

文章编号: 1000-713X(2022)11-0085-09

中图分类号: U491

文献标识码: A

# 高速公路半幅路段施工前中分带开口长度设置方案的熵权与变异系数组合赋权模糊综合评价

刘红灵<sup>1</sup>, 胥 川<sup>1\*</sup>, 方嘉欣<sup>1</sup>, 苏 宇<sup>2</sup>, 田毕江<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学交通运输与物流学院, 成都 610031; 2. 云南省交通规划设计研究院有限公司  
陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 650011)

**摘 要:** 高速公路改扩建工程中典型的分幅铺筑路面和分幅拆除旧桥的施工, 需在特定位置打开中分带组织双向交通流至同向车道内, 由此将对现状地面层交通流造成较大影响。因此合理设置中分带开口长度对保障施工区交通安全和节约施工区用地资源具有重要作用。以典型的高速公路半幅路面施工区前开口长度设置为研究对象, 依托六自由度的驾驶模拟仿真平台, 设计4种不同中分带开口长度设置的模拟场景(90米、105米、120米、150米), 开展驾驶模拟试验采集驾驶行为、眼动特性和生理信号数据, 采用主观评价与配对t检验分析驾驶模拟试验的有效性与仿真性, 以保证试验数据的可靠性。提出了由三类七项指标的评估系统, 并建立基于熵权法与变异系数法的综合赋权模糊综合评价模式, 提出高速公路半幅路段施工前中分带开口长度设置方案组合模糊综合评价方法, 对4种高速公路中分带开口场景进行了比较分析和安全评价。结果表明: 驾驶模拟器和试验场景均不会对试验造成不利影响, 获取的实验数据可靠性较高; 中分带开口长度120米的设置方案计算分值最高, 综合响应表现最好。高速公路半幅路段施工前的中分带开口长度设置为120米, 有效兼顾了节约用地范围和保障行车安全, 可为科学设置高速公路施工设施提供决策参考。

**关键词:** 交通工程; 驾驶模拟; 高速公路施工; 组合赋权-模糊综合评价

## Fuzzy Comprehensive Evaluation Based on Entropy Weight and Coefficient of Variation for Setting Scheme of Middle Strip Opening Length Before Construction of Expressway Half Section

LIU Hongling<sup>1</sup>, XU Chuan<sup>1\*</sup>, FANG Jiabin<sup>1</sup>, SU Yu<sup>2</sup>, TIAN Bijiang<sup>2</sup>

(1. Southwest Jiaotong University School of Transportation and Logistics, Chengdu 610031, China; 2. Yunnan Institute of Transportation Planning and Design National Engineering Laboratory for Land Transportation Meteorological Disaster Prevention and Control Technology, Yunnan 650011, China)

**Abstract:** In the construction of the expressway reconstruction and expansion project, the construction of

收稿日期: 2021—

录用日期: 2022—

作者简介: 胥川(1987—), 四川西充人, 西南交通大学交通运输学院副教授, 博士, 硕士生导师, 四川省海外高层次留学人才。

\* 通讯作者: xuchuan@swjtu.edu.cn

the typical segmented paving pavement and the demolition of the old bridge need to open the middle zone to organize two-way traffic flow into the same lane in a specific position, which will have a great impact on the current traffic flow on the ground. Therefore, reasonable setting of the opening length plays an important role in ensuring traffic safety and saving land resources in construction area. Based on the 6-DOF driving simulation platform of The National Engineering Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Control Technology of Land Traffic, four simulation scenes with different opening lengths (90m, 105m, 120m and 150m) were designed. Data of driving behavior, eye movement characteristics and physiological signals were collected in driving simulation tests. Subjective evaluation and paired T test were used to analyze the validity and simulation of driving simulation test to ensure the reliability of test data. Three evaluation systems of seven indicators are proposed. The establishment method and coefficient of variation method based on entropy weight are a fuzzy comprehensive evaluation model combining weights, put forward by three kinds of seven indicators evaluation system, building method and the variation coefficient method based on entropy weight is a combination of empowerment fuzzy comprehensive evaluation model, put forward the highway in the former half of the road construction zoning opening length setting scheme combination fuzzy comprehensive evaluation method, zoning in the opening scene of 4 kinds of highway has carried on the comparative analysis and safety evaluation. The results show that neither the driving simulator nor the test scene has any adverse effect on the test, and the experimental data obtained is highly reliable. The setting scheme with 120 meters of middle strip opening has the highest calculated score and the best comprehensive response. The length of the belt opening before the construction of half section of expressway is 120 meters, which effectively gives consideration to the scope of saving land and ensuring driving safety, and can provide a reference for decision making for the scientific setting of expressway construction enclosure.

