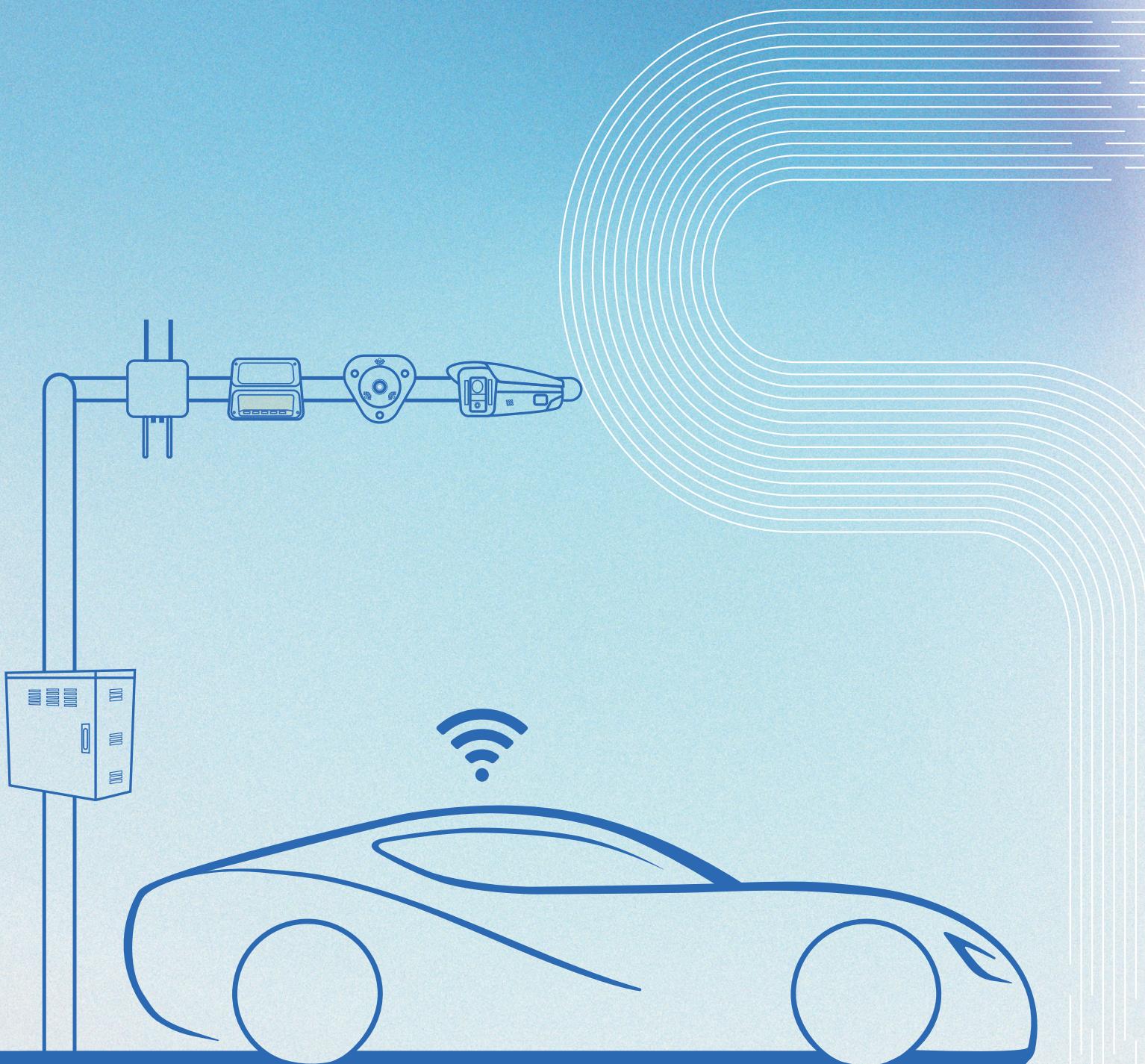


面向自动驾驶的 车路协同关键技术与展望



版权声明

本白皮书版权为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》，2021”。

序 言

PREFACE

汽车产业正在经历百年未有之大变局，电动化、智能化、网联化和共享化是未来汽车产业发展的主要趋势。一方面，能源消耗、环境保护、供需失衡、交通拥堵和行车安全给汽车产业可持续发展带来的压力与日俱增，要求汽车行业必须把握新机遇提供全新解决方案。另一方面，新一轮科技革命推动科技公司、创业公司及新型模式运营公司等外部力量加速跨界进入汽车领域，汽车的产品属性、产业价值链和生态结构都将完全不同。

现阶段，汽车的电动化已经取得了阶段性的进展，接下来应该把网联化、智能化放到更加重要的位置。近年来，全球自动驾驶汽车发展迅速，以 Waymo、Tesla、百度等为代表的企业持续加大自动驾驶技术研发投入，大规模开展自动驾驶测试验证和示范应用，并逐步探索无人驾驶汽车商业化运营。但总体来看，全球自动驾驶发展仍然处在初级阶段：L2 级别自动驾驶汽车正处在商业化落地发展阶段，但市场渗透率和应用规模仍然较小；L3、L4 及以上等级自动驾驶仍以试验和区域性示范为主，运行场景有限。全球自动驾驶行业仍需要探索更加安全、更加泛化、更加经济高效的自动驾驶技术方案和落地路径，早日实现自动驾驶规模商业化落地。

清华大学智能产业研究院（AIR）与百度共同致力于推进人工智能和自动驾驶技术发展、产业升级和社会进步。2021 年 5 月，AIR 联合百度共同发布了“Apollo Air 计划”，将率先探索中国车路协同自动驾驶技术的“无人区”。本次编制发布“面向自动驾驶的车路协同关键技术与展望”白皮书，则深入阐述了车路协同自动驾驶的核心内涵，为“Apollo Air 计划”的技术方案和落地路径提供了参考。

希望本报告能够在行业引起广泛共鸣，也希望通过行业共同努力，推动我国自动驾驶快速发展，助力我国汽车产业转型升级和经济高质量发展。

张亚勤
清华大学讲席教授
清华大学智能产业研究院（AIR）院长
美国艺术与科学院院士



前言 INTRODUCTION

自动驾驶技术是影响未来汽车产业的重要因素。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、双眼将被解放，出行过程中的娱乐、社交、消费场景被彻底打开，开辟万亿级市场。

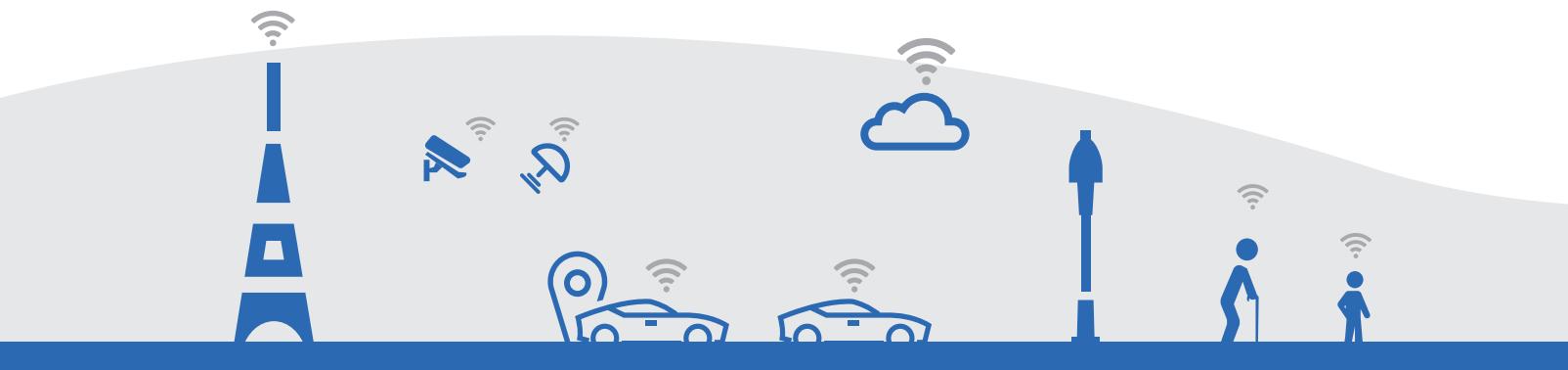
自动驾驶目前有单车智能自动驾驶（ Autonomous Driving, AD¹）和车路协同自动驾驶（ Vehicle-Infrastructure Cooperated Autonomous Driving, VICAD²）两种技术路线。其中 AD 主要依靠车辆自身的视觉、毫米波雷达、激光雷达等传感器、计算单元、线控系统进行环境感知、计算决策和控制执行。VICAD 则是在单车智能自动驾驶的基础上，通过车联网将“人 - 车 - 路 - 云”交通参与要素有机地联系在一起，助力自动驾驶车辆在环境感知、计算决策和控制执行等方面的能力升级，加速自动驾驶应用成熟。VICAD 不仅可以提供更安全、更舒适、更节能、更环保的驾驶方式，还是城市智能交通系统的重要环节，也是构建新型智慧城市的核心要素。

VICAD 是 AD 的高级发展形式，是一个循序渐进由低到高的发展过程，可以分为三个大的发展阶段：

- (1) 阶段 1：信息交互协同，实现车辆与道路的信息交互与共享；
- (2) 阶段 2：协同感知，在阶段 1 的基础上，发挥路侧的感知定位优势，与车辆进行协同感知定位；
- (3) 阶段 3：在阶段 1 和阶段 2 的基础上，车辆与道路可实现协同决策与控制功能，能够保证车辆在所有道路环境下都能实现高等级自动驾驶。

我国 VICAD 研究和发展迅速，I 阶段 VICAD 已在多个城市开展规模性测试验证和先导示范，并逐步开展商业化运营先行先试；II 阶段 VICAD 也在部分城市开展了建设部署和测试试验，道路的协同感知能力得到了充分验证，部分场景下基础设施的协调和控制也得到了探索，但总体而言，II 阶段 VICAD 目前还不足以支撑高等级自动驾驶规模商业化落地。原因主要体现在：

- (1) 路侧协同感知定位能力有待进一步提高，尤其是需要从功能安全和预期功能安全（ Safety of The Intended Functionality, SOTIF ）的角度全面提高设备和系统的精确性、稳定性、数据可靠性等；
- (2) 道路智能化设备的覆盖范围有限，还不足以提供有效的车路协同应用服务；
- (3) 需要更加高效、经济的车路通信技术方案，解决更大连接、低时延、高可靠的数据传输问题。



所以，为了尽早实现自动驾驶规模商业化落地，需要针对车路协同深度融合系统进一步开展深入研发测试，加快建设部署高等级智能化道路，在保障自动驾驶安全运行和快速规模商业化落地的同时，为智能交通、智慧出行和智慧城市建设提供高维数据，带来更多新智能应用。

本白皮书在深入研究 VICAD 概念与内涵、SOTIF、设计运行域（Operational Design Domain, ODD）扩展等一系列问题的基础上，阐述了车路协同自动驾驶的必然趋势、展望和愿景目标，并针对现阶段我国 VICAD 发展存在一系列问题，提出了加快建设部署高等级智能化道路的发展建议和具体措施。

本白皮书的主编单位包括：清华大学智能产业研究院、百度 Apollo

本白皮书由清华大学智能产业研究院（AIR）张亚勤博士牵头编制，其他编制组成员包括清华大学智能产业研究院（AIR）的周谷越博士、袁基睿博士、王哲、陈家璇、陈小雪、蒋程宇、韩一峰、苏泽然、李今、郭昊乐、陈翔宇；百度 Apollo 的尚国斌、陶吉博士、胡星、杨凡、王鲲、张雯、胡茂洋、杨国义、骆乃瑞、张珠华、汪泰源、王阳、王亚丽、邓烽、时一峰、杨加林、张美博、马雪晶、赵晶齐、王耀萱等。

本白皮书的指导专家包括（排名不分先后，按汉语拼音排序）：

冉 斌 东南大学 - 威斯康星大学智能网联交通联合研究院院长

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

朱西产 同济大学汽车安全技术研究所所长

感谢各编制单位、编制人员和指导专家对白皮书编制工作的大力支持，限于时间和研究水平，白皮书仍有待改进之处，需要不断修订和完善，欢迎各位领导、专家和业界同仁提出指导意见和建议，也欢迎加入到车路协同自动驾驶的研究和推进工作，共同推进我国自动驾驶、智能交通快速发展。

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，参考国外现状，并结合我国技术发展水平提出了车路协同自动驾驶（Vehicle–Infrastructure Cooperated Autonomous Driving, VICAD）。



目录

CONTENTS

第1章

单车智能自动驾驶发展现状与存在的挑战	07
1.1 单车智能自动驾驶发展现状	08
1.2 高等级自动驾驶规模商业化落地存在的挑战	08

第2章

车路协同自动驾驶是规模商业化落地的必然趋势	10
2.1 车路协同自动驾驶概念与内涵	11
2.1.1 概念与定义	11
2.1.2 车路协同自动驾驶内涵	12
2.2 基于车路协同的SOTIF提升自动驾驶安全	15
2.2.1 单车智能自动驾驶SOTIF	15
2.2.2 车路协同自动驾驶SOTIF保障自动驾驶安全	16
2.2.3 车路协同安全分析模型	21
2.3 基于车路协同扩展自动驾驶ODD	23
2.3.1 自动驾驶ODD限制	23
2.3.2 车路协同对ODD的扩展	24

第3章

车路协同自动驾驶需要高等级智能道路	25
3.1 面向车路协同自动驾驶的道路智能化分级	26
3.1.1 分级目的	26
3.1.2 技术分级	26
3.2 自动驾驶规模商业化对道路智能化的关键需求	27
3.3 建设高等级智能道路具有显著经济性	29
3.3.1 微观经济效益比较	29
3.3.2 宏观经济效益分析	31

第4章

百度车路协同自动驾驶实践	32
4.1 百度ACE智能交通引擎	33
4.2 Apollo车路协同自动驾驶实践	34
4.2.1 Apollo共享无人车规模化测试运营	34
4.2.2 Apollo Air计划	34
4.2.3 标准先行	34
4.3 Apollo车路协同典型场景和技术优势	35
4.3.1 全量交通要素感知定位	35
4.3.2 道路交通事件感知定位	39
4.3.3 路侧信号灯融合感知	40

第5章

建设高等级智能道路助力实现跨行业协同创新	42
5.1 建设高等级智能道路的中国优势	43
5.2 提升城市智能交通管理能力，提高交通出行效率	45
5.3 推进高速公路建管养运一体化，建设智慧高速	46
5.4 提高城市综合治理能力，构建安全节能新型智慧城市	47

第6章

总结与展望	48
6.1 观点总结	49
6.2 发展展望	49
6.3 发展建议	50

附录

附录1：国外车路协同自动驾驶发展现状	53
附录2：车路协同带来的以高维数据为代表的智能要素	55
附录3：安全评价模型	57
缩略语	63
参考文献	64



单车智能自动驾驶 发展现状与存在的挑战



SECTION 1

1.1 单车智能自动驾驶发展现状

自动驾驶指车辆主要依靠人工智能、视觉计算、雷达和全球定位及车路协同等技术，使汽车具有环境感知、路径规划和自主控制的能力，能够让计算机自主操控车辆，在不受任何人为干预的情况下自动安全地驾驶。自动驾驶是未来汽车产业发展的主流趋势，各国都在持续加大投入开展技术研究和产业化落地。

自动驾驶有单车智能自动驾驶（AD）和车路协同自动驾驶（VICAD）两大技术路线。单车智能自动驾驶的环境感知是通过车上安装的传感器完成对周围环境的探测和定位功能。计算决策一方面将传感器数据进行分析处理，实现对目标的识别；另一方面进行行为预测和全局路径规划、局部路径规划和即时动作规划，决定车辆当前及未来的运行轨迹。控制执行主要包括车辆的运动控制以及人机交互，决定每个执行器如电机、油门、刹车等控制信号。

按照美国国际自动机工程师学会（SAE）划分的 L0-L5³自动驾驶等级来看，AD 先进辅助驾驶系统功能（Advanced Driver Assistance System, ADAS）仍然是主力；L2 正处在商业化落地发展阶段，但市场渗透率和应用规模仍然较小；L3、L4 及以上等级自动驾驶仍处在试验和区域性示范为主，规模商业化落地则需要更长的时间。

（1）全球自动驾驶处于 L2 商用落地发展阶段

L2 级的 ADAS 是现阶段自动驾驶汽车商用落地的核心，由车辆的一个或多个驾驶辅助系统依据驾驶环境信息，在特定工况下执行转向或加速 / 减速，驾驶员执行所有其余的各类动态驾驶任务。根据高工智能汽车研究院《2020 年 1-5 月乘用车新车上险量 ADAS 市场数据报告》，国内新车累计销量超过 5 万辆的车型中，ADAS 前装标配搭载率平均值达到 53.43%，其中，经济型车型搭载率平均为 45.96%。《智能网联汽车技术路线图 2.0》提出，到 2025 年，L2 和 L3 相当功能的自动驾驶（PA）和有条件的自动驾驶（CA）的汽车销量占比将超过 50%，高度自动驾驶（HA，相当于 L4）开始进入市场。各车企也都相继规划提出了 L2、L2.5 甚至无限接近于 L3 功能的量产计划，但是 L3 一方面受限于自动驾驶汽车上路法律法规限制，另一方面受到场景和技术的限制，目前还难以进入实质量产阶段。

（2）高等级自动驾驶主要聚集于限定区域应用场景

在高等级自动驾驶领域，因为前期研发投入大、技术难度高，L3 级及以上自动驾驶汽车商业化进程缓慢，产业链合作伙伴抱团共同发展渐成常态。现阶段，高等级自动驾驶研发投入及商业化验证主要聚集在智慧园区 / 示范园区、港口、码头、停车场等限定区域应用场景，以及商用车物流、自动泊车等细分领域，低成本自动驾驶解决方案以及可弥补真实道路测试验证的自动驾驶仿真测试需求凸显。同时随着汽车产业“四化”转型加速，以及国家频繁发布产业红利政策加速推进围绕智能汽车等新经济生态的快速发展，自动驾驶载人、载物、高速测试等陆续开放，关键节点及核心领域具备前沿技术验证及整合服务能力的企业有望实现突破。

SECTION 2

1.2 高等级自动驾驶规模商业化落地存在的挑战

高等级自动驾驶规模商业化落地仍然面临着诸多挑战，主要体现在以下三个方面：

（1）自动驾驶安全依然面临着巨大挑战

与传统汽车相比，自动驾驶汽车是一个更为复杂的系统，对安全将提出更高的要求。单车智能自动驾驶经过多年的发展，安全问题依然是影响自动驾驶规模商业化落地的关键原因。

在低等级自动驾驶方面，很多车企都已经商用量产，但很多 ADAS 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；另外针对雨天打伞、雨衣、隧道等场景也较容易出现系统失效的现象。在高等级自动驾驶方面，自动驾驶的可靠性和应对挑战性交通场景的能力仍然有待提升。2016 年兰德智库报告指出，一套自动驾驶系统需要测试 110 亿英里，才能达到量产条件。但即使是 L4 级自动驾驶头部企业 Waymo 在 2020 年的路测里程达到了 981 万公里，距离 110 亿英里还有很大的差距，另外自 2019 年至 2020 年 9 月，Waymo 自动驾驶汽车共发生 18 起事故、29 次人为干涉以避免碰撞的场景。高等级自动驾驶车辆目前面临的安全问题主要包括：

- （1）软硬件系统出现错误或漏洞；

³ SAE（美国国际自动机工程师学会）及中国发布的国家标准《汽车驾驶自动化分级（报批稿）》都将自动驾驶分为 L0-L5 共 6 个等级，其中 L0：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。

01 单车智能自动驾驶发展现状与存在的挑战

- (2) 感知容易受到遮挡、恶劣天气等环境挑战影响出现失效；
- (3) 目标运动行为出现预测能力不足、决策时间超时和生成轨迹错误的现象；
- (4) 目前的道路设施是以服务人类驾驶员进行设计和建设，车辆难以高效准确获取道路设施提供的交通规则、交通状态等信息。

(2) 单车感知长尾问题限制了车辆可运行设计域（ODD）

自动驾驶运行设计域（Operational Design Domain, ODD）是指自动驾驶系统功能设定的运行条件，包括环境、地理和时段限制、交通流量及道路特征等。ODD 限制是保证车辆安全的重要手段，但却不利于自动驾驶的规模商业化落地。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。

限制自动驾驶 ODD 的原因或条件有很多，例如：1、道路条件，比如高速公路、无信号灯十字路口、山区道路等；2、环境条件，天气（雨雪雾）和日照状况（昼或夜、逆光、隧道出入口）等；3、其他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。

感知的长尾问题是当前限制单车智能自动驾驶车辆 ODD 的主要原因之一。受车端传感器安装位置、探测距离、视场角、数据吞吐、标定精度、时间同步等限制，车辆在繁忙路口、恶劣天气、小物体感知识别、信号灯识别、逆光等环境条件下行驶时，仍然难以彻底解决准确感知识别和高精度定位问题。**这些长尾问题，严重制约和影响了自动驾驶的规模商业化落地，而这些感知长尾问题仅靠车端传感器融合感知是难以解决的。**

(3) 自动驾驶的经济性问题还未得到充分解决

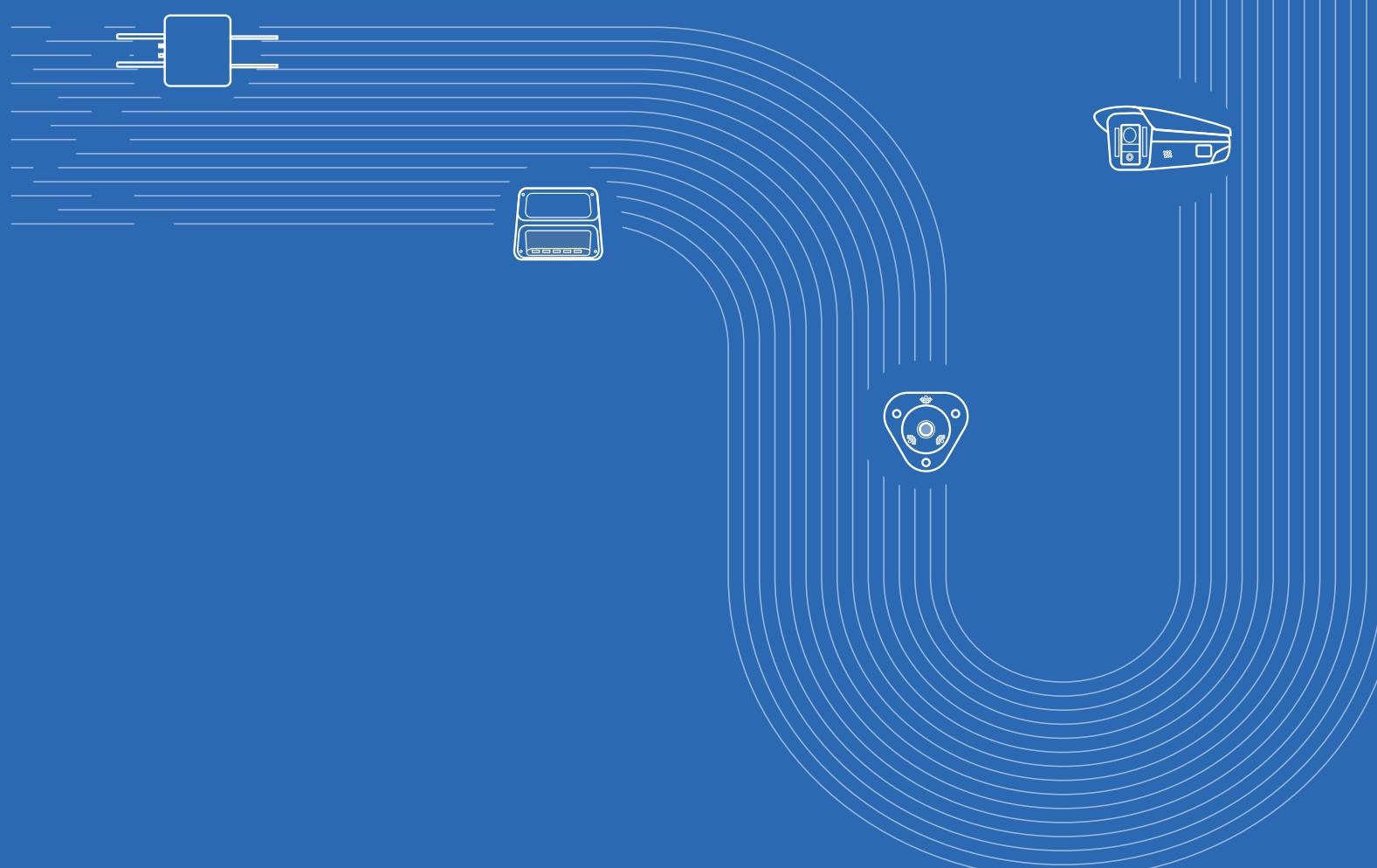
经济性是自动驾驶规模商业化落地必须考虑的现实问题。为了实现高等级自动驾驶，车载传感器的数量需要显著增加，目前 L4 级自动驾驶车辆的硬件设备一般包含：6 ~ 12 台摄像头、3 ~ 12 台毫米波雷达、5 台以内的激光雷达以及 1 ~ 2 台 GNSS/IMU 和 1 ~ 2 台计算平台，硬件成本过高，难以保证车辆的经济性。另外，为了确保自动驾驶安全，会在车端部署冗余传感器系统、高精度地图、及相应的软件系统，也大大增加了自动驾驶车辆的成本。

