



中国人工智能系列白皮书 -智能驾驶 2017

中国人工智能学会

二〇一七年十月

《中国人工智能系列白皮书-智能交通》编委会

主任：

李德毅（中国人工智能学会理事长，中国工程院院士）

执行主任：

邓伟文（中国人工智能学会智能驾驶专业委员会主任，北京航空航天大学交通科学与工程学院院长）

副主任：

谭铁牛（中国科学院院士）

杨放春（北京邮电大学教授）

黄河燕（北京理工大学教授）

焦李成（西安电子科技大学教授）

马少平（清华大学教授）

刘 宏（北京大学教授）

蒋昌俊（东华大学教授）

王国胤（重庆邮电大学教授）

任福继（合肥工业大学教授）

杨 强（香港科技大学教授）

胡 郁（科大讯飞执行总裁）

委员：

陈 杰（北京理工大学教授）

董振江（中兴通讯股份有限公司研究员级高工）

杜军平 （北京邮电大学教授）

桂卫华 （中国工程院院士）

韩力群 （北京工商大学教授）

何 清 （中国科学院计算技术研究所研究员）

黄心汉 （华中科技大学自动化学院教授）

贾英民 （北京航空航天大学教授）

李 斌 （华中科技大学教授）

刘 民 （清华大学教授）

刘成林 （中国科学院自动化研究所研究员）

刘增良 （中国人民解放军国防大学教授）

鲁华祥 （中国科学院半导体研究所研究员）

马华东 （北京邮电大学教授）

马世龙 （北京航空航天大学教授）

苗夺谦 （同济大学教授）

朴松昊 （哈尔滨工业大学教授）

乔俊飞 （北京工业大学教授）

任友群 （华东师范大学研究员）

孙富春 （清华大学教授）

孙长银 （北京科技大学教授）

王 轩 （哈尔滨工业大学教授）

王飞跃 （中国科学院自动化研究所研究员）

王捍贫（北京大学教授）
王万森（首都师范大学教授）
王卫宁（北京邮电大学研究员）
王小捷（北京邮电大学教授）
王亚杰（沈阳航空航天大学教授）
王志良（北京科技大学教授）
吴朝晖（浙江大学教授）
吴晓蓓（南京理工大学教授）
夏桂华（哈尔滨工程大学教授）
严新平（武汉华夏理工学院教授）
杨春燕（广东工业大学研究员）
余凯（地平线机器人技术创始人兼 CEO）
余有成（吴文俊人工智能科学技术奖办公室主任）
张学工（清华大学教授）
赵春江（北京农业信息技术研究中心研究员）
周志华（南京大学教授）
祝烈煌（北京理工大学教授）
庄越挺（浙江大学教授）

主笔专家

张天雷 任秉韬 郑思仪 王鑫 马楠 张新钰

目录

第 1 章 发展概述篇	1
1.1. 汽车智能化发展	1
1.2. 汽车智能驾驶技术的内涵	2
1.3. 汽车智能驾驶技术分级	3
1.4. 国内外技术发展现状	4
1.4.1 国外智能驾驶技术现状	4
1.4.2 国内智能驾驶技术现状	8
1.5. 公开性智能驾驶比赛	11
1.5.1 国外智能驾驶比赛	11
1.5.2 国内智能驾驶比赛	15
1.6. 汽车自动驾驶产业概述	18
1.7. 智能驾驶社会效益与影响	19
1.7.1 安全性-减少交通事故	19
1.7.2 经济性-促进节能减排	19
1.7.3 互联性-推动社会变革	20
1.7.4 行业性-改变传统产业发展，行业交互共赢	21
1.8. 国内外相关政府政策	21
1.8.1 国外情况	22
1.8.2 国内情况	25
第 2 章环境感知篇	27
2.1 智能驾驶感知任务	27
2.2 智能驾驶的感知盲区	27
2.3 环境感知功能系统构成	27
2.4 系统硬件配置方案	28

2.5 传感感知技术	30
2.5.1 相机视觉	30
2.5.2 雷达传感	33
2.5.3 听觉传感	36
2.6 定位与导航技术	38
2.6.1 感知态势的基准	39
2.6.2 设备组成和种类	39
2.6.3 姿态和状态感知	41
2.6.4 测试技术	42
2.6.5 数字地图	42
2.7 V2X 网联通信技术	44
2.7.1 设备组成和种类	45
2.7.2 功能和感知范围	47
2.7.3 测试技术	48
第 3 章 决策规划篇	49
3.1 决策规划技术概述	49
3.2 决策规划技术结构体系	50
3.2.1 分层递阶式体系结构	50
3.2.2 反应式体系结构	51
3.2.3 混合式体系结构	52
3.3 决策规划系统的关键环节	53
3.3.1 传感信息融合	54
3.3.2 任务决策	55
3.3.3 轨迹规划	55
3.3.4 异常处理	56
3.4 决策规划技术方法	56

3.4.1 全局规划方法	57
3.4.2 局部规划方法	58
3.5 路权分配技术	60
第 4 章 控制工程篇	62
4.1 智能汽车控制架构设计	62
4.2 自动驾驶控制核心技术组成	64
4.2.1 车辆纵向控制	65
4.2.2 车辆横向控制	67
4.3 自动驾驶控制方法	69
4.3.1 传统控制方法	69
4.3.2 智能控制方法	70
4.4 自动驾驶控制技术方案	72
4.4.1 基于规划-跟踪的间接控制方法	72
4.4.2 基于人工智能的直接控制方法	74
4.5 人机交互系统	77
4.5.1 人机交互系统的作用和意义	77
4.5.2 智能汽车人机交互系统发展现状	78
4.5.3 人机交互系统的核心技术	83
4.5.4 人机交互系统的发展趋势	86
第 5 章 测试验证篇	87
5.1 模拟仿真技术	88
5.1.1 需求分析	88
5.1.2 技术方案	89
5.1.3 未来发展的技术挑战和趋势	90
5.2 试验测试示范区	91
5.2.1 国外情况	92

5.2.2 国内情况	94
5.3 测试验证技术	98
5.3.1 需求分析	98
5.3.2 技术方案	99
5.3.3 未来发展的技术挑战和趋势	107
参考文献:	108

第 1 章 发展概述篇

1.1. 汽车智能化发展

汽车智能化技术在减少交通事故、缓解交通拥堵、提高道路及车辆利用率等方面具有巨大潜能，已成为众多企业的竞争热点。我国发布的《中国制造 2025》中明确指出将智能网联汽车作为一项重点发展对象，并定义智能网联汽车是指搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置，并融合现代通信与网络技术，实现车内网、车外网、车际网的无缝链接，具备信息共享、复杂环境感知、智能化决策、自动化协同等控制功能，与智能公路和辅助设施组成的智能出行系统，可实现“高效、安全、舒适、节能”行驶的新一代汽车^{[1][2]}。

智能汽车（图 1-1）是新一轮科技革命背景下的新兴技术，集中运用了现代传感技术、信息与通信技术、自动控制技术、计算机技术和人工智能等技术，代表着未来汽车技术的战略制高点，是汽车产业转型升级的关键，也是目前世界公认的发展方向^[3]。

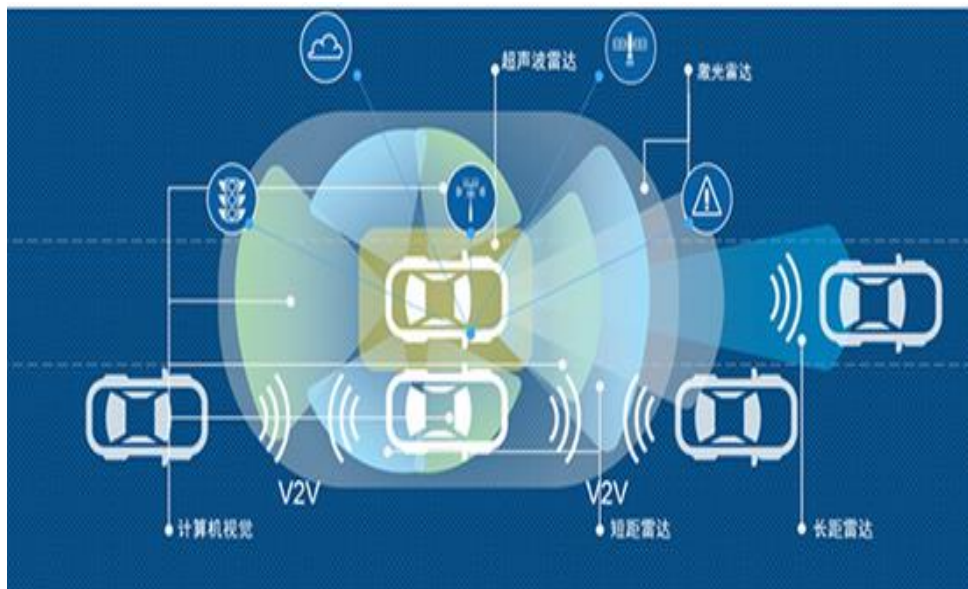


图 1-1 智能汽车

在智能驾驶技术的研究方面，美国起步较早，早在 1939 年纽约

世界博览会上，美国通用汽车公司首次展出了无人驾驶概念车 Futurama。1958 年，美国无线电公司（RCA，Radio Corporation of America）和通用集团联合，对外展示了智能驾驶汽车原型。依赖于预埋线圈的道路设施，车辆可以按电磁信号指示确定其位置与速度，控制方向盘、油门和刹车。

自 20 世纪 80 年代，在美国国防部先进研究项目局（DARPA，Defense Advanced Research Projects Agency）的支持下掀起了智能车技术研究热潮。1984 年由卡耐基梅隆大学研发了全世界第一辆真正意义的智能驾驶车辆，如图 1-2 所示。该车辆利用激光雷达、计算机视觉及自动控制技术完成对周边环境的感知，并据此做出决策，自动控制车辆，在特定道路环境下最高时速可达 31km/h。



图 1-2 第一辆真正意义的智能驾驶车辆

欧洲从 20 世纪 80 年代中期开始研发智能驾驶车辆，其研究不强调车路协同，而是将智能驾驶车辆作为独立个体，并让车辆混行于正常交通流。日本智能驾驶技术研发起步较晚，且更多关注于采用智能安全降低事故发生率，以及采用车间通信方式辅助驾驶。日本在智能安全及车联网方面的研究走在世界前列，但对完全智能驾驶技术关注较少。

1.2. 汽车智能驾驶技术的内涵

汽车智能驾驶具有“智慧”和“能力”两层含义，所谓“智慧”是指汽车能够像人一样智能地感知、综合、判断、推理、决断和记忆；

所谓“能力”是指智能汽车能够确保“智慧”的有效执行，可以实施主动控制，并能够进行人机交互与协同。自动驾驶是智慧和能力的有机结合，二者相辅相成，缺一不可^[3]。

为实现“智慧”和“能力”两方面内容，自动驾驶技术一般包括环境感知、决策规划和车辆控制三大部分。类似于人类驾驶员在驾驶过程中，通过视觉、听觉、触觉等感官系统感知行驶环境和车辆状态，自动驾驶系统通过配置内部传感器和外部传感器获取自身状态及周边环境信息。内部传感器主要包括车辆速度传感器、加速传感器、轮速传感器、横摆角速度传感器等；主流的外部传感器包括摄像头、激光雷达、毫米波雷达以及定位系统等。通过这些传感器提供海量的全方位行驶环境信息。不同传感器的量测精度、适用范围都有所不同，为有效利用这些传感器信息，需要利用传感器融合技术将多种传感器在空间和时间上的独立信息、互补信息以及冗余信息按照某种准则组合起来，从而提供对环境综合的准确理解。决策规划子系统代表了自动驾驶技术的认知层，包括决策和规划两个方面。决策体系定义了各部分之间的相互关系和功能分配，决定了车辆的安全行使模式；规划部分用以生成安全、实时的无碰撞轨迹。车辆控制子系统用以实现车辆的纵向车距、车速控制和横向车辆位置控制等，是车辆智能化的最终执行机构。“感知”和“决策规划”对应于自动驾驶系统的“智慧”；而“车辆控制”则体现了其“能力”。

1.3. 汽车智能驾驶技术分级

美国高速公路安全管理局(NHTSA)将汽车智能化水平分成五个等级：无自主控制；辅助驾驶；部分自动驾驶；有条件自动驾驶；高度自动驾驶。SAE将汽车智能化水平划分为六个等级：人工驾驶；辅助驾驶；部分自动驾驶；有条件自动驾驶；高度自动驾驶；全自动驾驶。

《中国制造 2025》将智能汽车分为 DA, PA, HA, FA 四个等级,并划分了各自的界限^[2]。其中, DA 指驾驶辅助,包括一项或多项局部自动功能,如 ACC, AEB, ESC 等,并能提供基于网联的智能提醒信息; PA 指部分自动驾驶,在驾驶员短时转移注意力仍可保持控制,失去控制 10 秒以上予以提醒,并能提供基于网联的智能引导信息; HA 指高度自动驾驶,在高速公路和市内均可自动驾驶,偶尔需要驾驶员接管,但是有充分的移交时间,并能提供基于网联的智能控制信息; FA 指完全自动驾驶,驾驶权完全移交给车辆。

通常将自动驾驶和无人驾驶视作不同的两个概念,二者之间泾渭分明。自动驾驶是指可以帮助驾驶员转向和保持在车道内行驶,实现跟车、制动以及变道等操作的一种辅助驾驶系统,驾驶员可以随时介入对车辆的控制,并且系统在特定环境下会提醒驾驶员介入操控。同自动驾驶汽车相比,无人驾驶汽车也配备有各类传感器和相应的控制驱动器,但是取消了方向盘、加速踏板和制动踏板,汽车在没有人为干预的情况下自主完成行驶任务。

1.4. 国内外技术发展现状

1.4.1 国外智能驾驶技术现状

汽车自动驾驶技术发展初期,研究者通过无线通信或在道路上铺设电缆、磁诱导设备来实现车辆的自动控制。1921 年 World Wide Wireless 期刊上出版的一篇文章中提出,通过无线通信技术实现无人驾驶技术。1955 年美国 Barret Electronics 公司研制出了第一台自动引导车辆系统 AGVS(Automated Guided Vehicle System),它是一个运行在固定线路上的自动运输平台,具有无人驾驶智能车辆的基本的特征^[5]。1961 年,斯坦福大学介绍了其研发的自动驾驶汽车 Stanford Cart,该车上装有一个摄像机,通过有线电缆控制^[6]。日本机械技术研究所 在 1978 年进行了世界上首次基于机器视觉的自主汽车驾驶系统道路

试验，速度达 30km/h。1980 年，慕尼黑联邦国防军大学开发了无人驾驶汽车 UniBW，车上装配有 8 个 16 位英特尔微处理器，车速可以达到 90km/h^[7]。同时，美国俄亥俄州立大学的 Robert E. Fenton 提出了 AHS(Automated Highway Systems)概念，旨在促进高速自动驾驶汽车发展。20 世纪 80 年代，德国联邦国防军大学 Ernst Dickmanns 开发的视觉导航汽车“Va-Mors”在没有交通流干扰的情况下车速可以得到 100km/h，为汽车智能化发展奠定了重要基础。1994 年，梅塞德斯-奔驰的“VaMP”完成了 1600km 测试，全程有 95%为自动驾驶^[7]。2004 年，美国政府通过资助军事项目 Demo I、II、III 推动自动驾驶技术发展。其中最先进的 DEMO III 智能车辆集成了多种子系统，包括 CCD 立体视觉系统、激光深度成像仪、GPS 导航系统、惯性导航包及遥视机器人驱动系统，该车辆可以在多种恶劣环境下(如雨天、路面有污垢等)、多种光照条件(比如白天、黑夜和阴影等)下实现自动驾驶。

在汽车智能化技术发展历程中，美国卡内基·梅隆大学研制了 NavLab 系列智能车辆。其中，NavLab-1 系统于 1986 年基于雪弗兰的一款厢式货车改装而成，装有 Sun3、GPS、Warp 等计算机硬件，但由于软件的局限性，直到上世纪 80 年代末，它的最高速度也只有 32km/h。NavLab-5 系统是 1995 年建成的，CMU 与 Assist-Ware 技术公司合作开发研制的便携式高级导航支撑平台 PANS 为系统提供计算基础和 I/O 功能，并能控制转向执行机构，同时进行安全报警。它使用了一台便携式工作站 Sparc Lx，能够完成传感器信息的处理与融合、路径的全局与局部规划。NavLab-5 以 Pontiac 运动跑车作为基础，在试验场环境道路上的自主行驶平均速度达到 88.5km/h，首次进行了横穿美国大陆的长途自动驾驶公路试验，自主行驶里程为 4496km，占总行程的 98.1%。车辆的横向控制实现了完全自动控制，而纵向导

航控制仍由驾驶员完成。NavLab-11 系统是该系列最新的智能车平台，车体采用了 Wrangler 吉普车，最高车速达到 102km/h。装备的传感器包括差分 GPS、激光雷达、摄像机、陀螺仪和光电码盘等。

斯坦福大学 Michael 基于大众帕萨特研制出无人驾驶车辆 Junio，车上装备有五个激光雷达 (IBEO, Riegl, SICK, Velodyne)，一个 GPS/INS 系统 (Applanix)，五个 BOSCH 雷达，两个 Intel 四核计算机，一个由大众汽车电子实验室开发的电传线控接口。

意大利帕尔玛大学 VisLab 实验室一直致力于 ARGO 项目研究。于 1998 年沿着意大利的高速公路网进行了 2000 公里的长距离道路试验，整个试验途经平原和山区，也包括高架桥和隧道，试验车的无人驾驶里程为总里程的 94% 左右，最高车速达到了 112km/h。在 2010 年，ARGO 试验车装载了 5 个激光雷达、7 个摄像机、GPS 全球定位系统、惯性测量设备以及 3 台 Linux 电脑和线控驾驶系统，同时将太阳能作为辅助动力源，沿着马可·波罗的旅行路线，全程自动驾驶来到中国上海参加世博会，行程 15900km，经历了多种极端环境条件。2013 年，他们研制的智能车在无人驾驶的情况下能够实现交通信号灯识别、避开行人、安全驶过十字路口和环岛等功能。

除高校在自动驾驶领域的积极研究外，众多汽车厂商也相继开展了相关研究计划。奥迪推出的无人驾驶系统使用两个雷达探头、八个超声波探头和一个广视角摄像机，可以在设定的时间内，按照导航系统提供的信息，在最高 60km/h 的速度下自主转向、加速和刹车，实现完全的自动驾驶。特斯拉开发了自动驾驶系统 Autopilot，并安装在了 8 万辆 Model S 上。车辆挡风玻璃中间安装有一个 MobileyeEyeQ3 视觉系统、前保险杠下方安装有一个毫米波雷达、车辆四周安装有 12 个超声波雷达。通用于 2010 年推出了电动联网概念车 EN-V，它能够通过实时交通信息的分析，自动选择路况最佳的行驶路线，从而避

免发生交通堵塞。沃尔沃于 2015 年 3 月 25 日至 28 日在北京六环高速公路上进行高度自动驾驶测试和展示，测试中，自动驾驶车辆以 70km/h 的速度巡航，自动驾驶系统在真实的道路情况下完成了自动转弯、跟车、制动等动作，此间完全没有人为干预。尼桑计划于 8 月下旬在日本上市全新 **Serena**，该车型将配备日产 **ProPILOT** 自动驾驶系统，该系统支持车道保持和自动跟车等功能。宝马携手大陆集团在自动驾驶领域展开了合作，共同开发驾驶辅助系统。

以谷歌为代表的 IT 公司在自动驾驶领域的表现也十分活跃，谷歌公司于 2009 年开始研发无人驾驶技术，2012 年，美国内华达州机动车辆管理部门为其无人驾驶汽车颁发了首例驾驶许可证。谷歌无人驾驶车辆搭载了雷达、车道保持系统、激光测距系统、红外摄像头、立体视觉系统、GPS 以及车轮角度编码器等设备，而外部装置的核心便是车顶的 64 线激光雷达，它能提供 200 英尺以内的精细 3D 地图数据。据 2015 年 11 月底谷歌提交给机动车辆管理局的报告，谷歌的无人驾驶汽车在自动驾驶模式下已经完成了 130 多万英里。2013 年，苹果公司宣布向汽车领域进军，开发了智能车载系统 **CarPlay**，并在 2014 年 3 月 4 日的日内瓦国际汽车展上进行了展示。**CarPlay** 能够支持“电话”、“音乐”、“地图”、“信息”和第三方音频应用程序。梅赛德斯-奔驰，法拉利、宝马、福特、通用等汽车厂商也陆续展示各自车型与 **CarPlay** 的整合界面。

为促进自动驾驶技术的发展，美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 于 2004 到 2007 年共举办了 3 届 DARPA 无人驾驶挑战赛。2004 年的第一届 DARPA 挑战赛在美国的 Mojave 沙漠进行，道路全长 240km，参赛队伍共有 21 支，有 15 支进入了决赛，但却没有一支队伍完成整场比赛。第二届 DARPA 挑战赛于 2005 年举行，有五支队伍通过了全部考核项目，其中来自斯坦福大学的 **Stanley** 以

30.7km/h 的平均速度和 6 小时 53 分 58s 的总时长夺冠。2007 年 11 月，第三届 DARPA 挑战赛在美国加利福尼亚州一个后勤空军基地举行。比赛要求参赛车辆在 6 小时内完成 96km 的城市道路行驶，同时遵守所有交通规则。这次比赛不仅要求参赛车辆完成基本的无人行驶，更重要的是参赛车辆要与其他车辆进行实时交流，相遇时能主动避让。最终来自卡内基·梅隆大学的 BOSS 车辆以总时长 4 小时 10 分 20 秒，平均速度 22.53km/h 的成绩取得了冠军。

1.4.2 国内智能驾驶技术现状

相比之下，国内在自动驾驶方面研究的起步稍晚。从 80 年代末开始，国防科技大学先后研制出基于视觉的 CITAVT 系列智能车辆。其中，在 CITAVT-I、CITAVT-II 型无人驾驶小车的研制过程中对无人驾驶汽车的原理进行了研究；CITAVT-III 型的研究以实现在非结构化道路下遥控和自动驾驶为目的；CITAVT-IV 型自动驾驶车基于 BJ2020SG 吉普车改装而成，该车型以研究结构化道路环境下的自动驾驶技术为目标，空载条件下速度最高为 110km/h，车辆具有人工驾驶、遥控驾驶、非结构化道路上的低速自动驾驶和结构化道路上的自动驾驶四种工作模式^[10]。

清华大学在国防科工委和国家“863 计划”的资助下从 1988 年开始研究开发 THMR 系列智能车。THMR-V 智能车能够实现结构化环境下的车道线自动跟踪，准结构化环境下的道路跟踪，复杂环境下的道路避障、道路停障以及视觉临场感遥控驾驶等功能，最高车速达 150km/h。THMR-V 智能车采用了基于扩充转移网络的道路理解技术，大幅度降低了道路图像处理和车道线识别的计算量，并通过实验测得在车道线跟踪阶段全部计算过程的周期小于 20 毫秒，保证了实际场景下的实时性要求^[11]。

吉林大学从上世纪 90 年代初开始，在智能车辆的体系结构、道

路边界识别、车辆的路径跟踪及车体控制等方面取得了一定成果，先后开发了 JLUIV、DLIUUV 系列智能汽车。重庆大学研制开发出 CQAC 系列视觉导航智能车辆。西安交通大学开发了基于 DSP 高速视频处理系统的 Springrobot 智能车，可实时完成道路检测、行人检测、车辆检测等。

国内一汽集团、上汽集团、长安汽车等车企也纷纷涉足自动驾驶。一汽集团于 2007 年与国防科技大学合作，在红旗 HQ3 车型基础上完成高速公路自动驾驶样车。2011 年 7 月 14 日，红旗 HQ3 无人车完成了从长沙到武汉 286 公里的高速全程无人驾驶实验，历时 3 小时 22 分钟；2013 年具备 PA-HA 功能的红旗 H7 投放市场；2015 年 4 月，一汽集团正式发布了其“擎途”技术战略，标志着一汽集团的互联智能汽车技术战略规划正式形成。根据该战略的十年发展计划，“擎途”战略将从当前的 1.0 发展到 4.0。目前“擎途”1.0 已经于 2013 年应用到红旗轿车上，具备紧急制动、防碰预警、车道偏离等驾驶辅助功能。计划在 2018 年前实现的“擎途”2.0 计划，可以通过自主研发的智能互联驾驶系统实现手机叫车、自动泊车和编队跟车功能，且有望搭载于红旗 H7 和解放商用车上。而在 2020 年实现“擎途”3.0，可以实现 V2X 功能，能够整合高速代驾及深度感知和城市智能技术。最终在 2025 年实现“擎途”4.0，实现高度自动驾驶技术整车产品渗透率达 50% 以上。2015 年 4 月 19 日，一汽在同济大学举行了“擎途”技术实车体验会，包含有“手机叫车、自主泊车、拥堵跟车、自动驾驶”等 4 项智能化技术。手机叫车功能可在视距范围内通过手机发出叫车指令，车辆自动行驶到指定地点，中途可自动躲避行人；自主泊车可通过手机界面寻找车位，输入停车指令，完成平行或垂直泊车任务；拥堵跟车功能可在堵车时自动跟随前车走停、转弯、加减速，可识别交通标识和车间危险，可降低拥堵驾驶的疲劳和烦躁。

2013 年，上汽集团在自动驾驶领域“结盟”中航科工，并且在 2015 年的上海车展上展示了自主研发的智能驾驶汽车 iGS。iGS 可以通过摄像头和雷达观测周遭环境，再把路况数据传达给控制软件进行分析，给出指令。iGS 可以初步实现远程遥控泊车、自动巡航、自动跟车、车道保持、换道行驶、自主超车等功能。

长安汽车在 2015 年 4 月发布了智能化战略“654”，即建立 6 个基础技术体系平台，开发 5 大核心应用技术，分 4 个阶段逐步实现汽车从单一智能到全自动驾驶。目前长安汽车已经完成第一阶段开发试验，即在 4 月完成的 2000 公里高速公路路试。现已进入第二阶段，将在 2018 年实现组合功能自动化，如集成式自适应巡航、全自动泊车、智能终端 4.0 等。未来在第三阶段，实现有限的自动驾驶，如高速公路全自动驾驶等；计划在 2025 年完成第四阶段，实现汽车全自动驾驶，并进入产业化应用。当前，长安汽车已掌握智能互联、智能个性化、智能驾驶三大类 60 余项智能化技术，其中，结构化道路无人驾驶技术已通过实车技术验证。

北汽集团在 2016 年 4 月份的北京车展上，展示了其基于 EU260 打造的无人驾驶汽车。车辆通过加装毫米波雷达、高清摄像头、激光雷达和 GPS 天线等元器件识别道路环境，同时配合高清地图进行路线规划实现无人驾驶。北汽无人驾驶汽车目前搭载的无人驾驶感知与控制元器件大部分都采用了国产化采购，目的是为未来的量产打下基础。在 2016 年 7 月 6 日，北汽集团新技术研究院与盘锦市大洼区人民政府在北京市举行无人驾驶汽车战略合作协议签约仪式，双方将在“红海滩国家风景廊道”合资合作共同开发建设无人驾驶体验项目。

长城汽车在 2012 年成立了专业团队，对汽车无人驾驶等智能技术进行研究。目前哈弗 H8、H9 及部分后续车辆已经完成了驾驶辅助（ADAS）阶段的开发。预计在 2020 年，将会推出能够在高速公路上

实现自动驾驶的车辆。长城无人驾驶技术通过多种传感器的应用，可实现对道路情况与周围环境的全方位探测，并经过内部智能电子控制单元高速运算，直接控制车辆的电子转向系统、发动机管理系统及制动系统等机构，实现车辆加减速、变换车道、跟随车辆以及超车等动作。

百度公司于 2013 年开始了百度无人驾驶汽车项目，其技术核心是“百度汽车大脑”，包括高精度地图、定位、感知、智能决策与控制四大模块。2015 年百度无人驾驶汽车在国内首次实现了城市、环路和高速公路混合路况下的全自动驾驶，测试时的最高速度达 100km/h。乐视超级汽车公司于 2015 年 1 月 20 日在北京成立，发布了智能系统“LeUI”，将贯穿汽车、手机、TV 等所有乐视智能终端。LeUI Auto 版能够通过语音与乘员进行交互，可以通过挥手、轻点、指向和抓取等手势进行人机交互，同时内嵌了地图导航功能。

