



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型  
作者：李杰文, 康朝贵  
DOI: 10.13203/j.whugis20210633  
收稿日期: 2021-11-18  
网络首发日期: 2022-07-19  
引用格式: 李杰文, 康朝贵. 一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210633>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210633

### 引用格式：

李杰文, 康朝贵. 一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210633 (Li Jiewen, Kang Chaogui. A space-time prism based ridesharing model for shared mobility[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210633)

## 一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型

李杰文<sup>1</sup> 康朝贵<sup>1,2</sup>

1 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079

2 中国地质大学(武汉) 国家地理信息系统工程技术研究中心, 湖北 武汉 430078

**摘要：**拼车作为城市共享出行的重要组成部分，获悉行程间的可拼性程度对城市推广拼车服务和提高乘客的出行效率具有重大意义。当前研究大多依据车辆在多个上下车点之间先后到达顺序是否满足相应的时空约束条件来判断拼车的可实现性，缺少有效建模行程可拼性强度的手段，在应对大规模拼车请求中无法快速全面地发现潜在可拼行程。为此，本文基于时空棱柱的建模方法和乘客共享意愿的时空表达，构建行程时空范围的潜在可达性模型，并将行程时空棱柱间的拓扑关系应用到行程的可拼性判断过程中，计算行程的可拼性强度；最后，提出了两种拼车匹配策略用于模拟真实出行环境下的拼车匹配结果。实验表明，本研究提出的行程时空棱柱可拼性判断模型能准确构建行程的潜在可达时空范围，使得发现潜在可拼行程的过程变得更加容易，实现了行程间可拼性程度的准确及有效判断，可视化分析的结果在呈现城市的行程可拼性能力和拼车结果的时空分布特征上表现出一定优势。在城市的共享出行系统中能为车辆资源调度方案和乘客拼车出行规划提供一定的决策支持。

**关键词：**共享出行；时空棱柱；道路网络；可拼性判断模型；拼车匹配策略

收稿日期：2021-11-18

项目资助：国家自然科学基金（41601484 和 41830645），国家重点研发计划（2017YFB0503600 和 2019YFE0106500）。

第一作者：李杰文，硕士研究生，主要从事交通大数据分析 with 挖掘。13672791068@163.com

通讯作者：康朝贵，博士，教授。kangchaogui@cug.edu.cn

城市交通出行中出租车及网约车服务是人们的主要出行方式之一，具有比公共交通更高的灵活性和便利性<sup>[1]</sup>。然而，更高的出行成本以及空间不平等一直是这种出行方式的劣势<sup>[2]</sup>。一车一用这种司机与乘客一对一的匹配模式，会导致环境中车辆的低满座率，增加乘客出行对空车的需求量，进一步加剧城市的交通压力<sup>[3]</sup>。随着共享经济的快速发展，涌现出更多共享车辆、共享出行等新的出行方式，使城市环境中的乘客出行效率有望得到提高<sup>[4]</sup>。其中，拼车作为重要的共享出行方式能够很好地解决城市出行需求带来的供需失衡、交通拥堵以及交通出行成本过高等问题<sup>[5]</sup>。而通过推广拼车服务这种司机与乘客一对多甚

至多对多的匹配模式，实现一车多用，能有效分摊乘客出行费用<sup>[6]</sup>，同时在一定程度上改变人们的出行行为方式，进而对城市环境保护、资源节约产生有利影响<sup>[7,8]</sup>。

拼车系统的实现需要考虑多方面的因素<sup>[9]</sup>。例如，如何发现行程间的可拼性，以满足乘客行程的容忍时间限制、车辆容量限制等出行规划需求<sup>[10]</sup>；如何最大化拼车带来的收益，实现最小化车辆需求量、最小化行驶总距离、最小化运营成本等出行目标<sup>[11-14]</sup>；如何提出最优的路线规划和资源调度方案；如何完善共乘系统中的信用和价格体系来提高乘客出行隐私及安全权益的保护程度等。值得注意的是，部分学者从基于人们活动行为模式进行建模的角度来实现拼车的潜在可行性<sup>[15-18]</sup>，充分利用乘客出行目的潜在可扩展性。相对于固定目的地的拼车方式，这种利用活动范围的灵活性来提高拼车可实现性的方式具有一定的可行性，但会增加对乘客活动要求的限制条件。

在以往的拼车研究中，判断行程间的可拼性大多数都是基于行程之间上下车点的先后到达顺序是否满足时间和距离的约束条件，来规划最优的车辆接送路线<sup>[19]</sup>。一段行程必须与所有的其他行程都进行上述的判断才能发现行程的可拼行程集，而不够充分的约束条件会在判断中产生冗余，并缺乏足够的准确性。此外，只通过上下车点之间的时间先后顺序来进行可拼性判断难以全面发现潜在的可拼行程。因此，如何更有效地发现一段行程的潜在可拼行程集，在提高拼车的可实现性上具有重要的研究意义。本文利用行程的潜在可达性 (Potential Accessibility, PA)<sup>[20]</sup>来描述行程在参与拼车时可偏离原本路线的潜在时空范围。在这段时空范围中，如果搭载该行程的车辆满足另一段行程的乘车请求，则表明行程间具有可拼性。因此，选取合适的模型对行程的潜在可达性进行建模，将行程的潜在可达范围应用到行程间的可拼性判断中将有利于解决上述提出的问题。

在拼车行为研究中，对行程的潜在可达区域建模的意义体现在两个方面。一是，利用行程的弹性时间能够准确地反映行程活动区域的时空范围<sup>[21]</sup>；二是，利用准确的时空范围能快速实现行程间的可拼性判断，提高拼车的可实现性。在时空地理学的层面，可达区域的建模通过构建潜在时空活动范围来实现，因此可沿用时空棱柱 (Space-time prisms, STP) 的概念<sup>[22]</sup>。时空棱柱是时间地理学中发现人类潜在活动空间的重要工具<sup>[23]</sup>，Bart Kuijpers 等人在文献<sup>[24]</sup>的最后提及到利用行程的时空棱柱来识别潜在的拼车伙伴，能为拼车服务提供潜在的会面地点。当一段行程在满足一定的时空容忍条件下 (即在规定的时间内到达目的地)，其最大活动范围便可通过时空棱柱的时空区域来描述<sup>[25,26]</sup>。因此，本文从行程的潜在可达区域建模出发，提出行程的时空棱柱模型。此外，区别于传统无限制访问范围的时空棱柱模型<sup>[23]</sup>，针对现实复杂的城市道路环境，本文采用以路网等因素为限制的道路时空棱柱模型加以建模<sup>[27,28]</sup>，它能更加精确地描述行程的潜在可达范围。本文的结构安排如下，首先通过对车辆在现实交通状况中的道路通行时间进行预估，以及模拟乘客的共享意愿和可容忍时间条件，作为行程时空棱柱的构建基础；其次，利用行程的道路时空棱柱模型对行程的潜在时空可达范围进行建模；最后，提出行程间基于时空棱柱的可拼性判断方法和呈现可视化分析的结果。

# 1 研究方法

## 1.1 道路通行时间估计

在构建严密的行程时空棱柱前，需要准确估计道路通行时间来保证时空棱柱范围的准确性，亦是行程时空容忍条件到潜在可达时空范围映射的关键所在。本文基于行程的起始点 (Origin-destination, OD) 信息，而不是基于载客车辆的实时 GPS 速度信息来估计城市道路的通行时间。原因在于，一是大量的 OD 流数据能很好的模拟了车辆在转弯、拥堵情况下的行驶时间，以及司机和乘客在上下车点的交互时间；二是在载客车辆的实时 GPS 数据中存在一定的隐私保护问题，不方便获取。因此，本文参考由 P. Santi 等人<sup>[19]</sup>提出的道路通行时间估计算法，使用基于行程 OD 流数据来估计道路实时通行时间。完整的估计流程如图 1 所示，在每一个时间段内，根据城市道路网络的道路长度以及该时间段内所有行程的行驶时间，对每一道路上的车辆平均行驶速度进行预估，生成道路上车辆的平均行驶通过时间。

