

文章编号:1671-1637(2015)04-0093-08

## 高速公路半幅封闭施工区限速标志效能试验

贾兴利<sup>1</sup>, 富志鹏<sup>2</sup>, 许金良<sup>1</sup>, 陈文辉<sup>3</sup>, 景立竹<sup>1,4</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 天津水泥工业设计研究院有限公司, 天津 300400; 4. 德克萨斯大学奥斯汀分校 Cockrell 工程学院, 德克萨斯 奥斯汀 78741)

**摘要:**采用现场试验与统计分析,研究了高速公路半幅封闭施工作业区交通标志尤其是限速标志的警示效能,提出了分阶限速方案和交通标志效能试验方案,选择典型路段开展了既有交通标志效能试验、限速标志位置试验、分阶限速效能试验和优化后交通标志效能试验。试验结果表明:既有交通标志尤其是限速标志效能不足,试验路段客货车经过限速标志后车速远高于限速值,且速度降低幅度很小。通过分阶限速优化交通标志设置,施工作业区车辆速度明显降低,客车速度降低 $38\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,货车速度降低 $32\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ;施工作业区客车运行速度与限速值的差值从 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 降低到 $15\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,货车速差从 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 降低到 $5\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,基本达到限速值,整个交通流运行速度与限速值差值变化趋势一致。可见,分阶限速优化后的交通标志效能提高明显。

**关键词:**交通工程;限速标志;效能试验;半幅封闭施工区;运行速度;分阶限速

**中图分类号:**U491.52

**文献标志码:**A

### Effectiveness test of speed-limit sign in one-way closed work zone for expressway

JIA Xing-li<sup>1</sup>, FU Zhi-peng<sup>2</sup>, XU Jin-liang<sup>1</sup>, CHEN Wen-hui<sup>3</sup>, JING Li-zhu<sup>1,4</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. Tianjin Cement Industry Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300400, China; 4. Cockrell School of Engineering, The University of Texas at Austin, Austin 78741, Texas, USA)

**Abstract:** The warning effectiveness of traffic sign, especially the speed-limit sign, in one-way closed work zone of expressway, was studied by using field tests and statistical analysis. The grading speed-limit program was proposed and the test program for traffic sign effectiveness was set up. A typical expressway section was chosen to test the effectivenesses of existing traffic sign, speed-limit sign position, grading speed-limit and optimizing traffic sign. Test result shows that the effectiveness of existing traffic sign, especially the speed-limit sign, is insufficient for speed-limit. In the expressway test section, after the vehicles pass through the speed-limit sign, they still have much higher speeds than the speed-limit values, and the speed reductions of the vehicles are very small. Through the optimization of traffic sign using grading speed-limit, the vehicles after passing through the work zone have significant reductions in their speeds, the speed of passenger car reduces by  $38\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , and the speed of freight car reduces by  $32\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

收稿日期:2015-01-12

基金项目:交通运输部科技项目(2011 318 362 810);国家自然科学基金项目(51208047);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821151007)

作者简介:贾兴利(1986-),男,山东嘉祥人,长安大学讲师,工学博士,从事道路总体工程研究。

The difference value between passenger car running speed and the speed-limit value has reduced from  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  to  $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , this kind of speed difference value for freight car is from  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  to  $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , the speeds of vehicles are very close to the speed-limit values, and the variation tendency of traffic flow speed is consistent with the speed-limit difference value, so the effectiveness of traffic sign is greatly improved by the grading speed-limit optimization. 3 tabs, 10 figs, 21 refs.

**Key words:** traffic engineering; speed-limit sign; effectiveness test; one-way closed work zone; running speed; grading speed-limit

**Author resume:** JIA Xing-li(1986-), male, lecturer, PhD, +86-29-82334864, jxl0126@sina.com.

## 0 引 言

中国高速公路已经进入大规模改扩建时期,为保证高速公路的通行效率,往往采用“边施工边通行”的组织模式,导致施工作业区路段频繁出现。施工作业区路段车道数减少导致运行车辆经常被迫减速、换道、分流、合流以及跟驰,增加了驾驶人的操作强度<sup>[1]</sup>。另外,施工作业区路段内施工机械及作业人员活动、交通隔离设施等对车辆运行也产生了干扰。为保证施工作业区路段交通流的顺畅和安全,合理的交通标志设置至关重要。

