

文章编号:1671-1637(2013)05-0091-08

高速公路施工区限速标志位置确定方法

于仁杰,马荣国,韩海,阎莹,王俊凌

(长安大学公路学院,陕西西安 710064)

摘要:根据驾驶人的视认性和短时记忆理论,分析了限速标志影响下的驾驶人自适应性和车辆的易操控性,计算了高速公路施工区内限速标志的前置、后置和重复距离。基于高速公路施工区长度划分计算模型,考虑了车辆排队长度、驾驶人短时记忆以及重复距离等因素,提出了高速公路施工区限速标志位置确定方法,并运用 VISSIM 仿真软件进行实例验证。仿真结果表明:在最低限速为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大车混入率为 40% 条件下,当交通量为 $1\,400 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,一、二、三级限速标志的最小冲突率分别为 $0.06, 0.10, 0.21 \text{ 次} \cdot \text{m}^{-1}$,最大冲突率分别为 $0.56, 0.14, 0.23 \text{ 次} \cdot \text{m}^{-1}$;当交通量为 $1\,960 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,三级限速标志的最小冲突率分别为 $0.84, 0.28, 0.36 \text{ 次} \cdot \text{m}^{-1}$,最大冲突率分别为 $0.87, 0.31, 0.40 \text{ 次} \cdot \text{m}^{-1}$;当交通量为 $2\,240 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,三级限速标志的最小冲突率分别为 $0.72, 0.31, 0.39 \text{ 次} \cdot \text{m}^{-1}$,最大冲突率分别为 $0.74, 0.34, 0.48 \text{ 次} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

关键词:交通安全;高速公路施工区;限速标志;视认分析;前置距离;后置距离

中图分类号:U491.52

文献标志码:A

Determination method of speed-limit sign position in expressway work zone

YU Ren-jie, MA Rong-guo, HAN Hai, YAN Ying, WANG Jun-ling

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the visibility and short-term memory of driver, the adaptability of driver and the controllability of vehicle under the influence of speed-limit sign were analyzed, and the front distance, post distance and repetitive distance of speed-limit sign in expressway construction area were calculated. Based on the calculation model of length partition in expressway work zone, the influences such as vehicle queue length, the short-term memory of driver and repetitive distance were considered, the determination method of speed-limit sign position in expressway work zone was proposed, and the example verification was carried out by using VISSIM simulation software. Simulation result shows that when the lowest speed-limit value is $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, the car mix rate is 40% and traffic volume is $1\,400 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$, the minimum conflict rates of the first, second and third grade speed-limit signs are $0.06, 0.10$ and $0.21 \text{ times} \cdot \text{m}^{-1}$, the maximum conflict rates are $0.56, 0.14$ and $0.23 \text{ times} \cdot \text{m}^{-1}$. When traffic volume is $1\,960 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$, the minimum conflict rates of the three speed-limit signs are $0.84, 0.28$ and $0.36 \text{ times} \cdot \text{m}^{-1}$, the maximum conflict rates of the three speed-limit signs are $0.87, 0.31$ and $0.40 \text{ times} \cdot \text{m}^{-1}$. When traffic volume is $2\,240 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$, the minimum conflict rates of the three speed-limit signs are $0.72, 0.31$ and $0.39 \text{ times} \cdot \text{m}^{-1}$, the maximum conflict rates of the three speed-limit signs are

收稿日期:2013-04-18

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(CHD2012JC042)

作者简介:于仁杰(1968-),男,内蒙古兴安盟人,长安大学工学博士研究生,从事道路交通规划研究。

导师简介:马荣国(1955-),男,陕西西安人,长安大学教授,工学博士。

0.74, 0.34 and 0.48 times $\cdot m^{-1}$. 1 tab, 7 figs, 23 refs.

Key words: traffic safety; expressway work zone; speed-limit sign; visual recognition analysis; front distance; post distance

Author resumes: YU Ren-jie(1968-), male, doctoral student, +86-29-82334856, yrj@163.com; MA Rong-guo(1955-), male, professor, PhD, +86-29-82334856, mrg@chd.edu.cn.

