

季冻区二级公路线形与驾驶员生理负荷相关性研究

陈春, 刘安, 张灏睿, 宋明珠, 王添翼
吉林建筑大学 交通科学与工程学院, 吉林 长春 130000
DOI: 10.61369/VDE.2025280033

摘要: 本研究依托吉林省国道303开展实车驾驶试验, 采集驾驶员在不同圆曲线半径与纵坡坡度条件下的心率、交感神经参数、皮电增量及肌电振幅等多维生理信号, 通过对比分析不同线形区段的生理负荷变化规律, 构建线形—生理响应模型并识别驾驶负荷敏感阈值。研究结果表明, 圆曲线半径越小驾驶员生理压力越大, 当半径小于200 m时负荷明显上升, 约110m为敏感阈值; 纵坡坡度对生理指标影响显著, 坡度由3%增至7%时生理负荷快速增加, 下坡方向在坡度大于7%时出现明显紧张峰值; 同时, 连续急弯及急弯—陡坡复合路段的线形组合效应最为突出, 生理负荷增幅最大, 属于潜在高风险路段。

关键词: 季冻区; 二级公路; 几何线形; 驾驶员生理负荷; 实车试验

Research on the Correlation Between Alignment of Secondary Highways in Seasonal Frozen Regions and Drivers' Physiological Load

Chen Chun, Liu An, Zhang Haorui, Song Mingzhu, Wang Tianyi

School of Transportation Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130000

Abstract: Based on the real-vehicle driving test carried out on National Highway 303 in Jilin Province, this study collects multi-dimensional physiological signals of drivers under different horizontal curve radii and longitudinal slope gradients, including heart rate, sympathetic nerve parameters, skin conductance increment, and electromyographic amplitude. By comparative analysis of the variation law of physiological load in different alignment sections, an alignment-physiological response model is constructed and the sensitive threshold of driving load is identified. The research results show that the smaller the horizontal curve radius, the greater the driver's physiological pressure; when the radius is less than 200 m, the load increases significantly, and about 110 m is the sensitive threshold. The longitudinal slope gradient has a significant impact on physiological indicators: when the slope increases from 3% to 7%, the physiological load rises rapidly; in the downhill direction, an obvious tension peak appears when the slope is greater than 7%. Meanwhile, the alignment combination effect of continuous sharp curves and sharp curve-steep slope composite sections is the most prominent, with the largest increase in physiological load, which are classified as potential high-risk sections.

Keywords: seasonal frozen regions; secondary highways; geometric alignment; drivers' physiological load; real-vehicle test

引言

道路交通安全研究长期关注道路几何特征、驾驶员行为反应及安全设施配置等要素的综合影响, 其中, 道路线形作为决定车辆行驶稳定性与驾驶负荷的关键参数, 一直是国内外学者的重要研究对象。国外研究起步较早, 通过大量实证与统计模型探讨线形与事故风险之间的关系。例如 Jørgensen^[1] 等学者指出交通警示标志、弯道可视性和驾驶员危险感知密切相关, 道路曲线半径、路肩条件等因素会显著影响驾驶人的行为表现。Zegeer^[2] 的研究进一步证实, 平曲线转角越小, 道路的事故率越低, 合理的线形优化能够将事故发生减少约 80%, 说明曲线要素与安全之间具有强关联性。此外, Dell'Acqua^[3] 等人从系统角度分析道路几何元素与交通要素的相互作用, 提出道路结构、驾驶行为与环境条件共同构成交通事故发生的重要机制。

国内研究近年来逐渐重视驾驶员生理指标与道路线形的耦合关系。多项研究指出, 道路线形不协调会增大驾驶任务需求, 提高驾驶员主观风险认知, 进而导致生理指标剧烈波动。例如, 王令飞^[4] 基于高原公路线形研究表明, 小半径弯道与陡坡组合显著增加驾驶负荷, 生

