

文章编号:1671-8879(2018)05-0154-08

# 基于交通冲突的山区高速公路 可变限速控制方法

李传华<sup>1</sup>, 吴昊<sup>2</sup>, 孙一帆<sup>2</sup>

(1. 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了提高山区高速公路交通运行的安全性,将相邻路段速度差以及交通冲突风险最小化。针对以往研究缺乏从交通流稳定性层面对可变限速(VSL)系统控制效果分析的现状,提出基于METANET宏观动态交通流模型的可变限速控制方法,建立山区高速公路多目标限速优化控制模型并开发仿真环境进行测试,分析可变限速控制系统对山区高速公路交通运行安全性的影响。首先,构建基于METANET宏观动态交通流模型的可变限速控制策略。通过METANET宏观动态交通流模型实现对交通流在时空域中运行态势的描述,以相邻路段速度差以及路段冲突风险,即替代型交通安全指标最小为优化目标,以交通系统运行效率以及限速值变化范围为约束条件,构建了可变限速多目标优化控制模型,采用基于群智能的差分进化算法求解计算可变限速值。应用VB与MATLAB混合编程技术,开发基于VISSIM COM的仿真平台测试控制效果。最后,以实测山区高速公路交通流数据对仿真模型进行校准,并综合考虑山区高速公路交通特性、驾驶人服从率等因素,运用VISSIM COM/MATLAB模拟环境对山区高速公路进行可变限速控制。研究结果表明:与未实施可变限速时相比,对山区高速公路实施可变限速控制,能够显著降低速度离散性,使可变限速路段各分段中心断面的速度标准差降低30%~40%,山区高速公路交通安全性得到了提高。

**关键词:**交通工程;交通安全;可变限速;METANET;交通冲突;山区高速公路

**中图分类号:**U491 **文献标志码:**A

## Variable speed limit method of mountainous expressway based on traffic conflict Index

LI Chuan-hua<sup>1</sup>, WU Hao<sup>2</sup>, SUN Yi-fan<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In view of the lack of research on the control effect of the VSL system in a traffic flow stability layer, METANET macro traffic flow model was proposed, with the purpose of improving traffic safety on mountainous highways by minimizing the risk of traffic conflicts and decreasing the speed difference in adjacent road sections. The variable speed limit method was used to establish a multi-target speed limit optimization model for mountainous highways and

收稿日期:2018-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51178054);陕西省交通运输厅科技项目(15-12K)

作者简介:李传华(1976-),男,山东菏泽人,工学博士研究生,E-mail:1027306183@qq.com。

develop a simulation environment for testing different conditions. The impact of the variable speed limit control system on the safety of mountain highway traffic was analyzed. First, a variable rate control strategy was constructed based on the METANET macro traffic flow model, which was then employed to describe traffic flow in the space-time domain. The ultimate aim was to minimize adjacent section speed differences and thus the total conflict risk. Setting operation efficiency and speed limit range as constraints, the multi-objective optimization variable speed limit model was constructed, and VSL ratios were calculated using the differential evolution algorithm based on swarm intelligence. VB and MATLAB hybrid programming technology was applied, and the speed limit control effect was tested by developing a simulation platform based on traffic flow simulator VISSIM COM. Finally, the simulation model was calibrated with actual mountainous highway traffic flow data, with comprehensive consideration given to factors such as mountain highway traffic characteristics and driver compliance rates. The VISSIM COM/MATLAB simulation environment was used to implement the variable speed limit on the mountain expressway. The results show that speed limit control significantly reduces speed dispersion, resulting in a 30% to 40% reduction of velocity standard deviation, comparison with the case where variable speed limit control is not implemented. This indicates that variable speed limit control can enhance traffic safety in mountainous expressways. 2 tabs, 10 figs, 26 refs.

**Key words:** traffic engineering; traffic safety; variable speed limit; METANET; traffic conflict; mountainous expressway

## 0 引言

随着中国高速公路的不断发展,高速公路交通量的增加带来了一系列交通安全和通行效率的问题,可变限速作为一种有效的交通控制技术被越来越多地运用于高速公路交通安全和通行效率提升<sup>[1-3]</sup>。

可变限速技术根据高速公路实时的速度、流量等参数以及天气状况,通过一定的决策算法将限速值显示于可变限速标志牌或车载限速显示设备,来实现对驾驶人的车速管理。部分学者以行车时间最小、燃料消耗最少等为优化目标,建立可变限速控制模型,如 Khondaker 等以微观交通流预测模型计算得到的总行程时间(TTT),预碰撞安全指标(TTC)以及微观燃料消耗模型(VT-Micro)指标建立多目标优化函数,利用模型预测控制(MPC)方法,研究了可变限速方法对交通运行状态的影响,结果表明,当 VISSIM 模型中的所有车辆都服从可变限速控制时,相比不实施可变限速而言,总行程时间降低 20%,安全性指标改善 6%~11%,燃料消耗量降低 5%~16%<sup>[4]</sup>。部分学者考虑道路环境参数建立可变限速模型,以使交通系统处于最安全的运行状态,如刘建蓓等构建了综合考虑道路线形、道路环境、视距、路面状态因素的安全容许速度确定模型,研究结

