

附件1

JTG

中华人民共和国行业标准

JTG ***_**_****

基于驾驶模拟技术的公路线形评价指南

Guidelines for Highway Evaluation Using Driving Simulator Technology

征求意见稿

2023-xx-xx 发布

2023-xx-xx 实施

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国行业标准

基于驾驶模拟技术的公路线形评价指南

Guidelines for Highway Evaluation Using Driving Simulator Technology

JTG ***-**-****

主编单位：同济大学

批准部门：中华人民共和国交通运输部

实施日期：

人民交通出版社

前 言

我国公路建设项目趋于复杂化。中西部地区逐渐成为公路建设重心、综合通道成为“123出行交通圈”的关键、过江跨海通道基建需加强方案论证、特殊环境和用途道路建设需求增加，诸如深中通道、港珠澳大桥等复杂线形、交通标志和标线、重大工程与特殊道路建设需求不断涌现。

驾驶模拟作为复杂道路建设项目安全优化设计的重要手段，已在国内外工程项目、研究领域得到了广泛认可和应用。基于驾驶模拟技术，可获取人-车-路-环境交互的驾驶操作、车辆运行数据，有助于揭示道路线形、交通安全设施对驾驶人的综合作用机理，为复杂项目、复杂路段安全评价与优化设计提供依据。

《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)明确指出，“对复杂项目、复杂路段，可采用驾驶模拟方法对线形设计协调性、交通安全设施等进行评价”。我国已逐步应用驾驶模拟技术对设计阶段的公路进行评价，如在港珠澳大桥、深圳至中山跨江通道、虎跳峡地下互通立交等大量工程项目的公路交通安全评价工作中得到了应用和使用，对国家重特大建设项目起到了重要的支撑作用。

目前在利用驾驶模拟技术对公路工程项目进行评价的过程中，其适用范围、评价方法、评价内容、评价流程，设计参数与评价指标的关系等均无相关的规范指导。因此，亟需将行业内成熟的经验凝练为统一的标准，指导应用驾驶模拟技术对复杂项目和复杂路段进行安全评价并提出优化意见。

交通运输部于2020年在交公便字392号文中，下达了《基于驾驶模拟技术的公路线形评价指南》的制订任务，制订工作由同济大学负责，交通运输部公路科学研究院、北京工业大学、云南省交通规划设计研究院有限公司、湖南省高速公路集团有限公司参加。

《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》作为国家发展战略，提出了提升道路本质安全的发展理念。本规范编制组紧密结合了我国公路建设需求及安全形势，总结了团队多年相关科研、设计成果，在全国范围内广泛征求了交通运输行业主管部门、公路建设和运营单位以及公路设计、科研单位的意见，经反复讨论、修改，最后经审

查定稿。

本指南包括5章、4个附录及正文相应条文说明，分别是：1 总则，2 术语，3 驾驶模拟实验，4 一般路段线形评价，5 特殊路段线形评价。

由王雪松负责撰写总则；由王雪松、吴兵、周荣贵、房锐负责撰写术语；由方守恩、张巍汉、王艳丽、毋妙丽负责撰写驾驶模拟实验；由王雪松、郭忠印、王晓梦、赵晓华、田毕江负责撰写一般路段线形评价；由陈雨人、王晓梦、毛琰、朱晓蕾、章照宏负责撰写特殊路段线形评价。

请各有关单位将发现的问题和意见函告本指南日常管理组，联系人：王雪松（地址：上海市四平路1239号，邮编：200092，电话：021-69583946，邮件：wangxs@tongji.edu.cn），以便下次修订时参考。

主 编 单 位：同济大学

参 编 单 位：交通运输部公路科学研究院

北京工业大学

云南省交通规划设计研究院有限公司

湖南省高速公路集团有限公司

主 编：王雪松

主要参编人员：

主 审：李爱民

参与审查人员：

目 次

1 总则.....	1
2 术语.....	2
3 驾驶模拟实验.....	3
3.1 一般规定.....	3
3.2 实验设备.....	3
3.3 实验设计.....	3
3.4 实验准备.....	4
3.5 实验实施.....	5
3.6 实验数据存储与预处理.....	6
4 一般路段线形评价.....	7
4.1 一般规定.....	7
4.2 分析单元划分.....	7
4.3 评价指标计算.....	7
4.4 安全性评价.....	9
4.5 评价结果分析.....	11
5 特殊路段线形评价.....	12
5.1 一般规定.....	12
5.2 线形组合路段.....	12
5.3 桥梁.....	19
5.4 隧道.....	20
5.5 互通式立体交叉.....	22
附录A 实验场景逼真度问卷.....	26
附录B 基本信息问卷.....	27
B.1 被试基本信息.....	27
B.2 驾驶相关信息.....	27
附录C 模拟器眩晕问卷.....	28
附录D 安全性主观评价问卷.....	29

附件 《基于驾驶模拟技术的公路线形评价指南》(JTG *—*) 条文说明..	30
3 驾驶模拟实验.....	31
4 一般路段线形评价.....	41
5 特殊路段线形评价.....	49
参考文献.....	55

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为指导利用驾驶模拟技术对公路线形进行安全性评价，并在开展公路线形安全性评价中考虑人因的影响，制定本指南。

1.0.2 本指南适用于高速公路、一级公路、二级公路、三级公路新建及改扩建项目的线形安全性评价。

1.0.3 应根据公路工程特点、交通特性、评价需求等确定驾驶模拟实验的目的和评价指标。

1.0.4 通过驾驶模拟技术开展公路线形安全性评价，除应符合本指南的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 驾驶模拟器 driving simulator

由视景系统、运动系统、声音系统、操纵系统和控制软件系统组成，利用虚拟现实技术生成仿真驾驶环境的设备。

2.0.2 驾驶模拟技术 driving simulator technology

利用驾驶模拟器模拟道路、环境、天气和光照等场景、车辆操纵、力反馈和环境音，开展人-车-路-环境交互实验的技术。

2.0.3 运动系统自由度 motion system degree of freedom

驾驶模拟器运动系统能提供的沿坐标轴、绕轴转动的独立运动参数的数目。

2.0.4 样本量 sample size

为保证实验有效性，参与正式实验的被试数量。

2.0.5 模拟器眩晕 simulator sickness

在驾驶模拟实验过程中，被试的视觉系统接收的视觉信息和前庭感知的运动信息不匹配而导致眩晕、恶心、头痛等不适症状，可衡量被试数据的有效性。

3 驾驶模拟实验

3.1 一般规定

3.1.1 驾驶模拟实验包括实验设备、实验设计、实验准备、实验实施、实验数据存储与预处理。

3.1.2 应围绕实验目的开展实验设计，以指导实验准备和实验实施。

3.2 实验设备

3.2.1 实验设备为驾驶模拟器，辅以眼动仪等辅助仪器。

3.2.2 驾驶模拟器可采用固定底座驾驶模拟器、多自由度驾驶模拟器。对于线形组合、桥梁、隧道、互通式立体交叉等特殊路段，宜采用多自由度驾驶模拟器。

3.2.3 驾驶模拟器应具备实验数据采集、存储、导出功能。

3.3 实验设计

3.3.1 实验设计包括实验场景设置、被试选取、实验顺序安排和实验数据选取。

3.3.2 实验场景设置应确定以下内容：

- 1 确定天气、气象、光照、路面条件等实验环境。
- 2 针对有车辆间交互需求的场景，实验中应增加环境交互车辆。

3.3.3 被试选取应考虑样本量和样本组成，并应符合下列规定：

- 1 被试的样本量应不少于30人。
- 2 样本组成应包括道路、交通设计专业人员，样本的性别、年龄、驾龄分布

宜参考交通管理部门公布的驾驶人特征信息。

3.3.4 应以交叉实验方法安排实验顺序以降低被试的学习效应影响。

3.3.5 应选取实验所需采集的车辆运行数据和视认数据，车辆运行数据应至少包括速度、纵向加速度、横向加速度、轨迹偏移，视认数据应至少包括注视时间、注视次数。

3.4 实验准备

3.4.1 实验准备包括实验场景建模、实验人员准备和预实验。

3.4.2 实验场景建模的对象应包括三维道路交通环境、实验车辆，并应符合以下规定：

1 根据公路工程特点、评价需求和场景建模精细化程度，收集场景建模所需的路线、结构物、交通工程及沿线设施的设计文件和环境数据。

2 三维道路交通环境模型应涵盖路线模型、结构物模型、交通工程及沿线设施模型、环境模型，并应符合下列规定：

1) 路线模型应依据道路平纵线形、横断面的设计文件建模。

2) 结构物模型应依据隧道、桥梁设计文件建模。

3) 交通工程及沿线设施模型应依据交通标志和标线、安全设施、人工岛、收费站、机电设施和景观绿化等设计文件建模，宜采用多层次细节处理方法渲染交通标志和标线模型。

4) 环境模型应涵盖地形地貌、景观、光照、天气和气象、路面条件等。

3 实验车辆的车辆动力学模型特征参数应进行标定，并应符合下列规定：

1) 车辆动力学模型特征参数标定应包括发动机、制动系统、质量、尺寸、车轴、轮胎、最高车速等。

2) 使用大型车作为实验车辆时，其车辆动力学模型的功率质量比宜通过调研项目所在地的大型车组成确定，或选用功率质量比为5.1kW/t和8.3kW/t的车辆

动力学模型。

4 有车辆间交互需求的实验场景，应设置环境交互车辆的初始位置、初始速度、行驶轨迹、交互指令，环境交互车辆的数量宜参考远景设计年限交通量。

5 应由道路、交通设计专业人员开展实验场景逼真度评价，并应符合下列规定：

1) 评价对象应包括路线模型、结构物模型、交通工程及沿线设施模型、环境模型，问卷见附录A。

2) 实验场景逼真度分为“好、一般、差”三级。

3) 评价结果不含“差”，则实验场景逼真度评价通过；否则应优化实验场景模型，并再次开展评价，直至通过。

3.4.3 实验人员准备应包括主试实验交底、被试招募，并应符合下列规定：

1 主试实验交底应包括实验设计说明、实验设备操作、紧急情况处置。

2 主试应根据实验设计中的样本量和样本组成要求招募被试。

3.4.4 应按实验设计开展预实验，校核实验设计合理性、数据采集完整性，测算实验时长，并结合预实验开展情况优化实验设计。

3.5 实验实施

3.5.1 实验实施的流程应包括实验指导、试驾、正式实验和实验收尾等四个阶段。实验实施流程应符合图3.5.1要求。

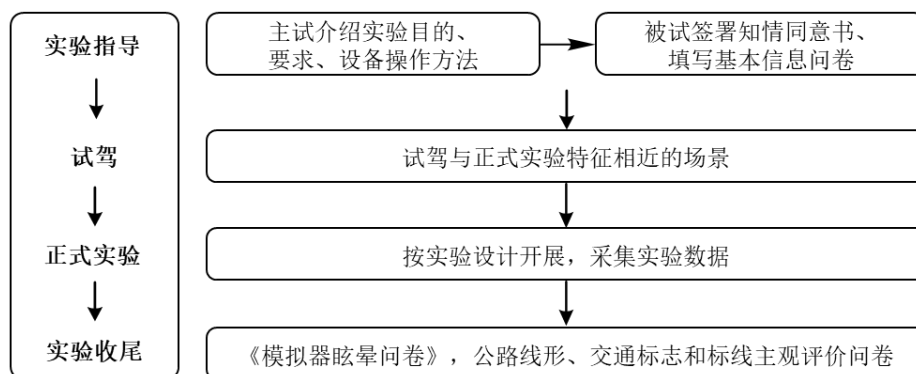


图3.5.1 实验实施流程

3.5.2 实验指导阶段，主试应向被试介绍实验目的、实验要求和实验设备操作方法，被试签署实验知情同意书、填写基本信息问卷，问卷见附录B。

3.5.3 试驾阶段，应选取与正式实验特征相近的场景开展试驾，时长约5分钟，并应符合下列规定：

- 1 被试将汽车座椅、后视镜调整至合适位置。
- 2 被试熟悉方向盘、离合器、油门、刹车、挡位等装置的操纵。

3.5.4 正式实验阶段，应按实验设计开展并采集实验数据。

3.5.5 实验收尾阶段，应开展下列工作：

- 1 被试填写《模拟器眩晕问卷》，问卷见附录C。
- 2 被试填写公路线形、交通标志和标线的主观评价问卷，问卷见附录D。

3.5.6 完成所有被试的实验后，应校核被试数据有效性。《模拟器眩晕问卷》结果不含“中度”、“严重”，则该被试数据有效，否则该被试数据无效，应剔除其实验数据，并根据无效被试的性别、年龄、驾龄特征补充招募被试实施实验，直至被试数据有效。

3.6 实验数据存储与预处理

3.6.1 实验数据存储包括数据分类、数据命名，并应符合下列规定：

- 1 实验数据应按问卷、驾驶模拟器、辅助仪器等来源分类存储。
- 2 实验数据命名应包括实验时间、被试编号。

3.6.2 实验数据预处理包括数据时空转换、数据对齐，并应符合下列规定：

- 1 按固定时间间隔采样的驾驶模拟器、辅助仪器实验数据宜转换为按固定里程间隔分布的数据。
- 2 驾驶模拟器和辅助仪器采集的实验数据宜根据公路桩号，与公路线形、交通标志和标线等设计参数进行对齐。

4 一般路段线形评价

4.1 一般规定

4.1.1 一般路段开展线形安全性评价时应对线形的平、纵、横设计要素进行评价，宜同时对交通标志和标线进行评价。

4.1.2 评价流程包括分析单元划分、评价指标计算、安全性评价和评价结果分析。

4.1.3 评价应同时考虑纵向行车安全性、横向行车安全性。

4.1.4 评价应以客观评价为主，主观评价为辅。

4.2 分析单元划分

4.2.1 一般路段分析单元应划分为平直路段、平曲线路段、纵坡路段、弯坡组合路段、桥梁路段、隧道路段和互通式立体交叉路段。

4.2.2 路线的平面线形进行分幅设计时，应分方向对路段分析单元进行划分。

4.2.3 对长度较长的分析单元可以进行等距划分，划分后长度不宜小于500米。

4.3 评价指标计算

4.3.1 客观评价指标包括安全替代指标和视认指标。

4.3.2 安全替代指标包括纵向行车安全性指标与横向行车安全性指标。

1 纵向行车安全性指标包括最大车速差、纵向加速度。

2 横向行车安全性指标包括横向加速度、轨迹偏移标准差。

3 安全替代指标的计算应符合以下要求：

1) 最大车速差 Maximum speed reduction (简称85MSR)：分析单元内车速差

最大值的85%分位值，单位为km/h。可由驾驶模拟器采集的速度数据计算得出，指标计算方法如下表所示：

表4.3.2-1 最大车速差计算

公式	计算方法
$85MSR=(V_{\max}-V_{\min})_{85}$	1) 逐个提取被试在分析单元内的最大车速和最小车速数据； 2) 逐个计算被试车速差绝对值； 3) 取所有被试车速差绝对值累计分布曲线上的85%分位值。
$V_{\max}$: 分析单元内单个被试取得的最大车速 $V_{\min}$: 分析单元内单个被试取得的最小车速	