对高速公路施工作业区交通标志的研究随着交通安全科学的发展而不断深入,最初的施工作业区交通标志设置往往是以基本路段的限速标志为基础稍加改善而来。随着道路养护需求不断增加,养护作业区交通安全逐渐被重视,研究主要集中在合理限速和限速措施等方面<sup>[2-4]</sup>。Chien 等研究了交通标志的版面设计和布设位置<sup>[5]</sup>;Sayer 等通过试验分析影响作业区通行能力的因素,并对几种限速方法进行了分析,为作业区限速提供了新的思路<sup>[6-7]</sup>;Riffkin 等对各种限速标志的实际限速效果尤其是对施工作业区内的限速效果进行了分析<sup>[8]</sup>。

近年来中国大规模实施高速公路改扩建,国内对于施工作业区交通标志的研究也逐渐兴起<sup>[9-10]</sup>。于仁杰等通过开展 VISSIM 仿真试验,结合驾驶人视认特性,分析了高速公路施工作业区限速标志的合理位置,提出了层级限速方法<sup>[11-12]</sup>;韩跃杰以国内典型改扩建高速公路为调查对象,研究了作业区的交通组织层次和形式,并对交通标线、护栏以及其他交通设施的设置方法进行了探讨,给出了施工作业区的速度控制思路和限速要求<sup>[13]</sup>;孟祥海等以双向四车道高速公路为试验路段,针对常用的几种施工组织作业形式,统计分析了主要特征点的车速及区间速差,总结了施工作业区车速特征,提出了区间路

段的限速建议<sup>[14]</sup>。现有的施工作业区交通标志研究多是以标志外观、几何尺寸、信息内容及构造与颜色组合等为主,而对于既有标志对汽车运行速度及驾驶人行为的影响效果研究较少,仅有的一些交通标志效能评价也是基于数学建模仿真实现,评价结果不够直观,说服力不足,没有实测数据的验证与支撑。

本文采用现场试验与统计分析,开展既有交通标志效能试验、限速标志位置试验以及优化后交通标志效能试验,提出分阶限速方案,即按照连续渐变的原则设置速度控制标志,使车辆速度逐渐降低至预设的限速值。根据试验结果,分析高速公路施工作业区交通标志效能,提出采用分阶限速的交通标志设置优化方法。

## 1 限速标志效能试验

### 1.1 试验目的

高速公路施工作业区因车道数减少、施工活动干扰等对运行车辆安全产生了较大影响,交通标志尤其是限速标志的合理设置对正确引导过往车辆,保障施工作业区顺畅通行起到了重要作用<sup>[15-16]</sup>。本文考虑晴天、雨天不同天气条件,通过开展高速公路施工作业区限速标志效能及优化试验,为施工作业区交通标志的合理设置提供技术支撑。

### 1.2 试验内容

为了达到试验目的,本次试验分为既有交通标志效能试验、限速标志位置试验、分阶限速效能试验、优化后交通标志效能试验 4 部分。

#### 1.2.1 观测参数

作为道路使用者,车辆驾驶人往往根据自己的驾驶水平和对道路状况的综合判断给出心理期望行驶速度。限速标志效能的高低可以通过管理限速值与驾驶人心理期望行驶速度间的偏离程度来描述,偏离程度越小则说明限速越合理,限速标志越有效,

而运行速度则是驾驶人心理期望行驶速度的直观表征,因此,实际运行速度的变化情况能够真实地反映出标志的警示效能,本文选择运行速度作为限速标志有效性的评价指标。

同时,路段的交通量及交通组成也是分析标志效能的重要背景环境特征,因此,选择运行速度做为反映标志效能的主要指标,同时注意交通量、交通组成等基础条件,本次试验观测参数包括运行速度、交通量和交通组成。

运行速度( $V_{85}$ )就是车辆的实际行驶速度,通常选择观测的第85百分位车辆速度作为记录值。运行速度是大多数驾驶人交通心理需求的反映。交通量是通过道路某一断面交通流数量上的表征,能够提供路段交通流的背景环境。交通组成也就是交通量的车型组成,是分析标志效能的基本数据。

### 1.2.2 数据采集仪器

本次试验采用 NC-200 便携式交通分析仪与手持雷达测速仪相结合的数据采集手段,可以高效、准确地收集试验路段的车辆运行速度、交通量及其组成。其中,NC-200 便携式交通分析仪具有体积小、采集信息快速、数据易于处理等特点,其采用的车辆磁场成像技术可准确记录所需观测参数,见图1。

