

互通立交入口匝道大型车加速车道长度研究

李敏, 苏莉晓, 李纳纳, 陈婷婷

(山东省公路设计咨询有限公司, 山东 济南 250102)

摘要: 加速车道长度设计是否合理对车辆运行安全至关重要。为提高互通立交入口匝道加速车道长度设计的合理性及车辆运行的安全性,通过分析合流影响区车辆交通特性,基于修正的二阶爱尔朗车头时距分布模型,建立大型车在不同坡度($-2\% \leq i \leq 2\%$)、不同比功率($8 \sim 12 \text{ kW/t}$)下的加速车道长度计算模型,重点研究大型车在不同坡度、不同比功率下的加速车道长度。研究发现:坡度、比功率与加速车道长度均成正比。该研究可以为针对大型车的高速公路互通立交加速车道长度相关规范的修订提供参考。

关键词: 大型车;互通立交;加速车道长度;坡度;比功率

中图分类号: U412.35+2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)01-0058-04

0 引言

据统计,在高速公路变速车道上发生的交通事故中,大型车事故率占20%以上^[1],由于合流时主线车速快,入口匝道的事故数占比较大,其中加速车道长度不足是导致事故率高的主要原因之一。同时由于大型车车身长且重、加速慢,合流时间长,合流所需要的加速车道长度要比小型车长。我国现行《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)(简称“规范”)^[2]中规定的不同设计速度下最小加速车道长度不能满足比功率较小、坡度较大时大型车的加速合流需求,存在一定安全隐患。因此分析互通立交入口匝道大型车交通特性,研究更加合理、人性化的大型车加速车道长度至关重要。

国内外很多学者对于变速车道长度及车辆合流特性进行了深入研究。Mohsen等^[3]通过对大、小型车加速行为进行研究,从而发现在合流区加速车道的长度不能满足大货车的加速要求,应结合大型车的运行特性增加加速车道的长度以保证车辆安全汇入。Weng等^[4]通过研究车辆合流影响因素,发现大型车汇入主线需要的可插入间隙大。张亚坤等^[5]研究了大型车比功率、坡度与加速车道长度的关系,推导出符合我国互通立交车辆运行状况的加速车道长度推荐值。

收稿日期: 2023-05-10

作者简介: 李敏(1993—),女,工学硕士,工程师,从事公路设计工作。

1 合流影响区交通特性研究

如图1所示,合流影响区指主线车道1、车道2及加速车道合流鼻上游150 m,下游760 m的范围^[6]。

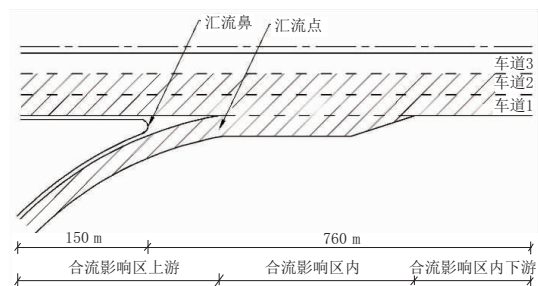


图1 合流影响区范围示意图

1.1 车头时距分布模型

不同车流量服从不同的车头时距分布模型。受车辆加速合流行为的影响,车道1在整个合流影响区不同区段的车流量不同,因此车头时距分布模型不同。合流影响区上游,车辆行驶相对自由,车道1车流量分布在 $0 \sim 250 \text{ veh/h}$ 范围内,此时车头时距服从1阶爱尔朗分布;在合流影响区内及下游,受车辆合流行为的影响,车道1车流量增加,基本保持在 $250 \sim 500 \text{ veh/h}$ 范围内,此时车头时距服从2阶爱尔朗分布^[7]。

1.2 可插入间隙特性

可插入间隙是指匝道车辆顺利汇入主线时利用的最小车头时距^[8-9]。合流车辆从匝道经过加速车道驶入主线,在行驶过程中跟随道路条件及周围车辆行驶状况来适当调整车辆行驶的速度,寻找主线合适的可插入间隙。大量的调查统计资料和研究表明,大型

车可插入间隙一般在 4.5~5 s^[10]。

2 加速车道长度计算模型及关键参数取值

2.1 计算模型

经实地调研发现,当前大多数互通立交入口匝道采用单车道平行式,因此本文研究的加速车道形式为单车道平行式。如图 2 所示,加速车道长度包括加速段 L_1 、等待段 L_2 和渐变段 L_3 ,净加速车道长度 $L_{12}=L_1+L_2$ 。

