

中文引用格式:袁春玲,侯亘,杨子邈,等.高速公路高密度立交不同行驶工况驾驶员视觉特性分析[J].中国安全科学学报,2025,35(11):180-189.

英文引用格式:YUAN Chunling, HOU Gen, YANG Zimiao, et al. Analysis of drivers' visual characteristics under different driving conditions in high-density interchange of freeway[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 180-189.

高速公路高密度立交不同行驶工况驾驶员 视觉特性分析*

袁春玲¹, 侯亘², 杨子邈³, 朱兴林⁴副教授, 徐进^{**4}教授

(1 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2 中交第二公路勘察设计院有限公司,

湖北 武汉 430056; 3 重庆市信息通信咨询设计院有限公司, 重庆 400039;

4 新疆农业大学 交通与物流工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.1391

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52172340); 重庆市高校创新研究群体项目(CXQT21022)。

【摘要】 为研究小净距立交不同行驶工况对驾驶行为的影响特征,使用眼动仪采集实车试验中驾驶员的眼动数据,利用 k -medoids 动态聚类方法划分驾驶员的视觉兴趣区域(AOI),对比分析常规净距立交和小净距立交下驶入/驶出主线工况及不同行驶阶段下驾驶员的注视行为和扫视特征,揭示驾驶员在高速公路高密度互通下的驾驶行为特征。结果表明:驾驶员主要关注前方道路区域以及车身仪表区域,驶入主线工况还特别关注左视镜区域;500 ms 注视时间是驾驶员捕获关键信息的常见时间窗,小净距立交上的注视时间均值要高于常规净距立交;不同行驶阶段下驾驶员观察横向和纵向信息具有明显的偏向性,立交净距的减小会增大驾驶员的扫视幅度以及改变扫视方向,其中交织段最为明显,扫视幅度在 200 px 范围内分布均匀;不同驾龄的驾驶员之间的注视时间均值分布无明显差异;驾驶员的注视时间与扫视速度、扫视幅度无单调关系,而扫视速度与扫视幅度呈现显著正相关。

【关键词】 高速公路; 高密度立交; 行驶工况; 驾驶员; 视觉特性; k -medoids

Analysis of drivers' visual characteristics under different driving conditions in high-density interchange of freeway

YUAN Chunling¹, HOU Gen², YANG Zimiao³, ZHU Xinglin⁴, XU Jin⁴

(1 College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2 China Communications Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan Hubei 430056, China; 3 Chongqing Communication Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400039, China;

4 School of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to study the influence characteristics of different driving conditions on driving behavior of small-clearance interchanges, eye tracker was used to collect the drivers' eye movement data in

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0180-10; 收稿日期:2025-06-04; 修稿日期:2025-09-10

** 通信作者:徐进(1977—),男,吉林四平人,博士,教授,主要从事人—车—路协同、道路交通安全、交通环境影响以及驾驶行为方面的研究。E-mail:yhnl_996699@163.com。

the real vehicle experiment. *k*-medoids dynamic clustering method was used to divide the drivers' visual interest area. A comparative analysis of gaze behavior and saccade characteristics of drivers was conducted of under mainline entry and exit conditions at conventional clear-distance and small-clearance interchanges and across different driving stages. The driving behavior characteristics of drivers under high-density interchange of the expressway were revealed. The results show that drivers mainly focus on the area of road ahead and instrument panel, and they also pay special attention to the area of the left mirror when driving into mainline conditions. The 500 ms gaze time is a common time window for drivers to capture key information. The mean value of the gaze time on small-clearance interchange is higher than that on regular-clearance interchanges. There is a clear bias in observing the horizontal and vertical information in different driving phases. The mean gaze duration was higher in the small-clearance interchanges than in the conventional interchanges. The reduction of clear distance of the interchanges increases drivers' scanning amplitude and changed the scanning direction, which is most obvious in the interweaving section. The scanning amplitude is uniformly distributed in the range of 200 px. There is no significant difference in the mean distribution of fixation time between drivers of different driving ages. There is no significant monotonic relationship between the drivers' gaze duration and scanning speed and amplitude, while there is a significant positive correlation between scanning speed and amplitude of scanning.

Keywords: expressway; high density interchange; driving mode; driver; visual characteristic; *k*-medoids

0 引言

互通式立交具有转换不同方向交通流、减少交叉道路交通流冲突等作用^[1]。随着经济迅速发展,交通需求不断增加,这导致路网密度持续提升,互通立交的数量也明显增加,立交之间的距离逐渐缩小,由此形成高密度立交群。根据《公路立体交叉设计准则》(JTG/T D21—2014)及文献[2],高速公路高密度立交是指在高速公路一定范围内,平均间距小于 4 km 的相邻立交。立交间距过小造成交织路段长度不足,驾驶员需要在更短时间内完成相关驾驶任务,收集和处理更多外界信息,增加驾驶难度和安全风险。此外,车辆在行驶过程中驾驶员通过视觉通道传递的交通环境信息占比达 80%^[3],分心驾驶、疲劳驾驶等危险驾驶行为的发生多与驾驶员的视觉特性密切相关,因此,研究驾驶员在高密度立交群下的眼动特性,对于提高立交交通安全具有重要意义。

近年来,国内学者注重利用多源数据^[4]对行车安全开展相关研究,但将驾驶员眼动特征选作评价指标并进行分析^[5]仍是研究重点。相关学者基于采集的驾驶员眼动数据分析驾驶员在隧道场景下的驾驶负荷变化情况^[6]以及视觉特性变量差异^[7]。国外主要关注人和路差异下的驾驶员视觉特性,以及眼动数据在驾驶状态识别中的应用研究^[8-9]。

