

研究报告

(2023 年第 1 期 总第 122 期)

2023 年 03 月 6 日

人工智能在自动驾驶研发中的应用¹

资本市场与公司金融研究中心

朱雅姝 刘碧波

【摘要】 行业图谱研究是本中心科技成果转化研究的一项子课题，目标定位于清晰理解前沿科技成果的技术核心、科创企业的技术竞争力及科研工作者的研究进度，从而助力科技成果转化效率的提升。行业图谱研究将以系列形式展开，选取国家战略重点科技领域的商业应用场景逐一进行，时效性较强。

本报告为行业图谱的计算机科学系列之自动驾驶领域：人工智能在自动驾驶研发中的应用。当今，自动驾驶技术已经成为汽车产业的未来发展方向。应用自动驾驶技术可以全面提升汽车驾驶的安全性、

¹ 感谢资本市场与公司金融研究中心的实习生许喜远同学对本报告的助研工作。许喜远同学是清华大学医学院 2022 级博士。

舒适性，满足更高层次的市场需求，并推动产业科技升级。得益于人工智能技术的发展，自动驾驶技术在环境感知、精准定位、决策与规划、控制与执行等方面实现了突破性提升。其中，基于人工智能应用的研发，关键性技术竞争点包括高精地图、传感器融合、语音与图像识别等。国外自动驾驶汽车研发历程较早，已逐步实现商业化应用，国际顶级公司在人工智能自动驾驶领域的研究处于全球引领地位。而我国自动驾驶汽车研发也在逐步崛起。政府鼓励政策和资金支持成为我国研发自动驾驶汽车的重要动力。本文从自动驾驶汽车的定义、研发历程到人工智能在自动驾驶汽车中的技术应用、全球自动驾驶市场进行了较为全面的介绍，并汇总了国内重点科学家的研究现状，以期了解我国当前行业发展的状态及国际竞争定位。

目 录

一、自动驾驶汽车概述	1
（一）自动驾驶汽车的等级标准及相关概念	1
（二）自动驾驶汽车的应用价值	4
二、自动驾驶汽车的研发历程	5
（一）国外研发历程	6
（二）我国研发历程	13
三、人工智能在自动驾驶汽车中的应用	18
（一）人工智能在环境感知中的应用	19
（二）人工智能在精准定位中的应用	22
（三）人工智能在决策与规划中的应用	24
（四）人工智能在控制与执行中的应用	27
（五）基于人工智能的自动驾驶研发中关键性技术竞争点	30
四、自动驾驶市场与国内外企业调研	34
（一）人工智能在自动驾驶领域的市场情况	34
（二）国际顶级公司在人工智能自动驾驶上的最新研发成果	34
（三）本章小结	40
五、专业术语解析	41
参考文献	44

图表目录

图 1-1 SAEJ3016 标准	2
图 1-2 自动驾驶技术	2
图 1-3 自动驾驶技术的价值	5
图 1-4 国外自动驾驶汽车发展历程	6
图 1-5 谷歌公司的自动驾驶原型车	11
图 1-6 Pacifica 混动厢式自动驾驶出租车	12
图 1-7 Zoox 的自动驾驶汽车	13
图 1-8 我国自动驾驶汽车发展历程	14
图 1-9 百度“阿波龙”自动驾驶巴士	17
图 2-1 自动驾驶汽车体系结构	18
图 2-2 环境感知应用中使用的深度学习模型	20
图 2-3 深度学习智能控制方法	28
图 3-1 基于人工智能的自动驾驶所需要的条件及关键性技术竞争点	31
表 1-1 三届 DARPA 自动驾驶挑战赛	7
表 4-1 全球已上市的人工智能自动驾驶企业	35
表 4-2 国内外重点 AI 自动驾驶企业的概况以及相应的融资信息	37
表 4-3 自动驾驶技术中国学者研究优势定位	39

自动驾驶汽车（Automated Vehicle； Intelligent Vehicle； Autonomous Vehicle； Self-driving Car； Driverless Car）又称智能汽车、自主汽车、自动驾驶汽车或轮式移动机器人，是一种通过计算机实现自动驾驶的智能汽车。本文首先讲述自动驾驶汽车涉及到的关键概念，包括自动驾驶汽车等级标准、智能汽车定义等；接着对国外、国内自动驾驶汽车的发展历程进行梳理；重点解析人工智能在自动驾驶汽车技术中的应用及其关键技术竞争点；最后通过国际市场分析展现全球行业动态及我国在该领域国际科技中的发展定位。

一、自动驾驶汽车概述

（一）自动驾驶汽车的等级标准及相关概念

1. SAE J3016 标准

该标准于 2014 年由美国国际汽车工程师学会（Society of Automotive Engineers International, SAE International）制定，内容如图 1-1 所示。该标准将车辆分为 Level 0 至 Level 5 共 6 个级别^[1]，并针对道路机动车辆的自动化系统相关条款做了分类和定义。它不但被美国交通运输部采纳为联邦标准，同时也已经成为了全球汽车业界评定自动驾驶汽车等级的通用标准。