**Keywords:** Traffic engineering; Driving simulation; Highway construction; Combination weighting fuzzy comprehensive evaluation

## 0 引言

由于中国经济日益发达, 道路交通量也呈现了迅速增长势头, 全国不少地区的既有高速公路交通已经达到了“饱和”, 甚至“过饱和”的运营状况, 道路拥挤问题严重。因此, 部分地区既有高速道路的通过能力已经无法适应现阶段和未来车辆通行的需要。为改善这一状况, 国家设计并进行了较大规模的高速改扩建工程项目, 将对这类高速公路实施改扩建工程, 以进一步提升其技术标准和通过能力, 在工程改扩建的重点施工区对道路交通运营质量和安全管理方面均会造成交通流堵塞, 也将伴随不同程度的交通安全风险<sup>[1,2]</sup>。据美国死因分析公报系统显示, 近十年以来, 美国高速公路施工区的致死数量约占车祸造成的致死数量的百分之三。据不完全统计, 中国每年在高速公路施工区出现的交通事故数量超过一千余起, 导致的人员伤亡数量也达到一千人, 造成的交通拥堵频繁发生。因此, 高速公路改扩建工程中施工设施设置的研

究是具有重要意义的课题。

近年来, 由于道路与施工区的交通安全问题已经引起了更多技术人员和专家学者的重视, 从而进行了大量的关于道路交通组织方法与交通安全等方面的科学研究。1995年, 吴兵和刘开平<sup>[3]</sup>共同研讨了公路的施工和维护等方面的安全对策等问题。2002年, 吴晓宇<sup>[4]</sup>针对高架路段的警示区、缓冲区、作业区、过渡区域和终止区域, 给出了区域设置宽度的计算方法。2005年, 张丰焰等<sup>[5]</sup>针对公路建设施工对周边交通流的不良影响问题, 提出相应的交通流诱导与疏散的组织原则和方案。王中平<sup>[6]</sup>基于洛三灵高速公路改扩建工程项目, 根据不同道路特征设计的路段, 提出转化加宽的方案以组织道路交通流。廖小凤和富志鹏<sup>[7]</sup>则针对石安高速公路改扩建中存在的通行能力、交通分流的典型问题, 提出具有强针对性的措施建议。2012年, 韩跃杰<sup>[8]</sup>从交通流在高速公路封闭车道施工区域内的表现特征分析, 探究了施工区域内出现道路交通拥堵的影响原因与机制, 从宏观路网到中观、微

观的视角,给出了道路交通组织关键控制指标。代庆兵<sup>[9]</sup>则分析了技术管理模式有效控制交通流组织,提出高速公路改扩建施工的交通组织的原则与方案。总体而言,既有文献对高速公路改扩建施工设施设置的量化研究较少,原因在于量化研究主要基于实车测试、仿真、驾驶模拟试验的方法获取数据,但实车测试和仿真会受到安全、成本或无法描述复杂驾驶行为等原因的限制。而驾驶模拟器能够通过对道路上的环境、所驾车辆、周围车流的模拟,提供高度仿真的驾驶体验;同时,可以根据研究需求控制驾驶过程中的各种因素变量,实现施工作业区驾驶员驾驶行为研究。

针对高速公路改扩建工程中典型的分幅铺筑路面和分幅拆除旧桥的施工需求,该施工需在特定位置打开中分带组织双向交通流至同向车道内,由此将对现状地面层交通流造成较大影响。故本文依托陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室的360°环评3D全视驾驶模拟仿真平台(六自由度),以高速公路半幅路段前施工前中分带开口为典型施工场景,通过选择不同的开口情况条件,并通过驾驶仿真试验获取细粒度的驾驶行为数据、眼动数据以及生理信息数据;通

过测量综合效应可以研究中分带开口长度设置的最佳方案,以期高速公路改扩建施工设施设置、交通组织 and 安全管理提供参考。

## 1 驾驶模拟试验

### 1.1 场景设计

本文研究对象为双向六车道高速公路,车道宽度为3.75米,应急车道为2.5米,其交通量已经超出设计最大承载能力。本工程将采取分幅铺筑路面和分幅拆除旧桥的方式扩容施工,需在特定位置打开中分带,组织双向交通流至同向车道内,由此将对现状地面层交通流造成较大影响。

为此,以半幅路面施工前中分带开口为研究场景(限速70千米/小时),设定不同的开口长度为场景变量,研究中分带开口施工场景下驾驶员的驾驶行为和响应特性。通过借用对向车道通行,对向交通流临时组织于外侧两车道,试验路段总长设置为2千米,在适合位置打开中分带开口(长度为D),试验方案示意图与仿真效果图分别如图1和图2所示。实验场景信息见表1。

