

文章编号: 0258-2724(2013)05-0942-07 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2013.05.025

## 高速公路可变限速控制策略安全性效果仿真

李志斌<sup>1</sup>, 刘攀<sup>1</sup>, 单肖年<sup>2</sup>, 王炜<sup>1</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 同济大学交通运输工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为了减少高速公路常发交通瓶颈上游路段运动波传播引发的追尾事故, 在分析 PARAMICS 微观仿真模型的基础上, 建立了可变限速控制仿真平台, 在高速公路入口匝道交通瓶颈仿真路段, 采用事故预测模型定量研究路段内冲击波传播过程中追尾事故的实时风险, 提出了减少事故发生概率可变限速控制策略. 结果表明: 减少事故风险效果最好的控制策略是将阈值设置为预测事故概率等于 0.25, 限速值变化周期为 120 s, 限速值降低幅度为 20 km/h, 恢复幅度为 10 km/h, 相邻路段限速值差为 20 km/h. 采用可变限速最优控制策略后, 高速公路瓶颈上游路段追尾事故风险降低了 20%.

**关键词:** 交通运输工程; 可变限速; 交通安全

**中图分类号:** U491.4 **文献标志码:** A

## Simulating Impacts of Variable Speed Limits on Traffic Safety on Freeways

LI Zhibin<sup>1</sup>, LIU Pan<sup>1</sup>, SHAN Xiaonian<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To reduce the occurrence of rear-end collisions during the propagation of kinematic waves in freeway section upstream of a recurrent bottleneck, a simulation platform for variable speed limits (VSLs) was developed using the PARAMICS microscopic simulation model. The simulation network is a freeway section containing an on-ramp bottleneck. A crash prediction model was adopted to quantify the real-time rear-end collision risks accompanying the propagation of kinematic waves in the section upstream of the on-ramp bottleneck. Control strategies for VSLs were proposed to reduce the collision potential. Results show that the optimal strategy to reduce collision risk is that the startup threshold of collision probability is set to 0.25, time step for VSL change to 120 s, speed step for reduction to 20 km/h, speed step for recovery to 10 km/h, and difference between adjacent speed limit signs to 20 km/h. Using the optimal control strategy for VSLs, the rear-end collision risk in the freeway section upstream of the recurrent bottleneck is reduced by 20%.

**Key words:** engineering of communication and transportation; variable speed limits; traffic safety

高速公路车速管理和控制是保证车辆行驶安全的重要手段. 高速公路交通流运行状态随时变化, 传统高速公路固定限速值设置无法满足动态道路交通条件下的限速要求. 可变限速控制技术

(variable speed limits, VSL) 是近年来在发达国家受到广泛关注的高速公路交通控制技术, 它通过自动检测道路交通流运行状态, 针对变化中的道路交通情况, 自动计算当前合理限速值, 并通过信息发

收稿日期: 2012-08-08

基金项目: 国家道路交通安全科技行动计划资助项目(2009BAG13A07-5); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2012CB725400); 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA112304)

作者简介: 李志斌(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为交通运输规划与管理, E-mail: lizhibin@seu.edu.cn

布技术将限速信息发布给驾驶员,其核心思想为通过调整限速值对高速公路交通流运行状态进行人工干预,从而达到改善交通流运行状态、减少事故发生风险、提高交通安全的目的。

近年来,学者们提出了一系列高速公路可变限速控制策略,将其用于减少高速公路交通事故风险,并通过仿真测试验证了控制策略的有效性<sup>[1-6]</sup>。文献[1]提出的可变限速控制策略使中速-高速交通状态下事故风险显著降低,文献[5]提出的可变限速控制策略使事故风险降低了5%~17%。部分学者分析了驾驶员对限速值遵从度对于可变限速控制效果的影响。文献[7]认为驾驶员遵从可变限速控制值对于减少交通事故风险效果显著;文献[8]研究表明,遵从可变限速控制值对于减少车速标准差影响不大;文献[9-12]从可变限速控制方式、大车比例与限速关系、可变限速社会经济效益及不良天气下合理限速值等方面,对可变限速控制技术进行了相关研究。

