

# 自动驾驶出租车动态合乘效益仿真分析



曾伟良<sup>1,2,3</sup> 韩宇<sup>1</sup> 何锦源<sup>1</sup> 吴淼森<sup>1</sup> 孙为军<sup>1</sup>

1 广东工业大学自动化学院 广州 510006

2 中山大学智能工程学院 广州 510275

3 广东省智能交通系统重点实验室 广州 510006

(weiliangzeng@gdut.edu.cn)

**摘要** 自动驾驶出租车共享出行是未来变革性的智能交通方式,它将带来前所未有的社会效益。共享订单数(合乘人数)是影响出行时间、费用、舒适度和运营成本的关键参数,然而鲜有研究对共享人数上限进行分析。为此,文中基于多人共享的路径规划方法,建立了一个自动驾驶出租车动态合乘的仿真系统。该系统由“搜索”“调度”“等待”3个模型组成,在变化乘车需求的情况下,对共享人数上限进行了探讨。在深圳市南山区 41.25 km<sup>2</sup> 的路网上仿真不同共享人数上限和出行需求情况下的效益,结果表明,共享模式极大地提高了出行成功率(达到了 20%)并降低了总耗时(降低到原来的 3%~23%)。当共享人数上限达到一定值时,合乘效益逐渐收敛。在出行需求较高的情况下(人车比率大于 5),共享人数上限设为 3~4 人时,合乘效益得到最大化。实验结果充分说明了多乘客共享出行能够缓解当下“打车难”的问题,且随着出行需求的增加,自动驾驶共享模式相比传统非共享模式具有更强的鲁棒性。

**关键词:** 智能交通;合乘效益;交通仿真;动态共享;共享上限

**中图分类号** TP391

## Simulation Analysis on Dynamic Ridesharing Efficiency of Shared Autonomous Taxi

ZENG Wei-liang<sup>1,2,3</sup>, HAN Yu<sup>1</sup>, HE Jin-yuan<sup>1</sup>, WU Miao-sen<sup>1</sup> and SUN Wei-jun<sup>1</sup>

1 School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

2 School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

3 Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China

**Abstract** Shared autonomous taxi is one of the revolutionary intelligent transportation modes in the future, which will produce huge social and environmental benefits. The maximum number of rideshare is a key parameter affecting passengers' travel time, price, comfort and operating cost. However, previous researches rarely analyzed the maximum number of rideshare. To fill this gap, a dynamic autonomous taxi simulation system is developed. It consists of three models: searching, scheduling and waiting, and investigates how the maximum number of rideshare influences the system performance under the changing travel demand. The road network of the Nanshan district in Shenzhen is examined as a case study to evaluate the ridesharing efficiency in different settings of the maximum number of rideshare and the travel demand. The simulation results show that switching from traditional taxis to shared autonomous taxis can greatly increase the success rate of the serviced requests by 20% and reduce the total travel time by 3%~23%. Interestingly, the ridesharing efficiency converges gradually as the maximum number of rideshare increasing to a certain value. The ridesharing efficiency can be almost optimized when the maximum number of rideshare is set to 3 or 4 for the case of high travel demand. It can be concluded that multi passenger ridesharing can alleviate the current problem of struggle to hail a taxi, and as the travel demand increases, the shared autonomous taxis system has a stronger robustness compared with

收到日期:2019-04-08 返修日期:2019-09-29 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61803100, U1911401);广东省智能交通系统重点实验室开放基金(202005003);广东省科技计划(2019B010121001, 2019B010118001, 2019B01019001);工信部工业互联网创新发展工程(TC190A3X9-2-2);国家重点研发计划(2018YFB1802400)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61803100, U1911401), Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System (202005003), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China (2019B010121001, 2019B010118001, 2019B01019001), Industrial Internet Innovation and Development Project of MIIT (TC190A3X9-2-2) and National Key Research and Development Project (2018YFB1802400).

通信作者:孙为军(14341569@qq.com)

traditional non-shared taxi system.

**Keywords** Intelligent transportation, Ridesharing efficiency, Traffic simulation, Dynamic sharing, Maximum number of rideshare

## 1 引言

随着出行需求的日益增长,快速高效的出行愿景与“打车难”的矛盾愈发严重。近年来,随着联网的自动驾驶<sup>[1-2]</sup>汽车的兴起和共享经济概念的延伸<sup>[3]</sup>,共享出行<sup>[4]</sup>受到了越来越多的关注。大量研究探索了共享方式的发展潜力<sup>[4-5]</sup>和各种共享自动驾驶汽车(SAV)系统,如 T-share<sup>[6]</sup>、UTRS 系统<sup>[7]</sup>,提出了 SAV 系统内部运行逻辑,探讨了如何共乘匹配<sup>[8]</sup>和提高路径规划的计算能力<sup>[6]</sup>,并通过仿真实验取得了积极的论证<sup>[9]</sup>。

