

安全与环境学报
Journal of Safety and Environment
ISSN 1009-6094, CN 11-4537/X

《安全与环境学报》网络首发论文

题目：基于行车安全可靠度的地下互通匝道横断面宽度参数研究
作者：张驰，高艳阳，唐协，宋金明，林国进
DOI：10.13637/j.issn.1009-6094.2026.0488
收稿日期：2026-04-02
网络首发日期：2026-08-04
引用格式：张驰，高艳阳，唐协，宋金明，林国进. 基于行车安全可靠度的地下互通匝道横断面宽度参数研究[J/OL]. 安全与环境学报.
<https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2026.0488>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于行车安全可靠度的地下互通匝道横断面宽度参数研究

张驰¹, 高艳阳¹, 唐协², 宋金明¹, 林国进²

(1 长安大学公路学院, 西安 710064; 2 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 成都 610000)

摘 要: 为明确山区高速公路地下互通匝道横断面宽度参数与行车安全状态之间的关系, 依托驾驶仿真技术构建 9 组车道宽度、侧向宽度及线形组合场景, 招募 30 名驾驶人开展重型货车驾驶模拟试验, 基于 10 m 空间窗口提取横向偏移、最小侧向裕度和归一化注视熵, 分析车辆横向控制和视觉注意分配特征, 并采用响应面法和蒙特卡洛模拟建立系统行车安全可靠度模型。结果表明, 曲线段车辆轨迹横向调整幅度和轨迹波动高于直线段, 右转曲线的归一化注视熵高于直线段和左转曲线; 侧向宽度对最小侧向裕度和注视熵均具有显著影响。系统行车安全可靠度随侧向宽度增加而提高, 随运行速度提高而降低。以目标可靠度 0.95 为控制值, 车道宽度为 3.50 m 时, 直线、左转和右转曲线侧向宽度工程取值分别为 0.75、0.75 和 1.00 m。研究可为地下互通匝道横断面参数取值提供依据。

关键词: 安全工程; 地下互通匝道; 系统可靠度; 横断面设计; 注视熵; 驾驶仿真

中图分类号: X951; U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6094 (2026) XX-XXXX-XX

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2026.0488

0 引 言

受深山峡谷地形和复杂建设条件制约, 常规地面互通立交的布设空间受到明显限制, 地下互通立交逐渐成为受限地形条件下实现高速公路与区域路网衔接的重要工程形式^[1]。该类路段耦合了隧道封闭空间与多匝道交叉特性, 其光照环境、侧向边界条件及封闭空间感知特征均不同于常规地面互通^[2], 会对驾驶人速度选择、轨迹控制及视觉感知产生影响^[3]。现行公路互通立交设计规范^[4]主要面向地面互通, 尚未充分考虑隧道条件下侧向空间侵占、封闭洞身环境等对行车行为的影响; 城市地下道路相关设计规范^[5]则主要针对直线型地下道路, 对地下互通匝道小半径曲线、分合流等场景缺乏针对性设计要求。直接套用现有规范^[6]可能导致横断面参数与运行安全适配性不足^[7]。因此, 有必要针对高速公路地下互通匝道横断面参数设计开展研究, 解析环境与构造叠加下的驾驶机理, 明确横断面参数安全适用范围, 为地下互通匝道设计提供依据。

上世纪 90 年代以来, 研究人员利用事故回归分析、实车观测等手段, 探究了道路几何横断面与行车安全之间的宏观关联^[8]。1995 年, Hadi 等^[9]首次采用负二项回归模型系统分析了道路横断面要素对交通事故率的影响, 为道路几何设计安全性量化研究提供了方法基础。后续研究进一步量化了事故率与车道宽、路肩宽的关系, 证实了合理横断面设计有助于降低运行风险^[10]。上述事故统计视角反映了横断面参数与安全水平之间的总体关系, 但对驾驶行为形成过程的刻画仍有不足。随着驾驶模拟技术的发展, 研究视角逐渐由事故结果分析转向驾驶行为机理分析。依托驾驶模拟技术, 王雪松等^[11]量化了车道宽度、侧向宽度对车辆轨迹偏移及速度的影响规律; 部分学者^[12]进一步分析了加宽过渡形式对驾驶稳定性的影响。在匝道横断面设计方面, 2021 年, 吴明先等^[13]率先建立了车道宽度及加宽位置与车辆运行轨迹之间的计算模型, 为匝道横断面参数的精细化优化提供了工程分析框架。上述研究已从行为层面揭示了横断面参数对车辆运行状态的影响规律, 但对地下互通匝道复合线形与受限边界条件下的车辆运行特征关注相对不足。除车辆运行状态外, 横断面空间构成还会影响驾驶人的视觉认知与路径预期。1995 年, Theeuwes 等^[14]首次提出了自解释道路 (Self-explaining Road, SER) 概念, 为利用道路横断面空间构成来引导驾驶人速度与路径预期引入了新思路。随后, 部分学者^[15]进一步指出横断面空间构成是封闭环境下驾驶人获取速度感知与路径信息的重要参照; 随着眼动追踪技术的引入, 横断面环境对驾驶人视觉的调控机制^[16]也逐渐受到关注。然而, 现有视觉试验多聚焦于普通单洞隧道或开阔地面道路, 较少涉及地下互通匝道线形连续变化、侧墙边界连续约束和分合流构造叠加等特有场景, 横断面参数对驾驶人视觉注意分配的影响规律仍需进一步量化。

在横断面参数校核方面, 地下互通匝道的复合环境特征也对评价方法提出了更高要求。现有横断面参数设计指标多依据现行规范中基于设计速度的查表法确定, 或辅以运行速度协调性等指标进行校验^[4]。该类确定性设计方法便于工程应用, 但对人-车-路系统中车辆轨迹波动、驾驶行为差异和视觉环境变化等随机因素考虑有限, 难以表征地下受限空间内的综合失效风险^[17-18]。系统可靠度理论可将随机变量、极限状态和目标可靠指标纳入统一分析框架, 已在桥梁结构、路基路面和长隧道衬砌设计等领域实现广泛的工程化应用, 为道路设计由确定性校核向概率化评价拓展提供了方法基础。但针对隧道密闭环境与匝道多曲线耦合条件下的地下互通场景, 现有研究仍缺乏相应的系统可靠度计算框架。

收稿日期: 2026-04-02

作者简介: 张驰 (1981-), 男, 博士, 教授, 从事道路总体设计及交通安全研究。E-mail: zhangchi@chd.edu.cn。

基金项目: 四川省交通运输科技项目 (2021-ZL-15); 四川省交通运输科技项目 (2023-A-4)

基于上述问题，本文以山区高速公路地下互通匝道为对象，构建不同车道宽度、侧向宽度和线形组合的驾驶模拟场景，采集大型车辆运行和眼动数据，分析横断面参数对速度选择、横向控制和视觉注意分配的影响。在此基础上，引入系统可靠度方法，将侧向边界裕度和视觉注意离散程度纳入同一评价框架，提出不同线形和运行速度条件下的侧向宽度取值，为地下互通匝道横断面设计参数的确定提供依据。

1 仿真试验设计

1.1 方案场景设计

本研究依托我国西部某高速公路在建地下互通立交工程实际设计资料，基于其平纵线形、横断面及隧道结构参数构建三维驾驶仿真场景。仿真试验路段纵坡取 4%，左、右转曲线路段平曲线半径均取 162 m，相关指标来源于依托工程设计方案，并接近受限地形条件下的规范不利取值，可表征山区高速公路地下互通匝道小半径、大纵坡条件下的典型车辆运行环境。考虑高速公路交通组成中重型货车通行需求，选取符合《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589-2016) [19]标准的典型三轴重型货车模型作为试验代表车型，车长 12.0 m，车宽 2.55 m，用于分析相对不利条件下横断面宽度参数对大型车辆横向控制和侧向安全裕度的影响。依托工程及部分横断面试验驾驶仿真场景如图 1 所示。

