

# 混行自行车道超车干扰与车道设计

陈小鸿, 岳李圣飒

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 基于上海市非机动车道 113 起助动车超越自行车事件, 通过分析超车助动车和被超自行车行驶轨迹, 提出了助动车超车干扰强度指标. 超车干扰强度指标同时考虑了助动车和自行车速度的差异, 以及超车时两车间距的特征. 研究发现, 当助动车超车干扰强度大于临界值时, 被超自行车侧向加速度波动率明显降低. 然而, 超车干扰存在边际效应, 即随着超车干扰的持续增大, 自行车侧向加速度波动的减少幅度却在降低. 利用  $K$ -means++ 算法对超车干扰强度进行了分级, 认为自行车道单车道宽度在 1.1 m 到 1.3 m 之间, 且同时对助动车实施  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的限速, 能有效减小超车干扰的严重程度.

**关键词:** 助动车; 自行车; 超车干扰; 自行车道设计; 限速  
**中图分类号:** U491.3 **文献标志码:** A

## Overtaking Interference on Shared Bicycle Path and Its Influence on Lane Design

CHEN Xiaohong, YUE Lishengsa

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In this paper, we analyze bicycles' maneuvers in 113 moped-passing-bicycle events collected from shared bicycle path in Shanghai. By analyzing trajectories of both overtaking mopeds and overtaken bicycles, we propose an indicator of overtaking interference for mopeds. This indicator describes the speed difference as well as the overtaking distance, between the moped and the bicycle. The results show that when the indicator of overtaking interference exceeds a critical value, the overtaken bicycle's acceleration volatility at lateral direction will significantly decrease. However, the overtaken interference has its marginal utility, which means when the overtaken interference continually increases, the decrease rate for the lateral acceleration volatility of overtaken bicycles will decrease. The  $K$ -means++ model is used to classify the overtaking interference and the further results show that

when bicycle lane width is between 1.1 m and 1.3 m, meanwhile a  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  posted speed for mopeds is taken, the severe overtaking interference could be limited.

**Key words:** moped; bicycle; overtaking interference; bicycle lane design; speed limit

影响自行车出行的重要因素之一是骑行环境的安全感<sup>[1]</sup>. 一项调查显示, 有 40% 的受访者表示如果能够提供一个更加有安全感的自行车骑行环境, 他们愿意平日里更多地使用自行车<sup>[2]</sup>. 在自行车出行中, 经常影响骑行安全感的风险之一便是助动车超越自行车造成的干扰. 根据上海市第 5 次综合交通调查结果, 自行车道上助动车和自行车的混行比例接近 3:1, 自行车在骑行过程中, 往往要频繁地被助动车所超越<sup>[3]</sup>. 研究表明, 车辆超车行为是造成自行车骑行者死亡事故的最重要原因<sup>[4]</sup>. 由于助动车的平均速度接近自行车的 2 倍(助动车的平均速度为  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 自行车的平均速度为  $14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 且助动车质量可以超过自行车质量的 2 倍(自行车质量一般不超过 15 kg, 助动车质量可接近 40 kg)<sup>[5]</sup>, 两者共同在自行车道上混行时, 助动车的超车行为往往会给自行车骑行者带来较大干扰, 特别是在助动车和自行车大量混行时, 车辆之间间距较小, 助动车比较容易以较快速度贴近或超越自行车, 此时产生的干扰更加明显. 然而, 目前自行车道的设计主要基于自行车流量考虑<sup>[6-7]</sup>, 对助动车和自行车混行环境下的安全性关注不多. 研究助动车超车干扰及其影响因素, 有助于指导自行车道安全性设计. 通过设施设计的调整来减小超车干扰的严重性, 增加自行车出行安全品质, 从而提高使用自行车出行的意愿. 需要指出的是, 自行车道的设计是多维度的设计, 既包括车道宽度的设计, 也包括车速的设计.

收稿日期: 2017-03-07

第一作者: 陈小鸿(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 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, 主要研究方向为交通安全. E-mail: 2010yuelishengsa@tongji.edu.cn

目前,很多关于超车干扰的研究主要集中于超车过程中两车横向距离的变化及其影响因素方面。两车横向距离可作为评估超车安全性的重要指标<sup>[8]</sup>。研究显示,自行车道设置(如机非分隔形式、专用道标志)<sup>[9]</sup>、自行车的行驶位置<sup>[10]</sup>、骑行者外观(如性别和年龄特征<sup>[10-11]</sup>、穿着及护具佩戴<sup>[10]</sup>)以及超车时对向交通流特征(如对向来车速度<sup>[12]</sup>、对向来车车身大小<sup>[13]</sup>)等因素对两车横向距离有明显影响。除两车横向距离外,超车速度以及超车舒适区域大小也被认为对超车安全性有重要影响。Chen 等<sup>[14]</sup>发现,最小碰撞时间随着超车速度的改变而改变。Dozza 等<sup>[15]</sup>则发现,对向来车、自行车道宽度、道路限速对超车舒适区的大小有显著影响。这些研究中,合理的超车阶段划分是很重要的一环,根据不同阶段中超车车辆与被超自行车的交互影响特征,常用的超车阶段划分有 Petrov 等<sup>[16]</sup>和 Chaurand 等<sup>[17]</sup>采用的三分法,还有四分法<sup>[15]</sup>和五分法<sup>[18]</sup>。

