

文章编号:1001-7372(2022)09-0051-15

隧道与互通出口小净距路段换道 可靠性研究

陈 荔¹, 张 驰^{*2}, 王 博², 刘昌赫², 谢子龙², 李超同²

(1. 长安大学 信息与网络管理处, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为分析高速公路隧道与互通出口小净距路段在不同交通流状况下的车辆驶出概率,提出了基于交通仿真的安全换道概率模型。首先,采用 VISSIM 标定仿真模型并进行正交试验,获取小净距路段在不同净距长度、交通量、驶出比例、大型车比例下的交通数据,在此基础上确定瞬时交通流密度及相应车流平均速度的计算方法,构建相应的分布模型,通过 K 均值聚类算法研究不同速度下的瞬时交通流密度大小和出现概率;同时引入可靠度方法并利用微分法来构建车辆安全换道概率模型,综合考虑车速、车流密度、目标车道临界可插入间隙等因素的不确定性,应用蒙特卡罗仿真法搭建求解概率模型的算法,并通过 MATLAB 对模型进行求解;针对分流车初始位置的不同,分别得到了不同交通量、大型车比例、净距长度下的换道驶出成功率,进而研究不同交通流状况组合下的净距长度。结果表明:交通量、大型车比例、净距长度对净距路段内侧车道车辆换道驶出成功率有显著性影响,研究结果可为规范的进一步完善提供参考。

关键词:交通工程;换道概率;VISSIM 仿真;可靠度;小净距路段;互通

中图分类号:U491

文献标志码:A

Research of Lane Changing Reliability on Short Distance Section Between Tunnel and Interchange Exit

CHEN Li¹, ZHANG Chi^{*2}, WANG Bo², LIU Chang-he², XIE Zi-long², LI Chao-tong²

(1. Information and Network Management Division, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To analyze the vehicle exit probability of expressway tunnels and interchange exits with small clear distances under different traffic flow conditions, this study proposes a safe lane change probability model based on traffic simulation. First, VISSIM was used to calibrate the simulation model and conduct orthogonal experiments to obtain traffic data from small clear distance sections under different clear distance lengths, traffic volumes, driving out and large vehicle ratios. On this basis, the instantaneous traffic flow density calculation method and the average speed of the corresponding traffic flow was determined, the corresponding distribution model was constructed, and the instantaneous traffic flow density and occurrence probability under different speeds were studied using the K -means clustering algorithm. The reliability method was introduced, and the differential method used to build the probability model of vehicle safe lane

收稿日期:2021-07-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600103,2020YFC1512005,2021YFB2301602);四川省科技计划项目(2022YFG0048)

作者简介:陈 荔(1979-),男,福建莆田人,高级工程师,工学博士,E-mail:chenli@chd.edu.cn。

* 通讯作者:张 驰(1981-),男,四川宜宾人,教授,工学博士,E-mail:zhangchi@chd.edu.cn。

change. Considering uncertainties in vehicle speed, traffic density, target lane critical insertable gap, and other factors, the Monte Carlo simulation method was used to build the probability model algorithm, which was solved using MATLAB. Based on shunting vehicle different initial positions, the lane change success rate under different traffic volumes, large vehicle ratios, and clear distance lengths was obtained. Subsequently, the clear distance length under different traffic flow conditions was investigated. The results demonstrate that traffic volume, proportion of large vehicles, and clear distance length have a significant impact on the success rate of lane-changing vehicles in the clear distance section, which provides a reference point for further improvement of the specification.

Keywords: traffic engineering; lane changing probability; VISSIM; reliability; short distance section; interchange

Received 15 July. 2021

Funding: National Key Research & Development Program of China (2021YFB2600103, 2020YFC1512005, 2021YFB2301602); Sichuan Science and Technology Program (2022YFG0048)

* Corresponding author. *E-mail address:* zhangchi@chd.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.09.005>

0 引言

随着中国高速公路网建设的不断完善、加密,部分路段的高速公路建设条件较为困难,有时为了线形、成本、区域连接等的需要,部分路段不得已将互通设置在隧道附近,导致隧道与互通间距过近(以下称小净距路段)。根据相关数据显示,中国 30% 以上的高速公路事故发生在互通出口路段及其影响区域内,超速驾驶及不合理的换道驶出行为是其主要诱因^[1]。对于小净距路段,隧道内外照度差异较大导致的视觉障碍也会放大对驾驶人正常操作的影响,严重时将会导致交通事故的发生,且隧道出口前 100 m 至出口后 200 m 的路段属于交通事故高发路段^[2]。因此,对小净距路段在不同交通流状况下的车辆驶出概率进行研究,并研究不同交通流状况组合下的净距长度,可为规范的进一步完善提供参考。

近年来,国内外相关学者对出口路段交通特性及净距长度进行了研究,但均未考虑出口路段较大的行车波动性。如 2008 年, Sarhan 等^[3]对高速公路出入口间距、交通量与事故率间的关系进行了研究,发现交通量的增加和变速车道的减短均会增加车辆换道、追尾的概率;2020 年, He 等^[4]综合考虑驾驶行为、人机工程学和交通流理论,构建了隧道与互通出口路段最小净距模型,并给出了单向双车道和 3 车道的推荐值;2014 年,王云泽等^[5]综合考虑了匝道交通量、车头时距、车辆运行速度和位置等因素的影响,基于二项 Logistic 模型构建了高速公路

立交分流区驾驶人二向选择行为概率模型;2022 年,张驰等^[6]通过交通仿真法,以交通冲突率为评价指标,对小净距出入口路段的交通流和非交通流因素进行了研究,在确定净距长度、交通量、设计速度、转向比例、大车型比例、车道数对行车风险具有显著性影响后,构建了相应的风险评价模型,以确定不同工况下的出入口所需净距长度。此外,国内外相关学者还对可靠度进行了研究,来解决交通问题中的诸多变量及组合问题,因为其可考虑出口路段交通特性的波动性。如 2014 年, Musunuru 等^[7]应用蒙特卡罗仿真法获得了由交通相关变量产生的车辆密度和服务水平的可变性;2021 年, Gore 等^[8]整合多条高速公路的行驶时间数据,使用概率方法推导出表示拥堵状况下边界极限的行驶时间阈值,量化了拥堵水平,为高速公路生成了基于可靠度的服务水平阈值。在国外逐渐应用后,中国才开始可靠度的相关研究,目前已广泛应用在路网服务水平评价^[9]、信号配时^[10]、道路线形优化^[11]、爬坡车道^[12]、纵坡坡度坡长^[13]等方面。

综上所述,以往众多学者在研究出口路段净距长度时,速度、交通量等往往会根据其分布情况取较大值,从“保守”的角度计算其长度。但道路上的车辆并不会一直按照该理论行驶,分流车会根据实际的道路状况进行换道驶出,对于同样的道路状况可能会出现不同的驾驶行为。与确定性方法中的单值估计值相比,可靠度方法将设计参数解释为随机变量,用概率分布表示,通过风险的形式估计道路的安全

全性。因此,本文对交通仿真模型进行参数标定,对净距长度、交通量、驶出比例、大型车比例4个因素设计正交试验并进行仿真,研究车头时距、临界可插入间隙、速度的分布特性及对换道的影响,通过K均值聚类算法研究不同速度下的瞬时交通流密度大小和出现概率;并引入可靠度方法来构建出口小净距路段安全换道概率模型,综合考虑车速、车流密度、目标车道临界可插入间隙等因素的不确定性,应用蒙特卡罗仿真法搭建该模型的求解算法;通过MATLAB进行求解,从而探究不同交通流状况下的净距长度。

1 小净距路段交通特征分析

1.1 小净距路段

《公路路线设计规范》(JTGD20—2017)(以下简称规范)和《公路立体交叉设计细则》(JTGT/D21—2014)均对隧道与互通出入口净距做出了明确的定义:隧道口至互通出口匝道渐变段起点或入口匝道渐变段终点的距离。对四川CB、LS、GJ、DH、LX以及XJ共6条设计速度均为 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 、单向双车道的山区高速公路进行统计,发现存在48处互通出口路段净距长度小于规范要求设置 $1\,000\text{ m}$

出口预告标志的距离,且小于 300 m 的路段的占比高达 54.2% 。在隧道洞口明暗适应、换道等需求的影响下,该路段的交通流状况受到了严重干扰,若无法满足转向车辆的基本行车需求,将会导致驾驶人采取急减速、强制换道等危险驾驶行为;而且,逐年增加的交通量、载重车比例进一步加剧了行车风险。