GOTARDI 等^[10]通过驾驶模拟的方法调查患帕金森病和衰老对驾驶员注视行为的影响。

目前,学者们广泛研究了驾驶状态^[11-12]、驾驶视觉负荷^[13-14]以及特定场景下^[15-16]的视觉特性,但研究对象多为城市道路、高速公路、隧道等道路场景,而驾驶员在高密度立交上行驶时的视觉负荷强弱、视觉疲劳程度等安全指标均未明晰,且鲜有划分不同行驶工况并对其进行分析研究。鉴于此,笔者拟采集驾驶员在某高速公路某一簇高密度立交群的实车驾驶眼动数据,利用 *k*-medoids 动态聚类法划分驾驶员注视兴趣区域(Area of Interest, AOI),对比分析驾驶员在常规净距立交和小净距立交不同行驶工况下的注视时间、注视点位置以及扫视幅度等视觉特性,以期揭示高速公路高密度立交不同行驶工况下的驾驶行为特征。

1 高密度立交实车行驶试验方案

1.1 实车行驶试验线路

选择包茂高速(G65)重庆市东环立交—张家梁立交段作为试验线路,立交间的平均间距约为 2 km,线路全长约 10 km,高密度立交群如图 1 所示。根据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017),以立交净距 1 km 为判断标准将立交分为常规净距立交和小净距立交 2 类。

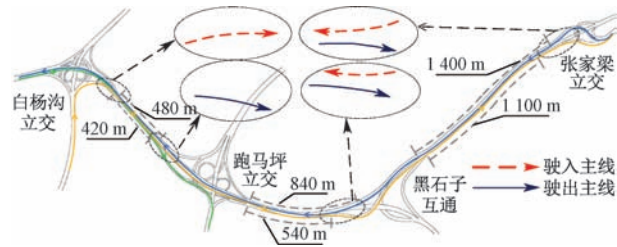


图 1 试验高密度立交群

Fig. 1 High-density interchange clusters

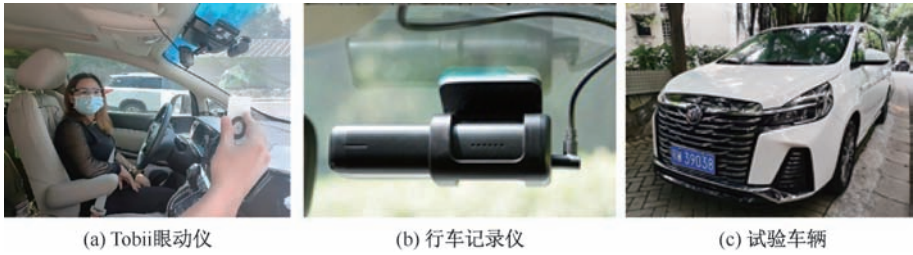


图 2 试验仪器及车辆

Fig. 2 Test apparatus and vehicle

1.3 被试(驾驶员)选择

通过网络平台招募 38 名视力矫正达 5.0 以上的被试,其中约 85% 为职业驾驶员。男性 22 人、女性 16 人,年龄分布在 27~53 岁(40.2 ± 6.7),驾龄分布在 5~25 年(12.5 ± 5.3),37 名驾驶员实际驾驶里程超过 5 万 km。所有被试近 1 个月内未行驶过试验路段,且大部分被试未驾驶过试验车型。

1.4 实车试验流程

试验于 2023 年 4 月 18 日—5 月 8 日进行,历时 21 天。时间安排在每天 10:00—17:00,避开极端天气与交通高峰。被试抵达指定起点后,告知其在遵守交通规则的原则上,按个人习惯正常驾驶。为被试佩戴并校准眼动设备,经试驾确认设备正常后,沿预设路线进行实车试验。每名被试需完成 2 个循环行驶,驾驶员回到试验起点表示 1 个循环完成,停止数据采集并保存数据。为避免驾驶疲劳对试验的影响,每完成一个循环有 10~20 min 的休息时间。

1.5 眼动数据截取与处理

为探究高速公路不同净距立交驶入和驶出主线工况中驾驶员的视觉特性变化特征,同时将驶入和驶出主线工况按行驶时间顺序分别划分为汇入段、交织段、主线段和主线段、交织段、汇出段,行驶工况划分情况如图 3 所示。截取上一立交的合流点前 200 m 至下一立交的分流点后 200 m 的眼动数据,并以合流点的时间点为基准对齐后续数据。将眼动仪

1.2 眼动参数采集仪器以及试验车辆

使用便携式眼动仪采集驾驶员注视点位置、注视持续时间、扫视速度等眼动数据,数据采集频率为 50 Hz;在车辆的前后挡风玻璃上安装行车记录仪,将记录的车辆周边环境信息和行车时间用于后期数据的截取和对齐;试验车辆选择 7 座多用途别克,该车具有足够的空间安装试验设备以及供相关试验人员使用,车辆和仪器如图 2 所示。

采集的原始数据导入配套的人机环境同步平台进行预处理,保留数据采集率高于 80% 的被试数据。通过平台回放试验录像,划分不同行驶阶段的视觉片段,逐帧映射和修正注视点,最终导出各片段中驾驶员的注视时间、注视位置及扫视幅度等视觉特性指标。