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平衡关系。例如，可以通过限制 ODD 并针对性调优逼近系统上限、使用较昂贵的设备来提升单车智能自动驾驶的安全性，从而实现小规模商业应用落地。但在规模商业化落地中，三个方面都是必要条件，需要提升。

综上所述，单车智能自动驾驶要实现规模商业化落地，还面临着安全性、ODD 限制和经济性等方面挑战和问题，在当前自动驾驶能力条件下，还无法找到安全性、ODD 限制和经济性的平衡点，需要从本质上提升自动驾驶的能力。

02

车路协同自动驾驶是
规模商业化落地的必然趋势



单车智能自动驾驶容易受到遮挡、恶劣天气等环境条件影响，在全量目标检测、轨迹预测、驾驶意图“博弈”等方面存在困难。而车路协同自动驾驶通过信息交互协同、协同感知与协同决策控制，可以极大地拓展单车的感知范围、提升感知的能力，引入高维数据为代表的新的智能要素，实现群体智能。可以从根本上解决单车智能自动驾驶遇到的技术瓶颈，提升自动驾驶能力，从而保证自动驾驶安全，扩展自动驾驶ODD。

SECTION 1

2.1 车路协同自动驾驶概念与内涵

2.1.1 概念与定义

车路协同是采用先进的无线通信和新一代互联网等技术，全方位实施车与车、车与路、车与人之间动态实时信息交互，并在全时空动态交通信息采集与融合的基础上开展车辆主动安全控制和道路协同管理，充分实现人车路的有效协同，保证交通安全，提高通行效率，从而形成安全、高效和环保的道路交通系统。车路协同能够加速自动驾驶规模商业化落地实现，其产业链潜力巨大，将成为新一轮科技创新和产业竞争的制高点。

车路协同自动驾驶则是在单车智能自动驾驶的基础上，通过先进的车、道路感知和定位设备（如摄像头、雷达等）对道路交通环境进行实时高精度感知定位，按照约定协议进行数据交互，实现车与车、车与路、车与人之间不同程度的信息交互共享（网络互联化），并涵盖不同程度的车辆自动化驾驶阶段（车辆自动化），以及考虑车辆与道路之间协同优化问题（系统集成化）。通过车辆自动化、网络互联化和系统集成化，最终构建一个车路协同自动驾驶系统。

车路协同自动驾驶是一个由低至高的发展过程，主要包括以下三个大的发展阶段⁴，如下表 2.1 所示，各个阶段的具体要求如下：

(1) 阶段 1：信息交互协同

车辆 OBU 与路侧 RSU 进行直连通信，实现车辆与道路的信息交互与共享，通信方式可以是 DSRC 或 LTE-V2X。

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 53-2019	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	交通参与者、交通事件等协同感知，2.2阶段所需的感知能力远高于2.1阶段
	阶段2.2：高级协同感知	T/CSAE 158-2020	
阶段3：协同决策控制	阶段3.1：有条件协同决策控制；	T/CSAE 157-2020 T/CSAE 158-2020 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	5G平行驾驶

注：T/CSAE 53-2019《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》

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 158-2020《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》

T/CSAE 156-2020《自主代客泊车系统总体技术要求》

(2) 阶段 2：协同感知（阶段 2.1：初级协同感知，阶段 2.2：高级协同感知）

在阶段 1 的基础上，随着路侧感知能力的提高，自动驾驶的感知和决策的实现不仅仅依赖于车载摄像头、雷达等感知设备，而且需要智能道路设施进行协同感知。协同感知分为初级协同感知和高级协同感知两个分阶段：

1、阶段 2.1 初级协同感知：道路感知设施相对单一、部署范围有限、检测识别准确率较低、定位精度较低，达不到服务于 L4 级自动驾驶车辆的要求；

⁴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4：车路一体化。本白皮书结合当前技术水平对阶段划分进行了适应性修改。

2、阶段 2.2 高级协同感知：道路感知设施多样、道路全面覆盖、检测识别准确率高、定位精度高，能够服务于 L4 级自动驾驶车辆；

(3) 阶段 3：协同决策控制（阶段 3.1 有条件协同决策控制，阶段 3.2：完全协同决策控制）

在阶段 2 协同感知的基础上，道路具备车路协同决策控制的能力，能够实现道路对车辆、交通的决策控制，保障自动驾驶安全、提高交通效率。

1、阶段 3.1 有条件协同决策控制：在自动驾驶专用道、封闭园区等环境下实现协同决策控制，或实现 AVP 自主泊车。

2、阶段 3.2 完全协同决策控制：在任何时间、任何道路和交通环境下，都可实现车路全面协同感知、协同决策控制功能。

车路协同自动驾驶由智能车辆、智能道路两大关键部分组成：

(1) 智能车辆：

可以是不同网联等级和自动化程度的车辆；

(2) 智能道路：

可包括以下设备设施：道路工程及配套附属设施；智能感知设施（摄像头、毫米波雷达、激光雷达等）；路侧通信设施（直连无线通信设施、蜂窝移动通信设施）；计算控制设施（边缘计算节点、MEC 或各级云平台）；高精度地图与辅助定位设施；电力功能等配套附属设备等；

要实现车路协同自动驾驶还需要攻克一系列的关键技术，包括：

(1) 协同感知技术：

传感器高精度标定技术；环境感知技术；融合与预测技术；

(2) 高精度地图与高精度定位技术：

高精度地图；路侧辅助定位技术；

(3) 协同决策与协同控制技术：

意图预测、博弈仲裁、引导调度等协同决策；车辆、设施、人类等协同控制引导；

(4) 高可靠低时延网络通信技术：

直连无线通信技术；蜂窝移动通信技术；交通系统集成优化与有线网络传输技术等；

(5) 云计算技术：

边缘计算 MEC 技术；多级云控平台技术；大数据和人工智能平台技术；

(6) 功能安全与预期功能安全；

(7) 物联网 IoT 技术；

(8) 网络安全技术等。

2.1.2 车路协同自动驾驶内涵

与 AD 相比，VICAD 的典型特征或内涵是高维数据带来新智能。其中高维数据为代表的智能要素特性体现在数据高维、算力高维和算法高维，新智能则体现在从单体智能向群体智能发展过渡。

1 高维数据

1.1 数据高维：

VICAD 在路侧会产生大量的数据，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（多源多层次）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 2.2。

02 车路协同自动驾驶是规模商业化落地的必然趋势

表 2.2 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

1.2 算力高维：

VICAD通过路侧智能匹配高维度数据的算力智能要素也具备更高等级的条件，如固定点位和机房集群、固网通信、算力调度等条件，如下表2.3所示。

表 2.3 AD与VICAD算力维度比较

维度子类别	AD算力	VICAD算力
移动属性	移动设备，体积较小且防震、防热、防电磁、防尘等要求障碍物持续时间求	固定设备，端边云多层，端的设备须防震、防热、防电磁、防尘等，云的设备有较好IDG环境
电源属性	电池供电，能耗受限	电网供电，能耗不受限
解耦调度	车载算力专用，定制紧耦合配套设计	多种解耦调度形态，如忙闲调度、多点位空间调度、时间调度、步骤配合调度、在线与离线调度
通信	整车CAN、车载以太网等	车路无线通信，路云间是有线传输

1.3 算法高维：

VICAD通过新的算法要素进行实时在线处理，离线的挖掘训练仿真，可为自动驾驶提供更多、更高等级的智能应用，如下表2.4所示。

表 2.4 AD与VICAD算法维度比较

维度子类别	AD算法和机制	VICAD算法和机制
场景化高精	依赖推理高级语义或地图，偏静态	具备基础设施设计参与度，可动态处理
分工服务化	单车能力闭环	交通运营商服务
全局大数据	单车实时结合地图与模型	端边云融合大数据分析处理
协同智能	单向，博弈推理	多方多层次协同

2 新智能

VICAD 区别于单车智能，是新的智能形态。VICAD 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。VICAD 新智能使自动驾驶能力得到本质提升，突破了单车智能的天花板限制，将极大促进自动驾驶技术发展和规模商业化落地。

以 VICAD 协同感知框架为例，如图 2.1 和图 2.2 所示，在 AD 车端感知子系统的基础上，路侧增加了冗余感知子系统和车路通信子系统，其中：1、冗余感知子系统为车辆提供感知冗余，弥补车端感知的缺陷和不足。2、车路通信子系统引入路侧智能感知结果，与车载感知结果并联，经过车路协同融合模块处理后，输出到下游的决策控制子系统。处理环节中，道路感知、车路协同融合使用的是与单车智能的感知、多传感器融合同类型的处理，仅通信的处理环节是完全新引入的处理环节。得益于 5G 的普及与 V2X（DSRC、LTE-V、NR-V2X、C-V2X）等通信技术长年发展，使得高可靠、低时延、大连接车路信息交互成为可能。所以车路协同所降低的复杂度是相对困难且长尾的算法和系统性复杂度，所增加的复杂度主要是相对低代价且可控的工程性复杂度。

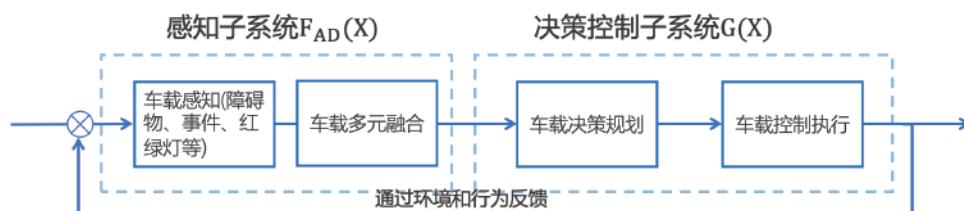


图 2.1 AD 感知、决策控制系统框架

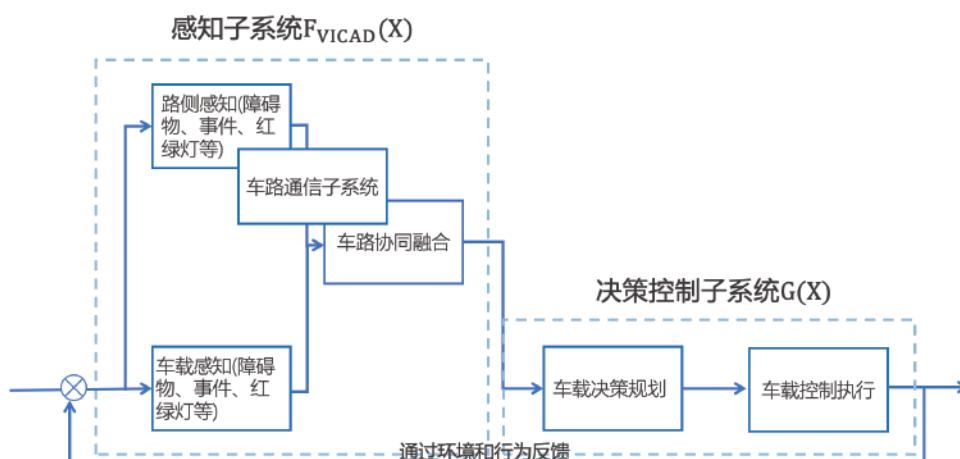


图 2.2 VICAD 协同感知系统框架

02 车路协同自动驾驶是规模商业化落地的必然趋势

从复杂度熵系统的角度，车路协同自动驾驶引入了熵减的智能要素，来对抗单车智能自动驾驶系统自然迭代生长的熵增。可以以一个较直观的案例来阐述VICAD系统的优势，以交通信号灯色识别为例，如果通过单车智能完成，需要在3D空间中识别定位到较远处的交通信号灯，通过光学传感器识别灯色，并且预测相位灯态变化；还需要面临炫光、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。而通过车路协同则可以引入路侧子系统的高维数据、系统连接算力、协调通行算法，使用低复杂度信号灯机对接信息，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意图信息。通过更加彻底地打通路侧交通基础设施，还可以通过优化交通管理、优化信号控制，实现感应通行和绿波通行，提升交通效率。此外，车路协同的路侧和云端基础设施更有条件进行数据积累和协作，进一步通过挖掘来提升个体与群体的协作智能和学习成长型智能。这样，车路协同引入路侧智能的高维数据等正交要素，实现了对抗系统复杂度熵增的熵减新智能。

通过车路协同路侧子系统的加入，提供了新的以高维数据为代表的智能要素，可以有效分担车载自动驾驶系统的感知、决策和控制压力，降低系统的复杂度。随着自动驾驶研发投入逐渐增加，投入产出比呈边际效益递减的趋势，VICAD可以使AD个体智能向VICAD协同智能或群体智能过渡，快速提高自动驾驶的能力，并加快规模商业化落地临界点的到来，如图2.3所示。

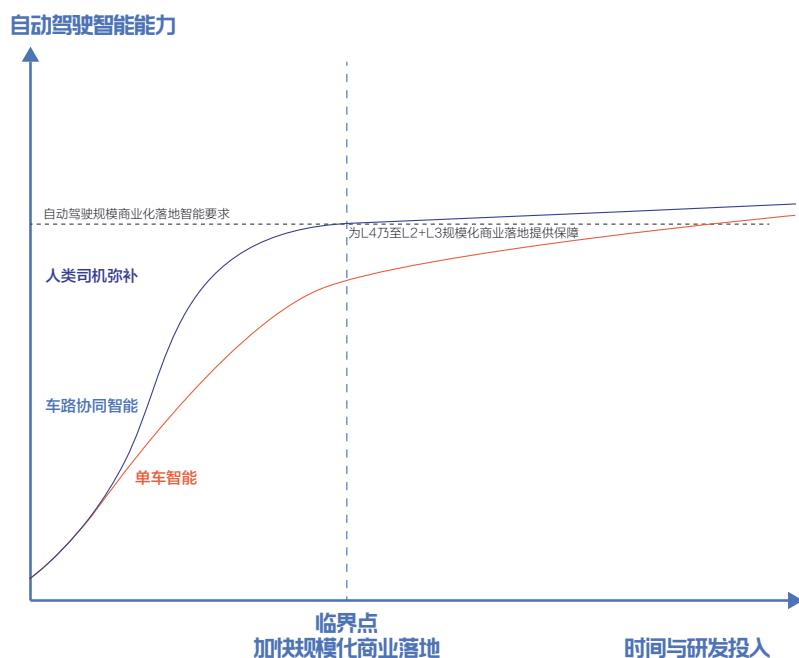


图 2.3 VICAD 与 AD 两种技术路线发展路径演进与比较

SECTION 2 2.2 基于车路协同的SOTIF提升自动驾驶安全

2.2.1 单车智能自动驾驶SOTIF

自动驾驶汽车是一种极其复杂的系统，所处的实际驾驶环境要素繁多、复杂多变，使得自动驾驶车辆在安全方面存在许多不确定性。预期功能安全（Safety Of The Intended Functionality, SOTIF）是自动驾驶安全体系的重要组成部分，主要是为了应对由于自动驾驶功能不足和可预见的人为误用造成危害问题。面向单车自动驾驶的预期功能安全（AD SOTIF）主要涉及感知、预测、决策、控制和人机交互共五个大的方面，其中感知和预测是目前面临的突出问题。

AD SOTIF 在感知方面存在的困难主要包括：

(1) 极端天气（雨、雪和大雾）条件下的感知问题。

飞溅的雨水会影响激光雷达的反射效果，雾可能会遮挡摄像机的视线，雪会覆盖道路上用于辅助感知的道路标识，也会因为雪的密度影响激光雷达光束的反射效果，产生“幻影障碍（Phantom obstacles）”。

(2) 不利照明条件下的感知问题。

镜头光斑（Lens-flares）、大阴影（Large shadows）和其他不利的照明条件都会对感知性能产生不同的影响。

(3) 遮挡条件下的感知问题。

比如由于前方大车遮挡，自动驾驶车辆无法识别前方的交通参与者、信号灯或者交通运行状况。

在 AD SOTIF 在预测和决策控制方面存在的困难主要包括：

(1) 行人或车辆轨迹预测的不确定性。

主要是因为：1、交通参与者的轨迹往往呈现高度非线性；2、驾驶行为具有多模态性；3、交通参与者之间的交互作用难以建模。目前车端轨迹预测算法输出难于确保安全。

(2) 自动驾驶决策控制算法的可靠性问题。

包括基于规则的决策方法与基于人工智能的决策方法，算法的可靠性也是目前自动驾驶面临的重要困难之一。

2.2.2 车路协同自动驾驶SOTIF保障自动驾驶安全

基于AD SOTIF，从保障自动驾驶安全的角度出发，引入并建立面向车路协同自动驾驶的预期功能安全（VICAD SOTIF）的安全理念，通过协同感知、协同决策与协同控制，解决AD SOTIF面临的突出问题，比如车端感知失效、行人和车辆轨迹预测等一系列典型安全问题。要通过VICAD SOTIF实现自动驾驶安全，就要求路侧的系统、设备以及车路通信必须满足SOTIF标准框架和相关标准，包括ISO 26262、ISO PAS 21448等，如表2.5所示。

表 2.5 车路协同自动驾驶功能安全与预期功能安全标准框架

车路协同自动驾驶安全挑战		安全技术类型	标准框架
系统（车辆+道路）因素	硬件故障和软件实现缺陷	功能安全	ISO 26262
	系统功能局限及设计不足	预期功能安全 SOTIF	ISO PAS 21448
人员因素	驾驶员误用		
环境因素	环境干扰	信息安全	SAE J3061/J3101 ISO/SAE FDIS 21434
	网络攻击		

根据 SOTIF 四象限理论，通过 VICAD SOTIF 可以使自动驾驶 SOTIF 中的不安全场景转化为安全场景，未知场景转化为已知场景，如下图 2.4 所示。

(1) 不安全场景转化为安全场景：

针对原有“不安全”的场景，处理方式有两种：一是提升自动驾驶能力将其转化为安全场景，二是进行触发条件检测并通过限制 ODD 进行排除。车路协同的加入，让自动驾驶车辆能够获取更全面的数据，可以更早更远的启动处理，从而为车辆应对不安全场景营造更好的条件。同时，也支持增强对危险场景的触发检测能力，以便通过 ODD 将其排除。

(2) 未知场景转化为已知场景：

针对原有“未知”的场景的探索是一个行业难题“你永远不知道不知道什么”，车路协同一方面可以通过全量的感知识别完成对未知现象触发和处理，如将未知异常的交通现象转化为触发条件，并且提示过往车辆提前做出预判；另一方面，通过数据驱动和算法学习，可以将未知数据采集、挖掘、训练提升，发现未知场景，从而完成学习式系统的成长。

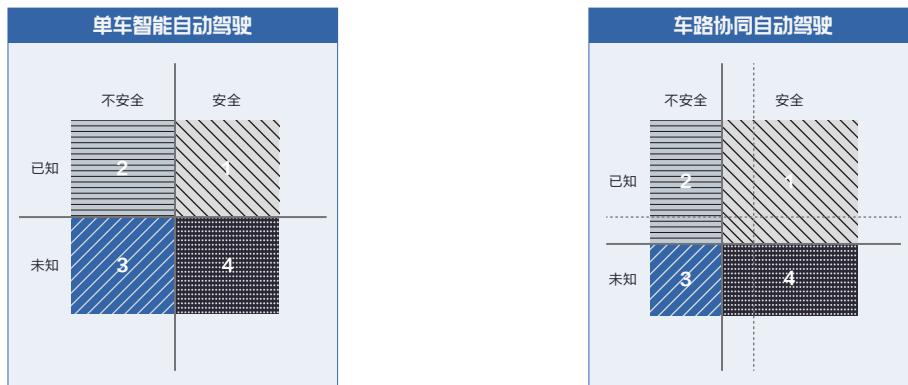


图 2.4 基于SOTIF-车路协同使得各区域发生变化

VICAD SOTIF 带来的显著变化是：

- (1) “已知安全” 场景集合明显扩大；
- (2) “未知不安全” 场景集合明显缩小；

2.2.2.1 “已知安全” 场景集合明显扩大

“已知安全” 对应着 SOTIF 第 1 象限的场景集合。由于部分单车智能自动驾驶 “已知不安全” 场景、“未知不安全” 场景和 “未知安全” 场景(第 2、第 3、第 4 象限的场景集合), 在加入车路协同后, 会转化为 “已知安全” 场景。这样就实现了 “已知安全” 场景集合的扩展。同时, 原单车智能自动驾驶即使是 “已知安全” 的场景并非是百分百安全, 在加入车路协同后, 安全的概率会进一步提升。具体以行人闯入预警、对向车辆预警和信号灯协同感知为例进行阐述。

(1) 基于车路协同感知的行人闯入预警 / 对向车辆预警

问题描述：

自动驾驶车辆在被前方遮挡情况下, 来不及对行人闯入、对向驶入车辆等进行准确感知和预判决策, 容易出现交通事故。

场景原理：

路侧系统对道路全量交通参与者 (包括但不限于车辆、行人、骑行者等目标物) 的位置、速度、轨迹等信息进行感知识别, 通过 V2X 发送给周围车辆, 收到此信息的其他车辆可提前感知到不在自身视野范围内的交通参与者, 辅助车辆及早做出正确的驾驶决策。场景原理示意图如下图 2.5 所示、图 2.6 所示。

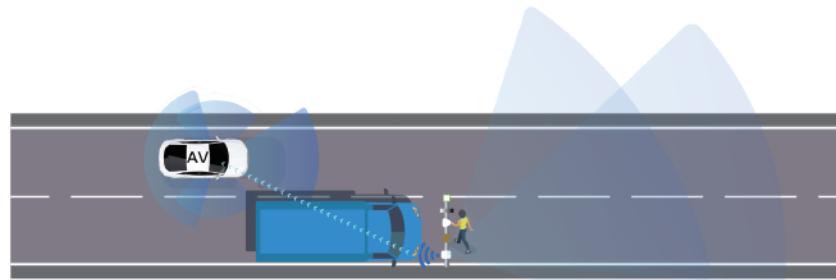


图 2.5 基于车路协同感知的行人闯入预警



图 2.6 基于车路协同感知的对向车辆预警

应用效果：

- 1、通过车路协同感知，增强了自动驾驶车辆的感知能力，尤其是对行人、骑行者等易受伤人群的感知能力，能有效的减少交通事故和二次伤害，提高复杂道路通行安全和通行效率。
- 2、对 SOTIF 的直接作用是通过车路协同感知，将部分 AD “已知不安全” 场景、“未知不安全” 场景和 “未知安全” 场景，转化为 “已知安全” 场景，最终实现第 1 象限 “已知安全场景”的扩展。

(2) 基于信号灯协同感知的交叉口安全通行

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（如下图 2.7 所示），自动驾驶车辆容易受到环境影响（遮挡、逆光）或自身感知能力下降（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。



图 2.7 道路中不同的信号灯形态

场景原理：

路侧系统通过多源信号灯数据感知融合，获取准确的路口信号灯实时数据，并通过 V2X 发送给周围车辆，收到此信息的车辆可根据信号灯相位和倒计时信息，提前做出驾驶决策控制，图 2.8 和图 2.9 为有无车路协同信号灯感知识别的比较。

