

DOI:10.11918/202409063

全自动驾驶环境下高速公路纵断面线形参数设计

程国柱¹,张禧龙¹,徐亮²

(1. 东北林业大学 土木与交通学院,哈尔滨 150040;2. 长春工程学院 土木工程学院,长春 130012)

摘要: 为了保证自动驾驶车辆在高速公路上的安全舒适行驶,开展了适应自动驾驶车辆的高速公路纵断面线形设计参数研究。改进了适应自动驾驶车辆的高速公路竖曲线半径和长度理论值计算方法,并基于 PreScan 和 MATLAB/Simulink 软件,通过 LiDAR 传感器从行车视距的角度提出了自动驾驶车辆-道路一体化的仿真测试方法,依据安全行驶速度分析了设计速度为 80~140 km/h 的高速公路对自动驾驶车辆的适应性,确定了适应自动驾驶车辆的高速公路竖曲线最小长度和半径。研究结果表明:140 km/h 的高速公路不足以满足现阶段自动驾驶车辆的安全性需求,可将其设计速度降至 130 km/h,待技术成熟再进行提速。由于自动驾驶车辆更低的系统反应时间和更高的传感器高度,高速公路设计速度为 80、100、120、130 km/h 时,其对应凸形竖曲线半径可分别降低至 1 800、2 800、5 600、10 600 m,凹形竖曲线半径可分别降低至 2 000、3 000、4 000、5 500 m。研究结果可为未来全自动驾驶高速公路设计提供理论支持。

关键词: 自动驾驶;高速公路;竖曲线半径;行车视距;仿真模拟;参数设计

中图分类号: U412.366 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)11-0105-10

Design of longitudinal profile parameters for motorways in a fully autonomous driving environment

CHENG Guozhu¹, ZHANG Xilong¹, XU Liang²

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. College of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to ensure the safety and comfort of self-driving vehicles on expressways, research has been conducted on the design parameters for the longitudinal profile of highway sections suitable for autonomous vehicles, improves the calculation method of vertical curve radius and length of expressways suitable for self-driving vehicles, and puts forward a simulation test method of self-driving vehicle-road integration from the point of view of driving sight distance through LiDAR sensor based on PreScan and MATLAB/Simulink software. According to the safe driving speed, the adaptability of the highway with the design speed of 80–140 km/h to the self-driving vehicle is analyzed, and the minimum length and radius of the highway vertical curve suitable for the self-driving vehicle are determined. The results show that the highway of 140 km/h is not enough to meet the safety requirements of self-driving vehicles at the present stage, and its design speed can be reduced to 130 km/h, and the speed can be increased when the technology is mature. Due to the lower system response time and higher sensor height of self-driving vehicles, the corresponding convex vertical curve radius can be reduced to 1 800 m, 2800 m, 5 600 m and 10 600 m when the design speed of expressway is 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h and 130 km/h respectively. The radius of concave vertical curve can be reduced to 2 000 m, 3 000 m, 4 000 m and 5 500 m. The research results of this paper can provide theoretical support for the design of fully automatic driving expressway in the future.

Keywords: self-driving; freeway; vertical curve radius; driving sight distance; analogue simulation; parameter design

高速公路设施作为车辆行驶的载体,通过设置智能化设备和升级管理控制系统来实现驾驶自动化。而在完全自动驾驶环境下,车辆的行驶完全由车载计算机控制运行^[1]。研究表明,现有的道路设

计标准并不能完全适用于自动驾驶环境,需要对完全自动驾驶公路几何设计标准进行重新探讨研究,使其匹配于未来的完全自动驾驶车辆^[2]。

随着自动驾驶技术的进步和汽车性能的提高,

收稿日期: 2024-09-24; 录用日期: 2024-11-14; 网络首发日期: 2025-07-10

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250710.1114.010>

基金项目: 国家自然科学基金(52378433); 中央高校基本科研业务费专项资金(2572023CT21)

作者简介: 程国柱(1977—),男,教授,博士生导师

通信作者: 程国柱, guozhucheng@nefu.edu.cn

近年来有越来越多的学者提出更大的高速公路限制速度^[3-5],但欧洲各国高速公路因经济效益过低而将设计速度从 160 km/h 降速至 140 km/h 以下^[6],同时,中国 2022 年开始执行的《道路交通安全违法行为记分管理办法》中取消了小客车在高速公路上超速 20% 以内的处罚^[7],即允许小客车行驶时速控制在 144 km/h 以内,故本文在研究高速公路设计速度时,对设计速度为 140 km/h 的高速公路也进行研究。

公路停车视距是汽车行驶安全的重要保障条件之一,也是公路几何设计的重要内容,邵春福等^[8]通过停车视距对比分析了各国道路设计参数的差异,并针对中国不同公路线形设计标准提出了修改理念和建议。张航等^[9]基于可靠度理论计算得到停车视距值进行了高速公路设计,提高了道路安全性。同时,高速公路路线纵断面设计尤为重要,纵断面设计水平的高低与整体路线的质量有着密切的联系,赵酉超^[10]基于自动驾驶汽车道路环境识别器最小距离来计算公路竖曲线的最小半径。陈正委等^[11]对轻型高速公路纵断面设计指标开展研究,确定了轻型高速公路的最大坡度和对应坡长,庄传仪等^[12]提出了一种汽车功率质量比模型,用于确定不同地区、不同等级公路的最大坡度和坡长。分析公路路线纵断面设计的方法,掌握公路路线纵断面设计的工作要点,对推动高速公路项目的开展有着重要的作用。但同时,现有纵断面研究大多从车辆的功率角度通过仿真或实测数据来对纵断面坡度和坡长展开研究,而对竖曲线半径的研究仅停留在理论计算阶段,缺乏通过仿真或实测进行研究的方法。

PreScan 能够设置传感器模型和行驶工况信息,构建虚拟道路环境场景。同时,通过 PreScan 的外接口利用 MATLAB/Simulink 可以构建自动驾驶车辆的功能决策模块,搭建虚拟测试平台,广泛应用于自动驾驶的研究。Chen 等^[13]利用 PreScan 搭建联合仿真平台对无人驾驶的高速公路合流区安全性进行评价。Kim 等^[14]利用 PreScan 进行 AEB 仿真并对照实车数据对车辆进行事故分析;Cao 等^[15]针对自动驾驶安全测试中人工场景测试效率低等问题,基于 PreScan 搭建了自动驾驶仿真场景自动生成系统。但鲜有从行车视距的角度对适应自动驾驶车辆的道路线形条件进行分析的研究。

