

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.053

# 互通式立交出口匝道运行速度过渡段长度研究

白浩晨, 柳银芳

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 为确定车辆在互通式立交出口匝道满足安全行驶需求的运行速度过渡段最小长度, 分别建立了满足超高过渡、变速行驶、3 s 行程时间及横向加速度变化率适中等要求的运行速度过渡段长度计算模型。采用 UMRR 链式开普勒雷达测速仪, 实测不同主线设计速度下立交出口匝道分流鼻运行速度, 结合 SPSS 软件分析, 得到分流鼻运行速度。基于运行速度过渡段长度计算模型和典型参数的分析论证, 得到了满足不同需求下的运行速度过渡段长度。结果表明: 匝道设计速度为 30~40 km/h 时, 车辆变速行驶需求为运行速度过渡段长度的主要控制因素; 匝道设计速度为 50~80 km/h 时, 超高过渡、3 s 行程时间为运行速度过渡段长度的主要控制因素; 基于安全行驶需求, 提出了互通式立交出口匝道运行速度过渡段长度最小建议值及纵坡修正系数。

**关键词:** 互通式立交; 运行速度过渡段; 理论分析; 分流鼻运行速度

## 1 前言

互通式立交作为高速公路的重要组成部分, 主要呈现为喇叭形、梨形、苜蓿叶形、枢纽形等主要形式, 其中, 以单喇叭互通式立交为主, 约占所有互通式立交的

68%。相关数据表明: 发生在高速公路立交分流区及其影响范围内的事故占总事故的比例超过 30%。由于互通式立交各出口匝道设计速度较主线设计速度低, 出口匝道线形存在高低指标相互衔接的情况, 存在较大安全隐患; 此外, 车辆到达减速车道分流鼻位置时的运行速度远远大于出口匝道限速值, 仍处于高速分

\*\*\*\*\*

### 参考文献:

- [1] 雷正保, 唐波, 刘兰, 等. 车一路一护栏系统的碰撞安全性 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2009.
- [2] VAN DE MOLENGRAFF LUIJTEN M F J, BESSELINK I J M, VERSCHUREN M A F, et al. Analysis of the Lateral Dynamic Behavior of Articulated Commercial Vehicles [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50 (S1): 169-189.
- [3] CHENG Cai-zhen. Enhancing Safety of Actively Steered Articulated Vehicles [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2009.
- [4] American Association of State Highway and Transportation offices. Manual for Accessing Safety Hardware [S]. 2009: 1-88.
- [5] JTG/T F83-01-2013 高速公路护栏安全性能评价指标 [S].
- [6] 高云凯, 彭和东, 张荣荣. 集装箱汽车列车与桥梁护栏碰撞分析 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2005 (1).
- [7] 邵永刚. 组合式桥梁护栏防撞性能仿真与试验 [J]. *交通运输工程学报*, 2010 (1).
- [8] 韩海峰, 皮振新, 李新伟. 新型梁柱式钢护栏研发与防撞性能试验研究 [J]. *中外公路*, 2016 (5).
- [9] 刘爽. 高速公路临时防护栏安全性分析及试验研究 [J]. *公路*, 2018 (1).
- [10] 肖顺. 高速公路路侧护栏设计优化探究 [J]. *大科技*, 2017 (32).
- [11] 崔砚东. 路侧护栏设计优化 [J]. *工程建设与设计*, 2017 (12).
- [12] 陈晖, 姜超, 丁旭东, 等. 波形梁钢护栏升级改造技术研究 [J]. *中外公路*, 2016 (2).
- [13] 闫书明, 包琦玮, 惠斌. 整体货车和拖头货车碰撞护栏分析 [J]. *特种结构*, 2011 (1).
- [14] 赖跃. 重型车辆与半刚性护栏碰撞的有限元分析 [D]. 同济大学硕士学位论文, 2006.
- [15] 雷正保, 刘漫雪, 岳阳洞庭湖二桥钢护栏优化设计 [J]. *长沙理工大学学报*, 2015 (2).