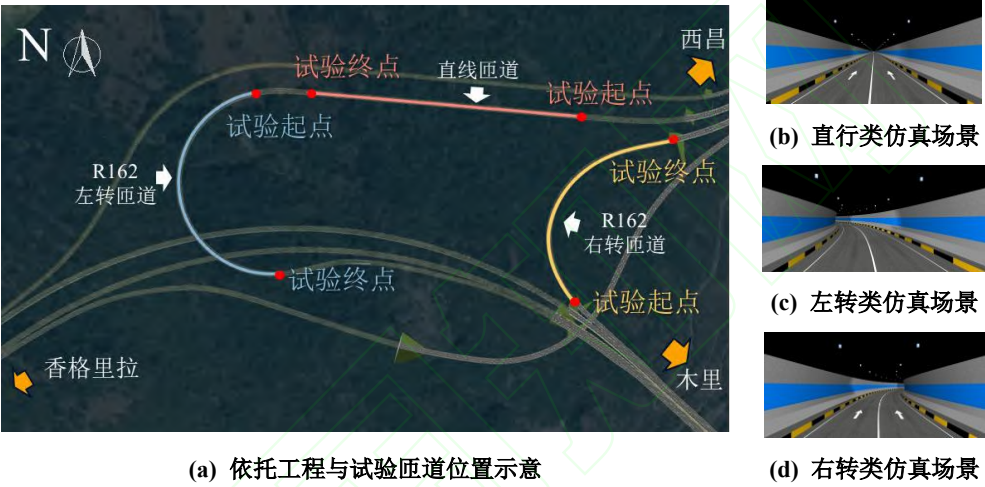


图 1 部分横断面试验驾驶场景示意图

Fig. 1 Schematic diagram of selected driving scenarios for cross-sectional tests

鉴于道路几何要素众多，若采用全因子试验将导致工况组合规模过大，难以高效实施。为此采用正交试验设计方法对方案进行降维优化。选取车道宽度、侧向宽度及车道位置作为 3 水平核心变量，将余宽与检修道宽度设为常量，并耦合直线、左转及右转曲线三种线形要素，构建基于 $L_{18}(3^7)$ 正交表的试验矩阵。通过正交筛选与数理统计分析，筛选形成 9 组代表性测试场景，实现以较少的试验次数有效覆盖关键几何特征组合，各试验场景的详细变量取值及组合参数见表 1。

表 1 试验场景设计

Table 1 Design of test scenarios

工况编号	场景类型	车道宽度/m	侧向宽度/m	曲线半径/m	纵向坡度/%
S1	直线	3.25	0.5	∞	4
S2	直线	3.5	1	∞	4
S3	直线	3.75	1.5	∞	4
L4	左转	3.5	1	162	4
L5	左转	3.75	0.5	162	4
L6	左转	3.25	1.5	162	4
R7	右转	3.5	1	162	4
R8	右转	3.25	0.5	162	4
R9	右转	3.75	1.5	162	4

1.2 试验组织

试验依托 UC-win/Road 驾驶模拟平台开展，该平台支持精细化三维道路建模与车辆动力学仿真，已广泛应用于地下道路

与复杂线形安全研究^[20]，试验场景高度还原了地下互通匝道的侧壁材质、驾驶环境及空间尺寸，确保驾驶沉浸感与视觉反馈的真实性。研究采用的试验设备与软件如图2所示。



图 2 研究采用的试验设备与软件

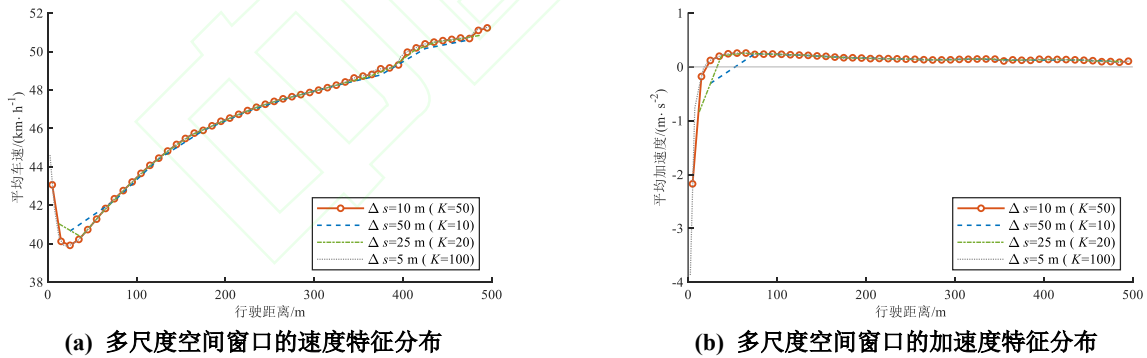
Fig. 2 Experimental equipment and software used in the research

试验共招募 30 名持照驾驶人，平均驾龄 3 年以上，身体状况良好，视力或矫正视力正常，均具有高速公路驾驶经历。试验流程分为三个阶段：（1）准备阶段：向被试讲解试验任务与注意事项，佩戴眼动仪并校准；（2）适应性试驾：被试进行约 10 分钟的自由驾驶，熟悉模拟器操控特性及车辆动力响应，降低模拟器晕动反应对试验数据的影响；（3）正式试验：被试按照随机顺序完成 9 组场景驾驶任务，期间采集车辆运行及眼动数据。考虑双车道地下互通匝道中车道位置可能影响车辆横向轨迹选择，每位受试驾驶人在各试验场景下分别完成左侧车道和右侧车道行驶任务。试验过程中要求受试者保持在指定车道内稳定行驶，不进行主动换道，后续数据处理中将车道位置作为分组因素进行统计分析。

1.3 数据采集与处理

依托驾驶仿真平台采集车辆运行轨迹、速度和方向盘转角等运行参数，采样频率为 10 Hz；同步记录驾驶人眼动注视数据，采样频率为 120 Hz。剔除信号抖动造成的异常离群值，再依据统一时间戳完成车辆运行数据与眼动数据的同步匹配。

针对地下互通匝道车速变化剧烈的特点，单纯的时间窗口统计难以保证空间位置的一致性。借鉴距离域建模思想，将试验路段划分为连续的空间统计单元。经图 3 对 5、10、25、50 m 四种窗口尺度进行比较后，选取 10 m 作为后续分析窗口。该尺度能够较好保留速度和加速度的局部变化，同时降低短时波动对统计结果的影响。



注： Δs 为空间窗口长度，m； K 为空间窗口数量。

图 3 多尺度空间窗口特征分布

Fig. 3 Feature distributions across multiscale spatial windows

2 车辆行驶特性分析

2.1 运行速度特征

为获得具有统计代表性的速度分布指标，基于原始行为数据计算了每位驾驶人在 9 组正交试验场景下的 85% 位车速 v_{85} ，采用四分位距法筛查离群值，其中， Q_1 和 Q_3 分别表示第一四分位数和第三四分位数，四分位距记为 I ，且 $I = Q_3 - Q_1$ ；将超出 $[Q_1 - 1.5 I, Q_3 + 1.5 I]$ 范围的样本判定为离群值并予以剔除。在此基础上，通过单因素方差分析 (One-way analysis of variance,

one-way ANOVA) 检验不同试验场景下运行速度的差异, 并采用 Tukey 诚实显著差异检验 (Tukey's honestly significant difference test, Tukey HSD) 开展事后多重比较, 依据显著性水平 $\alpha = 0.05$ 对各工况进行分组, 具体的统计分布与检验结果如图 4 所示。