本文基于 PreScan 仿真软件,通过自动驾驶车辆行车视距分析来探讨高速公路纵断面线形设计方法,构建竖曲线场景和平纵线形组合场景,进行仿真试验,并引入安全行驶速度的概念来对不同场景下的行车视距进行分析。此外,本文还从空间三维线形的角度,分析了参数取值对空间线形的曲率和挠

率的影响,验证了纵断面几何设计参数取值的合理性。本文的研究成果将为未来全自动驾驶环境下高速公路的工程设计提供借鉴依据,使自动驾驶汽车能够在安全,高速,舒适的环境下顺畅通行。

1 高速公路纵断面设计参数理论值

1.1 自动驾驶车辆停车视距

高速公路停车视距 S_T 由反应距离、制动距离和安全距离三部分组成,调整反应时间 t 以匹配自动驾驶车辆,计算公式为

$$S_T = \frac{vt}{3.6} + \frac{v^2}{254(\varphi + i)} + S_0 \quad (1)$$

式中: v 为运行车速,km/h,取设计速度的 85%; t 为系统反应时间,一般取 0.5 s^[16]; φ 为路面摩阻系数; i 为路线纵坡,上坡为正,下坡为负; S_0 为安全距离,取 3~5 m。

摩阻系数采用潮湿状态下的值,如表 1 所示。经计算得到自动驾驶车辆在不同设计速度下的需求停车视距如表 2 所示。

表 1 不同设计速度下的路面摩阻系数

Tab. 1 Friction coefficient of pavement at different design speeds

设计速度/(km·h ⁻¹)	运行车速/(km·h ⁻¹)	摩阻系数
80	68	0.31
100	85	0.30
120	102	0.29
140	119	0.28

表 2 不同设计速度下的停车视距

Tab. 2 Parking sight distance at different design speeds

设计速度/ (km·h ⁻¹)	需求停车视距/m		
	$i_c = 0$	最大坡度	最小坡度
80	75.0	64.9	84.4
100	110.0	98.9	124.6
120	160.0	146.8	176.3
140	220.0	200.9	243.9

尽管高性能的 LiDAR 传感器理论探测距离大于各路段的需求停车视距,但在实际应用时,其探测距离会受到各种因素的影响,较理论有较大偏差,有必要通过仿真试验得到具体场景下的探测距离。

1.2 高速公路竖曲线长度和半径

决定现役高速公路竖曲线的最小长度和半径的限制因素分别为缓和冲击、行驶时间不过短、满足视距的要求,为研究适应自动驾驶车辆的高速公路,需要对其相关参数进行修正。

此外,如图 1 所示,在凹形竖曲线道路场景下,车辆为保证夜间行车安全,前灯照明应有足够的距离,而对于装有 LiDAR 的自动驾驶车辆,其感知性

能不受白天夜晚的影响,但仍需满足 LiDAR 传感器具有足够的探测距离要求,故对该因素控制的行车视距公式进行改进,具体计算公式为

$$h_s + S_T \tan \delta = \frac{S_T^2}{2R} = \frac{S_T^2 \omega}{2L} \quad (2)$$

$$L_{\min} = \frac{S_T^2 \omega}{2(h_s + S_T \tan \delta)} = \frac{S_T^2 \omega}{2.9 + 0.728 S_T} \quad (3)$$

式中: h_s 为传感器高度,取 1.45 m; δ 为传感器垂面视场角,取 20° ; ω 为变坡点坡度差, ($^\circ$)。

将修正后的参数代入进行计算得到凸形和凹形竖曲线的最小半径值,如表 3、4 所示。表 3 中缓和冲击和视距要求控制的最小竖曲线长度计算公式分别为

$$L_{\min,1} = \frac{V_d^2 \omega}{3.6} \text{ 和 } L_{\min,2} = \frac{S_T^2 \omega}{4.6}$$

桥下视距和传感器探测距离控制的最小竖曲线长度

$$\text{计算公式分别为 } L_{\min,3} = \frac{V_d^2 \omega}{3.6}, L_{\min,4} = \frac{S_T^2 \omega}{27.69} \text{ 和 } L_{\min,5} = \frac{S_T^2 \omega}{2.9 + 0.728 S_T} \circ$$

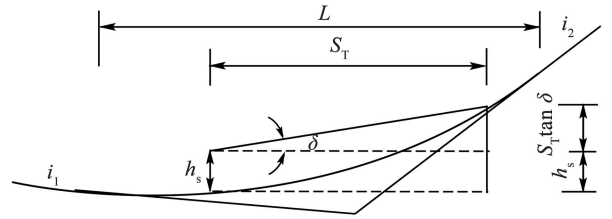


图 1 车辆传感器探测范围

Fig. 1 Detection range of vehicle sensor

表 3 不同因素控制下的凸形竖曲线的最小半径和长度

Tab. 3 Minimum radius and length of convex vertical curve under the control of different factors

设计速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	停车视距/m	缓和冲击/m	视距要求/m	半径极限值/m
80	75	$1\ 778\omega$	$1\ 223\omega$	1 800
100	110	$2\ 778\omega$	$2\ 630\omega$	2 800
120	160	$4\ 000\omega$	$5\ 565\omega$	5 600
140	220	$5\ 444\omega$	$10\ 521\omega$	10 600

表 4 不同因素控制下的凹形竖曲线的最小半径和长度

Tab. 4 Minimum radius and length of concave vertical curves under the control of different factors

设计速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	停车视距/m	缓和冲击/m	桥下视距/m	传感器探测距离/m	半径极限值/m
80	75	$1\ 778\omega$	203ω	98ω	1 800
100	110	$2\ 778\omega$	437ω	146ω	3 000
120	160	$4\ 000\omega$	925ω	214ω	4 000
140	220	$5\ 444\omega$	$1\ 748\omega$	297ω	5 500

由表 3、4 可以看出,对于凸形竖曲线,在设计速度为 120 km/h 和 140 km/h 时,其最小半径均以满足视距要求为有效控制,设计速度为 80 km/h 和 100 km/h 时,其均以缓和冲击为有效控制。而凹形竖曲线的最小半径均以缓和冲击为有效控制。以表 3 和表 4 所得竖曲线最小半径和长度作为仿真场景相关参数的取值依据。

2 自动驾驶虚拟测试仿真试验设计

利用 PreScan 构建道路环境场景,构建车辆驾驶模型并设置行驶路径,设置传感器参数并输出模型,同时,利用 MATLAB/Simulink 搭建算法,集成各功能模块,搭建虚拟测试仿真平台,并根据实测开源数据,实现对虚拟测试平台主要功能的验证。

