

基于 Lorenz 散点图的低等级道路驾驶安全评价

柳本民, 史冰玉, 廖岩枫

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 通过驾驶模拟实验采集 22 名驾驶人低等级道路行驶数据, 借助 Lorenz 散点图提出驾驶波动指标, 得到切向加速度、横向加速度和方向盘转动角速度的失稳波动阈值, 分别为 0.993、1.322 和 0.669。最后, 利用模糊逻辑理论综合 3 项指标, 完成对安全状态的分级。结果表明: 切向和横向加速度的波动受天气场景和弯道半径的交互作用, 在结冰路段的 15 m 弯道上最易发生危险失稳; 方向盘转动角速度的失稳只受弯道半径影响, 随着弯道半径增大逐渐加强。

关键词: 交通安全; 驾驶波动; 驾驶安全评价; Lorenz 散点图; 模糊逻辑

中图分类号: U491

文献标志码: A

Assessment of Driving Safety on Low-grade Roads Based on Lorenz Scatter Plot

LIU Benmin, SHI Bingyu, LIAO Yanfeng

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The low-grade road driving data of 22 drivers were collected through driving simulation experiment, and the driving fluctuation index was proposed based on Lorenz scatter plot. Then, the instability fluctuation thresholds of tangential acceleration, lateral acceleration and steering wheel speed were obtained (0.993, 1.322 and 0.669 respectively). Finally, the fuzzy logic theory was used to synthesize the three indicators to complete the classification of the safety state. It is found that the fluctuation of tangential and lateral acceleration is affected by the interaction of weather scene and curve radius, and the dangerous instability is most likely to occur on the 15 m curve in the icing section. However, the instability of steering wheel speed is only affected by the curve radius, and increases with the increase of curve

radius.

Key words: traffic safety; driving fluctuation; driving safety assessment; Lorenz scatter plot; fuzzy logic

低等级公路里程达到公路总里程的 86.5%^[1]。低等级公路多分布于山地等自然条件较差的区域, 具有地形复杂、连续弯道多、雨雪天气多发等特点, 容易导致汽车失控, 进而引发大量事故^[2]。研究表明, 弯道路段发生事故的的概率是平直路段的 3~4 倍^[3], 美国国家公路交通安全管理局的数据也发现, 恶劣天气引起的死亡事故中, 22% 的事故与冰雪天气有关^[4]。连续弯道和雨雪类天气使得养护管理水平本就较低的低等级公路面临更加严峻的道路安全形势, 因此深入分析其对低等级公路驾驶安全水平的共同影响具有较大的现实意义。

交通事故发生时通常伴随一系列不正常的行为变化, 如突然转向、加减速异常、偏离车道线过多等, 行为变化特征间接反映出整个驾驶过程的连续性与安全性。将驾驶操纵参数、车辆运动参数等在“人-车-路-环境”多因素耦合作用下发生的变化定义为驾驶波动, 进一步划分为稳定波动和失稳波动 2 类。驾驶状态参数沿着驾驶人安全期望缓慢有序变化称为稳定波动, 属于驾驶人的主动稳定修正, 此情况一般发生在驾驶人意识到道路环境变化时, 具有充足时间修正车辆运动以适应变化, 此时驾驶状态掌握在驾驶人手中, 安全性较高。失稳波动则是指由于注意力不集中、线性缺陷等原因, 当驾驶人感知到道路环境变化时, 修正车辆运动的时间不足甚至没有, 驾驶状态突然发生剧烈变化; 或者由于道路因素, 车辆运行出现了不可控的振动, 这一无序振动不会沿着特定规律进行, 此时驾驶人失去了对驾驶状态的

收稿日期: 2022-02-22

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0803902)

第一作者: 柳本民(1968—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为道路安全与环境。

E-mail: liubenming@tongji.edu.cn

通信作者: 史冰玉(2000—), 女, 硕士生, 主要研究方向为道路安全与驾驶行为。E-mail: 2133377@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

控制,驾驶安全性较低。

目前在驾驶波动量化研究中使用较多的是以相关参数的统计学指标为评价标准,如采用不同道路环境下速度的峰值、均值、方差、标准差、偏度与 V_{85} 等统计值来表征速度、轨迹的波动情况^[5-8]。还有部分学者建立行为参数与特定模型的关系,通过计算分布参数进行波动程度评价。陈雨等^[9]采用混合高斯模型对低等级公路速度分布特征进行描述,通过比较分布的权重与均值来分析不同路段环境的速度离散性。观察驾驶参数变化曲线特征以确定波动情况也是波动研究中常用的方法,李晨^[10]对正常型、漂移型、矫正型和切弯型4种不同轨迹波动曲线类型的特征进行了详细描述。Liu等^[11]也通过对速度曲线特征的观察,研究了低等级公路警示桩的设置对速度的影响。