这些研究中很多采用了装备有测距雷达、转向测量仪、加速度传感器等测量仪器的自行车,采集了大量的超车数据,然而很少有研究直接对超车干扰下被超自行车骑行状态的改变进行分析。由于超车车辆和被超自行车对于超车交互影响感受程度不一样<sup>[17]</sup>,相比超车车辆,超车干扰对于被超自行车的速度、加速度以及转角波动特征有更加明显的影响<sup>[19]</sup>。本文研究了这些变化,有助于直接从第一人视角来反映自行车骑行者的安全感受,建立更为客观的骑行安全性评估标准。

针对助动车超车行为对于被超自行车行驶的干扰,本文研究超车干扰的作用后果、产生的临界条件,以及影响超车干扰大小的因素。通过对超车干扰强度进行分级,研究不同分级下影响因素的特征,建立其与自行车道设计的关系。最后,给出了在助动车和自行车混行环境下,自行车道单车道宽度的设计意见以及针对助动车的限速方案。

## 1 数据准备

### 1.1 数据采集

选取上海市武宁路混行自行车道(见图 1)作为观测地点。该自行车道设置有机非分隔带,避免了机动车对于自行车行驶的影响;路面平整,没有坡度。通过在过街人行天桥上架设拍摄设备,捕捉助动车超越自行车事件。随后利用车辆轨迹分析软件提取超车事件中车辆在各采样时刻的位置、速度及加速

度信息。研究中采样间隔设置为 0.12 s, 0.12 s 是视频画面中相邻 2 个时刻车辆位置的改变能够被明确区分的最小时间间隔。最终从 3 h 拍摄画面中共提取出 113 起助动车-自行车超车事件的轨迹数据。



图 1 武宁路观测点位置

Fig.1 Observation site on Wuning Road

### 1.2 指标构建

#### 1.2.1 超车干扰强度

助动车超车干扰强度与超车速度和助动车相对被超自行车的距离有关。直观上,当助动车相对自行车的速度越快,超车时越贴近自行车,对自行车骑行者造成的心理压力就越大。

对于超车过程中的某个分析时段  $U$ ,该时段内超车车辆和被超车辆间速度差随时间的波动可以用两车间距离的变化率  $D_U$  来表示。一方面,距离的变化实际上是速度差对于时间的积分;另一方面,自行车骑行者对于两车速度差的感知,是通过两车距离的改变来进行判断的,距离是一个可以直接被人眼观测到的变量。用两车间距离的变化率参与构建超车干扰强度指标,既包含了对两车速度的考虑,又能更好地反映骑行者感知环境的特点。定义两车距离的变化率

$$D_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^{N-1} (W_i - \bar{W})^2} \quad (1)$$

式中: $N$  是采样时间点总数目; $W_i = \ln d_{i+1} - \ln d_i$ ,  $d_i$  是时刻  $i$  被超车辆与超车车辆间的距离; $\bar{W}$  表示所有  $W_i$  的平均值。使用距离的对数一阶差分形式,是因为这种形式具有无量纲的优点,同时这种处理能够使得时间序列数据具有平稳性。本文将采样间隔设定为 0.12 s, 0.12 s 是实际处理过程中能够区分车辆位置变化的最小时间间隔。

$D_U$  采用分析时段  $U$  内所有相邻时刻两车距离改变的标准差形式,避免了特殊时刻极端距离特征

造成的分析误差.同时,采用分析时段  $U$  内两车间最小距离来反映超车时助动车贴近自行车的程度.分析时段  $U$  内超车干扰强度

$$M = \frac{D_U}{\min d_i} \quad (2)$$

$M$  越大,则超车干扰强度越大.然而,若助动车超车时始终保持跟被超自行车较远的距离,或者助动车超车时速度较低,对自行车骑行的影响将会较小.只有当

$$M = \frac{D_U}{\min d_i} \geq M^*$$

助动车超车行为才会明显影响到被超自行车的正常行驶.  $M^*$  是一个常数,表示超车干扰生效的临界强度.