2.1 测试软件

许多传统测试工具和测试方法仅适用于人工驾驶车辆,难以满足自动驾驶车辆的测试需求,而 PreScan 具有良好的图形交互界面和丰富的传感器模型、能提供逼真的道路环境场景及自动驾驶系统功能模块。PreScan 能够胜任高级驾驶辅助系统的开发和自动驾驶汽车的虚拟测试等工作。

PreScan 配备了与 MATLAB/Simulink 的连接端口,可以将 MATLAB/Simulink 中的控制和决策算法导入至 PreScan 的工程工作区模块,导出仿真结果并借助 MATLAB 算法计算所需数据。实现自动驾驶虚拟测试平台的联合仿真。虚拟测试仿真试验的设计流程如图 2 所示。

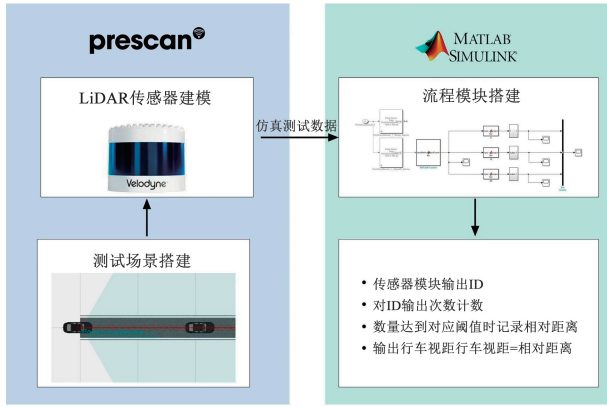


图 2 Simulink 模块搭建及测试步骤

Fig. 2 Simulink module building and testing steps

2.2 测试场景

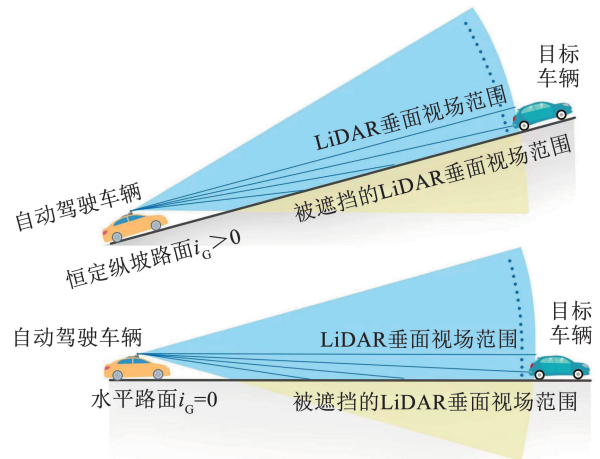
为简化试验流程,本文自动驾驶车辆行车视距测试采用相反设置,测试场景内容为在晴朗天气条件下,设置目标车与自动驾驶测试车同处道路起点,自动驾驶测试车保持静止,而目标车以设计速度匀速向前行驶。测试场景中的主要要素包括:

1) 车辆。自动驾驶测试车和目标车均选择 Audi A8 Sedan,以保证车辆结构和性能一致。该车质量为 1 820 kg、长为 5.2 m、宽为 2.0 m、高为 1.4 m,属于小客车车型。

2) LiDAR。许多研究^[17-18]发现,LiDAR 相较于 Radar 和摄像机更能决定障碍物最终检测结果,且感知结果更依赖于单个传感器,故本文选择单个高性能 LiDAR 的相关技术参数来反映自动驾驶车辆的行车视距,并选择 PreScan 中点云传感器模块 PCS 作为 LiDAR 的目标仿真。综合考虑市场既有 LiDAR 产品技术参数,同时考虑到 L4、L5 级自动驾驶汽车的广泛应用还有一段时间,届时车载 LiDAR 产品也会相应更新迭代,现有的高性能但价格昂贵的 LiDAR 产品在未来可能会有更广泛的应用。本文选取目前市场中性能较高的 Velodyne Alpha Prime 产品作为后续仿真场景的 PCS 参数设置,其具体参数为:探测距离为 245 m,水平面视场角分别为 120°和 360°,垂面视场角为 40°,水平角度分辨率为 0.1°,垂直角度分辨率为 0.11°,垂面激光光束 360 条,扫描频率 20 Hz,传感器高度分别为 0.6 m 和 1.45 m。基于 LiDAR 的目标检测算法有效性依赖于采集自目标物的激光点数量,Teichman 等^[19]选取错误率最高的案例进行测试,由其样本点数与正确率曲线可知返回点数在 20 以上时的正确率为 85%。而 Sukanuma 等^[20]对提出的算法进行测试,由其样本点数与正确率曲线可知返回点数在 20 以上时,其正确率为 90%。Abdo 等^[21]则调查了两种激光雷达产品的有效识别距离。结果发现,随着激

光点数识别阈值 N_T 的提高,激光产品的有效识别距离均会逐渐降低。考虑到识别准确度和识别距离的减损,且后续的线形参数样本较多,本文主要选取感知准确度较高的 10、20 作为考察的 N_T 值。

3) 道路线形。为简化试验,采用单车道道路,令目标车沿道路中心线行驶。选择高速公路标准行车道宽度为 3.75 m,路拱横坡度为 2%。a) 直线,本文采用直线长度应大于等于探测距离 245 m,以得到完整的不同 N_T 条件下的探测距离数据,故直线路段长度设置为 250 m。b) 竖曲线,当自动驾驶车辆与目标车处于同一直坡路段内时,如图 3 所示。自动驾驶车辆的行车视距不受直坡段 i_c 的影响,与在直线路段的行车视距相同。因此,可设置变坡点前直坡段 i_c 为 0,变坡点后直坡段 i_c 为该路段的最大纵坡坡度。

图 3 不同 i_c 下自动驾驶汽车的传感器感应视场Fig. 3 Sensor induced field of view of self-driving vehicles under different i_c

1.2 节中自动驾驶车辆停车视距要小于人工驾驶车辆,这意味着自动驾驶车辆可以满足更加苛刻的道路线形条件,计算所得竖曲线半径小于《公路路线设计规范》所规定的最小竖曲线半径,同时,如图 4 所示,当竖曲线半径变化时,车辆被识别时的距离、俯仰角度和被探测面积等影响行车视距的因素均会产生变化,其对自动驾驶车辆行车视距的影响机理需要通过仿真试验来探究,计算所得的竖曲线理论最小半径也需要通过仿真实验来进一步验证。以 1.2 节中所得竖曲线极限最小半径作为仿真试验的范围下界,同时依照《公路路线设计规范》中竖曲线的一般最小半径作为仿真试验的范围上界,并依照各设计速度的最大坡度分别对凸形竖曲线半径 L_{VC} 、凹形竖曲线长度 L_{VS} 、凸形竖曲线半径 R_{VC} 和凹形竖曲线半径 R_{VS} 的取值范围进行选定,并划分适当的取值步长,其结果如表 5 所示。

