

苜蓿叶分离式互通立交二次定向分流匝道合理长度研究

冯志成, 雷桂荣, 蒋若曦, 王红, 朱顺应

(武汉理工大学, 湖北 武汉 430063)

摘要: 互通立交分离区出口匝道长度会对立交整体运行安全与效率产生重要影响。文中以山东济青(济南—青岛)高速公路涌泉分离式苜蓿叶形互通立交青岛出口方向二次定向分流匝道改造为例, 选取交通量、匝道段长度、大车率、驾驶员组成作为变量, 结合 VISSIM 仿真建模与 SPSS 统计软件对交通运行安全和交通效率进行单因素敏感性分析并构建优化交通因果模型, 模拟试验结果表明匝道段长度延长 204~227 m 使其总长达到 825~848 m 能有效适应再分流 14%~21% 外来车辆的变化。

关键词: 交通安全; 苜蓿叶形分离式互通立交; 二次定向分离式匝道; 匝道段长度; 交通因果模型

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)05-0028-05

二次定向分流匝道段是分离式互通立交的交通流重要转换处, 在高速运行情况下驾驶员需连续两次判断识别出口、两次减速分流, 由于高速公路互通间距大, 若出口错误, 绕行距离大, 对路线陌生的驾驶员识别出口时会出现犹豫、紧张的心理。道路上驾驶员组成非常复杂, 有线路熟悉的驾驶员和陌生驾驶员, 两种驾驶员在识别出口时心理不同, 驾驶行为也不同, 对线路走向陌生者减速大, 熟悉者减速小, 两种驾驶员行为导致交通流十分紊乱, 潜在危险性大。二次分流匝道长度影响交通流的安全与效率, 研究其合理长度具有重要意义。

对于城市快速路短间距互通立交, 孙璐等发现交通冲突率随着交织区交通量的增加而增加, 随着交织区长度、交织区车道数的增加而降低; 李光等提出出口匝道安全评价宜综合公路安全评价指南和汽车行驶动力学两种方法; 宋成举等采用模糊数学方法确定圆曲线半径、纵横坡度、匝道交通量、大型车比例及行驶速度分级权重标准, 建立了匝道出口交通安全评价模型; 付鹏飞等基于 VISSIM 仿真, 选取延误、行程时间、排队长度、停车次数等指标对比评价了现状立交与改造方案立交的整体运行状况、安全性及适用性; Boris R. Claros 等采用经验贝叶斯法、对比分析法评价了分离式菱形互通立交与传统菱形互通立交的交通事故数。大量研究表明出入口匝道段修建长度的合理性是车辆定向分流安全驶过互通立交的重要影响因素。周伟杰等通过实测数据

对 VISSIM 仿真模型参数进行标定, 研究了固定车型比例下单因素服务水平、入口匝道限速值及加速车道长度变化对交通冲突数的影响; 苑中丹等基于枢纽互通式立交实测数据计算各类出口匝道运行速度 $v_{85\%}$, 考虑车辆行驶发动机制动及制动器制动确定各类出口匝道减速车道长度; 黄治炉等基于二次减速与可插入间隙理论, 分析了车辆进入高速公路服务区出口匝道的变速过程, 通过回归分析提出了不同主线和出口匝道设计速度下匝道长度推荐值。目前, 对于高速公路出口匝道交通安全性的研究大部分集中于车辆一次减速分流进入互通立交匝道, 且影响因素仅限于交通量、交织段长度、大车率、运行速度协调性、冲突率、施工组织、线形设计等指标, 很少考虑复杂的二次分流, 也未考虑驾驶员对行驶路况的熟悉情况。为此, 该文依托山东济青(济南—青岛)高速公路改扩建项目, 针对涌泉分离式苜蓿叶形互通立交改造, 考虑交通量、匝道长度、大车率和驾驶员组成的影响, 研究基于交通安全性的二次定向分流匝道的合理长度。