然而,大部分研究忽略了一个重要问题:从宏观角度看,究竟合乘人数上限为多少时,整体效益最大?现在市场上流行的是 4 座出租车,即最多满足 4 个订单共享,但是我们不必局限于此,在共享模式下,多座出租车或小型客车可能具有更高的运行效益。2017 年 10 月,上海已经上线了 7 座出租车;2019 年,深圳交通局将出租车标准改为“7 座以下专用车”。毫无疑问,将来市场很有可能拓展出出租车多座共享的模式。那么,是否共享订单人数越多,总体效益就越高?此外,一些研究着力于探究“城市最小车队”的问题,提出了各种出租车调度策略<sup>[10-12]</sup>以及降低车辆密度的方法<sup>[13-14]</sup>。显然,共享出行是一个具有潜力的发展方向。因此,我们研究的问题是:1)从特定人车比率中,寻找当前乘车需求下出租车的共享订单上限值的较优值;2)当订单需求改变时,共享出行的交通模式对日益增长的出行需求的兼容程度。基于以上两个问题,我们在动态合乘路径规划的基础上建立了一个模拟仿真系统,用于分析出租车共享出行合乘效益。

## 2 动态合乘路径规划方法

### 2.1 变量定义和路网设置

- $O \in Orders$ : 乘车需求或订单
- $O_i.o$ : 订单  $O_i$  的起点
- $O_i.d$ : 订单  $O_i$  的终点
- $T_{o_i.l}$ : 订单  $O_i$  的发起时刻
- $T_{o_i.s}$ : 订单  $O_i$  分配成功的时刻
- $T_{o_i.d}$ : 订单  $O_i$  的乘客出发时刻
- $T_{o_i.A}$ : 订单  $O_i$  的到达时刻
- $T_{o_i.LA}$ : 订单  $O_i$  的最迟到达时刻
- $T_A$ : 到达时刻
- $T_{now}$ : 当前时刻
- $v \in V$ : 出租车或车辆
- $v_i.l$ : 车辆  $v_i$  的当前位置
- $r \in R$ : 交通网络上的道路
- $r.v$ : 道路  $r$  的通行速度
- $p \in P$ : 交通网络上的节点
- $g_i$ : 交通网络上的网格
- $m_i: g_i$ : 网格的信息点
- $t_w$ : 候车时间

$t_R$ : 绕路时间

$t_D$ : 延误时间

$t_L$ : 富余延误的时间

$t_{D.up}$ : 延误时间上限

$t_{g_i, g_j}$ : 从  $g_i$  的信息点到  $g_j$  的信息点的用时

$t_{p_i, p_j}$ : 从  $p_i$  点到  $p_j$  点的用时

$t_{od}$ : 订单起点到终点的用时

$t_{v.l.o.o}$ : 车辆从当前位置到订单起点的用时

$S.o$ : 起点搜索的车辆集

$S.d$ : 终点搜索的车辆集

$S.v$ : 搜索的空车结果集

$S.f$ : 搜索时失败车辆集

$n_g$ : 网格数量

$n_v$ : 区域内车辆数

$n_p$ : 每辆车的最大乘客数

$PTR$ : 每小时订单数与车辆数的比例

订单状态以及路网设置如图 1 所示。二维地图划分为若干个网格  $g$ ,  $g$  记录了其范围内的交通信息。1) 静态信息。所有道路节点  $p$  唯一属于一个  $g$ ; 定义  $g$  中最接近其中心的节点  $p$  作为该网格的信息点  $m$ ; 网格间的距离定义为信息点  $m$  之间的最短路径。2) 动态信息。 $g$  中包含的车辆信息列表, 记录未来将到达的车辆 ID 及其预计到达的时刻。

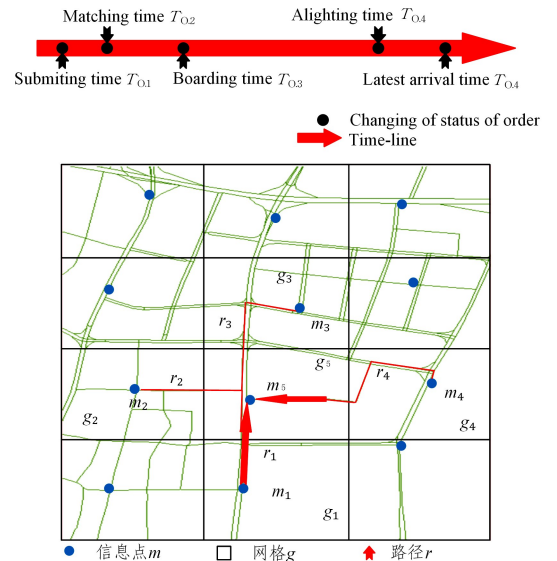


图 1 订单状态及路网设置

Fig. 1 Order status and road network setting

### 2.2 动态合乘仿真系统建模

下文将围绕乘客整体总耗时最小化建模,然而在动态交通网络中,获取全局最优的计算成本是巨大的。Santi 等<sup>[15]</sup>表示,最大匹配只能使用启发性算法进行近似求解, Ma 等<sup>[6]</sup>也认为每辆出租车计算一条最短路径的时间开销极大,因此本文亦是使用启发式的算法尽可能地接近全局最优调度方案。