近年来可变限速控制领域的研究成果丰富,但将该项技术应用于提高高速公路交通安全方面仍未成熟。现有研究对于可变限速控制的具体影响因素(例如驾驶员遵从度)存在争议,且不同研究中可变限速减少事故风险的效果存在较大差异。可变限速控制效果受选择的交通安全替代评价指标(surrogate safety measure)、可变限速控制路段交通特征、仿真模型参数标定、可变限速控制策略等因素的影响,多数研究中只针对某个或多个影响因素进行可变限速控制策略效果分析,因此,需要对已有研究成果进行验证、补充和修正,以提高可变限速控制技术的实用性。

本文采用了国际上可变限速研究领域普遍使用的PARAMICS微观仿真模型,建立可变限速控制的仿真平台,针对高速公路入口匝道导致的交通瓶颈上游路段设置可变限速控制,对可变限速控制策略的关键参数进行测试及对比,分析最优控制策略对提高高速公路交通安全的效果。本研究拓展了可变限速控制技术的应用范围,其研究成果为实际高速公路入口匝道瓶颈区可变限速控制策略的制定提供了参考。

## 1 可变限速微观仿真平台的建立

在可变限速控制研究领域内,目前绝大部分研究均采用了仿真技术对可变限速控制策略的效果进行评价与分析<sup>[1-8,13-17]</sup>。与实际测试相比,仿真技

术的优点为:

(1) 利用仿真技术比实际测试耗费更低,节约大量人力、物力及财力;

(2) 仿真测试耗时更短,能在短时间内测试大量控制策略;

(3) 实际测试中较难实现的策略可以在仿真中实现;

(4) 仿真中可以调整可变限速设置路段,无需多次安装拆除设备;

(5) 某些控制策略可能导致事故风险增加,只能在仿真模型中研究。

采用仿真技术对可变限速控制策略进行研究的重要性已得到国际交通研究领域广泛认同。

以往研究中采用了多种仿真模型进行可变限速控制仿真,包括PARAMICS<sup>[1-6]</sup>、VISSIM<sup>[13]</sup>、METANET<sup>[14-15]</sup>及Cell Transmission Model<sup>[16-17]</sup>等。作者采用PARAMICS微观仿真模型建立可变限速控制仿真平台,并进行效果测试。PARAMICS模型提供了功能强大的编辑器(programmer)及基于C++的应用程序接口(application programming interface, API),允许用户自主开发并植入复杂交通控制策略,具备较强的可控制性及可扩充性。

在PARAMICS微观仿真模型中,建立高速公路可变限速控制仿真平台的步骤如下:

(1) 在仿真模型中建立高速公路路网,设置路网属性及交通需求;

(2) 设置仿真模型核心参数,根据真实交通流数据对参数进行标定;

(3) 根据可变限速控制方案,在路网相应位置设置交通流检测器和可变信息板;

(4) 最后通过应用程序接口API,将编译好的可变限速控制策略插入PARAMICS模型中。

在PARAMICS编辑器中,通过编程实现可变限速控制策略。PARAMICS模型提供了丰富的编译函数,可以方便地修改和设置仿真过程中的动态交通控制规则。可变限速控制使用的主要函数有:

(1) 用qpx\_NET\_postOpen设置当仿真路网打开时,进行参数初始化;

(2) 用qpx\_NET\_timeStep设置每步迭代后的控制命令,包含检测器交通流参数输出、可变限速控制策略等;

(3) 用qpx\_VHC\_detector计算检测器检测实时交通流数据。

在编译完成控制策略之后,生成动态链接库

base.dll,并在对应路网文件内建立存放该动态链接库的地址文件. PARAMICS 模型打开该路网文件时,可在 Modeller 信息浏览器中查看可变限速控制插件程序是否成功植入.

已有研究中,可变限速控制的仿真路段特征存在差异.文献[4]针对入口匝道下游路段进行可变限速控制;文献[5]针对出口匝道上游路段进行研究;文献[1-3,6]针对包含多个出、入口匝道的高速公路区段进行研究;文献[13]针对施工区附近路段进行研究.以往研究未全面考虑高速公路路段的重要特征,例如交通瓶颈附近拥堵现象经常出现,导致追尾事故经常发生,但未见将可变限速控制技术应用于改善高速公路交通瓶颈附近交通安全性的研究成果.