1 数据与方法

1.1 交通量及车型比例

1.1.1 交通量

该项目于 2016 年开工建设, 2019 年建成通车。改造方案评价选取具有代表性的交通量预测特征年 2038 年。根据交通量预测结果, 开通济南—潍坊高

速公路(济青复线)后,对济青高速公路潍坊至济南段交通量的分流作用达 30%左右。将济青高速公路涌泉互通立交各方向所预测的日小时交通量折算成高峰小时自然车流车辆数,结果见表 1。

表 1 2038 年涌泉互通立交预测高峰小时

自然车流车辆数		veh/h	
方向	车辆数	方向	车辆数
青岛入口	2 833	青岛—奎文	679
济南入口	3 255	奎文—济南	313
平度—青岛	108	济南—平度	889

1.1.2 车辆比例

根据项目影响区各地市社会经济发展现状及发展规划,参考现状运输通道内车型比例关系预测拟建项目未来年车型比例,结果见表 2。

表 2 拟建项目 2038 年车型比例预测结果 %

车型	所占比例	车型	所占比例
小型货车	9.7	集装箱	3.4
中型货车	5.9	小客车	56.8
大型货车	7.0	大客车	4.0
特大型货车	13.2		

1.2 仿真模型建立与参数设置

1.2.1 典型分离式苜蓿叶形互通立交模型

根据该项目互通式立体交叉方案及其平纵横线形设计图,结合 VISSIM 仿真软件建立仿真模型(见图 1)。济青高速公路主线为双向四车道,其中立交段主线拓宽为“3+2”模式的双侧分离十车道,外侧两车道为大型车专用道,车道宽度为 3.75 m。青岛出口方向 H 匝道为车道宽 3.5 m 的单车道匝道,D 匝道为车道宽 3.5 m 的双车道匝道。

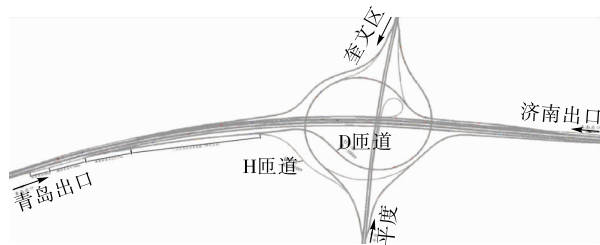


图 1 涌泉互通立交改造方案仿真模型

1.2.2 模型参数设置

(1) 设计速度与期望速度。济青高速公路主线设计速度为 120 km/h,半直连式匝道设计速度为 60 km/h。结合《公路项目安全性评价指南》与期望

车速推荐值,对于线路熟悉的驾驶员,设置主线高速小型车期望速度为 135 km/h、中型车为 115 km/h、大型车为 90 km/h;对于线路陌生的驾驶员,设置主线高速小型车期望速度为 125 km/h、中型车为 105 km/h、大型车为 80 km/h;并在青岛出口方向相应决策路径与匝道出口处设置期望车速决策点,小型车限速 75 km/h,中型车限速 65 km/h,大型车限速 55 km/h。

(2) 车辆几何尺寸及性能参数。依据该路段互通区交通调查结果,模拟交通组成包含大型车(车长 13 m,车宽 2.5 m,最大加、减速度分别为 1.4、-4.8 m/s²)、中型车(车长 7.2 m,车宽 2 m,最大加、减速度分别为 2、-5.9 m/s²)、小型车(车长 4.5 m,车宽 1.7 m,最大加、减速度分别为 3.6、-7.3 m/s²),其他均按默认值设置。

(3) 匝道圆曲线半径及车道宽度。仿真模型青岛出口方向 H 匝道圆曲线半径 $R_H=350$ m,单车道宽度 $L_H=3.5$ m;D 匝道圆曲线半径 $R_D=300$ m,双车道宽度 $L_D=7$ m;主线双向八车道宽度 $L=30$ m。