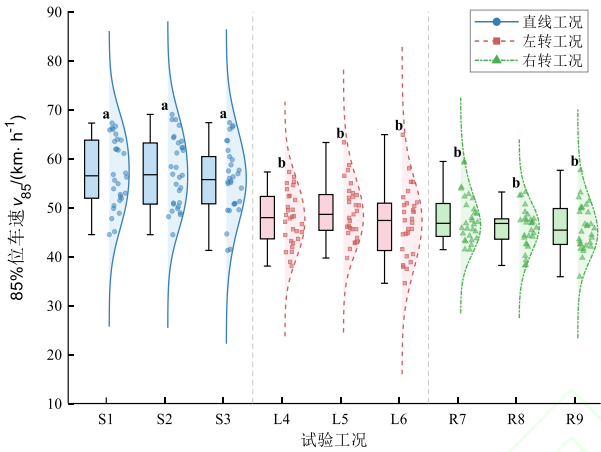


图 4 不同场景运行速度分布

Fig. 4 Operating speed distributions under different scenarios

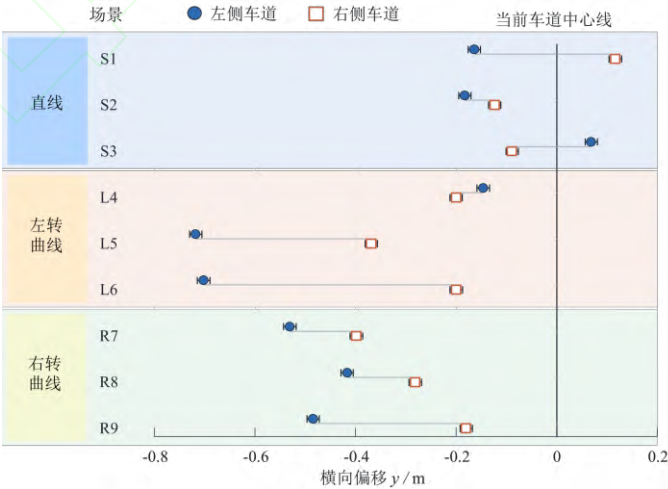
图4展示了不同试验工况下85%位运行车速 v_{85} 的分布及显著性检验结果。图中字母为Tukey HSD事后多重比较的显著性分组标记, 含有相同字母的工况间差异未达到显著水平, 字母完全不同的工况间差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。统计结果表明, 直线工况均归入a组, 左转和右转曲线工况均归入b组, 说明直线段与曲线段运行速度差异达到显著水平。直线段的 v_{85} 整体高于曲线段, 表明平面线形对地下互通匝道运行速度具有显著影响。同一线形类别内, 车道宽度和侧向宽度变化引起一定的速度波动, 但总体仍呈现直线段速度较高、曲线段速度较低分布特征。

2.2 横向偏移特征

横向偏移量用于表征车辆相对于当前行驶车道中心线的位置。设第 k 个空间窗口单元内车辆左、右外轮廓至双车道行车区域左、右边界的距离分别为 $d_L(k)$ 、 $d_R(k)$, 则车辆横向偏移量 $y(k)$ 定义为:

$$y(k) = \frac{d_R(k) - d_L(k)}{2} - \eta \cdot \frac{W_j}{2} \quad (1)$$

式中, W_j 为第 j 个工况的单车道宽度, m; η 为车道位置修正系数, 当车辆位于左侧车道时 $\eta=1$, 位于右侧车道时 $\eta=-1$ 。 $y(k)=0$ 表示车辆位于当前车道中心线, $y(k)>0$ 表示车辆偏向当前车道左侧, $y(k)<0$ 表示车辆偏向当前车道右侧。各工况下的横向位置分布如图 5 所示, 其中误差线表示同一工况、同一车道位置下 30 名驾驶人横向偏移均值的 95%置信区间, 用于表征均值估计的不确定性。



注: 误差线为95%置信区间, 正值表示相对当前行驶车道中心线偏左; 负值表示偏右。

图 5 不同工况及车道位置下车辆横向偏移均值

Fig. 5 Mean vehicle lateral offset under different test conditions and lane positions

由图 5 可见,直线路段车辆横向偏移较小,左、右车道平均偏移量分别约为 -0.092 m 和 -0.029 m ,车辆整体接近当前车道中心线。曲线路段右向偏移明显增大,其中左转曲线左、右车道平均偏移量分别约为 -0.528 m 和 -0.258 m ,右转曲线分别约为 -0.478 m 和 -0.287 m 。分工况看,L5 和 L6 左侧车道偏移幅度较大,R7~R9 均表现出较为稳定的右向偏移。结果说明曲线条件下车辆横向控制由小幅波动转为较明显的车道内位置调整。

左转曲线中的右向偏移主要与内侧通行余量有关。车辆左转时,所在车道左侧边界对应曲线内侧,重型货车后轴轨迹相对前轴向内侧收缩,车辆转弯轨迹包络宽度增大,车身外廓与内侧边界间的余量减小。既有研究将内轮差和转弯占用宽度作为重型车辆受限空间通行评价的重要指标^[21],实车轨迹研究也指出,横向偏移和侧向余宽直接关系到车道内安全余量^[22]。因此 L5、L6 工况左侧车道较大的右向偏移体现了驾驶人在内侧余量受限条件下对车身通过空间的调整。

右转曲线的右向偏移更接近视觉参照引导下的轨迹调整。右侧标线、侧墙和照明带在近场视野内连续出现,为驾驶人提供了稳定的边界参照,使车辆轨迹控制更容易受到右侧边界线索影响。既有曲线驾驶研究表明,路肩、边缘线和道路标线会影响驾驶人的注视策略、横向位置和车道保持行为^[23-24]。同时,左舵车辆驾驶人视点位于车身中心左侧,当驾驶人以自身视点或方向盘位置估计车道位置时,车辆质心可能出现一定右向偏置。从这一角度而言,R7~R9 工况中较稳定的右向偏移,反映右侧连续边界参照与左舵视点偏置共同作用下的车道内轨迹调整。

2.3 横向稳定性评价

单一横向偏移均值难以反映车辆运行过程中的轨迹波动和边界接近状态。为进一步评价车辆横向控制稳定性,引入横向偏移标准差 S_y 表征车辆在当前车道内的横向波动程度,采用最小侧向裕度 $M_{\min}$ 表征车辆外轮廓接近车道行车区域侧向边界的最小距离。设第 j 个工况下某一有效轨迹包含 n 个空间窗口,第 k 个窗口的横向偏移量为 $y(k)$,则 S_y 定义为:

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (y(k) - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中, $\bar{y}$ 为该有效轨迹的横向偏移均值, m 。 S_y 越大,表示车辆在车道内的横向波动越明显。

考虑车辆外廓宽度对边界裕度的影响,第 k 个空间窗口的侧向裕度 $m(k)$,单位为 m ,定义为:

$$m(k) = \min (d_L(k), d_R(k)) \quad (3)$$

进一步取全过程最小值作为该有效轨迹的最小侧向裕度:

$$M_{\min} = \min_{1 \leq k \leq n} m(k) \quad (4)$$

$M_{\min}$ 越小,表示车辆运行过程中越接近车道边界,边界安全裕度越低。各工况下 S_y 和 $M_{\min}$ 的统计结果如图 6 所示。

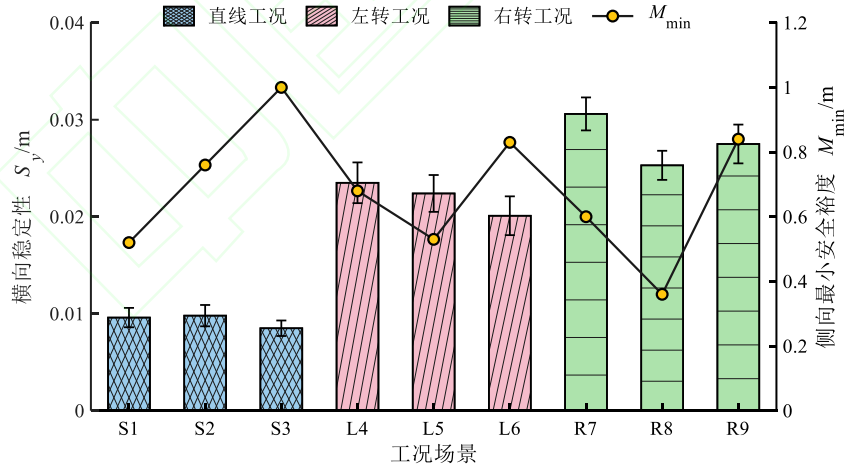


图 6 不同工况下横向偏移标准差与最小侧向裕度

Fig. 6 Standard deviation of lateral offset and minimum lateral margin under different test conditions

由图 6 可见,直线工况 S1~S3 的 S_y 整体较低,车辆横向控制较稳定;曲线工况的 S_y 明显增大,其中右转工况 R7~R9 整体高于直线工况,说明曲线行驶过程中车辆轨迹修正更频繁。结合最小侧向裕度结果,R8 工况表现出较高横向波动和较低边界裕度, $M_{\min}$ 约为 0.36 m ,为各工况中的低值。该结果表明,在车道宽度和侧向宽度均受限的右转曲线中,车辆横向控制波动和边界接近风险同步增大,是后续可靠度分析中需要重点关注的工况。

3 驾驶人视觉注视行为分析

3.1 AOI 设置与划分

结合地下互通匝道典型视觉要素和驾驶任务需求, 本文将驾驶人视野划分为 8 个注视兴趣区(Area of Interest, AOI), 具体包括: 隧道洞顶、右侧洞壁、左侧洞壁、左侧侧宽、右侧侧宽、左侧车道、右侧车道等, 划分结果如图 7 所示。

