

未来城市自动驾驶共享汽车规模研究： 以上海为例

姚晓锐^{1,2}, 王冠¹, 杨超^{*1,3}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海宣怀教育科技有限公司, 上海 200050; 3. 同济大学 城市交通研究院, 上海 200092)

摘要: 随着自动驾驶技术的发展, 未来以自动驾驶共享汽车(Shared Autonomous Vehicle, SAV)替代有人驾驶汽车成为可能. 使用SAV满足城市居民机动化出行需求的情况下, 研究SAV的车辆规模. 从上海市300万手机用户信令数据中提取机动化出行需求, 考虑上海市实际路况的影响, 建立基于车辆可共享网络的图论模型, 将最小车队规模问题转化为有向无环图的最小路径覆盖问题, 利用Hopcroft-Karp算法求解. 求解得到, 12.8万辆SAV可以满足300万手机用户的机动化出行需求. 研究最大调度时间限制、服务范围限制、交通拥堵对SAV车辆规模的影响, 为自动驾驶技术普及后, 从城市层面确定SAV的车队规模及相应基础设施规划提供参考.

关键词: 智能交通; 自动驾驶; 车队规模; 车辆可共享网络; 最小路径覆盖; Hopcroft-Karp算法

Exploring Fleet Size of Shared Autonomous Vehicles in Future City: A Case Study in Shanghai

YAO Xiao-rui^{1,2}, WANG Guan¹, YANG Chao^{*1,3}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai HH Institute Co., Ltd. Shanghai 200050, China; 3. Urban Mobility Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The development of autonomous driving technology has made it possible to replace traditional manned vehicles with Shared Autonomous Vehicles(SAV) in the future. The SAV's fleet size problem is studied in the case of using SAV to meet all motorized travel demands of residents. The cell phone signaling data of 3 million users in Shanghai was used, and the motorized travel demands were extracted from it. The impact of actual road conditions in Shanghai was considered. A graph theory model based on the vehicle-sharing network was established to convert the minimum fleet size problem into the minimum path cover problem of directed acyclic graphs, which was solved by the Hopcroft-Karp algorithm. 128 000 SAVs are needed to meet the motorized travel demands of 3 million cell phone users. The impact of maximum scheduling time limit, service area limitation and traffic congestion on fleet size are also studied. Providing a reference for determining the fleet size of SAVs and corresponding infrastructure planning at the city level after the popularization of the autopilot technology.

Keywords: intelligent transportation; autopilot; fleet size; vehicle-sharing network; minimum path cover; Hopcroft-Karp algorithm

收稿日期: 2019-06-24

修回日期: 2019-09-29

录用日期: 2019-10-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金/ Fundamental Research Funds for the Central Universities of Education of China (22120180241).

作者简介: 姚晓锐(1978-), 男, 山西太原人, 博士生.

*通信作者: tongjiyc@tongji.edu.cn

0 引言

随着社会经济发展,中国城市机动化率迅速提高,机动车保有量也呈爆发式增长.相关研究表明,对于拥有私人小汽车的家庭,大约平均17%的时间使用汽车^[1],小汽车在大部分时间是处于闲置状态,造成严重的资源浪费.

自动驾驶技术的研究正在如火如荼地进行.2009年至今,谷歌无人车在自动驾驶模式下已经累积行驶228.5万km.2015年12月,百度公司宣布其自动驾驶汽车在国内首次实现城市、环路及高速公路混合路况下的全自动驾驶.2018年4月11日,工信部、公安部、交通运输部印发《智能网联汽车道路测试管理规范(试行)的通知》,表达了政府对自动驾驶技术发展的支持.与此同时,分时租赁汽车已经取得了较成功的应用,知名的有EV-CARD、Car2go、Zipcar等.随着自动驾驶技术的发

展,未来两者的融合是必然趋势,称为自动驾驶共享汽车(Shared Autonomous Vehicle, SAV).在城市层面(如上海),如果使用SAV来满足居民所有的机动化出行需求,需要解决SAV的最小车队规模,车辆之间如何调度,影响车队规模的因素等问题.

1 出行衔接判别

1.1 数据介绍

本研究使用上海市2015年5月4日一天内约300万手机用户信令数据,数据记录了该用户一天中某时间在某基站附近的信息.将产生信令数据的基站位置看作用户的大致位置,得到用户连续的时空轨迹.另外,有一份基站属性表,详细记录了上海市的基站信息,其基站编号和手机信令数据中的基站编号是一一对应关系,如表1所示.