2) 纵向加速度：车辆沿行驶方向的加速度，单位为 m/s^2 。数据可由驾驶模拟器直接导出，指标计算方法如下表所示：

表4.3.2-2 纵向加速度计算

公式	计算方法
$85\alpha_{ZX}=(\Delta v/\Delta t)_{85}$	1) 逐个提取被试在分析单元内的纵向加速度数据，值为负表示减速行为，值为正表示加速行为； 2) 分别汇总所有被试纵向加速度正、负值，分别取累计分布曲线的85%分位值。
$\Delta v/\Delta t$: 被试纵向加速度	

3) 横向加速度：车辆沿与行驶方向垂直方向的加速度，一般由车辆转弯行驶时所受的离心力引起，单位为 m/s^2 。数据可由驾驶模拟器直接导出，指标计算方法如下表所示：

表4.3.2-3 横向加速度计算

公式	计算方法
$85\alpha_{HX}=(\Delta v/\Delta t)_{85}$	1) 逐个提取被试横向加速度绝对值； 2) 汇总所有被试横向加速度绝对值，取累计分布曲线上的85%分位值。
$\Delta v/\Delta t$: 被试横向加速度	

4) 轨迹偏移标准差：车辆中心与车道中心线距离标准差的85%分位值，单位为m。可由驾驶模拟器采集的轨迹偏移数据计算得出，指标计算方法如下表所示：

表4.3.2-4 轨迹偏移标准差计算

公式	计算方法
$SDLO = \left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)_{85}$	1) 逐个提取被试轨迹偏移数据； 2) 逐个计算被试轨迹偏移数据标准差； 3) 汇总所有被试轨迹偏移标准差，取累计分布曲线上的85%分位值。
n: 样本数 $x_i - \bar{x}$: 某一被试轨迹偏移数据与样本轨迹偏移平均值之间的偏差	

4.3.3 视认指标包含注视时间和注视次数，视认指标的计算应符合以下要求：可通过眼动仪提取被试的视认数据。

1 注视时间：被试在指定视线区域内所有注视点持续时间的总和，单位为s。可由眼动仪采集的注视点数据计算得出，计算方法如下表所示：

表4.3.3-1 注视时间计算

公式	计算方法
$T = \sum_{i=1}^n t_i$	1) 提取被试在指定视线区域内的所有注视点数据； 2) 对每个注视点的注视时间进行求和。
n: 注视点个数 t _i : 每个注视点的注视时间	

2 注视次数：被试在指定视线区域内所有注视点个数的总和，单位为次，可由眼动仪采集的注视点数据计算得出，计算方法如下表所示：

表4.3.3-2 注视次数计算

公式	计算方法
$N = \sum_{i=1}^n t_i$	1) 提取被试在指定视线区域内的所有注视点数据； 2) 对注视点的个数进行计数。
n: 指定视线区域内所有点个数 t _i : 如果该点为注视点，则记为1；否则记为0	

4.4 安全性评价

4.4.1 一般路段开展线形安全性评价时，应分方向对分析单元进行评价。

4.4.2 对一般路段进行线形安全性评价时，应以分析单元为单位，先进行主观评价，评价问卷见附录D，并符合以下要求：

1 应同时对道路线形、交通标志和标线进行评价，评价等级分为“好”、“一般”、“差”。

1) 道路线形的评价内容包括“线形无突变”、“视线无遮挡”、“路面平整、横向倾斜感可接受”。

2) 交通标志和标线的评价内容包括“能注意到交通标志和标线”、“能理解

标志和标线含义”、“能遵循标志和标线要求”。

2 应对主观评价结果进行统计，存在以下情况时，应记录该分析单元存在的问题：

- 1) 某项评价内容中，75%的被试评价为“差”。
- 2) 某项评价内容中，有道路、交通设计专业人员评价为“差”。

3 应对整体被试的主观评价结果进行可视化展示，可采用面积堆积图、直方图等方式。

4.4.3 对一般路段进行线形安全性评价时，应以分析单元为单位，采用安全替代指标进行客观评价，并符合以下要求：

1 安全替代指标阈值分为“好”、“一般”、“不良”三个区间，各区间的阈值见表4.4.3-1。

表4.4.3-1 安全替代指标阈值

安全替代指标	评价标准		
	好	一般	不良
最大车速差	$85MSR < 10\text{km/h}$	$10\text{km/h} \leq 85MSR < 20\text{km/h}$	$85MSR \geq 20\text{km/h}$
纵向加速度	$\alpha_{ZX} \leq 0.9\text{m/s}^2$	$0.9\text{m/s}^2 < \alpha_{ZX} < 1.2\text{m/s}^2$	$\alpha_{ZX} \geq 1.2\text{m/s}^2$
	$\alpha_{ZX} \leq 1.3\text{m/s}^2$	$1.3\text{m/s}^2 < \alpha_{ZX} < 2.5\text{m/s}^2$	$\alpha_{ZX} \geq 2.5\text{m/s}^2$
横向加速度	$\alpha_{HX} < 1.5\text{m/s}^2$	$1.5\text{m/s}^2 \leq \alpha_{HX} < 2.5\text{m/s}^2$	$\alpha_{HX} \geq 2.5\text{m/s}^2$
轨迹偏移标准差	$SDLO < 0.35\text{m}$	$0.35\text{m} \leq SDLO < 0.5\text{m}$	$SDLO \geq 0.5\text{m}$

注：横向加速度、轨迹偏移标准差的阈值由累计分布曲线的50%分位值，85%分位值所得。

2 应对客观评价结果进行可视化展示，可采用折线图等方式，并满足以下要求：

- 1) 绘制一般路段平、纵线形随里程变化的折线图。
- 2) 绘制安全替代指标随平、纵线形变化的折线图，并标注安全替代指标的阈值。

4.4.4 对一般路段的交通标志和标线进行评价时，应符合以下要求：

1 对单个交通标志和标线设进行评价时,应根据交通标志和标线的设计要素进行组合形成评价方案。

2 对多种交通标志和标线整体作用效果时,应根据不同交通标志和标线组合形式形成评价方案。

3 根据交通标志和标线的作用效果和使用意图,从驾驶行为、视认特征以及主观感受选择相应的指标进行评价。

4 通过对比实验,对不同评价方案的评价指标进行特征分析,根据各项指标的评价结果选择最优方案。

5 当不能通过评价指标直接确定最优方案时,则应通过主观或者客观的方法对评价指标赋权,通过综合评价方法对方案进行比选。

4.5 评价结果分析

4.5.1 应统计客观评价结果中存在“不良”安全替代指标的分析单元,形成汇总表,并记录分析单元桩号及“不良”的安全替代指标数值。

4.5.2 结合主观评价中对该分析单元记录的问题,对路段的平、纵、横设计要素,交通标志和标线进行分析。

5 特殊路段线形评价

5.1 一般规定

- 1 特殊路段线形评价应包括线形组合路段、桥梁、隧道和互通式立体交叉。
- 2 应根据各类设施特点及评价重点，对实验参数进行调整或开展补充实验。
- 3 应根据各类设施特点及评价重点划分分析单元。
- 4 宜根据各类设施特点及评价重点增加评价指标。

5.2 线形组合路段

5.2.1 线形组合路段评价包括平曲线上坡、平曲线下坡、平曲线凹曲线、平曲线凸曲线评价。平纵线形组合示意图如图5.2.1所示。

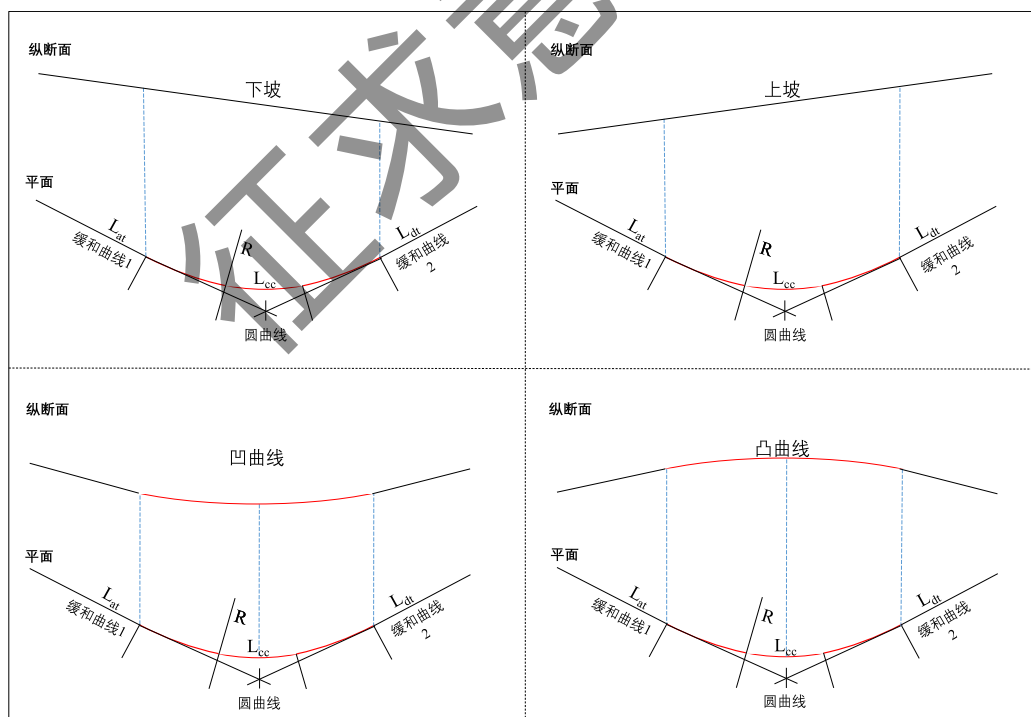


图 5.2.1 平纵线形组合示意

5.2.2 对平曲线上坡进行安全性评价，应满足以下要求：

1 应对平曲线上坡的曲线半径、缓和曲线长度、坡度、超高进行安全性评价。

2 对于平曲线上坡，轨迹偏移标准差受曲线半径影响。如式5-1，其中 $SDLO$ 为轨迹偏移标准差， R 为曲线半径。

$$SDLO = 0.18 + 137.6 \, 1/R \quad (5-1)$$

为避免平曲线上坡的横向行车安全性出现“不良”，曲线半径取值不应小于550m。

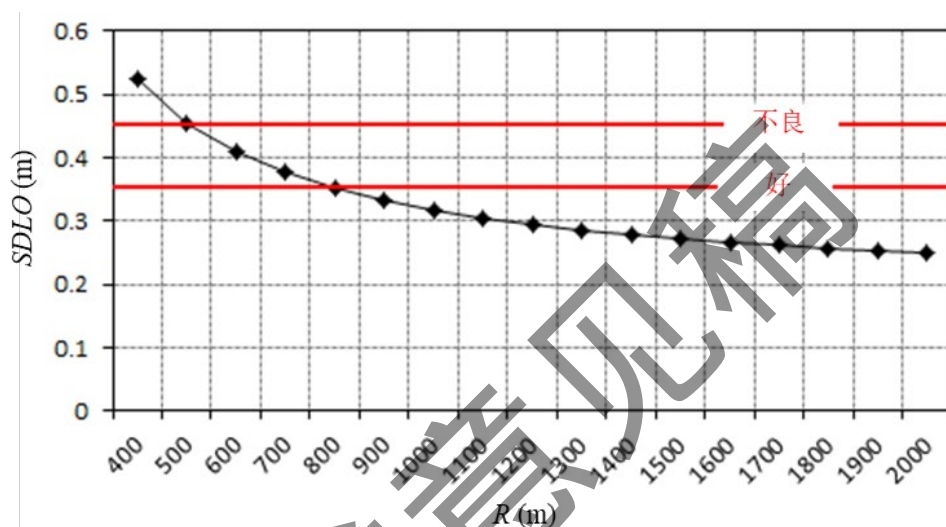


图 5.2.2-1 平曲线上坡与轨迹偏移标准差关系

3 对于平曲线上坡，横向加速度受到曲线半径和最大纵坡坡度的影响，如式5-2，其中 R 为曲线半径， $Grade_{max}$ 为最大坡度。

$$\alpha_{HX} = 0.937 + 663.4 \, 1/R - 3.57 Grade_{max} \quad (5-2)$$

为避免平曲线上坡的横向行车安全性出现“不良”，曲线半径取值不应小于460m。

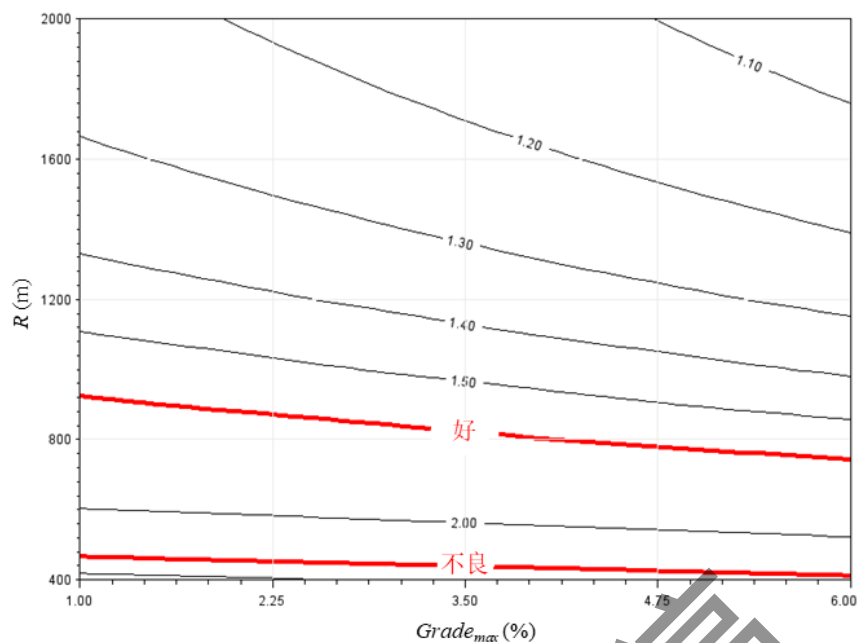


图 5.2.2-2 平曲线上坡与横向加速度关系

5.2.3 对平曲线下坡进行安全性评价，需满足以下要求：

- 1 应对平曲线下坡长度、曲线半径、坡度进行评价。
- 2 对于平曲线下坡，轨迹偏移标准差受到路段长度和曲线半径同时影响，如式5-3，其中 $SDLO$ 为轨迹偏移标准差， L 为长度， R 为曲线半径。

