

文章编号:1671-1637(2015)03-0101-08

高速公路直线路段突起路标间隔设置方法

梁国华,姚广鹏,李凯伦,邓涵月,梁康,王雨晨

(长安大学公路学院,陕西西安 710064)

摘要:基于驾驶人的视觉惰性、视觉警示频率和感觉特性,分析了突起路标的视觉警示作用,确定了突起路标的闪现频率,计算与修正了突起路标的初始间隔。应用 ADAMS/Car 仿真软件模块,建立了道路、车辆和突起路标模型,将车型设置为大型车和小型车,大型车的车速设置为 60、80、100 km·h⁻¹,小型车的车速设置为 80、100、120 km·h⁻¹,大型车和小型车的方向盘转角均设置为 1°、3°、5°。分别对提出的 12 m 间隔与现行规范推荐的 15 m 间隔各进行 243 次仿真,分析振动警示效果。仿真结果表明:在 12 m 间隔下,平均碾压率为 93.1%,小型车和大型车对应的平均警示率分别为 41.7%和 5.6%;在 15 m 间隔下,平均碾压率为 93.7%,小型车和大型车对应的平均警示率分别为 33.3%和 28.9%;12、15 m 间隔对小型车都具有较好的振动警示效果,15 m 间隔对大型车的振动警示效果更好。当高速公路夜间交通流较大或需要加大交通设施的夜间安全效果时,可选 12 m 间隔提供良好的视觉连续性和视觉警示效果;考虑施工维护的方便性和经济性或者大型车比例较大时,可选择 15 m 间隔。

关键词:交通规划;高速公路;直线路段;突起路标;闪现频率;振动仿真

中图分类号:U491.51

文献标志码:A

Setting method of raised pavement marker interval at line section of freeway

LIANG Guo-hua, YAO Guang-peng, LI Kai-lun, DENG Han-yue, LIANG Kang, WANG Yu-chen
(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the driver's visual inertia, visual warning frequency and feeling feature, the visual warning effect of raised pavement marker was analyzed, the flash frequency of raised pavement marker was determined, and the initial interval of raised pavement marker was calculated and corrected. By using the simulation software module ADAMS/Car, the simulation models of road, vehicle and raised pavement marker were built, vehicle type was set as truck and car, the speed of truck was set as 60, 80, 100 km·h⁻¹ respectively, the speed of car was set as 80, 100, 120 km·h⁻¹ respectively, and the steering wheel angles of truck and car were set as 1°, 3°, 5° respectively. The simulation times were 243 for the calculated 12 m-interval and 15 m-interval recommended in the current specification respectively, and the warning effect was analyzed. Simulation result shows that under the 12 m-interval condition, the average crushing rate is 93.1%, and the average warning rates for car and truck are 41.7% and 5.6% respectively. Under the 15 m-interval condition, the average crushing rate is 93.7%, and the average warning rates for car and truck are 33.3% and 28.9% respectively. Both two intervals

收稿日期:2015-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51208053);陕西省交通科技项目(14-32R);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1211011, 310821153402)

作者简介:梁国华(1977-),男,吉林珲春人,长安大学副教授,工学博士,从事道路交通规划研究。

have good vibration warning effect on cars, 15 m-interval has a better vibration warning effect on trucks than 12 m-interval. When there is a great traffic flow at night or the safe effect of traffic equipment need to be enhanced at night, 12 m-interval can be chosen to provide a good visual continuity and visual warning effect. When the convenience and economy of construction and maintenance are considered or there is a higher percentage of trucks in traffic flow, 15 m-interval can be chosen. 3 tabs, 14 figs, 18 refs.

Key words: traffic planning; freeway; line section; raised pavement marker; flash frequency; vibration simulation

Author resume: LIANG Guo-hua(1977-), male, associate professor, PhD, +86-29-82334856, lgh@chd.edu.cn.

