

文章编号: 1005-0523(2026)03-0074-09



基于驾驶模拟器的高速公路工作区预警策略优化

梁钰¹, 杨艳群², 张燕³, 和绍君³, 廖律超¹

(1. 福建理工大学人工智能与交通工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116;
3. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要:随着高速公路使用年限的增加, 日常养护已成为当前高速公路运营的重点。养护活动往往会占用部分道路资源, 导致潜在的交通拥堵和安全风险。为提高高速公路工作区交通安全, 在现有工作区安全设施设置的基础上, 文章提出了4种优化方案, 包括工作区安全设施标志加红旗、路面铺设红色频闪灯、全程提供语音导航及预警策略综合优化方案。通过驾驶模拟实验, 采集驾驶人驾驶数据比较安全设施优化方案对驾驶人驾驶安全的影响, 利用秩和比法综合评价方法对每种优化方案进行评估。结果显示, 工作区安全设施标志加红旗、路面铺设红色频闪灯和全程提供语音导航的综合优化方案对驾驶人驾驶安全提升最高。未来在高速公路工作区可考虑加入语音导航提高驾驶人驾驶安全。

关键词:工作区; 预警策略; 非整次RSR评价方法; 交通安全

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

本文引用格式: 梁钰, 杨艳群, 张燕, 等. 基于驾驶模拟器的高速公路工作区预警策略优化[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(3): 74-82.

Optimization of Warning Strategies for Highway Work Zone Based on Driving Simulator

Liang Yu¹, Yang Yanqun², Zhang Yan³, He Shaojun³, Liao Lyuchao¹

(1. School of Artificial Intelligence and Transportation Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
3. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: As expressways age, routine maintenance has become a critical aspect of expressway operations. However, such maintenance often necessitates partial lane closures, which can lead to traffic congestion and heightened safety risks. To address these challenges, this study proposes four optimized strategies for the deployment of safety facilities in work zones, drawing on prior research in this area. These strategies include the work area safety facilities logo plus red flag, road laying red strobe lights, the whole process to provide voice navigation and warning strategies comprehensive optimization scheme. To assess the effectiveness of each strategy, a driving simulation experiment was conducted. Driver behavior data were collected and analyzed to evaluate the impact of the different safety configurations on driving performance. The rank sum ratio (RSR) comprehensive evaluation method was used to assess and compare the performance of each scheme. The results show that the comprehensive optimization scheme of adding red flags to

收稿日期: 2025-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(62376059); 河北省科技厅科技项目(SH2018-5); 中央引导地方科技发展专项(2023L3033); 福建省本科高校教育教学研究项目(FBJY20230045); 教育部产学研合作协同育人项目(231104575143120, 241002554295249)

the safety facilities signs in the work area, laying red strobe lights on the road surface and providing voice navigation throughout the whole process has the highest improvement in driver safety. These findings suggest that integrating voice navigation into safety systems may further enhance safety in expressway work zones.

Key words: work zone; warning strategies; non-integer RSR evaluation method; traffic safety

Citation format: LIANG Y, YANG Y Q, ZHANG Y, et al. Optimization of warning strategies for highway work zone based on driving simulator[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026,43(3):74-82.

随着交通量和大型车比例的不断增加以及运营时间的推移,高速公路不可避免地出现路面磨损、裂缝等病害,近年来高速公路工作区数量大幅增加。研究表明,由于工作区交通环境复杂,驾驶人在靠近工作区的路段比在正常路段上行驶更加困难,且事故率也更高^[1]。因此工作区安全已成为交通安全领域热门的研究方向,其中在驾驶人进入高速公路工作区之前对其进行警告是确保工作区交通安全的重要步骤。

在现实的高速公路工作区,部分司机会忽视工作区安全设施提醒,无意中进入封闭车道,对其他道路使用者构成重大风险。但如果能在驾驶人发生危险之前对其进行有效提醒,可降低交通事故发生率^[2]。严利鑫等^[3]通过交通安全设施的设置有效提醒驾驶人对养护工作区的警觉性与识别度。夏然^[4]提出了在作业区中实施分级限速方案以提高安全性的建议。吴文燕^[5]确定了不同道路服务水平条件下的最佳提前换道位置以及限速标志牌间距和位置的最优方案。Thapa等^[6]提出了一种工作区入侵警报系统。Almallah等^[7]通过设置VMS确保司机保持较大的车头时距,从而提高工作区交通安全水平。

