

基于操纵信号的小客车专用高速平曲线驾驶特性

李贤钰¹, 郭忠印¹, 苏东兰², 刘 强³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011;

3. 南京航空航天大学 航空学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 利用驾驶模拟软件设计并实施了小客车专用高速平曲线路段仿真实验, 并对平曲线驾驶特性进行了分析。结果表明, 不同半径平曲线路段均满足速度变化绝对值和速度梯度绝对值的协调性要求; 小半径曲线路段起弯、回正点滞后严重, 分别比直缓点和缓直点晚了100 m和30 m, 操作负荷主要受曲率变化的影响; 不同转向和半径的平曲线均会造成内侧和外侧偏移, 随着半径的减小, 车道偏移增加并向内侧集中, 同时横向位置更稳定。

关键词: 交通工程; 小客车专用高速; 驾驶模拟; 功率谱分析; 香农熵

中图分类号: U495

文献标志码: A

Driving Characteristics of Horizontal Curve of Passenger Car Expressway Based on Manipulation Signal

LI Xianyu¹, GUO Zhongyin¹, SU Donglan², LIU Qiang³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 3. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Driving simulation software was used to design and implement the simulation experiment of horizontal curve of passenger car expressway. Then, the driving characteristics of horizontal curve were analyzed. It is shown that all horizontal curves with different radii satisfy the consistency of absolute speed change and absolute speed gradient. The starting points and returning points of small-radius curves lag significantly, which are 100 m later than the tangent-to-spiral points and 30 m later than the spiral-to-tangent points, respectively. Additionally, the operation load is mainly affected by curvature variation. Horizontal curves with different turns and radii cause inner and outer lane departures. As the

radius decreases, the departures increase and concentrate toward inside of the curve with a more stable lateral position.

Key words: traffic engineering; passenger car expressway; driving simulation; power spectrum analysis; Shannon entropy

随着高速公路通行小客车数量逐年增多与小客车出行的持续升温, 小客车与大型车辆混行的交通状况导致服务水平下降, 部分路段拥堵严重。混合交通流下车辆速度差异大、车辆超车需求多, 导致交通事故增多。为适应社会发展和人民群众对交通安全、便捷的需求, 客货分流成为交通运输发展的方向之一, “小客车专用高速公路”是解决问题的思路。

目前国际上尚未建造小客车专用高速公路, 也没有完整的小汽车专用高速公路技术标准, 仅日本在《道路构造令》中列有小汽车专用高速公路的部分技术指标, 车道宽度由3.50 m降至2.75 m, 极限纵坡由7%增至12%, 但未形成完整的标准系列^[1]。我国在2007年对轻型高速公路的线形指标做过初期探索, 车道宽度由3.75 m调整为3.50 m, 极限纵坡由8%增至10%^[2]。小客车专用高速公路的设计参数参考前期轻型高速公路的研究成果, 设计速度为140 km·h⁻¹。由于没有实际工程作为依托, 因此采用驾驶模拟的实验方法收集操纵信号, 通过数据分析来实现小客车专用高速平曲线驾驶特性研究。

1 文献综述

1.1 驾驶模拟器有效性

驾驶模拟器具有以下优点: ①在可控条件下进行; ②实验所需的成本低; ③数据收集容易; ④最大限

收稿日期: 2019-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(51608344); 江苏省交通运输科技项目(2017Z02)

第一作者: 李贤钰(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路安全与环境工程。E-mail: shanelee_123@126.com



论文
拓展
介绍

度地保障测试驾驶员的安全^[3];⑤驾驶模拟器是交互式的,它允许被测驾驶员根据不同的驾驶任务操纵踏板和方向盘。国内外学者利用驾驶模拟器的这些特性进行了针对性的研究,尤其是在道路设计阶段^[4-5]。Blana^[6]提出,驾驶模拟器能否模拟真实情况取决于其图像系统、运动系统(纵横向运动、加速、刹车、路面颠簸程度)、操控系统、声音系统、驾驶室环境与真实驾驶时的相似程度。Siegler等^[7]设置了4种工况,即运动系统关闭、横向运动系统开启、纵向运动系统开启、纵横向运动系统同时开启,研究车辆进行90°转弯时运动系统对驾驶行为的影响。结果表明,随着横向运动系统自由度的升高,驾驶员对车辆的操控更加稳定。Greenberg等^[8]让驾驶员沿设定的曲线行驶,同时伴有电话、收音机、横风等干扰,通过开启或关闭横向运动系统,测量车身的横向偏移以及车头方向与曲线切线的夹角。研究发现,横向运动系统有助于驾驶员更加精确地操控车辆,减少操控误差。

1.2 操纵信号在曲线驾驶行为分析中的应用

汽车操纵信号是指驾驶员的操纵数据,包括三轴速度、三轴加速度、方向盘转角、油门或制动踏板开合度等。在道路设计阶段应充分考虑驾驶员的驾驶行为特征、操纵能力以及所能承担的驾驶负荷,降低驾驶员采取不适当驾驶措施的可能性。已有多位学者采用车速、车辆轨迹、加速度以及驾驶员工作负荷等参数作为曲线行驶安全评价指标^[9-10]。速度变化对运行效率和安全性都有预测作用,因此驾驶员的速度变化能够为道路的设计速度提供敏感性度量^[11]。当以横向加速度为行车舒适性评价标准时,

感觉舒适、比较舒适和不舒适的阈值分别为1.8、3.6、5.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ^[12]。郭忠印等^[13]通过对方向盘转角进行coif小波分解得到了更精确的平曲线转向启动点坐标,从而验证了平曲线不同标志标线组合的有效性。陈亦新等^[14]通过建立的双层logit模型对山区高速组合线形路段车道偏移进行了研究。结果表明,相比直线路段,曲线路段更易引发车道偏离行为,驾驶人易偏向于曲线内侧行驶。