0 引 言

由于车道封闭形成瓶颈,高速公路施工区内车辆运行复杂,易产生减速、换道、合流、跟驰等行为,导致施工区安全隐患增加。合理地限速标志设置可以有效地提高车辆的运行效率和运行安全,防止二次事故的发生。目前,国外对限速标志的设置方面大多集中在限速标志的识别与限速方法的研究方面。Ruta等在传统的探测、跟踪、识别三阶段体系的基础上,提出了新型图像展现与判别的特征选择算法,并将该算法运用于交通标志识别系统上,通过将新型的图像识别算法与传统的主成分分析方法和迭代算法比较,发现新型算法能够更高效地满足基于实时交通视频的交通标志识别系统的要求^[1-2];Mcmurtry等通过监测北万希普6英里施工区范围内驾驶人对VSL的反应情况,并将VSL可变限速标志与静态限速标志限速效果对比分析,发现可变限速标志能够有效降低施工区起点附近的速度^[3];Lee等根据交通流短期变化特征提出了实时碰撞预测模型来改善可变限速策略,并评价了交通量变化条件下的预测模型效果,结果表明当潜在碰撞超过给定阈值时,在极危险的交通条件下通过暂时降低车速限速值能够使事故率降低5%~17%^[4];Hellinga等在VSL可变限速系统的基础上,提出了驾驶人遵守程度对可变限速措施的重要作用,并运用Paramics软件分析了驾驶人对VSL的遵守灵敏度,发现驾驶人的遵守程度与安全性成正相关,与行程时间成负相关且影响的大小由可变限速策略决定^[5];Jongen等选取集中注意力和不集中注意力的2组驾驶人分析重复限速标志对速度控制的影响,结果发现重复限速标志设置的频率越低,驾驶人超速的可能性越大,且当不设置重复标志时,驾驶人超速概率最高^[6]。国内对限速标志的设置多采用《道路作业交通安全标志》(GA 182—1998)和相关规范的推荐值,王薇等将高速公路主线可变限速控制过程看作离散时间的马尔可夫决策过程,提出了基于强化记忆和有限阶段的马尔可夫决策的VSL可变限速模型,运用Paramics软件对吉长高速公路全程仿真分

析,发现在平均限速值低于设计时速6.25%的情况下,平均流量不仅没有降低反而增加了3.2%^[7-8];王强等依托VISSIM仿真软件对各种限速条件下的交通运行情况进行了仿真模拟,选取适合于养护施工区的安全评价指标,并对各种限速方案进行安全评价,得出了较优的限速方案和限速标志牌的位置^[9];张文会基于驾驶人对交通标志的视认过程,建立了高速公路交通事故现场标志设置的前置距离和设置方式计算模型,提出了双向四车道、六车道和八车道高速公路典型交通事故现场以及特殊条件下的事故现场的限速标志、警示标志和指示标志等设置方案^[10];陆建等分析了当大型车遮挡内侧车道时,小型车驾驶人视认交通标志的过程,推导出了遮挡长度和概率计算式,建立了路侧交通标志重复间距计算模型,算例计算结果表明重复设置一次后,2块标志都被遮挡的概率为0.023,且重复间距最佳距离为155m^[11];徐婷等以山区高速公路平曲线路段为研究对象,采集了8条山区高速公路平曲线段运行速度数据,以平曲线半径和运行速度为自变量建立了线性预测模型预测速度差,综合运行速度和设计速度给出了推荐限速值,并根据驾驶人视认特性,计算出不同运行速度下的建议限速标志距离^[12]。

施工区内交通流秩序比较紊乱,限速标志的设置应具有一定的针对性,而目前已有限速标志的研究大多集中在限速标志识别方法和可变限速理论的计算研究。若施工区内交通流量较大,会形成排队并向上游延续,需在上游排队末端设置移动限速标志;同时由于施工区影响范围和交通流特性不同,应该根据实际情况针对性地考虑限速标志的设置位置。

本文以高速公路施工区为研究背景,分析了施工区层级限速标志对驾驶人驾车行为和车辆行驶安全的影响,基于驾驶人视认性分析建立了施工影响区后置距离、前置距离和重复距离计算式,运用车辆运行的制动减速安全间距理论,结合施工区交通流动态交通特性及警告区、上游过渡区长度计算式,提出了施工区层级限速标志设置位置确定方法。

1 层级限速标志作用机理分析

层级限速标志的设置是为保证车辆梯度降速,

减少交通冲突,提高车辆运行的安全性。限速标志位置设置的合理性关系到驾驶人以及施工人员的安全,距离施工区太远驾驶人容易遗忘前一标志内容而加速,产生安全隐患;距离太近车辆无法平稳降至限速值,路段上车辆速度离散性大,危险性高。本文从安全角度出发主要从以下 2 方面阐述限速标志设置的作用机理。

1.1 驾驶人自适应性描述

驾驶人的驾车行为不仅与道路交通条件有关,而且与自身的素质、条件有关。不同的年龄、驾龄、性别、情绪以及经济条件等都对驾驶人的驾车行为产生影响。限速标志位置设置的远近能够改变驾驶人的适应时间,影响其驾车行为。合理地设置位置能够有效减少紧急刹车的频率,对驾驶人的生理、心理起到平衡缓和作用。

驾驶人对限速标志的适应性可以用自适应能力描述。自适应能力定义为单位时间内驾驶人对其与限速标志距离变化的适应程度,自适应能力 W 为

$$W = M/t$$

$$M = \sum_i X_i c_i \Delta p / t_1 \quad (1)$$

式中: M 为驾驶人对标志的距离变化产生的影响,与驾驶人的反应时间和车辆与标志的距离等因素有关; t 为驾驶人自适应时间; t_1 为驾驶人视认标志的反应时间; Δp 为车辆与标志的距离; c_i 为第 i 种影响因素产生的影响; X_i 为 c_i 的权重。

