高速公路双车道出口辅助车道长度可靠性设计

张 航[1],孙 煜[1],马宝林[1],牛世豪[1],王星月[1],吕能超[2]

(1.武汉理工大学 交通与物流工程学院,武汉 430063;2.武汉理工大学 智能交通系统研究中心,武汉 430063)

摘 要:为探究高速公路双车道出口辅助车道的合理长度,分析车辆的运行状态,推导了辅助车道段车辆换道的最大距离计算公式;引入可靠度理论,建立了辅助车道长度的功能函数,分析了不同辅助车道长度同辅助车道可靠性之间的关系,并计算得出了不同设计速度下辅助车道长度的推荐值;最后,通过VISSIM仿真分析了推荐值的合理性。结果表明:辅助车道长度与辅助车道可靠概率呈正相关关系;在不同仿真场景中,仿真路段取推荐值相较于规范值具有良好的交通流畅性,且不会造成材料的浪费。研究成果可为规范的进一步完善提供参考。

关键词:道路工程;可靠度理论;辅助车道;高速公路;VISSIM仿真;交通安全

中图分类号:U412.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2025)08-2611-08

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231226

Reliability-based design of length for auxiliary lane at dual-lane highway exits

ZHANG Hang[1],SUN Yu[1],MA Bao-lin[1],NIU Shi-hao[1],WANG Xing-yue[1],LYU Neng-chao[2]

(1. *School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430063, *China*; 2. *Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430063, *China*)

Abstract: To explore the reasonable length of the auxiliary lane at the exit of the two-lane highway, the operating status of vehicles was analyzed, the maximum distance formula for vehicle lane change in the auxiliary lane segment was derived; by introducing reliability theory, a functional function of the length of the auxiliary lane was established, and the relationship between the length of the auxiliary lane and the reliability of the auxiliary lane was analyzed, the recommended values of the length of the auxiliary lane under different design speeds were calculated; finally, the rationality of the recommended values was analyzed through VISSIM simulation in this paper. The results show that the length of the auxiliary lane is positively correlated with the reliability probability of the auxiliary lane. In different simulation scenarios, the recommended value of the simulation section has good traffic flow compared to the standard value, and will not cause material waste. The research results can provide reference for further improvement of the regulations.

Key words: highway engineering; reliability theory; auxiliary lane; dual-lane highway; VISSIM simulation; traffic safety

---

收稿日期:2023-11-08.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52072290);湖北省重点研发计划项目(2022BAD142).

作者简介:张航(1967-),男,副教授,博士.研究方向:道路规划与设计,路线设计理论与方法,道路交通安全设计与评价.E-mail:zhanghang1999@sina.com

0 引 言

高速公路出口区属于事故多发区,根据统计,超过40%的高速公路事故发生于高速互通分流区域内,其中事故类型多为追尾和变道[1]。在分流区出口前设置辅助车道可有效提高在这一区域的行车安全性。邬岚等[2]以高速公路交织区为研究对象,建立了基于方差异质性随机参数模型的车辆汇入换道模型,发现辅助车道领车速度对该路段的换道行为具有显著的影响;邢岩等[3]以快速路入口辅助车道长度为研究对象,建立了基于交通流崩溃理论的辅助车道合流段长度模型,得到了快速路入口辅助车道长度的参考取值;宋灿灿等[4]以山区高速公路避险车道辅助车道为研究对象,建立了失控车辆汇入主线外侧车道的汇入概率模型,得到了不同路面状况、主线外侧交通流量和车辆驶入速度下的辅助车道长度推荐设计值;潘兵宏等[5]通过实测双车道出口辅助车道路段车辆的轨迹数据,明确了辅助车道段车辆的运行和换道特征,为辅助车道的长度设计提供了计算方法。以上研究在辅助车道设计上均采用了确定性的思想,没有考虑到相应参数在实际中并非定值,而是呈一定的概率分布。因此有必要结合可靠度理论,量化不同辅助车道长度设计值下的行车安全性,更好地指导高速公路出口区域辅助车道长度的设计。在公路设计方面,Navin[6]最早引入了可靠度理论,并计算得到了不同半径的平曲线可靠概率;张航等[7]运用可靠度理论,以可靠概率表征路段的可靠性,通过MATLAB编程求解的方法,对高速公路避险车道进行了可靠性设计;游克思等[8]以车辆运行速度和路面摩擦因数作为随机变量,分别构建了基于质点模型与考虑车辆侧倾作用的侧滑失效功能函数,通过对比2种功能函数的行车失效概率,提出了公路平曲线半径的可靠性设计流程;陈富坚等[9]基于可靠度理论,建立了纵坡可靠性计算模型,提出了基于货车制动安全的公路长大下坡可靠性设计方法。