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目, 项目名称: 基于实车实验采集驾驶员生理数据的山区二级公路安全保障研究; 任务书编号: JJKH20250997KJ。

作者简介: 陈春(1984.4-), 高级工程师, 博士, 研究方向: 道路交通安全。

理指标可作为判断关键线形安全性的重要依据。汪旭^[5]在研究重庆山区公路纵坡影响时发现,下坡路段因制动频繁,驾驶员心率增长率显著高于其他路段。胡飞^[6]进一步提出,在高原低氧环境下驾驶员心理负荷更加显著,道路线形参数对驾驶状态的影响成倍增强。

此外,模拟驾驶技术在国内被广泛用于线形安全和驾驶行为特征分析。张卫华^[7]等利用模拟实验研究低能见度条件下危险驾驶行为的形成机理,强调外部环境变化对驾驶负荷的影响不可忽视。秦雅琴^[8]等通过模拟实验评估山区道路交通安全设施组合的效用,表明安全设施优化可有效降低驾驶员不安全行为发生概率。

一、研究方法

本研究选择吉林省季冻区典型山区二级公路 G303 (K4+933 ~ K26+524) 作为实车试验道路,该路段受地形和冻融作用影响显著,呈现出小半径急弯、较大纵坡和多处弯坡组合等复杂线形特征,其中 $R < 200$ m 的圆曲线比例较高,最大纵坡超过 8%,部分视距受山体遮挡限制,为分析季冻区线形与驾驶生理负荷的耦合机制提供了典型路线样本。

受试者均为驾龄不少于 3 年且身体健康的驾驶员;试验车辆为统一型号的小型轿车。

采用 BIOPAC 多通道系统对驾驶员的心率 (HR)、皮电 (SC) 和肌电 (EMG) 进行实时监测,其中 HR 和 SC 反映驾驶员的心理负荷变化,EMG 表征操作紧张程度;所有信号均在行驶过程中动态记录,并同步采集车速、加速度与路线位置,用于后续特征匹配与模型构建。

基于不同线形变量与生理指标的对应数据,分别构建圆曲线半径—生理负荷二次拟合模型、纵坡坡度—生理负荷模型以及反映多因素叠加效应的线形组合模型,通过分析模型参数与变化趋势识别生理反应的敏感阈值,用于揭示不同线形影响驾驶员负荷的机理并为季冻区道路安全评价提供量化依据。

二、结果与分析

基于实车试验获取的多维生理信号数据,对驾驶员在不同线形条件下的心率 (HR)、皮电 (SC) 与肌电 (EMG) 变化进行分析。本章从圆曲线半径、纵坡坡度以及线形组合三个方面探讨季冻区复杂线形对驾驶员生理负荷的影响规律,识别关键敏感阈值,并揭示高风险路段的生理机制。

(一) 圆曲线半径对驾驶员生理负荷的影响

1. 心率变化规律分析

从整体趋势来看,心率增长率 (HRG) 与圆曲线半径之间呈典型的负相关关系。随着曲率增大 (半径减小),驾驶员的生理紧张程度明显升高,如图 3-1 所示。

将圆曲线半径划分为三个区间进行统计:

$R > 200$ m (安全区), HRG 通常维持在 5% - 7% 的平稳区间;驾驶员仅需轻微转向调整,心理负荷较低。

$120 \text{ m} < R \leq 200$ m (中等负荷区), HRG 平均提升至 9% - 12%;心率波动性增强,驾驶员警觉性上升;多数驾驶员增加方向盘转向频率用于修正行车轨迹。