1.5. 公开性智能驾驶比赛

1.5.1 国外智能驾驶比赛

进入 21 世纪后，美国国防部先进研究项目局于 2004、2005、2007 年举办了三届 DARPA 挑战赛，掀起了智能驾驶技术研发的热潮^[12]。

首届比赛于 2004 年在美国莫哈韦沙漠举行，全长 240 公里，21 支车队报名参赛，15 支通过资格测试，所有车队均未能完成首届比赛的测试。完成程度最高的来自卡耐基梅隆大学的 SandStorm 也仅仅跑完了 11.78 公里，不足全程的 5%。

第二届比赛于 2005 年举行，全长 212 公里，仍侧重于考察车辆在非结构化道路自动驾驶的能力，全程无人、车干扰。23 支车队报名参赛，5 支跑完全程。斯坦福大学的 Stanley 和卡耐基梅隆大学的 SandStorm、Highlander 获得前三名。

第三届比赛于 2007 年举行，全长 89 公里，侧重于考察车辆在城

区结构化道路的自动驾驶能力，有少量行人及车辆干扰，53 支队伍报名，11 支通过资格测试，6 支车队跑完全程。卡耐基梅隆大学的 Boss、斯坦福大学的 Junior 和弗吉尼亚理工的 Odin 获得前三名，如图 1-3 所示。



图 1-3 三届 DARPA 挑战赛冠军—SandStorm、Stanley、Boss

2006 年起，欧洲开始举办陆地机器人测试（ELROB，European Land-Robot Trial），在真实场景下测试包括智能驾驶汽车在内的陆地机器人性能。共举行了三届军事场景和两届民用场景测试，军事主题包括侦察监测、自主导航、编队运输等，民用场景包括安全、消防、灾难控制等。18 支队伍参加首届测试，大部分采用无线遥控方案，机械故障频发。后几届测试中，自主车辆占比和任务完成度逐年提高。ELROB 测试对欧洲智能驾驶技术研发起到了积极促进作用。

2005 年，Vislab 实验室智能驾驶车辆 TerraMax 参加第二届 DARPA 挑战赛，完成全程，获得第五名，如图 1-4 所示。2010 年，其智能驾驶车辆历时 3 月横跨 9 国，完成从帕尔马到上海共 13000km 的智能驾驶试验。2013 年，其智能驾驶车辆完成了包括环岛行驶、交通信号灯、躲避行人在内的城市智能驾驶环境测试。



图 1-4 Vislab 实验室 TerraMax 智能驾驶车辆

2011 年在荷兰举行的第一届合作驾驶挑战赛（GCDC: Grand Cooperative Driving Challenge）旨在加速 CACC 系统的实现，缓和世界各地的交通问题，为各国的研究团队提供了展示先进的 CACC 技术的平台。2016 年 5 月第二届 GCDC 比赛在荷兰海尔蒙德举办，由欧洲的项目 i-GAME（2013 年十月份启动）支撑，来自六个欧洲国家的十个学生团队参加，在海尔蒙德到埃因霍温的高速公路上测试（图 1-5），测试场景包括：两车队汇合，十字路口穿越，转向和自动让道等。



图 1-5 GCDC 比赛场景

2015 年 6 月 9 日，在美国加州举行的美国国防部高等研究计划署（DARPA）机器人挑战赛日前落下帷幕，此次比赛要求参赛队伍建造可以执行核清理等相关任务的机器人，包括驾车、拆卸和开门、使用标准电动工具在墙上切割孔洞、连接消防栓以及旋转打开阀门等。

为了模拟真实环境，机器人与控制团队的内部沟通网络需要中断 30 秒以上。图 1-6 中韩国 KAIST 队机器人 DRC-HuBo 赢得冠军。

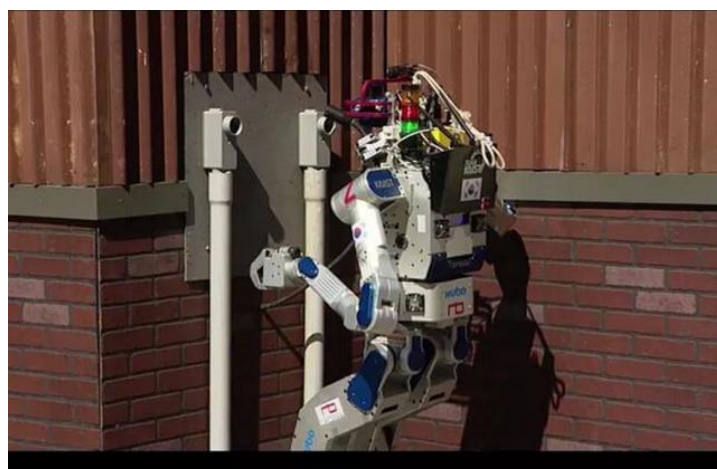


图 1-6 韩国 Hubo 机器人赢得 DARPA 冠军

2015 年自动驾驶汽车挑战赛 Autonomous Vehicle Competition (AVC)，由电子产品厂商 SparkFun 在其位于科罗拉多州博尔德市的总部所在地主办，挑战赛的规则是：开发一款机器人，机器人本身能够自行在该公司的停车场辨识方向。在所有参赛的 71 支队伍中，有一半队伍都能顺利完成 AVC 挑战赛的第一个弯道。但只有少数的自动驾驶汽车能够度过所有的难关——躲避木桶、跳跃坡道等。

2017 年 2 月首场电动无人驾驶比赛 Roborace 在布宜诺斯艾利斯举行，所有参赛车辆都采用相同设计，完全比拼软件设计能力。两辆 DevBot 无人驾驶电动赛车（图 1-7），在布宜诺斯艾利斯的 ePrix Formula E 赛道上展开比拼。不幸的是，失败的一方因为事故而中途退赛。中途撞车赛车的“胜利者”最高时速达到 115 英里（约合 185 公里）。



图 1-7 参赛中的 DevBot 无人驾驶电动赛车

1.5.2 国内智能驾驶比赛

为促进我国无人驾驶技术发展，国家自然科学基金委于 2008 年提出了“视听觉信息的认知计算”重大研究计划，并于 2009 年起主办中国智能车未来挑战赛，截止目前已举办 7 届赛事。

第一届比赛于 2009 年在西安举办，包括机械性能测试、交通信号灯识别、交通标志识别和交通标线识别等基本能力测试，以及自动驾驶测试。共有 10 支队伍参赛，最终湖南大学取得冠军。

第二届比赛于 2010 年在西安举办，比赛内容仍然包括基本能力测试和自动驾驶测试，同上届内容相比，基本能力测试中增加了沿锥形标曲线行驶和定点泊车。共有 10 支队伍参赛，最终中国科学院合肥物质研究院的“智能先锋”无人驾驶车辆获得冠军。

第三届比赛于 2011 年在鄂尔多斯举行，比赛要求参赛车辆完成约 11 公里的真实道路环境行驶，全程包括交通标识和信号灯识别、动静态障碍物识别、路口通行、U 形掉头、停止线停车等科目，国防科技大学的“开路雄狮”无人驾驶车辆获得了冠军。

第四届比赛于 2012 年在赤峰举办，比赛内容包括城区道路测试和乡村道路测试，重点考察车辆的安全性、智能性、平稳性和速度。共有 15 支队伍参加了此次比赛，军事交通学院的“猛狮 3 号”取得了冠军。

第五届比赛于 2013 年在常熟举办，包括环湖公路测试和城市道路测试，全程 18 公里，共有 18 支队伍参赛，最终北京理工大学获得冠军。

第六届比赛于 2014 年在常熟举办，比赛内容包括通过拱桥、驶入/驶出高架桥匝道、交叉路口通行等科目，共有 22 支队伍参赛，军事交通学院取得了冠军。

第七届比赛于 2015 年也在常熟举办，此次比赛主要侧重于真实道路环境测试，共有 20 支队伍参加比赛，军事交通学院的猛狮车队夺冠。

2016 年第八届“中国智能车未来挑战赛”在常熟举行（图 1-8），本次比赛包括真实综合道路环境测试和认知能力离线测试两部分。其中道路环境测试分为真实高架快速道路测试（约 22 公里）和城区道路测试（约 6 公里），考察在遵守道路交通安全法规、减少交通事故前提下无人驾驶车辆的交通场景识别能力及不同道路环境的适应性和正常行驶 4S 性能（即安全性（Safety）、舒适性（Smoothness）、敏捷性（Sharpness）和智能性（Smartness），也是首次提供真实高架快速道路、城区道路的测试环境与条件；认知能力离线测试是首次在真实道路交通场景数据库基础上，通过仿真环境评估无人驾驶车辆的视觉信息环境认识基础能力。另外，本届比赛首次实现无人机与无人驾驶车协同。



图 1-8 比赛中的智能汽车

2016 年 12 月中国智能汽车大赛（CIVC）在上海国际汽车城国家智能网联汽车(上海)试点示范区封闭测试区举行（图 1-9）。大赛定位于行业高端交流平台和技术实践测评标尺，旨在通过汽车智能化功能测试、汽车自动驾驶测试和汽车智能互联测试等一系列立体化、实践性、全方位的测评，促进中国智能汽车行业发展进步。



图 1-9 来自国内部分院校、研究机构及汽车制造商的 19 支参赛队伍

2017 年 6 月 28 日至 30 日，世界智能驾驶挑战赛(WIDC)在天津举行（图 1-10）。赛事由无人驾驶组、智能辅助组、信息安全组三个组别组成，其中无人驾驶组有 19 支车队参赛，智能辅助组有 20 支车队参赛，信息安全组有 24 支车队参加。无人驾驶组比赛设置初赛和

决赛，共测试 15 个场景；智能辅助组比赛包含自动泊车（AP）、自动紧急制动（AEB）、车道偏离预警与保持（LDW&LKA）三个测试项目，主要针对装有智能辅助驾驶系统的量产车进行测评，从而为消费者提供汽车智能化水平的信息；信息安全组比赛主要针对具有智能化功能的汽车进行信息安全的攻防测评，从而推动全球汽车信息安全技术进步和发展。



图 1-10 参加世界智能驾驶挑战赛的车辆通过非机动车横穿测试项目点

1.6. 汽车自动驾驶产业概述

传统车企一般采取从辅助驾驶到自动驾驶的逐步递进方案，20 世纪 90 年代已经出现了能够批量生产装车的辅助驾驶系统。2000 年之后，辅助驾驶得到了越来越多的关注，各车企也都投入了大量的研究资源，与此同时，越来越多的辅助驾驶系统出现在了高端车型上。近年来，辅助驾驶逐渐过渡到中低端车型。图 1-11 为我国学者于 2012 年调研得到的辅助驾驶系统的消费认知度情况，可以看出此时辅助驾驶系统已经得到了较为广泛的关注^[13]。

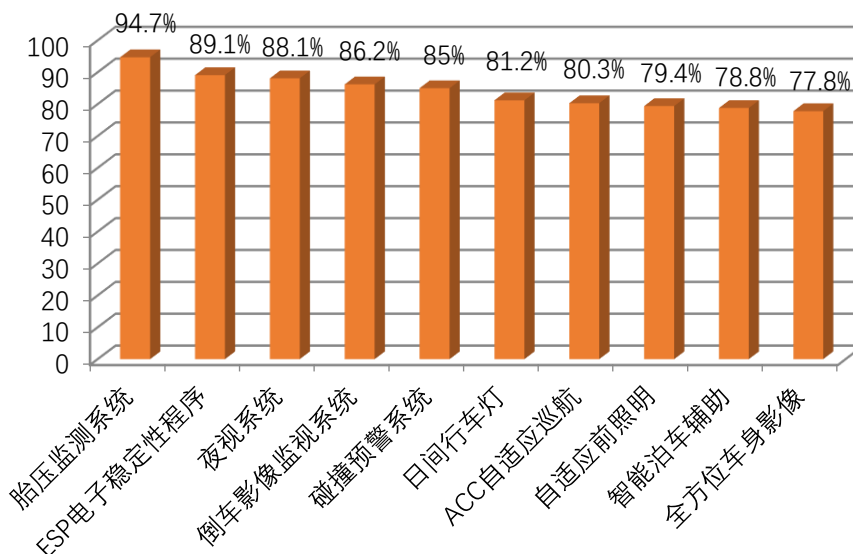


图 1-11 辅助驾驶系统认知度

1.7. 智能驾驶社会效益与影响

1.7.1 安全性-减少交通事故

2012 年我国平均每天约 280 人因交通事故伤亡，相当于一次重大空难。驾驶员的责任是交通事故的主要因素，很多时候道路的拥堵也是由于人为的乱并道、乱超车、不按规定速度行驶等不文明行为造成的，驾驶员注意力分散导致交通事故。

智能驾驶不受人的心理和情绪干扰，遵守交通法规，按照规划路线行驶，可以有效减少人为所造成的交通事故和拥堵。同时，智能驾驶汽车能够比人类更加精准地计算和使用路权，通过车联网共享交通资源信息，可以最大化利用城市的道路资源。

1.7.2 经济性-促进节能减排

智能驾驶可以更合理地操控和切换驾驶模式、控制车辆的提速和减速，避免由于驾驶员的不良驾驶习惯导致的车辆能源消耗和尾气排放等问题。电动智能车可以在空闲时间自动到指定位置充电，也为电动汽车的充电问题提供了解决方法。从这个意义上讲智能驾驶对城市环境改善是有贡献的。如果将智能驾驶汽车与智能交通、云计算相结

合，构建城市智能车指挥调度服务中心，共享交通资源，实现最优的交通出行，将道路上行驶的汽车变成一个个小型的为公众提供服务的电动智能车，将大大减少城市汽车的保有量，可能有望解决城市交通拥堵难题。

智能卡车编队使得，一排卡车排成一排，以固定间距、同样车速行使在路上。这并不是因为司机们有默契或车技好，而是因为采用了车队一体智能驾驶行车系统。日本研究机构 2013 年 2 月 25 日展示了这一高效行驶、节能环保的新技术：4 辆卡车分别保持 4 米间距、以时速 80 公里的同一速度进行了试跑。每辆卡车上都安装了自动驾驶系统，通过车辆间的通信，各辆车可以共享速度和刹车等信息，从而使得系统能够同时控制多辆卡车。研究机构表示，安装这一系统的卡车能以很短的车间距排成队列自动行驶，减少空气阻力，避免不必要的刹车，大幅提高燃油效率。上述测试结果显示，与车辆各自行驶相比，能够节省油耗 15% 以上。这一技术有望应用于行驶在高速公路上的汽车车队。

在智能网联时代来临之际，国内汽车厂商在卡车智能驾驶技术方面紧跟国外行业的发展步伐，一汽解放于 2017 年 4 月份完成国内首次实车演示后，成为国内首个进行高速公路实测的商用车品牌，并与 10 月 6 日，在长春举行解放智能卡车高速公路实车测试活动^[15]。由 3 台解放牵引车组成的集装箱运输车队，在长深高速完成了本次测试，这是国内商用车首次在高速公路环境下实现智能驾驶功能的应用。智能驾驶技术的成功研发，彰显了以一汽解放为代表的国内汽车厂商雄厚的研发实力，不仅能为司机朋友带来更加舒适便捷的操作体验，也将为驾驶提供更多安全可靠的有力保障。

1.7.3 互联性-推动社会变革

智能驾驶将带来汽车下游产业链的巨大变革，比如汽车驾校的低

迷、陪练市场的萎缩、出租车行业的失业、代驾行业的彻底消失、汽车维修行业和保险行业的改变等。麻省理工大学学者埃里克·布吕诺尔夫松和安德鲁·麦卡菲在《与机器的赛跑》一书中阐述了这样的观点：谷歌智能驾驶汽车中包含的计算技术进步代表下一波新技术到来，而这些技术将减少全社会的工作机会。许多眼下被认为是非常有保障的技能（比如开车）的价值最终可能一文不值。

也有观点认为，由于安全性提高，投汽车保险的人可能锐减，汽车保险公司和经纪人也将面临失业，智能驾驶汽车还将导致急诊室和骨科业务量下降。每年因为交通违规而收到大量罚款的政府，可能也面临着财政收入的下降等。斯坦福大学汽车研究中心布莱恩特·沃克·史密斯表示，智能驾驶汽车“挑战了城市和国家中所有门类的传统收入模式”。

1.7.4 行业性-改变传统产业发展，行业交互共赢

智能汽车从根本上改变了传统的“人一车一路”闭环控制方式，将不可控的驾驶员从该闭环系统中请出去，减少了人为影响因素，由机器驾驶脑实现精确的机器控制，从而大大提高了交通系统的效率和安全性。

不少专家预测，智能车在 10~20 年内无法真正实现产品化。不过，这并没有阻碍智能车研究的进一步发展。相反，越来越多的汽车厂商开始加入到研究队伍中。现代智能车以传统汽车工业为基础，以现代的环境感知技术为依托，以新技术革命为动力，以改善人们的生活品质为目标，遵循由低到高、由少到多、由单点到多面、不断集成和上升推进的规律发展。其横向发展离不开各种用途的实际需要，而其纵向发展的生命力在于持续不断的技术创新。

1.8. 国内外相关政府政策

世界各国都在积极制定自动驾驶普及路线图，放宽无人驾驶汽车

与无人机相关法律法规^[14]，如图 1-12 所示。

	North America (US)	Europe	China	Japan
Current Legislative Environment	No uniform approach at the federal level; patchwork of states with autonomous laws that serve to foster R&D but are prohibitive. Electronic Stability Control mandated on all vehicles produced after 2011.	Similar to US, no formal European Union oversight; however, individual countries have created varying degrees of autonomous testing regulatory frameworks.	Government has been quiet on the topic, but most believe supportive to innovation for autonomous vehicles.	Current law does not allow L4 autonomous driving. However, OEMs can perform R&D on public roads with permission each time from Ministry of Land and National Police Agency.
New Car Assessment Program (NCAP)	US NCAP does not currently take active safety features into account for vehicle ratings star, but does recommend crash avoidance technologies like forward collision warning, lane departure warning, and rearview video systems. However, we believe inclusion into NCAP star ratings being considered.	Euro NCAP Advanced rewards vehicles for safety technologies (e.g., blind spot monitoring, lane support systems, vision enhancement systems, and autonomous emergency braking).	C-NCAP includes potential for 1 safety bonus point for electronic stability control. Absent this, there is no formal inclusion or recommendation for advanced safety technologies. However, active safety features are expected to be included in 2018.	JNCAP includes advanced safety assessment for new technologies to avoid accidents: autonomous emergency braking systems and lane departure warnings systems.
Barriers to Autonomous Vehicles	Prohibitive patchwork of state regulations, no formal federal target. Requirements vary: trained expert, special license, minimum number of autonomous miles prior to public road testing.	More lenient patchwork of individual country regulatory frameworks than the US. However, must amend Vienna convention.	Appear low given lack of formal regulation and willingness to include in future NCAP.	Government has positive attitude to autonomous driving, but progress of the discussion is slow compared to the US and Europe.
Upcoming Milestones	DOT/NHTSA have issued notice of proposed rulemaking that may lead to mandate for V2V technology; update expected by end of 2015. However, no formal target for autonomous vehicles.	"Drive Me" test by Volvo in Gothenburg, Sweden of 100 driverless cars from 2017 to 2019. Though some regulatory clarity in Sweden is required. NCAP inclusion of pedestrian automatic braking in 2016.	2018 C-NCAP draft rule expected to circulate at end of 2015, expected to include active safety and collision prevention into its five-star requirement.	Cabinet Office is targeting L2 autonomous driving by 2017, L3 autonomous driving in early 2020s, and L4 autonomous driving in late 2020s.
GS target date for first autonomous vehicles	2025	2025	2030	2028

图 1-12 高盛报告中全球各个地区对智能汽车的政府政策框图

1.8.1 国外情况

1) 美国：

2012 年 5 月 8 日，谷歌的智能驾驶汽车在美国内华达州上路测试。内华达州是允许谷歌智能驾驶汽车上路测试的第一个州，该州的机动车辆管理局(DMV)向谷歌发出首张许可证，测试的内容是检测谷歌的智能驾驶汽车如何在拥挤的街道和高速公路上行驶及做出各种反应。内华达州一直领导着允许智能驾驶汽车上路的立法工作。2011 年，内华达州立法委员会通过了美国第一部允许测试智能驾驶汽车的法案。据该法案规定，在对智能驾驶汽车进行测试时，车内必须搭载两名测试人员，一人坐在驾驶位，另一人坐在副驾驶位。2012 年 9 月，由美国谷歌公司注入智能驾驶技术的汽车已获美国加利福尼亚州法案通过，2015 年起可以在加州内的道路上行驶，这标志着智能驾驶汽车已被合法化。

美国通过立法的形式，制定《联邦机动车辆安全标准》；推动车辆强制安装 DSRC；高速公路安全管理局制定自动驾驶汽车指导方针和政策框架；成立交通变革研究中心，推进示范测试，从战略、立法、测试层面上都有全面的布局。

2) 欧盟

欧盟在顶层设计、重大研发规划上做了很多工作，未来交通研究计划中强调了车车、车路通信，强调了人车路一体化和道路安全。

2015 年 2 月，欧盟携欧洲十几家整车制造商和零配件供应商共同推出“Adaptive”项目（Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles，“智能车辆自动驾驶应用和技术”），旨在开发能在城市道路和高速公路上行驶的部分或完全自动化汽车。该项目预计持续 3 年半时间，将获得欧盟 2500 万欧元资金支持。

“Adaptive”项目总部设在德国大众汽车集团总部所在地——沃尔夫斯堡。参与该项目的整车制造商有大众、宝马、标致雪铁龙、雷诺、沃尔沃、福特、菲亚特、欧宝、戴姆勒等，零配件供应商有博世、大陆、德尔福等，其他项目参与方还包括研究中心、大学和一些欧洲的中小企业。欧洲部分国家因受《维也纳协定》（道路交通公约部分）的限制，目前无法实现无人驾驶汽车的应用。因此，除进行技术研发外，“Adaptive”项目还将研究与无人驾驶汽车匹配的标准和道路交通安全法律法规。

德国汽车厂商早于几年前就推出了无人驾驶汽车概念车。去年开始，德国无人驾驶汽车的应用迈出了阶段性一步：博世公司首先在德国高速公路上进行了无人驾驶汽车测试；随后，梅德赛斯-奔驰公司在高速公路、城市交通和乡间道路上进行了无人驾驶汽车的实地测试。随着测试的成功，德国开始对无人驾驶汽车的研究更进一步。2014 年 6 月开始，德国汽车业界展开了对是否需要在无人驾驶汽车上安装黑匣子的讨论。在一些德国厂商看来，类似航空业使用的“黑匣子”设备可帮助保险公司和汽车制造商借助采集行车速度、传感器、驾驶者状况等数据进行调查，分清车祸责任方在汽车、驾驶人还是其他第三方因素。

法国为实现工业复兴，曾于 2013 年推出了《新工业法国》战略，着重培育发展 34 个工业部门，无人驾驶汽车就是其中的一项内容。2014 年 2 月，法国公布了无人驾驶汽车发展路线图，投资 1 亿欧元，利用三年时间重点研发无人驾驶汽车，2015 年开始进行无人驾驶汽车实地测试。法国的重要汽车生产企业和零配件供应商，如标致雪铁龙、雷诺、瓦雷奥等都参与了这一项目。法国政府看好无人驾驶汽车前景。一方面，法国政府认为，无人驾驶汽车有助于提高道路安全（90% 的交通事故都是人为造成）、提高驾驶者生活质量（平均每人每天开车时间达 78 分钟）、改善公共交通；另一方面，法国政府预计未来十年，无人驾驶汽车市场将达数十亿欧元，颇具发展潜力。法国汽车业界预计于 2020 年向市场推出第一批无人驾驶汽车。为保证无人驾驶汽车的顺利发展，法国已于 2016 年年底实现全国数千公里道路的联网，并推动道路交通法律法规的修订，满足无人驾驶汽车上路要求。此外，还将向全球汽车生产商开放道路进行无人驾驶汽车的试验。

5) 英国

英国研究无人驾驶汽车已有几年时间，牛津就有企业开发了一款半自助的智能汽车，允许乘客在需要的情况下自动驾驶。根据英国科学部部长的描述，这款汽车比谷歌的无人驾驶汽车造价低。英国政府已表示 2017 年首次允许无人车在高速公路及重要道路上进行试驾，其中沃尔沃于 2017 年初在英国测试无人驾驶汽车。根据 HIS 调研公司的报告，到 2035 年，全球道路上约有 5400 万辆无人驾驶汽车。为迎接无人驾驶汽车的到来，英国还将修改相关的道路交通法规，目前已由英国科学部与交通部开始着手研究。

6) 日本

早在 2015 年 10 月，日本政府就酝酿针对自动驾驶汽车启动立法。2016 年上半年，日本经济贸易产业省成立了一个研究小组，决定

联手车企在地图、通讯、人类工程学及其他领域展开合作，以实现到 2020 年在公共道路上测试自动驾驶汽车。2017 年 5 月，日本已经制定了自动驾驶普及路线图，表明自动驾驶汽车（有司机）将在 2020 年允许上高速公路行驶。在最新发布的规划里，已经把联网、智能化、道路安全概念融合在一起，规划分成辅助驾驶、V2X 和更高级的道路安全三个阶段^[16]。

法规方面，日本首相安倍晋三曾声明，将放宽无人驾驶汽车与无人机的相关法律法规，在 2017 年允许纯自动驾驶汽车进行路试。而日本国土交通省则决定最早将于 2017 年秋季制定有关在高速公路同车道行驶的自动驾驶安全法规。

目前，针对自动驾驶汽车引发事故的责任所属问题，日本警视厅已经开始进行法律层面的探讨，同时日本政府正在着手修订《道路交通安全法》和《道路运输车辆法》等相关法规，并计划展开关于自动驾驶汽车发生事故的赔偿机制的讨论。提到自动驾驶汽车发生事故的赔偿机制，日本的东京海上日动火灾保险已经明确，从 2017 年 4 月起，把自动驾驶期间的交通事故列入汽车保险的赔付对象，据悉这是日本国内首例以自动驾驶为对象的保险。

1.8.2 国内情况

2015 年，国务院印发了《中国制造 2025》，将智能网联汽车列入未来十年国家智能制造发展的重点领域，明确指出到 2020 年要掌握智能辅助驾驶总体技术及各项关键技术，到 2025 年要掌握自动驾驶总体技术及各项关键技术。同年，《中国智能网联汽车标准体系建设方案》（第一版）出台^[17]。

2016 年 6 月，中国汽车技术研究中心党委书记于凯在第二届智能网联汽车技术及标准法规国际研讨会透露，全国汽车标准化技术委员会已经完成《先进驾驶辅助系统术语和定义》ISO 标准草案的准备

工作。8月，工信部网站发布了“三部门关于印发《装备制造业标准化和质量提升规划》的通知”，“规划”要求开展智能网联汽车标准化工作，加快构建包括整车及关键系统部件功能安全 and 信息安全在内的智能网联汽车标准体系。10月底，《中国智能网联汽车技术发展路线图》发布，以引导汽车制造商的研发以及支持未来政策制定。

目前由工信部组织起草的智能网联汽车标准体系方案已形成标准框架体系，该标准体系框架包括基础、通用规范、产品与技术应用、相关标准四个主要部分，其中基础和通用规范涉及网联化共性的基础标准；产品与技术应用涉及具体的设计标准，是该框架的主干部分，包含信息采集、决策报警、车辆的控制等方面的细则。而相关标准则涉及到信息交互、通讯协议、接连接口等。

同时，智能网联汽车分技术委员会也在申请成立，计划吸纳相关领域专家共同研究制定相关技术标准；智能辅助技术信息安全等具体标准制定工作也在加快推进。今年年底，通用汽车携手清华大学和长安汽车一起牵头拟定的中国网联汽车技术(V2X)应用层标准也将发布第一版标准。

2017年6月7-8日，由全国汽车标准化技术委员会主办的“第三届智能网联汽车技术及标准法规国际研讨会（ICV 2017）”在上海揭开帷幕。来自工业和信息化部、国家发展和改革委员会等政府主管部门、联合国等国际组织、国内外汽车及相关产业的技术机构和骨干企业的专家、学者及行业精英共计300多人出席会议。

第 2 章环境感知篇

2.1 智能驾驶感知任务

智能驾驶的核心不在车而在人，是物化驾驶员在长期驾驶实践中，对“环境感知-决策规划-控制执行”过程的理解、学习和记忆。环境感知作为第一环节，处于智能驾驶车辆与外界环境信息交互的关键位置，其关键在于使智能驾驶车辆更好地模拟人类驾驶员的感知能力，从而理解自身和周边的驾驶态势。

