文章编号:1673-0291(2026)01-0173-11 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250059

考虑匝道车辆非序贯汇入的加速车道长度研究

邵长桥,张东宇
(北京工业大学 北京市交通工程重点实验室,北京 100124)

摘 要:快速路合流区车辆存在频繁的换道和加减速行为,制约着道路的整体通行效率,影响行车安全,合流区的几何设计关系到合流区的交通运行效果,而加速车道长度是快速路合流区几何设计的重要内容,直接影响着合流区的交通效率和安全.针对合流区通行效率低下和交通事故频发的问题,对加速车道长度进行研究.根据实测数据,使用Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验对合流区主线最外侧车道不同分段的车头时距分布进行分析,应用极大似然法估计车头时距分布函数参数,并在考虑匝道车辆非序贯汇入行为的基础上结合间隙接受理论计算出加速车道长度,最后应用VISSIM对加速车道长度优化前后的合流区交通运行情况进行仿真.研究结果表明:最外侧车道不同分段的车头时距分布呈现异质性;优化后的加速车道,能够满足多数匝道车辆等待主线最外侧车道出现合流间隙所需的时间,提高车辆合流的安全性;在主线三级服务水平条件下,匝道车辆汇入主线交通量提高7.15%~15.11%,交通冲突数降低8.68%~22.16%;在主线四级服务水平条件下,匝道车辆汇入主线交通量提高5.47%~14.22%,交通冲突数降低2.08%~14.74%.优化后的加速车道能够提高合流区通行效率和交通安全,为加速车道长度计算提供新思路.

关键词:交通工程;加速车道长度;间隙接受理论;非序贯汇入;车头时距分布特性;快速路合流区
中图分类号:U491 **文献标志码**:A

Research on acceleration lane length considering non-sequential merging of ramp vehicles

SHAO Changqiao, ZHANG Dongyu
(Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Frequent lane-changing and acceleration-deceleration behaviors in expressway merge areas restrict overall traffic efficiency and compromise driving safety. The geometric design of these areas is critical to traffic operations; specifically, the length of the acceleration lane is a vital design element that directly impacts efficiency and safety. To address issues of low efficiency and frequent accidents in merge areas, this study investigates acceleration lane length. Based on field-measured data, the Kolmogorov-Smirnov (K-S) test is employed to analyze headway distributions across different segments of the outermost mainline lane within the merge area, and the maximum likelihood method is applied to estimate distribution parameters. Subsequently, the acceleration lane length is calculated by integrating gap acceptance theory with the non-sequential merging behavior of ramp vehicles. Finally,

收稿日期:2025-04-28;**修回日期**:2025-07-26
基金项目:国家重点研发计划(2012CB723303)
Foundation item: National Key R&D Plan (2012CB723303)
第一作者:邵长桥(1972—),男,山东临沂人,副教授,博士.研究方向为道路通行能力、交通组织等.**email**:shaocq@bjut.edu.cn.

引用格式:邵长桥,张东宇.考虑匝道车辆非序贯汇入的加速车道长度研究[J].北京交通大学学报,2026,50(1):173-183.
SHAO Changqiao, ZHANG Dongyu. Research on acceleration lane length considering non-sequential merging of ramp vehicles[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(1): 173-183. (in Chinese)

VISSIM is utilized to simulate and compare traffic operations of the merge area before and after the optimization of the acceleration lane length. The results indicate that headway distributions exhibit heterogeneity across different segments of the outermost lane. The optimized acceleration lane accommodates the waiting time required for most ramp vehicles to find a merging gap, thereby enhancing safety of vehicle merging. Under level of service 3 conditions on the mainline, ramp merging volume increased by 7.15%-15.11%, while traffic conflicts decreased by 8.68%-22.16%. Under level of service 4 conditions on the mainline, merging volume increased by 5.47%-14.22%, and conflicts decreased by 2.08%-14.74%. Consequently, the optimized acceleration lane improves both traffic efficiency and safety of the merge area, providing a novel approach for calculating acceleration lane length.

Keywords: traffic engineering; acceleration lane length; gap acceptance theory; non-sequential merging; time headway distribution characteristics; expressway merge area

合流区存在频繁的车辆动态交互行为(加速/减速和换道),容易引发交通拥堵和事故[1].主线车辆与匝道车辆在速度特性方面存在差异,加速车道为匝道车辆缩小与主线车辆之间的速度差距及寻找可接受间隙提供了行驶空间.若加速车道长度设计不合理,会导致匝道车辆完成加速和寻找可接受间隙的行驶距离不足,迫使车辆强行汇入主线或在加速车道发生排队,造成加速车道通行能力下降,交通安全风险上升.因此,研究快速路合流区加速车道长度优化,对保障匝道车辆顺畅汇入主线,提高汇入主线交通量,提升合流区交通安全具有重要意义.

加速车道长度为合流鼻端至渐变段终点之间的道路长度,影响加速车道长度的主要因素有匝道车辆交通特性、主线交通量及主线最外侧车道车头时距[2].在合流区交通特性、主线交通量对加速车道长度计算方面,文献[3]根据加速车道不同断面的匝道车辆行驶速度数据,建立了行驶速度与加速车道长度关系模型.文献[4]运用多元回归方法建立了加速车道长度与匝道车辆汇入主线所需行驶距离关系模型.文献[5]建立了考虑主线服务水平、匝道车辆初速度和可变合流间隙的加速车道长度计算模型.文献[6]根据设计速度、车辆加速度性能、主线设计通行能力建立了加速车道长度计算模型,发现我国现行的道路设计规范对加速车道长度的要求未能满足匝道设计速度小于50 km/h时的合流要求.文献[7]假设主线最外侧车道为二级服务水平,建立了合流速度、匝道车辆成功合流概率与加速车道长度关系模型.文献[8]对合流区匝道交通量、加速车道长度与合流区通行能力之间的关系进行了研究,发现匝道车辆汇入主线概率与主线交通量并非呈现单一特性,合流区通行能力与加速车道长度基本成正比.

主线最外侧车道车头时距分布与加速车道长度关系研究方面,文献[9]假设主线最外侧车道车头时距服从三阶Erlang分布,建立了基于成功合流概率的加速车道长度计算模型.文献[10]应用二阶Erlang分布拟合主线最外侧车道车头时距,构建了加速车道通行能力、匝道车辆成功合流概率与加速车道长度之间的关系模型.文献[11]应用两阶移位Erlang分布来描述主线最外侧车道车头时距,结合间隙接受理论计算加速车道长度.文献[12]利用n阶Erlang分布拟合了不同服务水平下主线最外侧车道车头时距,建立了匝道车辆成功合流概率与加速车道长度关系模型.文献[13]假设匝道车辆在满足安全合流间距的前提下,选择负指数分布描述主线最外侧车道车头时距,给出了匝道车辆在不同合流概率下对应的加速车道长度.文献[14]假设主线最外侧车道车头时距服从M3分布,分析了加速车道剩余行驶距离对驾驶员合流行为的影响,建立了主线最外侧车道交通量、匝道车辆成功合流概率与加速车道长度关系模型.

