

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.009

文章编号:1672-9331(2022)03-0087-09

引用格式:龙科军,李文达,何石坚.不同服务水平下车辆汇入行为差异的研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):87-95.

Citation:LONG Kejun,LI Wenda,HE Shijian. Research on the differences among vehicle merging behaviors at different service levels[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2022,19(3):87-95.

不同服务水平下车辆汇入行为差异的研究

龙科军,李文达,何石坚

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】探索不同服务水平下车辆汇入行为的差异。【方法】采用无人机拍摄城市快速路合流区车辆的汇入过程,追踪 838 辆车的轨迹,获取 4 种服务水平下车辆的汇入起始位置、速度和最大加速度等汇入运动特征的数据,分析不同服务水平下车辆汇入行为的差异。【结果】不同服务水平下车辆汇入起始位置的概率分布有明显差异。一级和二级服务水平下,车辆可在加速车道上正常加速,但服务水平达到三级和四级时,车辆的汇入速度低于匝道限速;一级和二级服务水平下,车辆的最大加速度均值比在三级和四级服务水平下的高出了 10%~30%;三级和四级服务水平下,在汇入前有明显的减速行为车辆的比例是一级和二级时的 2~4 倍。【结论】研究结果可为城市快速路设计服务水平的选择以及合流区交通组织优化设计提供参考。

关键词:交通工程;交通流;统计分析;服务水平;汇入行为

中图分类号: U491

文献标志码: A

0 引言

快速路合流区是影响快速路通行能力及效率的重要节点。匝道车辆在合流区汇入主线车道时发生交织,可能对主线车道的车流产生干扰,导致合流区出现交通流紊乱、车辆行驶速度降低、交通流密度增大等问题,严重时甚至造成“鼻端事故”。因此,合流区常成为快速路的通行“瓶颈”^[1]。事实上,交通量是影响车辆汇入行为的最关键因素,研究不同服务水平下匝道车辆汇入特征的差异,对优化合流区几何设计,提高合流区的交通安全管理水平具有重要意义。

国内外学者对影响合流区汇入行为的因素作了大量研究^[2],主要包括合流区的几何条件、驾驶员的自身条件和主线外侧的交通条件 3 个方面。

1) 几何条件:经由直接式加速车道汇入车辆的加速度比经由平行式加速车道汇入车辆的大^[3];加速车道越长,汇入的起始位置离合流起始端越远^[4];在加速车道行驶速度小的汇入车辆的加速度大^[5],当汇入角度过小或过大时,车辆会减速^[6]。由于技术限制,以上研究所采集的车辆轨迹均不够精确,因此仅解释了几何条件对车辆汇入行为的宏观影响。2) 驾驶员自身条件:驾驶员汇入行为存在地域性差异^[7];和年轻驾驶员相比,中老年驾驶员汇入过程的时间更长,速度更小^[8];易怒的驾驶员在汇入过程中更危险^[9]。以上研究样本量较小,可能存在偶然性。3) 主线外侧车道条件:主线外侧车道交通流在从自由流向拥挤流转变的过程中,匝道车辆在汇入过程中速度会锐减^[10],交通越拥挤,汇入时的速度越小,时间越长,加速曲线越复杂^[11];大部分匝道车辆会选取与主线外侧车道车

收稿日期:2021-08-17;修回日期:2021-12-02;接受日期:2021-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52172313);湖南省科技创新计划(2020RC4048);国家重点研发计划(2018YFB1600905-4);湖南省科技厅重点领域研发计划(2019SK2171)

通信作者:龙科军(1974—)(ORCID:0000-0002-5659-9855),男,教授,主要从事交通运输规划与管理方面的研究。

E-mail:longkejun@csust.edu.cn

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

辆速度差较小的时机汇入^[12]。以上研究说明主线外侧车道的交通条件对车辆的汇入行为有显著影响,但车辆的汇入参数使用的是截面数据,连续数据的特征参数所对应的关系未能被有效地使用。