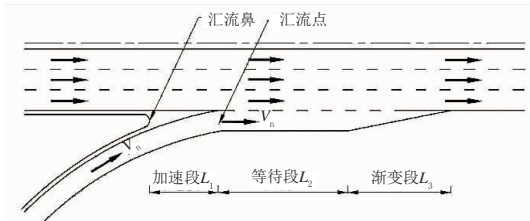


图 2 单车道平行式加速车道长度示意图

根据如图 2 所示的车辆在加速车道每段的驾驶特性,结合 1.1 节分析,本文以二阶爱尔朗车头时距分布模型为基础,建立合流车辆在坡度 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 的加速车道长度计算模型。

坡度 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 的的大型车加速车道长度计算模型如下:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = \int_{v_n}^v \frac{u}{a_i} du + \frac{v_n}{3.6} t_w + \frac{v_m - v_n}{3.6} t \quad (1)$$

式中: v_n 为汇流鼻初速度, km/h; v_m 为汇流点末速度, km/h; u 为车辆行驶速度, km/h; a_i 为车辆加速度, m/s^2 ; a 为车辆平均加速度, m/s^2 ; a_0 为车辆重力分力沿坡面产生的反向加速度, m/s^2 ; t_w 为平均等待时间, s; t 为横移时间, s。

2.2 模型关键参数取值

2.2.1 汇流鼻初速度 v_n

图 3、图 4 为实测坡度 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 的互通立交汇流鼻平均运行速度^[7]。结合车辆实际汇流情况,以汇流鼻平均运行速度作为加速车道长度计算的汇流鼻初速度。

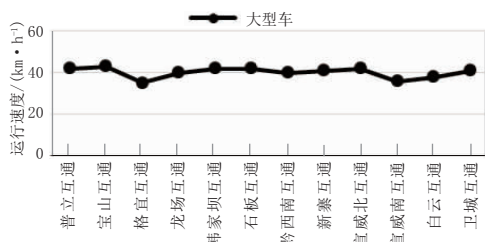


图 3 匝道设计速度 40 km/h 的汇流鼻平均运行速度曲线图

结合实际调研数据并参考规范等相关规定,推荐大型车在坡度 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 的汇流鼻初速度的取

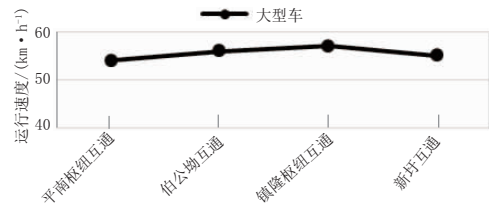


图 4 匝道设计速度 60 km/h 的汇流鼻平均运行速度曲线图
值如表 2 所列。

表 2 汇流鼻初速度取值表

匝道设计速度 / ($km \cdot h^{-1}$)	80	70	60	50	40	35
$v_n / (km \cdot h^{-1})$	60	55	50	40	35	20

2.2.2 汇流点末速度 v_m

参考日本、美国相关规范及国内观测统计资料^[11],推荐主线设计速度 80 km/h、100 km/h、120 km/h 时的汇流点末速度取值,见表 3 所列。

表 3 汇流点末速度取值表

主线设计速度 / ($km \cdot h^{-1}$)	120	100	80
$v_m / (km \cdot h^{-1})$	70	65	58

2.2.3 车辆加速度 a_i

结合汽车理论,以东风 EQ-140 车型为研究对象,分析大型车在爬坡过程中的受力,可知车辆在坡度为 i 的坡道上行时,车辆主要受力有空气阻力 F_w 、坡度阻力 F_i 、滚动阻力 F_f 、加速阻力 F_a ,根据汽车运动方程可知^[7]:

$$T = F_w + F_i + F_f + F_a \quad (2)$$

$$\text{其中: } T = \frac{P}{v} \eta_T, F_w = \frac{C_a A v^2}{21.15}, F_i = Gi, F_f = Gf, F_a =$$

$$\delta \frac{G}{g} a_i。$$

通过计算可得:

$$a_i = \frac{3600 P \eta_T}{\delta v M} - \frac{C_a A v^2}{21.15 \delta M} - \frac{Gi}{\delta} - \frac{Gf}{\delta} \quad (3)$$

式中: A 为车辆迎风面积, m^2 ; v 为行驶速度, m/s ; a 为加速度, m/s^2 ; i 为纵坡, %; G 为车辆总重力, N; P 为发动机功率, kW; M 为车辆总质量, kg; P/M 为比功率, kW/kg; η_T 为传动系统的机械效率; C_a 为空气阻力系数; δ 为惯性力系数; f 为滚动阻力系数; g 为重力加速度, m/s^2 ^[7]。