### 1.2.3 试验路段及交通标志设置

高速公路施工作业区交通组织方式多种多样,包括半幅全线封闭施工、半幅分时段封闭施工、全幅内外侧分期施工与组合式施工,其中以半幅全线封闭施工最为常见。本文选择施工进度满足要求的陕西某高速公路改扩建路段作为试验路段,该路段施工组织方案为半幅封闭半幅通车,具体交通标志设置见图2。



(a) 仪器组成



(b) 仪器埋设

图1 NC-200 交通分析仪

Fig. 1 Traffic analyzer of NC-200

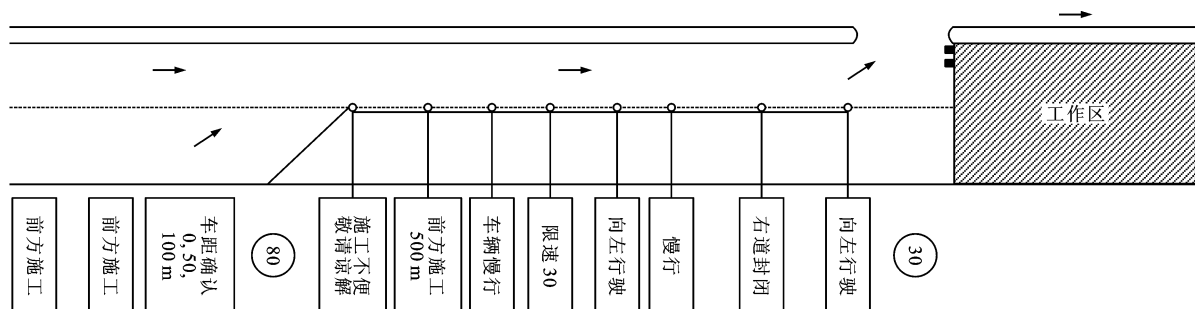


图2 既有交通标志

Fig. 2 Existing traffic signs

## 1.3 试验参数观测

### 1.3.1 既有交通标志效能试验

为了分析既有交通标志对过往车辆的警示效能,针对试验路段已有交通标志设置情况,分别在各既有标志处和正常路段(第1个标志前500 m)处埋设交通参数观测仪器,采集经过各标志处的车辆运行速度及断面交通量,并采用手持雷达测速仪进行

个别点位的参数观测,以便对比验证。

### 1.3.2 限速标志位置试验

限速标志位置是标志设置需要重点考虑的内容,合理的标志位置能够充分发挥标志的功能,而不合理的设置位置则会严重影响标志的警示效用。若标志设置距离过长,因长时间无法到达驾驶行为改变点,驾驶人则不能准确判断是否需要

改变行驶方式。若设置距离过短,驾驶人改变驾驶行为的时间不足,标志设置将失去意义。为确定限速标志合理的设置位置,分别将“限速 30”标志移至距中分带开口前 100、150、250 m 三个距离,观测车辆到达限速标志处的运行速度,具体见图 3,距离单位为 m。

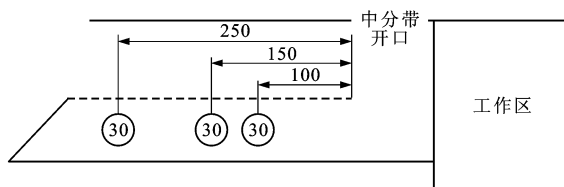


图 3 限速标志位置试验

Fig. 3 Location test of speed-limit sign

### 1.3.3 分阶限速效能试验

总结限速标志的实际使用效果发现,单个限速标志往往难以达到使运行车辆按照控制速度行驶的

目标。车辆经过单个限速标志后,驾驶人容易忘记前置限速标志的控制速度内容,若长时间没有后续提示,驾驶人将按照自己的心理需求改变驾驶行为,导致车速回升,因此,本文提出分阶限速方案,连续渐变地设置速度控制标志。为方便和单个限速标志进行对比,分别设置“限速 30 km · h<sup>-1</sup>”、“限速 40、30 km · h<sup>-1</sup>”、“限速 60、40、30 km · h<sup>-1</sup>”、“限速 60、40、40、30 km · h<sup>-1</sup>”4 种方案进行试验,具体设置见图 4,距离单位为 m。

#### 1.3.4 优化后交通标志效能试验

在试验路段既有交通标志的基础上,将分阶限速方法运用到试验路段,优化调整该路段的交通标志设置情况,连续渐变地增设速度限制标志,并分别进行晴天、雨天 2 种气象条件下的运行速度变化观测。优化后交通标志设置见图 5,图中距离单位为 m。

