

高速公路施工区上游过渡区的车辆汇入模型

孙智勇, 孙小端, 荣建

(北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为确定高速公路施工区上游过渡区长度对高速公路主车道交通流的影响, 首先应用实测数据分析施工区上游过渡区主车道的车头时距分布特性, 结果表明车头时距分布符合爱尔朗分布; 其次在考虑车辆汇入过程中临界间隙变化情况的基础上, 利用间隙接受理论和微分法建立了车辆汇入模型, 用以计算高速公路上游过渡区的长度; 最后通过算例揭示了上游过渡区长度、主车道交通量和汇入速度对车辆汇入概率的影响规律。研究结果表明: 车辆汇入模型能较好地反映不同公路几何要素和交通条件情况下行驶车辆的汇入行为, 为施工区设计提供一种新方法。

关键词: 施工区; 上游过渡区; 汇入车道; 汇入模型

中图分类号: U 491.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)04-0594-05

Merging Model of Vehicles on Upstream Transition Area of Expressway Work Zones

SUN Zhi-yong, SUN Xiao-duan, RONG Jian

(Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To explore the influence of upstream transition length on expressway main lane traffic volume, the headway characteristics in main lanes of upstream transition area were analyzed based on actual data, showing the headway distribution in accord with Erlang distribution. Considering the vehicles' changeable critical headway when driving along upstream transition area, a vehicle merging model was proposed by gap acceptance theory and differential methods, thus a new optimal design method of the upstream transition length was presented. This method reveals the effect of upstream transition length, traffic flow of main lane and merging speed on merging probability. Results show that the merging model can well consider the effect of expressway geometry characteristic and traffic conditions on driver's merging behavior. The upstream transition length provides a new method for the design of work zones.

Key words: work zones; upstream transition area; merging lane; merging model

高速公路养护施工区由于封闭部分行车道施工等原因, 改变了原有车流的行驶状态, 封闭行车道(以下简称“汇入车道”)的车流需要在施工区的上游过渡区汇入非封闭车道(以下简称“主车道”), 由于车辆的汇入行为往往会引起交通流紊乱, 行车速

度降低, 延误增加, 形成高速公路的“瓶颈”路段。因此, 有必要对施工区上游过渡区车辆的汇入特征及上游过渡区长度设计方法进行研究。传统的施工区上游过渡区长度的计算公式为

收稿日期: 2011-08-25.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAG13A03).

作者简介: 孙智勇(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事道路交通安全方面的研究, E-mail: sunzhiyong@emails.bjut.edu.cn.

$$L = \begin{cases} \frac{v^2 W}{155} & (v \leq 60 \text{ km/h}) \\ 0.625vW & (v > 60 \text{ km/h}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: L 为上游过渡区长度; W 为被关闭的车道宽度; v 为车辆在上游过渡区的行驶速度. 这种设计方法适用于交通量不是很大时的情况, 当交通量比较大时, 会发生排队拥堵而不适用. 这是因为式(1)没有考虑高速公路主车道和汇入车道的交通量、车头时距等基本参数, 当主车道的交通量较大时, 在汇入车道上行驶的车辆需要寻找可接受间隙汇入主车道. 国内外对于车流汇入特征和模型的研究主要针对互通立交的合流区. 文献[1-2]在应用间隙-接受理论的过程中, 详细分析了外侧车道车头时距的分布特性; 文献[3-4]在对实测数据分析基础上, 提出高速公路入口匝道主车道车头时距符合 k 阶爱尔朗分布; 文献[5-6]指出城市快速路互通立交合流区车头时距分布符合韦布尔分布; 文献[7-8]通过对合流区车辆的汇入特征数据分析, 建立了匝道车辆的汇入模型和行驶距离模型; 文献[9]利用相对车头时距分析主线车流与合流车辆运行速度, 主线流量对合流的影响, 得到了新的加速车道长度计算模型; 文献[10]采用波动理论方法建立数学模型, 分析不同匝道和主线上游流量条件下, 匝道合流区上游和下游等处的交通流运行状态和交通流的演变规律; 文献[11]利用间隙接受理论, 以高速公路主线和加速车道的车流量、最小车头时距等参数为基础, 研究高速公路加速车道长度设计方法; 文献[12]研究了高速公路施工区的交通特性, 施工区车辆运行特性表现为合流车辆会造成施工区交通流重分布、超车道车辆优先通行以及合流的强制性等.

