

# 基于间隙接受理论的高速公路双车道入口 辅助车道长度

潘兵宏<sup>1</sup>, 张佳乐<sup>1</sup>, 王 潮<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 湖北省交通规划设计院股份有限公司 第一勘察设计院, 湖北 武汉 430051)

**摘要:** 为研究高速公路双车道入口辅助车道的合理长度, 采用路侧激光雷达获取车辆在辅助车道区域的运行速度和车头时距数据并分析其分布特征; 采用无人机航拍视频及 Tracker 车辆追踪软件获取入口辅助车道路段的接受间隙和拒绝间隙, 通过 Raff 临界间隙估算方法确定路段的临界间隙为 2.475 s。根据驾驶人在入口辅助车道路段的驾驶行为, 结合路段车辆运行和微观换道特性, 建立了双车道入口辅助车道长度计算模型, 将辅助车道划分为等待距离和左换道距离 2 个组成部分。基于临界间隙和运行速度与车头时距分布特征, 标定了长度计算模型中的相关参数, 提出了双车道入口辅助车道长度推荐值。研究表明: 入口辅助车道长度与车辆运行速度正相关, 且辅助车道长度推荐值较《公路路线设计规范》(JTG D20—2017) 规定值小, 说明规定值有一定的长度富余, 在用地紧张路段可控制车辆运行速度, 适当缩短辅助车道长度。

**关键词:** 交通工程; 临界间隙; 辅助车道; 双车道入口; 换道模型

中图分类号: U412.33

文献标志码: A

## Length of Auxiliary Lanes at Dual-Lane Highway Entrances Based on Gap Acceptance Theory

PAN Binghong<sup>1</sup>, ZHANG Jiale<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>2</sup>

(1. College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. First Survey and Design Institute, Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China)

**Abstract:** To investigate the appropriate length of the auxiliary lane at a two-lane highway entrance, this study utilizes roadside LiDAR to collect data on vehicle operating speeds and headway distributions within the

auxiliary lane area and analyzes their distribution characteristics. Additionally, UAV aerial videos combined with Tracker vehicle tracking software are employed to obtain accepted and rejected gaps at the entrance auxiliary lane section. Using the Raff critical gap estimation method, the critical gap for this section is determined to be 2.475 s. Based on driver behavior in the entrance auxiliary lane section, as well as vehicle operation characteristics and microscopic lane-changing behaviors, a length calculation model for the two-lane entrance auxiliary lane is established. The auxiliary lane is divided into two components: waiting distance and left lane-changing distance. The model parameters are calibrated based on the critical gap, vehicle speed, and headway distribution characteristics, and a recommended length for the two-lane entrance auxiliary lane is proposed. The results indicate that the length of the entrance auxiliary lane is positively correlated with vehicle speed. Moreover, the recommended auxiliary lane length proposed in this study is shorter than the value specified in the *Design Specification for Highway Alignment*, suggesting that the existing standard provides a certain length margin. In land-constrained areas, vehicle operating speed can be regulated to appropriately shorten the auxiliary lane length, optimizing land use efficiency.

**Keywords:** traffic engineering; critical clearance; auxiliary lanes; two-lane entrances; lane change models

随着路网密集程度的增加, 高速公路互通式立交(高速互通)成为重要的交通转换枢纽, 互通范围内的出入口往往易发生交通事故和拥堵<sup>[1]</sup>。根据美国 Fatality Analysis Reporting System (FARS) 和

收稿日期: 2023-11-22

第一作者: 潘兵宏, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为路线设计、互通式立交设计、道路安全。

E-mail: panbh@chd.edu.cn

通信作者: 张佳乐, 硕士生, 主要研究方向为路线设计、互通式立交设计、道路安全。

E-mail: 2022121213@chd.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

General Estimates System (GES) 的调查数据<sup>[2]</sup>, 高速公路入口处互通相关事故占比达到 36%。我国事故数据表明, 互通立交及服务区范围内入口路段事故占比约为 40%<sup>[3]</sup>, 由此可见高速公路入口路段的交通安全隐患较大。在驶入车辆较多的双车道入口布设辅助车道可为车辆提供速度缓冲, 在一定程度上降低事故率。增设车道平衡型辅助车道还可避免交通量变化导致的合流处车道不平衡。而辅助车道长度过短会直接或间接导致驾驶人在合流区附近频繁变道、强制汇入等, 影响交通安全; 过长则会增加不必要的土地占用和工程造价。因此高速公路双车道入口的辅助车道长度设计需要进一步研究。

在高速互通入口辅助车道长度和间隙接受理论研究方面, 国内外学者做了相关研究。邢岩等<sup>[4]</sup>将交通流崩溃概率理论与传统间隙接受理论相结合, 建立了快速路入口辅助车道长度计算模型, 通过实测交通流数据和仿真验证, 论证了交通量对辅助车道长度有显著影响; 宋灿灿等<sup>[5]</sup>基于间隙接受理论, 建立了失控车辆的合流概率模型, 提出了 6 种不同路面状况下的辅助车道长度建议值; 孔冰杰<sup>[6]</sup>以复合式立交辅助车道为研究对象, 运用 HCM2000 中的交织区理论, 以临界车流密度为控制条件, 试算得到了交织型辅助车道长度; Wang 等<sup>[7]</sup>基于实测城市快速路菱形立交出口的交通流数据, 建立了出口 VISSIM 微观仿真模型, 得到了城市快速路辅助车道及其渠化长度的推荐值; 关羽等<sup>[8]</sup>根据加速车道上车辆汇入主线的临界间隙变化情况, 建立了加速车道车辆汇入概率模型; 贾洪飞等<sup>[9]</sup>根据快速路合流区实测车辆轨迹数据, 构建了二元 Logit 间隙接受模型, 通过 MTSS 仿真平台验证了模型的有效性; 李文权等<sup>[10]</sup>运用间隙接受理论建立了城市快速路平行式加速车道长度计算模型, 研究结果表明临界间隙越大, 所需加速车道长度越长; 李霞等<sup>[11]</sup>通过分析高速公路主线外侧车流的临界间隙, 得到了加速车道车辆安全合流概率, 建立了加速车道长度计算模型。国外对高速互通的研究成果大部分已汇集在相应的设计指南、标准、手册中。国内的《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)<sup>[12]</sup>(简称《路线规范》)规定: “双车道加速车道宜采用直接式, 为保证车道平衡, 需要在合流点后设置一条适当长度的辅助车道, 即辅助车道的范围为合流点至渐变段起点”。《路线规范》的条文解释中说明了出口辅助车道长度一般值和最小值的由来, 但是对入口辅助车道长度无过多