0 引 言

利用突起路标的反光性能为驾驶人提供视觉警示,利用车辆碾压突起路标时产生的振动警示可以有效降低驾驶人视觉疲劳,提供线形诱导。国外研究表明,在道路上设置突起路标可以有效减少交通事故,美国交通部门规定了突起路标和路面标线配合使用时的设置间隔的长度。Hammond 等对平曲线路段设置突起路标进行了研究,并通过分析实测数据说明了布设突起路标有利于保障交通安全^[1];Zwahlen 等指出突起路标和路面标线配合使用,可以降低路面标线的反射要求,延长路面标线的维护周期,节约路面标线的使用成本^[2];Wright 等研究指出设置突起路标可以有效减少车辆冲突碰撞,尤其夜间的效果更好,并且能够有效减少单车碰撞事故^[3];Presaud 等对突起路标的设置进行了安全评价,分析了不同设置间隔对交通安全的影响^[4];Jiang 结合数据分析了突起路标对交通安全的作用,并给出了突起路标在曲线段的设置间隔及其与路面标线的配合形式^[5]。国内对突起路标设置间隔的研究较少,《道路交通标志和标线 第 3 部分:道路交通标线》(GB 5768.3—2009)规定:当突起路标配合路面标线使用时,应选用主动发光型或定向反光型,且颜色应与标线的颜色一致,间隔为 6~15 m,一般设置在虚线标线的空当中,也可根据实际情况适当加密;当突起路标配合边缘线和中心单实线使用时,突起路标应该设置在标线一侧,且应与行车道分界线的间隔相同。《突起路标》(GB/T 24725—2009)对突起路标的形状、尺寸和材料等作了一些规定,可以作为一般的应用参考,但是对于突起路标在不同道路线形条件下的间隔问题依然没有进行相关的具体解释。朱顺应等在研究突起路标的设置时,分别基于视觉连续性和曲率感知精度计算突起路标的间

隔,并对 2 种方法求出的间隔进行比较^[6];孙强借鉴线形诱导标志的设置方法确定了突起路标的间隔设置方法^[7];刘兵等在研究视觉边缘率时,对人眼有效刺激的闪现频率进行了研究,给出了闪现频率范围^[8-10]。关于突起路标振动的研究主要集中在减速带振动性能的研究上,对于仿真结果的评价多采用加速度均方根值。杨宏志等根据不同的车辆参数建立相应的 ADAMS 车辆模型,分别对不同车型进行相应分析^[11-13];侯树展等通过分析大、小型车通过高速公路振动减速带时的实测数据,建立了车辆加速度模型,得出振动对速度变化的影响^[14];陈波借助 ADAMS 仿真软件对减速带进行货车平顺性仿真试验,建立了适用于路面的减速带^[15];马骁以车身垂向加速度与车轮动载荷为评价指标,在 ADAMS/Car 软件模块中进行仿真,分析了减速带的结构对行车舒适度的影响^[16];任玉晓以汽车的垂向加速度对车轮冲击力的影响系数作为影响因素,在 ADAMS/Car 软件模块中对横断面的尺寸进行仿真试验,提出了在不同车速下减速带合理的结构尺寸^[17];张犇等基于车身加速度和车轴加速度分析了不同车型通过道路减速带时的平顺性^[18]。

国外对于突起路标间隔的设置大多是依据实践经验来确定,多立足于调查数据进行安装后评价,然后对间隔进行调整,并没有对间隔进行系统计算,国内对突起路标的研究给出了分析方法,但没有给出间隔建议值,也没有对间隔的振动警示性进行分析。本文在以往研究的基础上,基于驾驶人的视觉特性(视觉惰性、视觉警示)和感觉特性,结合 ADAMS 软件对振动仿真进行研究,首先对突起路标在高速公路长直路段的间隔进行计算,然后以驾驶人对振动产生的主观感觉为评判标准评价突起路标布设的振动警示效果,从而确定突起路标的间隔。

1 突起路标与驾驶人视觉特性分析

1.1 驾驶人视觉惰性

突起路标在驾驶人眼中的成像过程具有一定的惰性,具有一个短暂的变化过程,在确定突起路标间隔的过程中,应充分考虑视觉惰性的影响。突起路标的反射光投射到视网膜上,经过一段短暂的建立过程,人眼才能够形成稳定的亮度感觉,随着时间的增长,亮度感觉先由小到大,达到最大值后回落至稳定值。视觉的消失也是一个过程,光线消失后的残留称为视觉暂留,具体变化情况见图1,物体光线在 t_1 时刻进入人眼,在 t_2 时刻达到亮度的最大值,然后在 t_3 时刻消失。根据视觉反应的相关研究结果可知,人眼的反应时间($t_2 - t_1$)为0.150 s,视觉暂留时间($t_3 - t_2$)为0.105 s。

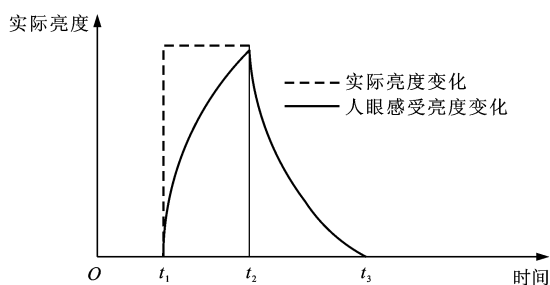


图1 视觉暂留过程

Fig. 1 Visual persistence process

1.2 突起路标视觉警示

发光体或逆反射体的设置间隔能够形成闪现的视觉警示。视觉警示的频率应在一个适当的范围内,过低不能提供有效的视觉警示,过高会对驾驶人产生视觉压力,应结合发光体的闪烁刺激效果,确定突起路标的视觉警示频率。