本文针对高速公路入口匝道瓶颈上游路段进行可变限速控制仿真研究.入口匝道和主线交接处的交通情况复杂,匝道车辆进入主线后变道行为对主线车辆正常行驶产生一定干扰,甚至导致主线车

辆在瓶颈位置排队,且排队状态向上游路段逐渐扩散,增加了车辆交通冲突的数量和强度.已有研究表明,高速公路入口匝道交通瓶颈附近事故风险较高<sup>[18]</sup>.对入口匝道上游路段进行可变限速控制,可使抵达拥堵路段的车辆速度逐渐降低,从而降低事故风险.

在 PARAMICS 模型中建立的可变限速控制仿真路网如图 1 所示.

路段为单向 3 车道,长度为 4 km,车辆自左向右行驶,设计车速为 120 km/h.主线路段每隔约 600 m 设置交通流检测器,共计 7 台,检测器 1 与 2 之间为入口匝道,匝道上游路段检测器位置设置可变限速信息板.采用浙江省杭甬高速公路实测交通流数据,对 PARAMICS 仿真模型中的关键参数进行标定,使仿真结果符合我国高速公路交通流特征.基于遗传算法的参数标定结果为车头时距 1.16 s,反应时间 1.17 s<sup>[19]</sup>.

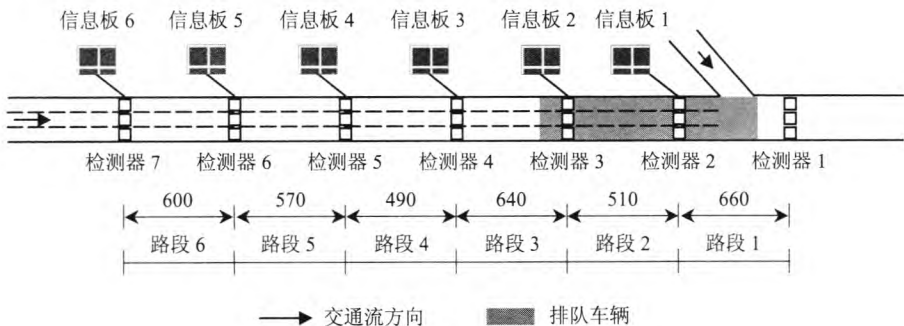


图 1 可变限速控制仿真路网(单位:m)  
Fig. 1 Simulation network for VSLs(unit: m)

2 可变限速控制策略及评价指标

2.1 可变限速控制策略

控制策略是可变限速控制技术的核心,是充分发挥可变限速控制功能的关键.应用可变限速控制系统前,需首先确定系统核心控制策略.针对虚拟系统的控制策略进行研究,国际学术界通用方法是在微观仿真软件中建立控制系统仿真平台,对各类控制策略进行仿真效果对比分析,从而确定最优控制策略<sup>[1-8,13-17]</sup>.

高速公路路段实行可变限速控制需要先确定以下核心控制参数:

- (1) 可变限速何时开始控制(阈值);
- (2) 限速值多长时间改变一次(周期);
- (3) 限速值一次改变多少(幅度);

(4) 相邻路段限速值如何协调.

这 4 个控制参数间存在先后逻辑关系:首先要根据设定的阈值判断是否启动可变限速控制,其次考虑限速值的变化周期,然后确定限速值单次变化的幅度,最后对相邻路段限速值进行协调控制.因此,本文按顺序对上述 4 类控制参数逐一进行测试,选择各参数最优值的组合作为可变限速最优控制策略.

本文设置每组实验中可变限速控制策略系统的仿真时间长度为 1 h,仿真时间步长为 30 s,前 10 min 为预热期,预热期后开始实施可变限速控制. PARAMICS 微观仿真软件的单次仿真结果存在一定随机性,为消除仿真随机性的影响,在仿真过程中对每组实验进行 3 次仿真( PARAMICS 模型中设置的种子数为 2、4、6),根据 3 次仿真平均结

果作为该次实验的结果.

