

城市道路超车特征分析与高风险超车识别

李君羨¹, 王浩², 沈宙彪³, 吴志周¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海应用技术大学 计算机科学与信息工程学院, 上海 200235;
3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

摘要: 为高效、有针对性地管理城市道路超车行为, 提出基于量化特征在线识别高风险超车的方法。首先以交通波理论划分城市路段超车类型, 并根据其特性构建多维度指标体系以描述关键特征; 然后提出使用车牌识别数据在线计算各项指标的方法; 最后基于真实数据, 验证该指标体系用于高风险超车识别的有效性。结果表明, 可以多项式分别拟合路段超车数和超车幅度总和与流量的关系, 以筛选超车频次和强度对流量敏感的路段; K -means 算法可根据计划行程速度、单车超车当量速度差将主超车聚为 3 类, 将该类型与车辆超车后行程速度、单车超车当量速度差相结合可实时识别高风险超车; 高风险超车常见于相邻交叉口信控相位协调不利的周期, 且多发于上游交叉口周期初期和下游交叉口绿灯末期。

关键词: 交通工程; 超车; 城市道路; 车牌识别数据

中图分类号: U121

文献标志码: A

Overtaking Characteristic Analysis and High-Risk Overtaking Recognition on Urban Roads

LI Junxian¹, WANG Hao², SHEN Zhoubiao³, WU Zhizhou¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Computer Science and Information Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: To take proper measures to manage the overtaking behavior on urban roads, a method is proposed to recognize high-risk overtaking vehicles online based on quantitative indicators. First, the traffic wave theory is employed to classify overtaking on urban roads.

收稿日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(52172330)

第一作者: 李君羨(1987—), 女, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为智能交通、交通数据分析。

E-mail: 1911549@tongji.edu.cn

通信作者: 吴志周(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统。

E-mail: wuzhizhou@tongji.edu.cn

Enlightened by the types, a multi-dimensional index system is constructed to illustrate the essential features of urban-road overtaking. Then, based on license plate recognition data, a method is introduced to calculate these indexes online. Finally, with the real data, the effectiveness of the index system and its calculation are verified to recognize high-risk overtaking. According to the analysis results, both the correlations between the overtaking number and volume and the overtaken number and volume can be fitted by the polynomial, which would help identify volume-sensitive segments. The K -means algorithm is used to cluster the overtaking vehicles into three types according to the difference between the planning speed and the overtaking speed. Given the type, the actual speed and the overtaking speed difference are suitable for evaluating the overtaking risk. It is found that high-risk overtaking frequently occurs in the unfavorable phases resulting from inappropriate signal control coordination between adjacent intersections. Moreover, overtaking with high risk is also prone to be found among the vehicles passing by the end of green light at downstream intersections and the first vehicles passing during green light at upstream intersections.

Key words: traffic engineering; overtaking; urban roads; license plate recognition data

超车是影响道路交通安全和效率的重要因素^[1], 量化描述超车过程、识别高风险超车对提升道路安全、增进交通管理效率有重要意义。

超车涉及 2 辆甚至多辆车辆的复杂互动过程, 许多学者通过分解该过程开展研究: 柏伟等^[2]基于车辆跟驰过程中的车辆互动关系建立超车模型, 详



论文
拓展
介绍

细描述了不同超车阶段车辆的距离变化; Jenkins等^[3]根据超车加、减速的行为分别将超车的开始和结束分为多类,并逐类讨论其特征; Zhao等^[4]引入区间分析法探讨最小超车安全距离的影响因素,并以高斯伪谱方法将最优控制问题转化为非线性规划问题求解以描述超车过程; 张文会等^[5]将双车道公路场景下的超车划分为多个时段,继而分别分析了各种车辆与被超车、对向车的安全距离。

上述成果从微观层面研究主超车与被超车的行为,强调复现单次超车的完整过程。由于超车可能涉及除主超车与被超车以外的其他主体,故以上模型变量关系复杂,求解也多有明显的模糊性;此外,单次超车在路段中可能密集发生多次,且涉及主体类型多样。因此,从微观行为切入研究路段上的全部超车行为特征及风险可能导致组合爆炸,无法满足实时分析要求。鉴于此,许多学者转而提出从中观层次考察路段上超车行为的统计特征: 荣建等^[6]以仿真为工具,分析了等速、加速超车模型中主超车与被超车的速度变化,拟合了双车道公路的超车率与流量的关系; Qin等^[7]提出关键决策点的概念,认为在双车道公路场景下,若干个关键位置的多重决策共同决定了超车行为的结果; Lu^[8]定义了表征公路运行特征的拥挤概率、自由行驶概率、车辆进入概率等指标,研究双车道公路上自由超车规则对公路通行安全及效率的影响。

以上针对超车对路段整体影响的研究对路网交通管理有指导意义,但此类研究多聚焦在公路场景。鉴于城市地面道路交通的间断流特性,驾驶员超车目的和行为必然与之不同,故前述研究结论难以为城市道路管理所借鉴。目前针对城市道路上非机动车或机非交互超车有较丰富的研究成果^[9-10],但针对机动车专用道超车的中观描述指标及总体行为特征分析较为有限: 秦雅琴等^[11]构造超车次率指标,建立某指定路段上该指标与流量、平均速度和平均行程时间在不同场景下的拟合关系; 王浩等^[12]利用GRU网络实现对城市路段超车率的预测。上述研究对城市道路超车的独有特征解释不足; 涉及的指标比较单一,反映出超车行为的特征较少,也无法很好地支持风险分析; 研究中拟合定量关系时仅基于唯一路段数据,缺乏对普遍规律的讨论。

综上,从中观层面描述城市道路路段上的超车行为统计特征及其与路段交通运行特征参数的关系,可有效降低分析的复杂度,也能为城市道路交通管理提供直接依据; 而对城市道路超车特征的讨论

也有待深入。本文以此为切入点,在分析城市路段超车过程特征的基础上,构建描述这些特征的多维度中观指标,利用多条路段的车牌识别(license plate recognition, LPR)数据实现上述指标群的实时计算,并将其用于路段高风险超车的在线识别。

