

基于信息熵的城市道路可变信息板布点方法

衣谢博闻, 唐克双, 李克平

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 针对城市道路环境下可变信息板单点选址与设计问题, 对交通标志视认过程进行了分析, 从可变信息板视认时间与布设环境两个方面对现有布设方法进行了改进. 通过引入可变信息板信息量-视认时间模型, 建立了城市环境下可变信息板前置距离模型和最小字体模型. 该模型可以确保驾驶员有充分的时间接受可变信息板发布的诱导信息, 并在接受信息后有充分的反应距离. 此外, 还给出建成可变信息板的评价方法和可变信息板前置距离与字体高度的推荐值.

关键词: 信息量模型; 可变信息板; 前置距离; 字体高度; 交通诱导系统

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

Location Optimization of Urban Variable Message Sign Based on Amount of Information

YI Xiebowen, TANG Keshuang, LI Keping

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Variable message sign (VMS), as an infrastructure of the urban traffic guidance system, is a main platform to release guidance information. Improper installation of VMS is incapable of information releasing, which has a negative effect on the performance of the urban traffic guidance system and traffic safety. Aiming at VMS design and location problem with urban traffic environment, the process of reading traffic sign was analyzed. With the consideration of VMS reading time and city traffic environment, the VMS installation model was built for calculating the VMS frontal distance and the height of characters in VMS. The amount of information model was constructed for evaluating the complexity of VMS and its reading time. In order to ensure that the driver has enough distance to react after accepting the information from the VMS, the queue length and no change lanes zone were also considered in the VMS installation model. In addition, the evaluation method for existing VMS and the recommended

frontal distance and the height of characters were given.

Key words: amount of information; variable message sign (VMS); frontal distance; height of characters; traffic guiding system.

交通诱导系统是智能交通系统(ITS)的重要组成部分, 通过对公众发布实时的交通运行信息和出行建议, 诱导公众合理选择出行路径, 从而有效地缓解交通拥堵, 提高交通系统的运行效率^[1]. 可变信息板作为交通诱导系统的主要发布方式之一, 以交通标志的形式设置在道路上, 通过 LED(light emitting diode)屏幕为驾驶员提供动态的诱导信息, 因此合理布设可变信息板, 确保驾驶员接受诱导信息是交通诱导系统正常运行的基本保证.

目前针对可变信息板布设的研究大都集中于系统层面, 研究路网环境下可变信息板的布设密度与布设路段^[2-4], 尚未有针对单点可变信息板布设位置的研究. 而单点交通标志布设位置的研究往往针对传统静态交通标志, 对交通标志的前置距离和字体高度进行建模, 确保交通标志的合理安装^[5-6]. 20 世纪 90 年代初, 李锋^[7]提出为了让驾驶员有足够的反应及采取措施的时间, 交通标志设置离开特定地点应有合理距离, 称为“设置前置距离”. 其他学者^[7-10]针对交通标志设置位置及影响因素进行了相关研究, 发现交通标志前置距离或字体高度选择不合理, 可能导致驾驶员无法完成信息获取, 或者迫使驾驶员减速以增加视认时间, 增加驾驶风险.

以上研究为可变信息板的科学安装奠定了基础, 但是仍存在两个局限: 一是未考虑可变信息板中动态信息的因素, 研究发现可变信息板在文字数量以及图像复杂度上都高于静态交通标志, 因此需要更多的视认时间^[11-12]. 二是以上研究未考虑城市交

收稿日期: 2018-07-04

基金项目: “十三五”国家科技支撑计划(2014BAG03B02)

第一作者: 衣谢博闻(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为智能交通系统. E-mail: 1310718@tongji.edu.cn

通信作者: 唐克双(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统. E-mail: tang@tongji.edu.cn

将32组测试单元随机排序,可获得一个测试方案。之后招募实验人员(30人次)分别完成不同的测试方案,即顺序逐个完成测试方案中所包含的测试单元。在单独的测试单元中,首先告知实验人员驾驶任务,在其明确驾驶任务后为测试人员展示可变信息板,并开始计时,直到实验人员确认行车路径后,停止计时并记录实验人员的行车路径。实验可以获得