综上所述,先进的驾驶模拟器是研究道路设计问题的有效工具。本研究将从运行速度协调性、转向合理性以及横向位置稳定性3个角度对平曲线驾驶特性进行分析,分别由速度及其变异性指标、方向盘转角和横向偏移等进行表征。

2 实验设计与数据准备

2.1 实验设备

采用同济大学八自由度驾驶模拟器进行实验(见图1)。驾驶模拟车辆是一辆完全真实的小型客车 Renault Megane III,设置了真实的力反馈系统,包括方向盘、油门、刹车。车辆前方是个水平视角为250°的环形屏幕,投影系统有8个投影仪并内置于驾驶舱,后视镜由3块液晶显示器组成,每个投影仪分辨率为1400×1050,刷新率为60 帧·s⁻¹,投影效果逼真。当驾驶模拟器运动系统开启后,驾驶模拟器沿 x 、 y 、 z 方向微量平移以及 x 、 y 、 z 轴微量转动,同时在5 m×20 m的钢轨上自由移动,驾驶员可以感受到方向盘、油门、刹车的力反馈。



图1 同济大学八自由度驾驶模拟器

Fig.1 Eight-degree-of-freedom driving simulator of Tongji University

2.2 实验人员

招募了18名拥有驾驶证的合格实验者,均具有丰富驾驶经验。实验者年龄范围为25.0~42.0岁

(平均值30.2岁,标准差4.5岁);驾驶年限范围为6.0~13.0年(平均值7.2年,标准差3.6年);驾驶里程为 $0.8\times 10^4\sim 20.0\times 10^4$ km(平均值 5.4×10^4

km,标准差 3.1×10^4 km)。其中,男性 16 名,女性 2 名,有 1 位驾驶员在实验过程中出现轻微不适症状。驾驶员样本参数如表 1 所示。

2.3 实验参数

依据《小客车专用高速公路工程技术标准(征求意见稿)》^[15]中道路几何指标极限值,利用 SCANeR 软件设计双向四车道、车道宽 3.50 m 的驾驶模拟实验路线。交通参数设置 1~2 级服务水平的低密度交

表 1 驾驶员样本参数			
Tab.1 Parameters of driver sample			
参数	年龄/岁	驾驶年限/年	驾驶里程/ (10 ⁴ km)
平均值	30.2	7.2	5.4
范围	25.0~42.0	6.0~13.0	0.8~20.0
标准差	4.5	3.6	3.1

通流,让驾驶员基本处于自由行驶状态。小客车专用高速公路驾驶模拟实验设计参数如表 2 所示。

表 2 小客车专用高速公路驾驶模拟实验设计参数					
Tab.2 Design parameters of driving simulation experiment for passenger car expressway					
桩号	平曲线长/m	圆曲线半径/m	圆曲线长/m	缓和曲线长/m	超高/%
K0—K1+000	1 000	∞			
K1+000—K1+700	700	10 000(左)	700		>2
K1+700—K2+400	700	7 500(左)	700		≤2
K2+400—K2+700	300	∞			
K2+700—K3+400	700	1 400(右)	460	120	4
K3+400—K4+300	900	∞			
K4+300—K5+000	700	1 200(右)	460	120	6
K5+000—K5+300	300	∞			
K5+300—K6+100	800	1 000(左)	300	250	8
K6+100—K7+000	900	∞			
K7+000—K7+900	900	910(左)	300	300	10
K7+900—K8+200	300	∞			
K8+200—K9+400	1 200	1 200(右)	600	300	6
K9+400—K9+700	300	∞			

注:极限圆曲线半径计算式为 $R_{\min}=v^2/(127/(e_{\max}+u))$,其中 v 为设计车速, e_{\max} 为最大超高, u 为横向力系数。

2.4 预实验

每位驾驶员被告知应遵守的操作规范并熟悉驾驶模拟器。每位驾驶员在高速公路上自由驾驶 5 min,在此过程中将经历启动加速、平稳行驶、制动减速的过程,同时也将熟悉方向盘的扭矩、油门和制动踏板的行程。观察驾驶员是否有不适反应,若驾驶员一切正常,休息 5 min 后正式开始实验。

员一切正常,休息 5 min 后正式开始实验。

2.5 数据采集及预处理

驾驶操控信号包括运行速度、纵向加速度、横向加速度、油门踏板开合度、制动踏板开合度、方向盘转角、横向偏移等。驾驶操控信号如表 3 所示。将采集到的平曲线驾驶模拟时间序列数据绘于图 2。

表 3 驾驶操控信号采集			
Tab.3 Driving signals acquisition			
分类	参数	符号	说明
纵向	运行速度/(km·h ⁻¹)	v	汽车行驶速度
	纵向加速度/(m·s ⁻¹)	a_x	与汽车行驶方向平行的加速度分量
	油门踏板开合度/%	η_{TH}	踩踏油门踏板行程百分比
	制动踏板开合度/%	η_{BR}	踩踏制动踏板行程百分比
横向	横向加速度/(m·s ⁻²)	a_y	与汽车行驶方向垂直的加速度分量,左转为正,右转为负
	偏航角/(°)	ψ	车体沿垂直地面轴旋转角度
	方向盘转角/(°)	θ_{sw}	操纵方向盘转动角度,逆时针为正,顺时针为负
	横向偏移/m	l_{ld}	汽车行驶偏离车道中心线距离,左偏为正,右偏为负