1 城市路段超车类型分析

在城市路网中,超车不仅与主超车和被超车的行为以及所在路段长度、限速、流量有关,还受到管控措施的影响。在同一外部环境下,即使各项微观指标都相同的超车行为,由于主超车出发时间与上下游交叉口信控方案对应关系不同,超车过程也可能存在差异。考虑交通波理论体系成熟、展示直观等优势,以其为工具解释导致该差异的原因。根据该理论,路段交通运行过程可抽象表示为图1^[13-14]。假设不考虑交叉口排队溢出情况,排队车辆可在下一个周期绿灯期间完全疏散,且所有未超车车辆的路段平均行驶速度相等且小于路段限速。以上假设可根据实际情况深化调整,不影响过程分析的有效性。

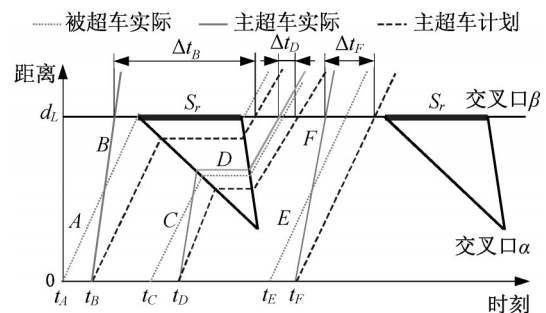


图1 不同出发时间对应超车过程示意

Fig. 1 Diagram of overtaking processes with different departure times

图1中,长度为 d_L 的路段 L 连接两相邻交叉口 α 与 β ,现有若干车辆由 α 经过 L 向 β 行驶。落在 $y=d_L$ 水平线上的粗实线段 S_r 表示交叉口 β 处与这股交通流对应的红灯期间车辆在此期间内积累排队。参考排队形成波速和消散波速,可结合 S_r 唯一确定各周期的“排队三角”,从而描述排队形成与消散过程。图1包含了3对超车共6辆过车(B 车超过 A 车、 D 车超过 C 车、 F 车超过 E 车)的时刻-位置曲线。除主超车和被超车的实际曲线外,图中还给出了主超车按照路段平均行驶速度行驶、并未超车的假想曲线(简称“计划曲线”,对应状态称为“计划

状态”)。

图1中,3对超车的出发时间差、主超车与被超车各自的平均行驶速度均相同,但主超车在该路段上的行程时间减少程度不同:其中F车超过E车的情况较常见,两者均不停车通过交叉口 β ,F车通过超车所节约的行程时间 Δt_F 完全由其计划状态速度和实际速度的差值决定;D车虽超过C车,但在交叉口 β 加入了排队队尾,超车所节约的行程时间 Δt_D 因排队时车头时距被压缩而减少,获益最小;B车因超过A车赶在交叉口 β 红灯期间前通过,避免了交叉口排队延误,比计划状态节约了 Δt_B 的时间,获益最大。以上第2、3种超车反映了城市道路特有的、超车获益被信号控制所影响的现象。事实上,许多驾驶员为实现第3种超车会在路段行程中有意识地提高速度,引发较高风险,值得关注。下文分析中称第3种超车为“高收益超车”,称第1、2种超车为“一般超车”。

可见,类似的超车行为对主超车的行程速度提升效用可能存在差别,这是城市路段超车的显著不同于公路超车之处。仅以超车数量或次数作为描述指标则不足以反映这一特征,因此需构建更多指标。

2 城市道路超车特征描述指标

图1示例可泛化至任意城市路段 L ,在其上游交叉口 α 经相同转向 d_α 驶入 L 、在其下游交叉口 β 也经相同转向 d_β 驶离 L 的所有车辆构成一组次序可变的车队,记作 $Q_{d_\alpha, d_\beta}^{(\alpha, \beta)}$,一般有 $d_\alpha, d_\beta \in \{\text{左转, 直行, 右转}\}$ 。对于车队中任意样本 $V_i (i \in [1, N_Q], N_Q \text{ 为 } Q_{d_\alpha, d_\beta}^{(\alpha, \beta)} \text{ 元素数})$,如其在路段上超车1次或多次,且通过 β 时在车队中的次序相对通过 α 时有所提前,则定义其为超车车辆,此时标记其为 V'_i 。现从中观层次研究 L 上的超车行为,可合理忽略相互超车现象,并假设车队驶过 L 时无成员加入或退出,构建如下指标:

(1)路段超车数 n_T :指定时段 T 内 V'_i 的计数,为时段集计量。

(2)单车超车幅度 $n_{V'_i}$:任意 V'_i 驶过 L 时,其通过超车所实现的车队序列的提前程度为

$$n_{V'_i} = S_{\alpha, V'_i} - S_{\beta, V'_i} \quad (1)$$

其中, $S_{\alpha, V'_i}, S_{\beta, V'_i}$ 分别为 V'_i 通过 α 和 β 时在车队中的次序,对任意 V'_i 均有 $n_{V'_i} > 0$ 。对指定时段 T ,可集计时段超车幅度总和 $n_{Q, T}$,如式(2):

$$n_{Q, T} = \sum_{i=1}^{N_Q} n_{V'_i} \quad (2)$$

(3)单车超车收益 $B_{V'_i}$: V'_i 驶过 L 时通过超车实现的获益,以 V'_i 因超车所节约的行程时间为表征,如式(3):

$$B_{V'_i} = T_{B, V'_i} - T_{A, V'_i} \quad (3)$$

其中, T_{B, V'_i}, T_{A, V'_i} 分别为 V'_i 在计划状态未超车、实际已超车2种场景下的路段行程时间。由于超车为确定发生的行为,故 T_{A, V'_i} 可实测,如式(4):

$$T_{A, V'_i} = t_{\beta, V'_i} - t_{\alpha, V'_i} \quad (4)$$

其中, t_{β, V'_i} 和 t_{α, V'_i} 分别为 V'_i 经过下游、上游交叉口的时刻。而 T_{B, V'_i} 发生在假设场景下,需合理估算。认为若 V'_i 按计划状态行驶而从未超车,其将继续排在原车队中所有前方车辆之后,并被原本排在其后的其他 P 辆车超过,即有 V'_i 的计划到达次序 $\overline{S_{\beta, V'_i}}$,如式(5):

$$\overline{S_{\beta, V'_i}} = S_{\alpha, V'_i} + P \quad (5)$$

其中, P 为满足式(6)条件的车辆 X 的计数:

$$\begin{cases} S_{\alpha, X} > S_{\alpha, V'_i} \\ S_{\alpha, X} - S_{\alpha, V'_i} < n_X \end{cases} \quad (6)$$