1.2 交通特征分析

目前针对出口小净距路段的研究主要集中在以下3个方面:①以隧道出口至互通入口间路段为对象,分析出入口间距、交通量与事故率间的关系;②基于仿真分析,对比实际交通以构建小净距相关模型;③对匝道交通量、车头时距等因素进行分析,从概率的角度确定最小净距长度。以上研究的不足之处在于其在计算净距时往往按最不利情况考虑,且采用定值进行研究。而在实际中,小净距路段由于其净距长度有限的特殊性,实际的交通流状况会不一样^[14]。因此,本文首先从车辆变道位置、运行速度、车头时距3个角度,分析了出口小净距路段的实际交通流状况(表1),并基于此,利用实测数据标定仿真模型,进而获取车头时距、速度、密度等交通数据,然后在研究其变化特性的基础上,构建相应的分布模型。

表1 出口小净距路段实际交通流状况

Table 1 Actual Traffic Flow Condition of Small Clear Distance Road Section at the Exit

过程	计算公式	变量	出口小净距路段
明适应距离	$S_1 = \frac{v_1}{3.6} t_1$	明适应时间 t_1	长安大学安欣对陕西境内福银高速的研究发现:隧道限速 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下的 $t_{1-\max}=1.2\text{ s}$
		v_1	所调研出口路段净距段的内侧车道分流车平均运行速度主要分布在 $40\sim 70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,外侧车道分布在 $30\sim 45\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;净距长度较短,可认为该平均速度接近隧道出口速度
等待可插入间隙距离	$S_2 = \frac{V_2}{3.6} t_w$	等待可插入间隙时间 t_w	爱尔朗分布、M3分布均不适用;出口路段长度有限,需考虑外侧车道车队(即屏障效应)的影响,尤其是大型车比例较高时
		V_2	车辆在了解到隧道出口不远处即是主线出口后,速度往往会更低,结合所调研路段的净距段车速可知:速度较低,若净距过小,驾驶人还会大幅减速以完成驶出

2 交通仿真工况的建立

2.1 道路模型构建及参数标定

本文现场采集数据的地点为XH高速秦岭1号隧道出口小净距路段,对连续采集 18 min 的交通流状况进行统计,可以得到出口小净距路段的交通量、车型比例及转向交通量,进而采用VISSIM来获取不同工况下的速度、车头时距等数据,以便于提高小净距路段换道概率模型的适用性。

道路模型如图1所示。考虑实地调研路段的主线和单车道匝道设计速度、隧道限速分别为 80 、 40 、 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,故本文对象为此速度下的出口小净距

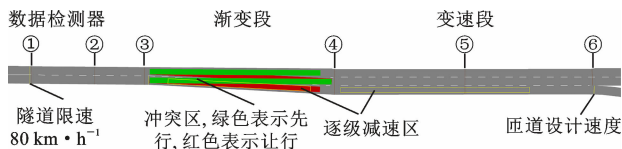


图1 VISSIM道路模型示意

Fig. 1 Diagram of VISSIM Road Model

路段。渐变段和减速车道按逐级减速考虑,分别为 60 、 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;主线按单向二车道考虑,匝道按单车道考虑。根据文献[6]研究可知,道路线形在交通仿真中对车辆的运行状态基本不产生影响,故平纵线形采用规范值,渐变段和减速车道长度分别为 80 、 110 m 。

根据本文研究对象,选用 Wiedemann99 跟驰模型,并选取小型车和重载货车作为试验的大/小型。每次试验的仿真总时间均为 4 500 s,其中 0~900 s 主要实现交通流稳定行驶,900~4 500 s 为有效数据持续采集的时间。根据文献[15]的研究可知,Wiedemann99 跟驰模型中的参数取值如表 2 所示。

表 2 对仿真结果较为敏感的驾驶行为参数取值

Table 2 Parameter Values of Driving Behaviors That Are Sensitive to Simulation Results

参数	最小值	最大值	软件默认值	步长
CC1(车头时距)/s	0.7	1.6	0.9	0.3
CC2(跟车变量)/m	3	6	4	1
CC3(进入跟车状态的阈值)	-9	-6	-8	1
最大减速度/(m·s ⁻²)	-8	-2	-4	2

另外,采用“五点标定法”(即在累计频率 0~100%中取 5 个点位)对一般路段、隧道限速段、变速

车道的期望速度分布曲线进行仿真标定。需要标定的期望速度分布曲线为:主线设计速度 80 km·h⁻¹,逐级减速区 60、40 km·h⁻¹,单车道匝道设计速度 40 km·h⁻¹和隧道限速段 80 km·h⁻¹。取式(1)~(3)作为评价指标

$$P_{ij} = \left| \frac{T_{ej} - T_{sij}}{T_{ej}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$P_i = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 P_{ij} \quad (2)$$

$$P_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (3)$$

式中: T_{ej} 为现场实测速度; T_{sij} 为第 i 次试验下第 j 个断面的仿真平均值; P_{ij} 为实测速度与相应位置断面仿真平均速度的相对偏差^[16]; P_i 为同一次试验中 6 个位置相对偏差的平均值; P_j 为在 n 次试验下,同一位置(第 j 个位置)相对偏差的平均值。

为减少试验次数,提高效率,本文采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行试验,结果如表 3 所示。

表 3 相对偏差结果

Table 3 Relative Deviation Result

试验组号	相对偏差 $P_{ij}/\%$						相对偏差平均值 $P_i/\%$
	隧道出口	净距段中间点	渐变段起点	渐变段终点	减速车道中点	减速车道终点对应的主线位置	
1	2.58	5.70	2.17	1.55	10.12	7.59	4.95
2	6.03	7.24	11.06	5.71	4.82	3.61	6.41
3	11.48	11.27	11.48	10.88	0.83	0.62	7.76
4	8.46	10.16	11.04	13.54	6.82	5.12	9.19
5	6.81	8.17	13.62	6.45	5.01	3.76	7.30
6	9.59	7.30	7.30	12.10	10.58	10.58	9.57
7	8.75	10.51	9.51	8.29	10.69	8.77	9.42
8	0.97	1.17	1.95	0.92	3.58	2.69	1.88
9	12.26	10.29	12.26	11.61	0.66	0.50	7.93
10	2.14	2.57	4.28	2.03	9.62	7.22	4.64
11	7.98	9.57	15.95	7.56	7.69	5.77	9.09
12	9.05	10.86	11.19	8.57	1.27	0.96	6.98
13	12.48	8.99	4.99	12.42	10.87	9.65	9.90
14	8.23	14.42	6.86	13.74	9.43	7.07	9.96
15	9.92	11.91	14.84	9.40	5.80	4.35	9.37
16	2.53	3.04	5.06	2.40	9.24	6.93	4.86
相对偏差平均值 $P_j/\%$	7.45	8.32	8.97	7.95	6.69	5.32	

为选出驾驶行为参数和期望速度分布取值的最优组合,明确各参数取值对仿真结果的影响程度,本文引入 2 个变量^[17]: P_k 和 P_i 。 P_k 表示某一因素第 k 个水平下相对偏差平均值 P_i 的平均值,其值越小,则表明在该水平下仿真结果产生的相对偏差越小,结果如表 4 所示。

根据各参数的极差 R_i 可知各参数对仿真结果的主次关系为:期望速度分布>CC2(跟车变量)>最大减速度>CC1(车头时距)>CC3(进入跟车状态的阈值);根据同一因素的 P_k 可以选出对仿真结果产生较小相对偏差的水平数,进而根据该因素的水平数从表 4 中找到相应的参数取值。故本文各参

表 4 参数敏感性分析

Table 4 Parameter Sensitivity Analysis

	CC1	CC2	CC3	最大减速度	期望速度分布
$P_1/\%$	7.08	7.52	7.12	7.83	5.21
$P_2/\%$	7.04	7.65	7.52	6.82	7.16
$P_3/\%$	7.16	8.91	6.88	6.14	8.55
$P_4/\%$	8.52	5.73	8.29	9.02	8.88
极差 $R_i/\%$	1.48	3.18	1.41	2.87	3.67
主次因素	4	2	5	3	1
各参数最优取值	1	6	-7	-4	$A_1B_1C_1D_1$

数的最优取值:CC1 为 1 s,CC2 为 6 m,CC3 为 -7,最大减速度为 $-4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,期望速度分布为 $A_1B_1C_1D_1$ 。

2.2 试验方案设计

结合笔者所在课题组前期研究^[6]可知,净距长度、驶出比例、交通量及大型车比例对出口小净距路段的行车风险具有显著性影响,进而会影响分流车的变道位置。故本文考虑净距长度 L 、交通量 Q 、驶出比例 P 、大型车比例 H 这 4 个关键因素,并采用正交试验获取相关数据,以减少仿真试验次数。

