

混行非机动车道被超车自行车骑行安全评价

陈小鸿, 岳李圣飒, 杨 奎

(同济大学, 交通运输工程学院, 201804)

摘要: 研究基于上海市混行非机动车道 92 起助动车超越自行车事件, 发现超车事件中被超自行车的行驶阶段包括正常行驶阶段, 受超车影响阶段, 以及调整骑行状态的过渡阶段。在受超车影响阶段, 被超自行车的加速度波动幅度将增大, 而波动均衡性将减小。同时, 受超车影响阶段的起始时间和持续时间, 与超车事件类型, 以及车辆行驶方向(前进方向和侧向方向)有关。研究还发现平均每次邻贴超车事件中超车助动车对被超自行车骑行安全的影响, 是自由超车事件的 5 倍。提出了基于自由超车和邻贴超车事件数的混行非机动车道被超自行车骑行安全评估方法, 能有效反映骑行者的真实感受, 模型理论值和骑行者实测值匹配度达 87.05%。

关键词: 助动车; 自行车; 超车行为; 超车影响; 骑行安全
中图分类号: U491.3 **文献标志码:** A

Safety Evaluation of Overtaken Bicycle on a Shared Bicycle Path

CHEN Xiaohong, YUE Lishengsa, YANG Kui

(School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

Abstract: This research analyzes bicycle maneuvers in 92 e-scooter-passing-bicycle events collected from two shared bicycle paths in Shanghai. The results show that an overtaken bicyclist may experience three phases in a passing event: a normal riding phase, an overtaking effect phase in which the bicyclist is under the e-scooter's pressure, and a transitional phase of adjusting the bicycle's maneuvers. In the overtaking effect phase, the bicycle's acceleration will fluctuate more sharply but less uniformly than in the normal riding phase. The start time and the length of the overtaking effect phase differ between different types of passing events, and they also differ based on the bicycle's longitudinal and lateral movements. A safety evaluation model is proposed to assess the overtaken bicycle's safety in these events. The model indicates that, on average, the negative effect of an adjacent passing event on the overtaken bicycle's safety is five times

as much as that of a free passing event. A field test shows that the model can accurately reveal bicyclists' actual sense of safety during the overtaking, with an accuracy of 87.05%.

Key words: moped; bicycle; overtaking behavior; overtaking effect; traffic safety

非机动车主要包括自行车和助动车。近年来, 由于助动车使用量的迅猛增长, 非机动车道上原本较为单一的自行车交通转变助动车和自行车的混行交通。上海市 2015 年第五次综合交通大调查显示, 助动车和自行车两者保有量的之比, 2004 仅为 1:5, 到 2014 年已接近 3:1^[1]。

助动车平均行驶速度一般为 $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 而自行车平均行驶速度仅为 $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 同时助动车的体积和质量也明显大于自行车^[2], 当两者在同一个非机动车道空间中混行时, 助动车对于自行车而言具有更类似于机动车的行驶特性, 此时处于弱势一方的自行车的行驶安全往往得不到保障。如何准确评估混行非机动车道自行车行驶安全性, 已成为城市交通管理部门日益关心的问题。

相当一部分对于非机动车道自行车行驶安全性的研究主要分析环境变量对于自行车事故数的影响。在这些研究中环境变量可以分为两大类, 一类是非机动车道本身的物理设计条件, 包括非机动车道路面铺装和非机动车道标志^[3]; 非机动车道宽度和坡度^[4]; 另一类则考虑非机动车道周边的道路环境因素, 例如与非机动车道相邻的最右边机动车道宽度^[5], 非机动车道所在道路等级和路边停车^[6]等。另一些研究从自行车骑行者心理感受的角度出发, 建立了非机动车道交通流状态, 非机动车道设计等因素与骑行者安全感知之间的模型^[7]。

对于单向行驶的非机动车道, 实际工程应用中

收稿日期: 2016-02-26

第一作者: 陈小鸿(1961—), 女, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交通规划. E-mail: tongjicxh@163.com

通讯作者: 岳李圣飒(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为慢行交通, 交通分配. E-mail: 2010yuelishengsa@tongji.edu.cn

常用非机动车道超车事件数来评估非机动车道安全水平. 这是因为每次超车事件的发生, 可以看做非机动车之间发生了一次冲突, 而这类冲突往往会加大骑行者精神负担, 对其正常行驶造成干扰. H. Botma 最早研究了自行车超车事件数与自行车流量, 速度及道路宽度的关系^[8]. 随后有专门的研究, 利用美国 10 个城市的数据, 建立了自行车超车和会车预测模型^[9], 并被 HCM2010 所采用, 用于评价非机动车道安全水平^[10].

本文利用超车事件数, 来评估具有机非隔离的混行非机动车道自行车行驶安全性. 由于助动车相对自行车具有更快的速度, 因此在中国混行非机动车道发生的超车事件一般是助动车超越自行车. 然而, 有必要区分不同类型的助动车超越自行车事件, 而不能简单考虑超车事件总数. 这是因为若超车过程中助动车始终离自行车较远, 那么助动车对自行车行驶的干扰将较小.

