

中文引用格式:陈云,何诗语,晋良海,等. 融合眼动-心电的地下洞室施工环境驾驶负荷评价[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 229-238.

英文引用格式:CHEN Yun, HE Shiyu, JIN Lianghai, et al. Evaluation of driving load in construction environment of underground tunnel based on eye-ECG physiological indicators[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 229-238.

融合眼动-心电的地下洞室施工环境驾驶负荷评价*

陈云^{1,2}副教授,何诗语^{1,2},晋良海^{1,2}教授,陈述^{**1,2}教授,曾沁^{1,2},刘皓^{1,2}

(1 三峡大学 水电工程施工与管理湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443002;

2 三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.0655

基金项目:国家自然科学基金资助(52209163,52479127,52179136)。

【摘要】 为探究地下洞室施工环境下驾驶负荷变化特征,搭建试验平台并开展地下洞室施工环境下的驾驶模拟试验,获取驾驶员眼动及心电(ECG)数据;以心率、心率变异性(HRV)时域指标及平均眨眼次数(BF)为参量,构建基于因子分析与熵值法的驾驶负荷综合评价模型,并提出基于K-means聚类算法的驾驶负荷等级划分方法。结果表明:地下洞室非施工路段环境相对单调,心理压力相比视觉压力能更准确地反映驾驶负荷;施工路段环境复杂多变,心理压力易受驾驶操作影响,而当视线受限时,单一的视觉压力指标易高估驾驶负荷;基于眼动-心电建立的驾驶负荷综合评价模型灵敏度高、稳定性好,可校正单一指标的评价结果,有效量化驾驶负荷。

【关键词】 眼动; 心电(ECG); 地下洞室; 驾驶负荷; 施工环境

Evaluation of driving load in construction environment of underground tunnel based on eye-ECG physiological indicators

CHEN Yun^{1,2}, HE Shiyu^{1,2}, JIN Lianghai^{1,2}, CHEN Shu^{1,2}, ZENG Qin^{1,2}, LIU Hao^{1,2}

(1 Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China; 2 College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China)

Abstract: To explore the changing characteristics of driving load under the construction environment of underground tunnels, a test platform was built, and a driving simulation test was carried out in the construction environment of underground tunnels to obtain the driver's eye movement and ECG data. Taking the time domain index of heart rate, heart rate variability (HRV) and average number of blinks frequency (BF) as parameters, a comprehensive evaluation model of driving load based on factor analysis and entropy was constructed, and a classification method of driving load based on K-means clustering algorithm was proposed. The results show that in the relatively monotonous environment of non-construction sections in underground tunnels, psychological pressure could more accurately reflect the driving load compared to visual pressure. However, in the complex and changeable environment of construction section, psychological pressure is prone to being influenced by driving operations. Moreover, when line of sight is limited, a single visual pressure indicator tends to overestimate the driving load. The

* 文章编号:1003-3033(2024)11-0229-10; 收稿日期:2024-05-20; 修稿日期:2024-08-21

** 通信作者:陈述(1986—),男,湖北英山人,博士,教授,主要从事工程施工安全管理方面的研究。E-mail:chenshu@ctgu.edu.cn。

comprehensive evaluation model of driving load based on eye movement and ECG exhibits high sensitivity and good stability, and can correct the evaluation results of a single indicator and effectively quantify driving load.

Keywords: eye movement; electrocardiogram (ECG); underground tunnel; driving load; construction environment

0 引言

地下洞室施工环境恶劣、施工干扰大^[1]。一方面,相比视野开阔、光线良好的地面环境,驾驶员更易受到地下昏暗环境的影响,心理压力较大^[2-3];另一方面,地下洞室施工过程中产生的噪声普遍大于100 dB,远高于一般高速公路环境噪声^[4],更易引发交通事故^[5-7]。在人-车-路系统中,驾驶员处于整个系统的核心,研究驾驶员的负荷状态,对降低大型地下洞室施工路段驾驶风险,保障大型地下洞室驾驶安全有重要意义。

生理参数测量法利用生理信号采集设备实时观测和记录驾驶员的生理参数,并通过分析指标变化来评价驾驶负荷特性。由于驾驶过程中驾驶员接收到的信息有80%为视觉信息^[8],许多学者借助视觉需求研究驾驶负荷^[9-11]。如QIN Pengcheng等^[9]对比分析了熟练驾驶员与新手驾驶员分别在城市双车道、市郊道路及乡村道路上行驶时的注视顺序,探究了驾驶员熟练程度对视觉负荷的影响。除眼动指标外,一些学者也聚焦于心电(Electrocardiogram, ECG)^[12-13]、肌电^[14]、近红外^[15-16]、脑电^[17]等指标,对各典型场景下的驾驶员负荷状态展开了大量研究。其中,GERHARD等^[12]以心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)为参数,评价驾驶员操控车辆通过隧道路段时的驾驶负荷状态,发现应激反应不及时是造成事故的主要原因;胡宏宇等^[14]利用肌电图技术,分析了车辆转弯行驶时驾驶员的肌肉疲劳度,以此评估驾驶负荷值;李建平等^[16]利用近红外光谱技术,对比了不同驾驶负荷下驾驶员近红外信号的差异;郭孜政等^[17]基于驾驶员脑电信号构建脑力负荷识别模型,为自动辅助驾驶及交通信息设计提供依据。然而,现有研究表明:任何单一的生理测量指标在评估驾驶负荷时均存在不足^[18-19]。不同的生理测量指标或许能精准反映某一维度的负荷水平,但难以全面评估各种驾驶条件下的负荷状况。除上述研究外,部分学者综合运用多种生理参数测量手段来评估驾驶负荷。WANG Fan等^[20]基于眼动、ECG等2种生理指标,针对高原地区驾驶员

