DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250897

基于驾驶模拟的高速公路改扩建受限路段安全性评价

孟庆楠
[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 既有高速公路在改扩建设计中常因用地空间、结构物等的限制,造成局部路段的横断面宽度、纵断面线形指标等难以100%达到规范要求的情况。如何有效应对受限路段、确保交通运行安全是影响设计方案可行性的重中之重。为了研判设计方案的合理性,采用8自由度高仿真驾驶模拟器进行了实验,根据车辆运行特征和驾驶行为特征两大类实验数据,在车速一致性、行车轨迹一致性和加速测试等指标上对G15公路嘉金段(G1503公路—S32公路)改扩建工程中的4处典型受限路段进行了安全性评价。根据评价结论,对总体及交通设计方案上进行了优化,在实现“安全与效率兼顾、设计与实际匹配”目标的同时,也为其它改扩建工程提供了参考和借鉴。

关键词: 高速公路;驾驶模拟;受限路段;安全评价
中图分类号: U491 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)01-0125-06

Evaluation on Safety of Restricted Sections in Expressway Reconstruction and Expansion Based on Driving Simulation

MENG Qingnan
[Tongji University Architectural Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In the design of expansion and reconstruction of existing expressways, due to the limitations of land space and structures, it is often difficult for the cross-sectional width and longitudinal section linear indicators of some road sections to fully meet the requirements of the specifications. How to effectively deal with the restricted sections and ensure the safety of traffic operation is a top priority affecting the feasibility of the design scheme. To assess the rationality of the design scheme, an 8-degree-of-freedom high-fidelity driving simulator is used to conduct the experiments. Based on two major types of experimental data such as vehicle operation characteristics and driving behavior characteristics, 4 typical restricted sections in the G15 Highway Jiajin Section (from G1503 Highway to S32 Highway) Reconstruction and Expansion Project are evaluated in the safety in terms of indicators such as vehicle speed consistency, driving trajectory consistency and acceleration tests. According to the evaluation conclusion, the overall and traffic design schemes are optimized. At the same time of achieving the goal of “balancing safety and efficiency, matching design with reality”, a reference is provided for other similar projects.

Keywords: expressway; driving simulation; restricted road sections; safety evaluation

0 引 言

随着我国经济社会的持续快速发展,早期建设的高速公路已难以满足日益增长的交通需求。高速公路改扩建作为解决交通拥堵、提升服务水平的重要手段,面临着诸多技术和管理挑战。由于早期高速公路的建设标准相对较低,受用地空间、结构物限制等因素的制约,改扩建过程中常常出现宽度及线形指标等难以100%达到规范要求的情况,集中表现在硬路肩及车道宽度不足,纵断面线形指标略差等问题上。对这些受限点若全部拆除重建,在花费高昂工程费用的同时,还将带来保通压力过大等一些列问题。因此,如何在改扩建设计中有效应对受限点、确保交通运行安全是影响项目方案可行性的重中之重。

道路行车安全性评价作为守护交通安全的重要保障,对受限点的安全性评价是改扩建工程设计方案中应该特别关注的内容。传统的安全评价方法多采用规范复核检查和专家经验结合的方法,以道路

收稿日期:2025-09-10
作者简介:孟庆楠(1984—),男,硕士,高级工程师,从事道路交通工程设计工作。

事故数据和交通运营数据为基础进行评价。运行车速依据车速模型获取,虽然现有运行车速模型虽然已经被广泛用于行车安全评价,但对新改建道路的安全评价难免存在一些模糊、不完整的地方。

近年来,国内驾驶模拟技术蓬勃发展。张玉、黄炎等提出基于驾驶模拟安全评价方法[1-2]。郭志杰等借助驾驶模拟技术对高等级立体复合通道进行了安全评价[3]。邱志雄、王安民、石京等结合驾驶模拟仿真实验数据,对高等级公路的线形安全、驾驶行为等进行了研究[4-10]。祁文洋、何云勇等通过驾驶模拟实验,提出了交安设施的改善方案[11-12]。夏墩辰等通过驾驶模拟对护栏色彩与行车安全进行了研究[13]。袁方等基于设计软件AIROAD研发了驾驶模拟系统VRROAD[14]。