目前我国高速公路工作区交通安全设施的设置主要是参考《公路养护安全作业规程》(JTG H 30—2015)与《道路交通标志和标线第4部分:作业区》(GB 5768.4—2017),但不同的标准之间对于同种情况的设置存在一定的差异。传统物理标志的位置设置与信息告知范围具有一定的局限性,驾驶人容易错过警示信息,且难以及时获取远距离路况信息。在此背景下,本研究基于驾驶模拟系统平台,在国内外高速公路工作区安全设施设置方法的基础上,构建多组实验场景,并利用采集到的眼动与脑电数据,评估出最合理的基础设施组合设计方案。

1 高速公路工作区预警策略试验设计

1.1 试验方案概述

八车道高速公路车速快、车流量大,能够更充分激发驾驶员在不同诱导策略下的行为与生理反应,有助于提高实验结果的代表性和适用性。同时,该路段具备良好的可控性,便于实施标准化的实验设置。因此,研究场景设置为双向八车道高速公路,平直无坡,采用驾驶模拟实验。实验场景中警告区、缓冲区及工作区的长度设置,主要通过参考《高速公路交通安全设施设计细则》(JTJ D81—2017)中对临时交通控制区域的相关规定,并结合驾驶行为特征和既有研究成果进行合理调整。具体设置情况为:①依据驾驶员识别交通信息所需的反应时间和准备距离,设定警告区长度1500m;②根据车辆以限速行驶时的平均制动距离,并结合安全冗余因子,布设上游过渡区和缓冲区为100m;③考虑高速公路典型行驶速度(80~120 km/h)下的驾驶响应距离及通过时间,认为100m的长度可确保驾驶员在进入工作区期间有足够时间进行识别、反应与调整,具备较高的安全性与代表性。预警策略具体优化方案如图1和表1所示。

1.2 试验人员及设备

利用G*Power3.1.9软件估计样本量, α 误差为0.05,效应量为0.25,结果表明,达到0.95统计功效的样本量至少为22。本实验共招募30名参与者,参与者年龄范围为19~34岁($M=23.81$, $SD=4.36$),且均拥有1年及以上驾龄($M=2.13$, $SD=1.38$),身心健康,视力正常。参与者签署了一份声明,表示其自愿参加实验,实验结束后参与者获得50元奖励。本研究采集模拟驾驶时车辆运动状态数据以及驾驶人脑电与眼动数据,实验设备如下。

