基于纵向间距和亮度差的隧道群驾驶舒适度

孟云伟[1],李智鹏[1],张 引[2],全振宇[1],杨光清[3],陈 芳[3],赖思静[4],乔 俊[5]

(1.重庆交通大学 智能综合立体交通重庆市重点实验室,重庆 400074;2.重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074;3.招商局重庆交通科研设计院有限公司 道路工程研究院,重庆 400067;4.招商局公路信息技术(重庆)有限公司,重庆 400067;5.中铁第四勘察设计院集团有限公司,武汉 430063)

摘 要:为探究高速公路隧道群路段驾驶舒适度的变化规律,通过实车试验采集了隧道群路段的长度范围、各区域亮度值和驾驶人的实时心率。分析了不同纵向间距、环境亮度差与心率增长率的关系,并基于隧道群纵向间距对下游隧道路段心率增长率的影响机理,提出了隧道群心理效应的概念。利用心率增长率表征驾驶舒适度,构建了环境亮度差与纵向间距耦合作用下的驾驶舒适度模型,探究了隧道群心理效应的产生机理。研究发现,随着纵向间距的增加,驾驶人心率增长率呈先增长再下降的趋势,且较长的纵向间距会加剧下游隧道的驾驶负荷、降低舒适度;驾驶人心率增长率随着环境亮度差的增大而增加。隧道群的纵向间距与亮度差的耦合作用显著影响驾驶舒适度,环境亮度差越大,相应的发生隧道群心理效应的纵向间距范围越大。

关键词:交通运输系统工程;隧道群心理效应;实车试验;驾驶舒适度;纵向间距;环境亮度差
中图分类号:U458.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2026)07-1904-11
DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241361

Driving comfort in tunnel groups based on longitudinal spacing and brightness difference

MENG Yun-wei[1], LI Zhi-peng[1], ZHANG Yin[2], QUAN Zhen-yu[1], YANG Guang-qing[3], CHEN Fang[3], LAI Si-jing[4], QIAO Jun[5]

(1. *Chongqing Key Laboratory of Intelligent Integrated and Multidimensional Transportation System, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*; 2. *College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*; 3. *Institute of Road Engineering, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institution Co. Ltd., Chongqing* 400067, *China*; 4. *China Merchants Roadway Information Technology (Chongqing) Co. Ltd., Chongqing* 400067, *China*; 5. *China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan* 430063, *China*)

Abstract: To investigate the variation law of driving comfort on expressway tunnel group sections, real vehicle tests were carried out to collect the tunnel section length, regional luminance, and drivers′ real-time heart rate . The relationships among tunnel spacing, environmental luminance difference, and heart rate

收稿日期:2024-12-26.
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3002603);重庆交通大学研究生科研创新项目(2024S0070);重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD-2020029).
作者简介:孟云伟(1980-),男,教授,博士.研究方向:道路交通安全.E-mail:ywmeng@cqjtu.edu.cn

growth rate were analyzed. Based on the mechanism by which tunnel spacing affects the downstream heart rate response, the concept of the tunnel group psychological effect was proposed. Driving comfort was characterized by heart rate growth rate, and a comfort model was developed under the coupling of luminance difference and tunnel spacing. The mechanism underlying the tunnel group psychological effect was also explored. The results show that as tunnel spacing increases, the heart rate growth rate first rises and then falls. A longer tunnel spacing intensifies the driving load in downstream tunnels and reduces comfort. The heart rate growth rate increases with the environmental luminance difference. The coupling of tunnel spacing and luminance difference significantly affects driving comfort. A greater luminance difference corresponds to a wider tunnel spacing range in which the psychological effect is likely to occur.

Key words: engineering of communications and transportation system; psychological effect in tunnel group; real vehicle test; driving comfort; longitudinal distance; environmental brightness differences

0　引　言

山区高速公路中的隧道群路段，对于缩短行程、减少碳排放发挥了重要作用，但也带来了行驶过程较为郁闭的影响。在隧道这一类郁闭式环境中行车，相较于隧道外较为开阔的路域环境，驾驶人视觉生理负荷较大[1]。隧道群路段是纵向间距较近，由两座及以上隧道构成的连续行车路段，由上游隧道的出口段、纵向间距段、下游隧道的入口段组成。该路段环境亮度频繁变化，驾驶舒适度较低，为此，对驾驶人心理的研究，需要综合考虑这一特殊行车环境的系统性影响。在“人-车-路-环境”系统中，“人”的安全可靠度对交通安全起主导作用。在隧道群路段行车时，驾驶人主要依靠视觉感知获取明暗交替的环境信息，行车环境更易导致驾驶人出现压抑和疲劳、心率突变[2]，从而产生较大的行车风险，加之其他因素的综合影响，隧道群路段是事故易发、多发的路段[3]。

隧道路段的驾驶负荷与交通风险直接相关。朱彤等[4]研究得出普通高速路段虽然行车环境较好，但运行车速过高也会造成驾驶人负荷增加，驾驶人的心理负荷在隧道入口前会升高。Yang等[5]利用驾驶人的松弛效应，阐释了隧道出口段交通事故发生率较高的现象。孟云伟等[6]利用实车试验研究了驾驶人在隧道口路段的驾驶心理负荷与速度、亮度的相关性，发现公路隧道入口段驾驶人的心率增长率较大。Jiao等[7]基于驾驶人白天驶入隧道时的瞳孔变化特征，构建了瞳孔面积随时间变化的数学模型，计算了暗适应的时间和视觉适应距离。Pervez等[8]基于均值、方差异质性随机参数Logit模型展开实证研究，证实高速公路出、入口段是加剧交通事故严重程度的重要诱因之一。张姝玮等[9]研究的多重分形特征指标中，加速度的奇异强度与驾驶员疲劳状态显著相关，该结论有助于提高驾驶负荷检车模型精度。Chen等[10]的研究认为，由于隧道内灯具的布设方式，路面和隧道壁上周期性地连续出现明暗带所引起的闪烁效果，会分散驾驶员的注意力，并造成视觉疲劳，诱发交通事故。