#### 2.2.1 共享系统的基础框架

SAV 系统在运营过程中通过动态共享的方式将具有相

似行程的乘客在短时间内聚集运送<sup>[16]</sup>。

SAV系统由3大核心模块组成:搜索模块、调度模块和等待模块。订单由乘客一方提交后,按优先级与先到先得的原则进行排序,根据搜索模块的内部搜索策略,检索周围的合适车辆,调度模块将对订单与备选车辆进行匹配,最后发送路线规划命令给最优匹配的车辆。任意环节失败,订单都将被放入等待模块,等待重新搜索。

2.2.2 搜索模型

搜索策略的目的是筛选出满足约束条件的备选车辆<sup>[6]</sup>。大部分乘客只关注自己从起点到终点的损耗时间,希望延误尽可能缩短。延误时间可分为候车时间 $t_w$ 和绕路时间 $t_R$ 。 $t_w$ 定义为 $T_{o_i,D}$ 与 $T_{o_i,L}$ 的差值; $t_R$ 定义为由于满足多个订单而绕路导致的额外时间。另外,定义延误时间上限为 $t_{D,up}$ ,其约束如式(1)所示,表示订单可允许的最大延误时间。

$$t_w + t_R \leq t_{D,up} \quad (1)$$

我们应用双向 T-Share<sup>[6]</sup> 的搜索策略对候选车辆进行筛选。搜索过程按照图 2 所示的流程进行,搜索过程逐层进行,每个层级代表一次搜索操作,层级不断增加,直到搜索到合适的车辆或者所有搜索网格都已经被搜索。第一层按时间顺序搜索起点  $O_o$  和终点  $O_d$  周围的网格,第二层按照路程顺序将第一层的结果集排序,第三层及以下的层按照第二层选中的  $g$  挑选其中的车辆,直到结果集  $S$  有结果后,搜索结束。

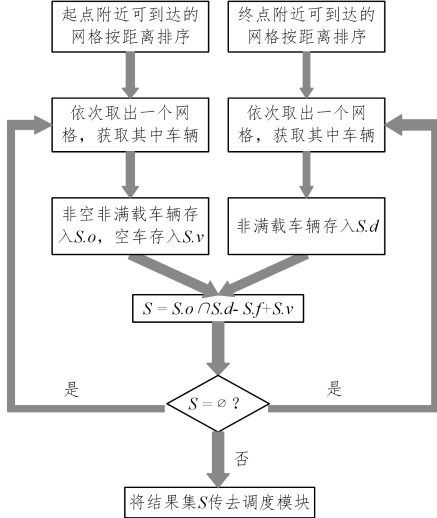


图 2 搜索模块流程图

Fig. 2 Process of searching module

如图 3 所示, $O_o$  和  $O_d$  分别属于网格  $g_7$  和  $g_6$ , 仿真区域内其他网格到  $g_7$  和  $g_6$  的用时分别用  $t_{g_i,g_7}$  和  $t_{g_i,g_6}$  表示。 $t_{od}$  表示订单起点到终点的用时,第 1 层按照时间顺序选出最晚到达时间前  $(t_{od} + t_{D,up})$  分别能够到达  $g_7, g_6$  的  $g_i, g_j$ , 可用式(2)和式(3)进行判断,示例搜索到了  $\{g_7, g_8, g_5\}$  和  $\{g_6, g_3, g_9\}$ 。

$$t_{g_i,g_7} < t_{od} + t_{D,up} \quad (2)$$

$$t_{g_j,g_6} < t_{od} + t_{D,up} \quad (3)$$

第 2 层按照路程顺序重新对第 1 层的结果进行排序,为  $\{g_7, g_8, g_5\}$  和  $\{g_6, g_3, g_9\}$ 。第 3 层及以下层取出每个  $g$  的车辆,并按照到达时间排序。根据车辆的当前位置  $v.l$  选出能够按时到达  $O_o, O_d$  的车辆集合,并剔除空余座位数不适合的车辆。如  $t_{v.l,O_o}$  表示车辆从  $v.l$  到  $O_o$ , 式(4)判断能否按时

到达  $O_o$ 。图 3 给出了一个示例。最初,起点终点结果集  $S_o, S_d$  均为空,空车结果集  $S_v$  表示起点附近的空车,也为空,上次搜索时失败车辆集  $S_f$  含有元素  $v_1$ 。第 3 层根据式(4)搜索完毕后,得到的车辆均是非空车辆,但剩余空位可满足订单,故  $S_o = \{v_1, v_3, v_4\}, S_d = \{v_1\}, S_v = \{v_1\}, S_f = \{v_1\}$ 。搜索结果集  $S$  用式(5)计算,计算结果为空,继续进行下一层。第 4 层分别根据式(4)搜索到  $\{v_{12}\}$  和  $\{v_1, v_{13}\}$ ,  $v_{12}$  空余位置满足订单,且不是空车,放入  $S_o$ 。而  $v_1, v_{13}$  由于空余座位不满足订单需求而被剔除,仅需更新  $S_o = \{v_1, v_3, v_4, v_{12}\}$ 。 $S$  经过式(5)计算仍为空,进入下一层。第 5 层根据式(4)在起点附近搜索到空车  $v_9$ , 放入  $S_v$ , 终点附近搜索到  $\{v_{12}\}$ , 放入  $S_d$ 。式(5)计算后得到  $\{v_9, v_{12}\}$ ,  $S$  非空,搜索结束。