$$SDLO = 0.33 - 0.29L + 116.6 \frac{1}{R} \quad (5-3)$$

随着路段长度和曲线半径增加，轨迹一致性越好。为保证平曲线下坡的横向行车安全性为“一般”及以上，曲线半径取值应为400m以上，路段长度取值应为750m以上。

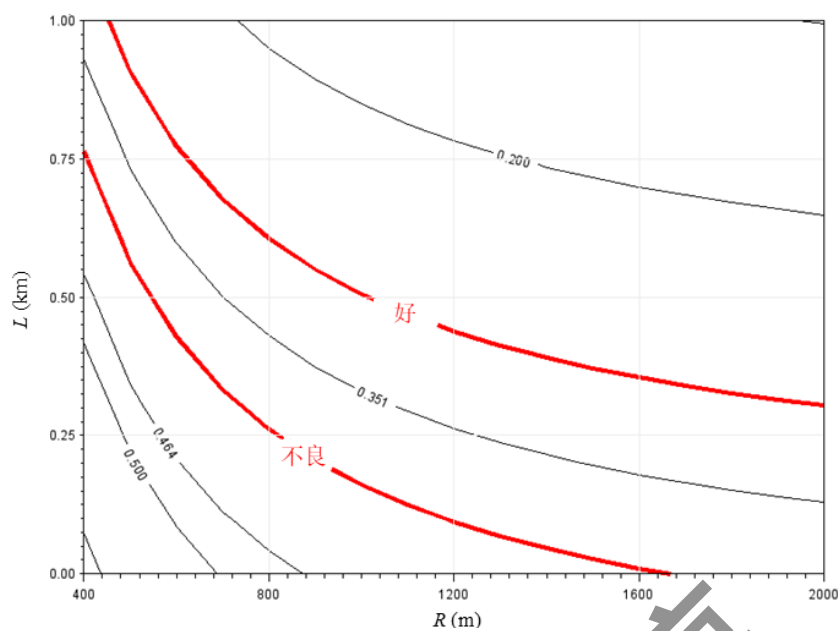


图 5.2.3-1 平曲线下坡与轨迹偏移标准差关系

3 对于平曲线下坡，横向加速度受到曲线半径和最大纵坡坡度的影响，如式 5-4，其中 α_{HX} 为横向加速度， R 为曲线半径， $Grade_{max}$ 为最大坡度。

$$\alpha_{HX} = 0.452 + 798.5 \frac{1}{R} - 12.148 Grade_{max} \quad (5-4)$$

为避免平曲线下坡横向行车安全性出现“不良”，曲线半径取值不应小于 700m。

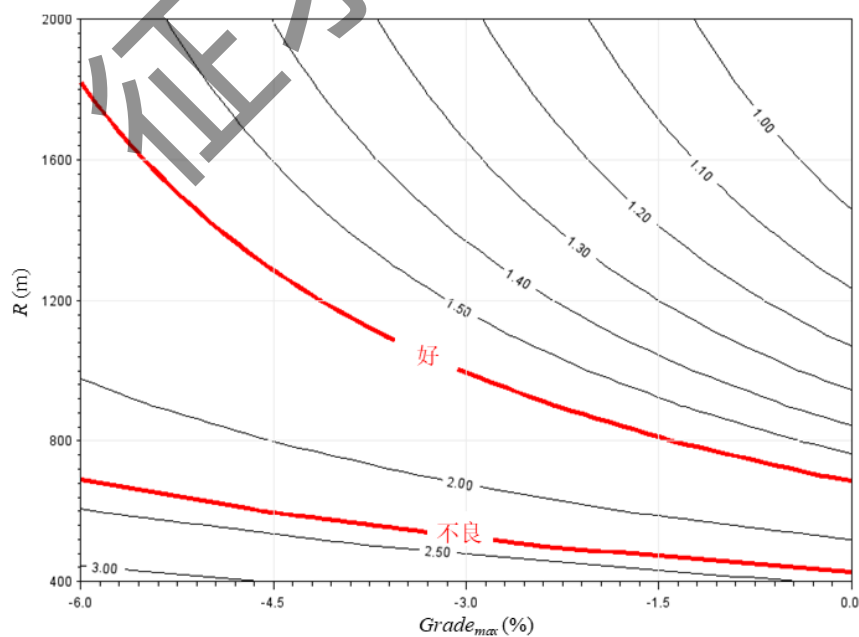


图 5.2.3-2 平曲线下坡与横向加速度关系

5.2.4 对平曲线凹曲线进行安全性评价，需满足以下要求：

- 1 应对平曲线凹曲线的缓和曲线长度、半径进行评价。
- 2 对于平曲线凹曲线，轨迹偏移标准差受到路段长度的影响，如式5-5，其中 $SDLO$ 为轨迹偏移标准差， L 为路段长度。

$$SDLO = 0.676 - 0.54L \quad (5-5)$$

为避免平曲线凹曲线横向行车安全性出现“不良”，平曲线长度取值不应小于 400m。

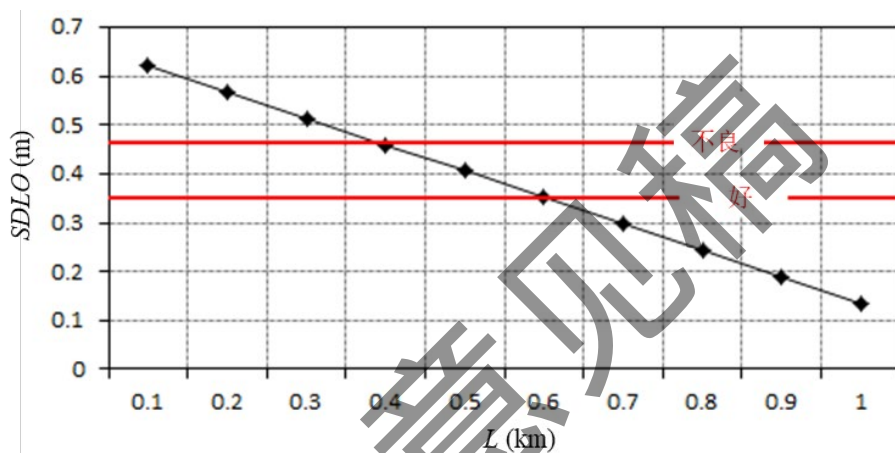


图 5.2.4-1 平曲线凹曲线与轨迹偏移标准差关系

- 3 对于平曲线凹曲线，横向加速度受到曲线半径的影响，如式 5-6。其中 α_{HX} 为横向加速度， R 为曲线半径。

$$\alpha_{HX} = 1.383 + 539.1 \frac{1}{R} \quad (5-6)$$

为避免平曲线凹曲线的横向行车安全性出现“不良”，曲线半径取值不应小于 600m。

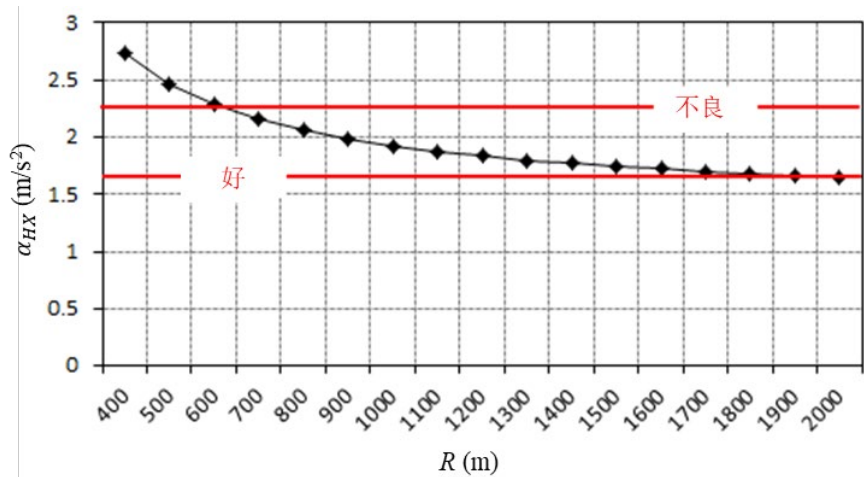


图 5.2.4-2 平曲线凹曲线与横向加速度关系

5.2.5 对平曲线凸曲线进行安全性评价，需满足以下要求：

1 应对平曲线凸曲线的缓和曲线长度、圆曲线长度、半径、超高进行评价。

2 对于平曲线凸曲线，轨迹偏移标准差同样受到路段长度和曲线半径的影响，如式5-7，其中 $SDLO$ 为轨迹偏移标准差， L 为长度， R 为曲线半径。

$$SDLO = 0.33 - 0.29L + 121.61/R \quad (5-7)$$

增大路段长度和曲线半径，均能够改善轨迹偏移程度。为保证平曲线凸曲线的横向行车安全性达到“一般”和“好”以上，当曲线半径为 500m，路段长度取值应为 580m 以上。

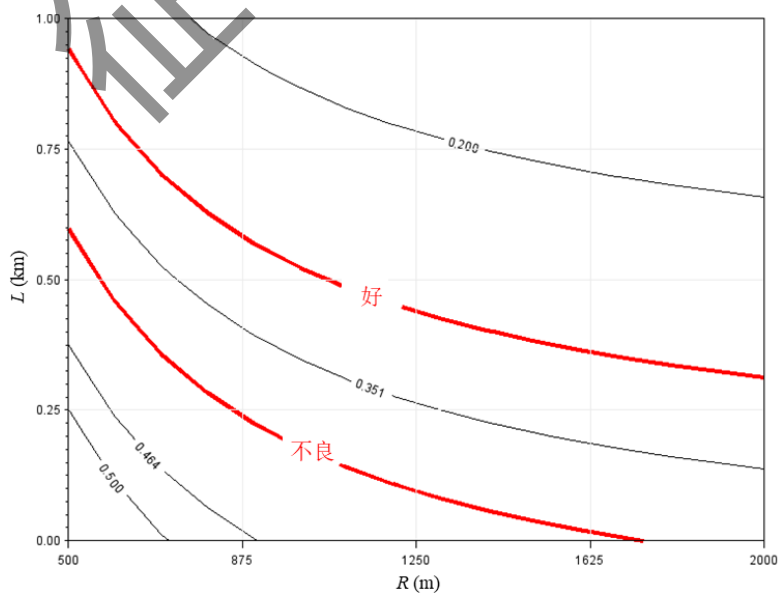


图 5.2.5-1 平曲线凸曲线与轨迹偏移标准差关系

3 对于平曲线凸曲线，横向加速度也易受到曲线半径和路段长度的影响，公式如式 5-8。其中 α_{HX} 为横向加速度， R 为曲线半径， L 为长度。

$$\alpha_{HX} = 0.203 + 931.5 \frac{1}{R} + 0.722L \quad (5-8)$$

随着道路长度和曲线半径的增大，横向稳定性将会逐渐提升。曲线半径在 1300m 以上时，平曲线凸曲线的横向加速度达到“好”。

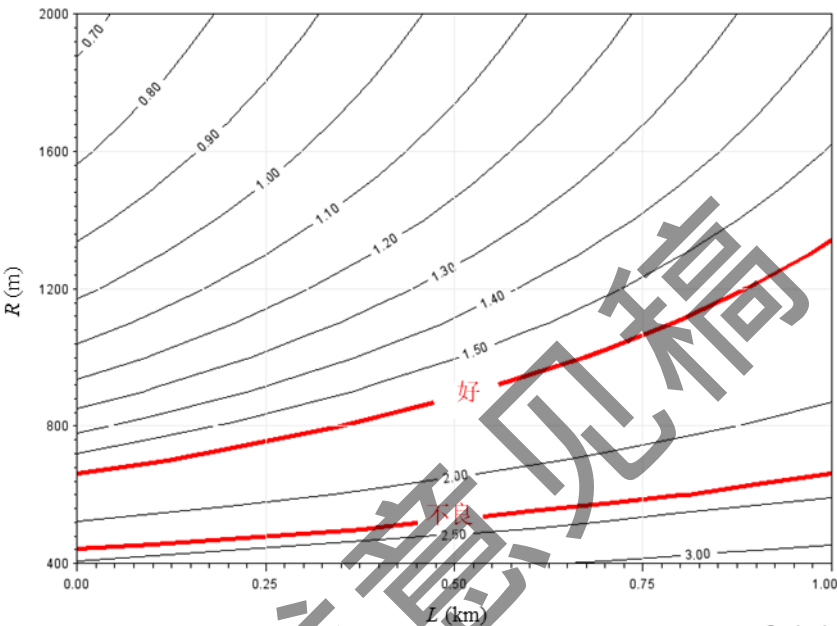


图 5.2.5-2 平曲线凸曲线与横向加速度关系

5.2.6 宜同时考虑平纵线形组合路段与上、下游路段的衔接，包括上、下游路段与平纵线形组合路段的曲线半径差及坡度差，上下游路段长度不宜小于 400m，如图5.2.6所示。

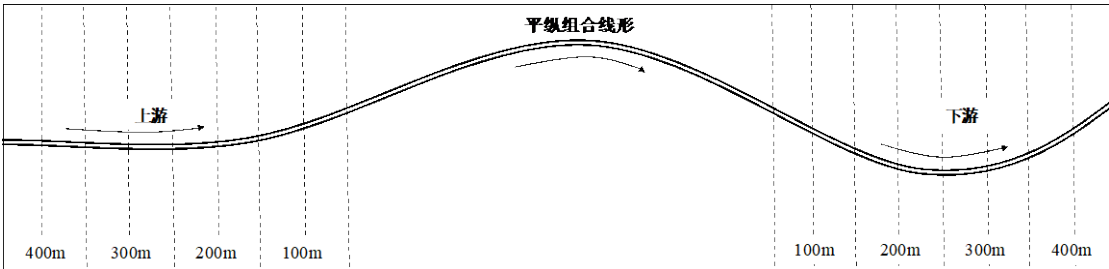


图 5.2.6 平纵线形组合与上、下游路段示意

5.2.7 应对长大下坡、长大上坡路段的坡度、坡长、变坡点进行进一步评价。

5.2.8 当线形组合路段设计不合理，即存在小半径平曲线的起讫点设置在竖

曲线的顶底部、急弯与陡坡的组合设计时，宜基于驾驶模拟技术对线形组合路段的交通标志和标线开展评价。

5.2.9 应对线形组合路段中诱导标志进行评价，并符合以下要求：

- 1 应考虑曲线半径、曲线方向，采用对比实验对线形诱导标志的设置参数进行评价。
- 2 宜通过速度、横向偏移对线形诱导标志的诱导效果进行评价。
- 3 宜通过统计分析方法对评价指标进行分析选定最优方案。当通过指标难以直接评估方案时，推荐采用综合评价的方法进行方案比选。

5.2.10 应对线形组合路段中纵向标线进行评价，并符合以下要求：

- 1 应考虑曲线半径对纵向标线的宽度采用对比实验进行评价。
- 2 宜通过横向偏移对纵向标线的指引效果进行评价，宜通过统计分析方法对评价指标进行分析选定最优方案。

5.3 桥梁

5.3.1 桥梁存在以下情况时，宜针对桥梁开展基于驾驶模拟技术的线形安全性评价：

- 1 桥梁为特大桥。
- 2 桥头引道或桥梁的横断面发生变化。
- 3 桥梁纵坡坡度较大或坡长较长。
- 4 桥梁位于大风多发路段。

5.3.2 对桥梁开展线形安全性评价时，除应遵守第3章的驾驶模拟实验要求外，尚应符合以下要求：

- 1 实验场景设置中宜将路面条件设置为湿滑状态，并通过调整路面摩擦系数予以模拟。
- 2 当桥头引道或桥梁的横断面发生变化，对其过渡段的线形进行评价时，实

验车辆动力学模型宜包括大型车。

3 当桥梁设计中纵坡坡度较大或坡长较长,对桥梁上坡方向的坡度坡长进行评价时,实验车辆动力学模型应包括大型车。

4 当桥梁位于大风多发路段,评价横风对桥面交通安全的影响时,应模拟最大横风条件,并开展有横风和无横风的对比实验。

5.3.3 对桥梁开展线形安全性评价时,应根据桥梁的线形特征划分分析单元,并符合以下规定:

1 将桥梁的分析单元分为桥梁上坡段和桥梁下坡段。存在引桥时,应对主桥与引桥分别划分。

2 桥梁的横断面发生变化时,过渡段应单独划分。

3 桥梁路段平纵线形发生变化时,应参考一般路段的分析单元划分。

5.3.4 对桥梁开展线形安全性评价时,应采用安全替代指标对分析单元进行评价,并符合以下规定:

1 桥梁纵坡坡度较大或坡长较长时,宜通过分析货车行驶速度的折减情况对桥梁上坡方向的坡度坡长进行评价。

2 桥头引道或桥梁的横断面发生变化时,宜采用轨迹偏移标准差和最大车速差对车辆在白天和夜间的行驶情况以及车辆在不同车道的行驶情况进行分析,以对过渡段的线形进行评价。

3 桥梁位于大风多发路段时,宜通过对比有无横风作用下的轨迹偏移标准差、最大车速差评价横风对桥面交通安全的影响。

5.4 隧道

5.4.1 当隧道存在以下情况时,宜针对隧道开展基于驾驶模拟技术的线形安全性评价:

1 隧道为特长隧道。

- 2 隧道的平、纵设计要素接近极限值或存在不利线形组合。
- 3 隧道路段的横断面发生变化。
- 4 隧道洞口受阳光直射或炫光影响较大。
- 5 隧道洞口位于大风多发路段。

5.4.2 对隧道开展线形安全性评价时，除应遵守第3章的驾驶模拟实验要求外，尚应符合以下要求：

- 1 隧道纵坡坡度较大或坡长较长时，对隧道上坡方向的坡度坡长进行评价时，实验车辆动力学模型应包括大型车。
- 2 隧道洞口受阳光直射或炫光影响较大时，应模拟隧道的“黑白洞效应”，并开展有无“黑白洞效应”的对比实验。
- 3 隧道洞口位于大风多发路段，评价横风对桥面交通安全的影响时，应模拟最大横风条件，并开展有横风和无横风的实验对比。

5.4.3 对隧道开展线形安全性评价时，应根据隧道的线形特征划分分析单元，并符合以下规定：

- 1 将隧道的分析单元分进洞口前100m，进洞口后100m，洞内路段，出洞口前100m，出洞口后100m。
- 2 隧道的横断面发生变化时，过渡段应单独划分。
- 3 隧道洞内路段平纵线形发生变化时，应参考一般路段的分析单元划分。

5.4.4 对隧道开展线形安全性评价，应采用安全替代指标对分析单元进行评价，并符合以下规定：

- 1 隧道未设置照明或洞口段的照明设置需进行验证，宜采用轨迹偏移标准差和最大车速差，评价“黑洞效应”和“白洞效应”对行车安全的影响。
- 2 隧道洞口位于大风多发路段时，宜通过对比有无横风作用下的轨迹偏移标准差、最大车速差评价横风对行车安全的影响。

5.4.5 应对隧道的入口预告标志、入口前限速标志、禁止超车标志、减速标线开展评价，并符合以下规定：

- 1 应对以上各类交通标志和标线的不同组合形式开展评价。
- 2 宜通过注视时间、注视次数、速度、横向偏移对隧道入口段交通标志和标线的不同组合方案进行评价。
- 3 宜通过统计分析方法对各项指标进行分析，选择最优方案。当通过指标难以直接评估方案时，推荐采用综合评价的方法进行方案比选。

5.4.6 中长及特长隧道内照明度的降低会扭曲被试的距离感，应对隧道中间段突起路标进行评价，应符合以下规定：

- 1 应对凸起路标的亮度和设置间距开展评价。
- 2 宜通过速度、加速度、横向偏移、瞳孔直径对不同突起路标设置方案进行评价。
- 3 宜通过统计分析方法对各项指标进行分析，选择最优方案。当通过指标难以直接评估方案时，推荐采用综合评价的方法进行方案比选。

5.4.7 对隧道出口距离标志进行评价，应符合以下要求：

- 1 应对隧道出口距离标志的设置位置、预告次数开展评价。
- 2 宜通过注视时间和注视次数对隧道出口距离标志进行评价。
- 3 宜通过统计分析方法对各项指标进行分析，选择最优方案。当通过指标难以直接评估方案时，推荐采用综合评价的方法进行方案比选。

5.5 互通式立体交叉

5.5.1 当互通式立体交叉存在以下设计时，宜针对互通式立体交叉开展基于驾驶模拟技术的线形安全性评价：

- 1 互通式立体交叉出入口与隧道间距不满足最小净距。
- 2 存在连续分流的互通式立体交叉。

- 3 存在多车道匝道分合流区。
- 4 地下互通式立交等连接部视距受限。

5.5.2 对互通式立体交叉开展安全性评价，除遵守第3章的驾驶模拟实验要求外，尚应将评价范围遍历所有可能途经的路径。

5.5.3 对互通式立体交叉开展安全性评价，应将分析单元划分为主线路段、连接部、匝道路段。

5.5.4 对互通式立体交叉开展线形安全性评价，应主要采用安全替代指标对分析单元进行评价，安全替代指标的阈值应与第4章的表4.4.3-1一致，行驶轨迹、换道位置宜结合工程特点和交通特性进行评价，并符合下列规定：

- 1 当隧道出口端与前方互通式立体交叉主线出口之间的净距（图5.5.4-1）不满足表5.5.4-1的规定值时，宜采用最大车速差、纵向加速度、换道位置，评价由主线内侧车道驶入出口匝道过程的安全性。

表5.5.4-1 隧道出口端与前方主线出口之间的最小净距

主线设计速度（km/h）		120	100	80	60
最小净距（m）	主线单向双车道	500	400	300	250
	主线单向3车道	700	600	450	350
	主线单向4车道	1000	800	600	500

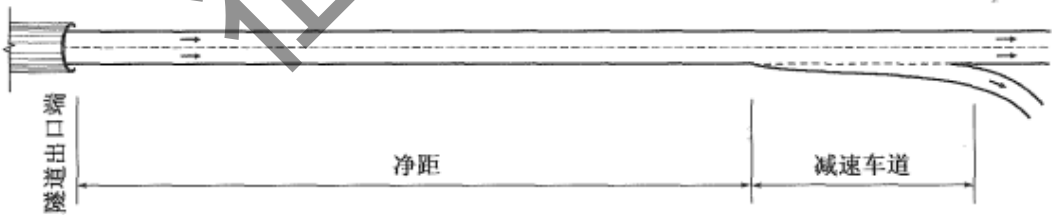


图5.5.4-1 隧道出口端与前方主线出口之间的净距示意

- 2 当互通式立体交叉主线入口与前方隧道之间的净距（图5.5.4-2）不满足表5.5.4-2的规定值时，宜采用最大车速差、纵向加速度、换道位置，评价由入口匝道驶入隧道过程中的安全性。

表5.5.4-2 主线入口与前方隧道之间的最小净距

主线设计速度（km/h）	120	100	80	60
最小净距（m）	125	100	80	60

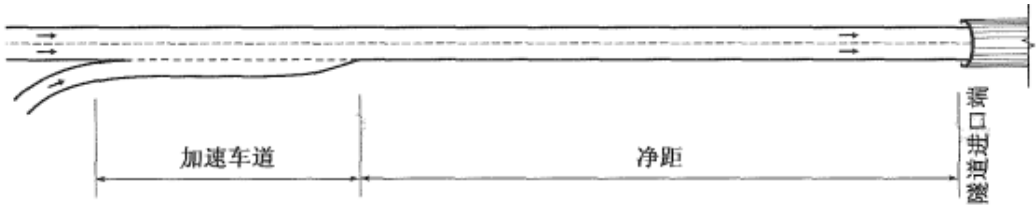


图5.5.4-2 主线入口与前方隧道之间的净距示意

3 对存在连续分流的互通式立体交叉，宜采用最大车速差、纵向加速度、行驶轨迹，评价多次分流的横断面过渡。

4 对多车道匝道分合流区，宜采用最大车速差、纵向加速度、行驶轨迹、换道位置评价安全性。

5.5.5 宜通过实验场景可视化，校核互通式立体交叉的通视条件和交通标志视认效果，并应符合下列规定：

1 连接部的分流鼻端前识别视距应不小于表5.5.5-1的规定。条件受限时，识别视距不应小于1.25倍的停车视距。

表5.5.5-1 识别视距

设计速度（km/h）	120	100	80	60
识别视距（m）	350~460	290~380	230~300	170~240

2 匝道基本路段的停车视距应不小于表5.5.5-2的规定。

表5.5.5-2 匝道基本路段停车视距

设计速度（km/h）		80	70	60	50	40	35	30
停车视距（m）	一般地区	110	95	75	65	40	35	30
	积雪冰冻地区	135	120	100	70	45	35	30

3 合流鼻端前，主线距合流鼻端100m、匝道距合流鼻端60m形成的通视三角区内，主线与匝道之间应满足车辆间相互通视的要求，如图5.5.5所示。

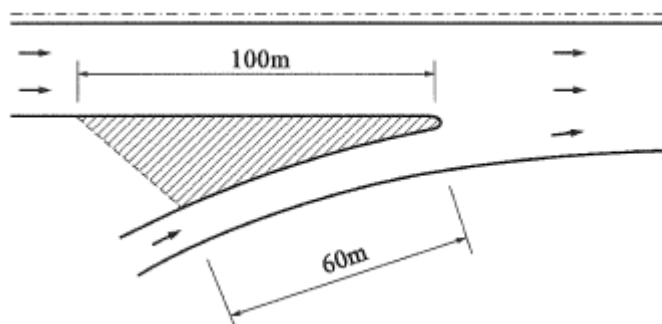


图5.5.5 合流鼻端前通视三角区

4 校核停车视距时，视高应为1.2m，物高应为0.1m；校核识别视距时视高应为1.2m，物高应为0m。

5.5.6 当互通式立体交叉存在以下设计时，宜针对互通式立体交叉开展基于驾驶模拟技术的交通标志和标线评价：

- 1 互通式立体交叉间距较小，互通式立体交叉出入口形式复杂。
- 2 公路改扩建后道路拓宽，路幅宽度、车道功能发生较大变化。

5.5.7 对互通式立体交叉单个出口预告标志开展评价，应符合以下要求：

- 1 应考虑互通式立体交叉的出口功能和物理形式，对单个出口预告标志的信息量、版面形式开展评价。
- 2 宜通过注视时间、注视次数对单个出口预告标志进行评价。
- 3 对单个出口预告标志开展评价时，宜通过统计分析方法对各项指标进行评价。当通过指标难以直接评估方案时，推荐采用综合评价的方法进行方案比选。

5.5.8 对互通式立体交叉出口预告标志系统进行评价应符合以下要求。

- 1 应考虑路幅宽度和互通式立体交叉之间的间距，对互通立交出口预告标志系统的版面形式、预告次数、设置位置开展评价。
- 2 宜通过视认难易程度对预告标志系统进行评价。
- 3 对出口预告标志系统进行评价时，应开展标志作用对驾驶行为和视认特征的影响分析，宜通过统计分析方法对指标进行评价。当通过指标难以直接评估方案时，推荐采用综合评价的方法进行方案比选。

附录A 实验场景逼真度问卷

表A 实验场景逼真度问卷

评价对象	好	一般	差
路线模型			
结构物模型			
交通工程及沿线设施模型			
环境模型			

征求意见稿

附录B 基本信息问卷

B.1 被试基本信息

1.性别：☐ (1) 男 ☐ (2) 女 出生年月：____年____月

2.所在地区：____省（直辖市）____市____区

3.驾驶证初次领证日期：____年____月

4.职业：

- ☐ (1) 机构组织 ☐ (2) 信息产业 ☐ (3) 机械机电 ☐ (4) 建筑建材
☐ (5) 金融投资 ☐ (6) 广告传媒 ☐ (7) 医药卫生 ☐ (8) 冶金矿业
☐ (9) 消费服务 ☐ (10) 农林牧渔业 ☐ (11) 水利水电 ☐ (12) 轻工食品
☐ (13) 办公文教 ☐ (14) 服装纺织 ☐ (15) 交通运输

5.是否为道路、交通设计的专业人员

- ☐ (1) 是 ☐ (2) 否

6.驾照类型：

- ☐ (1) A1（大型客车） ☐ (2) A2（牵引车） ☐ (3) A3（城市公交车）
☐ (4) B1（中型客车） ☐ (5) B2（大型货车） ☐ (6) C1（手动挡小型车）
☐ (7) C2（自动挡小型车） ☐ (8) C3（低速载货汽车） ☐ (9) C4（三轮车）

7.目前所驾车型：

- ☐ (1) 重型拖挂车/大型货车 ☐ (2) 大型客车 ☐ (3) 中型货车
☐ (4) 中型客车 ☐ (5) 小型载货汽车 ☐ (6) 小型客车

B.2 驾驶相关信息

1.平时____开车

- ☐ (1) 从不 ☐ (2) 少于每周一次 ☐ (3) 每周2次及以上 ☐ (4) 每天

2.去年开车公里数：

- ☐ (1) 5000公里及以下 ☐ (2) 5001-10000公里 ☐ (3) 10001-15000公里

3.是否在驾驶中发生过交通事故

- ☐ (1) 是 ☐ (2) 否

如“是”，请描述（多少次？什么日期？什么原因？）_____

附录C 模拟器眩晕问卷

表C 模拟器眩晕问卷

要素	无	轻度	中度	严重
综合不适评价				
眩晕				
恶心				
头痛				
头胀				
疲倦				
很难集中视力				
出汗				
视野模糊				
眼花（睁眼时）				
眼花（闭眼时）				
胃感觉异样				

附录D 安全性主观评价问卷

表 D 安全性主观评价问卷

(a) 道路线形

评价内容	分析单元1		分析单元2		分析单元N	
	上行	下行	上行	下行	上行	下行
线形无突变						
视线无遮挡						
路面平整、横向倾斜感可接受						

(b) 交通标志和标线

评价内容	分析单元1		分析单元2		分析单元N	
	上行	下行	上行	下行	上行	下行
能注意到交通标志和标线						
能理解交通标志和标线含义						
能遵循交通标志和标线要求						

注：评价等级分为好、一般、差

附件

《基于驾驶模拟技术的公路线形评价指南》

(JTG ***-**-****)

条文说明

3 驾驶模拟实验

3.2 实验设备

3.2.2 1 驾驶模拟器根据其运动系统自由度，可分为以下类型：

1) 固定底座驾驶模拟器，无运动系统或运动系统处于关闭状态，如图3-1。



图3-1 固定底座驾驶模拟器

2) 多自由度驾驶模拟器，在沿 x 、 y 、 z 坐标轴、绕轴转动等方向具有移动或转动自由度，常见的如低自由度、六自由度、八自由度驾驶模拟器等，如图3-2。



a) 三自由度（北京工业大学）



b) 六自由度
(云南省交通规划设计研究院有限公司)



c) 八自由度（同济大学）



d) 八自由度（交通运输部公路科学研究院）

图3-2 多自由度驾驶模拟器

2 国际上基于驾驶模拟技术开展公路安全性评价的研究中,所使用的驾驶模拟器运动系统自由度差异较大,如表3-1所示。驾驶模拟器运动系统自由度对于实验有效性至关重要,可能影响被试的模拟器眩晕和实验数据。

