

基于交通流稳定距离的匝道连续入口最小间距研究

温长鹏¹, 周磊², 潘兵宏¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通规划设计研究院)

摘要:针对中国规范在匝道连续入口间距值规定未考虑合流区整体交通流运行安全的情况,该文从安全角度出发,将匝道连续入口间距分为三角区 L_t ,交通流稳定距离 L_s ,反应距离 L_r ,操作距离 L_o 。进行分段计算。从主次匝道速度组合最不利情况考虑,利用 Vissim 仿真技术进行仿真试验,并从上游合流点开始以 20 m 为间隔进行数据采集,对仿真所得的原始数据进行处理并提取车速标准差变异系数 C_v 指标,研究 C_v 值随距上游合流点距离的变化情况。采用分段线性拟合的方法,对 C_v 值距上游合流点距离的变化情况进行拟合,并以曲线斜率变化值小于等于 $|2.5 \times 10^{-5}|$ 的位置作为交通流开始稳定点,从而确定交通流稳定距离长度 L_s 。采集交通流开始稳定断面的速度平均值,计算驾驶员反应距离 L_r 和操作距离 L_o ,其中操作距离 L_o 分为减速距离和主匝道为双车道时的换道距离,分别计算后选择最大者作为最不利情况,并通过求和得出了基于交通流稳定距离的不同设计速度、不同车道数下的匝道连续入口间距最小值。经计算,该文所得间距值虽大于规范规定值,但是由于间距值计算中考虑了匝道合流过程中交通流达到稳定状态所需的距离,对保证匝道连续合流区域的整体交通安全具有重要作用。

关键词:互通式立交; 连续入口最小间距; 交通流仿真; 匝道; 交通工程

表1 《细则》关于匝道连续入口最小间距规定值

设计速度/ (km · h ⁻¹)	三角区/ m	渐变段/ m	间距值/ m
80	90	120	210
70	80	100	180
60	70	90	160
50	60	80	140

1 引言

由于公路、城市道路的快速的发展,互通式立交数量的增多,在受用地或经济等因素限制时,在匝道上难免出现同侧连续出入口的布置情况,尤其是对于多路互通式立体交叉,如果匝道连续入口之间的间距过小,则易使得主匝道驾驶员和从第一个次匝道汇入驾驶员在遇到第二个入口的车辆汇入时反应不及时,从而导致事故,而若相邻匝道连续入口之间的间距过大,则会造成工程上的浪费。JTG/T D21—2014《公路立体交叉设计细则》(以下简称《细则》)关于匝道连续出入口鼻端的最小间距规定值如表1所示,由三角区长度 L_t 和渐变段长度 L_g 组成,主要考虑为车辆合流与几何设计需要,并未从合流区整体交通流运行安全考虑。

目前,国内外关于出入口间距研究的内容较多。美国 AASHTO 关于匝道连续入口间距规定枢纽互通式立体交叉最小值为 240 m,一般互通式立体交叉最小值为 180 m,其取值未考虑合流速度的不同;Iwasaki 利用交通事故,建立与立交范围的间距相关的研究,

得出入口匝道间距对交通事故率的影响;潘兵宏等针对《细则》关于高速公路主线同侧连续入口间距未考虑上游匝道设计速度和匝道接入形式的情况,建立了由加速车道长度和安全视距组成的高速公路主线同侧连续入口最小间距计算模型,得出基于主线和匝道设计速度、接入匝道车道数的高速公路主线同侧连续入口最小间距指标值;杨少伟等通过研究不同的主线相互合流方式、换道类型及车道数,考虑主线相互合流的交通流特性和车辆换道特征,得到高速公路主线相互合流至主线出口的最小间距值,并通过 Vissim 仿真试验,以冲突率为指标验证了间距的合理性;蒋飞将匝道连续入口间距分为渐变段长度 L_g 和安全视距长度 L_v 。