1) DRS-10002.0驾驶模拟系统。DRS-10002.0汽车驾驶模拟系统分为驾驶舱、操纵台与显示器,

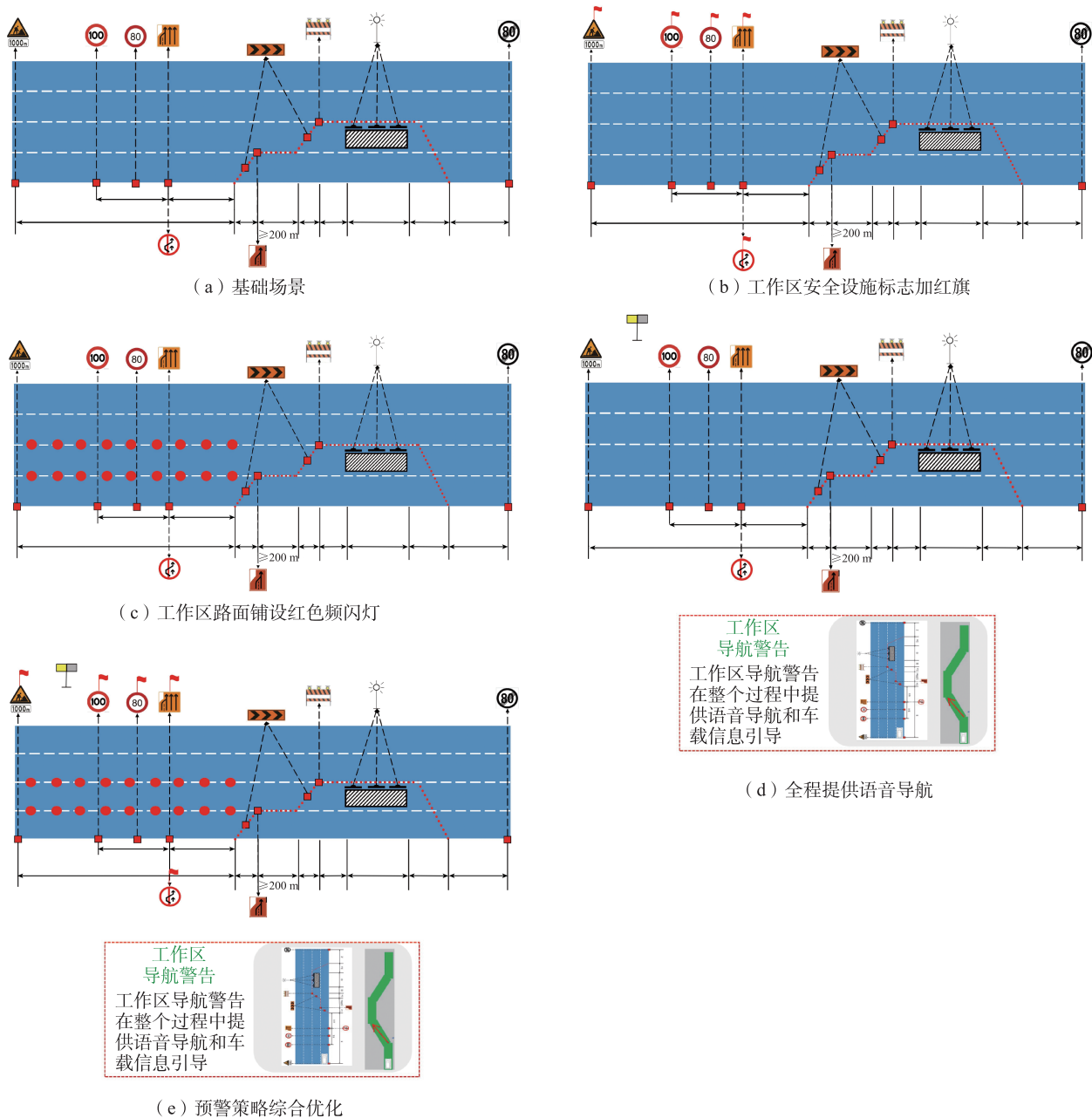


图1 预警策略优化方案

Fig. 1 Warning strategies optimization schemes

能够对驾驶人的行为参数进行实时采集,驾驶舱包括操作车辆所需的各种部件,例如方向盘、踏板、变速杆和仪表板。显示屏的通视角为 120° ,由3块60英寸4K LCD组成,辅助音响系统可以模拟环境和车辆声音,控制系统实现了对加载实验场景的控制和实验数据的采集。

2) 32通道NE无线脑电系统。32通道NE无线脑电系统拥有24位高分辨率与500 SPS采样率,是

一种可以广泛运用与观众场景的便携式可穿戴系统。该系统能够通过电极实时接收人的脑电波,确保脑电信号采集准确。

3) Dikablis眼动仪。Dikablis眼动仪与分析软件D-Lab共同使用来采集被试的眼球运动行为特征。该设备具有重量轻、仪器操作简单等特点。在采集数据时,眼动仪频率为60 Hz,精度为 $0.1^{\circ}\sim 0.3^{\circ}$ 。

表1 各方案设置情况
Tab.1 Settings of each scenario

方案	方案内容	方案说明
方案1	基础场景	按居中对齐设置,如图1(a)所示。
方案2	工作区安全设施标志加红旗	采用《美国交通工程设施手册 城市道路和公路》(2009版) ^[8] 中的建议,在安全设施上放置红色的旗子,如图1(b)所示。
方案3	工作区路面铺设红色频闪灯	工作区路面选用红色闪烁灯光,并按10 m/组的间距,连续布设于作业区所在一侧车道的左侧和右侧车道标线上,如图1(c)所示。
方案4	全程提供语音导航	增设简短的语音导航并全程播放,如图1(d)所示。
方案5	预警策略综合优化	综合方案2、方案3、方案4形成高速公路工作区综合措施优化方案,具体布置场景如图1(e)所示。

