

文章编号: 1674-599X(2020)03-0067-07

## 车速限制下高速公路临时路肩使用条件研究

李晓虎<sup>1</sup>, 范炜<sup>2</sup>, 袁浩<sup>1</sup>, 朱彤<sup>1</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064;

2. 西安电子科技大学 计算机科学与技术学院, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 针对高速公路出口处交通拥堵等问题, 以车辆平均延误时间表征交通效率, 以冲突率表征交通安全水平, 建立了西汉高速公路出口处上游主路临时路肩使用模型。基于车速限制理论, 结合临时路肩使用方法, 应用 MATLAB/VISSIM COM 软件分别建立了交通效率和行车风险仿真模型。研究表明: 当交通量在 2 400 pcu/h 以下时, 行车风险与交通效率在路肩开启时, 没有显著差异。当交通量超过 2 400 pcu/h 时, 对于主路路肩使用进行车速限速 80~90 km/h 时, 能在行车风险没有显著性差异的情况下, 交通效率提高了 27.9%。

**关键词:** 交通安全; 主动交通管理; 跟驰模型; 交通效率模型; 行车风险模型

中图分类号: U491

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.011

### Research on temporary applicable conditions of expressway shoulder under speed limit

LI Xiao-hu<sup>1</sup>, FAN Wei<sup>2</sup>, YUAN Hao<sup>1</sup>, ZHU Tong<sup>1</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to alleviate the problems of traffic congestion at the exit of expressway, the average delay time of vehicles is used to characterize traffic efficiency, and the conflict rate to represent the traffic safety level. The model for temporary use of upstream main road shoulder at the exit of Xi Han expressway is established. Based on the speed limit theory, combined with the temporary use of the road shoulder, the traffic efficiency model and driving risk model are established by using MATLAB/VISSIM COM software. Research results show that when the traffic volume is below 2 400 pcu/h, there is no significant difference between the driving risk and traffic efficiency when the shoulder is opened. However, when the traffic volume exceeds 2 400 pcu/h, and the speed limit is set as 80-90 km/h in the main road shoulder, the traffic efficiency is increased by 27.9% without significant differences in driving risk.

**Key words:** traffic safety; active traffic management; car-following model; traffic efficiency model; driving risk model

高速公路的需求日趋增大, 高速公路出现了服务水平降低、交通拥堵及交通效率低等问题。为了提高匝道口出入口处的车辆行驶效率。吴江<sup>[1]</sup>通过出入口建立合理的最小间距, 可以对交通流进行有效

疏导, 满足交通安全和服务水平要求。在发挥高速公路最大效益的研究中, 主动交通管理(Active Traffic Management, 简称为 ATM)提到了临时路肩使用方法(Hard Shoulder Running, 简称为 HSR), 能

收稿日期: 2020-04-13

基金项目: 交通运输标准项目(2019-99-069)

作者简介: 李晓虎(1995-), 男, 长安大学硕士生。

有效缓解高速公路拥堵等问题<sup>[2]</sup>。Gitelman<sup>[3]</sup>等人提出了以色列允许公交车在拥堵时间内,使用 HSR 的公共交通运输优化方法,该措施将公交车的出行时间减少了 30%、公交车的使用率增加了 10%。Guerrieri<sup>[4]</sup>等人在意大利 A22 公路上,结合可变限速和 HSR 理论,使通行能力提升了 35%。Aron<sup>[5]</sup>等人在法国城市高速公路特定拥堵路段进行 HSR,将事故的经验数量与预测的事故数量进行比较,综合分析了车道管理操作的安全影响。李瑞敏<sup>[6]</sup>等人以高速公路 METAENT 宏观动态交通流模型为基础,通过遗传算法与滑动时间窗,对路肩使用进行了优化,网络总行程时间减少了 30.61%。Vadde<sup>[7]</sup>等人通过研究主动交通管理的可变限速控制、路肩使用及匝道信号控制措施,提出了主动交通管理系统,能够有效缓解交通拥堵问题。随意占用路肩现象,对于交通安全会产生较大影响。国内外主要针对路肩宽度、设施改善及算法优化等进行了研究,而对于 HSR 研究并没有给出具体的使用条件。因此,作者拟基于跟驰模型和西汉高速实测数据,以平均延误时间和冲突率为指标,采用 MATLAB/VISSIM COM 软件,建立三维曲面的交通效率模型和行车风险模型,得到西汉高速公路出口上游主路的路肩使用条件,以解决高速公路出口匝道处交通拥堵,为高速公路出口管理提供借鉴。