果表明,采用的雨天公路可变限速方法能够克服静态限速的不足,提升路段运行效率和安全性<sup>[5]</sup>。

研究可变限速常用的方法有实地试验和建立交通模型 2 种。通过建立交通模型进行的研究方法大多数是基于微观交通模型,也有部分学者利用宏观交通流模型。Van De Hoogen 等在阿姆斯特丹和乌得勒支的 A2 高速公路研究发现,可变限速在拥堵和不安全驾驶行为较多的路段有很大的改善作用<sup>[6]</sup>。Papageorgiou 等采用 METANET 宏观动态交通流模型描述交通运行状态,在英国 M42 高速公路实施可变限速控制并探讨了其有效性<sup>[7]</sup>。

基于交通模拟的可变限速系统研究主要集中在交通安全和交通效率,少数研究考虑到可变限速系统对环境的影响,如空气污染和噪声等。Allaby 等建立了微观交通仿真模型和分类碰撞模型相结合的评价框架,评价了实施可变限速控制对拥堵的高速公路交通安全和行程时间的影响<sup>[8]</sup>。Lee 等通过建立实时碰撞模型,并根据交通流特征的短期变化来估计实施可变限速路段的碰撞风险,结果表明,实施可变限速使得路段的碰撞风险降低 5%~17%<sup>[9]</sup>。也有部分学者将可变限速与车路协同技术结合研究,如 Grumert 等在可变限速系统中引入限速设施与车辆之间的通信、自主车辆控制以及个体化速度限制,并利用微观仿真模型分析了可变限速控制对

交通流量以及尾气排放的影响<sup>[10]</sup>。

可变限速系统对交通安全的积极影响在一定程度上取决于驾驶人的服从率;Hellinga 等通过仿真模型评估驾驶人的服从率对实施可变限速路段交通安全和行程时间的影响,结果表明,交通安全性与驾驶人服从率成正比,其中,驾驶人服从率指所有驾驶人中按照限速标志限速值控制车速的驾驶人所占比例,行程时间与驾驶人服从率成反比<sup>[11]</sup>。Yang 等对比 VISSIM 仿真模型中实施可变限速和不实施可变限速情况,结果表明,驾驶人的服从率也是一个影响可变限速系统运行效率的重要因素<sup>[12]</sup>。Piao 等通过建立英国 M6 高速公路的 AIMSUN 交通仿真模型,考虑了限速范围、车载限速信息显示设备的安装率以及服从率等因素,探究了可变限速控制对高速公路交通安全的影响,结果表明,可变限速的实施显著降低高速公路车道内以及车道间的速度差,并且减少了较小车头间距的数量<sup>[13]</sup>。交通流量也会对可变限速系统的作用产生影响,特别是在中等和高流量情形下。Juan 等指出,当交通流大于 2 800 veh/h 时,可变限速的效果显著,如增加通行量,减少行程时间以及降低速度离散性<sup>[14]</sup>。

综上,以往研究中的动态限速模型多依赖于事故数据与交通流参数的关系,而交通流不稳定易导致交通事故的发生,本文从路段交通流运行特征的角度出发,提出以改善交通冲突作为限速优化目标之一,在山区高速公路实施可变限速控制策略,综合考虑交通特性、驾驶人服从率等因素,利用能够反映交通流稳定性的路段平均速度以及基于 PET 的冲突风险评价模型,建立多目标优化函数,并通过智能优化算法求解。以期为山区高速公路可变限速控制提供理论支撑,提高山区高速公路的交通安全。

## 1 VSL 控制算法

山区高速公路交通流具有速度离散性较大以及冲突风险较高等特点,为了对山区高速公路交通流进行可变限速(VSL)优化控制,需要建立表征其交通流运行特性的模型,然后通过实时的 VSL 优化控制目标函数来调节作用于交通流的控制变量。本文 VSL 优化控制策略是通过最小化控制路段与相邻路段速度差和冲突风险来实现的,解决可变限速控制中限速值的时变优化计算问题。VSL 控制算法包含 2 个主要部分:METANET 宏观动态交通流模型是利用数学模型表达交通流规律的经典模型<sup>[7,15]</sup>;应用差分进化算法,据目标函数及其约束条