表1 数据样例及字段说明

Table 1 Data sample and fields description

字段所属	字段含义	取值/数据格式	示例
手机信令数据	用户编号	IMSI编号	0627****6965
	进入基站时间	YYYYMMDDHHMMSS	20150504092217
	离开基站时间	YYYYMMDDHHMMSS	20150504113230
	基站中停留时间		7 813 s
	基站编号		4 830
基站属性表	基站编号		4 830
	基站所处经度		122.075 102°
	基站所处纬度		30.591 716°

1.2 出行提取

得到用户一天连续时空轨迹后,首先提取出行需求.本研究结合叶文等^[2]研究,采用此用户在一个基站内的停留时间若大于30 min,则认为此用户为一次停留,两次停留之间为一次出行的判断标准.经过划分出行,共得到426万余次出行,对应着202万余用户.上述出行是全方式的出行,包含步行、小汽车、公交等方式,本研究替代的是机动化出行需求,需从中识别出机动化出行.借鉴王璞等^[3]的专利,识别机动化出行的标准为:

(1) 一次出行时间大于10 min,小于3 h;

(2) 一次机动化出行的出行距离大于3 km,且出行速度大于8 km/h.

在计算出行距离时,受制于百度地图API一天

访问次数的限制.本文在上海市范围内选择一足够大的矩形,栅格化为100个小矩形,分别计算两两顶点间的最短路距离和直线距离,得到上海市域范围内,两点间最短路距离与直线距离的平均比值,如图1所示.

统计不同比值区间的情况,区间[1.1,1.2)和[1.2,1.3]两部分的数量约占总体72.2%,得到上海市域范围内最短路与直线距离的平均比值为 $\beta=1.255$.得到 β 后,将基站所处位置近似看作用户位置,然后计算两两基站之间的直线距离,使用 β 扩大得到最短路距离,认为是出行距离.一次出行的开始和结束时间均已知,差值为出行时间,得到出行速度.经过识别机动化出行后,得到110万余用户的180万余次机动化出行记录.图2是按照

出发时间排列,统计每30 min的出行数,1 min内出行数最多的,大约有4 300次出行需求.



图1 栅格矩形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rasterized rectangle

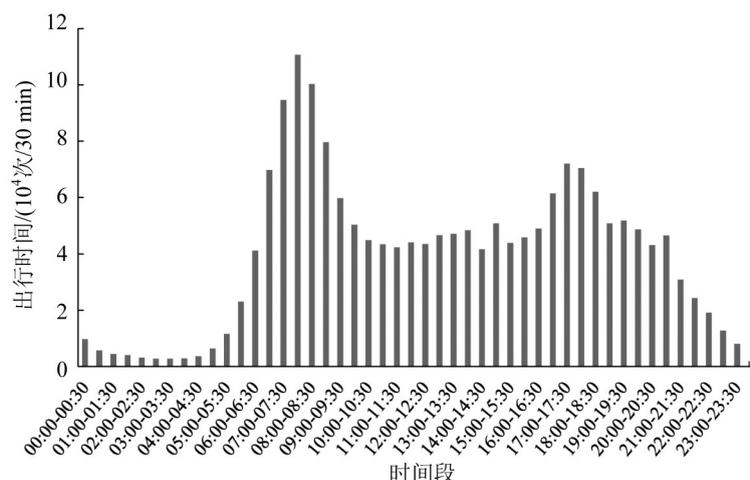


图2 机动化出行数量时间分布图

Fig. 2 Distribution of motorized travel demands

表2 选取典型地点及特征

Table 2 Selected representative locations and characteristics

编号	地点	经度/纬度	特征
1	同济嘉定校区	121.218 366°/31.288 279°	黄浦江以西外环外
2	浦东国际机场	121.815 020°/31.157 386°	黄浦江以东外环外
3	桃浦站	121.395 622°/31.304 187°	黄浦江以西外环—中环间
4	孙桥中学	121.637 752°/31.178 828°	黄浦江以东外环—中环间
5	上海西站	121.407 936°/31.268 594°	黄浦江以西中环—内环间
6	上海超级计算中心	121.607 141°/31.217 672°	黄浦江以东中环—内环间
7	上海自然博物馆	121.468 584°/31.241 363°	黄浦江以西内环内
8	上海科技馆	121.548 905°/31.225 379°	黄浦江以东内环内

