

高峰期主干路预约通行方法

黄凯 李泓宣 帅庆珍 贤亚齐

重庆交通大学交通运输学院, 重庆, 400074;

摘要: 围绕高峰期城市主干路拥堵问题, 提出预约通行和公交乘坐补贴的方式, 限制高峰期私家车在主干路的通行, 减少非必需的出行, 同时, 诱导乘坐公共交通。以区域为研究对象范围, 展开交通流量和居民出行特性调查分析; 构建拥堵判别模型, 确定区域内各路段的交通流量, 研究高峰期主干路车流的到达规律, 标定自由流与堵塞流状态之间的过渡变化状态; 根据研究的过渡变化状态, 实施预约通行机制, 对研究区域外一定范围内的私人小汽车车主提供高峰期主干路预约通行的机会, 提供公交出行补贴, 缓解区域内主干路拥堵, 同时引导居民绿色出行。

关键词: 交通组织; 预约通行; 拥堵判别; 公交补贴

DOI: 10. 69979/3041-0673. 24. 7. 039

引言

目前, 国内外已在公共交通、高速公路、城市道路交通高峰时段等推行预约出行服务。高速公路层面, 罗杰超^[1]提出一种应用于该场景的预约出行模式, 并通过仿真实验证明了该模式可以减轻假日高速公路的拥堵症状。Koolstra^[2]在拥堵收费调控模型的基础上建立一种预约出行模型。Edara 等^[3]建立一种由预约模块和分配模块两部分组成的高速公路预约出行系统。杨蕤铜等^[4]考虑不同预约程度的出行需求, 构建时空优化模型并规划用户最优出行时间与路径, 以奖励机制吸引用户错峰出行。黎俊廷^[5]在高速公路预约系统中引入差异化定价方法, 调节预约和非预约用户的出行时间和路径, 调节交通流量在高速公路路网上的均衡分布。城市道路层面, Zhao 等^[6]构建一种由优化模块和决策模块两部分组成的预约出行系统, 以缓解市中心的交通拥堵症状。结果表明, 预约出行机制应用于公路和城市道路场景调控交通供需动态平衡, 能有效降低出行成本, 减缓交通拥堵。

有关预约的研究多以停车预约与公交预约为主, 对于城市道路交通高峰时段车辆预约出行的研究较少。现有预约出行的理论研究和应用对于城市道路交通高峰时段应用场景还存在以下问题^[7-11]: 现有研究侧重于预约出行对缓解交通拥堵的作用, 对高峰时段车辆预约出行模式的应用理论、具体模型方案的建立缺乏研究; 预约形式多以划分预约时段、出行名额先到先得、预约后按预约时间直接通行等流程进行, 未考虑主、次干路道路容量以及未系统性对预约车辆数进行限制, 降低了预约出行的应用效果。为弥补已有研究的不足, 本文在现有预约通行方法的基础上, 引入公交补贴方式, 提高传统预约出行的实施效果。

1 交通调查与分析

通过城市道路交通运行指数, 分析城市道路交通拥堵时空分布, 为研究和制定交通管理措施提供依据。调查地点选择南岸区四公里立交附近区域。

1.1 交通量调查分析

从交通出行大数据平台收集得到重庆市主城区 2023 年 11 月早晚高峰拥堵指数 (图 1)。重庆主城区 2023 年 11 月早高峰为 07:00~09:00, 晚高峰为 17:00~19:00, 交通运行状况整体平稳, 有 10 天处于缓行或拥堵状态, 交通拥堵在时间上呈典型的双峰特征, 早晚高峰交通运行波动较大, 晚高峰拥堵现象较为严重。

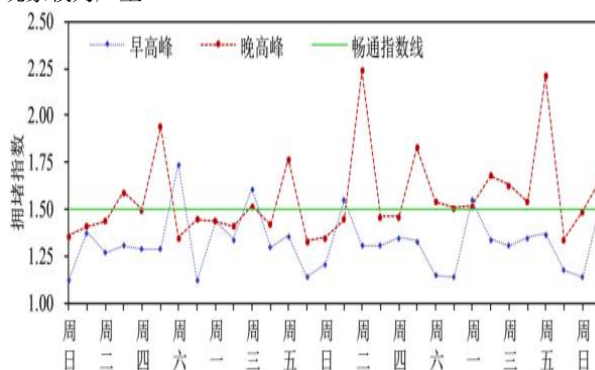


图 1 早晚高峰拥堵指数变化图

2 拥堵判别模型构建

(1) 利用收集到的主干路车辆行驶数据拟合 MFD 曲线 (图 2), 得到曲线的方程

$$y = f(x) \begin{cases} y = 7.226 \times 10^{-7} x^3 - 2.329 \times 10^{-3} x^2 + 1.873x - 98.36 \\ R^2 = 0.9145 \end{cases}$$

