

# 高速公路平曲线标志标线组合设计评价指标

宋灿灿<sup>1</sup>, 郭忠印<sup>1</sup>, 乔亚丹<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 江苏金融租赁股份有限公司, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 基于驾驶模拟实验数据, 结合驾驶员在高速公路平曲线的运行速度特征、转向特征与行驶轨迹特征, 选择速度、方向盘转角系数与横向位置数据构建了高速公路平曲线标志标线组合设计的合理性评价指标与有效性评价指标。其中, 合理性评价指标包括转向位置的合理性评价与驾驶负荷的合理性评价, 采用小波分解的方法对方向盘转角系数进行多层分解, 获取驾驶员转向起终点位置与高频能量, 通过驾驶员转向起终点与直缓点/缓直点的距离进行转向位置的合理性评价, 通过高频能量比进行驾驶员操作负荷的合理性评价。有效性评价包括运行速度控制的有效性与车辆横向位置控制的有效性, 通过平均速度、运行速度与车速离散度进行速度控制效果的评价; 通过平均换道次数、平均压线行驶距离进行车辆横向位置控制的有效性评价。通过实例应用验证了研究标志标线组合设置的必要性与评价指标的有效性。

**关键词:** 交通工程; 评价指标; 标志标线; 平曲线; 驾驶模拟

中图分类号: U491

文献标志码: A

## Evaluation Indexes of Layout Combination of Signs and Markings in Highway Horizontal Curve

SONG Cancan<sup>1</sup>, GUO Zhongyin<sup>1</sup>, QIAO Yadan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. Jiangsu Financial Leasing Co., Ltd., Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Based on driving simulation data, combined with drivers' characteristics in highway horizontal curve of operation speed characteristics, steering characteristics and driving track features, speed, steering wheel angle coefficient and lane position were chose to construct rationality evaluation indexes and effectiveness evaluation indexes for layout combination of signs and markings in highway horizontal curve. Among them, rationality evaluation included steering position evaluation and driving workload evaluation.

Wavelet decomposition method was used to decompose steering wheel angle coefficient into multilayers. Then starting/ending turning position and high frequency energy were obtained. So steering position evaluation was conducted through the distance between starting/ending turning position to point of tangent to spiral/ point of spiral to tangent. Driving workload evaluation was carried out through high frequency energy ratio. Effectiveness evaluation included speed control effectiveness and lane position control effectiveness. Speed control effectiveness evaluated by average speed, operation speed and speed deviation while lane position control effectiveness evaluated by average lane changing times and average distance of rolling on markings. Through the application example, the necessity of researching on layout of signs and marking and the validity of evaluation indexes was verified.

**Key words:** traffic engineering; evaluation indexes; signs and markings; horizontal curve; driving simulation

限于地形地质与经济条件, 小半径圆曲线是山区高速公路的重要组成部分, 但常常成为事故多发点, 给山区高速公路的安全运行带来极大的隐患。交通事故统计资料表明, 发生在弯道上的交通事故占所有交通事故的60%以上<sup>[1]</sup>。在美国, 因交通事故造成每年3.8人死亡, 发生在平曲线的比率高达25%<sup>[2]</sup>。虽然全世界公认平曲线段事故高发, 但是迄今为止并未有非常有效的解决措施<sup>[3]</sup>。近年来, 人们已经认识到标志标线设置的重要性, 不合理的标志标线设置是诱发交通事故的重要原因<sup>[4]</sup>。

驾驶模拟器的应用已成为世界上一个重要的发展方向<sup>[5]</sup>。近年来, 通过驾驶模拟实验研究平曲线段交通标志标线设置效果的学者非常多。通过驾驶模拟实验, Charlton<sup>[3]</sup>选择速度、横向偏移量指标对比了警告标志、轮廓标、标线组合设置方案对驾驶员的

收稿日期: 2016-07-21

基金项目: 山西省交通厅科技项目(2013-1-21); 同济大学国际合作培养基金(2016XKJC-007)

第一作者: 宋灿灿(1988-), 女, 工学博士, 助理研究员, 主要研究方向为道路安全与环境。E-mail: 77conshir@tongji.edu.cn

影响. Wu 等<sup>[6]</sup>基于驾驶模拟实验采用了速度、横向位置指标研究了平曲线线形诱导标的设置效果. 贺玉龙等<sup>[7]</sup>通过运行速度、运行速度标准差、 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度差幅度车辆比例研究了高速公路控制设施的实施效果. 赵晓华<sup>[8]</sup>、Charlton<sup>[3]</sup>、Vest<sup>[9]</sup>、Ding<sup>[10]</sup>均通过驾驶模拟实验的方法采用了运行车速指标分别研究了警告标志、线形诱导标、频闪灯、减速标线的减速效果. 综上,国内外通过驾驶模拟实验的方法对平曲线标志标线的评价指标为运行速度与横向位置,且仅对标志设置的有效性进行了评价,未对其设置的合理性进行评价. 因此,本文从驾驶员在平曲线段的运行特征入手,构建基于驾驶模拟的高速公路平曲线标志标线组合设计评价指标,以期能对平曲线不同的标志标线组合设置效果进行全面系统的评价.