每个驾驶人对事物改变的适应能力都存在一个最大值,即自适应能力的阈值,记为 N 。驾驶人对限速标志位置的适应能力应满足的关系为: $W > N$,驾驶人驾车处于危险状态; $W \leq N$,驾驶人驾车处于安全状态。

1.2 车辆易操控性描述

道路上车辆行驶的安全隐患主要体现在驾驶人紧急制动行为上。合理的限速标志的位置设置能够杜绝加速度峰值的出现,尤其是对于多级限速的情况下,设置适当的限速标志的距离,能够减少驾驶人频繁的制动刹车行为,保证平稳制动使整个限速标志区域内加速度变化为平稳状态,提高行车的稳定性和安全性。假设车辆从上游驶入警告区并经过若干级限速标志后,驶入过渡区域内。车辆在整个警告区长度内行驶的加速度 a 为

$$a = \int_0^{p_1} \int_{v_{10}}^{v_1} \frac{v}{p} dp dv + \sum_y \lambda_y \int_0^{p_y} \int_{v_{y-1}}^{v_y} \frac{v}{p} dp dv + \int_{p_k}^{s_2} \int_{v_k}^{v_{20}} \frac{v}{p} dp dv \quad (2)$$

式中: k 为警告区内限速值种类数量; λ_y 为第 y 块限速标志的系数,取值 0 或 1; p_y 为车辆至第 y 块限速标志距离; v_y 为第 y 块限速标志的限速值; v_{10} 为车辆在警告区上游的行驶速度; v_{20} 为车辆在过渡区内的行驶速度; s_2 为警告区长度; p_k 为车辆至第 k 块限速标志距离; v_k 为第 k 块限速标志的限速值; v 为警告区内车辆的行驶速度; p 为车辆与限速标志间的距离。

驾驶人对行车的加速度变化值存在一个最大可承受范围,称为加速度阈值,记为 X ;当各个不同路段的加速度曲线与加速度阈值曲线走势一致时,行车处于一个安全平稳的状态。对每一路段微元加速度 a_x 应满足:对任意路段微元 x , a_x 要小于等于 X ,且当 x 趋近于 0 时, a_x 趋近于 X 。

2 层级限速标志位置确定方法

2.1 位置设置理论分析

根据《公路养护安全作业规程》(JTJ H30—2004)规定,按车辆运行特性以及道路交通条件将施工区划分为警告区、上游过渡区、缓冲区、作业区、下游过渡区、终止区 6 个控制区。

2.1.1 警告区限速标志后置距离分析

警告区限速标志后置距离定义为限速标志到警告区起点处的长度。结合驾驶人对标志的视认过程分析^[13-16],限速标志在警告区内的后置距离分布见图 1, A 为察觉点; B 为限速标志视认开始点; C 为限速标志读完点即反应起始点,并设为警告区始端; D 为限速动作开始点; E 为限速标志认知消失点; F 为限速标志设置点; G 为减速动作完成点; l_1 为驾驶人视认距离; s_1 为标志认读时间内车辆的行驶距离; j 为反应距离; l 为行动距离; d_1 为消失距离; d_2 为上游过渡区的前置距离; m 为限速标志读完点到限速标志距离,定为限速标志的后置距离。

根据驾驶人视认过程分析,为使驾驶人有充足的时间读完标志内容,在设置标志时应满足警告区后置距离大于等于行车中心线到标志的横向宽度,警告区限速标志后置距离 m 为

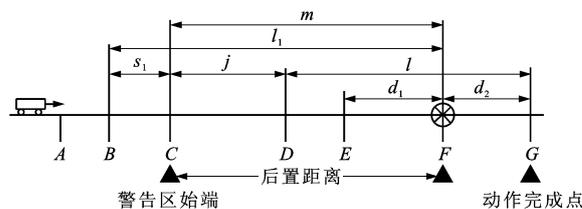


图 1 后置距离分布

Fig. 1 Distribution of post distance

$$m = l_1 - s_1 = \frac{v_{w0}t_2}{3.6} + \sqrt{\frac{h^2 + d^2}{\tan(\alpha/2)}} - \frac{v_{w0}t_3}{3.6} \geq \frac{h}{\tan(\theta)} \quad (3)$$

式中： v_{w0} 为警告区内车辆行驶速度； t_2 为限速标志读取时间； t_3 为反应与理解时间； h 为标志与驾驶人视线高度差； d 为行车中心线与限速标志的横向宽度； α 为驾驶人视野角度，一般取 30° ； θ 为消失视角，路侧式标志可采用 15° ，悬臂式和门架式可取 7° 。