根据超车过程中超车助动车与被超自行车的相对距离大小, 可以将助动车超越自行车事件分为助动车自由超车事件和助动车邻贴超车事件两种^[11]. 在自由超车事件中, 超车发生时超车车辆有两条及以上超车车道可供选择. 邻贴超车是指当超车事件发生时, 超车车辆仅能选择被超车辆临近的一条车

道进行超车, 超车车辆和被超车辆处在相邻的车道上. 不同超车事件中, 被超自行车行驶状态的平均改变程度, 可以用来度量该种超车类型对于被超自行车行驶安全的影响.

1 超车过程中被超自行车行驶状态改变

考虑两个指标: 被超自行车加速度波动幅度的变化以及加速度波动均衡性的变化. 前者反应了超车过程中骑行人对自行车操纵力大小的变动; 后者可以表征骑行人操纵力输出是否均衡. 两个指标与行驶安全的关系如下图 1 所示. 图 1a 中两种情形下加速度均随时间波动均衡, 但是情形一中加速度波动更大, 表明自行车骑行者操纵力大小变化明显, 骑行更耗费体力, 则行驶安全性更低. 图 1b 中两种情形里加速度整体波动程度一致, 但是情形一中加速度波动不均衡, 表明骑行可控性低, 则行驶安全性更低.

本文取从超车点前 5 s 到超车点后 5 s, 总共 10 s 作为加速度分析时段, 并将超车点时刻作为计时原点. 将整个 10 s 分析时段, 再细划分为若干个连续的时间片段, 分析每个时间片段内加速度的变化.

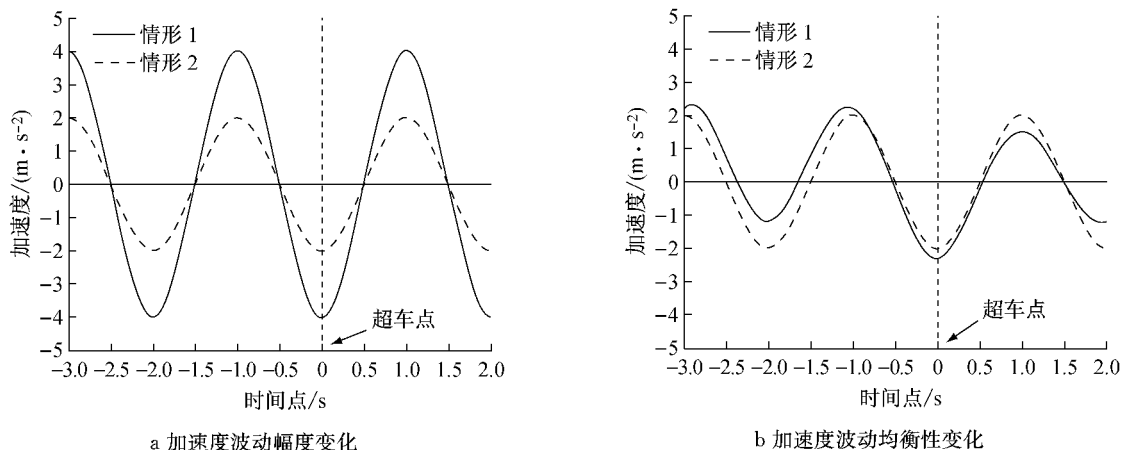


图 1 被超自行车加速度变化(以超车点为计时原点)

Fig.1 Fluctuation of an overtaken bicycle's acceleration(time of the passing point is set as 0)

1.1 加速度波动幅度

用每个时间片段内加速度的标准差来度量该时间片段内加速度的平均波动幅度.

1.2 加速度波动均衡性

用加速度熵来度量某个时间片段内加速度波动的均衡性. 根据 Shannon 的信息熵理论, 熵可以用来度量信息源的平均不确定性. 大量的研究, 利用熵

理论来提取动态信号的变化特征. 刘志强等^[12]利用转向熵分析了驾驶员在疲劳状态下的转向行为特征, 朱明等^[13]根据列车振动加速度能量熵和奇异熵, 建立了列车运行故障诊断模型, 何正友等^[14]利用小波能量熵给出了 5 种电力暂态信号在不同状态下随尺度的分布规律.

根据熵理论, 某个时间片段内加速度熵值越大,

表明该时间片段内加速度波动越不均衡. 设 a_{mk} 为被超自行车在时间片段 m 内第 k 个采样时刻的加速度, 定义该时间片段 m 内的加速度熵如下:

$$W = - \sum_k \frac{|a_{mk}|}{\sum_k |a_{mk}|} \log \frac{|a_{mk}|}{\sum_k |a_{mk}|} \quad (1)$$

2 被超自行车行驶安全评估模型

考虑被超自行车在沿车辆前进方向上和沿车辆侧向方向上加速度波动幅度和波动均衡性. 某次超车事件中被超自行车行驶安全性可以通过式(2)来计算:

$$S = \sqrt{(W_i^* \cdot \sigma_i^* \cdot t_i^*)^2 + (W_j^* \cdot \sigma_j^* \cdot t_j^*)^2} \quad (2)$$

式中: i 为车辆前进方向; j 为车辆侧向方向; t^* 为被超自行车受到助动车超车影响的时间, 也即超车影响阶段长度; σ^* 表示超车影响阶段中被超自行车加速度标准差; W^* 表示超车影响阶段中被超自行车加速度熵.