根据公式(3)可以看出,大型车加速度与车辆的速度 v 、坡度 i 及比功率 P/M 有关;车辆在加速行驶过程中,随着坡度、比功率的变化,加速度也在发生变化。

3 大型车加速车道长度

3.1 不同坡度下大型车加速车道长度

3.1.1 加速段长度

由公式(3)分析可知,大型车的加速度是实时变化的,因此通过积分计算方法对加速车道长度进行计算,见公式(4)。

$$L_1 = \int_{v_n}^v \frac{u}{a_i} du = \int_{v_n}^v \frac{21.15 \delta u^2}{71 \cdot 640 P/M \eta_r - C_a A v^3/M - 21.15 u g i - 21.15 u g f} du \quad (4)$$

式中: L_1 为加速段长度,m; v 为运行速度,km/h,取值范围为 $v_n \sim v_m$; v_n 为汇流鼻初速度,km/h; a_i 为加速度, m/s^2 , $2\% \leq i \leq 2\%$;式中其它字母代表的含义同公式(3)。

以实际调研中的东风汽车EQ-140货车为例,公式(4)中参数取值见表4所列。

表4 汽车运动方程中参数取值表

参数	P/kW	η_r	C_a	A/m^2	M/t	f	δ	$g/(m \cdot s^2)$
取值	100	0.9	0.8	6.0	10	0.01	1.07	9.8

通过表4中参数计算出东风汽车EQ-140的比功率为10 kW/t。结合实际情况,当坡度小于0时,有利于车辆加速,所需加速车道长度比上坡时小。因此以此车型为例,利用MATLAB软件编程,绘制出比功率10 kW/t,坡度 $0\% \leq i \leq 2\%$ 时的大型车的速度与加速段长度的关系曲线图见图5所示。

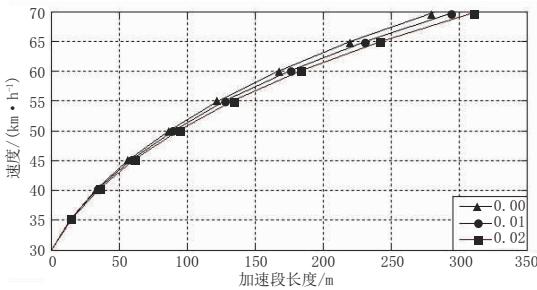


图5 坡度0%~2%的大型车运行速度-加速段长度曲线图

从图5中可以看出,坡度 $0\% \leq i \leq 2\%$ 时,坡度越大,车辆加速所需的加速车道长度越长。由于坡度 $0\% \sim 2\%$ 的加速段长度相差很小,为保证大型车行车安全,计算出坡度 $i=2\%$ 时大型车需要的加速段长度作为坡度 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 时的大型车加速段长度的推荐值。具体推荐值如表5所列。

3.1.2 等待段长度

通过1.1节分析可知,合流影响区范围内车道的车头时距服从2阶爱尔朗分布。车头间距至少为

表5 坡度 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 的大型车加速段长度表

$i/\%$	$v_{\text{主线}} / (km \cdot h^{-1})$	$v_m / (km \cdot h^{-1})$	$v_{\text{匝道}} / (km \cdot h^{-1})$					
			80	70	60	50	40	35
			$v_n / (km \cdot h^{-1})$					
			60	55	50	40	35	30
	120	70	130	180	220	275	295	310
$i=2\%$	100	65	—	—	145	180	205	225
	80	58	—	—	—	130	150	165
	80	58	—	—	—	145	165	180

一个车身长加上一定的安全车距。因此需要对2阶爱尔朗分布进行修正。修正后的2阶爱尔朗分布的概率密度函数为:

$$f(t) = \lambda^2(t-\tau)e^{-\lambda(t-\tau)} \quad (5)$$

车头时距大于等于t的概率为:

$$p(h \geq t) = [\lambda(t-\tau)+1] e^{-\lambda(t-\tau)} \quad (6)$$

汇流车辆在等待m个不可插入间隙后汇入主线的概率为:

$$P(\text{等待 } m \text{ 个间隔}) = \{1 - [\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)}\}^m [\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)} \quad (7)$$

则平均等待个数为:

$$\bar{n} = \sum_{i=0}^{\infty} i P(i) = \frac{[\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)}}{1 - [\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)}} \quad (8)$$