相机、雷达、定位导航系统等为智能驾驶车辆提供了海量的周边环境及自身状态数据，这些以图像、点云等形式呈现的数据包含了大量与驾驶活动无关的信息。选择性注意作为人类自然感知的重要特征，可以帮助智能驾驶车辆聚焦当前驾驶行为，确保智能驾驶的安全性和实时性。环境感知需要遵照近目标优先、大尺度优先、动目标优先、差异性优先等原则，采用相关感知技术对环境信息进行选择性处理。

2.2 智能驾驶的感知盲区

人类驾驶员受限于视野范围，存在诸多驾驶盲区。智能驾驶车辆上安装的每类传感器也都有自身的感知盲区。实际上，这些区域仅相对于特定时刻而言，随着车辆的行进在下一时刻即会产生新的盲区。智能驾驶过程中，通过组合使用多类传感器和运用时序关联的感知技术，可以缩小感知盲区的范围，一般不会影响正常驾驶。

2.3 环境感知功能系统构成

智能驾驶车辆获取和处理环境信息，主要用于状态感知和 V2X 网联通信。状态感知主要通过车载传感器对周边及本车环境信息进行采集和处理，包括交通状态感知和车身状态感知。V2X 网联通信是利用融合现代通信与网络技术，实现智能驾驶车辆与外界设施和设备之

间的信息共享、互联互通和控制协同。

交通状态感知功能的实现依赖于环境感知传感器及相应的感知技术。按照获取交通环境信息的途径,可将这些传感器分为两类:1) 被动环境传感器,该类传感器自身不会发射信号,而是通过接收外部反射或辐射的信号获取环境信息,主要包括相机等视觉传感器和麦克风阵列等听觉传感器;2) 主动环境传感器,该类传感器主动向外部环境发射信号进行环境感知,主要指激光雷达、毫米波雷达和超声波雷达。

车身状态感知功能的实现主要基于 GPS (Global Position System, 全球定位系统)、北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 等设备,旨在获取车辆的行驶速度、姿态方位等信息,为智能驾驶车辆的定位和导航提供有效数据。

V2X (即 Vehicle to Everything, 车辆同所有交通参与者) 网联通信强调了车辆、道路、使用者三者之间的联系,主要利用 RFID (Radio Frequency Identification, 射频识别)、拍照设备、云服务器等获得实时路况、道路信息、行人信息等一系列交通信息,从而提高驾驶安全性和驾驶效率。

2.4 系统硬件配置方案

可用于智能驾驶环境感知的硬件设备有很多,主要包括相机、激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达、GPS、BDS、INS 等,目前智能车上采用的配置方案往往是多种型号或多种类型设备的组合,如图 2-1 所示。

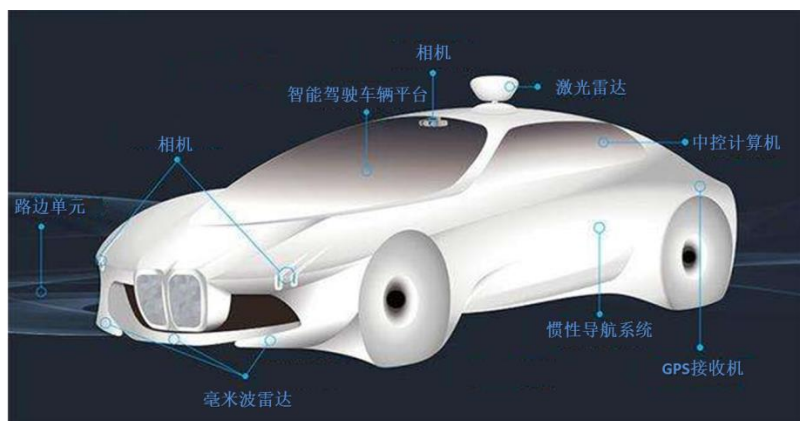


图 2-1 智能车环境感知系统硬件配置示意图

一般来讲，感知设备种类越多、价格越贵，精度相对越高、识别范围相对越大。但是每种感知设备都有其局限性。

无论是单目相机、双目相机，还是多目相机、深度相机，无论像素再清晰、采样速率再高，也无法解决所有图像采集和处理的难题。由于道路环境、天气环境的多样性、复杂性以及智能驾驶车辆本身的运动特性，相机容易受到光照、视角、尺度、阴影、污损、背景干扰和目标遮挡等诸多不确定因素的影响。而在驾驶过程中，车道线、交通灯等交通要素存在一定程度的磨损、反光是常态，因此不存在完全理想的相机。

雷达对光照、色彩等干扰因素具有很强的鲁棒性，激光雷达、毫米波雷达和超声波雷达也都有各自的优势。但是安装多少数量/种类的雷达、选取多高的采样速率，都不可能彻底解决凹坑反射、烟尘干扰和雨、雪、雾等恶劣天气条件下的探测难题，也难以实现真正的全天候、全天时、全三维，因此雷达不可能完美。

定位导航系统为智能驾驶提供了高精度、高可靠定位、导航和授时服务，RTK（Real-Time Kinematic，载波相位差分技术）+INS组合更是为实时精准定位和位置精度保持奠定了重要基础。但是无论位置服务公共平台多好、陀螺精度多高，还是存在采样频率不够、地理

环境过于复杂、初始化时间过长、卫星信号失效等问题，因此定位导航系统总是存在缺陷。

可见，没有完美的感知设备，设备不理想是常态，也不存在完美无缺的设备组合方案。然而对于不同的驾驶任务而言，需要不同的感知设备种类和类型，并非要配置最全、最多、最贵的感知设备才能完成驾驶任务，而是要以任务需求为导向，有针对性地选取合适的感知设备，组合实现优化配置。

2.5 传感感知技术

感知功能的实现既需要合适的感知设备，也离不开相应的感知技术。环境感知功能分工的不同，决定了所需感知设备和感知技术的差异。其中，交通环境感知是车辆对外界环境信息的捕获和处理，主要基于车载传感器和传感感知技术。按照传感器获取的信号类型，可分为相机视觉、雷达传感和听觉传感。

2.5.1 相机视觉

人类在驾驶过程中所接收的信息大多来自视觉，例如交通标志、道路标志、交通信号等，这些视觉信息成为人类驾驶员控制车辆的主要决策依据。在智能驾驶中，相机取代人类视觉系统作为交通环境感知的传感器之一。相较于其他传感器，视觉传感器安装使用的方法简单、获取的图像信息量大、投入成本低、作用范围广，并且近些年更是得益于数字图像处理技术的快速发展和计算机硬件性能的提高。但是在复杂交通环境下，视觉传感器依然存在目标检测困难、图像计算量大、算法难以实现的问题，视觉感知技术在应对道路结构复杂、人车混杂的交通环境时也还存在很多不足。

（1）视觉传感器

智能驾驶中配置的视觉传感器主要是工业相机，与民用相机相比

具有更大优势，例如较高的图像稳定性、传输能力和抗干扰能力。

按照输出的数据信号，工业相机可分为模拟式和数字式两种。模拟相机的输出为模拟电信号，需要借助视频采集卡等组件完成数字信号转换，该类相机连线简单、成本较低，但是转换速率慢；数字相机所采集的图像直接通过内部感光组件及控制组件转换为数字信号，该类相机采集速率快、数据存储方便，但是价格相对昂贵。

按照芯片类型，可分为 CCD（Charge-Coupled Device，电荷耦合元件）相机和 CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor，互补金属氧化物半导体）相机。CCD 相机由光学镜头、时序及同步信号发生器、垂直驱动器及模拟/数字信号处理电路组成，具有无灼伤、无滞后、低电压、低功耗等优势；CMOS 相机集光敏元阵列、图像信号放大器、信号读取电路、模数转换电路、图像信号处理器及控制器于一体，传输速率高、动态范围宽、局部像素可编程随机访问。

除了以上两种常见的分类方法，工业相机还可以按照传感器的结构特性分为线阵相机和面阵相机；按照输出图像的色彩分为黑白相机和彩色相机；按照响应频率范围分为普通相机、红外相机和紫外相机；按照扫描方式分为逐行扫描相机和隔行扫描相机等；按照接口类型分为网络相机、1394 相机和 USB 相机，如图 2-2 所示。



图 2-2 三种接口类型的相机

(2) 视觉感知技术

视觉感知技术主要包括三种：1) 单目视觉技术，即通过单个相

机完成环境感知任务，具有结构简单、算法成熟并且计算量较小的优点，但是感知范围有限、无法获取场景目标的深度信息；2) 立体视觉技术，基本原理是采用 2 个（或多个）相机从不同视点观察同一目标，并通过计算图像像素间位置偏差恢复三维场景，难点在于寻找多个相机图像中匹配的对应点；3) 全景视觉技术，成像视野较宽，但图像畸变较大、分辨率较低。

单目视觉技术多用于智能车辆的车道级定位、识别道路几何结构、检测周边的车辆或行人等障碍物、识别交通灯和交通标志等，主要包括车道检测与跟踪技术、障碍物检测与跟踪技术、交通灯及交通标志识别技术、基于视觉的 **SLAM** 技术和视觉里程计技术等。

立体视觉技术常用于相机标定、图像匹配和障碍物检测。相机标定的方法包括传统标定法、主动视觉标定法和自标定法，三种标定方法在鲁棒性、计算精度和算法复杂程度上各有优劣；图像匹配有区域匹配法、特征匹配法和相位匹配法，在对图像的量化程度上有所差异；障碍物检测的方法有逆投影变换法和 **V** 视差图法，前者对相机参数较为敏感，后者对视差图要求较高。

全景视觉技术一般分为四类：单相机 360° 旋转式成像、鱼镜头相机成像、多相机拼接成像和折反射全景成像。其中，单相机 360° 旋转式成像对系统可靠性要求较高，鱼镜头相机成像需要标定和畸变校正，这两种技术获取的图像视角较宽；多相机拼接成像可实现全景实时拼接，但标定复杂、成本较高；折反射全景成像具有自动化、小型化和集成化的特点，成像特性取决于反射镜面的形状。

近年来，深度学习（**Deep Learning**）在计算机视觉和图像处理领域的应用取得了巨大成功，基于深度学习的图像处理成为智能驾驶视觉感知的重要支撑。深度学习的输入可以为原始的图像像素，通过构建含有多隐层的机器学习模型模拟人脑的多层结构。经逐层抽取得到

的信息特征，相比传统图像处理算法构造的特征更具表征力和推广性，大大地提高了目标检测和识别的准确性。在智能驾驶视觉感知中，深度学习多用于对车辆、行人、交通标志等交通要素的检测和识别。由于深度学习需要大数量、多样性的数据集，而且对计算平台的性能要求高，目前大多仅应用于离线数据的处理。

（3）测试评价

在智能驾驶中，相机视觉必须具备准确性、实时性和鲁棒性三方面的技术特点。准确性是指图像处理过程中应该能够有效提取与驾驶活动相关的交通要素；实时性是指视觉感知系统的数据处理必须与智能车辆的高速行驶同步；鲁棒性是指视觉感知算法对于经常变化的天气条件和道路环境需要具有良好的适应性。视觉传感器的配置参数和视觉感知技术的算法优劣共同决定了视觉感知系统的性能。

2.5.2 雷达传感

在国内外智能驾驶车辆开发过程中，传感感知技术研究的重点除了视觉就是雷达。雷达通过对目标发射电磁波并接收目标回波来获得目标的距离、方位、距离变化率等信息。得益于其主动探测的环境探测模式，雷达感知比视觉感知受外界环境的影响较低，近年来在智能驾驶中发挥的作用也较大。

（1）雷达传感器

雷达传感器一般由发射机、发射天线、接收机、接收天线、显示器、处理部分以及电源设备、数据录取设备、抗干扰设备等辅助设备构成。按照电磁波的波段，雷达分为三类：激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达，如图 2-3 所示。

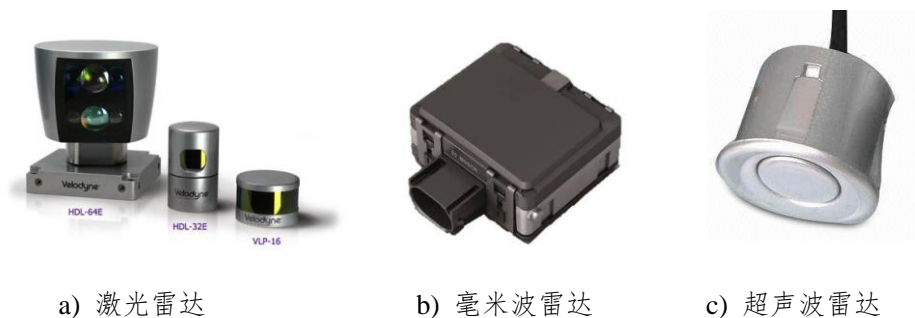


图 2-3 三种雷达传感器

1) 激光雷达

激光雷达工作在红外和可见光波段，是一种以激光为工作光束、使用光电探测技术手段的主动遥感设备。具有分辨率高、隐蔽性好、抗有源干扰能力强、定向性好、测量距离远、测量时间短的特点；不足之处在于技术门槛和成本较高，而且在云雾雨雪等恶劣环境中衰减严重。

根据探测原理，激光雷达分为单线（二维）激光雷达和多线（三维）激光雷达。单线激光雷达仅通过一条扫描线进行旋转扫描，获取二维扫描范围内的深度信息，如德国 **SICK** 光电设备公司研发的 **LMS** 系列，在智能驾驶中常用于自动跟车行驶；三维激光雷达，通过综合多条扫描线旋转扫描的结果，得到空间范围内的深度信息，能够有效捕获目标的基本特征和局部细节，测量精度和可靠性很高，如美国 **Velodyne LiDAR** 公司的 **HDL** 系列，常用于测距、测速和三维成像。

2) 毫米波雷达

毫米波雷达工作在毫米波波段，频率在 $30\sim 300\text{GHz}$ 之间。具有体积小、质量轻、分辨率高、抗干扰能力强且便于安装的特点，能够精确测量目标的相对距离和相对速度。但是由于毫米波是重要的雷达频段，在很多场合会受到干扰。

按照测距原理，可以将毫米波雷达分为两类：1) 脉冲式毫米波雷达，其基本原理与激光雷达相似，由于探测技术复杂、成本较高，

很少用于智能驾驶；2) 调频连续式毫米波雷达，具有穿透力强、精度高、稳定性高、抗干扰能力强的优势，能够在雨雪等恶劣条件下正常工作，而且结构简单、成本低廉，容易实现近距离探测。

3) 超声波雷达

超声波雷达工作在机械波波段，工作频率在 20KHz 以上。超声波雷达多用于测距，如图 2-4 所示，其基本原理是通过测量超声波发射脉冲和接收脉冲的时间差，结合空气中超声波的传播速度计算相对距离。超声波测距的优势主要有四点：对恶劣天气不敏感，穿透性强、衰减小；对光照和色彩不敏感，可用于识别透明和漫反射性差的物体；对外界电磁场不敏感，适用于存在电磁干扰的环境；原理简单、制作方便、成本较低，容易进行市场推广。但是超声波雷达也存在很大的不足，测距速度无法与光电测距和毫米波雷达测距相比，而且无法测量方位，应用领域受限。

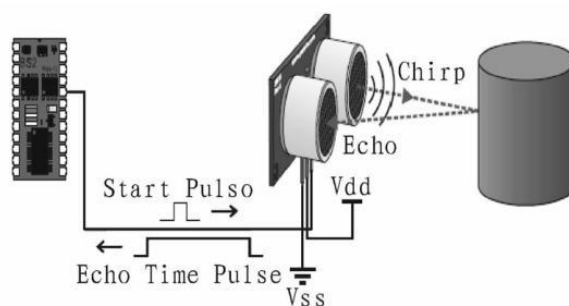


图 2-4 超声波测距原理示意图

雷达传感器对目标信息的感知来源于自身发送的电磁波。相比被动传感器而言，雷达受外界环境影响小，获取的深度信息可靠性高，测距范围和视角大、准确度高。另外，雷达每帧接收的点云数据量远小于相机记录的图像信息，更能满足智能驾驶对实时性的需求。

雷达的最大缺点在于制造工艺复杂、成本很高，在一定程度上使其广泛应用受到限制。我国在雷达研制方面实力不足时，常常受制于

国外雷达研制的技术垄断。2017 年 9 月,由中电 14 所联合清华大学、龙芯中科等单位研发的国产 “华睿 1 号” 专用 DSP, 在第三届军民融合发展高技术装备成果展览暨论坛活动中亮相。“华睿 1 号” 总体性能优于国内外同类芯片, 近几年先后成功应用于十多型雷达产品, 打破了国产雷达长期受到国外 DSP 技术封锁的现状。

(2) 雷达感知技术

智能驾驶感知过程中,毫米波雷达和超声波雷达的主要作用即为测距和测速,目前在盲点探测、自适应巡航、前/后方碰撞预警等技术中应用较为广泛。

除了距离和速度,激光雷达还能够较为准确地获取目标的形状、深度等信息。随着激光雷达性能的提高,相应的激光雷达感知技术也在不断发展。目前常用的感知技术主要有:

1) 障碍物检测与跟踪,关键在于同一时刻障碍点的聚类 and 不同时刻障碍物的匹配,基于深度学习的雷达障碍物检测逐渐成为近年来的研究热点,雷达与图像融合的障碍物检测技术研究也取得了一定成果;

2) 路面检测,主要是为了区分路面和道路上的其他目标障碍物,还可以通过检测路面材质和坡度为智能驾驶车辆决策和控制提供数据参考;

3) 定位与导航,基于激光雷达的 SLAM 在智能车定位中可以发挥重要作用,智能车通过检测路边障碍物位置判断道路走向并实现基于雷达的自主导航;

4) 三维重建,利用激光雷达获取的深度信息即可以实现智能车周围环境的三维场景重建。

2.5.3 听觉传感

目前大部分智能驾驶车辆仅依靠视觉感知和雷达感知,已经能够

完成绝大多数交通环境感知任务，因此往往忽略了听觉感知，很多智能驾驶车辆甚至是“聋子”。然而在人类驾驶员开车时，交通环境中有许多声音也会携带重要信息，例如喇叭、警笛等，这些信息能够帮助驾驶员做出即时反应，包括改变车辆行驶速度和行驶方向等。智能驾驶车辆同样需要对环境中的声音有所感知并做出反应，这些声音一般无法通过相机或雷达获取，而是需要开发车辆的“耳朵”，让听觉传感感知系统能够真正发挥作用。

（1）听觉传感器

按照相对于智能车辆位置区域的范围，听觉感知能力可分为三类：1) 个域听觉感知，即“听”车厢内的声音，主要是根据感知到的异常声音判断发动机等汽车零件的运行情况；2) 局域听觉感知，通过辨识车体周边一定范围内的相关声音并做出反应；3) 广域听觉感知，即感知电磁波中的音频以获取最新道路信息等。个域听觉感知和局域听觉感知一般是通过麦克风阵列采集车体内部及外界环境中的声音信息，而广域听觉感知多是通过车载电台、手机、网络终端等平台获取无线通信系统承载的音频信息。

（2）听觉感知技术

听觉感知系统主要涉及三种关键技术：声源定位技术、音频识别技术和软件无线电技术。

声源定位是一种接收声场信息并利用电子装置确定目标声源位置的被动声探测技术，主要目的是计算信号源相对于麦克风阵列的方位和距离。目前常用的声源定位技术按其定位原理可分为三大类：1) 基于最大输出功率的可控波束形成技术，关键在于对接收的信号滤波及加权求和，并控制阵列波束指向最大输出功率对应的方向；2) 基于高分辨率谱估计的定位技术，通过求解所接收信号与阵列间的相关矩阵确定信号源方向和位置；3) 基于声达时间差的定位技术，主

要是利用声源信号到每个麦克风阵元的时间差估计来实现测向和测距。

音频识别技术是通过将输入的音频信号进行识别和理解并转变为相应的文本或命令。传统的音频识别一般分为训练和识别两个阶段：首先对获取的音频信号进行预处理和特征提取，之后通过训练生成词条模板库，在识别时利用模式匹配等方法比较待测信号与模板库中的参考模板，最后将得到的最佳匹配作为识别结果。近年来，深度学习在音频识别领域的应用越来越多，大大提高了识别效率和准确率。在车辆的行驶环境中，包含内容丰富多变的音频信息，智能驾驶只需重点感知与驾驶活动相关的信息。有用的音频信息包括人类语音和汽车警笛两类，其中语音识别主要涉及语种识别、说话人识别、语音关键词识别等，可用于人机交互等；警笛声识别的目的在于通过不同的基频模式区分救火车、救护车、警车等特殊车辆，为智能驾驶车辆换道、超车等提供依据。

软件无线电是一种用软件来操纵、控制硬件平台的数字化通信方式。如图 4-5 所示，软件无线电平台一般由宽带/多频段天线、宽带 A/D 或 D/A 转换器、DSP（Digital Signal Processing，数字信号处理）处理器以及实时操作系统构成。该技术的基本思想是尽量将宽带模数（A/D）转换器和数模（D/A）转换器向射频天线靠近，建立一个具有开放性、可编程性的模块化的通用硬件平台，并且在该平台上通过安装不同的软件模块实现电台各种功能，例如信道分离、选择通信频段、信息收发、选择调制解调方式、实现不同的保密结构和网络协议等。

2.6 定位与导航技术

智能驾驶的基础是自主导航，不仅需要获取车辆与外界环境的相对位置关系，还需要通过车身状态感知确定车辆的绝对位置，因此定

位与导航也是环境感知的关键技术之一。

2.6.1 感知态势的基准

智能驾驶车辆的位置数据不可能脱离感知态势的基准(常说的坐标系)而独立存在,不同的基准对应的车辆定位表现结果有很大差异。目前在智能驾驶中常用的基准包括:大地坐标系(WGS-84/ CGCS 2000)、摄像机坐标系、图像坐标系、雷达坐标系、驾驶员认知坐标系等。选定基准之后,将车身姿态、周边环境 and 地图等信息都进行映射并标注,生成基于这些坐标系的一张或多张图上。在这些图中,基于驾驶员认知坐标系的驾驶态势图能够更好地体现选择注意性,可以与车辆实现同步移动。

2.6.2 设备组成和种类

(1) 卫星导航系统

卫星导航系统都由空间段(导航卫星)、地面段(地面观测站)和用户段(信号接收机)三个独立部分组成,如图 2-5 所示。卫星导航的基本原理是测量已知位置的卫星到用户接收机之间的距离,并综合多颗卫星的数据计算出用户所在地理位置信息。

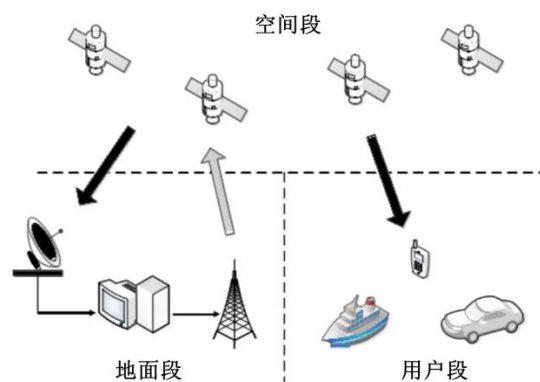


图 2-5 卫星导航系统组成示意图

目前主要有 GPS、北斗卫星导航系统、GLONASS 和 GALILEO 四大全球卫星导航系统,我国常用的为 GPS 和北斗卫星导航系统。

GPS 是由美国国防部研制的全球首个定位导航服务系统,空间段由平均分布在 6 个轨道面上的 24 颗导航卫星组成,采用 **WGS-84** 坐标系;北斗卫星导航系统是中国自主研发、独立运行的全球卫星定位与通信系统,是继美国的 **GPS**、俄罗斯的 **GLONASS** 之后第三个成熟的卫星导航系统,空间段包括 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星,采用我国独自建立使用的 **CGCS 2000** 坐标系。这两种导航系统都可在全全球范围内全天候、全天时为用户提供高精度、高可靠的定位、导航和授时服务,北斗卫星导航系统拥有更多的地球同步轨道卫星,还兼具短报文通信能力。

卫星导航定位技术按照定位方式分为单点定位技术和相对定位技术:单点定位是根据单独一台信号接收机的观测数据确定用户绝对位置的方式,容易受到系统性偏差的影响;相对定位是利用两台以上接收机的观测数据来计算观测点相对位置的方法,定位精度较高。相对定位又分为静态定位和动态定位两种类型,其中实时动态定位 **RTK** 技术是一种新的常用的卫星定位测量方法。

RTK 是一种基于载波相位观测值的定位技术,利用了参考站和移动站之间观测误差的空间相关性。与以前的静态定位和动态定位不同,**RTK** 无需事后结算即可在野外实时得到厘米级的定位精度,成为卫星定位应用的重大里程碑。**RTK** 属于广域定位技术,对天气状况和周边障碍物不敏感,但还是存在几点问题:1) 初始化时间较长,主要受到卫星数、电离层、多路径等综合影响;2) 工作距离短,基站覆盖范围一般不超过 15km;3) 对卫星数量需求较高,在 6 颗以上卫星时作业较为可靠;4) 存在信号失锁,卫星信号常常在隧道、高楼等严重遮挡的环境下失效。这些技术缺陷限制了 **RTK** 技术的应用,网络 **RTK**(又称 **COS**)应运而生。网络 **RTK** 是由多个基站组成的网络,通过将数据统一传送至网络服务器,并由服务器根据移动站和网络中

基站的位置关系从最近的基站发送数据，或者在移动站附近虚拟出基站信息进行差分解算，从而提高移动站与基准站的误差相关性，获得高精度的定位结果。

（2）惯性导航系统

惯性导航系统（简称惯导）由陀螺仪和加速度计构成，通过测量运动载体的加速度和角速率数据，并将这些数据对时间进行积分运算，从而得到速度、位置、姿态和航向。惯导以牛顿力学定律为基础，工作原理是根据陀螺仪的输出建立导航坐标系并给出航向和姿态角，再根据加速度计的输出解算运动载体，实现惯性参考系到导航坐标系的转换。惯导属于推算导航方式，即在已知基准点位置的前提下根据连续观测推算出下一点的位置，因而可连续测出运动载体的当前位置。

惯性导航系统能够提供包括水平姿态、方位、速度、位置、角速度和加速度等的全面的导航信息，而且数据更新率高、连续性好、噪点低、短期精度和稳定性高。由于惯导是一种不依赖于外部信息、也不向外辐射能量的自主式导航系统，它不受外界电磁干扰的影响，具有全天候、全时段、全地域的工作特性。

由于导航信息是根据积分计算所得，惯导也存在其固有缺陷：定位误差会随时间而增大，数据的长期精度较低，而且无法获取时间信息。另外，惯导在每次使用之前需要较长时间的初始化，在智能驾驶过程中如果出现断电等突发状况，往往需要重新初始化。

交通环境复杂多变，单一的导航系统往往会受限于自身的不足而无法确保精准定位和导航，因此当前的智能驾驶车辆大多采用GPS/BDS + INS 的组合导航方式。

2.6.3 姿态和状态感知

智能驾驶车辆环境感知系统对车体的感知包括两部分：车身姿态感知和车身状态感知。姿态感知和状态感知对应的车辆信息不同，信

息来源也有所差异。

(1) 车身姿态感知：主要指对车辆航向角、侧倾角和俯仰角的感知，一般通过惯导或者陀螺仪来获取这些参数。

(2) 车身状态感知：主要包括对车辆行驶速度、纵向加速度、发动机转速、方向盘转角、节气门开度、制动主缸压力等车辆状态信息的感知。

2.6.4 测试技术

智能驾驶对定位导航系统的性能有一定的要求，需要通过测试得到性能指标数值作为衡量依据。测试指标一般包括：1) 首次定位时间，用于测试接收终端搜索信号的速度；2) 定位测速精度，一般包括水平和高程定位精度；3) 失锁重捕时间，能够反应接收终端在信号失锁后恢复定位的快慢；4) 跟踪灵敏度，主要评估定位状态下接收机维持定位精度所需的最小信号功率；5) 捕获灵敏度，代表了失锁状态下接收机捕获弱信号的能力。

实际驾驶时，车辆在不同场景下对导航系统的定位性能需求不同，例如，正常环境下需要关注的指标为跟踪灵敏度，但是在隧道等信号遮挡严重的环境中更需要关注捕获灵敏度。因此导航系统的性能测试一般会有针对性地设置特定场景。