综上所述,目前针对驾驶参数时间连续性及其变化情况的评价方法比较简单,大多依靠曲线特征或常用统计值进行粗略比较。同时,传统波动分析方法并未区分驾驶变化是稳定波动或是失稳波动。因此,量化评估驾驶过程中的失稳波动,判断驾驶状态是否掌握在驾驶人手中,从而达到对驾驶安全的评价更加全面的目的。

1 驾驶模拟实验

1.1 实验设备

目前驾驶行为数据采集主要依靠实车实验和驾驶模拟实验进行。实车实验可操作性强,采集的数据具有更强的说服力,但由于实验环境和外界变量难以控制,安全性较低,观测也会受到一定的约束。驾驶模拟实验实现了在人机交互的虚拟驾驶环境里对真实驾驶行为的模拟,适用于实车实验具有一定

危险性或数据难以观测等场景。由于不良天气下低等级道路的弯道行车风险偏高,因此本研究依托同济大学高逼真驾驶模拟器通过驾驶模拟实验进行数据采集。

1.2 实验场景设计

本实验利用SCANNER1.6仿真软件设计道路场景。实验道路为双向二车道,设计车速为20~60 km·h⁻¹,全长约7 km,按降雨、降雪、结冰和晴天4种天气场景依次分为4个子路段,每个子路段线形相同。以《公路路线设计规范》为参考,子路段半径取值与各级设计车速下的极限最小半径一致,如表1所示,并增设半径 $R=270$ m,基本符合取值等比增长的规律。缓和曲线对称设置于圆曲线两侧,长度 L_s 设置遵循规范建议的合理线型组合,并且保证车辆在直线与两侧缓和曲线上的行驶时间之和超过10 s。此外,由于研究聚焦于车辆过弯时的运行波动情况,因此为了减少纵坡对实验的影响,竖曲线纵坡均设置为零。为了减少不同路段的排列顺序对驾驶行为产生的影响,将子路段交替首尾相接,尽量避免行驶后期驾驶员因熟悉弯道设置规律而影响实验结果。实验道路平面线形如图1所示。在此基础上构建道路晴雨天及冰雪环境,4个子路段路面附着系数分别取0.5、0.3、0.2和0.8,同时设置不同的气象参数对不同天气场景进行进一步的渲染,仿真结果如图2所示。

表1 圆曲线半径

Tab.1 Radius of circular curve

设计速度/(km·h ⁻¹)	圆曲线极限最小半径/m
60	135
40	60
30	35
20	15

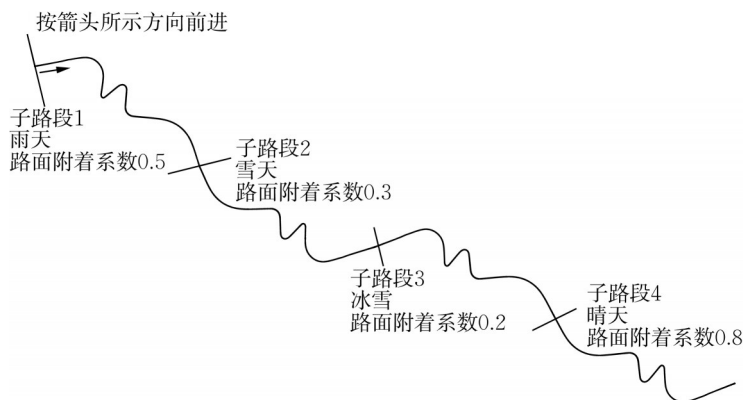


图1 实验道路平面线形

Fig.1 Plane alignment of experimental road

1.3 实验过程

根据研究需求,优先考虑具有低等级公路驾驶经验者,招选了25名持有驾照且身体健康的驾驶员参与模拟实验,年龄为23~47岁,驾龄为1~12年,平均年龄为26.3岁,平均驾龄为4.97年。

考虑到大部分驾驶人可能无使用驾驶模拟器经验,因此在正式实验前先在试驾场景中进行试驾,使驾驶人熟悉模拟器操作,同时将无法适应驾驶模拟器的驾驶员移出实验对象。通过试驾的驾驶人进行正式实验,告知其大致驾驶环境并且尽量把安全性放在首位,之后在设计场景中开始驾驶实验,驾驶人

一次性通过4个子路段,全程记录驾驶数据。

1.4 数据采集

实验共采集25名专业司机的驾驶数据,按数据类型分为驾驶人操作数据、车辆运动学参数、车辆力学反馈和环境参数4类。据以往研究^[12],切向加速度、横向加速度和方向盘转动角速度3个指标可以较全面地反映驾驶人过弯时的操作特征以及风险程度,故在后续数据分析中以上述3个指标为基础。由于实验中有3人因不适应模拟驾驶环境而多次发生严重的驶出车道事故,将作为无效数据剔除。处理后得到440(22人×4种天气×5类弯道)组数据。