现有文献对影响匝道车辆汇入行为因素的研究取得了较多成果,但不同服务水平下车辆汇入行为差异这一关键问题却很少得到有效的讨论,其原因可能在于车辆轨迹数据的调查收集难度较大,没有将连续量化识别和追踪大量车辆轨迹的手段用于统计分析;同时,数据采集和筛选受技术限制,可用于分析的车辆样本量少,不能满足对主线外侧车道车辆进行分类研究的要求。数据采集和图像识别技术的发展使得采集视频数据、识别和追踪车辆轨迹成为可能,研究者可通过追踪车辆的轨迹,提取车辆汇入过程的行为特征参数,并进行统计来分析车辆汇入行为的变化规律。

本研究首先采用无人机高空悬停的方法,拍摄长沙大道合流区入口匝道处的交通流视频;将视频导入 Tracker 物理跟踪软件,在该软件中建立合流区坐标系,追踪入口匝道处车辆的汇入轨迹,获得 838 辆机动车的汇入轨迹信息,提取汇入过程中的时间、位置、速度和加速度等数据,同时根据图像得到合流区主线外侧车道的交通量,据此将主线外侧车道的服务水平分为 4 级。然后,采用统计学方法分析了 4 种服务水平下主线外侧车道汇入车辆的汇入起始位置的分布、速度的分布和加速行为;拟合 4 种服务水平下汇入起始位置的分布曲线;比较不同服务水平下汇入速度和汇入最大加速度的差异,得到不同服务水平对车辆汇入行为的实际影响。

1 研究数据采集

1.1 设计变量

采集设计速度为 80 km/h 的双向六车道快速路合流区入口匝道路段的车辆轨迹数据。根据中国《城市道路工程设计规范(2016 版)》(CJJ 37—2012),该设计速度下的城市快速路的基本通行能力为 2 100 辆/h,匝道限速为 50 km/h。

本研究的变量分为自变量、因变量和环境变量 3 种。其中,服务水平是自变量,通过采集主线外侧车道流量计算得到。中国公路四级服务水平

分类标准,将主线外侧车道服务水平分为一级自由流(车流量为 0~720 辆/h)、二级稳定流上段(720~1 280 辆/h)、三级稳定流(1 280~1 750 辆/h)和四级饱和流(1 750~2 100 辆/h)。因变量为汇入参数,包括汇入起始位置 d_c 、汇入速度 v_c 和汇入时的最大加速度 a_{max} 。选取匝道速度 v_0 作为环境变量。因变量和环境变量均可通过车辆轨迹数据获得。

车辆汇入行为参数示意图如图 1 所示。服务水平是指匝道车辆汇入时主线外侧车道上交通流所处的状态,该指标反映了某种交通条件下提供通行服务的质量水平。汇入起始位置是指车辆变道时的起始位置,该指标综合表征了驾驶员对路况的观察、对实际车速的调整以及对自身驾驶状态的感知情况,是汇入特征的直观体现。汇入速度是指车辆在汇入起始位置时的速度。该指标是汇入行为变化的特征参数,也是用于评价匝道设计一致性的指标。最大加速度是指加速过程中加速度的最大值,它是加速行为变化的一个特征参数,也是评价汇入行为安全性的重要指标。尤其在入口匝道合流路段,加速行为可能会对主线外侧车道内正常行驶的车辆造成干扰,影响交通安全。匝道速度是指车辆离开匝道、进入加速车道时的速度,其不仅是车辆在匝道内的最终行驶速度,也是进入主线外侧车道时的起始速度。