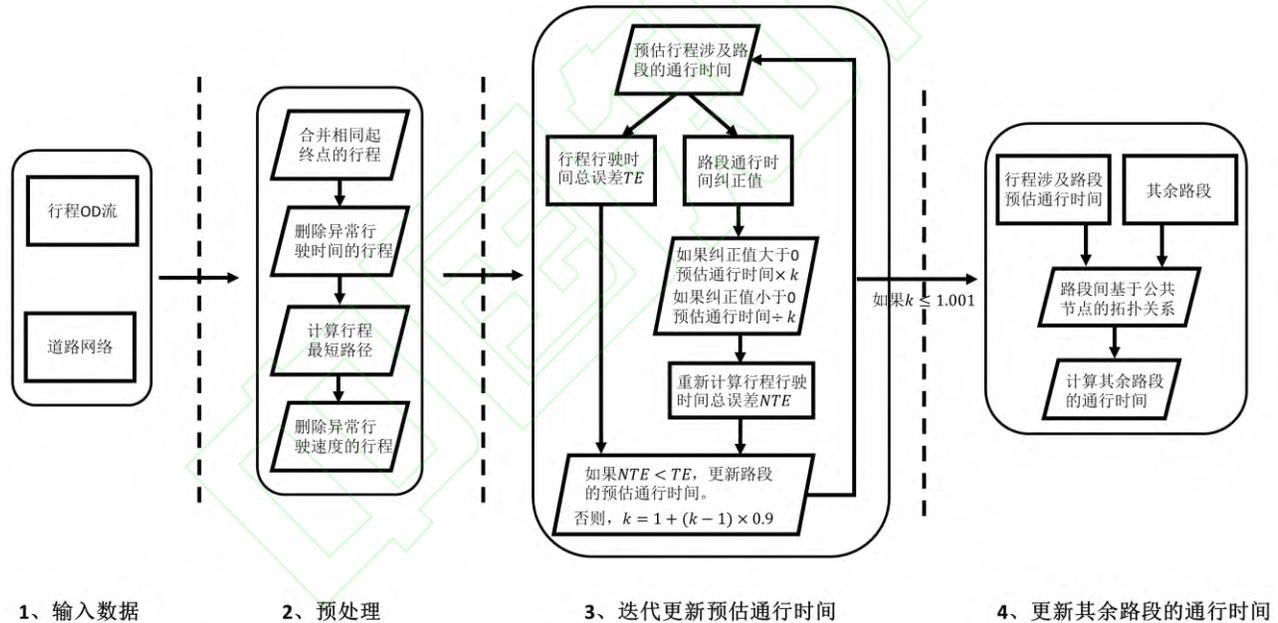


图 1 道路通行时间的估计方法

Fig.1 Estimation of road commuting time

输入数据包括城市道路网络  $G = (V, E)$ ，行程集  $\mathcal{T} = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ ，其中  $T_i = (v_{o_i}, v_{d_i}, t_i)$ ， $v_{o_i}, v_{d_i}, t_i$  分别表示行程的起点、终点以及持续时间。首先是数据的预处理部分，将相同起点  $o_i$  和终点  $d_i$  的行程归并到同一类行程中去，记为  $\mathcal{T}^{o_i, d_i}$ ，计算行程类的平均行驶时间  $\bar{t}_i = \frac{\sum_{T_j \in \mathcal{T}^{o_i, d_i}} t_j}{|\mathcal{T}^{o_i, d_i}|}$ ；同时，初始化每条道路的行速度  $av^{init}$ ，可通过路网数据的交通流参数获取。利用最短路径算法计算每个行程类  $\mathcal{T}^{o_i, d_i}$  的最短路径

$R^{o_i, d_i} = (e_p, e_{p+1}, \dots, e_q)$ ,  $R^{o_i, d_i} \in \mathbf{R}_{trip}$  和平均行驶速度  $av^{o_i, d_i} = \frac{\sum_{e_j \in R^{o_i, d_i}} e_j}{|R^{o_i, d_i}|}$ 。为了筛选有效的行程数据，去除“噪声数据”，在处理中过滤掉行驶时间过短或过长的行程类（即  $\bar{t}_i \leq 2\text{min}$  or  $\bar{t}_i \geq 1\text{h}$ ）以及平均行驶速度过低或过高的行程类（即  $av^{o_i, d_i} \leq 0.5\text{m/s}$  or  $av^{o_i, d_i} \geq 30\text{m/s}$ ），因为这部分数据很可能是由某些特殊情况产生的（例如交通事故或极端天气导致的异常数据等），会对道路通行时间的估计产生影响。

估算道路通行时间的方法为确定行程类的平均行驶时间分配在行驶路径上每一段道路的时间长短。假设每段行程的路径都由最短路径确定，本文通过迭代估计的方法不断更新每一段道路的估计通行时间，再重新计算行程类的最短路径，最后使道路的估计时间接近分配的时间。具体的方法如下，在每一步的迭代过程中，利用最短路径算法计算每个行程类的最短路径  $R^{o_i, d_i}$ ，根据道路的行驶速度计算行程的预估行驶时间  $et_{o_i, d_i}$ ，得到所有行程类的行驶时间与根据最短路径计算的行驶时间的总误差  $TE = \sum |et_{o_i, d_i} - \bar{t}_i|$ 。其次，对于所有行程最短路径所涉及的每一路段  $e_j$ ，依据该路段涉及的行程类的预估行驶时间和原本行驶时间之间的差值作为该路段的纠正值，并设置纠正系数  $k$ 。纠正系数表示纠正估计时间的程度，如果纠正值小于 0，则将路段的预估行驶时间乘以纠正系数，否则除以纠正系数。最后利用纠正后的路段预估时间重新计算行程类的新预估行驶时间  $et'_{o_i, d_i}$ ，再次计算时间总误差  $NTE = \sum |et'_{o_i, d_i} - \bar{t}_i|$ 。如果  $NTE < TE$ ，则更新所有行程的预估行驶时间  $et_{o_i, d_i} = et'_{o_i, d_i}$ ，同时另  $TE = NTE$ ，进行下一步的迭代过程；否则按一定比例缩减  $k$  值，直到  $k$  小于一定的阈值（即  $k \leq 1.0001$ ），表示迭代过程接近饱和，则退出，得到于行程类  $\mathbf{R}_{trip}$  所涉及路段的预估通行时间。此外，对于行程类  $\mathbf{R}_{trip}$  没有涉及的城市路段，估计的精度对研究影响程度不高，因为这些路段上几乎不会出现行程车辆，可利用初始化的道路速度来估计通行时间或根据其相邻路段的估计通行时间进行近似估计。

## 1.2 基于时空棱柱的行程潜在可达区域建模方法

行程的潜在可达区域建模依赖于定义的额外时空范围。在拼车情境中，车辆连续搭载多批乘客，司机和乘客虽然均能获得更高的订单收益，但需要在原本行程时间的基础上承担车辆绕路、相互等待等额外时间成本。因此，研究中默认乘客的拼车意愿强弱决定了其在拼车中所承担的额外成本上限，并基于乘客的最大可容忍时间，定义了行程潜在可达区域的时空范围。在本文的研究中，由于采用的数据是历史行程数据，包括了乘客现实出行中的上、下车时间。其中下车时间视为乘客的最早到达时间，因为这是乘客不考虑拼车等因素，在当时交通状况下的真实行程时间。在给定乘客的最大可容忍时间范围下，行程的潜在可达时空范围是准确定义的，由此建立的时空棱柱亦是严密的，它只取决于乘客的最大可容忍时间和现实生活中出行时间。本文对行程时空棱柱的具体建模方法如下：

