

DOI:10.11918/201906022

高速公路改扩建的渐变安全限速设置方法

程国柱¹,程 瑞¹,薛长龙²,刘兴旺³

(1.东北林业大学 交通学院,哈尔滨 150040; 2.吉林省高等级公路建设局,长春 130033;
3.北京中交华安科技有限公司,北京 100088)

摘 要:为保障高速公路改扩建过程中的施工安全和行车安全,开展改扩建作业区上游限速标志的设置研究,基于驾驶人白天和夜间行车过程中的视觉特性和制动特性,构建驾驶人视认距离模型及限速标志前置距离模型,提出一种高速公路作业区昼夜渐变限速标志间距计算方法,并将该方法应用于珲乌高速公路吉林至龙嘉机场段改扩建工程中.最后利用基于运动学的计算方法得到了不同限速标志间的车辆平均减速度特性.研究结果表明:随着限速标志限速值的增大,相邻限速标志的昼夜设置间距随之增大,二者呈正线性相关,且夜间限速标志设置间距大于白天限速标志设置间距;随着限速标志限速值的减小,车辆昼夜平均减速度随之减小,二者近似呈正线性相关,且夜间平均减速度小于白天平均减速度.设置间距值符合驾驶人行车减速过程中的心理生理特征,证实了所构建的间距计算模型的合理性.

关键词:交通工程;高速公路;改扩建作业区上游;昼夜渐变限速标志;设置间距;视觉特性

中图分类号: U491.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)09-0185-08

Setting of gradient speed limit for safety in freeway reconstruction and extension

CHENG Guozhu¹, CHENG Rui¹, XUE Changlong², LIU Xingwang³

(1. School of Traffic and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Jilin Provincial High Class Highway Construction Bureau, Changchun 130033, China;
3. Beijing Zhong Jiao Hua An Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: To guarantee the construction safety and traffic safety in the process of freeway reconstruction and extension, the setting of speed limit signs at the upstream of reconstruction and extension work zone was studied. Based on the analysis of the visual characteristics and braking characteristics of drivers in the process of driving in daytime and nighttime, the model of driver's visual distance and the model of advance distance of speed limit sign were built, and a method for calculating the spacing of gradient speed limit signs at the upstream of work zone was proposed, which was then applied to the reconstruction and extension work zone in Jilin to Longjia Airport section of Huiwu Freeway. In the end, based on kinematics calculation method, the vehicle mean deceleration characteristics between different speed limit signs were obtained. Results show that with the increase of the values of speed limit, the spacing of adjacent speed limit signs in daytime and nighttime increased, which were positively linear correlated, and the spacing of speed limit signs in nighttime was greater than that in daytime. With the decrease of the values of speed limit, the mean deceleration of the vehicle in daytime and nighttime decreased, which were approximately in a positive linear correlation, and the mean deceleration in nighttime was less than that in daytime. The setting of spacing accorded with the psychological and physiological characteristics of drivers during the process of driving deceleration, which proves the rationality of the proposed calculation model for spacing.

Keywords: traffic engineering; freeway; upstream of reconstruction and extension work zone; gradient speed limit signs in daytime and nighttime; spacing; visual characteristics

高速公路改扩建工程引起的行车条件恶化导致交通事故频发.据相关数据统计,发生在高速公路作业区的交通事故占事故总数的 2%~3%,受伤、死亡事故数比正常路段高约 17.3%,而夜间交通事故

死亡率是白天的 2.5 倍^[1],且事故原因多为超速行驶,因此有必要在高速公路作业区设置限速标志.与高速公路一般施工作业不同,由于改扩建工程工期长且施工复杂,使得路侧设置的交通标志多而繁杂,行车环境也更为恶劣,导致驾驶人难以从大量交通信息中发现限速信息.另外,由于改扩建工程中严格的车速限制导致车速骤降,更易造成追尾事故.因此设置在改扩建作业区的限速标志不仅要能够及

收稿日期: 2019-06-04
基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金(18YJAZH009);
吉林省交通运输科技项目(2018ZDGC-3)
作者简介: 程国柱(1977—),男,教授,博士生导师
通信作者: 程国柱, guozhucheng@126.com

时、有效地提醒驾驶人安全行车,更要从人机工程学角度考虑位置设置的科学性、合理性. 若限速标志设置过于密集,不仅增加了施工成本,而且会对驾驶人造成视觉负担;若限速标志设置太稀疏,就达不到提示驾驶人安全降速的目的. 渐变限速标志通过对限速标志的连续设置,可以实现逐级限速,这样不仅能够保证驾驶人及时发现限速信息,而且考虑了速度降低的连续性和过渡性,保证了车辆安全平稳降速,能够有效减少追尾事故的发生. 中国《道路交通标志和标线》^[2]规定:养护作业控制区的逐级限速标志可按照每 200 m 降低 20 km/h 的方式设置. 上述规定只给出了限速标志设置间距的一般取值,并没有针对不同限速值的渐变限速标志间距进行量化分析.