2.2 控制效果评价指标

评价指标是分析控制策略效果的关键,需根据可变限速控制目标选择评价指标. 本文采用文献[18]针对高速公路入口匝道交通瓶颈上游路段追尾事故建立的事故风险实时预测模型,定量评价可变限速控制效果. 该模型对冲击波传播过程中个体车辆轨迹特征及追尾事故发生条件进行集计分析,建立了基于集计交通流数据的追尾事故风险指

数解析模型,并根据真实交通流及事故数据,标定了 Logistic 回归模型. 采用该模型对真实高速公路瓶颈区追尾事故的预测结果符合真实情况,采用该模型衡量交通瓶颈上游路段追尾事故风险,表明交通流从自由流状态转至拥堵状态的过程中追尾风险最大,拥堵中冲击波传播亦会增加追尾事故风险.

高速公路入口匝道瓶颈上游路段追尾事故风险实时预测 Logistic 模型如下<sup>[18]</sup>:

$$P(Y=1)=\frac{\exp(-1.94+0.28R+0.18\sigma(O_u))}{1+\exp(-1.94+0.28R+0.18\sigma(O_u))}, \tag{1}$$

$$R=\frac{(\bar{v}_u(t-\Delta T,t)-\bar{v}_d(t-\Delta T,t))\bar{O}_u(t-\Delta T,t)}{1-\bar{O}_u(t-\Delta T,t)}, \tag{2}$$

$$\bar{v}_u(t-\Delta T,t)=\frac{\sum_{m=1}^M\sum_{j=1}^Jv_{um}(t_j-\Delta t,t_j)}{MJ}, \tag{3}$$

$$\bar{v}_d(t-\Delta T,t)=\frac{\sum_{m=1}^M\sum_{j=1}^Jv_{dm}(t_j-\Delta t,t_j)}{MJ}, \tag{4}$$

$$\bar{O}_u(t-\Delta T,t)=\frac{\sum_{m=1}^M\sum_{j=1}^JO_{um}(t_j-\Delta t,t_j)}{MJ}, \tag{5}$$

式中:  $P$  为追尾事故发生概率;  
 $Y$  为追尾事故发生变量,  $Y=1$  表示事故发生;  
 $O_u$  为上游占有率;  
 $\sigma$  为上游占有率的标准差;  
 $R$  为冲击波传播过程中追尾风险指数;  
 $\Delta T$  为计算周期,  $\Delta T=5\text{ min}$ ;  
 $\Delta t$  为数据检测周期,  $\Delta t=30\text{ s}$ ;  
 $J$  为一个检测周期内时长个数,  
 $J=\frac{\Delta T}{\Delta t}$ ;

$M$  为车道数(如路段内车道数不等,则将最小车道数作为  $M$  值);  
 $v_u$  为上游车辆速度;  
 $v_d$  为下游车辆速度.

采用交通瓶颈上游各路段内追尾事故风险均值作为衡量可变限速控制策略效果的评价指标.

3 可变限速控制策略仿真效果

3.1 最优启动阈值

启动阈值用于判断可变限速控制何时启动及关闭,当检测到的实时事故风险大于所设阈值时,

可变限速控制启动. 本次实验设置 5 组事故风险阈值,分别为 0.15、0.20、0.25、0.30 及 0.35,仿真结果如图 2 所示.

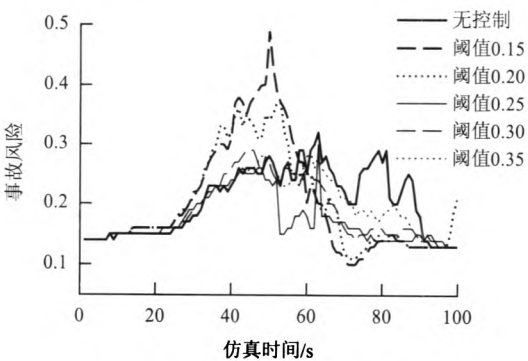


图 2 不同启动阈值下事故风险曲线  
Fig. 2 Collision risk curves for different startup thresholds

总体而言,可变限速控制可以减少仿真过程中期(时间 40 ~ 70 s)和后期(时间 70 ~ 100 s)的事故风险,但过低的阈值(0.15 和 0.20)设置增加了中期事故风险. 其原因是如果启动阈值设置较低,则可变限速控制对路段交通流变化过于敏感,较小的交通流波动会导致可变限速控制启动,会导致交通流运行紊乱,反而增加事故风险.