(4) 驾驶员行为参数设置。VISSIM 仿真中车辆行驶采用高速公路 Wiedemann99 模型。总仿真时间为 4 600 s,考虑到初始仿真交通流稳定性,取仿真前 1 000 s 为预热期。依据济青高速公路主线收费站本地与外来车辆车牌比例统计结果,初始设置出口匝道线路熟悉驾驶员比例为 55%,其中小型车占比为 36.58%、中型车为 3.25%、大型车为 15.18%;陌生驾驶员比例为 45%,其中小型车占比为 29.93%、中型车为 2.66%、大型车为 12.42%。

1.3 评价指标

(1) 行车延误,即车辆实际驶过研究路段的行驶时间与自由流行驶时间之差。

(2) 交通量,指在仿真时间内通过整体匝道的车辆数,由 VISSIM 仿真 rsz 评价文件得到。

(3) 平均单车延误率 W ,为平均总延误时间/(平均总行程长度×平均交通量),反映匝道单位长度上每辆车所延误的时间。

(4) 平均单车冲突率 Y ,为平均总冲突数/(平均总行程长度×平均交通量),反映单位车辆在匝道上行驶时单位长度上发生的冲突次数。

(5) 平均冲突速度 v ,通过 VISSIM 输出所得 trj 文件导入 SSAM 统计软件进行分析,筛选出驾驶车辆转换方向、改变车速、突然停车等避险行为时的行驶速度。它是一种非事故统计的交通安全评价量化指标。

1.4 试验设计

1.4.1 单因素敏感分析

将影响青岛出口方向二次定向分流匝道段安全性的交通量、匝道长度、大车率、驾驶员组成等因素进行水平变化,分别运用 SPSS 统计软件对交通运行指标和交通安全指标进行 F 检验,分析影响因素对评价指标的敏感性。图 2 为二次定向分流匝道研究区域段。

1.4.2 交通效率与交通安全的因果关系模型

考虑交通量大小、匝道长度、大车率、驾驶员组成与评价指标的关系,在不同水平组合下进行 256 次试验,运用 SPSS 统计软件回归分析影响因素交

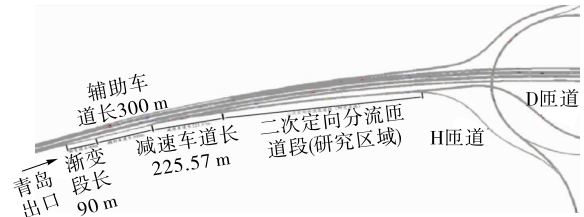


图 2 二次定向分流匝道研究区域段

互作用下评价指标的显著性差异与拟合程度,建立匝道段长度、陌生驾驶员比例与评价指标的交通效率和交通安全因果关系模型。各影响因素的绝对增加量见表 3,考虑试验数据的偶然性,分别进行 5 次独立的仿真试验,取平均值进行分析。

表 3 各影响因素的绝对增加量

影响因素	各水平下的取值			
	1	2	3	4
交通量绝对增加比例 $A_i/\%$	$A_1=0$	$A_2=5$	$A_3=10$	$A_4=15$
匝道段绝对增加长度 B_j/km	$B_1=0$	$B_2=0.1$	$B_3=0.2$	$B_4=0.3$
大车率绝对增加比例 $C_k/\%$	$C_1=0$	$C_2=3$	$C_3=6$	$C_4=9$
陌生驾驶员绝对增加比例 $D_m/\%$	$D_1=0$	$D_2=15$	$D_3=30$	$D_4=45$

注: i,j,k,m 为水平编号, $i,j,k,m=1,2,3,4$ 。

2 仿真结果与分析

2.1 单因素分析结果

2.1.1 交通量变化分析

不同车流量(原车流量,车流量 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 、 $\pm 40\%$)时涌泉立交的运行状况和交通冲突情况见图 3。

