

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.012

引用格式:李璇,许卉莹,黄钢,等.基于 VISSIM 仿真的二级公路路侧同向接入口最小间距研究[J].公路与汽运,2024,40(5):71-77.

Citation:LI Xuan,XU Huiying,HUANG Gang,et al.Research on the minimum distance between side access points of secondary highway based on VISSIM simulation[J].Highways & Automotive Applications,2024,40(5):71-77.

## 基于 VISSIM 仿真的二级公路路侧同向接入口最小间距研究\*

李璇<sup>1,2</sup>, 许卉莹<sup>1,2</sup>, 黄钢<sup>1,2</sup>, 瞿伟斌<sup>1,2</sup>

(1.公安部交通管理科学研究所,江苏无锡 214151;2.道路交通安全公安部重点实验室,江苏无锡 214151)

**摘要:**针对当前关于公路接入口最小间距的规定较笼统,公路设计、隐患排查等环节参照标准有差异的问题,以二级公路路侧同向接入口间距为研究对象,提出接入口设置原则,以保证主路行车安全为条件,分别从满足停车视距、避免右转重叠冲突、满足主路运行速度协调三方面提出接入口最小间距;以保证主路通行效率为条件,基于 VISSIM 仿真建立不同路侧同向接入口间距的二级公路路网模型,对比分析主路不同车速下满足规范中平均车速和延误率要求的最小接入口间距;最后综合行车安全和通行效率因素,得到二级公路不同设计速度下路侧同向接入口最小间距。

**关键词:**公路;公路设计;二级公路;接入口间距;行车安全;通行效率;VISSIM 仿真

中图分类号:U412.53

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0071-07

公路路侧接入口主要指与一级、二级公路相交的服务路侧居民出行或村镇交通的“主路优先”接入点,它与平面交叉口的区别在于:大部分接入口公路是四级或等外公路;接入口大多未经公路管理部门审批,为擅自开口;接入口的交通量非常小,主要服务沿线村(居)民日常出行<sup>[1-2]</sup>。但从近年关于公路接入口的实地调研和隐患排查治理情况来看,一级、二级公路路侧无序设置接入口、接入口间距过小等问题依然存在,隐患改善时大多依据经验合并路侧接入口。接入口间距不足会导致冲突增多、通行不畅、车辆频繁加减速,易引发交通事故。文献[1]的研究表明交通事故率与接入口密度正相关,信号交叉口研究中也有相应结论<sup>[3]</sup>。合理控制接入口间距,有利于降低横向干扰,减少车辆之间速度差,提升交通流稳定性;延长驾驶员处理接入口各种交通状况的时间,提升公路通行能力和安全水平。

### 1 研究现状

国内外关于交叉口或接入口最小间距的研究较多,总体是从保证主干公路通行能力和安全水平的

角度进行研究。美国交通研究委员会采用事故率法、停车视距法、接入口功能分区法和避免右转冲突重叠法确定了接入口最小间距<sup>[4-5]</sup>。美国部分州针对不同功能的道路建立了交叉口间距标准<sup>[6]</sup>,其中俄勒冈州分别提出了城市和农村地区主干道、次干道、集散道路无信号控制接入口间距标准,提出城市、农村地区次干道的无信号接入口间距推荐值为 660 ft(1 ft=0.304 8 m,660 ft≈201 m);密苏里州提出了城市主干路、次干路、集散道路信号交叉口间距,其中主干路、次干路间距推荐值为 2 640 ft(约 805 m),集散道路间距推荐值为 1 320 ft(约 402 m)。Isebrands H. N.认为信号交叉口避免延误的间距为 1 320 ft(约 402 m)<sup>[7]</sup>。李超等基于一级公路事故数据,利用回归分析方法,得到了出入口密度与事故率之间的函数关系<sup>[8]</sup>。赵云安分别从满足车辆交织运行、满足附加左转弯车道及减速车道总长度、满足指路警告标志设置和交叉口构造长度三方面提出了一级公路平面交叉口间距推荐值<sup>[9]</sup>。毛林锋等建议参考国外停车视距约束法确定无信号交叉口接入口间距,提出以不同车速对应的货车停车视距作为无

\* 基金项目:公安部科技强警基础工作计划项目(2022JC22)