$$t_{v.l,O_o} < t_D \quad (4)$$

$$S = S_o \cap S_d - S_f + S_v \quad (5)$$

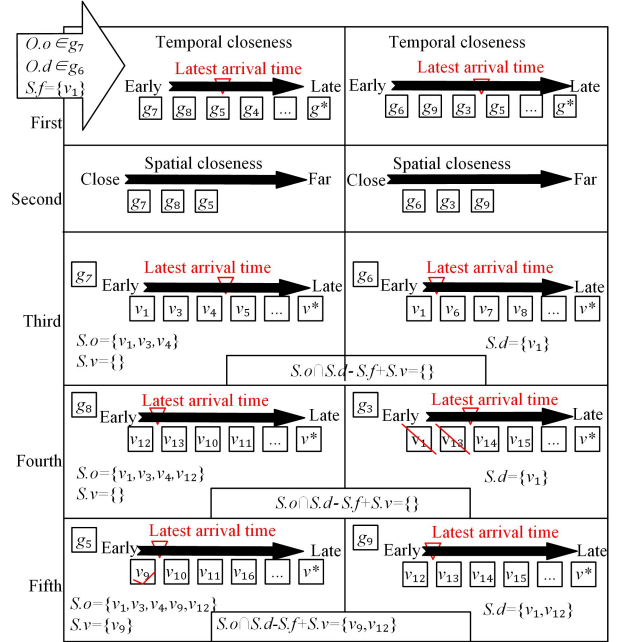


图 3 搜索模块内部示例

Fig. 3 Illustration of searching module

2.2.3 调度模型

调度模块的任务是把新增订单插入到搜索模块获取的备选车辆的行程计划表中。在不改变原计划表中节点的通过顺序的条件下,插入新订单过程分为两个步骤:1)插入订单起点  $O_o$ ; 2)插入订单终点  $O_d$ 。调度过程整体按图 4 所示的流程进行。

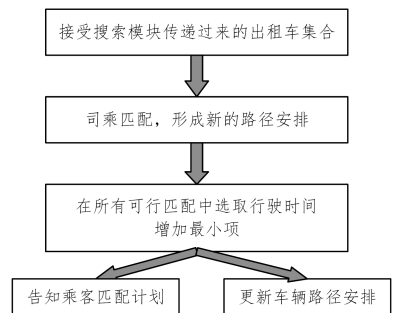


图 4 调度模块流程图

Fig. 4 Process of scheduling module

图 5 给出了一个订单插入的实例。例如,尝试把  $O_o$  插入计划点  $p_1$  和  $p_2$  之间,形成新的路径  $p_1 \rightarrow O_o \rightarrow p_2$ 。新路径耗时为  $t_{p_1, O_o} + t_{O_o, p_2}$ , 原路径耗时  $t_{p_1, p_2}$ , 插入需“询问”  $p_2$  及其后的计划点。  $p_2$  收到“询问”后,用式(6)计算绕路延误,到达时刻  $T_{,A}$  需要用式(7)更新为  $T'_{,A}$ 。假设计划点  $p_2$  是订单  $O_p$  的计划点,  $t_D$  是  $O_p$  在此前已造成的延误时间,由于延误时间上限固定,式(8)可计算  $O_p$  仍可富余延误的时间  $t_L$ 。

$$t_R = t_{p_1, O_o} + t_{O_o, p_2} - t_{p_1, p_2} \quad (6)$$

$$T'_{,A} = T_{,A} + t_R \quad (7)$$

$$t_L = t_{D, up} - t_D \quad (8)$$

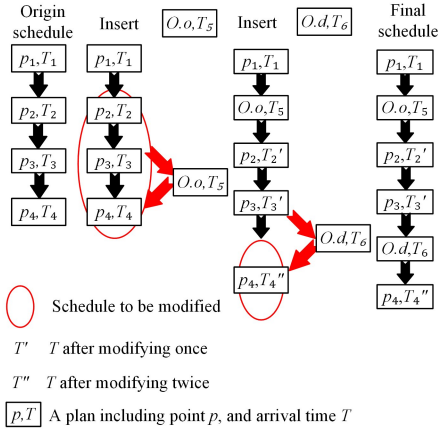


图 5 车辆动态路线计划表更改示例

Fig. 5 Illustration of route schedule update

该次延误  $t_R$  对于  $O_p$  不应超过  $t_L$ , 结合式(6)一式(8)可得式(9)。若满足式(9), 则代表  $p_2$  “同意”此次插入, 继而“询问”  $p_3$  和  $p_4$ 。同理, 欲将  $O_d$  插入  $p_3$  和  $p_4$  之间, 需要“询问”  $p_4$ 。

