

基于驾驶行为的声屏障设计对行车安全及舒适性评价影响

徐 强¹, 樊兆董², 黄 迪¹, 宋太龙², 李鑫聃¹, 陈 亮²

(1. 四川成邛雅高速公路有限责任公司, 成都 610041; 2. 山东省交通科学研究院, 济南 250031)

摘 要:为量化评估声屏障设计对驾驶员驾驶行为及驾驶感受的影响, 依托四川天府新区至邛崃高速公路, 提出不同复杂度及不同样式的声屏障设计方案, 通过构建 5 个实验场景, 招募 25 名驾驶员进行驾驶模拟实验, 分析不同设计方案下驾驶员的驾驶行为及生理、心理变化特性; 选取具有代表性的车辆运行指标及驾驶员生理、心理指标, 构建基于博弈论组合赋权-Topsis 综合评价模型。结果表明: 声屏障图案连续性、信息负荷度等指标对驾驶员的驾驶行为、生理及心理产生显著性影响, 降低信息负荷度、提高声屏障图案连续性可以有效降低横向加速度标准差、速度标准差, 提高行车稳定性及安全性的同时, 驾驶员的驾驶舒适性也得到明显提升。

关键词:声屏障设计; 信息负荷度; 驾驶模拟; 博弈论组合赋权-Topsis 法

中图分类号:U417.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)10-3189-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240093

Influence of noise barrier design based on driving simulation on driving safety and comfort evaluation

XU Qiang¹, FAN Zhao-dong², HUANG Di¹, SONG Tai-long², LI Xin-dan¹, CHEN Liang²

(1. Sichuan Chengqiongya Expressway Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250031, China)

Abstract: In order to quantitatively assess how the design of sound barriers affects the driver's behavior and experience, the study proposes various acoustic barrier design schemes for the Sichuan Tianfu New Area-Qionglai Expressway, with different levels of complexity and style. To analyze the driving behavior of subjects under different design schemes, 25 participants were recruited to conduct driving simulation tests in five different scenarios. The study selected representative vehicle operation indexes and physiological and psychological indexes of the subjects. A comprehensive evaluation model was constructed based on the combination of game theory and the Topsis evaluation model. The results of the study are summarized in the following table. The research results indicate that the Topsis comprehensive evaluation model has a significant impact on the driving behavior, physiology, and psychology of the driver. Specifically, the continuity of the sound barrier pattern and the degree of information loading are important indicators. To

收稿日期: 2024-01-24.

基金项目: 四川省交通运输厅科技项目 (2020-ZL-B1).

作者简介: 徐强 (1974-), 男, 高级工程师. 研究方向: 道路与桥梁. E-mail: 379573881@qq.com

通信作者: 黄迪 (1989-), 男, 工程师. 研究方向: 道路与桥梁. E-mail: 2057919356@qq.com

improve driving stability and safety, it is recommended to reduce the degree of information loading and improve the degree of pattern continuity. These changes can effectively reduce the lateral acceleration standard deviation and speed standard deviation. Additionally, the driver's driving comfort is also improved.

Key words: sound barrier design; information load degree; driving simulation; game theory combinatorial weighting Topsis method

0 引言

声屏障是行车道路上的重要组成部分,传统设计虽然可以改善公路两旁的噪声环境,但单一的样式设计与周围环境和人文特征不协调,缺乏美感的同时驾驶舒适性较差,给驾驶员及乘车人员带来一定压抑感。为提高公路空间品质《公路声屏障第2部分:总体技术要求》(JT/T 646.2—2016)^[1]中规定,声屏障景观除应与公路主体工程相协调外,还应与所在区域的自然环境、人文环境和建筑风格相协调。我国颁布的《交通文化建设实施纲要》中也提出,道路建设应将地域文化元素作为关注要点之一^[2]。

在道路空间中,考虑文化景观融合的道路设施设计可以有效改善驾驶环境,提高安全性及舒适性^[3-8]。其中,加入文化景观融合的声屏障设计在声屏障降噪功能的基础上,可提升道路空间的丰富度,缓解驾乘人员的驾驶疲劳,提高行车安全。许多国家公路沿线已经通过设置类型多样的声屏障提升驾驶舒适性及安全性。例如:美国结合心理学理论,收集地域特色以及人文历史元素,修建带有景观色彩的声屏障,为驾驶员提供更好的视觉体验和心理舒适度,以提高驾驶安全性^[9]。李今朝等^[10]考虑到当前单调的声屏障样式不仅易造成压抑的行车体验,也易导致驾驶员视觉疲劳,增加行车风险,因此分析驾驶员在不同样式声屏障下的驾驶感受,研究表明,在透明形式的声屏障设计下驾驶员的驾驶感受更加积极,驾驶行为更加稳定。李南初^[11]从景观因素出发,研究景观对驾驶行为的影响,研究表明道路围合度及色彩等会显著影响驾驶行为。刘江伟等^[12]从视觉角度定量分析了声屏障对乘客感受的影响,并构建景观评价模型,研究表明,声屏障自身所携带的信息量及色彩丰富指数会对乘客心理及情绪产生较大影响。

综上所述,景观型声屏障设计有利于提升道路空间的丰富度,缓解司乘人员的驾驶疲劳,但针

对具体设计要点及驾驶员影响的研究较少,且声屏障效用评价更倾向于驾驶员及司乘人员的主观判断,缺少客观数据的支撑。为探究不同景观型声屏障方案对驾驶员驾驶行为、生理及心理的影响,本文基于交通驾驶模拟仿真集群系统完成驾驶模拟实验设计,分析驾驶员的驾驶行为、生理及心理的变化特性,构建主客观相结合的组合赋权-Topsis综合评价模型,为后续考虑文化及景观融合的声屏障方案优化设计提供技术支撑。