总体来看,国内对驾驶模拟的应用从安全评价、驾驶行为分析、设计优化、改善交安设施、系统开发等方面均进行了一定探讨。但也存在着设备简易,适用性及针对性不强等问题,此外,对于改扩建道路受限路段的研究较少。

为了能如实反映出改建后道路受限路段可能存在的安全运行问题,在设计阶段尽早发现并提出改善措施,项目团队最终选用同济大学教育部重点实验室实车驾驶的8自由度高仿真驾驶模拟器进行实验,以期获得更接近实际情况的实验数据,为行车安全评价及设计优化提供依据。

1　背景情况

G15公路是上海市域西部重要的南北向交通大动脉[15],全长65 km,于2004—2007年间分三期建成通车,本次G15嘉金段改扩建范围长42.7 km,车道规模双向6扩8,局部路基段抬升为高架。

由于沿线城镇化发展迅速,高速公路东西两侧沟通需求大,既有横向车行跨线桥数量就多达20座。此外,还有高铁跨线桥8座、地铁跨线桥1座,10座互通立交的20余上跨匝道。结合改扩建工程的总体方案,经过详细梳理,其中因横向跨线桥立柱及立交匝道紧贴等因素限制主线无法按标准断面尺寸拓宽的受限点共计39处。其中,因立柱位于拓宽车道内不得不拆除还建的车行跨线桥有4座,共解决8处,其余31处无法设置标准3 m硬路肩,个别点位甚至需压缩2号车道宽度来布置单向4车道通行的规模。若全部按标准宽度改建,需拆除还建10余座桥梁,代价极大。

实验共选取4处典型的受限路段作为驾驶模拟实验场景。受限点位的特征见表1,受限点在改扩建工程中的位置见图1。

表1　实验选取的受限路段情况表

路段	桩号范围	受限路段特征
S6立交	K1270+060~K1270+109	0.5 m+2×3.5 m+2×3.75 m+1.5 m=16.75 m;既有匝道立柱的限制且匝道无法拆除重建,宽度受限
G60立交	K1300+550~K1300+954	0.5 m+2×3.5 m+2×3.75 m+1.5 m=16.5 m;既有匝道边线全部紧贴无法拆除重建,宽度受限
吴淞江大桥	K1276+900~K1277+040	0.75 m+3.5 m+3×3.75 m+0.75 m=16.25 m;系杆拱桥无法直接拓宽,桥梁状况为二类桥,宽度受限
金昌立交WS匝道合流区	K1272+980~K1273+336	既有跨京沪铁路桥梁起桥段无法拆除重建,新增立交区内主线纵坡为3.2%,纵坡受限。

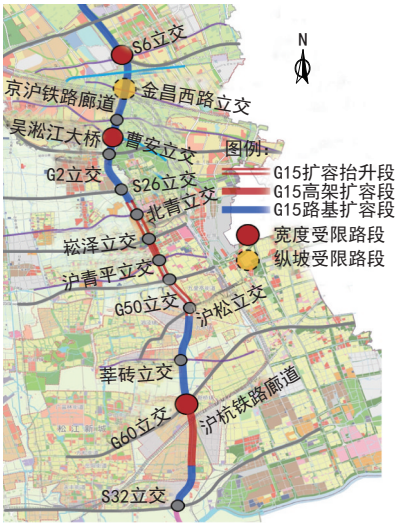

图1　受限点位地理位置示意图

2　驾驶模拟实验设计

同济大学实车驾驶8自由度高仿真驾驶模拟器见图2。

图2　驾驶模拟实验仪器

2.1　实验准备

根据道路设计成果,构建道路三维仿真模型,交

通场景内交通流产生方式为随机分布的自有流。模拟驾驶人员共 30 人,年龄 23~55 岁,驾龄在 1~20 年之间,驾驶实验共计 600 轮次。

2.2　实验流程

(1)实验准备

实验参与者在等待室中接受关于驾驶模拟器实验的说明以及实验前的准备工作,了解将要进行的实验内容和操作以及所采集的数据用途,填写个人信息、驾驶经历等内容的基础信息调查表及安全评价问卷。

