

文章编号:1001-7372(2015)10-0105-07

动态低照度环境中公路合理行车速度确定方法

冯忠祥¹,雷叶维¹,袁华智²,张卫华¹,张楠楠¹

(1. 合肥工业大学 交通运输工程学院,安徽 合肥 230009;

2. 长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘要:为合理确定动态低照度时公路行车速度限值,保障低照度环境时的公路行车安全,设计实车试验研究环境照度及速度变化耦合影响驾驶人视觉机能的规律。分析了环境照度、行车速度对驾驶人识别不同颜色目标物识认时间的影响,构建了行车速度、动态低照度和识认时间感知关系度量模型,并结合驾驶人反应制动停车视距模型,考虑速度离散对驾驶人的影响,给出了低照度下公路合理行车速度确定方法及建议值。结果表明:驾驶人对红、绿目标物识认时间有一定差异性,红色目标物在低照度环境下的识认性优于绿色;低照度环境时应依据照度变化进行公路合理行车速度限制,且需考虑限速的平顺过渡,在设计停车视距为110 m的公路上,照度为200~500 lx时,建议限速为70 km·h⁻¹;照度为200 lx以下,建议限速为60 km·h⁻¹;在设计停车视距为75 m的公路上,照度为200~500 lx时,建议限速为50 km·h⁻¹;照度为200 lx以下,建议限速为40 km·h⁻¹。

关键词:交通工程;车速限制;时间感知试验;识认时间;驾驶人;交通安全

中图分类号:U491.25

文献标志码:A

Determination Method of Reasonable Driving Speed on Highway in Dynamic Low Illumination Environment

FENG Zhong-xiang¹, LEI Ye-wei¹, YUAN Hua-zhi², ZHANG Wei-hua¹, ZHANG Nan-nan¹

(1. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To determine reasonable driving speed limit and ensure traffic safety on highway in dynamic low illumination environment, experimental research on driver visual ability affected by environmental illumination and driving speed change was conducted. The influences of environmental illumination and driving speed on driver recognition time of targets with different colors were analyzed. The quantitative model of recognition time perception, driving speed and dynamic low illumination was established. Then the determination method and suggestive value of reasonable driving speed limit on highway in dynamic low illumination environment were given based on response-braking stopping sight distance model and the influence of speed dispersion on driver. The results show that the driver recognition time has certain differences between red targets and green targets, and red target recognition function is better than green target in low illumination environment; the reasonable driving speed limit values on highway in dynamic low illumination environment should be based on illumination change, and the smooth transition of

收稿日期:2014-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51308177,51578207);教育部高等学校博士学科点专项科研项目(20120111120021);

安徽省自然科学基金项目(1408085MG137);汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室开放基金项目(2013G1502061)

作者简介:冯忠祥(1982-),男,安徽含山人,副教授,工学博士,E-mail:fzx@hfut.edu.cn.

speed limit must be considered. When the stopping sight distance is 110 m, and the illumination between 200 lx and 500 lx, the speed limit value should be $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. While the illumination is less than 200 lx, the speed limit value should be $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. When the stopping sight distance is 75 m, and the illumination between 200 lx and 500 lx, the speed limit value should be $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. While the illumination is less than 200 lx, the speed limit value should be $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Key words: traffic engineering; speed limit; time perception experiment; recognition time; driver; traffic safety

0 引言

交通事故作为车辆在道路上运行的伴随产物,其诱因复杂,一般受人、车、路、环境四大系统影响,且各系统内部又涉及众多因素^[1],从风险概率的角度来分析,各因素均有不稳定的致因概率,使得事故具有随机性和难以预测性,但各因素的风险概率却不尽相同,且通过技术和管理等手段,能够降低人和车因素产生风险的概率。但环境因素往往难以管控,且环境因素变化会对驾驶人生理、心理产生影响,使得原本的单一因素变化成复杂交汇的多因素,导致事故风险概率变化且难以控制。如黄昏低照度时驾驶人难以辨识道路上的目标物,尽管车辆具有补光功能,道路可以安装照明设施,但效果均不显著。究其原因,是因为环境低照度时,人眼内部视觉细胞会受到影响,使得视觉功能短期内失调,而驾驶人在行车过程中 80% 以上的信息依靠视觉获取,所以易发交通事故,且一般较为严重。国内外学者对环境照度影响行车安全的研究较多,成果较为丰富。Laapotti 等^[2]研究认为,青年男性驾驶人身亡交通事故通常发生在黄昏和深夜。Suh 等^[3]研究发现,夜间有限的照明条件会使驾驶人产生车辆行驶速度不快的错觉,导致驾驶人提高速度行驶甚至超速。Baker^[4]发现夜间照度不足,驾驶人会提高行驶速度且对速度估计不足,因此需要对夜间行驶的车辆进行限速。Easa 等^[5]分析了夜间光照强度对驾驶人的影响,并指出直线路段上,光照强度的增加有助于提高驾驶人对标志的视认能力,然而在曲线段,光照过高,使得标志视认性变差,甚至产生反作用。Plainis 等^[6]从夜间驾驶人的反应时间着手,建立了反应距离与光照强度的关系。