收稿日期: 2019-06-14

作者简介: 白浩晨, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: 37698212@qq.com

流状态。因此,若分流鼻至控制曲线之间的运行速度过渡段长度不能够满足车辆安全行驶要求,易发生冲出护栏、侧翻、追尾等事故,甚至影响主线通行能力。

目前,国内外对于立交出口匝道减速车道的研究相对较多,而针对分流区运行速度过渡段的研究相对较少。AASHTO、Liu B, Kong L、王海君等均是基于二次减速理论,建立了互通式立交减速车道长度计算模型并给出减速车道长度建议值;张驰等通过实测立交单车道出口匝道小客车运行速度,回归出小客车在分流点及分流鼻处运行速度预测模型;王云泽等基于分流行为的随机复杂性,利用二项 Logistic 模型,建立驾驶员分流选择行为的概率模型;潘兵宏等基于驾驶员分流选择行为特征,建立了立交分流区不同分流选择行为的巢式 NL 概率模型,并优化了减速车道、运行速度过渡段参数;上述文献或是对于减速车道长度及特征点运行速度进行建模分析,或是对分流区范围内的驾驶员分流行为进行分析,均未对立交出口匝道运行速度过渡段进行相关研究。刘建蓓等从安全性评价的角度提出了不同类型主线公路的运行速度过渡段设计方法,但对于立交,适应性则显得不足。JTG/T D21-2014《公路立体交叉设计细则》(以下简称《细则》)中对于运行速度过渡段的规定则是参考日本《高速公路设计要领》中的相关规定,两者对分流鼻运行速度的取值不同,从而形成不同分流鼻曲率半径下的运行速度过渡段上任一点的平曲线最小曲率半径图。

该文通过建立运行速度过渡段长度计算模型,实测高速公路互通式立交出口匝道分流鼻运行速度,研究满足车辆安全行驶要求的立交出口匝道运行速度过渡段长度值。

## 2 运行速度过渡段长度

车辆按二次减速理论采用直接分流驶出主线是驾驶员所期望的减速分流方式,然而在实际过程中,由于受到人一车一路一环境等因素的综合影响,驾驶员分流方式主要为直接式/协作式/挤入式,结果使车辆行驶到减速车道终点分流鼻位置时的运行速度往往大于匝道设计速度。

因此,有必要在出口匝道控制曲线与分流鼻之间设置满足强制变速需求的运行速度过渡段,以满足车辆由分流鼻的高速运行状态变化到立交匝道控制曲线(按匝道设计速度控制的曲线)的安全行驶状态,如图1所示。

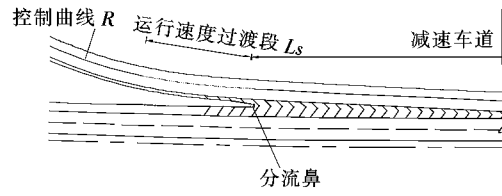


图1 运行速度过渡段示意图

## 3 运行速度过渡段长度计算模型

为保证车辆从主线安全分流,运行速度过渡段长度应满足匝道超高渐变需求  $L_{SUP}$ 、变速行驶需求  $L_{AC}$ 、3 s 行程时间  $L_{3s}$  及横向加速度变化率适中要求  $L_{LCA}$ 。因此,运行速度过渡段最小长度如式(1):

$$L_{TS} = \max\{L_{SUP}, L_{AC}, L_{3s}, L_{LCA}\} \quad (1)$$

式中: $L_{TS}$ 为运行速度过渡段最小长度(m)。

### 3.1 超高渐变需求

《细则》中规定,当主线与匝道转向相反时,分流鼻处与主线横坡代数差值不应大于6%。满足超高过渡的运行速度过渡段最小长度采用式(2)计算:

$$L_{SUP} = (B_2 i_{h2} - B_1 i_{h1}) / \rho_{\max} \quad (2)$$

式中: $B_2$ 、 $B_1$ 为运行速度过渡段起终点路面边缘至旋转轴边缘距离; $i_{h2}$ 、 $i_{h1}$ 为运行速度过渡段起终点超高值; $\rho_{\max}$ 为最大超高渐变率。

由式(2)计算出满足超高渐变需求的运行速度过渡段长度见表1。

### 3.2 车辆变速行驶需求

#### 3.2.1 变速行驶模型

车辆在行驶过程中,受到道路滚动摩阻力、风阻力、道路纵坡、车辆加速度等因素的综合影响。限于篇幅并简化计算模型,该文明考虑在晴朗、风速较小可忽略的天气情况下,车辆的减速行驶需求。