1.2.2 自行车骑行影响指标确定

从 113 起助动车-自行车超车事件的车辆轨迹数据中分析被超自行车速度、加速度指标(见表 1),并分析其波动趋势在助动车超车前后是否发生规律性变化.由于自行车骑行者在其运动的前进和侧向方向上面临的交通场景不同,侧向方向上主要面临超车场景,前进方向上骑行者存在对前方交通流状态的预判等,因此需要对待选指标分方向考虑.研究发现,被超自行车侧向加速度的波动在助动车贴近超车(意味着此时超车干扰强度较大)时会发生规律性改变,适合用来进一步构建自行车骑行受影响指标.侧向加速度的实测值如表 2 所示.可以看到,自行车侧向加速度在靠近路缘石方向上变化范围更大,这是因为自行车骑行者倾向于靠近路缘石行驶<sup>[20]</sup>,而把自行车道内侧(即靠近机动车道一侧)留给助动车行驶.后文将对该指标在超车干扰下的变化作进一步详细说明.

表 1 分析指标及评价

Tab.1 Analysis index and evaluation

分析指标	采样间隔/s	超车前后的波动是否发生规律性变化
侧向速度	0.12	规律不明显,不适合作为检测指标
前进速度	0.12	无规律
侧向加速度	0.12	助动车贴近超车时存在规律性变化
前进加速度	0.12	无规律

1.2.3 侧向加速度波动率

自行车转向灵活,其运动时的稳定性较差,容易左右摇摆.正常行驶状态下自行车侧向加速度随时间变化的典型情况如图 2a 所示,其具有不稳定性,始终处在动态变化中.特别是当侧向加速度变化趋势将要发生改变时,加速度波动曲线将迅速出现一个波峰或者波谷,如图 2a 圈内所示.图 2b 是助动车

表 2 被超自行车侧向加速度特征

Tab.2 Characteristics of overtaking bicycle's lateral acceleration

位置	侧向加速度 $m \cdot s^{-2}$			
	最大值	最小值	均值	标准差
靠近路缘石	0.50	0	0.09	0.08
远离路缘石	0.37	0.01	0.08	0.06

超车过程中,当超车干扰生效时(即  $M \geq M^*$ ),被超自行车侧向加速度的典型波动曲线.图 2b 与图 2a 不同的是,在助动车超越自行车的时刻附近,会存在一个明显的侧向加速度波动降低的阶段.

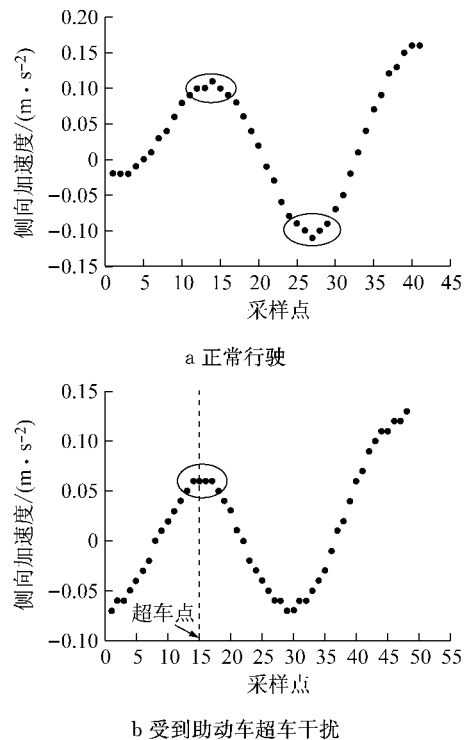


图 2 自行车侧向加速度随时间变化的 2 种典型特征  
Fig.2 Two typical lateral acceleration developments of bicycle

在分析时段  $U$  内,可用被超自行车侧向加速度波动率  $K_U$  来度量助动车超车干扰作用后果.  $K_U$  越小,表明超车干扰对自行车的影响越大.  $K_U$  的定义如下所示:

$$K_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^{N-1} (R_i - \bar{R})^2}$$

式中:  $R_i$  表示被超自行车从时刻  $i$  到时刻  $(i+1)$  的侧向加速度变化,  $R_i = \ln |a_{i+1}| - \ln |a_i|$ , 其中  $a_i$  是被超自行车在时刻  $i$  的侧向加速度;  $\bar{R}$  表示所有  $R_i$  的平均值.

1.2.4 超车干扰时段

在整个超车过程中,超车干扰仅存在于其中的某一个时段.显然超车干扰时段一定存在于超车时

刻点附近,但干扰时段的长度却存在很大不确定性.不同超车事件中,超车助动车与被超自行车的相对速度以及两车的相对距离存在很大不同,因此超车干扰时段开始产生的时刻及持续时间也存在很大不同.出于对安全的考虑,助动车对超车速度和超车时两车间距离的选择均存在一定限制,所以超车干扰时段必定存在一个极限时长.据此可以选择一个分析时段,让它最有可能包含超车干扰时段.这涉及到对分析时段长度和开始时刻的选择.