从目前研究成果来看,将辅助车道同可靠度理论进行结合的研究还相对较少。本文选取直接式高速公路双车道出口辅助车道(以下简称辅助车道)为研究对象,通过构建辅助车道段车辆换道模型,引入可靠度理论,量化不同长度辅助车道的可靠程度,并给出相应推荐值,以期为规范的进一步完善提供参考。

1 辅助车道段车辆换道距离计算

1.1 车辆换道情况分析

高速公路双车道出口侧辅助车道段横断面的车道分布如图1所示,由辅助车道、外侧车道和内侧车道3部分组成。车辆在由外侧车道换道进入辅助车道后,其运行轨迹有2种,如图2所示。一种是直行驶至减速段后驶离高速,另一种则是发现错路运行后,再次向左换道返回外侧车道。显然,第2种情况所需的辅助车道长度更长。

1.2 车辆换道距离计算

根据以上分析,考虑换道过程中驾驶员的实际行为,可将车辆换道所需要的最大辅助车道长度L_S划分为:右换道距离L_1、反应距离L_2、等待距离L_3和左换道路距离$L_4$4部分。汽车在每一部分的行驶距离均需要考虑汽车性能,驾驶员特性以及周围环境的影响,本文结合潘兵宏等[10]的研究成果,综合考虑汽车换道过程中所受各因素的影响,得到车辆换道所需要的最大辅助车道长度计算式(1)。

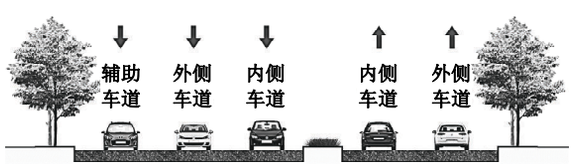


图1 高速公路出口侧辅助车道段横断面的车道分布

Fig. 1 Lane distribution of the auxiliary lane section cross section on the highway exit side

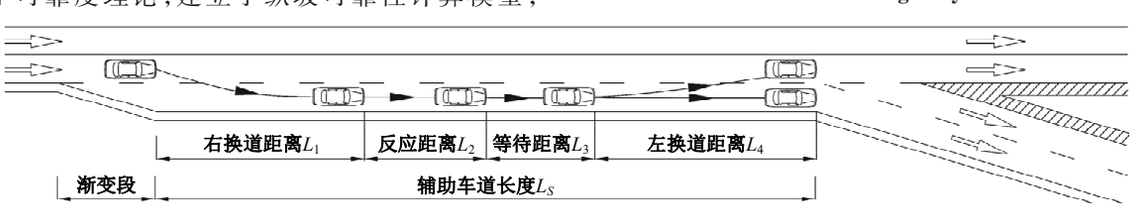


图2 车辆在辅助车道上的运行轨迹

Fig. 2 Trajectory of the vehicle on the auxiliary lane

$$L_S=\sqrt[3]{\frac{W}{j_{max}\tanh(\tau_1/2)}}\tau_1V_a+\frac{V_a}{3.6}(t_0+t_w)+\sqrt[3]{\frac{W}{j_{max}\tanh(\tau_2/2)}}\tau_2V_b \quad (1)$$

式中:W为变道宽度;j_{max}为最大横向加速度变化率,m/s^3;τ_1为左换道紧急程度系数;t_0为反应时间,s;t_w为等待时间,s;τ_2为右换道紧急程度系数;V_a为辅助车道车辆运行速度,km/h;V_b为主线外侧车道车辆运行速度,km/h。

2　参数分析

2.1　定量参数

(1)变道宽度 W。《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)(以下简称规范)中规定了高速公路不同设计速度下的车道宽度均为3.75 m,车辆变道的宽度恰好为1条车道的宽度,按规范取值。

(2)换道紧急程度系数τ。换道紧急程度系数τ为表征换道紧急情况的系数,与换道时间和换道宽度等因素有关,国内外对该系数进行了大量研究,结果表明不同辅助车道长度下换道紧急程度系数τ并无显著差异,且左换道紧急程度系数高于右换道紧急程度系数。不同的研究结果对该系数的取值范围如表1所示。为保障大多数车辆能够安全换道,左换道紧急程度系数τ_1取3.0,右换道紧急程度系数τ_2取2.5。