国外主要开展限速标志的识别及限速系统整体优化研究,文献[3]通过虚拟驾驶试验,验证了重复设置限速标志能够有效地控制车速,强调了在某些特殊路段重复设置限速标志的必要性. 文献[4]通过建立双层规划模型并结合具体的案例分析,得到了高速公路作业区合理的限速值及可变限速标志的设置方案. 文献[5]通过遗传算法对高速公路可变限速系统进行优化分析,证实了优化后的可变限速系统能保障高速公路的安全畅通. 文献[6-8]为了提高恶劣天气条件下的行车安全,先后开展了夜间和大雾条件下限速标志的识别方法研究.

国内对于限速标志的前置距离以及限速值重复设置间距的研究较多,文献[9]基于驾驶人的视觉特性以及信息短时记忆特性建立了最小前置距离计算模型,确定了路侧限速标志的最佳设置位置. 文献[10]通过实车试验,给出了城市道路人行横道处夜间限速标志前置距离建议值. 文献[11]建立了驾驶人短期记忆衰减规律指数模型,给出高速公路限速标志重复设置的合理间距. 相对于重复设置的限速标志,渐变限速标志具有良好的过渡性、稳定性,容易被驾驶人所接受. 因此,文献[12]通过 VISSIM 仿真软件对多种渐变限速方案实施了效果评价. 文献[13]通过现场试验,证实了渐变限速优化后的交通标志能够有效降低车速.

综上所述,目前国内外涉及到渐变限速标志设置间距的研究较少. 另外,由于夜间复杂的行车条件会影响驾驶人的视线,导致视认能力变差,使得夜间事故风险率高于白天,因此有必要开展夜间限速标志设置间距的研究. 为此,本文以前人的研究为基础,从驾驶人昼夜行车过程中的视认性角度出发,并结合驾驶人制动特性,进一步开展高速公路改、扩建作业区昼夜渐变限速标志的设置间距研究. 研究

成果有助于提高高速公路改扩建作业区上游的行车安全性和稳定性,为今后高速公路相关作业规程的修订提供了一定的理论依据.

1 驾驶人昼夜视认性分析

无论白天还是夜晚,驾驶人在驾车过程中,面临着复杂的行车环境及各种交通信息和指示,只有获得及时的视觉信息和有效的肢体反应,才能顺利完成各种操作. 另外,由于驾驶人精力不集中或者观察不及时可能导致驾驶人没能看到限速标志或者减速发生滞后,为了确保驾驶人能够有效获取减速信息并顺利减速,驾驶人读取路侧限速标志的视认过程(如图 1 所示)可描述为:驾驶人行驶至 A 点发现限速标志 F 点并开始读取,直到 C 点读完,在读取标志的过程中,驾驶人准备采取制动措施并从 B 点开始制动,随着车辆前进,标志点 F 会消失在驾驶人视野中,此时对应消失点 E,整个制动过程直到 D 点完成. 其中 L_{AF} 为驾驶人的视认距离, L_{AB} 为制动反应距离, L_{BD} 为制动距离, L_{DF} 为标志的前置距离, L_{EF} 为标志的消失距离.

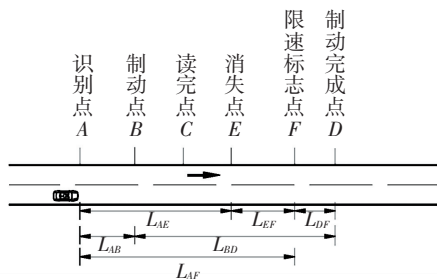


图 1 视认过程

Fig.1 Visual cognition process

1.1 驾驶人视认距离

驾驶人实际驾车过程中,行驶至路段某一位置时可以发现前方的路侧标志,那么此时车辆至前方路侧标志的距离称为视认距离,视认距离包括读取距离和识别距离. 驾驶人在读取标志的时间段内车辆行驶的距离为读取距离;驾驶人识别限速值后,车辆至限速标志的距离为识别距离. 其中,读取距离为

$$L_{AC} = \frac{V_0}{3.6} t_1 \quad (1)$$

式中: t_1 为读取标志时间, s; V_0 为车辆行驶速度, km/h.

驾驶人读取标志的时间主要受光照强度的影响,通过相关试验结果^[14]分析可得,当光照强度大于 500 lx,即白天条件下,驾驶人读取标志的时间约为 1.4~3.1 s;当光照强度小于 100 lx,即夜间条件下,驾驶人读取标志的时间约为 2.4~3.4 s. 为了从

安全角度考虑, 计算时均取上限值。

假设车辆行驶在单向双车道外侧车道上, 构建的限速标志识别距离计算模型为

$$L_{CF} = \frac{\sqrt{I^2 + S^2}}{\tan \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sqrt{(h_1 + h_2 + R - h_3)^2 + (R + m + W/2)^2}}{\tan \frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

式中: I 为限速标志中心点与驾驶人视线高差, m; S 为限速标志与驾驶人的横向距离, m; h_1 为限速标志下边缘离地高度, m; h_2 为路肩高度, m, 取 0.2 m; R 为限速标志半径, m; h_3 为驾驶人的视高, m, 取 1.2 m; m 为限速标志内边缘距离最外侧行车道的距离, m; W 为行车道宽度, m; α 为驾驶人视野范围, ($^\circ$)。计算原理如图 2 所示。