图2 驾驶模拟实验的仿真场景

Fig.2 Simulation scenarios of driving simulation experiment

2 基于Lorenz散点图的驾驶波动分析

2.1 Lorenz散点图简介

Lorenz散点图由Poincare首先建立,亦称Poincare截面图,是一种具有非线性混沌特性的“多维空间结构”截面图,主要用于观察非线性系统的演化规律^[13]。近年来,Lorenz散点图常搭载动态心电图分析软件,根据散点图特征推断心率差异^[14]。常见的心电散点图分为单象限散点、差散点以及四象限散点3种模式,三者的散点坐标均由相邻心电信号共同提供,直观反映了心电信号的时间连续性以及变化波动性。

2.2 驾驶失稳波动

参考医学心率变异分析中差值散点图的原理及

其“迭代计算”的性质,定义车辆运动状态点在Lorenz散点图中散点的坐标为

$$\begin{cases} x_n = f(n) - f(n-1) \\ y_n = f(n+1) - f(n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为驾驶状态参数; n 为运行时间断面。

基于式(1),以散点 (x_n, y_n) 作图,可以得到如图3所示的Lorenz散点图。以 $y=x$ 与 $y=-x$ 作2条相互垂直的直线,分别记为“ x ”和“ y ”。若散点落在 x' 轴附近,说明驾驶状态参数在2个相邻时间段内变化趋势及速率相同,此驾驶状态参数在恒定地增大或者减小,即驾驶人通过驾驶操纵在有意地维持

当前的运动变化,此时驾驶状态掌握在驾驶人手中并按照其安全期望进行稳定波动。相反,散点落在 y' 轴附近则说明驾驶状态参数在2个相邻时间段内的变化速度及趋势不尽相同,数值产生增减甚至方向发生逆转,这一变化多为失稳波动,即可认为此时驾驶人失去了对驾驶状态的控制,车辆运动不稳定,安全性偏低。

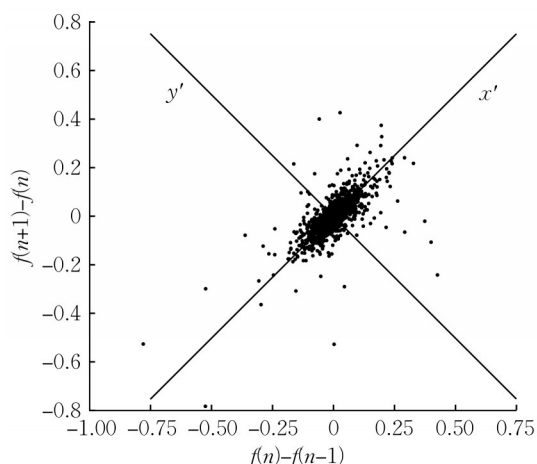


图3 Lorenz 散点分析图

Fig.3 Diagram of Lorenz scatter analysis

综上所述,Lorenz 散点分布图可以表征驾驶参数变化是否稳定有序,判断驾驶状态是否掌握在驾驶人手中,从而对传统波动分析进行有效补充。

2.3 Lorenz 散点图量化方法

在现有研究中,有关Lorenz 散点图的量化评估较少,医学中一般采用向量长度指数和矢量角度指数进行评估,后续也提出了长短轴、夹角、面积等新的量化指标。为了克服传统Lorenz 散点图量化过于简单、抗噪性能偏弱的缺点,2012年有学者提出了采用“等效半径”评价散点图离散程度的方法,用以评估整个散点图的离散程度^[15]。在2.2节中提到,车辆运行状态的Lorenz 散点图分析重点在于散点对 x' 轴与 y' 轴的聚拢程度。因此,结合“等效半径”和杨猛^[16]在操纵稳定性中的研究方法,得到以下Lorenz 散点图量化方法。

按下式将 x - y 坐标系下的散点坐标换算为 x' - y' 坐标系下的散点坐标:

$$\begin{cases} x_2 = y_1 \sin 45^\circ + x_1 \cos 45^\circ \\ y_2 = y_1 \cos 45^\circ - x_1 \sin 45^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: (x_1, y_1) 为 x - y 坐标系下坐标; (x_2, y_2) 为 x' - y' 坐标系下坐标。按下式计算散点几何中心;

$$\begin{cases} x_c = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m x_2(n) \\ y_c = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m y_2(n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: (x_c, y_c) 为 x' - y' 坐标系下散点的几何中心; m 为散点图中散点个数。按下式计算散点在 y' 轴方向的聚拢程度:

$$D_{SD1} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m (x_2(n) - x_c)^2} \quad (4)$$