以上的研究对于互通立交合流区的车头时距研究取得了不同的结论, 而高速公路施工区与互通立交合流区对交通流影响不同, 对施工区上游过渡区

主车道车头时距分布的研究很少; 间隙接受理论已经广泛应用于互通合流区车辆汇入模型、加速车道长度设计和通行能力的研究, 但以往研究通常基于临界间隙为某一固定值, 而没有考虑上游过渡区长度对于驾驶员汇入决策过程的影响. 本文在以往研究的基础上, 首先对施工区上游过渡区主车道车头时距的分布进行研究, 基于概率论的可接受间隙理论, 考虑汇入过程中驾驶员的行为特性, 应用概率和微分法建立高速公路上游过渡区的车辆汇入模型, 在此基础上提出上游过渡区长度的设计方法.

1 施工区上游过渡区主车道车头时距分布特性

为了研究施工区上游过渡区车辆汇入对主车道交通流的影响, 对京港澳高速公路广州至珠海段、沈海高速佛山至开平段、京沪高速济南至泰安段和北京至天津段等展开调研, 利用气压管采集仪、视频摄像机、NC200 交通数据检测仪等设备, 采集施工区上游过渡区不同断面的车型、车速、驾驶特性、排队特征、交通量、车头时距等数据, 数据采集示意图如图 1 所示.

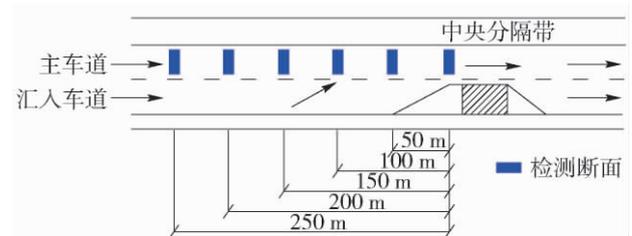


图 1 调查地点仪器布置示意

Fig. 1 Layout of apparatus in research region

对不同断面检测的数据汇总结果如表 1 所示. 以往的研究表明, 交通流在非拥挤情况下, 车头时距的分布符合 k 阶爱尔朗分布 ($k = 1, 2, 3$), 对采集的

表 1 上游过渡区主车道车头时距统计

Table 1 Statistics of headway in main lane of upstream transition area

位置	均值	方差	k	样本量	χ^2	结果 ($\chi^2_{0.05} = 43.77$)
上游过渡区终点 0 m	9.91	68.98	1.42	1 377	41	符合
上游过渡区终点前 50 m 处	10.50	67.64	1.63	879	39	符合
上游过渡区终点前 100 m 处	7.96	49.51	1.28	1 405	24	符合
上游过渡区终点前 150 m 处	9.59	61.78	1.49	987	29	符合
上游过渡区终点前 200 m 处	8.12	50.52	1.31	1 208	31	符合
上游过渡区终点前 250 m 处	7.90	58.46	1.07	1 122	22	符合

数据整理、剔除无效数据后,发现车头时距曲线基本符合负指数分布(1阶爱尔朗分布),对不同断面的数据计算相应的均值、方差和 k 值,进行 χ^2 分布拟合检验,从检验结果来看,车头时距分布符合爱尔朗分布,这与文献[3-4]的研究结论是一致的。

2 施工区上游过渡区车辆的汇入过程分析及模型建立

2.1 汇入过程分析

间隙接受理论在研究高速公路互通立交交流区通行能力和汇入模型中被广泛应用,其假设主车道优先通行,汇入车道的车辆在优先道路车头间距大于某一值(即临界间隙)时方可汇入或直行穿过,否则必须停车等待直到出现可汇入间隙。以往研究中临界间隙多为某一固定的数值,然而,在实际汇入过程中,随着车辆进入施工区的上游过渡区,在交通量较小时,驾驶员可选择汇入间隙轻松地完成汇入,当交通量较大时,出现临界间隙的概率降低,车辆需要行驶一定的距离从而选择临界间隙完成汇入,随着上游过渡区终点的临近,驾驶员会选择更小的间隙进行汇入,直到上游过渡区终点,如果还未完成汇入,驾驶员停车等待进行强行汇入。因此可看出,临界间隙随着车辆在上游过渡区行驶距离的增加而减小,可建立临界间隙与上游过渡区行驶距离的相关函数。