信号交叉口接入口的最小间距值<sup>[10]</sup>。过秀成等比较了美国《接入口管理手册》中 4 种确定接入口最小间距的方法,以接入口功能分区法得到了最小间距推荐值,并仿真分析了一级公路接入口密度对交通延误和车速的影响<sup>[1]</sup>。张兰芳等提出信号交叉口最小间距应保证交叉口上游、下游功能区长度和车辆平稳运行范围,其中上游功能区由驾驶人发现交叉口的感知反应时间内行驶的距离、减速行驶的距离、排队长度三部分组成,下游功能区受停车视距、右转重叠冲突、左转交通 3 个因素影响,平稳运行段长度参考曲线间直线段最小长度<sup>[11]</sup>。徐松分别提出一级公路同向接入口最小间距、对向接入口最小间距、接入口与平面交叉口最小间距模型,提出同向接入口最小间距应保证主线通行能力、相邻接入口之间交通互不影响,并满足视距要求<sup>[12]</sup>。张志清等认为公路沿线连续 2 个交叉口的间距应至少保证驾驶人完成加速、反应、减速过程,并以此建立交叉口合理间距模型,通过调查北京市双向两车道二级公路疏辛路交通状况,确定模型参数,计算得到限速 60 km/h 的穿村过镇公路沿线交叉口合理间距应大于 150 m<sup>[13]</sup>。张奕等针对不同设计速度、服务水平及相邻接入口组合形式(大型住宅区接入口、商住混合区接入口及沿街商铺接入口互相组合),以主路通行能力达到相应服务水平、接入口满足安全交叉停车视距、避免右转重叠冲突为约束,提出了同向接入口最小间距推荐值<sup>[2]</sup>。方雪朋从安全和效率两方面分别建立一级公路平面交叉口安全间距,提出安全间距包括上游功能区、交织段和下游功能区,并建立了交叉口间距与通行能力折减系数之间的函数关系,以此分析“效率间距”<sup>[14]</sup>。李彬将无信号控制干线公路平面相邻交叉口之间的距离划分为稳定行驶段、功能段、构造段,其中稳定段距离基于驾驶员心理最小稳定行驶距离相关研究成果确定(速度  $v \leq 22.2$  m/s 的稳定行驶距离为  $40v$ ),功能段以靠近中间带车辆右转驶离交叉口的距离建模,构造段包括进出口专用右转车道和进出口物理段<sup>[15]</sup>。王子豪等针对接入口最小间距,分别建立接入口上游和下游功能区长度模型,上游功能区的划分与文献<sup>[11]</sup>一致,区别在于车辆减速行驶距离模型不同,下游功能区长度以满足停车视距为约束<sup>[16]</sup>。

根据 JTG D20—2017《公路路线设计规范》,干线一级公路平面交叉口的最小间距为 1 000 m,集散一级公路、干线二级公路平面交叉口的最小间距

为 500 m,集散二级公路平面交叉口的最小间距为 300 m;干线一级、二级公路应优先保证畅通,保证平面交叉口间距足够大;集散一级、二级公路应通过合并支路减少平面交叉数量<sup>[17]</sup>。工程设计中,一级公路出入口最小间距控制为 200 m<sup>[18]</sup>。

交叉口、接入口间距问题较复杂,不可笼统处理,分析同侧接入口间距、对向接入口间距、接入口与交叉口间距、交叉口之间间距时,考虑因素有所区别,其中信号交叉口与非信号交叉口也有区别。此外,学者们研究同类间距问题时,模型建立、参数取值有所不同,推荐值也有差别。自 JTG B01—2003《公路工程技术标准》颁布以来,有关交叉口间距一直未修订、未细化,对接入口间距也未作出特殊规定,导致公路设计、隐患排查等无规可依。2021 年颁布的 JTG 2112—2021《城镇化地区公路工程技术标准》针对二级公路右出右进控制平面交叉最小间距作出了规定。中国农村地区公路建设不断发展,沿线城镇化率提高,路侧接入口问题日益突出。考虑到双向两车道国省道最常见,路侧接入口较密集,且大多非右出右进控制,本文以双向两车道二级公路为切入点,研究同侧接入口最小间距。