1 实验设计

1.1 驾驶员与实验设备

考虑到实验对视觉要求的特殊性,驾驶员在满足基本的驾驶要求以外,仍需满足以下条件:①驾驶员裸眼视力不应低于4.9,且不存在色弱等情况;②实际驾龄不低于3年;③拥有丰富的高速公路行驶经验。

考虑到研究结果依赖于实验数据进行推断,应保证实验样本量满足最小样本例数。依据配对设计与单个总体均数假设检验进行最小样本量的估算,计算公式为:

$$n = \frac{(t_{\alpha} + t_{\beta})^2 \sigma^2}{\delta^2} \quad (1)$$

式中: n 为样本量; t_{α} 与 t_{β} 为分别在一定自由度下的单侧与双侧 t 界值; α 为第一类错误概率,一般取值0.05; β 为第二类错误概率,一般取值0.10; δ 为允许误差; σ 为总体样本差。

由计算可得, n 应 >21 。为保证实验数据具备一定的可靠性,满足实验最小样本量需求,本次实验共招募25名驾驶员,其中女性9位,男性16位,年龄分布均在23~55岁,平均值 $M=36.640$,标准差 $S=7.969$,30~45岁驾驶员占总体的64%。驾龄分布在3~29年, $M=10.880$, $S=6.502$,驾龄在10年及以上的驾驶员占总体的52%。驾驶员年龄分布情况如图1所示,驾驶员驾龄分布情况如图2所示。

实验主要借助智能交通驾驶模拟仿真集群系

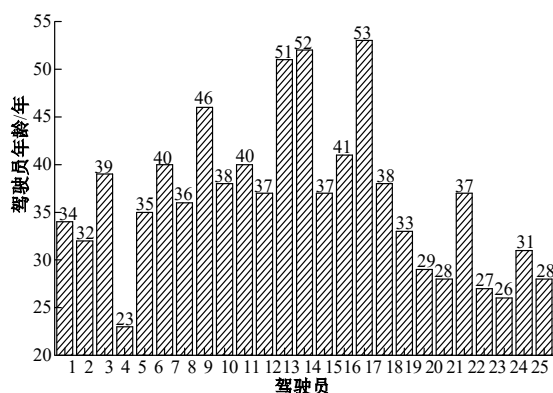


图 1 驾驶员年龄分布情况

Fig. 1 Age distribution of drivers

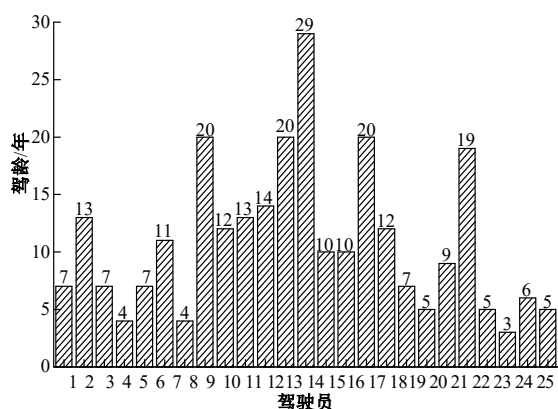


图 2 驾驶员驾龄分布情况

Fig. 2 Distribution of drivers by driving age

统完成驾驶模拟实验,系统包括六自由度实车驾驶模拟器、驾驶模拟仿真软件以及驾驶模拟人因数据采集设备。智能交通驾驶模拟平台见图 3。



图 3 智能交通驾驶模拟平台

Fig. 3 Intelligent transportation driving simulation platform

1.2 实验场景设计

实验依托天府新区至邛崃高速公路,选取 7 km 的实际道路情况完成场景构建,道路设计速度为 120 km/h,车道数为 3,车道宽度为 3.75 m,基于 3Dmax 软件搭建实验场景。在场景搭建时涉及

的交通标志、标线、路侧景观均按照实际道路情况及《道路交通标志和标线》(GB 5768.1—5768.8)进行设计,并使用交通仿真软件 SCANeR 构建仿真实验模型,交通流及交通组成按照实际调查结果设置。

为提升公路空间品质,交通行业开展文化设施建设,推进景观、人文与道路设施设计的融合。然而国内针对声屏障样式、图案及颜色的改变对驾驶行为以及驾驶员生理与心理影响要点的研究较少,对声屏障景观融合效用的研究也较少,且声屏障安全及舒适效用评估大多依赖于驾驶员及乘客的主观感受。因此,本文为深入研究不同景观融合声屏障设计的可行性及对驾驶员的影响机理,通过形象元素选择、意象表述及色彩元素提取理论,收集并提取天府新区至邛崃高速公路沿线的文化景观特色,构建 5 个仿真实验场景。其中,场景一为对照组(现状),实验组 1~4 分别对应梨花景区、历史文物、竹林及湖泊。为对比各实验组的异同,通过设计问卷的形式收集驾驶员对各实验方案的主观感受,并对各方案的色彩舒适度、图案连续性、信息负荷度、路景融合度进行排名,共回收问卷 41 份。计算最终排名并赋值,9 分为最高分,1 分为最低分。各实验组的声屏障设计情况及问卷打分结果如表 1 所示。

由表 1 可知,在驾驶员的主观感受中,实验组 1 的色彩舒适度及图案连续性最好,实验组 2 较差;现状设计由于无图案及颜色优化,因此信息负荷度最低,但路景融合度最差;实验组 3 的路景融合度较高,导致图案的信息负荷度较大。

为保证实验数据的有效性,每个场景中在相同位置共设置两段不连续且长度不同的声屏障,路段长度分别为 500 和 900 m,即单次实验场景中驾驶员会前后两次通过设有声屏障的路段。根据实验需求,25 名驾驶员需在测试场景中熟悉驾驶模拟器的使用并完成部分基础操作。实验开始前,实验员告知驾驶员本次实验的目的地,驾驶员依据自身驾驶习惯在高速公路驾驶,车辆出发后前往羊安镇并在驶出匝道后靠右停车。实验中,驾驶员不得交流、接打电话,以保证数据的有效性。实验结束后,驾驶员填写驾驶感受问卷并回答相关问题。每次实验间隔 3~5 min,避免学习效应对实验结果带来干扰。各场景下驾驶模拟场景仿真效果图如图 4 所示。

