

文章编号: 0451-0712(2022)03-0001-10

中图分类号: U412.34; U491.21

文献标识码: A

高速公路多心卵形曲线路段行车风险分析

张 驰¹, 李永春¹, 吴 斌², 李 泉³

(1. 长安大学 公路学院 西安市 710064; 2. 四川雅康高速有限责任公司 雅安市 625000;

3. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司 成都市 610041)

摘 要: 为分析高速公路多心卵形曲线路段的行车风险, 依托西部地区 5 条高速公路的交通事故数据资料, 选取平面设计指标和车速作为行车风险分析的主要影响因素, 利用 UC-win/Road 软件进行驾驶仿真试验; 以车辆横向轨迹偏移值期望作为评价指标, 基于数理统计理论分析各因素的显著性; 最后运用 MATLAB 软件, 建立多心卵形曲线路段行车风险评价模型。研究结果表明: 圆曲线半径组合方式、车速、中间圆曲线半径、回旋线参数与半径比值和相邻圆曲线半径比值的影响显著性逐渐降低; 当车辆横向偏移值期望大于 205 mm 时, 可认为该多心卵形曲线路段处于危险状态。

关键词: 道路工程; 多心卵形曲线; 行车风险分析; UC-win/Road; 风险评价模型

我国公路总里程逐年增加, 2019 年底总里程达 501.25 万 km^[1]。根据 2% 的复合增长率计算, 预计 2021 年全国公路总里程大约 520 万 km。山区高速公路受地形地物等多方面因素的影响, 存在较多短直线段。但在同向曲线间插入短直线时易使驾驶人将其看成断背曲线^[2]。为避免短直线问题, 常采用回旋线连接两同向圆曲线构成卵形曲线^[3]。这导致西部山区高速公路出现了较多的卵形曲线路段, 尤其是多心卵形曲线。但是现行的规范中对于卵形曲线具体规定的相关条文较少, 仅对卵形曲线两圆曲线半径比值 R_2/R_1 、回旋线参数 A 及两圆曲线间距做了规定^[3]。此外, 相关研究表明, 公路平曲线路段的事故率是其他路段的 2~3 倍^[5]。对高速公路多心卵形曲线路段行车风险进行研究, 对提高高速公路曲线路段安全水平具有一定意义。

早期国内的研究中对卵形曲线的参数设计值进行了规定。2012 年以前主要提出了针对卵形曲线路段坐标计算和测设等问题的解决方法, 其中主要包括了基于曲率推算的计算方法^[6]、将卵形曲线中缓和曲线延伸为完整回旋线的计算方法^[7]、以曲线计算为内核的交点转角计算方法^[8]以及针对卵形曲线中的问题推导双向计算公式^[9]等。周烨则总结了

卵形曲线坐标解算方法, 主要包括补全缓和曲线法、曲率推算法和其他方法^[10]。此外, 为了解决曲线桥测设困难的问题, 有学者提出了拟合导线计算曲线桩点大地坐标方法^[11]和弦距法放样道路边线方法^[12]。近几年, 部分研究中结合实际项目定义了卵形曲线的应用^[13]。同时有学者进一步明确了多心卵形曲线的定义, 并以吉惠路为例, 分析了地形地物条件限制下, 用多心卵形曲线进行道路设计的情况^[14]。后来有学者对卵形曲线安全性评价进行了探讨, 论述了评价中需要对哪些要素采用定性、定量评价, 并提出了一些安全措施^[15]。但是总体来看, 目前的研究主要集中在曲线线元以及坐标的计算上面, 对于卵形曲线的运用也主要是针对路线线形与地形地物等限制条件如何进行协调方面, 而缺少对行车安全方面的考虑。个别学者分析了规范中卵形曲线相关条文的合理性, 研究结果主要是针对 D/R_2 的取值, 也缺乏从行车安全方面的考虑。还有个别学者对卵形曲线路段的安全性评价进行了探讨, 分析了卵形曲线路段行车安全影响因素, 并提出一些安全保障措施, 对提升卵形曲线路段行车安全有一定指导意义, 但其提出的评价方法主要是利用设计速度或运行速度进行规范符合性检查, 无法避免规

基金项目: 国家重点研发计划项目, 项目编号 2020YFC1512005; 四川省交通运输科技项目, 项目编号 2019-ZL-12

收稿日期: 2021-07-06

范缺陷对评价结果的影响,也无法对卵形曲线路段行车风险进行量化并根据行车风险大小或分级提出有针对性的行车安全保障措施。

本文综合考虑车速以及多心卵形曲线平面设计指标等因素,提出将路段行车轨迹横向偏移值期望用于多心卵形曲线路段行车风险评价,并利用 UC-win/Road 软件对 3 心卵形曲线路段进行车辆行驶仿真试验,同时获取行车轨迹。最终通过控制变量法等分析了行车轨迹横向偏移值期望随各平面设计指标和车速的变化规律,采用正交试验方差分析方法分析了各影响因素对横向偏移值期望的影响显著性及影响程度大小,采用多元非线性回归构建了多心卵形曲线路段行车风险评价模型,并结合累积频率曲线确定了行车风险等级及阈值。

1 多心卵形曲线的基本概念及参数

根据连接同向圆曲线的数目,卵形曲线可分为双心卵形曲线和多心卵形曲线。双心卵形曲线为最基本的卵形曲线,由一个回旋线连接两同向圆曲线构成,如图 1。双心卵形曲线连接第 3 个同向圆曲线即形成 3 心卵形曲线(如图 2),进而连接第 4 个同向圆曲线即形成 4 心卵形曲线,等等。卵形曲线中同向圆曲线的个数为 3 及以上时即为多心卵形曲线。