对于驾驶模拟实验的有效性, Godley<sup>[11]</sup>与 Jamson<sup>[12]</sup>等均验证了驾驶模拟实验在标志标线设置效果研究方面的相对有效性. 因此,本文基于驾驶模拟仿真实验数据,研究平曲线标志标线组合设置的使用效果是可行的.

## 1 高速公路平曲线车辆运行特征

### 1.1 运行速度特征

在平曲线处车辆的运营环境发生变化,驾驶员为适应该变化往往采取减速措施,但由于车辆在曲线路段行驶受视距、曲率、横向力等因素的影响程度较大,车速往往不能控制在安全范围内. 过高的行车速度易导致驾驶员因接受信息不全面、操作反应不及时发生急刹车、侧滑、侧倾等情况,降低车辆在急弯处的安全性与稳定性<sup>[13]</sup>. 研究发现,超速行驶是影响平曲线运行安全的根源,因此控制车辆的运行速度是解决平曲线车辆运行安全问题的关键<sup>[14]</sup>. 因此,在高速公路平曲线标志标线组合设置效果的评价中,速度是重要指标之一.

通过对车辆在高速公路平曲线处速度控制措施的调研发现,采用制动踏板与松油门减速的车辆比例相当,且减速方式对车辆的运营安全性并不存在直接影响,因此,不选择减速措施指标进行评价指标的构建.

### 1.2 驾驶员转向特征

车辆为了追随平面线形的变化,必须旋转方向盘调整行驶方向. 在平曲线处,道路设计者理想的方向盘转角的变化规律见图 1<sup>[15]</sup>. 在直缓点,方向盘转

角开始线性增大,至缓圆点后方向盘转角保持不变,自圆缓点方向盘转角线性减小,至缓直点减小至正常波动范围. 由于道路的不平整性、转向系统中存在间隙、驾驶员对线形判断的偏差,在平曲线段驾驶员方向盘转角与理想曲线存在差异,但这种差异性越小,车辆的运行特征与线形设计特征越贴合. 因此,车辆运行特征与线形设计特征的一致性检验标志标线组合设置的重要指标之一.

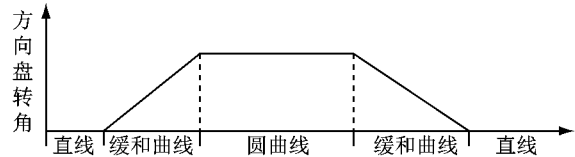


图 1 理想方向盘转角变化规律图

Fig. 1 Ideal changing regularity of steering wheel angle

鉴于道路线形设计的一致性,车辆在平曲线运行速度的降低值保持在  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  以内<sup>[16]</sup>,且驾驶员在进入平曲线之前已经开始减速,而方向盘的调整贯穿于整个平曲线段,所以驾驶员在平曲线的操作负荷主要体现在驾驶员对方向盘的操作负荷. 因此,可通过方向盘转角进行小半径平曲线处驾驶操作负荷特征的研究.

### 1.3 行驶轨迹特征

道路线形设计中理想的车辆行驶轨迹与行车道中线保持一致,但由于高速公路行车道宽度为  $3.75 \text{ m}$ ,驾驶员有充足的空间选择不同的行驶路径,因此即使在直线段,车辆的行驶轨迹也不会完全贴近道路中线<sup>[17]</sup>. 在高速公路平曲线段,为了获取更大的转向半径,技术娴熟或者偏爱高速行驶的驾驶员会选择“切弯”的行驶方式<sup>[18-19]</sup>,但由于难以控制“切弯”的精准性,大量跨线或骑线行驶的情况存在于平曲线处. 跨线或切线行驶一方面降低了平曲线处车辆的通行效率,另一方面,增加平曲线段侧面碰撞事故的概率,因此,在平曲线标志标线组合设置中,车辆的车道保持能力也是重要的评价指标.

综合以上分析,小半径平曲线标志标线组合设置可以通过运行速度特征、车辆转向特征、行驶位置特征进行评价.

## 2 评价指标的构建

通过驾驶模拟实验可以迅速获取大量的试验数据,结合驾驶员在平曲线段的运行特征,选择方向盘转角、速度、行驶轨迹三组数据进行平曲线标志标线

组合设计评价指标的构建. 根据评价目的的不同, 将标志标线组合设置方案的评价分为有效性评价与合理性评价两个方面. 有效性评价指标包括速度控制指标与车道保持能力评价指标. 标志的合理性评价指标包括转弯位置合理性与标志标线设置数量的合理性.