此外,还有学者应用其他方法求解加速车道长度,文献[15]根据合流区Breakdown现象(车速在短时间内迅速下降,交通密度急剧上升)发生概率给出加速车道长度.文献[16]对比间隙接受理论与交通流Breakdown发生概率两种方法计算出的加速车道在交通运行效果方面的差异,发现应用间隙接受理论计算出的加速车道在提升车辆平均运行速度方面更具优势.文献[17]应用数据驱动的方法,选择速度、交通密度和交通冲突率作为模型变量,求解加速车道长度.文献[18]选择速度偏差和交通冲突相关系数作为评价指标,通过仿真实验的方法探究合流区最优加速车道长度.国内外相关道路设计规范也提供了加速车道长度确定方法,美国根据主线和匝道设计速度给出了对应的加速车道长度[19];我国及日本均依据主线设计速度规定了加速车道长度建议值[20-22].

加速车道长度确定与匝道车辆的汇入行为密切

相关,而车辆在加速车道并非按照先后顺序逐一汇入主线,匝道车辆存在非序贯汇入主线的情况.学者主要对匝道车辆汇入行为、主线交通量与汇入位置之间的关系进行了研究,发现随着主线交通量的增加,匝道车辆汇入位置越靠近加速车道后半段[23-25],对车辆非序贯汇入行为与加速车道长度之间的关系研究较少.

综上,国内外学者从不同角度对合流区加速车道长度设计进行了研究,给出了不同的计算模型和方法.然而现有研究在确定加速车道长度时,多考虑主线的交通运行情况,对匝道车辆寻找可接受间隙过程中需要行驶距离的关注程度不足,导致匝道车辆在主线饱和度较高时合流困难,汇入主线的交通量下降.同时,间隙接受理论是确定加速车道长度的常用方法,但在求解时通常假设匝道车辆按照先后顺序依次汇入主线,与实际的运行情况存在差异.针对车辆非序贯汇入主线对加速车道长度计算的影响,尚未形成系统性的研究成果.因此,本文结合间隙接受理论从合流区匝道车辆非序贯汇入的角度对加速车道长度进行优化,并通过仿真方法对比优化前后的交通运行效果.

1　问题分析

匝道车辆通过加速车道汇入主线的过程中,先加速到期望的合流速度,然后寻找主线最外侧车道可接受的合流间隙,随即汇入主线.主线交通量越大,最外侧车道提供的合流间隙越小,匝道车辆合流越困难,需要在加速车道上行驶的距离也越长.主线最外侧车道车头时距分布影响着匝道车辆的合流间隙及加速车道长度.相关研究表明,匝道车辆汇入主线后,会改变主线最外侧车道的车头时距[5],并且存在匝道车辆非序贯汇入主线的行为(第 $m+1$ 辆车先于第 m 辆车汇入主线),如图 1 所示.图 1 中,第 $m+1$ 辆匝道车辆汇入主线后,第 n 辆主线车辆与后方相邻车辆(由第 $n+1$ 辆车变成第 $m+1$ 辆车)车头时距由 t_n 变为 t_n',主线最外侧车道车头时距分布特性发生变化,对于第 m 辆匝道车辆,其合流间隙由 t_n,缩小为 t_n',驾驶员需要重新考虑是否汇入主线.因此,采用单一分布或仅依据合流区上游主线最外侧车道车头时距分布来计算加速车道长度,忽略了匝道车辆非序贯汇入特性引起的合流间隙变化,计算出的加速车道无法满足匝道车辆合流过程所需行驶的距离,本文结合主线最外侧车道车头时距分布特性对匝道车辆非序贯汇入行为进行分析,进而求解出加速车道长度.

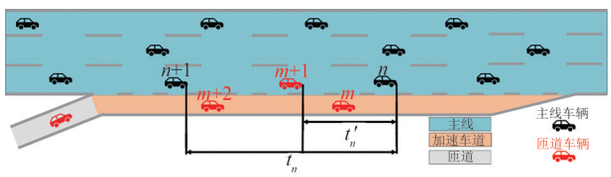


图 1　主线最外侧车道车头时距重新分布示意

Fig. 1　Schematic diagram of time headway redistribution in the mainline outermost lane

为便于分析匝道车辆的非序贯汇入行为,依据快速路合流区实测数据,将匝道车辆非序贯汇入主线的个体行为集计到主线最外侧车道车头时距分布特性.通过 K-S 检验(Kolmogorov-Smirnov,K-S)对主线最外侧车道不同分段的车头时距分布进行分析,确定合流区主线最外侧车道车头时距分布函数.

1.1　数据介绍

文献[26]对北京市高峰期间典型的常发性交通拥堵区域进行了汇总,选择榴乡桥合流区(由东向西方向)作为数据采集地点.榴乡桥合流区位于北京市南四环快速路,如图 2 所示.图 2 中,该路段是联系丰台区和朝阳区的重要通道,在高峰时期合流区主线交通量往往超过三级服务水平.主线交通饱和度较高,该段还承接了来自京台高速以及三环、四环连接道路的分流车辆,合流需求较大.合流区主线为 4 车道城市快速路,地形平坦,视野条件良好,加速车道布设形式为平行式,总长度 250 m,主线限速 80 km/h,匝道限速 40 km/h.考虑到节假日车流量的波动情况,数据采集时间选择工作日并且处于高峰时段,数据采集时间为 2024 年 5 月 7 日的 17:00 至 19:00,主线交通量处于四级服务水平,使用摄像机记录合流区交通运行情况,通过后期处理得到主线最外侧车道车头时距、车辆汇入率等数据.



(a) 平面图　　(b) 实拍图

图 2　数据采集地点

Fig. 2　Data acquisition site

为探究合流区主线最外侧车道车头时距分布特性,将最外侧车道等分为 5 段(不包含渐变段),每段长 40 m.其中合流点至上游 150 m 处标记为 S_0,合流点下游每个分段依次标记为 S_1、S_2、S_3、S_4 和 S_5,每段对应的车头时距分别记为 h_0、h_1、h_2、h_3、h_4 和 h_5,如

图3所示.根据分段情况分别统计出各个分段内的车头时距、车辆汇入率等数据.

