

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.09.017

高速公路隧道出口与互通出口最小净距研究

安欣¹, 孙毅², 李涛¹, 潘兵宏³, 林宣财¹

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 中国交通建设股份有限公司, 北京 100088;
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对高速隧道出口与互通出口净距过小时易在互通出口附近导致发生交通事故的问题, 对高速公路隧道互通的最小净距进行了研究。在分析隧道互通出口净距影响因素的基础上, 通过分析隧道出口与互通出口之间车辆行驶主要过程 (包含明适应、车辆加速、标志判读、车辆换道过程), 建立了高速公路隧道互通出口最小净距模型。对模型中基本路段和隧道出口的运行速度、明适应时间等关键参数进行了实测数据调查分析。根据互通不同出口方式和主线车道数, 确定了不同车型的换道次数。采用双曲正切函数换道模型确定了换道所需距离。最后, 在综合各种影响因素的基础上, 提出了净距充裕和不足2种条件下的隧道互通出口最小净距的建议值。研究表明: 高速公路隧道互通出口最小净距与路段和隧道出口的运行速度、主线的设计速度和车道数、出口形式等因素相关。

关键词: 交通安全; 最小净距; 调查分析; 高速公路; 隧道; 互通

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2021) 09-0132-09

Study on Minimum Clear Distance between Expressway Tunnel Exit and Interchange Exit

AN Xin¹, SUN Yi¹, LI Tao¹, PAN Bing-hong², LIN Xuan-cai¹

(1. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China;
2. China Communications Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China;
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: Aiming at the problem that the clear distance between expressway tunnel exit and the interchange exit is too small, which is easy to cause traffic accidents near the interchange exit, the minimum clear distance between the expressway tunnel and the interchange is studied. Based on the analysis of the factors affecting the clear distance between tunnel exit and interchange exit, by analyzing the main process of vehicle driving between tunnel exit and interchange exit (including the process of light adaptation, vehicle acceleration, sign interpretation, and vehicle lane change), the minimum clearance model between expressway tunnel exit and interchange exit is established. In the model, the key parameters such as operating speeds at basic road section and tunnel exit, light adaptation time etc. are investigated and analyzed by the measured data. According to the different exit modes and the number of main line lanes, the number of lane changes for different vehicle types is determined. The distance required for lane change is determined by using the hyperbolic tangent function lane changing model. Finally, on the basis of integrating various influencing factors, the suggested values of the minimum clear distance between tunnel exit and the interchange exit under the conditions of sufficient and insufficient clear distance under the conditions of sufficient and insufficient clear distances are proposed. The research result shows that the minimum clear distance between expressway tunnel exit and interchange exit is related to the factors such as operating speeds

收稿日期: 2021-04-26

基金项目: 中交科技基金项目 ([2018] 05)

作者简介: 安欣 (1979-), 男, 山西忻州人, 硕士, 高级工程师. (26097214@qq.com)

at road section and tunnel exit, the design speed and number of lanes of main line, and the form of exit.

Key words: traffic safety; minimum clearance; survey and analysis; expressway; tunnel; interchange

0 引言

我国高速公路的建设里程和隧道数量在国家经济迅猛发展的背景下持续增长,特别是随着山区高速公路网的进一步完善,出现了一些隧道出口与相邻主线互通式立交(以下简称互通)出口之净距(以下简称隧道互通出口净距)偏小的情况,影响该路段的行车安全。隧道出口与主线互通出口间路段的交通事故率远高于主线其他路段,成为山区高速公路建设和营运管理中急需解决的问题。

我国《公路路线设计规范》^[1](以下简称《路线规范》)规定:隧道出口与前方互通间的距离,应满足设置出口预告标志的需要;条件受限时,隧道出口至前方互通出口起点的距离不应小于1 km,小于1 km时应在隧道入口前或隧道内设置预告标志。《公路立体交叉设计细则》^[2](以下简称《立交细则》)规定:隧道出口与前方主线出口之间的间距宜满足全部指路标志的需求,当受到现场条件限制时间距可适当减小,但隧道出口与前方主线出口之间的净距不宜小于规定值。《日本公路技术标准的解说与运用》^[3]和《日本高速公路设计要领》^[4]根据主线侧出口的预告标志的设置距离的要求规定高速公路互通式立交的最小间距为3 km,并没有规定最小净距。德国的《联邦德国道路设计》^[5]综合考虑驾驶人行车特性、出口预告标志设置、匝道几何设计要素、交通量等因素,对互通式立交的最小间距做了详细规定。美国的《公路与城市道路几何设计》^[6]对高速公路互通式立交的间距作了详细规定。我国研究隧道互通出口净距较少,研究者多是从建立换道模型、驾驶人行为特征方面入手对隧道出口与互通式立体交叉净距进行讨论。赵一飞等^[7]考虑明适应、标志认读完整性、对出口的识别,提出高速公路隧道出口至主线侧出口在2级服务水平下的最小间距大于等于600 m,一般值大于800 m。王少飞等^[8]基于换道行为,结合影响间距的因素,提出3车道高速公路隧道出口与主线侧出入口的最小间距计算模型,并提出建议值。廖君洪等^[9]利用VISSIM仿真软件,从通行能力、驾驶人反应时间等方面分析,提出了设计速度为80 km/h时隧道出口与主线侧出口、主线侧入口至隧道入口最小净距的一般值、条件受限值、特殊条件下的值。丁光明^[10]通过实车试验研究驾驶人心理、视觉等变化特征,发现在驶入隧道时人眼扫视幅度逐渐减小,驶出隧道时瞳孔面积呈指数增

