

文章编号:1671-8879(2014)04-0120-07

# 高速公路大型车混入率与交通流稳定性关系

梁国华<sup>1</sup>,程国柱<sup>2</sup>,王春艳<sup>1</sup>,马荣国<sup>1</sup>,彭田田<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘 要:**在分析高速公路上大型车移动瓶颈影响效应及其对交通流稳定性影响的基础上,选取跟车距离标准差、速度标准差、车辆变道率和平均延误作为交通流稳定性评价指标,以大型车混入率为研究对象,对基本参数、车辆参数和可变参数进行设计,对不同的交通量、单向车道数、纵坡坡度条件下的交通流运行状态进行仿真。研究结果表明:在交通量小于 1 500 pcu/h、车道数大于 2、大型车比例小于 60%、路段或路段坡度小于 4% 时未形成移动瓶颈,交通流稳定性高;随着大型车混入率增加(大于 60%)、交通量大于 1 500 pcu/h、车道数为 2、纵坡坡度大于 4% 的路段易形成移动瓶颈,车流的跟车距离趋向于大型车的跟车距离,速度离散性增大,稳定性降低;大型车混入率大于 80%、交通量接近道路通行能力、车道数为 2、坡度大于 5% 的路段,移动瓶颈效应会相互影响,严重时造成交通阻塞,交通流状态很不稳定。据此,将交通流稳定性划分 4 个等级。

**关键词:**交通工程;交通流稳定性;移动瓶颈;大型车混入率;交通仿真;评价指标;等级划分

**中图分类号:**U491

**文献标志码:**A

## Relationship between mixing rate of freeway large vehicles and traffic flow stability

LIANG Guo-hua<sup>1</sup>, CHENG Guo-zhu<sup>2</sup>, WANG Chun-yan<sup>1</sup>, MA Rong-guo<sup>1</sup>, PENG Tian-tian<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

**Abstract:** On the base of analyzing highway large vehicles moving bottleneck effect and its impact on the stability of traffic flow, following distance standard deviation, speed standard deviation, the vehicle lane changing rate and the average delay were chosen as traffic flow stability evaluation indexes. With large vehicles mixing rate as the research object, the basic parameters, vehicle parameters and variable parameters were designed, and the traffic flow running conditions under different traffic volumes, number of one-way lanes and longitudinal slope were simulated. The results show that when the traffic volume is less than 1 500 pcu/h, the number of lanes is greater than 2, the proportion of large vehicles is less than 60%, the straight section or the slope of section is less than 4%, there is no moving bottleneck and the stability of traffic flow is high; with the increase of the large vehicles mixing rate(greater than 60%), traffic flow greater than 1 500 pcu/h, 2 lanes, section slope greater than 4%, it is easy to form moving bottleneck following distance tends to be large car following distance, speed dispersion increases, and stability decrea-

收稿日期:2013-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51208053);中央高校基本科研业务费专项资金项目(0009-2014G1211011)

作者简介:梁国华(1977-),男,吉林珲春人,副教授,工学博士,E-mail:lgh@chd.edu.cn。

ses; with large vehicle mixing rate greater than 80%, close to the road traffic capacity, 2 lanes, slope greater than 5%, moving bottlenecks interact with each other, causing serious traffic congestion and unstable traffic flow. Accordingly, the stabilities of the traffic flow are divided into four levels. 3 tabs, 7 figs, 16 refs.