件计算最优限速值。

### 1.1 METANET 模型

为了实现对交通流在时空域中运行态势的描述,METANET 模型对高速公路交通流动态速度连续守恒方程在时间和空间上进行离散化处理。在 METANET 模型中,高速公路段被划分为具有相同属性的基本路段<sup>[15]</sup>。如图 1 所示,将高速公路段  $m$  划分为  $N_m$  个长度为  $L_m$ 、车道数为  $\lambda_m$  的分段,其中  $L_m$  取值为 500 m<sup>[16-17]</sup>。高速公路段  $m$  的分段  $i$  在时刻  $t=kT$  的交通流状态用车流密度  $\rho_{m,i}(k)$ ,平均速度  $v_{m,i}(k)$  和交通流量  $q_{m,i}(k)$  三个参数来描述,其中, $T$  为交通流预测的时间步长,一般取  $T=10$  s,  $i=1,2,\dots,N_m, k=0,1,2,\dots,K$ 。高速公路分段  $i$  的交通流参数计算如下

$$\rho_{m,i}(k+1)=\rho_{m,i}(k)=\frac{T}{L_m\lambda_m}[q_{m,i-1}(k)-q_{m,i}(k)] \quad (1)$$

$$q_{m,i}(k)=\rho_{m,i}(k)v_{m,i}(k)\lambda_m \quad (2)$$

$$v_{m,i}(k+1)=v_{m,i}(k)+\frac{T}{\tau}(V(\rho_{m,i}(k))-v_{m,i}(k)+\frac{T}{L_m}v_{m,i}(k)(v_{m,i-1}(k)-v_{m,i}(k))-\frac{\eta T}{\tau L_m}\frac{\rho_{m,i+1}(k)-\rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k)+\kappa}) \quad (3)$$

$$V(\rho_{m,i}(k))=v_{f,m}\exp[-\frac{1}{\alpha_m}(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}})^{\alpha_m}] \quad (4)$$

式中: $v_{f,m}$  为高速公路段  $m$  的自由流速度; $\rho_{cr,m}$  为高速公路段  $m$  每条车道的临界密度; $\alpha_m$ 、 $\tau$ 、 $\eta$ 、 $\kappa$  为描述总体驾驶行为以及车辆特性的高速公路网参数。

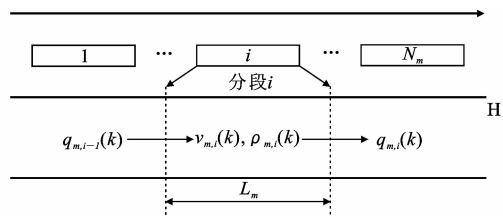


图 1 离散化高速公路段示意

Fig. 1 Sketch of discretized expressway segment

Cralson 等构建的 VSL 对交通流影响的量化模型<sup>[18-19]</sup>如下

$$\dot{v}_{f,m}'=v_{f,m}b_i(k) \quad (5)$$

$$\dot{\rho}_{cr,m}'=\rho_{cr,m}\{1+A_m[1-b_i(k)]\} \quad (6)$$

$$\dot{\alpha}_m'=\alpha_m[E_m(E_m-1)b_i(k)] \quad (7)$$

式中: $\dot{v}_{f,m}'$ 、 $\dot{\rho}_{cr,m}'$ 、 $\dot{\alpha}_m'$  为无 VSL 影响的交通流参数值; $A_m$ 、 $E_m$  为 VSL 对交通流产生影响的量化参数; $b_i(k)$  为实施于高速公路段  $m$  的分段  $i$  的优化 VSL 比率。

## 1.2 目标函数

交通事故与人和环境的因素,道路线形特征以及交通流状态有关。Solomon 通过大量的实例研究得出速度离散性与事故率之间的关系,即速度离散性越大,事故率越高<sup>[20]</sup>,因此可变限速控制的目标之一是最小化运行速度的离散性,本文采取相邻路段速度差作为表征速度离散性的指标。

由于微观仿真软件无法重现交通碰撞,但可以实时生成微观的车辆运行参数,建立评价 VSL 对高速公路运行影响的安全性指标。开发实时碰撞或冲突风险评价模型是量化 VSL 模拟研究中交通安全性常用的方法,本文中以高速公路交通流量与分段中心断面的冲突数建立可变限速控制的目标函数。

建立的多目标函数包含相邻路段速度差以及高速公路段分段的中心断面的冲突数  $J$ ,即

$$\min J = \alpha J_1 + \beta J_2 \quad (8)$$

$$J_1 = \sum_{k=0}^K \sum_{i=1}^{N_m} |v_{m,i}(k+1) - v_{m,i-1}(k+1)| \quad (9)$$

$$J_2 = \sum_{k=0}^K \sum_{i=1}^{N_m} (\alpha + b q_{m,i}^2(k+1)) / N_m \quad (10)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$  分别为 2 个目标分配到的权重,权重取值参见文献[21]; $a$ 、 $b$  分别为冲突风险函数的系数,本文采用冲突风险函数描述高速公路交通流量与分段的中心断面冲突数之间的关系。

