}$ 上自由流在途时间
ϕ_a	路段 a 上 PT 的出发时间表
τ_a	路段 a 上单位时间段的费用 (PT 的票价、PC 的燃油费)
τ^r	预约 SC 的成本
$\tau_a^{(l),c}(t)$	t 时段 l 处的 SC 单位时间段的租车价格
$\tau_a^{(l),r}(t)$	t 时段 l 处的 PC 单位时间段的停车价格
$t_a^{(ml),w}(t)$	t 时段到达 l 处出行路段 a 上 m 类出行者的等待时间
$t_a^{(ml)\hat{}}(t)$	t 时段到达 l 处出行路段 a 上 m 类出行者的在途时间
$d_a^{(ml)}$	t 时段到达 l 处活动路段 a 上 m 类出行者的活动时长
$disU_a^{(ml)\hat{}}(t)$	t 时段到达 l 处路段 a 上 m 类出行者的负效用 (当 $\hat{l} = l$, 路段 a 是活动路段)
$disU_a^{(ml),r}(t)$	t 时段通过路段 a 的 m 类出行者停在目的地 \hat{l} 处的停车负效用
$\delta_{at}^{(hpk)}$	0-1 变量: $\delta_{at}^{(hpk)} = 1$ 表示 k 时段从居住地 h 出发通过活动 - 出行路径 p 在 t 时段到达路段 a ; 否则, $\delta_{at}^{(hpk)} = 0$
$f_{hp}^{(m)}(k)$	k 时段从居住地 h 出发使用路径 p 的 m 类出行者
$PU_{hp}^{(m)}(k)$	k 时段从居住地 h 出发使用路径 p 的 m 类出行者的路径效用

注: t 时段, 若 SC 的供给不能满足当前需求, 那么当前需求量将转入下一时间段。

2 SC 供需交互过程分析

2.1 融合 SC 的多状态超网络模型

多模式多活动 - 出行链的多状态超网络结构^[27]的本质是通过串联不同活动参与状态形成一条可行活动 - 出行路径来表达出行者的活动 - 出行日程安排。Liao 等^[28,29]对该网络模型进行了应用与扩展, 提升了初始网络模型的可应用

性^[30]。图 1 给出了使用 SC 进行活动 - 出行的多状态超网络示例。其中, 五边形表示私有车辆行驶网络 (private vehicle network, PVN), 六边形表示公共交通行驶网络 (public transport network, PTN), 顶点表示地点。示例网络中只包含 A 一个活动 (为了简化, 活动具体地点未表示), 停车地点 P1、P2 可用来停泊 PC 与取/还 SC, 停车地点 P3 仅可以用来取/还 SC。图中连线表示一条活动 - 出行路径, 描述了出行者租借 SC 离开家到达活动 A 处进行活动, 完成活动后租借 SC 回家的活动 - 出行过程。

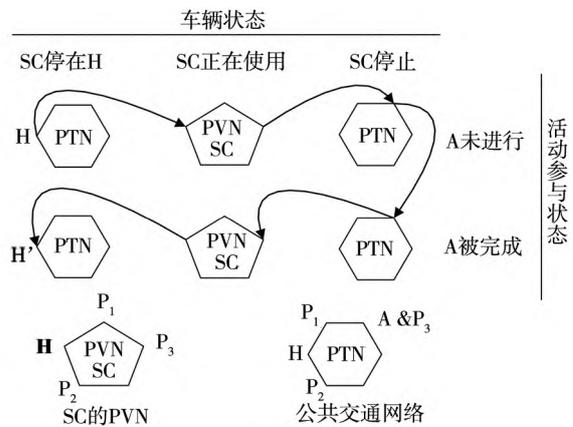


图 1 使用 SC 的活动 - 出行路径示例

Fig. 1 Example of an ATP via SC

2.2 SC 的供需交互过程

由于 FFC 的性质, 可用 SC 数量与新增预约/未预约需求、过去未满足的预约/未预约需求、新增供给量以及已有供给量有关。其中, t 时段 l 处新增预约/未预约需求与过去未满足的预约/未预约需求之和为 t 时段 l 处的 SC 总需求量, t 时段 l 处新增供给量与已有供给量之和为 t 时段 l 处 SC 的总供给量。

特别地, 当过去未满足的需求量与当前新增需求量形成队列, 根据假设 6, 新增预约用户可在过去未满足的未预约用户前获得 SC。 t 时间段 l 处的总供给量, 需求量以及过去未满足的需求量之间的关系可由图 2 表示。

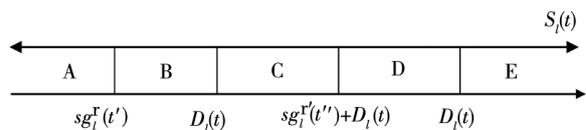


图 2 当前供给, 当前需求与过去未满足需求的关系

Fig. 2 Relationships among current supply, current demand and past unsatisfied demand

由图,对于预约需求, t 时间段 l 处供给量有以下3种情况:

A区域 供给小于任意过去未满足的预约需求量,则当前时段,没有出行者可使用SC出行;

B区域 供给小于当前预约需求量,但大于过去某时段未满足的预约需求量,则当前时段仅有满足的那部分过去需求量可使用SC出行;

C区域 供给大于等于当前预约需求量,则当前所有预约者可使用SC.

对于未预约出行者, t 时间段 l 处供给量具有以下4种情况:

A和B区域 供给小于预约需求量,则当前未预约出行者不可使用SC出行;

C区域 供给大于预约需求量,但小于任意过去时段未满足的未预约需求量,则当前未预约出行者不可使用SC出行;

D区域 供给大于预约需求量,小于当前未预约需求量,但大于过去某时间段未满足的未预约需求量,则当前未预约出行者,仅有满足的那部分可出行;

E区域 供给大于等于总需求量,当前所有未预约出行者可使用SC出发.