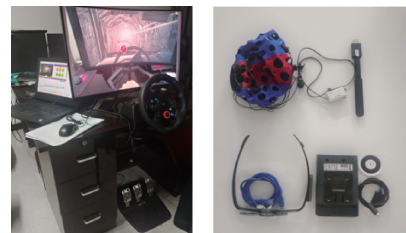
ECG指标易受海拔频繁变动影响的问题,提出了一种驾驶负荷评估方法,并证实了融合2指标进行驾驶负荷评估的可行性。

已有研究在单一行车环境和特定驾驶行为方面取得了进展,但地下洞室施工场景中多种施工因素对驾驶负荷的影响尚未得到充分研究。此外,许多生理数据采集设备在实际应用中使用条件受限,而ECG和眼动设备因其便携性,更易实现驾驶负荷的实时监测。鉴于此,笔者拟开展地下洞室施工环境下的驾驶模拟试验,采集驾驶员眼动、ECG等数据,构建驾驶负荷综合评价模型,探究地下洞室施工路段驾驶负荷变化特征,为降低地下洞室施工环境下的驾驶负荷、保障地下洞室驾驶安全提出合理化建议,提高地下洞室交通安全。

1 大型地下洞室驾驶模拟试验设计

1.1 试验设备与场景

驾驶模拟平台包括生理数据采集设备及驾驶模拟器,如图1所示。生理数据采集设备选用可穿戴式眼动仪(采样频率50 Hz)和快速ECG检测仪,驾驶模拟器包括主机、32英寸曲面显示器、方向盘、加速踏板、刹车。试验时生理数据采集设备连接到相应平台,主机屏幕实时显示被试眼动与ECG信号,供研究者观察,32英寸曲面显示器呈现道路环境,供被试驾驶模拟。



(a) 驾驶模拟器

(b) 生理数据采集设备

图1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

选取雅砻江杨房沟水电工程某段地下洞室,运用Unity软件搭建地下洞室施工现场模型。根据实地考察,提取隧道照明、噪声及交通设施布设等显著

影响驾驶员生理及心理状态的环境因素^[4,13],设置指示牌、防撞桶、路口凸面镜及警示标志等静态标识,以及施工人员作业场景、施工噪声的强弱变化等动态场景。试验场景如图 2 所示,图 2b 中圆点为眼动仪标记的被试注视点。

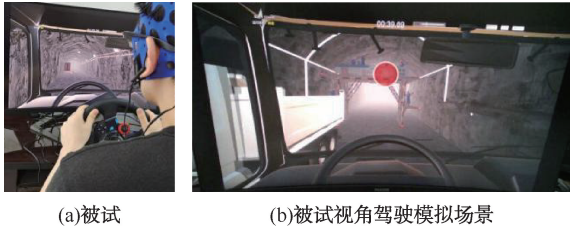


图 2 试验场景
Fig. 2 Test scenario

提取会车、语音提示、弯道、下坡场景,形成 5 种设计方案,见表 1。

表 1 地下洞室施工路段环境设计方案

Table 1 Environmental design scheme of underground tunnel construction section

施工路段	基本描述	图示
1	基础设施设置参数:提前警示距离 100m,设反光柱、标牌,数名工人正在施工,并伴随施工噪声,声音强弱随距离远近变化	
2	基础设施设置参数:施工平台设 1.2 m 防护栏杆及红白相间反光条,四角处设置警示信号灯,经过施工现场时需完成会车	
3	基础设施设置参数:施工平台设 1.2 m 防护栏杆及红白相间反光条,四角处设置警示信号灯。距施工现场 80 m 处起设“前方施工,注意安全”提示广播,至驶过 80 m 后消失,提示声音的强弱随距离远近变化	
4	基础设施设置参数:进入弯道约 30 m 处,施工现场位于道路左侧	
5	基础设施设置参数:施工现场位于下坡约 20 m 处的道路左侧	

根据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01—2014),试验开始前在地下洞室内设置 2 种符

合规定的灯光条件(灯光昏暗、灯光明亮),如图 3 所示,每种灯光条件下测试被试 20 人。

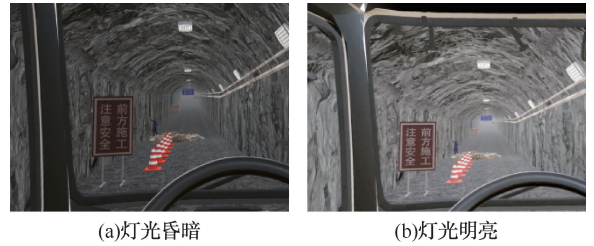


图 3 地下洞室不同灯光条件设置
Fig. 3 Different lighting conditions setting diagram of underground tunnel

1.2 试验过程

1.2.1 被试人员选取

共招募 40 名被试,其中男性 38 人,女性 2 人,95%的被试有隧道驾驶经验,被试年龄在 32~48 岁(38±6.8),驾龄均在 5 年以上(14.1±7.3)。所有被试均视力正常,无心脏病史,健康状况良好,持有效驾驶执照,无重大事故记录。

1.2.2 试验步骤

试验前,向被试说明试验流程及规则,并为被试佩戴眼动仪、ECG 测试仪,根据被试舒适度及眼动仪摄像范围调整显示器高度、显示器距被试的距离(约 40 cm),采用定标法标定眼动仪,随后被试在非试验路段进行试驾以熟悉驾驶操作;试验时,被试在驾驶模拟器上连续行驶直至通过试验路段,驾驶过程中眼动仪和 ECG 测试仪实时采集并记录被试者心理生理数据,驾驶模拟器采集驾驶操作数据;驾驶完成后再次标定眼动仪以验证眼动数据准确性,随后采集被试主观调查问卷。为确保试验数据的准确性,减少可能产生的驾驶疲劳,被试实际驾驶时长(含试驾约 3 min)严格控制在 10 min 内^[21]。

