



# 自动驾驶汽车交通安全 白皮书



## 编写组

(排名不分先后，按姓氏笔划排序)

王云鹏

王学平

王 翀

王文霞

王兴昌

王 辰

朱西产

任 翰

刘 洋

李 洵

李明阳

李旭东

李晓虎

连晓威

辛 宁

宋德王

林 淼

姜 珊

耿 磊

柴智勇

徐宝强

睦思敏

魏 东

# 专家寄语

软件定义汽车背景下，自动驾驶技术快速发展，车辆系统日趋复杂、智能，对交通安全的影响也日益广泛。为了实现对新技术的包容审慎监管，需要确定一些基本的安全原则，如在自动驾驶系统中引入交通规则，利用事故场景库考核自动驾驶对危险、复杂交通场景的应对能力等。本书在这方面做了有益的探索。

——公安部道路交通安全研究中心机动车辆安全研究室 周文辉 主任

安全可靠是自动驾驶商业应用的前提，高效便捷是道路运输自动驾驶发展的目标，以安全、高效为导向，以中国国情特点为条件，分类分级分阶段推动商业应用，促进自动驾驶可持续发展，支撑交通强国建设。

——交通运输部公路科学研究院汽车运输研究中心 周炜 主任

自动驾驶功能的实现相对简单，但其完善却是一个长期的过程。我们将以咬定青山不放松的执着和行百里者半于九十的清醒，主动适配技术产业发展，动态完善智能网联汽车标准体系，有效支撑自动驾驶安全可靠运行。

——中国汽车技术研究中心有限公司汽车标准化研究所 王兆 所长

安全是汽车工业发展的永恒主题，自动驾驶汽车的出现为实现道路交通“零事故、零伤亡”的美好愿景提供了可能，诚然现有的自动驾驶技术方案还存在着种种不尽人意的的问题，但作为新生事物，相信其在发展过程中所产生的问题也必将随着发展而得到解决。

——司法鉴定科学研究院道路交通事故鉴定研究室 冯浩 主任

高算力芯片和 AI 算法开启了智能汽车产业化变革。分心驾驶、疲劳驾驶是人类驾驶交通事故的主因，自动驾驶能够消除人类驾驶员的事故隐患，大大提高道路交通安全。但是智能汽车在环境感知和交通认知能力方面仍然有待提高。对于汽车，安全是 1，其他是 0，在 1 前面的 0，毫无价值，只有确保安全，在 1 后面的 0 才能提升自动驾驶汽车的价值。造汽车，必须确保安全。

——同济大学汽车学院 朱西产 教授

# 前言

---

随着人工智能、物联网、高性能计算等新一代技术的发展，汽车产业乃至整个交通出行领域正在发生一场革命，曾经出现在科幻影视作品中的自动驾驶汽车已经来到，并正在加速来到每个人的身边。作为国际公认的汽车未来发展方向，自动驾驶的意义不仅在于汽车行业的技术升级，因其涉及的产业链长、价值创造空间巨大，已成为各国的重要战略高地与汽车产业和科技产业跨界、竞合的必争之地。

出行平安不仅是公众美好的期盼，也是自动驾驶汽车设计与应用的前提条件。随着自动驾驶技术及示范应用的快速发展，自动驾驶交通安全引发了政府、行业的高度重视，公众的关注度也在不断地提升。更高效、更便捷、更智能、更安全的交通环境已成为社会各界的共同期待。

中国汽车技术研究中心有限公司联合同济大学和百度 Apollo，共同编写《自动驾驶汽车交通安全白皮书》，结合自动驾驶汽车交通安全相关政策法规、安全技术、当前中国道路交通事故情况下自动驾驶与人类驾驶汽车的安全性对比，对自动驾驶汽车的交通安全进行分析，并提出建议和展望，为社会各界提供参考，助力我国自动驾驶汽车交通安全的良好发展。

本白皮书的编写得到了以下专家的指导和支持，在此一并致谢（排名不分先后）：

公安部道路交通安全研究中心机动车辆安全研究室 周文辉 主任

交通运输部公路科学研究院汽车运输研究中心 周炜 主任

中国汽车技术研究中心有限公司汽车标准化研究所 王兆 所长

司法鉴定科学研究院道路交通事故鉴定研究室 冯浩 主任

同济大学汽车学院 朱西产 教授

限于目前自动驾驶产业发展阶段和编者的研究高度与角度，本白皮书仍有诸多待改进之处，欢迎各位领导、专家与业界同仁提出指导意见和建议，共同推进自动驾驶交通安全的发展。

2021年12月



# 目 录

<b>第 1 章 自动驾驶时代势不可挡，政策法规保障安全发展</b>	<b>1</b>
1.1 自动驾驶有望提升道路交通安全	1
1.2 顶层设计推动产业蓬勃发展	2
1.3 政策法规保障自动驾驶安全发展	5
<b>第 2 章 自动驾驶汽车的安全技术特点</b>	<b>10</b>
2.1 自动驾驶主系统安全	11
2.2 自动驾驶安全冗余系统	14
2.3 远程云代驾	16
2.4 自动驾驶汽车测试与验证	17
<b>第 3 章 自动驾驶与传统驾驶汽车安全对比</b>	<b>24</b>
3.1 人类驾驶事故场景分析	25
3.2 人类驾驶事故原因分析	33
3.3 自动驾驶汽车与人类驾驶汽车安全性对比分析	39
3.4 自动驾驶汽车事故分析	42
<b>第 4 章 总结展望</b>	<b>58</b>
4.1 观点总结	59
4.2 展望建议	60

# 01

## 自动驾驶时代势不可挡 政策法规保障安全发展



## 1.1 自动驾驶有望提升道路交通安全



据世界卫生组织《2018 年全球道路安全现状报告》统计，全球每年约有 135 万人死于道路交通事故，相当于每 24 秒就有 1 人因交通事故丧命，另外还有 2000 万至 5000 万人受到非致命伤害。道路交通伤害已经成为全球第八大死因。道路交通事故问题在我国同样严峻，据《中华人民共和国道路交通事故统计年报》统计，2017-2020 年我国交通事故年均发生 23.51 万次，年均死亡人数达 6.29 万人，另有 24.38 万人受到非致命伤害。道路交通事故已成为我国儿童意外伤害的第二大死因，并作为唯一非病因素位列中国人员死亡原因前十。

据统计，约 90% 以上的道路交通事故是驾驶员人为因素导致的。消除和减少驾驶员违法违规操作、驾驶经验不足和自身缺陷或感知限制等不良人为因素，无疑对减少交通事故，降低道路交通风险具有重大价值。

随着传感技术的发展与信息技术在汽车领域应用的加深，汽车正由人工操控的机械产品向智能化系统控制的智能产品转变。在智能产品提高汽车行驶效率和人们驾乘体验的同时，通过自动驾驶技术减少驾驶中的人为失误，提高车辆感知和操控能力，让驾驶更安全，成为了自动驾驶汽车研发的重要初衷。

目前搭载高级驾驶辅助系统（ADAS）的 L2 级及以下辅助驾驶汽车已实现产业化应用，L3 级有条件自动驾驶化的汽车正在产业化的道路上发展。但要实现无人驾驶，不再需驾驶员的操控和注意力，则需要 L4 级及以上自动驾驶汽车才能真正实现（无特别说明，本白皮书内自动驾驶汽车指达到驾驶自动化 L4 级及以上汽车）。

目前，L4 级自动驾驶汽车已在码头、机场、分级开放道路等特定运用场所开展了较多测试和运营活动。2021 年 10 月 15 日，北京市智能网联汽车政策先行区正式开放无人化道路测试，并为企业发放了首批无人化道路测试牌照，L4 级自动驾驶汽车已允许开展“主驾无人，副驾有人”的公开城市道路测试。未来，被批准测试车辆还将被允许从“副驾有人”转为“后排有人”，直至“车内无人”。随着自动驾驶汽车不断通过安全验证，最终，自动驾驶汽车将实现“全无人驾驶”的应用目标。

面对驾驶位空空的自动驾驶汽车，我们不禁发出疑问：自动驾驶安全吗？自动驾驶能让道路交通更加安全吗？

自汽车开始普及，交通事故问题一直伴随人类至今。随着汽车安全标准的不断推动，安全技术能力的不断提升，社会逐渐接纳了适当的风险，定义了相对安全的标准。虽然自动驾驶并不直接等于 0 事故，但与传统汽车相比，自动驾驶汽车具备更全面的环境感知能力，更高效的自动规划决策能力和更及时更精准的驾驶操控能力，能够脱离人类驾驶，理论上能够避免驾驶人为因素导致的 90%以上道路交通事故，显著促进道路交通安全水平的提升。

后文，我们将结合现阶段自动驾驶汽车相关交通安全政策法规、安全技术保障措施、中国道路交通事故情况、部分相关事故或事件，对自动驾驶交通安全进行详细的研究与探讨。

## 1.2 顶层设计推动产业蓬勃发展

我国汽车产业整体规模保持世界前列，自动驾驶产业受到了政府的重视和支持，具有多元化的应用场景、良好的道路条件、快速发展的通信技术良好产业发展土壤。相较于早期更注重单车智能的欧美国家，我国的自动驾驶汽车的发展始终强调智能网联、车路协同，近年来已初步形成《汽车产业中长期发展规划》、《智能汽车创新发展战略》、《中国制造 2025》、《交通强国建设纲要》等系列智能网联汽车发展战略，并在国际产生影响。

### 发展愿景

到 2025 年我国高度自动驾驶汽车将实现限定区域和特定场景商业化应用，力争 2035 年高度自动驾驶汽车实现规模化应用。

——《新能源汽车产业发展规划（2021~2035 年）》



以百度为例,2021年12月,百度自动驾驶道路测试里程已超过2100万公里。根据《2021百度自动驾驶出行服务半年报告》,高质量测试覆盖30+城市,覆盖面积超过600平方公里,推进上车点超过1000个,服务人次达40万+,用户评价五星好评占比达95.3%。自2021年11月25日起,百度获得北京市高级别自动驾驶示范区批复的首批商业化试点,68台“萝卜快跑”自动驾驶车辆已启动商业试点收费服务,覆盖64平方公里的范围。

2021年在抗击新冠疫情中,百度、文远知行、小马智行、广汽集团等企业纷纷驰援抗疫,投入自动驾驶汽车用于防疫物资的配送、保温送餐、移动零售、移动服务、人员接驳等不同场景,充分发挥了运输高效、安全可控的优势。不仅解决了疫区运力不足和最后一公里配送的难题,同时还降低了流行病的交叉感染等风险,成为科技“战疫”的新亮点。

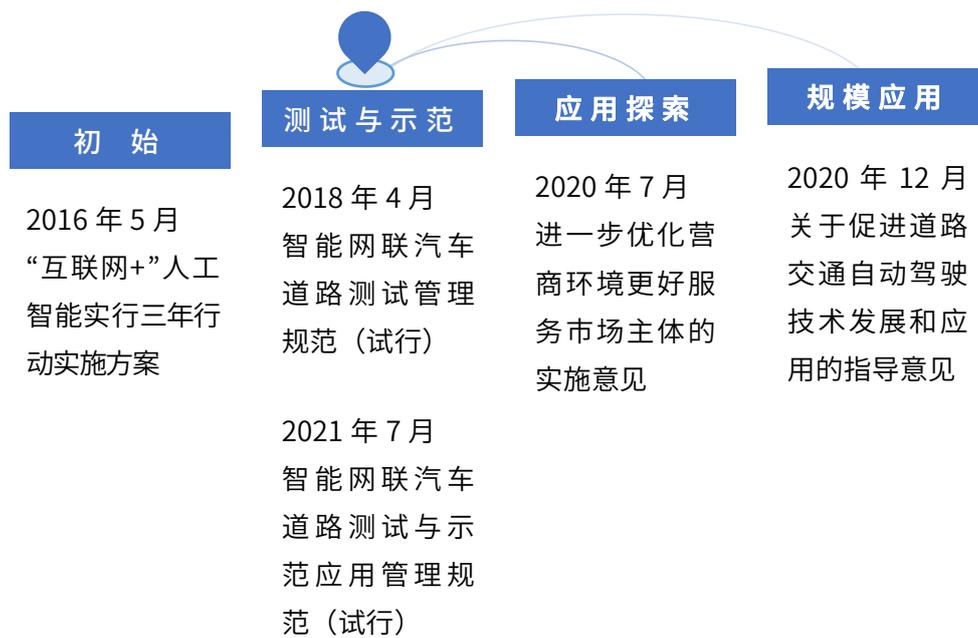


图 1.2 自动驾驶支援抗疫场景

自动驾驶汽车已经来到人们身边,正在快速被公众接纳,并成为一项出行新选择。在顶层设计的推动下,在各方的响应下,汽车自动驾驶时代正在加速到来。

### 1.3 政策法规保障自动驾驶安全发展

随着近年来自动驾驶产业的快速发展，国务院办公厅、工业和信息化部、公安部、交通运输部等多部门高度重视安全，积极制定完善相关政策法规，陆续出台多项指导文件，保障自动驾驶汽车交通安全，并为后续发展进行铺垫。



目前我国自动驾驶汽车相关政策和法规基本能够适应现阶段应用的需要，并能够按照技术应用的发展需要进行更新完善。2018年智能网联汽车道路测试管理规范（试行）发布推动了我国自动驾驶汽车测试工作的开展。随着各地自动驾驶测试和示范运营区的快速发展，一系列新的问题和需求浮现，为了响应道路测试工作开展过程中测试方案不统一、测试结果不互认、车路协同不到位等问题和行业企业提出进一步开放高速公路、无安全员测试等需求，2021年7月，工业和信息化部、公安部、交通运输部部门联合印发了《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范（试行）》对应用主体、驾驶人、车辆、示范应用申请管理和交通违法与事故处理方面给出了安全相关要求。同时，国家对道路交通安全法、汽车产品召回等方面也根据实际需要，进行了相关修订、补充和研究，支持自动驾驶产业的安全发展。

目前，自动驾驶汽车交通安全领域主要涉及的法律法规要求如下：

  
 道路测试与  
 示范应用申请

- 道路测试主体应提供智能网联汽车道路测试或示范应用安全性自我声明并由省、市级政府相关主管部门进行确认，其中，交通事故责任强制险凭证以及每车不低于五百万元人民币的交通事故责任保险凭证或不少于五百万元人民币的自动驾驶道路测试事故赔偿保函
- 省、市级政府相关主管部门于每年 6 月、12 月将智能网联汽车道路测试情况报送至工业和信息化部、公安部和交通运输部，并向社会公布
- 对具有网联功能的车辆或远程控制功能的监控平台，应提供网络安全风险评估结果及采取的风险应对措施证明
- 对开展载人示范应用的，应包括为搭载人员购买的座位险、人身意外险等必要的商业保险

  
 道路测试与  
 示范应用主体

- 对道路测试可能造成的人身和财产损失，具备足够的民事赔偿能力
- 具备对道路测试车辆进行事件记录、分析和重现的能力
- 具备对道路测试车辆及远程监控平台的网络安全保障能力

  
 驾驶人

- 取得相应准驾车型驾驶证并具有 3 年以上驾驶经历
- 驾驶历史记录良好：最近连续 3 个记分周期内没有被记满 12 分记录；最近 1 年内无超速 50% 以上、超员、超载、违反交通信号灯通行等严重交通违法行为记录；无饮酒后驾驶或者醉酒驾驶机动车记录，无服用国家管制的精神药品或者麻醉药品记录；无致人死亡或者重伤且负有责任的交通事故记录
- 经道路测试、示范应用主体培训合格，熟悉自动驾驶功能测试评价规程、示范应用方案，掌握车辆道路测试、示范应用操作方法，具备紧急状态下应急处置能力

行业积极推进自动驾驶车辆测试安全员专业技能要求

2020 年 12 月 2 日，以百度为主要发起单位的《自动驾驶车辆测试安全员专业技能要求》正式通过中国智能交通产业联盟批准并发布，是国内首个关于自动驾驶车辆测试安全员应具备的知识体系和专业操作技能类行业团体标准，也是全球首个对于测试安全员进行系统化管理的规范，可作为企业对测试安全员进行遴选与管理，以及监管机构进行考核评估参考