本文假设临界间隙与上游过渡区行驶距离是线性关系,初始临界间隙为 t_0 ,在上游过渡区终点驾驶员强行汇入的临界间隙是主车道最小车头时距 t_1 ,上游过渡区长度为 L ,上游过渡区行驶距离为 l 处的临界间隙为 t_l ,因此,临界间隙与上游过渡区行驶距离的关系式为

$$t_l = (t_1 - t_0) l/L + t_0 \quad (2)$$

2.2 上游过渡区车辆的汇入模型及长度设计

2.2.1 上游过渡区车辆的汇入模型

设车辆在上游过渡区起点 $x=0$ 至 $x=l$ 处的汇入概率为 $P(l)$,主车道某一点 l 处出现临界间隙的概率是随机的,符合一定的概率分布, $P(h \geq t) = F(t)$,设汇入车道车辆在 $l + \Delta l$ (其中 $\Delta l \rightarrow 0$)处成功汇入的概率为 $P(l + \Delta l)$,则

$$P(l + \Delta l) = P(l) + (1 - P(l)) \Delta t F(t_l) \quad (3)$$

式中 Δt 为汇入车道车辆在 Δl 的行驶时间,由于 Δl 非常短,从而车辆在 Δl 内的可接受间隙为其在 l 处的可接受间隙 t_l 。在 Δl 内保持其在位置 l 处的行驶速度,并假设车辆在汇入车道以速度 u 行驶,则 $\Delta t =$

$\Delta l/u$,式(3)可转化为

$$\frac{P(l + \Delta l) - P(l)}{\Delta l} = (1 - P(l)) \frac{F(t_l)}{u} \quad (4)$$

对式(4)左端 Δl 趋于零取极限,可得

$$P'(l) = (1 - P(l)) \frac{F(t_l)}{u} \quad (5)$$

对式(5)求微分方程的通解得

$$P(l) = e^{-\frac{F(t_l)}{u}l} (e^{\frac{F(t_l)}{u}l} + C) \quad (6)$$

由式(6)的连续性及 $l=0$ 位置点的定义可知,当 $l < 0$ 时 $P(l) = 0$,对式(6)两端取 $l=0$ 处的左极限,可得到 $C = -1$,于是汇入车道车辆在 $0 \rightarrow l$ 距离内的累计汇入概率 $P(l)$ 见式(7),式(7)就是施工区上游过渡区的汇入模型。

$$P(l) = 1 - e^{-\frac{F(t_l)}{u}l} \quad (7)$$

那么,车辆在汇入车道上行驶 l 距离时还没有合流的概率为

$$P_N(l) = 1 - P(l) = e^{-\frac{F(t_l)}{u}l} \quad (8)$$

由式(8)可知:车辆在汇入车道上行驶的距离越长,其不能汇入主车道的概率越小。

2.2.2 上游过渡区长度设计

车辆在进入施工区前,需要经过警告区和上游过渡区,为了计算最短上游过渡区长度,本文假设在警告区驾驶员已经对施工区的警告标志理解,并采取了相应的措施(如减速等),并且在上游过渡区起点车辆就可进行汇入。

根据前面的结论,主车道车头时距分布符合爱尔朗分布,即

$$P(h \geq t) = F(t) = \sum_{i=0}^{k-1} (\lambda kt)^i \frac{e^{-\lambda kt}}{i!} \quad (9)$$

将临界间隙与上游过渡区行驶距离的关系式(2)和式(9)代入式(7),就可得到上游过渡区的长度。

3 算例分析

3.1 汇入概率与上游过渡区长度的关系

针对汇入模型,应用实际数据分析模型中的参数,以证明模型的合理性和有效性。图2为主车道交通量和汇入车道车辆行驶速度一定的情况下,上游过渡区长度与汇入概率的变化关系。假设交通量 $Q = 1000$ 辆/h,初始临界间隙为 $t_0 = 4$ s,最小车头时距 $t_1 = 2$ s,汇入车道车辆行驶速度 $u = 80$ km/h (22.2 m/s),设主车道车头时距符合1阶爱尔朗分布,即 $k = 1$,在 L 分别为200、300和400 m时的汇入概率曲线如图2所示。

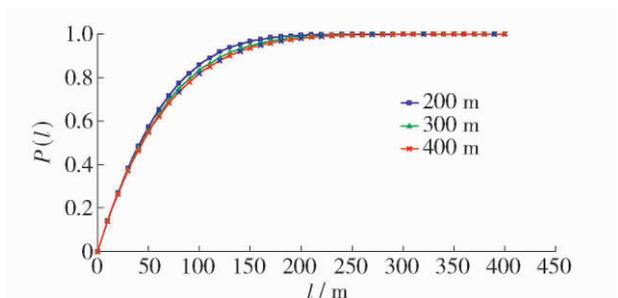


图 2 汇入概率与上游过渡区长度的关系
Fig. 2 Relationship between merging probability and length of upstream transition area

从图 2 可看出 随着上游过渡区长度 L 的增加, 在上游过渡区同一位置的汇入概率下降. 因为随着上游过渡区长度的增加, 驾驶员并不急于汇入主车道, 而是尽可能选择更大的间隙汇入, 上游过渡区的长度增加可提高车辆汇入的安全性, 但是上游过渡区长度超过一定长度后, 对驾驶员的影响将降低, 因此, 通过分析汇入概率和上游过渡区长度的关系能合理地确定上游过渡区的长度. 传统的上游过渡区更多从道路几何因素的角度来进行设计, 提出的长度与实际车辆汇入所需的上游过渡区长度差别较大.