不同可变信息板的视认时间、视认次数以及路径选择数据。将驾驶员路径选择数据带入公式(11)可以得到各类可变信息板的信息量,即4块诱导板针对不同驾驶任务的平均信息量分别为3.89、3.58、4.19和3.62 bit。实验结果表明,提出的信息量模型可以有效区分不同可变信息板之间的复杂程度^[22]。

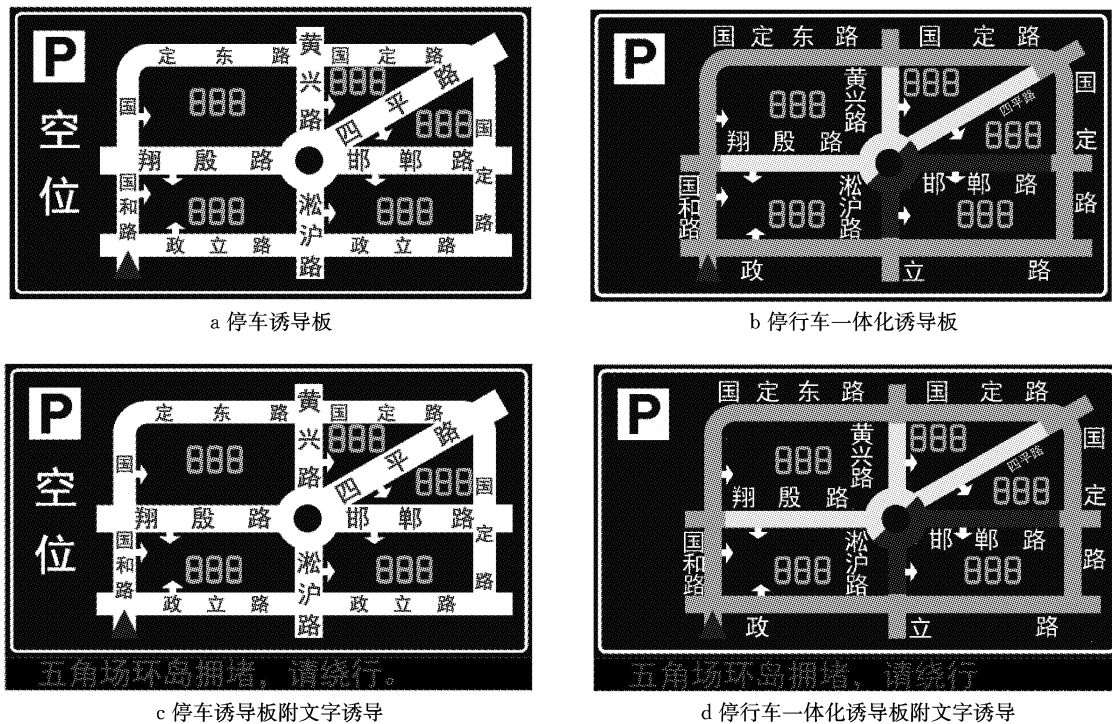


图3 用于信息量模型验证的可变信息板

Fig.3 VMS for amount of information model calibration

实验结果显示,驾驶员对于可变信息板的视认时间受到两种因素的显著影响,一是驾驶员对于诱导板的熟悉程度,二是诱导板信息量^[16]。因此本文采用双层线性模型对可变信息板视认时间、视认次数与信息量进行拟合,拟合模型的结构如下:

第一层模型为

$$\ln t_r = \alpha_0 - \alpha_1 \ln x_t + r \quad (12)$$

第二层模型为

$$\begin{cases} \alpha_0 = \gamma_{00} + \gamma_{01}(I) + u_0 \\ \alpha_1 = \gamma_{10} + \gamma_{11}(I) \end{cases} \quad (13)$$

式(12)、(13)中: t_r 为可变信息板视认时间; x_t 为驾驶员对于可变信息板的视认次数; γ_{00} 、 γ_{01} 、 γ_{10} 、 γ_{11} 为固定效应; I 为信息量; u_0 为随机效应。第一层模型为学习曲线模型,表达驾驶员熟悉程度对于视认时间的影响;第二层模型为信息量模型,表达信息量对于视认时间的影响。拟合结果如表1所示。