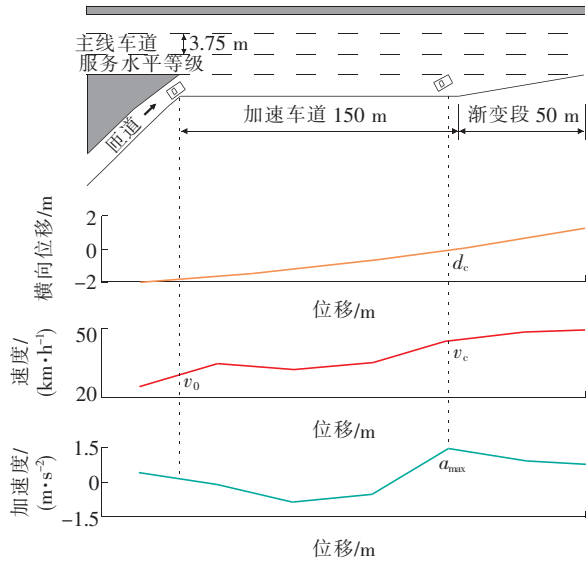


图 1 车辆汇入行为参数示意图
Fig. 1 Illustration of vehicle merging behavior's parameters

1.2 研究对象

选取长沙市万家丽快速路长沙大道由北向南合流区入口的匝道路段作为试验路段。万家丽高架快速路位于长沙市河东,是长沙市第二大主干道——万家丽路的一段。该路为双向六车道,北起福元路北口,南至湘府路南口,全长 16.5 km,是一条南北向、长距离出行的大流量快速通道。其主线采取“全线高架+主辅分离”的形式,高架路部分为双向 6 车道。主线车道设计速度为 80 km/h,匝道设计速度为 50 km/h。该路段位于长沙市中心地区,路段平坦,高峰时期交通量大,受其他环境因素影响小,符合本研究的要求。

1.3 数据采集

考虑万家丽高架桥的实际情况,采用在长沙大道路段的合流区匝道入口处布置检测线圈与无人机拍摄视频相结合的方法。在主线外侧车道合流路段前布置检测线圈,将无人机升空,并将镜头对准调查区域进行垂直俯拍,在此期间避免无人机上下升降。在视频拍摄完成之后,对数据进行统计分析。根据万家丽高架快速路的交通状况,调查时间段为 2020 年 10 月 3 日 7:00—9:00 的早高峰时段。

本研究重点分析了入口匝道车辆的汇入特征。拍摄高峰时间段合流区 150 m 范围内的交通流,提取匝道车辆的汇入行为数据,将视频导入 Tracker 软件中,提取匝道车辆的汇入行为数据。

Tracker 是一款通过分析视频信息,提取目标车辆的位置、速度和加速度等车辆行驶数据的软件。该软件在导入视频后首先设立坐标原点、坐标轴、比例尺、帧数等,然后每两帧对视频进行分析,所追踪车辆的移动轨迹,分析其位置、速度、加速度等信息。

2 结果分析

对从车辆行驶轨迹数据中获取的因变量使用方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 方法进行显著性检验。ANOVA 可判断单一控制变量影响下多组样本的均值间是否存在显著性差异,要求各组检验样本具有可比性、正态性和齐方差性。其中, F 值表示组间和组内平均方差的比值, p 值

表示检验统计量 F 的置信区间,每个 F 值对应一个 p 值, F 与 p 值呈负相关关系。 F 值越大,组间的特征差别越大, $p < 0$ 表示组间存在显著差异,说明该控制变量是影响样本差异的重要因素。服务水平对汇入行为影响的 ANOVA 显著性检验结果见表 1。检验结果表明:不同服务水平下的汇入起始位置、速度和最大加速度的差异性均具有统计学意义 ($p < 0.01$),即服务水平对 3 个汇入行为参数有显著的影响。

表 1 服务水平与车辆汇入行为特征的 ANOVA 结果

Table 1 ANOVA results of service levels and the features of merging behavior

统计量	4 种服务水平下的汇入起始位置	4 种服务水平的汇入速度	4 种服务水平下的最大加速度
F	64.95	188.12	5.99
p	<0.01	<0.01	<0.01

2.1 汇入起始位置

为了分析服务水平对车辆汇入起始位置的影响,对不同服务水平下在加速车道和渐变段范围内汇入匝道的车辆数进行了统计,结果见表 2。分析表 2 可知,在一级和二级服务水平下,只有少量的匝道车辆在渐变段范围内汇入,但在三级和四级服务水平时,却有大量的匝道车辆在渐变段范围内汇入。快速路匝道车辆的汇入属于强制性汇入行为,车辆必须在合流区结束前汇入主线外侧车道,匝道距离的缩短会增大汇入车辆的压力,因此当条件允许时,车辆会在加速车道内尽快汇入。这说明处于三级和四级服务水平时,有大量的匝道车辆在加速车道范围内找不到合适的机会汇入。

表 2 不同服务水平下汇入起始位置的统计结果

Table 2 Statistical results of merging starting position at different service levels

