

面向自动驾驶的 车路协同关键技术与展望2.0

Key Technologies and Developing Prospect of Vehicle Infrastructure
Cooperated Autonomous Driving (VICAD) 2.0



版权声明

本白皮书版权归清华大学智能产业研究院及阿波罗智联(北京)科技有限公司所有，如需引用本白皮书内容，不得对本白皮书内容做任何改编，并满足如下引用规范：“清华大学智能产业研究院、百度Apollo，《面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望2.0》，2023”。

序言

PREFACE

自动驾驶是人工智能领域未来五年最复杂的任务之一。自动驾驶技术走向产业应用，本质上是跨越“达尔文之海”，同样充满挑战。

站在技术角度，完全成熟的自动驾驶技术不会缺席，但什么时候到来？不同的技术路径选择指向不同的商业临界点。更为关键的是，自动驾驶技术应用有一项不可妥协的原则——『安全性』，必须充分考虑当下的法律法规、政策、伦理等诸多因素。现阶段如果完全依赖单车智能，长尾场景短期内难以得到解决，若算力无法快速突破、硬件价格无法快速下降，那么自动驾驶的规模商业落地将需要较长时间。

技术创新与产业应用之间存在挑战，需要科学家与企业家携手面对。这是清华大学智能产业研究院（AIR）在2021年与百度公司联合发起“Apollo AIR”计划、探索以纯路侧感知能力赋能自动驾驶的原因，也是两个团队牵头众多行业合作伙伴，共同编写《面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望》（简称“AIR系列白皮书”）的初心。

得益于C-V2X、边缘计算、云计算等技术的发展和應用，车路协同技术可以有效补充单车智能面临的安全长尾，兼顾设计运行范围和经济性。车路协同自动驾驶（VICAD）为智能汽车引入了一套更高维的智能要素，数据、算力和算法都不再局限于单体智慧，而是演变为协同智慧，不同级别的自动驾驶、智能网联汽车均可以参与到道路交通信息的交互中。有了高维视角，加上实时信息传递，智能汽车的“感官”将被进一步增强，在错综复杂的交通环境中做出更好的判断和决策。

车路协同与单车智能相辅相成，是自动驾驶的高阶发展形态和必然趋势。这既是技术命题，更是产业命题。发展车路协同不仅让自动驾驶真正成为一项老百姓用得起、用得上的技术服务，极大降低规模商业化门槛，更是一项跨产业的超级系统工程，可带动汽车、通信、交通、半导体等产业跨越式发展，加速构建以自动化、智能化为特征的交通出行体系，全面进入智能化城市和社会。

“AIR白皮书2.0”围绕这些思考作了详细论证，它不是一套乌托邦式的畅想，而是一份基于真实产业需求、应用场景，并且旨在带来关键改变的技术报告。

2022年的秋天，我与清华AIR和百度Apollo的同事在北京奥森公园有过一场面对面的交流，大家探讨了在未来人工智能技术如何才能更好地被应用到交通场景，自动驾驶的未来将呈现何种景象。彼时，“AIR白皮书2.0”在经过近一年的推演、探讨与修订后即将付梓。创新没有尽头，有关人工智能、车路协同、自动驾驶的探索始终是进行时，白皮书也会伴随人工智能技术的迭代、我们对于行业理解的加深持续升级。我想感谢所有参与编写和评审的同事，并衷心期待《面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望2.0》能成为一个新的连接点，推动车路协同自动驾驶加速走向广阔的产业，走入我们的日常生活。

张亚勤

中国工程院院士
清华大学讲席教授、智能产业研究院（AIR）院长



2022年12月

前言

INTRODUCTION

自动驾驶技术是影响未来汽车产业发展的重要因素。随着自动驾驶技术的成熟和商业化的加速,汽车将不再只是从属于人的驾驶工具,车的核心价值部件由体现动力和操作系统的传动系统,转向体现自动驾驶水平的智能软件系统和处理芯片,驾驶员的双手、双脚和双眼将被解放,出行过程中的娱乐、社交、消费场景将被彻底打开,自动驾驶万亿级市场将被激活。

当我们谈论自动驾驶时,通常是指单车智能自动驾驶(Autonomous Driving, AD)¹和单车智能自动驾驶车辆(Autonomous Vehicle, AV),希望车辆能够自主识别交通标识,读懂交通信号灯,分辨出路上的物体,并能够进行实时路径规划与决策控制,像人类一样去驾驶。结合行业自动驾驶的发展情况来看,AD又可以分为“渐进式”和“跨越式”两条技术路径:其中渐进式自动驾驶以车企为代表,从低级别的辅助驾驶系统搭载开始,先量产商用,再通过数据对算法进行迭代,最终实现完全无人驾驶;而跨越式自动驾驶路径以互联网公司、创业科技公司为典型代表,大多选择摄像头与激光雷达等多传感器融合的方式,坚持“一步到位”,直奔L4及以上高等级自动驾驶技术成熟和规模商业化。

随着自动驾驶的深入发展,在AD的基础上,演进出现了车路协同自动驾驶(Vehicle Infrastructure Cooperated Autonomous Driving, VICAD)²这一新的技术路线和新的发展阶段³。VICAD则是在AD的基础上,充分发挥道路系统、云与网络的优势,开展车与车、车与路、车与云、车与人的协同配合,最终实现完全自动驾驶。世界各国都高度重视VICAD相关技术的研究和产业应用。美国2004年就启动了车路集成系统(Vehicle-Infrastructure Integration, VII)研究计划,并连续发布了《自动驾驶车辆综合计划》(*Automated Vehicles Comprehensive Plan*)⁴、《ITS战略计划》(*ITS Strategic Plan*)⁵等一系列纲领性文件,并主导了IntelliDrive、Connected Vehicle Pilot、CARMA等一系列研究和验证示范项目;欧洲也在ITS-G5、4G/5G通信技术的基础上,发布了*Connected Automated Driving Roadmap*⁶、*Cooperative Intelligent Transport Systems and Services*⁷、*Cooperative, connected and automated mobility (CCAM)*⁸等顶层设计规划,并在欧洲地平线计划(Horizon Europe)总体框架下,主导开展了大量的研究测试和建设部署项目,如eSafety、CVIS、Drive C2X、CAR2CAR和C-ROADS等;日本早在2006年就启动了下一代

¹美国将单车智能自动驾驶定义为Autonomous Driving,欧洲ERTRAC将单车智能自动驾驶定义为Automated Driving。

²美国CARMA提出了协同式自动驾驶(Cooperative Driving Automation, CDA),欧洲ERTRAC提出了网联自动驾驶(Connected Automated Driving, CAD)的概念,参考国外情况,并结合我国技术发展现状,本白皮书将车路协同自动驾驶定义为Vehicle Infrastructure Cooperated Autonomous Driving, VICAD)。

³关于自动驾驶技术路线的详细论述见《面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望》(2021年)。

⁴<https://www.transportation.gov/av/avcp>

⁵<https://www.its.dot.gov/>

⁶Connected Automated Driving Roadmap[R]. The European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC)

⁷<https://www.car-2-car.org/about-c-its/>

⁸<https://www.ccam.eu/>

“Smartway计划”，通过整合ITS的各种功能，建立全国性的车载集成平台，为车辆提供ETC、DSSS、ASV等服务，2017年9月，日本东京发布最新一版城市总体规划《都市营造的宏伟设计——东京2040》，推进“新东京”实现3个愿景：“安全城市”、“多彩城市”、“智慧城市”。

中国积极推动VICAD技术和产业发展，从顶层设计、战略布局、行业应用等层面进行系统性推进，目前总体处于全球领先水平。在技术路线与政策体系方面，“单车智能+网联赋能”自动驾驶技术路线已成为广泛共识，政府主管部门积极加强顶层规范设计，营造产业发展良好环境，出台了一系列政策文件，包括《扩大内需战略规划纲要（2022-2035年）》⁹《智能汽车创新发展战略》¹⁰《新能源汽车产业发展规划（2021-2035）》¹¹《交通强国建设纲要》¹²《交通领域科技创新中长期发展规划纲要（2021—2035年）》¹³等，为车路协同自动驾驶发展指明了方向；各地政府部门结合自身发展需求和优势，发布了积极推进产业发展的一系列指导意见和发展计划，大力发展车路协同技术，推动产业应用。在技术验证和应用示范方面，工信部牵头先后批准建设了江苏（无锡）、天津（西青）、湖南（长沙）、重庆（两江新区）等国家级车联网先导区，北京、上海、广州、深圳等地也大力支持开展车联网示范区建设和“双智”试点¹⁴，加快车路协同基础设施规模建设部署，IMT-2020（5G）推进组、中国智能网联汽车产业创新联盟（CAICV）等组织也先后开展了C-V2X“三跨”、“四跨”、“新四跨”系列大规模先导应用示范活动，逐步推动VICAD从封闭开发走向互联互通和大规模应用。

行业针对VICAD的研究和探索从未止步。为了进一步加快构建完善VICAD理论和技术体系，推动VICAD走向落地应用，清华大学智能产业研究院(AIR)张亚勤院士与百度Apollo、中国信息通信研究院、中国信科、中国联通等10余家行业单位共同组建研究团队，针对VICAD开展系统化研究和探索。2021年，研究团队从自动驾驶发展存在的问题出发，提出了VICAD技术路线，并从安全性、设计运行范围（Operational Design Domain, ODD）¹⁵和经济性等维度对VICAD进行了分析和论证；同时，针对VICAD中“路”这个短板，研究团队也提出了智能化道路的分级标准和统筹建设高等级智能道路的发展建议，最终在2021年6月，面向行业首次发布了《面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望1.0》白皮书。

2022年，我们继续聚焦VICAD，又有了进一步的理解和认识。首先，VICAD是一个持续发展演进的技术体系，为应对自动驾驶、智能交通、C-V2X车联网以及共享出行等一系列交叉行业的融合发展需求，需要有一个“面向未来、兼容当下”的车路协同系统作为支撑，同时支持“渐进式”和“跨越式”自动驾驶走向普及应用，并为以后推动智能交通、智慧出行和智慧城市融合创新发展奠定坚实基础；

⁹2022年12月14日，中共中央、国务院印发了《扩大内需战略规划纲要（2022—2035年）》

¹⁰2020年2月10日，国家发展改革委等11部门联合发布《智能汽车创新发展战略》

¹¹2020年10月20日，国务院办公厅印发《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》

¹²2019年9月19日，中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》

¹³2022年1月24日，交通运输部、科学技术部印发《交通领域科技创新中长期发展规划纲要（2021—2035年）》

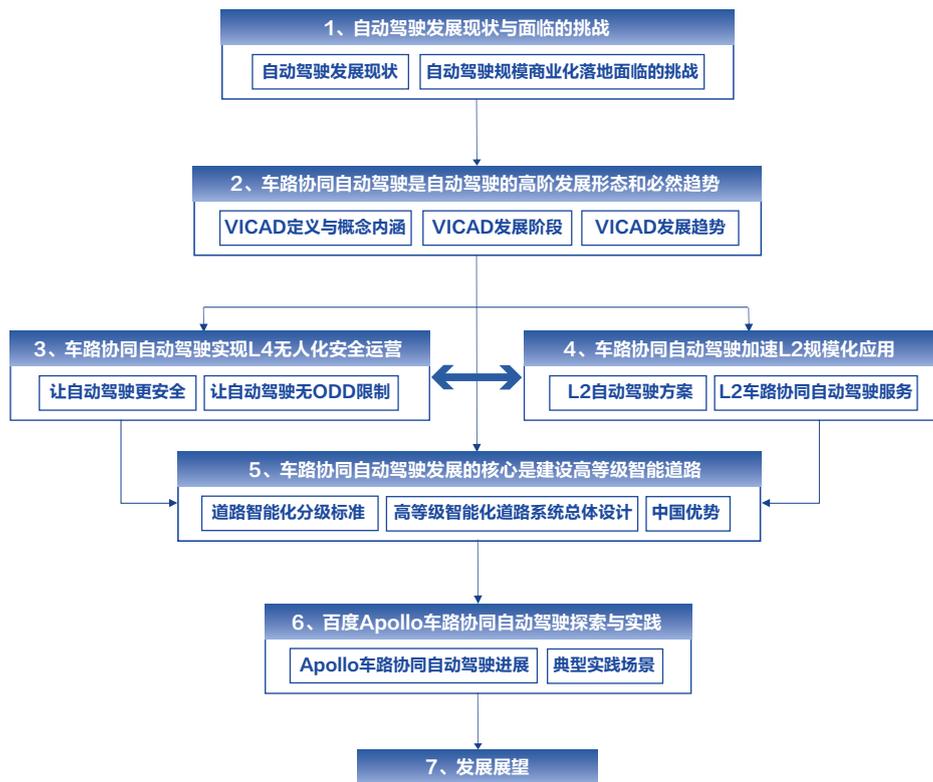
¹⁴智慧城市基础设施与智能网联汽车协同发展试点，简称为“双智”试点

¹⁵引自GB/T 40429-2021《汽车驾驶自动化分级》

其次,我们针对不同等级自动驾驶车辆,明确了VICAD走向规模商业化的落地路径,借助车路协同全方位技术能力(包括车路协同感知、车路协同决策规划与车路协同控制),可以从本质上解决自动驾驶面临的瓶颈问题,提升自动驾驶能力水平;第三,现阶段发展VICAD的首要任务仍然是补齐“路”这个短板,而我国在这方面具有强大的体制机制、战略政策、产业生态和技术领先优势,需要统筹规划、分级推进高等级智能道路在先行城市和高速公路的建设部署,探索车路协同公交专用道、车路协同自动驾驶专用道等一系列商业化运营新模式,形成可推广、可复制的实践经验和成熟方案;最后,建设发展高等级智能道路具有良好的经济效益和社会效益,在解决自动驾驶发展“临门一脚”的同时,还可以显著减少交通事故风险、提高交通运行效率、带动地方和区域经济发展,带给人民群众更多的安全感、获得感与幸福感。

总结以上研究工作和一年多的探索实践,研究团队正式对外发布《面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望2.0》白皮书。本白皮书全文共分为七个章节(七个章节之间的逻辑关系见下图),其中:

- 1)第一章:总结了当前自动驾驶的发展现状与存在的突出问题;
 - 2)第二章:明确了VICAD的概念定义、内涵外延、发展阶段、发展现状与趋势;
 - 3)第三章:以L4等级自动驾驶无人化安全运营为发展目标,基于VICAD全面解决L4等级自动驾驶无人化面临的问题,实现自动驾驶零接管、高安全,远超人类驾驶水平;
 - 4)第四章:针对L2等级自动驾驶车辆,通过VICAD为车辆和驾驶员提供多样化应用服务,让L2车辆在城市、高速等各种交通环境下畅行无阻;
 - 5)第五章:提出了道路智能化分级标准和高等级智能道路的总体设计方案,并建议分步骤统筹规划建设高等级智能道路,同时尝试对建设发展高等级智能道路的经济效益和社会效益进行了量化分析;
 - 6)第六章:介绍百度Apollo和清华AIR近两年在车路协同方面的最新探索与实践;
 - 7)第七章:总结性提出了全文的核心观点和发展建议。
-



限于时间和研究水平，本白皮书仍有许多待改进之处，需要不断修订和完善，在此感谢各编制单位、编制人员和指导专家对白皮书研究与编制工作付出的努力，也欢迎各位领导、专家和业界同仁提出指导意见和建议，共同加入车路协同的技术研究和产业推进工作，加快我国自动驾驶与智能交通融合创新发展。

指导专家

(排名不分先后, 按姓氏拼音排序)

陈山枝 中国信息通信科技集团有限公司副总经理、总工程师、专家委主任,
移动通信及车联网国家工程研究中心主任

龚建伟 北京理工大学机械与车辆学院教授、博导、智能汽车研究所所长

李国强 中国工程院院士, 清华大学教授

李兴华 同济大学中国交通研究院院长

王先进 交通运输部科学研究院副院长、总工程师

王志勤 中国信息通信研究院副院长

杨殿阁 清华大学教授、车辆学院创院院长, 中国汽车工程学会会士

姚丹亚 清华大学自动化系工程研究所教授

余卓平 同济大学汽车学院教授, 国家智能型新能源汽车协同创新中心主任

张进华 中国汽车工程学会常务副理事长兼秘书长、
国家智能网联汽车创新中心执行主任

张永伟 中国电动汽车百人会副理事长兼秘书长、首席专家

编制单位及成员

主编：

张亚勤 中国工程院院士，清华大学讲席教授、智能产业研究院（AIR）院长

主编单位及成员：

清华大学智能产业研究院(AIR)：

周谷越、袁基睿、龚江涛、陈龙瑞、李楚璇、张研、初梦迪、沈嘉浩、田倍闻、蒋程宇、许莹、宋旭升

百度：

尚国斌、刘常康、王淼、胡星、杨凡、王鲲、胡茂洋、张健、王洪浪、刘泽宇、肖骁、王洪岳、张雯、沙杰峰、骆乃瑞、司远、杜小川、吴雯玥、李赓、杨国义、黄秀林、王立琦、马雪晶

参编单位及成员：

中国信息通信研究院：葛雨明、康陈、于润东、李凤、余冰雁

中国信息通信科技集团有限公司：胡金玲、杨雅茹

中信科智联科技有限公司：邓婷婷、房家奕、于中腾、张杰、范炬、张连栋

联通智网科技股份有限公司：周光涛、杨海军、程军峰、李胜、辛亮

北京车网科技发展有限公司：孙宁、李峰、宋娟、霍俊江、陈瀚、高景伯、姜川

同济大学：胡笏、安连华

北京理工大学：吕超、巨志扬

胡凯：英特尔中国区互联网行业总经理

Apollo理事会及成员单位

CONTENTS

目录

第1章

自动驾驶发展现状与挑战 ----- 01

1.1 自动驾驶发展现状 02

1.2 自动驾驶规模商业化落地存在的挑战 03

第2章

车路协同自动驾驶是自动驾驶的高阶发展形态和必然趋势 ----- 06

2.1 车路协同自动驾驶概念与内涵 07

2.2 车路协同自动驾驶发展阶段 11

2.3 车路协同自动驾驶发展现状与趋势 12

2.3.1 车路协同感知已进入规模化建设部署应用阶段 12

2.3.2 车路协同决策控制存在现实需求 13

第3章

车路协同自动驾驶实现L4无人化安全运营 ----- 14

3.1 面向L4的车路协同自动驾驶服务策略 15

3.2 让自动驾驶更安全，远高于人类驾驶水平 18

3.2.1 将“未知”场景转化为“已知”场景 18

3.2.2 将“不安全”场景转化为“安全”场景 30

3.2.3 VICAD安全评价模型与仿真验证 46

3.3 管理扩展自动驾驶ODD，实现无接管连续运行 50

3.3.1 自动驾驶ODD限制 50

3.3.2 基于车路协同的ODD动态管理与扩展 52

3.4 小结 56

第4章

车路协同自动驾驶加速L2规模化应用 ----- 57

4.1 L2自动驾驶主流方案及其限制 58

4.1.1 L2常见技术方案 58

4.1.2 电子电气架构演进 59

4.1.3 L2自动驾驶面临的主要挑战 60

4.2 面向L2的车路协同自动驾驶服务 65

4.2.1 总体技术框架 65

4.2.2 车端参考技术架构 66

4.2.3 车路协同地图服务和更新方案 67

4.2.4 车路协同公开停车场泊车服务 69

4.2.5 车路协同决策规划 73

4.2.6 综合应用效果 75

4.3 小结 75

第5章

车路协同自动驾驶发展的核心是建设高等级智能道路 ----- 76

5.1 支持自动驾驶的高等级智能道路系统总体设计	77
5.1.1 智能道路分级标准	77
5.1.2 高等级智能道路性能指标	80
5.1.3 高等级智能道路具体设计	85
5.2 高等级智能道路的经济效益、产业价值和社会效益	95
5.2.1 显著经济效益	95
5.2.2 巨大产业价值	97
5.2.3 潜在社会效益	97
5.3 建设高等级智能道路中国优势	102

第6章

百度Apollo车路协同自动驾驶探索与实践 ----- 107

6.1 百度Apollo车路协同自动驾驶进展	108
6.1.1 标准先行	108
6.1.2 Apollo Air计划	109
6.1.3 智路OS与车路协同开放平台	110
6.1.4 DAIR-V2X开放数据集	112
6.1.5 L4共享无人车规模化测试运营	113
6.1.6 面向C端用户的大规模网联服务	114
6.2 车路协同自动驾驶典型实践场景和技术优势	116
6.2.1 高精地图实时更新实践	117
6.2.2 车路协同感知实践	119
6.2.3 车路协同决策规划实践	128
6.2.4 车路协同控制实践	136

第7章

总结与展望 ----- 141

7.1 观点总结	142
7.2 发展展望	142
7.3 发展建议	144

附录 ----- 146

附录A：地图参考位置协议	147
附录B：自动驾驶一体化安全评价实验	148
B.1 场景分布模型	148
B.2 感知模型	150
B.3 决策控制模型	151
B.4 评价模型	152
缩略语	155
参考文献	158
免责声明	165

01

自动驾驶发展现状与挑战

自动驾驶是人类一直追求的发展目标。1925年,世界首辆由无线电远程操纵的汽车出现在纽约街头,这应该是自动驾驶的雏形概念;1961年,斯坦福大学研究院试制的Stanford Cart,依赖车顶搭载的摄像头和早期的人工智能算法,实现了感知、决策、规划和控制的一系列过程,被认为是世界上第一辆“自动驾驶”汽车。进入21世纪,自动驾驶加速与人工智能、物联网、高性能计算等新一代信息技术深度融合,已经成为当前全球汽车与交通出行领域智能化和网联化发展的主要方向,也是各国争抢的战略制高点。

SECTION 1

自动驾驶发展现状

如今,自动驾驶已经逐渐从技术研究和测试验证阶段演进至产品落地阶段,越来越多的企业加入到自动驾驶技术研发和自动驾驶汽车生产制造的行列,共同探索自动驾驶的落地应用路径。按照美国国际自动机工程师学会(SAE)和我国自动驾驶分级标准¹⁵,自动驾驶划分为L0-L5¹⁶共6个等级,根据“开启自动驾驶功能后,驾驶员是否应该处于驾驶状态”这一标准,自动驾驶以L3等级作为分界线,理论上,L3等级以上(包括L3等级)才能称之为高等级自动驾驶,L3等级以下为辅助驾驶;自动驾驶最理想的状态是L5等级(完全自动驾驶),能在所有的道路环境下执行完整的动态驾驶任务和动态驾驶任务支援,全程无需驾驶员介入,此时的自动驾驶汽车又可以称为无人驾驶汽车。

综合来看,当前配备先进辅助驾驶系统功能(Advanced Driver Assistance System, ADAS)的L2辅助驾驶车辆仍然是市场主力,正处在加速量产阶段,但市场渗透率和应用规模仍需要进一步扩大;L3、L4及以上高等级自动驾驶仍以测试验证和区域性示范为主,部分企业无人驾驶开始进入小规模全无人开放运营阶段,但城市级全域商业化落地仍然需要克服技术、基础设施、法规等一系列挑战。

(1) 大多数车企已实现L2辅助驾驶车辆量产,市场渗透率大幅提升

L2等级的自动驾驶车辆是现阶段自动驾驶落地的核心,尤其是以Tesla为代表的造车新势力,在标配L2级辅助驾驶系统的基础上,进一步规划提出了L2.5甚至无限接近于L3功能的汽车量产计划。截止2022年6月的统计数据显示¹⁷,全国1-6月累计乘用车销量1035.5万辆,其中L2及以上等级智能网联汽车销量187.3万辆,渗透率达到20.2%;全国1-6月累计新能源乘用车销量260.0万辆,其中L2及以上等级新能源智能网联汽车销量112.3万辆,渗透率高达43.2%;中国汽车工业协会同时预测,2022年全年乘用车销量有望达到2300万辆,由此估计2022年全年L2及以上等级智能网联汽车销量保守估计将达到460万辆;预计2022年全年新能源汽车销量有望达到550万辆,估计2022年全年L2及以上等级新能源智能网联汽车销量保守将达到237.6万辆。

(2) 高等级自动驾驶应用场景快速拓展,并实现了初步商业化

当前,自动驾驶技术还不足以实现在任意场景下的完全无人驾驶,只能通过不断学习和反馈实现技术能力的持续迭代,优先在人车混行较少、红绿灯设置合理、交通规则遵守意识较强的区域和环境落地,比如高速、干线物流、港口、园区、固定路线等限定区域的接驳、清扫车、自动驾驶出租车等场景,其中:

1) 在自动驾驶出租车方面, IHS Markit发布的《中国自动驾驶市场和未来出行市场展望》认为,

¹⁵GB/T 40429-2021《汽车驾驶自动化分级》

¹⁷L0: 应急辅助, L1: 部分驾驶辅助, L2: 组合驾驶辅助, L3: 有条件自动驾驶, L4: 高度自动驾驶, L5: 完全自动驾驶。

¹⁸中国汽车工业协会: 2022年上半年中国汽车产销报告

未来自动驾驶出租车将占到共享出行市场的60%以上。百度自动驾驶出行平台“萝卜快跑”已在北京、上海、广州、深圳、成都等10多个城市提供自动驾驶出行服务，截至2022年第三季度末，累计订单量已超过140万¹⁹；全球范围来看，GM Cruise、Waymo等企业也在探索自动驾驶出租车商业运营。

2) 在自动驾驶干线物流方面，自动驾驶可以填补国内超过1000万的货车司机缺口，节省运输总成本中30%-40%的人力成本，该领域的自动驾驶企业较多，包括DeepWay、主线科技、赢彻科技、干挂科技、希迪智驾等。

3) 在无人配送方面，新冠疫情期间的无人配送代替人工完成了送餐、送药、送快递、清扫等任务，为抗疫作出了积极贡献，未来5-10年，无人配送将进入快速发展时期，成为智慧物流的重要组成部分，国内无人配送已经拥有比较完整的产业链，如京东、美团、菜鸟等。

4) 在无人矿卡、封闭园区物流等方面，可以利用场景简单、干扰因素少等优势，在港口、矿区、机场等特定环境开展无人化自动驾驶服务，提高自动化作业效率。

除了以上所列的主流自动驾驶应用场景外，还有很多自动驾驶细分应用场景有待探索。

1.2 ACTION 2 自动驾驶规模商业化落地存在的挑战

自动驾驶是一个复杂系统，由一整套自动驾驶硬件（激光雷达、毫米波雷达、摄像头、超声波传感器、GPS定位装置、芯片和计算平台等）和多个复杂系统（高精度地图系统、高精度定位系统、感知系统、决策规划系统、车辆控制系统、车辆通信系统等）组成。尽管目前自动驾驶技术已经取得了巨大的进步，自动驾驶的商业化进程也初见成效，但距离自动驾驶的大规模普及应用，还有很长的路要走。总结来看，影响自动驾驶走向规模商业化落地的因素主要集中在安全性、运行设计范围（ODD）和经济性三个方面。

(1) 自动驾驶安全依然面临着巨大挑战，特定场景有失效风险

安全问题依然是影响自动驾驶规模商业化落地的最关键原因，而不同等级自动驾驶车辆在安全方面面临的问题存在一定差异。

在低等级自动驾驶方面，车辆辅助驾驶系统的功能仍然存在特定场景下应对能力不足和失效的风险。以自动紧急刹车为例，在夜间或者儿童穿梭等场景下，车辆的应对能力不足，很容易出现碰撞危险；另外在特殊目标识别（例如下雨天打伞或穿雨衣的行人）和高精度定位（如隧道、城市桥梁等）方面，也较容易出现系统失效的现象。通过研究国内外目前出现的多起自动驾驶安全事故案例发现，车辆对静止交通设施和静止交通参与者的准确识别和实时干预控制也存在一定困难，是造成事故的主要原因。

¹⁹截止2022年第三季度末，萝卜快跑向公众提供的乘车次数已累计达到140万

在高等级自动驾驶方面，其最大的挑战是“无人”，由于L4-L5的驾驶和责任主体由驾驶员切换为自动驾驶系统，只有达到99.9999%及以上的场景通过成功率，才能确保上路无或极低概率出现碰撞事故风险。根据加州车辆管理局(The California Department of Motor Vehicles, CA DMV)统计数据，2021年度(2020年12月1日~2021年11月30日)，28家自动驾驶公司的1180辆自动驾驶汽车累计完成了超过410万英里的测试总里程，其中Waymo有693辆登记车辆，年度行驶总里程超过232万英里，年度接管总次数292次，平均接管里程为7965英里；事故方面，Waymo全年共发生64起交通事故，平均每百万英里约发生27.6起事故，即 171.5×10^{-7} 次/公里；排名第二的Cruise全年共发生30起交通事故，平均每百万英里约发生34.1起事故(Cruise 2021年自动驾驶行驶总里程87.6万英里)，事故概率为 211.9×10^{-7} 次/公里，这比人类驾驶事故概率²⁰要高出很多，说明自动驾驶距离“绝对安全”和完全“无人化”的终极目标还有一定差距。

(2) 感知长尾、混行博弈、极端场景等一系列突出问题限制了车辆的ODD

自动驾驶ODD是指自动驾驶系统设计时确定的适用于其功能运行的外部环境条件，包括环境、地理、时段限制、交通流量及道路特征等。限制自动驾驶ODD的原因或条件有很多，例如：1) 道路条件，高速公路、无信号灯十字路口、山区道路等；2) 环境条件，天气(如雨、雪、雾)和日照状况(昼或夜、逆光、隧道出入口)等；3) 其它还包括过时的地图信息、收费站、水洼、低垂的植物、道路结冰、遗撒的物体、特种机械和违反交通规则的人类行为。

限制ODD是保证车辆安全的重要手段，但不利于自动驾驶的连续运行。当前，自动驾驶车辆只能在限定的环境内行驶，例如美国国会至今也没有发布全国性的自动驾驶法规，亚利桑那州、佛罗里达州和其他地方政府也都要求自动驾驶汽车必须在限定的区域内开展自动驾驶测试和试运营。目前已实现量产的L2等级自动驾驶车辆要求只能在高速公路、快速路或部分城市限定环境下，才能开启自动驾驶系统。

限制ODD的本质原因是自动驾驶存在感知长尾、混行交通博弈、极端场景等一系列问题难以克服，无法在所有场景下保证成功应对。在感知方面，基于数据驱动的深度学习技术已在自动驾驶感知领域得到了广泛的应用，在日常的驾驶环境中，已经能够实现单车的自动驾驶，但受车端传感器物理特性、车端算力等限制，车辆在恶劣天气、遗撒物体、鬼探头等长尾场景中的感知能力，仍然需要持续提升。在这些场景中，路端可以发挥其稳定性和全局性等优势，提供高性能交通信号数据、全量感知数据、为单车智能自动驾驶系统提供支持，减少因为感知不足带来的ODD限制。除感知外，单车智能自动驾驶车辆还需要面对混行交通博弈等挑战，从交通全局的角度看，依靠个体智能无法取得最优的效果，因此需要车与路的统一协调管理，才能更好地权衡自动驾驶车辆的安全与效率。

(3) 自动驾驶需要更有竞争力的成本

²⁰以北京交通发展研究院2018年发布的“北京市机动车保有量及使用特征分析”报告中的数据测算：2018年，北京市机动车保有量608.4万辆，小汽车平均出车率为67.6%，小汽车日均行驶里程为31.3公里，北京市2018年公布的交通事故为3242起，测算得到有人驾驶汽车的事故概率约为 0.69×10^{-7} 次/公里。

汽车本身就是一项要求严苛的工业产品,它在被交付到消费者手中之前,需要经过长期的测试与打磨,遍历各类极端环境的考验,无论是机械性能还是电子电气性能都需要做到极致,这样才能保证用户的行车安全。自动驾驶汽车更需要在安全性和稳定性上做到极致,甚至比普通汽车的要求还要严苛,不仅需要配备更多传感器、辅助定位设备、通信设备,还要求车身、传感器、计算平台及配套软硬件设备都需要经过车规级量产的考验,这必然会大幅增加车辆成本,难以实现量产应用。

自动驾驶要实现规模商业化落地,形成一个健康的商业闭环,就必须降低成本。如今,自动驾驶汽车上的硬件如激光雷达、芯片的价格正在不断降低,这是整个产业链共同努力的结果,特别是国产企业在这方面做出的积极贡献,例如2021年6月,百度与极狐合作打造的Apollo Moon,整车成本降到了48万元;2022年7月,百度推出第六代无人车Apollo RT6,在性能大幅提升的同时,整车成本价降低至25万元,标志着L4的大规模量产正在从理想成为现实。

为了进一步降低成本,还需要持续加强软硬件一体化自主研发,并在设计制造、生产管理和质量管控工艺上投入更多精力打磨优化,推动自动驾驶走向规模量产应用,因为量产规模越大,规模效应就越明显,成本就压得更低。

综上所述,在一定的自动驾驶能力条件下,安全、ODD和经济性这三个方面存在矛盾关系。例如,为提高自动驾驶安全性,必须通过限制ODD并针对性调优逼近系统上限,才能实现小规模商业化落地;或使用较昂贵的设备来提升单车智能自动驾驶的安全性,但这样会损失自动驾驶的经济性。自动驾驶要实现规模商业化落地,需要进一步探索找到安全性、ODD限制和经济性的平衡点,从本质上提升自动驾驶的能力水平。

02

车路协同自动驾驶是 自动驾驶的高阶发展形态和 必然趋势

车路协同的概念并不新鲜。早在20世纪60年代，美国汽车三巨头之一的通用汽车，便在新泽西州的普林斯顿市打造了一条电子化高速公路的测试跑道，车辆在这条测试跑道上可以实现自动启动、加速、转向与停止，全程没有人工参与，这被业内视为最早的“车路协同”方案。普林斯顿市政府随后还发表了一篇畅想自动驾驶的文章：未来某一天，电子化高速公路将允许人们周末出游时，坐在行驶的车中打桥牌或者睡上一觉。囿于当时的技术水平，以及高昂的成本，电子化高速公路并没有流行起来。

2.1 ACTION 1

车路协同自动驾驶概念与内涵

车路协同自动驾驶是在单车智能自动驾驶的基础上,借助C-V2X和4G/5G通信技术,将“人-车-路-云”交通要素有机地联系在一起,实现车与车(V2V)、车与道路(V2I,主要指道路各类系统和设备设施,如感知设施、气象检测器、状态监测设备、交通诱导与控制设施等)、车与云(V2N,地图平台、交管平台、出行服务平台等)和车与人(V2P)等的全方位协同配合(如协同感知、协同决策规划、协同控制等),从而满足不同等级自动驾驶车辆应用需求(如辅助驾驶、高等级自动驾驶),实现自动驾驶单车最优化和交通全局最优化发展目标。图2.1示意说明了自动驾驶车辆与不同交通要素间的协同关系。

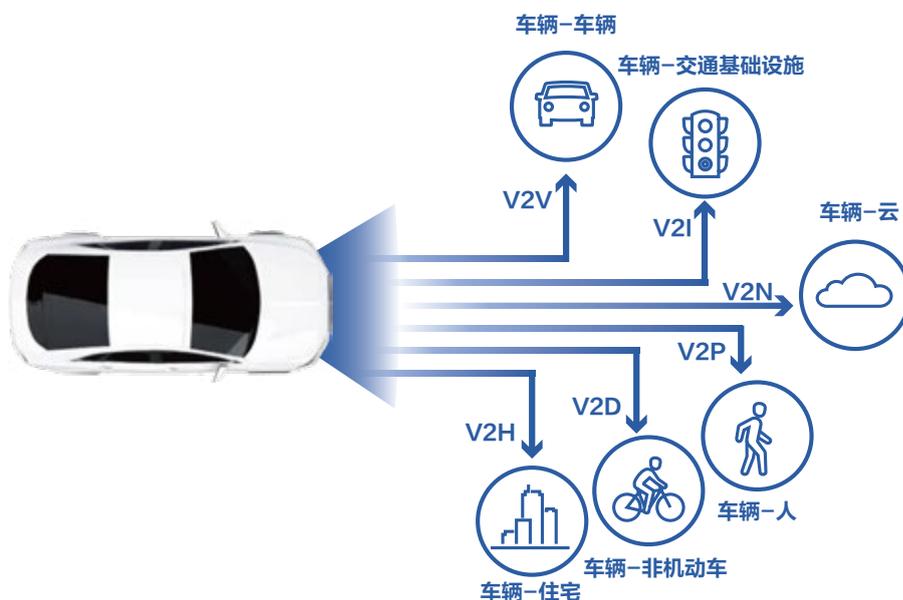


图 2.1 自动驾驶车辆与不同交通要素间的协同关系

VICAD发展除自动驾驶技术外,还需要综合运用多种基础支撑技术,具体包括:

- 1) 高可靠、低时延通信技术: 包括无线通信和有线传输,其中无线通信又可分为直连无线通信(如LTE-V2X PC5、NR-V2X PC5等)和蜂窝移动通信(包括4G、5G,以及未来演进的6G)两类,有线传输则包括CAN、车载以太网、光纤网络等;
- 2) 2D/3D高精度融合感知技术: 包括传感器离线/在线高精度标定技术、多传感器融合技术、交通事件感知认知技术、交通参与者行为预测技术、交通运行状况检测与预测技术等;

- 3) 高精度地图与高精度定位技术: 包括高精度地图动态更新技术、路侧辅助定位技术等;
- 4) 车路协同决策与协同控制技术: 包括自动驾驶意图预测、博弈仲裁、引导调度等协同决策规划, 车辆、设施、人等多目标协同控制技术;
- 5) 高性能云计算技术: 包括高性能边缘计算技术、多级云控平台技术、大数据和人工智能平台技术、算网一体智能调度技术;
- 6) 多级纵深安全技术: 如自动驾驶功能安全与预期功能安全, 信息安全技术(包括数据安全、网络安全技术、地理信息安全等), 安全统一认证技术、安全态势感知技术、安全主动防御技术等。

VICAD的本质是给每辆车开了一个“天眼”, 这个“天眼”就是“上帝视角”, 它不仅能帮助车辆在“完美”视角下保障安全, 还能高效分配道路时空资源, 让所有交通要素各行其道、各得其所。需要说明的是, VICAD实现的基础是通过集成先进的感知、计算、通信、决策控制等技术, 构建一套能够连通信息空间与物理空间, 基于数据的自由流动构建状态感知、实时交互、科学决策、精准执行的闭环赋能体系。VICAD中的“V”是Vehicle, 包括不同网联等级和自动化程度的车辆, “I”则是Infrastructure, 一般代指路端智能基础设施及环境, 包括但不限于:

- 1) 道路工程及配套附属设施(路面、道路标志标识、信号灯、照明、供电等设施);
- 2) 智能感知设施(摄像头、毫米波雷达、激光雷达等);
- 3) 车路通信设施(直连无线通信设施、蜂窝移动通信设施);
- 4) 计算控制设施(路侧边缘计算节点、多接入边缘云或各级云服务平台);
- 5) 高精度地图与辅助定位设施;
- 6) 其他配套附属设备设施(如供能、照明设施);
- 7) 道路上承载的各类人员(如行人、施工人员、非机动车驾驶员等)。

将支持VICAD应用所需的全部要素所组成新型复杂系统称为车路协同系统, 它除了具有数据驱动、软件定义、泛在连接、虚实映射、异构集成等一系列通用特征外, 还面向自动驾驶和智能交通应用, 具有以下核心特征和优势:

(1) 交通全要素的一体化

如图2.2所示, 车路协同系统中的交通参与者、交通运输工具、交通基础设施和交通环境不再只被看作一个简单的对象, 人、车、路和环境所对应的交通要素通过传感器的采集和融合处理, 成为具有自主身份且可具备信息交互功能的数字孪生体。物理实体和数字孪生体之间可以通过有效信息流和决策控制流完成信息传递和决策控制闭环, 例如车辆的远程操控、道路信号灯的优化控制、道

路可变标识控制等; 不同物理实体之间, 在车路协同这个复杂信息物理系统的全局调度下, 呈现出更加高效、更加秩序化的交通运行态势。

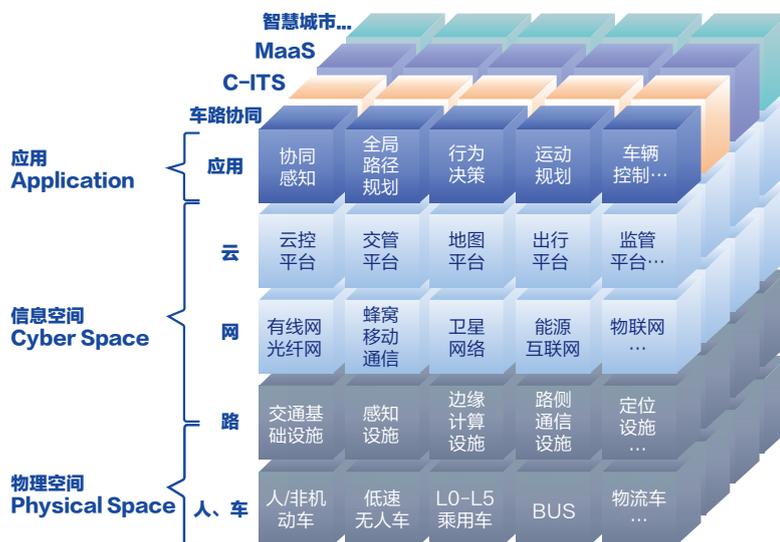


图 2.2 基于VICAD的交通全要素一体化系统模型

(2) 自动驾驶计算、感知、决策、控制的一体化

如图2.3所示, AD由车辆自身完成“感知-决策-规划-控制-执行”全过程, 而在VICAD模式下, 车辆、路端或云端都可能承担部分或全部“感知-决策-规划-控制-执行”功能, 基于车路云一体化计算和互联, 实现一体化感知、一体化决策规划和一体化控制, 其中一体化计算和互联是关键基础, 一体化感知与决策控制是核心应用。

在一体化计算方面, 智能汽车的算力从2019年开始快速提升, 目前TESLA Model3的算力达到144 TOPS, 蔚来发布的ET7算力甚至会超过1000 TOPS, 但仅仅依靠单车智能增加传感器提升感知能力、增加运算单元提升车端算力, 这样会导致自动驾驶汽车成本无限增加。基于低时延、高可靠网络的传输互联, 通过VICAD可以充分发挥路端和云端算力充裕、易部署调度等优势, 对车端感知能力和算力进行有效分担, 突破单车算力极限, 实现全系统算力的合理分布分配和优化均衡。

在一体化感知、决策规划和控制方面, 一体化感知可以通过车车协同感知、车路协同感知和车云协同感知的综合作用, 起到扩展自动驾驶车辆感知范围、提高车辆感知能力的作用。一体化决策规划和一体化控制一方面可以帮助车辆克服全局优化类场景和极端场景, 进一步提升自动驾驶的安全性、扩展自动驾驶ODD, 提高车辆的自动驾驶能力; 另一方面还能通过对交通环境的控制, 为车辆创造安全秩序化的驾驶环境, 提高交通整体运行安全性和效率。

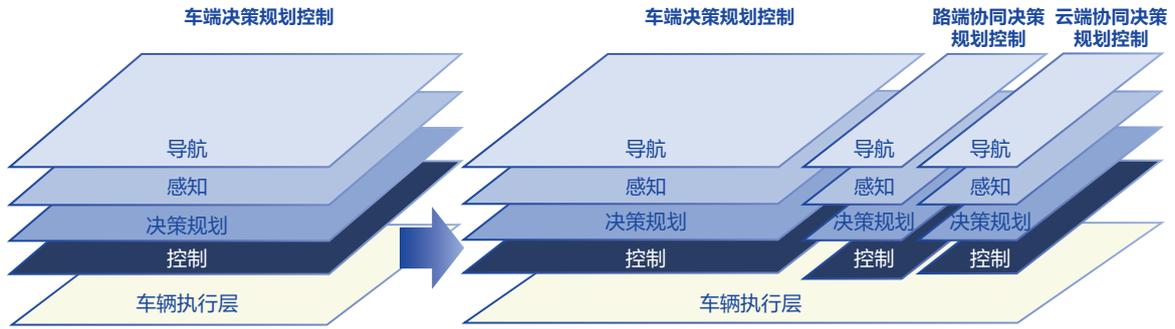


图 2.3 VICAD感知、决策、控制的一体化

(3) 数据驱动的自动驾驶、智能交通跨行业应用一体化

车路协同系统的核心目标是利用一套车路云基础设施与基础能力体系，通过数据驱动同时赋能自动驾驶、智能交通，甚至共享出行、智慧城市等更多行业，支持不断迭代和创新发展。传统交通系统和车辆中大量的数据都是隐性存在的，没有被充分利用和挖掘出其背后潜在的价值。如图2.4所示，车路协同系统通过构建数据层面“状态感知、实时分析、科学决策、精准执行”自由流动的闭环赋能体系，能够将数据源源不断地从物理空间中的隐性形态转化为信息空间的显性形态，并不断迭代优化。数据是车路协同系统的基础和灵魂，贯穿了状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的全流程，数据在自动生成、自动传输、自动分析、自动执行以及不断迭代优化过程中不断积累、螺旋上升，不断产生更为优化的数据，能够通过聚变引起质变。

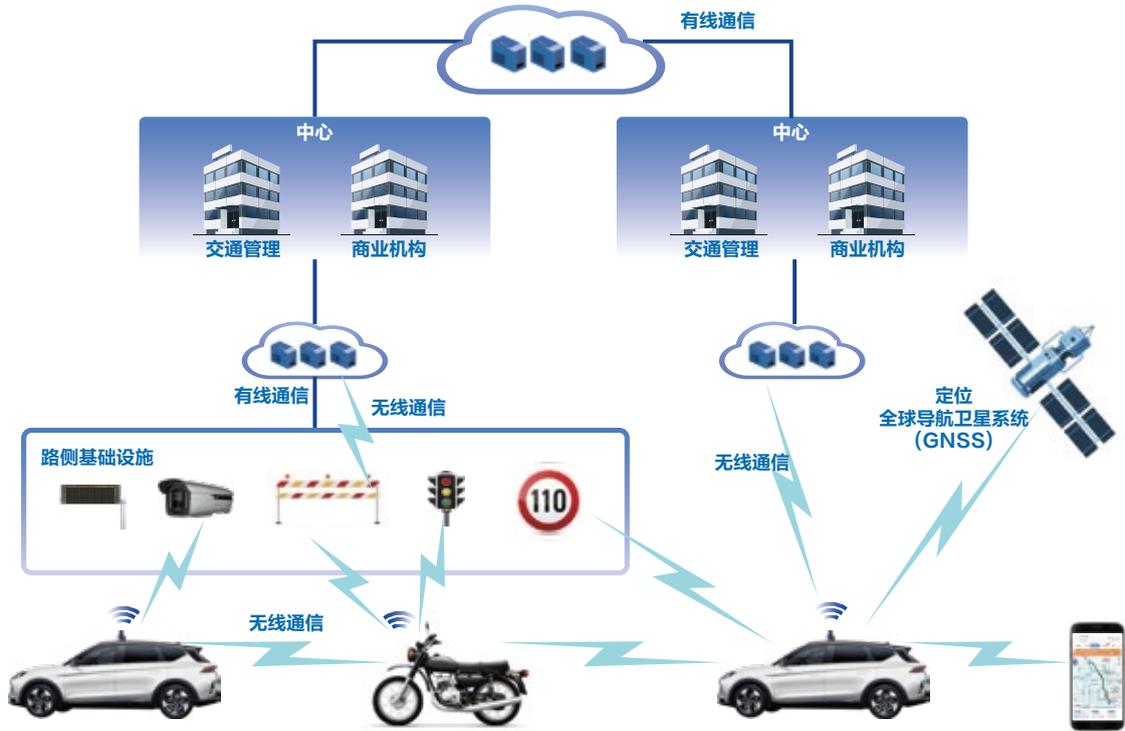


图 2.4 C-ITS与VICAD融合应用

2.2 ACTION 2

车路协同自动驾驶发展阶段

VICAD是一个由低至高、逐渐演进的发展过程。参考国内外对VICAD阶段划分情况，如SAE J3016²¹、SAE J3216²²，以及国内相关机构发布的报告和标准²³，本白皮书将VICAD划分为以下三个大的发展阶段（如表2.1所示），其中：

- 1) 阶段1信息交互协同是重要基础，为各类车路协同应用提供互联互通保障支持；
- 2) 阶段2协同感知是关键核心，实现自动驾驶感知互补、强化与冗余；
- 3) 阶段3协同决策控制是最终目标，实现自动驾驶微观决策控制与智能交通宏观决策控制兼容统一。

表2.1 VICAD发展阶段划分

阶段	子阶段	适用标准	典型应用场景举例
阶段1：信息交互协同	无	T/CSAE 53-2020	碰撞预警、道路危险提示等
阶段2：协同感知	阶段2.1：初级协同感知	T/CSAE 157-2020	2.2阶段所需的感知能力远高于2.1阶段，达到全量高精度级别，满足高等级自动驾驶应用需求，相关性能指标见5.1.2节。
	阶段2.2：高级级协同感知	YD/T 3978-2021 ²⁴	
阶段3：协同决策控制	阶段3.1：有条件协同决策控制	YD/T 3978-2021 T/CSAE 157-2020 T/CSAE 156-2020	协作式换道、无信号灯协同通行、紧急车辆优先、AVP等
	阶段3.2：完全协同决策控制	暂无	远程遥控驾驶、信号灯优化控制等

注：YD/T 3978-2021《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》（或T/CSAE 158-2020《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》）
T/CSAE 53-2020《合作式智能运输系统 车用通信系统应用层及应用数据交互互准》
T/CSAE 157-2020《合作式智能运输系统 车用通信系统应用层及应用数据交互标准（第二阶段）》
T/CSAE 156-2020《自主代客泊车系统总体技术要求》

其中，在VICAD第1发展阶段，以LTE-V2X为核心的直连无线通信可以支持车与车、车与道路之间进行直接通信，实现较为基础的消息提醒和安全预警类应用；而VICAD的第2发展阶段，则是在C-V2X车路云高效通信的基础上，以人工智能（Artificial Intelligence, AI）和边缘计算应用为核心的路端感知技术，可以发挥路端视角好、观测时间长、易部署等优势，解决AV遮挡、盲区、不利照明、极端天气相关感知长尾问题，扩展AV的感知范围，提升AV的感知能力，进而保障车辆安全高效行驶；到了VICAD的第3个发展阶段，在车路协同感知的基础上，依托泛在互联的基础设施，还可以进一步发挥路端和云端全局性优势，支持实现协同决策规划和协同控制等应用，全方位保障自动驾驶安全连续运行。

²¹SAE J3016-2021 Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles

²²SAE J3216-2021 Cooperative Driving Automation: Definitions and Taxonomy

²³中国公路学会自动驾驶委员会2019年6月发布的《车路协同自动驾驶发展报告1.0版》将车路协同自动驾驶分为4个阶段：阶段1：信息交互协同；阶段2：感知预测决策协同；阶段3：控制协同；阶段4V：车路一体化。本白皮书结合当前技术发展水平对阶段划分进行了适应性修改。

²⁴与YD/T 3978-2021《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》为通信行业标准，T/CSAE 158-2020《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》为中国汽车工程学会发布的团体标准，行业标准由团体标准演进升级制定。

2.3 ACTION 3

车路协同自动驾驶发展现状与趋势

2.3.1 车路协同感知已进入规模化建设部署应用阶段

目前,国内外VICAD第1发展阶段已经开展了大规模测试验证与示范应用,第2发展阶段车路协同感知也已完成了理论研究、技术验证和标准制定,正在加速走向规模化建设部署与应用,主要体现在以下三个方面:

(1) 协同感知类场景是国内外V2X研究的重点内容

美国、欧洲和我国车路协同相关标准中都重点针对车路协同感知规划了大量的应用场景。美国在DSRC通信技术的基础上,发布了SAE 2735、SAE 2945、SAE 3016、SAE 3216及相关标准,是全球范围内最早的车路协同标准,规划了一系列协同感知类场景,比如弱势交通参与者预警、信号灯信息共享、紧急车辆警告等;欧洲ETSI也在DSRC的基础上制定了欧洲的ETSI G5标准,场景方面与美国标准基本类似;中国车路协同系列标准具有领先优势,DAY I、DAY II、增强型、高等级车路协同应用场景行业标准和国家标准已经完成制定并发布²⁵,V2X应用层标准的场景设计比美欧更加全面,服务对象兼顾了L0-L5的普通网联汽车和高等级自动驾驶汽车,应用场景不仅涉及协同感知类应用场景,甚至还包括协同决策规划和协同控制类应用场景。

(2) 车路协同感知技术和能力得到了极大提升

随着行业对车路协同自动驾驶研究的逐渐深入,相关技术也逐渐走向成熟,路端设施和系统的感知能力已经具备了为不同等级网联自动驾驶车辆(Connected Automated Vehicle, CAV)提供规模化应用服务的条件。比如对于L2等级的CAV,国内外多家汽车厂商如福特、丰田、大众等公司都已经规划或完成了量产商用车型的上市,路端系统可以为这些车辆提供基础的交通事件、信号灯等协同感知服务,还能基于C-V2X服务数据进一步实现优先通行、绿波通行等复杂度较高的应用;另外,在高等级自动驾驶方面,路端系统的感知精度、时延和可靠性已经能够满足L4车端融合感知要求,可以实现在关闭车端感知的情况下,仅依靠路端感知能力就能够实现L4等级自动驾驶闭环运行,这些感知能力已在北京经开区、广州黄埔区等区域进行规模化建设部署,可为自动驾驶车辆提供全量、高精度协同感知服务。