**Key words:** traffic engineering; stability of traffic flow; moving bottleneck; large vehicle mixing rate; traffic simulation; evaluation index; classification

## 0 引言

中国在长距离运输上,车辆偏向大型车和超大型车,而且高速公路上大型车比例高、性能差、超载严重、驾驶人素质低等形成了大量移动瓶颈,混入的大型车使得小客车行驶速度明显下降,造成车辆间的相互干扰严重,各慢行车队之间出现较大的空隙导致道路资源浪费,通行能力下降,并且影响交通流的稳定性。国外对大型车引发的道路运行性能及稳定性的专项研究已有报道,1991年,Agent等以大型货车为目标评估了高速公路几何线形的设计<sup>[1]</sup>;1992年,美国的Gazis和Herman注意到,有些重型货车在高速公路上可以引发几辆甚至大量车辆减速跟行,形成“成簇”慢行车队,不同于高速公路上常规交通流的行驶规律,他们针对该类现象首次正式提出“移动瓶颈(moving bottleneck)”的概念,并第一次提出用车流波理论解释这种现象,指出通过变换后的密度-流量曲线,可以表示、分析移动瓶颈上下游的状态<sup>[2]</sup>;之后,Newell等从车流波的角度研究了移动瓶颈的形成机理,并通过基本车流波的移动瓶颈原理分析了一些现象和试验数据,得到了比较好的效果<sup>[3-8]</sup>。中国学者研究了关于货车对道路交通的影响,郝媛等通过阐述道路条件及密集交通流随机波动的交通干扰,来分析引发交通流的不稳定性因素<sup>[9]</sup>;鲁翠娥等研究了在交通流中不同的货车比率对交通流产生的换车道率、交通流稳定性等方面的影响<sup>[10]</sup>;刘卫铮对不同大型车混入率进行交通流变化的微观仿真,对交通流安全性的研究,揭示了不同大型车混入率对交通流稳定性的影响<sup>[11]</sup>。然而中国对移动瓶颈理论的研究和应用才刚刚开始,王永明等通过对高速公路移动瓶颈换道规则的模拟,从安全性角度提出较优的换道规则对高速公路运行的影响<sup>[12]</sup>;林航飞等在分析货运车辆造成的移动瓶颈影响规律基础上,根据移动瓶颈随时间、空间动态变化的特点,提出了针对性的策略<sup>[13]</sup>;高学辉等通过分析重载货车造成的移动瓶颈对高速公路行驶车辆的平均速度和平均延误的影响,建立了高速公路

移动瓶颈影响效应模型<sup>[14]</sup>;李炎分析了移动瓶颈的形成机理及其对高速公路通行能力的影响<sup>[15]</sup>;李嘉总结了大型货车对交通流安全和运行的主要影响,引入了移动瓶颈,通过分析移动瓶颈的流量-密度曲线图,得到可通过提高移动瓶颈的速度缓解货车影响<sup>[16]</sup>。

以上对大型车引发的道路交通问题的研究,主要是分析其产生的移动瓶颈影响效应,而对大型车引起的交通流稳定性的研究较少。为此,本文基于移动瓶颈理论通过微观系统仿真分析了大型车移动瓶颈效应对交通流稳定性的影响,选取跟车距离标准差、速度标准差、车辆变道率和平均延误作为交通流稳定性评价指标。考虑交通量、车道数、坡度对交通流的影响,针对不同大型车混入率,进行交通流状态参数仿真,对交通流稳定性进行分析。

## 1 移动瓶颈理论

### 1.1 移动瓶颈形成机理分析

设高速公路某一长度为 $L$ 、交通量为 $q$ 的单向双车道路段,有正常行驶的小汽车(速度为 $V_1$ )和大型车(速度为 $V_2$ ,  $V_1 > V_2$ )。开始路段中交通流以小汽车的速度 $V_1$ 运行,即下页图1中状态I;当大型车以速度 $V_2$ 进入该路段后,交通流将以速度 $V_2$ 前进(图1中状态II),后面的车辆受到混入速度为 $V_2$ 的大型车影响产生排队,且整体交通流的速度不稳定,在一定范围内波动(图1中状态III);经过一段时间后,根据交通工程理论可知,速度小于 $V_2$ 的集结波将在大型车后形成(图1中状态IV);持续一定时间,大型车后的车辆相继超车成功排队慢慢消失,形成1个消散波,交通流重新进入正常状态,速度为 $V_1$ (图1中状态I)。此即移动瓶颈形成和消失的全过程。