服务水平	加速车道内汇入		渐变段内汇入	
	车辆数	汇入比例/%	车辆数	汇入比例/%
Level I	247	97.2	7	2.8
Level II	102	90.3	11	9.7
Level III	211	54.7	175	45.3
Level IV	58	67.4	28	32.6

为了找出大量匝道车辆在加速车道范围内不能找到合适机会汇入这一现象的内在原因,我们

进一步研究了不同服务水平下汇入起始位置分布的统计规律,结果如图 2 所示。

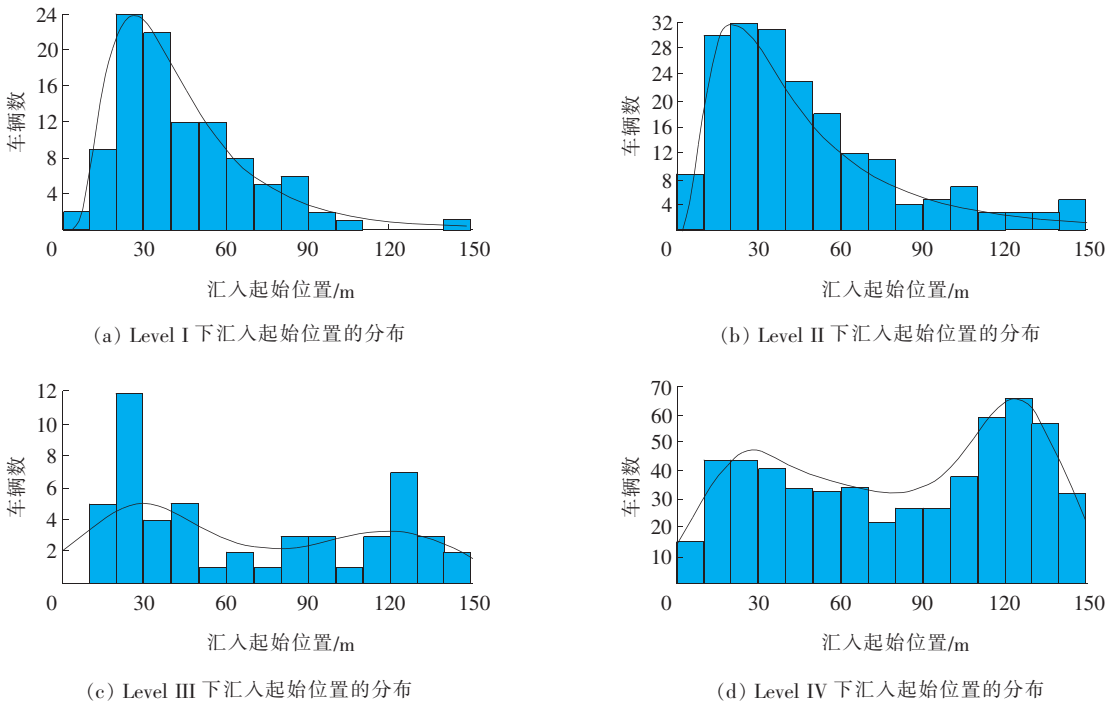


图 2 不同服务水平下汇入起始位置的分布

Fig. 2 Distribution of merging start positions at different service levels

以 10 m 为单位对车辆数进行统计,并进行曲线拟合。发现 4 种服务水平下车辆数的分布均符合正态分布。不同的是,一级、二级时拟合的曲线是单峰对数正态分布,高峰位置分别在 20~40 和 10~50 m 处;而三级和四级时拟合的曲线是双峰 Kernel Smooth 的正态分布,其中三级时曲线的高峰位置在 10~40 和 20~30 m 处,四级时曲线的高峰位置在 110~140 和 120~130 m 处。无论服务水平如何,加速车道范围内车辆数分布的高峰位置都集中在起始位置为 10~50 m 处,这验证了条件允许时车辆会在加速车道内尽快汇入的结论;但当服务水平达到三级和四级时,渐变段范围内汇入的车辆数几乎与加速车道内的车辆数相同,而且车辆数的分布比一级和二级服务平时的更均匀,车辆数分布的峰型变得平缓。这说明服务水平的增大会减少汇入车辆的汇入机会、压缩车辆驾驶员的操作时间。