自动驾驶车辆

- 满足对应车辆类型除耐久性以外的强制性检验项目要求。对因实现自动驾驶功能而无法满足强制性检验要求的个别项目，需提供其未降低车辆安全性能的证明
- 具备人工操作和自动驾驶两种模式，且能够以安全、快速、简单的方式实现模式转换并有相应的提示，保证在任何情况下都能将车辆即时转换为人工操作模式
- 具备车辆状态记录、存储及在线监控功能，能实时回传要求信息，并自动记录和存储下列各项信息在车辆事故或失效状况发生前至少 90 秒的数据，数据存储时间不少于 1 年

#### 2018 年《道路机动车辆生产企业及产品准入管理办法》

提出对因采用新技术、新工艺、新材料等原因，不能满足本办法规定的准入条件的，企业可以提出相关准入条件豁免申请，为智能网联、自动驾驶车辆的准入做好了铺垫，鼓励、促进了技术创新和新型产业生态形成

#### 2021 年《关于加强智能网联汽车生产企业及产品准入管理的意见》

要求加强汽车数据安全、网络安全、软件升级、功能安全和预期功能安全管理，保证产品质量和生产一致性，推动智能网联汽车产业高质量发展。以解决汽车智能化、网联化发展，产生数据安全、网络安全、交通安全问题，应对在线升级（OTA 升级）改变车辆功能、性能可能引入的安全风险

准  
入

召

回

#### 2021 年《关于汽车远程升级（OTA）技术召回备案的补充通知》

指出汽车企业实施 OTA 召回，必须提供汽车远程升级（OTA）安全技术评估信息表，加强了对软件升级的监管，避免车企将本该召回的车辆以 OTA 升级的方式解决安全隐患

#### 2021 年《汽车产品缺陷线索报告及处理规范》

重视消费者这一发现产品缺陷最重要的信息源。规定了消费者提交缺陷线索报告的方式和内容。明确任何单位和个人可通过互联网、电话、电子邮件、信函等方式向缺陷产品召回技术机构提交汽车产品缺陷线索报告



## 自动驾驶违法和事故责任即将纳入《道路交通安全法》

目前世界各国尚无完善的自动驾驶汽车交通事故责任划分规则。

### 违法与事故责任

我国正式发布的《中华人民共和国道路交通安全法》和《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》也未涉及自动驾驶车辆及其道路行驶安全方面的内容，现阶段道路测试、示范应用期间交通违法和事故要求参照现行法律对驾驶人处理。

2021年3月24日，公安部发布了《道路交通安全法（修订建议稿）》公开征求意见的公告，已明确了具有自动驾驶功能的汽车进行道路测试和通行的相关要求及违法和事故责任分担规定，赋予了自动驾驶系统、道路测试的法律地位，为自动驾驶的规模化商用设立了法律环境。

其中第一百五十五条规定：“具有自动驾驶功能的汽车开展道路测试应当在封闭道路、场地内测试合格，取得临时行驶车号牌，并按规定在指定的时间、区域、路线进行。经测试合格的，依照相关法律规定准予生产、进口、销售，需要上道路通行的，应当申领机动车号牌。

具有自动驾驶功能且具备人工直接操作模式的汽车开展道路测试或者上道路通行时，应当实时记录行驶数据；驾驶人应当处于车辆驾驶座位上，监控车辆运行状态及周围环境，随时准备接管车辆。发生道路交通安全违法行为或者交通事故的，应当依法确定驾驶人、自动驾驶系统开发单位的责任，并依照有关法律、法规确定损害赔偿责任。构成犯罪的，依法追究刑事责任。

具有自动驾驶功能但不具备人工直接操作模式的汽车上道路通行的，由国务院有关部门另行规定。

自动驾驶功能应当经具有相应资质的从事汽车相关业务的第三方检测机构检测合格。”

自动驾驶道路测试、示范应用要求测试、示范应用主体每月将道路测试、示范应用期间发生的交通事故情况上报省、市级政府相关主管部门。造成人员重伤或死亡、车辆损毁应在24小时内通过信息系统将事故情况上报省、市级政府相关主管部门，并于事故认定后5个工作日内，以书面方式将事故原因、责任认定结果及完整的事报告等相关材料上报省、市级政府相关主管部门。

理论上，由于自动驾驶汽车的驾驶系统已取代驾驶员操控车辆，事故责任应当由系统，由自动驾驶汽车生产者和销售者承担，但自动驾驶汽车决策核心的算法并不是完全可以预测和解释的，如何证明算法和事故损害的因果关系，如何科学合理解释免责等难题仍待研究，事故相关具体规定仍需政府进一步完善。

# 02

## 自动驾驶汽车的安全技术特点



“安全第一”是自动驾驶的核心理念和价值观。自动驾驶车辆的整体系统安全设计是一项复杂的系统工程，涉及车载自动驾驶系统的核心算法策略设计、硬件和软件冗余安全设计、远程云代驾技术、全流程测试验证技术等，并遵循功能安全（ISO 26262）和预期功能安全（ISO/PAS 21448）的要求和设计思路。本章节主要参考百度 L4 级自动驾驶的安全系统实践，分为主系统安全、冗余安全系统、远程云代驾系统三层安全体系。

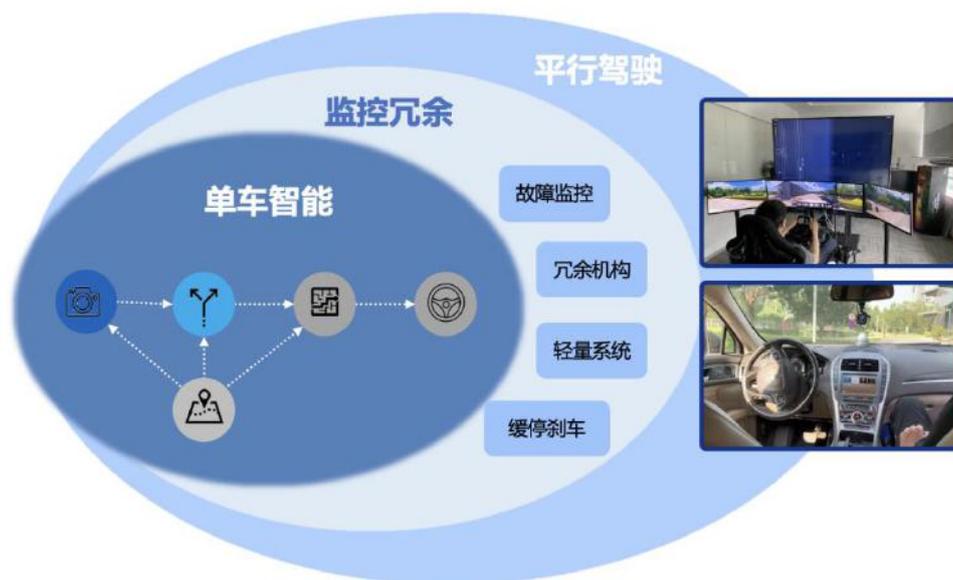


图 2.1 百度 L4 整体系统安全设计思路

## 2.1 自动驾驶主系统安全

主系统安全体系即通过车载自动驾驶系统的核心算法层来保证驾驶策略和驾驶行为的安全性，也可称为“策略安全”。使用最先进可靠的感知与定位算法、预测决策规划与控制算法来应对道路行驶中的各种场景，尤其是需要保证在遇到难度场景时也可以从驾驶策略和行为上确保安全。

自动驾驶主系统安全是软硬件组合套件的安全设计。软件算法是整个自动驾驶系统的核心，典型的 L4 级自动驾驶算法系统架构主要包括车载操作系统、环境感知、高精地图与定位、预测决策与规划、控制与执行模块等。

### 2.1.1 操作系统

基础操作系统是运行在自动驾驶汽车上用于管理、调度、控制车载软硬件资源的基础软件。其主要任务是为自动驾驶系统提供任务实时调度、实时计算任务资源隔离、实时消息通

讯、系统级访问控制等能力，有效管理系统资源，提高系统资源使用率，向无人车算法模块屏蔽硬件软件物理特性及操作细节，承载运行感知、定位、规划决策与控制等自动驾驶核心组件。操作系统具有高稳定、实时性、低时延（反应速度高于人类驾驶员 250ms）等特点。

### 2.1.2 泛感知系统

环境感知是自动驾驶的前提条件。环境感知系统融合激光雷达、毫米波雷达、摄像头等多传感器的优势，实现车身周围 360 度视距，在复杂变化的交通环境中稳定检测并跟踪交通者的行为和速度朝向等信息，为决策规划模块提供场景理解信息。

感知算法采用多传感器融合的框架，能够提供最远 280 米外的障碍物的检测。基于深度神经网络及海量的自动驾驶数据，能够准确的识别出障碍物类型、并稳定跟踪障碍物行为，为下游决策模块提供稳定的感知能力。基于多传感器融合方案的感知系统，通过异源感知通路形成冗余，为自动驾驶系统提供高容错能力从而提升系统安全。除此之外，感知算法还通过水雾噪声识别、低矮障碍物检测、异形交通信号灯和标识的检测等能力，有效支持场景扩展。在红绿灯识别上，可将自车感知识别的红绿灯灯色和倒计时与高精地图提供的先验信息进行交叉验证，同时提高临时红绿灯识别能力，确保可靠性和安全性。

高精地图与高精定位为自动驾驶车辆提供预先的道路信息、精准的车辆位置信息和丰富的道路元素数据信息，强调空间的三维模型以及精度，非常精确的显示路面上的每一个特征和状况。高精地图与定位采用激光雷达、视觉、RTK 与 IMU 多传感器融合的方案，通过多种传感器融合使得定位精度可以达到 5-10 厘米，满足 L4 级自动驾驶需求。

### 2.1.3 预测决策与规划控制

预测决策与规划控制技术模块相当于自动驾驶汽车的大脑。预测决策与规划是软件算法核心模块，直接影响车辆自动驾驶的能力和效果。该算法模块基于交通安全规范与共识规则，为车辆规划出安全、高效、舒适的行驶路径和轨迹。为了更好提升算法的泛化能力，应用数据挖掘和深度学习算法来实现智能规划驾驶行为。

在给定车辆设定的出发地与目的地后，系统生成最优的全局规划路径。车辆能够实时接收感知模块提供的环境和障碍物信息，结合高精度地图，跟踪并预测周边车辆、行人、骑行者或其他障碍物的行为意图和预测轨迹，综合考虑安全性、舒适性和效率，生成驾驶行为决策（跟车、换道、停车等），并按照交通规则和文明交通礼仪对车辆进行运行规划（速度、轨迹等），最终输出到控制模块实现车辆加减速和转向动作。车辆控制部分是最底下一层，直接与车辆底盘通信，将车辆的目标位置和速度通过电信号传给底盘来操作油门、刹车和方

向盘。

自动驾驶的目标是应对城市道路的复杂交通场景,在任何道路交通状况下都能保证自动驾驶车辆处于安全驾驶状态。在软件算法层,有基于海量测试数据训练的深度学习模型,保证自动驾驶车辆在常规驾驶场景下安全高效平稳的通行;在安全算法层,针对各种典型危险场景设计了一系列安全驾驶策略,保证自动驾驶车辆在任何场景下都能做出安全的驾驶行为。如在恶劣天气、视野遮挡等极端场景下,会触发防御性驾驶策略,通过多观察减速驾驶降低安全风险等。自动驾驶车辆更加遵守交通规则和道路优先通行权,在道路交叉口与其他交通参与者交汇场景下,在高路权情况下遇到抢行车辆,也会以安全第一原则考虑减速让行,避免风险。在遇到“鬼探头”等高危风险场景时,也会坚持安全第一原则采取紧急制动策略尽可能避免伤害。随着自动驾驶道路测试数据和大量的极端场景数据的积累,自动驾驶核心算法通过数据驱动的深度学习算法模型,得以持续不断进化,成为能够提前预判、安全谨慎驾驶的“老司机”。

### 2.1.4 车路协同

车路协同自动驾驶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,实现车与车、车与路、车与人之间动态实时信息交互共享,保证交通安全。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。可以帮助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,扩展自动驾驶设计运行域(Operational Design Domain, ODD)。

例如,车路协同自动驾驶可以解决单车智能易受到遮挡、恶劣天气等环境条件影响,在动静盲区/遮挡协同感知方面的问题。单车智能自动驾驶受限于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,AV无法准确获取盲区内的车辆或行人的运动情况。车路协同则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。



图 2.2 动静态盲区非机动车/行人鬼探头协同感知

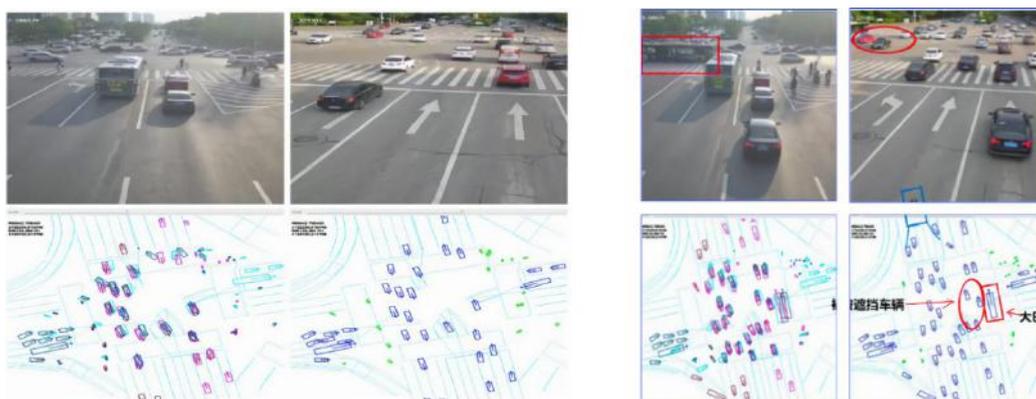


图 2.3 路口遮挡车路协同感知

## 2.2 自动驾驶安全冗余系统

根据《ISO 26262 道路车辆功能安全》，系统功能安全必须考虑功能冗余的要求。按照功能安全的设计标准，功能冗余从部件级、系统级和整车级三个层面来完成。冗余的系统设计是保证自动驾驶安全可控的关键，依托全线冗余设计可有效应对车辆控制系统、硬件平台、软件平台三个层次单点故障或功能失效，为完全无人自动驾驶系统提供基础支撑。

L4 级自动驾驶系统在车载主计算单元和传感系统之外又配置了安全冗余实现了软件和硬件的异构冗余设计，避免了各个系统的单点失效，主计算系统和冗余安全系统分工不同且互为校验，整体上实现安全性和可靠性极大提升。冗余安全系统在功能和算法策略设计上，侧重于对主计算系统软硬件的实时监控，并进行危害识别，当检测到主计算系统异常时将触发 MRC 机制，通过告警、缓刹、靠边停车、紧急制动等方法让车辆进入最小风险状态

(Minimal Risk Condition, MRC)。

### 2.2.1 硬件和传感器冗余

从传感器、计算单元到车辆控制系统，都具备两套互为独立冗余的系统，避免单点失效，提升系统整体可靠性和安全性。

#### (1) 计算单元冗余

安全系统通过配置一套 SafetyDCU 作为冗余计算单元，实时运算并监控主系统工作状态。当主计算单元故障时，能够支持冗余系统的算法运算继续控制车辆，做出风险最小回退的缓刹、靠边停车等动作。

#### (2) 传感器冗余

安全系统通过冗余设计两套独立的自动驾驶传感器系统，采用激光雷达、摄像头、定位设备等零部件冗余方案，在任何单一零部件失效的情况下，都能够触发冗余系统，提供完善环境感知能力，从而安全控制车辆，保障系统的运行更加可靠。