表3-1 国内外开展驾驶模拟实验的运动系统自由度选取统计

年份	运动系统自由度	研究对象	年份	运动系统自由度	研究对象
2006	三自由度	交通标线	2018	固定底座	交通标线
2011	固定底座	路肩、护栏	2018	四自由度	路肩、护栏
2013	固定底座	护栏	2019	八自由度	线形组合
2015	固定底座	线形组合	2019	八自由度	线形组合
2015	八自由度	线形组合	2019	固定底座	路肩
2018	八自由度	线形组合	2019	固定底座	视距
2018	八自由度	线形组合	2020	八自由度	线形组合

已有研究通过调节驾驶模拟器运动系统的配置^[1],使被试分别在多自由度驾驶模拟器(指八自由度)、固定底座驾驶模拟器中开展实验。采用速度、纵向加速度、横向加速度、轨迹偏移作为客观评价指标,以模拟器眩晕、运动系统逼真度作为主观评价指标。将道路线形根据平面线形(直线、圆曲线、缓和曲线)和纵坡(平坡、上坡、下坡)特征划分为九类,利用Wilcoxon符号秩检验方法,比较了两种运动系统自由度间的差异。结果表明:

1) 相比固定底座驾驶模拟器,具有运动系统的多自由度驾驶模拟器可提供更逼真的运动提示(图3-3),模拟器眩晕更轻(图3-4)。

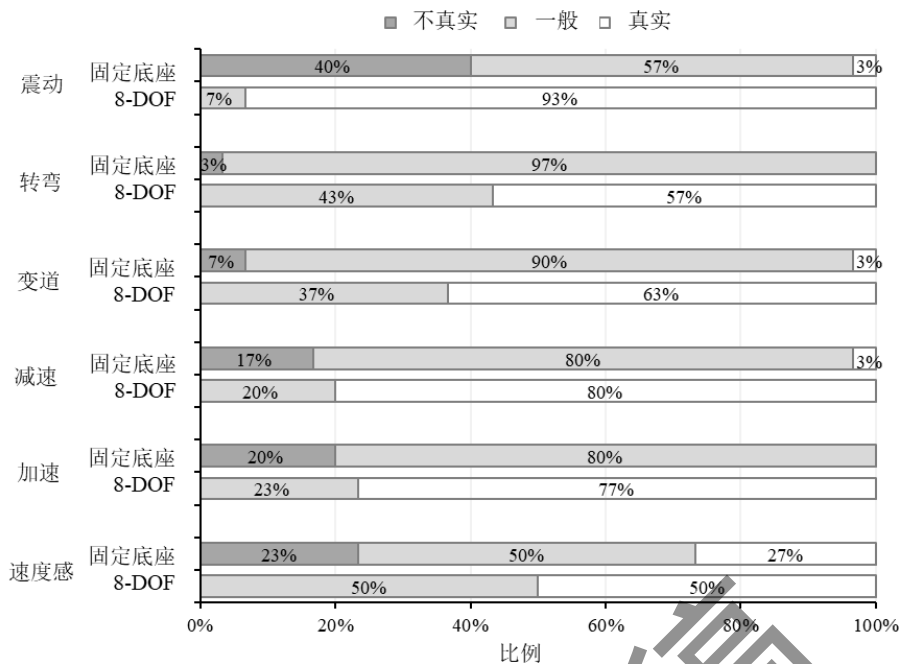


图3-3 运动系统逼真度评价结果

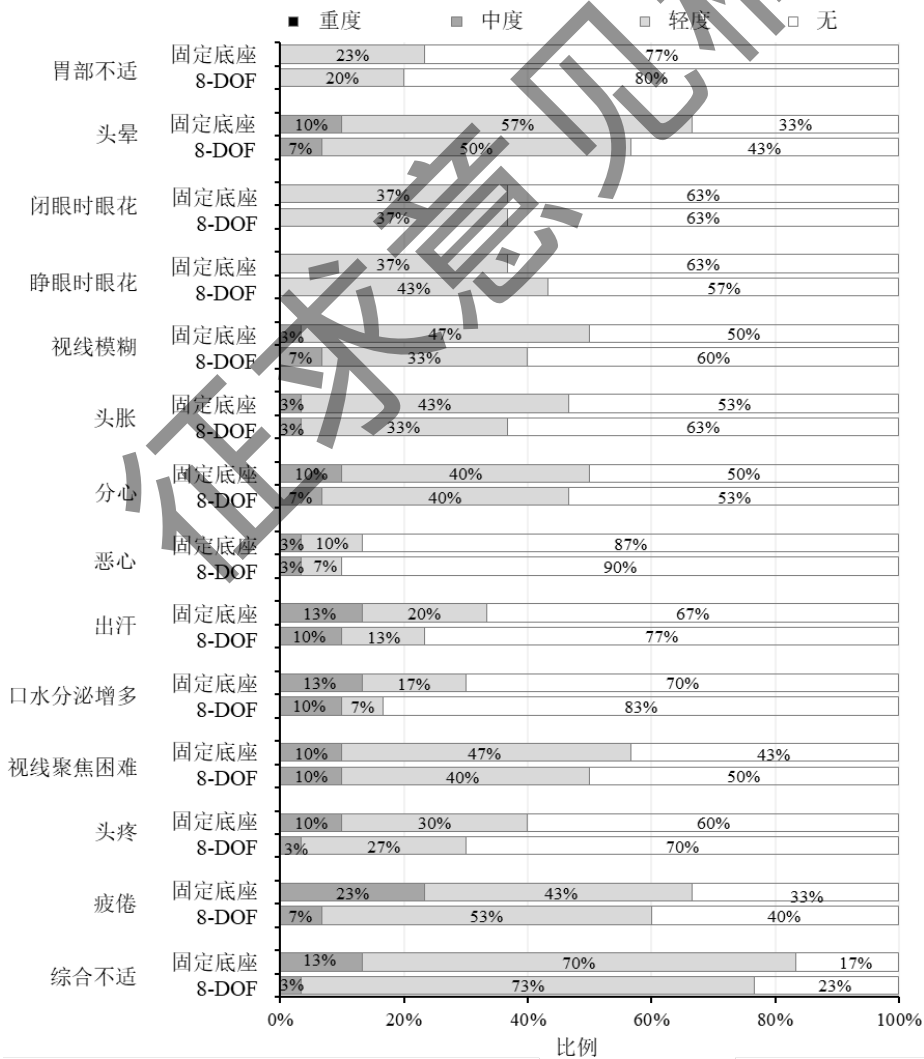


图3-4 模拟器眩晕评价结果

2) 驾驶模拟器运动系统会显著影响被试在线形组合路段的速度（表3-2）、横向加速度（表3-3）。

表3-2 速度指标Wilcoxon符号秩检验结果

平面线形	纵坡	八自由度		固定底座		Z 值	P 值
		均值	标准差	均值	标准差		
直线	平坡	99.80	9.69	98.19	8.27	-1.53	0.125
	上坡	96.21	11.36	93.71	8.14	-2.03	0.043
	下坡	102.03	11.36	100.71	8.38	-0.83	0.405
圆曲线	平坡	95.72	11.34	93.54	9.91	-1.88	0.060
	上坡	91.74	12.41	89.22	9.71	-2.15	0.032
	下坡	100.07	10.95	97.88	9.49	-1.39	0.165
缓和曲线	平坡	96.44	10.97	94.13	9.42	-2.21	0.027
	上坡	90.49	12.86	87.26	10.55	-2.40	0.017
	下坡	101.60	10.51	99.52	8.34	-1.49	0.136

表3-3 横向加速度指标Wilcoxon符号秩检验结果

平面线形	纵坡	八自由度		固定底座		Z 值	P 值
		均值	标准差	均值	标准差		
直线	平坡	0.148	0.071	0.145	0.058	-1.06	0.289
	上坡	0.156	0.086	0.138	0.068	-0.96	0.339
	下坡	0.154	0.080	0.162	0.075	-0.67	0.504
圆曲线	平坡	1.018	0.243	0.965	0.214	-2.17	0.030
	上坡	0.987	0.274	0.924	0.214	-2.27	0.023
	下坡	0.946	0.211	0.894	0.175	-1.68	0.094
缓和曲线	平坡	0.547	0.126	0.537	0.118	-0.69	0.491
	上坡	0.607	0.170	0.563	0.142	-2.01	0.045
	下坡	0.552	0.130	0.531	0.097	-1.04	0.299

因此对于包含线形组合、桥梁、隧道、互通式立体交叉等特殊路段的实验场景，建议采用多自由度驾驶模拟器开展实验。

3.3 实验设计

3.3.3.1 样本量太大会造成人力、物力和财力的浪费，样本量太小会因抽样误差过大而影响实验的有效性。迄今为止，大多数基于驾驶模拟技术的研究都参考同类研究的实验方法并结合实验成本等方面确定样本量。

对 30 项国际基于驾驶模拟技术开展道路线形安全性评价的研究样本量进行梳理（表 3-4），样本量范围为 15~48 人，无统一选取标准。其中，7 篇研究的样本量分布在 40~48 人，15 篇研究的样本量分布在 30~39 人，8 篇研究的样本量分布在 15~29 人。

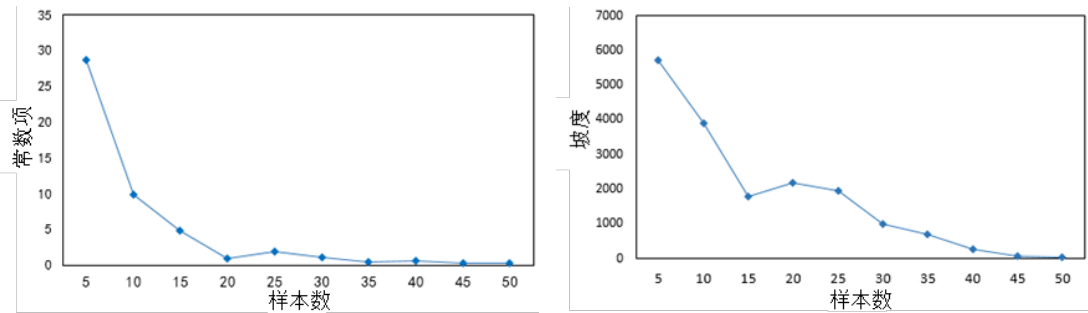
表3-4 国内外开展驾驶模拟实验的样本量选取统计

年份	样本量	研究指标	年份	样本量	研究指标
2005	36	横向位置	2014	40	速度
2006	25	速度、横向位置	2014	40	速度
2007	20	速度、横向位置	2015	35	速度
2008	40	速度	2015	22	横向加速度
2010	30	速度、横向位置	2016	30	速度、横向位置
2011	48	运行速度	2017	42	速度
2011	22	速度、横向位置	2017	40	速度、横向位置
2011	23	速度、纵向加速度、横向位置	2017	36	速度、注视点
2012	30	速度、纵向加速度	2018	30	横向轨迹偏移
2012	30	速度、横向位置	2018	30	驾驶行为、负荷
2013	15	速度差	2018	21	速度差
2013	31	速度、横向位置	2019	30	纵向加速度
2013	33	速度、横向位置	2019	30	速度、横向位置
2013	25	速度、横向位置	2019	41	速度、横向位置
2014	30	速度、纵向加速度	2021	30	速度

已有研究通过样本量计算和验证，确定了驾驶模拟实验的最小样本量^[2]。

1) 样本量计算：采用基于系数估计误差和预测精度误差的样本量计算模型确定实验所需样本量。首先以 10 位被试数据作为初始样本，使用车速数据与线形设计特征构建混合线性速度模型，得到回归模型系数。根据置信区间公式得到基于系数估计误差的样本量计算模型，使用边际误差公式得到基于预测精度误差的样本量计算模型，选择两个模型结果的最大值作为研究所需的最小样本量。

2) 样本量验证：采用变量系数均方误差的收敛性验证结果。采集55位被试的车辆运行数据，通过随机抽取样本，建立不同样本量条件下的混合线性速度模型、混合效应纵向加速度Logit模型和混合效应轨迹偏移Logit模型。基于变量系数均方误差的收敛趋势，选取均方误差收敛并趋于稳定的样本量值作为实验最小样本量。



a) 常数项

b) 坡度

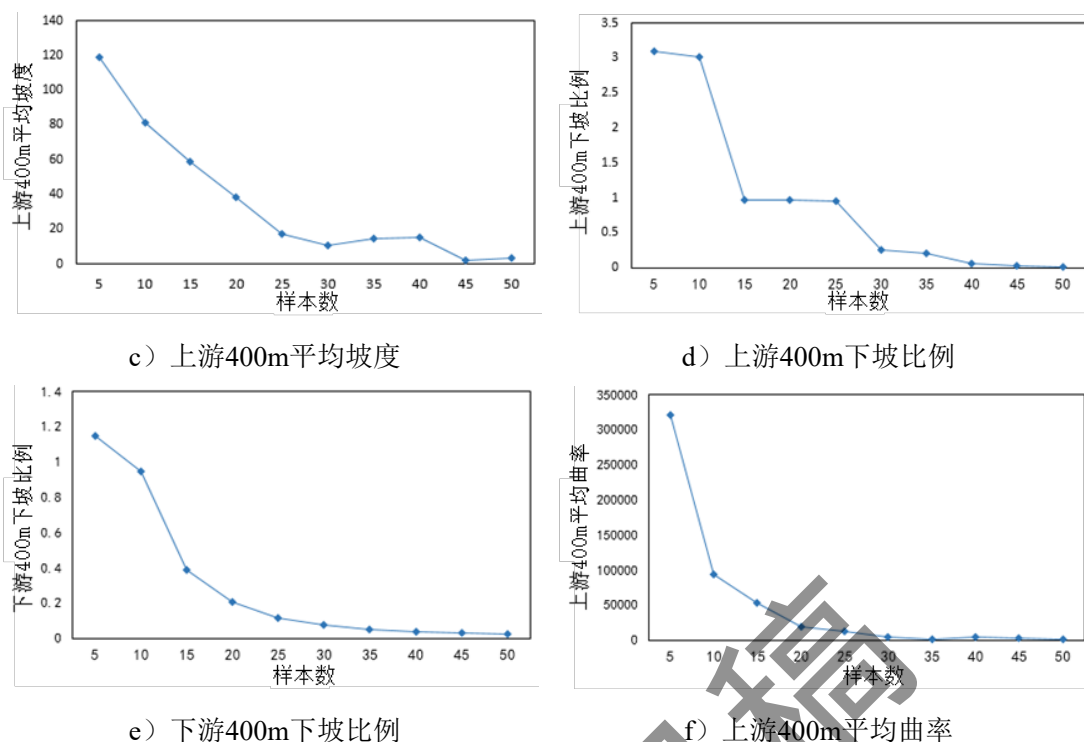


图3-5 不同样本量的车速混合线性模型变量系数均方误差折线图

图3-5中，横坐标轴是样本数，纵坐标包括常数项、坡度、上游400米平均坡度、上游400米下坡比例、下游400米下坡比例和上游400米平均曲率，是车速混合线性模型中道路线形设计参数的系数。随着样本量的增加，通过变量系数的均方误差的变化对变量系数的稳定性进行评价。当达到或超过一定数量的样本大小时，均方误差收敛并稳定，即可识别出最小样本大小。