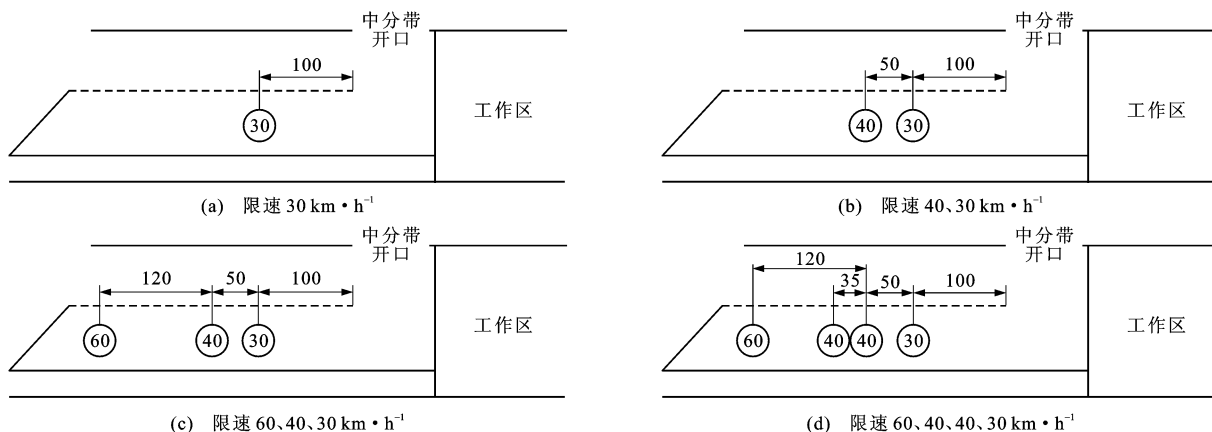


图 4 分阶限速效能试验

Fig. 4 Effectiveness test of grading speed-limit

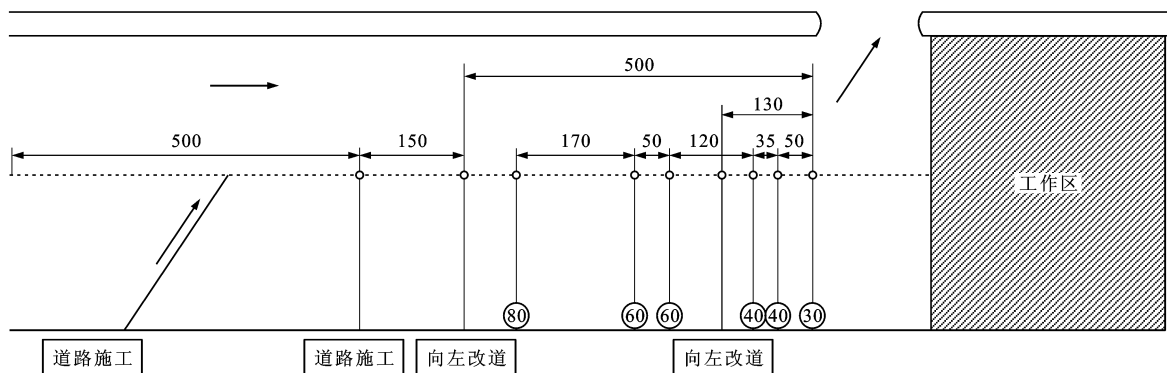


图 5 优化后交通标志效能试验

Fig. 5 Effectiveness test of optimized traffic signs

## 2 试验结果分析

### 2.1 既有交通标志效能分析

从数据采集仪器导出观测参数,整理分析试验

路段在既有交通标志设置情况下的交通参数,可以得到该施工作业区的基本交通条件,见表 1。同时可以得到试验路段客、货车及整个交通流在各交通标志处的运行速度变化趋势,见图 6。