表 1 实验场景设计情况及问卷打分结果

Table 1 Experimental scenario design status and questionnaire scoring results

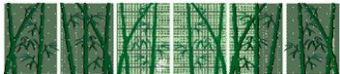
组别	文化景观	声屏障设计图案	色彩舒适度	图案连续性	信息负荷度	路景融合度
对照组	—	—	3	1	9	1
实验组 1	梨花景区		9	9	7	7
实验组 2	历史文物		1	3	1	3
实验组 3	竹林		7	5	3	9
实验组 4	湖泊		5	7	5	5



图 4 驾驶模拟场景仿真效果

Fig. 4 Driving simulation scene simulation effect

1.3 实验指标选取

为有效分析驾驶过程中的安全性及舒适性,针对驾驶行为、心理、眼动的实验数据选取多项指标进行研究,指标及选取依据如表 2 所示。

研究发现,在一定速度区间内,行驶速度与行车安全显著相关,世界卫生组织根据事故数据分析得出平均车速每提升 1%,致命车祸的风险就会增加 4%^[13],事故发生时的速度越快,人员死亡概率越高,经济损失越大。横向加速度及标准差可以反映车辆行驶的稳定性,据统计,横向不稳定偏移是导致车辆发生事故的主要原因之一,横向加速度越大,标准差越高,则车辆横向摆幅幅

度越大、频率越高,行车风险越大。瞳孔直径与驾驶员视觉感受相关,隧道出入口的明、暗变化对驾驶员视觉造成较大负荷,因此隧道出入口的事故率高于普通路段^[14]。注视时间及注视次数与事物对驾驶员的吸引程度及驾驶员认知、判断该事物所需时间有关,注视点频繁转移会导致驾驶员大脑处理的信息变多。所有正常窦性 NN 间期(即心跳间期)的标准差(Standard Deviation of NN intervals,SDNN)、短时副交感神经活性指标(Root Mean Square of Successive Differences,RMSSD)及 LF/HF 值是体现心率变异性的指标,心率变化越不稳定,驾驶员操作失误的概率

表 2 实验指标及选取依据
Table 2 Selection of experimental indicators and the basis for selection

指标类型	选取依据
行驶速度	反映驾驶员在道路行驶时主观上判断为安全的期望车速,与道路限速值越接近表明安全性越高
横向加速度	反映驾驶员驾驶车辆的稳定性,车辆稳定性越高,则安全性及舒适性越高
横向加速度标准差	反映行车的速度波动情况,数值越小,则车速前后变化越小,行驶越稳定
瞳孔直径	反映驾驶环境对视觉的刺激程度,瞳孔直径高于正常值,则视觉刺激较大,眼部舒适性较差
注视时间	反映被注视对象对驾驶员的吸引程度或驾驶员进行正确判断所需要的时间
注视次数	反映被注视对象对驾驶员的吸引程度
SDNN	心率变异性的指标之一,评估心脏交感神经和副交感神经的平衡状态,用于反映驾驶员心理压力
RMSSD	心率变异性的指标之一,指相邻正常心动周期差值的均方根,反映驾驶员心率快慢的变化程度
低频/高频(Low frequency/ High frequency, LF/HF)	心率变异性的指标之一,指交感神经与副交感神经的相对活跃程度,反映驾驶员的心理负荷程度

越大^[15]。

2 实验结果描述性分析

2.1 驾驶员驾驶行为分析

计算两个不同长度路段的各项车辆运行指标时,需结合驾驶模拟器 100 Hz 的采样频率,即每秒生成 100 行数据,先截取进入声屏障路段后的前 10 s 驾驶行为数据,再每秒计算一次指标均值。不同实验组下的车辆运行车速变化情况如图 5、图 6 所示,使用配对样本 *t* 检验分析不同方案运行车速指标的显著性,显著性分析结果见表 3。结果表明:不同设计方案下驾驶员行车车速与现状设计存在显著性差异($p<0.05$)。由图 5 及图 6 可知,实验组 3、实验组 4 的平均行驶车速明显高于其他组,车速分布于 101~109 km/h,相较于对照组车速分别提升约 5% 及 10.59%。其中实验组 1 与对照组的速度差异性较小。实验组 2 及实验组 3 中的车辆行驶车速最不稳定,速度标准差数值较大,原因可能为实验组 2 的声屏障设

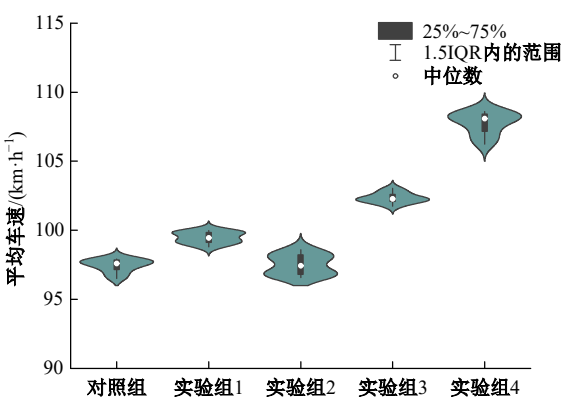


图 5 不同组别路段驾驶员行车车速分布(500 m)
Fig. 5 Distribution of drivers' traveling speed in different groups(500 m)

计图案信息负荷度较高,对酒具的认知和理解相比其他方案较复杂,且实验组 2 中声屏障图案颜色偏黄,对驾驶员的驾驶行为具有一定的警示作用,在一定程度上影响了车速稳定性^[16]。实验组 1 中的车辆行驶车速最稳定,原因可能在于设计方案图案连续性较高且图案较简单。