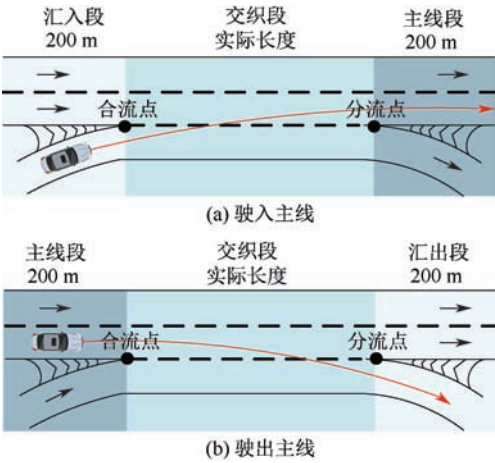


图 3 驶入/驶出主线行驶工况划分

Fig. 3 Classification of driving conditions entering/exiting the mainline

2 驾驶员注视 AOI 划分

2.1 聚类方法选取

驾驶员在驾驶过程中,反复观察使驾驶员的注视点呈现出团聚状,据此可对驾驶员注视 AOI 分

块。使用划分式聚类法来划分驾驶员在行驶过程中的视觉 AOI。驾驶人在行驶过程中,会进行与驾驶任务无关的注视观察行为,该行为可能导致孤立点的产生并对聚类中心选择产生较大影响, k -medoids 方法的簇中心选取的是样本中的实际数据点,对异常值以及噪声数据具有更高鲁棒性,所以此处采用 k -medoids 划分驾驶员的视觉兴趣区。

聚类时主要确定 2 个参数,一是距离的计算方法,考虑驾驶员的注视点数据形式和特征以及现有研究,选择曼哈顿距离作为聚类的判断指标^[17];二是聚类的簇数 k 值,使用肘部法则分析类簇质心平均距离 R_c ^[18],根据变化拐点确定 k 值。

$$D[(x_i, y_i), (x_j, y_j)] = (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|)$$

(1)

$$A = \sum_{i=1}^k \sum_{(j \in N_i)} D[(x_j, y_j), (x_{N_i}, y_{N_i})]$$

(2)

式中: D 为样本间的曼哈顿距离,px; A 为各簇内距离的和,px; k 为聚类簇的个数; N_i 为第 i 个簇; (x_{N_i}, y_{N_i}) 为第 i 个簇的簇中心点,px。

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \{|x_i - u_j| + |y_i - v_j|\}$$

(3)

式中: n 为类簇数; m 为第 j 簇中的样本个数; (x_i, y_i) 为 j 簇中的一个样本点的坐标,px; (u_j, v_j) 为 j 簇的质心,px。

2.2 驾驶员注视 AOI 划分

以各个驾驶员的注视点在视野平面的解析坐标作为聚类变量(X, Y)。聚类 k 值选定在 3~11 范围内,汇总全部驾驶员的连续注视点坐标作为聚类数据,得到类簇指标变化情况如图 4a 所示。从图 4a 看出,聚类数目为 3~7 时,指标下降速度快,但 7~11 内下降速度明显降低,所以 7 是聚类数目的变化拐点,即将驾驶员的注视点聚类为 7 类区域较为符合研究的场景和目的。利用 Matlab 编制 k -medoids 聚类程序,聚类分析驾驶员的注视点位置,聚类结果如图 4b 所示,将驾驶员的视野平面划分为 AOI1—AOI7 区域,如图 4c 所示。

3 注视行为特征分析

选取注视时间和注视点位置 2 个眼动指标研究驾驶员在高速公路高密度立交下的视觉特性,其中,环境越复杂,注视时间越长、注视次数越多。

3.1 不同工况下注视时间特征

注视持续时间的长短可反映出驾驶员收集和处

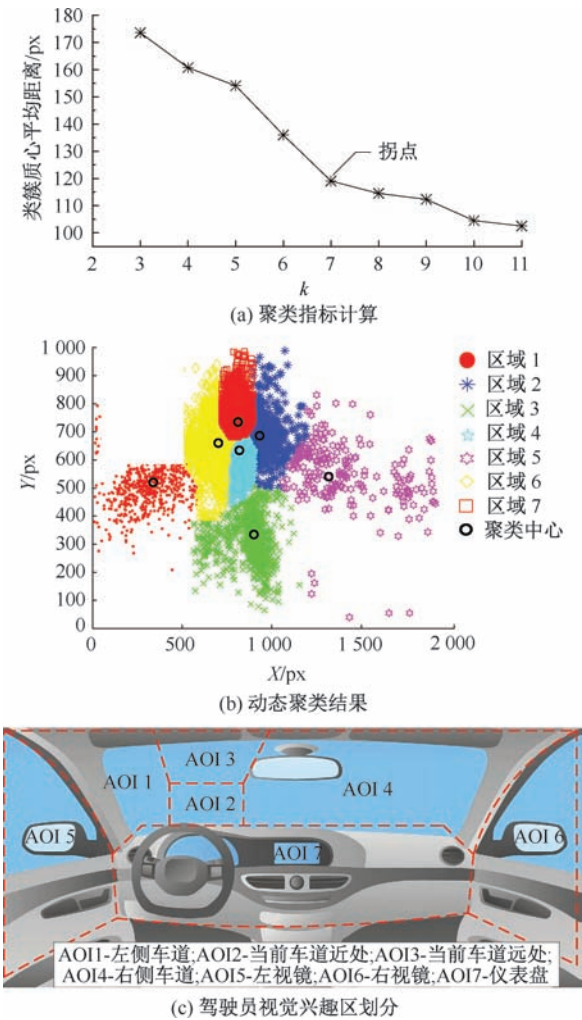


图 4 驾驶员注视 AOI 划分

Fig. 4 Schematic diagram of drivers' visual AOI

理信息的难易程度,分别汇总所有驾驶员在高速公路常规净距立交和小净距立交下的注视持续时间,将其按 50 ms 为步距进行划分和统计,得到注视时间分布直方图(图 5)。由图 5 可知:2 类立交在驶入/驶出主线工况下的注视持续时间主要分布在 50~100 ms,占比 30%~40%,数据分布形状与对数分布较为相似。从累积频率曲线来看,驾驶员在高速公路高密度立交驶入/驶出主线工况下注视时间的主要分布区间为 0~500 ms,累积占比超过 95%。综合来看,高速公路常规净距立交和小净距立交驶入/驶出主线工况下的注视时间分布差异性较小。