考虑往返的情况,8个地点间共有56条线路,以04:00调用百度地图Route Matrix API获取的行程时间作为自由流行程时间.分工作日和周末,进行

1.3 行程时间调整系数

判断两次出行是否可衔接(由同一辆车完成)的过程中,受制于实际路况,在不同时刻计算同一起终点之间的实际行程时间是不同的,需对其进行调整,即 $t_{ij} = a_{\tau} \tilde{t}_{ij}$, 其中, \tilde{t}_{ij} 为 i, j 之间自由流行程时间, a_{τ} 为 τ 时刻行程时间调整系数.

为确定 a_{τ} , 本研究通过调用百度地图的Route Matrix API, 选取上海市具有代表性的8个地点, 所选地点的名称及特征如表2所示. 在一周时间内, 每隔30 min 计算两两间最短路的实际行程时间, 以此来反映上海市总体路况. 最后求得不同时刻行程时间的均值, 根据工作日和周末分别进行聚类, 得到上海市工作日和周末的高峰时间段, 以及相应时间段的行程时间调整系数.

k -means 聚类, 工作日 $k=3$, 周末 $k=2$, 结果如下.

- (1) 工作日, 分为3类: 第1类为 00:00-06:30, 21:00-24:00, $a_{\tau} = 1.273$; 第2类为 06:30-07:00,

10:00-16:00,19:00-21:00, $a_r=1.674$;第3类为07:00-10:00,16:00-19:00, $a_r=2.066$.

(2) 周末,分为2类:第1类为7:00-21:00, $a_r=1.603$;第2类:00:00-07:00,21:00-24:00, $a_r=1.308$.

1.4 出行衔接

为求解最小车队规模,需要知道哪些出行可由一辆SAV服务,即出行衔接.若两次出行可以衔接,代表一辆车在服务上次出行后,有充足的时间行驶至下次出行的出发地点.本研究相关参数如表3所示.

表3 主要变量
Table 3 Main variables

符号	说明
Γ	一天出行的集合
$T_i=(t_i^p, t_i^d, l_i^p, l_i^d) \in \Gamma$	一次出行需求
t_i^p	出行 i 的期望出发时间
t_i^d	出行 i 期望到达时间
l_i^p	出行 i 的期望出发地点
l_i^d	出行 i 的期望到达地点
t_{ij}	衔接出行 i 和出行 j 的调度时间
δ	调度时间上限

其中, t_i^p 、 t_i^d 、 l_i^p 、 l_i^d 在提取出行的过程中均已得到,未知的只有 t_{ij} .当 $t_i^d + t_{ij} \leq t_j^p$, 且 $t_j^p - t_i^d \leq \delta$ 时,即可判断 i, j 两次出行可衔接.

将上海市04:00的车流情况看作自由流,计算1.2节中100个地点之间04:00的行程车速均值,连续计算5d,分别为9.40、9.35、9.41、9.37和9.40 m/s,平均是9.39 m/s,因此本研究采用的自由流速度为9.39 m/s.在具体计算两次出行是否可衔接的过程

中,从前一次出行的终点到后一次出行的起点,计算两点之间的直线距离,乘以 β ,得到最短路径距离.根据调度所处的时间段,对自由流速度进行折减,得到下次出行出发前,一辆SAV是否有足够时间调度至其出发地点,为后续建立模型打下基础.

2 建立模型

本文在Vazifeh等^[4]研究的启发下,建立车辆可共享网络求解最小车队规模问题.本研究不考虑合乘情况,因为出行需求是事先已知的,是静态的车辆共享问题.基本假设如下:

- (1) SAV提供的是点到点的服务,即中途没有换乘;
- (2) 两次出行需求之间的调度采用最短路径;
- (3) 对最长调度时间的约束是硬性的;
- (4) 在一次出行开始前,必定已有一辆SAV停留在出发地,不存在延误出行的情况.

给定一个有向网络 $V=(N, E)$, N 为网络节点集合, E 为网络的边的集合,节点代表一次出行.根据1.4节的计算,若两次出行可衔接,在代表两次出行的节点间加一条有向边;若不能衔接,则不添加边,得到车辆可共享网络如图3所示.