车辆在运行速度过渡段上行驶的纵向受力情况,如图2所示。

车辆的加(减)速度计算公式如式(3)所示:

$$a_{ac} = \frac{Gf \pm G \sin i_g}{m} + a_2(1 + \delta_1 + \delta_2 i_k^2) \quad (3)$$

式中: $a_{ac}$ 为车辆减速度( $m/s^2$ ); $f$ 为路面滚动摩阻力系数; $G$ 为车辆重力(N); $m$ 为质量(kg); $i_g$ 为道路纵坡,纵坡较小时, $\sin i_g = \tan i_g = i_g$ ;  $a_2$ 为制动器减速度( $m/s^2$ ); $\delta_1$ 为车轮惯性力影响系数; $\delta_2$ 为发动机飞轮惯性力影响系数; $i_k$ 为变速箱速比。

立交出口分流鼻运行速度为  $V_0$ ,匝道控制曲线设

表 1 运行速度过渡段长度  $L_{SUP}$

超高 $i_{h2}/\%$	不同匝道设计速度(km/h)时运行速度过渡段长度/m											
	双车道匝道					单车道匝道						
	80	70	60	50~35	30	80	70	60	50	40	35	30
8	91	86	80	68	74	83	80	75	67	56	65	77
7	78	74	68	59	59	71	68	64	57	45	53	61
6	65	62	57	49	49/53	59	57	53	48	36/40	38/47	45/56
5	52	49	46	39	39	48	46	43	38	29	29/32	30/42
4	39	37	34	29	29	36	34	32	29	21	21	21/24
3	26	25	23	20	20	24	23	21	19	14	14	14
2	13	12	11	10	10	12	11	11	10	7	7	7

注：“—/—”对应于最大超高取 8%、6% 时的运行速度过渡段长度最小值。

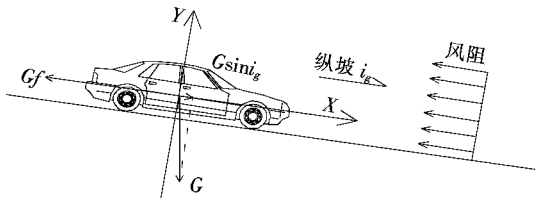


图 2 车辆减速行驶示意图

计速度为  $V_d$ 。当运行速度过渡段纵坡一定时,车辆在该范围内做匀减速运动,得到满足车辆变速行驶要求的最小运行速度过渡段长度  $L_{AC}$  的计算模型,如式(4)所示:

$$L_{AC} = \frac{V_0^2 - V_d^2}{2a_{ac}} = \frac{V_0^2 - V_d^2}{25.92(1.082a_2 + f \pm gi_g)} \quad (4)$$

### 3.2.2 分流鼻运行速度 $V_0$

该文以广州至河源、广州北二环、西安至柞水高速公路为数据采集范围,收集主线设计速度为 120、100、80 km/h 的互通式立交出口匝道分流鼻车辆运行速度。

运行速度获取采用 UMRR 链式开普勒雷达测速仪(简称链式雷达)。该链式雷达能够精确地对移动目标进行位置和速度跟踪,并返回实时的速度值、坐标等参数。仪器前部检测区域为以雷达为中心的扇形区域,每 50 ms 记录 1 次车辆运行速度。

为减少后期数据处理的工作量及试验过程中的干扰。将试验仪器安置于变速车道渐变段起点前 30~40 m 的硬路肩上(图 3),并将测试范围调到分流鼻后 20 m。数据采集在温度适宜、天气晴朗、风速较小、能见度较高的白天进行,车辆受其他因素的影响较小,为自由流状态,测试数据具有代表性。