$$T'_{,A} - T_{,A} < t_{D, up} - t_{D, O_p} \quad (9)$$

同时, 新订单与车辆之间存在的约定是: 车辆需要保证在最晚到达时刻之前  $T_{o, LA}$  将乘客送达目的地,  $T_{o, LA}$  可用式(10)计算, 其中  $t_{od}$  是订单起终点的最短通行时间。

$$T_{o, LA} = T_{o, s} + t_{od} + t_{D, up} \quad (10)$$

$O_o, O_d$  同时插入成功且满足约束, 则形成新的车辆计划表。现有的一些研究常考虑忽略一些插入的可能来提高计算成本。Cordeau 等<sup>[17]</sup> 建议两种插入策略: 一种是优先为新订单规划, 另一种是按照第一次  $O_o, O_d$  “询问”成功的计划执行; Jung 等<sup>[18]</sup> 建议最小化行程时间为优化目标; Xing 等<sup>[12]</sup> 以最大化乘客服务数量为主要目标。文献[6]比较了多种路径规划的情况后指出, 应选择尽可能缩短出租车行驶距离的插入方式, 使得共享路径的总行程增加最小。基于文献[6]的建议, 我们采用 Insertion Feasibility Check<sup>[6]</sup> 算法进行插入“询问”, 最终得到一种行驶时间增加最小的方案。

#### 2.2.4 等待模块

等待模块的任务是对未匹配的订单进行队列排序。等待策略使用先入先出(FIFO)方案, 依照订单创建时间排序, 以 1s 为周期, 先检索队列中正在等待的订单, 再检索周期内新产生的订单, 实现对等待时间最长的乘客优先分配车辆。规定等待间隔(60s)内不对同一订单重复检索, 检索 20min 仍然没有匹配成功的订单将被归为失败订单。

图 6 给出了一个等待队列示例, 队列内有订单  $O_1 - O_5$ , 其创建时刻  $T$  满足式(11)所示的关系。当前时刻为  $T_{now}$ , 取出  $O_1$ , 若判断  $O_1$  不是 60s 内创建的订单, 且与上次搜索间隔了 60s, 即同时满足式(12)和式(13), 则满足再次搜索的条件; 当取出  $O_2$  时, 若  $T_2$  为  $T_{now} - 30s$ , 不满足式(12), 根据式(11), 队列后面的订单必然也不满足式(12), 故搜索停止在  $O_2$  处, 出队停止, 将合适的订单送去搜索模块。

$$T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5 \quad (11)$$

$$T_{now} - T > 60 \quad (12)$$

$$(T_{now} - T) \% 60 = 0 \quad (13)$$

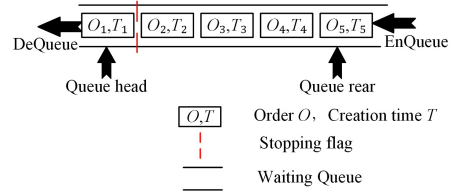


图 6 等待队列示例

Fig. 6 Illustration of queuing procedure

#### 2.2.5 时间复杂度

针对上述 3 个模块, 我们对其时间复杂度的分析如下。假定网格数量为  $n_g$ , 区域内车辆数为  $n_v$ , 每辆车的最大乘客数为  $n_p$ , 对于一个订单, 在搜索模块中, 最差的情况是每个网格都记录了所有车辆的信息, 且订单搜索了所有的网格, 则循环比较次数的数量级为  $O(n_g \times n_v)$ 。在匹配模块中, 最差的情况是一次性接受到  $n_v$  辆车, 且所有车辆都只剩一个空余座位。此时, 在插入新订单起点时, 最多比较了  $2n_p - 1$  次, 对应终点最大比较次数为  $2n_p^2 - n_p$ , 则从所有车辆中挑选出最小方案的循环数量级为  $O(n_p^2 \times n_v)$ 。由于等待模块只是重复将订单送去搜索和匹配, 没有增大整个系统的循环数量级, 因此整个系统的最差时间复杂度为  $O(n_p^2 \times n_v + n_v \times n_g)$ 。

### 3 实验分析

#### 3.1 仿真流程设计

本实验采用深圳市南山区  $7.5 \text{ km} \times 5.5 \text{ km}$  的区域作为实验区域, 包含 1426 个道路节点  $p$  和 2715 个路段。根据区域内 3 个月的出租车真实 GPS 数据设置仿真系统的基础数据, 仿真中每路段上车辆的行驶速度根据数据中出租车在路段上的分时段速度平均值得出, 并使用弗洛伊德(Floyd)算法预先计算出所有  $p$  之间的分时段最短时间路径并存储在列表中, 仿真实验中的出租车在任意  $p$  之间通行中按照最短时间路径行驶。仿真系统根据实际的打车需求模拟产生乘车的 OD, 且规定订单的起点与终点之间的路径距离大于 4000m。我们将出行者可接受的延误时间  $t_{D, up}$  设定为 5min。