### 1.2 大型车移动瓶颈影响效应分析

描述单独1个车队中移动瓶颈的变化,可分析其对交通流的行驶特性和稳定性的影响效应。在一队车流中小型车换道超越大型车以及大型车换道超越大型车明显要比小型车之间的超车行为要难,需

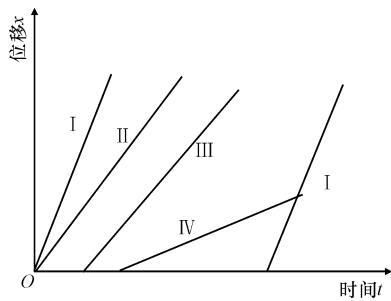


图 1 移动瓶颈效应  
Fig. 1 Moving bottleneck effect

要消耗较大的时空资源。车流中大型车的存在也会使车流中小型车的驾驶行为产生一系列变化,显然在移动瓶颈独立作用的范围内,车速的离散性变大,车流中的加、减速行为较为频繁,车辆的速度、加速度以及车辆轨迹的差异性引起车辆的行驶状态发生变化,使得车辆之间的纵向干扰较为严重;而且越接近大型车,小型车的交通流状态变化越大,车队中交通流的状态会随着多个移动瓶颈产生的叠加波动效应而更复杂。根据中国公路服务水平等级,相应大型车的特征及移动瓶颈效应分析见表 1。

表 1 大型车的移动瓶颈效应

Tab. 1 Large vehicles' moving bottleneck effect

等级	车辆运行特征	饱和度	大型车移动瓶颈效应
一	自由流,车辆行驶自由,无相互干扰,超车易实现	0~0.30	独立分布,瓶颈影响效应作用极小
二	车流连续不断,存在一定间隙,车辆相对自由行驶,超车难实现	0.30~0.50	不独立分布,瓶颈易形成易消散,影响效应不明显
三	车流连续不断,但间隙极少,相互干扰较大,呈不稳定状态	0.50~0.75	不独立分布,瓶颈易形成不易消散,影响效应比较明显
四	接近道路通行能力,车流以最小间隙成队行驶,极不稳定	0.75~0.90	不独立分布,瓶颈易形成很难消散,影响效应很明显

2 交通流稳定性评价指标

从移动瓶颈影响效应可以看出,当一辆大型车在行车道上行驶时,会对跟车车辆的行驶状态产生影响,这种影响的传递形成交通流运行状态。因此,可以将移动瓶颈下的交通流宏观运行状态运用微观车辆行驶状态来进行判定,不同交通流状态对应不

同的车辆行驶状态。在交通密度较小时,车辆自由行驶,具有较大的车头时距和车头间距,相互干扰可忽略;在中等交通密度时,有一定的行车干扰,车辆处于跟驰和超车 2 种状态;较高交通密度时,车辆处于跟驰状态。本文分析的是在微观状态下大车混入对路段宏观交通流运行稳定性状态的影响,提出了从宏观到微观分析,进而构建评价指标体系的思想。交通流稳定性评价指标见下页图 2。

(1)宏观层。用来综合反映整个道路的交通流状态,包括稳定状态和失衡状态,其中稳定状态是指交通量较小,道路上车辆之间基本无干扰,交通流运行畅通,服务水平较高的状态;失衡状态是指交通量较大,车辆之间的干扰较多,无法正常行车和超车,并出现交通瓶颈和局部拥堵甚至停车的状态。