#### (3) 车辆控制系统冗余

车辆底盘具备冗余能力，包括转向、动力、制动等关键部件，能够在单一系统故障失效时，切换到备用系统控制车辆，帮助安全停车，防止车辆失控的发生。

### 2.2.2 故障监控系统与软件冗余

故障监控系统为部署在主计算单元与安全计算单元之间的一套完整故障检测系统，能够对系统运行中的所有软硬件类失效、故障、超出 ODD 范围、系统算法缺陷等做到实时检测监听，并且通过主系统和冗余系统进行交叉验证，互相校验和监控，确保故障没有遗漏。同时进行风险预测，对易发生问题的数据进行挖掘分析、特征提取，在车端进行实时安全风险计算。

软件冗余系统是一套完整的轻量化的感知定位与决策控制的软件。例如完善的定位系统冗余，增加多重交叉验证提升定位异常检测和容错的能力；感知 360 度环视检测覆盖，对车身周围和前向风险做到实时感知；当检测到主系统故障或失效时，备份系统代替其接管车辆的操控，通过限速、缓慢刹车、靠边停车、刹停等进行功能降级或进入 MRC，实现车辆的安全停车。

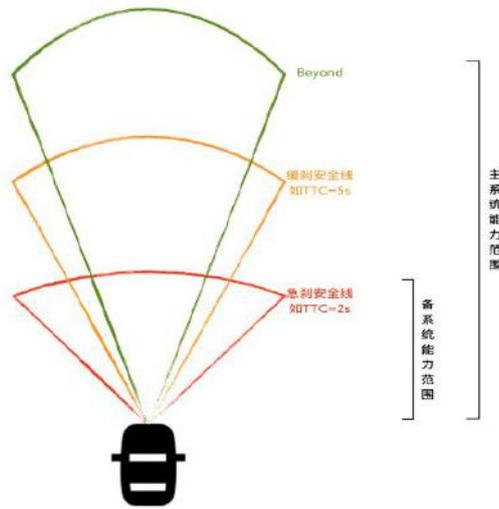


图 2.4 故障监控系统与软件冗余

## 2.3 远程云代驾

远程云代驾系统是在车辆遇困或极端场景下，由远程驾驶员接管车辆，通过环绕屏展示环境建模型及主视觉、俯视角，为安全员提供身临其境的平行驾驶感受。当远程驾驶员将车辆开到安全地带后再将控制权移交给车端，整个过程端到端时延比人类司机的反应时间更短，且车端和远程的控制权切换完全平滑无感。在远程驾驶舱，通过配置多屏监控，以及通过风险预警和动态调度等功能，可以实现车队级实时监控。

远程云代驾设有包含主动安全、安全预警以及安全基础功能在内的全面安全分层设计，可实时监测驾驶舱、网络、无人驾驶车辆状态，并根据不同故障或风险等级做出安全处理，进一步为自动驾驶运营全面护航。当前自动驾驶技术在常规城市道路下主要由车端自动驾驶系统实现自动驾驶，仅在极端场景下借助远程云代驾，因此可以实现远程驾驶员一人控制多车的高效运营服务。

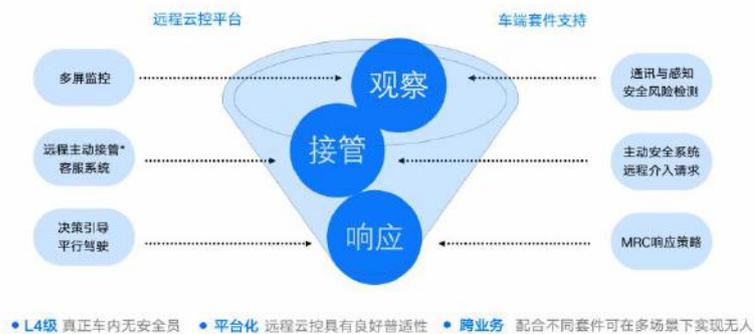


图 2.5 远程云代驾产品设计

平行驾驶基于 5G 技术，远程控制中心的安全操作员能够实时了解车辆所处环境与状态，车云无缝对接，在自动驾驶无法通过的场景下完成远程协助，结束后使车辆回到自动驾驶状态，实现极端场景下的车辆脱困和避险。

5G 云代驾是未来无人驾驶的重要配套设施，基于 5G、智慧交通、V2X 等新基础设施建设，实现自动驾驶车辆车内、车外视频实时回传监控，可在车上无驾驶员的情况下为自动驾驶系统的能力缺口补位。



图 2.6 远程云代驾适用场景

## 2.4 自动驾驶汽车测试与验证

自动驾驶系统从研发到应用，需要进行充分的功能安全和性能安全测试验证来证明其运行安全性，以保障乘车用户和其他交通参与者的人身安全。虚拟仿真需要进行数亿至上百亿公里的验证测试，真实道路测试需要百万公里以上的测试积累。

### 2.4.1 测试流程体系

自动驾驶测试以场景化的测试方法，验证在每个场景下是否都具备安全驾驶能力。自动驾驶测试场景库是测试体系的基础，驱动自动驾驶车辆测试各个环节。测试场景库包含典型的日常行驶场景、高碰撞风险场景、法律法规场景等，同时也包含已经形成行业标准的场景，例如 AEB 功能的标准测试场景。具体分为不同自然条件（天气、光照）、不同道路类型（路面状态、车道线类型等）、不同交通参与者（车辆、行人位置、速度等）、不同环境类型（高速公路、小区、商场、乡村等）的多类型虚拟仿真测试场景和真实交通环境的测试试验场景。测试内容包括传感器、算法、执行器、人机界面以及整车等，从应用功能、性能、稳定性和

鲁棒性、功能安全、预期功能安全、型式认证等各个方面来验证自动驾驶系统的合理性、安全性和稳定性，从而确保车辆能够自主上路。

自动驾驶汽车的测试流程体系主要包括离线环境测试、车辆在环测试（Vehicle in the Loop, VIL）、道路在环测试（Road in the Loop, RIL）三个阶段，对软件、硬件、车辆进行逐层环环相扣测试，确保自动驾驶系统上路测试的安全性。在离线测试阶段，每一行代码都能被充分及时的测试，当软件发生修改后，系统会逐一自动触发各个测试环节，直至达到安全的上车测试标准方进入车辆在环测试阶段及道路在环阶段。道路在环测试阶段发现问题会进行下一轮的代码修改，开始下一次的循环。经过一轮又一轮的闭环，使得自动驾驶能力不断提升。

### (1) 离线测试

离线是指未包含车辆的测试，大部分工作是在实验室里完成的。这个阶段包含了模型在环测试（Model in the Loop, MIL）、软件在环测试（Software in the Loop, SIL）、硬件在环测试（Hardware in the Loop, HIL）。

模型在环测试利用大规模数据集对感知、预测、定位、控制等核心算法模型进行精确的评估，通过模型评估后的各项指标度量模型能力变化，通过自动化挖掘在早期暴露算法问题和 BadCase，避免遗留到后续测试过程。

软件在环测试阶段，仿真测试是自动驾驶测试体系的关键环节，通过将海量的道路测试数据灌入仿真系统，反复回归验证新算法的效果。同时在仿真系统中构造大量的极端场景，并且通过参数扩展的方法将单一的场景自动化生产规模化的场景，以提高测试的覆盖度。此外，仿真平台还有一套精细的度量体系，可以自动化地判断仿真过程中发生的碰撞问题、违反交规问题、体感问题、路线不合理问题。

硬件在环测试阶段，把软件和硬件集成到一起，以测试软硬件系统的兼容性和可靠性。通常硬件的故障发生都有一定的概率，带有一定的偶然性，在硬件在环测试阶段基于真实和虚拟硬件结合方式进行成千上万真实场景的还原测试，并且 24 小时不间断的对自动驾驶系统施加压力，以模拟系统在不同资源极限条件下（比如：GPU 资源不足，CPU 使用率过高）的性能和稳定性表现。同时在这个阶段模拟了大量的硬件故障，测试在硬件故障的情况下系统的反映，如硬件失效、断电、丢帧、上下游接口异常等，确保系统符合 ISO26262 功能安全要求。

### (2) 车辆在环测试

车辆在环测试阶段会先进行基于台架的测试，在台架上完成各项车辆线控功能、性能和稳定性测试，以确保自动驾驶系统可以按照意图控制车辆。完成对车辆线控的测试之后 VIL 环节会进入封闭场地，基于真实的道路构建虚实结合的场景测试自动驾驶系统在真实车辆上的表现。

### (3) 道路在环测试

在离线测试和车辆在环测试阶段通过后（每个环节都有严格的测试通过标准），接下来进入封闭场地内构建真实的场景来测试车辆的自动驾驶各项能力和安全性。封闭测试场涵盖了常见的城市道路及高速道路，包括直行道路、弯道、路口、坡路、隧道及停车场等。另外，通过假人、假车等测试设备构造各种低频场景。这类低频场景在社会道路上存在，但是出现的频率较低，在开放道路上不易得到充分验证。例如逆行的自行车、突然冲出的行人、路段积水等场景。

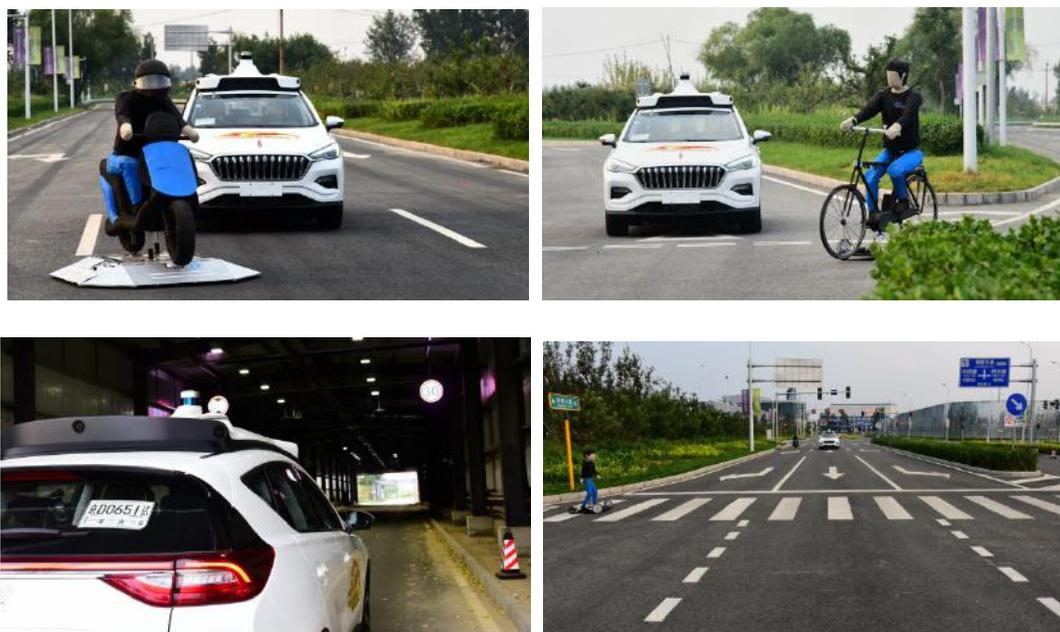


图 2.7 国家智能汽车与智慧交通（京冀）示范区亦庄基地

开放道路测试是道路在环测试的最终环节，也是自动驾驶车辆完成测试评估所必须经过的重要环节。开放道路测试是循序渐进开展的，通常最新的系统部署在少量车上进行测试，确认安全后再部署到更大规模的车队。通过部署规模化自动驾驶车辆不断在实际道路上进行测试和验证，形成实际路上场景和自动驾驶能力不断闭环，使自动驾驶车辆在智能度、安全

## 2.4.2 合规上路

自动驾驶车辆在正式进入公开道路测试之前，需经过有关部门的封闭测试场训练、自动驾驶能力评估和专家评审等系列程序，并且符合或满足《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范（试行）》全部要求的主体和车辆，才可以合规上路进行道路测试和示范应用。规范中，不仅提出了道路测试与示范应用主体、驾驶人及车辆的能力和要求，还规定了智能网联汽车运维巡检等项目，保证车辆的软硬件状态合格。

以北京市为例，2017年12月18日，北京市交通委联合北京市公安交管局、北京市经济信息委等部门，制定发布了《北京市关于加快推进自动驾驶车辆道路测试有关工作的指导意见（试行）》和《北京市自动驾驶车辆道路测试管理实施细则（试行）》两个文件，规范推动自动驾驶汽车的实际道路测试。即在上路测试之前，需取得面向自动驾驶车辆的“驾考牌照”。因此，在北京市自动驾驶测试管理联席工作小组的指导下，北京市科委、中关村管委等相关单位的支持下，由中关村智通智能交通产业联盟组织北京智能车联产业创新中心与互联网、汽车、交通、通信等相关领域单位共同开展研究，编制了《T/CMAA 116-01-2018 自动驾驶车辆道路测试能力评估内容与方法》团体标准及《T/CMAA 116-02-2018 自动驾驶车辆封闭试验场地技术要求》。

能力评估标准在全球范围内首次提出了以交通场景复杂度来划分自动驾驶能力评估标准在全球范围内首次提出了以交通场景复杂度来划分自动驾驶能力级别的思路：从交通密度、车道类型、交叉路口形态、交通设施种类、区域特征、交通参与者特征、交通流组织模式等维度，将城市交通复杂度划分为五大类场景；在每类城市交通情景下，从认知与交通法规遵守能力、执行能力、应急处置能力、综合驾驶能力、网联驾驶能力五个维度对自动驾驶能力进行分级，分别为 T1-T5 共 5 个等级；其中如车辆具备 V2X 车路协同功能，则被特别标注为 TX。评估内容涵盖美国高速公路安全管理局（NHTSA）关于自动驾驶的 28 项测试内容，也涵盖《智能网联汽车道路测试管理规范（试行）》中的 14 项测试内容。同样，依据五大类场景，对开放测试路段道路进行分级，分为 R1-R5；其中，测试道路具备 V2X 车路协同功能，则被特别标注为 RX 道路。根据自动驾驶车辆封闭测试场通过的能力评估级别，确定其能行驶的开放测试道路级别，避免了自动驾驶车辆在其不能驾驭的交通场景下进行测试，从而保障了开放道路测试的安全有序进行。



图 2.8 道路交通场景划分



图 2.9 部分测试场景实拍

不同的测试专项中, 还包含了大量细分测试场景。以“变更车道”测试专项为例, 测试场景包括避让障碍物变道、避让静止车辆变道、避让故障车辆变道、避让事故车辆变道、避让施工路段变道、避让低速行驶车辆变道、临近车道有车变道、前方车道减少变道共计 8 个

细分场景。每个测试场景中的测试难点均不同，对自动驾驶系统的技术要求也不同。



图 2.10 封闭测试场“变更车道”测试场景方案

截止 2020 年底，已有 14 家企业共计 87 辆车，参与北京市自动驾驶车辆一般性道路测试，自动驾驶车辆道路测试安全行驶里程已超过 220 万公里。

表 2-1 北京市测试牌照发放与道路测试情况

测试主体名称	2018年-2020年	
	累计道路测试车辆 (辆)	累计测试里程数 (公里)
北京百度网讯科技有限公司	57	2019230
上海蔚来汽车有限公司	2	3515
北京新能源汽车股份有限公司	1	235
戴姆勒大中华区投资有限公司	2	926
北京小马智行科技有限公司	7	163249
腾讯大地通途(北京)科技有限公司	1	4157
苏州滴滴旅行科技有限公司	2	1332
奥迪(中国)企业管理有限公司	2	1144
北京智行者科技有限公司	2	1403
重庆金康新能源汽车设计院有限公司	1	0
北京四维图新科技股份有限公司	1	1220
丰田汽车研发中心(中国)有限公司	4	15022
北京三快在线科技有限公司	1	464
北京沃牙科技有限公司	4	1540
合计	87	2213436

(资料来源：北京智能车联产业创新中心《北京市自动驾驶车辆道路测试报告 2020》)