该级数绝对收敛:

$$\bar{n} = \frac{1 - [\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)}}{[\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)}} \quad (9)$$

则平均每个间隔的等待时间为:

$$\bar{H} = \frac{\int_{\tau}^{t_c} t \lambda^2(t-\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} dt}{1 - [\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)}} = \frac{\tau + \frac{2}{\lambda} - \left[\lambda \left(t_c + \frac{1}{\lambda} \right)^2 + \frac{1}{\lambda} - \tau \lambda t_c - \tau \right] e^{-\lambda(t_c - \tau)}}{1 - [\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)}} \quad (10)$$

平均等待时间等于 \bar{H} 与 \bar{n} 的乘积,所以有:

$$t_w = \bar{H} \cdot \bar{n} = \frac{\tau + \frac{2}{\lambda} - \left[\lambda \left(t_c + \frac{1}{\lambda} \right)^2 + \frac{1}{\lambda} - \tau \lambda t_c - \tau \right] e^{-\lambda(t_c - \tau)}}{[\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-\lambda(t_c - \tau)}} \quad (11)$$

车辆在等待段以汇流点末速度 v_m 匀速行驶,因此等待段长度 L_2 为:

$$L_2 = \frac{v_m}{3.6} t_w \quad (12)$$

式中: Q_{max} 为单车道二级服务水平最大交通量; λ 为车辆单位时间的平均到达率, $\lambda = Q/1800, \text{veh/s}$; τ 为目标车道最小车头时距, $\tau = 1800/Q_{\text{max}}$; \bar{n} 为平均等待个数,个; t_w 为平均等待时间,s; t_c 为可插入间隙值,

s,大型车的可插入间隙值一般取 4.5~5 s^[7]。

具体的大型车等待段长度计算结果如表 6 所列。

表 6 大型车等待段长度表

参数	取值		
$v_{\text{主线}} / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	120	100	80
$v_m / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	70	65	58
t_c / s	4.5	4.75	5.0
$Q_{\text{max}} / (\text{veh} \cdot \text{h} \cdot \text{lane})$	1 600	1 400	1 200
$\tau / (\text{s} \cdot \text{veh})$	1.125	1.286	1.500
$\lambda / (\text{veh} \cdot \text{s})$	0.749	0.656	0.562
$\bar{n} / \text{个}$	2.45	1.96	1.41
t_w / s	6.96	6.10	4.81
L_2 / m	135	110	80

3.1.3 渐变段长度

车辆在渐变段以汇流点末速度 v_m 匀速行驶,因此渐变段段长度 L_3 为:

$$L_3 = \frac{1}{3.6} v_m t \quad (13)$$

式中: t 为横移时间,s,取 4 s。

综上,经过计算,纵坡 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 的大型车加速车道长度 L 如表 7 所列。

表 7 坡度 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 大型车加速车道长度表

$i/\%$	$v_{\text{主线}} / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$v_m / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	渐变段长度 / m	$v_{\text{匝道}} / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$					
				80	70	60	50	40	35
				$v_n / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$					
				60	55	50	40	35	30
$i=2\%$	120	70	80	265	315	355	410	430	445
	100	65	75	—	—	255	290	315	335
	80	58	65	—	—	—	210	230	245

从表 7 中可以看出大型车加速过程需要的单车道加速车道的长度比《规范》中规定的长。大型车在 $v_{\text{匝道}}=40\sim 50 \text{ km/h}$ 时需要的加速车道长度是《规范》中规定长度的 1.2~1.8 倍。

3.2 不同比功率的大型车加速车道长度

通过公式(4)、公式(12)及公式(13)可知,大型车加速段长度与比功率成反比,大型车等待段、渐变段长度与比功率无关。通过 MATLAB 编程,研究大型车在不同比功率下加速段长度和比功率的关系,以坡度 $i=2\%$ 为例,计算出比功率为 8~12 kW/t 的大型车加速段长度,见表 8 所列。

表 8 比功率为 8 kW/t~12 kW/t 大型车加速车道长度推荐值一览表

$P/W / (\text{kW} \cdot \text{t}^{-1})$	$v_{\text{主线}} / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$v_m / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	渐变段长度 / m	$v_{\text{匝道}} / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$					
				80	70	60	50	40	35
				$v_n / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$					
				60	55	50	40	35	30
8	120	70	80	305	370	425	500	525	545
	100	65	75	—	—	305	380	405	425
	80	58	65	—	—	—	250	275	295
9	120	70	80	285	340	385	450	475	490
	100	65	75	—	—	280	345	370	385
	80	58	65	—	—	—	225	250	265
10	120	70	80	265	315	355	415	435	450
	100	65	75	—	—	260	320	340	355
	80	58	65	—	—	—	210	230	245
11	120	70	80	250	95	330	385	400	415
	100	65	75	—	—	245	300	315	330
	80	58	65	—	—	—	195	210	225
12	120	70	80	240	280	315	360	380	390
	100	65	75	—	—	235	280	300	310
	80	58	65	—	—	—	185	205	215