3.2 不同行驶阶段驾驶员注视点位置分布

统计并计算所有驾驶员分别在高速公路高密度立交驶入/驶出主线工况下不同行驶阶段对各 AOI 的注视点数量占比,如图 6 所示。每个行驶阶段下驾驶员在 AOI2 和 AOI3 注视点数量占比和超过 60%,即高密度立交环境下,驾驶员主要关注当前车

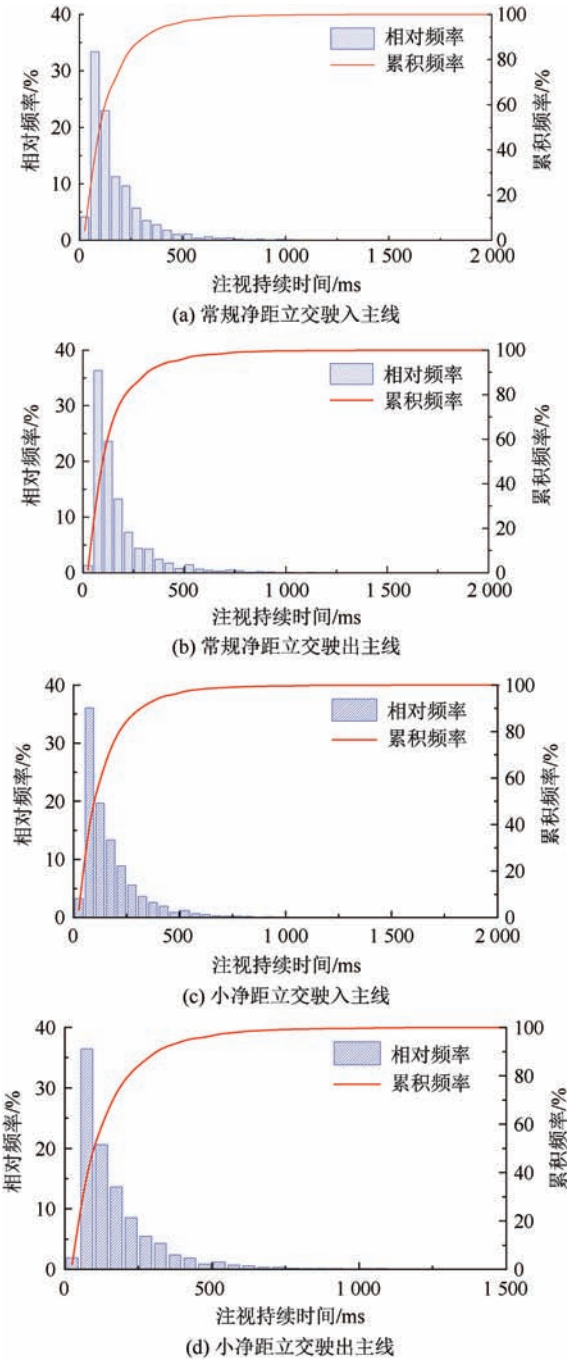


图5 驶入/驶出主线总体注视持续时间

Fig. 5 Overall gaze duration for entering/exiting the mainline

道的近前处和远处。高速公路小净距立交下对 AOI4—AOI6 注视点占比整体上要高于常规净距立交,说明驾驶员在小净距立交行驶时更注重收集左右两侧后视镜来车信息。在小净距立交驶入主线工况下对左侧道路的关注程度减少,3 个阶段的关注程度几乎一致,而驶出主线工况下交织段对 AOI1 的关注度最高。常规净距立交和小净距立交下驶入主线工况不同行驶阶段驾驶员在 AOI7 的注视点数

量占比均高于驶出主线工况占比,表明驾驶员在驶入主线时更关注仪表盘区域,尤其是在小净距立交驶入主线工况下对 AOI7 的注视点数量占比达 36.03%。对比分析 AOI5 和 AOI6 区域的注视点数量占比,发现驶入主线时更关注左视镜,驶出主线对两侧视镜的关注较少,说明驾驶员在驶入主线时更多情况下关注左侧来车信息,驶出主线时对左右两侧来车信息关注较少。

3.3 不同行驶阶段驾驶员注视时间特征

图 7 为所有驾驶员分别在高速公路常规净距立交和小净距立交的不同行驶阶段下各视觉 AOI 的注视持续时间占比。高速公路常规净距立交驶入主线工况下,汇入段多关注 AOI2,交织段多关注 AOI3,主线段主要关注 AOI1—AOI3;驶出主线时,汇出段对 AOI2 的注视时间占比要远高于主线段和交织段,对比图 7a 和图 7b 发现,驾驶员在驶入主线工况时对 AOI5 和 AOI7 的注视时间占比要明显高于驶出主线工况,表明驾驶员在驶入主线时更关注左侧后视镜区域以及仪表盘区域,即可能关注左后方来车和车速、行驶路线等信息。由图 7c、图 7d 可知:小净距立交下的注视分布时间较为集中,即各行驶阶段都明显关注 AOI2 和 AOI3,且驶入主线工况下 AOI5 和 AOI7 的注视时间占比较常规净距立交明显提高,说明随着立交净距的减小,驾驶员对车后信息、速度控制以及路线信息需求提高;驶入主线工况对区域 AOI1 和 AOI5 的注视时间占比更高,驶出主线时对区域 AOI4 更为关注,说明驾驶员在驶入和驶出主线时的注视特征有较明显的偏向性,且这种现象在小净距立交更明显。