表2 实验指标
Tab.2 Experimental index

指标类型	指标名称	指标说明
驾驶行为指标	速度标准差/(m/s)	驾驶人在工作区行驶过程中的速度标准差。数值越小,表示驾驶人进入工作区时驾驶状态越稳定 ^[9] 。
眼动指标	瞳孔面积/pixel ²	瞳孔面积代表驾驶人的视觉适应性和负荷水平,其数值越大说明驾驶人的心理负荷越大 ^[10] 。
	平均注视时间/ms	发生注视行为的累计注视时间与注视次数的比值,其值越大说明驾驶人将更多的注意力资源用于目标信息 ^[11] 。
脑电指标	β 波绝对功率值	β 波主要反映驾驶人的警觉性和精神集中度,往往会在人精神紧张与情绪激动时产生,随着驾驶人注意力和警觉性得降低, β 波活动也会降低 ^[12] 。
	$(\alpha+\theta)/\beta$	该指标是驾驶人的脑电波的 α 波与 θ 波之和与 β 波的比值,是衡量驾驶人疲劳程度的一个重要指标,其值越高说明驾驶人负荷越大,精神疲劳度越高 ^[13] 。

1.3 试验流程及指标计

八车道高速公路工作区标志设置应有效提高驾驶人警觉度与行车安全性,而驾驶人生理反应和驾驶行为稳定性与行车安全性密切相关,因此确定本试验指标如表2所示。本试验采取室内试验,同时避免外界光线与噪音的影响,试验步骤如下:①在进行驾驶模拟试验之前,对参与者开展驾驶模拟预试验以熟悉和了解驾驶模拟设备,同时为驾驶人解释试验流程和注意事项,并告知参与者驾驶试验场景的相关标志含义,确保参与者对实验过程有清晰的认识;②参与者按照要求在不同实验场景下进行模拟驾驶,实验场景顺序均被打乱以避免记忆效应,完成一个场景后参与者休息5 min,以缓解疲劳,确保后续试验的准确性;③在完成一项试验后,会提供一份问卷供参与者作答,以测试其对工作区不同安全设施设置的感受;④一名参与者完成所有试验后,另一名参与者进入模拟舱完成试验,此过程重复直至完成所有参与者完成试验。

根据研究,眼动数据采集始于道路施工标志前

方113 m处,采集完成后利用D-Lab软件导出原始眼动数据。驾驶模拟器车辆动力学模块每0.03 s记录一次驾驶行为数据,本次试验全程对驾驶行为指标进行记录。采集到的脑电数据导出至MATLAB软件进行预处理分析。

2 试验结果分析

2.1 显著性检验

试验结果表明,与基础方案相比,在优化方案下,驾驶人在各项指标上表现出显著差异。因此,通过单因素方差分析进一步验证这一假设,各项指标的显著性结果如表3所示,各项指标在不同方案之间均表现出统计学上的显著性差异($P<0.001$),说明优化方案对驾驶员的生理及行为指标具有显著影响。其中 F 表示自由度, P 表示显著性水平。

2.2 速度标准差

不同方案下驾驶人行驶速度标准差如图2所示,在优化方案下,速度标准差显著降低,表明驾驶人的速度波动较小,速度控制能力显著提高,驾驶

表3 指标显著性结果

Tab.3 Calculation results of indicator significance

指标	F	P	事后分析	
眼动指标	瞳孔面积	31.43	<0.001	$S_1-S_2:P=1.000$
				$S_1-S_3:P<0.001$
				$S_1-S_4:P<0.001$
				$S_1-S_5:P=0.004$
	平均注视时间	18.16	<0.001	$S_1-S_2:P=0.029$
				$S_1-S_3:P=0.391$
				$S_1-S_4:P<0.001$
				$S_1-S_5:P<0.001$
脑电指标	β 波绝对功率值	14.13	<0.001	$S_1-S_2:P=1.000$
				$S_1-S_3:P=0.001$
				$S_1-S_4:P=0.041$
				$S_1-S_5:P<0.001$
	$(\alpha+\theta)/\beta$	9.68	<0.001	$S_1-S_2:P=0.594$
				$S_1-S_3:P=0.055$
				$S_1-S_4:P=0.228$
				$S_1-S_5:P=1.000$