研究表明:小型车在分流鼻的运行速度大于大型车的运行速度,其差值为 5~10 km/h。因此,在车辆(包括大型车及小型车)减速性能良好的情况下,考虑

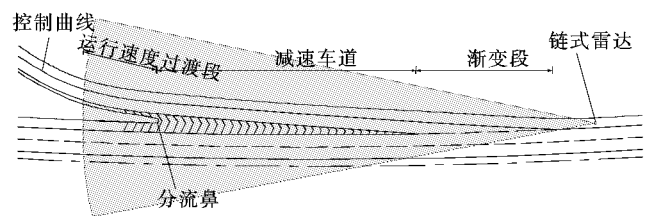


图 3 链式雷达设置位置示意图

最不利情况,该文以小型车为研究对象。根据统计学原理,分流鼻断面所需的小型车最小样本数可由式(5)确定,即:

$$N_{min} = \left( \frac{\delta K}{E} \right)^2 \quad (5)$$

式中:  $N_{min}$  为最小样本量;  $E$  为车速观测值允许误差(km/h),  $E=2$  km/h;  $K$  为置信概率系数,取分流鼻车辆运行速度测试置信概率为 90%,取  $K=1.64$ ;  $\delta$  为样本标准差,取 10。

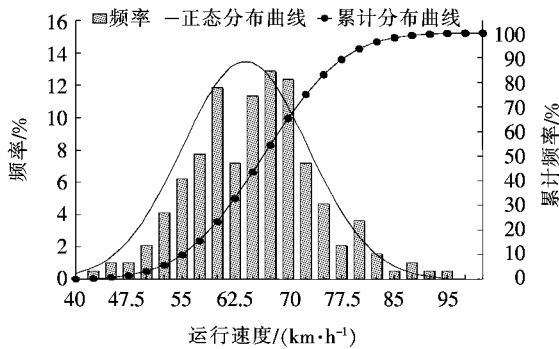
由式(5)计算可得,所需的最小样本数量  $n=67$ 。当实测数据具有正态性时,结果便具有统计学意义,利用 SPSS 软件对各立交出口匝道分流鼻运行速度进行单样本 K-S 正态性检验,结果如表 2 所示。

表 2 单样本 K-S 检验结果

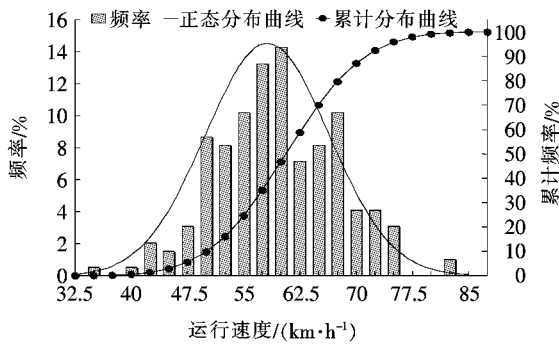
立交编号	样本容量/ 个	Z 值	渐进显著性 水平(双侧)
1	185	0.735	0.864
2	219	0.685	0.734
3	104	0.635	0.812
4	155	0.727	0.513
5	143	0.628	0.772
6	148	0.712	0.62

由表 2 可得:Z 值均大于 0.05,渐进显著性水平(双侧)值均大于 0.1,因此,分流鼻运行速度正态性分布显著,满足统计学要求。

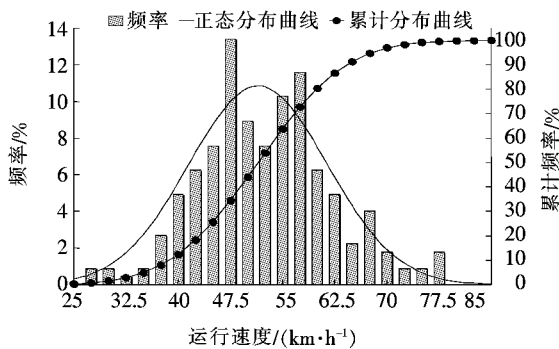
根据样本值的正态分布特性,生成互通式立交出口匝道分流鼻运行速度分布图、频率累计分布图(图 4);对比《细则》、日本对于分流鼻运行速度的规定,得到不同主线设计速度下的分流鼻运行速度见表 3。