长。Nishiwaki等^[11]根据隐马尔科夫模型,考虑驾驶人行为习惯的不确定性模拟驾驶人行为换道轨迹,结果表明该模型拟合良好。尹露^[12]在分析了高速公路出入口事故原因的基础上,对从视距保证、速度控制、路面抗滑等方面提出了安全保障措施。

综上所述,我国隧道出口与互通出口净距的文献较少,研究中采用换道模型未考虑驾驶人心理、路段位置等因素,适配性不强。对影响隧道互通出口净距的关键参数缺乏深入研究,存在如明适应时间的选用缺乏研究依据、驾驶人等待可插入间隙距离计算模型不合理、车辆运行速度直接采用设计速度等问题。本研究综合考虑车辆运行速度、互通出口形式、大小车型换道最不利情况等因素,根据实车试验研究明适应时间,并采用双曲正切换道模型分别建立隧道出口与互通最小净距模型,提出净距充裕及不足条件下的最小净距值。

1 隧道出口至互通出口净距影响因素分析

隧道出口至互通出口的净距受到诸多因素的影响,具体分析如下:

(1) 互通出口形式

互通出口形式分为不设置辅助车道(车道平衡)和设置辅助车道(车道不平衡)2种情况,不同情况车辆换道有所差异,换道距离结果不相同,隧道与互通的净距也不一样。

(2) 主线及匝道的车道数

随着车道数的增加,车辆运行更为自由,可选择的目标车道也更多,对于不同的车道数而言,车辆换道的情况、换道次数也有所差异。不仅主线车道数影响换道情况及换道次数,匝道为单车道或双车道时也会影响小型车、大型车的换道次数,从而计算距离不同。

(3) 主线车辆的运行速度

在目前的研究中,多数采用设计速度,未考虑实际行车状态及不同车道不同车型的影响,也未考虑车辆在不同车道上和隧道出口的运行速度。而采用运行速度计算出的净距结果也更符合实际要求。

(4) 主线的行驶车辆

不同车型其动力性能和本身的轮廓尺寸均不相同,运行速度相差较大,而且不同车道的运行管理方式也有所差异,此外不同车型在考虑换道时驾驶人的心里紧张程度也不相同,因此也应考虑换道时

不同车型驾驶人的心理,综合以上因素计算出的针对不同车型的净距有所差异。

(5) 明适应

明适应距离属于净距的一部分。明适应时间是指照明开始或由暗处转入亮处时人眼感受性下降的时间过程,它与隧道洞内外照度差、车辆运行速度均有关。根据实车试验得出不同车辆行驶速度、不同照度差范围下的明适应时间,从而确定明适应距离。

(6) 交通标志的布设

驾驶人在不同的交通设施之间行驶时,需要布设交通预告标志等设施以提醒驾驶人,让驾驶人有足够的时间进行反应,以免错过前方出口。净距的大小影响着交通标志的布设,而驾驶人认读交通标志需要时间对净距也有影响。

2 实测数据调查分析

本研究所选高速公路为单向双车道、单向 3 车道、单向 4 车道公路,选取的路段为直线或大半径的圆曲线路段,避免半径等因素造成的附加影响。路段的选取原则均可认为驾驶人自由行驶,以便更加准确地测量运行速度的大小。试验人员的位置应尽量隐蔽,避免路段上的驾驶人看到试验人员而产生紧张心理,以致调查结果不准确。调查路段交通量不应过于拥挤。

2.1 隧道附近基本路段运行速度调查分析

考虑车辆在不同车道上的运行速度确定净距更符合实际要求。第 1 处选取福银高速的正常路段,为双向 4 车道,设计速度 100 km/h;第 2 处选取西安绕城高速的正常路段,为双向 6 车道,设计速度 120 km/h;第 3 处选取连霍高速的正常路段,为双向 8 车道,设计速度 120 km/h。选取的路段均为直线或大半径的圆曲线路段。

单向 4 车道高速公路第 1、第 2 车道为小客车专用车道,第 3 车道为客货混行车道,第 4 车道为大货车专用车道。单向 3 车道高速公路第 1 车道为小客车专用车道,第 2 车道为客货混行车道,第 3 车道为大货车专用车道;单向双车道高速公路内侧为小客车专用车道,外侧为大客车及货车专用车道。因篇幅有限,本研究以单向 3 车道为例说明运行速度的处理过程及结果,单向双车道及单向 4 车道运行速度的处理与单向 3 车道类似。

由处理结果得出以下结论:(1)由于不同测点的车流量不同,第 1 车道上的实际运行速度略有差

异。(2)单向双车道内侧车道的小型车运行速度与外侧车道的大型车运行速度相差约 15 km/h。(3)单向 3 车道小型车相邻车道的运行速度大约差 10 km/h 左右;大型车在同一车道上与小型车的运行速度大约差 15 km/h 左右,与相邻车道的大型车运行速度也大约差 15 km/h 左右。(4)单向 4 车道相邻车道的小型车运行速度大约差 5 km/h 左右;大型车在同一车道上与小型车的运行速度大约差 15 km/h 左右,与相邻车道的大型车运行速度大约差 10 km/h 左右。基于以上规律,考虑车道数、不同的限速管理,提出基本路段车辆的运行速度推荐值(表 1)。