对图 2 进行分析发现,当启动阈值设置为 0.25 时,可变限速控制策略能够及时检测到事故风险的增加,在适当时机降低上游路段车速,从而有效减小了追尾事故风险.当阈值大于 0.25 时,控制策略对于减少事故风险的效果并不明显.因此,将阈值 0.25 作为可变限速控制策略的最优控制阈值,并应用于控制策略效果测试.

3.2 最优控制周期

路段内限速值不能频繁变化,根据控制时间周期判断可变限速值改变的时间间隔.实验设置了不同时间周期,分别为 60、120、180 和 240 s,仿真结果如图 3 所示.

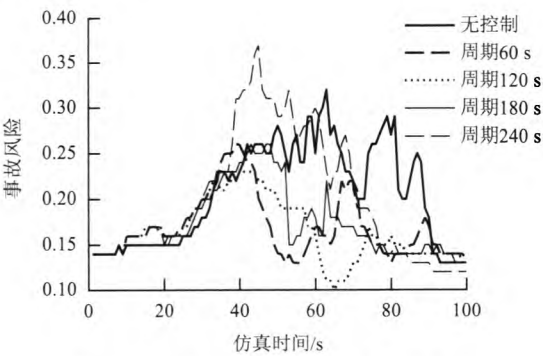


图 3 不同控制周期下事故风险曲线  
Fig. 3 Collision risk curves for different time periods

当控制时间周期为 240 s 时,可变限速控制在

仿真后期减少了事故风险,但在仿真中期增加了事故风险.该结果表明,如果控制周期较长,在达到事故风险阈值后无法及时调整限速,而是在较长时滞后才开始限速控制,不合时机的控制不仅无法降低事故风险,反而会增加事故风险.

当控制周期过短(例如周期为 60 s)时,可变限速控制可以及时降低车速以减少事故风险,但由于限速值变化过于频繁,对交通流产生一定干扰,并不是最优控制周期.图 3 表明,当时间周期为 120 s 时,可变限速控制策略可以有效降低事故风险,同时可以避免对交通流产生较大干扰.因此,在控制策略效果测试中,将时间选取 120 s 作为可变限速控制策略的最优控制周期.

3.3 最优变化幅度

对可变限速值每次允许变化的最大幅度有一定的限制.限速值降低和恢复过程中变化幅度不一定相同,本次实验测试了 3 组限速值降低幅度及 3 组限速值恢复幅度值,以确定最优限速值变化幅度.各控制策略仿真结果见表 1.

表 1 中,设置限速值降低幅度分别为 15、20 和 25 km/h,结果表明,当限速值变化幅度过小时(15 km/h),无法有效降低事故风险;当限速值变化过大时(25 km/h),会对交通流产生干扰,导致降低事故风险效果有限.

表 1 不同变化幅度下可变限速控制策略效果  
Tab. 1 Effects of VSLs with different change magnitudes

风险指标	限速降低幅度/(km·h <sup>-1</sup> )				限速恢复幅度/(km·h <sup>-1</sup> )			
	无控制	15	20	25	无控制	10	15	20
最大事故风险	0.320	0.450	0.270	0.330	0.320	0.230	0.340	0.270
平均事故风险	0.205	0.211	0.174	0.181	0.205	0.165	0.178	0.174
平均值变化量	—	0.006	-0.031	-0.024	—	-0.040	-0.027	-0.031
风险变化比例/%	—	2.953	-15.102	-11.665	—	-19.555	-13.214	-15.102

当限速值变化幅度为 20 km/h 时,可变限速控制能够有效降低车辆行驶速度,同时避免过大的限速值变化带来的负面影响,因此,该控制策略对于降低事故风险效果最好.设置限速值恢复过程中变化幅度分别为 10、15 及 20 km/h,结果表明,幅度为 10 km/h 时,可变限速控制策略降低事故风险效果最好.因此,将 20 km/h 和 10 km/h 分别作为最优限速值降低幅度和恢复幅度,并应用于控制策略效果测试中.