中国对环境照度影响行车安全问题研究较晚,前期虽然关注到了此问题的严重性,但由于缺乏必要的理论知识和技术手段,常常难以解释和解决此问题,仅从一般角度提出改善对策。随着相关研究的深入,从应对疲劳驾驶和夜间图像识别等方面对

低照度行车安全问题研究较多^[7-8],其中以技术性改善为主,而从驾驶人视觉特性着手研究照度对行车安全影响的较少^[9],如赵炜华等^[10-12]对比分析了高低照度时驾驶人对目标物空间距离的判识规律,并发现速度不同、目标物颜色不同,判识误差变化均不同;程国柱等^[13-15]则开展了夜间环境下驾驶人识认能力等方面的研究,并构建了相关模型。

上述研究成果对驾驶人行车安全及动态视觉理论有重要贡献,但研究对象以识认距离为主,对反应时间关注较少。驾驶人视觉机能的下降是低照度环境中驾驶人最典型和突出的变化,且在行车过程中,此方面表现为驾驶人反应时间的变化。人的反应过程可分为 2 个阶段,即辨识阶段和决策阶段。辨识阶段包括发现和识认过程,其中目标物在视野范围内出现至被发现的时间称为发现时间,而发现后确认目标物大小、颜色及动作等特征的时间记为识认时间。环境照度对发现和识认过程产生影响,但传统研究常将反应时间取经验值进行模型计算和相关分析,使得结果科学性存疑,且未见相关论文对驾驶人识认时间进行研究,故研究低照度环境下的反应时间需重点关注其识认时间的变化规律。在上述研究基础上,本文设计实车试验,在动态环境下照度变化时,开展驾驶人对不同颜色目标物的识认研究,并针对识认时间开展系统性工作,拟将研究成果应用至低照度时公路行车速度限制方面,增强该环境下道路行车安全性。

1 试验方案

1.1 被试选择

本试验不考虑驾驶人个体差异对识认时间的影响,要求被试驾驶人视觉系统良好,驾龄 5 年以上或行驶里程 3 万 km 以上,最终选择 27 名被试驾驶人,其中男性 21 名,女性 6 名;年龄在 25~60 岁,均值 42 岁,标准差 10.8 岁;职业与非职业驾驶人比例为 1:2;驾照类型包括 A1, A2, B1, B2, C1, 共计 5 种。

1.2 试验设备

(1) 测量仪器及设备

试验测量仪器及设备主要有:照度计,型号为 Victor 1010B,测量范围为 $0.1 \sim 99\,999 \text{ lx}$;试验车辆为上海大众新桑塔纳自动挡 5 座轿车;其他相关辅助设备有记录板、计时器、行车记录仪、移动电源、对讲机等。

(2) 目标物

识认时间为识认变化的相对值,需设计能够反映发现和识别过程的目标物,故结合静视力的测量方法,以《国际标准视力表》中的标准“E”形图案为基础(“C”形视标经预研试验发现,中空面积较大,不符合实际道路上目标物特征),根据中国成年人平均身高,取图案长宽均为 42 cm ,架设在高度为 128 cm 的夹杆上,总高度 170 cm 。考虑自然界中暖、冷色调具有较强代表性,且其中的红、绿色又是交通中常用的颜色,故目标物颜色方面选取红、绿两色作为试验基础颜色。试验车辆及目标物如图 1 所示。