按照卫星信号的产生方式，定位与导航性能测试包括实验室测试、实场测试和虚拟路测三种方法；按照测试的评估方式，可以分为一定场景下的性能一致性测试、极限值测试和余量测试。

2.6.5 数字地图

人类驾驶员开车离不开地图的指引，即使是没有借助纸质地图或者手机 App，实际上也在使用自己记忆中的地图。智能驾驶车辆上路也同样需要地图来辅助定位与导航，因此数字地图必不可少。

(1) 数字地图

数字地图是以数字形式将纸质地图的要素存储在计算机上，并可以显示在电子屏幕上的地图。数字地图能够表示远大于纸质地图的信息量，可以进行任意比例、任意范围的绘图输出，而且地图上的内容易于修改、组合和拼接。

数字地图主要有六个特点：1) 快速存取和显示；2) 可以动画形式呈现；3) 地图要素可分层显示；4) 图上的长度、角度、面积等要素可自动测量；5) 可进行传输；6) 利用 VR (Virtual Reality, 虚拟现实) 技术可将地图立体化、动态化。

(2) 驾驶地图

现有的城市地图、经济地图、旅游地图、摄影地图等都是立足于人类日常生活的需求，这些缺少智能驾驶所需的道路几何、物理属性等信息的地图不能看作是驾驶地图。驾驶地图有自己的特点和需求：

1) 驾驶地图是服务于驾驶车辆的专用地图。普通交通地图只需要精确至道路长度、宽度等粗略信息，对道路曲率、道路中的车道数目、车道的具体宽度等信息并不关注，而驾驶地图需要精确记录道路中每条车道的详细属性，对于车道标线的位置需要精确到分米甚至厘米级别；

2) 驾驶地图是变粒度的。现有交通地图的比例尺固定，对于不同道路环境设置的粒度相同。驾驶地图需要区分道路的复杂性，在高速公路、城市主干路等简单的结构化道路条件下，只需用粗粒度对环境进行概略描述，而对于包含路口和城乡结合部等复杂的半结构化和非结构化道路环境下，则需要较细粒度来精确而完善地描述交通环境；

3) 驾驶地图只包含与驾驶行为相关的交通要素。理想的驾驶地图要包含道路固有设施高度、道路边缘宽度、交通灯位置和高度等诸多交通要素，但这些要素只限于一次规划轨迹途经道路的附近区域，对于城市地图、旅游地图中包含的景点信息、建筑名称等，在驾驶地

图中则可以忽略。

驾驶地图对环境感知具有非常重要的作用：1) 再次确认，传感器识别出的道路要素被地图确认；2) 互相补充，地图告知进入特定道路区域，传感器数据反映对应目标数目变化；3) 冲突消解，不同传感器获取的数据产生冲突时利用地图进行取舍；4) 提醒帮助，地图为已有障碍物的跟踪提供空间位置预测；5) 过滤噪声，根据地图给出待测目标的大致位置，滤除部分疑似目标的噪点；6) 属性关联，从地图获取不同路段的物理和几何属性，与传感器检测结果进行关联。

2.7 V2X 网联通信技术

近年来，随着物联网、大数据、“互联网+”等新技术的兴起，智能交通系统（ITS，Intelligent Transport System）在智能网联、车联网方面也有了长足发展。作为 ITS 的重要载体，智能驾驶汽车不再是孤立的个体，仅关注车辆与周边道路环境已无法满足安全、高效、节能行驶的更高要求，需要进一步实现车辆与外部节点间的信息共享和控制协同，V2X 网联通信技术将成为未来智能驾驶发展的重要技术支撑。

V2X 网联是基于物联网，运用 D2D（Device to Device，终端直通）以及信息通信等技术实现车辆与外界互联的无线通信技术。欧美和日本较早展开 V2X 网联技术研究，美国在 2010 年颁布了以 IEEE 802.11P 作为底层通信协议和 IEEE 1609 系列规范作为高层通信协议的 V2X 网联通信标准。与之相比，V2X 在我国发展相对较晚，2015 年才开始相应研究；2016 年国家无线电委员会确定了我国的 V2X 专用频谱；同年 6 月，V2X 技术测试作为第一家“国家智能网联汽车试点示范区”及封闭测试区的重点布置场景之一；2017 年 9 月 19 日，我国首部 V2X 应用层团体标准《合作式智能交通系统 车用通信系统

应用层及应用数据交互标准》正式发布。

智能驾驶对 V2X 网联通信提出了以下几点技术要求：网络接入时间短、传输时延低、传输可靠性高、干扰性低、信息安全性高、频谱可再利用。另外，还需要对海量数据进行分析与处理，这就要求 V2X 技术可以合理借助各类感知传感器，并从获取的数据中探索规律进行有效表示。

2.7.1 设备组成和种类

V2X 技术的实现一般基于 RFID、拍照设备、车载传感器等硬件平台。V2X 网联通信产业分为 DSRC（Dedicated Short Range Communication，专用短程协议）和 LTE-V2X 两个标准和产业阵营：

（1）DSRC

DSRC 的设备组成包括车载单元(OBU，On Board Unit)、路边单元（RSU，Road Side Unit）、控制中心等。1999 年，美国联邦通信委员会专门分配了无线频率 5.9GHz 频段内 75MHz 频谱，作为智能交通系统中 DSRC 的专属频谱。作为以 IEEE802.11p 为基础的标准，DSRC 可以在数百米的特定区域内实现对高速移动目标的识别和双向通信。

智能驾驶中的网联通信对系统稳定性和实时性提出了高要求。DSRC 的优势在于技术成熟可靠，能够保证低时延和安全可靠性，因此依然是当下市场主流的 V2X 标准。

为了强推 DSRC 技术，美国于 2016 年年底发布了 V2X 建议公告，计划在 2021 年、2022 年、2023 年为新推汽车配备 DSRC 的百分比依次达到 50%、75%、100%。与此同时，欧盟委员会提出的“欧洲合作式智能交通系统战略”通过了最终框架，设定的目标为：将 DSRC 作为合作式智能交通系统的推荐技术，到 2019 年实现欧盟国家大规模道路配置。另外，全球最大的汽车半导体厂商恩智浦，作为 DSRC

的坚决支持者之一，开发了一套完整的 V2X 安全系统解决方案--V2X RoadLINK，该方案获得了 CITE2017 的“创新金奖”。

DSRC 能够支持的最高车速为 200km/h，数据传输速率一般为 12Mbps，反应时间为 100ms 以内，低时延达到 20ms。另外也存在一些不足，包括覆盖范围小、传输速率低、易受到建筑物遮挡、处理大量数据较慢、建设成本较高等。

目前，DSRC 在不停车收费（ETC 系统）、车队管理、出入控制、信息服务等领域已经有广泛应用。

（2）LTE-V2X

LTE-V2X 基于现有蜂窝移动通信支持（3G/4G），拥有自主知识产权。相比 DSRC，LTE-V2X 的起步较晚：2015 年初，国际标准化组织 3GPP（3rd Generation Partnership Project，第三代合作伙伴计划）启动了 LTE-V2X 的业务需求研究工作，明确了对 LTE-V2X 在时延、覆盖范围、可靠性、安全性等方面的要求；2016 年 9 月完成了 LTE-V2X 第一阶段标准，优先实现了基于 D2D 的 V2V 标准化。

中国通信标准化协会（CCSA）已经针对 LTE-V2X 先后开展了需求与系统结构、无线空口技术和频谱需求等项目的研究工作，工信部、发改委和科技部等政府部门和高通、华为等公司也在大力推动 LTE-V2X 技术的产业化发展。

LTE-V2X 技术按照通信方式分为集中式（LTE-V-Cell）和分布式（LTE-V-Direct）两种，如图 2-6 所示。LTE-V-Cell 以基站为分布中心，需要现有蜂窝网络的支持，具有带宽大、覆盖广的通信特点，能免实现远距离通信；LTE-V-Direct 独立于蜂窝网络，是一种车辆与周边环境节点直接通信的技术，具有低时延、高可靠的优势。

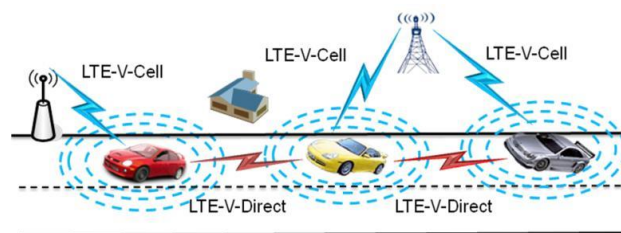


图 2-6 LTE-V2X 两种通信方式

目前，LTE-V2X 仍在研发测试阶段，但是已形成可运营的完整网络体系，能够在高频段（5.9GHz）、高车速（250km/h）、高车流量的环境下提供可靠的通信能力，并且在大容量、低时延、抗干扰性以及可管理性等方面更为成熟。LTE-V2X 具有三点优势：1) 部署成本低，可以重复利用既有蜂窝网络的基础设施；2) 覆盖范围广，可扩展至数百米以上的非视距范围；3) 数据传输速率高，峰值上行 500Mbps、下行 1Gbps。对国内企业而言，采用 LTE-V2X 还有助于规避专利风险。

2.7.2 功能和感知范围

V2X 网联通信集成了 V2N、V2V、V2I 和 V2P 四类关键技术：

1) V2N（Vehicle to Network，车-互联网），主要是通过网络将车辆连接到云服务器，能够使用云服务器上的娱乐、导航等功能；2) V2V（Vehicle to Vehicle，车-车），指不同车辆之间的信息互通；3) V2I（Vehicle to Infrastructure，车-基础设施），主要包括车辆与道路、交通灯、路障等基础设施之间的通信，用于获取交通灯信号时序、路障位置等道路管理信息；4) V2P（Vehicle to Pedestrian，车-行人），指车辆与行人或非机动车之间的交互，主要是提供安全警告。

四类技术的感知范围不同，为智能驾驶提供的信息和能力也有所差异：

（1）通过 V2N 技术，智能驾驶车辆可以提高收集数据的能力，并且通过对这些数据进行模拟和调优，不断提升智能驾驶体验效果。

V2N 还可提供实时路况、获取远程交通信息、发出交通事故警报等，从而减少拥堵、提高驾驶效率；

(2) V2V 技术有助于智能驾驶车辆获取周边车辆运行信息，包括相对位置、行车环境等，为行车提供防碰撞警示提醒。V2V 还可为进一步缩短车辆之间的安全距离提供可靠信息；

(3) V2I 为智能驾驶提供交通信号灯状态、交通管制信号等交通道路信息，为车辆选择加减速时机和改变行驶路线提供依据，进而控制道路整体通行速度，提高驾驶安全性；

(4) V2P 技术通过向智能驾驶车辆提供周边行人状态信息，保证行人的安全，提高道路安全服务质量。

2.7.3 测试技术

为了准确评估 V2X 技术对智能驾驶安全性、运行效率和服务能力等方面的作用，需要进行 V2X 技术测试。从测试环境上主要分为封闭环境下的模拟测试和真实环境下的通信测试。测试内容包括 V2N、V2V、V2I、V2P 四类通信方式和通信安全、通信效率、信息服务、（恶劣环境下）通信策略四种通信能力，通过构建不同的测试场景完成测试。

随着最终实用性测试的进行，V2X 技术还需要进一步规范和完善标准法规，持续建设相应的基础设施，构建真正的“人、车、路”协同的智能交通系统。

第 3 章 决策规划篇

3.1 决策规划技术概述

智能汽车 (Intelligent Vehicles) 是智能交通系统 (Intelligent Transportation Systems) 的重要组成部分。智能汽车根据传感器输入的各种参数等生成期望的路径, 并将相应的控制量提供给后续的控制。所以决策规划是一项重要的研究内容, 决定了车辆在行驶过程中车辆能否顺畅、准确得完成各种驾驶行为^[1]。

决策规划是自动驾驶的关键部分之一, 它首先融合多传感信息, 然后根据驾驶需求进行任务决策, 接着在能避开可能存在的障碍物前提下, 通过一些特定的约束条件, 规划出两点间多条可选安全路径和, 并在这些路径中选取一条最优的路径作为车辆行驶轨迹。决策规划按照划分的层面不同可分为全局规划和局部规划两种。全局规划是由获取到的地图信息, 规划出一条在一些特定条件下的无碰撞最优路径; 局部规划则是根据全局规划, 在一些局部环境信息基础上, 能避免撞上未知的障碍物, 最终到达目标点的过程^[19]。

轨迹规划是智能汽车自动驾驶行为必须涉及到的一项研究, 由于道路环境非常复杂, 车辆系统本身是非完整系统, 使得智能汽车在行驶过程中的运动轨迹规划问题变得复杂。传统的路径规划方法仅仅考虑了地形空间的几何约束, 忽略了车辆的运动学和动力学特性, 因而规划结果不一定是可行的, 运动控制系统无法使得车辆准确得跟踪规划轨迹。近年来, 国内外智能汽车的运动轨迹规划方法有了很大的改进, 这些方法最大的改进就是考虑车辆实际行驶的环境条件并根据控制系统的需要, 以生成最优的参考轨迹^[20]。

轨迹规划技术概述: 路径规划问题最早出现在 20 世纪 60 年代末的人工智能机器人领域, 特指考虑移动主体和障碍物之间的几何关

系，找到一条不发生碰撞的静态路径，通常表示轮式移动机器人在笛卡尔坐标下位置和姿态的关系^[21]。运动轨迹规划是在静态路径规划的基础上考虑时间因素和车辆的运动学、动力学约束条件，并根据车辆当前的位姿以及传感器收集到周围环境的状态信息，考虑智能汽车的内在约束条件(如非完整约束)和车辆的运动学、动力学约束条件对轨迹生成的影响，规划出可行的参考轨迹^[22]。最后将轨迹以控制量的方式供给到后续的控制系统，使得车辆可以沿着相应的轨迹行驶，避免碰撞。

3.2 决策规划技术结构体系

决策规划层是自动驾驶系统智能性的直接体现，对车辆的行驶安全性和整车性能起着决定性作用，以谷歌和斯坦福等为代表的众多企业和高校做出了大量研究。常见的决策规划体系结构有分层递阶式、反应式以及二者是混合式^[23]。

3.2.1 分层递阶式体系结构

分层递阶式体系结构是一个串联系统结构，如图 3-1 所示。在该结构中，智能驾驶系统的各模块之间次序分明，上一个模块的输出即为下一个模块的输入，因此又称为“感知-规划-行动”结构。当给定目标和约束条件后，规划决策就根据即时建立的局部环境模型和已有的全局环境模型决定出下一步的行动，进而依次完成整个任务。

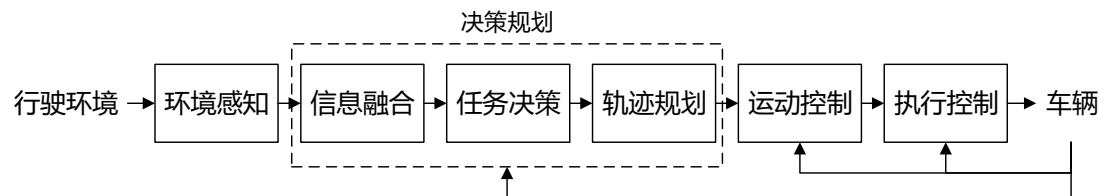


图 3-1 决策规划-分层递阶式体系结构

由于该结构对任务进行了自上而下的分解，从而使得每个模块的

工作范围逐层缩小，对问题的求解精度也就相应的逐层提高，具备良好的规划推理能力，容易实现高层次的智能控制。但是也存在一些缺点：(1) 它对全局环境模型的要求比较理想化，全局环境模型的建立是根据地图数据库先验信息和传感器模型的实时构造信息，所以它对传感器提出了很高的要求，与此同时，存在的计算瓶颈问题也不容忽视，从环境感知模块到执行模块，中间存在着延迟，缺乏实时性和灵活性；(2) 分层递阶式体系结构的可靠性不高，一旦其中某个模块出现软件或者硬件上的故障，信息流和控制流的传递通道就受到了影响，整个系统很有可能发生崩溃而处于瘫痪状态。

3.2.2 反应式体系结构

与分层递阶式体系结构不同，反应式体系采用并联结构，如图 3-2 所示，每个控制层可以直接基于传感器的输入进行决策，因而它所产生的动作是传感器数据直接作用的结果，可突出“感知-动作”的特点，易于适应完全陌生的环境。其中，基于行为的反应式体系结构是反应式体系中最常用的结构。反应式结构最早于 1986 年由 Brooks，并成功应用于移动机器人^[24]。其主要特点是存在着多个并行的控制回路，针对各个局部目标设计对应的基本行为，这些行为通过协调配合后作用于驱动装置，产生有目的的动作，形成各种不同层次的能力。虽然高层次会对低层次产生影响，但是低层次本身具有独立控制系统运动的功能，而不必等高层次处理完毕。

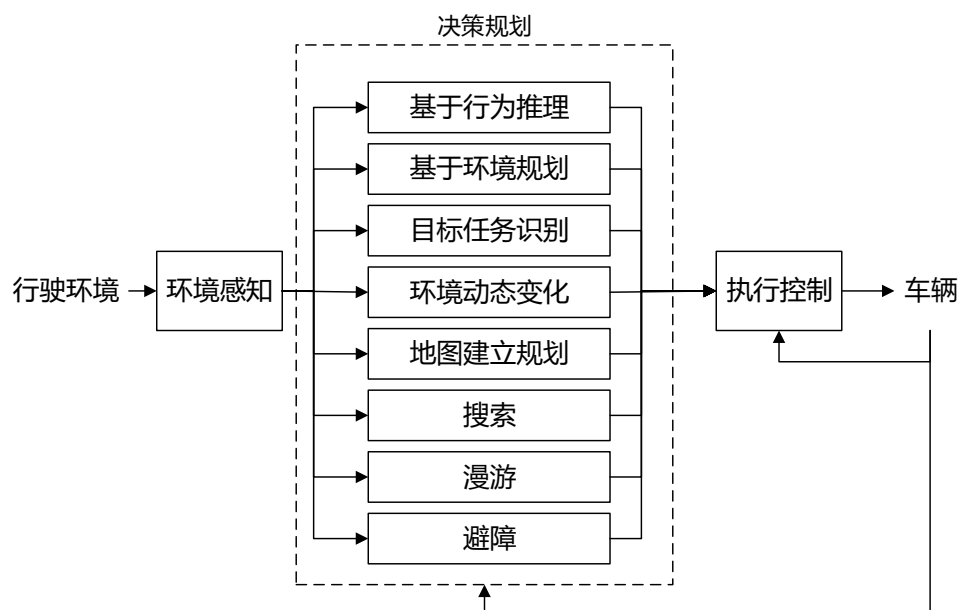


图 3-2 决策规划-反应式体系结构

反应式体系结构中的许多行为主要设计成一个简单的特殊任务，所以感知、规划和控制三者可紧密地集成在一块，占用的存储空间不大，因而可以产生快速的响应，实时性强。同时，每一层只需负责系统的某一个行为，整个系统可以方便灵活的实现低层次到高层次的过渡，而且如若其中一层的模块出现了预料之外的故障，剩下的层次仍能产生有意义的动作，系统的鲁棒性得到了很大的提高。但是设计方面也存在一些难点：(1) 由于系统执行动作的灵活性，需要特定的协调机制来解决各个控制回路对同一执行机构争夺控制的冲突，以便得到有意义的结果；(2) 除此之外，随着任务复杂程度以及各种行为之间交互作用的增加，预测一个体系整体行为的难度将会增大，缺乏较高等级的智能。

3.2.3 混合式体系结构

分层递阶式体系结构和反应式体系结构各有优劣，都难以单独满足行驶环境复杂多变时的使用需求，所以越来越多的行业人士开始研究混合式体系结构，将两者的优点进行有效的结合（如图 3-3），在全

局规划层次上，则生成面向目标定义的分层递阶式行为；在局部规划层次上，生成面向目标搜索的反应式体系的行为分解。

车辆驾驶决策技术是实现自动驾驶的核心，不良驾驶决策将影响车辆自身安全、节能和舒适性，并造成外部交通流效率降低。国内外学者在基于环境信息、车辆状态等方面的车辆智能驾驶决策方法已取得了一些成果，能够在一定程度上满足复杂、动态的实际交通场景[25][26][27]。

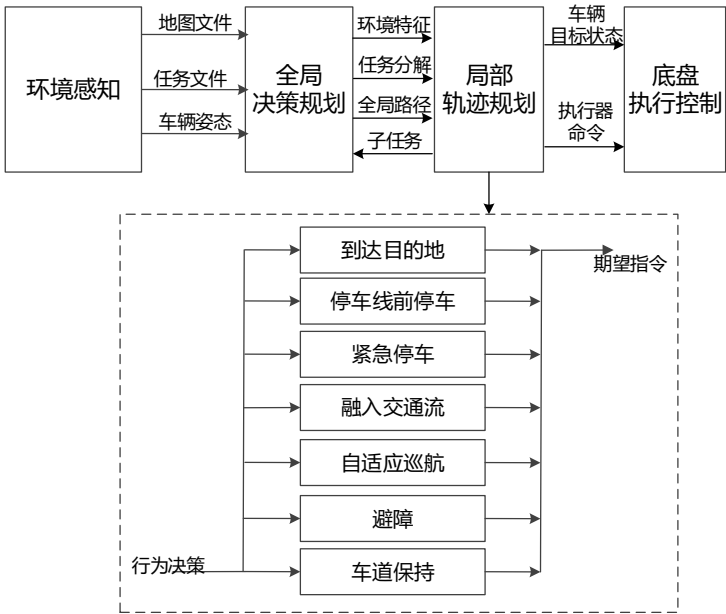


图 3-3 基于功能和行为分解的混合体系结构

3.3 决策规划系统的关键环节

智能驾驶决策规划系统的开发和集成基于递阶系统的层次性特征，可分为四个关键环节，分别是信息融合、任务决策、轨迹规划和异常处理。其中，信息融合，完成多传感器的数据关联和融合建立周边环境模型；任务决策，完成智能汽车的全局路径规划任务；轨迹规划，在不同的局部环境下，进行智能驾驶车辆的运动轨迹状态规划；异常处理，负责智能汽车的故障预警和预留安全机制。任务决策和轨

迹规划分别对智能性和实时性要求较高。

3.3.1 传感信息融合

传感信息融合是将多个传感器的输出信息统一在车辆坐标系下，建立具有时间标记的数据关联和融合，以保证场景数据信息的连贯性和适用性。

智能驾驶汽车在环境感知方面，通常会使用到多种传感器来进行行驶环境数据的采集与分析，分为环境传感器如单目摄像头、立体摄像头、毫米波雷达、激光雷达、超声波传感器、红外传感器等，定位导航设备如 GPS 和北斗等，以及 V2X 车联网通信设备三种信息来源。智能汽车在复杂多变的路况下行进时，对周围信息的不确定性会使之处于危险之下，尤其是仅依赖于单一的环境传感器时。因此，使用多传感器对周围环境进行检测，利用数据融合，可以充分准确地描述目标物体的特征，并且减少二义性，提高智能驾驶汽车决策的准确性与鲁棒性。

数据融合技术可以认为是一种解决问题的工具，它包括对融合单元的理解以及对融合架构的设计两个方面。融合单元是指每一次数据处理到输出给决策层的整个部分，而融合架构则是进行数据融合的框架与模式。一个数据融合架构至少需要包括负责采集外部信息的感知框架，即传感器管理框架，以及负责数据处理的模型管理框架。其中，模型管理具体涉及数据匹配、数据关联、融合决策等部分。

数据融合具体技术中包括数据转换、数据关联、融合计算等，其中数据转换与数据关联在融合架构的实现中已经体现，而数据融合的核心可以认为是融合计算，其中有很多可选择的方法，常用的方法包括：加权平均，卡尔曼滤波，贝叶斯估计，统计决策理论，证据理论，熵理论，模糊推理，神经网络以及产生式规则等等。

3.3.2 任务决策

任务决策作为智能驾驶的智能核心部分，接收到传感感知融合信息，通过智能算法学习外界场景信息，从全局的角度规划具体行驶任务，从而实现智能车辆拟人化控制融入整个交通流。智能驾驶中任务规划结构如图 3-4 所示，描述了道路、车道和行驶三级任务分工，在道路级进行全局的任务规划，在车道级根据周边交通状况规划运动轨迹，行驶时根据前后车进行运动智能控制。交通流的复杂度借助信息传递影响规划任务的复杂程度，进而决定智能驾驶动作。不断实时的监督车辆运动状态和周围环境信息，当探测到当前道路阻塞时，要求重新规划任务，并做分解调整。



图 3-4 智能驾驶中任务规划结构

3.3.3 轨迹规划

轨迹规划是根据局部环境信息、上层决策任务和车身实时位姿信息，在满足一定的运动学约束下，为提升智能汽车安全、高效和舒适性能，规划决断出局部空间和时间内容车辆期望的运动轨迹，包括行驶轨迹、速度、方向和状态等^[28]。并将规划输出的期望车速以及可行行驶轨迹等信息给入下层车辆控制执行系统。轨迹规划层应能对任务决策层产生的各种任务分解做出合理规划。规划结果的安全性、舒适性是衡量运动规划层性能的重要指标。

3.3.4 异常处理

异常处理作为预留的智能驾驶系统安全保障机制，一方面是在遇到不平及复杂路面易造成车辆机械部件松动、传感部件失效等问题时，通过预警和容错控制维持车辆安全运行；另一方面是决策过程某些算法参数设置不合理、推理规则不完备等原因导致智能汽车在行为动作中重复出现某些错误并陷入死循环时，能够建立错误修复机制使智能汽车自主的跳出错误死循环，朝着完成既定任务的方向继续前进，以减少人工干预来解决问题，这是提高车辆智能化水平的必需。

异常处理采用降低系统复杂性的原则，在程序正常运行使智能汽车陷入重复错误死循环时，进入错误修复状态，利用自适应错误修复算法产生新的动作序列直至智能汽车成功跳出错误死循环方转入程序正常运行状态。具体的技术方法是：建立专家系统，就智能汽车交叉口通行中出现的错误状态的表现与成因进行分析、定义与规则描述，制定判断动作失败的标准；研究自适应错误修复算法，对各错误状态的成因进行分类，并相应地制定调整策略，以产生新的动作序列。

3.4 决策规划技术方法

决策规划是智能汽车导航和控制的基础，从轨迹决策的角度考虑的，可分为全局规划和局部规划两个层次。其中，全局路径规划的任务是根据全局地图数据库信息规划出自起始点至目标点的一条无碰撞、可通过的路径。由于全局路径规划所生成的路径只能是从起始点到目标点的粗略路径，并没有考虑路径的方向、宽度、曲率、道路交叉以及路障等细节信息，加之智能汽车在行驶过程中受局部环境和自身状态的不确定性的影响，会遇到各种不可测的情况。因此，在智能汽车的行驶过程中，必须以局部环境信息和自身状态信息为基础，规划出一段无碰撞的理想局部路径，这就是局部路径规划^[29]。

3.4.1 全局规划方法

(1) 基于状态空间的最优控制轨迹规划方法

在状态空间进行轨迹规划的方法主要有最优控制方法。最优控制方法是指通过最优控制理论找到可行的控制量 $u^*(t)$ ，使得系统 $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$ 能够沿着可行轨迹 $x^*(t)$ 行驶，该轨迹能够使得评价函数 J 最小^[30]。将评价函数和系统的状态方程联系起来，只有系统状态方程的约束条件满足，评价函数才能置零，求得可行的轨迹 $x^*(t)$ 。最优控制一般包括一到两个性能指标，对于控制变量的取值不受约束的情况，一般用变分法进行求解；对于控制量受约束的情况，一般用极小值原理进行求解。由于在最优控制方法中考虑时间的因素，因此生成的最优轨线是轨迹而不是路径，轨迹具有曲率连续的优点，且生成的轨迹中包括和时间相关的速度、加速度等轨迹特征值。对于终端时间自由问题的求解一般采用边界值问题求解方法 BVP (Boundary Value Problem)，这种求解方法需要对问题的解有初始估计值，如果初始估计值和结果数值相差较大会影响最终对问题的求解精度，同时为了容易求解，评价函数一般只包括一到两个评价指标，多个评价指标会使得问题的求解变得复杂。这就需要新的数值算法和最优控制求解方法相结合，以完成复杂问题的求解，使得最优控制方法能够更好得在轨迹规划中进行应用。