(3)等待时间t_w。等待时间为驾驶员发现错路运行后,在进行左换道行为之前,寻找左侧直行车道出现可插入间隙过程中在辅助车道继续行驶的时间。根据文献[5]的研究成果,等待时间如表2所示。

(4)最大横向加速度变化率j_{max}。对于汽车来说,人体能够忍受的最大横向加速度变化率为0.4～1.0 m/s^3,考虑人体的最大承受能力按照1.0 m/s^{3}取值[11]。

表 1 换道紧急程度系数取值范围

Table 1　Range of values for the lane change urgency coefficient

换道方向	换道紧急程度系数范围
左	2.5～3.0
右	2.0～2.5

表 2 等待时间

Table 2　Waiting time

设计速度/(km·h^{-1})	等待时间/s
80	2.66
100	3.27
120	3.76

2.2　变量参数

(1)反应时间t_0。反应时间包括驾驶员识别标志信息所需要的时间和对信息做出反应所需要的时间2部分。

侯德藻等[12]通过大量室内外试验,得到了驾驶员识别不同信息量所需要的时间和判断正确率,如表3所示。可以看出当驾驶员识别的信息量为7条时,正确判断率达到97.5%所需时间为3 s。考虑到指路标志版面极少出现7条以上的信息,3 s已经可以满足大多数驾驶员完成对标志信息的识别,故驾驶员识别标志信息的时间取3 s。

研究表明驾驶员对某一信息做出反应所需要的时间呈正态分布,文献[7]总结了不同数据来源测得的驾驶员对某一信息做出反应所需要的时间分布,如表4所示,选取样本数量最多的数据来源作为驾驶员对某一信息做出反应所需要的时间的参数取值。

综合以上分析,反应时间呈正态分布,均值为4.34 s,标准差为0.31 s。

(2)运行速度V_a、V_b。阎莹等[13]以大量高速

表 3 驾驶员识别不同信息量水平

Table 3　Drivers recognize different levels of information

信息量	所需时间/s	判断正确率/%
5条信息	1.8	86.3
	2.0	93.8
	2.2	98.8
6条信息	2.2	86.3
	2.4	95.0
	2.6	97.5
7条信息	2.6	87.5
	2.8	92.5
	3.0	97.5

表 4 反应时间分布参数比较

Table 4　Comparison of distribution parameters of reaction time

数据来源	样本数量/个	平均值/s	标准差/s
Ahmed(1999)	402	1.34	0.31
潘雨帆(2018)	20	1.05	0.35
柴琳果(2016)	30	1.51	0.28
徐志(2011)	16	0.96	0.32

公路实测车辆运行速度数据为研究对象,通过研究断面车辆运行速度的频率分布特征,得到了高速公路断面的车辆运行速度呈正态分布的结论。吴明先等[14]分析了高速公路不同车道车辆运行速度,结果表明:高速公路断面车辆运行速度由内侧车道向外侧车道呈递减趋势。

本文实测了3种设计速度下辅助车道段辅助车道及外侧车道的车辆运行速度,通过SPSS软件剔除异常值后,进行K-S检验,结果如表5、表6所示。

从K-S检验结果可知,不同车道的车辆运行速度符合由内向外递减的特征。3种设计速度下辅助车道和外侧车道车辆运行速度所对应的精确显著性水平统计值均>0.05,故可认为辅助车道和外侧车道车辆运行速度均服从正态分布。

表 5 辅助车道车辆运行速度K-S检验结果

Table 5 K-S test results for operating speed of auxiliary lane vehicles

主线设计速度/(km·h^{-1})		120	100	80
正态参数	平均值	101.360	81.640	71.490
	标准差	5.740	3.490	2.840
精确显著性水平(双侧)		0.771	0.862	0.918

表 6 外侧车道车辆运行速度K-S检验结果

Table 6 K-S test results for operating speed of outer lane vehicles

主线设计速度/(km·h^{-1})		120	100	80
正态参数	平均值	106.450	92.290	75.440
	标准差	7.620	3.710	3.210
精确显著性水平(双侧)		0.784	0.965	0.715