最终得到的信息量与视认时间的拟合模型为

表1 模型拟合结果

Tab.1 Result of intercepts and slopes mode			
参数	固定效应	参数估计	P 值
α_0	γ_{00}	1.522 349	0
	γ_{01}	-0.108 272	0.001
	γ_{10}	-0.543 799	0
α_1	γ_{11}	0.083 731	0.007

$$t_r = \exp(1.52 - 0.11I + (-0.54 + 0.08I) \ln x_t) \quad (14)$$

由式(14)可知,视认时间 t_r 随视认次数 x_t 增大而减小。因此当视认次数 x_t 取最小值1时,视认时间 t_r 为最大值。将公式(14)带入公式(8),最终得到基于可变信息板信息量的字体高度的计算公式为

$$h_c \geq \left(\exp(1.52 - 0.11I + (-0.54 + 0.08I) \ln x_t) v + \max\left(\frac{d}{\tan \beta_1}, \frac{h}{\tan \beta_2}\right) \right) / 200 \quad (15)$$

在计算最不利情况时, x_t 应取值1。

3 城市环境下行动距离计算

3.1 最小行动距离计算

可变信息板具有路径指引功能,因此驾驶员的行动内容应当包含变道行为和减速行为,即

$$l_4 = l_{ch} + l_{de} \quad (16)$$

式中: l_4 为车辆根据诱导信息完成相应交通任务需要的最小距离; l_{ch} 为车辆变道需求距离; l_{de} 为车辆减速需求距离. 汽车变换车道是一个复杂的行驶过程, 车流密度、行驶速度和道路条件都会对变道产生影响. 为保证 l_{ch} 计算结果有效, 需要选取最不利情况进行考虑, 即最长变换车道距离.

$$l_{ch} = (n_{lanes} - 1)L_{ch} \quad (17)$$

式中: n_{lanes} 为道路车道数; L_{ch} 为车辆单次变道需要的距离, 该距离发生在超越相邻车道上的汽车后变换到该车道的过程中. 具体计算如下:

$$L_{ch} = \frac{v_1}{3.6} T_{ch} \quad (18)$$

式中: v_1 为超车速度, 取路段最高限速 v_L ; T_{ch} 为变换 1 次车道的时间, s, 取 6.2~6.9 s^[23].

公式(16)中减速距离 l_{de} 的计算如下:

$$l_{de} = \frac{(v_i^2 - v_o^2)}{2a} \quad (19)$$

式中: v_i 为车辆的初速度; v_o 为行动完成后的车速; a 为车辆减速度. 按照最不利情况取值, 车辆初速度为道路最高限速 v_L , 车辆行动完成后速度为 0 km·h⁻¹.

3.2 可用行动距离计算

城市交通环境下可变信息板布设位置如图 4 所示.

由图 4 可知, 可变信息板前置距离 l_s 可表达为

$$l_s = l_v - l'_s \quad (20)$$

式中: l_v 为可变信息板安装位置与交叉口停车线之间的距离; l'_s 为限制行动距离, 表示受到交叉口不可变道标线和停车排队距离的影响, 驾驶行为受到限制. 因此 l'_s 存在两种情况, 即

(1) 排队长度大于不可变道距离, 如图 4a 所示, 此时不可行动距离为最长排队距离 l_q .

(2) 排队长度小于不可变道距离, 如图 4b 所示, 此时车辆在进入不可变道路段后仍可以进行减速行为, 因此需要在不可变道距离中去除减速距离.