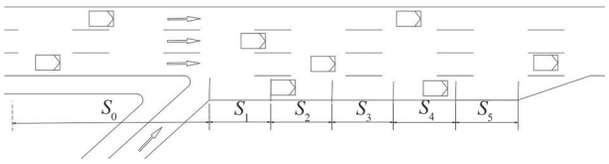


图3 主线最外侧车道分段示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the mainline outermost lane

匝道车辆在不同分段的汇入率、车头时距统计结果分别见表1、表2.表1中:超过半数(63.5%)的匝道车辆选择在加速车道0～80 m范围内(S_1～S_2分段)汇入主线;在0～120 m范围内(S_1～S_3分段)有80.3%的车辆汇入主线;在120～200 m范围内(S_4～S_5分段)汇入主线的车辆较少,占比19.7%.由表2可知:①合流点上游主线最外侧车道车头时距均值相对较大,导致车辆在不同分段汇入率存在差异.②匝道车辆驾驶员选择合流位置的自由程度较高,车辆集中在加速车道前半段汇入主线,加速车道后半段对应的主线最外侧车道车头时距均值较小,匝道车辆合流相对困难,在加速车道后半段汇入主线的车辆比例较低.③由于车辆汇入主线,合流区主线外侧车道前半段车头时距均值逐渐减小,h_1、h_2和h_3的均值明显低于h_0.最外侧车道后半段对应的车头时距均值逐渐变大,h_4和h_5均值比h_1、h_2和h_3均值高约2 s,但主线最外侧车道车头时距均值尚未恢复到合流点上游h_0状态,说明汇入主线的匝道车辆对车头时距重新分布的影响会持续一段距离.④h_1、h_2和h_3的均值、中位数和标准差相对接近;h_4和h_5均值、中位数和标准差相对接近,不同分段的车头时距数据可能存在异质性.

表1 匝道车辆汇入率统计结果

Tab.1 Statistical results of the vehicle merging rate on the ramp

分段	汇入率/%	累计汇入率/%
S_1	22.3	22.3
S_2	41.5	63.8
S_3	16.5	80.3
S_4	12.8	93.1
S_5	6.9	100.0

表2 车头时距统计结果

Tab. 2 Statistical results of time headway

车头时距	样本量	均值/s	标准差/s	最小值/s	中位数/s	最大值/s
h_0	621	7.69	3.67	0.53	6.35	48.06
h_1	1 125	2.63	1.83	0.81	2.05	16.56
h_2	1 023	2.35	1.28	0.69	2.04	9.57
h_3	998	2.38	1.30	0.68	2.01	9.69
h_4	1 013	4.59	1.59	1.11	4.20	13.50
h_5	1 075	4.75	1.81	0.83	4.27	16.95

主线最外侧车道分段车头时距分布直方图见图4,由图4可知:在合流点上游S_0分段,最外侧车道车头时距主要集中在5～20 s;在合流点下游,S_1分段车头时距分布主要集中在1.5～5 s;相比S_1分段的车头时距,S_2、S_3分段观测到的车头时距数据集中范围稍有扩散;随着S_4、S_5分段车辆汇入主线比例的下降,车头时距数据主要集中在2.5～8.0 s.

1.2 分布检验及参数估计

在交通工程中通常使用x^2检验或K-S检验作为检验数据分布的方法.相比x^2检验,K-S检验更适用于连续型数据,并且不需要假设数据遵循特定的分布[27],常用于车头时距分布检验.因此,在0.05的显著性水平条件下,对不同分段的车头时距数据进行双样本K-S检验.选择统计量D作为检验指标,若统计量D大于临界值D_{critical},则拒绝原假设,即两样本属于不同分布.

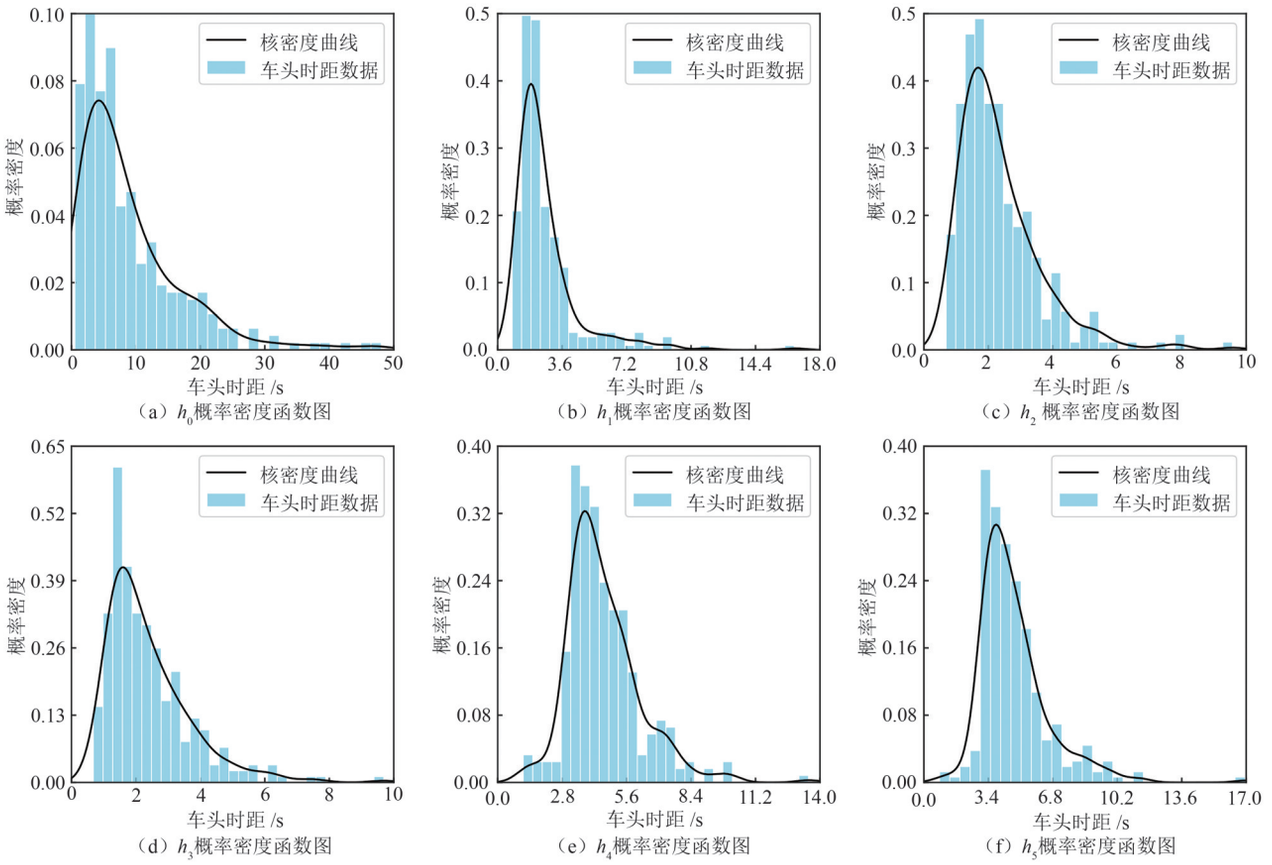
双样本K-S检验结果见表3,由表3可知:h_1与h_2、h_2与h_3、h_4与h_5数据统计量均小于临界值,说明S_1、S_2和S_3分段车头时距属于同一分布,S_4与S_5分段车头时距属于同一分布;而h_0与h_1、h_3与h_4的双样本检验统计量均大于临界值,说明S_0与S_1、S_3与S_4分段车头时距不属于同一分布.