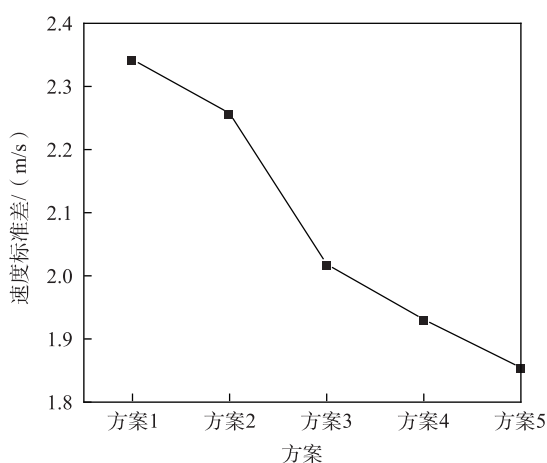


图2 不同方案驾驶人速度标准差

Fig. 2 Standard deviation of driver speed in different schemes

行为更加稳定。方案控制效果排序为:方案5>方案4>方案3>方案2>方案1,方案5的控制效果最佳,速度标准差下降了20.84%。

在方案1基础方案中,主要依靠工作区限速标志的提醒,其效果容易受到驾驶人注意力波动的影响,速度控制能力较差。方案2和方案3中分别引入了视觉提示,即增设红旗和频闪灯,都在一定程度上增加了驾驶人的警觉性,但可能由于缺乏即时反馈,难以在稳定驾驶速度方面提供足够的引导。方案4中引入了语音导航提示,能够提供清晰直接、

实时动态的指导,直接干预驾驶人的行为,帮助其调整速度,有助于减少驾驶人对道路环境变化的反应时间,从而避免因环境不确定性而导致的速度波动。方案5的速度控制能力效果最好,归因于语音导航与视觉提示相结合,形成了多模态的信息引导系统,证明了在复杂交通环境中,多模态提示系统更具优势。

2.3 眼动指标

1) 瞳孔面积。不同方案下驾驶人瞳孔面积变化如图3所示,且由表3可知,优化方案与基础方案具有显著性差异($F=31.43, P<0.001$)。相较于方案1基础方案,方案2与方案3的驾驶人瞳孔面积增大,说明频闪灯和红旗均能够有效引起驾驶人的视觉警觉性。而方案4和方案5的驾驶人瞳孔面积减小,且数据波动较小。这是由于方案4与方案5都引入了语音导航,为驾驶人提供了更加有效的驾驶信息,使驾驶人能更有效地处理外部刺激,减少无关信息对其注意力的干扰,降低了驾驶人视觉负担。对比方案4,方案5对驾驶人瞳孔面积影响更低,这是由于方案5中同时加入了红旗与频闪灯的影响。因此,合理设计语音引导系统能够优化驾驶人的信息获取方式,提高安全性,尤其是信息量较大、环境复杂的情况下,语音与视觉提示的结合更能帮助驾驶人减少认知负担,提高了整体驾驶表现。

2) 平均注视时间。不同方案下驾驶人平均注

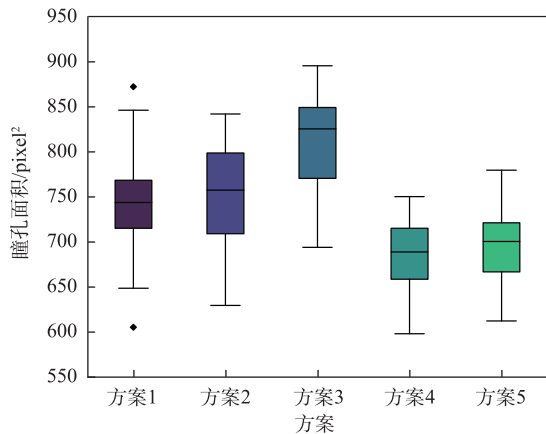


图3 不同方案驾驶人瞳孔面积分布
Fig. 3 The pupil area distribution of driver in different schemes

视时间变化如图4所示,且由表3可知,优化方案与基础方案具有显著性差异($F=18.16, P<0.001$)。相较于方案1基础方案,优化方案的平均注视时间中位数均有所提高,表明驾驶人对目标信息的关注度均有所增加。其中方案3的驾驶人平均注视时间增量最小,表明路面增设警示频闪灯会导致驾驶人在驾驶过程中需将注意力分散至路面其他区域,会减弱其引导效果。而方案4的驾驶人平均注视时间中位数增量最高,表明增设语音导航对提高驾驶人平均注视时间效果最好,这是由于语音提示能够有效引导驾驶人注意力,且不增加其视觉负担。

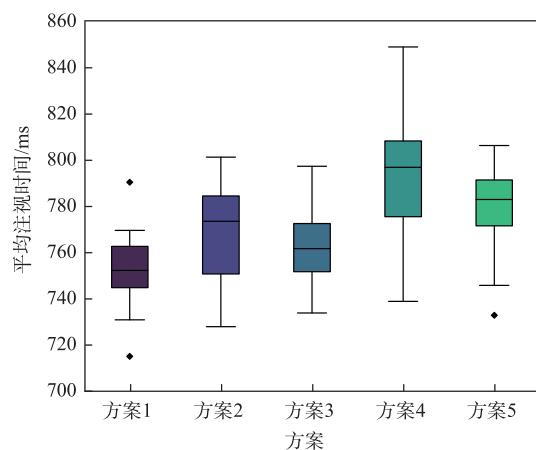


图4 不同方案驾驶人平均注视时间分布
Fig. 4 The average fixation time distribution of driver in different schemes