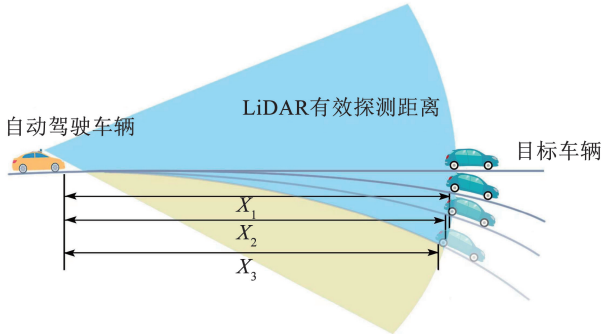


图 4 不同竖曲线半径条件下的自动驾驶车辆行车视距

Fig. 4 Sight distance of self-driving vehicles under different vertical curve radius

表 5 纵断面线形参数取值空间

Tab. 5 Value space of profile alignment parameters

$V_d / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	L_{VC}		R_{VC}		L_{VS}		R_{VS}	
	取值	步长	取值	步长	取值	步长	取值	步长
80	[90, 225]	10	[1 800, 4 500]	200	[100, 150]	5	[2 000, 3 000]	100
100	[112, 400]	8	[2 800, 10 000]	200	[120, 180]	4	[3 000, 4 500]	100
120	[168, 510]	6	[5 600, 17 000]	200	[120, 180]	3	[4 000, 6 000]	100
140	[212, 360]	4	[10 600, 18 000]	200	[110, 180]	2	[5 500, 9 000]	100

步骤 3 点云数据采集。在仿真运行期间,采集每段仿真时间域 t 内,由 LiDAR 发射并经目标车返回的激光点数 N_p 。基于 20 Hz 的测试平台仿真频率,构建 0.05 s 时间域。通过 MATLAB 编程求和每段仿真时间域内来自目标车的激光点云数量,获得 N_p 。

步骤 4 通过 MATLAB 对式(4)编程处理以获取自动驾驶车辆的行车视距^[22]。

当 $N_{p,i} > N_T$ 且 $N_{p,i+1} \leq N_T$ 时,

$$\text{行车视距} = x_{2,i} - x_{1,i} - a \quad (4)$$

式中: $N_{p,i}$ 和 $N_{p,i+1}$ 分别为 t_i 和 t_{i+1} 内的 N_p ; t_i 为第 i 个时间, s; $x_{2,i}$ 为 t_i 时目标车位置, m; $x_{1,i}$ 为 t_i 时自动驾驶车辆位置, m; a 为车身长度, 本文取 5.2 m。

步骤 5 以表 5 所列取值空间,在 PreScan 中调整道路线形参数,并重复按照上述步骤测试。

2.4 测试平台行车视距有效性验证

2.4.1 验证数据来源及试验工况

本文研究选取 Abdo 团队^[21]发布的 LiDAR 产品 Ouster OS1-32 激光雷达静态测试数据作为行车视距有效性验证基准,其具体设计参数:探测距离为 120 m,水平面视场角为 360° ,垂面视场角为 45° ,水平角度分辨率为 0.70° ,垂直角度分辨率为 1.45° ,垂面激光光束 32 条,扫描频率 20 Hz。本文据此检验虚拟测试平台获取自动驾驶车辆行车视距功能的有效性。

Abdo 等在直线单车道试验路($i_c = 0, L_T = 122 \text{ m}$,

2.3 测试步骤

自动驾驶车辆行车视距测试具体步骤如下:

步骤 1 初始场景搭建。将自动驾驶测试车置于整体路段模型的起点处,安装并配置 LiDAR 传感器,保持静止。并以 LiDAR 安装高度为 0.6 m 和 1.45 m 分别搭建场景。

步骤 2 目标车辆标定。令目标车与自动驾驶测试车位于相同起点,沿预设的高速公路行车道中线匀速行驶,直至路段模型终点。

车道宽 3.75 m)上,选取了为未知品牌的小客车作为目标车,将激光雷达中心点固定于距路面 0.9 m 的位置,且位于试验道路起点的车道中点位置。水平面最大直线距离为有效识别距离,其考察的 N_T 分别为 5、10、20、40、80、200。

由于 PreScan 软件已经说明了点云传感器 Point Cloud Sensor 模块作为 LiDAR 仿真的有效性,在虚拟测试平台中构建完全一致的工况,获取与 Ouster OS1-32 有效识别距离配对的测试数据。

2.4.2 验证数据与测试数据对比

在不同 N_T 条件下,基于虚拟仿真平台获取的仿真数据与 Abdo 等实际测量的有效识别距离对比如图 5 所示。

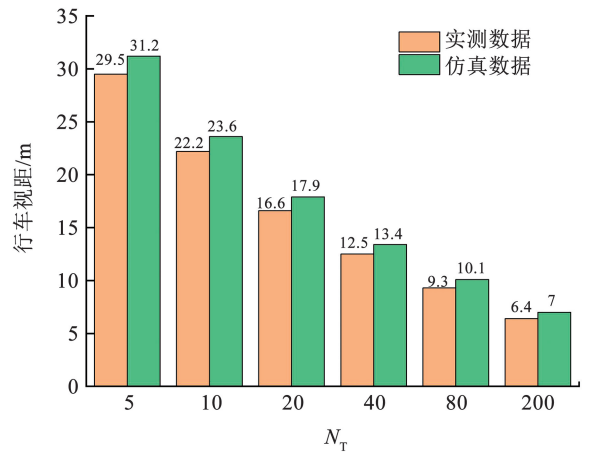


图 5 自动驾驶车辆行车视距仿真数据与实测数据对比

Fig. 5 Comparison between simulation data and measured data of sight distance of self-driving vehicles

计算图 5 两者平均偏差得出仿真数据为实测数据的 6.9%，验证了虚拟测试平台能够较理想地采集由目标车返回的激光点数。同时前者均略大于后者，这可能是仿真试验所用车型 Audi A8 Sedan 反射面积略大于 Abdo 等实测所用车型所导致的。