表1 试验路段交通条件

Tab. 1 Traffic conditions of test section

施工方案	交通量/(veh·h <sup>-1</sup> )		货车比例/%	
	晴天	雨天	晴天	雨天
半幅封闭半幅施工	300	220	23	26

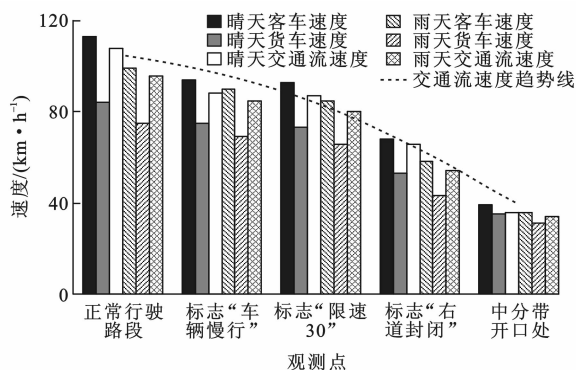


图6 既有交通标志下运行速度

Fig. 6 Running speeds under existing traffic signs

由图6可以看出:试验路段客货车在经过限速标志后车速远高于限速值,且速度降低幅度很小,无论晴天、雨天,交通流 $V_{85}$ 离限速值相距甚远,直至中分带开口处车辆运行速度才接近限速值;大部分车辆选择在“右道封闭”标志处开始大幅度减速,反映驾驶人通过目测中分带开口自定刹车起始点,此时为安全通过中分带,车辆需大幅度制动,尤其是大货车刹车制动为短距离频繁制动,存在安全隐患;雨天运行速度普遍低于晴天,且限速后运行速度降幅大于晴天。

通过对试验路段的运行速度分析,表明既有交通标志尤其是限速标志警示能力不足,需进一步优化。

## 2.2 限速标志位置试验分析

分别将限速30 km·h<sup>-1</sup>标志移至中分带开口前100、150、250 m三个距离,观测车辆到达限速标志处的运行速度,见图7。

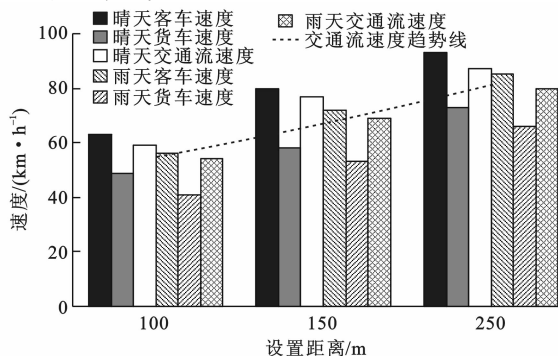


图7 不同设置距离下限速标志效果

Fig. 7 Speed-limit sign effectiveness under different distances

从图7可以看出,晴雨天条件下限速标志离中分带开口距离越近,车辆到达限速标志处的运行速度越低,表明限速标志效果越明显。但即使距离最近的设置方式,车辆经过限速标志时车速依然大于限速值。

## 2.3 分阶限速效能分析

分析“限速30 km·h<sup>-1</sup>”、“限速40、30 km·h<sup>-1</sup>”、“限速60、40、30 km·h<sup>-1</sup>”、“限速60、40、40、30 km·h<sup>-1</sup>”4种方案下的运行速度观测结果,见图8。

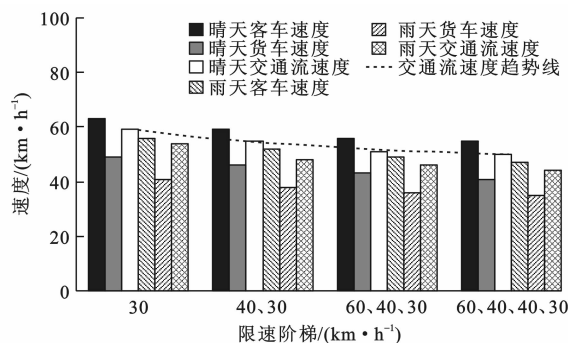


图8 分阶限速效果

Fig. 8 Effectiveness of grading speed-limit

由图8可以看出,晴雨天条件下,采用分阶限速方法进行限速,较仅设置一块限速标志方法,限速效果更加明显,车辆速度接近限速值,因此,分阶限速方案效能更优。

## 2.4 优化后交通标志效能分析

将分阶限速方法运用到试验路段,进行交通标志设置的优化调整,进而观测车辆在该路段的运行速度变化情况,见表2。

表2 优化后车辆运行速度

Tab. 2 Running speeds after optimization km·h<sup>-1</sup>

运行速度	晴天既有方法	雨天既有方法	晴天分阶优化方法	雨天分阶优化方法	晴天速差	雨天速差
客车	93	85	55	47	38	38
货车	73	66	41	35	32	31
交通流	87	80	50	44	37	36

