

# 地下道路视觉环境影响车辆运行特征机理分析

陈雨人, 郑仕文

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 计算不同道路环境下驾驶员所获得的视觉信息负荷, 解析导致车辆在不同道路环境下存在运行特征差异的机理, 提高地下道路技术设计和运营管理水平. 应用实车试验技术获取地上和地下道路环境中车辆运行特征数据和视觉环境资料, 进行不同道路环境系统中车辆运行特征和驾驶员视觉信息负荷的对比研究, 分析视觉信息负荷对车头间距和运行车速等车辆运行特征的影响规律. 在此基础上深入研究了地下道路视觉环境影响驾驶员视觉信息负荷的机理. 最后通过模拟驾驶技术提出了完善和提高地下道路视觉环境交通安全性的技术措施.

**关键词:** 地下道路; 信息负荷; 视觉环境; 车辆运行特征

**中图分类号:** U412.366

**文献标志码:** A

## Mechanism Analysis of Vehicles Operating Characteristic Affected by Visual Environment of Underground Road

CHEN Yuren, ZHENG Shiwen

(College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Driver visual information load in different road environments was calculated and the mechanism of vehicles operating characteristics affected by different road environments was analyzed in order to improve the underground road technical design and operational management. First, vehicle operating characteristic and visual environment information were collected by naturalistic driving on underground and aboveground road. A comparative study was carried out on the vehicle operation characteristics and driver visual information load. The relationship between the visual information load and the vehicle operation characteristics (headway space and operating speed) was investigated. Then, an analysis was made of the influence mechanism of vehicles operating characteristics affected by visual environment in underground road. Finally, the

measures to improve the underground traffic security was proposed based on a driving simulation.

**Key words:** underground road; information load; the vision environment; vehicles operating characteristic

对于大城市来说, 地下道路的建设可缓解城市交通压力, 提升城市交通运行水平. 人们同样也认识到地下与地面的道路视觉环境是不同的. 地面道路视野开阔, 具有风光景物以及人们所习惯的自然光照; 而地下道路呈现的是视觉狭窄封闭的空间, 没有路侧的绿化景观, 只有人工制造的灯光以及单调压抑的隧道护墙. 这种不同的视觉环境差异最终通过车辆不同的行驶特征表现出来, 已经引起众多学者的注意. 事实上为了探寻道路视觉环境对交通安全和驾驶行为的影响, 国内外大量研究者已经在该领域进行了大量研究, 取得了很好的研究成果. 比如, 日本学者 Kato. M 提出, 驾驶员在单调的环境中、夜间行驶时以及跟随在大型车辆之后时, 容易引起驾驶疲劳, 降低反应速度<sup>[1]</sup>. Terumitsu HIRATA 等人研究表明, 地下道路由于其空间给人的压迫感、单调环境、交通量以及城市道路相对接近的出入口设置等, 都会对驾驶员的驾驶行为造成较大的影响, 增加其内心烦躁程度, 减低行车注意力, 为交通事故的发生埋下隐患<sup>[2]</sup>. 王琰等人通过对暗视场环境下驾驶员视觉特性变化的研究, 提出了对安全行车的影响关系及预防措施<sup>[3]</sup>. 潘振斌从暗视场的角度研究了在行车过程中随着环境的改变驾驶员的视觉特性发生的变化, 分析了环境改变时驾驶员的视觉特性及其对安全行车的影响<sup>[4]</sup>. 殷艳红从驾驶员的视觉角度出发, 论述了驾驶员视觉环境对驾驶员心理、行为及安全行车的影响. 提出在道路设计与改造中应充分考虑驾驶员视觉特征与道路视觉环境对驾驶员的

收稿日期: 2012-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(51078270); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120072110019)

第一作者: 陈雨人(1966—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为道路交通规划设计、交通安全与道路环境、道路交通计算机辅助工程.

E-mail: Chenyr@tongji.edu.cn

影响,合理设计道路、交通设施和道路景观等交通环境要素<sup>[5]</sup>.日本学者 Toshihiro Wakita 通过驾驶模拟器进行地下道路行驶试验,采集驾驶员油门踏板、制动踏板、车辆速度、与前车间距保持等驾驶行为信息,运用非参数建模得出了驾驶员行为识别模型<sup>[6]</sup>. Wohlwill 认为视觉环境会产生一个最佳水平的刺激或信息量,太多的信息会产生压力感,太少的信息则会产生乏味感觉<sup>[7]</sup>. Taylor 则指出道路两侧的视觉环境对驾驶员决策影响很大,要么是有利的决策,要么是有利的决策<sup>[8]</sup>. Topp 通过研究发现合适的树木栽种对驾驶员降低车速有心理作用,也就是说视觉环境的适当处理可以改变驾驶员的行车速度<sup>[9]</sup>.

以上这些研究都清楚地表明道路环境对驾驶行为有很大影响,但是无论是国内还是国外,基本上都是在试图说明交通视觉环境会对驾驶行为产生影响,对形成这些影响的内在机理上却没有从微观角度进行深入的剖析,对如何进行地下道路交通环境的规划设计和运营管理也缺乏强有力的支持.笔者近几年一直致力于视觉环境影响驾驶行为机理的研究,努力探求影响驾驶行为的外在原因,从而有效地使用技术手段加以改善.本文是有关地下道路交通安全保障方面的研究总结.这项研究希望能够从驾驶员视觉感知角度来分析道路环境影响驾驶行为的原因.本文主要内容包括:通过自然驾驶实车实验,分析地下和地上道路在运行速度保持和车头间距控制方面的差异;利用视觉负荷计算模型对差异性机理进行解析;根据解析结果,对地下道路规划设计和运营管理提出改善措施.