综上,VSL 优化策略可以表示为

$$b_i(k+1) = f(b_i(k), \mathbf{u}(k)) \quad (11)$$

$$b_i(0) = 1 \quad (12)$$

式中: $\mathbf{u}(k)$  为交通流参数向量,包括平均速度、车流密度以及交通流量; $f(\cdot)$  为函数。

## 1.3 约束条件

从式(11)可以看出,优化模型的输入为交通流参数以及当前的 VSL 比率,输出为下一时间步长内的 VSL 优化比率,考虑到交通流的运行特征以及交通安全,需要设置以下约束条件<sup>[22]</sup>:

(1) 相邻分段内的限速值差  $\Delta V \leq 15$  km/h,即

$$b_i(k+1) - b_{i-1}(k+1) \leq 0.167 \quad (13)$$

(2) 相邻时间步长内的限速值差  $\Delta V \leq 15$  km/h,即

$$b_i(k+1) - b_{i-1}(k) \leq 0.167 \quad (14)$$

(3) 实施 VSL 控制后,高速公路段内总行程时间不得大于未实施 VSL 控制时总行程时间的 1.05 倍,即

$$\sum_{i=1}^{N_m} \frac{L_i}{v_i(k+1)} \leq 1.05 \sum_{i=1}^{N_m} \frac{L_i}{v_i(k)} \quad (15)$$

式中: $v_i(k+1)$  为未实施 VSL 控制时高速公路段  $m$  的分段  $i$  的平均速度; $L_i$  为高速公路段  $m$  的分段  $i$  的长度。

## 1.4 目标函数的优化求解

本文对目标函数的求解采用差分进化算法(DE)。差分进化算法可以输出离散化的变量,如限速值,其求解 VSL 比率步骤如下:

(1) 产生初始种群。 $b_{hi}(0) = b_{hi}^L + \text{rand}(0, 1) \cdot (b_{hi}^U - b_{hi}^L)$ ,其中  $b_{hi}(0)$  为初始种群第  $h$  个体第  $i$  维的值,即实施于高速公路段  $m$  的分段  $i$  的 VSL 比率; $b_{hi}^L$  为限速值的下限; $b_{hi}^U$  为限速值的上限, $h \in (1, 2, \dots, M)$ ,  $M$  为种群规模。

(2) 变异操作。随机选取种群中的 2 个不同个体,将其向量差缩放后与待变异个体进行向量合成, $s_{hi}(t'+1) = b_{p1i}(t') + F(b_{p2i}(t') - b_{p3i}(t'))$ ,其中, $p1 \neq p2 \neq p3 \neq h$ ,中间体  $s_{hi}(t'+1)$  满足  $\{s_{hi}(t'+1) | b_{hi}^L \leq s_{hi}(t'+1) \leq b_{hi}^U\}$ ;  $F$  为缩放因子; $t'$  为进化代数。

(3) 交叉操作。对第  $t'$  代种群  $b_{hi}(t')$  及其变异的中间体  $s_{hi}(t'+1)$  进行个体间的交叉操作,如果  $\text{rand}(0, 1) \leq C_R$  或  $i = \text{rand}(1, n)$ ,则试验个体  $u_{hi}(t'+1) = s_{hi}(t'+1)$ ,否则  $u_{hi}(t'+1) = b_{hi}(t')$ ,其中, $C_R$  为交叉概率。

(4) 选择操作。由目标函数对变异和交叉操作后的  $n$  维试验个体  $u_h(t'+1)$  和  $n$  维向量  $b_h(t')$  进行比较,如果  $J(u_h(t'+1)) < J(b_h(t'))$ ,则  $b_h(t'+1) = u_h(t'+1)$ ,否则  $b_h(t'+1) = b_h(t')$ ,判断是否满足迭代终止条件,若满足,则输出  $\min J(b_{h(1,2,\dots,M)}(t'+1))$  对应的  $n$  维个体  $b_h(t'+1)$ 。

由此,即可得在时间段  $[kT, (k+1)T]$  内实施于高速公路段  $m$  的各分段的优化 VSL 比率。

## 2 VSL 仿真试验设计

### 2.1 模拟环境

为了实现上述 VSL 控制逻辑,本文利用 VB 语言通过 VISSIM 接口与 VISSIM 微观仿真模型进行数据传输,采用差分进化算法在 MATLAB 中实现,差分进化算法的参数选取:种群规模为 30,缩放因子为 0.4,交叉概率为 0.7<sup>[23]</sup>。METANET 模型中参数可按文献[24]选取: $v_{f,m} = 102$  km/h,  $\rho_{cr,m} = 24$  veh/(lane · km<sup>-1</sup>),  $\alpha_m = 1.41$ ,  $\tau = 0.015$  h,  $\eta = 60$  km<sup>2</sup>/h,  $\kappa = 64$  veh/(lane · km<sup>-1</sup>),  $A_m = 0.65$ ,  $E_m = 0.85$ 。利用 VISSIM 接口与 MATLAB 程序