上述7种关系描述了由于SC规模的限制,预约/未预约需求与供给间的不平衡导致每个时间段内实际使用SC的流量差异.

3 考虑预约需求的动态用户均衡模型

3.1 活动/出行路段效用函数

3.1.1 SC出行路段负效用($a \in A_s^{(v)}$)

根据上述分析, t 时间段到达 l 处的预约/未预约出行者可能的等待时间 $t_a^{(ml),w}(t)$ 分别用式(1)与式(2)表示.供给量 $S_l(t)$,库存量 $sk_l(t)$,总需求量 $D_l(t)$,预约/未预约需求量 $D_l^r(t)$ 、 $D_l^f(t)$ 以及未满足的需求量 $sg_l(t)$ 、 $sg_l^r(t)$ 、 $sg_l^f(t)$ 之间的动态变化过程见式(3)~式(10).

$$t_a^{(ml),w}(t) = \arg \min_{t'} \{sg_l^r(t) \leq S_l(t')\} - t, \quad t' \geq t, m \in R \quad (1)$$

$$t_a^{(ml),w}(t) = \arg \min_{t'} \{sg_l^r(t) \leq S_l(t') - D_l^f(t')\} - t, \quad t, t' \geq t, m \notin R \quad (2)$$

$$S_l(t) = \sum_m \sum_{\hat{l}} \sum_{a \in A_s^{(v)}} v_a^{(ml)}(t) + sk_l(t-1) \quad (3)$$

$$D_l^r(t) = \sum_{m \in R} \sum_{\hat{l}} \sum_{a \in A_s^{(v)}} u_a^{(ml)}(t) + sg_l^r(t-1) \quad (4)$$

$$D_l^f(t) = \sum_{m \notin R} \sum_{\hat{l}} \sum_{a \in A_s^{(v)}} u_a^{(ml)}(t) + sg_l^f(t-1) \quad (5)$$

$$D_l(t) = D_l^r(t) + D_l^f(t) \quad (6)$$

$$sg_l(t) = sg_l^r(t) + sg_l^f(t) \quad (7)$$

$$sk_l(t) = \begin{cases} S_l(t), & 0 \leq S_l(t) < sg_l^r(t) < D_l^r(t) \\ S_l(t) - sg_l^r(\bar{t}), & 0 \leq sg_l^r(\bar{t}) \leq S_l(t) < D_l^r(t) \\ S_l(t) - D_l^f(t), & 0 \leq D_l^f(t) \leq S_l(t) < sg_l^f(\underline{t}') + D_l^f(t) \\ S_l(t) - D_l^f(t) - sg_l^f(\bar{t}'), & sg_l^f(\bar{t}') + D_l^f(t) \leq S_l(t) < D_l(t) \\ S_l(t) - D_l(t), & S_l(t) \geq D_l(t) \end{cases} \quad (8)$$

$$sg_l^r(t) = \begin{cases} D_l^r(t), & 0 \leq S_l(t) < sg_l^r(\underline{t}) < D_l^r(t) \\ D_l^r(t) - sg_l^r(\bar{t}), & 0 \leq sg_l^r(\bar{t}) \leq S_l(t) < D_l^r(t) \\ 0, & 0 \leq D_l^r(t) \leq S_l(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$sg_l^f(t) = \begin{cases} D_l^f(t), & 0 \leq S_l(t) - D_l^f(t) < sg_l^f(\underline{t}') < D_l^f(t) \\ D_l^f(t) - sg_l^f(\bar{t}'), & 0 \leq sg_l^f(\bar{t}') \leq S_l(t) - D_l^f(t) < D_l^f(t) \\ 0, & 0 \leq D_l(t) \leq S_l(t) \end{cases} \quad (10)$$

上述各式中

$$\underline{t} = \arg \min \{0 < S_l(t) < sg_l^r(\underline{t})\}, \underline{t} < t, \\ \bar{t} = \arg \max \{0 < sg_l^r(\bar{t}) \leq S_l(t) < D_l^r(t)\}, \bar{t} < t, \\ \underline{t}' = \arg \min \{0 \leq D_l^f(t) \leq S_l(t) < sg_l^f(\underline{t}') + D_l^f(t)\}, \underline{t}' < t,$$

$$\bar{t}' = \arg \max \{sg_l^f(\bar{t}') + D_l^f(t) \leq S_l(t) < D_l^f(t)\}, \bar{t}' < t,$$

当

$$0 \leq sg_l^r(\bar{t}) \leq S_l(t) < D_l^r(t),$$

$$0 \leq sg_l^f(\bar{t}') \leq S_l(t) - D_l^f(t) < D_l^f(t)$$

时,未满足的预约与未预约需求量分别更新为

$$sg_l^r(t') = \begin{cases} sg_l^r(t') - sg_l^r(\bar{t}), & \bar{t} \leq t' < t \\ 0, & t' < \bar{t} \end{cases}$$

$$sg_l^{r'}(t'') = \begin{cases} sg_l^{r'}(t'') - sg_l^{r'}(\bar{t}'), & \bar{t}' \leq t'' < t \\ 0, & t'' < \bar{t}' \end{cases}$$

