

# Evaluation of Safety and Economy of Autonomous Commercial Vehicles

Jun LI<sup>1</sup>, Lin HU<sup>1</sup>, Fang WANG<sup>1</sup>, Jing HUANG<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, 410114.

<sup>2</sup> College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, China, 410082.

Email: 17861101909@163.com

**Abstract:** Autonomous commercial vehicles hold the promise of reducing labor and fuel costs and enhancing safety. However, the problem with autonomous driving lies in the fact that the current scene-based autonomous driving evaluation methods pay insufficient attention to economy and cannot comprehensively evaluate the performance of autonomous commercial vehicles. In response, this paper constructs a comprehensive evaluation framework for autonomous commercial vehicles considering economy, establishes evaluation indicators for experimental scenarios, and deeply analyzes the performance of autonomous commercial vehicles in different scenarios. The research results show that in terms of safety, autonomous commercial vehicles have excellent obstacle avoidance performance and can maintain a safe distance in all test items in the scenario. The lane keeping performance has high stability in the straight section, but needs further optimization in the curved section. In terms of economy, by analyzing instantaneous fuel consumption, etc., it is concluded that the longitudinal speed control of vehicles should pursue a more stable driving to reduce fuel consumption. The comprehensive evaluation framework proposed in this research is of great significance for promoting the development of autonomous commercial vehicle technology and provides a more comprehensive evaluation standard and decision-making basis for the transportation industry.

**Keywords:** Autonomous driving; Scenario; Commercial vehicle; Evaluation framework

## 自动驾驶商用车安全性与经济性评价

李峻<sup>1</sup>, 胡林<sup>1</sup>, 王方<sup>1</sup>, 黄晶<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 长沙, 中国, 410114

<sup>2</sup> 湖南大学 机械与运载工程学院, 长沙, 中国, 410082

Email: 17861101909@163.com

**摘要:** 自动驾驶商用车有望降低人力与燃油成本, 提升安全性。但是自动驾驶问题在于当前基于场景的自动驾驶评估方法对经济性关注不足, 无法全面地评估自动驾驶商用车的性能。对此, 本文构建了考虑经济性的自动驾驶商用车综合评估框架, 搭建了实验场景评价指标, 深入分析了自动驾驶商用车在不同场景下的性能表现。研究结果表明: 自动驾驶商用车在安全性方面, 避障性能优秀, 在场景中的各项测试内容中均能保持安全车距, 车道保持性能在直道部分具有较高稳定性, 但弯道部分需进一步优化; 在经济性方面, 通过分析瞬时油耗等得出汽车纵向速度控制应追求更加平稳的驾驶以降低油耗。该研究提出的综合评估框架对推动自动驾驶商用车技术发展具有重要意义, 为运输行业提供更全面的评估标准和决策依据。

**关键词:** 自动驾驶; 场景; 商用车; 评价框架

# 1 引言

在现代交通运输体系中，公路运输无疑占据着至关重要的地位。它具有灵活性高、适应性强等诸多优势<sup>[1]</sup>。然而，公路运输也面临着成本方面的问题，包括燃油费用、人工成本等，这些成本因素在一定程度上制约了公路运输的进一步发展<sup>[2]</sup>。自动驾驶技术的应用对于公路运输来说显得尤为重要。它有望降低人工成本，提高运输效率，减少交通事故，为公路运输带来新的变革和机遇<sup>[3]</sup>。

在早期自动驾驶技术的研发和推广过程中，主要包括封闭场地测试、开放道路测试和自动驾驶汽车竞赛等测试方法<sup>[4]</sup>。在这一阶段中，由于高水平自动驾驶系统（Advanced Driving System, ADS）的功能相对简单，评价方式主要以无人车比赛为主，如美国国防高级研究计划局主导的越野机器人感知（Perception for Off-Road Robotics, Percept OR）比赛<sup>[5]</sup>。传统的基于功能或里程的测试方法存在场景可控、安全性高和接近真实使用环境等优点，但也面临一些问题，例如效率低、客观性差、测试过程僵化，导致传统车辆评价方法已无法满足高水平自动驾驶系统（ADS）的评价要求<sup>[6]</sup>。基于场景的虚拟测试技术，场景配置灵活、效率高、重复性强、过程安全且成本低，能实现自动与加速测试，节省人力物力<sup>[7]</sup>。