同时, Bland-Altman 图可用于直观展示两种方法进行测量时数据的一致性情况^[23]; 横坐标为两种方法测量数据的平均值, 纵坐标为两种方法的测量差值; 中间线条表示差值的平均值, 上下线条为 95% 一致性界限的上下限(即 1.96 个标准差上下界限); 如果散点基本均落在 95% 一致性区间, 则说明一致性情况良好。通过 Bland-Altman 图对仿真数据和实测数据进行处理, 所得结果如图 6 所示。由图 6 可知, 散点数据全部落在 95% 置信区间内, 满足上述一致性要求。

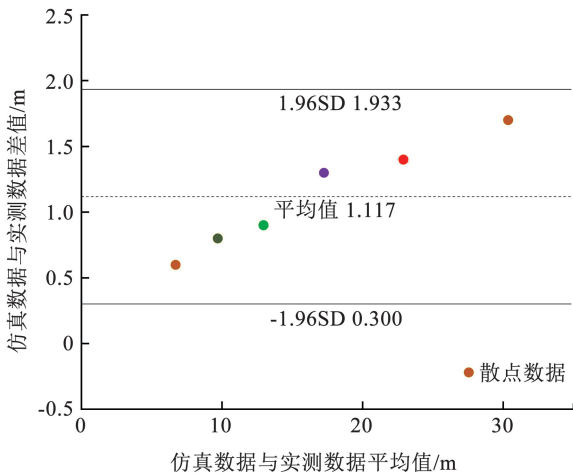


图 6 实测数据与仿真数据的 Bland-Altman 图

Fig. 6 Bland-Altman diagrams of measured data and simulation data

因此, 虚拟测试平台输出的自动驾驶车辆行车视距较理想于实际获取的 LiDAR 有效识别距离, 但其偏差较小并且具有很好的有效性。

3 基于行车视距分析的高速公路纵断面参数设计

选取不同的设计速度和道路参数, 构建直线及竖曲线场景, 获取自动驾驶车辆行车视距。并依据虚拟测试结果, 分析不同线形条件对行车视距的影响机理。

3.1 行车视距分析

3.1.1 直线

在直线路段内, 自动驾驶车辆在不同的设计速度 V_d 、返回点数阈值 N_T 及传感器安装高度 h_s 条件下的行车视距, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 试验所得行车视距明显小于理论

行车视距 245 m, 且在其余条件不变时, 行车视距随 N_T 的增加而下降。这是由于引入更多真实的 LiDAR 技术参数, 测试获得的行车视距较理论行车视距更短。此外, 增加 N_T 代表识别激光点数的需求上升, 自动驾驶车辆只能识别更近的障碍物。

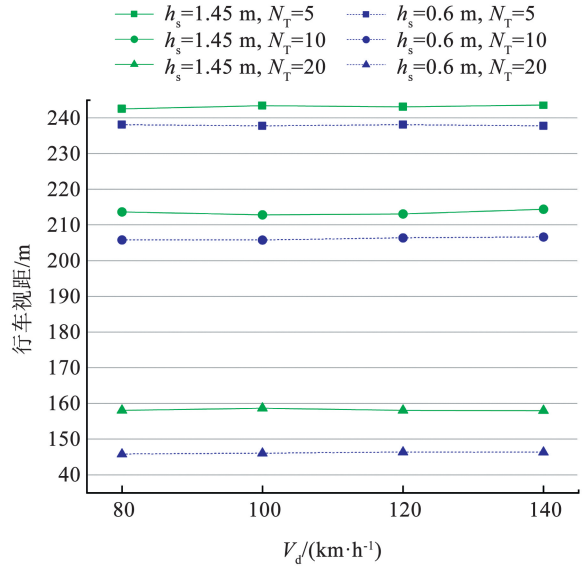


图 7 直线场景中的自动驾驶车辆行车视距

Fig. 7 Sight distance of self-driving vehicles in straight-line scene

在角度分辨率、 N_T 等因素限制下, 更大的相对速度将增加目标车在脱离自动驾驶车辆有效视场范围前未被探测的可能性。但由于水平角度分辨率较高, 扫描频率较大, V_d 变化对行车视距的影响并不明显。

同时, $h_s = 1.45$ m 的行车视距要略大于 $h_s = 0.6$ m 时的行车视距, 因此, 在后续仿真测试时, 主要将传感器高度 h_s 设置为 1.45 m。

3.1.2 凸/凹形竖曲线

在凸形和凹形竖曲线路段内, 自动驾驶车辆在不同 V_d 、 N_T 条件下行车视距随竖曲线半径的变化曲线如图 8 所示。由于不同设计速度下最大纵坡坡度 ω 固定, 竖曲线长度 L_V 对应竖曲线半径 R_V 的变化。

由图 8 可知, 其他条件不变时, 行车视距随竖曲线半径 R_V 变化呈现出振荡趋势。 $N_T = 10$ 时, 该振荡幅值可达约 20 m, 较大于 $N_T = 20$ 时的振荡幅值。该振荡趋势受 LiDAR 的角度分辨率和扫描频率、 V_d 、 N_T 、竖曲线场景中的路面遮挡与俯仰角偏差等因素的综合影响。

与直线场景相似, V_d 对行车视距影响较小。竖曲线场景中的自动驾驶车辆与目标车存在纵向相对运动。但由于 ω 受限, 竖曲线内车辆间的俯仰角偏差较小, 车辆间的垂向位移也较小, 由于水平角度分辨率较高, 扫描频率较大, V_d 变化对行车视距的影响不明显。

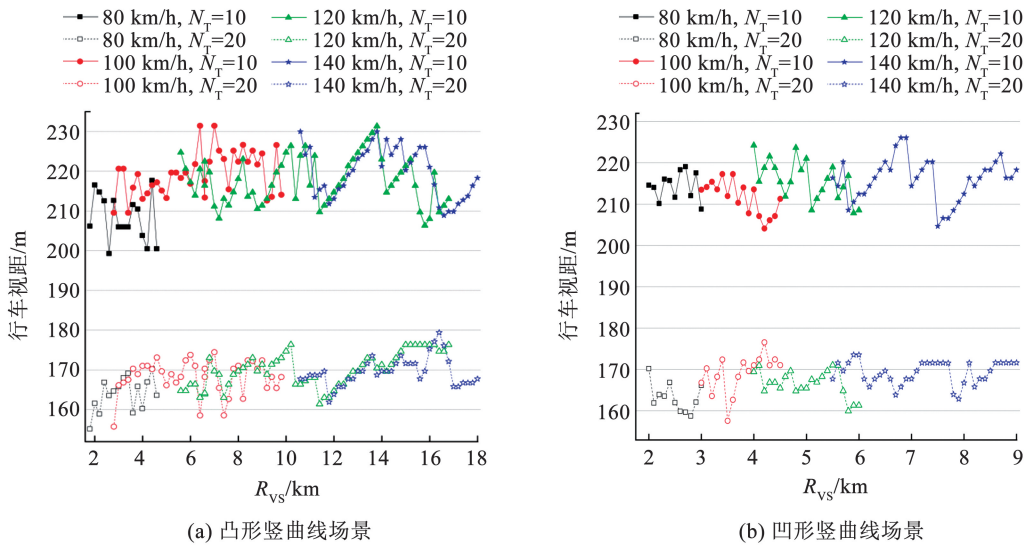


图 8 不同设计速度的竖曲线道路线形条件下的自动驾驶车辆行车视距

Fig. 8 Sight distance of self-driving vehicles under the condition of vertical curve road alignment with different design speeds