1.3 仿真度评价

为确保试验数据的真实度及科学性,驾驶完成后被试需评价模拟场景的仿真度,满分 10 分,分数越高场景越真实。结果如图 4 所示,试验各场景仿真度均在 8.8 分以上,说明试验场景在洞室内整体轮廓及结构、静态标识、动态场景、被试的操作体验等方面均具有较高的仿真度。

2 驾驶负荷综合评价模型构建

2.1 数据处理

2.1.1 数据分段

为进一步明确施工环境对驾驶负荷的影响,将

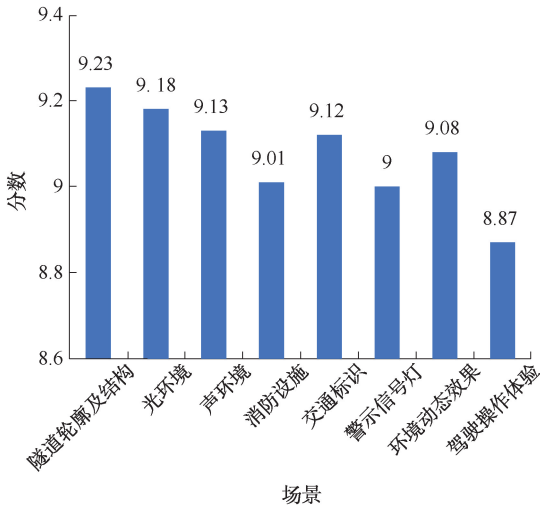


图4 地下洞室仿真度评价

Fig. 4 Simulation evaluation of underground tunnel

整个驾驶过程的数据按照行车场景划分为5个施工路段、5个非施工路段(表1)。

2.1.2 眼动数据处理

原始眼动数据的采样占比为84%~93%,根据前人^[21]经验,数据完整性可充分满足试验要求。为剔除试验中因被试头部及身体晃动等主观因素造成的伪迹,减少试验误差,逐帧回放眼动仪记录的视频,标记数据,并预处理眼动数据。运用滑动中值滤波技术降噪,合并注视时间低于75ms、注视角变幅小于0.5°的相邻注视,剔除注视时间低于60ms的注视点;通过线性插值处理瞳孔参数,设定瞳孔直径下限为2mm^[3,21]。

在整理得到的数据中,平均眨眼次数(Blink Frequency, BF, 次/s)可直观表征驾驶员所承受的视觉压力;平均扫视次数(Saccade Frequency, SF, 次/s)能够反映驾驶员视觉信息的获取难度及获取数量,从而间接表征其视觉压力^[10-11]。计算公式如下:

1) 平均眨眼次数(Blink Frequency, BF)。

$$BF = \frac{V_{B_i}}{T_i} \quad (1)$$

式中: V_{B_i} 为被试第*i*个路段的眨眼次数; T_i 为被试经过第*i*个路段的时长。

2) 平均扫视次数(Saccade Frequency, SF), 次/s。

$$SF = \frac{V_{S_i}}{T_i} \quad (2)$$

式中 V_{S_i} 为被试第*i*个路段的扫视次数。

2.1.3 ECG 数据处理

HRV为逐次心跳周期之间时间上的微小变异特性,是反映驾驶员心理压力的有效指标^[22]。为提取该指标,设置呼吸频率(Respiratory Rate, RR)间期允许范围500~1200ms,得到以逐次心搏为横坐标,RR间期为纵坐标的HRV序列信号。

为表征驾驶员心理压力,选取3项关键指标:平均心率(Heart Rate, HR)、HRV指标中的全部窦性心搏RR间期标准差(Standard Deviation Normal to Normal heart beat, SDNN)、相邻RR间期差值的均方根(Root Mean Square of the Successive Differences, RMSSD)。其中心率变异性指标计算公式如下:

1) SDNN的计算如下:

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2} \quad (3)$$

式中: N 为被试在该路段内总的R波个数; \overline{RR} 为该路段内所有RR间期的平均值; RR_i 为第*i*个RR间期值的大小。

2) RMSSD的计算如下:

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2} \quad (4)$$

式中 RR_{i+1} 为第*i+1*个RR间期值的大小。

2.1.4 主观驾驶负荷数据处理

采用NASA-TLX量表评估主观驾驶负荷,通过对比量表评分与生理指标的结果,验证生理参数测量法的有效性。该量表包括脑力需求、时间需求、体力需求、努力程度、业绩水平及受挫程度6个维度。驾驶任务完成后,驾驶员依据自身感受对上述6个维度的重要性进行两两对比,并对每个路段的驾驶感受评分。根据每个维度被选中的次数确定该维度权重并计算量表最终得分,量表分数越高表示被试驾驶负荷越高。

2.2 基于熵值法的驾驶负荷综合评价模型

基于单一指标的驾驶负荷评价方法具有较大的不稳定性和片面性^[18]。为准确反映和量化驾驶员的负荷,融合驾驶员视觉压力、心理压力双指标,构建驾驶负荷综合评价模型。

2.2.1 视觉压力指标

驾驶员BF、SF的Kendall W检验结果显示,眼动指标间一致性强,具有统计学意义,故选取BF表征驾驶员视觉压力。BF与驾驶员视觉压力呈负相关关系^[10],对其取倒数,得到视觉压力指标*U*。

$$U = \frac{1}{BF} = \frac{T_i}{V_{B_i}} \quad (5)$$

2.2.2 心理压力指标

对比分析驾驶员 SDNN 与 RMSSD 及 HR 等 3 种指标,发现各指标所呈现的心理压力变化趋势虽大体一致,但仍存在一定差异,深入解释和量化驾驶员心理压力十分困难。