衔接的方式,VISSIM 仿真模型检测数据传输至 MATLAB 程序中,计算 VSL 可变限速值,并将 VSL 可变限速值返回 VISSIM 仿真模型中,以控制车速。最后,通过 VISSIM 仿真模型的输出数据观察控制效果。本文交通控制措施的 VISSIM COM/MATLAB 环境结构如图 2 所示。

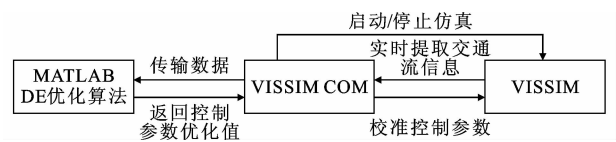


图 2 模拟环境工作流程

Fig. 2 Simulation environment workflow

2.2 VISSIM 模型

本文所选山区高速公路段为双向四车道,道路弯道曲线曲率较大,交通流在弯道附近易产生波动,交通风险较高。建立的 VISSIM 微观仿真模型中虚拟设置了 5 处 VSL 标志牌和 6 处检测器(Det),为了避免风险迁移并提高数据采集的合理性,实施可变限速控制路段的总长为 2.5 km,相邻 VSL 标志牌相距 500 m,相邻检测器(Det)相距 500 m,VSL 控制区域为相邻 2 个 VSL 标志牌之间的路段,检测器设置在 VSL 控制区域的中点处,弯道处设置减速区以模拟驾驶人弯道减速行为,所选山区高速公路分段中无进出口匝道,如图 3 所示。

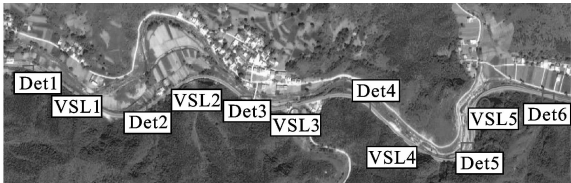


图 3 VSL 标志牌和检测器布设

Fig. 3 Layouts of VSL sign and detector bitmap

图 4 为蓝田—商洛高速公路李家河隧道内、外交通视频图像,利用前端交通视频数据检测设备,对其实际交通运行图像数据进行处理和分析,并根据处理所得数据信息校准 VISSIM 仿真模型,修改固定参数直到模型中的期望速度曲线与实际数据相匹配,其中校准的参数包括车道变换行为、车头间距、跟车行为以及车道变换距离<sup>[25]</sup>,考虑交通流量不断变化的特点,本文仿真试验通过 COM 接口每 5 min 对交通流量进行一次调整。利用 GEH 统计指标对 VISSIM 微观仿真模型进行交通流量校准

$$G_{EH} = \sqrt{\frac{(M_{obs}(n) - M_{sim}(n))^2}{(M_{obs}(n) + M_{sim}(n))/2}} \tag{16}$$

式中: $M_{obs}(n)$ 为实地观察流量; $M_{sim}(n)$ 为交通模型



(a) 隧道内



(b) 隧道外

图 4 蓝田—商洛高速公路前端交通检测设备视频图像

Fig. 4 Lantian to Shangluo Expressway front-end traffic detection equipment video images

的模拟流量; $G_{EH}$ 为 GEH 的值。

如果 85% 的测量地点的 GEH 统计指标小于 5,则认为模拟交通流能真实准确反映实地交通流,表 1 为所选检测器在 2 h 时间间隔内的 GEH 统计指标,其 92.6% 的 GEH 统计指标值小于 5。

表 1 检测器的 GEH 统计指标值

Tab. 1 Detector's GEH statistical index values

检测器编号	均值	标准差	最大值	最小值
2	1.71	1.12	5.23	0.13
5	1.65	1.03	4.98	0.23

2.3 基于 PET 的冲突风险评价模型

后侵入时间(PET)表示 2 辆车通过同一指定区域的时间差,是交通冲突严重性的常用评价指标,国外将 3.0 s 作为严重冲突与非严重冲突的界限,并且设定 PET 的有效值为不大于 8.0 s,其中小于 3.0 s 的冲突为严重冲突<sup>[26]</sup>。对于山区高速公路,搭建无 VSL 的 VISSIM 仿真模型用于建立冲突风险评价模型,本文利用 VISSIM 仿真模型中的检测器收集 PET 小于 1.5 s 的交通冲突,无 VSL 的 VISSIM 仿真模型中检测器设置间隔 100 m,共 12 组 24 个检测器,每 5 min 收集一次,进而建立描述实时交通流量与高速公路段分段的冲突数之间函数关系的冲突风险评价模型,在进行冲突数统计时,以高速公路分段的中心断面为代表分段。