求解最小车队规模的问题等价于寻找到最少的路径覆盖到所有的节点,且每一个节点有且仅能被覆盖一次.这样得到的最小路径数,即为所需的最小车队规模,每一条路径包含的节点,即为相应一辆SAV所能满足的出行需求的编号序列,即为调度策略,如图3所示.

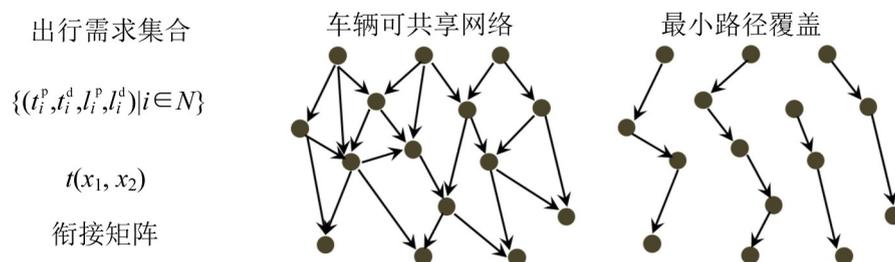


图3 图论模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of graph theory model

Hopcroft-Karp算法是对匈牙利算法的改进,由John E. Hopcroft和Richard M. Karp于1973年提出.算法实质仍是匈牙利算法求增广路,改进的地方是在深度搜索增广路前,先通过广度搜索,查

找到多条不相交的增广路,提高搜索效率,故在时间复杂度上显著优于匈牙利算法.后续使用Hopcroft-Karp算法求解车辆可共享网络的最小路径覆盖问题.

3 结果分析

3.1 最小车队规模

使用全部的180万余次出行需求构建车辆可共享网络时,网络过于庞大,超出了电脑的处理能力.因此,采用随机抽样的方法,分别抽取1万,5万,10万,15万,20万,⋯,50万次出行需求,设置最大调度时间为15 min,经多次计算,分别得到对应的最小车队规模.选择增长、对数、幂函数等5种拟合曲线进行拟合,得到幂函数拟合曲线的 R^2 值最大,达到0.995,拟合效果最好,如图4所示.得到的拟合曲线方程为

$$y = \exp[0.679 \ln(x) + 1.97727] \quad (1)$$

式中: y 为最小车队规模; x 为出行需求数量.

可看出随着出行需求数的增多,最小车队规模的增长幅度越来越缓.约300万手机用户对应的机动化出行需求是180万余次,代入拟合方程,得到SAV的最小车队规模是127 781辆,即为满足300万手机用户的出行需求,SAV的最小规模是约12.8万辆(平均替代率为14.1次/辆).

随着出行数的增多,SAV各项参数的变化情况如表4所示.与上海市2009年部分出租车数据

计算得到的参数进行对比:在平均每车行驶里程、平均每车载客里程和替代率上,出租车均大于SAV;里程利用率和平均乘距,SAV大于出租车.SAV车队和出租车的服务模式存在显著差别,SAV车队是事先知道各出行需求,并事先计算好最优服务顺序和调度路径的,而出租车大部分仍是巡游状态,故里程利用率上会显著降低.通过手机信令数据提取的出行需求,除出租车出行外,还包括私家车、公交车和地铁的长距离出行,在平均乘距上会大一些.