认为车队实际通过 β 时,队列中次序为 $\overline{S_{\beta, V'_i}}$ 的车辆的到达时间可作为 V'_i 的计划到达时间估计值,则有

$$T_{B, V'_i} = t_{\beta, V'_i} - t_{\alpha, V'_i}, j = \overline{S_{\beta, V'_i}} \quad (7)$$

(4)单车超车当量速度差 $\Delta v_{V'_i}$: $\Delta v_{V'_i}$ 为 V'_i 实际超车后的行程速度 v_{A, V'_i} 与计划未超车的行程速度 v_{B, V'_i} 之差,有

$$\Delta v_{V'_i} = v_{A, V'_i} - v_{B, V'_i} = \frac{d_L}{T_{A, V'_i}} - \frac{d_L}{T_{B, V'_i}} = \frac{d_L \cdot B_{V'_i}}{T_{A, V'_i} \cdot T_{B, V'_i}} \quad (8)$$

$$B_{V'_i} = \frac{T_{A, V'_i} \cdot T_{B, V'_i}}{d_L} \Delta v_{V'_i} \quad (9)$$

上述指标中, n_T 和 $n_{Q, T}$ 综合表征了指定时段内的路段 L 上超车发生的频繁程度,两者能间接反映超车行为对路段的影响,其数值的异常波动可能预示着有特殊事件发生; $n_{V'_i}, \Delta v_{V'_i}$ 和 v_{A, V'_i} 则从各方面间接体现单个 V'_i 通过路段时的超车风险; $B_{V'_i}$ 衡量了单个 V'_i 在 L 上超车的获益,由 $B_{V'_i}$ 可初步区分高收益超车和一般超车,将之与 $v_{A, V'_i}, S_{\alpha, V'_i}$ 结合可揭示超车意图,便于实时查找以高速甚至超速超车以获取高收益的车辆,实现对车辆或路段的管理。

为实时标定以上指标,需具备较高时间颗粒度采集的、连续经过2个交叉口的所有过车信息,并能

唯一识别各个车辆,LPR数据可满足该要求。

3 基于LPR数据的指标计算

LPR数据多由视频设备采集并上传,原理如下:车辆进入设备初始设定的虚拟线圈位置,触发设备采集标准化图像。对图像进行信息提取与结构化压缩,可将其转化为逐条的过车LPR文本数据,包括车牌、时间戳、车辆类型等关键信息。LPR数据颗粒度高、压缩后存储成本低,基于多个设备车牌碰撞还可实现车辆路径跟踪。

为研究指定路段的超车特征,需结合其上下游2个交叉口的各向LPR数据。沿用前文标记,为研究在交叉口 α 直行进入路段 L 并于交叉口 β 直行离开的车辆群体超车行为,需对 α 、 β 分别采集到的LPR数据集 Φ_α 、 Φ_β 预处理,如下:

(1)数据清洗。仅保留LPR数据的车牌、时间戳2个字段;剔除无法支持车牌碰撞的无车牌数据及有明显时间戳录入错误的数据。

(2)确定目标车道组。在 α 、 β 处不同相位放行的车辆,其进入、离开 L 的时间受信控相序的强制干扰,无法进行超车比较,故要求研究的车辆样本群应在 α 、 β 处分别属于同一车道组,即在相同相位进入、相同相位离开 L 。

(3)提取目标车道组有效数据。根据目标车道组所对应的交叉口分支与车道编号过滤 Φ_α 、 Φ_β ,仅保留相关样本,分别构成压缩数据集 Φ'_α 、 Φ'_β 。

(4)匹配路段过车记录。对 Φ'_α 所有车牌去重,构成出发车牌集合 P ,遍历 P 碰撞比对 Φ'_β ,匹配同一辆车先后出现在2个集合中的记录,按照图2所示规则组织字段,对每一次过车 V_i 生成1条路段过车记录 r_i 。若同一车牌有多次匹配记录,则应分别保存。将所有记录汇聚为路段 L 的过车记录集合 R_L 。

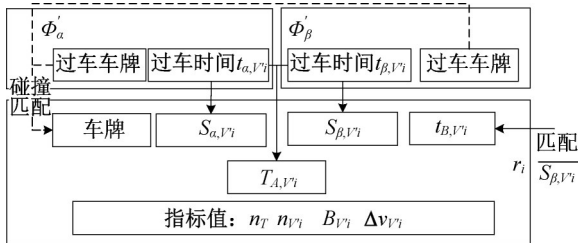


图2 单条过车记录字段组成
Fig. 2 Attributions of a single passing record

(5)将 R_L 按照 t_{β, V_i} 先后排序,由1递增按序赋值每条记录的 S_{β, V_i} ;再将 R_L 按照 t_{α, V_i} 先后排序,由1递

增按序赋值每条记录的 S_{α, V_i} 。

(6)对于每条记录 r_i ,获取其 S_{α, V_i} ,对满足式(6)的车辆计数得到 P ,由式(5)计算 $\overline{S_{\beta, V_i}}$,在 R_L 中查找 S_{β, V_i} 与之相等的记录 r_j ,以 t_{β, V_j} 赋值 r_i 的 t_{β, V_i} 。

综合上述属性,可根据式(1)~(3)及式(8)计算 r_i 的各项指标,并对指定时间段计算指标集计值。在此过程中,需根据 B_{V_i} 值剔除有明显长时间停车行为的车辆,以避免对超车分析的干扰。