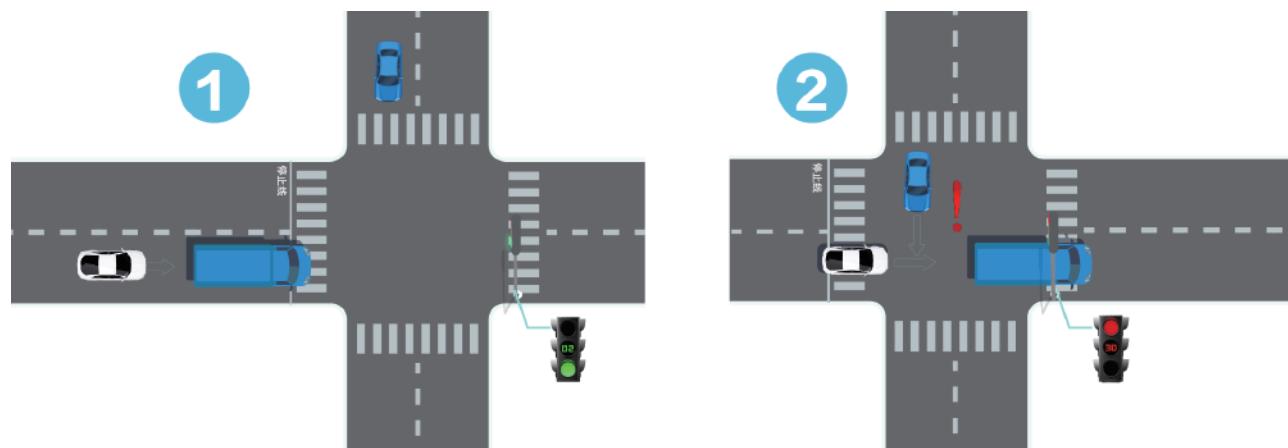


图 2.8 路口无信号灯协同感知

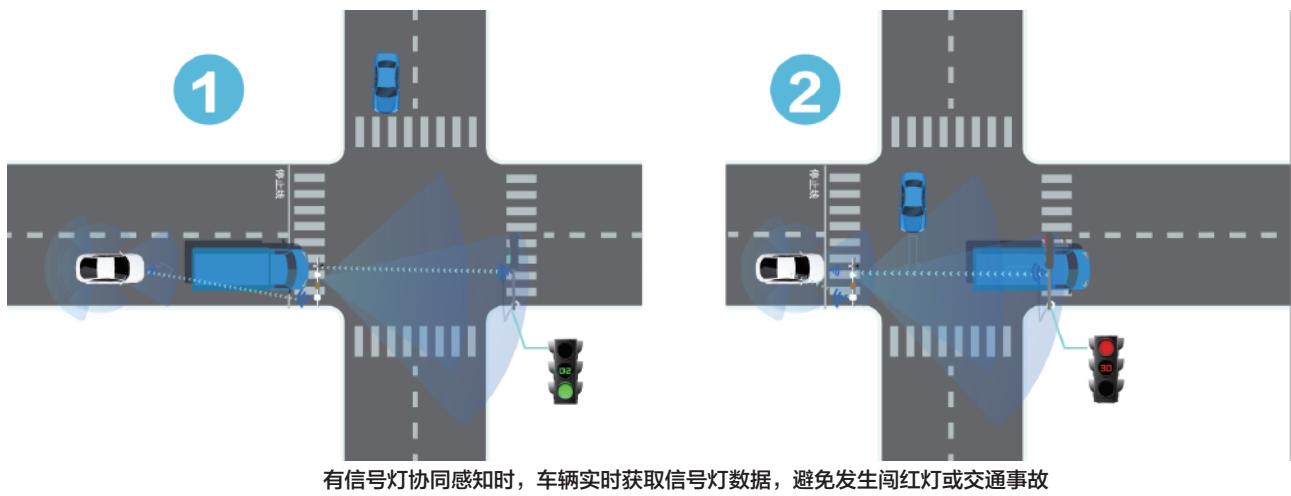


图 2.9 路口有信号灯协同感知

应用效果：

- 1、通过车路协同感知，车辆可以快速安全通过路口；
- 2、对 SOTIF 的直接作用是通过车路协同感知，将部分 AD “已知不安全” 场景、“未知不安全” 场景和 “未知安全” 场景，转化为 “已知安全” 场景，最终实现第 1 象限 “已知安全场景”的扩展。

2.2.2.2 “未知不安全” 场景集合明显缩小

以如下三个案例来阐述 VICAD SOTIF 对第 3 象限 “未知不安全” 场景集合的改变。

(1) 前方事故，AV 主车跟驰时前车突然避让

问题描述：

前方事故，AV 主车跟驰时前车突然避让。由于前车处置突然，对于跟驰的后车来说，前车前方的区域在后车的盲区里，使得后车无法提前发现前方有事故，来不及反应，导致出现二次交通事故。

场景原理：

路侧系统通过路侧感知系统，对环境状况和事故进行实时感知识别，即使是在前车所遮挡的盲区里，只要有对象出现就可及时通过 V2X 将事故信息发送给车辆，从而可以控制车辆避让障碍物。该场景的原理示意图如图 2.10 所示。

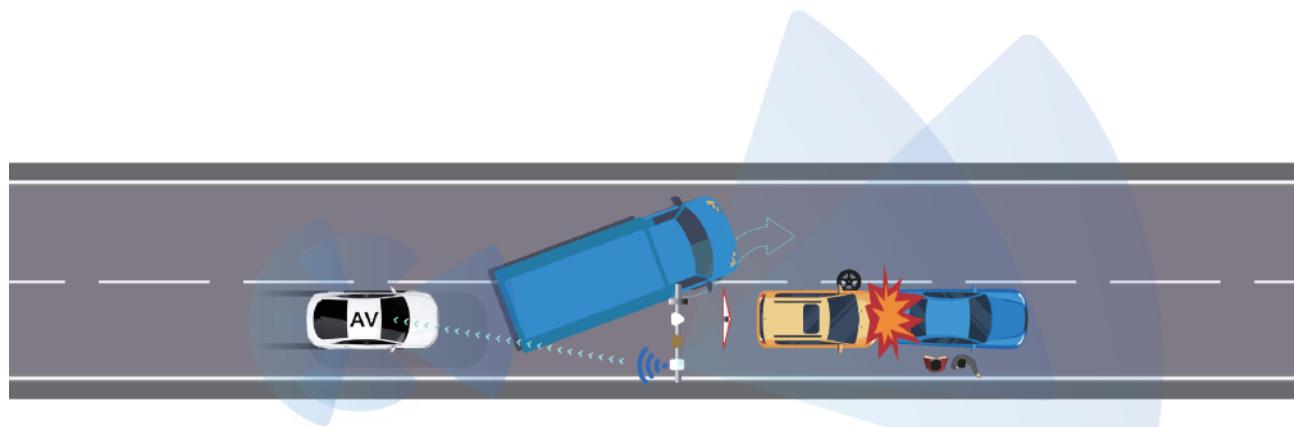


图 2.10 主车跟驰时前车突然避让示例

应用效果：

- 1、提前对于事故和全车辆行为进行检测通知 AV 主车，避免车辆在前车反应后进入来不及反应的范围，从而避免发生二次交通事故，保证人身安全和交通安全；

2、对 SOTIF 的直接作用是通过车路协同感知,将部分 AD “未知不安全” 转化为 “已知安全” 场景,最终实现第 3 象限 “未知不安全”的缩小。

(2) 遇非机动车闯红灯违规驾驶

问题描述:

自动驾驶车辆在绿灯通过路口时,车辆感知被旁边固定物体(建筑物等)所遮挡,此时若垂直方向非机动车违规行驶闯红灯,因自动驾驶车辆按照交规正常行驶,须以正常速度及时通过路口,无法预见盲区会出现违规驾驶的非机动车,导致出现交通事故。

场景原理:

路侧系统通过路侧感知系统,对路口的环境状况进行实时感知识别,即使是违规行驶闯红灯,只要当路口内有对象出现时,及时通过 V2X 将对象信息发送给车辆,就可以控制车辆避让障碍物。该场景的原理示意图如图 2.11 所示。

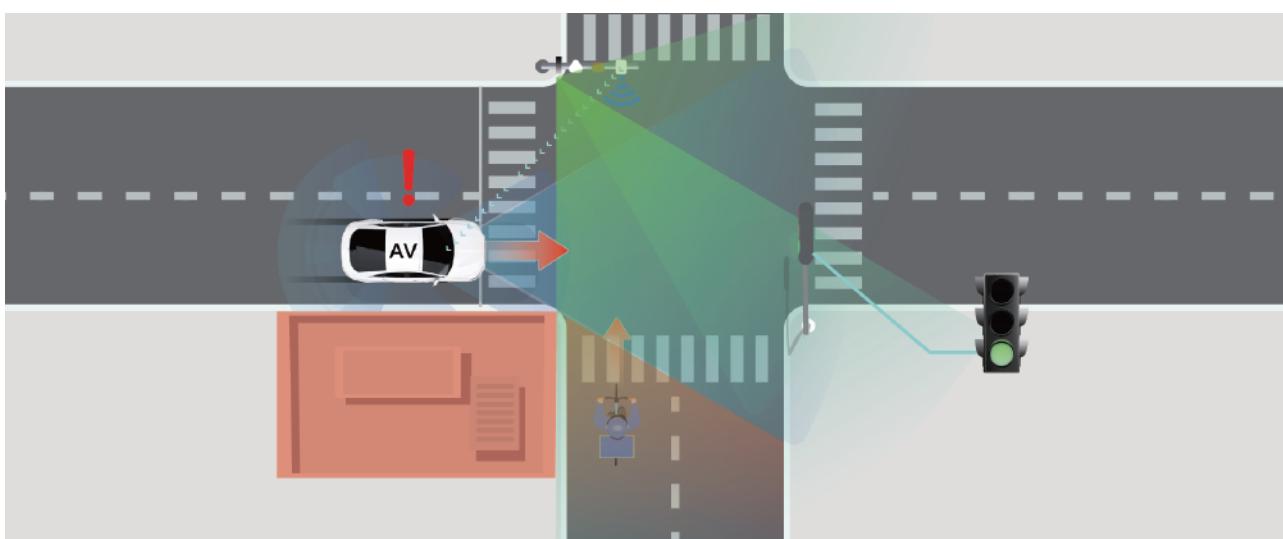


图 2.11 遇非机动车闯红灯违规驾驶

应用效果:

- 1、路侧系统检测到非机动车违反交规闯红灯,及时通知 AV 主车,避免车辆与非机动车碰撞,保证人身安全和交通安全;
- 2、对 SOTIF 的直接作用是通过车路协同感知,将部分 AD “未知不安全” 转化为 “已知安全” 场景,最终实现第 3 象限 “未知不安全”的缩小。

(3) 基于路侧协同感知的隧道内事件协同感知与协同决策控制

问题描述:

以自动驾驶车辆在隧道行驶场景为例,由于现阶段高速公路隧道内的监测或感知设备并未与隧道口的信号控制设备打通,车辆在进入隧道前无法知道隧道内的安全状况和道路条件,若隧道内发生危险情况(比如火灾、瓦斯、坍塌或事故),自动驾驶车辆由于无法提前预知,导致出现交通事故或人员伤亡等情况出现。

场景原理:

路侧系统通过路侧感知系统和在线状态监测系统等,对隧道环境内的环境状况和交通运行状况进行实时感知识别,当发生危险情况时,及时在隧道入口处通过 V2X 将危险信息发送给车辆,控制车辆不要进入隧道。该场景的原理示意图如 2.12 所示。

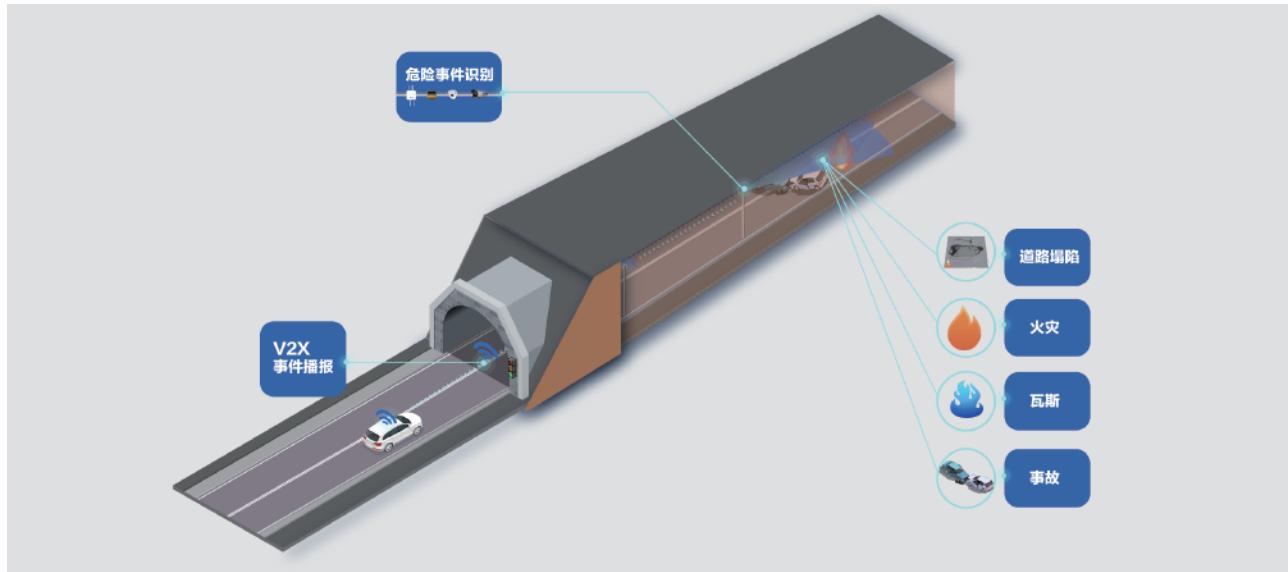


图 2.12 隧道内突发危险场景示例

应用效果：

- 1、避免车辆进入危险区域，发生二次交通事故，保证人身安全和交通安全；
- 2、对 SOTIF 的直接作用是通过车路协同感知，将部分 AD “未知不安全” 转化为“已知安全” 场景，最终实现第 3 象限“未知不安全”的缩小。

2.2.3 车路协同安全分析模型

在 SOTIF 框架下，为缩小自动驾驶中已知不安全（SOTIF 第 2 象限）的区域范围，选取超视距跟驰、换道冲突及无保护左转等三个典型交通场景，从真实数据生成仿真场景，通过协同感知、协同决策与协同控制等机制，构建不同场景下的车路协同安全收益模型，对比分析了单车智能和车路协同对自动驾驶安全的影响，证明了车路协同可以延长碰撞时间、提升安全概率。

如图 2.13 所示，在经典安全评价理论的基础上，通过引入车路协同路端感知信息及感知可靠性概率模型，进一步结合多传感器融合的概率迁移模型，我们提出了车路协同自动驾驶安全收益模型（VICAD-SRM）。其中，针对某类场景的具体状态分布可以通过超参数 θ 进行表征， T_{act} 则表示车辆目标发生感知、变道、路口转弯等关键动作的时间。若给定一组 θ 和 T_{act} ，借助安全评价模型以及自动驾驶系统干预下的车辆交互模型，可以得到安全量化指标 P_{safe} 的解析解。同时，通过场景分布模型和自动驾驶交互模型求得任一组 θ 和 T_{act} 的产生概率，进而通过积分得到该类场景下的平均安全理论指标。将车路协同和单车智能的场景分别代入上述框架，即可在理论上得到车路协同相对单车智能在自动驾驶安全方面的收益。

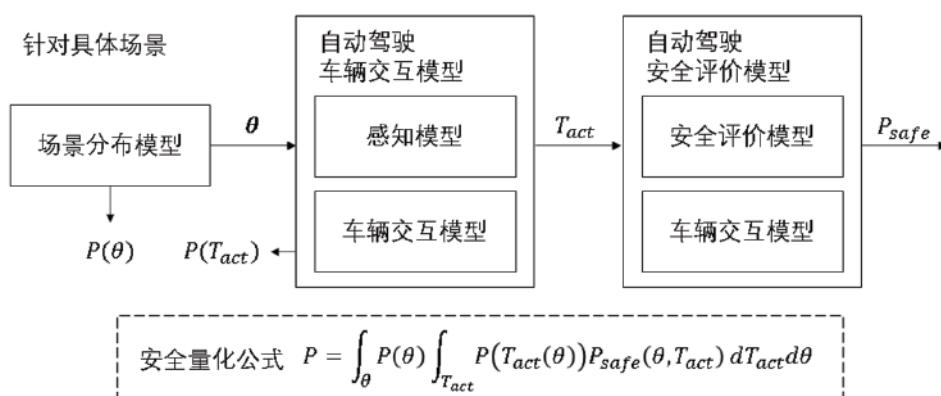


图 2.13 VICAD-SRM 理论模型框架

以下我们将分别从理论模型框架模块、代入典型场景的计算方法和计算结果分析三个方面进行具体介绍。

2.2.3.1 理论模型框架模块

Hayward 提出的基于碰撞时间的车辆驾驶行为安全量化技术指标受到行业内的普遍认可，该模型虽可用于分析车路协同自动驾驶的安全性，但往往只针对非智能车辆或处于理想工况的车路协同系统，在真实场景中，往往存在传感器失效、不良天气影响及算法边缘场景（corner case）等状况，造成了理想仿真场景与实际交通场景在感知方面的较大差异，无法体现车路协同为单车智能提供冗余信息和互补信息的优势，因此，在传统安全模型框架的基础上加入感知模型，得到一个更接近真实场景的自动驾驶安全理论模型框架。框架中所涉及的各模型介绍如下：

(1) 场景分布模型：

由大量实际交通数据统计得出，车速服从对数正态分布，在非路口条件下的车头时距服从负指数分布，在路口条件下的冲突距离的倒数和左转车速服从泊松分布，其中各模型的参数可以结合特定场景的实际交通数据通过最大似然估计等方法得到。

(2) 感知模型：

感知的不确定性是单车智能和车路协同产生驾驶安全差异的核心因素，包括硬件检测的不确定性、软件模型的不确定性与多传感器融合的不确定性。对这类不确定性，可使用贝叶斯神经网络对感知模型进行误差表征与估计。

(3) 车辆交互模型：

针对超视距跟驰、换道冲突和无保护左转场景，分别使用了智能驾驶模型（IDM, Intelligent Driver Model）、三阶段车道变更模型和三阶段左转模型，实现仿真场景下的车辆交互。

(4) 安全评价模型：

为评价系统的安全性，我们引入基于时间和基于概率的安全评价指标。在时间维度，我们使用碰撞时间（TTC, Time to Collision）和抵达冲突点时间差 ΔT 作为安全评价指标；在概率维度，我们使用实际未发生碰撞的概率 P_{Safe} 作为安全评价指标。

2.2.3.2 典型场景下的安全计算方法

为了对比车路协同与单车智能在自动驾驶安全方面的差异性，根据已选取的三个典型交通场景（见表 2.6），分别代入上述自动驾驶安全的理论模型框架中，计算在不同典型场景下的安全量化指标，分析其安全性。

表 2.6 三种典型场景下自动驾驶安全的理论计算方法

场景	超视距跟驰	换道冲突	无保护左转
场景示意图			
场景分布超参数 θ 及其概率分布 $P(\theta)$	前车速度： $v_1 \sim N(\ln v, \sigma_v)$ 后车速度： $v_2 \sim N(\ln v, \sigma_v)$ 后车车头时距： $h_2 \sim Exp(-h, \lambda_h)$	前车速度： $v_1 \sim N(\ln v, \sigma_v)$ 中车速度： $v_2 \sim N(\ln v, \sigma_v)$ 后车速度： $v_3 \sim N(\ln v, \sigma_v)$ 中车车头时距： $h_2 \sim Exp(-h, \lambda_h)$ 后车车头时距： $h_3 \sim Exp(-h, \lambda_h)$	对向直行车速度： $v_1 \sim N(\ln v, \sigma_v)$ 对向左转车速度： $v_2 \sim P(v, \lambda_v)$ 左转车速度： $v_3 \sim P(v, \lambda_v)$ 对向直行冲突距离： $d_2 \sim P(\frac{1}{d}, \lambda_d)$ 对向左转冲突距离： $d_3 \sim P(\frac{1}{d}, \lambda_d)$
关键动作时间 T_{act} 及其概率分布 $P(T_{act})$	感知生效时间： t_1 $P(t_1) = P_S(t_1) \prod_{i=0}^{\frac{t_1}{\Delta T}-1} (1 - P_S(i\Delta T))$	前车变道时间： $t_1 \sim U(t_{min}, t_{max})$ 感知生效时间： t_2 $P(t_2) = P_S(t_2) \prod_{i=0}^{\frac{t_2}{\Delta T}-1} (1 - P_S(i\Delta T))$	直行感知生效时间： t_1 左转感知生效时间： t_2 $P(t_1) = P_S(t_1) \prod_{i=0}^{\frac{t_1}{\Delta T}-1} (1 - P_S(i\Delta T))$ $P(t_2) = P_S(t_2) \prod_{i=0}^{\frac{t_2}{\Delta T}-1} (1 - P_S(i\Delta T))$
车辆交互模型	加减速模型，匀速运动模型，三阶段变道模型		
安全评价指标	$TTC = \frac{\Delta d}{\Delta v}, \Delta T = \frac{d_1}{v_1} - \frac{\theta_3}{w_3}, P_{safe} \Delta T = TTC = \frac{\Delta d}{\Delta v}, \Delta T_{leftturn} = \frac{d_1}{v_1} - \frac{\hat{d}_3}{v_3} P_{safe} = \begin{cases} 0, & \text{if collision} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$		

02 车路协同自动驾驶是规模商业化落地的必然趋势

超视距跟驰场景下的安全评价指标计算过程如下：

- (1) 对场景分布的超参数 $\theta = \{v_1, v_2, h_2\}$ 进行离散采样，并计算该分布产生的概率 $P(\theta) = P(v_1)P(v_2)P(h_2)$ ；
- (2) 对关键动作时间 t_1 进行离散采样，并通过感知模型 P_s 计算关键动作发生在时间 t_1 的概率 $P(t_1)$ ，即在 t_1 时刻前均未发生有效感知且在 t_1 时刻发生有效感知的概率；
- (3) 对于 θ 和 t_1 计算量化的安全评价指标 TTC、 ΔT 及 P_{Safe} ，对 $P(\theta)P(t_1)P_{Safe}(\theta, t_1)$ 进行积分得到安全评价指标的期望值。

针对换道冲突和无保护左转的场景，仍可延用上述计算过程，在此不再累述（详见附录 3）。

2.2.3.3 理论计算结果与分析

基于百度 Apollo 提供的真实交通流数据，统计拟合出场景分布模型，并结合我们提出的 VICAD-SRM，计算单车智能和车路协同在三种典型场景下的运动状态和安全评价指标，实验计算结果如表 2.7 所示。

表 2.7 三种典型场景下自动驾驶安全的理论计算结果

场景	超视距跟驰		换道冲突		无保护左转	
感知	单车智能	车路协同	单车智能	车路协同	单车智能	车路协同
TTC(s)	7.209	7.212	4.493	4.835	N/A	N/A
$\Delta T(s)$	N/A	N/A	N/A	N/A	2.852	3.745
$1-P_{Safe}$	2.08×10^{-5}	1.27×10^{-5}	1.17×10^{-4}	1.81×10^{-5}	8.39×10^{-4}	7.76×10^{-5}

在时间评价维度，针对超视距跟驰、换道冲突和无保护左转三种场景，我们分别采用 TTC、TTC 和 ΔT 作为基于时间的安全评价指标，车路协同对比单车智能，实现了 0.04%、7.61% 和 31.31% 的提升。在概率评价维度，我们使用事故率 $1-P_{Safe}$ 作为指标，车路协同相比单车智能在三种场景下分别降低 38.94%，84.53% 和 90.75%。实验结果表明，车路协同将 SOTIF “已知不安全” 场景转化为 “已知安全” 场景，因此能够显著提升自动驾驶安全性。

SECTION 3 2.3 基于车路协同扩展自动驾驶ODD

2.3.1 自动驾驶ODD限制

自动驾驶运行设计域 (Operational Design Domain, ODD) 是指自动驾驶系统功能设定的运行条件。每个自动驾驶系统运行的前提条件及适用范围可能都不太一样，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。由于现在的自动驾驶技术还处于发展阶段，无法保证自动驾驶车在任何天气条件下和任何道路环境中都可以安全行驶。因此，自动驾驶系统会提前设定好 ODD，通过限制行驶环境和行驶方法，将有可能发生的事故防范于未然。

自动驾驶 ODD 包括但不限于天气条件、区域和时段限制、速度区间、交通流量及道路特征等，例如某品牌汽车的 L3 自动驾驶的 ODD 如下：

- (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也就是说在堵车状态下；
- (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。

从上面的例子可以看出，自动驾驶必须在限定条件下才能正常运行，其根本原因是自动驾驶车辆自身的传感器能力、计算能力、决策规划能力等存在限制，难以保证车辆在各种复杂工况下都能安全运行。

例如受限于车载传感器的安装位置、传感器自身特性等原因，车辆难以完成以下场景的精准识别：

- (1) 路面遗撒，此场景下必须人工识别并及时接管；
- (2) 违停车辆、排队等交通事件，车辆难以做出准确决策，部分情况下需人工接管。

自动驾驶要实现规模商业化，就必须保证车辆在各种真实复杂交通环境下都能安全运行，在单车智能难以得到很好解决的情况下，就必须依靠车路协同解决。

2.3.2 车路协同对ODD的扩展

通过车路协同，可以解决上述单车感知遇到的问题，以图 2.14(改自欧洲 ERTRAC: Connected Automated Driving Roadmap) 为例进行说明，单车智能自动驾驶车辆的 ODD 存在一定局限性（局限性体现在两方面：1、单车感知范围或边界的局限；2、单车可识别应对的场景有限），路侧通过协同感知可以解决单车感知和预测方面的局限性，对车辆的感知范围、感知能力和可识别场景进行扩展，最终实现对单车运行设计域的扩展，保证自动驾驶车辆能够应对更多场景。当车路协同感知、协同决策控制达到一定能力水平时，车辆就可以所有时间、所有道路环境安全行驶。