3.4 不同驾龄驾驶员注视时间分析

将每个驾驶员按照驾龄分布划分,计算每个驾驶员在高速公路高密度立交环境中,2 种净距立交驶入和驶出工况下的注视时间均值,得到图 8 所示结果,箱体范围为 25%~75%。分析高密度立交路段的同类型立交,3 组驾龄中驶出主线的注视时间均值分布范围均比驶入主线大,其中 5~10 年以及 15 年以上驾龄的驾驶员差异最为明显;不同净距立交同种工况对比下,常规净距立交的注视时间均值分布范围比小净距立交大。以上分析表明:5~10 年以及 15 年以上驾龄的驾驶员注视时间均值受立交净距和行驶工况的影响较大,但是 10~15 年驾龄的驾驶员受的影响较小。

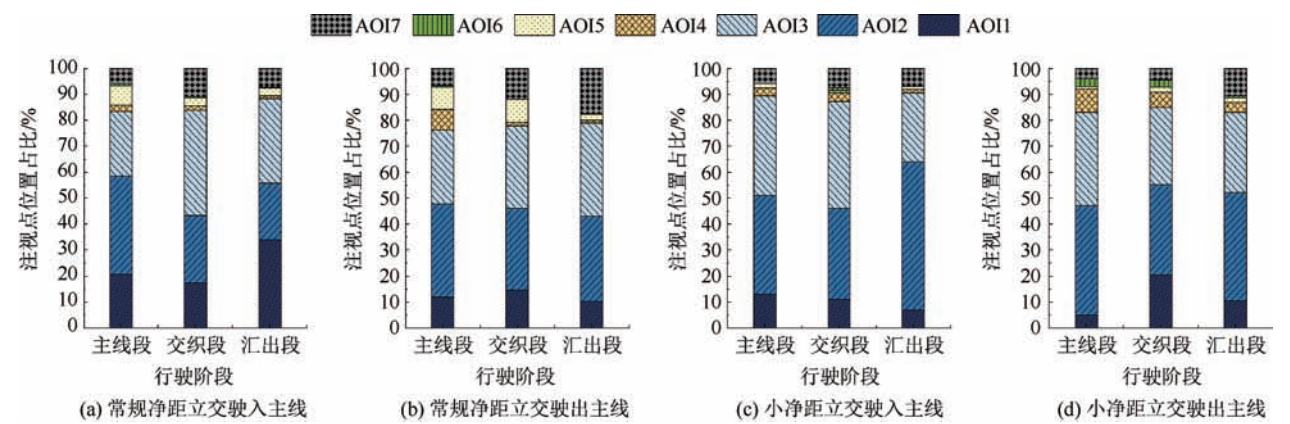


图 6 不同净距立交驶入/驶出主线注视点位置占比

Fig. 6 Watchpoint position percentage of entering/exiting the mainline at different clearance interchanges

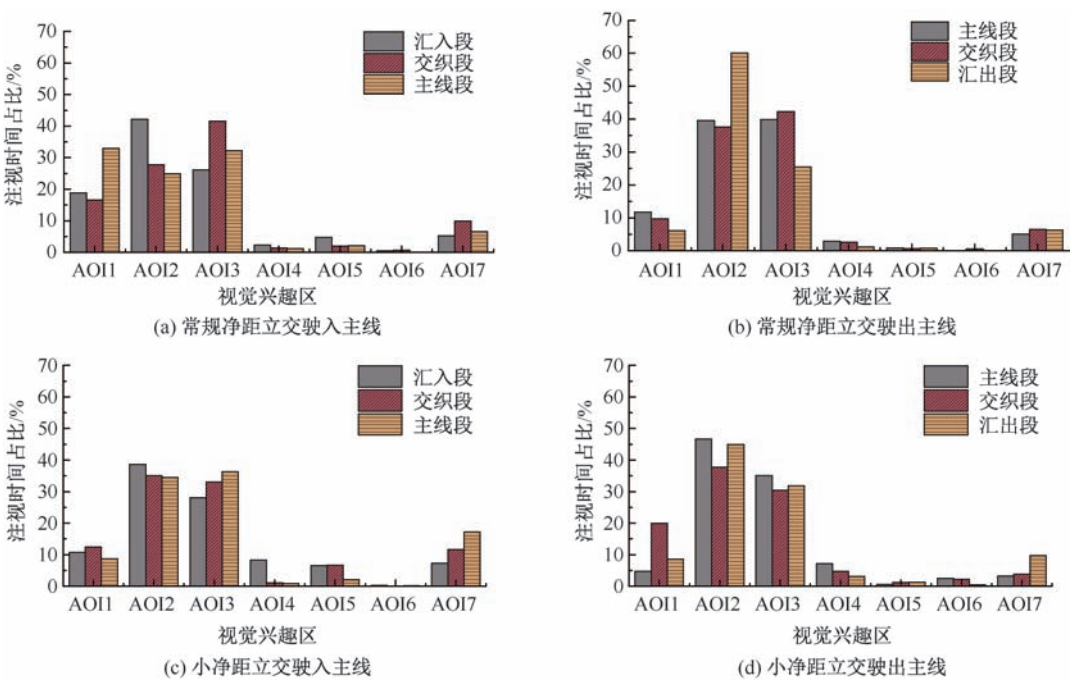


图 7 驶入/驶出主线不同行驶阶段注视时间 AOI 分布

Fig. 7 Distribution of AOI of attention time of entering/exiting the mainline at different driving phases