分别计算,得到了不同匝道设计速度、不同车道数下匝道连续入口最小安全间距值。但是,其研究上游匝道渐变段 L_g 终点速度为主匝道设计速度对应的行驶速度,当主、次匝道交通量较大,在上游进行合流时,如果采用直接合流的形式,那么两者在渐变段终点行驶速度一定会受到干扰减速甚至停车的情况,且该位置的交通情况复杂,如果驾驶员合流后直接对下游的次匝道交通进行反应,则不利于保证驾驶安全;马永锋认为相邻信号交叉口间的交通流状态应为“紊乱—过渡—稳定—过渡—紊乱”的过程,以车速标准差变异系数 C_v 为指标,结合实地观测资料和 Vissim 仿真试验,得出基于交通流稳定距离的信号交叉口间距值。

该文定义匝道连续入口间距为两鼻点之间的距离,针对《细则》关于匝道连续入口间距取值未考虑交

通流运行安全的情况,以及文献[6]关于匝道连续入口间距研究的不足,并结合文献[7]的研究成果,如图 1(a)、(b)所示,将匝道连续合流间距 L 分为三角区 L_t ,交通稳定距离 L_s ,驾驶员反应距离 L_r 以及操作距离 L_o ,采用 Vissim 仿真试验得到车速标准差变异系数 C_v 和相关计算点速度平均值作为距离计算指标,最终计算得不同匝道设计速度,不同车道下的匝道连续入口最小间距值。匝道连续合流情况常存在于形式复杂的复合式互通式立体交叉或多岔交叉互通式立体交叉中,由于该文在匝道连续入口最小间距值计算中考虑了匝道合流过程中交通流达到稳定状态所需的距离,对保证匝道连续入口区域的交通安全具有重要作用,同时研究所得的最小间距值可为互通式立交匝道连续入口设计提供参考依据。

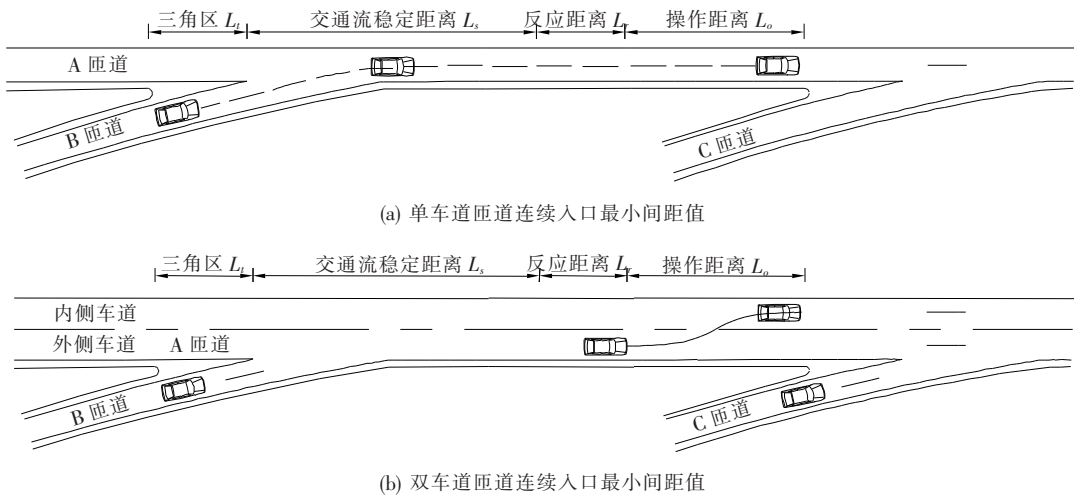


图 1 匝道连续入口最小间距值

2 分段计算

为计算匝道连续入口最小间距,考虑工程实际情况,该文选取主匝道设计速度分别为 80、70、60、50 km/h,同时,由于该文计算过程中,匝道合流的形式均采用直接合流的形式,因此从安全角度考虑,主次匝道间的设计速度差不宜超过 20 km/h,且从最不利情况考虑,该文在计算不同设计速度匝道连续入口最小间距时,上游合流主、次匝道进行 Vissim 仿真的速度标定时速度组合(主,次)为(80,60),(70,50),(60,40),(50,30)。