4 结论

计算结果发现:(1)主线设计速度一定时,匝道设计速度越小,需要的加速车道越长。(2)匝道设计速度一定时,主线设计速度越大,需要的加速车道越

长。(3)考虑到大型车加速车道长度受坡度的影响较大,对大型车从坡度 $2\% \leq i \leq 2\%$ 建立相应加速车道长度计算模型,计算出在坡度 $-2\% \leq i \leq 2\%$ 时,大型车在匝道设计速度 $=40\sim 50 \text{ km/h}$ 时需要的加速车道长度是《规范》中规定的长度的 1.2~1.8 倍。(4)一定

(下转第 69 页)

仑山路立交建设条件,节点处主路双向六车道,辅路双向四车道。主路设计速度 60 km/h,辅路设计速度 40 km/h。

4 结 语

胶州湾第二海底隧道将会使黄岛端现状路网交通饱和度有不同程度增加,对衔接路网的疏解能力提出了更高的要求。根据二隧黄岛端出入口设置方案,结合交通影响分析,分层梳理疏解路网体系,对综合交通规划路网进一步细化与提升,从而提高了黄岛端路网对外疏解能力,并考虑第二海底隧道对沿线组团的服务作用。截至 2023 年 3 月,淮河路高架桥、嘉陵江路(昆仑山路-奋进路段)快速化改造、疏港高架拓宽(含西接 2 号疏港高速匝道、黄岛立交改造、通河路立交匝道等)工程已开始实施,黄河路

高架桥项目正稳步推进,规划方案将充分发挥第二海底隧道对西海岸新区发展的带动作用,促进胶州湾东西两岸一体化发展。

参考文献:

[1] 青岛规划建设第二条海底隧道[J].建筑技术开发,2017,44(20):16.

[2] 李勋高,万浩,苏南.青岛胶州湾第二海底隧道西端接线方案研究[J].工程技术研究,2020,5(19):209-210.

[3] 上海市城市规划设计研究院,青岛市城市规划设计研究院.青岛西海岸新区总体规划(2018-2035年)[Z].青岛:上海市城市规划设计研究院,2019.

[4] 青岛市城市规划设计研究院.西海岸新区综合交通规划(2017-2035年)[Z].青岛:青岛市城市规划设计研究院,2018.

[5] 许佳.临港新片区骨干路网规划研究[J].城市道桥与防洪,2021(9):19-21.

[6] 袁倩倩,陈丹.关于城市快捷路设计的探讨和思考[J].城市道桥与防洪,2020(12):26-28.

(上接第 61 页)

坡度下,比功率越大,车辆加速性能越好,合流需要的加速段越短,加速车道长度越短。

参考文献:

[1] 张慧杰,程玮.高速公路互通立交加减速车道长度设计[J].交通运输研究,2012(12):130-132.

[2] JTG D20—2017,公路路线设计规范[S].

[3] Mohsen S. Reliability-Based Design of Freeway Acceleration Speed-Change Lanes[D].Diss: University of Ottawa, 2010.

[4] Weng J.X., Li G.R., Yu Y.. Time-dependent Drivers' Merging Behavior Model in Work Zone Merging Areas[J]. Journal of Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, V80:409-422.

[5] 张亚坤,李敏,杨碧琦.互通立交入口匝道大型车加速特性研究[J],

汽车实用技术,2020,22:214-217.

[6] 王玮,过秀成.交通工程学[M].南京:东南大学交通出版社,2011.

[7] 李敏.不同车型的高速公路互通立交加减速车道长度研究[D].西安:长安大学,2018.

[8] 孔令臣.多车道高速公路互通立交加减速车道长度及最小净距研究[D].西安:长安大学,2012.

[9] 李文权,张云颜.道路互通立交系统通行能力分析[M].北京:科学出版社.2009.

[10] 李铁柱,李文权,周荣贵.高速公路加减速车道合流分流特性分析[J],公路交通科技,2001,18(4):89-91.

[11] 交通运输部公路科学研究院.高速公路互通立交分、合流区辅助车道长度设计标准研究[R].2001.