在光源闪烁过程中,通过统计方法测得人眼对光源闪烁的感觉特性,可用视觉敏感系数的概念来量化,人眼对不同闪烁频率引起的视觉敏感系数曲线,见图2,可以得出最敏感的频率为8.80 Hz,在此频率两侧,敏感度随频率的变化而降低^[8-10]。

2 基于视觉特性确定初始间隔

突起路标的主要作用在于夜间线形诱导,由曲率感知精度可知,在视野范围内能够出现6个突起路标就能够很好地勾勒线形。另外,小型车的远光灯照射距离约为125 m,因此,突起路标的间隔在20.83 m以内就能够起到线形诱导的作用。在满足此条件的基础上,本文结合视觉警示频率进一步确定初始间隔。

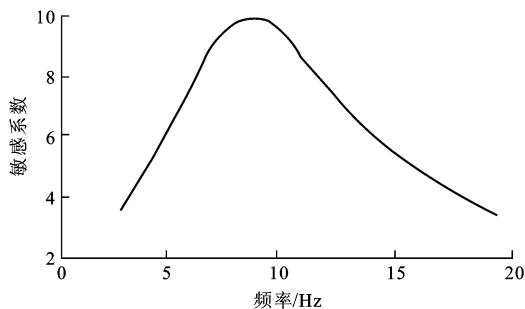


图2 视觉敏感系数

Fig. 2 Visual sensitivity factor

2.1 闪现频率的确定

在驾驶人行车过程中,突起路标会在较远的地方进入视野,驾驶人有充足的时间发现突起路标,而由于挡风玻璃支柱的遮挡与驾驶人视野的有限范围,使突起路标在驾驶人的视野中产生闪现效应,对驾驶人产生视觉警示。

在一般情况下,闪现频率不大于4.00 Hz认为可以接受,闪现频率在2.50~3.00 Hz为效果最好,即闪现间隔时间在0.333~0.400 s之间为人眼的最舒适范围。但是考虑到视觉警示的作用,当车速较高时,应给驾驶人较高的视觉警示。视觉警示频率不能过低和过高,频率过低会减弱警示作用,频率过高会给驾驶人太大视觉压力,甚至会给驾驶人带来恐惧感。结合上述视觉敏感系数,确定视觉警示频率为2.00~12.00 Hz,即闪现间隔时间为0.500~0.083 s^[8-10]。

2.2 初始间隔的计算与修正

2.2.1 舒适闪频下不同速度对应的间隔

根据上文对视觉警示频率的分析,驾驶人的舒适刺激频率为2.50~3.00 Hz,假定最舒适的时间间隔为0.350 s,结合不同车速进行求解突起路标设置间隔,有

$$S = vT_1 / 3.6 \quad (1)$$

$$T_1 = T_f + T_z + T_j \quad (2)$$

式中: S 为突起路标的间隔; v 为车速; T_1 为闪现间隔时间; T_f 为视觉反应时间; T_z 为视觉暂留时间; T_j 为视觉警示时间。

根据图1中的人眼反应时间与入眼的视觉暂留时间可知, $T_f + T_z$ 为0.255 s, T_j 为0.350 s, T_1 为0.605 s。在舒适视觉警示频率条件下,不同车速对应的突起路标的间隔见图3。

2.2.2 基于车速和警示频率的间隔修正

对图3中的初始间隔进行修正,确定一个能够满足实际情况的间隔值。高速公路的车速是离散的,一般为60~120 km·h⁻¹。有效视觉警示的闪

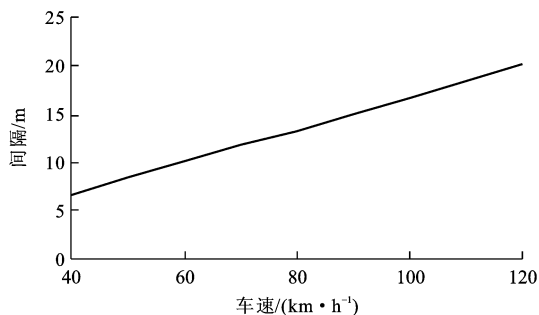


图3 间隔与车速的关系

Fig. 3 Relation between interval and vehicle speed

现频率为 2.00~12.00 Hz,通过计算最小车速在最小警示频率条件下的间隔,并验证其对车速范围内其他车速的警示作用,使得突起路标的间隔对车速范围内各个车速的视觉警示频率在此范围内。

在车速范围内,最小车速 v_{\min} 为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,在满足警示范围最小频率 2.00 Hz 时,由式(1)、(2)计算得对应间隔 $S(v_{\min} = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1})$ 为 12.6 m,反推闪现频率为 12.00 Hz 对应的车速 $v(f=12.00 \text{ Hz})$ 为 $135.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,由于此速度超出速度范围,则可以适当缩短间隔为 12 m。