图 1 试验车辆及目标物

Fig. 1 Experimental Vehicle and Target

1.3 试验环境

试验时间选择在 2014 年 8 月 1 日至 8 月 31 日 18:00~20:00,因为该时段为夏日天气,黄昏时间较长,照度变化缓慢,可进行多组试验。试验时天气需晴朗且能见度为 1 km 以上。试验场地选择合肥某新建道路,道路主体已完工,沥青混凝土路面,交通标线已划设,但未通车,且无路灯,几乎无行人和其他车辆。试验路段长 1 km ,线形良好,无较大纵坡和转弯。具体如图 2 所示。

1.4 试验步骤

试验按以下步骤进行:

步骤 1:试验开始前,按照预先试验方案进行场地布置,目标物及车辆安放至指定位置。

步骤 2:主试向驾驶人说明试验目的、要求和过程,并开展预试验至驾驶人完全理解。

步骤 3:试验开始后,驾驶人在加速区将车辆加



图 2 试验道路和环境

Fig. 2 Experimental Road and Environment

速到试验设计车速,保持速度进入匀速区,当车辆到达匀速区起点时,启动计时器;当驾驶人发现目标物时,点击计时器记录时刻,当驾驶人识别出目标物“E”的方向时,点击计时器记录时刻。

步骤 4:根据试验方案车速依次设定为 $30, 40, 50, 60, 70, 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,共计 6 组,并循环进行,至环境照度为 0.1 lx 左右试验停止。

1.5 试验数据误差处理

数据误差主要来自以下 2 个方面:一是被试驾驶人对车辆速度控制难以绝对精确,无法维持在绝对匀速,如果偏差过大(利用距离和设计速度计算出车辆经过各目标物的时刻,当计算值小于实测所得驾驶人发现、辨识时间值时,说明该组试验行车速度超速较大),则剔除数据;二是驾驶人个体差异导致试验数据变化较大,可采用拉依达准则法,剔除离散度过高的极值数据。

2 数据分析

2.1 照度和速度对目标物识认时间交互影响规律

根据上述数据误差处理方法对试验数据进行统计分析,并进行三维数据曲面绘制,具体见图 3,4。

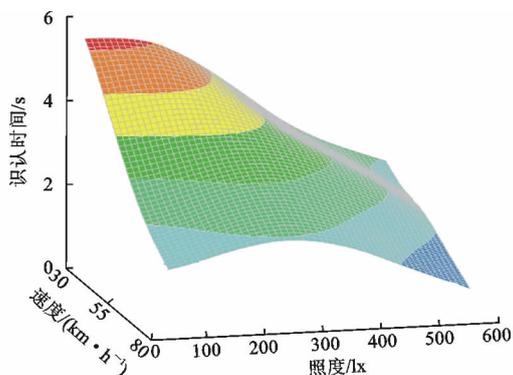


图 3 对红色目标物识认时间随速度、照度变化规律

Fig. 3 Change Law of Recognition Time for Red Target with Speed and Illumination

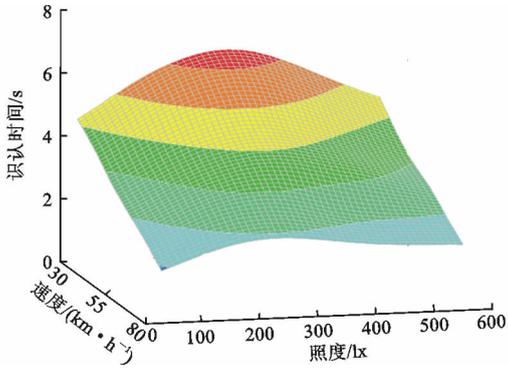


图4 对绿色目标物识别时间随速度、照度变化规律

Fig. 4 Change Law of Recognition Time for Green

Target with Speed and Illumination

由图3可见:对红色目标物识别时间整体呈随照度增加而减小、随速度增大而减小的趋势,尤其在低照度、低速时,其识别时间达到最大值;在车速为 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上时,随照度的变化,识别时间又呈先增大后减小的趋势;在照度为 300 lx 时为变化拐点,说明红色目标物在此种速度和照度耦合环境下,识别性最差。由图4可见:对绿色目标物识别时间随速度增大而减小,但随照度增大呈先增大后减小的趋势,整体随照度和速度交互影响呈波浪式变化,照度为 300 lx 左右是曲面变化的波峰线,尤其是速度为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,为整个曲面的最高峰,此时绿色目标物识别性相对较差。由图3,4可知:红、绿色目标物识别性有明显差异,且与照度和速度单因素均非简单的线性相关,但在低照度和低速情况下,识别时间均相对较长;2种因素的耦合对其影响较为复杂,曲面变化波动性较为明显。