4 实验与结果分析

4.1 数据描述与处理

以某城市主干道上连续4个信控交叉口及其双向连接共6个路段作为研究对象,各要素关系如图3所示。路段全线限速 $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($16.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),各交叉口进口道均布设电子警察以采集LPR数据,虚拟线圈设置在停车线位置,即LPR的时间戳对应过车车头通过停车线的时刻。

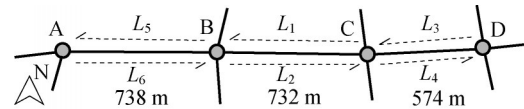


图3 示例交叉口及路段关系示意
Fig. 3 Sample intersections and road section relationship

收集2018年7月6日各交叉口全量LPR数据,并参照第3节步骤进行处理,具体细节包括:

(1)确定研究对象为由西直行向东继续直行、由东直行向西继续直行的车道组,即要求对于6条路段而言,均有 $d_\alpha = d_\beta =$ 直行。根据选定车道组过滤并清洗数据,生成各交叉口过滤数据集 Φ'_V ($Y \in \{A, B, C, D\}$)。

(2)依次计算各路段过车记录集合 R_Z ($Z \in [1, 6]$),根据 R_Z 对应的路段长度,结合路段限速约束路段行程时间范围,行程时间超出该范围的过车可能离开路段、长时间停车或时间戳录入有误,不适于作为研究样本,予以剔除。

4.2 实验结果与分析

4.2.1 路段整体超车分析

按5 min间隔集计全日各路段的 $n_{5\text{min}}$ 、 $n_{Q, 5\text{min}}$ 指标,分析其与对应时段流量 $V_{5\text{min}}$ 关系,如图4。

由图4可知,在路段流量不饱和条件下, $n_{5\text{min}}$ 、 $n_{Q, 5\text{min}}$ 均与 $V_{5\text{min}}$ 呈正相关关系。拟合结果表明,2组相关关系分别可以有界的一次和二次多项式拟合。

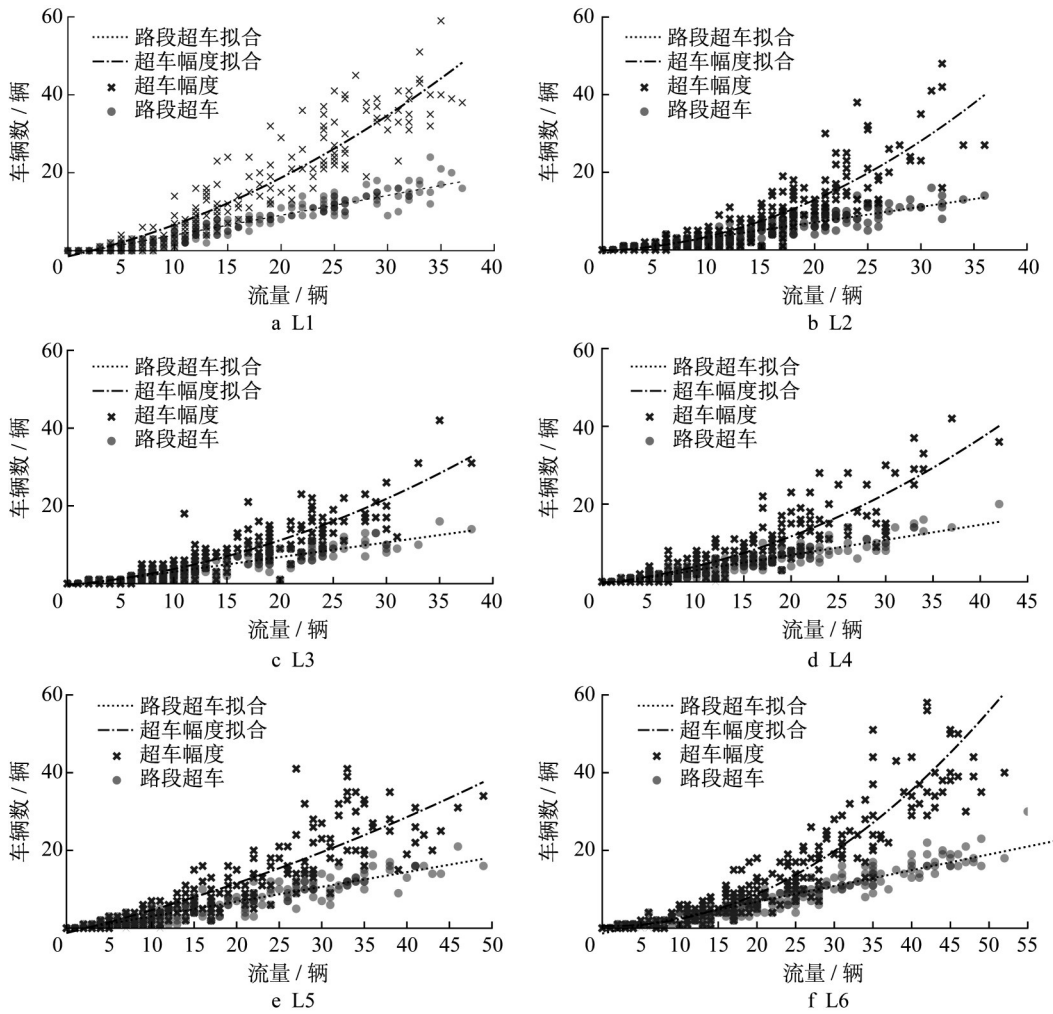


图4 指标 n_{5min} 、 $n_{Q,5min}$ 与流量 V_{5min} 关系分析

Fig. 4 Correlativity between n_{5min} , $n_{Q,5min}$, and volume V_{5min}

对 6 条样本路段, n_{5min} 的一次拟合系数均稳定在 $[0.37, 0.40]$ 区间, 各子图相应曲线斜率相近; 而 $n_{Q,5min}$ 与 V_{5min} 的关系则因路段不同有显著差异, 其中 L1 和 L6 的 $n_{Q,5min} - V_{5min}$ 曲线最陡峭, 意味着路段集计超车幅度总和对流量增长更敏感; 在同等流量条件下, 这 2 个路段的超车行为相对更加冒进。以上差异说明, 城市道路的超车次数特性因路段而异, 应根据真实数据逐一拟合, 对于超车频次统计量对流量敏感的路段应进行重点管理。