### (1) 干扰时段最大长度

由第 1.2.2 节可知,超车干扰越强,被超自行车越容易出现侧向加速度稳定不变的阶段.较短时间的侧向加速度稳定不变,可能是正常现象,也可能是受单辆助动车超车干扰产生的;较长时间的侧向加速度稳定不变,很可能是被超自行车连续被多辆助动车超越而产生的.因此,分析时段不能太短,否则无法区分超车干扰下的侧向加速度波动特征和正常行驶下的侧向加速度波动特征;分析时段也不能太长,否则可能会包含了多辆助动车超车的影响.

提取每起超车事件中被超自行车侧向加速度稳定不变的最长持续时间,给出累积分布曲线,如图 3 所示.取图中 50%分位值 0.72 s 作为分析时段  $U$  的长度.

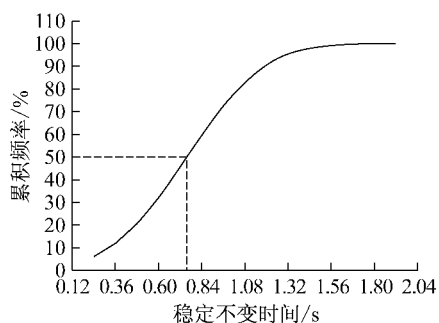


图 3 被超自行车侧向加速度保持不变持续时间累积分布  
Fig. 3 Cumulative distribution of overtaken bicycle's maximum stable acceleration phase length

### (2) 干扰时段开始时刻

超车干扰肯定发生在超车时刻附近,此时超车助动车与被超自行车相距较近,被超自行车能够明显感受到来自助动车的超车压迫,因此可将分析时段设置为包含超车时刻点.计算被超自行车侧向加速度稳定不变的最长持续时间中,发生在超车时刻前的时间长度占该最长持续时间比例的平均值为 60.59%,因此可将被超自行车侧向加速度波动的分析时段  $U$  设置为  $[-0.36, 0.36]$  s(超车时刻设为 0 s).这样设置的目的是使分析时段尽可能完整地包

括全部超车干扰时段.

## 2 指标分析

### 2.1 超车干扰后果及临界强度

提取被超自行车在  $[-0.36, 0.36]$  s 时段内侧向加速度,给出该时段内加速度波动率  $K_U$  与助动车超车干扰强度  $M$  之间的散点图,如图 4a~d 所示.从图 4a 到图 4d,分析时段内加速度稳定不变的时间长度依次增加.

由图 4a~c 可知,当超车干扰强度  $M < 0.05$  时,被超自行车侧向加速度的波动率  $K_U$  分布比较随机, $M$  值的改变对  $K_U$  没有明显影响.当  $M \geq 0.05$  时, $K_U$  与  $M$  之间存在明显的负相关关系,此时随着超车干扰强度的增大,被超自行车侧向加速度的波动率越来越低. $T$  检验显示,在  $M \geq 0.05$  和  $M < 0.05$  时侧向加速度波动率  $K_U$  存在明显差异( $P = 0.005$ ), $M \geq 0.05$  时  $K_U$  均值仅为 0.100 4,而  $M < 0.05$  时  $K_U$  为 0.133 0.据此判断,超车干扰开始对自行车骑行产生明显影响的临界强度  $M^*$  为 0.05.当  $M < 0.05$  时,超车助动车接近被超自行车的速度较低,或者超车助动车与被超自行车之间的距离始终较远.此时,助动车超车没有对自行车骑行者造成明显的心理压力,因此自行车侧向加速度的波动率也就没有发生明显改变.当  $M \geq 0.05$  时,此时助动车超车速度更快和超车时更靠近自行车,给自行车骑行者造成了明显的心理负担,骑行者出于对可能发生碰撞的担忧,增加了对车辆横向运动的控制,以此来减少车辆运动的不确定性,降低碰撞风险,因此会产生侧向加速度波动率降低的情况.

