

# 高速公路事故路段分区域可变限速控制方法

王希良<sup>1</sup>, 张士东<sup>2</sup>, 于雪涛<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**针对高速公路可变限速控制问题,利用交通量与密度之间的关系建立了可变限速模型,研究了分段限速、分道分车型限速和分时段限速3种可变限速措施,以车均延误和平均排队长度作为评价指标,采用VISSIM仿真分析,与未采取限速相比,仿真得到分道限速车均延误降低37.9%,平均排队长度降低24.1%。与分段限速相比,分道分车型限速车均延误降低0.7%,平均排队长度降低35.9%;分时段限速车均延误减少38.4%,平均排队长度减少36.8%。结果表明:分段限速、分道分车型限速和分时段限速较好地缓解交通拥堵问题。

**关键词:**高速公路;交通流;可变限速控制;车均延误;平均排队长度

**中图分类号:**U491.31 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)01-0041-05

## 0 引言

随着高速公路交通流的不断增加,由交通事故引发的交通拥挤频频发生,特别是瓶颈区域以及上游的密度增大,导致高速公路的服务水平和运行效率下降。在交通流理论中,密度和交通流量之间存在着三角关系,当密度处于拥挤和非拥挤的临界时,交通流量最大,因此,合理地控制事故路段上游的交通密度可以提升高速公路的通行能力<sup>[1-2]</sup>。而在事故区上游可变限速控制(Variable Speed Limits,简称VSL)可以控制密度,进而可以缓解高速公路的交通拥堵。

针对目前的高速公路交通状况,许多专家和学者采用可变限速控制方法进行了缓解瓶颈路段的拥堵研究,取得了许多成果。Kianfar J et al 根据可变限速与流量-密度之间的关系,提出了一种简单规则的瓶颈路段可变限速控制方法,并在实际道路上应用<sup>[3]</sup>。张存宝等人根据高速公路动态交通流的不足,提出了分车型可变限速控制模型,取得了较好的效果<sup>[4]</sup>。杨庆芳等人融合元胞传输模型与可变限速控制方法,提出了高流量下的可变限速方法、可变限速阶梯控制方法以及主线路段和匝道协调控制模型<sup>[6-7]</sup>。Hyerim Cho et al 利用交通流理论和冲击波理论进行了车辆轨迹的时间/距离研究,并用VISSIM仿真验证<sup>[8-10]</sup>。总之,国内外学者虽然根据密度和交通流量建立可变限速模型,对于缓解交通拥堵问题有一定作用,但是采用不同控制措施的效果究竟如何,仍然需要进一步的研究。

## 1 可变限速控制方法分析

以石黄高速公路黄骅段为研究对象,其地理位置如图1所示,石黄高速起于石家庄市,途径衡水和沧州,东至黄骅市,全长约281 km,按照平原微丘的高速公路标准设计,石黄高速公路设计车速为100 km/h,类型采用双向四车道、全封闭、全立交的设计形式。根据历年交通流状况分析,该路段事故较多,

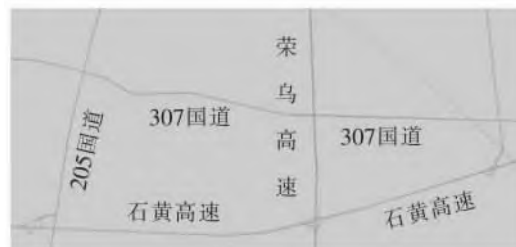


图1 高速公路主线路段示意图

收稿日期:2016-03-02 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.01.08

基金项目:2016年河北省高等学校自然科学研究重点项目(Z665717)

作者简介:王希良(1966-),男,博士,教授,主要从事交通运输规划方面的教学科研工作。E-mail:wangxiliang263@sina.com

王希良,张士东,于雪涛.高速公路事故路段分区域可变限速控制方法[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(1):41-45.