2.1.2 上游过渡区限速标志前置距离分析

基于驾驶人对上游过渡区限速标志视认过程分析，上游过渡区限速标志的前置距离分布见图1。

上游过渡区限速标志的前置距离 d_2 为^[17-18]

$$d_2 = l + j - m \quad (4)$$

$$\begin{cases} l = \frac{v_{w1}t_4}{3.6} \\ j = \frac{v_{w1}^2 - v_{w2}^2}{25.92g(\varphi + b)} \end{cases} \quad (5)$$

式中： v_{w1} 为警告区内车辆减速前的速度值； v_{w2} 为警告区内车辆减速后的速度值； g 为重力加速度，取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ； φ 为道路纵向摩擦因数，取值范围为 $0.29 \sim 0.44$ ； b 为道路纵坡，上坡取正，下坡取负； t_4 为驾驶人制动刹车的反应时间，通常取 2.5 s 。

为使车辆在上游过渡区始端能够完成减速动作，上游过渡区限速标志前置距离 d_2 应满足

$$d_2 \geq \frac{v_{w1}t_4}{3.6} + \frac{v_{w1}^2 - v_{w2}^2}{25.92g(\varphi + b)} - \left(\frac{v_{w0}t_2}{3.6} + \sqrt{\frac{h^2 + d^2}{\tan(\alpha/2)}} - \frac{v_{w0}t_3}{3.6} \right) \quad (6)$$

2.1.3 标志重复距离分析

实际应用中，限速标志设立在路侧情况居多，外侧车道大型车会对内侧驾驶人产生视线遮挡问题。驾驶人受到视线遮挡或其他随机因素影响，在标志视认开始点至消失点未能准时获取限速信息。考虑减速分布集中性，为防止车速离散过大而带来安全隐患，采用连续无间断重复限速标志。驾驶人在前一限速标志消失点即可读取重复限速标志信息，重复标志设置见图2， l_2 为重复距离。

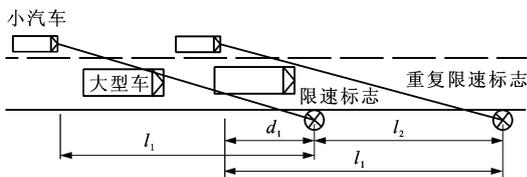


图2 重复标志设置原理

Fig. 2 Setting principle of repetitive sign

小汽车在视认距离内被大型车遮挡，无法获取限速标志信息，通常情况下，小汽车车速高于大型车，在限速标志消失点处可以看到重复限速标志，获得限速信息。

限速标志重复距离 l_2 应满足

$$l_2 = l_1 - d_1 = \frac{v_{w0}t_2}{3.6} + \sqrt{\frac{h^2 + d^2}{\tan(\alpha/2)}} - \frac{h}{\tan(\theta)} \quad (7)$$

2.2 限速标志位置设置模型

高速公路层级限速标志设置时应考虑驾驶人特性和周围布设环境等因素，限速标志设置过多容易使驾驶人产生减速疲劳感，给作业人员带来不便，不仅实用性差且效果不佳；设置过少会使驾驶人减速降幅增大，从而增加减速危险性。本文主要针对层级限速中一级、二级和三级限速标志的设置位置展开研究。

2.2.1 三级限速标志位置设置

根据《公路养护安全作业规程》(JTG H30—2004)规定，警告区长度 s_2 和上游过渡区长度 s_3 分别为

$$s_2 = \frac{v_{10}t_4}{3.6} + \frac{v_{10}^2 - v_w^2}{25.92g(\varphi + b)} + \frac{v_w t_4}{3.6} + \frac{v_w^2}{25.92g(\varphi + b)} + \frac{QL}{n} \quad (8)$$

$$s_3 = \begin{cases} v_s^2 \omega / 155 & v_s \leq 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \\ 0.625 v_s \omega & v_s > 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

式中： v_w 为警告区内车辆限速值； v_s 为上游过渡区内车辆限速值； ω 为封闭车道宽度； Q 为发生在道路上的交通事件引起交通拥挤的最小流量； L 为车辆平均长度，本文取 7 m ； n 为车道数量。

为使车辆在上游过渡区运行平稳，车速离散性降低，考虑在上游过渡区前端附近设置一个限速标志，三级限速中其他2个限速标志依次设在警告区内。《公路养护安全作业规程》(JTG H30—2004)中计算的警告区长度仅考虑了警告区设立一个限速标志的情况，故在设立三级限速标志时应对上述警告区长度进行修正，修正后警告区长度分布见图3， s_4 为车辆在第一限速标志处的反应减速距离； s_5 为车辆在第二限速标志处的反应减速距离； s_6 为车辆