## 2 二级公路接入口间距设置原则

### 2.1 接入口交通特点

二级公路为供汽车行驶的双车道公路,设计交通量为 5 000~15 000 pcu/d,设计速度一般取 80 km/h、60 km/h,受地形、地质条件等限制时取 40 km/h,设计服务水平为四级。从行政等级来看,二级公路大部分属于普通国省道,路侧接入口一般采用“主路优先、次路减速/停车让行”的管理方式,当主路车辆临近接入口时,主要表现是车速降低,很少出现紧急停车的情况,行人、非机动车通过主路时,主路车辆应减速让行。

### 2.2 接入口间距设置原则

接入口间距不足会增加车辆冲突,导致行车不畅,从而引发交通事故或降低通行效率。接入口最小间距设置原则如下:

(1) 接入口最小间距设置应有利于驾驶人识别周边地形地物,能快速辨认接入口位置,不会导致紧急制动。

(2) 驾驶人视线范围内不宜同时出现多个接入口。

(3) 客观情况下,接入口对主线车速有一定程

度折减,但其间距设置不应对主线车速运行协调性产生影响。

(4) 应保证主线通行能力,即接入口间距设置中应尽量降低接入口设置对主线交通流的影响。

(5) 与周围环境相协调,接入口的设置不能破坏周围环境(农田、景区等),尽量合并邻近接入口。

(6) 接入口与平面交叉口之间保留足够间距,确保车辆交织、排队等所需空间。

### 3 基于行车安全的接入口间距

接入口间距越小,对主路通行安全影响越大。从既有研究来看,接入口最小间距应满足停车视距、避免右转重叠冲突等基本要求。由于主路车辆在临近接入口处会产生减速行为,交叉口间距不应对主路车辆运行速度协调性产生影响。因此,基于行车安全的接入口间距应同时满足停车视距、避免右转重叠冲突、保证主路运行速度协调 3 个条件。

#### 3.1 停车视距

停车视距是保证驾驶人发现潜在危险并安全停车所需最小距离。根据 JTG D20—2017《公路路线设计规范》,两相交公路间,由各自停车视距组成的三角区应通视<sup>[17]</sup>。既有研究建议将停车视距作为限制接入口间距的安全性指标之一,建议采用小客车停车视距、货车停车视距或安全交叉停车视距<sup>[1,2,10]</sup>。当三角区范围内接入口公路存在视线被树木、建筑遮挡等情况时,停车视距所组成的三角区不能保证通视,应保证主路的安全交叉停车视距与接入口至主路边车道中心线 5~7 m 所组成的三角区通视(见图 1)。因此,接入口间距应保证安全交叉停车视距要求(见表 1)<sup>[19]</sup>。

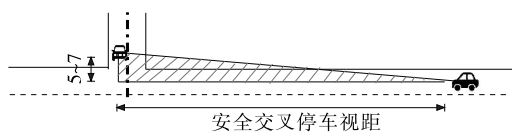


图 1 安全交叉停车视距通视三角区(单位:m)

表 1 接入口安全交叉停车视距

设计速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	小客车停 车视距/m	平坡货车停 车视距/m	6%下坡货车 停车视距/m	安全交叉停 车视距/m
80	110	125	139	175
60	75	85	95	115
40	40	50	50	70

#### 3.2 避免右转重叠冲突

如果位于主路上车辆驾驶员在同一时刻要关注

多个接入口,则认为产生了右转重叠冲突(见图 2)。通过合并接入口等措施可有效减少接入口数量,进而减轻驾驶员的驾驶负担,同时降低事故发生隐患。为避免右转重叠冲突,美国《出入口管理手册》提出了接入口间距标准<sup>[20-21]</sup>,文献[2]提出了不同设计速度下接入口间距。

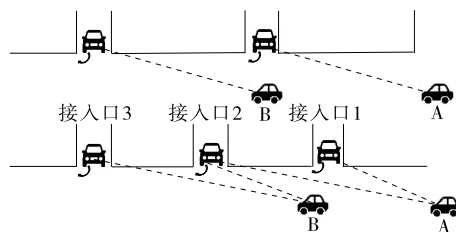


图 2 右转重叠冲突示意图

表 2 避免右转重叠冲突的接入口间距

国家	设计速度	接入口间距
美国	30 mi/h(48 km/h)	185 ft(56 m)
	40 mi/h(64 km/h)	300 ft(91 m)
	45 mi/h(72 km/h)	350 ft(106 m)
中国	40 km/h	35 m
	60 km/h	80 m
	80 km/h	125 m