2.2.3 闪频有效性验证

当间隔为 12 m 时,分析最大和最小车速 (120 、 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 分别对应的闪现频率。根据式(1)和频率的定义可得闪现频率 f 的计算式为

$$f = \frac{1}{3.6S/v - T_f - T_z} \quad (3)$$

当 S 为 12 m 时,分别将最小车速 (v_{\min}) 与最大车速 (v_{\max}) 代入式(3)求得最小车速与最大车速分别对应的频率 f_{\min} 与 f_{\max} 分别为 2.15、9.52 Hz,且 f_{\min} 、 f_{\max} 均在视觉警示频率范围内,并且在车速为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的情况下,能够提供较大的视觉刺激。

2.3 初始间隔的确定

根据《道路交通标志和标线 第 3 部分:道路交通标线》(GB 5768.3—2009)规定:设计速度不小于 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的道路,可跨越同向行车道分界线的间隔和线段长度分别为 900、600 cm,并建议突起路标和行车道分隔线配合使用时,可设置在虚线间隔的中间,则突起路标的间隔为 15 m。根据上述间隔计算闪现频率,可得 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速对应的闪现频率为 1.55 Hz, $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速对应的闪现频率为 5.13 Hz,可知大部分车速对应频率满足警示频率,具有较好的视觉连续性。另外,考虑到突起路标实际安装施工与路面标线维护的方便性,仿真初始间隔确定为 12、15 m 两种情况。

3 基于 ADAMS 软件的振动效果仿真

3.1 仿真系统建模

ADAMS/Car 小型车模块是 ADAMS 软件的专业模块之一,可以建立精确的样机,通过确定车身、悬架、轮胎、转向系统、制动系统等也可以建立大型车样机,仿真界面见图 4,仿真流程见图 5。采用模块化的建模方法,可以快速构建出高精度的车辆模型(小型车、大型车模型)、道路模型、安全设施凸块模型等,并可以对车辆模型在道路模型上的行驶状态进行仿真模拟,输出各种试验工况下整车动力学状态的特征参数。

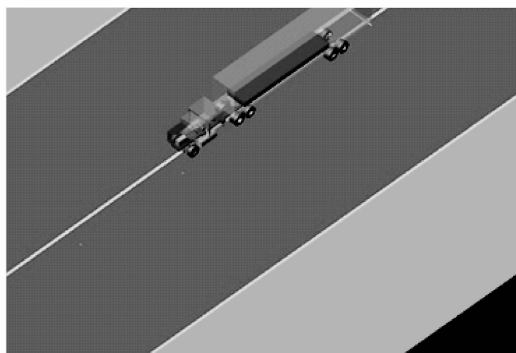


图4 仿真界面

Fig. 4 Simulation interface

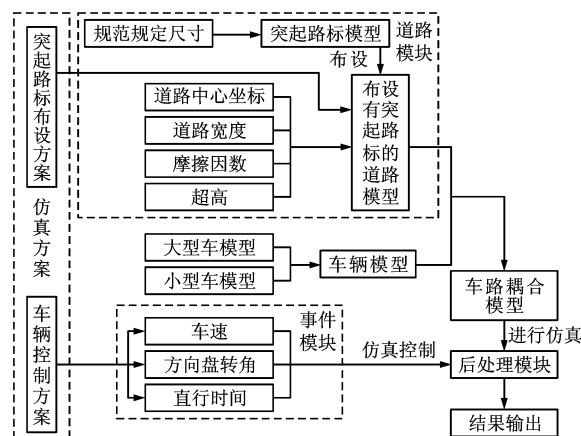


图5 仿真流程

Fig. 5 Simulation flow

本文在仿真模型选取桑塔纳 2000 为小型车的整车模型,以 5 轴半挂汽车列车为大型车的整车模型,对应的参数见表 1。在 ADAMS/Car 模块中构建 3D 道路模型有 2 种方法:3D 等效容积路面建模与 3D 样条道路建模。本文采用 3D 等效容积路面建模,通过给定节点坐标来构建一系列的空间三角平面以组成三维路面模型:长度为 500 m,宽度为 3.75 m,摩擦因数为 0.5。采用 ADAMS/Car 模块

表1 车辆参数
Tab.1 Vehicle parameters

车型	参数							
	初始发动机 转速/(r·min ⁻¹)	发动机 功率/kW	制动比	前轮制动最大 转矩/(N·m)	机架比例	后轮制动最大 转矩/(N·m)	尺寸(长×宽×高)/ mm	转向 传动比
小型车	2×10 ³	66	0.55	1.70×10 ⁶	174.50	1.00×10 ⁶	4 473×1 706×1 469	27.6
大型车	2×10 ³	249	0.60	5.88×10 ⁶	436.00	3.67×10 ⁶	11 980×2 500×3 980	12.5