4.2.2 超车速度变化与分布特征

除超车次数与幅度指标, 超车的速度特性也会影响路段安全, 且能反映超车车辆对路段运行的影响。分析时需参考路段限速 $v_{lim} = 16.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并根据管理需求定义路段的临界速度 v_{th} 作为路段高速行驶车辆的界定标准, 设定 $v_{th} = 0.85 \times v_{lim} = 14.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

首先考察各主超车的 v_{B, V_i} 、 v_{A, V_i} 与 Δv_{V_i} 的关系。

以 L2 和 L6 为例, 分析结果如图 5。

$v_{B, V_i} - \Delta v_{V_i}$ 散点图有明显的分组聚集特征, 尝试以 K-means 算法对样本点自动聚类。首先采用组内平方误差和 (sum of squared error, SSE) 指标辅助算法法定参^[15], 结果显示对于 2 个样本路段, 均有聚类数目 $K=3$ 时效果最理想。按照此参数聚类并计算类别中心坐标, 结果见图 5a、5c; 然后保持原有聚类结果的标签, 按照相同图例绘制各主超车的 $v_{A, V_i} - \Delta v_{V_i}$ 散点图, 对比计划状态与实际状态的速度散点图, 可知:

(1) 低 v_{B, V_i} 的主超车如果没有超车, 其聚类速度中心将低于 $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 小于正常路段行驶速度。这表示其如按计划速度行驶, 将在下游交叉口遇到红灯停车。

(2) 在低 v_{B, V_i} 车辆中, 有部分样本超车后平均速度提升 Δv_{V_i} 高达 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 构成了与其他 2 簇明显分离的簇 (图 5 中簇 III)。簇 III 车辆经过超车加

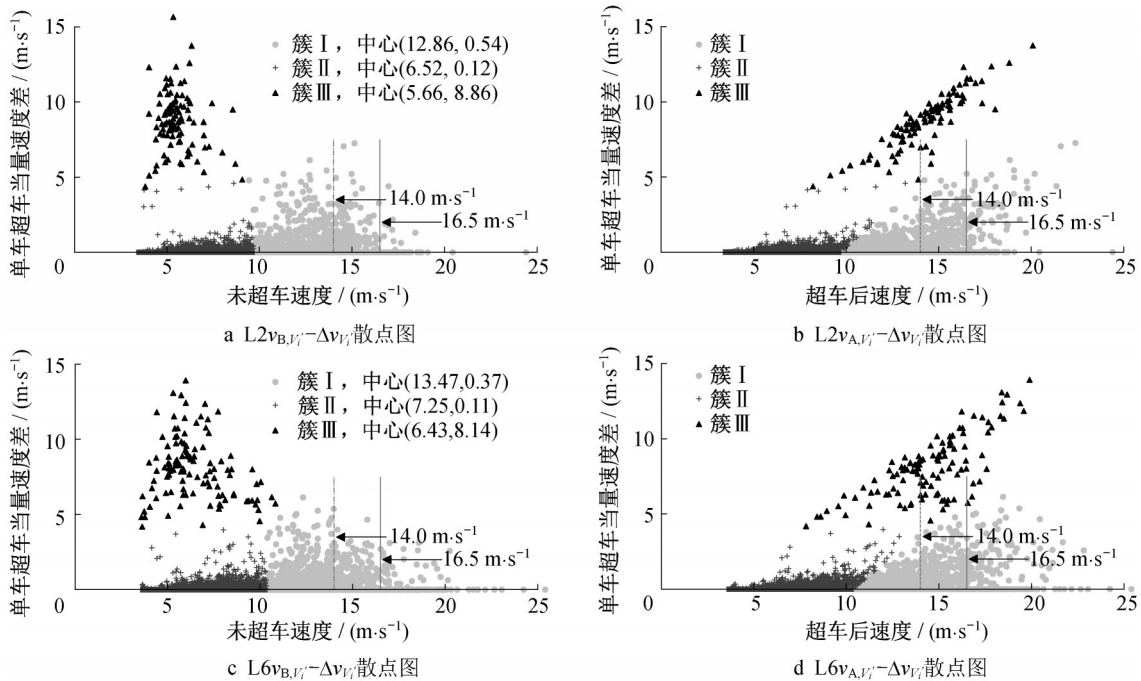


图5 示例路段 v_{B,V_i} 、 v_{A,V_i} 与 Δv_{V_i} 散点图及聚类结果

Fig. 5 $v_{B,V_i}-\Delta v_{V_i}$ and $v_{A,V_i}-\Delta v_{V_i}$ scatter diagrams of sample segments and clustering results

速,其 v_{A,V_i} 转移至高速区,明显避免了下游交叉口停车排队,实现了一次性通过路段,即为高收益超车车辆。需注意,对于部分车辆有 $v_{A,V_i} > v_{lim}$ 。

(3)与簇Ⅲ对比,部分同样低 v_{B,V_i} 的车辆仅通过超车略微提升了行程速度(图5中的簇Ⅱ)。从其聚类中心来看, $\Delta v_{V_i} < 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应出发次序靠后、超车目的性较弱的一般超车,其超车后 v_{A,V_i} 的聚集位置相对 v_{B,V_i} 基本不变,只略微向右侧迁移。

(5)图5中簇Ⅰ聚类中心的X坐标值显著大于簇Ⅱ和簇Ⅲ,对应 v_{B,V_i} 较高的样本群。即使按计划速度行驶,此类车辆也不会下游交叉口遇到红灯,或在加入下游交叉口排队队尾较短时间后即跟驰通过。但当其有超车行为时, Δv_{V_i} 比簇Ⅱ更大, v_{A,V_i} 相

对 v_{B,V_i} 右迁更明显,显示这类超车有更强的目的性,行为也更加冒进。虽由于路段限速等客观因素限制,簇Ⅰ车辆整体速度上浮空间有限,但也有部分车辆 $v_{A,V_i} > v_{lim}$, 存在一定风险。