2.2 照度对目标物识别时间的影响规律

上述曲面拟合情况,可以反映速度和照度耦合对识别时间的综合影响情况,但难以量化,且在同一速度下照度对识别时间的影响,应做单因素分析,其结果如图5,6所示。

由图5可见:总体来讲,随着速度的增加,各识别时间均呈下降趋势,且变化越来越平稳,但在不同照度范围内波动幅度较大,如照度为 $300\sim 400\text{ lx}$ 时,各曲线开始交错,尤其在车速为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,识别时间曲线降至 $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的识别时间以下,说明该照度段速度变化对识别时间影响敏感。车速为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,驾驶人对红色目标物识别时间受照度影响变化幅度最大,随着照度下降基本呈现先降低后升高再降低的趋势,最高峰和最低峰尤其明显;在照度为 200 lx 以下时,识别

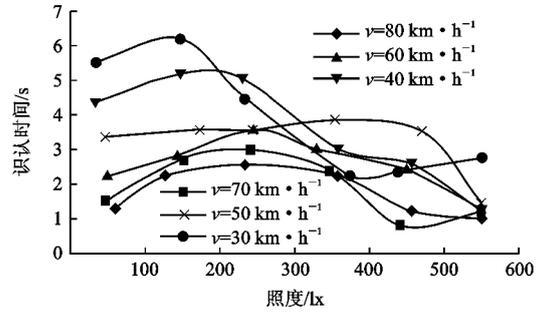


图5 对红色目标物识别时间受照度影响变化规律

Fig. 5 Change Law of Recognition Time for Red Target with Illumination

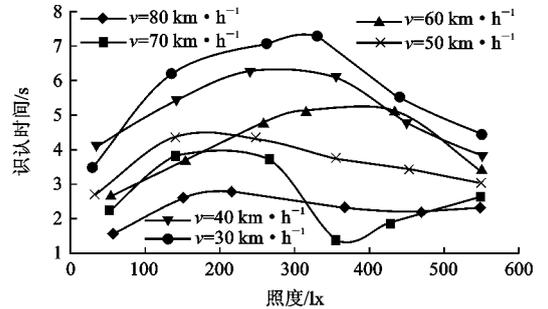


图6 对绿色目标物识别时间受照度影响变化规律

Fig. 6 Change Law of Recognition Time for Green Target with Illumination

时间达到最大峰值($5.5\sim 6.3\text{ s}$),则意味着驾驶人从发现到确认目标物需要经过 $165\sim 189\text{ m}$;该速度下识别时间最低值出现在 400 lx 左右,为 2.3 s 。 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以后,各识别时间曲线变化较为平稳,因此, $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 应是环境照度对红色目标物识别时间影响的速度阈值。

根据图6可知:随着速度增加,驾驶人对绿色目标物各识别时间也呈下降趋势,且曲线变化形状较为相似,除 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 外,均有一个最高波峰,位于 300 lx 左右。但 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时波形有较大变化,随着照度的降低,识别时间呈现先减小后增大再降低的趋势。表明绿色目标物在高速时受照度环境影响更为明显,且 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 应是环境照度对绿色目标物识别时间影响的速度阈值。

综合比较图5和图6可知,驾驶人对红色目标物识别时间随照度变化表现出更为复杂的趋势,尤其是综合比较各速度下的影响结果,进一步说明红色目标物的识别性随速度变化大。但通过对比发现,对红色目标物在各速度下的平均识别时间均低于绿色目标物(图7),说明在低照度时,其综合识别性仍优于绿色目标物。