(2)试驾阶段

在正式实验前,实验参与者将在模拟器内驾驶指定的场景(高速公路主线)3~5 min,使其能够尽快地适应、熟悉驾驶模拟器的环境。

(3)正式实验

驾驶人依次完成:S6 立交节点、G60 立交节点、吴淞江大桥、金昌西路立交 WS 匝道合流区四个场景的相关测试。其中,S6 立交节点重点评估左侧路缘带、右侧硬路肩宽度变化对行车影响;G60 立交节点除左侧路缘带、右侧硬路肩宽度变化外,还包括 2 号车道宽度变窄对行车的影响;吴淞江大桥节点重点评估无右侧硬路肩行车的影响;金昌西路立交 WS 匝道合流区重点评估主线纵坡对车辆汇流的影响。

2.3　数据采集

主要包括车辆运行特征和驾驶行为特征两大类数据。车辆运行特征,即由驾驶人操作车辆在道路环境中行驶而表现出来的运行特点。描述车辆运行特征的指标主要包括:车辆车速、车辆制动加速度、车辆启动加速度、车头间距、车辆运行轨迹等等。驾驶行为特征,即在车辆行驶过程中,驾驶人根据道路状况、外部环境变化等实际情况,不断地执行各种操作策略的过程中所表现的特征。其主要组成包括:踩踏油门踏板的大小、时刻、位置,踩刹车的轻重、时刻、位置,打方向盘的角度,使用的档位等。

实验中通过驾驶模拟器采集的数据字段见表 2。

表 2　驾驶模拟器采集数据字段定义及用途

数据属性	字段含义及单位	数据用途
车辆位置	主车实时 X 坐标 主车实时 Y 坐标 主车实时 Z 坐标 主车行驶里程/m	判断车辆实时位置,与桩号对应
车辆运行状态	主车车道偏移/m(距车道中线,左偏为正,右偏为负) 主车加速度/($m\cdot s^{-2}$) 主车速度/($km\cdot h^{-1}$)	安全评价所需数据
驾驶员操作负荷	主车加速踏板力度(0~1) 主车刹车踏板力度(力)/N 主车方向盘转角(方向盘居中时为 0)/rad	反应驾驶员加减速及转向操作负荷
道路线形	主车行驶所在车道编号(1、2、3) 主车行驶线型曲率(半径的倒数,右转为负,左转为正) 主车行驶线型半径 主车行驶道路坡度/%	反应当前断面线形
换道相关	主车转向灯数据(0 无转向灯、1 左转向灯亮、2 右转向灯亮)	换道标志

3　驾驶模拟安全性评价

基于模拟器采集的驾驶过程中的车速、加速度、侧向偏移等客观数据,根据评价方法中描述的客观评价指标体系的各项指标计算方法,得出体系中各参数的数值。计算的数值用于对模拟实验路段进行客观一致性、安全性的评价,并通过分析鉴别得到行车中潜在的安全隐患区段。

3.1　车速一致性

评价指标见表 3,主要包含车速变异系数 C_v、断面车速差 ΔV_{85}、车速降低系数 SRC、超限速差 U(km/h)。

表 3　车速一致性评价指标对道路安全的反映

评价指标	对道路安全的反映
车速变异系数 C_v	车速变异系数越大,说明该断面不同驾驶人驾驶车辆的速度差异越大,越容易发生事故
断面车速差 ΔV_{85}/($km\cdot h^{-1}$)	相邻断面的车速差绝对值越大,道路线形的连续性就越差
车速降低系数 SRC	车速降低系数的绝对值越大,道路线形的连续性就越弱
超限速差 U/($km\cdot h^{-1}$)	超限速差越大,说明该断面安全性越差或设计合理性有待商榷