进一步探究S_0与S_1～S_3分段,S_1～S_3分段与S_4～S_5分段的车头时距分布是否具有异质性.将h_1、h_2与h_3数据合并为$h_{1\text{-}3}$,h_4与h_5数据合并为$h_{4\text{-}5}$,对h_0与$h_{1\text{-}3}$、$h_{1\text{-}3}$与$h_{4\text{-}5}$数据再次进行双样本K-S检验,检验结果见表4.由表4可知:h_0与$h_{1\text{-}3}$、$h_{1\text{-}3}$与$h_{4\text{-}5}$数据双样本K-S检验统计量均大于临界值,说明S_0与S_1～S_3分段车头时距不属于同一分布;S_1～S_3分段与S_4～S_5分段车头时距不属于同一分布.

由上述分析可得,合流区主线最外侧车道不同位置的车头时距分布具有异质性.根据K-S检验结果将主线最外侧车道重新分段,分段结果如图5所示.图5中:S_0分段不变,S_1、S_2与S_3合并为$S_{1\text{-}3}$,S_4与S_5合并为$S_{4\text{-}5}$;S_0分段车头时距数据仍为h_0,$S_{1\text{-}3}$和$S_{4\text{-}5}$分段的车头时距数据分别记为$h_{1\text{-}3}$和$h_{4\text{-}5}$.

在车头时距分布研究中,常选用Gamma分布、Weibull分布、移位Log-Normal分布、负指数分布和Erlang分布[28]描述车头时距分布,上述分布函数的概率密度函数(Probability Density Function,PDF)分别为

$$f(t|\alpha,\beta,\gamma)=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}(t-\gamma)^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\beta(t-\gamma)}\quad t>\gamma,t>0 \tag{1}$$



（a）h_0概率密度函数图　（b）h_1概率密度函数图　（c）h_2概率密度函数图

（d）h_3概率密度函数图　（e）h_4概率密度函数图　（f）h_5概率密度函数图

图 4　主线最外侧车道分段车头时距分布直方图

Fig. 4　Time headway distribution histogram of the mainline outermost lane

表 3　车头时距双样本 K-S 检验结果 1

Tab. 3　Results of the two-sample K-S test at time headway 1

检验指标	h_0-h_1	h_1-h_2	h_2-h_3	h_3-h_4	h_4-h_5
D_{critical}	0.053	0.053	0.080	0.114	0.148
D	0.081	0.045	0.062	0.140	0.009

表 4　车头时距双样本 K-S 检验结果 2

Tab. 4　Results of the two-sample K-S test at time headway 2

检验指标	h_0-$h_{1\text{-}5}$	h_0-$h_{1\text{-}3}$	$h_{1\text{-}3}$-h_4	$h_{1\text{-}3}$-$h_{4\text{-}5}$
D_{critical}	0.049	0.050	0.095	0.076
D	0.8583	0.491	0.465	0.441

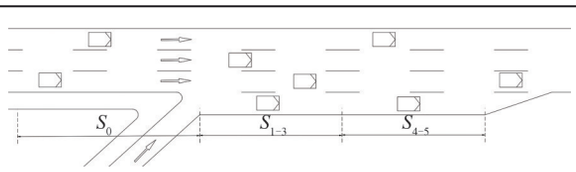


图 5　主线最外侧车道重新分段示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the re-segmented mainline outermost lane

$$f(t|\alpha,\beta,\gamma)=\frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}}\quad t>0 \tag{2}$$

$$f(t|\mu,\sigma,\gamma)=\frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{(\ln(t-\gamma)-\mu)^2}{2\sigma^2}}\quad t>\gamma,t>0 \tag{3}$$

$$f(t|\lambda)=\lambda\mathrm{e}^{-\lambda t}\quad t>0 \tag{4}$$

$$f(t|m,\lambda)=\frac{\lambda^m t^{m-1}\mathrm{e}^{-\lambda t}}{\Gamma(m)}\quad t>0 \tag{5}$$

式中:α为形状参数;β为尺度参数;γ为位置参数;t为车头时距;μ为原始数据取自然对数后的均值;σ为原始数据取自然对数后的标准差;$\bar{h}$为车头时距均值;λ为车头时距均值的倒数,即$1/\bar{h}$;m为分布阶数.

对S_0、$S_{1\text{-}3}$和$S_{4\text{-}5}$分段车头时距应用单样本 K-S 检验,若某个分布的p值大于 0.05,则接受原假设,即车头时距服从该分布.单样本 K-S 检验结果见表 5.由表 5 可知:h_0、$h_{1\text{-}3}$和$h_{4\text{-}5}$数据均不服从负指数分布、Erlang 分布;h_0数据均通过了 Gamma 分布、Weibull 分布和移位 Log-Normal 分布的 K-S 检验,p值均大于 0.05;$h_{1\text{-}3}$和$h_{4\text{-}5}$数据的移位 Log-normal 分布 K-S 检验p值分别为 0.091 和 0.061,略大于 0.05,移位 Log-normal 分布对$h_{1\text{-}3}$和$h_{4\text{-}5}$数据的拟合效果一般;$h_{1\text{-}3}$数据的 Gamma 分布 K-S 检验p值为 0.106,对$h_{1\text{-}3}$数据拟合效果一般;$h_{4\text{-}5}$数据 Weibull 分布 K-S 检验的p值为 0.189,对$h_{4\text{-}5}$数据拟合效果一般.

P-P 图(Probability-Probability Plot,P-P)能够反映经验分布累计概率和理论分布累计概率之间的

表 5 单样本 K-S 检验结果

Tab. 5 Single-sample K-S test results

车头时距分段	Gamma 分布		Weibull 分布		移位 Log-normal 分布		负指数分布		Erlang 分布		
	p 值	结论	p 值	结论	p 值	结论	p 值	结论	阶数 n	p 值	结论
h_0	0.385	接受	0.761	接受	0.796	接受	0.000	拒绝	1	0.000	拒绝
$h_{1\text{-}3}$	0.106	接受	0.588	接受	0.091	接受	0.000	拒绝	3	0.004	拒绝
$h_{4\text{-}5}$	0.412	接受	0.189	接受	0.061	接受	0.000	拒绝	3	0.001	拒绝