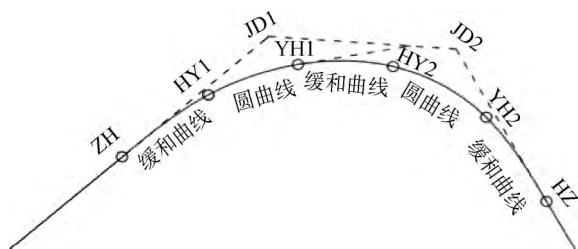


图 1 双心卵形曲线

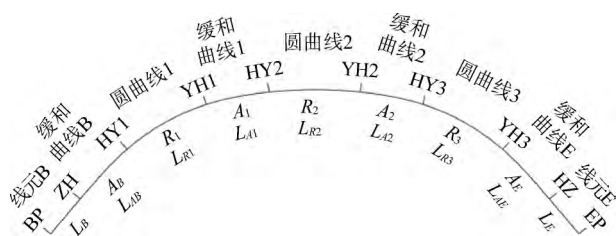


图 2 3 心卵形曲线

本文共收集到西部地区 5 条高速公路的设计资料以及交通事故数据。统计结果表明:5 条高速公路共计 16 处多心卵形曲线,其中 3 心卵形曲线有 15 处、4 心卵形曲线有 1 处。可见,实际工程项目中

3 心卵形曲线出现频率远高于其他多心卵形曲线,故本文以 3 心卵形曲线为例对高速公路多心卵形曲线路段行车风险开展相关研究。为便于表述,图 2 中 L 均指某线元长度, A 均指缓和曲线参数, R 均指圆曲线半径,具体如下:

(1) R_1 、 R_2 、 R_3 分别表示圆曲线 1、圆曲线 2、圆曲线 3 的半径,m;

(2) A_B 、 A_1 、 A_2 、 A_E 分别表示缓和曲线 B、缓和曲线 1 等线元的缓和曲线参数,m;

(3) L_B 、 L_E 、 L_{AB} 、 L_{R1} 、 L_{A1} 、 L_{R2} 、 L_{A2} 、 L_{R3} 、 L_{AE} 分别表示线元 B、线元 E、缓和曲线 B、圆曲线 1 等线元的长度,m。

2 行车风险因素及评价指标

2.1 行车风险分析

本文基于事故数据分析驾驶人、车辆、环境等因素对高速公路多心卵形曲线路段行车风险的影响,从而确定本文主要影响因素。从高速公路管理部门获取了 NQ、SG、SX 等 3 条高速的事故数据及设计图纸等。NQ 高速公路事故数据记录年份为 2016 年~2018 年,SG、SX 高速公路为 2017 年~2019 年。3 条高速公路共有 5 处多心卵形曲线路段(均为 3 心卵形曲线),其中 NQ 高速公路有 2 处,SG 高速公路有 1 处,SX 高速公路有 2 处;3 条高速公路 3 年内多心卵形曲线路段共发生交通事故 52 起,其中 NQ 高速公路为 13 起,SG 高速公路为 19 起,SX 高速公路为 20 起。根据交通事故台账,对 5 处多心卵形曲线路段交通事故原因、发生交通事故时气候环境、车型比例等进行统计分析,结果如表 1~表 3 所示。

表 1 事故成因统计结果

序号	道路名称	下列原因的事故数/起			合计起
		驾驶操作不当	车辆故障	其他	
1	NQ 高速	12	1	0	13
2	SG 高速	19	0	0	19
3	SX 高速	20	0	0	20

由表 1 可知,因驾驶操作不当引起的交通事故占比高达 98%,而因车辆故障或其他原因引起的交通事故很少。由表 2 和表 3 可知,高速公路多心卵形曲线路段在不同天气状况下发生交通事故的比例相当,客车、货车发生交通事故的比例也相当。因此,可认为高速公路多心卵形曲线路段发生交通事故与驾驶人因素紧密相关,而与环境因素、车辆因素

表 2 车型对交通事故的影响

序号	道路名称	事故百分比(A)/%		交通量百分比(B)/%		A/B	
		客车	货车	客车	货车	客车	货车
1	NQ 高速	69.23	30.77	71.36	28.64	0.970	1.074
2	SG 高速	73.33	26.67	74.63	25.37	0.983	1.051
3	SX 高速	82.35	17.65	80.90	19.10	1.018	0.924

表 3 气候环境对交通事故影响

序号	道路名称	事故百分比(A)/%			天气百分比(B)/%			A/B		
		雨雪	雾	其他	雨雪	雾	其他	雨雪	雾	其他
1	NQ 高速	38.46	0.00	61.54	52.28	0.00	47.72	0.736	0	1.290
2	SG 高速	42.11	0.00	57.89	26.85	1.46	71.69	1.568	0	0.808
3	SX 高速	35.00	0.00	65.00	26.85	1.46	71.69	1.304	0	0.907
4	均值	38.46	0	61.54	35.33	0.97	63.70	1.089	0	0.966

关系不大。

但影响驾驶人决策的驾驶人因素特别多,直接考虑驾驶人自身因素较为困难。车辆运行速度、行驶轨迹是探究行车安全性的重要参数,可用于表征车辆行驶过程中的驾驶行为和运行状态^[16]。因此本文以行车速度间接反映驾驶人因素对多心卵形曲线路段行车风险的影响。早期有学者^[17]提出使用运行速度评价公路平纵面线形,还有学者^[18]对运行速度与曲率半径之间建立预测模型,此外还有其他学者^[19]建立了不同的运行速度预测模型。

除驾驶人因素外,众多研究表明道路线形对道路交通事故的影响是非常显著的,因此研究高速公路多心卵形曲线路段行车风险时应将道路线形作为主要影响因素。多心卵形曲线路段线形条件较为复杂,有待确定的平面设计指标较多,若同时考虑平、纵断面设计指标,那么还需考虑平、纵面指标协调性的问题,问题会非常复杂。因此,本文暂不考虑纵断面线形对高速公路多心卵形曲线路段行车风险的影响。