当前，基于场景的虚拟测试技术主要关注自动驾驶系统的安全性与智能性<sup>[8]</sup>，而对经济性方面的评估尚未受到足够关注。经济性的评估对于商用车是十分必要的，这可以帮助商用车用户选择经济性更优的车型，从而降低车辆的运营成本，提升利润空间与市场竞争力。对于运输行业来说，评估经济性也是推动技术创新、促进产业升级的必然选择。为了克服现有评价体系的不足，并全面评估自动驾驶技术，有必要将经济性纳入到评估框架中。特别考虑到商用车领域自动驾驶技术应用评估的局限性，本文提出了一个综合性的评估框架，在保证安全性的前提下创新性地引入自动驾驶商用车经济性评估。这个框架将为商用车自动驾驶技术的发展提供更全面的评估标准。

## 2 自动驾驶商用车评价框架与实验设计

### 2.1 综合评价框架

要实现自动驾驶商用车的综合评估，需要建立一个全面准确的评价框架。具体包括可行的测试环境、实验过程中涵盖的测试内容、实验车辆，以及最重要的评价指标。测试内容可分为环境感知、行为决策和运动规划三个层面。车辆行为包括单车决策（转弯、变道、超车等）和多车交互机动（避障）。评价指标可以定义为综合考虑安全性和经济性的驾驶过程的系统行为。本文提出的考虑经济性的自动驾驶商用车综合评价框架，如图1所示。

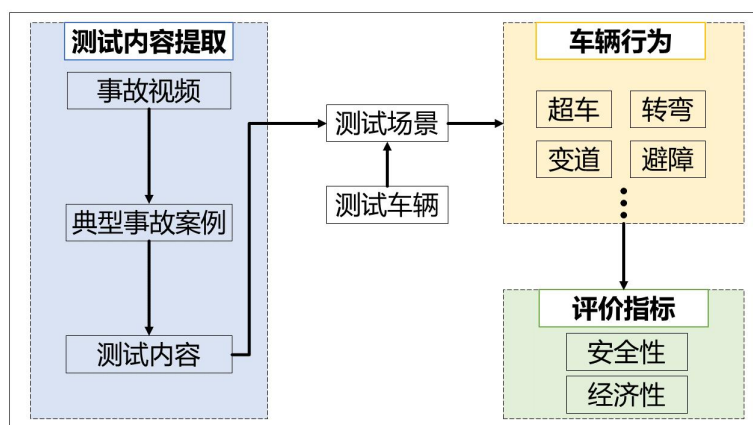


图1 自动驾驶商用车综合评价框架

### 2.1.1 测试场景与测试内容

测试环境涉及自动驾驶系统可能遭遇的多种外部条件，包括不同类型及状况的道路、多样的天气状况、交通信号系统的多样性、各种障碍物的特性以及可能的外部干扰因素<sup>[9]</sup>。鉴于真实驾驶环境的复杂多变，测试环境应尽量模拟这些多样化的元素，以确保对系统性能的全面验证<sup>[10]</sup>。在设计测试场景时，必须考虑到每个元素对自动驾驶系统的潜在影响，并确保这些元素能在测试中得到充分的体现和组合，从而更准确地评估系统在真实环境中的表现<sup>[11]</sup>。为符合自动驾驶商用车的使用环境，选取 Coral-Data（珊瑚数据）开源计划中的 SimTerrain-Highway1 for SCANer 仿真静态场景数据集作为本次测试的场景，能够全面地对商用车使用环境进行测试。场景环境要素具体包括：直道、弯道（小曲率与大曲率）、坡道、立交枢纽与匝道。本文根据路段类型将场景分为三段，分别为直线段（A 段）、复杂节点段（B 段）与曲线段（C 段）。