## 1 不同道路环境下的车辆运行特征试验分析

采用运行车速和车头间距来描述车辆运行特征,使用自然驾驶实车试验来分析车辆在地上和地下道路环境中表现出来的差异情况,分为自由流和跟驰两种状态进行试验和分析.

### 1.1 试验方案及数据采集

选用小型车辆作为试验车,选定晴好天气,在上海市的新建路隧道和人民路隧道进行实车正常行驶试验,同时在中环线浦西武宁路立交至国定路出入口段进行对比试验.试验车配备非接触式速度仪(ES-II型非接触式五轮仪)、激光测距仪(LDS-RS-200型工业级激光测距传感器)和数字摄像机(德国 Allied Marlin F-131C),分别采集车辆行驶速度、车头间距和道路交通环境视频图像.

试验按照“匝道进—主线出”、“主线进—匝道出”和“主线进—主线出”3组模式组织,新建路隧道试验路线为“陆家嘴环路→新建路隧道浦东主线入口进→新建路隧道高阳路匝道出→东余杭路调头→新建路隧道东余杭路入口进→新建路隧道浦东主线出口出→陆家嘴环路调头→新建路隧道浦东主线入口进→新建路隧道浦西主线出口出”.人民路隧道试验路线为“长乐路瑞金一路→人民路隧道主线入口进→人民路隧道主线出口出→东昌路调头→人民路隧道主线入口进→人民路隧道河南南路匝道出→河南南路→大境路→人民路→人民路隧道人民路匝道进→人民路隧道银城东路匝道出口出→陆家嘴环路”.中环线试验路线为“中环武宁路立交进→沪嘉立交→共和新路立交→国定路出口出→国和路调头→中环国和路匝道进→共和新路立交→沪嘉立交→中环武宁路立交出”.共组织23名试验者,每一位试验者均要求完成上述3组路线的驾驶试验,试验时间大约在60~80 min左右,获取的数据为一个样本集,从中每10 s抽取一个样本(运行速度、车头间距和驾驶员视觉图像).全部试验完成后,按照地下和地上道路中的直线段、曲线段、分流段和合流段的不同位置,再结合跟驰和自由流两种状态,共分成16类,分别整理出250个数据样本进行统计分析.

### 1.2 跟驰状态下行车速度和车头间距特征关系

记录试验车辆运行速度和与前车间距,根据车辆行驶在道路上的直线段、曲线段、分流段和合流段4个不同位置,对运行速度进行分布检验,总体服从正态分布,检验结果  $N(\mu, \sigma)$  标注在图1中,同时在图上标出地上和地下道路的速度限制值,分别为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

从图1中可以看出,在直线和曲线路段,在跟驰状态下,无论地上还是地下道路环境下,车速大体随车间距的增大而增大;当车间距拉大到一定数值之后,这种车速增大的趋势逐渐放缓直到最终徘徊在一定数值附近.对地上道路来说,这一数值与路段限速值较一致(限速  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ );对地下道路来说,这一数值要大于路段限速值( $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ).这是因为在跟驰状态下,驾驶员主要是根据与前车距离的远近来决定行驶速度,一般不会超过限速值.显然驾驶员在地上环境中更容易保持速度,而在地下环境中,人对于车速保持和空间距离的判断能力有所下降,以至于在较近的车距情况下仍然无法及时感知到车速过高带来的驾驶风险.

在匝道的出入口段,地下道路在小间距情况下

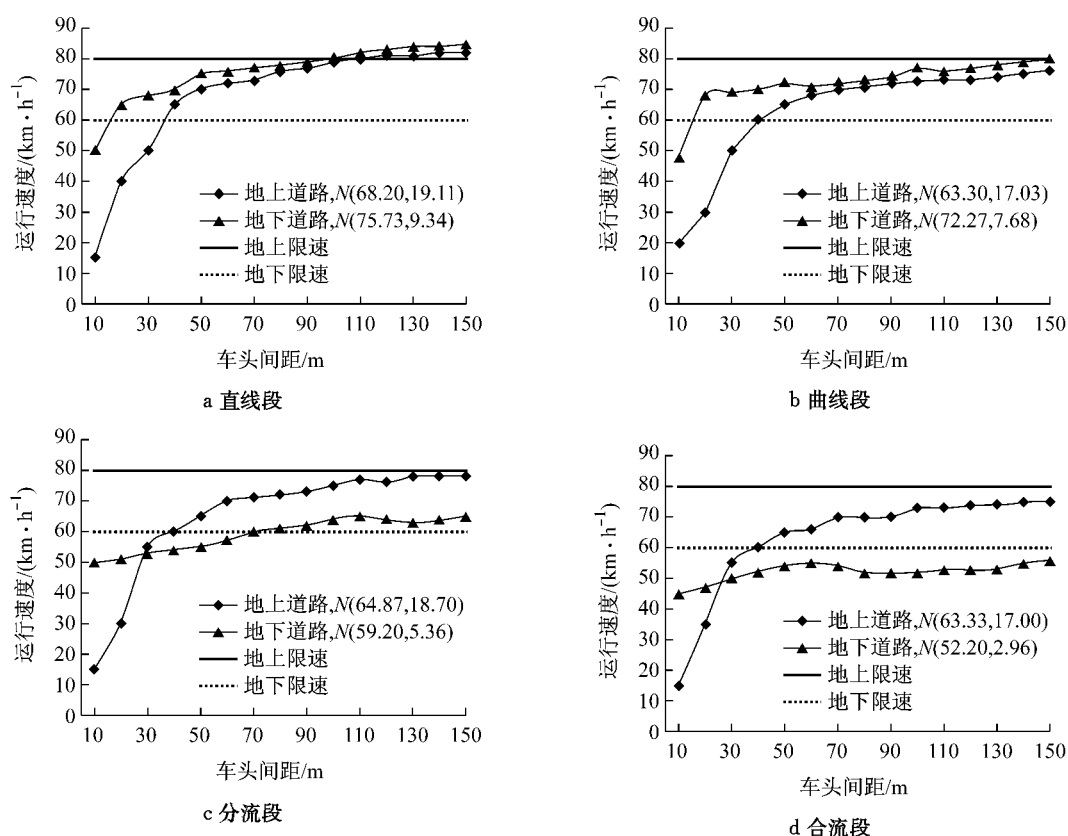


图1 跟驰状态下车头间距和车速的关系

Fig.1 Relationship between headway space and vehicle speed on a car-following state