D_{SD1} 越小,说明散点越集中分布在 y' 轴方向,沿 y' 轴方向的聚拢程度越高。按下式计算散点在 x' 轴方向的聚拢程度:

$$D_{SD2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m (y_2(n) - y_c)^2} \quad (5)$$

D_{SD2} 越小,说明散点越集中分布在 x' 轴方向,沿 x' 轴方向的聚拢程度越高。按下式计算散点对 x' 轴与 y' 轴的相对聚拢程度:

$$D_{\text{Ind}} = \frac{D_{SD1}}{D_{SD2}} \quad (6)$$

D_{Ind} 越大,说明 D_{SD1} 越大, D_{SD2} 越小,即散点沿 y' 轴的聚拢程度越低、沿 x' 轴的聚拢程度越高。

以 x' - y' 坐标系下散点的几何中心 (x_c, y_c) 为椭圆中心,以 D_{SD1} 为 x' 轴方向半轴,以 D_{SD2} 为 y' 轴方向半轴,在 x' - y' 坐标系下做出散点图以及椭圆,如图4所示。由图4可知, D_{Ind} 越大则椭圆越扁平,散点沿 x' 轴方向集中分布,结合2.2节可知,此时波动是稳定修正,驾驶状态掌握在驾驶人手中,整个行驶过程相对安全。反之,该波动为失稳波动,行驶安全性下降。

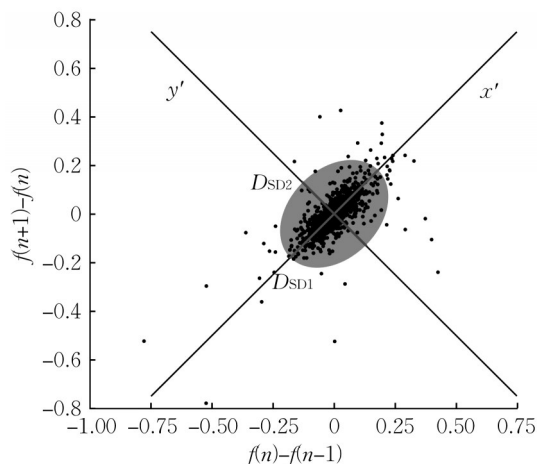


图4 Lorenz 散点椭圆分析示意图

Fig.4 Ellipse diagram of Lorenz scatter analysis

2.4 基于 Lorenz 散点图的失稳波动特征

根据采集到的 22 位驾驶人驾驶数据,选择每一弯道直缓点与缓直点之间的行为数据作为有效数据,分别计算 20 个道路场景下每位驾驶人的切向加速度、横向加速度和方向盘转动角速度在 Lorenz 散点图中的聚拢特征 $D_{\text{Ind}1}$ 、 $D_{\text{Ind}2}$ 、 $D_{\text{Ind}3\circ}$

2.4.1 波动阈值计算

本小节参照运行速度 V_{85} 的概念,提出低等级公路 $D_{\text{Ind}15\%}$ 、 $D_{\text{Ind}50\%}$ 与 $D_{\text{Ind}85\%}$,即排在 D_{Ind} 分布曲线第 15、50 和 85 分位的 D_{Ind} 值,并将 $D_{\text{Ind}15\%}$ 作为该参数的波动阈值。当实测 $D_{\text{Ind}} < D_{\text{Ind}15\%}$ 时,说明该驾驶人的驾驶失稳强于大多数人,此时认为驾驶人失去了对驾驶状态的控制,安全性偏低。根据实验数据得到分位数计算结果,如表 2 所示。

表 2 D_{Ind} 分布参数计算结果
Tab.2 Calculation results of D_{Ind} distribution parameters

D_{Ind}	$D_{\text{Ind}15\%}$	$D_{\text{Ind}50\%}$	$D_{\text{Ind}85\%}$
$D_{\text{Ind}1}$	0.993	1.262	1.885
$D_{\text{Ind}2}$	1.322	2.459	3.527
$D_{\text{Ind}3}$	0.669	0.862	1.187

根据表 2 中的计算结果,可对驾驶人驾驶过程中的失稳波动及安全性进行定量评估。当参数波动实际值 $D_{\text{Ind}}^* < D_{\text{Ind}15\%}$ 时,说明该驾驶人的失稳波动强于绝大多数人,定义为危险驾驶。具体来看,切向加速度主要反映驾驶人对速度的控制情况,当 D_{Ind}^* 小于阈值时,说明驾驶过程存在急刹现象,道路的速度连续性差,纵向风险大,此时可以通过合理规划限速,在交叉口、路障前方设置提示标志等措施辅助驾