2.4 脑电指标

1) β 波值。不同方案下驾驶人 β 波值的测量结

果如图5所示,且由表3可知,优化方案与基础方案具有显著性差异($F=14.13, P<0.001$)。相较于方案1基础方案,方案3(频闪灯)、方案4(语音导航)和方案5(综合方案)对驾驶人 β 波值有显著提升($P<0.05$),表明这三种方案有效提高了驾驶人的警觉性。而方案2(加红旗)的 β 波值与基础方案无显著差异($P=1.000$),表明单独加红旗对提高警觉性作用有限。其中方案5效果最好,其均值相较基础方案提高了17.80%,这是因为驾驶人使用语音导航与视觉提示综合方案时,其警觉性得到了最有效的提升,表明多模态提示系统能够促进驾驶人神经活动的增强,进而提高驾驶状态。

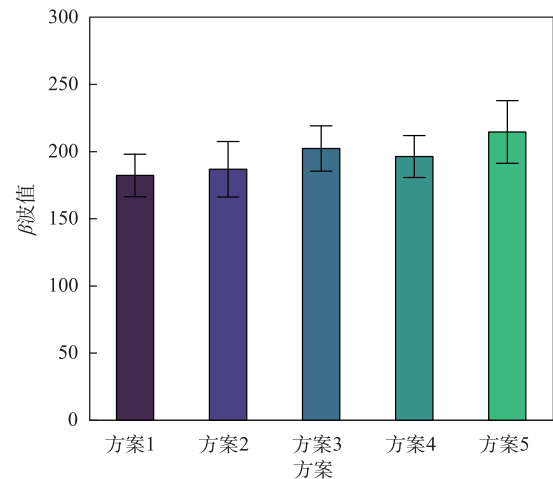
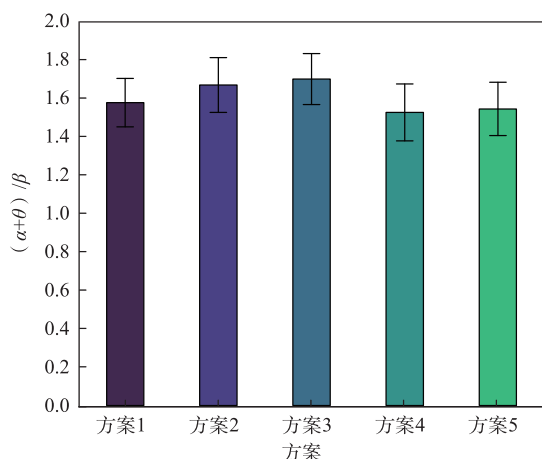


图5 不同方案驾驶人 β 分布
Fig. 5 Different schemes of driver β distribution

2) $(\alpha+\theta)/\beta$ 。不同方案下驾驶人 $(\alpha+\theta)/\beta$ 的测量结果如图6所示,且由表3可知,优化方案与基础方案具有显著性差异($F=9.684, P<0.001$)。方案4和方案5的瞳孔面积显著小于基础方案,而方案2和方案3的瞳孔面积大于基础方案。这一结果表明,语音导航(方案4和方案5)能够有效降低驾驶人的视觉认知负荷,使驾驶人无需过度注视道路即可获取关键信息;而单独增加视觉警示(红旗、频闪灯,方案2和方案3)反而增加了视觉刺激,导致瞳孔面积增大,反映出更高的视觉负荷。在方案5中,语音导航的“减负”效应压过了视觉警示的“增负”效应,最终表现为瞳孔面积降低。这说明,在复杂工作区环境中,听觉信息比额外视觉信息更有利于优化驾驶人的视觉资源分配。

图6 不同方案驾驶人 $(\alpha+\theta)/\beta$ 分布Fig. 6 Different schemes of driver $(\alpha+\theta)/\beta$ distribution