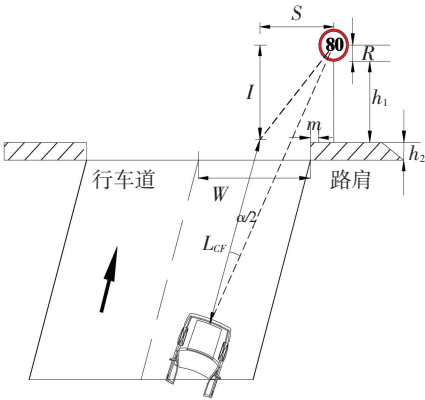


图 2 识别距离计算原理

Fig.2 Calculation principle of identification sign distance

路侧限速标志通常采用圆形结构, 根据中国《道路交通标志和标线》^[15] 的规定: 圆形结构标志半径 R 一般为 0.5 m, 柱式标志下边缘离地高度为 1.5 ~ 2.5 m, 标志内边缘距离最外侧行车道不小于 0.25 m。考虑到限速标志可能会被其他车辆遮挡, 为了确保驾驶人能够及时发现限速标志, 标志应尽可能设置在较高位置, 且不宜距离车道太远, 故本研究采用标志下边缘最大离地高度为 2.5 m, 以及标志内边缘距最外侧行车道最小距离为 0.25 m。

由人体工程学可知, 车辆在白天高速行驶状态下, 由于近处物体在眼前快速闪过而难于认清, 驾驶人会倾向性地关注远方物体, 因此导致视线变长、视野范围变窄。根据文献^[16]研究成果可得, 驾驶人白天视野范围一般随车速变化而改变, 当车速分别为 40、60、80、100、120 km/h 时, 对应白天视野范围 α' 分别为 100° 、 86° 、 60° 、 40° 、 22° 。实际上, 车辆在

白天行驶过程中, 驾驶人为了兼顾路面状况, 其视野范围往往小于上述值, 并且研究认为驾驶人视锥边缘处的认读能力极差, 为了正确辨识路侧交通标志, 驾驶人最理想的视野范围为 30° ^[17]。因此, 当车辆在低速行驶状态下, 视野范围大于 30° 时, 计算时取 30° ; 视野范围小于 30° 时, 计算时取实际视野范围。

车辆在夜间行驶过程中, 由于驾驶人的视力受到影响, 驾驶人会倾向性地关注近处物体, 因此导致视线变短、视野范围变宽。驾驶人主要借助车辆开启的灯光观察周围路况, 因此驾驶人的视野范围主要取决于车灯开启的几何可见度。通常远光灯几何可见度 α_1 、 $\alpha_2 \geq 5^\circ$, 近光灯几何可见度 $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 10^\circ$ ^[18]。驾驶人进入作业区之前, 随着交通指示信息的增多, 需要时刻注意周围行车条件的不断变化, 应开启近光灯。由此可近似计算夜间驾驶人驾车过程中的视野范围为

$$\alpha'' = 180^\circ - 2(90^\circ - \alpha_1) \quad (3)$$

式中 α_1 为车辆外侧车灯的几何可见度, ($^\circ$)。计算原理如图 3 所示。

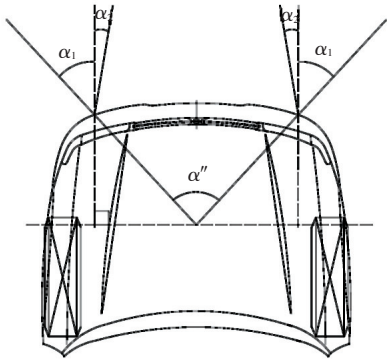


图 3 驾驶人夜间视野范围计算原理图

Fig.3 Calculation principle of visual field of driver in nighttime

1.2 限速标志前置距离

为了保证车辆行驶至道路某一位置时能够减速到规定的限速值, 限速标志应设置在该位置之前的一定距离处, 这个距离称为限速标志前置距离 L_{DF} 。为了保证驾驶人在限速标志消失之前, 能够发现限速标志, 根据图 1 所示的视认过程, 需满足: $L_{AE} = L_{AB} + L_{BD} - L_{EF} - L_{DF} \geq 0$, 即 $L_{DF} \leq L_{AB} + L_{BD} - L_{EF}$ 。由关系式可知, 限速标志前置距离取决于限速标志消失距离、驾驶人制动反应距离和制动距离。

1.2.1 限速标志消失距离

当车辆行驶到距离限速标志牌某一点处时, 标志将消失在驾驶人的视野中, 这一点为标志的消失点, 消失点到标志的距离即为限速标志消失距离。通常认为只有当限速标志的下边缘从驾驶人的视野中消失

时,限速标志才完全消失. 因此,基于限速标志识别距离模型,可以推算出限速标志消失距离模型为

$$L_{EF} = \frac{\sqrt{M^2 + S^2}}{\tan \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sqrt{(h_1 + h_2 - h_3)^2 + (R + m + W/2)^2}}{\tan \frac{\alpha}{2}}. \quad (4)$$

式中 M 为驾驶人视线与限速标志标志下边缘的垂直距离, m . 为了更好地与识别距离模型区分开,图 4 给出了消失距离与识别距离的计算简图.