2.3 数据获取

在隧道出口、净距段中间点、减速车道渐变段起点和终点、减速车道中点这 5 个位置所在断面由外至内侧车道依次布设数据采集器 1~13,见图 2。

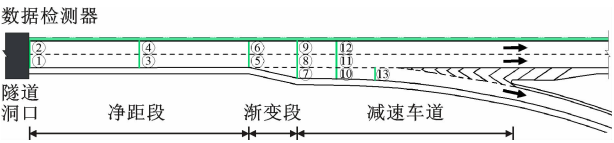


图 2 试验时的数据采集器位置

Fig. 2 Location of Data Collector During Test

本文采用车头驶入时刻来计算各数据采集器所在位置的车头时距,并将某一时刻下通过数据采集器的车辆记为车辆 A,根据文件获取并输出相关数据,再根据式(4)、(5)计算出车辆 A 通过数据采集器时的密度及周围车流的速度(图 3)。

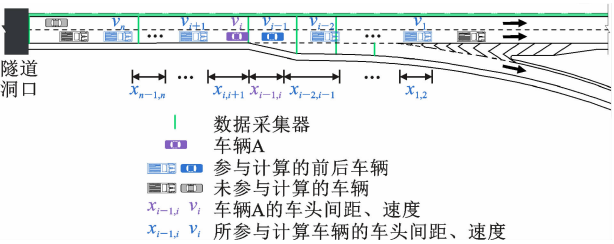


图 3 车流密度、速度计算示意

Fig. 3 Diagram of Traffic Density and Speed Calculation

$$k = 1\,000 \frac{n-1}{\sum_{i=1, j=i+1}^{n-1} x_{i,j}} + 1 \tag{4}$$

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \tag{5}$$

式中: k 为按照 n 辆车来计算的交通流密度; $x_{i,j}$ 为第 i 辆车与第 $i+1$ 辆车的车头间距; $\bar{v}$ 为这 n 辆车的平均车速; v_i 为第 i 辆车的车速。

3 模型构建与拟合

3.1 车头时距分布模型

对各车道路段的车头时距从小到大按 0.1 s 进行频率分布统计(图 4)。应用 Weibull 分布来拟合有效的车头时距,由于该模型是非线性的,本文利用 1stOpt 进行拟合^[18],并选取“Levenberg-Marquardt (LM)+通用全局优化算法(UGO)”进行迭代,从而标定出 16 组仿真试验下净距段外侧车道、变速段外侧车道和变速车道的参数。根据拟合的结果可知:车头时距的分布与净距长度、交通量、驶出比例、大型车比例有一定关系,不同的分布模型参数与仿真变量之间的相关性随着车道路段位置的不同而不同。进而采用典型相关性分析来研究两组变量之间的整体相关性^[19]:将高维的两组数据分别降维到一维,使降到一维后的两组数据相关系数最大,该最大相关系数即为相关性,该过程利用 SPSS 软件实现。最终得到净距段外侧车道、变速段外侧车道和变速车道的标准典型相关线性系数向量 i_1 和 i_2 ,结果如表 5 所示。

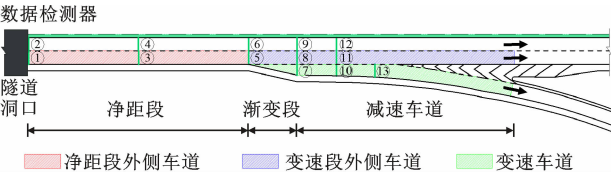


图 4 分路段分车道统计

Fig. 4 Statistics By Road Sections and Lanes

根据典型相关性分析可知,不同参数与仿真变量之间存在一定的量化关系,故本文采用 1stOpt 进行量化,自变量为净距长度 L 、交通量 Q 、驶出比例 P 、大型车比例 H ,因变量分别为分布模型参数 φ 、 γ 、 β 、 α ,见式(6)。各模型参数与仿真变量间采用四次多项式拟合,见式(7)

$$f = f(L, Q, P, H) \tag{6}$$

$$f = p_1 Q^4 + p_2 Q^3 + p_3 Q^2 + p_4 Q + p_5 L^4 + p_6 L^3 + p_7 L^2 + p_8 L + p_9 P^4 + p_{10} P^3 +$$

$$p_{11}P^2 + p_{12}P + p_{13}H^4 + p_{14}H^3 + p_{15}H^2 + p_{16}H + p_{17} \quad (7)$$

式中: f 分别为参数 $\varphi, \gamma, \beta, \alpha; p_i$ 为拟合系数。

表 5 各车道路段的标准典型相关线性系数

Table 5 Standard Canonical Correlation Linear Coefficient of Each Lane Section

线性系数 向量	变量	净距段外侧 车道	变速段外侧 车道	变速车道
i_1	φ	-0.563	0.214	-0.120
	γ	-0.327	0.573	-0.576
	β	0.885	-0.533	0.215
	α	-0.630	0.674	-0.943
i_2	净距长度	0.234	-0.515	0.422
	交通量	-0.872	0.622	-0.885
	驶出比例	-0.378	-0.465	-0.139
	大型车比例	-0.206	0.363	-0.138
2 组变量之间的相关性 R^2		0.961	0.935	0.913

注:非标准化前可以计算 2 组变量之间的相关性;由于组内变量间的量纲或尺度不一致,需采用标准化处理的系数来判别某一组变量对另一组变量的影响程度。

3.2 临界可插入间隙模型

根据文献[20]的研究可知,屏障效应的形成与交通流密度、车头时距有关,故本文首先将屏障效应对驾驶人换道行为的影响进行量化,再探讨临界可插入间隙与位置的关系。本文以第 6 组仿真试验结果为例,取车辆数 $n=5$ 来计算瞬时交通流密度。根据交通流三参数的基本关系式可以计算

$$q = \bar{v}k \quad (8)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{m} \sum q \quad (9)$$

式中: q 为该 n 辆车所占路段长度的平均交通量; m 为通过外侧车道和变速车道数据采集器断面的车辆次数; $\bar{q}$ 为平均交通量的平均值。

根据前文分析及文献[20]可知,道路是否产生屏障效应可根据车头时距、瞬时交通流密度来判别,因此,将每一个车头时距与对应的瞬时交通流密度当做二维数据,并划分成 2 个集合,可分别代表道路是否产生屏障效应。

采用 K 均值聚类算法对车头时距、瞬时交通流密度二维数据进行迭代聚类分析,先随机选取 2 个聚类数作为初始的聚类中心,然后把每个二维数据分配给距离它最近的聚类中心,得到 2 个聚类,每分配完一组样本数据,会根据聚类中现有的数据重新计算聚类中心,这个过程不断重复直到聚类中心几乎不再发生变化,最终将二维数据划分为 2 类。该过程利用 SPSS 软件实现。

根据图 5 结果可知:在低交通流密度下,较大和较小车头时距均有不同程度的分布;随着密度的增加,出现较小车头时距的频率增大;且各断面中的车头时距、瞬时交通流密度二维数据产生了明显的二元一次线性分界线,故按式(10)对各分界线上的点进行拟合,结果如表 6 所示。

$$t_k = ak + b \quad (10)$$

对同一车道而言,随着车辆不断接近出口最终可变速道位置, k_1 和 k_2 的值越来越小, k_1 和 k_2 分别代表图 5 中不同的交通流密度。对于 k_2 的值,尽管此时未达到临界交通流密度,但由于驾驶人迫切驶出的心理活动,车流密度对换道的影响更大。

对于目标车道路段,可将图 5(a)~(g)的瞬时交通流密度 k 分为 3 个阶段:

(1)当 $k \leq k_1 = \frac{\gamma - b}{a}$ 时,目标车道的车流不会对

更内侧车道分流车产生屏障效应。

(2)当 $k_1 < k < k_2$ 时,需要根据分界线方程判断目标车道屏障效应的产生: $t \geq ak + b$, 不产生; $t < ak + b$, 产生。

在该阶段内,目标车道屏障效应的产生与车头时距的大小有关,这是因为随着密度的增加,出现较小车头时距的频率增大,尽管仍出现部分较大车头时距,但是前后紧挨着更多的较小车头时距,形成车队,有换道需求的驾驶人更容易受较小车头时距的影响,随着密度的增加,驾驶人不受影响所要求的车头时距越来越大。

(3)当 $k \geq k_2$ 时,目标车道的车流对更内侧车道分流车产生屏障效应。

随着目标车道密度的增加,分流车越来越容易受到屏障效应的影响,为量化这种影响,本文采用屏障效应强度来衡量^[20],如图 6 所示,并按式(11)计算

$$\Delta_k = 1 - P(h_{t_k} \geq t_k) = 1 - \exp \left[-\varphi \left(\frac{t_k - \gamma}{\beta - \gamma} \right)^a \right] \quad (11)$$

根据表 6 的各分界线方程和式(11),可以计算不同瞬时交通流密度下各数据采集器断面的屏障效应强度,结果如表 7、图 7 所示。

图 7 中实线代表的数据采集器位置位于净距段和变速段外侧车道,虚线位于变速车道。根据该图可知:对于同一数据采集器位置,随着目标车道交通流密度的增大,目标车道的屏障效应强度越大,且增幅逐渐减小;而对于同一目标车道,随着未变道的分流车不断靠近出口,驾驶人认为车队开始形成时的