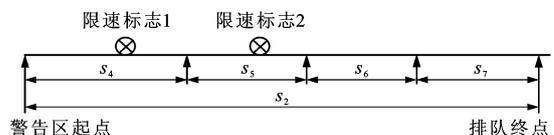


图3 警告区长度分布

Fig. 3 Length distribution in warning zone

安全停车距离; s_7 为车辆在道路上的平均排队长度。

三级限速警告区长度 s_2 为

$$s_2 = s_4 + s_5 + s_6 + s_7 \quad (10)$$

$$s_4 = \frac{v_{10} t_4}{3.6} + \frac{v_{10}^2 - v_{w11}^2}{25.92g(\varphi + b)} \quad (11)$$

$$s_5 = \frac{v_{w11} t_4}{3.6} + \frac{v_{w11}^2 - v_{w22}^2}{25.92g(\varphi + b)} \quad (12)$$

$$s_6 = \frac{v_{w22} t_4}{3.6} + \frac{v_{w22}^2}{25.92g(\varphi + b)} \quad (13)$$

$$s_7 = \frac{QL}{n} \quad (14)$$

式中: v_{w11} 、 v_{w22} 分别为警告区限速标志 1、2 的车辆限速值。

警告区内三级限速标志的分布情况见图 4, s_8 和 s_9 分别为限速标志 2 到警告区起点和上游过渡区始端距离。

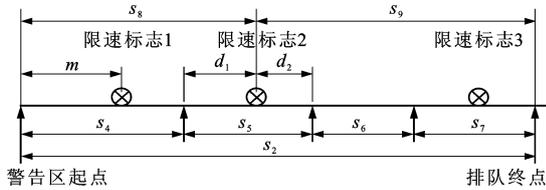


图 4 三级限速标志分布

Fig. 4 Distribution of third grade speed-limit sign

限速标志 1 和 3 可根据警告区、上游过渡区长度分布和前置距离 d_2 、后置距离 m 设置,限速标志 2 的设置应根据前后标志位置和警告区长度分布计算,其中 s_8 和 s_9 至少应满足

$$\begin{cases} s_8 \geq s_4 + m \\ s_9 \geq d_2 + s_6 + s_7 \\ s_8 + s_9 \geq s_2 \end{cases} \quad (15)$$

2.2.2 二级限速标志位置设置

二级限速标志分别设在警告区始端和上游过渡区始端附近设置限速标志。美国《统一交通控制手册》(MUTCD)中规定当限速差值大于 $16 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,为了保证车辆安全减速,需提供额外的提示标志,可考虑设立重复限速标志。二级限速标志在控制区分布情况见图 5。

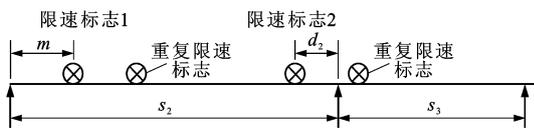


图 5 二级限速标志分布

Fig. 5 Distribution of second grade speed-limit sign

2.2.3 一级限速标志位置设置

当车辆仅需降速一次即可达到预定限速值时,

可考虑设置一级限速标志。具体位置设置时应考虑 2 种情况:交通量很小,几乎无排队;交通量很大,排队长度向上游延长。

交通量很小仅需一级限速时,可在警告区始端附近设置限速标志,当考虑大车遮挡问题时,可设置重复限速标志。警告区和上游过渡区长度计算,后置、重复设置距离计算同上,具体分布见图 6。

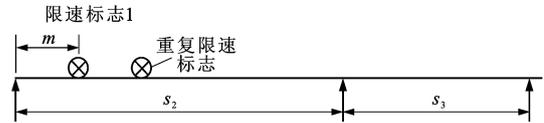


图 6 一级限速标志分布

Fig. 6 Distribution of first grade speed-limit sign

交通量较大造成排队,且排队长度逐渐增加时,需在排队后方合适距离内设置一级限速标志。为保证车辆停驶安全及排队容许空间,限速标志距离排队尾端不能过近或过远,应满足 2 个条件:应满足车辆减速及制动停车安全距离;最长长度应满足短时记忆距离、驾驶人视认距离或安全停车视距。

车辆减速及制动停车安全距离,即移动限速标志到排队尾部的距离 s_{10} 为

$$s_{10} \geq s_4 + s_6 + s_{11} = \frac{v_{10} t_4}{3.6} + \frac{v_{10}^2 - v_{w1}^2}{25.92g(\varphi + b)} + \frac{v_{w2} t_4}{3.6} + \frac{v_{w2}^2}{25.92g(\varphi + b)} + s_{11} \quad (16)$$

式中: s_{11} 为车辆停止后与前车保持的安全距离,一般为 3~5 m。

驾驶人对标志信息存在短时记忆性,若相邻标志间距过大,驾驶人会遗忘限速信息,对车辆行驶产生安全隐患。标志设置最大长度应满足短时记忆距离、驾驶人视认距离或安全停车视距,即

$$\begin{cases} s_{10} \leq s_4 + s_{12} + s_{13} \\ s_{13} = \max\{s_{14}, s_{15}\} \end{cases} \quad (17)$$