$R \leq 120$ m (高负荷区), HRG 急剧升高至 14% - 18%,明

显高于其他区段;心率偶尔出现尖峰,表明驾驶员进入高警觉状态;R 在 110 m 左右时 HRG 增长曲线发生显著拐点。

通过回归分析得到典型拟合关系:

$$HRG = 0.000004R^2 - 0.0015R + 0.167 \quad (3-1)$$

模型的决定系数 (R^2) 达到 0.89,表明该拟合关系具有较强解释能力。

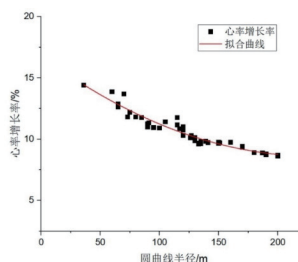


图 3-1 HRG 与圆曲线半径的关系

2. 皮电反应变化规律分析

皮电增长率 (SCG) 可直接反映驾驶员瞬时紧张程度。当车辆进入急弯或视距不足的弯道前,皮电信号常出现幅度显著增加。

分析结果显示:

$R > 200$ m 时, SCG 平稳,无明显波动;

120 - 200 m 区间, SCG 明显上升,表明驾驶员开始警觉;

$R \leq 120$ m 时, SCG 达到 1.8 - 2.2 倍的基线水平,是最显著的风险表现;

在部分 $R < 100$ m 的弯道, SCG 出现突发性尖峰,对应潜在危险。

典型拟合模型如下:

$$SCG = -0.000006R^2 + 0.0021R + 0.32 \quad (3-2)$$

模型趋势呈倒“U”型,意味着随着半径减小,驾驶员的情绪波动和认知压力呈加速式上升,如图 3-2 所示。

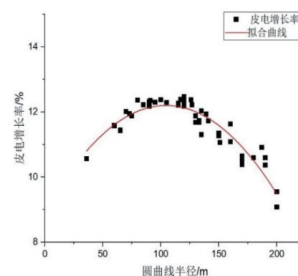


图 3-2 SCG 与圆曲线半径的关系

3. 肌电反应特征分析

肌电信号 (AEMG) 能反映驾驶员在转向操作过程中的肌肉

紧张程度如图3-3所示。分析结果发现：

当 $R > 150\text{ m}$ 时，驾驶员的 AEMG 变化幅度不大；

当 $R < 150\text{ m}$ 时，AEMG 显著上升；

当 $R \leq 110\text{ m}$ 时，AEMG 峰值频繁出现，驾驶员出现“用力握紧方向盘”的现象。说明急弯不仅带来心理负荷，也带来明显的操作负荷增幅。