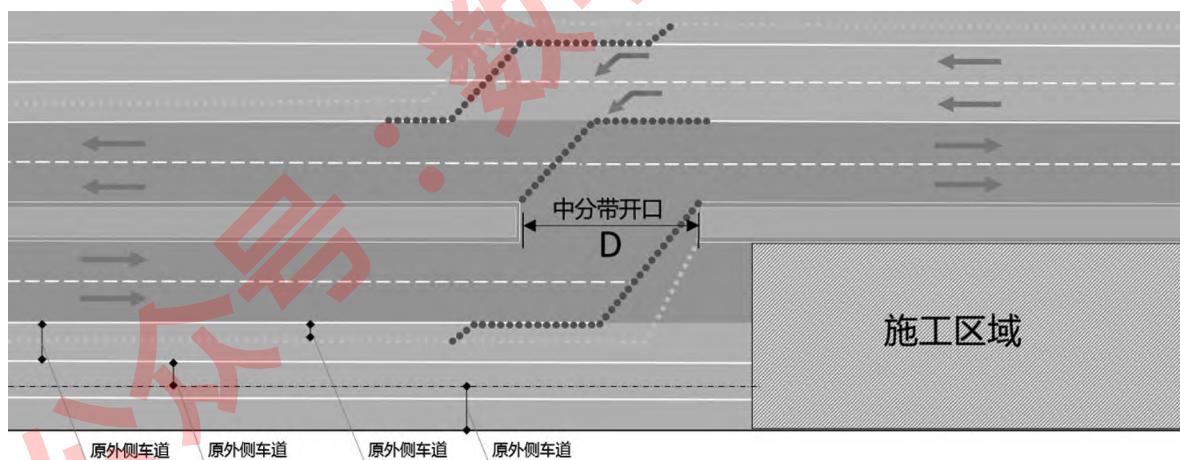
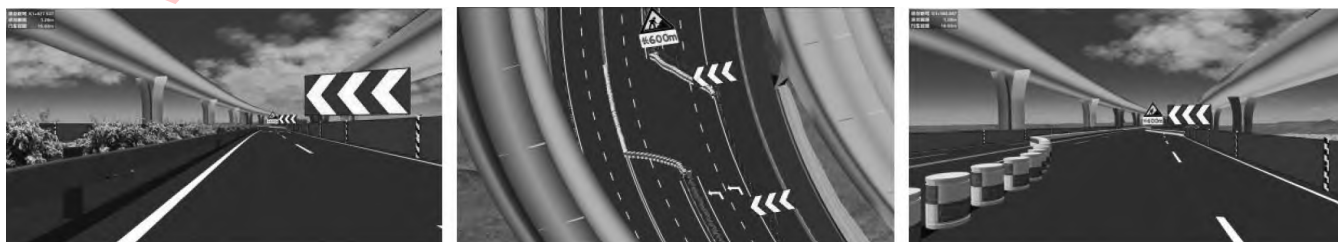


图1 中分带开口施工场景示意图



(a) 进入中分带开口前驾驶视角

(b) 中分带开口俯视角

(c) 进入中分带开口中驾驶视角

图2 中分带开口施工模拟场景



表 1 中分带开口施工实验场景

序号	试验方案	限速	中分带开口长度 D
1	方案 1	70 km/h	90 m
2	方案 2		105 m
3	方案 3		120 m
4	方案 4		150 m

1.2 试验人员招募

驾驶模拟实验需要相对有效精度的实验条件，必须采用相应的样本量进行统计分析，而被试驾驶员样本量的选取是获取足够实验数据的关键，样本量较小会降低试验分析结论的准确性，较大则会造成试验资源的浪费。因此，基于预计方差、目标置信度和误差幅度计算所需样本量  $N^{[10]}$ 。

$$N = Z^2 \sigma^2 / E^2 \tag{1}$$

式中， $Z$  为标准正态分布统计量， $\sigma$  为标准差， $E$  为最大误差。

通常选择 10% 的显著水平，来反映未知参数的 90% 置信水平；当置信水平为 90% 时，为 1.25。的取值范围为 0.25 ~ 0.5；由于驾驶模拟试验人数限制，本文取 0.40。因此，计算所得本驾驶模拟实验的最小样本量为 25。本研究选择 40 名试验人员参与试验，基本特征信息见表 2 所示。其中，95% 的驾驶员有高速公路施工路段驾驶经验。男性驾驶员占比为 77.5%，女性驾驶员占比为 22.5%；年龄小于 30 岁 10 名，年龄介于 30~45 岁之间 30 名，无年龄大于 45 岁的驾驶员。

试验驾驶员被要求禁止在试验进行的前一天饮酒或熬夜，禁止在试验前饮茶或咖啡等刺激性饮品，试验过程严格按照试验操作进行，尽可能保持良好的限速习惯，减少其他可能干扰试验过程的驾驶行为。

1.3 实验设备

实验设备采用陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室的 360° 环屏 3D 全视景效果驾驶模拟仿真平

表 2 试验驾驶员特征信息

特性分类		数量	占比
性别	男	31	77.5%
	女	9	22.5%
年龄	<30	10	75%
	30-40	30	25%
	>40	0	0%
驾照类别	A2	5	12.5%
	B2	3	7.5%
	C1	32	80%
实际驾龄	<3 年 (新手驾驶)	5	12.5%
	3-8 年 (经验丰富)	14	35%
	>8 年 (熟练驾驶)	21	52.5%
驾驶模拟经验	无	3	7.5%
	有	37	92.5%
高速公路施工驾驶经验	无	2	5%
	每年 1-3 次	14	35%
	每年大于 3 次	24	60%

台（六自由度）、ETG2W 型眼动仪（德国 SMI 公司）和 MP160 型生理仪（美国 Biopac 公司）。在本试验中，驾驶模拟仿真平台主要采集驾驶行为绩效数据，包括速度、加速度、横向偏移、油门、刹车、方向盘转角、车辆位置坐标等；眼动仪主要采集驾驶员眼球特性数据，包括瞳孔直径、眨眼频率等，生理仪主要采集驾驶员心率变化数据，三类数据构成了获取模拟驾驶行为和响应特性的数据集。