上述规律在各样本路段中普遍存在。按 v_{B,V_i} 行驶将明显受到信控影响而停车等待的车辆,其超车获益大、目的性强,贡献了最大的 Δv_{V_i} , 这部分车辆中,短小时内完成加速超车或 v_{A,V_i} 较大的车辆存在较高风险,故还需结合超车时机以及 v_{A,V_i} 观察。仍以L2和L6为例,图6由不同行程速度区间的样本量转移,更直观地体现了超车所导致的路段整体速度分布变化。

根据图6,超车行为对中段区间速度分布影响较

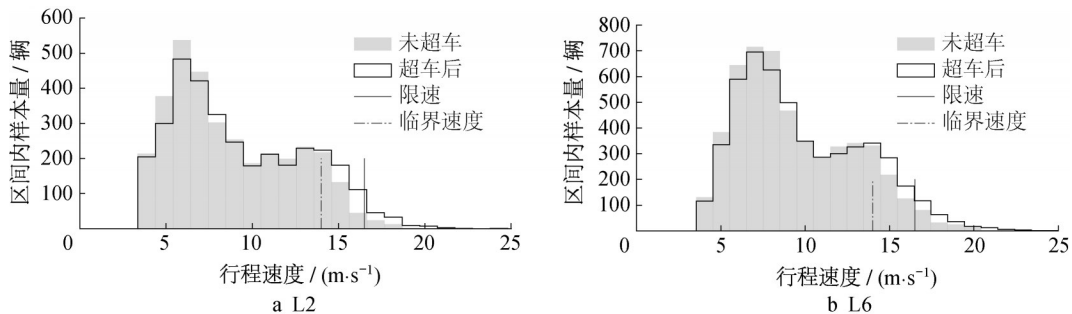


图6 示例路段有无超车速度分布对比

Fig. 6 Speed comparisons of sample segments with and without overtaking

小,主要的变化体现为原低速区车辆转移到高速区,尤其是超过 v_{th} 的车辆明显增加,这与簇Ⅲ车辆的较大速度变化以及簇Ⅰ车辆进一步提速有关。如前分析,这部分车辆的超车行为可能增加路段的安全风险,需结合 v_{A,V_i} 和 Δv_{V_i} 对其重点分析。

4.2.3 高风险车辆分析

根据 v_{A,V_i} 将超车车辆划分为 $v_{A,V_i} \leq v_{th}$ 的低速车辆、 $v_{lim} \geq v_{A,V_i} \geq v_{th}$ 的高速车辆和 $v_{A,V_i} \geq v_{lim}$ 的超速车辆3类,3类车辆的路段行程风险依次增加,以下结合超车风险及收益情形详细分析。如第1部分所述,因车辆出发和到达上下游交叉口的时刻与信控方案对应关系不同, Δv_{V_i} 和 B_{V_i} 并非一一对应。以L1、L2、L5为例,绘制 $\Delta v_{V_i} - B_{V_i}$ 散点图,并以不同图例区分不同风险类型车辆,如图7。

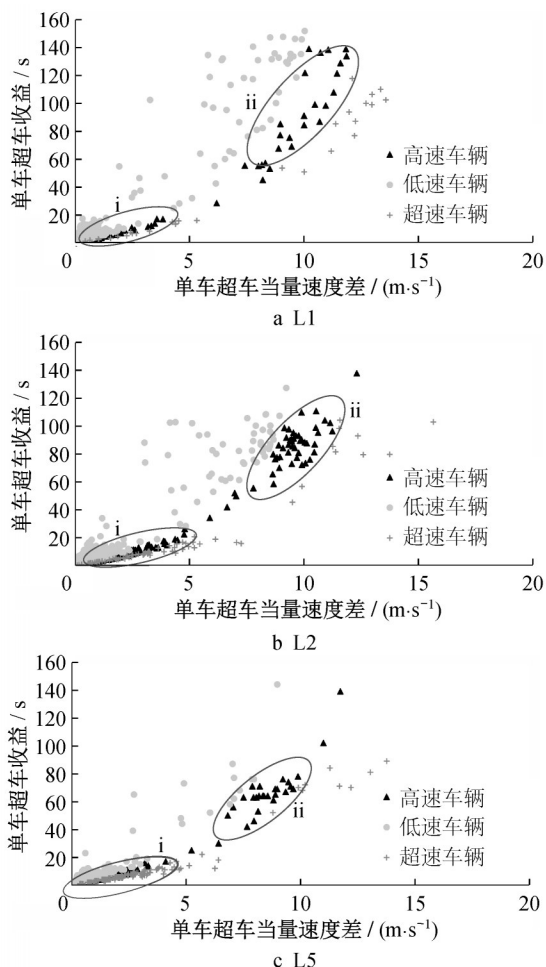


图7 3类车辆 Δv_{V_i} 与 B_{V_i} 关系分析

Fig. 7 Correlativity between Δv_{V_i} and B_{V_i} for 3 types of vehicles

图7显示,由于信号配时方案和路段长度差异,不同路段超车车辆的收益上限也不同,但各类车辆

的风险与收益关系有以下统一规律:

(1) 根据式(9), B_{V_i} 和 Δv_{V_i} 的相关系数 $\frac{T_{A,V_i} \cdot T_{B,V_i}}{d_L} > 0$,无论哪种车辆, B_{V_i} 都随 Δv_{V_i} 增加而增加;且在 d_L 相等时, $T_{A,V_i} \cdot T_{B,V_i}$ 越大,则 B_{V_i} 也越大。因此,对于任意路段,在 Δv_{V_i} 相等条件下, B_{V_i} 普遍按超速车辆、高速车辆、低速车辆的顺序依次增加。

(2) 低速车辆靠近原点有一处明显聚集,对应图5中的簇Ⅱ,这部分车辆在超车后仍以较低速度行驶,其 $B_{V_i} < 20$ s,属于一般收益车辆,其超车多与争抢绿灯末尾通过交叉口无关,对路段行车秩序影响有限。在低速车辆中,也有少部分超车收益较大,但这类数据点样本量较少且比较分散,且其超车增速后仍在低速区,影响相对可控。