(3) 车路协同感知已在重点城市实现行政区级别建设部署应用

车路协同感知是当前阶段车路协同发展的重要方向。以美国为例,美国已在全国35万个交叉口,部署约5315套DSRC RSU和大约18000套车载终端OBU,比如在美国I-80公路示范项目中,施工区预警、恶劣天气预警、盲区预警等应用都是基于感知能力来实现的,再比如美国纽约市和坦帕市示范项目中的信号灯预警、人行横道行人预警都属于协同感知场景。我国各级车联网先导区、示

²⁵ DAY I标准包括YD/T 3709、T/CSAE 53, DAY II标准包括T/CSAE 157, 增强V2X应用标准是YD/T 3977,高等级自动驾驶V2X应用标准是YD/T 3978。

范区建设示范项目中,协同感知都是最重要的应用方向,以北京市高级别自动驾驶示范区为例,目前已完成了1.0和2.0阶段的建设任务,示范区内支持全量高精度车路协同感知应用的路口数量达到329个,城市道路双向里程超过750公里,覆盖面积达到60平方公里,占比超过了亦庄城市核心区域的70%,能够与示范区内数百台L4自动驾驶出租车进行数据闭环交互;2022年,北京将启动示范区3.0阶段的建设²⁶,持续推动车路协同自动驾驶更大规模建设和更多商业化场景落地。

2.3.2 车路协同决策控制存在现实需求

(1) 在协同感知基础上进一步解决自动驾驶安全性与ODD问题

根据自动驾驶预期功能安全(Safety Of The Intended Functionality, SOTIF)理论,提升自动驾驶安全性有两种方式,一种是将SOTIF“未知”场景转化为“已知”场景,另一种是将“不安全”场景转化为“安全”场景。车路协同感知通过多源感知渠道为CAV提供更加丰富、精确的感知信息,提升车辆的感知能力,可以实现将SOTIF“未知”场景转化为“已知”场景,但是在将“不安全”场景转化为“安全”场景方面,却存在一定的局限性,需要通过决策规划和控制进一步解决。在ODD方面,协同感知只能解决自动驾驶车辆部分ODD限制,需要从全局高度进行车路云协同感知和决策控制,进行ODD动态管理,合理扩展自动驾驶ODD。

(2) 解决混行状态下自动驾驶与非自动驾驶的冲突博弈问题

自动驾驶车辆是交通系统的组成部分之一,现阶段道路上还有大量的非自动驾驶、较低等级自动驾驶车辆、非机动车辆和行人,以及大量的违法违章驾驶行为,因此迫切需要解决混行交通模式下局部或全局的车辆最优化问题,在保障交通安全和交通效率的前提下,实现分布式智能和群体智能,最终达成全局最优化智能交通发展目标。

(3) 解决自动驾驶“无人化”问题

自动驾驶车辆在有驾驶员或安全员作为安全保障措施时,遇到复杂或极端场景情况时,可通过人工接管控制车辆通过极端场景,但当L4车辆完全去掉车端主驾或副驾安全员时,仅靠单车能力还有一定概率无法顺利通过复杂极端场景,需要借助路端和云端能力,为车辆提供全方位协同感知、决策规划和控制服务,帮助车辆安全通过复杂极端场景,全方位保障无人驾驶的安全性和普及应用。

(4) 解决交通环境秩序化和最优化问题

不仅自动驾驶对车路协同存在需求,在智能交通、共享出行和智慧城市等领域,车路协同发展也成为充分共识。我国交通系统经历了近30年的快速增长时期,道路里程和运输规模全球第一,但仍然还面临着许多突出问题,比如交通拥堵呈现常态化、交通安全形势依然严峻、碳中和与碳达峰目标任务艰巨。通过车路协同,能够支持开展更加复杂、更深层次、更大范围、更加多样的车路协同应用服务,满足跨行业、跨领域、跨地域交通出行需求,解决区域级移动多接入、多层次互操作和协同、大规模高密度实施控制、高可靠低时延计算决策等协同控制等一系列关键问题,实现从个体最优向群体智能最优化和全局智能最优化发展,这是对智能交通本质性的变革和突破。

²⁶北京市政府2022年政府工作报告。

03

车路协同自动驾驶 实现L4无人化安全运营

尽管L4自动驾驶通过测试里程积累和持续技术迭代，自动驾驶的安全性越来越高，ODD限制也越来越少，但L4自动驾驶的发展目标是在保证安全的基础上，实现完全无人化自动驾驶，并达到大规模运营级别，这就对自动驾驶的安全性、可用性和可靠性提出了更高要求。VICAD可以全流程参与L4自动驾驶感知、决策规划和控制等过程，在ODD范围内保证自动驾驶安全，远高于人类驾驶水平；动态管理和扩展自动驾驶ODD，优化自动驾驶运行环境，实现无接管连续运行。

3.1 ACTION 1

面向L4的车路协同自动驾驶服务策略

结合L4自动驾驶系统总体架构,同时考虑到L4自动驾驶车辆的受控度,VICAD可以深度参与L4自动驾驶从感知到决策规划和控制的全部过程,为L4提供全方位支撑服务(如图3.1),具体包括以下四个方面:

1) **通过车路协同感知解决自动驾驶感知长尾问题:**发挥路端和云端感知优势,与CAV进行协同感知,解决超视距、盲区、遮挡等一系列感知长尾问题;

2) **通过车路协同感知和地图动态更新解决自动驾驶地图实时性问题:**在车路协同感知的基础上,还可以通过分钟级自动驾驶地图更新,帮助CAV应对交通标志标线、信号灯等一系列自动驾驶地图要素变更带来的问题;

3) **通过车路协同决策规划解决全局路径优化、混行冲突及阻塞问题:**通过车路协同路径规划(Routing),为CAV提供全局路径规划服务;通过车路协同行为决策(Decision)与运动规划(Planning),解决自动驾驶博弈、阻塞等典型混行场景问题;

4) **通过车路协同控制解决复杂特殊场景问题:**针对自动驾驶复杂特殊场景,例如“脱困”、泊车等,可以通过VICAD直接控制CAV,帮助CAV成功应对这些场景,降低安全风险;针对复杂无序交通环境,还可以通过车路协同控制对交通基础设施、交通运行状况等进行有效干预和控制,优化自动驾驶整体交通环境,间接控制CAV,为CAV营造安全、简单、秩序化的交通环境。



图 3.1 VICAD加速L4实现无人化自动驾驶落地路径

需要说明的是, VICAD并不是要完全取代车端的自动驾驶系统, 而是同时运行在路端和云端的自动驾驶系统, 发挥路端和云端的优势, 为L4 CAV提供互补、冗余和强化三个层次的支撑和促进作用:

(1) 互补:

以感知为例, AD存在感知范围有限、易被遮挡、受环境和光线影响较大、难以预测等不足, 而路端和云端感知可以充分发挥感知范围广、长时间连续观测、容易工程化等优势, 与车端感知进行感知互补, 实现遮挡、超视距、动静态盲区等协同感知, 从而提升车辆的感知能力。以定位为例, AV已经采用了多种方式进行高精度定位, 但是在长隧道、地下、桥梁、高大建筑物遮挡等环境行驶时, 经常出现定位信号缺失或定位不准的问题, 路端通过感知定位、特征定位、UWB定位、C-V2X定位等多种定位方式, 可以为车辆提供定位互补, 辅助车辆实现高精度定位。再以路云协同决策规划和控制为例, 单车智能自动驾驶车辆遇到复杂交通环境和驾驶场景时, 容易出现急刹或被迫接管行为, 通过路端或云端的协同决策和控制, 可以为车辆重新规划路径, 帮助车辆安全通过复杂场景。互补的关系示意图3.2。

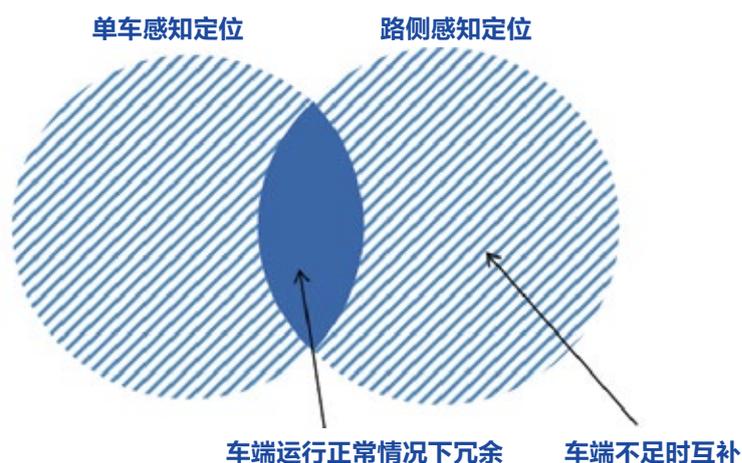


图 3.2 感知定位互补和冗余作用示意图

(2) 冗余:

仍以感知和定位为例, 车辆在开阔环境下行驶时, 车端感知和定位功能正常运行, 路端系统对车辆周围环境同时进行检测识别与定位, 或者通过转发RTK定位信息, 辅助车端进行融合定位, 此时路端起到了冗余的作用。冗余的关系示意图3.2。

(3) 强化:

如图3.3和3.4所示, 以交通信号灯识别为例, AD模式时, 需要通过车端光学传感器在3D空间中识别定位到较远处的交通信号灯灯色, 并且预测相位灯态变化, 会面临一系列难题, 比如炫光、尾

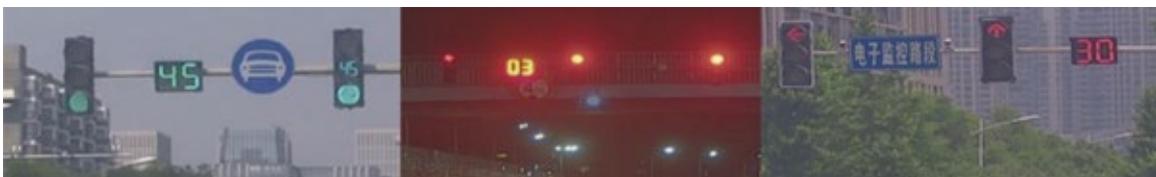
灯霓虹灯干扰、LED频闪、灯亮度达标延迟、损坏和老化、移动式红绿灯的位移、欧美悬挂式灯的晃动、多相位匹配、超视距、盲区、动静态遮挡、异常天气等场景中的感知难题；而在VICAD模式下，可以通过路端系统或设施与低复杂度信号控制机对接信息，不仅可以实时通过低码率编码获得准确可靠的信号灯态语义信息，还可以超视距获得灯态信息以及倒计时等信息，此时路端和云端起到了强化和提升的作用。



多语义信号灯和异彩信号灯



移动式信号灯



倒计时信号灯

图 3.3 道路中不同的信号灯形态

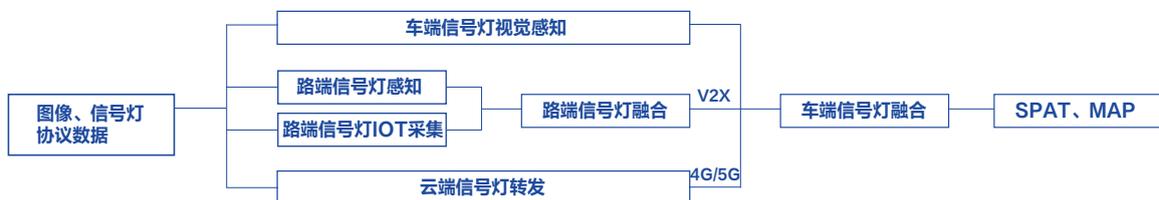


图 3.4 VICAD信号灯强化感知作用示意图

3.2 ACTION 2

让自动驾驶更安全，远高于人类驾驶水平

安全是自动驾驶发展的基础，也是现阶段自动驾驶首先需要重点解决的问题。根据自动驾驶SOTIF理论，如图3.5所示，自动驾驶运行场景总体上可以分为4类，其中区域1为已知安全类场景、区域2为已知不安全场景、区域3为未知不安全场景、区域4为未知安全场景。VICAD对自动驾驶安全的核心目标是将自动驾驶“未知”场景转化为“已知”场景，将“不安全”场景转化为“安全”场景。即重点解决区域2和区域3中的场景问题，将区域2转化为区域1，并证明区域2的残余风险足够低；针对未知不安全区域3，VICAD将区域3转化为区域1、2或4，尽量减少区域3中的场景，保证区域3的风险控制在合理可接受的水平。

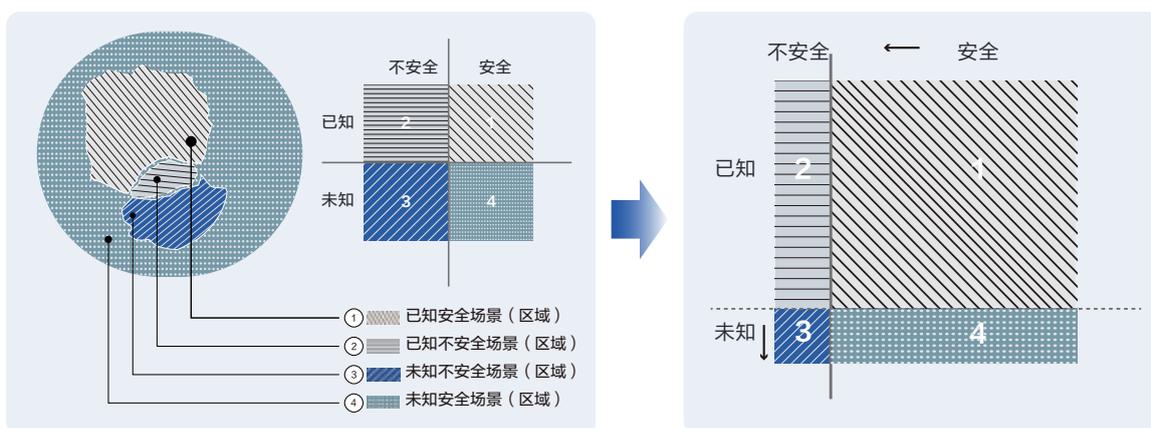


图 3.5 自动驾驶SOTIF安全目标

3.2.1 将“未知”场景转化为“已知”场景

SOTIF“未知”场景的探索是一个行业难题，“你永远不知道不知道什么”。VICAD可以充分发挥车端、路端和云端协同感知优势，通过持续数据驱动和算法学习提升系统的认知能力，发现未知场景，并通过车路协同感知、高精度地图实时更新等方式，将“未知”场景转化为“已知”场景，降低自动驾驶安全风险。

3.2.1.1 车路协同感知定位实现“未知”到“已知”

（一）总体技术原理

车路协同系统的车端、路端和云端同时具备感知能力，都可以作为主车的感知信息源，如图3.6所示，主车周围车辆可通过V2V方式进行感知共享，路端感知系统和设施可通过V2I进行感知共享，

云端平台也可以发挥数据优势, 通过V2N方式进行数据共享, 所有感知数据汇聚在车端进行融合处理, 得到最终感知结果信息。

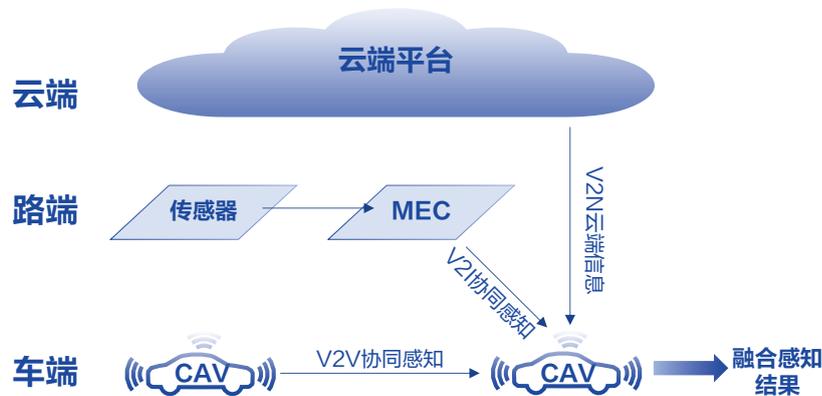


图 3.6 协同感知示意图

车路协同感知的优势主要体现在:

- 1) 路端传感器可选择性多, 可实现多方位、长距离连续部署;
- 2) 路端和云端可通过移动蜂窝接入、有线接入等差异化方式获取数据, 突破视觉感知认知瓶颈问题(比如信号灯数据采集), 可以有效降低算力投入;
- 3) 路端和云端可通过长时间连续检测, 提高对复杂环境、交通事件、交通态势的语义判断和理解认知, 实现对各类交通事件(“死车”、排队、施工、遗撒等)实时准确感知识别。

路端多传感器进行融合感知的策略可以是前融合, 也可以是后融合, 一种路端后融合感知的框架和流程见图3.7, 包括以下主要步骤:

- 1) **数据容器:** 数据容器提供了自适应参数、多种消息回调及支持热插拔的接口, 通过内置的参数和地图将所有传感器消息、车端/路端/云端消息转化成统一的消息格式, 并向下游输出;
- 2) **数据关联:** 对数据容器中的信息进行采样处理时, 会对所有信息按照触发时间进行排序匹配, 将混乱的位置变成时序状态估计。在每一次匹配前, 都会根据数据的属性及其误差计算协方差, 作为匹配边距离。经过若干次匹配后, 将结果分组打包传递给状态估计模块;
- 3) **状态估计:** 状态估计模块会对每组信息进行时序相关的处理, 再分别送给针对静止和运动物体建立的不同滤波器;
- 4) **状态预测:** 滤波器的预测状态经过地图和模型的处理后, 生成短时间的预测消息输出, 同时回

03 车路协同自动驾驶实现L4无人化安全运营

送到数据关联模块，与下一次的传感器结果进行关联，形成时序的跟踪；

5) **结果输出:** 向外输出最终融合感知结果信息，包括位置、速度、加速度、航向角、置信度等参数。

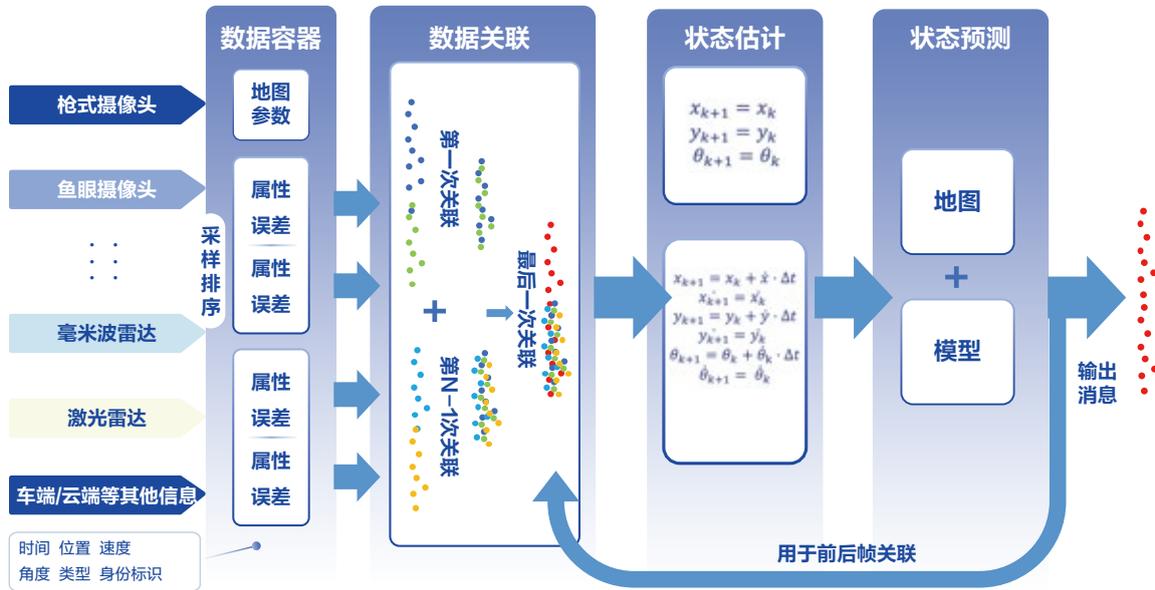


图 3.7 路端多传感器后融合感知定位框架

车路协同感知适用的场景见表3.1。

表 3.1 车路协同感知类应用场景举例

场景分类	具体场景示例
全量交通参与者协同感知与定位	动静盲区/遮挡协同感知定位
	车辆超视距协同感知定位
	路边低速车辆协同感知定位
	低矮障碍物协同感知定位
	室内、隧道、山区等无GNSS环境协同感知定位
交通信号灯协同感知	交通信号灯协同感知
交通事件协同感知	如超速、逆行、拥堵、违章停车、排队事件、道路遗撒等
交通环境感知	道路交通气象、路面条件、交通基础设施状态及变更信息

(二) 协同感知典型场景举例1: 行人闯入协同感知

下面选取城市环境中较为常见的行人闯入场景对车路协同感知进行展开说明, 更多应用场景可参见6.2.2节。

问题描述:

实际交通环境中, 行人横穿马路、闯红灯等现象经常发生, 自动驾驶车辆一般对低速行人的轨迹预测较为困难, 或者由于行人突然闯入导致较难快速应对, 容易造成自动驾驶车辆急刹或者碰撞风险。

场景原理:

(1) 路端可以通过多视角连续观测, 对行人、非机动车等目标进行实时识别定位和轨迹预测, 生成行人、非机动车的状态意图标签, 如路边等车、路边施工、路边行走、人行横道过街、横穿马路等;

(2) 路端将识别到的路口全量交通目标通过V2X实时发送给车辆, 空口发送的V2X报文数据可以是SSM (Sensor Sharing Message) 数据集²⁷, 车辆及时获取全量交通目标的状态意图, 进行合理的通行决策控制, 例如:

- 1) 人行横道过街: 主车停车礼让, 见图3.8;
- 2) 行人横穿马路: 主车停车礼让, 见图3.9;
- 3) 路边施工人员: 主车减速绕行通过, 见图3.10;
- 4) 路边等车人员: 主车保持车速通过;
- 5) 路边行走人员: 主车保持车速通过。

应用效果:

车端收到路端发送的感知信息, 与车端感知进行感知融合, 并由车端进行综合决策, 最终安全通过这类场景, 避免急刹或事故风险, 带来更好的驾乘体验。



图 3.8 人行横道过街安全礼让

²⁷SSM数据集的数据帧、数据元素、数据发送要求参见标准YD/T 3978-2021《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》



图 3.9 行人横穿马路安全礼让



图 3.10 工人路边施工减速绕行

(三) 协同感知典型场景举例2: 无/弱GNSS环境下协同感知定位

问题描述:

自动驾驶车辆在开阔环境行驶时, 可以通过GNSS+RTK提供绝对定位信息, IMU+轮速+方向盘转角提供相对定位信息, 并在此基础上结合高精度地图和观测类传感器匹配定位结果进行多传感器融合定位; 但当自动驾驶车辆行驶在桥隧、地下、山区等无/弱GNSS信号环境时, 没有有效的绝对定位信息输入, 导致无法实现高精度定位。

场景原理:

通过车路协同可以有多种方式解决自动驾驶在上述环境行驶所面临的定位问题:

(1) 路端多传感器融合感知定位: 技术实现原理同图3.7, 路端融合感知定位信息与车辆动静态特征信息进行匹配, 可得到车辆实时高精度位置信息, 该方案在隧道的实际部署应用效果如图3.11所示;

(2) 基于超宽带UWB或LTE PC5的辅助定位技术方案: 如图3.12所示, 在路端部署无线定位基站/Anchor和GNSS信号放大器, 通过预先的位置标定, 确定每个近场无线定位基站/Anchor的绝对位置, GNSS信号放大器用于无/弱GNSS信号环境下车、路的主时钟授时; 车端加装无线定

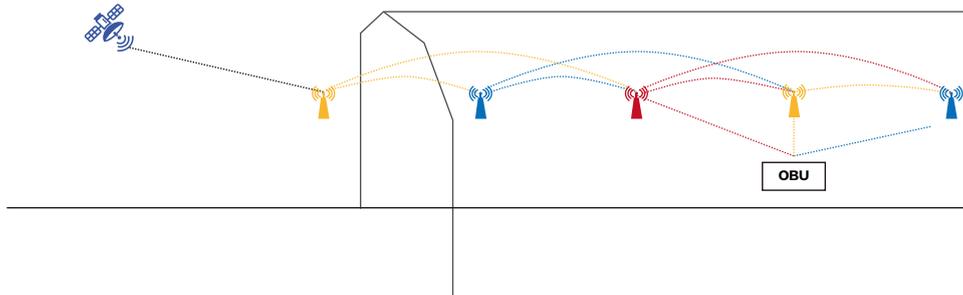
位接收机/Tag, 接收带有绝对时间信息的近场无线定位信号, 并进行定位信息解算, 得到较高精度定位信息;

(3) 基于路端特征定位标志物与高精度地图融合的定位技术方案等。



注: 本方案已在长沙智慧高速等实际项目中部署应用

图 3.11 隧道内车路协同感知定位方案



注: 本方案由中信科智联科技有限公司提供

图 3.12 隧道内基于LTE PC5车路协同定位方案

应用效果:

通过综合运用车路协同感知定位、超宽带UWB、LTE PC5、特征定位等多种方式, 解决自动驾驶在长隧道等无/弱GNSS信号环境下的高精度定位问题, 实现从“未知”到“已知”。

3.2.1.2 自动驾驶地图实时更新实现“未知”到“已知”

自动驾驶地图(业界也有称为“高精地图”或“高清地图”)是自动驾驶的关键支撑要素之一, 现阶段自动驾驶地图比较常用的制图以及更新的方式有两种, 一种是利用专业测绘设备进行集中数据采集后制图及更新, 一种是利用车载传感器进行众包数据采集后制图及更新。当前业界在初始建图方面, 能够在完整性和精度上, 基本满足高等级自动驾驶的需求, 但在地图的鲜度维护方面, 存在难以解决的问题。

(1) 通过专业的高精度测绘设备更新: 是指采用专业采集设备, 定期对存量地图覆盖范围进行采集、制作。这种方式一般有人工制图的参与, 所以可以对全要素的地图进行更新, 是目前主要的地图更新方式。但这种方式需要专业的采集设备, 成本高、数量少, 对于大范围地图的采集和制作更新成本高、周期长, 难以满足自动驾驶对地图实时更新需求。

(2) 众包地图更新: 是指依赖量产车车端搭载的智能摄像头或高级辅助驾驶系统的实时感知和定位能力, 对交通环境进行不定期的重复扫描, 云端通过收集的采集数据在线成图, 并与底图进行差分, 从而实现更新。凭借公开道路上的海量车载终端进行众包更新, 为高精度地图实时更新提供了可能性, 但是众包更新难以完全支撑高精度地图的实时更新, 主要原因是:

- 存在“车辆首次通过的天花板”, 即现实道路变化后车辆首次经过时的地图失效问题。
- 量产车车端算力、定位精度有限, 需要采用在一段时间内的多次采集信息进行聚合生成高置信度结果后进行地图更新。
- 车端传感器数据上传至云端进行建图工作, 过程中需要占用较大的通信资源, 数据流量费用较高, 另外传感器原始数据的公共网络传输会对国家地理信息安全造成重大隐患。

高等级自动驾驶对自动驾驶地图实时更新存在迫切需求, 因为车辆在行驶过程中周围环境是动态变化的, 比如道路结构(封路、新建道路)、道路附属设施(比如道路标志标线、标志牌、交通信号灯等)或交通运行状况(交通管制、道路施工等), 会造成车端地图与现实交通环境存在不一致, 影响自动驾驶的正常运行。

不管是通过专业高精度测绘设备还是车端众包获取地图更新数据, 目前都无法完全解决自动驾驶地图实时更新问题, 存在较高概率的“未知场景”问题。

(一) 总体技术方案

为解决上述问题, 本文在行业常用的地图更新方式之外, 提出基于车路协同的自动驾驶地图实时更新方式——路端局部动态地图更新。路端局部动态地图更新的原理如图3.13所示, 通过路端智能设施进行高频率的定点观测, 实时发现动静态地图要素的变更情况, 并更新覆盖范围内的地图, 发送给车端和图商, 与当前使用的地图版本进行要素级的融合更新。

相较于专业测绘地图更和车端众包地图更新方式, 路端局部动态地图更新有如下优势(具体比较见表3.2):

- 定点观测数据精度高、可靠性强: 路端传感器在安装部署时, 可通过精确的内外参标定, 以及多传感器融合感知定位, 实现厘米级位置精度检测。同时对于需要周期性观测获取的经验类型的地图数据, 路侧作为定点连续观测单元, 更具有优势(如图3.14)。
- 实时性强: 利用路端毫秒级感知, 以及分钟级地图制作, 为地图分钟级更新提供了保障支持, 与传统更新相比, 具有明显优势。
- 可识别的地图动静态要素信息丰富: 路端不仅可以识别重要的静态和半静态地图要素信息, 还可以识别半动态、动态的地图要素信息。

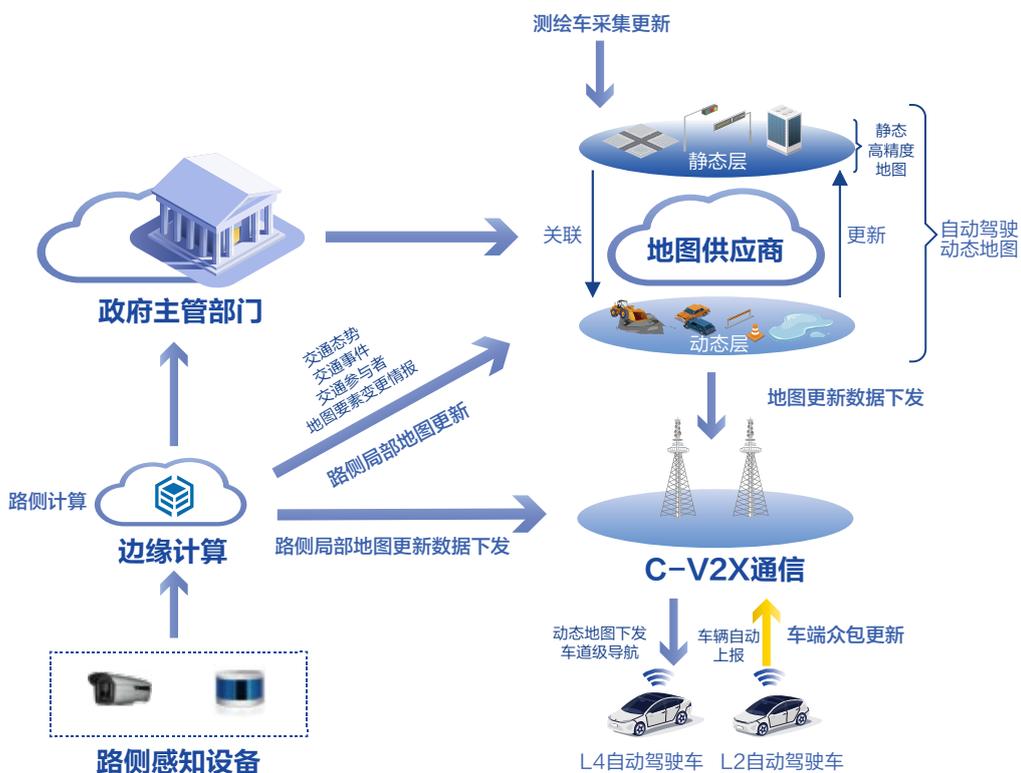


图 3.13 路端局部动态地图更新总体原理

表 3.2 三种地图更新方式比较

地图更新方式	相对精度	实时性	观测连续性	覆盖范围	成本估算 (万元/公里)
测绘车地图更新	0.1m	-	单点观测	区域全覆盖	千元级别
车端众包地图更新	0.4m	天级别	断点重复观测	区域大部分覆盖	无需新增设备投入
路端局部地图更新	0.2m	分钟级别	定点连续观测	区域路口覆盖	无需新增设备投入



图 3.14 三种观测连续性比较示意图

通过路端局部动态地图更新实现自动驾驶地图动态更新的过程包括两个主要步骤：

(1) 自动驾驶地图动态更新

如图3.15所示，自动驾驶地图总体上分为静态图层和动态图层两类，其中静态图层可以粗略分为静态图层和半静态图层，动态图层可以粗略分为半动态图层、动态图层（也可根据具体需求划分成更多图层）。如表3.3所示从下到上图层不仅对数据实时性的要求是不同的，对数据的连续观测周期要求也不同，对于需要连续观测周期和高频周期获取的信息（例如路口合理的左转引导线，未知原因的道路阻塞点，未知原因的低速行驶区间），基于路端感知的地图更新方式才更有优势。

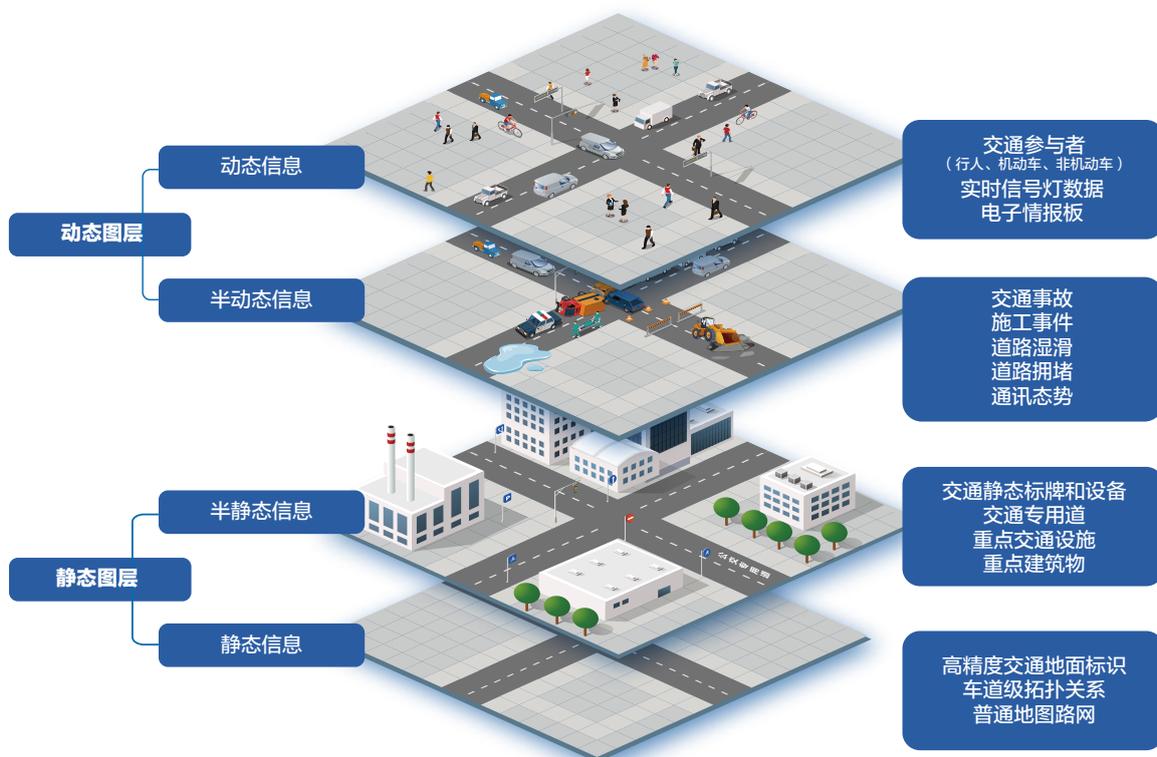


图 3.15 动态自动驾驶地图图层划分

表 3.3 动态自动驾驶地图不同图层特点以及对周期性观测的需求

图层	图层分类标准	获取方式	对周期性观测的需求
静态层-静态信息	固定不动的道路交通设备设施 地图要素	一次采集后静态提取	无
静态层-半静态信息	位置不动但是属性会发生变化 且变化的地图要素	多次采集后静态提取	周期长，频率低
动态层-半动态信息 (事件、经验)	信息有明确效期，一次性或者 周期性有效的经验地图要素	多次反复采集，反复提取	连续周期，高频率
动态层-动态信息	瞬时发生或者有效时间很短的 地图要素	实时采集快速提取	短周期，高频率

大量的实测统计结果显示, L4自动驾驶因自动驾驶地图更新不及时而导致的常见“未知”场景问题见表3.4, 有超过八成的问题场景发生在路口, 主要包括以下两大类变更:

表 3.4 自动驾驶地图更新不及时导致的部分“未知”场景问题

地图要素	变更方式	导致自动驾驶问题	可能导致后果
机动车道 信号灯 变更	信号灯错位	无法正确识别信号灯灯态, 某些灯头位置无法识别	阻塞(绿灯停车) 违反交规(闯红灯)
	信号灯删除	无法正确识别信号灯	阻塞(绿灯停车) 违反交规(闯红灯)
	信号灯新增	无法正确识别信号灯	违反交规(闯红灯)
	信号灯故障恢复	识别信号灯后不参与决策	阻塞(绿灯停车) 违反交规(闯红灯)
	信号灯故障	无法获取正确的信号灯灯态	阻塞(路口停车)
	信号灯控制方向变更	信号灯灯态误识别	违反交规(闯红灯)
车道线 标识 变更	车道数变化	无法正确识别车道线	碰撞风险 违反交规(骑车道线行驶)
	车道重绘	无法正确识别车道线	碰撞风险 违反交规(跨多个车道线行驶)
	可通行流向变化	车道流向识别错误	碰撞风险(临时变道) 违反交规(不按导向行驶)
	停止线后移	停止线识别错误	违反交规(压线停车)
	待转区变更	待转区识别错误	违反交规(闯红灯)
	护栏新增	无可行驶区域	碰撞风险
路口内虚 拟连接车 道变更	入口道与出口道 连接关系变更	感知车辆轨迹预测错误, 未及时识别碰撞风险	碰撞风险
		车辆路口内并线	碰撞风险
	掉头虚拟连接线不合理	掉头转弯位置错误, 无法完成转弯	碰撞风险
	左转虚拟车道绘制不合理	与路口内交通附属障碍物距离过近	碰撞风险
道路阻塞 点变更	路段绕行点新增	对于未知类型障碍物无法有效避让	碰撞风险、阻塞风险
	路段绕行路段	对于未知类型交通事件无法有效避让	碰撞风险、阻塞风险
道路驾驶 行为变更	低速行驶路段新增	对于未知原因导致的路段低速驾 驶无法有效识别	碰撞风险、阻塞风险
	行驶曲线变更	无法通过转弯区域	碰撞风险、阻塞风险

(1) 实体类的地图要素变更, 包括信号灯变更(机动车道信号灯、非机动车道信号灯、行人信号灯等)、道路标志标线变更(车道边界线、车道行驶方向、停止线、左转/右转待行区等)、交通设施变更(如栅栏/隔离柱)。

(2) 经验类的地图要素变更, 包括路口内车道连接线的变更(如直行、左转、掉头连接线)、道路阻塞点变更、道路驾驶行为变更。

因此, 通过路端局部动态地图更新方式, 可以解决当前自动驾驶由于地图要素变更引起的绝大多数人工接管问题。

(2) 地图更新实时下发

更新的地图数据最终需要下发到车端并作用于车端决策规划, 才能有效发挥地图的价值。目前地图的下发渠道、下发内容、下发形式多种多样, 在下发的过程中同时还有跨图商、跨车企、跨模组无损且安全的信息流动的诉求。利用路端作为统一的信息发布渠道, 采用地图参考位置协议(详见附录A)的方式发送与图商地图版本解耦的局部动态地图数据, 是保证车辆数据实时性、有效性的一种重要方式, 同时对于图商也可以利用路端信息进行版本级地图更新。

(二) 地图实时更新典型场景举例与比较分析

下面以常见的信号灯变更和车道线变更为例进行说明。

通过对多个智能网联示范区的长期观测统计, 可知自动驾驶车辆在实际道路行驶时, 会有较高概率遇到道路现实变更场景(比如道路信号灯、车道线、标志标牌等), 每万公里遭遇道路现实变更的次数 M_{AD} 约为6.38次/万公里(其中信号灯变更次数5.5次/万公里, 车道线变更次数0.78次/万公里, 其他变更约0.1次/万公里), 这类场景会直接影响自动驾驶车辆的安全运营, 需要通过有效手段快速解决。下面对众包地图更新和路端局部动态地图更新两种典型地图更新模式进行比较分析。

(1) 车端众包地图更新模式

在众包地图更新模式下, 地图完成现实变更的更新时间 D_{AD} , 由于需要积累多趟、多车道数据才能完整重建, 一般需要天级别($\geq 24h$)的数据积累, 云端才能完成地图的更新下发, 因此众包地图更新模式下可定义地图更新周期 $D_{AD}=24h$, 假设自动驾驶车辆每天的运营时间 $T_{AD}=10h$ 。

那么该模式下遭遇地图要素变更场景的概率通过长时间的运营观测可以从两个层面得出:

单车每万公里里程遭遇该场景的概率: $M_{AD}=6.38$ 次/万公里, 单车每天遭遇该场景的概率: $N_{AD}=1.7$ 次/车·天。

该模式下车辆遭遇地图要素变更场景的通过成功率仅依赖于单车的能力, 定义地图要素变更场景通过成功率为 $P_{AD|变更}$, $P_{AD|变更}$ 的具体值应结合车辆的实际能力, 并由大量实测结果确定。

(2) 路端局部动态地图更新模式

依靠路端感知优势，道路交通要素在变更完成后可在云端短时间内完成地图重建和车端更新，将总的更新时间定义为 D_{VICAD} ，保守按5min计算，那么：

$$D_{VICAD}=5\text{min}$$

同时假设通过车路协同感知实现地图更新的场景召回率 $R_{VICAD}=99.9\%$ 。

那么该地图更新模式下自动驾驶车辆遇到变更场景的遭遇率 M_{VICAD} 和 N_{VICAD} 为：

$$\text{令 } r = \frac{\min(T_{\text{车}}, D_{\text{单车}}, D_{\text{边缘}})}{\min(T_{\text{车}}, D_{\text{单车}})}$$

$$M_{VICAD}=M_{AD} \times (r+(1-r) \times (1-R_{VICAD}))=0.0587\text{次/万公里}$$

$$N_{VICAD}=N_{AD} \times (r+(1-r) \times (1-R_{VICAD}))=0.00159\text{次/车} \cdot \text{天}$$

场景成功率方面，运营时间内发生一次地图要素现实变更时，若地图要素变更场景发生时刻为 t_1 ，有车辆在 t_2 时刻途经该点，则在 t_1 至 $\min(T_{AD}, t_1+D)$ 时间窗口内，车辆受到场景的环境影响，通过成功率为 $P_{AD|变更}$ ，在时间窗口前，车辆通过成功率为 $P_{AD|变更}=1$ ，时间窗口后车辆若完成更新，成功率恢复为 $P_{AD|变更}$ ，那么：

$$p(t_1, t_2, D, R) = \begin{cases} P_{AD|未变更} & t_2 < t_1 \\ P_{AD|变更} & t_1 \leq t_2 \leq \min(T_{\text{车}}, t_1 + D) \\ P_{\text{单AD}|变更}(1-R) + P_{AD|未变更}R & t_2 > t_1 + D \end{cases}$$

引入局部动态地图更新后的场景通过率：

$$P_{VICAD|变更} = \frac{\int_0^{T_{AD}} \int_{T_{AD}-D_{AD}}^{T_{AD}} p(t_1, t_2, \min(D_{AD}, D_{VICAD}), R_{VICAD}) dt_1 dt_2}{\int_0^{T_{AD}} \int_{T_{AD}-D_{AD}}^{T_{AD}} p(t_1, t_2, D_{AD}, 1) dt_1 dt_2}$$

由于 $D_{\text{边缘}} \ll T_{\text{车}} < D_{\text{单车}}$ ，可得：

$$P_{VICAD|变更} \approx (1 - (1 - P_{AD|变更})(1 - R_{VICAD})) \left(1 - \frac{D_{VICAD}}{D_{AD}}\right) + P_{AD|变更} \times \frac{D_{VICAD}}{D_{AD}}$$

根据大量自动驾驶车辆的测试和运营数据，可以进一步计算得出：

假设AD模式下地图要素变更场景通过成功率： $P_{AD|变更}=90\%$ ，路端局部动态地图更新模式下变更场景召回率： $R_{VICAD}=99\%$ ，可得 $P_{VICAD|变更} \approx 99.86\%$ 。

若AD模式下场景通过成功率： $P_{AD|变更}=99.8\%$ ，路端局部动态地图更新模式下场景召回率：

$R_{VICAD}=99.9\%$, 可得 $P_{VICAD|变更} \approx 99.999\%$ 。

(3) 收益评估分析

综上所述, 路端局部地图更新模式具有显著收益, 见表3.5, 具体如下:

- 1) 地图更新时间方面: D_{VICAD} 小于等于5min, 地图更新时间大幅缩短;
- 2) 地图要素变更场景的遭遇概率明显降低: $R_{VICAD}=99.9\%$ 情况下, 场景遭遇率可从6.38次/万公里降低至0.0587次/万公里;
- 3) 场景通过成功率P得到显著提升: 在 $P_{AD|变更}=99.8\%$, $R_{VICAD}=99.9\%$ 情况下, $P_{VICAD|变更}$ 甚至可达到理想的99.999%, 场景的失败率从1.26次/百万公里降低到0.0063次/百万公里。

表 3.5 地图要素变更场景下VICAD收益分析

地图更新方式	地图更新时间/D	场景遭遇率/M	场景成功率/P	
			条件1 $R_{VICAD}=99\%$	条件2 $R_{VICAD}=99.9\%$
车端众包地图更新	$\geq 24h$	6.38次/万公里	$P_{AD 变更}=90\%$	$P_{AD 变更}=99.8\%$
路端局部 动态地图更新	$\leq 5min$	0.0587次/万公里 ($R_{VICAD}=99.9\%$ 条件下)	$P_{VICAD 变更} \approx 99.86\%$	$P_{VICAD 变更} \approx 99.999\%$

3.2.2 将“不安全”场景转化为“安全”场景

VICAD除了可以将自动驾驶“未知”场景转化为“已知”场景, 还可以综合运用车路协同感知、决策规划和控制等技术, 进一步实现将“不安全”场景转化为“安全”场景, 提高自动驾驶安全性。如表3.6所示, 自动驾驶“不安全”场景主要可以分为三类:

- 1) **交互博弈类场景安全。**当车车冲突时, 路端和云端作为“仲裁者”定义道路使用权的优先级, 并进行协同决策规划, 减少冲突引发的危险场景; 当车人冲突时, 应采取弱势交通参与者保护策略, 给车辆下发避让、缓行或停车指令, 保护行人安全。
- 2) **极端或特殊场景安全。**自动驾驶车辆发生故障或出现极端场景的概率相对较低, 但一旦出现时危害程度较高, 可能会导致多车连续追尾、碰撞危险, 通过车路协同决策规划和控制可以有效帮助车辆避免事故。

3) 环境安全。 车辆运行环境的复杂度与车辆的安全紧密相关，环境越简单车辆越安全，反之环境越复杂，自动驾驶车辆安全挑战越大。车路协同决策规划和控制可以降低环境复杂度，提升安全性，如非机动车/行人安全治理、交通事故预防、客货运车辆管理等，实现车辆和所有交通参与者安全、秩序化运行。

表 3.6 将“不安全”场景转化为“安全”场景举例

场景分类	典型场景	“不安全”场景转化为“安全”场景的方式
交互博弈类场景安全	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 匝道汇入汇出 ➢ 变道超车 ➢ 无信号灯交叉口通行 ➢ 车辆优先通行 ➢ 场站进出等 	“控车”：在车路协同感知的基础上，通过车路协同决策规划和控制，实现对CAV的实时控制，提高自动驾驶安全性。
极端或特殊场景安全	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 车辆故障 ➢ 极端拥堵、道路阻塞/阻断等 ➢ 车辆被困场景 	
环境安全	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 雨雪雾天气 ➢ 非机动车、行人安全治理 ➢ 道路施工、交通事故安全 ➢ 低矮抛洒物 ➢ 路面积水、塌陷 ➢ 隧道事故、火灾等 	“控环境”：通过控制交通基础设施，对交通运行状况进行诱导和控制，间接控制CAV，从而提高自动驾驶安全性。

其中，交互博弈类场景安全与极端或特殊场景安全问题可通过“控车”方式实现“不安全”到“安全”，所谓“控车”是指通过VICAD直接参与CAV的决策规划和控制过程，影响车辆的驾驶行为，如图3.16所示。



图 3.16 VICAD直接控车实现“不安全”到“安全”

环境安全类问题可通过“控环境”方式实现“不安全”到“安全”。“控环境”是指通过VICAD直接控制道路基础设施和设备，间接参与CAV的决策规划和控制过程，影响车辆的驾驶行为，如图3.17所示。

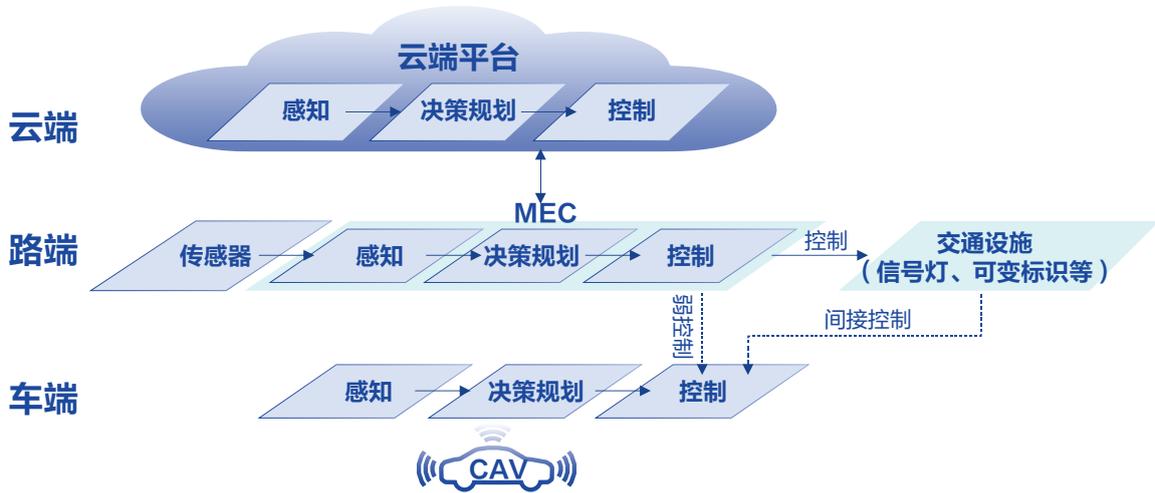


图 3.17 VICAD控环境实现“不安全”到“安全”

3.2.2.1 “控车”实现“不安全”到“安全”

(一) 总体技术原理

如图3.18所示，在典型的自动驾驶系统中，除了感知、预测和定位模块或系统外，还包括路径规划（Routing）、行为决策（Decision）、运动规划（Planning）和控制（Control）等一系列模块，VICAD在协同感知基础上，可以进一步参与自动驾驶的决策规划和控制，实现动态路径规划、协同决策规划和协同控制三个层次深度协同。

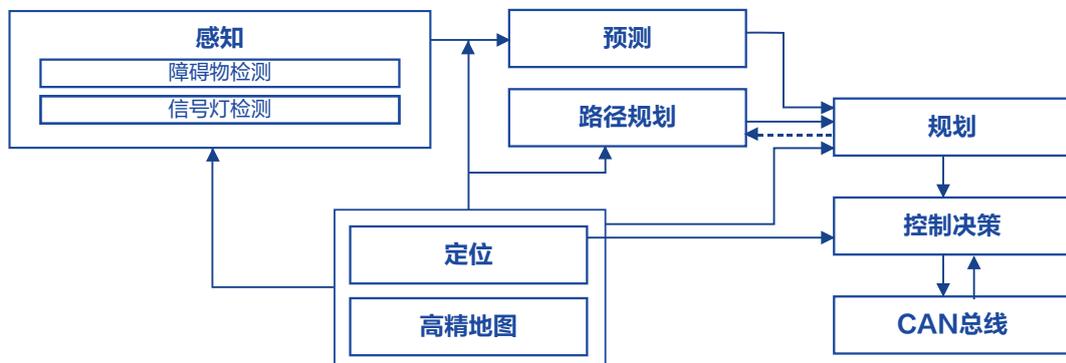


图 3.18 自动驾驶感知、决策规划与控制总体流程示意图

(1) 动态路径规划

动态路径规划是指自动驾驶车辆在行驶过程中, 通过融合标准路网地图、高精度地图、车道级交通态势、车道级交通事件等信息, 不断修正和优化行驶路径, 实现路径的实时优化, 在保证安全的前提下, 最大化提升交通出行效率。如图3.19所示, 车辆从起点开始, 在行驶过程中, 地图会给出从车辆所在位置到终点的推荐路径, 自动驾驶车辆可根据实际需求(如时间最短、交通场景最简单)选择最佳路径。