隧道路段环境亮度的变化可引起驾驶人生心理状态明显变化。崔洪军等[11]的研究显示，在公路隧道路段行驶，驾驶人的暗反应时间随明暗转换次数的增加而减少，在经历3次明暗转换后达到最小值并趋于稳定。王首硕等[12]提出了一种高速公路隧道入口区域视线诱导系统的改善方法，可使驾驶人更加关注道路前方远处及洞内的交通信息，并降低驾驶人负荷。Prithila等[13]利用驾驶模拟器，收集被试驾驶人的脑电图信号、心电图数据、皮肤电以及眼动追踪数据，提出了用于评价驾驶负荷的综合数据集。Zheng等[14]的研究证实，节奏视觉引导(Rhythmic visual guidance, RVG)技术可有效降低高速公路隧道群中各种照明下的驾驶风险。Liang等[15]通过在隧道路段的实车试验，研究了驾驶人的生理、心理负荷变化，发现驾驶人的瞳孔面积变化率呈先增大后减小的趋势，洞外亮度的变化会引起驾驶人生理、心理指标变化。叶飞等[16]指出，适宜的隧道景观可以有效缓解驾驶人的不适心理，合理的隧道洞口景观还能缓和隧道内外环境亮度的剧烈变化，从而提高驾驶安全。

综合现有研究可知，隧道出入口路段环境亮度的变化会引起驾驶负荷的波动。隧道群的纵向

间距是从保证线形连续性的角度进行设置的,而间距与隧道环境亮度的匹配程度,以及纵向间距的大小、亮度变化对驾驶舒适度的协同性影响,还未见统一的标准,需要深入研究。同时,对于纵向间距路段长度、环境亮度差异对驾驶舒适度的耦合作用,以及对驾驶人心理状态的系统性影响机理,直接关系到驾驶负荷的疏解,值得深入研究。鉴于此,本文开展实车试验,建立驾驶舒适度计算模型,利用隧道群心理效应探究阐释驾驶人生理状态的变化,为隧道群路段的行车安全提供支撑。

1 试验设计

1.1 驾驶人选择

为保证测试数据的有效性,选择适当数量的驾驶人作为被试。根据统计学原理,对招募的驾驶人数量进行验证,最小样本量N的计算公式为:

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

式中:σ为样本标准差;Z为标准正态分布统计量;E为最大允许误差。

本文取90%置信水平,则$Z=1.25$,$E=10\%$;σ的取值为0.25~0.5[17],本文取$\sigma=0.5$。由此求得最小样本量为25组。在确定驾驶人招募数量时,结合我国男女驾驶人数量的比例,试验共招募了27名驾驶人,其中18名男性、9名女性,这样既满足了计算得出的最小样本量要求,又保证了试验条件的冗余性,样本量具备统计学意义的科学性和合理性。

被试驾驶人均签署了知情同意书,知晓试验所测的数据以及用途,并获得了180元/天的报酬。驾驶人年龄在24~49岁之间,驾驶年限为5~19年,矫正视力为5.0,且无色盲色弱等眼部问题。在试驾过程中,参与者身体状况良好,测试前无饮酒和熬夜情况。驾驶人统计数据如表1所示。

表1 驾驶人数据统计

Table 1 Driver data statistics

基本信息	平均值	标准差	取值
年龄/岁	36.5	9.8	24~49
驾驶年限/年	11.2	6.4	5~19
驾驶里程/km	91 625	113 984	25 600~300 000
日均驾驶时长/(h·d^{-1})	3.1	1.6	1.0~6.0

1.2 试验设备

选取五座SUV作为测试车辆。在行经隧道群路段的过程中,使用Prince 180D快速心电检测仪与驾驶员的肢体连接,持续采集心率数据,同时,副驾驶位持LS-100点状单镜反光型亮度计,持续采集试验道路的亮度值,亮度计的测定角为1°,测量精度为±5%。各仪器的数据实时传入随车电脑保存。此外,在车内安装高清行车记录仪,以记录整个试验过程的画面,用于确保时间与路段位置的一致性。在数据后处理阶段,通过与行车记录仪采集的视频进行比对,排除在干扰条件下所收集的试验数据。试验设备如图1所示。



图1 试验所用仪器

Fig. 1 Instruments used in the experiment

1.3 试验路段

试验路段为G65包茂高速重庆市境内的武隆-彭水段,试验线路总长度约为100 km,双向4车道,路基设计宽度为24.5 m,路段设计速度、限速值均为80 km/h。试验路段有隧道16座,其中特长和长隧道11座,中短隧道5座,从而形成若干个间距较近的隧道路段,隧道均处于半径大于1 000 m的平曲线上,通视条件良好,如图2所示。



图2 隧道群进出口

Fig. 2 Entrance and exit of tunnel group

在公路隧道设计细则(JTG/T D70—2010)中,隧道群的定义为:隧道与隧道洞门之间的距离较近,在勘察测量、平纵设计、通风设计及照明设计等方面必须考虑相互之间影响的多座隧道的总称。根据不同设计速度时的相邻隧道洞口纵向间距值确定隧道群的存在与否。当设计速度为80 km/h、纵向间距值小于等于200 m时,即可称之为隧道群。本文中,采用纵向间距小于200 m的

标准判定隧道群。每两座隧道视为一个隧道群，以纵向间距大小对隧道群进行编号，则试验路段有 3 个隧道群，同时增加一个间距大于 200 m 的对照组，以便于对照分析。隧道群在路段上的分布，如图 3 所示，单个隧道详细信息如表 2 所示。