2.1 渐变段长度

根据《细则》和相关文献,表 1 所列不同设计速度下合流端三角区,主要用于布置三角区斑马线,其长度

由互通式立交连接部的设计模型进行统计分析所得,可反映大部分互通式立交合流端三角区长度取值,故该文沿用表 1 所列合流端三角区长度 L_t 如表 2 所示。

表 2 不同设计速度下匝道合流区三角区长度

设计速度/ (km · h ⁻¹)	渐变段 长度/m	设计速度/ (km · h ⁻¹)	渐变段 长度/m
80	90	60	90
70	80	50	80

2.2 交通流稳定距离

如图 2 所示,当匝道连续入口间距达到一定程度时,车辆在匝道连续入口间的交通状态可表述为“紊乱—过渡—稳定—过渡—紊乱”的过程,因此为保证交通流匝道连续入口间的稳定状态,该文取交通流稳定

距离 L_s 计算公式为:

$$L_s = d_1 \quad (1)$$

式中: d_1 为交通流开始进入稳定状态所需距离。图 2 中 d_3 作为后文计算反应距离 L_r 与操作距离 L_o 的依据。为计算交通流稳定距离, 该文采用 Vissim 仿真技术, 从仿真结果中提取检测断面检测数据计算得到该断面的车速标准差变异系数值 C_v :

$$C_v = \frac{S}{V} \quad (2)$$

式中: S 为断面速度值标准差 (km/h); V 为断面速度平均值 (km/h)。

C_v 由于表示每个测量断面的车速标准差变异情况, 因此可作为间接反映交通安全的指标。

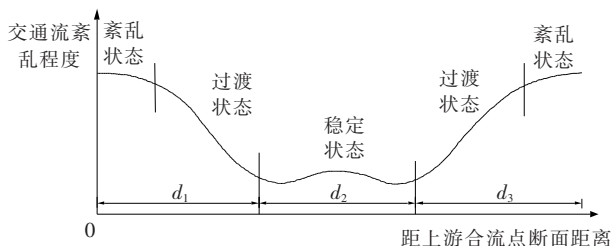


图 2 交通流紊乱程度随距上游合流点断面距离变化情况

2.2.1 Vissim 仿真试验

进行 Vissim 仿真试验时, 为研究 C_v 与距上游主、次匝道合流点距离之间的关系, 该文在试验中单独考虑上游主、次匝道的合流, 不再在主匝道下游中添加路段合流。该文采用的仿真试验步骤及参数标定为:

① 交通流输入: 由于主、次匝道间采用相互合流的方式, 且两者间设计速度差不大, 因此对于主匝道为单车道情况, 该文在交通流输入上采用主次匝道输入交通量相等的原则, 由主、次匝道交通量均以 400 veh/h 开始, 以间隔 100 veh/h 逐渐增加至主匝道设计通行能力。对于主匝道为双车道情况, 主匝道以 1 000 veh/h 为开始, 逐次增量为 200 veh/h, 次匝道以 500 veh/h 为开始, 逐次增量为 100 veh/h, 逐渐增加至主匝道设计通行能力为止。同时车型比例均采用为小客车: 大货车 = 4: 1; ② 车速输入: 该文只考虑主匝道与次匝道间设计速度差最大时的组合, 因此在 Vissim 交通构成中输入主、次匝道的期望速度时, 速度组合 (主, 次) 为 (80, 60), (70, 50), (60, 40), (50, 30)。同时, 在两者间的合流位置添加期望速度决策点, 使主、次匝道间车辆合流后保持以主匝道的期望速度行驶; ③ 交通规则: 根据 Vissim 仿真试验, 由于该文研究对象为公路匝道, 因此设置驾驶行为为 Weidemann99, 冲突区域

设置为不明确, 即先到先行的原则; ④ 仿真时间: 仿真试验时间设置为 3 600 s; ⑤ 数据采集: 从主、次匝道间的合流点开始, 往下游间隔 20 m 设置数据采集点, 用于采集仿真过程中车辆的原始数据, 且数据采集应在 300 s 后开始。