3 辅助车道长度可靠性分析

3.1 构建可靠度功能函数

结构可靠度的定义是:结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。将可靠度理论引入辅助车道长度设计中,设L_R为辅助车道长度设计值,L_S为车辆可以顺利实现换道行为的安全值,即可得到辅助车道长度的可靠度功能函数:

$$Z=g(L_R,L_S)=L_R-L_S \tag{2}$$

当$Z=0$,即辅助车道长度设计值等于安全值时,辅助车道长度设计处在极限平衡状态,介于失效和可靠2种状态之间;当$Z>0$,即辅助车道长度设计值大于安全值时,则可认为辅助车道长度设计可靠;当$Z<0$,即辅助车道长度设计值小于安全值时,则认为辅助车道长度设计存在隐患。

3.2 可靠度分析求解

选取可靠概率P_s,失效概率P_f与可靠指标β作为表征辅助车道长度可靠程度的指标,3者间的关系为:

$$\begin{cases} P_s=P\{Z\geqslant 0\}=\int_0^{\infty} f_Z(Z)dZ \\ P_f=1-P_s \\ \beta=-\Phi^{-1}(1-P_s) \end{cases} \tag{3}$$

式中:$f_Z(Z)$为功能函数的概率密度分布函数。

通过MATLAB编程,运用蒙特卡洛法,模拟3种可靠度指标的求解,步骤如图3所示。为减小抽样次数过少而造成的误差,参照高速公路交通量的远景预测[15],定义抽样次数为1 000 000次。

分别计算得到不同设计速度下,不同辅助车道长度对应的可靠概率分布曲线如图4所示,并将部分辅助车道长度对应的可靠概率,失效概率与可靠指标如表7所示。

根据图4可以发现,在相同设计速度下,辅助车道的可靠概率随辅助车道长度的增加而增加。在不同设计速度下,要达到相同的可靠概率,设计速度越高所需要的辅助车道长度越长。

规范中对高速公路出口辅助车道长度的规定

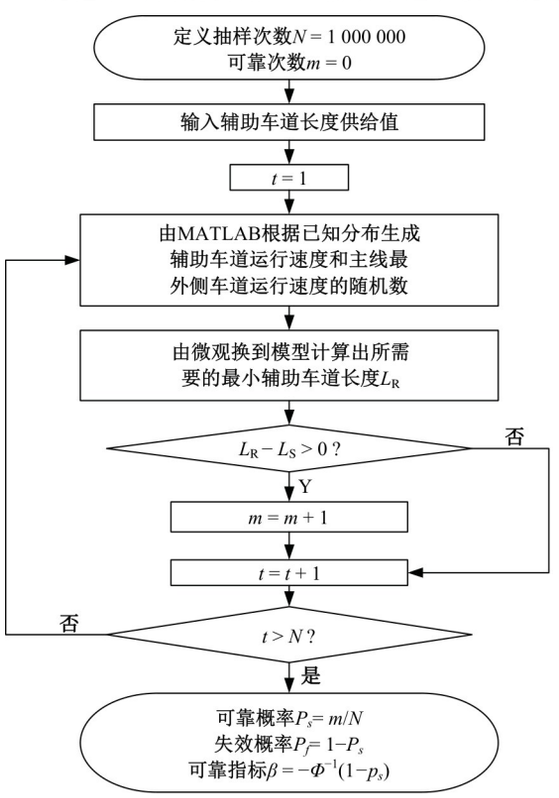


图 3 蒙特卡洛法模拟流程

Fig. 3 Monte Carlo simulation process

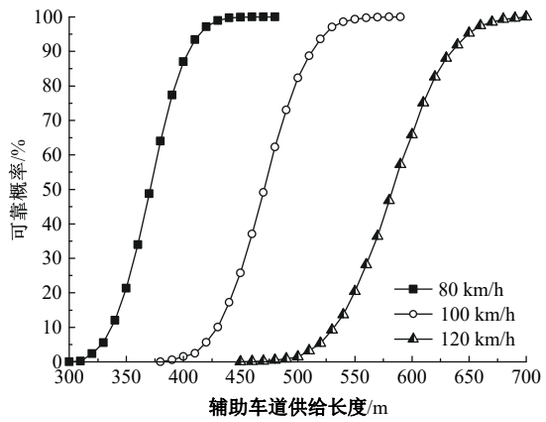


图 4　不同辅助车道长度可靠概率分布曲线

Fig. 4　Probability distribution curves of different lengths of auxiliary lanes

表 7　不同辅助车道长度可靠度计算结果

Table 7　Calculation results of reliability for different lengths of auxiliary lanes