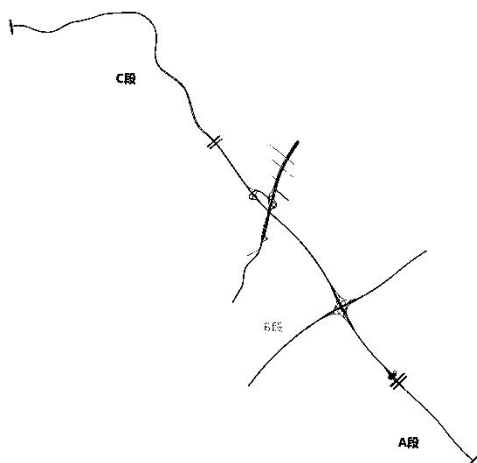


图2 静态场景数据集

测试内容聚焦于被测系统的驾驶能力，包括环境感知、决策制定、规划策略和运动控制等<sup>[12, 13]</sup>。本文统计了 109 个高速公路交通事故视频案例，结合高速公路交通事故成因方面相关研究<sup>[14]</sup>来设计场景的冲突。将场景冲突按照方向分为两类：纵向运动冲突，包含目标物静止、目标物直线匀速/减速行驶、目标物左/右侧切入、目标物左/右侧切出等工况；横向运动冲突主要是目标物横穿。这些冲突在视频表现为包含影响道路安全的各种因素，例如不同类型的道路环境（直道、弯道与匝道）、天气状况以及障碍物的类型等。图 3 中是视频样本，根据危险场景的形态进行分类。



图3 高风险场景的视频案例

在测试内容方面，综合了实际事故中的极端事件以及事故研究中的相关内容。一方面，对于实际事故中的极端事件的纳入，在一定程度上拓展了传统自动驾驶车辆测试场景的范围。实际事故中的极端事件往往具有突发性、复杂性和高风险性，通过将这些极端事件纳入测试内容，可以更加真实地模拟现实中自动驾驶车辆可能面临的严峻挑战。另一方面，结合事故研究中的相关内容，为测试提供了科学的依据和指导。事故研究是

对以往发生的交通事故进行深入分析和总结，从中可以提取出导致事故发生各种因素和规律。将这些研究成果融入到自动驾驶车辆的测试中，可以更加有针对性地检测车辆在不同情况下的性能和安全性。

测试中障碍点具体情况如图 4 所示：障碍 1，前车紧急制动；障碍 2，前车左侧切入；障碍 3，弯道中前车制动；障碍 4，匝道入口前车制动；障碍 5，恶劣天气下前方静止障碍物。表 1 为障碍点所在路段及天气情况。



图 4 自动驾驶汽车超车障碍点

表 1 障碍点路段与天气

路段	天气	障碍
A	晴	1, 2
B	晴	3, 4
C	雨	5

2.1.2 评价指标

在综合评价框架中，最重要的是评价指标的确立。本文的评价指标分为安全性与经济性两大类，具体内容如图 5 所示。

安全性作为自动驾驶车辆性能的核心要素，是我们在构建评价体系时首要考虑的因素，因为它直接关系到车辆在各种复杂交通环境下的应对能力、系统的稳定性以及乘客和行人的安全。同时，经济性也是自动驾驶商用车的重要考察指标之一。随着自动驾驶算法的应用，商用车的燃油消耗量可能会发生变化，进而影响运营成本。由于商用车的油耗成本在总运营成本中占比较高，因此将经济性指标纳入评价体系中，能够更加全面地评估自动驾驶算法对商用车运营成本的影响，为运输行业提供更为经济、高效的解决方案。