综上,本文主要考虑平面线形和驾驶人因素对高速公路多心卵形曲线路段行车风险的影响。同时,采用车辆行车速度来间接反映驾驶人因素对多心卵形曲线路段行车风险的影响。

2.2 行车风险评价指标

将事故形态分为撞击护栏或其他障碍物、侧翻、追尾、其他等 4 类,对 5 处多心卵形曲线路段事故形态进行统计分析,结果见表 4。

由表 4 可知,多心卵形曲线路段主要事故形态

表 4 多心卵形曲线路段事故形态分布

序号	道路名称	事故数/起				合计 起
		撞击护栏 或其他障 碍物	侧翻	追尾	其他	
1	NQ 高速	10	1	1	1	13
2	SG 高速	14	2	3	0	19
3	SX 高速	16	1	3	0	20

为车辆撞击护栏或其他障碍物,占比近 80%。该类事故显著特征为车辆驶出行车道范围,而行车轨迹可很好地表征车辆在道路上的具体位置,因此本文采用行车轨迹评价多心卵形曲线路段行车风险。具体评价指标采用路段行车轨迹横向偏移值期望(记作 ED)。该指标具体定义如下。

$$ED = \frac{\sum_{i=1}^n |D_i|}{n} \quad (1)$$

式中:ED 为某个路段的行车轨迹横向偏移值期望; $m; D_i$ 为第 i 个行车轨迹横向偏移值(当 $D_i \leq 0.4875 \text{ m}$ 时,取 $D_i = 0$); $m; n$ 为路段行车轨迹横向偏移值的数据个数,无量纲。

高速公路行车道宽度一般为 3.75 m,小型车车辆宽度约为 1.8 m^[20]。因此车辆在行车道范围行驶时,其行车轨迹横向偏移值 D_i 取值范围为 0 ~ 0.975 m。最大横向偏移值的 50% 为 0.4875 m。本文认为 $D_i \leq 0.4875 \text{ m}$ (50% D_i) 时为车辆正常偏移行为,即当 $D_i \leq 0.4875 \text{ m}$ 时,取 $D_i = 0$ 。

3 仿真试验设计

3.1 试验方法

行车轨迹数据的收集在以往的试验中主要通过现场数据的实测进行收集,这种方法的明显优点就是直接获取到行车轨迹数据,能够真实反映在相应道路条件下的驾驶情况;但同时存在的问题就是难以匹配到符合试验要求的交通条件,而且在运营的道路中进行试验会对试验人员的安全产生威胁。而计算机仿真试验则可以根据试验要求进行不同交通条件的道路仿真,最大程度实现不同线形组合。尽管驾驶人的操作行为与实际道路条件下的驾驶行为存在一定的差异,但是运用驾驶仿真试验可以有效收集到研究所用的数据。综上,本文采用 UC-win/Road 软件进行驾驶仿真试验。

根据前述分析可知,车型对多心卵形曲线路段行车风险影响较小,故采用小客车开展试验,其车辆宽度、轴距等按公路工程设计标准进行取值,车辆动力学模型采用默认的 UC-win/Road 车辆动力学模型。黄星对采用驾驶模拟仿真试验开展行车轨迹研究的文献中的样本量进行了统计分析,发现较多学者采用 20~40 个的样本量^[21]。故本文每组试验有效样本量采用 30 个。同时本试验选定的驾驶人均通过合法途径取得了机动车驾驶证,驾龄均在 2 年以上。各驾驶人均身体健康,裸眼视力或矫正

视力均达 5.0 以上。

3.2 单因素试验方案

基于图 2 对 3 心卵形曲线路段各线元、参数的定义,本研究考虑的影响因素所用符号及其具体含义如下。

(1) $R_{\min}/R_{\max}(1)$:3 心卵形曲线 R_1 、 R_2 中较小者与较大者的比值,规范建议取值范围为 0.2~0.8。

(2) $R_{\min}/R_{\max}(2)$:3 心卵形曲线 R_2 、 R_3 中较小者与较大者的比值,规范建议取值范围为 0.2~0.8。

(3) $A/R_{\min}(1)$:3 心卵形曲线 A_1 与 R_1 、 R_2 中较小者的比值,规范建议取值范围为 0.5~1.0。

(4) $A/R_{\min}(2)$:3 心卵形曲线 A_2 与 R_2 、 R_3 中较小者的比值,规范建议取值范围为 0.5~1.0。

(5) R_2 :圆曲线 2 的半径, m。

(6) V :通过 3 心卵形曲线路段的行车速度,对于高速公路而言,取值范围一般为 80~120 km/h。

(7) C :3 心卵形曲线圆曲线组合方式,共 6 种。当 $R_1 < R_2 < R_3$ 时,记作 C_{123} ;当 $R_1 \leq R_3 < R_2$ 时,记作 C_{132} ;当 $R_2 < R_1 \leq R_3$ 时,记作 C_{213} ;当 $R_3 \leq R_1 < R_2$ 时,记作 C_{312} ;当 $R_2 < R_3 \leq R_1$ 时,记作 C_{231} ;当 $R_3 < R_2 < R_1$ 时,记作 C_{321} 。

3 心卵形曲线路段各工况下不同变量取值见表 5。

表 5 单因素分析试验方案设计

序号	$R_{\min}/R_{\max}(1)$	$R_{\min}/R_{\max}(2)$	$A/R_{\min}(1)$	$A/R_{\min}(2)$	R_2/m	C	$V/(\text{km/h})$
1	0.2~0.8	0.8	0.75	0.75	1 000	C_{132}	80
2	0.8	0.2~0.8	0.75	0.75	1 000	C_{231}	80
3	0.5	0.5	0.5~1.0	0.75	1 000	C_{132} 、 C_{231}	80
4	0.5	0.5	0.75	0.5~1.0	1 000	C_{132} 、 C_{231}	80
5	0.5	0.5	0.75	0.75	800~2 000	C_{132} 、 C_{231}	80
6	/	/	0.75	0.75	400/700/1 000	$C_{132} \sim C_{321}$	100
7	0.5	0.5	0.75	0.75	1 000	C_{132}	80~120