设计速度/(km·h^{-1})	辅助车道长度/m	可靠指标	可靠概率/%	失效概率/%
80	400	1.51	93.44	6.56
	410	1.91	97.22	2.78
	420	2.30	98.94	1.06
	430	2.75	99.7	0.30
	440	3.12	99.91	0.09
	450	3.35	99.96	0.04
100	510	1.24	89.33	10.67
	520	1.54	93.85	6.15
	530	1.85	96.75	3.25
	540	2.16	98.45	1.55
	550	2.49	99.37	0.63
	560	2.83	99.77	0.23
120	580	0.17	56.85	43.15
	590	0.42	66.38	33.62
	600	0.65	74.2	25.80
	610	0.91	81.75	18.25
	620	1.20	88.46	11.54
	630	1.40	91.92	8.08
	640	1.65	95.09	4.91

如表 8 所示,结合表 7 和图 4 可以看出,当辅助车道长度在 3 种设计速度下取规范中的一般值(以下简称规范值)580、510 和 440 m 时,其可靠概率分别为 56.85%、89.33% 和 99.91%。而当取规范中的最小值时,其可靠概率则均趋近于 0%,这是因为当设计值取规范最小值时,将不可避免地增加车辆间的相互影响,使交通流进入拥堵的状态,造成高速出口处车辆运行速度的大幅度降低,功能函数失效。

表 8 规范中对辅助车道长度的规定

Table 8　Provisions on the length of auxiliary lanes in the specifications

主线设计速度/(km·h^{-1})		120	100	80
辅助车道长度/m	一般值	580	510	440
	最小值	300	250	200

由表 7 可以看出,在 120 km/h 设计速度下,规范值的失效概率高达 43.15%,但这并不代表此时路段将有 43.15% 的车辆发生交通事故。失效概率并不等同于事故率,当辅助车道长度的设计值小于安全值,即辅助车道进入失效状态时,只能认为此时辅助车道长度已经不能满足所有车辆保持理想的运行状态,这可能会造成路段车辆运行速度的降低和交通流的拥堵,但并不能等同地认为此时就一定会发生交通事故。

3.3　辅助车道可靠性设计

由于规范中并没有明确不同等级公路的可靠性要求,故选用《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)中的相关规定对辅助车道长度进行可靠性设计。其中规定了各级公路对应的目标可靠指标,如表 9 所示。

按照高速公路所要求的 1.64 的目标可靠指标,反算出不同设计速度下所需要的辅助车道长度并取整后得到辅助车道长度的推荐值,如表 10 所示。

在不同设计速度下,当辅助车道设计值取推荐值时,其可靠概率均能达到 95%。120 和 100 km/h 2 种设计速度下,推荐值相较于规范值辅助车道的可靠概率分别上升了 38.15%、6.25%。在设计速度 80 km/h 下,推荐值相较于规范值辅助车道的可靠概率下降了 4.91%。

表 9 不同等级公路对应的可靠指标

Table 9　Reliability indicators corresponding to different levels of highways

公路等级	高速	一级	二级	三级	四级
目标可靠指标	1.64	1.28	1.04	0.84	0.52

表 10 不同设计速度对应的辅助车道长度推荐值

Table 10　Recommended length values for auxiliary lanes corresponding to different design speeds

设计速度/(km·h^{-1})	80	100	120
辅助车道长度/m	405	525	640

4 VISSIM仿真验证

4.1 模型建立

利用VISSIM软件分别建立6种仿真场景,如表11所示。通过对比不同设计速度下辅助车道长度取规范值与推荐值2种情况下,辅助车道段的交通流顺畅程度来验证辅助车道长度可靠性设计的合理性。

表 11 仿真场景参数

Table 11 Simulation scenario parameters

场景	设计速度/(km·h^{-1})	辅助车道长度取值/m
仿真场景1	120	640
仿真场景2	120	580
仿真场景3	100	525
仿真场景4	100	510
仿真场景5	80	440
仿真场景6	80	405

将平均车速和交通流密度2项内容作为对仿真路段交通流畅性的评价指标。平均速度是指渐变段到分流点之间所有车辆的平均速度,一般作为评价指标对路段整体交通运行流畅性进行评估;交通流密度是指某一瞬间单位长度内辅助车道段的车辆数量,可用于衡量道路的通行能力和服务水平等级。