1 数据采集及仿真实验设计

1.1 路网数据采集

西汉高速公路主线道路为双向四车道,主线车道宽度为 3.75 m,路肩宽度为 3.50 m,匝道处车道

宽度为 3.75 m,路肩宽度为 3.00 m。通过交通管理部门得到西汉高速的 3 个出口附近点位交通检测 7 d 的视频。通过视频分析,总结了高速公路的路肩使用状况,并采用视频采集与处理技术,得到了 2019 年 10 月 1-7 日西汉高速的 3 个出口附近上游主路点位单向横断面的相关数据,见表 1。从表 1 可以看出,由于交通量的增加,导致较多占用路肩的现象。

表 1 视频处理采集数据

| Table 1 Video processing data collection |                               |                               |        |        |          |
|--|-------------------------------|-------------------------------|--------|--------|----------|
| 日期                                       | 平均时交通量/(pcu·h <sup>-1</sup> ) | 最大时交通量/(pcu·h <sup>-1</sup> ) | 路肩停车/次 | 路肩借道/次 | 借用路肩总数/次 |
| 1  | 2 327                         | 3 900                         | 55     | 75     | 130      |
| 2  | 2 125                         | 3 720                         | 46     | 27     | 73       |
| 3  | 1 781                         | 2 760                         | 17     | 21     | 38       |
| 4  | 1 870                         | 3 600                         | 25     | 16     | 41       |
| 5  | 2 430                         | 3 720                         | 51     | 28     | 79       |
| 6  | 1 924                         | 3 660                         | 39     | 14     | 53       |
| 7  | 1 101                         | 2 600                         | 48     | 40     | 88       |

1.2 跟驰模型

跟驰模型基于动力学方法,根据前导车运动状态变化,引起跟驰车的行为变化,判断车辆行驶中是否存在冲突<sup>[8]</sup>。跟驰模型理论的示意图如图 1 所示。

从图 1 可以看出,假设反应时间  $T$  内,  $n+1$  车速度不变及两车的制动距离相等( $d_2=d_3$ ),两车在时刻  $t$  的间距为:

$$S(t) = X_n(t) - X_{n+1}(t) = d_1 + L。$$
 (1)

其中,  $d_1 = \dot{X}_{n+1}(t+T)T$ 。在公式(1)中两边对  $t$  求导,得到:

$$\dot{X}_n(t) - \dot{X}_{n+1}(t) = \ddot{X}_{n+1}(t+T)T。$$
 (2)

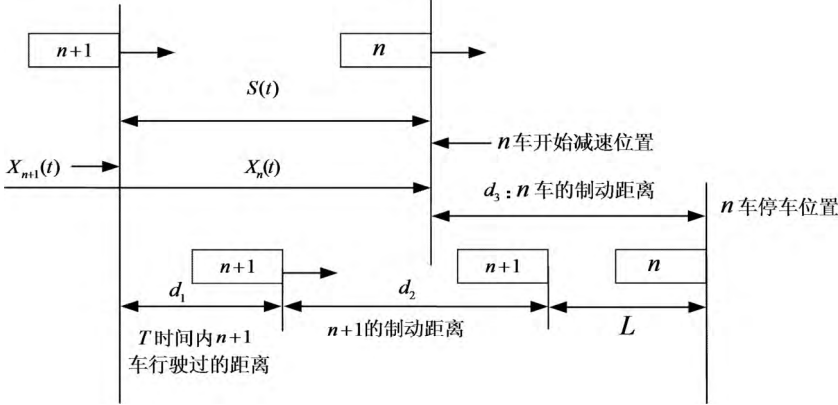


图 1 跟驰模型示意

Fig. 1 Schematic diagram of the following model

即:

$$\ddot{X}_{n+1}(t+T) = \lambda[\dot{X}_n(t) - \dot{X}_{n+1}(t)], n=1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式中:  $X_i(t)$  为第  $i$  辆车在时刻  $t$  的位置;  $d_1$  为后随车在反应时间  $T$  内行驶的距离;  $L$  为停车后的车头间距;  $\lambda$  为强度系数,  $\lambda = T^{-1}$ 。