综上所述, 受限制距离为

$$\begin{cases} l'_s = l_q, & l_q \geq l_N \\ l'_s = l_q, & l_q \leq l_N \text{ 且 } l_{de} \leq l_g \\ l'_s = l_q - l_{de}, & l_q \leq l_N \text{ 且 } l_{de} \geq l_g \end{cases} \quad (21)$$

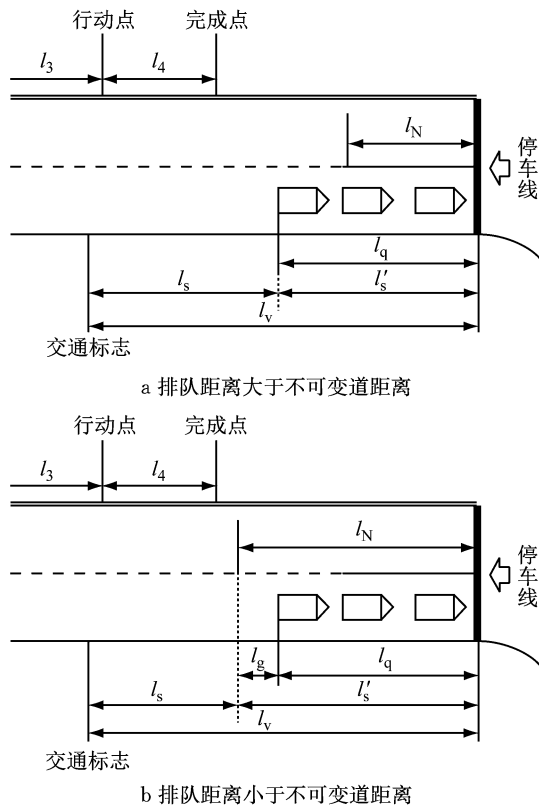


图 4 可变信息板安装位置示意图

Fig. 4 Demonstration of VMS location

式中: l_q 为排队距离; l_{de} 为减速距离; l_N 为不可变道距离; l_g 为不可变道距离与排队距离之间的差值, 即

$$l_g = l_N - l_q \quad (22)$$

其中交叉口排队距离 l_q 可以通过实地调查和公式计算两种方法获取. 排队距离公式计算分为两种情况, 即拥堵情况(有效绿灯时间内无法清空所有排队车辆), 和非拥堵状态(绿灯时间可以将排队车辆全部清空). 在拥堵情况下, 进口道排队长度随时间增加而不断增加, 此状态本文不做讨论. 在非拥堵情况下车辆排队长度为红灯时间内到达车辆数, 即

$$l_{q,k} = \frac{n_{q,k} L_q}{n_{lanes,k}} = \frac{q_k C (1 - u_k) L_q}{n_{lanes,k}} \quad (23)$$

$$l_q = \max\{l_{q,k}\} \quad (24)$$

式中: $l_{q,k}$ 为第 k 个绿灯相位对应的最大排队长度; $n_{lanes,k}$ 为第 k 个绿灯相位对应的排队车道数; L_q 为排队车辆的平均车头间距; C 为交叉口的信号总周期时长; u_k 为第 k 个绿灯相位的有效绿灯时间; l_q 为最大排队长度. 在实际计算中也可以根据 HCM2010 中的调查方法, 取 95% 分位排队长度做 l_q .

综上所述, 将以上公式带入公式(9), 整理后获得可变信息板安装位置计算公式为

$$l_v \geq v_L (t_r + t_{th}) + (n_{lanes} - 1) L_{ch} + \frac{v_1 T_{ch}}{3.6} + l'_s - 200 h_c \quad (25)$$

4 模型应用与分析

城市可变信息板布点模型可以应用于:①对已建成的可变信息板检验;②为拟建的可变信息板提供设计参考。

4.1 已建可变信息板检验

对于已建成可变信息板的评价主要分为两部分:①可变信息板字体高度是否满足视认需求;②可变信息板前置距离是否能为驾驶员提供足够的行动

距离。

本算例研究的可变信息板为一块一级停车、行车一体化诱导板,位于上海市杨浦区国定路由南至北段。该诱导板的具体位置与样式如图5所示。根据实际调查得到可变信息板所在路段的限速为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,可变信息板北段道路为两车道,南段道路为单车道。可变信息板为悬臂式,离地高度为 4.50 m 。信息板宽度为 3.12 m ,字体高度为 0.30 m 。已建可变信息板检验过程如下:

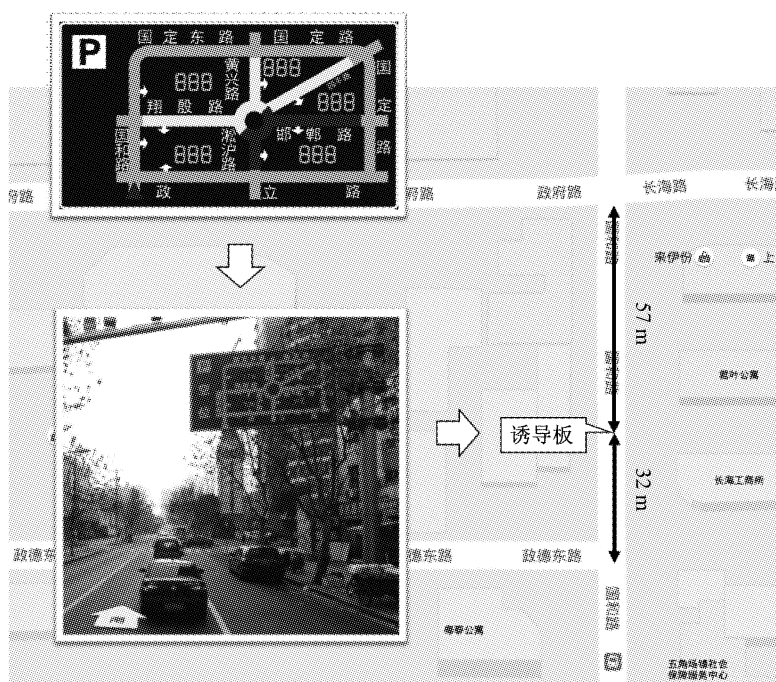


图5 可变信息板

Fig.5 VMS

(1) 字体高度检验

字体高度检验即判断可变信息板提供的可视认距离是否满足可变信息板需要的视认距离。

可变信息板可视认距离计算:可变信息板的可视认距离为可变信息板最大可视认距离减去不可视认距离,如公式(7)所示。其中最大可视认距离由可变信息板字体高度决定,根据公式(3)计算,即 $l_5 = 200h_c = 200 \times 0.3 \text{ m} = 60 \text{ m}$ 。由于可变信息板距离上游交叉口小于 60 m ,因此可变信息板最大视认距离取到达上游交叉口距离,即最大可视认距离为 57.00 m 。可变信息板的不可视认距离由公式(4)、(5)、(6)求得。通过计算得到水平可变信息板不可视认距离为 18.66 m ,垂直不可视认距离为 11.18 m ,即可变信息板在驾驶员视野中消失距离为可变信息板前 18.66 m 。最终根据公式(7),得到可变信息板

的可视认距离为 38.34 m 。

可变信息板视认距离需求计算:算例可变信息板为一块一级停车、行车诱导板。根据之前实验结果,得到其最大信息量为 3.58 bit 。因此可以根据公式(14)得出该可变信息板的视认时间为 3.11 s 。将视认时间和可变信息板设置路段最高限速($40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)带入公式(1),可以得到需要的视认距离为 $l_2 = t_r v_L = 3.11 \text{ s} \times \frac{40}{3.6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 34.56 \text{ m}$ 。

此时,可变信息板提供的可视认距离(38.34 m)大于该可变信息板视认距离需求(34.56 m)。因此该可变信息板字体高度设置满足视认需求,可以为驾驶员提供足够的视认时间。

(2) 前置距离检验

前置距离检验即判断可变信息板是否为驾驶员提供充足的可行动距离。

可行动距离计算:可变信息板可行动距离为可变信息板消失点到交叉口停车线之间的距离,减去驾驶员判断距离与限制行动距离.本算例中,可变信息板视认消失点与布设点之间的距离为 18.66 m,可变信息板布设点与交叉口停车线之间的距离为 32.00 m,因此可变信息板消失点到交叉口距离为 40.66 m.驾驶员判断距离可根据公式(2)计算得到,即 $l_3 = vt_{th} = 22.22$ m.限制行动距离由交叉口不可变道距离和排队距离共同决定.本算例中,可变信息板设置的进口道仅有一条车道,无不可变道距离.排队距离通过实地调查获得为 10 m(对于无法调查的可变信息板,可以根据公式(23)和公式(24),即限制行动距离为 10.00 m.最终得到可行动距离为 $40.66 \text{ m} - 22.22 \text{ m} - 10.00 \text{ m} = 8.44 \text{ m}$.