仿真开始时所有车辆均为空车, 随机分布在  $p$  上。按照模拟中车辆行驶数据的变化, 每 1s 更新一次订单和车辆的状态, 车辆更新的位置由下文提出的“3 次定位”方法来更新。

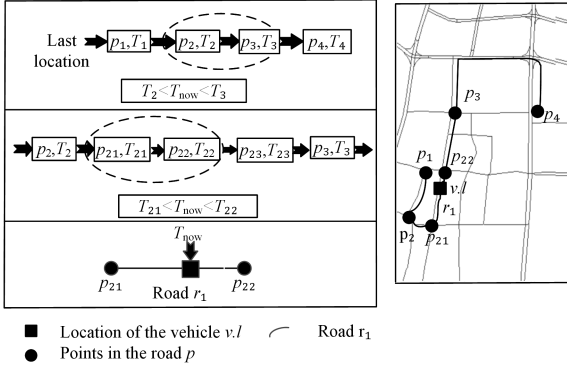
如图 7(a) 所示, 当前时刻  $T_{now}$  出租车  $v$  在计划表中有 4 个计划通过的节点, 第 1 次定位方式如式(14)所示,  $T_{now}$  在  $T_2, T_3$  计划时刻之间, 故  $v$  在  $p_2$  和  $p_3$  之间, 第 2 次定位找到  $p_2$

和  $p_3$  之间所有道路节点的到达时刻,根据式(15)将  $v_1$  确定在  $p_{21}$  和  $p_{22}$  之间的图 7(b) 所示的道路  $r_1$  上,第 3 次定位则根据道路  $r_1$  的通行速度  $r_v$  计算  $v$  的具体位置,由式(16)可知  $v$  的新位置在  $r_1$  离  $p_{22}$  距离为  $L$  处。

$$T_2 < T_{\text{now}} < T_3 \quad (14)$$

$$T_{21} < T_{\text{now}} < T_{22} \quad (15)$$

$$L = (T_{\text{now}} - T_{21}) * r_v \quad (16)$$



$T^*$  Arrival time in plan  $T^*$ , the current time  $T_{\text{now}}$

图 7 出租车定位示例

Fig. 7 Illustration of taxi positioning

### 3.2 仿真结果与讨论

仿真模拟一天 9 点—15 点人们的出行状况,设定订单基数为实际出租车数据的分时段平均订单统计数量。考虑到未来交通需求的增加,为了测试订单增大的情况下自动驾驶出租车动态合乘的效益,我们引入人车比率(PTR)的概念。人车比率指每小时订单数与车辆数的比例。如图 8 所示,PTR 基数为  $PTR=2.5$ ,按比例增大订单数(PTR 设置为 2.5~5.5),下文将分析不同订单量和共享上限时合乘效益的变化。

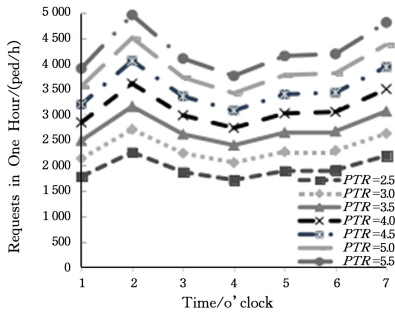


图 8 仿真订单数设置

Fig. 8 Setting of order number in simulation

#### 3.2.1 乘客打车总体成功率

仿真统计了共享人数上限设置为 1~7 时乘客的打车成功率,其中上限为 1 即为传统非共享模式。如图 9 所示,当出租车运营模式由非共享变为共享时,打车成功率显著提高。当  $PTR=5$  时,打车成功率提高了 20% 以上。非共享模式下, $PTR=5.5$  与  $PTR=2.5$  的打车成功率相差近 30%,而共享模式下,当共享上限达到 4 时,两者之间的差距仅在 1% 以内,意味着共享可满足大幅增加的订单需求。随着共享人数上限  $n$  的增大,打车成功率将会逐渐收敛而不再大幅提高。

当打车成功率的提升幅度小于 0.5% 时,我们把此时设置的共享人数上限视为最优值。

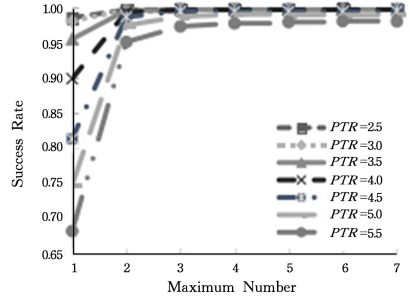


图 9 打车成功率与共享人数上限的关系

Fig. 9 Relationship between matching success rate and maximum number of ridesharing

表 1 列出了多次仿真后各 PTR 对应的最优共享人数上限值。尽管 PTR 与  $n$  之间存在微弱的正相关关系,但过分提高合乘人数上限不能持续大幅提高乘客的打车成功率,反而造成了运力的浪费。