(2) 基于参数化曲线的轨迹规划方法

B 样条曲线由一组称作控制点的向量来确定，这些控制点按顺序连接形成一个控制多边形，B 样条曲线就是逼近这个控制多边形。通过确定控制点的位置，可以控制曲线的形状。由于 B 样条曲线具有曲率连续的优点，在相邻曲线段的节点处曲率也是连续的^[31]，且具有局部支撑性等特点，如果轨迹局部的约束条件不满足，可以通过调整相

应控制点的方法来对轨迹进行修正，而不影响其它的轨迹段，具有应用性强的特点。 β 样条曲线是对B样条曲线的推广和发展，且具有B样条曲线的若干性质，

在此基础上还有基于多项式的智能汽车行驶轨迹规划方法，用六次项式来构造轨迹函数，根据 T_k 和 T_{k+1} 周期的车辆状态 $S_k=(x_k, y_k, \theta_k, \phi_k)$ 和 $S_{k+1}=(x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1}, \phi_{k+1})$ 可以得到 $[P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5]^T$ 。再根据跟踪误差最小的原则，就可以将六阶多项式的所有系数全部求出，根据这些系数就可以求出这个轨迹需要的控制量。多项式函数构造的轨迹也具有曲率连续的优点，但是如果轨迹约束条件不满足，必须对整条轨迹进行调整来满足约束条件的要求，计算量较大，使其应用受到限制。

(3) 基于系统特征的轨迹规划方法

微分平坦法是基于系统特征的一种轨迹规划方法。微分平坦是指可以找到一组系统输出，使得所有状态变量和输入变量都可以由这组输出及其导数决定(不需积分)。不过该方法在规划轨迹的过程中没有考虑最大曲率和最大曲率变化率的约束条件。文献针对路径规划给定的路径函数信息，通过微分平坦的方法规划出系统输入及状态的时间相关的轨迹函数，在满足车辆侧向加速度约束的情况下使得系统的某性能指标最优。

3.4.2 局部规划方法

智能汽车进行局部路径规划（也可称之为实时路径规划），一般是指在有障碍物的环境中，如何利用自身传感器感知周边环境，并寻找一条从当前点到目标点点的局部行驶路径，使智能汽车在本次任务中能安全快速地到达目标位置。局部路径规划的方法主要包括以下两个关键部分：(1)建立环境模型，即将智能汽车所处现实世界抽象后，建立计算机可认知的环境模型；(2)搜索无碰路径，即在某个模型的空间中，在多种约束条件下，选择合乎条件的路径搜索算法。

根据不同行驶环境的特点,智能汽车局部路径规划中的侧重点和难点都会有相应不同:

- 在高速公路中,行车环境比较简单但车速较快,此时对智能汽车控制精度要求很高,算法难点主要在于环境信息获取的位置精度和路径搜索的速度;
- 在城市半结构化道路中,道路环境特征性比较明显但交通环境比较复杂,周边障碍物较多,这就对智能汽车识别道路特征和障碍物的可靠性有较高要求,路径规划的难点主要在于车辆周边环境建模和避障行驶的路径搜索,特别是对动态障碍物方向和速度预测;
- 在越野环境的非结构化道路中,智能汽车所处的环境没有明显的道路边界,路面起伏不平,可能有大坑或土堆,这就对智能汽车识别周围环境,特别是地形地势有较高要求,路径规划的难点主要在于车辆可通行区域的识别。

(1)基于滚动时域优化的轨迹规划方法

基于滚动时域优化的路径规划算法^[7]依靠智能汽车通过传感器实时探测到的局部环境信息,以滚动优化的方式进行在线规划。在滚动的每一步智能汽车根据探测到的局部信息,采用启发式的方法生成优化子目标,在当前时域内进行局部路径规划,然后实施当前策略(依局部规划路径移动一步),随着时域的推进,不断取得新的环境信息,从而在滚动中实现优化与反馈的结合。还可以利用预测控制的基本原理,同时收集利用实时的局部环境信息,以滚动优化方式进行在线轨迹规划。该方法能够确保机器人在未知环境中安全地避开障碍物行驶,具有反应速度快的优点,能够迅速适应变化的环境,是一种有效实用的工具,但计算量相对较大。

(2) 基于轨迹片段的运动规划方法

轨迹片段包含配平轨迹和机动轨迹。其中配平轨迹是系统处于相对平衡时所经历的轨迹，而机动轨迹则是系统从一个相对平衡跃入另外一个相对平衡所经历的轨迹。可以通过考虑车辆的运动学和动力学约束条件，基于最优控制原理的机动轨迹设计方法和随机采样法，实现基于轨迹片段连接的最优运动轨迹规划和快速运动规划。但是该方法计算较为复杂，使其在实际应用中受到限制。

3.5 路权分配技术

路权（Right of Weight, ROW）^[32]，是指道路使用者依据法律规定，在一定的时间对一定的道路空间使用的权力。在智能驾驶中，路权可以用来描述满足车辆当前安全行驶所需要的道路空间。行驶中的

$$\begin{aligned} r_{ROW} &= f_1(l, v, \xi, \Delta r, t)|_{t=t_1} \\ \theta_{ROW} &= f_2(l, v, \xi, \Delta r, t)|_{t=t_1} \end{aligned}$$

智能汽车的路权是一个流动的扇形区，与本车的尺寸、速度、周边的车流量、前方拥有的空间密切相关，是本车速度的非线性函数，可用距离和角度来表示：

在驾驶过程中，人们会出现不同的驾驶行为，如超车、换道或者重新规划道路，智能汽车可以利用路权来描述换道三角形区域，如图 3-5 所示，判断是否可以超车。例如，本车道内车间距较小，且没有变大趋势，路权受限，超出容忍；相邻车道的车间距较大，且没有变小趋势，路权允许；则从换道窗口中确定换道路径，执行换道。

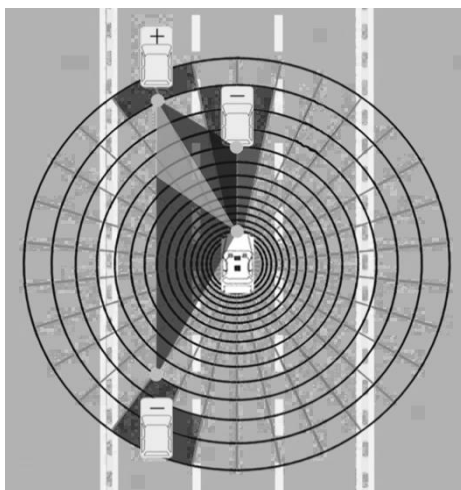


图 3-5 换道三角形

路权与车速强相关，可分为期望路权和实际路权，当两者不一致时，就需要进行调节来解决冲突。自动驾驶是智能汽车在任意时刻对路权的检测和使用，多车交互是车群在任意时刻对路权的竞争、占有、放弃等协同过程。自动驾驶的不确定性，体现在车辆行驶中拥有的路权在不停地发生变化。

智能汽车编队，路权和本车的尺寸、速度、周边的车流量、前方拥有的空间密切相关，是本车速度的非线性函数。飙车占用了较大的路权，高峰时段停在车道上的故障车，也占用了较大的路权。如果在特定地段的所有车辆都匀速行驶，每辆车只占用最小路权，如公路火车。当智能汽车以编队结构进行行驶时，就是跟踪形式，此时智能汽车不需要对周边环境进行详细的关注，只需要紧跟前方车辆运动，保持合适的安全距离即可，无需过多的路权。

第 4 章 控制工程篇

4.1 智能汽车控制架构设计

智能驾驶汽车通过搭载先进的车载传感器、控制器和数据处理器、执行机构等装置，借助车联网和 V2X 等现代移动通信与网络技术实现交通参与物彼此间信息的互换与共享，从而具备在复杂行驶环境下的传感感知、决策规划、控制执行等功能，以实现安全、高效、舒适和节能的自动或智能行驶。智能驾驶汽车代表了汽车技术和产业化的重要发展方向，也是未来汽车技术创新的主流趋势。

智能驾驶系统基于环境感知技术对车辆周围环境进行感知，并根据感知所获得的信息，通过车载中心电脑自主地控制车辆的转向和速度，使车辆能够安全、可靠地行驶，并到达预定目的地。无人驾驶是汽车智能化追求的终极目标，是信息通信等先进技术在汽车上的深度应用，体现了更便捷、更简单的人车交互方式，是对人的更大程度的“解放”。它将在减少交通事故、提高运输效率、完成特殊作业、国防军事应用等领域发挥至关重要的作用。

智能驾驶的关键技术是环境感知技术和车辆控制技术，其中环境感知技术是无人驾驶汽车行驶的基础，车辆控制技术是无人驾驶汽车行驶的核心，包括轨迹规划和控制执行两个环节，这两项技术相辅相成共同构成智能驾驶汽车的关键技术，其系统组成如图 4-1 所示。智能驾驶的整个流程归结起来有三个部分，首先，是通过雷达、像机、车载网联系统等对外界的环境进行感知识别；然后，在传感感知融合信息基础上，通过智能算法学习外界场景信息，规划车辆运行轨迹，实现车辆拟人化控制融入交通流中；其次，跟踪决策规划的轨迹目标，控制车辆的油门、刹车和转向等驾驶动作，调节车辆行驶速度、位置和方向等状态，以保证汽车的安全性、操纵性和稳定性。如果能够默契地进行，那么整个智能驾驶流程就算完成了。因此研究自动驾驶的

控制技术变得具有十分重要的意义^[33]。

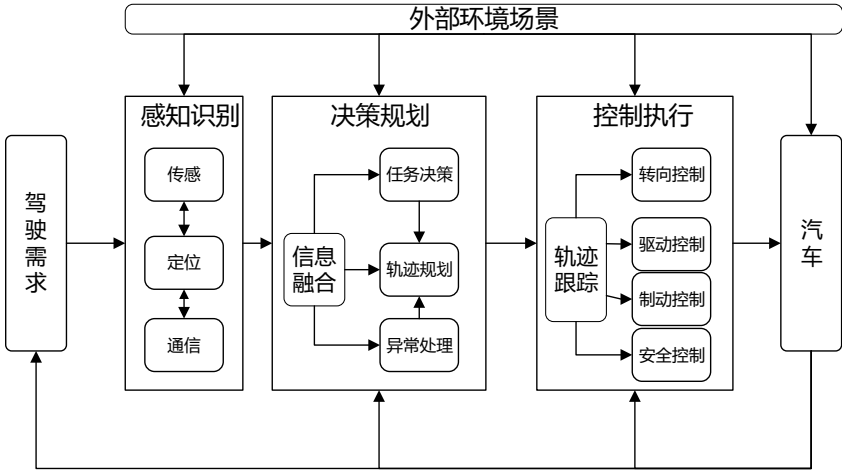


图 4-1 智能驾驶系统结构框图

因此，智能驾驶的系统将驾驶认知形式化，利用驾驶认知的图表达语言，设计通用的智能驾驶软件架构。在这一架构中，智能决策模块并不直接与传感器信息发生耦合，而是基于多传感器的感知信息、驾驶地图和车联网通信等先验信息综合形成的驾驶态势完成自主决策。智能驾驶试验平台软件的架构如图 4-2 所示^[34]。

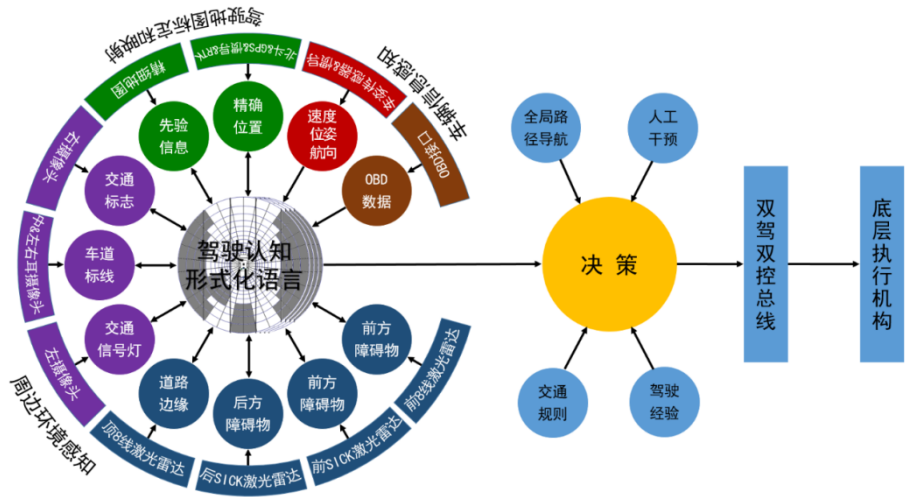


图 4-2 智能驾驶试验平台软件架构示意图

平台软件运行流程：多传感器信息处理模块，由驾驶认知的图表达语言统一输出构成驾驶态势实时信息；驾驶地图的信息，则根据车辆实时位置及朝向，映射到驾驶态势中，与驾驶态势实时信息融合，

形成全面反映当前驾驶态势的公共数据池；车联网通信信息，利于V2X系统使得车与车、车与基站之间能够通信互联，获得周边交通流实时路况、路口标识、交通灯标示信息以及来自外部云服务器的超视距路况信息；决策控制模块，以这行驶环境信息数据池为基础，综合考虑交通规则、驾驶经验、全局路径等先验知识，完成决策。此外，融合了实时信息与先验知识的行驶环境信息数据池，也能够帮助传感器信息处理模块确定感兴趣区域、帮助定位模块提高定位准确性、帮助驾驶地图模块及时更新先验信息，提升智能驾驶的性能。

此外，智能汽车的软件架构将决策控制与传感器的感知信息解耦，增加或减少一路或几路传感器、改变传感器型号或安装位置，不再对决策控制直接造成影响。整个软件架构只需做很少的改动，甚至完全不需要调整，就可以在不同试验平台上方便的进行移植。

4.2 自动驾驶控制核心技术组成

智能驾驶汽车的车辆控制技术旨在环境感知技术的基础之上，根据决策规划出目标轨迹，通过纵向和横向控制系统的配合使汽车能够按照跟踪目标轨迹准确稳定行驶，同时使汽车在行驶过程中能够实现车速调节、车距保持、换道、超车等基本操作。

自动驾驶控制的核心技术是车辆的纵向控制和横向控制技术。纵向控制，即车辆的驱动与制动控制；横向控制，即方向盘角度的调整以及轮胎力的控制。实现了纵向和横向自动控制，就可以按给定目标和约束自动控制车运行。所以，从车本身来说，自动驾驶就是综合纵向和横向控制。但要真正实现点到点的自动驾驶运行，车辆控制系统必须获取道路和周边交通情况的详细动态信息和具有高度智能的控制性能。完善的交通信息系统和高性能、高可靠性的车上传感器及智能控制系统是实现自动驾驶的重要前提。由于点到点自动驾驶的难度，

人们提出首先实现自动驾驶路段的概念，即在路况简明的高速公路段开辟可自动驾驶路段，进入这种路段可以启动自动驾驶，出这个路段时再转人手操纵。由于道路条件和车上控制系统性能的限制，目前考虑的自动驾驶结构几乎都是手动自动可转换的。

自动驾驶控制技术需要在智能驾驶汽车上配置各种对应的系统才能实现其复杂的功能，目前包括车道保持系统 **LKA**、自适应巡航控制系统 **ACC**、自动泊车系统、紧急制动和卫星导航系统等：

车道保持系统 **LKA**：使汽车遵循道路标志和声音警告并在车辆开始偏移车道时调整方向，保证汽车沿着目标车道线行驶。

自适应巡航控制系统 **ACC**：使汽车和前而的车辆始终保持一个安全的距离，确保无人驾驶汽车的安全性。

自动泊车系统 **AP**：使无人驾驶汽车能够顺利地实现在停车位的倒入和离开。

紧急制动系统 **AEB**：使汽车在遇到紧急情时能够充分有效制动，同时使无人驾驶汽车处于人类的监视和控制范围之内。

4.2.1 车辆纵向控制

车辆纵向控制是在行车速度方向上的控制，即车速以及本车与前后车或障碍物距离的自动控制。巡航控制和紧急制动控制都是典型的自动驾驶纵向控制案例。这类控制问题可归结为对电机驱动、发动机、传动和制动系统的控制^{[35][36][37]}。各种电机-发动机-传动模型、汽车运行模型和刹车过程模型与不同的控制器算法结合，构成了各种各样的纵向控制模式，典型结构如图 4-3 所示。

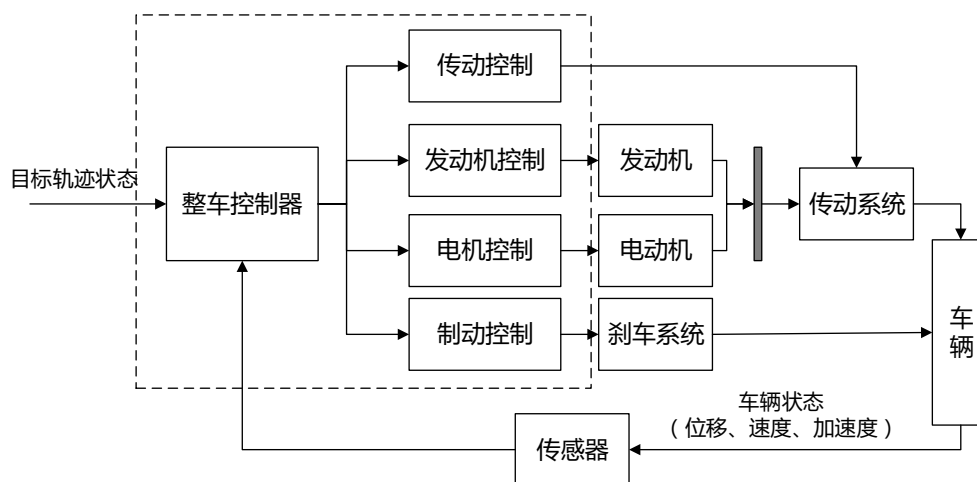


图 4-3 纵向控制基本结构

此外，针对轮胎作用力的滑移率控制是纵向稳定控制中的关键部分。滑移率控制系统通过控制车轮滑移率调节车辆的纵向动力学特性来防止车辆发生过度驱动滑移或者制动抱死，从而提高车辆的稳定性和操纵性能。制动防抱死系统（antilock brake system）简称 **ABS**，在汽车制动时，自动控制制动器制动力的大小，使车轮不被抱死，处于边滚边滑（滑移率在 20% 左右）的状态，以保证地面能够给车轮提供最大的制动作用力值。一些智能滑移率控制策略利用充足的环境感知信息设计了随道路环境变化的车轮最有滑移率调节器，从而提升轮胎力作用效果^{[38][39]}。

智能控制策略，如模糊控制、神经网络控制、滚动时域优化控制等，在纵向控制中也得到广泛研究和应用，并取得了较好的效果，被认为是最有效的方法。而传统控制的方法，如 **PID** 控制和前馈开环控制，一般是建立发动机和汽车运动过程的近似线形模型，在此基础上设计控制器，这种方法实现的控制，由于对模型依赖性大及模型误差较大，所以精度差、适应性差。从目前的论文和研究的项目看，寻求简单而准确的电机-发动机-传动、刹车过程和汽车运动模型，以及对随机扰动有鲁棒性和对汽车本身性能变化有适应性的控制器仍是研究的主要内容。目前应用的系统如巡航控制、防碰撞控制，都是自主

系统，即由车载传感器获取控制所需信息，而往往缺乏对 V2X 车联网信息的利用。在智能交通环境下，单车可以通过 V2X 通讯信息系统获得更多周边交通流信息以用于控制。在纵向控制方面，可利用本车及周边车辆位置、当前及前方道路情况、前车操纵状态等信息实现预测控制，达到提高速度减小车间距的同时保证安全，即达到安全、高效和节能的目的。

4.2.2 车辆横向控制

车辆横向控制指垂直于运动方向上的控制，对于汽车也就是转向控制。目标是控制汽车自动保持期望的行车路线，并在不同的车速、载荷、风阻、路况下有很好的乘坐舒适性和稳定性^[40]。

车辆横向控制主要有两种基本设计方法，一种是基于驾驶员模拟的方法^{[41][42]}；另一种是给予汽车横向运动力学模型的控制方法^{[43][44]}。基于驾驶员模拟的方法，一种策略是使用较简单的运动力学模型和驾驶员操纵规则设计控制器；另一策略是用驾驶员操纵过程的数据训练控制器获取控制算法^[45]。基于运动力学模型的方法要建立较精确的汽车横向运动模型。典型模型是所谓单轨模型，或称为自行车模型，也就是认为汽车左右两侧特性相同。横向控制系统基本结构如图 4-4。控制目标一般是车中心与路中心线间的偏移量，同时受舒适性等指标约束。

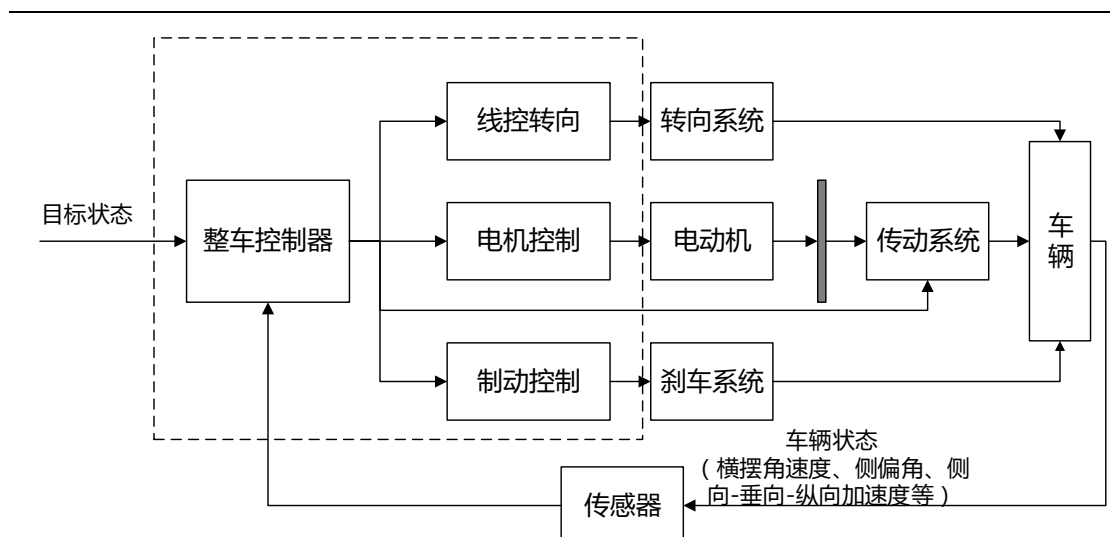


图 4-4 横向控制系统结构

针对低附着路面的极限工况中车辆横摆稳定控制是车辆横向控制中的关键部分。传统操纵稳定性控制思路，如电子稳定性控制系统（ESP）^{[46][47]}和前轮主动转向系统（AFS）^{[48][49]}等，控制分布的轮胎作用力和前轮转向，通过利用轮胎附着力和降低轮胎利用率来提高车辆稳定性。大多数文献沿袭冗余驱动的控制分配框架，通过改变内外侧轮胎驱/制动力差异的方法，增加单侧驱/制动转矩，并相应减小另一侧驱/制动转矩的方式为整车产生一个附加的横摆转矩来改善车辆转向动态特性，以保证车辆的横摆稳定性和行驶安全性。电子控制技术和电气化的发展给汽车底盘技术的突破带来了革命性的契机，也使得汽车的整体集成控制成为可能。同时在智能网联的交通环境下，单车可以通过自身环境传感、定位导航和 V2X 通讯信息系统获得更多周边交通流信息以用于横向控制，以利于提前感知道路危险（图 4-5），提高智能驾驶的安全性。

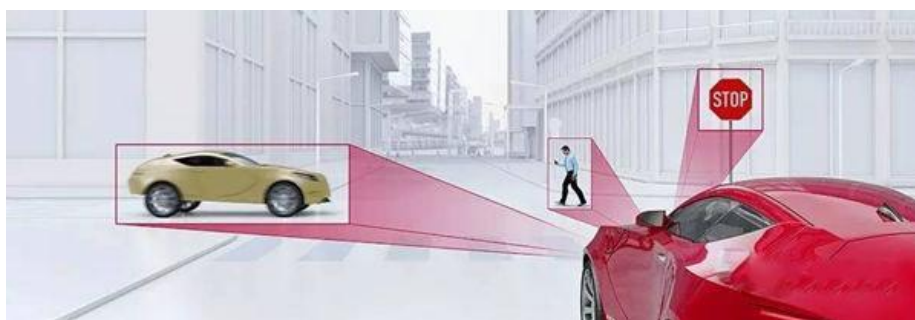


图 4-5 感知道路危险

4.3 自动驾驶控制方法

4.3.1 传统控制方法

传统的汽车控制方法主要有：PID 控制、模糊控制、最优控制、滑模控制等，这些算法应用都较为广泛。

(1)PID 控制

PID 控制器(比例-积分-微分控制器)，由比例单元 P、积分单元 I 和微分单元 D 组成。通过 K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数的设定。PID 控制器主要适用于基本上线性、且动态特性不随时间变化的系统。PID 是以它的三种纠正算法而命名的。这三种算法都是用加法调整被控制的数值，其输入为误差值（设定值减去测量值后的结果）或是由误差值衍生的信号^[52]。

(2)模糊控制

模糊逻辑控制策略（Fuzzy Logic Control Strategy）简称模糊控制（Fuzzy Control）^{[53][54]}，其本质是一种计算机数字控制技术，集成了模糊理论、模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理等。与经典控制理论相比，模糊逻辑控制策略最大的特点是不需要准确的数学公式来建立被控对象的精确数学模型，因此可极大简化系统设计和数学建模的复杂性，提高系统建模和仿真控制的效率。模糊控制系统在建模过程中，利用人类积累的相关知识和生活经验进行推理，模拟人类大脑处理复杂事件的过程，进而产生相应的控制思想，控制思想经

过编译成为控制策略。模糊逻辑控制策略由工程人员的控制思路和实践经验积累编译而成，具有较佳的鲁棒性、适应性以及容错性。其主要由定义模糊变量、模糊变量模糊化、定义规则库、推理决策和解模糊化五个环节组成。

(3)最优控制

最优控制理论^[55]是变分法的推广，着重于研究使控制系统的指标达到最优化的条件和方法。为了解决最优控制问题，必须建立描述受控运动过程的运动方程，给出控制变量的允许取值范围，指定运动过程的初始状态和目标状态，并且规定一个评价运动过程品质优劣的性能指标。通常，性能指标的好坏取决于所选择的控制函数和相应的运动状态。系统的运动状态受到运动方程的约束，而控制函数只能在允许的范围内选取。同时，最优控制的实现离不开最优化技术。最优化技术是研究和解决如何将最优化问题表示为数学模型以及如何根据数学模型尽快求出其最优解这两大问题。

(4)滑模控制

在系统控制过程中，控制器根据系统当时状态，以跃变方式有目的地不断变换，迫使系统按预定的“滑动模态”的状态轨迹运动。变结构是通过切换函数实现的，特别要指出的是，通常要求切换面上存在滑动模态区，故变结构控制又常被称为滑动模态控制^[56]。

4.3.2 智能控制方法

相对于传统的控制方法，智能控制方法主要体现在对控制对象模型的运用和综合信息学习运用上，主要有基于模型的控制、神经网络控制和深度学习等方法，目前这些算法已逐步在汽车控制中广泛应用。

基于模型的控制

基于模型的控制，一般称为模型预测控制^{[57][58][59]}（Model predictive control, MPC），又可称为滚动时域控制（Moving horizon

control, MHC) 和后退时域控制 (Receding horizon control, RHC), 它是一类以模型预测为基础的计算机优化控制方法, 在近些年来被广泛研究和应用的一种控制策略。其基本原理可概括为: 在每个采样时刻, 根据当前获得的当前测量信息, 在线求解一个有限时域的开环优化问题 1, 并将得到的控制序列的第一个元素作用于被控对象, 在一个采样时刻, 重复上述过程, 再用新的测量值刷新优化问题并重新求解。在线求解开环优化问题获得开环优化序列是模型预测控制与传统控制方法的主要区别。预测控制算法主要由预测模型、反馈校正、滚动优化、参考轨迹四个部分组成, 最好将优化解的第一个元素 (或第一部分) 作用于系统。

$$\begin{aligned} \text{优化问题 1:} \\ \min_{u_k} J(y(k), u_k) \quad & \text{控制约束 } u_{\min} \leq u(k+i|k) \leq u_{\max}, i=0, 1, \dots, p-1 \\ & \text{输出约束 } y_{\min} \leq y(k+i|k) \leq y_{\max}, i=1, 2, \dots, p, \\ \text{满足动力学约束 } & x(k+1) = f(x(k), u(k)), x(0) = x_0, \\ & y(k) = h(x(k), u(k)), \end{aligned}$$