3.3 多因素试验方案

实际问题中,当影响因素及其水平较多时,进行全面试验较为困难。正交试验设计可使各因素及水平分布均衡^[22]。本研究影响因素共 7 个。其中圆曲线组合方式共计 6 种,根据 3 心卵形曲线路段单因素试验结果,将 C_{123} 与 C_{321} 、 C_{213} 与 C_{312} 、 C_{132} 与 C_{231} 各视为同一组合方式,共计 3 种水平。将设计速度、相邻圆曲线比值以及回旋线与半径比值均划分为 3 个水平。本文暂不考虑交互作用对行车轨迹的影

响,因此较为合适的正交试验表为 $L_{18}(3^7)$ 正交试验表。3 心卵形曲线路段正交试验因素水平表详见表 6,方案布置见表 7。

4 仿真结果分析

4.1 仿真数据处理

本文将车辆行车轨迹横向偏移值定义为车辆重心偏移所在行车道中线的横向距离(图 3 中 D)。将车辆至左、右侧边界距离(图 3 中 A 、 B)换算为路段

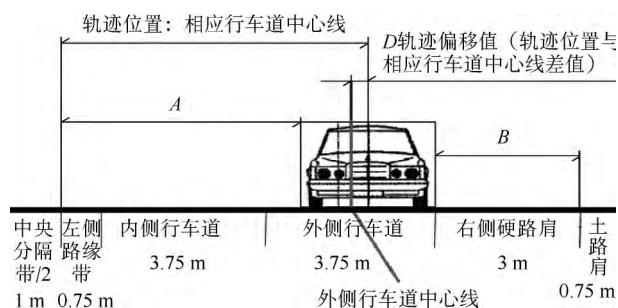
表 6 正交试验影响因素水平

水平	$R_{\min}/R_{\max}(1)$	$R_{\min}/R_{\max}(2)$	$A/R_{\min}(1)$	$A/R_{\min}(2)$	R_2/m	$V/(km/h)$	C
1	0.3	0.3	0.55	0.55	1 000	120	C_{213}, C_{312}
2	0.5	0.5	0.75	0.75	1 500	100	C_{132}, C_{231}
3	0.7	0.7	0.95	0.95	2 000	80	C_{123}, C_{321}

表 7 正交试验方案布置

编号	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7
	$R_{\min}/R_{\max}(1)$	$R_{\min}/R_{\max}(2)$	$A/R_{\min}(1)$	$A/R_{\min}(2)$	R_2/m	$V/(km/h)$	C
1	0.3	0.3	0.55	0.55	1 000	120	C_{213}
2	0.3	0.5	0.75	0.75	1 500	100	C_{132}
3	0.3	0.7	0.95	0.95	2 000	80	C_{123}
4	0.5	0.3	0.55	0.75	1 500	80	C_{321}
5	0.5	0.5	0.75	0.95	2 000	120	C_{312}
6	0.5	0.7	0.95	0.55	1 000	100	C_{132}
7	0.7	0.3	0.75	0.55	2 000	100	C_{321}
8	0.7	0.5	0.95	0.75	1 000	80	C_{213}
9	0.7	0.7	0.55	0.95	1 500	120	C_{231}
10	0.3	0.3	0.95	0.95	1 500	100	C_{312}
11	0.3	0.5	0.55	0.55	2 000	80	C_{132}
12	0.3	0.7	0.75	0.75	1 000	120	C_{321}
13	0.5	0.3	0.75	0.95	1 000	80	C_{231}
14	0.5	0.5	0.95	0.55	1 500	120	C_{123}
15	0.5	0.7	0.55	0.75	2 000	100	C_{312}
16	0.7	0.3	0.95	0.75	2 000	120	C_{231}
17	0.7	0.5	0.55	0.95	1 000	100	C_{123}
18	0.3	0.3	0.55	0.55	1 000	120	C_{213}

行车轨迹横向偏移值期望 ED 时包含以下两个步骤。

图 3 D 与 A 、 B 关系示意

步骤 1: 计算车辆行车轨迹横向偏移值 D 。本文路幅组成采用 24.5 m(0.75 m 土路肩+3 m 硬路肩+2×3.75 m 行车道+0.75 m 左侧路缘带+2 m 中央分隔带+0.75 m 左侧路缘带+2×3.75 m 行车

道+3 m 硬路肩+0.75 m 土路肩)。当车辆在高速公路外侧车道行驶时,车辆行车轨迹横向偏移值 D 与车辆至左侧边界距离(图 3 中 A)以及车辆至右侧边界距离(图 3 中 B)之间的关系为式(2)。当 $D>0$ 时,表示车辆向左侧偏移;当 $D<0$ 时,表示车辆向右侧偏移。

$$D = 6.375 - (A + \frac{11.25 - A - B}{2}) \quad (2)$$

式中: D 为车辆行车轨迹横向偏移值(即车辆重心与相应行车道中心线的横向距离),m; A 为车辆至左侧边界距离,m; B 为车辆至右侧边界距离,m。

步骤 2: 计算路段行车轨迹横向偏移值期望 ED 。通过式(1)即可将 D 换算为 ED 。

车辆在驶入曲线时有向曲线内侧偏移的趋势,在驶出曲线时有向曲线外侧偏移的趋势,最大偏移

值发生在 HY、HZ 点附近^[23]。加之,设置直线段主要作用是使车辆驶入多心卵形曲线路段前驾驶人有充分时间达到要求的行车速度,以及车辆在直线段行驶时其行车轨迹横向偏移值 D 往往较小。因此本文在计算 ED 时采用的路段范围为 ZH 点前 200 m 至 HZ 点后 200 m,未将与多心卵形曲线路段两侧