1.4 试验过程

试验场景设计为白天，天气晴朗，路面干燥，能见度好。试验主要由预试验和正式试验构成，预试验采用了非正式实验场景检测被试人员能否适应驾驶的模拟环境。同时，为保证试验的有效性，将被试驾驶员分为指定车道组和自由换道组。指定车道组被试驾驶员按照行车道靠近施工围挡或不利位置的约束条件



(a) 360° 环屏 3D 全景驾驶模拟器



(b) SMI 眼动仪



(c) Biopac 生理仪

图 3 驾驶模拟试验设备

进行驾驶,而自由换道组被试驾驶员将按照自己的判断选定车道进行驾驶。试验按照如下3个步骤进行:

**Step1:** 试验前工作人员向被试驾驶员简要介绍试验内容、试验要求和试验过程,并采集被试驾驶员基本信息。

**Step2:** 正式试验开始前,为使被试驾驶员尽快掌握车辆三大功能(刹车、油门和方向盘)的性能特点,专门设定了一条8km的试驾路段,包括缓慢起步、急加油门、急踩刹车、S形绕路行驶等操作(共4km)和不同场景的试驾路段(共4km),试驾时长约6min。被试驾驶员穿戴试验采集设备进入驾驶舱,开始试驾测试;试驾之后,工作人员询问被试驾驶员身体状况,是否有眩晕或不适感,适时调整被试驾驶员试验顺序。

**Step3:** 正式试验开始时,告知被试驾驶员按照指定车道或自由换道进行驾驶试验,每位被试驾驶员仅进行1种行驶方式的试验,依次交替进行20位指定车道行驶和20位自由换道行驶的驾驶试验。每位被试驾驶员在驾驶完毕后,稍作休整,进行主观问卷填写,评价模拟场景的真实性和驾驶过程中的心理主观体验。

### 1.5 试验有效性分析

为掌握驾驶模拟器和场景的相对有效性情况,进而认可所采集的相关数据质量,分析被试驾驶员对驾驶模拟器及场景的适应性,适应性包括眩晕度和疲劳感,根据这两项的问卷调查结果,判断被试驾驶员在完成实验后出现的适应情况。具体通过配对t检验,针对不同的身体不良反应评价指标,从统计学角度上分析驾驶模拟器及场景是否对被试驾驶员有显著影响。分析步骤如下:

**Step1:** 将每个身体反馈问题的6类程度用数字表示,即“不晕/不累”为1、“略微”为2、“一般”为3、“晕/累”为4、“很晕/很累”为5、“非常晕/非常累”为6。

**Step2:** 用试验前的不适身体反馈数值减去试验后的不适身体反馈数值,作为试验前后波动的变量。

**Step3:** 针对不同的不良身体反应评价指标,运用配对t检验从统计学角度分析驾驶模拟器及场景造

成的不良状态是否有显著差异。

配对t检验分析表明(见表3),驾驶模拟器及场景对正式试验前后眩晕和疲倦两项指标的影响均不显著( $\text{Sig} > 0.05$ ),即驾驶模拟器及场景设计对被试驾驶员没有显著造成不良状态,因此试验数据的可靠性得以保障。

与此同时,通过调查驾驶人员对驾驶模拟器及场景仿真度的评价,判断该实验是否能够较好的模拟得到被试驾驶员在各场景下的驾驶反应,进而判断该实验所采集的数据是否具有可靠性。试验驾驶员在模拟驾驶过程中主要操纵的三个装置分别为油门、刹车、方向盘,因此这些操纵装置的仿真度高低将会一定程度上影响被试驾驶员的驾驶感受。通过主观问卷得到的驾驶模拟器及场景仿真度的评价。50%以上的被试驾驶员认为油门与刹车的仿真度高或很真实,仅有10%的被试驾驶员(3人)认为油门与刹车仿真度偏低;46.67%的被试驾驶员认为方向盘仿真度高或很真实,16.67%的被试驾驶员(5人)认为方向盘仿真度偏低;此外,90%以上的被试驾驶员对驾驶模拟行驶路段沉浸感的给出了正面评价(非常真实、身临其境、沉浸感好、有沉浸感),仅有6.67%的被试驾驶员(2人)认为驾驶模拟行驶路段的沉浸感差。

综上所述,驾驶模拟器及场景设计对被试驾驶员驾驶体验和实验结果影响较小,且整个驾驶模拟实验具有较高的仿真度,故通过本实验平台获取的实验数据可靠性较高。

## 2 评价指标体系的建立

### 2.1 驾驶行为绩效关键指标

驾驶行为绩效关键指标主要从驾驶行为数据中提取。主要采集的驾驶行为数据有驾驶操控数据(包括方向盘转角等)和车辆行驶数据(包括车辆运行速度、车道偏移值等)。通过对驾驶行为数据预处理,去除缺失值等异常数据;再提取3个关键指标来分别反映车辆的车速控制能力、车道保持能力和操作稳定性,3个指标分别为累计超速时空面积、车道偏移标准差

表3 配对t检验分析结果

实验前 - 实验后	平均值	标准差	最小值	最大值	均数 95% 置信区间	t 值	Sig	
晕眩	-0.17	0.83	0	4	-0.48	0.14	-1.09	0.283
疲劳	-0.13	1.09	0	4	-0.55	0.28	-0.66	0.514