车速一致性评价标准见表 4。

表 4　车速一致性评价标准

评价等级	良好	一般	差
车速变异系数 C_v	$C_v\leq 0.169$	$0.169<C_v\leq 0.179$	$C_v>0.179$
断面车速差 ΔV_{85}/($km\cdot h^{-1}$)	$\Delta V_{85}\leq 10$	$10<\Delta V_{85}\leq 15$	$\Delta V_{85}>15$
车速降低系数 SRC	$0.90<SRC\leq 1.095$	$0.87\leq SRC<0.90$ $1.095<SRC\leq 1.12$	$SRC<0.87$ $SRC>1.12$
超限速差 U/($km\cdot h^{-1}$)	$U\leq 10$	$10<U\leq 20$	$U>20$

采用车速一致性评价标准对 S6 立交、G60 立交、吴淞江大桥三个节点场景分别进行评价,评估断面变化对车速一致性指标的影响。其中 S6 立交节点和 G60 立交节点主要评价路缘带和硬路肩收窄对行车的影响,吴淞江大桥节点主要评价无右侧硬路肩

对行车的影响,评价结果见表5~表8。

表5　左侧路缘带变窄对最左侧车道行车的影响

节点位置	路段	C_v	ΔV_{85}	SRC	U
S6立交节点	K1269+860~K1269+960	0.087 良好	14.091 一般	1.131 差	14.979 良好
	K1269+960~K1270+060	0.061 良好	−3.332 良好	0.973 良好	20.358 差
	K1270+060~K1270+109	0.078 良好	−7.248 良好	0.939 良好	15.068 一般
	K1270+109~K1270+209	0.046 良好	5.500 良好	1.049 良好	14.194 一般
	K1270+209~K1270+309	0.040 良好	−6.505 良好	0.944 良好	13.692 一般
G60立交节点	K1300+350~K1300+450	0.046 良好	6.804 良好	1.059 良好	19.084 一般
	K1300+450~K1300+550	0.088 良好	−14.323 一般	0.883 一般	15.325 一般
	K1300+550~K1300+954	0.058 良好	9.268 良好	1.086 良好	12.797 一般
	K1300+954~K1301+054	0.007 良好	−1.128 良好	0.990 良好	16.867 一般
	K1301+054~K1301+154	0.034 良好	−2.651 良好	0.977 良好	14.978 一般

表6　硬路肩由3 m变为1.5 m对最右侧车道行车的影响

节点位置	路段	C_v	ΔV_{85}	SRC	U
S6立交节点	K1269+860~K1269+960	0.032 良好	5.090 良好	1.046 良好	12.395 一般
	K1269+960~K1270+060	0.039 良好	−13.510 一般	0.882 一般	8.185 良好
	K1270+060~K1270+109	0.021 良好	5.750 良好	1.057 良好	4.305 良好
	K1270+109~K1270+209	0.053 良好	7.370 良好	1.069 良好	10.865 一般
	K1270+209~K1270+309	0.012 良好	1.920 良好	1.017 良好	15.510 一般
G60立交节点	K1300+350~K1300+450	0.074 良好	7.917 良好	1.113 一般	−5.968 良好
	K1300+450~K1300+550	0.098 良好	−8.962 一般	0.885 一般	−6.490 良好
	K1300+550~K1300+954	0.027 良好	−2.329 良好	0.966 良好	−12.136 一般
	K1300+954~K1301+054	0.026 良好	2.801 良好	1.042 良好	−11.90 一般
	K1301+054~K1301+154	0.012 良好	0.835 良好	1.012 良好	−10.082 一般

3.2　行车轨迹一致性

行车轨迹一致性评价标准见表9。

根据实验数据,对部分断面受限路段进行轨迹一致性评价计算,评价结果见表10。

3.3　加速测试

金昌西路立交WS合流区节点位于新建金昌西路立交,受既有上跨京沪铁路桥的影响,立交主线范围内最大设计纵坡为3.2%。为了给驶出主线的车辆提供平稳减速的运行条件,同时为流入主线的车辆平稳加速和安全合流,当主线设计速度为100 km/h时,减速车道下坡路段和加速车道上坡路段不应大于3%[16]。经核查,本节点WS匝道加速车道位于原