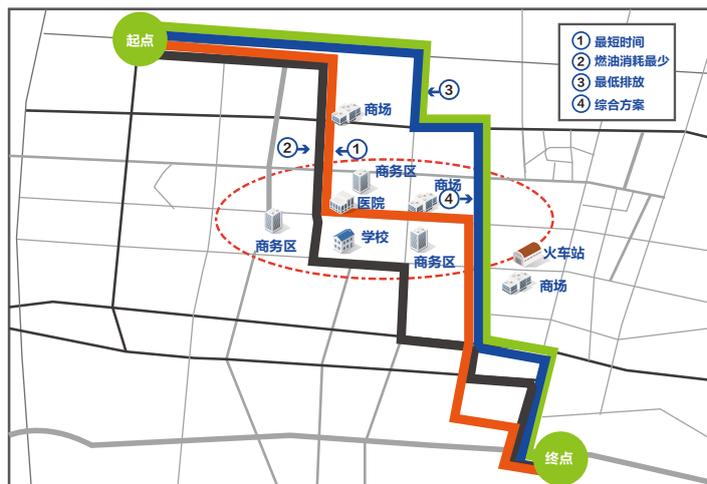


图 3.19 自动驾驶动态路径规划总体技术原理

动态路径规划对于拥堵路口躲避、占道施工绕行、车辆动态编队等应用场景, 具有明显优势, 其他相关应用场景见表3.7。

表 3.7 动态路径规划可在L4自动驾驶中的典型应用

应用分类	具体应用	L4自动驾驶收益	对比单车路径规划的优势
安全类应用	交通事件动态路径规划	避免陷入复杂极端场景	更从容应对复杂场景
	保障通行与定位稳定	保障车道级定位+实时信息获取	定位和通讯更有保障
	不良路面环境绕行	保障车辆控制安全	道路行驶环境更有保障
	低能见度通行	全天候通行	可行驶条件更宽松
效率类应用	绿波车速	降低路口等待时间	等待时间更低
	躲避拥堵	减少运行时间	平均速度更快
	路权预约与管理	提高运行效率	道路更有秩序
	编队行驶	降低驾驶复杂度	行驶速度更高

(2) 协同决策规划

协同决策规划可分为协同行为决策与协同运动规划两个步骤。

车路协同行为决策的总体流程见图3.20。在特定的驾驶任务中，基于车路协同感知、高精度定位及全局路径规划输入信息，完成驾驶场景的分析判断及关键障碍物行为轨迹预测，同时结合交通规则、历史决策信息、驾驶经验等驾驶先验知识，利用决策理论（如马尔可夫决策过程）在决策空间集合中给出最优化车辆行为决策判断。

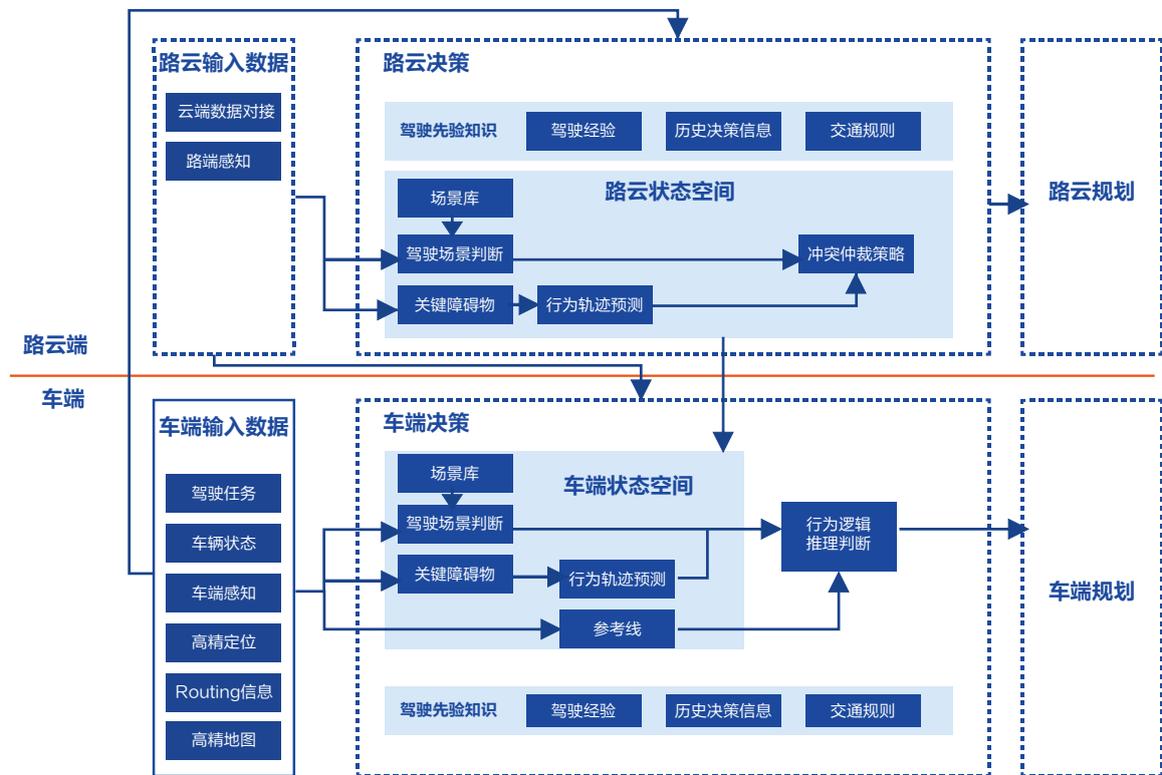


图 3.20 车路协同行为决策 (Decision) 流程

车路协同运动规划总体框架见图3.21。基于驾驶舒适度评价、可达性评价、安全性评价、通行效率评价等轨迹评价体系，结合最优行为决策结果数据，给出最优轨迹规划结果，供车辆控制执行。

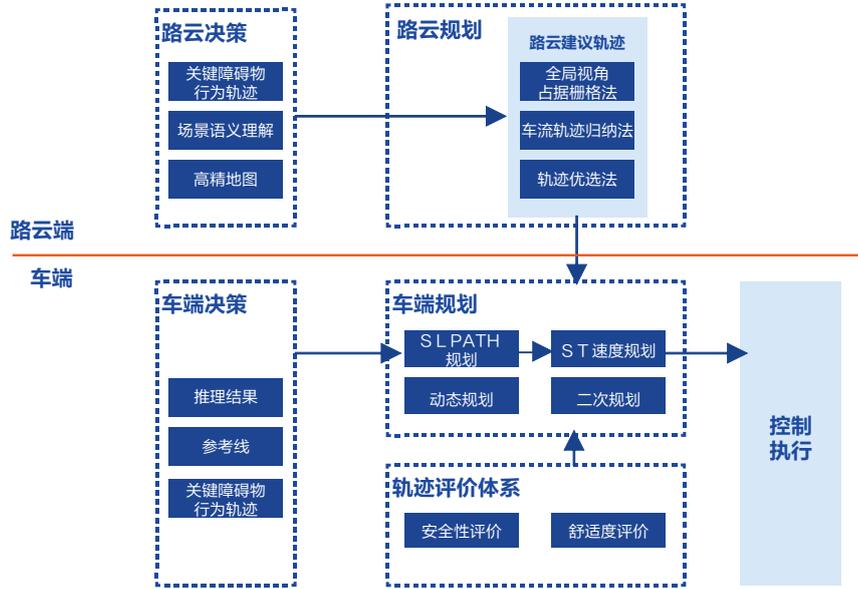


图 3.21 车路协同运动规划 (Planning) 流程

表 3.8 自动驾驶决策规划类挑战场景与解决策略

场景分类		场景名称	车路协同决策规划策略与服务内容
一级分类	二级分类		
交互冲突类场景	与机动车冲突	变道超车	1、车路协同感知对所有交通参与者进行实时感知定位； 2、若路径规划能解决，提前进行全局路径规划避免冲突； 3、路径规划无法解决时： 1) 行为决策：为车辆制定通行策略(a.跟车；b.超车；c.绕行；d.加速；e.减速等)； 2) 运动规划：(可选) 推荐主车通行速度及局部轨迹规划建议。
		匝道分合流	
		左右转冲突	
		掉头冲突	
	与行人、非机动车冲突	闯红灯	1、车路协同感知对所有交通参与者进行实时感知定位； 2、行为决策：制定主车通行策略(a.减速避让；b.绕行通过；c.正常行驶通过)； 3、运动规划：(可选) 推荐主车通行速度及轨迹建议。
		横穿马路	
		占道行驶	
		逆行	
		超速等	
道路阻塞类场景	交通事件	排队、拥堵	1、车路协同感知对所有交通参与者进行实时感知定位； 2、若路径规划能解决，提前进行全局路径规划避免阻塞； 3、若路径规划无法解决： 1) 行为决策：为车辆制定通行策略(a.跟车；b.超车；c.绕行；d.加速；e.减速等)； 2) 运动规划：推荐局部轨迹规划建议和通行速度； 4、若路径规划、行为决策和运动规划仍无法解决，需通过车路协同控制解决。

在车路协同行为决策和运动规划的配合下,可以解决自动驾驶交互冲突和道路阻塞两大类挑战场景,详见表3.8,其中:

- 1) 交互冲突类场景: 道路车辆之间存在交互博弈或路权博弈问题, VICAD基于全局交通参与者状态感知及意图预测, 完成交互博弈场景中冲突车辆行驶方向、行驶速度、行驶次序的协调决策建议和通过策略;
- 2) 道路阻塞类场景: 自动驾驶车辆在道路中遇到阻塞事件会产生不合理停滞, VICAD基于阻塞场景的语义理解及交通态势感知结果, 合理制定绕行或通过策略。

(3) 协同控制

车路协同还可以进一步参与自动驾驶的控制过程, 根据控制方式的不同, 有两种模式:

- 1) 间接控制: 通过控制交通基础设施(如交通信号灯)或交通流, 间接控制自动驾驶车辆;
- 2) 直接控制: 可以在特定环境或场景下, 实现对车辆的直接实时控制。

下面以直接控制为例进行说明, 当L4自动驾驶车辆驶入复杂交通环境、驶出地理围栏、面临复杂认知交互类场景或极端场景时, 车辆较难独立应对, 可通过车路协同控制帮助车辆脱困, 其总体流程见图3.22, 包括以下步骤:

- 1) 车辆遇到阻塞性场景时, 可由车端主动发起远程遥控驾驶请求; 或者在车端即将到达复杂场景前, 由路端主动发起云端控制请求; 此外, 乘客有特殊需求时, 也可由乘客发起云端控制请求;
- 2) 车辆周期性上报自车状态信息、自车感知信息、自车状态信息等;
- 3) 路端周期性上报路端感知信息、路端决策规划信息等;
- 4) 云端接收到车辆主动申请/乘客手动申请/路端申请的云端控制请求后, 云端对车端和路端的上报的数据进行融合处理;
- 5) 通过云端智能驾舱的方向盘和踏板下发控制指令到车辆底盘, 实现远程遥控驾驶。其中, 控制指令的下发有两种通信链路实现: 一种是通过4G/5G直接从云端下发至车端; 另一种是通过云端下发到路端, 再由路端RSU下发至车端。两种实现方式可以起到互补的作用, 尤其是在城市内4G/5G信号出现遮挡或不稳定时, 路端RSU可以对4G/5G进行有效补充。

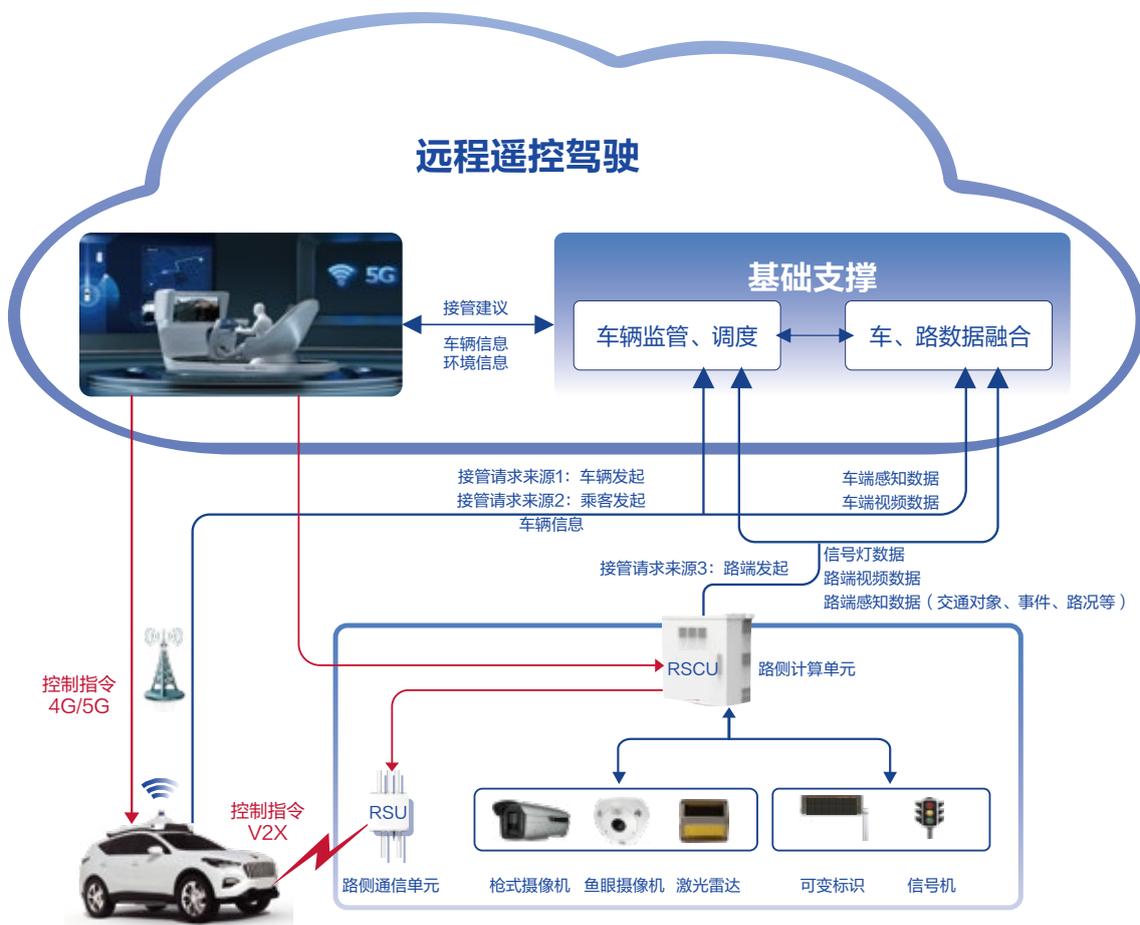


图 3.22 车路协同控制原理与总体流程

(二) 协同决策控制典型场景举例

下面以施工场景为例，对车路协同决策规划和控制如何提高自动驾驶安全性展开进行说明。

问题描述：

道路施工、交通事故、交通管制等交通事件是自动驾驶车辆经常遇到、且较难应对的一类场景，尤其是在一些复杂的道路施工（如路口内施工、占据所有行进方向车道的施工）场景中，仅依靠车路协同感知或动态地图更新也不能成功克服，容易造成车辆停滞或接管，存在安全风险。

场景原理：

针对施工场景，VICAD具体有动态路径规划、协同决策规划、协同控制三种应对解决方式。

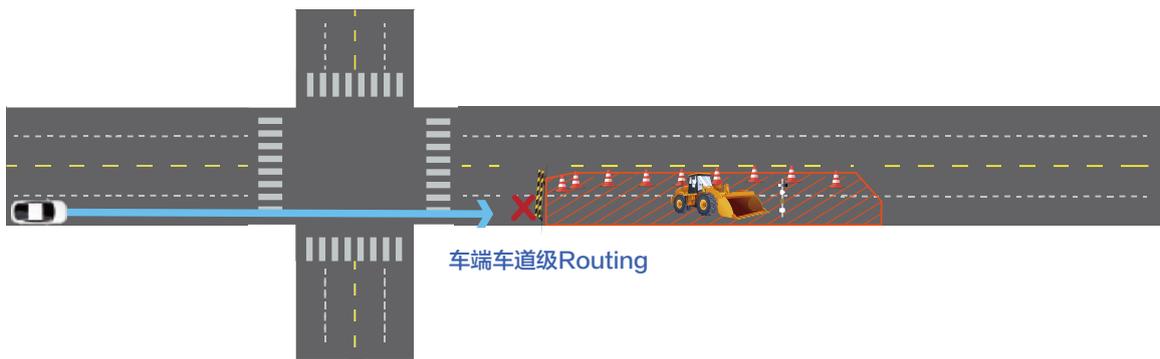
(1) 动态路径规划提前改变路径

如图3.23所示，路端可以识别施工信息并发送到地图平台，发送的信息包括但不限于事件类型、时

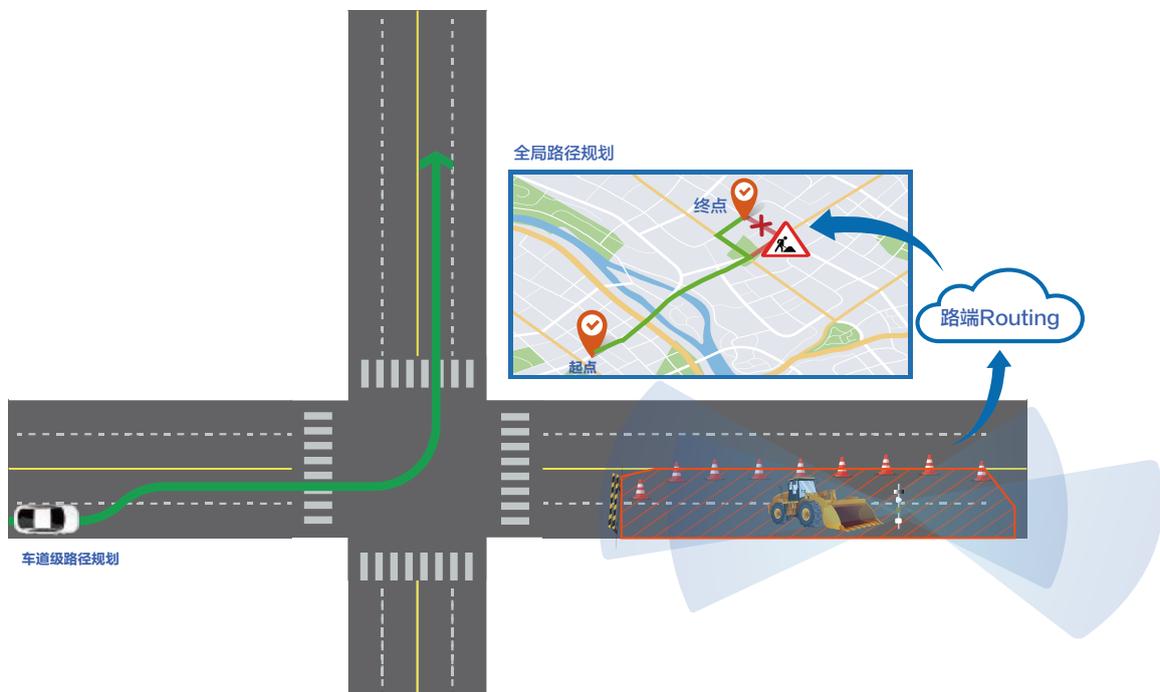
03 车路协同自动驾驶实现L4无人化安全运营

间地点、影响范围、影响时间等，通过车路协同路径规划，可以评估车辆的可通过性，若不能通过或难度较大，可重新为车辆规划路径，提前避开施工路段。具体实现流程如下：

- 1) 车辆设置目的地后，路径规划模块根据道路拓扑关系和道路拥堵情况构建全局路径规划，车辆按照路径规划行驶；
- 2) 路端检测到占道施工，同步该信息至云端，通过自动和人工的方式及时更新路网拓扑关系；若判断车辆无法通行，重新对车辆进行全局路径规划，提前绕开施工区域所在路段。



a) 单车智能自动驾驶施工场景：有一定概率停车或接管



b) 基于VICAD: 动态路径规划提前改变行车路径

图 3.23 施工场景动态路径规划

(2) 协同决策规划绕行

在车路协同路径规划部分, 针对施工场景给出了通过提前改变车辆行进路径的解决方式; 如果车辆必须保持直行, 则需要在车路协同路径规划的基础上, 进一步从车路协同决策规划的角度来解决施工阻塞问题, 具体流程如下:

- 1)通过车路协同感知,对道路阻塞区域、阻塞原因、阻塞可达性等进行识别, 对双向车流进行实时持续性观测, 获取阻塞区域周边车流轨迹, 结合对道路交通态势的判断, 识别本侧道路已经无法通行, 但是对侧道路最内侧车道临时变更行驶方向, 作为本侧方向的车道。
- 2)路端发现车道可通行方向和连接关系变更后, 更新局部区域的道路拓扑数据。
- 3)车辆到达施工区域前, 获取新的局部路网拓扑, 重新对车辆进行局部路径规划, 借用对向道路通过施工区域所在路段, 见图3.24。

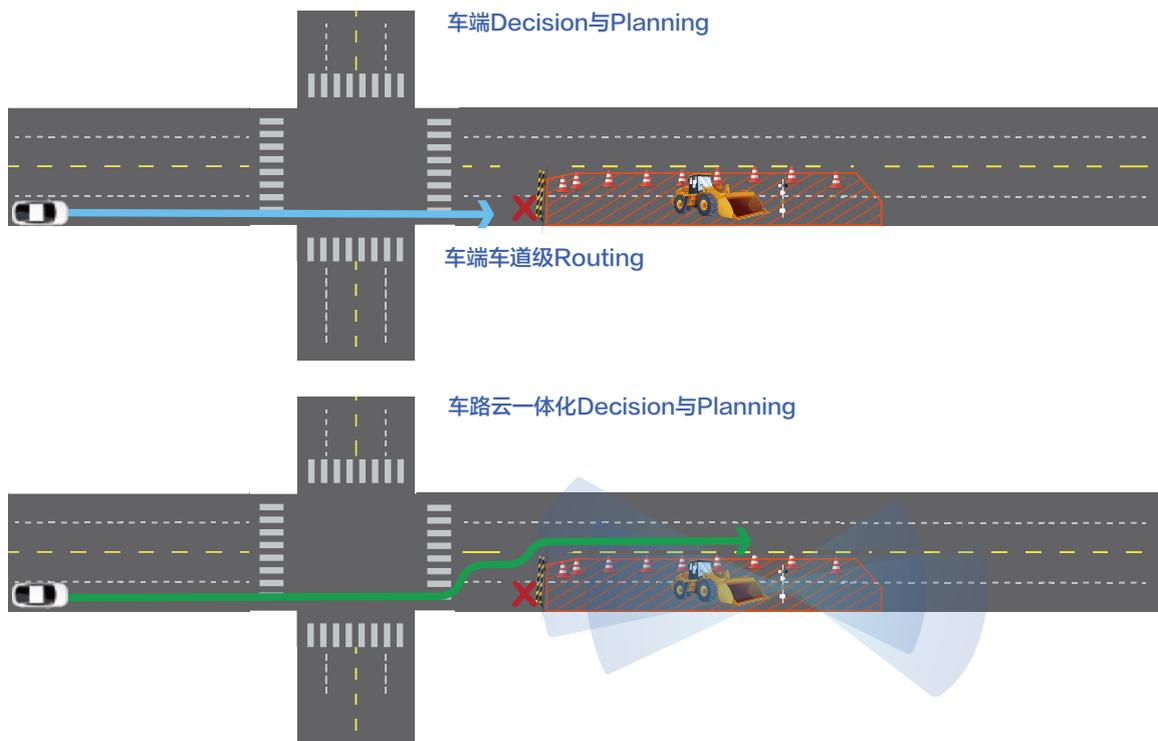


图 3.24 施工场景车路协同决策规划

(3) 车路协同控制绕行

若通过上述两种方式仍不能解决该场景问题时, CAV可主动发起接管请求, 由云端接管车辆, 通过远程遥控驾驶帮助车辆通过施工阻断路段。如图3.25所示, 车辆主动请求接管的流程如下:

- 1)车端遇道路阻塞, 向云端发起接管请求;
- 2)云端远程遥控驾驶员接到车辆的脱困或代驾请求;
- 3)车端/路端各类实时数据同步上传云端, 云端远程遥控驾驶员通过信息显示屏上的信息进行人工决策;
- 4)远程遥控驾驶员控制驾驶舱的方向盘、油门、刹车等, 给车端下发控制指令;
- 5)车辆执行远程驾驶的控制指令, 进行脱困。

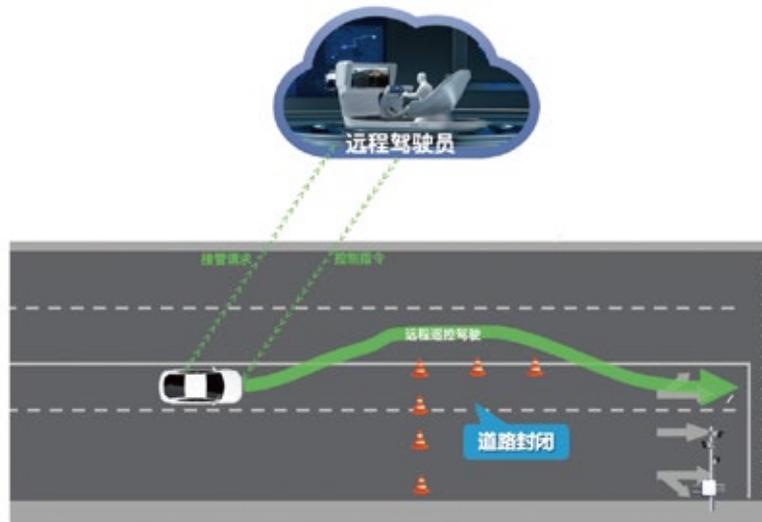


图 3.25 跨道路阻断, 车端主动请求接管

(三) 与单车智能应用效果比较

基于上述道路施工场景案例, 下面分别对基于AD的单车决策规划和基于VICAD的车路协同决策规划两种模式进行量化比较分析。

(1) 基于AD的单车决策规划

根据长期实测统计, 自动驾驶车辆每万公里遭遇的施工事件 M_{AD} 为4.5次/万公里, 同时定义:

AD模式下自动驾驶地图更新(场景召回)时长: $D_{AD}=24h$

自动驾驶车辆每日运营时长: $T_{AD}=10h$

单车智能自动驾驶遇该类场景的成功率为 P_{AD} (P_{AD} 的值可根据实测数据获得)。

(2) 基于VICAD的车路协同决策规划

依靠路端和云端协同感知和协同决策规划,可在较短时间内完成施工事件的精准识别和决策规划,并下发到车端,保守起见,将整个链路的时间定为3min,那么:

$$D_{VICAD} = 3\text{min}$$

3min时间周期情况下,施工事件场景的召回率可做到: $R_{VICAD} = 99.9\%$

车路协同决策规划模式下可以通过多种方式帮助自动驾驶车辆避免遭遇施工事件,比如Routing、Decision和Planning,那么该模式下施工事件的场景遭遇率为:

$$\begin{aligned} M_{VICAD} &= M_{AD} \times \left(\frac{\min(T_{\text{车}}, D_{\text{单车}}, D_{\text{边缘}})}{\min(T_{\text{车}}, D_{\text{单车}})} \right) + \left(1 - \frac{\min(T_{AD}, D_{AD}, D_{VICAD})}{\min(T_{AD}, D_{AD})} \right) \times (1 - R_{VICAD}) \\ &= 0.0270\text{次/万公里} \end{aligned}$$

场景成功率方面,假设施工时长服从对数正态分布: $l \sim L, \ln(l) \sim N(\ln(2), \ln(6))h$,对于运营时间内发生的一次场景,若场景发生 t_1 时刻,持续时长分布 $\sim L$,有车辆在 t_2 时刻途径该点,则在 t_1 至 $\min(T_{AD}, t_1 + l, t_1 + D), l \sim L$ 时间窗口内,车辆受到场景的环境影响,通过成功率为 $P_{\text{未知|施工}}$,时间窗口后若施工持续且完成召回,成功率为 $P_{\text{已知|施工}} = 1$,其余时间车辆通过成功率为 $P_{\text{未施工}} = 1$:

$$p(t_1, t_2, D, R) = \begin{cases} P_{\text{未施工}} & t_2 < t_1 \\ P_{\text{未知|施工}} & t_1 \leq t_2 < \min(T_{\text{车}}, t_1 + D), l \sim L \\ P_{\text{未知|施工}}(1 - R) + P_{\text{已知|施工}}R & \min(T_{\text{车}}, t_1 + D) \leq t_2 < \min(T_{\text{车}}, l), l \sim L \\ P_{\text{已知|施工}} & t_2 > l, l \sim L \end{cases}$$

引入车路协同决策规划后的场景通过率:

$$P_{VICAD|施工} = \frac{\int_0^{T_{AD}} \int_{-\infty}^{T_{AD}} p(t_1, t_2, \min(D_{AD}, D_{VICAD}, R_{VICAD})) dt_1 dt_2}{\int_0^{T_{\text{车}}} \int_{-\infty}^{T_{\text{车}}} p(t_1, t_2, D_{AD}, 1) dt_1 dt_2}$$

由于 $D_{\text{边缘}} \ll T < D_{\text{单车}}$, 可得:

$$\begin{aligned} P_{VICAD|施工} &\approx 1 - (1 - P_{\text{未知|施工}})(1 - R_{VICAD}) \\ &\quad - \left(1 - (1 - P_{\text{未知|施工}})(1 - R_{VICAD}) - P_{\text{未知|施工}} \right) \times \frac{P(D_{VICAD} < l, l \sim L)}{P(T_{AD} < l, l \sim L)} \end{aligned}$$

若单车场景通过成功率: $P_{\text{未知|施工}} = 90\%$,车路协同决策规划模式下场景召回率: $R_{VICAD} = 99\%$,可得 $P_{VICAD|施工} \approx 99.87\%$ 。

若单车场景通过成功率: $P_{\text{未知|施工}}=99.8\%$, 边缘计算场景召回率: $R_{\text{VICAD}}=99.9\%$, 可得 $P_{\text{VICAD|施工}} \approx 99.9991\%$ 。

(3) 收益评估分析:

综上所述, 通过车路协同决策规划对自动驾驶具有显著收益, 见表3.9, 具体如下:

1) 车辆场景的遭遇概率明显降低: 通过车路协同Routing、Decision和Planning等, 可以多种方式避免车辆遭遇施工类场景, 在 $R_{\text{VICAD}}=99.9\%$ 情况下, 场景遭遇率可从4.5次/万公里降低至0.0270次/万公里;

2) 车辆场景通过成功率P得到显著提升: 在 $P_{\text{未知|施工}}=99.8\%$, 边缘计算场景召回率 $R_{\text{VICAD}}=99.9\%$ 情况下, $P_{\text{VICAD|施工}}$ 可达到理想的99.9991%, 场景的失败率从0.9次/百万公里降低到0.00405次/百万公里。

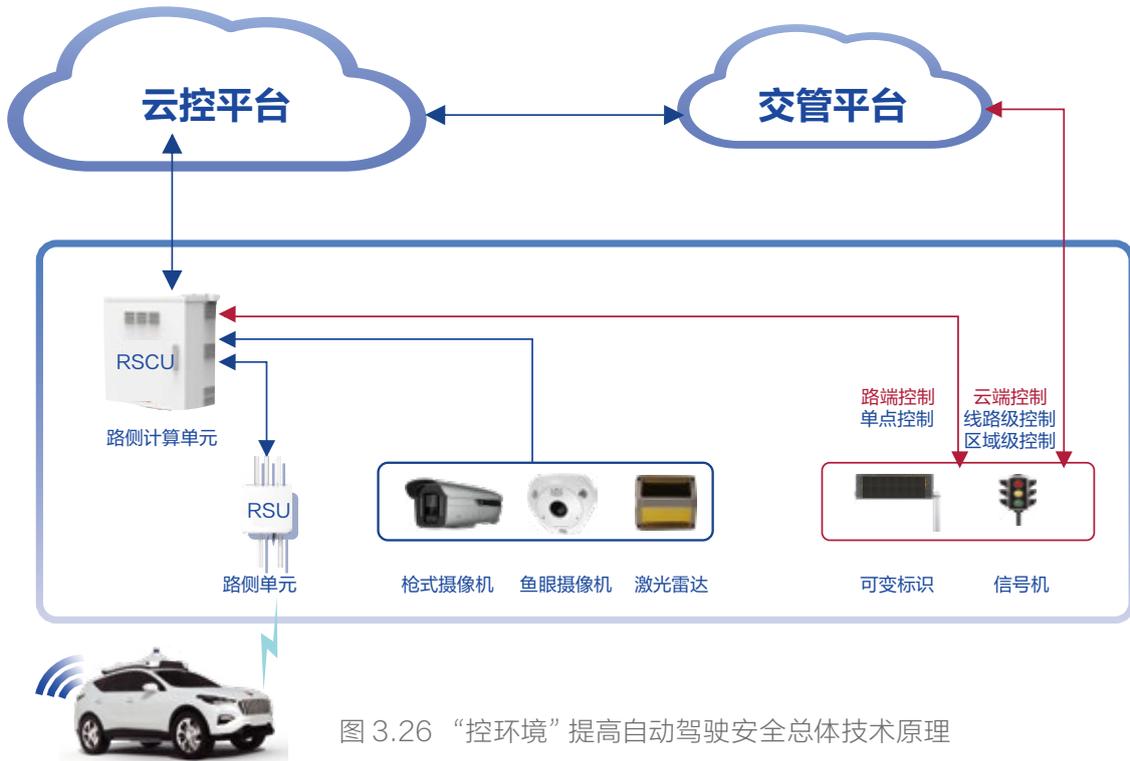
表 3.9 施工场景下VICAD收益分析

比较项	车路协同决策规划 链路时间/ D_{VICAD}	场景遭遇率/M	场景成功率/P	
			条件1	条件2
单车智能决策控制	—	4.5次/万公里	$P_{\text{AD 变更}}=90\%$ $R_{\text{VICAD}}=99\%$	$P_{\text{AD 变更}}=99.8\%$ $R_{\text{VICAD}}=99.9\%$
车路协同决策控制	$\leq 3\text{min}$	0.0270次/万公里 ($R_{\text{VICAD}}=99.9\%$ 条件下)	99.87%	99.9991%

3.2.2.2 “控环境”实现“不安全”到“安全”

(一) 总体技术原理

环境安全也是影响自动驾驶安全的重要因素, 通过车路协同可以实现“控环境”, 实现车辆驾驶出行与交通运行管理的协调统一, 最终提高自动驾驶的安全性。如图3.26所示, 路端系统与设施在为自动驾驶提供VICAD服务的同时, 也可以利用路端实时高精度感知定位能力, 对道路和交通运行状况进行实时监测, 识别不安全事件和因素, 并及时采取有效手段对交通设施进行干预和控制, 并通过移动蜂窝网络或者RSU通信设备提前向车辆发布交通环境信息, 避免交通事故发生, 达到提升交通安全的目的。



(二) 典型场景举例

下面从“控环境”提高自动驾驶安全的角度，列举两个比较常见的“不安全”到“安全”场景案例。

(1) 下穿道路积水管控

问题描述:

城市道路中下穿道路比较普遍，遇到下雨天气时，道路低洼地段容易积水，一旦车辆驶入可能会严重威胁车辆和人身安全，造成生命财产损失。

场景原理:

如图3.27所示，1) 在路端有积水传感器的情况下，可由路端对下穿道路积水深度进行检测；2) 根据水深判断危险程度，若有安全风险，可通过多种方式提醒或控制车辆，禁止车辆驶入危险路段。相关方式包括地图提醒、V2X预警、云端修改Routing、控制信号灯禁止通行，或者将危险信息报送交管、城管平台，由交管和城管统一对道路进行封路管理。



图 3.27 下穿道路积水场景

应用效果:

如图3.28所示, 路端系统可以通过控制信号灯, 禁止车辆靠近危险区域, 提前避让积水路段, 保障车辆和人员安全; 或者可以在下穿道路入口处设置路闸, 通过关闭路闸的方式, 禁止车辆驶入, 避免发生水淹事故。

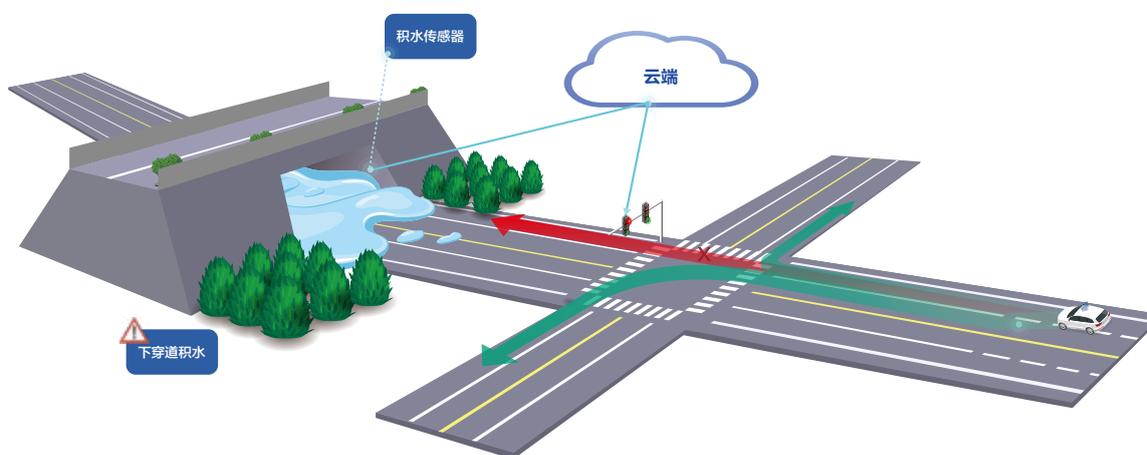


图 3.28 下穿道路积水安全管控

(2) 隧道内危险事件管控

问题描述:

如图3.29所示, 若高速公路隧道内发生危险情况(比如火灾、瓦斯泄露、坍塌或事故), 自动驾驶车

辆无法提前获取事件信息，一旦驶入隧道可能会导致二次事故。



图 3.29 隧道内交通事故

场景原理:

如图3.30所示, 1) 路端通过感知系统对隧道的危险事件进行实时感知识别; 2) 隧道内感知系统与隧道口的信号控制设备打通, 通过控制信号灯禁止车辆进入隧道, 或通过V2X将隧道事件广播给车辆, 提前让车辆和驾驶员知悉隧道内事件。

应用效果:

通过控制信号灯, 避免车辆陷入危险环境, 发生二次交通事故, 保证人身安全和交通安全。

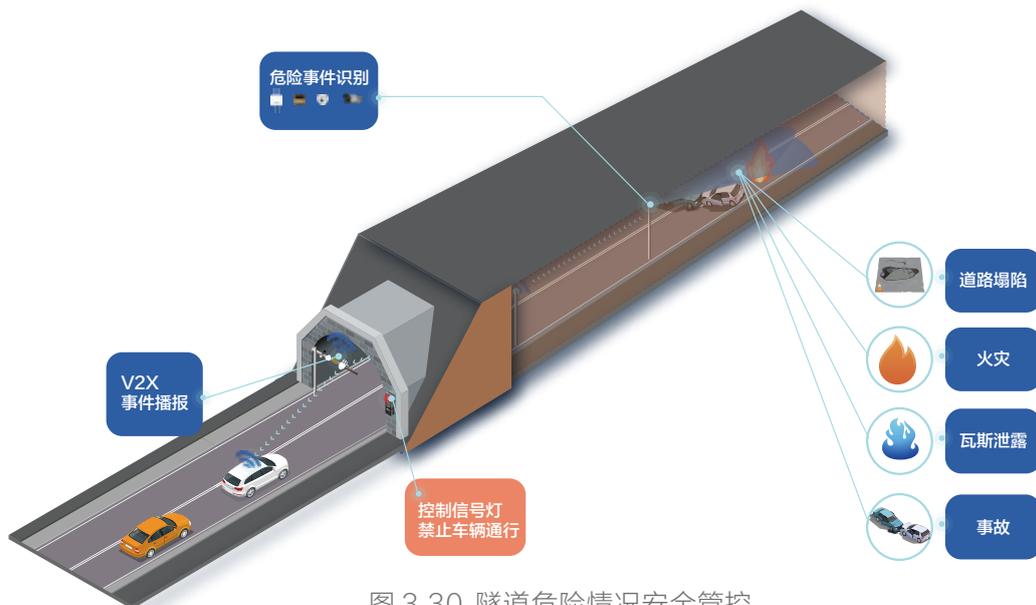


图 3.30 隧道危险情况安全管控

3.2.3 VICAD安全评价模型与仿真验证

为了量化评价VICAD在典型交通场景下对安全的收益,本白皮书在车路协同自动驾驶安全收益模型(Vehicle-Infrastructure Cooperated Autonomous Driving Safety Revenue Model, VICAD-SRM)²⁸的基础上进一步加入复杂的交通场景交互与高保真的传感器数据渲染,建立了自动驾驶一体化评价模型(Unified Model of Autonomous Driving Evaluation, UMADE)。如图3.31所示,UMADE支持选取不同的测试场景、不同的交通交互方式以及不同的评价指标,针对不同的自动驾驶解决方案进行系统表现的量化对比测试。

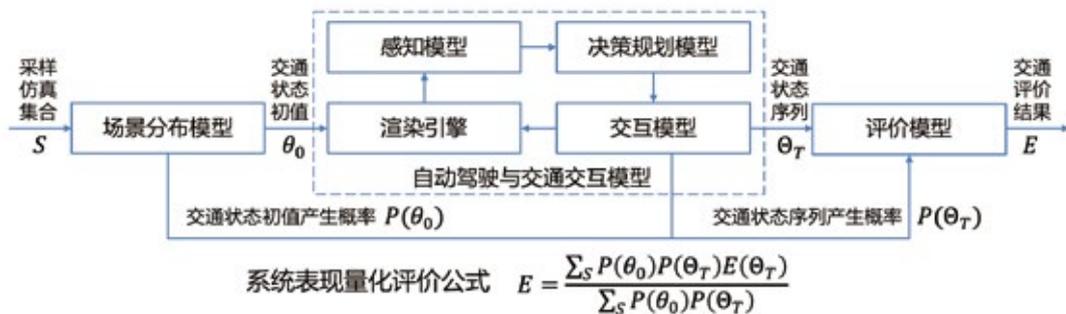


图 3.31 自动驾驶一体化评价模型 (UMADE)

以下为自动驾驶一体化评价模型中各功能模块的简要介绍。

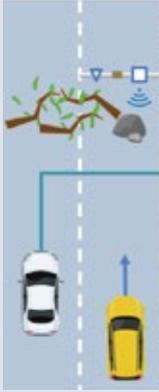
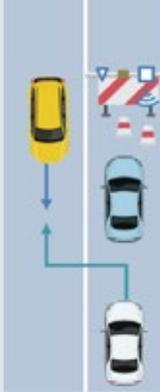
- 1) **场景分布模型**: 用于描述选定场景中交通状态初值的分布概率。常见的分布概率模型包括: 跟驰车速服从对数正态分布、跟驰车头时距服从负指数分布等;
- 2) **渲染引擎**: 用于根据交通状态为自动驾驶车辆与路端设备提供高保真的传感器数据, 同时也将用于对交通场景的行为事件进行可视化还原。自动驾驶一体化评价模型对基于UE4渲染引擎的开源自动驾驶模拟器CARLA进行了二次开发, 提供了包括激光雷达与视觉相机在内的常见车载传感器以及路端感知设备的数据接口;
- 3) **交互模型**: 用于描述交通参与对象之间的交互行为。自动驾驶一体化评价模型支持交通信号、车辆、行人、非机动车等交通参与对象, 在CARLA自带的交互模型的基础上进一步提供了交通参与对象交互的自定义接口;
- 4) **感知模型**: 用于模拟车路协同系统通过云端信息以及车端与路端的传感器数据进行环境感知的过程。自动驾驶一体化评价模型支持在车路两端自由接入目标检测、语义分割、异常检测等自动驾驶相关的感知算法;
- 5) **决策控制模型**: 用于模拟车路协同系统通过云端信息以及车端与路端的传感器数据进行决策、规划与控制的过程。自动驾驶一体化评价模型支持在车路两端部署协同决策控制算法, 进而有序调度交通场景内的相关交通信号与车辆;

²⁸车路协同自动驾驶安全收益模型(Vehicle-Infrastructure Cooperated Autonomous Driving Safety Revenue Model, VICAD-SRM)见《面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望》(2021年)。

6) 评价模型: 用于评价自动驾驶在交通环境下的系统表现。自动驾驶一体化评价模型支持选取不同的评价方法, 可以对指定自动驾驶方案在指定交通场景下的安全性和通行效率等指标进行量化评价。

为了有效阐释自动驾驶落地过程中遇到的实际困难, 经过对自动驾驶领域公开数据与百度实际测试数据的分析与归纳, 针对最为关注的自动驾驶安全与极端场景应对问题, 选取行人鬼探头、无保护左转、异常障碍物与异常交通状况四个典型场景(详细描述见表3.10), 利用自动驾驶一体化评价模型开展量化评价。

表 3.10 场景列表

场景	行人鬼探头	无保护左转	异常障碍物	异常交通情况
场景描述				
场景参数	主车速度 从车速度 主从车间距	主车速度 从车速度 对向车辆速度 主从车间距	主车速度 从车速度 从车进入时间	主车速度 从车速度 从车进入时间
交通参与对象	路端设备 车辆、行人	路端设备 车辆	路端设备 车辆	路端设备 车辆、修路标识
协同感知	互补感知	互补感知	冗余感知/强化感知	强化感知
协同决策控制	同向行驶车辆的 协同刹车	同向行驶车辆的 协同刹车	同向行驶车辆的 协同障碍绕行	对向行驶车辆的 协同让行
关键算法	协同感知 协同决策控制	协同感知 协同决策控制	协同异常检测 协同决策控制	协同预测与模仿 协同决策控制
评价方法	碰撞概率 行人伤害 通行效率	碰撞概率 通行效率	碰撞概率 通行效率	通行能力 通行效率

针对上述典型交通场景,可选取单车智能、车路协同感知与车路协同决策控制三种不同的自动驾驶模式进行系统表现对比,借助自动驾驶一体化评价模型得到以下仿真结果与分析。

(1) 行人鬼探头

如图3.32所示,单车智能无法对遮挡产生的视野盲区进行有效感知,因此存在较大的交通安全隐患。相比之下,车路协同感知提供了互补信息,为前车避让行人提供了感知的信息增量。而车路协同决策控制则提供了全局车辆协同决策的能力,为后车提供了前车驾驶行为的信息增量,从而降低了碰撞事件的发生概率。



图 3.32 基于行人鬼探头场景的系统表现对比

(2) 无保护左转

如图3.33所示,由于对向左转的大型车辆遮挡了主车的感知视野,使主车仅依赖单车智能无法有效感知到对向的直行车辆,因此存在较大的交通安全隐患。与行人鬼探头场景类似,车路协同感知提供了互补信息,为前车避让对向直行车辆提供了感知的信息增量。而协同决策控制则提供了全局车辆协同决策的能力,为后车提供了前车驾驶行为的信息增量,从而降低了碰撞事件的发生概率。



图 3.33 基于无保护左转场景的系统表现对比

(3) 异常障碍物

异常障碍物一般不会出现在自动驾驶感知系统的训练样本内,需要由额外的感知异常检测算法进行感知不确定分析,将预期功能安全SOTIF中的“未知”场景转化为“已知”的异常场景。如图3.34所示,单车智能无法预先对异常障碍物进行有效的检测,存在较大的交通安全隐患。而车路协同感知提供了冗余与强化信息,为前车避让异常障碍物提供了信息增量。而协同决策控制则提供了全局车辆协同决策的能力,为后车提供了前车驾驶行为的信息增量,降低了碰撞事件的发生概率。



图 3.34 基于异常障碍物场景的系统表现对比

(4) 异常交通状况

在图3.35所示场景下, 车辆需要面对较为复杂的交通状况。首先, 存在一辆静止车辆停在修路路段前, 自动驾驶车辆需要判断其驾驶意图并确定排队策略。其次, 在双向单车道条件下存在临时的修路路段, 自动驾驶车辆需要决策是否违反交通规则进行“逆行”。最后, 由于在单车道的条件下存在对向来车, 自动驾驶车辆需要与对向来车进行博弈与交互。由于缺少全局信息, 单车智能难以在这一复杂状况下采取有效决策。而车路协同感知提供了冗余与强化的增量信息, 可以通过路端长时间观测, 有效预测静止车辆的意图并模仿其他非自动驾驶车辆的驾驶行为, 具有在所述复杂状况下采取有效决策的可行性。协同决策控制则可以获取云端交通状况异常的先验信息, 结合全局车辆协同决策的能力, 为对向车辆提供了自动驾驶车辆的驾驶意图等信息增量, 进而提高了单车道对向通行的通过效率。



图 3.35 基于异常交通状况场景的系统表现对比

总体而言, 车路协同感知与车路协同决策控制对自动驾驶的安全性有较大提升。上述典型场景为低概率出现的极端场景, 具有较高危险性。行人作为交通安全问题中的弱势群体, 确保行人安全对自动驾驶技术的发展与应用尤为重要。在极端的行人鬼探头场景下, 与AD相比, VICAD模式在人体伤害评价指标方面可以得到大幅的安全提升; 同时, 实验结果表明, VICAD在应对无保护左转、异常障碍物与异常交通情况时均取得了明显的系统表现提升, 证明了VICAD能够有效帮助解决自动驾驶落地面临的极端场景应对问题。详细的实验数据如表3.11所示, 具体的实验方法请参见附录B。

表 3.11 基于自动驾驶一体化评价模型的实验结果

场景	行人鬼探头			无保护左转		异常障碍物		异常交通情况	
	行车碰撞率	行人伤亡率	极端场景通行效率	行车碰撞率	极端场景通行效率	行车碰撞率	极端场景通行效率	通行能力	极端场景通行效率
单车智能	3.30×10^{-5}	6.85×10^{-6}	1881.51s	3.10×10^{-5}	201.30s	5.30×10^{-5}	359.98s	无	N/A
车路协同感知	2.95×10^{-6}	9.22×10^{-8}	119.13s	1.04×10^{-5}	71.25s	1.05×10^{-5}	80.02s	有	10.504s
车路协同决策控制	6.93×10^{-7}	4.78×10^{-8}	50.52s	9.26×10^{-6}	64.84s	0	10.39s	有	7.143s

3.3 ACTION 3

管理扩展自动驾驶ODD,实现无接管连续运行

3.3.1 自动驾驶ODD限制

自动驾驶ODD是指自动驾驶系统设计时确定的适用于其功能运行的外部环境条件。只有当全部条件都满足时,自动驾驶才能保证正常运行;相反,欠缺任何一个前提条件,自动驾驶系统都有可能出现故障,这时就需要采取紧急停车措施或是驾驶员手动接管。如图3.36所示,不同等级自动驾驶车辆的ODD限制存在差异,L4等级自动驾驶ODD限制相对较小、L3等级自动驾驶次之、L2等级自动驾驶限定更为严格,只能在有限的环境或场景下启用自动驾驶模式。以某品牌L3等级自动驾驶ODD为例,只有在满足下述条件时,才允许开启自动驾驶模式:

- 1) 行驶在高速公路或者带有中央隔离带和护栏的两车道以上机动车专用公路上;
- 2) 所在车道和周边车道的车间距离较近,即在堵车状态下;
- 3) 车的行驶速度不超过60km/h;
- 4) 在传感器可检测到的范围内没有信号灯也没有行人。

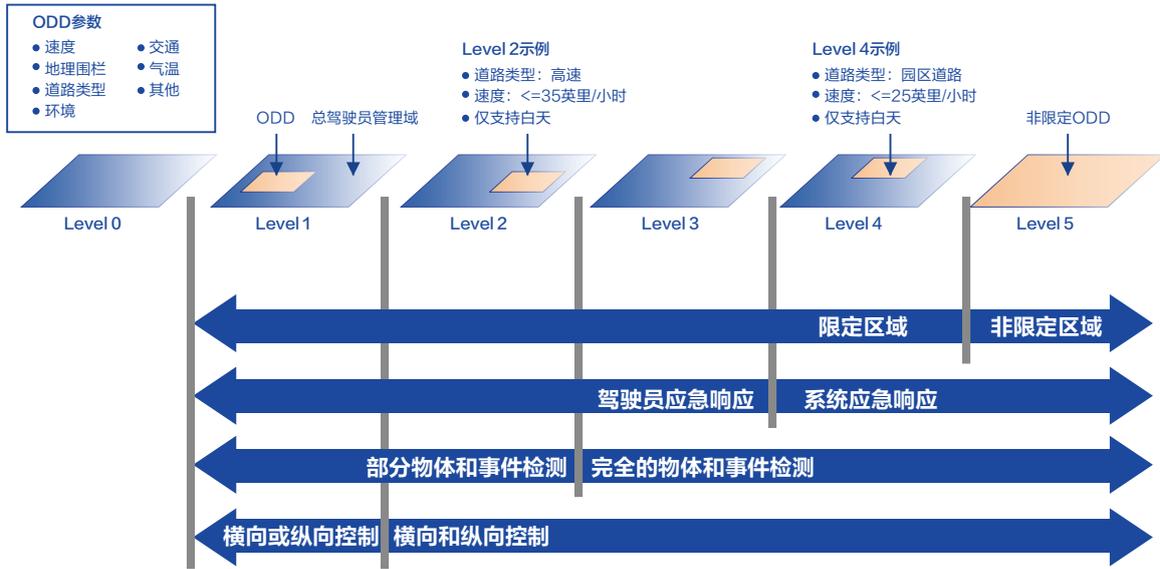


图 3.36 不同等级自动驾驶ODD限制

如图3.37所示, 自动驾驶ODD总体上可以分为静态实体、环境条件和动态实体三类²⁹, 其中:

- 1) 静态实体由运行环境中状态不改变的实体组成, 如: 道路、建筑等;
- 2) 环境条件包括天气、大气条件和信息环境;
- 3) 动态实体由运行状态发生变化的实体组成, 如交通情况、道路使用者和非道路使用者。

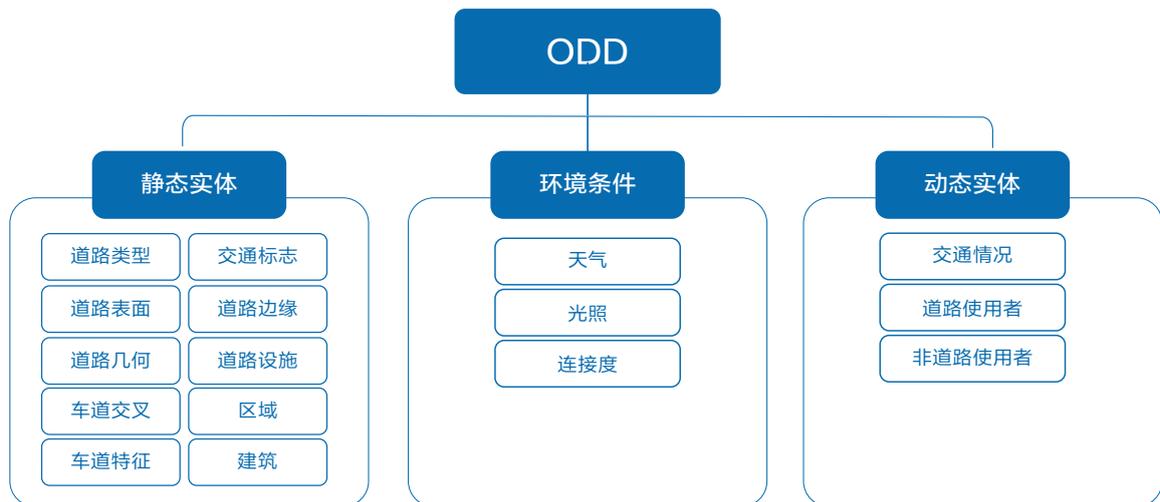


图 3.37 自动驾驶ODD分类

²⁹参考全国汽车标准化技术委员会发布的《自动驾驶设计运行白皮书》。

3.3.2 基于车路协同的ODD动态管理与扩展

(一) 总体技术原理

通过车路协同,可以支持对自动驾驶ODD进行动态管理,并合理扩展自动驾驶ODD,让自动驾驶车辆在尽可能多的环境下实现连续自动驾驶。通过VICAD管理扩展自动驾驶ODD的流程见图3.38,包括以下步骤:

- 1) 明确自动驾驶ODD限制场景清单,需要确定不同等级、不同品牌、不同车型自动驾驶车辆的具体ODD限定场景清单;
- 2) 实时检测识别ODD限制场景:通过车路协同感知,对CAV及周边交通环境进行实时感知识别,包括交通参与者、交通事件、交通运行状况等,并对感知结果信息进行综合判断,确定对自动驾驶是否有影响,并确定影响时间、影响范围和影响程度等,以及是否作进一步处理;
- 3) 路端发起对自动驾驶车辆提供VICAD应用服务:针对确有影响的ODD场景,路端发起对CAV的应用服务请求,车辆平台经审核确认后,由路端为车辆提供协同感知、协同决策规划或协同控制服务;
- 4) 车辆在路端的帮助下,安全无接管通过ODD限制场景。



图 3.38 ODD动态管理流程图

(二) 典型场景举例: 无信号灯交叉口协调通行

表3.12列举了L4自动驾驶的可能存在的典型ODD限制场景,如道路施工、交通事故、混行等相关场景。针对其中的动态实体类ODD限制场景,可通过车路协同感知或决策规划方式,提升CAV的感知能力和决策规划能力,解除ODD限制;针对静态实体和环境条件类ODD限制,在车路协同感知和决策规划的基础上,还可以通过车路协同控制实现对车辆、交通设施和交通环境的优化控制,例如信号灯优化控制、道路融雪除冰、装置等,保障车辆安全通过ODD限制场景。

表 3.12 自动驾驶ODD限制与管理扩展实现方式(举例)

ODD限制场景分类			典型场景举例	L4自动驾驶场景应对能力	扩展ODD的方式	
一级分类	二级分类	三级分类				
动态 实体	交通情况	交互冲突	机动车-机动车交互冲突：并线汇合冲突、前车急刹、加塞、切弯等突发行行为	困难	车路协同 感知/决策/规划	
		交通阻塞	车辆停滞			困难
	车辆排队或拥堵			困难		
	道路使用者	机动车	危险行为：超速、逆行、闯红灯等突发行行为	困难		
		行人	危险行为：行人进入机动车道、鬼探头、闯红灯等突发行行为	困难		
		非机动车	危险行为：非机动车进入机动车道、鬼探头、超速、逆行、闯红灯等突发行行为	困难		
	非道路使用者	动物	动物闯入的突发行行为	困难		
		其他	低矮障碍物、抛洒物、异常障碍物等	困难		
静态 实体	道路类型	停车场	室内停车场	困难	车路协同控制 (控环境)	
	道路表面	道路路面	积水、结冰、积雪、泥泞等	困难		
	车道交叉	平面交叉	有信号控制交叉口		困难	车路协同 感知/决策/规划
			无信号控制交叉口		困难	
			匝道分合流、岔道		困难	
			环形交叉口		困难	
	车道特征	车道标线	车道线模糊		困难	车路协同控制 (控环境)
			无车道线		困难	
	道路边缘	边界线	无道路边界线		困难	
	道路设施	特殊设施	长隧道		困难	> 车路协同 感知/决策/ 规划/控制 (控车) > 车路协同 控制 (控环境)
			桥梁		困难	
立交				困难		
铁路交叉口				困难		
临时设施		道路施工		困难		
	交通事故		困难			
环境 条件	天气	能见度	较差(大雾、大雪、大雨、沙尘暴、团雾等)	困难		
	连接性	信号强度	信号干扰		困难	
			无信号		困难	

下面以无信号灯交叉口协调通行为例，对ODD管理和扩展进行说明。

问题描述：

以图3.39为例，自动驾驶车辆在通过复杂路口（包括城市内复杂交叉口、高速公路或快速路匝道口）或无信号灯交叉口时，由于不同方向车辆流向的交叉冲突，容易造成碰撞风险或引发接管。



图 3.39 无信号灯交叉口场景

场景原理：

通过车路协同可以从路口全局识别预测所有车辆的驾驶意图，并给车辆制定合适的通行策略，让路口车辆有序通行，可避免接管。具体流程如下：

- 1) 路端系统和设施对路口车辆进行实时感知预测，路口车辆也可通过V2X主动上报车辆行驶意图（预期轨迹，包含各时刻的车辆位置及速度）；
- 2) 路端系统和设施依据交通规则（左转让直行）、优先策略等进行一体化决策，比如让直行车辆优先通过、左转车辆随后通过；
- 3) 左转车辆根据路端的统一调度提前减速避让，直行车辆可不减速或加速通过；
- 4) 所有车辆在路端的统一调度下，高效通过路口。

应用效果：

如图3.40所示，通过协同感知和决策规划，可以保证自动驾驶车辆在不接管的情况下，具备在交叉型道路环境行驶的能力，从而扩展了自动驾驶的ODD。

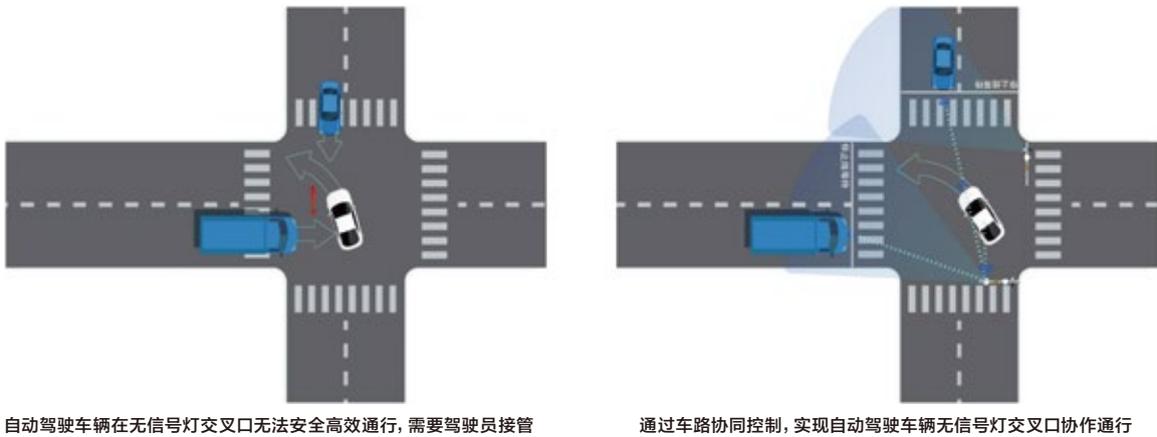


图 3.40 车路协同决策规划实现无信号灯交叉口协调通行

(三) 综合应用效果

车路协同对自动驾驶ODD扩展的前后对比效果示意图3.41和图3.42。以一次具体出行行程为例，从起点到终点过程中，会经历一系列场景，如：

- 1) 泊车场景，如室内封闭的停车区域驶入驶出；
- 2) 城市道路中的交通冲突场景，如有信号灯交叉路口、行人非机动车混行道路；
- 3) 高速道路中的长隧道、沙尘团雾等低能见度区域、施工区域等场景等。

受自动驾驶ODD限制，在经过困难场景时，车辆必须退出自动驾驶模式，并由驾驶员对车辆进行接管，使得自动驾驶不能连续运行；通过VICAD，可以帮助车辆在这些ODD限制场景中依然保持自动驾驶状态，实现自动驾驶连续无接管运行（除极端恶劣天气、无高精度地图覆盖等不可控因素外），如图3.42所示。

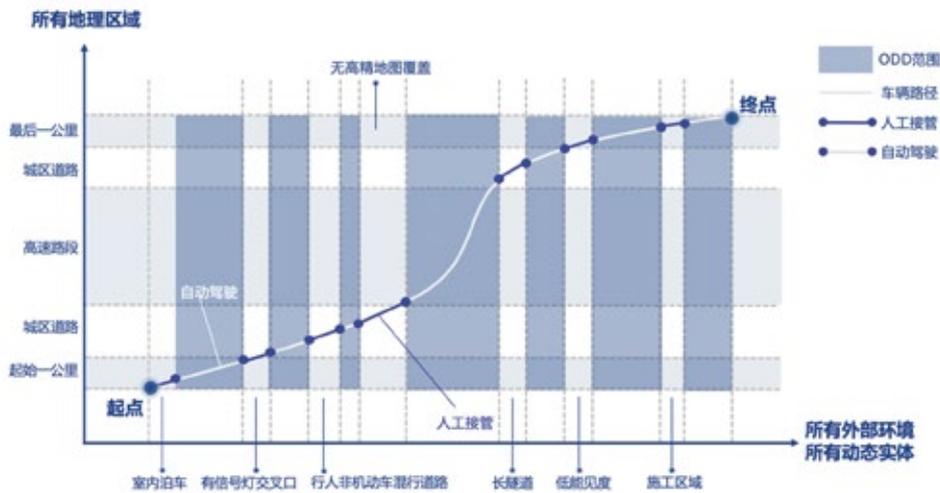


图 3.41 ODD扩展前

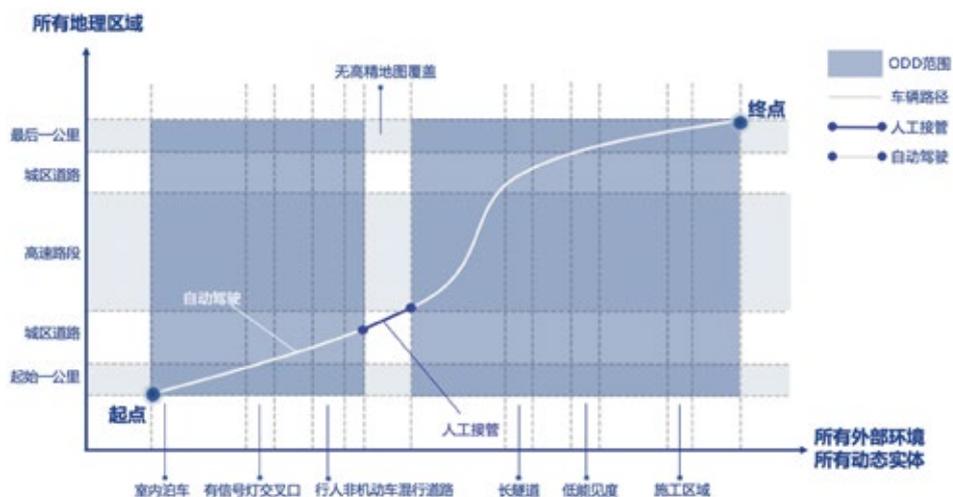


图 3.42 ODD扩展后

3.4 ACTION 4 小结

如上论述，在VICAD多重作用下，可以为L4自动驾驶车辆提供差异化应用支撑服务，让L4自动驾驶车辆更安全、更普适，服务于居民的日常出行。图3.43示意性给出了VICAD对L4自动驾驶车辆的作用效果，其中：

1) 在自动驾驶能力水平方面，L4自动驾驶能力水平会显著提高，能够成功应对各类复杂场景；

2) 在自动驾驶商业化落地方面，现阶段L4的自动驾驶只能在封闭或有

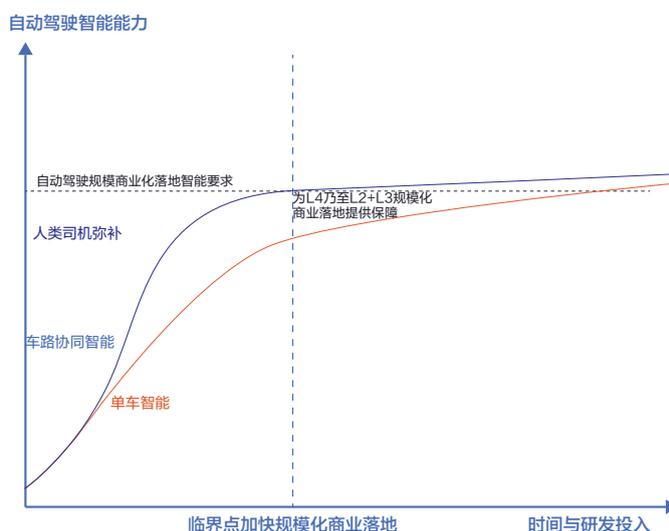


图3.43 VICAD对L4自动驾驶的促进作用

限区域内实现自动驾驶规模商业化落地，L4单车智能在足够长的时间和足够充分的研发投入条件下，最终可以实现无人化自动驾驶规模商业化落地，但是在VICAD加持作用下，可以快速达到无人化自动驾驶规模商业化落地要求的临界点。

04

车路协同自动驾驶 加速L2规模化应用

L2等级自动驾驶在现阶段已经实现规模商业化落地,且呈现出爆发式增长趋势,但另一方面,L2较快发展的同时,也暴露出安全性问题高发、功能适用场景有限等一系列问题。VICAD面向L2等级自动驾驶车辆,可以发挥多触达、多层次服务优势,将L2带入到更加安全,用户体验大幅改善的规模商业化新阶段。

4.1 ACTION 1

L2自动驾驶主流方案及其限制

根据SAE标准定义，L2等级自动驾驶同时提供转向和速度控制，要求驾驶员全时参与驾驶，并能随时介入，紧急情况下在系统要求时须随时接管驾驶。

而L2+并不是一个标准自动驾驶等级，是目前行业各个厂家为了强调自身产品在L2级功能基础上有不同程度的增强，从而采取的非正式称呼，其他如L2.5，L2++等名称也属于此类情况，此类汽车的共同特性在于驾驶人仍然作为责任主体，需要全程保持专注并在系统要求时随时接管，这一点与L2保持一致。本白皮书统一用L2来代表这类产品。

4.1.1 L2常见技术方案

目前L2等级自动驾驶按照传感器布局有三种常见的技术方案，分别是1R1V(3R1V)方案、5R1V(5R5V)方案和1R8V方案，其中R代表毫米波雷达，V代表摄像头。

(1) 1R1V(3R1V)方案

1R1V(3R1V)方案是目前比较成熟，也是装配率最高的方案。如图4.1所示，1R1V由单视觉模块FCM和单雷达模块FCR通过连接组成，没有单独集中式控制器，由FCM模块负责视觉感知部分，同时FCR模块处理雷达感知，采用传感器后融合方案。3R1V是1R1V基础上增加两个后方雷达，实现高速公路部分速域辅助驾驶（HWA）。

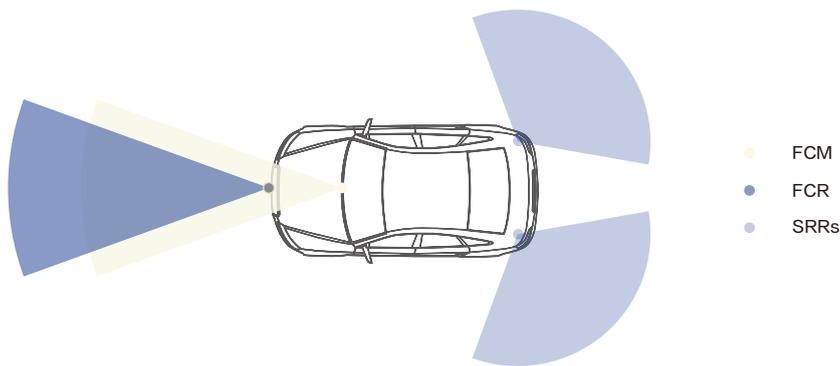


图4.1 1R1V方案

(2) 5R1V(5R5V)方案

如图4.2所示，5R1V方案是在1R1V方案基础上加上四颗角雷达，集中域控DCU仍为低算力

MCU, 负责结构化传感器数据的融合并进行控车。在5R1V方案基础上, 还可以升级增加4颗环视摄像头形成5R5V方案, 在此方案中集成了集中域控制器, 功能方面一般实现了高速公路全速域辅助驾驶HWP (High Way Pilot)。

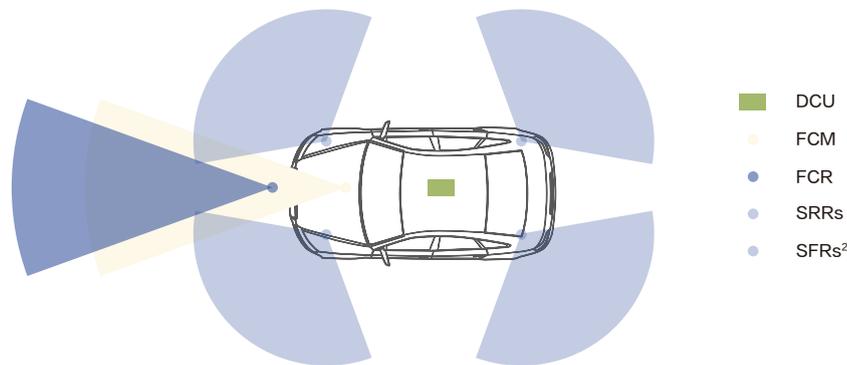


图4.2 5R1V方案

(3) 1R8V方案

如图4.3所示, 1R8V的传感器方案配备了FCR, 前向3目摄像头, 侧前侧后4个侧方摄像头和1个后方摄像头, 功能方面1R8V可以支持领航辅助驾驶功能, 同时开始配备高精地图。在此方案中, DCU一般都升级为大数据力计算平台, 大部分传感器从智能传感器变为单纯传感器数据输出, 在计算平台进行处理并融合。

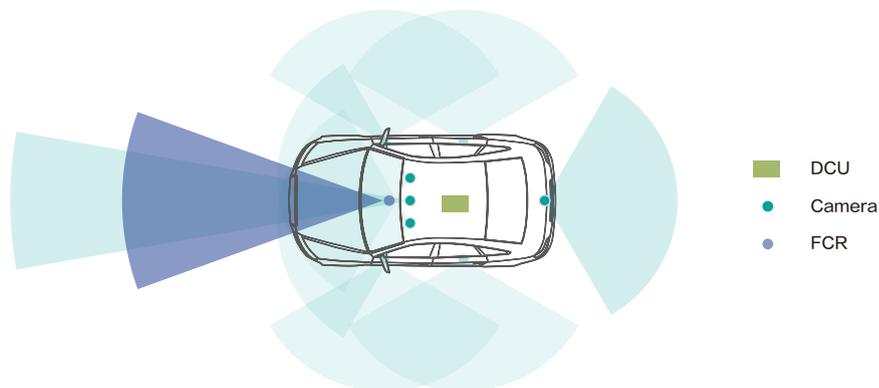


图4.3 1R8V方案

4.1.2 电子电气架构演进

智能驾驶的电子电气架构也在不断发展和演进。如图4.4所示, 从L1到L4, 在车辆传感器方案演进的同时, 计算平台也在从分布式ECU发展到L2的域集中计算平台, 再到L4的整车中央计算平台, 集中化程度越来越高。

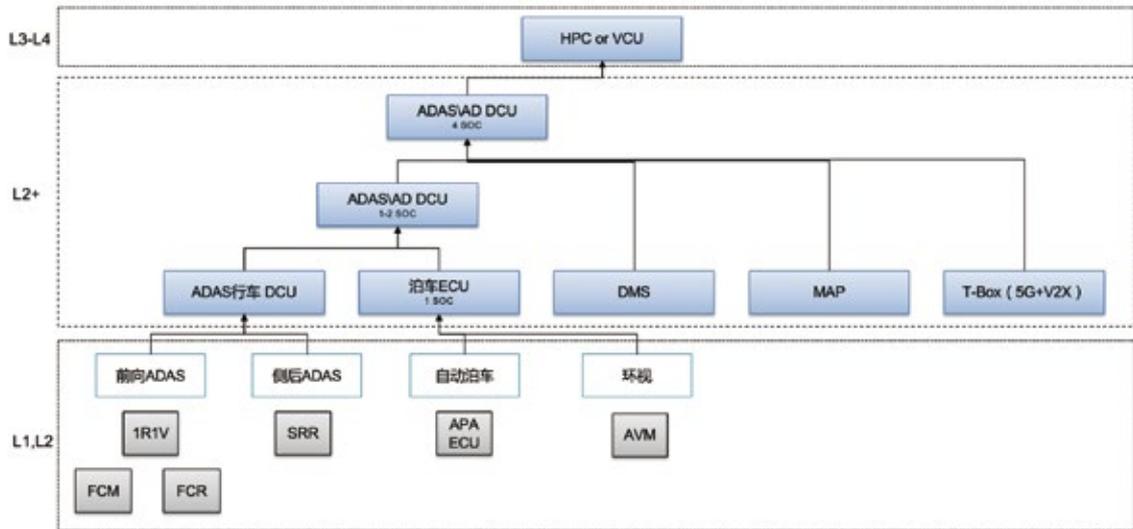


图4.4 汽车电子电气架构的演进

对照4.1.1节, 在1R1V方案中, 不存在中央控制器, 一般由FCM或者FCR模块来进行传感器融合并进行控车, 传感器融合一般采用后融合方案, 算力要求低, 规划和控制部分逻辑简单, 能够适应高速结构化道路简单工况。

随着传感器数量增多, 感知复杂深度学习模型引入, 从5R1V开始, 传感器融合、感知、预测、规划, 控制的复杂度提高, L2车辆开始装配集中式计算平台、高精地图、高精度定位、车载通信单元等设备, 具备领航辅助驾驶能力。

随着L2的进一步发展, 车载计算平台在融合了定位、地图、单车感知的基础上, 进一步融合通信能力, 具备车车、车路、车云通信能力, 为基于车路云协同环境下的协同定位、协同感知、协同规划控制提供了软硬件架构上的有力保障。

4.1.3 L2自动驾驶面临的主要挑战

与第三章L4面临的问题类似, L2级自动驾驶面临的问题在安全和ODD两个方面的问题更加突出。在安全性方面, 由于L2处于人机共驾的阶段, 人类驾驶员仍然是责任主体, 所以对于路端感知和路端安全事件提醒, 不仅仅是需要用于车端决策规划, 更重要是要和人类驾驶员交互, 使得接管有更充足的提前量, 减少接管突然性, 使得L2自动驾驶更安全、更人性。

4.1.3.1 安全挑战

如图4.5所示, 在L2等级ADAS安全事件中, 超过10%为危害人身安全的交通事故, 这一比例大幅超过手动驾驶, TOP4事故原因包括:

- 1) 对于前方故障、抛锚或施工未能及时感知;

- 2) 前车突然减速、急停或加塞应对不及时;
- 3) 异常ADAS工作环境条件, 如雨雪天路面和团雾, 可能会导致车辆刹车距离过长或者传感器时效;
- 4) 高速道路路面抛洒, 遗落物等静态物体不能有效识别。

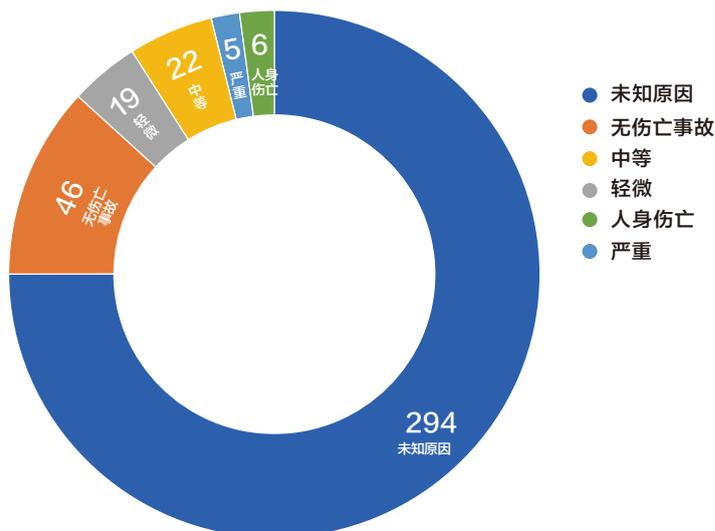


图4.5 L2 ADAS 危害等级分析 (数据来源: NHTSA ADS SGO Report, 2022年6月)

(1) 感知距离和人类反应时间的冲突

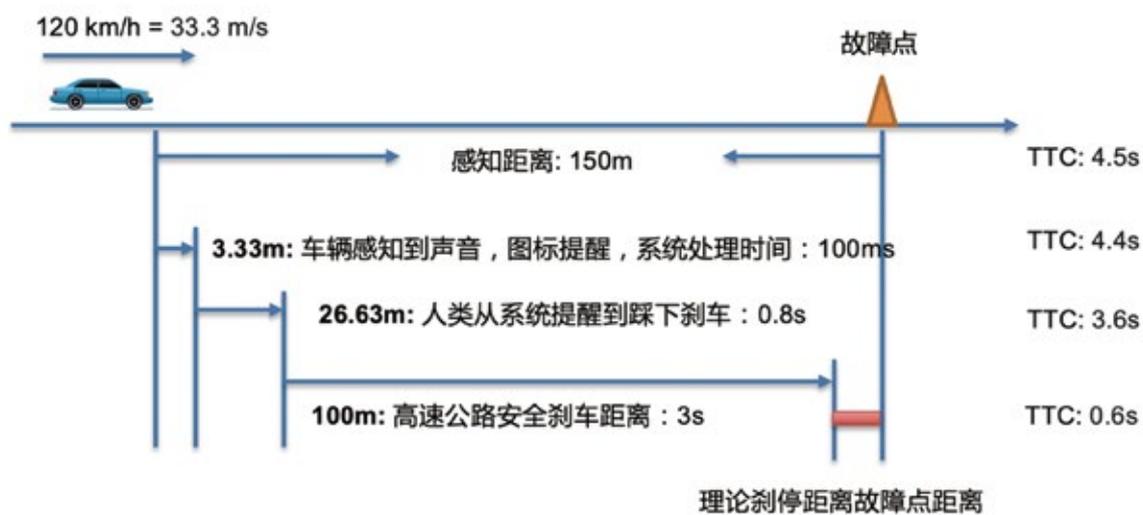


图4.6 高速施工场景TTC分析

感知距离和人类驾驶员反应时间的矛盾,是目前高速公路场景下各类L2 ADAS安全的首要因素,提前预知前方事故,施工等安全事件是提高L2 ADAS安全性的首要前提。如图4.6所示,按照典型场景高速公路路障识别为例,车辆以120km/h速度行驶时,在150m左右距离可以识别到路障锥桶,从车辆感知识别,到通过图标或声音为驾驶员提供预警,以及驾驶员反应刹车,最终TTC (Time to Collision, 预计碰撞时间)已经不足1s,留给人类的安全反应时间严重不足。再比如图4.7所示的两个场景,在道路转弯曲率过大,或者在前方隧道的场景下,L2 ADAS无法预知前方安全事件,驾驶员没有任何反应时间。

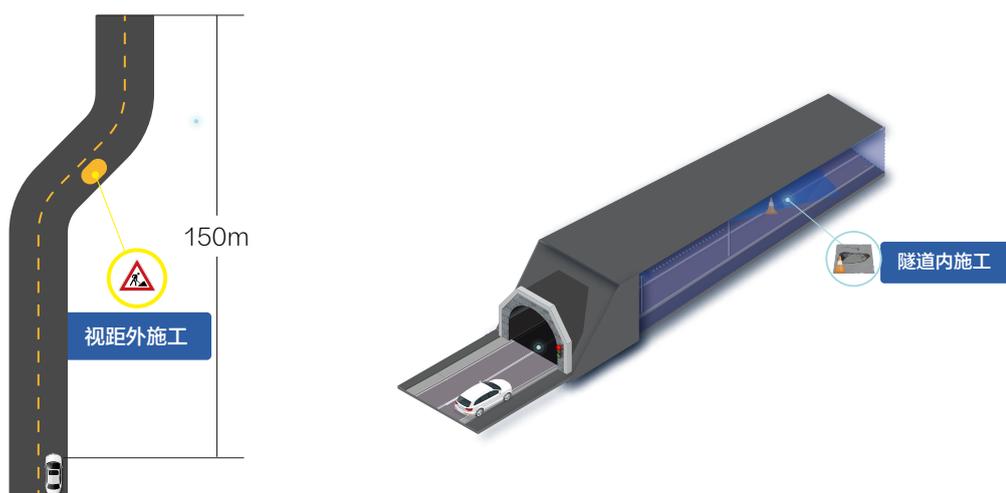


图4.7 道路环境影响感知距离

(2) 静态物体识别能力不足

静态物体识别是目前高速公路L2 ADAS的安全难点之一,已经发生多起因未能识别路障或抛锚车辆而引发安全事故的案例。目前L2广泛采用的毫米波雷达,因为识别方向精度低,为了避免幽灵刹车,在高速上对于路面静态物体的识别会进行过滤,而摄像头目前受到反光,光线不足、识别距离等因素也影响了高速静态物体识别。本章后续提出使用路端检测,并且通过路端V2I和云端V2N形式进行广播的方式,提供解决方案。

(3) 路面和环境条件感知能力缺乏

L2车辆的动力模型需要考虑各种环境因素。以刹车距离为例,车辆在不同环境条件下的刹车距离差异较大,如行驶在湿滑路面或冰雪路面上的车辆会有不同的制动性表现,当传感器失灵、无法感知当前道路条件,并且按照固定参数控车时,可能会导致紧急情况下的控制失效,引发安全事故。如图4.8所示,随着车速增加,车辆在干湿两种路面的刹车距离差异逐步扩大(忽略车辆环境、按照固定参数控车无法保证安全的跟车距离)。

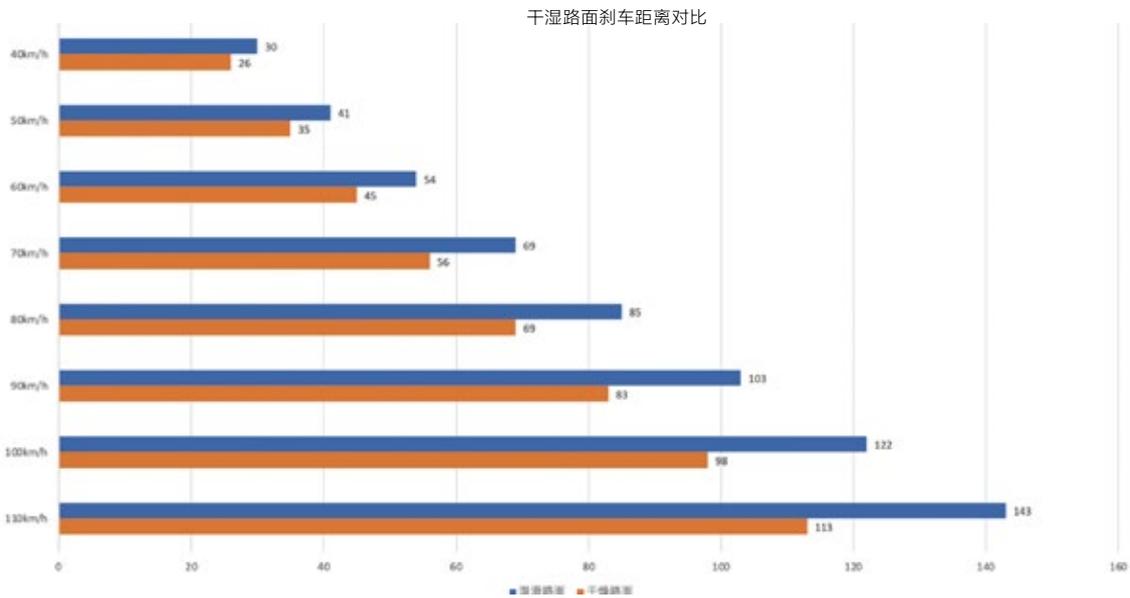


图4.8 干湿路面刹车距离对比

受车辆传感器限制，L2车辆较难获取更多环境条件信息。通过路端感知和云端下发信息，车辆可以提前获知前方道路条件等环境信息，保证L2辅助驾驶安全。

4.1.3.2 ODD受限

在自动驾驶ODD方面，L2自动驾驶车辆面临的问题更加突出，目前仅能在高速公路的部分简单场景允许自动驾驶系统运行，城市道路、停车场等均要求驾驶员接管，下面对于城市和停车场场景限制及其原因进行分析。

(一) L2辅助驾驶城市场景限制

L2辅助驾驶目前在城市道路还不成熟，还面临诸多技术方面和安全方面的挑战，下面列举两个典型的城市挑战场景：

(1) 红绿灯识别问题



图4.9 红绿灯识别问题

L2扩展到城市道路驾驶的首要挑战就是红绿灯识别问题，逆光、多语义、遮挡等问题，导致目前靠前向摄像头视觉识别红绿灯的方案很难系统地彻底解决所有长尾问题，给L2扩展到城市道路带来挑战。

(2) 高精地图覆盖和更新问题

目前L2辅助驾驶方案大多建立在高精度地图之上，高精度地图为自动驾驶车辆提供了车身传感器之外的重要先验信息，大幅加速了感知，规划，决策及定位等自动驾驶应用算法，但是在L2扩展到城市道路场景后，高精地图仍面临以下挑战：

- 1) 高精地图主要覆盖高速公路和城市快速路，城区道路覆盖不足，并且建设成本高；
- 2) 高精地图鲜度问题，即如何保证足够的更新频率以及及时体现现实世界变化；
- 3) 高精地图动态图层更新，比如封路、可变车道、限行政策等动态元素的更新。

高精地图的缺失或者鲜度不足问题也是目前导致L2辅助驾驶尤其是领航辅助驾驶模式导致接管的主要原因之一，行业也亟待一种更优的地图变更识别，采集和分发的方案。

(二) 公共停车场泊车功能限制

在各种驾驶场景中，停车场泊车耗费大量的时间和驾驶员精力，相比其他公开道路的驾驶活动，在停车场内泊车几乎没有乐趣可言。停车场（尤其是购物中心停车场）实现自动驾驶将极大提高社会资源利用率和商业效率，改善驾驶体验。当前已经量产的自主泊车技术方案主要为学习型技术路线，适用于在家庭、办公区等固定场景，通过车辆对驾驶行为以及周边环境的学习而来，难以应用在大型公共停车场。下面列举一些限制公共停车场自主泊车功能实现的限制：

(1) 遮挡环境定位能力缺失

目前室内停车场定位，尤其是复杂多层停车场定位仍然缺少行业标准解决方案，停车场自动泊车功能受限需要解决室内定位能力问题，目前自动驾驶依靠的GNSS、RTK、IMU等定位方式在室内有遮挡时因为缺少可靠，标准的绝对定位信号源来消除IMU的时间累计误差，所以在室内定位技术方案的建立和标准化是目前停车场自动泊车的前提。

(2) 缺乏行业标准化方案

要实现停车场自动泊车，首先车辆必须能够从停车场场端获取车位状态，并且能够接受场端指派车位，而停车场本身也需要支持车位状态管理、车位预留、车位指派、车辆自动计费等功能。目前的停车场还停留在车位占用指示灯，可用车位数量指示灯等为人类驾驶泊车引导的阶段，缺乏为自动驾驶服务的标准化的车位查询、车位分派、车位预留、车位引导、自动离场收费等功能。

表 4.1 VICAD对L2主要服务内容 (部分)

服务主体	服务内容	实时性要求
云端服务	<p>聚合车端、路端和云端信息，进行实时数据分析并输出：</p> <ul style="list-style-type: none"> a)交通事故、路况信息； b)天气等环境信息； c)施工、阻断等信息； d)高精地图基础图层服务； e)聚合并管理其他服务，如停车场引导系统； f)其他交通信息； <p>车云之间采用移动蜂窝Uu通信，云端接受车端请求，发送相应信息到车端。</p>	<p>事件分钟级更新 地图周级或天级更新</p>
智能路端	<p>聚合路端传感器，车端V2X消息输入，进行实时数据分析，输出：</p> <ul style="list-style-type: none"> a)路端全量感知结果； b)红绿灯信号相位及倒计时； c)高精地图局部动态图层； d)道路弱势通行信号； e)行人、非机动车横穿和车辆逆行提醒等安全提醒信号； f)路面抛洒物，遗落物等提醒信号； g)提供车辆协作式通行信号； h)差分定位参考信号，室内定位参考信号； <p>车路之间采用PC5标准通信，采用C-V2X协议标准。</p>	<p>安全相关提醒： 100ms内 其他提醒类信号： 200ms内</p>
自动驾驶车辆	<ul style="list-style-type: none"> a)接收来自云端，路端实时信息； b)融合车、路、云端的输入形成车端完整感知； c)和人类驾驶员进行实时交互，确保驾驶员预知前方安全事件，必要时提前做好接管准备。 	

4.2.2 车端参考技术架构

与L4相比较，服务于L2的车路协同技术方案，既要考虑车路协同自动驾驶，也需要考虑路端事件，云端事件和人类驾驶员的实时交互。建议的系统设计参考方案如图4.11所示。

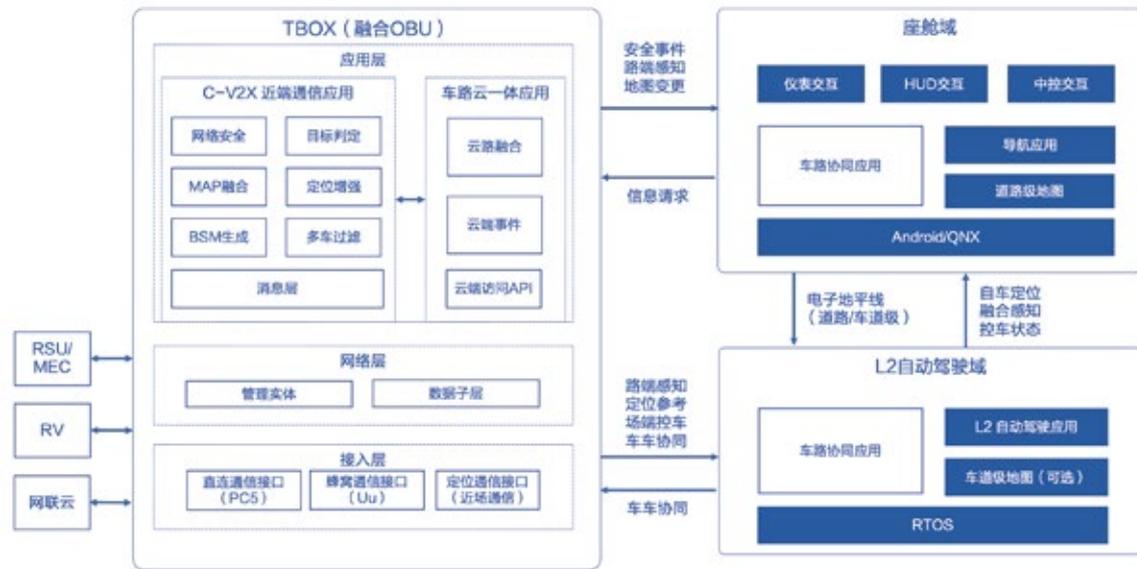


图4.11 车端参考架构

在L2级自动驾驶车端参考方案中，主要涉及到三个域控制器，其各自功能分配按照如下设计：

1)T-BOX-OBU域控制器：负责与云端、路端、场端通信的链路，同时对V2X信号进行基本处理，将路端感知、地图变更、安全事件等输出到座舱，同时将路端感知、定位参考信号、场端控车信号、车车协同信号输出到自动驾驶域。T-BOX-OBU域控制器接收来自座舱域的信息请求，同时接收自动驾驶域的车车协同消息。

2)座舱域：负责与用户交互，包括车路协同事件和导航应用的融合，并通过中控屏幕、HUD、仪表等形式将导航、车路协同事件等信息显示给用户，让驾驶员随时了解车、路、云输出的车辆和环境信息；座舱域同时将路端地图和本地地图融合生成地图动态层EHP信息给到自动驾驶域，供自动驾驶获取前方地图及地图动态层信息。

3)自动驾驶域：负责车辆定位、融合自车定位，并接收路侧定位参考信号，得到融合后自车位置；负责感知融合，将路端感知和自车感知融合以得到完整的环境感知信息；负责车辆控制，同时接收来自场端的控车信号，在地下停车场等场景可以接收来自场端控车信号，以实现场端控车来完成泊车功能。

4.2.3 车路协同地图服务和更新方案

高精地图面临着地图覆盖和地图更新两个问题，地图覆盖问题随着自动驾驶场景拓展和市场装配率提高，必将持续提升，但是高精地图的更新将是自动驾驶，尤其是L2级自动驾驶所面临的一个更大的挑战。高精地图更新包含现实世界变更发现和地图更新两个部分。

目前行业探索的变更发现和更新方案主要有：

- 1)**众包**：主要靠大量投放具有环境数据采集能力的车辆，让这些车辆行驶过程中收集道路信息数据并上传到云端，云端根据反馈得来的数据构建还原度高的、即时更新的行车地图；
- 2)**专业采集和更新**：成本高，可解决首次安全通过问题，但无法解决实时变更发现问题，本文不再进行深入讨论；
- 3)**路端地图发现与更新**：依靠智慧路端传感器摄像头，雷达等，持续观测覆盖区域道路变化，实时发现，实时更新。

相比于众包更新，路端地图服务于更新具有以下优势：

- 1)**数据鲜度高且稳定**：路侧地图更新服务具有更高的固定空间范围观测频率（15-30hz），可以实现稳定的分钟级地图更新服务；而众包更新一般需要在一定周期t内，在相同车道有n次重访（n一般超过10次，t取决于特定空间位置交通要素发生变化的频率），由于具备地图众包能力的车辆分布的不均匀性，导致众包更新鲜度的随机性较大，对于车流量较小区域，甚至无法提供地图更新服务；
- 2)**成本更低**：路侧地图更新服务，主要的计算行为均在路侧计算单元，不需要将传感器原始数据通过4G/5G进行网络传输；而众包更新直接将车端原始数据或结构化数据上传云端进行聚合，由于聚合平台要求有限空间范围内高重访次数，会产生大量流量费用；
- 3)**首次通过安全性更高**：众包更新无法解决车辆首次经过的地图更新问题，而路侧的高频、持续观测特点，能够在使用地图的车辆到来之前，大概率完成地图变更识别，保证与地图相关的安全性。



图4.12 路侧地图更新架构

路侧地图更新流程如图4.12所示，流程如下：

- 1)路端传感器将原始传感器数据通过以太网上传至RSCU；

2)在RSCU内对固定点位的地图变更及动态交通事件进行检测,根据地图变更及动态交通事件检测结果,生成局部变更信息或地图动态信息,以EHP的形式通过高速通信协议发送至车端通信域控制器;

3)车端EHR对于接收到的地图变更及动态交通事件进行解析,并发送到车端融合模块;

4)车端融合模块将接收到的增量地图变更信息和动态事件基于参考位置协议与车端高精地图融合,供自动驾驶系统使用。

4.2.4 车路协同公开停车场泊车服务

(1) 系统定义及分级

车路协同泊车将现有的单车自主泊车扩展为由车路协同完成,在具体实施中,车路协同泊车区分为3个等级,以满足不同车辆及场端的配置:

1)信息协同泊车:在此状态下,场端向车辆提供可用车位信息,车位预留,并提供定位参考信息,而不参与路线规划、控车,车辆利用自身地图,由人类驾驶员或者单车自动驾驶完成泊车;

2)规划协同泊车:在此状态下,场端除了提供车位信息,车位预留外,还提供行车路线规划,并向车辆提供场端感知补盲,但不参与直接控车;

3)控制协同泊车:在此状态下,场端还将增加直接控车,完全利用场端感知、车辆定位信息、车辆单车感知信息,都发送到场端,由场端控车完成泊车过程,在此过程中,自车MEB功能仍需开启,在紧急状态下启动并退出场端控车状态。

下面将三种模式进行对比:

表4.2 三种协同泊车模式

协同泊车模式	行车路线	环境感知	轨迹规划	车辆控制
信息协同泊车	自车+场端	自车+场端	自车	自车
规划协同泊车	场端	自车+场端	自车	自车
控制协同泊车	场端	场端	场端	场端

(2) 系统架构

下图4.13列出车路协同泊车技术架构,在此架构中,车辆必须具备车路协同定位能力,可选感知、路线规划、轨迹规划能力。车端可以利用自身不同配置选择使用不同等级的场端泊车服务。场端需

要进行升级，增加车路通信、场端定位、停车场地图服务、行程规划、轨迹规划、控车和应急人工接管等服务。

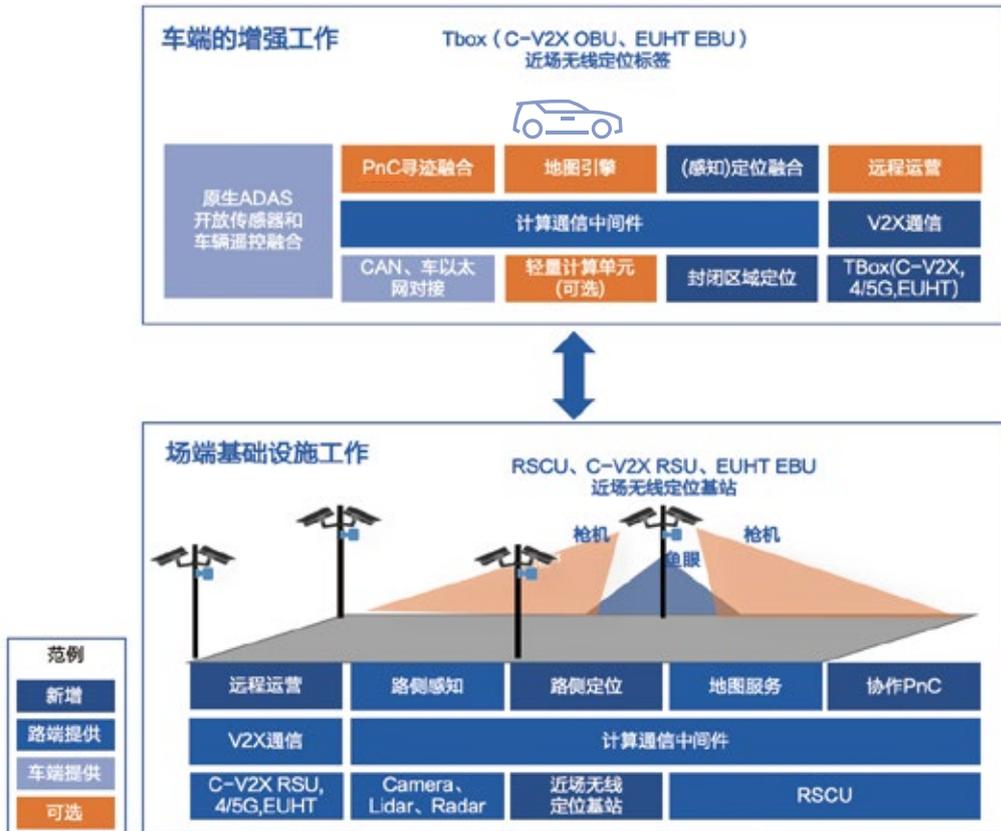


图4.13 车路协同泊车系统架构

(3) 协同定位

定位是自动驾驶需要突破的关键技术问题，尤其是在地下停车场、隧道、立交桥等卫星定位信号受遮挡的区域，需要在场端或者路端布置辅助定位设施，辅助车辆实现高精度定位。现阶段主流的辅助定位方案有定位标识（如ArUco码等）和近场无线定位基站，其中无线定位技术有超宽带定位技术（Ultra Wide Band, UWB）、射频识别定位技术（Radio Frequency Identification, RFID）、Wi-Fi定位技术（Wi-Fi Positioning System, Wi-Fi）、可见光通信技术（Visible Light Communication, VLC）和低功耗蓝牙定位技术（Bluetooth Low Energy, BLE）等。定位标识由于其难以维护，且与车端软件系统耦合度较高，难以推广。因此，考虑在场端或者路端增加近场无线定位设施，在车辆在进入室内或者地下停车场后，提供连续、高精度定位信息，完成泊车引导。

现阶段主流近场无线定位技术对比可参考图4.14，针对自动驾驶的技术需求以及车载机电环境，可优先考虑精度较高的选择，如UWB, RFID等。

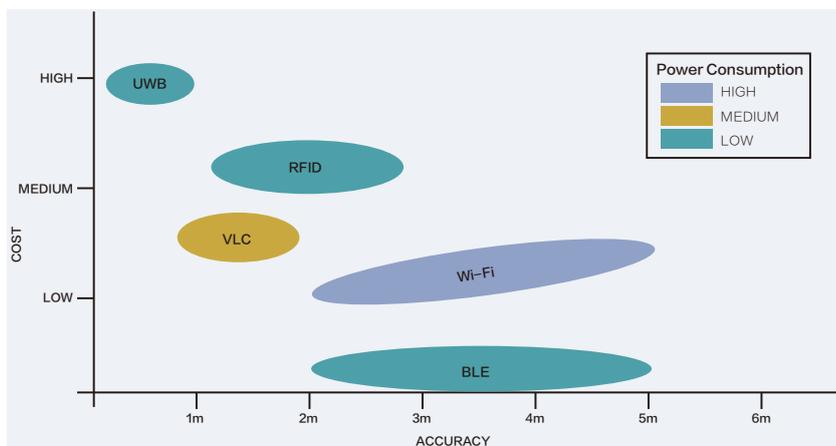


图4.14 室内无线定位技术对比

同时, 从车辆行驶的完整周期看, 需要保证定位的连续性。在无遮挡区域, 可以通过GNSS+RTK方式获得全局定位信号; 而在有遮挡区域, 可参考上文所述, 设置局部的近场无线定位设施, 并保证其空间参考的连续性。参照下图4.15, 自动驾驶车辆可以通过连续的定位和通信服务, 保证其自动驾驶功能的连续性。



图4.15 室内外路(场)辅助定位

(4) 泊车流程

信息协同泊车模式描述如下:

- 1) 场端负责空闲车位的识别, 对停车场内全部车位实现全面覆盖, 将停车场实时车位占用情况, 并上报给路侧;

- 2) 当人工主动申请或者车辆主动申请自主泊车时, 路侧基于用户停车需求和实时车位占用情况, 进行车位分配;
- 3) 车辆收到路侧路径分配后, 根据车辆自身地图进行路径规划;
- 4) 车辆利用场端辅助定位信号进行自车定位;
- 5) 车辆利用自身传感器进行环境感知, 自主生成行车轨迹并控车完成泊车过程;
- 6) 运营管理平台提供停车场内的交通管理信息、地图信息, 进行停车全业务流程的远程监控, 为车辆提供应急远程接管服务。

规划协同泊车模式描述如下:

- 1) 场端负责空闲车位的识别, 对停车场内全部车位实现全面覆盖, 将停车场实时车位占用情况上报给路侧;
- 2) 当人工主动申请或者车辆主动申请自主泊车时, 路侧基于用户停车需求和实时车位占用情况, 进行车位分配和全局路径规划;
- 3) 车辆收到路径分配后, 根据场端定位信息、全局路径规划信息和地图数据开始泊车;
- 4) 车辆接收场端感知结果后进行融合感知, 并生成实时行车轨迹, 开始控车完成泊车;
- 5) 运营管理平台提供停车场内的交通管理信息、地图信息, 进行停车全业务流程的远程监控, 为车辆提供应急远程接管服务。