中的凸块障碍对突起路标进行建模,在路面建模器中独立障碍的设置选项卡中,通过设置凸块障碍的类型、宽度、长度与摩擦因数来设置形状,以满足《道路交通标志和标线 第3部分:道路交通标线》(GB 5768.3—2009)中规定的突起路标的尺寸:长度为20.0 cm,宽度为10.0 cm,高度为2.5 cm。

3.2 仿真参数确定

在突起路标的振动效果仿真中,为了能够尽量模拟现实情况,进行多种情况下的仿真,选取对仿真结果产生影响的突起路标的间隔、车型、车速、方向盘转角和车辆方向偏离的初始位置作为仿真参数。间隔参数是仿真试验最重要的参数,本文已经确定仿真的初始间隔分别为12、15 m。在ADAMS/Car模块中,通过道路建模器,设置突起路标模型坐标,将突起路标模型按照上述2个间隔布设在建好的路面模型上。选取大、小型车2种车型,根据高速公路的设计车速和最高限速,小型车车速分别设定为80、100、120 km·h⁻¹,大型车车速分别设定为60、80、100 km·h⁻¹。当高速行驶的车辆换道时,方向盘转动的角度并不大,120 km·h⁻¹车速对应的方向盘转角为3°。车辆偏离行车道大多是在驾驶人疲劳、分心等状况下发生,此时方向盘的转角不会太大,因此,在仿真过程中,方向盘转角选取了3个小角度,分别为1°、3°、5°。在车辆实际行驶过程中,方向偏离的初始位置具有随机性,进而会影响突起路标的碾压率和警示率,仿真时需要考虑这种随机性,因此,在突起路标的间隔内以1 m为单位进行等分,每1等分处作为方向偏离初始位置逐次进行仿真,即在12、15 m两种设置间隔情形下,仿真次数分别为12、15次。

在确定上述仿真模型和参数后,运用ADAMS/Car模块中的事件构造器,进行整车仿真,分析在不同车型、速度、方向盘转角、车辆方向偏离的初始位置下的车辆行驶状况。

3.3 振动效果仿真

3.3.1 仿真方案

在突起路标振动效果仿真试验的设计要素中,

突起路标的间隔、车型、车速和方向盘转角间存在相关性,根据车辆的实际行驶特性,对2种间隔在不同车型、车速、方向盘转角和车辆方向偏离的初始位置的情况下,对上述5个因素进行多次仿真,对大、小型车各进行243次模拟仿真。以间隔为主因素,车型为次因素,同时考虑不同的方向盘转角、车速和车辆方向偏离的初始位置,得到4种仿真方案,即12 m间隔大、小型车仿真方案与15 m间隔大、小型车仿真方案,对不同的振动加速度图像经离散化处理后求得记权均方根加速度,最终得到仿真结果。

3.3.2 振动效果评价标准

振动仿真模拟试验结果的处理采用平顺性的评价方法。根据《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价 第1部分:一般要求》(GB/T 13441.1—2007/ISO 2631—1:1997)标准规定,当振动波形峰值系数小于9(t 时刻加权加速度时间历程 $a_w(t)$ 的峰值与加权加速度均方值 a_w 的比值)时,将记权均方根加速度作为振动对人体舒适和健康影响的评价指标。一般先计算各轴向记权均方根加速度,但由于垂直方向的加速度对驾驶人的舒适性影响比较大,故选取垂向加速度作为评价指标。

对于已获取的加速度时间历程的计算,通过满足《汽车平顺性试验方法》(GB/T 4970—2009)规定的频率加权滤波网络或者符合频率加权函数 $w(F)$ 得到的加权加速度时间函数 $a_w(t)$,计算式为

$$a_w = \frac{1}{2T_2} \int_0^{T_2} a_w^2(t) dt \quad (4)$$

式中: T_2 为振动时间。

频率加权函数 $w(F)$ (渐近线)为

$$w(F) = \begin{cases} 0.5 & 0.5 \leq F < 2.0 \\ F/4 & 2.0 \leq F < 4.0 \\ 1.0 & 4.0 \leq F < 12.5 \\ 12.5 & 12.5 \leq F < 80.0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: F 为振动频率。

对 t 时刻的加速度时间历程 $a(t)$ 进行频谱分析得到功率谱函数 $G(F)$,可计算记权均方根加速度值 a_w 为

$$a_w = \frac{1}{2} \int_{0.5}^{80.0} w^2(F) G(F) dF \quad (6)$$

表 2 为人的主观感受与记权均方根加速度之间的关系。当记权均方根加速度大于 $0.315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,驾驶人开始有不舒服的感觉。