车速保持的总体水平与路段限速接近,和一般地上道路出入口情况没有明显差异,这可能与地下道路入口前通常布置带信号灯的地面平交口、出口带有上坡帮助减速以及驾驶员心理有所准备有关,并不像一般隧道在入口处有明显先减速、出口处有明显加速,形成车辆速度分布波动的现象<sup>[10]</sup>. 故可以认为,在城市地下道路中,出入口匝道中的车辆运行状态是基本安全的,和一般地上道路出入口相比,并没有明显的差异.

### 1.3 自由流状态下行驶速度特征情况

车头间距大于 150 m 时可以认为车辆处于自由行驶状态. 此时,车速与车头间距相互独立,不再有必然的联系,而是根据行车条件由驾驶员根据自己的体会决定. 这时车辆的行驶状态不受前车的限制,大量速度样本统计后呈现一定的分布规律. 为了显示这种状态下的车速分布情况,绘制自由行驶状态下的车速频率分布直方图(如图 2),同样分为直线段、曲线段、分流段和合流段 4 个位置,从图中可以看出大部分驾驶员习惯维持的行驶速度,自由流状态下,运行速度呈正态分布.

从图 2 中看出,在自由行驶状态下,无论地上还是地下道路,其车速均体现了两类状况,即第 1 类车

速分布在  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  附近,离散程度较大;第 2 类在  $55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  附近,离散程度较小. 地上与地下道路在直线段、分合流段车速较为相似. 唯独不太相似的是在曲线段的车速,地下道路明显快于地上道路. 这种差异可能源自地下道路驾驶员对曲线的敏感程度降低,车辆容易以高速行驶. 事实上实际地下道路的限速为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,低于地上道路的运行限速  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . 这表明,在自由行驶情况下,地下道路的行车环境容易使驾驶员产生误判出现超速现象,这对安全行车将构成很大的威胁.

综合以上的分析,可以总结出地上与地下道路的车辆运行特征的主要差异为:

(1)跟驰状态下,地上道路车速、车头间距分布较合理,车速、车头间距呈明显的单调递增,且实际车速曲线递增趋势与限速接近,这表明地上环境下,驾驶员能较为准确地判断车速与距离,将车辆操控在安全的范围内. 而在地下道路中,车速与车头间距虽然也呈现很强的单调关系,但是车头间距控制得相对比较小,驾驶员对车头间距的敏感性出现一定程度的迟钝,无法及时准确地感知到车辆正处于危险状态.