行动需求距离计算:行动需求距离即最小行动

距离,由最小变道距离与减速距离组成.由于本算例为单车道,不涉及变道需求,因此最小行动距离即减速距离,根据公式(19)得到最小行动距离为 7.71 m.

此时,算例可变信息板提供的可行动距离(8.44 m)大于最小行动距离(8.44 m).因此该可变信息板的设置满足行动需求.

4.2 拟建可变信息板设计推荐值

假设可变信息板的信息量取值为 4(当可变信息板信息量大于 4 时,建议修改可变信息板版面设计降低信息量),车道宽度为 3.25 m,悬臂式与门架式可变信息板的高度为 4.50 m,可变信息板宽度为 3.12 m,交叉口最大排队长度为 50 m,汽车减速度为 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.根据本文提供模型,计算获得可变信息板字体高度与前置距离的推荐值见表 2(对比标准为 GB5768.2—2009 道路交通标志与标线).

表 2 可变信息板布设推荐值

Tab.2 Recommend value for VMS installation

车道数	道路限速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	模型推荐字体高度/m	标准推荐前置距离/m	模型推荐前置距离/m	标准推荐前置距离/m
2	30	≥ 0.35	0.25~0.30	$\geq l_q + l_N - 16$	*
	40	≥ 0.40	0.35~0.50	$\geq l_q + l_N - 7$	*
	50	≥ 0.40	0.35~0.50	$\geq l_q + l_N + 4$	*
	60	≥ 0.45	0.35~0.50	$\geq l_q + l_N + 15$	30
	70	≥ 0.50	0.50~0.60	$\geq l_q + l_N + 27$	50
	80	≥ 0.55	0.50~0.60	$\geq l_q + l_N + 40$	80
3	30	≥ 0.35	0.25~0.30	$\geq l_q + l_N - 23$	*
	40	≥ 0.40	0.35~0.50	$\geq l_q + l_N - 14$	*
	50	≥ 0.45	0.35~0.50	$\geq l_q + l_N - 4$	*
	60	≥ 0.50	0.35~0.50	$\geq l_q + l_N + 7$	30
	70	≥ 0.55	0.50~0.60	$\geq l_q + l_N + 20$	50
	80	≥ 0.60	0.50~0.60	$\geq l_q + l_N + 33$	80

注: * 为不提供具体建议值.

从表 2 可以发现:①本文模型得到的推荐字体高度均大于规范推荐的最小字体高度.更大的字体高度,可以为驾驶员提供更长的视认距离和视认时间,从而确保驾驶员对可变信息板的有效视认.②本文模型得到的推荐字体高度随车道数的增加而增高,以确保内侧车道驾驶员的有效视认.③规范给出的推荐前置距离易于实际操作,而本文模型给出的推荐前置距离综合了更多影响因素,以应对城市区域复杂的交通环境,更具指导意义.

5 结论

本文从交通标志视认过程的分析入手,针对可变信息板信息量大以及城市交叉口的布设环境,引入了可变信息板信息量模型,并建立了基于信息量的城市可变信息板最小前置距离和字体高度模型.

该模型可用于对已建成可变信息板进行校验,或为设计阶段的可变信息板设置提供指导.最后通过对比本文计算的建议值与国家标准给出的推荐值,发现本文提出的算法更符合城市路网环境复杂以及可变信息板信息量大的特性.对现有可变信息板的设计标准进行了补充.

参考文献:

- [1] ZHONG Shiquan, ZHOU Lizhen, MA Shoufeng, *et al.* Effects of different factors on drivers' guidance compliance behaviors under road condition information shown on VMS [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46 (9): 1490.
- [2] LI Meng, LIN Xi, HE Fang, *et al.* Optimal locations and travel time display for variable message signs [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 69(1): 418.