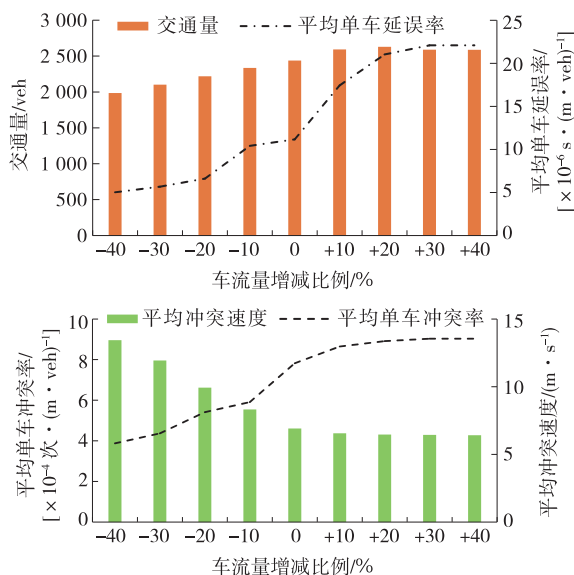


图 3 涌泉立交交通量变化时运行指标评价

SPSS 统计软件 F 检验结果如下: $F_{\text{平均单车延误率}} =$

89.832, $\text{sig}_{\text{平均单车延误率}} = 0.008 < 0.05$; $F_{\text{交通量}} = 21.524$, $\text{sig}_{\text{交通量}} = 0.021 < 0.05$; $F_{\text{平均单车冲突率}} = 43.816$, $\text{sig}_{\text{平均单车冲突率}} = 0.013 < 0.05$; $F_{\text{平均冲突速度}} = 27.838$, $\text{sig}_{\text{平均冲突速度}} = 0.037 < 0.05$ 。由此得出交通量变化对涌泉立交交通运行和交通安全评价指标具有显著影响。当青岛出口预测车流量增加 20% 时,平均单车延误率上升明显,之后趋于平缓。由于交通量逐渐趋于饱和,平均冲突速度逐渐降低,间接反映在车流量增加时车辆行驶速度降低,预测车流量增加超过 20% 时,由于匝道段交通流趋于稳定,平均冲突速度、平均单车冲突率上升相对不明显,匝道段随着交通量的变化具有一定的适应性。

2.1.2 匝道段长度变化分析

不同匝道段长度(原匝道段长度,匝道段长度 ± 100 、 ± 200 、 ± 300 m)时涌泉立交的运行状况和交通冲突情况见图 4。

SPSS 统计软件 F 检验结果如下: $F_{\text{平均单车延误率}} = 116.31$, $\text{sig}_{\text{平均单车延误率}} = 0.004 < 0.05$; $F_{\text{交通量}} = 56.385$, $\text{sig}_{\text{交通量}} = 0.012 < 0.05$; $F_{\text{平均单车冲突率}} = 87.453$, $\text{sig}_{\text{平均单车冲突率}} = 0.008 < 0.05$; $F_{\text{平均冲突速度}} = 45.916$, $\text{sig}_{\text{平均冲突速度}} = 0.011 < 0.05$ 。由此得出匝道段长度变化对涌泉立交交通运行和交通安全评价指标具有显著影响。随着匝道段长度的增加,各评价指标均呈

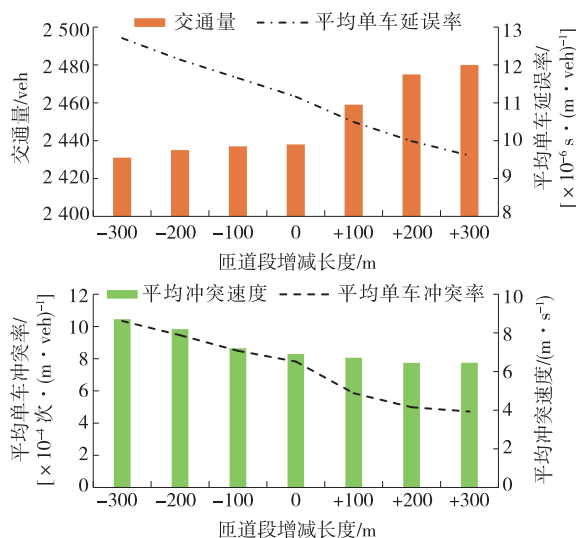


图4 涌泉立交匝道段长度变化时运行指标评价

下降趋势,当匝道段长度增加 200 m(总长 821 m)时,平均单车延误率、平均单车冲突率与平均冲突速度降低明显,且通过互通立交的交通量有所增加;匝道长度增加 300 m(总长 921 m)时各评价指标趋于平缓。说明合理确定匝道段长度可有效改善互通立交的整体运行状况,提升行驶安全性和效率。