设 T 表示超车事件类型, 则某条混行非机动车道被超自行车骑行安全性 S_s 可以通过式(3)计算:

$$S_s = \sum_{T=1}^2 N_T \cdot \bar{S}_T \quad (3)$$

式中: $T=1$ 表示自由超车事件, $T=2$ 表示邻贴超车事件; N_T 为在给定时段内测得的各类超车事件数; \bar{S}_T 为超车类型 T 的平均安全性, 其值等于公式(2)中所有参数值的平均值.

S_s 越大, 表示被超自行车在该起超车事件中的安全性越低.

3 数据采集

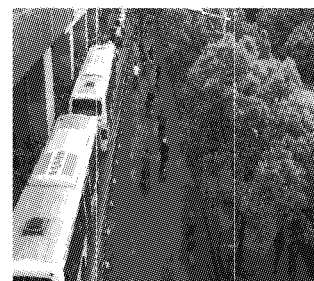
研究选取位于上海市武宁路和共和新路的混行非机动车道作为观测地点. 其中武宁路观测点非机动车道宽 3.5 m, 共和新路观测地点非机动车道宽 5 m. 两条非机动车道均设置有机非分隔带, 排除了机动车对于非机动车行驶的影响. 两条非机动车道均路面平整, 没有坡度. 通过在两条道路上的人行天桥上架设拍摄设备, 来记录超车事件, 如图 2 所示. 分别采集了两条非机动车道早高峰 2 h 的交通数据.

非机动车辆的位置用车辆前轮的位置表示. 通过视频读取非机动车每 0.5 s 的位置画面, 然后通过 Matlab 获得位置画面中非机动车辆的图像坐标信息. 由于拍摄地点设置有实物参考线, 位置画面中某些点的真实坐标已知. 基于 4 个位置点的图像坐标

和它们的真实坐标, 可以求得真实坐标和图像坐标之间的转换关系矩阵^[15], 进而可以求得每张位置画面中各辆非机动车的真实坐标. 通过这种方式可以计算非机动车辆每 0.5 s 的速度和加速度.



a 武宁路



b 共和新路

图2 观测地点情况

Fig.2 Observation Sites

根据《HCM2010》^[10]中对自行车道宽度的规定, 武宁路非机动车道可视为具有 3 车道, 共和新路非机动车道可视为具有 4 车道. 实际观测中, 确实也发现武宁路并排行驶的非机动车数最大为 3 辆, 共和新路最大为 4 辆. 因此将武宁路观测到的超车事件中, 两车并排行驶, 第三车超车的那些超车归为邻贴超车; 将共和新路观测到的超车事件中, 两车超车, 或者两车并排行驶, 第三车超车的那些超车归为自由超车. 不同超车事件中被超自行车在分析时段内的加速度情况见表 1.

表1 超车样本情况

Tab.1 Samples of passing events

| 路段 | 观测 时 长/h | 交通流 率/(辆· h ⁻¹) | 采集 样本 数/个 | 超车 类型 | 加速度绝对值/ (m·s ⁻²) | | |
|------|----------------|-----------------------------------|-----------------|----------|---------------------------------|---------|---------|
| | | | | | 最大 值 | 最小 值 | 平均 值 |
| 武宁路 | 2 | 2 400 | 46 | 邻贴超车 | 2.031 | 0.002 | 0.322 |
| 共和新路 | 2 | 1 818 | 46 | 自由超车 | 2.214 | 0.002 | 0.370 |

4 模型参数标定

4.1 标定方法

模型参数标定分为 3 步. 第一步是确定超车影

响阶段. 在助动车超越自行车的整个过程中, 只有当超车助动车进入被超自行车一定范围内时, 被超自行车的正常行驶才会受到助动车超车压迫的影响. 第二步是比较超车影响阶段内被超自行车在车辆前进方向和侧向方向上加速度波动变化; 第三步中将加速度波动变化的平均水平作为模型参数取值.

第一步中, 首先计算每一个采样时刻, 所有样本的加速度标准差和加速度熵, 考察其随时间的变化. 对于每个样本而言, 在超车影响阶段内, 被超自行车加速度的波动情况相比该阶段前后相邻的两个正常行驶阶段会发生明显改变, 而在这两个正常行驶阶段内被超自行车的加速度波动的趋势应当是类似的. 易知超车影响同样会体现在所有样本整体的加速度波动上: 在超车影响阶段的前后时段内, 所有样本加速度标准差和加速度熵随时间的变化趋势应当相同, 而在超车影响时段内将发生明显改变. 由此可以确定超车影响时段. 之后再针对样本个体, 检验所划分行驶阶段的合理性.