拥堵严重,假设在由东向西的路段发生交通事故,将事故路段上游分为 4 段作为控制区,其编号由事故区开始向上游依次为控制区 1、控制区 2、控制区 3、控制区 4,如图 2 所示。



图 2 可变限速路段设置

交通流量和密度符合三角关系,  $\rho_i$  趋向于  $\rho_c$ , 道路的交通流量将会变大, 合理的调节交通密度能够增大道路的交通流量, 如图 3 所示。

发生交通事故时, 车道关闭使得车辆出现瓶颈现象, 采取限速措施时, 交通流量与密度的关系将会变为图 4 中 I 和 IV 的线性关系, 同样也将产生新的最大交通量  $Q''_{\max}$ 、新的临界密度  $\rho''_c$  和新的自由流速度  $v''_f$ , 当采用不同的限制速度时, 图 4 中 I 和 IV 中的密度与流量之间的关系也将会发生不同的改变。

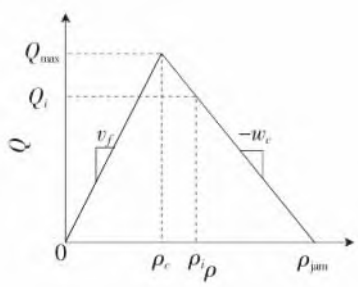


图 3 无限速交通流量与密度关系示意图

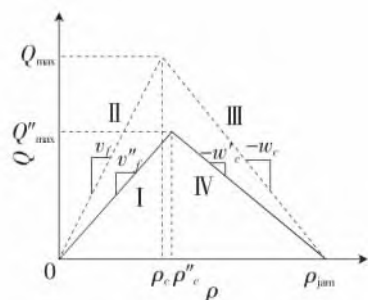


图 4 事故路段上游流量-密度关系

为了使得事故路段交通流量能够最大, 车均延误和平均排队长度最小, 主要的措施是将速度和密度调节到合理的范围内, 即在临界密度  $\rho''_c$  附近, 进而使得道路的通行能力最大化。通过对于不同的控制区域的限速, 使得事故区域的密度在临界密度  $\rho''_c$  附近, 进而使得道路的通行能力最大, 车均延误和平均排队长度最小化。基于此, 提出可变限速控制方法如下:

(1) 分段限速措施。将 4 个不同的控制区分别采取不同的限速措施, 由控制区 4 到控制区 1 随着事故的持续时间逐渐进行限速, 进而调节事故路段上游的速度和密度提升道路的通行能力。

(2) 分道分车型限速。在同方向的道路上对不同车型和不同车道的车辆采用不同的限速值。当同一路段上不同的车型车辆或者不同车道上的车辆的速度差异值比较大时, 通常调节指定类型或者指定车道上的车辆的速度值, 进而减少车辆之间的速度差和换道的次数, 使得高速公路的交通运行均衡, 提高通行效率。

(3) 分时段限速措施。对于 4 个控制区进行不同时间段和不同的限速值, 进而能够合理的调节路段上的密度, 使得道路的通行交通量趋向最大化, 进而提高道路的通行效率和服务水平。

## 2 可变限速控制模型构建

将以高速公路的车均延误和平均排队长度进行分析可变限速方法的效果, 车均延误是衡量车辆运行的重要指标之一, 以道路的车均延误作为目标函数, 考虑到单独使用车均延误作为目标函数存在缺陷, 将以平均排队长度作为评价标准, 由于平均排队长度作为目标函数难以建立, 排队长度与密度相似, 将排队长度用密度代替, 因此, 以车均延误和密度最小作为路段的 VSL 控制目标构建函数。

$$J_1 = \left[ \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_k-1} L_k \rho_{k,i}(t) - \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_k-1} \frac{L_k q_{k,i}(t)}{v_{f,k}} \right] / \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^{T-1} q_k(t) \quad (1)$$

式中,  $L_k$  为控制区  $k$  的长度;  $\rho_{k,i}(t)$  为控制区  $k$  第  $i$  个元胞在  $t$  时段的密度;  $q_{k,i}(t)$  为在  $t$  时段控制区  $k$  中流入元胞  $i$  的流量;  $v_{f,k}$  为控制区  $k$  的自由流速度,  $N_k$  为控制区  $k$  的元胞数量;  $T$  为时间终止时段。

$$J_2 = \delta \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_k-1} \rho_{k,i}(t) \quad (2)$$