3.2 基于行车视距的安全行驶速度分析

根据视距供需平衡关系分析自动驾驶车辆的安全行驶速度,并依照速度协调性需求^[24],对高速公路纵断面设计参数进行评价。

为保证自动驾驶车辆在不同线形条件下的行车视距足够避免碰撞风险,其值应不小于停车视距。令行车视距等于停车视距,以视距失效为导向的车辆最大安全行驶速度 V_{sf} 能够利用式(1)反算获得。当 $V_{sf} > V_d$ 时,则停车视距大于行车视距;当 $V_{sf} < V_d$ 时,则停车视距小于行车视距。由于水平/垂直角度分辨率及扫描频率等因素的综合作用,车速仅对行车视距产生较小扰动。因此,在给定线形条件及 LiDAR 相关参数后,行车视距为常数。

在 LiDAR 相关参数方面: $N_T = 10$ 时的安全行驶速度要大于 $N_T = 20$ 时的安全行驶速度,其具有更好的线形适应性,但探测目标准确性更低。因此,以 $N_T = 10$ 作为考察道路线形设计参数的最低要

求。以 $N_T = 20$ 的安全行驶速度作为自动驾驶车辆线形适应性的评判标准,具体评判情况如表 6 所示。

表 6 安全行驶速度评价标准

Tab. 6 Evaluation standard of safe driving speed

评价标准	$V_{sf} \geq V_d$	$V_d > V_{sf} \geq V_d - 10$	$V_d - 10 > V_{sf} \geq V_d - 20$	$V_{sf} \geq V_d - 20$
评价结果	好	较好	较差	差

此外,在相同 R_v 条件下,对凹形和凸形竖曲线进行分析,同时,在 $V_d = 80$ km/h 和 100 km/h 的场景中, V_{sf} 均远大于 V_d ,这表明其线形设计完全适应自动驾驶车辆,故以 $V_d = 120$ km/h 和 140 km/h 的场景的安全行驶速度作为主要研究对象。

3.2.1 直线/直坡场景

图 9 选取了不同 N_T 条件下 120 km/h 和 140 km/h 对应的行车视距结果平均值计算所得的安全行驶速度。其中,不同 i_c 对应的行车视距均为直线场景中的行车视距。

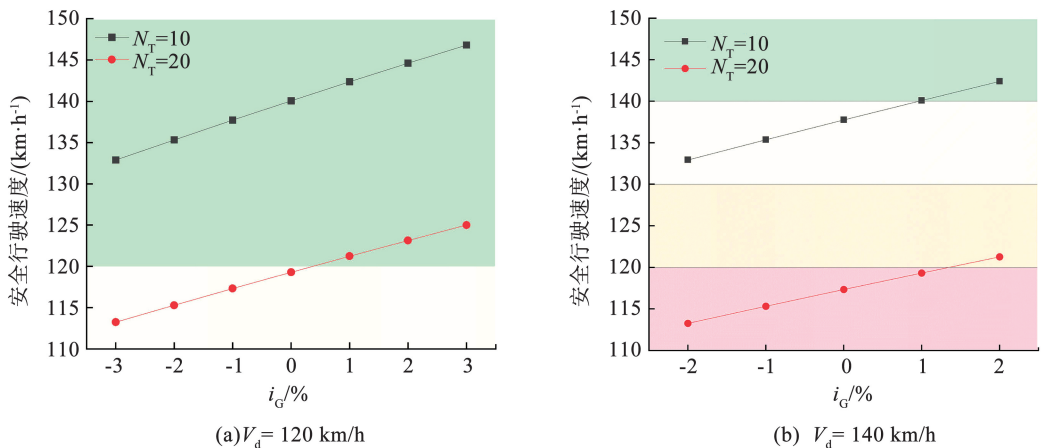


图 9 直线/直坡场景下自动驾驶车辆的安全行驶速度

Fig. 9 Safe speed of self-driving vehicles in straight line/straight slope scene

可知,在 $N_T = 10$ 时,设计速度为 120 km/h 以下的道路可以很好地满足自动驾驶车辆的行车视距需求,但在 140 km/h 时的场景下,自动驾驶车辆的行车视距不足以满足要求。而在 $N_T = 20$ 时, $V_d = 120$ km/h 场景的车辆道路线形具有较好的适应性,