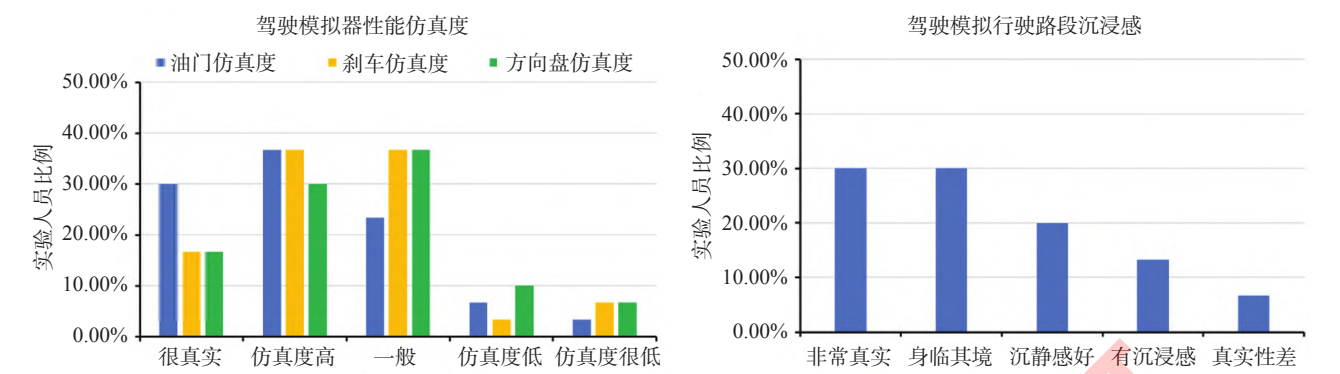


图 4 驾驶模拟器及场景仿真度调查结果

和方向盘反转率<sup>[11]</sup>。

2.2 驾驶眼动特征关键指标

驾驶眼动特征关键指标从眼动仪采集数据中提取。通过对眼动特征数据预处理，去除缺失值等异常数据，再计算平均瞳孔直径、平均眨眼频率和兴趣区注视时间比例<sup>[12]</sup>。

通常情况下，由于外部驾驶环境复杂多变，驾驶员需要注意多个角度的信息<sup>[13]</sup>，将视线范围按功能划分兴趣区，即可统计各兴趣区内注视时长比例。依据试验者具体情况和试验场景，驾驶员注视区域被划分为 5 个兴趣区，分别为左视区、远视区、正视区、右视区、仪表盘，分别被标记为第 1、2、3、4、5 兴趣区。根据每位被试驾驶员的身高，分别划分其兴趣区，最后统计目光停留在每一区域的时长，计算该时长占总试验时间的比例，公式为

$$r_i = t_i / T \tag{2}$$

式中， $r_i$  为第  $i$  个兴趣区注视时间比例， $t_i$  为第  $i$  个兴趣区注视时间， $T$  为所有兴趣区注视时间。

2.3 驾驶生理信号关键指标

采用被试驾驶员研究区域内的心率变异率来表征其在驾驶过程中的生理状态，以此评价不同场景下的

生理差异性。心率变异率指连续两次心跳之间的时间变化，心率变异率较高往往表明身体处于运动、心理事件或其他压力的刺激之下，心率变异率较低通常意味着身体处于轻松的状态。

综上所述，从驾驶行为绩效、驾驶眼动特征和驾驶生理信号三类指标中选用 7 个指标建立评价指标体系。在提取各指标特征时，选取开口前 200 米路段（普通驾驶场景）与开口开始后 200 米路段（施工改道驾驶场景）的指标差值作为试验驾驶员进入中分带开口前后的表现差异。

3 基于熵权和变异系数综合赋权的模糊评价模型

为综合评价不同中分带开口长度方案下的驾驶行为与反应特征，采用熵权与变异系数组合赋权 - 模糊综合评估法<sup>[14]</sup> 构建高速公路中分带开口长度评估方法。首先建立指标集和评语集，通过  $k$  均值聚类确定特征指标不同等级所对应的取值区间；通过构建隶属度矩阵和确定指标权重来实现模糊评价（见图 4）。需特别说明的是：隶属度函数是定量计算，而非专家知识；熵权不是层次分析，而是由数据特性决定的，同时结合变异系数

表 4 数据预处理与指标提取

数据类型	采集指标	数据单位	数据预处理	特征提取
驾驶数据	实时速度	千米 / 小时	提取速度	累计超速时空面积
	方向盘转向	度	—	方向盘反转率
	车辆距中心线距离	米	修正车道中心线偏差	车道偏移标准差
眼动数据	眼睛状态	字符	分别赋值	平均眨眼频率
	瞳孔直径	毫米	数据清洗	平均瞳孔直径
	注视时间	秒	兴趣区划分；统计兴趣区注视时间	兴趣区注视时间占比
生理数据	心电信号	毫伏	提取 RR 间期	心率变异率