由于每次超车事件中助动车超车位置不同, 部分超车事件中助动车超越自行车后, 在回到原来的行驶轨迹时已驶出视频画面, 因此不是全部的超车事件均拍摄到了完整的 10s 画面. 考虑到样本数太

少的采样时刻误差较大, 本文选取包含 8 个样本数及以上的采样时刻进行分析. 其中, 对于共和新路自由超车样本, 分析超车过程中 -4.0 s 到 3.0 s 内的加速波动情况; 对于武宁路邻贴超车样本, 分析超车过程中 $-4.0\text{ s} \sim 2.0\text{ s}$ 时间段内的加速度波动情况.

4.2 前进方向加速度波动幅度

由图 3a 可知, 自由超车中在分析时段内被超自行车前进方向上的加速度波动幅度很不稳定, 没有明显的超车影响阶段.

与自由超车不同, 邻贴超车中助动车的超车行为明显对被超自行车的正常行驶产生了影响. 图 3b 中, 在时段 $[-4\text{ s}, -2\text{ s}]$ 与时段 $[0\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 内, 被超自行车前进方向加速度标准差均呈相似的上升趋势. 而在时段 $[-2\text{ s}, 0\text{ s}]$ 内, 被超自行车加速度标准差变化却呈现出下降趋势. T 检验表明加速度标准差在时段 $[-4\text{ s}, -2\text{ s}]$ 与时段 $[0\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 之间不存在显著性差异 (P 值为 0.372), 而这两个时段内的加速度标准差却明显异于时段 $[-2\text{ s}, 0\text{ s}]$ (P 值分别为 0.030 和 0.039). 易知在时段 $[-4\text{ s}, -2\text{ s}]$ 与时段 $[0\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 内为被超自行车处于正常行驶状态, 而时段 $[-2\text{ s}, 0\text{ s}]$ 是一个超车影响阶段.

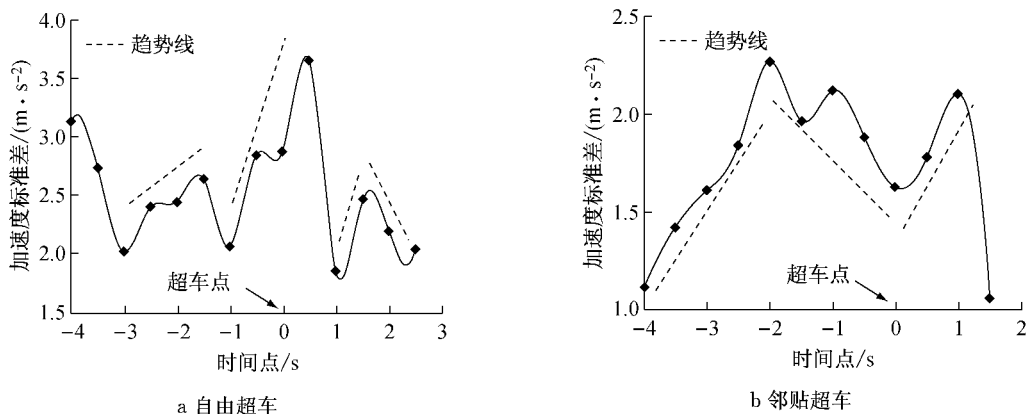


图 3 前进方向样本整体加速度波动幅度

Fig. 3 Fluctuation range of overtaken bicycles' acceleration in longitudinal direction

4.3 前进方向加速度波动均衡性

由 4.2 节可知自由超车中被超自行车在前进方向上的加速度波动幅度不受助动车超车影响, 又由第 2 部分提出式 (2) 可知, 由于式 (2) 中 t_i^* 为 0, 即包含 t_i^* 的所有项均为 0, 因此不需要分析自由超车事件中, 被超自行车在前进方向上的加速度波动均衡性的变化.

邻贴超车事件中, 被超自行车在前进方向上的加速度波动均衡性变化如图 4 所示. 很明显时段 $[-2\text{ s}, 0\text{ s}]$ 为超车影响阶段. 在该时段内, 加速度熵

变化不大, 而前后相邻两个时段内加速度熵均呈相似的上升趋势. T 检验显示时段 $[-2\text{ s}, 0\text{ s}]$ 内的加速度熵与时段 $[-4\text{ s}, -2\text{ s}]$ 存在显著性差异 ($P = 0.016$). 因此时段 $[-4\text{ s}, -2\text{ s}]$ 为被超自行车正常行驶的时段.