关系，图中的样本点围绕坐标轴对角线分布越紧密，其理论分布越接近真实分布．基于合流区主线最外侧车道不同分段对应的车头时距分布函数，给出不同分段车头时距分布分析结果，如图 6 所示．由图 6 可知：Gamma 分布、Weibull 分布和移位 Log-normal 分布均能较好地拟合 h_0 数据，3 个分布的 P-P 图都呈现较好的线性趋势；结合 h_0 数据 K-S 检验 p 值结果，选择移位 Log-normal 分布描述合流点上游主线最外侧车道车头时距分布；移位 Log-normal 分布与 $h_{1\text{-}3}$ 数据实际分布情况拟合效果较差，相比 Gamma 分布，Weibull 分布呈现出的线性趋势更好；移位 Log-normal 分布对 $h_{4\text{-}5}$ 数据拟合效果较差，Gamma 分布和 Weibull 分布都能较好地拟合 $h_{4\text{-}5}$ 数据，但 Gamma 分布更接近数据的经验分布．

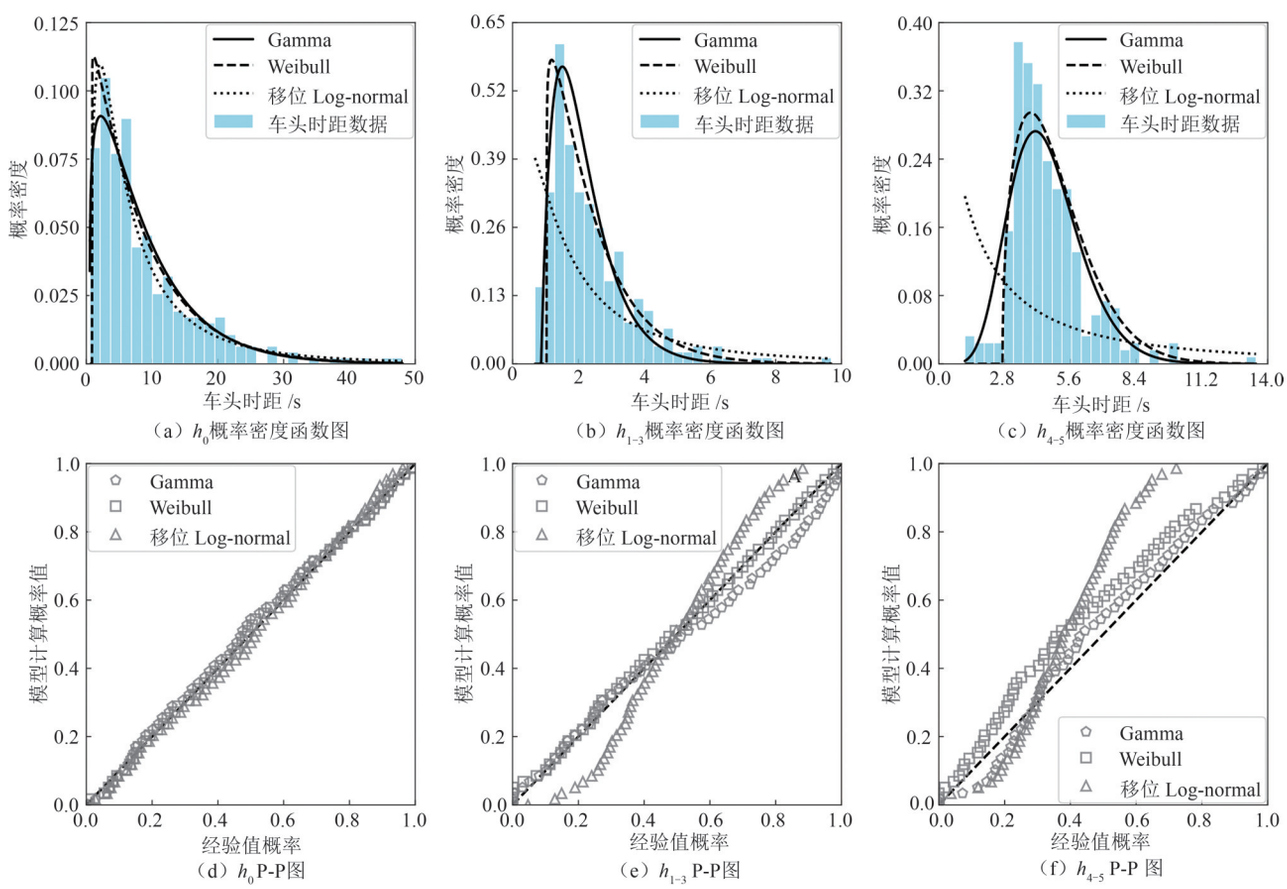


图 6 车头时距分布分析图

Fig. 6 Analysis diagram of time headway distribution

根据 $h_{1\text{-}3}$ 数据和 $h_{4\text{-}5}$ 数据的 K-S 检验 p 值，选择 Weibull 分布描述 $S_{1\text{-}3}$ 分段车头时距分布，选择 Gamma 分布描述 $S_{4\text{-}5}$ 分段车头时距分布．使用极大似然法（Maximum Likelihood Estimation，MLE）对 h_0、$h_{1\text{-}3}$ 和 $h_{4\text{-}5}$ 车头时距分布函数的参数进行估计，参数估计结果见表 6.

2 加速车道长度优化

2.1 研究假设

间隙接受理论（Gap Acceptance Theory Model）最早用于无信号交叉口次要道路的通行能力研究[29]．有学者将间隙接受理论应用到合流区加速车

表 6　参数估计结果

Tab. 6　Parameter estimation results

车头时距分段	Gamma分布参数			Weibull分布参数			移位Log-normal分布参数		
	α	β	γ	α	β	γ	μ	σ	γ
h_0	—	—	—	—	—	—	6.002	1.026	0.126
$h_{1\text{-}3}$	—	—	—	1.094	1.404	1.038	—	—	—
$h_{4\text{-}5}$	2.029	1.058	0.612	—	—	—	—	—	—

道长度计算,并且已经发展成为一种成熟的加速车道长度计算方法[2,16,30].结合间隙接受理论和合流区车辆运行特性研究成果,在计算加速车道长度时做出假设:驾驶员行为特征具有一致性和相似性,可接受的临界间隙相同,当主线最外侧车道出现满足可接受间隙的条件时即可汇入主线[31];主线车辆与匝道车辆之间存在速度差,较大的速度差会影响行车安全,主线限速为80 km/h,相邻路段的速度差应小于20 km/h[32],因此,假设匝道车辆在合流前达到的最低合流速度 v_2 为60 km/h;匝道车辆加速到合流速度 v_2 后,在寻找汇入间隙的过程中保持匀速行驶[7].

2.2　加速车道长度计算

平行式加速车道由加速段 L_1、等待段 L_2 和渐变段 L_3 构成[33].其中加速段 L_1 根据匝道车辆初速度、合流速度及车辆加速度进行计算,表达式为

$$L_1=\frac{v_2^2-v_1^2}{25.92a} \tag{6}$$

式中:v_1 为匝道车辆初速度,取匝道限速40 km/h;v_2 为匝道车辆最低合流速度,取60 km/h;a 为匝道车辆加速度,一般为0.8～1.2 m/s^2,取其均值1 m/s^2.