表 1 不同 PTR 对应的最优共享人数上限值

Table 1 Optimal numbers of ridesharing for different PTR

PTR	$n$
5.5	4
5.0	3
4.5	3
4.0	3
3.5	2
3.0	2
2.5	2

#### 3.2.2 时间效益

总耗时指乘客从发出乘车请求到下车的总用时( $T_{o_i,A} - T_{o_i,L}$ )。成功出行的乘客总耗时变化如图 10 所示。相比传统非共享模式,使用了共享模式后,可以缓解人对车辆需求的紧张程度,共享上限为 2 时,总耗时缩短最大幅度达到 23%。当共享人数上限进一步提高,总耗时缓慢缩短,达到 4 及以上时,总耗时基本趋于平稳。显然,共享出行不仅使得出租车在同一时间可服务多位乘客,还能缩短每位乘客的出行总耗时,提高了双方的时间效益。

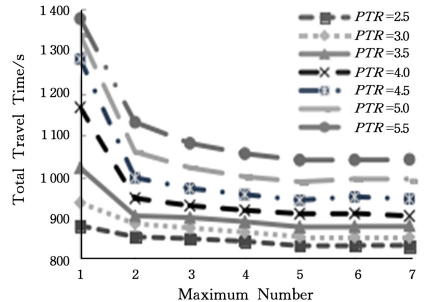


图 10 总耗时

Fig. 10 Illustration of total travel time

预约时间指乘客发出请求到出租车接单的用时( $T_{o_i,S} - T_{o_i,L}$ )。同时考虑成功和失败的订单,计算预约时期望值。

根据模型设置,预约时间超过 20 min 还未成功匹配车辆的订单为失败订单。乘客可以根据预约时间期望值估计该次出行能否成功打车,因此预约时间可视为一项较为重要的指标,一旦超过预约时间期望值,乘客应考虑改变出行方式。

如图 11 所示,相比传统非共享出行,预约时间最多可缩短近 70%。当共享人数上限增加到 3 时,预约时间的下降趋于平稳。因此,共享出行对降低预约时间期望值有很大的帮助。

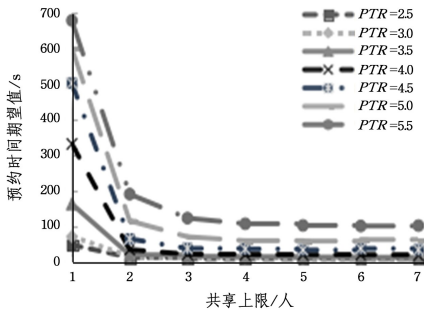


图 11 预约时间期望值

Fig. 11 Expected appointment time

### 3.2.3 有效行驶比

有效行驶比定义为仿真中乘客总出行距离与车辆总行驶距离的比值。车辆行驶距离对能耗和运营成本有很大的影响。由于传统的出租车需要行驶从当前位置到乘客上车点这一段空载里程,因此有效行驶比总是小于 1。如图 12 所示,在非共享模式的状态下,7 种 PTR 的有效行驶比大概为 0.8~0.9。每个非共享的订单将浪费 10%~20% 的空载里程。在这段空载行驶中,出租车处于占用状态,但没有收益,造成了能源损耗。使用动态共享的策略后,有效行驶比迅速上升。当共享人数上限达到 4 时,有效行驶比的提升趋于稳定。当 PTR=5.5 时,共享上限的增大使得有效行驶比提高超过 40%。这是由于当乘车需求较大时,每辆车更容易在同一时间获得更多订单和组成共享路线,从而使得有效行驶比更高,更加容易获得更高的利润。

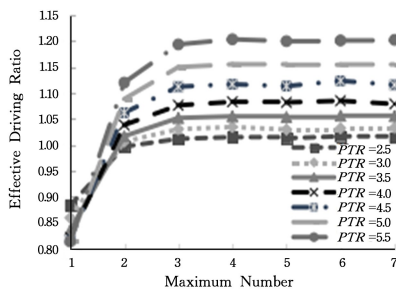


图 12 有效行驶比

Fig. 12 Illustration of effective driving ratio

### 3.2.4 性能比较

如表 2 所列,本文模型在较高 PTR 下,3 项基本指标项(成功率、时间效益、有效行驶比)的综合增益明显,尽管难以达到所有指标全面最优,但由于前人所述模型多数以国外城市为样本(如纽约、新加坡),因此本文模型所体现的性能也更贴切我国的交通实况。

表 2 多模型的性能指标比较

Table 2 Comparison of various models

Paper	Success Rate/%	Time efficiency/%	Effective Driving Ratio
This study (PTR=2.5, 3人共享)	97%—>99%	4.6% less (total time)	1.01
This study (PTR=5.5, 3人共享)	68%—>97%	19.0% less (total time)	1.19
Ma 等 <sup>[6]</sup>	30%—>55%	No Mention	1.11
Fagnant 等 <sup>[9]</sup>	No Mention	1.8% increase (total time) 36% less (waiting time)	1.05
Wang 等 <sup>[4]</sup>	36%—>60%	50% less (waiting time) 40s increase (total time)	No Mention
Javier 等 <sup>[19]</sup>	75%—>94%	20% less (waiting time)	1.06