(a) 主线设计速度 120 km/h



(b) 主线设计速度 100 km/h



(c) 主线设计速度 80 km/h

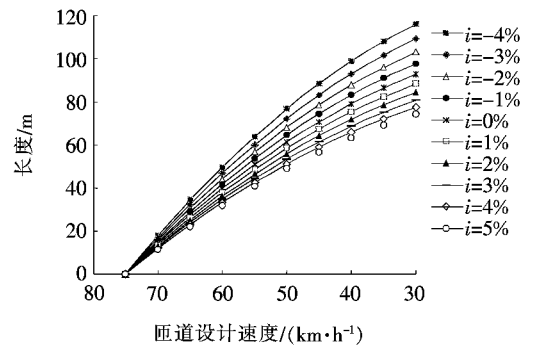
图 4 分流鼻运行速度分布图

表 3 分流鼻运行速度  $V_0$  km/h

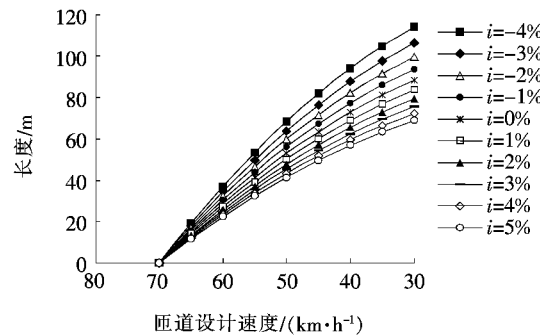
主线设计速度	日本	《细则》	实测值 $V_{85}$	分流鼻运行速度 $V_0$
120	60	70	75	75
100	55	65	69	70
80	50	60	62	65

### 3.2.3 运行速度过渡段最小长度 $L_{AC}$

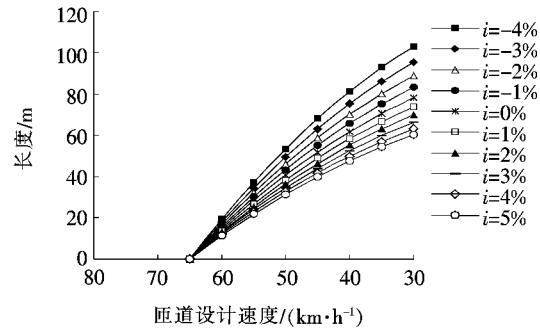
由式(4),得到满足车辆由分流鼻安全减速行驶至出口匝道控制曲线的运行速度过渡段最小长度与纵坡、匝道设计速度之间的变化关系如图 5 所示。



(a) 分流鼻运行速度 75 km/h



(b) 分流鼻运行速度 70 km/h



(c) 分流鼻运行速度 65 km/h

图 5  $L_{AC}$  随纵坡、匝道设计速度的变化关系

### 3.3 3 s 行程时间要求

《细则》中规定,匝道各曲线单元不宜小于 3 s 设计速度行程要求。由于车辆在运行速度过渡段范围内做匀减速运动,则:

$$L_{3s} = \frac{(V_0 + V_d)}{2} t_1 \quad (6)$$

取  $t_1 = 3$  s,当  $V_0 \leq V_d$ ,取  $V_0 = V_d$ ,则满足 3 s 行程时间要求的运行速度过渡段长度如表 4 所示。

### 3.4 横向加速度变化率适中

车辆在运行速度过渡段上行驶时,其横向加速度

表 4 运行速度过渡段长度  $L_{3s}$

$V_0/$ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	不同匝道设计速度(km/h)时过渡段长度/m						
	80	70	60	50	40	35	30
75	63	60	56	52	48	46	44
70	58	58	54	50	46	44	42
65	54	54	52	48	44	42	40

在平、纵、横三方面综合作用后,随曲率、时间的变化而变化。车辆由直线段进入曲线段,横向加速度由零逐渐增大,增加了驾驶员行车负荷,研究表明横向加速度变化率一般为  $0.2 \sim 0.6 \text{ m/s}^3$ 。为使驾驶员或旅客感觉舒适,并控制工程造价,需将横向加速度变化率控制在一个恰当的范围。

车辆在运行速度过渡段上行驶的横向受力如图 6 所示。

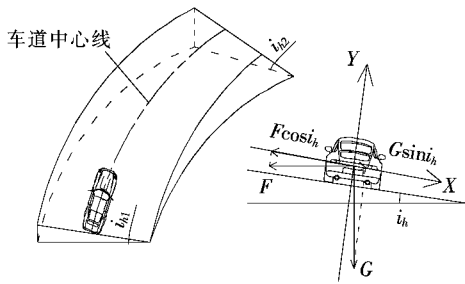


图 6 车辆行驶横向受力示意图

对图 6 进行分析,曲线上任意一点的横向加速度,如式(7):

$$a_{xi} = \frac{V_i^2}{R_i} \cos i_{hi} - g \sin i_{hi} \quad (7)$$

式中: $a_{xi}$ 为任意一点横向加速度( $\text{m/s}^2$ ); $V_i$ 、 $R_i$ 为任一点车辆运行速度(km/h)、该点曲率半径(m); $i_{hi}$ 为任意一点超高值。