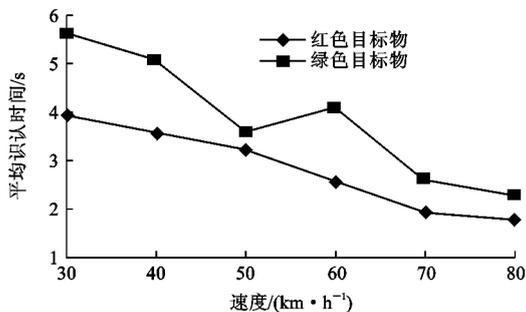


图 7 对红、绿色目标物平均识认时间

Fig. 7 Average Recognition Time for Red and Green Targets

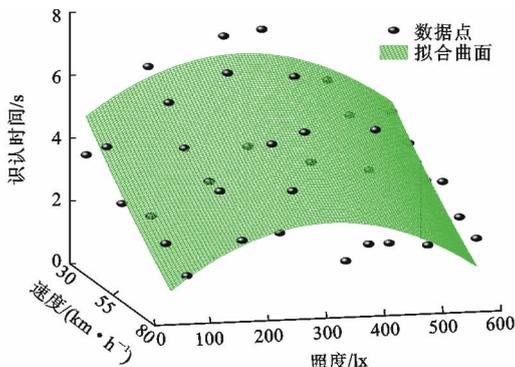


图 9 对绿色目标物识认时间曲面拟合结果

Fig. 9 Fitting Surface Result of Recognition Time for Green Target

3 模型构建

3.1 照度和速度交互影响下的识认时间模型

照度和速度对目标物识认形成交互影响,属于典型的 2 自变量与因变量间的关系,如要客观描述三者的度量关系,深入量化识认时间变化规律,则需开展三维曲面拟合分析,构建模型。应用 Origin8. 5 软件,根据图 3, 4 曲面形状,以公式 $z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$ 为基础(其中 x 和 y 为自变量, z 为因变量; a, b, c, d, e, f 为回归系数),将自变量速度和照度、因变量识认时间代入上述公式,得到红、绿目标物识认时间曲面拟合结果,分别如图 8, 9 所示。

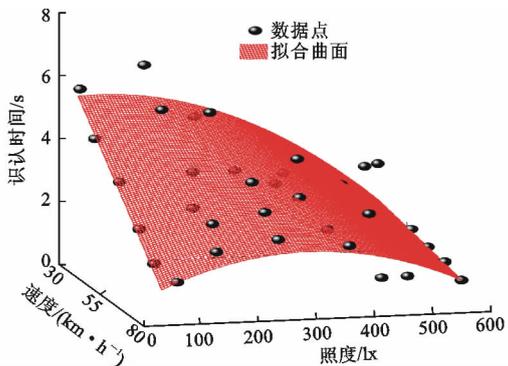


图 8 对红色目标物识认时间的曲面拟合结果

Fig. 8 Fitting Surface Result of Recognition Time for Red Target

由图 8, 9 可见,拟合形状和曲面变化规律分别与图 3, 4 接近,对红、绿目标物识认时间拟合系数 R^2 分别为 0. 775 0 和 0. 739 0,拟合程度较好。对红、绿目标物识认时间具体计算公式分别为

$$t_1 = 7.858 - 0.086v - 0.002i - 1.767 \times 10^{-5}v^2 - 1.578 \times 10^{-5}i^2 + 1.385 \times 10^{-4}vi \quad (1)$$

$$t_2 = 7.007 - 0.100v + 0.015i + 2.515 \times 10^{-4}v^2 - 2.591 \times 10^{-5}i^2 + 1.191 \times$$

$$10^{-5}vi \quad (2)$$

式中: t_1 为对红色目标物识认时间; t_2 为对绿色目标物识认时间; v 为行车速度; i 为环境照度。

3.2 基于识认时间特性的停车视距模型构建

反应制动停车视距模型由两部分组成,一是驾驶人在反应时间内行驶的距离,二是开始制动到车辆停止所行驶的距离,即制动距离。传统的停车视距计算并未细化驾驶人的识认时间,只是将总的反应时间给出经验参考值。本文基于停车视距模型,考虑识认时间影响,建立安全停车视距模型。根据《公路路线设计规范》(JTJG D20—2006),停车视距计算公式为

$$s = \frac{v}{3.6}t + \frac{(v/3.6)^2}{2g\varphi} \quad (3)$$

式中: s 为停车视距; t 为驾驶人制动反应时间; φ 为道路摩擦因数; g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

驾驶人制动反应时间包括识认时间、决策时间和制动响应时间。其中识认时间受车速、环境照度及目标物颜色共同影响;决策时间属于大脑响应机制,取人的决策时间统计值即可;制动响应时间是大脑给出制动指令后,脚从油门踏板移到制动踏板的时间与制动踏板间隙消除时间之和,可取统计值。因此驾驶人反应时间为

$$t = t_a + t_b + t_c$$

式中: t_a 为驾驶人识认时间; t_b 为驾驶人决策时间,一般取 $0.1 \sim 0.5 \text{ s}$,本文取 0.25 s ; t_c 为制动响应时间,一般取 $0.5 \sim 1 \text{ s}$,本文取 0.75 s 。这样反应时间和识认时间的关系为

$$t = t_a + 1.0 \text{ s}$$

停车视距计算公式变为

$$s = \frac{v}{3.6}(t_a + 1.0 \text{ s}) + \frac{(v/3.6)^2}{2g\varphi} \quad (4)$$