说明, 且未给出取值依据。

双车道入口辅助车道路段车辆虽与单车道车辆汇入主线的需求相同, 但交通特性明显不同。而目前国内外大多是计算单车道加速车道长度及汇入概率, 尚未有针对双车道的研究。同时, 现有研究的辅助车道类型多为交织型, 而有关平衡型辅助车道的研究相对较少, 研究地点也多为城市道路, 但城市道路与高速公路的交通运行状况存在较大差异。因间隙接受理论符合驾驶人的实际汇入需求, 故基于间隙接受理论对高速公路双车道入口辅助车道长度展开研究。

基于无人机、路侧激光雷达和 Tracker 车辆追踪软件获取的双车道入口路段车辆交通数据, 分析速度和车头时距的分布特征, 通过 Raff 临界间隙估算方法确定路段的临界间隙。基于驾驶人在入口辅助车道路段的微观驾驶行为建立双车道入口辅助车道长度计算模型, 将辅助车道划分为等待距离和左换道距离两部分, 依次标定计算模型中的参数, 提出高速公路双车道入口辅助车道长度推荐值。

## 1 辅助车道范围交通数据采集与分析

### 1.1 交通数据采集

为了获取双车道入口辅助车道范围的交通数据, 得到该路段车辆运行速度和车头时距分布特征, 为辅助车道长度计算模型的建立提供理论依据, 采用路侧激光雷达、无人机采集拍摄西兴高速、西安绕城高速、连霍高速和沪陕高速 4 处调查点(表 1)早、晚高峰的车辆运行数据和视频(图 1), 拍摄时晴朗无风, 拍摄路段标志标线设置完整清晰。

应用统计学方法<sup>[13]</sup>分析 4 条高速所测行驶速度和车头时距样本量, 经计算满足最小样本量要求。通过 Nano-L 软件处理利用路侧激光雷达所获的初始 .nml 格式数据文件, 进而获取车辆的行驶位置、运行速度、车型和车头时距等参数; 采用 Premiere 软件对航拍视频预处理, 将视频分区并用变形稳定器进行防抖处理, 保证后续车辆轨迹和临界间隙提取的精确性。

### 1.2 辅助车道运行速度

车辆在辅助车道上行驶距离随运行速度的增大而增加, 因此当设置更长的辅助车道来满足换道、操作等反应需求时, 运行速度是影响辅助车道最小长度的显著因素。故对 4 处调查地点的小客车行驶速度作单样本 K-S 正态性检验(表 2)。

表1 调查地点概况  
Tab. 1 Overview of survey location

调查地点	设计速度/(km·h <sup>-1</sup> )	车道数		互通图示
西兴高速—帽耳刘互通	120	主线	双向四车道	
		入口匝道	双车道	
		辅助车道	单车道	
西安绕城高速—阿房宫互通	120	主线	双向六车道	
		入口匝道	双车道	
		辅助车道	单车道	
连霍高速—西吴互通	100	主线	双向八车道	
		入口匝道	双车道	
		辅助车道	单车道	
沪陕高速—田王互通	100	主线	双向六车道	
		入口匝道	双车道	
		辅助车道	单车道	

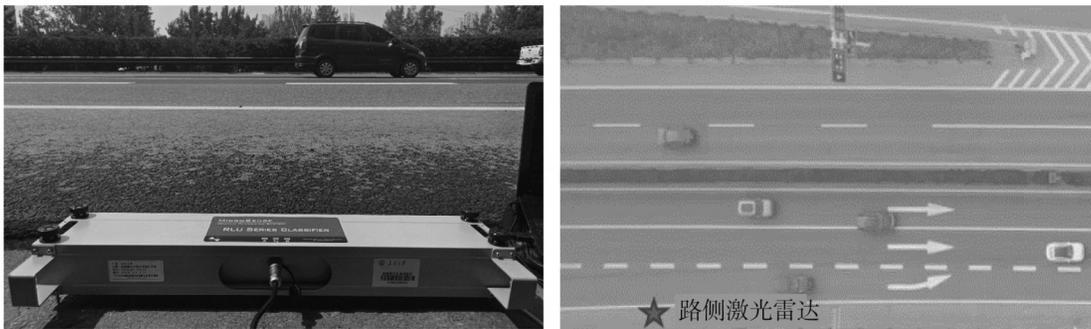


图1 调查地点与航拍视频截图

Fig. 1 Survey location and screenshots of aerial video

表2 入口辅助车道行驶速度K-S检验结果

Tab. 2 K-S test results of driving speed on the entrance auxiliary lane

调查地点	最大垂直差	$p$ 值
西兴高速	0.046 1	0.358 1
西安绕城高速	0.067 5	0.238 5
连霍高速	0.049 2	0.775 3
沪陕高速	0.059 0	0.501 0

由表2易知显著性 $p$ 值均大于0.05,即数据符合正态分布,此数据采集具备统计学意义。4处调查地点的辅助车道行驶速度分布如图2所示。

由图2可进一步计算得到4处辅助车道行驶速度平均值和第85分位值,见表3。

由表3相关速度数据可知,西安绕城高速的平均行驶速度较低,但 $V_{85}$ 同连霍高速相近,表明西安绕城高速辅助车道行驶速度离散性偏大,侧面反映了平均行驶速度不能满足大部分驾驶员的速度期

望,故选取第85分位运行速度更为合理。

日本和美国分别在《日本高速公路设计要领》<sup>[14]</sup>及《公路与城市道路几何设计》<sup>[15]</sup>中规定了与主线合流需要达到的速度,但辅助车道上的车辆必须在某一位置汇入主线,故辅助车道运行速度不应小于最小合流速度。结合实测数据及相关规范规定,得到入口辅助车道运行速度的取值(表4)。

### 1.3 主线最外侧车道车头时距分布

车道观测断面的车头时距与交通量有关<sup>[16]</sup>。当主线交通量较大时,出现可插入间隙的概率降低,合流车辆难以汇入主线,进而导致入口匝道拥堵,出现排队等待现象。调查期间的西安绕城高速主线交通状态如表5所示。