**结束语** 应用 SAV 系统的出租车可大幅度缩短乘客的等待时间<sup>[12]</sup>和减小出行成本<sup>[20]</sup>,再加预定成功率高<sup>[4]</sup>等优势,能够鼓励和吸引用户合乘,起到了节能减排的作用。

本文建立了一个自动驾驶出租车动态合乘的仿真系统,以深圳市南山区为实验路网,分析了不同共享人数上限和乘车需求情况下的合乘效益,填补了国内外关于共享模式在合乘人数上限方面的研究空白。通过仿真实验,我们肯定了共享模式的潜力。应用共享模式后,乘客打车成功率明显上升,随着出行需求的增加,打车成功率提高了 20% 以上。乘车总耗时有不同程度的下降,在 7 种人车比率中分别下降了 3%~23%。对于出租车运营商而言,出租车整体有效行驶比也有超过 10% 的提升,大大减小了空车行驶的概率。

研究发现,出租车共享上限为 3~4 时,整体效益趋于平稳,但从乘客的心理角度出发,部分人群不愿意与过多的人共享出行,因此探索乘客的共享合乘意愿和制定合理的定价方案是下一步的研究方向。

## 参考文献

- [1] LIU Z G, TOMIO M W, ZENG W L, et al. Dynamic shared autonomous taxi system considering on-time arrival reliability[J]. Transportation Research Part C, Emerging Technologies, 2019, 103(6): 281-297.
- [2] BERGER C. From a competition for self-driving miniature cars to a standardized experimental platform: concept, models, architecture, and evaluation[J]. arXiv: 1406. 7768, 2014.
- [3] LIU Z G, TOMIO M W, ZENG W L, et al. Shared Autonomous Taxi System and Utilization of Collected Travel-Time Information[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018(PT. 4): 8919721. 1-8919721. 13.
- [4] WANG Y, ZHENG B, LIM E P. Understanding the effects of taxi ride-sharing—A case study of Singapore[J]. Computers Environment & Urban Systems, 2018, 69: 124-132.
- [5] SHAHEEN S A, COHEN A P. Carsharing and Personal Vehicle Services: Worldwide Market Developments and Emerging

- Trends[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2013,7(1):5-34.
- [6] MA S ,ZHENG Y ,WOLFSON O. T-share: A large-scale dynamic taxi ridesharing service[C]// 2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering (ICDE). IEEE Computer Society, 2013.
- [7] LIU X Y, YANG W, HUANG L S, et al. UTRS: A Carpooling Recommendation System fro Taxi Drivers[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2017(12):72-76.
- [8] GUO Y H, YU J Y. Modelization and Resolution of Ride-sharing Problem with Spatiotemporal Thermo[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019,19(6):112-122.
- [9] FAGNANT D J ,KOCKELMAN K M. Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas[J]. *Transportation*, 2016,45(1):1-16.
- [10] MACIEJEWSKI M, BISCHOFF J, NAGEL K. An assignment-based approach to efficient real-time city-scale taxi dispatching [J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2016,31(1):68-77.
- [11] NOURINEJAD M, RAMEZANI M. Developing a large-scale taxi dispatching system for urban networks[C]// 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2016:441-446.
- [12] XING X, WARDEN T, NICOLAI T, et al. Smize: a spontaneous ride-sharing system for individual urban transit[C]// German Conference on Multiagent System Technologies. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009:165-176.
- [13] VAZIFEH M M, SANTI P, RESTA G, et al. Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility[J]. *Nature*, 2018,557(7706):534-538.
- [14] ZENG W L, WU M S, SUN W J, et al. Comprehensive Review of Autonomous Taxi Dispatching Systems[J]. *Computer Science*, 2020,47(5):181-189.
- [15] SANTI P ,RESTA G ,SZELL M ,et al. Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014,111(37):13290-13294.
- [16] AGATZ N, ERERA A L, SAVELSBERGH M W P, et al. Dynamic ride-sharing: A simulation study in metro Atlanta[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2011,17:532-550.
- [17] CORDEAU J F ,LAPORTE G. A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem[J]. *Transportation Research, Part B*, 2003,37(6):579-594.
- [18] JUNG J, JAYAKRISHNAN R, PARK J Y. Dynamic shared-taxi dispatch algorithm with hybrid-simulated annealing [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2016,31(4):275-291.
- [19] JAVIER, ALONSO-MORA, SAMITHA, et al. On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017,114(3):462-467.
- [20] CEPOLINA E M, FARINA A. A new shared vehicle system for urban areas [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012,21(1):230-243.



**ZENG Wei-liang**, born in 1986, Ph. D., associate professor. His main research interests include routing problem in complex network, traffic simulation and big data visualization for smart city.



**SUN Wei-jun**, born in 1975 , Ph.D, lecturer, is a member of China Computer Federation. His main research interests include internet of thing and machine learning.