表 2 记权均方根加速度与人的主观感受的关系

Tab. 2 Relation between human subjective feeling and weighted RMS acceleration

记权均方根加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	人的主观感受
> 2.000	极不舒适
$1.250 \sim 2.500$	很不舒适
$0.800 \sim 1.600$	不舒适
$0.500 \sim 1.000$	相当不舒适
$0.315 \sim 0.630$	有一些不舒适
< 0.315	没有不舒适

3.3.3 仿真结果分析

对每个方案的仿真数据归类分析,将同种车型和速度的仿真方案数据进行分析。以 12 m 间隔下对小型车的仿真为例进行说明,12 m 间隔下对大型车的仿真和 15 m 间隔下对大、小型车的仿真按照相同方法进行分析。对小型车速度分别为 80 、 100 、 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 进行仿真,对每种车速在方向盘转角分别为 1° 、 3° 、 5° 情况下进行 3 次仿真。当车速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,角度为 1° 、 3° 、 5° 分别对应工况 1~3;当车速为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,角度为 1° 、 3° 、 5° 分别对应工况 4~6;当车速为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,角度为 1° 、 3° 、 5° 分别对应工况 7~9。工况 1~9 对应的仿真数据分别见图 6~14。在 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速下,分别对工况 1~3 进行 12 次仿真,共 36 次,碾压率为 100%,其中 19 次记权均方根加速度大于 $0.315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,警示率为 52.8%。在 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速下,分别对工况 4~6 进行 12 次仿真,共 36 次,2 次未压上突起路标,碾压率为 94.4%,其中 14 次的记权均方根加速度大于 $0.315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,警示率为 38.9%。在

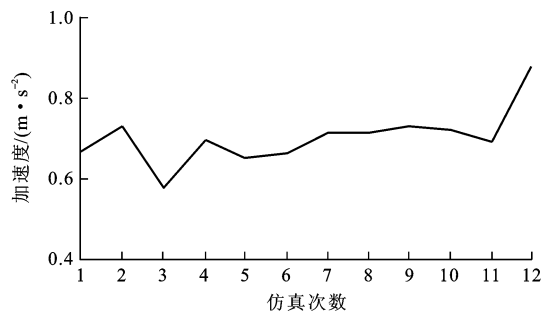


图 6 工况 1 的加速度

Fig. 6 Acceleration under condition 1

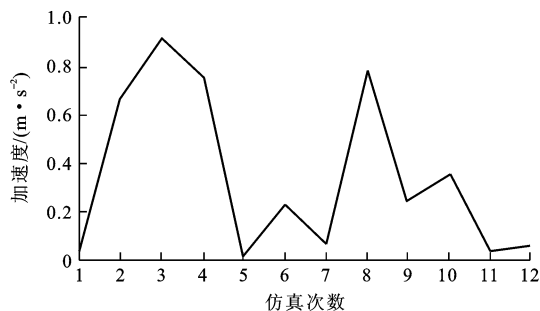


图 7 工况 2 的加速度

Fig. 7 Acceleration under condition 2

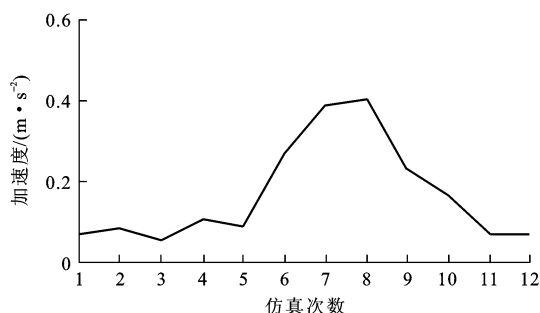


图 8 工况 3 的加速度

Fig. 8 Acceleration under condition 3

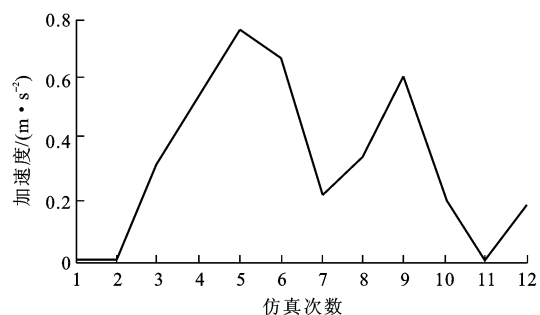


图 9 工况 4 的加速度

Fig. 9 Acceleration under condition 4

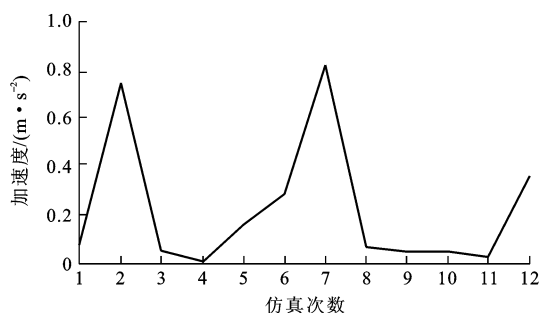


图 10 工况 5 的加速度

Fig. 10 Acceleration under condition 5

$120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速下,分别对工况 7~9 进行 12 次仿真,共 36 次,2 次未压上突起路标,碾压率为 94.4%,其中 12 次记权均方根加速度大于 $0.315 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,警示率为 33.3%。根据以上分析方法进行 12 m 间隔下对大型车、15m间隔下对大、小型车的仿真分