由表5可知,17:00—19:00的流量、密度均高于其他非高峰时期,而速度低于非高峰时期,因此选择该时间段的主线最外侧车道的车头时距调查数据进

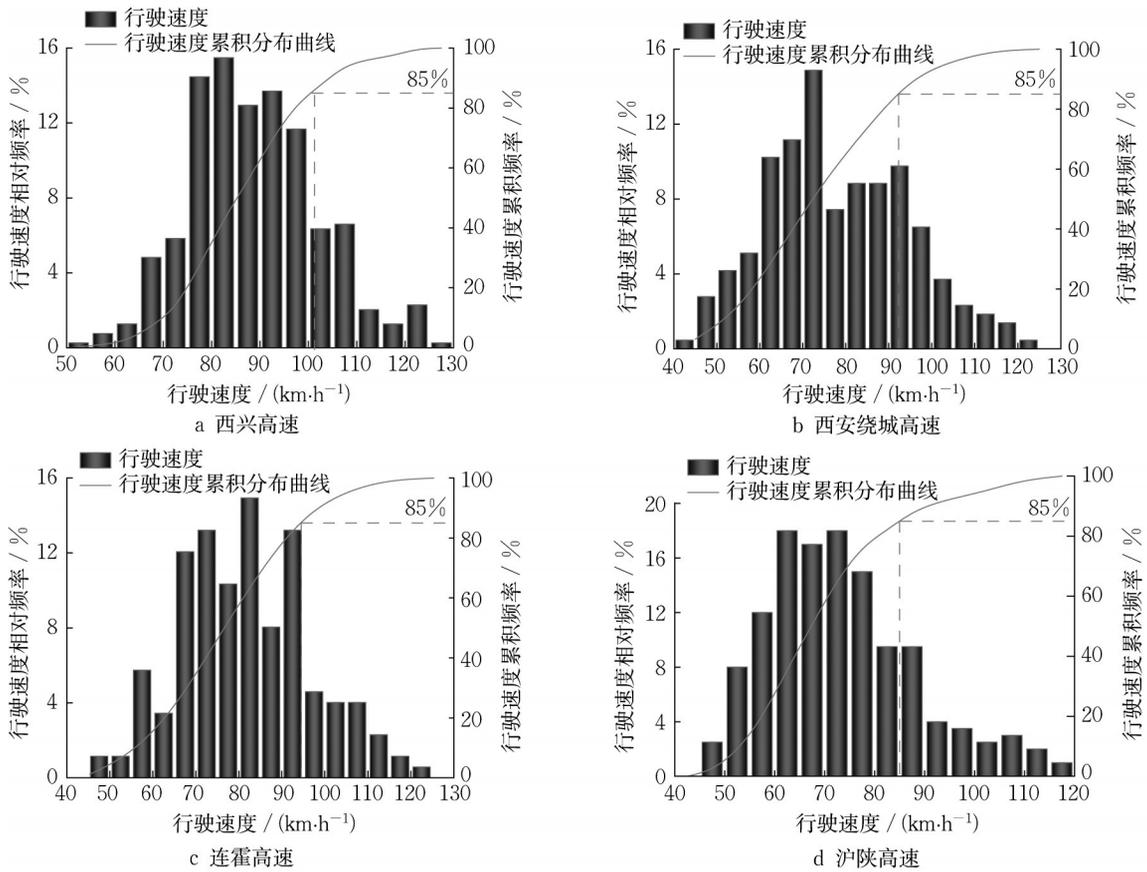


图 2 双车道入口辅助车道行驶速度

Fig. 2 Driving speed in the auxiliary lane of a dual-lane entrance

表 3 入口辅助车道汇入处实测运行速度

Tab. 3 Measured operating speed at the junction of the entrance auxiliary lane

调查地点	单向车道数	平均行驶速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	V <sub>85</sub> / (km·h <sup>-1</sup> )
西兴高速	2	88.58	101.61
西安绕城高速	3	78.15	96.21
连霍高速	4	82.02	96.73
沪陕高速	2	70.00	84.00

表 4 入口辅助车道运行速度推荐值

Tab. 4 Recommended operating speed for the entrance auxiliary lane

主线设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	入口辅助车道运行速度/ (km·h <sup>-1</sup> )
120	90
100	80
80	70

行拟合分析。

在入口路段,当车辆驶入辅助车道之后,驾驶人观察相邻主线车道的车流并寻找合适的可插入间隙,在与前车保持安全距离的前提下伺机汇入主线。

表 5 调查地点主线交通流三参数

Tab. 5 Three parameters of mainline traffic flow at the survey location

时段	流量/ (veh·h <sup>-1</sup> )	密度/ (veh·km <sup>-1</sup> )	速度/ (km·h <sup>-1</sup> )
7:00—9:00	3 275	36.2	90.5
11:00—13:00	2 249	23.0	97.8
17:00—19:00	3 822	44.3	86.2

主线交通量越大,平均车头时距越小,车辆等待可插入间隙的时间越长,在辅助车道上行驶的距离越长,所需的辅助车道长度也越长。车辆有汇入主线最外侧车道的需求,故主线最外侧车道的车头时距影响着车辆的汇入过程。采用移位负指数分布、移位二阶爱尔朗分布、M3分布和对数正态分布<sup>[17]</sup>分别拟合实测车头时距数据,并用 $\chi^2$ 检验方法检验各分布模型的拟合优度(表 6)。

由表 6 可知,4 处调查地点的主线最外侧车道车头时距只符合移位二阶爱尔朗分布和对数正态分布,考虑到对数正态分布的参数较难估计,因此采用移位二阶爱尔朗分布描述入口主线最外侧车道车头时距(图 3)。

表6 入口主线最外侧车道车头时距分布 $\chi^2$ 检验

Tab. 6  $\chi^2$  Test of headway distribution for the outermost lane of the entrance mainline

调查地点	分布类型	$\chi^2$	$\chi_{0.05}^2$	检验结果
西兴高速	移位负指数	72.675	14.067	拒绝
	移位二阶爱尔朗	9.484	11.070	接受
	M3	81.929	12.592	拒绝
	对数正态	10.753	12.592	接受
西安绕城高速	移位负指数	37.376	26.296	拒绝
	移位二阶爱尔朗	18.620	22.362	接受
	M3	60.453	24.996	拒绝
	对数正态	23.224	23.685	接受
连霍高速	移位负指数	16.784	11.070	拒绝
	移位二阶爱尔朗	2.049	9.488	接受
	M3	50.223	11.070	拒绝
	对数正态	2.609	11.070	接受
沪陕高速	移位负指数	41.337	16.919	拒绝
	移位二阶爱尔朗	8.742	15.507	接受
	M3	69.927	16.919	拒绝
	对数正态	16.943	18.307	接受