3 综合评价

3.1 模型构建

本研究涉及高速公路工作区多项交通设施改进方案的效果评价,秩和比法(rank-sum ratio, RSR)是一种将古典参数统计和近代非参数统计相结合,并融合其各自优点于一身的统计分析方法。其属于非参数统计的范畴,对指标数据的要求较低,适用于各种类型的数据,并且可以避免异常值的影响^[14]。非整次 RSR 法用类似于线性插值的方式对指标值进行编秩,以改进 RSR 法编秩方法的不足,所编秩次与原指标值之间存在定量的线性对应关系,从而克服了 RSR 法秩次化时易损失原指标值定量信息的缺点。因此本研究采用非整次 RSR 法,选用实验所获取驾驶人驾驶行为数据作为指标,对不同工作区方案设施布置形式进行评价。

1) 权重计算。通过熵权法^[15]计算得到本文所选取指标的权重,结果如表4所示。

表4 指标权重

Tab.4 Indicator weights

指标	权重/%
速度标准差	19.891
瞳孔面积	23.086
平均注视时间	20.652
β	15.790
$(\alpha+\theta)/\beta$	20.581

2) 列出原始数据矩阵。根据评价目的,选择评价指标,区分高优指标与低优指标,原始矩阵如下

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 项评价指标。

3) 计算秩值。高优指标的秩值为

$$R_{ij} = 1 + (n-1) \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

低优指标的秩值为

$$R_{ij} = 1 + (n-1) \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

式中: n 为评价对象个数; $x_{\max}$ 与 $x_{\min}$ 分别为原始序列中的最大值与最小值。

4) 计算秩和比 RSR 及排名 r_{RSR}

$$r_{\text{RSR}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m W_j R_{ij} \quad (4)$$

式中: W_j 为第 j 项评价指标的权重。

5) RSR 的分布是指用概率单位 Probit 表达的值特定的累计频率。

6) 以累计频率所对应的概率单位值 Probit 为自变量,以 RSR 值为因变量,计算回归方程。

7) 根据 RSR 法对 5 种工作区交通标志设置方案的有效性进行排序,并对结果进行方差分析,以确定各排序是否具有统计学意义。

3.2 模型评价结果

根据上述步骤,对不同交通设施布置方案进行评价。首先计算 RSR 值和 Probit 值(x_{Probit})。并以 x_{Probit} 为自变量,RSR 值为因变量,推导出拟合 RSR 估计值(y_{RSR})的线性回归方程,回归方程如下

$$y_{\text{RSR}} = -0.733 + 0.252x_{\text{Probit}} \quad (5)$$

对模型进行 F 检验,分析结果显示其 $P=0.026$, $R^2=0.801$,模型构建良好。根据回归方程计算出 y_{RSR} ,将评价对象分为 3 档,分档等级数字越大表示等级水平越高,即效应越好。各方案 RSR 排名及指标综合评价结果如表5所示,由表5可知,各种交通预警策略布置场景综合评价结果为:方案5>方案4>方案3>方案2>方案1。与原始布置方案相比,优化方案均提高了驾驶人在工作区行驶的安全性,其中方案5安全设施综合优化方案对驾驶人驾驶安全提升最高,其次为方案4增加语音导航。表明多模态信息交互在减轻认知负担、优化驾驶体验方面具有显著作用,尤其在高速公路工作区这样复杂且信

表5 指标综合评价结果

Tab.5 Comprehensive evaluation results of indicators

方案	RSR 排名	γ_{RSR}	分档等级
方案1	5	0.315	2
方案2	4	0.463	2
方案3	3	0.591	2
方案4	2	0.739	2
方案5	1	0.941	3

息量大的环境下,语音导航不仅能提升驾驶安全性,还能有效降低疲劳风险,确保驾驶人处于最佳的警觉状态,在未来可考虑加入语音导航提升驾驶人行车安全。

4 结论

1) 设计了4种高速公路工作区交通预警策略优化方案,并选择驾驶速度,眼动指标,脑电指标与主观问卷得分构建RSR综合评价体系,对优化方案进行评价。

2) 红色旗帜与频闪灯虽能引起视觉警觉,但也增加视觉负担;语音导航则能降低视觉负担和疲劳状态,提升驾驶体验,使得驾驶人能够实时了解工作区道路环境,实现更稳定的工作区速度控制。

3) 运用RSR法对不同方案进行综合评价,预警策略综合优化方案对驾驶人驾驶安全提升最高,其次为增加语音导航。因此未来可考虑加入车载语音导航提示,提高驾驶人工作区驾驶安全。

4) 本研究招募的参与者平均驾龄为2.13年,偏向新手/生手驾驶员群体。新手驾驶员对工作区环境的熟悉程度、对视觉警示的响应模式与经验丰富的驾驶员可能存在差异。因此,本研究结论在向全体驾驶人推广时需谨慎。未来研究应纳入驾龄更长、驾驶经验更丰富的样本,以验证本结论的普适性。

参考文献:

[1] ABDALLAH A, IBRAHIM A, RUSSELL-VERNON C, et al. Advancing safety in short-term utility work zones: assessing the role of work zone intrusion alert technologies (WZIATs) [J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2024, 26: 101133.