当 $S_l(t) \geq D_l(t)$ 时,过去所有未满足的需求量均在 t 出发,即 $sg_l(t) = sg_l^r(t) = sg_l^{r'}(t) = 0, t' \leq t$. 则 t 时间段路段 a 实际流入的预约与未预约需求量分别见式(11)与式(12)

$$r_a^{(ml)}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq S_l(t) < sg_l^r(t) < D_l^r(t) \\ \sum_{\omega=t}^{\bar{t}} u_a^{(ml)}(\omega), & 0 \leq sg_l^r(\bar{t}) \leq S_l(t) < D_l^r(t), m \in R \\ \sum_{\omega=t}^t u_a^{(ml)}(\omega), & 0 \leq D_l^r(t) \leq S_l(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$r_a^{(ml)}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq S_l(t) - D_l^r(t) < sg_l^{r'}(t') < D_l^r(t) \\ \sum_{\omega=t'}^{\bar{t}'} u_a^{(ml)}(\omega), & 0 \leq sg_l^{r'}(\bar{t}') \leq S_l(t) - D_l^r(t) < D_l^r(t), m \notin R \\ \sum_{\omega=t'}^t u_a^{(ml)}(\omega), & 0 \leq D_l^r(t) \leq S_l(t) \end{cases} \quad (12)$$

由于 SC 与 PC 使用相同的实际道路 $y(a)$, 基于 BPR (bureau of public roads) 的出行时长为

$$t_a^{(ml)}(t) = t_a^{(0)} + \eta_a \left(\frac{x_{y(a)}^{(\hat{l})}(t)}{c_a^{(\hat{l})}} \right)^{\gamma_a}$$

乘坐 SC 的负效用主要由等待时间,在途时间与租车费用构成

$$disU_a^{(ml)}(t) = \lambda_0^{(m)} \tau^r + \lambda_1^{(m)} t_a^{(ml),w}(t) + \lambda_2^{(m)} t_a^{(ml)}(t') + \lambda_3^{(m)} \sum_{t'}^{t'+t_a^{(ml)}(t')} \tau_a^{(l),c}(\omega) \quad (13)$$

式中当 $m \in R$ 时, $\lambda_0^{(m)} > 0$; 否则, $\lambda_0^{(m)} = 0$. 由于等待的发生,出行者实际到达路段 a 的时间为 $t + t_a^{(ml),w}(t)$, $t' = t + t_a^{(ml),w}(t)$.

由于停泊 SC 的复杂性,目前尚未出现停车收费机制统一的标准. 假设 $disU_a^{(ml),r}(t) = 0$.

3.1.2 PC 出行与停车负效用 ($a \in A_c^{(v)}$)

乘坐 PC 的等待时间 $t_a^{(ml),w}(t)$ 为 0,在途时长与 SC 类似,则使用 PC 的出行负效用见式(14). 停车负效用为式(15)

$$disU_a^{(ml)}(t) = \lambda_2^{(m)} t_a^{(ml)}(t) + \lambda_3^{(m)} \tau_a t_a^{(ml)}(t) \quad (14)$$

$$disU_a^{(ml),r}(t) = \lambda_3^{(m)} \sum_{t(\hat{l}^s)}^{t(\hat{l}^e)} \tau_a^{(\hat{l}),r}(\omega), t(\hat{l}^s) = t \quad (15)$$

式中 $t(\hat{l}^s)$ 与 $t(\hat{l}^e)$ 分别表示在 \hat{l} 处开始停车和取车的时间.

3.1.3 PT 出行负效用 ($a \in A_l^{(v)}$)

乘坐 PT 的等待时间为到达站点的时间与该站点下一个出发时间之差. 根据假设 4, 等待 PT 的时间为 $t_a^{(ml),w}(t) = \min\{t' \mid t' \geq t, t' \in \phi_a\} - t$. 在途时长假设是固定的,但是由于 PT 的容量限制,出行者感知的出行时长受到需求量的影响^[21,31],见式(16). 乘坐 PT 的出行负效用见式(17),其中, $\tau_a t_a^{(0)}$ 表示乘坐 PT 的固定费用

$$t_a^{ml}(t) = t_a^{(0)} \left(1 + \eta_a \left(\frac{\max(0, \sum_m r_a^{(ml)}(t) - \vartheta^{(m)} c_a^{(\hat{l})})}{c_a^{(\hat{l})}} \right)^{\gamma_a} \right) \quad (16)$$

$$disU_a^{(ml)}(t) = \lambda_1^{(m)} t_a^{(ml),w}(t) + \lambda_2^{(m)} t_a^{(ml)}(t') + \lambda_3^{(m)} \tau_a t_a^{(0)} \quad (17)$$

3.1.4 活动负效用定义 ($a \in A^{(a)}$)

Ettema 等^[32]与 Liao^[33]认为参与活动的效用与理想效用、活动地点、活动时长以及开始活动的时间有关. t 时间段到达 l 处的 m 类出行者进行活动(活动路段 a) 的负效用 $disU_a^{(ml)}(t)$ 可定义为理想效用与实际效用之差. 令,活动 a 的理想效用为 $U_a^{(m)*}$; $U_a^{(ml)}(t, d_a^{(ml)}, c_a^{(\hat{l})})$ 为 t 时间段到达 l 处的 m 类出行者进行活动时长 $d_a^{(ml)}$ 的效用值,其表达式为

$$U_a^{(ml)}(t, d_a^{(ml)}, c_a^{(\hat{l})}) = F_a^{(ml)}(t) \frac{\log(1 + \beta_a d_a^{(ml)})}{\Phi(t, c_a^{(\hat{l})})}$$

$$\Phi(t, c_a^{(\hat{l})}) = \left(1 + \max \left(0, \frac{\sum_m u_a^{(ml)}(t) - \vartheta^{(m)} c_a^{(\hat{l})}}{c_a^{(\hat{l})}} \right) \right)^{\gamma_a}$$

式中 $F_a^{(ml)}(t)$ 为时间依赖的函数,定义为与两个时间高峰有关的二次方程;log 函数描述了效用与活动时长的关系,时长越长,效用增长速度越慢; β_a 为常数; $\Phi(t, c_a^{(\hat{t})})$ 为活动地点处的拥挤效应函数,描述活动地点处流量越大,实际活动效用越低.