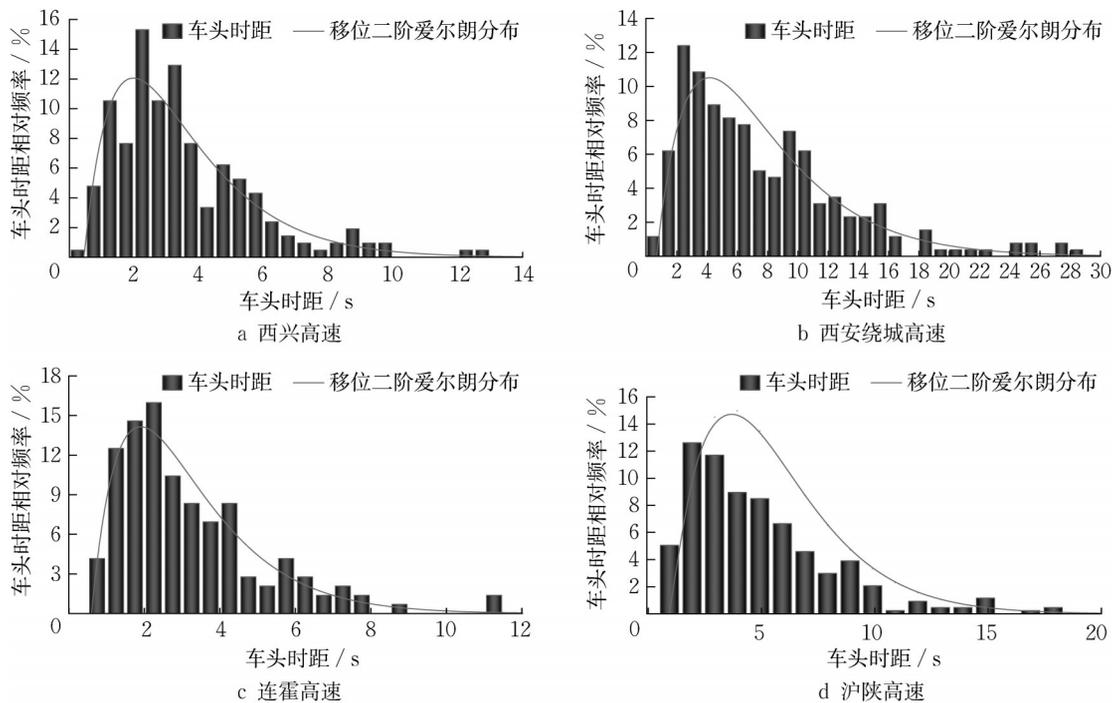


图3 入口主线最外侧车道车头时距分布占比

Fig. 3 Distribution proportion of headway in the outermost lane of the main entrance

## 2 间隙接受理论

### 2.1 临界间隙的应用

临界间隙指目标车道上出现的可供车辆插入的最小时间间隔,一般应用于无信号交叉口,表示在主路连续车流下,支路车辆可通行的最小时间间隔<sup>[18]</sup>。当主路车流间隙大于临界间隙时,支路车辆穿越交叉口,此时主路的车头时距为接受间隙,反之,支路车辆拒绝穿越交叉口,此时对应的主路车头时距为拒绝间隙。

临界间隙也应用于合流区,车辆在双车道入口路段的辅助车道上行驶并伺机汇入主线时,相邻主线车道的的时间间隙往往影响着驾驶人的判断与决策。当时间间隙大于接受间隙,车辆才能安全汇入主线,否则将拒绝汇入主线并继续向前行驶。临界间隙反映了驾驶人选择汇入主线的可接受程度,决定了入口车辆能否安全汇入主线。因双车道入口辅助车道与单车道功能类似,但交通特性明显不同,故对临界间隙展开估算。

### 2.2 临界间隙数据获取

选取西兴高速辅助车道入口路段的视频获取临界间隙,采集方法如下。

利用 Tracker 软件追踪视频中汇入车辆的运行轨迹,设汇入车辆在汇入主线过程中经历了  $n(n=1, 2, 3, \dots)$  个间隙,则前  $n-1$  个间隙为拒绝间隙,第  $n$  个间隙为接受间隙。接受间隙和拒绝间隙均为目标车道前后车通过同一断面的时间差,但何时确定标记断面,两者有所不同。对于某一汇入车辆 B,目标车道前车 A、后车 C,若车辆 B 选择插入车辆 A 与 C 之间,则该间隙为接受间隙(图 4),此时汇入过程即为左换道过程,记车辆 B 车身开始呈一定角度汇入的时刻为起始时刻  $t_1$ ;若车辆 B 拒绝插入车辆 A 与 C 之间,则该间隙为拒绝间隙(图 5)。

为保证行车安全,车辆 B 一般会将车速减至低于后车 C,继而判断目标车道的下个间隙是否为可插入间隙,显然车辆 B 介于车辆 A 与 C 之间某一点时决定拒绝插入,该点位置因人而异,具有较大的不



图 4 接受间隙

Fig. 4 Gap acceptance

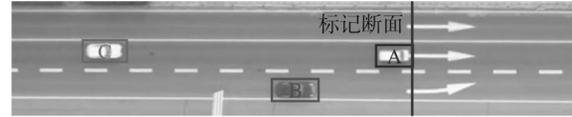


图 5 拒绝间隙

Fig. 5 Gap rejection

确定性,为便于统计,记车辆 B 在当前车道上位于车辆 A 与 C 中点的时刻为起始时刻  $t_1$ 。在  $t_1$  时刻前车 A 处绘制标记断面,记录后车 C 通过标记断面的时刻  $t_2$ ,根据以上对应关系,可得到接受间隙或拒绝间隙为  $t_2-t_1$ 。航拍视频分析完成后共得到 110 个接受间隙(表 7)和 62 个拒绝间隙(表 8)。