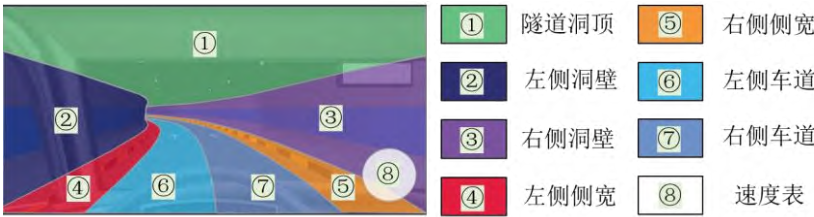


图 7 AOI 划分示意图

Fig. 7 Schematic diagram of AOI partitioning

3.2 视觉注意组织特征

为刻画不同场景类型与横断面组合条件下的视觉组织差异, 采用归一化注视熵量化注意资源在 AOI 间的分配均衡性。将行驶过程按 10 m 距离窗口进行统计, 对第 k 个窗口内落入 AOI i 的注视持续时间记为 $T_{i,k}$, 则该窗口内的注视概率为:

$$P_{i,k} = \frac{T_{i,k}}{\sum_{i=1}^m T_{i,k}} \quad (5)$$

据此定义窗口 k 的 Shannon 注视熵为:

$$H_k = -\sum_{i=1}^m P_{i,k} \ln P_{i,k} \quad (6)$$

为消除 AOI 数量对可比性的影响, 在相同对数底下对注视熵进行归一化处理:

$$H_{n,k} = \frac{H_k}{\ln m} \in [0,1] \quad (7)$$

其中, $H_{n,k}$ 反映单位窗口内驾驶人视觉注意在各 AOI 间的离散程度。一般而言, $H_{n,k}$ 较大表示注视分布更分散, 驾驶人需要在更多视觉目标之间分配注意资源; $H_{n,k}$ 较小表示注视更集中, 注意资源更倾向于少数关键参照目标。为比较不同试验场景下驾驶人视觉注意分配特征, 进一步统计各工况的归一化注视熵, 结果见表 2。

表 2 不同场景下注视熵统计结果

Table 2 Statistical results of gaze entropy under different scenarios

组别	N (窗数)	H_n (均值 $\pm$ SD)	95%CI
总体	1 436	0.764 $\pm$ 0.142	[0.758, 0.771]
直线	480	0.761 $\pm$ 0.162	[0.746, 0.776]
左转弯线	476	0.738 $\pm$ 0.108	[0.728, 0.748]
右转弯线	480	0.796 $\pm$ 0.122	[0.785, 0.807]

注: SD 为标准差 (Standard Deviation, SD); CI 为置信区间 (Confidence Interval, CI)。

表 2 表明, 总体 H_n 为 0.764, 表明地下匝道环境下驾驶人视觉注意呈现出多 AOI 分配特征。分场景比较结果显示, 左转弯曲线组 H_n 最低, 且其 95% 置信区间整体低于总体均值附近水平, 表明该场景下驾驶人的注意分配更倾向于向少数关键参照信息集中; 右转弯曲线组 H_n 最高, 说明其注意分布更分散, 驾驶人需要在车道保持、道路边界及前方路径等信息之间进行更广泛的视觉采样。上述结果表明, 不同线形条件下驾驶人的视觉注意组织方式存在差异, 横断面组合条件对视觉策略的影响同时体现在注视对象选择和注意资源分配的离散程度两方面。

根据自解释道路理论, 良好的道路环境应能诱导驾驶人产生直观、低负荷的视觉认知模式。本研究中, 较高的归一化注视熵 H_n 表明驾驶人注意资源在多个兴趣区之间分配更分散, 通常对应更广范围的信息采样需求。结合驾驶行为研究结果, 右转弯曲线中较高的 H_n 与较明显的横向波动相对应, 说明曲线段驾驶人需要同时关注路径走向和侧向边界信息。

4 横断面设计参数行车安全可靠度分析

4.1 极限状态模型构建

受横断面参数、运行速度和线形条件共同作用，驾驶人的车辆操纵和视觉响应呈现个体差异，并具有相对稳定的变化规律和概率分布特征，为采用可靠度方法开展行车安全评价提供了统计基础。系统可靠度通常用于表征多失效模式系统在给定功能要求下保持安全状态的概率，已被广泛用于结构可靠度和道路几何可靠度分析^[25-26]。据此，本文将驾驶人、重型货车和地下匝道横断面环境共同作用下的车辆运行过程视为行车安全系统。基于前文车辆横向运行特征与视觉注意组织特征分析，从侧向安全裕度和视觉注意离散程度两个方面构建横断面参数可靠度评价模型。

在物理层面，定义侧向裕度不足为失效模式 I。选取最小侧向裕度 $M_{\min}$ 作为评价指标，表征车辆外轮廓接近横向边界时的最小安全余量。结合既有研究^[27]及本研究样本统计，选取 $M_{\min}$ 15%分位值 0.45 m 作为物理失效阈值 T_{phy} 。当 $M_{\min}$ 小于物理失效阈值时，说明车辆可用侧向避险空间不足，系统失效。在视觉认知层面，定义视觉注意离散超限为失效模式 II。选取归一化注视熵 H_n 作为评价指标，表征驾驶人注意资源在不同兴趣区之间的分配离散程度。依据样本结果，选取 85%分位值 0.90 作为视觉注意控制阈值 T_{vis} 。当 H_n 超过该阈值时，表明驾驶人的视觉注意分布较为分散，路径信息获取负荷相应增加。

基于上述失效模式定义，将横断面参数行车安全校核转化为极限状态函数。设 B 为车道宽度， C 为侧向宽度， v_{85} 为运行速度， A 为线形类型，构建侧向裕度极限状态函数 Z_1 与视觉注意极限状态函数 Z_2 ，如式 8-式 9 所示：

$$Z_1 = M_{\min}(B, C, v_{85}, A) - T_{\text{phy}} \quad (8)$$

$$Z_2 = T_{\text{vis}} - H_n(B, C, v_{85}, A) \quad (9)$$

式中， $M_{\min}(B, C, v_{85}, A)$ 为给定车道宽度 B 和侧向宽度 C 下的侧向裕度预测值，m。当 $Z_1 < 0$ 时，表示车辆侧向安全裕度不足； $H_n(B, C, v_{85}, A)$ 为给定参数下的归一化注视熵预测值。当 $Z_2 < 0$ 时，表明视觉注意离散程度超过阈值。

4.2 性能指标建模

为连续计算不同横断面参数和运行条件下的行车安全性能指标，采用响应面法（Response Surface Method, RSM）建立回归模型。分别以最小侧向裕度 $M_{\min}$ 和归一化注视熵 H_n 为响应变量 Y ，以车道宽度 B 、侧向宽度 C 、运行速度 v_{85} 和线形类型为解释变量，建立回归方程见式 10：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 B + \beta_2 C + \beta_3 v_{85} + \beta_{22} C^2 + \beta_{12} BC + \delta_L A_L + \delta_R A_R + \epsilon \quad (10)$$

式中： β_0 为常数项； β_1 、 β_2 和 β_3 分别为车道宽度、侧向宽度和运行速度的一次项回归系数，表征各因素的主效应； β_{22} 为二次项系数，表征非线性特征； β_{12} 为交互项系数，表征两类宽度参数的共同作用； A_L 和 A_R 分别为左转曲线和右转曲线变量，直线条件下均取 0，左转曲线条件下 $A_L=1$ ，右转曲线条件下 $A_R=1$ ； δ_L 和 δ_R 分别为左转曲线和右转曲线修正系数，用于表征其相对于直线条件的变化； ϵ 为残差项。

采用最小二乘法估计模型参数，并对回归系数进行显著性检验，结果详见表 3。

表 3 性能指标响应面模型回归系数与显著性检验

Table 3 Regression coefficients and significance tests for response surface models of performance indicators

模型项	最小侧向裕度 $M_{\min}$		归一化注视熵 H_n	
	系数值(β)	p 值	系数值(β)	p 值
常数项	0.477 3	<0.001	0.820 4	<0.001
车道宽度 B	0.050 0	0.031	-0.010 0	0.071
侧向宽度 C	0.105 0	<0.001	-0.105 0	<0.001
运行速度 v_{85}	-0.001 5	0.041	0.001 0	0.018
二次项 C^2	-0.012 0	0.184	0.015 0	0.032
交互项 $B \cdot C$	0.008 0	0.096	0.005 0	0.041
左转修正项	-0.030 0	0.004	-0.014 5	0.021
右转修正项	-0.025 0	0.012	0.017 7	0.006