可见,不同服务水平下的汇入起始位置存在明显差异。更值得注意的是,根据我国《城市道路

工程设计规范(2016 版)》(CJJ 37—2012),新建快速路应按三级服务水平设计,车辆数的分布应符合对数正态分布。但从分析结果中可看出,一级和二级服务水平下车辆数的分布曲线符合对数正态分布的假设,三级服务平时车辆的分布曲线符合 Kernel Smooth 正态分布,与规范中的假设分布不同,这是导致三级服务水平下汇入机会减少的根本原因。

2.2 汇入速度

4 种服务水平下车辆汇入速度和匝道速度的均值如图 3 所示。从图 3 可知,服务水平为一级和二级时,匝道车辆的汇入速度大于匝道限速。服务水平为三级和四级时,车辆的汇入速度小于匝道限速。这说明服务水平低时,汇入过程中匝道车辆均在加速,服务水平高时,汇入过程中车辆均在减速。但从表 1 可知,车辆汇入时的最大加速度的均值为正,且都大于 2 m/s²,说明匝道车辆在变道时是加速的。这可能是因为当服务水平达到三级或更高时,匝道车辆的汇入机会明显减少,

导致车辆只能减速后等待合适的机会再加速变道,因此出现了汇入过程中大量车辆减速但变道时加速的现象。此外,汇入起始位置车辆数的分布曲线在一级和二级服务水平时类似,在三级和四级时也类似。汇入速度也有同样的结论:一级和二级服务水平下的车辆汇入速度均呈增大趋势,三级和四级服务水平时汇入速度均呈减小趋势。这说明一级和二级服务水平下车辆的汇入特征存在相似性,三级和四级服务水平时车辆的汇入特征也存在相似性。因此,本研究对相邻服务水平下车辆汇入速度的差异性进行了检验,结果见表 3。

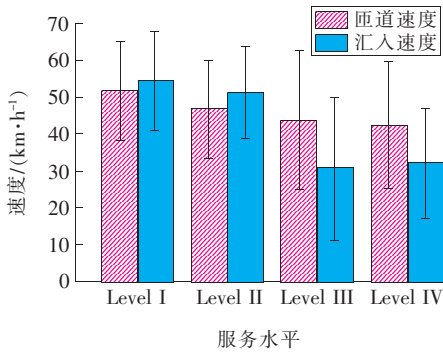


图 3 不同服务水平下的匝道限速和车辆汇入速度

Fig. 3 Ramp speed limit and merging speed at different service levels

表 3 相邻服务水平下车辆汇入速度的差异性

Table 3 Difference of merging speed at adjacent service levels

统计量	对比组		
	Level I 和 Level II	Level II 和 Level III	Level III 和 Level IV
F	106.37	98.33	0.80
p	<0.01	<0.01	0.37

由表 3 可知,一级、二级服务水平下车辆的汇入速度和二级、三级服务水平下的汇入速度之间存在差异性,但三级和四级服务水平之间不存在显著的差异性。虽然一级和二级服务水平下车辆的汇入速度均呈增大趋势,但它们之间也存在差异($p<0.01$),说明两组内的汇入速度分布存在差异。不同的是,三级与四级服务水平的车辆汇入速度不存在显著的差异($p=0.37$),两组内的汇入速度分布具有很高的相似性。这可能是因为服务

水平低时主线外侧车道车流量少,对汇入时速度的限制也小;而服务水平高时,车辆驾驶员的操作空间被压缩,限制了匝道车辆汇入时的速度。

因此,服务水平是影响车辆汇入速度的重要因素。在主线外侧车道服务水平达到三级之前,匝道车辆在整个汇入过程中处于加速状态;在服务水平达到三级或更高时,车辆的汇入速度在不同服务水平时则不存在显著的差异,车辆出现明显的减速行为。这一现象可能与汇入位置的分布规律有关,三级服务水平下,汇入的车辆数的分布与假设不一致导致加速车道实际运行状况与假设的不符。这一发现可为入口匝道上游可变限速控制提供参考,如适当减小匝道的限速值,或当入口匝道排队超出容量限制时关闭匝道等,这些措施都能提升快速路的通行效率,减小合流区的事故发生率。