真实道路安全测试中，每辆自动驾驶汽车需要配备测试驾驶员，即安全员。自动驾驶企业一般严格筛选安全员，并按照规范的安全管理要求对其进行专业培训。在车端，安全员始终监控车辆运行状态及周围环境，当发现车辆处于不适合自动驾驶的状态或系统提示需要人工操作时及时采取相应措施，保障车辆安全行驶。在云端，远程安全员可实时监测无人驾驶车辆所处环境与状态，如遇到临时交通管制或者车辆遇到紧急情况时，云端驾驶员能够远程实时帮助车辆脱困，保障安全运营。

自动驾驶汽车在底层系统设计之初综合考虑整车、系统、软硬件等各方面的安全性，并将安全性纳入各系统层级与各个开发阶段，确保从主安全系统设计、冗余系统、远程云代驾、到测试验证、合规上路整个过程中始终贯彻“安全第一”的核心理念。

# 03

## 自动驾驶与传统驾驶汽车 安全对比



因驾驶人自身驾驶行为多样性和不同驾驶人之间驾驶行为异质性,在面对动态交通环境时,驾驶人成为了交通安全中最不确定因素。驾驶人会存在疲劳驾驶、违反交通规则等主观错误,人类驾驶汽车在道路交通安全中存有较大的事故风险。相对应,先进的自动驾驶汽车能够百分百避免驾驶人酒驾等不良驾驶行为,相较于人类驾驶汽车,自动驾驶汽车能够极大地提高道路交通安全水平,减少大部分因驾驶人错误导致的事故发生,并且在面对其他道路交通参与者等造成的无法避免事故时,自动驾驶汽车也能够像一个熟练、谨慎的手动驾驶者一样尽可能减轻事故带来的伤害,从而有效地提高道路交通安全性。

### 3.1 人类驾驶事故场景分析

据公安部统计,近年来我国公路里程、机动车保有量和驾驶人数量持续增长。2020年末,全国公路总里程为519.81万公里,比上年末增加18.56万公里;机动车保有量为3.72亿辆,同比增长9.4%,其中汽车保有量为2.81亿辆,同比增长7.5%;机动车驾驶人数量为4.56亿人,同比增长8.1%。根据《中华人民共和国道路交通事故统计年报(2020版)》显示,2020年全国共发生道路交通事故244674起,造成61703人死亡,万车死亡人数为1.66人,10万人口死亡人数为4.37人。其中,造成重大交通事故的五项违法行为分别为:未按规定让行、超速行驶、无证驾驶、机动车逆行和酒后驾驶。并且其他交通参与者的安全理念、基础设施建设仍滞后于汽车产业发展,道路交通安全风险突出。

中国汽车技术研究中心有限公司在相关主管部门的支持下,联合国内外多家知名整车及零部件企业共同发起了中国交通事故深度调查(China In-Depth Accident Study, CIDAS)项目。从2011年7月启动至今, CIDAS 累计在中国8个典型城市或区域采集了近8000起交通事故,建立了丰富的事故数据样本库,涵盖调查事故前、碰撞过程中和事故后各阶段人、车、路、环境等方面的详细信息,单例样本调查信息超过3000项,按照事故严重程度分为轻伤、重伤、死亡三个等级,其中死亡1921人,重伤1799人,轻伤5681人。事故发生地点在高速公路案例总数约为1100起次,其中死亡413人,重伤308人,轻伤922人。城市道路(主干、次干、支路)案例总数约为3600起次,其中死亡720人,重伤784人,轻伤2747人。通过典型案例采集和调查, CIDAS 以数据驱动中国道路交通安全发展。



图 3.1 中国交通事故深度调查 (CIDAS)

### 3.1.1 人类驾驶事故交互类型

在 CIDAS 数据库中，人类驾驶事故交互类型主要表现在车辆与二/三轮车事故、车辆与行人事故、车辆间事故和单车事故等。其中，车辆与二/三轮车事故最多，并且作为交通弱势参与方的二/三轮车驾乘人员伤亡最为严重，详见表 3-1。

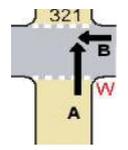
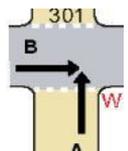
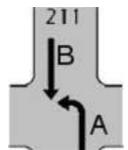
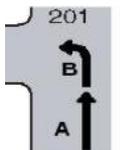
表 3-1 中国道路交通事故交互类型

事故类型	轻伤占比	重伤占比	死亡占比
车辆与二/三轮车事故	62.5%	58.4%	42.1%
车辆与行人事故	12.3%	18.0%	31.2%
车辆间事故	18.9%	17.3%	17.7%
单车事故	6.3%	6.3%	9.1%

(1) 车辆与二/三轮车事故

在车辆与二/三轮车事故中，伤亡总数为 5410 人，事故工况主要为机动车未正确礼让二/三轮车，事故主要集中在城市道路交叉口（无信号灯）处和红绿灯处，具体冲突类型如表 3-2 所示。

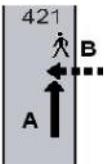
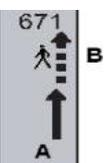
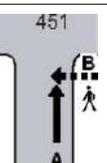
表 3-2 车辆与二/三轮车事故冲突类型

序列	冲突类型	占比
TOP1	 <p>路口，具有等待义务的直行车辆 (A) 与右侧直行车辆</p>	17.9%
TOP2	 <p>路口，具有等待义务的直行车辆 (A) 与左侧直行车辆</p>	16.3%
TOP3	 <p>转弯—左转弯车辆与对向直线行驶车辆</p>	9.7%
TOP4	 <p>转弯—右转弯车辆与专用道路（自行车道、特殊轨道车辆）</p>	6.6%
TOP5	 <p>转弯—左转弯车辆与后方驶来的二/三轮车之间的冲突</p>	6.4%

## (2) 车辆与行人事故

行人是交通事故中最容易受到伤害的参与者之一。在车辆与行人事故中，伤亡总数为1620人，因涉及道路优先权问题，事故多发生于道路交叉口车辆转向过程中，合计约占44.5%，主要集中在行人穿行时，车辆未正确礼让行人，并且当行人横穿路口时，驾驶人未进行预先感知和察觉。其具体冲突类型如表 3-3 所示。

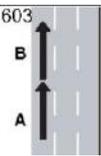
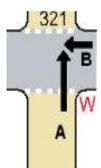
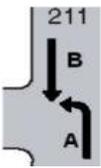
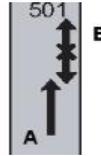
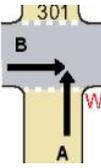
表 3-3 车辆与行人事故冲突类型

序列	冲突类型	占比
TOP1	 非交叉口前车辆与右侧穿行行人 冲突	24.1%
TOP2	 非交叉口前车辆与左侧穿行行人 冲突	20.4%
TOP3	 非超车车辆与在相同车道上行走的行人之间的冲突	17.9%
TOP4	 转弯—左转弯车辆与专用道路（行人）冲突	6.6%
TOP5	 路口前，车辆与右侧横穿行人	5.8%

(3) 车辆与车辆事故

对于车辆间事故，纵向交通中车辆追尾碰撞占比最高，达19.7%，其次是有等待义务的转入或横穿车辆与具有优先行驶权的右侧车辆之间冲突引发的事故，这种情况经常发生在道路入口或十字路口、乡村小路或自行车道、铁路道口以及例如房屋或停车场入口，较多致因为视线障碍、天气影响/道路环境影响下的驾驶人不良驾驶行为，其具体冲突类型如表3-4所示。

表3-4 车辆与车辆事故冲突类型

序列	冲突类型	占比
TOP1	 <p>纵向交通-前行车辆与紧跟车辆冲突</p>	19.7%
TOP2	 <p>路口处具有等待义务的车辆与右侧车辆冲突</p>	17.4%
TOP3	 <p>转弯-左转弯车辆与对向车辆冲突</p>	9.4%
TOP4	 <p>行驶车辆与停泊车辆冲突</p>	6.9%
TOP5	 <p>路口处具有等待义务的车辆与左侧车辆冲突</p>	6.6%

#### (4) 单车事故

单车事故主要发生在直线路段上,事故主要致因为天气及道路环境因素、车辆自身缺陷、视线障碍和疲劳驾驶等不良驾驶行为,其具体冲突类型如表 3-5 所示。

表 3-5 单车事故冲突类型

序列	冲突类型	占比
TOP1	 纵向交通-在直线行驶路段上	32.6%
TOP2	 因交通参与者突然身体障碍引发的 事故	22.1%
TOP3	 转弯-弯道走向不明确	12.4%
TOP4	 因车辆突然损坏引发的事故	10.4%
TOP5	 因可移动障碍物引发的事故(石头、 树枝、非施工现场障碍物)	4.4%

#### 3.1.2 人类驾驶事故特征分析

在人类驾驶汽车道路交通事故中,事故易发多发点位为交叉口(无信号灯)处和信号灯处,其合计数量占比达到了百分之五十以上,弯道等典型路段事故也存有一定规模,事故地点分布详见表 3-6。

表 3-6 汽车事故地点分布

事故地点	占比
一般路段	35.9%
交叉口（无信号灯）	32.9%
信号灯处	22.7%
弯道	5.1%

按照事故碰撞部位或对象进行统计，其中乘用车追尾事故最多，达 29.9%，其次为侧部碰撞事故为 29%。前部碰撞事故和固定物碰撞事故也占有一定比例，详见图 3.2。

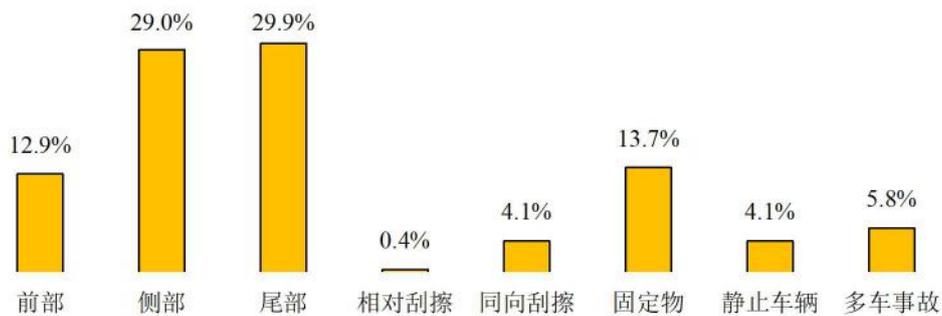


图 3.2 人类驾驶汽车事故碰撞部位

对于人类驾驶汽车道路交通事故特征，因车辆设计等缺陷导致的驾驶人视野盲区使得车辆在转弯过程中易发事故。并且交叉口（无信号灯）处和红绿灯等处是人类驾驶汽车事故多发点位。在事故碰撞过程中，追尾相撞（尾部）和交叉相撞（侧部）是前部主要碰撞形态，其次为侧部和前部刮蹭。

### 3.1.3 人类驾驶冲突场景

交通事故场景分析和重建能够更好地反映出事故整体状况。人类驾驶汽车发生典型事故场景主要为：城市道路中因视野盲区导致的乘用车碰撞行人事故，在转弯时乘用车与自行车事故、夜间因超速或闯红灯导致的乘用车碰撞电动二轮车事故，其次为追尾和自身车辆故障导致的事故，详见图 3.3。



图 3.3 人类驾驶汽车事故场景

在上述易发和常发的交通场景中，造成事故较多的冲突类型主要为停车、转弯、掉头、倒车、车速、车距、超车、同向驾驶、违反交通规则、人类缺陷和行人错误行为，如表 3-7 所示。

表 3-7 汽车事故典型冲突场景

序列	冲突场景	占比
TOP1	停车、转弯、掉头、倒车	20.2%
TOP2	车速、车距、超车、同向驾驶	12.6%
TOP3	违反交通规则	11.3%
TOP4	人类缺陷	10.1%
TOP5	行人错误行为	6.8%

因人的不安全行为和物的不安全状态，人类驾驶事故主要为乘用车和二/三轮车之间和

车辆与行人之间事故，其较多事故致因是驾驶人无法对不安全状态进行提前感知，并无法较好地相应的决策和控制。因驾驶人不良驾驶（如驾驶疲劳等），人类驾驶事故风险主要来自车辆间追尾事故和单车事故（如碰撞护栏等）。受道路交通参与者多样性，在面对动态变化的交通环境，因驾驶人自身缺陷和周边环境因素的影响，传统汽车仍然存在较大事故风险。

### 3.2 人类驾驶事故致因分析

目前，L4 及以上自动驾驶汽车道路测试试验对象以乘用车为主。对 CIDAS 数据库中 5664 起乘用车事故案例进行致因分析，总结出 6967 个事故致因。其中驾驶员人为因素导致的事故案例为 4488 起次，事故致因占比约为 81.5%，死亡 883 人，重伤 1011 人，轻伤 3720 人；机动车和环境因素（包含其他道路交通参与者、天气和路况等）导致的事故案例为 1176 起次，事故致因占比为 18.5%，死亡 294 人，重伤 250 人，轻伤 914 人，详见表 3-8。

表 3-8 人类驾驶汽车事故致因

事故致因	个数	占比
驾驶人因素	5191	81.5%
机动车因素	33	0.5%
环境因素	1143	18%
总数	6967	100%

人是交通安全中最不确定的因素。驾驶员人为因素导致的事故主要包含两方面：一是驾驶员无法对风险进行正常感知和识别等主观错误，例如未按规定让行和超速等违反交通规则行为；二是驾驶员自身能力受限无法正确面对内外部干扰，例如未留意其他交通参与者的行为和驾驶熟练度低等其他错误驾驶行为。因外部环境因素导致事故的致因主要为其他车辆的危险驾驶和天气因素等影响。

### 3.2.1 人类驾驶主观错误事故致因分析

危险感知和识别是人类安全驾驶汽车的前提。在乘用车驾驶人事故致因中，约 79.9% 是由于驾驶人主观错误导致。因主观错误的存在，驾驶人无法对危险进行提前识别和感知，其中因未按规定让行发生的事故占比最高，达 43.4%，其次是速度过快、车道的违规使用、酒驾、违反交通信号灯和疲劳驾驶，详见表 3-9。

表 3-9 驾驶人主观错误下致因划分

主观错误	总数 4150 占比 79.9%	
	个数	占比
未按规定让行	2254	43.4%
速度过快	502	9.7%
车道的违规使用	491	9.5%
酒驾	343	6.6%
违反交通信号灯	318	6.1%
疲劳驾驶	242	4.7%

未按规定让行主要包括：机动车在人行横道前未对行人进行礼让、忽视“右侧优先”的交通规则和忽视来向车辆道路优先权等。车道的违规使用主要包括：逆行、违规占用非机动车道等。

近几年我国开始为机动车礼让行人制定相应的法律和交规。在 CIDAS 数据库中，因未礼让行人导致的事故占有未按规定让行总数 27%，事故地点常发于交叉口或信号指示灯等处。其中未礼让行人典型案例如图 3.4 所示：

案例描述：2014 年 1 月 5 日 14 时，在某城市没有信号指示灯的 T 型路口人行横道处，一辆越野车在发现行人过街时并未进行相应礼让动作，与行人发生了碰撞，导致行人重伤。