在混合线性模型中，6个变量的均方误差折线的变化趋势是随着样本量的增加，模型系数的均值误差减小。当样本量达到30时，均方误差折线趋于稳定。进一步通过T-test检验了样本数为30与样本数为55时模型系数的差异，检验结果表明样本数为30时自变量的系数与样本数为55时的系数没有显著差异。由此确定，基于驾驶模拟技术开展公路线形评价的实验样本量应不小于30人。

2 由于道路、交通设计专业人员具有专业背景，可在主观评价问卷中更针对性地提出意见，因此样本组成应包括道路、交通设计专业人员。

以公安部公布的2021年全国驾驶人数据为例：

1) 性别：男性占66%，女性占34%。

2) 年龄：18-25岁占11%，26-50岁占71%，51-60岁占14%，超过60岁占4%。

3) 驾龄：不满1年的占6%。

3.3.4 交叉实验方法安排实验是有效的对照研究方式，可以更好地消除或减少重要的非处理因素的影响。交叉实验方法设计一般用于安排 1 个不超过 2 水平的实验因素，以及不超过 2 个与因素无交互作用的重要非处理因素。

交叉实验方法具体实施为：选取 n (n 为偶数) 个受试对象，按某属性（即第一个区组因素）将受试对象配成 $n/2$ 对，用随机的方法决定每对中的 1 个受试对象接受 2 种处理的先后顺序（即第 2 个区组因素），让该对中的另 1 个受试对象接受处理的顺序相反。2 种处理先后作用于同 1 个受试对象，并且交叉出现在各对受试对象之间。

以评价隧道路段上、下行的安全性为例（表 3-5）：随机选择配对中的一名被试先驾驶隧道上行场景，后驾驶隧道下行场景；另一名被试先驾驶隧道下行场景，后驾驶隧道上行场景。

表3-5 基于交叉实验方法的实验顺序安排示例

实验顺序	第一组被试	第二组被试
1	驾驶隧道上行	驾驶隧道下行
2	驾驶隧道下行	驾驶隧道上行

3.4 实验准备

3.4.1 1 列表中根据设计文件对实验场景建模的贡献程度设置了三类需求等级，其中需求度★★★为建模必备的设计文件。

基础道路设计文件应包括设计说明文件、平纵线形、横断面和交通工程设计文件等五类文件，具体文件需求参照表 3-6。

表3-6 基础道路设计文件需求

序号	类目	明细	范围	需求度
1	设计说明	工程设计说明	--	★★★
2		工程可行性研究报告		★★
3	平纵线形	地形数据	路线所在区域	★★★
4		路线平面图	主线、匝道、辅路、被交道路等与研究路线相关的其他道路	★★★
5		路线纵断面图		★★★
6		直线曲线及转角表		★★★
7		纵坡及竖曲线表		★★★
8		逐桩坐标表		★★★

《基于驾驶模拟技术的公路线形评价指南》

9	横断面	道路标准横断面	主线、匝道、辅路、被交道路等	★★★
10		桥梁标准横断面		★★★
11		隧道横断面	主线、匝道、被交道路、标准段、加宽段、敞开段、暗埋段	★★★
12		隧道建筑界限		★★★
13	交通工程	标志标线布设图\布设表	主线、匝道、辅路、被交道路等	★★★
14		标志版面设计图		★★
15		标志支撑结构设计图	单柱、悬臂、门架、附着	★
16		安全设施设计图	护栏、轮廓标、防撞墩、防眩板、隔离栅	★

重要结构物设计文件应包括隧道、桥梁、人工岛等，具体文件需求参照表 3-7。

表3-7 重要结构物设计文件需求

序号	类目	明细	范围	需求度
1	隧道	隧道设置一览表	主线、匝道、被交道路等	★★★
2		隧道内壁装饰方案		★★★
3		横通道布置图\布置表	主线、匝道、被交道路等	★★
4		紧急停车带布设图\布设表		★★
5		洞口一般构造图		★★
6		洞口遮阳棚设计图		★★
7		通透式隧道挡墙设计图		★★
8		风机平面布置图		★
9	桥梁	桥梁设置一览表	主线桥、匝道桥	★★★
10		桥墩及基础一般构造图		★★
11		索塔及基础一般构造图	主桥	★
12		锚碇及基础一般构造图		★
13		主缆及吊索一般构造图		★
14	人工岛	岛体结构平面图	--	★★★
15		人工岛结构断面图		★★★
16		人工岛总体平面布置图		★★
17		人工岛总体立面布置图		★★
18	收费站	收费天棚设计图	--	★★
19		收费岛尺寸设计图		★
20		收费广场平面布置图		★★★
21		收费车道配置方案		★★★

道路环境设计文件应包括景观、附属设施等，具体文件需求参照表 3-8。

表3-8 道路环境设计文件需求

序号	类目	明细	范围	需求度
1	附属设施	照明灯具布设方案	普通路段、隧道、互通区等	★★★
2		照明灯具配色方案		★★★
3		灯具设计大样图		★

4	景观绿化	声屏障工程数量表	主线、互通、被交道路等	★★★
5		声屏障设计图		★
6		绿化总体平面图		★★
7	其他	设计效果图	全线、互通、隧道、桥梁等	★★
8		重要结构物三维模型(.3ds)	主桥、人工岛、收费站、遮阳棚等	★
9		代表性建筑三维模型	--	★
10		气象观测\预测数据	路线所在区域	★
11		相关道路视频录像	--	★

21) 道路模型的要素中：路线，指平面线形、纵面线形、横断面。结构物，指隧道、桥梁。附属设施，指护栏、防撞垫、减速带、信号灯等。

3) 多层次细节处理方法是指根据交通标志和交通标线在模型中所处的远近距离和重要度，分配细节渲染资源，对模型分层级显示，降低非重要标志和标线的模型面数和细节度，获得高效率的渲染运算。

4) 环境模型的要素中：

地形地貌，指地势高低起伏的变化，可使用等高线地形图生成。景观，指沿途树木、水系、建筑等，应使用公路周边相似的景观建模。

光照，指光照强度、光照方向，针对隧道应通过调整光照方向实现隧道口眩光、“黑白洞效应”建模。

天气和气象，指晴、阴、雨、雪、雾、横风等，按需调整光照强度、雨量、雪量、能见度、横向风力等参数，并根据雨量调整音效。

路面条件，指路面材料和路面状态。路面材料包括沥青、水泥混凝土等，可调整路面外观；路面状态包括干燥、湿润、冰雪等，可调整路面附着系数。

3 重载车型的车辆动力学模型参数宜通过调研项目所在地的重载货车车辆参数获取，同时根据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)第 8.3.2 条的条文说明中我国高速公路货运车型组成的调查研究结果，车型必须包括五、六轴半挂式铰接列车，功率质量比为 5.1kW/t。

3.5 实验实施

3.5.3 试驾阶段旨在使被试熟悉驾驶模拟器的操作，能在驾驶模拟环境下执

行加速、减速、换道等基本驾驶行为。试驾时长过短，被试无法充分熟悉驾驶模拟器的操作；而试驾时长过长，易使被试在正式实验阶段出现疲劳、注意力不集中等反应。国内外研究表明，5 分钟的试驾时长可达到试驾目的，且被试可接受。

征求意见稿

4 一般路段线形评价

4.2 分析单元划分

4.2.1 《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)第B.2.1条规定了将公路划分为平直路段、平曲线路段、纵坡路段、弯坡组合路段、隧道路段和互通式立体交叉路段等分析单元。《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)4.5.4规定应结合桥位条件评价桥梁引线及桥梁路段的线形设计对交通安全的影响,宜将桥梁路段作为单独的分析单元,评价其线形的安全性。

《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)第B.2.1条有以下规定:

- 1 平直路段、纵坡路段、弯坡组合路段划分宜符合表4-1的规定。

表4-1 分析单元划分原则

车型	纵断面	平面	
		圆曲线半径>1000m	圆曲线半径≤1000m
小型车或大型车	坡度<3%	长度>200m平直路段 长度≤200m短平直路段	平曲线路段
	坡度≥3%	纵坡路段	弯坡组合路段

- 2 隧道路段宜为驶入隧道洞门前200m至驶出隧道洞口后100m。

3 互通式立体交叉区主线路段宜为减速车道渐变段起点至加速车道渐变段终点,匝道路段宜为匝道与主线连接点到匝道终点。

4.3 评价指标计算

4.3.1 客观评价指标,包括安全替代指标和驾驶人视认指标。

1 评价道路安全性最可靠的指标是交通事故的数量及严重程度,但事故是小概率事件,难以在短时间内获取足够的样本。同时由于事故形成机理复杂,影响因素众多,即使采集到足够的历史事故数据,也很难将事故与道路几何设计参数之间进行直接的关联分析。为了量化地研究线形组合道路设计参数的安全性,考虑引入安全替代指标。

安全替代指标指的是与交通事故之间具有同致因关系、且可以通过统计模型

构建定量预测关系的各类危险事件，这些危险事件可以基于运行曲线进行提取。安全替代指标需要满足两个基本条件^{[3][4]}：安全替代指标与替代对象（这里即事故）之间有着显著的相关关系；安全替代指标能反映外加措施（这里即各类交通安全改善措施或交通运行方式的改变）带来的变化。

4.3.2 安全替代指标应同时考虑纵向行车安全性、横向行车安全性^[5]。纵向行车安全性评价指标包括最大车速差、纵向加速度。横向安全性评价的指标包括横向加速度、轨迹偏移标准差。

《公路项目安全性评价规范》（JTGB05—2015）中仅采用运行速度差、运行速度梯度进行纵向行车安全性评价，本指南同时考虑纵向行车安全性与横向行车安全性评价，采用速度^{[6][7][8]}、加速度、轨迹偏移指标进行多角度评价。

安全替代指标的计算应符合以下要求：

1 车速在不同平曲线段间的平稳过渡是十分重要的，路段车速差一直是最常用和有效的道路线形设计安全性评价指标^{[9][10][11]}。个体驾驶员车速变化曲线中提取的车速差的85%分位值，可反映绝大多数驾驶员的速度变化幅度。

2 纵向加速度变化曲线一般能反映驾驶员在线形不良路段上的急加速和急减速行为^[12]，个体驾驶员纵向加速度变化曲线中提取的85%分位值，可反映绝大多数驾驶员的纵向加速度。

3 横向加速度被广泛用于检测车辆稳定性水平。当车辆的横向加速度值过大时，车辆快速偏离道路中心线，易引发交通事故。普通客车往往侧翻阈值较高约达到1.2 g，而稳定性性能的较差的卡车在侧向加速度达到0.26到0.34 g时就可能发生侧翻。同时，车辆横向加速度超过0.2 g就会引起驾驶员感到不适^[13]。个体驾驶员横向加速度变化曲线中提取的85%分位值，可反映绝大多数驾驶员的横向加速度^[14]。

4 轨迹偏移标准差：车辆中心偏移车道中心线距离标准差的85%分位值。单位为m。

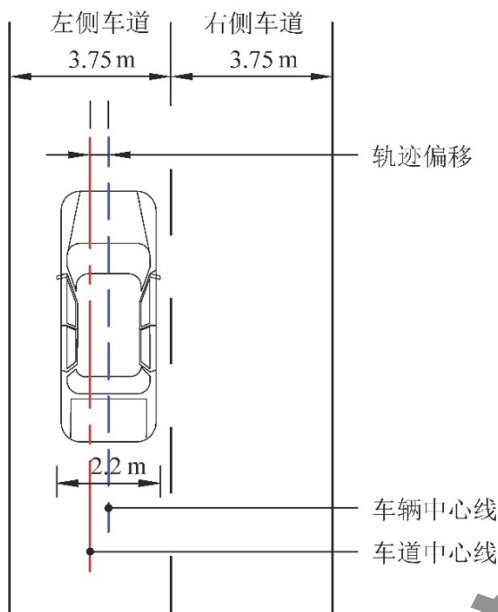


图4-1 轨迹偏移示意

车辆行驶轨迹偏移易引发侧碰、追尾及车辆驶出路外事故，是交通安全研究中重要的考虑因素^{[15][16]}。世界范围内大约有44%的机动车事故与车辆偏离正常车道行驶有关^[17]，事故率与车辆轨迹等存在着一定的相关性。不良的线形组合设计，易引发与车道偏离相关的事故^[18-20]。轨迹偏移标准差代表了驾驶过程中行驶轨迹的一致性，反映了车辆偏离行驶过程中的理想轨迹的偏移量的变化程度，变化程度越大，说明道路线形设计对于驾驶员保持连续的理想轨迹难度越高。个体驾驶员轨迹偏移标准差变化曲线中提取的85%分位值，可反映绝大多数驾驶员的轨迹偏移标准差。

4.4 安全性评价

4.4.2 进行线形安全性评价，应先进行主观评价，并符合以下要求：

作为道路的使用者，驾驶员的主观感受是重要的评判依据。针对线形主观评价，采用了是否存在线形突变、是否存在视线遮挡、以及行车过程中是否存在颠簸、横向倾斜感三个主观评价指标。线形既要适应沿线地形地物条件变化，又要保证前后线形相协调，线形突变会造成运行速度突变，导致不安全驾驶行为的发生；弯道、陡坡等不良线形组合均可能造成视线遮挡，道路线形应能自然地诱导驾驶员的视线，并保持视觉的连续性，最大限度地保证行车安全；行车过程中存在颠簸、横向倾斜感会影响驾驶员的驾驶心理和驾驶舒适性。

4.4.3 对线形进行客观评价时，应符合以下要求：

1 通过驾驶模拟器所采集的驾驶行为参数，均属于安全替代指标。评价时需要为安全替代指标选择合适的阈值，才能有效地利用安全替代指标对实际道路进行一致性安全评价。

实际上，若一个变量被证明能够服从正态分布，则可以利用变量自身的分布特征选取相应地阈值进行区分。如图4-2所示，为若干个不同正态分布曲线（均值=0）的累计频率曲线，对于服从正态分布的变量，其50th分位值即为样本均值，且代表了有50%以上的样本超过了样本均值，而起85th值则代表了有85%的样本达到了该值。根据Cafiso和Cava^{[21][22]}的研究，当安全替代指标服从正态分布时，50th和85th对于变量的分布范围具有较为典型的代表性，可以作为划分路段安全水平的阈值。