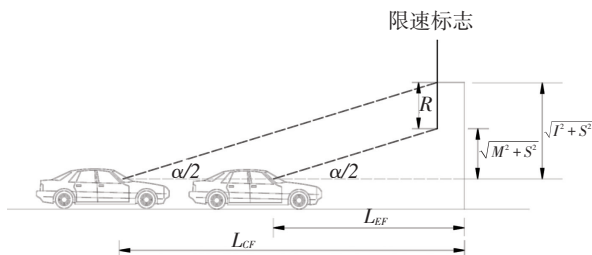


图 4 消失距离与识别距离计算简图

Fig. 4 Calculation of disappearing distance and identification distance

1.2.2 驾驶人制动反应距离

当发现前方有限速标志时,驾驶人需要经过对前方物体识别、判断决策、右脚对加速踏板、制动踏板的转换操作及车辆逐渐产生制动力等过程,在上述过程中车辆所行驶的距离即为制动反应距离,计算公式为

$$L_{AB} = \frac{V_0}{3.6} t_2. \quad (5)$$

式中 t_2 为制动反应时间, s.

由于驾驶人白天和夜间驾车过程中的身体机能不同,心生理变化规律不一致,导致制动反应时间不一样. 大部分研究认为,驾驶人的制动反应时间随着车速、驾驶人疲劳程度和年龄的增加而增大,一般低于 2 s. 为了从安全角度考虑,计算时白天制动反应时间取 2 s; 考虑到夜间驾驶人容易疲劳,其疲劳程度可用觉醒水平来描述. 由于人的反应时间与觉醒水平呈正相关,可通过驾驶人昼夜相对觉醒水平和白天制动反应时间计算夜间制动反应时间,计算公式为

$$t_2'' = m t_2'. \quad (6)$$

式中: t_2' 为白天制动反应时间, s; t_2'' 为夜间制动反应时间, s; m 为驾驶人夜间制动反应时间修正系数平均值.

文献[19]给出了夜间不同时间段的驾驶人制动反应时间修正系数,当夜间时段分别为 18:00—

21:00、21:00—24:00、00:00—03:00 和 03:00—06:00 时,对应修正系数分别为 0.9、1.1、1.3 和 1.5,由此可得修正系数平均值 m 为 1.2,进而求得夜间制动反应时间为 2.4 s.

1.2.3 驾驶人制动距离

当驾驶人对车辆开始制动,随着制动力上升,车辆减速度逐渐增大,在 t_3 时刻达到最大减速度 $a_{\max}$,随后 $a_{\max}$ 保持不变,车辆在 t_3 — t_4 时段内进行全制动. 整个制动过程如图 5 所示.

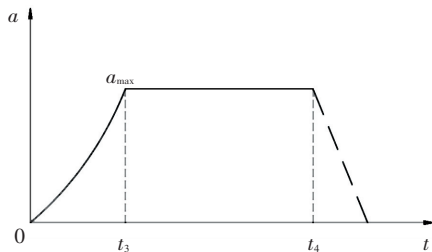


图 5 车辆减速度变化过程

Fig. 5 Variation of vehicle deceleration

由于 0— t_3 时段内的车辆减速度时刻处于变化的状态,难以利用一般的运动学公式进行求解. 为此,根据文献[20]的研究成果, 0— t_4 时间段内的车辆制动距离为

$$L_{BD} = \frac{V_0}{7.2} t_3 + \frac{V_0^2 - V^2}{2 \times 3.6^2 \times a_{\max}}. \quad (7)$$

式中: t_3 为制动力上升时间, s, 取 0.2 s; V 为限速标志限速值, km/h; $a_{\max}$ 为车辆最大减速度, m/s^2 , 取 $3.4 m/s^2$ [21].

通过构建限速标志消失距离、驾驶人制动反应距离和制动距离模型,整理得到限速标志前置距离计算模型为

$$L_{DF} \leq \frac{V_0}{3.6} t_2 + \frac{V_0}{7.2} t_3 + \frac{V_0^2 - V^2}{25.92 a_{\max}} - \frac{\sqrt{M^2 + S^2}}{\tan \frac{\alpha}{2}}. \quad (8)$$

2 渐变限速标志设置间距计算

根据中国《道路交通标志和标线》[2]的规定,高速公路改扩建作业区分为警告区、上游过渡区、缓冲区、工作区、下游过渡区和终止区,其中警告区、上游过渡区和缓冲区较其他区域更容易发生交通事故,通常认定为事故多发区,这里统称为作业区上游,如图 6 所示. 为了保证车辆安全平稳地经过施工作业区,作业区上游均应设置限速标志. 由于渐变限速标志考虑到了速度降低的连续性和过渡性,更容易被驾驶人所接受. 因此,本文主要针对高速公路改扩建作业区上游进行昼夜渐变限速标志的设置间距研究.