采用巴特沃斯低通滤波器对驾驶操控数据进行降噪预处理,目的是过滤由于设备等其他原因产生的高频噪声。以噪声信号明显的横向加速度数据为例,预处理结果如图 3 所示。

2.6 驾驶模拟数据总体变化趋势

纵向操控数据方面,用运行速度、纵向加速度、踏

板油门开合度三者对纵向驾驶行为进行描述,变化趋势如图 4a 所示。运行速度随着半径减小而折减明显,离散程度也随之增加。不设超高的半径平曲线油门踏板开合度保持在 50% 左右,其余四处小半径平曲线在 30% 上下变化,并且离散程度增加。纵向加速度直接受油门踏板开合度影响,故变化趋势与其相同。

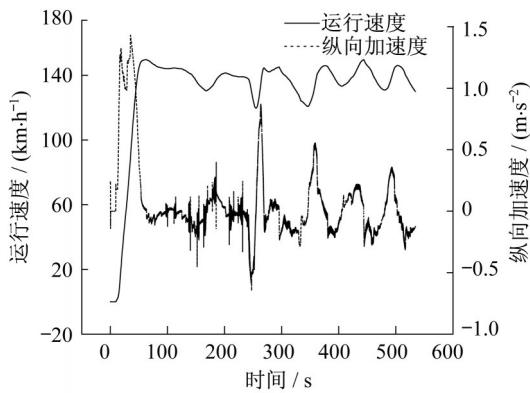


图2 平曲线路段驾驶模拟数据时间序列

Fig.2 Time series of driving simulated data of entire horizontal curve

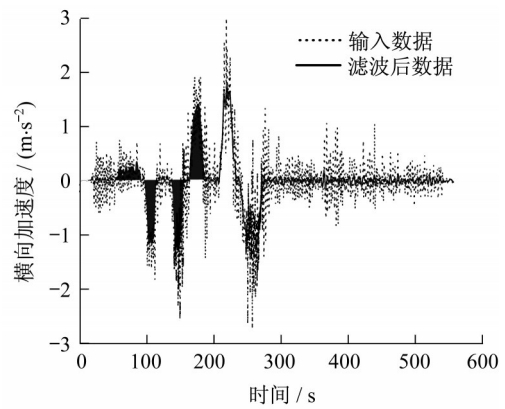


图3 驾驶操纵数据滤波

Fig.3 Driving data filtering

平曲线路段减速行驶,所以纵向加速度以负值为主。

横向操控数据方面,为避免曲线转向相反造成的正负值,对右转曲线参数取负,绘制不同半径平曲线下驾驶行为横向操纵参数箱形图,如图4b所示。横向加速度方面,设有超高的四处平曲线的横向加

速度绝对值和离散程度明显大于不设超高的两处大半径平曲线;横向偏移量绝对值随半径减小而增加的趋势明显,并且离散程度和极值也增加明显;方向盘转角绝对值随半径减小的变化趋势不明显,并且中位数保持在 0.5° 左右,但离散程度明显增加。

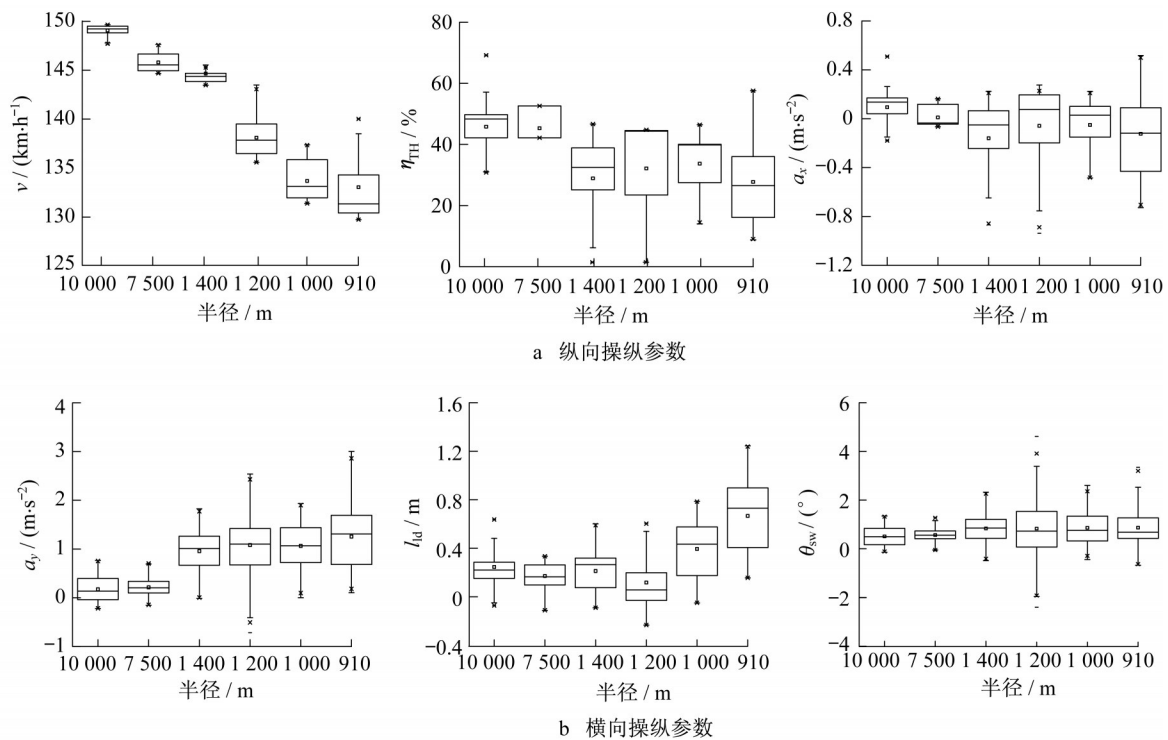


图4 不同半径平曲线下操纵参数箱形图

Fig.4 Box diagram of manipulation parameters for horizontal curves with different radii