表 7 实测接受间隙

Tab. 7 Measured gap acceptance

单位:s

第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组
2.878	2.294	2.293	2.294	2.711	0.959	1.71	5.338	4.713	2.628
2.711	1.961	2.086	6.34	3.129	3.128	2.169	3.754	3.044	3.003
1.419	2.961	2.502	3.128	2.044	4.255	4.337	2.378	2.002	4.797
4.838	3.545	1.543	2.419	1.96	5.631	2.878	3.378	4.087	1.418
3.17	2.503	3.253	5.422	4.379	6.132	3.295	2.544	2.419	2.002
4.547	4.088	2.127	4.504	4.546	3.461	4.129	2.21	3.003	2.67
5.213	1.96	4.17	3.295	2.085	4.672	1.543	2.085	1.836	2.377
3.545	2.294	3.712	2.878	4.338	2.336	3.671	5.214	3.503	3.878
2.836	2.169	2.252	3.503	3.962	5.035	2.002	2.628	1.334	3.879
2.794	3.211	3.253	3.462	3.504	3.337	2.127	1.459	2.792	2.625
3.292	5.832	1.75	2.291	2.792	2.625	2.417	2.249	3.625	2.375

表 8 实测拒绝间隙

Tab. 8 Measured gap rejection

单位:s

第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组	第 10 组
1.96	2.126	2.001	3.002	3.586	2.794	2.543	3.168	2.126	2.001
2.335	2.919	5.255	4.379	2.418	2.752	3.711	3.586	2.043	2.627
2.126	2.501	2.793	2.001	2.292	2.335	2.501	2.168	1.875	2.208
2.998	3.413	3.14	3.016	2.24	3.015	2.71	3.176	2.419	2.328
2.268	2.959	2.561	3.195	2.01	3.62	3.522	2.353	3.963	2.907
3.121	2.976	2.995	3.432	2.396	3.309	3.823	2.638	2.811	3.319
2.044	2.656								

### 2.3 临界间隙计算

临界间隙往往不是固定值,而是一个服从某种分布的随机变量,一般采用分布的期望值作为临界间隙的代表值。此外,临界间隙无法由实际观测得

到,但可通过接受间隙和拒绝间隙的分布规律间接估算。常用的临界间隙估算方法有 Raff 方法<sup>[19]</sup>、Ashworth 方法<sup>[20]</sup>、极大似然估计法<sup>[21]</sup>等。因 Raff 方法的基本思想符合实际驾驶行为、对数据的描述较

为直观、操作简单且结果真实可靠,故本文采用Raff方法计算临界间隙值。

Raff假设主线车辆与汇入车辆的到达相互独立,基本思想为小于临界间隙的接受间隙数与大于临界间隙的拒绝间隙数相等(式1)。

$$N_a F_a(t_c) = N_r [1 - F_r(t_c)] \quad (1)$$

式中: $t_c$ 为临界间隙,s; $N_a$ 为接受间隙个数; $N_r$ 为拒

绝间隙个数; $F_a(t)$ 为接受间隙正向累积概率分布函数,单调递增; $1 - F_r(t)$ 为拒绝间隙反向累积概率分布函数,单调递减。

由式(1)可知接受间隙与拒绝间隙累积概率分布曲线与各自样本量乘积后的交点,即接受间隙正向累积频数分布曲线与拒绝间隙反向累积频数分布曲线的交点所对应的车头时距为临界间隙。对接受间隙和拒绝间隙分别进行区间频数统计,见表9。

表9 接受间隙和拒绝间隙频数统计结果

Tab. 9 Frequency distribution of gap acceptance and gap rejection

间隙区间/s	接受间隙频数	拒绝间隙频数	接受间隙累积频数	拒绝间隙累积频数
0-0.9	0	0	0	0
0.9-1.2	1	0	1	0
1.2-1.5	4	0	5	0
1.5-1.8	4	0	9	0
1.8-2.1	11	8	20	8
2.1-2.4	16	13	36	21
2.4-2.7	11	9	47	30
2.7-3.0	10	11	57	41
3.0-3.3	13	8	70	49
3.3-3.6	9	7	79	56
3.6-3.9	6	3	85	59
3.9-4.2	5	1	90	60
4.2-4.5	4	1	94	61
4.5-4.8	6	0	100	61
4.8-5.1	2	0	102	61
5.1-5.4	3	1	105	62
5.4-5.7	2	0	107	62
5.7-6.0	1	0	108	62
6.0-6.3	1	0	109	62
6.3-6.6	1	0	110	62

根据表9中的结果,以间隙区间终点为横坐标、累积频数为纵坐标绘制接受间隙和拒绝间隙的累积频数分布曲线(图6),易知当间隙为2.475s时,累积接受频数等于累积拒绝频数,即临界间隙为2.475s。

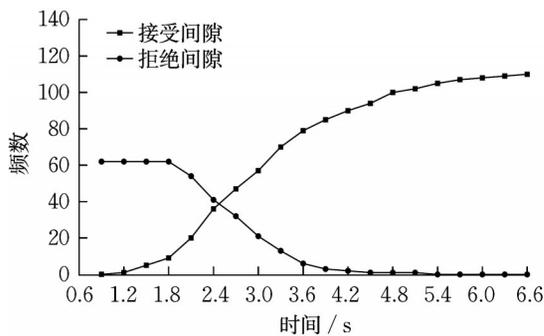


图6 接受间隙和拒绝间隙累积频数各分布曲线

Fig. 6 Cumulative frequency distribution of gap acceptance and gap rejection

### 3 高速互通双车道入口辅助车道长度

#### 3.1 辅助车道长度计算模型

因《路线规范》中规定双车道入口匝道宜采用直接式,且目前我国大部分均为直接式双车道入口匝道,故本文仅研究直接式双车道入口辅助车道。

直接式入口的辅助车道紧接匝道外侧车道,当路段交通流为自由流状态时,匝道内侧车道车辆可直接汇入主线,无需驶入辅助车道;匝道外侧车道车辆一般情况下会直接驶入辅助车道,行进一段距离之后汇入主线(图7)。