表7　2号车道由3.75 m变为3.5 m对大客车的影响

节点位置	路段	C_v	ΔV_{85}	SRC	U
G60立交节点	K1300+350~K1300+450	0.025 良好	−3.742 良好	0.965 良好	5.355 良好
	K1300+450~K1300+550	0.048 良好	5.341 良好	1.052 良好	6.155 良好
	K1300+550~K1300+954	0.035 良好	4.130 良好	1.038 良好	10.890 一般
	K1300+954~K1301+054	0.034 良好	−4.754 良好	0.958 良好	10.578 良好
	K1301+054~K1301+154	0.020 良好	−1.632 良好	0.985 良好	7.385 良好

表8　无硬路肩对吴淞江大桥最右侧车道行车的影响

节点位置	路段	C_v	ΔV_{85}	SRC	U
吴淞江大桥	K1276+700~K1276+800	0.065 良好	−4.753 良好	0.938 良好	−5.43 良好
	K1276+800~K1276+900	0.167 良好	−10.10 一般	0.860 一般	−12.856 一般
	K1276+900~K1277+040	0.041 良好	4.496 良好	1.072 良好	−15.658 一般
	K1277+040~K1277+140	0.148 良好	10.079 一般	1.115 一般	−8.371 良好
	K1277+140~K1277+240	0.006 良好	0.890 良好	1.012 一般	−2.887 良好

表9　行车轨迹安全评价标准

评价等级	良好	一般	差
有效偏移量I	$I>7.32$	$0<I\leqslant7.32$	$I\leqslant0$
车道占用率O_r	$O_r<0.91$	$0.91\leqslant O_r<1$	$O_r\geqslant1$

表10　行车轨迹评价结果

节点路段	位置车型	有效偏移量I	评价等级	车道占用率O_r	评价等级
S6立交K1269+860~K1270+209	1号车道小客车	56.6	良好	0.644	良好
	4号车道小客车	57	良好	0.662	良好
	4号车道大货车	58.4	良好	0.734	良好
G60立交K1300+350~K1301+054	1号车道小客车	55.8	良好	0.656	良好
	2号车道大客车	55.6	良好	0.64	良好
	4号车道小客车	59.6	良好	0.648	良好
	4号车道大货车	53.6	良好	0.604	良好
吴淞江大桥K1276+700~1277+240	4号车道小客车	52.6	良好	0.674	良好
	4号车道大货车	55.2	良好	0.638	良好

主线设计纵坡 3.2%(路段平均纵坡 2.5%)的范围内,由于 G15 上跨京沪铁路桥状况良好,无论是经济性还是对铁路和高速公路运营影响上来看,都需要保留利用该桥。

规范考虑主线纵坡过大易导致合流车辆无法平稳加速,而低速车辆合流易对主线车辆产生干扰,为评估本节点设计方案的是否安全可行,基于驾驶模拟场景,分析该纵断面设计条件下,小客车、货车的加速特性,并提出改善方案。

对于金昌西路立交 WS 汇流匝道节点,驾驶模拟结果见图 3,大、小型车辆经 50 m 的加速距离,速度可达到 55~60 km/h,满足汇入主线的最低速度要求,加速 100~150 m 后速度可达到 75~80 km/h,加速 200~250 m 后速度可达到 85~100 km/h,大、小型车辆经过 200 m 的加速后,均能加速至主线车速,根据驾驶模拟结果,推荐该匝道汇入主线加速车道的长度不小于 250 m。