相接的直线路段完全纳入计算路段范围。

4.2 多心卵形曲线路段行车轨迹正交试验分析

对高速公路 3 心卵形曲线路段车辆行车轨迹数据进行处理后,得到各工况下路段行车轨迹横向偏移值期望 ED ,见表 8。

表 8 正交试验结果

试验号	$R_{\min}/R_{\max}(1)$	$R_{\min}/R_{\max}(2)$	$A/R_{\min}(1)$	$A/R_{\min}(2)$	R_2/m	$V/(km/h)$	C	ED/mm
1	0.3	0.3	0.55	0.55	1 000	120	C_{213}	136
2	0.3	0.5	0.75	0.75	1 500	100	C_{132}	157
3	0.3	0.7	0.95	0.95	2 000	80	C_{123}	8
4	0.5	0.3	0.55	0.75	1 500	80	C_{321}	79
5	0.5	0.5	0.75	0.95	2 000	120	C_{312}	82
6	0.5	0.7	0.95	0.55	1 000	100	C_{132}	155
7	0.7	0.3	0.75	0.55	2 000	100	C_{321}	96
8	0.7	0.5	0.95	0.75	1 000	80	C_{213}	2
9	0.7	0.7	0.55	0.95	1 500	120	C_{231}	169
10	0.3	0.3	0.95	0.95	1 500	100	C_{312}	0
11	0.3	0.5	0.55	0.55	2 000	80	C_{132}	90
12	0.3	0.7	0.75	0.75	1 000	120	C_{321}	193
13	0.5	0.3	0.75	0.95	1 000	80	C_{231}	156
14	0.5	0.5	0.95	0.55	1 500	120	C_{123}	179
15	0.5	0.7	0.55	0.75	2 000	100	C_{312}	0
16	0.7	0.3	0.95	0.75	2 000	120	C_{231}	183
17	0.7	0.5	0.55	0.95	1 000	100	C_{123}	75
18	0.7	0.7	0.75	0.55	1 500	80	C_{213}	0

根据正交试验步骤及方法,对正交试验结果进行方差分析,结果见表 9。

表 9 正交试验方差分析

误差来源	离差平方和	自由度	平均离差平方和	F 值
$R_{\min}/R_{\max}(1)$	1 318	2	659	15.221
$R_{\min}/R_{\max}(2)$	1 310	2	655	15.131
$A/R_{\min}(1)$	2 416	2	1 208	27.906
$A/R_{\min}(2)$	2 475	2	1 238	28.596
R_2	5 534	2	2 767	63.933
V	33 403	2	16 701	385.891
C	40 108	2	20 054	463.355
误差	130	3	43	
总和	86 692	17		

经过查询, $F_{0.05}(2,3)=9.552$,因此因子 1~7

相应 F 值均大于 $F_{0.05}(2,3)$,这说明因子 1~因子 7 对 3 心卵形曲线路段行车轨迹横向偏移值期望均有显著影响。根据 F 值的大小可确定各因素对高速公路 3 心卵形曲线路段行车轨迹横向偏移值期望 ED 影响由强到弱的排序,依次为 C 、 V 、 R_2 、 $A/R_{\min}$ 、 $R_{\min}/R_{\max}$ 。

4.3 多心卵形曲线路段行车轨迹单因素分析

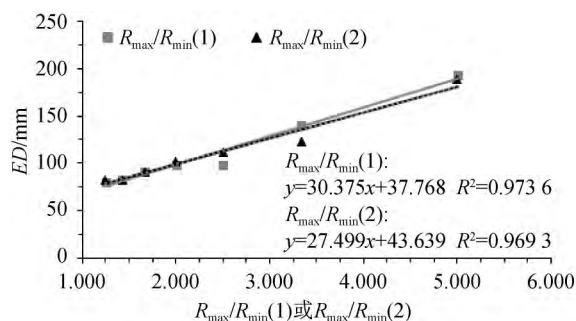
不同圆曲线组合方式下,路段行车轨迹横向偏移期望 ED 计算结果如表 10 所示。圆曲线组合方式 C_{123} 与 C_{321} 、 C_{132} 与 C_{231} 、 C_{213} 与 C_{312} 的路段,行车轨迹横向偏移值期望 ED 较为接近;而 C_{123} 与 C_{321} 、 C_{132} 与 C_{231} 、 C_{213} 与 C_{312} 之间的路段,行车轨迹横向偏移值期望 ED 差别较大。将 C_{123} 与 C_{321} 、 C_{132} 与 C_{231} 、 C_{213} 与 C_{312} 各合并为 1 组数据,经过计算得到圆曲线组合方式对路段行车轨迹横向偏移值期望 ED 影响

非常显著。

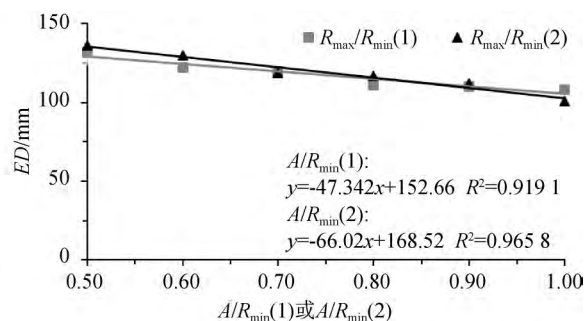
表 10 不同圆曲线组合方式 ED 计算结果

序号	C	ED/mm
1	C_{123}	69, 74, 63, 67, 67, ..., 74, 75, 73, 67, 73
2	C_{132}	87, 83, 80, 87, 95, ..., 88, 80, 86, 86, 88
3	C_{213}	123, 121, 128, 135, 124, ..., 123, 120, 113, 119, 115
4	C_{231}	90, 91, 84, 85, 84, ..., 91, 96, 84, 84, 91
5	C_{312}	110, 121, 122, 121, 121, ..., 128, 113, 120, 118, 111
6	C_{321}	65, 66, 70, 67, 67, ..., 65, 70, 71, 62, 75