由车辆微观行驶过程可知,车辆进入辅助车道

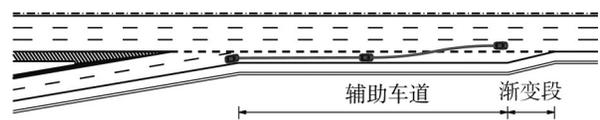


图7 入口辅助车道车辆行驶过程

Fig. 7 Vehicle movement on the entrance auxiliary lane

后,首先观察相邻车道的交通状况,等待可插入间隙的出现,随后左换道汇入主线,整个过程仅包括等待距离和换道距离两部分(图8)。

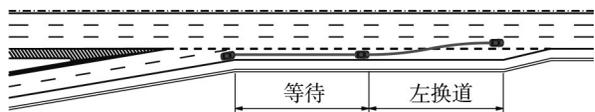


图8 入口辅助车道最小长度计算模型

Fig. 8 Calculation model for the minimum length of the entrance auxiliary lane

辅助车道长度按式(2)计算:

$$L = L_w + L_c \quad (2)$$

式中: $L$ 为辅助车道长度,m; $L_w$ 为等待距离,m; $L_c$ 为左换道距离,m。

### 3.2 模型关键参数分析

#### 3.2.1 等待距离

驾驶人由辅助车道换道至相邻车道需等待一个可插入间隙的出现,设目标车道车头时距 $h$ 大于等于 $t$ 的概率为 $P(h \geq t)$ ,驾驶人拒绝的临界间隙为 $t_c$ ,则在可插入间隙出现之前,必然拒绝了 $j$ 个小于 $t_c$ 的间隙,其概率为

$$P(j) = [1 - P(h \geq t_c)]^j P(h \geq t_c) \quad (3)$$

平均等待时间为拒绝间隙的平均个数与平均时长的乘积,如式(4)所示:

$$t_w = \sum_{j=0}^{\infty} j \cdot P(j) \int_{\tau}^{t_c} t f(t) dt = \frac{1 - P(h \geq t_c)}{P(h \geq t_c)} \int_{\tau}^{t_c} t f(t) dt \quad (4)$$

移位二阶爱尔朗分布的平均等待时间 $t_w$ (式5)为

$$t_w = \frac{1 - [2\lambda(t_c - \tau) + 1]e^{-2\lambda(t_c - \tau)}}{[2\lambda(t_c - \tau) + 1]e^{-2\lambda(t_c - \tau)}} \left\{ \frac{1}{\lambda} + \tau - \left[ 2\lambda(t_c - \tau)^2 + (2 + 2\lambda\tau)(t_c - \tau) + \frac{1}{\lambda} + \tau \right] e^{-2\lambda(t_c - \tau)} \right\} \quad (5)$$

等待距离(式6)为

$$L_w = \frac{V_a}{3.6} t_w \quad (6)$$

式中: $\tau$ 为目标车道最小车头时距,s; $t_c$ 为临界间隙,s,根据前文分析,取2.475s; $\lambda$ 为目标车道单位时间到达率, $\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ln}^{-1}$ ;  $V_a$ 为辅助车道车辆运行速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,按表3选取; $\tau$ 和 $\lambda$ 分别按式(7)<sup>[22]</sup>和式(8)计算:

$$\tau = t_1 + t_2 + \frac{3.6L}{V} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{1}{3600/Q - \tau} \quad (8)$$

式中: $t_1$ 为跟车反应时间,取1.0 s<sup>[15]</sup>;  $t_2$ 为协调制动时间,取0.4 s<sup>[23]</sup>;  $V$ 为主线设计速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $L$ 为车身长度,小客车取6 m<sup>[12]</sup>;  $Q$ 为三级服务水平下主线单车道最大服务交通量, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ln}^{-1}$ ,依表10取值<sup>[12]</sup>。

表10 三级服务水平下主线单车道最大服务交通量

Tab. 10 Maximum service traffic volume on a single mainline lane in level-of-service III

主线限速/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	交通量/( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ln}^{-1}$ )
120	1 650
100	1 600
80	1 500

由式(5)得临界间隙 $t_c$ 与目标车道最小车头时距 $\tau$ 对等待时间 $t_w$ 的影响如图(9)所示。由图9可知,目标车道最小车头时距越大,等待时间越短,临界间隙越小,等待时间越短;且平均等待时间对临界间隙敏感,故需重点考虑临界间隙的取值。

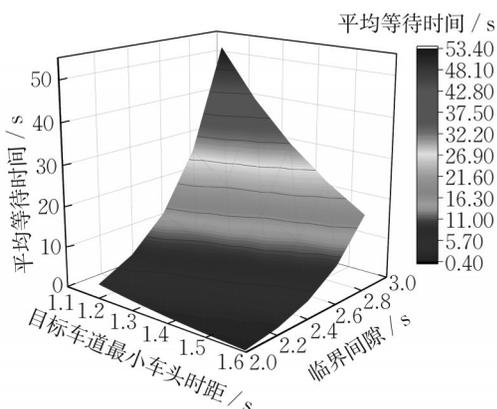


图9 临界间隙与目标车道最小车头时距对等待时间的影响

Fig. 9 Impact of critical gap and minimum headway of the target lane on waiting time

#### 3.2.2 左换道距离

研究表明,换道决策点在辅助车道起点之前的车辆约占换道车辆总数的65%,即大部分车辆在辅助车道之前已有明确的换道意图<sup>[24]</sup>。目前,国内外学者拟合的不同车辆行驶条件下的换道轨迹模型包括直线型、圆弧型、缓和曲线型、样条曲线型、五次多项式型、正弦函数型等类型。这些模型在拟合精确性、计算简洁性、表达换道行为准确性上各有欠缺。王焯<sup>[25]</sup>提出的双曲正切函数换道模型中的换道紧急系数可描述不同换道场景中驾驶人的换道特性,然

而该换道模型的起终点与实际换道轨迹不一致,考虑边界条件 $x(0)=\beta$ 对模型进行修正,得到修正双曲正切换道模型式(9)和式(10):

$$x(t) = \frac{\beta}{\tanh(\sigma/2)} \tanh\left[\frac{\sigma}{L_c/V_d}\left(t - \frac{L_c}{2V_d}\right)\right] + \frac{x_0 + x_T}{2}, t \in \left[0, \frac{L_c}{V_d}\right] \quad (9)$$

$$\beta = \begin{cases} W/2, & \text{左换道} \\ -W/2, & \text{右换道} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x(t)$ 为换道过程中的横向位置,m; $\beta$ 为换道横向距离,m; $W$ 为换道宽度,m; $\sigma$ 为表征换道紧急情况的系数; $L_c$ 为换道长度,m; $V_d$ 为换道起始车道的运行速度, $m \cdot s^{-1}$ ; $x_0, x_T$ 分别为换道起点和终点与基准车道线的横向距离,m。

采用该模型拟合 Tracker软件提取的实测换道轨迹,计算拟合优度均值为0.982,证明修正双曲正切函数换道模型可较好地描述入口车辆实际换道轨迹。

对实测入口路段的左换道紧急系数 $\sigma$ 的分布进行统计分析(图10)可知,当 $\sigma$ 取4.0时已满足95%驾驶人的换道需求,故左换道 $\sigma_{max}$ 取4.0。