控制协同泊车模式描述如下:

- 1) 场端负责空闲车位的识别, 对停车场内全部车位实现全面覆盖, 将停车场实时车位占用情况上报给路侧;
 - 2) 当人工主动申请或者车辆主动申请自主泊车时, 路侧基于用户停车需求和实时车位占用情况, 进行车位分配和全局路径规划;
 - 3) 车辆上传自身感知和自身定位到场端, 由场端融合场端感知后, 生成车辆实时行车轨迹;
 - 4) 场端向车辆发送控车信号, 车辆按照按照控车信号开始泊车;
 - 5) 车辆MEB功能全程保持打开, 在泊车过程中因为碰撞预警激活, 应停止泊车, 并向场端上报状态;
 - 6) 运营管理平台提供停车场内的交通管理信息、地图信息、全局路线、行车轨迹, 进行停车全业务流程的远程监控, 为车辆提供应急远程接管服务。
-

(5) 应用效果

车路协同泊车可以帮助车辆快速找到停车位,并且在驾驶员不参与操控的条件下,实现车辆自动驶入和驶出停车位。用户到达停车场入口即可下车,只需启动一键泊车程序,车辆自动驾驶完成在停车场的泊车入位;用户准备取车时启动“一键取车”功能,车辆自动驾驶从车位驶出,自主接驾。停车场场端管理平台对车位、缴费实现统一管理。

4.2.5 车路协同决策规划

目前,L2级自动驾驶面临一系列挑战,除了感知不足、高精地图覆盖及更新不足、遮挡环境下定位能力较弱之外,对其他车辆意图缺乏判断和协同同样是造成安全事故、驾驶员接管的关键原因。车路协同决策规划在车路协同感知、地图、定位的基础上,在决策和规划方面也利用VICAD的方法,对当前L2单车决策规划进行扩展,融入协作式通行方法,主要体现在车路协同变道、车路协同匝道汇入、车路协同交叉口通行等创新应用。

(一) 车路协同变道

车路协同变道场景描述如下:

- 1) 车辆HV在道路正常行驶,车辆NV在HV相邻车道行驶;
- 2) HV和RSU具备无线通信能力, NV不具备无线通信能力;
- 3) RSU具备感知和无线通信能力;
- 4) HV在行驶过程中需要变道, HV向RSU发送变道意图, RSU根据HV信息和当前目标车道车辆行驶状态,向HV发送引导信息,见图4.16,使得HV安全变道或者延后变道。

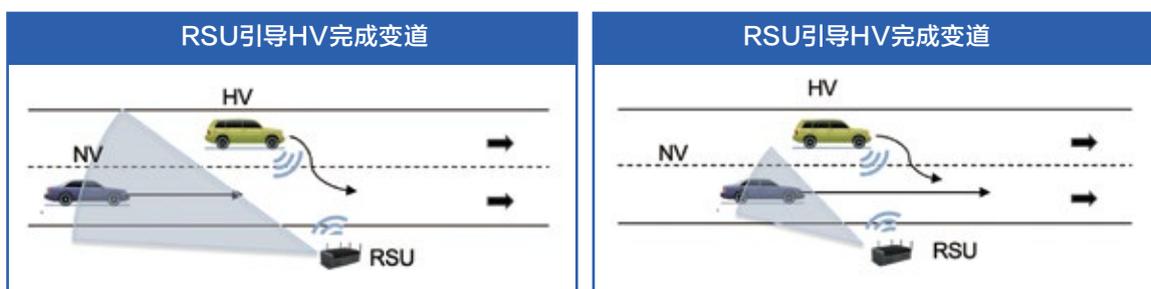


图4.16 车路协同变道

(二) 车辆协同匝道汇入

车路协同匝道汇入场景描述如下:

- 1) 车辆HV在匝道行驶, 即将汇入主路, 主路最右车道有车辆NV在最右车道直行, 匝道附近有RSU, 见图4.17;
- 2) HV具备无线通信能力, NV具备或者不具备无线通信能力;
- 3) RSU具备感知和无线通信能力;
- 4) RSU根据匝道车辆HV的行驶状态信息或者HV发送的行驶意图信息, 判断HV即将汇入主路, 并根据主路车辆运动信息, 生成匝道汇入的引导信息, 并发送给匝道车辆HV;
- 5) HV收到RSU的汇入引导信息, 根据自身运行状态和主路交通参与者信息, 生成行车规划轨迹, 在不影响主路车辆的前提下安全汇入主路。

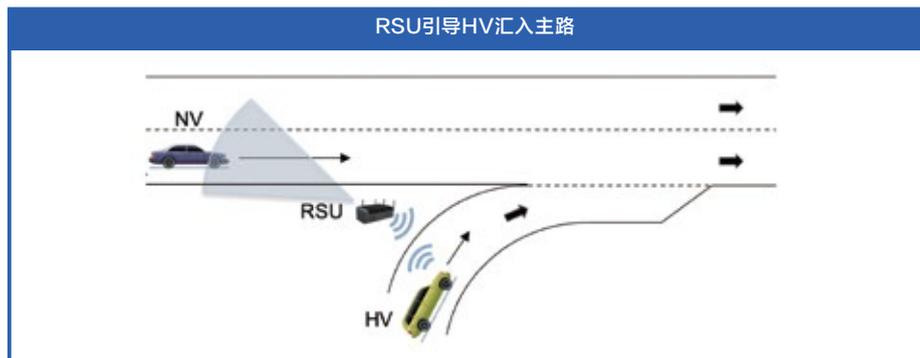


图4.17 车路协同匝道汇入

(三) 车路协同交叉口通行

车路协同交叉口通行是通过具备无线通信能力HV和路侧设备RSU协同, 使得HV安全、高效地通过无信号灯的路口。该功能适用于城市、郊区、园区等地面道路及公路的无信号灯交叉路口。以图4.18为例, 车路协同交叉口通行的场景如下:

- 1) 车辆HV-1行驶接近交叉路口, 并将要左转, HV-2在HV-1相邻车道并将要直行, HV-3从另一方向接近路口将要直行;
- 2) 路口装备RSU, 并具有无线通信和感知能力;
- 3) HV-1, HV-2具有无线通信能力, HV-3不具备无线通信能力;
- 4) HV-1, HV-2分别向RSU上报通过意图, RSU综合HV-1, HV-2的通过意图, 并结合观察到的HV-3通过意图, 生成综合的通过引导信息发送给HV-1和HV-2;

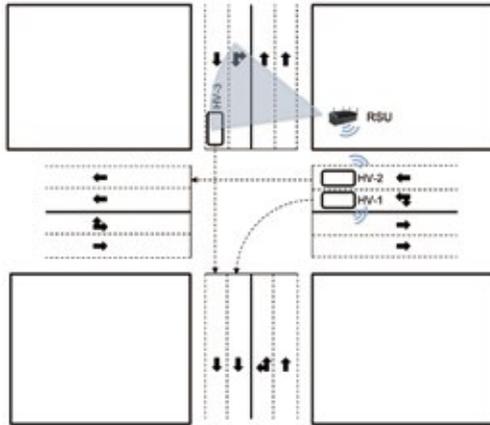


图4.18 车路协同交叉口通行

4.2.6 综合应用效果

基于VICAD总体框架的车路协同L2辅助驾驶，将极大地增强车辆的安全性，并且未来可以将城市道路和室内停车场变为工作区域，如图4.19所示。

起点	ETC 收费站	JCT 高速立交	ETC 收费站	目的地
城市道路 失效区域 技术难点： 1.红绿灯识别困难； 2.复杂路口通过困难； 3.高精地图覆盖和更新问题；	高速道路 L2/L2+ 工作区域 高频安全问题 TOP4： 1.对于前方故障，预警车辆未能及时感知； 2.前车突然减速，急停，加塞应对不及时； 3.在ADAS 设计OOD范围之外启用，如雨天跟车距离，团雾等环境无法感知； 4.高速公路路面抛洒，遗落物等静态物体不能有效识别；		城市道路 失效区域	园区/停车场 失效区域 技术难点： 1.自车定位失效； 2.场端高精地图覆盖和动态车位等信息不足，缺少行业标准；
工作区域 车路协同方案： 1.路端红绿灯信号； 2.路端协作式通行； 3.云+路高精地图覆盖和更新；	工作区域 车路协同方案： 1.通过云端获取前方事故、施工、天气等信息； 2.通过V2V、I2V应对加塞； 3.通过I2V获取路面变化，获取路面抛洒、遗落物信息；		工作区域 车路协同方案： 1.室内场端辅助定位； 2.场端辅助规划，控车；	单车L2自动驾驶 车路协同L2自动驾驶

图4.19 综合应用效果

4.3 ACTION 3 小结

如上论述，当前阶段L2级自动驾驶安全性、场景局限等问题仍然非常突出。在高速场景下安全问题频繁，危害道路参与者安全；在城市或有遮挡场景下，功能受限，影响了交通通行效率和驾驶体验。

VICAD可以增强L2级自动驾驶安全性，改进用户体验，提升社会交通安全和通行效率，让真正安全无忧、省心畅行的量产自动驾驶变为现实。

05

车路协同自动驾驶发展的 核心是建设高等级智能道路

VICAD既是一个技术命题，同时也是一个宏大的产业命题。从全球范围看，很多国家都高度重视发展VICAD，并上升到国家战略层面，其原因不仅仅是可以加速自动驾驶普及应用，提高交通安全和出行效率，更加重要的是，通过VICAD这样跨产业的超级系统工程，能够带动汽车、通信、交通、半导体等产业跨越式升级，加速构建以自动化、智能化为特征的交通出行体系，全面进入智能化城市和社会。

VICAD需要车端、路端和云端齐头并进、协同发展，而建设高等级智能道路，全面提升道路基础设施的感知认知、连接通信、地图定位、决策控制等能力，将是VICAD发展的核心关注点和首要任务。中国完全有机会充分发挥自身的体制机制优势、战略政策优势和技术产业优势，形成VICAD可落地、可持续的技术产业路线，引领全球自动驾驶与智能网联汽车发展。

5.1 ACTION 1

支持自动驾驶的高等级智能道路系统总体设计

5.1.1 智能道路分级标准

对道路进行智能化分级的原因有两方面：

(1) 不同等级智能驾驶汽车需要不同能力等级的道路支撑，以实现规模商业化

虽然VICAD已成为我国发展高等级自动驾驶的明确技术路线，但不同等级的自动驾驶车辆要实现规模商业化发展，对道路的能力具有不同的要求，其中L2及以下等级车辆驾驶和责任主体是驾驶员，道路所需的能力以感知为主，而L3、L4高等级的车辆要想实现规模商业化，则需要较高能力的智能道路。

(2) 我国公路里程数庞大，需要分级规划建设

2021年末，我国公路总里程达到528.07万公里，其中高速公路里程16.91万公里³⁰，位居世界第一。要将如此庞大的公路体系进行智能化升级改造，需要一个合理的建设规划与技术路径。公路智能化建设不是一蹴而就的，各地公路的自身条件不同，对智能化的需求也不相同，因此我国智能道路的发展应兼顾各地公路不同的功能需求，将公路划分为不同的智能化等级，并采取差异化策略分步骤建设。

本白皮书在参考国内外自动驾驶分级、智能网联分级、智能道路分级研究的基础上，结合我国VICAD发展与智能道路建设情况，提出了面向VICAD的道路智能化技术分级建议。主要参考的国内外自动驾驶与道路分级标准包括：

- 1) SAE J3016-2021 Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles;
- 2) SAE J3216-2021 Cooperative Driving Automation: Definitions and Taxonomy;
- 3) 《汽车驾驶自动化分级》(GB/T 40429-2021)；
- 4) 欧洲ERTAC提出的ISAD³¹；
- 5) 中国公路学会自动驾驶工作委员会、自动驾驶标准化工作委员会发布的《智能网联道路系统分级定义与解读报告》；

³⁰2021年交通运输行业发展统计公报。

³¹ERTAC（欧洲道路运输研究咨询委员会，European Road Transport Research Advisory Council）2019年3月发布的《Connected Automated Driving Roadmap》中明确提出了ISAD（自动驾驶的基础设施支持级别，Infrastructure Support levels for Automated Driving）的概念。

- 6)中国智能交通协会团体标准《智慧高速公路分级》;
- 7)中国公路工程行业标准《公路智能化数字技术规范》;
- 8)IMT 2020《智能网联汽车分级》研究课题等。

参考调研的内容包括:

- 1)国内天津、无锡、长沙、北京、上海、广州等市内车联网先导区建设和车路协同应用示范情况;
- 2)国内智慧高速公路设计、建设,以及新技术的发展情况,包括杭绍甬、杭绍台、京雄、延崇等智慧高速公路项目。

道路智能化分级重点考虑的要素包括:

- 1)感知能力:包括可识别的交通参与者、交通运行状态、交通环境类型、动静态特征等;
- 2)地图能力:如导航地图、高精度地图;
- 3)定位能力:米级、分米级、厘米级;
- 4)网络通信能力:包括有效负荷、时延(分钟级、秒级、毫秒级)、可靠性、覆盖范围等;
- 5)决策控制能力:自动驾驶决策控制、交通设施与交通运行决策控制;
- 6)安全防护能力:包括数据安全、网络安全、V2X通信安全、地理信息安全、可信节点认证等。

综合以上,满足VICAD规模商业化发展需求的道路智能化分级标准建议如表5.1所示。

表 5.1 使能自动驾驶的道路智能化技术分级

道路智能化等级		道路能力						与VICAD 发展阶段 对应情况	可配套实 现L4闭 环的车辆 要求
		道路附属设施	地图	感知识别与 定位能力	网络通信能力	路端算力 TOPS	功能安全与 SOTIF体系		
无	C0: 无	无	无	无	无	无	无	无	无
低 等 级 智 能 化 道 路	C1: 较低智 能化	<ul style="list-style-type: none"> 基础交通安全设施 基础交通管理设施 	导航 SD地图	无	<ul style="list-style-type: none"> 3G、4G蜂窝通信 DSRC、LTE-V2X直连通信 	0-10	无	无	<ul style="list-style-type: none"> L5 限定环境下的L4
	C2: 初级智 能化	<ul style="list-style-type: none"> C1所有设施 直连通信设施 	导航 SD地图 (车道级)	无	<ul style="list-style-type: none"> 4G蜂窝通信 DSRC、LTE-V2X直连通信 	10-50			
	C3: 部分智 能化	<ul style="list-style-type: none"> C2所有设施 感知设施(单一传感器) 辅助定位设施、计算设施等 		<ul style="list-style-type: none"> 机非人环境感知识别 米级定位 	<ul style="list-style-type: none"> 4G、5G蜂窝通信 DSRC、LTE-V2X直连通信 500ms端到端较低时延 	50-100	可选	阶段2.1: 初级协同 感知	
高 等 级 智 能 化 道 路	C4: 高度智 能化	<ul style="list-style-type: none"> C3所有设施 高精度融合感知定位设施 高精度辅助定位设施 MEC、区域级云控平台 	HD地图 (静态+ 动态)	<ul style="list-style-type: none"> 全量交通要素实时感知 多特征精准识别 分米级定位 	<ul style="list-style-type: none"> 5G Uu蜂窝通信 LTE-V2X、NR-V2X、5G 200ms端到端超低时延 	100-300	必须 满足	阶段2.2: 高级协同 感知; 阶段3.1: 有条件协 同决策控 制;	<ul style="list-style-type: none"> L5 L4 L3 L2+ 在部分条件下甚至可以支持L2及以下具备精细化线控底盘和车载定位能力的车辆
	C5: 完全智 能化	<ul style="list-style-type: none"> C4所有设施连续部署 跨域协同MEC、云控平台 		<ul style="list-style-type: none"> 全时空全量感知 厘米级定位 	<ul style="list-style-type: none"> 支持5G、NR-V2X、6G等 100ms端到端极低时延 	300+		阶段3.2: 完全协同 决策控制	

注:

- 1) 自动驾驶分级满足我国国家标准《汽车驾驶自动化分级(报批稿)》要求;
- 2) 本白皮书将C4和C5等级的智能道路统称为高等级智能道路;
- 3) 本白皮书暂从支撑实现自动驾驶规模商业化落地的角度提出了智能道路的技术分级, 道路建管养运服、执法情指勤督宣相关的智能化, 在后续报告中可考虑补充完善;
- 4) 本技术分级适用于城市道路、高速公路、1-4级公路等, 其他道路可参照实施。
- 5) 本白皮书中L2+指在L2等级AV基础上提升部署高等级的车路协同以及配套的融合、决策规划、控制模块进行升级后的AV, 以完成车路协同自动驾驶闭环。

5.1.2 高等级智能道路性能指标

(1) C4等级智能道路性能指标

根据L4级自动驾驶对协同感知、协同决策控制的要求, 提出C4等级智能道路的技术分级描述、典型特征、具体指标要求见下表5.2和5.3。

表 5.2 C4技术分级智能道路核心指标要求

道路功能或性能要求		具体指标
交通对象感知定位	类型识别 (机动车、非机动车、行人、障碍物等)	准确率≥95%
		召回率≥95%
	位置精度	3m (99分位)
		0.5m (均值要求)
	速度大小精度	4.5m/s (99分位)
		1.5m/s (均值)
	速度方向精度	10° (99分位)
路侧对象感知端到端时延 (含通信时延)	≤200ms (99分位)	
数据发送频率	≥10hz	
交通事件感知定位	事件类型识别	准确率≥95%
		召回率≥95%
	定位精度	3m (99分位)
	事件感知端到端时延 (含通信时延)	≤200ms (99分位)
数据发送频率	≥10Hz	
信号灯能力	路侧信号灯颜色感知准确率	99.9999%
	故障灯状态识别率	99.9999%
	信号灯数据端到端时延	≤200ms (99分位)
	信号灯数据发送频率	≥8Hz
地图要素实时检测能力	交通设备物理位置和属性变更检测	准确率≥99%
		召回率≥99%
	地面标识位置和属性变更检测	准确率≥99%
		召回率≥99%

表 5.3 C4技术分级智能道路决策规划核心指标要求

交通对象预测	预测轨迹3s最终偏差	<3.5m
	预测轨迹3s平均偏差	<1.5m

交通场景理解	死车	准召>99%
	排队	准召>99%
	施工	准召>99%
	事故	准召>99%
	拥堵	准召>95%
	临时接泊	准召>95%

(2) C4等级智能道路算力需求分析

要得到VICAD技术路线下智能道路的算力需求,就必须首先对标分析AD技术路线下车端算力的发展现状与趋势。如图5.1所示,目前自动驾驶车端算力已跨过千TOPS门槛,蔚来ET7、智己L7、Apollo RT6面向量产的自动驾驶车端算力最高达到了1200 TOPS,行业龙头NVIDIA甚至计划在2024年,推出超过2000 TOPS的Thor芯片,应用在自动驾驶DRIVE平台。

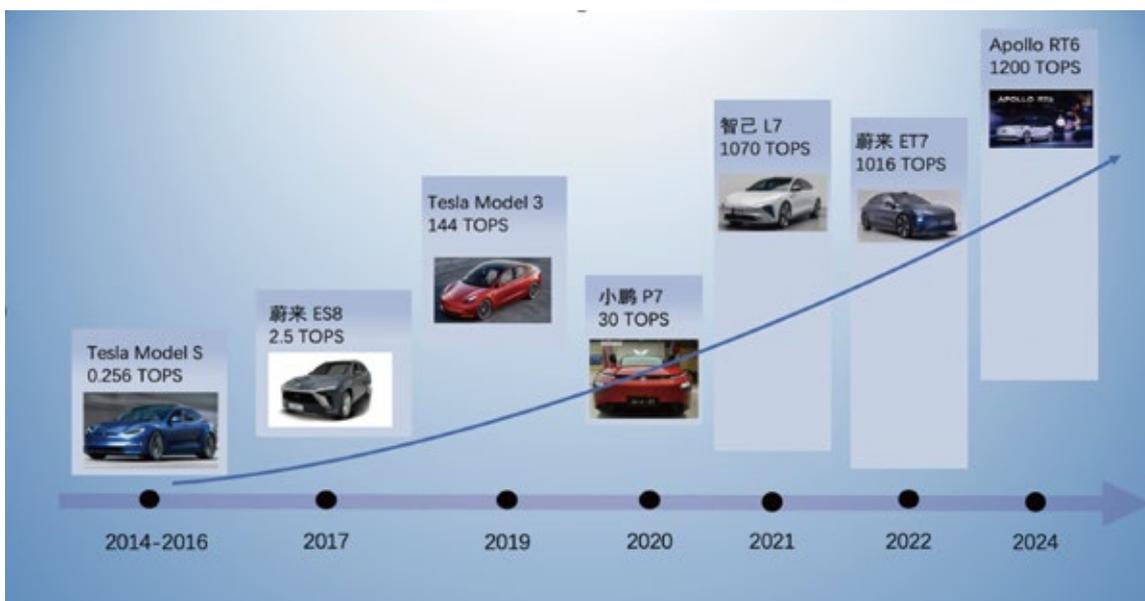


图 5.1 自动驾驶车端算力发展趋势

从服务于自动驾驶的角度来看,随着路端从协同感知向协同决策控制发展,路端算力与车端算力将呈现出相同的发展趋势,并且,路端单个节点的算力会明显超出单车算力,主要原因有:

1) VICAD中路端需要处理的具体任务与车端一致(都包括感知、地图、定位、决策规划、控制等),且都有高可靠、高精度、低时延要求。在车端和路端所需要解决的问题具备同源同构的特性,以感

知环节为例，目标检测任务需要面对4大类20小类以上的参与者和障碍物；精确性方面，典型的位置精度需要达到带99分位约束的分米级精度；实时性方面，典型的端到端时延（物理世界发生到控制发出）需要达到带99分位约束的端到端百毫秒级；协同性方面，多传感器、多交通参与者、多基础设施间需要达到时空校准和能力协同；安全性方面，系统需显著优于人类司机，这就意味着系统安全和计算器件的冗余、保障机制等需要进行系统性设计，支撑自动驾驶达到99.9999%以上的场景通过率。

2) 路端不仅要解决单车最优化的问题，还承载着群体最优和全局最优化的职责与使命，需要更高算力支持。VICAD区别于单车智能，是新的智能形态，通过引入新的智能要素，带来高维数据，并配合灵活算力和算法机制，实现由个体智能向协同智能或群体智能发展，提供更加多元化的应用服务，如智能信控、监控执法、收费等。以高维数据为例，VICAD会产生大量的数据，且信息特性与单车智能数据具有一定的正交属性，通过车路协同融合后将形成新的更高维度数据，如空间维度（范围、视角、盲区）、时间维度（动/静态、时间范围）、类型维度（多源多层）等，分布在不同维度具有正交性的高维数据信息量更大，对于智能系统的能力会产生更有效的帮助。VICAD与AD数据维度的比较见表5.4。

表 5.4 AD与VICAD数据维度比较

维度类别	维度子类别	AD数据维度特性	VICAD数据维度特性
空间维度	范围	单车局部范围，且同等设备可更密集精确	多点位全局范围，超视距，且有条件因地制宜地布设
	视角	第一视角有优势，但易于被视距问题影响	有多视角优势，可俯视视角
	盲区	传感器集中部署于车上易造成静态盲区和动态遮挡盲区，可通过运动推理盲区状态来补偿	高于参与者观察，所以盲区小，并可通过多传感器重叠区域消除盲区
时间维度	动/静态	观测点动态移动所以有难度，但也有动态视角变化前后印证的优势；观测相对变化	观测点静态，可长时间观测并分辨差异
	时间范围	单车实时	持续观测长期推理预测未来
类型维度	多源多层	单车传感器，实时一手	交通、场景、用户等多源多层数据，且易做灾害异常等高等级推理，如红绿灯、天气、人文活动等跨领域跨行业信息
其他维度特性		设备按车规部署于车内须较小，耐高温振动电磁，且能力受限	架设于路侧，可使用较大体积和重量的设备，可选择不同的形态种类，且上限更高

综合来看，目前的低等级道路，路端部署的设备功能较为单一、数据量小且算法模型简单；高等级智能道路为了达到表5.2和5.3所列性能指标，传感器数量、类型的增加及分辨率的提升，带来了海量数据处理需求，算法模型的复杂程度亦大幅提升，亟需算力提升，需要专门建设部署计算设备或

设施执行数据汇聚、感知融合、任务调度、数据存储等关键任务。表5.5以国内多个城市的车路协同自动驾驶示范区中的路端算力为参考，列出了不同等级智能化道路路端的算力需求建议，现阶段，满足高等级自动驾驶应用的高等级智能道路路端单个节点算力需求应不低于100 TOPS。

表 5.5 不同等级智能道路路端算力需求

道路智能化程度		C0-C1	C2	C3	C4-C5
支持的感知识别能力		无或弱感知能力	交通监控 交通执法	兼容C3能力 交通对象检测 交通运行状况识别 车道级别定位	兼容C3能力 交通事件检测 全量交通对象感知 高精度定位 交通运行情况识别等
支持的端到端的时延		秒-分钟	秒级	<500ms	<200ms
支持的路口算力总和		0-10 TOPS	10-50 TOPS	50-100 TOPS	100-300 TOPS
自动化应用	L4自动驾驶				√
	L3领航辅助驾驶				√
网联化应用	道路基础设施智能管理				√
	安全信息实时提醒			√	√
	车道及车辆行为监管			√	√
	智能网联公交		√	√	√
数字化应用	智慧停车		√	√	√
	智慧城管道路管理		√	√	√
	智慧交管		√	√	√
	车内信息娱乐	√	√	√	√
	地图导航	√	√	√	√

(3) C4等级智能道路对传感器性能要求

智能道路系统主要通过各类传感器设备完成对道路全要素信息收集，感知传感器应当满足全天候全天候要求，以应对各类自动驾驶场景。目前主流的感知传感器设备主要包括视觉传感器、激光雷达和毫米波雷达。每类传感器的感知范围、对不同物体的识别能力以及环境适应能力均有所差异，应发挥不同传感器性能优势，进行设备选型和方案配置，以达到最佳的感知效果。

	相机	毫米波雷达	激光雷达	多传感器融合
物体检测	●	●	●	●
物体分类	●	●	●	●
识别范围	●	●	●	●
车道跟踪	●	●	●	●
抗恶劣天气	●	●	●	●
低光照环境	●	●	●	●

● 优 ● 合格 ● 差

图5.2 不同传感器特性比较

(4) C4等级智能道路对地图要求

地图对于自动驾驶而言:

- 1) 地图作为一种虚拟的感知类传感器,为自动驾驶系统提供超视距、高可信的静态交通要素结构和语义信息,作为车端感知系统的有效补充;
- 2) 地图作为一种高实时性、全局的空间协议,为自动驾驶路径规划提供准确的车道级动、静态通行信息,使得自动驾驶汽车可以实现时、空最优的通行路径选择;
- 3) 地图作为一种虚拟的、语义化的交通规则,为自动驾驶决策与控制模块提供明确的行为约束规则和地理围栏,使得自动驾驶汽车可以更安全地与其他交通参与者进行交互。

表 5.6 C4等级智能道路对地图的要求

内容	地图要求		
	时间分辨率	空间分辨率	准确度
路况	1分钟	车道级	高
道路事件	分钟级	车道级	高
路口事件	分钟级	亚米级	中
环境	分钟级	车道级	高
地图要素更新	分钟级	厘米级	高

5.1.3 高等级智能道路具体设计

5.1.3.1 系统组成与总体架构

高等级智能道路系统总体架构见图5.3, 从物理分布角度看, 由车端、路端和云端三部分组成。

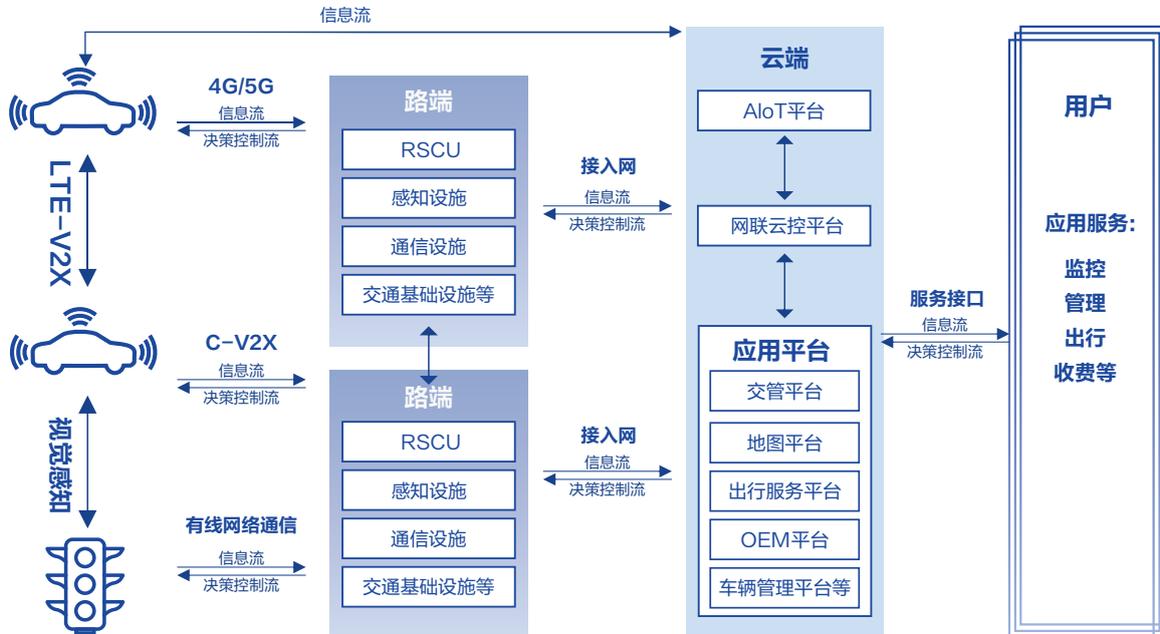


图 5.3 高等级智能道路系统总体架构

(一) 车端参考架构

车辆是高等级智能道路系统的重要组成部分, 既是被服务对象, 也可能是服务的提供方, 车辆应具备网联化和智能化两方面能力, 其中:

1) **网联化方面, 应支持PC5、Uu多模态通信能力和多终端触达方式。** 车辆应支持多种车路通信模式和通信协议, 包括但不限于基于Uu的4G/5G, 以及基于直连无线通信的LTE-V2X、NR-V2X; 在触达方式方面, 可利用车机、前后装T-BoX、OBU或其他智能终端, 支持开展数据共享和多样化、个性化应用服务;

2) **智能化方面, 应支持车路云分层协同的智能驾驶系统架构。** 如图5.4所示, CAV车端智能驾驶系统不仅可以解析处理V2X报文消息, 借助HMI或其他方式为驾驶员提供预警服务, 还可以进一步与车端智能驾驶系统的感知、决策规划及控制模块进行深度融合, 全方位支持自动驾驶安全、连续运行。

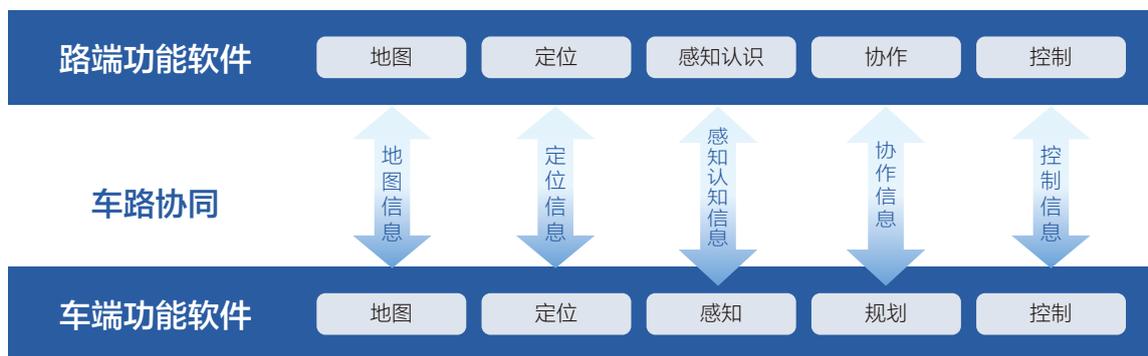


图 5.4 车端智能驾驶系统架构对路端的开放兼容性

(二) 路端系统与设施

路端主要包括各类基础设施和应用服务系统，其中路端系统包括感知系统、决策规划系统、信号控制系统、监控执法系统、收费系统等；路端基础设施包括感知设施、路侧计算单元(RSCU)、通信设施、交通管理设施、交通安全设施及各类附属设施等。

RSCU是路端系统的大脑，承载核心计算能力，同时要将多个子系统有机整合在一起，提供自动驾驶服务。RSCU有两种存在形态，一种是部署在路端的独立节点设备，另一种是部署在边缘的云平台（也称可为MEC平台）。在当前技术发展水平下，为满足高等级自动驾驶应用需求，RSCU多以节点设备形态为主，部署在更靠近传感器设备的位置。

RSCU应满足高智能、高性能、高可靠和开放化等一系列应用要求，其架构呈现出OS化发展趋势，图5.5提出了一种建议的RSCU总体架构，由实时操作系统内核层、硬件设备抽象层、中间件层、各类域服务、车路云通信、工具链以及安全等模块组成。



图 5.5 路侧计算单元OS参考架构

(1) **系统内核层**: 实时的操作系统内核层, 为上层软件栈提供了必要的内核级支持, 同时进行了面向实时处理的定制优化;

(2) **设备抽象层**: 设备抽象层实现各种设备设施接入的驱动程序。南向适配不同厂家、不同类型的硬件设备;

(3) **中间件层**: 中间件层包含通用通信计算和AI加速计算中间件等。通信中间件需要满足高并发性、低延迟和高吞吐量要求。AI加速计算中间件适配各类AI芯片, 为AI算法程序执行提供标准调用方法;

(4) **域服务**: 为了满足车路协同自动驾驶要求应该提供包括: 低时延信号灯服务, 提供统一信号灯接口; 全量障碍物感知服务, 为车辆提供盲区车、超视距能力; 智能协作服务, 为车辆提供辅助决策规划能力; 高精地图服务, 提供高精地图引擎, 对高精地图数据进行解析等; 高精度传感器设备内外参标定等服务;

(5) **车路云通信**: 提供车路、路云通信能力, 实现与车端、云端的无缝平滑通信, 支持车端、路端以及云端的一体化计算协同;

(6) **工具链**: 工具链为上层软件编译、调试和分析提供工具支持;

(7) **安全**: 为底层硬件到操作系统、设备设施抽象层、中间件层一直到服务层和应用层提供安全服务。

(三) 云端平台



图 5.6 高等级智能道路主要组成

如图5.6所示, 云端平台包括智能物联网(AIoT)平台、网联云控平台和应用服务平台三部分。

(1) 智能空间物联网(AIoT)平台

AIoT平台以设备管理为基础, 以云边端AI计算为支撑, 以数据赋能为目标, 应具备三个方面关键能力:

- 1)基于传统物联网(IoT)平台的连接能力。IoT平台连接智能道路系统各类设备, 提供设备管理, 运维监控和OTA等基础服务;
- 2)AI计算能力。面向设备边缘、局域网边缘、网络边缘提供边缘计算融合能力, 支持云边端算力资源灵活弹性调度, 协同实现感知、规划和决策等车路协同服务, 支持不同时延、不同精度、不同规模的服务场景;
- 3)业务数据赋能。通过海量的数据接入能力, 将车路云数据进行聚合、转换、计算、建模、分析, 对外提供数据开放服务, 为网联云控平台提供基础数据支撑。

(2) 网联云控平台

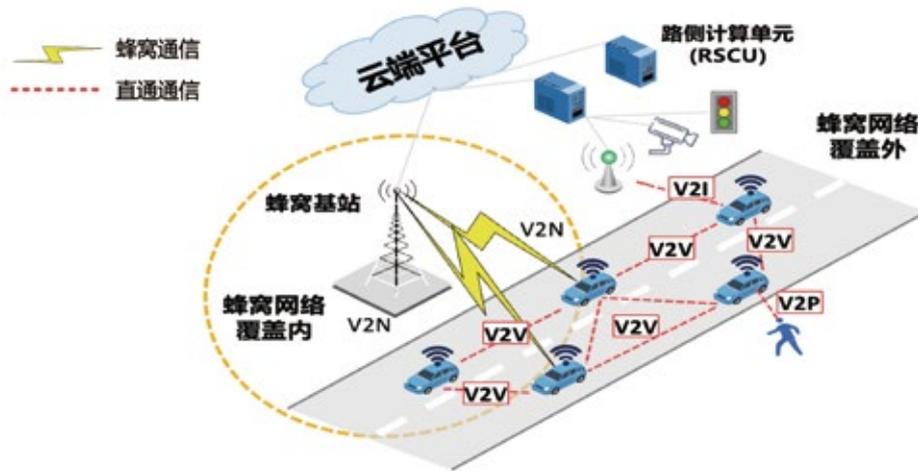
网联云控平台是服务于车路协同业务的平台系统。具有实时信息融合与共享、智能应用编排、信息安全等服务能力, 可为智能汽车、管理机构、终端用户提供辅助驾驶决策、交通运输安全、交通管理等协同应用和数据服务。

(3) 应用服务平台

应用服务平台以网联云控平台为支撑, 为产业提供各种差异化定制化应用服务, 如乘用车网联服务、交管、地图、出行、监管等。从道路监管、车辆运营、交通治理等不同角度, 提供遵循行业业务逻辑的专业化解决方案。

5.1.3.2 高可靠通信设计

C-V2X作为车联网专用无线通信技术, 能够在高速移动环境中提供低时延、高可靠、高速率、安全的通信能力, 满足车联网多种应用的需求; C-V2X通信有两种相互独立、互为补充的工作模式, 即基于PC5的直连无线通信模式和基于Uu的蜂窝移动通信模式, 分别满足不同交通要素之间的通信需求。PC5直连通信解决近程信息交互需求, Uu蜂窝移动通信解决远程的信息服务需求, 两种通信方式相互配合, 互相补充, 有效保证了车联网业务的连续性和可靠性。其系统架构设计采用直连通信与蜂窝通信融合的系统架构。C-V2X包括基于LTE技术的版本LTE-V2X和基于5G NR新空口技术的NR-V2X, 二者均采用图5.7所示的系统架构。



注：该图改自“车联网产业与技术发展路线图”，由中信科智联科技有限公司提供

图 5.7 直连无线通信与蜂窝移动通信融合的C-V2X通信系统架构

(一) 直连无线通信

为了实现车车、车路、车人通信的低时延高可靠需求，C-V2X技术引入了直连无线通信特性，终端间可不经基站转发直接进行数据传输，既可实现端到端通信的低时延，又可以在蜂窝覆盖外工作，满足车车、车路等设备间信息快速交互的需求。根据YD/T3400-2018的定义，基于LTE技术的LTE-V2X车联网直连无线通信满足如下功能要求：

- 1)车联网终端应能够通过直连通信发送和接收消息。路侧单元应能够向车联网终端发送消息，并接收来自车联网终端的消息。车联网终端之间也能够通过PC5直连通信接口实现互通。系统应能够支持向大量车联网终端高效分发信息，并支持高密度的车联网终端通信。同时，其交互的无线信号还可辅助支持定位功能，实现空口资源的高效复用；
- 2)在移动速度方面，系统应能够支持最高相对速度为500km/h的车辆间发送消息，以及绝对速度为250km/h的车辆与车辆、车辆与路侧单元、车辆与行人发送消息；
- 3)在通信时延方面，对于支持车车和车人通信的终端，无论是直接发送还是由路侧单元转发，最大通信时延应不超过100ms。对于特殊用例（如碰撞感知），车联网终端间发送V2V消息的最大时延应不超过20ms。对于车到路侧单元的最大通信时延不超过100ms；
- 4)在消息发送频率方面，系统应能够支持路侧单元RSU和车联网终端不低于10Hz的消息发送频率；
- 5)在消息大小方面，不包括安全相关的消息单元，对于周期性消息，两个支持V2X应用的用户设备之间传输的消息大小在50-300 byte；对于事件触发的消息，其消息最大为1200 byte。

对于基于5G NR新空口技术的NR-V2X相关的功能要求，在3GPP TS23.287中进行了定义，尚未完成国内行业标准的制定，本章节不做详述。

（二）蜂窝移动通信

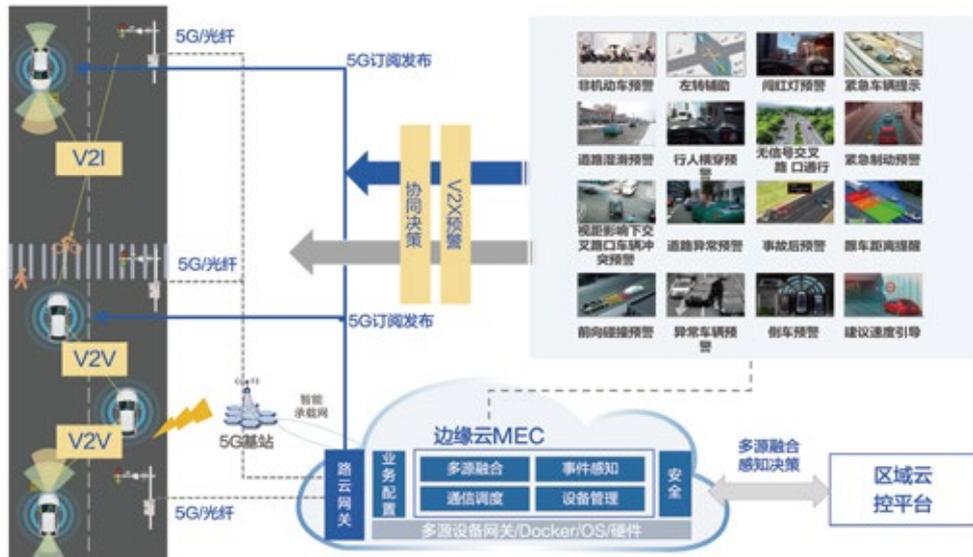
自动驾驶等级应用的不断提高，对网络也提出更高要求，如3GPP TS22.186定义的车辆编队、半自动/自动驾驶、远程驾驶等高等级智能驾驶应用场景，需要采用“通信+计算”一体化的方案构建新移动蜂窝网络，以满足高可靠性、大带宽等需求，进一步提升车路云一体化的服务能力，5G Uu网络引入了V2X通信切片、边缘计算、服务质量（QoS）预测等新特性。

通过5G网络切片具有“网络功能按需定制、自动化、业务安全隔离”典型特征，利用5G公众网络资源，利用端到端QoS或切片技术，为面向自动驾驶的车路协同数据传输提供独立切片，构建时延和带宽有保障、与其他业务数据隔离的虚拟专有网络。自动驾驶汽车可以通过5G专属切片通道访问部署在移动蜂窝网基站侧的边缘云，同时路侧感知系统也可以通过5G Uu或者有线网络回传数据到边缘云，边缘云通过云边协同机制与云控平台等进行高效互联，实现车路云数据的融合处理，形成不同的交通事件识别以及驾驶辅助预警信息推动到车端。此外，5G蜂窝网络将智能感知网络通信性能，实现不同场景下的信道建模，将结合不同的业务的QoS需求，提前进行网络质量的预判，形成对于业务有效性的及时预警以及信道优化。MEC边缘计算设备批量处理多个路口的RSU和OBU侧摄像头、雷达、信号灯等数据，通过融合感知AI算法提高了数据运算效率与数据融合度，同时MEC具有算力弹性扩容和智能调度特点，可在线扩容，支持单路口、多路口以及区域协同类应用，并能对全域下的目标全程跟踪、记录及分析，支持复杂场景下的自动驾驶策略制定，支持跨时空的驾驶路径引导，有效突破解决车端、路侧设备的算力瓶颈，实现车路云一体化协同计算。MEC节点采用标准化的互操作框架，支持不同域应用服务的按需订阅与实时更新，具有“一点分发、全网部署”的特性，快速实现自动驾驶辅助、高精地图分发与智慧交通管控等标准化应用服务的推广。

（三）Uu与PC5融合组网

如图5.8所示，对车辆接入而言，采用5G Uu与PC5直连通信融合组网，既发挥5G大带宽、广覆盖的车辆连接能力，支持远程信息服务（如交通导航、地图下载、车辆调度等）和区域协同信息服务（如高精地图分发、智能交通管理）；同时利用RSU的PC5通信实现重点场景（交叉路口、危险路段）的覆盖，实现实时的近程信息交互，保障路侧信息及时准确触达车辆，提高行驶安全。

随着5G网络规模部署以及关键性能指标有效提升，逐步成为支持车路协同、远程驾驶、云控服务等业务的有效手段，而“云网一体、算网一体、云边协同”等信息基础设施部署也进一步加速自动驾驶开展城市级规模商用进程。在5G全场景连接的基础上，6G将进一步实现万物互联，并建立多层次、全覆盖的无缝连接，作为通信、交通、汽车等多个行业融合交叉的关键领域，不断增强无感切换、协同计算、可信安全、高精定位、通感融合、空天一体等新特性，真正实现全场景下的自动驾驶。



注：本方案由联通智网科技股份有限公司提供

图 5.8 基于“通信+计算”一体化的5G车路协同服务网络

5.1.3.3 系统高可用设计

VICAD对系统可靠性提出了更高的要求，智能道路系统作为基础设施，在车路协同自动驾驶中扮演了重要的角色。智能道路系统本身是一个包含车、路和云的复杂系统，路端环境复杂、通信链路长、系统性能要求高，系统的高可用设计尤为重要。智能道路高可用设计需要考虑的因素包括但不限于：

- 1) 道路设备设施的高可用性，尤其是应对各种天气环境的高可用性；
- 2) 通信系统的高可用性，作为VICAD应用的重要一环，尤其要保证通信的可持续高性能服务；
- 3) 计算与应用服务的高可用性，应达到车规级连续高质量服务级别要求，尤其是涉及到协同决策控制相关的服务；

为满足上述要求，高等级智能道路高可用设计可从以下方面重点设计：

- 1) 算力冗余备份：系统应具备一定的冗余设计，边缘算力需要有明确的衡量压力的指标，当系统容量达到极限影响系统性能指标时，可通过冗余的算力实现弹性调度；
- 2) 负载均衡：应用服务应具备负载均衡能力，例如车云通信，云端应具备将流量均衡分配到不同的应用服务实例的能力，增强服务吞吐量；
- 3) 支持多级容灾：单机房，单机器或单实例故障应具备无需外界干预，自行恢复的能力，保证服务可完成自切换，无单点故障；

4) 分级降级: 服务设计需满足最小功能原则, 充分考虑不同组件之间的依赖性, 降低功能服务的紧耦合性, 服务可分为核心服务和非核心服务, 对非核心服务的异常能实现快速摘除, 保证核心功能的可用性, 具备服务降级能力;

5) 网络隔离: 应具备网络安全控制策略, 能够检测并防范网络嗅探、DDos攻击(分布式拒绝服务攻击)等, 减少机器攻击面, 降低被攻击的风险;

6) 灰度发布和回滚机制: 面向服务的车、路、云开发环境应具备灰度发布能力, 在小规模测试验证后, 若存在问题, 具备回滚机制, 迅速恢复到灰度发布前的稳定版本;

7) 监控告警: 系统构建环境复杂、链路长、硬件多, 应对路侧基础设施、网络、系统资源、设备状态、软件运行状态以及车端软硬件状态进行实时监控, 问题能够实时发现、快速定位, 提升运营效率。

5.1.3.4 安全设计与安全管理

智能道路系统安全设计应包含系统基础安全、运维安全和数据安全三部分。系统基础安全是指基础设施安全, 包括主机安全、通信安全等; 运维安全是指通过身份认证、访问控制、安全审计等安全防护措施, 保证运维人员在对系统进行远程运维过程中可靠性、有效性、可审计性; 数据安全指的是数据采集、传输、存储、共享等环节的数据安全保护。

其中通信安全是车路协同自动驾驶安全的重要组成部分基础, 包括网络通信安全和C-V2X通信安全两个方面。如图5.9所示, 应为通信终端颁发数字身份(V2X证书), 基于身份构造安全消息, 保证PC5消息的真实、可信, 还应基于假名证书, 保护车辆的位置隐私。

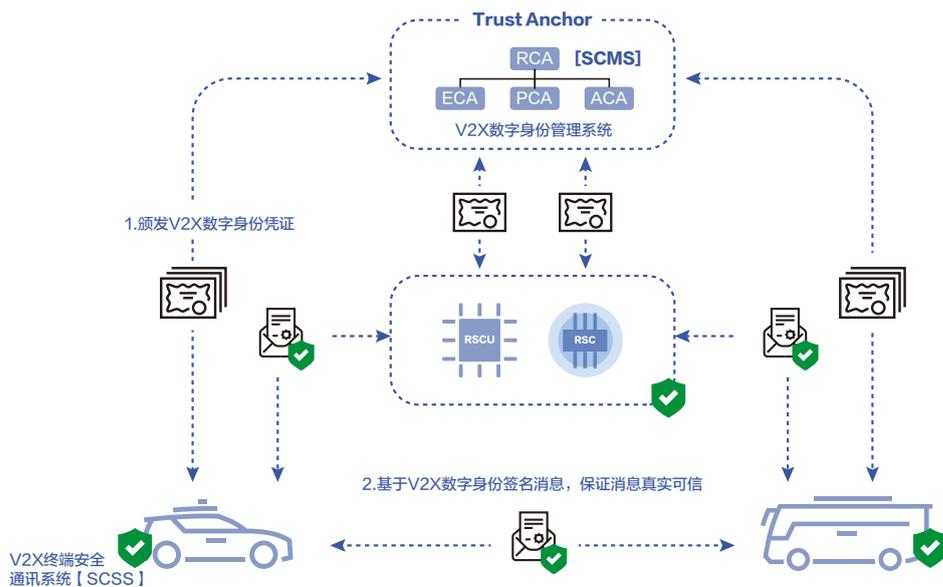


图 5.9 C-V2X通信安全

5.1.3.5 建设部署方案

以下以标准十字路口和标准路段为例，对C4高等级智能道路的具体建设部署方案进行介绍。

(1) C4标准十字路口方案

在十字路口，选取四个方向的4个监控杆和1个信号杆，安装感知、路侧计算单元、通讯设备及相应配件，电力及网络单独组建局域网。部署示意图及主要设备清单见图5.10。



图 5.10 标准十字路口感知覆盖范围与部署示意图

(2) C4标准路段方案

在路段，选取两个方向的2个监控杆，安装感知、路侧计算单元、通讯设备及相应配件，电力及网络单独组建局域网。部署示意图及主要设备清单见图5.11。



图 5.11 标准路段感知覆盖范围与部署示意图

该方案有以下突出特征和优势:

1) 视觉感知为主

路口和路段的感知设备以纯视觉感知摄像机为主, 仅在少量复杂或特殊道路环境下, 选配少量激光雷达, 在保证同等感知精度和定位能力的前提下, 大大减少了道路设备设施的数量和复杂程度, 建设成本大幅降低;

2) 全覆盖、全量高精度感知定位

该方案可以实现主路机动车道、辅路机动车道、非机动车道、右转道等道路环境的全覆盖感知; 感知能力方面, 通过多视角融合感知, 可实现全量交通参与者和交通事件精准识别与定位, 并满足L4高等级自动驾驶需求;

3) 路端支持平滑升级

路端方案支持平滑升级, 在不改变路端已有的边缘计算RSCU算力配置情况下, 通过加配AI摄像机和AI雷达等终端设备, 可满足不断变化的灵活扩展和多业务融合升级需求, 最大可能降低路端方案的升级改造代价, 实现路端平滑升级; 同时, 路端RSCU及相关设备设施也可通过在线升级, 不断提升路端系统的能力和服务内容;

4) 在线持续标定, 提高感知鲁棒性

由于外力原因, 相机可能会发生偏移、标定参数失效、感知精度下降等问题, 传统方法是需要标定人员对该相机重新进行参数标定, 不仅人力投入成本高, 而且时效性差。通过在线标定算法, 当检测出相机发生较大偏移后, 自动进行在线标定, 持续保证路侧感知相机标定参数的正确性, 提高了感知系统的鲁棒性, 持续为自动驾驶车辆提供高质量服务;

5) 多感合一、多杆合一、多箱合一

多感合一是指多感知设备或多感知功能合一, 由一套感知设备解决多业务应用问题, 路端感知设备与交通感知设备(如电警卡口)进行复用, 将网联和交管等多业务进行深度融合, 避免重复投资建设。既满足车路协同自动驾驶需求, 具备对象级、低时延、高精度、高可靠的3D全量目标感知, 又满足交管需求, 实现交管电警、卡口的违法抓拍功能, 以及电警卡口的一体化管控, 避免重复投资建设。

多杆合一是指将交通监控、交通标牌、道路照明、公安监控等相关设备进行整合设计, 减少杆件对道路空间的占用。多箱合一是指将交通监控、道路照明、公安监控、传感器等设备的箱体进行整合, 减少道路设备数量, 美化城市空间, 同时设备舱的整合也便于集中管理与维护。

5.2 ACTION 2

高等级智能道路的经济效益、产业价值和社会效益

建设部署高等级智能道路具有显著经济效益、产业价值和社会效益，不仅可以“面向未来”满足车路协同自动驾驶车辆规模商业化落地的发展需求，也可以“兼容当下”降维满足低等级自动驾驶和车联网的发展需求，支撑开展智能交通、智能交管、智能高速、智慧出行服务，开展新型智慧城市建设。