因子分析是处理高维数据的降维方法,旨在用少数综合指标反映原始变量的绝大部分信息。基于因子分析法对驾驶员 3 种 ECG 指标降维,过程如下:

设 $X=(X_1, X_2, X_3)^T$ 为驾驶员 ECG 数据的原始数据集,其中, X_1 为驾驶员 HR 的原始数据集, X_2 为驾驶员 HRV 指标 SDNN 的原始数据集, X_3 为驾驶员 HRV 指标 RMSSD 的原始数据集, $E(X)=\mu$ (μ 为 X_1, X_2, X_3 均值), $\Sigma = \text{Cov}(X)$ 。则正交因子模型如下:

$$\underset{(3 \times 1)}{X} = \underset{(3 \times 1)}{\mu} + \underset{(3 \times m)}{A} \underset{(m \times 1)}{F} + \underset{3 \times 1}{\varepsilon} \quad \text{且 } m < 3 \quad (6)$$

式中: $F=(F_1, F_2, \dots, F_m)^T$ 为 ECG 原始变量的公共因子集; m 为公共因子个数; ε 为 ECG 原始变量的特殊因子集; A 为驾驶员 ECG 数据的因子载荷矩阵。

分别计算方差贡献率和累积方差贡献率:

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k}, i = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

$$\frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k}, i = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

式中 λ_i 为第 i 个因子的特征值。

根据常用的特征根值大于 1 和累计方差贡献率大于 80% 的准则确定主成分。采用正交法旋转因子,利用旋转后的特征值 λ_i^* 计算出各评价指标的权重如下:

$$W_i = \frac{\lambda_i^*}{\sum_{i=1}^m \lambda_i^*} \quad (9)$$

式中: λ_i^* 为第 i 个因子旋转后的特征值; W_i 为第 i 个评价指标的权重。

使用 Thompson 回归法估计因子得分,得到回归方程:

$$F = A^T \Sigma^{-1} X \quad (10)$$

得出心理压力指标:

$$M^- = \sum_{i=1}^m F_i W_i \quad (11)$$

2.2.3 驾驶负荷综合评价模型

熵值法是一种客观赋权法,在解决多指标权重分配问题上具有独特优势。需确定 M, U 在评价驾驶负荷时所占权重的大小,正适合使用熵值法处理。具体步骤为:

1) 设原始数据集为 $D = \{x_i, y_i\} (i = 1, 2, \dots, 40)$, x_i 为第 i 个被试的心理压力值, y_i 为第 i 个被试的视觉压力值,对数据作归一化处理,并计算第 j 个指标下第 i 个对象的贡献度

$$\theta_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{40} r_{ij}} (0 \leq \theta_{ij} \leq 1), j = 1, 2 \quad (12)$$

式中 r_{ij} 为第 i 个被试的心理压力和视觉压力指标。

2) 分别计算 M, U 的指标熵值 H_j 、指标差异性系数 g_j :

$$H_j = \frac{1}{\ln 40} \sum_{i=1}^{40} \theta_{ij} \ln \theta_{ij}, j = 1, 2 \quad (13)$$

$$g_j = 1 - H_j, j = 1, 2 \quad (14)$$

3) 计算 M, U 的权重 v :

$$v_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^2 g_j}, j = 1, 2 \quad (15)$$

4) 得出驾驶负荷综合评价模型 P :

$$P = v_1 M + v_2 U \quad (16)$$

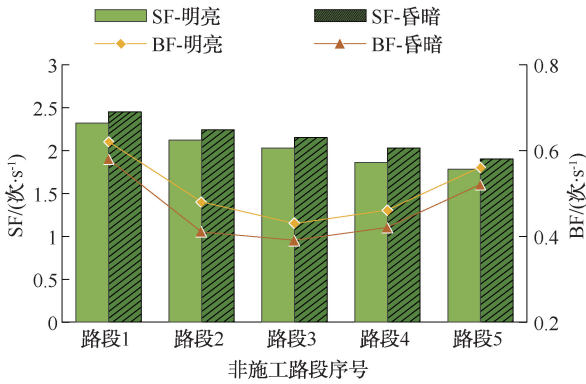
3 驾驶负荷模型评价结果分析

3.1 视觉压力分析

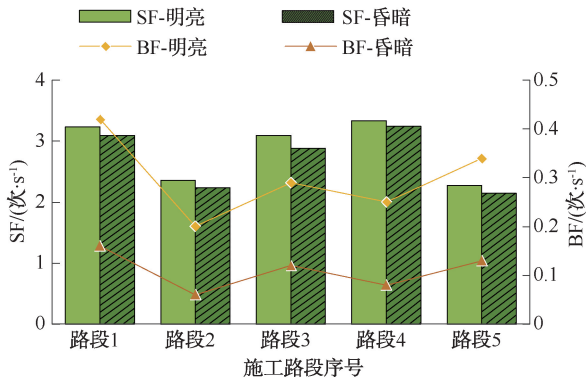
为确定地下洞室灯光昏暗与明亮条件下驾驶员视觉压力的变化特征,绘制非施工路段与施工路段不同灯光条件下的眼动指标,如图 5 所示。