基于 Wiedemann99 跟驰模型, 当车头间距  $\leq 150$  m 时, 车辆处于跟驰状态。

在  $\Delta t$  时间内, 第  $n$  号车的平均加速度为:

$$\bar{a}_n = \frac{a_n(t) + a_n(t + \Delta t)}{2} \quad (4)$$

第  $n$  号车在  $\Delta t$  时间内, 加速度计算如下:

$$\frac{\dot{X}_n(t + \Delta t) - \dot{X}_n(t)}{\Delta t} = \frac{\ddot{X}_n(t) + \ddot{X}_n(t + \Delta t)}{2} \quad (5)$$

第  $n$  号车在  $t + \Delta t$  时, 速度为:

$$\dot{X}_n(t + \Delta t) = \dot{X}_n(t) + \left[ \frac{\ddot{X}_n(t) + \ddot{X}_n(t + \Delta t)}{2} \right] \Delta t \quad (6)$$

第  $n$  号车在  $\Delta t$  时间内, 行驶距离为:

$$X_n(t + \Delta t) = X_n(t) + \dot{X}_n(t) \Delta t + \left[ \frac{\ddot{X}_n(t) + \ddot{X}_n(t + \Delta t)}{2} \right] \frac{\Delta t^2}{2} \quad (7)$$

### 1.3 仿真设计

采用 VISSIM 软件, 建立西汉高速公路出口匝道路段的仿真模型。通过 HSR 减少外侧车道负担, 对即将离开高速公路的车辆, 临时使用路肩, 快速驶离高速公路出口匝道。以固定步长仿真, 得到路肩使用前后的交通状况, 单个仿真时长为 3 600 s。仿真模型建立步骤为:

1) 仿真路段设计。通过调查西汉高速出口附近车道设置情况, 在 VISSIM 中, 建立西汉高速公路出口路段仿真。在高速公路出口匝道处, 设置交互区域; 在高速公路出口处, 上游主路路肩设置动态路肩开闭和限速区域。

2) 交通参数设置。基于视频数据, 设置大、小车比例为 7:3, 仿真交通量取值区间为 1 600~4 000 pcu/h 在 VISSIM 中, 所设定小型车的期望车速为 120 km/h, 大型车的期望车速为 100 km/h, 匝道中速度限制为 40 km/h。

3) 条件设置。通过 VISSIM 中的路径设置, 可以允许车辆临时使用路肩驶出当前高速公路。因为路肩相比于正常车道较窄。所以, 提高交通效率的同时必须保障交通安全。根据可变限速理论, 对路肩上车辆进行限速处理<sup>[9-10]</sup>。通过 MATLAB/VISSIM COM 接口技术, 动态控制高速公路主路的路肩开放与关闭, 开放路肩位置设置在距高速公路出口匝道上游 1 km 处, 路肩使用的限速值设定为 60, 80, 90, 100, 120 km/h, 其示意图如图 2 所示。