注:1 mi≈1.6 km。

#### 3.3 主路运行速度协调

运行速度协调性是评价公路行车安全性的重要指标。运行速度梯度  $\Delta I_v$  更贴近实际,能更好地反映一定路程范围内运行速度的变化敏感度,该指标是指一定长度(一般取 100 m)路段的运行速度变化值,若二级公路中运行速度梯度  $\Delta I_v$  大于 15 km/(h · m),则相应路段运行速度协调性不良<sup>[22]</sup>。

$$|\Delta I_v| = |\Delta v_{85}| \times 100/L$$

式中: $\Delta v_{85}$  为某路段起终点运行速度差(km/h); $L$  为某路段长度(m)。

两接入口间距记为  $L$ ,一般情况下,车辆从接入口 A(车速  $v_a$ )到达接入口 B(车速  $v_b$ )的运行状态为先加速(相应距离为  $L_1$ )至  $v_{max}$ ,后减速(相应距离为  $L_2$ )。假设:1) 由于接入口对车速有一定折减,参考《公路项目安全性评价规范》中交叉口密度与车速的折减关系并应用于接入口;2) 接入口 A 与接入口 B 的车速相同,且均为折减后的车速;3) 根据《公路项目安全性评价规范》,与加速过程相比,车辆减速且短距离内减速幅度大对行车安全影响较

大,仅以减速过程中速度梯度不小于  $15 \text{ km}/(\text{h} \cdot \text{m})$  为约束条件;4) 最小间距对应车辆先加速后减速两个行驶过程,即  $L=L_1+L_2$ ;5) 将路段设计速度作为  $v_{\max}$ ,  $v_a$  与  $v_b$  均在  $v_{\max}$  上折减。

以设计速度  $80 \text{ km}/\text{h}$  为例,选取小客车作为代表车型进行计算,交叉口密度与折减系数的关系见表 3<sup>[22]</sup>。

表 3 接入口密度与车速折减系数(设计速度  $80 \text{ km}/\text{h}$ )

接入口密度/ (个· $\text{km}^{-1}$ )	平均间 距 $L/\text{m}$	折减系 数 $Q$	接入口密度/ (个· $\text{km}^{-1}$ )	平均间 距 $L/\text{m}$	折减系 数 $Q$
5.0	200	0.92	1.0	1 000	0.97
2.5	400	0.94	0.5	2 000	0.99
2.0	500	0.94	0.3	3 333	1.00

进行曲线拟合,得到间距  $L$  与折减系数  $Q$  的关系如下:

$$Q=0.7605+0.0298\ln L \quad (R^2=0.9874)$$

以减速过程中速度梯度为  $15 \text{ km}/(\text{h} \cdot \text{m})$  为临界条件,则:

$$100 \times (80 - 80Q) / L_2 = 15$$

将车辆由车速  $v_a$  加速至  $v_{\max}$  视为匀加速过程,加速度  $a_{\max}=0.5 \text{ m}/\text{s}^2$ <sup>[22]</sup>,则:

$$(80/3.6)^2 - (80Q/3.6)^2 = 2a_{\max}L_1$$

结合假设条件 4,求得折减系数  $Q$  为 0.907,接入口间距  $L$  为 137 m。同理,设计速度为  $60 \text{ km}/\text{h}$  时,折减系数  $Q$  为 0.945,接入口间距  $L$  为 52 m。

## 4 基于通行效率的接入口间距

### 4.1 主路通行效率

设置路侧接入口不应影响主路的通行效率和服务水平。根据《公路路线设计规范》<sup>[17]</sup>,二级公路设计服务水平为四级,不同设计速度下通行效率参数见表 4,即设计速度为  $80 \text{ km}/\text{h}$  且路段通行量达到  $1\,600 \text{ pcu}/\text{h}$  时,路段相应延误率不超过  $80\%$ (延误率为车头时距  $\leq 5 \text{ s}$  的车辆数占总交通量的比例),平均车速不小于  $58 \text{ km}/\text{h}$ 。为对比研究不同路侧接入口间距对主路通行效率的影响,假设主路大部分范围不允许车辆借用对向车道超车。