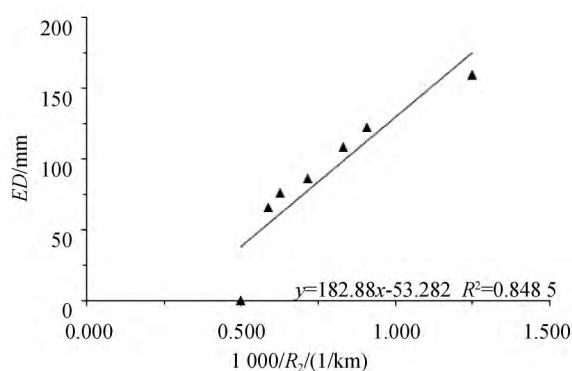
图 4 的纵坐标为 ED 值,横坐标分别为 $R_{\max}/R_{\min}$ 、 $A/R_{\min}$ 、 $1\,000/R_2$ 和 V 。4 张图分别反映了 ED 与不同影响因素的变化关系。 ED 与 $R_{\max}/R_{\min}$ (1) 或 $R_{\max}/R_{\min}$ (2) 的关系反映了 ED 随着圆曲线半径的减小而增大。因此, $R_{\max}/R_{\min}$ (1) 或 $R_{\max}/R_{\min}$ (2) 减小时, R_1 、 R_3 减小, D 与 ED 均增大。这与陈柳晓等对盘山公路车辆行驶轨迹的研究结论一致^[24]。



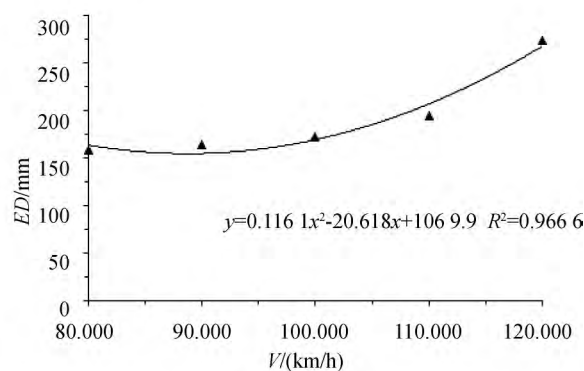
(a) ED 随 $R_{\max}/R_{\min}$ (1) 或 $R_{\max}/R_{\min}$ (2) 变化



(b) ED 随 $A/R_{\min}$ (1) 或 $A/R_{\min}$ (2) 变化



(c) ED 随 R_2 变化



(d) ED 随 V 变化

图 4 ED 与各影响因素关系

5 评价模型构建

5.1 行车风险评价模型

由上述分析可知, ED 与各影响因素均显著相关, 且 ED 与 $R_{\min}/R_{\max}$ (1)、 $R_{\min}/R_{\max}$ (2)、 R_2 为反比

ED 均值随着 $A/R_{\min}$ (1) 或 $A/R_{\min}$ (2) 的增大而减小。当 $A/R_{\min}$ (1) 或 $A/R_{\min}$ (2) 增大时, 缓和曲线长度 L_{A1} 或 L_{A2} 均增大。因此, ED 均值也随着 L_{A1} 或 L_{A2} 的增大而减小, 也即 D 随缓和曲线长度增大而减小。这与林雨等对驾驶人决策行为研究的变化规律基本一致^[25]。 ED 均值随 $1\,000/R_2$ 的增大而增大, 反映出 ED 均值随 R_2 的增大而减小。这与 ED 均值随 $R_{\min}/R_{\max}$ (1)、 $R_{\min}/R_{\max}$ (2) 的变化规律类似, 其本质均是因为车辆行车轨迹横向偏移值 D 随着圆曲线半径的增大而减小。当 R_2 增大到某值时, ED 突变为 0。车速对 ED 有着显著影响, 两者呈现出较强的二次多项式函数关系, ED 随着行车速度 V 的增大而增大。这与于海等的研究结论中两者的变化规律类似^[26]。当车速较高时, 即使车速的少量增加也会对驾驶人的驾驶行为产生显著影响, 驾驶人难以维持在车道中心线附近行驶, 横向偏移值 D 随之增大。

关系, 与 $A/R_{\min}$ (1)、 $A/R_{\min}$ (2) 为线性关系, 而与 V 为二次多项式关系。同时, $R_{\min}/R_{\max}$ (1)、 $R_{\min}/R_{\max}$ (2)、 $A/R_{\min}$ (1)、 $A/R_{\min}$ (2)、 R_2 以及 V 之间是相互独立的。因此, 基于多元非线性回归构建 ED 评价

模型时,可采用式(3)所示的基本形式。

$$ED = P_1/X_1 + P_2/X_2 + P_3X_3 + P_4X_4 + P_5/X_5 + P_6X_6^2 + P_7X_6 + P_8 \quad (3)$$

式中: ED 为路段行车轨迹横向偏移值期望; $P_1 \sim P_8$ 均为回归系数; X_1 为 $R_{\min}/R_{\max}(1)$; X_2 为 $R_{\min}/R_{\max}(2)$; X_3 为 $A/R_{\min}(1)$; X_4 为 $A/R_{\min}(2)$; X_5 为 R_2 ; X_6 为 V 。

$$ED = \begin{cases} 28.501/X_1 + 26.496/X_2 - 50.857X_3 - 133.429X_4 + 118.425.849/X_5 + 0.08X_6^2 - 12.803X_6 + 496.986 & C = C_{123} \quad R^2 = 0.879 \\ 31.077/X_1 + 31.592/X_2 - 50.571X_3 - 46.857X_4 + 187.642.170/X_5 + 0.047X_6^2 - 5.837X_6 + 47.936 & C = C_{132}, C_{231} \quad R^2 = 0.933 \\ -8.103/X_1 - 7.952/X_2 - 60.857X_3 - 59.857X_4 + 84.438.452/X_5 + 0.092X_6^2 - 15.273X_6 + 685.659 & C = C_{213}, C_{312} \quad R^2 = 0.891 \\ 1.847/X_1 + 29.906/X_2 - 59.714X_3 - 46.571X_4 + 109.973.3/X_5 + 0.065X_6^2 - 9.417X_6 + 308.162 & C = C_{321} \quad R^2 = 0.926 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)拟合优度大于 0.85,拟合效果较好。由式(4)可知:无论 C 为何种取值,各式中 X_3 与 X_4 前系数均小于 0。这是因为当圆曲线半径一定时, $A/R_{\min}(1)$ 、 $A/R_{\min}(2)$ 越大,则缓和曲线参数越大,进而缓和曲线长度越大。缓和曲线越长时, D 越小,进而 ED 越小。 $C = C_{132}$ 、 C_{231} 的评价模型中 X_1 与 X_2 前系数均大于 0,而 $C = C_{213}$ 、 C_{312} 的评价模型中 X_1 与 X_2 前系数均小于 0,其实均反映了行车轨迹横向偏移值随着圆曲线半径增大而减小的事实。这与李宇^[27]的研究结论一致。