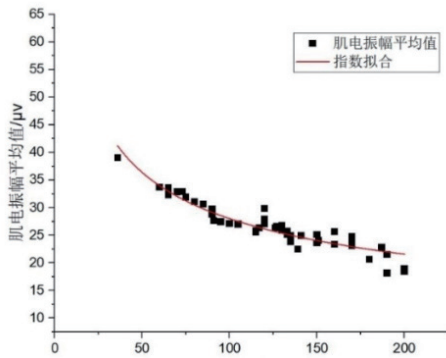


图3-3 AEMG与圆曲线半径的关系

综合三类生理指标可发现：

$R=200\text{m}$ 为生理负荷明显增加的初始阈值；

$R=120 - 130\text{m}$ 为中等风险区；

$R=110\text{m}$ 为敏感拐点，进入急弯高风险状态。

该敏感阈值与事故统计中“ $R < 120\text{m}$ 事故频发”的结论相互印证，说明生理信号可用于提前识别危险线形。

(二) 纵坡坡度对驾驶员生理负荷的影响

本研究将纵坡按坡度大小划分为： $i \leq 3\%$ （低坡度）， $3\% < i \leq 7\%$ （中坡度）和 $i > 7\%$ （大坡度）

1. 心率增长率随坡度变化规律

从心率增长率（HRG）的变化趋势来看：

$i \leq 3\%$ ：HRG 保持在 5% - 6%，驾驶员处于正常负荷；

$3\% < i \leq 7\%$ ：HRG 上升至 8% - 11%，驾驶员明显变得谨慎；

$i > 7\%$ ：HRG 达到 14% - 17%，接近急弯的生理压力水平。

说明中大坡度对驾驶员心理状态影响显著，如图3-4所示。

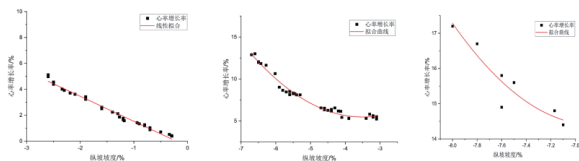


图3-4 HRG与坡度之间的关系

2. 皮电反应随坡度变化规律

皮电信号对下坡路段尤为敏感，SCG 在下坡段显著高于上坡段，表明驾驶员对潜在危险的警觉性更强。

上坡：SCG 值相对平稳；

下坡：SCG 经常成倍增加；

大坡度下坡：SCG 峰值频繁出现，反映驾驶员处于高紧张状态。

典型拟合关系为：

$$SCG = 0.08i^2 + 0.21i + 4.3 \quad (3-3)$$

说明坡度作用具有显著的“放大效应”，如图3-5所示。

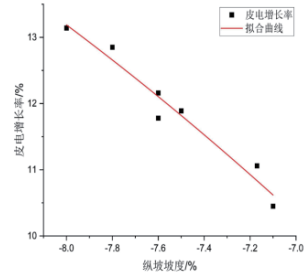


图3-5 SCG与坡度之间的关系

3. 肌电反应随坡度变化规律

肌电信号在大坡度下坡段变化最为剧烈。部分长度超过400m的连续下坡段，驾驶员握力显著增加，AEMG 振幅近乎为直线路段的1.5 - 2倍如图3-6所示。

其原因包括：

驾驶员需持续转向修正车道位置；

制动操作频率增加导致手部肌肉紧张；

路面附着系数受冻融与冰雪影响波动，强化紧张感。

综合结果表明：

坡度3%为负荷上升起点；

坡度7%为生理负荷显著增强的敏感阈值；

大坡度下坡段 风险显著高于上坡，属于重点关注区段。

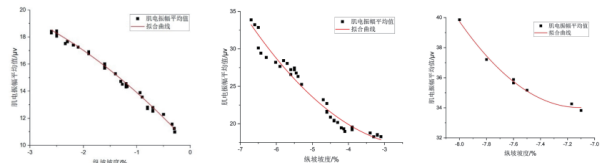


图3-6 AEMG与坡度之间的关系

(三) 线形组合对生理负荷的叠加效应

道路的真实环境通常不只有单一线形，而是曲线、坡度和视距条件的综合叠加。因此，分析线形组合对驾驶员生理负荷的影响具有重要意义。

1. 急弯—陡坡组合段（典型高风险线形）

当半径 $R \leq 120\text{m}$ 且坡度 $i \geq 6\%$ 同时出现时：

HRG 显著高于单一急弯或陡坡；

SCG 出现多次尖峰，表明驾驶员瞬时紧张程度极高；

AEMG 增幅最明显，驾驶员需不断修正转向。

该组合段是所有线形中生理负荷最高的类型，是重要的危险路段特征。

2. 连续急弯对生理负荷的累积效应

若相邻两个圆曲线均为小半径（如， $R_1 < 150\text{m}$ ， $R_2 < 100\text{m}$ ）：

HRG 呈阶梯式上升；

驾驶员连续处于高注意状态；

SCG 信号的峰值密集出现，显示恐惧与紧张情绪叠加。

说明即使单个急弯不是事故高发点，但连续急弯会导致认知资源消耗严重，使驾驶风险指数化增加。

3. 弯道入口视距不足的风险效应

在季冻区山体遮挡或植被密集区域，视距常因环境因素受

限。研究发现:

在视距小于60m的急弯入口, SCG 峰值出现次数明显增多;

驾驶员对道路走向预测能力降低, 心率上升明显;