图 3　试验隧道群路段

Fig. 3　Experimental tunnel group section

表 2 隧道群的分布

Table 2　Overview of tunnel groups

隧道群编号	组成隧道名称及长度	纵向间距/m
①	中兴隧道(6 000 m)-银盘隧道(1 100 m)	30
②	白马隧道(3 100 m)-羊角隧道(6 656 m)	80
③	羊角隧道(6 656 m)-大湾隧道(2 800 m)	190
④对照组	董家湾隧道(1 000 m)-望江寺隧道(667 m)	300

在整个隧道群路段，驾驶人的心率是持续变化的，需要精准捕捉纵向间距影响范围内的心率变化。同时，驾驶人在 3 s的行驶时间内，对应的路线线形保持一致将有利于行车平稳和安全。为此，在纵向间距的影响路段，取纵向间距段、上下游隧道洞口各 3 s行程之和。根据试验路段的设计速度，本文取上游隧道出口前 70 m、纵向间距段、下游隧道进口后 70 m 的连续路段为研究范围，将上游隧道出口设定为研究的原点位置，用坐标表示为[－70，纵向间距＋70]，隧道群路段的研究范围如图 4 所示。

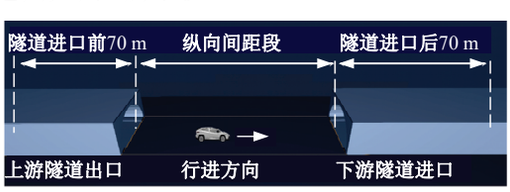

图 4　隧道群路段的研究范围

Fig. 4　Research scope of tunnel group

1.4　试验流程

实车试验于 2022 年 11 月在重庆市武隆区至彭水县的隧道群路段进行，试验持续 10 d，均为在晴朗、无雾的条件下进行，避免了能见度降低和异常驾驶行为。每天试验时间固定在 9：00～11：00、13：00～15：00、17：00～19：00，相对固定的时间最大限度地减少了太阳高度角变化对亮度差的影响，交通处于自由流状态。试验分为如下 4 个阶段。

(1)前期准备

确定试验路段，并检查该路段是否存在可能影响结果的因素，确保交通状况满足自由流的条件，同时明确试验的起止点桩号。

(2)预试验

安装和调试相关仪器设备，在参与者胸前粘贴电极传感贴片，校准设备时间以确保所有仪器的时间同步。被试驾驶人在试验路段上按照预定路线行车，同时检查设备的正常数据采集能力，使驾驶人熟悉完整的试验流程，从而确保后续正式试验的准确性。

(3)正式试验

被试驾驶人从起点驾驶车辆，所有仪器同时开始采集数据。试验全程要求驾驶人遵循其日常驾驶习惯，避免超速。在试验路段，每位参与者在不同时间段需各进行一次驾驶任务。

(4)数据采集

在纵向间距的影响范围内，每间隔 10 m 记录一次心率和亮度数据。在试验过程中，由于路面颠簸等偶然因素或设备故障，可能导致仪器采集数据出现不同程度的异常。在进行数据分析之前，采用 3σ 准则法剔除异常数据，以确保数据分析的精确性。当数据在短时间内剧烈变化时，原始数据曲线可能出现毛刺现象，采用 smooth 函数对原始数据进行滤波平滑处理，以更真实地反映测试数据的变化。再通过 ECG Viewer Manager

软件对数据进行预分析。采集的所有指标异常值比例小于5%,表明数据质量较高,可用于深入分析。实车试验的流程图如图5所示。

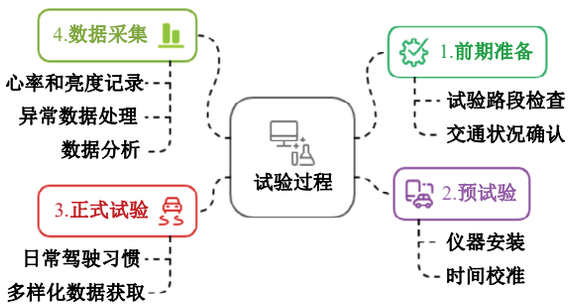

图5 试验流程

Fig. 5 Experimental process

驾驶人生心理负荷的研究中,有皮电反应(Electrodermal activity,EDA)、脑电图(Electroencephalogram,EEG)、心率变异性(Heart rate variability,HRV)、肌电信号(Electromyogram,EMG)等多种生心理指标可以用于评估。然而,在隧道群实车试验环境下,上述指标的获取存在一定局限性,脑电和皮电信号对外界干扰较为敏感,采集设备对驾驶人的驾驶行为产生一定影响,增加试验的复杂度,且数据处理算法复杂。相比之下,心率变化不仅稳定、易于采集和处理,心率增长率更能反映驾驶人在试验中瞬时心率的变化,与驾驶人在隧道群行驶时进出隧道口的亮度瞬时变化适配性较好,尤其适用本研究关注的"短时进入下游隧道前、后心理变化"过程。同时,隧道群的纵向间距路段与洞内环境亮度差可用于驾驶视觉的客观表征。为此,本文认为心率增长率可以作为评价被试驾驶人生理状态的指标[18]。心率增长率计算公式为:

$$H_R = \frac{n_i - n_0}{n_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中:H_R为心率增长率,%;n_0为驾驶人在静息状态下的心率值,次/min,取驾驶人佩戴好仪器未行车时5 min内心率的平均值;n_i为试验过程中驾驶人的瞬时心率,次/min。

2 纵向间距对心率增长率的影响

2.1 隧道群①~④

隧道群①~④的纵向间距依次为30 m、80 m、190 m和300 m,驾驶人在此隧道群路段的心率增长率变化如图6所示。在图6(a)中,横坐标为行驶的距离;IQR(Inter-quartile range)是数据集上四分位数(即第25百分位数和第75百分位数)之间的距离。