表 4 不同设计速度下路段通行效率参数

设计速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	延误率/ %	车辆行驶速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	禁止超车区长度占 比 $\geq 70\%$ 对应的 $V/C$	基准通行能力/ ( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ )	设计服务水平下最大服务 交通量/( $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ )
80	$\leq 80$	$\geq 58$	0.57	2 800	1 600
60	$\leq 80$	$\geq 48$	0.43	1 400	600
40	$\leq 80$	—	0.35	1 300	450

注: $V/C$  为在理想条件下最大服务交通量与基本通行能力之比。

### 4.2 接入口交通特征

根据 JTG/T 3311—2021《小交通量农村公路工程设计规范》<sup>[23]</sup>,二级公路路侧被交公路特征与四级公路(I类)相近,设计速度为  $15 \text{ km}/\text{h}$ ,为机动车道宽  $6 \text{ m}$  的双车道公路,路肩宽  $0.5 \text{ m}$ ,年平均日设计交通量在  $1\,000$  辆小客车及以下(小时交通量系数取  $12\%$ ,约  $120$  辆/h),交通组成主要为小型客车、四轮低速货车、三轮汽车、摩托车、非机动车、行人混行。

### 4.3 基于 VISSIM 仿真的路侧间距研究

VISSIM 微观交通流仿真软件在实际交通状态、动态驾驶行为和车辆行驶轨迹等方面具有较高的仿真精度。通过模拟不同接入口间距下车辆的运行状态,分析路段平均车速、平均延误率的变化。

#### 4.3.1 路网模型及交通输入

以主路设计速度  $80 \text{ km}/\text{h}$  为例,建立车道宽度

$3.75 \text{ m}$ 、一定长度的双向两车道直线段二级公路,设计服务水平下最大服务交通量为  $1\,600 \text{ pcu}/\text{h}$ 。仿真时简化交通组成,主路以小客车、货车为主(小客车:货车=9:1),被交路以小客车、行人为主。采用右行原则(机动化)中的 Wiedemann99 跟车模型描述公路驾驶行为,期望速度为  $80 \text{ km}/\text{h}$ 。每处路侧开口范围的小时交通流量及路径设定见图 3,其中横穿二级公路的单向直行箭头为行人交通(仅模

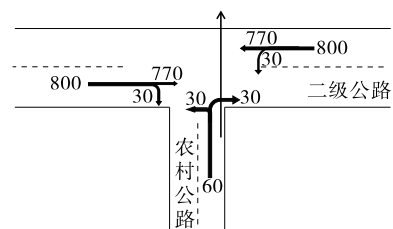


图 3 路侧开口范围小时交通流量及路径设定(单位: $\text{pcu}/\text{h}$ )



拟行人横穿对主路的影响),流量为 10 人/h。仿真时间为 3 600 s,考虑到交通量的加载过程,选取 1 800~3 600 s 时段数据进行分析评价。

4.3.2 接入口间距对比

以主路设计速度 80 km/h 为例,结合工程实践经验及既有研究成果,设计 4 组试验,分别将路侧接入口间距设置为 500 m、300 m、250 m、200 m,每组

试验中接入口数量保持一致(3 个),且主路路段首尾 2 个接入口与路段起终点的距离保持不变(300 m),即 4 组试验中主路路段长度依次约为 1 600 m、1 200 m、1 100 m、1 000 m。接入口间距为 500 m 时,VISSIM 仿真数据检测布设见图 4,设置 A、B 2 个行程时间检测点及 6 个车辆检测点。

仿真时间为 3 600 s。行程时间记录设置为

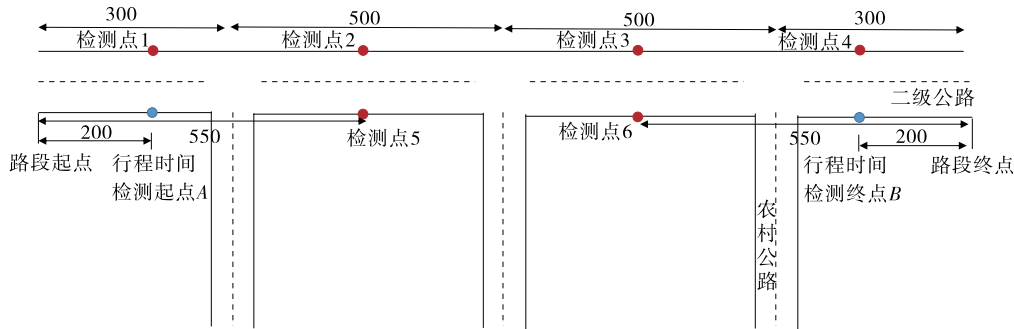


图 4 VISSIM 仿真数据检测布设(单位:m)