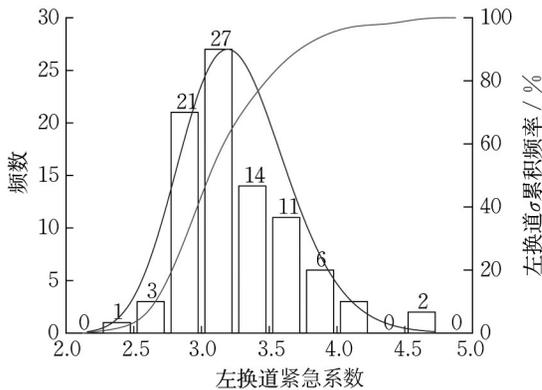


图10 入口左换道紧急系数分布

Fig. 10 Distribution of left lane change emergency coefficients at the entrance

在车辆的换道过程中,若产生的横向加速度和加速度变化率过大,则会致使乘客感到明显的倾覆感,故需保证式(11)、(12)不等式成立:

$$x''(t) \leq \frac{2\sqrt{3}W}{9\tanh(\sigma/2)} \left(\frac{\sigma V_d}{L_c}\right)^2 \leq a_{max} \quad (11)$$

$$x'''(t) \leq \frac{W}{\tanh(\sigma/2)} \left(\frac{\sigma V_d}{L_c}\right)^3 \leq j_{max} \quad (12)$$

进而得到换道长度为

$$L_c = \max \left\{ \sqrt{\frac{2\sqrt{3}W}{9a_{max} \tanh(\sigma_{max}/2)} \sigma_{max} V_d}, \sqrt[3]{\frac{W}{j_{max} \tanh(\sigma_{max}/2)} \sigma_{max} V_d} \right\} \quad (13)$$

式中: $a_{max}$ 为横向加速度最大值, $m \cdot s^{-2}$ ,按表11取值<sup>[26]</sup>; $j_{max}$ 为横向加速度变化率最大值, $m \cdot s^{-3}$ ,取 $0.6 m \cdot s^{-3}$ <sup>[27]</sup>; $\sigma_{max}$ 为换道紧急系数最大值,根据前文分析取4.0; $W$ 取3.75m。

表11 最大横向加速度取值

Tab. 11 Maximum lateral acceleration value

设计速度/( $km \cdot h^{-1}$ )	横向力系数	$a_{max}/(m \cdot s^{-2})$
120	0.10	0.588
100	0.12	0.784
80	0.13	0.882

### 3.3 辅助车道最小长度推荐值

根据式(2)—(13),计算高速公路双车道入口辅助车道长度的过程参数和推荐值见表12。

分析表12及计算过程可知:

(1)主线设计速度增大,对应辅助车道车辆运行速度也增大,进而导致道路通行能力提高,交通量增大,等待时间变长,所需辅助车道长度也增加。

(2)辅助车道长度与运行速度正相关,与换道紧急程度负相关。

(3)临界间隙的大小决定了车辆等待汇入目标车道的距离,对辅助车道长度影响较大。

(4)辅助车道长度推荐值较《路线规范》规定值小,说明规范规定值存在一定的富余,也在一定程度说明规范的合理性。在用地紧张路段可适当缩短辅助车道长度。

表12 入口辅助车道计算过程参数和长度推荐值

Tab. 12 Recommended values for the calculation parameters and length of the entrance auxiliary lane

主线设计速度/ ( $km \cdot h^{-1}$ )	车辆运行速度/ ( $km \cdot h^{-1}$ )	$\tau/s$	$\lambda/(pcu \cdot s^{-1} \cdot ln^{-1})$	$t_w/s$	$L_w/m$	$L_c/m$	辅助车道长度推荐值/m	《路线规范》规定值/m
120	90	1.580	1.661 6	6.29	157	186	350	400
100	80	1.616	1.577 3	4.70	104	166	270	350
80	70	1.670	1.369 9	2.48	48	145	200	300

## 4 结论

为研究高速公路双车道入口单车道辅助车道长度的合理取值,选取3处入口辅助车道路段,采用路侧激光雷达、无人机和 Tracker 软件获取原始间隙、运行速度、车头时距和换道轨迹数据,在此基础上结合车辆在入口辅助车道路段的驾驶行为与微观换道特性,建立了双车道入口辅助车道长度计算模型并提出了高速公路双车道入口单车道辅助车道推荐值,主要结论如下:

(1)基于 Raff 临界间隙估算方法,获取并统计航拍视频中车辆的接受间隙和拒绝间隙,估算入口辅助车道路段的临界间隙为 2.475 s。

(2)采用修正双曲正切函数换道模型拟合换道轨迹,左换道的拟合优度为 0.982,表明所使用的换道模型能够准确描述车辆在辅助车道路段的行驶特征。

(3)建立了基于间隙接受理论的直接式双车道入口辅助车道长度计算模型,将车辆在辅助车道上的行驶过程分为等待距离和左换道距离,从原理上解释了辅助车道长度确定的依据,并给出了不同设计速度下双车道入口单车道辅助车道长度推荐值。

(4)通过计算对比可知《路线规范》中对于双车道入口辅助车道长度的规定值留有一定的富余,也表明在用地紧张路段可适当缩短辅助车道长度。

由于篇幅原因,仅调查了设计速度  $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  条件下辅助车道的交通数据,调查区域和样本数量有限,当设计速度小于  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时采用经验值,后续研究应增加入口辅助车道交通特征的调查数据样本,增加货车交通特性的研究,进一步验证辅助车道范围内驾驶人的驾驶行为特征。