2.1.3 大车率变化分析

不同大车率(原大车率,大车率 $\pm 3\%$ 、 $\pm 6\%$ 、 $\pm 9\%$)时涌泉立交的运行状况和交通冲突情况见图 5。

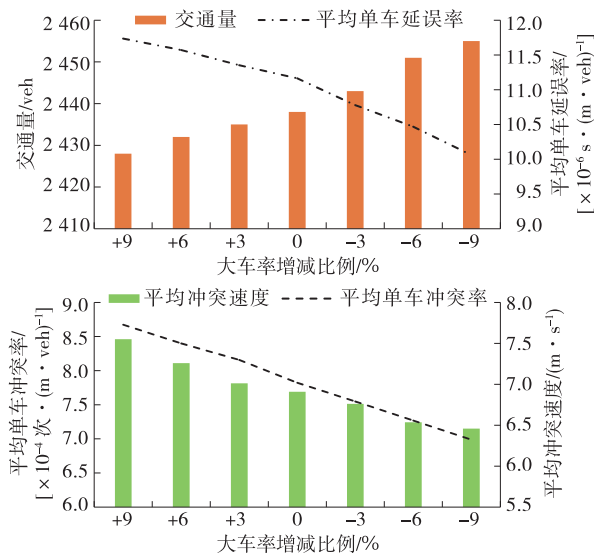


图5 大车率变化时安全指标评价

SPSS 统计软件 F 检验结果如下: $F_{\text{平均单车延误率}} = 68.563$, $\text{sig}_{\text{平均单车延误率}} = 0.001 < 0.05$; $F_{\text{交通量}} = 55.927$, $\text{sig}_{\text{交通量}} = 0.009 < 0.05$; $F_{\text{平均单车冲突率}} = 49.251$, $\text{sig}_{\text{平均单车冲突率}} = 0.003 < 0.05$; $F_{\text{平均冲突速度}} = 88.028$,

$\text{sig}_{\text{平均冲突速度}} = 0.017 < 0.05$ 。由此得出大车率变化对涌泉立交交通运行和交通安全评价指标具有显著影响。随着大车比例的减小,平均单车延误率、平均单车冲突率及平均冲突速度降低明显,通过互通立交的交通量有所增加。说明匝道段出口大车率的减少有利于改善互通立交的交通运行状况和安全性。

2.1.4 线路陌生驾驶员比例变化分析

不同线路陌生驾驶员比例(原陌生驾驶员比例,陌生驾驶员比例 $\pm 15\%$ 、 $\pm 30\%$ 、 $\pm 45\%$)时涌泉立交的运行状况和交通冲突情况见图 6。