3 平曲线驾驶特性分析

3.1 运行速度协调性

受曲率变化以及横向超高影响,驾驶员需要减

速通过以保证横向稳定性,因此运行速度的一致性对曲线行驶至关重要。采用运行速度变化绝对值 $|\Delta v_{85}|$ 和运行速度梯度绝对值 $|\Delta v_v|$ 对平曲线运行速度协调性进行评价,计算式如下所示:

$$|\Delta I_v| = \frac{|\Delta v_{85}|}{L} \times 100 \quad (1)$$

式中: L 为分析单元路段长度。

将平曲线路段以 100 m 为单元进行划分, 绘制不同半径平曲线分路段的运行速度, 如图 5 所示。图 5 显示, 除半径 10 000 m 和 7 500 m 不设超高平曲线外, 其他四处小半径平曲线运行速度变化趋势符

合多数学者研究中对平曲线运行速度的“入圆减速, 出圆加速”^[16]的规律, 并且在行驶至平曲线中点时运行速度降至最低值, 出圆时运行速度恢复, 但都未达到入圆水平。同时, 运行速度离散程度在入圆时最高, 随着进入到平曲线深处, 运行速度降低的同时离散程度也降至最低, 出圆时离散程度有小幅增加。

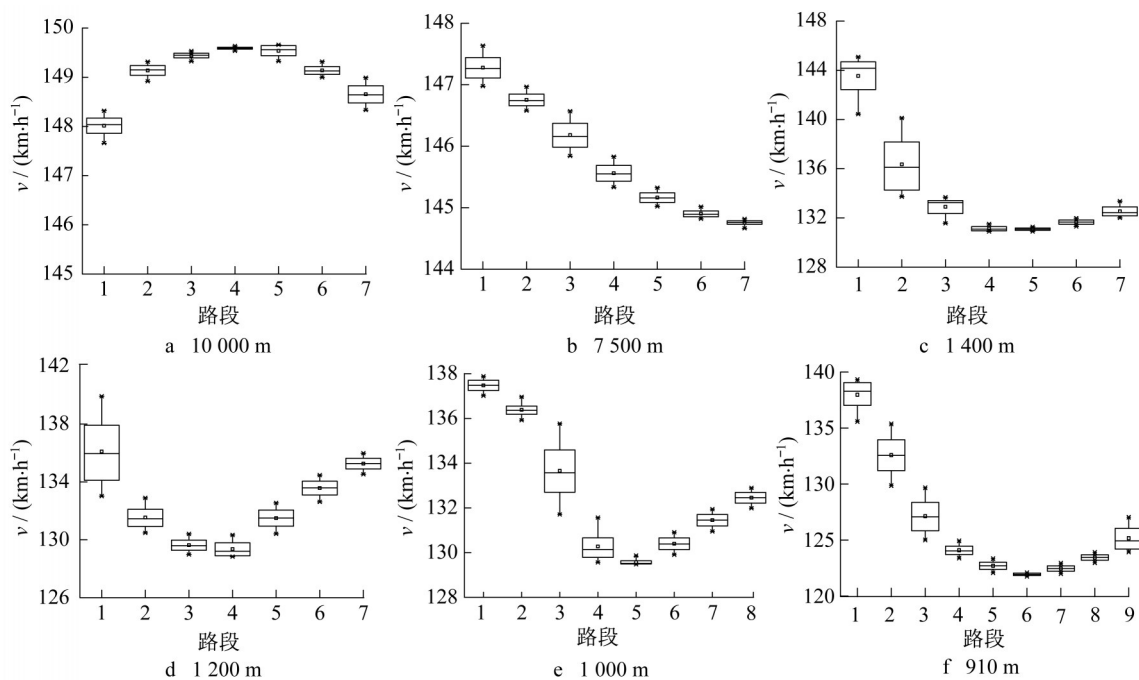


图 5 不同半径平曲线分路段的运行速度

Fig.5 Operating speed of each segment for horizontal curves with different radii

所有平曲线路段平均运行速度为 $141.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $|\Delta v_{85}|$ 小于 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $|\Delta I_v|$ 小于 $10 \text{ km} \cdot (\text{h} \cdot \text{m})^{-1}$, 满足速度变化协调性^[17]。不同半径平曲线的 $|\Delta v_{85}|$ 和 $|\Delta I_v|$ 如表 4 所示。表 4 显示, 随着半径减小, 相应平曲线路段的运行速度极大值和极小值都随之减小。然而, $|\Delta v_{85}|$ 和 $|\Delta I_v|$ 随半径变化趋势没有运行速度极值变化趋势明显, 明显的参数差别只存在于小半径平曲线和不设超高半径平曲线之间, 不同小半径平曲线之间参数差别随半径变化规律不显著。

3.2 转向合理性

平曲线处驾驶员的理论方向盘转角应与平曲线曲率变化相近^[18], 如图 6a 所示。方向盘转角在直线处保持不变, 圆曲线处保持在某个恒定值, 缓和曲线处规律性地过渡。由于道路的不平整性以及驾驶员对线形判断的偏差, 平曲线路段实际方向盘转角与理想曲线存在差异, 但总体趋势两者相符, 如图 6b 所示。因此, 方向盘转角能够反映平曲线路段驾驶

表 4 不同半径平曲线 $|\Delta v_{85}|$ 和 $|\Delta I_v|$ 分布

Tab.4 Distribution of $|\Delta v_{85}|$ and $|\Delta I_v|$ for horizontal curves with different radii