### 作者贡献声明:

潘兵宏:设计研究方案,统筹规划,指导论文写作。

张佳乐:初稿写作与修改,理论建模,数据采集与分析。

王 潮:数据采集与分析,文稿修改。

### 参考文献:

- [1] 谢永彰,龙科军,余进修,等.城市快速路交通事故特性研究[J].交通与运输(学术版),2005(2):90.  
XIE Yongzhang, LONG Kejun, YU Jinxiu, et al. Characteristics of traffic accidents on urban expressways [J]. Traffic & Transportation. 2005(2): 90.
- [2] 程飞,郭唐仪,白泉.美国 Florida 州高速公路出口区域事故特征分析[J].中外公路,2015,35(5):313.  
CHENG Fei, GUO Tangyi, BAI Quan. Characterization of accidents in highway exit areas in Florida, USA [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(5): 313.
- [3] 尹露.高速公路变速车道几何设计参数及安全保障措施研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.  
YIN Lu. Research on geometric design parameters and safety measures for highway variable speed lanes [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [4] 邢岩,吴免东,白竹.快速路入口处辅助车道长度研究[J].中国科技论文,2020,15(8):915.  
XING Yan, WU Huandong, BAI Zhu. Auxiliary lane length study at expressway entrances [J]. China Science and Technology Papers, 2020, 15(8): 915.
- [5] 宋灿灿,郭忠印,王维利.山区高速公路紧急避险车道辅助车道设置[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(5):747.  
SONG Cancan, GUO Zhongyin, WANG Weili. Auxiliary lane setting for emergency evacuation lane on mountain highway [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5): 747.
- [6] 孔冰杰.复合式立交辅助车道设置条件及主要技术指标研究[D].西安:长安大学,2021.  
KONG Bingjie. Study on the setting conditions and main technical indicators of auxiliary lanes of composite Interchanges [D]. Xi'an: Chang'an University; 2021.
- [7] WANG Zhenbao, GUO Nan, LI Jinshan. Calculating the lengths of auxiliary lane and its channelization of urban expressway exit using simulation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2007, 7(5): 96.
- [8] 关羽,张宁.可变临界间隙条件下的加速车道车辆汇入模型[J].公路交通科技,2010,27(6):117.  
GUAN Yu, ZHANG Ning. Modeling vehicle convergence in accelerated lanes under variable critical clearance conditions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 117.
- [9] 贾洪飞,谭云龙,李强,等.考虑驾驶员特征的快速路合流区间接接受模型构建[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(1):55.  
JIA Hongfei, TAN Yunlong, LI Qiang, et al. Construction of gap acceptance model for merging zone of expressway considering driver's characteristics [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1): 55.
- [10] 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.  
LI Wenquan, SHAO Zike, WANG Shiheng, et al. Calculation of the length of parallel acceleration lanes on urban expressways [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 113.
- [11] 李霞,朱志强,崔洪军,等.基于安全合流概率的加速车道长度计算模型[J].铁道科学与工程学报,2018,15(3):785.  
LI Xia, ZHU Zhiqiang, CUI Hongjun, et al. Acceleration lane

- length calculation model based on safe merging probability [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(3): 785.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路路线设计规范: JTG D20—2017[S]. 北京:人民交通出版社,2017.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design specification for highway alignment: JTG D20—2017 [S]. Beijing:China Communications Press,2017.
- [13] 王建军,严宝杰. 交通调查与分析[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2004.  
WANG Jianjun, YAN Baojie. Traffic survey and analysis - 2nd edition [M]. Beijing:China Communications Press,2004.
- [14] 日本道路公团. 日本高速公路设计要领[M]. 西安:陕西旅游出版社,1991.  
Japan Road Corporation. Essentials of highway design [M]. Xi'an:Shaanxi Tourism Publishing House,1991.
- [15] AASHTO. A policy on geometric design of highways and streets [S]. Washington D C: American Association of State Officials, 2018.
- [16] 李文权,王炜,周荣贵. 高速公路合流区1车道车头时距分布特征[J]. 公路交通科技, 2003, 1: 114.  
LI Wenquan, Wang Wei, ZHOU Ronggui. Characteristics of 1-lane headway time-distance distribution in freeway merging area [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2003, 1: 114.
- [17] 邵长桥,何民,杜晓辉. 车头时距分布模型研究[J]. 城市交通, 2003, 1: 5.  
SHAO Changqiao, HE Min, DU Xiaohui. Modeling of headway distribution [J]. *City Traffic*, 2003, 1: 5.
- [18] 马万经,叶新晨,廖大彬,等. 停车让行交叉口机动车接受间隙和拒绝间隙分布特征[J]. 中国公路学报, 2015, 28(4): 86.  
MA Wanjing, YE Xincheng, LIAO Dabin, *et al.* Characteristics of motor vehicle acceptance gap and rejection gap distributions at stop-and-go intersections[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(4): 86.
- [19] RAFF M S. A volume warrant for urban stop signs [M]. Washington D C: Eno Foundation for Highway Traffic Control, 1950.
- [20] GURTMAN M B, BALAKRISHNAN J D. Circular measurement redux: the analysis and interpretation of interpersonal circle profiles [J]. *Clinical Psychology: Science and Practice*, 1998, 5(3):344.
- [21] TROUTBECK R. Estimating the critical assessment gap from traffic movements[J]. *Research Report*, 1992, 92(5):23.
- [22] 项乔君,王炜,李伟. 汽车最小行车时距计算模型的研究[J]. 东南大学学报, 1998, 3: 81.  
XIANG Qiaojun, Wangwei, LI Wei. Research on the calculation model of minimum travel time distance for automobiles [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 1998, 3: 81.
- [23] 杨耀. 高速公路最小安全行车间距研究[D]. 西安:长安大学, 2017.  
YANG Yao. Research on minimum safe traveling distance of highway[D]. Xi'an: Chang'an University; 2017.
- [24] 潘兵宏,王潮,王俏,等. 基于微观换道的高速公路双车道出口辅助车道长度研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(11): 1647.  
PAN Binghong, WANG Chao, WANG Qiao, *et al.* A study of auxiliary lane lengths for two-lane freeway exits based on microscopic lane changing [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(11): 1647.
- [25] 王焱. 基于轨迹数据的高速公路车辆换道特性与换道模型研究[D]. 西安:长安大学, 2021.  
WANG Ye. Research on highway vehicle lane-changing characteristics and lane-changing model based on trajectory data [D]. Xi'an: Chang'an University; 2021.
- [26] 刘斌. 基于乘客感受的互通式立交范围内路面宽度过渡段关键技术研究[D]. 西安:长安大学, 2019.  
LIU Bin. Research on key technology of transition section of pavement width within interchange based on passengers' feeling [D]. Xi'an: Chang'an University; 2019.
- [27] 黄艳国,许伦辉,罗强,等. 加速度变化对道路平面线形行车舒适性评价方法[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2014, 32(2): 1.  
HUANG Yanguo, XU Lunhui, LUO Qiang, *et al.* Evaluation method of acceleration change on traveling comfort of roadway planar alignment [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 32(2): 1.