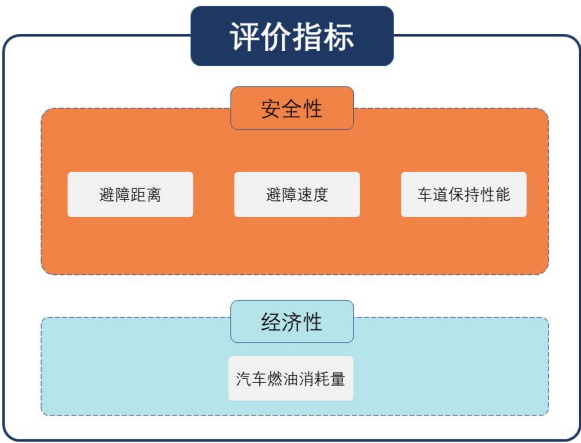


图 5 评价指标

### 2.1.2.1 安全性

自动驾驶汽车的安全性评估，关键在于观察车辆在特定场景下的表现。安全性决定自动驾驶汽车实际应用可行性，对其进行安全性评估需充分考虑各种驾驶场景，确保车辆在不同场景下表现出色，以保障安全性和可靠性。常用的安全性评价指标有最小碰撞时间（Time To Collision, TTC）、TTC 变化量与避障性能等。本文的安全性评价指标避障性能（避障距离、避障速度）和车道保持性能决定<sup>[15]</sup>。

避障距离和避障速度是衡量行车安全的两个重要参数，它们与车辆在紧急情况下的安全性能密切相关<sup>[16]</sup>。通过合理的避障距离和速度控制，自动驾驶汽车可以在更多情况下成功避开障碍物，降低交通事故的发生率。车道保持性能是评估车辆安全性的重要指标<sup>[17]</sup>。自动驾驶汽车通过持续监控车道线并自动调整车辆位置，有效避免了因驾驶员分心或疲劳导致的车道偏离事故，从而显著提升了行车安全<sup>[17]</sup>。

### 2.1.2.2 经济性

经济性指标在自动驾驶车辆的评估中占据着重要地位，而这一指标的核心便是车辆在特定场景中运行时的油耗表现。将油耗经济性纳入评估范畴，拓展了评估的维度，这使得对自动驾驶汽车的评价更加全面和综合，不再仅仅局限于单一的技术指标或安全指标，能够从能源消耗的角度对车辆进行考量，为用户和行业提供更丰富的评估信息。同时油耗直接关联到运输成本和运营效率的高低<sup>[18]</sup>，所以将油耗作为衡量商用车经济性指标的标准。

## 2.2 实验

在已搭建测试场景中，对自动驾驶商用车的综合性能展开全面测试。安全性由车辆在通过所有测试内容时的避障距离、避障速度以及车道偏移距离评估。其中，避障距离及避障速度选取自通过 5 个障碍点时的车辆数据，分别定义为车辆采取避障时与障碍物的相对距离以及自车的瞬时速度。然后通过避障速度与避障距离计算车辆的车头时距（Time Headway, THW），当车头时距处于[1,5]s 时，车辆即为安全跟驰状态<sup>[19]</sup>。车道偏移距离提取测试场景全程数据。

$$THW = \frac{d}{v} \quad (1)$$

其中  $d$  为两车之间距离， $v$  为自车速度。

经济性的评估由车辆的油耗数据完成。油耗数据可以通过 SCANeR 软件中的 ANALYSIS 模块提取瞬时油耗以及油门踏板深度数据。

本实验依托于长沙理工大学智能汽车驾驶模拟与人机交互实验室。实验测试系统主要由自动驾驶仿真测试系统（SCANeR studio2023）与车辆状态分析系统（ErgoLAB Driving）等组成。利用 SCANeR studio 的 TERRAIN 和 SCENARIO 模块搭建实验环境。车辆模型使用 Renault 卡车，型号 D14，由 VEHICLE 模块提供。实验设备是搭载 Inter(R) Core(TM) i7-14700KF 处理器、64GB RAM 和 4080 显卡的台式机。