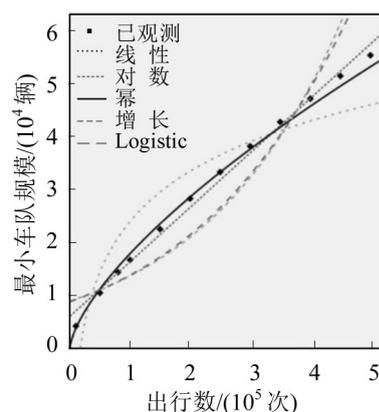


图4 最小车队规模变化

Fig. 4 Variation of minimum fleet size

表4 SAV各参数变化及与出租车数据对比

Table 4 Variation of SAV parameters and comparison with taxi data

参数	车队规模/辆	平均每车行驶里程/km	平均每车载客里程/km	里程利用率/%	替代率/(次/辆)	平均乘/km	
SAV 出行 需求	1万次	4 163	37.0	32.7	88.4	2.4	13.6
	5万次	10 442	77.7	66.1	85.1	4.8	13.8
	8万次	14 334	90.7	76.7	84.5	5.6	13.7
	10万次	16 665	97.7	82.3	84.3	6.0	13.7
	15万次	22 486	109.1	91.8	84.1	6.7	13.8
	20万次	28 254	116.1	97.3	83.9	7.1	13.8
	25万次	33 277	123.2	103.3	83.8	7.5	13.7
	30万次	38 148	129.5	108.5	83.8	7.9	13.8
	35万次	42 734	134.6	112.6	83.7	8.2	13.7
	40万次	47 139	139.6	116.8	83.7	8.5	13.8
	45万次	51 437	144.0	120.4	83.6	8.7	13.8
	50万次	55 347	148.8	124.2	83.5	9.0	13.8
	2009年出租车数据	4 629	341.7	219.8	64.3	34	6.5

3.2 最大调度时间限制

上述计算的最小车队规模是基于最大调度时间控制在15 min得到的,为研究不同最大调度时间限制对车队规模的影响,分别抽取5万和10万次出行,设定最大调度时间分别为0,5,10,⋯,60 min,

分别计算对应的最小车队规模,结果如图5所示.随着最大调度时间的增大,最小车队规模先急剧降低而后幅度越来越缓,最后基本在最大调度时间为30 min时趋于稳定.

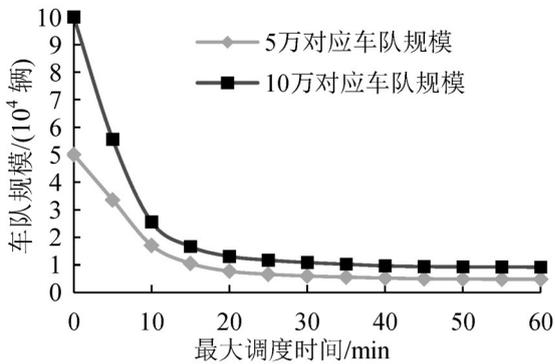


图5 不同调度时间对应车队规模变化

Fig. 5 Variation of minimum fleet size corresponding to different dispatch time

3.3 服务范围限制

限制一次出行需求的出发点和到达点均在海外环以内,筛选后共有77万余次机动化出行.在最大调度时间 δ 限制为15 min下,分别抽取1万,5万,10万,15万, ..., 50万次出行,最小车队规模变化如图6所示.可知两种车队规模之间的差值存在先增大后减小的变化趋势,当抽取出行数在临界点之前时,一辆SAV一天可满足的出行还未饱和,有更多的出行是已存在的SAV继续服务的;当超过临界点之后,两种服务范围下,一辆SAV可满

足的出行均饱和,因此两者间的差值减小.

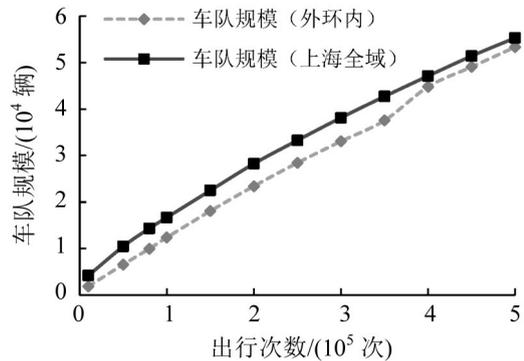


图6 服务范围不同对车队规模影响

Fig. 6 Impact of different service area on fleet size

3.4 交通拥堵影响

为实现车辆共享,从总的车公里的角度来说,需要增加19.7%的行驶距离.本研究之前的行程时间调整系数 a_r 是在有人驾驶条件下得到的,未考虑由于车辆共享导致车公里数的增加从而加重拥堵的情况,因此高峰时段会发生改变.以时间和 a_r 值为横、纵坐标,其包围的面积作为总行程时间,然后增加19.7%,增加的面积通过延长高峰时间得到,合理分配到早晚高峰,取整到30 min,得到新的高峰时间段分配如图7所示.