在道路网络  $G = (V, E)$  中，其中  $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ ,  $E = (e_1, e_2, \dots, e_m)$ ， $E$  的权值定义为车辆平均通行时间  $w_{e_k}^t \in W^t$ ，由上文提出的道路通行时间估计算法得到。在本文的研究中，一段行程表示为  $T_i = \{(t_{o_i}, v_{o_i}), (t_{d_i}, v_{d_i}), \theta_i^d, \theta_i^w, \delta_i\}$ ，其中  $(t_{o_i}, v_{o_i})$  表示出发时空点， $t_{o_i}$  表示出发时间， $v_{o_i}$  表示出发位置；

$(t_{d_i}, v_{d_i})$ 表示在正常行程中(即不参与拼车)的到达时空点,  $t_{d_i}$ 表示到达时间,  $v_{d_i}$ 表示到达位置; 而 $t_{d_i}$ 可表示为 $D(v_{o_i}, v_{d_i}, W^t) + t_{o_i}$ , 其中 $D(v_{o_i}, v_{d_i}, W^t)$ 表示行程在对应上下车点之间的行驶时间。行程的最大可容忍时间包括最大额外行驶时间 $\theta_i^d$ 和最大额外等待时间 $\theta_i^w$ , 表示乘客愿意接受在参与拼车时产生的额外时间成本。在本文中, 研究默认乘客最大可容忍时间与原本行程时间存在关系, 用参数 $\alpha_d, \alpha_w$ 表示容忍时间与行程时间存在的线性关系。同时拟定了一个上限值 $\beta_d, \beta_w$ , 即乘客最大可容忍时间不会超过该上限值, 计算方式如下:

$$\begin{cases} \theta_i^d = \max(\alpha_d(t_{d_i} - t_{o_i}), \beta_d) \\ \theta_i^w = \max(\alpha_w(t_{d_i} - t_{o_i}), \beta_w) \end{cases} \quad (1)$$

在道路网络中, 一段行程 $T_i$ 的时空棱柱范围可表示为 $STP_i = f_{stp}((t_{o_i}, v_{o_i}), (t_{d_i}, v_{d_i}), \theta_i^d)$ ,  $f_{stp}$ 表示由上下车时空点和最大额外行驶时间映射构成的可达时空点集 $S_i$ , 任意时空点 $(t_k, v_k) \in S_i$ 满足以下条件:

$$D(v_{o_i}, v_k, W^t) + D(v_k, v_{d_i}, W^t) \leq t_{d_i} - t_{o_i} + \theta_i^d \quad (2)$$

对于行程 $T_i$ , 一个潜在可达的时空点应该保证乘客能在容忍时间内到达目的地, 其时空范围可表示为 $(t_k^p, t_k^q, v_k)$ ,  $(1 \leq k \leq N)$ , 包括行程 $T_i$ 到达该节点 $v_k$ 的最早到达时间 $t_k^p$ 和最晚到达时间 $t_k^q$ , 约束条件如下:

$$\begin{cases} t_{o_i} \leq t_k^p \leq t_k^q \leq t_{d_i} + \theta_i^d \\ t_k^p = t_{o_i} + D(v_{o_i}, v_k, W^t) \\ t_k^q = t_{d_i} + \theta_i^d - D(v_k, v_{d_i}, W^t) \end{cases} \quad (3)$$

因此, 一段行程 $T_i$ 的时空棱柱可表示为路网中所有潜在可达时空点的时空范围组合, 表示为 $STP_i = \{(t_{i_1}^p, t_{i_1}^q, v_{i_1}), \dots, (t_{i_k}^p, t_{i_k}^q, v_{i_k}), \dots, (t_{i_m}^p, t_{i_m}^q, v_{i_m})\}$ 。由于每一段行程均要计算所有节点的时空范围, 在给定路网中任意节点之间的行驶时间下, 构建所有行程时空棱柱的计算复杂度为 $O(NM)$ ,  $N$ 表示行程数量,  $M$ 表示路网节点数量。

### 1.3 拼车模式分析

在具体定义拼车行为之前, 本文使用参数 $k(k \geq 2)$ ,  $c(c \geq 2)$ ,  $v(v \geq 1)$ 控制下的不同拼车模式来表示拼车中可能出现的复杂情况。如图2所示, 灰色箭头表示车辆的行驶时间, 不同颜色的线段表示不同行程的持续时间, 在同一时刻同时存在的不同线段表示不同行程的乘客在对应车辆上的共乘时刻。其中,  $k$ 表示该次拼车行为所参与的行程数量,  $c$ 表示该次拼车行为车辆同时搭载的最大行程数量,  $v$ 表示该次拼车行为行程所使用的最大车辆数。于是, 本文将一次拼车行为定义如下: 如果车辆的路径规划能依次经过所有行程的上下车点, 并且保证满足所有乘客可容忍的时空约束条件, 则说明行程间构成拼车行为。对于多段行程参与的拼车行程, 必须保证其参与的每一段行程在出行中存在 $c \geq 2$ 的时段(即存在部分行程时段与其他人共乘), 另外, 参与的行程数量需满足 $k \geq 2$ , 且不存在车辆空载的情况。因为涉及多个行程、多个车辆及复杂共乘方式的拼车模式在现实生活中并不常见, 分析的价值亦不高, 大多只涉

及 2 个行程的拼车模式。因此在本文的研究中主要基于这种主要且容易实现的拼车模式(即 $k = 2, c = 2, v = 1$ )进行分析, 介绍相应的建模和匹配方法。

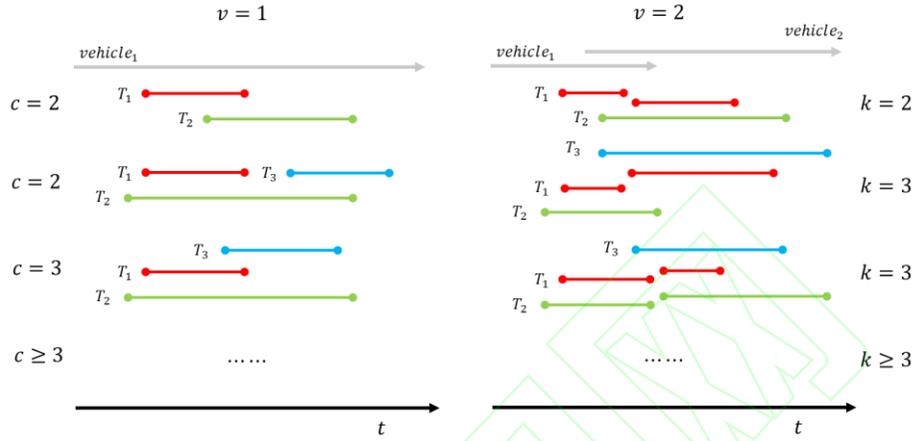


图 2 不同 $k, c, v$ 值下的拼车模式

Fig. 2 Ridesharing patterns with different values of  $k, c, v$

#### 1.4 拼车的可行性判断

在拼车中, 一段行程在满足一定的额外时空容忍条件下(即在规定的时间内到达目的地)的最大时空活动范围可以通过其构建的时空棱柱呈现的时空区域进行准确描述。若存在多段行程时空棱柱之间都涉及的时空区域, 既表明行程间存在拼车的可能。因此, 通过相应时空棱柱之间的交互关系进行行程间的可拼性判断能充分挖掘潜在的可拼行程。