表 1 隧道附近基本路段运行速度推荐值(单位:km/h)

Tab. 1 Recommended values of operating speed for basic sections near tunnel (unit: km/h)

车道 类型	设计速度/ (km · h ⁻¹)	车道 1	车道 2		车道 3		车道 4
			小型车	大型车	小型车	大型车	
单向 4 车道	120	120	115		110	95	85
	100	100	95		90	75	65
	80	80	75		70	60	60
单向 3 车道	120	120	110	95	80		—
	100	100	90	75	60		—
	80	80	70	60	60		—
单向 双车道	120	120	105		—		—
	100	100	85		—		—
	80	80	65		—		—

2.2 隧道出口路段运行速度调查分析

以隧道出口运行速度计算净距更符合实际要求,选取 G65 包茂高速西安至柞水路段、G5 京昆高速西安至汉中路段和 G40 沪陕高速西安至商洛路段作为调查路段。因篇幅有限,以隧道限制速度为 80 km/h 的情况为例说明运行速度的处理过程及结果,其余在不同限速情况下的处理与之相同。处理数据时分别取每个断面上的 V_{85} 作为该断面上的运行速度值。

由处理结果得出以下结论:(1)在隧道出口路段,距离隧道出口一定范围之内,车辆的速度基本保持不变,之后车辆逐渐加速,这是驾驶人从隧道内压抑的环境急于过渡至主线开阔的环境而做出的反应。(2)小型车与大型车的行驶速度有所差异,在隧道出口,大型车比小型车均慢 5 ~ 10 km/h,且小型车的运行速度与隧道限制速度几乎相同。考虑驾驶最不利情况,同时结合隧道限制速度,提出隧道出口的运行速度建议值(表 2)。

表2 隧道出口运行速度建议值(单位: km/h)

Tab. 2 Suggested values of running speed at tunnel exit

(unit: km/h)

设计速度设计速度	120	100	80
隧道限速值	80	80	60
小型车运行速度	80	80	60
大型车运行速度	70	70	50

2.3 明适应时间调查分析

2.3.1 试验方案设计

(1) 试验地点

选取陕西境内的福银高速作为试验路段,共经过200个长度不等的隧道,最长的隧道为李家河3号隧道,全长共4.3 km。

(2) 试验时间

为了排除额外的因素,本研究均选择晴天进行试验,日期为10月16日~10月18日的9:00—18:00。

(3) 试验设备

SMI ETGTM 眼动仪、华谊照度计、宝沃甘AC9T96牌试验用车、手机监控设备、大容量直流电源。

(4) 试验人员

(1) 被试人员驾龄在3 a以上,具有丰富的高速公路行车经验,驾驶操作熟练。(2) 被试人员均无重大疾病、生理缺陷,并主动愿意配合相关试验。

选取13人作为试验人员。根据我国男女比例为7:3的现状,取男性9人,女性4人。

2.3.2 试验数据采集

(1) 照度数据采集

驾驶人沿行车方向自由行驶,照度计放在车内实时记录照度数据,处理数据时将照度的时间与眼

动仪的时间对应起来,即为某时刻的照度。

(2) 驾驶人瞳孔面积与行车速度

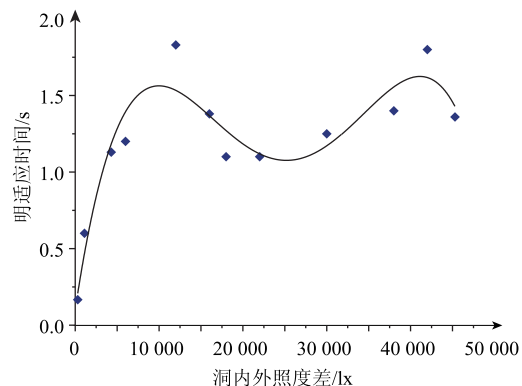
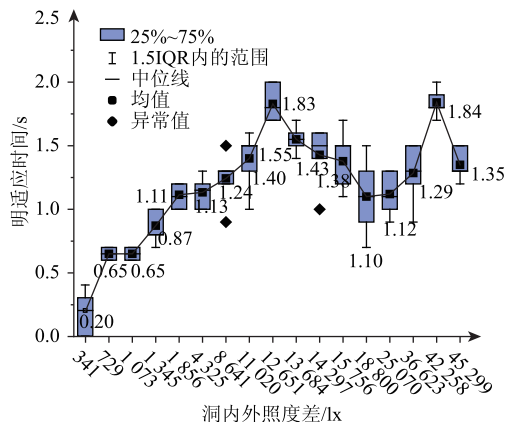
驾驶人的瞳孔面积由眼动仪自带的软件输出,行车速度由手机监测驾驶人的行车仪表盘记录,处理数据时将记录速度的时间与眼动仪录屏的时间对应起来,即可得到某一时刻的速度值。

2.3.3 数据预处理

首先用眼动仪自带的分析软件将数据导出,以avi视频、wav音频、txt文本研究件保存在笔记本电脑中,其次用Adobe Premiere Pro CC 2018将照度视频、速度视频、眼动视频、音频对应时间的一致性。由于数据量大,在Excel中将数据进行初步整理,用KM player将照度、速度、瞳孔面积的对应数值记录到相应的表格。