隧道群②~④由于纵向间距变大,利用图6(a)的表示方法会导致横坐标过长,因此本文将研究范围归一化,行驶距离利用百分比显示,其心率增长率变化如图6(b)(c)(d)所示,横坐标0为上游隧道出口前70 m,100%为下游隧道进口后70 m处,图中其余符号含义与图6(a)相同。

在图6(a)中,横轴的0 m处为上游中兴隧道的出口,30 m处为下游银盘隧道的进口,0~30 m

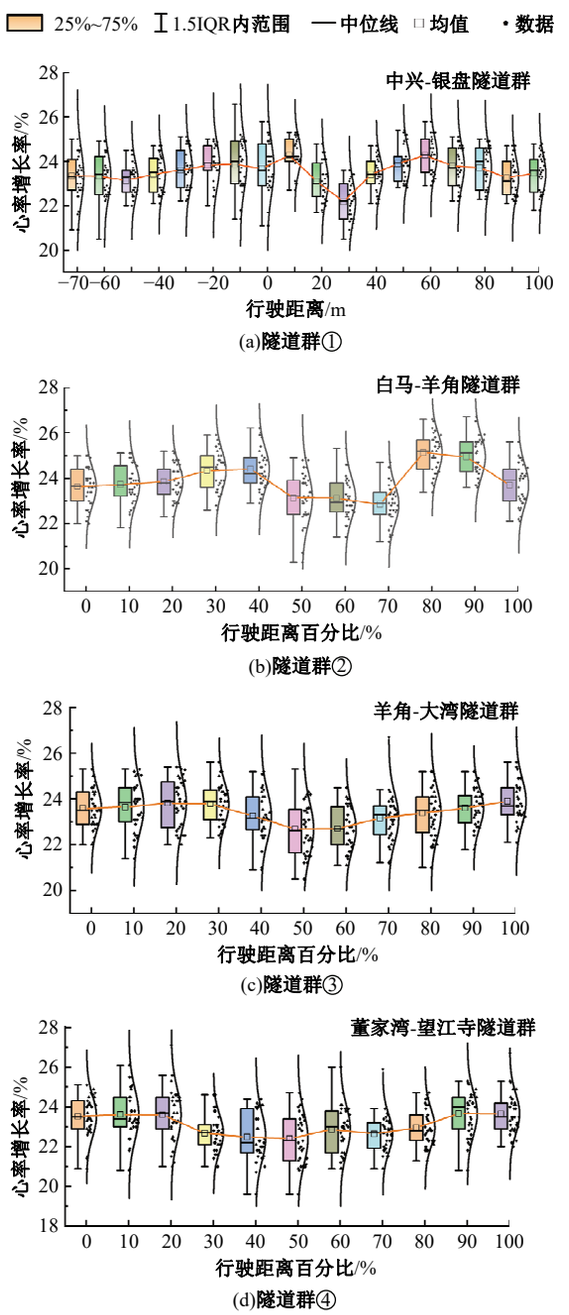

图6 隧道群①~④的心率增长率

Fig. 6 Heart rate growth rate of tunnel groups ① to ④

为隧道的纵向间距段。在纵向间距影响范围内，每间隔 10 m 设一个数据观测点，将各个观测点对应的心率增长率平均值作为代表值进行分析，由图 6 中数据可知：

(1)在该隧道群路段行驶时，驾驶人的心率增长率有 2 次处于较高状态，对应的横轴分别为 0～10 m、30～60 m，即上游隧道的出口段、下游隧道的进口段，心率增长率最大值均为 24.3%，这说明上游隧道出口段、下游隧道进口段的心率变化较为剧烈，同时发现下游隧道心率较高的状态有更大的长度，表明驾驶人的暗适应时间比明适应更长。

(2)在 10～30 m 内，心率增长率值逐渐降低，在 30 m 处下降至最低点，此时的心率增长率为 22%，该范围处于实车试验中的明亮环境，这种环境易于驾驶人接收外界信息，驾驶负荷较小。

(3)在该隧道群纵向间距影响的其他路段，均为在隧道内部行驶，驾驶人的心率变化率较为平稳，这主要归因于 2 个方面：一是隧道的通视条件较好，且纵向间距仅 30 m，驾驶人从上游隧道出口路段可清晰观察感知到下游隧道的洞口，有一定的心理预期；二是由于顺适效应的存在，在长隧道内部驾驶人已适应在暗环境中连续行驶。

由图 6(b)(c)(d)可知，相较于隧道群①，隧道群②～④路段的心率增长率明显不同，这与纵向间距值较大有直接关系。为便于对比分析，将隧道群①～④路段心率增长率的平均值一并显示出来，如图 7 所示。在图 7 中，横轴原点为上游隧道的出口位置，与横轴垂直相交的竖直虚线对应的是下游隧道的进口位置，原点到各竖直虚线的横轴距离代表上下游隧道连接段的纵向间距值。

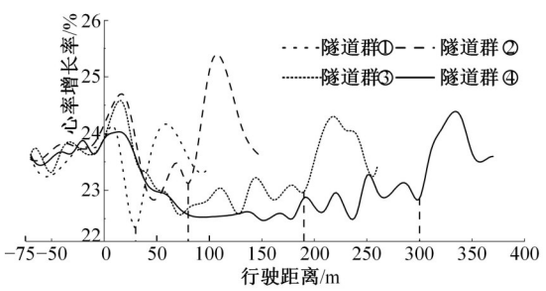

图 7　不同隧道群的心率增长率对比图

Fig. 7　Comparison of heart rate growth chart for various tunnel groups

由图 7 可知，对 4 个隧道群而言，在横轴为 −70～0 m 内，即距离上游隧道出口处前的 70 m 路段，心率增长率变化幅度较小，说明驾驶人在上游隧道内部临近出口段的驾驶负荷水平较低。本文研究的 4 个隧道群上游隧道均为长隧道或特长隧道，驾驶人在上游隧道内部行驶时间较长，已适应隧道内部的暗环境，在出口路段，隧道内部环境对驾驶人心率增长率的影响较小。而在 4 个隧道群纵向间距段的心率增长率，均低于在上游隧道内部行驶时的心率增长率。这说明无论隧道长短，纵向间距段更舒适的行驶环境更有利于产生较小的驾驶负荷。