3.4 最优相邻路段限速协调控制

设置相邻路段限速协调控制可以避免相邻路

段限速值差别过大,有利于提高驾驶员遵从限速值.本次实验中设置了 3 类协调控制限速策略,用于约束相邻路段内限速值差,分别为 10、20 及 30 km/h,仿真结果如表 2 所示.当相邻限速值设置为 10 km/h 时,可变限速控制对于减少平均事故风险效果最好(风险降低 21.98%),但此控制策略下,最大事故风险值(为 0.30)较高;当相邻路段限速值为 20 km/h 时,可以有效降低平均事故风险(降低了 19.56%),同时最大事故风险(为 0.23)最低.因此,最优相邻路段可变限速值协调控制策略的限速值差为 20 km/h.



表 2 不同协调控制策略下可变限速控制效果  
Tab.2 Effects of VSLs with different coordinating controls

风险指标	协调控制策略/(km·h <sup>-1</sup> )			
	无控制	10	20	30
最大事故风险	0.320	0.300	0.230	0.310
平均事故风险	0.205	0.160	0.165	0.184
平均值变化量	—	-0.045	-0.040	-0.020
风险变化比例/%	—	-21.975	-19.555	-9.971

3.5 最优可变限速控制策略及效果

根据上述各实验的关键参数最优值确定的最优可变限速控制策略为:启动阈值为预测事故概率等于 0.25,时间控制周期为 2 min,限速值降低幅度为 20 km/h,限速值恢复幅度为 10 km/h,相邻路段限速值协调控制差值为 20 km/h. 仿真实验中,采用与不采用最优控制策略的事故风险随时间变化的曲线如图 4 所示. 从图 4 中可见,最优可变限速控制策略对于减少追尾事故风险的效果明显. 在无控制情况下,仿真中期和后期路段内追尾事故风险高于 0.2;采用最优可变限速控制策略后,仿真中期和后期路段内追尾事故风险显著降低,均保持在 0.2 以下. 采用最优可变限速控制策略降低了路段内追尾事故风险约 20%.

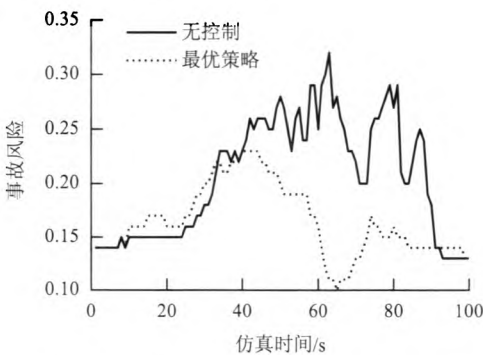


图 4 有、无可变限速控制下事故风险曲线  
Fig.4 Collision risks with and without optimal VSL control

4 结束语

对可变限速控制提高高速公路交通安全性的效果进行仿真研究,在 PARAMICS 微观仿真模型中建立可变限速控制仿真平台,对高速公路入口匝道交通瓶颈上游路段进行研究,通过仿真实验测试了可变限速控制策略的核心参数,采用追尾事故预测模型来衡量控制策略的效果,并进行最优控制策略选择.

研究表明:最优可变限速控制策略的控制阈值为预测事故概率(等于 0.25),变化周期

为 2 min,限速值降低幅度为 20 km/h,恢复幅度为 10 km/h,相邻路段限速值差为 20 km/h. 应用该最优控制策略可有效减少高速公路交通瓶颈附近追尾事故风险约达 20%. 合理的可变限速控制策略能够有效减少高速公路瓶颈路段追尾事故,对提高行车安全具有重要作用. 该研究成果为高速公路可变限速控制策略的制定、控制效果分析及工程实践应用提供了参考.