4.2 仿真参数标定

(1)主导车型参数。通过调查我国高速路出口处的各种车辆类型及其运行状况,发现小型车辆交通量最大,且速度最快,在换道过程中所需要的距离最长。因此,选用小型车辆(小汽车—奔驰CLK级别)作为主导车型。相关交通参数及期望速度分布如表12、表13所示。

表 12 主导车型参数

Table 12 Dominant vehicle model parameters

车辆类型	车长/m	加速度/(m·s^{-2})		减速度/(m·s^{-2})	
		最大	期望	最大	期望
小汽车	4.644	3.5	2	7.5	2.8

表 13 主导车型期望速度及其分布

Table 13 Expected speed and distribution of dominant vehicle models

设计速度/(km·h^{-1})	下限值	上限值	分布
120	85	155	正态分布
100	85	130	正态分布
80	75	110	正态分布

(2)驾驶行为参数。李燊[16]通过对实际交通数据的调查,得到了高速路段分流区域的驾驶员行为参数,如表14所示。

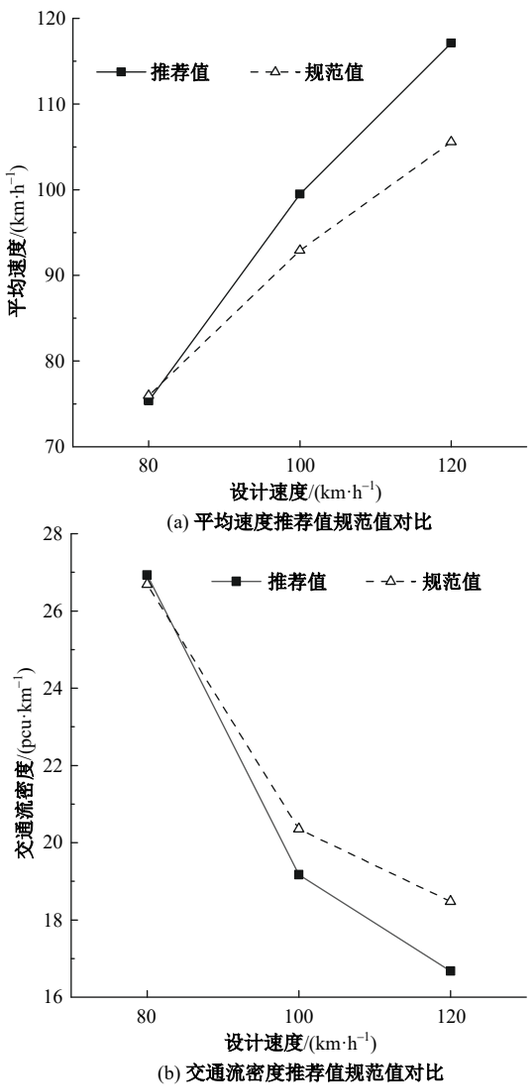
表 14 驾驶员行为参数

Table 14 Driver behavior parameters

参数	最小值	最大值	平均值
车头时距CC1/s	0.7	1.6	0.9
跟车变量CC2/m	3	6	4
进入跟车状态的阈值CC3	−9	−6	−8
最大减速度/(m·s^{-2})	−8	−2	−4

4.3 不同辅助车道长度的仿真试验研究

为确保获取的交通流数据的稳定性和可靠性,对每种场景进行4 200 s的仿真,前600 s作为仿真预热时间,取后3 600 s的仿真结果进行评价对比,如图5所示。



(a) 平均速度推荐值规范值对比

(b) 交通流密度推荐值规范值对比

图 5 仿真结果统计

Fig. 5 Simulation result statistics

由以上统计结果可知,在120和100 km/h两种设计速度下,辅助车道取推荐值相较于规范值,交通流畅性均有了明显的上升。在设计速度为80 km/h时,虽然辅助车道长度减少了35 m,但无论是路段车辆平均速度还是交通流密度都几乎没有变化,这说明推荐值比规范值更加合理。同时与前文得出的辅助车道取推荐值与规范值的可靠概率相对比,可以发现辅助车道长度的可靠概率可以反映路段的交通流顺畅程度,可靠概率越高,路段交通流越顺畅,这在一定程度上证明了辅助车道长度可靠性设计的合理性。

5　结　论

(1)车辆在辅助车道段所需最大换道距离的变化主要受驾驶员反应时间和车辆运行速度的影响,二者均为非定值,且均服从正态分布。

(2)辅助车道的可靠概率同辅助车道长度呈正相关关系,在120、100和80 km/h三种设计速度下,满足车辆换道可靠概率95%的辅助车道长度推荐值分别为640、525和405 m。

(3)不同仿真工况中,从平均速度和交通流密度2个评价指标看,120和100 km/h两种设计速度的推荐值均明显优于规范值;80 km/h设计速度的推荐值与规范值相差无几。验证了以可靠度理论对辅助车道长度进行设计的合理性。

参考文献:

[1] 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): 313-317.
Cheng Fei, Guo Tang-yi, Bai Quan. Analysis of accident characteristics of highway exit areas in Florida, USA[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 35(5): 313-317.