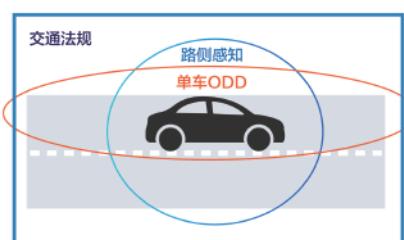


图 2.14 车路协同扩展自动驾驶ODD示意图

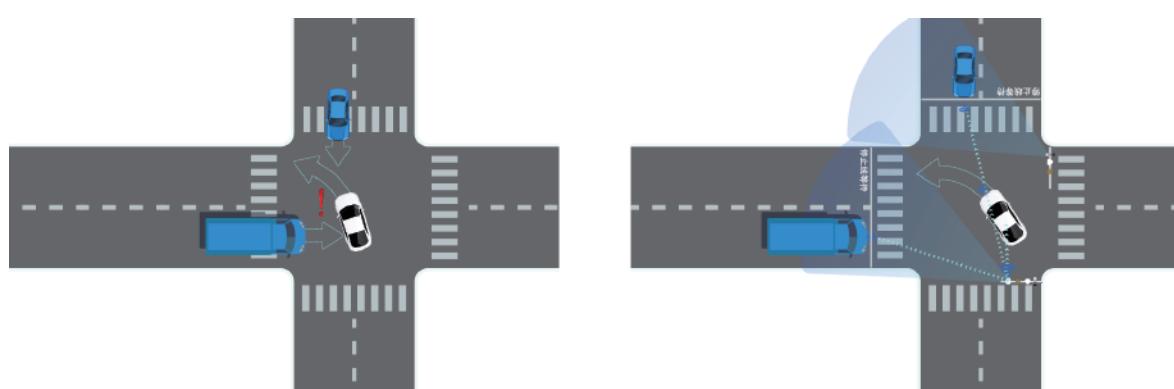
场景举例：无信号灯交叉口协调通行

问题描述：

在无信号灯的交叉口，由于单车智能自动驾驶车辆难以准确判断路口其他车辆的驾驶意图，使得车辆通过该类交叉口时存在较大难度，经常需要人工接管。无信号灯的交叉口是一类单车自动驾驶 ODD 需要排除或限制自动驾驶能力的场景。

场景原理：

通过车路协同感知实时识别路口每个方向的交通流和排队车辆，路侧计算处理设备对车辆和行人的位置、速度、轨迹等信息进行分析，为每辆车辆生成通过交叉路口的通行调度信息，调度车辆安全通过交叉口。调度与控制信息通过路侧通信设备（RSU）发送到车载 OBU。



自动驾驶车辆在无信号灯交叉口无法安全高效通行，需要驾驶员接管

通过车路协同控制，实现自动驾驶车辆无信号灯交叉口协调通行

图 2.15 无信号灯交叉口协调通行场景示例

应用效果：

通过路侧的协同调度，所有车辆都能安全高效通过路口，自动驾驶车辆无需驾驶员接管。

该场景适用于城市、郊区以及封闭园区等的普通道路及公路的交叉路口、无信号灯等交叉路口的通行，也适用于高速匝道出入口合流等。该场景的原理示意如图 2.15 所示。

03

车路协同自动驾驶 需要高等级智能道路



VICAD 由于安全性、可靠性高，能充分发挥道路的优势弥补 AD 的不足，可以大大降低自动驾驶规模商业化的门槛，但是不同自动驾驶能力水平的车辆要通过 VICAD 实现规模商业化，对道路智能化的要求存在较大差异。本章从面向 VICAD 规模商业化的角度，提出了道路的智能化分级目的、技术分级，并明确了高等级智能道路的具体指标要求，针对中国建设部署高等级智能道路的经济性和综合优势进行了阐述分析。

本白皮书中所提智能道路的范围见 2.1.1 节，包括路侧服务于 VICAD 的各类智能设施（感知、计算、存储、通信、控制器等）和各类云服务平台（如边缘计算节点、MEC、中心云）等。

SECTION 1

3.1 面向车路协同自动驾驶的道路智能化分级

3.1.1 分级目的

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。

虽然车路协同自动驾驶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 L4 和 L5 级别车辆只需要较低能力的道路即可实现，而 L2、L3 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，为自动驾驶车辆提供支撑。

(2) 我国道路公路数庞大，需要分级规划建设。

我国 2020 年末全国公路总里程 519.81 万公里，高速公路里程 16.10 万公里，高速公路里程数世界第一，要将如此庞大的公路体系建设成为智能化公路，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。我国智能道路的发展应兼顾各地公路不同的功能需求，将智能公路的智能化等级进行划分，不同公路采用不同的智能化等级为目标进行规划与建设。

3.1.2 技术分级

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，结合我国车路协同自动驾驶发展与智能道路建设情况，提出了面向车路协同自动驾驶的道路智能化技术分级。

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《Cooperative Driving Automation: Definitions and Taxonomy(预研阶段)》;
- (3)《汽车驾驶自动化分级(报批稿)》(国家标准，报批待发布);
- (4) 欧洲 ERTAC 提出的 ISAD⁵;
- (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(征求意见稿)》;
- (6) 中国智能交通协会团体标准《智慧高速公路分级(征求意见稿)》;
- (7) 中国公路工程行业标准《公路智能化数字技术规范(预研阶段)》;
- (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、广州等城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。

综上所述，为适应车路协同自动驾驶的规模商业化发展，需要提出对应的智能道路技术分级，如下表 3.1 所示。

⁵ ERTAC (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 ISAD (自动驾驶的基础设施支持级别，Infrastructure Support levels for Automated Driving) 的概念。

03 车路协同自动驾驶需要高等级智能道路

表 3.1 使能自动驾驶的道路智能化技术分级

道路智能等级	等级名称	道路+云的能力						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	协同感知定位能力	网络通信能力	协同决策控制能力	功能安全与SOTIF体系		
C0	无	无	无	无	无	无		无	无
C1	较低智能化	• 基础交通安全设施 • 基础交通管理设施	导航SD地图	无	• 3G、4G蜂窝通信 • DSRC 直连通信	无		无	
C2	初级智能化	• C1所有设施 • 直连通信设施		无	• 4G蜂窝通信 • DSRC、LTE PC5直连通信	无		阶段1： 信息交互协同	• L5 • 限定环境下的L4
C3	部分智能化	• 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	导航SD地图 (车道级)	• 机非人环境感知识别 • 米级定位	• 4G、5G蜂窝通信 • DSRC、LTE PC5直连通信 • 全链路500ms端到端较低时延	无	可选	阶段2.1： 初级协同感知	
C4	高度智能化	• 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)	• 全量交通要素实时感知 • 多特征精准识别 • 分米级定位	• 5G Uu蜂窝通信 • LTE-V2X、NR-V2X直连通信 • 全链路200ms端到端超低时延	有 (限定场景)	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；	• L2+ • L3 • L4 • L5
C5	完全智能化	• C4所有设施连续部署 • 跨域协同MEC、云控平台		• 全时空全量感知 • 厘米级定位	• 支持5G、NR-V2X、6G等 • 全链路100ms端到端极低时延	所有环境		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。

SECTION 2

3.2 自动驾驶规模商业化对道路智能化的关键需求

根据表 3.1 的道路智能化技术分级，考虑到技术和产业的发展水平，实现 VICAD 规模商业化落地的可行路径如图 3.1 所示

(1) 现阶段：“聪明的车”与“智慧的路”协同推进

考虑到现阶段自动驾驶、V2X通信、云控平台、智能道路等技术的发展现状，VICAD规模商业化落地的可行路径有两条：

- 1、C4级智能道路+（L2-L4）网联自动驾驶车辆（Cooperated Automated Vehicle, CAV）；
- 2、L4级别CAV+（C1-C4）级智能道路。

这两条路径都能助推自动驾驶实现规模商业化落地，也需要“聪明的车”与“智慧的路”协同发展，仅依靠“聪明的车”或者“智慧的路”，要实现规模商业化落地都面临着巨大的挑战和困难。

(2) 未来：L5的车与C5的路是终极目标

未来，仅依靠L5的AV就可以在任何智能道路环境下实现完全自动驾驶，或者仅依靠C5的智能道路与L2以上等级的CAV也能实现完全自动驾驶，但这两种方式都是理想中的终极目标，是多技术、多产业深度融合协同的终极形态，可实现的难度较大。

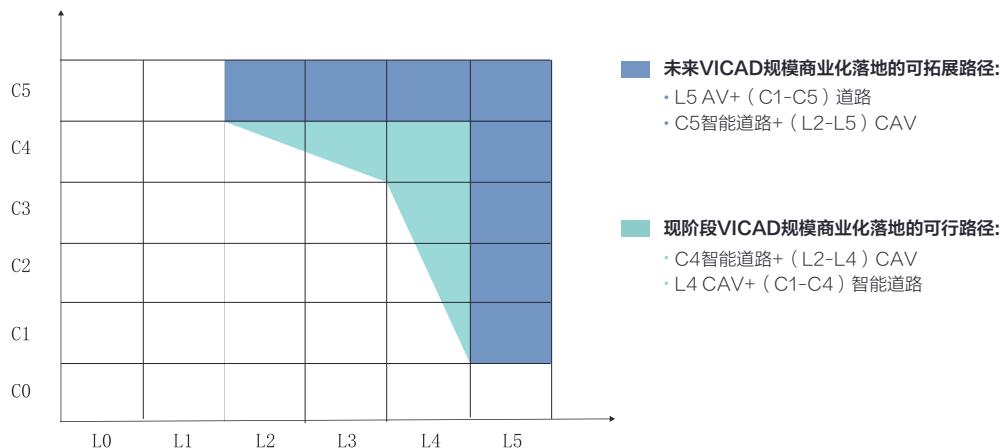


图 3.1 VICAD 规模商业化落地的可行路径

综上所述，

- (1) 考虑到经济性和现阶段技术发展水平，在发展单车智能自动驾驶的同时，需要同等重视发展车路协同自动驾驶，两种方案都是实现自动驾驶规模商业化落地的可行路径；
- (2) 在 L4 单车智能自动驾驶规模商业化存在较大困境的情况下，建议加快建设 C4 级智能道路，支撑 L2+ 和 L3 自动驾驶快速提升能力获得收益实现规模商业化落地。

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 3.2。

表 3.2 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 $\geq 95\%$ 召回率 $\geq 95\%$
	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)
	感知对象漏检率	< 2%
	路侧对象感知端到端时延 (含通信时延)	$\leq 200\text{ms}$ (99分位)
	数据发送频率	10-20Hz
交通事件感知定位	事件类型识别	准确率 $\geq 95\%$ 召回率 $\geq 95\%$
	定位精度	3m (99分位)
	事件感知端到端时延 (含通信时延)	$\leq 200\text{ms}$ (99分位)
	数据发送频率	$\geq 10\text{Hz}$
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	$\leq 200\text{ms}$ (99分位)
	信号灯数据发送频率	$\geq 8\text{Hz}$

SECTION 3

3.3 建设高等级智能道路具有显著经济性

建设部署高等级智能道路“面向未来，兼容当下”，具有显著经济性，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”降维解决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設。

高等级智能道路的经济性可以从微观和宏观两个角度进行分析：

(1) 微观角度：

以实现 L4 高等级自动驾驶规模化落地为目标，单车智能自动驾驶技术路线所需的成本是增加车端冗余设备系统费用，而车路协同自动驾驶技术路线所需的成本约等于建设 C4 级智能道路的升级改造费用，也可以等同于将智能化道路上的投资费用与分摊到每一辆车上的节约投入费用的两种费用进行比较。3.3.1 节将详细展开比较论述。

(2) 宏观角度：

建设部署高等级智能道除服务于自动驾驶外，还有多重收益，比如：

- 1、通过基础设施的集成或复用，避免道路设施重复建设，节约投资成本；
- 2、通过道路基础设施数据开放共享和创新应用，可以提供更多新型智能应用，带来营收收入，同时带动产业发展。

3.3.1 微观经济效益比较

本节分别以全国和单个城市作为研究对象，分析建设高等级智能道路的经济效益。由于成本涉及到的因素和制约条件较为复杂，本白皮书的测算以粗粒度估算为主，难以精确到具体准确数字，仅供参考。

本白皮书中道路或路口的建设部署成本均是假设以当前发展阶段的市场价格水平进行测算的，以后车端设备成本和路侧设备成本随着规模化程度提高有可能都会逐步降低，但是这个价格浮动不会对论证对比结果产生较大偏差影响。

参照第二章所述功能安全标准和 SOTIF 梳理，可以清晰看到自动驾驶冗余系统的设计是必不可少的。车规级自动驾驶系统需要等效于冗余子系统的机制，可以简单理解为自动驾驶车端感知增加了一套冗余子系统，车路协同与单车智能相比也提供了一套路侧感知冗余能力，也就是强化在智能化道路上的投资。路侧系统的投资可以等效于分摊为在每一辆车上节约的投入。在同等的自动驾驶安全的前提下，如果使用与车端冗余传感器和处理等效的智能道路传感器和设施，路侧基础设施可以大范围实施部署，大规模地服务于车路协同自动驾驶车辆。在此条件下整体边际成本较低，也以较少的成本来取得更加全面、深入的智能化道路升级。另一方面，除了经济性以外，VICAD 安全性和 ODD 适用性更高。综上所述，车路协同自动驾驶比单车智能自动驾驶在经济性上更具有积极意义。

(1) 全国数据推算

据公安部统计发布数据，截至到 2020 年末，全国汽车保有量达 2.81 亿辆⁶。据统计评估，全国各大城市交通路口数量约 25 万个，从汽车保有量和城市交通路口的两者数字上就可以直观看出，汽车保有量与路口数量的比例为“千”级别。

据交通运输部《2020 年交通运输行业发展统计公报》数据显示，截止到 2020 年末，全国四级及以上等级公路里程 494.45 万公里⁷，高速公路里程 16.10 万公里⁸，全国城市道路 45.90 万公里⁹。全国汽车保有量有 2.81 亿辆，由此可推算，只要在每辆车上节省 1.98 万元的成本，就可以在每公里的道路上投入 100 万元的智能化改造。考虑到由于城市车辆密度高，分摊到每辆车费用低，是造成每辆车节约金额有数量级差别的主要因素。而且，随着车路协同大规模落地，可以预测每公里智能化道路的升级改造成本会远低于 100 万元，即使我们扣除掉一些测算的误差，VICAD 智能化道路所需的升级改造成本也是相对很低的。

(2) 单个城市数据推算

我们再以部分城市具体数据为例。根据大多数城市车辆运行规律，市内道路行驶是城市保有车辆的主要用途，本白皮书仅做自动驾驶车辆在城市道路运行的成本收益分析。同理，以高速场景为主要用途的车辆也可以做高速运行成本收益分析，在此不再赘述。

⁶ 2021年公安部交通管理局官方发布的数据

⁷ 2021年交通运输部综合规划司发布的《2020年交通运输行业发展统计公报》

⁸ 2021年交通运输部综合规划司发布的《2020年交通运输行业发展统计公报》

⁹ 住房和城乡建设部发布的《2019年城乡建设统计年鉴》数据

表 3.3 中信建投证券单位成本预测

场景	项目	2020~2021年(导入期)	
		数量	总价(万元)
城市内交叉路口	RSU	单个路口需要1~2个，遮挡不严重则仅需1个，假设每个路口1.3个	81.84
	高清摄像头	每个方向1~3个，四个方向合计4~12个，与信号灯调控情况相关，假设平均每个路口8个	
	高清摄像头控制单元(CCUs)	单个路口需要1个，控制8个摄像头	
	毫米波雷达	每个方向1~3个，四个方向合计4~12个，与信号灯调控情况相关，假设平均每个路口8个	
	激光雷达	一般的辅助驾驶场景不需要激光雷达，自动驾驶场景下少则对角设置2个、多则每个方向设置2个（合计8个），假设在示范区有20%新改造路口部署了激光雷达、这20%的路口平均每个部署3个激光雷达，则整体上平均每个路口20%*3=0.6个	
	边缘服务器	单个路口需要1个	
	交通信号机	单个路口需要1个	
	配套设备和基建	\	
高速/快速路	RSU	每500m部署1个，每公里2个	39.72
	高清摄像头	每个RSU配备2个（前向、后向），每公里4个	
	高清摄像头控制单元(CCUs)	单个RSU配备1个，每公里2个（分别控制2个摄像头）	
	毫米波雷达	每个RSU配备2个（前向、后向），每公里4个	
	激光雷达	假设初期高速/快速路不部署激光雷达	
	边缘服务器	单5~10公里部署1个，平均每公里0.15个	
	配套设备和基建	\	

根据中信建投证券的预测数据¹⁰（见表 3.3），单个交叉路口的 C-V2X 改造成本平均约为 81.84 万元，每公里高速 / 快速路的 C-V2X 改造成本平均约为 39.72 万元。考虑城市道路存有遮挡情况，推算城市道路每公里部署设备成本略高于高速公路，所需的路侧智能设备成本介于城市路口和高速公路之间，据此假设每公里城市道路的 C-V2X 改造成本平均约为 50 万元。

根据公式：

$$\text{节约成本 (元 / 车)} = \frac{\text{路口数量} * \text{路口单价 (元 / 路口)} + \text{道路里程} * \text{里程单价 (元 / 公里)}}{\text{汽车保有量}}$$

可计算求得建设 C4 等级智能道路所需对路侧智能设备升级改造成本，以及对应于 AD 车端可以节约成本预测表，见下表 3.4。

¹⁰ 2020年3月中信建投证券《车联网：新基建重要方向，5G应用明珠》。

03 车路协同自动驾驶需要高等级智能道

表 3.4 VICAD 路侧智能设备升级改造成本与 AD 车端节约成本

城市	VICAD 智能设备升级改造平均成本							AD 车端节约平均成本	
	路口数量 (万个)	平均成本 (万元)	合计 (亿元)	道路里程 (万公里) ¹¹	平均成本 (万元)	合计 (亿元)	总计 (亿元)	汽车保有量 (万辆) ¹²	车端节约成本 (万元)
北京	0.96	81.84	78.57	0.83	50.00	41.50	120.07	593.40	0.20
上海	0.70	81.84	57.29	0.55	50.00	27.50	84.79	415.80	0.20
天津	1.23	81.84	100.66	0.89	50.00	44.50	145.16	309.00	0.47
石家庄	0.37	81.84	30.28	0.24	50.00	12.00	42.28	288.10	0.15
重庆	1.56	81.84	127.67	1.01	50.00	50.50	178.17	463.30	0.38

注：

1、以上数据为统计估算，测算结果仅供参考。

以北京为例说明，只要在每辆车上节省 2000 元的成本，就可以在每公里的道路上投入约 50 万元和每个路口投入 81.84 万元的全部智能化设备升级改造。相对比于全国，城市的车辆密度高，摊薄到每辆车费用较低。通过单个城市部署成本收益分析，重点城市快速部署具备一定的经济可行性。

基于以上分析从整体发展趋势上看，可以预测 VICAD 比 AD 具有更高的经济效益。同时考虑智能化道路公共设施复用率高，又有成本分摊机制效果，随着 VICAD 技术不断迭代，单位道路资源上需要承载的车辆会逐渐增多，VICAD 的部署成本优势会更加明显。

3.3.2 宏观经济效益分析

建设部署高等级智能的宏观经济效益分析，可从避免重复投资建设和创新应用两个角度进行分析：

(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：

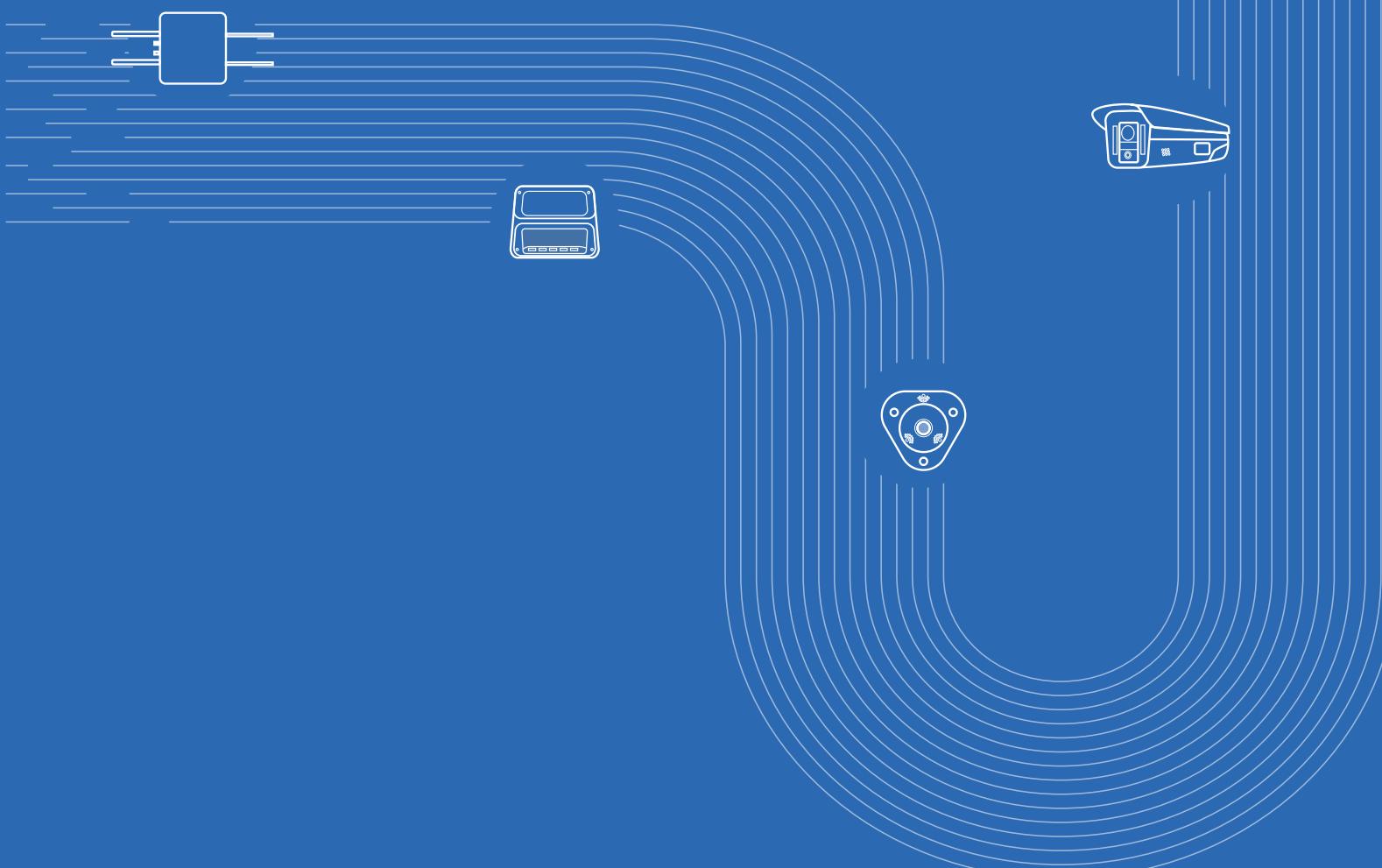
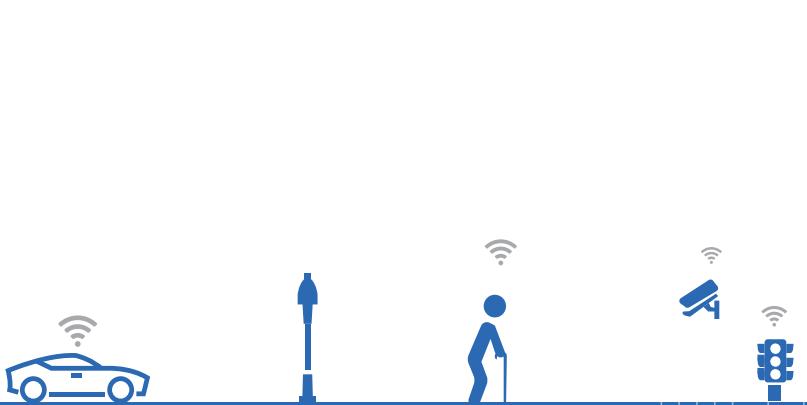
高等级智能道路具备车辆、道路、行人、云端高维数据的汇聚和实时处理分析能力，除服务于车路协同自动驾驶外，可以不断探索开展更多的商业化运营服务创新，比如智慧交管服务、城市智慧出行、车辆安全管理等，通过各类服务为高等级智能道路带来盈利，最大可能发挥智能道路价值。

¹¹住房和城乡建设部发布的《2019年城乡建设统计年鉴》数据，石家庄市统计局发布的《2019年城乡建设统计年鉴》数据

¹²公安部发布的统计数据，截至2019年底数据

04

百度车路协同 自动驾驶实践



SECTION 1

4.1 百度ACE智能交通引擎

百度从 2013 年开始大力投入无人驾驶汽车的研发，2017 年，百度基于在自动驾驶领域的技术研发和积累经验，正式面向全球推出首个自动驾驶开放平台“Apollo（阿波罗）”，Apollo 是一个开放的无人驾驶平台或者是一个开放的无人驾驶的生态系统，目的是帮助汽车行业及自动驾驶领域的合作伙伴结合车辆和硬件系统，快速搭建一套属于自己的完整的自动驾驶系统。目前 2021 年，Apollo 开放平台已升级到 6.0 版本（如图 4.1 所示），平台拥有全球生态合作伙伴超过 210 家，汇聚全球开发者 55000 名，开源代码数 70 万行。



图 4.1 Apollo 开放平台架构

2020 年 4 月，百度正式对外发布全球首个车路智行融合的全栈式智能交通解决方案“ACE 交通引擎”（如图 4.2 所示）。ACE 交通引擎是一个覆盖基础技术能力、平台解决方案和垂直应用场景的系统化方案，包括“一大数字底座、两大智能引擎、N 大应用生态”，其核心目标是发挥 Apollo 自动驾驶与车路协同核心能力，全面构筑人、车、路全域数据感知及智能处理分析的智能交通系统，为自动驾驶与智能交通提供泛在连接技术与端到端应用服务，改善交通效率与安全。