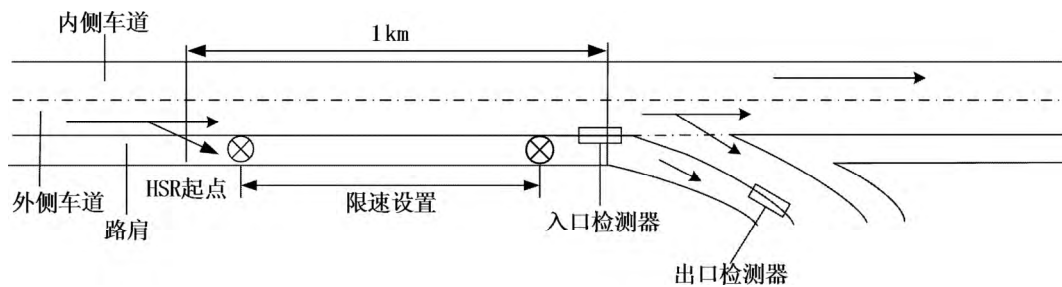


图2 仿真模型示意

Fig. 2 Schematic of simulation model

## 2 评价指标建立

### 2.1 交通效率

路肩的使用会导致车辆出现加、减速及变换车道等行为, 影响通过匝道的平均行程时间, 造成交通延误时间差异<sup>[11]</sup>。本研究选择平均延误时间作为指标, 评价交通效率, 反映 HSR 对交通效率的影响。

其平均延误时间  $D$  的计算式<sup>[12]</sup>为:

$$D = T_M - T_N \quad (8)$$

式中:  $D$  为匝道出口处车辆平均延误时间, s;  $T_M$  为车辆通过匝道的实际平均行驶时间, s;  $T_N$  为车辆通过匝道的理论平均行驶时间, s。

### 2.2 冲突率

由于路肩的使用, 会对交通流产生干扰, 导致

车辆会发生横、纵向冲突。事故率可用冲突率表示,冲突率的高低能够反映事故率的大小。因此,选择冲突率作为交通安全评价指标,冲突率  $R_C$  的计算式<sup>[13]</sup>为:

$$R_C = \frac{T_C}{L \cdot Q}.$$

(9)

式中:  $T_C$  为路段时冲突数;  $Q$  为断面交通量;  $L$  为使用硬路肩长度。

因 VISSIM 内部无法实时显示车辆行车安全,但可以实时生成微观的车辆运行参数。本研究结合跟驰模型理论,在 VEHICLE RECORD(车辆记录)模块中,定义输出变量 Interaction state(交互状态),统计冲突数<sup>[14]</sup>。其流程如图 3 所示。

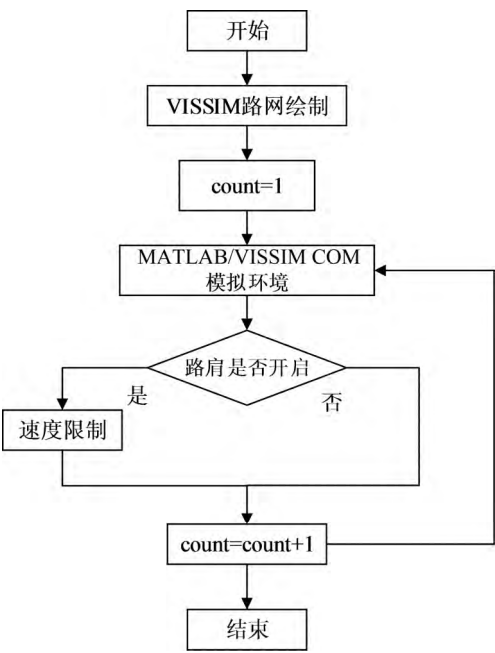


图 3 路肩控制流程

Fig. 3 Hard shoulder control flow chart

3 仿真结果分析

通过 VISSIM,对西汉高速公路出口上游主路路肩的动态开启和关闭进行仿真。在不同交通量和不同限速值下,车辆平均延误时间关系如图 4 所示(限速值为 0 km/h,表示不开放路肩)。

通过 MATLAB 软件,对数据进行回归分析,可得到平均延误时间、交通量及限速值的交通效率模型为:

$$D_{Q,V} = f_1(Q,V)$$

$$=0.605-0.01316 \cdot V+6.7 \cdot 10^{-4} \cdot Q$$

(10)