圆曲线半径/m	v_{in}	v_{mid}	v_{out}	$ \Delta v_{85} $	$ \Delta I_v $
10 000	148.0	149.6	148.5	1.6	0.51
7 500	147.6	144.7	145.5	2.9	0.72
1 400	145.1	130.9	131.2	14.2	3.51
1 200	139.9	128.8	129.1	11.1	2.78
1 000	137.9	129.5	129.8	8.4	2.25
910	139.3	121.7	122.8	17.6	2.93

注: v_{in} 为入圆速度, v_{mid} 为平曲线中点速度, v_{out} 为出圆速度。

转向合理性, 具体分为转向位置和操作负荷。

3.2.1 转向位置

由图 6 可知, 驾驶员起弯点和回正点的理论位置应与平曲线的直缓点和缓直点相近。由于驾驶员的转弯拐点不明确, 因此通过方向盘转角速率变化点对转弯位置进行识别。将方向盘转角变化率看成非周期信号, 选用 $\text{coif}^{[19]}$ 小波分析对其进行 5 层分

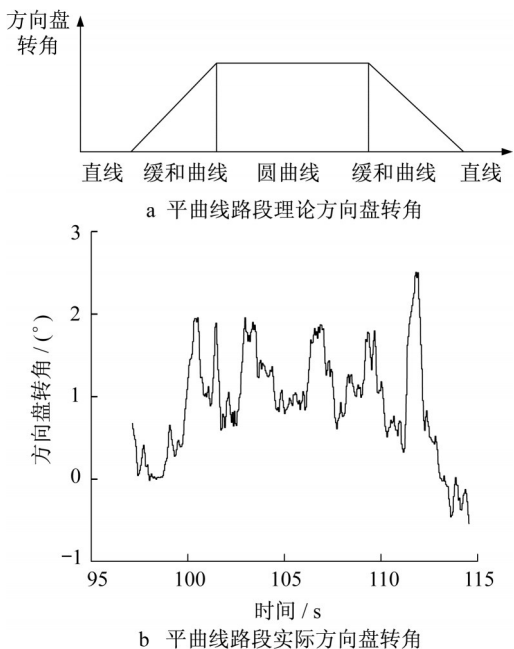


图6 方向盘转角理论值与实际值

Fig.6 Theoretical and practical values of steering wheel angle

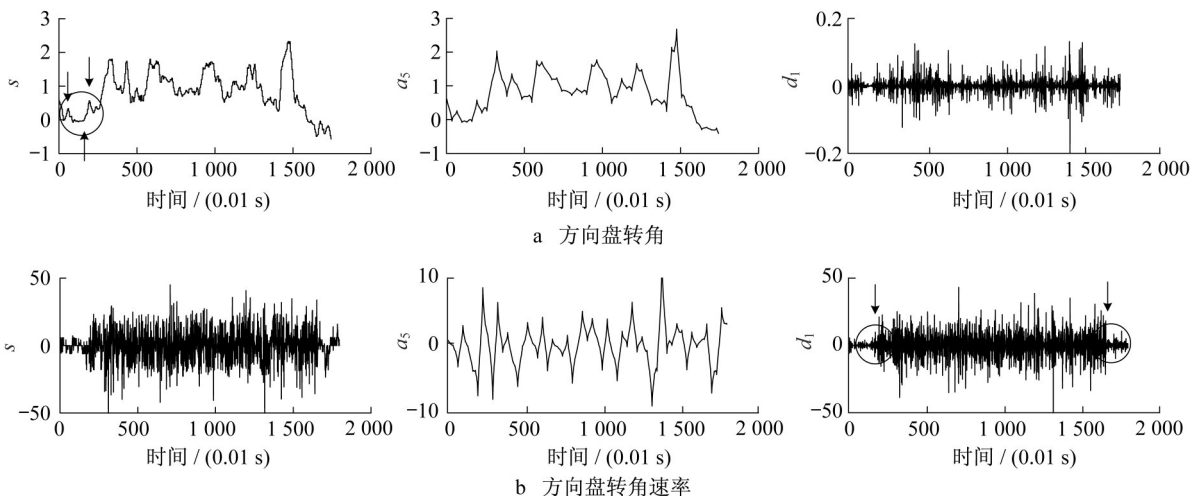


图7 1400 m半径平曲线方向盘转角速率的小波分解

Fig.7 Wavelet decomposition of steering wheel angle rate in 1400 m-radius horizontal curve

缓点滞后100 m左右;相比之下,回正点各半径平曲线间差异较小,回正点比缓直点平均滞后30 m,随着平曲线半径减小方向盘回正得越晚。

3.2.2 操作负荷

以方向盘转角速率的高频能量表征不同半径平曲线转弯时的操作负荷。以1400 m半径平曲线为例,对该路段方向盘转角速率进行harr 5层小波分解,分别为 d_1-d_5 ,原始信号 $s = \sum_{i=1}^5 d_i + a_5$ 。对各层小波求自相关函数,再进行傅里叶变换,得到各层小波功率谱,功率谱表示信号功率随着频率的变化情

况,从而确定方向盘转角变化率的突变点。图7为1400 m半径平曲线方向盘转角速率的小波分解。图7中, s 为原始信号, a_5 为低频信号, d_1 为高频信号。在直线或圆曲线上方向盘转角保持稳定值时方向盘转角速率为低频信号,当遇到曲率变动的路段时,驾驶员需要迅速转动方向盘,这时方向盘转角速率为高频信号,如图7b中高频信号的突变点。这样能够容易得到驾驶员转向位置,但方向盘转角数据却不够灵敏(见图7a中 s)。