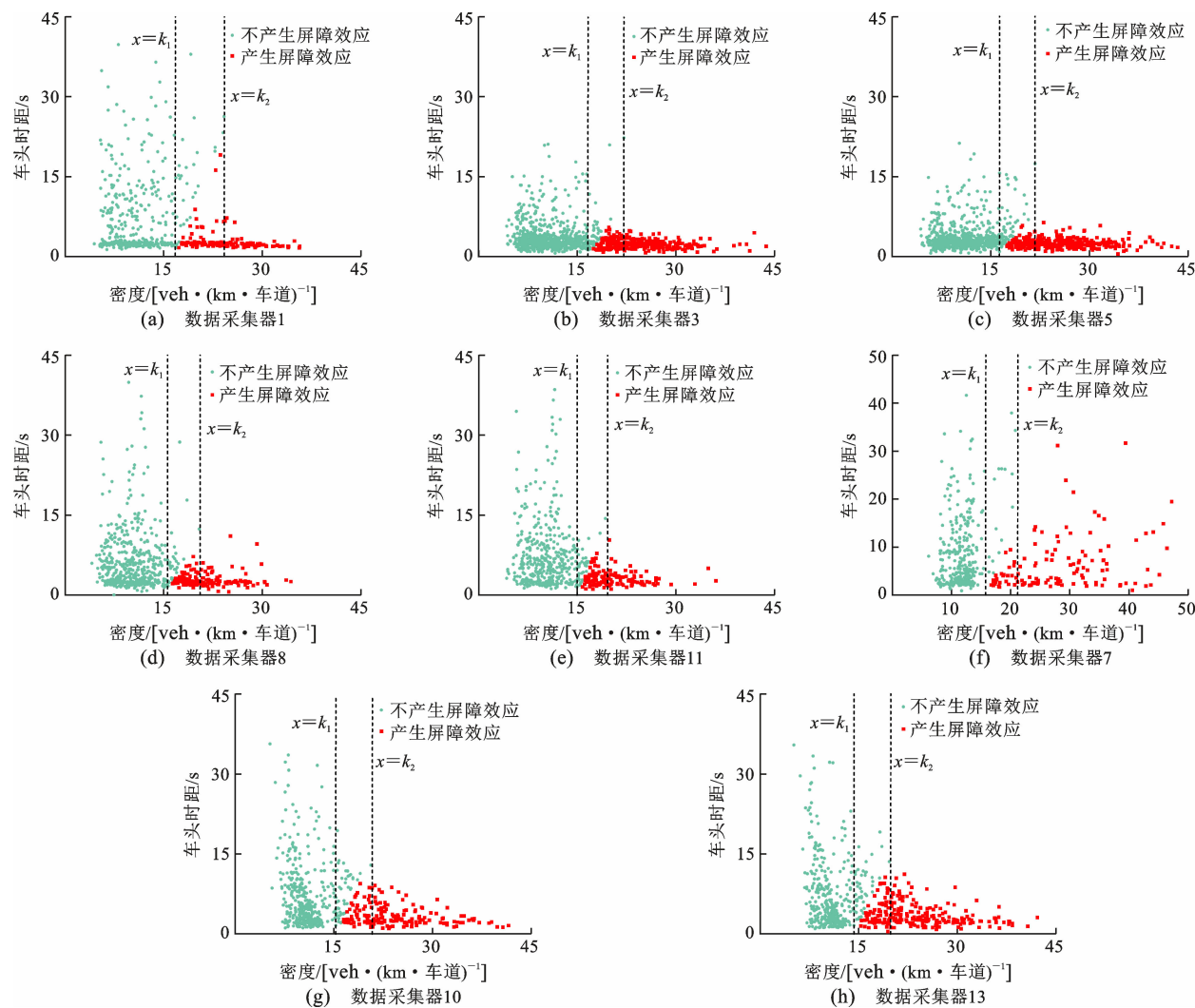


图 5 不同数据采集器断面的屏障效应识别结果

Fig. 5 Identification Results of Barrier Effect at Different Data Collector Sections

表 6 分界线方程拟合结果

Table 6 Fitting Results of Boundary Equation

路段位置	数据采集器编号	a	b	R^2	k_1	k_2
净距段外 侧车道	1	2.934	-49.350	0.985	17.314	24.3
	3	1.794	-29.856	0.993	17.448	22.1
	5	1.724	-28.103	0.991	17.140	21.7
变速段外 侧车道	8	2.643	-41.068	0.995	16.127	20.5
	11	2.988	-44.761	0.996	15.499	19.6
变速车道	7	2.711	-42.787	0.989	16.278	21.2
	10	2.559	-38.971	0.993	15.758	20.8
	13	2.632	-37.632	0.987	14.813	19.9

交通流密度呈变小的趋势。而目标车道的屏障效应强度越大,该车道上的较小车头时距占比就会越来越大,导致原车道驾驶人为变道驶出主线而会接受更小的临界可插入间隙。

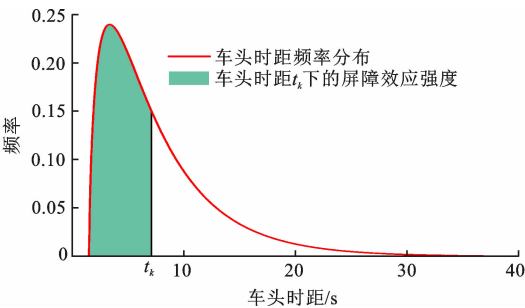


图 6 屏障效应强度示意

Fig. 6 Schematic Diagram of Barrier Effect Strength

$$t_{c-k} = \begin{cases} t_{c-\max} & \Delta_k = 0, k \leq k_1 \\ t_{c-\max} - (t_{c-\max} - t_{c-\min}) \Delta_k & 0 < \Delta_k < 1, k_1 < k < k_2 \\ t_{c-\min} & \Delta_k = 1, k \geq k_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: t_{c-k} 为目标车道交通流密度为 k 时,原车道驾驶人选取的临界可插入间隙; $t_{c-\max}$ 、 $t_{c-\min}$ 分别为驾驶人一般可接受的临界可插入间隙最大值和最小

表 7 不同交通流密度下的屏障效应强度值

Table 7 Intensity of Barrier Effect Under Different Traffic Flow Density

密度/ [veh · (km · 车道) ⁻¹]	不同数据采集器位置处的屏障效应强度							
	1	3	5	8	11	7	10	13
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0.147
16	0	0	0	0	0.371	0	0	0.503
17	0	0	0	0.482	0.675	0.382	0.508	0.680
18	0.654	0.463	0.570	0.704	0.817	0.619	0.680	0.786
19	0.877	0.742	0.779	0.821	0.892	0.752	0.783	0.853
20	0.949	0.861	0.876	0.888	1	0.833	0.850	1
21	0.977	0.921	0.927	1	1	0.885	1	1
22	0.989	0.953	1	1	1	1	1	1
23	0.995	1	1	1	1	1	1	1
24	0.997	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1

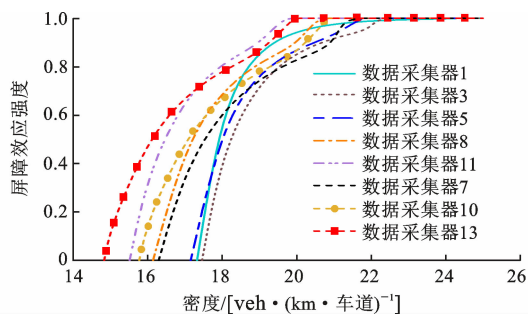


图 7 不同交通流密度下的屏障效应强度曲线

Fig. 7 Intensity Curves of Barrier Effect Under

Different Traffic Flow Density

值,根据相关研究^[21],最大值一般为 4~5 s,最小值为 2~3 s,本文取 $t_{c-max}=5$ s, $t_{c-min}=2$ s;各数据采集器所在车道位置的 k_1 和 k_2 的取值见表 6。

根据式(12)和表 7,可以计算不同车道位置、交通流密度下的临界可插入间隙,结果如表 8、图 8 所示。

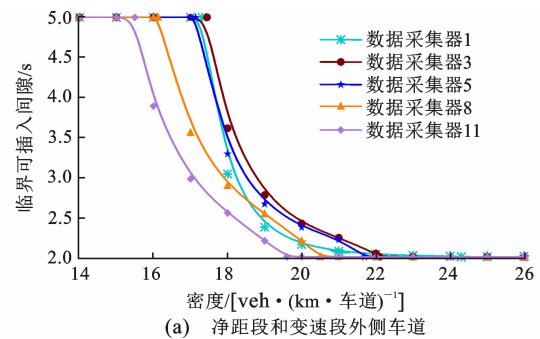
根据图 8 可知:对于同一数据采集器位置,随着目标车道交通流密度的增大,原车道驾驶人所选取的临界可插入间隙越小,且减幅逐渐减小;而对于同一目标车道,随着未变道的分流车不断靠近出口,驾驶人开始选择更小临界可插入间隙时的交通流密度呈变小的趋势。随着目标车道交通流密度的增加,越容易产生屏障效应,屏障效应强度越大,驾驶人会选择更小的临界可插入间隙。