而 $V_d = 140$ km/h 的道路线形与车辆适应性差。

3.2.2 凹/凸形竖曲线

图 10 选取了不同 N_T 条件下 120 km/h 和 140 km/h 对应的行车视距结果计算所得的安全行驶速度。

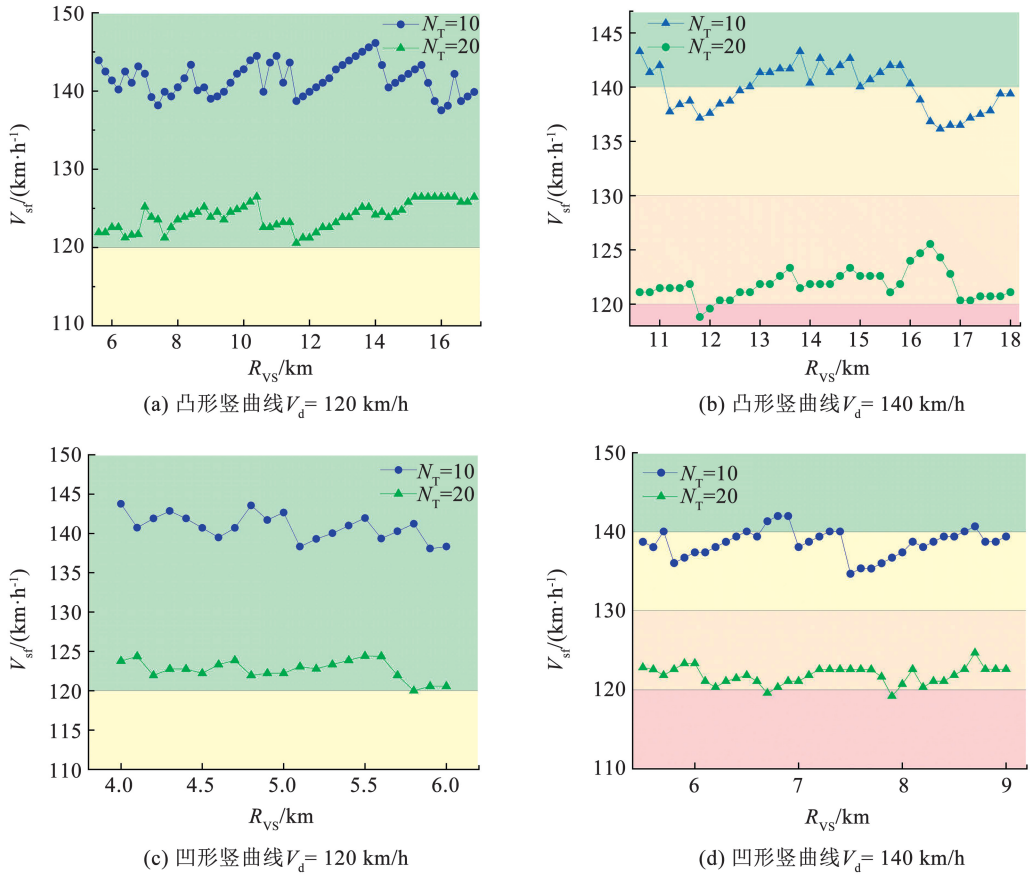


图 10 竖曲线场景的自动驾驶安全速度

Fig. 10 Self-driving safety speed in vertical curve scene

由图 10 可知,在设计速度为 120 km/h 及以下时, $N_T = 10$ 和 20 时对应的自动驾驶车辆的安全行驶速度均大于设计速度,这表明根据纵断面参数计算值构建出的竖曲线场景可以很好地满足自动驾驶车辆的运行需求。而在设计速度为 140 km/h 的竖曲线场景下, $N_T = 10$ 对应的安全行驶速度有部分低于 140 km/h 的情况, $N_T = 20$ 对应的安全行驶速度基本在 120 ~ 130 km/h 的范围内,道路场景对自动驾驶车辆的适应性较差。

参数标准设计的高速公路设计速度调整至 $V_d = 130$ km/h。在后续自动驾驶技术成熟后再进行提速。

3.3 纵断面参数设计

参考《规范》和黎纲^[27]提出的 140 km/h 纵坡坡度值,得到高速公路纵坡坡度如下:当设计速度为 80、100、120、130 km/h 时,其最大纵坡坡度分别为 5%、4%、3% 和 2%。

综上所述,现有的传感器技术不足以支持自动驾驶车辆在设计速度为 140 km/h 的道路上安全舒适的行驶,但考虑自动驾驶技术和传感器探测技术未来的发展,同时,车辆在 140 km/h 道路场景下的 V_{sf} 均能以 130 km/h 的速度安全舒适运行,引入高速公路预留提速的思路^[25-26],将以 $V_d = 140$ km/h 的

依照 1.2 节竖曲线最小半径计算值和 3.2 节所得结论,得到竖曲线的极限最小半径,并以其 1.5 ~ 2 倍作为竖曲线一般最小半径。竖曲线极限最小长度通常以 3 s 的行程作为极限值,以极限值 2.5 倍作为一般最小长度,得到竖曲线最小半径与竖曲线长度如表 7 所示。

表 7 竖曲线最小半径与竖曲线长度

Tab. 7 Minimum radius of vertical curve and length of vertical curve

设计速度/(km·h ⁻¹)	凸形竖曲线半径/m		凹形竖曲线半径/m		竖曲线长度/m	
	一般值	极限值	一般值	极限值	一般值	极限值
80	3 500	1 800	3 000	2 000	170	70
100	5 000	2 800	4 500	3 000	210	85
120	11 000	5 600	6 000	4 000	250	100
130	18 000	10 600	9 000	5 000	300	120

此外,由于平纵线形组合要求的合成坡度小于 10%,本文依照最不利原则进行仿真试验,选取如表 7 所规定极限最小半径和长度条件下的竖曲线与《规范》规定的超高为 8% 对应最小半径的平曲线组成的平纵线形组合场景中,自动驾驶车辆行车视距仍能满足行驶需求。

4 结 论

1) 采用 PreScan 和 MATLAB/Simulink 软件,基于 LiDAR 传感器从行车视距的角度提出了自动驾驶车辆-道路一体化仿真测试方法,并根据已有试验数据验证了测试平台的有效性,结果表明,虚拟测试平台输出的自动驾驶车辆行车视距较远于实际获取的 LiDAR 有效识别距离,但数据偏差较小,该测试平台具有很好的有效性。

2) 分析了直线、竖曲线和平纵线性组合条件对行车视距的影响机理。并分析了直线/直坡场景下自动驾驶车辆的安全行驶速度和竖曲线场景的自动驾驶安全速度,通过安全行驶速度分析了道路线形条件对自动驾驶车辆的适应性。

3) 基于自动驾驶车辆不同于人工驾驶车辆驾驶人的视线高度和反应时间,提出了适应自动驾驶车辆的高速公路竖曲线最小半径和长度建议值,如表 7 所示。

4) 适应自动驾驶车辆的高速公路的竖曲线最小半径相对于现行高速公路的设计标准显著降低,这意味着未来高速公路建设具有更低的工程技术难度和更高的经济性,本文的研究成果可为未来完全自动驾驶环境下的高速公路设计提供理论支持。此外,本文在虚拟仿真测试过程中仅从行车视距的角度进行了仿真测试,未从车辆动力学特性和行驶稳定性的角度验证研究成果,此方面研究仍需完善和改进。

参考文献

[1] 于斌, 王书易, 马羊, 等. 面向智能车辆的现役道路设施行驶适应性研究综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 205
YU Bin, WANG Shuyi, MA Yang, et al. Review of driving

adaptability of intelligent vehicles to as-built roadway infrastructures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 205. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.10.019