夜间或冰雪路面观测时, 这一风险效应进一步放大。

4. 生理负荷的叠加模型分析

综合三种线形因素, 可建立复合风险模型:

$$Load=k_1HRG+k_2SCG+k_3AEMG \quad (3-4)$$

其中:

k_1 ——心理压力权重;

k_2 ——风险刺激敏感度;

k_3 ——操作负荷贡献。

结果表明: 弯——坡——视距不足组合的复合 *Load* 值最高, 远高于任意单因素线形。

三、结论

本研究基于季冻区典型山区二级公路开展实车试验, 系统分析了不同线形条件下驾驶员生理负荷的变化规律。通过对心率、皮电和肌电等多维生理信号的综合处理, 可以较为全面地揭示驾驶员在真实道路环境中应对复杂线形时的心理压力与操作负荷变

化。研究证明, 季冻区道路特殊的气候与路面状况对驾驶员的生理反应具有显著放大效应, 尤其在小半径急弯、陡坡下坡以及弯道组合段, 驾驶员的紧张水平与操作强度远高于常规道路条件。

生理信号的变化趋势显示, 当曲线半径减小至120m以下时, 驾驶员的心理压力和操作负荷出现明显增加, 尤其是在半径约110m的附近区域, 心率增长率与皮电峰值呈现敏感上升, 显示驾驶员在该区段进入高度紧张的心理状态。与此同时, 纵坡对驾驶员生理负荷的影响同样显著, 坡度超过3%即可引起负荷上升, 而坡度超过7%时, 无论心率还是皮电信号均表现出加速增长的趋势, 特别是在下坡路段, 由于驾驶员需持续控制车速, 导致其生理负荷水平明显高于上坡路段。

线形组合的叠加效应更是揭示了复杂道路环境下驾驶员生理压力的集中体现。急弯与陡坡同时存在时, 驾驶员不仅要保持对车辆横向和纵向动力状态的精准控制, 还需面对视距不足、附着系数不确定等外部影响因素, 使其在短时间内产生多维度的压力累积。生理信号峰值的密集出现说明驾驶员在组合线形段处于持续的高度警觉状态, 这种负荷状态若长时间维持, 容易导致注意力下降, 加剧潜在风险。这也解释了为何实际事故统计中, 弯道叠加纵坡的结构往往是典型高风险区段。

参考文献

- [1] Jørgensen F, Wentzel-Larsen T. Optimal use of warning signs in traffic[J/OL]. *Accident Analysis & Prevention*, 1999, 31(6): 729-738. DOI:10.1016/S0001-4575(99)00036-6.
- [2] 高硕岭, 周建, 徐岩, 等. 季冻区绿色公路建设技术管理创新与实践[J]. *公路工程*, 2019, 044(004):130-134,201.
- [3] Dell'Acqua G, Luca M D, Prato C G, et al. The impact of vehicle movement on exploitation parameters of roads and runways: A short review of the special issue[J/OL]. *TRANSPORT*, 2016, 31(2): 127-132. DOI:10.3846/16484142.2016.1201912.
- [4] 崔国军, 李伟, 魏凡钦, 等. 季冻区运营公路隧道冻害分析及对策研究[J]. *公路*, 2021.
- [5] 肖伟. #i{ 季节冻土区高速铁路路基温度场及保温措施研究 }. Diss. 北京交通大学, 2014.
- [6] 吕华强. 季冻区高速公路路基施工技术及其质量控制的研究[J]. *北方交通*, (2017). (12), 3.
- [7] 张卫华, 胡喆, 冯忠祥, 等. 低能见度环境中驾驶人危险驾驶行为影响因素分析[J/OL]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(1): 13-18.
- [8] 秦雅琴, 李国鑫, 赵仕林, 等. 基于驾驶模拟试验的山区公路交通安全设施组合效用研究[J/OL]. *安全与环境学报*, 2023, 23(10): 3398-3408.