将式(1)、(2)分别代入式(4),可得红色目标物和绿色目标物的视距、速度和照度关系式。该关系式中照度 i 为取值的变量,道路摩擦因数 φ 可取《公路路线设计规范》(JTGD20—2006)推荐值,则视距和速度关系为一元三次方程,但表达和求解较为复杂,可应用 MATLAB 进行编程求解。

4 低照度时公路最高车速限值算例

根据《公路路线设计规范》(JTGD20—2006),在设计速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的道路,规定的停车视距如表 1 所示。

表 1 停车视距规定值

Tab. 1 Specified Value of Stopping Sight Distance

公路设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	80	60
摩擦因数 φ	0.31	0.33
停车视距/m	110	75

将上述值代入 MATLAB 2013b 计算公式,得出在设计停车视距为 110 m 和 75 m 的公路上不同照度时公路安全行车速度,具体见表 2、3。

表 2 红色目标物时低照度下车辆安全速度

Tab. 2 Vehicle Safety Speed when Red Target in

Low Illumination

公路参数		不同照度(lx)下的计算安全速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)				
s/m	φ	100	200	300	400	500
110	0.31	57.29	56.27	58.10	62.27	68.72
75	0.33	36.50	37.49	40.21	44.94	52.16

表 3 绿色目标物时低照度下车辆安全速度

Tab. 3 Vehicle Safety Speed when Green Target in

Low Illumination

公路参数		不同照度(lx)下的计算安全速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)				
s/m	φ	100	200	300	400	500
110	0.31	56.06	49.52	47.80	49.75	56.36
75	0.33	35.67	31.94	30.99	32.27	36.41

根据表 2 和表 3,针对红、绿目标物的识认,在已建成且限速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的公路上,停车视距为 110 m 时,该环境下随着照度的变化,满足驾驶人识认目标物的识认时间要求,需进行分级速度限制,即当环境照度为 500 lx 时,安全行车速度分别应小于 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (红色目标物)和 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (绿色目标物),而在全部低照度环境时,安全行车速度可取 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (红色目标物)和 $55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (绿色目标物)。在已建成且限速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的公路上,停车视距为 75 m 时,安全行车速度限值可取 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (红色目标物)和 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (绿色目标物)。

道路行车速度限制是一项交通安全与交通效率间的博弈过程,一般是取其中的最佳平衡阈值,从理论角度计算的行车限速值,可以最大程度保障低照度行车安全,但会对通行效率产生较大影响,且公路限速从 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 降低至 $55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 降低至 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,速度的离散差对驾驶人行车本身就造成较大影响,反而易导致事故;另外,如每 100 lx 进行 1 次行车速度调整,从交通管控角度来说,科学性和操作性均较差,因而应综合考虑安全与效率间的平衡关系。红、绿色作为暖、冷色调的代表,在公路上两色系也较为普遍,且交通标志中红、绿色也是基本色,因此,应用驾驶人对红、绿色目标物识认时间获得的计算结果,可以作为限速的参考依据。

综上,对红、绿目标物限速平均并取整,结合实际交通管控方法,建议在低照度环境可采用分级制最高行车速度限制,具体如表 4 所示。

表 4 低照度下公路建议最高限速

Tab. 4 Recommended Maximum Speed Limit on

Highway in Low Illumination

公路设计参数		建议限速值/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	
停车视距/m	限速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$i=200 \sim 500 \text{ lx}$	$i < 200 \text{ lx}$
110	80	70	60
75	60	50	40