鉴于驾驶模拟实验的相对有效性, 同一圆曲线半径不同的组合设置方案中, 针对构件的各指标, 样本数据满足正态分布时采用方差分析进行假设检验, 样本量较少或不满足正态分布时采用非参数检验方法. 通过定量对比横向比较标志标线组合设置的有效性, 尽量避免定量的分析.

## 2.1 合理性评价指标

### 2.1.1 转向位置的合理性

因仪器输出数据为方向盘转角系数(范围[-1, 1], 正值表示右转, 负值表示左转, 最大转角值为 90°), 即瞬时方向盘转角与方向盘转角最大值的比值, 因此方向盘转角系数与方向盘转角的意义相同, 二者可以相互替代. 选取某被试驾驶员在 800m 圆曲线半径行驶的方向转角系数数据, 其变化特征如图 2 所示. 其中, ZS1(平曲线告示标志与线形诱导标)、ZS2(平曲线告示标志、纵向减速标线与线形诱导标)、ZS3(平曲线告示标志、纵向减速标线、横向减速标线与线形诱导标)代表 3 种不同的标志标线组合设置方案.

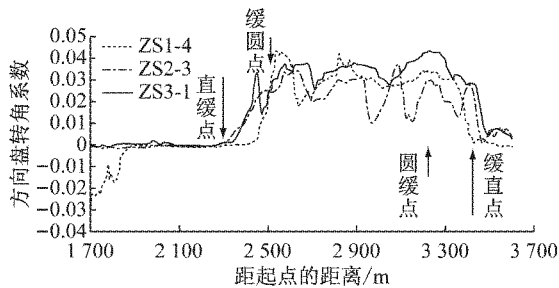


图 2 某驾驶员在三种方案下方向盘转向系数折线图  
Fig.2 Steering wheel angle coefficients of one testing driver under three layouts

由图 2 可知, 不同设置方案中驾驶员转向起点与转向终点的位置不完全相同, 因此, 标志标线组合设置方案对驾驶员转向起点、转向终点的位置产生影响, 而转向起点、转向终点与直缓点、缓直点的距离越接近, 标志标线组合设置的位置越合理.

仅通过方向盘转角系数折线图不能精确地确定驾驶员转向起点与转向终点的位置. 因方向盘转角系数折线图类似于非周期信号, 因此采用信号分析中小波分析的方法, 选择 coif 小波对方向盘转角系数进行 6 层分解, 如图 3 所示. 图中,  $d_1 \sim d_6$ , 以及

$a_6, S$  均为方向盘转角系数, 且  $s = a_6 + d_6 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1$ . 从分解之后的信号变化规律来看, 可精确获取驾驶员转向的起终点.