(3) 高速车辆普遍通过超车实现了一次性通过路段。相对低速车辆,其点集在X轴方向分布更加均匀,但在 $\Delta v_{V_i} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近有一处高密度聚集。对于3条示例路段,此处的超车收益均值均大于70s,明显与车辆通过加速在下游绿灯通过有关,属于高收益车辆。此类主超车通过以较大的 Δv_{V_i} 达到较高的 v_{A,V_i} ,虽然尚未超速,但速度变化幅度大,有一定不稳定性。

(4) 超速车辆是路段交通管理中的重点。样本路段的超速车辆均明显地分为2组,分别对应较高和较低的 Δv_{V_i} ,如各子图中i和ii标示的部分。这2组车辆的组间距较大,其间以 $\Delta v_{V_i} \in [4, 8] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的幅度超车以致超车后速度超限的车辆较少,多数在超车后超速的车辆或本就已经超速(Δv_{V_i} 较小),或有目的地提升速度并超车以争取更多利益(Δv_{V_i} 较大)。前者对应的是驾驶行为较为冒进的车辆,后者则对应大幅加速以争取在下游绿灯结束前通过的车辆,两者对交通运行均有严重的影响,而后者的速度还伴随不稳定特征,其超速行为更可能集中在路段后半行程,属于高危超车行为车辆,需要加强管制。

可见, v_{A,V_i} 和 Δv_{V_i} 较大的主超车车辆都是路段超车管理所需关注的重点,且其与上下游交叉口信控方案的协调有一定关系,以下展开分析。

4.2.4 高风险超车与信号方案关系分析

按照Ban等^[16]的研究,路段行程速度及延误等同时受上下游交叉口信控配时方案及其协同设计影响,在各周期车辆可完全疏散的理想假设下,上游同周期放行车辆的行程速度逐渐增加、延误逐渐减小。

图8为L1和L2这2条路段的所有车辆 $v_{A, V_i} - t_{A, V_i}$ 散点图,其中无超车车辆的速度称为“稳定速度”,以实心圆点表示;有超车车辆的计划、超车后实际速度称为“超车前/后速度”,分别用向上三角形和向下箭头表示,并以虚线将 $\Delta v_{V_i} > 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的成对标记相连。按照行程速度分布曲线,可设置一个分位数速度 v_s 作为低速车辆的界定标准,本文以15%分位数为例,在图8绘出 $v_{lim} = 16.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 v_s 这2条水平线以便对比。

图8除了显示出文献[16]所描述的单周期行程速度变化趋势外,更揭示了多个连续周期在更长时间轴上的行程速度周期性变化现象。这种周期性由相邻交叉口的协调相位差引起,且因相邻交叉口信控周期时长关系不同呈现不同的循环间隔和波动。结合以上2类周期性,观察图8a、8b可知,在两交叉口相位差协调情况较好的周期,绝大部分同相位放行车辆可以大于 v_s 的速度通过路段,此时 v_{A, V_i} 和 Δv_{V_i} 较大的高风险超车明显减少。但由于一般相邻交叉口并无绿波协调设计,较佳通行状态通常仅能维持少数几个周期,随后进入最不利协调周期时,对绝大部分过车有 $v_{B, V_i} < v_s$,此时高 Δv_{V_i} 值超车迅速增加。可见,高风险超车多发于相邻交叉口信控配时协调导致上游交叉口整个周期过车平均速度全部较低的周期。

图8b中,92%的超速车辆由 $v_{B, V_i} < v_s$ 的低速车辆通过加速超车转化而来;而2个示例路段上 $\Delta v_{V_i} > 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的车辆中,90%的车辆有 $v_{B, V_i} < v_s$ 。在计划速度提升到接近 v_s 时,超车后超速以及高速

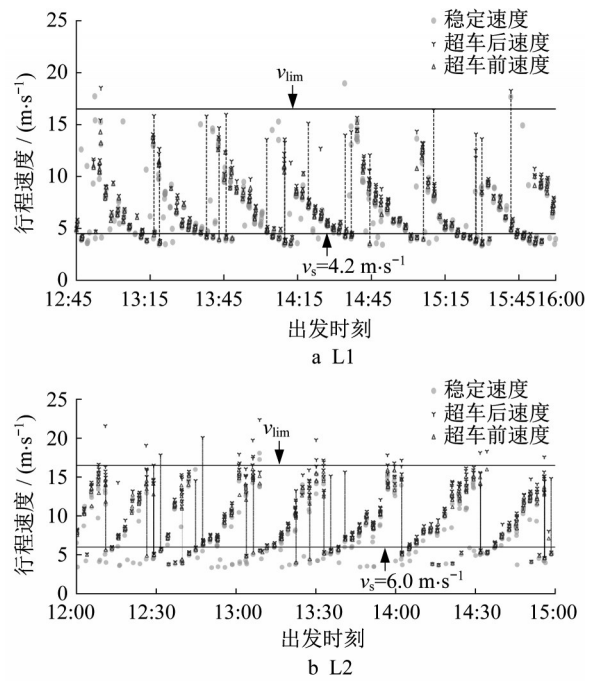


图8 高风险超车速度特性分析

Fig. 8 Speed characteristics of high-risk overtaking

度变化等风险较高的超车数量就有明显下降。这提示加强相邻交叉口信号控制协调除了可以增加绿波带宽、使得更多车辆不停车通过路段外,更对减少不安全超车行为有一定作用,即使并非协调控制的交叉口群,合理调整主要流向的相序或微调其放行相位的绿信比,保证大部分车辆的行程速度,都有助于改善超车对路段交通的不利影响。