理想效用与实际效用之差可表达为

$$disU_a^{(ml)}(t) = U_a^{(m)*} - U_a^{(ml)}(t, d_a^{(ml)}, c_a^{(\hat{t})}) \quad (18)$$

3.2 活动-出行路径效用函数

根据假设5,活动-出行路径 p 的总负效用为

$$PU_{hp}^{(m)}(k) = \sum_{a \in A} \sum_t \delta_{at}^{(hpk)} disU_a^{(ml)}(t) + \sum_{a \in A^{(v)}} \sum_t \delta_{at}^{(hpk)} disU_a^{(ml),r}(t) \quad (19)$$

3.3 基于可接受规则的动态用户均衡模型

考虑到出行者的有限理性决策心理,在均衡状态下,所有被使用的活动-出行路径上的负效用均满足可接受条件,且小于未被使用的活动-出行路径上的负效用.该均衡条件及其约束条件如下所示

$$\begin{cases} PU_{hp}^{(m)}(k) \leq (1 + \varepsilon) \min\{PU_{hp}^{(m)}(k)\}, f_{hp}^{(m)}(k) > 0 \\ PU_{hp}^{(m)}(k) \geq (1 + \varepsilon) \min\{PU_{hp}^{(m)}(k)\}, f_{hp}^{(m)}(k) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\sum_m \sum_h \sum_p \sum_k f_{hp}^{(m)}(k) = \sum_m Q^{(m)} \quad (21)$$

$$u_a^{(ml)}(t) = \sum_h \sum_p \sum_k \delta_{at}^{(hpk)} f_{hp}^{(m)}(k) \quad (22)$$

$$\sum_l S_l(0) = Q^{(sc)} \quad (23)$$

$$\sum_l v_a^{(ml)}(t) = \sum_l u_a^{(ml)}(t) \quad (24)$$

$$u_a^{(ml)}(t) = v_a^{(ml)}(t + d_a^{(ml)}(t)), \forall a \in A^{(a)} \quad (25)$$

$$u_a^{(ml)}(t) = v_a^{(ml)}(t + t_a^{(ml),w}(t) + t_a^{(ml)}(t')), \quad a \in A^{(v)} \quad (26)$$

$$x_{y(a)}^{(\hat{t})}(t) = \max \left(\begin{array}{l} 0, \\ x_{y(a)}^{(\hat{t})}(t-1) + \sum_m u_{a \in A^{(v)}}^{(ml)}(t) + \sum_m r_{a \in A^{(v)}}^{(ml)}(t) - c_a^{(\hat{t})} \end{array} \right) \quad (27)$$

$$f_{hp}^{(m)}(k) \geq 0, u_a^{(ml)}(t) \geq 0, v_a^{(ml)}(t) \geq 0 \quad (28)$$

4 求解算法

使用基于仿真的 route-swapping 算法^[34,35]对模型进行求解.具体步骤如下:

步骤1 初始化,将各类出行需求平均分配到各路径上得到初始可行流量 $\{f_p^{(m)}(0)\}$,迭代计数 n 为0.

步骤2 计算均衡流量.计算 SC 在各点处的供给与需求量,获得活动-出行路径的总负效用.

步骤3 收敛性检验.设 $\gamma^{(n)}$ 与 $PU^{(n)}$ 分别表示流量标识变量 $\{\gamma_{hp}^{(m)}(k)^{(n)}\}$ 与活动-出行路径负效用 $\{PU_{hp}^{(m)}(k)^{(n)}\}$.若 k 时段出发的 m 类出行者在路径 p 的流量不为0,则 $\gamma_{hp}^{(m)}(k)^{(n)}$ 为1;否则为0.当 $\max(\gamma^{(n)}(PU^{(n)} - PU^{*(n)})) \leq \varepsilon PU^{*(n)}$ 满足,迭代终止;否则,继续.

步骤4 更新当前流量,计算 $f^{(n+1)}$.若 $p, k \in \Gamma^{(n)}$, 则 $f^{(n+1)} = f^{(n)} + \frac{\sum (f^{(n)} - f^{(n+1)})}{|\Gamma^{(n)}|}$;否

则 $f^{(n+1)} = \max(0, f^{(n)} - \rho^{(n)} f^{(n)} (PU^{*(n)} - PU^{(n)}))$.

其中 $\Gamma^n = \{h, p, k: PU_{hp}^{(m)}(k)^n \leq (1 + \varepsilon) \times \min\{PU_{hp}^{(m)}(k)^{(n)}\}\}$, $\rho^{(n)} = \frac{\rho}{INT\left(\frac{n+1}{v} + 0.5\right)}$, ρ 与 v

为调整参数.将 SC 的分布恢复为初始状态.令 $n = n + 1$,返回步骤2.