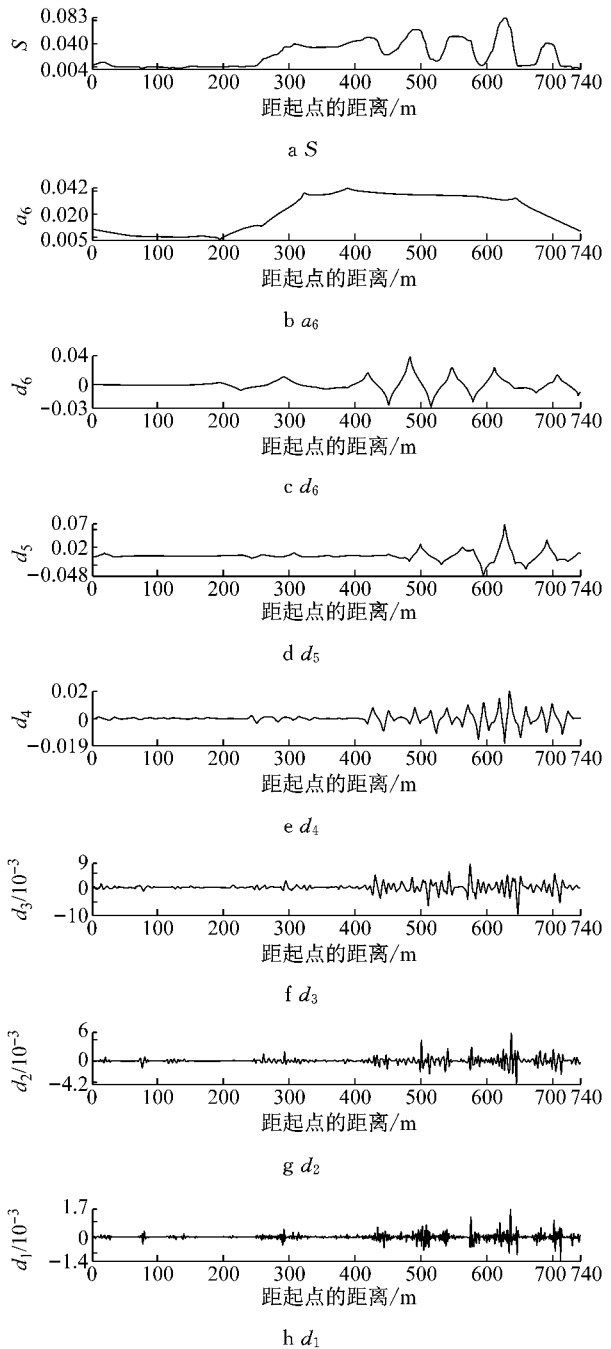


图 3 某驾驶员 ZS1 方案的方向盘转向系数小波分解  
Fig.3 Wavelet decomposition of steering wheel angle coefficient for ZS1 scenario of one participant

### 2.1.2 操作负荷的合理性

通过 1.2 节可知, 驾驶员在平曲线处的操作负荷主要来源于对方向盘的操作. 方向盘转角幅值反映驾驶员转向时转动方向盘的最大幅度, 方向盘转角变化率的绝对值反映驾驶员在转向过程中操作方向盘的频率, 二者均能在一定程度上表征驾驶员转

向时的操作负荷. 此处用方向盘转角系数最大幅值与方向盘转角系数变化率的绝对值代替.

(1) 方向盘转角系数幅值

方向盘转角系数幅值的最大值定义为驾驶员在驶经小半径圆曲线过程中, 最大转向角幅值与最小转向角幅值的差值, 如下:

$$A = a_{\max} - a_{\min} \quad (1)$$

式中:  $A$  为方向盘转角系数幅值;  $a_{\max}$  为方向盘转角系数的最大值;  $a_{\min}$  为方向盘转角系数的最小值. 方向盘转角系数幅值越小, 驾驶员的操作负荷越低.

(2) 方向盘转角系数变化率的绝对值

方向盘转角系数变化率的绝对值指单位时间内方向盘转角改变的大小, 如下:

$$f_i = \left| \frac{a_i - a_{i-1}}{t} \right| \quad (2)$$

式中:  $f_i$  为第  $i$  点的方向盘转角系数变化率的绝对值;  $a_i$  为第  $i$  点的方向盘转角系数;  $a_{i-1}$  为第  $i-1$  点的方向盘转角系数;  $t$  为方向盘自  $(i-1)$  点转向至  $i$  点的时间间隔, s. 方向盘转角系数变化率的绝对值越小, 驾驶员的操作负荷越低.

选用同一被试驾驶员在三种标志标线组合设置方案时的试验数据, 分别统计其方向盘转角系数幅值与方向盘转角系数变化率的绝对值, 见表 1.

根据方向盘转角系数幅值的统计数据对比发现, ZS1 方案的方向盘转角幅值的最大值最大, 说明其操作负荷最高. 根据方向盘转角系数变化率的绝对值统计数据对比发现, ZS2、ZS3 方案的方向盘转角变化率的绝对值的极值、平均值、标准差均高于 ZS1 方案, ZS1 方案的驾驶员的操作负荷最低.

表 1 某驾驶员方向盘转角系数幅值与变化率绝对值统计表  
Tab.1 Amplitude and absolute change rate of steering wheel angle coefficient of one participant

方案名称	方向盘转角系数幅值		方向盘转角系数变化率绝对值		
	最大值	距起点距离/m	平均值	极值	标准差
ZS1	0.44	2 537	$3.7 \times 10^{-6}$	0.038	0.005 8
ZS2	0.38	3 090	$4.8 \times 10^{-6}$	0.050	0.008 1
ZS3	0.41	3 218	$8.6 \times 10^{-6}$	0.083	0.006 7

综合以上分析, 由于方向盘转角系数幅值与方向盘转角系数变化率的绝对值都仅能在一个方面反映驾驶员对方向盘的操作负荷, 二者可以相互补充, 但难免出现上述所示结论相悖的情况, 因此, 拟构造新的指标对驾驶员操作负荷进行评价.