利用实测数据对无 VSL 的 VISSIM 微观仿真模型进行校准,车辆的平均速度为 90 km/h。考虑运行车速、交通流量、车流密度与高速公路段分段的冲突数之间的关系,利用 SPSS 进行数据分析得出,交通流量与高速公路的分段中心断面平均冲突数之间的相关性显著,两者的 Pearson 相关系数为 0.763,显著性水平  $p<0.001$ 。

图 5 为交通流量从 800~3 000 veh/h 时,整个高速公路限速路段各分段中心断面处的 24 个检测器检测到的交通冲突数的变化情况,可以看出,当交通流量小于 1 000 veh/h 以及大于 2 300 veh/h 时,高速公路段各分段的冲突数明显增加,交通流量与高速公路段分段中心断面冲突数拟合曲线如图 6 所示。

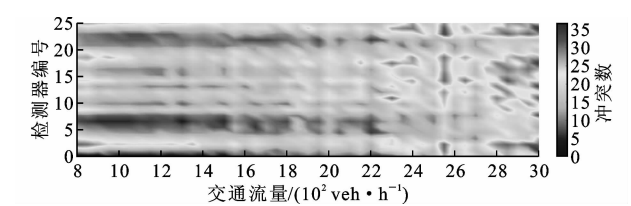


图 5 冲突数分布情况  
Fig. 5 Distributions of conflicts number

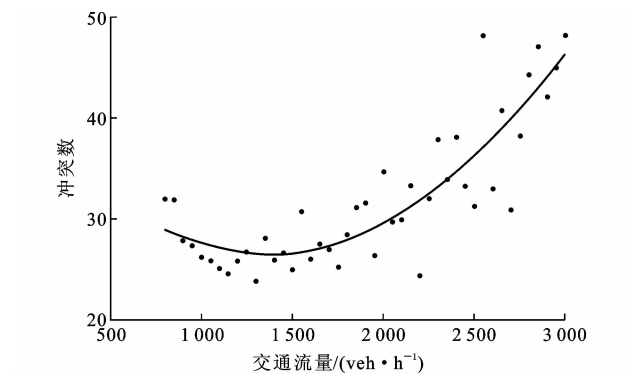


图 6 交通流量与高速公路段分段中心断面冲突数关系  
Fig. 6 Relationships of traffic flow and number of sections of central section of highway segment conflict

利用 SPSS 分析可得,拟合优度  $R^2=0.755$ ,  $x$  项的回归系数为  $-0.02$ ,显著性水平为  $p<0.001$ ,  $x^2$  项的回归系数为  $7.5\times 10^{-6}$ ,显著性水平为  $p<0.001$ ,拟合优度较高。时间段  $[kT,(k+1)T]$  内高速公路段  $m$  的冲突风险  $J_2$  计算式为

$$J_2 = \sum_{k=0}^K \sum_{i=1}^{N_m} (40.62 - 0.02q_{m,i}(k+1) + 7.5 \times 10^{-6} q_{m,i}^2(k+1)) / N_m \quad (17)$$

### 3 仿真试验结果分析

VSL 控制策略在 VISSIM COM/MATLAB 模

拟系统中运行 6 h,为了降低 METANET 模型的预测误差的影响,每 5 min 计算一次限速值,并且设定开始的 5 min 为系统预热时间,VISSIM 模型中驾驶人对限速的服从率为 85%。VSL 控制策略对交通系统在运行安全性方面的影响以各分段中心断面速度标准差指标来衡量,如图 7~图 10 所示。

从图 7~图 10 可以看出,相对于未实施 VSL 系统前,实施 VSL 系统使可变限速控制路段各分段中心断面的速度离散性下降,速度标准差的变化幅度明显下降,交通流稳定性有所提高。

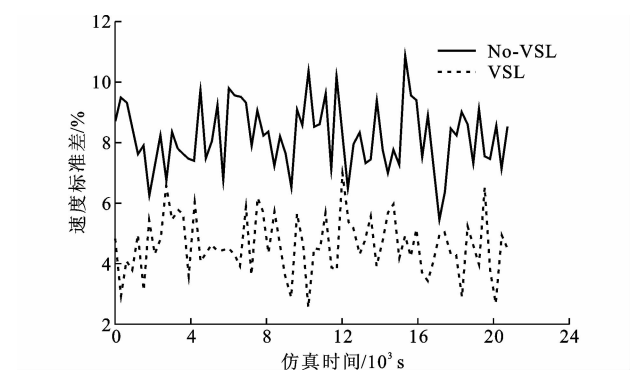


图 7 2 号检测器在 VSL 和 No-VSL 下的速度标准差对比  
Fig. 7 Comparisons of speed standard deviation for detector No. 2 in VSL and No-VSL scenarios