2.3.4 明适应时间变化规律研究

根据以上不同行驶速度时明适应时间变化规律(图1~图2),得出以下结论:(1)明适应时间总体为0.2~1.83 s,由于取值为平均值,也会在该范围内小幅波动。(2)随着洞内外照度差值的增大,明适应时间整体呈上升趋势。(3)大部分趋势下为速度越高,明适应时间越小。(4)当洞内外的照度差为12 000 lx左右时,较多速度的明适应时间达到最大值,驾驶人对前方目标物的视认不敏感;当洞内外的照度差为22 000 lx左右时,较多速度的明适应时间达到最小值,驾驶人对前方目标物的视认最敏感。(5)当行驶速度为50~65 km/h时,波峰最大,与其他速度范围相比规律较为明显,所以50~65 km/h也是明适应时间的变化阈值。(6)如果明适应的视认距离相差不大,速度越高,所需的明适应时间理应越短,然而发现行车速度在70 km/h以上时,在照度差为25 000~38 000 lx范围内,明适

图1 $V=50 \sim 65$ km/h 时明适应时间变化规律及拟合模型Fig. 1 Change rule of light adaptation time and fitting model when $V=50 \sim 65$ km/h

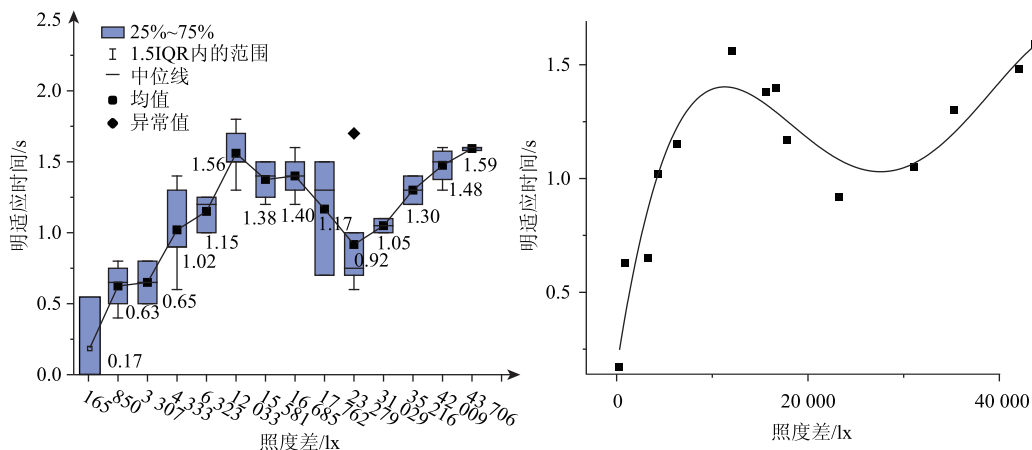


图2 $V = 66 \sim 70$ km/h 时明适应时间变化规律及拟合模型

Fig. 2 Change rule of light adaptation time and fitting model when $V = 66 \sim 70$ km/h

应时间较 66 ~ 70 km/h 的时间长, 则说明在车速为 70 km/h 以上时, 照度差在 25 000 ~ 38 000 lx 范围时也是该速度范围驾驶人视认能力下降最快的时段。

根据 2.2 节得到的隧道限速建议值, 依据相应速度范围的明适应时间拟合模型, 考虑最不利情况, 取在相应速度范围内明适应时间的最大值 (表 3)。

表 3 明适应时间取值

Tab. 3 Values of light adaptation time

隧道限速值设计速度/(km · h ⁻¹)	80	70	60	50
明适应时间/s	1.2	1.3	1.7	1.7

3 隧道出口至互通出口净距研究

3.1 净距充裕和净距不足条件下的净距计算模型

隧道出口至互通出口的净距为隧道洞口至渐变段起点之间的距离。在净距充裕条件下的隧道出口至互通出口净距模型包括明适应距离、车辆加速距离、标志判读距离、车辆换道总距离, 同时考虑辅助车道的影响。 L_1 为明适应距离; L_2 为车辆加速距离; L_3 为标志判读距离; L_4 为车辆换道距离; L 为隧道出口至互通出口净距。

与互通出口的净距往往难以满足要求。将净距不足的情况分为 3 种: (1) 将洞内外的照度差控制在一定范围时, 驾驶人能够直接看清前方路况, 可不考虑明适应距离; (2) 由于驾驶人在进隧道之前或在隧道内已知出隧道后的道路信息, 无需加速行驶。(3) 可提前于出隧道之前设置和完善分流预告标志, 不考虑标志判读距离。因此, 在净距不足条件下, 隧道出口与互通出口的净距只需考虑车辆换道总距离。