(2)微观层。用于反映车辆间的运行特征,分为自由、跟驰和超车 3 个状态,且不同状态会根据不同的车速、视距、间距和换车道等车辆驾驶条件进行变化。

(3)指标层。可用于表征微观车辆行驶状态,是车辆的微观行驶特征对应于宏观交通流状态的定量评价。

跟车距离标准差用以描述高速公路行驶中交通流的连续性状态,速度标准差是对车辆速度摆动的描述,在一定程度上表述了交通流的离散性程度;车辆变道率从微观方面显示了交通流的稳定性;车辆的延误从宏观方面表明了交通流的整个运行状态。小客车的驾驶行为会随着大型车的混入而改变,大型车混入后使得小型车产生一系列的加减速行为,从而对其前后车的速度差和跟车距离产生变化。由于大型车辆速度低的影响,造成道路时空资源的浪费,使得后续到达车辆被迫减速,延误增加,从而对交通流产生较大的扰动,交通流中存在的干扰性因素越大,交通流呈现出越不稳定的趋势。综上所述,选取跟车距离标准差、速度标准差、车辆变道率和平均延误作为交通流稳定性评价指标。

交通流中车辆的跟车距离标准差  $D$  为

$$D=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(d_i-\bar{d})^2}{n}} \tag{1}$$

式中: $n$  为一次仿真所运行的车辆数; $d_i$  为第  $i$  个车辆的跟车距离; $\bar{d}$  为平均跟车距离。

交通流中车辆的速度标准差  $V$  为

$$V=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(v_i-\bar{v})^2}{n}} \tag{2}$$

式中: $v_i$  为第  $i$  辆车的速度; $\bar{v}$  为平均速度。

交通流中车辆变道率  $M$  为

$$M = \frac{m}{n} \quad (3)$$

式中:  $m$  为车辆变道次数。

交通流中车辆的延误  $T$  为

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4)$$

式中:  $t_i$  为第  $i$  辆车的延误时间。

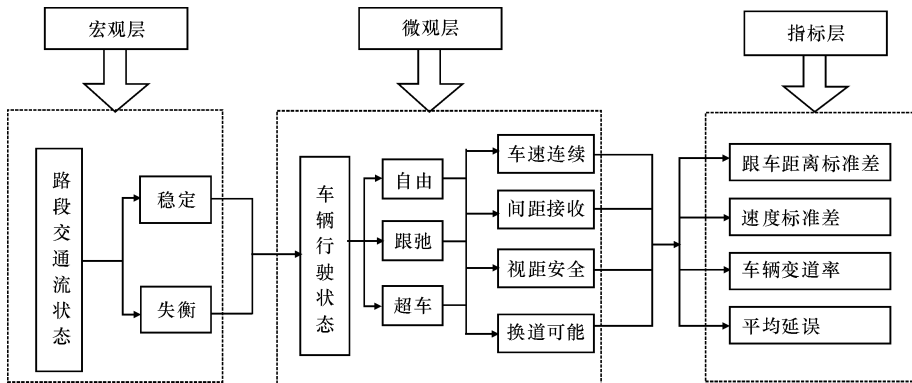


图2 交通流稳定性评价指标

Fig.2 Traffic flow stability evaluation indexes

### 3 移动瓶颈下交通流仿真

高速公路上大型车较多,车辆之间相互作用,造成的移动瓶颈不再独立。使得交通流不断产生相互作用的集结波和消散波,对交通流的影响变得复杂。因此,本文采用 VISSIM 软件对大型车移动瓶颈下交通波的集结与消散进行仿真,以大型车混入率为研究对象,分析不同交通量、车道数、路段坡度情况下车辆的跟车距离标准差、速度标准差、变道率和平均延误的变化,进而分析大车混入率与交通流稳定性的关系。为研究的方便性,假定交通流仅由大

型车和小型车组成。

#### 3.1 仿真参数选取与设置

##### 3.1.1 基本参数

仿真背景为正常天气,高速公路,左侧超车,车道宽度为 3.75 m,设计车速为 120 km/h,路段长度 3 km,每隔 1 000 m 设立 1 个数据采集点,仿真时间 3 600 s,间隔时间 60 s;仿真输出参数为跟车距离、速度差、车辆变道次数、延误。