在给定两段行程 $T_1 = \{(t_{o_1}, v_{o_1}), (t_{d_1}, v_{d_1}), \theta_1^d, \theta_1^w, \delta_1\}$ ,  $T_2 = \{(t_{o_2}, v_{o_2}), (t_{d_2}, v_{d_2}), \theta_2^d, \theta_2^w, \delta_2\}$ , 及其建模的行程时空棱柱 $STP_1$ 和 $STP_2$ , 拼车的可行性表现为司机在双方乘客的最大可容忍时间范围内, 完成四个上下车点的接送任务。具体的组合方式如图 3 所示, 可分为两种情形(假设行程 $T_1$ 的下单时间在 $T_2$ 之前): 一为先完成行程 $T_1$ , 即 $v_{o_1} \rightarrow v_{o_2} \rightarrow v_{d_1} \rightarrow v_{d_2}$ ; 二为先完成行程 $T_2$ , 即 $v_{o_1} \rightarrow v_{o_2} \rightarrow v_{d_2} \rightarrow v_{d_1}$ 。

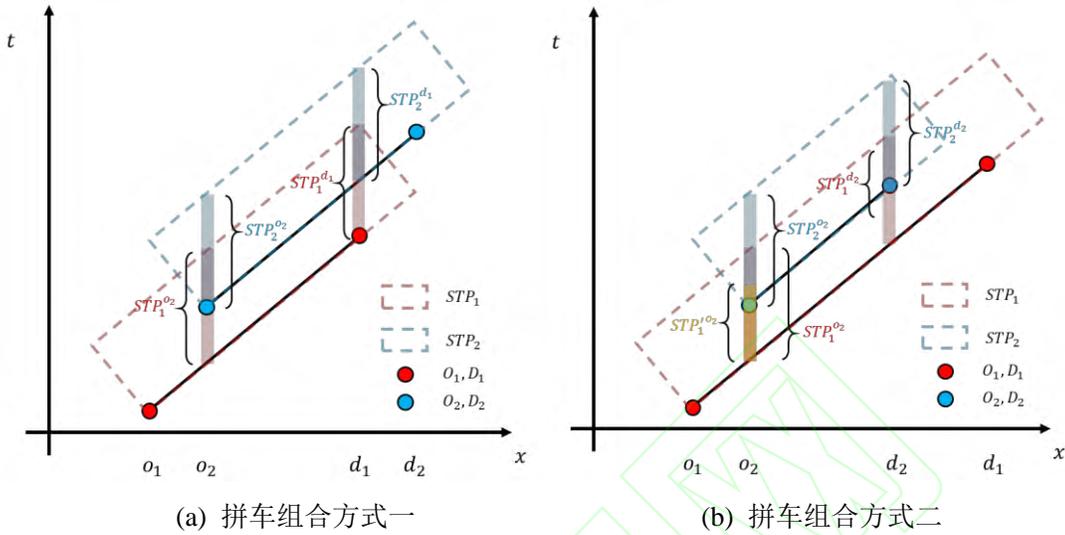


图 3 一维空间下的时空棱柱可拼性判断模型

Fig.3 STP ridesharing identification model in one-dimensional space

对于第一种拼车组合方式，如公式(4)所示。首先，司机必须在 $T_1$ 行程的可达时空范围内前往 $T_2$ 行程的上车点 $v_{o_2}$ ，并且能顺利到达 $T_1$ 行程的终点 $v_{d_1}$ ，以完成 $T_1$ 行程。在时空棱柱的拓扑判断中表示为 $T_2$ 行程的上车时空点 $(t_{o_2}, v_{o_2})$ 存在于 $T_1$ 行程的时空棱柱 $STP_1$ 内。其次，司机必须在 $T_2$ 行程的可达时空范围内前往 $T_1$ 行程的下车点 $v_{d_1}$ ，并且能顺利到达 $T_2$ 行程的终点 $v_{d_2}$ ，以完成 $T_2$ 行程。在时空棱柱的拓扑判断中表示为 $T_1$ 行程的下车时空点 $(t_{d_1}, v_{d_1})$ 存在于 $T_2$ 行程的时空棱柱 $STP_2$ 内。图 3(a)在一维空间中描述了两段行程的第一种拼车组合方式。

$$\begin{cases} STP_1[(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2})] \cap STP_2[(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2})] \neq \emptyset \\ STP_1[(t_{d_1}^p, t_{d_1}^q, v_{d_1})] \cap STP_2[(t_{d_1}^p, t_{d_1}^q, v_{d_1})] \neq \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

对于第二种拼车组合方式，如公式(5)所示。因为要满足在完成 $T_1$ 行程的过程中，完成 $T_2$ 行程，而 $T_1$ 的时空棱柱 $STP_1$ 范围只能满足单个节点的潜在可达，并不能满足涉及两个节点行程的依次可达，因此在完成一个节点的可达判断后要对 $STP_1$ 的范围进行更新。如图 3(b)所示，首先需要满足司机在 $T_1$ 行程的可达时空范围都能同时前往 $T_2$ 行程的上车点 $v_{o_2}$ 和下车点 $v_{d_2}$ ，在时空棱柱的拓扑判断中表示为 $T_2$ 行程的上车时空点 $(t_{o_2}, v_{o_2})$ 和上车时空点 $(t_{d_2}, v_{d_2})$ 均存在于 $T_1$ 行程的时空棱柱 $STP_1$ 内。其次必须对 $STP_1$ 进行更新，点 $v_{o_2}$ 的时空范围必须受到在 $STP_1$ 时空范围内到达 $v_{d_2}$ 点的限制，即 $STP_1$ 在 $v_{o_2}$ 的时空上限更新为 $t_{o_2}^{q'} = t_{o_2}^q - D(v_{o_2}, v_{d_2}, W^t)$ ，再判断 $T_2$ 行程的上车时空点 $(t_{o_2}, v_{o_2})$ 是否处于更新后的时空范围内。

$$\begin{cases} STP_1[(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2})] \cap STP_2[(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2})] \neq \emptyset \\ STP_1[(t_{d_2}^p, t_{d_2}^q, v_{d_2})] \cap STP_2[(t_{d_2}^p, t_{d_2}^q, v_{d_2})] \neq \emptyset \\ t_{o_2}^{q'} = t_{o_2}^q - D(v_{o_2}, v_{d_2}, W^t) \\ STP_1[(t_{o_2}^p, t_{o_2}^{q'}, v_{o_2})] \cap STP_2[(t_{o_2}^p, t_{o_2}^q, v_{o_2})] \neq \emptyset \end{cases} \quad (5)$$

在现实行程的可拼性判断过程中，由于行程实际的出发时间存在变数，乘客和司机难以准时到达指定的上下车位置，可能存在第一批乘客和司机与第二批乘客互相等待的情况，即司机不能顺利地在 $v_{o_2}$ 接上第二批乘客。因此，需要考虑司机、行程在 $v_{o_2}$ 上车点的相互等待时间，具体等待时间的长短表示为 $ET_i^w$ ，如公式(6)所示。其中，行程 $T_1, T_2$ 的实际等待时间表示为车辆到达 $v_{o_2}$ 的时刻与行程 $T_2$ 开始等待时刻的差值，它必须满足小于最大额外等待时间 $\theta_1^w, \theta_2^w$ 的约束条件。值得指出的是，等待时间的长短并不会影响到其时空棱柱 $STP_1, STP_2$ 的具体结构变化，因为时空棱柱的具体范围取决于最大额外行驶时间 $\theta_i^d$ 。在拼车判断中只需要将时空棱柱根据等待时间进行相应的上下平移操作即可，能方便地融入到行程时空棱柱的可拼性判断模型当中。

$$\begin{cases} ET_1^w = \max(0, t_{o_2} - t_{o_1} - D(v_{o_1}, v_{o_2}, W^t)) \\ ET_2^w = \max(0, t_{o_1} + D(v_{o_1}, v_{o_2}, W^t) - t_{o_2}) \\ ET_1^w \leq \theta_1^w \\ ET_2^w \leq \theta_2^w \end{cases} \quad (6)$$