驶人进行速度控制。横向加速度和方向盘转动角速度反映了驾驶人对横向位置的控制情况,当 D_{Ind}^* 小于表 2 中阈值时,可能存在路面湿滑或者较多急转弯等,可以通过道路养护、设置线形诱导标识等强化驾驶人对横向位置的控制。

2.4.2 双因素方差分析

在以上基础上,对数据的正态性与方差齐性进行检验,以便后续利用双因素方差分析进一步研究低等级道路弯道半径及不良天气类型对驾驶人驾驶失稳波动的作用。考虑到实际数据的不完美性,将放宽检验要求。由于方差分析对正态性并不是非常敏感,而且样本量较大(440 个样本点),因此以直方图基本符合正态分布特征即可,不再进行量化检验;关于方差齐性,如果各组的个例数相同,单因素方差分析模型对方差不齐就有一定的耐受性,只要最大方差与最小方差之比小于 3,分析结果就都是稳定的^[17]。完成前提假设检验后,得到切向加速度、横向加速度和方向盘转动角速度的双因素方差分析结果。

(1) 切向加速度

表 3 展示了弯道半径和天气场景对切向加速度的失稳波动指标 $D_{\text{Ind}1}$ 的双重作用结果, $p < 0.05$ 则说明该因素有显著影响。从表 3 可以看出,弯道半径和天气场景对 $D_{\text{Ind}1}$ 的交互作用显著($p < 0.05$),但单独作用都不显著($p > 0.05$),即此时单独研究弯道半径或天气场景对驾驶人驾驶过程中失稳波动的作用没有意义,必须在一个因素的不同水平研究另一因素的作用大小。图 5 反映了剔除天气影响时不同半径下 $D_{\text{Ind}1}$ 估算边际均值变化。

表 3 $D_{\text{Ind}1}$ 双因素方差分析
Tab.3 Two-factor analysis of variance for $D_{\text{Ind}1}$

源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 统计量	p
弯道半径	0.846	4	0.212	0.747	0.560
天气场景	1.117	3	0.372	1.316	0.269
弯道半径×天气场景	6.357	12	0.530	1.871	0.036
误差	118.897	420	0.283		
修正后总计	127.219	439			

图 5 中 5 条折线之间交叉明显,单独看天气场景或弯道半径并无明显特征,即 $D_{\text{Ind}1}$ 主要受交互影响,与方差分析结果一致。 $D_{\text{Ind}1}$ 是切向加速度失稳波动情况的反映,其值越小代表失稳波动越剧烈。结合表 2 的 $D_{\text{Ind}1}$ 分布特征可以发现,结冰路段弯道半径 $R=15\text{ m}$ 和 135 m 的弯道上最易发生切向加速度危险波动,说明此时道路的速度连续性差,驾驶人在驾驶时存在多次急刹,此类道路场景需要合理设置减

速带、提示标识等,辅助驾驶人进行速度控制。

(2) 横向加速度

表 4 展示了弯道半径和天气场景对横向加速度的失稳波动指标 $D_{\text{Ind}2}$ 的双重作用结果。从表 4 可以看出,弯道半径和天气场景对 $D_{\text{Ind}2}$ 的交互作用极显著($p < 0.001$),并且单独作用时也都极显著($p < 0.001$)。图 6 反映了剔除天气影响时不同半径下 $D_{\text{Ind}2}$ 估算边际均值变化。

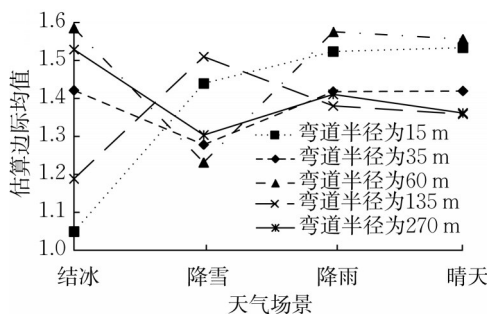
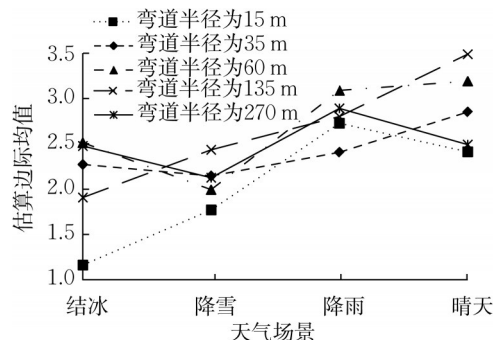
图5 D_{Ind1} 估算边际均值Fig.5 Estimated marginal mean of D_{Ind1}