尽管 T 检验显示加速度熵在时段 $[-4\text{ s}, -2\text{ s}]$ 与时段 $[0\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 之间不存在显著性差异 ($P = 0.107$), 时段 $[0\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 并不能认为是被超自行车的正常行驶阶段, 因为 T 检验同样显示加速度熵在时段 $[0\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 与时段 $[-2\text{ s}, 0\text{ s}]$ 之间不存在显著

性差异($P=0.124$),然而从 P 值可以看出时段 $[0\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 内的加速度熵要更接近时段 $[-2\text{ s}, 0\text{ s}]$,这是因为在时段 $[0\text{ s}, 1.5\text{ s}]$ 内被超自行车虽然不受超车

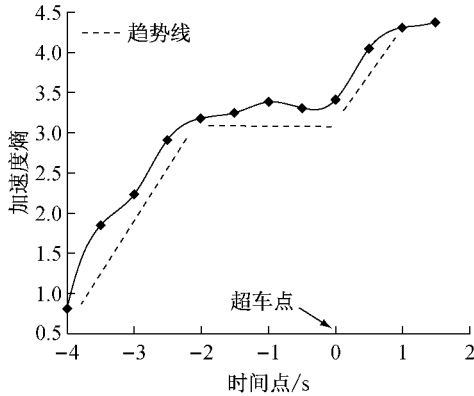


图4 邻贴超车样本整体在前进方向上加速度波动均衡性
Fig.4 Fluctuation uniformity of overtaken bicycles' acceleration in longitudinal direction in adjacent passing events

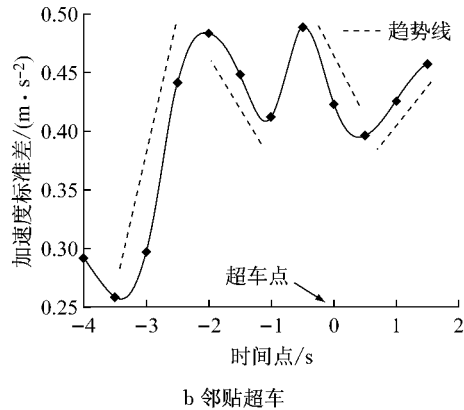
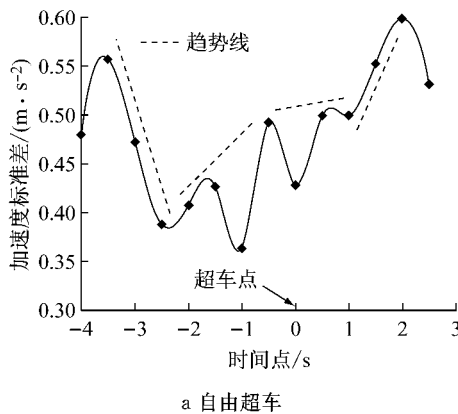


图5 侧向方向样本整体加速度波动幅度

Fig.5 Fluctuation range of overtaken bicycle's acceleration in lateral direction

邻贴超车事件中被超自行车侧向加速度波动幅度变化如图5b所示.从 -2 s 到 0.5 s ,被超自行车受到超车助动车的影响,其加速度波动幅度呈下降趋势. T 检验也显示加速度标准差在时段 $[-2\text{ s}, -0.5\text{ s}]$ 与时段 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$ 之间存在显著性差异($P=0.005$).由于时段 $[-0.5\text{ s}, 1\text{ s}]$ 内的加速度标准差与时段 $[-2\text{ s}, -0.5\text{ s}]$ 相似($P=0.322$),表明超车影响阶段将一直持续到时刻 1 s .加速度标准差在时段 $[1\text{ s}, 2\text{ s}]$ 与时段 $[-0.5\text{ s}, 1\text{ s}]$ 之间相差较小($P=0.205$),在时段 $[1\text{ s}, 2\text{ s}]$ 和时段 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$ 之间加速度标准差的差异更小($P=0.730$),表明时段 $[1\text{ s}, 2\text{ s}]$ 是一个被超自行车调整骑行姿态的过渡阶段.

助动车的直接影响,但仍处于调整骑行姿态的过渡阶段.

4.4 侧向方向加速度波动幅度

根据图5a自由超车事件中被超自行车加速度标准差变化曲线,可以将超车过程分成时段 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$,时段 $[-2\text{ s}, -0.5\text{ s}]$,时段 $[-0.5\text{ s}, 1\text{ s}]$,以及时段 $[1\text{ s}, 2.5\text{ s}]$ 四个阶段. T 检验显示自由超车事件中在时段 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$ 与时段 $[-2\text{ s}, -0.5\text{ s}]$ 内侧向方向加速度标准差变化相似($P=0.058$),而从时刻 -0.5 s 开始,侧向方向加速度标准差变化开始异于前面时段($P=0.004$),此时助动车超车行为开始对被超自行车产生影响.由于时段 $[-0.5\text{ s}, 1\text{ s}]$ 与时段 $[1\text{ s}, 2.5\text{ s}]$ 内的加速度标准差不存在显著性差异($P=0.382$),而时段 $[1\text{ s}, 2.5\text{ s}]$ 内的加速度标准差变化明显不同于时段 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$ ($P=0.004$),表明超车影响一直持续到观测时段末尾.