注： β 为响应面模型回归系数， p 为显著性概率。粗体数据表示除常数项外回归系数在 $\alpha=0.05$ 水平下显著； $p<0.01$ 表示极显著，直线为线形参照组，其线形修正项取 0。

采用调整决定系数（Adjusted coefficient of determination， R_{adj}^2 ）和均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）评价响应面模型的拟合程度与预测误差。经计算，最小侧向裕度模型的 R_{adj}^2 和 RMSE 分别为 0.798 和 0.099，归一化注视熵模型

分别为 0.846 和 0.056，表明两模型具有较好的数据解释能力和较小的预测误差，可用于不同横断面参数、运行速度和线形条件下两项性能指标的估计。

结合表 3 分析，侧向宽度对两项行车安全性能指标均具有显著影响。其中， $M_{\min}$ 模型的侧向宽度和车道宽度一次项系数均为正数，且侧向宽度系数较大，表明增加侧向空间对车辆安全余量的提升作用更为明显。对于视觉指标 H_n ，侧向宽度的一次项系数为负、二次项系数为正，表明随着侧向宽度增加，视觉注意离散程度下降，且改善幅度逐渐减弱；交互项 $B \cdot C$ 达到显著水平，说明车道宽度与侧向宽度对视觉注意分配存在一定的耦合作用。

运行速度 v_{85} 的回归系数在 $M_{\min}$ 模型中为负，在 H_n 模型中为正，表明运行速度提高时，车辆侧向安全余量减小，驾驶人的视觉注意分布趋于分散，横向控制和信息获取要求相应提高。线形修正项表明，以直线参数为参照，左转和右转曲线条件下 $M_{\min}$ 的修正系数均为负，说明曲线条件下驾驶人对横向空间的使用需求增加。左转曲线对应的 H_n 修正系数为负，右转曲线为正，与前文左转曲线注意分配较集中、右转曲线视觉搜索范围较广的特征一致。

响应面模型用于计算给定横断面参数、运行速度和线形条件下两项行车安全性能指标的平均水平，模型残差还包含驾驶人之间的稳定差异以及同一驾驶人在不同空间窗口内的状态变化。为表征这两部分随机变异，分别统计驾驶人平均残差和窗口剩余残差的标准差，结果见表 4。

表 4 安全性能指标随机变异统计结果

Table 4 Statistical results of random variation in safety performance indicators

安全性能指标	样本量 N	驾驶人差异标准差	窗口内波动标准差
最小侧向裕度 $M_{\min}$	1 916	0.055 m	0.082 m
归一化注视熵 H_n	1 436	0.031	0.046

驾驶人差异反映不同驾驶人在车辆操纵和视觉响应方面的差别，窗口内波动反映同一驾驶人的状态随空间位置产生的变化。在同时具有两项有效指标的窗口样本中，两项性能指标的模型残差相关系数为-0.25。后续蒙特卡洛模拟采用成对经验抽样，使驾驶人差异、窗口内波动及两项指标之间的相关关系进入系统可靠指标计算。

上述模型同时包含横断面宽度、速度和线形因素，其中车道宽度与侧向宽度属于工程设计中的直接控制参数。为进一步解析两类宽度参数对性能指标的总体作用， v_{85} 取 50 km/h 对应绘制三维响应曲面，如图 8 所示。

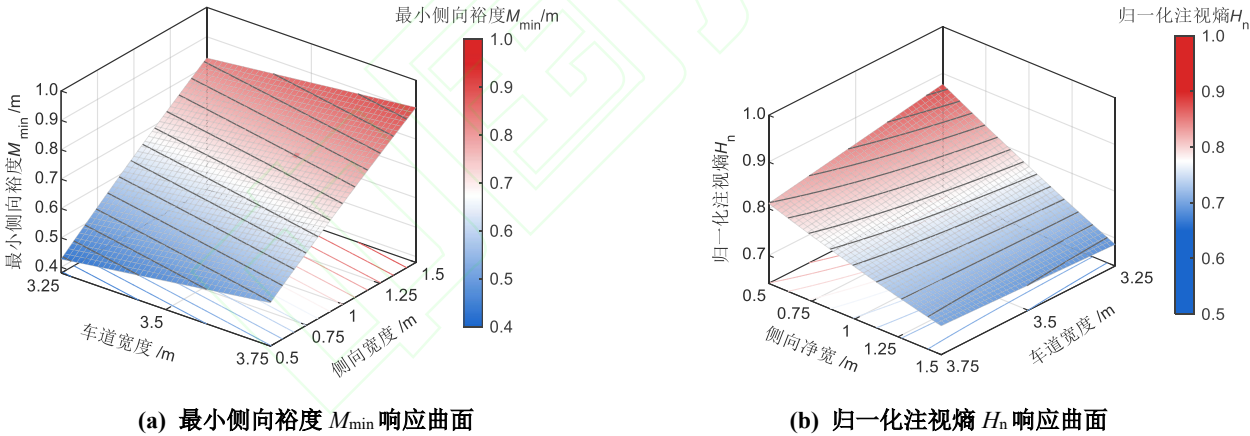


图 8 横断面宽度参数对安全性能指标的响应曲面

Fig. 8 Response surfaces of safety performance indicators with respect to cross-sectional width parameters

由图 8 (a)可见，在研究参数范围内，最小侧向裕度 $M_{\min}$ 的预测值约为 0.61~0.75 m，并随车道宽度和侧向宽度增加而提高。其中，沿侧向宽度方向的曲面变化更为明显，表明增加侧向空间能够有效提高车辆与横向边界之间的安全余量。由图 8 (b)可见，归一化注视熵 H_n 的预测值约为 0.74~0.80，并随侧向宽度的增加而下降，说明驾驶人注视分布趋于集中，视觉搜索范围有所收敛。车道宽度方向的曲面变化相对平缓，表明在地下互通匝道受限空间中，侧向宽度对驾驶人视觉注意分配的影响更明显。随着侧向宽度增加，两项响应曲面的变化逐渐平缓，表明继续增加侧向宽度时，性能指标的改善幅度逐步减小。

4.3 行车安全系统可靠度计算

在上述安全性能指标模型和随机变异统计结果基础上，开展不同线形和横断面参数组合下的系统可靠指标计算。考虑到地下互通匝道行车安全同时受到侧向可用空间和视觉认知状态影响，任一安全失效模式发生即视为整体行车安全系统失效，因此将其定义为串联系统。系统失效概率 P_{sys} 为两类失效事件的并集概率，计算公式见式 11：

$$P_{\text{sys}} = P(Z_1 < 0 \cup Z_2 < 0) = 1 - P(Z_1 \geq 0 \cap Z_2 \geq 0) \quad (11)$$

式中, Z_1 为侧向裕度极限状态函数, Z_2 为视觉注意极限状态函数。

由于两类极限状态函数均受到车道宽度和侧向宽度的非线性影响, 且参数间存在交互作用, 采用蒙特卡洛模拟法 (Monte Carlo Simulation, MCS) 计算系统失效概率。当模拟抽样次数 N 足够大时, 失效事件的样本频率逐渐趋近于理论概率。综合计算精度和结果稳定性, 模拟抽样次数取 $N=10^6$ 以保证低失效概率区间内计算结果的稳定性。具体计算步骤如下:

步骤 1 设置计算工况。车道宽度分别取 3.25、3.50 和 3.75 m, 侧向宽度在 0.50~1.50 m 范围内按 0.01 m 间隔取值; 结合图 4 所示 v_{85} 分布范围, 运行速度分别取 40、50 和 60 km/h, 并分别计算直线、左转曲线和右转曲线工况。

步骤 2 根据式 10 计算给定车道宽度、侧向宽度、运行速度和线形条件下 $M_{\min}$ 与 H_n 的预测值。

步骤 3 在同时具有两项有效指标的样本中, 分别从驾驶人平均残差对和空间窗口剩余残差对中进行有放回抽样, 并分别叠加至 $M_{\min}$ 和 H_n 的预测值, 生成一次模拟对应的两项性能指标。成对抽样用于保留两项指标随机变化之间的相关关系。

步骤 4 将模拟结果与控制阈值进行比较。满足 $M_{\min} < 0.45$ m 或 $H_n > 0.90$ 时, 该次模拟计入系统失效次数 N_f ; 两项指标均满足控制要求时, 该次模拟计为安全状态。