致谢:本文工作得到东南大学优秀博士学位论文基金(YBPY1211)的资助.

参考文献:

[1] ABDEL-ATY M, DILMORE J, DHINDSA A. Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement[J]. Accident Analysis and Prevention, 2006; 38: 335-345.

[2] ABDEL-ATY M, DILMORE J. Coordinated use of variable speed limits and ramp metering for improving safety on congested freeways[ C ]//86th Annual Meeting Transportation Research Board. Washington D C: National Academies, 2007: 1-17.

[3] ABDEL-ATY M, CUNNINGHAM R J, GAYAH V V, et al. Dynamic variable speed limit strategies for real-time crash risk reduction on freeways[J]. Transportation Research Record, 2008, 2078: 108-116.

[4] LEE C, HELLINGA B, SACCOMANNO F. Assessing safety benefits of variable speed limits[J]. Transportation Research Record, 2004, 1897: 183-190.

[5] LEE C, HELLINGA B, SACCOMANNO F. Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety[J]. Transportation Research Part C, 2006, 14(3): 213-228.

[6] ALLABY P, HELLINGA B, BULLOCK M. Variable speed limits: safety and operational impacts of a candidate control strategy for freeway applications[J].

- IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2007, 8(4): 671-680.
- [7] HELLINGA B, MANDELZYS M. Impact of driver compliance on the safety and operational impacts of freeway variable speed limit systems[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(4): 260-268.
- [8] BHOWMICK A, QIU T Z, HADIUZZAMAN M. Driver compliance analysis of variable speed limit based freeway traffic control[C]// Proceedings of the 11st International Conference of Chinese Transportation, Beijing: American Society of Civil Engineers, 2011: 4181-4192.
- [9] 干宏程, 孙立军. 高速公路可变限速控制技术研究[J]. 交通科技, 2004, 6: 91-93.  
GAN Hongcheng, SUN Lijun. A study on the variable speed limits technology for freeways[J]. Transportation Science & Technology, 2004, 6: 91-93.
- [10] 徐婷, 孙小端, 贺玉龙, 等. 高速公路可变限速中大车混入因素研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(2): 70-72.  
XU Ting, SUN Xiaoduan, HE Yulong, et al. Mixed rate of large vehicles in expressway variable speed limit[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(2): 70-72.
- [11] 姚宏伟. 高速公路可变限速系统社会经济影响评价[D]. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 2004.
- [12] 史桂芳, 袁浩, 程建川. 雾天交通限速计算[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(1): 136-139.  
SHI Guifang, YUAN Hao, CHENG Jianchuan. Calculation of speed limit on foggy days[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1): 136-139.
- [13] PARK B, YADLAPATI S S. Development and testing of variable speed limit logics at work zones using simulation[C]// 82nd Annual Meeting Transportation Research Board. Washington D C: National Academies, 2003: 1-19.
- [14] CARLSON R C, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M. Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1261-1276.
- [15] CARLSON R C, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORIOU M, et al. Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering[J]. Transportation Science, 2010, 44(2): 238-253.
- [16] LU X Y, VARAIYA P, HOROWITZ R, et al. A novel freeway traffic control with variable speed limit and coordinated ramp metering [J]. Transportation Research Record, 2011, 2229: 55-65.
- [17] HADIUZZAMAN M, QIU T Z. Cell transmission model based variable speed limit control for freeways[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(1): 46-56.
- [18] LI Zhibin, CHUNG K, LIU Pan, et al. Surrogate safety measure for evaluating rear-end collision risk near recurrent bottlenecks[C]// 91st Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington D C: National Academies, 2012: 1-15.
- [19] 张美慧, 李志斌, 陈若昀, 等. 基于遗传算法的PARAMICS可变限速仿真参数自动标定[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(5): 130-134.  
ZHANG Meihui, LI Zhibin, CHEN Ruoyun, et al. Automatic parameter calibration for variable speed limits in paramics simulation model using genetic algorithm[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012, 30(5): 130-134.

(中文编辑: 秦萍玲 英文编辑: 兰俊思)