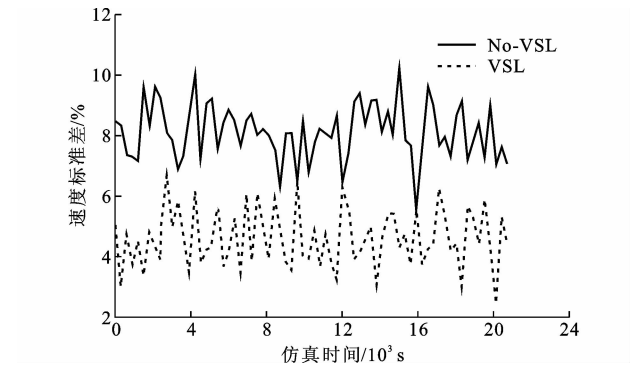


图 8 3 号检测器在 VSL 和 No-VSL 下的速度标准差对比  
Fig. 8 Comparisons of speed standard deviation for detector No. 3 in VSL and No-VSL scenarios

表 2 为各分段中心断面速度标准差提升比例。从表 2 可以看出,实施 VSL 系统后可变限速路段的各分段中心断面速度标准差降低 30%~40%,SPSS 分析结果显示,VSL 和 No-VSL(未实施 VSL)情形下,各分段中心断面速度标准差均值有显著差异,即实施 VSL 使得山区高速公路交通安全性得到显著提升。

### 4 结 语

(1)考虑到交通事故数据获取难问题,利用山区

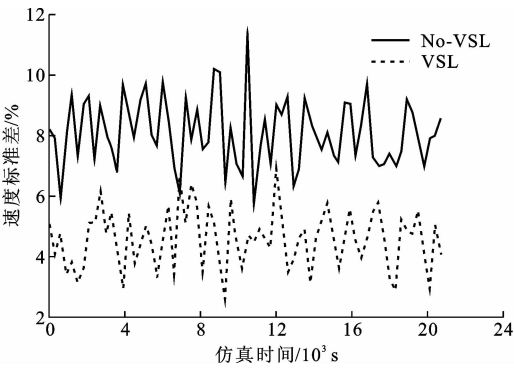


图 9 4号检测器在 VSL 和 No-VSL 下的速度标准差对比  
Fig. 9 Comparisons of speed standard deviation for detector No. 4 in VSL and No-VSL scenarios

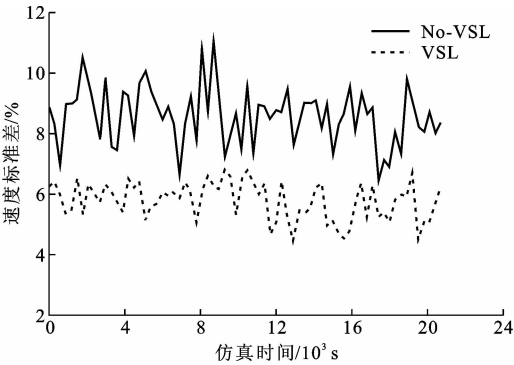


图 10 5号检测器在 VSL 和 No-VSL 下的速度标准差对比  
Fig. 10 Comparisons of speed standard deviation for detector No. 5 in VSL and No-VSL scenarios

表 2 各分段中心断面速度标准差提升比例

Tab. 2 Ratios of standard deviation of speeds of central section of each section increasing

检测器编号	No-VSL	VSL	提升比例/%	t 值	显著水平
1	8.208 2	4.632 5	43.56	18.548	<0.001
2	8.130 9	4.600 4	43.42	19.549	<0.001
3	8.080 1	4.580 7	43.31	20.962	<0.001
4	8.580 7	5.772 0	32.73	21.997	<0.001

高速公路微观仿真模型的交通运行数据,建立基于 PET 的冲突风险评价模型,分析结果显示模型拟合优度较好,即山区高速公路冲突风险与交通流量显著相关,并结合山区高速公路相邻路段速度差,构建其可变限速优化目标函数。

(2)针对山区高速公路段可变限速的要求,构建了基于宏观动态交通流模型的 VISSIM COM/MATLAB 可变限速控制系统,综合考虑交通流特性,驾驶人服从率等因素,研究了 VSL 系统对山区高速公路交通安全性的影响;在驾驶人服从率为 85%的情形下,与未实施 VSL 控制系统相比,实施 VSL 控制系统后,可变限速路段的各分段中心断面速度标准差降低 30%~40%。

(3)仿真结果表明,基于交通冲突的可变限速控制方法对于提高山区高速公路交通安全水平影响显著。山区高速公路的交通安全性亦受天气条件等环境相关变量的影响,因此下一步,可开展建立包括环境变量的 VSL 系统或者针对恶劣天气条件下的 VSL 系统。

参考文献:

References:

[1] ABDEL-ATY M, DILMORE J, DHINDSA A. Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement[J]. Accident analysis & prevention, 2006, 38(2): 335-345.