2.3 加减速

通过对车辆加减速变化的分析可以直观地了解匝道车辆在汇入过程中的行为特征。根据表 1,不同服务水平下匝道车辆的最大加速度具有显著性差异,为研究同一服务水平下匝道车辆的最大加速度的分布,对其进行了正态性检验,结果见表 4。

表 4 不同服务水平下最大加速度的正态性检验

Table 4 Normality test results of maximum acceleration at different service levels

服务水平	均值/ ($s \cdot m^{-2}$)	标准差	95%置信区间	
			上限	下限
Level I	2.91	2.120	3.17	2.65
Level II	2.74	3.015	3.31	2.17
Level III	2.24	1.640	2.40	2.07
Level IV	2.51	1.610	2.85	2.15

2.3.1 加速

由表 4 可知,不同服务水平下匝道车辆最大加速度的均值和标准差均不相同。其中,在服务水平为一级和二级时,匝道车辆最大加速度的均值和标准差均大于三级和四级服务水平下的,即一、二级服务水平时的匝道车辆在汇入过程中的最大加速度更大,其分布也更分散。这可能是因

为服务水平高时,匝道车辆在汇入过程中的汇入机会减少,压缩了车辆驾驶员加速行为的操作空间,导致加速变慢。但三级服务水平时匝道车辆的最大加速度小于四级服务水平时的,四级服务水平时匝道车辆的最大加速度均值则大于三级服务水平时的,这与先前的研究结论一致,即当主线外侧车道的交通流量很大时,车辆汇入需要更大的加速度。为了验证三级和四级服务水平下匝道车辆汇入行为的一致性,对相邻服务水平间的最大加速度的差异性进行了 ANOVA 检验,结果见表 5。

表 5 相邻服务水平间最大加速度的差异性

Table 5 Difference of the maximum accelerations between two adjacent service levels			
统计量	对比组		
	Level I 和 Level II	Level II 和 Level III	Level III 和 Level IV
F	0.38	5.16	1.88
p	0.54	0.02	0.17

由表 5 可知,一级和二级服务水平之间的匝道车辆最大加速度不存在显著性差异,三级和四级服务水平之间也有同样的结论,但二级和三级服务水平之间,匝道车辆的最大加速度则存在显著性差异。因此,服务水平可按照匝道车辆的加速度分为两组,其中,一级和二级同组,这组的匝道车辆在汇入过程中加速更快;三级和四级为另一组,这组的匝道车辆在汇入过程中加速较为缓慢。

2.3.2 减速

当主线外侧车道的服务水平为三级或四级时,匝道车辆在合流区内行驶时存在减速行为。为了研究匝道车辆的减速行为,对不同服务水平下的所有车辆进行了统计,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,服务水平越高,发生过减速行为的车辆比例越高。发生过减速行为的车辆的比例在二级和三级服务水平之间有着巨大的差别,说明当主线外侧车道服务水平达到三级时,服务水平对匝道车辆汇入时加减速行为的影响产生了质变,在入口匝道进行减速成为普遍现象。同时,主

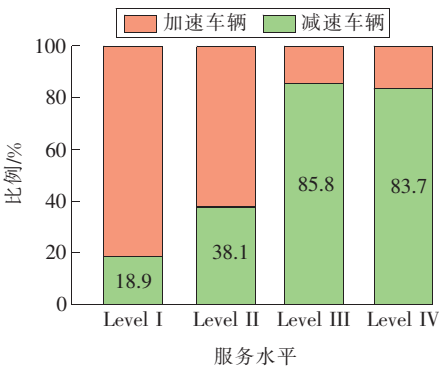


图 4 不同服务水平下减速车辆的比例

Fig. 4 Proportion of deceleration vehicles at different service levels

线外侧车道处于三级服务水平时,匝道车辆的汇入机会大量减少,且前车的减速行为干扰了后续车辆,提高了匝道的服务水平。这也解释了处于三级和四级服务水平时,匝道车辆在汇入过程中最大加速度的分布更为集中,不存在显著性差异现象。

合流区入口加速车道的设计旨在降低入口匝道的车流和主线外侧车道的交通流之间的相互影响,使汇入车辆在短时间加速之后,能达到以合适的速度汇入主线外侧车道的目的,但三级或更高服务水平下大部分的匝道车辆进行了明显的减速。显然,加速车道的实际运行状态与设计目的不符。从不同服务水平引起的匝道车辆加减速行为的差异性来看,为改善合流区的通行能力,可根据主线外侧车道流量将匝道流量控制在适当范围内,或者对主线进行适当限流,避免车道的服务水平提高到三级或更高。