3.2 隧道出口处驾驶人的明适应距离

明暗适应的距离应满足人眼在一定时间经过一定距离能够恢复到正常状态, 从而做出车辆加速、认读标志等后续一系列操作。车辆处于此阶段时为匀速行驶。隧道出口处驾驶人的明适应距离计算式为:

$$L_1 = \frac{V_x}{3.6} t_1, \quad (1)$$

式中, L_1 为明适应距离; V_x 为隧道出口路段的运行速度, 按表 2 取值; t_1 为明适应时间, 按表 3 取值。

3.3 车辆加速距离

由于隧道内的行驶速度较低, 当车辆经过明适应之后, 当前方出口距离较远时, 驾驶人对于从隧道内压抑的环境转变为视野开阔环境的适应性逐渐提高, 此时驾驶人也急于更快地适应正常路段的行驶环境, 因此会进行加速, 2.2 节对于隧道出、入口运行速度的分析也证明了这点。根据姚晶^[13]的研究, 车辆经过明适应之后小型车的加速度取值为 1 m/s^2 , 大型车的加速度取值为 0.44 m/s^2 。车辆的加速距离计算式为:

$$L_2 = \frac{V_{85}^2 - V_x^2}{25.92a}, \quad (2)$$

式中, L_2 为车辆加速距离; V_x 为车辆运行速度, 按表 1 取值; a 为车辆加速度。

3.4 标志判读距离

标志判读距离包括驾驶人视认距离和驾驶人判断距离。驾驶人视认距离指驾驶人通过隧道出口后, 发现前方分流预告的标志并进行读取的距离。计算公式为:

$$L_{3a} = \frac{V_{85}}{3.6} t_{3a} + \sqrt{\frac{H^2 + (B/2)^2}{\tan(\theta/2)}}, \quad (3)$$

式中, L_{3a} 为驾驶人视认距离; V_{85} 为第 85 百分位的行驶速度; H 为标志牌与车辆的视线高差, 小客车视线高取 1.2 m, 大货车视线高取 2 m, 标志牌高度取 7.5 m; θ 为驾驶人视野界限, 根据潘兵宏的研究^[14], 驾驶人在认读标志时人眼视线移动的理想角度为 5° , 因此本研究取 5° ; B 为驾驶人视点至单臂指路标志中间的距离, 取 10.5 m; t_{3a} 为驾驶人视认反应时间, 即为驾驶人阅读完标志内容所需时间, 该时间取决于标志牌上的语言种类和字数, 计算式为:

$$t_{3a} = t'_{3a} \omega_1 \omega_2, \quad (4)$$

式中, t'_{3a} 为驾驶人阅读完一定的拉丁文所需时间, 取 1.5 s; ω_1 为语言种类修正系数, 取 2; ω_2 为汉字复杂性修正系数, 取 1.1。

驾驶人在阅读完标志牌的信息后, 需对前方是否进行换道进行决策。根据国外研究成果^[15], 得出驾驶人在对前方道路有预期时的判断决策时间为:

$$t_{3b} = 1.237\ 554e^{0.258\ 913x}, \quad (5)$$

式中, t_{3b} 为对前方道路有预期时驾驶人判断决策时间; x 为信息容量。

驾驶人判断决策距离计算式为:

$$L_{3b} = \frac{V_{85}}{3.6} t_{3b}, \quad (6)$$

式中 L_{3b} 为驾驶人判断决策距离。

3.5 车辆换道总距离

车辆换道的距离分为等待可插入间隙的距离

$$t_w = \frac{\int_{\tau}^c tf(t)dt}{1 - P(H \geq t_c)} = \frac{1 - P(H \geq t_c)}{P(H \geq t_c)} = \frac{2(1 + \tau\lambda) - e^{-3\lambda(t_c - \tau)} [9t_c^3\lambda^3 + 9(1 - 2\tau\lambda)t_c^2\lambda^2 + 3(3\tau^2\lambda^2 - 4\tau\lambda + 2)t_c\lambda + 3\tau^2\lambda^2 - 4\tau\lambda + 2]}{2V\lambda[4.5\lambda^2(t_c - \tau)^2 + 3\lambda(t_c - \tau) + 1]e^{-3\lambda(t_c - \tau)}}, \quad (7)$$

式中, t_w 为等待可插入间隙时间; t_c 为车辆可插入的临界最小时距, 按照车辆的横移率为 1 m/s 取值; H 为车头时距; $P(H > t_c)$ 为车头时距大于临界最小视距的概率; τ 为目标车道上车头时距的最小值; λ

L_{4a} 、实施车辆换道的距离 L_{4b} 。为了分析方便, 认为双车道匝道上小型车在 2 个车道均有分布, 大型车行驶在外侧车道上。(1) 主线为单向双车道时, 若出口不设置辅助车道 (车道平衡时), 车辆换道的最不利行为是主线内侧的小型车换道 1 次至最外侧车道; 若出口处设置辅助车道 (车道不平衡时), 车辆换道的最不利行为是主线内侧的小型车换道 1 次至最外侧车道或外侧大型车换道 1 次至辅助车道。(2) 主线为单向 3 车道时, 车道平衡时车辆换道的最不利行为是最内侧车道的小车换道 2 次至最外侧车道或中间车道的大车换道 1 次至最外侧车道; 车道不平衡时车辆换道的最不利行为是最内侧的小车换道 2 次至最外侧车道或中间车道的大车换道 2 次至辅助车道。(3) 主线为单向 4 车道时, 若出口处车道平衡, 车辆换道的最不利行为是最内侧的小车换道 3 次至最外侧车道或次外侧车道的大车换道 1 次至最外侧车道; 车道不平衡时, 车辆换道的最不利行为是最内侧的小车换道 3 次至最外侧车道或次外侧车道的大车换道 2 次至辅助车道。