5 结语

(1)红、绿色目标物在低照度环境下识认性存在一定差异性,且对红色目标物平均识认时间均小于绿色目标物,表明红色目标物在低照度环境下的识认性优于绿色目标物。

(2)低照度环境下可依据照度变化来进行速度限制,且需考虑限速的平顺性,在设计停车视距为 110 m 的公路上,照度为 200~500 lx 时,建议限速为 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,照度为 200 lx 以下,建议限速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;在设计停车视距为 75 m 的公路上,照度为 200~500 lx 时,建议限速为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,照度为 200 lx 以下,建议限速为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(3)所计算的低照度环境下公路行车限速建议值,填补了夜间和黄昏等照度不足时道路未有限速或限速缺乏标准的空白,从安全行车角度为低照度环境下交通速度管控提供了理论依据。

(4)由于试验最高车速仅为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,因此,所得研究结论对于拓展到高速状态下,驾驶人在受照度影响时对目标物识认时间的规律需进一步

验证。

参考文献:

References:

- [1] SOLOMON D. Accidents on Main Rural Highways: Related to Speed, Driver and Vehicle[R]. Washington DC: US Department of Commerce, 1964.
- [2] LAAPOTTI S, KESKINEN E. Differences in Fatal Loss-of-control Accidents Between Young Male and Female Drivers[J]. Accident Analysis & Prevention, 1998, 30(4): 435-442.
- [3] SUH W, PARK P Y J, PARK C H, et al. Relationship Between Speed, Lateral Placement, and Drivers' Eye Movement at Two-lane Rural Highways [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(8): 649-653.
- [4] BAKER R G V. On the Quantum Mechanics of Optic Flow and Its Application to Driving in Uncertain Environments [J]. Transportation Research Part F, 1999, 2(1): 27-53.
- [5] EASA S M, REED M J, RUSSO F, et al. Effect of Increasing Road Light Luminance on Night Driving Performance of Older Adults[J]. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 6(1): 41-48.
- [6] PLAINIS S, MURRAY I J. Reaction Times as an Index of Visual Conspicuity when Driving at Night[J]. Ophthalmic and Physiological Optics, 2002, 22(5): 409-415.
- [7] 张希波, 成波, 冯睿嘉. 基于方向盘操作的驾驶人疲劳状态实时检测方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(7): 1072-1076, 1081.
ZHANG Xi-bo, CHENG Bo, FENG Rui-jia. Real-time Detection of Driver Drowsiness Based on Steering Performance [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(7): 1072-1076, 1081.
- [8] 王洋. 主动式汽车夜视系统若干关键技术的应用研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2013.
WANG Yang. Active Automotive Night Vision System Application Research of Some Key Technology [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2013.
- [9] 马勇, 付锐. 驾驶人视觉特性与行车安全研究进展[J]. 中国公路学报, 2015, 28(6): 82-94.
MA Yong, FU Rui. Research and Development of Drivers Visual Behavior and Driving Safety[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(6): 82-94.
- [10] 赵炜华, 刘浩学, 陈昊. 基于 BP 网络的驾驶员黄昏空间距离判识规律[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2012, 36(4): 744-747.
ZHAO Wei-hua, LIU Hao-xue, CHEN Hao. BP Neural Network-based Space Distance Cognition of Drivers at Dusk[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2012, 36(4): 744-747.
- [11] 魏建国, 赵炜华, 熊保林. 不同因素对驾驶人夜间视认距离影响[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 21-27.
WEI Jian-guo, ZHAO Wei-hua, XIONG Bao-lin. Effects of Different Factors on Visual Cognition Distance of Drivers at Night [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(12): 21-27.
- [12] 李都厚, 刘浩学, 赵炜华. 黄昏时段颜色对驾驶人空间判识距离的影响规律[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 71-75.
LI Du-hou, LIU Hao-xue, ZHAO Wei-hua. Influence Rules of Color on Driver's Space Cognitive Distance at Dusk [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 71-75.
- [13] 程国柱, 韩娟. 高速公路夜间最高车速限制研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 147-153.
CHENG Guo-zhu, HAN Juan. Maximum Speed Limit on Expressway at Night [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 147-153.
- [14] 程国柱, 徐慧智, 莫宣艳. 驾驶员夜间对过街行人的视认规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 65-70.
CHENG Guo-zhu, XU Hui-zhi, MO Xuan-yan. Driver Recognition Rule for Crossing Pedestrian at Night-time [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 65-70.
- [15] 程国柱, 胡立伟, 韩娟. 高速公路驾驶员昼夜感知速度变化规律[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(3): 547-550.
CHENG Guo-zhu, HU Li-wei, HAN Juan. Variation Rule of Driver's Perception Speed on Freeway During Daytime and Nighttime [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(3): 547-550.