2.2.2 数据采集及分析

每进行仿真一次, Vissim 都会按时间序列生成每个数据采集断面的原始数据文件 (.mer 文件), 采用程序对文件内经过每个断面的车辆速度进行提取, 求断面速度平均值 V 和标准差 S , 代入式 (2) 求算每个测量断面的 C_v 值。在正式进行仿真试验前, 初步定义采集断面为 14 组, 故采集总长为 260 m, 并按最大设计速度组合, 最大主、次交通量进行初步仿真, 得到各断面的 C_v 值随距上游合流点的距离变化情况, 经试验发现, 交通流在距上游合流点 260 m 位置前数据点已经收敛, 故可认为定义的采集区间长度 0~260 m 可行, 同时, 为减少试验次数, 单车道每组主、次匝道交通量组合按取值相等输入, 双车道每组主、次交通量组合按主交通量为次匝道交通量的 2 倍输入, 如主、次匝道交通量为 400 veh/h 表示主、次匝道交通量输入值均为 400 veh/h, 主、次匝道交通量总共为 800 veh/h。

将某一设计速度组合, 每组主、次匝道交通量输入下数据处理得到的 14 组 C_v 值随距上游合流位置的距离变化情况进行点汇成图, 限于篇幅, 该文仅展示单车道速度组合 (80, 60) 组的 C_v 值变化情况, 如图 3 所示。经试验, 其他不同速度组合所得曲线情况与图 3 类似。

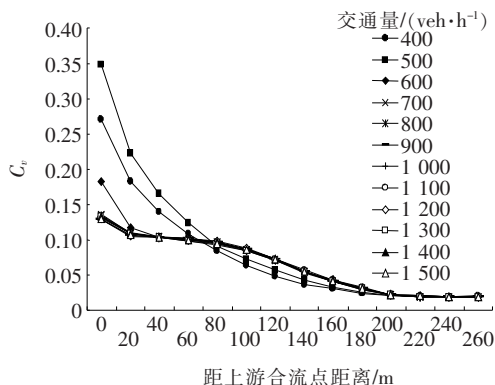


图 3 单车道 (80, 60) 组合下 C_v 值随距上游合流点距离变化情况

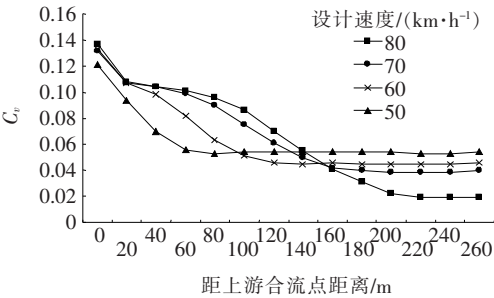
由图 3 可以看出: ① C_v 值随着距离的增加呈现非线性下降, 并最终逐渐收敛于某个值, 且该值不随交通量的变化而变化, 始终固定在 0.02 附近; ② 当主、次匝道交通量输入值均大于 600 veh/h 后, 即从 700 veh/h 开始, 曲线收敛形式固定且几乎重合, 因此曲线

变化情况可视为不再随交通量的增加而发生改变;③当输入交通量较小时,曲线收敛情况为先快后慢;当输入交通量大于一定值时,曲线收敛情况呈先快后慢,再快再慢,原因是交通量较小时,主次交通量相互干扰较小,一般只会出现减速,而当交通量较大的时候,主次交通量相互干扰甚至停车,而货车相对于小客车本身加速度较小,需要的加速至较大期望速度所需的距离较长,所以中间会有一段小客车与货车通过速度差较大的情况,因此曲线收敛情况才会呈现为后一种形式。故对于(80,60)速度组合, C_v 值分析可取为700 veh/h情况。

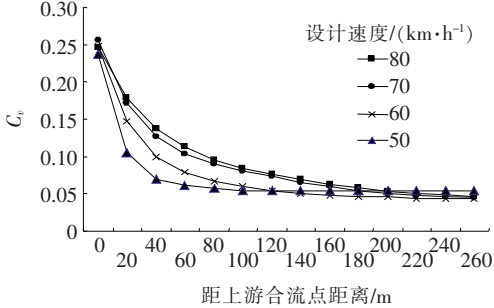
根据前述 C_v 值确定方法,对不同车道数,不同速度组合下不同交通量仿真试验结果得到的 C_v 值进行点汇成图后,筛选出收敛至固定值所需距离最长的一组交通量对应的 C_v 值作为计算依据。