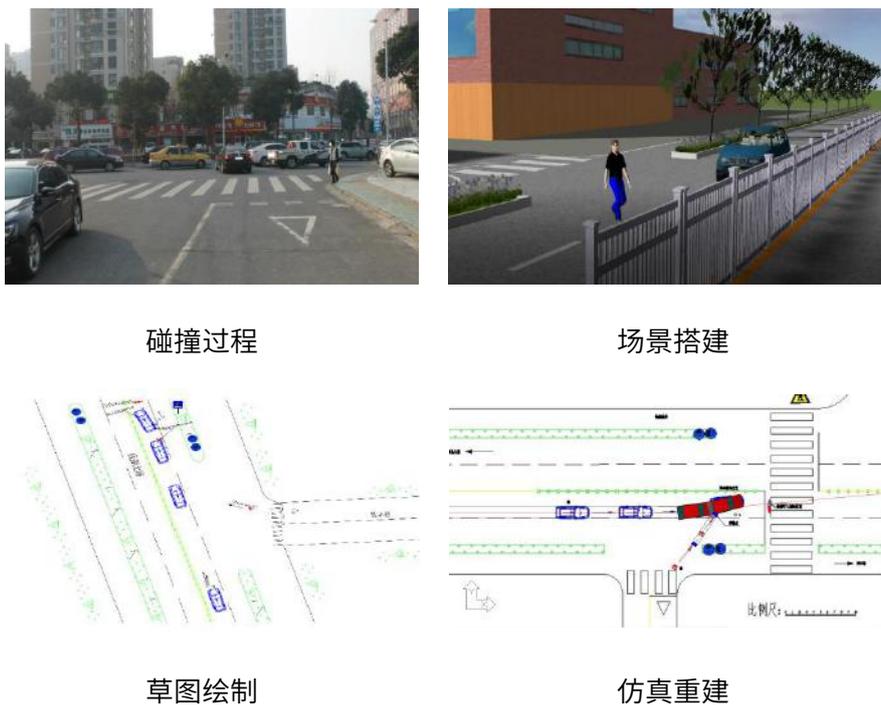


图 3.4 车辆与行人事故重建分析

违反交通信号灯是交通事故中易发和常发的致因之一。由于人类主观错误导致的 318 起违反交通信号灯的事故中，死亡与重伤人数高达 104 人，事故常发于夜间或小型交叉口等处，其中违反交通信号灯典型案例如图 3.5 所示：

案例描述：2014 年 12 月 11 日 20 时，某驾驶人自西向东行驶至十字路口时，因违法交通信号指示通行，车辆前部与自南向北行驶的某摩托车发生碰撞，造成两车受损，摩托车驾驶员送医院抢救无效死亡。



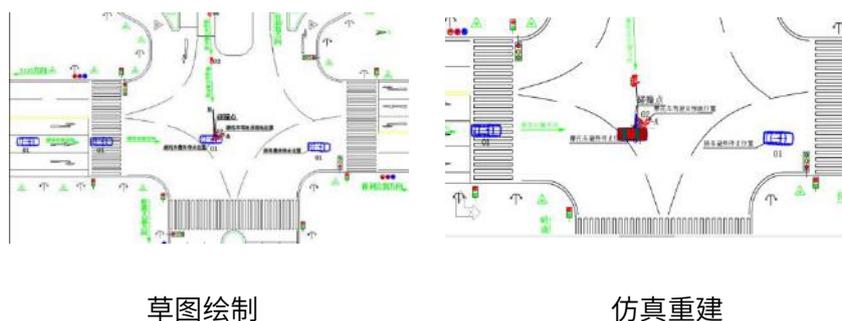


图 3.5 车辆与二/三轮车事故重建分析

### 3.2.2 人类驾驶能力受限事故致因分析

在乘用车驾驶人事故致因中，约 20.1%是由于驾驶人能力受限导致。因驾驶行为不规范或不熟练驾驶，驾驶人难以在面对潜在风险时做出正确动作响应。其中因无法有效留意到潜在风险事故参与者而发生事故的占比最高，其次是未与其他交通参与者保持安全距离等，详见表 3-10。

表 3-10 驾驶人能力受限下致因划分

能力受限	总数 1041 占比 20.1%	
	个数	占比
未留意其他交通参与者的行为	322	6.2%
没有保持安全距离	305	5.9%
驾驶熟练度低	224	4.3%
其他错误驾驶行为	190	3.7%

未留意其他交通参与者行为主要包括：受其他障碍物干扰或因自身缺陷导致的未发现或未留意到其他交通参与者等。其中未留意其他交通参与者典型案例如图 3.6 所示：

案例描述：2017 年 9 月 10 日 17 时，在某城市红绿灯交叉口处，驾驶人受左侧车辆视线遮挡，直行机动车未能察觉到对向转向车辆，与对向左转车辆发生碰撞，导致人员重伤。

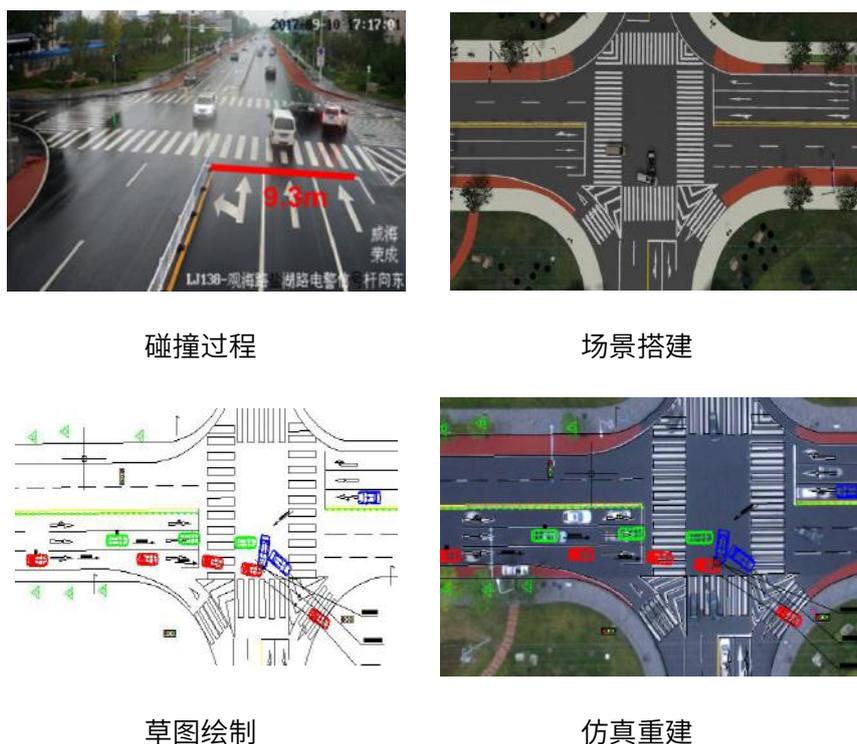


图 3.6 车辆与车辆事故重建分析

### 3.2.3 机动车及环境因素分析

在机动车自身问题或其他外部环境引发的事故中，主要致因为其他道路使用者造成，即事故责任划分为他因占比为 85%，详见表 3-11。

表 3-11 机动车和环境因素导致的事故类型

机动车和环境因素	个数	占比
其他道路使用者（车辆）造成的事故	863	73.4%
其他道路使用者（行人）造成的事故	136	11.6%
车辆视线障碍	58	4.9%
道路状况、障碍物	58	4.9%
技术缺陷	33	2.8%
天气、视线	28	2.4%

在面对不同道路交通状况时，如前方道路施工或极端天气影响，人类驾驶会因无法及时应对当前路况而导致事故发生。其中因道路状况和障碍物影响的典型案例如图 3.7 所示：

案例描述：2013 年 07 月 23 日 20 时，某越野车沿某高速左侧车道由南向北行驶，至道路施工混流处，因未及时发现前方施工，车辆前部右侧与中央隔离带发生碰撞，造成车辆受损、驾驶人及副驾重伤。



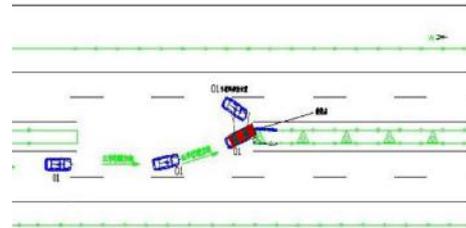
碰撞过程



场景搭建



草图绘制



仿真重建

图 3.7 单车事故重建分析

由于交通参与者的多样性，人类驾驶过程中因主观错误导致的事故是无法完全消除的；因不同驾驶员之间驾驶水平的差异性，在人类驾驶过程中因驾驶能力受限导致的事故是难以减少的；因外界环境中物的不安全状态，在人类驾驶过程中因外部环境和其他交通参与者导致的事故是难以避免的。因此，在动态交通环境下，不同交通参与者之间的异质性会导致不同事故致因出现，面对不同路况或场景时，驾驶人自身驾驶行为问题占有较大的比例，而环境因素（主要是其他交通参与者不规范驾驶）也会增大人类驾驶的事故风险。

### 3.3 自动驾驶汽车与人类驾驶汽车安全性对比分析

自动驾驶汽车发展首要任务是减少交通伤亡，提高道路交通安全。自动驾驶汽车利用全方位的感知系统、智能的决策系统和精确的执行系统，可以充分地识别道路中各类动态、静态目标，实现自主决策和车辆运行。自动驾驶汽车不会出现违反交通规则、疲劳驾驶、酒后驾驶、疏忽大意等情况，能极大减少甚至消除因驾驶员违法违规操作、注意力不集中、驾驶经验不足、酒驾、醉驾等产生的道路安全风险。这意味着，自动驾驶能显著减少人为因素导致的道路交通安全事故，促进道路交通安全水平提升。据国外机构 Eno Centre for Transportation 研究显示，如果美国公路上 90% 的汽车变成自动驾驶汽车，每年交通事故数量将从 600 万起降至 130 万起，死亡人数从 3.3 万人降至 1.13 万人。

虽然市面上没有任何一款车能彻底杜绝事故的发生，但自动驾驶汽车中的科学技术能够显著地降低事故发生的可能性和风险。2020 年 10 月 Waymo 发布《Waymo 公共道路安全性能数据》白皮书，首次对自动驾驶汽车遇到的碰撞事故进行了公开探讨。该报告显示，在约 610 万英里（约合 981 万公里）真实道路行驶过程中，Waymo 无人车一共发生 18 起碰撞或轻微接触事故。虽然仍有事故发生，但 Waymo 无人车整体碰撞事故率已经比较低了。更值得关注的是报告中对 47 起碰撞事故（18 起真实事故和 29 起模拟环境下的碰撞事故）原因进行了分析，其中 8 起伤害程度最严重的碰撞事故中，其他道路交通参与者不合规行为是事故发生的主要原因。相较之下，自动驾驶汽车严格遵守交规、发生事故时往往会执行减速、刹车等规避动作，反而表现出了更高的安全性。虽然 Waymo 报告中数据样本量有限，且并非是针对所有道路交通事故的研究，但通过这一具有典型性分析，我们还是可以看到，自动驾驶汽车交通安全性远高于人类驾驶员。

相较于人类驾驶，自动驾驶汽车能够有效地对周边环境进行提前感知，并对其他交通参与者做出正确礼让。针对人类驾驶事故场景，自动驾驶汽车能够显著减少车辆与二/三轮车之间和车辆与行人之间冲突风险，进一步保障弱势交通参与者生命安全。并且在因驾驶人自身原因等导致的单车事故中，自动驾驶汽车可以凭借严格的安全算法控制进行有效避免，进一步加强自身安全保障。因此，面对中国道路交通环境，发展自动驾驶能够较大提高道路交通安全水平。

相较于人类驾驶汽车事故主要致因中驾驶员自身错误，自动驾驶汽车在行驶过程中不需要或者很少需要驾驶员操作，车辆行驶将更加规范，因而能够减少因驾驶员因素导致的交通事故。

在面对驾驶人主观错误导致的事故致因中，因自动驾驶汽车不会有疲劳和情绪影响，完

善的决策规划能确保车辆按照交规行驶。此时，驾驶员主观错误中未按规定让行、速度过快、车道违规使用、酒驾、违反交通信号灯和疲劳驾驶等现象几乎可以完全得到解决，相当于在自动驾驶汽车正常行驶时能够完全减少人类驾驶主观错误，即人类驾驶 80% 的事故致因能够得到有效避免，交通安全得到较大提升。

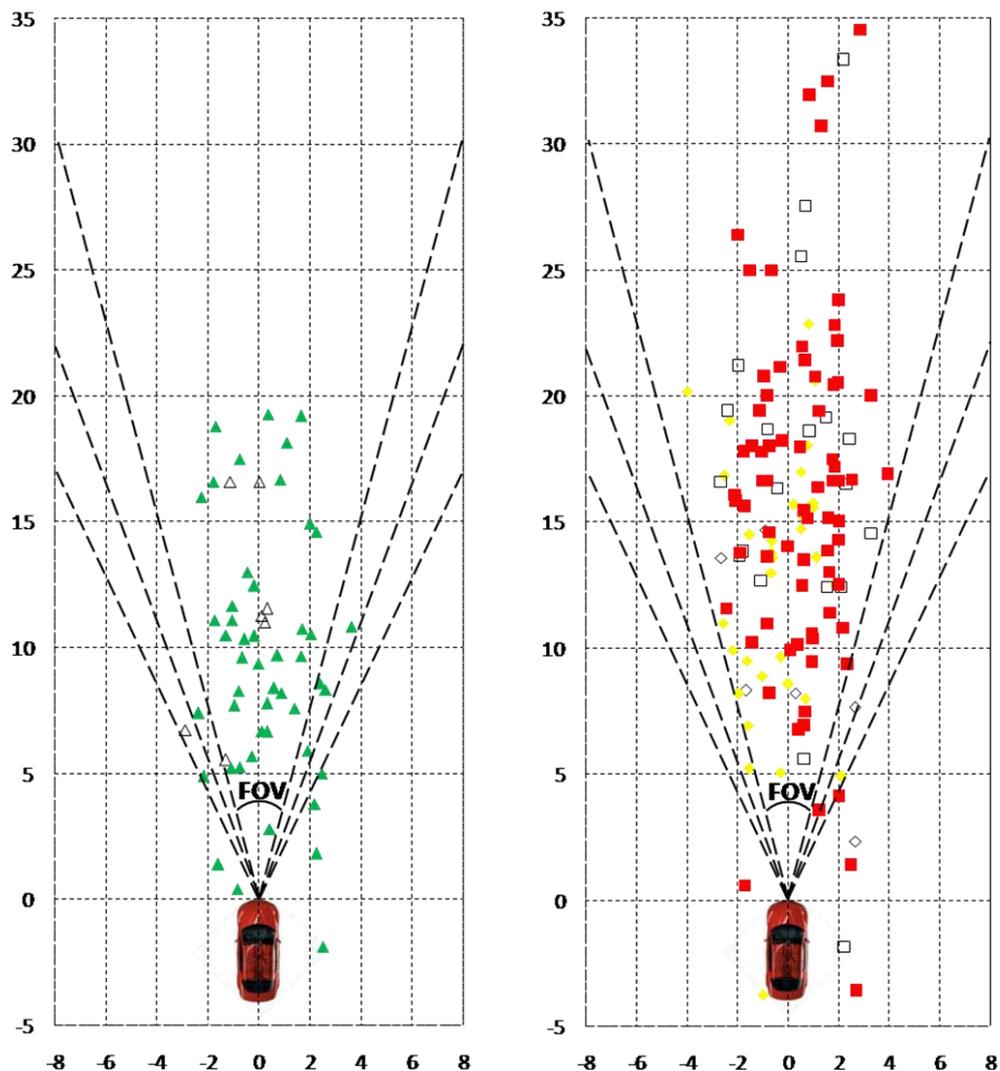


图 3.8 自动驾驶感知系统安全优势

在面对驾驶人能力受限导致事故致因中，自动驾驶汽车能够通过车路协同技术对周围环境进行全视角感知，面对危险场景时能够快速做出反应进行避撞控制，在多种传感器融合下对周围环境信息实时动态获取和识别，这些信息包括但不限于自车的状态、交通流信息、道路状况、交通标志等，此时，人类驾驶能力受限事故致因中驾驶熟练度低和其他错误驾驶行为能够得到解决。图 3.8 为 CIDAS 数据库中车辆碰撞前 1.0 秒时刻，探测范围为 30°、45° 和 60° 的行人重心分布。先进的自动驾驶感知功能相较于人类驾驶汽车能力受限问题能够提

前发现 90% 以上的事故案例。因此，自动驾驶汽车能够最大限度觉察到其他交通参与者，合理的与其他机动车辆保持安全距离。此时，人类驾驶能力受限事故致因中未留意其他参与者和没有保持安全距离能够得到有效改善。