采用小波分析对不同半径平曲线下方向盘转角速率信号进行分解,得到起弯桩号和回正桩号,并分别与直缓点和缓直点比较,得到的结果如图8所示。方向盘操作早于直缓点或缓直点,桩号差为正;方向盘操作晚于直缓点或缓直点,桩号差则为负。图8显示,整体的行驶曲线相比实际曲线都向后平移,起弯和回正均晚于直缓点和缓直点。细节上,不设超高的半径平曲线起弯点最接近直缓点,而四处小半径平曲线起弯点则晚于直缓点,起弯点比直

况,如图9所示。从图9可见,以10 Hz作为高低频分界,高频段蕴含功率更高,因此高频段功率可以看作是环境对驾驶员的干扰,即平曲线路段的操作负荷。

不同半径平曲线方向盘转角速率功率谱如图10所示。图10中,随着半径的变化,功率谱整体呈现“两头低,中间高”的趋势。10000 m和7500 m大半径平曲线操作负荷小,少量高频能量是由于没有设置缓和曲线而导致过渡的不充分。功率最大的是1400 m和1200 m半径平曲线路段。由表2可知,1400 m和1200 m半径平曲线处于不设超高半径和

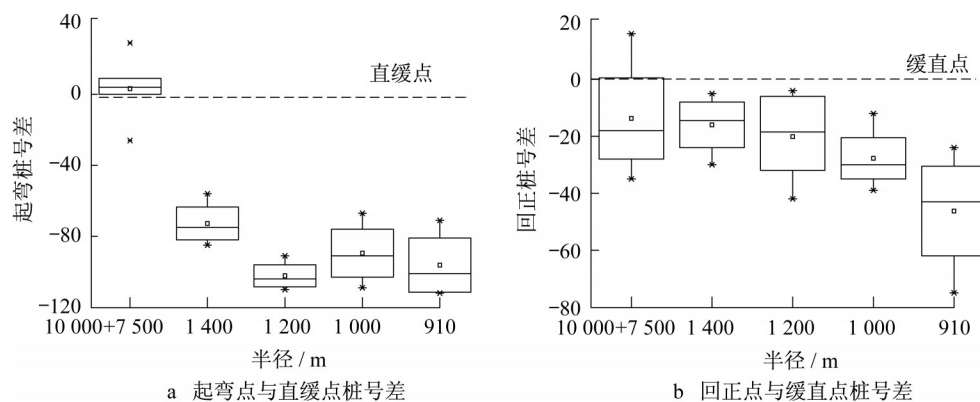


图8 不同半径平曲线起弯点及回正点箱形图

Fig.8 Box diagram of start-turning points and end-turning points for horizontal curves with different radii

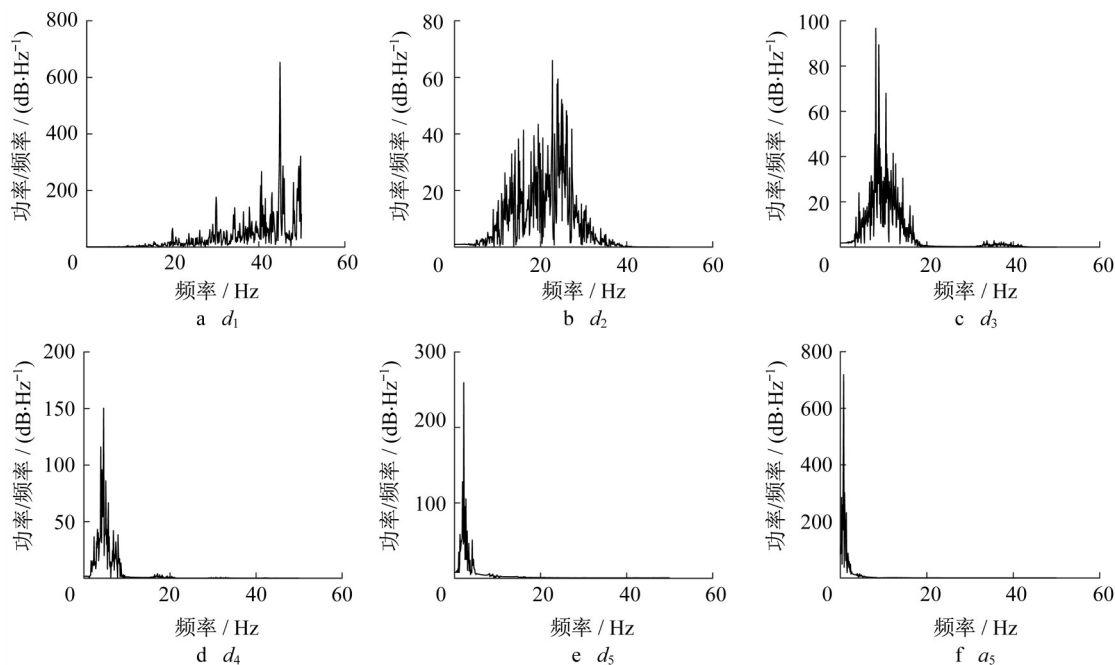


图9 1400 m半径平曲线方向盘转角速率的小波功率谱

Fig.9 Wavelet power of steering wheel angle rate in 1400 m-radius horizontal curve

最小半径的过渡段,曲率变化大,驾驶员转向操作负荷也同时增大,所以高频能量最高。小半径1000 m和910 m平曲线在经过前两处小半径路段的曲率过渡,曲率变化减小,驾驶操作负荷也相应减小。因此,曲率变化对操作负荷影响更大。