[2] 任立海, 聂珍龙, 于潇, 等. 基于脑电信号的不良驾驶状态识别研究综述[J]. 中国公路学报, 2024, 37(8): 216-230.

REN L H, NIE Z L, YU X, et al. Review on recognition

of unsatisfactory driving status based on electroencephalogram[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(8): 216-230.

[3] 严利鑫, 胡鑫辉, 刘清梅, 等. 道路交通事故严重程度预测及致因分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 65-73.

YAN L X, HU X H, LIU Q M, et al. Road traffic accident severity prediction and causation analysis[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 65-73.

[4] 夏然. 高速公路养护作业区追尾冲突模型构建及安全改善研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.

XIA R. Research on rear-end conflict model construction and safety improvement in freeway work zone[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.

[5] 吴文燕. 基于改进元胞自动机的高速公路养护施工路段安全研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2021.

WU W Y. Security study on expressway maintenance construction section based on improved cellular automata[D]. Jinan: Shandong Jiaotong University, 2021.

[6] THAPA D, MISHRA S. Using worker's naturalistic response to determine and analyze work zone crashes in the presence of work zone intrusion alert systems[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 156: 106125.

[7] ALMALLAH M, HUSSAIN Q, ALHAJYASEEN W K M, et al. Improved traffic safety at work zones through animation-based variable message signs[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 159: 106284.

[8] 交通部联邦公路局. 美国交通工程设施手册 城市道路和公路(2009版)[M]. 赵晓华, 伍毅平, 边扬, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Manual on uniform traffic control devices for streets and highways(2009 edition)[M]. ZHAO X H, WU Y P, BIAN Y, et al(translation). Beijing : China Construction Industry Press, 2020.

[9] CHEN Z C, LI H, BAO Y Q, et al. Identification of spatio-temporal distribution of vehicle loads on long-span bridges using computer vision technology[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(3): 517-534.

[10] WANG A G, HUANG C X, WANG J Y, et al. The association between physiological and eye-tracking metrics and cognitive load in drivers: a meta-analysis[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2024, 104: 474-487.

[11] DOU J Z, XU C, WU W Y, et al. Using a visual attentional task and eye-tracking to investigate the effects of pre-takeover resource engagement on attention restoration in

conditionally automated driving[J]. Traffic Injury Prevention, 2025, 26(5): 506-514.

- [12] CRAIG A, TRAN Y, WIJESURIYA N, et al. Regional brain wave activity changes associated with fatigue[J]. Psychophysiology, 2012, 49(4): 574-582.

- [13] YANG Y Q, YE Z H, EASA S M, et al. Effect of driving distractions on driver mental workload in work zone's warning area[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2023, 95: 112-128.

- [14] 吕新兵, 孟丽萍, 潘春华, 等. TOPSIS联合RSR综合评价法在CHS-DRG运营绩效体系建设中的应用研究[J]. 中国卫生经济, 2024, 43(9): 23-28.

LYU X B, MENG L P, PAN C H, et al. Research on the application of TOPSIS combined with RSR comprehensive evaluation method in the construction of CHS-DRG operational performance system[J]. Chinese Health Economics, 2024, 43(9): 23-28.

- [15] 李智强, 王少成, 柴华, 等. 基于AHP和熵权法组合赋权的空间目标威胁评估方法[J]. 信息工程大学学报, 2024, 25(6): 751-756.

LI Z Q, WANG S C, CHAI H, et al. A spatial target threat assessment method based on combined weighting by ahp

and entropy weighting [J]. Journal of Information Engineering University, 2024, 25(6): 751-756.



第一作者: 梁钰(1988—), 女, 实验师, 硕士, 研究方向为交通安全, 交通心理学。E-mail: 920126627@qq.com。



通信作者: 杨艳群(1969—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为交通安全, 交通心理学。E-mail: yangyanqun@fzu.edu.cn。

(责任编辑: 吴海燕)