根据图 8 的变化趋势,本文按照式(13)进行拟合,拟合结果如表 9 所示。

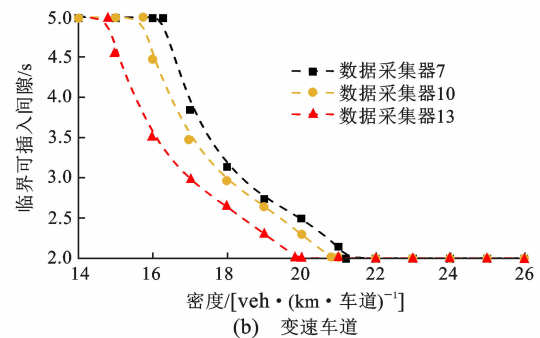
表 8 不同交通流密度下的临界可插入间隙

Table 8 Critical Insertable Gap Under Different Traffic Flow Densities

密度/ [veh · (km · 车道) ⁻¹]	不同数据采集器位置处的临界可插入间隙/s							
	1	3	5	8	11	7	10	13
14	5	5	5	5	5	5	5	5
15	5	5	5	5	5	5	5	4.56
16	5	5	5	5	3.89	5	4.48	3.49
17	5	5	5	3.56	2.98	3.85	3.48	2.96
18	3.04	3.61	3.29	2.89	2.55	3.14	2.96	2.64
19	2.37	2.77	2.66	2.54	2.20	2.75	2.65	2.30
20	2.15	2.42	2.37	2.20	2	2.50	2.30	2
21	2.07	2.24	2.22	2	2	2.15	2	2
22	2.03	2.04	2	2	2	2	2	2
23	2.02	2	2	2	2	2	2	2
24	2.01	2	2	2	2	2	2	2
25	2	2	2	2	2	2	2	2



(a) 净距段和变速段外侧车道



(b) 变速车道

图 8 不同交通流密度下的临界可插入间隙

Fig. 8 Critical Insertable Gap Under Different Traffic Flow Density

$$t_{c-k} = 2 + e^{(A_1 + A_2 k)} \quad 0 < \Delta_k < 1, k_1 < k < k_2 \quad (13)$$

由表 9 可知,各位置的相关系数平方和 R^2 均大于 0.98,拟合结果较好。按式(14)对各数据采集器所在的位置进行归一化处理(表 10),并采用多项式分别对 A_1 、 A_2 与归一化后的车辆位置进行拟合(表 11)。

$$s_1 = \frac{x}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (14)$$

表 9 临界可插入间隙与交通流密度间的拟合结果

Table 9 Results of Fitting Between Critical Intercalable Gap and Traffic Flow Density

路段位置	数据采集器编号	A_1	A_2	R^2
净距段外侧车道	1	25.752	-1.424	0.995
	3	16.532	-0.886	0.987
	5	15.470	-0.839	0.988
变速段外侧车道	8	12.862	-0.724	0.985
	11	12.666	-0.748	0.992
变速车道	7	10.199	-0.560	0.985
	10	9.419	-0.530	0.988
	13	9.074	-0.540	0.989

表 10 车辆实际位置归一化结果

Table 10 Results of Vehicle Actual Location Normalization

路段位置	数据采集器编号	实际位置/m	归一化后的位置	A_1	A_2
外侧车道	1	0	0	25.752	-1.424
	3	50	0.172	16.532	-0.886
	5	100	0.345	15.470	-0.839
	8	180	0.621	12.862	-0.724
	11	235	0.810	12.666	-0.748
变速车道	7	80	0.421	10.199	-0.560
	10	135	0.711	9.419	-0.530
	13	162.5	0.855	9.074	-0.540

表 11 系数 A_1 、 A_2 与归一化后车辆位置的拟合结果

Table 11 Fitting Results of Coefficients A_1 、 A_2 and Vehicle Position After Normalization

路段位置	系数	B_0	B_1	B_2	B_3	R^2
外侧车道	A_1	25.450	-62.634	110.162	-64.960	0.894
	A_2	-1.406	3.689	-6.678	3.884	0.871
变速车道	A_1	11.549	-3.506	0.716		1
	A_2	-0.727	0.568	-0.409		1

表 12 车流平均速度拟合结果

Table 12 Fitting Results of Average Velocity of Traffic Flow

位置	拟合结果	R^2
净距段外侧车道	$f = \frac{1.223}{10^6} \left(\frac{v+91.655}{1.94+91.655} \right)^{22.115} \exp \left[-\frac{4.954}{10^6} \left(\frac{v+91.655}{1.94+91.655} \right)^{23.115} \right]$	0.999
变速段外侧车道	$f = 3.025 \left(\frac{v+41.164}{96.205+41.164} \right)^{14.585} \exp \left[-26.665 \left(\frac{v+41.164}{96.205+41.164} \right)^{15.585} \right]$	0.999
变速车道	$f = \frac{1}{4.068 \sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(v-43.63)^2}{2 \times 4.068^2} \right]}$	0.999
隧道洞口内侧车道	$f = \frac{6.690}{10^6} \left(\frac{v+72.872}{12.223+72.872} \right)^{22.13} \exp \left[-\frac{26.02}{10^6} \left(\frac{v+72.872}{12.223+72.872} \right)^{23.13} \right]$	0.998
隧道洞口外侧车道	$f = 0.009 \left(\frac{v-10.724}{41.443-10.724} \right)^{4.879} \exp \left[-0.049 \left(\frac{v-10.724}{41.443-10.724} \right)^{5.879} \right]$	0.999

$$s_2 = \frac{x-l_1}{l_2+l_3} \tag{15}$$

式中： x 分别为车辆距离隧道洞口的纵向距离； s_1 、 s_2 分别为外侧车道和变速车道的归一化位置； l_1 、 l_2 、 l_3 分别为净距段、渐变段、减速车道的长度。

按式(16)计算出相应的归一化位置，再按式(17)、(18)计算该模型的临界可插入间隙

$$s_2 = \begin{cases} 0.421 \frac{x-l_1}{l_2} & l_1 \leq x < l_1+l_2 \\ 0.421 + (1-0.421) \frac{x-l_1-l_2}{l_3} & l_1+l_2 \leq x \leq l_1+l_2+l_3 \end{cases} \tag{16}$$

$$t_{c-(k,x)} = \begin{cases} 5 & \Delta_k=0, k \leq \frac{\ln(3)-A_1}{A_2} \\ 2+e^{(A_1+A_2k)} & 0 < \Delta_k < 1, \frac{\ln(3)-A_1}{A_2} < k < \frac{\ln(0.01)-A_1}{A_2} \\ 2 & \Delta_k=1, k \geq \frac{\ln(0.01)-A_1}{A_2} \end{cases} \tag{17}$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \begin{cases} 25.45-62.634s_1+110.162s_1^2-64.96s_1^3 \\ \text{目标车道为外侧车道} \\ 11.549-3.506s_2+0.716s_2^2 \\ \text{目标车道为变速车道} \end{cases} \\ A_2 &= \begin{cases} -1.406+3.689s_1-6.678s_1^2+3.884s_1^3 \\ \text{目标车道为外侧车道} \\ -0.727+0.568s_2-0.409s_2^2 \\ \text{目标车道为变速车道} \end{cases} \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

3.3 速度分布模型

根据文献[22]的研究可知，出口小净距路段的速度分布服从 Weibull 分布，故本文对净距段外侧车道、变速段外侧车道和隧道洞口内外车道采用修正的 Weibull 分布拟合。结果如表 12 所示。

结果表明,各位置的拟合判定系数 R^2 均大于 0.998,拟合效果较好。

3.4 速度与密度模型

本文按 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的区段对速度进行划分,然后采用 K 均值聚类算法对同一区段的速度、瞬时交通流密度二维数据进行迭代聚类分析,得到 2 个聚类中心:同一区段速度下,高密度的聚类中心为 (v_a, k_a) 、低密度的聚类中心为 (v_b, k_b) ,最后

将各聚类出现的次数除以该区段下所有的二维数据点个数,分别得到该速度区段下各聚类中心出现的概率 $P(k_a)$ 和 $P(k_b)$ 。分别对聚类中心 1 (v_a, k_a) 和聚类中心 2 (v_b, k_b) 进行多项式拟合,得到对应的速度与密度函数关系。将 $P(k_a)$ 作为某一速度下出现密度 k_a 的概率;对速度 v_a (聚类 1) 和概率 $P(k_a)$ 进行多项式拟合,结果如表 13、14 所示。