5 算例分析

5.1 参数设置

1) 网络参数

基于经典 Nguyen-Dupuis 网络结构^[36],将其划分为3个区域,1个城市中心与2个郊区,设计如图3所示.枚举所有可行的活动-出行路径,共838条.假设上午6:30至上午10:00为出发时间段,时间间隔为1min,则生成175980条时空活动-出行路径.(活动-出行路径的具体设置见文献[21]的附录 <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0191261517304988-mmc1.docx>)

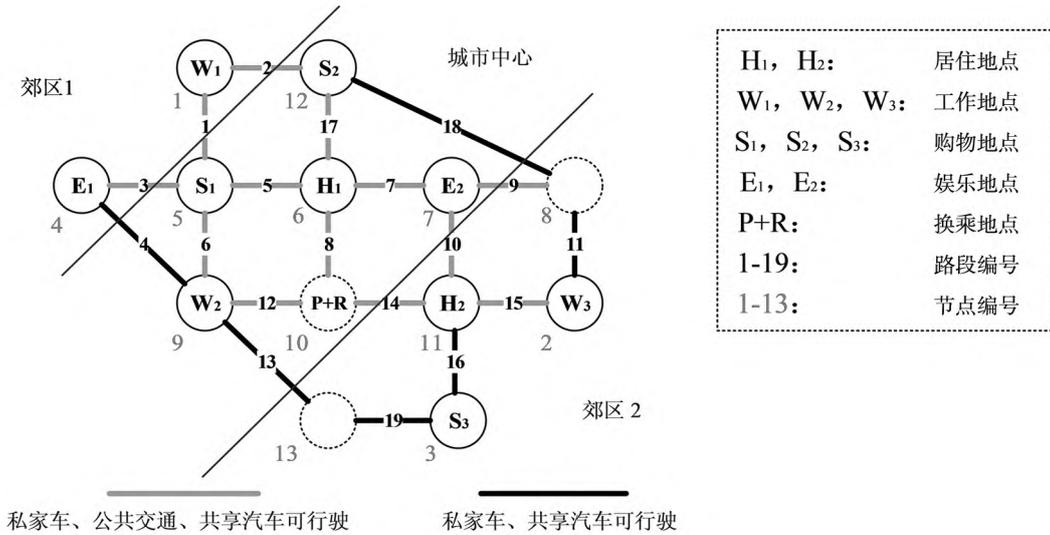


图3 基于活动的 Nguyen-Dupuis 网络

Fig. 3 Activity-based Nguyen-Dupuis network

2) 模型参数

设总需求为 50 000 人,城郊需求分布服从二八定律,则住在中心的需求为 40 000 人,住在郊区的需求为 10 000 人. SC 的规模占出行总需求的 20%,为 10 000 辆. 初始分布如表 2 所示.

表 2 SC 的初始分布

Table 1 Initial distribution of SCs

地点	W1	W3	S3	E1	S1	S2
数量/辆	1 500	600	400	400	600	400
地点	H1	E2	W2	P + R	H2	
数量/辆	1 500	600	1 500	1 000	1 500	

需求分类如表 3 所示. 根据出行方式集将住在中心与住在郊区的出行者分别分为 5 类: a) PC、预约 SC、PT; b) PC、不预约 SC、PT; c) 预约 SC、PT; d) 不预约 SC、PT; e) PT. 各区域需求量均分,则住在中心的各类需求为 8 000 辆,住在郊区的各类出行需求为 2 000 辆. 然后,根据活动集将每类出行者继续分为 4 类: a) 仅工作; b) 仅购物或者娱乐; c) 工作结束后购物或者娱乐; d) 购物且娱乐. 其中,工作者占有所有需求的 80%.

出行者的时间与金钱价值参数设置: $\lambda_0^{(1)} = \lambda_0^{(2)} = 0.1$, $\lambda_1^{(1)} = 0.2$, $\lambda_2^{(1)} = 0.2$, $\lambda_3^{(1)} = 0.15$, $\lambda_1^{(2)} = 0.1$, $\lambda_2^{(2)} = 0.1$, $\lambda_3^{(2)} = 0.2$. $\tau_a = 0.1$ 元/min, $\tau_a^{(l)} = 1.2$ 元/min, $\rho^{(0)} = 5$, $\mu^{(0)} = 100$, $\varepsilon = 0.1$. 仅市中心收取停车费, $\tau_a^{(5),r}(t) = 0.15$ 元/min, $\tau_a^{(7),r}(t) = 0.15$ 元/min, $\tau_a^{(10),r}(t) =$

0.1 元/min, $\tau_a^{(12),r}(t) = 0.15$ 元/min, $\tau^r = 5$ 元. 各路段上 PT 每 15 min 出发 1 次. 工作时长均为 8 h,购物时长有 15 min、30 min 和 1 h 三种选择,娱乐时长有 30 min、1 h 和 2 h 三种选择.

表 3 需求分类表

Table 3 Classification of demand

依据	分类	所占比重/%
居住地	H1	80
	H2	20
出行方式集	PC, 预约 SC, PT	20
	PC, 不预约 SC, PT	20
	预约 SC, PT	20
	不预约 SC, PT	20
	PT	20
活动集	仅工作	80 × 50
	工作后购物或者娱乐	80 × 50
	仅购物或者娱乐	20 × 50
	购物且娱乐	20 × 50

5.2 算例结果

1) 均衡状态分析

使用 Matlab R2015b 对算例进行求解, 经过 16 步迭代, 686.7 s 达到均衡状态. 各类活动地点处 SC 供给量随时间的变化过程如图 4 所示. 由图可知, 上午 7:30 至 9:00 期间居住地 SC 供给量减少, 工作地 SC 的供给量增加显著, 休闲地的供给量在 9:00 后逐渐增加. 这说明上午大部分出行者要去工作, 少部分出行者会选择休闲活动. 工作结束后, 居住地供给量增加, 购物地的供给量先增后

减,说明工作结束后,一部分出行者会选择购物后回家.该结果在一定程度上能够描述城市居民的活动 - 出行结构特征.