由表2可知:在晴天和雨天条件下,通过分阶限速优化交通标志设置,施工作业区车辆速度明显降低,客车速度降低38 km·h<sup>-1</sup>,货车速度降低约32 km·h<sup>-1</sup>,整个路段交通流运行速度降低约36 km·h<sup>-1</sup>,驾驶人紧急刹车现象基本消失,提高了运行安全性。

为了一进步分析优化后交通标志的效能,统计分析优化交通标志前后运行速度与控制速度的差值变化,见图9。

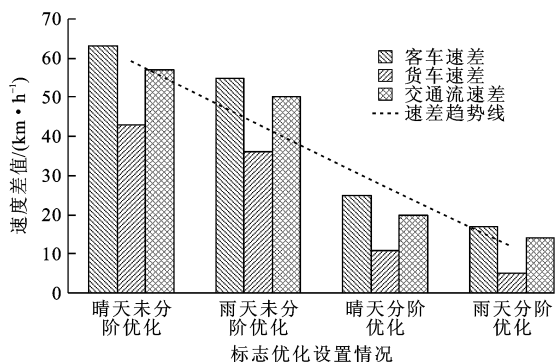


图9 运行速度与限速差值

Fig. 9 Difference values between running and limiting speeds

从图9可以看出:采用分阶限速方法优化交通标志设置,晴天和雨天客车在施工作业区运行速度与限速值差值从开始的  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  降低到  $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,接近限速值;晴天和雨天货车在施工作业区运行速度与限速值差值从开始的  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  降低到  $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,雨天情况已基本达到限速值,整个交通流运行速度与限速值差值变化趋势一致,进一步证明了采用分阶限速优化后的交通标志效能提高明显。

### 3 分阶限速标志设置方法

分阶限速方法是为了实现施工作业区行驶车辆渐变降速,避免因突然大幅度减速带来的安全隐患,降低交通冲突。同时,也为了提高限速标志的降速效果,使得施工作业区车辆速度逐渐降低至预设限速值,按照控制速度进入作业区,保证施工作业区的交通流稳定性。

通过限速标志效能试验发现,限速标志的前置位置以及分阶限速标志的重复设置情况对行驶车辆速度影响较大<sup>[17-19]</sup>。距离设置太远,驾驶人因长时间行驶易忘却前置标示内容,导致车辆速度的再次提升;距离设置太近,驾驶人为了达到预设限速值,需要采取紧急制动,影响了安全性<sup>[20-21]</sup>。同时,分阶限速要求重复设置情况也存在类似问题。本文从分阶限速的合理前置位置、重复位置2方面阐述分阶限速标志的设置方法。

#### 3.1 限速标志前置距离计算

根据限速标志位置试验结果可知,限速标志离中分带开口距离越近,车辆到达限速标志处的运行速度越低,表明限速标志效果越明显。但是,由于驾驶人对交通标志内容有一个反应时间,限速标志离中分带距离不可过短,避免因反应不及时,造成刹车不及时,带来交通事故。一般限速标志前置距离为<sup>[1]</sup>

$$D \geq \lambda_1 n \frac{v_1}{3.6} t_3 + \lambda_2 \frac{v_1^2 - v_2^2}{254(\phi' + \phi)} + \frac{v_1}{3.6} t_2 - \frac{d}{\tan(\alpha)} \quad (1)$$

式中: $D$ 为限速标志前置距离(m); $v_1$ 为认读标志时的车速( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ); $v_2$ 为采取行动后的车速( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ); $t_2$ 为反应时间(s); $t_3$ 为变换一次车道所需时间(s); $n$ 为变换车道数; $\phi'$ 为道路阻力系数; $\phi$ 为路面附着系数; $d$ 为驾驶人的视高到标志牌上缘的距离(m); $\alpha$ 为消失点与标志定边的夹角; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别为变换车道与减速行为系数。

按照上述公式计算得到的标志前置距离是个增大的范围值,结合限速标志试验结论给出的前置距离属于减小的范围值,两者结合就可以得到限速标志前置的最短距离。

#### 3.2 分阶限速标志重复距离计算

分阶限速的主要措施就是通过重复设置限速标志来提醒驾驶人降低车速,同时限速值逐渐减小有助于实现车辆提前减速,保障车辆行驶稳定。但是标志若重复过于频繁既导致了标志设置的繁余,也提升了成本。通过考虑减速分布集中性,在驾驶人前一限速标志消失点即可重复设置限速标志,重复距离计算公式为<sup>[11]</sup>

$$l = s - c = \frac{v_1}{3.6} t_1 + \sqrt{\frac{q^2 + d^2}{\tan^2(\theta/2)}} - \frac{d}{\tan(\alpha)} \quad (2)$$