2.1 基于运动学的计算方法

假设车辆在两个相邻的限速标志之间保持均减速直线运动,可利用运动学公式计算限速标志间距为

$$x = \frac{V_{11}^2 - V_{22}^2}{2a} \tag{9}$$

式中: x 为限速标志设置间距, m; V_{11} 为第 1 个限速值, m/s; V_{22} 为第 2 个限速值, m/s; a 为车辆减速度, m/s², 取值需根据驾驶人视认特征分析来获取。

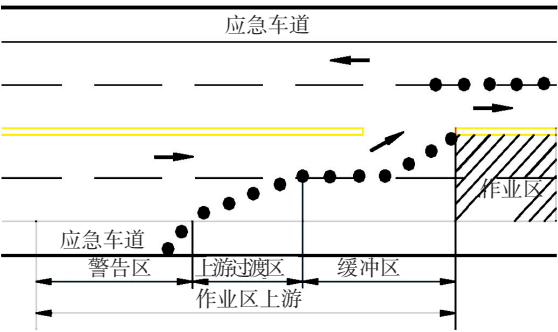


图6 作业区上游示意图

Fig.6 Schematic diagram of upstream of work zone

2.2 基于驾驶人特性的计算方法

考虑到驾驶人在行车过程中要源源不断地接受各种交通指令和路况信息,同时视线也会受到道路环境的干扰,因此限速标志空间位置的设置应符合驾驶人行车过程中的视认规律。基于对驾驶人昼夜视觉特性以及视认过程的分析,本文提出了一种高速公路作业区渐变限速标志间距的计算方法,计算步骤如下所述,计算原理如图 7 所示。

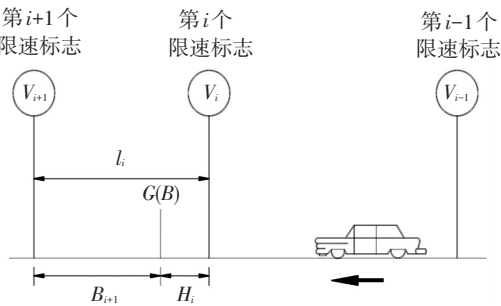


图7 计算方法原理图

Fig.7 Schematic diagram of calculation method

设第 i 个限速标志和第 $i + 1$ 个限速标志的间距为 l_i , 对应的限速值分别为 V_i 和 V_{i+1} ($V_i > V_{i+1}$)。如果车辆以速度 V_{i-1} 驶过第 $i - 1$ 个限速标志, 首先根据式(8) 计算第 i 个限速标志的前置距离 H_i 。此刻车辆行驶至 G 点的速度值应为 V_i , 这时认为驾驶人已经发现前方第 $i + 1$ 个限速标志, 记为点 B (B 点和 G 点重合)。于是对驾驶人关于第 $i + 1$ 个限速标志的视认距离可根据式(1)、(2) 进行求解, 即读取点 B 至第 $i + 1$ 个限速标志的距离 B_{i+1} 。由此可得间距

l_i 的计算方法为

$$l_i = H_i + B_{i+1} = \frac{V_{i-1}}{3.6}t_2 + \frac{V_{i-1}}{7.2}t_3 + \frac{V_{i-1}^2 - V_i^2}{2 \times 3.6^2 \times a_{\max}} - \frac{\sqrt{M^2 + S^2}}{\tan \frac{\alpha}{2}} + \frac{V_i}{3.6}t_1 + \frac{\sqrt{I^2 + S^2}}{\tan \frac{\alpha}{2}} \tag{10}$$

3 实例应用

3.1 工程概况

珲乌高速公路吉林至龙嘉机场段高速公路(G12)改扩建工程全长 63.247 km。施工组织采用半幅通车半幅施工的交通组织方式。施工道路原为双向四车道,路基宽度为 34.5 m,中央分隔带宽度为 10.5 m,左侧路缘带宽度为 2×0.75 m,行车道宽度为 2×2×3.75 m,硬路肩宽度为 2×3.00 m,土路肩宽度为 2×0.75 m,设计速度为 120 km/h。本次对现有高速公路中央分隔带预留的两车道进行恢复建设,形成完整的设计速度为 120 km/h 的双向六车道高速公路,路基宽度维持原有路基宽度。

3.2 限速标志设置

为了减小事故损失,保证工程施工作业顺利进行。根据项目的交通组织方案,施工作业区上游应进行区段降速设置。根据《道路交通标志和标线》^[2] 中关于作业区最终限速值的规定,设定作业区上游限速值为 40 km/h,限速标志采取递减量为 10 km/h 的方式设置,具体限速值分布情况如图 8 所示。为避免驾驶人视线被相邻车道的车辆遮挡而未能及时发现限速标志,道路两侧均应同步设置限速标志,即位于内侧车道行驶的驾驶人主要关注中央分隔带处的限速标志,位于外侧车道行驶的驾驶人主要关注外侧车道边缘处的限速标志。

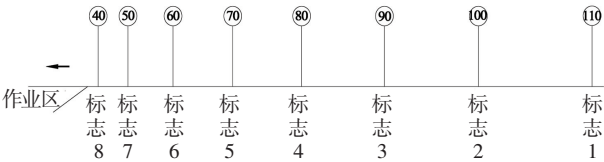


图8 作业区上游限速值分布图

Fig.8 Distribution of speed limit values at upstream of work zone

3.2.1 白天作业区上游限速标志间距计算

根据式(8) 计算距离作业区最近的限速标志的前置距离为 28 m,根据式(10) 计算各个限速标志之间的距离分别为: $l_7 = H_7 + B_8 = 92$ m; $l_6 = H_6 + B_7 = 108$ m; $l_5 = H_5 + B_6 = 125$ m; $l_4 = H_4 + B_5 = 142$ m; $l_3 = H_3 + B_4 = 158$ m; $l_2 = H_2 + B_3 = 175$ m。对于 l_1 的计算,本文认为车辆以最高限速为 120 km/h 的速

度进入减速路段,由此可得: $l_1 = H_1 + B_2 = 192\text{ m}$.