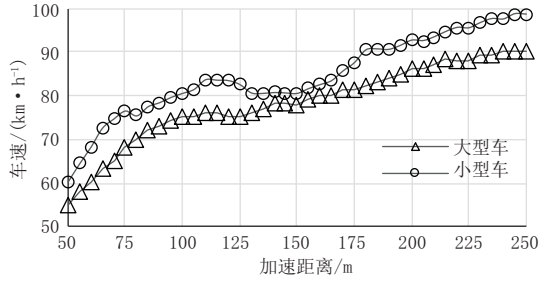

图 3　金昌西路立交 WS 合流区爬坡加速模拟实验

3.4　驾驶模拟实验总结

3.4.1　S6 和 G60 立交节点

两个节点的评估结果较为接近,C_v 和 ΔV_{85} 评价总体良好。1 号车道小客车行驶在路缘带变窄路段时,车速未受到显著影响,车辆横向偏移有所增加,但未引起压线、变道的情况。对于 4 号车道的小客车、大货车,在驶入硬路肩变窄路段时,由于起始速度较高,车速有下降趋势,横向偏移无显著变化,车辆运行情况较平稳。

车速降低系数 SRC 表征了车辆通过断面前后速度变化情况,受宽度变化影响,在宽度受限路段,小客车、大货车均出现了不同程度的降速、车辆偏移增加的情况,但影响幅度有限。小客车的超限速差 U 的指标值总体偏高,主要是由于车辆运行速度较高导致,与断面变化关系较小。

总体来看,路缘带宽度降低至 0.5 m,硬路肩宽度由 3.0 m 渐变至 1.5 m,会导致车辆运行速度和横向偏移控制产生波动,但并未对运行速度特征、横向轨迹特征产生显著的不良影响。对于 2 号车道大客车,未发现车道宽度的微小变化对评价指标产生明显影响。

3.4.2　吴淞江大桥节点

对于吴淞江大桥节点,分析结果显示,4 号车道小客车、大货车在驶入无硬路肩路段前,行驶速度下降,车道偏移增加,车速差指标评价等级由良好降为一般,车速下降幅度相对较大,但总体仍保持在一般水平。本路段无硬路肩,仅设置 0.75 m 右侧路缘带,导致右侧车辆的纵横向控制容易出现波动,相关指标评价等级一般。

3.4.3　金昌西路立交 WS 合流区

通过分析该纵断面设计条件下,小客车、大货车的爬坡加速过程,未发现该节点纵坡未对车辆加速性能产生显著的不利影响,考虑纵坡系数及驾驶模拟分析结果,推荐加速车道设计长度不小于 250 m。

4　受限路段设计优化措施

对于 S6 立交、G60 立交和等宽度受既有桥梁结构限制的路段:

(1)标线渐变设计:路缘带、行车道及硬路肩宽度变化的渐变长度按 1/100 的渐变率且不小于 100 m 控制;

(2)标志设计:通过标志(硬路肩宽度变窄,反光设施等)标线(导流线)措施提前引导,在传统的逆反光标志的基础上增设主动发光导流灯柱;

(3)障碍物警示设计:在桥墩立面绘制警示标记,采用黄黑相间的倾斜线条,并在桥墩前 100 m 设置警示灯;左侧路缘带处紧邻车道分界线设置如图 4 所示的反光凸起路标;

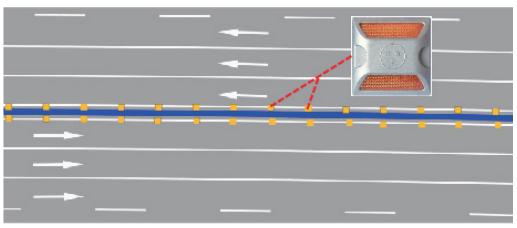

图 4　路缘带宽度受限路段凸起路标设置示意

(4)为保护受限点处既有桥墩的安全,将常规的波形护栏提升为 SA 级加强型高护拦(见图 5),减少护栏外倾对桥梁立柱的影响。

对于吴淞江大桥段,根据多年运营情况,虽然该路段非事故黑点路段,但结合驾驶模拟实验结果,总体设计方案中仍然考虑在系杆拱主桥范围外的引桥段通过拼宽增设硬路肩,尽可能减少无硬路肩路段的长度。