[2] BERTINI R, BOICE S, BOGENBERGER K. Dynamics of variable speed limit system surrounding bottleneck on German autobahn[J]. Transportation Research Record, 2006(1778): 149-159.

[3] ISLAM M T, HADIUZZAMAN M. Assessing mobility and safety impacts of a variable speed limit control strategy[J]. Transportation Research Record, 2013 (2364): 1-11.

[4] KHONDAKER B, KATTAN L. Variable speed limit: A microscopic analysis in a connected vehicle environment[J]. Transportation Research Part C, 2015, 58: 146-159.

[5] 刘建蓓, 罗 京, 郭腾峰. 基于安全容许速度的雨天公路可变限速方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 128-133.

LIU Jian-bei, LUO Jing, GUO Teng-feng. Variable speed limit method based on safe permissible speed under wet weather[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 128-133.

[6] VAN DEN HOOGEN E, SMULDERS S. Control by variable speed signs: Results of the Dutch experiment [C]//IEEE. International Conference on Road Traffic Monitoring and Control. New York: IEEE, 1994: 145-149.

[7] PAPAGEORGIOU M, KOSMATOPOULOS E, PAMPACHIL I. Effects of variable speed limits on motorway traffic flow[J]. Transportation Research Record, 2008(2047): 37-48.

[8] 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.

[9] LEE C, HELLINGA B, SACCOMANNO F. Evalua-

- tion of variable speed limits to improve traffic safety [J]. *Transportation Research Part C*, 2006, 14 (3): 213-228.
- [10] GRUMERT E, MA X, TAPANI A. Analysis of a co-operative variable speed limit system using microscopic traffic simulation[J]. *Transportation Research Part C*, 2015, 52: 173-186.
- [11] 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.
- [12] YANG X, LIN Y. Optimal variable speed limit control for real-time freeway congestions[J]. *Procedia-Social and Behavioral*, 2013, 96: 2362-2372.
- [13] PIAO J, MCDONALD M. Safety impacts of variable speed limits — A simulation study[C]//IEEE. International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2008: 833-837.
- [14] JUAN Z, ZHANG X. Simulation research and implemented effect analysis of variable speed limits on freeway[C]// IEEE. International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2004, 40(24): 894-898.
- [15] MESSMER A, PAPAGEORGIOU M. METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks[J]. *Traffic Engineering & Control*, 1990, 31 (8): 466-470.
- [16] 李瑞敏. 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. Optimal control and simulation of hard shoulder running on highways[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(3), 1036-1045.
- [17] 张存保. 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*, 2015, 39(6): 1125-1134.  
ZHANG Cun-bao. Expressway variable speed limit control method based on speed limit of sub-model[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 39 (6): 1125-1134.
- [18] CARLSON R, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M. Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering[J]. *Transportation Science*, 2010, 44(2): 238-253.
- [19] CARLSON R, PAPAMICHAIL I, PAPAGEORGIOU M. Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks [J]. *Transportation Research Part C*, 2010, 18(2): 193-212.
- [20] SOLOMON D. Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle[M]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1964.
- [21] 龙 琼. 考虑交通管理策略的交叉口信号控制多目标优化[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2014, 45(7): 2503-2508.  
LONG Qiong. Multi-objective optimization based on traffic management strategy for intersection signal controlling[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2014, 45(7): 2503-2508.
- [22] ABDEL-ATY M. Dynamic variable speed limit strategies for real-time crash risk reduction on freeways [J]. *Transportation Research Record*, 2008 (2078): 108-116.
- [23] 呼忠权. 差分进化算法的优化及其应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.  
HU Zhong-quan. The optimization of differential evolution algorithm and its application research[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.
- [24] PAPAGEORGIOU M, KOTSIALOS A. Freeway ramp metering: An overview[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(4): 271-281.
- [25] 孙 剑, 杨晓光. 微观交通仿真模型系统参数校正研究——以 VISSIM 的应用为例[J]. *交通信息与安全*, 2004, 22(3): 3-6.  
SUN Jian, YANG Xiao-guang. Research on parameter calibration of microscopic traffic simulation model system — Taking the application of VISSIM as an example[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2004, 22(3): 3-6.
- [26] SONGCHITRUKSA P. Innovative non-crash-based safety estimation: An extreme value theory approach[R]. West Lafayette: Purdue University, 2004.