2.2.3 交通流稳定距离

当交通量增大至一定程度时,由于 C_v 随距上游合流点距离的变化趋势不再随交通量变化,且此时 C_v 值收敛所需的距离最长,因此对于每组设计速度,选取在不同车道数下,不再受交通量增长影响的一组交通量对应的 C_v 值随上游合流点距离变化趋势图,如图 4 所示。



(a) 单车道



(b) 双车道

图 4 不同设计速度,不同车道数下 C_v 值随上游合流点距离变化图

以单车道 80 km/h 设计速度为例,对连续三点间的数据进行最小二乘线性拟合,获得该线性曲线的斜率,拟合曲线情况如图 5 所示,再对相邻曲线的斜率相

减获得斜率变化率,结合曲线变化趋势可以看出:当相邻两曲线斜率差开始出现 $\leq |2.5 \times 10^{-5}|$ 情况时,后一个曲线中间拟合点开始落入 C_v 收敛至平稳范围内,表示交通流在该位置处开始进入稳定状态,故取该点作为交通流开始稳定点,同时取该点所在的数据采集断面采集到的通过速度平均值 V 作为该位置处的交通流稳定速度,便于后续反应距离 L_r 和操作距离 L_o 的计算。

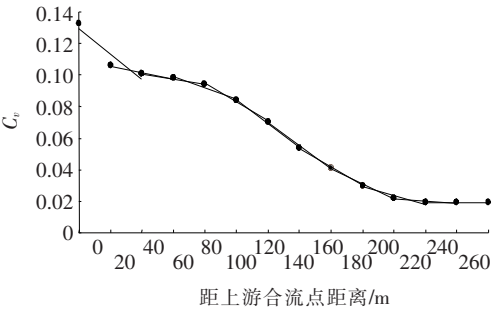


图 5 单车道 80 km/h 下 C_v 值随距离变化分段曲线拟合示意图

通过计算不同速度,不同车道数情况下所得的交通流开始稳定点,得相应的交通流稳定距离见表 3。

表 3 不同速度、不同车道数匝道连续入口交通流稳定距离

设计速度/ (km · h ⁻¹)	交通流稳定距离/m	
	单车道	双车道
80	200	140
70	160	120
60	120	100
50	80	80

结合图 5 和表 3 计算结果可知:在合流区交通流运行情况不受交通量条件影响下,随着设计速度的降低, C_v 值收敛至稳定所需要的距离越小,主要原因是低设计速度相对于高设计速度,其期望速度也较低,合流区车辆可以较快加速并趋于稳定。同时,从表 3 可以看出:双车道匝道 C_v 值收敛至稳定所需要的距离比单车道要短,原因在于双车道合流区范围内,车辆不仅可以减速制动,还可以通过换道来避免冲突,因此车辆在双车道区域内 C_v 值趋于稳定所需的距离短于单车道情况。

2.3 反应距离

根据前文计算所得交通流开始点所在相邻数据采集断面采集所得的速度取平均值,经试验,由于不同车道数下车辆速度平均值相差不大,因此反应距离不考虑车道数的影响,故不同设计速度下的交通稳定流车辆速度计算值如表 4 所示。

表 4 不同设计速度下交通稳定流车辆平均速度

设计速度/ (km·h ⁻¹)	平均速度/ (km·h ⁻¹)	设计速度/ (km·h ⁻¹)	平均速度/ (km·h ⁻¹)
80	77	60	63
70	73	50	53

反映距离计算公式如式(3)所示:

$$L_r = \frac{V \times t}{3.6} \tag{3}$$

式中:V 为交通稳定流车辆平均速度(km/h);t 为驾驶员反应时间,取 t=1.5 s。

得到反应距离计算结果如表 5 所示。

表 5 不同速度、车道数下交通稳定流驾驶员反应距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	反应距离 (单车道)/m	设计速度/ (km·h ⁻¹)	反应距离 (单车道)/m
80	32	60	26
70	30	50	22