大型地下洞室非施工路段下,扫视行为呈现出 $SF_1 > SF_2 > SF_3 > SF_4 > SF_5$, 眨眼行为呈现出 $BF_1 > BF_5 > BF_2 > BF_4 > BF_3$, 且在灯光明亮时驾驶员的 BF 均大于灯光昏暗时的 BF, SF 均小于灯光昏暗时的 SF; 大型地下洞室施工路段下,扫视行为呈现出 $SF_4 > SF_1 > SF_3 > SF_2 > SF_5$, 眨眼行为呈现出 $BF_1 > BF_5 > BF_3 > BF_4 > BF_2$, 在灯光明亮时驾驶员的 BF、SF 均大于灯光昏暗时的 BF、SF。

由非施工路段、施工路段各眼动指标变化情况得出:①在非施工路段,驾驶员 SF 随时间不断减小,说明长时间在地下洞室环境中,驾驶员对周围环境更加熟悉,减小了信息搜索的眼动行为;BF 先减小后增大,说明驾驶员视觉压力先是逐渐累积,后随着驾驶员对环境的熟悉逐渐减小。②灯光明亮时驾驶



(a)非施工路段不同灯光条件下驾驶员的BF及SF



(b)施工路段不同灯光条件下驾驶员的BF及SF

图5 不同环境下驾驶员眼动指标对比

Fig. 5 Comparison of drivers' eye movement indexes in different environments

员的BF均大于灯光昏暗时的BF, SF均小于灯光昏暗时SF,说明隧道内较明亮的灯光环境有利于驾驶员获取道路信息,降低了驾驶员的视觉压力。③在非施工-明亮,施工-昏暗的条件下,SF最低,即当周围环境最简单和最复杂时,驾驶员搜索信息的眼动行为最不活跃,结合施工-昏暗环境下BF最低可知:当驾驶员处于施工-昏暗的环境中,需要识别的信息过多或信息识别较为困难。

3.2 心理压力分析

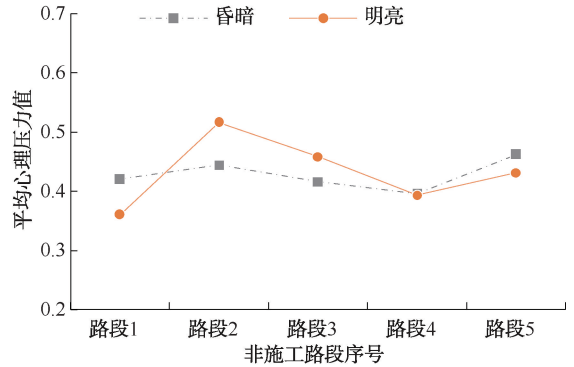
根据式(6)一式(11),得到驾驶员心理压力为

$$M^- = \frac{1}{0.9694} (0.6076F_1 + 0.3618F_2)$$

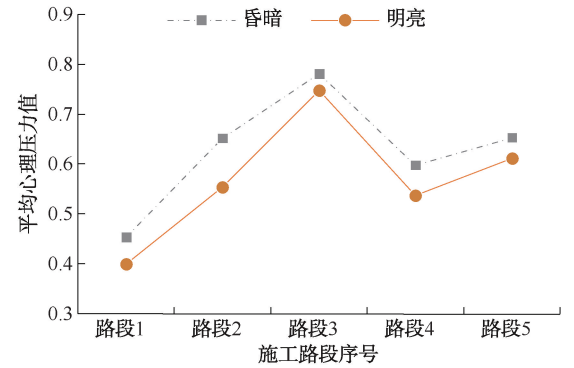
,数据归一化处理得到M。

为分析地下洞室灯光昏暗与明亮条件下驾驶员心理压力的变化,绘制非施工路段与施工路段不同灯光条件下的M如图6所示。在非施工路段,灯光明亮时心理压力呈现出 $M_2 > M_3 > M_5 > M_4 > M_1$,灯光昏暗时 $M_5 > M_2 > M_1 > M_3 > M_4$;在施工路段,2种灯光条件下心理压力均呈现出 $M_3 > M_5 > M_2 > M_4 > M_1$;施工-昏暗状态下的平均心理压力值最大,非施工-昏暗

状态下的心理压力值最小。



(a)非施工路段不同灯光条件下的心理压力值



(b)施工路段不同灯光条件下的心理压力值

图6 各路段不同灯光条件下的心理压力值

Fig. 6 Psychological stress value under different lighting conditions of each road section

由非施工路段、施工路段心理压力折线图变化情况可以得出:①在施工路段,灯光明亮时驾驶员的心理压力值均小于灯光昏暗时的心理压力值;但在非施工路段不同灯光条件下,驾驶员心理压力表现出无规律的变化。说明当周围环境较复杂时,灯光对于驾驶员心理压力缓解的作用更为显著。②在施工路段与非施工路段,不同灯光条件下的平均心理压力值均无明显差异,说明心理压力指标对灯光环境不敏感。

3.3 驾驶负荷综合评价模型分析

通过式(12)一式(16),得到驾驶负荷综合评价模型 $P = 0.6345M + 0.3655U$ 。

3.3.1 主客观驾驶负荷情况一致性检验

为验证驾驶负荷综合评价模型P值的有效性,对主客观驾驶负荷情况进行一致性检验。以主观驾驶负荷值即量表得分为横坐标,客观驾驶负荷值即P作为纵坐标,将各被试主客观驾驶负荷均值绘制在坐标系中,得到散点密度图,如图7所示。