式中: s_{12} 为驾驶人短时记忆距离; s_{13} 为车辆安全停车视距和驾驶人视认距离中较大者; s_{14} 为车辆安全停车视距; s_{15} 为驾驶人临界视认距离。

驾驶人驶过限速标志后存在一个短时记忆时间,驾驶人在驶过标志 500~1 000 m 后会忘记刚看过的限速标志^[15-23],故计算中驾驶人短时记忆距离 s_{12} 取 500 m。

根据驾驶人临界视角与临界视认距离关系,驾驶人的临界视认距离 s_{15} 为

$$s_{15} = \frac{d_3}{2 \tan(\beta/2)} \quad (18)$$

式中: β 为临界视角角度; d_3 为被观察对象上下两端

点的垂直距离。

中国交通运输部在驾驶人培训管理中要求动视力为静视力的 0.8~0.9,故驾驶人动视力最低取为 4.0 时,临界视角为 0.167°,驾驶人判断前方车辆时的视线垂直距离应为车的高度,取 1.5 m。将上述数据代入式(18)得 s_{15} 为 514.6 m。基于安全因素考虑, s_{15} 取 500 m。车辆安全停车视距 s_{14} 为

$$s_{14} = s_6 + s_{11} = \frac{v_{w2} t_4}{3.6} + \frac{v_{w2}^2}{25.92g(\varphi+b)} + s_{11} \quad (19)$$

当客车和货车速度分别为 110 km · h⁻¹ 和 100 km · h⁻¹, 摩阻因数分别为 0.29 和 0.24 时, 将各参数值代入式(19)得客车安全停车视距为 245.6 m, 货车安全停车视距为 238.5 m。

由以上分析知, 2 种大型车的安全停车视距都满足关系 $s_{14} < s_{15}$, 根据式(17)得最大停车视距 s_{13} 为 500 m, 因此, 可移动标志或车载标志距离排队尾部的距离 s_{10} 为

$$s_{10} \leq \frac{v_{10} t_4}{3.6} + \frac{v_{10}^2 - v_{w1}^2}{25.92g(\varphi+b)} + 1\ 000 \quad (20)$$

综合以上 2 个条件, 设置一级限速标志应满足

$$\frac{v_{10} t_4}{3.6} + \frac{v_{10}^2 - v_{w1}^2}{25.92g(\varphi+b)} + \frac{v_{w2} t_4}{3.6} + \frac{v_{w2}^2}{25.92g(\varphi+b)} + s_{11} \leq s_{10} \leq \frac{v_{10} t_4}{3.6} + \frac{v_{10}^2 - v_{w1}^2}{25.92g(\varphi+b)} + 1\ 000 \quad (21)$$

3 计算结果分析

运用 VISSIM 仿真软件对上文方法进行有效性验证。选用某一双向四车道高速公路, 大型车与小汽车的车型比为 4 : 6, 单车道宽为 3.75 m, 设计速度

120 km · h⁻¹, 施工区限速 40 km · h⁻¹, 采用 1 400、1 960、2 240 pcu · h⁻¹ 3 种交通量, 仿真 2 400 s 并记录 600~1 800 s 的数据, 连续运行 5 次, 取其平均值。

3.1 仿真模型

针对一、二、三级限速标志位置方法分别构建 3 种交通量下的仿真方案。3 类限速条件分别设为 40、60~40、80~40 km · h⁻¹, 工作区长度设为 400 m, 上游过渡区长度由式(10)计算, 可取为 100 m。针对上述 3 类限速标志位置确定方法, 分别计算不同交通量下警告区长度、后置距离、前置距离。对以上 3 种交通量和限速条件下的限速标志设置位置存在 3 种位置形式。位置 1 为设置位置不满足方法计算值且两者差值较小; 位置 2 为设置位置满足方法计算值; 位置 3 为设置位置不满足方法计算值且两者差值较大。3 种交通量条件下对应的 3 种工况分布见表 1。

3.2 结果分析

以冲突率为指标, 评价 3 种位置形式的安全性。冲突率定义为单位长度上的冲突数量, 即

$$R = E' / L_p$$

式中: R 为冲突率; E' 为冲突数量; L_p 为仿真路段长度。

通过对以上方案仿真结果对比分析, 得出 3 种工况下的冲突率与限速标志位置设置形式关系, 见图 7。

同种交通量和限速条件下, 交通量大小与排队长度、警告区长度有关。当限速标志的前、后置距离固定时, 同级限速下的安全性主要体现在警告区长度变化。在最低限速为 40 km · h⁻¹、大车混入率为