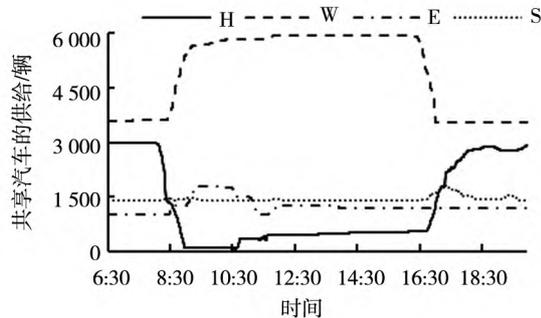


图 4 各类活动地点处 SC 供给量的变化过程

Fig. 4 Change process of supply of SCs at each type of activity location

汇总各时间段预约与未预约 SC 的需求量,如图 5 所示.由图可知,两类需求随时间变化的总体趋势相差不大,且呈现双峰结构.但是,未预约需求量大部分情况下高于预约需求量,这说明尽管预约享有优先使用权,但是由于预约成本的存在,均衡处预约需求量略小于未预约需求量.

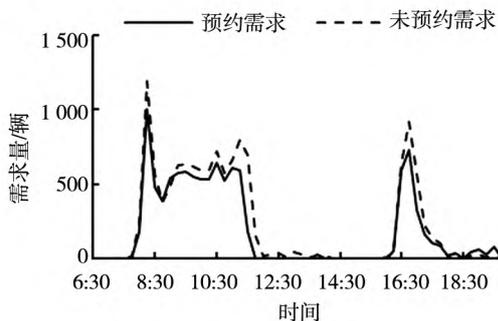


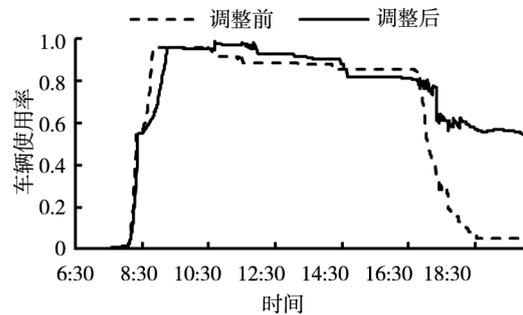
图 5 预约与未预约 SC 的需求变化过程

Fig. 5 Change process of demand with and without reservation of SCs

2) SC 的分布对车辆使用率的影响

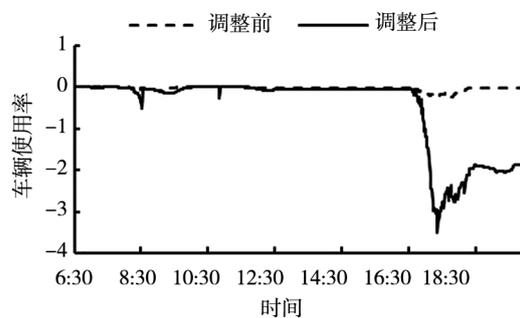
车辆使用率 = (初始供给量 - 每时间段供给量) / 初始供给量,则当车辆使用率大于 0 时,表示 SC 被使用;当车辆使用率小于 0 时,表示相对于初始供给,活动地点处车辆增多.基于 1) 的设置,减少娱乐休闲场所的初始供给量,增加居住地、工作地的初始供给量,分析初始分布状态对车辆使用率的影响.以居住地与购物地为例,对比结果如图 6 所示.由图可知,调整后,居住地车辆使用率增加;在工作结束后,购物地车辆增加较多,网络中 SC 使用率增加.结果表明,增加活动链前序地点处的供给量会对需求产生刺激作用,减少活动链

后序地点处的供给对需求不会产生抑制作用.



(a)居住地

(a)Home



(b)购物地

(b)Shopping location

图 6 SC 的分布对车辆使用率的影响

Fig. 6 Influence of initial distribution of SCs on the vehicle utilization

3) SC 的规模对车辆使用率的影响

保持 2) 中调整后的初始分布结构,分别将 SC 的规模增加 50%、100% 与 150%,分析规模对车辆使用率的影响,结果如图 7 所示.由图可知,规模增加 100%,全网 SC 使用率最高;而规模增加 150%,车辆使用率得到抑制.这说明 SC 租用价格一定的条件下,适当增加规模对车辆使用率起到促进作用;而由于传统出行方式的存在,过度增加规模并不能刺激需求.

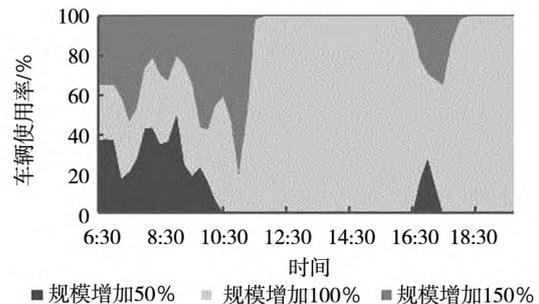


图 7 车队规模对车辆使用率的影响

Fig. 7 Influence of fleet size on the vehicle utilization

4) 租车价格对 SC 需求的影响

保持 2) 中的规模与调整后的初始分布结构, 分别将 SC 的价格降低 50%、10%, 增加 10%、50%, 分析价格对 SC 需求的影响, 结果如图 8 所示. 由图可知, 价格增加或者降低 10%, 需求增加较大; 价格增加或者降低 50%, 需求没有得到激励. 结果表明当规模一定时, 适当调整价格可以激励 SC 的需求, 提高车辆使用率.