表 3 配对样本 *t* 检验结果(车辆运行速度)
Table 3 Results of paired samples *t* test (vehicle operating speed)

组别	配对样本	差值 95% 置信区间		<i>t</i>	显著性(双尾)
		下限	上限		
路段一(500 m)	对照组—实验组 1	-2.488 817 50	-1.563 551 46	-9.908	.000*
	对照组—实验组 2	-.176 091 26	1.493 761 06	1.785	.108
	对照组—实验组 3	-3.903 110 97	-3.478 986 46	-39.374	.000*
	对照组—实验组 4	-11.082 110 32	-9.571 268 88	-30.924	.000*
路段二(900 m)	对照组—实验组 1	2.091 719 64	2.997 195 05	12.714	.000*
	对照组—实验组 2	2.972 498 72	3.702 796 08	20.677	.000*
	对照组—实验组 3	-8.794 931 52	-6.097 018 44	-12.487	.000*
	对照组—实验组 4	-6.995 320 43	-6.659 303 79	-91.927	.000*

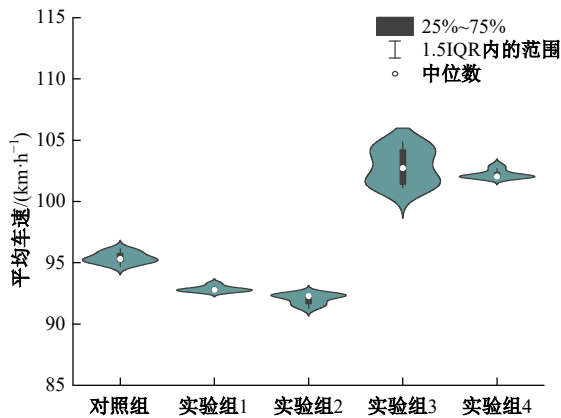


图 6 不同组别路段驾驶员行车车速分布(900 m)

Fig. 6 Distribution of drivers' traveling speed in different groups(900 m)

横向加速度主要用于反映车辆横向的行驶稳定性,使用配对样本 t 检验分析不同方案下的横向加速度指标的显著性。结果表明:对照组与实验组 1 存在显著性差异($p < 0.05$),不同实验组下的车辆横向加速度变化情况如图 7 及图 8 所示,实验组 1 的车辆整体横向加速度最为稳定,原因可能在于实验组 1 的声屏障图案连续性、色彩舒适度相比其他实验组更高。

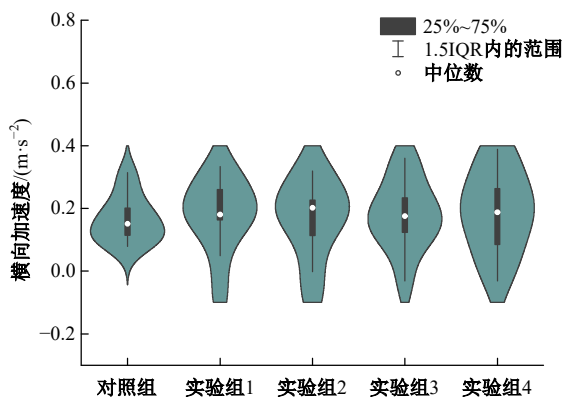


图 7 不同组别路段车辆横向加速度分布(500 m)

Fig. 7 Distribution of lateral acceleration of vehicles in different groups of road sections (500 m)

2.2 驾驶员心率、眼动数据分析

根据驾驶员经过声屏障路段的时间点,截取其生理、心理数据,驾驶员心率指标及眼动指标结果如图 9 所示。由于驾驶员最熟悉(现状),因此驾驶负荷度较小,SDNN 及 RMSSD 数值均处于正常值,其中实验组 1、实验组 4 与对照组心率指标较为接近,且实验组 1 的 LF/HF 数值更低,即驾驶员的心理变异程度更低。实验组 2 及实验组 3 中驾驶员的心率指标较高,反映出驾驶员在该

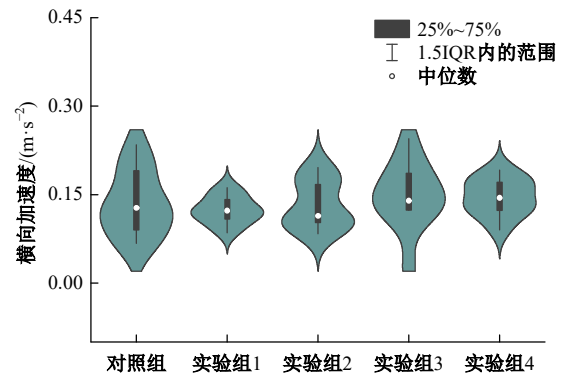
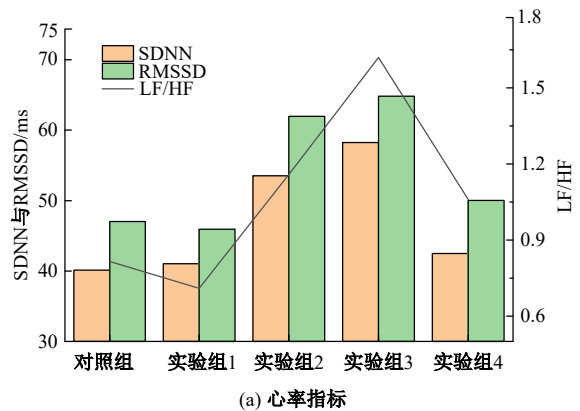


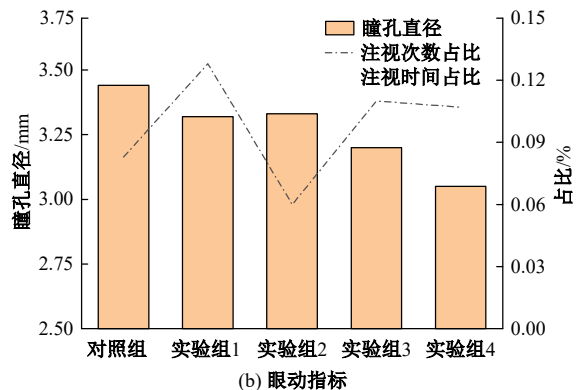
图 8 不同组别路段车辆横向加速度分布(900 m)