式中:  $Q$  表示断面交通量;  $V$  表示路肩限速值。

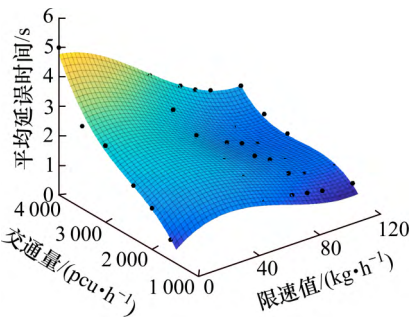


图 4 限速值-交通量-平均延误时间关系

Fig. 4 3D surface of speed limit value-traffic volume-average delay time

在回归结果中,确定系数  $R^2$  为 0.74,可知模型的相关程度较高,数据拟合较佳。由于显著水平检验值  $Sig.$  小于显著性检验的临界值(0.05)见表 2,回归分析检验结果为显著。表明:该模型成立,并具有统计意义。

表 2 各回归模型的显著性检验结果

| Table 2 Significant test results of regression models |        |     |        |        |      |
|---|--------|-----|--------|--------|------|
| 来源  | 交通效率模型 |     |        |        |      |
|   | 离差     | 自由度 | 均方     | F 值    | Sig. |
| 回归  | 20.335 | 2   | 10.167 | 49.241 | 0.00 |
| 残差  | 6.814  | 33  | 0.206  | —      | —    |
| 总计  | 27.149 | 35  | —      | —      | —    |

| 来源 | 行车风险模型 |     |         |        |      |
|----|--------|-----|---------|--------|------|
|    | 离差     | 自由度 | 均方      | F 值    | Sig. |
| 回归 | 1.005  | 5   | 0.201 0 | 28.315 | 0.00 |
| 残差 | 0.213  | 30  | 0.007 1 | —      | —    |
| 总计 | 1.218  | 35  | —       | —      | —    |

注:  $F$  值为回归均方与剩余(残差)均方比例,表示数值判断回归是否显著。

从图 4 中可以看出,在交通量较低时,即 1 600, 2 000 pcu/h 输入下,平均延误时间并没有显著地变化。但随着交通量的增大,主路路肩的使用,会使平均延误时间明显降低。当交通量达到 2 400 pcu/h 时,与正常行驶状态下的相比,分别对路肩限速 60, 80,90,100,120 km/h 下,进行临时使用时,其平均延误时间分别降低了 11%,22%,39%,50%,55%。交通量为 3 000 pcu/h 时,其平均延误时间分别降低了 11%,26%, 30%, 38%,40%。交通量为 3 500 pcu/h 时,其平均延误时间分别降低了 10%,21%,32%,39%,

40%。交通量为4 000 pcu/h时,其平均延误时间分别降低了30%,40%,44%,48%,48%。

通过检测器检测匝道的车辆速度数据如图5所示。从图5中可以看出,交通量为2 400 pcu/h~2 600 pcu/h时,进入匝道车辆的行驶速度明显提高。通过回归模型和流密速关系可知,当交通量超过2 400 pcu/h,由于交通量和密度的提高,使用路肩的车辆数增加。因此,此时开放路肩,能够提高匝道处的交通效率。