(3) 方向盘转角高频能量比

通过小波分析分解得到驾驶员转动方向盘的较高频率部分的能量, 以此构造驾驶员方向盘操纵负荷的评价指标. 分别用 coif 小波与 Harr 小波以同一被试驾驶员的方向盘转角数据为例进行分解, 如图 4

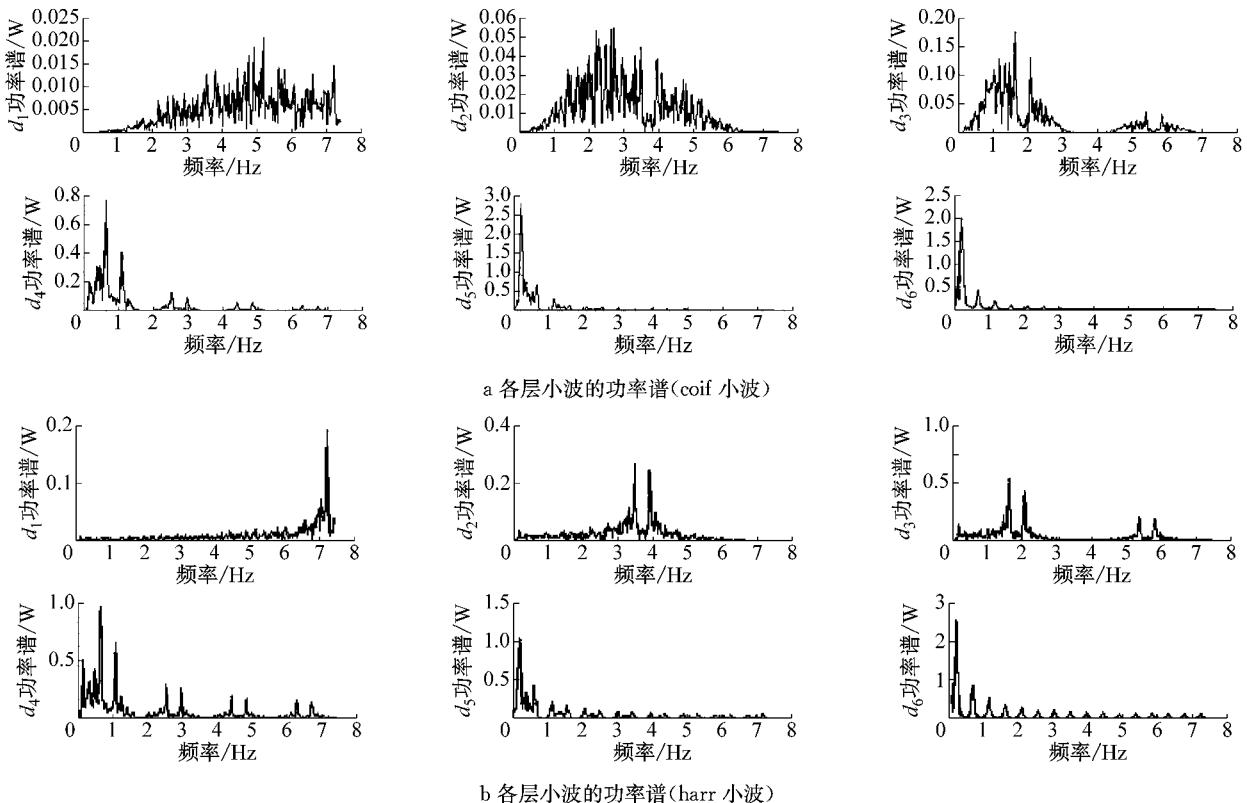


图 4 小波分解功率谱

Fig.4 Power spectrum

所示.对比发现,Harr小波可以减少边界影响而更快地进行分析,因此采用Harr小波进行方向盘转角信号的分解.

由图4b可知,从第一层小波的功率谱( $d_1$ )可知,方向盘转角的高频成分是一个宽带过程,其频谱近似于白噪声.第二层小波的功率谱( $d_2$ )也近似为宽带过程,但与第一层小波相比具有一定的明显峰值.第3~6层小波的功率谱( $d_3 \sim d_6$ ),低频段的频谱为一窄带谱,说明方向盘的输出低频是一个窄带过程.同时,功率谱中还有一定的高频成分,但是幅值较小.对比发现,第五层及第六层的功率谱分布已经与逼近小波 $a_6$ 的功率谱相似,因此,进行四级分解即可.

参考心率分析方法,选取第三、四层小波功率的比值 $E(d_3)/E(a_4)$ 、前四层小波功率之和与逼近小波的比值 $(E(d_1)+E(d_2)+E(d_3)+E(d_4))/E(a_4)$ 作为指标进行独立样本t检验,结果表明 $(E(d_1)+E(d_2)+E(d_3)+E(d_4))/E(a_4)$ 的方差明显大于 $E(d_3)/E(a_4)$ ,故选择 $(E(d_1)+E(d_2)+E(d_3)+E(d_4))/E(a_4)$ 作为反映驾驶员高频率操作比例的指标,其值越大表明驾驶员以较高频率调整方向盘的行为越频繁,驾驶员的操作负荷越大.