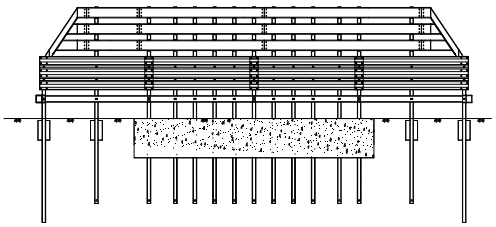

图5　SA级加强型高护栏示意图

对于金昌西路立交WS匝道合流区，转向匝道圆曲线加密设置线形诱导标，鼻端设置合流警示标志提醒主线车辆，合流区域自匝道鼻端起，设置长约150 m的长实线，确保匝道转入车辆在加速到位后再并入主线。

4　结　语

驾驶模拟实验作为一种切实可行的技术手段，为高速公路改扩建受限点的安全评估及设计优化提供了有效支撑。

总体而言，局部路缘带、硬路肩宽度收窄会对驾驶员产生影响，主要表现为车辆的行驶速度降低、车辆偏移增加，但未对运行速度特征、横向轨迹特征产生显著的不良影响；车辆驶入无硬路肩的桥梁受限路段时，车辆速度、横向控制波动比收窄硬路肩的路段更大，但相关评价等级仍保持在良好或一般水平，局部无硬路肩路段对行车安全的影响有限，可以满足行车安全要求，但仍建议在有条件的路段恢复硬路肩以提升安全保障度。对于立交区主线纵坡超限的路段，可通过加速测试来确定合理的加速车道长度，并通过交安设施的优化确保车辆汇入主线的行车安全。

参考文献：

[1] 张玉，王俊骅，刘阳．基于驾驶模拟器高速公路线形设计安全性评价[J]．上海公路，2015(1)：60-65.
[2] 黄炎，邓敏，王欣南．基于BIM和驾驶模拟的道路安全评价研究[J]．交通科技，2022(1)：28-33.
[3] 郭志杰，周颖，余文珺，等．基于模拟驾驶的立体复合通道安全评价研究[J]．公路，2024(7)：155-161.
[4] 邱志雄，余文琚，余东，等．考虑驾驶行为的高速公路改扩建短直线长度研究[J]．中国交通信息化，2024(增刊)：486-489；500.
[5] 王安民，何佳银，张涛，等．基于驾驶模拟试验的特长公路隧道驾驶疲劳规律研究[J]．现代隧道技术，2022(增刊1)：610-617.
[6] 石京，柳美玉．基于驾驶模拟实验的驾驶风格对高速公路换道行为的影响[J]．东南大学学报(自然科学版)，2017(9)：1037-1041.
[7] 邢小亮，崔降龙，李璨，等．高速公路右侧硬路肩宽度对驾驶行为协调性影响研究[J]．交通信息与安全，2016(6)：30-36.
[8] 田毕江，胡澄宇，杨文臣，等．基于驾驶模拟技术的山区高速公路桥隧群区限速值分析[J]．公路，2022(1)：240-247.
[9] 孙智，张彦宁，孟凌霄，等．高速公路改扩建期间强制变道行为驾驶模拟的有效性研究[J]．重庆交通大学学报(自然科学版)，2021(9)：55-59；67.
[10] 陈玲，于泉，宋树坚．基于驾驶模拟实验的高速公路加速车道渐变段长度研究[J]．交通世界，2024(34)：7-9.
[11] 祁文洋，王作杰．线形受限地下快速路交通运行特性研究[J]．城市道桥与防洪，2025(2)：37-40.
[12] 何云勇，冉小松，张书豪，等．基于驾驶模拟试验的公铁交叉路段安全分析[J]．公路交通技术，2023，39(4)：168-174.
[13] 夏墉辰，宋太龙，郑雯婷，等．基于驾驶模拟的高速公路护栏色彩设计与安全影响研究[J]．市政技术，2024(7)：116-123.
[14] 袁方，唐敏，袁梧蓓．面向道路设计与安全评价的驾驶模拟系统研究[J]．中国交通信息化，2024(增刊)：509-511.
[15] 宋妙．G15公路嘉金段改建总体方案设计[J]．城市道桥与防洪，2024(5)：62-65.
[16] JTG/T D21—2014，公路立体交叉设计细则[S].