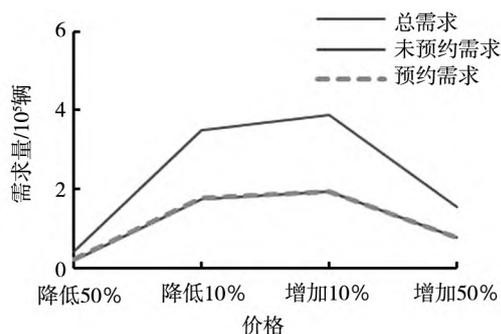


图 8 租车价格对 SC 需求的影响

Fig. 8 Influence of rental price on demand of SCs

6 结束语

本文基于融合 FFC 的多状态超网络, 提出了考虑预约服务的可接受动态活动 - 出行配流模型, 刻画了各活动地点处预约/未预约 SC 的出行

需求与 SC 供给之间的交互机理. 通过算例分析了 SC 的分布、规模、价格等供给因素对车辆使用率以及需求的影响. 结果表明增加活动链前序地点处 SC 的初始供给, 适当增加规模与调整价格, 可以有效促进车辆的使用率, 改变出行者的活动 - 出行日程安排; 但是, 由于传统出行方式的存在与出行者的可接受的心理作用, 过度扩大规模或者调整价格, 均衡时 SC 的使用率并未显著提高. 本文的研究说明 FFC 在传统交通系统中的影响力, 受到其供给条件与出行者有限理性行为的约束.

但是, 本文还存在一定的不足. 1) 假设仅存在在一个 FFC 的运营商, 未考虑多个运营商间的竞争机制对 SC 供给条件的影响; 2) 考虑了预约需求的流量分配问题, 但是预约机制以及为响应预约需求的调度机制未进行具体的设计; 3) 假设 SC 的初始分布每天不发生变化, 未考虑 day-to-day 的调度机制; 4) 基于 Nguyen-Dupuis 网络, 枚举了所有可行的活动 - 出行路径, 全枚举法不适用于大规模网络, 基于路径生成算法^[37,38]来研究多模式网络中的活动 - 路径组合生成问题也是未来的研究内容之一; 5) 基于居民实际的活动 - 出行轨迹^[39,40]对所构建的模型进行算例分析, 能够更准确的为 FFC 的运营提供参考.

参考文献:

- [1] Kortum K, Machemehl R B. Free-Floating Carsharing Systems; Innovations in Membership Prediction, Mode Share, and Vehicle Allocation Optimization Methodologies[R]. Southwest Region University Transportation Center, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 2012.
- [2] Kopp J, Gerike R, Axhausen K W. Do sharing people behave differently? An empirical evaluation of the distinctive mobility patterns of free-floating car-sharing members[J]. Transportation, 2015, 42(3): 449 - 469.
- [3] Ciari F, Bock B, Balmer M. Modeling station-based and free-floating carsharing demand; Test case study for Berlin[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, (2416): 37 - 47.
- [4] Mounce R, Nelson J D. On the potential for one-way electric vehicle car-sharing in future mobility systems[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 120: 17 - 30.
- [5] Becker H, Ciari F, Axhausen K W. Measuring the car ownership impact of free-floating car-sharing: A case study in Basel, Switzerland[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 65: 51 - 62.
- [6] Liao F, Molin E, Timmermans H J P, et al. Carsharing: The impact of system characteristics on its potential to replace private car trips and reduce car ownership[J]. Transportation, 2020, 47(2): 935 - 970.
- [7] Ciari F, Balac M, Balmer M. Modelling the effect of different pricing schemes on free-floating carsharing travel demand: A test case for Zurich, Switzerland[J]. Transportation, 2015, 42(3): 413 - 433.
- [8] Schmöller S, Weigl S, Müller J, et al. Empirical analysis of free-floating carsharing usage: The Munich and Berlin case [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 56: 34 - 51.