Fig. 8 Distribution of lateral acceleration of vehicles in different groups of road sections(900 m)

场景下的心理负荷度较大^[17]。在眼动指标中,实验组 1 中驾驶员注视时间较长,注视时间占总时间的 5.1%,注视次数占总注视次数的 12%。对照组的瞳孔直径均值较大,证明在该场景下驾驶员的视觉不舒适感较强,注视次数占总数的比例较低,主要原因在于设计样式单一乏味,不具备吸引驾驶员的特性^[18]。实验组 1 及实验组 3 中声屏障被注视的次数占总数的比例较高,表明该方案下的声屏障对驾驶员更具备吸引力^[19]。



(a) 心率指标



(b) 眼动指标

图 9 驾驶员心率指标及眼动指标结果

Fig. 9 Driver heart rate indicator(HRI) and eye movement indicator(EMI) results

3 声屏障行车安全及舒适性评价模型

3.1 基于博弈论的组合赋权-Topsis综合评价方法

3.1.1 主观赋权法-层次分析法

主观赋权法主要指专家根据认知和经验对各项指标的重要程度进行评估和排序,较为常用的经典评价方法为层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)。基于 AHP 法的模型构建过程如下:

(1)构建判断矩阵 A ,将所有指标两两比较;

(2)层次单排序及一致性检验;

(3)对判断矩阵 A 进行归一化,求解权重矩阵 W_1 并计算最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及一致性比率(Consistency ratio, CR),当 $CR < 0.1$ 时通过检验。

3.1.2 客观赋权法-熵权法

客观赋权法主要通过分析数据之间的数学关系来确定权重,其判断结果不依赖于主观判断,较为经典的方法包括熵权法、主成分分析法、CRIT-IC 权重法等。

熵权法主要利用数据携带的信息量进行权重计算,基于熵权法的模型构建过程如下。

(1)构建初始评价矩阵 X ,并对矩阵进行标准化处理,计算公式为:

$$X = X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11}, \cdots, x_{1m} \\ \vdots \\ x_{n1}, \cdots, x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 为评价对象个数; m 为指标个数; x_{ij} 为第 i 个对象的第 j 项指标经过标准化后的数值。

(2)计算每个指标数据项的比重 P_{ij} ,计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (3)$$

(3)计算每个指标的熵值 e_j ,计算公式为:

$$e_j = \frac{-1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (4)$$

(4)计算指标的熵权,得到权重矩阵 W_2 ,计算公式为:

$$W_2 = \frac{1 - e_j}{n - \sum e_j} \quad (5)$$

3.1.3 基于博弈论的组合赋权法

主、客观赋权法均存在一定的不合理性:主观赋权法对于指标权重的确定过度依赖于专家的主

观认知及实践经验,权重的精确度较低,无法较好地解决实际问题^[20];客观赋权法大多依赖于足够且完善的样本数据,当样本数据较少时,客观赋权法计算出的权重往往与指标的实际影响程度相差较大。

因此,可通过将主、客观赋权思想相结合的方式,修正评价指标权重值,使修正后的权重既符合客观数据计算所得的权重值,又不偏离主观判断的结果。常用的方法包括博弈论、偏好系数法及排序学习法等^[21]。

博弈论通过计算多个对象之间竞争、合作关系来寻求最优控制策略,本文通过博弈论的离差最小化思想,计算最优组合权重系数,确定修正后的组合权重^[22]。

基于博弈论方法的组合赋权法构建步骤如下:

(1)将利用熵权法得到的权重 W_2^T 与 AHP 法得到的权重 W_1^T 进行线性组合,求得组合权重 W^* ,计算公式为:

$$W^* = \alpha_1 W_1^T + \alpha_2 W_2^T \quad (6)$$

式中: α_1 和 α_2 为权重系数,表示主、客观权重的影响程度。

(2)利用博弈论思想确定纳什均衡点,计算公式为:

$$\text{Min} \|W^* - W_k\|_2, k = 1, 2 \quad (7)$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 为矩阵的二范式。

(3)求解权重系数 α_1 和 α_2 ,求解方式见式(8),并对权重系数 α_1 和 α_2 进行归一化处理; α_1^* 和 α_2^* 为归一化后的值,计算见式(9)。

$$\begin{bmatrix} W_1 W_1^T & W_1 W_2^T \\ W_2 W_1^T & W_2 W_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 W_1^T \\ W_2 W_2^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\alpha_i^* = \frac{\alpha_i}{\alpha_1 + \alpha_2}, i = 1, 2 \quad (9)$$

(4)计算最终组合权重 W^* ,计算公式为:

$$W^* = \alpha_1^* W_1^T + \alpha_2^* W_2^T \quad (10)$$

3.1.4 基于组合赋权-Topsis的评价方法

根据组合赋权法确定指标最终权重 W^* ,并结合 Topsis 法构建评价模型^[23],步骤如下:

(1)原始矩阵 X 正向化,将指标转为极大型指标,并进行矩阵标准化,标准化后的矩阵记为 Z ,计算公式为:

$$Z = Z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} \quad (11)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个对象第 j 个指标的数值。

(2) 通过将指标最终权重 W^* 与矩阵 Z 做乘积, 得到加权后的决策矩阵 C , 计算公式为:

$$C = C_{ij} = \begin{bmatrix} W_1 z_{11} & \cdots & W_n z_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ W_1 z_{m1} & \cdots & W_n z_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: z_{mn} 为第 m 个对象第 n 个指标经过标准化后的数值。