1 800~3 600 s,时间间隔 200 s,输出 RSZ 文件,从 RSZ 文件中获取 1 800~3 600 s 时起点 A 至终点 B 的行程时间,共输出 9 组数据,取其平均值作为检测区段行程时间,根据平均行程时间得到平均车速。车速、车头时距等数据采集时间设置为第 1 800~2 700 s,输出 MER 文,计算 6 个检测点的延误率,取其平均值作为路段延误率。

根据仿真结果,当主路车速为 80 km/h、接入口间距为 300 m 时,平均行程时间为 61.5 s,检测区段长度为 1 200 m,平均车速为 70.2 km/h;6 个检测点的车头时距分布见图 5~10,延误率分别为 91.6%、81.2%、65.5%、60.1%、64.3%、75.7%,平均延误率为 73.1%。

接入口间距为 500 m、300 m、250 m、200 m 时路段平均车速、平均延误率见表 5。

当主路车速为 60 km/h、40 km/h 时,将接入口间距分别设置为 300 m、200 m、150 m、100 m,仿真结果见图 11、图 12。

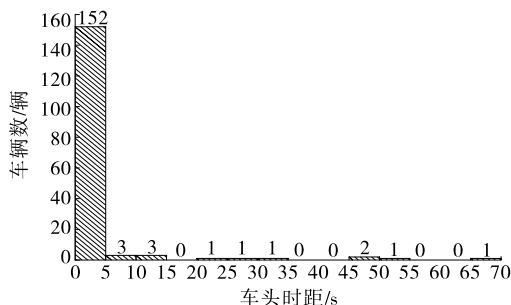


图 5 检测点 1 的车头时距分布

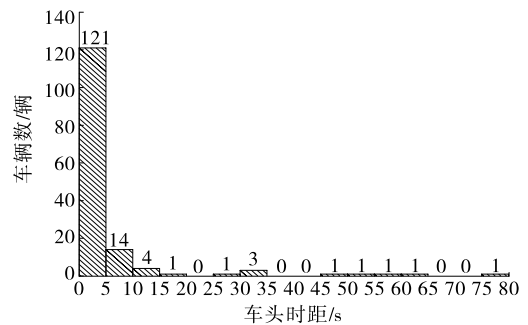


图 6 检测点 2 的车头时距分布

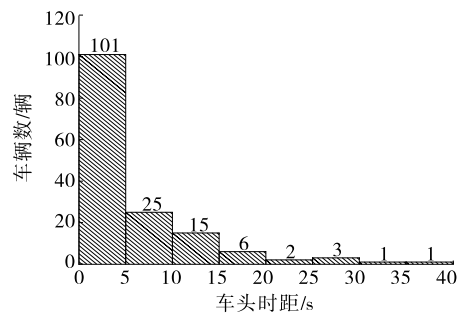


图 7 检测点 3 的车头时距分布

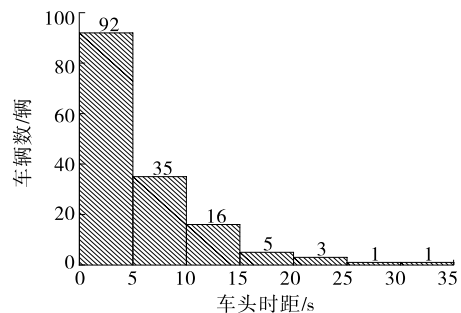


图 8 检测点 4 的车头时距分布

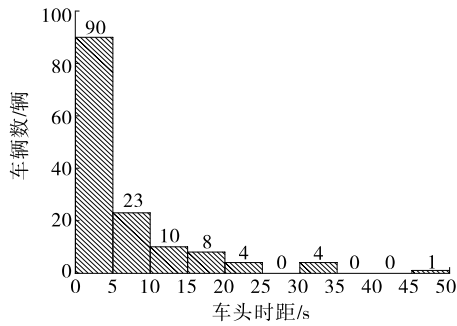


图 9 检测点 5 的车头时距分布

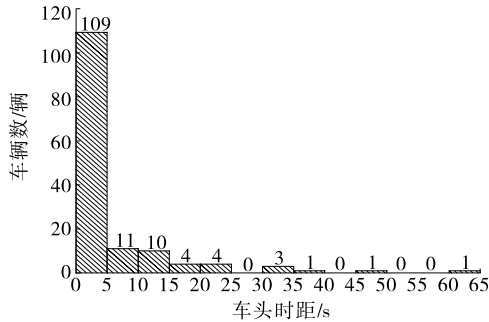


图 10 检测点 6 的车头时距分布

表 5 主路车速为 80 km/h 时路段通行效率参数

接入口间距/m	平均车速/(km·h <sup>-1</sup> )	平均延误率/%
500	70.2	73.1
300	62.4	67.6
250	52.2	61.2