3.2.2 夜间作业区上游限速标志间距计算

同理,根据式(8)得到距离作业区最近的限速标志的前置距离为 39 m,根据式(10)得到各个限速标志之间的距离分别为: $l_7 = 102\text{ m}$ 、 $l_6 = 120\text{ m}$ 、 $l_5 = 139\text{ m}$ 、 $l_4 = 158\text{ m}$ 、 $l_3 = 176\text{ m}$ 、 $l_2 = 195\text{ m}$ 、 $l_1 = 214\text{ m}$.

通过以上计算分别得到作业区上游限速标志的昼夜设置间距,如表 1 所示,并绘制了限速标志昼夜设置间距与限速值的关系图,如图 9 所示. 从表 1 和图 9 中可以看出,随着限速标志限速值的增大,相邻限速标志设置间距随之增大,二者呈正线性相关,且夜间设置间距比白天设置间距增幅大. 另外,夜间限速标志设置间距大于白天限速标志设置间距,分析认为由于夜间复杂的行车条件导致驾驶人的视线和反应能力受到影响,驾驶人需要更多的时间来获取交通指示信息,然后及时进行相应的操作. 因此,适当地增加夜间限速标志的设置间距能够给驾驶人提供一定的反应距离进行减速操作,保障了行车安全性和稳定性.

表 1 作业区上游限速标志设置间距

Tab.1 Spacing of speed limit signs at upstream of work zone

限速标志	设置间距/m	
	白天	夜间
标志 8-7	92	102
标志 7-6	108	120
标志 6-5	125	139
标志 5-4	142	158
标志 4-3	158	176
标志 3-2	175	195
标志 2-1	192	214

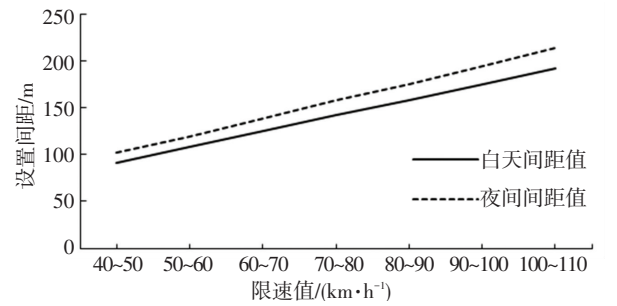


图 9 昼夜设置间距与限速值的关系

Fig.9 Relation between spacing in daytime and nighttime and speed limit values

根据相邻限速标志的设置间距,利用式(9)可求相邻限速标志之间的车辆平均减速度值,如表 2 所示,并绘制了车辆昼夜平均减速度特性散点图,如

图 10 所示. 从表 2 和图 10 中可以看出,随着限速标志限速值的减小,车辆昼夜平均减速度随之减小,且减小幅度越来越大,二者近似呈正线性相关,夜间平均减速度小于白天平均减速度. 对于上述变化特点,分析认为:驾驶人第 1 次看到限速标志,一般会集中注意力,采取较强的制动,对应于图 10 中的 110 km/h 到 90 km/h 的限速区段;随着对渐变限速标志的适应,驾驶人对车辆的制动程度逐渐减弱,对应于 90 km/h 到 60 km/h 的限速区段;随着限速值的继续减小,驾驶人会根据不同路段的限速值不断地调节车辆减速度的大小以保证顺利减速到作业区上游规定的限速值,对应于 60 km/h 到 40 km/h 的限速区段.

通过以上分析可得,本文基于视认性的计算方法得到的昼夜间距值符合驾驶人昼夜行车过程中不同的视觉特性和反应特性,同时得到的车辆平均减速度特性能够反应驾驶人行车减速过程中的心生理特征,证明了该方法考虑了驾驶人的驾驶行为特点,确定了更为合理的间距值.

表 2 相邻限速标志之间的车辆平均减速度

Tab.2 Mean deceleration of vehicle between adjacent speed limit signs

限速标志	平均减速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	
	白天	夜间
标志 8-7	0.377	0.340
标志 7-6	0.393	0.354
标志 6-5	0.401	0.361
标志 5-4	0.408	0.366
标志 4-3	0.415	0.373
标志 3-2	0.419	0.376
标志 2-1	0.422	0.379