4 扫视行为特征分析

驾驶员的扫视幅度和扫视速度是分析驾驶员视觉特性的重要指标,2 个指标可反映驾驶员提取信息的移动范围^[19]及在信息收集过程中视觉搜索的快慢程度。

4.1 不同行驶阶段扫视幅度特征

整理高速公路高密度立交不同行驶阶段下所有驾驶员驶入和驶出主线过程中的水平和垂直扫视幅度,绘制如图 9 所示的三维散点图。高密度立交条件下,驾驶员在小净距立交行驶时的扫视幅度分布范围总体上要大于常规净距立交。对比分析不同工

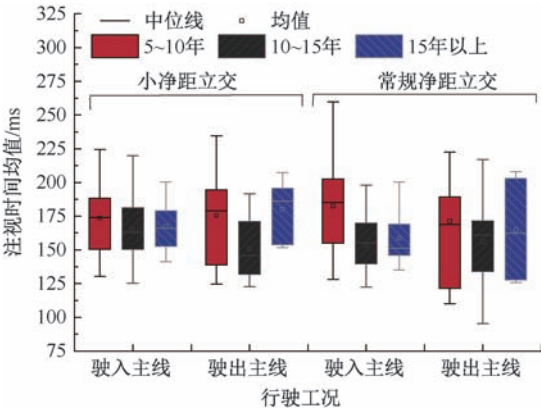


图 8 不同驾龄驾驶员的注视时间均值箱线图

Fig. 8 Box plots of mean gaze duration for drivers of different driving ages

况的交织段扫视幅度特征,发现常规净距立交驶入主线工况下驾驶员的扫视方向有明显的偏向性,主要集中在垂直方向上,而小净距立交上驾驶员的扫视数据分布相对均匀,该现象说明随着净距减小,行车的横向干扰因素增加,驾驶员会增强水平方向的信息收集。高速公路立交净距的减少会加大驶入主线

工况下主线段驾驶员垂直方向扫视幅度。驾驶员的扫视数据在驶出主线汇出段时主要分布在垂直方向,说明驾驶员在高密度立交分流鼻端后主要关注道路纵向的信息。不同净距立交驶出主线工况主线段和驶入主线工况汇入段,驾驶员的扫视数据都没有明显偏向性,且扫视幅度主要分布在 0~200 px 范围内。

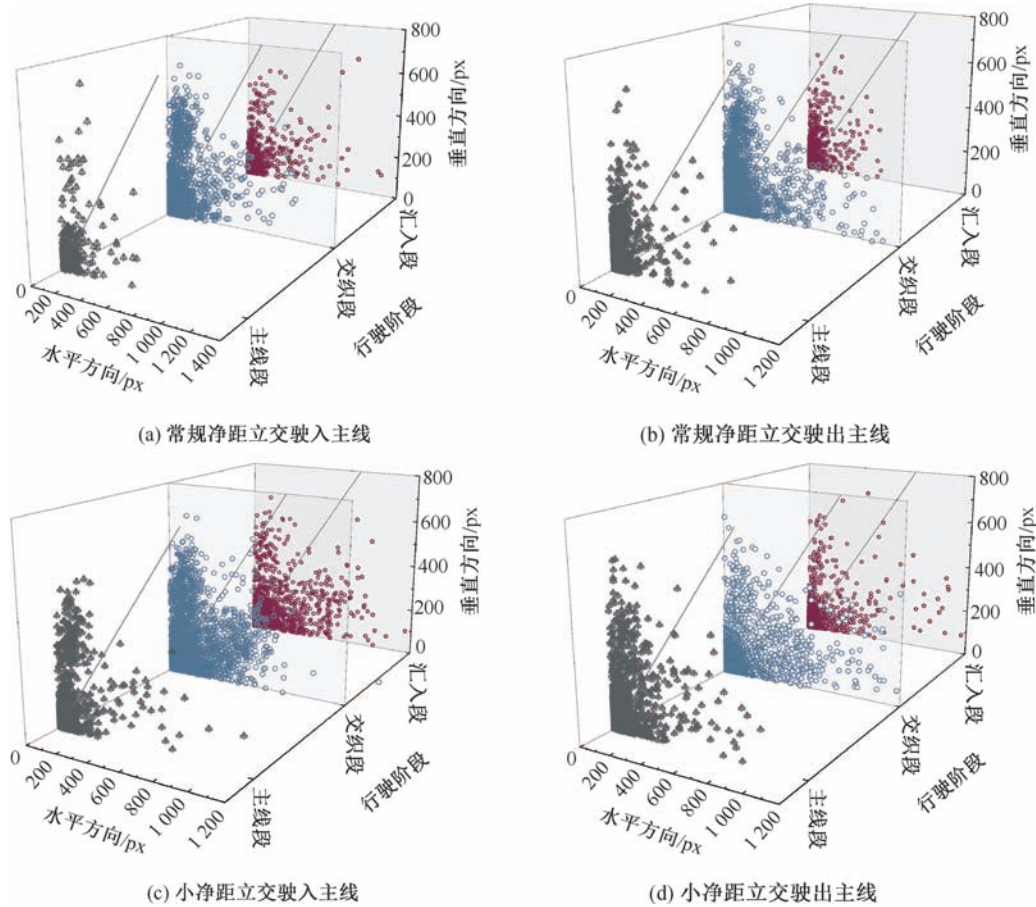


图9 不同净距立交驶入/驶出主线工况相对扫视幅度

Fig. 9 Relative saccade amplitude of different net distance interchanges entering/exiting of the mainline conditions

总体来看,驾驶员扫视幅度超过 200 px 时,扫视方向明显集中于水平或者垂直其中一个方向,而在 0~200 px 范围,驾驶员的扫视幅度分布较均匀,说明驾驶员在低扫视幅度(即 0~200 px)时视线移动相对自由,呈现发散式,在高扫视幅度(即大于 200 px)时视线则会向单一方向移动,而 200 px 可以作为区分驾驶员在高速公路高密度立交环境行驶时的高低扫视的阈值。