从图 4a~c 可以看出,在  $M \geq 0.05$  的区域内, $M$  与  $K_U$  之间的关系可用对数函数来表示,发现  $M$  的系数绝对值在降低( $0.181 > 0.070 > 0.052$ ),表明超车干扰对于自行车侧向加速度的影响效果在降低.图 4d 中,在  $M \geq 0.05$  的区域内  $K_U$  已经处在很低的水平,此时随着  $M$  的增大, $K_U$  不再呈现明显减小的趋势,表明此时超车干扰的增强无法再进一步显著降低自行车侧向加速度波动率.现实中,骑行者对于外界刺激的反应必定存在一个极限,刺激刚开始起作用时,骑行者反应比较明显,但这种反应的程度并不会随着刺激强度的增大而无限制地加深下去,因为人体在单位时间内能够处理有关刺激的信息容量是有限的.图 4a~d 的现象正是说明了超车干扰作为一种刺激,它存在“边际效应”:随着超车干

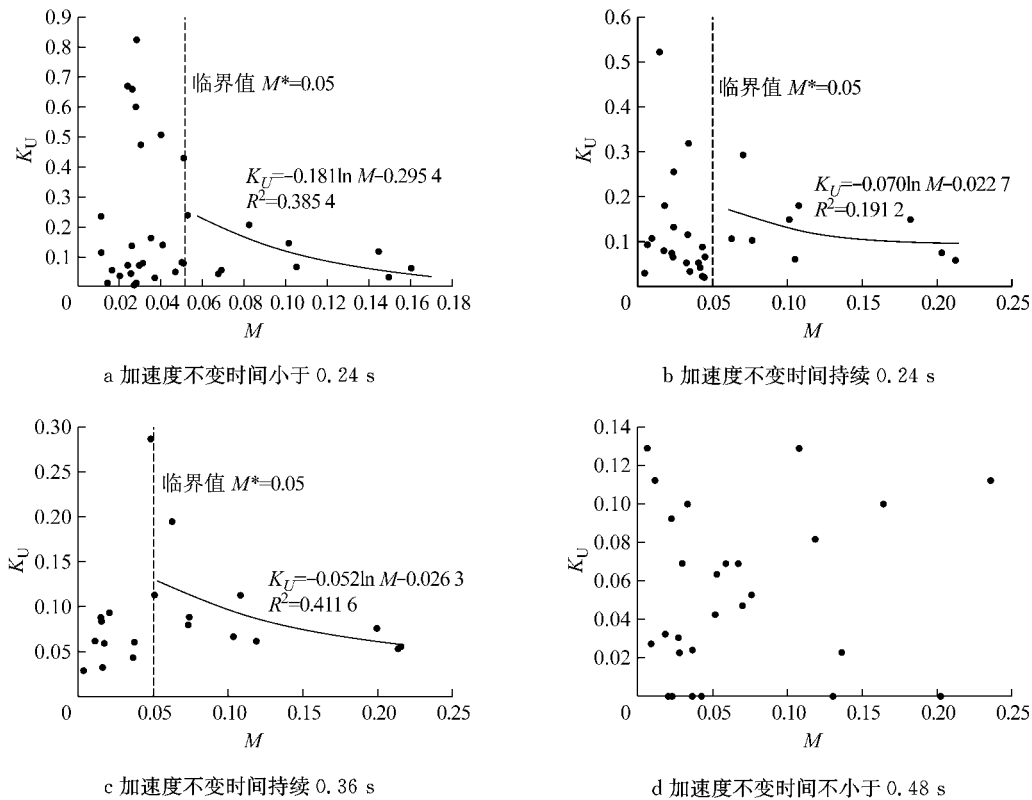


图 4 被超自行车侧向加速度波动率与对应的超车干扰强度

Fig. 4 Overtaken bicycle's lateral acceleration volatility and overtaking interference magnitude

扰强度的持续增大,单位时间超车干扰强度能够减少加速度波动率的能力在降低。

## 2.2 超车干扰强度分级

K-means 模型是一种高效的非监督型学习算法,它不需要一个已知分类的数据集作为训练样本,而是能够根据数据本身的属性特征对数据进行分类,使得同一类中的对象相似度较高,不同类中的对象相似度较小。K-means 模型的标准流程如下所示:① 给定分类数目  $K$ ,并随机选择  $K$  个数据集中的点作为每个分类的中心点;② 把数据集中的每个点归属到距离最近的中心点所在的那个类别;③ 重新计算每个分类的中心点;④ 重复步骤②和步骤③,直到中心点不再发生改变。至此分类完成。然而,K-means 算法存在 2 个缺陷:① 分类数目  $K$  需要给定,通常这个  $K$  值的选定是难以估计的;② 算法初始时需要随机选择  $K$  个中心点,不同的中心点选择很可能会得到完全不同的分类结果。

K-means++ 模型是对 K-means 模型的改进,它提供了一种选择  $K$  个初始分类中心的方案。该模型能够有效地使  $K$  个初始分类中心彼此尽可能地在整个样本空间中分散开来,从而有更大的概率找到最优分类解<sup>[21]</sup>。本文运用 K-means++ 模型,对动车超车干扰强度进行分级。K-means++ 模型

算法设计如下所示:

(1) 给定分类数量  $K$ 。本文主要通过不断尝试来选择最佳分类数目。评价标准是不同分类之间的特征指标差异性最大。

(2) 从待分类的数据集中随机选择一个作为分类中心点。

(3) 对于每个干扰指标值  $i$ ,计算其与已经确定的、最近的分类中心点的距离  $D_i$ 。

(4) 按照正比于距离  $D_i$  的概率,挑选与距离  $D_i$  对应的干扰指标值作为新的分类中心点。

(5) 重复步骤(3)和步骤(4),直到所有  $K$  个初始分类中心全部被挑选出来。

(6) 进行标准的 K-means 算法流程,对干扰指标值进行分类。

对超车干扰强度进行分级的目的主要是为了确定自行车道设计改善效果的依据。分级太少无法反映自行车骑行者的真实感受,还有可能造成过分追求自行车道设计的完善而减少工程实施的可行性;分级太多则不容易区分各级之间特征指标的差异,增加了理论分析的繁琐性,又由于在工程实践中往往又会重新把特征指标差异较小的几个级别作合并处理,因此没有必要进行过细的分级。经综合考虑,本文将超车干扰强度分为 3 级(I~III),并规定第

Ⅲ级为不可接受等级。

用 K-mean++ 算法将全体样本中  $M \geq 0.05$  的样本分成 2 类,其所属区间依次为  $D_1 [0.05, 0.14)$ ,  $D_2 [0.14, 0.25)$ 。T 检验显示,  $K_U$  在  $D_1$  上均值为 0.083, 在  $D_2$  上均值为 0.190,  $K_U$  在  $D_1$  和  $D_2$  之间存在显著性差异 ( $P=0.004$ ), 说明 K-mean++ 算法达到了很好的区分效果。结合  $M < 0.05$  的情况, 将超车干扰强度  $M$  分成 I~Ⅲ 3 级, 如图 5 所示。当干扰强度  $M$  达到第 II 级时, 被超自行车侧向加速度波动率  $K_U$  相比超车干扰生效前平均下降了 16.7%, 而当  $M$  达到第 III 级时,  $K_U$  平均下降了 44.5%, 不同超车干扰强度等级之间被超自行车侧向加速度波动率差异明显。

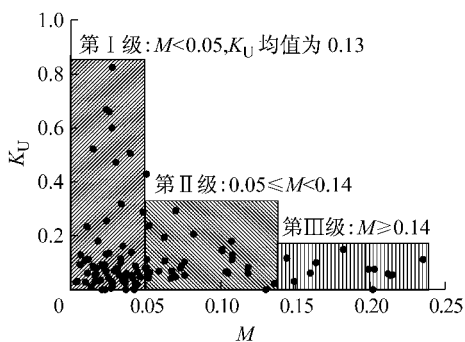


图 5 超车干扰强度分级

Fig. 5 Classification of overtaking interference magnitude

### 3 混行条件下自行车道设计

助动车和自行车混行条件下的自行车道设计应当有利于塑造自行车骑行安全感,其关键在于减少助动车超车对于自行车的影响。对自行车道的设计包括车道宽度的设计和车速的设计。目前,众多设计规范将自行车道单车道宽度设定为 1.0 m<sup>[6-7]</sup>, 这原本针对的是非机动车交通流为单一的自行车交通流而非混行交通流,并综合考虑了自行车行驶所需动态空间以及对自行车流量的要求。同时,由于自行车速度较低,原来的车道设计并不需要对车辆速度进行规定。然而,近年来由于助动车使用量的快速增长,自行车道上出现大量助动车和自行车混行的情况。助动车更快的速度(助动车平均速度比自行车高出 8~10 km·h<sup>-1</sup>)以及更大的车体质量(助动车质量可超过自行车质量的 2 倍)<sup>[5]</sup>,使得自行车遭遇的超车事件频率以及超车过程中的安全风险都比以前有了很大增加。这对自行车道的设计提出了新的

要求。

若想减小超车干扰强度,可以增大超车过程中最小距离  $\min d_i$ , 或者减小超车过程中两车距离变化率  $D_U$ 。最小距离发生在助动车与自行车车身平齐的时刻,它近似等于自行车道单车道宽度(假设车辆均沿车道中心线行驶);  $D_U$  与助动车速度之间呈现系数为正的幂函数关系(见图 6), 因此理论上增大自行车道单车道宽度, 或者减小助动车速度, 可以减小超车干扰强度。