对于行程集 $\mathcal{J}$ ，所有行程间的可拼性判断流程如图4所示。算法的最大复杂度为 $O(N^2)$ ， $N$ 表示行程数量，即对每个行程的上下车点时空棱柱范围存在拓扑相交的行程进行可拼性判断。实际上，由于潜在可达时空范围的限制，每个行程的上下车点时空范围中存在拓扑相交的行程时空棱柱数量远小于 $N$ ，筛选后参与行程可拼性判断的行程数量远小于 $N$ 。因此实际上整体算法的复杂度会远小于 $O(N^2)$ 。

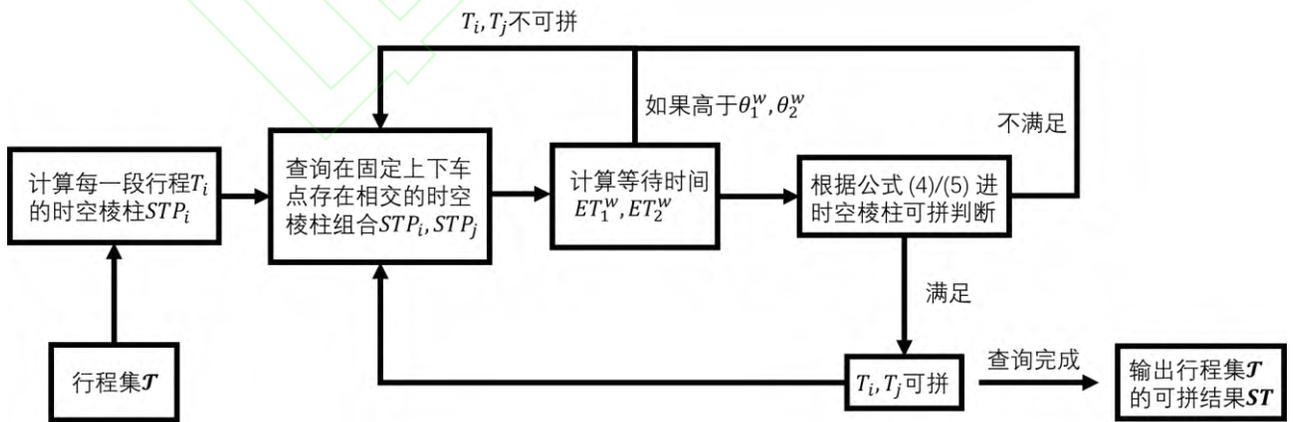


图4 行程可拼性判断流程图

Fig.4 Flowchart of ridesharing identification

上述研究从拼车的基本模式出发，给出了基于时空棱柱的行程可拼性判断模型，据此能拓展研究  $k(k \geq 3)$ ,  $c(c \geq 3)$ ,  $v(v \geq 2)$  复杂情况下的拼车形式。本文基于研究内容的限制只给出以下的讨论设想：对于更多行程依次参与的情况 ( $k \geq 3$ )，通过将时空棱柱不断进行更新来简化复杂的可拼性判断过程。对于连续参与拼车的行程集  $(\dots T_i, T_{i+1}, T_{i+2})$ ，假设  $(\dots T_i, T_{i+1})$  满足拼车的条件，于是行程  $T_{i+2}$  的可拼性判断可根据公式 (4) 和 (5) 在  $STP_{U_{i+1}}$  与  $STP_{i+2}$  之间进行。其中， $STP_{U_i} = f_{stp}((t_{i_a}, v_{i_a}), (t_{i_b}, v_{i_b}), \theta_{U_i}^d)$  表示对行程集合  $(\dots T_i)$  进行可拼性判断过程后产生的新时空棱柱范围，参数分别表示前  $i$  个行程构成的拼车行程中最后两个时空节点和合计最大额外行驶时间。 $STP_{i+1}$  表示行程  $T_{i+1}$  的时空棱柱范围。两段时空棱柱范围通过  $f_u$  函数更新，得到时空棱柱范围  $STP_{U_{i+1}} = f_u(STP_{U_i}, STP_{i+1})$ ，其中  $f_u$  函数的具体计算公式如下：

$$f_u(STP_{U_i}, STP_{i+1}) = \begin{cases} v_{(i+1)_a} = v_{i_b} \\ v_{(i+1)_b} = v_{d_{i+1}} \\ t_{(i+1)_a} = t_{i_a} + D(v_{i_a}, v_{o_{i+1}}, W^t) + D(v_{o_{i+1}}, v_{i_b}, W^t) \\ t_{(i+1)_b} = t_{(i+1)_a} + D(v_{i_b}, v_{d_{i+1}}, W^t) \\ \theta_{U_{i+1}}^d = \max(t_{i_b} + \theta_{U_i}^d, t_{d_{i+1}} + \theta_{i+1}^d) - t_{(i+1)_b} \end{cases} \quad (7)$$

当同乘行程数量增加时 ( $c \geq 3$ )，基于行程  $T_1, T_2, T_3 \dots$  及其对应的时空棱柱  $STP_1, STP_2, STP_3 \dots$ ，可拼性判断与公式 (4) 和 (5) 类似，区别在于在相应时空点上需要考虑  $c$  段时空棱柱的相交判断，情况更为复杂；当所搭乘的最大车辆数变化时 ( $v \geq 2$ )，这种情况往往涉及车辆的最优调度决策，为了使车辆资源的更优分配以及拼车行程的更优实现，某些参与拼车的行程会依次搭载不同的车辆前往目的地。在这种情况下将某一行程  $T_i$  拆分成多段行程  $T_i^1, T_i^2 \dots$ ，分别参与不同车辆的可拼性判断过程，同时需要解决车辆资源优化配置等调度问题。由于本文篇幅的限制，复杂情况下的拼车模式并不是本文的研究重点，希望在以后的工作中将进一步增加自动化分析方法的实现及分析效率的探究。

### 1.5 拼车匹配策略

行程间的可拼性结果反映了行程的可拼性能力，但并不能呈现现实中的拼车结果，由于每一段行程只能参与一次拼车，需要按照一定的匹配规则筛选出合适的拼车匹配结果。首先，研究对行程集  $\mathcal{J} = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  得到的拼车结果  $\mathbf{ST} = (st_1, st_2, \dots, st_n)$ ，其中  $st_i = (T_p, \dots, T_q)$  表示行程  $T_i$  的可拼行程集，进行筛选，去除拼车收益较低的可拼行程。因为这部分拼车匹配的实现价值不高，同时过多的可拼行程会增加匹配优化的复杂度。用  $sr_{i,j}$  表示行程  $T_i$  和  $T_j$  拼车匹配的共享收益，计算公式如下：

$$sr_{i,j} = \frac{D_{i,j}^s}{D_{i,j}^c} \leq \tau \quad (8)$$

其中， $D_{i,j}^s$  表示乘客  $i$  和  $j$  共乘的路程， $D_{i,j}^c$  表示整个拼车行程路程， $\tau$  表示设定的最低共享收益值，在本文实验中取值为 0.2。 $sr_{i,j}$  反映了拼车行程中共乘路程所占的比例，因为在拼车行程中共乘的路程长短能直观展示拼车为出行成本带来的节约程度。更高的共乘路段比例表明参与的行程路径重合度更高，产生更高的共享收益，因此本文通过  $sr_{i,j}$  来表示拼车的共享收益程度。