(2)自由流状态下,地下道路中车辆运行速度相

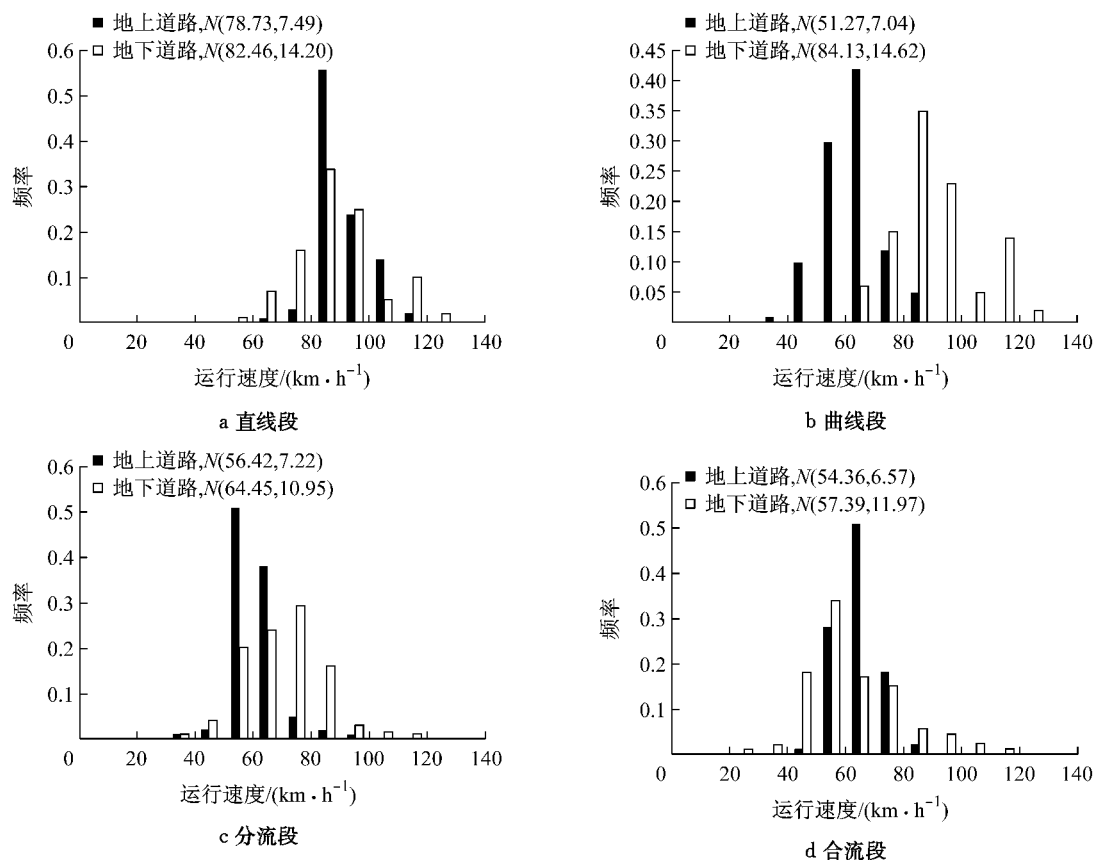


图2 自由行驶状态车速频率直方图

Fig.2 Vehicle speed frequency histogram on a free-driving state

对来说要比地上道路高,尤其在曲线路段,驾驶员存在明显的超速行驶情况,问题的关键在于驾驶员并没有意识到这点,表明驾驶员在不知不觉中维持一个自己认为比较安全的行驶速度,而实际的速度要比限制的速度高得多,存在的事故风险自然就增大了。

这些差异表明驾驶员在地下环境中对速度和与前车距离的感知能力下降,主要原因是驾驶环境的改变造成的,而地下和地上道路环境主要不同就表现在驾驶员所获得的视觉环境不相同,或者说反映在驾驶员视觉中的信息数量和强度都不相同,表现出来就是车辆行驶特征的不相同。

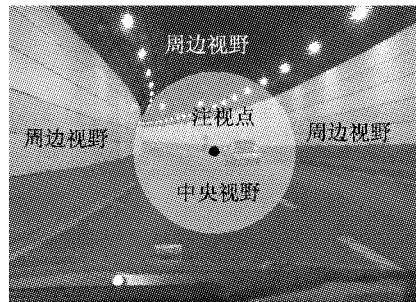
## 2 驾驶员获得的视觉信息负荷计算

从上面分析可以看出,由于道路交通视觉环境的不同,驾驶员表现在地上和地下环境中的行车特征有明显的差异。那么这其中究竟是哪些因素在起作用,影响的程度如何,以及如何有针对性地道路设计和运营管理中予以改善都是急需解决的问题,这对提高道路交通安全性有非常现实的意义。

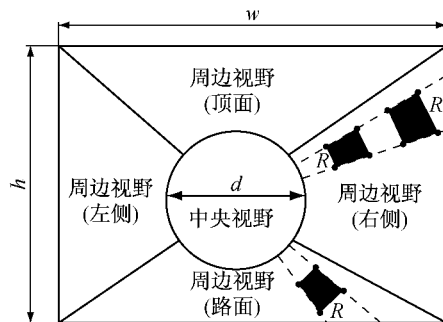
### 2.1 视觉动态特性、视野和信息负荷

驾驶员在行车过程中通过动态视觉来感知交通环境信息,人眼视觉动态特性主要包括动视力、动视野和动态注视距离等能力。研究表明这些都会随运动速度变化而变化。行车过程中驾驶员会通过一个动态视锥台来获取道路交通的环境信息,有一个视线集中点,根据人眼的生理特性,存在中央视野和周边视野的情况,中央视野负责感知运动物体的细部特征、大小、层次和意向等,如需要认清对象细节,就需要在景物上停留。这一范围内视力最高,也被称为有效视野。而周边视野主要从总体上感知物体轮廓、色彩、方向和快慢等信息,还可以适应光线的突然变化等情况,也称周边视野(如图3a)。图3b是计算中央视野和周边视野所产生的信息负荷模型,其中 $w$ 和 $h$ 分别表示驾驶员感知到的视觉画面宽度和高度, $d$ 则是中央视野的直径, $R$ 是计算视觉负荷的面域示例。通常情况下,随着速度提高,注意力逐步提高,注视点逐渐后退,而视野逐渐变小。表1是有关行驶速度、视野范围、注视距离和可视时间等方面的资料,人的中央视野范围在 $22^\circ \sim 100^\circ$ 度之间,随速度增加而逐渐减少,而景物在驾驶员视野中出现的

时间在 6~18 s 之间,同样随速度增大而逐步减少。



a 视觉空间



b 计算模型

图3 包含中央和周边视野的视觉空间和计算模型

Fig.3 Visual space and computational model with central and peripheral vision

表1 行驶速度、视野范围和可视距离

Tab.1 Moving speed, field of view and visual distance

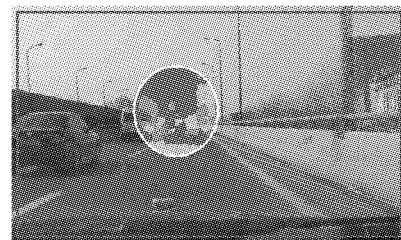
速度/(km · h <sup>-1</sup> )	视野/(°)	注视距离/m	可视时间/s
40	100	180	18.0
60	86	335	12.0
80	60	377	9.0
100	40	564	7.2
120	22	710	6.0

道路交通运行环境通过驾驶员的视觉进行信息感知,就会产生视觉信息负荷。视觉信息负荷是视野中的信息刺激人眼产生的,视觉环境越复杂,车速越快,需要处理接受的信息量就越大,信息负荷就越大。反之,当视觉环境简单,处理的信息量小,产生的信息负荷就会比较小。中央视野和周边视野均会产生视觉信息负荷,最终眼睛所获得的信息负荷是两者的总和,但是不同的视觉环境所产生的两类信息负荷分配是不相同的。视觉信息负荷水平较低时,驾驶员容易分散注意力,因疏忽大意而发生交通事故,当信息负荷过大,超过生理极限,驾驶适应性就会降低,因反应迟钝或者判断错误导致交通事故。从安全驾驶角度分析,信息负荷水平适中对于行车安全是有利的。