4.5 侧向方向加速度波动均衡性

由图6a可知,自由超车过程中被超自行车加速度熵随时间的变化可以分为 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$, $[-2\text{ s}, -0.5\text{ s}]$, $[-0.5\text{ s}, 1\text{ s}]$ 和 $[1\text{ s}, 2.5\text{ s}]$ 四个阶段.在时段 $[-2\text{ s}, -0.5\text{ s}]$ 和时段 $[-0.5\text{ s}, 1\text{ s}]$ 内加速度熵均呈相似的上升趋势($P=0.560$),但这两个时段的加速度熵与时段 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$ 和 $[1\text{ s}, 2.5\text{ s}]$ 存在着显著性差异(P 值小于 0.05),这表明在时段 $[-2\text{ s}, 1\text{ s}]$ 内,被超自行车受到了助动车超车行为的影响.时段 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$ 内的加速度熵,要明显不同于时段 $[1\text{ s}, 2.5\text{ s}]$ (P 值小于 0.001),因此时段 $[1\text{ s}, 2.5\text{ s}]$ 是一个被超自行车调整骑行姿态的过渡阶段.

由图6b可知,邻贴超车中被超自行车加速度熵

随时间的变化也可以分为 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$, $[-2\text{ s}, -0.5\text{ s}]$, $[-0.5\text{ s}, 1\text{ s}]$ 和 $[1\text{ s}, 2\text{ s}]$ 四个阶段. 在时段 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$ 和时段 $[1\text{ s}, 2\text{ s}]$ 内加速度熵均呈上升趋势, 且上升速度比较接近, T 检验显示这两个时段中加速度熵不存在显著性差异($P=0.227$), 这两个时段是被超自行车正常行驶的阶段. 而 T 检验

显示时段 $[-2\text{ s}, -1\text{ s}]$ 内的加速度熵, 和 $[-3.5\text{ s}, -2\text{ s}]$ 以及时段 $[1\text{ s}, 2\text{ s}]$ 之间均存在显著性差异(P 值小于 0.05), 说明被超自行车从时刻 -2 s 起, 开始受到超车助动车的影响, 且影响一直持续到时刻 1 s .

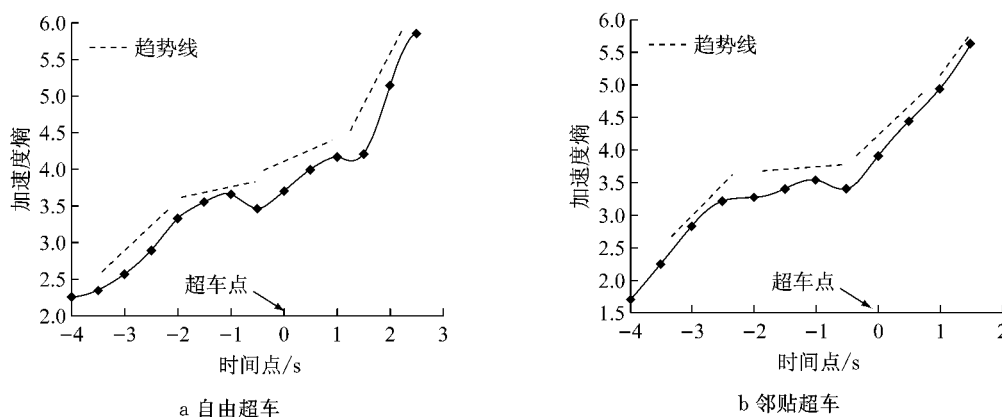


图 6 侧向方向样本整体加速度波动均衡性

Fig. 6 Fluctuation uniformity of overtaken bicycle's acceleration in lateral direction

4.6 参数取值

考虑被超自行车行驶受到超车影响最为明显的时段, 取所有样本在该时间段内的平均指标值作为模型参数取值. 被超自行车行驶安全评估模型中各参数取值见表 2. 表中, 括号内数据表示该时段端点值的另外一种取值.

表 2 两类超车事件中被超自行车行驶安全模型参数值

Tab. 2 Parameters of safety model for overtaken bicycle in two types of passing events

| 方向 | 参数 | 时段 | 自由超车 | 邻贴超车 |
|----------|---|----------------|-----------------------|-----------------------|
| 侧向 方向 | 加速 度标 准差 $\diagup(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | -4~-2 s | 2.182 | 0.809 |
| | | -2~0 s | 1.907 | 1.739 ^[a] |
| | | 0~2.5 s(1.5 s) | 2.295 | 1.339 |
| | 加速 度熵 | -4~-2 s | | 0.172 |
| | | -2~0 s | | 0.288 ^[a] |
| | | 0~1.5 s | | 0.241 ^[b] |
| 前进 方向 | 加速 度标 准差 $\diagup(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ | -3.5~-2 s | 0.286 | 0.219 |
| | | -2~-0.5 s | 0.342 | 0.400 ^[a*] |
| | | -0.5~1 s | 0.468 ^[a*] | 0.336 ^[a] |
| | | 1~2.5 s(2 s) | 0.412 ^[a] | 0.232 ^[b] |
| | 加速 度熵 | -3.5~-2 s | 0.175 | 0.182 |
| | | -2~-0.5 s | 0.283 ^[a] | 0.281 ^[a*] |
| | | -0.5~1 s | 0.295 ^[a*] | 0.216 ^[a] |
| | | 1~2.5 s(2 s) | 0.235 ^[b] | 0.141 |
| 安全性水平S | | | 0.207 | 1.016 |