由几何关系可知:

$$\sin i_{hi} = \frac{h_{hi}}{\sqrt{b_{hi}^2 + h_{hi}^2}} \quad (8)$$

$$\cos i_{hi} = \frac{b_{hi}}{\sqrt{b_{hi}^2 + h_{hi}^2}} \quad (9)$$

式中: $b_{hi}$ 为任意一点路面边缘至旋转轴边缘距离(m); $h_{hi}$ 为任一点抬高的高度(m)。

车辆在运行速度过渡段范围内做匀减速运动:

$$t = \frac{2L_{LCA}}{V_0 + V_d} \quad (10)$$

则满足横向加速度变化率适中的运行速度过渡段长度为:

$$L_{LCA} = \frac{0.0214}{2P} (V_0 + V_d) \left[ \frac{V_d^2}{R_d} \cos i_{hd} - \frac{V_0^2}{R_0} \cos i_{h0} - g (\sin i_{hd} - \sin i_{h0}) \right] \quad (11)$$

式中: $P$ 为横向加速度变化率,取  $0.5 \sim 0.6 \text{ m/s}^3$ ;  $t$ 为车辆在运行速度过渡段上的运行时间(s)。

极限状态下,取分流鼻处曲率半径  $R_0$  为  $\infty$ ,由式(11)、表 3,计算得到满足横向加速度变化率适中的运行速度过渡段最小长度见图 7。

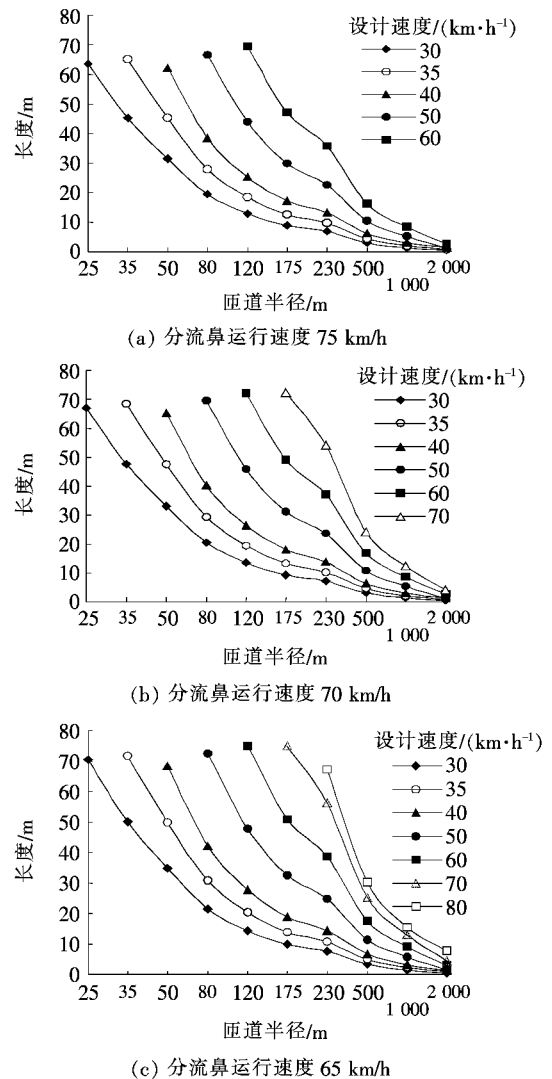


图 7 运行速度过渡段长度  $L_{LCA}$  变化图

当匝道控制曲线半径取极限值时,满足横向加速度变化率适中的运行速度过渡段最大长度为  $65 \sim 75 \text{ m}$  之间。

#### 4 运行速度过渡段长度建议值

综上,当匝道设计速度为  $30 \sim 40 \text{ km/h}$  时,车辆

变速行驶为互通式立交出口运行速度过渡段长度的主要控制因素。由图5可知:以纵坡为零时满足车辆变速行驶需求的运行速度过渡段最小长度为基准值(计算结果按5 m取整,表5),得到不同纵坡下长度修正系数见表6。