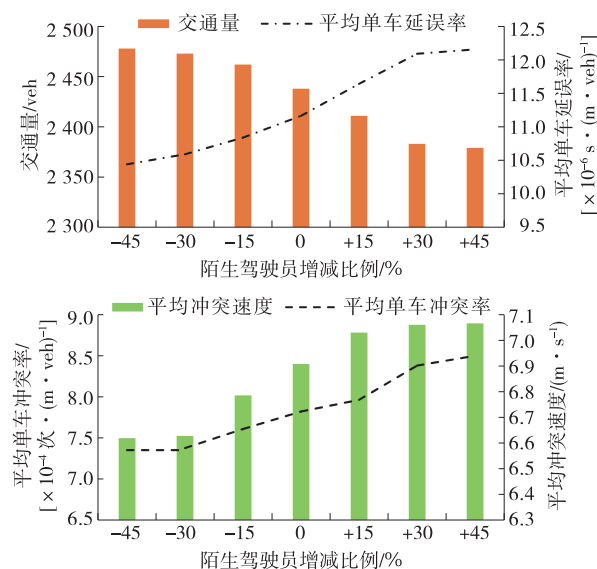


图6 线路陌生驾驶员比例变化时安全指标评价

SPSS 统计软件 F 检验结果如下: $F_{\text{平均单车延误率}} = 89.467$, $\text{sig}_{\text{平均单车延误率}} = 0.001 < 0.05$; $F_{\text{交通量}} = 83.721$, $\text{sig}_{\text{交通量}} = 0.003 < 0.05$; $F_{\text{平均单车冲突率}} = 67.329$, $\text{sig}_{\text{平均单车冲突率}} = 0.015 < 0.05$; $F_{\text{平均冲突速度}} = 59.382$, $\text{sig}_{\text{平均冲突速度}} = 0.006 < 0.05$ 。由此得出匝道段出口陌生驾驶员比例变化对涌泉立交交通运行和交通安全评价指标具有显著影响。随着线路陌生驾驶员比例的增加,平均单车延误率、平均单车冲突率及平均冲突速度均呈上升趋势,且通过互通立交的交通量有所减少,影响其交通运行效率与安全。说明线路陌生驾驶员比例的变化会影响高速公路二次定向分流出口匝道交通流的稳定性。

2.2 交通效率与交通安全的因果关系

为构建简化回归模型,排除影响因素之间没有显著性影响的变量,采用 SPSS 对评价指标试验数据进行多因变量方差分析,结合方差分析结果中具有显著性关系的交互因素分别对评价参数指标构建交通安全与交通效率因果关系模型。结果如下:

$$W = 1.83B_j^2 + 0.09D_m^2 - 0.26B_jD_m - 0.73B_j + 0.02D_m + 10.43$$

$$R^2 = 0.837, F = 96.46, sig = 0.000 \quad (1)$$

$$Y = 1.35B_j^2 + 0.08D_m^2 - 0.28B_jD_m - 0.51B_j + 0.03D_m + 16.18$$

$$R^2 = 0.825, F = 93.71, sig = 0.001 \quad (2)$$

$$v = 1.2B_j^2 + 0.81D_m^2 - 0.32B_jD_m - 0.49B_j - 0.27D_m + 5.83$$

$$R^2 = 0.842, F = 98.69, sig = 0.000 \quad (3)$$

经 T 检验, 式(1)~(3)中各项差异性 P 值均小于 0.05, 说明模型中各项式之间存在显著性差异。经 F 检验, 决定系数 R^2 值均大于 0.8, 显著性 sig 值均小于 0.05, 模型均拟合良好。运用 MATLAB 拟合, 得 3D 交通安全与效率模型曲面(见图 7~9)。

由图 7~9 可知: 匝道段增加长度、陌生驾驶员增加比例两变量交互作用对评价指标均具有显著影响。1) 固定陌生驾驶员比例条件下, 匝道段增加长度与评价指标基本呈开口向上抛物线关系。这可能是陌生驾驶员为了避免前方车辆发生紧急情况时造成事故, 随着匝道段长度的增加, 车头间距适当增加, 有利于提升陌生驾驶员行驶安全性, 故评价指标