## 2.2 有效性评价指标

### 2.2.1 速度控制的有效性

表征速度特征的指标有平均速度、运行速度、车速离散度,三者均可以从不同的角度进行车辆速度的表征,其中,平均速度表征了车辆整体的运行速度水平,运行速度反映了85%的车辆运行速度特征,车速离散度反映了车辆运行速度的离散程度.有效的标志标线组合设置方案应对尽可能多的驾驶员产生提示,并且给予驾驶员速度控制的信息应一致,避免出现过大的车速差.

### 2.2.2 车辆横向位置

研究驾驶员在平曲线的横向位置时,通过平均换道次数与平均压线行驶距离进行评价.平均换道次数指参与一种标志标线组合设置方案的所有驾驶员在驶经平曲线时的换道次数的平均值.平均压线距离指参与一种标志标线组合设置方案的所有驾驶员在驶经平曲线时的压线行驶距离的平均值.该统计值根据车辆在场景内行驶的横向位置数据获取,如图5所示.

## 3 应用

在总长度为6.5 km、平均纵坡为-2.75%,设

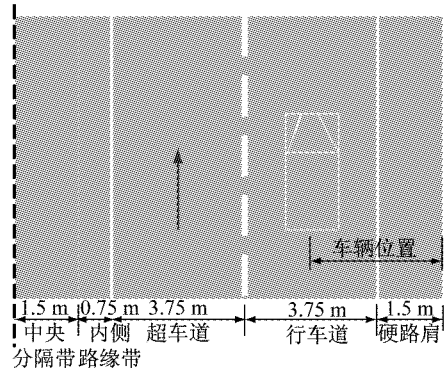


图5 车辆横向位置计算示意图

Fig. 5 A schematic figure of vehicle lateral position calculation

置有3段平曲线(半径分别为1 220,800,1 500 m)的实验场景内,选择半径为800 m的圆曲线处设置三种(记为ZS1、ZS2、ZS3)不同的标志标线组合设置方案.标志标线的设置位置均根据规范建议设置.共13名熟练营运驾驶员参与实验,每种标志标线组合设置方案各获取了9组有效实验数据.实际行车过程中,驾驶员转弯与生理反应的起始位置可能早于直缓点,因此,根据3 s原则选择小半径圆曲线直缓点上游3 s行驶距离处作为分析路段的起点,分析路段为1 700~3 600 m.

### 3.1 合理性评价

#### 3.1.1 转向位置的合理性评价

对样本总体进行coif小波分解并获取各样本的转向起终点桩号,如图6所示.对于转向起点,标志

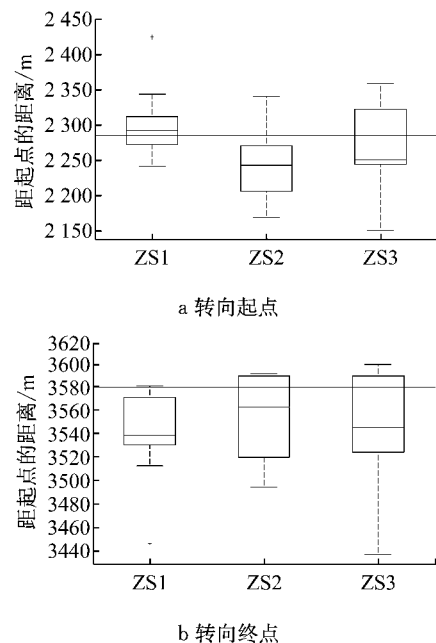


图6 驾驶员转向起点及转向终点

Fig. 6 Starting turning point and end turning point

与标线组合设置使驾驶员对直缓点的判断的离散度增大,准确性下降.而对于转向终点,标线的设置使驾驶员转向的终止位置接近缓直点,假设检验表明驾驶员转向终点与缓直点的距离的离散度明显增大.

通过转向位置的合理性分析,标志标线组合设置之间会产生交叉影响,因此,组合标志标线的设置位置不能根据单一标志设置位置的结果进行简单的叠加.

### 3.1.2 驾驶负荷的合理性评价

通过 Harr 小波分解获得每个驾驶员不同标志标线组合设置方案的高频能量值,见表 2.

方差分析结果表明,减速标线的设置对驾驶员的操作负荷有显著影响.与设置纵向、横向减速标线的 ZS3 方案相比,ZS2 方案的操作负荷较小,说明过多的标志标线会使驾驶负荷增大.