结合间隙接受理论建立加速车道等待段长度求解模型,由加速车道分段 i 内的车头时距分布函数 P_i(对概率密度函数 $f(t)$ 求积分),可得主线最外侧车道任意1个时间间隔内车头时距小于临界间隙 t_c 的概率 $P_i(h\leqslant t_c)$ 为

$$P_i(h\leqslant t_c)=1-P_i(h>t_c) \tag{7}$$

式中:临界间隙 t_c 为驾驶员判断能否汇入主线的阈值,实测的匝道车辆合流间隙数据统计结果见表7.根据匝道车辆合流间隙数据,利用二元Logit模型求解出 t_c 为3.5 s.

则任意一个车头时距小于 t_c 的间隔 $G_i(t)$ 为

表 7　合流间隙统计结果

Tab. 7　Statistical results of the merge gap

统计项目	值	统计项目	值
样本量	1 418	标准差/s	1.72
最小值/s	1.65	中位数/s	4.54
最大值/s	9.98	85% 分位数/s	6.79
均值/s	3.53	90% 分位数/s	7.43

$$G_i(t)=P_i(H<t/H<t_c)=\frac{P_i(H<t,H<t_c)}{P_i(H<t_c)} \tag{8}$$

由条件概率可得

$$G_i(t)=\begin{cases}\dfrac{P_i(t)}{P_i(t_c)} & 0<t<t_c\\ 0 & t\geqslant t_c\end{cases} \tag{9}$$

分段 i 内主线最外侧车道车头时距小于 t_c 的均值 $\bar{h}_i$ 为

$$\bar{h}_i=\int_{\tau}^{t_c}t\mathrm{d}G_i(t) \tag{10}$$

式中:τ 为最小车头时距,在保证安全的前提下一般取1.2 s[34].

分段 i 内匝道车辆平均等待间隔个数 $\bar{n}_i$ 为

$$\bar{n}_i=\frac{1}{P_i(t\geqslant t_c)}-1 \tag{11}$$

分段 i 内匝道车辆等待主线出现可接受间隙的平均等待时间 $\bar{t}_i$ 为

$$\bar{t}_i=\bar{n}_i\ \bar{h}_i \tag{12}$$

分段 i 对应的长度 L_{2i} 为

$$L_{2i}=\frac{v_2\ \bar{t}_i}{3.6} \tag{13}$$

式中:v_2 为合流速度,取60 km/h.

将主线最外侧车道对应的分段车头时距分布函数代入式(7),并按照式(8)～式(13)完成计算,求出加速车道不同分段对应的等待段长度 L_{2i}.

文献[21]中给出主线设计速度80 km/h对应的平行式加速车道渐变段 L_3 长度为70 m,加速车道总长度 L_r 为

$$L_r=L_1+\sum_{i=1}^{w}L_{2i}+L_3 \tag{14}$$

式中:w 为主线最外侧车道分段个数,$w=1,2$.

其中,加速段 L_1 计算结果为77 m,$S_{1\text{-}3}$ 分段车头时距分布符合Weibull分布,$S_{4\text{-}5}$ 分段车头时距分布符合Gamma分布,计算出 L_{21} 为165 m,L_{22} 为83 m,等待段长度 L_2 为248 m,L_3 取70 m,考虑匝道车辆非序贯汇入计算出的加速车道总长度为395 m.

加速车道长度计算的传统方法与本文提出的方法主要在等待段长度计算上存在差异,传统方法根据合流区上游主线最外侧车道的交通量选择相应的

Erlang分布计算等待段长度，分布函数的确定方法为：主线最外侧车道交通量小于250 veh/h时，选择一阶Erlang分布描述主线最外侧车道车头时距；主线最外侧车道交通量位于250～500 veh/h时，选择二阶Erlang分布描述主线最外侧车道车头时距；主线最外侧车道交通量大于750 veh/h时，选择三阶Erlang分布描述主线最外侧车道车头时距[35]. 结合实测数据，选择3阶Erlang分布描述主线最外侧车道车头时距，应用间隙接受理论得到传统方法计算出的等待段长度为150 m. 根据上述两种方法得出的加速车道长度对比见表8，由表8可知，考虑匝道车辆非序贯汇入方法求解出的加速车道长度比传统方法计算结果长100 m.

表 8 加速车道长度对比

Tab. 8 Acceleration lane length comparison m

参数	L_1	L_2	L_3	L
L	80	150	70	300
L_r	80	250	70	400

注：为便于仿真和应用，将加速车道各部分长度计算结果均保留为5的整数倍.

3 对比分析

将考虑匝道车辆非序贯汇入方法与传统方法计算出的匝道车辆平均等待时间理论值与合流间隙实测值进行对比；应用VISSIM对加速车道长度优化前后的合流区进行仿真，比较交通运行效果方面的变化.

3.1 平均等待时间

在合理的加速车道长度范围内，匝道车辆平均等待时间越长，对应的合流间隙累计频率曲线上出现满足合流条件的概率越大. 考虑匝道车辆非序贯汇入方法与传统方法计算出的匝道车辆汇入主线平均等待时间与实测的合流间隙数据对比如图7所示. 图7中：$S_{1\text{-}3}$分段计算出的平均等待时间为9.89 s；$S_{4\text{-}5}$分段计算出的平均等待时间为5.00 s；传统方法计算出的平均等待时间为4.32 s.

考虑匝道车辆非序贯汇入计算出的平均等待时间大于实测合流间隙数据的均值，$S_{1\text{-}3}$分段的平均等待时间大于实测合流间隙的90%分位数，说明加速车道长度按照9.89 s的匝道车辆合流平均等待时间设计，能满足绝大多数匝道车辆合流间隙需求. $S_{4\text{-}5}$分段的平均等待时间大于实测合流间隙的中位数，说明加速车道长度按照5.00 s的匝道车辆平均等待时间设计，可以满足近半数匝道车辆合流间隙需求. 而传统方法计算出的匝道车辆平均等待时间为4.32 s，小于实测合流间隙的中位数4.54 s，说明加速车道长度按照传统方法计算出的平均等待时间设计，只能满足不到半数的匝道车辆合流间隙需求. 因此，相较于传统方法，考虑匝道车辆非序贯汇入方法计算出的加速车道至少能满足过半数匝道车辆汇入主线所需的等待时间，提高了匝道车辆汇入主线的安全性.