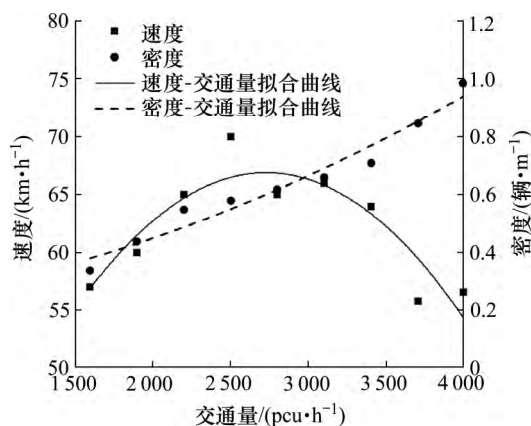


图5 交通量-速度-流量关系

Fig. 5 Relationship of traffic volume-speed-flow

在不同的交通量和限速值下,车辆冲突率关系如图6所示(限速值为0 km/h,表示不开放路肩)。

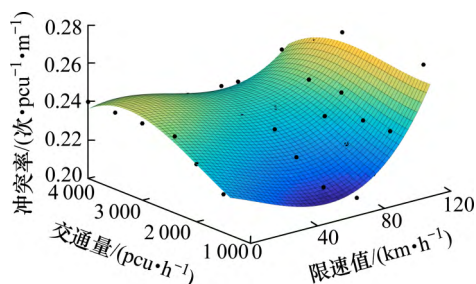


图6 限速值-交通量-冲突率三维曲面

Fig. 6 3D surface of speed limit value-traffic volume and-conflict rate

为了分析冲突率、限速值及交通量间的关系,基于MATLAB软件,建立行车风险模型:

$$R_{Q,V} = l_2(Q,V) = 0.1657 - 4.7 \times 10^{-4} \cdot V + 4.382 \times 10^{-5} \cdot Q + 6.295 \times 10^{-6} \cdot V^2 - 6.273 \times 10^{-8} \cdot V \cdot Q - 6.273 \times 10^{-9} \cdot Q^2 \quad (11)$$

在行车风险模型回归结果中,确定系数 $R^2$ 为0.804,可知模型的相关程度较高,数据拟合较好。在表2中,由于Sig.小于显著性检验的临界值,表

示回归分析检验结果为显著。因此,该模型成立,并具有统计意义。

当交通量输入较低时,这时车辆行驶速度相对较高,驾驶人注意程度较低<sup>[15]</sup>,从图6中可以看出,冲突率维持在0.24。交通量提高到2 400 pcu/h~3 000 pcu/h时,与路肩限速80~100 km/h时对比,冲突率有所下降。当路肩与正常车道车速设置为120 km/h时,由于路肩宽度窄于正常车道,冲突率处于较高水平。因此,有必要对路肩实施限速,保证交通安全,提高交通效率。

在不同限速条件下,HSR的交通量与冲突率关系如图7所示,结合行车风险模型,进行冲突率分析。当限速60 km/h交通量输入分别为1 600,2 000,2 400 pcu/h时,此时冲突率相较于正常行驶状态(路肩关闭),分别提高了6%,5%,7%。当交通量在3 500 pcu/h以上时,冲突率逐渐降低。当最大输入交通流4 000 pcu/h时,冲突率降低了6%。当路肩限速80 km/h后进行使用,这时交通量分别为1 600,2 000,2 400,3 000 pcu/h时,冲突率分别增高了8%,7.7%,11.6%,11.8%,而当交通量为4 000 pcu/h时,冲突率会明显低于正常行驶状态的。当路肩限速90 km/h后进行使用,这时交通量分别为1 600,2 000,2 400,3 000,3 500 pcu/h时,冲突率分别增高了9.2%,8.1%,13.7%,12.9%,6.1%。当交通量为3 500 pcu/h以上时,冲突率明显下降。当交通量为4 000 pcu/h时,冲突率与正常行驶状态的基本持平。当限速100 km/h,交通量分别为1 600,2 000,2 400,3 000,3 500 pcu/h时,冲突率分别增加了9.5%,9.1%,13.8%,13.5%,7.6%。当交通量为3 500 pcu/h以上时,冲突率明显下降。当交通量为4 000 pcu/h时,冲突