5.2.1 显著经济效益

以实现L4高等级自动驾驶规模化落地为目标，AD技术路线所需的费用是所有车辆增加车端设备或系统升级到L4的费用，而VICAD技术路线所需的成本约等于建设C4高等级智能道路的费用与所有车辆升级到L2+的费用。将两条路线所需花费的费用进行比较，即可得到两条路线的经济性比较。

(1) AD技术路线实现完全L4所需费用

以北京市为例进行估算，截止到2021年末，北京市汽车保有量685万辆³²。如果要实现全部L4级自动驾驶，保守估算每辆车所需增加的成本约为2万元左右（假设传感器1万元、1000 TOPS域控1万元），则完全实现L4需要的费用约为1370亿元。

(2) VICAD技术路线实现完全L4所需费用

基于VICAD技术路线，实现完全L4的条件是所有道路和路口按照C4标准完成智能化升级改造，同时车辆具备L2+及以上的自动驾驶能力，因此该路线所需费用包括道路的升级改造费用和车辆的升级改造费用两个方面：

1) 车辆的升级改造费用主要用于将车辆升级达到L2+以上自动驾驶能力所需改造成本。2021年，国内商用车ADAS整体装配率约为17.3%。那么北京市685万辆车中，约有566.5万辆车需要升级改造，按每辆车升级改造成本5000元（传感器、通信设备、辅助驾驶系统等）进行计算，则所有车辆达到L2+以上需要的增量成本约为283.25亿元。

2) 智能道路的升级改造费用主要用于路口和路段的智能化升级改造费用，以及相关设备、系统和平台的运维服务费用。在路口和路段的智能化升级改造费用方面，根据中信建投证券的预测数据³³，2020年路侧基础设施单个交叉路口的C-V2X改造费用平均约为81.84万元，每公里高速/快速路的C-V2X改造费用平均约为39.72万元。以上价格假是在行业发展初期出货量较小的情况下提出来的。随着“新基建”的全面铺开，一方面车路协同设备由实验室形态向功能量产化阶段演变，基础设施建设成本将会有大幅降低；另一方面受益于产业升级迭代，产业成本也会保持持续的降本收益，比如芯片行业“摩尔定律”不断演进，从基础设施侧来看，智能算力保持快速发展，基础设施算

³²北京市统计局、国家统计局北京调查总队发布《北京市2021年国民经济和社会发展统计公报》。

³³2020年3月中信建投证券《车联网：新基建重要方向，5G应用明珠》。

力规模持续扩大,也会大幅降低高等级智能道路的投资成本。如图5.12所示,初步估计2022年单个交叉路口的C-V2X改造费用降低至约57.84万元,每公里高速/快速路的C-V2X改造费用降低至约26.88万元,城市道路每公里部署设备费用约为30万元(城市道路存在遮挡等情况,道路智能设备部署密度和数量多于高速公路,所需成本会相应增加),道路基础设施建设投资成本降低了约为30%。随着产业升级迭代和车路协同自动驾驶规模化落地,建设费用还将会进一步降低。

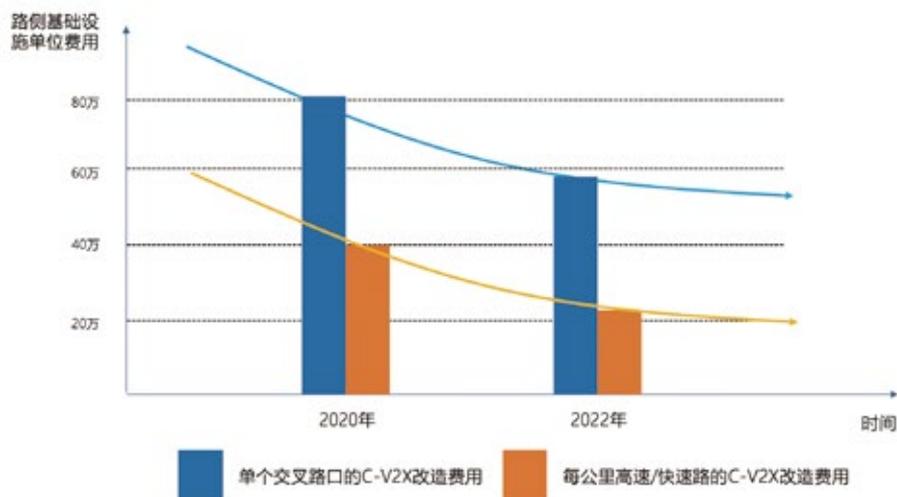


图 5.12 路侧基础设施单位成本发展趋势

在运维费用方面,一般而言,不同地区、不同项目、不同公司的设备运营维护费用成本存差异,但约占设备总成本的2%~3%,本白皮书统一按照3%进行测算。那么,城市C4高等级智能道路建设总成本费用计算公式为:

城市C4道路建设成本费用(元)={路口数量*路口单价(元/路口)+公路总里程*里程单价(元/公里)}*(1+设备维护成本系数),表5.7选择了北京、上海、杭州三个城市,并分别计算出该城市全部建设C4高等级智能道路的总成本费用。

表 5.7 城市C4道路建设费用估算

城市	路口升级改造费用			路段升级改造费用			运维费用估算 (亿元)	总计 (亿元)
	路口数量 (万个)	平均成本 (万元)	合计 (亿元)	公路总里程 (公里) ³⁴	平均成本 (万元)	合计 (亿元)		
北京	0.96	57.84	55.53	2.23	30.00	66.90	3.67	126.10
上海	0.70	57.84	40.49	1.31	30.00	39.30	2.39	82.18
杭州	0.58	57.84	33.55	1.69	30.00	50.70	2.53	86.78

注:以上数据为统计估算,测算结果仅供参考。

³⁴北京交通发展研究院发布的《2021年北京交通发展年度报告》,上海市交通委员会发布的《2021年上海市收费公路统计公报》,杭州市交通运输局发布的《2021版杭州市年鉴交通篇》

仍以北京为例，到2021年底，北京市公路（含高速公路、城市道路、乡村公路）总里程约为2.23万公里，按照每公里改造/建设费用30万元计算，城市路口数量约为0.96万个，按照交叉路口的C-V2X改造费用57.84万元计算，全市范围建设C4高等级智能道路的费用约为126.10亿元；全市所有车辆达到L2+以上需要的总费用约为283.25亿元。那么采用VICAD路线实现完全L4所需的总费用为409.35亿元。

从经济性来看，采用VICAD路线，原来用于车端的高性能传感器、大算力计算平台，转移到了路端，实现设备与系统的公用化复用，相对于AD技术路线来说，其成本仅占到30%左右。

5.2.2 巨大产业价值

VICAD作为一个牵引性的系统工程，其意义不仅仅在于加速自动驾驶的普及应用，提高交通安全和交通效率，我们更加关注它对产业的推动作用，如“两弹一星”、“航空航天”等国家级重大工程一样，可以带动基础科学、尖端技术发展，实现制造与管理等跨学科融合创新应用。

首先，VICAD可以带动智能装备、地图定位、云计算、通信、安全等相关产业协同发展。在自动驾驶大规模落地量产的过程中，产业从业者与监管单位都面对大量的安全问题，尤其是高精度地图、高精度定位、数据闭环等对精准性、实时性和大数据传输要求较高的问题，在当前以单车智能和车云结合的架构中，安全问题无法得到有效的解决，也长期困扰整个产业，而通过VICAD可以更加系统化整合跨行业资源，为跨行业融合发展提供不竭动力。另外，在通信方面，VICAD是5G、C-V2X通信的重要应用场景，将加速通信技术演进和产业发展。我国在5G、C-V2X等先进通信技术领域已经从跟跑走到了领跑地位，确立了在标准和专利方面的全球领先优势，目前亟需一个体量充分、市场前景广阔的应用场景，支撑通信行业加速迭代创新。

其次，发展VICAD，建设高等级智能路，是解决当前中国智能化产业“缺芯少魂”的关键破局点。从需求构建的角度，VICAD为芯片、操作系统等智能化产业链关键环节发展提供了一个重要机遇和窗口。从上个世纪80年代起，计算机产业经历了个人电脑普及，移动互联网等两个史诗级的浪潮，也催生了PC时代的“win-tel联盟”（微软与英特尔），移动时代的Arm与Android（谷歌公司）。“芯片+操作系统”牢牢地控制了相关产业链的关键环节，不论是从技术上还是从生态上，形成了不可逾越的壁垒，唯有新的产业的诞生，才有可能产生新的生态主宰者，VICAD应当肩负起这个责任。另一方面，万物互联的物联网时代已经不可阻挡，以人工智能为核心驱动力的自动驾驶技术也逐渐成为交通行业最大的变革因素，智能交通体系即将迎来以自动驾驶为核心驱动技术的“智能交通物联网”时代，亿万级的“移动机器人”即将接入一个空前宏大网络之中，由此带来的智能化产业机遇将超越以往。

5.2.3 潜在社会效益

建设C4等级智能道路的社会效益可以从减少交通事故、缓解交通拥堵和带动经济增长等三个方面进行量化分析：

1) 减少交通事故经济收益: VICAD可以大幅度提升交通安全, 减少交通事故, 让出行更安全。据美国交通部基于600万辆车交通事故分析, 单车智能可预防60%的交通事故, V2X可以减少81%的交通事故³⁵。CIDAS (中国交通事故深入调查) 数据统计显示 (见图5.13), 由于驾驶员人为因素造成的交通事故占比高达94%, 事故原因包括驾驶员未发现、视线障碍、判断错误、错误操作等³⁶, VICAD理论上可以通过协同感知、决策规划和控制避免所有的人为交通事故, 本次测算保守起见, 在计算时规定VICAD可以预防80%的交通事故。

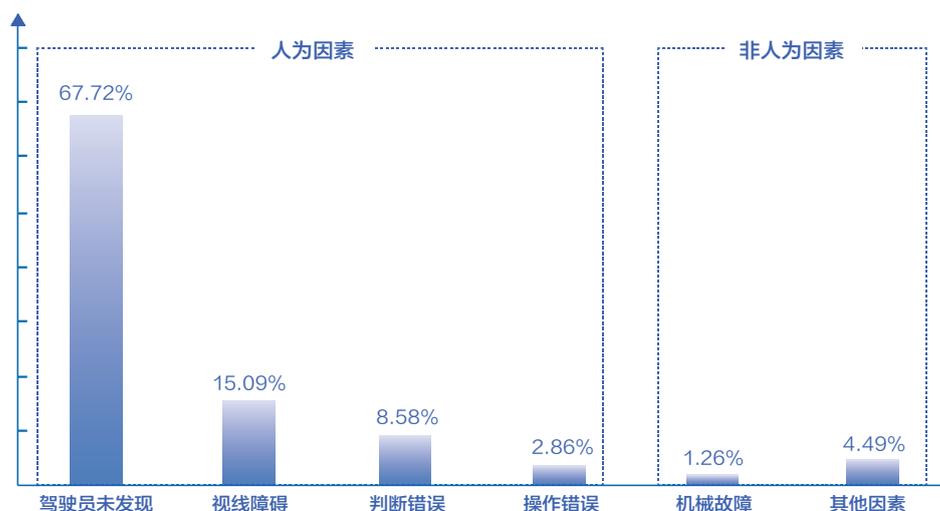


图 5.13 CIDAS事故原因数据统计

交通事故造成的损失是惊人的——这些损失包括误工费用、医疗费用、法律诉讼费用、应急救助费用、保险费用、财产损失等。本文仅从交通事故造成的直接财产损失, 以及通过减少交通事故造成人员死亡所避免的间接经济损失进行测算, 建设C4高等级智能道路减少交通事故的经济收益计算公式为:

$$\begin{aligned} & \text{C4道路每年可减少交通事故的经济收益 (元)} \\ & = (\text{事故直接财产损失 (元)} + \text{死亡人数} * \text{死亡赔偿金 (元/人)}) * \text{交通事故预防率} (\%) \end{aligned}$$

2) 减少交通拥堵油耗节约经济收益: 据2019年中国智能网联创新联盟发布《智能网联汽车产业发展动态及对策建议》, 车联网技术可提高道路通行效率10%。交通拥堵经济损失是多方面的, 除了拥堵造成的油耗成本, 还会有拥堵的时间成本、碳排放及尾气治理成本等。考虑在测算拥堵时间成本和治理成本的一定期间内也可能会生产GDP, 为了规避与下文“(3) 带动经济增长收益”中的经济增长GDP造成重复计算, 本次测算主要做拥堵造成油耗经济损失的估算。据统计, 在堵车怠速的情况下每3分钟的油耗相当于正常行驶1公里, 以每辆车平均油耗为8升/百公里计算, 则每3分钟的停车油耗为0.08升, 按照每天每辆车堵车的时间为30分钟计算³⁷, 交通拥堵造成平均每辆车每天额外油耗为0.8升。按照92号汽油当前价格和城市机动车保有量、平均出车率等指标, 本次测算以C4高等级智能道路交通拥堵平均降低10%进行计算, 油耗节约的经济收益计算公式为:

³⁵2021年中国电动汽车百人会、智能汽车与智慧城市协同发展联盟、奥迪(中国)企业管理有限公司《V2X商业化落地路径分析》研究报告。

³⁶CIDAS(中国交通事故深入调查)数据统计。

³⁷高德地图联合未来交通与城市计算联合实验室、清华大学-戴姆勒可持续交通研究中心、阿里云等单位共同发布《2018Q3中国主要城市交通分析报告》

C4道路每年可减少交通拥堵油耗节约的经济收益(元)=

$$(\text{拥堵额外油耗(升/车天)} * \text{92号汽油单价(元/升)} * \text{机动车保有量} * \\ \text{平均出车率(}\%) * \text{1年天数(天)} * \text{交通拥堵降低率(}\%))$$

3)带动经济增长收益: 交通参与者、运载工具、设施一体化协同系统成为交通系统发展的大趋势。车路协同等技术研究也趋向以车路云一体化的智能交通系统实现交通控制综合优化与智能决策, 强化城市综合交通智能化协同管控, 提高城市交通道路通行效率和综合服务水平, 提升交通运输效率。2019年中国智能网联创新联盟发布《智能网联汽车产业发展动态及对策建议》, 车联网技术可提高道路通行效率10%。参考《城市群综合交通运输效率对经济增长的影响——基于长三角与粤港澳大湾区的比较研究》³⁸, 综合交通运输效率每提升1%, 对长三角和粤港澳本地经济增长的促进作用分别为0.076%和0.069%。综合交通运输体系是由多种运输方式组成的综合体系, 参考该文献的指标选取, 本次测算以反映规模水平的客货运量作为产出变量指标, 对不同交通运输方式的比重进行估算。客运量(万人次)的运输与货运量(万吨)的运输对经济增长GDP贡献是有差异的, 为了方便测算进行简单比较, 本文假设两者系数比值为1。根据北京、上海、杭州三个城市客运量、货运量数据^{39, 40}, 可得综合交通运输中不同交通运输方式承担比重估算见表5.8。

表 5.8 综合交通运输中不同交通运输方式承担比重估算

交通方式	北京市不同交通方式承担比重				上海市不同交通方式承担比重				杭州市不同交通方式承担比重			
	客运量 (万人次)	货运量 (万吨)	客货运 量合计	比重	客运量 (万人次)	货运量 (万吨)	客货运 量合计	比重	客运量 (万人次)	货运量 (万吨)	客货运 量合计	比重
公路	24548.00	21789.00	46337.00	0.74	1332.00	46051.00	47383.00	0.31	4535.00	34837.00	39372.00	0.73
铁路	6383.00	360.00	6743.00	0.11	7605.00	478.00	8083.00	0.05	5895.00	578.00	6473.00	0.12
航空	5339.00	147.00	5486.00	0.09	3021.00	403.00	3424.00	0.02	1414.00	46.00	1460.00	0.03
水运	-	4049.00	4049.00	0.06	15.00	92294.00	92309.00	0.61	339.00	6483.00	6822.00	0.13
共计	36270.00	26345.00	62615.00		11973.00	139226.00	151199.00		12183.00	41944.00	54127.00	

注: 以上数据为统计估算, 测算结果仅供参考。

建设C4高等级智能道路带动经济增长的收益计算公示为:

C4道路每年带动经济增长收益(元)

$$= \text{每提升1\%对经济增长的促进作用(}\%) * \text{地区生产总值GDP(元)} * \\ \text{综合交通效率提升率(}\%) * \text{公路交通运输承担比重(}\%)$$

综上, 选择北京、上海、杭州三个城市, 分别用投资收益率和内部收益率⁴¹来测算评估建设C4道路所带来收益, 见表5.9和表5.10。

³⁸ 《城市群综合交通运输效率对经济增长的影响——基于长三角与粤港澳大湾区的比较研究》

³⁹ 北京市统计局发布的《2021年北京统计年鉴》, 上海市统计局发布的《2021年上海统计年鉴》, 杭州市统计局发布的《2021年杭州统计年鉴》

⁴⁰ 北京市统计局发布的《2021年北京统计年鉴》中管道货运量数据

表 5.9 城市C4道路投资收益率估算

城市	每年C4等级智能道路建设费用		每年C4等级智能道路综合投资收益率				
	共计 (亿元)	设备使用经济寿命按照5年分摊 (亿元/年)	可减少交通事故经济收益合计 (亿元/年)	可减少交通拥堵油耗节约经济收益合计 (亿元/年)	综合交通效率提升带动经济增长合计 (亿元/年)	综合经济收益共计 (亿元/年)	综合投资收益率 (%)
北京	126.10	25.22	12.05	8.22	205.62	225.89	795.68%
上海	82.18	16.44	10.76	7.34	101.81	119.91	629.56%
杭州	86.78	17.36	2.68	4.40	100.47	107.55	519.67%

注：以上数据为统计估算，测算结果仅供参考。

表 5.10 城市C4道路内部收益率估算

城市	初始成本 (亿元)	第1年收益 (亿元)	第2年收益 (亿元)	第3年收益 (亿元)	第4年收益 (亿元)	第5年收益 (亿元)	内部收益率 IRR (%)
北京	-126.1	225.89	225.89	225.89	225.89	225.89	178.06%
上海	-82.18	119.91	119.91	119.91	119.91	119.91	144.23%
杭州	-86.78	107.55	107.55	107.55	107.55	107.55	121.62%

注：以上数据为统计估算，测算结果仅供参考。

以北京为例进行说明：

- 1) 建设C4高等级智能道路的总成本约为126.10亿元，按照设备经济寿命5年来进行分摊，每年投入成本约为25.22亿元⁴¹；
- 2) 在5年周期内，北京市C4高等级智能道路每年所带来的总经济收益平均每年约为225.89亿元，综合投资收益率高达795.68%，内部收益率达到178.06%。

可以看出，建设C4高等级智能道路具有显著经济优势。建设部署高等级智能道路还有更多经济收益，本白皮书暂没有进一步展开分析，比如：

⁴¹投资收益的计算，按照5年投资周期一次投资到位的方案进行估算。实际建设经验是先期示范区、先导区建设、中期推广部署、后期高速发展的逐步推进方案建设，如果按照逐步推进建设模式估算，经济收益指标会比本次简化计算结果要好，本次估算是在往较差方面计算，但是这个指标计算不会对论证结论产生较大偏差。

(1) 避免重复投资建设:

高等级智能道路具有全量高精度感知识别的能力, 可以充分发挥道路系统和设备设施的优势, 研究提供交通监控执法、舆情监控、公共安全管理等能力, 为交通、公安、城建等多个政府部门提供基础数据和基础能力服务, 实现设备设施的最大化利用, 避免重复投资建设和设备浪费。

(2) 通过创新应用探索更多服务模式和商业模式:

高等级智能道路具备车辆、道路、行人、云端高维数据的汇聚和实时处理分析能力, 除服务于车路协同自动驾驶外, 可以不断探索开展更多的商业化运营服务创新, 比如智慧交管服务、城市智慧出行、车辆安全管理等, 通过各类服务为高等级智能道路带来盈利, 最大可能发挥智能道路价值。

5.3 ACTION 3

建设高等级智能道路中国优势

我国车路协同近几年发展迅速,目前总体上已处于全球第一阵营,具有一定的引领优势,中国完全有机会充分发挥自身的体制机制优势、政策优势、技术产业优势,建设和发展高等级智能道路,不仅服务于自动驾驶,还能充分发挥智能道路的全要素高精度感知、车路协同决策规划和管控等多方面能力,为交通的智能管理、智能管控、智慧服务等方面提供基础条件,支持探索开展共享出行、自主泊车、智慧物流、交通运营商等更多创新应用和智慧服务,从而加快建设智慧城市,助力实现交通强国宏伟目标,推动我国经济转型升级和高质量发展。

(1) 体制机制层面,国家统筹能力优势

我国国情决定了国家拥有强大的全局统筹能力,可以在新技术的研发落地的各个阶段发挥其强大的号召引领作用。这种统筹能力可在车路协同自动驾驶的研究与落地中显得尤为突出,比如国家或地方通过制定优惠政策,批准设立测试示范区和先导区(如表5.11),牵头大公司合作等方式加速技术研发,并逐步完成全国范围内的道路基础设施重新规划与升级。

表 5.11 国家级智能网联汽车先导区/示范区

类别	城市	实时性
车联网先导区/示范区	无锡	江苏(无锡)国家级车联网先导区
	天津	天津(西青)国家级车联网先导区
	长沙	长湖南(长沙)国家级车联网先导区沙
	重庆	重庆(两江新区)国家级车联网先导区
	长三角三省一市	国家级长三角区域车联网先导区
	苏州	苏州车联网先导区
	南京	南京市省级车联网先导区
	柳州	柳州市车联网先导区(在建)
	北京	北京市高级别自动驾驶示范区(注:全球首个)
	北京、河北各地市	国家智能汽车与智慧交通(京冀)示范区
	长春	国家智能网联汽车应用(北方)示范区
	上海	国家智能网联汽车(上海)试点示范区

车联网先导区 /示范区	武汉	国家智能网联汽车（武汉）测试示范区
	杭州、嘉兴	浙江5G车联网应用示范区
	广州	广州智能网联汽车与智慧交通应用示范区
	重庆	国家智能汽车集成系统实验区（i-VISTA）
	上海	上海临港智能网联汽车综合测试示范区
	上海	上海基于智能汽车云控基础平台的“车路网云一体化”综合示范
测试区/基地	长沙	国家智能网联汽车（长沙）测试区
	无锡	国家智能交通综合测试基地（无锡）
	成都	中德合作智能网联汽车车联网四川试验基地
	北京	北京通州国家运营车辆自动驾驶与车路协同测试基地
	重庆	重庆车检院自动驾驶测试应用示范基地
	西安	长安大学车联网与智能汽车试验场
	泰兴	智能网联汽车自动驾驶封闭场地测试基地（泰兴）
	襄阳	智能网联汽车自动驾驶封闭场地测试基地（襄阳）
城市智慧汽车基础设施 和机制建设试点	宁波、泉州、莆田、武汉、德清、广州	
智慧城市基础设施 与智能网联汽车 （“双智”）协同发展试点	北京、上海、广州、武汉、长沙、无锡、重庆、深圳、厦门、南京、济南、成都、合肥、 沧州、芜湖、淄博	

（2）战略政策层面，国家新基建政策会加速车路协同的全面发展

在国家战略层面，我国明确了单车智能+网联赋能的智能网联汽车发展技术路线。在单车智能领域，我国与美国差距在逐渐缩小，但考虑到我国路况和交通环境更加复杂，相较而言，车路协同自动驾驶更具优势，可以作为我国自动驾驶换道超车的杠杆着力点。

在政策层面，国家主管部门统筹规划，加强顶层协同，营造良好的产业发展环境；各级地方政府部门也结合自身发展需求和基础优势，积极推动车路协同自动驾驶产业发展。国家层面近两年发布了《智能汽车创新发展战略》、《交通强国建设纲要》、《国家综合立体交通网规划纲要》等一系列顶层规划设计文件，见表5.12。地方政府层面，江苏省编制发布了《江苏省车联网产业发展重点任务分解表（2020-2021年）》，天津市发布《天津车联网（智能网联汽车）产业发展行动计划》，上海

市印发《上海市先进制造业发展“十四五”规划》，重点发展新能源汽车、智能网联汽车、整车及零部件等制造领域，广东省印发《广东省制造业高质量发展“十四五”规划》，支持发展智能网联汽车感知、控制、执行、车载信息娱乐系统，推进汽车检测和测试场地等领域建设，积极推进自动驾驶示范应用。其中，一些城市政策法规创新已进入“深水区”，例如，北京市在高级别示范区基础上建设智能网联汽车政策先行区，适度超前并系统构建智能网联汽车道路测试、示范应用、商业运营服务以及路侧基础设施建设运营等政策体系，目前已经给予无人配送车路权，开放高速公路测试、无人化测试、商业运营。

表 5.12 近三年国家发布的智能网联汽车相关政策文件

时间	发布单位	文件名称
2019年9月	中共中央国务院印发	《交通强国建设纲要》
2021年2月	中共中央、国务院	《国家综合立体交通网规划纲要》
2021年3月	国家发展改革委、工信部等28个部门和单位	《加快培育新型消费实施方案》
2021年4月	公安部	《道路交通安全法（修订建议稿）》
2021年4月	工信部	《智能网联汽车生产企业及产品准入管理指南（试行）》（征求意见稿）
2021年7月	工信部	《网络安全产业高质量发展三年行动计划（2021-2023年）（征求意见稿）》
2021年7月	工信部、中央网络安全和信息化委员会办公室、发改委等10个部门和单位	《5G应用“扬帆”行动计划（2021-2023年）》
2021年7月	工信部、公安部、交通运输部	《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范（试行）》
2021年8月	工信部	《工业和信息化部关于加强智能网联汽车生产企业及产品准入管理的意见》
2021年8月	交通运输部、科学技术部	《关于科技创新驱动加快建设交通强国的意见》
2021年9月	工信部	《关于加强车联网网络安全和数据安全工作的通知》
2021年9月	工信部	《关于加强车联网卡实名登记管理的通知》
2021年9月	交通运输部	《数字交通“《交通运输领域新型基础设施建设行动方案（2021—2025年）》”发展规划》
2021年10月	交通运输部	《数字交通“十四五”发展规划》
2021年11月	工信部	《“十四五”信息通信行业发展规划》
2022年1月	交通运输部	关于印发《绿色交通“十四五”发展规划》的通知
2022年1月	国务院	关于印发《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》的通知

2022年3月	交通运输部	关于印发《交通强国建设评价指标体系》的通知
2022年4月	交通运输部、科学技术部	关于印发《交通领域科技创新中长期发展规划纲要（2021—2035年）》的通知（无锡）
2022年4月	交通运输部、科学技术部	关于印发《“十四五”交通领域科技创新规划》的通知
2022年7月	科技部教育部工业和信息化部交通运输部农业农村部卫生健康委	《关于加快场景创新以人工智能高水平应用促进经济高质量发展的指导意见》
2022年8月	科技部	《关于支持建设新一代人工智能示范应用场景的通知》
2022年11月	工信部、公安部	《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知(征求意见稿)》
2022年12月	中共中央、国务院	《扩大内需战略规划纲要（2022—2035年）》

（3）产业层面，汽车、5G、道路和ICT产业具备创新引领条件

我国在汽车、交通、ICT技术与产业方面具有较大的优势，这些产业通过车路协同自动驾驶深度融合与协同，形成合力，初步具备了创新引领发展的条件。

在汽车和交通市场方面，中国的汽车和交通市场规模稳居世界前列，其中2021年我国汽车年产量分别为2608.2万辆和2627.5万辆，连续13年保持全球汽车产销量第一，其中新能源汽车产销分别为354.5万辆和352.1万辆，销量连续7年位居全球第一，继续巩固我国作为世界第一汽车市场大国的地位，同时不断向世界汽车强国迈进⁴²。到2020年底，我国公路总里程超过519.8万公里，路网规模持续提升，其中高速公路总里程超过16万公里位居世界第一，国家高速公路网主线基本建成，覆盖约99%的城镇人口20万以上城市及地级行政中心。中国超大规模的汽车和交通市场在全球市场中发挥着重要的引领作用，中国可以充分利用自身的市场优势，按照自己需求制定具有中国特色的市场规则、技术标准，赢得未来较量的宝贵话语权。

在5G通信方面，将AI赋能的单车智能和5G相结合，为单点智能的车加装上全天候、全场景、360度的“千里眼”和统筹全局的“智慧脑”，实现车、路、人、基础设施的万物互联和万物互控。截至2021年底，我国累计建成并开通5G基站142.5万个，5G基站总量占全球60%以上，建成全球最大5G网，实现覆盖所有地级市城区、超过98%的县城城区和80%的乡镇镇区⁴³，为实现车、路、人等万物互联提供了通信保障。

在ICT方面，中国拥有一大批具有世界影响力的全球顶级ICT企业，通信公司有中国移动、中国联通、中国电信、华为和中国信科等，互联网公司百度、阿里、腾讯等，这些企业掌握了国际先进的技术 and 标准话语权。此外，我国自行研制的北斗卫星定位系统，是被联合国卫星导航委员会认定的，继GPS、GLONASS之后的第三个成熟的卫星导航系统，在国家战略层面上确保了车辆卫星导航定位方面不会受制于人。这些优势连德国、日本也不具备，是支撑我国车路协同自动驾驶发展

⁴²人民日报（2022年1月13日）：我国汽车产销量连续13年保持全球第一http://www.news.cn/fortune/2022-01/13/c_1128257359.htm

⁴³人民日报（2022年2月8日）：我国5G基站总量占全球60%以上http://www.gov.cn/xinwen/2022-02/08/content_5672469.htm

的重要保障。

(4) 技术保障层面, 车路云标准体系规划配套完整

2018年6月, 工业和信息化部联合国家标准化管理委员会组织完成制定并印发《国家车联网产业标准体系建设指南》系列文件(如图5.14所示), 明确了国家构建车联网生态环境的顶层设计思路, 表明了积极引导和推动跨领域、跨行业、跨部门合作的战略意图, 该系列文件包括总体要求、智能网联汽车、智能交通、车辆智能管理、信息通信和电子产品与服务共5个分册, 如下图所示。目前, 5个分册的体系规划都已正式发布, 其中信息通信标准体系中基于LTE-V2X的接入层、网络层、消息层和安全等核心技术标准已制定完成, 同时, LTE-V2X设备规范、测试方法等标准已制定完成, 技术标准体系基本形成, 为车路协同自动驾驶发展奠定了坚实基础。

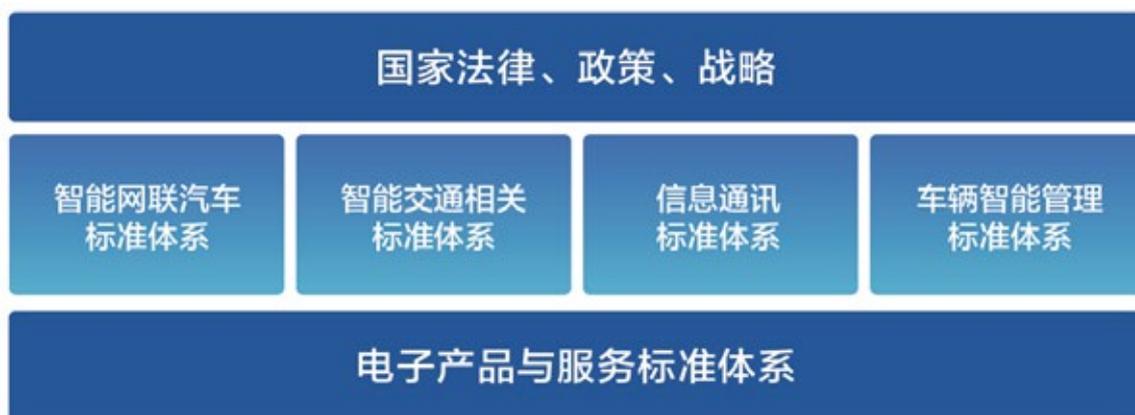


图 5.14 国家车联网产业标准体系总体架构

06

百度Apollo车路协同自动驾驶 探索与实践

6.1 ACTION 1

百度Apollo车路协同自动驾驶进展

6.1.1 标准先行

为全面支撑百度Apollo自动驾驶与ACE智能交通实现技术引领和项目落地，百度高度重视并全面布局车路协同、自动驾驶与智能交通国内外各级标准，涉及V2X通信、汽车、交通、人工智能、数据、地图、信息安全等多个专业领域。目前百度已发布各类标准超过10项，如YD/T3978-2021《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》；参与及牵头的标准超过200项，核心牵头的重要标准包括《车载激光雷达性能要求及试验方法》（国标）、《智能网联汽车 自动驾驶系统数据记录性能要求和测试方法》（国标）、《智能网联汽车 自动泊车系统性能要求及试验方法》（国标）、《车路协同信息交互技术要求》系列标准（国标）等，后续将继续依托百度在自动驾驶、智能交通、AI等领域的技术积累，支撑引领自动驾驶和道路智能化标准建设和产业发展。

百度牵头和深度参与的车路协同部分标准见表6.1。

表 6.1 百度牵头和深度参与的车路协同重要标准

序号	标准名称	标准类别	标准状态
1	《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》 (YD/T 3978-2021、T/ITS 0135-2020、CSAE 158-2020)	行业标准/ 团体标准	已发布
2	《车路协同信息交互技术要求 第1部分 路侧设施与云控平台》 (T/ITS 0180.1—2021)	国家标准/ 团体标准	国标在研 团标已发布
3	《车路协同信息交互技术要求 第2部分 云控平台与第三方应用服务》 (T/ITS 0180.2—2021)	国家标准/ 团体标准	国标在研 团标已发布
4	《车路协同信息交互技术要求 第3部分 路侧设施之间》	国家标准/ 团体标准	在编
5	《合作式智能运输系统 车用通信系统应用层及应用数据交互标准第二阶段》 (CSAE 157-2020)	团体标准	已发布
6	《自动驾驶路侧感知定位技术要求》	团体标准	在编
7	《车路协同 边缘计算设施》系列标准	团体标准	在编
8	《适应自动驾驶公路工程附属设施技术指南》	行业标准	在编
9	《公路智能化数字技术规范》	行业标准	在编
10	《智能网联汽车 数据通用要求》	国家标准	在编

11	《车路协同 路侧感知系统》系列标准	行业标准/ 团体标准	在编
12	《车路协同 路侧激光雷达测试方法》	国家标准	在编
13	《基于5G的远程遥控驾驶业务要求 自动驾驶出租车云端控制》	团体标准	在编
14	《基于LTE的车联网无线通信技术 MEC平台测试方法》	团体标准	在编
15	《基于LTE的车联网无线通信技术 V2I基础信息单播传技术》	行业标准	在编
16	《智能网联汽车运行安全半开放道路测试场景要素及设置要求》	国家标准	在编

6.1.2 Apollo Air计划

2021年5月, 百度联合清华大学智能产业研究院正式提出了Apollo Air计划。Apollo Air计划有三大大典型特征: 1) 依靠纯路端感知实现车路协同自动驾驶; 2) 持续降维反哺车路协同应用; 3) 标准开源开放实现业界共享。

Apollo Air最大的技术创新是在关闭车端感知情况下, 仅依靠路端轻量化连续感知, 就可以实现L4级别的自动驾驶闭环。截至2022年4月, Apollo Air累计闭环测试里程(含仿真)达到3万公里, 其中路口通过成功率达99%。基于Apollo Air的路端感知有以下突出优势:

(1) 端到端时延满足车端融合需求

路端与车端进行实际需求对齐, 各环节合理分配时延指标: 1) 路端感知融合时延140ms, 主要通过边缘大算力、高性能AI模型、并行化局部高精地图实现; 2) 空口传输时延50ms, 主要通过LTE-V2X网络层进行包长限制、底层收发方式优化和在编码上进行帧内/帧间压缩实现; 3) 车端预处理10ms, 通过轨迹预测模型补偿丢包; 端到端时延总计约200ms。

(2) 路端感知精度符合车端要求

路端的感知精度已完全符合车端要求, 路端具备全量交通要素(包括机动车、非机动车、行人、障碍物等)的实时准确感知能力, 交通要素感知的准确率、召回率 $\geq 95\%$, 感知定位达到0.5m(均值)、速度大小精度1.5m/s(均值)、感知对象漏检率 $< 2\%$ 。

(3) 建立质量评测闭环系统

Apollo Air在实践过程中逐步完成路端数据质量评测体系的建立, 可动态评估每个点位的质量是否符合L4车辆的要求。满足数据质量评测要求的点位可支撑完成Apollo Air闭环, 即该点位能够支持“纯路端感知实现车路协同自动驾驶”, 图6.1是目前在亦庄建设的满足Apollo Air要求的标准路口之一。

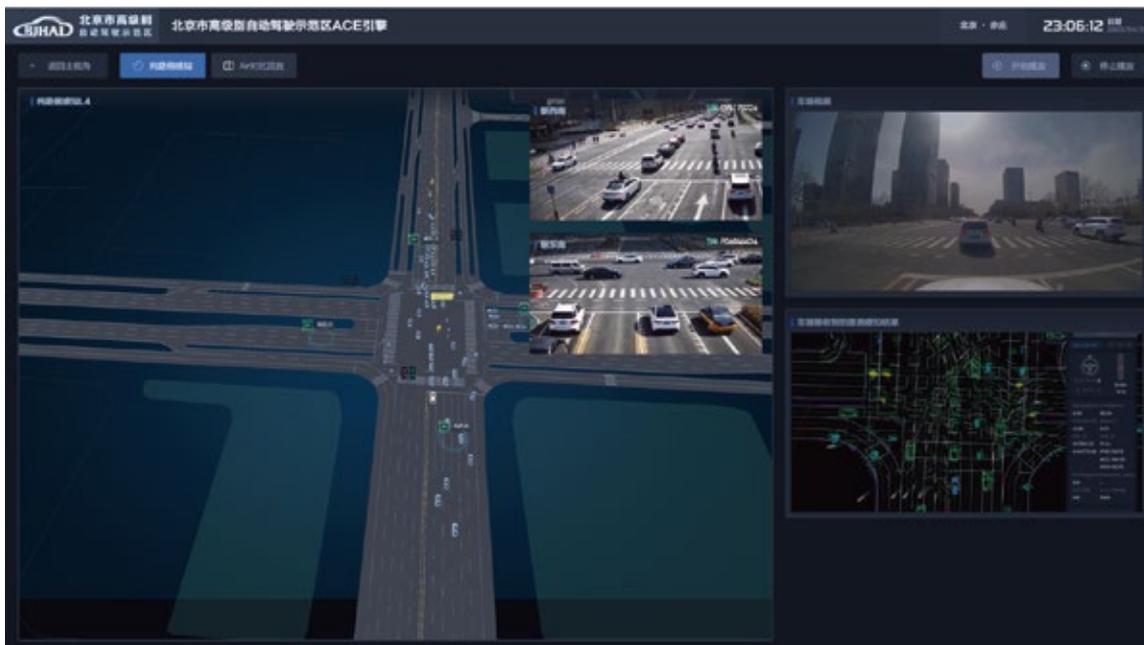


图 6.1 基于Apollo Air标准路口实现纯路侧感知的L4自动驾驶闭环

6.1.3 智路OS与车路协同开放平台

“开放能力、共享资源、加速创新、持续共赢”是百度一贯的技术理念。百度车路协同自动驾驶的发展也始终坚持开放开源理念，2019年12月，百度Apollo正式发布了车路协同开放平台1.0，这是国内首个针对车路协同的开放平台。2022年4月19日，百度Apollo正式升级发布面向交通和汽车行业的车路协同开放平台2.0——“开路”，这标志着百度Apollo从“自动驾驶开放”升级到“自动驾驶和车路协同的全面开放”。

“开路”是一套完整的软件和服务开放体系，包含路端软件平台、路端参考硬件和云服务平台三大部分。“开路”将开放感知、预测、地图、标定等基础能力，为设备设施和硬件合作伙伴提供技术准则和集成规范，结合百度在车端广泛的用户触达，共享场景资源。

“开路”把百度自2016年研发的车路协同全栈技术开放给业界，建立起以合作为基础的良性生态，促进车路协同技术的广泛应用；提供完整框架，支持快速开发，实现数字化、网联化、自动化的应用生态和效果，帮助开发者降低成本、提升创新效率；发挥百度在人工智能领域的技术优势，满足智能化的应用开发需求。



图 6.2 车路协同开放平台2.0总体架构

2022年8月1日, 百度Apollo、清华AIR联合行业单位发布了全球首个开源开放的智能网联路侧单元操作系统(以下简称“智路OS”), 以开源开放、自主可控、网联生态为核心价值, 将面向高级别自动驾驶和智能交通的路侧OS核心技术彻底开源, 打造开源开放新底座, 构建自主可控新高地, 促进智能网联产业应用的多样化和规模化发展。

智路OS是在“车路云一体化融合控制系统”的整体架构下, 以高等级自动驾驶技术和应用为牵引, 沉淀出来的路侧边缘计算单元的基础软件平台; 自下而上分别由内核层、硬件抽象层、中间件层三部分组成。



图 6.3 智路OS行业应用

智路OS面向智能网联、高级别自动驾驶和交通数字化管理全场景，构建统一的数据和技术底座，打破生态孤岛。面向行业，智路OS开放全栈技术，突破“缺芯少魂”的产业瓶颈，加速自主可控升级迭代；面向城市管理者，智路OS承载了各类应用场景对基础设施的升级诉求，实现软件赋能网联交管；面向生态，智路OS助力智能网联生态厂商实现标准统一的高效创新，加速商业化落地。

智路OS支持厂商快速开发、降低成本，加速商业化落地；面对硬件生态，智路OS以“高智能、高性能、高可靠、国产化”的特性，支持国产魂带动国产芯，助力硬件生态的创新探索。目前，已有超过50家行业组织、公司等成为智路OS首批生态合作伙伴，共建智能网联新生态。

6.1.4 DAIR-V2X开放数据集

2022年2月，百度Apollo联合清华智能产业研究院、智源人工智能研究院以及北京车网公司，发布了全球首个车路协同自动驾驶数据集：DAIR-V2X。该数据集是首个用于车路协同自动驾驶研究的大规模、多模态、多视角数据集，全部数据均采集自真实场景，同时融合了2D&3D标注，经脱敏和安全加密等处理后发布。中国境内用户可访问<https://thudair.baai.ac.cn/index>进行下载。

表 6.2 DAIR-V2X典型特征描述

典型特征	特征描述
规模大	总计有超过71254帧图像数据，以及71254帧点云数据： 1) 路端数据：10084帧图像、点云数据； 2) 车端数据：22325帧图像、点云数据； 3) 车路协同数据：38845帧图像、点云数据； 4) Rops3D数据：50009帧图像数据。
多视角、多模态	1) 数据采集传感器类型丰富，包含车端摄像头、激光雷达以及路侧摄像头和激光雷达等； 2) 首次实现车路协同的同时空标注，以及车端、路端数据的2D&3D联合视角标注； 3) 障碍物目标3D标注属性全面，标注10类道路常见的障碍物目标。
场景真实	1) 数据采集自北京高级别自动驾驶示范区，包括10公里城市开放道路和10公里城市高速公路，以及28个路口； 2) 数据涵盖晴天/雨天/雾天、白天/夜晚、城市道路/高速公路等丰富场景。

作为业界、学界首个开源的车路协同自动驾驶数据集，DAIR-V2X将有效服务科研、产业、政府机构，有效协同各方进行车路协同研究、产业落地和市政规划建设，促进我国车路协同以及自动驾驶发展，共同探索车路协同自动驾驶的落地模式和学术研究。在产业领域，本次数据集发布后，为更多的车路协同落地场景探讨和落地实现提供了支持。在学术研究领域，学术影响力和权威性被世界顶级会议CVPR认可，继续引领相关领域研究。其中，清华AIR和百度车路协同团队基于数据集早期研究工作形成的两篇论文⁴⁴已被2022届IEEE国际计算机视觉与模式识别会议（CVPR，IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition）收录。

2022年3月，针对路侧视角下的3D感知任务的研究，DAIR-V2X补充开放了多视角下共计50009帧图像数据的Rope3D数据集，Rope3D数据集更加聚焦于纯视觉的单目3D感知任务。

截至2022年9月，DAIR-V2X已经在中国境内被超过3000位用户下载使用，累计下载超过15000个数据包。清华AIR携手百度将基于已开源的车路协同自动驾驶数据集DAIR-V2X共同举办首届车路协同3D目标检测挑战赛。挑战赛提出了在通信带宽约束下，车端融合路端信息，实现3D目标检测的视觉感知任务目标，吸引学界、业界更多研究者共同探索车路协同技术升级。

6.1.5 L4共享无人车规模化测试运营

截至2022年11月14日，百度Apollo在世界范围内的近30个城市开放道路测试，测试总里程超过4000万公里，百度已获得中国自动驾驶测试牌照718张，其中载人测试牌照571张，商业试点牌照194张。百度自动驾驶出行服务平台“萝卜快跑”已在北京、上海、广州、深圳、重庆等十余座城市全面开放载人测试运营服务，测试车队规模达到600辆级别；在北京亦庄，开放了国内首个方向盘后无人的自动驾驶出行服务商业化试点，亦庄成为中国第一个无人驾驶生活圈；在重庆、武汉，也发布了全无人商业化试点政策，并向百度发放首批全无人商业示范运营牌照。截至2022年第三季度末，萝卜快跑向公众提供的乘车次数已累计达到140万，这一数据仍在高速增长中，百度已经成为了全球最大的自动驾驶出行服务商。Apollo自动驾驶巴士已在北京、广东、重庆等多地落地，其中MiniBus和RoboBus运营里程累计超过37万公里，乘车人次累计超过26万。

基于百度Apollo衍生发展的百度ACE智能交通引擎也已在北京、广州、长沙、保定、沧州、成都、南京、上海、阳泉、重庆、西安、银川、合肥、武汉、济南、佛山、海口、南通、大连、杭州、鹤壁、眉山等五十多个城市开展落地实践。

⁴⁴D^a-V2X: A Large-Scale Dataset for Vehicle-Infrastructure Cooperative 3D Object Detection, Rope3D: Take A New Look from the 3D Roadside Perception Dataset for Autonomous Driving and Monocular 3D Object Detection Task



图 6.4 ACE智能交通引擎2.0

6.1.6 面向C端用户的大规模网联服务

(一) 百度地图app

作为国民级出行平台和智能交通地图数字底座，百度地图将车路协同技术应用于地图导航，打造出“新一代人工智能地图”，不仅让亿万用户享受到AI技术红利，也推动着智能化的出行变革。在北京亦庄等部分区域，百度地图用户可以收到红绿灯倒计时和绿灯提醒、车道级事件提示等服务。



图 6.5 百度地图在亦庄提供的精细化导航服务

(二) 车载智能终端度小镜

百度推出了智能网联后视镜终端度小镜，用户可以通过加装智能终端来接收车路协同数据。比如在广州黄埔，驾驶员可在科学城、知识城体验区域享受到红绿灯倒计时、绿灯起步提醒、闯红灯预警、绿波车速提醒、建议车道等智能网联红绿灯服务。



图 6.6 度小镜提供V2X红绿灯倒计时服务



图 6.7 度小镜提供V2X事件提醒服务

(三) 智能网联汽车

百度车路协同基础服务能力，除了服务高级别自动驾驶车辆外，还可以向下兼容为低等级智能网联汽车提供更多有价值应用。百度目前已经与福特等8家OEM车企建立了网联合作，可提供信号灯预警、绿波车速、绿灯起步提醒等服务。



图 6.8 百度V2X量产车应用

6.2 ACTION 2 车路协同自动驾驶典型实践场景和技术优势

百度Apollo在全面满足行业已发布标准的基础上，结合已落地项目开展了大量V2X车路协同应用测试和先导应用，以下列举4个大类19个小类的典型协同感知、决策规划和控制应用场景，见表6.3。

表 6.3 百度Apollo典型应用场景举例

类别	场景类别	场景子类别/名称	适用标准	对应道路智能化等级	
1	高精地图实时更新	地图要素变更：交通信号灯 地图要素变更：车道线	标准制定中	C4	
2	协同感知	路端信号灯融合感知	YD/T 3978-2021		
		静态盲区/遮挡协同感知			
		动态盲区/遮挡协同感知			
		超视距协同感知			
		低速车辆协同感知			
		道路遗撒与低矮障碍物协同感知			
	地图要素变更：车道线				
3	协同决策规划	Decision	排队决策		标准制定中
			“死车”决策		标准制定中
		Decision + Planning	交叉口协调通行		T/CSAE 157-2020
			阻塞绕行		标准制定中
			路口内施工绕行		T/CSAE 157-2020
Routing+ Decision+Planning	合作式代客泊车	T/CSAE 156-2020			
	编队行驶	T/CSAE 157-2020			
4	协同控制	控制车辆：5G云代驾	标准制定中		
		控制基础设施：优先通行	标准制定中		
		控制基础设施：绿波通行	标准制定中		

6.2.1 高精地图实时更新实践

在百度Apollo的落地实践中, 高精地图为自动驾驶感知、决策规划和控制等提供一致的定位和环境语义信息, 是自动驾驶车辆感知辅助、高精定位和安全的决策规划的基础。

(一) 地图要素变更-交通信号灯

问题描述:

在自动驾驶高精地图中, 信号灯是地图的重要要素之一, 但路口信号灯经常会发生安装位置、运行状态等变更, 如果变更信息没有及时同步到车辆, 在路口处容易出现信号灯无法识别的情况, 导致车辆在路口处退出自动驾驶状态, 或造成安全事故。



a) 路口信号灯故障, 设置临时信号灯

b) 路口新建信号灯, 与原信号灯位置不一致

图 6.9 路口信号灯现实变更场景

场景原理:

在车路协同感知的基础上, 可以借助V2X通信对高精度地图进行更新, 辅助车辆在特定区域准确检测信号灯信息, 帮助车辆安全通过路口。具体逻辑和流程如下:

- 1)以某一特定路口为例, 如图6.10所示, 信号灯从安装在路口中心的临时信号灯, 更改为安装在交通信号灯杆的横杆位置;
- 2)路端检测到变更信息后, 会将新的信号灯位置更新发送给地图平台, 图商通过地图编译后, 可通过OTA方式进行高精地图的版本升级, 地图升级后的车辆经过该段道路时, 可以通过地图获取信号灯正确位置;
- 3)在地图版本更新之前, 通过变更路口的车辆可通过V2X收到路端发送的当前最新的路端局部地图信息, 包含新的信号灯位置信息, 以及信号灯的灯组、灯色与相位等信息, 车辆会根据获取的信号灯位置和灯态信息进行驾驶行为决策。

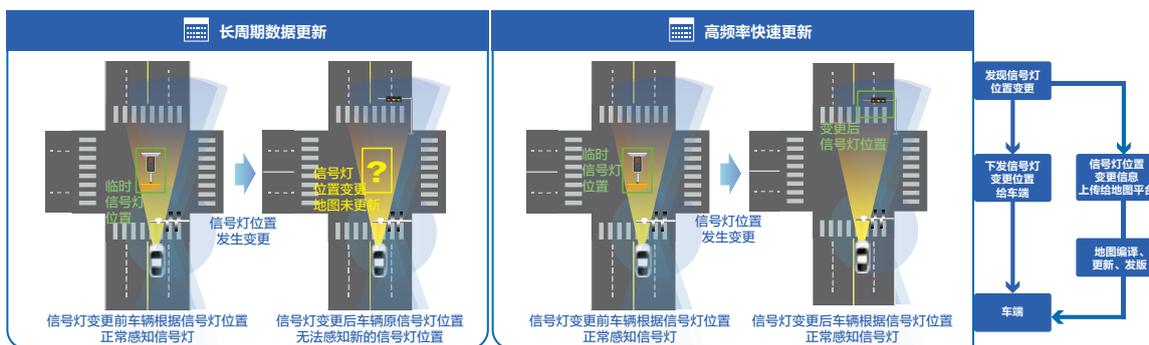


图 6.10 信号灯位置现实变更

(二) 地图要素变更-车道线变更

问题描述:

如图6.11所示, 由于长期施工的原因, 需要对车道线进行重绘, 可能会出现车道数减少、车道变窄、车道弯曲等复杂的地面标识变化, 同时还有可能出现原有车道线未清理干净的情况。对于强依赖高精度地图的自动驾驶车辆, 在如此复杂的车道要素变化情况下, 地图未能及时更新, 很容易出现车道线感知错误, 从而导致不按导向箭头行驶、压车道线行驶、跨越对向车道行驶等危险驾驶行为。