在拼车匹配策略中，匹配过程表示为在某一时间段中，存在着正在服务于一趟行程的司机队列  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  以及待参与拼车的乘客队列  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ ，利用一定的匹配策略进行组合，得到相应的拼车匹配结果  $MR = \{\dots, (d_i, p_j), \dots\}$ ，( $d_i \in D, p_j \in P$ )。本文提出两种拼车匹配策略如下，一是先叫先安排成本最小的拼车匹配策略 (First call and minimum cost, FCMC)，对于先请求的乘客订单  $p_i$ ，优先在司机队列中寻找可拼的且拼车成本最小的司机  $d_j$  构成匹配，对应的行程为  $T_i, T_j$ ，相应的拼车成本记为  $sc_{p_i, d_j}$ ，计算公式见 (9) 和 (10)。其中， $ET_i^w, ET_j^w$  表示等待时间， $ED_i, ED_j$  表示额外行程时间。例如，在第一种拼车组合中， $ED_i = D(v_{o_i}, v_{o_j}, W^t) + D(v_{o_j}, v_{d_i}, W^t) - D(v_{o_i}, v_{d_i}, W^t)$ ；二是先叫先服务的拼车匹配策略 (First call and first service, FCFS)，对于先请求的乘客订单  $p_i$ ，优先在司机队列中寻找能最早到达订单  $p_i$  位置的司机  $d_j$  构成匹配，相应的到达时间记为  $at_{p_i, d_j} = t_{o_i} + D(v_{o_i}, v_{o_j}, W^t)$ ，相应的匹配策略的计算公式如 (11) 所示。此外，本文采用无拼车匹配策略 (No policy, NP) 的情况作为分析基准，即对于先请求的乘客订单  $p_i$ ，优先分配司机队列中的第一个满足可拼要求的司机  $d_j$  构成匹配。

$$sc_{i,j} = \left( \frac{ET_i^w}{t_{d_i} - t_{o_i}} + \frac{ET_j^w}{t_{d_j} - t_{o_j}} \right) + \left( \frac{ED_i}{D(v_{o_i}, v_{d_i}, W^t)} + \frac{ED_j}{D(v_{o_j}, v_{d_j}, W^t)} \right) \quad (9)$$

$$FCMC : \begin{cases} match_{p_i, d_j} = 1 & \text{if } sc_{p_i, d_j} = \text{Min}(sc_{p_i, d_1}, \dots, sc_{p_i, d_n}) \\ match_{p_i, d_k} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$FCFS : \begin{cases} match_{p_i, d_j} = 1 & \text{if } at_{p_i, d_j} = \text{Min}(at_{p_i, d_1}, \dots, at_{p_i, d_n}) \\ match_{p_i, d_k} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

## 2 实验分析

本文采用纽约曼哈顿区域一周的 TLC 黄色出租车历史订单数据<sup>[29]</sup>进行模拟实验。数据包含行程上下车点和上下车时间等相关属性的订单数据。并根据 OpenStreetMap<sup>[30]</sup>获取的路网数据，提取了曼哈顿主要的行驶道路和交叉口，构建城市路网  $G = (V, E)$ ，共计 3537 个节点和 6856 条边。本文采用拼车匹配率 (Percentage of shared travel, PS) 和平均可拼选择数 (Average shared travel options, ASO) 来描述曼哈顿区域的拼车结果，PS 表示某时间段内能够参与拼车的行程数与总行程数之间的比例，ASO 表示某时间段内行程的平均可选拼车数量，具体的计算公式如下：

$$PS(\alpha_d, \alpha_w, \beta_d, \beta_w, h) = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} P_i}{n_h}, P_i = \begin{cases} 1, & \text{if } T_i^p \neq \emptyset \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$ASO(\alpha_d, \alpha_w, \beta_d, \beta_w, h) = \frac{\sum_{i \in n_h} |st_i|}{2n_h} \quad (13)$$

根据本文提出的行程时空棱柱可拼性判断方法得到的曼哈顿区域每小时的行程拼车可选行程集  $ST_h = (st_1, st_2, \dots, st_{n_h})$ , ( $h = 1, 2, \dots, 24$ )。通过相应的拼车匹配策略, 可得到不同策略 ( $p = FCMC, FCFS, NP$ ) 支持下的最优拼车匹配结果  $ST_h^p = (T_1^p, T_2^p, \dots, T_n^p)$ 。为了分析不同乘客容忍参数  $\alpha_d, \alpha_w, \beta_d, \beta_w$  对拼车匹配率和平均可拼选择数的影响程度, 本文利用 FCMC 策略支持下的最优拼车匹配结果和行程拼车可选行程集绘制如图 5 所示的统计图:

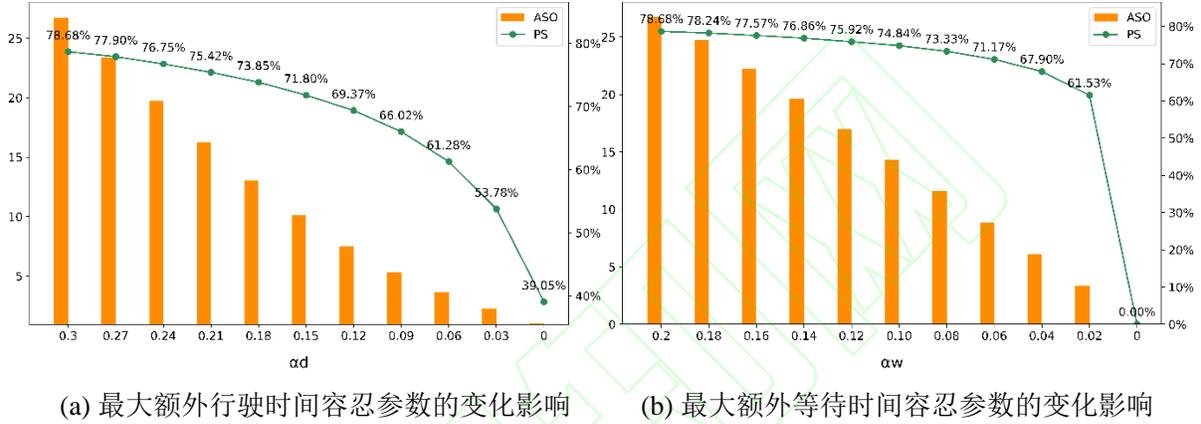


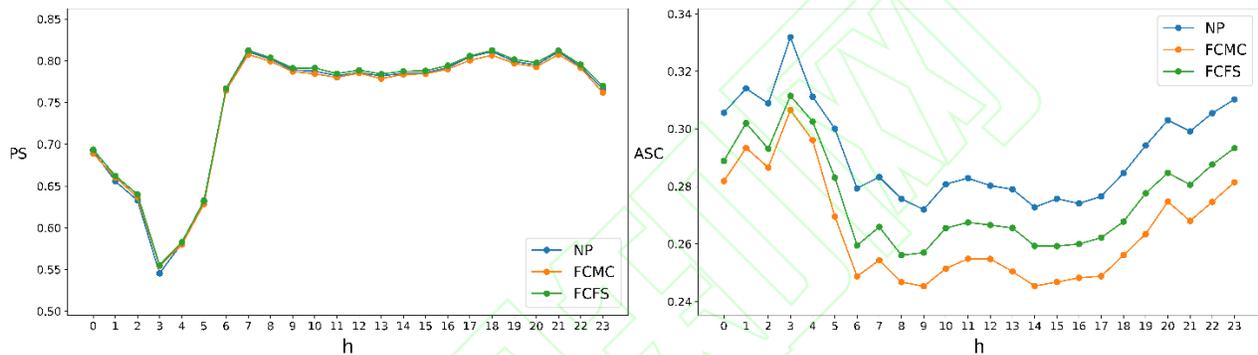
图 5 不同参数设置  $\alpha_d, \alpha_w$  下的匹配率 PS 及平均可拼选择数 ASO