## 3 结果与讨论

### 3.1 安全性

#### 3.1.1 避障性能

如图 6 所示，自动驾驶货车处理障碍 1 与障碍 5 时，避障距离与避障速度均能保持较高水平，表明此时自动驾驶货车对直线障碍物的情况处理能够兼顾安全与通行效率。障碍 2 是左前方车辆突然向自车所在车道切入，使得自车紧急避障距离远小于其他障碍情况，而此时的车辆速度也已经明显降低。在障碍 3 与障碍 4 两种情况下，车辆在复杂节点避开障碍物时，避障距离相对 1, 5 有了明显降低，表明车辆在复杂节点时反应时间有所降低，未能及时处理障碍物情况，车辆在复杂节点位置应对障碍时的避障策略需要进一步优化。根据避障距离以及避障速度计算得到 THW，均分布在[1,5]s 内，证明车辆具有良好的纵向安全性。车辆在简单场景下能够较好地处理障碍物，而在突发场景及复杂情况下存在不足，这种情况可能是由于避障策略较为单一，在面临紧急切入

时，无法适应快速变化的交通状况，而在复杂节点处，车辆需要同时考虑多个方向的障碍物，导致无法快速做出最优决策，导致避障距离降低和反应时间不足。

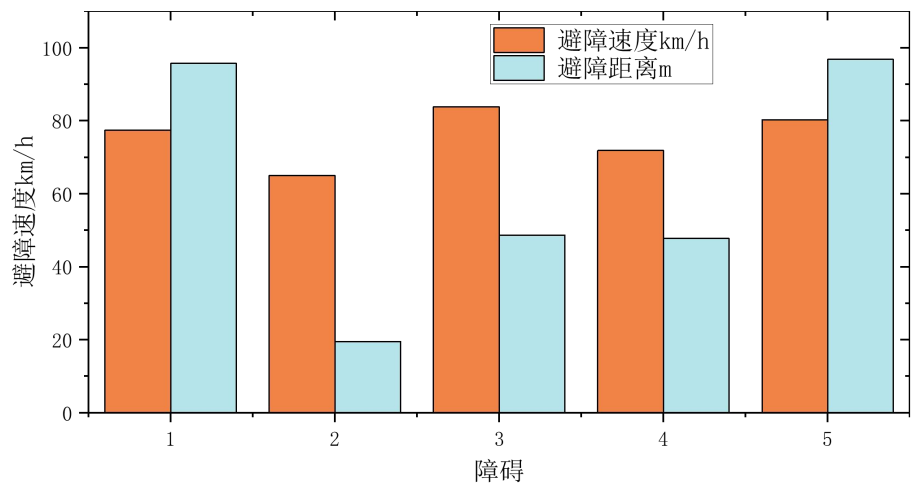


图 6 避障距离与避障速度

表 2 避障距离与避障速度

	障碍 1	障碍 2	障碍 3	障碍 4	障碍 5
避障距离 m	95.71	19.48	48.65	47.75	96.85
避障速度 km/h	77.46	65.02	83.84	71.83	80.28
车头时距 (THW)	4.42	1.07	2.09	2.39	4.34