200	41.3	55.6

#### 4.4 接入口最小间距建议

根据表 4,参照设计速度 80 km/h、60 km/h 时的车速,主路设计速度为 40 km/h 时,平均车速宜 ≥38 km/h。从不同设计速度下仿真输出的通行效率参数可知:主路设计速度为 80 km/h、接入口间距为 300 m 时,平均车速 >58 km/h 且平均延误率 <80%;主路设计速度为 60 km/h、接入口间距为 200 m 时,平均车速 >48 km/h 且平均延误率 <80%;主路设计速度为 40 km/h、接入口间距为 150 m 时,平均车速为 37.3 km/h(与 38 km/h 接近)且平均延误率 <80%;主路设计速度为 40 km/h、接入口间距为 100 m 时,平均车速为 30.4 km/h,运行速度明显降低,对通行效率影响较大,建议主路设计速度为 40 km/h 时,接入口最小间距取 150 m。

对比保证行车安全与通行效率的最小接入口间距,后者所需最小间距值更大,建议二级公路同侧接入口最小间距按表 6 取值。

表 6 二级公路同侧接入口最小间距建议值

设计速度/(km·h <sup>-1</sup> )	接入口最小间距/m	设计速度/(km·h <sup>-1</sup> )	接入口最小间距/m
80	300	40	150
60	200		

## 5 结语

本文针对当前行业规范中关于路侧接入口间距要求模糊的情况,以二级公路同侧接入口为研究对象,综合行车安全和通行效率,提出接入口最小间距建议值。采取 VISSIM 仿真方法对比研究不同接入口间距对主路通行效率的影响,既能通过数据客观反映路网运行情况,输出的评价指标又与现有规范相对应,结果具有信服力。接入口最小间距不仅与主路功能、设计速度有关,还与被交公路的交通量、交通组成有关。本文提出的接入口最小间距确定方法既丰富了行业相关研究理论体系,又可为其他公路接入口、信号交叉口间距问题研究提供参考。

关于不同交通量和交通组成的接入口最小间距及异侧接入口最小间距将在后期开展研究。

#### 参考文献:

[1] 过秀成,卢光明,冉江宇,等.一级公路最小接入间距研究[J].公路,2007,52(12):12-16.