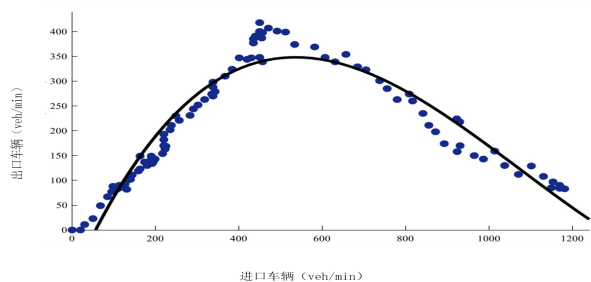


图 2 主干路 MFD 拟合图

(2)对曲线方程求一阶导数 $y' = f'(x)$, 分析曲线变化趋势, 推导出曲率 c 变化拐点 (表 1)。

表 1 MFD 临界点划分

一阶导数	$y' = f'(x) :$ x_c	$y' = f'(x) =$ x_e	$y' = f'(x)$ x_{new}
$y' = 2.1678 \times 10^{-6} x^2 - 4.6$	474	604	534

$$M = \begin{cases} 0 \leq n_i < 474 & \text{自由流} \\ 474 \leq n_i < 535 & \text{稳定流} \\ 535 \leq n_i < 604 & \text{非稳定流} \\ n_i \geq 604 & \text{拥堵流} \end{cases}$$

(3) 由于车辆随时间变化, 在临界点附近会出现小幅波动, 定义涨落值为 x' , 临界点 x_l 附近的范围为 $(x_l - x', x_l + x')$, 临界点 x_r 的范围为 $(x_r - x', x_r + x')$ 。针对路段车辆状态处于临界点附近范围时, 建立 MC 模型拥堵判别方法, 为方便计算, 将稳定流和非稳定流归为中间流。

$$Y_{t+1} = \frac{f_{t+1}(x) - f_t(x)}{x_{t+1} - x_t}$$

时间 T 的状态	Y_{t+1}	初始状态	P_{pq}	最终状态
自由流	$Y_{t+1} > c$	自由流	1	自由流
	$-c \leq Y_{t+1} \leq c$	中间流	0	自由流
中间流	$Y_{t+1} < -c$	拥堵流	0	中间流
	$-c \leq Y_{t+1} \leq c$	中间流	1	中间流
拥堵流	$Y_{t+1} < -c$	拥堵流	0	自由流
	$Y_{t+1} > c$	自由流	0	自由流
	$-c \leq Y_{t+1} \leq c$	中间流	0	拥堵流
	$Y_{t+1} < -c$	拥堵流	1	拥堵流

当求解出的 Y 较小时, 接近 0, 此时路段状态为 MFD 中的中间状态; 当求解出的 Y 过大或过小时, 分别对应自由流、拥堵流状态。

3 预约出行机制

预约出行机制是通过手机 APP 或网站实现主干路通行的在线预约, 用户可以根据自身需求选择预约时间、线路, 系统根据预约情况进行结果反馈, 如图 3。

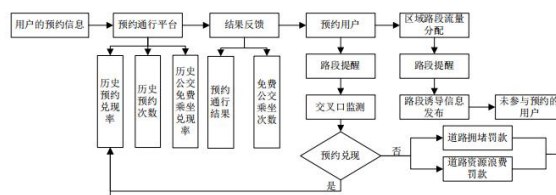


图 3 预约通行流程图

3.1 补贴机制设计

（1）补贴对象及条件

补贴的目标群体主要为高峰期使用私家车出行的驾驶人,特别是那些在高峰时段(如早高峰:7:00-9:00)出行的用户。用户需通过移动应用程序(APP)或小程序进行账户注册,并在出行前至少提前12小时预约限制路段内的公共交通。

（2）补贴标准

a. 固定补贴：在高峰时段乘坐通行限定路段的公交用户可获得 1 元的固定补贴。

b. 动态补贴：根据交通拥堵程度、出行时间和公共交通的使用情况，补贴金额可以进行动态调整。

c. 在极度拥堵时段（交通拥堵指数超过 80%），补贴提升至 2 元。若用户选择非高峰时段（上午 9:00 后或下午 5:00 前），则补贴减少至 0.5 元。

3.2 补贴标准模型构建

在制定公交乘坐补贴标准时,为分析公交乘坐补贴对用户出行行为选择的影响,构建如下决策模型。

(1) 假设条件

a. 用户选择公共交通的倾向与补贴金额 (X3) 成正相关, 即补贴金额越高, 选择公共交通的概率越大。

b. 当私人车辆使用成本 (X_1) 高于公共交通费用 (X_2) 加上补贴金额 (X_3) 时, 用户更有可能选择公共交通。

c. 通勤时间 (X4) 越短, 用户选择公共交通的概率就越高。

(2) 目标函数

该模型目标为提高公共交通分担率，即最大化选择公共交通的用户比例。故定义目标函数如下：

$$\text{Maximize } P(Y = 1) = e^U / (1 + e^U)$$

其中, U 为用户的效用函数:

$$U = \beta_0 + \beta_1 X1 + \beta_2 X3 + \beta_4 X4 + \beta_5 X5$$

式中, X_1 为私人车辆使用成本(单位: 元), 由燃油费用、停车费用和车辆维护费用组成。 X_2 为公共交通费用(单位: 元)表示单次公交出行的票价。 X_3 为补贴金额(单位: 元), 表示用户在选择公共交通时可获得的补贴金额, 根据高峰与非高峰时段的不同而变化。 X_4 为通勤时间(单位: 分钟), 包括公交的预计行驶时间和等待时间。 X_5 为交通拥堵指数(0-100), 反映高峰时段的交通状况, 数值越高表示拥堵程度越严重。

(3) 补贴金额与用户选择的关系

通过分析, 可以推导出补贴金额(X_3)与用户选择公共交通的关系, 例如:

a. 用户选择公共交通的概率:

随着补贴金额的增加, 用户的经济负担下降, 会增强选择公共交通的意愿。设定用户对补贴金额的敏感度为 δ , 即:

$$\frac{\partial P(Y=1)}{\partial X_3} = \delta > 0$$

b. 经济效益的平衡:

补贴金额的增加会带来直接的财政支出, 因此需要在用户增加的出行量与财政支出之间找到平衡点。

(4) 预算约束

设定整体补贴预算为 B , 则有以下预算约束:

$$C = n \cdot S \leq B$$

式中, C 为总补贴支出, n 为预计使用补贴的用户数量, S 为每位用户获得的补贴金额。

4 结论

针对高峰期城市主干路拥堵问题, 本文提出一种“预约通行+公交补贴”的交通供需平衡调控方法, 为城市交通管理部门制定、实施新的交通管理措施提供有价值的参考及思路。组织研究区域交通调查, 分析交通流量时空分布、居民出行特征; 基于 MFD 理论, 利用分析数据建立拥堵判别模型; 设计预约通行机制, 对在研究区域外一定范围内的私人小汽车车主提供高峰期主干路预约通行的机会, 同时保证预约的公平性和兑现率, 对一部分预约不上的车主提供免费公交乘坐次数, 倡导绿色出行。

参考文献

- [1] 罗杰超. 出行预约模式在节假日高速公路场景的应用方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
 - [2] Koolstra K. Potential Benefits of a Freeway Slot-Reservation System: Queuing Costs Versus Scheduling Costs[C]//Urban Transport Systems Conference, Lund, Sweden, June 7-8, 1999.
 - [3] Edara, P., & Teodorović, D. (2008). Model of an advance-booking system for highway trips. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 16(1), 36-53.
 - [4] 杨蓁铜, 胡郁葱, 陈枝伟, 毕仕昌. 考虑预约的高速公路交通流主动式时空优化模型[J]. 综合运输, 2020, 42(11): 48-54.
 - [5] 黎俊廷. 基于预约的高速公路差异化定价模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
 - [6] Zhao Y, Triantis K, Edara P. Evaluation of travel demand strategies: A microscopic traffic simulation approach[J]. Transportation, 2010, 37(3): 549-571.
 - [7] 宁瑞昌. 基于预约模式的停车选择模型研究[硕士学位论文]. 长安大学, 2017.
 - [8] 刘磊. 我国大城市实施交通需求管理的法律体系构想[硕士学位论文]. 山东大学, 2009.
 - [9] 郭震. 路权分配与限制的法理分析[硕士学位论文]. 辽宁师范大学, 2017.
 - [10] 鄢勇飞, 朱顺应, 王红. 公众参与的交通需求管理. 城市交通, 2010, 8(03): 64-71.
 - [11] 李洪武. 基于公交优先的交通需求管理思考. 道路交通科学技术, 2014(3): 33-39.
- 基金项目: 本文 2023 年重庆交通大学研究生科研创新项目《基于高峰期主干路拥堵治理的预约通行方法研究》研究成果; 项目编号: 2023S0061。
- 作者简介: 黄凯 (2000.1-), 男, 汉族, 硕士研究生在读, 研究方向: 交通运输规划与管理。