3 讨论

虽然快速路的设计服务水平为三级,但在实际使用中,三级服务水平下的汇入特征明显与假设的汇入特征不符,这可能是近些年我国机动车保有量迅速增加导致的。因此,本文的研究结果为新建快速路设计服务水平的确定提供了一些依据,也为优化设计参数提供了参考。已有研究表明加速车道的类型对合流区匝道车辆的汇入行为具有明显的影响。但限于仪器设备及试验水平,本次试验仅选取平行式加速车道的合流区作为研

研究对象,后续试验可增加带有直接式加速车道的合流区作为研究对象,这样可以得出具有普适性的结论。显然,当服务水平达到三级或四级时,主线其他车道的交通状况也将影响匝道车辆的汇入行为。因此,可将研究区域适当扩大到主线其他车道。此外,可加入事故车辆信息以分析服务水平对事故多发路段的影响。

4 结论

本文通过研究不同服务水平下匝道车辆的汇入起始位置、速度和最大加速度,分析了不同服务水平对快速路合流区的匝道车辆汇入行为的影响,得到了以下主要结论:

1) 服务水平对匝道车辆的汇入起始位置有显著影响。匝道设计假设车辆汇入起始位置服从对数正态分布,但实际情况中,在一级和二级服务水平下车辆的起始位置服从对数正态分布,服务水平达到三级时,其汇入规律发生突变,起始位置服从 Kernel Smooth 正态分布,与规范的假设不符。这是影响车辆汇入效率及汇入安全的可能原因。

2) 服务水平对匝道车辆的汇入速度有显著影响。处于一级和二级服务水平时,汇入车辆在加速车道上能正常加速,但当服务水平达到三级和四级时,匝道车辆的汇入速度小于匝道于限速,加速车道的加速功能失效。

3) 服务水平是影响匝道车辆加速的重要因素。一级和二级服务水平下的加速特征相似,三级和四级下的加速特征相似;一级和二级服务水平下匝道车辆的平均加速度高于三级和四级服务水平下的。

4) 不同服务水平会影响车辆汇入时的减速行为。当服务水平达到三级或四级时,减速车辆的比例分别为 85.8% 和 83.7%,是一级和二级服务水平下减速车辆的 2~4 倍,在加速车道内减速成为普遍现象。

〔参考文献〕

[1] 况爱武,张胜伟,覃定明. 预测信息下降级路网的交通流演化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),

2019,16(4):27-34.

KUANG Aiwu, ZHANG Shengwei, QIN Dingming. Traffic flow evolution of degradable road network with forecast information[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(4): 27-34.

[2] 陈永恒,陶楚青,白乔文,等. 基于 SVM 的快速路合流区车辆间隙选择模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 752-758.

CHEN Yongheng, TAO Chuqing, BAI Qiaowen, et al. Gap choice model at urban expressway merging sections based on SVM[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 752-758.

[3] 左康,刘启远,孙剑. 城市快速路匝道汇入行为建模及仿真[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 1895-1906. DOI: 10. 16182/j. issn1004731x. joss. 201709004.

ZUO Kang, LIU Qiyuan, SUN Jian. Modeling and simulation of merging behavior at urban expressway on-ramp[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 1895-1906. DOI: 10. 16182/j. issn1004731x. joss. 201709004.

[4] 李文权,邵孜科,王世恒,等. 城市快速路平行式加速车道长度计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 113-121.

LI Wenquan, SHAO Zike, WANG Shiheng, et al. Calculation method of parallel-type acceleration lane length of urban expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 113-121.

[5] 李宗平,李林恒. 快速路合流区加速车道长度计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 888-892.

LI Zongping, LI Linheng. Computational method of acceleration lane length in expressway merging area[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(4): 888-892.

[6] 魏中华,李志,周晨静,等. 城市快速路合流区汇入角度对合流区通行能力的影响[J]. 公路交通科技, 2017, 34(5): 116-121.