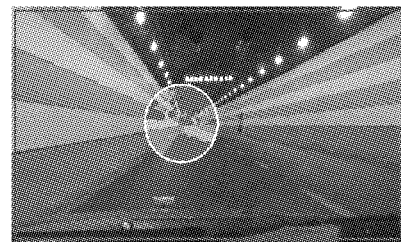
## 2.2 考虑视野的道路环境视觉信息负荷计算模型

在道路视觉环境中,视野包含中央视野和周边

视野,为进一步刻画视觉环境空间,将视觉环境空间解析成图3的计算模型。中央视野表述为一个圆形“面”区域,而周边视野划分成4个相邻的“面”区域,分别为路面、顶面、左侧和右侧,这些对象在驾驶员视野中持续存在的时间为 $\bar{t}$ ,而对应的平均纹理亮度值用 $\bar{L}$ 表示,车辆运行速度为 $\bar{v}$ ,可视距离为 $\bar{s}$ , $\bar{t} = \bar{s} / \bar{v}$ ,每一个区域再根据纹理亮度信息划分成若干个小面域进行更精细的计算,如图3中的小面域R。图4则为具体的不同道路环境下的中央视野,周边视野所产生的负荷计算情况。



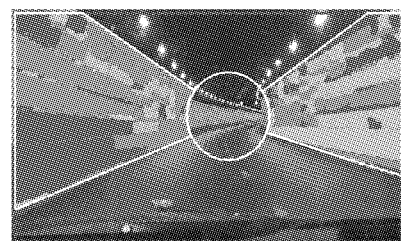
a 地上道路中央视野



b 地下道路中央视野



c 地上道路周边视野



d 地下道路周边视野

图4 不同环境下的中央和周边视野视觉负荷计算

Fig.4 Visual load calculations from central and peripheral vision in different environments

设时间 $t$ 内分别有 $n_c$ 和 $n_p$ 个视觉环境区域块R对驾驶员的中央视野和周边视野产生信息刺激,产生的视觉信息负荷分别为

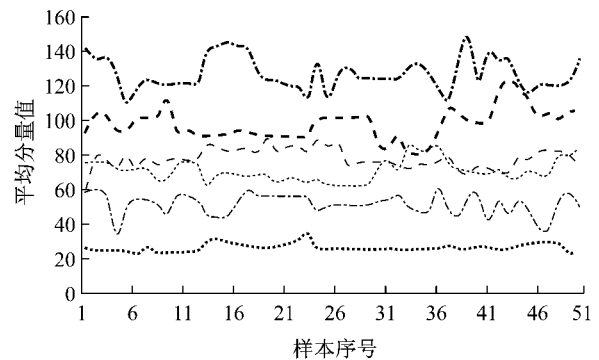
$$F_c = \sum_{i=1}^{n_c} \bar{L}_i \bar{t}_i \bar{A}_i \quad (1)$$

$$F_p = \sum_{i=1}^{n_p} \bar{L}_i \bar{t}_i \bar{A}_i \quad (2)$$

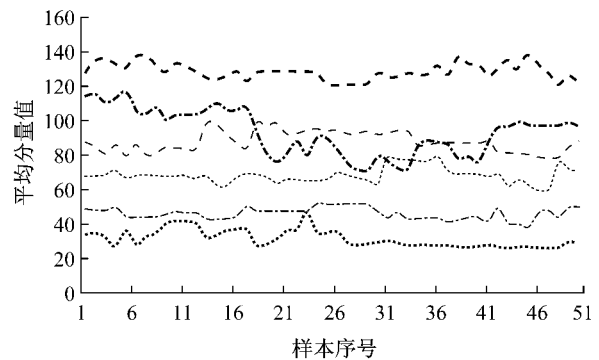
式中:  $\bar{A}_i$  为小块区域图像的面积, 总的视觉信息负荷为  $F = F_c + F_p$ . 在单位时间内所获得的视觉负荷称为视觉信息负荷强度, 表征视觉信息变化的情况.

$$K_F = \frac{\Delta F}{\Delta t} = \frac{F_2 - F_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

毫无疑问, 无论中央视野还是周边视野, 都是通过获取信息而产生负荷的, 才会使地下和地上道路环境产生不同的驾驶行为. 视觉信息包含许多重要的信息, 那么在地下和地上环境中究竟是哪些因素起关键作用, 这里采用 HSV(hue saturation value)颜色模型解析, HSV 颜色模型比 RGB 颜色模型更加符合描述人类的视觉感知情况, 这里  $H$  为色相, 是色彩的基本属性, 即常用的颜色, 取值在  $0 \sim 255$  之间;  $S$  为饱和度, 指色彩的纯度, 值越高色彩越纯, 低则逐渐变灰,  $V$  指亮度, 两者取值在  $0 \sim 100\%$  之间, 为便于处理, 本文将其转化为  $0 \sim 255$  之间. 图 5 是分别计算的地上和地下道路视觉环境中各区域对应的 HSV 分量情况(局部样本). 可以明显看出在地下和地上环境中, HSV 的各分量的特征非常明显,  $H$  分量在地上和地下环境中差异并不很大, 这说明如果希望通过改变地下视觉环境的颜色来达到和地上环境差不多的水平, 意义是不大的. 而  $S$  分量和  $V$  分量在地上环境和地下环境中差异很明显, 不仅数值上差异比较大, 而且波动情况也明显不同, 地上环境中中央视野中的  $S$  分量和  $V$  分量均比地下环境中要高, 且波动也比较剧烈, 而地下环境中周边视野获得的  $V$  分量却比地上环境中的要高, 这就说明地下环境中周边视野中的亮度并不低. 这些特征情况为今后采取与其相适应的改善措施提供了基础. 因此纹理亮度值  $\bar{L}$  可以根据区域  $\bar{R}$  对应的纹理光照情况由 HSV 颜色空间中的所有区域的  $S$  值和  $V$  值的平均值之和来计算,  $H$  值忽略不计,  $\bar{L}$  较大则表明图像信息丰富, 各级的色彩信息离散性较好, 有利于分辨出其中的物体.  $\bar{L}$  较小则表明图像信息贫乏, 色彩信息趋于单一, 不利于区分画面中的物体.  $\bar{t}$  则为区域  $\bar{R}$  在驾驶员视野中持续保持的时间, 这样视觉信息负荷可以理解为在一定时间内平均纹理亮度为  $\bar{L}$ , 图像面积为  $\bar{A}$  的对象对驾驶员视觉产生的视觉刺激量, 而负荷强度则表示在单位时间内对驾驶员产生的视觉刺激量.



a 中央视野



b 周边视野

..... 地下  $H$  分量    --- 地上  $H$  分量    - · - · 地上  $S$  分量  
 ..... 地下  $S$  分量    --- 地下  $V$  分量    - · - · 地上  $V$  分量

图5 中央和周边视野对应 HSV 分量计算

Fig.5 HSV component calculation corresponding to central and peripheral visual

### 3 不同道路环境视觉信息负荷特性研究

根据前面完成的中央视野和周边视野所感知的视觉信息负荷计算方法, 就可以计算出不同道路环境下、不同速度下产生的视觉信息负荷量和视觉负荷强度. 下面分两种情况进行研究: ①分析中央视野信息负荷与车头间距的关系; ②分析周边视野信息负荷强度与行驶速度的关系.

#### 3.1 中央视觉信息负荷与车头间距的关系

结合实车试验中的车头间距与视频图像, 选取车辆稳定驾驶时的资料. 对地下道路与地上道路各采集 100 组数据分别进行视觉负荷计算, 形成车头间距和中央视觉负荷的关系图(如图 6).

可以看到, 无论地上道路还是地下道路中车头间距与中央视觉负荷具有明显的联系 ( $R^2 = 0.805$  和  $R^2 = 0.859$ ), 呈现二次多项式的关系. 在车头间距较近的情况下, 中央视野负荷比较大, 而当车头间距比较大时, 中央视野负荷则比较小, 与实际的驾驶

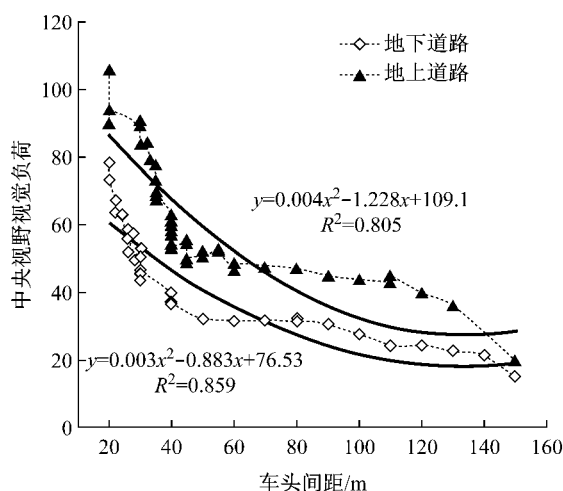


图6 中央视觉信息负荷与车头间距的关系  
Fig.6 Relationship between central vision information load and headway space

感受是一致的。可见驾驶员在跟驰的情况下,视线集中位置基本上在前面车辆上面,当车头间距比较大时,获得的视觉负荷比较小,不足以引起驾驶员的反应,不知不觉将车头间距缩小,此时中央视野的负荷也逐步增大;当驾驶员获得足够视觉负荷时(达到阈值),反应水平也达到比较高的水平,这时候车头间距就基本保持在一个相对稳定的数值附近,驾驶员可以平稳地驾驶。由于不同驾驶员对视觉负荷敏感程度不同,就表现出不同车头间距保持情况。从图中两条曲线可以看出,地上道路环境要比地下道路环境提供的视觉负荷大一些,基本上同样的视觉负荷水平,地下道路环境中车头间距要比地上近20 m左右,这也就解释了在地下道路环境中为什么驾驶员经常会保持比地面近一些的车头间距。

### 3.2 周边视觉信息负荷强度与速度保持关系分析

在自由流情况下,驾驶员对速度的保持主要取决于自己的安全感觉和驾驶经验,就容易出现超速现象,尤其是自我感觉出现偏差的情况下更是如此。为此同样采集100组地上和地下道路环境中自由行驶时的资料,计算周边视野负荷强度,形成运行速度和周边负荷强度之间的关系图(如图7)。

同样可以看出,运行速度和周边视野负荷强度相关性非常好( $R^2=0.971$ 和 $R^2=0.970$ ),呈幂函数关系。随着运行速度的增加,周边视野负荷强度呈现快速增加的情况。在自由流状态下,驾驶员不受前方车辆的限制,完全凭自己的理解和感知进行驾驶。当速度比较低时,周边视野负荷强度也比较低,驾驶员没有明显的速度感觉;当速度不断增加,周边视野负荷强度也在增加,当增加到某一个数值时(达到阈

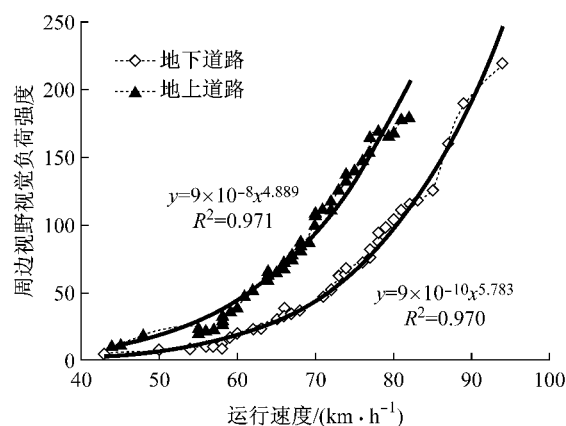


图7 周边视觉信息负荷强度与运行速度的关系  
Fig.7 Relationship between peripheral vision information load intensity and operating speed

值),驾驶员对速度有了比较清晰的反应,这个时候驾驶员一般会保持这个速度行驶,此时驾驶员感觉相对比较舒服,反应也比较灵敏,一般不会再无限制地加速行驶了。可以说在自由流行驶情况下,让驾驶员尽快获得足够的周边视野负荷强度是有积极意义的。从图上可以看出,要达到同样的周边视野负荷强度,地下道路环境中要比地上速度快近 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,这就说明了为什么地下道路环境中驾驶员往往在不自觉的情况下经常会超速行驶。

## 4 通过模拟驾驶研究可以采取的技术和管理措施分析

根据上面分析和研究,导致地下道路和地上道路车辆运行特征有差异的主要原因是中央视野及周边视野感知到视觉信息负荷量及强度的不同。为了提高行车安全性,对地下道路的设计方法和管理技术进行改善:①通过改善中央视野获得的信息负荷水平,尽快满足驾驶员视觉信息的需求;②增强驾驶员周边视野信息负荷强度,提高驾驶员对速度的感知能力。

### 4.1 提高中央视野提供的视觉负荷量

如前所述,在跟驰状态下,影响车头间距的主要原因是中央视野负荷量,而影响中央视野视觉负荷量的主要因素是S分量和V分量,也就是说可以通过提高中央视野对象的饱和度或者亮度来提高视野负荷量的大小。就地下道路环境而言,提高前方物体的可视性是解决问题的关键;就安全性的角度而言,后车驾驶员并不需要看清前方物体的每一个细节,而是只需要及时分辨出前方物体位置和轮廓,就可



以大大提高驾驶员从中央视野获取的信息负荷水平. 强制进入地下道路的车辆开启尾灯是一个有效且相对易于实施的手段, 同时要求大型厢式货车在车厢后部使用反光轮廓标也是非常有效的措施. 针对开启和不开启尾灯进行模拟驾驶研究, 结果表明在相同间距的情况下, 当开启尾灯后其  $V$  分量能比未开尾灯时提高约 60%, 可以显著地提高后车驾驶员对于前车的感知能力, 并且可以根据左右尾灯的视角变化较为准确地判断其与自身车辆的间距.

#### 4.2 提高周边视野的视觉信息负荷变化强度

根据前面分析, 地下道路驾驶员对于自身车辆速度感知能力的下降源自于周边视野负荷强度比较小, 使得驾驶员会不知不觉中通过提高行驶速度, 以获得足够的信息负荷, 从而比较容易引起超速的情况, 缺少应有的警觉. 因此提高负荷强度是解决问题的关键, 简单地讲就是需要提高路侧图案的丰富程度(即饱和度). 理想的路侧图案应当是丰富而有条理性的, 路侧纹理沿着道路纵向存在一定的周期性变化, 这样在车辆行进过程中, 有规律的图案变化一方面可以调节地下道路中单调的视觉环境, 另一方面可以通过变化周期的长短使驾驶员较容易地感知到自身车辆的速度情况. 因此, 对现有地下道路侧墙进行饱和度提升, 加入有条理的富有周期性的图案, 则能够帮助行驶于其中的驾驶员更好地控制车速.

为此, 设计了 4 种地下道路侧墙图案饱和度提升模式(如图 8), 每个方案长度 500 m, 通过模拟驾驶分析其速度控制情况, 要求驾驶员按照指定的控制速度行驶. 图 9a 是自由流状态下的模拟驾驶实验分析结果, 共有 10 名驾驶员参加实验, 分别要求他们以  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  两种控制速度模拟驾驶 2 km, 结果显示方案 a ( $0 \sim 500 \text{ m}$ ) 和方案 c ( $1\,000 \sim 1\,500 \text{ m}$ ) 速度保持得最好, 其他两个方案都有明显的超速现象, 尤其是方案 d ( $1\,500 \sim 2\,000 \text{ m}$ ) 在  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  限速下超速比较大. 图 9b 是限速为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的模拟驾驶跟驰实验分析结果, 速度总体比较平稳, 因为前面有车辆, 因此速度总体受到制约, 车头间距很能说明问题, 方案 a ( $0 \sim 500 \text{ m}$ ) 的车头间距明显要比其他方案来得大, 这说明接近自然景观的环境可以让驾驶员比较容易控制车速和车头间距. 图 9c 是限速为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的模拟驾驶跟驰实验分析结果, 由于速度比较快, 因此无论是速度控制和车头间距都比上面的结果要稍高一些, 这符合实际情况, 除了方案 a 保持比较大的车头间距外, 方案 b 和方案 c 也有所提高, 说明做一些图案和形状在速

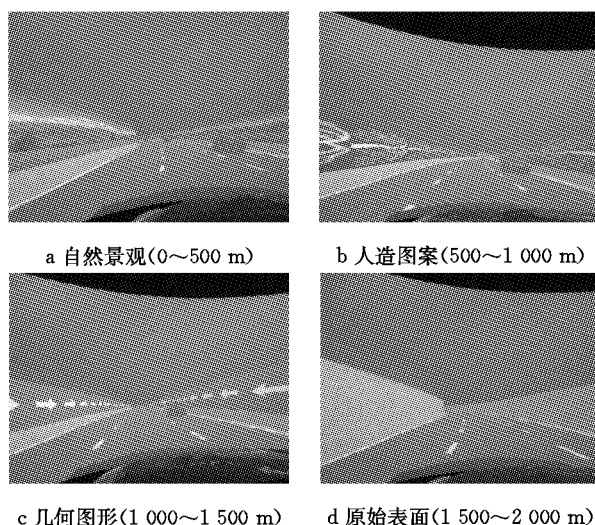


图 8 地下道路路侧环境饱和度提升方案

Fig.8 Saturation lifting scheme of underground roadside environment

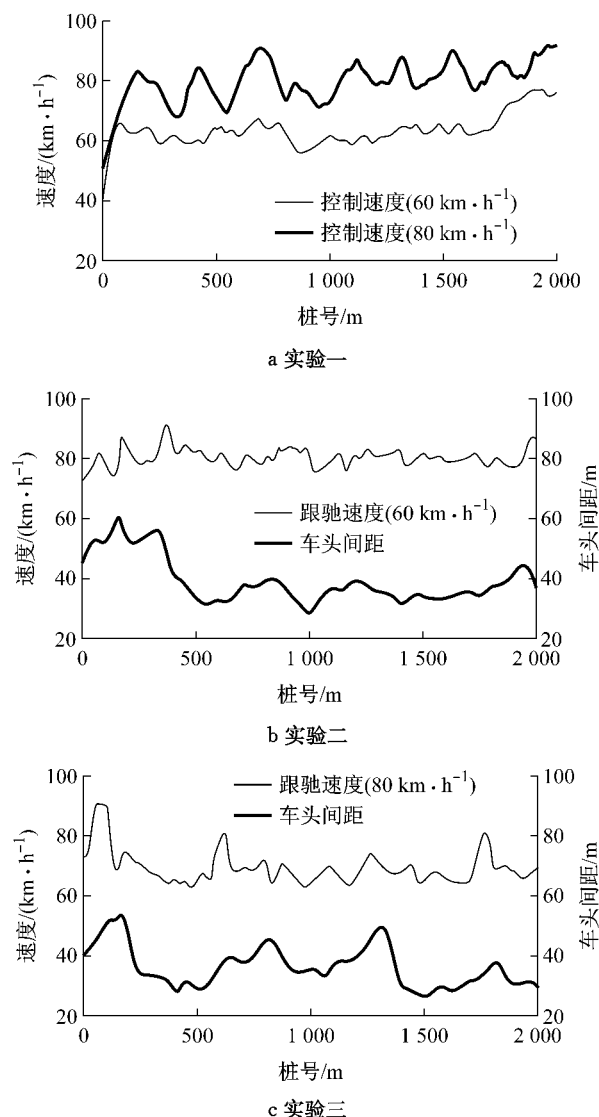


图 9 模拟驾驶实验结果分析

Fig.9 Analysis of driving simulation results



度比较高的情况下也有一定的效果,但方案 d 始终不理想。

上述实验和分析表明方案 a 比较合理,不仅可以提高周边视野的负荷强度,而且可以大大提高驾驶员对速度的控制能力。

## 5 结语

本文是有关道路视觉环境影响驾驶行为系列研究的阶段成果。通过研究可以发现,一方面道路视觉环境对驾驶行为有很大影响,另一方面如果有针对性地采取措施可以大大提高道路环境提供给驾驶员视觉信息的质量和水平,提高交通安全性。后续研究将进一步结合驾驶员视觉其他特性,充分挖掘道路交通基础设施的潜力,最大程度地为驾驶员提供准确丰富的信息,减少交通事故的发生。

### 参考文献:

- [1] Kato M. An analysis on traffic accidents of highway[J]. The Japanese Journal of Ergonomics, 1980, 16(3): 99.
- [2] Terumitsu Hirata, Tetsuo Yai. Traffic safety analysis in underground urban expressway using a driving simulator[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2003(5): 2592.
- [3] 王琰, 孔令旗, 郭忠印, 等. 基于运行安全的公路隧道进出口线形设计[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 134.  
WANG Yan, KONG Lingqi, GUO Zhongyin, et al. Alignment design at tunnel entrance and exit zone based on operating safety[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2008, 25(3): 134.
- [4] 潘振斌, 杨荫. 暗视场对驾驶员视觉特性的影响分析[J]. 公路与汽运, 2003(1): 22.  
PAN Zhenwu, YANG Yin. Analysis driver visual characteristics impacted by dark vision field[J]. Highways and Automotive Applications, 2003(1): 22.
- [5] 殷艳红, 潘晓东, 杨轸. 道路视觉环境与安全行车的关系[J]. 公路与汽运, 2007(3): 48.  
YIN Yanhong, PAN Xiaodong, YANG Zhen. The relationship between highway visual environment and safe driving [J]. Highways and Automotive Applications, 2007(3): 48.
- [6] Toshihiro Wakita, Koji Ozawa, Chiyoumi Miyajima. Driver identification using driving behavior signals[C]//Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Vienna: IEEE, 2005: 907.
- [7] Wohlwill F. Environmental aesthetics: the environment as a source of affect[C]//Human Behavior and Environment. New York: Plenum Press, 1976: 37-86.
- [8] Taylor J G. Zube, Landscape assessment and perception research methods [C]//Methods in Environmental and Behavioral Research. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1987: 361-393.
- [9] Topp H H. Traccic safety, usability and streetscape effects of new design principles for major urban roads [J]. Transportation, 1990(16): 297.
- [10] 潘晓东, 杜志刚, 杨轸. 动视点指标与隧道进口平曲线半径[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(2): 1661.  
PAN Xiaodong, DU Zhigang, YANG Zhen. Relationship between eye movement index and horizontal alignment at entrance of highway tunnel[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(2): 1661.