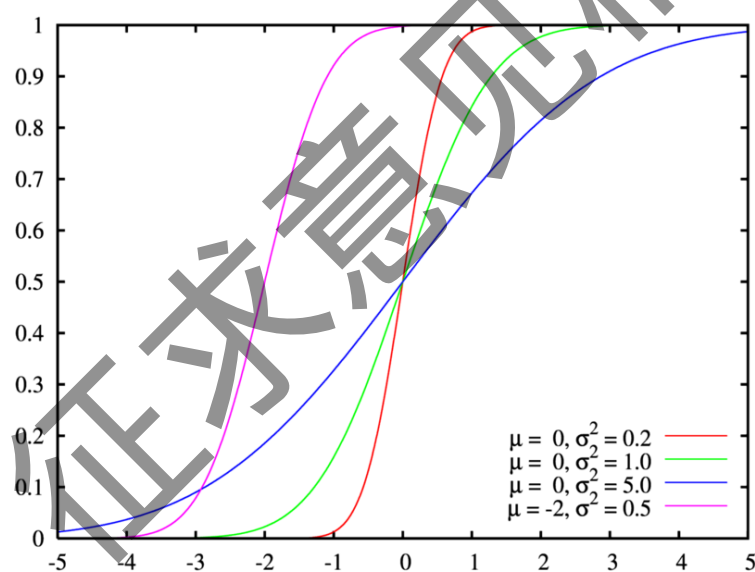


图4-2 正态分布的累计频率曲线

国内外标准中针对相邻路段运行速度协调性评价标准基本选取了一致的阈值，如表4-2。现行《公路项目安全性评价》(JTG B05—2015)中指出，小于10km/h的速度协调性评价为“好”；大于等于10km/h且小于20km/h评价为“较好”；大于等于20km/h评价为“不良”。虽然本指南选取“最大车速差”指标的计算方法与《公路项目安全性评价》(JTG B05—2015)不同，但其提出的阈值是相对公认的。因此，本指南规定选取10km/h和20km/h的最大车速差作为评价分析单元安全性的阈值。

表4-2 运行速度协调性评价标准

国内外标准及文献	运行速度评价阈值	计算方法
《公路项目安全性评价》 (JTG B05—2015)/交互式 道路安全设计模型 (Interactive Highway Safety Design Model, IHSDM)	小于10km/h评价为“好”；大于 等于10km/h且小于20km/h评价为 “较好”；大于等于20km/h评价 为“不良”	两连续路段单元运行 速度 V_{85} 差值的绝对 值
交通运输部公路科学研究院 安全中心	小于10km/h评价为“好”；大于 10km/h且小于20km/h评价为“较 好”；大于20km/h评价为“不 良”	取路段单元的上、下 85分位速度作为上限 与下限，计算速度差 值
IHSDM	小于等于10km/h评价为“好”； 大于10km/h且小于等于20km/h评 价为“较好”；大于20km/h评价 为“不良”	路段单元的设计速度 V_d 与运行速度 V_{85} 差 值的绝对值

车辆在线形组合中行驶时，出于驾驶平顺性考虑会相应产生加速或制动行为，由此产生的纵向加速度会显著影响驾驶的舒适性和安全性。现有规范未能就纵向加速度作为安全性评价指标提出一致的阈值，如表4-3。本指南参考了方守恩等人编著的《道路规划与几何设计》表7-13的纵向加速度评价标准，确定加速情况下选取加速度 0.9m/s^2 和 1.2m/s^2 作为评价阈值；减速情况下选取减速度 1.3m/s^2 和 2.5m/s^2 作为评价阈值，两种情况下均认为速度变化率越小，行驶平顺性越佳，安全性相应越高。

表4-3 纵向加速度评价标准

国内外标准及文献	纵向加速度评价阈值	计算方法
方守恩, 陈雨人《道路规划 与几何设计》 ^[23]	加速情况下: $a \leq 0.9\text{m/s}^2$ 好 $0.9\text{m/s}^2 < a < 1.2\text{m/s}^2$ 中等 $a \geq 1.2\text{m/s}^2$ 不良 减速情况下: $a \leq 1.3\text{m/s}^2$ 好 $1.3\text{m/s}^2 < a < 2.5\text{m/s}^2$ 中等 $a \geq 2.5\text{m/s}^2$ 不良	-
交通运输部公路科学研究 院安全中心	加速度 $a > 1.25\text{m/s}^2$ 不良 减速度 $a < -2\text{m/s}^2$ 不良	参考三部委一期科研项目 专题《基于驾驶人期望的 山区公路交通安全性分析 关键技术研究》成果
瓦伦西亚理工大学 <i>Use of driving simulator for road safety audit</i>	减速度 $a > -3.4\text{m/s}^2$ 良好 减速度 $a < -5.88\text{m/s}^2$ 较差	-

《基于驾驶模拟技术的公路线形评价指南》

美国国家道路与交通运输协会（American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO） <i>A policy on geometric design of highways and streets</i> ^[24]	-3.4m/s ² 为最大舒适减速度	避免碰撞的减速度（Deceleration Rate to Avoid a Crash, DRAC）
美国联邦公路署（Federal Highway Administration, FHWA）	加减速阈值范围在±1.0m/s ² 之间	以水平曲线半径为唯一解释变量，加速和减速的回归模型，估算得出纵向加速度范围

国内外标准及文献中针对横向加速度舒适性阈值范围大致为1.2~2.5 m/s²，但目前尚无通用的阈值，如表4-4。基于2012年开展的《基于交通行为虚拟现实平台的湖南永吉高速公路设计驾驶安全及舒适性评价》专题研究，借鉴意大利学者将指标分布的50th分位值和85th分位值作为区分阈值的方法，经过类似的计算，并取整数，横向加速度的阈值则分别为1.5m/s²和2.5m/s²。因此将1.5m/s²作为“好”与“一般”的评价阈值，将2.5m/s²作为“一般”与“不良”的评价阈值。

表4-4 横向加速度评价标准

国内外标准及文献	横向加速度评价阈值	计算方法
《公路路线设计规范》（JTG D20—2017）	横向加速度舒适范围为-2m/s ² 至2m/s ²	参考JTG D20—2017中横向力系数要求，换算得出横向加速度舒适范围
方守恩, 陈雨人《道路规划与几何设计》 ^[23]	人体对横向加速度的舒适感觉极限1.2m/s ²	-
AASHTO <i>A policy on geometric design of highways and streets</i> ^[24]	一般曲线最小横向加速度的范围在0.4至1.3m/s ² 之间；舒适横向加速度不超过1.3m/s ²	由横向力系数换算得来
Horizontal curve design for passenger cars and trucks ^[25]	横向加速度超过1.96m/s ² ，会引起驾驶员不适	$a = \frac{V^2}{15R} - e$ e为超高
人体信息技术在道路几何构造安全性评价中的应用 ^[26]	横向加速度大于2.5m/s ² 时，驾驶员会明显感到不适	由横向力系数换算得来

目前国内外标准及文献中针对轨迹偏移标准差尚无通用的阈值，如表4-5。基于2012年开展的《基于交通行为虚拟现实平台的湖南永吉高速公路设计驾驶安全及舒适性评价》专题研究，借鉴意大利学者将指标分布的50th分位值和85th分位值作为区分阈值的方法，经过类似的计算，并取整数，轨迹偏移标准差的阈值

则分别为0.35m和0.5m。因此将0.35m作为“好”与“一般”的评价阈值，将0.5m作为“一般”与“不良”的评价阈值。

表4-5 轨迹偏移评价标准

国内外标准及文献	轨迹偏移评价阈值	计算方法
A lane departure warning system using lateral offset with uncalibrated camera ^[27]	取车道宽度的1/4为危险警告阈值，车道宽度3.75m时，阈值为0.93m	车辆中心偏移车道中心线距离
A driver adaptive lane departure warning system based on image processing and a fuzzy evolutionary technique ^[28]	高度危险阈值1.35m，中度危险阈值1.16 m	左侧轮胎偏离道路中点的横向距离
Analyzing road near departures as failure-caused events ^[29]	最大阈值1.036m	轮胎到行驶道路边缘的横向距离

根据美国联邦公路管理局（Federal Highway Administration, FHWA）开发的交互式公路安全设计模型（Interactive Highway Safety Design Model, IHSDM），驾驶员/车辆模型（Driver/Vehicle Model, DVM）评估结果中，横向加速度等评价指标随公路里程变化的折线图如图4-3所示。

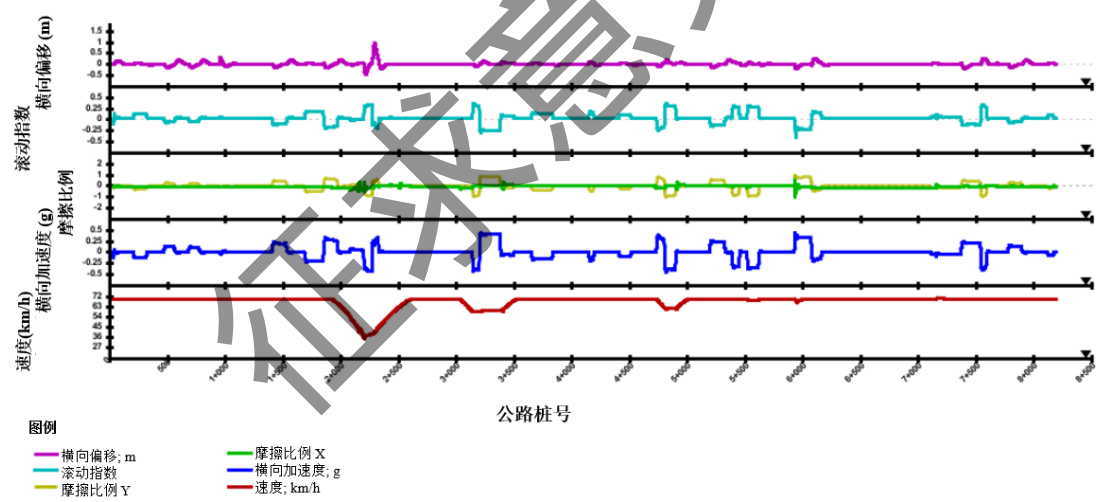


图4-3 评价指标可视化

在基于交通行为虚拟现实平台的湖南永吉高速公路设计驾驶安全及舒适性评价中，利用虚拟现实建模技术在驾驶模拟器环境中构建了永吉高速公路，并展开模拟驾驶实验，采用客观分析方法对设计中的永吉高速的舒适性、宜人性进行评价，形成如图4-4所示的评价指标随公路里程变化的折线图。

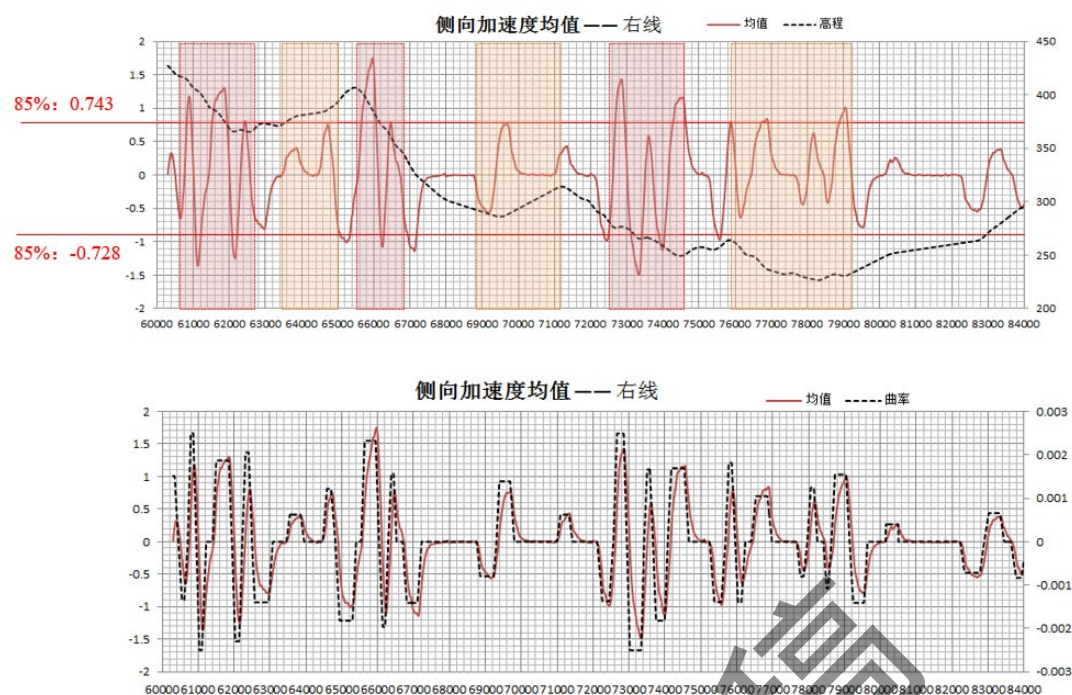


图4-4 评价指标可视化

4.4.4 《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015)第5.4.7条规定了对交通标志、交通标线进行评价。针对交通标志,评价主要考虑标志的设置位置、标志信息的合理性、标志尺寸、标志字高、反光强度等级与线形的适应性;针对交通标线,评价主要考虑标线的宽度、形式、颜色、反光等级等与线形的适应性。

4.4.5 2 为了评价标志与标线能否达到预期的效果,主要通过评价人员和驾驶人模拟驾驶,根据直观感受检查各种标志的视认效果。对交通标志和标线进行主观评价时,主要评价是否能注意到交通标志和标线、能理解交通标志和标线含义,能遵循交通标志和标线要求。

5 特殊路段线形评价

5.2 线形组合路段

5.2.2-5.2.5 平纵组合线形与安全替代指标定量关系是通过数理统计建模得出。以评价指标作为因变量，设计要素作为自变量，等过多元线性回归分析等方法，筛选与安全替代指标有显著统计意义的设计要素进行评价。平纵线形组合定量关系模型汇总如表5-1所示。

表5-1 平纵线形组合定量关系模型汇总表

线形组合	最大车速差	纵向加速度	横向加速度	轨迹偏移标准差
平曲线上坡	√	√	√	√
平曲线下坡	√	√	√	√
平曲线凸曲线	√	√	√	√
平曲线凹曲线	√	√	√	√

在建立安全分析模型之前，理解各项参数之间的相关性具有重要的意义，能够避免对相关性高的因变量进行重复建模。因此，在进行建模时，对几何线形参数自变量进行相关性分析。自变量为连续变量时，采用皮尔森相关性分析；当自变量为离散变量时，采用斯皮尔曼相关性分析。筛选显著不相关或相关性系数绝对值低于0.4的设计要素作为自变量。

5.2.9 线形诱导标志设置在曲线段主要用于提供可见性和视线诱导，使驾驶人降速。因此，车辆速度和横向放置最常用于反映线形诱导标志在曲线段的有效性。

5.2.10 驾驶人无法保持适当的车道位置是单车碰撞的最大原因之一。更宽的纵向标线的形式能够提供额外的信息提示，帮助驾驶人保持车道位置，降低单车碰撞的可能性。

5.3 桥梁

5.3.1 一般情况下，在整条路段中，桥梁作为道路中的构筑物，无需基于驾驶模拟技术开展专门的线形安全性评价，但当存在本条所列的情况时，宜将桥梁

段作为单独的单元，评价其线形的安全性。

3 桥梁的纵坡或坡长接近极限值时，宜对桥梁上坡方向的坡度、坡长进行评价。

4 以往研究表明，风力为5级或5级以下时对车辆正常行驶基本没有影响，风力为6级时有一定的影响，风力在7级以上时可产生明显影响，当桥梁较长且位于常年或瞬时风力较强的地区时，应对桥面行车的安全性进行评价。