## 3.2 有效性评价

### 3.2.1 速度

分析路段每 100 m 的断面速度统计如图 7 所示.对比方案的车辆断面车速进行参数检验结果表明,平均速度、运行速度、车速离散度指标的参数检验结果均为  $ZS2 < ZS1 < ZS3$ .设置横向减速标线与纵向减速标线的 ZS3 方案速度特征值较高,部分驾驶员对横向减速标线与纵向减速标线的组合产生过度反应,以较高的运行车速通过平曲线.而线形诱导标与纵向减速标线的组合设置的减速效果显著.

表 2 方向盘转角系数高频能量比

Tab.2 High frequency ratio of steering wheel angle coefficient

方案名称	最小值	最大值	平均值	标准差	方差
ZS1	0.18	0.69	0.41	0.18	0.03
ZS2	0.23	0.57	0.35	0.12	0.02
ZS3	0.19	0.54	0.37	0.12	0.01

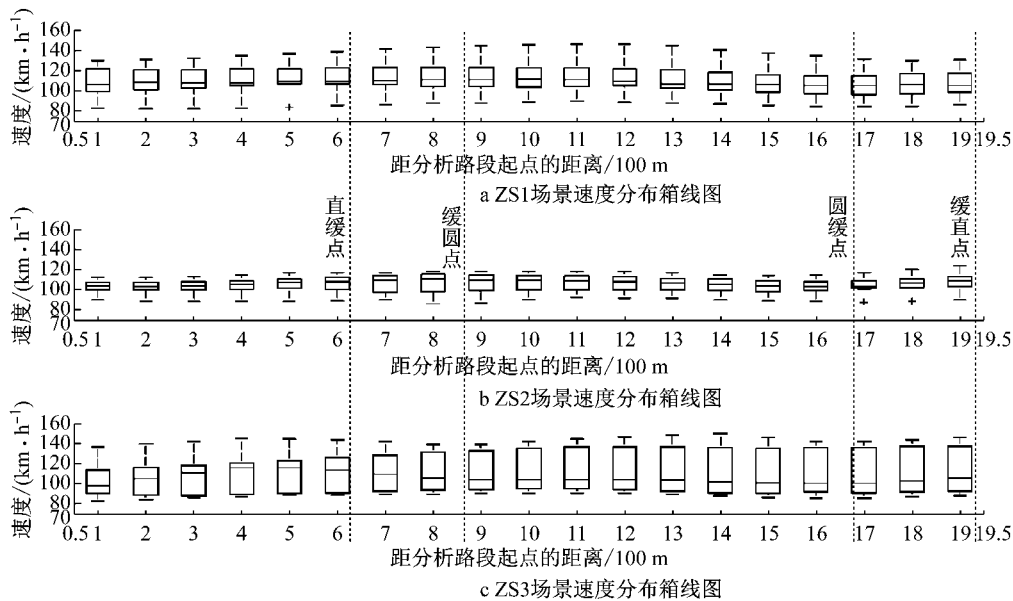


图 7 标志标线各组合方案的速度分布

Fig.7 Speed of signs and markings layouts

### 3.2.2 车辆横向位置

根据偏移量绘制三种组合设置方案的车辆横向位置频率分布图,如图 8 所示.平曲线半径范围内,ZS2、ZS3 方案的车辆行驶轨迹集中在一个车道内,ZS3 方案车辆压线行驶程度最低.

对驾驶员换车道行为与压线行驶距离进行统计,ZS1、ZS2、ZS3 场景的平均压线行驶距离分别为 268.78、164.67 与 68.33 m,平均换车道次数分别为 0 次、0.83 次与 0.5 次.方差分析表明,纵向与横向减速标线的设置不能减少驾驶员的换车道行为,但可以显著减少驾驶员压线行驶的距离.

## 3.3 综合评价

根据分析结果,通过合理性评价指标,可对不同设置方案中标志标线的设置位置的合理性、标志标线设置数量的合理性进行评价,而通过有效性分析,可对标志标线组合设置的速度控制、横向位置控制的有效性进行评价,评价指标合理,评价方法可行.

对比国内外现有的研究,对平曲线段标志标线的组合设置分析集中于有效性评价<sup>[3~10]</sup>,缺乏合理性评价,无法对标志标线的设置位置、设置数量的合理性进行评价,易形成标志标线的过量设计与设置位置的不合理.