皮尔逊相关分析显示,2种评价方法一致性程度高(相关性系数 $r = 0.837 > 0.8$,显著性水平值

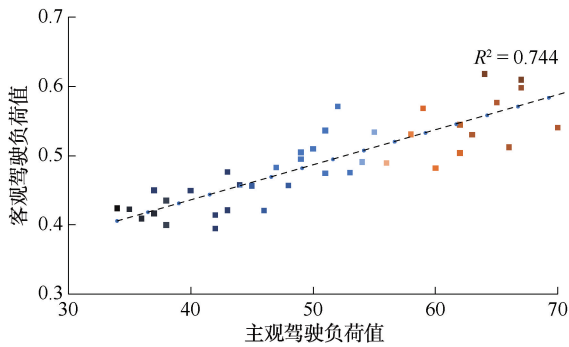


图 7 主观-客观驾驶负荷值散点密度图

Fig. 7 Scatter-density plot of subjective-objective driving load values

Sig. = 0.000 < 0.05), 即客观驾驶负荷值 P 能有效衡量驾驶负荷水平。

3.3.2 驾驶负荷与压力指标综合分析

为探究驾驶员视觉及心理压力深层变化特征,厘清地下洞室内各施工场景要素(会车、语音提示、弯道、下坡)对驾驶员的影响,综合分析各路段心理压力值 M 、视觉压力值 U 、驾驶负荷值 P ,绘制各指标的变化情况如图 8 所示。在非施工路段,驾驶员的视觉压力于路段 3 到达顶峰,而心理压力及驾驶负荷值于路段 2 到达顶峰,随后下降并在路段 5 回升;在施工路段,驾驶员的心理压力呈现 $M_3 > M_5 > M_2 > M_4 > M_1$,视觉压力呈现 $U_2 > U_4 > U_3 > U_5 > U_1$,驾驶负荷呈现 $P_2 > P_3 > P_4 > P_5 > P_1$ 。

由非施工路段、施工路段各评价指标折线图变化情况可以得出:①在施工环境中,相较于 2、3 路段,4、5 的驾驶负荷更低,说明下坡及弯道路段虽对驾驶负荷产生影响,但其影响程度和方式相对固定和可预测,驾驶员可以通过调整车速、行驶方向等来适应道路线型的变化;相比之下,在复杂的道路环境中,驾驶员应对会车及施工区语音提示时,由于道路环境的不确定性,更易产生持续的紧张状态及心理压力,从而增加驾驶负荷。②驾驶员的心理压力值在非施工路段分布阈值为(0.35, 0.5),在施工路段分布阈值为(0.4, 0.8);视觉压力值在非施工路段分布阈值为(0.1, 0.3),在施工路段分布阈值为(0.4, 1)。说明心理压力值在整个驾驶过程中变化较为平稳,而视觉压力值更易发生突变。③在非施工路段,心理压力与驾驶负荷变化趋势更为接近,说明在相对简单的环境中,心理压力相比视觉压力更能反映驾驶负荷情况。④在施工路段,视觉压力、心理压力与驾驶负荷值均存在较大差异。视觉压力在路段 2、4 时最高,联系施工路段环境,可知驾驶员处

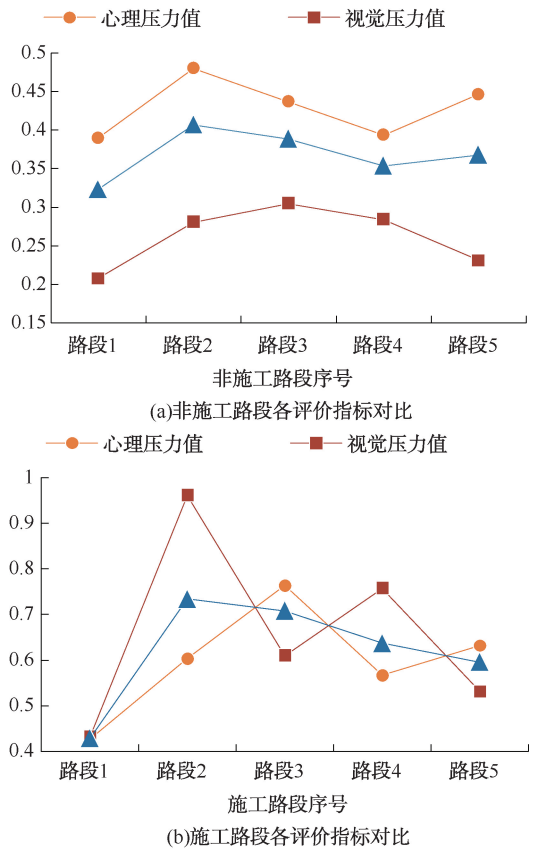


图 8 不同路段各评价指标对比

Fig. 8 Comparison of evaluation indexes of different road sections

于弯道或会车时视线差,视觉需求较高,容易造成视觉压力;心理压力值在路段 3、5 时最高,联系驾驶模拟器记录的驾驶操作数据,可知:路段 3、5 中被试操作次数更频繁,容易产生较大心理压力。

综合分析 3.3.1、3.3.2 节可知:在地下洞室施工路段,单一的视觉压力指标受视线干扰影响显著,但对驾驶操作无明显响应;反之,单一的心理压力指标易受驾驶操作影响,但对视线干扰无明显响应;驾驶负荷综合评价模型结合视觉压力指标及心理压力指标的特点,既保证稳定性又提高灵敏度。

3.4 驾驶负荷等级划分

为进一步辨识每位驾驶员的负荷状态,基于 K -means 聚类分析方法划分驾驶负荷等级。将路段均等划分为 30 个区间,绘制所有被试在每个区间的平均驾驶负荷散点图,对其进行 K -means 聚类分析。根据散点图初步设定分类数范围为 2~4,并计算聚 2 类、3 类、4 类时轮廓系数 S 分别为 0.61、0.49、0.53,可见聚 2 类时效果最好。因此,将驾驶负荷分为 2 级,即高负荷、低负荷,最终聚类结果如图 9 所示。根据 K -means 聚类分析算法计算出驾驶负荷分