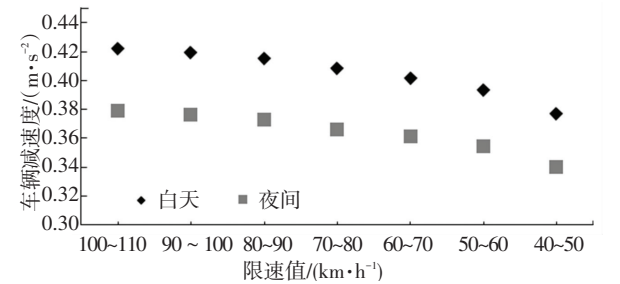


图 10 车辆昼夜平均减速度特性

Fig.10 Mean deceleration characteristics of vehicle in daytime and nighttime

为了全面保障高速公路改扩建工程安全顺利的进行,白天和夜间均应在作业区上游设置限速标志. 若针对白天和夜间分别在路侧设置两套限速标志,这样会加重驾驶人的视觉负担,增加驾驶人对标志

的视认时间、判断时间,不仅起不到安全限速的目的,反而会增加事故率. 基于本文的研究结果,由于夜间限速标志设置间距小于白天限速标志设置间距,若只按照夜间限速方案进行设置,不仅能够保证夜间车辆的安全限速,又能满足白天行车安全的需求. 由此确定了将夜间限速标志设置方案作为珲乌高速公路吉林至龙嘉机场段高速公路改扩建工程的限速方案并予以应用. 为了进一步验证限速方案的应用效果,对上述改扩建工程路段各个限速标志所处位置的车辆行驶速度进行了实地采集,车速分布情况如图 11 所示,并计算得到各个采集点的车速均值和标准差,见表 3. 结果表明:被观测车辆通过各个限速标志位置处的车速均值基本维持在相应的限速值附近,对应车速标准差为 1.3~2.2,说明车速离散性较小,实际车速与期望车速相接近. 由此证实了本文提出的限速方案的实用性和有效性.

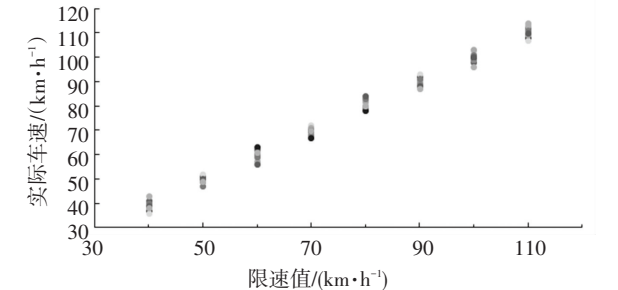


图 11 实际车速与限速值的关系

Fig.11 Relation between actual and limited speed

表 3 车速均值与标准差

Tab.3 Mean and standard deviation of vehicle speed

限速标志	车速均值/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	车速标准差
标志 8	38.1	2.0
标志 7	49.8	1.3
标志 6	58.6	2.2
标志 5	69.3	1.4
标志 4	80.9	1.8
标志 3	90.1	1.8
标志 2	99.4	2.0
标志 1	110.8	2.2

4 结 论

1) 基于对驾驶人的视认性分析,研究确定了驾驶人昼夜驾车过程中的视野范围,构建了驾驶人视认距离计算模型;基于对驾驶人的制动特性分析,构建了限速标志前置距离模型.

2) 提出了一种基于驾驶人特性的渐变限速标志间距计算方法,实现了对限速标志间距值的量化分析. 研究结果显示:随着限速值的增大,相邻限速

标志设置间距随之增大,二者呈正线性相关,且夜间设置间距比白天设置间距增幅大,夜间限速标志设置间距大于白天限速标志设置间距.

3) 利用基于运动学的计算方法得到了渐变限速标志之间的车辆昼夜平均减速度,分析了车辆逐级减速过程中的平均减速度特性. 研究结果显示:随着限速值的减小,车辆昼夜平均减速度随之减小,二者近似呈正线性相关,且夜间平均减速度小于白天平均减速度.

参考文献

[1] KHATTAK A J, KHATTAK A J, COUNCIL F M. Effects of work zone presence on injury and non-injury crashes [J]. Accident Analysis and Prevention, 2002, 34(1): 19

[2] 中华人民共和国交通运输部. 道路交通标志和标线: GB 5768.4—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Road traffic signs and markings: GB 5768.4—2017 [S]. Beijing: China Standards Press, 2017

[3] JONGEN E M M, BRIJS K. 70 km/h speed limits on former 90 km/h roads: effects of sign repetition and distraction on speed [J]. Human Factors, 2011, 53(6): 771

[4] WANG W, CHENG Z. Variable speed limit signs: control and setting locations in freeway work zones [J/OL]. Journal of Advanced Transportation. (2017-04-12) [2019-05-20]. <https://doi.org/10.1155/2017/4390630>

[5] LIU H Y, ZHANG L H, SUN D, et al. Optimize the settings of variable speed limit system to improve the performance of freeway traffic [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(6): 3249

[6] KAGEYAMA Y, KAMEYA H, NISHIDA M, et al. Recognition of speed limit signs in night scene images in Japan [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2013, 8(9): S88

[7] YAN G, YU M, SHI S, et al. The recognition of traffic speed limit sign in hazy weather [J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2017, 33(2): 873

[8] HASSAN H M, ABDEL-ATY M A, CHOI K, et al. Driver behavior and preferences for changeable message signs and variable speed limits in reduced visibility conditions [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2012, 16(3): 132

[9] 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): 74
LU Jian, JIANG Jun, YE Haifei. Setting location of speed limit signs along highway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31(1): 74