图 3.9 极端天气影响下的自动驾驶汽车感知

在面对机动车和外部环境事故致因中，因自动驾驶汽车在上路前需经历充分的虚拟验证测试和真实道路测试经验，自动驾驶汽车能够针对雨雪等极端特殊工况保证稳定感知，此时，机动车和环境因素事故致因中天气、视线、道路状况和障碍物影响等能够得到有效应对。在自动驾驶汽车和人类驾驶汽车混合交通流环境中，自动驾驶汽车并不能规范其他交通参与者驾驶行为，不能完全避免由其他交通参与者造成的事故，但自动驾驶汽车能够对风险和危险进行提前感知和预判，此时，自动驾驶汽车能够有效减轻事故带来的伤亡情况，并且能够减少二次事故的碰撞风险。

CIDAS 典型事故场景中，自动驾驶汽车能够有效避免因车速、车距、同向驾驶、违反交通规则和人类缺陷等因素导致的事故发生，即其能够减少 CIDAS 中三分之一以上事故场景发生。并且，将 CIDAS 事故场景库对自动驾驶汽车进行应用，如图 3.10，自动驾驶车辆能够通过先进的感知、决策和执行技术减少和避免大多数事故场景的发生。

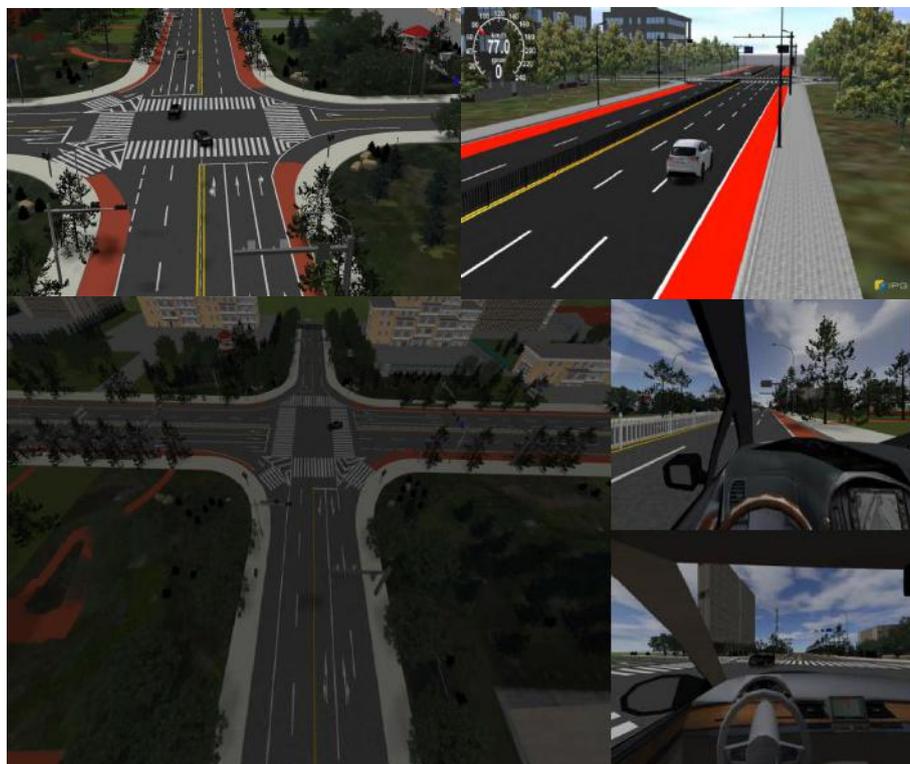


图 3.10 CIDAS 事故场景库-自动驾驶汽车应用

### 3.4 自动驾驶汽车事故分析

自动驾驶=零事故？自动驾驶安全性话题被越来越多人进行讨论。2018 年 Uber 在配备安全员的情况下测试其自动驾驶汽车，撞上了一名推着自行车过马路的行人。在此事件之前，Uber 自动驾驶汽车至少涉及 37 起轻微车祸。目前关于自动驾驶与事故关联形成了两极代表观点：一极认为，“自动驾驶事故”面前，应该对所有自动驾驶展开重估，应该叫停研发，禁止推广，从根本上杜绝类似事故。另一极强调，辅助驾驶的锅，不能让自动驾驶背，“真正的自动驾驶”就会有绝对安全，自动驾驶=零事故。面对不同认知和观点，我们既不能因为频发的辅助驾驶事故对自动驾驶汽车安全性进行完全否定；因受外部环境（其他道路参与者）影响，也不宜把自动驾驶与零事故划上等号。

#### 3.4.1 自动驾驶汽车真实事故案例

自动驾驶汽车凭借自身感知、决策和执行系统优势能够较好地解决传统汽车驾驶人主观错误和自身能力问题。然而面对因车或外部环境因素导致的不可避免情况，自动驾驶汽车也会发生事故。近期自动驾驶汽车事故案例主要表现以下几个方面：

#### (1) 自动驾驶汽车对复杂和突发危险场景未能有效处理

1) 美团无人车与机动车事故。据南方都市报报道，2021 年 10 月 9 日，北京市顺义区白马路与后疃村口（美团无人配送车道路测试路段），美团无人配送车自西向东在辅路的非机动车道上行驶与一辆从后疃村口自南向东右转进入白马路主路的人工驾驶小型轿车发生碰撞事故，双方车辆受损，未导致人员受伤。事故发生后，交警判定美团无人配送车为微型客车，因未在机动车道行驶承担全责。美团方面表示事故并非技术原因导致，事发前无人配送车的传感器已发现人工驾驶车辆，因该车行驶速度很慢系统判定无碰撞风险，所以继续行驶，但人工驾驶车辆未发现美团无人车突然加速行驶，虽然无人车紧急向北进行了一定角度的避让且无人车与现场安全员同时采取了紧急制动停止，但由于两辆车相对速度较快，两车发生了碰撞事故，碰撞场景如图 3.11 所示。



图 3.11 美团无人车与机动车事故

2) 全球首例自动驾驶汽车致人死亡事故。据人民网和车东西媒体报道，2018 年 3 月 18 日（当地时间）晚 10 点左右，美国亚利桑那州坦佩市一辆 Uber 自动驾驶汽车与一名推着自行车横穿马路（没有斑马线）的行人相撞，造成行人死亡。事故前 5.6 秒时，Uber 自动驾驶汽车已经检测到行人，但它未准确地将她归类为行人或预测她的路径，当自动驾驶汽车即将发生碰撞时，该情况已经超出了自动驾驶汽车制动系统的响应规格，需要安全员进行

接管，然而此时车内安全员正在低头观看屏幕，错失了最后的避险时机，导致了事故的发生，碰撞场景如图 3.12 所示。



图 3.12 Uber 自动驾驶汽车与二轮车事故

3) Google 自动驾驶汽车与公交车侧面碰撞。在美国加州机动车辆管理局 (California Department of Motor Vehicles) 所记录的自动驾驶汽车事故案例中，2016 年 2 月 14 日，一辆 Google 自动驾驶汽车以自动驾驶模式行驶，因前方道路有障碍物阻挡，Google 自动驾驶汽车试图变更到左侧车道。此时一辆公共汽车从左侧车道后面开过来，自动驾驶汽车和测试员都认为公交车会停下或者减速使其通过，并未进行任何操作，然而公交车司机继续保持直行，Google 自动驾驶汽车与公交车侧面发生了接触碰撞。Google 自动驾驶汽车左前挡泥板、左前轮及其驾驶员侧传感器受到损坏，现场没有人员伤亡报告，碰撞场景如图 3.13 所示。

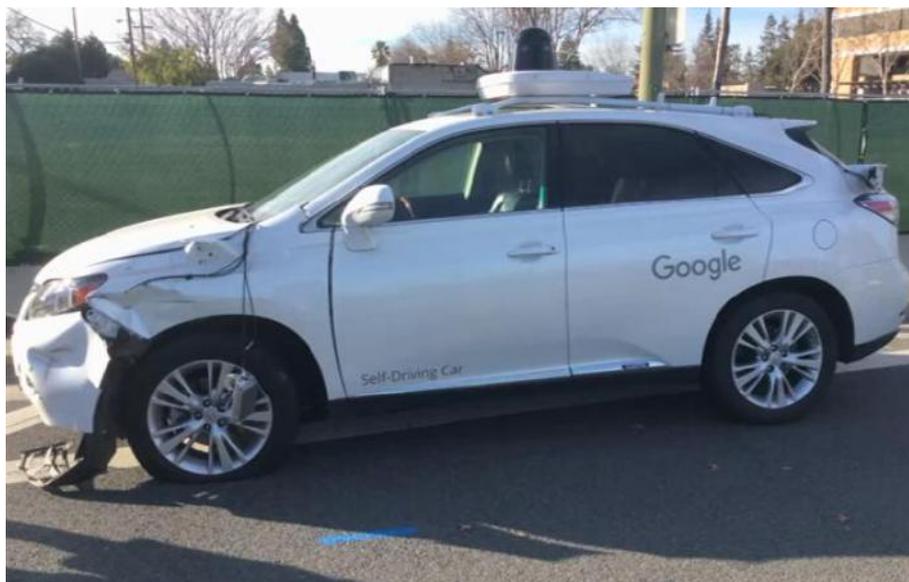


图 3.13 Google 自动驾驶汽车与公交车事故

(2) 其他交通参与者危险驾驶引起的自动驾驶事故案例

1) 百度与社会车辆碰撞事故。百度一辆 L4 级自动驾驶测试车辆曾于 2021 年在某开放道路测试过程中，发生一起由于安全员接管不当导致的车辆碰撞。事发时，测试车辆左转通过交叉路口，对向社会车辆直行闯红灯，进入路口后社会车辆前部碰撞测试车辆右侧前部。

事故过程分析：测试车辆进入路口时，社会车辆通行方向信号灯状态为红灯（见图 3.14 图 3.15），测试车辆具有优先通行路权。



图 3.14 测试车辆左转通过交叉路口前



图 3.15 社会车辆直行通过交叉路口前的信号灯状态

测试车辆在自动驾驶模式下左转进入路口（见图 3.16），行驶至路口中间位置时，感知到对向车道内有社会车辆处于运动状态，并根据预测出的行驶轨迹预判其有闯红灯的安全风险，从安全角度考虑，自动驾驶系统采取制动措施提前避让违规通行的社会车辆（见图 3.17）。

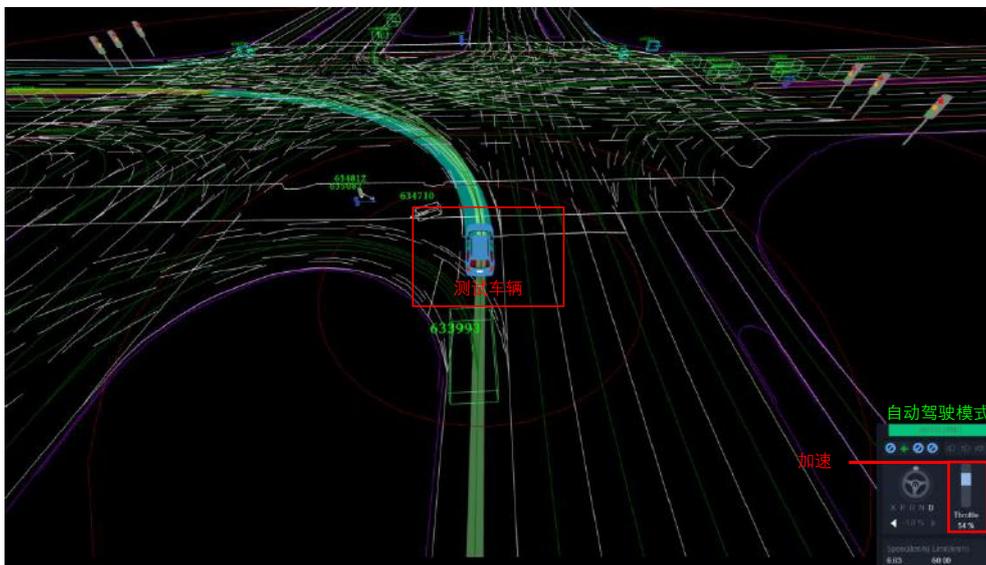


图 3.16 测试车辆起步

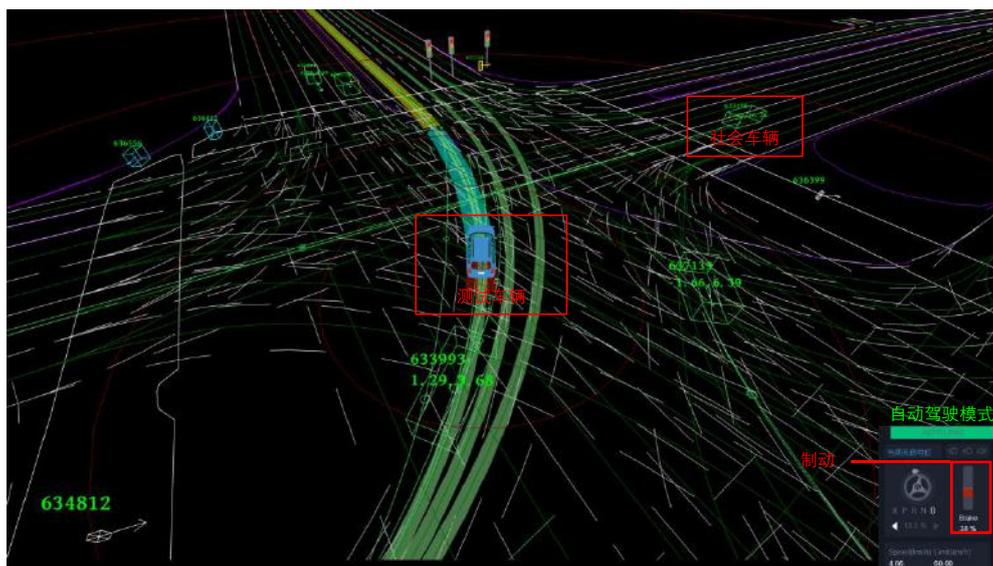


图 3.17 测试车辆感知到社会车辆后做出制动决策

但同时，测试车上的安全员也看到有车闯红灯朝向测试车驶来，出于驾驶本能，通过踩踏加速踏板的方式进行人工接管（见图 3.18），指挥测试车辆在人工驾驶模式下加速行驶，最终被社会车辆碰撞（见图 3.19）。