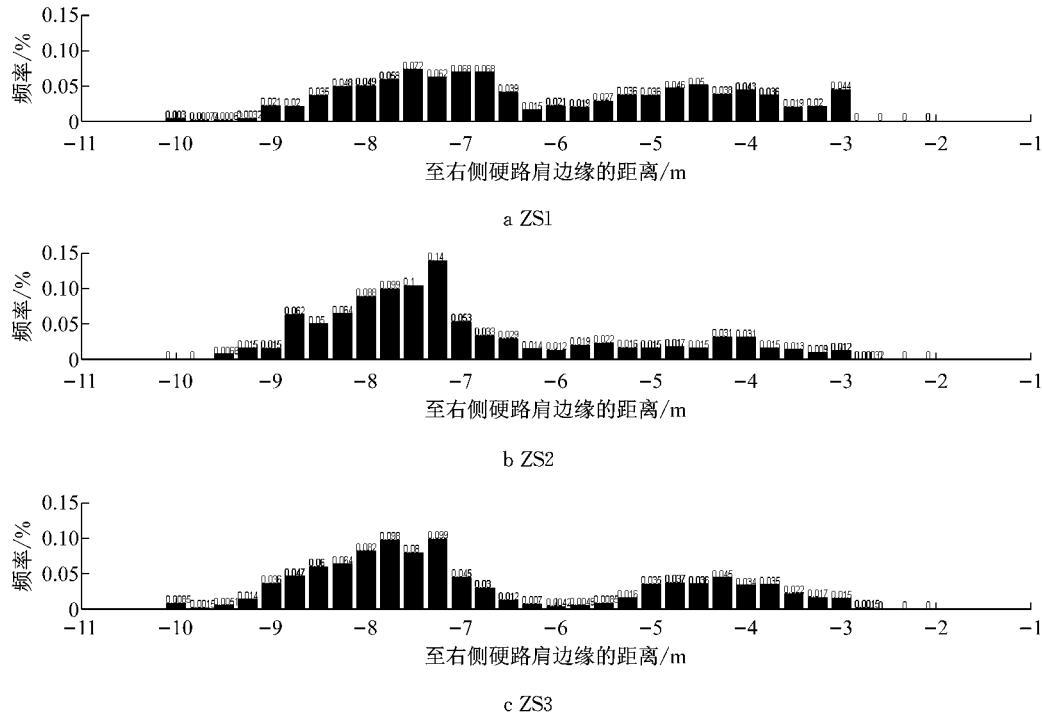


图 8 不同场景下偏移量频率分布图

Fig.8 Frequency of lane position for signs and markings layout

### 4 结论

通过分析自由流条件下车辆在平曲线的运行特征,选择速度、横向位置与方向盘转角进行平曲线标志标线组合设置评价指标的构建。通过平均速度、运行速度、速度离散度、平均压线行驶距离、平均换道次数指标构建了组合标志标线的有效性评价指标,通过转向位置、驾驶负荷评价构建了组合标志标线的合理性评价指标。

通过实例验证了标志标线组合设计评价指标的有效性与合理性,弥补了现有研究对标志标线组合设置研究中合理性评价的缺失。

### 参考文献:

[ 1 ] 夏荣霞,吴德华,何杰,等. 平曲线处大型客车最大安全运行速度计算模型[J]. 公路交通科技, 2016, 33(1): 140.  
XIA Rongxia, WU Dehua, HE Jie, *et al.* Research on calculation model of maximum safe driving speed of coach at highway horizontal curve [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(1): 140.

[ 2 ] TORBIC D J, HARWOOD D W, GILMORE D K, *et al.* NCHRP report 500: guidance for implementation of the AASHTO strategic highway safety plan—volume 7: a guide for reducing collisions on horizontal curves [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2004.

[ 3 ] CHARLTON S G. The role of attention in horizontal curves: a comparison of advance warning, delineation, and road marking treatments [J]. Accident Analysis & Prevention, 2007, 39(5): 873.

[ 4 ] 肖润谋,赵金龙,陈荫三,等. 山区公路交通安全标志设计[J]. 长安大学学报(自然科学版),2006,26(3):63.  
XIAO Runmou, ZHAO Jinlong, CHEN Yinsan, *et al.* Design traffic safety signs on mountain roads [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26(3): 63.

[ 5 ] AUBERLET J M, ROSEY F, ANCEAUX F, *et al.* Impact of perceptual treatment on driver's behavior: from the driving simulation studies to the field tests—first results [J]. Accident Analysis & Prevention, 2012, 45(5): 91.

[ 6 ] WU Yiping, ZHAO Xiaohua, RONG Jian, *et al.* Effects of chevron alignment signs on driver eye movements, driving performance and stress [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013 (2365):10.

[ 7 ] 贺玉龙,孙小端,侯树展,等. 高速公路速度控制设施的实施效果分析[J]. 中国公路学报,2010, 23(增):93.  
HE Yulong, SUN Xiaoduan, HOU Shuzhan, *et al.* Analysis of implementary effect of speed control device on expressway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (S):93.

[ 8 ] 赵晓华,关伟,黄利华,等. 急弯处警告标志位置对驾驶行为的影响研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(9): 101.  
ZHAO Xiaohua, GUAN Wei, HUANG Lihua, *et al.* Research on influence of warning sign position in sharp curve on driving behavior [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(9): 101.