步骤 5 重复上述抽样与判定过程 10^6 次, 根据式 11 计算系统失效概率 P_{sys} , 再将其换算为系统可靠指标 β_{sys} , 计算公式如式 12 所示:

$$\beta_{\text{sys}} = \Phi^{-1}(1 - P_{\text{sys}}) \approx \Phi^{-1}\left(1 - \frac{N_f}{N}\right) \quad (12)$$

式中: β_{sys} 为系统可靠指标, 可理解为系统状态距失效的安全宽裕度, 其数值越大, 系统失效概率越低, 横断面参数对应的行车安全水平越高; N 为总抽样次数; N_f 为蒙特卡洛模拟中系统失效的样本数; $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的逆函数。

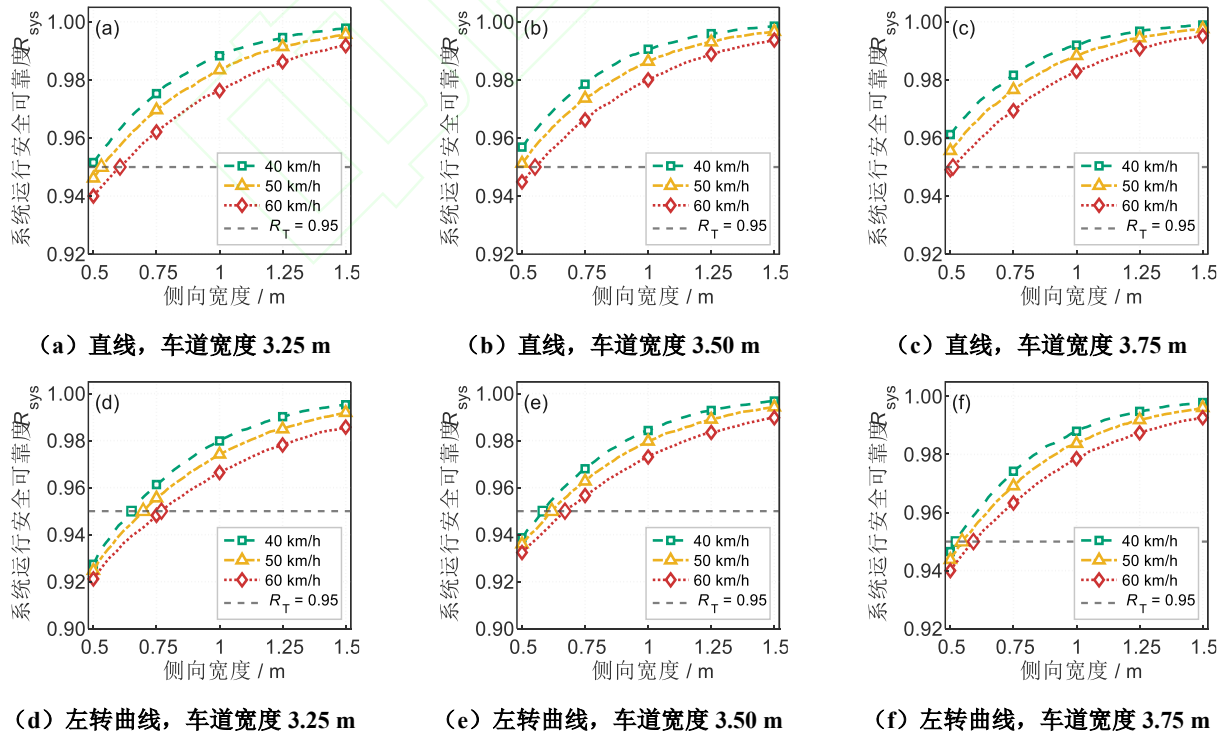
为直观表示不同参数组合下的安全概率, 将系统可靠指标进一步转换为系统行车安全可靠度 R_{sys} , 计算公式见式 13:

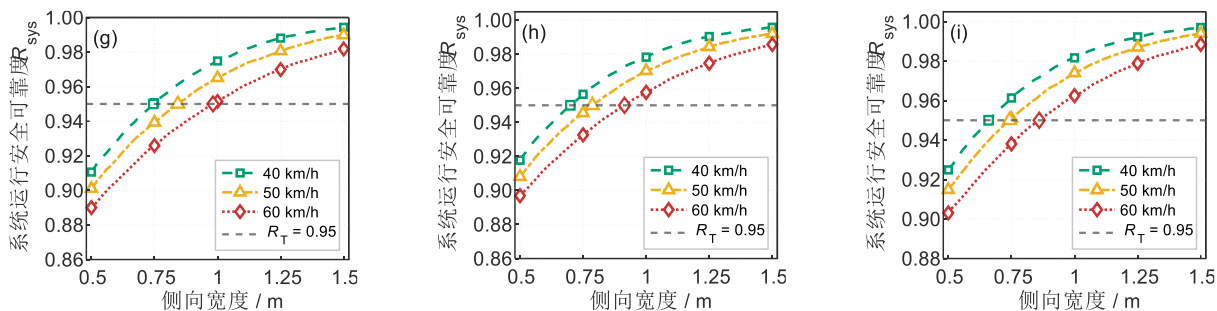
$$R_{\text{sys}} = 1 - P_{\text{sys}} = \Phi(\beta_{\text{sys}}) \quad (13)$$

式中, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; R_{sys} 表示给定参数组合下车辆行驶状态同时满足侧向安全裕度和视觉注意约束的概率。

参考《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120-2020)^[28] 中对高速公路一级安全等级可靠度的规定, 目标系统行车安全可靠度 R_T 取 0.95, 对应的目标可靠指标 β_T 为 1.645, 目标失效概率 P_T 为 0.05, 该目标水平表示给定参数条件下 95% 的随机行车状态满足两项安全约束。

按照上述步骤, 计算各参数组合对应的 P_{sys} 和 β_{sys} , 随后转换为 R_{sys} 。为直观反映侧向宽度变化及目标可靠度 $R_T=0.95$ 的交点关系, 以侧向宽度为横坐标、系统行车安全可靠度 R_{sys} 为纵坐标绘制可靠度曲线, 结果如图 9 所示。





(g) 右转曲线, 车道宽度 3.25 m (h) 右转曲线, 车道宽度 3.50 m (i) 右转曲线, 车道宽度 3.75 m

图 9 不同工况下侧向宽度与系统行车安全可靠度的关系

Fig. 9 Relationship between lateral width and system driving safety reliability under different test conditions

由图 9 可见, 各工况下的系统行车安全可靠度均随侧向宽度增加而提高, 并逐渐趋于稳定。运行速度提高时, 可靠度曲线整体下移, 曲线与目标可靠度线的交点向较大侧向宽度方向移动, 表明达到目标可靠水平所需的侧向宽度随运行速度提高而增加。车道宽度由 3.25 m 增加至 3.75 m 时, 同一线形和运行速度条件下的可靠度曲线整体上移, 说明增加车道宽度能够改善系统可靠水平, 并对侧向宽度需求形成一定补偿。相同车道宽度和运行速度条件下, 直线路段的可靠度总体较高, 左转曲线次之, 右转曲线相对较低。右转曲线在 50 km/h 和 60 km/h 条件下的目标可靠度交点整体位于较大侧向宽度区间, 表明该类工况同时受到车辆横向空间需求和视觉注意离散程度增加的影响。图 9 中各曲线与 $R_T=0.95$ 水平线的交点即为后续工程参数取值所采用的临界侧向宽度。

4.4 横断面参数工程适配性分析

现行公路路线、隧道及立体交叉相关规范从道路功能、设计速度、车辆通行和建筑限界等方面规定了横断面参数的基本取值, 为地下互通匝道横断面设计提供了基础依据。地下互通匝道受隧道封闭边界、曲线行驶和路径转换等因素共同影响, 相同横断面参数在不同线形和运行速度条件下对应的行车安全水平存在差异。为此, 在规范基本取值^[4]基础上结合系统行车安全可靠度结果, 对车道宽度和左右侧侧向宽度取值进行工程适配性分析。

为将可靠度计算结果转化为横断面参数取值, 在给定车道宽度、运行速度和线形条件下, 将系统可靠指标达到目标值 β_T 时对应的侧向宽度记为临界侧向宽度 C_{cr} 。计算时根据图 9 中可靠度曲线与目标可靠度 $R_T=0.95$ 的交点确定 C_{cr} , 并按 0.25 m 工程级差向上归整。左右侧侧向宽度存在差异时, 可分别将对应侧向宽度代入模型计算, 并以可靠度较低的一侧作为横断面参数取值依据。