在驾驶人驶出上游隧道后，隧道群编号从①到④，纵向间距依次增大，呈现出以下驾驶心理特征。

(1)在纵向间距路段，驾驶人的心率增长率均先增大再减小，直至进入下游隧道。4 个隧道群在纵向间距路段的心率增长率最大值为 24.8%，最小值为 22.2%，心率增长率的逐渐降低，说明纵向间距路段起到了舒缓心理负荷的功能。

(2)纵向间距超过一定阈值时，在纵向间距路段，心率增长率的变化幅度较小。隧道群③的纵向间距为 190 m，在 0～70 m 内，心率增长率变化幅度较大，在 70～190 m 内，心率增长率逐步趋于稳定；隧道群④的纵向间距为 300 m，在 0～70 m 内，心率增长率变化幅度较大，随后也趋于稳定，这说明纵向间距较大时，其对心率增长率的影响较小。

(3)纵向间距的增大，将导致驶入下游隧道后驾驶人心率增长率增大。在驶入下游隧道入口后，驾驶人在隧道群①～④路段，都经历了心率增长率上升的过程，在入口后 30 m 左右心率增长率到达极大值，纵向间距为 30 m 时，进入下游隧道的心率增长率为 22.2%，当纵向间距增至 300 m 时，心率增长率增至 22.8%。这说明较长的纵向间距段，将与下游隧道产生明显的行驶环境差异，从而导致驾驶心理的突变。

2.2　隧道群心理效应

为进一步探究隧道群的纵向间距对下游隧道路段心率增长率的影响机理，本文提出隧道群心理效应的概念，即下游隧道的驾驶人心理状态与上游隧道存在一定程度的传递效应，具体表现为下游隧道的心率增长率受上游隧道的影响，这种影响程度通过纵向间距路段进行效应传递。隧道群心理效应的存在与否，取决于上下游隧道的纵向间距值。纵向间距过短时，行车时间也过短，驾

驶人对纵向间距段来不及进行有效的感知和加工,即进入下游隧道内部;纵向间距过长时,行车时间较长,上游隧道中行驶的心理状态也不会延续到下游隧道中,因此只有纵向间距处于适当范围时,隧道群心理效应才会发生。

在隧道群路段,驾驶人瞳孔面积与环境光照度呈指数变化关系,上游隧道出口视觉明适应水平及连接段长度是影响下游隧道及整个隧道群路段视觉适应的主要因素[19]。距离下游隧道入口段的内外行驶环境差异,是导致驾驶人在下游隧道心率增长率变化的主要诱因[20]。为此,在实车试验的纵向间距路段上,选取多个位置点,将其作为观测点,在观测点采集所有被试驾驶人的心率增长率,再取这些平均值的最大值,如下所示:

$$H_{\mathrm{R}}(L)=\max\left\{H_{\mathrm{R}}(i)\right\} \tag{3}$$

式中:$H_{\mathrm{R}}(L)$为各观测点位置的心率增长率的最大值;L为隧道群的纵向间距值;$H_R(i)$为各个观测点心率增长率的平均值;$i=-70,-60,\cdots,0,10,\cdots,L,L+10,\cdots,L+70$。

由式(3)可得隧道纵向间距与心率增长率的散点图,选取心率增长率变化的有效区间,对纵向间距为0~200 m对应的散点数据,利用GAUSS模型进行拟合,相关系数为0.967,说明隧道群的纵向间距与心率增长率具有显著相关性,基本符合正态分布,如图8所示。

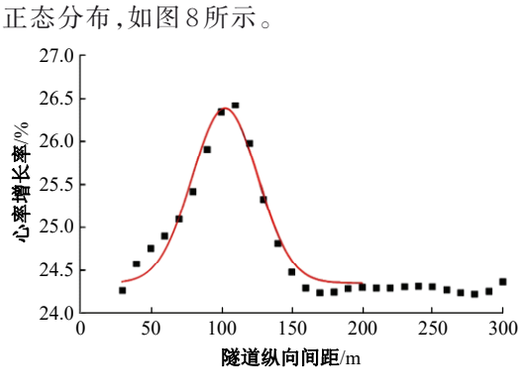

图8 纵向间距与心率增长率拟合

Fig. 8 Longitudinal spacing fitted to heart rate growth rate

由图8可知:①在纵向间距小于103 m时,心率增长率呈逐渐上升趋势,大于103 m时,心率增长率则呈下降趋势。纵向间距小于50 m时,心率增长率上升较为缓慢;纵向间距为50~103 m时,心率增长率上升较快;纵向间距为103~150 m时,心率增长率下降较快;纵向间距为150~170 m时,心率增长率下降较慢;纵向间距大于170 m时,心率增长率保持平稳状态。②驾驶人在隧道群行驶时,驶出上游隧道后,接着通过纵向间距段驶入下游隧道,需要经历连续的明暗交替适应过程。在驶出上游隧道后,驾驶人尚未完全适应洞外的高亮度环境,接着又驶入下游隧道经历暗适应,连续交替适应的变化会导致驾驶人心理负荷增大。在纵向间距为103 m时,驾驶负荷达到最大值,此时心率增长率达26.4 %;纵向间距大于103 m后,上下游隧道的明暗交替环境变化对驾驶负荷的影响减弱;当纵向间距大于170 m时,驾驶负荷变化很小,隧道群心理效应消失。