5.2 行车风险等级划分

通过对所有样本进行统计分析,得到高速公路多心卵形曲线路段行车轨迹横向偏移值期望 ED 的累计频率分布,结果如图 5 所示。

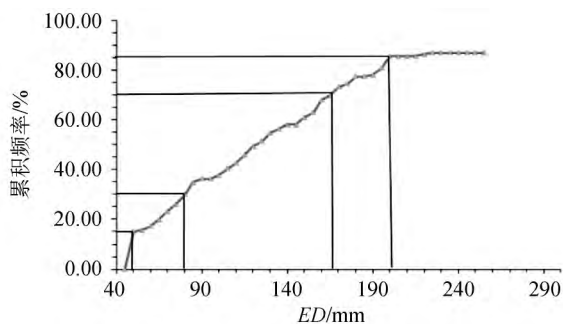


图 5 ED 累计频率分布

根据统计学原理,选取高速公路多心卵形曲线路段行车轨迹横向偏移值期望 ED 的 15%、30%、70% 和 85% 分位数作为划分阈值,将高速公路多心

考虑 C 为离散型变量,且不易量化,而其他变量均为连续型变量,因此采用分段函数。同时,鉴于圆曲线组合(C_{132} 与 C_{231} 、 C_{213} 与 C_{312})方式对路段行车轨迹横向偏移值期望 ED 无显著影响,分别将 C_{132} 与 C_{231} 、 C_{213} 与 C_{312} 各合并为一个计算模型进行拟合。综上,各种圆曲线组合方式下高速公路 3 心卵形曲线路段行车风险评价模型为式(4)。

卵形曲线路段行车风险划分为安全、较安全、中、较危险和危险 5 个等级,结果见表 11。

表 11 行车风险指数划分

安全等级	安全	较安全	中	较危险	危险
ED/mm	<50	$50 \sim 85$	$85 \sim 165$	$165 \sim 205$	>205

5.3 实例验证与应用

为验证前述所建立行车风险评价模型的可行性,现选取西南地区 NQ 高速公路中的 3 心卵形曲线路段为研究对象,应用所得预测模型对行车风险进行分析。根据 NQ 高速公路施工图设计文件可得,NQ 高速公路主线采取双向 4 车道,车道宽 3.75 m,设计速度为 80 km/h。此外,根据对 NQ 高速公路调研路段 2016 年~2018 年 3 年交通事故数据分析可得,NQ 高速公路 3 心卵形曲线路段的交通事故水平平均值为一般路段交通事故水平的 2.048 倍,说明该高速公路 3 心卵形曲线路段属于事故多发路段,具体交通事故水平见表 12。

表 12 交通事故水平分析

路段	类型	长度/km	交通事故数/起	交通事故水平/次/(km·a)
K1751+000~K1785+000	调研全线	34	75	0.735
K1759+289.750~K1761+038.040	3 心卵形	1.748	8	1.526
K1770+914.390~K1772+046.980	3 心卵形	1.133	5	1.471

本文将行车风险等级较危险与中的临界值,即 $ED=165$ mm 作为速度管控措施中的临界值。由于实际驾驶过程中,行驶速度往往大于设计速度,故采取 80 km/h 与 100 km/h 对 2 处 3 心卵形曲线路段分别进行横向偏移值期望预测,其余参数则根据前述规定进行计算,具体设计参数见表 13,预测结果见表 14。

表 13 3 心卵形曲线设计参数

路段	R_1	R_2	R_3	A_1	A_2
K1759+289.750~ K1761+038.040	790	1 255.13	634.75	450.02	339.97
K1770+914.390~ K1772+046.980	600	1 172.21	876.93	313.58	527.74

表 14 行车风险分析

序号	$R_{\min}/R_{\max}(1)$	$R_{\min}/R_{\max}(2)$	$A/R_{\min}(1)$	$A/R_{\min}(2)$	R_2/m	C	$V/(km/h)$	ED/mm	风险等级
1	0.629	0.506	0.570	0.535	1 255	C_{231}	80	139	中
							100	191	较危险
2	0.512	0.748	0.523	0.602	1 172	C_{231}	80	146	中
							100	199	较危险

由表 14 可得出如下结果。

(1)在平面设计指标确定的情况下,横向轨迹偏移值期望会随着车速的增大而增大,这就导致车辆更容易偏离行车道中心线,从而增大车辆撞击护栏及其他障碍物的可能性。根据表 4 可知,发生在 3 心卵形曲线路段范围内 13 起交通事故中,主要事故形态为撞击护栏及其他障碍物,所以通过预测模型得到的结果与表 4 反映的该路段主要事故形态相吻合。

(2)当车速达到 100 km/h 时,计算结果与设计速度计算得到的 ED 值相比增加了 36%~37%,且行车风险等级均由中变为较危险。这说明如果驾驶人采用的行车速度过高,则难以沿着道路中心线行驶,行车轨迹偏移值往往较大,甚至车辆会驶出既有行车道范围。因此为保证行车安全要求,该路段应按照 80 km/h 速度进行严格限速。

(3)对于已建成的 3 心卵形曲线路段,在平面设计指标无法调整的情况下,可通过速度管控措施临界值计算相应的临界行车速度,从而指导该路段限速值的选取。对于设计阶段的 3 心卵形曲线路段,可以按照设计速度等设计参数进行风险预分析,若判别结果为 $ED>165$ mm,则应根据 ED 随各因素的变化趋势有目的地调整,使得 $ED\leq 165$ mm。