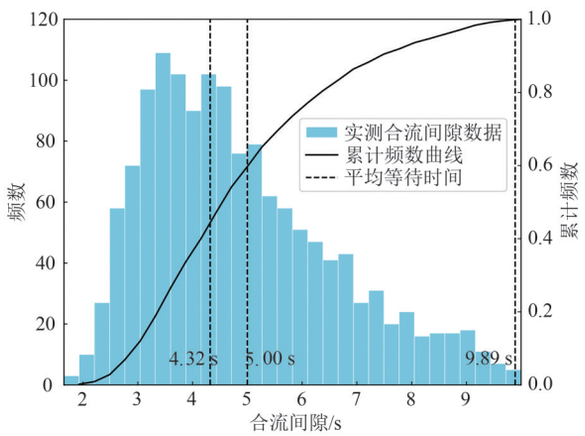


图 7 合流平均等待时间理论值与合流间隙实测值对比

Fig. 7 Comparison of theoretical average waiting time for merging and measured value of merging gap

3.2 交通运行效果

应用VISSIM仿真软件比较两种方法求解出的加速车道在合流区交通运行效果上的差异. 选择汇入主线交通量及合流区交通冲突数作为评价指标. 选择碰撞时间模型（Time to Collision，TTC）[36]和侵入时间模型（Post Encroachment Time，PET）[37]作为交通冲突次数的判断标准，在交通冲突数判别方面，普遍将TTC小于1.5 s[38]或PET小于5 s[39]记为一次交通冲突.

为确保仿真结果的可靠性，仿真场景设置尽可能吻合实际交通运行情况，主线为单向4车道快速路，匝道为单车道，合流区加速车道布设形式为平行式，主线限速80 km/h，匝道限速40 km/h；匝道车辆加速度与式（1）中的加速度取值保持一致；根据现场调查数据，主线交通量分别设置为三级服务水平（1 500 pcu/h/ln），四级服务水平（1 800 pcu/h/ln）两种情况；为了符合实际交通需求，匝道交通量以500 pcu/h为基础，100 pcu/h为步长依次增加；在仿真软件中通过设置匝道车辆行驶路径的方式模拟出匝道车辆在加速车道不同分段换道汇入主线的比例. 仿真时长设定为3 900 s，为了获得稳定的仿真数据并尽可能减小仿真结果的偶然性，在仿真启动300 s后开始输出结果，每种情况仿真10次，取10次仿真的平均值作为最终加速车道长度. 优化前后的交通仿真结果见表9.

表 9　仿真结果

Tab. 9　Simulation results

主线服务水平	匝道交通量/(pcu/h)	优化前汇入主线交通量/(pcu/h)	优化后汇入主线交通量/(pcu/h)	提升率/%	优化前冲突数/(次/h)	优化后冲突数/(次/h)	提升率/%
三级	500	454	491	8.12	356	290	18.60
	600	521	586	12.56	389	303	22.16
	700	592	681	15.11	416	342	17.80
	800	676	749	10.78	462	409	11.40
	900	781	837	7.15	486	444	8.68
四级	500	448	479	6.99	587	512	14.74
	600	514	569	10.78	660	589	12.02
	700	575	657	14.22	669	602	11.11
	800	666	715	7.29	711	656	8.40
	900	746	787	5.47	691	677	2.08

由表 9 可知:①匝道交通量在 500 pcu/h 时,两种方法计算出的加速车道均能满足合流需求,汇入主线交通量提升效果相差不大,但考虑匝道车辆非序贯汇入计算出的加速车道对交通冲突数的降低效果较为明显,在主线三级服务水平下,交通冲突数能够降低 17.80%～22.16%.②在主线四级服务水平下,交通冲突数能够降低 11.11%～14.74%.随着匝道交通量的增加,考虑匝道车辆非序贯汇入计算出的加速车道对汇入主线交通量的提升效果较好.③在主线三级服务水平下,汇入主线交通量能够提高 10.78%～15.11%.④在主线四级服务水平下,汇入主线交通量能够提高 7.29%～14.22%.⑤受制于现有道路设施通行能力和交通组织,当匝道交通量超过 800 pcu/h 时,合流区交通饱和度增加,车辆在合流区的运行速度下降,汇入主线交通量及交通冲突数的提升效果也发生下降,但仍优于传统方法计算出的合流区加速车道仿真运行结果.

主线交通量在三、四级服务水平下,考虑匝道车辆非序贯汇入计算出的加速车道相比传统方法能够更好地提升汇入主线交通量,降低合流区交通冲突,适应合流需求较高的情况.

4　结论

1) 相比传统方法计算出的加速车道,考虑匝道车辆非序贯汇入行为计算出的加速车道,在主线三级服务水平条件下,匝道车辆汇入主线交通量提高 7.15%～15.11%,交通冲突数降低 8.68%～22.16%;在主线四级服务水平下,匝道车辆汇入主线交通量提高 5.47%～14.22%,交通冲突数降低 2.08%～14.74%.

2) 合流区主线最外侧车道不同分段的车头时距分布具有异质性,合流区主线上游、合流区主线不同、最外侧车道不同分段的车头时距数据分别服从不同分布;加速车道长度优化后,能够满足 50% 以上的匝道车辆等待主线最外侧车道出现合流间隙所需的时间.

本文对匝道车辆非序贯汇入主线行为对加速车道长度影响进行了研究,参数取值主要参考小型车,而不同车型的合流间隙存在差异,下一步将对混合交通流环境下加速车道长度设计进行研究.

参考文献(References):

[1] 程国柱, 陈永胜, 王文志, 等. 异质交通流下高速公路 CAV 合流次序优化与轨迹规划方法[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(1): 100－109.
CHENG Guozhu, CHEN Yongsheng, WANG Wenzhi, et al. Merging order optimization and trajectory planning methods for highway CA Vs in heterogeneous traffic flow [J] . Journal of Beijing Jiao Tong University. 2025, 49(1): 100－109.(in Chinese)

[2] 何永明, 王繁, 隋胜春. 高速公路加速车道设计影响因素及长度计算模型综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2025, 44(3): 40－48.
HE Yongming, WANG Fan, SUI Shengchun. Review of design influencing factors and length calculation models for highway acceleration lane[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2025, 44(3): 40－48. (in Chinese)

[3] YANG G, TIAN Z, XU H, et al. Recommendations for acceleration lane length for metered on-ramps[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2588(1): 1－11.

[4] AHAMMED M A, HASSAN Y, SAYED T A. Modeling driver behavior and safety on freeway merging areas [J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(9): 370－377.