为观察高风险超车频发时段的 $v_{A, V_i} - t_{A, V_i}$ 关系,进一步放大时间轴绘图,图9a、9b分别为取自L5和L6的示例时段。

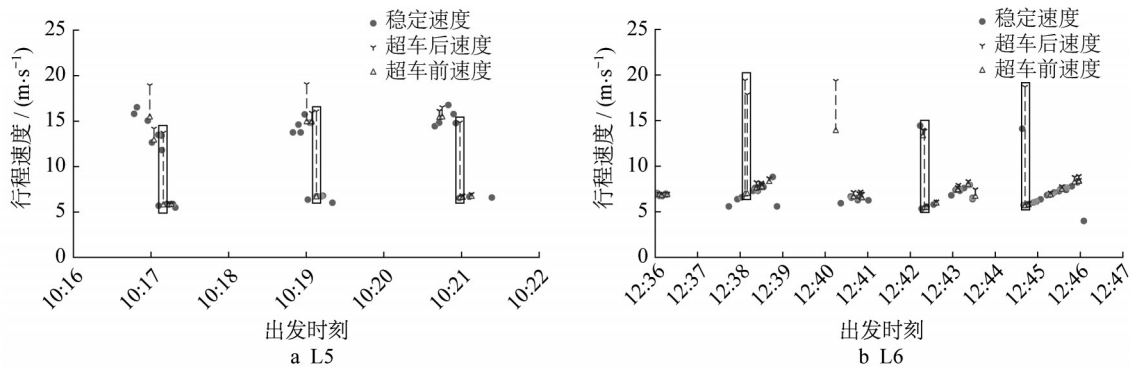


Fig. 9 高风险超车车辆在上游交叉口车队中的序列

Fig. 9 Sequences of high-risk overtaking vehicles at upstream intersection

图9a所显示的3个连续周期中,部分车辆以接近 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 v_{A, V_i} 不停车通过路段,这些车辆中,出发时刻最晚的少数几辆车均是 Δv_{V_i} 值接近 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

的主超车(图9a框选部分)。因上下游相位协调问题,跟随这些主超车之后的车辆则因无法顺利超车或提高速度,在下游交叉口红灯期间到达,需要多等

待1个周期才能驶离路段,其 $v_{A,V'}$ 仅为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。可见,当路段上游交叉口同一相位放行的交通流在下游交叉口被红灯部分阻断时,下游交叉口绿灯末尾常见高风险超车。

区别于图9a,图9b所示的几个连续周期中,因上下游相位协调十分不利,几乎全部车辆按计划速度行驶都将在下游交叉口停车等待,如前分析,此类周期常发高风险超车。图9b显示,这些高风险超车多发于上游交叉口相应相位的放行初期(图9b框选部分),这是由于车辆行驶在车队队首时,受前方和侧向车辆约束较小,超车难度也最小。

综上,当相邻交叉口的信号控制方案及协调情况确定后,高风险超车高发时段呈现明显规律性并可提前根据信控方案具体预测,为管理路段上的高风险超车和超速运行提供了依据。

5 结语

以交通波理论分析了城市路段超车特征,并构建多维度中观指标体系对其加以描述。以真实LPR数据实现各指标的实时计算,并讨论了基于该指标体系识别、预测高风险超车的方法,主要结论包括:

(1) 城市道路超车的特征在于其收益受上下游交叉口信控配时协调的影响。为体现这一特征,应构建涵盖超车频次、超车速度、超车收益等多方面特征的指标体系。

(2) 在一定时段内,路段超车次数和超车幅度总和与流量的关系可分别以有界的一次、二次多项式拟合,可由此识别超车行为对流量高敏感的路段并重点关注。

(3) 可根据主超车的计划行程速度和单车超车当量速度将其聚类为3种类型;根据主超车的类型,结合其超车后行程速度和单车超车当量速度差可识别路段高风险超车车辆。

(4) 高风险超车多发于因相邻交叉口信控协调不利导致的全部车辆低速行驶的周期;其常见于下游交叉口绿灯末期;如上游交叉口全周期车辆低速行驶,则周期初放行车辆更倾向于高速超车。

作者贡献声明:

李君羨:论文构思,方法论提出,算法编程,可视化呈现,初稿写作。

王 浩:论文构思,校验。

沈宙彪:形式分析,审核与编辑写作。

吴志周:获取资助,项目管理,指导。

参考文献:

- [1] FIGUEIRA A C, LAROCCA A P C. Proposal of a driver profile classification in relation to risk level in overtaking maneuvers [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 2020, 74: 375.
- [2] 柏伟,李存军.基于不同限速条件下的超车模型研究[J].*交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(2): 63.
BAI Wei, LI Cunjun. Overtaking model based on different limiting speed [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(2): 63.
- [3] JENKINS J M, RILETT L R. Classifying passing maneuvers a behavioral approach [J]. *Transportation Research Record*, 2005, 1937(1): 14.
- [4] ZHAO Youqun, ZHANG Wenxin, ZHANG Xinglong, *et al.* Minimum time overtaking problem of vehicle handling inverse dynamics based on interval mathematics[C]//In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. Thousand Oaks: SAGE Publications Ltd, 2019, 233(6): 1534-1545.
- [5] 张文会,孙舒蕊,苏永民.双车道公路超车安全距离模型[J].*交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(2): 182.
ZHANG Wenhui, SUN Shurui, SU Yongmin. Safe distance model for overtaking on two-lane highway [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(2): 182.
- [6] 荣建,刘世杰,邵长桥,等.超车模型在双车道公路仿真系统中的应用研究[J].*公路交通科技*, 2007, 24(11): 136.
RONG Jian, LIU Shijie, SHAO Changqiao, *et al.* Application of overtaking model in two-lane highway simulation system[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(11): 136.
- [7] QIN Simu, LI Xu, WANG Jianchun. Two-lane multipoint overtaking decision model based on vehicle network[C]// In Proceedings of the 15th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). Piscataway: IEEE, 2020: 317-322.
- [8] LU Shuai. A study on overtaking traffic rules in two-lane system based on Cellular Automaton Model [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 644-650: 2479.
- [9] 刘启远,孙剑,田野,等.机非交互路段非机动车越线超车行为建模与仿真[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11): 1585.
LIU Qiyuan, SUN Jian, TIAN Ye, *et al.* Modeling and simulation of cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicles at mixed flow road section [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1585.