式中: $l$ 为重复距离(m); $s$ 为驾驶人视认距离(m); $c$ 为消失距离(m); $t_1$ 为限速标志读取时间(s); $q$ 为行车中心线与限速标志的横向宽度(m); $\theta$ 为驾驶人视野角。

#### 3.3 分阶限速设置步骤

根据分阶限速标志合理位置与重复位置计算公式(1)、(2),结合其他交通安全设施,设置完整的施工作业区分阶限速措施,具体步骤见图10。

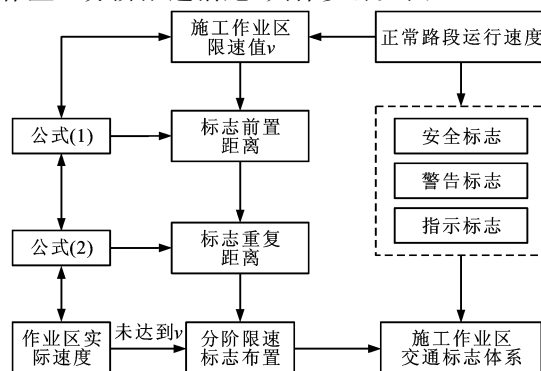


图10 分阶限速步骤

Fig. 10 Grading speed-limit steps

分阶限速在应用中还应根据不同的改扩建形式、车道数,结合实际的限速效果进一步调整,以达到限速目标,保障施工作业区的交通安全。

### 3.4 分阶限速下施工作业区交通标志优化设计

施工作业区行车安全除通过分阶限速进行速度控制,还应结合交通标志的合理设置,形成完整的交通安全保障体系。

#### 3.4.1 交通标志版面尺寸设计

道路的行车速度决定了交通标志版面内容文字的高度,而字体高度又直接影响版面的尺寸。本文对施工作业区进行了车速调查,计算不同行车速度对应的标志字体高度,见表3。确定文字高度后,可根据字数、间隔、行距等确定版面尺寸。

表3 交通标志字体高度与车速对应关系

Tab.3 Relationship between traffic sign font height and vehicle speed

行车速度/(km·h <sup>-1</sup> )	100~120	71~99	40~70	<40
字体高度/cm	60~70	50~60	35~50	25~30

#### 3.4.2 交通标志版面内容设计

交通标志版面内容是交通标志的设计核心,是引导道路使用者安全、顺利、快捷抵达目的地的关键。根据高速公路施工作业区交通标志视认数据可知,标志内容应简明易懂,提高驾驶人对标志的理解效率,重点包括车辆慢行标志、局部封闭标志、道路施工标志与警示标志等。施工作业区车辆慢行标志内容宜显示“车辆慢行”,可以去掉施工作业图案,在相同的位置以“慢”字替代。局部封闭标志内容除明确的文字信息外,版面左端还可附有作业图案,使标志内容更容易被驾驶人理解。道路施工标志内容应设置有施工作业图案和“道路施工”两组内容。

#### 3.4.3 交通标志版面颜色设计

不同颜色的刺激作用使人们产生一种不同含义的思维反应,即产生不同的视认效果和视认能力,将标志颜色标准化,驾驶人可根据交通标志颜色直接判断标志所提示内容,发现前方存在危险,提前采取措施。

根据高速公路施工作业区交通标志视认数据可知:施工标志颜色为蓝底、白字,施工作业图案为黄底、黑图案形式,可设置白色边框,增加颜色明暗对比,提高交通标志的视认效果;黄色比较醒目,蓝色具有宁静、有序之意,配以冷色字体,使得警示标志颜色组合明显,视觉清晰度能够得到明显的提高,可将施工作业区警示标志设计为黄底、黑字与蓝边组合;施工作业区限速标志颜色设计宜为红圈、白背景