不同线形、运行速度和车道宽度条件下的临界侧向宽度见表 5。

表 5 不同运行条件下侧向宽度临界值及工程取值

Table 5 Critical and engineering values of lateral width under different operating conditions

线形	运行速度/(km·h ⁻¹)	侧向临界宽度 C_{cr} /m		
		车道宽度 3.25 m	车道宽度 3.50 m	车道宽度 3.75 m
直线	40	0.50 (0.50)	0.50 (0.50)	0.50 (0.50)
	50	0.53 (0.75)	0.50 (0.50)	0.50 (0.50)
	60	0.60 (0.75)	0.55 (0.75)	0.51 (0.75)
左转曲线	40	0.65 (0.75)	0.58 (0.75)	0.52 (0.75)
	50	0.70 (0.75)	0.62 (0.75)	0.55 (0.75)
	60	0.77 (1.00)	0.67 (0.75)	0.59 (0.75)
右转曲线	40	0.74 (0.75)	0.70 (0.75)	0.66 (0.75)
	50	0.84 (1.00)	0.78 (1.00)	0.74 (0.75)
	60	0.98 (1.00)	0.91 (1.00)	0.85 (1.00)

注: 括号外数值为系统行车安全可靠度 $R_T=0.95$ 对应的临界侧向宽度, 括号内数值为按 0.25 m 级差向上归整后的工程取值。

由表 5 可见, 临界侧向宽度随运行速度提高而增加, 随车道宽度增加而减小。车道宽度取 3.50 m 时, 直线路段在 40~

60 km/h 条件下的临界侧向宽度为 0.50~0.55 m，左转曲线为 0.58~0.67 m，右转曲线为 0.70~0.91 m。按 0.25 m 工程级差归整后，直线和左转曲线的侧向宽度主要取 0.75 m，右转曲线在 50~60 km/h 条件下取 1.00 m。车道宽度增加可在一定程度上降低侧向宽度需求。以右转曲线、60 km/h 工况为例，车道宽度由 3.25 m 增加至 3.75 m 时，临界侧向宽度由 0.98 m 减小至 0.85 m，降低 0.13 m。结果表明，在右转曲线和较高运行速度条件下，侧向宽度仍是横断面参数取值中的主要控制因素。

为进一步说明模型在依托工程中的应用，以车道宽度 3.50 m 作为基础宽度，分别计算侧向宽度取 0.50、0.75 和 1.00 m 时的系统行车安全可靠度，结果见表 6。

表 6 依托工程不同侧向宽度方案的行车安全可靠度结果

Table 6 Driving safety reliability results of different lateral-width schemes in the project

线形	$v_{85}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	系统行车安全可靠度 $R_{\text{sys}}/\%$			目标可靠度下	工程取值/m
		侧向宽度0.50 m	侧向宽度0.75 m	侧向宽度1.00 m	侧向临界宽度 C_{cr}/m	
直线	57.27	94.72	96.88	98.18	0.53	0.75
左转曲线	49.31	93.66	96.34	98.00	0.61	0.75
右转曲线	47.87	91.06	94.84	97.22	0.76	1.00

注：各方案车道宽度均取 3.50 m；目标系统行车安全可靠度 R_T 取 95%，对应目标系统可靠指标 β_T 为 1.645。

由表 6 可见，当侧向宽度取 0.50 m 时，直线、左转曲线和右转曲线的系统行车安全可靠度分别为 94.72%、93.66%和 91.06%。直线路段可靠度接近本文目标水平，曲线路段安全可靠储备相对较小，且右转曲线较为明显。侧向宽度增加至 0.75 m 后，直线和左转曲线的可靠度分别提高至 96.88%和 96.34%；侧向宽度增加至 1.00 m 后，右转曲线可靠度提高至 97.22%。因此，在车道宽度取 3.50 m 条件下，直线和左转曲线路段侧向宽度宜取 0.75 m，右转曲线及运行速度较高路段宜取 1.00 m。

从道路环境自解释性角度分析，侧向宽度增加能够提高车辆与横向边界之间的安全余量，改善驾驶人对车道边线、侧墙距离和车辆横向位置的辨识条件，增强道路边界对车辆横向运行的引导作用。因此，地下互通匝道横断面参数取值应在满足规范基本要求的基础上，兼顾空间利用效率和道路环境自解释性，结合线形类型、运行速度和侧向边界条件确定侧向宽度建议值。对于新建地下互通匝道，可将车道宽度 3.50 m 作为一般方案比选的基础宽度，并结合表 5 确定侧向宽度建议值。右转曲线、较高运行速度或连续曲线段宜优先采用较大的侧向宽度值。对于既有工程，可将现状车道宽度、侧向宽度和实测 v_{85} 代入模型，计算系统行车安全可靠度，并结合速度管理、边线强化、侧墙视线诱导和局部断面优化等措施提高行车安全储备。

5 结 论

本文以山区高速公路地下互通匝道为对象，开展不同车道宽度、侧向宽度和线形组合下的驾驶模拟试验，分析重型货车运行状态和驾驶人视觉注意分配特征，并结合响应面法和蒙特卡洛模拟建立系统行车安全可靠度评价模型。主要结论如下：

（1）地下互通匝道横断面参数和线形条件共同影响车辆横向控制与驾驶人视觉注意分配。直线段车辆横向偏移较小，轨迹控制较稳定；曲线段车辆横向调整幅度和轨迹波动增大。右转曲线归一化注视熵最高，驾驶人需要在路径走向、车道边界和侧墙参照之间进行更广泛的视觉搜索。

（2）侧向宽度是影响地下互通匝道横断面运行适配性的关键参数。响应面模型中，侧向宽度增加能够有效提高最小侧向裕度，降低归一化注视熵；运行速度提高会降低最小侧向裕度，并使视觉注意分布趋于分散。相比车道宽度，侧向宽度对车辆边界安全余量和视觉注意组织的影响更为明显。

（3）基于侧向安全裕度和视觉注意离散程度构建了系统行车安全可靠度模型。以 $M_{\text{min}}<0.45\text{ m}$ 和 $H_n>0.90$ 作为两类失效判据，并按串联系统计算系统失效概率。系统行车安全可靠度随侧向宽度增加而提高，随运行速度提高而降低；在相同车道宽度和运行速度条件下，直线段可靠度总体较高，左转曲线次之，右转曲线可靠储备相对有限。

（4）以目标系统行车安全可靠度 $R_T=0.95$ 为控制值，提出了不同线形、运行速度和车道宽度条件下的侧向宽度取值。车道宽度取 3.50 m 时，直线、左转曲线和右转曲线的临界侧向宽度分别为 0.53、0.61 和 0.76 m，按 0.25 m 工程级差归整后分别取 0.75、0.75 和 1.00 m。依托工程中，侧向宽度由 0.50 m 增加至 1.00 m 后，直线、左转曲线和右转曲线的系统行车安全可靠度分别提高至 98.18%、98.00%和 97.22%。

（5）地下互通匝道横断面参数取值应兼顾空间利用效率和道路环境自解释性。新建工程可结合线形类型、运行速度和车道宽度确定侧向宽度建议值，右转曲线和较高运行速度路段宜采用较大的侧向宽度。本文结果适用于以重型货车为控制车型、线形和横断面条件与依托工程相近的地下互通匝道场景。

参考文献(References):