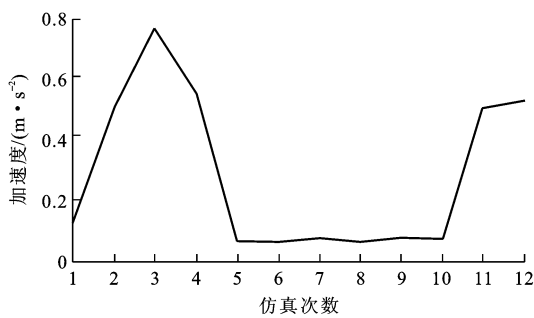


图 11 工况 6 的加速度
Fig. 11 Acceleration under condition 6

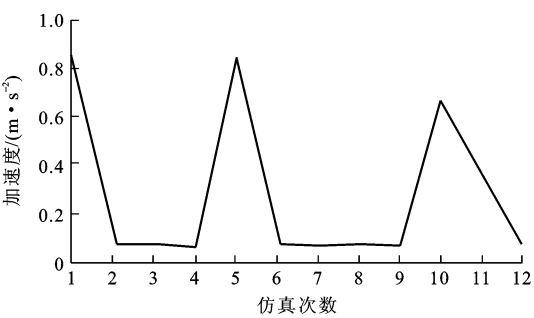


图 13 工况 8 的加速度
Fig. 13 Acceleration under condition 8

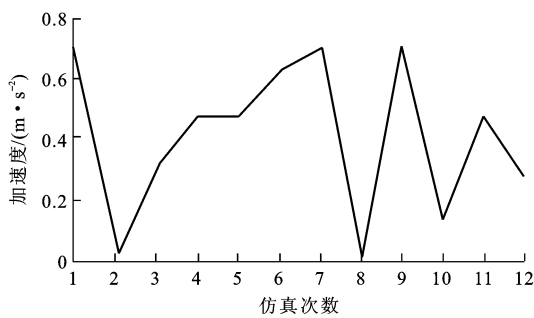


图 12 工况 7 的加速度
Fig. 12 Acceleration under condition 7

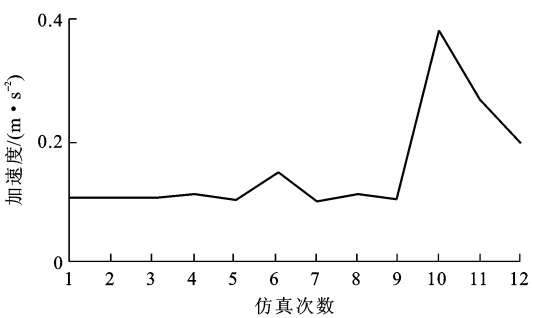


图 14 工况 9 的加速度
Fig. 14 Acceleration under condition 9

表 3 仿真结果
Tab.3 Simulation result

设置间隔/m	车型	车速/(km • h ⁻¹)	仿真次数	碾压次数	有效警示次数	碾压率%	警示率%	平均警示率%	平均碾压率%	
12	小型车	80	36	36	19	100.0	52.8	41.7	23.6	93.1
		100	36	34	14	94.4	38.9			
		120	36	34	12	94.4	33.3			
	大型车	60	36	34	3	94.4	8.3	5.6		
		80	36	32	3	88.9	8.3			
		100	36	31	0	86.1	0.0			
15	小型车	80	45	45	15	100.0	33.3	33.3	31.1	93.7
		100	45	44	14	97.8	31.1			
		120	45	45	16	100.0	35.6			
	大型车	60	45	40	13	88.9	28.9	28.9		
		80	45	39	10	86.7	22.2			
		100	45	40	16	88.9	35.6			

析,仿真结果见表 3。由图 6~14 和表 3 可知,2 种间隔都具有良好的碾压率,不同车型在相同间隔下有不同的碾压率和警示率,而且在相同车型的情况下,车速的不同对警示率也有影响。12 m 间隔的平均碾压率为 93.1%,平均警示率为 23.6%,小型车和大型车对应的平均警示率分别为 41.7% 和 5.6%;15 m 间隔的平均碾压率为 93.7%,平均警示率为 31.1%,小型车和大型车对应的平均警示率为 33.3% 和 28.9%。