表 1 三种工况分布

Tab. 1 Distribution of three positions

参数	一级限速			二级限速			三级限速		
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
交通量/(pcu · h ⁻¹)	1 400	1 960	2 240	1 400	1 960	2 240	1 400	1 960	2 240
警告区长度/m	230	390	790	240	340	770	300	386	800
后置距离/m	位置 1	130	130	130	120	120	120	120	120
	位置 2	90	90	90	90	90	90	90	90
	位置 3	190	190	190	170	210	520	260	300
前置距离/m	位置 1				20	20	20	20	20
	位置 2				30	30	30	30	30
	位置 3				0	0	0	0	0
中间标志距离/m	位置 1						220	220	220
	位置 2						200	200	200
	位置 3						260	300	700

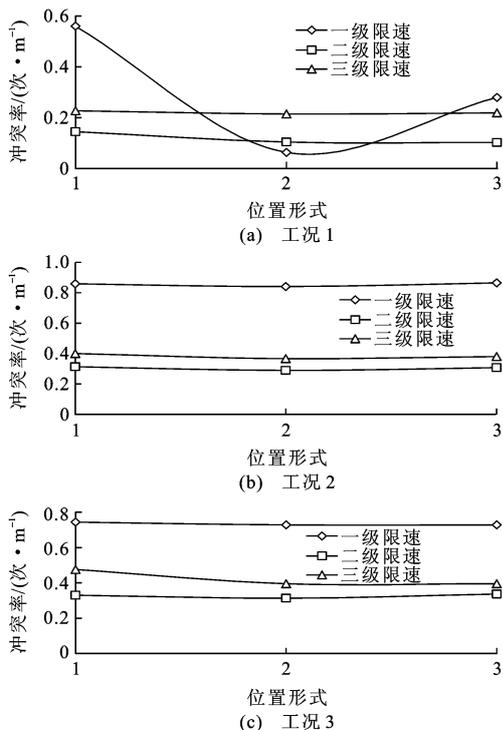


图 7 三种不同工况下的冲突率

Fig. 7 Conflict rates under three different positions

40%条件下,当交通量为 $1\ 400\ \text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,一、二、三级限速标志的最小冲突率分别为 0.06 、 0.10 、 $0.21\ \text{次} \cdot \text{m}^{-1}$,最大冲突率分别为 0.56 、 0.14 、 $0.23\ \text{次} \cdot \text{m}^{-1}$;当交通量为 $1\ 960\ \text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,一、二、三级限速标志的最小冲突率分别为 0.84 、 0.28 、 $0.36\ \text{次} \cdot \text{m}^{-1}$,最大冲突率分别为 0.87 、 0.31 、 $0.40\ \text{次} \cdot \text{m}^{-1}$;当交通量为 $2\ 240\ \text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,一、二、三级限速标志的最小冲突率分别为 0.72 、 0.31 、 $0.39\ \text{次} \cdot \text{m}^{-1}$,最大冲突率分别为 0.74 、 0.34 、 $0.48\ \text{次} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

由以上分析可以看出,本文层级限速标志位置确定方法具有一定的合理性且适用性不同。一级限速标志位置方法适用于交通量较小且警告区长度有限的条件;二、三级限速标志位置方法适用于交通量大、排队长且有足够长度满足多级限速的施工区段。

4 结 语

本文建立了基于驾驶人视认性和短时记忆的限速标志的前置、后置与重复距离计算式,提出了基于制动减速安全间距的层级限速标志位置确定方法,运用 VISSIM 仿真软件验证了计算方法的有效性。结果表明:一级限速标志确定方法适用于交通量较小的情况,二、三级限速标志位置方法适用于交通量大且排队长度向上游持续延伸的情况。本文仅从安

全角度构建了标志计算方法,实际上施工区层级限速标志的设置位置还受到效率、道路条件、管制等因素的影响,在后续的研究中,应着重考虑这些因素影响下的限速标志位置确定方法。

参 考 文 献 :

References :

[1] RUTA A, LI Yong-min, LIU Xiao-hui. Real-time traffic sign recognition from video by class-specific discriminative features[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(1): 416-430.

[2] GU Yan-lei, YENDO T, TEHRANI M P, et al. Traffic sign recognition using hybrid camera system[J]. The Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, 2011, 65(7): 967-975.

[3] MCMURTRY T, SATIO M, RIFFKIN M, et al. Variable speed limits signs: effects on speed and speed variation in work zones[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2009, 33(2): 159-174.

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

[5] 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.

[6] JONGEN E M, BRIJS K, MOLLU K, et al. $70\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ speed limits on former $90\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ roads effects of sign repetition and distraction on speed[J]. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2011, 53(6): 771-785.