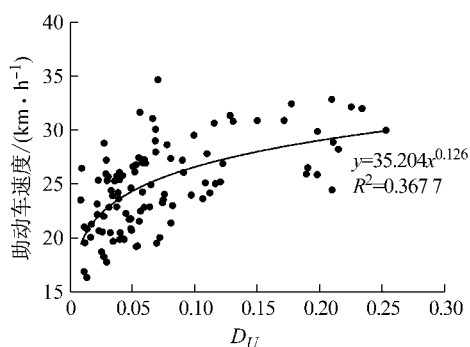


图 6 超车过程中两车距离变化率与助动车速度的关系

Fig. 6 Relationship between  $D_U$  and moped speed during overtaking process

将超车干扰强度第 III 级定为不可接受等级, 则新的自行车道设计方案必须尽量减少第 III 级超车干扰发生的可能性。由图 7 可知(注: 图中所有参数值均为对应干扰强度等级下的平均值;  $v_{助}$  表示助动车速度, 单位  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $M = D_U / \min d_i$ , 详见式(2)), 超车干扰强度从第 I 级增加到第 III 级时, 最小距离  $\min d_i$  从 1.57 m 降低到了 1.08 m, 而  $D_U$  从 0.04 增加到了 0.20。与此同时, 助动车速度则从 23.67  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  增大到了 28.47  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。显然, 当超车干扰强度处在第 III 级时, 助动车超车时更贴近自行

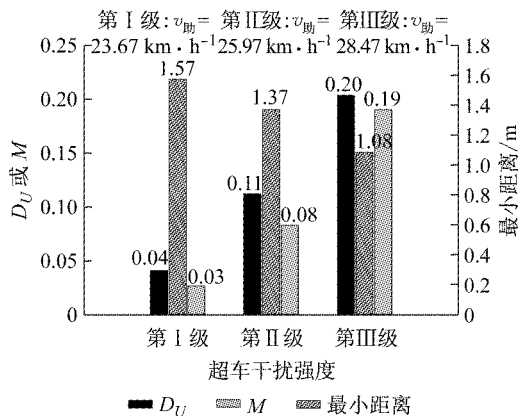


图 7 不同等级下超车干扰强度的特征参数值

Fig. 7 Index value at different levels of overtaking interference magnitude

车,超车速度也更快,这将给自行车骑行者造成显著压力. 为避免超车干扰强度达到第Ⅲ级,则自行车单车道宽度至少大于 1.08 m,同时助动车速度不应当超过  $28 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . 不妨考虑将自行车道单车道宽度设为 1.1 m,同时对助动车实施  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的限速规定(新方案).

当自行车道单车道宽度等于 1.1 m 时,可以假设原有超车情景中两车超车时的最小距离不会小于 1.1 m;由于助动车限速  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,认为原有超车情景中车速在  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  以上的助动车将按照限速值行驶,根据图 7 中给出的超车时助动车速度与两车距离变化率  $D_U$  之间的函数关系,可以计算得到限速后新的  $D_U$  分布,进一步可以计算得到实施新的车道宽度和助动车限速后超车干扰强度的分布概率,如图 8 所示.

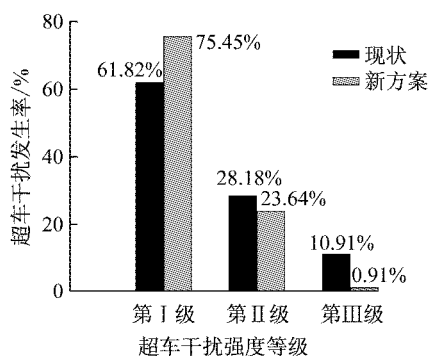


图 8 自行车道设计现状与新方案下不同等级超车干扰强度分布

Fig. 8 Comparison of overtaking interference magnitude between existing and new bicycle lane design

由图 8 可知,新方案下超车干扰得到了减弱. 不可接受的第Ⅲ级超车干扰发生率从 10.91% 降低至接近于零,第Ⅱ级超车干扰发生率也减小了将近 5%. 这个结论是当单车道宽度取 1.1 m 时得到的,显然当车道宽度取值更大时,效果将更好.

然而,过宽的自行车道单车道宽度,反而有可能导致第Ⅲ级超车干扰事件的发生. 这是因为当车道过宽时,两车道的空间可以提供给三车并排行驶,此时两两车辆间的距离反而会减小. 实测中观察到两车并排行驶的极限间距为 0.68 m,若认为极限情况下三车并排行驶时车辆间等间距分布,则自行车道单车道宽度不能超过 1.3 m ( $0.68 \text{ m} \times 2 = 1.36 \text{ m}$ ),考虑工程实施的方便性,设计时按从现状车道宽度 1.0 m 开始,10 cm 递增车道宽度来考虑,故取上限值 1.3 m).

## 4 结语

自行车道上助动车和自行车大量混行的现状下,由于助动车相比自行车速度更快,车体质量更大,助动车的超车行为往往给自行车造成明显的心理压力. 通过调整自行车道设计来减少助动车超车干扰,已成为重塑自行车出行安全感的重要手段.