- [3] HENDERSON J. A planning model for optimizing locations of changeable message signs [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2004.
- [4] CHIU Y C, HUYNH N, MAHMASSANI H S. Determining optimal locations for variable message signs under stochastic incident scenarios [C/CD] // Transportation Research Board 80th Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2001.
- [5] 王跃辉,彭国雄. 指路标志设置位置的研究[J]. 道路交通与安全, 2004, 1(1): 26.
WANG Yuehui, PENG Guoxiong. Research on location of traffic signs [J]. Road Traffic & Safety, 2004, 1(1): 26.
- [6] 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.
YUN Meiping, LIU Bin, YANG Xiaoguang. Model on location optimization of traffic sign based on lane choice behavior [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(5): 627.
- [7] 李峰. 我国高等级公路交通标志及其设置的研究[J]. 人类工效学, 1995, 1(2): 18.
LI Feng. Traffic signs and its installation on high-grade highway in China [J]. Chinese Journal of Ergonomics, 1995, 1(2): 18.
- [8] 刘浩学. 公路交叉口交通标志设置的工效学分析[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(3): 100.
LIU Haoxue. Ergonomics of intersection traffic signal installation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(3): 100.
- [9] 李爱增,李文权,王炜. 城市快速路出口标志位置设置研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 19(5): 36.
LI Aizeng, LI Wenquan, WANG Wei. Research on position of traffic sign on urban expressway off-ramp [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 19(5): 36.
- [10] ERKE A, SAGBERG F, HAGMAN R. Effects of route guidance variable message signs (VMS) on driver behavior [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 2007, 10(6): 447.
- [11] NYGAARDHS S. Literature review on variable message signs (VMS) 2006—2009 [R]. Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 2011.
- [12] ANUND A, AHLSTRÖM C, ALMQVIST S, *et al.* Evaluation of local ITS solutions in urban areas [R]. Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 2009.
- [13] 林雨,潘晓东,方守恩. 交通标志的视角阈值研究[J]. 公路, 2005, 7(1): 142.
- LIN Yu, PAN Xiaodong, FANG Shouen. Research on the visual threshold of traffic signs [J]. Highway, 2005, 7(1): 142.
- [14] LEE C, ABDEL-ATY M. Testing effects of warning messages and variable speed limits on driver behavior using driving simulator [J]. Transportation Research Record, 2008, 2069(1): 55.
- [15] RICHARDS A, MCDONALD M. Questionnaire surveys to evaluate user response to variable message signs in an urban network [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2007, 1(3): 177.
- [16] CHATTERJEE K, HOUNSELL N B, FIRMINP P E, *et al.* Driver response to variable message sign information in London [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10(2): 149.
- [17] WARDMAN M, BONSALE P W, SHIRES J D. Driver response to variable message signs: a stated preference investigation [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1997, 5(6): 389.
- [18] ULLMAN B R, ULLMAN G L, DUDEK C L, *et al.* Driver understanding of sequential portable changeable message signs in work zones [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2015(1): 28.
- [19] DUDEK C L, SCHROCK S D, ULLMAN B R. License plate and telephone numbers in changeable message sign amber alert messages [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2012(1): 64.
- [20] KIM T, KIM T T, OH C, *et al.* Evaluation of causal factors affecting drivers' reading time on variable message signs [C/CD] // Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2014.
- [21] KIM Taehyung, OH cheol, YEON J Y, *et al.* Estimation of message reading time for variable message signs [C/CD] // Transportation Research Board 88th Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2009.
- [22] YI Xiebowen, TANG Keshuang, SUN Jian, *et al.* A generalized assessment model for the amount of information of variable message signs [C/CD] // 15th International Conference of Transportation Professionals. Beijing: Transportation Research Board, 2014.
- [23] 郭文莲. 城市道路车辆变道安全距离模型研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
GUO Wenlian. Research on safety distance model of urban road vehicle lane change [D]. Changsha: Institutes of Technology of Changsha, 2009.