式中,  $\delta$  为时间间隔。

根据公式(1)和公式(2)构建高速公路主线瓶颈区域的 VSL 目标函数为

$$J = \alpha J_1 + \beta J_2 \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  为权重系数。

为了更好地确保高速公路主线上瓶颈区域 VSL 控制效果,从交通运行的安全性和驾驶员的服从性等角度进行考虑,设定 VSL 模型的约束条件为:

(1)从行车安全方面和车辆的运行效率两方面考虑,控制区的限制速度值要小于高速公路的最大安全速度,同时控制区的限速值最小要大于高速公路通行的最小值,即  $\max\{v_1(t), v_2(t), v_3(t), v_4(t)\} \leq v_{\max}$ ,  $\min\{v_1(t), v_2(t), v_3(t), v_4(t)\} \geq v_{\min}$ 。

(2)为了保证车辆安全和稳定的行驶,相邻间隔的限速差值要小于道路能够容忍的最大值,即  $\max\{|v_1(t) - v_1(t+1)|, |v_2(t) - v_2(t+1)|, |v_3(t) - v_3(t+1)|, |v_4(t) - v_4(t+1)|\} \leq v_{\max, \text{change}}$ 。

(3)对于控制区的限制速度值取 10~90 中取 10 的整数倍。

通过分析可知,相邻间隔内可变限速数值变化为 10 km/h 或者 20 km/h,  $v_{\max, \text{change}} = 20$  km/h,可变限速值设置为 10 km/h 的整数倍,其中  $v_{\max} = 100$  km/h,通过多次仿真实验和真实的交通流参数的数据分析,确定  $v_{\min} = 30$  km/h。

### 3 基于 VISSIM 可变限速控制的仿真分析

为了验证所提出的高速公路事故瓶颈路段的可变限速控制方法的合理性和有效性,以石黄高速公路黄骅段作为研究对象,利用 VISSIM 对于未采取可变限速控制、分段限速、分车道分车型限速、分时段限速等措施进行仿真和计算,将得到的评价结果进行分析和比较。

参数设置:以石黄高速公路主线路段为单向双车道,瓶颈路段为单向一条车道,对于限制速度值采用 VSL 模型的约束条件进行设置。石黄高速公路黄骅段的交通量取 2 000 veh(小汽车所占比例 70%,货车所占比例 15%,客车所占比例 15%),交通事故占用一条车道,仿真时间设置为 2 400 s,在第 600 s 发生交通事故,事故持续时间为 20 min,在第 1 800 s 事故解除。对于仿真模型的效果图的 2D 和 3D 的拥堵情况如图 5 所示。

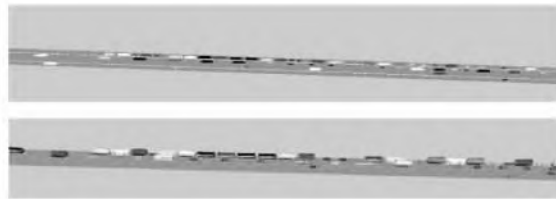


图 5 事故交通流运行效果图

#### 3.1 分段限速仿真分析

对于方案一设置 4 个相等控制区,每段 1.5 km,对于限速值分别取 40 km/h、60 km/h、80 km/h、90 km/h 进行仿真分析,从控制区 4 到控制区 1 逐渐开始进行减速,如图 6 和图 7 所示。