2.4 操作距离

操作距离 L_o 包括减速距离和换道距离。对于单车道匝道,由于不存在侧向干扰,故仅考虑减速距离,对于双车道,则应分别对反应距离和操作距离进行比较,选取两者计算值的最大者作为操作距离指标。

2.4.1 减速距离

减速距离如式(4)所示:

$$L_o = \frac{V_2^2 - V_1^2}{25.92a} \tag{4}$$

式中:V₂ 为减速初速度,采用交通稳定流车辆运行速度;V₁ 为末速度,取 V₁=0;a 为平均减速度,取 a=1.6 m/s²。

经计算,得到减速距离如表 6 所示。

表 6 不同速度下交通稳定流驾驶员减速距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	减速距离/ m	设计速度/ (km·h ⁻¹)	减速距离/ m
80	143	60	96
70	128	50	68

2.4.2 换道距离

如 2.2.2 所述,当进行 Vissim 仿真试验时,对于主匝道为双车道合流情况,当主匝道交通量为 1 400 veh/h 时,次匝道合流交通量为 700 veh/h 时,C_v 值曲线变化已不再受交通量的增大和主匝道设计速度组合影响,因此计算交通量可取为 2 100 veh/h。假设车头

时距服从 M3 分布,且车辆横移率为 1 m/s,主匝道车道宽为 3.5 m,因此车辆换道操作时间 t_o 可估计为 3.5 s,则车辆换道距离计算公式如式(5)所示:

$$L_o = \frac{V}{3.6} \times (t_w + t_o) \tag{5}$$

式中:V 为交通流稳定状态下车辆平均运行速度;t_w 为平均换道等待时间,其计算公式如下:

$$t_w = h \times n = \frac{-(t_c + \frac{1}{\lambda})\alpha e^{-\lambda(t_c - \tau)} + \alpha(\tau + \frac{1}{\lambda})}{\alpha e^{-\lambda(t_c - \tau)}} \tag{6}$$

式中:t_c 为换道临界间隙,取值为 3.75 s;λ 为特征参数,采用 λ=aq/(1-τq)计算;τ 为车辆之间保持的最小车头时距,该研究取为 1.2 s;α 为按自由流状态行驶车辆所占的比例,其计算公式为:

$$\alpha = \begin{cases} 1.25 - 1.13\tau q, & \tau q > 0.22 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

式中:q 为车辆平均到达率(veh/s)。

通过上述公式计算,得到不同设计速度下,双车道主匝道车辆平均换道距离如表 7 所示。

表 7 不同速度下交通稳定流驾驶员换道距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	换道距离/ m	设计速度/ (km·h ⁻¹)	换道距离/ m
80	168	60	136
70	158	50	114

3 匝道连续入口最小间距

根据前述计算,将匝道连续入口间各组成部分相加得到基于交通流稳定距离的匝道连续入口间距最小值,根据《细则》规定,当匝道设计小时交通量 DDHV>400 veh/h,且匝道长度大于 350 m 时,宜采用 II 形横断面,即单向双车道形式。因此,结合《细则》长度规定以及仿真试验采用的交通量输入值,将计算结果汇总并按十位数取整以后,得到匝道连续入口间距最小值如表 8 所示。

表 8 匝道连续入口最小间距推荐值

设计速度/ (km·h ⁻¹)	最小间距/m		《细则》 规定值/m
	单车道	双车道	
80	—	430	210
70	—	390	180
60	310	330	160
50	230	280	140

由表8可得:①由于该文在计算交通流稳定距离时,在主匝道为单车道情况下,以主、次匝道交通量均为700 veh/h进行研究,得到单车道条件下,主匝道设计速度为80、70 km/h的最小间距均大于350 m,因此根据《细则》可知单车道断面不再适用,故不再给出上述两种设计速度条件下的匝道连续入口最小间距值;②整体情况下,双车道条件下计算所得的最小间距值均大于单车道情况,主要原因在于双车道条件下,车辆的换道距离要长于相同设计速度下的减速距离。