图 4.2 ACE 智能交通引擎

百度 ACE 智能交通引擎已在北京、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、眉山等二十多个城市开展落地实践。

SECTION 2

4.2 Apollo车路协同自动驾驶实践

4.2.1 Apollo共享无人车规模化测试运营

截止 2021 年 6 月，百度 Apollo L4 级自动驾驶路测里程已经突破 1200 万公里，成为全球唯一一家实现千万公里级路测积累的中国企业，并且保持着 0 安全事故的纪录。百度 Apollo 率先在全国范围内开启了量产自动驾驶服务，用最强自动驾驶技术挑战中国复杂的城市道路场景。

共享无人车与自动驾驶巴士是百度 Apollo 自动驾驶规模商业化的重要探索实践，Apollo 共享无人车与自动驾驶巴士拿到了超过 244 张测试牌照，接待乘客超 21 万人次，路网覆盖 30 个城市，面积达到 391 平方公里。

伴随着共享无人车与自动驾驶巴士在不同城市落地，Apollo 车路协同自动驾驶为共享无人车与自动驾驶巴士提供规模化测试验证和示范运营服务，保证了自动驾驶安全运营，为乘客提供高质量体验服务。

4.2.2 Apollo Air计划

为进一步推进车路协同自动驾驶从先导示范到规模商业化落地，基于百度 ACE 智能交通引擎实践，在对北京亦庄、广州黄埔、沧州等若干路口进行智能化改造和不断打磨迭代的基础上，百度于 2021 年 5 月，联合清华大学智能产业研究院正式提出了 Apollo Air 计划。

Apollo Air 计划有三大典型特征：

- (1) 依靠纯路侧感知实现车路协同自动驾驶；
- (2) 持续降维反哺车路协同产品；
- (3) 标准开源开放实现业界共享。

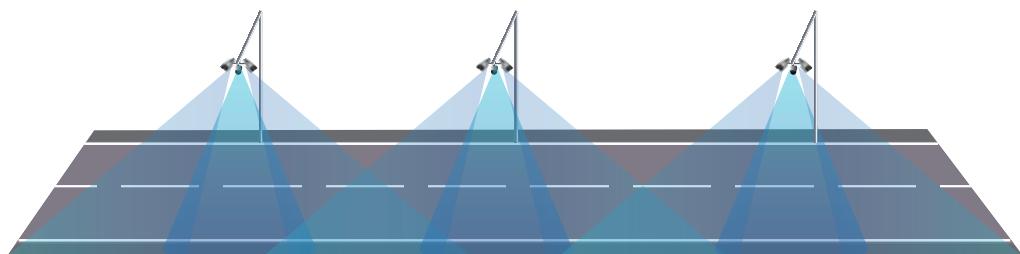


图 4.3 Apollo Air 全息道路感知部署示意图

其中，依靠纯路侧感知实现车路协同自动驾驶是 Apollo Air 的最大技术创新，在不使用车载传感器，仅依靠路侧轻量感知的前提下，实现连续覆盖感知（部署示意图见图 4.3），并利用 V2X、5G 等无线通信技术就可以实现车 - 路 - 云协同的 L4 级自动驾驶。

依靠 Apollo Air 纯路侧感知技术，还可以持续反哺现有的智能路口解决方案，将技术降维释放给车路协同量产产品，为共享无人车运营和高级别辅助驾驶提供高可靠性的路侧感知数据。

Apollo Air 计划是行业发展到无人化、规模商业化运营新阶段的必然需求，也是对现有的车路协同技术的一次全面升级，只有以高可靠性、高准确率的路侧感知技术的提升来加强车路协同的融合感知框架，才能更好地为自动驾驶提供安全保证。

4.2.3 标准先行

为全面支撑 ACE 智能交通引擎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国内外各级标准，包括通信、汽车、交通、智能网联、地图、信息安全等多个行业领域，牵头或全面参与了《基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容》(CCSA、T/ITS 0135-2020、CSAE 158-2020)、《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》(CSAE 157-2020)、《广州市车联网先导区建设总体技术规范》以及《广州市车联网先导区 V2X 云控基础平台技术规范》等车路协同关键标准的研制和发布（仅列出部分项目），牵头在研的关键国家标准项目包括：

- (1)《车路信息交互协同技术要求 第2部分：路侧设施与中心子系统》;
- (2)《车路信息交互协同技术要求 第3部分：中心子系统与第三方平台》;
- (3)《自动驾驶路侧辅助定位技术要求》;

深度参与在编的关键标准项目包括：

- (1)《公路工程适应自动驾驶附属设施总体技术规范》;
- (2)《公路智能化数字技术规范》;
- (3)《智能网联汽车 数据通用要求》等。

SECTION 3

4.3 Apollo车路协同典型场景和技术优势

百度 Apollo 车路协同自动驾驶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 车路协同应用测试验证和先导示范，以下列举出 3 个大类 7 个典型协同感知应用场景，如表 4.1 所示。

表 4.1 典型车路协同自动驾驶应用场景举例（部分）

场景类别	场景名称	适用标准	对应道路智能等级
全量交通要素 感知定位	动静态盲区/遮挡协同感知		C4
	车辆超视距协同感知		
	路边低速车辆检测	(1) 满足高等级 (CSAE 158-2020) 标准 要求; (2) 且向下兼容 DAYI (CSAE 53-2019) 与 DAYII (CSAE 157-2020) 标准。	
道路交通 事件感知	违章停车、“死车”事件识别		C4
	排队事件识别		
	道路遗撒事件（施工锥筒、货物等）		
	路侧信号灯融合感知		

4.3.1 全量交通要素感知定位

基于 Apollo 车路协同规模化测试验证和示范运营积累，百度在智能道路方面具备对全量交通要素（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、位置精度、端到端全链路时延等指标达到了 C4 级高等级智能道路标准，核心指标符合表 3.2 要求，比如感知定位达到 0.5m（均值）、速度大小精度 1.5m/s（均值）、感知对象漏检率 < 2%、路侧对象感知端到端时延 ≤ 200ms（99 分位）、数据发送频率 10-20Hz 等。

同时，为了满足与 L4 级自动驾驶车辆进行车路协同感知的要求，实现交通要素对象级位置融合和速度融合，Apollo 车路协同在路侧感知方面专门开展了零速检测准确性优化、速度波动优化、静转动时延的专项优化等一系列专项优化，最终实现了 VICAD 动静态盲区融合感知、车辆超视距融合感知、路边低速车辆检测等一系列高难度复杂场景感知识别。

4.3.1.1 动静态盲区/遮挡协同感知

AD 盲区问题描述：

受限于单车智能的传感器感知角度限制，在出现静态障碍物或动态障碍物（如大型车辆）遮挡时，自动驾驶汽车（Autonomous vehicles, AV）主车难以准确获取盲区内的车辆或行人的运动情况。

VICAD 动静态盲区协同感知：

通过路侧多传感器部署，实现对多方位、长距离连续检测识别，并与 AV 主车感知进行融合，实现自动驾驶车辆对盲区内车辆或行人的准确感知识别，车辆可提前做出预判和决策控制，进而降低事故风险。

具体案例：

(1) 左转 / 掉头盲区或遮挡协同感知：如图 4.4 所示，AV 主车（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，AV 主车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 4.4 左转/掉头盲区或遮挡协同感知

(2) 大车遮挡协同感知：在 AV 主车直行时，右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 4.5 所示。

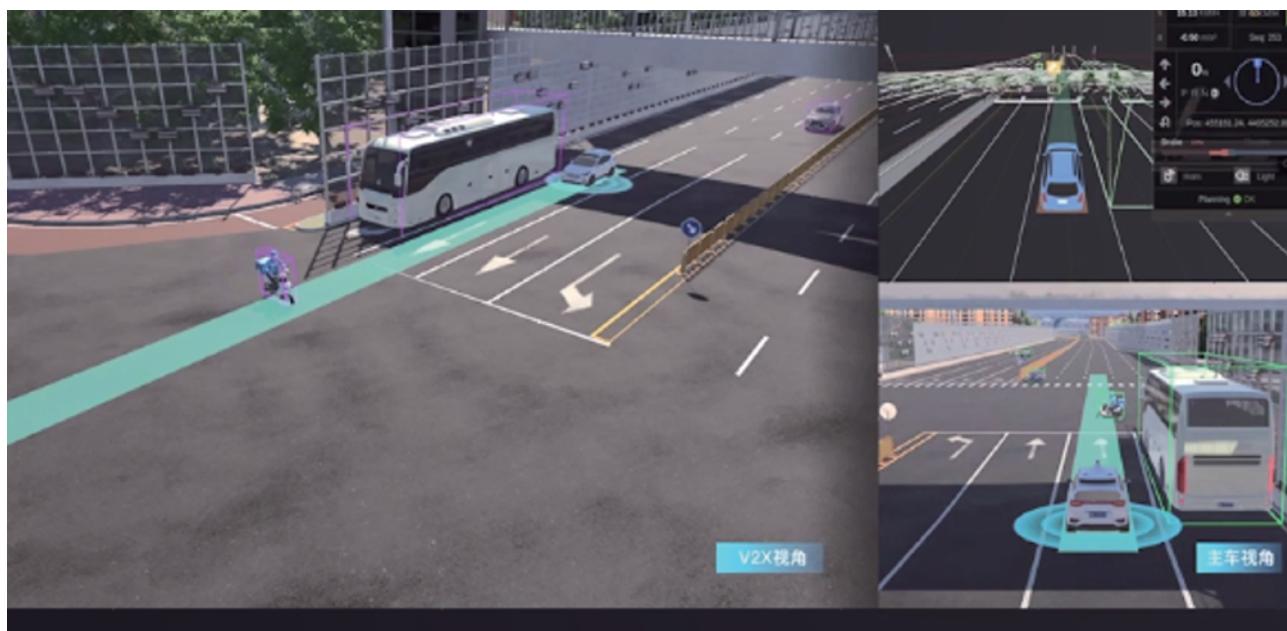


图 4.5 动静态盲区非机动车/行人鬼探头协同感知

(3) 路口遮挡协同感知：在复杂路口，很容易出现大车遮挡小车，影响车辆感知，通过VICAD路口全量感知，车辆可以提前获取路口内全量车辆、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4.6所示。

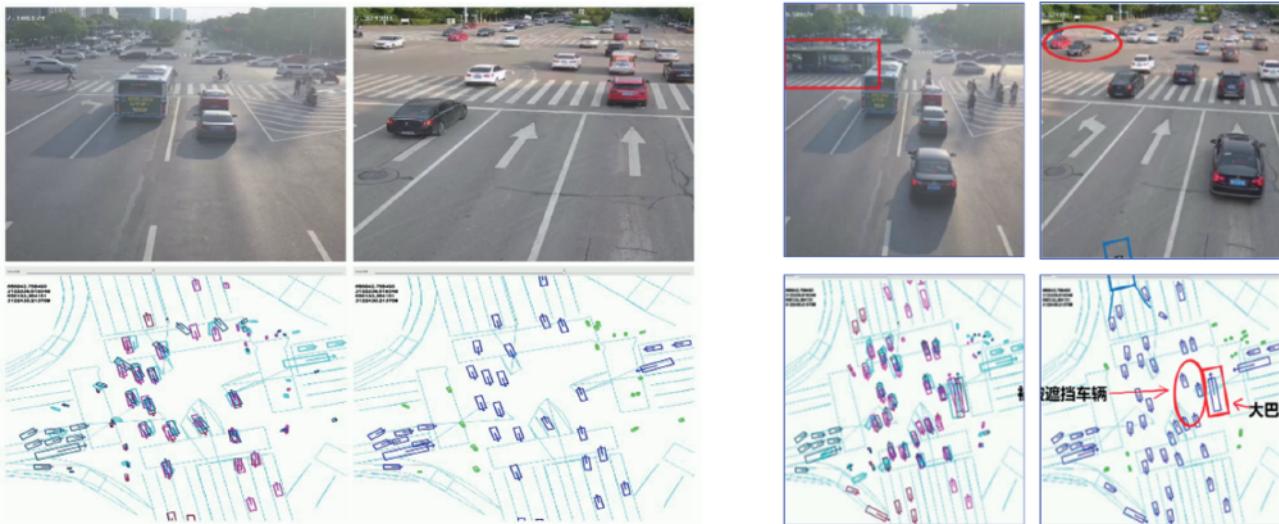


图4.6 路口遮挡车路协同感知

4.3.1.2 车辆超视距协同感知

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，AV主车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，容易出现类型跳变等问题。

VICAD 超视距协同感知：

通过路侧多传感器部署，实现对多方位、长距离连续检测识别，并与AV主车感知进行融合，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，车辆可提前做出预判和决策控制，进而降低事故风险。

具体案例：

如图4.7、4.8所示，两张图片是同一时刻的车端和路侧检测与车融合后的结果。在图4.7中，AV主车（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的风险。在图4.8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（路径附近的粉色筐），避免了车辆急刹或事故的风险。



图4.7 超视距协同感知



图 4.8 超视距协同感知

4.3.1.3 路边低速车辆检测

AD 超视距感知问题描述：

受车端传感器感知视角及车辆实时运动等因素的影响，AV 主车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 超视距协同感知：

通过路侧多传感器部署，实现对道路多方位、长距离连续检测识别，并与 AV 主车感知进行融合，实现自动驾驶车辆对低速车辆或行人的准确感知识别，车辆可提前做出预判和决策控制，进而降低事故风险。

具体案例：

AV 主车直行时，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 AV 主车进行融合感知定位，进而避免了 AV 主车急刹或事故的风险。如图 4.9 所示。



图 4.9 路边低速车辆协同感知

4.3.2 道路交通事件感知定位

自动驾驶车辆需要对各类交通事件（如违章停车、“死车”、排队、施工、遗撒等）进行实时准确感知识别，但是交通事件往往具有一定的复杂性、实时性，仅依靠车辆很难进行准确全面的识别定位，车端由于观察的角度、视距时长受限，面对违章占道停车、“死车”等场景，难以对交通态势进行及时的语义判断，使得车辆刹车或变道距离短，容易造成急刹。百度 Apollo 车路协同通过 C4 级智能道路对背景建模实现交通态势的语义判断，进行交通事件实时感知，为 L4 级自动驾驶车辆提供交通事件协同感知服务，让车辆提前进行预判和决策控制，如变道绕行、停车，避免急刹或事故等风险，保障自动驾驶车辆安全。

具体案例：

(1) 违章停车、“死车”等交通事件识别：AV 主车前方有大车“死车”并停占两个车道，临近路口 AV 主车无法判断前方信息而停滞不前。通过 VICAD 交通事件协同感知，可以长时间对道路车辆进行跟踪和预测，及时将死车事件广播给 AV 主车，AV 主车可以及时做出变道等决策。如图 4.10 所示。



图 4.10 大车“死车”交通事件协同感知识别

(2) 排队交通事件识别：跟车状态下，前方路口红灯，直行车辆出现排队现象；而 AV 主车此时因为无法判断前车停止原因（排队中），因此会选择往左侧（左转车道）并线超车；然而临近路口时，却因为车道中的排队车辆而无法再并线回原车道。通过 VICAD 交通事件协同感知，及时发现前方排队事件，并将排队事件及时发送给 AV 主车，AV 主车根据排队信息做出不变道超车并在车道内排队等候的决策。如图 4.11 所示。

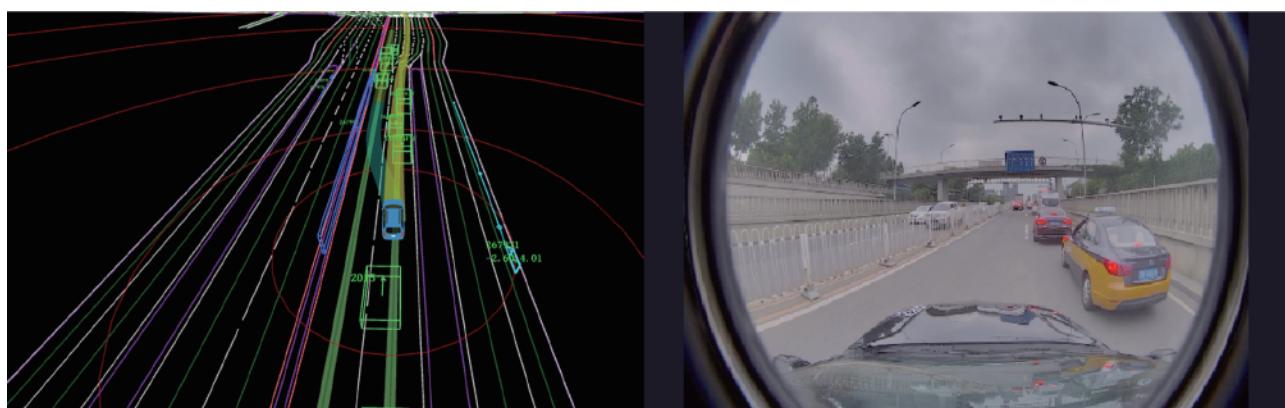


图 4.11 排队交通事件识别

(3) 道路遗撒（施工锥筒、货物等）事件识别：AD 车辆的感知视角有限，对低矮障碍物的准确检测需要较近距离才能实现，容易造成车辆急刹，如图 4.12 所示。通过 VICAD 交通事件协同感知，可对道路遗撒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，提前进行预判和车辆决策控制，如变道绕行。如图 4.13 所示。

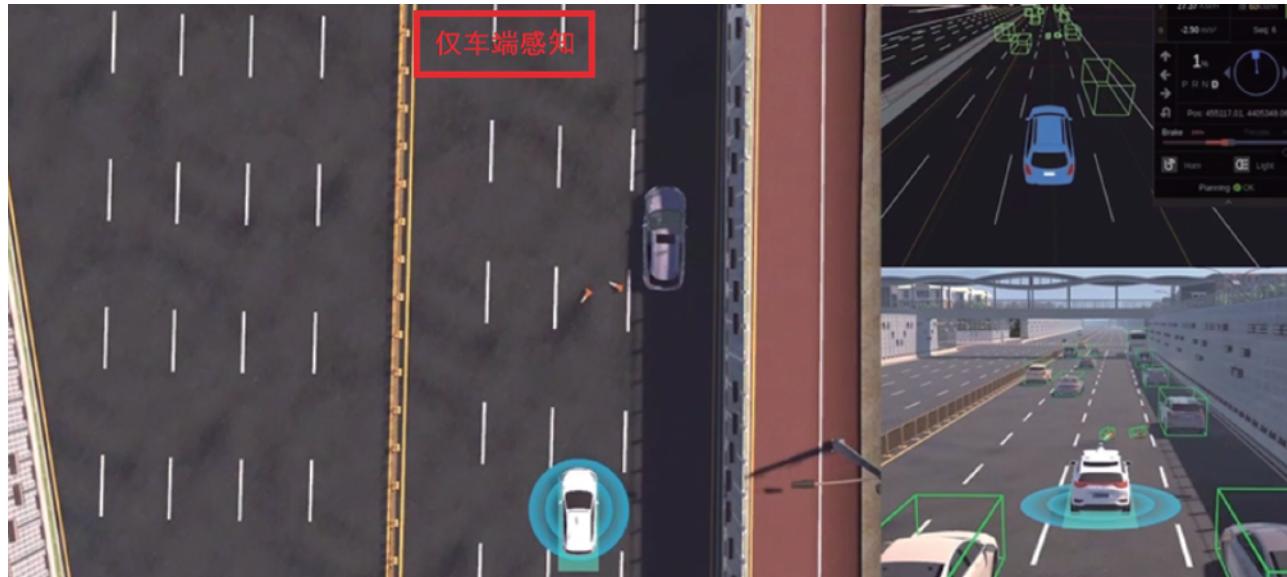


图 4.12 仅依靠AD车端感知无法在远距离对遗撒交通场景精确识别



图 4.13 基于VICAD协同感知的遗撒交通事件识别

4.3.3 路侧信号灯融合感知

通过 VICAD 协同信号灯感知识别，将信号灯灯色和倒计时数据实时发送到车端，路侧识别信号灯灯色和倒计时数据的准确率、端到端时延等满足 C4 级道路指标要求，如表 3.2 所示，核心指标如路侧信号灯灯色倒计数识别准确率不低于 99.9999%，信号灯端到端时延低于 200ms，数据发送频率不低于 8Hz。

具体案例：

AD 信号灯感知问题描述：信号灯数据获取是自动驾驶必须解决的问题，单车智能主要通过视觉 AI 获取，但仍存在很多不足：

- (1) 识别信号灯能力有限，异形信号灯无法识别；
- (2) 车端视角限制，容易被前车遮挡；
- (3) 容易受外界环境限制，尤其是逆光、雾天、扬尘、夜晚等环境；
- (4) 识别的数据维度有限，倒计时信息识别不准。

VICAD 超视距 / 遮挡信号灯协同感知：VICAD 协同感知主要是通过 IoT 信号灯数据接入、路侧多视觉融合感知等技术获

取信号灯灯色和倒计时信息，经数据融合处理后，通过 V2X 发给自动驾驶车辆。VICAD 信号灯协同感知的优势：

- (1) 获取方式不受灯的外观、环境影响；
- (2) 获取到的数据内容丰富（包括灯色、倒计时）；
- (3) 车辆可在很远的距离提前获取信息，提前进行决策控制。

具体案例：

前方大车遮挡信号灯时（如图 4.14 所示），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，以便车辆提前做出预判和决策控制，避免出现闯红灯或者急刹。

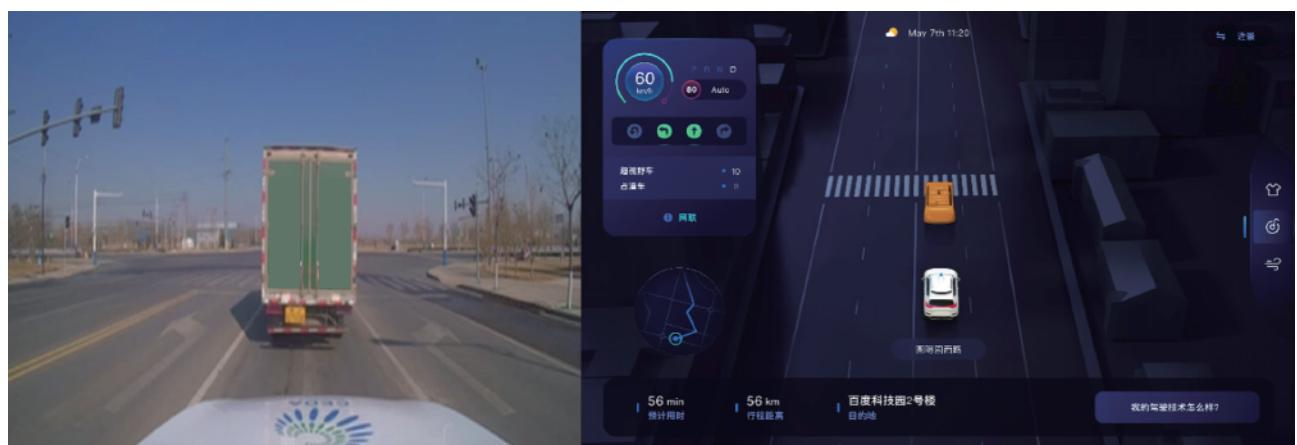
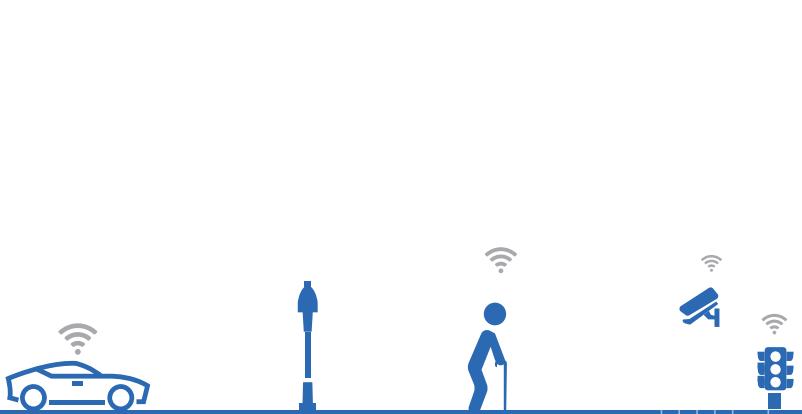


图 4.14 信号灯遮挡场景

05



建设高等级智能道路 助力实现跨行业协同创新



综合国内外车路协同自动驾驶发展情况（见附录 1），全球车路协同自动驾驶相关技术研究、测试示范、法规标准制定总体还处于探索和起步阶段，我国虽然起步较晚，但发展迅速，总体上处在第一阵营地位，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、技术产业优势，建设高等级智能道路，发展车路协同自动驾驶，引领自动驾驶快速规模商业化落地。

建设高等级智能道路，通过连接交通、汽车、电子、通信、互联网等多个行业，除了服务于车路协同自动驾驶外，还能充分发挥智能道路的全要素高精度感知能力、车路云一体化智能化管控和服务能力，探索开展更多创新应用和创新服务，催生出数字经济发展新机遇，加快新型智慧城市建设，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。

SECTION 1

5.1 建设高等级智能道路的中国优势

（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 5.1 所示），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 5.1 国家级智能网联汽车示范区/先导区