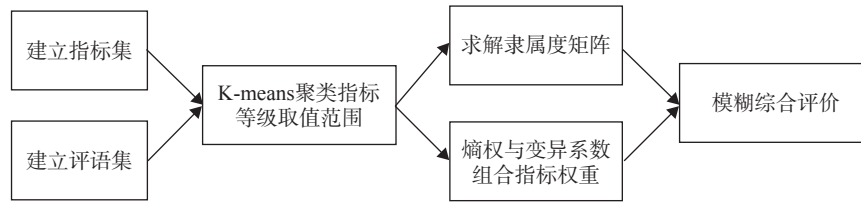


图5 熵权与变异系数组合赋权模糊评价过程

法，能够避免单纯使用熵权法赋权的均衡化问题。

### 3.1 不同指标等级的取值范围确定

根据模糊综合评估体系，拟定评价指标集  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\}$ ，并将每项指标划分为“好”、“较好”、“一般”、“较差”、“差”共五个等级，拟定评价集为  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。为了明确各个指标所对应等级的取值范围，本文通过 k-means 聚类算法计算指标的聚类区间<sup>[15]</sup>，实现算法如下：

Step1：从计算观测指标数据样本矩阵  $T_{n \times m}$  中随机选择  $k$  个元素作为初始聚类中心  $s_{j \times m}, j = 1, 2, \dots, k$ 。

Step2：计算从矩阵  $T_{n \times m}$  的每行元素  $p_i$  到聚类中心  $s_j$  的欧氏距离  $d(p_i, s_j)$ ，计算公式为

$$d(p_i, s_j) = \sqrt{(p_{i1} - s_{j1})^2 + (p_{i2} - s_{j2})^2 + \dots + (p_{im} - s_{jm})^2} \quad (3)$$

式中， $i = 1, 2, \dots, n$ ； $p_{im}$  为第  $i$  个对象的第  $m$  个属性； $s_{jm}$  为第  $j$  个聚类中心的第  $m$  个属性。

Step3：依次比较每个对象到每个聚类中心的距离  $d(p_i, s_j)$ ，将所有对象划分到距其最近的类簇中。

Step4：重新计算每类簇的中心  $s_k$ ，即类簇内每个对象在不同维度的均值，计算公式为

$$s_k = \left( \sum_{j=1}^k p_{jm} \right) / k \quad (4)$$

式中， $s_k$  为第  $k$  个聚类中心。

Step5：通过迭代更新类簇中心和分配对象，直至达到指定迭代次数或类簇中心点变化很小。

根据上述算法，得到数据集的特征指标等级取值区间如表 5 所示。

### 3.2 隶属矩阵建立

评价指标隶属度计算是模糊评价中的重要内容。进行隶属度计算后，将  $r_i$  作为第  $i$  行，形成一个综合了  $n$  个因素  $m$  个评价等级的模糊矩阵  $R$ 。对于评价指标集的第  $i$  个指标  $U_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ，分析其对于评价集  $V_j (j = 1, 2, \dots, m)$  的隶属度  $r_{ij}$ ，以计算隶属度矩阵。本文所采用的  $\Pi$  型隶属度函数表达式为

$$r_{ij} = \begin{cases} -\rho_1 / (|b_{ij} - a_{ij}|) & \lambda_i \in [a_{ij}, b_{ij}] \\ \rho_1 / (|\rho_2 - \rho_1|) & \lambda_i \notin [a_{ij}, b_{ij}], \rho_2 \neq \rho_1 \\ -\rho_1 - 1 & \lambda_i \notin [a_{ij}, b_{ij}], \rho_2 = \rho_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\rho_1 = |\lambda_i - 1/2(a_{ij} + b_{ij})| - 1/2(b_{ij} - a_{ij})$ ； $\rho_2 = |\lambda_i - 1/2(a_i + b_i)| - 1/2(b_i - a_i)$ ； $\lambda_i$  为第  $i$  个评价指标的现状取值； $[a_i, b_i]$ 、 $[a_{ij}, b_{ij}]$  为各指标  $i$  的评价等级  $j$  的取值区间。各等级取值见表 5。

根据隶属度公式进行计算，得到七项评价指标和五个评价等级的隶属度矩阵 ( $7 \times 5$ )。不同中分带开口长度方案的隶属度计算结果见表 6。

### 3.3 基于熵权法的指标权重

中分带开口方案评价中某一项指标的信息熵值越小，其对决策的影响就越大<sup>[16]</sup>。在包含多个评价对象时，通过使用熵权法对各因子赋权，可以简化模糊评价模型，评估结论也更为客观与合理<sup>[17]</sup>。因此基

表 5 等级取值区间

评价指标差值	等级 1	等级 2	等级 3	等级 4	等级 5
累积超速时空面积	-0.789 ~ -0.521	-0.520 ~ -0.297	-0.296 ~ -0.097	-0.096 ~ 0.243	0.244 ~ 0.669
车道偏移标准差	-0.773 ~ 0.936	0.937 ~ 1.774	1.775 ~ 2.320	2.321 ~ 2.809	2.810 ~ 3.853
方向盘反转率	-1.286 ~ -0.470	-0.469 ~ -0.051	-0.050 ~ 0.451	0.452 ~ 1.051	1.052 ~ 2.091
平均瞳孔直径	-0.695 ~ -0.154	-0.153 ~ 0.039	0.040 ~ 0.485	0.486 ~ 0.597	0.598 ~ 0.987
平均眨眼频率	-0.712 ~ -0.265	-0.264 ~ -0.052	-0.051 ~ 0.108	0.109 ~ 0.270	0.271 ~ 0.466
兴趣区注视时间比例	-0.579 ~ -0.221	-0.220 ~ -0.081	-0.080 ~ 0.066	0.067 ~ 0.280	0.281 ~ 0.729
心率变异率	-0.213 ~ -0.140	-0.139 ~ -0.047	-0.046 ~ -0.009	-0.008 ~ 0.072	0.073 ~ 0.277