图6中5条折线之间存在明显交叉,且整体呈现向上趋势,说明天气场景对 D_{Ind2} 主效应显著,同时还会与弯道半径产生交互影响。 D_{Ind2} 是驾驶人横向加速度失稳波动情况的反映,其值越小代表失稳波动越剧烈。结合表2的 D_{Ind2} 分布特征可以发现,降雨和晴天场景下的横向加速度波动基本平稳,而结冰和降雪场景下普遍不平稳。弯道半径 $R=15\text{ m}$ 和 35 m 时,横向加速度的失稳波动强于其他半径,尤其当弯道半径为 15 m 时结冰路段极易发生危险波动。当道路附着系数偏低时,急弯的存在很容易使车辆横向失稳而发生滑移或倾覆,因此出现道路结冰或积雪时,小半径弯道需要及时清理,撒黑煤渣或设置

减速带等,帮助驾驶人实现横向运动稳定。

图6 D_{Ind2} 估算边际均值Fig.6 Estimated marginal mean of D_{Ind2}

(3) 方向盘转动角速度

表5展示了弯道半径和天气场景对方向盘转动角速度的失稳波动指标 D_{Ind3} 的双重作用结果。从表5可以看出,弯道半径和天气场景对 D_{Ind3} 的交互作用不显著($p>0.05$),且天气场景的单独作用不显著($p>0.05$),但弯道半径的单独作用极显著($p<0.001$),即此时可基本看作天气场景对驾驶过程中方向盘转动角速度的失稳波动无影响, D_{Ind3} 只受弯道半径影响。图7反映了剔除天气影响时不同半径下 D_{Ind3} 估算边际均值变化。

表4 D_{Ind2} 双因素方差分析Tab.4 Two-factor analysis of variance for D_{Ind2}

源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F统计量	p
弯道半径	25.948	4	6.487	8.562	<0.001
天气场景	63.421	3	21.140	27.903	<0.001
弯道半径×天气场景	30.866	12	2.572	3.395	<0.001
误差	318.209	420	0.758		
修正后总计	438.444	439			

表5 D_{Ind3} 双因素方差分析Tab.5 Two-factor analysis of variance for D_{Ind3}

源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F统计量	p
弯道半径	11.062	4	2.765	69.612	<0.001
天气场景	0.096	3	0.032	0.805	0.492
弯道半径×天气场景	0.652	12	0.054	1.368	0.178
误差	16.685	420	0.040		
修正后总计	28.495	439			

从图7可以发现,5条折线之间基本无交叉, D_{Ind3} 在不同天气场景下估算边际均值无明显差别,但会随着弯道半径的增加逐渐下降,说明此时 D_{Ind3} 只受弯道半径影响,与方差分析结果一致。 D_{Ind3} 是驾驶人方向盘转动角速度失稳波动情况的反映,其值越小代表失稳波动越剧烈。图7中 D_{Ind3} 估算边际均值的变化特征说明随着弯道半径的增大,方向盘操作

的失稳波动逐渐加强。小半径弯道一定程度上会使驾驶人在过弯时更加小心,方向控制更加谨慎平稳;随着弯道半径逐渐增大,驾驶人会逐渐变得放松而减少对弯道的观察,进而导致猛打方向盘等情况增加。因此,对于中大半径弯道,要合理设置一些轮廓标识等以强化驾驶人对方向的感知,辅助对方向的控制。

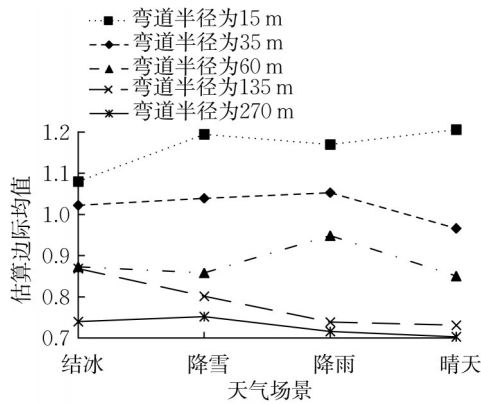


图7 $D_{\text{Ind}3}$ 估算边际均值

Fig.7 Estimated marginal mean of $D_{\text{Ind}3}$

3 驾驶安全综合评价模型

3.1 基于模糊逻辑理论的综合评价模型

在进行车辆运行安全综合评价时,将运行安全水平确定为好、中、差3个等级,相应地确定3个模糊集,即好(μ_g)、中(μ_m)和差(μ_b)。

模糊集是由隶属度函数刻画的,故各个模糊集的隶属度函数选择十分重要^[17]。2.4.1节中计算了评价指标 $D_{\text{Ind}1}$ 、 $D_{\text{Ind}2}$ 和 $D_{\text{Ind}3}$ 的特征值 $D_{\text{Ind}15\%}$ 、 $D_{\text{Ind}50\%}$ 与 $D_{\text{Ind}85\%}$,因此采用三角形和梯形隶属度函数,以3个特征值作为节点值。以 $D_{\text{Ind}3}$ 为例,其隶属度函数 μ_3 如图8所示。