匝道连续合流情况可见于形式复杂的复合式互通式立体交叉或多岔交叉互通式立体交叉中,根据表8所列匝道连续入口计算值分析,相较于《细则》规定值仅考虑了车辆合流和几何设计的情况,该文从合流区整体交通运行安全性出发,综合考虑了不同设计速度、不同交通量情况下合流区交通稳定距离以及驾驶员操作距离的影响,计算出基于交通流稳定距离的匝道连续入口间距的最小值。计算结果虽然普遍大于《细则》规定值,但在匝道连续入口区域,由于次匝道通常不设置专门的加速车道,主、次匝道间车辆均为直接合流,横向干扰较为严重,且在连续入口合流区域,主匝道交通量的骤增也必然会引起该区域的交通流运行受到影响。因此,该文所提出的匝道连续入口间距最小值,对于交通量较大,横向交通干扰条件较多的匝道连续合流区域,其取值更能保证交通运行的安全。

4 结语

基于Vissim仿真技术,以数据采集断面测得的车速标准差变异系数 C_v 和 C_o 开始收敛时所在断面的平均速度为指标,将匝道连续入口间距分为三角渐变段、交通流稳定距离、反应距离和操作距离进行计算,得到了基于交通流稳定距离的匝道连续入口间距最小值推荐值,该间距值虽然大于《细则》规定值,但是由于考虑了交通流稳定的过程,更能保证合流区交通运行的整体安全性,对于工程其他条件如地形、经济限制少,立交形式复杂如多岔交叉互通式立体交叉等情况,该间距值对保证匝道运行车辆的安全具有一定的意义,可为互通式立交的设计提供参考依据。

该文所研究的匝道连续入口间距最小值只考虑了匝道合流形式均为直接合流、且主次匝道设计速度相差20 km/h以内的情况,当两条合流匝道的设计速度差较大时应设置加速车道,待次匝道加速至合流速度

后方可汇入主匝道,该文后续工作将对主次匝道设计速度差较大时的匝道连续入口间距最小值进行研究。

参考文献:

- [1] JTG/T D21—2014 公路立体交叉设计细则[S].
- [2] A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [S]. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D. C., 2004:843—845.
- [3] IWASAKI M, SEKINEI, TAJIMA H. An Analysis of Traffic Accidents at Diverging and Merging Sections on the Metropolitan Expressway[J]. Proceedings of Infrastructure Planning Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1992:311—316.
- [4] 潘兵宏,余小龙. 高速公路主线同侧连续入口最小间距研究[J]. 公路, 2017(6).
- [5] 杨少伟,赖泓志,潘兵宏,等. 高速公路主线相互合流至出口最小间距的研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2018(6).
- [6] 蒋飞. 互通式交叉匝道连续出入口最小间距研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2018.
- [7] 马永锋,项乔君,陆键. 基于交通流稳定距离的多车道信号平交口安全间距分析[J]. 中国公路学报, 2010(3).
- [8] 马永锋. 公路平面交叉口合理间距研究[D]. 东南大学博士学位论文, 2007.
- [9] 刘子剑. 互通式立体交叉设计原理与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2015.
- [10] 邓建华. 道路交通系统仿真技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
- [11] 程学庆,唐瑞雪,朱海,等. 基于VISSIM的高速公路交通事件仿真及数据处理[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010(4).
- [12] Jacqueline Kazil, Katharine Jarmul. Python 数据处理[M]. 北京:人民邮电出版社, 2017.
- [13] 任福田. 交通工程心理学[M]. 北京:北京工业大学出版社, 1993.
- [14] 杨少伟,张弛,潘兵宏,等. 城市道路非信号控制交叉与隧道净距的研究[J]. 中外公路, 2016(5).
- [15] 姚晶. 主线分合流与隧道及主线出入口最小间距研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017.
- [16] Luttinen R T. Properties of Cowan's M3 Headway Distribution [J]. Transportation Research Record, 1999, 1678(1):189—196.
- [17] 段力,过秀成,姚崇富. 车头时距分布函数的验证、分析与选择[J]. 公路交通科技, 2014(5).