注: $X^{[a]}$ 表示被超自行车受到超车影响的阶段; $X^{[a*]}$ 表示被超自行车受到超车影响最为明显的阶段; $X^{[b]}$ 表示调整骑行姿态的过渡阶段.

由式(2)计算可知, 平均每次邻贴超车事件中超车助动车对被超自行车骑行安全的影响, 是自由超

车事件的 5 倍.

5 模型结果验证

从助动车和自行车混行视频中, 截取了 139 段不同交通流状态下的混行视频, 每段视频长度均为 30 s, 包含若干次自由超车和邻贴超车事件. 挑选了 15 名测试者, 给予每位测试者 2~3 组视频, 每组视频包含 4~5 个 30 s 视频画面, 要求测试者感受每个视频中当自行车被助动车超越时, 自行车行驶安全性受到影响的程度, 并根据受影响程度的大小, 给每组中各个视频的被超自行车行驶安全性水平排序. 另一方面, 假设每起自由超车事件对被超自行车安全性影响的分值为 1, 由 4.6 节可知每起邻贴超车事件对被超自行车安全性影响的分值为 5. 利用被超自行车行驶安全评估模型(式(2)和式(3)), 可以计算每个视频中被超自行车行驶安全性水平的理论分值. 考虑邻贴超车数次数, 将被超自行车安全性从高到低分为 A 到 E, 5 个等级. 每个等级对应的理论分值见表 3.

比被测者主观感受与模型理论值, 两者整体匹配值达到 87.05%. 除了等级 E 由于被测视频数较少导致准确率较低, 对于其余 A~D 四个安全等级的判定, 模型理论值均能很好地反映被测者主观感受, 准确率都在 80% 以上.

表3 模型理论计算与骑行者真实感受值对比

Tab.3 Comparison between the perception and the model output

| 安全性等级 | 临贴超车数 | | 理论得分 | 视频数 | 判定准确率/% |
|-------|-------|----|-------|-----|---------|
| | 上界 | 下界 | | | |
| A | 0 | 0 | 0~5 | 35 | 94.29 |
| B | 1 | 1 | 6~10 | 31 | 83.87 |
| C | 2 | 3 | 11~20 | 29 | 86.21 |
| D | 4 | 5 | 21~30 | 37 | 86.49 |
| E | 6 | | >30 | 7 | 71.43 |

6 模型结果分析

自由超车事件中超车助动车与被超自行车侧向间距较大,超车行为对被超自行车前进方向影响较小,因此前进方向上被超自行车加速度波动幅度不会出现明显的受超车行为影响时段。而邻贴超车事件与此相反,由于超车助动车距离被超自行车更近,且被超自行车行驶空间有限,超车助动车将明显加重被超自行车骑行负担,因此会出现明显的受超车影响的时段 $[-2\text{ s}, 0\text{ s}]$ 。

自由超车中被超自行车侧向方向上加速度波动幅度开始受到超车影响的时间要晚于前进方向上加速度波动幅度开始受到超车影响的时间,为 -0.5 s ,且超车影响持续时间更长,超过 2.5 s 。邻贴超车中被超自行车加速度波动幅度开始受超车影响的时间为 -2 s ,但在侧向方向上比前进方向上超车影响持续时间更长,为 3 s ,且侧向方向上存在被超自行车调整骑行姿态的过渡时间段。

自由超车和邻贴超车中被超自行车在侧向方向上加速度波动均衡性受超车影响的时间段均为 $[-2\text{ s}, 1\text{ s}]$ 。然而自由超车事件中被超自行车受影响最为明显的时段是 $[-0.5\text{ s}, 1\text{ s}]$,邻贴超车则是 $[-2\text{ s}, -0.5\text{ s}]$ 。在超车影响时段之后,自由超车中被超自行车侧向方向上存在一个过渡时段 $[1\text{ s}, 2.5\text{ s}]$,在该时段内,即使超车助动车已越过被超自行车,但被超自行车仍受超车行为的后续影响,需要骑行者调整自行车操控力输出的均衡性,使自行车往正常骑行状态过渡。然而邻贴超车中在被超自行车侧向方向上并不存在这一过渡时段,而仅存在于前进方向上,为 $[0, 1.5\text{ s}]$ 。

7 结语

混行非机动车道上助动车超越自行车时,由于助动车相比自行车存在速度和质量上的明显优势,

会加大自行车骑行者精神负担,对其行驶安全性造成影响。在助动车超车过程中存在一个时间段,在这个时间段内被超自行车明显受到超车行为的影响,表现为被超自行车加速度波动均衡性降低,而加速度波动幅度增大。