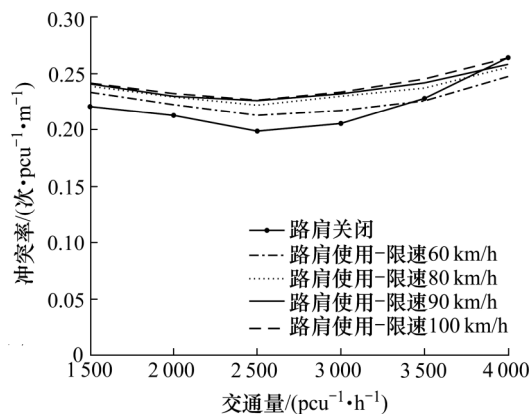


图7 交通量-冲突率关系

Fig. 7 Relationship of traffic volume-conflict rate

率与正常行驶状态的持平。

利用 SPSS 软件,对冲突率进行单因素方差分析见表 3。由表 3 可知,当限速 60,80,90 km/h 时,路肩关闭和路肩使用二者冲突率的 *levene* 统计值分别为 0.328,0.273,0.291,均大于显著性水平 0.05,满足方差分析的前提。二者对应的 *P* 值分别为 0.587,0.128,0.071,均大于显著性水平 0.05。表明:二者的冲突率,没有显著性差异。当限速 100 km/h 时,路肩关闭和路肩使用的冲突率的 *levene* 统计值为 0.370,大于显著性水平 0.05,满足方差分析的前提,对应的 *P* 值为 0.041,小于显著性水平 0.05。表明:二者冲突率存在显著性差异,冲突率明显高于正常行驶状态下的。

表 3 冲突率单因素方差分析结果

Table 3 Results of one-way ANOVA of conflict rate

| 路肩状态-限速/(km·h <sup>-1</sup> ) | 平均值   | 方差      | levene | F 值   | P 值   |
|-------------------------------|-------|---------|--------|-------|-------|
| 路肩关闭                          | 0.222 | 0.023 0 | —      | —     | —     |
| 路肩使用-限速 60                    | 0.226 | 0.012 5 | 0.328  | 0.199 | 0.587 |
| 路肩使用-限速 80                    | 0.235 | 0.011 6 | 0.273  | 1.683 | 0.128 |
| 路肩使用-限速 90                    | 0.238 | 0.011 6 | 0.291  | 2.402 | 0.071 |
| 路肩使用-限速 100                   | 0.240 | 0.013 3 | 0.370  | 2.959 | 0.041 |

注: *levene* 为单因素方差分析的方差齐性检验的统计值;

*P* 值是衡量控制组与试验组差异大小的指标;

*F* 值表示组间和组内均方比例。

从图 8 和交通效率模型可知,在冲突率没有显著变化的情况下,当路肩限速 80~90 km/h 的平均延误时间明显低于 60 km/h 的。表明:当限速 80~90 km/h 使用路肩时,在没有增加行车风险情况下,显著提高交通效率。

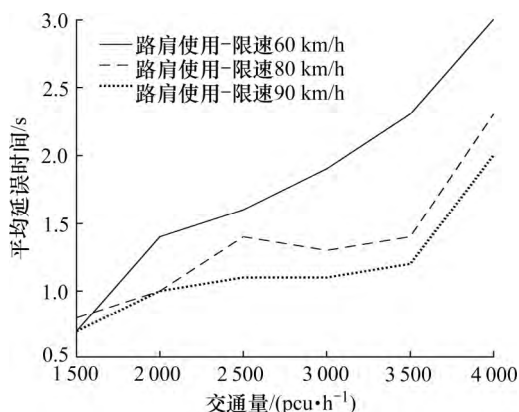


图 8 交通量-平均延误时间关系

Fig. 8 Relationship of traffic volume-average delay time

## 4 结论

以西汉高速为例,建立了高速公路临时路肩使用模型。通过交通效率模型和行车风险模型,分析了临时路肩使用条件,得到结论为:

1) 路肩使用能够提高高速公路交通设施的使用率。当交通量在 2 400 pcu/h 以下时,由于交通量较低,高速公路出口处车辆行驶通畅。因此,路肩使用较低,此时并不会提高交通效率。

2) 当交通量超过 2 400 pcu/h 时,交通量增大,匝道处较为拥堵。通过交通效率模型和流密速的关系可知,此时开放路肩,能够明显提高匝道处的交通效率。通过对比不同车速控制下 HSR 的行车风险,对路肩分别限速 60,80,90 km/h 时,路肩使用与关闭的冲突率,没有显著性差异。表明:路肩的使用,能够满足交通安全的要求。通过对比其延误时间,在路肩限速 80~90 km/h 时,匝道处的交通效率显著提升。表明:在保障行车风险没有增加的情况下,HSR 提高了交通效率。