(3) 确定正理想解 C^+ 和负理想解 C^- , 计算公式分别为:

$$C^+ = (\max(c_{11}, \cdots, c_{m1}), \cdots, \max(c_{1n}, \cdots, c_{mn})) \quad (13)$$

$$C^- = (\min(c_{11}, \cdots, c_{m1}), \cdots, \min(c_{1n}, \cdots, c_{mn})) \quad (14)$$

式中: C_{mn} 为第 m 个对象第 n 个指标的数值。

(4) 计算相对接近度 S_i , 第 i 个评价对象与正、负理想解的接近度为:

$$S_i = \frac{C_i^-}{C_i^- + C_i^+} \quad (15)$$

式中: S_i 取值为 0~1, 且数值越大评价对象结果越好。

3.2 评价过程及结果

根据驾驶员完成实验后的驾驶行为数据、生理及心理数据及问卷调查结果选取关键性指标构建评价指标集, 指标类型共分为 4 类, 分别为驾驶行为指标、眼动指标、心率指标及问卷数据指标。

在指标评价体系中, 共确定评价指标 12 个, 指标名称如表 4 所示, 分别对这 12 个指标采用 AHP 法与熵权法进行主观权重及客观权重计算。

表 4 评价指标集

Table 4 Evaluation indicator set

指标类型	指标代码	指标名称	单位
驾驶行为数据	B1	平均行驶车速	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
	B2	横向加速度标准差	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
眼动数据	B3	瞳孔直径	mm
	B4	注视时间	s
	B5	注视次数	次
心率数据	B6	SDNN	ms
	B7	RMSSD	ms
	B8	LF/HF	—
问卷数据	B9	图案的连续性	—
	B10	色彩舒适度	—
	B11	路景融合度	—
	B12	信息负荷度	—

(1) 基于 AHP 法的指标权重计算结果

将 4 类指标作为准则层, 将每类多个具体指标作为因素层, 通过专家打分给出各指标的主观影响程度, 并对计算结果进行一致性检验。准则层的最大特征值为 4.264, CR 值为 0.078 6 (< 0.1); B1、B2 因素层 CR 值为 0.00 (< 0.1), B3、B4、B5 因素层 CR 值为 0.021 4 (< 0.1), B6、B7、B8 因素层 CR 值为 0.003 9 (< 0.1), B9、B10、B11 因素层 CR 值为 0.079 7 (< 0.1)。CR 计算值均通过一致性检验, 权重结果有效。准则层权重和因素层权重见表 5。

表 5 准则层权重和因素层权重结果

Table 5 Results of criterion level weights and factor level weights

指标类型	准则层权重	指标代码	指标名称	因素层权重
驾驶行为指标	0.599 6	B1	平均行驶车速	0.250 0
		B2	横向加速度标准差	0.750 0
眼动指标	0.210 9	B3	瞳孔直径	0.637 0
		B4	注视时间	0.104 7
		B5	注视次数	0.258 3
心率指标	0.133 9	B6	SDNN	0.247 9
		B7	RMSSD	0.282 6
		B8	LF/HF	0.469 4
问卷数据指标	0.055 6	B9	图案连续性	0.131 8
		B10	色彩舒适度	0.131 8
		B11	路景融合度	0.067 8
		B12	信息负荷度	0.668 5

(2) 基于熵权法的指标权重计算结果

经过标准化处理后, 将数据代入式(2)~(5), 计算所得的客观权重值见表 6, 其中横向加速度标准差、信息负荷度、RMSSD、瞳孔直径等指标的权重值较高。

(3) 基于博弈论的组合权重计算结果

将熵权法得到的客观权重值与 AHP 法得到的主观权重值代入式(6)~(10), 经过博弈组合赋权计算, 可得 AHP 法权重系数 $\alpha_1^* = 0.317 5$, 熵权法权重系数 $\alpha_2^* = 0.682 5$, 计算指标最后的组合权重值见表 6。

由指标计算结果可知, 在主观层面上, 驾驶员更注重车辆行驶的横向稳定性 ($W_{B2} = 0.449 6$)、瞳孔变化情况 ($W_{B3} = 0.134 4$)、行驶速度 ($W_{B1} = 0.149 9$), 认为在考虑驾驶舒适性及安全性时仅需注重此类指标, 对于自身心率变化情况 ($w_{B6} = 0.011 8$ 、 $W_{B7} = 0.032 5$ 、 $W_{B8} = 0.089 6$)、路景融

表 6 基于博弈论组合赋权的指标权重结果
Table 6 Results of indicator weights based on game-theoretic portfolio assignment

指标代码	指标名称	熵权法 客观权重	AHP 法 主观权重	组合 权重
B1	平均行驶车速	0.061 6	0.149 9	0.089 6
B2	横向加速度标准差	0.159 0	0.449 6	0.251 3
B3	瞳孔直径	0.095 5	0.134 4	0.107 8
B4	注视时间	0.072 1	0.022 1	0.056 2
B5	注视次数	0.079 2	0.054 5	0.071 4
B6	SDNN	0.085 0	0.011 8	0.061 8
B7	RMSSD	0.099 8	0.032 5	0.078 4
B8	LF/HF	0.068 8	0.089 6	0.075 4
B9	图案连续性	0.068 2	0.007 3	0.048 9
B10	色彩舒适度	0.069 2	0.007 3	0.049 6
B11	路景融合度	0.048 2	0.003 7	0.034 1
B12	信息负荷度	0.093 2	0.037 2	0.075 4

合度($W_{B11}=0.0037$)重视程度较低。

在客观层面,数据信息熵显示,不同实验场景下的横向加速度标准差($W_{B2}=0.1590$)、瞳孔直径($W_{B3}=0.0955$)、心率变化情况($W_{B6}=0.0850$ 、 $W_{B7}=0.0998$, $W_{B8}=0.0688$)、信息负荷度($W_{B12}=0.0932$)等指标数据中离散程度更大,不同实验场景中指标差异性明显,效用性更高,即在不同的实验场景下进行综合评估时,这些指标对评价结果影响较大。