系统复盘显示，整个过程中，如果自动驾驶系统全程控制、人工驾驶不介入，测试车辆将在图 3.17 位置中停止，社会车辆将从测试车辆前方通过，不会发生此次碰撞。

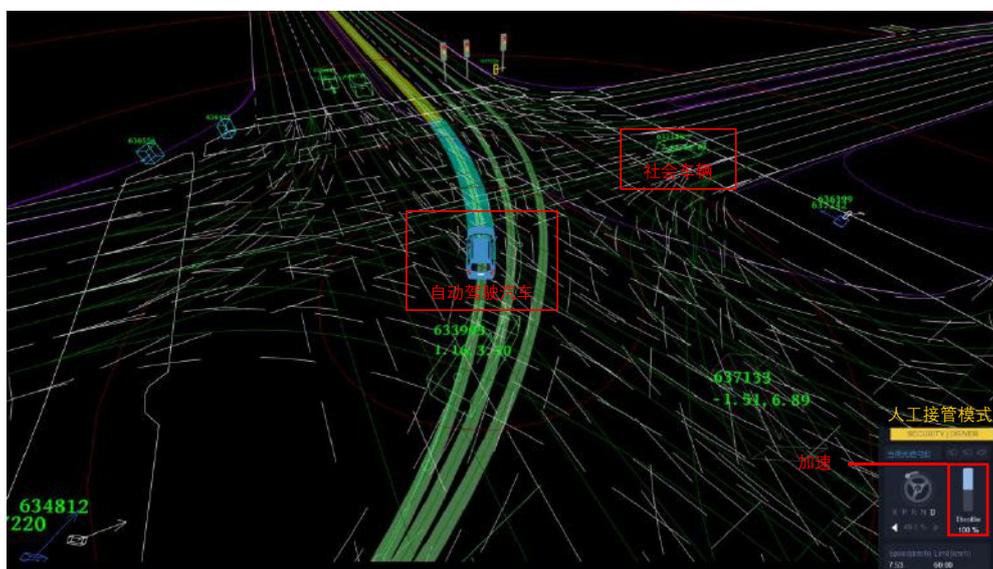


图 3.18 安全员人工接管

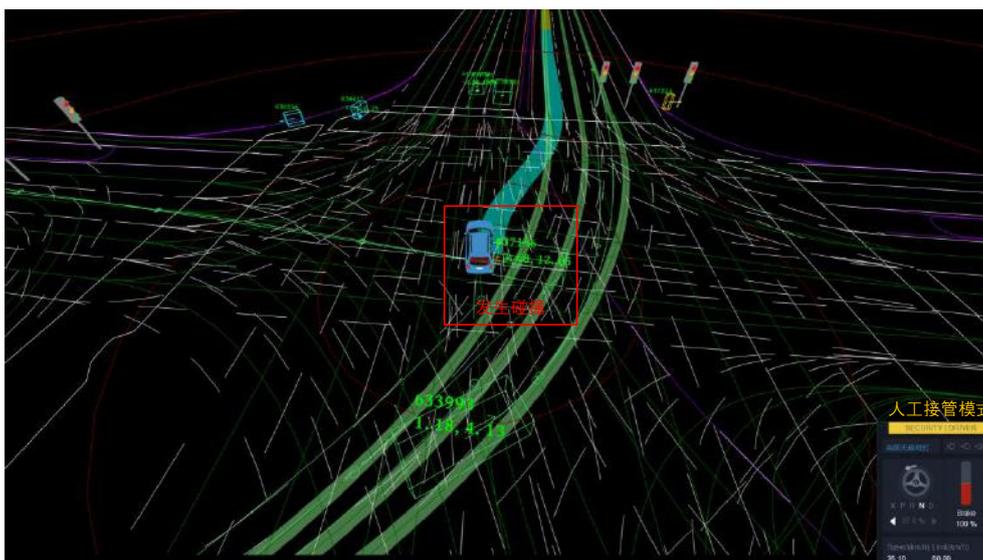


图 3.19 两车发生碰撞

**案例总结：**在上述道路交通事故场景中，针对违法行驶社会车辆，自动驾驶和人类驾驶做出了完全相反的应对措施，其原因在于人类驾驶对周边环境感知范围有限，且更倾向于完成自我通行目标，而自动驾驶因拥有更大环境感知范围和更科学的预测规划兼顾了通行目标和通行安全。这一优势在通行场景中体现的更为明显，自动驾驶和人类驾驶感知能力出现了“是与否”的区别。传统道路交通事故大多是由人类驾驶员疲劳驾驶和不遵守交通规则导致，而与传统人类驾驶不同，搭载自动驾驶系统的车辆拥有可持续、可预测以及反应迅速等优势，行驶表现优于人力。依靠系统预先感知能力，自动驾驶车辆还可提前识别出各个交通参与者的潜在危险，从而更好地进行应对。如果百度的这台 L4 级自动驾驶测试车辆安全员不进行基于自身经验的人工接管，完全由自动驾驶系统控制，这起碰撞事件完全可以避免发生。

2) **Waymo 自动驾驶汽车被其他社会车辆追尾事故。**据智车科技报道，2018 年 5 月 4 日凌晨，美国亚利桑那州钱德勒，一辆自西向东开的人类驾驶本田汽车为了躲避一辆向北开的车，突然连续变道至对向车道，撞击正在路测的 Waymo 自动驾驶汽车，导致车内测试员受轻伤。警方判断事故责任不在 Waymo。尽管 Waymo 汽车处于自动驾驶模式，但事发突然未能有足够时间避免事故发生，碰撞场景如图 3.20 所示。



图 3.20 Waymo 自动驾驶汽车被其他社会车辆追尾事故

3) 自动驾驶公共汽车与卡车事故。据中新网报道，2017 年 11 月 8 日，一辆由 Navya 开发的全自动驾驶公共汽车在美国拉斯维加斯市中心与一辆半挂货车相撞。半挂货车司机正在倒车进入一条小巷，全自动驾驶公共汽车在检测到前方半挂货车后放慢了自己速度，并使车辆停下。而此时卡车继续缓慢倒车，因两车距离过近，自动驾驶公共汽车被缓慢倒车的卡车右前轮胎撞击，造成轻微损坏，未造成人员伤亡，碰撞场景如图 3.21 所示。



图 3.21 自动驾驶公共汽车与卡车事故

4) Uber SUV 被其他社会车辆碰撞事故。据前瞻网报道，2017 年 3 月 24 日，一辆 Uber

自动驾驶试验车在亚利桑那州坦佩市发生交通事故。在一处十字路口处，由北向南行驶的 Uber 自动驾驶汽车与一辆东西行驶试图左拐的普通汽车发生了碰撞。Uber 自动驾驶汽车发生侧翻，另一部车严重受损，事故未造成人员伤亡。警方表示，事故是由人类司机并未让行直行的自动驾驶汽车所致，碰撞场景如图 3.22 所示。

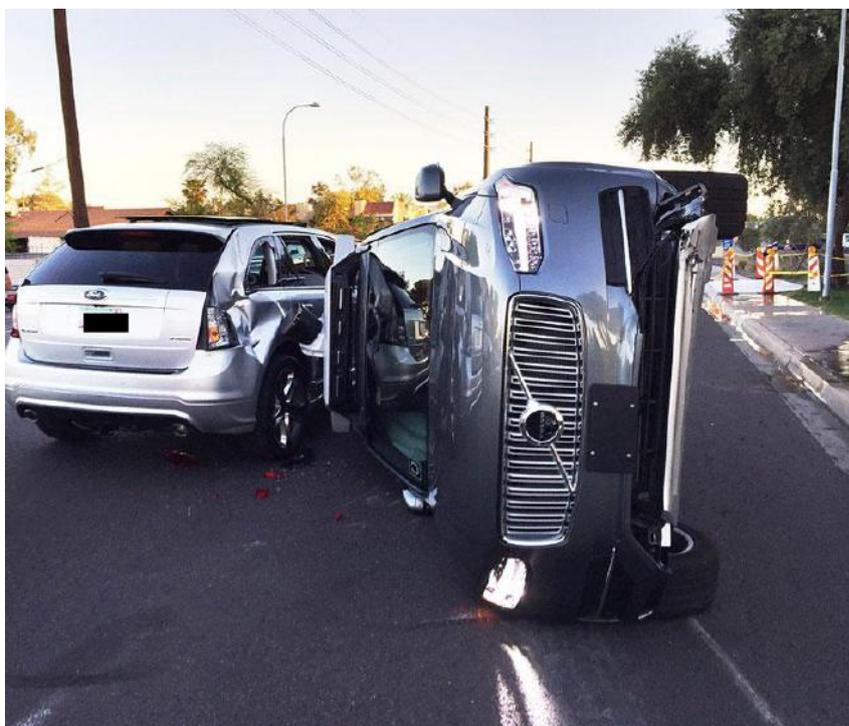


图 3.22 Uber SUV 被其他社会车辆碰撞事故

### (3) 辅助驾驶汽车事故案例

1) 小鹏汽车追尾事故。据汽车之家报道，2021 年 9 月 22 日，山东东营界内高速路段一辆小鹏电动汽车追尾碰撞前方载物板车，造成小鹏驾驶人受伤，两车不同程度损坏。根据驾驶人方面描述，事发时开启了 NGP（自动导航辅助驾驶），但车辆未进行减速，驾驶人介入刹车时已来不及避免事故发生，碰撞场景如图 3.23 所示。



图 3.23 小鹏汽车追尾事故

2) 蔚来汽车追尾事故。据太平洋汽车报道, 2021 年 8 月 12 日, 沈海高速公路莆田市涵江段, 一辆蔚来电动汽车追尾碰撞前方同车道正在施工作业的轻型普通货车后侧, 造成蔚来驾驶人当场死亡, 货车乘车人受伤。根据蔚来驾驶人方面证言及其提供的驾驶数据, 事发时该车启用了 NOP 领航状态 (自动辅助驾驶), 未能识别本车道内前方车辆, 车辆未进行急减速, 碰撞场景如图 3.24 所示。



图 3.24 蔚来汽车追尾事故

3) Tesla 与道路清扫车事故。国内披露的首起特斯拉 Autopilot 自动辅助驾驶功能使用中发生的事故致死案例, 比被普遍认为的全球首例致死事故还早 4 个月。据新华网和观察者网报道, 2016 年 1 月 20 日, 京港澳高速河北邯郸段一辆特斯拉轿车直接撞上一辆正在作业的道路清扫车, 发生追尾事故, 造成特斯拉驾驶人当场死亡。事发时, 特斯拉处于开启 Autopilot 自动辅助驾驶状态, 未能识别躲闪道路清扫车, 涉事驾驶人也未采取制动和避让措施, 导致了事故发生。交警部门认定驾驶特斯拉驾驶人负事故主要责任, 碰撞场景如图 3.25 所示。



图 3.25 Tesla 与道路清扫车事故

以上案例中，自动驾驶汽车在面对“未见过”复杂驾驶情景时或无法正确对周边事物进行有效分类，其仍存在处理能力不足问题。当自动驾驶汽车无法对复杂场景进行有效处理时，事故主要致因为安全员未能进行及时接管或安全员错误操作错失了最后的避险时机。在其他交通参与者危险驾驶引起的自动驾驶事故案例中，自动驾驶汽车并不能够规范其他社会车辆驾驶行为，在面对其他社会车辆违规行驶时，自动驾驶汽车并不能有效的进行躲避，多发于其他社会车辆对自动驾驶汽车发生的追尾事故和侧面刮蹭。在目前道路环境中行驶最多的辅助驾驶汽车案例中，主要致因为安全员过于相信辅助驾驶技术，没有对自动驾驶汽车进行有效监管，在事故发生前并没有做出相应的安全反应。

交通环境是动态可变的，在如今自动驾驶汽车与人类驾驶汽车共存的交通环境中，自动驾驶汽车仍然会存在对复杂场景处理不足现象，其中安全员接管问题和操作员对自动驾驶汽车或辅助驾驶技术过于信任而未能有效监管等问题是影响目前自动驾驶汽车自身安全行驶的最大弊端。

### 3.4.2 自动驾驶汽车事故致因分析

美国加州机动车辆管理局（California Department of Motor Vehicles，简称 DMV）从 2014 年 4 月份开始为自动驾驶汽车发放道路测试许可证，允许公司在公共道路上测试真正的自动驾驶汽车。在 2014 年至 2020 年中，DMV 详细记录到了不同厂商自动驾驶汽车真实道路测试事故案例 278 起。其中，2019 年进行道路测试的自动驾驶公司有 28 家，真

实道路测试总里程数约为  $2.85 \times 10^6$  英里（约为  $4.58 \times 10^6$  公里），发生接管次数为 8883 次，发生事故数为 105 起。因受疫情影响，2020 年进行道路测试公司有 25 个，真实道路测试总里程数约为  $1.95 \times 10^6$  英里（约为  $3.13 \times 10^6$  公里），发生脱离次数为 3695 次，发生事故数为 44 起。据统计，在所记录真实事故案例中，自动驾驶汽车事故主要由其他道路交通使用者所致，占比为 84%，因自动驾驶汽车自身原因所致事故占比为 16%。自动驾驶汽车事故常发于交叉口等地，2019-2020 年自动驾驶汽车事故地点分布如表 3-12 所示：

表 3-12 DMV 自动驾驶汽车事故地点分布

事故地点	个数	占比
交叉口（无信号灯）	58	38.9%
一般路段	53	35.6%
信号灯处	25	16.8%
交通标志处	13	8.7%

自动驾驶汽车发生事故时碰撞点位如表 3-13，不同点位以事故发生时自动驾驶汽车碰撞部位为准。其中，后部碰撞表示其他道路交通参与者追尾正常行驶的自动驾驶汽车。

表 3-13 DMV 自动驾驶汽车碰撞点位

碰撞点位	个数	占比
后部	101	67.8%
前部	28	18.8%
侧部	20	13.4%

在自动驾驶汽车事故地点和碰撞点位中，事故主要致因表现为其他道路交通参与者对自动驾驶汽车侧面剐蹭和追尾，占比高达 81.2%，因其他道路交通参与者追尾导致事故占比接近 70%。在追尾事故中，主要为自动驾驶汽车在交叉口（无信号灯）处和信号灯处保持正确礼让时，其他道路交通参与者未能保持相应安全距离而发生碰撞。在侧面剐蹭事故中，主要为其他道路交通参与者占用自动驾驶车道进行对向超车或强制变道。因其他道路交通参与者导致的追尾和侧面剐蹭事故致因主要包含以下几点：

1) 在其他道路交通使用者所致事故中，追尾自动驾驶汽车占比最高，其中主要包含其他机动车辆试图对自动驾驶汽车强行变道超车时或当自动驾驶汽车在交叉口附近进行减速礼让时，其他机动车辆对自动驾驶汽车发生的追尾事故。

2) 其次是因其他机动车辆驾驶不规范，如逆行、随意变道等违反交通规则行为，与自动驾驶汽车发生剐蹭事故。

3) 在红绿灯等交叉口前，因非机动车或行人违反信号灯控制等导致的侧面碰撞自动驾驶汽车事故。

自动驾驶汽车因自身问题主动碰撞其他道路交通参与者占比为 18.8%，其事故致因主要包含以下几点：

1) 在自动驾驶汽车本身原因所致事故中，自动驾驶汽车主动碰撞静止物占比最高，其中主要包含因躲避其他车辆不良驾驶行为与路边停放车辆碰撞，因自身车道偏离导致的单车碰撞等。

2) 其次，前车突然急减速或在未使用相应指示灯（如未使用转向灯等）情况下，强制加塞至自动驾驶汽车行驶道路等，自动驾驶汽车难以对该社会车辆形态（如特种车辆等）及不良驾驶行为进行有效分类和识别，从而发生剐蹭事故。

3) 当自动驾驶汽车感觉到前方危险时（如雨天等道路湿滑情况），脱离自动驾驶转为手动驾驶过程中，因安全员未能及时反应导致的事故。

为了鼓励自动驾驶汽车发展，促进自动驾驶汽车安全性，国内也对自动驾驶汽车进行了真实道路测试试验。截至 2020 年底，北京市已累计开放 4 个区县的自动驾驶测试道路，共计 200 条，699.58 公里；开放 2 个自动驾驶测试区域，面积约 140 平方公里；累计为 14 家自动驾驶企业的 87 辆车发放一般性道路测试牌照，道路测试里程超 200 万公里，其中，百度在测试车辆和测试里程数方面均位列第一。测试过程中，未对其他交通参与者产生不良影响；首次为百度 43 车发放了允许载人测试第三阶段以及 5 车发放了允许无人化测试第一阶段的测试许可。

近期《北京市自动驾驶车辆道路测试报告》公布了自动驾驶汽车在北京开放道路测试过程和封闭试验场中的事故和脱离情况。2020 年度，封闭试验场内测试里程超过 5.44 万公里，发生碰撞事故 3 起，平均每 1.81 万公里发生一次碰撞事故；其中，碰轧路边石 2 起，未及时躲避模拟行人发生碰撞 1 起。截至 2020 年底，封闭试验场内累计测试里程 20 余万公里，发生碰撞事故 19 起，未出现对测试人员造成伤害的安全事件。事故原因主要是由定位异常及感知错漏，其中定位异常在所有的事故原因中占有最大的比重。

在 2020 年度真实道路测试过程中，北京市对自动驾驶汽车进行了脱离数据的汇总，其中脱离类别主要包括系统故障（系统检测到异常发出接管信号引发的接管），策略缺陷（由于算法模块策略原因导致的非预期的车辆行为引发的接管），人工安全防御（超出设计 ODD 车辆系统无法解决时的接管），人为接管（由于测试需求或人为原因造成的接管）。从主车驾驶行为角度对脱离场景进行总结，数据显示直行类场景脱离占 47%，路口类场景脱离占 42%，其他场景共占 11%。自动驾驶车辆在直行时的脱离情形包括社会车辆加塞、违规变道、违规停车、行人横穿等。路口类场景脱离较多的原因包括自动驾驶需要同时处理信号灯、标志标线、行人、车辆等目标，路口交通流密度大、数量较多，对目标行为预测的难度更大。从统计结果来看，目标车道被占用(25%)、道路施工(2%)、路口博弈(17%)是造成自动驾驶脱离的主要原因，其他如交通参与者逆行、横穿、切入、过于贴近等原因造成的脱离共占 36%。自动驾驶车辆的规划系统基于不违反交通规则的前提为车辆规划行驶路径，这样的设计原则确保了自动驾驶车辆基本不会出现违反交通规则的行为，但也导致在自动驾驶车辆无法像人类驾驶员那样“灵活”地选择借道通过，自动驾驶系统无法判断哪种情况下可以“违反”行驶规则，哪种情况下必须严格遵守。