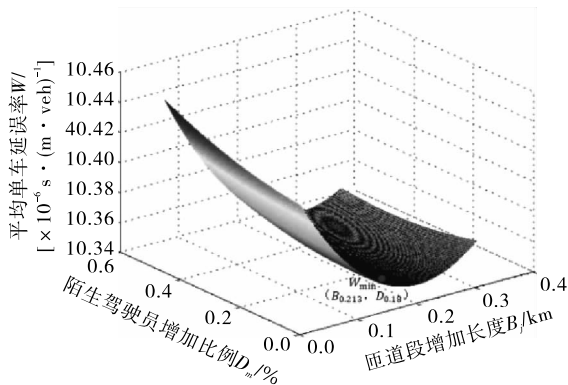


图 7 平均单车延误率 W 拟合 3D 曲面

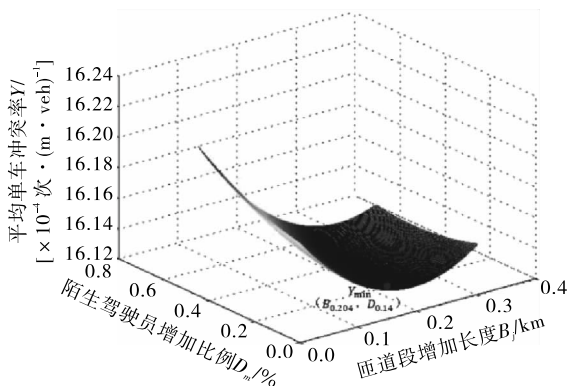


图 8 平均单车冲突率 Y 拟合 3D 曲面

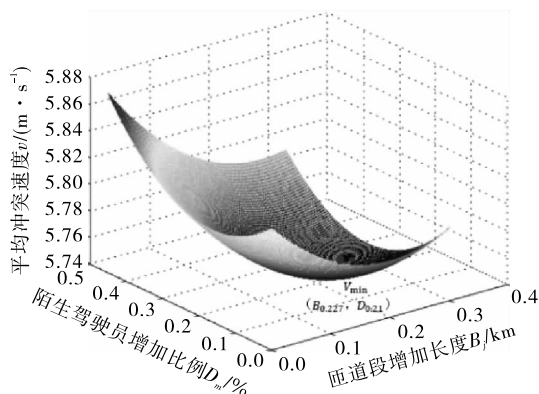


图 9 平均冲突速度 v 拟合 3D 曲面

值有所降低; 但当匝道长度进一步增加时, 线路熟悉驾驶员的行驶速度有所提高, 可能影响线路陌生驾驶员的正常行驶, 故评价指标值有所升高, 安全性降低。2) 固定匝道段长度条件下, 陌生驾驶员增加比例与评价指标大致呈开口向上抛物线关系。其原因可能是由于随着陌生驾驶员比例的增加, 匝道段长度适应小范围的驾驶员组成变化, 评价指标值略微降低; 但陌生驾驶员比例进一步增加时, 由于线路陌生驾驶员比例较大, 线路熟悉驾驶员驾驶的车辆被迫减速, 导致安全性降低, 评价指标值升高。3) 当 $B_j = 0.213$ km、 $D_m = 18\%$ 时, $W_{\min} = 10.35 \times 10^{-6}$ s/(m · veh); 当 $B_j = 0.204$ km、 $D_m = 14\%$ 时, $Y_{\min} = 16.12 \times 10^{-4}$ 次/(m · veh); 当 $B_j = 0.227$ km、 $D_m = 21\%$ 时, $v_{\min} = 5.74$ m/s。

3 结论

(1) 涌泉“3+2”单向主线分离青岛出口段研究匝道区域在交通流增加幅度较大时仍具有一定的适应性; 匝道段长度仍有一定的改善空间, 适当增加匝道段长度可有效降低行车延误, 提升运行效率; 驾驶员组成影响高速公路出口二次定向分流匝道交通流的稳定性; 适当分流匝道段大型车比例将有利于提升整体互通立交的安全性。

(2) 相比于交通量大小与大车率, 匝道段长度与驾驶员组成交互更加显著影响互通立交青岛出口方向的交通安全及效率, 且各交通评价指标在不同匝道段长度下最优值有所不同。匝道段长度增加 213 m(总长 834 m)、陌生驾驶员比例增加 18%(总比例 63%) 时, 平均单车延误率最小; 匝道段长度增加 204 m(总长 825 m)、陌生驾驶员比例增加 14%(总比例 59%) 时, 平均单车冲突率最小; 匝道段长

(下转第 37 页)