3.3 横向位置稳定性

小客车在平曲线行驶时的不稳定性主要表现为横向位置的移动,车道保持应为曲线行驶的主要目的,横向偏移常被国内外学者用来表征横向位置稳定性。单一的横向偏移量仅能反映车辆的瞬时空间位置,不能反映车辆偏离道路中线的累积危险性。因此,采用车辆偏移时空面积指标来反映驾驶过程中车辆横向偏移的时空严重性。车道偏移时空面积计算式如下所示:

$$S_{ld} = \sum_{i=1}^n |l_{ld}(t_i) - l_c| \Delta t \quad (2)$$

式中: $l_{ld}(t_i)$ 为 t_i 时刻车辆横向偏移; Δt 为计算时间间隔; l_c 为车道中心线偏移量,以内侧车道边线为基准, $l_c = 3.50/2 = 1.75$ m。压线行驶的车道偏移临界值是车道宽与车身宽差值的一半,为0.85 m。车道偏移时空面积如图11所示。

信息熵是描述信息不确定性的常用指标,引用横向偏移香农熵(Shannon entropy)描述横向偏移的稳定性,计算式如下所示:

$$H(x) = - \sum \Delta l_{ld}(t_i) \log_2 \Delta l_{ld}(t_i) \quad (3)$$

式中: $\Delta l_{ld}(t_i)$ 为横向偏移绝对值的时间序列值,

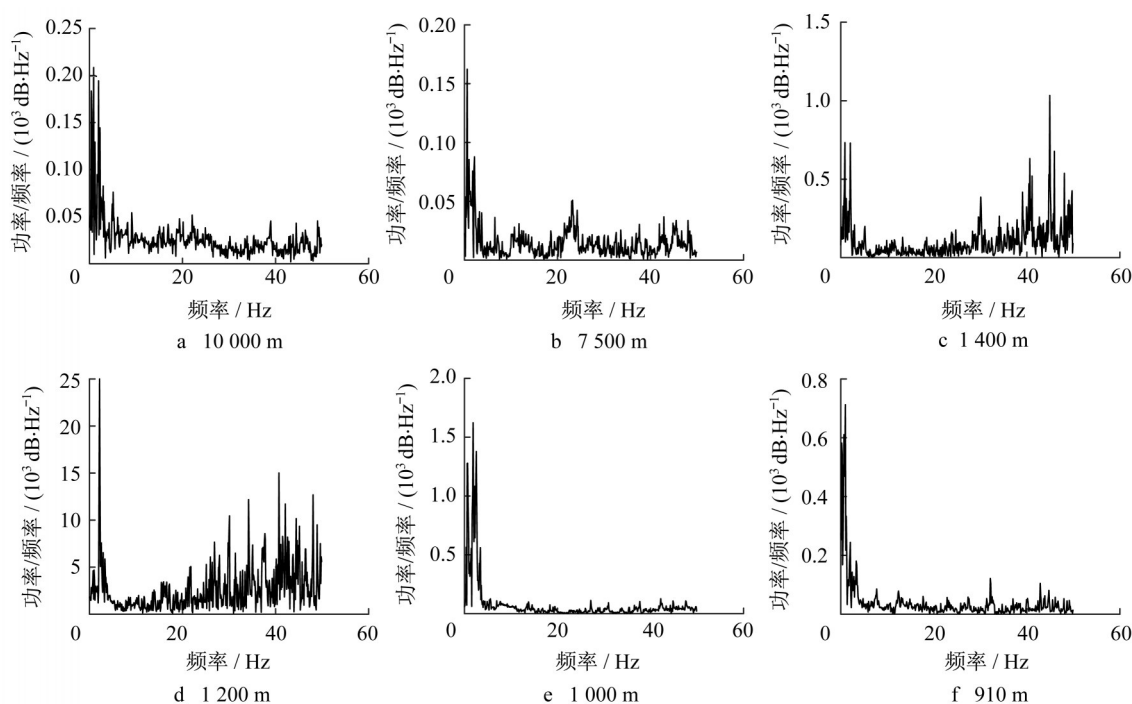


图 10 不同半径平曲线方向盘转角速率的功率谱

Fig.10 Power spectrum of steering wheel angle rate for horizontal curves with different radii

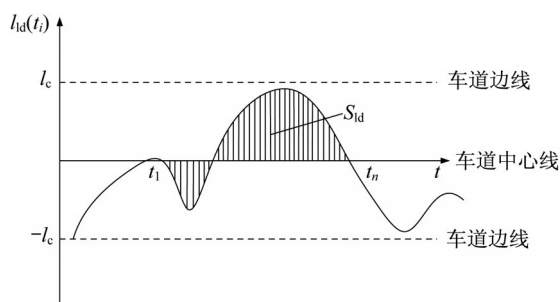


图 11 车道偏移时空面积

Fig.11 Spatial and temporal area of lane departure

$\Delta l_{id}(t_i) = |l_{id}(t_i) - l_c|$ 。 $\Delta l_{id}(t_i)$ 为零时, $H(x)$ 也为零。

将不同半径平曲线的车道偏移时空面积和香农熵的变化趋势与车道偏移基本参数进行比较,如表5所示。表5中的车道偏移基本参数显示:不论半径不同还是转向不同,驾驶员行驶均会向曲线内侧和外侧偏移;随着半径减小,横向偏移向曲线内侧集中并出现压线行驶。车道偏移时空面积在曲线内外侧的变化规律也验证这一现象。然而,作为描述数据稳定性的香农熵和标准差的变化趋势则相反,当数据具有“多峰性”时,标准差描述信息不确定度的能力降低^[20]。因此,随着半径的减小,车辆横向偏移增大并且向曲线内侧偏移,同时横向位置更加稳定。

表 5 不同半径平曲线车道偏移相关参数

Tab.5 Parameters related to lane departure for horizontal curves with different radii