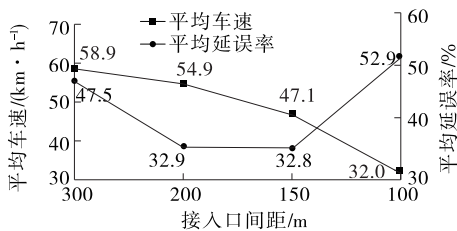


图 11 主路车速为 60 km/h 时不同接入口间距下通行效率参数

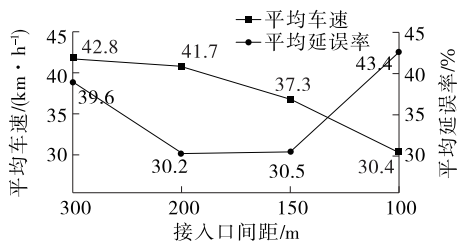


图 12 主路车速为 40 km/h 时不同接入口间距下通行效率参数

- [2] 张奕,刘超平,何小洲.城乡接合部道路接入口最小间距[C]//中国城市规划学会城市交通规划学术委员会.2017年中国城市交通规划年会论文集.北京:中国建筑工业出版社,2017:1-12.
- [3] GLUCK J, LEVINSON H S, STOVER V. NCHRP Report 420: impacts of access management techniques[R]. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D C, 1999.
- [4] Transportation Research Board. Access management manual[S]. Transportation Research Board, Washington D C, 2003.
- [5] WILLIAMS K M, STOVER V G, DIXON K K, et al. Access management manual[R]. Transportation Research Board, Washington D C, 2014.
- [6] STAMATIADIS N, HOUSE B, BRICKEY J, et al. Access management for Kentucky[R]. Research Report, KTC-04-05/SPR 251-01-1F, 2004.
- [7] ISEBRANDS H N. Roundabouts and signals: harmony even with increasing traffic volumes[J]. *Ite Journal*, 2009, 79(2): 30-32+37.
- [8] 李超,荣建,常成利.一级公路出入口密度对交通安全的影响[C]//中华人民共和国交通部,世界道路协会.国际公路安全研讨会论文集,2004:325-330.
- [9] 赵云安.一级公路平面交叉口合理间距探讨[C]//浙江省公路学会.浙江省公路学会2005年年会论文集.浙江省交通规划设计研究院,2005:72-74.
- [10] 毛林锋,陆键,项乔君.平面交叉口间距对道路交通的影响[J].*交通科技*, 2006(5): 71-73.
- [11] 张兰芳,方守恩.公路平面交叉口合理间距研究[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(2): 276-278+285.
- [12] 徐松.城郊一级公路接入口问题研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [13] 张志清,贾岩,周宇亮.穿村镇公路交叉口合理间距探讨[J].*公路*, 2011, 56(5): 119-123.
- [14] 方雪朋.一级公路平面交叉口合理间距研究[D].西安:长安大学,2017.
- [15] 李彬.无信号控制的干线公路平面交叉合理间距研究[J].*交通节能与环保*, 2019, 15(3): 37-40.
- [16] 王子豪,刘明阳,赵艳.集散一级公路接入口最小间距研究[J].*交通科技*, 2019(2): 48-51+59.
- [17] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路路线设计规范:JTG D20—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [18] 张勇想.一级公路平面交叉口和出入口设置原则[J].*建筑工程技术与设计*, 2015(5): 399.
- [19] 交通运输部公路局,中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路工程技术标准:JTG B01—2014[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.
- [20] WILLIAMS K M, DR VERGIL G S, DR KAREN D. Access management manual. Second edition[M]. Transportation Research Board of the National Academies, 2014.
- [21] Transportation Research Board. Access management manual[S]. Transportation Research Board, Washington D C, 2014.
- [22] 华杰工程咨询有限公司.公路项目安全性评价规范:JTG B05—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [23] 北京交科公路勘察设计研究院有限公司.小交通量农村公路工程设计规范:JTG/T 3311—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.

收稿日期:2023-11-16

\*\*\*\*\*

(上接第 70 页)

- [12] XU G J, WANG H. Diffusion and interaction mechanism of rejuvenating agent with virgin and recycled asphalt binder: a molecular dynamics study[J]. *Molecular Simulation*, 2018, 44(17): 1433-1443.
- [13] GULISANO F, GALLEGO J. Microwave heating of asphalt paving materials: principles, current status and next steps[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 278: 121993.
- [14] 石鹏程,沈菊男,魏伟.基于原子力显微镜和红外光谱仪的新旧沥青融合变化规律[J].*公路*, 2019, 64(3): 225-230.
- [15] 赵泽鹏,李梦园,李源,等.沥青单组分结构与微观形貌分析[J].*石油沥青*, 2021, 35(4): 14-18+37.
- [16] 吕松涛,杨硕,范涛,等.SMC再生SBS沥青的流变性能和微观特性研究[J].*长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 21(1): 1-11.
- [17] 叶群山,羊治宇,周剑波.生物油再生沥青-集料界面分子模拟研究[J].*交通科学与工程*, 2023, 39(4): 39-46.

收稿日期:2023-11-05