5 结语

整体式护栏总宽度较小,可节约用地和工程造价,但对中央分隔带需落墩的桥梁、安全标志立柱、人孔均需进行过渡处理,由于规范要求中央分隔带宽度渐变段位于曲线上时其应与平曲线的缓和段长度一致,位于直线段时其渐变率应不大于1/100,中央分隔带宽度渐变的影响长度都较长,当全线桥梁较多、中央落墩数量和标志立柱数量较多时,会引起全线中央分隔带宽度频繁变化,对行车舒适性非常不利。因此,这种情况下建议尽量采用分离式砼护栏。采用分离式护栏的优点:1)不需对现有桥梁、标志立柱、桥梁落墩及人孔进行过渡处理,线形流畅,有利于行车舒适性和安全性;2)能提供绿化防眩,景观更自然;3)桥面排水可穿越护栏至中间再向下固定在桥梁板梁下方,避免排水管穿过桥梁板梁负弯矩段。

高速公路中间带宽度取值直接影响行车安全和舒适性,同样影响项目工程规模和用地。在确保安全的前期下,力求经济合理,资源节约,美观环保,设计中应做好中间带宽度取值的论证,合理灵活地选择中间带宽度。

参考文献:

- [1] JTG B01—2014,公路工程技术标准[S].
- [2] JTG B01—2003,公路工程技术标准[S].
- [3] JTG/D T81—2006,公路交通安全设施设计细则[S].
- [4] 占辉.高速公路中央分隔带护栏型式比选[J].广东公路勘察设计,2009(2).
- [5] 张欣.高速公路中间带优化设计方法研究[J].交通标准化,2013(8).
- [6] 赵一飞.高速公路中间带安全侧向净距值[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(1).
- [7] 莫海鹰.高速公路中央分隔带设计[A].全国公路环保与景观技术研讨会[C].2003.
- [8] 文浩雄.高速公路中央分隔带横净距问题及对策[J].公路工程,2013,38(6).
- [9] 严云飞.对某高速公路中央分隔带设计的探讨[J].中华民居旬刊,2012(4).
- [10] 万伟.基于停车视距的高速公路中央分隔带安全性分析[J].山西建筑,2016,42(20).
- [11] 赵永平,杨少伟,赵一飞.具有中央分隔带公路弯道外侧超车车道的视距[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(5).

收稿日期:2017-05-21

(上接第32页)

度增加227 m(总长848 m)、陌生驾驶员比例增加21%(总比例66%)时,平均冲突速度最小。

(3) 综合各评价指标最优值,在交通流日益增大的趋势下,考虑匝道段施工难度和修建成本,将青岛出口方向二次定向分流匝道段长度增加204~227 m(总长825~848m),能有效适应以后调整区域整体路网后济青高速公路青岛出口方向再分流14%~21%外来车辆的需求,缓解其他路网的通行能力,提高立交通行安全性与效率。所得结论适应于类似分离式苜蓿叶形互通立交改造方案,具有一定的普适性,可为复杂互通式立交匝道改善提供参考。

鉴于客观情况,文中初始设置的驾驶员组成仅由收费站入口车牌类型统计得到,未考虑外地车辆中线路熟悉驾驶员比例与本地车辆中线路陌生驾驶员比例,且只研究了出口二次定向分流匝道影响因素变化对整体互通立交运行状况和安全性的影响,并未研究入口段匝道对互通立交的影响,还有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 孙璐,李颜平,钱军,等.基于交通冲突技术的交织区交通安全评价[J].中国安全科学学报,2013,23(1).
- [2] 李光,李志勇,袁杰,等.高速公路互通立交出口匝道安全评价[J].公路工程,2012,37(5).
- [3] 宋成举.高速公路出入口匝道行车安全性分析和评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [4] 付鹏飞.建宁路立交改造方案研究和评价[J].公路与汽运,2015(2).
- [5] Boris R Claros,Edara,Sun C,et al.Safety evaluation of diverging diamond interchanges in missouri[J].Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,2015,2486.
- [6] 周伟杰.高速公路匝道入口区安全评价研究[J].中外公路,2015,35(4).
- [7] 苑中丹,薛岭,王维礼.高速公路枢纽互通式立交变速车道长度设计研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(4).

收稿日期:2017-03-09