- [9] Zoepf S M, Keith D R. User decision-making and technology choices in the US carsharing market[J]. *Transport Policy*, 2016, 51: 150 – 157.
- [10] Zhang C, He J, Liu Z, et al. Travel demand and distance analysis for free-floating car sharing based on deep learning method[J]. *PLOS ONE*, 2019, 14(10): e0223973.
- [11] Sprei F, Habibi S, Englund C, et al. Free-floating car-sharing electrification and mode displacement: Travel time and usage patterns from 12 cities in Europe and the United States[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 71: 127 – 140.
- [12] De Luca S, Di Pace R. Modelling users' behaviour in inter-urban carsharing program: A stated preference approach[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 71: 59 – 76.
- [13] Carteni A, Cascetta E, de Luca S. A random utility model for park & carsharing services and the pure preference for electric vehicles[J]. *Transport Policy*, 2016, 48: 49 – 59.
- [14] Ciari F, Schuessler N, Axhausen K W. Estimation of carsharing demand using an activity-based microsimulation approach: Model discussion and some results[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2013, 7(1): 70 – 84.
- [15] Balac M, Ciari F, Axhausen K W. Modeling the impact of parking price policy on free-floating carsharing: Case study for Zurich, Switzerland[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 77: 207 – 225.
- [16] Balac M, Becker H, Ciari F, et al. Modeling competing free-floating carsharing operators—A case study for Zurich, Switzerland[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 98: 101 – 117.
- [17] Heilig M, Mallig N, Schröder O, et al. Implementation of free-floating and station-based carsharing in an agent-based travel demand model[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2018, 12: 151 – 158.
- [18] Li Z C, Lam W H K, Wong S C, et al. An activity-based approach for scheduling multimodal transit services[J]. *Transportation*, 2010, 37(5): 751 – 774.
- [19] Fu X, Lam W H K. A network equilibrium approach for modelling activity-travel pattern scheduling problems in multimodal transit networks with uncertainty[J]. *Transportation*, 2014, 41(1): 37 – 55.
- [20] Liu P, Liao F, Huang H J, et al. Dynamic activity-travel assignment in multi-state supernetworks[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 81: 656 – 671.
- [21] Li Q, Liao F, Timmermans H J P, et al. Incorporating free-floating car-sharing into an activity-based dynamic user equilibrium model: A demand-side model[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 107: 102 – 123.
- [22] Li Q, Liao F. Incorporating vehicle self-relocations and traveler activity chains in a bi-level model of optimal deployment of shared autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, 140: 151 – 175.
- [23] Li Z C, Lam W H K, Wong S C. Bottleneck model revisited: An activity-based perspective[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 68: 262 – 287.
- [24] 李志纯, 丁晶. 基于活动方法的瓶颈模型与拥挤收费问题研究[J]. *管理科学学报*, 2017, 20(8): 93 – 101.
Li Zhichun, Ding Jing. Activity-based bottleneck model and congestion toll pricing issues[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(8): 93 – 101. (in Chinese)
- [25] 尚华艳, 王闪, 黄海军, 等. 基于活动的瓶颈模型: 公交枢纽晚高峰居民通勤研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(3): 679 – 690.
Shang Huayan, Wang Shan, Huang Haijun, et al. Activity-based bottleneck model: Modeling the evening commute problem at bus transit hub[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2020, 40(3): 679 – 690. (in Chinese)
- [26] 邓瑶, 李志纯. 基于活动的瓶颈模型和收费机制: 研究进展评述[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(8): 2076 – 2089.
Deng Yao, Li Zhichun. Activity-based bottleneck model and charging mechanism: A literature review[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2020, 40(8): 2076 – 2089. (in Chinese)
- [27] Arentze T, Timmermans H J P. Multistate supernetwork approach to modelling multi-activity, multimodal trip chains[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2004, 18(7): 631 – 651.
- [28] Liao F, Arentze T, Timmermans H J P. Supernetwork approach for multimodal and multiactivity travel planning[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2175(1): 38 – 46.
- [29] Liao F, Arentze T, Timmermans H J P. Incorporating space-time constraints and activity-travel time profiles in a multi-state supernetwork approach to individual activity-travel scheduling[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2013, 55: 41 – 58.

- [30] 李 青. 基于活动-出行超网络的交通流分配模型研究综述[J]. 系统管理学报, 2020, 29(2): 354-360.
Li Qing. A literature review of traffic assignment models based on activity-travel super-network[J]. Journal of Systems & Management, 2020, 29(2): 354-360. (in Chinese)
- [31] Lo H K, Yip C W, Wan K H. Modeling transfer and non-linear fare structure in multi-modal network[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2003, 37(2): 149-170.
- [32] Ettema D, Bastin F, Polak J, et al. Modelling the joint choice of activity timing and duration[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2007, 41(9): 827-841.
- [33] Liao F. Modeling duration choice in space-time multi-state supernetworks for individual activity-travel scheduling[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 69: 16-35.
- [34] Nagurney A, Zhang D. Projected dynamical systems in the formulation, stability analysis, and computation of fixed-demand traffic network equilibria[J]. Transportation Science, 1997, 31(2): 147-158.
- [35] Szeto W Y, Lo H K. Dynamic traffic assignment: Properties and extensions[J]. Transportmetrica, 2006, 2(1): 31-52.
- [36] Nguyen S, Dupuis C. An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs [J]. Transportation Science, 1984, 18(2): 185-202.
- [37] Leventhal T, Nemhauser G, Trotter Jr L. A column generation algorithm for optimal traffic assignment[J]. Transportation Science, 1973, 7(2): 168-176.
- [38] Wang D, Liao F, Gao Z, et al. Tolerance-based strategies for extending the column generation algorithm to the bounded rational dynamic user equilibrium problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 119: 102-121.
- [39] 柴彦威, 刘志林, 李峥嵘, 等. 中国城市的时空结构[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
Chai Yanwei, Liu Zhilin, Li Zhengrong, et al. Time-Space Structure of Chinese Cities[M]. Beijing: Peking University Press, 2002. (in Chinese)
- [40] 张 雪, 柴彦威. 北京不同住房来源居民活动——移动模式的社会分异[J]. 城市发展研究, 2019, 26(12): 17-27+2.
Zhang Xue, Chai Yanwei. Activity-travel-pattern-based social segregation research of residents of different types of housing: A case study in Beijing[J]. Urban Development Studies, 2019, 26(12): 17-27+2. (in Chinese)

Incorporating free-floating car-sharing into a dynamic activity-travel assignment model with reservations

LI Qing^{1*}, CAO Jie²

1. School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Management Science and Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China

Abstract: Being more flexible than station-based car-sharing programs, free-floating car-sharing (FFC) has received increasing attention. To capture the influence of FFC on multi-modal urban mobility, this study proposes a dynamic activity-travel assignment model which considers the reserving demand for shared cars (SC). By the representation of extended multi-state super-network with SC, the dynamic interactions between the supply and the demand with/without reservation of SCs are formulated. Moreover, travelers' bounded rationality and traveler heterogeneity on activity-travel sets and value of time/money are taken into account. A numerical example demonstrates that the influence of FFC on the multi-modal traffic system is constrained by initial distribution, fleet size and price of SC from the supply side and bounded rational behavior of travelers from the demand side.

Key words: free-floating car-sharing; multi-state super-network; reservation; dynamic activity-travel assignment model; bounded rationality