表 13 各聚类中心速度与密度的拟合结果

Table 13 Fitting Results of Velocity and Density of Each Cluster Center

路段位置	聚类	速度	密度	C_0	C_1	C_2	C_3	R^2
净距段外侧 车道	1	v_a	k_a	33.913	0.035	-0.003		0.963
	2	v_b	k_b	32.029	-0.630	0.004		0.891
变速段外侧 车道	1	v_a	k_a	52.873	-0.639	0.003		0.952
	2	v_b	k_b	108.313	-3.814	0.049	-2.107×10^{-4}	0.978
变速车道	1	v_a	k_a	60.371	-1.178	0.009		0.949
	2	v_b	k_b	52.567	-1.927	0.023		0.912

表 14 同一速度 v 下不同密度出现概率的拟合结果

Table 14 Fitting Results of Occurrence Probabilities of Different Densities at the Same Velocity

路段位置	聚类	密度出现概率	D_0	D_1	D_2	D_3	R^2
净距段外侧 车道	1	$P(k_a)$	-0.180 43	0.073 76	-0.001 73	$1.103 30 \times 10^{-5}$	0.940
	2	$P(k_b)$	$1 - P(k_a)$				
变速段外侧 车道	1	$P(k_a)$	-2.595 89	0.177 15	-0.003 11	$1.662 07 \times 10^{-5}$	0.762
	2	$P(k_b)$	$1 - P(k_a)$				
变速车道	1	$P(k_a)$	2.675 54	-0.122 59	0.001 53		0.983
	2	$P(k_b)$	$1 - P(k_a)$				

故根据表 13 的函数关系,可以计算某一速度 v 下,可能会出现的 2 个密度值 k_a 和 k_b ,然后根据表 14 计算相应的出现概率 $P(k_a)$ 和 $P(k_b)$,以便后续计算换道概率需要。

4 基于可靠度的车辆换道驶出研究

4.1 模型构建

将车辆在等待长度距离 z 后可安全变道的可靠度极限状态数学模型设为

$$g(x_1, x_2, \dots, x_i) = g[P(z), P_T] = P(z) - P_T \quad (19)$$

式中: $P(z)$ 为安全换道概率; P_T 为目标换道概率; g 为车辆等待某一长度距离 z 后可安全、成功变道的可靠性功能函数; $g=0$ 表示失效面; x_i 为满足安全或目标换道概率的变量。

在考虑出口小净距路段的车辆行驶过程时,默认驾驶人在隧道内或进入隧道前完成了标志认读,故第 1 次开始换道只需考虑明适应距离、等待可插

入间隙所需距离、变道距离(图 9)。明适应时间 t 可根据文献[23]关于 YF 高速的研究来取值;隧道限速 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下的 t 最大值可按 1.2 s 考虑

$$S_1 = \frac{1.2v_1}{3.6} = \frac{v_1}{3} \quad (20)$$

假设车辆在 $x=S_1+l$ 处安全换道概率为 $P(l)$ ($0 \leq l \leq l_1 + l_2 + l_3 - S_1$)。出口小净距路段的车头时距服从 Weibull 分布,故车辆在 $x=S_1+l$ 处有大于临界可插入间隙的概率为

$$P(h_t \geq t_{c-(k, S_1+l)}) = \exp \left[-\varphi \left(\frac{t_{c-(k, S_1+l)} - \gamma}{\beta - \gamma} \right)^\alpha \right] \quad (21)$$

应用微分法^[24],构建车辆在 $x=S_1+l+\Delta l$ 处的安全换道概率 $P(l+\Delta l)$

$$P(l+\Delta l) = P(l) + [1 - P(l)] \cdot$$

$$P(h_t \geq t_{c-(k, S_1+l)}) \Delta t \quad (22)$$

Δt 时间内该车辆的速度、目标车道的间隙和临界可插入间隙均保持不变,因此,式(22)可改为

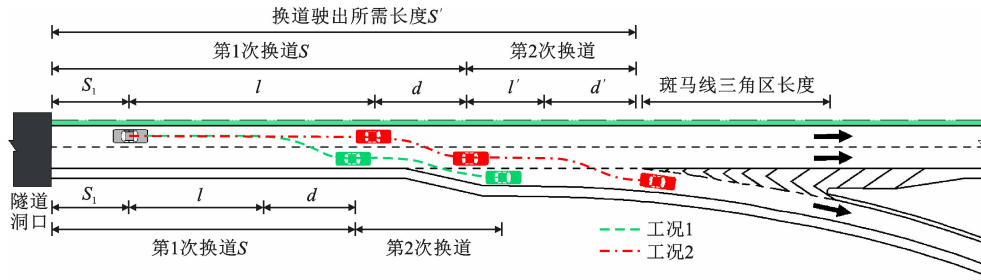


图9 分流车在内侧车道的驶出轨迹示意

Fig. 9 Diagram of Diverter Car's Exit Track in the Inside Lane

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{P(l+\Delta l) - P(l)}{\Delta l} + P(l) \frac{P(h_t \geq t_{c-(k, S_1+l)})}{v_l} = \frac{P(h_t \geq t_{c-(k, S_1+l)})}{v_l} \quad (23)$$

令 $Q(l) = \frac{P(h_t \geq t_{c-(k, S_1+l)})}{v_{S_1+l}}$, 则有一阶非齐次线性

微分方程, 对其求得通解

$$P(l) = 1 - e^{-\overline{Q(l)}l} \quad (24)$$

对 $\overline{Q(l)}$ 应用积分中值定理, 当 Δl 足够小时, 可按式(25)计算

$$\begin{aligned} P(l) &\approx 1 - \exp \left[- \sum_{i=0}^{n-1} \int_{i\Delta l}^{(i+1)\Delta l} \frac{1}{v_{S_1+y}} e^{-\varphi \left(\frac{t_{c-(k, S_1+y)} - \gamma}{\beta - \gamma} \right)^a} dy \right] \approx \\ &1 - \exp \left[- \sum_{i=0}^{n-1} \int_{i\Delta l}^{(i+1)\Delta l} \frac{1}{v_{S_1+i\Delta l}} e^{-\varphi \left(\frac{t_{c-(k, S_1+i\Delta l)} - \gamma}{\beta - \gamma} \right)^a} dy \right] = \\ &1 - \exp \left[- \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\Delta l}{v_{S_1+i\Delta l}} e^{-\varphi \left(\frac{t_{c-(k, S_1+i\Delta l)} - \gamma}{\beta - \gamma} \right)^a} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

当车辆位于原车道时, 可利用速度分布模型确定车辆速度和目标车道速度, 然后根据速度与密度模型确定目标车道在该位置附近的瞬时交通流密度, 进而计算目标车道的临界可插入间隙并确定相应位置的车头时距模型参数。依次确定 $i=0, 1, \dots, n-1$ 时的参数, 代入式(25)中计算得到车辆在 $x=S_1+l$ 处第1次安全换道概率 $P(l)$ 。若车辆在 $x=S_1+l$ 处可成功变道, 根据文献[25]的研究, 此时变道的横移速度按 $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 考虑, 纵向速度保持不变, 则一次变道的纵向位移 d

$$d = \frac{3.75}{3.6} v_{S_1+l} = 1.042 v_{S_1+l} \quad (26)$$

隧道洞口至最终可变道位置的距离 S 最小应满足

$$S = S_1 + l + d \quad (27)$$

4.2 模型求解

结构的失效概率 P_f 可以写为

$$P_f = P(g < 0) = \iint_{P(z) < P_T} f_{P(z)} f_{P_T} dP(z) dP_T \quad (28)$$

式中: $f_{P(z)}$ 、 $f_{P(T)}$ 分别为安全换道概率 $P(z)$ 和目标

换道概率 P_T 的概率密度函数。

工程上常采用蒙特卡罗抽样仿真法等近似计算方法^[26]来估算失效概率 P_f 。

5 基于蒙特卡罗仿真法的安全换道概率模型求解

5.1 仿真方案设计

本文渐变段长度 l_2 、减速车道长度 l_3 均按规范值取, 分别为 80、110 m。根据文献[27]的研究可知, 主线设计速度 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、单车道匝道出口的斑马线三角区长度为 46 m, 故仿真时实际的 $l_3 = 64 \text{ m}$ 。本文固定驶出比例为 20% 的工况进行研究, 寻找间隙的过程按最大减速度 $a = 4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-2}$ 考虑。通过 MATLAB 软件编程, 可以抽样模拟计算不同交通量 Q 、大型车比例 H 、净距长度 L 下车辆成功驶出主线的概率。

5.2 仿真结果分析

输入交通量 Q 为 $1\,000 \sim 2\,200 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$, 大型车比例 H 为 $10\% \sim 30\%$, 分别按 $\Delta Q = 200 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\Delta H = 5\%$ 的间隔进行赋值, 得到不同交通量 Q 、大型车比例 H 、净距长度 L 下主线分流车的换道驶出成功率。