6 结语

(1)基于事故数据,采用数理统计方法分析了环境、车辆和驾驶人因素对道路交通安全的影响,从理论上分析了道路线形对多心卵形曲线路段交通安全的影响。结果表明:环境、车辆因素对多心卵形曲线交通安全影响较小,而驾驶人因素和道路条件对多心卵形曲线交通安全有显著影响。同时,对比分析

了现有行车轨迹评价指标适用性后,提出采用路段行车轨迹横向偏移值期望 ED 作为本文评价指标,为研究高速公路多心卵形曲线路段行车风险评价和交通安全保障措施奠定了理论基础。

(2)采用多元非线性回归构建了不同 C 值条件下 ED 与 $R_{\min}/R_{\max}(1)$ 、 $R_{\min}/R_{\max}(2)$ 、 $A/R_{\min}(1)$ 、 $A/R_{\min}(2)$ 、 R_2 、 V 之间的关系模型,用于高速公路多心卵形曲线路段行车风险评价,通过 ED 累积频率曲线,从统计学的角度以 15%、30%、70%、85% 位 ED 作为多心卵形曲线路段行车风险分级阈值将其划分为安全、较安全、中、较危险、危险 5 种风险等级。

(3)本文仅以实际工程中应用情况最多的 3 心卵形曲线为例对高速公路多心卵形曲线路段行车风险进行了研究,研究结论未必适用于线形条件更为复杂的 4 心、5 心等多心卵形曲线,可进一步对 4 心、5 心卵形曲线进行深入研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京:中国统计出版社,2020.
- [2] 覃盛科. 基于运行速度的高速公路直线段最小长度取值研究[J]. 西部交通科技,2017,(4): 13-15+62.
- [3] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2017.
- [4] 戴琪,曾庆桓. 卵形曲线规范条文适应性及应用分析[J]. 中国公路,2018,514(6): 112-113.
- [5] 任园园. 公路弯道路段行车危险区域及驾驶行为模型研究[D]. 吉林:吉林大学,2011.
- [6] 叶松林. 道路卵形回旋线任意点坐标及方位角计算方法[J]. 测绘通报,1999,45(3): 25-27.
- [7] 张玥,杨根义,武文清. 卵形曲线中间缓和曲线的放样计算[J]. 内蒙古公路与运输,1999,24(1): 22-23.

- [8] 郭腾峰,王蒙. 公路路线的交点曲线算法[J]. 国外公路,1999,24(6):25—27.
- [9] 邢喜乐. 公路卵形曲线的双向测设法[J]. 工程勘察,2000,28(1):65—68.
- [10] 周焯. 高等级公路卵形曲线的计算方法[J]. 矿山测量,1999,27(2):53—54.
- [11] 曲德富. 道桥复曲线中插缓和曲线段的大地坐标计算[J]. 测绘通报,2001,47(4):25—27.
- [12] 方琴,纪为祥,严春林. 卵型曲线等距线的弦距法放样[J]. 重庆交通学院学报,2001,20(4):73—75.
- [13] 朱天璋. 卵型曲线在高速公路设计中的应用[J]. 湖南交通科技,2002,28(1):4—5.
- [14] 李丹. 浅谈道路线形设计中卵形曲线的运用[J]. 城市道桥与防洪,2017,215(3):36—38+7.
- [15] 昌毓虹. 卵形曲线的交通安全性评价分析[J]. 西部交通科技,2020,153(4):54—56+115.
- [16] 徐进,罗晓,张凯,等. 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—51.
- [17] Leisch J E, Leisch J P. New Concepts in Design Speed Application[C]//Transportation Research Record 631, TRB, Washington: National Academy of Sciences, 1977:4—14.
- [18] Lamm R, Choueiri E M. Recommendations for Evaluating Horizontal Design Consistency Based on Investigations in the State of New York[C]//Transportation Research Record 1122, TRB, Washington: National Academy of Sciences, 1987:68—78.
- [19] Krammes R A, Brackett R Q, Shafer M A. Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highways[M]. Vermont South: ARRB Group Limited,1995.
- [20] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S]. 北京:人民交通出版社,2014.
- [21] 黄星. 雾天不同能见度条件下高速公路动态限速方法研究[D]. 西安:长安大学,2018.
- [22] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [23] 林雨,牛建峰,徐颖. 双车道公路弯道行车轨迹特性研究[J]. 公路交通科技,2011,28(3):113—117.
- [24] 陈柳晓,唐伯明,张勃,等. “二十四道拐”盘山公路车辆行驶轨迹研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2019,38(4):47—54.
- [25] 林雨,杨轸,潘晓东. 双车道公路弯道驾驶人轨迹决策行为研究[J]. 计算机工程与应用,2011,47(23):224—227.
- [26] 于海,张兰芳,李迪. 山区低等级公路弯道行车速度对行车轨迹的影响[J]. 交通科学与工程,2012,28(4):59—64.
- [27] 李宇. 山区双车道二级公路弯道路段行驶特性与安全策略研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.

Analysis of Traffic Risk on the Expressway Sections with Multi-Centric Oval Curves

ZHANG Chi¹, LI Yong-chun¹, WU Bin², LI Xiao³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Sichuan Yakang Expressway Co. Ltd., Ya'an 625000, China; 3. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to analyze the traffic risk of the polycentric oval curve section of the expressway, relying on the traffic accident data of 5 expressways in the western region, the graphic design index and vehicle speed are selected as the main influencing factors of the driving risk analysis, and the UC-win/Road software is used to carry out the analysis. In the driving simulation test, the vehicle lateral trajectory offset value expectation is used as the evaluation index, and the significance of each factor is analyzed based on the mathematical statistics theory. Finally, MATLAB software is used to establish a driving risk evaluation model of multi-core oval curve road section. The results show that the influence of the combination of radius of circle curve, speed, radius of second circle curve, ratio of cyclotron parameter to radius and radius of adjacent circle curve decreases gradually; and the multi-centered oval curve section can be considered dangerous when the expectation of vehicle lateral offset is greater than 205 mm.

Key words: road engineering; multi-centric oval curve; traffic risk; UC-win/Road; risk evaluation model