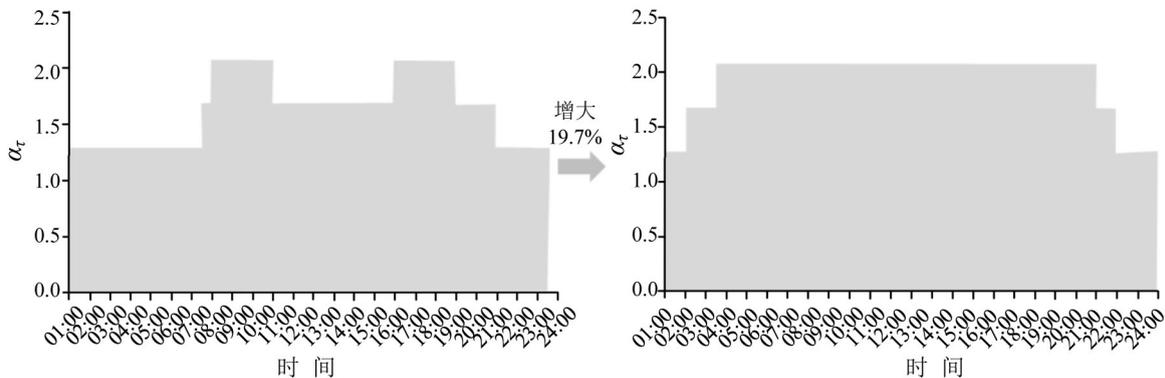


图7 高峰时段变化图

Fig. 7 Variation of peak hours

包围的面积增加19.7%后,高峰时间段从图7的左图变为右图,工作日分为3类:第1类为00:00-01:00,22:00-24:00, $a_r=1.273$;第2类为01:00-02:30,21:00-22:00, $a_r=1.674$;第3类为02:30-21:00, $a_r=2.066$.

从图7可看出,考虑交通拥堵影响后,高峰时间段显著延长.按此划分的时间段,重新判别出行

衔接,分别抽取5万次和10万次出行,得到最小车队规模分别是12 994辆和19 569辆,相比未考虑高峰时间变化的10 442辆和16 665辆分别增长了24.4%和17.4%.未考虑高峰时间变化时,抽取5万次出行的替代率是4.79次/辆,10万次出行的替代率是6.00次/辆;变化后的替代率分别是3.85次/辆和5.11次/辆,替代率分别降低了19.6%和14.8%.

4 结 论

本文以上海为例,从300万手机信令数据中提取机动化出行需求,研究使用SAV满足此部分需求所需的车队规模,得到约需12.8万辆SAV可满足,一辆SAV的平均替代率为14.1次/辆;并研究了最大调度时间限制、服务范围限制和交通拥堵对车队规模的影响,有助于未来SAV服务提供商平衡车队规模和出行服务质量,达到资源利用最大化。

本研究可从以下方面进一步完善:考虑加入合乘因素,设置一辆SAV的最大载客数,将出发时间相近、出发地和目的地接近的需求合乘后使用一辆SAV来满足,朱荣荣^[5]建立了基于共享网络的合乘匹配模型,可将本研究与其进行整合,以进一步减少车队规模;采用动态共享的方式,将服务区域划分为多个小区,考虑从单中心系统处理用户需求到多中心处理用户需求的转变,将动态车辆共享问题划分为多个静态车辆共享问题,宏观层面考虑每个静态车辆共享问题的协调互动性,微观层面考虑不同区域居民出行的差异性,对每一

个静态车辆共享进行针对性研究,以实现用户仅需提前几分钟提交需求,系统即可调度最优的SAV来满足出行。

参考文献:

- [1] Federal Highway Administration. National household travel survey[R]. Washington, D.C., U.S. Department of Transportation, 2009.
- [2] 叶文. 基于活动模式识别的个体分类及活动预测[D]. 上海: 同济大学, 2018. [YE W. Individual classification and activity type prediction based on activity pattern recognition[D]. Shanghai: Tongji University, 2018.]
- [3] 王璞, 曲迎春. 一种基于手机数据的交通出行方式划分的方法[P]. 中国: CN105809962A. [WANG P, QU Y C. Traffic trip mode splitting method based on mobile phone data[P]. China: CN105809962A.]
- [4] VAZIFEH M M, SANTI P, RESTA G, et al. Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility[J]. *Nature*, 2018(557): 534-538.
- [5] 朱荣荣. 大规模出租车动态合乘模型及算法研究[D]. 上海: 同济大学, 2017. [ZHU R R. Large-scale dynamic taxi ridesharing model and algorithm[D]. Shanghai: Tongji University, 2017.]