时间	批复单位	先导区/示范区
2015.06	工信部	国家智能网联汽车（上海）试点示范区
2015.09	工信部	国家 5G 车联网应用示范区（浙江云栖小镇、乌镇）
2016.01	工信部	国家智能汽车与智慧交通（京冀）示范区
2016.01	工信部	智能汽车集成系统实验区（i-VISTA）（重庆）
2016.11	工信部	国家智能网联汽车与智慧交通吉林（长春）示范区
2016.11	工信部	国家智能网联汽车与智慧交通湖北（武汉）示范区
2017.07	工信部、公安部	国家智能交通综合测试基地（无锡）
2017.11	工信部	国家级中德智能网联汽车四川试验基地（成都）
2018.03	工信部	国家基于宽带移动互联网智能网联汽车与智慧交通应用示范 区（广州）
2018.07	工信部	国家智能网联汽车应用（北方）示范区
2019.05	工信部	国家级江苏（无锡）车联网先导区
2019.12	工信部	国家级天津（西青）车联网先导区
2020.09	长三角三省一市	国家级长三角区域车联网先导区
2020.10	工信部	国家级湖南（长沙）车联网先导区

（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，我国基本明确了车路协同与单车智能结合的发展道路。在单车智能领域，我国与美国有一定差距，同时由于我国路况和交通环境更加复杂，相较而言，将车路协同作为发展智能交通、无人驾驶的杠杆着力点，重点发展车路协同，则有望实现换道超车。

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的一系列政策文件如表 5.2 所示。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）》，确定了 7 类 65 项推动车联网产业发展的任务。天津市发布《天津车联网（智能网联汽车）产业发展行动计划》，提出加快 LTE 网络升级改造和 5G 规模化部署。长沙市发布智能汽车产业“火炬计划”和“头羊计划”，重点支持智能网联车路协同相关企业，给予资金奖励和政策支持，大力推进重点车辆加装车载智能终端产品、城市道路智能化改造、智能网联云平台建设、特定场景智能网联示范应用等。广州市发布《广州市加快推进数字新基建发展三年行动计划（2020-2022 年）》，开展车联网直连通信频谱试运营，促进 C-V2X 规模部署，推动建立粤港澳大湾区跨市、跨境测试及应用协同机制，建设大湾区车路协同试验网。北京市发布《北京市智能网联汽车创新发展行动方案（2019-2022 年）》，提出部署智能路网试点改造工程。四川、河北、上海、浙江、深圳等其他省市地区也都发布了相关推进政策。

表 5.2 近两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7月	交通运输部	《数字交通发展规划纲要》
2019年9月	中共中央、国务院	《交通强国建设纲要》
2019年12月	国务院批准，工信部发布	《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年）（征求意见稿）》
2019年12月	交通部	《推进综合交通运输大数据发展行动纲要（2020-2025年）》
2020年2月	发改委等11部委	《智能汽车创新发展战略》
2020年1-5月	中共中央政治局常务委员会、中共中央全面深化改革委员会、国务院	重要会议重点支持“两新一重”（新型基础设施建设，新型城镇化建设，交通、水利等重大工程建设）建设。
2020年3月	发改委、工信部	《关于组织实施2020年新型基础设施建设工程（宽带网络和5G领域）的通知》
2020年3月	工信部	《关于推动5G加快发展的通知》
2020年3月	科技部、财政部	《关于开展“百城百园”行动的通知》
2020年4月	工信部、公安部、国标委	《国家车联网产业标准体系建设指南（车辆智能管理）》
2020年	住建部、中央网信办、科技部、工业和信息化部	《关于加快推进新型城市基础设施建设的指导意见》
2021年1月	交通部	关于促进道路交通自动驾驶技术发展和应用的指导意见
2021年1月	工信部	《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范（试行）》
2021年3月	工信部、交通部、国标委	《国家车联网产业标准体系建设指南（智能交通相关）》
2021年3月	工信部	宣布成立智能网联汽车推进组（ICV-2035）
2021年3月	全国人大	国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要
2021年3月	国务院	《国家综合立体交通网规划纲要》

（3）产业协同层面，汽车、5G 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。

05 建设高等级智能道路助力实现跨行业协同创新

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，其中汽车年产销量超过 2500 万辆，远超美国巅峰时期的 1700 万辆；中国公路总里程超过 500 万公里，其中高速公路总里程超过 15 万公里，美国公路总里程约 700 万公里，高速公路总里程约 10 万公里。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。每辆车都将成为信息的接收者、中转者、处理器和发出者,全局调配将在一张城市智慧网上运行实现。

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，互联网公司有百度、阿里、腾讯、美团等，通信企业包括华为、大唐等核心企业，这些企业掌握了国际先进的技术和标准话语权。此外我国独立于全球定位系统（GPS）之外的北斗卫星定位系统，也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 5.1 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。

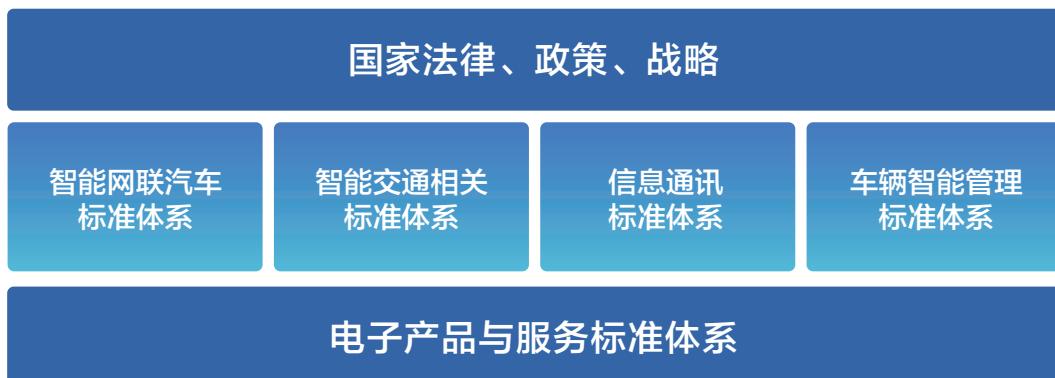


图 5.1 国家车联网产业标准体系总体架构

SECTION 2 5.2 提升城市智能交通管理能力，提高交通出行效率

通过建设高等级智能道路，利用人工智能、驾驶自动化、网络通信、云计算大数据、物联网等技术，将车、路、云、网、图等核心要素实现全面互联互通。构建以车路协同高维数据为重要基础、以通信网络为纽带、以产品服务应用为核心的服务体系，可以实现交通基础设施、交通运输装备与交通运行监控的有机结合，为用户和社会提供立体互联、完备可控、便捷舒适、经济高效的一体化交通运输服务。这是对传统分散式交通技术的一次深刻变革，也是构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通体系的科技支撑，如图 5.2 所示。

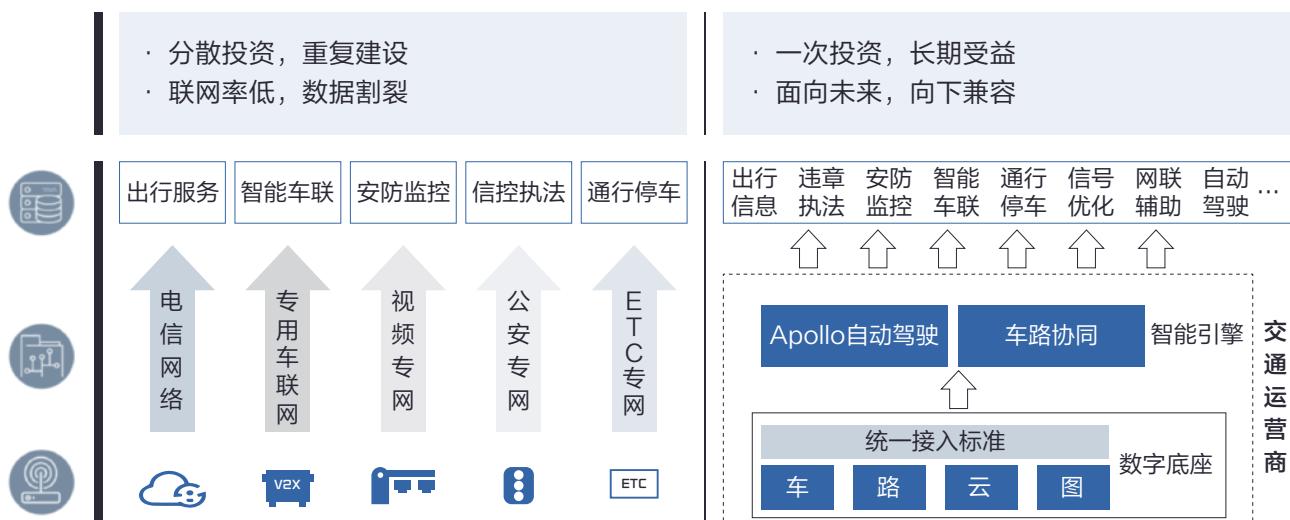


图 5.2 基于高等级智能道路的新型智能交通管理和服务体系

基于高等级智能道路，在进一步提升道路设施基础技术能力、打通设备和平台间数据壁垒的基础上，充分发挥设备和系统的技术潜力，智能交管、智能停车、交通治理、智能公交、智能货运、共享无人车、园区物种等更加丰富的智能交通场景深度结合，探索创新的智能化应用服务，实现合作式、共享化智能交通新模式。新模式的智能交通可以显著提升交通管理运营水平、减少道路安全事故、大幅提升交通出行效率、提供便捷陪伴式服务、降低城市碳排放能耗，有效地释放城市发展潜能，激发数字城市新增需求，带来万亿级规模的智能网联、智能交通新经济，为新一轮经济增长创造新动能。

SECTION 3

5.3 推进高速公路建管养运一体化，建设智慧高速

我国高速公路里程数世界第一，高速公路的数字化、智能化面临着迫切需求，全国各地已先后开展了大量智慧高速的试点建设项目，但仍然存在感知能力薄弱、智慧管控手段不足、资产管理手段匮乏、服务能力手段单一等痛点问题。

通过建设高等级智能高速公路，在开展传统高速公路应用服务的基础上，通过路网大数据实时接入和处理分析，支撑开展车路协同自动驾驶、一体化综合监测、全生命周期数字管养、全天候安全出行服务、智慧服务区、收费服务、应急指挥等服务，最终构建面向智慧高速“建管养运”全生命周期服务体系，其系统总体架构如下图 5.3 所示。



图 5.3 智慧高速总体系统架构

- (1) 全栈式车路协同：打造开放安全的行驶环境，让聪明的车“跑”聪明的路；
- (2) 一体化综合监测：通过多源交通数据融合、分析、预测，实现对高速公路路网运行、预警事件、重点车辆、重点区域、环境气象等一体化综合监测；
- (3) 主动式精细管控：基于数据治理，通过主动监测结合短时预测技术推演事件的发展态势，按照交通运行状况和特殊需求，生成车道级的交通管理和控制方案；
- (4) 全天候安全通行：对重点车辆运行状态、运行轨迹进行实时监测，对隧道、桥梁、边坡、盲区、合流等危险路段加强监测，自动收集道路交通信息和天气数据，并提升应对能力，保障车辆全天候安全通行；
- (5) 伴随式立体服务：精确识别车辆所处高速公路位置点，个性化提供互联网+位置精准信息服务，发送出行时间、路况信息、实时天气、道路事件等定制化信息；
- (6) 全生命数字管养：通过交通基础设施联网监控，覆盖道路、桥梁、隧道、边坡等重点状态采集，对道路设施的关键构件和部位布设物联网传感设备，对运行状态进行实时监测与风险预判，并自动识别隧道积水、边坡塌方、桥梁位移等异常事件，实现高速基础设施日常运营、监测、管养、预警等全生命周期日常监测与应急管控。

SECTION 4

5.4 提高城市综合治理能力，构建安全节能新型智慧城市

高等级智能道路是未来智慧城市建设的最重要基础设施，是构建数字孪生城市的关键基础，通过道路全息感知、边云智能决策等手段，能够实现物与物、物与人、物与网络、人与人之间的泛在连接，可以提升传统基础设施的建设质量、运行效率、服务水平和管理水平，解决城市供需平衡面临的一系列突出问题，助力城市高质量发展。从支撑新型智慧城市发展的角度，基于高等级智能道路，可针对以下重点内容进行探索研究：

(1) 通过智能道路构建城市全面感知体系，提升城市安全管理能力

在智能道路建设的基础上，通过智能道路实现对城市的全面感知（智能化）、态势监测（可视化）、事件预警（可控化），提高城市综合治理和安全管理能力。加快智慧多功能杆建设，完善物联网感知手段。加快集照明控制、WIFI天线基站、视频监控管理、广告屏播控、城区环境实时监测、紧急呼叫、水位监测、充电桩和井盖监测等功能于一体的智慧多功能杆建设，形成共建共享、集约高效的城市物联网感知网络建设模式，提升公共安全、城市管理、道路交通、生态环境等领域的智能感知水平。建立时空基础设施，实现全市遥感航测、定位、定位、物探、视频、雷达等各类地理空间数据和时空大数据的统一标准、统一汇聚和统一服务。建立开放式城市感知平台，加强感知数据标准化处理和共享共用，以及感知设备的规范化接入和数据汇聚，结合互联网数据，实现对物理社会和虚拟社会的全面感知，形成智慧城市全量信息视图。支持企业开展新型智能终端应用，支持企业在社区、公共场所、办公楼宇等区域部署智能服务终端，支持智能机器人、智能支付、虚拟现实等智能化应用。

(2) 通过智能道路支撑构建节能环保体系，助力实现碳中和碳达峰

通过建设高等级智能道路对构建节能环保新型智慧城市具有极大的促进作用，具体体现在：

- 1、通过道路智能化实现设备复用，避免重复建设，节约政府财政支出，节省电力能源；
- 2、通过高等级智能道路实现多杆合一，灯杆兼具照明、通信、V2X服务等多重功能，实现节能的目的；
- 3、高等级智能道路致力于实现高等级自动驾驶规模商业化落地，可以显著提高交通出行效率，减少有害气体排放，对于中国实现碳达峰和碳中和具有极大的促进作用。

充分利用高等级智能道路的全面感知能力、大数据汇聚处理能力、车路协同服务能力等，基于已有和新发展的交通方式，综合匹配乘客的出行时间、出行成本和对环境的影响，采用一种或多种交通方式服务乘客完成空间位置移动，提供一站式出行服务，实现便捷换乘、便捷支付、共享出行。

06



总结与展望



SECTION 1

6.1 观点总结

综合来看：

(1) 车路协同自动驾驶是自动驾驶规模商业化落地的必然趋势。

单车智能自动驾驶规模商业化落地面临较大挑战，而车路协同自动驾驶可以解决自动驾驶安全、ODD 限制、经济性等一系列问题，助力自动驾驶车辆在环境感知、计算决策和控制执行等方面的能力升级，加速自动驾驶应用成熟落地，是未来自动驾驶发展的必然选择。

(2) 发展车路协同自动驾驶需要高等级智能道路。

从服务于不同等级自动驾驶车辆规模商业化落地的角度，需要建设具备协同感知（全量高精度协同感知）、协同决策、协同控制能力的智能化道路，部署建设配套智能设施（感知设施、计算设施、通信设施、定位设施等）和云计算网络（MEC、区域云或中心云）等，全面支撑车路协同自动驾驶技术演进、规模化测试验证和商业化落地。

(3) 建设部署高等级智能道路“面向未来，兼容当下”，具有显著经济性和巨大社会效益。

建设高等级智能道路不仅可以“面向未来”满足车路协同自动驾驶规模商业化落地的发展需求，还可以“兼容当下”降维解决低等级自动驾驶和车联网的发展需求，支撑开展智能交通管理、智慧出行服务、乃至新型智慧城市建设。

SECTION 2

6.2 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、由局部到全面逐渐发展的过程：首先，需要实现关键技术突破，如VICAD系统、车路高效通信、云控平台等；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；第三，需要在政策法规和标准方面提供足够的保障支持。

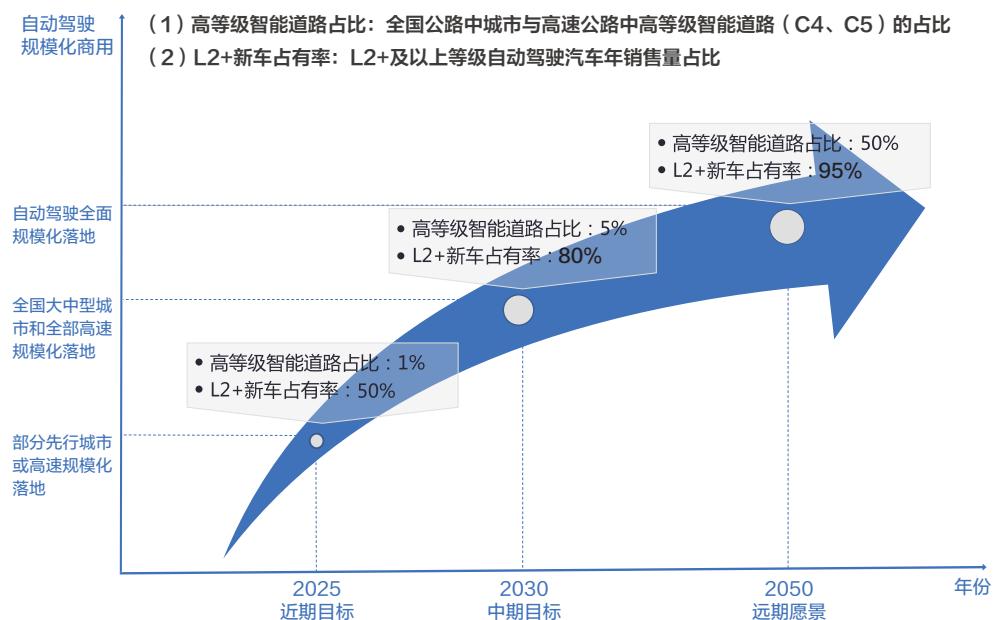


图 6.1 车路协同自动驾驶规模商业化落地愿景目标

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 6.1 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，L2+ 及以上等级的自动驾驶车辆可以在高等级智能道路上连续实现无人自动驾驶，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 1%，L2+ 及以上等级新车年销量占比达到 50%。

(2) 中期目标：

预计到 2030 年，大中型城市和部分高速公路完成了高等级智能化道路建设，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，该阶段城市和高速公路中 C4 及以上高等级智能道路里程达到 5%，L2+ 及以上新车年销量占比达到 80%。

(3) 远期目标：

预计到本世纪中叶，L2+ 及以上自动驾驶车辆在全国主要城市和重要高速公路智能道路上都能实现连续自动驾驶，该阶段 C4 及以上高等级智能道路里程达到 50%，L2+ 及以上新车年销量占比达到 95%。

SECTION 3

6.3 发展建议

全球范围内车路协同自动驾驶尚处在探索与发展的初级阶段，还有许多挑战与困难需要行业多方协同，共同攻克。

(1) 自动驾驶与车路协同深度融合所形成的复杂系统，需要构建基于系统工程的功能安全和预期功能安全体系。自动驾驶与车路协同深度融合所形成的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（北京、上海等超大城市）、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。

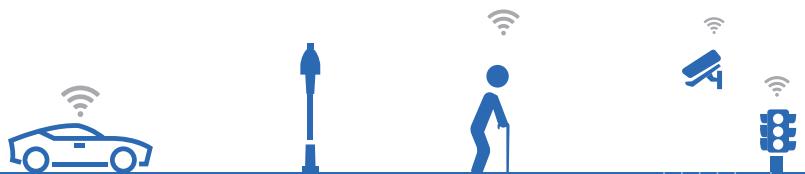
(2) 道路智能化与驾驶智能化发展不够协同，需要建设高等级智能化道路，服务于车路协同自动驾驶、智能交通管理和**智慧城市建设。**车路协同自动驾驶是未来的必然趋势，通过车路协同能够保障驾驶安全、加快自动驾驶的规模商业化落地，也可为智能交通管理、智慧出行和智慧城市建设等提供更多应用服务。目前国内部分城市和高速公路已经规划建设了一批自动驾驶封闭测试场、开放测试道路，但这些都还处在小范围测试验证和应用示范阶段，道路的感知定位、车路信息交互等方面的能力还不能满足自动驾驶的需求，更不具备协同决策或协同控制的能力，难以满足高等级自动驾驶对数据精度、数据质量的要求，因此需要建设高等级智能化道路，以推进自动驾驶规模商业化落地应用。

(3) 需要探索更加高效、经济的车路通信技术方案，以解决车端渗透率低难以规模商业化推广的一系列问题。在高效传输方面，基于 LTE-V2X 的车载通信设备和路侧通信终端能够满足 DAYI 和 DAYII 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 Uu，时延要求 10ms 以内，传输可靠性不低于 99.9%。在经济性方面，基于 LTE-V2X 通信终端的价格是影响车端渗透率和路侧规模化部署的重要因素，要实现自动驾驶的规模商业化落地，迫切需要 5G Uu 等更具经济性的车路通信技术方案。

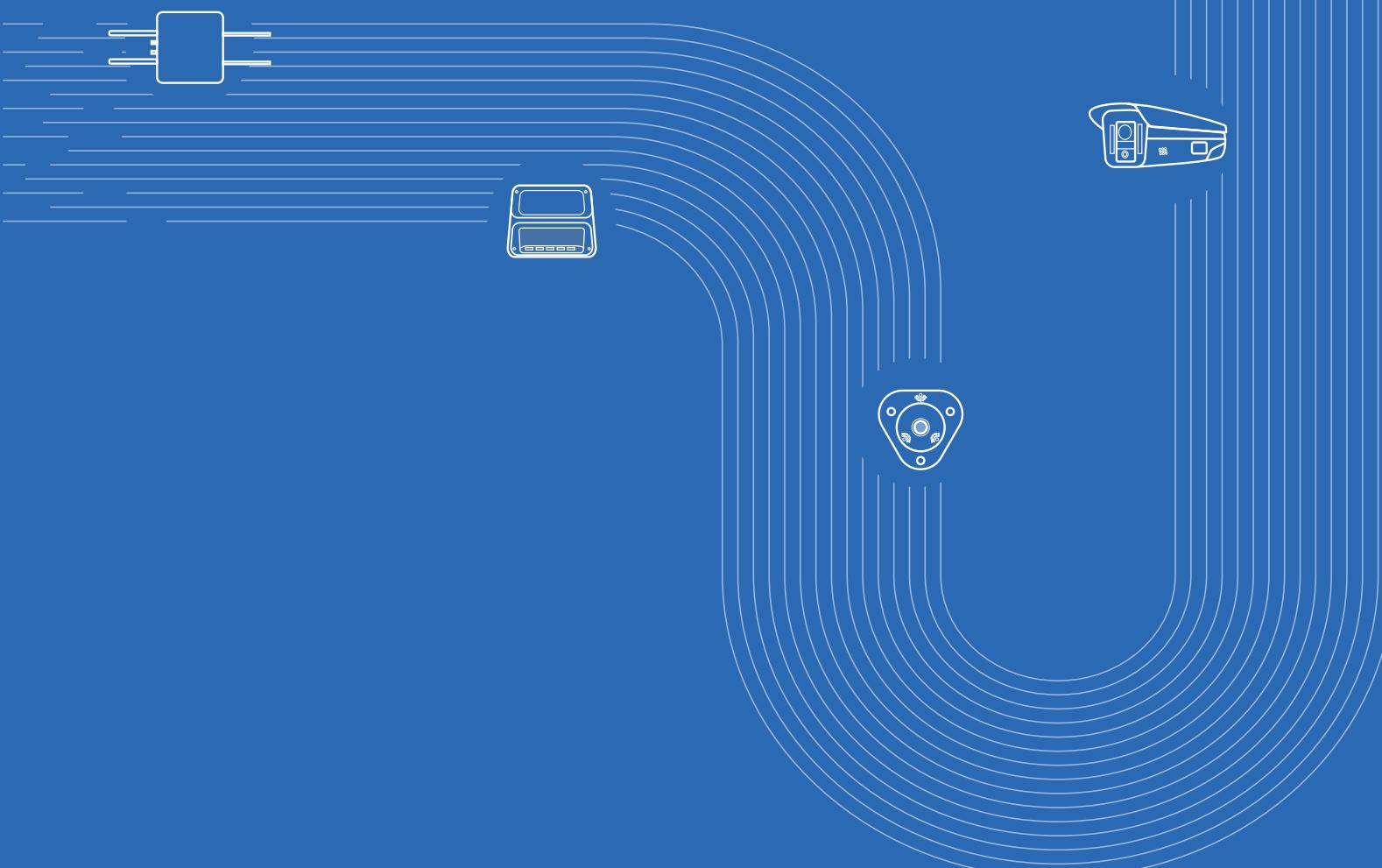
(4) 车路协同自动驾驶需要跨行业、跨地域互联互通，并不断探索开展应用服务创新和商业模式创新。在互联互通方面，车路协同自动驾驶在具体推进过程中还有很多影响或限制因素，比如车辆数据开放应用、道路感知设施复用、道路信号控制数据使用、道路收费系统打通等，需要开展深入研究并逐步推进。在应用服务创新和商业模式创新方面，要学习 DSRC 推广应用好的做法，也要总结其不足和局限性，充分发挥 C-V2X 可演进的优势，在服务于车路协同自动驾驶的基础上，探索更多应用服务和商业模式。