[5] 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)：113－121.
LI Wenquan，SHAO Zike，WANG Shiheng，et al. Calculation method of parallel-type acceleration lane length of urban expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2017，17(4)：113－121.(in Chinese)

[6] 潘兵宏，李翔. 高速公路小客车专用单车道加速车道最小长度[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2021，41(5)：107－117.
PAN Binghong，LI Xiang. Minimum length of passenger-car-only-acceleration single lane of highway[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)，2021，41(5)：107－117.(in Chinese)

[7] 刘亚非. 高速公路服务设施关键技术标准研究[D]. 西安：长安大学，2012.
LIU Yafei. Study on the key technical indicators on expressway service facility[D]. Xi'an：Chang'an University，2012.(in Chinese)

[8] 薛行健，戈林娟，邓力容，等. 快速路匝道合流区流量、加速车道长度与通行能力关系[J]. 铁道科学与工程学报，2020，17(2)：509－515.
XUE Xingjian，GE Linjuan，DENG Lirong，et al. Relationship between acceleration lane length，flow and capacity in the urban expressway ramp merging section[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2020，17(2)：509－515.(in Chinese)

[9] 贾俊波. 高速公路变速车道长度及立交最小净距研究[D]. 天津：河北工业大学，2017.
JIA Junbo. Study on the lenghth of speed-change lane and minimum net distance between interchanges on freeway[D] Tianjin：Hebei University of Technology，2017.(in Chinese)

[10] 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，2017.
YIN Lu. Study on the geometric parameters for the speed-change lane of the expressway and safeguard measures[D]. Chongqing：Chongqing Jiaotong University，2017.(in Chinese)

[11] 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，2020.
KONG Bingjie. Study on setting conditions and main technical indexes of auxiliary lanes for composite interchanges[D]. Xi'an：Chang'an University，2020.(in Chinese)

[12] 齐从一. 基于车头时距分布的加速车道长度模型研究[D]. 西安：长安大学，2023.
QI Congyi. Research on acceleration lane length based on the time headway distribution[D]. Xi'an：Chang'an University，2023.(in Chinese)

[13] 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)：785－791.
LI Xia，ZHU Zhiqiang，CUI Hongjun，et al. Calculation model for the length of acceleration lane based on security merging probability[J]. Journal of Railway Science and Engineering.2018，15(3)：785－791.(in Chinese)

[14] 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)：117－120.
GUAN Yu，ZHANG Ning. Vehicle merging model for acceleration lane under condition of changeable critical headway[J] Journal of Highway and Transportation Research and Development.2010，27(6)：117－120.(in Chinese)

[15] 李林恒. 快速路合流区设计与交通控制关键指标研究[D]. 成都：西南交通大学，2017.
LI Linheng. Research on the key indicators of design and traffic control for the expressway merging area[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2017.(in Chinese)

[16] 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 Huandong，BAI Zhu. Study on auxiliary lane length at the entrance of expressway[J]. China Science Paper.2020，15(8)：915－920.(in Chinese)

[17] 张航，马宝林，储泽宇，等. 基于数据驱动的快速路合流区加速车道长度的研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2024，43(5)：53－60.
ZHANG Hang，MA Baolinl，CHU Zeyu，et al. Data-driven acceleration lane length in merging areas of expressways[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)，2024，43(5)：53－60.(in Chinese)

[18] 张鑫，张卫华，宋军军，等. 加速车道几何参数对合流区交通状况的影响分析[J]. 中国安全生产科学技术，2021，17(11)：48－52.
ZHANG Xin，ZHANG Weihua，SONG Junjun，et al. Analysis on influence of geometric parameters of acceleration lane on traffic conditions in merge area[J]. Journal of Safety Science and Technology，2021，17(11)：48－52.(in Chinese)

[19] American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO). A policy on geometric design of highways and streets[M]. 2017.

[20] 日本道路社团. 日本高速公路设计要领[M]. 西安：陕西旅游出版社，1991.
Japanese Road Society. Japanese highway design essentials[M]. Xi'an：Shaanxi Tourism Press，1991.(in Chinese)

[21] 中华人民共和国交通运输部. 公路立体交叉设计细则：JTG/T D21-2014[S]. 北京：人民交通出版社股份有限公司，2014.
Ministry of Transport of the People's Republic of China.

Guidelines for design of highway grade-separated intersections: JTG/T D21-2014[S]. Beijing: People's Communications Press Co., LTD., 2014. (in Chinese)

[22] 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: People's Communications Press, 2017. (in Chinese)

[23] DAAMEN W, LOOT M, HOOGENDOORN S P. Empirical analysis of merging behavior at freeway on-ramp [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2188(1): 108－118.

[24] CHU T D, MIWA T, MORIKAWA T. An analysis of merging maneuvers at urban expressway merging sections [J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2014, 138: 105－115.

[25] 陈永恒, 熊帅, 白乔文, 等. 快速路入口匝道车辆汇入位置的分布特征分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 125－131.
CHEN Yongheng, XIONG Shuai, BAI Qiaowen, et al. Analysis of merging position distribution characteristics of on-ramp vehicles at urban expressway [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(11): 125－131. (in Chinese)

[26] 北京交通发展研究院. 2024年北京市交通发展年度报告[R]. 2024.
Beijing Transport Institute.2024 Beijing transport development annual report[R]. 2024. (in Chinese)

[27] YE F, ZHANG Y. Vehicle type-specific headway analysis using freeway traffic data [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2124: 222－230.

[28] WU S, ZOU Y, WU L, et al. Application of bayesian model averaging for modeling time headway distribution [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2023, 620: 128747.

[29] POLLATSCHEK M A, POLUS A, LIVNEH M. A decision model for gap acceptance and capacity at intersections [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(7): 649－663.

[30] ZHOU J, FANG J, ZHOU R. Study on the safety length of acceleration and deceleration lane of left-side ramp on freeway[C]// Proceedings of the 16th International Conference Road Safety on Four Continents. Beijing, 2013:1－11.

[31] 郝雨晴. 快速路入口匝道信号设置临界流量研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2022.
HAO Yuqing. Study on signal settings critical traffic volume of expressway on-ramp [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022. (in Chinese)

[32] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准: JTG B01-2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard of highway engineering: JTG B01-2014 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2014. (in Chinese)

[33] SCHURR K, TOWNSEND D P. Acceleration ramps along high operating speed roadways [M]. Nebraska: Merging Traffic, 2010.

[34] HASHIMOTO M, SUETOMI, T, OKUNO A. A study on driver model for lane change judgement [J]. Jsae Review, 2001, 22(2): 183－188.

[35] 王炜, 周荣贵, 李文权, 等. 高速公路加、减速车道长度设计标准研究报告[R]. 南京: 东南大学, 2001.
WANG Wei, ZHOU Ronggui, LI Wenquan, et al. Research Report on design standard of expressway acceleration and deceleration lane length[R]. Nanjing: Southeast University, 2001. (in Chinese)

[36] ARUN A, HAQUE MD M, WASHINGTON S, et al. A systematic review of traffic conflict-based safety measures with a focus on application context [J]. Analytic Methods in Accident Research, 2021, 32: 100185.

[37] 马艳丽, 祁首铭, 吴昊天, 等. 基于PET算法的匝道合流区交通冲突识别模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(2): 142－148.
MA Yanli, QI Shuming, WU Haotian, et al. Traffic conflict identification model based on post encroachment time algorithm in ramp merging area [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(2): 142－148. (in Chinese)

[38] 徐汉清. 高速公路典型区段交通冲突及安全性评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
XU Hanqing. Research on the traffic conflict and safety evaluation of freeway typical sections[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

[39] 张志召. 高速公路立交分合流区和收费站交通冲突研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHANG Zhizhao. Research on traffic conflict of freeway diverging and merging sections and toll booth[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)