3.1.2 车道保持性能

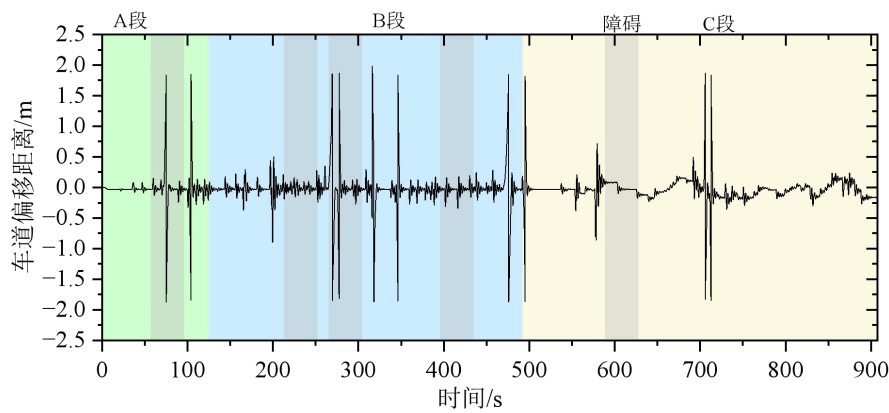


图 7 车道偏移距离

车道偏移情况如图 7 所示。当自动驾驶货车在直线道路上平稳行驶时，其表现出了较高的稳定性，车道中心的最大偏移量非常小。这充分显示了自动驾驶系统在直线行驶工况下的精准控制能力。然而，一旦进入曲率较大的路段行驶时，情况却发生了变化。车辆到车道中心的最大偏移量有所增加，这表明自动驾驶货车在弯道行驶时，在车道保持性能方面存在着些许的不足。通过上述数据发现该车的横向安全性在直道性能优异，但弯



道存在优化空间。以下两点有可能导致上述现象：一，在弯道行驶时，车辆会受到离心力的作用，这会使车辆有向外偏离车道的趋势。自动驾驶系统没有充分考虑离心力的影响，就可能导致车辆在弯道处的最大偏移量增加。二，车辆在 C 段行驶时，发生降雨，地面湿滑，造成轮胎的附着力的降低，此时如果车辆的速度过快或者转向角度过大，就容易出现打滑和偏离车道的情况。

### 3.2 经济性

经济性评价由车辆油耗指标决定。将瞬时油耗进行导出，并将其与油门踏板深度相对应，得到图 8。利用 MATLAB 将油耗数据进行整合计算，得到整个路径所消耗的总油耗为 4.48 L。瞬时油耗的数值范围在 0.0005 L/s 到 0.006 L/s 之间，表明汽车在不同时间点的油耗水平存在较大差异。观察瞬时油耗随时间的变化曲线，可以发现其波动较为明显。这是因为自动驾驶商用车趋向于保持稳定的时间间隔，一旦小于期望的时间间隔，便会执行制动，而这会造成更多的瞬时燃油消耗波动。经过对比瞬时油耗曲线与油门踏板深度的动态变化关系可以发现，当油门踏板深度增加时，相对应的油耗也会随之增加，这是因为加大油门意味着更大的功率输出，而这需要更多的燃料消耗。这表明车辆的加速控制存在较大波动，不够平稳。同时可以注意到车辆油门踏板深度变化较小的几处位置，瞬时燃油消耗却有所上升，此时车辆处于上坡路段，若此时通过优化车辆的行驶策略，实时监测道路坡度并预测未来的行驶条件，可以提前调整车速和加速度，以适应上坡或下坡的路况。这种预测性的调整有助于避免不必要的急加速或急减速，从而减少燃油消耗。例如，在接近上坡路段时，系统可能会提前加速以达到足够的速度，然后在上坡过程中保持稳定的速度，避免因动力不足而频繁变速导致的高油耗。