5.3.2.1 对跨海跨江大桥，空气湿度较大，昼夜温差大会导致空气中水汽的凝结，尤其是在冬季，桥面更容易结冰。因此，在进行实验场景设置时，考虑到最不利行车条件，宜将路面设置为湿滑状态，分析低摩擦系数下的行车安全性。

2 桥头引道或桥梁的横断面发生变化时，大型车与小型车的驾驶人视高不同，驾驶人对横断面变化产生的感受也不同，故对过渡段进行评价时，宜考虑不同视高的影响，除考虑小客车视高1.2m外，还宜考虑视高2.0m的货车。

3 桥梁纵坡坡度较大或坡长较长时，主要会对货车的通行速度产生影响。货车在上坡路段行驶时，速度会产生明显的折减情况，故对桥梁上坡方向的坡度坡长进行评价时，应选择大型车作为实验车辆的动力学模型。

在实验准备过程中，宜针对实验路段货车的功率质量比进行调研，选择具有代表性的货车动力学模型；若条件受限时，可根据《公路路线设计规范》（JTG D20—2017）第8.3.2条的条文说明中我国高速公路货运车型组成的调查研究结果“货运主导性车型主要为五、六轴半挂式铰接列车，功率质量比为5.1kW/t；以美国为代表的世界多国均是以功率质量比不低于8.3kW/t”，作为公路设计对货运车型综合性能的一般性的最低要求。

4 宜通过桥梁所在地区的气象资料对横风参数进行设置，当缺乏风观测资料时，宜参考《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01-2018）中附录A.2全国基本风速分布值及分布图和附录A.3全国主要地区不同重现期的风速值。

5.3.3 由于考虑通航、桥面排水等需求，桥梁纵断面最典型的特征为“人字坡”，且车辆在上下坡行驶过程中，其驾驶行为特征差异性较大，故在大的单元划分上，宜根据桥梁上坡路段和下坡路段进行划分。对于大型桥梁而言，主桥和

引桥的行驶环境也会不同，故主桥和引桥需单列。并需兼顾桥梁平纵线形以及横断面的变化，对桥梁分析单元做进一步细化。

5.3.4.1 货车行驶速度折减情况可参考《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)第8.4.1条中关于载重汽车上坡方向容许最低行驶速度的规定。

表5-2 上坡方向容许最低行驶速度

设计速度 (km/h)	120	100	80	60	40
容许最低行驶速度 (km/h)	60	55	50	40	25

2 针对车辆在不同车道的行驶情况，可考虑开展对比实验，包括实验车跟随前车行驶实验和实验车遭遇前方慢车后换道行驶实验。

3 车辆受横风影响的严重程度与风速、风向角、车辆总质量、行驶速度、路面摩擦系数等因素有关，宜调研项目所在地的天气和气候条件，通过设置有无横风的对比实验，对实验车辆行驶过程中的车道偏移、行车轨迹等进行分析，评价其行车安全性。

5.4 隧道

5.4.1 一般情况下，在整条路段中，隧道作为道路中的构筑物，无需基于驾驶模拟技术开展专门的线形安全性评价，但当存在本条所列的情况时，宜将隧道段作为单独的单元，评价其线形的安全性。

5.4.2.2 《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015)提到，公路隧道的照明尤其是洞口处的照明对车辆行驶安全的影响很大，这表现在以下两个方面：一方面，人的视觉功能对于由明到暗的变化需要有一个适应的过渡期。隧道内外明暗差很大时，驾驶人在隧道进口处往往会感觉洞口黑暗，以至于无法辨认洞口附近的状况和车辆，产生“黑洞效应”。此时，驾驶人可能进行急减速、制动、转向等操作，而且操作失误会导致车辆失控撞击隧道壁或被后车追尾。

另一方面，在隧道出口附近，白天驾驶人看到的是一个刺眼的眩亮白洞，此时形成“白洞效应”。“白洞效应”会降低驾驶人出洞口时的视觉功能，从而无法看见或准确判断前方线形和车辆。夜间正好与白天情况相反，在“黑洞效应”作用下驾驶人出洞口时看到的不是亮光而是黑洞，难以辨清洞外线形及路面上的障碍物。故需对隧道的“黑白洞效应”开展专门的安全性评价。

采用单一实验方案仅能对比出洞口段和相邻路段之间的差异，因此，宜通过设置对比实验，直观的反应出“黑白洞效应”对驾驶人的影响。

5.4.3 针对隧道开展基于驾驶模拟技术的线形安全性评价时，需要将分析单元进行细分。隧道作为半密闭空间结构物，对车辆运行安全性影响主要受制于隧道洞口前后的运营环境过渡。相关研究表明，当驾驶员遇到障碍物或紧急情况时，需历经“观察-判断-执行”约3s的操作时长，为有效判别隧道洞口内外的不利运营条件，选取洞口内外3s最大运行速度行程长度进行分析单元划分，即最大法定运行速度120km/h的3s行程长度为100m。

5.4.5 1 隧道入口预告标志主要用于预告和指引隧道，提醒驾驶人前方隧道道路名称、距离等信息，常与开车灯标志组合使用；隧道限速标志和减速标线配合使用，提醒驾驶员进入隧道时控制速度。同时，隧道内行车光线与一般路段有差别，特别是进入隧道口处光线变化强烈，易对驾驶员视线产生干扰，因此隧道入口前通常会同步出现禁止超车与限速标志，提示驾驶员隧道内严禁超车与控制车速行驶。

针对以上各类型入口标志，现有标准仅规定单个交通标志和标线的定义、位置、使用要求等，但实际使用时往往以组合形式出现，系统性较强，目前缺少组合使用相关规定，应加以补充。因此对于隧道入口段标志，主要评价以上交通标志和标线的不同组合形式设计对驾驶人的影响。组合形式应依据实际道路情况选择，可将入口预告标志与开车灯标志组合、入口前限速标志与禁止超车标志组合、入口预告标志与限速标志和禁止超车标志组合、限速地面标识与减速标线组合等。

入口标志的评价指标应选择驾驶车辆运行及人因特性指标，重点开展基于眼动特性指标的评价，并采用综合评价方法进行研究。

注视时间和注视次数是视觉搜索任务期间，驾驶员注视特定兴趣区域的时间和次数，即驾驶员保持视觉注视在某位置时间及次数越长，注意力越集中在区域内的标志上。

5.4.6 1 突起路标是降低高速公路隧道高事故率和死亡率的有效措施。因此需要对其进行评价。亮度和设置间距是影响突起路标效果的主要因素，合理的亮

度及间距有助于减少黑暗单调的隧道驾驶环境引起的焦虑、厌倦和疲劳，提高驾驶员的警觉和速度意识，提高驾驶安全性。

瞳孔直径表征驾驶员的视觉适应性和负荷水平。在认知任务中记录的瞳孔扩张程度是对任务处理负荷和资源分配的心理生理测量。正常情况下瞳孔直径在2mm~5mm范围内，一般会随着光线的强弱而发生一定变化。尤其是进出口光线变化或突起路标反光影响下，注视时间及注释次数注视时间及注释次数越大，表示心理负担或压力越大；相反，驾驶员的心理状态越好，他们的紧张程度越低。

5.4.7 隧道出口距离标志用于指示到前方隧道出口的距离，设置位置和预告次数等关键设计属性对驾驶人影响较大，一般从距离隧道出口开始处每隔一段距离会设置标志。因此，对于隧道出口预告标志，主要评价标志设置位置和预告次数等关键设计属性对驾驶人的影响。隧道出口处光线的改变对驾驶员视认标志影响较大，应选择眼动指标进行评价。

5.5 互通式立体交叉

5.5.1 一般情况下，无需基于驾驶模拟技术对互通式立体交叉开展专门的线形安全性评价，但当存在本条所列的情况时，宜进一步对互通式立体交叉开展线形安全性评价。

5.5.2 由于互通式立体交叉存在多种可选的行驶路径组合，驾驶人以不同路径途经同一路段时的驾驶任务不同，因此评价范围应遍历所有可能途经的路径。

5.5.3 《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)第B.2.1条规定了互通式立体交叉主线路段、匝道路段的范围。《公路立体交叉设计细则》(JTGT D21—2014)第2.0.28条定义了互通式立体交叉连接部。针对互通式立体交叉开展基于驾驶模拟技术的线形安全性评价时，由于驾驶人在主线路段、匝道路段、连接部的驾驶任务不同，需要进一步划分分析单元。

5.5.4 1 《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)第4.5.6条规定了对互通式立体交叉与隧道之间的间距进行评价。针对隧道出口端与前方主线出口的间距，评价主要考虑出口预告标志的辨认、读取和行动决策等过程在出隧道前能否完成。

2 针对主线入口与前方隧道之间的净距,评价时需考虑寻找间隙、车辆驶入主线调整车速和位置、隧道入口段的光环境变化和驾驶人暗适应过程等因素。

3 《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)第4.5.6条对交织部位或路段提出了评价重点。由于连续分流的互通式立体交叉可能出现交通流紊流,局部路段出现交通瓶颈,应评价多次分流的横断面过渡。

5.5.7 互通立交出口预告标志主要用于预告和指引出口,提醒驾驶人前方出口道路名称、方向等信息。因此对于单个出口预告标志,主要评价标志信息量和版面形式对驾驶人的影响。

5.5.8 对单个出口预告标志进行评价时,考虑到公路物理形式的变化和出口区域驾驶人的行为,定义数据指标的截取范围为出口渐变段起点上游 500 m 位置至主线和匝道的物理分流位置三角端。

对单个出口预告标志进行评价时,应综合考虑指标特征,实现标志方案间的比选。当通过所选指标难以直接评估方案的优劣时,推荐采用层次分析法、模糊综合评价方法进行评价。

5.5.9 互通立交出口区域是车辆进行分流,最终完成路径选择的关键区域,如果驾驶员对路径选择不明确,在这一区域就会犹豫观望,采取突然减速、紧急变道甚至违法停车和倒车,严重影响交通安全。因此对于出口区域预告标志系统,主要评价标志版面形式的一致性、预告次数和标志设置位置等关键设计属性对驾驶人的影响。对出口预告标志系统进行评价时,考虑到驾驶人在驾驶模拟环境中对标志的可视距离,定义数据指标的截取范围为第一级预告标志前 200 m 位置至主线和匝道的物理分流位置三角端。

视认难易程度指驾驶人在每个场景驾驶完成后对寻找目的地难易程度的打分结果,反应驾驶人对标志视认理解的主观评价,评分范围为0到10分,分数越高表示视认难度越高。

对出口预告标志系统进行评价时,应通过统计分析方法刻画车辆的运行轨迹,开展标志作用对驾驶行为的影响分析。当仅依靠指标显著性差异难以判断方案优劣时,推荐采用物元模型、灰色关联等综合评价方法进行评价。

参 考 文 献

- [1] Wang X, Ye X, Wang X. The Effect of Motion System on Driver Performance in Simulated Driving[C]// Transportation Research Board 99th Annual Meeting, Washington D.C., USA, 2020 1.12-16.
- [2] Wang X, Liu S, Cai B, et al. Application of Driving Simulator for Freeway Design Safety Evaluation: A Sample Size Study[C]// Transportation Research Board 98th Annual Meeting, Washington D.C., USA, 2019. 1.13-17.
- [3] Lu M. Modelling the effects of road traffic safety measures[J]. Accident Analysis & Prevention, 2006, 38(3): 507-517.
- [4] Chin H C, Quek S T. Measurement of traffic conflicts[J]. Safety Science, 1997, 26(3): 169-185.
- [5] 王雪松. 交通安全分析[M]. 同济大学出版社, 2022.
- [6] Wang X, Guo Q, Tarko A P. Modeling speed profiles on mountainous freeways using high resolution data[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2020, 117: 102679.
- [7] Wang X, Chen Z, Guo Q, et al. Transferability analysis of the freeway continuous speed model[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 151: 105944.
- [8] 郭启明,王雪松,陈志贵.基于驾驶模拟实验的山区高速公路运行速度建模[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(07):1004-1010.
- [9] Wang X, Wang X. Speed change behavior on combined horizontal and vertical curves: driving simulator-based analysis[J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 119: 215-224.
- [10] 王雪松,王晓梦,杨筱茵.平纵组合线形几何特征对车速变化的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(05):620-625+666.
- [11] 王雪松,刘姣,吴杏薇.山区高速公路相邻组合路段设计安全评估[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(11):1681-1686.
- [12] Wang X, Wang X, Cai B, et al. Combined alignment effects on deceleration and acceleration: a driving simulator study[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2019, 104: 172-183.
- [13] Harwood D W, Mason Jr J M. Horizontal curve design for passenger cars and trucks[J]. Transportation Research Record, 1994, 1445: 22-33.
- [14] Wang X, Wang T, Tarko A, et al. The influence of combined alignments on lateral acceleration on mountainous freeways: A driving simulator study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 76: 110-117.
- [15] Chen Y, Quddus M, Wang X. Impact of combined alignments on lane departure: A simulator study for mountainous freeways[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2018, 86: 346-359.

- [16] 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(04):98-104.
- [17] 周孝波. 基于视觉边缘率的高速公路弯道转向诱导设计方法及应用[D].湖北:武汉理工大学,2010.
- [18] Lord D, Brewer M A, Fitzpatrick K, et al. Analysis of roadway departure crashes on two lane rural roads in Texas[R]. Texas Transportation Institute, 2011.
- [19] Liu C, Subramanian R. Factors related to fatal single-vehicle run-off-road crashes[R]. 2009.
- [20] Eustace D, Almutairi O, Hovey P W, et al. Using decision tree modeling to analyze factors contributing to injury and fatality of run-off-road crashes in Ohio[R]. 2014.
- [21] Cafiso S, Di Graziano A, La Cava G. Actual driving data analysis for design consistency evaluation[J]. Transportation Research Record, 2005, 1912(1): 19-30.
- [22] Cafiso S, La Cava G. Driving performance, alignment consistency, and road safety: real-world experiment[J]. Transportation research record, 2009, 2102(1): 1-8.
- [23] 方守恩, 陈雨人. 道路规划与几何设计[M]. 人民交通出版社, 2021.
- [24] Transportation Officials. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 2011[M]. AASHTO, 2011.
- [25] Harwood D W, Mason Jr J M. Horizontal curve design for passenger cars and trucks[J]. Transportation Research Record, 1994, 1445: 22-33.
- [26] 潘晓东. 人体信息技术在道路几何构造安全性评价中的应用[D]. 上海:同济大学,2002.
- [27] Jung C R, Kelber C R. A lane departure warning system using lateral offset with uncalibrated camera[C]// IEEE Intelligent Transportation Systems, 2005. IEEE, 2005: 102-107.
- [28] Kim S Y, Oh S Y. A driver adaptive lane departure warning system based on image processing and a fuzzy evolutionary technique[C]//IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings. IEEE, 2003: 361-365.
- [29] Tarko A P. Analyzing road near departures as failure-caused events[J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 142: 105536.