[2] 王书易. 面向自动驾驶的现役道路线形行驶适应性分析及评估[D]. 南京: 东南大学, 2023
WANG Shuyi. Driving adaptability analysis and evaluation of automation systems on as-built roadway geometry [D]. Nanjing: Southeast University, 2023. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2023.000011

[3] 张高才, 周建, 李欣, 等. 超高速公路建设需求与可行性研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(增刊2): 297
ZHANG Gaocai, ZHOU Jian, LI Xin, et al. Studies on super expressway construction demand and feasibility [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(Sup. 2): 297

[4] 张航, 梁家明, 吕能超. 超高速公路圆曲线半径参数的可靠性分析[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(2): 38
ZHANG Hang, LIANG Jiaming, LÜ Nengchao. An analysis of the reliability of radius parameters of circular curves on super-speed highways [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(2): 38

[5] 何永明, 裴玉龙. 超高速公路发展可行性论证与必要性研究[J]. 公路, 2016, 61(1): 158
HE Yongming, PEI Yulong. Study on the feasibility and necessity of super expressway development [J]. Highway, 2016, 61(1): 158

[6] 周建, 李雨璇, 李欣, 等. 超高速公路设计标准研究综述与展望[J]. 公路交通科技, 2024, 41(7): 172
ZHOU Jian, LI Yuxuan, LI Xin, et al. Review and prospect on superhighway design standard [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(7): 172

[7] 中华人民共和国公安部. 道路交通安全违法行为记分管理办法 [EB/OL]. (2022-04-01) [2024-07-24]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5679697.htm

[8] 邵春福, 王颖, 周志祥. 《公路工程技术标准》的对比分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2005, 3(3): 16
SHAO Chunfu, WANG Ying, ZHOU Zhixiang. Comparative study of highway engineering technique standards [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2005, 3(3): 16

[9] 张航, 张肖磊, 吕能超. 高速公路停车视距可靠性设计[J]. 公路交通科技, 2019, 36(4): 44
ZHANG Hang, ZHANG Xiaolei, LÜ Nengchao. Reliability design for stopping sight distance of expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(4): 44

[10] 赵西超. 基于智能驾驶技术的超高速公路线形指标研究[D].

- 长沙:长沙理工大学, 2019
- ZHAO Youchao. The research on linear index of super freeway based on intelligent driving technology [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. DOI: 10. 26985/d.cnki. gcsjc. 2019. 000623
- [11] 陈正委, 熊文磊, 高升, 等. 轻型高速公路代表性车型与纵断面设计指标研究[J]. 公路, 2023, 68(9): 1
- CHEN Zhengwei, XIONG Wenlei, GAO Sheng, et al. Research on representative vehicle type and profile design index of light highway [J]. Highway, 2023, 68(9): 1
- [12] 庄传仪, 赵一飞, 潘兵宏, 等. 公路纵坡设计关键参数研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 39
- ZHUANG Chuanyi, ZHAO Yifei, PAN Binghong, et al. Research on key parameter of highway longitudinal grade design [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 39. DOI: 10. 19721/j.cnki. 1001-7372. 2009. 04. 007
- [13] CHEN Peng, NI Haoyuan, WANG Liang, et al. Safety performance evaluation of freeway merging areas under autonomous vehicles environment using a co-simulation platform [J]. Accident Analysis and Prevention, 2024, 199(5): 107530
- [14] HYUK J K, HYEONG J L, HUN J C, et al. AEB simulation method based on vehicle test data for accident analysis of ADAS vehicles [J]. International Journal of Automotive Technology, 2024, 25(2): 261
- [15] CAO Linling, FENG Xinxin, LIU Junli, et al. Automatic generation system for autonomous driving simulation scenarios based on PreScan [J]. Applied Sciences, 2024, 14(4): 1354
- [16] ZHAO Yifei, YING Xinzhi, LI Jingru. Research on geometric design standards for freeways under a fully autonomous driving environment [J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7109
- [17] YEONG D J, VELASCO-HERNANDEZ G, BARRY J, et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: a review [J]. Sensors, 2021, 21(6): 2140
- [18] WANG Zhangjing, WU Yu, NIU Qingqing. Multi-sensor fusion in automated driving: a survey [J]. IEEE Access, 2020, 8: 2847
- [19] TEICHMAN A, LEVINSON J, THRUN S. Towards 3D object recognition via classification of arbitrary object tracks [C]// 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.]: IEEE, 2011: 4034
- [20] SUGANUMA N, YOSHIOKA M, YONEDA K, et al. LiDAR-based object classification for autonomous driving on urban roads [J]. Journal of Advanced Control, Automation and Robotics, 2017, 3(2): 92
- [21] ABDO J, HAMBLIN S, CHEN G. Effective range assessment of lidar imaging systems for autonomous vehicles under adverse weather conditions with stationary vehicles [J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part B: Mechanical Engineering, 2022, 8(3): 031103
- [22] WANG Shuyi, MAO Chengyang, MA Yang, et al. Examining the feasibility of current spiral curve design controls for LiDAR-based automated vehicles [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2023, 17(5): 848. DOI: 10. 1049/itr2. 12310
- [23] 朱红梅, 高蕾, 谢冰, 等. 两种测量方法在成年女性冠状面形体测量中的 Bland-Altman 一致性评价 [J]. 中国妇产科临床杂志, 2023, 24(3): 285
- ZHU Hongmei, GAO Lei, XIE Bing, et al. Consistency of two measurements in coronary-plane posture measurement of adult women by Bland-Altman analysis [J]. Chinese Journal of Clinical Obstetrics and Gynecology, 2023, 24(3): 285. DOI: 10. 13390/j. issn. 1672-1861. 2023. 03. 019
- [24] WANG Shuyi, MA Yang, EASA M, et al. Sight distance of automated vehicles considering highway vertical alignments and its implications for speed limits [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 14(6): 45. DOI: 10. 1109/MITS. 2023. 3334769
- [25] 庄稼丰, 丁健华. 提高高速公路限速对安全和其他因素的影响 [J]. 中外公路, 2008, 28(4): 254
- ZHUANG Jiafeng, DING Jianhua. The influence of increasing speed limit on safety and other factors [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(4): 254
- [26] 唐登科, 周颖. 山海高速公路提高限速方案研究 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(11): 292
- TANG Dengke, ZHOU Ying. Study on the scheme of increasing speed limit of Shanhai Expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology), 2020, 16(11): 292
- [27] 黎纲. 超高速公路几何设计指标取值与安全设施设计方法 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022
- LI Gang. Geometric design index value and safety facility design method of superhighway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. DOI: 10. 27671/d.cnki. gcjtc. 2022. 000409