神经网络控制

神经控制是研究和利用人脑的某些结构机理以及人的知识和经验对系统的控制^[60]。利用神经网络, 可以把控制问题看成模式识别问题, 被识别的模是映射成“行为”信号的“变化”信号。神经控制最显著的特点是具有学习能力。它是通过不断修正神经元之间的连接权值, 并离散存储在连接网络中来实现的。它对非线性系统和难以建模的系统的控制具有良好效果。一般情况下, 神经网络用于控制系统有两种方法: 一种是用其建模, 主要利用神经网络能任意近似任何连续函数和其学习算法的优势, 存在前馈神经网络和递归神经网络两种类型; 另一种是直接作为控制器使用。

深度学习方法

深度学习源于神经网络的研究, 可理解为深层的神经网络^{[61][62]}。

通过它可以获得深层次的特征表示,免除人工选取特征的繁复冗杂和高维数据的维度灾难问题。深度学习在特征提取与模型拟合方面显示了其潜力和优势。对于存在高维数据的控制系统,引入深度学习具有一定的意义,近年来,已有一些研究关注深度学习在控制领域的应用。目前较为公认的深度学习的基本模型包括基于受限玻尔兹曼机 (Restricted Boltzmann machine, RBM) 的深度信念网络 (Deep belief network, DBN)、基于自动编码器 (Autoencoder, AE) 的堆叠自动编码器 (Stacked autoencoders, SAE)、卷积神经网络 (Convolutional neural networks, CNN)[6]、递归神经网络 (Recurrent neural networks, RNN)。无人驾驶系统需要尽量减少人的参与或者没有人的参与,深度学习自动学习状态特征的能力使得深度学习在无人驾驶系统的研究中具有先天的优势。如何充分利用和发挥深度学习在无人驾驶系统中的优势并发展深度学习在环的无人驾驶系统控制是目前的研究方向。

4.4 自动驾驶控制技术方案

根据从行驶环境到驾驶动作的映射过程,自动驾驶控制技术可以分为间接控制和直接控制两种不同方案。

4.4.1 基于规划-跟踪的间接控制方法

自动驾驶间接控制是一类基于规划-跟踪的主流智能驾驶车辆控制方法。根据当前车辆行为需求,在满足车辆自身运动学和动力学约束条件下规划出一条空间上可行且时间上可控的无碰撞安全运动轨迹,然后设计适当的控制律跟踪生成的目标轨迹,从而实现自动驾驶(如

图 4-6)。

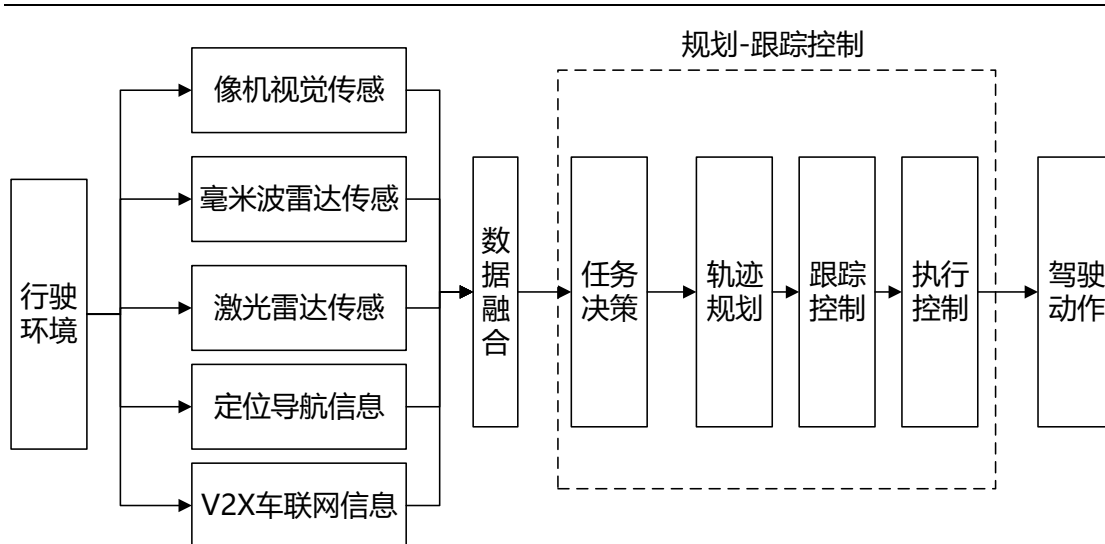


图 4-6 基于规划-跟踪的间接控制方案

早期的轨迹规划方法实际上是机器人研究领域的路径规划方法的某种扩展，80 年代后期被引入到智能汽车^[63]。这类方法给出的路径由直线和圆弧线两种基本元素构成，由于曲率在线段连接点处不连续，迫使车辆运动到连接点处时需要停下来完成转向动作，导致车辆运动过程的不连续^[64]。要消除这种情况，一种方法是采用精确的位置传感器和高频跟踪控制器来实现；另一种是通过修改轨迹规划方法来获得平滑的连续曲率轨迹。显然，后者更具现实意义。

回旋曲线是一种被广泛应用于高速公路设计的线形表达方法，当用于连接直线和圆弧线时，能有效地起到平滑作用^[65]。Nelson^[66]认为这类方法的缺点是轨迹表达式以弧长为参数，使用时需要进行积分，容易产生积累误差，并建议用五次多项式和极坐标样条以封闭式表达方式给出轨迹表达式。类似地，Bravo^[67]采用了刀样条。Fraichard^[68]在 Reeds 和 Shepp^[69]的研究基础上，考虑了轨迹曲率和曲率变化率的限制，相当于用运动学特性来约束轨迹曲率，这种方法在低速情况下，例如辅助泊车系统中获得了较好地应用^[70]，但在车辆行驶速度较高时将无法适用。

基于规划的智能驾驶车辆的转向控制律的设计发展较为成熟。

Tsugawa 等^[71]最先报道了采用视觉输入的比例控制方法解决自动驾驶车辆转向控制的问题。Broggi^[72]在 ARGO 无人车中也采用了类似的经典 P 控制器。近期研究表明,经典 PID 控制法可以应用于某些典型路况,但控制精度难以保证。人工智能法为复杂系统的控制问题提供了一条新的途径,在自动驾驶车辆转向行为控制中已有很多应用的报道。Pomerleau 基于人工神经网络设计了自动驾驶车辆转向控制器。Naranjo 等利用模糊逻辑建立控制模型来模仿人类驾驶员的驾驶行为,研究了转向行为控制和换道行为控制。该方法中,控制规律和控制器先以驾驶员对驾驶经验的描述初步确定参数,再根据实验结果对参数进行调整至最优性能。Perez 等基于自适应神经网络的模糊推理系统设计了无人驾驶车辆控制器,可以直接从人类驾驶经验样本中离线获得控制器参数的配置。Onieva 等^[73]研究了遗传算法对控制器参数的离线自调整方法。Bageshwar 和 Keviczky 基于模型预测控制理论,分别研究了自动驾驶车辆自主巡航控制模型^[74]和主动转向控制模型^[75]。Zhang 和 Gong 等^[76]基于跟踪预估控制和模糊逻辑理论,研究了控制器参数的自调整方法。高振海和管欣分别提出了基于预瞄理论的其次自适应转向控制算法^[77],及驾驶员确定汽车预期轨迹的模糊决策控制模型^[78]。

4.4.2 基于人工智能的直接控制方法

自动驾驶的直接控制是一类基于人工智能的智能驾驶车辆自主控制决策方法。实际过程中如果控制对象的特性和环境的状态全部已知,即可以进行精确的数学建模,则基于传统控制策略就可以获得满意的控制性能。实际上汽车行驶环境包括行驶道路、周边交通和气象条件等诸多因素,具有高度的不确定、不可重复、不可预测和不可穷尽等特征,同时车辆本身的非线性、不确定性也很严重,很难建立精确的数学模型进行控制律的设计,因此传统控制策略已无法完全满足

智能驾驶控制的要求。自动驾驶直接控制方法采用人工智能等手段，建立了从行驶环境到驾驶动作的直接映射过程，具体讲是在认知的范畴内试图建立一种先进的驾驶员模型以完成实际复杂驾驶过程，此外控制过程无需建立被控对象的数学模型，具有较强的机动性和实时性。

优秀的汽车驾驶员应具有过硬的汽车驾驶操作能力。不仅能够及时察觉、判断车内外环境的变化，还能够据此选择正确的方位和反应动作，从而有效地防止道路交通事故的发生。具体到简单场景(忽略道路中的其他车辆)的转向问题，优秀的驾驶员行为应至少具备：

正确的视觉注意机制，驾驶员的驾驶动作大部分是基于环境对视网膜的刺激，因此优秀的驾驶员在转向过程中视界应趋向于某些习惯的固定区域；

根据环境对视网膜的刺激而采取的正确安全的操纵动作，某一固定曲率的弯道必然对应合适的方向盘转角和打方向的时刻，而优秀的驾驶员则会通过合适地组合这二者的时序和大小达到理想的转向效果。

已有的基于人工智能的控制方法均需要较多的先验知识，且模型参数难以在线自适应，对环境的适应性差。近年来，利用增强学习来解决以上问题已经成为一大趋势。增强学习的基本原理是基于心理学的“试错法”，能够在与环境的交互过程中根据评价性的反馈信号实现序贯决策的优化，从而可以解决某些监督学习难以应用的优化控制问题^{错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。}。但是，如何去除“试错法”中“同等初始条件的假设”一直是尚未得到解决的问题^{错误!未找到引用源。}。同时对于复杂大系统的求解，其算法收敛速度直接影响控制器的实时性，因此如何利用有限已知的信息提高学习算法的实时性也是当前的一个研究难点。

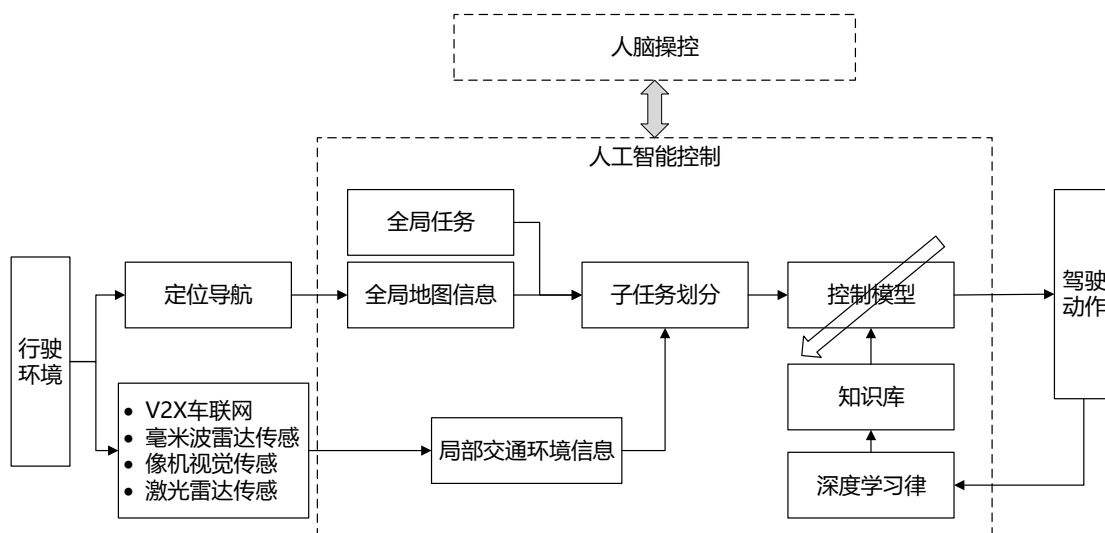


图 4-7 仿人智能控制模型

基于人工智能决策控制模型本质上是模拟人脑对外界环境信息和车体本身信息的感知(图 4-7),同时由驾驶经验并同在线学习机制来获得持续稳定输出的过程。因此如何建立合适的驾驶过程模型成为认知领域的一大难题。驾驶员行为的研究始于上世纪 50 年代,通用汽车研发人员希望通过研究驾驶员的行为,开发合理的辅助控制策略提高驾驶舒适性,降低交通事故率。通过对驾驶员驾驶样本数据的统计分析和系统辨识技术,建立基于某种场景的数学模型。

驾驶行为具有异常复杂的模型,其分类方法也不尽相同,一种分类方法将驾驶员模型分为:跟车模型、转向模型、驾驶负担模型和安全模型等^{错误!未找到引用源。}。跟车模型的研究起步相对较早,研究人员先后提出了线性和非线性动力学模型^{错误!未找到引用源。}、线性最优模型^{错误!未找到引用源。}、神经网络和模糊逻辑模型^{错误!未找到引用源。}等。一般认为驾驶员转向模型研究的里程碑为 MACDAM 的最优预瞄模型^{错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。},国内学者郭孔辉也进行了相应的跟进研究,其研究思路基本上是基于车辆动力学和闭环操纵稳定性的研究,目的在于替代人类驾驶员从事专业且危险的汽车动力学测试工作,旨在对汽车设计过程进行指导,并没有涉及对无人驾驶车辆的转向控制的直接研究。据笔者的调研,到

目前为止从学术界到工程界并没有建立一个公认的完善的转向控制模型。MACDAM 和郭孔辉^{错误!未找到引用源。}等提出的最优预瞄理论并没有考虑航向偏差对最优预瞄模型的贡献,且其最优预瞄仅限于高速公路上具有光滑曲率的小曲率转向模型,在交叉路口这样的城市工况下,其理论显然是不成立的。因此研究转向过程中具有普适性的的驾驶员生理特性成为建立转向驾驶模型的当务之急。M.F.LAND 在文献^{错误!未找到引用源。}中提出驾驶员在转向过程中视线总是集中在转向内侧的道路边缘的“TANGENT POINT”(道路变向的点)。D.D. Salvucci 在 M.F.LAND 基础上提出了一种“两点”转向驾驶员模型,他指出驾驶员在转向过程中注视前方一个远点和近点,利用近点保持汽车在路中间行驶,利用远点补偿前方的道路弯曲,实验结果显示和驾驶员驾驶相近^{错误!未找到引用源。}。

尽管生理学、心理学在研究驾驶员转向行为中取得了很多人欣慰的结果,却极少有人将这些成果应用到自动驾驶车辆技术中。其原因主要是:

前期研究的驾驶员转向计算模型都是基于某些固定的场景,获得的驾驶员模型适应能力较弱,距离工程应用还有一定的距离;

驾驶员模型的研究始于车辆工程领域,其目的多是为了研究汽车闭环操纵稳定性以及汽车动力学优化设计等。

4.5 人机交互系统

4.5.1 人机交互系统的作用和意义

人机交互系统作为智能驾驶的关键技术之一,对于智能汽车发展和应用有着十分重要的作用和意义,包括:

(1) 进一步提高智能汽车的可靠性和安全性。发展智能驾驶技术的一个主要目的就是提高了交通系统的效率和安全性。绝大多数情

况下，智能汽车对于问题的反应和处理速度都要比人快的多，其安全性要比人为控制高很多。但智能汽车毕竟不是人脑，其算法的复杂程度更无法与人的思维相比，在一些比较复杂、特殊的情况，例如在通过一些无路、施工或恶劣道路地域时，人们可以方便快速的对智能汽车进行接管控制。

(2) 拥有更强的实用性和更加出色的用户体验。智能汽车的设计最终是要让其能够为人所用，更好的为用户服务，最大限度的满足人们的需求，人永远都是控制和享受服务的主体。优秀的用户体验对于智能汽车自然是必不可少的。

(3) 增强智能汽车的灵活性和机动性。优秀的人机交互系统可以使人们随时随地对智能汽车的行为进行干预，使其在处理问题时，能够根据实际情况的不同，按照人们的要求，采取更加合理的实施方案。

(4) 提高智能汽车的任务执行力。人们可以通过交互系统，方便的给智能汽车下达任务命令，进行远程控制，实时监控其任务完成情况，并可以随时对目标进行变更和修正，使智能汽车能够更好的应用于智能交通及国防科技领域。

4.5.2 智能汽车人机交互系统发展现状

目前世界上比较主流的人车交互系统主要有以下几种：

(1) 奥迪 MMI

奥迪多媒体交互系统 MMI(Multi Media Interface)，它包含两个部分：终端操作装置和显示区域。终端操作装置位于换挡杆和中央扶手之间；显示区域包括多媒体交互系统显示屏(位于中控台顶部)和驾驶员信息系统显示屏。在设计方面，两个部分都具有用户友好性和清晰易读性。

多媒体交互系统的终端操作装置具有最佳的操作便利性和清晰

的布局，是一个依照人体工程学设计非常出色的控制装置。与仪表盘中的驾驶员信息系统显示屏一样，多媒体交互系统的显示屏不仅易于读取，而且安装于驾驶员的直接视线范围之内。显示屏和控制区域分别处于驾驶员能够直接读取和便于操作的位置，确保了道路始终在驾驶员的直接视野之中。

多媒体交互系统概念包含两个部分：终端操作装置和显示区域。终端操作装置位于换挡杆和中央扶手之间；显示区域包括多媒体交互系统显示屏（位于中控台顶部）和驾驶员信息系统显示屏。在设计方面，两个部分都具有用户友好性和清晰易读性。

在行驶时，驾驶员信息系统显示屏显示车辆的最新数据以及电话和导航系统的状态信息(视设备而定)，也可以读取基本的信息娱乐功能(例如选择无线电台或 CD 曲目)。这意味着大部分的重要信息始终处于驾驶员的直接视野之中。仪表盘显示屏与多媒体交互系统显示屏具有同样的外形风格，通过多功能方向盘上的菜单滚动键也可对其进行操作。

由于两个装置的操作原理一致，驾驶员从一个装置转向另一个装置时无需转换思维模式。驾驶员可以继续同样的操作逻辑。空调系统也是如此。鉴于温度调节对于驾驶员的重要性，空调系统采用了单独的控制装置，这个控制装置具备与多媒体交互系统相同的用户友好型操作逻辑。

（2）奔驰 COMMAND

COMMAND 包括显示屏、控制器、功能按钮和电话键区，COMMAND 可操作车内的以下功能：音响功能、导航系统、电话和通信功能、DVD 视频和电视以及各种车辆设置。COMMAND 控制器正前方是四个功能按钮，可以直接控制光盘播放器/收音机、HOME(回家功能)、多方向可调座椅和电话/导航功能。

COMMAND 的聪明之处在于其可以区分该功能是每日使用的(举例来说如电台的选择和交通信息的播放)还仅仅是单次的设置(举例来说如系统的设置和低音的设置)。这样做的结果是,会根据功能使用的频繁性来决定操作的先后顺序。菜单是根据项目的相互关联性和使用的频率来进行安排的。当在菜单上进行项选择时,系统会表明需要执行的操作路径。下一次当你再次选择这个菜单时,系统会直接显示该备选项目。这会减少操作的步骤。

而在竞争者的同类系统中,日常使用的功能通常位于子菜单中的,这就会增加所需操作的步骤。

(3) 宝马 iDrive

智能驾驶控制系统 **iDrive(intelligent Drive system)**,它是一种全新的、简单、安全和方便的未来驾驶概念,属于自动化信息化驾驶系统的范畴,某些高级轿车和概念车上配备了这项最新的科技新技术。**iDrive** 的使用节约了设置传统控制装置大量空间,使设计人员可以发挥他们的才智,创新地进行车内设计,使之更加符合人体工程学,使操纵更加便捷,同时仪表板更加简洁。**iDrive** 使用起来非常简便。8 个主菜单分别为车内气候、通信(车载电话等)、娱乐(CD / 电视等)、导航、信息、宝马服务支持、功能设置和帮助菜单。其中经常使用的前 4 个主菜单可通过圆形旋钮向上下左右四个方向推拉控制器进入。以气候调节为例,3 次简单操作就可以调节车内不同位置的温度和气流分布,比如可以设定某个座椅的加热从腰部位置开始(当然,这也归功于宝马的舒适性座椅),而气流是以某种流量按设定的方向吹出。

iDrive 具备记忆功能,驾驶者可以把某种设置储存,信息就自动储存在汽车"钥匙"中。宝马 7 系列的车钥匙是一个智能卡片,进入汽车后将之放入插座内,然后简单地按"启动 / 熄火"键发动 / 关闭发动机。另外,该电子钥匙还可自动储存汽车所需维修保养服务的信息数

据，使客户可以获得更便捷的服务。

但是，宝马在新 7 系上推出 iDrive 系统时，由于操作相对较为复杂，曾引起巨大争议。在开车之前要阅读详细的说明书，一些人对此功能并不认同。在后推出的新 5 系上，宝马的 iDrive 系统已作为大大简化，这也使 iDrive 系统的优势充分发挥出来。

（4）丰田 G-BOOK

丰田 G-BOOK 智能副驾系统于 2002 年在日本正式发布，是由无线网络、数据中心以及车载智能通信技术组成，其最基本的功能可以看作是导航系统功能的延伸和扩展。在功能逐渐扩展后，可为车主提供资讯、救援以及话务员直接服务等多种功能。

丰田 G-BOOK 有如下 7 项主要功能：话务员服务、G 路径检索、资讯提供、紧急救援、道路救援、防盗追踪、保养通知。

丰田 G-BOOK 在功能上主要是辅助设定导航、安全保障和资讯服务，没有太多的应用和扩展功能，与安吉星相比显得比较单薄。在安全保障方面，提供了最重要的事故自动报警和防盗追踪，但缺乏远程控制闪灯、解锁车门这些比较实用的功能。同时 G-BOOK 没有电话拨号和语音控制功能，行车中操作也比较繁琐。

（5）苹果 CarPlay

CarPlay 是苹果公司发布的车载系统，即将用户的 iOS 设备，以及 iOS 使用体验，与仪表盘系统无缝结合。CarPlay，可以将 iPhone 手机的绝大部分基础功能，通过汽车的控制面板来使用。其中的部分功能包括 Siri 语音助理工具，iTunes 音乐播放，苹果地图以及短信服务。通过 CarPlay，驾车人可以双手不离开方向盘就接打电话，另外可以听到语音邮件的内容，如图 4-8 所示。



图 4-8 CarPlay

绝大多数汽车厂 CarPlay 绝对是又爱又恨的。毕竟原本的车载 CD 机、硬盘、导航仪和车载电话都是可以当做配置作为卖点，现在全部都被一个集成的 CarPlay 取代了。所以这点很大程度上限制了自主品牌加入 CarPlay 联盟，配置受到冲击。

支持苹果全 CarPlay 的具体车型还很少，只有法拉利 FF、梅赛德斯奔驰 C-Class 以及沃尔沃 XCS90 SUV 三种车型。而且现在 CarPlay 移植于汽车上技术并不成熟，日内瓦车展上展出的法拉利样车，CarPlay 基本操作也会出现这样那样的问题。CarPlay 并非苹果的一大步，而更像是一个轻量级的 App，作用是把 iPhone 映射到车载中控屏幕上，而非真正的车载系统。就如苹果自己所说，“It's a smarter, safer way to use your iPhone in the car”，所以 CarPlay 只是一种辅助方式。

此外，从 CarPlay 的发布节奏来看，苹果试水的成分很大。作为全球最具影响力的 IT 公司，CarPlay 的发布几乎是用新闻通稿的形式传播，而且所有的展现形式都是通过合作伙伴来展示，这显得过于平常了。可以说，对于 CarPlay，我们无需给予太高的期望。但业界也有分析人士说，CarPlay 只是苹果公司进军车载系统的一个跳板，因此，对于 CarPlay 我们要给予足够的关注度，说不定某天，CarPlay 在苹果公司的演变下就变成行业颠覆性产品了。

4.5.3 人机交互系统的核心技术

(1) 人机界面技术

人机界面技术的研究主要针对驾驶员和车辆驾驶信息的交互。从上个世纪九十年代开始，美国、日本、欧洲等开始立项研究如何利用信息和通讯技术来加强车辆的安全性和操纵性。如美国从 1960s 晚期就开始研发的电子路径导航系统（Electronic Route Guidance System）；日本政府推出了复杂车辆交通控制系统（Comprehensive Automobile Traffic Control System）等研究项目；欧洲实施的交通和安全先导计划（[ROMETHEUS）等。这些项目的研究推动了智能交通技术的发展。各大汽车厂商，如 Honda, Toyota, Nissan, Bosch, BMW 等相继推出了自主的电子导航系统^{错误!未找到引用源。}。而开放给用户的导航界面正是最早的人机交互界面。

随着车辆控制功能的持续增多，越来越多的研究开始关注于人机界面的设计，如 Toyota 的集成操纵按钮，BMW 的 i-Drive 系统，Nissan 的人机交互界面等，如图 4-9 所示。一直到九十年代末期，中控台的主流设计风格依然是屏幕加按钮的形式。



图 4-9 早期人机交互界面

一直到 1990 年，驾驶员在人车系统中和车辆的交互仅仅是通过转向盘，操纵杆和踏板等机构。但是导航系统的出现，使得驾驶员在

操纵汽车的同时还需要分散一部分精力到 HMI 上。这势必将增加驾驶员的操纵负担，影响正常驾驶行为。因此，针对驾驶员在使用 HMI 中造成的精力分散的问题，人们开展了对 HMI 的改进设计研究，并提出了很多 HMI 的设计准则^{错误!未找到引用源。[79][80]}，如 UMTRI 设计准则；HARDIE 设计准则；ISO 也提出了车内 HMI 的相关设计准则。由于画面交互系统会分散驾驶员的目光，从而增加驾驶员的驾驶负担，为了解决这一问题，声音交互系统逐渐发展起来^[81]。

驾驶员信息交互的研究开始于 1970s，但直到 1990s 车辆导航系统的出现才真正应用到商业产品中。在这一发展过程中，研究人员开始认识到驾驶员在车辆行驶过程中的重要性。和传统汽车相比，驾驶员可以通过 HMI 实时的获得大量的车辆信息，在帮助驾驶员做出操纵判断的同时，也增加了驾驶员的精神负荷。在过去十年间，人们通过驾驶员负荷测量技术研究了驾驶员在利用 HMI 信息时的精神负担，这方面的研究结果对 HMI 的设计起到十分重要的作用，并且进一步推动了相关标准和设计准则的制定。

(2) 人机共驾技术

人机共驾技术的研究主要面向先进驾驶辅助系统。进入二十一世纪以后，人们对于车辆安全的研究已经从原先的被动安全转变为主动安全。1970 年，制动防抱死系统（ABS）第一次市场化应用标志着主动安全系统的开始。随后，电子稳定性控制系统（ESC），自适应巡航系统（ACC）等在 1990s 相继研发出来。除此之外，嵌入在 HMI 界面中的后视系统，车道保持系统（LK），车道偏离预警系统（LKW），盲点监测系统，辅助换道系统等也都相继展开了研究。

为了发展辅助驾驶过程中的人机交互系统研究，欧洲，德国，日本等相继启动了相关方面的研究项目。作为先进辅助驾驶系统中的一部分，驾驶员行为特性也得到了广泛的研究^{[82][83]}，如跟车行为，车道

保持行为和制动行为等。

随着具有不同功能的 ADAS 系统的发展，多个 ADAS 系统和驾驶员之间的协调问题日益凸现出来。如果车辆上安装有多个 ADAS 系统，那么驾驶员将会收到多个预警信号和其他信息，尤其是在复杂工况下。这会使驾驶员感到困惑并无法对预警信号作出回应。对于辅助驾驶系统，人机交互是其中很重要的一环。随着越来越多的辅助驾驶系统进入产品化的阶段，系统对于车辆的控制权变得越来越大，越来越复杂。如果不能很好地协调好各个辅助驾驶系统，驾驶员就不能正确分析出车辆的运动状态，进而无法做出正确的操纵判断。因此，如何将多个辅助驾驶系统和驾驶员之间进行集成已经成为当前的一个研究热点^[84]。ADAS 系统本身就被定义为辅助驾驶系统，这就不可避免的需要考虑到和驾驶员行为之间的交互关系。如果辅助驾驶系统不考虑驾驶员的操纵行为反而会增加车辆行驶过程中的危险性。

(3) 驾驶行为特性研究

驾驶员在真实道路中的驾驶行为研究是人机共驾技术中十分重要的一部分，也是智能辅助系统的研究的基础。尽管真实道路试验具有成本高，数据量大，试验采集复杂等缺点，但是各国依然在这一方面做了大量的工作。美国国家高速公路交通安全局（NHTSA）投入 100 辆汽车进行了驾驶员行为研究。他们采集了车辆状态信息，道路交通信息和在事故工况下以及濒临事故工况下的驾驶员行为信息。最终研究表明，注意力分散是事故发生的根源^[85]。日本新能源和工业技术发展组织（NEDO）利用三年的时间收集了正常工况下真实环境下驾驶员行为数据^[86]。欧洲 EURO-FOT 和 PROLPGUE 项目收集了数量十分可观的驾驶员信息。其中，EURO-FOT 主要关注于驾驶员信息在 ADAS 系统中的应用部分^[87]。

计算机图形学和计算性能的发展使得道路结构和交通车行为的

虚拟建模成为可能，这就使得驾驶模拟器可以模拟更为广泛的道路和交通状况。再加上处理器处理能力的发展和成本的下降，驾驶模拟器再次成为驾驶员行为特性研究的有力工具。和真实道路试验相比，驾驶模拟器具有可重复性好，工况设定更为灵活，耗时少，效率高，风险低等优点。尽管驾驶模拟器现在被广泛的应用于驾驶员特性研究中，但是对于通过驾驶模拟器获得的驾驶员特性数据和真实道路试验获得的驾驶员特性数据相比，其可靠性仍然需要进一步的验证。一个高质量的研究项目仍然需要平衡好驾驶模拟器实验数据和真实道路试验数据之间的关系。

4.5.4 人机交互系统的发展趋势

通过对目前人机交互系统的研究现状的分析，未来有关人机界面，人机交互和人机共驾可能的发展趋势包括：

在人机交互设计过程中，需要考虑不同人群的需求，这也是未来 HMI 设计标准和准则的制定方向。

车辆中和驾驶员操纵输入密切相关的部分，如转向盘力感，踏板脚杆，座椅舒适度，体感等，依然会是未来的研究方向之一。更适合驾驶员的操纵输入和身体感知将是一个需要持续努力的研究方向。

对于 ADAS 系统，驾驶员在获得辅助驾驶的同时，也会分散注意力增加驾驶负担，这是 ADAS 系统面临的一个重要问题。如何协调好驾驶员基本操纵行为和辅助驾驶系统之间的关系需进一步研究。

未来车辆以及交通领域不仅仅是驾驶员和车之间关系的研究，这一领域所面临的问题可能会是更为广泛的社会问题，需要更多领域的研究人员参与进来，如城市规划师，社会学家，人类学家等。

目前各国虽然都获得大量的驾驶员行为信息的数据库，但是如何将这数据应用于工程系统中仍有待研究。

第 5 章 测试验证篇

不管是身处汽车行业、IT 互联网，还是人工智能、机器人行业，都能听到自动驾驶的各种新闻，其中最大的热点就是关于各种自动驾驶测试区和各种自动驾驶演示测试活动。

自动驾驶将历经 4 至 5 个阶段才能进入完全无人驾驶的时代。目前可以实用化的技术是高级辅助驾驶 (ADAS)，而高级自动驾驶、完全无人驾驶等技术正在实验室和封闭、半封闭测试区紧锣密鼓的进行。只有经过长期的测试验证，自动驾驶车辆才能为大众提供安全可靠的出行服务。具体的讲，自动驾驶测试包括软件在环 (SIL)、硬件在环 (HIL)、车辆在环 (VIL)、场测、路测等环节，测试内容包括传感器、算法、执行器、人机界面等等各个环节，测试目的从应用功能、性能、稳定性和鲁棒性、功能安全、形式认证等等。

国外智能驾驶车辆的迅速发展，从某种意义上讲得益于其预先制定好的测试评价方法。在智能驾驶车辆测评方法发展初期，大多数的评价均是各个研发单位根据自身情况对其单项或部分功能要求进行单项指标评价，且大都是定性的评价。相反，无人驾驶车辆的定量评价很少，仅仅以简单的完成任务时间来评价无人驾驶车辆的性能。2000 年前后，美军在无人化战争的迫切需求和全球汽车电子巨大市场潜力的驱动下，无人驾驶车辆在军用和民用领域均处于迅猛发展的阶段。随着单项技术以及系统集成的逐渐成熟，测试与评价方法由单项测试向复杂综合能力测试发展，并出现了第三方测试。

自动驾驶汽车的开发测试，需要大量的训练数据采集和标注工作。如何有效采集数据，以及如何标记数据，是当前自动驾驶领域的一个热门话题。测试数据的简单标注可以自动化，复杂标注仍然需要大量人力。首先要有标记和训练学习的工作，把环境关键因素提取出来，然后要用图像处理等方式提取与环境其他要素之间的时空关系，这样

形成的数据就可以拿来分析建模，包括后续的算法开发和功能测评都可以用。除了训练数据采集，一个全面的评测数据集和合理的评测指标也非常关键。对于不同的任务，不同的技术阶段，需要有不同的评测指标和方法。

5.1 模拟仿真技术

5.1.1 需求分析

在智能驾驶领域，技术的每一步发展都必须以保障个人安全为丈量，于是它的发展除了将带给人们欢喜鼓舞的便利之外，也引发了对其安全性的担忧。自动驾驶汽车的实际道路测试有很大的局限性，需要用模拟仿真测试来弥补。实际道路测试采集的数据用于 **LDW/FCW/BSD** 这类报警应用还容易实现，但如果用于 **ACC/AEB/LKA** 这种有执行干预的应用，这些数据是无法用于调试加减速/转向这些干预功能和算法的。因为加减速/转向一变，采集数据没法跟着变。在很大一部分领域，比如 **LKA** 在不同转弯半径、车道宽度、车道标线形态的参数组合一下，就需要上千种场景，这就需要用到模拟仿真软件来实现。**ACC/TJA** 在不同拥堵状态和车流速度、车流组合状态下、本车速度的场景参数组合一下，也有成百上千种组合，这也需要用模拟仿真软件来构建。

谷歌、特拉斯、**Zoox** 等很多公司借助模拟仿真的方法力图使无人驾驶车的行驶里程尽快达到十亿英里。工程师基于大数据完善无人车辆的驾驶模型，实验场景从太阳光到传感器，再从不同角度的传感器到汽车前方的飞行障碍以及异常的外界行为等。而问题在于在重现现实场景并不容易，也不安全。兰德的一份报告发现，如果要测试无人驾驶的安全性是否达到可以接受的程度，实则需要上万英里甚至数十亿英里的实验里程作证明。即使作最合理的打算，现有的无人驾驶

车也需要几十年甚至数百年的时间才能完成预定的里程测试。而如果把测试放在现实道路上，则会是一个不可能完成的任务。

那么，从软件到硬件的模拟仿真被合理建模时，就会为公司实验和测试他们的无人驾驶汽车模式提供了可能性。它包括各种各样的应用场景，实时交通、司机行为、天气以及道路环境等。还要考虑传感器的使用情形，需要多少个相机和雷达？它们应该被放置在哪里？应该使用哪种模型硬件？

如今，诸如 Vires、TaSS PreScan、CarSim、Oktal ScanNer 和 ROS Gazebo 等产品给工程师模拟传感器及其发生机制和机械结构提供了可能。虽然模拟大多数传感器对于外界的感知存在困难，但是简单的模拟在车辆上的应用越来越普遍。

5.1.2 技术方案

Waymo 的自动驾驶模拟仿真软件 Carcraft

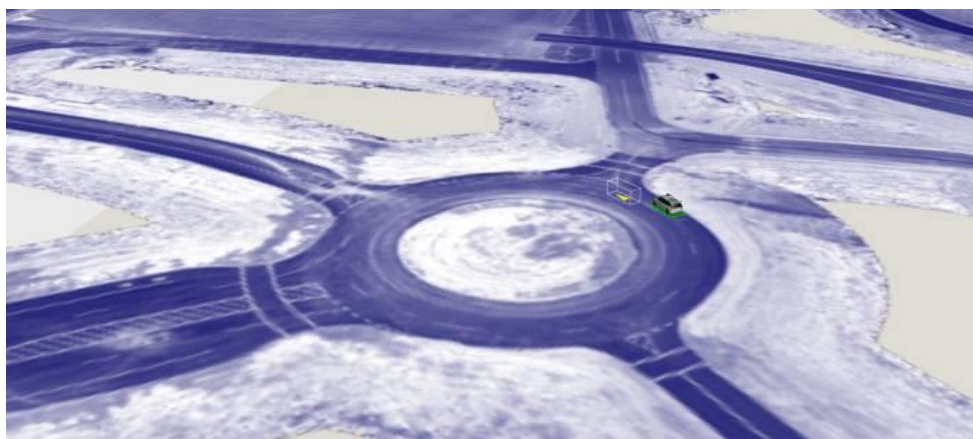


图 5-1 Waymo 自动驾驶仿真模拟架构软件

最初开发 Carcraft 是作为一种“回放”无人车在公共道路行驶经历场景的方式，之后慢慢发展成了仿真，并在 Waymo 自动驾驶项目中发挥了重大作用。目前已有 2.5 万辆虚拟自动驾驶汽车一直在奥斯丁、山景城和凤凰城的全建模版本里进行道路仿真测试，这其中还包括了一些赛道测试的场景。Waymo 可以在一天内沿着一条特别复杂

的道路模拟行驶数十万次，总行驶里程达到 800 万英里左右。2016 年，与谷歌 IRL 自动驾驶汽车在实际公共道路上运行的 300 多万英里相比，Waymo 已经行驶了 25 亿英里的虚拟路程。值得一提的是，这部分虚拟测试远比在现实高速公路上的测试有意思得多，因为工程师总是能学到一些新东西。

仿真测试是 Waymo 自动驾驶汽车研发中的一部分，仿真将 Waymo 自动驾驶原型车在实际道路中的测试与中央谷地一个叫做「城堡」(Castle)的秘密基地进行的“结构化测试”项目紧密结合在了一起。Waymo 此前从未公布过「城堡」的内部运作细节。在实际公共道路上进行的测试能够让开发人员知道需要在哪种地形进行额外训练。随后他们将这种地形在秘密基地「城堡」中复刻，使得测试车辆能够在不同的场景中进行训练。在这两种实体测试中，Waymo 的自动驾驶原型车捕获了足够数据，未来可以在任何时候进行全数字化的仿真模拟测试。在虚拟空间中，工程师可以解除真实世界的限制，并创造出数千个任何单一场景的变形，然后通过这些场景进行无人车的仿真测试。而随着自动驾驶软件的不断改善，实际路测无人车的表现会逐步提升，而整个测试的闭环又重新开始。

5.1.3 未来发展的技术挑战和趋势

对于模拟的里程效用真的有用吗？大家所持观点不一。支持一方认为，模拟可以用来模拟罕见情况和基线数据，罕见的情况是指难以重现或足够随机的场景。如果无人驾驶能够提供 99% 的可靠性，因为大部分场景已经通过模拟得以优化。而 AI 或 ML 的一些未来技术迭代则允许我们在没有事先数据预备的情况下，对极端情况做出反应。排除特殊情况之外，仿真对于构建基础数据集也非常有用，并且在此

基础上不断进行进一步的测试。反对一方则认为与此相对应的是：模拟环境不够好以至于不能高效地生成模型。通常，这是一个环境与车辆交互的场景，并且很难在现实场景中复现。此外，还存在着图像保真度过低的情景等等。

为了帮助解决有关数据质量的一些问题，研究人员正在测试将虚拟图像输入转化为现实模型的可能性，以改进模拟实验。谷歌曾放出消息，虽然许多政府机构还不愿意将模拟英里数作为规定中的自动驾驶测试所需里程的一部分，但随着对模拟的监管变得更加明确，这种情况可能会发生变化。

如果精确度足够高，那么模拟是有价值的。诚然，模拟可能不会解决的最后 1% 的自动驾驶问题。但如果技术可靠，那么在未来可以让模型完成更好的场景识别或应对更大范围的场景。许多公司对此表示赞同，包括特斯拉，Zoox，Comma.ai，Drive.ai 等，他们都在积极招聘模拟工程师。

模拟仿真技术的使用还能够扩展到无人驾驶领域之外。比如，我们可以借此理解无人机如何感知周围的世界，也能更好地明白交通、驾驶行为，甚至是行人行为的潜在逻辑。一个模拟环境中，存在足够多的特定模型和动态生命，因此我们还可以更好地理解机器人，它们将与我们的真实世界和数字世界发生交互。

5.2 试验测试示范区

欧美重视智能驾驶的测试与验证，建设智能驾驶专用测试设施。智能驾驶需要在完善的交通场景中对整个系统的表现进行测试，这是依靠传统测试设施无法实现的，因此世界各国开始升级换代现有试验场或新建专用测试场地，如美国安娜堡地区车联网示范区和 Mcity，瑞典 ASTA 试验场，英国 MIRA 试验场等。智能驾驶在场地测试后、

正式规模化应用以前，一般还会经过开放真实道路测试过程，以完成必要的技术验证和效果评估。

我国上海、重庆等地也开始智能驾驶相关测试的探索工作，但起步较晚，数量、规模和布局与我国汽车和交通产业的规模与技术水平不相适应，有必要建设完备的智能驾驶测试、评估与示范设施，尤其是先行建设场地测试条件。

5.2.1 国外情况

美国安娜堡车联网示范区

2014 年，美国交通运输部、密歇根州、安娜堡市以及密歇根大学共同成立了移动交通中心，并选择在安娜堡地区建立智能驾驶的测试基地。该项目分三期建设，首先在密歇根大学建立了占地面积 32 英亩的“模拟城市”试验场 (Mcity)，如图 5-2 所示，作为封闭测试场地，可以对交通环境变量进行控制对智能驾驶相关技术进行测试和评估。以封闭测试场地为基础，计划从 2016 年开始向外扩展，将密歇根大学附近的高速公路和部分城市道路进行改造，形成开放式测试场地，最终建成覆盖 27 平方英里的封闭和开放结合的测试示范区。安娜堡示范区整合了政府资源、技术资源以及行业资源，开展新技术的宣传与普及，以及人才培养，会员制的经营模式扩大了安娜堡示范区在行业内影响力。



图 5-2 Mcity 航拍图

瑞典 ASTA 测试场

瑞典沃尔沃集团在其总部所在地哥德堡市建设的 ASTA 智能驾驶技术封闭测试场，如图 5-3 所示。占地约 20 万平方米，可以对高速公路，城市道路，乡村道路等驾驶路况和交通状况进行模拟。所有的道路均有无线网络，电力以及光纤信号的覆盖，设有可用的模拟物品包括人型及动物假人，远程控制的“气球车”、道路护栏、交通标志等。

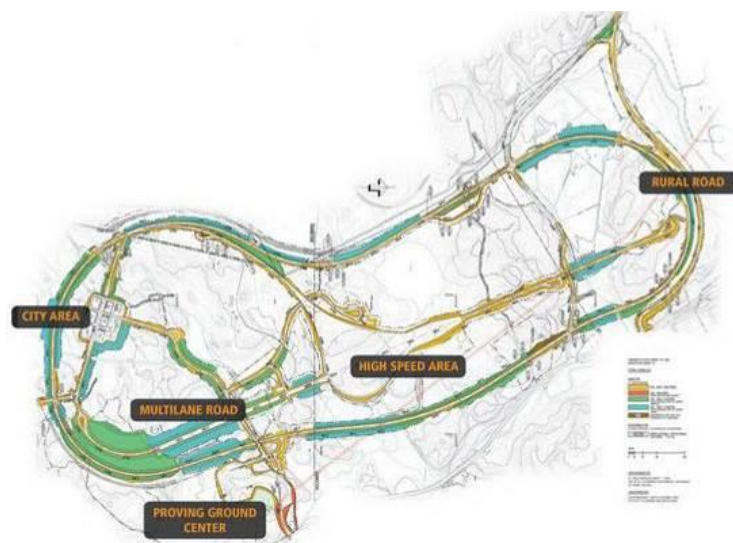


图 5-3 瑞典 ASTA 测试场

英国 MIRA 测试场

2011 年，英国 MIRA 公司对智能汽车和网联汽车测试场地的建设，如图 5-4 所示，旨在建立一个安全和可重复利用的 ITS 测试和评估环境。目前，MIRA 试验场建具有对城市道路，高速公路等交通环境模拟的功能，场内供电和网络全面覆盖，支持 GSM/GPRS、3G、WIFI 等多种通信方式，并设有齐备的交通基础设施，照明系统，监控系统，实时差分 GPS 参考站等服务设施。MIRA 试验场不仅提供 ADAS 技术测试服务，同时提供 GNSS 相关设备验证服务。



图 5-4 英国米拉公司（MIRA）试验场

美国陆军阿伯丁试验场

美国陆军阿伯丁试验场(Aberdeen Proving Ground)坐落在马里兰州哈福德郡的切萨皮克湾沿岸，是美军进行装备测试的国家试验场，为美国陆军提供了研发、测试和评估装备的多处设施。2017 年 1 月，阿伯丁试验场被美国交通部指定为自动驾驶测试的十大试验场之一。阿伯丁试验场面积广阔，车道总长超过 40 英里，是开展自动驾驶编队行驶测试的理想场所。

5.2.2 国内情况

上海国家智能网联汽车试点示范区

2016 年 6 月，由国家工信部批准的国内首个“国家智能网联汽车（上海）试点示范区”封闭测试区（如图所示）在上海市嘉定区安亭镇举行了开园仪式，可以为无人驾驶汽车提供综合性的测试场地和功能要求，标志着作为全球测试功能场景最多、DSRC 和 LTE-V 等 V2X 通讯技术最丰富，覆盖安全、效率、信息服务和新能源汽车应用等四类领域的国际领先的封闭测试区（一期）正式投入运营。该项目

首期以上海 F1 国际赛车场 3 公里道路为依托，逐步拓展同济大学嘉定校区 3.5 公里的道路，形成“两园”示范区，建成封闭式测试场地，并以此为核心，后期逐渐向外扩展，包含附近道路，最终覆盖嘉定全区，使示范区道路累计增加到 50 公里，基本建成基于智慧城市理念与要求下的汽车区域性示范区。示范其不仅致力于智能驾驶技术研发、标准规范研究和制定，同时也承担技术推广和宣传，产品技术测试与评估。

开放的一期测试场地，建设了 1 个 GPS 差分基站、2 座 LTE-V 通讯基站、16 套 DSRC 和 4 套 LTE-V 路侧单元、6 个智能红绿灯和 40 个各类摄像头，整个园区道路实现了北斗系统的厘米级定位和 WIFI 的全覆盖，完成了隧道、林荫道、加油/充电站、地下停车场、十字路口、丁字路口、圆形环岛等模拟交通场景，可以为无人驾驶、自动驾驶和 V2X 网联汽车提供 29 种场景的测试验证。



图 5-5 国家智能网联汽车（上海）试点示范区

天津智能网联汽车试验中心

2016 年，天津汽车检测中心启动了智能网联汽车试验中心建设项目，总体投资规模超过 3 亿元。其中智能网联汽车试验中心一期工程——ADAS 测试场地于 2016 年底正式动工，2017 年 7 月正式投入使用。

该测试场地坐落于中国汽车技术研究中心院区南侧，毗邻多角度碰撞试验室及建设中的风洞试验室。作为智能网联汽车试验中心的重要组成部分，试验路完全依据智能网联汽车自动驾驶及 ADAS 需求规划设计，包含交叉口、长直路、多车道、弯道、路缘石路肩、非铺装路肩等多种道路交通元素，并具备中国、欧洲、美国等多个国家和地区的标准道路标线，同时根据 ADAS 误作用测试需求设计建设有路面铁板等专用试验设施，满足企业开展 AEB、ACC、TJA、LKA、LDW、BSD 等 ADAS 功能的测试需求，2017 年内将进一步完成 V2X 试验能力和夜间可调照明环境系统等建设，辅助开展半自动、全自动驾驶功能的功能测试。



图 5-6 智能汽车室 ADAS 测试评价设备

在智能网联汽车试验能力方面，作为国内率先投建 AEB、ESC 等 ADAS 试验能力的第三方检测机构，天津汽车检测中心相关能力已全面对标国际一流实验室，汇聚全球各顶尖设备商供应的自动驾驶机器人、软碰撞台车、碰撞假人、牵引机构、惯性导航系统等专用测试设备。依托智能汽车专业测试技术团队建设、持续性的硬件设备投入，天津汽车检测中心在 2017 年内全面提升试验项目承载能力，将实现三支独立团队并行开展试验任务。未来，天津汽车检测中心希望能以智能网联汽车试验中心为依托，与行业开展多形式、多层次的技术交

流，共同合作研究智能网联汽车技术及试验评价方法，为推动中国智能网联汽车技术进步、提升道路交通安全性贡献力量。

江苏无锡国家智能交通综合测试基地

2017 年 8 月，工业和信息化部、公安部、江苏省人民政府签署“共建国家智能交通综合测试基地”协议，将综合测试基地建设作为大力发展车联网、推进智能交通建设的重要抓手，希望促进产业集聚和融合发展,破解智能网联汽车上路测试、责任认定等难题。9 月 10 日，工业和信息化部、公安部、江苏省人民政府共建的“国家智能交通综合测试基地”在无锡正式揭牌。



图 5-7 国家智能交通综合测试基地分布示意图

测试基地位于无锡市滨湖区，目前规划总面积为 178 亩，2 年内扩展至 208 亩，封闭测试道路总长 3.53 公里，分为公路测试区、多功能测试区、城市街区、环道测试区和高速测试区等，包括不少于 150 个由多种类型道路、隔离设施、减速设施、车道线、临时障碍物、交通信号、交通标志等组成的实际道路测试案例。测试基地建成后将对功能符合性、性能可靠性和稳定性等关键性能进行测试评估，同时为自动驾驶技术提供第三方权威测试和认证。

测试基地将与无锡市政府合作打造“智能车特色小镇”，建设基于测试基地内封闭式和测试基地外半开放式实际公共道路测试环境，构建实际道路测试场景和管理平台，包括由多种类型道路、障碍物、交通信号、交通标志、特殊气象条件环境等构建形成的综合实际道路测试场景。

5.3 测试验证技术

自动驾驶落地的困难茫茫多，其中一条就是如何对其进行测试，验证自动驾驶技术的安全性能。在此前，国外已经有机构通过研究提出，如果要证明自动驾驶能够比人类驾驶员更可靠，那么至少需要在真实或者模拟环境中行驶 110 亿英里才行。如果真的按照这个思路去测试，那么这个任务几乎是不可能完成的。且不说行驶 110 亿英里需要花费的人力物力财力，就算完成了这个测试，黄花菜也就凉透了。更何况，那么多的企业要制造推出自动驾驶车，在企业的自我测试之外，政府还需要有一套标准的测试方式对其验证，如果这个标准测试方法也按照这个方式来进行，自动驾驶的到来就是遥遥无期。

5.3.1 需求分析

在自动驾驶路测最为火热的美国加利福尼亚州，交通部门明确规定申请自动驾驶测试的企业要缴纳 500 万美元（约合人民币 3270 万元）保证金，并且要求“上路前已经尽可能地模拟了真实交通条件，申请者已经合理确定在公共道路上操作车辆是安全的”。取得牌照的企业需要按年度上报路测数据和“脱离”次数及原因。“脱离”是指进入自动驾驶系统失败或需要人工干预的情况。在这样的规定之下，自 2014 年 9 月开始实施自动驾驶路测规定后，截至 2017 年 9 月 1 日，美国加利福尼亚州交通管理局共发出 40 张路测牌照。其中包括一种车企、互联网科技公司以及自动驾驶创业企业。

2017 年 9 月 6 日，美国众议院正式通过“自动驾驶法案”（SELF-DRIVE Act），允许汽车厂商和科技公司每年在公共道路进行 10 万台车辆的自动驾驶测试。该法案要求，在车辆上路前，厂商需要证明其自动驾驶汽车至少如人驾驶车辆一样安全，测试过程中车辆必须报告意外发生的次数和情况，同时在公共数据库进行登记，确保数据隐私和安全。

2017 年 9 月，我国工信部装备司组织召开的《智能网联汽车公共道路适应性验证管理规范（试行）》讨论会，工信部联合公安部和交通部计划制定自动驾驶汽车公共道路测试管理规范，给予自动驾驶汽车上路权限，同时也加以规范。在被讨论的《规范》中，自动驾驶汽车路测申请流程与国际惯例类似，测试主体提出申请，主管部门设定申请门槛条件，颁给符合要求的申请者测试牌照。申请主体没有特别限制，除传统汽车公司和零部件公司外，互联网公司和高校院所等均可提出申请。但自动驾驶车辆进入公共道路前，需要经过 5000 公里实车验证和第三方技术机构验证。

5.3.2 技术方案

军用方面，从 2000 到 2003 年，美国国防高级研究计划局(DARPA)在其主导的 PerceptOR 项目[17]中对无人车自动驾驶能力进行了评价实验。此实验选择了美国 6 个具有代表意义的环境展开测试，对无人车在树林、沙漠、草地、山区等多种地形下的自主性能进行评价。测评的特点是采用统一的 Honda Foreman Rubicon 全地形车作为测试对象；测试人员是独立于开发人员的，也就是说测试的路线和环境对于开发人员是完全未知的；对任务均进行人工、遥控和自主行驶三种测试；建立了多重评价指标；在不影响车辆自主行驶的前提下测试车辆状态，并配备统一的 E-Stop 装置；最终的评价结论是由测试人员和开发人员共同对无人车运行数据进行对比分析得到的。在随后的

LearningGR 项目 (Learning Applied to Ground Robots), 对无人驾驶车辆地形通过的学习能力进行了测试和评价[18-20]。通过检测多次通过后地形识别的误差, 对车辆的学习能力进行了评估。Wagan 提出了 HCD(Harris Corner Detector)方法, 用以得到真值和被测数据的特征点, 利用特征点的匹配程序估计地图构建的能力。Censi 提出了利用贝叶斯边界的方法用来评价两个不同无人驾驶车辆的 SLAM 能力。与此同时, DARPA 又连续组织了三届无人驾驶车辆比赛, 分别是 2004 年、2005 年的 Grand Challenge 和 2007 年的 Urban Challenge。这三次比赛均借助 PerceptOR 项目的测评方法, 且完全是第三方测试, 测试环境和测试内容对于参赛车队是完全未知的, 比赛以完成所有规定项目的耗时长短作为评价指标。在 2007 年的 Urban Challenge 中, Urmson 等人对 CMU Boss 无人驾驶车辆的导航能力进行了测试和评价, 测试内容包括: 未知路径跟踪测试 (Blind Path Tracking Test), 无人驾驶车辆通过位置传感器跟踪预先规划的路径的测试; 感知辅助的路径跟踪测试 (Perception Assisted Path Tracking Test), 无人驾驶车辆在处理传感器感知信息辅助下的跟踪规划路径的测试; 感知规划测试 (Perception Planning Test), 无人驾驶车辆为了避免碰撞感知的障碍动态修改预先规划的路径的测试。

类似地, 欧洲在 2006 年举办了第一届以德国联邦军队主导的机器人车辆试验赛 (ELROB), 共有来自德国、英国、瑞士、法国和葡萄牙 5 个国家的大学和公司组成了 18 个参赛队伍参加了本次比赛。全程需要穿越城市、乡村、越野和沙漠等环境, 允许车辆采用自主或遥控方式行驶。与美国 DARPA Grand Challenge 不同, 欧洲的 ELROB 比赛更加强调适应性和交互性。此外, 机器人车辆还可以与操作人员进行实时通信, 并能向裁判员汇报检测结果。2007 年, 欧洲又举办了联合无人车 UGV 和无人机 UAV 的 C-ELROB 比赛^[28]。除了允许 UGV

和 UAV 采用自主或遥控方式,还可以使用 UAV 检测和确定任务设定的区域,当 UAV 与操作人员或 UGV 完成通信后,UGV 就能准确的到达指定区域,完成相应的任务并将结果汇报给裁判员,如果时间允许并能返回原地。此后,在 2008 年到 2014 年的 7 年时间里,ELROB 又分别开展了六次赛事,并分别按照军用和民用设定相应的比赛环境和任务,且第三方测试评价方法的制定也随着比赛的延续而变得更加全面和科学。

民用方面,从 1997 年 8 月到 2004 年 1 月,美国加州大学伯克利分校 PATH 分别对乘用车、公共汽车、商用卡车和特种车辆进行了 11 次自动化公路行驶的演示试验^[31-34]。演示试验采用磁道钉装置、车间通信、雷达、GPS 导航等技术,实现车辆编队行驶,车队拆分和车道变换等一系列功能测试,并结合安全交通和实际交通目标评价车队控制系统对横向车道位置与纵向车辆间距的稳定性。日本 AIST 主导的 Smart Cruise 21 Demo 2000 主要对执行车辆协作策略的车车通信的实时性、速率、丢包率等进行测试与评价^[35-36]。而 2009 年由欧盟赞助、英国 Ricardo 主导的 SARTRE 演示试验,更是综合了以上两次试验的测试方法,对车道保持、车队跟随和车车通信等多项技术分别作出了评价,并根据测评结果结合发展需求制订了下一步的研究计划^[37]。2011 年 5 月由荷兰应用科学研究院(TNO)和荷兰高科技汽车系统创新计划(HTAS)组织的第一届 GCDC 比赛在荷兰的埃因霍温和赫尔蒙德之间的 A270 公路试验场举行^[38]。比赛利用车队长度、通过红绿灯次数、车队稳定性等指标来评价智能驾驶车辆纵向控制和协作的性能。比赛的目的是智能驾驶车辆在自主行驶的基础上加快实现无线通信的互操作性,提高合作驾驶并着眼于实时应用,以改善交通流量,减少交通拥堵。在有限的道路资源下合理地、最大化地增加交通流量。

综上所述,随着立体相机、3D 激光雷达、高精度动态定位、高

性能计算等新设备的应用，无人驾驶车辆测试评价方法已经愈来愈成熟。谷歌无人驾驶车辆在已结束的加州山景城道路测试中，确定了涵盖典型场景、系统性能边界和约束条件的统一测试评价方法。奥迪、奔驰、大众、德尔福、博世等传统车企和供应商，尽管已获得无人驾驶的路试许可证，但是仍然采用汽车安全辅助驾驶系统（ADAS）关于可控性、有效性及可接受程度的测试评估方法。特斯拉电动车公司虽然不像谷歌采用的“一步到位”策略，但其借助 OTA 升级手段，利用用户数据返回和体验效果来稳步提升自动驾驶的成熟度和可接受程度。我国智能驾驶测试评估方法需要在考虑中国道路设施、路面车辆类型、行人、信号措施、汽车社会化发展阶段等复杂性和特点的基础上，按照无人驾驶车辆智能等级划分结果，依托现有成熟的 ADAS 测试评估方法，制定环境认知、路径规划、行为决策与控制等方面综合功能的测试评价方法。

Mcity 的自动驾驶快速测试方法论

密歇根大学机械工程学院研究出了一套加快评测进程的方式。这套方式重点针对可能发生危险的状况，以及在这种情况下自动驾驶车辆的应对措施，进而对自动驾驶的可靠性进行评估。相较于传统的方式来说，能够加快速度，并且减少资金花费。测试自动驾驶车，需要考虑到的问题是：1.自动驾驶车个体的不同，即在应对危险或者意外时，会采取不同的测录；2.要尽可能在所有场景中，考虑不同的道路与驾驶环境、天气；3.在自动驾驶车的早期，将会是自动驾驶与人类驾驶员混行的状态，因而自动驾驶车与人类驾驶的车辆之间的交互也是必须考虑的。

密歇根大学提出的加快评测进程的核心思想是，将真实驾驶环境分解成不同的场景，这些被分解的场景易于进行模拟和重复测试，在

每一个特定的场景，按照他们的方法进行加速测试。为了研究加速测试的方式，研究员对驾驶数据进行了六步分析：

1. 大量收集实际行驶过程中的数据。
2. 对数据进行过滤，保留下包含自动驾驶车与人类驾驶的车辆进行有价值的交互的数据。
3. 对人类驾驶行为进行建模，以此作为对自动驾驶车产生主要威胁，并且是概率分布的随机变量。
4. 减少日常驾驶中的没有发生事故的数据，然后用发生了危险事故的数据进行取代。
5. 在加速场景下使用蒙特卡罗的算法，从而能够在人类驾驶员与自动驾驶车之间产生高频率高密度的相互。
6. 使用统计分析的方式，根据测试的结果去反推，在实际情况中，自动驾驶车的表现情况。

在经过六步分析方法后，提供四种方法作为加速测试进程的基础：

1. 基于道路上发生一件与安全相关的关键事件的频率，刨除了安全驾驶的状态。
2. 使用重要抽样的方式来从统计上增加关键事件的发生次数，保证这些增加的事件依然能够正确反映真实环境中的驾驶条件。
3. 建立一个公式能够正确地提取出关键事件的数据，针对这些数据进行测试并用来进一步降低测试所需要的次数。
4. 在经过优化的随机事件中，对最复杂场景下的关键事件里人类驾驶员与自动驾驶车之间的交互数据进行分析。

目前针对两个场景进行测试：跟车、超车。在这两个状况中，被测试车辆都是处于后面的车，需要应对前方车辆的不同行为，而前方车辆默认是人类驾驶的。这两个场景选取于常见的发生事故的场景，在超车场景中，是由人类驾驶的车辆切入自动驾驶车前方，并且在自

动驾驶车后方还有一辆人类驾驶的车。

在不同的场景中，会考虑发生事故的可能、事故带来的伤害以及交通冲突率，考虑时会设定自动驾驶中有 1 名或多名乘客，他们受到中等程度以上伤害的结果。评估结果的准确性由行为决定，并将评估的结果与真实模拟的情况进行对比，来进行验证。如果将以上四种方式在一个整体测试进程中结合使用，那么这套评估程序能够将测试时间减少 300-10 万倍。如果一辆自动驾驶车按照这种方式在最严苛与最具挑战性的驾驶状态中行驶 1000 英里，那么可以相当于在真实环境中行驶了 30 万~1 千万英里。

未来，还会增加更多的测试场景：包括左转、十字路口以及对向来车的情况。另外，还需要能够仅仅只有车辆的碰撞，以及包含行人与骑行者的情况。研究人员们还需要更多的关键场景来对自动驾驶车可能出现的失效情况进行分析，比如像雨雪与大雾天气对传感器带来的挑战；闪烁的灯光以及来自其他驾驶员的手势；不符合交通规则的行为，闯红灯的车辆或者不按规则过马路的行人；重型车的驾驶行为，因为相比较乘用车重型车反应要慢等等。

ADAS 测试技术

2017 年 8 月，天津汽车检测中心在 ADAS 测试场地进行了 AEB 公开测试试验，来自国内多家整车与零部件企业、高校及科研机构的 300 余名技术专家莅临现场。测试过程包含技术说明会、AEB 现场试验、实车技术讨论等多个环节。



图 5-8 AEB 公开试验活动现场

DNN 驱动的驾驶系统测试技术

深度神经网络 (DNN) 近来的进展推动了 DNN 驱动的自动汽车的发展, 这些汽车使用了相机、激光雷达等传感器, 无需人类干预也能自己驾驶。但是, 尽管 DNN 成绩斐然, 但就像传统软件一样, 往往会表现出不正确的或非预期的极端案例行为, 这些行为可能会导致潜在的致命撞车。现在已经出现了一些涉及到自动驾驶汽车的车祸, 包括一起出现了死亡的事故。对 DNN 驱动的汽车的大多数已有的测试技术都严重依赖于人工收集的不同驾驶条件下的测试数据, 随着测试条件的增多, 这种收集方法的成本也会变得非常高昂。

来自弗吉尼亚大学和哥伦比亚大学的几位研究者提出了一种自动测试深度神经网络自动驾驶汽车的方法 **DeepTest**, 可以对自动驾驶系统进行更加全面的测试评估。**DeepTest** 是一个系统性的测试工具, 可用于自动检测 DNN 驱动的汽车可能导致致命碰撞的错误行为。首先, 该工具经过设计可以自动生成测试案例, 这种生成利用了驾驶环境的真实变化, 比如雨、雾、光照条件等。其次, 通过生成能最大化激活神经元数量的测试输入, **DeepTest** 系统性地对 DNN 逻辑的不同部分进行了探索。在 **Udacity** 自动驾驶汽车挑战赛中三个表现最好的 DNN 上, **DeepTest** 发现了不同现实驾驶条件 (比如模糊、雨、雾等) 下的数千种错误行为, 其中很多都可能导致致命碰撞。

自动驾驶编队测试技术

美国联邦公路管理局 (FHWA) 下属特纳费尔班克公路研究中心 (Turner-Fairbank Highway Research Center, TFHRC)、美国交通部下属沃尔佩国家交通系统中心 (Volpe National Transportation Systems Center) 和美国陆军阿伯丁测试中心 (U.S. Army Aberdeen Test Center) 在位于马里兰州的美国陆军阿伯丁试验场 (Aberdeen Proving Ground) 开展了一项研究名为“测试和评估基于协同自适应巡航控制的汽车编队

行驶概念验证雏形”(Test and Evaluation of Vehicle Platooning Proof-of-Concept Based on Cooperative Adaptive Cruise Control)。

5 辆具有自动化纵向控制功能的凯迪拉克汽车组成了研究人员所称的编队概念验证雏形。为使 5 辆凯迪拉克汽车形成编队，上述机构的研究人员为试验车辆配备了特殊的车载计算机，并将计算机与车对车(V2V)通信设备相连接。该通信设备利用专用短途通信技术(Dedicated Short-Range Communication, DSRC)，使车辆能彼此之间接收和传输数据。利用 V2V 技术，车辆能够快速地彼此沟通和分享信息，比如是否需要加速或减速以保持理想的行车间距。通过在车辆之间建立连接，我们能够对车辆交通实施集体管理，而不再是管理单独车辆。这项研究的独特之处在于主要侧重于自动驾驶系统协同配合方面，如果车辆能与基础设施以及彼此之间进行通信，就能利用这项功能来更高效地协调道路交通，从而节约大量的燃油和交通时间。



图 5-9 车载计算机与车对车(V2V)通信设备相连接

跟随车辆紧跟前方车辆，并接收编队中其他车辆的信息，这就是它们彼此之间的沟通方式——计算机能够计算车辆的当前及预计行驶轨迹，从而在行驶过程中保持相对位置。车载计算机不仅要控制刹车和加速，还要接收前方车辆的雷达数据，这些数据将用于帮助自适应巡航控制系统实现自适应巡航控制功能。测试车辆能够掌握前方车辆的位置和车速，并根据这些信息来控制刹车和油门，从而控制跟随

车辆的位置。对协同性自适应巡航控制技术（CACC）进行算法校准将是后续研究重要的工作之一。研究人员收集测试过程中的数据，监控车辆间的间距，确定跟随车辆难以及时进行加速或减速的过小间距，从而确保与领头车辆保持适当间距。研究处于大量测试、反思、更新代码，再次测试、反思、更新代码的循环流程。团队不仅从技术可行性的角度展开研究，也在与汽车厂商进行合作、共享研发成果，他们希望能与汽车产业共同打造自动驾驶编队的雏形，使之具备在公路上变道和并道等功能。

5.3.3 未来发展的技术挑战和趋势

对于中国来说，自动驾驶更是一个非常火热的未来潮流，从业者对于国内的自动驾驶相关法律法规也是翘首以待，因为到目前为之，中国的公共道路上还不允许自动驾驶汽车行驶，才有了此前百度 CEO 李彦宏乘无人车上路被调查的尴尬。但也不要太灰心，中国在自动驾驶方面的法规进程也在加快。

2017 年 9 月，国家发展改革委产业协调司在 2017 中国汽车产业发展(泰达)国际论坛上表示，根据智能汽车业快速发展需要，发改委正在组织起草国家智能汽车创新发展战略，使其成为引领我国智能汽车业发展的行动纲领。同时还将加快智能汽车领域立法，对公共道路测试和驾驶人的责任划分做出规范。

智能汽车发展是大势所趋，更是中国汽车产业发展的重大机遇。当前以智能化为重要特征的全球新一轮科技革命和产业变革仍在孕育兴起，人工智能发展将推动人类生产生活方式发生深刻变化，从历史上看，汽车产业和产品是新技术应用的重要载体，也带动相关产业基础设施创新发展和建设。为加快我国智能汽车创新发展，力争在全球新一轮产业变革中抢占制高点，发改委将会同有关方面抓紧开展五项工作，内容包括强化顶层设计，制订总体战略;集中优势资源，构建

创新平台;聚焦核心技术, 加强科研公关;优化制度供给, 完善法规标准, 加快我国智能汽车领域立法;创造使用条件, 促进智能交通基础设施和安全管理设施有序开展。

参考文献:

- [1] 中国电子信息产业发展研究院. 智能网联汽车测试与评价技术, 智能制造测试与评价技术丛书. 中国工信出版集团, 人民邮电出版社, 2017..2.
- [2] 中国制造 2025.
- [3] 赵福全, 中国发展智能汽车的战略价值与优劣势分析.
- [4] Vis I F A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 170(3): 677-709.
- [5] Gupta R A. Vision based control for autonomous vehicle navigation[M]. North Carolina State University, 2010.
- [6] I. Masaki, editor. Vision-based vehicle guidance. Springer-Verlag New York, Inc., NewYork, NY, USA, 1992.
- [7] Paden B, Cap M, Yong S Z, et al. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-driving Urban Vehicles[J]. arXiv preprint arXiv:1604.07446, 2016.
- [8] The DARPA urban challenge: autonomous vehicles in city traffic[M]. springer, 2009.
- [9] 孙振平, 安向京, 贺汉根. CITAVT-IV——视觉导航的自主车[J]. 机器人, 2002, 24(2): 115-121.
- [10] 肖延胜. 为极速智能车保驾护航——记清华大学计算机系 THMR 课题组之智能汽车研究[J]. 中国发明与专利, 2011, 12:

-
- [11] 马钧, 曹静. 基于中国市场特定需求的汽车先进驾驶辅助系统发展趋势研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2012 (3): 5-10.
 - [12] 中国智能驾驶白皮书. 中国人工智能学会, 2016.11.
 - [13] <http://www.aiweibang.com/yuedu/129677885.html>.
 - [14] <http://www.010lm.com/life/2016/0519/1972976.html>
 - [15] http://www.kacheren.com/news/201710/8_4116.html
 - [16] <https://zhuanlan.zhihu.com/p/21252434?refer=qcdzsj>
 - [17] <http://www.askci.com/news/dxf/20161128/17102479793.shtm>
1
 - [18] Sheng W, Yang Q, Guo Y. Cooperative Driving based on Inter-vehicle Communications: Experimental Platform and Algorithm[C]// Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2006:5073-5078.
 - [19] 宋洁. 无人驾驶智能车路径引导的研究[D]. 西安工业大学, 2013.
 - [20] 李爱娟. 智能车运动轨迹规划中的关键技术研究现状 .Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering 第 32 卷第 7 期。
 - [21] 辛江慧, 李舜酩, 廖庆斌. 基于传感器信息的智能移动机器人导航评述[J] .传感器与微系统, 2008, 27(4): 4 ~ 7
 - [22] Cheng P, Frazzoli E, LaValle S. Improving the performance of sampling-based motion planning with symmetry-based gap reduction [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24 (2): 488~ 494
 - [23] 汪明磊. 智能车辆自主导航中避障路径规划与跟踪控制研

-
- 究 [D]. 合肥工业大学, 2013.
- [24] Brooks, R. A robust layered control system for a mobile robot. IEEE J. Robotics Autom., 1986, 2(1),14–23.
- [25] Bila C, Sivrikaya F, Khan M A, et al. Vehicles of the Future: A Survey of Research on Safety Issues[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, PP(99):1-20.
- [26] Sivaraman S, Trivedi M M. Looking at Vehicles on the Road: A Survey of Vision-Based Vehicle Detection, Tracking, and Behavior Analysis[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(4):1773-1795.
- [27] Cesari G, Schildbach G, Carvalho A, et al. Scenario Model Predictive Control for Lane Change Assistance and Autonomous Driving on Highways[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(3):23-35.
- [28] 中国汽车工业协会.智能汽车的基础：浅谈车辆自动驾驶轨迹规划的作用。东南大学物联网研究中心, 2016.4.
- [29] 杨世强, 傅卫平, 张鹏飞.四轮全方位轮式移动机器人的运动学模型研究 J].机械科学与技术, 2009, 28(3):412 ~ 420
- [30] Bryson A E , Ho Y C . Applied Optimal Control [M]. BristolPA: Hemisphere, 1975
- [31] 宋金泽, 戴斌, 单恩忠等. 融合动力学约束的自主平行泊车轨迹生成方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版) , 2009, 40(Suppl.1) : 135~141.
- [32] 中国智能驾驶白皮书. 中国人工智能学会, 2016.11.
- [33] 彭金帅. 浅析无人驾驶汽车的关键技术及其未来商业化应用. 科技创新与应用.

-
- [34] 中国智能驾驶白皮书. 中国人工智能学会, 2016.11.
- [35] Hedrick J K, McMahon D, Narendran V, et al. Longitudinal Vehicle Controller Design for IVHS Systems[C]// American Control Conference. IEEE, 2009:3107-3112.
- [36] Yanakiev D, Kanellakopoulos I. Longitudinal control of automated CHVs with significant actuator delays[J]. Vehicular Technology IEEE Transactions on, 1997, 50(5):1289-1297.
- [37] Ioannou P, Xu Z, Eckert S, et al. Intelligent cruise control: theory and experiment[C]// Decision and Control, 1993. Proceedings of the, IEEE Conference on. IEEE, 1993:1885-1890 vol.2.
- [38] 付胜明. 基于智能滑模控制的线控防抱死系统(ABS)研究[D]. 山西大学, 2013.
- [39] 袁磊. 四轮轮毂驱动电动汽车滑移率控制系统研究[D]. 吉林大学, 2016.
- [40] Peng H, Tomizuka M. Vehicle Lateral Control for Highway Automation[C]// American Control Conference. IEEE, 1990:788-794.
- [41] Niehaus Axel, Stengel R F. An Expert System for Automated Highway Driving. Proceedings of the 1990' American Control Conference: 901 — 907
- [42] Habib M S. Robust Control of Driver — Vehicle Steering Behavior, Road Vehicle Automation II-Towards Systems Integration, Christopher Nwagboso. JOHN WILEY&SONS, 1995
- [43] Sahin T B, Ozbay H, Hatipoglu C. Design of Multivariable H^∞ — Based Steering Controllers for Vehicles with Modeled

-
- Time Delays. Advances in Automotive Control, Rizzoni G and Utkin V. PERGAMON. 1998
- [44] Ackermann Julgen, Guldner Jurgen, Sienel Wolfgang, Steinhauser Reinhold, Utkin V. Linear and Nonlinear Controller Design for Robust Automatic Steering. IEEE Transactions on Control System Technology, 1995;1(1)
- [45] Kehtarnavaz N, Sohn W. Steering Control of Automated Vehicle by Neural Networks. Proceedings of 1991 ' American Control Conference: 3096 — 3101
- [46] Heinzl P, Lugner P, Plochl M. Stability control of a passenger car by combined additional steering and unilateral braking[J]. Vehicle Syst. Dyn., 2002, 37:221–233.
- [47] Cong G, Mostefai L, Denai M, et al. Direct Yaw-moment Control of an In-Wheel-Motored Electric Vehicle Based on Body Slip Angle Fuzzy Observer[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. 2009, 56(5):1411 – 1419.
- [48] Wang R R, Zhang H, Wang J. Linear Parameter-Varying Controller Design for Four Wheel Independently-Actuated Electric Ground Vehicles with Active Steering Systems[J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2013, PP(99):1–16.
- [49] Song J. Active front wheel steering model and controller for integrated dynamics control systems[J]. Int. J. of Automotive Technology., 2016, 17(2):265–272.
- [50] Shino M, Nagai M. Yaw-moment Control of Electric Vehicle for Improving Handling and Stability[J]. JSAE Review, 2002, 22(4):473–480.

-
- [51] Shino M, Nagai M. Independent wheel torque control of small-scale electric vehicle for handling and stability improvement[J]. JSAE Review, 2003, 24(4):449-456.
- [52] 王蕾, 宋文忠. PID 控制[J]. 自动化仪表, 2004, 25(4):1-6.
- [53] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 清华大学出版社, 2003.
- [54] 祁华宪. 基于驾驶意图识别的纯电动汽车模糊控制策略研究[D]. 合肥工业大学, 2017.
- [55] 解学书. 最优控制:理论与应用[M]. 清华大学出版社, 1986.
- [56] Khalil H K. Nonlinear Systems Third Edition[J]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc. 2002, 2002.
- [57] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [58] 席裕庚. 预测控制 (第 2 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [59] 许芳. 快速模型预测控制的 FPGA 实现及其应用研究[D]. 吉林长春: 吉林大学博士学位论文, 2014.
- [60] 邱东强, 涂亚庆. 神经网络控制的现状与展望[J]. 自动化与仪器仪表, 2001(5):1-7.
- [61] 孙志军, 薛磊, 许阳明, 等. 深度学习研究综述[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8):2806-2810.
- [62] 段艳杰, 吕宜生, 张杰, 等. 深度学习在控制领域的研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(5):643-654.
- [63] Scheuer A, Fraichard T. Planning Continuous-Curvature Paths for Car-Like Robots[A]. IEEE Int. Conf on Intelligent Robots and Systems[C]. 1996, Osaka, Japan, 3:1304-1311.
- [64] Scheuer A, Fraichard T. Planning Continuous-Curvature Paths

-
- for Car-Like Robots[A]. IEEE Int. Conf on Intelligent Robots and Systems[C]. 1996, Osaka, Japan, 3:1304-1311.
- [65] Fleury S. Soueres P. Primitives for Smoothing Mobile Robot Trajectories[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(3): 441-448.
- [66] Nelson W L. Continuous Steering-Function Control of Robot Carts[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1989, 36(3): 330-337.
- [67] Gomez-Bravo F, Cuesta F, Ollerob A, et al, Continuous curvature path generation based on B-spline curves for parking manoeuvre[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(4):360-372.
- [68] Reeds J A, Shepp L. A.. Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards[J]. Pacific Journal of Mathematics, 1990, 145(2):367-393.
- [69] Fraichard T, Scheuer A. From Reeds and Shepp's to Continuous-Curvature Paths[J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 2004, 20(6): 1 — 12.
- [70] Müller B, Deutscher J, Grodde S. Continuous Curvature Trajectory Design and Feedforward Control for Parking a Car[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3):541-553.
- [71] S Tsugawa, T Yatabe, T Hirose, S Matsumoto. An automobile with artificial intelligence [A] International joint conference on Artificial intelligence[C]. Tokyo, Japan, 1979, 2:893-895.
- [72] D A Pomerleau. Neural Networks for Intelligent Vehicles [A].

-
- IEEE Intelligent Vehicles Symposium [C] . 1993 : 1924.
- [73] E Onieva, J E Naranjo, V Milanés, etc. Automatic lateral control for unmanned vehicles via genetic algorithms [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(1): 1303-1309.
- [74] V L Bageshwar, W L Garrard, R Rajamani. Model Predictive Control of Transitional Maneuvers for Adaptive Cruise Control Vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(5): 1573-1585.
- [75] T Keviczky, P Falcone, F Borrelli, etc. Predictive Control Approach to Autonomous Vehicle Steering [A]. Proceedings of the 2006 American Control Conference[C]. Minneapolis, Minnesota, USA, 2006: 4670-4675.
- [76] H J Zhang, H Y Chen, T Hong. Study on Tracking System of Intelligent Vehicle Based on Self-tuning Fuzzy Controller [A]. International Conference on Multimedia Technology [C]. Ningbo, China, 2010, 1:1-5.
- [77] 高振海.汽车方向预瞄式自适应 PD 控制算法[J].机械工程学报, 2004, 40(5): 101-105.
- [78] 高振海, 管欣, 郭孔辉.驾驶员确定汽车预期轨迹的模糊决策模型[J].吉林工业大学自然科学学报, 2005, 30(1): 7 — 10.
- [79] T. Ross, K. Midtland, M. Fuchs et al., HARDIE Design Guidelines Handbook: Human Factors Guidelines for Information Presentation by ATT Systems, Commission of the European Communities, Brussels, Luxembourg, 1996.
- [80] C. Heinrich, “Automotive HMI International Standards,” in Proceedings 4th International Conference on Applied Human

Factors and Ergonomics (AHFE '12), 2012.

- [81] A. Baron and P. Green, "Safety and usability of speech interfaces for in-vehicle tasks while driving: a brief literature review," Technical Report UMTRI 2006-5, University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, Mich, USA, 2006.
- [82] K. Naab and G. Reichart, "Driver assistance system for lateral and longitudinal vehicle guidance—heading control and active cruise support," in Proceedings of International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC '94), pp. S449–S454, Tsukuba, Japan.
- [83] M. P. Heyes and R. Ashworth, "Further research on carfollowingmodels," Transportation Research, vol. 6, no. 3, pp. 287–291, 1972.
- [84] J. C. Hayward, "Near miss determination through use of a scale of danger," Highway Research Record, vol. 384, pp. 24–34, 1972.
- [85] D. Popiv, C. Rommerskirchen, M. Rakic, M. Duschl, and K. Bengler, "Effects of assistance of anticipatory driving on driver's behaviour during deceleration situations," in Proceedings of the 2nd European Conference on Human Centred Design of Intelligent Transport Systems (HUMANIST '10), Berlin, Germany, April 2010.
- [86] S. G. Klauer, T. A. Dingus, V. L. Neale, J. Sudweeks, and D. Ramsey, "The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: an analysis using the 100-car naturalistic driving study data," Technical Report DOT, HS 810 594, U.S. Department of

Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA, 2006.

- [87] T. Sato and M. Akamatsu, “Influence of traffic conditions on driver behavior before making a right turn at an intersection: analysis of driver behavior based on measured data on an actual road,” *Transportation Research F*, vol. 10, no. 5, pp. 397–413, 2007.
- [88] “Field operational test support Action (FESTA),” in *FESTA Handbook*, European Commission, Brussels, Belgium, 2013..
- [89] Eric Krotkov, Scott Fish, Larry Jackel, et al. The DARPA PerceptOR evaluation experiments[J]. *Autonomous Robots*, 2007, 22(1): 19-35.
- [90] Urmson C, Anhalt J, Clark M, et al. High speed navigation of unrehearsed terrain: Red team technology for grand challenge 2004[J]. *Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-04-37*, 2004.
- [91] Thrun S, Montemerlo M, Dahlkamp H, et al. Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge[J]. *Journal of field Robotics*, 2006, 23(9): 661-692.
- [92] Miller I, Lupashin S, Zych N, et al. Cornell university's 2005 DARPA grand challenge entry[J]. *Journal of Field Robotics*, 2006, 23(8): 625-652.
- [93] Urmson C, Anhalt J, Bagnell D, et al. Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge[J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(8): 425-466.
- [94] Montemerlo M, Becker J, Bhat S, et al. Junior: The stanford

-
- entry in the urban challenge[J]. Journal of field Robotics, 2008, 25(9): 569-597.
- [95] Bacha A, Bauman C, Faruque R, et al. Odin: Team victortango's entry in the darpa urban challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(8): 467-492.
- [96] Osama A, Sayed T, Zaki M, Shaaban K. Inclusive Framework for Automatic Safety Evaluation of Roundabouts. Journal of Transportation Safety & Security, 2016, 8(4): 377-394.
- [97] Sahoo S, Subramanian S, Srivastava S. Evaluation of the Transient Response and Implementation of a Heading-angle Controller for an Autonomous Ground Vehicle[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Volume 230, Issue 8, 2016, 230(8):1040-1056.
- [98] 马育林, 徐友春, 吴青. 车队协同驾驶混成控制研究现状与展望[J]. 汽车工程学报, 2014.
- [99] Ploeg J, Shladover S, Nijmeijer H, et al. Introduction to the Special Issue on the 2011 Grand Cooperative Driving Challenge[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(3):989-993.
- [100] <http://www.cheyun.com/content/2442> [EB/OL]
- [101] Kilcarr S. Using a simulated city to test self-driving vehicles[J]. Fleet Owner Exclusive Insight, 2015.
- [102] Jacobson J, Janevik P, Wallin P. Challenges in Creating AstaZero, the Active Safety Test Area[C]// Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research

to Deployment. 2014.

[103] Steinmetz E, Emardson R, Eriksson H, et al. High Precision Control of Active Safety Test Scenarios[J]. 2011.

[104] <http://www.horiba-mira.com/> [EB/OL]