4.2 不同行驶阶段扫视速度分析

基于绝对扫视幅度数据,整理驾驶员在高速公路高密度立交 2 种工况下不同行驶阶段的扫视速度,计算每个驾驶员在 2 种工况不同行驶阶段的扫视速度均值绘制扫视速度均值箱型图(图 10),其中

箱体范围为 25%~75%。

由图 10 可知:常规净距立交驶入/驶出主线工况不同行驶阶段的扫视速度平均值接近;小净距立交驶入主线工况扫视速度平均值呈现下降趋势,驶出主线工况呈现上升趋势,具有显著差异。同时,小净距立交扫视速度均值总体上要高于常规净距立交扫视速度均值,而其中匝道段(即汇入段和汇出段)的扫视速度平均值最大。以上变化说明:高密度立交的不同行驶阶段信息需求不同可能会导致扫视速度明显变化,而不仅仅受车辆交织这一单一因素影响。主线段扫视速度数据分布最离散,汇入/汇出段次之,交织段最小,表明在驾驶任务较为复杂时扫视速度分布趋于集中,而在任务较轻时更为离散,这可

能是与驾驶员的风格、驾龄等个体差异有关。同时,高速公路小净距立交各行驶阶段的扫视速度分布较常规净距立交更为集中,说明立交净距的减小也会对驾驶员的扫视速度产生限制。由表 1 可知:小净

距立交驶入/驶出主线工况下的扫视速度标准差显著大于常规净距立交,说明净距减小会增大扫视速度的波动性。

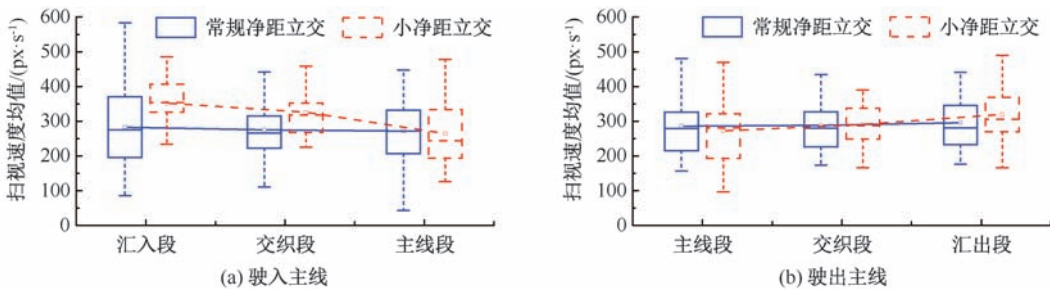


图 10 不同净距立交驶入/驶出主线工况扫视速度均值

Fig. 10 Mean sweep speed for different clearance interchanges entering/exiting mainline conditions

表 1 不同净距立交驶入/驶出主线工况扫视速度标准差分布

Table 1 Standard deviation distribution of sweep speed of entering/exiting the mainline at different clearance interchanges

立交类型	驶入主线			驶出主线		
	汇入段	交织段	主线段	主线段	交织段	汇出段
常规净距立交	335. 42	297. 03	256. 89	274. 58	294. 71	267. 59
小净距立交	366. 24	329. 78	284. 37	303. 47	324. 43	314. 71

4.3 眼动指标相关性分析

分析驾驶员在高速公路高密度立交下的注视时间和扫视幅度的分布,发现两者均不符合正态分布,所以使用 Spearman 相关系数探讨驾驶员的注视时间、扫视速度以及扫视幅度 3 个视觉特性指标之间的内在联系。分别汇总所有驾驶员的注视时间、扫视速度以及扫视幅度 3 个视觉特性指标数据,采用两两配对的方法分析指标间的 Spearman 相关系数。

通过 SPSS 软件计算得到的相关系数结果见表 2,其中 p 为显著性值。结果显示,3 个指标之间存在显著相关关系 ($p<0.01$),注视时间与扫视幅度、扫视速度的相关系数小于 0.3,即注视时间与其他 2 个眼动指标之间不存在单调关系;扫视幅度与扫视速度之间的相关系数表明两者之间有着显著的正相关关系,即扫视速度随着扫视幅度的增大而加快。

表 2 Spearman 相关性分析

Table 2 Spearman correlation analysis

变量	注视时间	扫视速度	扫视幅度
注视时间	1	—	—
扫视速度	-0.138 **	1	—
扫视幅度	-0.072 **	0.701 **	1

注: ** 表示 $p<0.01$ 。

5 结 论

1) 驾驶员视野中的主要关注对象为前方道路区域、左视镜以及车身仪表区域,提示前方的道路状况、车速信息、路线需求和左侧来车对驾驶员的干扰较大,交通管理方面可设置相关视线引导装置以减少驾驶风险。

2) 鉴于驾驶员的注视时间相对频率主要分布在 500 ms 内,车辆驶入、驶出立交路段的关键标志信息应保证在 500 ms 内被识别。考虑到小净距立交下驾驶员的驾驶负荷程度更高,相关部门应优化设计以降低驾驶员认知压力,以应对立交净距过短而带来的安全隐患。

3) 驾驶员在小净距立交行驶时,其扫视幅度范围会明显增大,且存在多维度驾驶任务需求,不同行驶工况下各个行驶阶段横纵向信息处理存在差异,应针对性管理。200 px 作为扫视幅度的关键阈值,可作为驾驶负荷的重要量化指标及交通标志的布局依据。

4) 注视时间的独立性提示复杂信息需单独留出加工时间,危险驾驶行为预警系统参数权重分配可参考 3 个视觉特性指标之间的相关关系。未来将进一步从性别区分、驾龄分层等方面分析驾驶员个

体化差异的眼动、心电、车速等数据,并融合多源数据分析,使研究结果更全面可靠。

参 考 文 献

[1] 易刚,杨迪,矫成武,等. 高密度立交出入口区段车流量对驾驶人精神负荷影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1 224-1 233.
YI Gang, YANG Di, JIAO Chengwu, et al. Influence of traffic flow in the entrance and exit section of high density interchange on the driver's mental load[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(3): 1 224-1 233.