3.5.1 等待可插入间隙的距离

当车辆准备进行换道时, 一般情况下会在原车道上维持原车道的速度, 并等待目标车道上的可插入间隙。目前国内外学者一般采用爱尔朗分布模型来描述不同情况下的车头时距分布情况。根据周锡滨的研究结果^[16]得出等待可插入间隙时间为:

为临近车道单位时间车辆平均达到率, $\lambda = Q/3\ 600$; Q 为单车道最大服务交通量; V 为车辆在不同车道的运行速度, 按表 1 取值。

等待可插入间隙时间计算结果见表 4。

表 4 模型参数值及等待可插入间隙时间

Tab. 4 Model parameter values and waiting time for insertable gap

主线速度/(km · h ⁻¹)	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60
Q	1 650	1 638	1 625	1 613	1 600	1 575	1 550	1 525	1 500	1 463	1 425	1 388	1 350
λ	0.458	0.455	0.451	0.448	0.444	0.438	0.431	0.424	0.417	0.406	0.396	0.386	0.375
t_c	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
t_w	3.91	3.8	3.69	3.58	3.47	3.29	3.11	2.94	2.77	2.55	2.34	2.14	1.93

在等待 1 个可插入间隙时车辆的前进距离为:

$$L_{4a} = \frac{V_0}{3.6} t_w, \quad (8)$$

式中, V_0 为等待可插入间隙时运行速度, 按表 1 取值; L_{4a} 为等待可插入间隙时的前进距离。

3.5.2 车辆换道距离

目前国内外采用的换道模型包括直线型、圆弧型、缓和曲线型换道轨迹模型等。这些模型均存在曲率不连续或发生突变、行驶轨迹起终点曲率不为 0 的情况,根据王烨的研究^[17],采用双曲正切函数来描述车辆的实际行驶轨迹。模型中的 τ 用来表征驾驶人换道时的紧急程度,能够更好地匹配不同换道情境下的车辆行驶轨迹。其表达式为:

$$y(t) = \frac{\gamma}{2} \tanh \left[\frac{\tau}{L_{4b}/V_d} \cdot \left(t - \frac{L_{4b}}{2V_d} \right) \right] + \delta, \quad (9)$$

式中, $y(t)$ 为换道段车辆任意时刻 t 横向行驶的宽度,即目标车道距离原车道的相对横向距离; γ 为换道宽度,根据《路线规范》,取 3.75 m; τ 为紧急系数,是用来表征换道紧急情况的参数,值越大代表车辆换道过程越紧急; L_{4b} 为车辆完成换道所需距离; V_d 为换道过程中车辆在原车道上的运行速度,按表 1 取值; δ 为表示换道轨迹中心位置相对于车道线位置的实际横向偏差。

对式 (9) 进行二阶求导,得到横向加速度:

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2} = \gamma \left(\frac{\tau \cdot V_d}{L_{4b}} \right)^2 \left[\tanh^3 \left(\frac{\tau \cdot V_d}{L_{4b}} t - \frac{\tau}{2} \right) - \tanh \left(\frac{\tau \cdot V_d}{L_{4b}} t - \frac{\tau}{2} \right) \right]. \quad (10)$$

同时,车辆在换道时的加速度还应该满足:

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2} \leq \gamma \left(\frac{\tau \cdot V_d}{L_{4b}} \right)^2 \leq a_{\max}, \quad (11)$$

从而可以计算出车辆换道所需的最小长度,

$$L_{4b} \geq L_{4b\min} = \tau_{\min} \cdot V_d \sqrt{\frac{\gamma}{a_{\max}}}, \quad (12)$$

式中, $\tau_{\min}$ 为紧急系数的最小值,不同车型在不同路段位置、不同换道方向时取值均不同 (表 5); $a_{\max}$ 为车辆在运行中的最大横向加速度。根据刘斌^[18]的研究,按表 6 取值。

表 5 不同位置处不同车型的 $\tau_{\min}$ 取值

Tab. 5 $\tau_{\min}$ values of different vehicle types at different locations

路段	左换道		右换道	
	小型车	大型车	小型车	大型车
互通出口	—	—	3.5	2.7
立交入口	3.2	2.2	—	—

3.5.3 车辆换道总距离

根据以上论述,车辆换道总距离由等待可插入间隙的距离、车辆换道距离组成,计算结果见表 7、表 8。

表 6 车辆最大横向加速度取值 (单位: m/s^2)

Tab. 6 Values of maximum lateral acceleration of vehicle (unit: m/s^2)

主线速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	120	115	110	105	100	95	90
$a_{\max}$	0.588	0.637	0.686	0.735	0.784	0.809	0.833
主线速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	85	80	75	70	65	60	—
$a_{\max}$	0.858	0.882	0.931	0.98	1.029	1.078	—

表 7 车道平衡时的车辆换道总距离 (单位: m)

Tab. 7 Total lane-changing distance of vehicles when lanes are balanced (unit: m)

设计速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	单向 4 车道		单向 3 车道		单向双车道	
	小客车	大型车	小客车	大型车	小客车	大型车
120	1 184	241	790	241	426	—
100	860	167	574	167	310	—
80	604	117	403	117	223	—

表 8 车道不平衡时的车辆换道总距离 (单位: m)

Tab. 8 Total lane-changing distance of vehicles when lanes are unbalanced (unit: m)

设计速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	单向 4 车道		单向 3 车道		单向双车道	
	小客车	大型车	小客车	大型车	小客车	大型车
120	1 184	445	790	427	426	283
100	860	300	574	284	310	204
80	604	234	403	234	223	133