Level 0：无自动化，由人类驾驶员全程操控汽车，但可以得到示警式或须干预的辅助信息。

Level 1：辅助驾驶，利用环境感知信息对转向或纵向加减速进行闭环控制，其余工作由人类驾驶员完成。

Level 2: 部分自动化，利用环境感知信息同时对转向和纵向加减速进行闭环控制，其余工作由人类驾驶员完成。

Level 3: 有条件自动化，由自动驾驶系统完成所有驾驶操作，人类驾驶员根据系统请求进行干预。

Level 4: 高度自动化，由自动驾驶系统完成所有驾驶操作，无需人类驾驶员进行任何干预，但须限定道路和功能。

Level 5: 完全自动化，由自动驾驶系统完成所有的驾驶操作，人类驾驶员能够应付的所有道路和环境，系统也能完全自动完成。

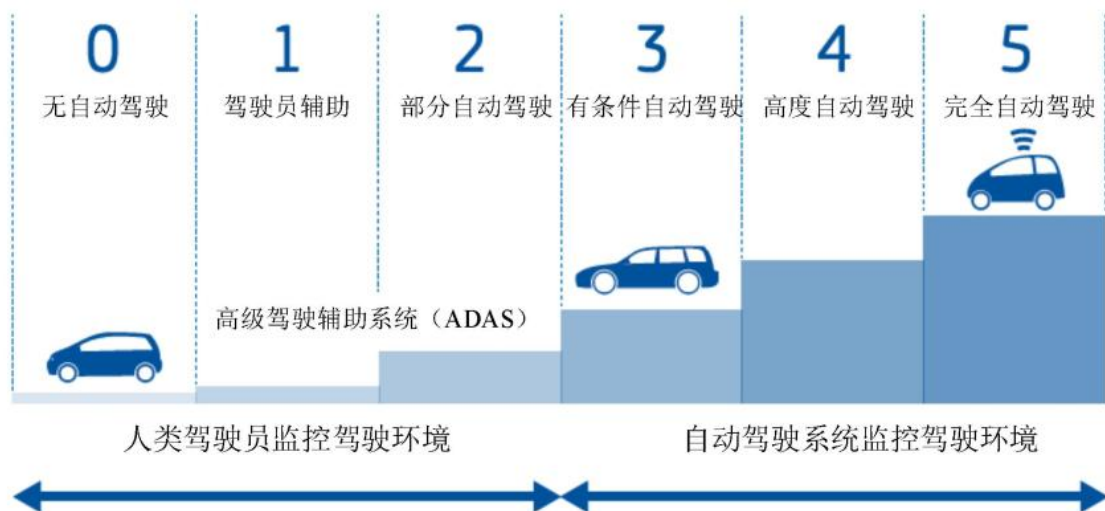


图 1-1 SAE J3016 标准

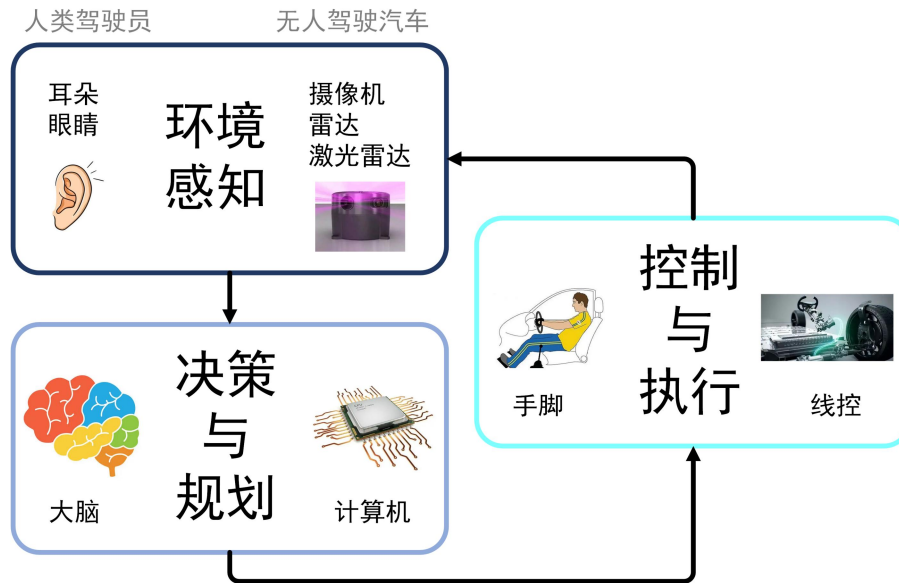


图 1-2 自动驾驶技术

2. 自动驾驶汽车

自动驾驶汽车是指一种无需驾驶员介入，通过集成多项技术，如计算机视觉、导航、传感器等系统的汽车。这种汽车可以根据道路环境、周围车辆、交通规则等信息，自主决策、驾驶和安全操纵。自动驾驶汽车的结构组成包括：①传感器：包括激光雷达、摄像头、加速计、陀螺仪、超声波传感器等，用于收集道路环境、周围车辆等信息；②计算机视觉系统：利用摄像头等数据，对道路环境、周围车辆等信息进行识别和分析；③导航系统：根据道路地图、定位信息等，实现汽车的导航；④控制系统：根据道路环境、周围车辆、交通规则等信息，进行决策和控制，实现自动驾驶；⑤电子控制单元：负责对汽车的操纵，如油门、刹车、转向等。通过这些组件的集成，自动驾驶汽车可以实现自主驾驶，并且能够提高驾驶安全性和效率。同时，通过大数据分析和人工智能技术的应用，自动驾驶汽车还可以实现更高效的交通管理和减少交通拥堵^[1]。由 SAE J3016

标准可以看出，通常大家谈论的自动驾驶汽车对应该标准的 Level 4 和 Level 5 级。

3. 自动驾驶技术

自动驾驶技术是对人类驾驶员在长期驾驶实践中，对“环境感知——决策与规划——控制与执行”过程的理解、学习和记忆的物化，如图 1-2 所示。自动驾驶汽车是一个复杂的软硬件结合的智能自动化系统，运用到了自动控制技术、现代传感技术、计算机技术、信息与通信技术以及人工智能等。

（二）自动驾驶汽车的应用价值

自动驾驶汽车之所以受到各国政府前所未有的重视^[2]，国内外各院校、研究机构都投入了大量人力、物力，各大车企、科技公司、汽车零部件供应商以及自动驾驶汽车创业公司也纷纷在这个领域进行布局，它主要具有以下如图 1-3 所示的价值。