图 3.26 所示为一辆公交车借对向车道超车，此时车辆横向距离和道路空间不足以满足自动驾驶汽车前行，为了避免碰撞风险，必须向右侧借非机动车道让行。而在严格不违反交通规则前提下，自动驾驶汽车面对该复杂场景，可能较难像人类驾驶员那样“灵活”处理和应对。



图 3.26 道路测试-社会车辆抢行风险场景

图 3.27 所示为实际道路测试过程中遇到的社会车辆违章逆行场景。自动驾驶汽车在一个施工道路右转，视野受施工围栏遮挡，难以及时获取目标车道情况，面对其他道路交通参与者异常行为，“谨慎”的自动驾驶汽车难以像人类驾驶员一样进行借用对向车道绕过障碍车。



图 3.27 道路测试-社会车辆违章逆行风险场景

面对复杂交通环境，自动驾驶汽车因自身或其他道路交通参与者影响总会被暴露在危险环境之下，对于人类“老司机”都无法避免的事故，自动驾驶汽车也难以做出较好地决策。

### 3.4.3 自动驾驶汽车现存风险与未来优势

根据 DMV 所披露的自动驾驶事故案例和所记录的自动驾驶汽车事故责任分布可以看到，对于其他道路交通使用者违反交通规则等错误行为导致的事故，自动驾驶汽车仍然无法完全避免，即自动驾驶汽车在保证自身安全行驶情况下，无法规范其他道路交通参与者驾驶行为。因周围环境的复杂性，自动驾驶汽车无法为了躲避其他道路交通参与者的追尾或侧面刮蹭而做出更危险的强制变道、急加减速或其他违反交通规则行为。

自动驾驶汽车因自身问题主动碰撞其他道路交通参与者事故中，自动驾驶“接管机制”问题占主要原因。当面对无法有效决策场景或是即将有潜在风险场景时，自动驾驶汽车在提示故障及异常情况下，安全员因注意力分心或疲倦等现象未能进行及时接管而导致事故发生；安全员因未能正确认识如何驾驶自动驾驶汽车而进行错误接管，即在自动驾驶汽车正常行驶时，安全员未能像自动驾驶汽车那样对周围环境进行全方位感知，以为自动驾驶汽车在“错误驾驶”，并对其进行强制错误接管而导致事故发生。

在面对复杂场景和“未见过”突发场景，如当前方车辆为装备车等特种车辆或“鬼探头”和猫狗横穿场景时，自动驾驶汽车难以对其进行正确识别和分类，系统难以对其进行及时决策和处理，即自动驾驶汽车识别及应对突发危险场景的能力还需要持续提升。

然而，在面对现存事故风险或已发事故案例中，自动驾驶汽车尽管无法完全避免交通事故，但其相比于人类驾驶汽车，能够显著降低事故带来的人员伤亡和财产损失。DMV 公布

的 2019 年至 2020 年 149 起事故案例中，没有一起死亡事故，接近 83% 事故未涉及人员受伤。而在有人员受伤案例中，仅有 2 起事故有安全气囊打开，且人员受伤程度仅为轻伤。其余 20 多起事故均仅为安全员或事故对方人员感觉到背部或颈部疼痛。

因此，随着自动驾驶汽车能力不断提升，安全员人工错误操作相关风险能够得到相应的改善；路侧会持续改造升级建成面向机器的交通系统；全自动驾驶汽车普及后会进一步减少不规范的交通参与者驾驶行为，进而减少因人类错误带来的事故；在面对不可避免事故中，自动驾驶汽车也能极大减少道路交通人员伤亡情况，有效避免事故带来的二次伤害，保障道路交通安全发展。

# 04

## 总结展望



### 4.1 观点总结

#### (1) 发展自动驾驶势在必行

自动驾驶以人工智能（AI）为基础，以数字化、智能化为依托，集环境感知、规划决策、车路协同、高精度地图与定位等高新技术于一体，顺应汽车产业电动化、网联化、智能化、共享化的发展潮流和趋势。近年来，中国、美国、欧盟、日本、韩国等纷纷加快推进政策法规研究、技术标准体系建立，鼓励自动驾驶汽车的技术研发和道路测试，加强安全监管，推动自动驾驶行业发展，包括百度、谷歌、特斯拉、福特、通用、宝马等科技巨头和传统车企都在加速布局汽车自动驾驶领域，加快产品推广和应用和产业落地发展。

中国政府高度重视自动驾驶产业发展，将自动驾驶列入国家战略。自动驾驶是交通运输未来发展的方向，是建设智慧城市生态系统不可或缺的一部分。随着硬件、软件及操控系统等技术的不断发展和完善，在政府顶层设计的推动和系列支持政策的助力下，中国自动驾驶商业化落地正在加速到来。

#### (2) 自动驾驶“安全第一”

自动驾驶汽车的安全性是自动驾驶技术发展和应用的核心，自动驾驶汽车安全系统的设计和开发满足功能安全、预期功能安全等过程保障要求，构建主安全系统、冗余系统、远程云代驾三层安全体系，从多个角度在技术上确保“安全第一”。

主安全系统以高稳定、实时性、低时延的操作系统为基础，通过“感知-规划-执行”能力进行系统运行。泛感知系统结合地图形成泛感知能力，准确刻画周围环境信息；采用多系统融合定位形成冗余；强视觉感知能力，保证全方向视距；能够对沙尘暴、大雾雨雪等恶劣天气进行识别和检测，实现泛场景应用。决策规划控制以保证遵守交通法规为安全框架，采取机器学习型方法确定障碍物让超决策，避免碰撞兜底策略理论计算确保核心障碍物无碰撞，结合动力学模型保证控制安全执行；实现盲区遮挡、交互博弈、高风险场景防御性驾驶等极端场景的应对能力；通过不断自学习进化养成“老司机”。车路协同提供超视距精准感知能力，可独立提供完整感知，打造适合汽车机器人的道路。

冗余系统进一步保障了自动驾驶系统的可靠性，计算单元及域控、传感器、车辆底盘等硬件均具备全冗余能力，当监测到软硬件异常状态或超出 ODD 应对能力，便针对性启动冗余系统，功能降级进入 MRC，从而安全控制车辆。

远程云代驾提供了远程实时控制车辆的基础能力，适用于遇困脱困、场景风险预警及干

预、复杂作业协助等场景，可实现一对多条件下的能力缺口补位。

完备测试流程和体系，通过对软件、硬件、车辆进行大规模的离线环境测试、车辆在环测试、道路在环测试，验证每个场景下系统的合理性、安全性和稳定性，持续提升车辆驾驶能力。在通过严格的能力评估和考试获取合规牌照后，自动驾驶车辆才能进行开放道路测试，同时配备车端或云端安全员提供安全屏障。经过一系列闭环的测试和验证，不断提升自动驾驶车辆自主上路的安全性。

### (3) 自动驾驶安全性高于人类驾驶

研究表明，传统的交通事故大多是由驾驶员的人为因素导致的。自动驾驶可以有效减少由于驾驶员疲劳驾驶、酒后驾驶、分神、操作不当、情绪影响及不遵守交通规则等人为错误原因引起的道路风险，从根本上避免人类驾驶过程中的驾驶员因素不安全行为。

在实际道路测试中，搭载自动驾驶系统的车辆拥有可持续、可预测以及反应迅速等优势，表现出比人类更高的安全性。相比人类驾驶员，自动驾驶汽车在感知、决策和执行三方面大幅度减少危险和事故的发生，实现比人类更安全的驾驶，促进道路交通安全水平的提升。

## 4.2 展望建议

### (1) 未来面向更安全的自动驾驶

自动驾驶技术持续发展，为实现全面无人化驾驶，从三方面来提升安全能力。

首先，扩大规模持续进行开放道路的测试里程积累，收集海量的数据，挖掘各类极端场景，训练算法模型，提升自动驾驶系统的算法智能性和泛化性，在人车共驾时代，能够更加智能的预判和防御驾驶，提前识别各类交通参与者的意图，做出安全的驾驶行为。

其次，打造更加安全的自动驾驶车辆，面向车规和量产，生产专为自动驾驶而设计的车辆，全套传感器前装量产，同时配置完备的冗余传感器和车辆线控底盘冗余，在任何情况下都能保证车辆受控，以及降低车辆和硬件失效故障。此外，需要建设更强大的车端风险监控系统和软件冗余系统，针对各个等级的风险预警，推进全栈冗余设计，能有效应对车辆底盘、硬件平台、软件平台三个层次单点故障或功能失效，为完全无人自动驾驶系统提供基础支撑。依照功能安全规范，提升安全问题的自主检测覆盖度，完善独立进入安全状态的能力；全方位实时监控及预警，并与远程云代驾联动，为远程提供决策，协助车辆快速脱困；借助道路环境规范、车路协同、5G云代驾覆盖等更适应自动驾驶的基础设施，为无人驾驶系统补位。

最后，提升远程云代驾的覆盖，拓展更多远程驾驶的覆盖场景，实现自动驾驶完全的安全兜底系统，通过不断优化网络传输时延和可靠性，使得远程云代驾堪比车端驾驶员的操作反应。提升远程云代驾的人效比，实现远程云代驾能够覆盖大规模自动驾驶车队的远程安全保障。

### (2) 加强自动驾驶汽车安全相关法规标准体系建设

自动驾驶正处于技术快速演进、产业加速布局的商业化前期阶段，传统汽车中对产品管理、交通管理、保险监管、网络安全等方面的法规标准已不能完全适用于自动驾驶汽车的发展，存在一定的空白盲区，甚至阻碍。虽然政府和行业组织已在积极制定自动驾驶相关法规标准，但由于自动驾驶涉及面较多，加之高频的技术迭代，使得相关法规标准难以在产生新需求的当下时间内进行确定。自动驾驶汽车发展陷入“没有标准无法开展应用验证，而未经应用验证又无法制订标准”的矛盾境地，制约了产业的快速发展。

安全是自动驾驶技术与产业应用发展最重要的前提条件，加快研究和制定自动驾驶汽车安全相关法规标准体系，能够有效推进自动驾驶汽车研发、生产、销售和商业化应用相关法律法规标准的发展，对自动驾驶汽车行业的参与主体形成规范引导，同时，利于自动驾驶系列科学实验豁免机制的建立，对弥补自动驾驶领域相关法规标准的“空窗期”，充分平衡产业创新和监管审慎之间的关系，提高行业资源的配置效率，保障自动驾驶实践工作的稳步推进具有积极的作用。

### (3) 加快推广自动驾驶规模化测试和商业化试点

实际道路测试对于验证自动驾驶功能与性能的优劣具有重要意义。目前，国内外针对自动驾驶汽车的运行安全测试都还处于探索阶段，尚未形成一套完整成熟的测试评价体系和准则，不利于满足产业发展的切实需求。另外，自动驾驶测试受测试技术、测试场地、测试场景、测试管理等多方面条件限制，现有的测试方法试验周期长，测试成本大，无法满足自动驾驶商业化快速发展的需求。

因此，需要加快推广自动驾驶规模化道路测试和示范应用，探索新的测试技术和方法，提升测试效率，提高测试评价的经济性、可靠性和完整性，通过大量的测试验证不断促进无人化技术提升。同时，尝试自动驾驶出行服务商业化试点，促进民众了解和接受自动驾驶，探索更多应用服务和商业模式创新，阶段性统筹推进商业化规模化运营。从理论到实践再到落地，对加快自动驾驶技术的量产，加速推进自动驾驶商业化进程都具有重要意义。

安全是汽车产业发展的永恒主题。自动驾驶旨在提升交通安全性，降低交通事故率以拯

救更多的生命，实现比人类驾驶更安全的出行。党坚持实施创新驱动发展战略，把科技自立自强作为国家发展的战略支撑。鼓励、支持、引导自动驾驶产业的应用，发展自动驾驶相关生态系统，不仅满足人们美好出行的需要，也符合国家创新驱动发展的战略。2021年11月11日，中国共产党第十九届中央委员会第六次全体会议审议通过了一份特别的“百年总结”——《中共中央关于党的百年奋斗重大成就和历史经验的决议》，在社会上掀起了学习热潮。同样拥有百年历史的汽车产业，也从党的百年奋斗历程中汲取了奋进的力量。

百年恰是风华正茂，在国家第二个百年奋斗目标的新赶考之路上，相信，通过加强自动驾驶方面相关基础研究，推进关键核心技术攻关和自主创新，自动驾驶的发展和应用将为建设智能交通、塑造智慧城市夯实基础，打造出一个智能、平安、绿色、共享的交通出行新时代，为人民交上一份满意的答卷。

# 参考文献

- [01] World Health Organization. Global status report on road safety 2018: summary[R]. World Health Organization, 2018.
- [02] 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,2017-2020.
- [03] SAE J3016.Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles[S],2021.
- [04] 汽车驾驶自动化分级 (GB/T 40429-2021) [S]. 中国工业和信息化部, 2021.
- [05] 新能源汽车产业发展规划 (2021~2035 年) .国务院办公厅,2020.
- [05] 国家综合立体交通网规划纲要 (2021 年) .中共中央 国务院,2021.
- [07] 2021 百度自动驾驶出行服务半年报告[R] .百度 Apollo,2021.
- [08] 智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范 (试行) .工业和信息化部 公安部 交通运输部,2021.
- [09] 自动驾驶车辆测试安全员专业技能要求(T/ITS 0132-2020)[S].中关村中交国通智能交通产业联盟,2021.
- [10] 道路交通安全法 (修订建议稿) . 公安部,2021.
- [11] 道路机动车辆生产企业及产品准入管理办法.工业和信息化部,2018.
- [12] 关于加强智能网联汽车生产企业及产品准入管理的意见.工业和信息化部,2021.
- [13] 关于汽车远程升级 (OTA) 技术召回备案的补充通知.市场监管总局办公厅,2021.
- [14] 汽车产品缺陷线索报告及处理规范 (GB/T 39892-2021) [S]. 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会,2021.
- [15] 北京市关于加快推进自动驾驶车辆道路测试有关工作的指导意见 (试行) .北京市交通委员会 北京市公安局公安交通管理局 北京市经济和信息化委员会,2017.
- [16] 北京市自动驾驶车辆道路测试管理实施细则 (试行) .北京市交通委员会 北京市公安局公安交通管理局 北京市经济和信息化委员会,2017.
- [17] 自动驾驶车辆道路测试能力评估内容与方法(T/CMAA 116-01-2018)[S].中关村智通智能交通产业联盟,2018.
- [18] 自动驾驶车辆封闭试验场地技术要求(T/CMAA116-02-2018)[S].中关村智通智能交通产业联盟,2018.
- [19] 2021-2027 年中国机动车行业市场研究分析及投资战略规划报告[R].智研咨询,2021.
- [20] 佚名. 公安部交通管理局公布 2020 年上半年事故多发 10 大路段和肇事突出 10 大交通违法行为[J]. 道路交通科学技术, 2020(4):1.
- [21] 林嘉兴. 自动驾驶技术遭遇行车安全困局[J]. 中国汽车市场, 2018(9):3.
- [22] 北京市自动驾驶车辆道路测试报告[R].中关村智能交通产业联盟, 2020.
- [23] Schwall M, Daniel T, Victor T, et al. Waymo public road safety performance data[J]. arXiv preprint arXiv:2011.00038, 2020.
-

# 自动驾驶汽车交通安全白皮书