(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，但总体上与国外还有不小的差距，影响自动驾驶汽车研发、生产、销售和商业化应用的相关法律法规仍需要加快研究和制定。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。



附录

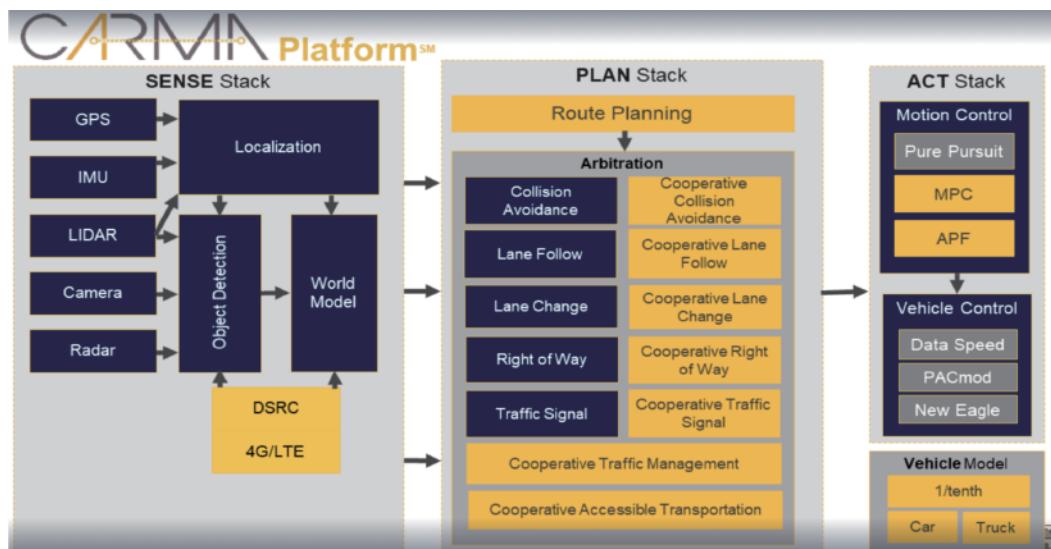


附录1：国外车路协同自动驾驶发展现状

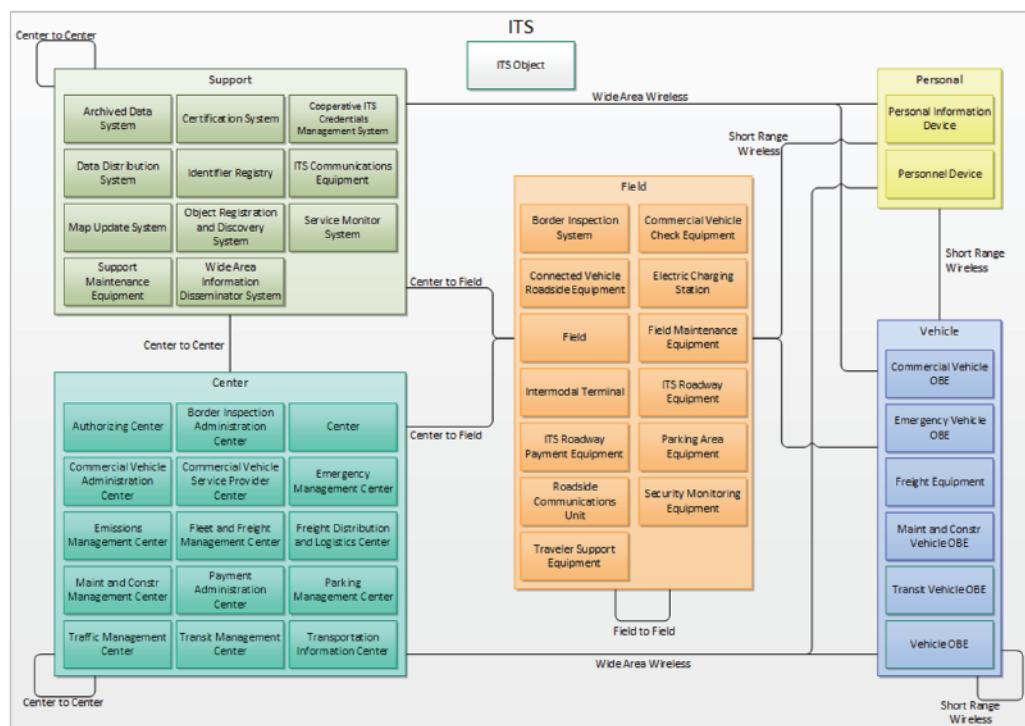
美国、欧洲和日本等主要发达国家和地区在发展单车智能自动驾驶的同时，对车路协同自动驾驶也给予了高度关注，在政策法规、技术研发、示范应用等方面开展了一系列创新探索。

(1) 美国在保持单车智能自动驾驶领先优势的基础上，开始重视车路协同

美国自动驾驶目前还是以单车智能自动驾驶为主，为保持自动驾驶的全球领先地位，美国交通部（DOT）连续发布《自动驾驶战略 V1.0-V4.0》、《智能交通系统战略计划（2010-2014）、（2015-2019）、（2020 - 2025）》等顶层规划，支持开展自动驾驶技术研究、测试验证和商业化探索。同时，美国也开始重视发展车路协同自动驾驶，提出了网联自动驾驶（CAV）的概念，美国联邦公路管理局（FHWA）开发了 CARMA 平台和 CARMA 云，以支持协同驾驶自动化（CDA）的研究和开发；美国通信委员会（FCC）为 C-V2X 分配了 5.905-5.925GHz 专用频谱，并把 5.895-5.905GHz 频段的 10MHz 从 DSRC 转给 C-V2X。在车辆与智能交通系统深度融合方面，由 DOT 主导的美国国家 ITS 参考架构（The National ITS Reference Architecture）ARC-IT 已经演进到了 9.0 版本，考虑了车路协同自动驾驶。



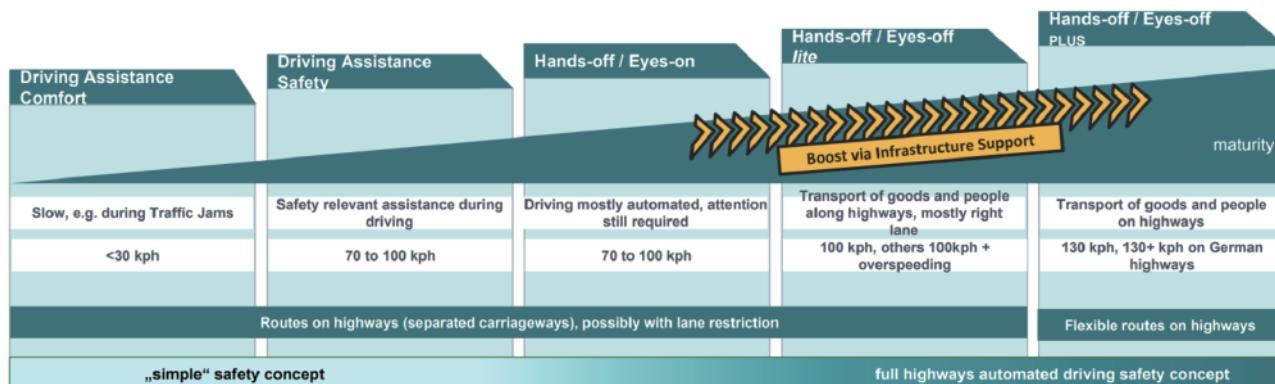
附图 1 CARMA Platform 总体架构



附图 2 ARC-IT物理视图

(2) 欧洲高度重视智能化与网联化协同发展

欧洲在发展单车智能的同时，高度重视单车智能与车路协同自动驾驶协同发展。欧盟道路运输研究咨询委员会(ERTRAC)在2019年发布了《Connected Automated Driving Roadmap》，提出的目标是：2020年通过云计算、IOT、大数据和V2X推动网联自动驾驶发展；2022年网联自动驾驶实现与大数据可信平台开放数据交互；2025年下一代V2X提升L4自动驾驶能力。为推进车路协同落地，ERTRAC明确提出了ISAD(Infrastructure Support levels for Automated Driving)，对道路基础设施进行了等级划分，支持自动驾驶发展；同时欧盟也启动了大量的示范验证项目，包括Horizon 2020计划、eSafety计划等，eSafety计划包括PReVENT、I-way(intelligent cooperative system in cars for road)、Car2car等若干子项目。



附图3 ERTRAC认为道路基础设施是高速公路自动驾驶的重要基础

(3) 日本车路协同基础设施存在较大优势

日本在车路协同方面，2007年就完成了Smartway东京场区公路的试验，2009年完成大规模测试和推广应用。2011年，基于Smartway项目发展的ITS Spot System在全国高速公路上开始安装使用，已经在全国安装了1600个ITS Spot System路侧设备，城际高速安装间隔为10至15公里，城市高速路安装间隔约为4公里。ITS Spot System为智能车路有效提供了自适应巡航、安全行驶、盲区检测、道路汇集援助、电子付费等服务，这些道路基础设施为发展车路协同自动驾驶提供了良好基础。

综合美、欧、日车路协同自动驾驶的发展情况来看，这些国家在车路协同自动驾驶领域研究起步早、技术积累雄厚、实践经验丰富，但也存在一些问题：

- (1) V2X标准存在摇摆和缺乏持续演进，不利于产业协同发展。美国政府和美国车企在车联网通信方式上存在较大分歧，政府和部分车企坚持使用DSRC，而另一部分车企则坚持C-V2X，这种摇摆不定将制约其车联网产业的发展。
- (2) 应用场景和商业模式探索不够。基于DSRC应用场景集中在驾驶安全和交通效率提升方面，由于路侧能力有限，无法开展更多车路协同应用，难以推进规模化商业化应用。
- (3) 缺乏政策持续推进，试点示范规模不足。美国DSRC试点示范虽然覆盖了26个州，但绝大部分都只是小规模试点，政府的投入难以推动DSRC大规模商用。

APPENDIX 2

附录2：车路协同带来的以高维数据为代表的智能要素

通过向自动驾驶引入车路协同，带来了以高维度数据为代表的新智能要素。

附录2.1 数据高维

比较单车智能自动驾驶和车路协同路侧智能的数据维度和特性，具体内容如正文 2.1.2 数据特性表格所示。高维数据特性可以分为新的空间、时间、类型以及其他维度特性的几方面。

2.1.1 空间方面，主要是单车设备和路侧设备的部署位置和角度可选范围有差异，分成范围、视角、盲区的三个小类别。相比单车智能的数据，路侧智能具备另一套维度的空间数据。

(1) 范围方面，车载设备的部署位置是单车局部范围覆盖，并且在使用同等设备的前提下可以更致密、更精确地采集局部数据；路侧设备的部署位置是多点位，从而可以进行全局范围的超视距覆盖，并且有条件更加因地制宜地投入更多种类和数量的设备进行布设。

(2) 视角方面，车载设备是第一视角，有一定的优势，但也容易被视角问题局限；路侧设备安装于路侧杆架上，可以具备多视角能力，并且目前部署形态多为车载设备所不具备的俯视视角。

(3) 盲区方面，车载设备传感器在车上安装存在静态盲区，也容易发生动态遮挡盲区，并且一旦由车辆或建筑物等遮挡产生盲区，车载多传感器融合的各冗余传感器很可能同时被遮挡，只有通过更加复杂的移动视角对盲区进行推理来做一定弥补；而路侧传感器一方面安装高于交通参与者，另一方面有条件由多个点位间不同角度交叉覆盖，所以不易被遮挡产生盲区，即使被遮挡时，还可以由连续空间的持续检测，来支持盲区内的交通参与者推理。

2.1.2 时间方面，主要是位置和时间构成的动 / 静态属性和数据处理的时间范围属性差异。相比单车智能的数据，增加的车路协同路侧数据有条件成为时间方面的高维数据。

(1) 动 / 静态方面，观测设备的位置与时间属性叠加构成 / 静态观测的差异。车载设备的观测点是动态移动的，有观测点不断变化的复杂度，但也有随着第一视角的移动，对同一物体和环境观测可以前后印证的优势；路侧设备的观测点是静态的，可以长时间持续观测同一位置来分辨差异，对于未曾预先训练的物体也具备一定识别能力。

(2) 时间范围方面，车载设备的观测和处理一般是基于单车的实时数据，由于不具备长时间针对目标和场景的观测和处理条件，历史数据或体现为模型，或体现为类似马尔可夫过程的较简单信息；路侧设施具备长时间的持续观测，结合路侧和云端基础设施的数据，可以较长期数据做推理，具备以本地化、个性化的方式预测未来等能力。

(3) 类型方面是多源、多层次的数据特性，车端智能的数据类型是单车传感器，优点是实时一手数据；路侧智能除了路侧传感器以外，还可以广泛地对接交通交管、场景方系统、用户方系统等多源多层次的数据，全面且易做高等级推理（如灾害、异常等）。

(4) 设备能力方面，车载设备藏于车内，须体积和能耗较小、耐高温振动电磁，因此能力受限；路侧设备架设于路侧或计算中心，可选择不同的形态种类，因此上限更高。

从以上介绍的数据特性，可以看到车路协同引入了高维度且与单车有正交属性的数据。在这样的数据基础上，由路侧差异性算力以及引入的差异性算法，无论是实时在线的处理系统，还是离线的挖掘训练系统都可以受益，车路协同融合后的智能系统会具备新的智能特性，达到新的智能高度。

附录2.2 算力高维

配合高维度数据，车路协同也带来了相匹配的更强算力，这也使得算法和机制有了更广阔的空间。

其中算力特性如正文 2.1.2 算力维度表格所示。

算力的特性，可以分为移动和电源属性、解耦调度属性、通信属性的几方面特性。

(1) 移动属性方面，单车智能的算力需要车辆搭载，所以有车载现场计算的收益，也受移动算力所限；路侧智能的算力由

于固定部署，即使是边缘计算，网络也是有线连接，而边缘机房和数据中心的条件就更加优越，算力的上限高自由度大。

(2) 电源属性方面，单车智能的算力使用电池，使得能耗受限、算力受限；路侧智能由于电网供电，所以能耗不受限，有条件使用强大的算力。

(3) 解耦调度方面，单车智能的算力是专用绑定在车载计算资源内的，繁忙时有更多计算需求也无法扩张，空闲时计算能力是也无法收缩转让；路侧智能的算力由于有计算基础设施的解耦作用，所以可以根据繁忙空闲，按需进行资源单元间的空间调度、对于高峰低谷的时间调度，在线处理和离线处理的调度，持久化和还原的调度，结合设备、MEC、云算力，可以提供兼顾专用和共享灵活的算力。

(4) 通信方面，单车智能算力的通信网络分成车内和车云两段。车内是车载以太网和 CAN 等车载形态通信网络，所以传感器和计算单元等车载设备间的通信是简单直接的。目前单车智能的车云通信，使用的是未经面向车路通信优化的普通移动运营商网络，成本低廉普及率高，但是网络通信质量不够可靠，延迟、带宽、接入设备数量、覆盖等特性缺乏保障。路侧智能的通信有两段，车路间的通信是通过 LTE-V、NR-V2X、5G 等车路协同通信方式，具备较高的高可靠、低延迟、高带宽、大并发特性，而路云之间的通信一般是有线网络，可选用光纤等高速率通信方式，从而将端管云连成一体，提供灵活的计算平台。这使得平台具有广泛的作用，一方面可以为在线协同以及建管养运等深层业务提供支持，另一方面也可以为离线挖掘、训练、仿真提供支持，还可以帮助系统建设成为大数据、学习成长型体系提供基础。

附录2.3 算法高维

另一方面，算法和协作特性如正文 2.1.2 算法维度表格所示。

算法和协同特性有场景化高精、分工服务化、全局大数据、协同智能的几个方面。

(1) 场景化高精方面，单车智能的算法和机制，依赖推理的高级语义和地图，由于自动驾驶的场景推理能力以及高精地图，在研发发布时就已经确定下来，所以策略处理能力偏静态，即以一套复杂场景策略处理所有场景；路侧智能具备基础设施的设计和参与度，可以直接按照场景下需求，细粒度地因场景制宜调度算法配合协同机制进行处理。

(2) 分工服务化方面，单车智能的能力会在单车完成闭环，有专用且直接的优点，也有相应限制；路侧智能可以通过基础设施的形态为交通参与者提供分布式算法和协同服务，所以服务灵活而且广泛。

(3) 全局大数据方面，单车智能算法是实时处理，有低延时等优势，但是在海量资源的使用能力上，仅具备使用地图和模型等离线模型化资源的能力；路侧智能具备边端云融合的大数据分析处理能力，一方面可以将路、车以及环境的海量数据汇聚到集群，也可以使用在线离线挖掘训练仿真机制，使得系统可以学习和迭代，并通过路侧和新基建设施提供服务以及 OTA 赋能提升自动驾驶能力。

(4) 协同智能方面，单车智能的协同是单向的、按照预先设定的博弈推理；路侧智能是全面层次的协同，可以是信息状态协同(如状态、事件、感知、定位)、意图预测协同(如轨迹规划交互)、决策规划协同(如引导、调度)、控制协同(如编队、脱困)，即使道路上的交通参与者未达到 100% 的高等级自动驾驶渗透率，只要交通参与者可以遵循路侧智能的引导，依然可以形成高等级的协同网络，形成高等级的群智智能。

APPENDIX 3

附录3：安全评价模型

附录3.1 场景分布模型

在跟驰场景中，超参数 $\{\theta\}=\{v_1, v_2, h_2\}$ ，其中 v_1 为前车速度， v_2 为跟车速度， h_2 为车头时距， d_1 为前车与路侧设备之间的距离， d_2 为两车距离并可以通过 $d_2=v_2 h_2$ 计算。其中两车速度 v 均满足对数正态分布， h_2 的分布为负指数分布， d_1 假设为常值 [10]：

$$q(v) = \frac{1}{v\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(lnv-\mu)^2}{2\sigma^2}}, v > 0$$

上式中， μ, σ 为基本参数，通过真实交通流数据拟合得出，它们的公式表达如下

$$\mu = \left(\prod_{i=1}^n v_i \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\sigma = e^{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\frac{v_i}{\mu}))^2}}$$

假定前车速度和后车速度符合范围 $v \in [v_{min}, v_{max}]$ ，对速度概率分布归一化处理计算得到前车的速度概率

$$P(v_1) = \frac{1}{\int_{v_{min}}^{v_{max}} q(v) dv} q(v_1)$$

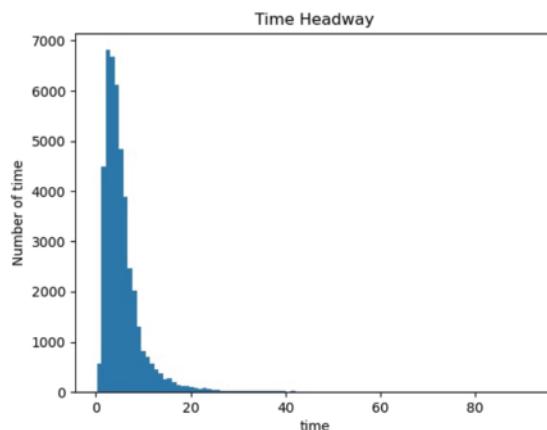
同理求出 v_2 的速度概率 $P(v_2)$ 。车头时距 h_2 的概率分布为

$$P(h) = \lambda e^{-\lambda h}, \lambda \text{ 为参数}$$

其中 $\lambda = \frac{1}{\bar{h}}$ ，其中 \bar{h} 指的是平均车头时距。根据文献[10]，在自由交通流状态下，车头时距一般取值范围为 [1.889, 2.344] (单位：s)，本白皮书文取 $\lambda = \frac{1}{2}$ 。

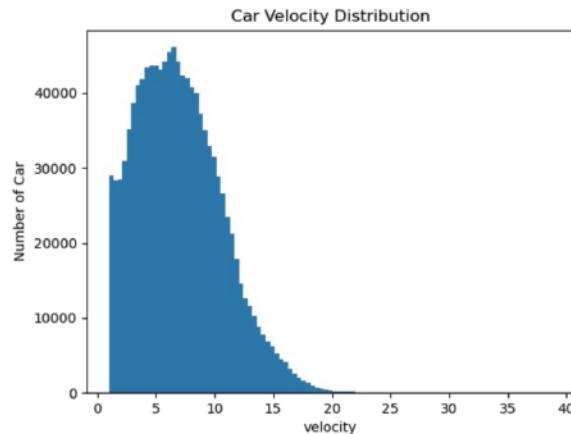
由百度的测试数据拟合可以得到

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



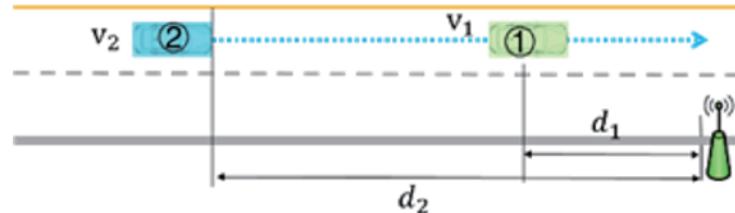
车速分布为

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



由于 v_1, v_2, h_2 为独立变量，故跟驰场景的分布概率为

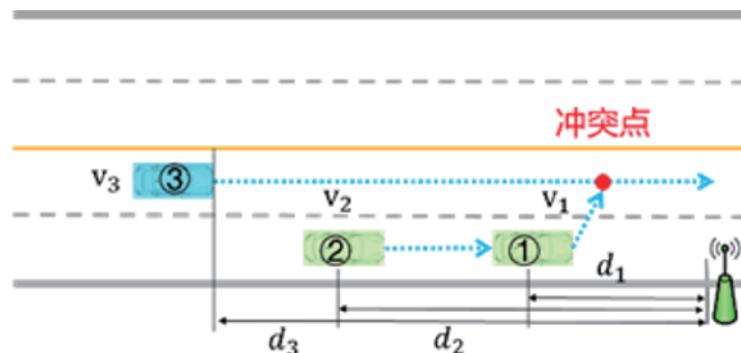
$$P(v_1, v_2, h_2) = P(v_1) \cdot P(v_2) \cdot P(h_2)$$



附图 4 直行

在换道场景中，超参数 $\{\theta\}=\{v_1, v_2, v_3, h_2, h_3\}$ ，其中 v_3 为跟车3速度， v_2 为遮挡车2速度， v_1 为换道车1速度， d_1 为换道车1与路侧设备之间的距离，假定为常值， h_2 为遮挡车2与换道车1之间的车头时距， h_3 为遮挡车2与跟车1之间的车头时距，三车之间的速度分布均满足跟驰场景中的速度对数正态分布， h_2 满足跟驰场景中的车头时距负指数分布， h_3 假定为均匀分布 $s(h) = \frac{1}{h_{max} - h_{min}}$ ，故换道场景的分布概率为

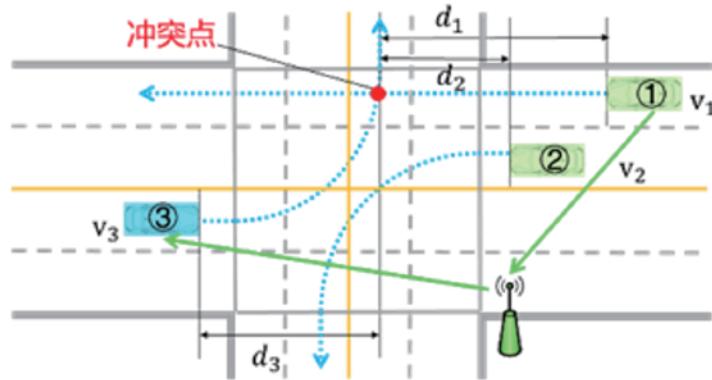
$$P(v_1, v_2, v_3, d_1, h_2, h_3) = P(v_1) \cdot P(v_2) \cdot P(v_3) \cdot P(h_2) \cdot P(h_3)$$



附图 5 左转

在左转场景中，超参数 $\{\theta\}=\{v_1, v_2, v_3, d_1, d_2, d_3\}$ ，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，本白皮书文定义左转车 3 与对向直行车 1 之间发生碰撞的点为冲突点， 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。根据真实车辆数据状态分布，可推算出 v_1, v_2 的分布近似满足对数正态分布， v_3 的分布近似满足泊松分布， $1/d_1, 1/d_2$ 近似满足泊松分布 [9]， d_3 假设为均匀分布，左转场景的分布概率为

$$P(v_1, v_2, v_3, d_1, d_2, d_3) = P(v_1) \cdot P(v_2) \cdot P(v_3) \cdot P(d_1) \cdot P(d_2) \cdot P(d_3)$$