本研究考虑了单向两车道的高速公路临时路肩使用模型,并得到了使用条件,忽略了三车道或多车道高速公路。后续研究可在该基础上,对三车道或多车道高速公路进行分析与实验。

## 参考文献(References):

- [1] 吴江.高速公路互通式立体交叉设计中的连续出口和入口间距设计[J].公路工程,2018,43(4):242-247.(WU Jiang. Design of continuous exit and entrance distance in interchange design of interworking freeway[J]. Highway Engineering,2018,43(4):242-247.(in Chinese))
- [2] 李兵.高速公路硬路肩综合利用研究[J].四川建材,2018,44(7):149-150,152.(LI Bing.Research on hard shoulder running management based on highway[J]. Sichuan Building Materials, 2018, 44(7): 149-150, 152. (in Chinese))
- [3] Gitelman V, Hakkert S, Zilberstein R, et al. Bus operations on hard shoulders during congested morning hours-A pilot evaluation in israel[J].Transportation Research Procedia,2016(14):1144-1153.
- [4] Guerrieri M, Mauro R. Capacity and safety analysis of hard-shoulder running (HSR). A motorway case study[J].

- Transportation Research Part A Policy and Practice, 2016(92):162-183.
- [5] Aron M, Régine Seidowsky, Cohen S. Safety impact of using the hard shoulder during congested traffic. The case of a managed lane operation on a French urban motorway[J]. Transportation Research Part C, 2013(28): 168-180.
- [6] 李瑞敏,叶朕,李斌.高速公路临时路肩使用措施优化控制与仿真[J].系统仿真学报,2018,30(3):1036-1045.(LI Rui-min, YE Zhen, LI Bin. Optimal control and simulation of hard shoulder running on highways[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1036-1045. (in Chinese))
- [7] Vadde R, Sun D, Sai J O, et al. A simulation study of using active traffic management strategies on congested freeways[J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(3):178-184.
- [8] 王雪松,朱美新.基于自然驾驶数据的中国驾驶人城市快速路跟驰模型标定与验证[J].中国公路学报,2018, 31(9):129-137. (WANG Xue-song, ZHU Mei-xin. Calibration and verification of Chinese driver's urban expressway car-following model based on natural driving data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 129-137. (in Chinese))
- [9] 李传华,吴昊,孙一帆.基于交通冲突的山区高速公路可变限速控制方法[J].长安大学学报:自然科学版,2018, 38(5): 160-167. (LI Chuan-hua, WU Hao, SUN Yi-fan. Variable speed limit method of mountainous expressway based on traffic conflict index[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2018, 38(5): 160-167. (in Chinese))
- [10] Abdelaty M A, Dilmore J, Dhindsa A. Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement[J]. Accident Analysis & Prevention, 2006, 38(2):335-345.
- [11] Jake Kononov, Steven Hersey, David Reeves, et al. Relationship between freeway flow parameters and safety and its implications for hard shoulder running[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2280(10): 10-17.
- [12] 朱宏. 高速公路出口匝道影响区分级限速方案适用性的研究[D].西安:长安大学,2014.(ZHU Hong. Study on applicability of grading and speed limit scheme for freeway exit ramp impact area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese))
- [13] 吴昊,朱彤,王长帅.服从率影响下高速公路施工区限速安全研究[J].交通科学与工程,2018,34(1):85-92.(WU Hao, ZHU Tong, WANG Chang-shuai. Research on speed of expressway work zone influenced by speed limit compliance[J]. Transport Science and Engineering, 2018, 34(1):85-92. (in Chinese))
- [14] 张姝玮,黄富斌,孟杰.基于 Vissim 仿真的高速公路施工区行车风险分析[J].筑路机械与施工机械化,2016(33): 63-66.(ZHANG Shu-wei, HUANG Fu-bin, MENG Jie. Analysis on driving risk of expressway work zone based on vissim[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016(33):63-66. (in Chinese))
- [15] 李鹏辉.驾驶分神对行车安全影响的建模研究[D].北京:清华大学,2018.(LI Peng-hui. Modeling the effects of driver distraction on driving safety[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese))