

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.01.015

# 视觉分神对驾驶员跟驰行为的影响

郑志晓, 李鹏辉, 胡孟夏, 李一兵

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为了研究驾驶员视觉通道被车载信息系统所占用时, 驾驶员对交通信息进行实时加工处理的机理及其应对事故风险的能力, 模拟车载信息系统设计了诱导驾驶员视觉分神的驾驶次级任务。根据次级任务的复杂程度划分为3个任务难度等级, 使得驾驶员单次视线离开路面的时间随着次级任务难度增加而递增; 基于驾驶仿真试验平台, 构建了城市道路和高速公路下的典型跟驰场景; 招募熟练驾驶员, 于驾驶过程中根据试验声音提示执行驾驶次级任务。对采集的试验数据先采用箱图方法进行离群处理, 对筛选后的数据采用方差分析和多重比较的方法, 分析驾驶员对车辆车道位置掌握、转向盘调整等相关横向操控行为, 驾驶员对车辆纵向位置调整、车速调整等相关纵向操纵行为, 以及通过其对车辆横纵向控制反映出的补偿措施。分析结果表明: 无论车辆处于高速还是低速行驶环境, 处于视觉分神状态的驾驶员对车辆的横向控制能力均会变差; 驾驶员视线离开路面的时间越长, 其对车辆的横向控制能力越差; 车辆高速行驶时, 驾驶员将面临更大的横向失控风险; 而无论车辆处于高速还是低速行驶环境, 驾驶员在意识到自身视线离开路面时间过长后, 均会通过降低速度和增大跟车距离, 以平衡视觉分神带来的纵向方向上的事故风险。

**关键词:** 交通安全; 视觉分神; 方差分析; 跟驰行为; 补偿措施

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)01-0122-09

## Influence of Visual Distraction on Driver's Car-following Behavior

ZHENG Zhi-xiao, LI Peng-hui, HU Meng-xia, LI Yi-bing

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy Saving, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to analyze the mechanism how would driver process the environment information in the real-time and how driver's ability to handle with accident would change in the situation where driver's visual channel is occupied by the in-vehicle information system, a secondary driving task that imitates the in-vehicle information system and will induce driver to visual distraction status is designed. The secondary task is subdivided into 3 levels according to the task's complexity, and driver's single eyes-off-road time will go up with the level of the secondary task. The classical city and expressway car-following scenarios are built on a driving simulator, and skilled drivers are recruited to carry out the secondary tasks while driving on the simulator according to the voice notification. The collected experimental data are pre-processed with the method of outliers kicking by box plot, and then methods of analysis of variance and post hoc tests are applied to analyze the drivers' relative lateral control behaviors such as vehicle lateral position and vehicle steering wheel adjustment, drivers' relative vehicle longitudinal control behaviors like vehicle longitudinal position and vehicle speed adjustment, as well as the compensatory measures reflected by the vehicle lateral and longitudinal control. The analysis result shows that (1) the visual distracted drivers' vehicle lateral control ability degenerates in whatever velocity; (2) drivers' lateral control ability to vehicle descends as the eyes-

收稿日期: 2017-10-17

基金项目: 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室自主课题项目(ZZZ2016-032)

作者简介: 郑志晓(1991-), 女, 广东阳江人, 硕士研究生. (zhengzx14@tsinghua.org.cn)

off-road time go up, (3) drivers face with a greater risk of being out of vehicle lateral control if they drive in a higher velocity; (4) no matter when drivers are in high speed or low speed driving situation, when they have realized that their eyes-off-road time are too long, they tend to lower the acceleration amplitude as well as increase the following distance, to make a compensation to the accident risk increased by visual distraction, in whatever velocity.

**Key words:** traffic safety; visual distraction; Analysis of variance; car-following behavior; compensatory measure

## 0 引言

在“人-车-路”闭环系统中, 驾驶员处于核心地位。道路交通事故统计表明, 驾驶员因素是引发交通事故的主要原因<sup>[1]</sup>。驾驶员在驾驶过程中需实时监控道路环境、操控车辆, 从而需要调用大量的视觉资源。因此, 当驾驶员的视觉通道资源被与驾驶无关的任务占据时, 驾驶员的行车安全最受威胁<sup>[2]</sup>。驾驶员处于视线离开路面的状态时 (Eye off Road) 被认为处于视觉分神状态<sup>[3]</sup>, 属于驾驶员分神的4种模式之一<sup>[4]</sup>。

视觉分神会损害驾驶员的行车效能, 增加事故风险。Yan等<sup>[5]</sup>的研究表明, 行车过程中发短信会导致青年驾驶员车速波动增大、车辆横向位置波动增大、跟车距离增大。Anttila等<sup>[6]</sup>采用了替代性次级任务 (Surrogate In-Vehicle Information Systems, S-IVIS) 研究了视觉分神对驾驶员驾驶表现的影响, 指出视觉分神会使驾驶员误操作频率增加以及事故风险增加。Holahan等<sup>[7]</sup>通过驾驶模拟器进行了相关试验, 指出视觉分神会使驾驶员反应时间增加。马艳丽等<sup>[8]</sup>通过实车试验, 对驾驶员在使用车载信息系统时 (动作分神) 的驾驶表现进行了分析, 指出交通环境和车载信息系统操作对驾驶员手离开转向盘的时间和制动操作差错具有显著影响。Engström等<sup>[3]</sup>通过驾驶模拟试验指出, 视觉分神会增加驾驶员的换道错误率。Lamble等<sup>[9]</sup>对追尾冲突的数据进行分析后发现, 视觉分神会导致驾驶员的平均制动时间延迟0.5 s, 增大事故风险。Zwahlen等<sup>[10]</sup>认为当驾驶员单次视线离开路面的时间超过2.0 s, 且连续保持4次以上时, 发生交通事故的可能性极大; 且驾驶员发生事故的可能性随着驾驶员单次视线离开路面的时间和驾驶员视线离开路面的频率增大而提高。Bruce等<sup>[11]</sup>研究发现, 驾驶员单次视线离开路面存在一定安全阈值, 对于普通驾驶员, 该安全阈值为2.0 s; 研究也发现, 事故风险与驾驶员单次视线离开路面的时间呈正相关关系。Liang等<sup>[12]</sup>

对100辆车的自然驾驶数据进行分析后, 也验证了事故风险与驾驶员视线离开路面的时间呈正相关关系。Wilde<sup>[13]</sup>认为当驾驶员面临事故风险时, 会对自己的驾驶行为采取一些补偿措施, 常见的措施有降低跟车速度<sup>[14-16]</sup>、增加跟车时距或跟车距离<sup>[14-16]</sup>、停止接听电话、与乘车人交谈等次级任务<sup>[15]</sup>、频繁换道<sup>[15]</sup>、提前把脚移到制动踏板处以缩短脚从油门踏板移动到制动踏板的时间<sup>[17]</sup>以及制动时增加制动力度<sup>[18]</sup>等, 该补偿措施可视为驾驶员在驾驶任务和次级任务中做出的事故风险平衡举措。

上述的研究对驾驶员在行车过程中处于视觉分神状态时的一些驾驶表现和危险应对能力进行了分析, 但关于何种程度的视觉分神会影响行车效能, 以及上述影响在不同交通环境 (如车速) 下是否一致, 鲜有研究。本研究分别分析在不同的车速环境下, 驾驶员处于不同程度的视觉分神状态时的驾驶行为及其补偿措施, 讨论视觉分神对行车安全的影响, 可为涉及视觉分神的车载设备设计及相关交通法规的制定提供理论基础。

## 1 试验设计与数据采集

### 1.1 试验仪器与试验过程介绍

本次试验在清华大学驾驶仿真试验平台 (如图1所示) 上完成, 并配备使用德国SMI公司生产的ETG™的眼镜式眼动仪。试验通过驾驶仿真试验平台采集驾驶员的驾驶数据 (采样频率为60 Hz), 通过眼动仪采集驾驶员的眼动数据 (采样频率为30 Hz)。清华大学汽车安全与节能国家重点实验室的驾驶仿真试验平台 (如图1所示) 由实时场景成像系统、六自由度驾驶平台、三维视觉系统、数据采集系统等组成。5个分别位于前、后、左右的显示屏能够给驾驶员提供水平36°、垂直30°的后视空间和水平200°、垂直50°的前视空间, 能够逼真地显示实车试验的驾驶场景。被试驾驶员根据所提供的交通场景, 依主观判断做出相应的行车决策, 然后通过转向盘、制动踏板、加速踏板等操纵机构操纵车辆, 数据采



图1 驾驶模拟器

Fig. 1 Driving simulator

集系统将实时记录车辆的运行状态参数。

本次试验用 Multigen Creator 和 Scenery Creator 软件生双向四车道城市道路场景(图2)及双向四车道的高速公路场景(图3)。城市道路场景包含宽 3.7 m 的自行车道、宽 3.7 m 的人行道和宽 3.5 m 的行车道,各车道线宽 0.2 m,双黄实线间宽 1.0 m,符合国家城市公路车道线设计标准。考察城市道路长 35 km,每隔 3 km 有由红绿灯控制的十字路。该城市道路场景限速为 50 km/h。高速公路包含宽 3.75 m 的行车道和宽 3.0 m 的紧急车道,车道线宽 0.2 m,中央隔离带宽 2.0 m,符合国家高速公路车道线设计标准。考察高速公路路段长 200 km,限速为 60~100 km/h。所有场景的路面均为沥青路面,路面平直,环境效果设置为白天,天气晴朗。场景中还包括其他车辆、交通标志、道路标线、树木等各种道路景观。该城市道路场景为 60 km/h,前车车速为 50 km/h。高速公路限速为 60~100 km/h,前车的车速为 90 km/h。



图2 城市道路场景

Fig. 2 Urban road scenario

本次试验数据来自 30 位熟练驾驶员,性别包含男女,年龄范围为 20~60 岁(平均值为 32 岁,标准差为 9.70 岁,驾龄不少于 2 a,驾驶里程不低于 10 000 km)。考虑到驾驶员视力对试验结果影响的可



图3 高速公路场景

Fig. 3 Expressway scenario

能性,本次试验所有被试驾驶员视力均满足散光在 100°以下、矫正视力在 5.0 以上的条件;此外,所有驾驶员身体状况良好,无晕车经历。所有被试驾驶员在试验开始前将在驾驶模拟器上试驾 10 min,以适应驾驶模拟器的操作。

本试验要求被试驾驶员分别在城市道路及高速公路直线段跟车驾驶,驾驶的同时根据语音提示完成所给的次级驾驶任务,如图 4 所示。该次级驾驶任务模拟车载信息系统与驾驶员的互动方式而设计<sup>[9]</sup>,以实现诱导驾驶员视线离开路面的目的。次级任务被设计为 3 个难度等级,难度等级越高,驾驶员单次视线离开路面的时间越长(不同视觉分神等级的单次视线离开路面的时间统计见表 1),则驾驶员分神程度越高。次级任务摆放的位置如图 5 所示。试验过程中,每次次级任务出现 5 组同等级的任务,每组任务持续 7.0 s,因此每次次级任务持续 35.0 s。每个试验场景驾驶员重复试验两次。

## 1.2 数据处理

用箱图法观测和剔除数据样本中的离群值,提高数据分析的准确性。

箱图法离群值的判断方法为:确定样本总体的第 25 个百分位数(第 1 个四分位数  $Q_1$ )、第 50 个百分位(第 2 个四分位数  $Q_2$ )、第 75 个百分位(第 3 个四分位数  $Q_3$ )以及四分位数间距( $Q_3$ 与  $Q_1$ 的差值),计算离群值上极限和下极限边界(大于或者小于剩下观测值的 1.5 倍的四分位数间距),筛选超过上极限和下极限的数值,判断该数值为离群值。

四分位数间距:

$$IQR = Q_3 - Q_1. \quad (1)$$

离群值上极限:

$$upper = O_3 + 1.5IQR. \quad (2)$$

离群值下极限:

$$lower = O_1 - 1.5IQR. \quad (3)$$

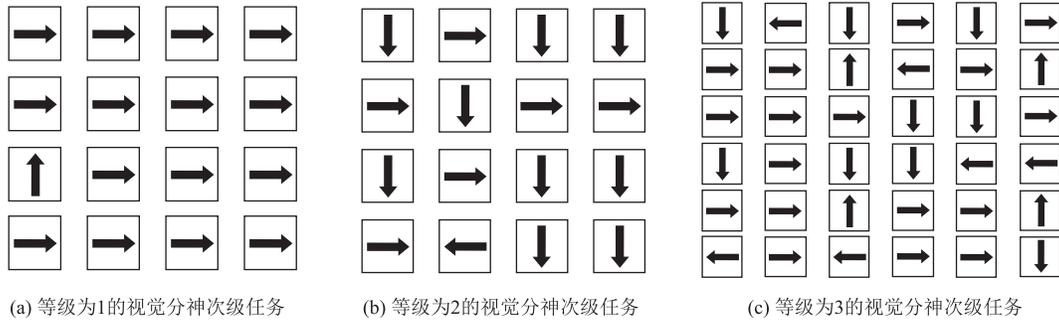


图 4 视觉分神次级任务

Fig. 4 Visual distraction secondary tasks



图 5 视觉分神次级任务摆放位置

Fig. 5 Location of visual distraction secondary task

采用方差分析 (Analysis of Variance, ANOVA) 的方法研究视觉分神对驾驶员车辆横向控制行为的影响。对于不满足方差齐性的样本, 将进行 Welch 修正后检验; 采用 LSD 及 Tamhane's T2 多重比较的方法对不同水平下的样本进行方差分析, 探究两两水平间差异的显著性。

## 2 结果

### 2.1 驾驶员视线离开路面的时间

本次试验, 在不同难度等级的次级任务中, 驾驶员单次视线离开路面的时间统计分析结果见表 1。

表 1 不同视觉分神等级下单次视线离开路面的时间

Tab. 1 Single eyes-off-road time of visual distraction in each level

分神等级	最小值/s	最大值/s	均值/s	标准差/s
1	1.346	2.171	1.746	0.187
2	1.538	2.371	1.947	0.193
3	2.094	3.684	2.814	0.389

驾驶员在驾驶过程中执行表 1 中的 3 种不同等级的视觉分神次级任务时, 其单次视线离开路面的时间有显著性差异 ( $F_{(2,760)} = 82.180, P < 0.001$ )。随着次级任务难度增大, 驾驶员单次视线离开路面的时间延长 ( $P_{0_1} < 0.001, P_{0_2} < 0.001, P_{0_3} <$

0.001), 因此验证了次级任务设计的合理性。

### 2.2 车辆横向控制

#### 2.2.1 车辆横向运动

车道偏离量标准差可反映车辆的横向位置波动。视觉分神对车辆的的车道偏离量标准差有显著性影响, 该影响均体现在高速公路 ( $F_{(3,196)} = 5.941, P = 0.006$ ) 和城市道路 ( $F_{(3,108.1)} = 2.823, P = 0.040$ ) 中。且无论驾驶员处于何种等级的视觉分神状态, 车道偏离量标准差 ( $F_{(1,398)} = 81.419, P < 0.001$ ) 的值在高速行驶环境下均高于低速行驶环境 (如图 6 所示), 说明车辆的横向位置波动与车辆行驶速度相关, 车速越高, 车辆的横向位置波动越大, 车辆的横向运动越不稳定。根据车辆的车道偏离量标准差在高速公路 ( $P_{0_1} = 0.197, P_{0_2} = 0.133, P_{0_3} < 0.001$ ) 和城市道路 ( $P_{0_1} = 0.662, P_{0_2} = 0.104, P_{0_3} = 0.050$ ) 中各自的多重比较结果分析可得, 当驾驶员的视觉分神程度达到高等级 (3 级视觉分神状态) 时, 车辆的车道偏离量标准差开始出现显著的增加 (如图 6 所示), 说明驾驶员单次视线离开路面的时间达到 2.814 s (表 1) 后, 车辆的横向位置开始出现明显的波动。

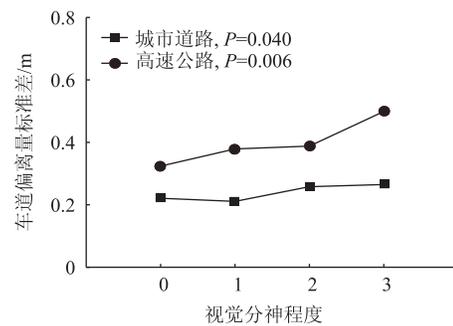


图 6 视觉分神对车道偏离量标准差的影响

Fig. 6 Influence of visual distraction on standard deviation of lane deviation

车道偏离量最大值反映了车辆的车道偏离程度。

在城市道路中,视觉分神对车辆的车道偏离量最大值 ( $F_{(3,196)} = 1.405, P = 0.245$ ) 未观测到有显著性影响,说明低速行驶时,视觉分神对车辆的车道偏离程度并无显著影响。但在高速公路中,观测到视觉分神对车道偏离量最大值 ( $F_{(3,196)} = 10.759, P < 0.001$ ) 即车道偏离程度产生了显著性影响。数据表明,在高速公路场景,当驾驶员视觉分神状态达到2级或其以上时,车辆的车道偏离量最大值 ( $P_{0_1} = 0.408, P_{0_2} = 0.001, P_{0_3} < 0.001$ ) 随着其视觉分神程度的提高而显著提高(如图7所示),说明在高速行驶的环境下,驾驶员单次视线离开路面的平均时间达到1.947 s后(见表1),车辆的车道偏离量最大值即其车道偏离程度会显著增大,车辆横向安全开始受到威胁。高速行驶环境下,当驾驶员视觉分神状态达到2级时,车辆的车道偏离量最大值超过1.50 m;而当驾驶员视觉分神状态达到3级时,车道偏离量的最大值可达2.181 m,偏离程度超过半个车道的距离。高速公路和城市道路的对比分析显示,无论驾驶员处于何种等级的视觉分神状态,车道偏离量最大值 ( $F_{(1,398)} = 600.624, P < 0.001$ ) 在高速行驶环境下均高于低速行驶环境(如图7所示),且高速行驶环境下的车道偏离量最大值约为低速行驶环境下的2倍,表明车速越高,车辆的车道偏离程度越大。

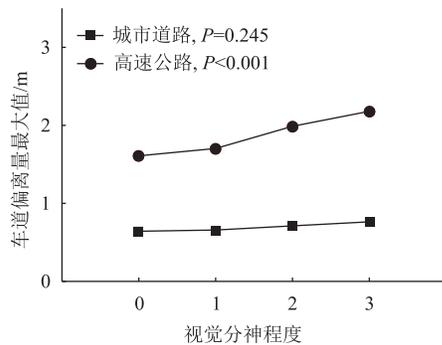


图7 视觉分神对车道偏离量最大值的影响

Fig.7 Influence of visual distraction on maximum lane deviation

车辆的横摆角标准差可作为驾驶员对车辆的操纵稳定性的观测指标之一。视觉分神对车辆的横摆角标准差的显著性影响均体现在高速公路 ( $F_{(3,196)} = 9.766, P < 0.001$ ) 和城市道路 ( $F_{(3,196)} = 3.749, P < 0.001$ ) 中。如图8所示,无论在高速公路 ( $P_{0_1} = 0.009, P_{0_2} = 0.001, P_{0_3} < 0.001$ ),还是在城市道路 ( $P_{0_1} = 0.029, P_{0_2} = 0.065, P_{0_3} = 0.001$ ),车辆的横摆角标准差均随着驾驶员视觉分

神等级的增大而显著增大,说明视觉分神导致了驾驶员对车辆的操纵稳定性下降,且视觉分神等级越高,驾驶员对车辆的操纵稳定性把握越弱。对比分析高速公路和城市道路在各等级的视觉分神程度下的车辆横摆角标准差均值 ( $F_{(1,398)} = 10.088, P < 0.001$ ),表明车辆行驶速度越高,驾驶对车辆的操纵稳定性下降得越多。

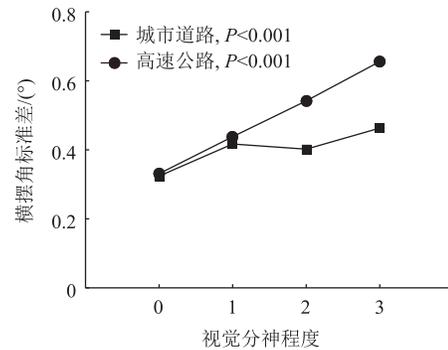


图8 视觉分神对横摆角标准差的影响

Fig.8 Influence of visual distraction on standard deviation of yaw angle

### 2.2.2 驾驶员转向盘操控

转向盘的转角熵<sup>[10]</sup>表征驾驶员的心理负荷,转角熵的值越大,驾驶员的心理负荷越大。数据表明,转角熵在高速公路 ( $F_{(3,196)} = 9.992, P < 0.001$ ) 和城市道路 ( $F_{(3,196)} = 14.770, P < 0.001$ ) 中均受到视觉分神的显著影响,表明无论在高低速行驶环境,视觉分神均会影响到驾驶员的心理负担。但转角熵 ( $F_{(1,398)} = 0.239, P = 0.625$ ) 在高速与低速行驶环境的对比中没有呈现显著性差异,表明当驾驶员处于相同等级的视觉分神状态时,车速并不会额外增加驾驶员的心理负荷。但无论在高速行驶环境 ( $P_{0_1} < 0.001, P_{0_2} < 0.001, P_{0_3} = 0.001$ ),还是低速行驶环境 ( $P_{0_1} < 0.001, P_{0_2} < 0.001, P_{0_3} < 0.001$ ) 下,转角熵均分别随着视觉分神程度的提高而出现不同程度的增大(如图9所示),表明驾驶员视觉分神程度越厉害,驾驶员的心理负荷会越大。

转向盘转角标准差是转向盘波动程度的表征参数,也是车辆横向运动稳定性的表征指标之一。无论在高速公路 ( $F_{(3,196)} = 11.521, P < 0.001$ ) 还是在城市道路 ( $F_{(3,196)} = 7.999, P < 0.001$ ) 中,视觉分神对转向盘转角标准差均产生显著性的影响。对比分析高速公路和城市道路的转向盘标准差均值,在相同等级的视觉分神程度下,高速行驶环境下的转向盘转角标准差 ( $F_{(1,398)} = 7.485, P = 0.007$ ) 均比

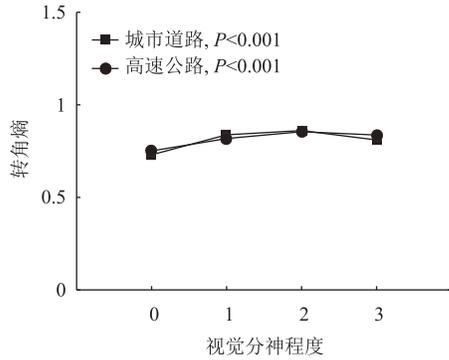


图 9 视觉分神对转角熵的影响

Fig. 9 Influence of visual distraction on steering entropy

低速行驶环境下的值高 (如图 10 所示), 表明车辆行驶速度越高, 转向盘的转角波动程度越大。进一步分析可知, 无论在高速公路 ( $P_{0_1} = 0.023, P_{0_2} < 0.001, P_{0_3} < 0.001$ ) 还是在城市道路 ( $P_{0_1} = 0.001, P_{0_2} = 0.004, P_{0_3} < 0.001$ ) 中, 转向盘转角标准差均随着驾驶员视觉分神的严重等级程度增大而显著增大, 表明驾驶员视觉分神程度显著影响转向盘波动程度。

转向盘逆转频率表征了驾驶员对转向盘调整的频率, 转向盘调整频率越高, 车辆横向运动越不稳定。经分析得, 转向盘逆转频率受到驾驶员视觉分神的显著影响, 该影响均表现在高速公路 ( $F_{(3,196)} = 4.524, P = 0.004$ ) 和城市道路 ( $F_{(3,196)} = 6.553, P < 0.001$ ) 中。且在相同等级的视觉分神程度下, 转向盘逆转频率 ( $F_{(1,398)} = 52.136, P < 0.001$ ) 在高速公路下均高于城市道路下 (如图 11 所示), 表明了车辆行驶速度越高, 驾驶员对转向盘的调整越频繁。在城市道路 ( $P_{0_1} = 0.001, P_{0_2} = 0.004, P_{0_3} < 0.001$ ) 和高速公路 ( $P_{0_1} = 0.023, P_{0_2} < 0.001, P_{0_3} < 0.001$ ) 中, 转向盘逆转频率均因驾驶员处于视觉分神状态而显著增大, 说明处于视觉分神状态的驾驶员对转向盘的调整次数会显著增加, 车辆趋于不稳定状态。

转向盘转角最大值反映了驾驶员对转向盘的调整幅值, 调整幅值越大, 车辆横向失稳的可能性会越高。对高速公路 ( $F_{(3,196)} = 0.000, P < 0.001$ ) 和城市道路 ( $F_{(3,196)} = 4.295, P = 0.006$ ) 下的转向盘转角最大值分析显示, 视觉分神对转向盘转角最大值均产生了显著性影响。且在相同等级的视觉分神程度下, 转向盘转角最大值 ( $F_{(1,398)} = 13.547, P < 0.001$ ) 在高速公路下均高于低速公路下 (如图 12 所示), 表明驾驶员视觉分神会影响驾驶员横向调整

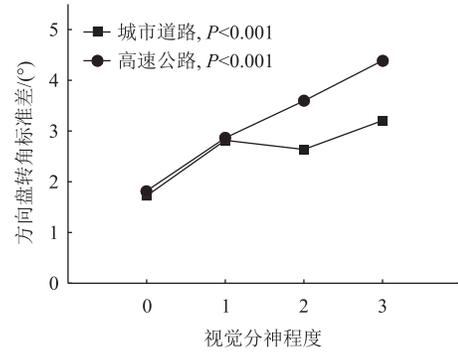


图 10 视觉分神对转向盘转角标准差的影响

Fig. 10 Influence of visual distraction on standard deviation of steering wheel angle

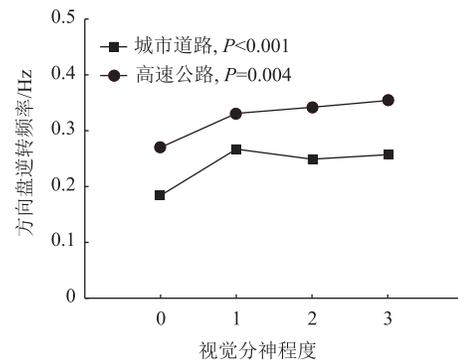


图 11 视觉分神程度对转向盘逆转频率的影响

Fig. 11 Influence of visual distraction on steering reversal rate

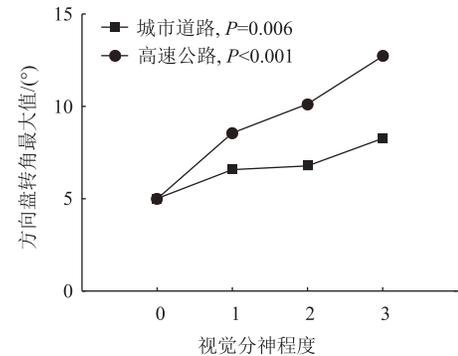


图 12 视觉分神对转向盘转角最大值的影响

Fig. 12 Influence of visual distraction on maximum steering angle

车辆的幅值, 且调整幅值会随着车速提高而增加。进一步分析表明, 城市道路中, 转向盘转角最大值 ( $P_{0_1} = 0.087, P_{0_2} = 0.053, P_{0_3} < 0.001$ ) 只在驾驶员视觉分神达到一定程度 (3 级视觉分神状态) 时, 才显著增加 (见图 12); 而在高速公路中, 在驾驶员处于 1 级视觉分神状态时, 转向盘转角最大值 ( $P_{0_1} = 0.022, P_{1_2} = 0.311, P_{1_3} = 0.095$ ) 已开始

显著增加(见图12),表明视觉分神程度在高速行驶环境下对驾驶员转向盘调整的幅值的影响更为显著。

### 2.3 车辆纵向控制

车辆的车速标准差反映了车速的波动程度。车速标准差的数据分析表明,无论在高速公路( $F_{(3,196)} = 0.004, P = 0.004$ )还是在城市道路( $F_{(3,196)} = 4.563, P = 0.004$ )中,车速标准差均受到驾驶员视觉分神的显著性影响。且在相同视觉分神等级状态时,高速行驶环境下的车辆车速标准差( $F_{(1,398)} = 26.636, P < 0.001$ )均高于低速行驶环境下的值(如图13所示),说明车速会影响车辆的车速波动程度。进一步分析表明,在城市道路中,驾驶员处于1级视觉分神状态时,车速标准差( $P_{0_1} = 0.018, P_{0_2} < 0.001, P_{0_3} < 0.001$ )已开始显著增加;而在高速公路中,车速标准差( $P_{0_1} = 0.354, P_{0_2} = 0.523, P_{0_3} = 0.008$ )在驾驶员处于一定等级的视觉分神状态时(3级视觉分神状态)才显著增加,表明在低速行驶环境,车速极易受到驾驶员视觉分神的影响,而在高速行驶的环境下,当驾驶员单次视线离开路面的时间达到2.814 s后(3级视觉分神状态),车速才会呈现显著的波动。

车辆的加速度标准差是驾驶员加减速操作频率的反映。加速度标准差的数据分析表明,无论在高速公路( $F_{(3,196)} = 101.420, P < 0.001$ )还是在城市道路( $F_{(3,196)} = 125.734, P < 0.001$ )中,车辆的加速度标准差均受到驾驶员视觉分神的显著影响。且无论在高速公路( $P_{0_1} = 0.321, P_{0_2} < 0.001, P_{1_2} < 0.001$ )还是在城市道路( $P_{0_1} = 0.528, P_{0_2} < 0.001, P_{0_3} = 0.793$ ),车辆的加速度标准差均只在驾驶员单次视线离开路面的时间达到1.947 s后(2级视觉分神状态),驾驶员对加减速的控制开始变得紊乱;当驾驶员单次视线离开路面的时间达到2.814 s后(3级视觉分神状态),车辆的加速度标准差下降到与驾驶员在零或1级视觉分神状态时的值无异(如图14所示),表明当驾驶员单次视觉分神过于严重,即驾驶员单次视线离开路面的时间达到2.814 s(3级视觉分神状态)后,驾驶员可能会在意识到视线离开路面的时间过长后,采取一些类似降低加减速频率和幅值的补偿措施,以弥补因视觉分神带来的行车安全威胁。

跟车距离是驾驶员纵向控制能力最直观反映。数据分析表明,仅在城市道路中,跟车距离均值( $F_{(3,196)} = 8.007, P < 0.001$ )受到驾驶员视觉分神的显著性影响;在高速公路中,跟车距离均值( $F_{(3,196)} =$

$0.844, P = 0.471$ )未观测到受视觉分神的显著性影响。在城市道路中,驾驶员的跟车距离均值( $P_{0_1} = 0.002, P_{0_2} < 0.001, P_{0_3} < 0.001$ )会随着驾驶员视觉分神等级的升高而显著升高,表明低速行驶环境下,驾驶员处于视觉分神时,会增大跟车距离,以弥补视觉分神带来的事故风险;而在高速公路中,即使当驾驶员意识到自身存在视觉分神情况,驾驶员亦无法准确评估安全的跟车距离而对跟车距离进行调整。进一步分析表明,跟车距离均值( $F_{(1,398)} = 107.903, P < 0.001$ )在高速行驶环境下均高于低速行驶环境下(如图15所示),且约为低速行驶环境下的2倍。

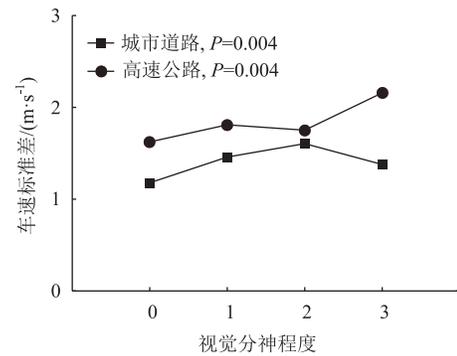


图13 视觉分神对车速标准差的影响

Fig. 13 Influence of visual distraction on standard deviation of vehicle speed

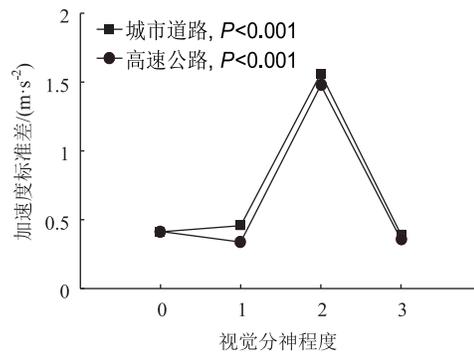


图14 视觉分神对加速度标准差的影响

Fig. 14 Influence of visual distraction on standard deviation of acceleration

跟车时距是常用的表征驾驶员对车辆纵向控制习惯的指标。驾驶员跟车时距均值在高速公路( $F_{(3,196)} = 3.045, P = 0.070$ )和城市道路( $F_{(3,109)} = 0.000, P = 1.000$ )均未检测出显著性影响(如图16所示)。综合文中对车速标准差和跟车距离的分析,当驾驶员意识到自身处于视觉分神状态时,会频繁改变车速、增大跟车距离的策略,以达到保持相对恒定跟车时距的目的,保持驾驶员对车辆纵向控制的习惯。

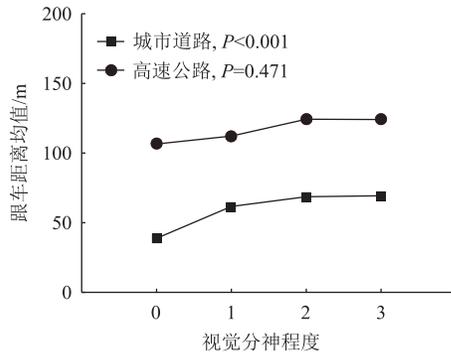


图15 视觉分神对跟车距离的影响

Fig. 15 Influence of visual distraction on car-following distance

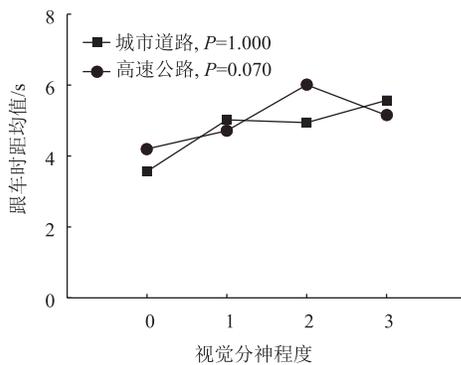


图16 视觉分神程度对跟车时距均值的影响

Fig. 16 Influence of visual distraction on car-following time headway

### 3 结论

通过设计诱导驾驶员视觉分神的次级任务(包含3个等级),讨论了视觉分神程度(驾驶员单次视线离开路面的时间)对其车辆横向控制和纵向控制行为的影响以及驾驶员为平衡事故风险可能采取的补偿措施,得到以下结论:

(1) 视觉分神会导致驾驶员对车辆的横向控制能力变差,使得车辆的车道偏离量标准差、转向盘转角标准差等反应车辆横向位置和转向盘转角变化的参数均增大;视觉分神对车辆横向操控的不利影响会随着驾驶员视线离开路面的时间和车速的增加而加剧。

(2) 视觉分神会使车速波动增大,但不直接影响驾驶员的跟车时距;处于视觉分神状态的驾驶员会通过增大跟车距离和降低加速度频率的方式来平衡事故风险。

缺少可以量化驾驶员对车辆横向控制能力和纵向控制能力的数学模型。在进一步的研究中,将寻

找可有效评估驾驶员的横向控制能力和纵向控制能力的方法,基于文中的指标参数以及考虑到驾驶员可能采取的补偿行为,建立可评价驾驶员驾驶表现的数学模型。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] KLAUER S G, DINGUS T A, NEALE V L, et al. The Impact of Driver Inattention on Near-Crash/Crash Risk: An Analysis Using the 100-Car Naturalistic Driving Study Data, DOT HS 810 594 [R]. Blacksburg: Virginia Tech Transportation Institute, 2006.
- [2] HANOWSKI R J, PEREZ M A, DINGUS T A. Driver Distraction in Long-haul Truck Drivers [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2005, 8 (6): 441-458.
- [3] ENGSTRÖM J, MARKKULA G. Effects of Visual and Cognitive Distraction on Lane Change Test Performance [C] // Proceedings of the Fourth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Iowa City: University of Iowa, 2007: 199-205.
- [4] RANNEY T A, MAZZAE E, GARROTT R, et al. NHTSA Driver Distraction Research: Past, Present, and Future [C] // 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, D. C.: US Department of Transportation, 2001: 1-11.
- [5] YAN W, WONG S C, LI Y C, et al. Young Driver Distraction by Text Messaging: A Comparison of the Effects of Reading and Typing Text Messages in Chinese Versus English [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2015, 31: 87-98.
- [6] ANTTILA V, LUOMA J. Surrogate In-vehicle Information Systems and Driver Behaviour in an Urban Environment: A Field Study on the Effects of Visual and Cognitive Load [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2005, 8 (2): 121-133.
- [7] HOLAHAN C J, CULLER R E, WILCOX B L. Effects of Visual Distraction on Reaction-Time in a Simulated Traffic Environment [J]. Human Factors, 1978, 20 (4): 409-413.
- [8] 马艳丽, 冷雪, 胡宝雨. 车载信息系统操作对驾驶员动作分神的影响 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15 (4): 204-209.  
MA Yan-li, LENG Xue, HU Bao-yu. Influence of In-vehicle Information System Operation on Driver Action Distraction [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15 (4):

- 204 - 209.
- [9] LAMBLE D, KAURANEN T, LAAKSO M, et al. Cognitive Load and Detection Thresholds in Car Following Situations: Safety Implications for Using Mobile (Cellular) Telephones while Driving [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1999, 31 (6): 617 - 623.
- [10] ZWAHLEN H T, ADAMS C C, DEBALS D P. Safety Aspects of CRT Touch Panel Controls in Automobiles [C] // *Vision in Vehicles II. Second International Conference on Vision in Vehicles*. Washington, D. C.: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 1988: 335 - 344.
- [11] SIMONS-MORTON B G, GUO F, KLAUER S G, et al. Keep Your Eyes on the Road: Young Driver Crash Risk Increases According to Duration of Distraction [J]. *Journal of Adolescent Health*, 2014, 54 (5): S61 - S67.
- [12] LIANG Y, LEE J D, YEKHSHATYAN L. How Dangerous is Looking Away from the Road? Algorithms Predict Crash Risk from Glance Patterns in Naturalistic Driving [J]. *Human Factors*, 2012, 54 (6): 1104 - 1116.
- [13] WILDE G J S. Risk Homeostasis Theory: An Overview [J]. *Injury Prevention*, 1998, 4 (2): 89 - 91.
- [14] MUHRER E, VOLLRATH M. The Effect of Visual and Cognitive Distraction on Driver's Anticipation in a Simulated Car Following Scenario [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2011, 14 (6): 555 - 566.
- [15] NAKAYAMA O, FUTAMI T, NAKAMURA T, et al. Development of a Steering Entropy Method for Evaluating Driver Workload [J]. *SAE Transactions*, 1999, 108 (6): 1686 - 1695.
- [16] STRAYER D L, DREWS F A, JOHNSTON W A. Cellphone Induced Failures of Visual Attention during Simulated Driving [J]. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2004, 9 (1): 23 - 32.
- [17] BELLINGER D B, BUDDER B M, MACHIDA M, et al. The Effect of Cellular Telephone Conversation and Music Listening on Response Time in Braking [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2009, 12 (6): 441 - 451.
- [18] HANCOCK P A, LESCH M, SIMMONS L. The Distraction Effects of Phone Use during a Crucial Driving Maneuver [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2003, 35 (4): 501 - 514.

(上接第121页)

- FANG Tao, ZHAO Xian-lan, LUAN Chang-fei. Study on the Connection Adjustment Method of Competitive Conventional Public Transport and Urban Rail Transit: Take Qingdao Metro Line 3 as an Example [J]. *Urban Public Transport*, 2018 (8): 37 - 41.
- [14] 李家斌, 过秀成, 王峰. 城市轨道交通走廊上道路公交线路的调整措施 [J]. *城市轨道交通研究*, 2017, 20 (10): 88 - 92, 133.
- LI Jia-bin, GUO Xiu-cheng, WANG Feng. Adjustment of Bus Lines in Urban Rail Transit Corridor [J]. *Urban Mass Transit*, 2017, 20 (10): 88 - 92, 133.
- [15] 陈宽民, 严宝杰. 道路通行能力分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- CHEN Kuan-min, YAN Bao-jie. Highway Capacity Analysis [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [16] Kittelson & Associates Inc. TCRPI00: Transit Capacity and Quality of Service Manual [M]. 2nd ed. Washington, D. C.: Kittelson & Associates Inc., 2003.
- [17] 任福田, 刘小明, 荣建. 交通工程学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- REN Fu-tian, LIU Xiao-ming, RONG Jian. Traffic Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [18] 孙锋, 金茂菁, 王殿海, 等. 公交站点对路段通行能力的影响研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33 (12): 1284 - 1288.
- SUN Feng, JIN Mao-jing, WANG Dian-hai, et al. Study of the Effect of Bus Stop on Roadway Link Capacity [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33 (12): 1284 - 1288.