在助动车超车事件中被超自行车的行驶包括正常行驶阶段,受超车影响阶段,可能还存在调整骑行状态的过渡阶段。

混行非机动车道被超自行车骑行安全评估模型考虑了两个指标,加速度波动幅度和波动均衡性,被证明能够较好地反映自由超车和邻贴超车对被超自行车骑行安全性影响的差异。

参考文献:

- [1] The fifth comprehensive traffic survey of Shanghai [R]. Shanghai: Shanghai Urban Construction and Communications Commission, 2015.
- [2] Chen X, Han H, Ye J, *et al.* Normalized volume measurement for non-motorized traffic flow mixed with mopeds [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2239: 9.
- [3] Hamanna C, Peek-Asa C. On-road bicycle facilities and bicycle crashes in Iowa, 2007—2010 [J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 56(5): 103.
- [4] Li Zhibin, Wang Wei, Liu Pan, *et al.* Physical environments influencing bicyclists' perception of comfort on separated and on-street bicycle facilities [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(3): 256.
- [5] Pulugurtha S S, Thakur V. Evaluating the effectiveness of on-street bicycle lane and assessing risk to bicyclists in Charlotte, North Carolina [J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 76: 34.
- [6] Klassen J, El-Basyouny K, Islam M T. Analyzing the severity of bicycle-motor vehicle collision using spatial mixed logit models: a city of Edmonton case study [J]. Safety Science, 2014, 62: 295.
- [7] Jensen S U. Pedestrian and bicyclist level of service on roadway segments [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2007(2031): 43.
- [8] Botma H. Method to determine levels of service for bicycle paths and pedestrian-bicycle paths [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1995, 1502: 38.
- [9] Federal Highway Administration. Evaluation of safety, design, and operation of shared-use paths[S]. FHWA2HRT2052137. Washington D C: Federal Highway Administration, 2006.
- [10] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2010 [Z]. Washington D C: National Research Council, 2010.
- [11] Zhao D, Wang W, Li Z, *et al.* Psychological delaying model of

- bicycle passing events on physically separated bicycle roadways in China [J]. *Physics Procedia*, 2012, 24(1): 856.
- [12] 刘志强, 焦立峰. 疲劳驾驶的转向特征研究[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2011, 30(3): 432.
- LIU Zhiqiang, JIAO Lifeng. Research on the steering feature in fatigue driving state [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2011, 30(3): 432.
- [13] 朱明, 吴思东, 付克昌. 基于熵特征的高速列车故障诊断方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(2): 381.
- ZHU Ming, WU Sidong, FU Kechang. Method of malfunction diagnosis based on entropy features of high-speed train [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(2): 381.
- [14] 何正友, 陈小勤. 基于多尺度能量统计和小波能量熵测度的电力暂态信号识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(10): 33.
- HE Zhengyou, CHEN Xiaoqin. A study of electric power system transient signals identification method based on multi-scales energy statistic and wavelet energy entropy [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2006, 26(10): 33.
- [15] Hartley R, Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision*[M]. San Diego: Cambridge University Press, 2003.

~~~~~

(上接第 202 页)

- [13] Chen J, Schinner A, Matuttis H G. Discrete element simulation for polyhedral granular particles[J]. *Theoretical & Applied Mechanics Japan*, 2011, 59: 335.
- [14] Huang H, Tutumluer E, Hashash Y M A, *et al.* Discrete Element Modeling of Aggregate Behavior in Fouled Railroad Ballast[C]//*GeoHunan International Conference: Challenges and Recent Advances in Pavement Technologies and Transportation Geotechnics*. Hunan: ASCE, 2009: 33-41.
- [15] McKenna M, Seidel R. Finding the optimal shadows of a convex polytope [C]//*Symposium on Computational Geometry*. Baltimore: Association for Computing Machinery, 1985: 24-28.
- [16] Freeman H, Shapira R. Determining the minimum-area encasing rectangle for an arbitrary closed curve [J]. *Communications of the ACM*, 1974, 18(7): 409.
- [17] TB/T 2140—2008 铁路碎石道砟[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- TB/T 2140—2008 Railway ballast[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [18] 曾树谷. 铁路散粒体道床[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- ZENG Shugu. *Railway granular media ballast*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997.
- [19] Hart R, Cundall P A, Lemos J. Formulation of a three-dimensional distinct element model—part II: mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1988, 25(3): 117.
- [20] Nassauer B, Kuna M. Contact forces of polyhedral particles in discrete element method[J]. *Granular Matter*, 2013, 15(3): 349.
- [21] 周维垣. 岩石力学数值计算方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- ZHOU Weiyuan. *Numerical computational methods for rock mechanics*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [22] Cundall P A. Distinct element models of rock and soil structure [C]//*Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*. Boston: Allen & Unwin, 2013: 129-163.