Figure 5 PS and ASO with different  $\alpha_d, \alpha_w$

其中, 本文结合现实的乘客共享意愿和实际的匹配情况, 设定容忍参数的上限限制为  $\alpha_d \leq 0.3$ ,  $\alpha_w \leq 0.2$ ,  $\beta_d \leq 300s$ ,  $\beta_w \leq 300s$ , 即假设行程的最大额外行驶时间和最大额外等待时间不超过原本行程时间的30%和20%, 上限均为300秒。在乘客均愿意参与拼车的理想情况下, 更低的行程容忍时间参数表明更苛刻的拼车实现条件, 导致更低的拼车匹配率和可选数。在出行需求高发的曼哈顿区域, 额外行程容忍时间  $\theta^d$  对于匹配率的影响更为明显, 以至于在  $\theta^d = 0$  的情况下, 仍有一定数量的拼车行程满足条件, 这是因为存在一部分拼车行程的路线规划能够实现无额外行程距离的连接, 即最理想的拼车行程。相反, 最大额外等待时间  $\theta^w$  的变化对匹配率的影响并不大, 因为在高实时出行需求量的曼哈顿, 主要的节点都能存在一定的订单请求, 乘客和司机并不需要过多的时间等候即能够匹配合适的行程。然而, 却不能保证相应的拼车匹配方案同样满足低额外行驶时间的约束条件。因此拼车的可实现程度会更多地受到最大额外行驶时间  $\theta^d$  的影响。

此外, 本文考虑固定的参数设置 ( $\alpha_d = 0.3$ ,  $\alpha_w = 0.2$ ), 分析不同拼车匹配策略对不同时段拼车匹配率 PS 和平均额外拼车成本 (Averaged shared travel cost, ASC) 的影响程度, 其变化情况如图 6 所示。与实时变化的行程需求量相关, 匹配率的变化具有明显的时间相关性, 存在一定的高峰时段。虽然不同的拼车匹配策略对曼哈顿区域的拼车匹配率影响程度区别不大, 但对行程参与拼车产生的额外成本变化却有所区别。在整体的拼车成本变化中, 受到城市的出行早高峰期 (8 点至 9 点) 以及下午时段 (14 点至 17 点) 中

人们规律的出行模式影响，人们往往有着相似的上下车区域，例如早高峰期从城市居住区前往办公区等固定的出行模式，而相似的出行模式会降低拼车的实现成本；而在凌晨期间，受到低出行需求量的影响，拼车的实现成本会达到峰值。值得注意的是，在中午时段或晚高峰期期间，高的出行需求量、高的拼车匹配率并不会导致更低拼车实现成本，因为人们的出行模式大多差异明显，乘客在下班后多样化的出行目的地导致拼车实现中承担更长的绕路时间和等待时间，造成更高的拼车成本。另外，采用不同拼车匹配策略使得行程选择了各自认为更优的匹配行程，如 FCMC 策略注重成本的最小化，而 FCFS 策略为了满足乘客优先上车利益，导致了更大的拼车成本消耗。



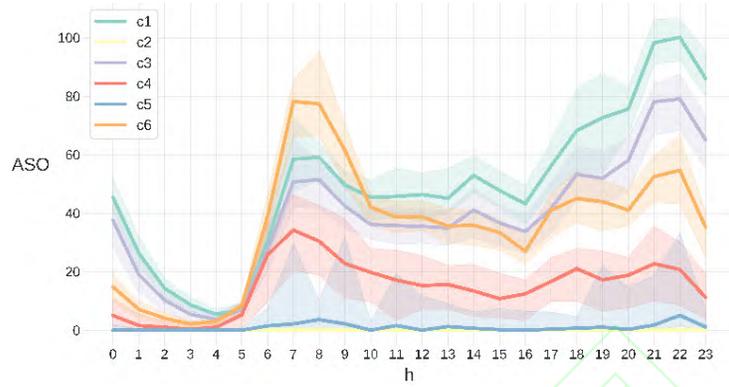
(a) 拼车匹配率随时间的变化趋势

(b) 平均额外拼车成本随时间的变化趋势

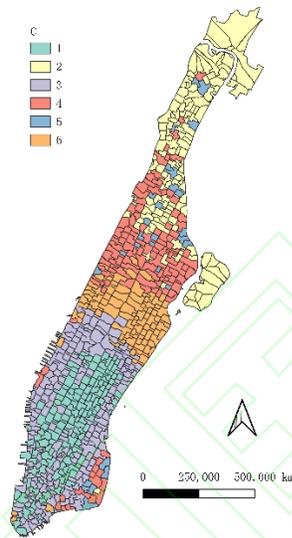
图 6 不同时间段下不同拼车匹配策略的匹配率 PS 及平均额外拼车成本 ASC

Figure 6 PS and ASC with ridesharing matching policies at different time

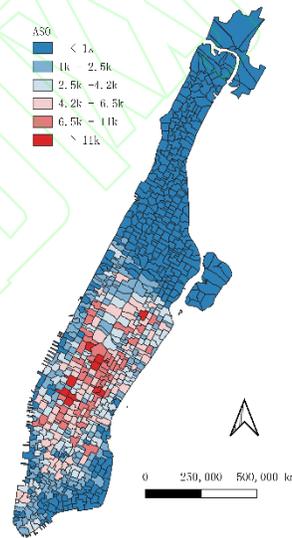
拼车结果的可视化在一定程度上呈现出城市行程可拼性强度的时空分布特征，本文通过分析以不同出发节点的行程 ASO 指标在一天中的变化情况，反映不同区域中行程的可拼性能力。如图 7 所示，研究将整个曼哈顿城市区域的节点按不同的可拼性能力分成了 6 类。每类区域中行程可选拼车数量相应一天的变化趋势如图 7(a) 所示，相应覆盖的空间区域如图 7(b) 所示。其中，不同区域行程可拼性强度的时间变化趋势反映了其一定的时空特性，例如，C6 类区域具有明显的住宅区特性(早高峰时期出发的行程具有更多的可拼行程选择)，而 C1 类区域具有明显的办公区和商业区特性，白天稳定，晚上高。此外，图 7(c) 描述了行程可拼性强度的空间分布图，每个区域的值表示行程的日平均可选拼车数量。与现实情况相符合，行程可拼性强度的地区都基本位于曼哈顿的中城区，因为其行程路径涵盖区域的高乘客出行需求量和行程间相似的路线规划使得越接近中心区域出发的行程具有更高的可拼性能力，呈现明显的空间分布特征。其中最高的几个区域分别位于车站(如纽约宾夕法尼亚车站、大中央总站)、时代广场、市中心公园出口、时代华纳中心等，都是常见的曼哈顿中心区域，现实中车辆在这些区域接取乘客也会更容易实现拼车。



(a) 不同类别区域的行程可拼性能力随时间的变化趋势



(b) 不同类别区域的空间分布



(c) 曼哈顿区域的行程可拼性能力分布

图 7 曼哈顿行程可拼性能力的时空分布特征及差异

Figure 7 Temporal-Spatial features and difference of ridesharing ability in Manhattan

### 3 结语

本文通过一种基于道路时空棱柱的建模方法直观呈现城市出行行程的潜在可达时空范围，提出了基于时空棱柱的拼车匹配判断模型，用于城市共享出行中的可拼性判断。本文证明了对行程的潜在可达区域进行时空棱柱建模，区别于利用上下车节点之间到达顺序的可拼性判断方法，通过在行程时空棱柱中的潜在相遇点的时空范围进行拓扑判断，能实现快速、有效地发现行程间的潜在可拼性。并且行程时空棱柱的时空范围可以随着乘客的共享意愿程度和额外可容忍时间条件进行方便地变化。换言之，能方便地生成符合实时交通状况下任意行程并满足乘客容忍时间要求的时空棱柱模型，来进行行程间的可拼性

判断及匹配工作，在表达性和准确性上得到提升。此外，本文对于复杂情况下的拼车模式，也提出基于时空棱柱分析和判断的构想，为未来研究复杂交通情境下的拼车实现形式提供一定的理论支持。