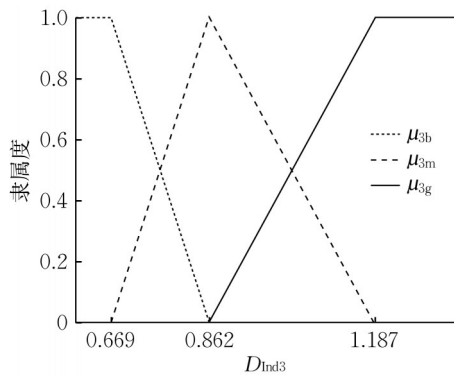


图8 基于 $D_{\text{Ind}3}$ 的评价模型隶属函数

Fig.8 Membership function of evaluation model based on $D_{\text{Ind}3}$

μ_1 、 μ_2 和 μ_3 分别代表来自切向加速度、横向加速度以及方向盘转动角速度的波动风险,即可分为纵向风险、横向风险以及驾驶人操纵风险,为了平等考虑3项风险,取 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3$ 为权重计算综合风险隶属度,如下所示:

$$\begin{cases} \mu_g = \frac{1}{3}\mu_{1g} + \frac{1}{3}\mu_{2g} + \frac{1}{3}\mu_{3g} \\ \mu_m = \frac{1}{3}\mu_{1m} + \frac{1}{3}\mu_{2m} + \frac{1}{3}\mu_{3m} \\ \mu_b = \frac{1}{3}\mu_{1b} + \frac{1}{3}\mu_{2b} + \frac{1}{3}\mu_{3b} \end{cases} \quad (7)$$

基于上述模糊评价结果,可以将驾驶过程中车辆运行安全水平分为4个等级,从而确定不同驾驶人的驾驶安全水平。安全等级划分结果如下:

I级:安全水平为好,最大隶属度为 μ_g , μ_g 越大,安全水平越高。

II级:安全水平介于好与中之间, $\mu_m > \mu_g > \mu_b$, μ_g 越大,安全水平越高。

III级:安全水平介于中与差之间, $\mu_m > \mu_b > \mu_g$, μ_b 越小,安全水平越高。

IV级:安全水平为差,最大隶属度为 μ_b , μ_b 越小,安全水平越高。

基于模糊逻辑理论的低等级公路驾驶安全评价方法为道路交通安全管理决策提供了有力的技术支持。依据评价结果,可以更加精确地区分不同驾驶人的驾驶安全水平差异,为过弯驾驶波动的可防可控提供了基本的数学依据。

3.2 过弯驾驶安全评价结果

基于上述理论计算22名驾驶人在低等级道路20组(4类天气×5种半径)场景下的驾驶波动安全等级,分布结果如表6所示。

表6 不同场景下各安全等级占比

Fig.6 Ratio of security levels in different scenarios

场景类别	弯道半径	各安全等级占比/%			
		I级	II级	III级	IV级
结冰	$R=15\text{ m}$	4.55	9.09	4.55	81.82
	$R=35\text{ m}$	31.82	22.73	9.09	36.36
	$R=60\text{ m}$	22.73	27.27	27.27	22.73
	$R=135\text{ m}$	4.55	18.18	18.18	59.09
	$R=270\text{ m}$	31.82	9.09	27.27	31.82
降雪	$R=15\text{ m}$	36.36	13.64	13.64	36.36
	$R=35\text{ m}$	22.73	18.18	18.18	40.91
	$R=60\text{ m}$	0.00	36.73	45.27	18.00
	$R=135\text{ m}$	31.82	18.18	9.09	40.91
	$R=270\text{ m}$	9.09	18.18	27.27	45.45
降雨	$R=15\text{ m}$	50.00	22.73	4.55	22.73
	$R=35\text{ m}$	40.91	22.73	4.55	31.82
	$R=60\text{ m}$	50.00	22.73	22.73	4.55
	$R=135\text{ m}$	13.64	13.64	40.91	31.82
	$R=270\text{ m}$	31.82	9.09	18.18	40.91
晴天	$R=15\text{ m}$	54.55	27.27	0.00	18.18
	$R=35\text{ m}$	40.91	31.82	13.64	13.64
	$R=60\text{ m}$	36.36	45.45	9.09	9.09
	$R=135\text{ m}$	36.36	13.64	27.27	22.73
	$R=270\text{ m}$	9.09	9.09	31.82	50.00