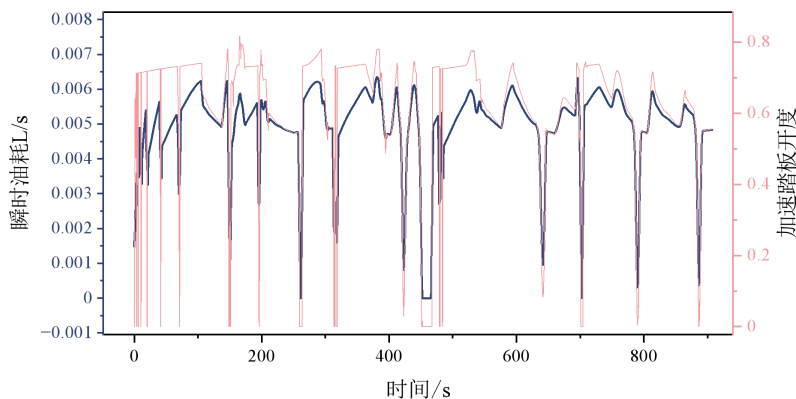


图 8 车辆瞬时油耗与车辆油门踏板深度

## 4 结论

本文建立了考虑经济性的自动驾驶商用车评价框架，通过自动驾驶商用车在测试场景中的数据，分析了自动驾驶商用车的安全性以及经济性，发现车辆的安全性表现良好，同时能够维持较高的避障速度，这将有利于通行效率及交通稳定性，但在弯道行驶时车道保持性能需要进一步提升，以提高车辆在弯道行驶时的稳定性。在经济性方面，自动驾驶商用车为了适应前方道路情况，采取较为频繁的加速制动，这会导致更多的瞬时燃油消耗，不利于燃油经济性的提升。在跟驰场景中，应使用更优化的规划算法代替基于时间间隔的规划算法，避免不必要的加速制动。

### 参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2023 年交通运输行业发展统计公报 [Z]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614\\_4142419.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html). 2024
- [2] NASRI M I, BEKTAŞ T, LAPORTE G. Route and speed optimization for autonomous trucks [J]. Computers & Operations Research, 2018, 100: 89-101.
- [3] FENG S, YAN X, SUN H, et al. Intelligent driving intelligence test for autonomous vehicles with naturalistic and adversarial environment [J]. Nature communications, 2021, 12(1): 748.
- [4] 朱冰, 张培兴, 赵健, et al. 基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试研究进展 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 1-19.
- [5] 陈君毅, 李如冰, 邢星宇, et al. Survey on intelligence evaluation of autonomous vehicles [J]. 同济大学学报, 2020, 47(12): 1785-90.

- [6] SUN J, ZHANG H, ZHOU H, et al. Scenario-based test automation for highly automated vehicles: A review and paving the way for systematic safety assurance [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2021, 23(9): 14088-103.
- [7] 赵祥模国家重点研发计划团队. 自动驾驶测试与评价技术研究进展 [J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(06): 10-77.
- [8] HUANG H, ZHENG X, YANG Y, et al. An integrated architecture for intelligence evaluation of automated vehicles [J]. Accident Analysis Prevention, 2020, 145: 105681.
- [9] ZHANG P, ZHU B, ZHAO J, et al. Performance evaluation method for automated driving system in logical scenario [J]. Automotive Innovation, 2022, 5(3): 299-310.
- [10] ZHANG P, ZHU B, ZHAO J, et al. Safety evaluation method in multi-logical scenarios for automated vehicles based on naturalistic driving trajectory [J]. Accident Analysis Prevention, 2023, 180: 106926.
- [11] 张培兴. 基于场景的自动驾驶汽车虚拟仿真加速测试与评价方法研究 [D]; 吉林: 吉林大学, 2023.
- [12] MA Y, JIANG W, ZHANG L, et al. Evolving testing scenario generation and intelligence evaluation for automated vehicles [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 163: 104620.
- [13] ZHANG P, ZHU B, ZHAO J, et al. Performance evaluation method for automated driving system in logical scenario [J]. Automotive Innovation, 2022, 5(3): 299-310.
- [14] 王坤. 道路和环境影响下高速公路交通事故严重程度分析与预测 [D], 2021.
- [15] ZHAO S, WEI Z, WANG P, et al. An objective evaluation method for automated vehicle virtual test [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 206: 117940.
- [16] RAHMAN M S, ABDEL-ATY M, LEE J, et al. Safety benefits of arterials' crash risk under connected and automated vehicles [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 100: 354-71.
- [17] CHEN Z, HUANG X. End-to-end learning for lane keeping of self-driving cars; proceedings of the 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), F 11-14 June 2017, 2017 [C].
- [18] BOREK J, GROELKE B, EARNHARDT C, et al. Economic optimal control for minimizing fuel consumption of heavy-duty trucks in a highway environment [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 28(5): 1652-64.
- [19] 耿嘉. 基于雷视一体机数据的快速路车辆跟驰模型优化研究 [D]; 重庆交通大学, 2023.