研究表明,当助动车速度较快,且超车时比较贴近自行车时,将产生明显的超车干扰,表现为被超车自行车侧向加速度波动率的降低. 本文给出了超车干扰强度的定义式,以及超车干扰生效的临界强度值. 分析表明,构建的超车干扰强度指标能够很好地反映助动车的超车行为及自行车骑行者的真实感受.

自行车道设计包括车道宽度的设计和车速的设计. 以往自行车道的设计针对的是单一自行车道交通流,主要考虑流量指标,对助动车和自行车混行条件下的骑行安全性考虑不足. 本文给出了混行条件下自行车道设计建议,在新方案下当自行车道单车道宽度在 1.1 m 到 1.3 m 之间,同时对助动车限速  $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,能够有效减小超车干扰的影响,这对于增加自行车骑行者出行安全感具有重要意义.

## 参考文献:

- [1] 同济大学陈小鸿教授团队,陈小鸿,叶建红. 基于出行者意愿的自行车出行品质评估方法及设施改善策略[J]. 城市规划学刊, 2015(4):120.  
The Xiaohong Chen's Research Group, CHEN Xiaohong, YE Jianhong. The evaluation and improvement method for riding environment based on travel intention of riders[J]. Journal of City Planning, 2015(4):120
- [2] Ministry of Transportation and Communications. A brief analysis of bicycle use survey [R]. Taipei: Ministry of Transportation and Communications, 2010.
- [3] 上海市城市规划管理局. 上海市第五次综合交通调查总报告[R]. 上海:上海市城市规划管理局,2015.  
Urban Planning Administration of Shanghai. General report on fifth comprehensive traffic survey in Shanghai [M]. Shanghai: Urban Planning Administration of Shanghai, 2015.
- [4] National Highway Traffic Safety Administration. Traffic safety facts 2011 data: bicyclists and other cyclists [R]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2011.
- [5] CHEN Xiaohong, HAN Hui, YE Jianhong, et al. Normalized volume measurement for non-motorized traffic flow mixed with mopeds [C]//The 90th TRB Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2011:1-14.

- [6] 中国公路学会交通工程手册编委会. 交通工程手册[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.  
China Highway Traffic Engineering Manual Editorial Board. Traffic engineering manual [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [7] 北京市市政工程设计研究院. 北京城区行人和非机动车交通系统设计导则[M]. 北京:中国计划出版社, 2010.  
Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute. Guidelines for the design of pedestrian and non-motor vehicle traffic systems in Beijing [M]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [8] LOVE D C, BREAUD A, BURNS S, *et al.* Is the three-foot bicycle passing law working in Baltimore, Maryland? [J] *Accident Analysis and Prevention*, 2012, 48: 451.
- [9] KAY J J, SAVOLAINEN P T, GATES T J, *et al.* Driver behavior during bicycle passing maneuvers in response to a Share the Road sign treatment [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2014, 70:92.
- [10] WALKER I. Drivers overtaking bicyclists: objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2007, 39(2):417.
- [11] FARAH H. Age and gender differences in overtaking maneuvers on two-lane rural highways[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2011, 2248(2248):30.
- [12] VLAHOIANNI E I. Modeling duration of overtaking in two lane highways[J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology & Behaviour*, 2013, 20(3):135.
- [13] LEVULIS S J, DELUCIA P R, JUPE J. Effects of oncoming vehicle size on overtaking judgments[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2015, 82(1):163.
- [14] CHEN R, KUSANO K D, GABLER H C. Driver behavior during overtaking maneuvers from the 100-car naturalistic driving study [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2015, 16 (S2):S176.
- [15] DOZZA M, SCHINDLER R, BIANCHI-PICININI G, *et al.* How do drivers overtake cyclists? [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2016, 88:29.
- [16] PETROV P, NASHASHIBI F. Planning and nonlinear adaptive control for an automated overtaking maneuver [C]//2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). [S.l.]:ITSC, 2011: 662-667.
- [17] CHAURAND N, DELHOMME P. Cyclists and drivers in road interactions: a comparison of perceived crash risk [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2013, 50: 1176.
- [18] HEGEMAN G, BROOKHUIS K, HOOGENDOORN S. Opportunities of advanced driver assistance systems towards overtaking[J]. *European Journal of Transport & Infrastructure Research*, 2005, 5(4): 281.
- [19] CHUANG K H, HSU C C, LAI C H, *et al.* The use of a quasi-naturalistic riding method to investigate bicyclists' behaviors when motorists pass[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2013, 56:32.
- [20] CHEN X, LIN B, FANG X, *et al.* Occurrence and impact of passing maneuvers in nonmotorized mixed traffic of bicycles and mopeds[C]// *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. Washington DC: TRB, 2014:1-13.
- [21] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. *K-means++*: the advantages of careful seeding [C]//*Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on discrete algorithms*. New Orleans: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007: 1027-1035.