级阈值为 0.52 时,分类准确率为 88.79%。分级阈值算法如下(“←”表示赋值)。

```

1: int r ← K-means 聚类结果类别数
2: For int t = 1 to r-1
3: int at ← 第 t 聚类中心驾驶负荷值
4: int bt ← 第 t+1 聚类中心驾驶负荷值
5: int st ← 第 t 及 t+1 两聚类数据量和
6: int f = 1
7: For float eij = at to bt
8: int cij ← 第 t 类中阈值划分错误的的数据量
9: int dij ← 第 t+1 类中阈值划分错误的的数据量

```

```

10: gij = 1 - ((cij + dij) / st) // 准确率计算
11: eif = eif + 0.01
12: Bt(f, 1 : 2) = [eij, gij] // 阈值及准确率存入矩阵 Bt
13: f = f + 1
14: End For
15: Ct ← 产生准确率最大对应的阈值
16: End For
17: C = [C1, C2, ..., Cr-1] // r-1 个阈值依次存入向量 C

```

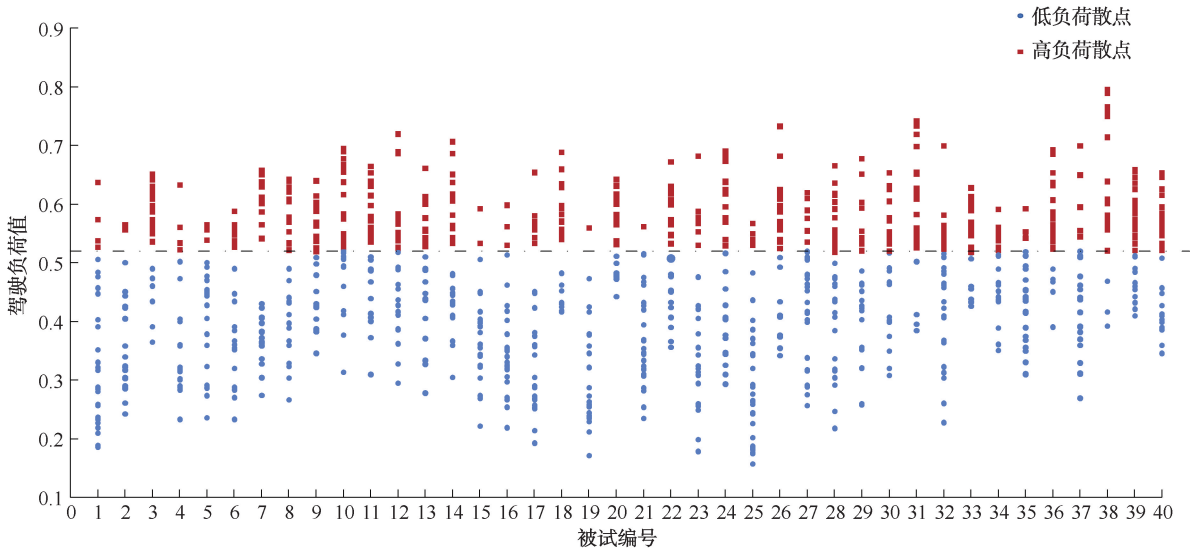


图9 各被试驾驶负荷值聚类结果

Fig. 9 Clustering result of driving load value of each test

取驾驶员高负荷状态下的行车区间占比作为量化指标。例如:被试 5 处于低负荷状态时的行车区间占比 90%,高负荷状态时的行车区间占比 10%,则该被试为低负荷驾驶员。最终结果见表 2。

表 2 各被试驾驶负荷状态统计结果

Table 2 Statistical results of driving load state of each test

高负荷驾驶员编号	低负荷驾驶员编号
3, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 20, 22, 24, 26, 29, 30, 31, 33, 36, 38, 39, 40	1, 2, 4, 5, 6, 8, 15, 16, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 28, 32, 34, 35, 37

分类驾驶负荷状态有助于为高负荷驾驶员驾驶行为进行导向性干预,鉴别易导致驾驶员高负荷的路段,从而减少事故发生,促进交通安全。

4 结论

1) 地下洞室非施工路段环境相对单调,心理压力相比视觉压力更能反映驾驶负荷;施工路段环境

较复杂,单一指标难以全面、准确地反映驾驶负荷状态。其中,眼动指标受地下洞室内视线干扰显著,ECG 指标易受驾驶操作影响。而基于眼动-ECG 的驾驶负荷综合评价模型可校正单一指标的评价结果,有效量化驾驶负荷,既保证稳定性又提高灵敏度。

2) 以行车区间占比为量化指标,划分驾驶员负荷状态等级,有效区分了高负荷与低负荷驾驶员。基于分类结果,可在实际应用中,对不同类型的驾驶员进行差异化安全培训,提升驾驶员行车安全性,也可为驾驶辅助系统的个性化参数定制提供理论研究基础。

3) 提出融合眼动-ECG 的驾驶负荷综合评价模型,由于篇幅限制,未能结合被试个体特征差异展开深入研究,特别是女性司机被试占比较低,可能无法准确反映女性司机的真实情况。未来计划基于该模型与驾驶试验数据,分析不同驾驶经验、性别、年