- [1] 马璐,蒋树屏,林志,等.大型地下互通式立交型式选择和路线标准研究[J].现代隧道技术,2011,48(1):1-5.
Ma Lu, Jiang Shuping, Lin Zhi, et al. Study on type selection and route standard of large underground interchange[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 1-5.
- [2] 白永厚,安炬峰,李冬,等.基于系统动力学的高原隧道作业职业安全影响因素分析[J].安全与环境学报,2026,26(2):667-673.
Bai Yonghou, An Jufeng, Li Dong, et al. System dynamics analysis of factors influencing occupational safety in plateau tunnel operations[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(2): 667-673.
- [3] 尚婷,易爱强,何军,等.自然驾驶状态下城市地下环道驾驶人心理负荷研究[J].交通运输系统工程与信息,2024,24(4):274-282.
Shang Ting, Yi Aiqiang, He Jun, et al. Mental workload of drivers in urban underground ring roads under naturalistic driving conditions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(4): 274-282.
- [4] JTG/T D21—2014 公路立体交叉设计细则[S].
JTG/T D21—2014 Guidelines for design of highway grade-separated intersections[S].
- [5] CJJ 221—2015 城市地下道路工程设计规范[S].
CJJ 221—2015 Code for design of urban underground road engineering[S].
- [6] JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].
JTG 3370.1—2018 Specifications for design of highway tunnels, section 1: Civil engineering[S].
- [7] 王佐,张驰,焦昱棋,等.基于驾驶负荷的高速公路地下互通匝道平纵设计指标研究[J].隧道建设(中英文),2025,45(2):256-267.
Wang Zuo, Zhang Chi, Jiao Yuqi, et al. Geometric design indices of freeway underground interchange ramps based on driving load[J]. Tunnel Construction, 2025, 45(2): 256-267.
- [8] 李振江,李璟,万利,等.高速公路隧道侧向宽度对驾驶绩效及交通安全的影响[J].安全与环境学报,2022,22(4):2024-2033.
Li Zhenjiang, Li Jing, Wan Li, et al. Influence of lateral clearance on driving performance and traffic safety in expressway tunnels[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(4): 2024-2033.
- [9] Hadi M A, Aruldas J, Chow L F, et al. Estimating safety effects of cross-section design for various highway types using negative binomial regression[J]. Transportation Research Record, 1995, 1500: 169-177.
- [10] Chen Sikai, Saeed T U, Alinizzi M, et al. Safety sensitivity to roadway characteristics: A comparison across highway classes[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019, 123: 39-50.
- [11] 王雪松,王婷,陈亦新.基于驾驶模拟技术的公路隧道车道宽度运行影响分析[J].中国安全科学学报,2016,26(6):36-41.
Wang Xuesong, Wang Ting, Chen Yixin. Influence of lane width on driving behavior on freeway tunnel: driving simulator study[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(6): 36-41.
- [12] 狄胜德,周建,张巍汉,等.城市主干道地下小半径平曲线车道加宽安全性研究[J].公路, 2019, 64(5): 16-23.
Di Shengde, Zhou Jian, Zhang Weihang, et al. Study of safety performance of underground urban road widening with small radius lane[J]. Highway, 2019, 64(5): 16-23.
- [13] 吴明先,周永涛,李星,等.匝道横断面宽度及加宽位置研究[J].公路交通科技,2021,38(9):114-122, 140.
Wu Mingxian, Zhou Yongtao, Li Xing, et al. Study on ramp cross-section width and widening position[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(9): 114-122, 140.
- [14] Theeuwes J, Godthelp H. Self-explaining roads[J]. Safety Science, 1995, 19(2/3): 217-225.
- [15] 张兰芳,武雅婷,王淑丽,等.地下快速路驾驶人速度感知敏感性分析及模型构建[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(1):83-90.
Zhang Lanfang, Wu Yating, Wang Shuli, et al. Analysis and modeling of speed perception sensitivity of drivers on underground expressways[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(1): 83-90.
- [16] 秦雅琴,杨妮,谢济铭,等.山区低等级公路典型路段驾驶人视觉差异性分析[J].安全与环境学报,2022,22(6):3235-3243.
Qin Yaqin, Yang Ni, Xie Jiming, et al. Analysis of driver's visual differences in typical sections of low-grade highways in mountainous areas[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 3235-3243.
- [17] 吕能超,王玉刚,周颖,等.道路交通安全分析与评价方法综述[J].中国公路学报,2023,36(4):183-201.

- Lyu Nengchao, Wang Yugang, Zhou Ying, et al. Review of road traffic safety analysis and evaluation methods[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(4): 183-201.
- [18] 胡立伟, 胡飞宇, 赵雪亭, 等. 高速公路隧道出口区域交通风险场识别研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(1): 53-62.
Hu Liwei, Hu Feiyu, Zhao Xueting, et al. Study on traffic risk field identification of expressway tunnel exit area[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(1): 53-62.
- [19] GB 1589—2016 汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值[S].
GB 1589—2016 Limits of dimensions, axle load and masses for motor vehicles, trailers and combination vehicles[S].
- [20] 杜志刚, 杨柳, 韩磊, 等. 行人过街安全岛的心理旋转效应理论优化方法研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(9): 3043-3050.
Du Zhigang, Yang Liu, Han Lei, et al. Research on traffic improvement of pedestrian crossing safety island based on mental rotation[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(9): 3043-3050.
- [21] Neighborgall C, Chen Yang, Ahmadian M. Tyre lateral slip effect on off-tracking of a long combination vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(11): 2765-2784.
- [22] 吴少峰, 陈智威, 张高峰, 等. 基于实车数据的高速公路行驶轨迹偏移和车道侧向余宽[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 197-209.
Wu Shaofeng, Chen Zhiwei, Zhang Gaofeng, et al. Investigation on trajectory deviation and lane lateral margin of passenger cars on freeways based on field driving data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5): 197-209.
- [23] Mecheri S, Mars F, Lobjois R. Gaze and steering strategies while driving around bends with shoulders[J]. Applied Ergonomics, 2022, 103: 103798.
- [24] 刘兵, 朱顺应, 王红, 等. 非对称边缘率标线对弯道驾驶人横向位置调整的影响机理[J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 104-111.
Liu Bing, Zhu Shunying, Wang Hong, et al. Impact mechanism of non-symmetry edge rate bars on drivers' lateral position adjustment when driving in curved sections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(2): 104-111.
- [25] De Santos-Berbel C, Essa M, Sayed T, et al. Reliability-based analysis of sight distance modelling for traffic safety[J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017: 1-12.
- [26] 孙璐, 游克思. 基于多失效模式可靠度的曲线路段行车风险分析[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 36-42.
Sun Lu, You Kesi. Reliability-based risk analysis of vehicle moving on curved sections considering multiple failure modes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 36-42.
- [27] 李诗佳, 徐进. 山区低指标复杂线形公路行驶安全性检验方法[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(7): 2962-2973.
Li Shijia, Xu Jin. Driving safety inspection method of highway with low index and complex alignment in mountainous area[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(7): 2962-2973.
- [28] JTG 2120—2020 公路工程结构可靠性设计统一标准[S].
JTG 2120—2020 Unified standard for reliability design of highway engineering structures[S].

Study on cross-sectional width parameters of underground interchange ramps based on driving safety reliability

Zhang Chi¹, Gao Yanyang¹, Tang Xie², Song Jinming¹, Lin Guojin²

(1 School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2 Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: This study aimed to clarify the relationship between cross-sectional width parameters and driving safety performance on underground interchange ramps of mountainous expressways. A driving simulation experiment was conducted based on nine scenarios formed by different combinations of lane width, lateral width, and alignment type. Thirty licensed drivers were recruited to complete heavy-truck driving tasks in the simulated underground ramp environment. Vehicle operation data and eye-movement data were collected synchronously during the experiment. The test section was divided into 10 m spatial windows to maintain spatial

consistency in the analysis. Lateral offset, minimum lateral margin, and normalized gaze entropy were extracted for each window. Lateral offset and minimum lateral margin were used to describe vehicle lateral control and boundary proximity. Normalized gaze entropy was used to quantify the dispersion of drivers' visual attention among different areas of interest. Based on these indicators, the effects of cross-sectional width parameters on vehicle lateral operation and visual attention allocation were analyzed. A response surface model was then developed to predict the minimum lateral margin and normalized gaze entropy under different combinations of lane width, lateral width, operating speed, and alignment type. Driver differences, spatial-window fluctuations, and the correlation between the two safety performance indicators were further incorporated into Monte Carlo simulation. A system driving safety reliability model was established by considering insufficient lateral margin and excessive visual-attention dispersion as two failure modes. The results show that the lateral adjustment amplitude and trajectory fluctuation on curved sections are greater than those on straight sections. Normalized gaze entropy is higher on the right-turn curve than on the straight section and the left-turn curve, indicating a more dispersed visual search pattern. Lateral width has a significant effect on both minimum lateral margin and normalized gaze entropy. Increasing lateral width improves the lateral safety margin and reduces the dispersion of visual attention. System driving safety reliability increases with lateral width and decreases with operating speed. Taking the target reliability of 0.95 as the control level, when the lane width is 3.50 m, the lateral width values for straight, left-turn, and right-turn sections can be taken as 0.75, 0.75, and 1.00 m, respectively.

Keywords: safety engineering; underground interchange ramp; system reliability; cross-sectional design; gaze entropy; driving simulation