与黑字体组合,解除限速标志颜色宜为白色背景、黑色字体以与黑色圆圈组合。

## 4 结 语

(1)采用便携式交通分析仪与手持雷达测速仪相结合的数据采集手段能够满足交通标志效能试验的数据需求,保证了交通标志效能分析的准确性与科学性。

(2)既有交通标志尤其是限速标志效能不足,试验路段客货车经过限速标志后车速远高于限速值,且速度降幅很小。通过分阶限速优化交通标志设置,施工作业区车辆速度明显降低,客车速度降低38 km·h<sup>-1</sup>,货车速度降低约32 km·h<sup>-1</sup>,客车施工作业区运行速度与限速值的差值从60 km·h<sup>-1</sup>降低到15 km·h<sup>-1</sup>,货车车速差从40 km·h<sup>-1</sup>降低到5 km·h<sup>-1</sup>,基本达到限速值,整个交通流运行速度与限速值差值变化趋势一致。分析结果表明分阶限速优化后的交通标志效能提高明显,也验证了采用运行速度作为限速标志效能评价指标的有效性和可行性。

(3)交通标志效能除与交通标志本身设置相关,还受交通量及交通组成的影响,不同交通条件下的标志效能是进一步研究重点。

### 参考文献:

### References:

- [1] 陈文辉. 高速公路改扩建施工作业区交通标志设置有效性研究[D]. 西安:长安大学, 2011.  
CHEN Wen-hui. Research on the effective of traffic signs setting in reconstruction and extension work zone of highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [2] PURDUSKI J M, RYS M J. Evaluations of a new advance flagger traffic sign[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 24(1): 107-114.
- [3] CARSON J, MANNERING F. The effect of ice warning signs on ice-accident frequencies and severities[J]. Accident Analysis and Prevention, 2001, 33(1): 99-109.
- [4] AL-MADANI H, AL-JANAHI A R. Assessment of drivers' comprehension of traffic signs based on their traffic, personal and social characteristics[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2002, 5(1): 361-374.
- [5] CHIEN S, TANG Y, SCHONFELD P. Optimizing work zones for two-lane highway maintenance projects[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(2): 145-155.
- [6] SAYER J R, MEFFORD M. High visibility safety apparel and the nighttime conspicuity of pedestrians in work zones[R]. Ann Arbor: The University of Michigan, 2003.
- [7] LEE C, HELLINGA B, SACCOMANNO F. Evaluation of

- variable speed limits to improve traffic safety[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2006, 14(3): 213-228.
- [8] RIFFKIN M, MCMURTRY T, HEATH S, et al. Variable speed limit signs: effects on speed and speed variation in work zones[R]. Salt Lake City: Utah Department of Transportation Research and Innovation Division, 2008.
- [9] 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)
- [10] 樊大可,王建军,常振文,等.道路交通标志信息过载阈值的计算[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(6):82-87.
- FAN Da-ke, WANG Jian-jun, CHANG Zhen-wen, et al. Overload threshold of traffic sign information[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 82-87. (in Chinese)
- [11] 于仁杰,马荣国,韩 海,等.高速公路施工区限速标志位置确定方法[J].交通运输工程学报,2013,13(5):91-98.
- YU Ren-jie, MA Rong-guo, HAN Hai, et al. Determination method of speed-limit sign position in expressway work zone[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(5): 91-98. (in Chinese)
- [12] 于仁杰,马荣国,王俊凌,等.高速公路施工区层级限速问题研究[J].中国公路学报,2013,26(6):150-156.
- YU Ren-jie, MA Rong-guo, WANG Jun-ling, et al. Research on level speed-limit problem in expressway construction area[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 150-156. (in Chinese)
- [13] 韩跃杰.高速公路改扩建作业区交通组织及安全保障技术研究[D].西安:长安大学,2012.
- HAN Yue-jie. Study of traffic organization and safety safeguard technique for freeway reconstruction and extension work zones[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [14] 孟祥海,史永义,王 浩,等.高速公路施工作业区车速分布特征及限速研究[J].交通运输系统工程与信息,2013,13(1): 149-155.
- MENG Xiang-hai, SHI Yong-yi, WANG Hao, et al. Speed distribution characteristics and speed limits of freeway work zones[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(1): 149-155. (in Chinese)
- [15] LIANG Guo-hua, WANG Feng-jing, WANG Wei, et al. Assessment of freeway work zone safety with improved cellular automata model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4): 261-271.
- [16] DU Bo, CHIEN S. Feasibility of shoulder use for highway work zone optimization[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4): 235-246.
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 陆 建,姜 军,叶海飞.普通公路路侧交通标志的遮挡与重复设置[J].西南交通大学学报,2011,46(6):1019-1024.
- 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): 1019-1024. (in Chinese)
- [20] 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)
- [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)