3 亮度差对心率增长率的影响

在隧道群路段行车,隧道口区域产生的行驶环境亮度差是驾驶人心理负荷变化的重要诱因,而环境亮度差引起的视觉暗适应,将导致更长的视觉震荡和行驶距离,暗适应对应的是下游隧道口路段,为此,本文选取进入下游隧道口的路段研究环境亮度差变化引起的心理负荷的变化。在实车试验的不同时间,采集纵向间距路段与下游隧道内部的亮度值,并计算出每个隧道群的亮度差,其与心率增长率的关系如图9所示,横轴为隧道①~④,柱体高度为5个隧道群的亮度差变化,折线为所有被试驾驶人的平均心率增长率。

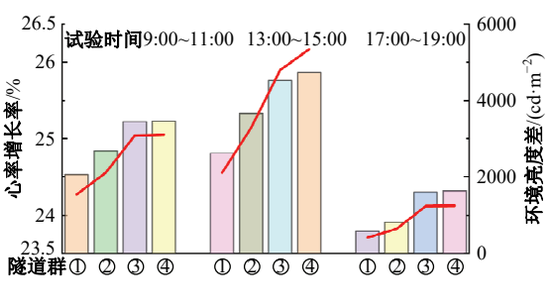

图9 亮度差与心率增长率的关系

Fig. 9 Relationship between brightness difference and heart rate growth rate

由图9可知,当亮度差值为580 cd/m^{2}时,心率增长率为23.7%;亮度差增大到4720 cd/m^{2}时,心率增长率达到26.2%。这说明,隧道群纵向间距路段与下游隧道的亮度差越大,心率增长率越大,驾驶人将产生更大的心理负荷。

对于4个隧道群的纵向间距段,采用相同环境亮度差时对应的心率增长率,构建两者的回归关系,选择二次多项式进行数据拟合,结果如图10所示,其相关系数为0.982,说明拟合效果较好。

由图10可知,环境亮度差从500 cd/m^{2}增加

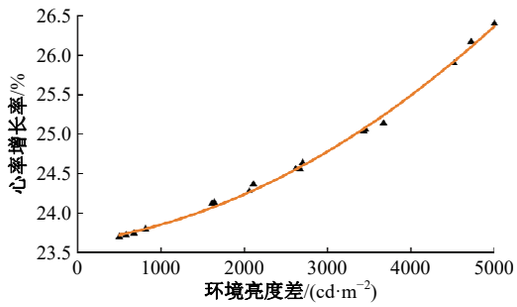

图 10　环境亮度差与心率增长率拟合

Fig. 10　Fitting of environmental brightness difference and heart rate growth rate

到 1000 cd/m²时，驾驶人心率增长率的变化较为平稳；当环境亮度差为 1000～5000 cd/m²时，心率增长率上升速度较快，亮度差为 5000 cd/m²时，心率增长率达到最大值 26.4%。心率增长率与环境亮度差密切相关，本文将把这个关系用于驾驶舒适度模型的构建。

在隧道群路段，环境亮度差主要由纵向间距路段与下游隧道内部的亮度不同所产生。考虑到实车试验中，隧道群内部灯具的固定式布设及亮度实测值，可认为下游隧道内部的环境亮度变化幅度很小，所以纵向间距段的环境亮度越大，则进入下游隧道的“黑洞效应”越明显，导致驾驶人的心理负荷越大。

4　驾驶舒适度模型的构建

为量化驾驶人在隧道群路段的舒适度，本文从驾驶行为心理生理反应角度出发，以心率增长率作为核心生理指标，构建驾驶舒适度评价模型。心率作为反映驾驶人心理负荷和应激水平的重要生理参数，具有客观性强、可量化、响应敏感等特点，在交通心理学和人因工程研究中被广泛应用于驾驶风险和舒适性分析[18]。

现有研究中常采用主观评分、车辆横纵向加速度、瞳孔变化等作为评估舒适度的指标，但主观评分易受人为偏差影响，车辆操作数据受道路因素干扰较大，难以反映驾驶人内在心理状态的动态变化。相比之下，心率增长率能更直接地揭示驾驶人对复杂交通环境（如隧道群明暗变化、道路线型不协调等）所产生的心理应激和不适感，具备更高的适用性和敏感性，尤其适用于短时动态工况下的舒适度评估。

本文使用 K-Means 方法对驾驶舒适度进行分类[21]，结果如表 3 所示。结合聚类划分的中心，以及在每一聚类中心率增长率观测值的个数，确定驾驶舒适度等级划分的阈值，如表 4 所示。采用不同心率增长率数值，将隧道群路段的驾驶舒适度划分成舒适、较舒适、不舒适 3 个等级。

表 3　聚类中心划分

Table 3　Cluster center division

分类	舒适	较舒适	不舒适
聚类中心	23.2%	24.9%	26.8%

表 4　隧道群路段的驾驶舒适度等级

Table 4　Comfort level in tunnel group

舒适度等级	心率增长率/%	驾驶负荷
舒适	＜24	低
较舒适	[24,26.3)	中
不舒适	≥26.3	高

将聚类后划分的驾驶舒适度结果与主观调查问卷的舒适感评分进行对比，发现生理指标的聚类结果与驾驶人主观感知高度一致，验证了本文模型指标选取的合理性和代表性。

利用二维多项式函数对心率增长率、纵向间距和环境亮度差进行非线性曲面拟合，采用 Levenberg-Marquardt 优化算法对拟合模型进行优化，得到纵向间距与环境亮度差耦合下的心率增长率模型图如图 11 所示。