##### 3.1.2 车辆参数

根据 VISSIM 仿真软件的参数设置,大型车和小型车的车辆参数设计见表 2。

表2 车辆参数设计

Tab.2 Vehicle parameters design

车型	车长/m	车宽/m	最大加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	最大减速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	质量/t	功率/kW
大型车	7.00~14.00	2.5	2.5	6.0	2.8~40.0	100~500
小型车	4.11~4.34	1.5	3.5	5.5	0.8~2.0	55~160

##### 3.1.3 可变参数

(1)大型车混入率:采取 10%~90%、间隔 10% 研究大型车混入率与几个评价指标的关系,寻找移动瓶颈下交通流稳定性规律。

(2)交通量:《公路路线设计规范》(JTG D20—2006)中的高速公路基本通行能力为 2 200 pcu/h,由实际条件的限制,无法达到此理想值,故仿真中采用 500~2 000 pcu/h、间隔为 250 pcu/h 的交通量取值。

(3)车道数:中国高速公路以双向 4 车道为主,部分采用双向 6 车道或 8 车道,故采取单向车道数为 2、3、4。

(4)纵坡坡度:根据不同地形条件下高速公路的设计车速及其对应最大纵坡,考虑坡度较大时,对大

型车爬坡性能影响显著,故坡道分别选取 3%、4%、5%、6% 进行仿真。

根据以上提供的可变参数,大型车混入率与其他可变参数组合而成的仿真次数为 117 次,为了提高研究的可信度,每种条件下均进行了 30 次仿真,即得到明显的规律性。

#### 3.2 结果分析

由 VISSIM 仿真软件可输出跟车距离、速度差、变道和延误等参数,参照式 (1)~式 (4) 对输出参数做进一步处理,可得大车混入率与稳定性评价指标之间的关系。

##### 3.2.1 大型车混入率与交通量

取单向车道数为 2 车道,纵坡坡度为 0,可变

参数为大型车混入率:10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%,单车道交通量:500、750、1 000、1 250、1 500、1 750、2 000 pcu/h 进行仿真,跟车距离标准差、速度标准差、车辆变道率和平均延误随大车混入率变化规律的结果见图 3~图 7。