半径/m	车道偏移基本参数/m				车道偏移时空面积/(m·s)			车道偏移香农熵
	内侧极值	外侧极值	均值	标准差	曲线内侧	曲线外侧	内外侧和	
10 000(左)	0.3	0.5	0.1(外)	0.2	4.2	0.1	4.3	718
7 500(左)	0.1	0.4	0.2(外)	0.1	3.1	0.1	3.2	682
1 400(右)	0.4	0.2	0.1(内)	0.1	0.2	3.8	4.0	706
1 200(右)	0.7	0.3	0.2(内)	0.2	2.7	0.4	3.1	505
1 000(左)	1.0	0.5	0.5(内)	0.4	8.4	0	8.4	534
910(左)	0.7	0.1	0.4(内)	0.3	14.6	0.1	14.7	238

4 结论

(1) 平曲线路段平均运行速度为 141.1 km·

h^{-1} , 速度变化绝对值均小于 $20 \text{ km} \cdot h^{-1}$, 满足速度变化协调性。小半径平曲线运行速度变化符合“入圆减速, 出圆加速”的普遍性规律。小半径平曲线路段

的 $|\Delta v_{85}|$ 和 $|\Delta I_v|$ 大于不设超高半径平曲线,各小半径平曲线之间参数差别不显著。

(2) 小波分析显示,方向盘转角速率比方向盘转角在识别转向位置上更灵敏,与平曲线路段的行驶曲线相比,实际曲线向后平移。小半径平曲线起弯点比直缓点平均滞后100 m,回正点比缓直点平均滞后30 m。由方向盘转角速率表征的转向操作负荷受曲率变化影响更大。

(3) 不论半径不同还是转向不同,驾驶员行驶均向内侧和外侧偏移。随着半径减小,车道偏移向内侧集中,内侧极值、均值均增大,外侧偏移接近消失。同时,车道偏移熵更稳定,即横向位置更稳定。

参考文献:

- [1] Ministry of Land and Transport of Japan. Road construction order (decree No. 321) [S]. Tokyo: Ministry of Land and Transport of Japan, 2003.
- [2] 周海涛. 轻型公路的理论及探索[M]. 北京:人民交通出版社, 2013.
ZHOU Haitao. Theory and exploration of lightweight highways [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [3] BELLA F. Driver perception hypothesis: driving simulator study [J]. Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2014, 24: 183.
- [4] ZAKOWSKA L. The role of geometric road design parameters in driving speed negotiation and safety perception: objective and subjective measures in a simulation study [J]. Advances in Transportation Studies, 2009, 18: 17.
- [5] BELLA F. Can driving simulators contribute to solving critical issues in geometric design? [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009 (2138): 120.
- [6] BLANA E. Driving simulator validation studies: a literature review [M]. Leeds: Institute for Transport Studies, 1996.
- [7] SIEGLER I, REYMOND G, KEMENY A, *et al.* Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks [C]//DSC2001. Sophia Antipolis: [s.n.], 2001: 1-12.
- [8] GREENBERG J, ARTZ B, CATHEY L. The effect of lateral motion cues during simulated driving [C]//DSC North America. Dearborn: DSC North American, 2003: 1-8.
- [9] CAFISO S, DI GRAZIANO A. Actual driving data analysis for design consistency evaluation [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005 (1912): 19.
- [10] CAFISO S. Driving performance, alignment consistency, and road safety: real-world experiment [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009(2102): 1.
- [11] NIE B, HASSAN Y. Modeling driver speed behavior on horizontal curves of different road classifications [C]//Transportation Research Board 86th Annual Meeting Washington DC: [s.n.], 2007: 1-16.
- [12] 彭志群. 道路平面线形舒适性评价方法研究[D]. 西安:长安大学, 2005.
PENG Zhiqun. Research on evaluation method of road plane linear comfort [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [13] 郭忠印, 乔亚丹, 宋灿灿. 高速公路小半径路段标志与标线的组合设置[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4): 107.
GUO Zhongyin, QIAO Yadan, SONG Cancan. Combination layout of signs and markings on expressway segment with small radius [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(4): 107.
- [14] 陈亦新, 王雪松. 山区高速公路组合线形路段车道偏移行为[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 98.
CHEN Yixin, WANG Xuesong. Lane deviation behavior of combined highway sections in mountainous highways [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 98.
- [15] 中华人民共和国交通部. 小客车专用高速公路工程技术标准(征求意见稿): T/CHTS—2018[S]. 北京:人民交通出版社, 2018.
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technical standards for expressway engineering for small passenger cars (draft for comments): T/CHTS—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [16] 徐进, 罗晓, 张凯. 基于自然驾驶试验的山区公路汽车行驶轨迹特性研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 38.
XU Jin, LUO Xiao, ZHANG Kai. Study on the trajectory characteristics of mountain road vehicles based on natural driving test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 38.
- [17] 华杰工程咨询有限公司. 公路项目安全性评价规范: JTG B05—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.
Chelbi Engineering Consultants Inc. Specification for highway safety audit: JTG B05—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [18] 宋灿灿, 郭忠印, 乔亚丹. 高速公路平曲线标志标线组合设计评价指标[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2018, 46(7): 913.
SONG Cancan, GUO Zhongyin, QIAO Yadan. Evaluation index of highway flat curve marking line combination design [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2018, 46(7): 913.
- [19] 刘明才. 小波分析及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
LIU Mingcai. Wavelet analysis and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [20] EBRAHIMI N, MAASOUMI E, SOOFI E S. Measuring informativeness of data by entropy and variance [M]//Advances in Econometrics, Income Distribution and Scientific Methodology. Heidelberg: Physica-Verlag, 1999: 61-77.