3.2 主车道交通量对汇入概率的影响

主车道交通量也是影响车辆汇入概率的重要因素. 假设其他参数不变, 上游过渡区长度 $L = 400\text{ m}$, 主车道交通量分别取 400、800、1 200 辆/h, 车辆汇入概率如图 3 所示. 当交通量为 400 辆/h 时, 平均车头时距较大, 车辆可选择较短的距离汇入主车道. 当交通量增大到 800 辆/h 时, 车辆需要行驶 200 m 才能实现完全汇入, 而当交通量为 1 200 辆/h 时, 车辆需要行驶 300 m 才能实现完全汇入. 由此可知, 交通量对于车辆的汇入概率有很大影响, 在其他条件相同的情况下, 主车道交通量越小, 汇入概率越大, 所需的上游过渡区长度越小, 反之, 交通量越大,

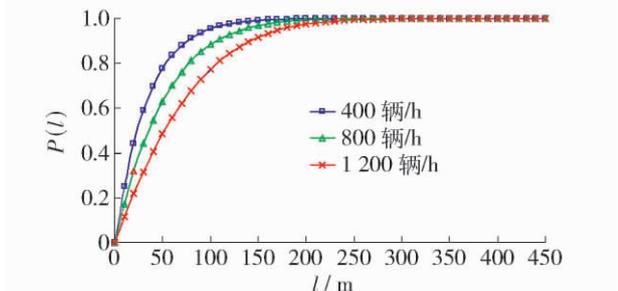


图 3 汇入概率与主车道交通量的关系
Fig. 3 Relationship between merging probability and traffic volume in main lanes

汇入概率越小, 所需的上游过渡区长度越大. 从交通量与车头时距的关系也可得到相同的结论, 交通量越大, 车头时距就越小, 因此, 可接受的间隙出现的概率会大大减小, 设计上游过渡区长度时, 主车道交通量是必须考虑的因素, 并且要考虑到由于天气、假日和事故等带来的短时高峰交通量的影响.

3.3 汇入车道车辆行驶速度对汇入概率的影响

目前, 高速公路施工区主要采用设置限速标志的方式对主车道车辆进行限速, 文献 [13] 的研究结论表明, 限速标志对主车道车辆的运行速度没有显著影响, 因此, 本文分析汇入车道车辆行驶速度对车辆汇入概率的影响. 一般而言, 上游过渡区长度给定时, 车辆在汇入车道上行驶速度越低, 其在汇入车道上可行驶的时间越长, 但汇入需要较大的临界间隙, 当行驶速度接近高速公路主车道的车流速度时, 车辆在汇入车道上行驶时间减少, 但所需临界间隙变小, 因此, 车辆行驶速度与汇入概率的大小有着复杂的关系. 假设所需的临界间隙不变, 其他参数不变, 上游过渡区长度 $L = 400\text{ m}$, 主车道交通量 $Q = 1\ 000\text{ 辆/h}$, 汇入车道车辆行驶速度 u 分别取 40 km/h (11.11 m/s)、60 km/h (16.67 m/s) 和 80 km/h (22.2 m/s) 时, 车辆汇入概率如图 4 所示.

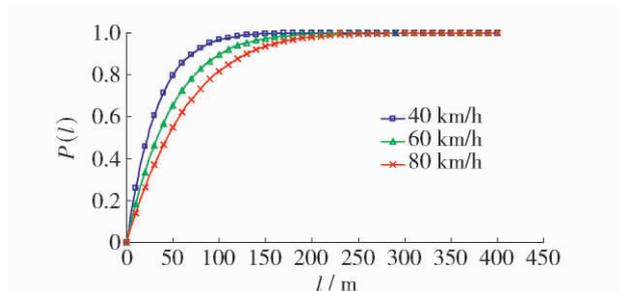


图 4 汇入概率与汇入车道车辆行驶速度的关系
Fig. 4 Relationship between merging probability and merging speed

由此可知, 在其他条件相同的情况下, 汇入车道车辆行驶速度越小, 汇入概率越大, 所需的上游过渡区长度越小; 反之, 当汇入车道车辆行驶速度越大, 汇入概率越小, 所需的上游过渡区长度越大.