[10] 程国柱, 秦丽辉, 徐亮, 等. 城市道路人行横道处夜间限速标志前置距离研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(6): 227
CHENG Guozhu, QIN Lihui, XU Liang, et al. Advance distance of speed limit sign for crosswalk of urban road at night [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(6): 227

[11] 徐婷, 孙小端, 贺玉龙, 等. 基于驾驶人短期记忆的限速标志合理间距研究 [J]. 公路, 2011(1): 177
XU Ting, SUN Xiaoduan, HE Yulong, et al. A study on speed limit

- signs appropriate intervals determination based on drivers short-term memory[J]. Highway, 2011(1): 177
- [12] 于仁杰, 马荣国, 王皓, 等. 公路施工作业区层级限速方案实施效果评价[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(3): 106
- YU Renjie, MA Rongguo, WANG Hao, et al. Evaluation of implementation effects of level speed limit programs in highway work zone[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(3): 106
- [13] 贾兴利, 富志鹏, 许金良, 等. 高速公路半幅封闭施工区限速标志效能试验[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(4): 93
- JIA Xingli, FU Zhipeng, XU Jinliang, et al. Effectiveness test of speed-limit sign in one-way closed work zone for expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(4): 93
- [14] 张楠楠. 动态环境下照度变化对驾驶人识认时间影响机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015
- ZHANG Nannan. The mechanism research of illumination variation's influence on driver's recognition time under dynamic circumstance[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 道路交通标志和标线: GB 5768.2—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Road traffic signs and markings: GB 5768.2—2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2009
- [16] 赵炳强. 驾驶人动态视觉特征及其影响[J]. 公路交通科技, 1998, 15(5): 38
- ZHAO Bingqiang. Driver's dynamic visual characters and its effects[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1998, 15(5): 38
- [17] 张瑾. 道路交通标志标线警示能力研究—限速标志设置研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005
- ZHANG Jin. Research on warn ability of the road traffic sign and marking—research on setting up the sign of limit speed[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005
- [18] 潘兵宏, 陈天幸. 保证夜间视距的警告类标志前置距离研究[J]. 中外公路, 2014, 34(2): 326
- PAN Binghong, CHEN Tianxing. Study on the leading distance of warning signs to ensure horizon in nighttime[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2014, 34(2): 326
- [19] 温惠英, 刘丹. 基于驾驶人特性的山区高速公路夜间限速模型[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(4): 6
- WEN Huiying, LIU Dan. Speed limit model of mountain freeway during the night based on driver's characteristics[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2015, 33(4): 6
- [20] 袁浩, 史桂芳, 黄晓明, 等. 停车视距制动模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(4): 859
- YUAN Hao, SHI Guifang, HUANG Xiaoming, et al. Braking model of stopping sight distance[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(4): 859
- [21] FAMBRO D B, FITZPATRICK K, KOPPA R. Determination of stopping sight distances NCHRP report 400[R]. Washington DC: National Research Council, 1997

(编辑 魏希柱)

(上接第 184 页)

- [7] MOUTHEREAU F, FILLON C, MA K F. Distribution of strain rates in the Taiwan orogenic wedge[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 284(3/4): 361. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.05.005
- [8] 宋义敏, 邢同振, 邓琳琳, 等. 不同加载速率下岩石变形场演化试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2773
- SONG Yimin, XING Tongzhen, DENG Linlin, et al. Experimental study of evolution characteristics of rock deformation field at different loading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2773. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.001
- [9] MAHMUTOĞLU Y. The effects of strain rate and saturation on a micro-cracked marble[J]. Engineering Geology, 2006, 82(3): 137. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.09.001
- [10] FUENKAJORN K, SRIAPAI T, SAMSRI P. Effects of loading rate on strength and deformability of Maha Sarakham salt[J]. Engineering Geology, 2012, 135–136: 10. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.02.012
- [11] LIANG W G, ZHAO Y S, XU S G, et al. Effect of strain rate on the mechanical properties of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1): 161. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.06.012
- [12] 苏承东, 李怀珍, 张盛, 等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 943
- SU Chengdong, LI Huaizhen, ZHANG Sheng, et al. Experimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 943. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.05.012
- [13] 苏晓波, 纪洪广, 裴峰, 等. 单轴压缩荷载下含黏结面花岗岩能量演化研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 161
- SU Xiaobo, JI Hongguang, PEI Feng, et al. Study on energy evolution law of defective granite specimen under uniaxial compressive loading and unloading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 161. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201710130
- [14] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Experimental research on energy evolution of red sandstone and stone samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.05.012
- [15] 张振杰, 朱杰兵, 汪斌, 等. 基于能量耗散机制的片麻状花岗岩损伤与剪胀演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 38(增刊1): 3441
- ZHANG Zhenjie, ZHU Jiebing, WANG Bin, et al. The damage and shear dilation property evolution based on energy dissipation mechanism of gneissic granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 38(S1): 3441. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1200
- [16] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 含层理岩石单轴损伤破坏声发射参数及能量耗散规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 646
- ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Analysis of acoustic emission parameters and energy dissipation characteristics and damage evolution of bedding rock failure process under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 646

(编辑 魏希柱)