[2] 牟俊龙,杨迪,矫成武,等. 基于心率变异性的高密度立交出入口驾驶人精神负荷特性[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(1): 28-40.
MOU Junlong, YANG Di, JIAO Chengwu, et al. Drivers' mental load characteristics at the entrance and exit of high-density interchanges based on heart rate variability[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(1): 28-40.

[3] 李之红,赵莉,许旺土. 基于眼动实验的右转车辆驾驶员注视行为研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2018, 37(12): 111-117.
LI Zhihong, ZHAO Li, XU Wangtu. Driver's gaze behavior for right turning vehicle based on eye movement experiment[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2018, 37(12): 111-117.

[4] 周扬,付锐,刘卓凡. 考虑驾驶人不同分心类型的分心识别研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(3): 132-139.
ZHOU Yang, FU Rui, LIU Zuofan. Distracted driving recognition considering distraction types[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(3): 132-139.

[5] 徐进,孙子秋,王思棋,等. 高密度互通立交出口匝道驾驶人视觉搜索行为特征[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2022, 52(6): 1 189-1 198.
XU Jin, SUN Ziqiu, WANG Siqi, et al. Characteristics of driver's visual search behavior in exit ramp of high-density interchanges[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2022, 52(6): 1 189-1 198.

[6] 白婧荣,唐伯明,孙宗元,等. 毗邻互通立交特长隧道驾驶负荷研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1): 301-310.
BAI Jingrong, TANG Boming, SUN Zongyuan, et al. On driving load of super-long tunnel adjacent to interchanges[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 301-310.

[7] 汤文蕴,丁纯璐,潘义勇,等. 高速公路连续隧道群驾驶人视觉特性分析[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(1): 54-62.
TANG Wenyun, DING Chunlu, PAN Yiyong, et al. An analysis of visual characteristics of drivers over continuous highway tunnels[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(1): 54-62.

[8] HU Xinyun, GABRIEL L. Exploration of the effects of task-related fatigue on eye-motion features and its value in improving driver fatigue-related technology[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2021, 80: 150-171.

[9] LEE J H, CHOI S Y, KIM S A, et al. The correlation between driving risk and visual attention when using smartphones while driving in novice drivers[J]. Medicine, 2024, 103(48): DOI: 10.1097/MD.00000000000040764.

[10] GOTARDI G C, BARBIERI F A, SIMAO R O, et al. Parkinson's disease affects gaze behaviour and performance of drivers[J]. Ergonomics, 2022, 65(9): 1 302-1 311.

[11] 郑霞忠,张蒙,陈云,等. 基于眼-脑生理指标的大型地下洞室驾驶员疲劳演化特征研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3 612-3 622.
ZHENG Xiazhong, ZHANG Meng, CHEN Yun. Research on characteristics of drivers' fatigue evolution in large underground caverns based on eye-brain physiological indicators[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(10): 3 612-3 622.

[12] USMAN S M, KHATTAK A J, CHAKRABORTY S, et al. Detection of distracted driving through the analysis of real-time driver, vehicle, and roadway volatilities[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2024, 16(12): 1 426-1 447.

[13] 梅家林,杜志刚,郑号染,等. 不同时段特长隧道入口区域视觉负荷研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 176-181.

MEI Jialin, DU Zhigang, ZHENG Haoran, et al. Research on visual load at entrance area of extra-long tunnel in different periods[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 176–181.

[14] SCHNEIDER A, SONDEREGGER A, KRUEGER E, et al. The interplay between task difficulty and microsaccade rate: evidence for the critical role of visual load[J]. Journal of Eye Movement Research, 2021, 13(5): DOI: 10.16910/jemr.13.5.6.

[15] 江文艺, 杜志刚, 贺世明, 等. 雾天高速公路隧道入口区域驾驶人视觉行为特性研究[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(4): 110–117, 135.

JIANG Wenyi, DU Zhigang, HE Shiming, et al. A study on the visual behavior characteristics of drivers at the entrance area of freeway tunnels in foggy weather[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(4): 110–117, 135.

[16] SUN Yali, FENG Shumin. Effects of lane-change scenarios on lane-change decision and eye movement[J]. Ergonomic, 2024, 67(1): 69–80.

[17] 徐进, 杨子邈, 陈钦, 等. 基于电子不停车收费数据的山区高速公路车速分布与车型分类研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(5): 75–84, 116.

XU Jin, YANG Zimiao, CHEN Qin, et al. Speed distribution and vehicle type classification of mountain expressway based on electronic toll collection data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(5): 75–84, 116.

[18] 尚婷, 谢磊, 连冠, 等. 公路特长隧道内疲劳唤醒区视觉行为特征研究[J]. 公路, 2024, 69(8): 260–273.

SHANG Ting, XIE Lei, LIAN Guan, et al. Characterization of visual behavior in the fatigue arousal zone in highway extra-long tunnels[J]. Highway, 2024, 69(8): 260–273.

[19] 商艳, 朱守林, 戚春华. 草原公路长直线段最佳信息量阈值研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 189–195.

SHANG Yan, ZHU Shoulin, QI Chunhua. Research on optimal information threshold of long straight section on grassland highway[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 189–195.

作者简介：袁春玲（2002—），女，重庆人，硕士研究生，研究方向为智能网联与协同控制理论与技术。E-mail:ycl_67890@163.com。