3.6 辅助车道的影响

当匝道为双车道时需设置辅助车道,由于车辆换道可在辅助车道上进行,因此应取换道距离、辅助车道长度、渐变段长度之和的较大值。主线出口设置辅助车道的长度及渐变段长度可按照《立交细则》中的规定进行取值 (表 9)。

表 9 主线出口辅助车道长度及渐变段长度 (单位: m)

Tab. 9 Length of auxiliary lane of main line exit and length of transition section (unit: m)

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	辅助车道长度/m	渐变段长度/m	总长/m
120	300	90	390
100	250	80	330
80	200	70	270

3.7 净距充裕条件下隧道出口至互通出口净距值

根据 3.1 节讨论的净距充裕条件下的净距计算模型,及 3.5.1 节讨论的车辆换道的最不利情况,在计算不同车道的需求净距时,只需比较进行最不利换道所需净距即可,在同一设计速度下取最大值作为不同主线类型的净距建议值,且最终结果取整为 10 m (表 10、表 11)。

表10 净距充裕条件下车道平衡时隧道出口至互通出口
净距值(单位:m)

Tab.10 Net distance values from tunnel exit to interchange
exit when lanes are balanced under ample clearance
condition (unit: m)

设计速度/ (km·h ⁻¹)	单向4车道			单向3车道			单向双车道	
	第1 车道	第3 车道	建议 值	第1 车道	第2 车道	建议 值	第1 车道	建议 值
120	1 670	902	1 670	1 276	902	1 280	912	920
100	1 157	526	1 160	871	526	880	627	630
80	855	483	860	654	483	660	521	530

表11 净距充裕条件下车道不平衡时隧道出口至互通出
口净距值(单位:m)

Tab.11 Net distance values from tunnel exit to interchange
exit when lanes are unbalanced under ample clearance
condition (unit: m)

设计速度/ (km·h ⁻¹)	单向4车道			单向3车道			单向双车道		
	第1 车道	第3 车道	建议 值	第1 车道	第2 车道	建议 值	第1 车道	第2 车道	建议 值
120	1 670	957	1 670	1 276	939	1 280	912	1 087	1 100
100	1 157	526	1 160	871	526	880	627	675	680
80	855	483	860	654	483	660	521	542	550

3.8 净距不足条件下隧道出口至互通出口净距值

根据3.1节讨论的净距不足条件下的净距计算模型和表6、表7,在同一设计速度下,将不同主线类型下针对不同车型的净距值做对比,取最大值作为不同主线类型的净距建议值,同时考虑辅助车道的影响,且最终结果取整为10 m(表12)。

表12 净距不足条件下隧道出口至互通出口净距
建议值(单位:m)

Tab.12 Recommended net distance between tunnel
exit and interchange exit under insufficient clearance
condition (unit: m)

设计速度/ (km·h ⁻¹)	车道平衡时			车道不平衡时		
	单向 4车道	单向 3车道	单向 双车道	单向 4车道	单向 3车道	单向 双车道
120	1 190	790	430	1 190	790	430
100	860	580	310	860	580	310
80	610	410	230	610	410	230

4 结论

(1) 根据实测数据,得到了基本路段不同车道车辆运行速度分布、隧道出口附近不同车型的运行速度规律,并提出了运行速度建议值。

(2) 在分析净距影响因素的基础上,根据互通出口不同车型换道的最不利情况、不同车道的运行

速度、隧道出口运行速度、驾驶人的行为特征等因素,采用双曲正切换道模型建立了隧道互通出口最小净距计算模型,并采用实车调查和试验的方法深入分析并标定了模型中的关键参数,提出了净距充裕和不足2种情况下的净距建议值。

参考文献:

References:

- [1] JTG D20—2006, 公路路线设计规范 [S].
JTG D20—2006, Design Specifications for Highway Alignment [S].
- [2] JTG/T D21—2014, 公路立体交叉设计细则 [S].
JTG/T D21—2014, Guidelines for Design of Highway Grade-separated Intersections [S].
- [3] 日本道路协会. 日本公路技术标准的解说与运用 [M]. 东京: 日本东京丸善株式会社出版社, 2004.
Japan Road Association. Explanation and Application of Japanese Highway Technical Standards [M]. Tokyo: Tokyo Maruzen Co., Ltd., Press, 2004.
- [4] 日本道路公团. 日本高速公路设计要领 [M]. 西安: 陕西省旅游出版社, 1991.
Japan Road Corporation. Essentials of Japanese Highway Design [M]. Xi'an: Shaanxi Tourism Publishing House, 1991.
- [5] 杜尔特 W. 联邦德国道路设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
DUERTE W. Road Design in Federal Republic of Germany [M]. Beijing: China Communications Press, 1987.
- [6] 美国各州公路与运输工作者协会. 公路与城市道路几何设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1988.
AASHTO. Highway and Urban Road Geometric Design [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1988.
- [7] 赵一飞, 陈敏, 潘兵宏. 隧道与互通式立交出口最小间距需求分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31 (3): 68—71.
ZHAO Yi-fei, CHEN Min, PAN Bing-hong. Minimum Spacing Demand Analysis Between Tunnel and Exit of Interchange [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31 (3): 68—71.
- [8] 王少飞, 李伟聪, 林志, 等. 三车道高速公路隧道出口与互通式立交最小间距研究 [J]. 公路交通技术, 2013 (6): 103—107.
WANG Shao-fei, LI Wei-cong, LIN Zhi, et al. Research on Minimum Space between Tunnel Outlets of Three-lane Expressway and Interchange [J]. Technology of Highway and Transport, 2013 (6): 103—107.
- [9] 廖军洪, 王芳, 邬洪波, 等. 高速公路互通立交与隧道最小间距研究 [J]. 公路, 2012 (1): 1—7.
LIAO Jun-hong, WANG Fang, WU Hong-bo, et al. Research on the Minimum Distance Between Expressway