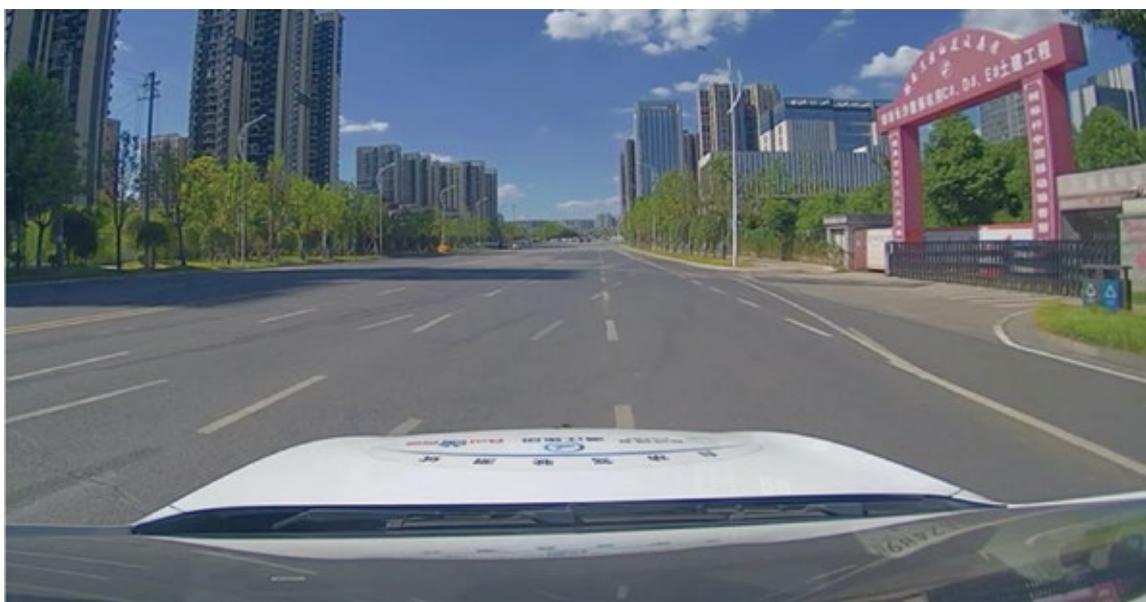


图 6.11 道路车道线重绘场景

场景原理:

1) 路端基于车道线的定点高频检测, 及时发现车道线变化, 自动更新路端自有路口局部地图的车道要素, 同时利用定点连续观测, 识别车辆的可通行方向和流向, 修正车道的行驶导向属性, 记录车道线的变更信息和变更时间;

- 2) 在车辆进入V2X广播范围后, 路端向车辆播发当前路口局部地图, 包含车道标线、停止线、信号灯等要素信息, 以及这些要素信息的置信度;
- 3) 车端收到数据后, 结合自身感知能力, 安全通过车道线变更路口(如图6.12)。

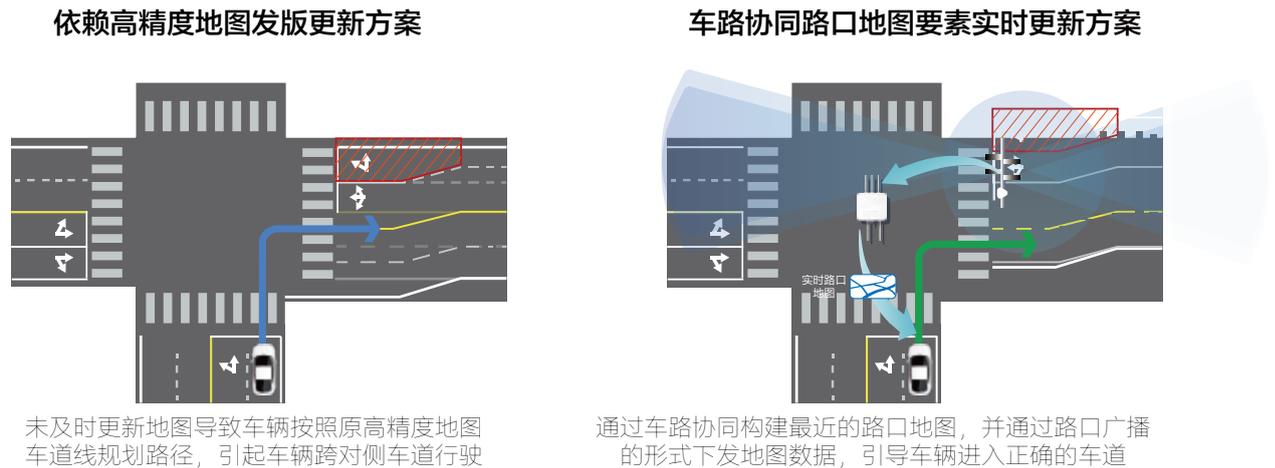


图 6.12 利用车路协同技术保障路口地图要素实时更新

综合应用效果:

车道线重绘后, 高精度地图及时更新, 在首辆车经过路口前即对于车道线进行识别, 并更新局部路口的车道线, 同时触发地图版本更新, 保证首辆自动驾驶车辆正常通过。

6.2.2 车路协同感知实践

(一) 路端信号灯融合感知

AD信号灯感知问题描述:

道路上经常会遇到异形、多语义或带倒计时的信号灯, 自动驾驶车辆容易受到环境影响(遮挡、逆光), 或在自身感知能力下降(感知失效)的情况下, 不能准确识别路口信号灯信息, 导致出现闯红灯或者交通事故, 降低交通效率。

无信号灯协同感知时, 路口信号灯被大车遮挡, 容易闯红灯或发生安全事故

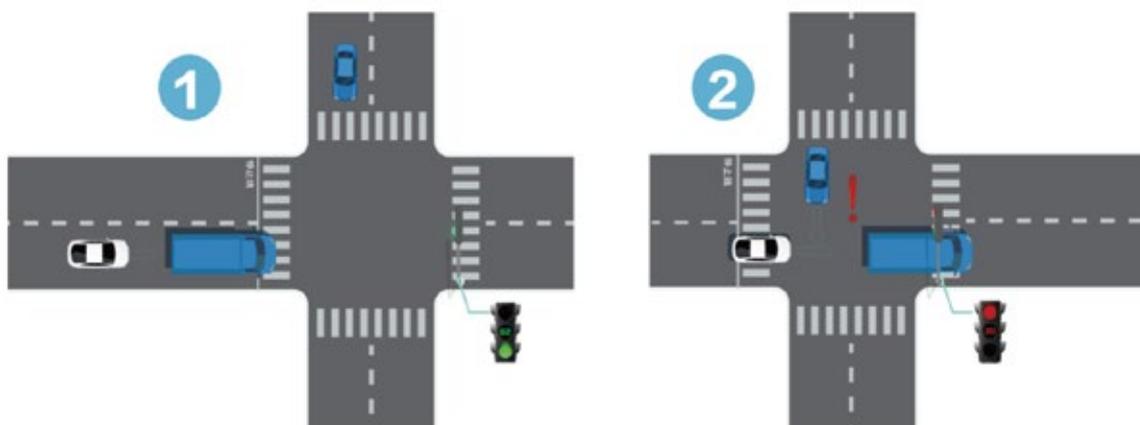


图 6.13 路口无信号灯协同感知

超视距/遮挡信号灯协同感知:

通过路端融合感知、信号灯数据接入、云端信号灯数据对接等技术实时获取信号灯灯色和倒计时信息, 经多源信号灯数据融合处理后, 通过V2X技术发给自动驾驶车辆。车辆可在距信号灯很远的位置提前获取信息, 提前进行决策控制, 降低交通事故风险。

有信号灯协同感知时, 车辆实时获取信号灯数据, 避免发生闯红灯或交通事故

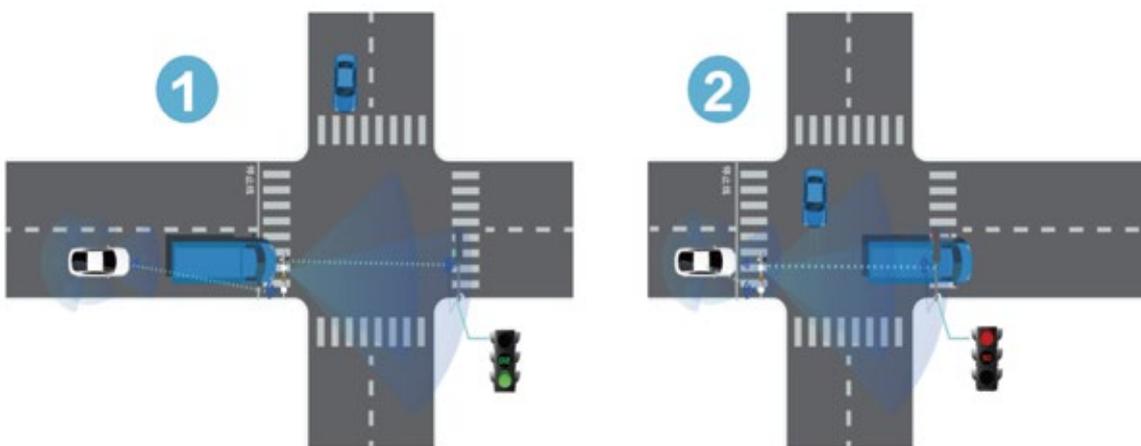


图 6.14 路口有信号灯协同感知

具体案例:

前方大车遮挡信号灯时(如图6.15), 可通过VICAD信号灯协同感知实时获取准确的路口信号灯灯色和倒计时数据, 以便车辆提前做出判断和决策控制, 避免出现闯红灯或者急刹。



图 6.15 信号灯遮挡场景

(二) 静态盲区/遮挡协同感知

AD盲区问题描述:

如图6.16所示, 受限于单车智能的传感器感知角度, 在出现静态障碍物或动态障碍物(如大型车辆)遮挡时, 车辆难以准确获取盲区内的车辆或行人的运动情况。

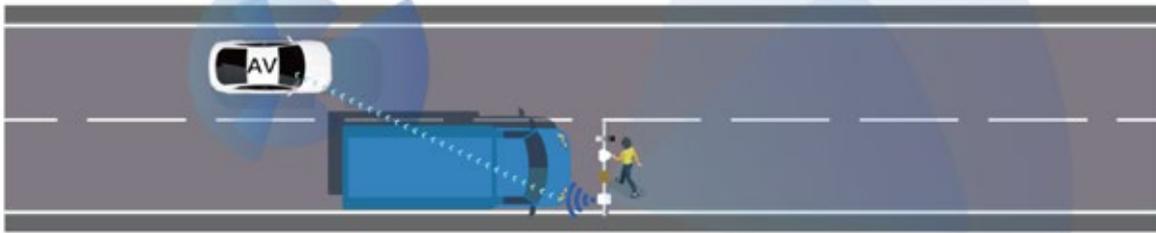


图 6.16 静态盲区: 行人突然闯入

VICAD动静态盲区协同感知:

如图6.17所示, 通过路端多传感器部署, 实现对多方位、长距离连续检测识别, 并与车辆感知进行融合, 实现自动驾驶车辆对盲区内车辆或行人的准确感知识别, 车辆可提前做出判断和决策控制, 进而降低事故风险。

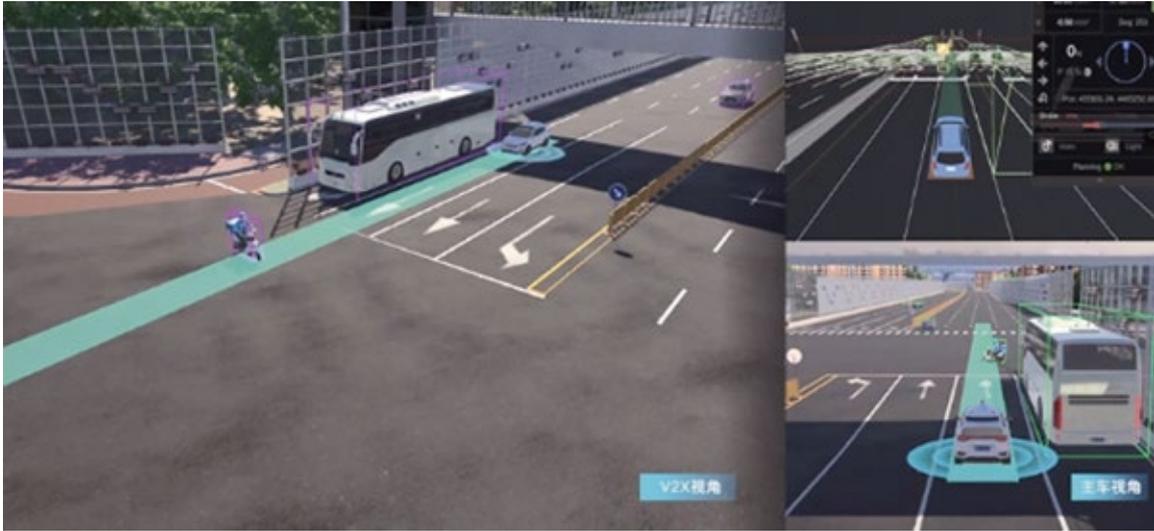


图 6.17 静态盲区非机动车/行人鬼探头协同感知

(三) 动态盲区/遮挡协同感知

(1) 左转/掉头盲区或遮挡协同感知:

如图6.18所示, 车辆(蓝白色)在路口左转或掉头时, 有大卡车或公交车(粉色长多边形)产生了动态盲区遮挡住了后面的车辆, 通过VICAD全量协同感知, 车辆可以获取盲区车辆的运动情况, 避免了车辆急刹或事故的风险。



图 6.18 左转/掉头盲区或遮挡协同感知

(2) 大车遮挡协同感知:

在车辆直行时, 左侧大车遮挡住了横穿的电动车, 通过VICAD动静态盲区协同感知, 车辆可以提前获取盲区车辆、非机动车或行人的运动情况, 避免了车辆急刹或事故的风险(如图6.19和6.20)。

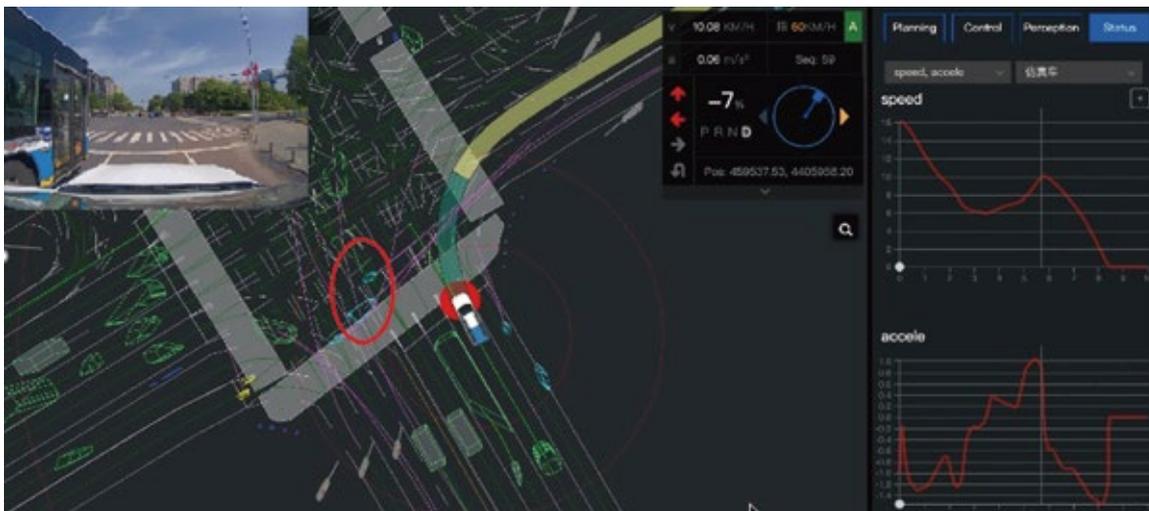


图 6.19 路口大车遮挡场景

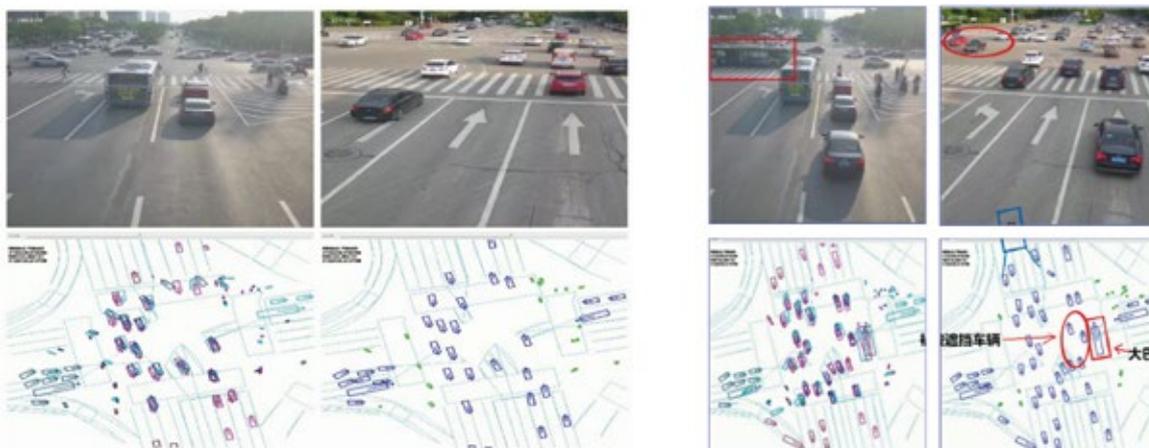


图 6.20 路口大车遮挡车路协同感知

(四) 超视距协同感知

AD超视距感知问题描述:

受限于车载传感器的类型、感知范围、分辨率等因素, 车辆对超出车载传感器覆盖范围的交通运行状况、交通参与者或障碍物检测结果不稳定, 容易出现感知不到、感知跳变等问题。

VICAD超视距协同感知:

如图6.21所示, 通过路端多传感器部署, 实现对多方位、长距离连续检测识别, 并与车辆感知进行融合, 实现自动驾驶车辆对超视距范围内车辆或行人的准确感知识别, 车辆可提前做出判断和决策控制, 进而降低事故风险。

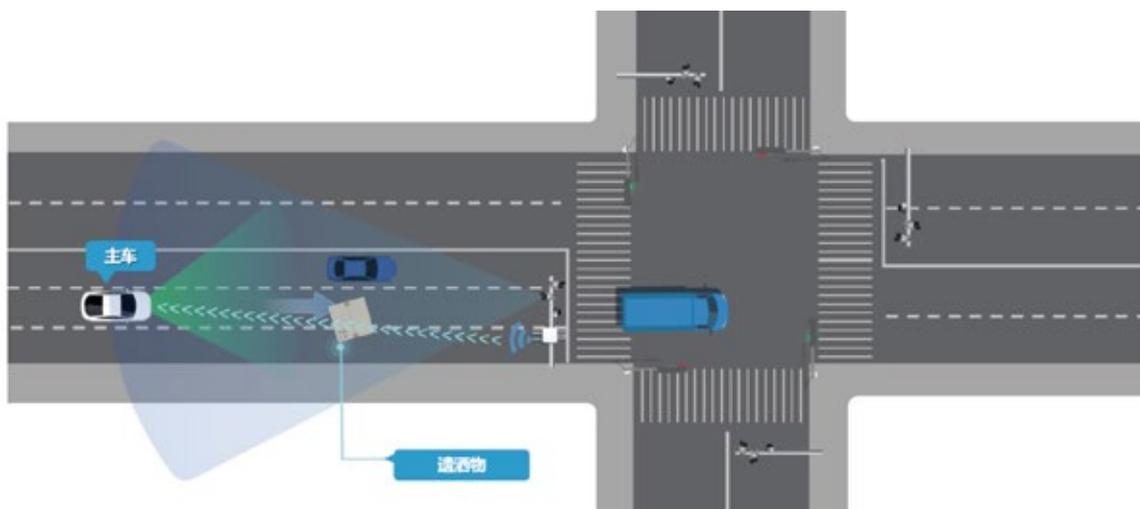


图 6.21 超视距协同感知

具体案例:

如图6.22、6.23所示, 两张图片是同一时刻的车端和路端检测与车融合后的结果。在图6.22中, 车辆(蓝白色)很难对较远处的障碍物进行稳定检测(行驶路径上没有障碍物显示), 容易造成急刹和事故风险。在图6.23中, 通过VICAD超视距协同感知, 车辆可以提前获取前方车辆、非机动车或行人的运动情况(路径附近的粉色框), 避免了车辆急刹或事故风险。

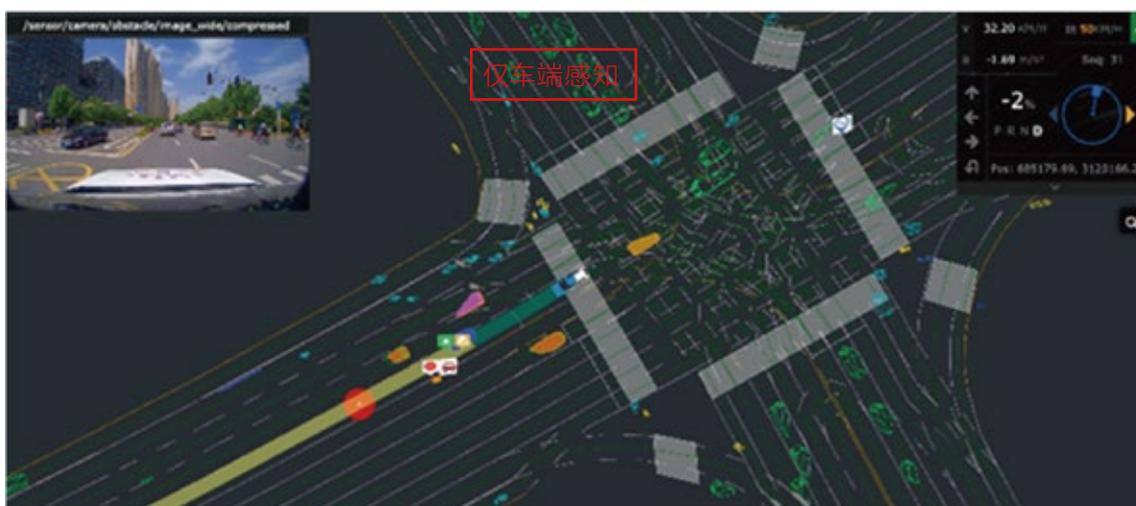


图 6.22 仅车端感知



图 6.23 车路协同感知

(五) 低速车辆协同感知

AD低速车辆感知问题描述:

受车端传感器感知视角及车辆实时运动等因素的影响, 车辆对路边低速车辆检测的速度估计不准, 如路边缓慢倒车、路边车辆驶出等, 造成潜在碰撞或急刹风险。

VICAD低速车辆协同感知:

如图6.24所示, 通过路端多传感器部署, 实现对道路多方位、长距离连续检测识别, 并与车辆感知进行融合, 实现自动驾驶车辆对低速车辆或行人的准确感知识别, 车辆可提前做出判断和决策控制, 进而降低事故风险。

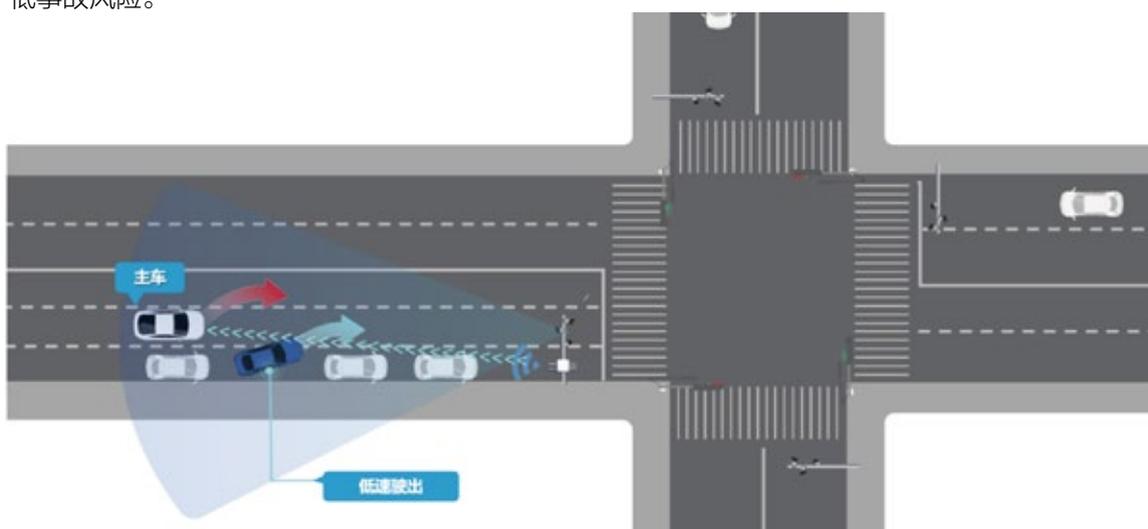


图 6.24 路边低速车辆协同感知

具体案例:

车辆直行时,有VICAD协同感知的情况下,对路边缓慢驶出车辆可以进行稳定检测,准确获取车辆速度、位置等信息,发送到车端进行融合感知定位,进而避免了车辆急刹或事故风险(如图6.25)。



图 6.25 路边低速车辆协同感知

(六) 道路遗撒与低矮障碍物协同感知

问题描述:

自动驾驶对低矮障碍物的感知能力要求是识别不小于5厘米的障碍物,场景的成功率不低于99%,而实测单车L4的成功率一般不能达到,车辆对车前低矮障碍物检测进行稳定检测有一定难度,存在感知漏检、误检的可能性,可能出现车辆急刹或事故风险。



图 6.26 仅依靠AD车端感知无法在远距离对遗撒交通场景精确识别

场景原理:

通过车路协同感知, 实现对低矮障碍物进行持续稳定检测识别, 由于路端感知设备固定安装, 可以通过背景建模等手段, 同时具有实时+历史的数据, 对低矮障碍物做到更高的检出率和准确感知, 并提前将感知到的障碍物信息发送给车辆, 做出提前变道、缓行避让等更安全的驾驶决策(如图6.27)。

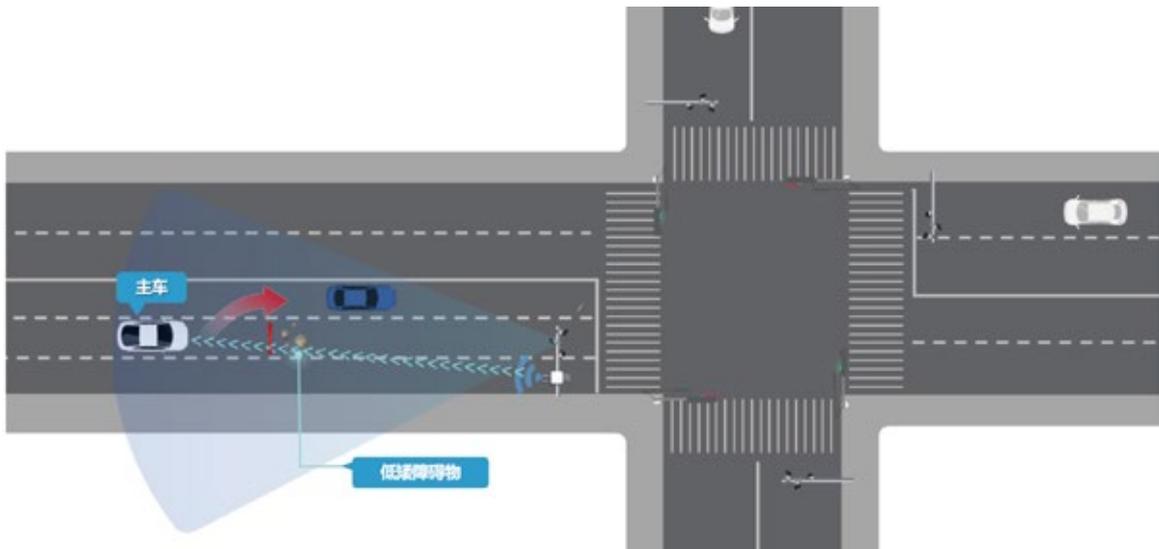


图 6.27 低矮障碍物协同感知

应用效果:

路端系统可对道路遗撒等低矮障碍物进行有效检测, 并通过V2X远距离提前发送给车辆, 提前进行判断和车辆决策控制, 如变道绕行(如图6.28)。



图 6.28 基于VICAD协同感知对道路遗撒识别

6.2.3 车路协同决策规划实践

(一) 排队决策

问题描述:

在排队场景中,自动驾驶车辆处于跟车状态下,前方路口红灯,直行车辆出现排队现象;而车辆此时由于无法判断前车停止的原因(排队中),会选择往左侧(左转车道)并线超车,如图6.29所示;然而行驶到临近路口时,却由于车道中的排队车辆过多而无法再并线回到原车道,可能会阻塞交通。



图 6.29 排队交通事件

场景原理:

通过VICAD对交通事件进行感知,及时发现前方排队事件,并将排队事件及时发送给车辆,同时为了规避车辆错误左转变道后而无法再并线回原直行车道,向车辆发出在车道内排队等候的决策(如图6.30)。



图 6.30 路口车辆排队决策

(二) “死车” 决策

问题描述:

在“死车”场景下, 车辆前方有大车“死车” 停占两个车道, 临近路口车辆无法判断前方信息而停滞不前 (如图6.31)。



图 6.31 大车“死车” 交通事件场景

场景原理:

通过VICAD对交通事件进行协同感知和决策, 可以长时间对道路车辆进行跟踪和预测, 及时将死车事件播发给车端, 车辆可以及时做出变道等决策 (如图6.32)。



图 6.32 “死车” 决策

(三) 交叉口协调通行

问题描述:

如图6.33所示, 自动驾驶车辆在直行车道行驶, 在道路分叉区域(例如岔道或分合流区域)驶出的车辆左转汇入直行车道, 与主车行驶路径产生冲突, 由于车辆缺乏通行次序协调, 导致主车急刹或接管。



图 6.33 交叉口冲突场景(无车路协同决策)

场景原理:

- 1) 通过车路协同, 双方车辆通过V2X方式上报车辆意图(预期轨迹, 包含各时刻的车辆位置及速度);
- 2) 路端或云端系统根据车辆意图、交通规则(左转汇入礼让直行)、车辆状态信息, 仲裁主车和岔道汇入车辆的通行策略为: 直行车辆优先并加速通过、左转车辆减速跟随通过;
- 3) 双方车辆执行仲裁结果, 在车辆不停滞情况下高效通过路口。

应用效果:

如图6.34所示, 通过车路云一体化协同决策, 合理仲裁车辆通行次序, 确保直行与左转汇入车辆有序高效通过, 避免了交互冲突造成路口车流阻塞或碰撞风险, 提升了通行效率和安全性。



图 6.34 交叉口冲突的协调通行 (有车路协同决策)

(四) 阻塞绕行

问题描述:

自动驾驶车辆在直行车道中行驶, 前方车道中遇到施工事件阻塞通行 (如图6.35所示), 单车智能难以在这一复杂状况下判断前方车辆的驾驶意图并确定排队或绕行策略, 容易造成车辆不合理停滞或绕行。



图 6.35 施工占道阻塞交通

场景原理:

- 1) 路端可发挥长时间观测和场景理解的优势, 同时结合云端多源数据输入, 判断前方阻塞场景类型及车辆状态属性;
- 2) 如主车所在车道前方因施工占道、车辆异常停滞(如车辆故障、违章停车等)阻塞车道, 且旁边车道可供主车绕行通过时, 给出主车绕行通过策略建议, 避免不合理停滞。

应用效果:

如图6.36所示, 通过VICAD可以帮助自动驾驶车辆顺利通过阻塞场景。



图 6.36 施工占道跨黄实线绕行

(五) 路口内施工绕行

问题描述:

如图6.37所示, 自动驾驶车辆行驶到无车道线刻画的道路区域(如路口中央区域), 有阻塞类事件发生(如施工区域、异常停滞车辆), 需重新规划行驶轨迹绕行通过。由于阻塞事件本身场景较为复杂, 同时所在位置为无车道线刻画的道路区域(如路口中央区域), 主车无变道或绕行策略的参考车道信息, 故无法执行绕行决策, 造成车辆不合理停滞。



图 6.37 路口内施工

场景原理:

- 1) 路端发挥场景理解和长时观测的优势, 获取道路阻塞区域类型、区域范围、区域分布及阻塞区域周边车流状态;
- 2) 路端或云端系统根据阻塞区域周边历史车流轨迹数据, 选择最优通过策略, 生成适用于主车通行的推荐轨迹引导线及速度建议, 发送给车端;
- 3) 车辆按照路云下发的轨迹引导线行驶脱离阻塞, 如图6.38所示。



图 6.38 路口内施工绕行场景

应用效果:

自动驾驶车辆顺利绕行通过路口阻塞区域。

(六) 合作式代客泊车

问题描述:

无论是L2还是L4车辆在面对泊车场景时, 因停车场环境复杂、定位信号缺失等问题可能会存在安全隐患。此外, 还需花费大量的时间寻找空闲车位导致效率低下, 甚至出现排长队的情况。

场景原理:

- 1) 对停车场内合作式泊车巡航道路和专属车位实现全面覆盖, 对停车场内车辆、行人、障碍物等目标进行检测, 并实时监测停车场车位占用情况;
- 2) 当人工主动申请或者车辆主动申请合作式泊车时, 云端结合车端和场端的感知数据进行全局调度, 给出全局导航路线支持车辆前往最近的空车位;
- 3) 车辆收到调度信息后进入低速自动驾驶状态, 能结合停车场的实际情况, 实现停车场内低速自动驾驶, 包含: 直道巡航、弯道巡航、路口通过、上下坡、减速带通过、低速跟车、固定场景障碍物绕行、定点停车等功能;
- 4) 当停车场内有弯道盲区时, 场端智能终端会将计算结果传给车端, 车辆可以主动减速慢行避免碰撞。

应用效果:

合作式代客泊车可以帮助车辆快速找到停车位, 并且在驾驶员不参与操控的条件下, 实现车辆自动驶入和驶出停车位。图6.39-6.41分别展示了百度AVP代客泊车在北京亦庄的建设情况。



图 6.39 北京亦庄管委会AVP车位路线示意图



图 6.40 北京亦庄管委会地面&地下AVP专用停车位



图 6.41 AVP智能套件示意图

(七) 编队行驶

问题描述:

自动驾驶编队行驶场景中, 编队组织形式为编队领队车辆及编队成员车辆, 编队领队车辆根据云端控制指令, 实现发起编队或解散编队; 成员车辆决定是否加入或离开编队。

场景原理:

- 1) 编队实现方式: 在组成编队之前, 编队头车确认发起编队的请求后, 会将本车的目的地、编队ID、编队速度、跟车距离等信息实时广播给所有周边车辆, 周边车辆确认加入该编队后, 根据跟车对象位置和距离信息重新规划路径, 计算并控制速度合入编队, 直到加入编队后, 按照编队统一推荐的规划信息(推荐速度、推荐车距、推荐车道)保持一致的行驶状态;
- 2) 编队解散方式: 编队领队车辆接收到云端的解编消息, 广播解编请求给编队各车; 成员车辆自动离开编队, 离开编队后重新规划路径驶向原目的地。



图 6.42 编队行驶场景

应用效果:

在昌九高速项目中, 百度和合作伙伴共同实现了编队车辆行驶, 完成了单车和编队能力验证。在 60km/h 速度下基本展示自动驾驶编队能力, 实现了 3 车组成编队、跟随、减速、加速、解散编队等应用。

6.2.4 车路协同控制实践

6.2.4.1 控制车辆：“5G云代驾”

自动驾驶车辆在实际运营过程中会面临临时道路变更或交通管制等特殊情况, 在 5G 环境下, 基于高带宽、低延时、稳定性强的数据连接, 远程驾驶员可以通过 5G 云代驾控制台像驾驶汽车一样通过方向盘和踏板控制车辆, 实现车辆的远程遥控驾驶, 帮助车辆解决问题。如图 6.43 所示, 因需要“5G 云代驾”介入的极端场景并不是经常出现, 所以云端驾驶员一个人可以同时为多辆车服务, 降低自动驾驶车的运营成本。

“5G 云代驾”目前已在北京、上海、广州、成都等多个城市落地应用, 2022 年 4 月 28 日, 北京率先允许自动驾驶车辆“方向盘后无人”, 11 月 21 日, 北京发放自动驾驶无人化通知书, 百度是首批获准企业, 正式开启前排无人测试, “5G 云代驾”将会全方位保障自动驾驶安全和乘客出行安全, 改善乘坐体验。



图 6.43 “5G 云代驾” Robotaxi 应用

“5G云代驾”技术同时可以应用在泊车、低速无人车、矿卡、港口、特种作业等多个场景,以矿山为例,可以通过“5G云代驾”实现矿山装-运-排自动化作业(如装/卸载区排队、自动化对铲、空/重载运输、沿帮排土等),单辆车年运营成本节省百万以上。



图 6.44 “5G云代驾”智慧矿山应用

6.2.4.2 控制基础设施

(一) 单点控信号灯优先通行

在实际交通运行环境中,经常遇到特种车辆(事故救援、医疗救护、警卫保障)执行特殊任务,需要赋予这些车辆一定的优先通行权,为特种车辆节省时间;同时,公交车、大巴车这一类车辆具有公共交通属性,从节能减排和交通效率的角度考虑也可以赋予这些车辆一定的优先通行权,避免交通拥堵。

问题描述:

为应对医疗、消防、应急等特种车辆的紧急出行任务,开通“绿波生命救援通道”的需求十分迫切。当前,特种车辆通行过程中,存在社会车辆难以感知无法提前让行、交叉口抢行安全隐患大、人工操作无法实现全局精准调配等难题。比较常用的做法是在道路上设置优先通行车辆的专用信号灯,如图6.45所示,这种方案需要在信号灯杆上额外挂信号灯,导致路端设备太多。



图 6.45 公交车专用信号灯

场景原理:

基于车路协同的车辆优先通行总体原理如下:

- 1) 特种车辆在出发前通过导航向平台提交优先通行申请,平台会为车辆制定最优化路径和实时导航服务;
- 2) 车辆向平台实时报送位置信息(或者路端对道路车辆进行实时检测,识别车辆),平台结合车辆所在位置,对车辆前方路径车道内的车辆进行导航优化或控制,避让特种车辆;
- 3) 特种车辆接近路口时,路端系统对车辆所在车道信号灯相位进行优化控制(如绿灯延长的方式),给予特种车优先通行权。

应用效果:

以北京亦庄某项目为例,通过VICAD为特种车辆的快速、安全通行提供必要的“绿色通道”,如图6.46所示,车辆实现不闯红灯、交通秩序影响最小化的相对优先出行,从而提升交管部门服务水平、充分保障整体交通效益。

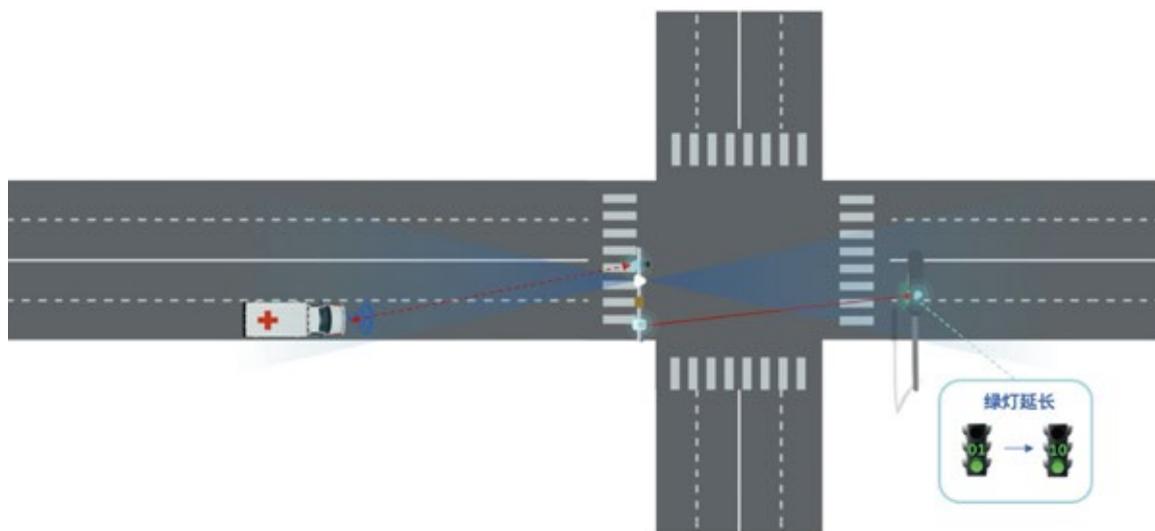


图 6.46 特种车辆优先通行应用效果

(二) 干线/区域控信号灯绿波通行

问题描述:

车辆在路口经常因为遇到红灯而造成停车等待,会降低整体交通的运行速度和通行效率。

场景原理:

车路协同通过对交通整体运行情况进行监测、预测和分析,同时结合车辆的位置、信号灯调控周期、交规限制等因素,为车辆制定个性化通行建议(如建议车速),让车辆可以连续绿灯通过多个路口,最大可能降低车辆停车次数,提高车辆平均速度和交通整体通行效率,减少交通拥堵概率。

场景流程:

该场景的具体实现步骤如下:

- 1) 收集一段时间内道路的交通流量、延误时间、平均速度等交通指标数据;
- 2) 从控基础设施的角度, 可根据对交通指标数据的分析, 优化信号灯周期, 并设计通过干线绿波的理论车速;
- 3) 将建议车速发送给车辆, 车辆结合自身位置、运行状态等信息, 可以综合制定更加合理的通行速度;
- 4) 车辆按照决策和控制指令连续绿灯通过路口, 提高了行驶效率。

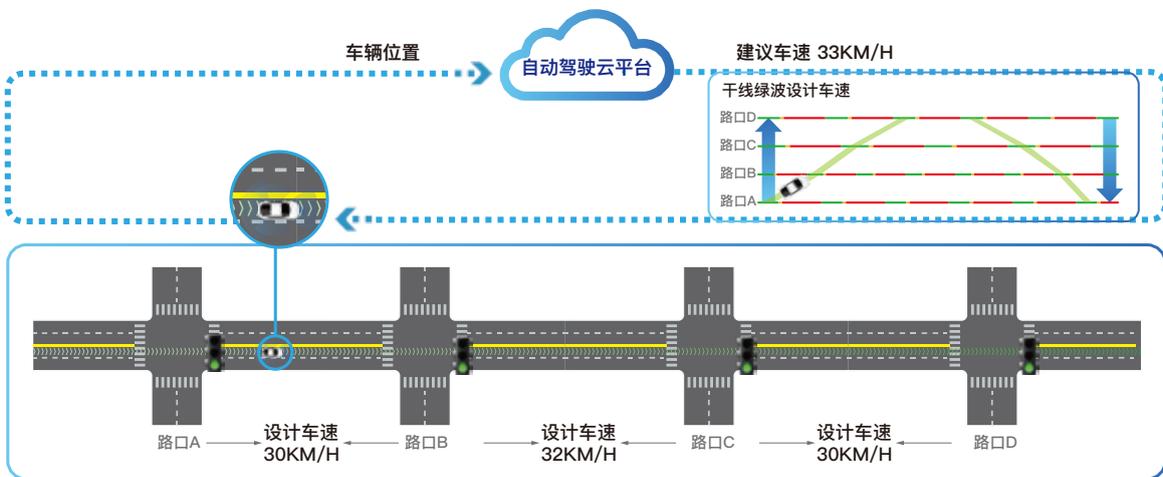


图 6.47 车速诱导

应用效果:

基于北京亦庄各个路口的实际交通流数据, 分别采用自适应控制方法, 以及基于GNN的数据预测与补全方法(原理见图6.48), 对区域信号灯进行优化控制性能比较, 如表6.4所示, 全天延误表示0点至24点内的平均延误; 早高峰延误表示早7时至9时内的平均延误; 平峰延误表示10时至16时内的平均延误。结果表明, 基于GNN的数据预测与补全方法, 在不同时段内均可有效提升交通通行效率, 降低车均延误。

表 6.4 基于GNN预测的区域信号控制与自适应区域信号控制对比(亦庄)

评估指标	自适应控制	GNN预测+全息路口方案	提升效果
全天延误(s)	26.31	24.68	6.21%
早高峰延误(s)	40.46	34.43	14.91%
平峰延误(s)	15.04	13.70	8.93%

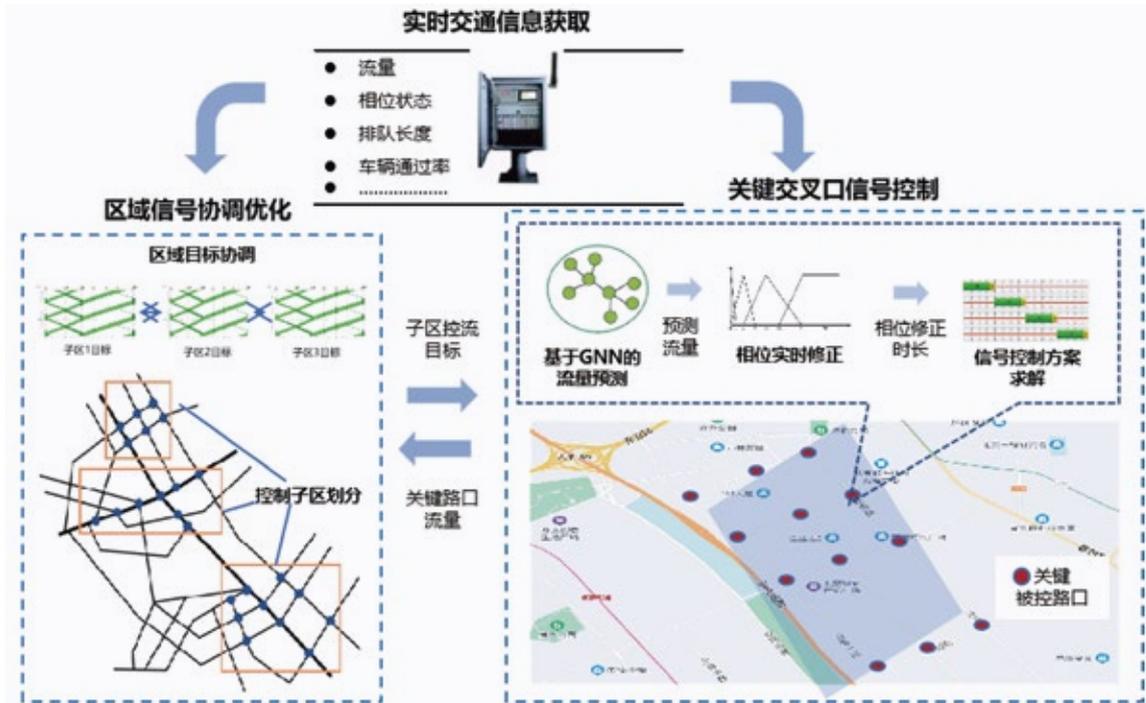


图 6.48 基于GNN流量预测的区域信号控制示意图

07

总结与展望



7.1 SECTION 1

观点总结

综合全文来看:

(1) 车路协同自动驾驶可以让自动驾驶更安全、支持管理或扩展自动驾驶ODD、实现完全无人化自动驾驶安全运营,还可以兼容当下,为低等级自动驾驶提供多样化支撑应用,加速自动驾驶规模商业化落地。VICAD在全方位支撑保障L4无人化安全运营的同时,还可以向下兼容为存量L2等低等级自动驾驶提供智能网联服务,加速汽车智能化与网联化协同发展;

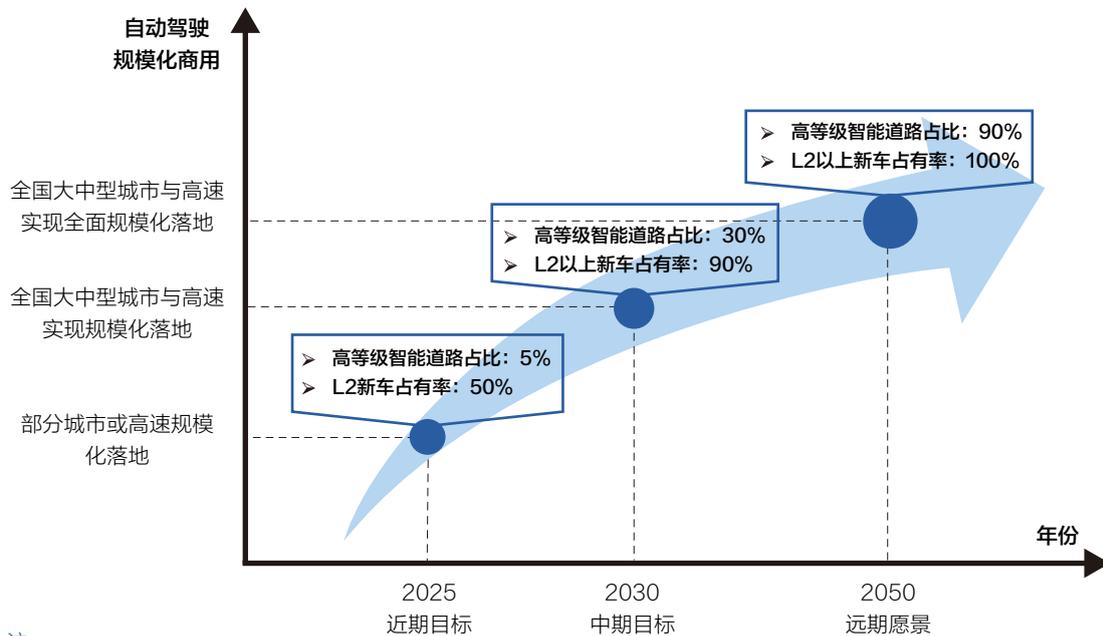
(2) 智能道路是发展车路协同自动驾驶的关键核心,也是短板,需要对道路进行智能化分级,并分步骤统筹建设部署高等级智能道路,高等级智能道路应具备协同感知、协同决策规划和协同控制能力。结合城市、高速公路、乡村等差异化驾驶和出行需求,应对道路进行智能化分级,并统筹制定差异化建设部署方案,优先在东部沿海大中型城市和部分具备条件的高速公路建设部署高等级智能道路,支持自动驾驶协同感知、协同决策规划和协同控制,加速L2、L4车辆在城市、高速等交通环境下规模商业化落地;

(3) 应主要从宏观社会经济的角度来评估高等级智能道路的收益,包括减少交通事故、提高交通效率、带动地方和区域经济发展等维度,按此方式估算高等级智能道路的综合投资收益率普遍高于5倍以上。道路具有较强的不可再生和公共服务属性,所以建设高等级智能道路的经济性更应该从宏观社会经济的角度进行评估测算。高等级智能道路在总投资成本方面主要包括道路基础设施的升级改造和云服务设施建设运维费用;总收益可以从减少交通事故、提高交通效率、带动地方和区域经济发展等维度进行综合测算。在所有车辆智能网联化、高等级智能道路完全覆盖的情况下,高等级智能道路的投资收益率普遍高于5倍以上。

7.2 SECTION 2

发展展望

建设高等级智能道路、大力发展车路协同自动驾驶、构建安全便捷高效的智能化出行服务体系,符合人民对美好生活向往的客观需求,是建设现代化经济体系的内在需要,也是全面建成社会主义现代化强国的有力支撑。但车路协同自动驾驶规模商业化落地是一个循序渐进、由局部到整体,从量变到质变逐渐发展的过程:首先,需要实现关键技术突破,如车路高效通信、云控平台研发、车路协同系统建设等;其次,智能车辆的渗透率和智能道路覆盖率需要达到一定水平;再次,需要在政策法规和标准方面提供充分的保障支持。



注：

- 1) 高等级智能道路占比：国内大中型城市及高速公路高等级智能道路（C4、C5）的占比
- 2) L2及以上新车占有率：L2及以上等级自动驾驶汽车年销售量占比

图 7.1 车路协同自动驾驶规模商业化落地愿景目标

以车路协同自动驾驶完全规模商业化作为愿景目标，可以分为三个阶段实施，如图7.1所示：

(1) 近期目标：预计到2025年，VICAD在部分先行城市和高速公路实现规模商业化落地。在建有高等级智能道路的城市、区域或高速公路，实现L2及以上等级的自动驾驶车辆的连续行驶，在该阶段城市道路和高速公路中C4及以上高等级智能道路里程占比达到5%，L2及以上等级新车年销量占比超过50%；

(2) 中期目标：预计到2030年，国内大中型城市和高速公路中C4及以上高等级智能道路里程达到30%，L2及以上新车年销量占比达到90%，L2及以上自动驾驶车辆在城市和高速公路智能道路可实现大规模商用；

(3) 远期目标：预计到本世纪中叶，国内大中型城市和高速公路中基本实现超过90%的C4高等级智能道路覆盖，L2及以上新车年销量占比达到100%，L2及以上自动驾驶车辆在全国大中型城市和重要高速公路智能道路上都能实现连续自动驾驶。

7.3 ACTION 3

发展建议

全球范围内VICAD仍处在探索与发展的初级阶段，还有诸多挑战与困难需要行业多方协同，共同攻克。

(1) 车路云深度融合形成高维复杂系统，需要构建基于系统工程的功能安全和预期功能安全体系。车路协同复杂系统需要解决大规模移动接入、多层次互操作、低延时、高安全可靠等一系列问题，尤其是要适用各种复杂场景，如地域（南北城市差异）、工况（高速、城市、乡村、停车场等重点区域）、环境（晴天、雨天、雪天、雾霾等天气）和范围（典型场景、边角场景、事故场景等多种类型）等。因此需要基于系统工程的角度构建车路系统自动驾驶功能安全和预期功能安全体系，明确系统架构、系统功能、应用场景和服务内容，对系统的设备设施提出明确的功能要求、性能要求、数据要求、安全要求，以保障车路协同自动驾驶安全可靠运行；

(2) 道路智能化与驾驶智能化发展不够协同，需要加快建设部署高等级智能道路，提升智能道路覆盖率，服务于车路协同自动驾驶、智能交通管理和智慧城市建设。目前国内部分城市和高速公路已经规划建设了一批自动驾驶封闭测试场、开放测试道路，但这些都还处在小范围测试验证和应用示范阶段，道路的感知定位、车路信息交互等方面的能力还不能满足自动驾驶的需求，更不具备协同决策或协同控制的能力，难以满足高等级自动驾驶对数据精度、数据质量的要求，因此需要建设高等级智能化道路，以推进自动驾驶规模商业化落地应用；