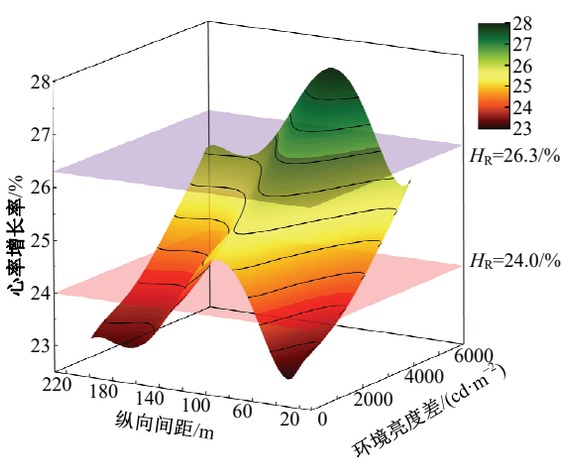

图 11　纵向间距与环境亮度差耦合下的心率增长率

Fig. 11　Heart rate growth rate under the coupling of longitudinal spacing and environmental brightness difference

为进一步验证本文模型的稳定性和泛化能力，采用 10 折交叉验证法和二维多项式函数计算本文模型的性能，结果如表 5 所示，可见本文模型的拟合效果较好，且具有良好的泛化性和较高的精确度。

在图 11 中，两个水平切面分别对应驾驶负荷高、驾驶不舒适的心率增长率阈值 H_R=26.3% 和

表5 拟合及验证结果

Table 5 Fitting and validation results

方法	决定系数R^2	均方根误差RMSE/%
二维多项式函数	0.93	—
10折交叉验证法	0.82	0.31

驾驶负荷低、驾驶舒适的心率增长率阈值H_R=24.0%。心率增长率可直接表征驾驶舒适度,由此提出隧道群路段的驾驶舒适度模型,如下所示:

$$H_R = H_{R_0} + \sum_{i=1}^{5}(A_i L^i + B_i L_t^i) \tag{4}$$

式中:L_t为环境亮度差,cd/m^2;A_i、B_i均为根据实车试验测得的参数值。

以此分别建立起舒适、较舒适和不舒适的舒适度模型,如下所示:

$$H_{R_0} + \sum_{i=1}^{5}(A_i L^i + B_i L_t^i) < 24\% \tag{5}$$

$$24\% \leqslant H_{R_0} + \sum_{i=1}^{5}(A_i L^i + B_i L_t^i) < 26.3\% \tag{6}$$

$$H_{R_0} + \sum_{i=1}^{5}(A_i L^i + B_i L_t^i) \geqslant 26.3\% \tag{7}$$

认为心率增长率为26.3%水平面以上的部分,存在隧道群心理效应,以此为判据论证环境亮度差、纵向间距的范围。为了利于行车安全,应使驾驶人处于较舒适或舒适的状态,采用不同环境亮度差计算对应的纵向间距值。以环境亮度差为5 000 cd/m^{2}为例,令L_t=5 000,H_R=26.3%,代入式(4),得到纵向间距的解分别为x_1=54.12,x_2=160.42,四舍五入则可得发生隧道群心理效应的纵向间距阈值为[54,160]。

同理,可得多种亮度差下对应的纵向间距范围,如表6所示,其中亮度差500 cd/m^{2}和5 000 cd/m^{2}是拟合出的驾驶舒适度模型的端点值,其余亮度差均从实车试验中测得。

表6 发生隧道群心理效应的纵向间距范围

Table 6 Longitudinal distance range of psychological effects in tunnel groups

序号	测试时间段	环境亮度差/(cd·m^{-2})	纵向间距/m
1	—	500	—
2	17:00~19:00	813	—
3	17:00~19:00	1 620	—
4	9:00~11:00	2 100	—
5	9:00~11:00	2 670	[103,112)
6	13:00~15:00	3 670	[76,122)
7	13:00~15:00	4 600	[61,153)
8	—	5 000	[54,160]

由表6可知,环境亮度差在500~2 100 cd/m^{2}时,不会发生隧道群心理效应。当环境亮度差逐渐增大时,对应的发生隧道群心理效应的纵向间距范围也逐渐增大。环境亮度差从2 670 cd/m^{2}增加到5 000 cd/m^{2}时,发生隧道群心理效应的纵向间距范围从[103,112]扩大到[54,160]。

5 结 论

(1)在纵向间距路段,驾驶人的心率增长率均先增大再减小,直至进入下游隧道,纵向间距路段发挥了舒缓心理负荷的作用。纵向间距超过一定阈值时,纵向间距段驾驶人的心率增长率变化幅度趋小,同时,纵向间距的增大,将导致驶入下游隧道后心率增长率增大。较长的纵向间距段,将与下游隧道产生明显的行驶环境亮度差异,从而导致驾驶负荷骤增。

(2)纵向间距小于103 m时,心率增长率呈逐渐上升趋势,直至最大值26.4%,隧道群心理效应显著;纵向间距大于103 m时,心率增长率则呈下降趋势,此时上、下游隧道的明暗交替环境变化对驾驶负荷的影响减弱;当纵向间距大于170 m时,驾驶负荷变化很小,隧道群心理效应消失。

(3)基于隧道群心理效应、驾驶舒适度需求,提出了环境亮度差所对应的纵向间距值。环境亮度差为500~2 100 cd/m^{2}时,不会发生隧道群心理效应;当环境亮度差逐渐增大时,对应的发生隧道群心理效应的纵向间距范围也逐渐增大。

(4)本文的分析过程仅依赖于被试驾驶人的心率数据,缺少对驾驶人全面的生理心率数据的考虑,同时,观测样本的数量和内容有限,在未来研究中,可增加样本量及观测内容。在发生隧道群心理效应的纵向间距路段,可采用遮光棚等减光措施,降低隧道内外的环境亮度差,从而适当缓解该效应的不利影响。

(5)本研究聚焦于隧道群典型工况下驾驶舒适度的短时动态变化,揭示了纵向间距和亮度差对驾驶人心理负荷的共同影响。然而,现实驾驶过程中,驾驶人可能长期、多次暴露于类似工况中,其心理和生理反应可能出现适应性或积累性变化。因此,未来研究可进一步关注长期暴露下的驾驶行为演变机制,结合驾驶人学习效应、生理节律等因素,分析其对交通安全决策和隧道机电设施设计的指导价值。

参考文献:

[1] 吕能超, 王玉刚, 周颖, 等. 道路交通安全分析与评价方法综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(4): 183-201.
Lyu Neng-chao, Wang Yu-gang, Zhou Ying, et al. Review of road traffic safety analysis and evaluation methods[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(4): 183-201.