表 6 隶属度矩阵

指标	中分带 开口长度 方案	等级 1	等级 2	等级 3	等级 4	等级 5
累积 超速 时空 面积	方案 1	0.295	0.139	0.065	0.335	0.554
	方案 2	0.299	0.115	0.054	0.327	0.549
	方案 3	0.352	0.138	0.465	0.155	0.433
	方案 4	0.376	0.214	0.083	0.025	0.346
车道 偏移 标准差	方案 1	0.547	0.364	0.138	0.432	0.174
	方案 2	0.509	0.311	0.065	0.203	0.214
	方案 3	0.421	0.188	0.284	0.084	0.276
	方案 4	0.199	0.325	0.107	0.265	0.365
方向盘 反转率	方案 1	0.286	0.085	0.252	0.216	0.417
	方案 2	0.290	0.095	0.288	0.206	0.410
	方案 3	0.304	0.129	0.426	0.166	0.380
	方案 4	0.314	0.153	0.461	0.133	0.356
平均 瞳孔 直径	方案 1	0.244	0.075	0.143	0.323	0.382
	方案 2	0.165	0.314	0.084	0.429	0.479
	方案 3	0.228	0.042	0.073	0.350	0.406
	方案 4	0.155	0.376	0.100	0.439	0.488
平均 眨眼 频率	方案 1	0.470	0.254	0.181	0.072	0.332
	方案 2	0.364	0.104	0.119	0.188	0.367
	方案 3	0.383	0.131	0.457	0.172	0.362
	方案 4	0.316	0.036	0.088	0.222	0.379
兴趣区 注视 时间 比例	方案 1	0.272	0.113	0.493	0.116	0.336
	方案 2	0.266	0.101	0.425	0.131	0.347
	方案 3	0.337	0.222	0.049	0.148	0.225
	方案 4	0.303	0.176	0.079	0.019	0.263
心率 变异率	方案 1	0.404	0.209	0.086	0.254	0.211
	方案 2	0.401	0.197	0.065	0.179	0.232
	方案 3	0.398	0.183	0.043	0.108	0.252
	方案 4	0.402	0.202	0.074	0.212	0.223

于信息熵原理，可以通过由评价指标值构成的判断矩阵来决定给各评价指标的权重高低。熵权法各指标权重如表 7 所示。

表 7 熵权法指标权重

中分带 开口 长度 方案	累积 超速 时空 面积	车道 偏移 标准差	方向盘 反转率	平均 瞳孔 直径	平均 眨眼 频率	兴趣区 注视 时间 比例	心率 变异率
方案 1	0.149	0.173	0.122	0.159	0.131	0.150	0.117
方案 2	0.228	0.165	0.088	0.159	0.121	0.125	0.114
方案 3	0.139	0.116	0.111	0.227	0.123	0.110	0.174
方案 4	0.201	0.075	0.121	0.179	0.177	0.141	0.105

3.4 基于变异系数法的指标权重

使用熵权法赋权，可将同一观测指标的多个样本组合确定权重，从而可减少异常值对权重的影响<sup>[18]</sup>；但同时，熵权法所获取的指标权重分配存在均衡化的问题<sup>[19]</sup>，这是因为熵权法只是用观测数据来决定权重比例，而没有考虑不同的绩效指标对驾驶绩效的影响能力差异，因此相应的权重比例不应该出现均衡性。因此，本文使用了变异系数法与熵权法相结合的综合赋权法来决定权重比例，也即是使用变系数法赋的权重来调整熵权法的权重的方法。变异系数法各指标权重如表 8 所示。

表 8 变异系数法指标权重

中分带 开口 长度 方案	累积 超速 时空 面积	车道 偏移 标准差	方向盘 反转率	平均 瞳孔 直径	平均 眨眼 频率	兴趣区 注视 时间 比例	心率 变异率
方案 1	0.176	0.134	0.123	0.139	0.148	0.154	0.126
方案 2	0.179	0.155	0.111	0.141	0.139	0.134	0.140
方案 3	0.127	0.127	0.118	0.189	0.121	0.139	0.178
方案 4	0.180	0.098	0.119	0.135	0.169	0.172	0.127