[7] 王 薇,杨兆升,赵丁选.有限阶段马尔可夫决策的可变限速控制模型[J].交通运输工程学报,2011,11(5):109-114. WANG Wei, YANG Zhao-sheng, ZHAO Ding-xuan. Control model of variable speed limit based on finite horizon Markov decision-making[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 109-114. (in Chinese)

[8] 郑 宇.分层强化学习算法及其应用研究[D].北京:北京交通大学,2009. ZHENG Yu. Research on hierarchy reinforcement learning algorithm and its application[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)

[9] 王 强,王显璞.高速公路养护施工区限速控制研究[J].交通信息与安全,2010,28(1):124-129. WANG Qiang, WANG Xian-pu. Speed-limiting control of freeway work zone[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2010, 28(1): 124-129. (in Chinese)

[10] 张文会.高速公路交通事故现场区划安全测度研究[D].长春:吉林大学,2010. ZHANG Wen-hui. Research on region division and safety measurement for traffic accident scene on freeway [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)

- [11] 陆建,姜军,叶海飞.普通公路路侧限速标志设置位置的确定方法[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(1):75-78.
LU Jian, JIANG Jun, YE Hai-fei. Setting location of speed limit signs along highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(1): 75-78. (in Chinese)
- [12] 徐婷,孙小端,贺玉龙,等.高速公路平曲线建议限速标志设置研究[J].中国公路学报,2010,23(增):112-114.
XU Ting, SUN Xiao-duan, HE Yu-long, et al. Research on advisory speed limit sign setting of horizontal curve for expressway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S): 112-114. (in Chinese)
- [13] 姜军,陆建,李娅.基于驾驶人视认特性的城市道路指路标志设置[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(5):1089-1092.
JIANG Jun, LU Jian, LI Ya. Setting of road guide signs based on driver's recognition characteristics[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(5): 1089-1092. (in Chinese)
- [14] 王彦军.山区公路交通标志及减速振动标线的优化[D].西安:长安大学,2009.
WANG Yan-jun. Optimization of mountain highway traffic signs and deceleration vibration marking [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [15] 陆建,姜军,叶海飞.普通公路路侧交通标志遮挡与重复设置[J].西南交通大学学报,2011,46(6):1020-1024.
LU Jian, JIANG Jun, YE Hai-fei. Occlusion and duplicate setting of roadside traffic signs for ordinary multilane highways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 1020-1024. (in Chinese)
- [16] 姚云.基于认知心理学的指路标志信息与信息密度阈值研究[D].成都:西华大学,2009.
YAO Yun. The study of information density and threshold for guiding signs based on cognitive psychology automotive engineering[D]. Chengdu: Xihua University, 2009. (in Chinese)
- [17] 徐婷,孙小端,贺玉龙,等.基于短时记忆的单义标志重复间距研究[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(6):145-149.
XU Ting, SUN Xiao-duan, HE Yu-long, et al. Single-mean signs appropriate repetition intervals determination by drivers' short-term memory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(6): 145-149. (in Chinese)
- [18] 云美萍,刘斌,杨晓光.基于车道选择行为分析的交通标志优化设置[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(5):627-630,636.
YUN Mei-ping, LIU Bin, YANG Xiao-guang. Model on location optimization of traffic sign based on lane choice behavior[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(5): 627-630, 636. (in Chinese)
- [19] 韦勇球,赵利苹,袁春建,等.高速公路改扩建交通组织仿真[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(4):38-43.
WEI Yong-qiu, ZHAO Li-ping, YUAN Chun-jian, et al. Traffic organization simulation of expressway rebuilding project [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(4): 38-43. (in Chinese)
- [20] 孟祥海,郑来,毕海峰,等.高速公路半幅封闭施工区交通特性与交通冲突特性研究[J].中国公路学报,2013,26(2):140-146.
MENG Xiang-hai, ZHENG Lai, BI Hai-feng, et al. Research on traffic characteristics and traffic conflicts of one-way closed work zone on expressway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 140-146. (in Chinese)
- [21] 王军雷,孙小端,徐婷,等.山区高速公路平曲线建议限速标志设置[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(4):77-80.
WANG Jun-lei, SUN Xiao-duan, XU Ting, et al. Curve advisory speed signs setting for freeway at mountain area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(4): 77-80. (in Chinese)
- [22] 邱兆文,张广昕,孙晋伟.基于交通平静化的一、二级公路交通安全研究[J].长安大学学报:社会科学版,2013,15(2):38-41.
QIU Zhao-wen, ZHANG Guang-xin, SUN Jin-wei. Study on traffic safety of first and second class highways based on traffic calming[J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition, 2013, 15(2): 38-41. (in Chinese)
- [23] 樊根耀,李武选,王丽萍.基于服务逻辑的运输管理研究范式探析[J].长安大学学报:社会科学版,2013,15(1):28-32.
FAN Gen-yao, LI Wu-xuan, WANG Li-ping. Analysis on the paradigm of transportation management based on the service view [J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition, 2013, 15(1): 28-32. (in Chinese)