[2] Wan L, Yan Y, Zhang C, et al. Characteristics and identification of risky driving behaviors in expressway tunnels based on behavior spectrum[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2024, 16: 5-17.

[3] 潘福全, 洋海涛, 王铮, 等. 照度与纵坡耦合作用下海底隧道出入口段驾驶人视觉特征分析与建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 142-148.
Pan Fu-quan, Pan Han-tao, Wang Zheng, et al. Analysis and modeling of drivers′ visual characteristics at entrance and exit of undersea tunnel with coupling of illuminance and longitudinal slope[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1): 142-148.

[4] 朱彤, 吴玲, 胡月琦, 等. 基于因子模型的高速公路特长隧道驾驶人心理负荷特性研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 165-175.
Zhu Tong, Wu Ling, Hu Yue-qi, et al. Research on characteristics of drivers′ mental workload in extra-long expressway tunnels based on the factor model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 165-175.

[5] Yang Y Z, Du Z G, Alonso F, et al. Why frequent traffic accidents at highway tunnel exit?—An experimental analysis of the slack effect[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 152: No. 105927.

[6] 孟云伟, 全振宇, 王子骁, 等. 亮度和速度协同下公路隧道口路段驾驶舒适度研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(4): 116-126.
Meng Yun-wei, Quan Zhen-yu, Wang Zi-xiao, et al. Driving comfort on highway tunnel portal sections based on coordination of luminance and speed[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(4): 116-126.

[7] Jiao F T, Du Z G, Chen G J, et al. Entrance zone length of extra-long undersea tunnels based on vision adaptation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: No. 103970.

[8] Pervez A, Lee J, Huang H L. Exploring factors affecting the injury severity of freeway tunnel crashes: a random parameters approach with heterogeneity in means and variances[J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 178: No. 106835.

[9] 张姝玮, 郭忠印, 杨轸, 等. 驾驶行为多重分形特征在驾驶疲劳检测中的应用[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51(2): 557-564.
Zhang Shu-wei, Guo Zhong-yin, Yang Zhen, et al. Application of multi-fractal features of driving performance in driver fatigue detection[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(2): 557-564.

[10] Chen S F, Lin Y, Zhao H T. Effects of flicker with various brightness contrasts on visual fatigue in road lighting using fixed low-mounting-height luminaires [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 136: No. 105091.

[11] 崔洪军, 王玉帛, 朱敏清, 等. 隧道群明暗转换对暗反应时间的影响[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 200-208.
Cui Hong-jun, Wang Yu-bo, Zhu Min-qing, et al. Influence of tunnel group light-dark conversion on dark reaction time[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 200-208.

[12] 王首硕, 杜志刚, 冯守中, 等. 高速公路隧道入口区域视线诱导系统有效性研究[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 267-277.
Wang Shou-shuo, Du Zhi-gang, Feng Shou-zhong, et al. Research on effectiveness of visual guiding system in entrance zone of freeway tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 267-277.

[13] Prithila A, Behnam B, Zunayed M, et al. Multimodal brain-computer interface for in-vehicle driver cognitive load measurement: dataset and baselines[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(6): 5949-5964.

[14] Zheng H R, Du Z G, Jia C F, et al. Evaluating the effectiveness of rhythmic visual guidance technology for mitigating driving risks in highway tunnel groups: a simulation study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2025, 212: No. 107940.

[15] Liang B, Wong Y D, He S Y, et al. Dynamic traffic safety risk assessment in road tunnel entrance zone based on drivers′ psychophysiological perception states: methodology and case-study insights[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024,

147: No. 105677.

[16] 叶飞, 苏恩杰, 梁晓明, 等. 公路隧道景观设计现状和思考[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 23-37.
Ye Fei, Su En-jie, Liang Xiao-ming, et al. Review and thinking on landscape design of highway tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 23-37.

[17] Lyu N, Wang Y, Wu C, et al. Using naturalistic driving data to identify driving style based on longitudinal driving operation conditions[J]. Journal of Intelligent and Connected Vehicles, 2022, 5(1): 17-35.

[18] 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[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(10): 2807-2818.
Xu Jin, Chen Zheng-huan, Liao Qi-shuo, et al. Mental workload of drivers at high-density interchanges of freeways based on ECG data[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(10): 2807-2818.

[19] 方守恩, 邬洪波, 廖军洪, 等. 山区高速公路隧道群路段安全评价[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 693-699.
Fang Shou-en, Wu Hong-bo, Liao Jun-hong, et al. Safety evaluation of freeway tunnel groups in mountainous areas[J]. Journal of Tongji University(Natural science), 2013, 41(5): 693-699.

[20] 段萌萌, 唐伯明, 胡旭辉, 等. 高隧道比路段隧道出入口驾驶员视觉负荷研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 113-119.
Duan Meng-meng, Tang Bo-ming, Hu Xu-hui, et al. Driver's visual load at tunnel entrance and exit of sections with high ratio of tunnels[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 113-119.

[21] 蔡晓禹, 雷财林, 彭博, 等. 基于驾驶行为和信息熵的道路交通安全风险预估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(6): 190-201.
Cai Xiao-yu, Lei Cai-lin, Peng Bo, et al. Estimation of road traffic safety risk based on driving behavior and information entropy[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(6): 190-201.