(3) 需要提升网联终端渗透率，并持续探索车路通信演进技术，支持车路协同自动驾驶及更加多样的车路协同应用。在提升渗透率方面，建议推进城市及高速公路RSU部署，同时加速提升C-V2X前装量产。以城市场景作为示范，推进单城或单区域规模部署，降低边际成本。针对网联车端，可通过政府车辆、社会营运车辆率先搭载OBU，并给予一定政策补贴；同时，面向广大普通用户，以提升用户体验感为目标，通过如后视镜、手机支架等后装C-V2X产品形态，及与APP、小程序和导航地图结合，推送C-V2X信息功能。在车路高效通信技术演进方面，基于LTE-V2X的车载通信设备和路侧通信终端能够满足DAY I和DAY II等标准确定的驾驶辅助类应用场景对数据交互的需求，但是高等级车路协同自动驾驶需要路侧协同感知或协同决策控制，车路之间的数据交互数据量更大、频率更高，需要更高性能的车路通信技术提供支持和保障，比如NR V2X或5G，时延要求10ms以内，传输可靠性不低于99.9%；

(4) 车路协同自动驾驶需要跨行业、跨地域互联互通，并不断探索开展应用服务创新和商业模式创新。在互联互通方面，车路协同自动驾驶在具体推进过程中还有很多影响或限制因素，比如车辆数据开放应用、道路感知设施复用、道路信号控制数据使用、道路收费系统打通等，需要开展深入研究并逐步推进。在应用服务创新和商业模式创新方面，要学习DSRC推广应用好的做法，也要总结

其不足和局限性,充分发挥C-V2X可演进的优势,在服务于车路协同自动驾驶的基础上,探索更多应用服务和商业模式;

(5) 政策法规和标准建设是引领和支撑车路协同自动驾驶发展的关键因素,应按照VICAD发展的不同阶段,提前开展相关法规标准的研究和制定修订工作。在政策法规层面,虽然国家和地方已积极出台了关于自动驾驶的道路测试管理规定,一定程度上推动了全国范围内自动驾驶公开道路测试进程,加快了自动驾驶应用的步伐。在标准层面,工业和信息化部、国家标准化管理委员会、交通运输部、公安部归口管理的相关标准化组织已经牵头制定了不少自动驾驶、智能网联、车路协同相关技术标准,但是道路基础设施、云控基础平台、功能安全和预期功能安全等车路协同自动驾驶核心技术标准仍需要加快研制,汽车、通信、电子信息、交通、安全等行业标准组织间也需要加强有效协同,尽快构建完善车路协同自动驾驶标准法规体系。

08

附录



附录A：地图参考位置协议

地图动态层数据的跨图商、跨车企、跨模组无损且安全的流动是地图更新必须考虑的关键要素，为了解决动态高精度地图动态层中由于坐标系不一致导致的坐标偏转、地图版本不一致导致的变更信息不匹配等一系列问题，可以采用地图参考位置协议的方式来解决。所谓地图参考位置协议是通过定义一组相对静止的有语义信息的地面标识特征位置作为地图参考点（例如导流区箭头、停止线和车道线的交点等），在坐标传输过程中通过参考点ID加偏移值的方式进行传输，使用端利用线型参考值和自身存储的静态地图数据解算动态地图更新信息，避免原始坐标的网络传输，保证数据安全，示意图见图A.1所示。

地图参考位置协议优势如下：

- 1) 动态地图信息无损地在多源异构地图之间流转：打通动态地图信息流通壁垒，面向不同精度，不同图商之间的多源异构地图传递动态信息，保证地理信息的精度以及表达和理解的一致；
- 2) 传输过程中避免暴露原始坐标，加强地理信息安全：利用线型参考的方式避免直接传输地理坐标，降低信息被截取后反解算的可能性；
- 3) 提高传输信息的密度，简化动态信息使用复杂度：利用线型参考，可以使用几个相对位置表达复杂矢量线数据，大大降低传输数据量；同时简化了地图匹配工作，简化相对空间关系的计算复杂度。

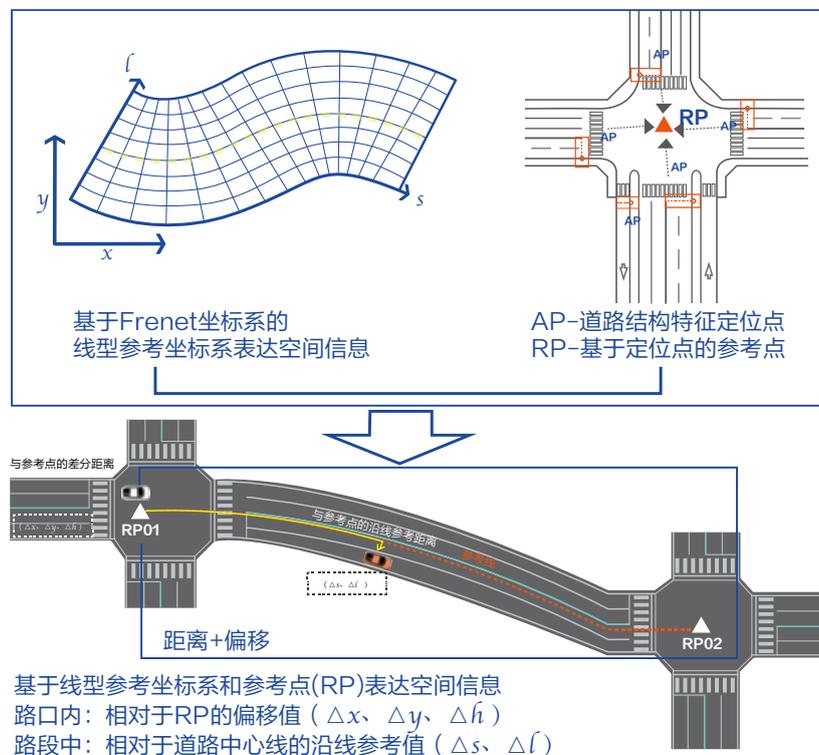


图 A.1 基于参考位置的坐标体系

附录B：自动驾驶一体化安全评价实验

为实现对不同自动驾驶解决方案系统的量化分析，本实验基于自动驾驶仿真模拟器Carla二次开发了交通仿真平台，支持模拟使用不同感知与决策控制算法的驾驶行为，并基于不同评价标准，对系统结果进行对比分析。

通过对百度实际测试数据与自动驾驶领域公开数据集的分析与归纳，实验选取了行人鬼探头、无保护左转、异常障碍物与异常交通情况四个典型场景，作为自动驾驶领域备受关注的安全问题与边缘场景的代表。真实数据被用于建模各场景的初始参数分布模型，以在仿真平台上渲染构建高保真的实验场景。

对每一个典型场景，均开展单车智能、车路协同感知、车路协同感知与决策控制三种对照实验各1000次，并从安全和通过效率等评价维度，对实验结果进行统计分析，为自动驾驶解决方案的量化分析与评价提供理论参考。

B.1 场景分布模型

通过对百度Apollo提供的近三万条真实交通流轨迹数据进行统计分析，采用最大似然估计等方法，拟合得到自由交通流状态下的场景分布函数^{[1][2]}。

其中，非路口环境下的车头时距分布为负指数分布：

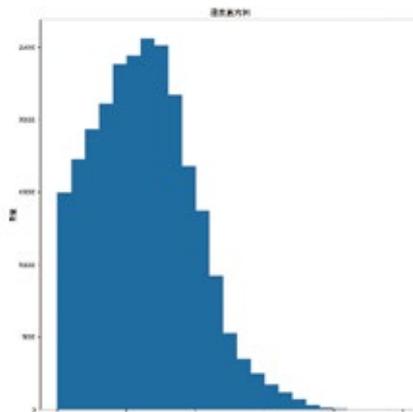
$$P(h) = 0.1742 e^{-0.1742h};$$

非路口环境下的车速分布满足对数正态分布：

$$P(v) = \frac{1}{0.4857v\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln v - 1.8304)^2}{0.4718}}, v > 0;$$

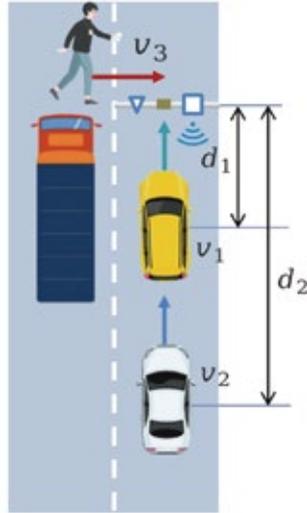
路口环境下的车速分布符合对数正态分布：

$$P(v) = \frac{1}{0.3827v\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln v - 1.5853)^2}{1.5269}}, v > 0。$$

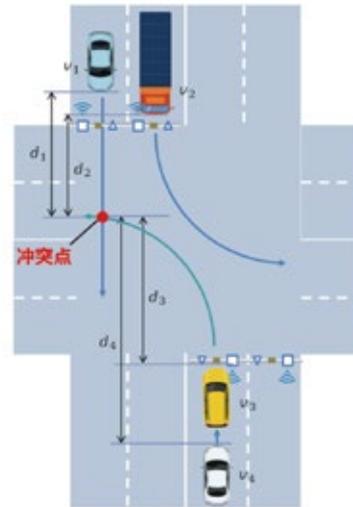


图B.1 路口环境下的车速直方图

在行人鬼探头场景中, 超参数 $\{\theta_0\}=\{v_1, v_2, d_1, h_2\}$, 其中 v_1 为主车速度, v_2 为跟车速度, h_2 为车头时距^[3], d_1 为主车与路端设备之间的距离, d_2 为后车与路端设备之间的距离并可以通过 $d_2=d_1+abs(v_2-v_1)h_2$ 计算。其中两车速度 v_1, v_2 均满足对数正态分布, 行人速度假设为常值, h_2 的分布为负指数分布^[4], 根据真实车辆数据状态分布, 推算 d_1 的分布近似满足均匀分布。

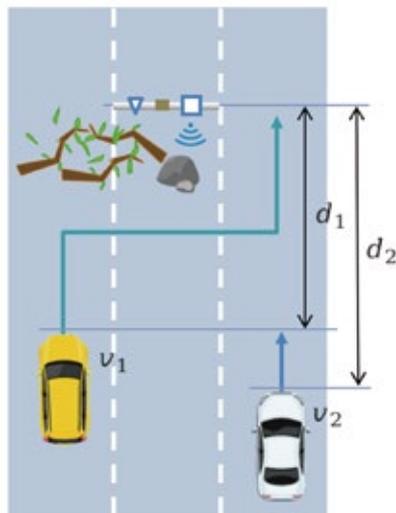


图B.2 行人鬼探头



图B.3 无保护左转

在无保护左转场景中, 超参数 $\{\theta_0\}=\{v_1, v_2, v_3, v_4, d_1, d_2, d_3, h_4\}$, 其中 v_1 为对向直行车1的速度, v_2 为遮挡车2的速度, v_3 为左转车3的速度, v_4 为车4跟车速度, 定义左转车3与对向直行车1之间发生碰撞的点为冲突点^[5], d_1 表示直行车1与冲突点的距离, d_2 为遮挡车2与冲突点所在平行直线的距离, d_3 为左转车3与冲突点所在平行直线的距离, h_4 为车3与车4间的车头时距。根据真实车辆数据状态分布, v_1, v_2, v_3 的分布均满足对数正态分布, d_1, d_2, d_3 假设为均匀分布, h_4 的分布为负指数分布。



图B.4 异常障碍物



图B.5 异常交通情况

在异常障碍物场景中, 超参数 $\{\theta_0\}=\{v_1, v_2, d_1, d_2\}$, 其中 v_1 为左侧车道的前车1的速度, v_2 为右侧车道的后车2的速度, d_1, d_2 分别为车1与车2距离路侧设备之间的距离^[6]。两车速度 v_1, v_2 均满足符合城市道路速度规范的均匀分布^{[7][8]}, 根据真实车辆数据状态分布, 推算 d_1, d_2 的分布近似满足均匀分布。

在异常交通情况下, 超参数 $\{\theta_0\}=\{v_1, v_2, v_3, v_4, d_3, d_4\}$, 其中 v_1, v_2 分别为异常情况发生前, 驶过该区域的其他非自动驾驶车辆车1与车2的速度, 车5为停在修路路段前的静止车辆, v_3 为需决策在车5后是否违反交通规则进行“逆行”的车3的速度, v_4 为对向转入车辆车4的速度。定义车3与对向车4之间发生碰撞的点为冲突点, d_3 为车3与冲突点的距离, d_4 为对向车4与冲突点的距离。根据真实车辆数据状态分布, 可推算出 v_1, v_2, v_3, v_4 的分布近似满足对数正态分布, $1/d_3, 1/d_4$ 近似满足泊松分布^{[2][9][10]}。

B.2 感知模型

在本实验中, 感知模型将RGB相机与深度相机采集的图像作为输入, 基于语义分割模型对当前车辆所处环境进行理解, 并将感知结果提供给后续的决策模型作为参考。一般情况下, 感知结果以像素级的语义标注和异常标注作为输出形式。

语义分割模型遇到训练集分布之外的异常输入时无法准确地进行预测, 使得语义分割模型难以被部署到对安全性要求极高的场景。为了能够检测到异常的物体, 如道路上意料之外的障碍物, 需要使用异常检测算法。在训练异常检测算法时, 需要在异常检测数据集上验证模型效果。

常用的异常检测数据集包括Fishyscapes^[11], RoadAnomaly^[12], StreetHarzards^[13], RoadObstacles^[14], Lost and Found^[15]等; 图片中的异常部分可能来自物体图片数据集, 也可能为场景中的真实异常物体。

现有的异常检测算法中, 以Synboost^[16]为代表的方法融合了语义分割、图像生成等多个模型的结果, 具有较好的效果但是运行速度较慢; 以SML^[17]为代表的方法对现有语义分割模型的输出结果进行归一化调整, 从而得到异常分割的阈值, 具有更高的实时性。本实验采用SML方法进行异常分割任务。

SML方法^[17]提出对语义分割模型的输出分数进行标准化。分割算法将一个像素分类为一个物体类别时, 像素确实属于此类别的情况下模型的预测分数会比像素属于异常输入时的分数要高。但并不是所有像素属于预测的类别的情况下, 模型输出的分数都比像素属于异常时高。因此, SML算法提出对输出的分数进行标准化, 从而使得这两种情况下模型输出的分数差别更大、重叠更少、更容易区分。为了对输出的分数进行标准化, 算法在训练集中统计每个类别的模型输出分数的均值 μ_c 和方差 σ_c^2

$$\mu_c = \frac{\sum_i \sum_{h,w} \mathbf{1}(\hat{P}_{h,w}^{(i)} = c) \cdot L_{h,w}^{(i)}}{\sum_i \sum_{h,w} \mathbf{1}(\hat{P}_{h,w}^{(i)} = c)}$$

$$\sigma_c^2 = \frac{\sum_i \sum_{h,w} \mathbf{1}(\hat{P}_{h,w}^{(i)} = c) \cdot (L_{h,w}^{(i)} - \mu_c)^2}{\sum_i \sum_{h,w} \mathbf{1}(\hat{P}_{h,w}^{(i)} = c)}$$

上式中 i 表示第 i 个训练样本。

取得均值与方差后,模型在测试集上运行时,对模型的输出分数进行标准化。每个位置 h,w 的标准化最大分数 $S_{h,w}$ 定义为:

$$S_{h,w} = \frac{L_{h,w} - \mu_{\hat{Y}_{h,w}}}{\sigma_{\hat{Y}_{h,w}}}$$

在对分数进行标准化之后,模型的预测的边缘仍然会错误地含有一些假阳和假阴。为了解决边缘的错误预测,该算法对边缘的预测结果进行迭代抑制。该算法逐渐将临近的非边缘区域的标准化最大分数传播到边缘区域。具体来说,该算法将边缘的宽度定为一个特定的值并逐渐缩小这个值。给定一个在第 i 次迭代时的边缘宽度 r_i 和语义分割输出 \hat{Y}_i ,位于每个 h,w 的像素非边缘面具 $M^{(i)} \in R^{H \times W}$ 为:

$$M_{h,w}^{(i)} = \begin{cases} 0, & \text{if } \exists h', w' \text{ s.t., } \hat{Y}_{h,w} \neq \hat{Y}_{h',w'} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

上式用于计算每一个满足 $|h - h'| + |w - w'| \leq r_i$ 的 h', w' 。

接下来,算法使用边缘自觉平均汇集。对于一个边缘像素 b 和它的感受场 R ,边缘自觉平均汇集(BAP)定义为:

$$BAP(S_R^{(i)}, M_R^{(i)}) = \frac{\sum_{h,w} S_{h,w}^{(i)} \times M_{h,w}^{(i)}}{\sum_{h,w} M_{h,w}^{(i)}}$$

上式中 $S_R^{(i)}$ 和 $M_R^{(i)}$ 分别表示在 $S^{(i)}$ 和 $M^{(i)}$ 上的感受场,且 $(h,w) \in R$ 列举 R 中的像素。

因为边缘抑制只能更新边缘像素,在非边缘区域的异常值无法被边缘抑制解决。该算法使用扩张平滑来解决非边缘区域的异常值。因为高斯核能够去除噪声,边缘抑制使用高斯核。通过已知的标准差 σ 和大小为 k 的卷积过滤器,在 i,j 位置的核权 $K \in R^{k \times k}$ 定义为:

$$K_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\Delta i^2 + \Delta j^2}{2\sigma^2}\right)$$

上式中 $\Delta i = i - \frac{k-1}{2}$ 和 $\Delta j = j - \frac{k-1}{2}$ 是 i,j 距中心的位移。

车路协同场景下,车端与路端同时部署一个SML模型,首先根据路端相机的位姿以及深度信息将路端的像素级异常检测结果先投影到世界坐标系下,然后根据车端相机的位姿,将世界坐标系下的异常点再投影到车端视角下;对车端自身和路端投影到车端的两套语义分割结果,如果路端和车端一致认为某一点是异常,或者路端和车端对某一点的语义分割结果不一致,两种情况均将对应点处理为异常。实验结果显示,采用上述方式的车路协同下的感知模型性能优于单车条件下的感知模型性能。

B.3 决策控制模型

本实验的决策控制模型基于CARLA自有决策与控制方法改进而得^[3]。针对不同驾驶状态,分别定义了对应的决策规划策略。状态之间的转换根据感知模块提供的估计与全局规划器提供的拓扑信息执行。自动驾驶车辆的当前位姿、速度和规划的导航点被传送给PID控制器,以执行对转向、油门和制动器的控制。对仿真器中可能出现的慢响应时间情况,PID控制器表现出了较好的鲁棒性。5种不同驾驶状态下的决策控制模型定义如下:

- (1) 沿道路行驶状态下, 局部规划器基于语义分割算法计算的本车道掩码, 选择与道路右边缘保持固定距离的系列点作为后续导航点;
- (2) 路口左转状态下, 由于车道线缺失、目标车道较远且前视摄像头视野有限, 需要使用相对复杂的决策规划策略: 先以预定义的倾斜角计算驶向路口中心的导航点, 以提升对目标车道的识别; 随后, 从路口中心向目标车道规划出平滑轨迹;
- (3) 右转状态下, 使用与左转类似的策略。但由于右转的目标车道更近, 需规划的导航点更少, 且只需前向信息而无需附加补充信息;
- (4) 路口直行状态下, 决策控制策略与沿道路行驶状态类似;
- (5) 急停状态: 在检测出动态障碍物的累积概率高于预定义阈值, 即具有潜在危险时, 系统将激活急停模式, 向控制器请求紧急中断连续控制。

B.4 评价模型

评价模型由车辆安全评价模型、行人安全评价模型和通行效率评价模型三部分组成。

其中**车辆安全评价模型**是在车辆模型为单车智能、车路协同感知及车路云一体化的情况下, 基于真实数据生成的场景初始参数模拟行车状况, 输出特定场景大规模仿真结果中的行车碰撞率, 并推算至绝对概率^{[18][19]}。基于统计的车辆碰撞概率为 $P_v = \frac{n_c}{N} * p_e$, 其中 n_c 为车辆发生碰撞的试验次数, N 为实验总次数, p_e 为场景出现概率。行人鬼探头场景下的碰撞率推算自CIDAS数据库, 描述的是自动驾驶车辆与行人和其他车辆的碰撞概率; 其余场景的出现概率基于小规模真实数据采样推算得出。

行人安全评价模型是基于真实的数据库, 通过风险因素分析, 得出碰撞车速与行人重伤或死亡概率的关系模型^{[20][21][22]}。此模型应用于场景一对行人安全的评估。

其中逻辑回归-风险曲线模型是一种通用的行人安全评价模型^{[23][24]}。在Jacques Saadé^[20]的研究中, 用于逻辑回归-风险曲线模型函数拟合的数据基于VOIESUR Accident Database的真实数据集, VOIESUR Accident Database数据来源于8500个交通事故致行人死亡或受伤的事件^{[20][25]}, 剔除车辆本身失控致行人受伤或死亡的案例, 并以行人受伤或死亡是由于第一次车辆碰撞而非二次碰撞, 以及车辆没有从行人身上碾压过的情况作为筛选条件, 最终筛选出了5163个满足条件的案例。其中有2483个案例有充足的信息, 其它案例使用了修正系数来补偿信息缺失, 使数据可以最大化利用。

在风险因素分析方法方面, 该逻辑回归-风险曲线模型通过计算优势比的方法, 分析了不同的撞击速度、行人年龄、撞击的身体部位、车辆生产年份、引擎盖高度和行人行走方向的存在与否对死亡率产生的影响。其中, 撞击速度 (V) 和行人年龄 (A) 是最鲁棒且显著的影响因素^[20]。此外Jacques Saadé^[20]在研究工作中设计了2*2实验, 测试了两种自变量关系 ($V+A, V^2+A$) 和两种回归模型

(Comprehensive-loglog, Logit) 形成的四种组合在预测行人死亡率或重伤率的准确性上的表现: 评价标准采用赤池信息量准则 (AIC) 和误差项。

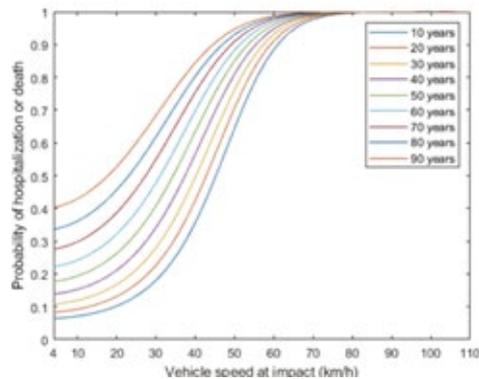
表B.1 回归误差分析结果^[20]

$$cloglog(p) = \ln(-\ln(1-p)) \qquad \text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

PERFORMANCE CRITERIA OF DIFFERENT RISK CURVE MODELS FOR BOTH K AND KSI OUTCOMES				
Model	AIC K	ΔN K	AIC KSI	ΔN KSI
Cloglog (V+A)	56.3559	1.1764	293.0908	2.125
Logit (V+A)	56.8511	0	296.0625	0
Cloglog (V ² +A)	55.8829	0.0773	291.2463	3.893
Logit (V ² +A)	56.1882	0	291.7609	0

实验结果表明损失最小的组合为Logit(V²+A)。最终得出撞击速度 (V) 与行人年龄 (A) 对行人死亡率或重伤率影响的关系模型及其风险曲线:

$$P_{KSI} = \frac{\exp(-2.9893 + 0.0013 * V^2 + 0.0286 * A)}{1 + \exp(-2.9893 + 0.0013 * V^2 + 0.0286 * A)}$$



图B.6 行人安全风险曲线^[20]

基于Jacques Saadé ^[20]的研究工作, 在仿真实验条件下, 我们引入碰撞发生概率 (P_h), 由条件概率公式可得, 行人安全性评价模型在仿真实验场景一中的函数公式为:

$$\mathcal{L}(P, V, A) = P_h * \frac{\exp(-2.9893 + 0.0013 * V^2 + 0.0286 * A)}{1 + \exp(-2.9893 + 0.0013 * V^2 + 0.0286 * A)}$$

其中行人年龄 (A) 采用由真实数据统计得到的高频出行事故人群年龄 (40岁) ^[26], 由上述行人安全性评价模型函数公式可知, 碰撞发生概率 (P_h) 与撞击速度 (V) 越小, 行人受伤或死亡的概率越小, 证明用于测试的仿真实验模型的安全性越高。

通行效率评价模型评估了对象车辆在单车智能、车路协同感知及车路协同决策控制下行驶过四种场景

的目标通行区域所需时间(T)。在每个场景下,记录对象车辆进入划分区域和离开划分区域的时间戳以计算通行时间,具体的划分区域定义如下:场景一中定义为包含左车道静止车辆与整个十字路口的矩形区域;场景二中定义为十字路口及各方向距人行横道2车身距离的区域;场景三中定义为主车最早可能产生变道行为位置到完全超越异常障碍物位置的矩形区域;场景四中定义为进入单车道区域位置到完全驶离单车道位置的矩形区域。此评价模型主要量化不同决策控制方案对交通通行效率的影响。对于发生碰撞的单车实验计算交通事故的处理时间,与车碰撞情况下的通行时间取平均值33分钟^[27],与人碰撞情况下的通行时间取平均值35分钟,该数据根据公开交通数据集计算^[28]。

综合安全与效率评价模型,可以更完备地考量单车智能、车路协同感知和车路协同决策控制在具体场景下的表现^{[29][30][31]}。

缩略语

3GPP: 3rd Generation Partnership Project 第三代合作伙伴计划

4G: the 4th generation mobile communication technology 第四代移动通信技术

5G: the 5th generation mobile communication technology 第五代移动通信技术

AD: Autonomous Driving 自动驾驶

ADAS: Advanced Driving Assistance System 高级驾驶辅助系统

AI: Artificial Intelligence 人工智能

ASV: Advanced Safety Vehicle 先进安全车辆

AV: Autonomous Vehicle 自动驾驶车辆

BSM: Basic Safety Message 基础安全消息

C-V2X: Cellular -V2X 蜂窝车联网

C-ITS: China ITS Industry Alliance 中国智能交通产业联盟

CAN: Controller Area Network 控制器域网

CAV: Cooperated Automated Vehicle 网联自动驾驶车辆

CCSA: China Communications Standards Association 中国通信标准化协会

CSAE: Society of Automotive Engineers of China 中国汽车工程学会

CVPR: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition IEEE国际计算机视觉与模式识别会议

DCU: Domain Controller Unit 域控制器

DOT: U.S. Department of Transportation 美国交通部

DSRC: Dedicated Short Range Communication 专用短程通信

DSSS: Driving Safety Support Systems 行车安全辅助系统

ECU: Electronic Control Unit 电子控制单元

ERTAC: European Road Transport Research Advisory Council 欧洲道路运输研究咨询委员会

ETC: Electronic Toll Collection 电子不停车收费

ETSI: European Telecommunications Standards Institute 欧洲电信标准化协会

EUHT: Enhanced Ultra High Throughput 增强型超高吞吐(超高速无线通信系统)

GPS: Global Positioning System 全球定位系统

GNN: Graph Neural Network 图神经网络

- GNSS: Global Navigation Satellite System 全球导航卫星系统
- HUD: Head Up Display 抬头显示
- HV: Host Vehicle 主车
- HWP: High Way Pilot 高速路自动驾驶
- ICT: Information and Communications Technology 信息与通信技术
- ICV: Intelligent Connected Vehicle 智能网联汽车
- IDM: Intelligent Driver Model 智能驾驶员模型
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers 电气和电子工程师协会
- IMT: International Mobile Telecommunications 国际移动通信
- IMU: Inertial Measurement Unit 惯性测量单元
- IoT: Internet of Things 物联网
- IRR : Internal Rate of Return 内部收益率
- ISAD: Infrastructure Support levels for Automated Driving 自动驾驶的基础设施支持级别
- ISO: International Organization for Standardization 国际标准化组织
- ITS: Intelligent Transportation Systems 智能运通系统
- LTE: Long Term Evolution 长期演进技术
- LTE-V2X: LTE Vehicle to Everything 基于LTE的车用无线通信技术
- MaaS: Mobility as a Service 出行即服务
- MCU: Microcontroller Unit 微控制单元
- MEC: Multi-access Edge Computing 多接入边缘计算
- NR-V2X: new radio V2X 基于5G新空口的车联网通信
- NV: Normal Vehicle 未装载通信系统的普通车辆
- OBU: On-Board Unit 车载单元
- ODD: Operational Design Domain 设计运行范围
- OEM: Original Equipment Manufacturer 原始设备制造商
- OS: Operating System 操作系统
- OTA: Over-the-Air Technology 空中下载技术
- PC5: 直连通信接口

PNC: Planning and Control 自动驾驶规划和控制, 包括导航、预测、决策、规划、控制等

RSCU: Road Side Computing Unit 路侧计算单元

RSI: Road Side Information 路侧信息

RSM: Road Safety Message 路侧安全消息

RSU: Road Side Unit 路侧单元

RTK: Real-time Kinematic 实时动态载波相位差分

RTMP: Real-time Messaging Protocol 实时消息传输协议

RTP: Real-time Transport Protocol 实时传输协议

RTSP: Real-time Streaming Protocol 实时流传输协议

SAE: Society of Automotive Engineers 国际自动机工程师学会

SOTIF: Safety Of The Intended Functionality 预期功能安全

SPAT: Signal Phase and Timing Message 信号灯相位与时序消息

SSM: Sensor Sharing Message 感知共享消息

T-BOX: Telematics BOX 车载远程信息处理器

TOPS: Tera Operations Per Second 处理器运算能力单位

TTC: Time to Collision 碰撞时间

UMADE: Unified Model of Autonomous Driving Evaluation 自动驾驶一体化评价模型

Uu: 蜂窝网络通信接口

UWB: Ultra Wide Band 超宽带

V2I: Vehicle to Infrastructure 车载设备与路侧基础设施通信

V2N: Vehicle to Network 车与网络通信

V2P: Vehicle to Pedestrians 车载单元与行人设备通信

V2V: Vehicle to Vehicle 车与车通信

V2X: Vehicle to Everything 车联网

VICAD: Vehicle Infrastructure Cooperated Autonomous Driving 车路协同自动驾驶

VICAD-SRM: Vehicle Infrastructure Cooperated Autonomous Driving Safety Reward Model 车路协同自动驾驶安全收益模型

参考文献

- [1]Bellomo N , C Dogbé . Dogbe, C.: On the Modeling of Traffic and Crowds: A Survey of Models, Speculations, and Perspectives. SIAM Rev. 53(3), 409–463[J]. Siam Review, 2011, 53(3):409–463.
- [2]Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62:1805–1824.
- [3]Jérôme Hrri, Filali F , Bonnet C , et al. VanetMobiSim: generating realistic mobility patterns for VANETs[C]// Proceedings of the Third International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, VANET 2006, Los Angeles, CA, USA, September 29, 2007. DBLP, 2006.
- [4]D Helbing, Farkas I J, Molnar P, et al. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations[M]. 2002.
- [5]Kesting A, Treiber M, Helbing D. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity[J]. Philos Trans A Math Phys Eng, 2010, 368(1928):4585–4605.
- [6]Kesting A, Treiber M, Schoenhof M, et al. Adaptive cruise control design for active congestion avoidance[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2008, 16(6):668–683.
- [7]Zheng X, Huang H, Wang J, et al. Behavioral decision-making model of the intelligent vehicle based on driving risk assessment[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2019(3).
- [8]A A T, B H S M. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 71:143–163.
- [9]Wang X, Zhao D, Peng H, et al. Analysis of Unprotected Intersection Left-Turn Conflicts based on Naturalistic Driving Data[J]. IEEE, 2017.
- [10]Shanzhi CHEN, Jinling Hu, Yan Shi, and Li Zhao, LTE-V: A TD-LTE based V2X Solution for Future Vehicular Network[J]. IEEE Internet of Things Journal, Vol.3, Issue: 6, p997–1005, December 2016.
- [11]Shanzhi Chen, Jin-Ling Hu, Yan Shi, Li Zhao, Wen Li, A Vision of C-V2X: Technologies, Field Testing and Challenges with Chinese Development[J]. IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 5, pp. 3872–3881, May 2020.
- [12]陈山枝, 胡金玲、时岩、赵丽, LTE-V2X车联网技术、标准与应用[J]. 电信科学, 2018年4月, 第34卷, 第4期, pp.1–11.
- [13]陈山枝, 蜂窝车联网 (C-V2X) 及其赋能智能网联汽车发展的辩思与建议[J]. 电信科学, 2022年7月, pp.1–17.
- [14]中国科学技术协会, 中国通信学会, “车联网产业与技术发展路线图”, 北京: 中国科学技术出版社, 2022年4月.
- [15]V Milanés, Shladover S E . Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 48:285–300.
- [16]Blum H, Sarlin P E, Nieto J, et al. Fishyscapes: A benchmark for safe semantic segmentation in autonomous driving[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops. 2019: 0–0.
- [17]Lis K, Nakka K, Fua P, et al. Detecting the unexpected via image resynthesis[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2019: 2152–2161.
- [18]Hendrycks D, Basart S, Mazeika M, et al. A benchmark for anomaly segmentation[J]. 2019.
- [19]Lis K, Honari S, Fua P, et al. Detecting Road Obstacles by Erasing Them[J]. arXiv preprint

arXiv:2012.13633, 2020.

[20]Pinggera P, Ramos S, Gehrig S, et al. Lost and found: detecting small road hazards for self-driving vehicles[C]//2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016: 1099-1106.

[21]Di Biase G, Blum H, Siegwart R, et al. Pixel-wise anomaly detection in complex driving scenes[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2021: 16918-16927.

[22]ung S, Lee J, Gwak D, et al. Standardized max logits: A simple yet effective approach for identifying unexpected road obstacles in urban-scene segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021: 15425-15434.

[23]自动驾驶汽车交通安全白皮书[R].中国汽车技术研究中心有限公司, 同济大学, 百度Apollo.2021.

[24]中华人民共和国道路交通事故统计年报[R].公安部交通管理局.2020.

[25]Saadé J, Cuny S, Labrousse M, et al. Pedestrian injuries and vehicles-related risk factors in car-to-pedestrian frontal collisions[C]//Proceedings of the 2020 IRCOBI Conference Proceedings. 2020: 278-289.

[26]Goel R. A new model to estimate pedestrian deaths from speed-related interventions[J]. Traffic injury prevention, 2021, 22(4): 330-335.

[27]Mokhtarimousavi S. A time of day analysis of pedestrian-involved crashes in California: Investigation of injury severity, a logistic regression and machine learning approach using HSIS data[J]. Institute of Transportation Engineers. ITE Journal, 2019, 89(10): 25-33.

[28]Kong C, Yang J. Logistic regression analysis of pedestrian casualty risk in passenger vehicle collisions in China[J]. Accident Analysis & Prevention, 2010, 42(4): 987-993.

[29]Cuny S, Chajmowicz H, Yong K, et al. A tool to assess pedestrian safety: Risk curves by injury severity and their confidence intervals for car-to-pedestrian front collision[C]//Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference, 2018, Athens (Greece). 2018.

[30]中华人民共和国道路交通事故统计年报[R].公安部交通管理局,2011-2016.

[31]张莉. 城市道路交通事故持续时间预测和事故影响因素关系研究[D].北京交通大学,2021.DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2021.000601.

[32]Moosavi S, Samavatian M H, Parthasarathy S, et al. A Countrywide Traffic Accident Dataset[J]. 2019.

[33]Norden J, O'Kelly M, Sinha A. Efficient black-box assessment of autonomous vehicle safety[J]. arXiv preprint arXiv:1912.03618, 2019.

[34]Koopman P, Wagner M. Toward a framework for highly automated vehicle safety validation[J]. SAE Technical Paper, Tech. Rep, 2018.

[35]Sohrabi S, Khodadadi A, Mousavi S M, et al. Quantifying the automated vehicle safety performance: A scoping review of the literature, evaluation of methods, and directions for future research[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 152: 106003.

[36]面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望[R].北京百度智行科技有限公司, 2021.

- [37]车联网白皮书（网联自动驾驶分册）[R].中国信息通信研究院，2020.
- [38]车路协同自动驾驶发展报告1.0版[R].中国公路学会自动驾驶工作委员会，2019.
- [39]T/CSAE 53-2017,合作式智能运输系统 车用通信系统 应用层及应用数据交互准[S].中国汽车工程学会,2017.
- [40]T/CSAE 157-2020 ,合作式智能运输系统 车用通信系统 应用层及应用数据交互标准（第二阶段）[S]. 中国汽车工程学会,2020.
- [41]T/CSAE 158-2020，基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容[S]. 中国汽车工程学会,2020.
- [42]GB/T 40429-2021 ,汽车驾驶自动化分级[S].
- [43]孟海华, 江洪波, 汤天波. 全球自动驾驶发展现状与趋势（上）[J]. 华东科技, 2014.
- [44]陈大明, 孟海华, 汤天波. 全球自动驾驶发展现状与趋势（下）[J]. 华东科技, 2014, 10(10):68-68.
- [45]GB/T 31024.1-2014,合作式智能运输系统专用短程通信[S].
- [46]2019年智能网联汽车标准化工作要点[R].工信部，2019.
- [47]智能网联道路系统分级定义与解读报告（征求意见稿）[R]. 中国公路学会自动驾驶工作委员会,自动驾驶标准化工作委员会,2019.
- [48]智慧高速公路分级（征求意见稿）[S]. 中国智能交通协会,2021.
- [49]车联网白皮书[R]. IMT-2020（5G）推进组C-V2X工作组.
- [50]MEC与C-V2X融合应用场景白皮书[R]. IMT-2020（5G）推进组C-V2X工作组.
- [51]中国智能交通系统体系框架（第二版）[R].交通运输部公路科学研究院.
- [52]智能网联汽车信息物理系统架构1.0[R].国汽智能网联汽车研究院有限公司.
- [53]USDOT: Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation.
- [54]边缘计算参考架构3.0[R]. 边缘计算产业联盟和工业互联网产业联盟.
- [55]信息物理系统白皮书[R]. 工业和信息化部信息化和软件服务业司.
- [56]信息物理系统标准化白皮书[R]. 中国电子技术标准化研究院.
- [57]GB/T 33474-2016，物联网 参考体系结构[S].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会，2016.
- [58]ISO/IEC 30141 ,Internet of Things Reference architecture [S].
- [59]工业互联网体系架构2.0. 工业互联网产业联盟.
- [60]The Industrial Internet of Things: Reference Architecture IIC:PUB:G1:V1.80.
- [61]TAFIM : The Open Group Architecture Framework (TOGAF) .
- [62]3GPP TS 23.285 Architecture enhancements for V2X services (Release 15).
- [63]3GPP TS 23.501 System Architecture for the 5G System; Stage 2 (Release 15).
- [64]3GPP TR 23.786 Study on architecture enhancements for EPS and 5G System to support advanced V2X services (Release 16).

- [65]3GPP TS 38.201 NR; Physical layer; General description (Release 15).
- [66]3GPP TS 38.300 NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (Release 15).
- [67]3GPP TR 22.886 Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services (Release 16).
- [68]ETSI WP11 Mobile Edge Computing A key technology towards 5G.
- [69]ETSI WP24 MEC Deployments in 4G and Evolution Towards 5G.
- [70]ETSI WP28 MEC in 5G Networks.
- [71]5GAA T-170219 Whitepaper-Edge Computing.
- [72]5GAA White Paper CV2X Roadmap.
- [73]5GCAR_D4.1_v1.0 Initial design of 5G V2X system level architecture and security framework.
- [74]5G-PPP Automotive-WG-White-Paper: A study on 5G V2X Deployment.
- [75]NGMN: Final Deliverable V2X White Paper v1.0.
- [76]USDOT FHWA-JPO-17-473 Comprehensive Maintenance and Operations Plan - Wyoming.
- [77]USDOT FHWA-JPO-17-467 System Architecture Document -WYDOT CV Pilot.
- [78]USDOT FHWA-JPO-17-468 System Design Document (SDD) - Wyoming CV Pilot.
- [79]YD/T 3978-2021,基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容[S].
- [80]YD/T 3400-2018, 基于LTE的车联网无线通信技术 总体技术要求[S].
- [81]YD/T 3340-2018,基于LTE的车联网无线通信技术 空中接口技术要求[S].
- [82]孙浣然, 李波. 自动驾驶汽车安全相关国际标准化工作的研究[J]. 中国标准化, 2020, 000(001):173-177.
- [83]ISO/PAS 21448. Road vehicles — Safety of the Intended Functionality[S].
- [84]ISO 26262 Road vehicles — Functional safety[S].
- [85]SAE J3061. Cybersecurity Guidebook for Cyber-Physical Vehicle Systems[S].
- [86]ISO/SAE FDIS 21434.Road vehicles — Cybersecurity engineering. [S].
- [87]智能网联汽车预期功能安全前沿技术研究报告[R].中国智能网联汽车产业创新联盟,2020.
- [88]智能网联道路系统分级定义与解读报告（征求意见稿）[R]. 中国公路学会自动驾驶工作委员会,自动驾驶标准化工作委员会,2019.
- [89]智能网联道路系统分级定义与解读报告（征求意见稿）[R]. 中国公路学会自动驾驶工作委员会,自动驾驶标准化工作委员会,2019.
- [90]智慧高速公路分级（征求意见稿）[S]. 中国智能交通协会,2021.
- [91]Apollo智能交通白皮书[R].百度智能交通事业部, 百度智能交通专家顾问委员会,2020.
- [92]迈克斯·泰格马克. 生命3.0[M]. 浙江教育出版社·湛庐文化,2018.
- [93]百度人工智能专利白皮书[R]. 百度, 2021.

- [94]余贵珍,周彬,王阳,周亦威.自动驾驶系统设计与应用[M].清华大学出版社,2019.
- [95]杨世春,肖赓,夏黎明,蒋晓琳等.自动驾驶汽车平台技术基础[M].清华大学出版社,2019.
- [96]李晓欢,杨晴虹,宋适宇,马常杰.自动驾驶汽车定位技术[M].清华大学出版社,2019.
- [97]王建,徐国艳,陈竞凯,冯宗宝.自动驾驶技术概论[M].清华大学出版社,2019.
- [98]甄先通,黄坚,王亮,夏添.自动驾驶汽车环境感知[M].清华大学出版社,2020.
- [99]杨世春,曹耀光,陶吉,郝大洋,华旸.自动驾驶汽车决策与控制[M].清华大学出版社,2020.
- [100]李瑞敏,章立辉.城市交通信号控制.[M].清华大学出版社,2015.
- [101]车联网:新基建重要方向,5G应用明珠[R].中信建投证券,2020.
- [102]李波."整车及关键电控系统功能安全和预期功能安全(SOTIF)量化指标及测试评价方法研究"取得实质性进展[J].中国汽车,2020,000(001):P.24-25.
- [103]李克强、常雪阳、李家文、许庆、高博麟、潘济安.智能网联汽车云控系统及其实现[J].汽车工程,2020.
- [104]朱华荣.关于加强智能网联汽车统筹管理及加快相关法规标准建立的建议[J].汽车纵横,2018, No.85(04):34.
- [105]公维洁.智能网联汽车发展面临的法律法规问题及建议[C]//2016中国汽车工程学会年会论文集.2016.
- [106]陈超,吕植勇,付姗姗,等.国内外车路协同系统发展现状综述[J].交通信息与安全,2011,29(001):102-105.
- [107]张云,李茹,焦伟熹,等.自动驾驶功能安全标准化研究[J].中国标准化,2020(11).
- [108]孙浣然,李波.自动驾驶汽车安全相关国际标准化工作的研究[J].中国标准化,2020,000(001):173-177.
- [109]郭菲菲,赵永飞,付金勇,等.全自动泊车辅助系统的预期功能安全开发研究[C]2020中国汽车工程学会年会论文集(4).2020.
- [110]寻找无人驾驶的缰绳—2018年全球自动驾驶法律政策研究报告[R]腾讯研究院,2018.
- [111]MALIK S, KHAN M A, EL-SAYED H. Collaborative autonomous driving—A survey of solution approaches and future challenges [J]. Sensors, 2021, 21(11): 3783.
- [112]ZHAO C, LI L, PEI X, et al. A comparative study of state-of-the-art driving strategies for autonomous vehicles [J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 150: 105937.
- [113]DUAN X, JIANG H, TIAN D, et al. V2i based environment perception for autonomous vehicles at intersections [J]. China Communications, 2021, 18(7): 1-12.
- [114]王建强,王海鹏,刘佳熙, et al. 基于车路一体化的交叉口车辆驾驶辅助系统 [J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 169-75.
- [115]FUKATSU R, SAKAGUCHI K. Automated driving with cooperative perception based on CVFH and millimeter-wave v2i communications for safe and efficient passing through intersections [J]. Sensors, 2021, 21(17): 5854.
- [116]SILVA C M, DE SOUZA F S, PITSILLIDES A, et al. Solutions for the deployment of communication roadside infrastructure for streaming delivery in vehicular networks [J]. Journal of Network and Systems Management, 2021, 29(3): 1-33.
- [117]吴冬升.5G车联网发展之道 人车路网云五维协同 [J]. 通信世界, 2019, (26): 16-9.
- [118]梁晓晓."车路协同:智能交通领域的升维谋划."人民论坛·学术前沿4(2021):56-65.

- [119]李克强, et al. "智能网联汽车云控系统原理及其典型应用." 汽车安全与节能学报 11.3 (2020): 261-275.
- [120]王建强, et al. "基于车路一体化的交叉口车辆驾驶辅助系统." 中国公路学报 26.4 (2013): 169-175.
- [121]郑茂宽, 张舜卿. 夯实智慧道路数字底座, 构建车路协同新体系 [J]. 张江科技评论, 2021.
- [122]高颖. 基于 CIM 的智慧交通与智慧道路感知体系 [J]. 中国交通信息化, 2021.
- [123]张艺帆. 基于 Q-学习演化博弈模型的区域交通优化方法研究 [D]; 北方工业大学, 2021.
- [124]曹家华. 车路协同下基于深度强化学习的自适应信号灯控制策略 [D]; 哈尔滨工程大学,
- [125]任永利, 董航瑞. "车路协同+ 自动驾驶助力郑州智慧岛交通强国示范." 科技导报 38.9 (2020): 82-88.
- [126]徐丽萍, 邓明君. "基于车路协同环境的信号交叉口车速引导方法." 交通信息与安全 39.2 (2021): 78-86.
- [127]安鑫, 蔡伯根, 上官伟. "车路协同路侧感知融合方法的研究." 测控技术 (2022).
- [128]王鲲, 张珠华, 杨凡, et al. "面向高等级自动驾驶的车路协同关键技术." 移动通信 (2021).
- [129]田野, 裴华鑫, 晏松, 张毅. 车路协同环境下行车风险场模型的扩展与应用. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 447-457.
- [130]张辉, 梁正. 自动驾驶“单车智能”模式的发展困境与应对[J]. 齐鲁学刊, 2021(06):81-89.
- [131]张毅, 姚丹亚, 李力, 裴华鑫, 晏松, 葛经纬. 智能车路协同系统关键技术与应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(05): 40-51. DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2021.05.005.
- [132]章锡俏, 毛伟, 洛玉乐, 杜泽华, 王刚. 车路协同系统接受度建模及性别差异分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(07):177-187. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.07.014.
- [133]梁晓晓. 车路协同: 智能交通领域的升维谋划[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021(04):56-65. DOI:10.16619/j.cnki.rmltxsqy.2021.04.007.
- [134]孙玲, 张静, 周瀛, 徐爱军. 车路协同环境下自动驾驶专用车道入口区域设计[J]. 公路交通科技, 2020, 37(S1):122-129.
- [135]任永利, 董航瑞. 车路协同+自动驾驶助力郑州智慧岛交通强国示范[J]. 科技导报, 2020, 38(09):82-88.
- [136]章军辉, 陈大鹏, 李庆. 自动驾驶技术研究现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(09):3394-3403.
- [137]陈新海, 祖晖, 王博思, 张迪思, 吴超. 车路协同车载高精定位服务系统设计[J]. 激光杂志, 2019, 40(11):109-113. DOI:10.14016/j.cnki.jgzz.2019.11.109.
- [138]KLEIN L A, MILLS M K, GIBSON D R. Traffic detector handbook: Volume I [R]: Turner-Fairbank Highway Research Center, 2006.
- [139]KLEIN L A, MILLS M K, GIBSON D, et al. Traffic detector handbook: Volume II [R]: United States. Federal Highway Administration, 2006.
- [140]VAN MIERLO J, MAGGETTO G, VAN DE BURG WAL E, et al. Driving style and traffic measures - influence on vehicle emissions and fuel consumption [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(D1): 43-50.
- [141]ALTAN O D, WU G Y, BARTH M J, et al. GlidePath: Eco-Friendly Automated Approach and Departure at Signalized Intersections [J]. Ieee Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(4): 266-77.
- [142]KATSAROS K, KERNCHEM R, DIANATI M, et al. Performance study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Application Using an Integrated Cooperative ITS Simulation Platform;

- proceedings of the 7th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Istanbul, TURKEY, F Jul 04-08, 2011 [C]. 2011.
- [143]DION F, RAKHA H, ZHANG Y. Evaluation of Potential Transit Signal Priority Benefits along a Fixed-Time Signalized Arterial [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2004, 130(3): 294-303.
- [144]HE H, GULER S I, MENENDEZ M. Adaptive control algorithm to provide bus priority with a pre-signal [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 64: 28-44.
- [145]YUN I, PARK B. Stochastic Optimization for Coordinated Actuated Traffic Signal Systems [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2012, 138(7): 819-29.
- [146]GRADINESCU V, GORGORIN C, DIACONESCU R, et al. Adaptive traffic lights using car-to-car communication; proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference, Dublin, IRELAND, F Apr 22-25, 2007 [C]. 2007.
- [147]FENG Y, HEAD K L, KHOSHMA GHAM S, et al. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55: 460-73.
- [148]LI Z F, ELEFTERIADOU L, RANKA S. Signal control optimization for automated vehicles at isolated signalized intersections [J]. *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 2014, 49: 1-18.
- [149]XU B, BAN X G, BIAN Y G, et al. V2I based Cooperation between Traffic Signal and Approaching Automated Vehicles; proceedings of the 28th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Redondo Beach, CA, F Jun 11-14, 2017 [C]. 2017.
- [150]Feng Y, Head K L, Khoshmagham S, et al. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment[J]. *Transportation Research Part C*, 2015, 55(jun.):460-473.
- [151]Hu J, Park B B, Lee Y J. Coordinated transit signal priority supporting transit progression under Connected Vehicle Technology[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 55(jun.):393-408.
- [152]Yu C, Feng Y, Liu H X, et al. Integrated optimization of traffic signals and vehicle trajectories at isolated urban intersections[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 112: 89-112.
- [153]冯忠祥,李靖宇,张卫华,尤志栋.面向人机共驾车辆的驾驶人风险感知研究综述[J].*交通信息与安全*,2022,40(02):1-10.
- [154]吴昊,王浩,苏醒,李明昊,许封元,仲盛.自动驾驶系统中视觉感知模块的安全测试[J].*计算机研究与发展*,2022,59(05):1133-1147.
- [155]张辰,喻剑,何良华.基于Q学习和动态权重的改进的区域交通信号控制方法[J].*计算机科学*,2016,43(08):171-176.
- [156]李彦宏. 智能交通 [M]. 人民出版社,2021.
- [157]李骏, 李克强, 王云鹏.智能网联汽车导论[M]. 清华大学出版社,2022.
- [158]李骏. 中国预期功能安全的挑战与解决方案[J]. *智能网联汽车*, 2021, 5: 12-13
- [159]杨殿阁, 黄晋, 江昆.汽车自动驾驶[M]. 清华大学出版社,2022.
- [160]苗圩.单车智能和网联赋能是实现自动驾驶的双支撑[C]// 中国电动汽车百人会论坛. 2022.
- [161]Wang, Min, et al. "Traffic signal control with reinforcement learning based on region-aware cooperative strategy." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2021).
- [162]Ge, Hongwei, et al. "Cooperative deep Q-learning with Q-value transfer for multi-intersection signal control." *IEEE Access* 7 (2019): 40797-40809.

[163]Chu, Tianshu, et al. "Multi-agent deep reinforcement learning for large-scale traffic signal control." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 21.3 (2019): 1086-1095.

[164]Abdoos, Monireh, and Ana LC Bazzan. "Hierarchical traffic signal optimization using reinforcement learning and traffic prediction with long-short term memory." Expert systems with applications 171 (2021): 114580.

[165]Wen, Ling, et al. "Signal coordination control based on comprehensive correlation degree." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 638. No. 1. IOP Publishing, 2021.

免责声明

清华大学智能产业研究院(AIR)、阿波罗智联(北京)科技有限公司及白皮书参编单位, 不对白皮书任何内容的准确性、及时性、完整性、时效性和可靠性以及使用这些内容可能得出的任何结果提供任何明示或暗示的保证。在任何情况下, 清华大学智能产业研究院(AIR)、阿波罗智联(北京)科技有限公司及白皮书参编单位对于任何使用或依据本白皮书作出的决定或采取的行动及任何损失, 不承担任何责任。