WEI Zhonghua, LI Zhi, ZHOU Chenjing, et al. Effect of merge angle on capacity of urban expressway merge area[J]. Journal of Highway and Transportation Research

and Development,2017,34(5):116-121.

[7] 孙剑,李克平,杨晓光. 拥挤交通流交织区车道变换行为仿真[J]. 系统仿真学报,2009,21(13):4174-4178,4182.

SUN Jian,LI Keping,YANG Xiaoguang. Simulation on lane-changing behavior under congested weaving sections[J]. Journal of System Simulation,2009,21(13):4174-4178,4182.

[8] 龙科军,周政川,姚午开. 高速公路交通流状态估计方法研究[J]. 公路与汽运,2019(5):25-28,34.

LONG Kejun,ZHOU Zhengchuan,YAO Wukai. Research on estimation method of expressway traffic flow state [J]. Highways & Automotive Applications,2019(5):25-28,34.

[9] 符锌砂,杜锦涛,何石坚. 提示距离和初始速度对高速出口驾驶行为的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(11):1-9.

FU Xinsha,DU Jintao,HE Shijian. Effects of guide distance and initial speed on driving behavior at expressway exit[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2019,47(11):1-9.

[10] 卢生巧,黄中祥. 基于深度学习的短时交通流预测模型[J]. 交通科学与工程,2020,36(3):74-80.

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.012.

LU Shengqiao, HUANG Zhongxiang. Prediction model of short-term traffic flow based on CNN-GRU deep learning[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (3): 74-80. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.012.

[11] 付康林,程向昕,陈涛,等. 考虑换乘时间需求的响应型接驳公交系统的协调优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(3):69-78. DOI:10.19951/j.cnki.cslgdxxbzkb.2021.03.009.

FU Kanglin,CHENG Xiangxin,CHEN Tao,et al. Coordination and optimization of responsive feeder transit system considering transfer time demand [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2021,18(3):69-78. DOI:10.19951/j.cnki.cslgdxxbzkb.2021.03.009.

[12] 尹月华,于晗正男,王金刚. 基于GIS的北京市道路交通流特性研究[J]. 公路工程,2020,45(4):102-108. DOI:10.19951/j.cnki.cslgdxxbzkb.2021.03.009.

YIN Yuehua,YU Hanzhengnan,WANG Jingang. Research on characteristics of Beijing road traffic flow based on GIS[J]. Highway Engineering,2020,45(4):102-108. DOI:10.19951/j.cnki.cslgdxxbzkb.2021.03.009.

Research on the differences among vehicle merging behaviors at different service levels

LONG Kejun,LI Wenda,HE Shijian

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract:[Purposes] The paper aims to explore the differences among vehicle merging behaviors at different service levels. [Methods] The data of vehicles' merging process at merging area of urban expressway were recorded by drone, and 838 vehicles' trajectories were extracted to obtain the features of merging behavior,including the start position, speed and maximum acceleration, the differences be-

tween these features at different service levels were also analyzed. [Findings] The probability distribution of the merging starting position at different levels is obviously different. At the first and the second service levels, the acceleration of vehicles is normal in the acceleration lane. However, when the service level reaches the third and the fourth levels, the vehicle's merging speed is lower than the on-ramp speed limit, and the average maximum acceleration of vehicles at the first and the second service levels is 10%—30% higher than that at the third and the fourth service levels; The number of vehicles which have significant deceleration behaviors before merging at the third and the fourth service levels is 2—4 times as much as the others. [Conclusions] The research results are helpful for the selection of the service level of expressway design and the optimal design of traffic organization at the merging area.

Key words: traffic engineering; traffic flow; statistical analysis; service level; merging behavior

Manuscript received:2021-08-17; **revised:**2021-12-02; **accepted:** 2021-12-17

Foundation item:Project(52172313) supported by the National Natural Science Foundation of China;Project(2020RC4048) supported by the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province;Project (2018YFB1600905-4) supported by the National Key Research and Development Program of China;Project(2019SK2171) supported by the Science and Technology Program in Key Fields of Hunan Province

Corresponding author:LONG Kejun(1974—)(ORCID:0000-0002-5659-9855), male, professor, research interest: transportation planning and management. E-mail:longkejun@csust.edu.cn

(责任编辑:李脉;校对:石月珍;英文编辑:邢璐)