基于行程间的可拼性判断结果，本文还通过相应的可视化分析方法呈现城市的行程可拼性强度，并提出了两种拼车匹配策略，以模拟现实情况下的拼车匹配结果。同时，提出的行程的拼车匹配率和平均可拼选择数等计算指标用以捕捉城市行程可拼性能力的时空分布特征。分析的结果在城市的实时车辆调度决策和共享出行规划中具有一定的指导意义。综上所述，本研究对于推广城市拼车服务，在缓解道路压力和降低交通出行成本，以及提高乘客的共享意愿、增加共享利益及大规模拼车策略的优化实现中都具有前瞻意义。

## 参 考 文 献

- [1] Vuchic V R. Urban transit: operations, planning, and economics[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005
- [2] Ji Hangyu, Cai Zhongliang, Jiang Lili, et al. Analysis of Spatial Inequality in Taxi Ride and Its Relationship with Population Structure[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 766-776 (季航宇, 蔡忠亮, 姜莉莉, 等. 出租车出行的空间不平等及其与人口结构的关联[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2021, 46(5): 766-776)
- [3] Mitchell W J, Borroni-Bird C, Burns L D. Reinventing the automobile: personal urban mobility for the 21st century[M]. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2010
- [4] Botsman R, Rogers R. What's mine is yours: the rise of collaborative consumption[M]. New York: HarperBusiness, 2010
- [5] d'Orey P M, Fernandes R, Ferreira M. Reducing the environmental impact of taxi operation: The taxi-sharing use case[C]//2012 12th International Conference on ITS Telecommunications. Taipei, China.: 319-323
- [6] Ardekani S, Jamei B, Herman R. A Taxicab Fare Policy Formula Based on Fuel Consumption Observations[J]. *Transportation Research Record*, 1986, 1103:33-39.
- [7] Clewlow R R. Carsharing and Sustainable Travel Behavior: Results from the San Francisco Bay Area[J]. *Transport Policy*, 2016, 51: 158-164
- [8] Cervero R, Tsai Y. City CarShare in San Francisco, California: Second-Year Travel Demand and Car Ownership Impacts[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2004, 1887(1): 117-127
- [9] Xu Yi, Tong Yongxin, Li Wei. Recent Progress in Large-Scale Ridesharing Algorithms[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2020, 57(1): 32-52 (徐毅, 童咏昕, 李未. 大规模拼车算法研究进展[J]. *计算机研究与发展*, 2020, 57(1): 32-52)
- [10] Ho S C, Szeto W Y, Kuo Y H, et al. A Survey of Dial-a-Ride Problems: Literature Review and Recent Developments[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 111: 395-421
- [11] 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
- [12] Wang X, Agatz N, Erera A. Stable Matching for Dynamic Ride-Sharing Systems[J]. *Transportation Science*, 2018, 52(4):850-867
- [13] Ma S, Zheng Y, Wolfson O. T-share: A large-scale dynamic taxi ridesharing service[C]//2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering. Brisbane, QLD, Australia.: 410-421

- [14] Hosni H, Naoum-Sawaya J, Artail H. The Shared-Taxi Problem: Formulation and Solution Methods[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 70: 303-318
- [15] Li Y F, Chen R, Chen L, et al. Towards Social-Aware Ridesharing Group Query Services[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2017, 10(4): 646-659
- [16] Chen X, Kwan M P. Choice Set Formation with Multiple Flexible Activities under Space-Time Constraints[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(5): 941-961
- [17] Timmermans H, Arentze T, Joh C H. Analysing Space-Time Behaviour: New Approaches to Old Problems[J]. *Progress in Human Geography*, 2002, 26(2): 175-190
- [18] Wang Y L, Kutadinata R, Winter S. Activity-Based Ridesharing: Increasing Flexibility by Time Geography[C]//Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. Burlingame, California. 2016: 1-10
- [19] 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 of the United States of America*, 2014, 111(37): 13290-13294
- [20] Hansen W G. How Accessibility Shapes Land Use[J]. *Journal of the American Institute of Planners*, 1959, 25(2): 73-76
- [21] Miller H J. Modelling Accessibility Using Space-Time Prism Concepts within Geographical Information Systems[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991, 5(3): 287-301
- [22] Hägerstrand T. What about People in Regional Science? [J]. *Papers of the Regional Science Association*, 1970, 24(1): 6-21
- [23] Yu H B, Shaw S L. Exploring Potential Human Activities in Physical and Virtual Spaces: A Spatio-Temporal GIS Approach[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(4): 409-430
- [24] Kuijpers B, Miller H J, Neutens T, et al. Anchor Uncertainty and Space-Time Prisms on Road Networks[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(8): 1223-1248
- [25] FANG Zhixiang, LI Qingquan, SHAW Shihlung. Representation of Location-Specific Space-Time Accessibility Based on Time Geography Framework[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(9): 1091-1095 (方志祥, 李清泉, 萧世伦. 利用时间地理进行位置相关的时空可达性表达[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(9): 1091-1095)
- [26] Wang Yafei, Yuan Hui, Chen Biyu, et al. Measuring Place-Based Accessibility under Travel Time Uncertainty[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(11): 1723-1729 (王亚飞, 袁辉, 陈碧宇, 等. 行程时间不确定环境下地点可达性研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2019, 44(11): 1723-1729)
- [27] Neutens T, Van de Weghe N, Witlox F, et al. A Three-Dimensional Network-Based Space-Time Prism[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2008, 10(1): 89-107
- [28] Kuijpers B, Othman W. Modeling Uncertainty of Moving Objects on Road Networks via Space-Time Prisms[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(9): 1095-1117
- [29] TLC Trip Record Data[EB/OL]. <https://www1.nyc.gov/site/tlc/about/tlc-trip-record-data.page>
- [30] OpenStreetMap[EB/OL]. <https://www.openstreetmap.org/>

# A space-time prism based ridesharing model for shared mobility

Li Jiewen<sup>1</sup> Kang Chaogui<sup>1,2</sup>

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 National Engineering Research Center of Geographic Information System, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

**Abstract:** Ridesharing is an essential part of shared mobility for improving passengers' travel efficiency in cities. Existing studies usually determine shareable trips based on whether the arrival sequence of vehicles in more than one pick-up and drop-off points can meet predefined spatio-temporal constraints. Such a simple approach cannot quickly and comprehensively find all the potential shareable trips under scenarios involving large-scale car-sharing requests. Therefore, based on the modeling method of space-time prism and the spatial-temporal expression of passengers' sharing willing, we propose a potential spatio-temporal path area model of travel. Then, we apply the topological relation between the space-time prisms of trips for ridesharing identification, and quantify the strength of ridesharing of trips. Finally, two ridesharing matching strategies are proposed to simulate the result of ridesharing matching in real-world travel environment. Results confirm that the proposed ridesharing identification model can accurately delineate the potential space-time accessibility of vehicular travel, which makes it easier to discover all potential shareable trips and to realize the accurate and effective car-sharing identification. Our study will be helpful to vehicle resource scheduling and passenger ridesharing travel planning in urban shared mobility system.

**Key words:** shared mobility; space-time prism; road network; ridesharing model; matching strategy

First author: LI Jiewen, master student, specializes in transportation data analysis and mining. E-mail: 13672791068@163.com

Corresponding author: KANG Chaogui, PhD, professor. E-mail: kangchaogui@cug.edu.cn

Foundation support: National Natural Science Foundation of China (41601484 and 41830645), National Key Research and Development Program of China (2017YFB0503600 and 2019YFE0106500).

## 网络首发:

**标题:** 一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型

**作者:** 李杰文, 康朝贵

**DOI:** 10.13203/j.whugis20210633

**收稿日期:** 2021-11-18

## 引用格式:

李杰文, 康朝贵. 一种基于时空棱柱的乘车行程可拼性判断模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210633 (Li Jiewen, Kang Chaogui. A space-time prism based ridesharing model for shared mobility[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210633)