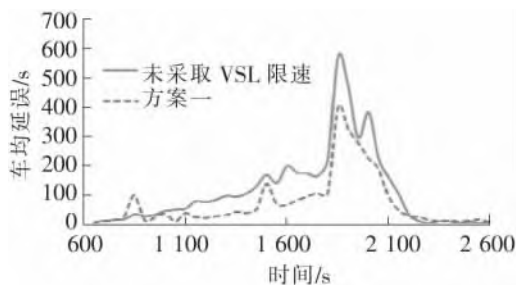


图 6 采取 VSL 与未采取的车均延误对比

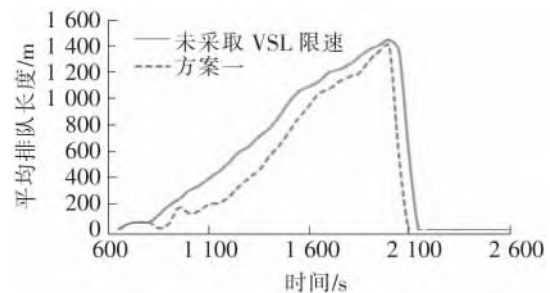


图 7 采取 VSL 与未采取的平均排队对比

根据图 6 和图 7 可以明显看出,方案一的车均延误和平均排队长度都要明显小于未采取 VSL 措施,方案一在 750 s 时,出现排队减少现象,主要是由于控制区车辆减速,减小事故区域的密度,方案一与未采

取限速控制措施相比,车均延误降低 37.9%,停车延误降低 26.9%,平均排队长度降低 24.1%。

### 3.2 分道分车型限速仿真分析

分车道限速与分车型限速一般相互结合进行控制车辆的速度。方案一为保持原有的参数不变,对于 4 个控制区域进行长度和不同的速度进行设置,主要是在 VSL 的基础上,对于货车和客车的限速在小汽车的基础上减少 10 km/h,根据高速公路车道设计,对于不同的车道进行不同的速度设置,根据仿真得到发生事故后交通流的车辆平均延误和平均排队长度随着时间的变化规律,如图 8 和图 9 所示。

通过方案一和方案二进行比较,方案一和方案二对于车均延误走向相互交织,没有明显变化,但是方案二排队长度明显低于方案一,方案二与方案一相比,车均延误降低 0.7%,停车延误降低 46.1%,平均排队长度降低 35.9%。

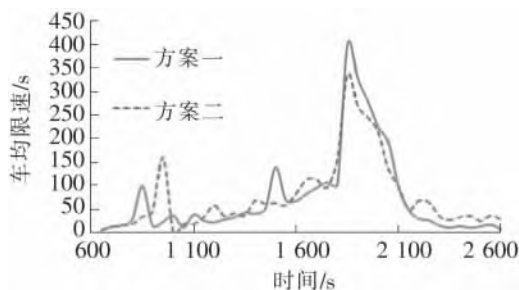


图 8 不同车型和车道的车均延误对比

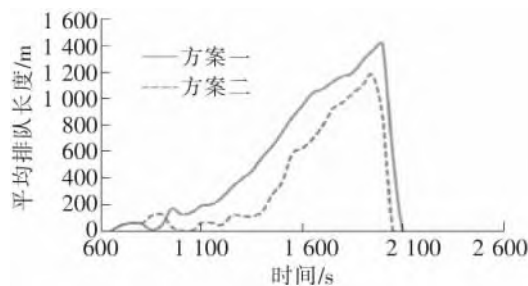


图 9 不同车型和车道平均排队对比

### 3.3 分时段限速仿真分析

方案三在不同的时段对车辆进行限速会起到一定的效果,在 1 200 s 前采用方案一限速措施,事故持续时间在 1 200~1 500 s,对控制区 1 至控制区 4 分别采取 30 km/h、40 km/h、60 km/h、80 km/h、在 1 500~1 700 s 分别采取 40 km/h、50 km/h、40 km/h、70 km/h,在 1 700 s 后恢复到方案一限速措施。

