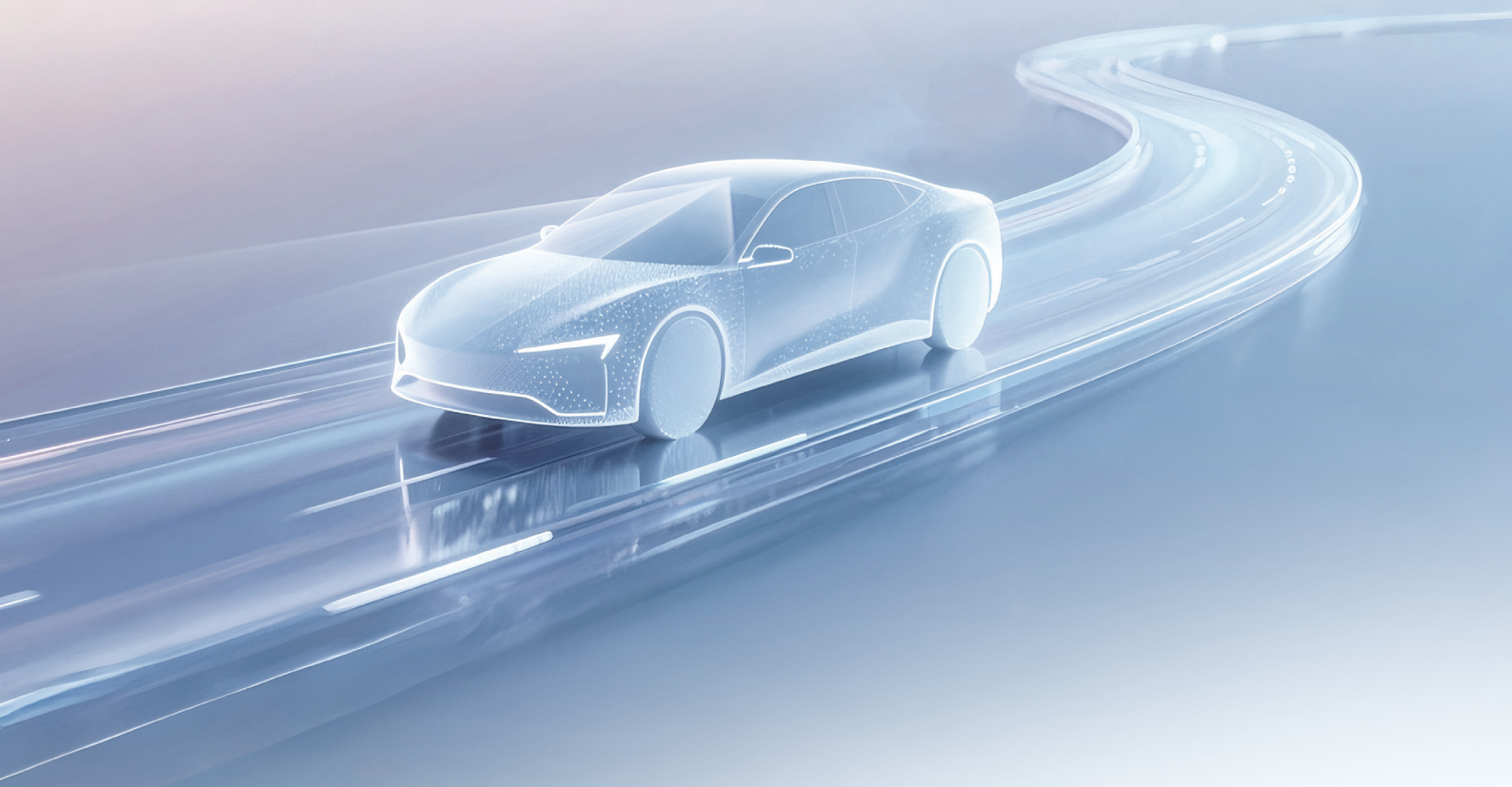


汽车智能驾驶技术及产业发展白皮书



- 联合发布单位 -



中国汽车技术研究中心有限公司
China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd



清华大学
Tsinghua University





汽车智能驾驶技术及产业发展白皮书

White Paper on Technology and Industry
Development of Intelligent Driving

中国汽车技术研究中心有限公司|清华大学|华为技术有限公司

2025 年 7 月

指导专家

中国工程院院士 清华大学车辆与运载学院教授 李骏

编写组成员

中国汽车技术研究中心有限公司

清华大学

深圳引望智能技术有限公司

华为终端有限公司

序言

在当今时代，科技创新正以令人瞩目的速度重塑着人类社会的未来。安全的自动驾驶作为智能交通系统的核心领域，已然成为全球科技竞争和产业变革的关键焦点。值此百年未有之大变局，我非常荣幸能够参与到相关工作中，并为《汽车智能驾驶技术及产业发展白皮书》作序，同时借此机会与业界同仁分享我对自动驾驶安全发展的思考和展望。

近年来，中国自动驾驶产业在政策支持、技术创新和市场需求的共同推动下取得显著进展。一方面，组合驾驶辅助系统持续升级迭代，高等级自动驾驶测试与准入稳步推进；另一方面，频发的交通事故也凸显出安全技术仍是其产业规模化应用的关键前提。

以人为本是初心，安全为先是使命。自动驾驶的目标不仅是解放人类的双手，更是在于安全、高效地重构未来出行方式与提升社会运行效率。通过构建安全无障碍出行体系，推动碳减排目标落地，并革新城市治理的智慧化路径。只有当技术创新深度融入安全的框架，并根植于创造社会价值，才能让科技成果转化普惠民生的发展动能，让每一条道路都通向更美好的安全出行图景。

技术突破是根基，安全落地是底线。自动驾驶技术的核心在于构建全域要素深度融合的智能系统。需要在感知算法、决策控制、高精定位、计算芯片等关键领域持续深耕，同时以更高标准解决复杂交通场景下的长尾问题。但技术的进步必须以安全为前提，必须将“可解释性”和“可靠性”融入技术研发的全生命周期，构建覆盖汽车研发、测试、运行的安全框架，让技术始终服务于人的生命价值。

产业协同是路径，生态开放是关键。自动驾驶技术的安全落地离不开跨行业、跨领域的深度融合。从芯片、传感器、通信等硬件层面的安全性与自主可控，到软件平台、数据服务的安全共享与标准化，再到交通基础设施

的智能化安全升级，需要产业链上下游打破壁垒，形成共研、共建、共享”的生态体系，共同筑牢安全基础。唯有如此，才能在保障安全的前提下提高技术转化效率，实现规模化商业应用的突破。

制度创新是保障，全球合作是趋势。我国陆续出台了多项政策文件支持自动驾驶汽车安全准入和上路通行，有效促进了全国范围内开展自动驾驶汽车的规模化示范应用和新型商业模式的实践探索。同时，深圳、上海、重庆、武汉等许多城市也在积极借助地方立法强化安全保障措施，推动自动驾驶及相关产业的安全、合规发展。安全无国界，中国也积极参与国际安全标准制定，推动技术与规则的互认互通，在开放合作中贡献中国安全方案。

《汽车智能驾驶技术及产业发展白皮书》的发布恰逢其时。本书系统梳理了技术演进脉络、产业生态格局与未来发展趋势，尤其注重对安全保障体系、风险挑战的剖析，既是对行业经验的系统性凝练，更是以精准角度剖析发展瓶颈，以创新思维擘画破局路径。希望本书能成为“政产学研”各界人士的参考，助力中国自动驾驶产业在技术攻坚、安全保障、商业落地与社会价值创造中实现新的突破。

未来已来，唯变不变。面对安全挑战，让我们以开放包容的心态拥抱变革，以科学理性的精神恪守安全底线、锚定发展方向，共同书写安全、可靠、智能的时代新篇章。

李骏

中国工程院院士 清华大学车辆与运载学院教授

2025年7月8日

前言

全球汽车产业正经历百年未有的深刻变革，以智能化、网联化为核心的智能网联汽车技术加速演进，成为重塑交通出行生态、推动产业转型升级的重要引擎。智能驾驶技术作为智能网联汽车发展的关键技术底座，其突破程度直接决定着产业发展的深度与广度。我国已将智能驾驶技术发展提升至国家战略高度，通过政策法规创新、标准体系构建、测试场景开放等多维度推进技术落地。然而，面对复杂的道路交通长尾场景应对、车规级芯片性能瓶颈、车用操作系统自主可控、数据安全与伦理挑战等关键问题，产业亟需系统性梳理技术路径、研判发展趋势、凝聚发展共识。

本书中所述的智能驾驶是行业内的一种通俗叫法，涵盖了 GB/T 40429—2021《汽车驾驶自动化分级》标准定义中 1 级驾驶自动化（部分驾驶辅助）、2 级驾驶自动化（组合驾驶辅助）、3 级驾驶自动化（有条件自动驾驶）、4 级驾驶自动化（高度自动驾驶）与 5 级驾驶自动化（完全自动驾驶）功能。当前，我国仍处于 2 级驾驶自动化阶段，未来随着技术与产业的发展与成熟，3 级驾驶自动化将逐步向商业化落地迈进。本书重点聚焦 2 级与 3 级驾驶自动化。我国智能驾驶产业在发展进程中呈现三大特点。一是国家战略布局。国家层面已将智能网联汽车列为政府工作报告中的重点发展方向，同时，地方先试先行，北京、武汉等已通过相关条例，一定条件下允许 3 级自动驾驶汽车上路测试及运营。二是企业竞争加剧。头部企业正加速技术迭代，华为发布乾崮智驾 ADS 4 组合辅助驾驶系统、比亚迪推出全车系组合辅助驾驶升级策略、吉利汽车推出“千里浩瀚”组合辅助驾驶系统、长安汽车发布“北斗天枢 2.0”计划、小鹏 G6 全系标配图灵组合辅助驾驶系统等，智能驾驶技术已成为企业争夺市场、塑造核心竞争优势的重要方向。三是用户需求升级。在购车决策中，智能驾驶功能已成为除传统指标外的重要考

量因素，智能驾驶功能的安全、舒适、效率等已经成为一、二线城市购车决策的关键指标。

与此同时，由于技术与用户认知的不匹配，市场中存在过度营销现象，智能驾驶技术相关功能概念“不清晰、不明确、易滥用”等问题日益突出。基于此，中国汽车技术研究中心有限公司、清华大学、华为技术有限公司联合编写了《汽车智能驾驶技术及产业发展白皮书》，从“产学研”角度联合研判汽车智能驾驶产业发展趋势，明晰智能驾驶发展过程中相关易错、易混的概念，分析智能驾驶相关技术原理与发展水平，研究智能驾驶安全体系建设要求，明确智能驾驶技术产业政策法规与合规要求，阐述以智能驾驶技术为核心的整车智能化路线演变方向。希望通过白皮书的发布与传播，协助智能驾驶产业能够成为更加具象化的新质生产力，激发行业及全社会的创新活力，助力汽车强国与交通强国建设。

鉴于产业动态演进迅速及信息获取渠道的客观约束，虽已采取多重校验机制最大限度确保信息时效性与准确度，仍可能存在数据更迭或认知局限导致的偏差，恳请产业界专家及学术界同仁对文中未尽之处予以批评指正。

缩略语

英文缩写	英文全称	中文解释
ODD	Operational Design Domain	运行设计域
OTA	Over the Air Technology	空中下载技术
IMU	Inertial Measurement Unit	惯性测量单元
DMS	Driver Monitoring System	驾驶员监测系统
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
GPU	Graphics Processing Unit	图形处理器
NPU	Neural Network Processing Unit	神经网络处理器
ECU	Electronic Control Unit	电子控制单元
MCU	Micro Control Unit	微控制单元
EPS	Electric Power Steering	电动助力转向系统
RWS	Rear Wheel Steering	后轮转向系统
SBW	Steer by Wire	线控转向系统
FCW	Forward Collision Warning	前方碰撞预警
AEB	Advanced / Automatic Emergency Braking	自动紧急制动系统
ESA	Emergency Steering Assistance	紧急转向辅助
AES	Automatic Emergency Steering	自动紧急转向
LCW	Lane Change Warning	变道碰撞预警
RCTA	Rear Cross Traffic Alert	后方交通穿行提示系统
BSD	Blind Spot Detection	盲区监测
SBSD	Side Blind Spot Detection	侧面盲区监测
SBSM	Side Blind Spot Monitoring	侧面盲区监测
LDW	Lane Departure Warning	车道偏离预警

英文缩写	英文全称	中文解释
LKAS/LKA	Lane Keeping Assistance System	车道保持辅助系统
LCC	Lane Centering Control	车道居中控制
ACC	Adaptive Cruise Control	自适应巡航控制系统
TJA	Traffic Jam Assist	交通拥堵辅助
RCA	Reversing Condition Assist	倒车辅助
IPA	Intelligent Parking Assist	智能泊车辅助
RPA	Remote Parking Assist	遥控泊车辅助
CAN	Controller Area Network	控制器局域网络
HSM	Hardware Security Module	硬件安全模块
CDC	Continuous Damping Control	连续可调阻尼减震器
TCS	Traction Control System	牵引力控制系统
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems	先进驾驶辅助系统
HUD	Head-up Display	抬头显示系统
AR-HUD	Augmented Reality Head-up Display	增强现实抬头显示

目录

第一章 智能驾驶概念与发展辨析	01
1.1 智能驾驶相关概念分类	02
1.2 智能驾驶的逻辑架构	04
1.3 数据是智能驾驶发展的核心	06
第二章 智能驾驶技术架构与关键能力	08
2.1 车端硬件	09
2.1.1 感知硬件	09
2.1.2 域控制器	13
2.1.3 执行硬件	18
2.2 车端推理	19
2.2.1 算法架构演进	19
2.2.2 算法场景应用	20
2.3 云端训练	20
2.3.1 训练数据	21
2.3.2 训练芯片	22
第三章 智能驾驶行业赋能与场景创新	24
3.1 主动安全	25
3.1.1 碰撞预警 (FCW/RCW)	25
3.1.2 自动紧急制动系统 (AEB)	25
3.1.3 紧急转向辅助 (ESA)	26
3.1.4 自动紧急转向 (AES)	26
3.1.5 变道碰撞预警 (LCW)	27
3.1.6 车道保持辅助 (LKA)	27
3.1.7 车道偏离预警 (LDW)	27
3.1.8 前 / 后方交通穿行提示系统 (FCTA/RCTA)	28
3.1.9 车门开启预警 (DOW)	28

3.1.10 智能限速提示 (ISLI)	29
3.1.11 驾驶员疲劳监测 (DFM)	29
3.1.12 盲区监测 (BSD)	29
3.1.13 侧面盲区监测 (SBSD)	30
3.1.14 转向盲区监测 (STBSD)	30
3.2 1级及2级智能驾驶功能场景	30
3.2.1 巡航辅助	31
3.2.2 泊车辅助	33
3.3 3级智能驾驶演进路线	34
3.3.1 交通拥堵领航	35
3.3.2 高速公路领航	35
3.3.3 城区公路领航	35
3.4 4级智能驾驶演进路线	36
3.5 产业发展节奏预测	37

第四章 自动驾驶安全体系 38

4.1 自动驾驶安全系统要素	38
4.1.1 自动驾驶系统安全	39
4.1.2 自动驾驶运行安全	40
4.2 自动驾驶系统安全	39
4.2.1 功能安全	41
4.2.2 预期功能安全	42
4.2.3 信息安全	46
4.3 自动驾驶运行安全	48
4.3.1 自动驾驶运行安全总体职能	48
4.3.2 自动驾驶运行风险管控关键技术	48
4.4 自动驾驶安全评估体系	51
4.4.1 自动驾驶安全评估全流程体系概述	51
4.4.2 自动驾驶功能启动过程安全性评估	52
4.4.3 自动驾驶功能运行过程安全性评估	52
4.4.4 自动驾驶功能退出过程安全性评估	53
4.4.5 自动驾驶功能全过程安全性评价	53

第五章 智能驾驶产业环境与生态构建 55

5.1 智能驾驶政策标准环境	55
5.1.1 政策法规	55
5.1.2 标准体系	57
5.2 产业生态链路	59
5.2.1 硬件供应商	62
5.2.2 软件供应商	64
5.2.3 核心技术突破与应用场景	64
5.3 智能驾驶测评体系倡议	66
5.3.1 测评场景	67
5.3.2 评价指标	71
第六章 智能驾驶产业未来展望	74
6.1 整车智能发展趋势	74
6.2 未来发展建议	75
6.2.1 政策端	75
6.2.2 产业端	76
6.2.3 消费端	76
参考文献	77

第一章

智能驾驶概念与发展辨析

近年来，在国家政策的持续引导和产业链协同推动作用下，我国智能网联汽车产业快速发展，逐步成为引领全球汽车技术变革的重要力量。但随着智能网联汽车的不断发展，与智能驾驶相关的概念与技术名词层出不穷、纷繁复杂，消费者理解门槛逐渐升高，购买产品时对于

产品的功能与技术存在“看不懂、理不清、易混淆”等问题。理清智能驾驶相关概念，既是筑牢消费者知情权与自主选择权的重要基石，也是推动行业标准化、规范化发展的关键支撑。



1.1 智能驾驶相关概念分类

为制定适合我国的智能驾驶分类方法，工信部牵头制定了 GB/T 40429—2021《汽车驾驶自动化分级》，该标准积极采用国际共识，切实结合我国国情，参照国际普遍认可的 SAE J3016 的 0-5 级分类框架，根据我国国

家标准制定规则、汽车产业情况和标准实施环境，精简描述用语、优化分级名称、强化安全要求，提升标准的科学性和可实施性。根据标准定义，驾驶自动化可分为 0-5 级，如表 1-1 所示。

表 1-1 驾驶自动化等级与划分要素的关系

国内分级	名称	持续的车辆横向和纵向运动控制	目标和事件探测与响应	动态驾驶任务后援	设计运行范围
0 级	应急辅助	驾驶员	驾驶员和系统	驾驶员	有限制
1 级	部分驾驶辅助	驾驶员和系统	驾驶员和系统	驾驶员	有限制
2 级	组合驾驶辅助	系统	驾驶员和系统	驾驶员	有限制
3 级	有条件自动驾驶	系统	系统	动态驾驶任务后援用户 (执行接管后成为驾驶员)	有限制
4 级	高度自动驾驶	系统	系统	系统	有限制
5 级	完全自动驾驶	系统	系统	系统	无限制



图 1-1 驾驶自动化等级示意图

在上述驾驶自动化的 6 个等级之中，0-2 级为驾驶辅助，系统辅助人类执行动态驾驶任务，驾驶主体仍为驾驶员；3-5 级为自动驾驶，系统在设计运行条件下代替人类执行动态驾驶任务，当功能激活时，驾驶主体是系统，各级核心区别如下：

(1) 0 级 驾 驶 自 动 化（ 应 急 辅 助，emergency assistance）系统不能持续执行车辆的横向或纵向控制任务，但具备一定的环境感知和事件响应能力，系统可以在特定情况下短暂介入车辆控制，以辅助驾驶员避险。

(2) 1 级驾驶自动化（部分驾驶辅助，partial driver assistance）系统能够在特定条件下持续控制车辆的横向或纵向运动中的一项，具备与控制相适应的目标和事件探测与响应功能，但驾驶员仍需持续监管系统运行，并在需要时介入。

(3) 2 级 驾 驶 自 动 化（ 组 合 驾 驶 辅 助，combined driver assistance）系统可以在特定条件下持续控制车辆的横向和纵向运动，但驾驶员仍需持续监管系统运行，并在需要时介入。

(4) 3 级驾驶自动化（有条件自动驾驶，conditionally automated driving）系统能够在特定的设计运行条件

内执行全部的动态驾驶任务，但在系统发出接管请求时，驾驶员需要及时进行接管。

(5) 4 级 驾 驶 自 动 化（ 高 度 自 动 驾 驶，highly automated driving）系统能够在特定的设计运行条件内执行全部的动态驾驶任务，且当遇到超出运行范围或系统失效等情况时，系统能够自动执行最小风险策略，无需驾驶员介入。

(6) 5 级 驾 驶 自 动 化（ 完 全 自 动 驾 驶，fully automated driving）系统可支持完全无人驾驶，能够在任何范围下自主执行所有动态驾驶任务。

2 级驾驶自动化与 3 级驾驶自动化的核心差异点在于责任主体、系统能力和驾驶员状态监测三个方面，如表 1-2 所示。2 级车辆能够同时自动进行持续的横向和纵向控制，即车辆具备自动加速、减速以及转向等功能，但驾驶员仍需时刻保持注意力，对车辆进行监督，并在必要时干预车辆，责任主体为驾驶员。3 级驾驶自动化的核心特征是在特定设计运行条件（ODD）下，系统可执行全部动态驾驶任务（如高速公路、城市道路等），允许驾驶员在系统运行期间不再持续监管道路环境，可进行有限度的非驾驶活动，但需在系统请求时进行接管，如果 3 级系统激活期间发生问题，经相关部门认定后，应由责任方承担责任。

表 1-2 2 级驾驶自动化与 3 级驾驶自动化主要区别

维度	2 级（组合驾驶辅助）	3 级（有条件自动驾驶）
责任主体	驾驶员全责	系统激活期间因系统出现交通事故，由责任方承担责任
系统能力	系统可持续控制车辆纵向 + 横向运动	系统执行全部驾驶任务（特定 ODD 内）
驾驶员状态	需持续监控，手扶方向盘	允许驾驶员在系统运行期间不再持续监控道路环境，但需响应接管请求
车辆行驶范围	受系统能力限制	设计运行范围内

截止本白皮书发布日期，市场上汽车产品均处于 2 级驾驶自动化及以下阶段，没有达到 3 级驾驶自动化程度。

根据现行交通法规及技术标准，2 级驾驶自动化阶段运行必须处于人类驾驶员的持续监管之下，操作主体是驾

驶员，若发生交通事故，驾驶员须承担法定责任。尽管标准中已经对驾驶自动化等级做了详细的定义、解释以及边界范围的限定，但在汽车市场的宣传与传播中，仍存在对上述概念混淆使用的乱象，有必要理清相关概念。辅助驾驶功能是指应急辅助、部分驾驶辅助、组合驾驶辅助的一个总称；自动驾驶功能是指 3 级及以上

驾驶自动化功能的总称，包括有条件自动驾驶、高度自动驾驶、完全自动驾驶功能；无人驾驶功能是指没有驾驶员情况下的高度自动驾驶与完全自动驾驶功能；驾驶自动化功能是指驾驶自动化系统在特定的设计运行条件内执行部分或全部动态驾驶任务的能力，指的是应急辅助、驾驶辅助与自动驾驶的总称。如下表 1-3 所示。

表 1-3 驾驶自动化相关概念辨析

名称	概念	混淆点
辅助驾驶功能	是指应急辅助（0 级驾驶自动化）、部分驾驶辅助（1 级驾驶自动化）、组合驾驶辅助（2 级驾驶自动化）的一个总称。	辅助驾驶≠自动驾驶
自动驾驶功能	是指 3 级及以上驾驶自动化功能的总称，包括“有条件自动驾驶（3 级驾驶自动化）”“高度自动驾驶（4 级驾驶自动化）”“完全自动驾驶（5 级驾驶自动化）”功能。	自动驾驶≠无人驾驶
无人驾驶功能	是指没有驾驶员情况下的高度自动驾驶（4 级驾驶自动化）和完全自动驾驶（5 级驾驶自动化）功能。	无人驾驶≠驾驶自动化
驾驶自动化功能	是指驾驶自动化系统在特定的设计运行条件内执行部分或全部动态驾驶任务的能力，指的是应急辅助（0 级驾驶自动化）、驾驶辅助（1、2 级驾驶自动化）与自动驾驶（3、4、5 级驾驶自动化）的总称。	驾驶自动化≠自动驾驶
智能驾驶	智能驾驶是一种通俗的叫法，覆盖 1 级至 5 级的驾驶自动化功能。	/

智能驾驶是行业中一种通俗的叫法，覆盖 1 级至 5 级的驾驶自动化功能，既不单纯指辅助驾驶功能，也不代表自动驾驶功能。

1.2 智能驾驶的逻辑架构

智能驾驶系统由车端传感器、车端平台层、车端算法层、云端服务层四大部分组成，车端平台层以芯片、域控制器、车载通信和操作系统等驱动摄像头、激光雷达、毫米波雷达等传感器进行环境感知，并通过车载通信实现车云协同；车端算法层整合管理域、算法、应用及安全

域，实时解析传感器数据生成决策指令；云端提供全导航、数据管理和模型训练等功能，通过 OTA 向车端推送更新。系统通过“传感器数据反馈、车端实时推理、云端模型训练”闭环，实现环境感知、动态决策与精准执行的全链路智能化驾驶。



图 1-2 智能驾驶整体技术架构图

车端传感器层包含摄像头、激光雷达、毫米波雷达、车载通信等设备，具有多模态融合、全天候工作的特点。摄像头提供高分辨率图像识别交通标识，激光雷达构建三维点云感知障碍物轮廓，毫米波雷达实现恶劣天气下的目标探测，车载通信模块保障车内外信息交互。这些传感器通过平台层的接口进行数据同步与时空对齐，形成环境感知的冗余体系。其采集的原始数据经平台层预处理后输入算法层，为决策提供实时环境输入，同时部分关键数据通过平台层回传云端用于模型优化，构成感知、决策、反馈的完整信息链。

车端平台层由操作系统、芯片、域控制器、车载通信等组成，具备高性能计算、模块化扩展和软硬解耦的特征。操作系统可细分为智能驾驶操作系统与车控操作系统，其中智能驾驶操作系统支持 CPU、NPU 等计算资源高效调度，车规级安全内核安全隔离，确定性低时延通信框架与实时调度框架，满足智能驾驶的高安全、高性能、低时延的极致要求。车控操作系统支持 MCU 的轻量化

部署与运行要求，安全隔离引擎、 μs 级硬实时任务调度，实现智能驾驶对执行器命令的高安全、高实时下发。芯片提供 AI 算力支撑神经网络推理，域控制器集成多源数据处理，操作系统实现硬件资源调度与任务管理。该层作为算法层的硬件载体，负责将传感器层采集的数据进行预处理并传输至算法层，同时将算法决策转化为具体的控制信号，是连接传感器、算法与执行机构的神经中枢。

车端算法层划分为管理域、算法、应用、安全域等，核心特点是融合实时决策与多重安全保障机制。管理域通过 OTA 升级模块接收云端模型更新，结合故障诊断功能确保系统可靠性；算法包含轨迹生成、意图预测、网络服务、地图服务、定位模块等关键环节，并集成神经网络实现环境理解与决策优化；应用主要包含主动安全、巡航以及泊车等功能；安全域则从功能安全、网络安全等维度构建防护体系。该层深度依赖平台层的硬件算力，芯片提供神经网络推理所需的计算资源，域控制

器协调传感器数据输入，操作系统则确保算法实时调度。同时，算法层输出的控制指令通过平台层传递至执行机构，形成感知、决策、执行链条。

云端服务层由地图服务、数据管理、模型训练等核心模块构成，其特点是依托远程服务器提供全局化、高精度服务支持。地图服务为车辆提供实时路网和车道级导航

信息，数据管理模块负责存储和处理海量行车数据，模型训练则利用这些数据持续优化 AI 算法模型，并通过 OTA 向车端推送迭代版本。该层与车端算法层紧密联动，模型训练结果通过算法更新提升车辆智能化水平，同时车端采集的传感器数据回传至云端形成数据闭环，实现系统自我进化。

1.3 数据是智能驾驶发展的核心

在智能网联汽车时代，车辆通过传感器矩阵和云端互联，构建起覆盖驾乘体验、生活服务、娱乐办公的数字化生态，而数据资产是整个生态系统的根基。现阶段，车企的核心能力不再局限于硬件制造，而是演进为数据采集、解析和应用的综合较量，谁能在真实场景中更精准地把握用户数据脉搏，谁就能在智能网联汽车赛道上赢得先机。智能驾驶技术作为智能网联汽车发展的关键标尺，其能力跃升的本质是依赖机器学习模型的持续训练升级。中国工程院院士邬贺铨指出，5 级智能驾驶需要处理高达 8000 亿参数的模型，训练数据量达到 1 亿

EB。特斯拉创始人兼首席执行官马斯克曾表示，特斯拉 FSD 测试里程需要达到 60 亿英里，才能满足全球监管机构的要求，这也是智能驾驶系统实现质变的一个重要节点。海量场景数据的喂养与解析，是驱动智能驾驶技术不断进步的核心动力。目前，与汽车智能驾驶相关的数据大致可以分为两类：一是智能驾驶系统数据，主要包含环境感知数据、感知决策数据、定位数据与车辆运行数据等关键数据；二是应用服务数据，主要包含出行辅助数据、影音娱乐数据、生活服务数据等类型。

表 1-4 智能驾驶相关数据

数据类型		数据范围
智能驾驶系统数据	环境感知数据	通过摄像头、雷达等传感器从汽车外部环境采集的道路、建筑、地形、基础设施数据等
	感知决策数据	车辆行驶控制、灯光控制、环境感知融合算法等指令数据
	定位数据	卫星定位数据、惯性定位数据、差分定位数据等
	车辆运行数据	车身系统、动力系统、电气系统、舒适系统等车辆运行状态参数
应用服务数据		出行辅助数据（如天气预报、交通拥堵、导航等）、影音娱乐数据（收音机、新闻等）及生活服务数据（日程提醒、停车场推送）等

在数据增长过程中，数据闭环能力已成为决定技术演进速度的核心要素。车端传感器持续采集多维环境信息，云端则构建起数据存储、智能挖掘、自动标注、模型训练与验证的完整技术链。值得注意的是，随着智能网联

车辆渗透率提升，行业数据总量呈指数级增长，但原始数据中普遍存在场景重复、特征模糊、标注噪声等问题，数据规模的爆发式增长并未直接转化为技术优势，未经筛选的海量数据中有效信息占比往往较低，这使得数据

价值的精准提炼成为关键突破口。这种“数据泡沫”现象倒逼企业构建智能化筛选机制，可以实现质效平衡的自动标注技术应运而生。总的来说，大规模且高质量的数据集才是智能驾驶技术迭代演进的核心。

从环境感知、决策规划、指令执行到模型训练，数据深

度渗透智能驾驶全流程，在系统功能优化、性能提升中发挥着不可替代的关键作用。对于智能网联汽车来说，数据已成为驱动行业革新的核心要素，是所有市场参与者无法回避的战略资源，构建高效、低成本的数据体系，是保障智能驾驶产业稳健前行的根基。

第二章

智能驾驶技术架构与关键能力

当前，汽车智能驾驶行业中存在技术过度化营销的现象，其核心症结在于技术参数的片面传播与系统价值的认知错位。一是算力参数的孤立化传播。智能驾驶系统的成熟度更取决于算法迭代能力、数据闭环体系、功能安全设计等深层技术要素的有机融合，算力硬件作为基础支撑平台固然重要，但必须与场景理解算法、海量数据训练验证、多层级安全冗余等系统化工程能力形成协同，才能真正实现安全可靠的驾驶体验。二是市场认知呈现断层式割裂。普通消费者受限于技术背景，难以分

辨算力数值与实际场景处理能力的差异，易被营销话术引导，导致选购决策与真实需求错配。这些现象不仅导致关键参数的市场认知混乱，更引发了无序竞争等市场失范问题，亟需行业合力携手构建技术科普体系，明确算力指标与实际性能的映射关系，解析智能驾驶系统技术逻辑，帮助用户建立包含硬件性能、算法成熟度与数据服务能力的认知框架，推动智能驾驶行业从“参数竞争”向“价值竞争”转变。智能驾驶系统的关键技术架构如下：

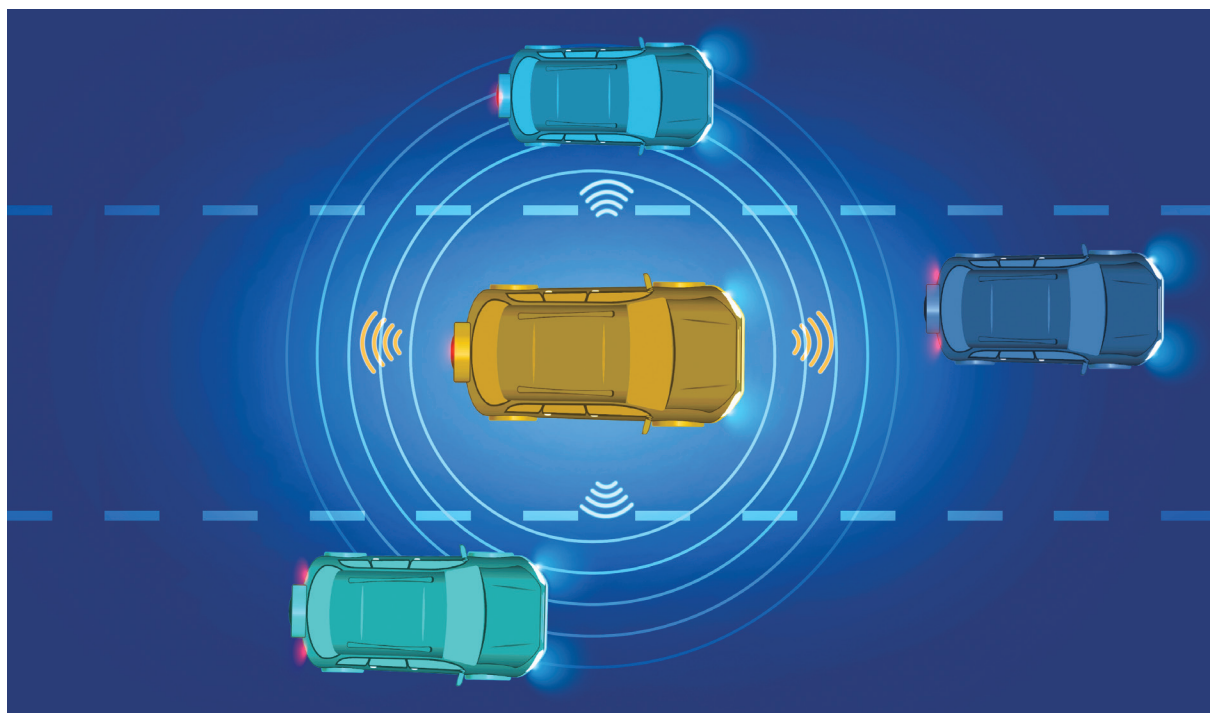




图 2-1 智能驾驶系统关键技术架构图

2.1 车端硬件

2.1.1 感知硬件

感知硬件作为智能系统的“感官中枢”，主要分为车外环境感知、车辆状态感知及车内环境感知，通过对内外部

的环境感知与车辆状态感知的协同，实现对内外部环境和自身状态的全域感知。

2.1.1.1 车外环境感知

(1) 摄像头

摄像头是智能驾驶的基础部件，指的是通过对拍摄的图像进行图像处理，对目标进行检测，并输出数据和判断结果的传感器。摄像头通过光学镜头采集图像，将光信号转化为电信号，再经模数转换变为数字信号，由处理器对数字图像进行分析处理，提取特征信息，从而实现

对物体的识别、测量、定位等功能。

场景中，车用摄像头能够快速精准捕捉交通标识、车道线等关键交通要素，实时监测前方车辆与行人动态，为智能驾驶系统提供高质量视觉数据支撑。车用摄像头具备识别颜色、红绿灯、车道线等多元交通要素的能力，可清晰地分辨道路边界、信号指示及动态目标特征，成为智能驾驶系统实现环境感知的核心视觉数据源载体。但是，在面对复杂环境挑战时其性能也呈现出显著的局限性：一是在极端天气条件下，暴雨形成的水渍、浓雾产生散射效应，会严重干扰镜头光学成像；二是在复杂光照环境中，强光直射引发的光晕、隧道明暗交替等产

生的眩光，以及夜间低照度场景，均会导致图像信噪比降低及对比度失衡，甚至出现数据丢失现象，致使摄像头对目标物体的识别准确率大幅下降，影响智能驾驶决策系统的安全性与可靠性。

表 2-1 摄像头关键参数及行业水平

参数分类	行业优秀水平	参数说明
像素（px）	前视≥ 8 millions、侧视≥ 2 millions 环视≥ 2 millions、后视≥ 2 millions	图像像素越大分辨率越高，但分辨率过大对目标识别提升有限且算力消耗大
帧率（fps）	前视≥ 30、侧视≥ 30 环视≥ 20、后视≥ 20	摄像头每秒能记录或显示的图像数量，越大画面实时性越高、提供的信息越精细，但帧率过大对目标识别提升有限且算力消耗大

(2) 激光雷达

激光雷达是激光探测及测距系统的简称，是一种以激光器为发射光源，采用光电探测技术手段的主动光学遥感设备。激光雷达通过发射器向环境发射激光束，激光遇到物体后反射，接收器捕捉反射光，根据发射与接收的时间差计算距离，并结合激光扫描角度和旋转频率，还原物体的形状、位置和空间分布，为系统提供高精度环境感知信息。根据激光雷达的结构形态可分为机械激光雷达、半固态激光雷达及固态激光雷达。其中机械激光雷达通过电机带动激光发射和接收装置进行 360 度旋转，实现全方位扫描，其扫描角度范围广、探测精度高，主要应用于无人驾驶测试领域。半固态激光雷达减少了部分机械旋转部件，在保持一定探测性能的同时，降低了成本、缩小了体积，扫描帧率和可靠性也有所提升，

适用于量产乘用车。固态激光雷达完全去除机械运动部件，利用相控阵、Flash 等技术实现激光的快速扫描，其具有体积小、可靠性高、成本低、易于集成的特点，目前已少量应用于乘用车。激光雷达识别能力强，可以精准勾勒出车辆、路牌、行人轮廓，即使在车水马龙的十字路口，也能敏锐捕捉车辆加塞、行人横穿等突发状况，在拥堵交通、高速、暗光环境等场景下感知精准性高，可以识别非规则小目标，且误差控制在厘米级。面向未来的智能驾驶，激光雷达对周边环境感知能力及安全要求更高，是必不可少的传感器。激光雷达在面对沙尘等恶劣天气场景时，点云数据会出现噪点，激光信号削弱，探测距离骤减，容易造成安全事故，所以需要从芯片到激光雷达，再到感知算法，整个链路深度协同优化，才能真正用好激光雷达，为车辆的安全行驶保驾护航。

表 2-2 激光雷达关键参数及行业水平

参数分类	行业优秀水平	参数说明
探测距离	≥ 200 m@10% 反射率	理论可以测量物体的最大距离，距离越远越好
线数	≥ 128	分辨率，线数越高越好
角分辨率	水平≤ 0.1°、垂直≤ 0.1°	目标辨别能力，分辨率越小越好
帧率	≥ 10Hz	每两帧的时间间隔，帧率越大越好

(3) 毫米波雷达

毫米波雷达是通过发射毫米波频段的电磁波，经目标反射后被接收，并对接收到的信号进行处理，进而探测物体之间的距离、方位和相对速度等的传感器设备。毫米波雷达可以根据多普勒效应检测目标的速度，还可通过天线阵列确定目标的角度，从而实现对目标的探测与跟踪，根据是否具备测量高度能力可分为传统毫米波雷达和 4D 毫米波雷达，其中 4D 毫米波雷达相较传统毫米波雷达具备测量识别目标高度的能力。与激光雷达

相比，不论是传统毫米波雷达还是 4D 毫米波雷达，其波长较宽，通常大于雨滴、雾滴等直径，其性能受天气环境等因素影响较小，故在雨天、大雾天或沙尘等极端环境下可以发挥出更稳定的感知能力。在光线不足的夜间、隧道等暗光场景中，也能持续感知周围车辆和障碍物的动态，保障行车安全。但是，毫米波雷达角分辨率天然较低，自然场景下信噪比较低，易发生虚假目标、目标漏检、目标识别错误等，导致误判的情况出现。

表 2-3 毫米波雷达关键参数及行业水平

参数分类	行业优秀水平	参数说明
探测距离	前向长距离雷达：≥ 280 m 角雷达：≥ 150	理论可以测量物体的最大距离，距离越远越好
水平角分辨率	≤ 3°	目标辨别能力，分辨率越小越好
垂直角分辨率	≤ 15°	仅 4D 毫米波雷达具备俯仰角测量能力
视场角	前向长距离雷达：水平 FOV ≥ 120°、垂直 FOV ≥ 30° 角雷达：水平 FOV ≥ 120°	探测覆盖范围，视场角越大越好
速度测量精度	≤ 0.1 m/s（匀速目标），≤ 0.5 m/s（急加速目标）	目标测速能力，精度越小越好

(4) 超声波雷达

超声波雷达是利用超声波的特性在超声波频率范围内将交变的电信号转换成声信号的能量转换器件，先由发射探头发出超声波，超声波遇到障碍物后反射回来后被接收探头接收，再通过测量超声波发射和接收的时间差，结合超声波在空气中的传播速度，就能计算出障碍物与雷达之间的距离。

超声波雷达凭借高频声波反射原理，在低速场景中展现出显著的技术优势，能够探测路沿、石柱、墙面等低矮障碍物，有效避免轮胎刮蹭与车身碰撞，成为自动泊车系统的重要传感器。在狭窄道路会车场景下，超声波雷

达可实时监测两侧的空间距离，辅助驾驶员进行安全通过决策。在低速跟车工况时，对前车尾部、路边静态物体进行检测，可大幅降低低速碰撞风险。但超声波雷达在应用中也存在明显局限性：一是受限于声波传播的特性，在高速行驶场景下超声波雷达最大探测距离有限，难以满足远距离目标预警的需求；二是在强风、暴雨、大雪等极端环境中声波传播易受干扰，检测结果容易出现误报或漏检；三是面对玻璃幕墙、积水路面等光滑表面时，超声波易发生镜面反射造成信号丢失；四是对于棉花、泡沫等软质材料，声波被大量吸收而无法有效反射，容易导致目标探测失效。

2.1.1.2 车辆状态感知

车辆状态感知部件主要包括转向角度传感器、轮速传感器、惯性测量单元组合等，可以实现对转向角度、车轮转速、车辆加速度、角速度等动态参数的监测，辅助判断车辆是否处于加速、制动、转向或侧滑的状态，为车身稳定系统、牵引力控制、防抱死制动等功能提供基础数据，确保车辆的操控稳定性。

(1) 转向角度传感器

转向角度传感器测量驾驶员转动方向盘的角度和速率，反映驾驶员的转向意图，是车辆动态控制的关键输入。转向场景中，根据转向角度和车速，动态调整助力大小，如倒车时方向盘仅需小力转动，高速时重助力，防止方向盘虚飘。在转弯跟车场景中，结合转向角度和曲率半径，ACC 系统可预判弯道半径，调整跟车距离，如大弯道时适当拉大间距，避免碰撞前车。

(2) 轮速传感器

轮速传感器主要测量车轮转速，通过脉冲信号计算车轮线速度、滑移率，降低抱死风险。制动场景中，若车轮转速骤降，传感器会触发 ABS 模块，周期性释放制动压力，保持车轮滚动，如冰雪路面紧急制动时，避免车辆失控；起步或加速场景中，若驱动轮转速高于从动轮，系统减少发动机扭矩或对打滑车轮制动，恢复抓地力，如泥泞路面起步时防止空转；当某轮胎胎压不足时，直径变小导致转速高于其他车轮，轮速

传感器通过转速差报警。

(3) 惯性测量单元

惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 主要组合加速度传感器和陀螺仪，通过三轴线性加速度和三轴角速度的同步测量，结合多传感器融合算法，实现对车辆的姿态角和运动轨迹的感知。加速度传感器负责捕捉 X/Y/Z 轴向的线性加速度，精确解析车辆加减速、倾斜角度及碰撞冲击，陀螺仪则持续监测绕 X/Y/Z 轴的角速度，实时追踪车身旋转姿态和方向变化速率，二者数据在 IMU 内形成互补。当车辆急加速或转向过度时，横向加速度数据与横摆角速度的协同分析可精准识别转向不足 / 过度状态，通过 ESP 系统实施单轮制动修正轨迹；面对坡道起步场景，纵向加速度感知结合 Z 轴角速度检测能及时识别溜车趋势，联动电子驻车系统主动介入。在隧道、城市峡谷等拒止环境中，IMU 通过双重数据积分推算车辆位移矢量，维持厘米级短时定位精度，为智能驾驶提供连续导航基准。针对侧翻风险防控，系统综合 X 轴侧倾角加速度与 Y 轴横摆角速度，当侧翻指数超过阈值时，即刻触发载荷转移控制与主动悬架调节，配合扭矩矢量分配实现车身动态稳定。在碰撞发生前，三轴加速度突变量与角速度异常波动形成的多维特征向量可精准触发安全气囊、预紧安全带等被动安全系统，构建起从主动避险到被动防护的全周期安全保障体系。

2.1.1.3 车内环境感知

驾驶员监测系统 (DMS, Driver Monitoring System) 通过摄像头、红外传感器、压力传感器等硬件，结合 AI 视觉算法，如人脸检测、姿态识别、眼球追踪等，实现对驾驶员状态的实时监测与分析。系统通常采用摄像头捕捉驾驶员的面部图像和动作，利用计算机视觉算法分析面部表情、眼睛睁开程度、头部姿态等，判断驾

驶员的疲劳程度、注意力集中情况以及是否有异常行为。例如，DMS 系统可以通过检测眼睛的眨眼频率和持续闭眼时间来评估疲劳状态，若眨眼频率过低或闭眼时间过长，可能表示驾驶员处于疲劳或困倦状态。在低速跟车时检测到驾驶员频繁低头、闭眼或者双手脱离方向盘时，会自动拉大跟车距离至安全阈值。

2.1.1.4 传感器配置技术路线分析

根据参与感知部件的不同，感知技术方案主要分为三类。一是纯视觉方案。纯视觉方案依赖摄像头作为核心感知硬件，通过图像处理、深度学习算法实现环境感知，并不依赖雷达、激光雷达等其他主动式传感器。纯视觉方案对于交通要素识别能力好，但是受光照、极端天气影响较大，适合环境相对简单的驾驶场景，纯视觉方案类似于人眼观察能力，可以达到类人驾驶水平。二是主视觉方案。主视觉方案以摄像头为核心感知单元，辅以少量超声波雷达、短距毫米波雷达等传感器，形成“视

觉为主，其他传感器为辅”的轻量融合方案。主视觉方案的核心决策仍依赖视觉数据，辅助传感器仅用于补充特定场景，如近距离盲区、低速泊车等典型场景，更加适应城区等复杂路况，是在纯视觉方案基础上的补盲，未来可以达到老司机驾驶水平。三是多传感器融合方案。多传感器融合方案整合多种异构传感器，如摄像头、毫米波雷达、超声波雷达、激光雷达等传感器实现环境感知，各传感器优势互补，对于环境、天气适应性更强，拥有更高的安全性能，未来可以实现超人的驾驶水平。

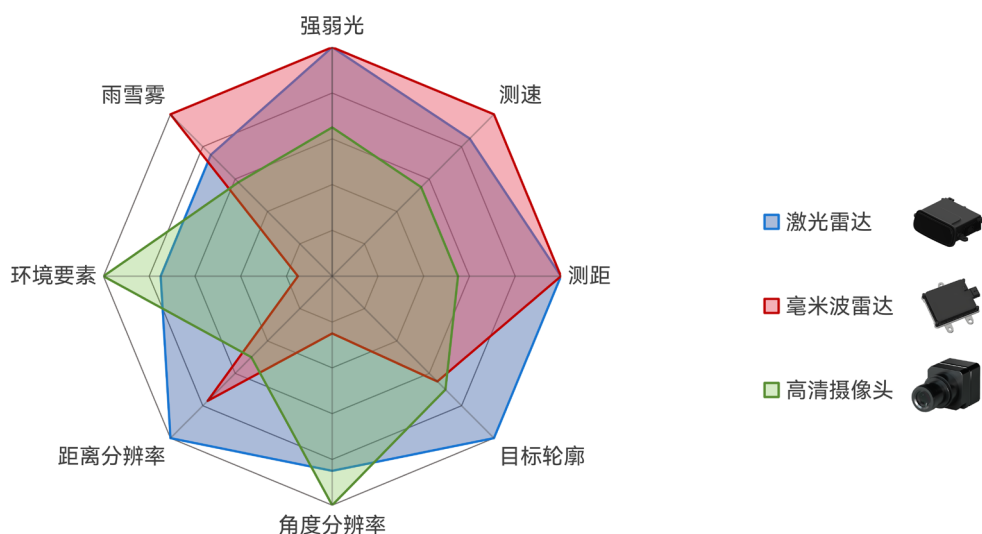


图 2-2 传感器场景优劣势对比

2.1.2 域控制器

域控制器是智能驾驶系统的传感器接入与车端推理算法运行的硬件平台，是智能驾驶系统运行的核心部件，需要满足高性能、高安全、高可靠、高能效的技术要求，提供丰富的硬件接口满足不同场景下多个摄像头、超声

波雷达、毫米波雷达、激光雷达、GPS/IMU 组合定位等传感器标准接口的接入处理和融合能力，同时提供标准接口与人机交互模块、车载通信模块 T-Box、线控底盘等互连，完成整车的互联互通。

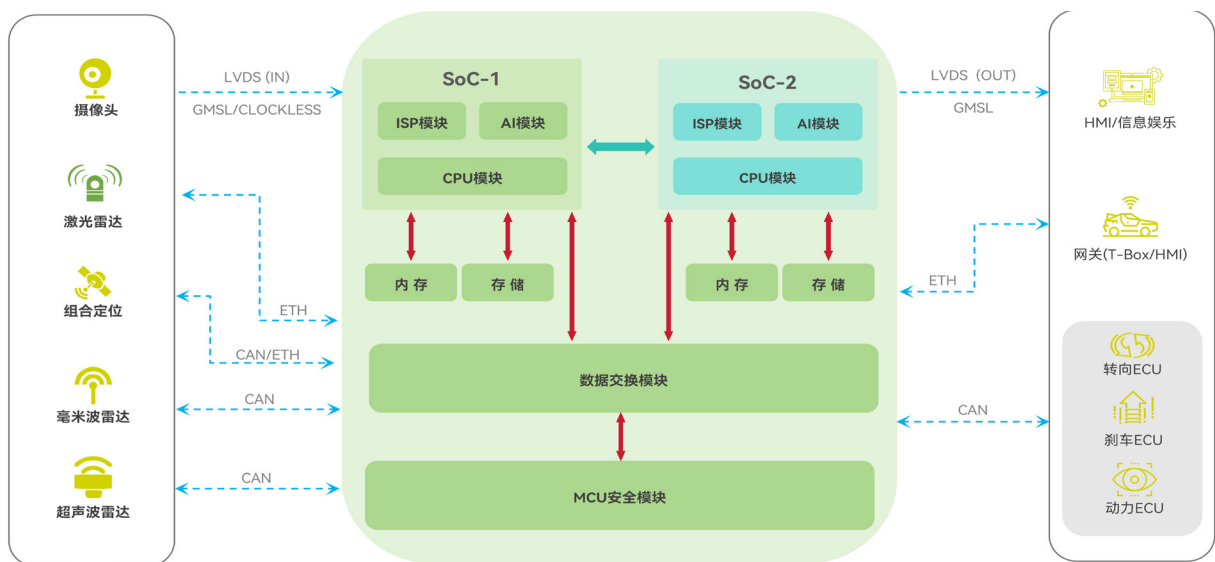


图 2-3 域控制器硬件逻辑示意图

2.1.2.1 计算 SoC

运行智能驾驶系统推理算法，需要强大的 NPU 与 CPU 算力，业界一般是集成为一颗 SoC 中，计算 SoC 的算力大小对智能驾驶推理算法的部署与运行效果至关重要。

车端算力要求：当前 2 级智能驾驶主流场景下，现有 50~200 TOPS 稠密算力水平已经可以满足实际运行需求，过度堆砌算力反而会造成资源浪费与成本增加。以人工智能领域为例，ChatGPT-O1 凭借 1.7 万亿参数构建庞大模型体系，却被 DeepSeek-R1 以更高效的算法架构与算力利用方式实现超越，计算资源需求仅为 Chat GPT 的 1% 左右。这一案例充分证明，算力规模

并非决定技术表现的唯一要素，算法优化与算力利用效率提升同样关键。回归智能驾驶领域，2 级智能驾驶对算力的需求约为 ≥ 50 TOPS 稠密算力，3 级则提升至 ≥ 200 TOPS 稠密算力，4 级提升至 ≥ 1000 TOPS 稠密算力，5 级可能将提升至 ≥ 2000 TOPS 稠密算力的水平。目前，多数企业已达成对应算力能力，盲目追求算力峰值既无必要，也不符合成本效益原则，行业发展的重点应转向算力资源的精细化管理与优化配置，通过算法迭代、软硬件协同设计等手段，实现功能体验升级与成本控制的动态平衡，推动智能驾驶技术向更高效、可持续发展的方向发展。

表 2-4 不同智能驾驶等级车端算力要求

等级	车端算力要求	可以满足的功能
2 级	≥ 50 TOPS（稠密）	ACC、LCC、APA、AVP、RPA、高速领航辅助驾驶、城区领航辅助驾驶
3 级	≥ 200 TOPS（稠密）	ACC、LCC、APA、AVP、RPA、TJP、高速有条件自动驾驶、城区有条件自动驾驶，双冗余 & 高可靠
4 级	≥ 1000 TOPS（稠密）	ACC、LCC、APA、AVP、RPA、TJP、高速自动驾驶、城区自动驾驶、园区自动驾驶，全冗余 & 高可靠
5 级	≥ 2000 TOPS（稠密）	任意点到任意点，全冗余 & 高可靠

另外，芯片算力大小并非绝对性要求，随着算力增大，成本增高，散热问题越严重，可靠性也越低，需要通过芯片、算法、传感器深度协同优化，发挥出最佳运行效率，才能获得最佳算法性能与商业收益。

对于车端推理算力而言，行业需明确稠密算力与稀疏算力的宣传口径。从数据结构特性与计算模式维度的不同，可分为稠密算力与稀疏算力，二者有着本质区别，不可混淆或简单等同。稠密算力通常指处理密集型数据的能力，如浮点运算、INT8 及以上精度整数运算等，以运算对象为元素连续填充的矩阵或张量，需对全量数

据执行计算。稀疏算力则聚焦于稀疏数据场景，针对仅包含非零元素的稀疏矩阵 / 张量，如 COO/CSR 格式数据等，支持 INT4、INT2 甚至二进制运算等更低精度运算，仅对有效数据点进行操作。当前，多数企业倾向于用稀疏算力口径进行宣传，但由于两种算力在定义、适用场景及性能表现上存在较大差异，宣传口径的不一致极易引发用户概念混淆，不利于用户准确评估产品的性能。建议规范行业算力宣传口径，在宣传时显性标注稠密算力或稀疏算力，避免对消费者造成误导。

2.1.2.2 标准接口

域控制器支持多种类传感器的接入，包括摄像头、毫米波雷达、超声波雷达、激光雷达、组合定位等，提供丰富、灵活可变的主流硬件接口。

一般需要支持的标准接口如下：

(1) GMSL 标准接口，支持摄像头输入 Raw Data 感知数据输入；

(2) 提供 100M/1000M Base-T1 车载以太网接口，支持激光雷达传感器接入和时间同步，可对接 T-Box、HMI。同时提供通用以太网接口和车载以太网接口的转接设备，实现多路时间信息和时间同步信息的转发，适配于多种场景；

(3) 提供标准 CAN/CAN FD 接口，典型速率分别为 500 kbps 和 2 Mbps，支持毫米波雷达、超声波雷达等传感器接入；

(4) 提供标准的 CAN 总线的车控信号接口，其中一路 CAN 支持休眠唤醒；

(5) 提供整车 ACC 信号输入；

(6) 提供 GPI 输入和 GPO 信号（具体功能依整车方案而定）；

(7) 支持 GPS/IMU 组合定位设备的接入，数据接口支持 RS232 串口与 PPS 信号输入。

2.1.2.3 实时智能驾驶 OS

智能驾驶 OS 基于异构分布式硬件平台，具备架构可扩展、接口标准化与生态开放的特点，同时满足高安全、高可靠、实时性等关键要求，主要包括以下特点：

(1) 车规级实时 OS 架构

a) 功能安全：符合 ASIL D 的功能安全架构和安全机制，以及启动、运行过程防止攻击保证安全可靠的架构

设计。

b) 信息安全：从硬件、启动、内核到应用层的保护，通过使用安全机制、多操作系统隔离以及完整性校验等手段保障信息安全。

c) 实时：支撑应用确定性实时调度与分布式实时通信的架构，满足高性能低时延要求的同时，保证车控平台安全维度所要求的确定性。

d) 丰富易用的集成开发环境：支撑第三方应用开发者

快速开发集成。

(2) 完善的南北向接口生态

a) 南向硬件芯片支持 CPU、DSP、NPU 等处理器和加速器，支持车控平台通用设备，存储（Flash、SSD）、网络、串口、USB、SPI 等。

b) 北向应用开发接口，兼容 Adaptive AUTOSAR 标准提供的 ARA 接口及配置文件、支持 POSIX PSE51 接口、非 AUTOSAR 应用使用的通信中间件通信接口，以及应用依赖的通用第三方库（如基础 C/C++ 库和算法库）。

业界主流的 OS 有 AUTOSAR、RTOS、Linux、QNX、华为自研的智能驾驶操作系统 AOS 及 VOS 等。

AUTOSAR: AUTOSAR OS 是一种基于 AUTOSAR 标准的嵌入式操作系统，它在 OSEK OS 的基础上进行了扩展和改进。AUTOSAR OS 继承了 OSEK OS 的核心特性，如任务管理、同步服务、中断处理和报警机制等，同时增加了对多核处理器和多任务的支持，以满足现代汽车电子系统对高性能和复杂功能的需求。AUTOSAR OS 提供了更强大的功能和更高的灵活性，使其成为汽车电子系统开发中的重要工具。

RTOS: 实时操作系统（RTOS）是指当外界事件或数据产生时，能够接受并以足够快的速度予以处理，其处理的结果又能在规定的时间之内来控制生产过程或对处理系统作出快速响应，并控制所有实时任务协调一致运行的操作系统。因而，提供及时响应和高可靠性是其主

要特点。实时操作系统有硬实时和软实时之分，硬实时要求在规定的时间内必须完成操作，这是在操作系统设计时保证的；软实时则只要按照任务的优先级，尽可能快地完成操作即可。通常使用的操作系统在经过一定改变之后就可以变成实时操作系统。

Linux: 嵌入式 Linux 系统作为一种广泛应用于嵌入式设备的操作系统，凭借其开源特性和高度可定制化，已成为开发者的首选。通过嵌入式 Linux 系统，开发者可以根据具体需求对系统进行裁剪和优化，以适应嵌入式设备的特殊需求，如低功耗、有限的存储和高实时性。

QNX: QNX 是一个分布式、可扩展、遵从 POSIX 规范的类 Unix 硬实时微内核操作系统。具有安全、可靠、可信的特点，因此通常应用于对安全性要求极高的领域。QNX 由微内核和一组共操作的进程构成，具有高度可伸缩性，可灵活地裁剪。最小配置只占用几十 KB 内存，可以广泛地嵌入到智能机器、智能仪器仪表、通信设备等应用中去。

华为智能驾驶操作系统 AOS: 支持 CPU、NPU 等计算资源高效调度，车规级安全内核安全隔离，确定性低时延通信框架与实时调度框架，满足自动驾驶的高安全、高性能、低时延的极致要求。

华为智能车控操作系统 VOS: 支持 MCU 的轻量化部署与运行要求，安全隔离引擎、μs 级硬实时任务调度，实现自动驾驶对执行器命令的高安全、高实时下发。

2.1.2.4 软件中间件与基础库

(1) AI 算子库及 AI 模型库: 提供业界主流 AI 算子库及模型管理能力。

a) AI 算子库: 提供支持 Caffe、TensorFlow、PyTorch 等框架的 AI 算子库，可支撑 SSD、Faster-RCNN、

ResNet 等主流 AI 算法开发。

b) AI 模型库管理: 提供基于软硬件相结合的密码学算法库，对 AI 模型进行加密管理。

(2) AUTOSAR 软件中间件：支持 Classic AUTOSAR 与 Adaptive AUTOSAR。

a) CP (Classic AUTOSAR Platform)：在 MDC 硬件平台的 MCU 上部署 CP，基于 CP 可进行二次开发（含最小安全系统）。

b) AP (Adaptive AUTOSAR Platform)：在 MDC 硬件平台的计算能力单元 CPU 上部署 AP，可进行二次

开发。

(3) 实时通信中间件：提供 DDS（基于共享内存、UDP、TCP 协议）、SOME/IP 等多种通信机制，确保不同节点间的不同业务数据高效通信。

(4) 算法外包：提供主流 POSIX 标准接口，以及智能驾驶应用开发所依赖的主流基础库和算法外包。

2.1.2.5 软件平台服务

(1) 诊断服务：提供故障诊断服务（UDS 服务），支持 ISO 14229-1、ISO 14229-5、ISO 13400 和 Adaptive AUTOSAR 诊断规范。

a) 离线诊断：诊断仪通过软件平台提供的 UDS 服务获取该 MDC 的各种故障信息，进行故障信息定位和修复。

b) 在线诊断：车辆运行过程中按规范要求记录各种软硬件故障信息，故障自诊断等。

(2) 软件升级服务：提供对外开放版本查询、版本安装、进度查询等升级操作相关的标准接口，可扩展开发多种升级功能，包括：

a) OTA 升级：提供模块标准 OTA 接口，支撑 OTA 升级应用程序开发，实现芯片固件、操作系统、软件平台的 OTA 升级功能。

b) 诊断升级：提供标准诊断接口，通过诊断仪上位机对芯片固件、操作系统、软件平台进行升级。

c) 命令行升级：提供命令行操作界面，以外接升级服务器的方式对芯片固件、操作系统、软件平台进行升级。

d) 智能功耗管理：提供运行模式、待机模式、休眠模式等不同的工作模式，并支持不同工作模式之间的状态

切换，实现对智能驾驶系统的功耗智能管理，最大程度减小和优化功耗。

e) HMI 服务支持：支持与车载信息娱乐系统进行交互，通过 HMI 接口与车载信息娱乐系统进行通信，包括智能驾驶启动、退出等命令控制及系统的状态显示等。

f) 数据录制：支持在路测过程中对车辆周边环境及车辆本身状态和控制信息的录制和存储功能。

g) 调试与跟踪服务：通过 MDC 工具链，车企或合作伙伴可以对应用软件进行调试与跟踪，软件平台也提供日志、诊断、告警等功能，协助进行问题定位。

h) 数据预处理：提供 Camera 图像数据的预处理，以及激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达、IMU/GPS 等传感器数据接口、车辆状态数据及车控数据接口的抽象与透传功能。

(3) 传感器 / 车辆数据同步：支持不同传感器以及车辆数据的时间同步：

a) 所有模块产生的数据都有时间戳记录，其时间信息与实际时间尽可能保持一致，精度控制在毫秒级。

b) 所有模块的时间信息保持精确一致，精度控制在毫秒级。

(4) 传感器 / 车辆标定服务：提供传感器标定以及车辆参数标定服务，使不同传感器配置的不同车辆参数完

成标定，提升智能驾驶应用开发调试效率。

2.1.3 执行硬件

经过感知硬件实时采集环境数据与智能驾驶算法计算后，预先调节执行各总成的控制参数，以实现驱动力精确控制、转向力自适应调节、悬架刚度与阻尼实时优化

以及制动系统快速响应等多样化场景需求，全方位提升驾驶安全性与舒适性。

2.1.3.1 驱动总成

在潮湿路面启动时，汽车常因车速过快，致使驱动力超过地面附着力极限而打滑，极易导致车辆偏离车道，引发车损人伤事故。在通过单侧泥泞道路时，传统驱动总成使得处于坏路的车轮极易打滑空转，导致车轮非主观意愿打转。针对上述典型驱动场景，需要推进驱动总成智能化升级，通过实时精准调控每个车轮的转速，并依据不同路面的附着系数，动态分配各车轮的驱动力，从

而有效提升车辆在复杂路况下的行驶稳定性与安全性。

在智能驾驶系统架构中，依托激光雷达、摄像头等多模态传感器，实时采集车辆运行状态与复杂路况信息，为系统提供基础数据支撑；智能驾驶算法对感知数据进行深度分析与处理，生成精准的驾驶策略；智能驾驶算法则通过独立控制车轮驱动力，并与悬架、制动系统协调控制，确保驾驶策略的高效执行。

2.1.3.2 转向总成

随着汽车保有量增长及车辆外形尺寸大型化趋势加速，城市交通拥堵问题愈发突出，传统转向系统在狭窄路况下难以实现灵活精准的转弯，需要多次转向才能达成目标。从用户体验来看，不同车速下驾驶员对转向力的需求存在差异，而传动系统固定的传动比导致如转向、倒车入库场景中需大幅转动方向盘，显著降低驾驶便捷性与舒适性。针对上述痛点，需要推进转向系统智能化升级，如通过引入后轮转向技术或动态调节方向盘转向力度与角度，实现高效省力的精准转向控制。

向（EPS）、后轮转向系统（RWS）及线控转向（SBW）等先进技术，实现转向控制的高精度、智能化执行。在实际应用场景中，系统通过优化转向控制逻辑，可显著提升车辆操控性能，有效减少方向盘转动圈数，增强转向响应灵敏度。在变道过程中，通过实时调节转向角度与力矩，大幅提升车辆行驶稳定性，并通过智能调整前后轮转向协同策略，实现转弯半径与窄路掉头操作次数的双降。以弯道行驶为例，当车辆感知弯道半径后，系统可精准控制后轮与前轮呈反向转动，使车辆转弯半径明显降低，实现小半径弯道的精准转向，有效提升狭窄路况下的通过性与驾驶安全性。

智能驾驶算法对感知数据进行特征提取与态势分析，动态生成最优转向策略；智能驾驶算法则整合电动助力转

2.1.3.3 制动总成

在城市道路场景中，由于频繁踩刹车，制动盘与刹车片持续摩擦产生高温，传统制动系统易出现热衰退现象，导致制动力显著下降。在高速行驶场景下，当车辆需要

紧急制动时，固定的制动力分配方式无法根据各车轮实时的附着力进行动态调整，可能导致某个车轮抱死，引发车辆侧滑、甩尾甚至失控，严重威胁行车安全。此外，

在冰雪、积水、砂石等复杂路况下，传统制动系统无法精准控制制动力度容易使车辆失去抓地力，造成事故。针对上述痛点，需要推进制动系统智能化升级，如通过车轮间制动力调整，提升制动安全性与稳定性。

通过传感器实时采集和估算车速、车轮转速、路面摩擦系数等数据，智能驾驶算法分析风险，动态制定制动力分配策略（如前后轮扭矩配比、电机能量回收强度），智能驾驶算法依托电控单元（ECU）精准调节液压/电机制动力，实现单轮独立控制。系统通过实时监测制动

距离、车身姿态等反馈数据，持续优化控制策略。典型跟车场景中，智能制动总成通过分级策略实现安全与舒适平衡，当与前车距离较大时，采用线性柔和制动，避免乘客前倾。距离接近时，切换为恒定制动力输出，确保跟车节奏稳定，停车前启动防点头模式，将车身俯仰角控制在一定范围以内。该策略在城市拥堵路况下可降低急刹频次，在高速场景中提升跟车精度，兼顾自动驾驶体验。

2.1.3.4 悬架总成

实际驾驶中，传统悬架总成的矛盾性与局限性日益凸显。面对颠簸的非铺装路面、坑洞、凸起物等场景下，传统悬架固定的刚度和阻尼无法实时调整，导致车辆行驶时颠簸感强烈，驾乘舒适性大打折扣；高速过弯时，传统悬架难以提供足够支撑力，车辆侧倾严重，操控稳定性差，增加了失控风险；紧急制动或加速时，还会出现明显的“点头”“抬头”现象，影响行车安全与驾驶体验。因此，为满足复杂路况和多样化驾驶需求，需要推进制动总成智能化发展，通过智能调节实现悬架参数的动态优化，有效提升车辆舒适性、操控性与安全性。

通过加速度、位移等传感器实时采集和估算路面颠簸程度、车辆姿态角等数据，智能驾驶算法通过算法，结合驾驶模式与实时路况，生成悬架刚度、阻尼调节策略，智能驾驶算法依托电控阻尼器、空气弹簧等硬件，快速响应指令调整悬架特性，实现全路况自适应调节。非铺装路面或急弯场景下，通过动态刚度调节增强轮胎抓地力与操控稳定性；高速巡航时主动降低悬架高度，减少风阻辅助节能。其技术融合传感器技术、智能算法与执行硬件，成为车辆智能化升级的核心载体，兼顾舒适性、安全性与经济性，推动智能驾驶体验从动力控制向全系统协同进阶。

2.2 车端推理

车端推理的核心是智能驾驶算法，作为智能驾驶系统的“决策大脑”，通过感知硬件采集的实时交通信息，算法

进行实时计算，将计算结果传递给执行硬件，实现对复杂交通场景下的车辆精确控制。

2.2.1 算法架构演进

智能驾驶算法是一系列数学模型与逻辑规则的集合，通过处理传感器输入数据，实现环境感知、决策规划、控制执行等功能，是智能驾驶的核心技术壁垒。在早期阶段，算法采用基于有限场景的规则架构，依赖人工编写规则库，以“红灯停、绿灯行”等确定性逻辑构建驾驶决策体系。随着人工智能技术发展，当前主流算法已转向

数据驱动的端到端 AI 模型架构，通过海量驾驶场景数据训练模型，自主学习复杂路况下的决策策略，同时保留关键安全规则作为风险防控底线。

表 2-5 不同算法发展特点

	传统规则式	端到端 AI 模型架构
概念解释	基于人工定义的逻辑规则，通过条件判断实现决策	输入传感器原始数据，通过 AI 模型输出感知结果或控制指令
数据依赖	无	强
算力需求	小	较大
长尾场景处理	弱	较强

随着智能驾驶场景越来越复杂，需要更多的传感器来满足不同的场景要求，比如道路结构及红绿灯需要摄像头传感器，夜晚光线不足时需要激光雷达传感器，雨雾尘天气时需要毫米波雷达传感器，识别特殊车辆时需要车外麦克风传感器等，所以会有大量不同类型的数据产生，对于车端推理算法的要求也越来越高。一是车端推理模型需要具备多传感器、多模态的感知数据的并行处理能力。二是在车端推理模型与云端训练模型的协同上，需使用专用智能驾驶云端模型提升运行效率，如以开源通用语言大模型为基模型进行二次训练与蒸馏出的智能驾驶模型，解决模型臃肿导致的效率低、时延大的问题。三是可采用 MoE（Mixture of Experts）多专家架构，进一步提升车端推理模型的运行效率，降低对车端算力及成本的要求。四是车端推理模型要有预见未来的能力，除了输出当前的行车轨迹用于控制车辆外，还需对复杂场景的理解预测未来几秒钟的行车意图，以提升驾驶员的心理安全感。

未来，算法将逐步向 AI 大模型的方向发展，借鉴 ChatGPT、DeepSeek、Qwen 等自然语言处理模型的泛化能力，处理更为复杂的现实交通场景与人机交互逻辑，赋予车辆更智能的场景理解与规划决策能力，提升智能驾驶的整体智能化水平与人机交互体验。但 AI 大

模型也面临训练数据多样化、模型参数规模大、性能资源要求高、人机交互逻辑复杂等现实问题，业界在世界模型仿真、轻量化模型设计、边缘计算优化、人机交互博弈等方面也在积极探索，为更高等级的智能驾驶规模化落地奠定技术基础。

2.2.2 算法场景应用

经过车端智能驾驶算法的实时推理计算，会输出两大类信息

(1) 轨迹生成：精确指挥自车当前执行硬件的操作，包括方向、速度、悬架等，实现对自车的精确控制。

(2) 场景理解：预测接下来几秒内，自车或其他交通参与要素的运动轨迹，用于人机交互显示，以提升人机信任度与协同。

2.3 云端训练

在云端超算集群通过分布式架构训练端到端神经网络模型，结合强化学习优化复杂决策策略，并通过模型量化、剪枝、蒸馏、压缩等技术实现轻量化，适配车载算力平台。接着，依托多层次仿真体系验证算法可靠性，基于真实事故数据构建包含极端工况的超大规模场景

库，测试模型泛化能力。最后，通过 OTA 技术将优化后的模型部署至车端，借助车云协同架构实现实时决策与云端策略迭代，利用影子模式持续收集实际路况中的异常数据，反哺模型训练，形成的全链路闭环，推动智能驾驶系统性能渐进提升。

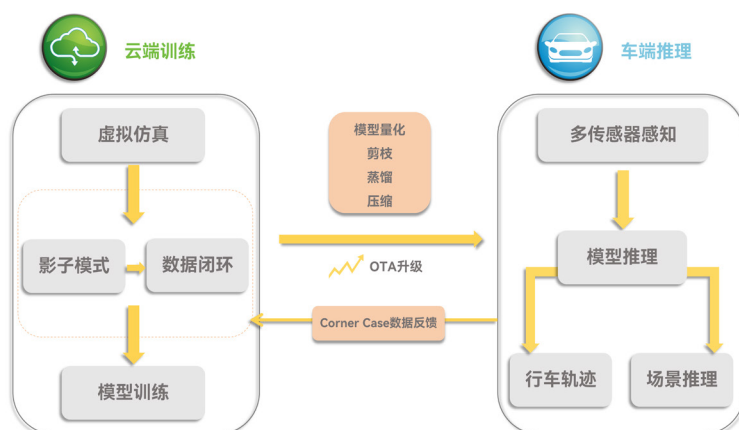


图 2-4 云端训练与车端推理

2.3.1 训练数据

在训练中，数据质量是算法优化的底层支撑。在汽车数据训练体系中，数据作为算法迭代的核心生产要素，需满足规模性、准确性、多样性三大核心要求，共同构建模型泛化能力的底层数据基座。大规模数据提供统计显著性，解决“有没有”的问题；高质量标注确保真值可靠，解决“对不对”的问题；广泛多样性避免过拟合，解决“泛不泛”的问题，三者缺一不可。

（1）数据规模是突破统计显著性阈值的核心前提。云端训练算法需处理千万级公里级真实路况数据，以覆盖人类驾驶员难以穷尽的长尾场景，还需通过仿真技术合成百亿级虚拟场景，解决 Corner Case 数据稀缺问题。没有足够数据量训练的模型在长尾场景下的误判率将激增，并且训练数据应基于一套数据逻辑与技术架构获得，不同架构之间的数据无法共享，难以形成规模效应。

（2）高精度数据质量是提升标注基准的核心要素。原始采集数据需要在行为层进行深度的清洗，并在标注层建立多级质量控制体系，也就是找到老司机开得好的数据。以自动泊车功能研发为例，当使用标注误差超 10cm 的低质量车位边界线数据进行训练时，算法可能未预留足够安全距离，易导致泊车时碰撞障碍物；而在

采用精准标注数据训练后，误差控制在 5cm 以内，自动泊车算法成功率可以显著提升。

（3）多样化的数据是打破场景分布偏差陷阱的关键。多样化的场景数据需要尽可能覆盖各类地理环境、气候条件、时间维度等变量，如重庆八向路、北京高环、胡同等复杂场景路段，避免数据分布偏差导致的驾驶缺陷，显著提升系统的环境适应性和场景泛化能力。

当前，业界一般通过影子模式与数据闭环来进行训练。通过影子模式及事件触发机制，获得现实世界中车辆在实际道路上驾驶时遇到的 Corner Case 脱敏数据，汇聚为数据库与场景库，进行人工标注与二次训练，再进行集成测试，以完成对 Corner Case 场景的优化。但现实世界中 Corner Case 的场景出现的次数与频率比较有限，所以此种模式目前对于模型能力的提升，在时间效率上较低。而作为训练数据的有效补充，虚拟仿真数据越来越重要。通过图像渲染引擎及扩散生成模型（如 Diffusion Transformer）等技术，结合仿真规则模拟仿真出符合现实世界基本物理规律的智能驾驶场景，比如白天、夜晚、隧道、乡村、城区等交通场景中各类物体的精准大小、光线明暗及相对位置。当前阶段，智

能驾驶算法对绝大部分的普通场景已经可以正确处理，对长尾的 Corner Case 处理能力仍需完善。通过云端虚拟仿真算法，可以构建高密度的 Corner Case，比如车辆切入、鬼探头、红绿灯、特殊车辆等，以及它们的排列组合，来为模型训练提供高质量的数据，可以较好地弥补数据闭环中现实世界中 Corner Case 数据量与多样性不足的问题，从人类教 AI，演进到让 AI 教 AI。值得注意的是，数据闭环收集的现实数据与虚拟仿真生成的仿真数据，会作为“原料”用于模型训练。但模型训练目前存在一定概率的不可解释性，模型决策逻辑难以

2.3.2 训练芯片

训练芯片是通过高并发的计算单元，对海量输入数据进行高效的深度学习，形成包括大规模参数的神经网络模型，通常采用大规模的并行计算阵列，以支持大量的矩阵运算和数据处理。例如图形处理器 GPU 具有数千个计算核心，能够并行执行数百万个数学运算，非常适合用于训练深度学习模型。推理芯片是在预训练好的神经网络模型基础上，对输入如图像、语音、文本等数据进行实时计算并输出匹配结果，它们是连接 AI 模型与实际应用的核心硬件载体。

在智能驾驶领域，芯片的功能细分与协同运作是实现高效决策的核心技术支撑，按照功能和设计特点来区分，芯片可以分为三种类型。一是中央处理器 CPU。作为智能驾驶系统的“总指挥”，承担着系统的统筹调度工作，负责处理复杂的逻辑判断、系统管理任务，确保整个系统的稳定运行。在车辆启动阶段，CPU 需要协调传感器、执行机构和其他芯片的初始化工作；在行驶过程中，CPU 实时监控系统状态，处理诸如车辆故障诊断、驾驶模式切换等逻辑任务。二是图形处理器 GPU。凭借并行计算能力，GPU 成为系统中进行图形渲染的“主力军”。GPU 拥有众多计算核心，在图形渲染、视频编解码以及大规模科学计算等场景中优势显著。在智能驾驶中，车辆的摄像头、激光雷达等传感器每秒会产生数

解释，有一定的安全风险。例如 Waymo EMMA 模型虽能生成可解释的“思路链”，但实际路测中仍存在少量场景因数据偏差导致轨迹突变，极端长尾场景（如突发洪水、桥梁断裂）的数据匮乏也可能引发系统性风险。

因此，在通过强化学习对数据进行模型训练时，需要引入安全对齐机制，把人类社会的安全规则与价值观，作为最高优先级设置入奖励函数中，通过奖励函数来牵引训练模型始终基于“安全优先”的原则进行推理运算，以提升模型输出的行车轨迹及场景意图的安全能力。

GB 的数据，GPU 可快速处理这些数据，生成高精度的环境模型。三是神经网络处理器 NPU。NPU 是专为神经网络计算量身定制的“加速引擎”，能够高效完成深度学习中的矩阵运算，在图像识别、语音交互等人工智能领域表现卓越。

云端算力是智能驾驶算法模型长期演进与迭代以及未来实现自动驾驶的重要保障，尤其是面对 AI 芯片被封锁与制裁的背景下，云端算力储备越多越好。2024 年底，特斯拉云端算力将提升至 70~80 EFLOPS，在行业内存在一定优势。

但行业需澄清的几个算力误区：

（1）行业应避免单位滥用导致的技术参数失真

当前汽车行业云端算力标注存在概念模糊等误导性表述问题，因前缀单位差异（T/P/E/Z 级）导致终端用户对算力规模产生认知偏差，行业亟需基于算力应用场景规范单位使用体系。浮点算力作为云端模型训练的核心指标，应以 EFLOPS 作为基础单位，这既符合特斯拉 Dojo 超算、华为昇腾 AI 集群等前沿部署的实际量级，也能适配未来算力需求。通过统一采用 EFLOPS 标注云端算力，可避免因单位滥用导致的技术参数失真，为

算力评估、能耗优化及跨平台协同提供标准化参照，推动行业从“算力数值比拼”转向“效率效能竞争”。

表 2-6 浮点运算单位对比

算力名称	FLOPS	TFLOPS	PFLOPS	EFLOPS	ZFLOPS
名词解释	浮点运算性能指标；基础单位	浮点运算性能指标； 10 ¹² FLOPS（万亿次 / 秒）	浮点运算性能指标； 10 ¹⁵ FLOPS（千万亿次 / 秒）	浮点运算性能指标； 10 ¹⁸ FLOPS（百亿亿次 / 秒）	浮点运算性能指标； 10 ²¹ FLOPS（十万亿亿次 / 秒）
应用场景	基础单位，用于低算力设备	消费级算力核心单位，用于游戏显卡，满足实时推理与中小规模模型训练	工业级超算与中型AI训练，如气象模拟、药物分子建模	大规模AI训练标配，适配智能驾驶大模型、复杂物理仿真	前沿科研与未来算力方向，用于量子模拟、宇宙演化建模等极复杂计算，尚未大规模商用

(2) 消费者需要辨别云端算力实际情况

云端算力的实际能力是权属稳定性、调度效率、持续供给的综合展现，消费者应跳出“唯数值论”的圈子，结合企业算力架构、技术自研度及商业模式进行多维评估，避免被宣传口径中的“峰值算力”误导，而忽视真实的技术差距。一是权属稳定性。可分为企业自建的专有算力和依赖第三方云服务商租用的可借调算力，可借调算力可能易受到资源分配情况影响，自建算力与其相比有着更高的稳定性。二是资源调度效率。大算力不代表算力使用效率，目前依赖自研分布式框架的企业，算力利用率甚至可较通用云平台提升近一倍。三是持续供给能力。自建算力中心初期投入较高，长期训练成本可持续降低，而外部借调的模式可能受算力价格波动影响，实际算力供给稳定性可能存在问题。

(3) 云端大算力不代表车端更新速度

车端功能更新速度取决于技术支撑体系与管理体的协同响应效率，其中云端大算力仅是技术支撑的组成部分，而非全部技术能力的代名词，二者概念不可简单等同。技术层面来看，算法高效迭代首先依赖于云端数据中心中的计算、存储、网络资源与训练算法的高效协同性（包括训练效率与连续性），其次还依赖于数据流水线的自动化处理水平、云端算力的规模化调度能力以及仿真测试的快速验证能力，这些技术要素的有序整合才是企业核心技术能力的集中体现。管理体系层面，跨部门协作机制的敏捷性、企业与供应商的协同效率从组织层面深刻影响着算法迭代的实际落地速度。简言之，车端更新能力是技术架构弹性与管理体系敏捷性的乘积，而非单一算力指标的线性映射。

第三章

智能驾驶行业赋能与场景创新



伴随智能驾驶技术的快速迭代与产业化进程推进，主动安全、巡航辅助、泊车辅助等核心功能场景不断拓展与深化。然而，由此衍生的功能配置体系呈现显著的碎片化与复杂化特征，各场景下的具象化功能模块相互耦合，致使普通消费者难以在短期内系统认知不同功能的技术差异与实际价值，在购车决策过程中面临信息过载困境，无法形成有效判断。与此同时，智能驾驶功能命名体系缺乏行业统一规范，同一技术在不同品牌产品中存在多种表述方式，功能定义模糊与概念边界不清的现

象普遍存在，进一步加剧了用户对功能原理、应用场景及实际效能的理解难度。更为关键的是，部分智能驾驶功能受限于技术成熟度与应用条件，存在明确的使用边界与安全约束，若消费者未能全面掌握功能运行逻辑与限制条件，不仅无法实现功能价值的有效发挥，还可能因使用不当对行车安全构成潜在威胁。基于此，本章重点厘清关键功能的概念，对其核心应用场景和参数进行解析，智能驾驶技术功能原理如下图所示。



图 3-1 智能驾驶技术功能原理图

3.1 主动安全

主动安全是指通过各种先进的技术和系统，在事故发生前采取措施来预防或减轻碰撞事故的风险，保护车辆驾乘人员及其他道路使用者安全的一系列技术和理念。随

着智能驾驶能力的提升，主动安全功能对碰撞事故场景的覆盖度也在持续提升。

3.1.1 碰撞预警（FCW/RCW）

追尾事故是汽车事故场景中发生概率最大的事故之一，FCW 通过技术手段将事故预防节点前置，填补了人类感知与决策的天然局限，是智能交通系统中提升道路安全性与通行效率的关键技术。

前方碰撞预警（Forward Collision Warning, FCW），是指实时监测车辆前方行驶环境，并在可能发生前向碰撞危险时发出警告信息的功能。后方碰撞预警（Rear Collision Warning, RCW），是指实时监测车辆后方环境，并在可能受到后方碰撞危险时发出警告信息功能。通俗讲就是发现有追尾可能，车辆对驾驶员进行声音或方向盘振动等形式的警示。作为主动安全技术的核心功能，其发展与 AEB 密切相关，但更聚焦于预警机制的演进，呈现其从单一测距到全域感知的发展脉络。

FCW 通过精准时序控制实现“预判断、早警示”，在为制动系统预留安全响应窗口的同时，避免因过度预警干扰驾驶体验，与 AEB 的协同策略本质上是“以最小风险换取最大安全”的工程选择。通过法律约束、结构优化与算法迭代，主动安全技术正在从“被动防御”向“主动干预”转型，而“让速不让道”原则将始终是这一演进过程的核心准则。优秀的 FCW 应具备精准的探测能力，可实时、稳定识别前方车辆、行人等目标，预警距离合理适配不同车速，响应时间迅速且提前量充足，能清晰区分危险与非危险场景，误报 / 漏报率极低。同时，预警方式，如声音、视觉、触觉均友好可调，抗强光、暴雨等环境干扰能力强，始终为驾驶员提供可靠、及时的碰撞风险警示，可以有效提升行车安全性。

3.1.2 自动紧急制动系统（AEB）

自动紧急制动系统（Advanced / Automatic Emergency Braking, AEB），是指实时监测车辆前方

行驶环境，并在可能发生碰撞危险时自动启动车辆制动系统使车辆减速，以避免碰撞或减轻碰撞后果的功能。

通俗讲就是在可能发生碰撞风险前汽车自主进行制动。FCW 仅通过声音、视觉等方式预警潜在碰撞风险，而 AEB 在预警基础上会主动介入制动系统，自动施加刹车以避免或减轻碰撞；在干预阶段上，FCW 在碰撞风险初期触发，留给驾驶员反应时间；AEB 则在驾驶员未及时反应时直接进入紧急制动阶段，覆盖更紧迫的碰撞场景。

众所周知，预警需早于制动介入，在保障行车安全的基础上，兼顾驾乘人员的舒适体验。传统安全带、气囊等安全系统以“事故发生后减轻伤害”为目标，而 AEB 的设计理念是“防患于未然”，通过实时监测前方车辆、行人、骑行者等周边环境，提前识别碰撞风险并主动介入，

3.1.3 紧急转向辅助（ESA）

紧急转向辅助（Emergency Steering Assistance, ESA），是指实时监测车辆前方、侧方及侧后方行驶环境，在可能发生碰撞危险且检测到驾驶员进行转向操作且力度不足时辅助驾驶员进行转向操作的功能。通俗来讲，当车辆面临碰撞危机，驾驶员转向避险操作不到位时，ESA 就像一位“隐形帮手”，为方向盘施加恰到好处的助力，引导车辆安全避开危险。

ESA 秉持精准介入，人机协同的设计理念，在保障行车安全的同时，最大程度尊重驾驶员操作意图，通过对转向系统的智能控制，实现危险预判、适时介入、精准

避免或缓解事故发生，将安全防护的重心前移至“事故发生前”。基于国标性能要求和当前驾驶需求，优秀的 AEB 功能理应实现高精度环境感知，可在强光、暴雨、逆光等复杂路况下稳定识别前方车辆、行人及骑行者，并且识别其他障碍物能力也应逐步提升。预警距离覆盖车速范围应该覆盖主要用车场景以减少伤害，响应时间越小越好，以 120km/h 时速为例，只要提前响应 0.1 秒，就可以为用户留出 3.3 米的安全距离。预警逻辑应贴合真实驾驶场景，通过声、光、触觉多模式清晰提示，提前建立制动准备，为驾驶员预留充足的反应时间，在安全性与驾驶舒适性之间争取平衡。

辅助的闭环流程。出色的 ESA 功能应具备卓越的环境感知与精准决策能力。一方面，它能快速、准确识别前方车辆、行人、两轮车等各类障碍物，结合车辆实时速度、位置、姿态等信息，毫秒级计算出最优避让路径；另一方面，辅助介入时机精准巧妙，既不会在正常驾驶时无端干扰驾驶员操作，又能在危险瞬间迅速且平稳地介入，给予驾驶员恰到好处的助力，整个辅助过程应流畅自然，在确保驾驶者始终掌握主导权的前提下，实现人机共驾的无缝衔接与高度协调。

3.1.4 自动紧急转向（AES）

自动紧急转向（Automatic Emergency Steering, AES），是指可以实时监测车辆前方、侧方及侧后方行驶环境，当系统判断仅依靠制动系统无法避免碰撞时，自动控制车辆转向，以避免碰撞或减轻碰撞后果的功能。在全国交通事故中追尾事故比例约为 20% ~ 30%，AEB 功能可有效减少追尾事故的发生，而 AES 作为 AEB 功能的补充，叠加后可把事故避免率进一步提升。

作为 AEB 的补充功能，AEB 优先级应该高于 AES。让速不让道是整个社会对主动安全的共识，尽量避免换道后带来的二重风险。当遇到前方存在碰撞风险的场景时，AEB 会辅助车辆能刹停尽量刹停，在刹不停的情况下，要基于 AES 的避撞策略做出决策。从车身框架结构设计方面考虑，车辆纵向具备前后防撞梁、吸能盒、前后纵梁、纵梁等传力路径，而侧面仅有车门防撞梁、车身 B 柱等结构，防碰撞强度低于纵向，除非无法刹

停且侧方具备安全紧急变道条件时 AES 才会进行介入避免碰撞发生。优秀的 AES 应具备毫秒级响应速度确保避险窗口的精准捕捉，大角度精准转向构建安全避障

轨迹，以及主动悬挂与 ESP 的协同控制保障变道过程的动态稳定性。

3.1.5 变道碰撞预警 (LCW)

变道碰撞预警 (Lane Change Warning, LCW)，是在车辆变道过程中，实时监测相邻车道，并在车辆侧方和 / 或侧后方出现可能与本车发生碰撞危险的其他道路使用者时发出警告信息的功能。通俗来说，当驾驶员打转向灯准备变道，而侧后方有车辆快速接近或存在潜在碰撞隐患时，LCW 就会通过声音提示、仪表盘灯光闪烁或方向盘振动等方式，提醒驾驶员暂停变道操作，避免事故发生。

LCW 遵循精准预判，人机协同的设计原则，在尊重驾驶员变道意图的前提下，通过智能算法实现风险感知、

及时预警、适度干预的闭环管理。可以通过精准的时序控制，在碰撞风险萌芽阶段即发出警示，为驾驶员预留充足的反应时间；当风险加剧时，以最小化干预为前提，辅助车辆规避危险。优秀的 LCW 功能须具备全方位的环境感知与精准判断能力，能实时捕捉侧后方车辆的速度、距离、加速度等信息，甚至能识别快速接近的摩托车、突然出现的行人等小目标。并且，预警逻辑设计严谨，既能在变道存在高风险时迅速且清晰地发出警示，又能避免在正常跟车或相邻车道车辆保持安全距离时产生误报情况的发生。

3.1.6 车道保持辅助 (LKA)

车道保持辅助系统 (Lane Keeping Assistance System, LKAS/LKA)，是指车辆可能发生非预期的车道偏离时，系统通过主动干预侧向移动，辅助驾驶员将车辆保持在车道内的功能。通俗讲就是当车辆因驾驶员分心或操作失误开始偏离车道时，系统会像“轻推方向盘”一样自动修正方向，让车保持在车道内。

LKA 是 LDW (车道偏离预警) 的升级功能，整合了预警与主动控制。LKA 和 LDW 是两种常见的驾驶辅助功能，LDW 监测车辆是否无意识偏离车道，并通过声音、震动或视觉提示警告驾驶员，不主动干预控制车辆。

LKA 则在 LDW 的基础上，主动控制车辆方向，通过微调方向盘或其他执行机构，帮助车辆保持在车道内。LKA 的设计理念以“预防为主、最小介入”原则为基础，进一步融合主动控制能力与安全冗余机制，形成“预警—干预—协同”的三层逻辑体系。LKA 功能遵循先感知风险、后分级响应”的递进式设计，相较于 LDW 的仅预警，通过主动干预与冗余设计，在降低事故风险的同时，兼顾驾驶舒适性与法规合规性。优秀的 LKA 功能应具备高车道线识别率、精准横向控制精度、自然转向干预力度及合理退出逻辑等能力。

3.1.7 车道偏离预警 (LDW)

车道偏离预警 (Lane Departure Warning, LDW)，是指实时监测车辆在本车道的行驶状态，并在出现或即将出现非驾驶意愿的车道偏离时发出警告信息的功能。通俗讲就是当车辆在行驶中因驾驶员分心或疲劳导致

无意识偏离车道时，如车轮即将压线时，系统会发出“滴滴”声或震动提醒，帮助驾驶员及时修正方向，避免事故。LDW 功能是基于视觉识别的车道线监测与基础预警，是车道偏离预警，当车辆有偏离车道趋势时发出警

报提醒驾驶员，而 LKA 是车道保持辅助，不仅能预警，还会控制转向系统，帮助车辆保持在车道内行驶。作为 LKA 的前置决策模块，LDW 遵循“预防为主、最小介入”的主动安全共识。根据《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》第四十四条第一款规定：“在道路同方向划有 2 条以上机动车道的，机动车在变更车道时，

应当提前开启转向灯，不得影响相关车道内行驶的机动车的正常行驶”。这一法规明确了“识别风险、提示优先”的技术导向，避免因盲目纠偏引发侧方碰撞或驾驶误判。优秀的 LDW 功能应具备高检测精度、低误报率、响应及时性与较强的环境适应性。

3.1.8 前 / 后方交通穿行提示系统 (FCTA/RCTA)

前方交通穿行提示 (Front Cross Traffic Alert, FCTA)，是指在车辆低速前进时，实时监测车辆前部横向接近的其他道路使用者，并在可能发生碰撞危险时发出警告信息的功能。后方交通穿行提示系统 (Rear Cross Traffic Alert, RCTA)，是指在车辆倒车时，实时监测车辆后部横向接近的其他道路使用者，并在可能发生碰撞危险时发出警告信息的功能。通俗来说，CTA 就像车辆的“第三只眼”，用传感器探测前 / 后方盲区动态目标。

在驾驶员因视线遮挡难以察觉前 / 后方横向穿行的车辆或行人场景中，CTA 通过雷达或摄像头实时探测前 / 后方动态目标，结合碰撞时间 (TTC) 计算和多模态警示 (声

光触觉)，可降低倒车事故率。其中，GB/T 44156—2024《乘用车后方交通穿行提示系统性能要求及试验方法》中规范了乘用车 RCTA 的性能指标，应在 TTC 不小于 1.7 s 时发出碰撞提示。CTA 核心设计理念为预见风险，主动守护，用科技弥补人类感知的局限性，向用户渗透人机共担责任的理性安全观，既可以提供无差别守护的安全感，又可以教育用户避免技术依赖。通过智能传感器与分级响应机制消除倒车盲区风险，覆盖雨雾、夜间等复杂场景，并与智能驾驶生态协同工作，优秀的 CTA 功能应具备较广的检测范围、毫秒级响应速度、高精度识别及声 / 光 / 震协同的预警能力。

3.1.9 车门开启预警 (DOW)

“汽车开门杀”是指一种因不当开车门方式而可能导致的交通事故现象。具体来说，车辆停稳后，驾驶人或乘客开门时不认真观察前、后方是否有行人或者来车，贸然打开车门，导致行人或者车辆经过时来不及反应，最终被撞摔倒，乃至受伤等情况，这种事故在日常生活中时有发生，给交通参与者带来了严重的安全隐患。

车门开启预警 (Door Open Warning, DOW)，是指在停车状态即将开启车门时，监测车辆侧方及侧后方的其他道路使用者，并在可能因车门开启而发生碰撞危险时发出警告信息的功能。DOW 系统利用安装在车辆后部和侧部的毫米波雷达或摄像头等传感器对车辆侧后方盲区

进行实时监测，这些传感器能够探测到一定距离和范围内的移动物体，如行人、自行车、电瓶车、摩托车以及其他车辆。系统可以根据传感器探测到的数据，评估车门开启时是否存在碰撞风险，包括判断移动物体的速度、距离以及运动轨迹等因素。当系统判定存在碰撞风险时，会通过多种方式向驾乘人员发出预警：一级报警通常表现为同侧车门未打开时，状态警示灯常亮或闪烁；当系统检测到同侧车门打开时，会启动二级报警，此时状态指示灯常亮或闪烁，并发出警示音或语音提示；部分系统检测到开门会导致碰撞风险发生时，会采取干预措施，比如保持车门关闭、锁上车门锁舌等。

3.1.10 智能限速提示 (ISLI)

智能限速提示 (Intelligent Speed Limit Information, ISLI), 是指自动获取车辆当前条件下所应遵守的限速信息并实时监测车辆行驶速度, 当车辆行驶速度不符合或即将超出限速范围的情况下适时发出提示信息的功能。

智能限速提示 (ISLI) 与智能限速控制 (ISLC) 是两个完全不同的功能。智能限速控制 (ISLC) 是自适应巡航功能 (ACC) 与交通标志识别功能 (TSR) 的融合功能, 车辆处于自适应巡航控制系统 (ACC) 驾驶模式下, 系

统可获取车辆当前条件下所应遵守的限速信息, 自动对比 ACC 设置车速和 TSR 识别的限速值, 实时监测并辅助控制车辆行驶速度, 以使其保持在限速范围内。而智能限速提示 (ISLI) 是交通标志识别 (TSR) 中的报警功能, TSR 通过前视摄像头等传感器对道路限速标志进行识别, 并将当前道路上相关的限速标志通过仪表显示给驾驶员, 同时具备 ISLI 功能, 在车速超过检测到的限速信息时向驾驶员发送警告信息。

3.1.11 驾驶员疲劳监测 (DFM)

驾驶员疲劳监测 (Driver Fatigue Monitoring, DFM), 是指实时监测驾驶员状态并在确认其疲劳时发出提示信息的功能。主要是通过摄像头获取的图像, 通过视觉跟踪、目标检测、动作识别等技术对驾驶员的驾驶行为及生理状态进行检测, 当驾驶员发生疲劳、分心、打电话、抽烟等危险情况时在系统设定时间内报警以避免事故发生。

通过车内摄像头捕捉驾驶员面部特征, 如眨眼频率、眼皮闭合时间、视线方向、头部倾斜角度等, 结合红外技

术适应光线变化完成视觉感知。同时, 融合方向盘转动频率、车辆轨迹偏移等数据, 通过算法判断疲劳等级, 完成行为分析。最后, 通过声音提示、仪表盘灯光闪烁、方向盘震动, 联动座椅震动或空调调强等方式发出预警。高精度的算法甚至能做到不受时间段、光照情况、是否戴墨镜等外界条件影响, 始终对驾驶员的疲劳状态进行有效管理, 当驾驶人员产生生理疲劳状态时, 立即发出预警警告, 及时唤醒驾驶员, 避免严重事故发生。

3.1.12 盲区监测 (BSD)

盲区监测 (Blind Spot Detection, BSD), 是指实时监测驾驶员视野盲区, 并在其盲区内出现其他道路使用者时发出提示或警告信息的功能。通俗来说就是当驾驶员想要变道时, 在后视镜可能看不到侧后方的车辆, 而 BSD 会通过雷达或摄像头发现这些盲区内的危险, 并通过声音或灯光提醒驾驶员。通常情况下, 汽车 BSD 功能可以辅助实现消

除盲区、主动预警的作用, 通过毫米波雷达与摄像头融合实时监测侧后方动态目标, 覆盖雨雾、夜间等低能见度场景, 并基于多级预警机制介入驾驶决策。BSD 的核心目标是通过技术手段“让不可见变为可见”, 优秀的盲区监测系统具备宽域检测、精准识别、实时响应及分级预警的能力。

3.1.13 侧面盲区监测 (SBSD)

侧面盲区监测 (Side Blind Spot Detection, SBSD)，是指实时监测驾驶员视野的侧方及侧后方盲区，并在其盲区内出现其他道路使用者时发出提示或警告信息的能力。通俗来讲，就是当有车辆、行人等处于驾驶员视线盲区时，车辆主动提醒驾驶员注意，避免变道或开门时发生剐蹭、碰撞事故。

SBSD 功能的核心在于精准感知、智能预警、安全辅助，通过精确控制传感器的探测范围与响应时间，实现对盲区目标的提前预判与及时警示，在为驾驶员预留充足反应时间的同时，避免频繁无效、干扰驾驶体验的预警。

3.1.14 转向盲区监测 (STBSD)

侧面盲区监测 (Side Blind Spot Monitoring, SBSM)，是指在车辆转向过程中，实时监测驾驶员转向盲区，并在其盲区内出现其他道路使用者时发出警告信息的功能。通俗来讲，就是在车辆转向时，系统通过声音、灯光或座椅振动等方式提醒驾驶员注意侧后方不易察觉的危险，避免因视觉盲区引发碰撞事故。

STBSD 功能以“预防为先，精准干预”为核心，通过传感器数据的深度融合与 AI 算法的实时运算，构建车辆侧后方的立体感知网络。在保障驾驶员操控自主性的前提下，系统需精准把握预警触发时机，既可以为驾驶员预留足够反应时间，又避免频繁干扰驾驶体验。STBSD 功能与车道保持、自动紧急制动等功能的协同设计，遵循“最小介入原则”，旨在通过温和的提示与辅助，将潜在的转向

SBSD 功能与自动紧急转向、车道保持等主动安全功能的协同设计，遵循最小干预、最大安全原则，在确保行车安全的前提下，尽可能减少对驾驶员正常驾驶操作的影响。优秀的 SBSD 功能应具备卓越的环境感知能力，能够在各种天气和光照条件下，如暴雨、黑夜、强逆光等，精准识别车辆、行人、非机动车等目标，且检测范围覆盖车辆两侧及斜后方较大区域。其预警响应迅速及时，在目标进入盲区的瞬间就能触发警示，并且预警逻辑严谨，能够准确区分正常行驶与危险场景，将误报、漏报率控制在极低水平。

盲区风险化解于无形，推动汽车安全从被动防护向主动预判的智能化方向发展。优质的 STBSD 功能应具备以下三点能力：一是高灵敏度与强抗干扰性，可实时精准识别侧后方 30 米内的动态目标，对快速接近的摩托车、电动车等小型移动物体也能及时响应；二是预警距离与速度智能匹配，在高速行驶时扩大监测范围，低速转向时增强近距离障碍物识别。同时，系统能有效过滤道路护栏、路标等干扰源，将误报率控制在极低水平；三是预警方式兼顾及时性与舒适性，支持后视镜警示灯、座椅振动、语音提示等多种模式自由调节，在复杂光照、暴雨、大雾等极端环境下仍保持稳定运行，为驾驶员提供全方位的盲区安全保障。

3.2 1 级及 2 级智能驾驶功能场景

3.2.1 巡航辅助

3.2.1.1 车道居中控制（LCC）

车道居中控制（Lane Centering Control, LCC），是指实时监测车辆与车道边线的相对位置，持续自动控制车辆横向运动，使车辆始终在车道中央区域行驶的功能。通俗来说，LCC 类似于“方向盘助手”，能自动识别车道线并持续调整水平方向，让车辆始终保持在车道中间，这一功能有效降低了因驾驶员分心、疲劳或操作失误导致的车辆压线、偏离车道等风险，尤其在高速公路和拥堵路段显著减少碰撞事故。

在组合驾驶辅助系统中，车道居中控制（LCC）与自适应巡航控制（ACC）常被混淆功能界定。从技术实现来看，

LCC 通过方向盘扭矩控制实现横向维度上的车道线居中保持，而 ACC 则专注于进行纵向维度上的速度调节，通过动力与制动系统的协同实现安全跟车，二者功能互补。LCC 技术最初推出的核心初衷是解决驾驶员在长时间行驶中的疲劳问题和车道偏离风险。通过多传感器融合与实时动态控制，在确保安全冗余的基础上，实现车辆全速域、全场景的车道内精准居中行驶。优秀的 LCC 应具备高车道线识别率、小横向偏移量、低调整频率且平顺无突兀感等能力。业界部分产品虽然也叫 LCC，但已经拓展至可实现横纵向控制的车道巡航辅助。

3.2.1.2 自适应巡航控制系统（ACC）

自适应巡航控制系统（Adaptive Cruise Control, ACC），是指实时监测车辆前方行驶环境，在设定的速度范围内自动调整行驶速度，以适应前方车辆和 / 或道路条件等引起的驾驶环境变化的功能。通俗来讲就是当驾驶员设定好最高车速和跟车时距，车辆会自动保持与前车的安全距离。前车减速时，本车也会自动减速；前车加速或变道后，本车又会加速回到设定速度。人类驾驶员常因反应延迟或跟车过近，常引发“蝴蝶效应”，前车轻微制动即导致后方车辆逐级放大减速幅度，ACC 通过毫米波雷达或其他传感器实时监测前车动态，以算法精确控制车辆加减速，将车距波动范围压缩，可以提升道路通行效率。

ACC 通过智能感知与自动控制，减轻驾驶员负担并提升行车安全，其核心思路是通过传感器实时监测前车距离和车速，自动调节油门和刹车以维持安全跟车距离或预设巡航速度，实现辅助加减速决策的目标。相较于传统定速巡航，ACC 不仅能在高速场景保持稳定车速，还能在拥堵路段自动启停，适应更复杂的路况。优秀的 ACC 应具备精准的车速跟踪能力、动态可调的安全跟车距离、平顺的加减速控制及快速响应的能力。

3.2.1.3 交通拥堵辅助 (TJA)

交通拥堵辅助 (Traffic Jam Assist, TJA), 是指在车辆低速通过交通拥堵路段时, 实时监测车辆前方及相邻车道行驶环境, 并自动对车辆进行横向和纵向控制的功能, 其中部分功能的使用需经过驾驶员的确认。通俗来说, 就是在堵车时, 车辆能够自动跟车、刹车并保持在车道内行驶, 减轻驾驶员频繁踩油门、刹车和转向的负担。

交通拥堵辅助功能以安全优先、舒适兼顾为核心设计理念, 通过精确的控制算法与多传感器协同, 在保证行车

安全的前提下, 最大限度减轻驾驶员在拥堵路段的操作负担。优秀的交通拥堵辅助功能应具备精准的环境感知能力, 能快速、稳定识别前车、加塞车辆、车道线等目标, 在复杂路况下也能准确判断车距与车速。系统响应迅速, 加减速操作自然流畅, 避免急刹、急加速带来的不适感。同时具备强大的抗干扰能力, 在雨雾、夜间等恶劣环境下仍能稳定运行。此外, 交互设计友好, 驾驶员可灵活调节跟车距离、介入提醒方式等设置, 系统也能及时提醒驾驶员介入车辆, 确保驾驶安全。

3.2.1.4 领航行车辅助

领航行车辅助在国家标准中并无准确的定义, 根据工信部《车辆产品主要汽车参数》清单和中汽中心 C-ICAP 用语, 该功能中文名为领航行车辅助, 其功能包含了环岛通行、绕过车道内障碍物、有 / 无交通信号灯的路口通行、离开或到达停车位等功能。当前行业称呼不同, 小鹏称为 NGP, 理想、小米和特斯拉称其为 NOA, 蔚来早期称其为 NAD, 长城品牌则称其为 NOH, 华为称其为 NCA, 虽然各厂商的叫法虽有不同, 本质上都是领航行车辅助技术。

领航行车辅助以拟人化决策为核心, 通过多模态感知与实时路径规划, 在安全边界内提供类人驾驶的舒适辅助体验。其核心逻辑是模拟经验丰富的驾驶员行为模式, 依托高精度传感器融合和 AI 算法, 在导航设定的路线

上动态调整车速与轨迹, 实现“点对点”的智能驾驶辅助。优秀的领航行车辅助须具备高精度定位、全场景感知、毫秒级决策及人性化规划的能力。领航行车辅助不再区分单一的具体的驾驶辅助功能, 而是致力于实现具体应用场景及设计运行域 (ODD) 下点到点的领航行车辅助通行能力, 按照其应用场景主要分为高速领航行车辅助和城市领航行车辅助。高速领航行车辅助限制在特定高速公路和城区快速路开启, 主要包含自动进出匝道、自动变道超车、自动调节车速、自动避让大型车辆等功能。城市领航行车辅助则可以在复杂的城市场景中实现点到点的智能辅助驾驶功能, 根据导航设定路线, 车辆可以实现自主变道、超车、识别红绿灯通行等行为动作。

3.2.2 泊车辅助

泊车辅助功能主要有 RCA（倒车辅助）、IPA（智能泊车辅助）、RPA（遥控泊车辅助）、记忆泊车辅助、

自主泊车辅助等功能。

3.2.2.1 倒车辅助（RCA）

倒车辅助（Reversing Condition Assist，RCA），是指在车辆倒车时实时监测车辆后方环境，并为驾驶员提供影像或警告信息的功能。通俗来说，就是在倒车时，车辆能够自动探测后方障碍物，通过提醒帮助驾驶员更轻松、安全地完成倒车操作。

倒车辅助作为车辆安全辅助系统的重要组成部分，其发展与传感器技术、图像处理技术的进步紧密相连，主要围绕环境感知精度提升与自动化程度增强展开，呈现从简单提示到智能主动干预的发展趋势。倒车辅助功能以

安全防护、便捷操作为核心设计理念，在保障倒车安全的同时，降低驾驶员操作难度。系统与驾驶员的权责划分遵循“辅助不越权”原则，在提供有效辅助的同时，始终确保驾驶员对车辆的最终控制权。优秀的倒车辅助功能应具备精准的环境感知能力，能快速、稳定识别后方车辆、行人、台阶等各类目标，无论是静止还是移动障碍物，都能准确判断距离与方位。系统响应灵敏，警报提示及时且分级明确，根据危险程度调整警报频率与强度，避免因过度提示造成驾驶员困扰。

3.2.2.2 智能泊车辅助（IPA）

智能泊车辅助（Intelligent Parking Assist，IPA），是指在车辆泊车时，自动检测泊车空间并为驾驶员提供泊车指示和 / 或方向控制等辅助功能。IPA 自动泊车辅助系统的设计理念为以环境感知冗余化和控制执行精准化为核心，通过多传感器融合与智能决策，实现复杂场景下的安全、高效泊车，同时降低驾驶员操作负荷。

其设计初衷源于解决城市停车痛点，推动智能驾驶演进。优秀的智能泊车辅助应具备高精度环境感知、智能路径规划、精准执行控制及低用户干预率，且支持垂直 / 侧方 / 斜列式车位，泊车完成后车身与车位边线保持一定距离，光照不足 / 障碍物遮挡等极端场景也保证一定的成功率。

3.2.2.3 遥控泊车辅助（RPA）

遥控泊车辅助（Remote Parking Assist，RPA），可以理解为通过手机 APP、遥控钥匙或其他外部设备远程操控车辆完成泊车辅助操作的功能，其核心特征是驾驶员可在车外对车辆进行泊入或泊出的控制。

RPA 功能设计需在安全边界内打造类人泊车体验，借助智能路径规划、多传感器融合，应对高频次、低速度的泊车复杂场景（如狭窄车位），缓解驾驶员空间判断压力与操作疲劳，实现自动化精准停靠，保障便利性的同时可以保证安全性。

3.2.2.4 记忆泊车辅助

记忆泊车辅助是指通过对用户泊车路线预先学习，在启动功能后自动沿记忆路线行驶，过程支持车速动态调整与不大幅偏离轨迹的绕障，最终精准泊入至目标车位的功能。对消费者来讲，“最后一公里”拎包即走的需求普遍存在，记忆泊车辅助可以通过对用户泊车路线预先学习，可有效释放驾驶员注意力、缓解乏味情况，使驾驶员可以提前收拾随身物品，提升效率与便利性。

该功能由小鹏首次发布，后续持续在记忆数量、路线存储与分享、学习方式等方面对功能进行迭代优化；华为支持路线云端存储并可通过账号同步至其他车辆、后台静默学习；蔚来支持驾驶员下车功能开启等。截至

目前，市场上仅有部分品牌具备记忆泊车辅助功能，例如小鹏、特斯拉、蔚来、理想以及搭载华为乾崮智驾的车型等。记忆泊车辅助围绕“学习—存储—复现”的闭环架构，将人工驾驶的泊车路径转化为可复用的自动化操作，其设计初衷是通过车端自主学习技术解决固定场所重复泊车操作繁琐、环境适应性弱的痛点。通过车端自动自主建图与路径规划，实现低成本、高灵活性的泊车自动化。优秀的记忆泊车功能通过传感器、高精度地图及算法，自主学习并记忆停车场路线、车位位置，实现从入口到指定车位的全流程自动泊车，支持跨楼层、避障、会车等复杂场景，具备高精度定位、场景适应强、安全可靠等特点，提升泊车效率与便利性。

3.2.2.5 自主泊车辅助

一、二线城市高峰时段综合停车时长平均为 30 ~ 60 分钟，包含找车位、泊入、步行至目的地等，医院、演唱会场馆等部分极端场景可能超过 1 小时，解决“最后一公里”便利性成为难题。面向不具备固定停车位的公共停车场景，自主泊车辅助通过自主规划路线、空闲车位泊入可有效释放驾驶员注意力、缓解乏味情况，驾驶员须通过手机端实时监控车辆行驶和泊车情况，可随时暂停。

自主泊车辅助可以理解为基础于云端数据多车共享、无需预先学习、自动规划最优泊车路线、可动态规避障碍、可自主漫游寻找空闲车位的泊车辅助功能。2025 年 1 月，华为在深圳机场开启自主泊车辅助商用试点，支持跨楼层、跨停车场的全自动泊车辅助代驾。在安全边界内打造类人泊车体验，借助智能路径规划、多传感器融合等冗余设计，应对高频次、低速度的泊车复杂场景，缓解驾驶员泊车时的空间判断压力与操作疲劳，实现“最后一公里”的自动化停靠，平衡便利性与安全性。

3.3 3 级智能驾驶演进路线

2020 年欧盟采纳通过全球首个 3 级智能驾驶国际法规《自动车道保持系统（ALKS）》（R157），2023 年修订后扩展了车速上限，在高速公路上车速上限从 60km/h 扩展到了 130km/h，推动了 3 级智能驾驶在欧盟地区的应用。2021 年 12 月，奔驰成为首家获得 UN R157 型式批准的汽车制造商。日本《道路交通安全法》

于 2019 年通过修正案，允许 L3 级自动驾驶汽车上路行驶，并在 2023 年 4 月正式施行，技术方面由丰田主导，侧重高速公路场景，但尚未大规模推广。在我国，2023 年，四部委联合发布《关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知》，遴选具备量产条件的搭载自动驾驶功能的智能网联汽车产品，开展准入

试点；对取得准入的智能网联汽车产品，在限定区域内开展上路通行试点。2024 年底，《北京市自动驾驶汽车条例》通过，自 2025 年 4 月 1 日起施行，明确了 3 级智能驾驶在北京市的测试和运营规则。与此同时，《武汉市智能网联汽车发展促进条例》也正式发布，自

2025 年 3 月 1 日起正式施行，多地条例的通过，3 级智能驾驶逐步进入商用阶段。然而，当前仍属于 2 级智能驾驶阶段，虽然诸多车企已推出 3 级智能驾驶功能，但国内尚未全面开放商业化应用。

3.3.1 交通拥堵领航

交通拥堵领航可以理解为在交通拥堵的高速公路或城市快速路上，允许驾驶员在限定速度范围内短暂放开双手和双脚，并将注意力从驾驶环境中转移的 3 级自动驾驶功能。在交通拥堵的低速行驶场景中，系统能够自动识别前方车辆，并保持合适的跟车距离，根据前车的加速、减速或停车动作，实时调整本车的速度和行驶状态，无需驾驶员频繁操作油门和刹车。通过摄像头、毫米波雷达、激光雷达等传感器，系统可以精准地识别车道线和周围环境，使车辆在车道内自动保持居中行驶，即使在车道线不清晰或有轻微弯道的情况下，也能稳定地控制车辆转向，确保车辆沿着正确的路径行驶。交通拥堵

领航系统能够对交通拥堵中的各种复杂情况进行分析和判断，如前方车辆突然变道、加塞，或出现行人、非机动车等障碍物时，会迅速做出合理的决策，如减速避让、调整行驶路线等，以避免碰撞事故的发生。2017 年，奥迪最早提出交通拥堵领航概念，并在奥迪 A8 上尝试 3 级功能，但因法规和技术限制未实际启用。交通拥堵领航支持脱手脱眼，允许驾驶员操作车机或手机，系统通过车内摄像头监控驾驶员状态。交通拥堵领航设计初衷源于解决高频次、低速度的复杂交通拥堵对驾驶员的身心消耗，是在安全边界内实现类人驾驶体验，通过智能控制与冗余设计缓解拥堵场景下的驾驶疲劳。

3.3.2 高速公路领航

高速公路领航可以理解为专注于高速及城市快速路场景的自动驾驶功能，相较交通拥堵领航增加了智能变道、智能避障、智能过弯等功能，当遇到收费站或匝道时，可以提前发出介入请求，请求驾驶员接管，且无需引导车辆。通过多传感器融合感知、定位与智能决

策算法，在法规允许的范围内实现“类人驾驶”体验，缓解驾驶员在长途高速场景下的操作疲劳与注意力消耗。高速公路领航通过多传感器融合，结合 AI 算法，实现了高速场景的全流程自动化，显著提升驾驶安全性与舒适性。

3.3.3 城区公路领航

城区公路领航是针对城市复杂道路场景的 3 级自动驾驶功能，覆盖城市主干道、支路、交叉路口、环岛、隧道等多样化路况，可实现智能变道、智能绕障、智能红绿灯识别、智能路口通行、礼让行人等功能，针对不能支持的功能，3 级智能驾驶车辆可提前发出介入请求，请求驾驶员接管。通过高精度感知系统、实时动态路径

规划与多目标行为预测技术，系统能够应对行人穿行、非机动车混行、交通信号灯识别、施工区域避让等复杂场景，实现城市道路的智能跟车、无保护左转、拥堵路段自动启停等功能，显著降低城区驾驶的操作强度与心理压力。

城区公路领航通过融合高精度感知系统、动态博弈决策算法与车云等协同技术，在复杂多变的城市交通环境中构建“类人化”驾驶逻辑。系统以多维度冗余安全架构为基础，优先应对行人、非机动车混行、无保护转向等高频风险场景，同时通过自适应学习城市交通流特征，动

态平衡通行效率与驾驶舒适性，其设计目标不仅是替代驾驶员的高负荷操作，更致力于与城市交通生态协同共生，在遵守交规的前提下，以拟人化交互策略融入复杂路权博弈，最终达成安全无感的“人车共驾”体验。

3.4 4 级智能驾驶演进路线

Robotaxi 作为城市出行革命的核心载体，将重塑城市出行范式。2021 年 SAE 对 J3016 标准更新定义了远程协助、远程驾驶的功能和场景，Waymo 和萝卜 Robotaxi 也都构建了远程协同。目前，Robotaxi 厂商均实现了远程协助和远程驾驶的功能，实现极端场景下的紧急接管、车辆脱困，驾驶人员失能紧急救援等。同时，在技术上也通过云端大模型与单车智能的深度协同，不断扩大 Robotaxi 的 ODD 活动边界。我国在北京亦庄、武汉天河机场等区域，已经开启全无人商业化试点，单公里成本较传统出租车大幅降低，并通过“云端仿真 + 车端学习”突破极端场景数据瓶颈。未来，远程方案将会是自动驾驶发展过程中的重要过渡环节。

干线物流作为现代物流体系的核心环节，承担着长距离、大批量货物运输的关键任务，其作用不仅体现在经济领域，还对社会发展和产业升级具有深远影响。中国目前有 1155 多万辆货运汽车，3000 多万名货运司机，人力成本占物流总费用的比重高。我国货运车辆万车肇事起数、死亡人数，分别为全社会平均水平的 2.8 倍、4.6 倍，远远高于社会平均水平。自动驾驶赋能干线物流，将为干线物流带来革命性变革，创造显著的社会价值，比如通过智能算法实现精准车速控制和路径规划，降低燃油消耗（传统重卡油耗占比 30%），编队运输模式可减少驾驶员需求，人力成本从 20% 降至更低；通过多传感器融合和实时决策，显著降低传统干线物流中疲

劳驾驶、恶劣天气、隧道、夜间行驶等复杂工况下导致的人为失误与事故，大幅提升安全性。

智慧物流构建起干线、城配、末端的三级运输网络，京东、菜鸟的无人配送车日均处理能力超千件包裹，续航可达 180 公里；干线物流中，4 级自动驾驶重卡通过节油算法大大降低能耗，在“天津港—马驹桥”线路已经实现跨省运营。

智慧园区场景中，自动驾驶与物联网深度耦合，实现感知、决策、执行全链路升级。华为云园区方案通过 5G 云控网关实现巡逻车、清扫车、物流车的统一调度；合肥骆岗中央公园部署的无人机送餐与自动驾驶接驳巴士，将服务响应时间大大压缩。

末端配送领域，美团、顺丰的无人车通过“AI 路径规划 + 多机协同”，已渗透至社区、高校等多种生活化场景。

这些场景的协同发展，标志着自动驾驶技术正从技术验证迈向规模化商业落地，未来该技术也将进一步往私人乘用车市场演进，如智能通勤自动驾驶、长途出行无人驾驶等。

3.5 产业发展节奏预测

基于当前产业界内政策推进、技术迭代、产业链协同及市场反馈等多维度分析，中国 3 级、4 级智能驾驶的落地节奏将呈现“场景先行、区域分化、渐进渗透”的特点。我们预测：

第一阶段：2025—2027 年，3 级智能驾驶高速场景规模化，4 级智能驾驶限定区域进行试点

2023 年四部委联合发布《智能网联汽车准入和上路通行试点通知》，首次允许具备条件的 3 级、4 级智能驾驶车辆在限定区域开展公共道路试点；2025 年 4 月《北京市自动驾驶汽车条例》实施，明确 3 级智能驾驶车辆合法上路权。华为、小鹏等企业已推出 3 级高速智能驾驶解决方案（如华为乾崮智驾 ADS 4 的 Ultra 旗舰版），冗余设计和 10 秒接管机制满足法规要求，奔驰 3 级智能驾驶系统在中国的本土化验证（如施工区识别、加塞应对）也为技术可靠性提供参考。小马智行、广汽埃安等计划 2025—2026 年在广州、北京等城市开展 Robotaxi 试点运营，通过网约车高频场景积累数据。干线物流领域，卡尔动力等企业预计 2027 年实现无驾驶舱 4 级智能驾驶货车量产，部分路线已盈利。

第二阶段：2026—2028 年，3 级智能驾驶城区渗透，4 级多场景扩展

端到端 AI 模型（如华为乾崮智驾 ADS 4 城区方案）和 MoE 架构压缩技术提升复杂路况处理能力，整体方案成本可控，推动功能下沉至中端车型；在法规上预计更多城市跟进责任认定细则，明确系统激活期间的保险与事故处理规则。菜鸟 4 级智能驾驶物流车、文远知行环卫车等已在 30 多个城市部署，成本下降 20% ~ 30%，验证垂直场景经济性。滴滴与广汽埃安前装量产 4 级智能驾驶 Robotaxi 车型计划 2026 年运营，若单车成本与传统出租车持平（当前差距约 30%），将触发规模化拐点。

第三阶段：2028-2030 年后，4 级智能驾驶城市主流化

城市道路覆盖基建成熟，车云协同网络覆盖主要城市，支持 4 级智能驾驶在 80% 以上城区道路运行。通过试点运营（如北京 Robotaxi）积累公众信任，保险制度完善（如车企担责）消除安全疑虑，用户接受度提升。

中国 3 级与 4 级智能驾驶的落地节奏将遵循“高速→城区”“封闭→开放”“B 端→C 端”的路径，政策试点与产业链降本为核心驱动力。2025—2030 年是 3 级与 4 级智能驾驶商业化黄金期，但全面普及仍需较长时间。

第四章

自动驾驶安全体系

随着自动驾驶相关技术逐步突破，自动驾驶技术正向商业化应用迈进。然而，因人为操作不当或驾驶系统缺陷等导致的安全事故层出不穷，严重削弱了消费者对自动驾驶技术的信任。中国工程院院士、清华大学教授李骏

曾表示，“安全是智能网联汽车发展的生命线，也是消费者最为关心的问题”。行业亟需构建科学的安全评估体系，尤其是面向自动驾驶的安全体系，通过安全体系的构建，让自动驾驶真正从“可用”迈向“可靠”。



4.1 自动驾驶安全系统要素

李骏院士强调，“自动驾驶汽车的安全是一个涵盖全生命周期的系统工程，必须同时确保自动驾驶系统安全与自动驾驶运行安全的双重保障。产品出厂前的功能安全只是基础门槛，更关键的是在动态交通环境中持续保障

运行安全，这涉及车辆与复杂环境的实时交互、与多元交通参与者的协同，以及控制策略的适应性。”这就要求汽车企业在研发阶段就构建“系统安全—运行安全”的一体化架构。一方面，通过 SOTIF 消除感知—决策链

路存在的潜在风险；另一方面，建立覆盖车辆全生命使用周期的运行安全体系，包括远程监控、动态 ODD 合规性检查及人机共驾时的控制权无缝交接等。只有将设计端的失效防护与运行端的风险管控形成闭环，才能真正实现“设计即安全、运行保安全”的目标。本节将对汽车自动驾驶安全系统的系统安全及运行安全进行详细地介绍^[1]，系统框架如图 4-1 所示。

正实现“设计即安全、运行保安全”的目标。本节将对汽车自动驾驶安全系统的系统安全及运行安全进行详细地介绍^[1]，系统框架如图 4-1 所示。

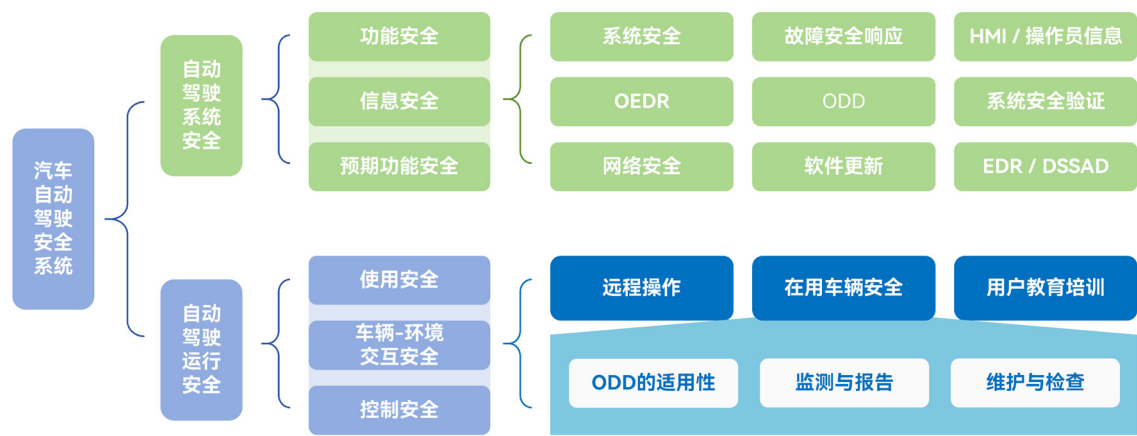


图 4-1 汽车自动驾驶安全系统框架

4.1.1 自动驾驶系统安全

自动驾驶系统安全主要包括系统安全性、故障安全响应、人机交互界面 / 操作员信息、目标物与事件检测响应、运行设计域、系统安全验证、网络安全、软件更新、自动驾驶车辆事件数据记录器与数据存储系统^[1]，详细如下：

- (1) 系统安全性 (System Safety)：处于自动驾驶模式时，自动驾驶车辆应确保驾驶员及其他道路使用者不存在不合理的安全风险，并符合道路交通安全法规要求。
- (2) 故障安全响应 (Failsafe Response)：自动驾驶车辆应能检测系统故障或 ODD 条件不满足的情况，此时车辆应能发出介入请求，并在驾驶员未接管时执行最小风险策略。
- (3) 人机交互界面 / 操作员信息 (Human Machine Interface, HMI/Operator information)：在驾驶员可能介入驾驶任务的场景下，自动驾驶车辆应配备驾驶员参与度监测功能，以评估其对全程驾驶任务的认知

与准备状态。当驾驶员需重新获取车辆控制权时，车辆应发出驾驶任务移交请求。此外，自动驾驶车辆应支持与其他道路使用者的交互。

- (4) 目标物与事件检测响应 (Object Event Detection and Response, OEDR)：自动驾驶车辆须具备检测并响应 ODD 内合理预期目标物 / 事件的能力。
- (5) 运行设计域 (Operational Design Domain, ODD)：就车辆安全性评估而言，制造商应书面说明车辆支持的 ODD 范围及规定 ODD 内的功能表现，ODD 应明确描述自动驾驶模式下的预期运行条件，至少包含道路类型、地理区域、速度范围、环境条件等。
- (6) 系统安全验证 (Validation for System Safety)：制造商应基于系统工程方法，通过可靠的设计与验证流程证明其自动驾驶系统不存在不合理的安全风险，且需要符合道路交通安全法规。设计与验证方

法应包括自动驾驶系统的危害分析与安全风险评估、OEDR 评估与集成系统的整车设计评估等，应能验证自动驾驶车辆在常规运行中的行为能力、碰撞规避能力及降级策略的效能。测试方法可结合仿真测试、试验场测试及实际道路测试进行。

(7) 网络安全 (Cybersecurity)：应依据车辆物理系统的网络安全实践，对自动驾驶车辆实施诸如网络攻击等手段的防护措施。主机厂须明确如何将网络安全考量纳入自动驾驶系统 (ADS) 开发全过程，包括所有的实施措施、变更项、设计决策、分析论证及相关测试验证，并确保在健全的文档版本控制环境下实现数据的可追溯性。

4.1.2 自动驾驶运行安全

自动驾驶运行安全包括：远程操作、在用车辆安全、用户教育与培训^[1]，具体如下：

(1) 远程操作 (Remote Operation)：自动驾驶系统遇到超出其处理能力的场景时，通过车外控制中心对车辆实施实时干预的技术方案。

(2) 在用车辆安全 (Safety of In-Use Vehicles)：确保已投入市场的自动驾驶车辆在全生命周期内持续符合安全要求的系统性措施，主要包含三方面：一是 ODD 适用性，确保车辆实际运行环境始终符合预设的 ODD 边界，包括地理围栏、天气条件、道路类型等参

(8) 软件更新 (Software Updates)：车辆制造商应确保系统更新能按需以安全可靠的方式执行，同时为售后维修及必要改装提供技术支持。

(9) 自动驾驶汽车事件数据记录系统与数据存储系统 (Event data recorder, EDR; Data Storage System for Automated Driving vehicles, DSSAD)：自动驾驶车辆应具备数据采集与记录功能，以可追溯形式存储与系统状态、功能异常、性能降级或故障发生相关的必要数据，这些数据可用于事故原因鉴定、自动驾驶系统状态判定与驾驶员状态的确认。

数；二是监测与报告，自动驾驶车辆在运行过程中，实时监控车辆的运行状态，并在发生与自动驾驶安全相关的事件时进行数据上传和报告；三是维护与检查，针对自动驾驶车辆硬件、软件及通信系统的全生命周期管理流程，旨在通过预防性维护、周期性检测及故障后修复，确保车辆始终符合设计安全标准。

(3) 用户教育与培训 (Consumer Education)：车辆制造商应制定、记录并持续更新针对内部员工、经销商、分销商及消费者的教育培训计划，重点涵盖自动驾驶车辆与传统车辆在操作使用方面的预期差异。

4.2 自动驾驶系统安全

系统安全是指在自动驾驶汽车系统生命周期内应用安全系统工程等相关理论辨识整车、零部件及算法等组件的潜在危害，并采取有效的安全保障措施及技术将其系统风险降至可接受水平，使汽车达到最佳安全状态的综合性体系。系统安全的研究重点是如何通过合理的保障技术改善功能安全、预期功能安全和信息安全，即

系统故障导致的功能安全 (Functional Safety, FuSa) 问题、功能不足导致的预期功能安全 (Safety Of The Intended Functionality, SOTIF) 问题以及网络攻击等手段导致的信息安全 (Cybersecurity) 问题，如图 4-2 所示。

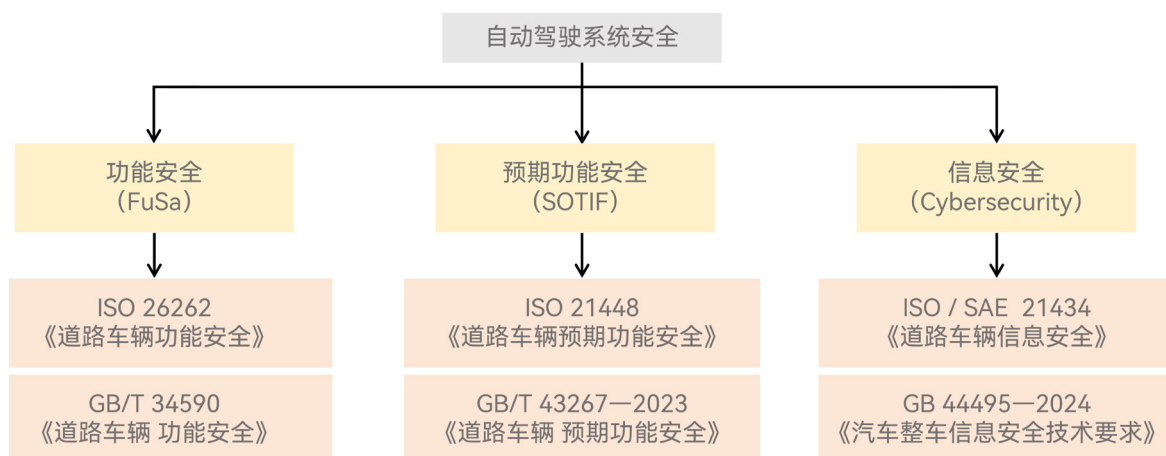


图 4-2 自动驾驶汽车系统安全框架

4.2.1 功能安全

(1) 定义与内涵

功能安全作为道路车辆电子电气系统的核心安全屏障，在国际标准 ISO 26262 中赋予了明确定义，指不存在由电气 / 电子系统的功能异常表现引起的危害而导致的的不合理风险^{[2][3]}。这一定义以风险防控为导向，构建了系统设计、开发、生产、在用、报废全生命周期的安全过程管控框架。功能安全的核心在于通过系统化的工程方法，识别、评估并缓解因系统功能失效引发的潜在危害，确保车辆在各种工况下的安全可控性。从技术实现维度看，功能安全并非单一的技术指标，而是涵盖需求分析、系统设计、验证测试及持续改进的完整体系。

(2) 研究对象的层级解构

道路车辆功能安全的研究对象是“相关项”，是指功能安全整车层面的范围，具体定义为实现整车层面功能或部分功能的系统或系统组合。这里的“功能”本质是用户对系统能力的预期，如加速、转向、制动等基础操作，或是自动驾驶、自动泊车等复杂功能。相关项的界定需明确功能边界，例如，自适应巡航控制系统 (ACC) 作为独立相关项，其功能范畴限定于车距保持与速度调节，而不涉及车道保持等其他功能域。

相关项由“系统”构成，而功能安全对系统的定义进行了严格的技术约束。一个完整系统至少包含传感器、控制器、执行器三大核心要素，三者缺一不可。以电子稳定程序 (ESP) 为例，主要包括传感器（通过陀螺仪、加速度计采集车辆姿态数据）、控制器（基于预设算法分析数据，判断是否触发稳定控制）及执行器（通过液压系统对特定车轮施加制动力纠正行驶轨迹）。若缺失执行器（如制动系统故障），即使传感器与控制器功能正常，系统也无法实现预期功能，更无法对外界环境产生作用，这正是功能安全强调系统完整性的根本原因。值得注意的是，传感器或执行器可位于相关项内部或外部，例如自动驾驶系统的转向执行器通常依托整车底盘系统（外部资源），而非独立集成于相关项内。

(3) 故障链分析

功能安全风险的根源在于“系统性失效”与“随机硬件失效”，二者通过“故障—错误—失效”的链式反应引发危害，理解这一过程是构建安全防护机制的关键。

“故障”是可导致要素或相关项失效的异常情况，具有多样性与动态性特征。常见的故障包括永久性故障（如传感器电路短路，导致持续输出错误信号等）、间歇性故

障（因组件老化或接触不良，如 ECU 焊点虚接导致偶发通信中断等）、瞬态故障（如电磁干扰引发的寄存器数据跳变等）。部分系统性故障也可能成为间歇性故障的诱因，例如时序设计不足导致控制器在高负载下出现周期性计算延迟等情况。

“错误”是计算值、观测值与真实值的差异，其产生源于内部故障或外部环境干扰，如雷达传感器因雨雾天气出现误检测，将水滴反射信号误判为障碍物（外部干扰引发错误）；微控制器因缓存错误导致控制算法输出异常扭矩值（内部故障引发错误）。错误可潜伏于软硬件系统各层级中（如软件逻辑错误、硬件信号错误等），是连接故障与失效的中间环节。

“失效”是因故障导致的功能执行能力终止，主要分为两类：系统性失效和随机硬件失效。前者与人的设计、操作等主观因素相关，具有确定性因果关系。例如，软件需求规格说明书存在歧义，导致控制逻辑错误；硬件布局未考虑电磁兼容，引发传感器信号串扰。此类失效需通过流程改进（如代码评审、设计验证）消除。后者服从概率分布的不可预测失效，源于物理层面的不确定性。例如，电容因长期工作温度过高导致电解液泄漏。此类失效需通过可靠性建模与冗余设计降低发生概率。

4.2.2 预期功能安全

（1）基本概念

预期功能安全（SOTIF）是伴随自动驾驶技术迭代应运而生的核心安全理念，旨在系统性应对因系统功能不足引发的安全风险。其核心逻辑在于通过全生命周期的安全评估与管理，在设计阶段精准识别潜在功能缺陷同时以工程优化手段降低风险，确保系统在预期使用环境下安全可靠运行。SOTIF 体系中，场景被定义为包含目标、环境条件及事件时序关系的复杂集合，用户对系统功能的误用或对其局限性的认知不足，均可能放大安全风险，此类风险通常由可控性与严重程度共同界定。

故障→错误→失效的演进最终可能引发危害，而危害需与具体场景结合形成危害事件。例如，制动系统失效在城市道路（高暴露率场景）的风险远高于停车场（低暴露率场景）。ISO 26262 通过严重度（伤害的严重程度）、暴露率（运行场景的暴露概率）、可控性（驾驶员或系统避免伤害的能力）三参数量化风险，形成汽车安全完整性等级（ASIL）^[4] 的判定依据。

（4）功能安全系统开发

根据 ISO 26262，功能安全系统阶段开发内容分为技术安全需求及技术安全概念的开发及验证（Verification）和系统集成测试及安全确认（Validation）两部分，分别隶属于系统开发“V”模型的左侧和右侧，二者中间穿插了具体的硬件和软件开发。系统阶段技术安全需求和技术安全概念的开发，与概念开发过程及输出产物紧密衔接，而只有完成具体的硬件和软件开发，才能进行系统层面的集成测试和安全确认。以软件功能安全开发为例，ISO 26262 第 6 部分规定的软件功能安全开发“V”模型左侧涵盖需求开发、架构设计及详细实现，右侧涉及集成与测试验证。该模型与 2005 年欧洲车企制定的 ASPICE 在内容和输出上基本类似，因此可参照 ASPICE 规范软件开发流程，以提升汽车软件质量。

在具体运行场景中，车辆承担的动态驾驶任务（DDT）涵盖实时操作与战术功能，如车道保持、速度调节等。以 3 级自动驾驶为例，当车辆故障为轻微失效时，此时应立即向 DDT fallback（驾驶员）发出介入请求，若 10s 内未接管，则执行最小风险操作（MRM）进入最小风险状态（MRC）；而当车辆故障为严重失效时，可直接执行 MRM，进入 MRC。而运行设计域（ODD）则为车辆划定了安全运行边界，从道路类型、气象条件到系统参数等多个维度明确规定了车辆可安全执行 DDT 的条件范围。

随着智能驾驶从 2 级向 3 级进阶，系统复杂度与场景多样性呈指数级增长，SOTIF 的重要性也愈发凸显。该体系围绕一个关键概念展开：功能不足，即规范定义不足或性能局限。前者表现为需求描述不完整，后者源于技术能力边界。当功能不足被特定触发条件触发，轻则

导致系统输出异常，重则引发车辆危害事件。例如，配备高速公路辅助驾驶的车辆，若驾驶员监测摄像头受强光干扰而失效，可能致使系统无法及时警示分心驾驶，进而在车道偏离时错失接管时机酿成事故。

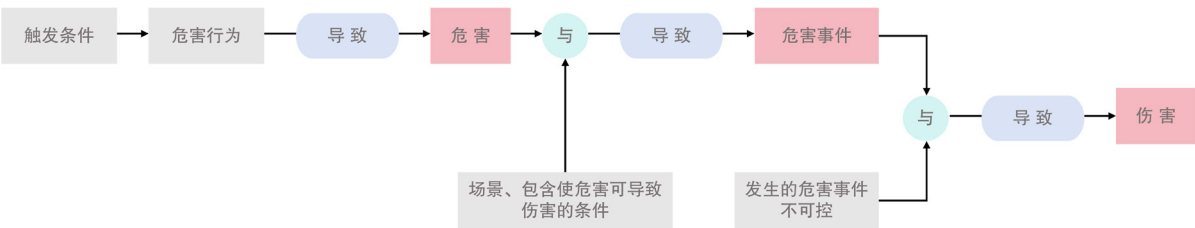


图 4-3 SOTIF 的危害事件模型

如图 4-3 所示，SOTIF 的危害事件模型可通过可视化手段揭示功能不足、触发条件与危害行为间的因果链。例如，高速公路场景中，传感器受环境干扰误将路标识别为换道车辆，触发不适当制动最终引发追尾；城市道路中，系统未能有效识别异形交通参与者，导致车辆跟车制动延迟造成碰撞事故。基于此，如图 4-4 所示，

SOTIF 将场景划分为已知安全、已知不安全、未知安全、未知不安全四类，其核心目标在于通过持续迭代，将未知场景转化为已知、将不安全场景优化为安全，逐步压缩风险区域，最终实现残余风险的可接受化，向全时速、全方向、全目标、全天候、全场景的全域安全目标持续迈进。

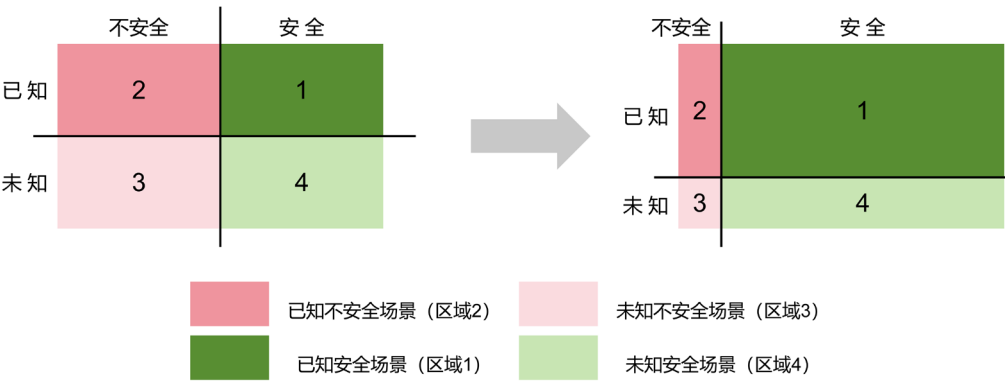


图 4-4 预期功能安全活动带来的场景区域之间的演变

时速安全：在动态变化的交通场景中，不同速度对应差异化的风险特征，通过建立速度域与安全边界的动态映射，自动驾驶系统能够实时匹配环境感知、决策响应与机械控制的协同节奏，有效预防因速度适配偏差引发的碰撞、失控等安全隐患。低速场景行业生效范围一般 $\leq 5 \sim 20\text{km/h}$ ，优秀企业可做到生效范围

$\leq 2 \sim 10\text{km/h}$ ，一般包括城市道路低速行驶场景、停车场相关场景、校园 / 园区 / 景区特殊场景等，车辆在高速公路上保持设定的较高速度（如 $100 \sim 120\text{km/h}$ ），高速场景前向自动紧急制动速度生效范围行业一般 $\geq 100\text{km/h}$ ，优秀企业可做到生效范围 $\geq 120\text{km/h}$ ；侧向防碰撞的速度生效范围行业一般 $\geq 80\text{km/h}$ ，优秀

企业可做到生效范围 $\geq 100\text{km/h}$ 。

方向安全：不同于传统被动防护，智能驾驶的全向防碰撞系统通过融合感知、决策与控制技术，构建起覆盖前向、侧向、后向及变道场景的动态防护网。无论是路口突现的“鬼探头”、后方高速逼近的电动车，还是加塞车辆的强行切入，系统能以毫秒级响应实现主动避让或紧急制动。这种突破视觉盲区的全域守护，主要包含了前、后、侧向的预警与紧急制动功能，可以让智能汽车真正具备“零死角”的风险化解能力。

识别安全：系统不仅需要准确感知常规动态目标，如移动车辆、横穿行人及自行车等，更要具备对静态障碍物（锥桶、水马等）及异形物体的精准辨识能力。尤其在复杂路况下，准确区分目标的运动属性（静止 / 移动）及行为模式（横穿、斜穿或逆向行驶等），可大幅提升预判风险的响应速度，有效预防因漏检或误判引发的碰撞事故。

环境安全：在复杂多变的现实交通场景中，恶劣天气、异常光照、极端温度等环境变量对感知系统的稳定性、决策算法的适应性和控制执行的可靠性提出了严苛挑战。从产业发展维度看，全天候安全不仅是技术攻坚的制高点，更是构建用户信任体系的关键支柱，当智能网联车辆能在暴雨夜的湿滑弯道、雨雾尘霾天的复杂路口等高风险场景中保持稳定可靠的行驶表现，才能真正推动自动驾驶迈向规模化商用。

场景安全：系统必须具备无差别风险处置能力，覆盖人机共驾路况判断、高速突发应对、低速泊车障碍物识别等全域场景。路面自适应 AEB 通过多源感知数据融合，在高速追击、弯道遮蔽、湿滑制动等极限条件下动态建模碰撞风险并分级干预，其场景覆盖广度决定主动安全系统可靠性边界；驾驶员失能靠边停车与辅助控制功能建立全链路应急响应，填补人机权责切换安全真空；紧急 Cut-in 鸣笛与 HUD 危险显示构成的预警体系，经声光融合将风险前置处理，强化人机共驾认知协同；

智能领航需平衡变道博弈与车道保持，智能泊车需突破狭小空间定位精度，自主泊车则需深化场库拓扑理解；从高速控制到泊车优化，从事件处置到风险预判增强，每个场景都考验感知—决策—执行闭环的无缝衔接。正是通过高频高危场景锤炼，自动驾驶系统才能建立行驶全周期安全护城河，推动智能出行向安全承诺的价值跃迁。

（2）安全保障技术

为了解决自动驾驶车辆的安全问题，与传统安全方法不同，预期功能安全保障技术从触发条件、系统功能不足的角度来解决车辆面临的安全风险，瞄准算法正常运行时的算法自身状态，关注算法或器件运行所在的驾驶环境，规范算法输出的驾驶结果，最终实现修正与规范自动驾驶系统行为的目标。

在实践层面，SOTIF 遵循 ISO/DIS 21448 标准构建全流程框架，涵盖分析评估、验证确认与运行监测三大阶段。分析评估阶段综合运用危害分析和风险评估（HARA）、功能失效分析等手段，深度挖掘功能缺陷与潜在风险；验证确认阶段通过策略制定与场景验证，确保系统在实际运行中满足安全要求；运行阶段则依赖持续监测与动态升级，保障系统长期可靠，如危急时刻的人机共驾、车辆紧急避险协同、多系统的协同控制、融合感知的安全应对、冗余安全设计等策略。

技术实现层面，SOTIF 突破传统安全框架，聚焦算法正常运行时的性能边界与环境适配问题。以人工智能算法为例，清华大学李骏院士团队针对深度学习模型可解释性差、泛化能力弱的固有缺陷，引入不确定性量化技术进行风险监测，该团队通过贝叶斯神经网络或深度集成等方法，量化认知不确定性与偶然不确定性，一旦检测到风险阈值立即触发分级预警与决策调整，最终确保行车安全^{[5][6]}。比如：

危急时刻的人机共驾策略：在助力叠加方面，驾驶员本

能触发制动或转向操作时，系统需实时融合干预力度；对于自动紧急制动（AEB）系统，需通过压力传感器获取驾驶员制动踏板力度，动态计算叠加制动力矩，避免系统单独作用导致过度制动；转向系统则需在驾驶员实施轻微转向操作时，基于力矩反馈和转向角度进行毫秒级运算，智能补偿辅助转向力矩。在避险策略处理上，系统设置毫秒级决策校验窗口，通过连续监测驾驶员操作意图与预设策略的偏差度，有效区分真实避险需求与误操作。

车辆紧急避险协同策略：AEB 应优先于 AES 启动，AEB 通过主动减速实现风险化解，而 AES 作为补充手段仅在制动距离不足等极端情况下启用。在此安全框架下，AES 系统需执行更严苛的防误触标准，其误触发率应从 AEB 的十万公里/次基准提升至亿公里/次量级，这种指数级安全冗余源于 AES 作为终极避险手段的特殊属性，每次介入都意味着系统已突破 AEB 的安全边界，伴随着车道偏移带来的二次风险。

多系统协同策略：当前行业普遍将传感器视作系统的“眼睛”，算法视为“大脑”，但若执行机构响应滞后，只有眼睛看得清、脑子反应快，但身体跟不上也无法保证安全，仍可能引发安全隐患。因此，需突破传统分布式底盘架构的限制，通过底盘域控制器的集中化重构，实现动力、制动、转向等执行单元的毫秒级协同响应，同时打通与座舱系统、通信网络、光学交互等模块的底层数据通道，构建全域联动的主动安全体系。

融合感知的安全应对策略：激光雷达的引入为感知系统补全关键拼图，其厘米级精度的三维点云数据可精准重构环境立体信息，显著提升目标物分类、距离及方位判断的可靠性，为自动驾驶决策提供确定性更强的感知输入。但激光雷达并非全能解决方案，相较于毫米波雷达，其在雨雪雾霾等复杂气象下的抗干扰能力存在短板，而摄像头独有的色彩感知能力仍是交通标识、信号灯等场景不可替代的信息来源。激光雷达强化空间建模能力，毫米波雷达保障基础环境感知鲁棒性，视觉系统维持语

义解析优势，三种传感器实质上构建起多维互补的感知网络。

冗余安全设计策略：自动驾驶在感知、决策、执行上有冗余安全要求，包含计算冗余、感知冗余、制动冗余、转向冗余、电源冗余、通信冗余、热管理冗余等，通过部署多重组件构建容错能力，确保预期功能持续稳定运行。

预测不确定性量化评估方法：预测是自动驾驶的关键技术，借助这一技术，自动驾驶车辆可在必要时提前做出调整，避免或减少交通事故的发生。该领域深度学习是研究热点，虽然其极大增强了自动驾驶系统在复杂场景的适应能力，但是仍面临多种挑战，尤其是预测问题的不确定性。该不确定性主要来源于两个维度，一是模型本身的不确定性；二是数据层面的认知不确定性。针对模型不确定性可通过概率分布形式进行量化，常用的方法如高斯分布及其变型；针对认知不确定性可引入预测熵作为度量，构建以贝叶斯推理模型为基础的认知评估模型，从而有效量化和管理模型不确定性和认知不确定性，提升自动驾驶系统的可靠性。

运行设计域（ODD）的动态监测同样是 SOTIF 的关键支撑。从道路规范（覆盖城市、高速等场景的几何特征与车道规则）、天气规范（限定能见度、温度等环境参数）到车辆与驾乘人员状态规范，ODD 构建了多层次安全屏障。例如，针对道路缺陷监测，常见的方法是利用单阶段式目标检测网络模型结合双目视觉与点云处理完成路面缺陷识别；针对天气状态监测，利用责任敏感安全模型动态调整车速以平衡理论安全间距，是确保极端天气下行车安全的有效方法之一。道路法规合规性监测则为 SOTIF 注入法律约束维度。为了实现法规数字化，李骏院士团队提出将自然语言法规转化为度量时序逻辑表达式，该过程从语义元素提取、原子命题构建到逻辑链梳理，最终形成机器可执行的规则库。在此基础上，该团队构建了分层触发监测与合规决策协同运作架构，实时校验车辆行为与法规约束的一致性，通过优

优先级划分与模型预测控制算法，动态生成合规行驶轨迹，确保自动驾驶既符合安全标准，又满足法律要求，

如图 4-5 所示 [7]。

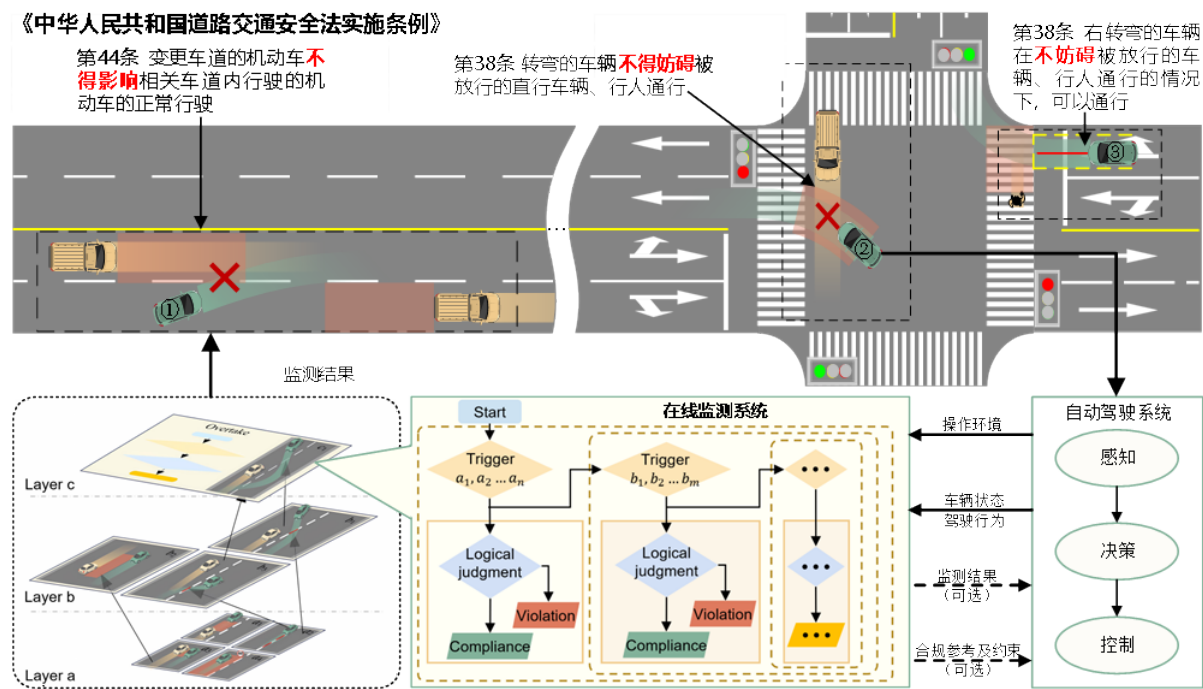


图 4-5 自动驾驶车端合规性在线监测架构

综上，SOTIF 并非孤立的技术模块，而是贯穿自动驾驶系统设计、开发、运营全生命周期的安全哲学。其通过多维度风险建模、智能化监测预警与动态化策略响应，

填补了传统安全体系的空白，为自动驾驶技术的规模化商用筑牢安全基石。

4.2.3 信息安全

(1) 基础概念

信息安全在自动驾驶领域承载着保障系统可信运行的核心使命，本质上是通过技术手段实现可用性（系统持续稳定工作，如遭攻击仍能通信）、机密性（数据不被非法获取，如加密传输位置信息）、完整性（数据不被篡改，如区块链验证数据一致性）、不可否认性（操作可追溯，如数字签名确认指令来源）、真实性（身份可信，如车载终端认证）、可控性（权限可管理，如分级访问控制）六大属性的动态平衡 [8]，核心内涵随技术发展从单一数据保护延伸至系统级风险防控，例如智能座

舱需防范物理层硬件篡改、网络层协议欺骗、应用层恶意代码注入等跨层级风险。根据 GB 44495—2024《汽车整车信息安全技术要求》，车企需构建覆盖全生命周期的信息安全管理体系统，并在外部连接、通信安全、软件升级及数据保护等维度设置强制性技术屏障。特别强调对远程控制、OTA 升级等关键场景的威胁防护，要求通过身份认证、完整性验证、最小化授权等机制抵御网络攻击。

信息安全威胁呈现多样化形态，包括信息泄露（如窃听通信信号）、数据篡改（如伪造导航路线）、重放攻击

(如重复发送开门指令)、身份假冒(如伪装成合法车辆接入网络)等多种核心模式,每种威胁均对应特定技术风险。

(2) 车联网架构

车联网是基于车内网、车际网和车载移动互联网的一体化网络,其作为自动驾驶通信基石构建于“端—管—云”三层架构,但也时常面临信息安全的挑战。

端系统(车内网络):相当于汽车的“神经中枢”,通过CAN总线、车载以太网等连接电动机、传感器等设备。例如,低速CAN总线用于车窗控制,但若缺乏认证机制,攻击者可通过OBD接口伪造指令。

管系统(车外通信):实现车与车(V2V)、车与人(V2R)的无线通信。专用短程通信(DSRC)用于近距离实时交互(如碰撞预警),但需防范信号伪造;蜂窝车联网(C-V2X)基于5G技术,覆盖范围广但面临中继攻击的挑战;无线局域网(WLAN)则可能被黑客通过Wi-Fi热点入侵。

云系统(云端平台):通过T-Box连接车辆与云端,可实现远程控制、OTA升级等功能。若升级包未加密,则可能缺乏完整性校验机制,面临被恶意篡改、病毒注入等风险;若云端数据泄露,大量用户隐私和车辆状态信息将面临安全挑战。

(3) 安全保障技术

自动驾驶信息安全设计的深化,不仅是满足合规要求的必要路径,更是重塑智能交通生态信任基石的战略选择。通过将GB 44495—2024的安全基因植入自动驾驶系统的研发闭环,既能有效防范勒索攻击、数据泄露等新型风险,又能为未来一体化协同提供可信数据底座。为了实现信息的安全防护,安全保障技术应运而生,常见的保障技术如下:

1) 态势感知与入侵检测技术

通过部署传感器和探针,可实时监控车内总线流量、车外通信信号和云端日志。例如,利用机器学习建立车辆行为基线,当转向角度、刹车频率等数据异常波动时,系统会立即预警。入侵检测系统则像“电子警察”,分为监控主机日志的“主机型”和分析网络流量的“网络型”,前者可发现病毒写入系统文件,后者能识别伪装成正常通信的攻击信号。随着AI技术的快速成熟,在入侵检测系统中利用神经网络模型自适应标记异常行为是当前技术热点之一。实际应用中多采用前向模型,利用逆向传播法(Back Propagation, BP)进行训练,其中输入层接收事件二进制信号,输出层指示可能的入侵,同时根据具体场景设定隐含层参数,最终结合前向估计输出与反向误差反馈实现网络权重调整过程。

2) 加密与认证技术

加密与认证技术是保障车载信息传输与访问安全的重要手段,具体如下:

加密技术:指利用算法对数据进行处理,防止信息在传输或存储中被窃取、篡改。可分为对称加密(如AES,速度快适合视频传输)和非对称加密(如RSA,适合密钥交换)。例如,车载摄像头拍摄的画面通过AES加密后传输,车云通信则用RSA协商密钥,确保“一次一密”^[9]。

身份认证:指用于确认操作者及信息访问者身份的过程。认证技术已经从简单的“用户名+密码”升级为多因子认证,如动态口令(每次登录密码不同)、生物特征(指纹、虹膜)、USB Key(硬件+密码双重验证)等方式,可实现信息安全性的大幅提升。

3) 主动防护技术

主动防护技术通过预先部署防御机制，从源头降低车载网络遭受攻击的风险，主要包括以下几类：

防火墙技术：如同网络的“安检门”，过滤不安全的流量。例如，禁止外部设备随意访问车载诊断接口（OBD）或只允许特定 IP 地址连接车载系统。

蜜罐技术：设置“诱饵系统”吸引黑客攻击。例如，在车

内网模拟一个虚假的空调控制节点，当黑客尝试入侵时，系统可记录攻击路径并及时防御^[10]。

应急响应技术：制定“安全应急预案”。若系统检测到攻击，可自动切断危险连接并启动备份系统，甚至让车辆进入“limp-home 模式”（低速安全行驶到维修点）。

4.3 自动驾驶运行安全

4.3.1 自动驾驶运行安全总体职能

自动驾驶运行安全管理体系涵盖运行风险管控与运行安全保障两大职能模块，其中运行风险管控作为体系核心，贯穿自动驾驶全生命周期管理流程。运行风险管控职能聚焦自动驾驶系统在环境交互及交通参与者交互过程中的动态风险管控。在环境交互领域，重点构建两大技术管控体系：一是实现 ODD 边界动态识别；二是建立环境参数实时监测机制。在与交通参与者交互层

面，确保车辆驾驶行为符合交通法规要求；实现风险实时监测与分级预警；构建标准化应急风险处置与响应流程。运行安全保障职能主要涵盖使用安全与安全管理两大领域。在使用安全上，一方面强化系统优化与人员管理，另一方面构建持续改进与维护机制。在安全管理上，实现风险事件及事故隐患的实时监控；建立标准化事故处理及溯源流程；制定突发事件管理制度。

4.3.2 自动驾驶运行风险管控关键技术

4.3.2.1 自动驾驶 ODD 边界动态识别

ODD 是自动驾驶系统设计运行的核心边界框架，其明确定义了系统能够安全、可靠执行自动驾驶功能的外部条件集合。根据国际标准与行业实践，ODD 通常涵盖多个维度。例如，物理环境条件：天气（如光照、降水、能见度等）、道路基础设施（如车道标线清晰度、交通信号类型等）、地理区域（如城市道路、高速公路）等；交通动态要素：涉及其他道路使用者（如车辆、行人、非机动车的密度与行为模式）等。ODD 的核心价值在于为自动驾驶系统划定“安全运行边界”。一方面，它是系统开发、测试与验证的基础，完整准确的 ODD 定义可确保测试场景覆盖所有设计工况；另一方面，它是运行阶段风险管控的依据，当系统检测到环境条件接近或超出 ODD 边界时，需触发后援响应（如人工接管、系

统降级等），避免因功能失效导致事故。

在传统自动驾驶开发中，ODD 通常作为静态参数写入系统设计文档。然而，实际交通环境具有强动态性与不确定性，仅仅依赖静态 ODD 定义存在显著局限。例如，边缘案例的不可穷举性：静态 ODD 难以覆盖所有潜在场景（如突发恶劣天气、非常规交通行为等），然而边缘案例往往是事故高发场景；环境参数的连续变化特性：光照强度、道路湿滑度等物理量呈连续波动，静态阈值无法精准描述系统实际能力边界；系统性能的实时衰减风险：传感器污染、硬件老化等因素会导致系统实际感知能力偏离设计参数，需动态校准 ODD 边界。因此，动态识别的核心目标是通过实时监测环境参数与系

统状态，动态判断当前工况是否处于 ODD 安全范围内，为风险管控提供前置决策依据。这一过程不仅涉及技术层面的感知与算法优化，更需融入系统工程的全生命周期管理理念。

自动驾驶 ODD 边界动态识别是针对与环境交互过程中风险管控的前提基础。相关技术框架通常涉及数据采集与多源融合、边界条件建模与实时评估、边缘案例的机器学习识别以及动态响应与控制策略。其中，动态识别的基础是对环境与系统状态的精准感知，需构建多模态数据采集体系。例如，在环境感知层，通过激光雷达、毫米波雷达和摄像头实时采集道路几何特征、交通参与者行为、气象参数等数据；通过 V2X 获取路侧单元发布的动态交通信息（如施工预警、临时限速等），卫星导航（如北斗）提供的高精度定位与地图匹配数据；在系统状态监测层，通过车载诊断系统实时采集传感器健康状态（如激光雷达点云密度衰减率）、计算平台算力利用率、执行器响应延迟等内部参数，但数据融合仍需

进一步解决多源数据时空同步、语义一致性问题；边界条件建模与实时评估可包含以下步骤。动态边界数学建模：将 ODD 边界从“静态阈值”升级为“概率分布模型”。如，针对“雨雾天气下的能见度边界”，可建立传感器检测概率与能见度映射关系，当检测概率低于安全阈值时，判定进入边界区域；风险量化评估模型：结合环境参数与系统状态构建风险指数，针对难以通过规则建模的复杂场景，可引入机器学习技术，如基于强化学习的边界探索、异常检测算法等；动态响应与控制策略：根据风险指数划分响应等级，并构建分级预警机制：一级预警（低风险），仅记录数据，不触发动作；二级预警（中风险），激活局部传感器增强模式（如激光雷达提高扫描频率），同时向驾驶员发出预接管提示；三级预警（高风险），强制触发后援响应，如切换至人工驾驶模式或自动泊车；动态重规划技术：当检测到前方道路条件超出 ODD（如突发大面积积水），通过路径规划算法实时调整路线，绕行至 ODD 允许的区域。

4.3.2.2 自动驾驶道路交通安全法规符合性

在自动驾驶技术蓬勃发展的当下，如何确保自动驾驶车辆安全、合规地融入现有道路交通体系，成为行业焦点。自动驾驶系统严格遵守交通规则是其安全运行的基石。道路交通安全法规是保障道路交通安全、有序和高效运行的重要准则，无论是人类驾驶员还是自动驾驶系统，都必须严格遵循。在日常道路行驶中，交通信号灯变化、车道线的清晰划分、限速标志的明确指示等，都是自动驾驶系统需精准识别并严格遵守的交通规则。只有通过这样严格遵循交通规则的行驶，自动驾驶车辆才能在道路上安全、稳定地行驶，切实保障车内乘客以及道路上其他交通参与者的生命财产安全。

公安部道路交通安全研究中心凭借其权威性与专业性，在自动驾驶法规符合性研究领域持续深耕，已取得了一系列重要成果，为行业发展指明方向。道研中心指出，现行自动驾驶测试模式存在短板，难以充分保障车辆对

交通法规的有效遵守。然而，目前封闭场地测试仅能覆盖不足 20% 的内容，且多为定性测试，对安全驾驶操作规范的定量验证有所欠缺。为突破这一困境，中心创新性地提出“两库一平台”的交通法规符合性仿真测试方法，为提升自动驾驶安全性、推动行业健康发展发挥了重要作用，也为未来自动驾驶全面融入交通体系筑牢了坚实基础。

此外，现有道路交通安全法规多以面向人类驾驶员的自然语言编写，部分条例表述不够清晰，导致各自动驾驶汽车企业对法规理解不同，进而使得自动驾驶汽车在实际行驶中的行为会出现明显分歧。让自动驾驶汽车在各种复杂情况下像人类驾驶员一样准确遵循自然语言编写的道路交通安全法规，一直是行业内亟待攻克的难题。为解决这一难题，清华大学李骏院士团队创新性地提出了自动驾驶“合规性在线监测”技术，该技术构建的系统独

立于自动驾驶系统而运行，通过实时获取自动驾驶汽车的行为信息可以准确判断车辆行为是否符合法规要求。具体而言，该团队提出了一套全面的道路交通安全法规数字化方法和基于触发的分层合规性在线监测架构。此架构通过巧妙地设置触发条件，可以确保不同法规条例在恰当的运行环境下被触发，并且具有良好的扩展性，能够方便地容纳数字化后的不同地域的驾驶经验及规则。

随着社会发展和交通环境的变化，道路交通安全法规并非一成不变，而是在不断进行修订和完善。例如，新的交通标志和标线的引入、交通管理政策的调整等。自动驾驶系统必须能够自动、及时地识别这些法规变化，迅速更新自身的法规知识库，以确保在任何情况下都能够严格

符合最新的法规要求。这就需要建立一个高效、快捷的法规信息收集、分析和更新机制。

自动驾驶道路交通安全法规符合性技术是自动驾驶技术实现广泛应用的关键性前提。稳态驾驶安全围栏技术通过对自动驾驶系统在遵守交通规则、兼顾多方面考量、识别场景变化及安全人员干预等方面提出明确且严格的要求，为保障自动驾驶法规符合性提供了全面、系统的解决方案。因此，随着技术的持续进步和法规体系的日益完善，自动驾驶技术将在严格遵守道路交通安全法规的坚实基础上，为人们带来更加安全、便捷、高效的出行体验，有力推动智能交通的蓬勃发展。

4.3.2.3 自动驾驶边界状态风险管控

在自动驾驶技术不断迈向商业化与规模化应用的进程中，边界状态风险管控技术成为保障系统安全稳定运行的核心环节。自动驾驶车辆在行驶过程中，不可避免会遭遇各类复杂场景，诸如极端天气、道路突发状况、系统异常等，这些都构成了边界状态。此时，边界状态风险管控技术可通过一系列严格要求与系统性措施，确保自动驾驶系统在面临风险时能够做出有效应对，保障乘客与道路交通安全。

部署安全模型规避事故风险是边界状态风险管控技术的首要任务。安全模型作为自动驾驶系统的“安全卫士”，需要基于大量的道路数据、事故案例以及场景模拟来进行构建。如同一个智能大脑，能提前预判潜在风险，并为自动驾驶系统提供相应的决策参考。例如，可通过机器学习算法对历史交通事故数据进行深度分析，识别出高风险场景的特征模式，当自动驾驶车辆再次遇到类似场景时，安全模型可迅速判断风险等级，并触发相应的安全策略。此外，安全模型还需具备动态更新能力，随道路环境变化、新交通规则出台及技术迭代，不断优化自身的风险评估与应对机制，始终保持对事故风险的高效规避能力，为自动驾驶车辆的每一次出行保驾护航。

确保实施适当主动安全控制是边界状态风险管控技术的关键所在。主动安全控制是自动驾驶系统边界状态下的“防御武器”，能在危险发生前主动采取措施降低风险，这涵盖了多个方面的技术应用，如自动紧急制动、车道保持辅助等。在边界状态下，系统检测到前方车辆突然减速，自动紧急制动系统可迅速响应，施加制动以避免碰撞；若车辆偏离车道，车道保持辅助系统会及时调整方向盘，将车辆拉回正确车道。同时，主动安全控制技术还需具备高度协同性，不同安全控制功能之间能够相互配合、协调运作。如在雨天路滑边界状态下，自适应巡航控制与自动紧急制动系统协同工作，可根据路面情况实时调整跟车距离与制动力度，确保车辆行驶安全。只有确保主动安全控制的适当实施，才能在边界状态下最大限度地降低事故发生的可能性。

最小风险策略 MRM 的合理性与合规性是边界状态风险管控技术的核心要点。最小风险策略是自动驾驶系统在无法维持正常行驶状态时，为将风险降至最低而采取的应对措施。MRM 的制定需充分考虑技术可行性、法律规定及社会伦理要求。从技术层面，策略要基于自动驾驶系统实际能力，确保在极端情况下能够有效执行；在

法律方面，需符合当地交通法规以及自动驾驶相关的法律条款，避免因策略不当引发法律纠纷；在社会伦理层面，要权衡各方利益，优先保障人员生命安全。同时，为确保 MRM 合理性与合规性，需通过大量仿真测试与实际道路试验，不断优化策略内容，并依据法规变化和反馈及时进行调整，使其始终处于科学、合理且合法的状态。

此外，驾驶权移交过程的安全性同样不容忽视。在自动驾驶边界状态下，当系统无法有效应对当前状况时，驾驶权需平稳、安全地移交至人类驾驶员或远程操作人员手中。这一过程要求自动驾驶系统提前发出清晰、明确的预警信号，给予接收方充足的准备时间。同时，系统需对驾驶员的接管能力进行实时评估，若驾驶员未能及时地做出响应，系统应继续采取必要的安全措施，直至

驾驶权成功移交或风险消除。同时，驾驶权移交过程中的人机交互界面设计也至关重要，需要确保信息传达准确、易懂，操作简便、快捷，避免因沟通不畅或操作复杂而导致移交失败，引发安全事故。通过保障驾驶权移交过程的安全性，能够在边界状态下建立起可靠的安全防线，确保自动驾驶系统在必要时可顺利过渡到人工控制模式。

自动驾驶边界状态风险管控技术通过部署安全模型、实施主动安全控制、确保 MRM 合理性与合规性及保障驾驶权移交安全等一系列严格要求，已构建起一套完整的风险防控体系。在自动驾驶技术持续发展的未来，这一技术将不断演进与完善，为自动驾驶车辆安全运行提供坚实保障，助力自动驾驶产业朝着更加安全、可靠的方向稳步前行。

4.4 自动驾驶安全评估体系

4.4.1 自动驾驶安全评估全流程体系概述

自动驾驶系统的安全评估已从单一功能测试转向全生命周期流程化验证，本体系以“ODD 全流程覆盖”和“人机交互安全性”为双核心，构建贯穿功能启动、运行、退出的闭环评估框架，如图 4-5 所示。其核心思想源于 ISO 3450X 系列标准对预期功能安全（SOTIF）的场景分层要求，将自动驾驶功能的安全边界划分为“ODD 外 - 进入 ODD-ODD 内运行 - 退出 ODD”三阶段，每个阶段对应不同的评估维度。就像给汽车的自动驾驶功能做“全身体检”，不仅要看它开在路上是否靠谱，还要管“启动前”和“退出时”的安全。不同于传统仅关注运行

阶段的测试模式，这套体系的核心逻辑是把自动驾驶的使用过程分成启动、运行、退出三个关键阶段，每个阶段都检查系统能不能正确判断自己的能力范围，以及和驾驶员的交互是否安全^{[11][12]}。本套流程体系可实现对 L3 级自动驾驶的安全性评估，同时可兼顾对 L2 级车辆的辅助驾驶能力评估。

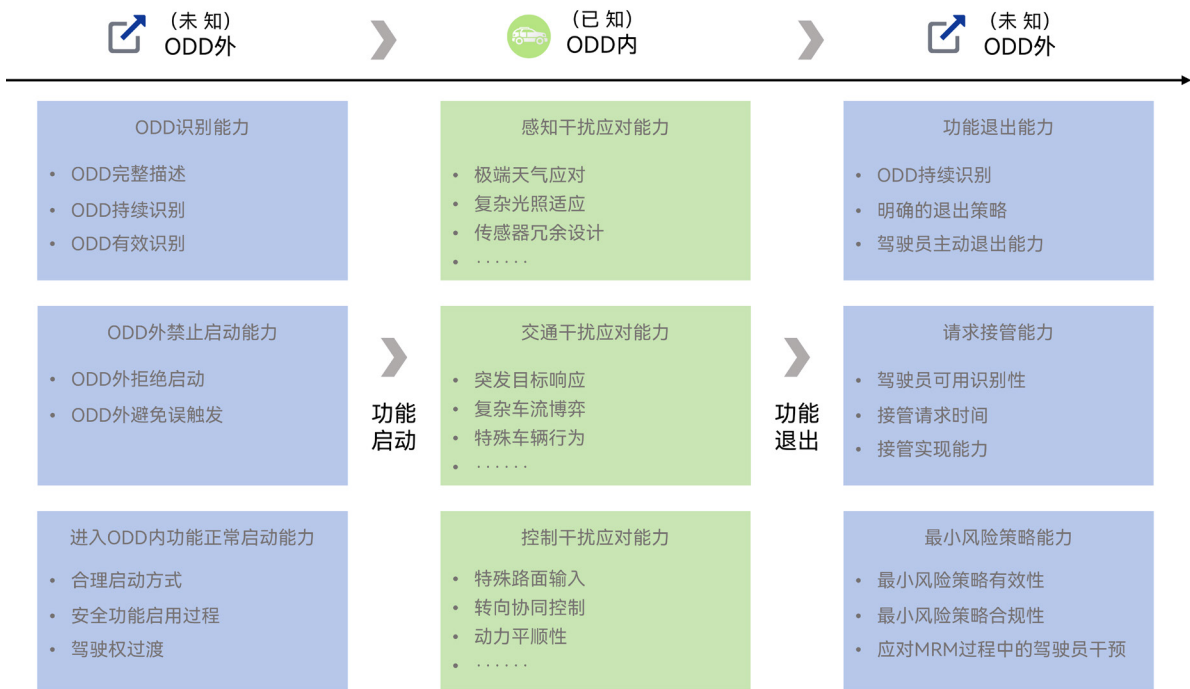


图 4-6 自动驾驶安全评估全流程体系图示

4.4.2 自动驾驶功能启动过程安全性评估

启动阶段就像系统的“开机自检”，主要看两件事：能不能开，该不该开。

1) ODD 识别：先看环境是否在能力范围内

系统启动前会“扫描”周围环境，判断是不是在自己设定的能力范围内，比如路面标线好不好，如果车道线磨损得只剩一半，超过了系统的最低要求，系统会拒绝启动，避免“看不清路”；下特大暴雨时，系统会判断如果雨量大小超出能力范围，则不启动，否则可以正常启动功能。

2) ODD 外禁止启动：不该开的时候坚决不开

遇到自己能力范围外的情况，系统应拒绝驾驶员的启动请求，例如：系统发现不在预设的城市道路范围，会弹窗提示“这里我不熟，无法自动驾驶”；夜间没路灯，系统无法有效识别场景，不会强行启动，防止事故发生。

3) ODD 内正常激活：该开的时候要开好

条件合适时，系统要平稳接手，启动速度要快，点击按钮后 2 秒内完成自检的同时，同时需要确认驾驶员状态；保证突发情况时的处理方式合理，例如启动时前车急刹，系统应抑制激活，首先停车保证安全。

4.4.3 自动驾驶功能运行过程安全性评估

运行阶段是自动驾驶系统的核心工作时段，需同时满足环境适应性与动态响应能力，可拆解为“感知干扰应对、

交通扰动应对、控制干扰应对”三大评估维度。

(1) 感知干扰应对能力

自动驾驶系统需具备对环境干扰的鲁棒性，确保感知数据的准确性与可靠性，内容包括但不限于：a) 极端天气处理：如在暴雨、浓雾、强光等场景下，激光雷达需抑制雨雾散射噪点，摄像头需通过多帧合成提升低光照画质，毫米波雷达需维持穿透性探测能力；b) 复杂光照适应：如隧道进出口的明暗突变场景中，系统需通过动态光圈调节、HDR 图像算法减少光晕和对比度失衡，确保交通标识、行人等目标的识别准确率；c) 传感器冗余设计：多模态传感器（如激光雷达 + 摄像头 + 毫米波雷达）需实现时空同步与交叉验证，单一传感器失效时，其他传感器需无缝接管感知任务，避免因单点故障导致感知盲区。

(2) 交通扰动应对能力

面对动态交通流与突发场景，系统需展现类人化决策逻辑，平衡安全性与通行效率，内容包括但不限于：a) 突发目标响应：前车急刹、行人“鬼探头”等场景中，系统需通过预碰撞安全系统（FCW+AEB）实现毫秒级制动，并结合 ESA 紧急转向辅助规避风险；b) 复杂车流博弈：在拥堵路段加塞、环岛合流等场景中，系统需基于博弈论算法判断路权优先级，通过合理加速 / 减速

策略融入车流，避免激进变道或过度保守引发拥堵；c) 特殊车辆让行：检测到救护车、消防车等紧急车辆时，系统需实时规划避让路径，在确保安全的前提下快速腾出通行空间。

(3) 控制干扰应对能力

系统需确保执行层对决策指令的精准执行，避免机械延迟或控制偏差引发风险，包括但不限于：a) 底盘协同控制：在湿滑路面紧急制动时，ESP（电子稳定程序）需与 ABS（防抱死系统）、TCS（牵引力控制系统）联动，通过轮速传感器实时调整制动力分配，防止车辆侧滑或甩尾；b) 转向精准性：高速过弯场景中，线控转向（SBW）系统需根据车道曲率动态调整转向比，配合 CDC（连续可调阻尼悬架）降低车身侧倾，确保转向轨迹与决策规划的偏差小于 0.2 米；c) 动力平顺性：在自动跟车场景中，电机扭矩输出需符合线性加减速曲线，避免急加速 / 急刹导致乘客不适。

通过上述维度的综合评估，可系统性检验自动驾驶系统在动态运行中的环境适应能力与风险管控水平，推动技术从“功能可用”向“全场景可靠”演进。

4.4.4 自动驾驶功能退出过程安全性评估

退出阶段聚焦人机接管可靠性与系统保底能力，确保控制权安全移交或自主避险。其中核心考察系统以下能力：

被动退出能力：当超出或即将超出设计运行条件 ODC 时，系统就需要提醒驾驶员来接管系统。这个阶段分为两个

方面：精准监测驾驶员状态和用合理高效的方式提醒驾驶员接管系统。

主动退出能力：当驾驶员主动退出功能时，需要平稳地交接控制权，并明确地告知驾驶员系统当前的状态。

4.4.5 自动驾驶功能全过程安全性评价

评分体系以“全流程覆盖、风险量化、动态加权”为核心，通过将复杂场景拆解为可量化的子能力指标，结合场景风险等级与测试结果，形成从单场景到综合能力的多层级评分逻辑。其核心设计逻辑包括：

1) 单场景风险矩阵：根据场景风险程度和通行结果的严重程度，将单场景得分映射至 [-3,3] 区间，负数代表风险未通过，正数代表安全通过，如图 4-7 所示。

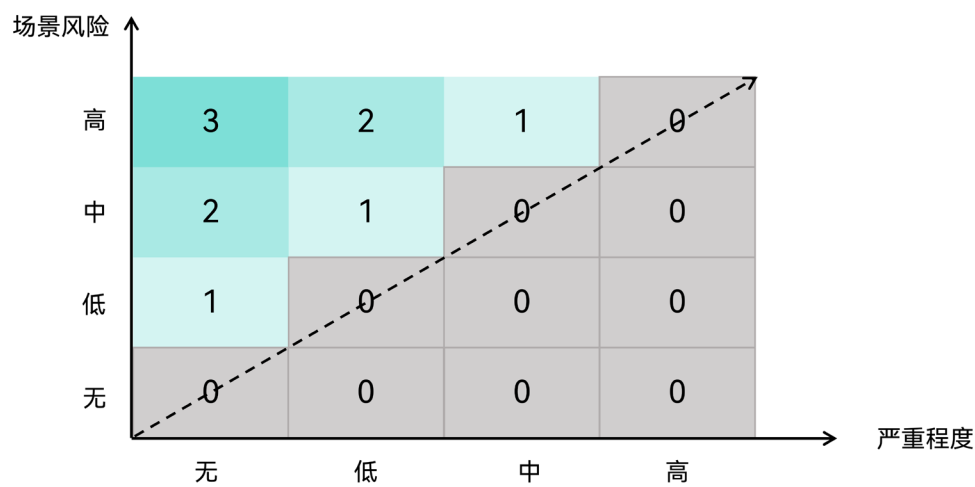


图 4-7 场景风险分数矩阵

- 2) 子能力加权聚合：单场景得分通过“平均得分 × 权重 + 最低得分 × (1 - 权重)”计算子能力得分，既关注整体表现，又强化对最低安全底线的考核。
- 3) 综合能力分级：通过加权求和各子能力得分，最终按分数区间划分安全等级，实现从定性评估到定量分级的转化，见表 4-1。

表 4-1 综合能力分级区间说明

分数区间	能力级别	说明
[0,60)	1 级	存在重大安全隐患，需全面改进
[60,70)	2 级	基础安全达标，但高风险场景表现不足
[70,80)	3 级	中等安全水平，部分复杂场景需优化
[80,90)	4 级	较高安全性能，多数场景表现可靠
[90,100]	5 级	全场景高可靠性，接近量产安全标准

未来汽车安全评估的核心演进方向在于超越传统基于预设场景和规则的测试方法。现实驾驶环境的复杂多变使得潜在危险场景近乎无限，试图穷举测试所有可能困难且不够高效，同时人工智能的快速发展正推动算法走向 AI 化。因此，通过收集和分析涵盖广泛车辆、驾驶员与环境的真实世界运行大数据，进行统计性评估，成

为衡量汽车整体安全水平更为合理和有效的途径。基于大数据的统计评估不仅能更精准地反映当前安全状态，还将为 AI 算法的持续迭代优化和安全策略的动态调整提供坚实依据，推动安全水平形成动态、进化式的提升机制。

第五章

智能驾驶产业环境与生态构建



5.1 智能驾驶政策标准环境

5.1.1 政策法规

(1) 国家政策逐渐由顶层设计向推动产品准入方向发展

经过多年发展，智能驾驶汽车已从“技术创新”走向“产品验证与准入许可”，并逐步迈向“小规模商用”。国家政策也伴随着产业的发展，经历了顶层设计、示范应用、试点小规模三阶段。

顶层设计阶段（2020 年前）

核心目标：以宏观规划为主，明确智能驾驶技术战略定位。

2020 年工业和信息化部 and 公安部等 11 部委《智能汽车创新发展战略》首次将智能驾驶发展纳入国家级战略，

提出“加强智能网联汽车研发”，为产业发展奠定政策基调。
初期阶段，解决了上路的合法性，对于数据安全、责任划分等细项规范，地方政策上，还在进一步实施。

示范应用阶段（2021—2022 年）

核心目标：聚焦技术验证与准入规则构建。
2021 年《智能网联汽车道路测试与示范应用管理规范》《智能网联汽车生产企业及产品准入管理意见》发布，从道路测试资质、企业生产准入、数据安全等维度建立基本监管框架，推动自动驾驶功能的合规化落地。
革新变化点：首次将功能安全、预期功能安全、网络和数据安全等安全维度纳入管理框架。

试点小规模阶段（2023 年至今）

开启 3 级、4 级智能驾驶功能的限制性试点。2023 年四部委联合发布《智能网联汽车准入和上路通行试点通知》，首次允许具备条件的 3 级、4 级智能驾驶车辆在限定区域开展公共道路试点，明确 8 项核心产品技术要求，如表 5-1 所示，包括动态驾驶任务执行、接管策略、最小风险策略等。
责任主体明确：事故责任认定从“模糊争议”走向“数据可溯”，使用主体（运营公司）承担责任，并可向责任方（车企）追偿。

表 5-1 上路试点政策相关技术要求

序号	技术要求	具体内容
1	动态驾驶任务执行要求	在激活状态下，自动驾驶系统应避免导致交通事故，当事故不可避免时，应采取合理控制策略，降低伤害或损失
2	接管要求	对于需要安全员执行接管的自动驾驶系统，应具备安全、可靠、有效的接管策略，及时向安全员发出介入请求，并能够检测安全员是否执行接管操作
3	最小风险策略要求	在自动驾驶系统执行最小风险策略过程中，不应禁止安全员通过合理的方式干预车辆
4	人机交互要求	自动驾驶系统应具备供安全员激活、退出等的专用操纵方式；具备安全、可靠、有效地响应干预的策略，并能检测安全员是否执行干预操作
5	产品运行安全要求	自动驾驶系统在激活状态下，不应对车辆驾乘人员和其他交通参与者造成不合理的交通安全风险
6	网络、数据和无线电安全要求	要求车辆具有网络、数据、无线电等的安全要求
7	软件升级要求	企业要做到告知义务，且在升级过程中通过技术手段确保车辆安全，若升级失败，可恢复到以前版本
8	数据记录要求	智能网联汽车产品应配备事件数据记录和自动驾驶数据记录功能

准入和上路通行试点政策有三个要点：一是试点汽车生产企业承担智能网联汽车产品质量和生产一致性主体责任；二是试点只是针对公共领域的道路运输经营用途，使用主体还需要获取交通运输主管部门的运营资质和运营管理要求，并不是面向普通消费者的个人用车开展的试点；三是试点是在限定的区域范围内，不是全路段范围内均能运行。

第一批试点的名单涉及 9 家企业联合出行平台，虽然

政策对试点企业的运行区域、投放车辆数量、安全技术要求及保障措施都有严格要求，但短期内仍处于不能全面向 C 端销售的状态。

(2) 典型城市推出引领性的地方政策

国家层面通过准入试点和政策体系建设推动智能驾驶商业化落地，地方层面则通过立法探索为试点应用积累了经验。当前，3 级及以上智能驾驶主要集中在

TO B 场景，如干线物流、无人配送、自动驾驶出租车（Robotaxi）等。这些场景具有封闭性高、风险可控的特点，适合技术验证和商业试运营。部分重点城市已开始探索 3 级智能驾驶在 TO C 场景中的试点应用，深圳、北京、武汉等地率先对 3 级以上个人乘用车自动驾驶上路限制进行逐步放开探索。

2022 年 8 月 1 日起实施的《深圳经济特区智能网联汽车管理条例》是国内首部关于智能网联汽车管理的法规，明确规定列入产业目录的智能网联汽车，经过公安机关交通管理部门登记后，方可上道路行驶，允许 3 级及以上智能驾驶级别车辆上路。2025 年 3 月 1 日正式实施的《武汉市智能网联汽车发展促进条例》强调车辆所有人在事故中的初步赔偿责任，随后可向实际责任主体进行追偿，这一规定为事故争议的解决提供了更为清晰的路径。2025 年 4 月 1 日正式实施的《北京市自动驾驶汽车条例》中对 3 级及以上智能驾驶的应用场景新增了“个人乘用车出行”，推动京津冀三地政策互认，企业无需重复申请测试，降低跨区域运营成本。

尽管典型城市为 3 级及以上智能驾驶汽车的上路提供了政策，但这并不意味着监管的放松。地方政策均设置了严格的上路条件，包括详细的申请流程、全面的安全

评估以及持续的运营监管等，确保自动驾驶技术在保障公共安全的前提下稳步推进。

（3）国家层面强化准入审查与召回机制，加强智能网联汽车数据安全与网络安全管理

2022 年 4 月 15 日，工业和信息化部发布《关于开展汽车软件在线升级备案的通知》，对获得道路机动车辆生产准入许可的汽车整车生产企业及其生产的具备 OTA 升级功能的汽车整车产品，实施 OTA 升级活动均应进行备案。

2025 年 2 月 25 日，工业和信息化部、市场监管总局联合发布《关于进一步加强智能网联汽车产品准入、召回及软件在线升级管理的通知》，旨在进一步做好搭载组合驾驶辅助系统和具备软件在线升级（OTA 升级）功能的智能网联汽车产品的准入与召回管理工作，规范车企 OTA 升级活动。

这两份通知既为智能网联汽车产品及软件在线升级管理提供了政策支撑，也构建了全面和有效的管理体系，确保智能网联汽车产业在技术创新发展的同时，能够切实保障公共安全，推动行业的健康、有序发展。

5.1.2 标准体系

智能驾驶生态产业链的快速迭代，不仅需要行业上的协同配合，还需要建立国家法规标准体系以规范行业智能驾驶技术范围边界，法规制定通过明确技术参数、试验与测试方法，为产业落地划定安全基线，推动硬件生态与政策体系的良性互动。多数汽车传统领域标准的制定早于智能网联汽车的出现，部分标准内容对新型产品存在适配性问题，随着技术向更高阶的 3 级以上自动驾驶演进，现有的法规标准体系面临着升级迭代的内在要求。

（1）自动驾驶标准体系逐步建立

自动驾驶主要针对 3 级和 4 级自动驾驶，主要涉及基

础要求、三支柱测试、设计运行条件、数据记录、功能安全、预期功能安全、网络安全和数据安全、软件升级、在用监测和报告等多个方面，如表 5-2 所示。

国家强制性标准是基线，目前来看标准方向多聚焦安全层面，包括信息安全与数据安全及自动驾驶安全等。同时智能驾驶作为新兴技术领域，尚未形成大量可复制的成熟经验。因此，相关标准的制定普遍借鉴国内、外的优秀实践，并结合产业实际发展情况，逐步形成为行业标准、国家标准乃至国际标准。

表 5-2 3 级以上智能驾驶主要标准

序号	类别	名称
1	基础	GB/T 40429—2021 《汽车驾驶自动化分级》
2	基础	GB/T 44373—2024 《智能网联汽车 术语和定义》
3	基础	GB/T 45312—2025 《智能网联汽车 自动驾驶系统设计运行条件》
4	基础	GB/T 44721—2024 《智能网联汽车 自动驾驶系统通用技术要求》
5	基础	《道路车辆 自动驾驶系统测试场景》
6	试验方法	GB/T 41798—2022 《智能网联汽车 自动驾驶功能场地试验方法及要求》
7	试验方法	GB/T 44719—2024 《智能网联汽车 自动驾驶功能道路试验方法及要求》
8	试验方法	《智能网联汽车 自动驾驶功能仿真试验方法及要求》
9	功能安全	GB/T 34590 《道路车辆 功能安全》
10	预期功能安全	GB/T 43267—2023 《道路车辆 预期功能安全》
11	数据安全	GB/T 44464—2024 《汽车数据通用要求》
12	信息安全	GB 44495—2024 《汽车整车信息安全技术要求》
13	数据记录	GB 44497—2024 《智能网联汽车 自动驾驶数据记录系统》
14	软件升级	GB 44496—2024 《汽车软件升级通用技术要求》
15	功能	《智能网联汽车 自动泊车系统性能要求与试验方法》
16	运行安全	《道路车辆 自动驾驶系统测试场景 基于场景的安全评估框架》

(2) 管理体系呈现三级分工生态

我国智能驾驶管理体系的法规生态体系构建，呈现出“国家统筹战略框架、部委牵头协同分工、地方先行试点实践”的三级分工形态。国家及部委层面，发布政策指引、试点通知等内容，涉及工信部、公安部、交通运输部等多部门协同管理，如 2024 年的《智能网联汽车准入试点工作方案》等。标准支撑层面，制定 GB/T 40429—2021 《汽车驾驶自动化分级》、GB 44497—2024 《智能网联汽车自动驾驶数据记录系统》等核心标准文件。地方性法规层面，地方政府积极响应国家战略方向，发布相关省级条例与市级试点政策，其中 2025 年 4 月施

行的《北京市自动驾驶汽车条例》明确 3 级及以上自动驾驶合法地位。通过战略规划、技术标准制定、监督管理的阶段迭代，形成对于企业实践中研发、测试、准入、运营、商业落地全链路覆盖。

5.2 产业生态链路

智能驾驶生态链是一个涵盖技术研发、硬件制造、软件算法、整车集成、出行服务及政策法规标准的协同网络，主要包括上游技术提供商、中游车企主机厂和下游服务商组成。产业链近年来呈现“自上而下”逐步完善的态势。在上游，集聚了一批头部企业和大量配套企业，研发、制造、测试、应用的完整产业链已经形成。芯片算力竞

争加剧，激光雷达降本显著。在中游，车企通过自研或与科技公司合作，提升数据与算法能力并降低成本；车企更倾向于模块化采购，软硬件解耦趋势明显，数据闭环能力成为核心竞争力。在下游，自动驾驶服务市场处在研发试运行阶段，百度 Apollo 在北京亦庄、武汉等地开展试运营，小马智行在广州、深圳开展全无人测试。

上 游

激光雷达



毫米波雷达



摄像头



DMS



导航地图与定位系统



芯片及控制MCU

 TESLA 特斯拉	 NVIDIA 英伟达	 HUAWEI 华为	 Qualcomm 高通	 地平线 地平线	 TEXAS INSTRUMENTS 德州仪器	 mobileye Mobileye	 NXP 恩智浦
 黑芝麻智能 黑芝麻智能	 life.augmented ST	 RENESAS 瑞萨电子	 X P E N G 小鹏	 蔚来 蔚来			

域 控

 德赛西威 德赛西威	 BOSCH 博世	 Continental 大陆集团	 A P T I V 安波福	 HUAWEI 华为	 Valeo 法雷奥	 X P E N G 小鹏	 蔚来 蔚来
 BYD 比亚迪	 HXINFO 华鑫信息						

算法&系统解决方案企业

 HUAWEI 华为	 理想 理想	 X P E N G 小鹏	 蔚来 蔚来	 TESLA 特斯拉	 BYD 比亚迪	 momenta Momenta	 卓驭 卓驭
 DEEPRUTE.AI 元戎启行	 轻舟智航 轻舟智航	 地平线 地平线	 NVIDIA 英伟达	 BOSCH 博世	 A P T I V 安波福	 mobileye Mobileye	 Baidu 百度 百度Apollo
 小马智行·pony.ai 小马智行	 WeRide 文远知行						



图 5-1 智能驾驶产业链全景图

供应链是智能驾驶生态的底层支撑，从整个智能驾驶系统技术架构来看，包括多种零部件、子系统，如图 5-2 所示。

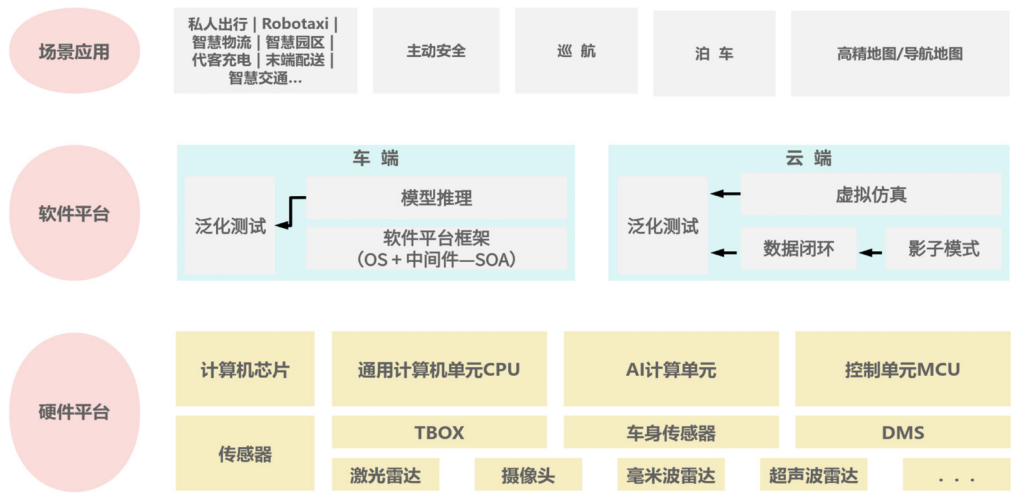


图 5-2 智能驾驶涉及模块

5.2.1 硬件供应商

(1) 通用计算单元

通用计算单元（CPU）是计算机的核心部件，其控制单元负责指令调度与执行流程，运算单元执行加减乘除及逻辑运算，存储单元用于暂存指令与数据，总线单元实现内部模块间及内存的数据交互，预取单元优化指令获取效率，以及数据高速缓存提升运算效率，优质龙头企业包括英特尔、华为、地平线等。

(2) AI 计算单元

AI 计算单元是支撑人工智能任务的核心硬件模块，涵盖云端训练芯片和车端推理芯片两大场景。其中云端侧重模型训练，车端注重实时决策。云端训练芯片以高算力、并行计算能力为核心，典型架构包括 GPU（如英伟达 A100/H100）、TPU（如谷歌第四代 TPUv4）及 NPU（如华为昇腾 910 系列）。车端推理芯片侧重低功耗、高能效与低延迟，优质企业有英伟达、高通、Mobileye、特斯拉、华为、地平线、黑芝麻等。

(3) 控制单元 MCU

汽车控制单元是车规级芯片中的一种，它是把 CPU 的主频与规格做适当缩减，并将存储器、定时器、A/D 转换、时钟、I/O 端口及串行通讯等多种功能模块和接口集成在单个芯片上，实现终端控制的功能，具有性能高、功耗低、可编程、灵活度高等优点，优势企业包括瑞萨电子、恩智浦、德州仪器、华为等。

(4) TBOX

车载 T-BOX 是车联网核心组件，通过集成 GPS、4G/5G 模块、CAN 总线接口等硬件实现车辆状态采集、远程控制及 OTA 升级，其原理为用户指令经 TSP 后台传输至 T-BOX，解析后通过 CAN 总线执行并反馈结果，国内优势企业有东软睿驰、华为、德赛西威等。

(5) 车身传感器

车身传感器是汽车电子系统的核心组件，主要用于监测和控制车辆内部运行状态，如压力、温度、位置、加速

度等，确保车辆安全、高效运行，主要包括转向角传感器、轮速传感器、惯性测量单元（IMU）等，国外龙头企业有博世、大陆集团、德尔福、电装、霍尼韦尔等，国内企业有万安科技、华为、华域汽车、东风电子等。

（6）DMS

DMS 是一种基于视觉感知与 AI 算法的智能安全技术，通过摄像头、红外传感器等硬件实时监测驾驶员的疲劳、分心及危险行为如闭眼、视线偏离、手持物品等。国内领先企业包括商汤科技、地平线、华为等。其中，商汤科技的 DMS 功能包括主副驾 Face ID 身份识别、车内手势识别、分心警示、疲劳检测、通话检测等；地平线搭载征程芯片可实现低延迟 DMS；华为 DMS 监测驾驶员疲劳程度，扩展之后可以实现面部身份识别、眼球追踪、手势识别以及情绪感应等方面的功能。

（7）激光雷达

激光雷达市场主要由华为、速腾聚创、禾赛科技及图达通等企业主导。其中速腾聚创、禾赛科技以高性能和大规模量产为核心优势，通过自研芯片和高度集成化技术，实现成本控制和规模化量产；华为在激光雷达领域布局深远，推出了 192 线激光雷达，具备超远距离感知和高分辨率成像能力，同时依托强大的研发能力和资源整合能力，显著地优化了成本，并通过多传感器融合方案，提升了整体系统的可靠性和适应性。随着激光雷达成本下降，激光雷达的成本不再是制约其发展与运用的核心矛盾，其与算法的深度融合才是未来发展的关键，正逐步成为智能驾驶产业发展过程中的“安全带”。

（8）摄像头

随着智能驾驶技术快速发展，车载摄像头的应用越来越广泛，国内龙头企业有比亚迪、舜宇智领、德赛西威、海康威视、欧菲光、联创电子、华为等。随着 800 万像素高清摄像头渗透率的提升，车载摄像头将向多光谱感知、事件驱动成像等方向演进，市场格局或将在 2025 年后随新兴厂商突破硅基量子点传感器技术而出现结构性调整。

（9）毫米波雷达

随着我国汽车产业链的快速发展，国内企业在毫米波雷达领域表现突出，通过硬件成本优化和定制化交付等优势，逐步抢占市场高点，主要有承泰科技、华为、弗迪和森思泰克等。弗迪目前主要以比亚迪内部供货为主，森思泰克其第二大股东是国内知名上市公司海康威视，为森思泰克在毫米波雷达的研发、生产和市场化提供了强有力的资源保障。在过去几年时间，毫米波雷达赛道出现变化，4D 毫米波雷达技术突破成为国产替代的核心路径，国产厂商通过 4D 技术突破实现替代加速。森思泰克 4D 雷达已进入吉利、长城供应链；华为首创分布式毫米波雷达，具有更强的探测性能与环境适应性。

（10）高精地图 / 导航地图

车用高精地图是面向智能驾驶的专用地图，精度达厘米级，包含车道线类型、坡度曲率、交通标志等静态数据及实时交通流量、事故等动态信息，通过专业采集车采集原始数据并融合众包车辆上传的局部感知数据，经云端 SLAM 聚类、人工修正后形成结构化矢量图层，并通过“特征匹配”实现亚米级定位。国内主要企业中，百

度与四维图新市占率超一半。百度 2013 年收购传统图商“长地万方”获取甲级资质及其成果，起点颇高，后发布百度智图；四维图新早在 2001 年便获取甲级资质，是中国最获批的企业之一，深耕地图产业多年，2014

年又获得腾讯资金助力；高德地图在 2014 年被阿里收购，本就在手机导航、传统车机导航应用颇广，为高精地图开发奠定基础。因算法持续迭代，当前业内部分优秀企业已逐步摆脱高精地图依赖。

5.2.2 软件供应商

(1) 车端

车端软件是嵌入在汽车电子系统中的核心程序集合，负责管理硬件资源并实现车辆功能，其本质是功能实现的平台框架。国内领先企业中，Momenta 通过闭环数据工厂实时采集量产车行驶数据，迭代优化感知模型与决策算法。华为通过“芯—硬—软—云”构建全栈能力，应用于问界、智界等车型；卓驭科技的车端软件以视觉感知方案与本地化场景优化为核心，基于轻量化算法实现 AEB、LKA 等基础 ADAS 功能，针对中国复杂道路环境专项训练模型，场景适应能力更强；东软睿驰的 NeuSAR 平台覆盖 AUTOSAR 标准，深度适配 NXP/ 芯驰芯片；百度 Apollo 依托昆仑芯片实现算法一芯片协同优化，提供智能驾驶全栈方案。

(2) 云端

云端软件是基于云计算技术的应用服务模式，通过虚拟化技术将软件部署在远程服务器上，用户无需本地安装即可通过互联网访问。智能驾驶云端供应商是产业链中提供云计算服务和云端解决方案的重要环节，其核心作用在于为智能驾驶系统提供强大的算力支持、海量数据存储与处理能力，以及高效的数据安全保护。主要云端供应商包括百度智能云、阿里云、华为云等，百度智能

云针对端到端智能驾驶技术进行优化，其“文心大模型”可提供强大的 AI 能力，助力车企实现智能化跃升；阿里云在智能驾驶领域提供弹性计算、大数据处理、人工智能等能力，支持多传感器融合和实时决策；华为云通过“车云一体化”技术，支持车、云深度融合，提供高效协同的云端服务。

(3) 解决方案供应商

当前，智能驾驶解决方案市场呈现出多元化的竞争格局，国内外供应商凭借各自的技术优势和资源整合能力，共同推动行业快速发展，典型企业有华为、Momenta、Mobileye、地平线、英伟达等。华为通过垂直整合硬件、软件、云服务，构建了智能驾驶领域的强大自研能力。Momenta 通过提供标准化硬件模块或软件服务，车企按需采购并自行集成。卓驭以纯视觉架构实现低成本组合辅助驾驶，支持领航行车辅助与泊车全场景。英伟达提供 DRIVE AGX 系列芯片和开发工具链，比亚迪就采用其硬件平台，自研上层算法。地平线为与车企协同开发的软硬件一体型供应商，以征程芯片 + 工具链构建软硬一体生态，支持车企快速部署。另外，头部车企倾向于自研核心算法，模块化采购硬件，诸如小鹏汽车、理想汽车、蔚来汽车等。

5.2.3 核心技术突破与应用场景

智能驾驶技术正以前所未有的速度重构人类出行图景，在算法突破、算力革命、硬件迭代等的驱动下，实现了从单点技术攻关到系统级生态构建的跨越式发展，中国

企业通过硬件自主化、算法通用化、架构集中化的创新实践，推动 3 级智能驾驶逐步规模化落地，重塑着人车交互方式与城市交通治理模式，标志着智能出行时代

已从技术探索期全面进入产业重构期。

(1) 关键技术突破

a) 关键技术突破驱动架构迭代

2021 年，特斯拉推出 BEV（鸟瞰图）与 Transformer 相结合的算法架构，为智能驾驶感知技术确立了全新技术路线。此后，众多智能驾驶研发企业在感知、预测算法开发中均采用该架构作为核心技术方案。

传统 BEV（鸟瞰图）感知框架虽解决了多摄像头视角统一问题，但其 2.5 维空间表征在复杂障碍物识别、长尾场景理解等方面仍存在建模瓶颈。2023 年华为 ADS 摒弃 BEV 空间，由 GOD 神经网络实现白名单目标和异形障碍物识别，避免构建 BEV 时的信息损失，通过更直接和高效地利用各传感器数据实现更高级别的物理规则和场景理解；在 2025 年进一步升级为 WEWA 架构，通过具有全模态感知能力的端到端网络实现对复杂场景的精确理解。

算力方面实现爆发式增长，芯片的自主可控取得突破。2014 年 Mobileye 推出首款量产级 ADAS 芯片 EyeQ3，标志着汽车智能化时代开启；此后英伟达相继推出 Drive PX2、Xavier、Orin-X、Thor 等系列化芯片，以及特斯拉自研 FSD 芯片的相继问世，彻底点燃了行业算力竞赛的战火。从追赶者到领跑者，国产芯片通过架构创新也取得革命性进展，蔚来汽车、小鹏汽车、地平线、黑芝麻等推出系列车规级芯片并量产，实现了芯片领域的关键突破。

技术创新推动激光雷达降本增效，感知技术路线逐步演变为纯视觉与多传感器融合两种方案。早期阶段，以离散式硬件搭载为主，2012 年后，英伟达 Drive PX 平台和特斯拉 HW1.0 将摄像头系统与深度学习结合，但受限于多传感器标定技术和计算瓶颈，车企普遍采用“毫米波雷达 + 摄像头”的弱融合方案。随着激光雷达技术

的进步，激光雷达从实验室走向量产。禾赛自主研发的激光雷达采用 VCSEL+SPAD 技术路线，显著提升了探测距离、分辨率和可靠性。2020 年，华为发布车规级混合固态激光雷达，并在 2025 年最新发布的高精度固态激光雷达在体积维度实现了突破性创新，其尺寸仅为 45×50×44mm，是目前行业内最小的车规级激光雷达之一。

b) 技术路线从单点突破向系统融合延伸

软硬协同发展。硬件性能升级为软件算法提供更强大的运算支持，而软件优化又能提升硬件资源利用效率，实现更低功耗、更快响应的系统表现，软硬件的深度耦合不仅增强了系统的实时性、安全性和环境适应性，更通过模块化设计形成可迭代的技术生态。

硬件标准化与算法通用化推动开发模式变革。硬件标准化，域集中架构下硬件得以标准化设计，功能由软件进行定义和修改，就像手机 App，进而降低硬件成本。算法通用化（如 BEV+Transformer），其出现具有划时代意义，在公布后到今天的三年里，国内头部车企悉数跟进。

行业进一步朝着域融合和中央集中式架构演进。具有更大算力和集成度的 SoC 预计会取代 MCU 的主导地位，形成 SoC 决策而 MCU 负责执行和监控，SoC 自身也有望从多颗进一步集成至单颗。

世界模型成为智能驾驶领域探索出的最新前沿解决方案。世界模型通过构建一套高度仿真的世界模型，在虚拟场景中广泛构建驾驶数据，尤其是着重仿真场景更为丰富的“corner case”（极端或罕见场景），为端到端大模型提供高质量的训练素材，推动智能驾驶技术从“规则驱动”向“认知智能”跃迁。

c) 行业进入整车级创新时代

华为在高端车智能驾驶领域的创新突破。华为以强大自研能力，打造高端车型智能驾驶标杆。基于多模态感知系统（激光雷达、视觉等）与 AI 算法，实现城市 / 高速场景领航辅助驾驶、自动泊车辅助等功能，并通过智舱与智能驾驶系统的深度协同，支持服务无缝流转与 OTA 持续升级，其软硬一体化架构以安全性和开放性赋能车企智能化，推动高端市场技术迭代。

比亚迪以垂直整合能力加速智能驾驶规模化落地。比亚迪依托垂直整合优势，推动组合辅助驾驶向大众市场普及。智能驾驶系统适配多价位车型，通过优化传感器融合与算法降低硬件成本。规模化量产车型积累海量数据驱动算法进化，加速智能驾驶从技术溢价转向普惠体验，引领行业量产进程。

(2) 应用场景

智能驾驶技术在主动安全、巡航辅助及泊车辅助三大应用场景的落地已形成完整技术闭环，并在实际应用中显著提升驾驶安全性与效率。

在主动安全领域通过多传感器融合与实时决策算法实

现全维防护。系统可精准识别潜在碰撞风险，在紧急变道、行人横穿、盲区障碍等复杂场景中主动触发紧急制动、车道纠偏或扭矩分配，形成从预警到干预的毫秒级响应闭环。其全域环境感知能力可覆盖雨雾夜间的低能见度场景，有效弥补人类驾驶者的感知盲区与反应延迟。

巡航辅助技术已从单一速度保持进化为场景自适应。依托高精度地图与实时交通流分析，车辆可动态调整巡航策略，在连续弯道主动降速稳舵，遇拥堵车队时智能缩短跟车距离，面对施工区或收费站提前切换驾驶模式，实现高速巡航与城市缓行的无感衔接。系统还能结合驾驶员习惯优化加速曲线，在安全合规基础上提升驾乘舒适性。

泊车辅助场景则呈现“全流程自动化”趋势。从车位搜索、路径规划到泊入完成逐步过渡到无需人工介入，窄道会车时可自主暂停避让，在立体车库中精准识别机械托盘定位，甚至在手机端实现跨楼层遥控泊车。多模态交互设计支持语音指令修正泊车角度，配合全景影像消除视觉死角，显著降低新手驾驶员与复杂地库场景的操作负担。

5.3 智能驾驶测评体系倡议

智能驾驶技术的升级突破持续赋能用户体验，而用户体验产生的需求与痛点又不断反哺技术的升级，两者相辅相成。当前阶段，领航行车辅助作为各家企业用户体验竞争的高地，已从开城之战进入了综合体验之战，基础的“可用”已不能满足用户长期增长的使用需求，通过构建科学系统的用户评价体系辨别什么是“好用”的领航行车辅助功能至关重要。本节所有评价体系都以 2 级驾驶自动化城区领航驾驶辅助为例，梳理了领航行车辅助

功能的 20 多个细分场景维度，并针对各场景的表现，从安全性、舒适性、可靠性、通行效率以及人机交互五大维度进行综合分析，旨在通过场景的体验升维，让技术释放的驾驶精力转化为生活价值的延展，使移动空间成为安全守护、效率提升与人文关怀的有机载体。后续 3 级及以上驾驶自动化评价体系则需要基于此进一步完善。

5.3.1 测评场景



图 5-3 2 级驾驶自动化城区领航驾驶辅助用户评价体系示例

(1) 基础场景

基础场景是指并非只存在于城区道路的场景，在高速公路等半开放道路中，也可能存在。领航行车辅助驾驶的基础场景主要是单车道的场景和变道场景。

单车道场景：单车道场景是最简单、最普遍的场景，是指车辆保持在车道内向前行驶的场景。根据道路的形态和交通参与者情况，单车道场景可以进一步分为直道巡航、直道跟车、弯道巡航、弯道跟车四类：

a) 直道巡航：道路几乎无弯曲，车道通畅，前方无车

辆，自车可以保持直线行驶，车速通常在 40 ~ 80km/h 之间；

b) 直道跟车：道路几乎无弯曲，自车跟随前方车辆行驶，保持特定的车间距离，车速随前车变化；

c) 弯道巡航：道路存在弯曲，车道通畅，前方无车辆，可根据道路结构，调整车速与方向；

d) 弯道跟车：道路存在弯曲，自车跟随前方的车辆行驶，车速与方向，同时受前车和道路曲率的影响。



图 5-4 单车道场景

变道场景：变道场景也是一种常见的出行场景，是指由于外部环境或导航路线的原因，导致自车需要变换车道行驶的场景。根据触发变道的原因不同，变道可分为指令变道和自主变道，自主变道是系统发出变道指令的自发变道行为，包含超车变道、地形变道、导航变道等：

a) 指令变道：变道指令来源于驾驶员的意图，是驾驶员主动控制的变道；

b) 超车变道：前车速度太慢，严重影响自车的通行效率，自车主动发起超车变道；

c) 地形变道：道路地形变化，例如分流与合流时，自车发起自动变道；

d) 导航变道：导航规划的路线导致自车需要变道，常见于路口和道路分岔的路段。

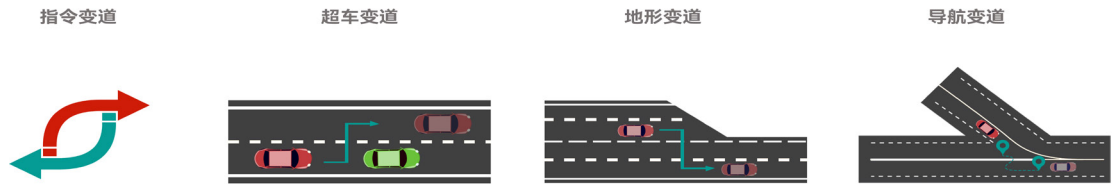


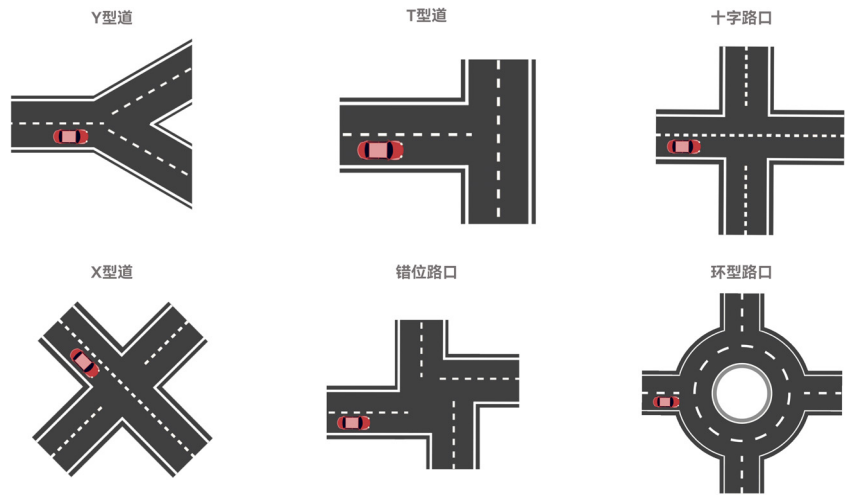
图 5-5 变道场景

(二) 特定场景

特定场景是指只会出现在城区道路的场景，是城区所特有的场景。领航行车辅助驾驶的特定场景主要包括路口、避障、人流密集、交通拥堵和窄路场景。

路口场景：路口场景是城区的代表性场景，车速通常不

超过 40km/h，需严格遵守路口各类交通设施的引导和约束。路口的道路形态多样，常见的有十字路口、T 形路口、错位路口、环形路口（环岛）、Y 形路口、X 形路口等。在路口场景中，领航行车辅助驾驶需完成红绿灯识别、跟车过路口、直行、左转、右转、调头等行驶任务。



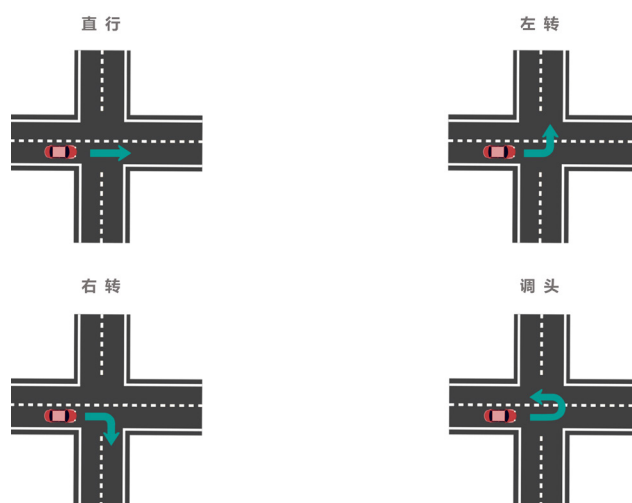


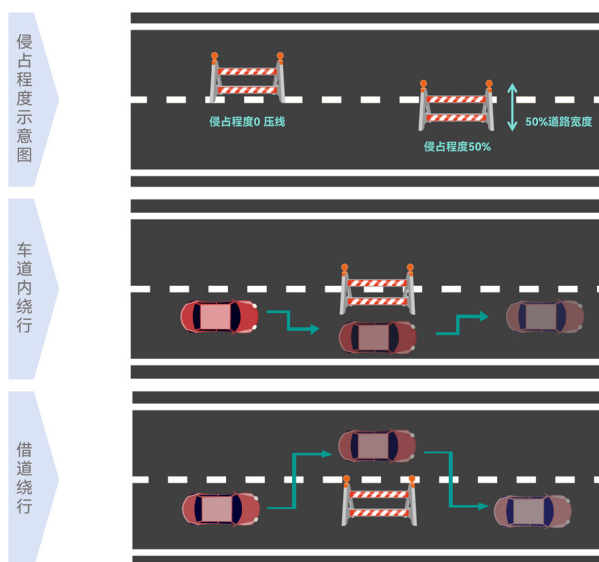
图 5-6 路口场景

避障场景：城区路况复杂，尤其存在无序穿行的行人、非机动车等高度不确定的因素，导致经常出现障碍物，需要避免碰撞。领航行车辅助驾驶应该能通过多种方式避障，通过横、纵向的联动控制策略，满足功能的安全性、流畅性，以及功能体验的连续性。根据障碍物的移动轨迹，避障场景可以分为前方纵向侵占车道的场景和前方横穿场景。

a) 前方纵向侵占车道：前方出现障碍物，侵占本车道，

导致自车按当前轨迹无法顺利通过的场景，常见的侵占物体包括行人、非机动车、机动车、施工区域锥桶、围墙、栏杆。根据侵占车道的程度，可以有不同的应对方案：车道内绕行或借道避障；

b) 前方横穿：非机动车与行人的无序突然穿行、机动车 Cut-in 等，横穿的场景可能发生在任何路段，包括车道中、路口、环岛等，横穿物体危险程度高，应该及时减速避让，必要时考虑停车等待。



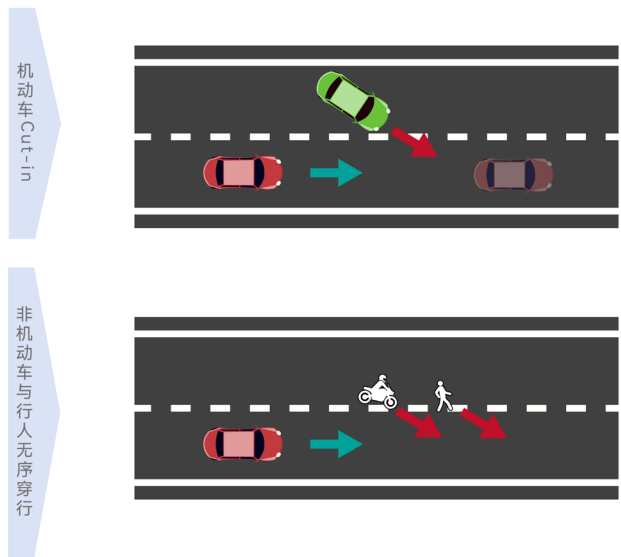


图 5-7 避障场景

人流密集场景：行人数量多且密集、移动轨迹难以预测，容易突然出现，严重干扰车辆行驶，不确定性非常高。城区的人流密集场景主要有公交站台、学校门口、园区门口等。人流密集场景是领航行车辅助驾驶的重点测评场景，极大地挑战领航行车辅助驾驶系统的环境感知与决策规划能力。

- a) 公交站台：容易出现行人横穿和“鬼探头”，公交车随时可能起步并向左变道；
- b) 园区门口：办公园区、居民社区、商业区等的出入口，行人横穿、非机动车穿行等现象普遍；
- c) 学校门口：未成年人的交通安全意识淡薄，移动轨迹突变，儿童高度低，识别难度大于成人。

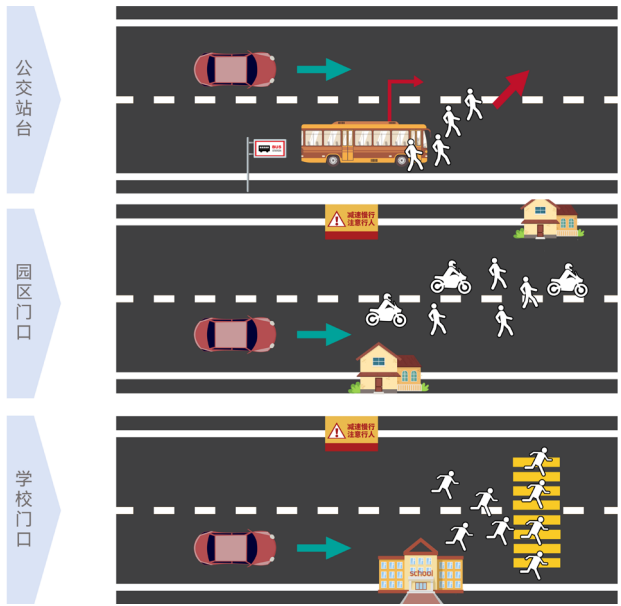


图 5-8 人流密集场景

交通拥堵场景：由于车流量大、人车混行、红绿灯时间过长等原因造成拥堵，车速受限，只能低速缓慢移动。

此时在保持低速跟车状态的同时，应该注意来自行人、非机动车的风险，并注意红绿灯的状态。

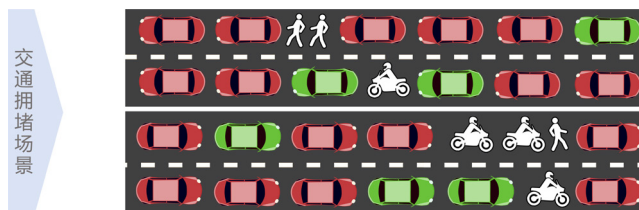


图 5-9 交通拥堵场景

窄路场景：城区内的狭窄巷道、小路等，通常只允许一辆车单向通行，路边存在多种障碍物，如临时停放的两轮车、大石块等，还会有非机动车和行人穿行，导致通

行困难。车辆须低速缓慢行驶，不断转动方向盘调整车身姿态。

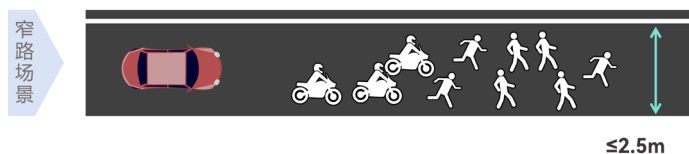


图 5-10 窄路场景

5.3.2 评价指标

本节构建了一个围绕安全性、舒适性、可靠性、通行效率和人机交互五大核心维度的评价指标体系，该体系具

体定义了反映每个维度的关键评价指标，如表 5-3 所示。

表 5-3 领航行车辅助驾驶的评价指标体系

分类	安全性	舒适性	可靠性	通行效率	人机交互
评价指标	●响应及时性 ●车速范围 ●跟车时距范围 ●跟停距离 ●自动启停时长 ●不画龙 ●默认车道、 ●车速变化策略 ●会车策略 ●避障策略 ●避障成功率	●响应及时性 ●行驶流畅度 ●加减速的线性程度 ●方向盘转动情况 ●车速波动范围 ●自动启停时长 ●不画龙 ●弯道减速策略 ●进入路口的减速策略 ●离开路口的加速策略 ●会车策略 ●避障策略	●功能不良率 ●介入率 ●平均介入里程 ●弯道通过率 ●自主变道成功率 ●红绿灯识别准确率 ●路口直行通过率（跟车 / 不跟车） ●路口左转通过率 ●路口右转通过率 ●路口调头通过率 ●避障成功率	●行使用时 ●路径偏差率 ●车速范围 ●跟车时距范围 ●跟停距离 ●自动启停时长 ●弯道减速策略 ●默认车道 ●车速变化策略 ●有效变道率 ●进入路口的减速策略 / 离开路口的加速策略 ●会车策略 ●避障策略 ●避障成功率	●激活 / 退出 ●驾驶策略选择 ●导航与路径规划 ●驾驶员注意力监测 ●驾驶策略选择 ●系统故障与降级 ●人工介入

同时，这些评价指标并非孤立存在，而是定向与测评场景进行交叉关联。每个测评场景都标注了适用的评价指标，明确指出了该指标具体在哪些设计好的测试环境下进行评估和验证。这种关联确保了评价过程紧贴实际应用需求，能够系统性地、场景化地评估领航行车辅助驾驶系统或解决方案在各维度的实际表现，如表 5-4 所示。

表 5-4 2 级驾驶自动化城区领航行车辅助评价指标体系与测评场景关联示例

指标场景	安全	舒适性	可靠性	通行效率	人机交互
直道巡航	1. 响应及时 2. 车速范围合理 3. 不画龙	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 车速波动范围合理 4. 不画龙	1. 介入率低 2. 平均介入里程高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 默认车道选择合理	1. 智驾激活 / 退出时，要有明确的状态提示 2. 支持驾驶策略（激进、保守、标准）选择 3. 导航与路径规划需有视觉展示 4. 支持驾驶员注意力监测 5. 系统故障与降级时，需要有明确提示 6. 人工介入要有合理分级提示
直道跟车	1. 响应及时 2. 跟车距离适中 3. 跟车距离适中 4. 自动起停时长适中	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 车速波动范围合理 4. 不画龙 5. 自动起停时长适中	1. 介入率低 2. 平均介入里程高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 跟车时距范围宽 5. 自动启停时长合理	
弯道巡航	1. 车速范围合理 2. 车速范围合理 3. 不画龙	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 车速波动范围合理 4. 不画龙 5. 弯道减速线性舒适	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 弯道通过率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 默认车道选择合理 4. 加减速策略合理	
弯道跟车	1. 响应及时 2. 跟车距离始终 3. 不画龙	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 车速波动范围合理 4. 不画龙 5. 弯道减速线性舒适 6. 自动起停时长适中	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 弯道通过率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 默认车道选择合理 4. 跟车时距范围宽 5. 自动启停时长合理 5. 加减速策略合理	
超车变道	1. 响应及时 2. 车速变化合理	1. 响应及时 2. 行驶流畅 3. 加减速线性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 自主变道成功率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 有效变道率高	
地形变道	1. 响应及时 2. 车速变化合理	1. 响应及时 2. 行驶流畅 3. 加减速线性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 自主变道成功率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 有效变道率高	
导航变道	1. 响应及时 2. 车速变化合理	1. 响应及时 2. 行驶流畅 3. 加减速线性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 自主变道成功率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 有效变道率高	
路口跟车	1. 响应及时 2. 车速变化合理 3. 会车策略安全可靠	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 进入路口减速 / 离开路口加速线性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 路口直行通过率高（跟车 / 不跟车） 4. 红绿灯识别准确率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 进入 / 离开路口加减速策略合理 5. 会车策略合理	

指标场景	安全	舒适性	可靠性	通行效率	人机交互
路口直行	1. 响应及时 2. 车速变化合理 3. 会车策略安全可靠	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 进入路口减速 / 离开路口加速线性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 路口直行通过率高 (跟车 / 不跟车) 4. 红绿灯识别准确率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 进入 / 离开路口加速减速策略合理 5. 会车策略合理	1. 智驾激活 / 退出时, 要有明确的状态提示 2. 支持驾驶策略 (激进、保守、标准) 选择 3. 导航与路径规划需有视觉展示 4. 支持驾驶员注意力监测 5. 系统故障与降级时, 需要有明确提示 6. 人工介入要有合理分级提示
路口左转	1. 响应及时 2. 车速变化合理 3. 会车策略安全可靠	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 进入路口减速 / 离开路口加速线性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 路口左转通过率高 (跟车 / 不跟车) 4. 红绿灯识别准确率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 进入 / 离开路口加速减速策略合理 5. 会车策略合理	
路口右转	1. 响应及时 2. 车速变化合理 3. 会车策略安全可靠	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 进入路口减速 / 离开路口加速线性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 路口右转通过率高 (跟车 / 不跟车) 4. 红绿灯识别准确率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 进入 / 离开路口加速减速策略合理 5. 会车策略合理	
路口调头	1. 响应及时 2. 车速变化合理 3. 会车策略安全可靠	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 进入路口减速 / 离开路口加速线性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 路口调头通过率高 4. 红绿灯识别准确率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 车速范围宽 4. 进入 / 离开路口加速减速策略合理 5. 会车策略合理	
避障场景	1. 响应及时 2. 避障策略安全可靠 3. 避障成功率高	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 避障时保持舒适性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 避障成功率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 避障策略高效 4. 避障成功率高	
人流密集	1. 响应及时 2. 避障策略安全可靠 3. 避障成功率高	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 避障时保持舒适性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 避障成功率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 避障策略高效 4. 避障成功率高	
交通拥堵	1. 响应及时 2. 避障策略安全可靠 3. 避障成功率高	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 避障时保持舒适性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 避障成功率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 避障策略高效 4. 避障成功率高	
窄路场景	1. 响应及时 2. 避障策略安全可靠 3. 避障成功率高	1. 行驶流畅 2. 加减速线性 3. 避障时保持舒适性	1. 介入率低 2. 平均介入里程高 3. 避障成功率高	1. 行驶用时短 2. 路径偏差率低 3. 避障策略高效 4. 避障成功率高	

第六章

智能驾驶产业未来展望

我国智能驾驶产业发展呈现出鼓励创新与规范发展并重的态势，国家将持续推动智能驾驶关键技术的研发，重点推进整车智能的技术攻关与场景落地，支持车载智能芯片等核心技术突破。在促进技术落地的同时，健全涵盖数据跨境流动、车端隐私保护、自动驾驶安全认证

标准与监管规范的安全体系，建立基于多责任主体的交通事故溯源机制，为商业化运营筑牢制度基础，通过“技术松绑 + 安全金箍”的双重作用，深度塑造整车智能技术路线的演进方向。



6.1 整车智能发展趋势

整车智能汽车的终极形态是具备感知、决策、执行能力的“智能体”。这一转变依赖于智能驾驶的技术基底，使汽车功能从被动执行指令转向可以主动理解用户需求与自主应对复杂场景。通过智能驾驶与底盘、座舱、车

身、电池、灯光的融合，使智能驾驶不再局限于单领域智能，更通过软件定义汽车持续迭代新功能，最终将汽车从交通工具进化为移动智能生命体。

(1) 环境感知系统正在构建汽车的数字神经网络

激光雷达、毫米波雷达、摄像头阵列及高精度定位单元等不仅服务于路径规划与障碍物识别，更成为全车感知环境的“神经网络”，激光雷达点云数据与摄像头视觉信息的时空对齐，配合毫米波雷达的穿透性探测，构建起厘米级精度的动态环境模型。环境感知系统作为汽车智能化的核心中枢，正通过多模态传感器融合、AI大模型部署与车路协同重构，推动单车智能向类人认知层级跃升。伴随固态激光雷达、车规级大算力芯片的成本下探和3级智能驾驶法规破冰，2025年有望成为高阶智能驾驶规模化落地的关键拐点，推动汽车从移动工具向具备环境交互与持续进化能力的“智能生命体”转型。

(2) 域控架构催生汽车的数字中枢神经系统

汽车电子电气架构的域控化重构正引领行业颠覆性变革，通过构建以域控制器为核心的数字中枢神经系统，重塑了智能汽车的进化逻辑。在硬件层面，域控制器整合多源异构数据流，依托以太网骨干和异构通信协议实现毫秒级跨域协同。在功能维度，其深度感知决策能力

不仅赋能数字底盘预判路况并动态优化悬架扭矩，更驱动智能座舱突破物理交互边界，基于实时导航与能耗数据的服务推荐系统、融合手势语音的多模态交互及人机共驾场景的无感切换，共同构建出具有自进化特征的智能体。这种通过架构革新释放的“数字脑容量”，本质上是将算力资源转化为场景智能，决定着整车在响应速度、场景泛化能力和用户体验维度的竞争壁垒。

(3) 中央计算演进正在塑造车辆的认知进化能力

随着电子电气架构加速向中央计算平台演进，智能驾驶系统正成为汽车认知进化能力的核心支撑体系。在车辆从机械载体向智能体转型的过程中，中央计算架构下的多模态感知系统构建了车辆理解物理世界的时空认知框架。无论是车路协同中的全局决策，还是“舱驾一体”模式下的人车共驾，均需以智能驾驶的感知决策体系为支点。值得注意的是，整车智能化的每一次迭代升级，都必然伴随智能驾驶在芯片算力、多源感知融合算法、全场景数据闭环等维度的同步突破，这种强耦合关系印证了其作为智能化基石的不可替代性。

6.2 未来发展建议

6.2.1 政策端

一是完善法律法规体系。逐步制定高级别自动驾驶的产品和功能定义、安全准入标准与管理法规，完善涵盖法律地位、数据确权、产品准入、责任认定等核心要素的法律法规框架，重点突破3级及以上智能驾驶系统权责划分、事故归责机制及数据安全规范、保险金融政策等制度瓶颈，为智能驾驶技术的规模化商业应用提供法律保障。二是营造良好的创新环境。营造支持创新、包容审慎的发展环境，鼓励智能网联汽车测试验证与示范应用活动，引导地方在保证安全的情况下探索梯度化开放模式，分阶段逐步放开复杂道路场景，优先推动在高

速公路、物流枢纽等限定场景的商业化验证。三是规范市场宣传引导。建立智能驾驶技术宣传内容审查机制，明确要求企业在产品推广中严格遵循分级标准标注智能驾驶等级，禁止使用误导性词汇，要求企业在公开演示视频中标注运行设计域限制条件，建立政府主导的智能驾驶技术科普平台，消解公众对智能驾驶技术的过度依赖或恐慌心理，为技术演进营造理性社会氛围。

6.2.2 产业端

一是构建协同创新生态。加强跨领域协同合作，为自动驾驶汽车系统安全、运行安全、研究与认定制定统一的标准和规范。汽车制造商、科技公司、通信企业、保险金融企业、自动充电补能等产业链上下游企业应深度合作，加强与集成电路、人工智能等产业融合发展，发挥集群优势。智能驾驶产业链核心企业应积极推动整车集成技术创新，重点培育智能驾驶软件算法、车载操作系统等汽车软件和感知通信技术，壮大相关产业规模。保险金融领域同步创新，适配自动驾驶技术带来的新变化。二是聚焦核心技术攻关。头部企业应重点突破多模态传感器融合算法、高精度环境感知模型、车规级 AI

芯片等关键技术，推动多传感器融合技术的升级迭代，提高智能驾驶系统的安全冗余和可靠性。积极与科研机构等加强“产学研”合作，推进关键核心技术攻关和科技成果转化。推动功能安全、预期功能安全、系统安全、运行安全融合，实现智能网联汽车全生命周期安全防护。三是构建风险共担体系。产业链积极探索智能网联汽车保险产品创新，探索融合驾驶行为、系统表现的动态保费模型。推动建立第三方技术认证机制，构建事故数据库和风险评估体系，先在试点过程中使用主体承担责任，再过渡到人车共责，最终建立动态责任体系。

6.2.3 消费端

一是提升消费者认知与教育。构建“产学研”协同的社会传播网络，完善由科普教育、媒体传播、体验活动组成的传播矩阵，建立风险披露与公众参与的沟通机制，通过组织相关会议、展览、试乘试驾与定期发布技术白皮书等活动，提高公众对智能驾驶技术的认识 and 了解，实现从技术认知到风险意识的全面升级，帮助公众建立对智能驾驶技术的理性认知框架和安全边界意识。二是加强消费者权益保护。完善个人信息保护机制，确保消费者在使用智能驾驶功能时的隐私和数据安全。保障用户的知情权，在汽车销售与宣传过程中向消费者详细说明智能驾驶相关功能的使用范围、功能作用，杜绝功能夸大表述与概念混淆，从源头防范因误用滥用引发的安

全隐患。三是构建完善的售后服务体系。针对智能驾驶功能出现的问题建立完备的保障机制，建立智能化问题反馈与快速响应通道，涉及安全风险的系统故障应采用 7×24 小时的应急服务机制，推行智能驾驶系统功能全生命周期的技术护航服务。

参考文献

- [1] Edition, F. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP. 29) [S]. 2021.
- [2] International Organization for Standardization. ISO 26262 1-12: 2018. Road vehicles - Functional safety [S]. 2018.
- [3] 中华人民共和国国家标准 . GB/T 34590 1-12, 2022. 道路车辆 功能安全 [S]. 2022.
- [4] SAE International, Automotive Functional Safety Committee. SAE J2980: 2018. Road vehicles-ASIL determination guidelines for electrical and electronic system [S]. 2018.
- [5] Peng L, Wang H, Li J. Uncertainty evaluation of object detection algorithms for autonomous vehicles [J]. Automotive Innovation, 2021, 4(3): 241-252.
- [6] Peng L, Li B, Yu W, et al. SOTIF entropy: Online SOTIF risk quantification and mitigation for autonomous driving [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023.
- [7] Yu W, Zhao C, Wang H, et al. Online legal driving behavior monitoring for self-driving vehicles [J]. Nature communications, 2024, 15(1): 408.
- [8] 吴武飞, 李仁发, 曾刚, 等. 智能网联车网络安全研究综述 [J]. 通信学报, 2020, 41(06): 161-174.
- [9] 陈宇, 易红旭, 王煜宇. 公钥加密综述 [J]. 密码学报 (中英文), 2024, 11(01): 191-226.
- [10] 田志宏, 方滨兴, 廖清, 等. 从自卫到护卫: 新时期网络安全保障体系构建与发展建议 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(06): 96-105.
- [11] 李骏, 王红, 李云巍, 等. 智能网联汽车预期功能安全指数 1.0 测试场景清单 [R]. 北京: 清华大学, 2025.
- [12] T/CSAE 336—2023. 智能网联汽车预期功能安全场景要素及管理要求 [S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2023.

版权所有 © 中国汽车技术研究中心有限公司 | 清华大学 | 华为技术有限公司保留一切权利。非经版权所有方书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部。

商标声明

在本手册中出现的所有商标，产品名称，服务名称以及公司名称，均由其各自的所有人拥有。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，版权所有方不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任，并且可能不经通知修改上述信息，不另行通知。