4 结 语

突起路标在高速公路直线路段的间隔可以根据实际情况进行选择,12 m 间隔具有较好的视觉效果,能够提供良好的视觉连续性和视觉警示,当高速公路夜间交通流较大或需要加大安全设施的夜间安全效果时,可选 12 m 间隔。如果考虑施工和维护的方便性和经济性或路段交通流中大型车比例较大时,可选择对大型车具有较好振动警示效果的 15 m

间隔。本文基于 ADAMS/Car 软件模块对突起路标的振动警示进行分析,由于受到试验路段和试验安全性的限制,没有在路段上进行实测,当条件允许时可以在实际道路上,测试突起路标的振动警示性能。

参考文献:

References:

- [1] HAMMOND J L, WEGMANN F J. Daytime effects of raised pavement markers on horizontal curves[J]. ITE Journal, 2001, 71(8): 38-41.
- [2] ZWAHLEN H T, SCHNELL T. Minimum in-service retro-reflectivity of pavement markings [J]. Transportation Research Record, 2000(1715): 60-70.
- [3] WRIGHT P H, ZADOR P L, PARK C Y, et al. Effect of pavement markers on nighttime crashes in Georgia[R]. Washington DC: Insurance Institute for Highway Safety, 1982.
- [4] PRESAUD B, BAHAR G, MOLLETT C, et al. Safety evaluation of permanent raised pavement markers[J]. Transportation Research Record, 2004(1897): 148-155.
- [5] JIANG Yi. The effectiveness and criteria for placement of raised pavement markers(synthesis study)[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2006.
- [6] 朱顺应,彭武雄,王 红,等.突起路标合理设置的原理与方法研究[J].中国安全科学学报,2007,17(11):113-118.
ZHU Shun-ying, PENG Wu-xiong, WANG Hong, et al. Principles and methods of setting reasonable space between road studs[J]. China Safty Science Journal, 2007, 17(11): 113-118. (in Chinese)
- [7] 孙 强.高速公路安全设施设计优化方法研究[D].西安:长安大学,2011.
SUN Qiang. Study on the design optimization theory and method of freeway safety facilities [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [8] 刘 兵.基于驾驶员视知觉的车速控制和车道保持机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
LIU Bing. Mechanism study on the vision-based speed control and lane keeping [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [9] WEI Da-li, LIU Hong-chao, CHEN Feng. Analysis of asymmetric driving behavior using a self-learning approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 47(1): 1-14.
- [10] WEI Da-li, LIU Hong-chao. An adaptive-margin support vector regression for short-term traffic flow forecast[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2013, 17(4): 317-327.
- [11] 杨宏志,张胜平,杨少伟.高速公路中间带护栏碰撞仿真实验[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(2):44-48.
YANG Hong-zhi, ZHANG Sheng-ping, YANG Shao-wei. Simulation test on collision of vehicles on guard-rail of expressway median[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(2): 44-48. (in Chinese)
- [12] 张建辉.基于ADAMS的汽车操纵稳定性研究[D].西安:长安大学,2008.
ZHANG Jian-hui. Study on vehicle handling stability based on ADAMS [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [13] ZHOU Yu-cai, CHEN Shi-an, WANG Jun-cheng. Two-acceleration-error-input proportional-integral-derivative control for vehicle active suspension [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(3): 228-234.
- [14] 侯树展,孙小端,贺玉龙.高速公路振动减速标线路段运行速度变化规律研究[J].中国公路学报,2010,23(12):105-110.
HOU Shu-zhan, SUN Xiao-duan, HE Yu-long. Research on variational rule of operating speed along transverse rumble strip on expressway section[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(12): 105-110. (in Chinese)
- [15] 陈 波.基于ADAMS/Car的货车通过高速路减速带的平顺性仿真分析[J].汽车实用技术,2012(11):64-66.
CHEN Bo. ADAMS/Car-based ride comfort simulation analysis of truck on highway speed bump zone[J]. Automobile Applied Technology, 2012(11): 64-66. (in Chinese)
- [16] 马 骁.基于ADAMS/Car的公路减速设施对车辆平顺性影响的研究[D].西安:长安大学,2013.
MA Xiao. Research of the impact of road speed control facilities on vehicle ride comfort based on ADAMS/Car [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [17] 任玉晓.基于ADAMS/Car的汽车通过减速带时的平顺性及行驶安全性研究[D].西安:长安大学,2009.
REN Yu-xiao. Research of vehicle riding comfort and safety when it crossing the hump based on ADAMS/Car [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [18] 张 铎,魏 朗,余 强.道路减速带对车辆平顺性和安全性的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(4):95-98.
ZHANG Wei, WEI Lang, YU Qiang. Effect of road hump on driving comfort and safety of vehicles [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 95-98. (in Chinese)