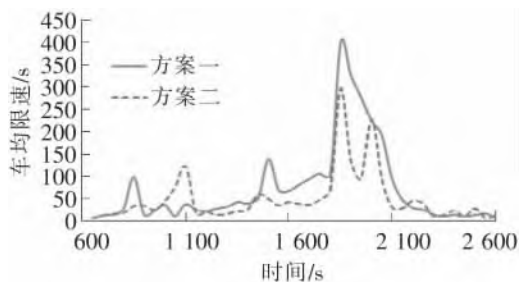


图 10 不同时段限速的车均延误对比

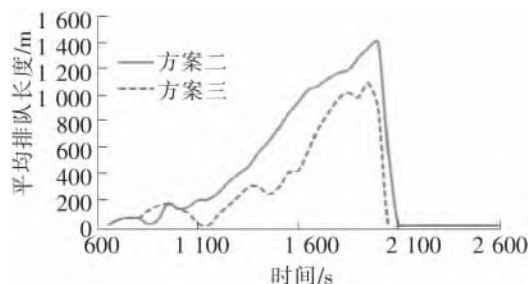


图 11 不同时段限速的平均排队对比

通过对于方案一和方案三进行比较,方案三明显优于方案一,方案三与方案一相比,车均延误减少 38.4%,停车延误减少 51.0%,平均排队长度减少 36.8%。

通过对于不同限速措施的仿真分析和计算,每一种限速方式都取得一定的效果,分时段限速要优于分段限速和分道分车型限速措施,与无 VSL 措施相比,分时段限速的车均延误降低 61.8%,停车延误降低 64.2%,平均排队长度降低 52.0%。

## 4 结论

(1)通过密度与交通流量之间的关系,建立了可变限速控制模型,并提出了分段限速控制、分道分车型限速控制、分时段限速控制 3 种控制方法。

(2)针对 3 种控制方法在 VISSIM 软件中进行仿真分析和验证,通过对比分析的方法得到:3 种控制方法在不同程度上解决高速公路交通拥堵问题,分时段限速要优于分段限速和分道分车型限速措施。

(3)在未来的研究中,将可变限速控制与紧急情况下交通组织方法相结合解决高速公路交通拥挤问题。

## 参 考 文 献

- [1] 张生瑞. 交通流理论与方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 10-22.
- [2] 李茂华, 朱峥艳, 马璐. 高速公路交通事故交通流辐射分析与仿真研究[J]. 公路交通技术, 2011(6): 109-111.
- [3] Kianfar J, Edara P, Sun C. Operational analysis of a freeway variable speed limit system in St. Louis, Missouri[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems Technology Planning & Operations, 2014, 19(4): 1-14.
- [4] 张存保, 周斌, 江周. 基于分车型限速的高速公路可变限速控制方法[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2015, 39(6): 1125-1134.
- [5] 马明辉, 杨庆芳, 梁士栋. 高速公路主线瓶颈区域的协调控制模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(9): 1700-1706.
- [6] 马明辉, 杨庆芳, 梁士栋. 基于元胞传输模型的高速公路可变限速控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(9): 46-50.
- [7] 杨庆芳, 马明辉, 梁士栋. 高速公路瓶颈区域可变限速阶梯控制方法[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 354-360.
- [8] Hyerim Cho, Youngchan Kim. Analysis of traffic flow with variable speed limit on highways[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(6): 1048-1056.
- [9] HR Cho, YC Kim, DI Ha, HR Cho, YC Kim. Modelling and evaluation of traffic flow with variable speed limit on highway[J]. Journal of Korean Society of Transportation, 2011, 10(1): 1048-1056.
- [10] Cho H, Kim Y. Development of VSL-RMS integrated model at freeway exit ramp[J]. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2011, 7(2): 333-338.

## Sub-area Control Method of Variable Speed Control for Accident Section on Expressway

Wang Xiliang<sup>1</sup>, Zhang Shidong<sup>2</sup>, Yu Xuetao<sup>1</sup>

(1. College of Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. College of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Based on the relationship of traffic flow and density, the model of variable speed limits is established to solve the problem of variable speed-limit control in highway. Three kinds of speed-limit measures including segment control, road and vehicle control and interval control are simulated and analyzed by using VISSIM. Compared with the original situation, the simulation results show that the average delay of the vehicle decreases by 37.9 percent by taking the measure of speed limit in different lane. At the same time, the average queue length decreases by 24.1 percent. Compared with the segment control method, the average delay and queue length of the condition in different lane and vehicle are reduce by 0.7 percent and 35.9 percent respectively. Meanwhile, the indexes in the situation of speed limit in interval decrease by 38.4 percent and 36.8 percent. The statistics suggest that this three kinds of measures can relieve traffic congestion.

**Key words:** expressway; traffic flow; variable speed control; vehicle delay; average queue length