附图 6 左转

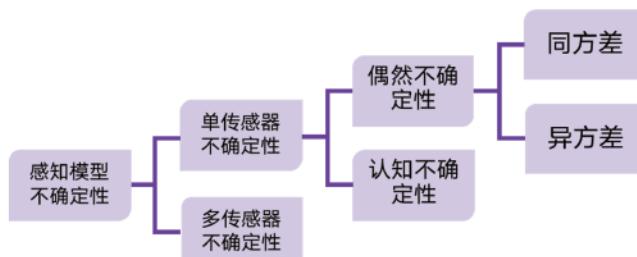
附录3.2 感知模型

感知的不确定性是单车智能和车路协同产生驾驶安全差异的核心因素，包括硬件检测的不确定性、软件模型的不确定性与多传感器融合的不确定性。对这类不确定性，可使用贝叶斯神经网络对感知模型进行误差表征与估计。针对传感器的硬件检测不确定性，依照广泛用于风险评估和可靠性分析的偶然不确定性分析方法，可以对传感器的检测过程进行建模并通过使用最大似然估计方法来估计其不确定性分布；针对传感器的软件模型不确定性，引入在主动学习领域中具有较高影响力的认知不确定性分析方法，利用皮尔逊相关系数分析得到感知算法不确定性与被测物体距离、被测物体被遮挡比例成线性正相关；针对多传感器融合的不确定性，由于贝叶斯网络的不确定性输出服从正态分布，仅考虑采用不同感知模型的不同传感器的感知结果级融合，其不确定性等同于多个正态分布不确定性的叠加。

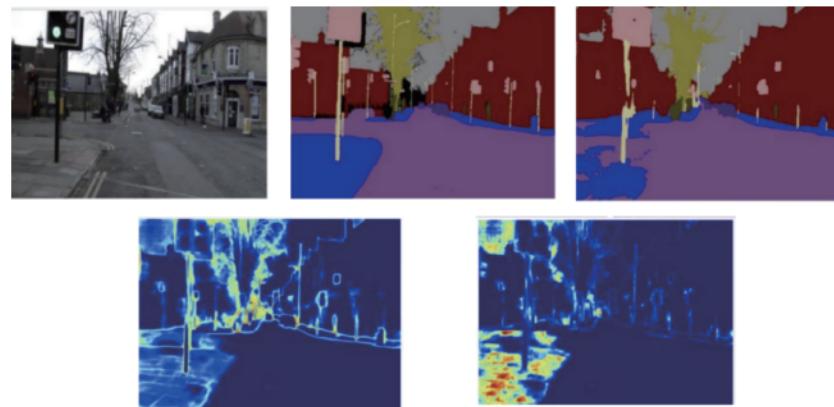
分析感知模型不确定度，具体包括：

(1) 评估同方差偶然不确定度；(2) 评估异方差任意不确定度 (3) 评估认知不确定度。

在风险分析和可靠性分析方法中，通常将不确定性通常分为两种：一种为偶然不确定性 (aleatoric uncertainty)，另外一种为认知不确定性 (epistemic uncertainty)。这种划分的依据为不确定性的来源。偶然不确定性的来源通常为感知模型中的自然随机噪声，包括受传感器分辨率等传感器内在品质相关参数影响的随机噪声，以及受传感器成像特性影响的随机噪声等。认知不确定性的来源是感知模型缺少知识，或数据而带来的不确定性，通常由规则训练样本数据分布与实际被检测样本数据分布差异过大导致。通常在不改变模型的前提下，偶然不确定是无法减少的，而认知不确定会随着训练数据量的增加而减少。

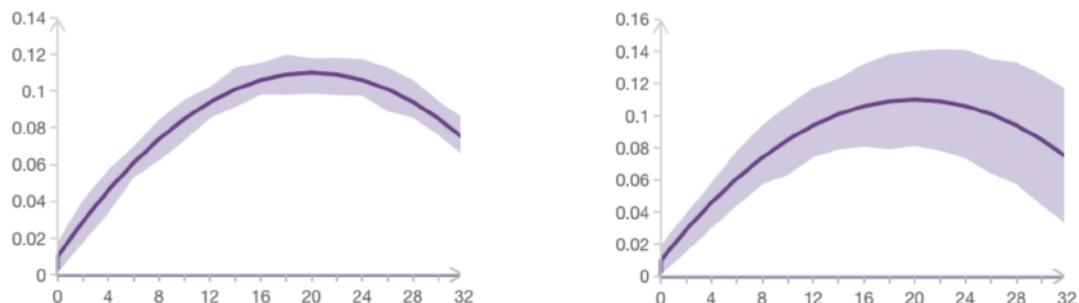


附图 7 感知不确定性模型分类



附图 8 语义分割任务中的偶然/认知不确定性

如附图 8, 上左图片为原图, 上中为标注真值, 上右为语义分割的结果。下左图片为偶然不确定性, 下右图片为认知不确定性。通过对分析图 X、图 Y 可得知, 偶然不确定性的主要原因是被测目标远离摄像头, 导致的画面模糊; 知识不确定性主要原因是被测物体与训练集数据分布有偏差。导致偶然不确定性的因素是多样化的。对于不同类型的感知任务以及传感器类型导致偶然不确定性的因素难以一一枚举的, 很难根据每一个影响因素分别进行建模。因此, 按照不确定度的分布, 可以将偶然不确定性拆分成两个组分量: 同方差不确定性和异方差不确定性。其中同方差不确定度在不同的输入下保持为常数项, 异方差不确定度会随着输入的变化而变化。



附图 9 同方差不确定性分量与异方差不确定性分量

如附图 9, 左图为同方差分量, 右图为异方差分量。横轴为模型输入量, 纵轴为不确定度。深色线表示不确定性的平均值, 浅色区域表示方差范围。通常使用贝叶斯神经网络方法计算不确定度, 对于分类问题, 可以表示为 [2]:

$$p(y \mid f^W(x)) = \text{Softmax}(f^W(x))$$

其中, y 代表模型的输出, x 代表模型的输入, W 代表知识不确定性为 0 的情况下贝叶斯神经网络的权重, $f^W(x)$ 表示模型在参数为 W 条件下、输入为 x 的输出结果, Softmax 代表神经网络中 Softmax 层的作用。

用 \hat{W} 表示对 W 的估计。则知识不确定性表示为 $f^W(x)$ 与 $f^{\hat{W}}(x)$ 的距离。

根据 [3] 中介绍的 MC-dropout 方法, 我们可以估计出分类任务中的误差分布。通过统计分析, 可以得到以下结论:

1. 知识不确定性与感知目标欧几里得距离皮尔逊相关系数接近 0, 不相关。
2. 偶然不确定度的异方差部分与感知目标欧几里得距离皮尔逊相关系数接近 1, 成正相关。

因此, 在本文白皮书中我们感知不确定性与欧几里得距离成正相关。在给定条件下, 特定传感器的偶然不确定与认知不确定之和为总不确定性 (Total Uncertainty, TU)。

在物体在传感器 x 轴 $0 \sim 50m$ 范围内, y 和 z 保持恒定, 设 $TU(x) = 0.004x + 0.05$ 。

附录3.3 车辆交互模型

针对车辆的跟驰加减速行为，我们使用了使用广泛应用的智能驾驶模型 (IDM)；针对车辆的换道行为，使用三阶段车道变更模型，车道变更可分为三个阶段：间距（范围）感知阶段、车道变更决策阶段和车道变更执行阶段。针对无保护左转交通场景，使用三阶段左转模型，可分为左转感知阶段、左转决策阶段和左转执行阶段。

在跟驰场景中，由附录 3.2 可知：感知不确定度是一个跟随距离变化的函数，即 $P_w(d)=0.004d+0.05$ （推导见附录 3.2），即当自车有一定概率感知到与前车距离，如果感知到，认为在此之后的时间序列中感知一直存在且不会消失；若没有感知到，则自车保持当前状态的速度行驶。

若感知到与前车的距离，根据 IDM(Intelligent Driving Model) 车辆交互模型，使用如下的公式对自车进行加速度控制。计算控制系数 α ，根据 α 判断自车当前应当完成加速或减速或保持当前状态等操作。

$$\alpha = \left[1 - \omega \left(\frac{v}{v_1} \right)^2 - (1 - \omega) \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right], s^* = \frac{v_2^2}{2b_{com}}$$

上式中， ω 为控制参数，本白皮书文中使用 $\omega=1/2$

$$a_{act} = \begin{cases} \alpha b_m, \alpha < 0 \\ \alpha a_m, \alpha > 0 \end{cases}$$

上式中 s^* 为期望距离，即当 $v=v_1=v_2, s^*=s$ 时，为控制模型的稳态解。此时认为达到了理想跟车状态，在该情况下 s^* 的值满足条件：前车意外突然减速至 0，后车仍可采取舒适减速度减速所需的安全距离。

同时加入关键动作时间指标 T_{act} ，关键动作时间描述为感知生效且完成关键动作的时间，即感知到前车减速且自车完成对应的减速动作的时间， T_{act} 的分布服从 $P(T_{act})$ ，计算公式如下：

$$P(t_1) = P_S(t_1) \prod_{i=0}^{\frac{t_1}{\Delta T}-1} (1 - P_S(i\Delta T))$$

在换道冲突场景中，关键动作时间用 t_1, t_2 表示，关键动作表示感知到前车换道，自车同时完成减速动作， t_1 的含义为前车变道的时间，假定其服从均匀分布

$$t_1 \sim U(t_{min}, t_{max})$$

t_2 的含义为感知生效的时间，计算方式如下：

$$P(t_2) = P_S(t_2) \prod_{i=0}^{\frac{t_2}{\Delta T}-1} (1 - P_S(i\Delta T))$$

在无保护左转场景中，关键动作时间分为直行感知生效时间 t_1 ，左转感知生效时间 t_2 ，分别的计算方式为

$$P(t_1) = P_S(t_1) \prod_{i=0}^{\frac{t_1}{\Delta T}-1} (1 - P_S(i\Delta T))$$

$$P(t_2) = P_S(t_2) \prod_{i=0}^{\frac{t_2}{\Delta T}-1} (1 - P_S(i\Delta T))$$

若感知生效，则根据 $\Delta T = \frac{d_1}{v_1} - \frac{\theta_3}{w_3}$ 计算左转车和直行车到达冲突点的时间差，若时间差过小，则左转车应减速停车避让直行车，若时间差过大，则左转车加速通过左转路口即可。

附录3.4 安全评价模型

TTC 一般可以定义为：如果车辆不改变当前的运动特性，则控制车辆与前方跟随车辆相撞所需要的时间。也可以理解为采取某种对策以避免碰撞的时间衡量标准。如果后车没有采取相应的对策来响应前车的突然减速，则会发生追尾冲突。TTC 值越小，意味着发生碰撞的可能性越高，即此种场景越危险。

$$TTC = \frac{S}{\Delta V}$$

由于 TTC 评价中未考虑加速度对跟车模型的影响，因此采用 MTTC 的安全评价标准更符合现实情况。MTTC 的计算方式如下，在确定采取加速度动作 $a_{act} = a_2$ 后，每一个当前状态下均有一个 MTTC 的值， $MTTC = f(v_1, v_2, a_{act}, s)$ ，对一段时间序列的 MTTC 求平均值。作为该状态下的 MTTC 值，与 MTTC 的标准阈值 4s 比较，高于该阈值时认为该状态下较安全，低于时认为处于危险状态。

V	$V_F > V_L$			$V_F \leq V_L$			
	a	$a_L > 0$	$a_L < 0$	$a_L = 0$	a	$a_L > 0$	$a_L < 0$
$a_F > 0$	P	C	C	P	C	C	P
$a_F < 0$	P	P	P	I	P	P	I
$a_F = 0$	P	C	C	I	C	C	I

C：冲突发生；P：可能冲突；I：不可能发生冲突

判断是否可能发生冲突完全是基于两车的轨迹参数，包括相对距离、相对速度和相对加速度的计算方法如下：

$$\begin{aligned} V_F t + \frac{1}{2} a_F t^2 &\geq D + V_L t + \frac{1}{2} a_L t^2 \\ \frac{1}{2} \Delta a t^2 + \Delta V t - D &\geq 0 \end{aligned}$$

MTTC: modified time to collision

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{-\Delta V - \sqrt{\Delta V^2 + 2\Delta a D}}{\Delta a} \\ t_2 &= \frac{-\Delta V + \sqrt{\Delta V^2 + 2\Delta a D}}{\Delta a} \end{aligned}$$

$$MTTC = \begin{cases} t_2, & t_1 \geq t_2 > 0 \\ t_1, & t_2 > t_1 > 0 \\ t_1, & t_1 > 0 \text{ and } t_2 \leq 0 \\ t_2, & t_1 \leq 0 \text{ and } t_2 > 0 \\ \frac{S}{\Delta V}, & \Delta a = 0 \text{ and } \Delta V > 0 \end{cases}$$

$$MTTC = (\sum_{t=0}^{t=t_k} MTTC_{t_a})/k$$

一般来说，如果 TTC 较小，则会发生碰撞，因自车没有足够的时间做出响应并采取措施来避免碰撞。然而，很难确定 TTC 值实际上有多短，因不同的驾驶车辆具备不同的响应能力，并且车辆的性能、交通状况也会影响 TTC。以往的研究也对 TTC 阈值的选择提出了不同的建议。例如，Van der Horst (1991) 和 Farber (1991) 建议 TTC 值为 4 秒，以区分道路上的安全和不舒适情况。Hogema 和 Janssen (1996) 建议，对于没有自动巡航控制系统的驾驶员，TTC 最小值为 3.5 秒，对于配备车辆的驾驶员，TTC 最小值为 2.6 秒。

目前没有广泛认同的一个标准，但是设定一个合理的阈值仍然必要。在本研究中，设计的仿真环境中为无事故环境，同时模拟驾驶员也工作在理想情况，因此选择一个相对较长的 TTC 是合理的。

在跟驰和换道场景中，通过计算平均 MTTC 值表征该场景下的安全性，越高的 MTTC 代表当前的安全性越高。在无保护左转中，使用通过路口的时间差评价左转的安全性

$$\Delta T = \frac{d_1}{v_1} - \frac{\theta_3}{w_3}$$

ΔT 值越大，表明直行车离冲突点就越远，即此时采取左转策略越安全，当 ΔT 较小时，则左转车减速停车等待直行车通过。

缩略语

AD: Autonomous Driving 自动驾驶

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

AV: Autonomous Vehicle 自动驾驶车辆

AI: Artificial Intelligence 人工智能

BSM: Basic Safety Message 基础安全消息

C-V2X: Cellular -V2X 蜂窝车联网

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

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

DSRC: Dedicated Short Range Communication 专用短程通信

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

GPS: Global Positioning System 全球定位系统

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 智能驾驶模型

IMT: International Mobile Telecommunications 国际移动通信

IoT: Internet of Things 物联网

ISAD: Infrastructure Support levels for Automated Driving 自动驾驶的基础设施支持级别

ISO: International Standard Organization 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

MaaS: Mobility as a Service 出行即服务

MEC: Mobile Edge Computing 移动边缘计算

OBU: On Board Unit 车载单元

ODD: Operational Design Domain 运行设计域

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

SAE: Society of Automotive Engineers 美国汽车工程师学会

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

SPAT: Signal phase timing message 交通灯相位与时序消息

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

TTC: Time to Collision 碰撞时间

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

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] Kiureghian, A. Der, & Ditlevsen, O. (2009). Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural Safety*, 31(2), 105 – 112. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>
- [2] Kendall, A., & Gal, Y. (2017). What uncertainties do we need in Bayesian deep learning for computer vision? *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017-December(Nips), 5575 – 5585.
- [3] Gal, Y., & Ghahramani, Z. (2016). Dropout as a Bayesian Approximation: Appendix. *33rd International Conference on Machine Learning*, ICML 2016, 3, 1661 – 1680.
- [4] Kiureghian, A. Der, & Ditlevsen, O. (2009). Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural Safety*, 31(2), 105 – 112. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>
- [5] Kendall, A., & Gal, Y. (2017). What uncertainties do we need in Bayesian deep learning for computer vision? *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017-December(Nips), 5575 – 5585.
- [6] Feng, D., Rosenbaum, L., & Dietmayer, K. (2018). Towards Safe Autonomous Driving: Capture Uncertainty in the Deep Neural Network for Lidar 3D Vehicle Detection. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings*, ITSC, 2018-November, 3266 – 3273. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569814>
- [7] Kryda, M., Berk, M., Buschardt, B., & Straub, D. (2021). Validating an Approach to Assess Sensor Perception Reliabilities Without Ground Truth. *SAE Technical Paper Series*, 1, 1 – 10. <https://doi.org/10.4271/2021-01-0080>
- [8] Lu, K., Sun, C., Fu, Q., & Zhu, Q. (2019). Heterogeneous sensor fusion based on Copula theory and importance sampling. *Iet Radar Sonar and Navigation*, 13, 1943-1950.
- [9] Wang X, Zhao D, Peng H, et al. Analysis of unprotected intersection left-turn conflicts based on naturalistic driving data[C]//2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2017: 218-223.
- [10] Treiber, Martin; Hennecke, Ansgar; Helbing, Dirk (2000), "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations", *Physical Review E*, 62 (2): 1805 – 1824, arXiv:cond-mat/0002177, Bibcode:2000PhRvE..62.1805T, doi:10.1103/PhysRevE.62.1805, PMID 11088643
- [11] S. E. Lee, C. B. E. Olsen, and W. W. Wierwille, “A Comprehensive Examination of Naturalistic Lane-Changes,” NHTSA, DOT HS 809 702, 2004
- [12] J. C. Hayward, “Near-miss determination through use of a scale of danger,” *Highway Research Record*, no. 384, pp. 24 – 34, 1972.
- [13] C. Hydén, The Development of a Method for Traffic Safety Evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique, vol. 70 of *Bulletin* (University of Lund, Lund Institute of Technology, Department of Traffic Planning and Engineering), 1987.
- [14] Kaan Ozbay, Hong Yang, Bekir Bartın, Sandeep Mudigonda. Derivation and Validation of New Simulation-Based Surrogate Safety Measure[J]. *Transportation Research Record*, 2008, 2083(1).
- [15] 喻丹,吴义虎,何霞,郭文莲.一种基于动态期望车头时距的跟驰模型[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2007(04):25-28.
- [16] SAE J3016.Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles[S].
- [17] The European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC) : Connected Automated Driving Roadmap[R].
- [18] 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.

参考文献

- [19] 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.
 - [20] CSAE 53-2019,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]
 - [21] 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].
 - [22] CSAE 158-2020, 基于车路协同的高等级自动驾驶数据交互内容[S].
 - [23] 汽车驾驶自动化分级（报批稿）[S]. 中国工业和信息化部, 2020.
 - [24] 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.
 - [25] 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.
 - [26] GB/T 31024.1-2014,合作式智能运输系统专用短程通信[S].
 - [27] 2019年智能网联汽车标准化工作要点.工信部, 2019.
 - [28] 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.
 - [29] 智慧高速公路分级（征求意见稿）[S]. 中国智能交通协会,2021.
 - [30] IMT-2020 (5G) 推进组C-V2X工作组: 车联网白皮书
 - [31] IMT-2020 (5G) 推进组C-V2X工作组: MEC与C-V2X融合应用场景白皮书
 - [32] 交通运输部公路科学研究院: 中国智能交通系统体系框架（第二版）
 - [33] USDOT: Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation.
 - [34] 边缘计算产业联盟和工业互联网产业联盟: 边缘计算参考架构3.0
 - [35] 工业和信息化部信息化和软件服务业司: 信息物理系统白皮书
 - [36] 中国电子技术标准化研究院:信息物理系统标准化白皮书
 - [37] GB/T 33474-2016物联网 参考体系结构
 - [38] ISO/IEC 30141 Internet of Things Reference architecture
 - [39] 工业互联网产业联盟:工业互联网体系架构2.0
 - [40] The Industrial Internet of Things: Reference Architecture IIC:PUB:G1:V1.80
 - [41] TAFIM : The Open Group Architecture Framework (TOGAF)
 - [42] 3GPP TS 23.285 Architecture enhancements for V2X services (Release 15)
 - [43] 3GPP TS 23.501 System Architecture for the 5G System; Stage 2 (Release 15)
 - [44] 3GPP TR 23.786 Study on architecture enhancements for EPS and 5G System to support advanced V2X services (Release 16)
 - [45] 3GPP TS 38.201 NR; Physical layer; General description (Release 15)
 - [46] 3GPP TS 38.300 NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (Release 15)
 - [47] 3GPP TR 22.886 Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services (Release 16)
 - [48] ETSI WP11 Mobile Edge Computing A key technology towards 5G
 - [49] ETSI WP24 MEC Deployments in 4G and Evolution Towards 5G
 - [50] ETSI WP28 MEC in 5G Networks
 - [51] 5GAA T-170219 Whitepaper-Edge Computing
 - [52] 5GAA White Paper CV2X Roadmap
 - [53] 5GCAR_D4.1_v1.0 Initial design of 5G V2X system level architecture and security framework
 - [54] 5G-PPP Automotive-WG-White-Paper: A study on 5G V2X Deployment
 - [55] NGMN: Final Deliverable V2X White Paper v1.0
 - [56] USDOT FHWA-JPO-17-473 Comprehensive Maintenance and Operations Plan - Wyoming
 - [57] USDOT FHWA-JPO-17-467 System Architecture Document -WYDOT CV Pilot
 - [58] USDOT FHWA-JPO-17-468 System Design Document (SDD) - Wyoming CV Pilot
 - [59] YD/T 3400-2018 基于LTE的车联网无线通信技术 总体技术要求
-

- [60] 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
- [61] ISO/PAS 21448. Road vehicles — Safety of the Intended Functionality
- [62] ISO 26262 Road vehicles — Functional safety
- [63] SAE J3061. Cybersecurity Guidebook for Cyber-Physical Vehicle Systems
- [64] ISO/SAE FDIS 21434.Road vehicles — Cybersecurity engineering.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 智慧高速公路分级（征求意见稿）[S]. 中国智能交通协会,2021.
- [69] 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.
- [70] 迈克斯·泰格马克. 生命3.0[M]. 浙江教育出版社·湛庐文化,2018.
- [71] 百度人工智能专利白皮书[R]. 百度, 2021.
- [72] 余贵珍, 周彬, 王阳, 周亦威. 自动驾驶系统设计及应用 [M]. 清华大学出版社,2019.
- [73] 杨世春, 肖赟, 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 甄先通, 黄坚, 王亮, 夏添. 自动驾驶汽车环境感知. 清华大学出版社,2020.
- [77] 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.
- [78] 李瑞敏, 章立辉. 城市交通信号控制. [M]. 清华大学出版社,2015.
- [79] 车联网：新基建重要方向，5G应用明珠[R].中信建投证券, 2020.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 张云, 李茹, 焦伟赟,等. 自动驾驶功能安全标准化研究[J]. 中国标准化, 2020(11).
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox. Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series)[M]. The MIT Press,2005.
- [90] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series)[M]. The MIT Press,2016.
- [91] J Li, Zhang Y , Shi M , et al. Collision Avoidance Strategy Supported by LTE-V-Based Vehicle Automation and Communication Systems for Car Following[J]. 清华大学学报自然科学版（英文版）, 2020.
- [92] Long L , Festag A , Baldessari R , et al. V2X Communication and Intersection Safety[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [93] Waymo Safety Report On the Road to Fully Self-Driving[R], WAYMO 2021

- [94] Waymo' s Safety Methodologies and Safety Readiness Determinations[R], WAYMO 2020
- [95] Matthew S, Tom D, Trent V, Francesca F, Henning H. Waymo Public Road Safety Performance Data[R], WAYMO 2020
- [96] John M. S, Kristofer D. K, Tom D, Christopher A, Alexander O, Trent V. Waymo Simulated Driving Behavior in Reconstructed Fatal Crashes within an Autonomous Vehicle Operating Domain[R], 2021
- [97] 2020年1-5月乘用车新车上险量ADAS市场数据报告[R], 高工智能汽车研究院, 2020
- [98] 智能网联汽车技术路线图2.0[R], 中国汽车工程学会, 2020
- [99] RAND:Vehicle Technology: A Guide for Policymakers[R]. 2016
- [100] Jincheng Lu,Meng Xia,Xu Gao,Xipeng Yang,Tianran Tao,Hao Meng,Wei Zhang,Xiao Tan,Yifeng Shi,Guanbin Li,Errui Ding. Robust and Online Vehicle Counting at Crowded Intersections[J], CVPR 2021
- [101] Jin Ye,Xipeng Yang,Shuai Kang,yue he,Weiming Zhang,Leping Huang,Min Yue Jiang,Wei Zhang,Yifeng Shi,Meng Xia,Xiao Tan. A Robust MTMC Tracking System for AI-City Challenge 2021[J], CVPR 2021
- [102] Wenhao Wu, Yuxiang Zhao, Yanwu Xu, Xiao Tan, Dongliang He, Zhikang Zou, Jin Ye, Yingying Li, Mingde Yao, Dong Zichao, Yifeng Shi. DSANet: Dynamic Segment Aggregation Network for Video-Level Representation Learning[J], ACMMM 2021
- [103] Xiaoqing Ye, Liang Du, Yifeng Shi, Yingying Li, Xiao Tan, Jianfeng Feng, Errui Ding, and Shilei Wen. Monocular 3D Object Detection via Feature Domain Adaptation[J], ECCV 2020
- [104] 中国重点城市道路网结构画像报告[R], 公安部道路交通安全研究中心, 北京世纪高通科技有限公司, 中国城市规划设计研究院, 2020

免责声明

清华大学智能产业研究院及阿波罗智联(北京)科技有限公司不对本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。任何情况下，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。



AIR

清华大学 智能产业研究院
Institute for AI Industry Research, Tsinghua University