根据图 10 对小净距路段内侧车道分流车的换道驶出成功率 P 进行分析:

(1) 对于同一大型车比例、交通量, P 随着净距长度的增大而增大。

(2) 同一交通量下, 大型车比例越小, P 呈变大的趋势, 这是因为外侧车道的大型车数量越少, 满足内侧车道分流车的换道机会越容易出现。

(3) 交通量较小或较大时, 大型车比例对 P 影响的波动性较小, 当交通量在 $1\,600 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 附近时, 车流速度容易发生波动, 导致车辆间距波动较大, 进而影响了 P 。

(4) 当交通量较小时, 外侧车道的大型车相对

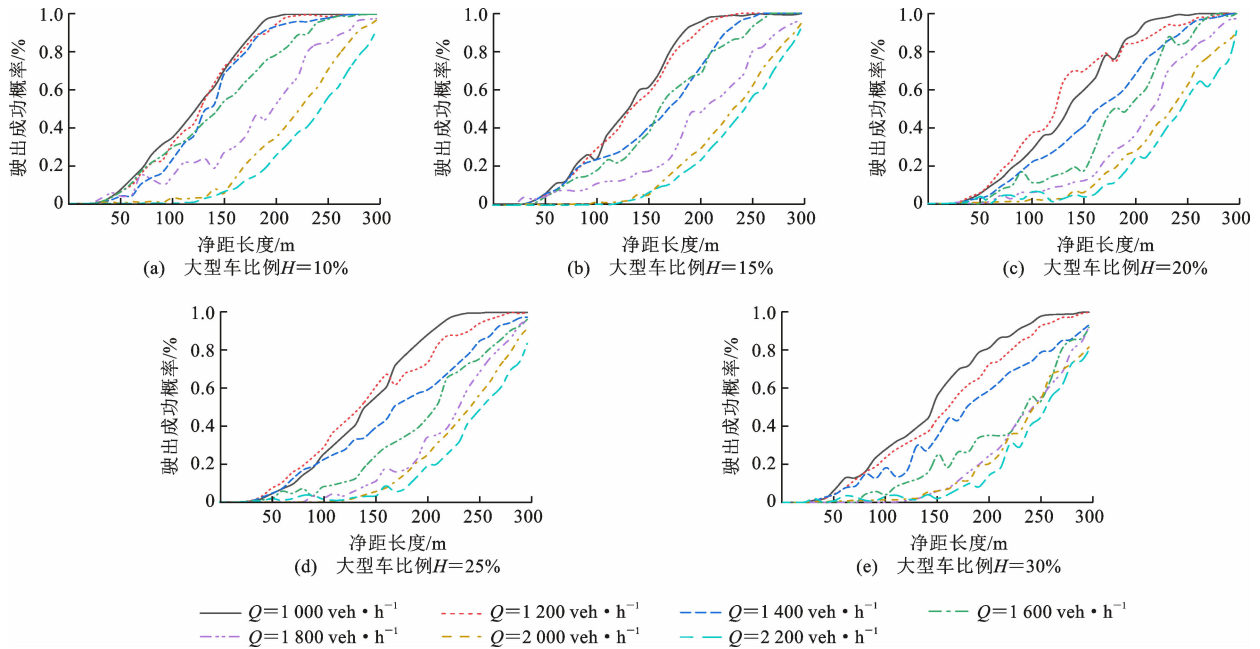


图 10 蒙特卡罗仿真结果
Fig. 10 Monte Carlo Simulation Results

较小,内外侧车道的车辆也相对容易协调,内侧车道分流车有更多的换道机会,故在净距长度较小时 P 增大较快;随着净距长度的增大,换道机会几率增加有限, P 增大速度逐渐减缓。随着交通量的增大,外侧车道的大型车数量也在增大,其车道整体呈现为密度变大,因而,内侧车道需要更长的净距长度来寻找换道机会,故净距长度较小时 P 增大相对缓慢;净距长度达到一定值时,足够让内外侧车道的车辆相互调整位置和车速,故 P 快速增大。

5.3 净距长度推荐值

为明确净距长度的取值,本文将基于可靠度对不同交通量、大型车比例下的出口路段净距长度建议值作进一步研究。可靠度分别按 90%、95% 考虑,即出口小净距路段分流车安全换道驶出所需要满足的概率,从而根据图 10 的蒙特卡罗仿真结果确定内侧车道的净距长度推荐值(以 10 m 为单位)。

对于设计速度 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、单向双车道高速公路(出口处斑马线三角区长度为 46 m),分流车的初始位置在内侧车道时的净距长度推荐值,见表 15~16。

6 实例应用

6.1 依托工程

选取 YK 高速和 XH 高速为例,根据实地调研的视频数据,对本文得到的车辆换道概率模型进行验证。先统计视频中内侧车道分流车成功行驶至减

表 15 目标可靠度为 90% 的净距长度推荐值

Table 15 Target Reliability is 90% of Recommended Net Distance Length		不同交通量(veh · h ⁻¹)下的净距长度推荐值/m					
大型车比例/%		1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
10		180	190	190	230	270	280
15		190	200	230	250	280	290
20		200	220	250	260	280	300
25		210	240	270	280	290	300
30		230	250	290	300	300	—

表 16 目标可靠度为 95% 的净距长度推荐值

Table 16 Target Reliability is 95% of the Recommended Net Distance Length		不同交通量(veh · h ⁻¹)下的净距长度推荐值/m					
大型车比例/%		1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
10		190	200	210	240	280	300
15		200	210	240	260	290	—
20		210	250	260	270	290	—
25		220	260	290	300	300	—
30		250	260	—	—	—	—

注:“—”表示 300 m 的净距长度较难满足该工况下的目标换道驶出成功率(即目标可靠度)。

速车道时距隧道洞口的纵向距离,然后采用本文第 5 节算法仿真得到内侧车道分流车成功驶出时的位置,将两者的位置分布状况进行对比,以验证模型的可行性。

YK 高速和 XH 高速均均采用双向 4 车道的设计标准,设计速度均为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,出口匝道设计

速度均为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,路基宽度均为 24.5 m ,且存在多处出口小净距路段。本研究选取 LD 互通和 QL 隧道出口小净距路段作为验证对象(表 17)。

表 17 实例相关设计参数

Table 17 Example Related Design Parameters

编号	公路	隧道	互通/ 服务区	净距段长度 L/m	渐变段长度 l_2/m	减速车道长度 l_3/m
1	YK 高速	ELS 隧道	LD 互通	10	80	110
2	XH 高速	QL 隧道	QL 服务区	40	80	110

在验证前,需要对 LD 互通和 QL 隧道出口小净距路段先进行数据处理:①交通量,LD 互通和 QL 隧道出口小净距路段交通量分别为 $1\,263$ 、 $677 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$,大型车比例分别为 24.5% 、 41.9% ;②换道位置,内侧车道分流车成功行驶至减速车道时距隧道洞口的纵向距离;③内侧车道分流车在隧道洞口的速度,该位置的速度基本集中在 $50 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

6.2 模型验证

基于本文第 4.3 节仿真算法,将隧道洞口的车速分布分别调整为 LD 互通与 QL 隧道出口小净距路段的分布状况,净距长度 L 不再按 ΔL 的间隔进行赋值,直接输入相应实例的净距长度,输出驶出成功车辆刚进入减速车道的位置,即:①车辆第 1 次换道后仍位于净距段,输出位置为减速车道起点;②第 1 次换道后为变速段,且第 2 次换道成功至减速车道,输出位置为此时车辆在减速车道的位置。

通过对算法的调整,可以输出得到换道驶出成功车辆刚进入减速车道的位置,将该结果与实测数据进行对比分析。

通过图 11 对内侧车道分流车进入减速车道时的位置进行分析可得:仿真位置的累计频率曲线能在一定程度上反映实测位置的分布情况,表明本文的模型及算法能较为准确地反映出车辆在小净距路段保持正常行驶行为时的换道驶出过程,也从侧面验证了本研究换道概率模型及算法具有一定的准确性,可供设计人员从车辆正常驾驶行为的角度考虑不同交通量、大型车比例下的净距长度,减少强制换道行为,同时更好地对小净距路段采取相应的措施。

7 结 语

(1)本文以出口小净距路段为研究对象,利用交通仿真技术,从定性和定量的角度探究其车头时距、临界可插入间隙、速度、密度等交通参数的分布规律、特性,进而构建出适合于出口小净距路段驾驶特性的安全换道概率模型,并研究不同交通流状况组