- Interchange and Tunnel [J]. Highway, 2012 (1): 1-7.
- [10] 丁光明. 高速公路隧道环境对驾驶人心理及生理影响研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
DING Guang-ming. Study on Impact of Freeway Tunnel Environment on Drivers' Physiology and Psychology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [11] NISHIWAKI Y, MIYAJIMA C, KITAOKA H, et al. Stochastic Modeling of Vehicle Trajectory During Lane-changing [C] //2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Taipei: IEEE, 2009: 1377-1380.
- [12] 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. Study on Geometric Parameters for Speed-change Lane of Expressway and Safeguard Measures [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [13] 姚晶. 主线分合流与隧道及主线出入口最小间距研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
YAO Jing. Research on Minimum Distance between Main Line Division and Merge and Tunnel and Main Line Entrance and Exit [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [14] 潘兵宏, 赵一飞, 梁孝忠. 动视觉原理在公路线形设计中的应用 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24 (6): 20-24.
PAN Bing-hong, ZHAO Yi-fei, LIANG Xiao-zhong. Application of Dynamic Vision Theory in Highway Alignment Design [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24 (6): 20-24.
- [15] 赵一飞. 宁波象山港公路大桥接线工程项目安全性评价报告 [R]. 西安: 长安大学, 2010.
ZHAO Yi-fei. Safety Evaluation Report on Connection Project of Ningbo Xiangshan Port Highway Bridge [R]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [16] 潘兵宏, 周锡滨, 周廷文, 等. 高速公路互通式立交出口识别视距计算模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2020, 48 (9): 1312-1318, 1352.
PAN Bing-hong, ZHOU Xi-zhen, ZHOU Ting-wen, et al. Decision Sight Distance Calculation Model of Expressway Interchange Exit [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2020, 48 (9): 1312-1318, 1352.
- [17] 潘兵宏, 王焱. 基于双曲正切函数的小客车换道轨迹模型 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2020 (4): 419-425.
PAN Bing-hong, WANG Ye. Car Lane Changing Trajectory Model Based on Hyperbolic Tangent Function [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2020 (4): 419-425.
- [18] 刘斌. 基于乘客感受的互通范围内路面宽度过渡段关键技术研究 [D]. 西安: 长安大学.
LIU Bin. Research on Key Technology of Road Width Transition Section within Interchange Range Based on Passenger Experience [D]. Xi'an: Chang'an University.
-
- (上接第122页)
- [13] 郭腾峰, 张志伟, 刘冰, 等. 适应6轴铰接列车动力性的高速公路最大纵坡坡度和坡长 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18 (3): 38-47.
GUO Teng-feng, ZHANG Zhi-wei, LIU Bing, et al. Maximum Grade and Length of Longitudinal Slope Adapted to Dynamic Performance of Six-axis Articulated Vehicle [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18 (3): 38-47.
- [14] JTG B01—2014, 公路工程技术标准 [S].
JTG B01—2014, Technical Standard of Highway Engineering [S].
- [15] 马捷, 李津, 程琳. 客货分离道路系统的车辆分类标准和评价方法 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2015, 32 (5): 524-531.
MA Jie, LI Jin, CHENG Lin. Vehicle Classification and Evaluation Method of Separating Trucks from Passenger Vehicles [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2015, 32 (5): 524-531.
- [16] 王冠森. 混合交通条件下非机动车左转交通组织优化方法研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
WANG Guan-sen. Research on Optimization Method of Left-turn Non-motor Vehicles Traffic Organization under Mixed Traffic Conditions [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.
- [17] 张翔, 杨海强. 城市道路宽度对交通安全影响分析 [J]. 现代商贸工业, 2016, 37 (20): 175-175.
ZHANG Xiang, YANG Hai-qiang. Analysis of Influence of Urban Road Width on Traffic Safety [J]. Modern Trade Industry, 2016, 37 (20): 175-175.
- [18] 元伟. 城市道路机动车道宽度研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
YUAN Wei. Study on Width of Motor Vehicle Lane in Urban Road [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2005.
- [19] 曾志刚. 高速公路硬路肩的功能与宽度值研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
ZENG Zhi-gang. Study on Function and Width Values of Expressway Hard Shoulder [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [20] JTG D20—2017, 公路路线设计规范 [S].
JTG D20—2017, Design Specifications for Highway Alignment [S].
- [21] 王佐, 潘兵宏, 曾志刚, 等. 基于紧急停车功能的高速公路右侧硬路肩宽度研究 [J]. 中外公路, 2013, 33 (3): 311-315.
WANG Zuo, PAN Bing-hong, ZENG Zhi-gang, et al. Research on Width of Hard Shoulder on Right Side of Expressway Based on Emergency Stop Function [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33 (3): 311-315.