由表6可见,结冰路段半径为15 m的弯道上IV级的安全等级可占到80%以上,在所有道路场景中最危险。结合2.4.2节分析可知,驾驶风险主要来源于切向加速度和横向加速度的剧烈失稳波动。其次,60 m弯道半径下的安全性普遍高于其他弯道半径,这是由于小半径弯道易发生横向加速度的危险波动,大半径弯道则承担了驾驶人放松状态下的急转操作,造成方向盘转动角速度易出现危险失稳。就天气场景而言,结冰路段的低安全状态占比最高,降雨与降雪天气居中,晴天最为安全,这与实际情况是相符的。

4 结论

(1)提出基于Lorenz散点图的驾驶安全评估方法与失稳波动量化指标 D_{ind} ,将驾驶过程的稳定修正与失稳波动分离,对驾驶状态是否掌握在驾驶人手中作出有效判断,完善了传统波动分析,使驾驶安全性评估更加全面。

(2)通过驾驶模拟实验得到低等级道路切向加速度、横向加速度和方向盘转动角速度的失稳波动阈值,分别为0.993、1.322和0.669,在此基础上利用模糊逻辑理论确定各自的隶属度函数并综合3项指标搭建安全评价模型。

(3)切向和横向加速度的波动受天气场景和弯道半径的交互作用,在结冰路段的15 m半径弯道上最易发生危险失稳。方向盘转动角速度的失稳波动只受弯道半径影响,并且随着弯道半径增大而逐渐加强。

作者贡献声明:

柳本民:指导并参与了实验设计、数据分析及模型构建。

史冰玉:参与了实验,并进行了数据分析及模型构建。

廖岩枫:设计了实验场景并进行了实验。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2020年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2021(6): 92.
Ministry of Transport. Statistical bulletin on transport industry development in 2020 [J]. Finance & Accounting for Communications, 2021(6): 92.
- [2] 王宪彬, 陈思远. 山区低等级公路弯坡组合路段安全性仿真[J]. 交通科技与经济, 2022, 24(1): 57.
WANG Xianbin, CHEN Siyuan. Safety simulation on the curve slope combination section of low-grade highway in mountainous area [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2022, 24(1): 57.
- [3] WANG B, HALLMARK S, SAVOLAINEN P, *et al.* Examining vehicle operating speeds on rural two-lane curves using naturalistic driving data [J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 118: 236.
- [4] SAHA S, SCHRAMM P, NOLAN A, *et al.* Adverse weather conditions and fatal motor vehicle crashes in the United States: 1994—2012 [J]. Environmental Health, 2016, 15(1): 104.
- [5] 寇云蛟. 小半径弯坡路段行车特性分析与安全处置策略研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
KOU Yunjiao. Analysis of driving characteristics and study of safety disposal strategy in small radius curve section [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [6] 孟欣强, 郭建钢, 李林, 等. 双车道公路弯道左右转弯车安全与舒适性分析[J]. 黑龙江工程学院学报, 2020, 34(4): 37.
MENG Xinqiang, GUO Jiangang, LI Lin, *et al.* Analysis of driving safety and riding comfort for left and right turning vehicles on the curve of two-lane highway [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2020, 34(4): 37.
- [7] 李锡波, 杨洋. 基于虚拟行车轨迹的高速公路安全评价[J]. 山东交通科技, 2014(6): 26.
LI Xibo, YANG Yang. Expressway safety evaluation based on virtual driving course [J]. Shandong Jiaotong Keji, 2014(6): 26.
- [8] 霍冠哲, 李文斌. 出入口设计对主线车辆速度波动影响分析[J]. 交通与港航, 2014, 1(4): 48.
HUO Guanzhe, LI Wenbin. Analysis of effect of design of access on mainline vehicle speed fluctuation [J]. Communication & Shipping, 2014, 1(4): 48.
- [9] 陈雨, 汪凡, 陈雨人. 低等级公路行车速度分布与行车环境协调性分析[J]. 公路交通科技, 2019, 36(8): 115.
CHEN Yu, WANG Fan, CHEN Yuren. Analysis on driving speed distribution and driving environment coordination on low-grade highways [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(8): 115.
- [10] 李晨. 穿村镇公路小半径曲线段行车轨迹实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
LI Chen. Experimental research on driving track path on small radius curve in highway through town areas [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [11] LIU Y, ZHAO X, LI J, *et al.* Effectiveness of warning piles on driving behavior on the curve of low-grade highway [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2021, 2675(8): 0361198121996358.
- [12] 柳本民, 廖岩枫, 涂辉招, 等. 基于模拟实验的低等级公路车辆过弯风险预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 499.
LIU Benmin, LIAO Yanfeng, TU Huizhao, *et al.* Risk prediction model of vehicle driving in small radius curves based on simulation experiment [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(4): 499.