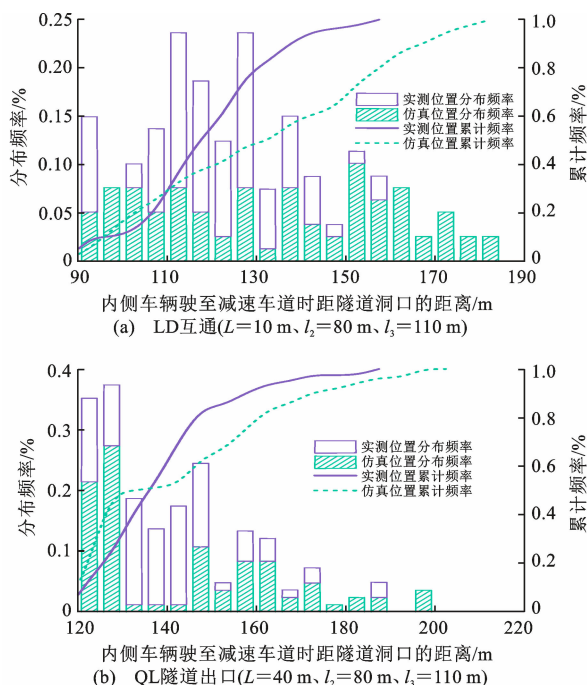


图 11 实测位置与仿真位置对比

Fig. 11 Comparison Between Measured

Position and Simulated Position

合下的净距长度,分别得到了不同交通量、大型车比例、净距长度下的换道驶出成功率。经分析,发现交通量、大型车比例、净距长度对净距路段内侧车道车辆换道驶出成功率有显著性影响。

(2)根据目标换道驶出成功率给出的不同交通量、大型车比例、可靠度下的净距长度推荐值,对净距长度进行分析,发现随着净距长度的增加以及大型车比例和交通量的减小,净距路段内侧车辆换道驶出成功率 P 增大,且当交通量在 $1\,600 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 附近时, P 波动性较大;当交通量较小时,内侧车道车辆有更多的换道机会,故在净距长度较小时 P 增大较快,随着净距长度的增大,换道机会几率增加有限, P 增大速度逐渐减缓;随着交通量的增大,外侧车道密度变大,内侧车道需要更长的净距长度来寻找换道机会,故净距长度较小时 P 增大相对缓慢。

(3)以 2 处出口小净距路段为实例,通过本研究的模型仿真得到内侧车辆成功行驶至减速车道时的位置分布,并与实测位置分布状况进行对比,从侧面验证了本研究模型的可行性,为规范的进一步完善提供了参考。

(4)本文主要通过仿真软件来研究出口小净距路段的交通特性,未考虑复杂天气、道路环境等的影响。下一阶段,应对这些因素进行考虑,以获得更为普适的结论。

参考文献:

References:

- [1] 徐洪涛. 基于速度一致性的高速公路分流区安全服务水平研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
XU Hong-tao. Research on safety service level of expressway diversion area based on speed consistency [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [2] 李 越. 公路隧道进出口过渡段安全技术措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
LI Yue. Study on safety technical measures for the transition section at the entrance and exit of highway tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [3] SARHAN M, HASSAN Y, HALIM A O A E. Safety performance of freeway sections and relation to length of speed-change lanes [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35 (5): 531-541.
- [4] HE J Q, ZHAO Y F, LIU C, et al. Study on safe distance between tunnel exit and interchange exit in expressway [C] // WANG H Z, WEI H, ZHANG L, et al. CICTP 2020: Advanced Transportation Technologies and Development-enhancing Connections. Reston: ASCE, 2020: 1366-1377.
- [5] 王云泽, 潘兵宏, 邵 阳. 互通式立交分流选择行为概率模型研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(12): 104-109.
WANG Yun-ze, PAN Bing-hong, SHAO Yang. Study on the probability model of interchange diversion behavior [J]. Highway Transportation Technology, 2014, 31 (12): 104-109.
- [6] 张 驰, 王 博, 杨 坤, 等. 高速公路隧道与互通出入口小净距路段行车风险评价方法[J/OL]. 安全与环境学报, 1-12 [2022-09-20]. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1925.
ZHANG Chi, WANG Bo, YANG Kun, et al. Evaluation method of driving risk in small clear distance sections of highway tunnels and interchanges [J]. Journal of Safety and Environment, 1-12 [2022-09-20]. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2021.1925.
- [7] MUSUNURU A, PORTER R J. Reliability-based geometric design approach for selecting basic number of freeway lanes [J]. Transportation Research Record, 2014 (2436): 70-80.
- [8] GORE N A, PULUGURTHA S S, ARKATKAR S S, et al. Congestion index and reliability-based freeway level of service [J]. Journal of Transportation Engineering Part A Systems, 2021, 147 (6): 0000531.
- [9] 肖雪梅, 贾利民. 城市轨道交通路网连通可靠度评估模型[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 132-137.
XIAO Xue-mei, JIA Li-min. Reliability evaluation model of urban rail transit network connectivity [J]. China Railway Science, 2016, 37 (1): 132-137.
- [10] 徐文文. 基于 GPS 轨迹的公交优先信号控制优化模型[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
XU Wen-wen. Optimization model of bus priority signal control based on gps trajectory [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [11] 朱兴琳. 基于可靠度理论的公路路线设计[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(4): 46-50.
ZHU Xing-lin. Highway route design based on reliability theory [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30 (4): 46-50.
- [12] 张 航, 涂智佳, 田 晟, 等. 山区高速公路爬坡车道长度可靠性设计[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(3): 1-7.
ZHANG Hang, TU Zhi-jia, TIAN Sheng, et al. Reliability design of climbing lane length of mountainous expressway [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Traffic Science and Engineering Edition), 2022, 46 (3): 1-7.
- [13] 王 路, 程建川. 基于可靠度的高速公路准临界坡长[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 181-187.
WANG Lu, CHENG Jian-chuan. Quasi critical slope length of expressway based on reliability [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48 (1): 181-187.
- [14] 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, 20(1): 114-117.
LI Wen-quan, WANG Wei, ZHOU Rong-gui. Characteristics of headway distribution of 1 lane in the merging area of expressway [J]. Highway Transportation Technology, 2003, 20 (1): 114-117.
- [15] 李 桑. 基于交通冲突的高速公路互通立交交通安全分析方法[D]. 南京: 东南大学, 2017.
LI Shen. Traffic safety analysis method of expressway interchange based on traffic conflict [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [16] 孙 剑. 微观交通仿真分析指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2014.
SUN Jian. Guide to microscopic traffic simulation analysis [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014.
- [17] 曹梦迪. 高速公路施工区交通冲突预测及安全评价应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
CAO Meng-di. Application of traffic conflict prediction and safety evaluation in expressway construction area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [18] 张 驰, 胡 涛, 侯宇迪, 等. 基于制动鼓温升的连续下坡货车事故风险评价模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 19-29.
ZHANG Chi, HU Tao, HOU Yu-di, et al. Crash risk evaluation model based on brake heating for trucks under continuous downhill road conditions [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48 (11): 19-29.
- [19] 徐世宇, 解家安, 刘美娟, 等. 青海省旅游景区公路时间可达性空间特征及相关性分析[J]. 公路, 2022, 67(6): 222-228.
XU Shi-yu, XIE Jia-an, LIU Mei-juan, et al. Spatial characteristics and correlation analysis of highway time accessibility in Qinghai tourist attractions [J]. Highway, 2022, 67 (6):

- 222-228.
- [20] 韩雪艳. 多车道高速公路客货分离设置技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- HAN Xue-yan. Research on the setting technology of passenger and freight separation in multi lane expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [21] POLUS A, LAZAR S S, LIVNEH M. Critical gap as a function of waiting time in determining roundabout capacity [J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129 (5): 504-509.
- [22] 郑 伟. 基于运行速度的隧道出入口与主线出入口净距控制及设计对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- ZHENG Wei. Research on clear distance control and design countermeasures between tunnel entrance and main line entrance based on running speed [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [23] 安 欣, 孙 毅, 李 涛, 等. 高速公路隧道出口与互通出口最小净距研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(9): 132-140.
- AN Xin, SUN Yi, LI Tao, et al. Study on the minimum clear distance between expressway tunnel exit and interchange exit [J]. Highway Transportation Technology, 2021, 38 (9): 132-140.
- [24] 刘伟铭, 邓如丰, 张 阳, 等. 高速公路出匝分流区超车车道车辆车道变换模型[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 106-111.
- LIU Wei-ming, DENG Ru-feng, ZHANG Yang, et al. Lane change model of overtaking vehicles in the off ramp diversion area [J]. Highway Transportation Technology, 2012, 29 (8): 106-111.
- [25] 潘兵宏, 王 烨. 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, 41(4): 419-425.
- PAN Bing-hong, WANG Ye. Lane changing trajectory model of passenger car based on hyperbolic tangent function [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41 (4): 419-425.
- [26] 王 路. 道路线形设计指标选用及安全评价研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- WANG Lu. Study on selection of road alignment design index and safety evaluation [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [27] 陈 瑾. 高速公路互通式立交出口和入口设置相关技术指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- CHEN Jin. Study on relevant technical indicators of expressway interchange exit and entrance setting [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.