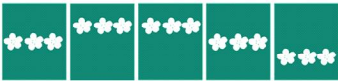
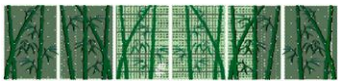
结合博弈论计算的组合系数进行综合权重计算,在行车安全与舒适性评价体系中,横向加速度标准差($W_{B2}=0.2513$)、瞳孔直径($W_{B3}=0.1078$)、信息负荷度($W_{B12}=0.0754$)、RMS-SD($W_{B7}=0.0784$)等指标所占权重较高,对评

价结果影响较大。

根据计算出的指标权重结果,基于Topsis法进行各设计方案的评价,评价结果如表7所示。其中,距离正理想解更近的为实验组1、实验组4及实验组3;距离负理想解更近的为实验组2及对照组。相对接近度中,实验组1与实验组4数值接近,分别为0.619与0.604;实验组3与对照组相对接近度数值接近,分别为0.473与0.410。实验组2综合评价结果最低,相对接近度为0.256。最终评价结果中,实验组1的综合排名最高,实验组2的排名最低。

根据评价结果进行分析,对比评价结果最好的实验组1及结果最差的实验组2,在两种设计方案中,实验组1的图案连续性、色彩舒适度、信息负荷度均优于实验组2;实验组1在行驶数据中横向加速度标准差更小,心率数据中心率变异性更低,瞳孔直径变化率更低,即实验组1对驾驶安全与舒适性起到积极作用;而实验组2的设计方案对驾驶舒适性与安全性起负作用。对比相对接近度较为接近的实验组1及实验组4,在行驶过程中横向加速度、心率变异性数据变化均相似,即二者虽然图案不同,但对驾驶员的影响较为接近;分析可得,二者信息负荷度较小,色彩舒适度较高,因此对驾驶员产生的副作用较少,且相比对照组在一定程度上提升了行驶的稳定性,降低了心率变异性。对比多个实验方案,声屏障设计均源于高速公路周边景观文化,但设计颜色、复杂程度、连续性的不同均会导致驾驶行为、驾驶员生理和心理变化。结合问卷统计与综合评估结果,信息负荷度、色彩舒适度对驾驶员驾驶行为及生理、心理

表 7 基于组合赋权的Topsis法评价结果
Table 7 Evaluation results of Topsis method based on portfolio assignment

组别	设计效果	正理想解 C^+	负理想解 C^-	相对接近度 S_i	评价结果
对照组	—	0.664	0.461	0.410	4
实验组 1		0.482	0.782	0.619	5
实验组 2		0.826	0.285	0.256	1
实验组 3		0.655	0.588	0.473	3
实验组 4		0.484	0.739	0.604	2

影响更大,主要在横向加速度、瞳孔直径、心率变异性等指标上存在明显差异,而路景融合度、图案连续性等指标对驾驶员驾驶行为及生理、心理影响较小,主要体现在心率变化层面。综上所述,在声屏障的图案设计中,为提高驾驶员的驾驶行为及驾驶感受,应着重考虑设计方案的信息负荷度及色彩舒适度,不必过分强调与周围环境的协调程度。在后续的声屏障优化设计中,可通过驾驶仿真技术,收集不同设计方案下横向加速度、瞳孔直径、信息负载度、RMSSD、LF/HF、平均行驶车速等权重较高指标评价设计的可行性。

4 结 论

(1)声屏障信息量、色彩的不同对驾驶员驾驶行为、生理及心理变化具有显著影响,不合理的声屏障设计会对驾驶稳定性、驾驶舒适性产生较大负面影响。

(2)通过离差最小化思想基于博弈论构建组合赋权法,确定了主观赋权值及客观赋权值的最优组合权重。经过博弈组合赋权计算,在声屏障设计方案对驾驶安全及舒适性评价模型中,基于AHP法计算的主观权重影响系数为0.317 5,熵权法计算的客观权重影响系数为0.682 5,在工程应用性研究中,可协助数据分析使评价模型更好地依据主客观判断进行结果评价,评价结果更具有合理性。

(3)在指标的权重计算中,横向加速度、瞳孔直径、信息负荷度及RMSSD指标在声屏障安全及舒适性评价模型中所占综合权重较大,分别为0.251 3、0.107 8、0.075 4及0.078 4,即在后续的声屏障优化方案可行性研究中,可通过模拟驾驶技术,收集不同实验方案下该指标的变化情况,用于对比评估各声屏障设计方案的优劣性及可行性,为实际工程应用提供技术及理论支撑。

(4)在声屏障优化设计中,信息负荷度更受驾驶员重视,在综合评价模型中该指标的权重相比图案连续性、色彩舒适度、路景融合度更高,后续在进行声屏障优化设计时,应合理控制信息负荷度。

参考文献:

- [1] JT/T 646.2—2016. 公路声屏障 第2部分:总体技术要求[S].
- [2] JTG B04—2010[S].
- [3] 张雨婷,郭钰佳. 天府文化在景观声屏障设计中的应用研究[J]. 工业设计, 2020(6): 143-144.
Zhang Yu-ting, Guo Yu-jia. Research on the application of Tianfu culture in the design of landscape sound barrier[J]. Industrial Design, 2020(6): 143-144.
- [4] 阿靖仁. 公路景观设计中地域文化的体现与应用研究[J]. 居舍, 2020(20): 129-130.
A Jing-ren. The embodiment and application research of regional culture in highway landscape design [J]. Residence, 2020(20): 129-130.
- [5] 张景威,常行. 传统文化在高速公路景观设计中的应用[J]. 河南科技, 2014(6): 178.
Zhang Jing-wei, Chang Xing. Application of traditional culture in highway landscape design[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2014(6): 178.
- [6] 吴晓. 地域文化视野下的城市道路景观设计研究[D]. 合肥: 安徽农业大学林学与园林学院, 2019.
Wu Xiao. Research on urban road landscape design under the vision of regional culture [D]. Hefei: School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, 2019.
- [7] 于彦. 基于历史文脉的道路景观设计初探: 以凤阳洪武大道为例[D]. 合肥: 安徽农业大学林学与园林学院, 2022.
Yu Yan. Exploration of road landscape design based on historical context: Taking hongwu avenue in eengyang as an example[D]. Hefei: School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, 2022.
- [8] 商艳. 基于驾驶员眼动特性的草原公路直线段景观单调问题研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 2020.
Shang Yan. Research on landscape monotonicity in straight sections of grassland highways based on driver eye movement characteristics[D]. Hohhot: College of Energy and Traffic Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [9] 张婷婷. 地域文化在城市道路景观提升与优化中的应用研究[D]. 桂林: 桂林理工大学艺术学院, 2023.
Zhang Ting-ting. Research on the application of regional culture in the enhancement and optimization of urban road landscape[D]. Guilin: College of Arts, Guilin University of Technology, 2023.
- [10] 李今朝,李滨杉,王云,等. 京台高速公路(泰枣段)声屏障景观设计方案及效果评价研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(7): 171-176.
Li Jin-zhao, Li Bin-shan, Wang Yun, et al. Research on landscape design scheme and effectiveness

- evaluation of sound barrier on Beijing-Taipei expressway (Tai zao section) [J]. *Environmental Science and Management*, 2023, 48(7): 171-176.
- [11] 李南初. 基于驾驶模拟实验的景观因素对驾驶行为的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学交通运输与物流学院, 2017.
- Li Nan-chu. Research on the impact of landscape factors on driving behavior based on driving simulation experiments[D]. Chengdu: College of Transport and Logistics, Southwest Jiaotong University, 2017.
- [12] 刘江伟, 吴小萍. 基于视觉信息的高速铁路声屏障景观量化分析探讨[J]. *铁道学报*, 2020, 42(2): 124-130.
- Liu Jiang-wei, Wu Xiao-ping. Exploring the quantitative analysis of high-speed railway sound barrier landscape based on visual information[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(2): 124-130.
- [13] World Health Organization. 世界卫生组织统计报告[R/OL]. [2023-08-22]. <https://www.who.int/health-topics/road-safety>.
- [14] 丁旭, 王海晓, 高明星, 等. 公路隧道出入口驾驶员视觉负荷评价与建模[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(4): 679-687.
- Ding Xu, Wang Hai-xiao, Gao Ming-xing, et al. Evaluation and modeling of visual load on drivers at road tunnel entrances and exits[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(4): 679-687.
- [15] 高梦圆. 考虑景观围合度的长直线公路驾驶行为特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学土木工程学院, 2023.
- Gao Meng-yuan. Characterization of driving behavior on long straight highways considering landscape enclosure[D]. Qingdao: School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, 2023.
- [16] 叶飞, 张兴冰, 苏恩杰, 等. 基于驾驶舒适性的公路隧道侧壁装饰研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(4): 196-203.
- Ye Fei, Zhang Xing-bing, Su En-jie, et al. Research on side wall decoration of highway tunnels based on driving comfort[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(4): 196-203.
- [17] 马爱英, 高明星, 朱守林. 草原公路路侧景观对驾驶员心率变异的影响研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(29): 312-316.
- Ma Ai-ying, Gao Ming-xing, Zhu Shou-lin. A study on the impact of grassland highway roadside landscape on driver heart rate variability[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(29): 312-316.
- [18] 叶飞, 应凯臣, 苏恩杰, 等. 基于眼动指标的公路隧道洞口景观设计舒适性及安全性评价[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(2): 218-226.
- Ye Fei, Ying Kai-chen, Su En-jie, et al. Comfort and safety evaluation of landscape design for highway tunnel openings based on eye movement indicators[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2021, 49(2): 218-226.
- [19] 杨鑫. 公路隧道景观对驾驶心理调适作用规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学交通运输学院, 2021.
- Yang Xin. A study on the role of highway tunnel landscape in adjusting driving psychology[D]. Chongqing: College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [20] 冯芝梅, 郭明洋, 贺玉龙, 等. 基于组合赋权-改进TOPSIS法的城市慢行三网融合评价方法[J]. *交通信息与安全*, 2023, 41(4): 163-172.
- Feng Zhi-mei, Guo Ming-yang, He Yu-long, et al. Evaluation method for urban slow traffic network integration based on combination weighting and improved TOPSIS method[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2023, 41(4): 163-172.
- [21] 毛明松, 邹瑞云, 毛福华, 等. 基于排序学习的主客观组合赋权研究[J]. *统计与决策*, 2024, 40(2): 67-72.
- Mao Ming-song, Zou Rui-yun, Mao Fu-hua, et al. Research on subject-objective combination assignment based on ranking learning[J]. *Statistics & Decision*, 2024, 40(2): 67-72.
- [22] 吕安涛, 高勇斌, 韩汶, 等. 基于博弈论组合赋权-TOPSIS法的交通运输企业综合信用评价[J]. *山东大学学报: 理学版*, 2024, 59(9): 88-97.
- Lyu An-tao, Gao Yong-bin, Han Wen, et al. Comprehensive credit evaluation of transportation enterprises based on game theory combination weighting TOPSIS method[J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2024, 59(9): 88-97.
- [23] 赵晓华, 樊兆董, 张常奋, 等. 基于TOPSIS与灰色局势决策的无信号交叉口交通安全设施综合评估[J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(7): 671-678.
- Zhao Xiao-hua, Fan Zhao-dong, Zhang Chang-fen, et al. Comprehensive evaluation of traffic safety facilities at unsignalized intersections based on TOPSIS and grey situation decision-making[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2019, 45(7): 671-678.