4 结论

1) 对高速公路施工区上游过渡区主车道车头时距的分布特性进行了研究, 在调查数据的基础上, 得出主车道车头时距符合爱尔朗分布的结论, 在分析驾驶员汇入行为的基础上, 提出临界间隙与汇入车道行驶距离的关系模型, 利用间隙接受理论和微

分法建立了上游过渡区的车辆汇入模型,并提出了上游过渡区长度的计算方法。

2) 通过进行算例分析,得到不同参数对车辆汇入模型的影响。随着上游过渡区长度的增加,驾驶员倾向选择更大的间隙汇入;当交通量增加时,汇入概率减小,所需的上游过渡区长度增大;汇入车道车辆行驶速度越小,汇入概率越大,所需的上游过渡区长度越小。这些结论对研究施工区上游过渡区车辆的汇入行为及上游过渡区长度的设计等具有积极的意义。

参考文献:

- [1] 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. Headway characteristics of lane 1 on expressway merge area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(1): 114-117. (in Chinese)
- [2] KIM J T, KIM J, CHANG M. Development of a lane changing gap acceptance model for merging on freeway [C]//The 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: Transportation Research Board, 2004.
- [3] KIM S G, SON Y T. Development of a new merge capacity model the effect of ramp flow on the merge capacity [C]//The 81rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: Transportation Research Board, 2002.
- [4] 赵春,王炜,李文权. 主路不同流量条件下入口匝道通行能力研究[J]. 公路交通科技,2005,122(2): 82-85.
ZHAO Chun, WANG Wei, LI Wen-quan. Research on on-ramp capacity in different traffic of main lane [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 122(2): 82-85. (in Chinese)
- [5] 臧晓冬,周伟. 城市快速路互通立交合流区车头时距分布特性[J]. 北京工业大学学报,2010,36(7): 961-965.
ZANG Xiao-dong, ZHOU Wei. Time headway distribution characteristics of merging area on urban expressway interchanges [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(7): 961-965. (in Chinese)
- [6] 裴玉龙,高晗. 城市快速路匝道连接段车头时距分布模型[J]. 交通与计算机,2007,25(5): 4-7.
PEI Yu-long, GAO Han. Headway distribution model in urban freeway [J]. Traffic and Computer, 2007, 25(5): 4-7. (in Chinese)
- [7] 李文权,王炜,邓卫,等. 高速公路加速车道上车辆的汇入模型[J]. 中国公路学报,2002,15(2): 95-98.
LI Wen-quan, WANG Wei, DENG Wei, et al. Merging model of vehicle on freeway acceleration lane [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 95-98. (in Chinese)
- [8] 李文权,王炜,李铁柱,等. 高速公路加速车道上车辆的汇入特征分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版,2002,32(2): 252-255.
LI Wen-quan, WANG Wei, LI Tie-zhu, et al. Characteristics analyses of merges on freeway acceleration lane [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2002, 32(2): 252-255. (in Chinese)
- [9] 邵长桥,荣建. 加速车道长度计算模型及其影响因素[J]. 北京工业大学学报,2008,34(1): 72-75.
SHAO Chang-qiao, RONG Jian. Research on model of computing acceleration lane length and analysis of its influence factors [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(1): 72-75. (in Chinese)
- [10] 杨晓芳,付强,张红军. 入口匝道衔接区域交通流运行机理解析[J]. 同济大学学报: 自然科学版,2008,36(12): 1652-1655.
YANG Xiao-fang, FU Qiang, ZHANG Hong-jun. Operation mechanism of traffic flow in join area of expressway and on-ramp [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(12): 1652-1655. (in Chinese)
- [11] 智永锋,张骏,史忠科. 高速公路加速车道长度设计与车辆汇入模型研究[J]. 中国公路学报,2009,22(2): 93-97.
ZHI Yong-feng, ZHANG Jun, SHI Zhong-ke. Research on design of expressway acceleration lane length and merging model of vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 93-97. (in Chinese)
- [12] 何小洲,过秀成,吴平,等. 高速公路施工区交通特性分析[J]. 公路,2005,12(12): 110-115.
HE Xiao-zhou, GUO Xiu-cheng, WU Ping, et al. Analyses of traffic characteristics of expressway work zones [J]. Highway, 2005, 12(12): 110-115. (in Chinese)
- [13] 钟连德,李秀文,侯德藻,等. 公路施工区限速措施效果评价研究[J]. 公路,2010,3(3): 176-180.
ZHONG Lian-de, LI Xiu-wen, HOU De-zao, et al. Research on evaluation of speed reduction measures in highway work zone [J]. Highway, 2010, 3(3): 176-180. (in Chinese)

(责任编辑 吕小红)