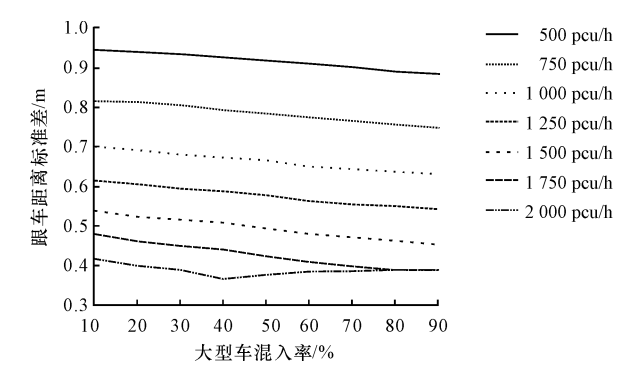


图 3 跟车距离标准差

Fig. 3 Following distance standard deviations

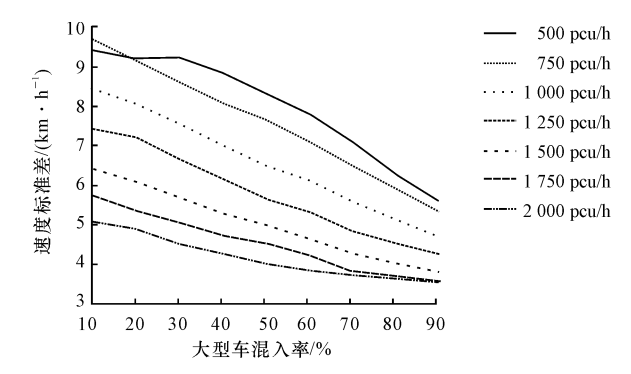


图 4 速度标准差

Fig. 4 Speed standard deviations

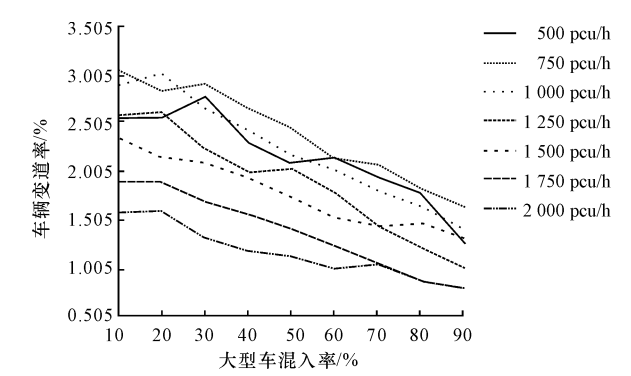


图 5 车辆变道率

Fig. 5 Vehicle lane change rates

由图 3~图 7 可知,随着单车道交通量的增大,交通流中车辆的跟车距离标准差呈明显的减小趋势,而随着大型车混入率的增加,跟车距离标准差亦呈减小趋势但变化相对较缓慢;单车道交通量在 750 pcu/h 以上时,交通流的速度标准差整体呈减小趋势,在单车道交通量为 500 pcu/h 时,平均速度

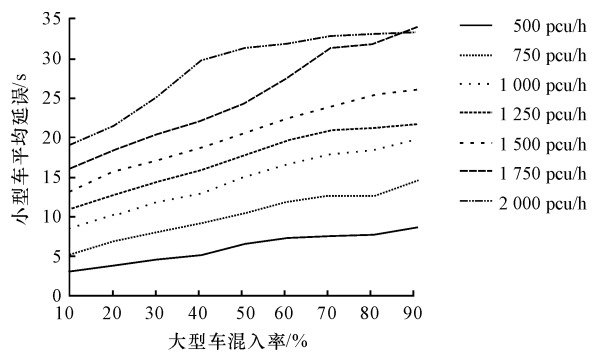


图 6 小型车延误

Fig. 6 Small cars' delay

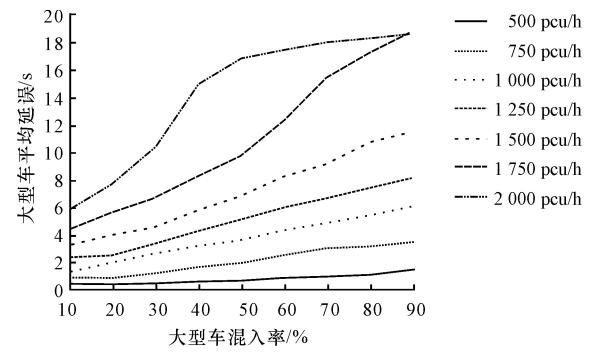


图 7 大型车延误

Fig. 7 Large vehicles' delay

差整体呈减小趋势,但混入率小于 30% 时表现出增大趋势;在单车道交通量大于 1 250 pcu/h 时,车辆变道率呈减小趋势,在单车道交通量为 1 250 pcu/h 及以下时,车辆变道率整体为减小趋势,但是局部很不稳定,表明路面交通流为不稳定状态;在单车道交通量小于 1 500 pcu/h 时,大型车和小型车的平均延误呈增大趋势,且小型车的延误变化大于大型车的延误变化;在单车道交通量达到 1 750 pcu/h 及以上时,大型车延误比小型车大很多且增大趋势变小,但在混入率为 30%~60% 之间车辆延误突然增加和下降,在 50% 达到最大,表明在大型车和小型车数量大致接近时,车辆延误最大。

### 3.2.2 大型车混入率与单向车道数

取单车道交通量为 1 500 pcu/h,纵坡坡度为 0,可变参数为大型车混入率:10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%,单向车道数分别取 3 车道、4 车道(2 车道在前文中已仿真),对跟车距离标准差、速度标准差、车辆变道率和平均延误随大车混入率变化规律进行仿真。