[2] 邬岚, 赵乐, 李根. 基于方差异质性随机参数模型的汇合行为分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(4): 883-889.
Wu Lan, Zhao Le, Li Gen. Analysis of merging behavior based on random parameter model with heterogeneity in variances[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(4): 883-889.

[3] 邢岩, 吴奂东, 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): 915-920.
Xing Yan, Wu Huan-dong, Bai Zhu. Study on auxiliary lane length at the entrance of expressway[J]. China Sciencepaper, 2020, 15(8): 915-920.

[4] 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): 747-752.
Song Can-can, Guo Zhong-yin, Wang Wei-li. Auxiliary lane for truck escape ramp on expressways in mountainous areas[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5): 747-752.

[5] 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): 1647-1657.
Pan Bing-hong, Wang Chao, Wang qiao. A study of length of auxiliary lanes for two-lane expressway exits based on microscopic lane change[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(11): 1647-1657.

[6] Navin F P D. Reliability indices for road geometric design[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19(5): 760-766.

[7] 张航, 刘洋. 高速公路避险车道平面参数可靠性设计[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2023, 47(2): 203-208.
Zhang Hang, Liu Yang. Reliability design of plane parameters of highway escape ramps[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2023, 47(2): 203-208.

[8] 游克思, 孙璐, 顾文钧. 公路平曲线半径可靠性设计理论与方法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(6): 1-6.
You Ke-si, Sun Lu, Gu Wen-jun. Reliability design theory and method of highway horizontal curve radius [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 1-6.

[9] 陈富坚, 郑峰, 徐培培. 基于货车制动安全的公路长大下坡可靠性设计方法[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(7): 1100-1107.
Chen Fu-jian, Zheng Feng, Xu Pei-pei. Reliability design method for long steep downgrades based on trucks′ braking safety[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(7): 1100-1107.

[10] 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. Car lane changing trajectory model based on hyperbolic tangent function[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 419-425.

[11] 佘守宪, 赵雁. 加加速度(加速度的时间变化率)——冲击、乘座舒适性、缓和曲线[J]. 物理与工程, 2001(3): 7-12.
She Shou-xian, Zhao Yan. Jerk(the time rate of change of acceleration): impact, passenger's comfortability, transition curve[J]. Physics and Engineering, 2001(3): 7-12

[12] 侯德藻, 黄凯, 韩文元. 基于驾驶员认知特性的汉字指路标志字高模型研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(3): 142-146.
Hou De-zao, Huang Kai, Han Wen-yuan. Study on Chinese character height model for traffic guide signs based on perceive characteristics of chinese drivers[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(3): 142-146.

[13] 阎莹, 王晓飞, 张宇辉, 等. 高速公路断面运行车速分布特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2008(7): 171-176.
Yan Ying, Wang Xiao-fei, Zhang Yu-hui. Research on section operating distribution characteristics of expressway[J]. China Safety Science Journal, 2008(7): 171-176.

[14] 吴明先, 曹骏驹, 林宣财, 等. 多车道高速公路不同车道运行速度的特点[J]. 公路交通科技, 2021, 38(9): 33-44.
Wu Ming-xian, Cao Jun-ju, Lin Xuan-cai. Operating speed characteristics in different lanes of multilane expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(9): 33-44.

[15] 郭科, 霍春阳. 东纵高速与忻阜高速公路共线段交通量研究[J]. 山西交通科技, 2023(6): 116-120.
Guo Ke, Huo Chun-yang. Research on traffic volume of sharing-line section of dongzong expressway and xinfu expressway[J]. Shanxi Science and Technology of Transportation, 2023(6): 116-120.

[16] 李燊. 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: 东南大学交通学院, 2019.
Li Shen. Freeway interchange traffic safety analysis method based on traffic conflict technique[D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2019.