3.5 组合赋权的模糊综合评价结果

为了弥补熵权法的不足，本文将变异系数法与熵权法进行加权组合，从而使指标权重更为合理。设熵权法权重和变异系数法权重分别为  $w_j$ 、 $w'_j$ ，则组合权重  $w_j$  为：

$$w_j = \lambda w_j + (1 - \lambda) w'_j \tag{6}$$

式中， $\lambda$  为偏好系数， $\lambda \in (0, 1)$ 。本文  $\lambda$  取 0.5，则组合权重如表 9 所示。

表 9 组合权重

中分带 开口 长度 方案	累积 超速 时空 面积	车道 偏移 标准差	方向盘 反转率	平均 瞳孔 直径	平均 眨眼 频率	兴趣区 注视 时间 比例	心率 变异率
方案 1	0.163	0.147	0.148	0.149	0.140	0.152	0.122
方案 2	0.304	0.227	0.211	0.220	0.183	0.185	0.177
方案 3	0.163	0.225	0.141	0.256	0.148	0.148	0.213
方案 4	0.186	0.134	0.095	0.152	0.169	0.153	0.113

在隶属度矩阵  $R$  和指标权重向量  $W$  确定的基础上，将权重向量  $W$  对归一化后的矩阵  $R$  模糊合成，得到模糊综合评估向量  $t$ ，即



$$t = W * R \quad (8)$$

式中，“\*”为模糊合成算子。

本文使用加权平均型算子，即考虑每个因素的影响，同时保留对单因素评判的所有信息。定义分数梯度向量  $G = (90, 80, 70, 60, 50)^T$ ，并计算  $t$  与  $G$  的乘积为场景方案综合得分  $F$ 。由此，场景 1、场景 2、场景 3 与场景 4 的综合评估得分分别为 68.84、69.47、72.23、69.73。因此可得，综合驾驶行为绩效、眼动特征、生理信号三类七项指标，3 号试验场景方案为最佳方案，即高速公路半幅路段施工前中分带开口长度设置为 120 米。

## 4 结论

(1) 本文依托陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室 360° 环屏 3D 全视驾驶模拟仿真平台（六自由度），以高速公路半幅路段施工区前中分带开口为典型施工场景，通过驾驶模拟试验测试获得驾驶行为数据、眼动数据和生理信号数据；通过主观评价和配对样本  $t$  检验，验证了驾驶模拟器和场景的有效性和仿真度，保证试验数据的可靠性；提出综合考虑行为绩效、眼动特征、生理特征三大类七项指标的中分带开口施工场景设置综合评价方法，确定最优方案。

(2) 本文使用熵权与变异系数的组合方法，确定评价指标的综合权重比例。熵权和变异系数的组合赋权法可以消弱异常值对权重的影响，避免了单纯使用熵权法赋权的均衡化问题，使综合评价结果更科学、合理和有效。

(3) 以在建工程建设项目为例，对高速公路半幅路段施工前中分带开口长度设置方案进行了应用研究，为高速公路改扩建施工设施设置、交通组织和安全管理提供参考。

### 参考文献：

- [1] Huang Y, Bai Y. Effectiveness of graphic-aided portable changeable message signs in reducing vehicle speeds in highway work zones[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2014, 48: 311–321.
- [2] LI S Q, PENG Y L, XIAO L Y et al. Analysis of the mechanism of the road traffic accidents in-situ and the future research trends[J]. Journal of Safety and Environment, 2014,

14(03): 14–19.

- [3] 吴兵, 刘开平. 公路施工, 养护安全评价与对策研究[J]. 上海公路, 1994(3): 61–70.
- [4] 吴晓宇. 高架道路维护作业安全技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- [5] 张丰焰, 周伟, 王元庆, 张佳. 高速公路改扩建工程交通组织设计探讨[J]. 公路, 2006(1): 109–113.
- [6] 王中平. 高速公路改扩建工程转换段交通组织研究[J], 中外公路, 2015, 35(1): 314–318.
- [7] 廖小凤, 富志鹏. 施工期高速公路改扩建作业区分流组织研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(11): 72–74.
- [8] 韩跃杰. 高速公路改扩建作业区交通组织及安全保障技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [9] 代庆兵. 高速公路改扩建工程施工交通组织分析[J]. 科技经济导刊, 2016(17): 50.
- [10] 赵晓华, 鞠云杰, 李佳, 陶盼盼, 王雪松, 周荣贵. 基于驾驶行为和视觉特性的长大隧道突起路标作用效果评估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(6): 29–41.
- [11] Xu C, Pei S, Wang X. Driver drowsiness detection based on non-intrusive metrics considering individual difference[J]. Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(10): 118–125.
- [12] 郑琬弋. 基于眼动跟踪技术的视觉专注界面分类研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [13] Yan G, Xiong J, Zang C, Yu L, Cui L, Bai X. Review of eye-movement measures in reading research[J]. Advances in Psychological Science, 2013, 21(4): 589–605.
- [14] 姜君. 基于熵权与变异系数组合赋权法的模糊综合评价模型[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [15] Xiao Q, He R, Yu J. Evaluation of taxi carpooling feasibility in different urban areas through the K-means matter-element analysis method[J]. Technology in Society, 2018, 53: 135–143.
- [16] 邱菀华. 管理决策与应用熵学. 管理决策与应用熵学, 2002.
- [17] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用, 2005.
- [18] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究. 管理学报, 2010, 7(1): 34–42.
- [19] 刘佳, 赵海军, 马凤山, 郭捷, 孙琪皓, 段学良. 基于改进变异系数法的 G109 拉萨—那曲段泥石流危险性评价. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 63–70.

(责任编辑: 杨小宝)