随着车道数和大型车混入率的增大,交通流中车辆的跟车距离标准差呈减小趋势;随着大型车混入率的增加速度标准差呈减小趋势,而随着车道数

的增加则表现为增大趋势,在大型车混入率小于 20%、单向车道数大于 2 时速度标准差随大型车混入率增加反而增大,说明此时大型车的混入率对交通流的稳定性影响较大;随着大型车混入率的增加车辆变道率整体呈减小趋势,而随着车道数的增加则呈增大趋势,但 3、4 车道的变道率较 2 车道大很多,且在车道数大于 2、混入率小于 20%时表现出增大趋势,表明在大型车混入率较小时车辆超车的可能性更大;在大型车混入率小于 90%时,大型车和小型车的平均延误随着大型车混入率的增加呈增大趋势,而随车道数的增加平均延误变小。

3.2.3 大型车混入率与路段坡度

取单车道交通量为 1 500 pcu/h,单向车道数为 2 车道,可变参数为大型车混入率,分别取 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%,路段坡度分别取 3%、4%、5%、6%进行仿真,跟车距离标准差、速度标准差、车辆变道率和平均延误随大车混入率变化规律的结果如下。

随着大型车混入率和坡度的增加,跟车距离标准差呈均匀减小趋势,当混入率大于 70%车道数大于 2

时,跟车距离标准差减少程度较缓慢;随着大型车混入率和坡度的增加,速度标准差整体上呈减小趋势,说明坡度的增加会干扰交通流的稳定性;在路段坡度大于 4%或大型车混入率大于 20%时,车辆变道率整体呈减小趋势,在大型车混入率小于 20%、路段坡度小于 5%时,车辆变道率呈增大趋势;大型车和小型车平均延误均随着大型车混入率和坡度的增加呈增大趋势,而在混入率大于 70%、坡度为 6%时,大型车和小型车的延误增大趋势均变得较为平缓,说明路段坡度较大时对车辆本身的性能影响较大。

4 稳定性评价等级划分

交通流稳定性是衡量处于平衡状态的交通流受到扰动后交通流状态最终是否会演化到初始的平衡状态。根据上述各因素的图表分析,在无拐点处各指标与大型车混入率呈线性关系,因此可利用拐点和突变情况以及在无拐点处,运用均匀分布思想,结合上述结果分析,将交通流稳定性状态划分为 4 个等级,具体见表 3。表中:括号内数据表示大型车混入率的区间;Q 为单车道交通量;R 为路段坡度。

表 3 大型车混入率与稳定性等级划分  
Tab. 3 Large vehicles' mixing rates and stabilities classification

影响因素			安全等级/%			
单向车道数 N/道	单车道交通量 Q/(pcu · h <sup>-1</sup> )	路段坡度 R/%	稳定	较稳定	较不稳定	不稳定
2	1 500	0	(80,90]	(10,30]	(30,60]	(60,80]
2	>1 500	0	(50,80]	(80,90]	(10,30]	(30,50]
3、4	1 500	0	(70,90]	(50,70]	(30,50]	(10,30]
2	1 500	≤4	(60,80]	(80,90]	(30,60]	(10,30]
2	1 500	>4	(80,90]	(60,80]	(30,60]	(10,30]

5 结 语

(1)高速公路上大型车造成的移动瓶颈不独立,引起横向的换车道行为和纵向的跟驰行为均会影响交通流稳定性。根据交通流理论和大型车移动瓶颈效应,本文选取跟车距离标准差、速度标准差、车辆变道率和平均延误作为交通流稳定性评价指标。

(2)高速公路大型车形成的移动瓶颈对交通流的影响是显著的。交通流中车辆的跟车距离标准差随着大型车混入率的增加而呈减小趋势。在车流交通量小于 1 500 pcu/h、车道数大于 2、大型车比例小于 60%时,未形成移动瓶颈,不会明显影响道路交通,交通流稳定性较高;随着大型车混入率增加(大于 60%)、交通量大于 1 500 pcu/h、单向车道数为 2 的路段易形成移动瓶颈,造成交通流中的跟车距离