龄等个体化差异被试的行为及生理反应特征,利用机器学习构建驾驶负荷预测模型,预测施工环境下驾驶负荷变化,为提前采取干预措施提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 赵树磊,孙兵,陈稳干,等. 超高海拔隧道施工人员生理指标变化及劳动强度研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 239-246.
ZHAO Shulei, SUN Bing, CHEN Wen'gan, et al. Physiological indicators and labor intensity of tunnel construction workers at ultra-high altitude[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 239-246.
- [2] 王安民,何佳银,张涛,等. 基于驾驶模拟试验的特长公路隧道驾驶疲劳规律研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(增 1): 610-617.
WANG Anmin, HE Jiayin, ZHANG Tao, et al. Research on driver fatigue in extra-long highway tunnels based on driving simulation test[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 610-617.
- [3] 张悦,何世永,孙远义,等. 隧道光环境下驾驶人视场对比度变化规律及其对行车安全的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(5): 30-39.
ZHANG Yue, HE Shiyong, SUN Yuanyi, et al. Study on variation of driver's field of view contrast in tunnel light environment and its influence on driving safety[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(5): 30-39.
- [4] 陈妍,杨芸翰,陶建成,等. 隧道噪声干扰下疲劳影响研究[J]. 南京大学学报:自然科学, 2021, 57(4): 690-694.
CHEN Yan, YANG Yunhan, TAO Jiancheng, et al. The influence of tunnel noise on fatigue [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 2021, 57(4): 690-694.
- [5] 黄晶,彭扬,黄烨,等. 考虑噪声标签影响的驾驶员精神负荷状态评价[J]. 汽车工程, 2022, 44(5): 771-777.
HUANG Jing, PENG Yang, HUANG Ye, et al. Evaluation of driver's mental load state considering the influence of noisy labels[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(5): 771-777.
- [6] 魏庆朝,张雪峰,臧传臻,等. 公路隧道内主动降噪声场研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 77-82.
WEI Qingzhao, ZHANG Xuefeng, ZANG Chuazhen, et al. Study on active noise control sound field in highway tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(1): 77-82.
- [7] 乔洁,徐鑫,刘传攀,等. 驾驶人危险感知能力影响因素及干预方式综述[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(2): 34-41.
QIAO Jie, XU Xin, LIU Chuanpan, et al. Review on affecting factors and intervention methods of drivers' hazard perception ability[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(2): 34-41.
- [8] 晋良海,尹洁,张荣坤,等. 塔机驾驶员的持续性视觉注意负荷研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(3): 157-162.
JIN Lianghai, YIN Jie, ZHANG Rongkun, et al. Study on continuous visual attention load of tower crane driver[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(3): 157-162.
- [9] QIN Pengcheng, WANG Mingnian, CHEN Zhanwei, et al. Characteristics of driver fatigue and fatigue-relieving effect of special light belt in extra-long highway tunnel: a real-road driving study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 114; DOI: 10.1016/j.tust.2021.103990.
- [10] 吕贞,戚春华,朱守林. 草原公路超车工况下驾驶人动态视觉特性及负荷[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 15-22.
LYU Zhen, QI Chunhua, ZHU Shoulin. Dynamic visual characteristics and load of drivers during overtaking maneuvers on prairie highways[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(4): 15-22.
- [11] 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.
- [12] GERHARD M, CHRISTOPHER C, JOOSTDE W. Review of eye-related measures of drivers' mental workload[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 3: 2854-2861.

- [13] 徐进,陈正欢,廖祺硕,等. 基于心电数据的高速公路高密度互通立交驾驶负荷研究[J/OL]. 吉林大学学报:工学版:1-12. [2024-08-16]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221522>.
XU Jin, CHEN Zhenghuan, LIAO Qishuo, et al. Mental workload of drivers at high-density interchanges of freeways based on ECG data[J/OL]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition: 1-12. [2024-08-16]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221522>.
- [14] 胡宏宇,周晓宇,张慧珺,等. 考虑肌电信号的驾驶人弯道操纵行为分析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(6): 77-83.
HU Hongyu, ZHOU Xiaoyu, ZHANG Huijun, et al. Electromyogram-based driver's manipulation analysis during the curve road[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(6): 77-83.
- [15] 李文博,喻文珑,吴盈章,等. 道路交通与生活场景诱发下驾驶人情绪的脑认知响应差异[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2024, 52(6): 829-837.
LI Wenbo, YU Wenlong, WU Yingzhang, et al. Difference in brain cognitive responses to driver emotions induced by road traffic and daily life scenarios[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2024, 52(6): 829-837.
- [16] 李建平,牛燕雄,杨露,等. 基于人眼状态信息的非接触式疲劳驾驶监测与预警系统[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 89-94.
LI Jianping, NIU Yanxiong, YANG Lu, et al. Contactless driver fatigue detection and warning system based on eye state information[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 89-94.
- [17] 郭致政,潘雨帆,潘毅润,等. 驾驶员脑力负荷的SVM识别模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 154-158.
GUO Zizheng, PAN Yufan, PAN Yirun, et al. SVM recognition model of driver's mental workload[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 154-158.
- [18] MIYAKE S. Multivariate workload evaluation combining physiological and subjective measures[J]. International Journal of Psychophysiology, 2009, 40(3): 233-238.
- [19] WEI Zongmin, ZHUANG Damin, WANG Xiaoru, et al. A model for discrimination and prediction of mental workload of aircraft cockpit display interface[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(5): 1 070-1 077.
- [20] WANG Fan, CHEN Hong, ZHU Caihua, et al. Estimating driving fatigue at a plateau area with frequent and rapid altitude change[J]. Sensors, 2019, 19(22): DOI:10.3390/s19224982.
- [21] 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, et al. 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.
- [22] 刘坤,焦钰博,张晓明,等. 基于心电的铁路列车驾驶压力检测研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 31-37.
LIU Kun, JIAO Yubo, ZHANG Xiaoming, et al. Test of railway train drivers' stress by using ECG signal[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(6): 31-37.

作者简介: 陈云 (1993—),男,湖北宜昌人,博士,副教授,主要从事安全管理方面的研究。E-mail:yunchen@ctgu.edu.cn。