表5 运行速度过渡段长度最小建议值  $L_{TS}$   
( $30 \text{ km/h} \leq V_d \leq 40 \text{ km/h}$ )

主线设计速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	不同出口匝道设计速度( $\text{km/h}$ )时 $L_{TS}/\text{m}$		
	40	35	30
120	80	85	95
100	75	80	90
80	65	70	80

表6 纵坡修正系数 ( $30 \text{ km/h} \leq V_d \leq 40 \text{ km/h}$ )

纵坡/%	修正系数	纵坡/%	修正系数
$[-4, -3)$	1.31	$(1, 2]$	0.91
$[-3, -2)$	1.22	$(2, 3]$	0.87
$[-2, -1)$	1.14	$(3, 4]$	0.83
$[-1, 0)$	1.06	$(4, 5]$	0.80
$(0, 1]$	0.95		

当匝道设计速度为50~80 km/h时,运行速度过渡段长度以超高过渡、3 s行程要求为主要控制因素,运行速度过渡段长度最小建议值见表7。

表7 运行速度过渡段长度最小建议值  $L_{TS}$   
( $50 \text{ km/h} \leq V_d \leq 80 \text{ km/h}$ )

超高/ %	不同匝道设计速度( $\text{km/h}$ )时 $L_{TS}/\text{m}$			
	80	70	60	50
8	90/85	85/80	80/75	70
7	80/70	75/70	70/65	60
6	65	65/60	60/55	50
5	65	60	55	50
4	65	60	55	50
3	65	60	55	50
2	65	60	55	50

注:“—/—”对应于匝道横断面为双、单车道断面时运行速度过渡段长度最小建议值。

## 5 结语

该文在建立满足超高过渡、变速需求、3 s行程时间及横向加速度变化率适中要求的运行速度过渡段

长度计算模型的基础上,基于实测分流鼻运行速度值提出了高速公路互通式立交出口运行速度过渡段最小长度建议值。研究结论可为立交出口匝道运行速度过渡段长度取值提供参考及理论依据。

该文未考虑风阻力的影响,后续可通过试验对加速度值进行修正。

## 参考文献:

- [1] 刘子剑.互通式立交设计原理与应用[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [2] 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].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2011.
- [3] 赵晓翠,杨峰,赵妮娜.高速公路互通立交分流区的驾驶行为[J].公路交通科技,2012(9).
- [4] AASHTO. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [M]. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011: 10-114-10-116.
- [5] LIU B, KONG L. Model of Deceleration Lane Length Calculation Based on Quadratic Deceleration [C]. Access Management Theories and Practices, 2015: 180-189.
- [6] 王海君,杨少伟.高速公路互通式立交单车道减速车道长度研究[J].公路交通科技,2015(3).
- [7] 张弛,闫晓敏,李小伟,等.互通式立交单车道出口小客车运行速度模型[J].中国公路学报,2017(6).
- [8] 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(12).
- [9] 潘兵宏,高健强,霍永富.互通式立交车辆分流选择行为的概率模型[J].公路交通科技,2017(7).
- [10] 刘建蓓,郭腾峰,王佐.公路运行速度过渡段设计方法研究[J].公路,2011(4).
- [11] JTG/T D21-2014 公路立体交叉设计细则[M].
- [12] 日本道路公团.日本高速公路设计要领[M].交通部工程管理司译制组,译.西安:陕西旅游出版社,1991.
- [13] 杨少伟.道路勘测设计[M].3版.北京:人民交通出版社,2009.
- [14] 孔令臣.多车道高速公路互通式立交加减速车道长度及最小净距研究[D].长安大学硕士学位论文,2012.
- [15] BAYKAL O. Concept of Lateral Change of Acceleration [J]. Journal of Surveying Engineering, 1996, 122(3): 132-141.
- [16] 杨少伟,许金良,杨宏志.考虑平、纵、横三方面关系的横向加速度变化率[J].中国公路学报,1999(4).
- [17] 林涛.山区公路曲线段车辆加速度及轨迹研究[D].同济大学硕士学位论文,2008.