趋向于大型车的跟车距离,速度离散性增大,从而使延误增加,稳定性降低;大型车混入率大于 80%、同时交通量接近道路通行能力、车道数为 2 的路段时,移动瓶颈效应会相互影响,使交通流延误明显增加,严重时造成交通阻塞,对交通流的稳定性产生很大影响。

(3)在模拟交通流稳定性评价指标随大型车混入率和其中 1 个可变参数的变化关系时,固定了其他可变参数,没有考虑组合变化的情况,而对于仿真所有可变参数的组合,是一个比较繁琐的过程,需要更多的数据和理论支持。

参考文献:

References:

[ 1 ] Agent K R,Plgman J G. Evaluation common wealth

- of Kentucky transportation cabinet of highway geometrics related to large trucks [R]. Lexington: Kentucky Transportation Center, 1991.
- [2] Gazis D C, Herman R. The moving and "phantom" bottlenecks[J]. Transportation Science, 1992, 26(3): 223-229.
- [3] Newell G F. A Moving bottleneck[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1998, 32(8): 531-537.
- [4] Munoz J C, Daganzo C F. The bottleneck mechanism of a freeway diverge [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2000, 36(6): 483-505.
- [5] Daganzo C F, Laval J A. On the numerical treatment of moving bottlenecks [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(1): 31-46.
- [6] Daganzo C F, Laval J A. Moving bottlenecks: A numerical method that converges in flows[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(9): 855-863.
- [7] Wu Y H, Yu D, Yu W, et al. Double-layer ramp-metering model for incident congestion on expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2014, 1(2): 129-137.
- [8] Wang J Q, Niu H M. Graded-information feedback strategy in two-route systems under ATIS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2014, 1(2): 138-145.
- [9] 郝媛, 徐天东, 孙立军. 交通扰动与交通流稳定性机理解析[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2010, 34(2): 218-220.
- HAO Yuan, XU Tian-dong, SUN Li-jun. Understanding the mechanism of traffic disturbance and traffic flow instability[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2010, 34(2): 218-220. (in Chinese)
- [10] 鲁翠娥, 李 晔. 用元胞自动机模型分析货运车辆对高速公路交通安全的影响[J]. 交通与计算机, 2007, 25(1): 17-21.
- LU Cui-e, LI Ye. Analyzing the impact of freight vehicles on freeway transportation safety through cellular automaton model[J]. Computer and Communications, 2007, 25(1): 17-21. (in Chinese)
- [11] 刘卫铮. 基于大车混入率的交通流状态安全性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- LIU Wei-zheng. Study on relationship between mix rate of large vehicle and traffic state safety[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 王永明, 周磊山, 吕永波. 基于元胞自动机交通流模型的车辆换道规则[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 89-93.
- WANG Yong-ming, ZHOU Lei-shan, LU Yong-bo. Lane changing rules based on cellular automation traffic model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 89-93. (in Chinese)
- [13] 林航飞, 付 强, 张红军. 基于移动瓶颈理论的高速公路货车影响对策[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(9): 1209-1213.
- LIN Hang-fei, FU Qiang, ZHANG Hong-jun. Moving bottleneck theory-based new countermeasure for influence of heavy vehicles[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(9): 1209-1213. (in Chinese)
- [14] 高学辉, 王 刚, 孙 皓, 等. 基于移动瓶颈理论的高速公路重载货车影响效应研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(3): 100-104.
- GAO Xue-hui, WANG Gang, SUN Hao. Study on the effect of full-load lorry on freeway based on moving bottleneck theory[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(3): 100-104. (in Chinese)
- [15] 李 炎. 基于元胞自动机仿真的高速公路移动瓶颈研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
- LI Yan. The research on moving bottleneck on expressway based on the cellular automata simulation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)
- [16] 李 嘉. 基于仿真的高速公路货车影响的改善措施研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- LI Jia. Improvement measure of freeway heavy truck influence based on simulation[D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese)