- 改善交通安全，出行革命：自动驾驶汽车具有改善交通安全和提升社会效率的潜力。由于驾驶员过失责任是交通事故的主要因素，自动驾驶汽车不受人的心理和情绪干扰，能够保证遵守交通法规，并按照规划路线行驶，因此可以有效地减少人为疏失所造成的交通事故。此外，自动驾驶汽车可以通过提高车速、缩小车距以及选择更有效路线来减少通勤所耗时间，从而消除交通拥堵，提升社会效率。

- 实现节能减排：自动驾驶技术还将带来出行革命，提高出行安全，实现绿色安全和谐智能交通的融合发展。这不仅将使得出行更加方便，而且更加安全、环保。
- 促进我国产业转型升级、引领创新：自动驾驶技术是一种先进的出行技术，它聚焦于应用车辆与人工智能、5G 等多种技术的集成。自动驾驶技术的发展不仅拉动了国民经济的转换，还有助于产业链供应链的生态化发展和产业转型。此外，自动驾驶技术还将引领产业的创新。它是科技革命与产业颠覆性创新的载体，将引领行业创造可持续发展的新范式。自动驾驶技术的发展与应用不仅改变了出行方式，而且将引领整个行业的创新与发展。



图 1-3 自动驾驶技术的价值

二、自动驾驶汽车的研发历程

目前对于自动驾驶汽车的研究有两条不同的技术路线：“渐进演化”和“一步到位”。“渐进演化”路线，指的是从 ADAS 产品

开始，逐步研发到无人驾驶技术，最终实现完全自动驾驶。传统车企多选择从 L1-L3 级进行大规模量产，逐步提高自动驾驶的级别。

“一步到位”路线，则是通过软件升级的方式，完善自动驾驶系统。一些新兴公司如谷歌、福特、通用、Momenta 等则一开始就研发 L4 或者 L5 级的高等级自动驾驶，跳过渐进演化的过程，直接达到高等级的自动驾驶。总的来说，渐进演化路线与一步到位路线各有特点，前者以安全性为首要考虑，逐步提高自动驾驶的级别；后者更加面向未来，以高效率、快速升级为特点。

在此，对国内外自动驾驶汽车技术的研究发展历史分别进行阐述比较：

（一）国外研发历程

20 世纪 70 年代，科技发达国家率先开始了自动驾驶汽车的研究。本节内容梳理了国外自动驾驶汽车发展历史，图 1-4 所示为重要时间节点事件。



图 1-4 国外自动驾驶汽车发展历程

1. 科研院校对自动驾驶技术的研究

1984 年，美国国防高级研究计划署（Defense Advanced Research Projects Agency，DARPA）与陆军合作，发起自主地面车辆（Autonomous Land Vehicle，ALV）计划，这是一辆八轮车，在校园中能够自动驾驶，但车速并不快。为了推进自动驾驶技术更快、更好地发展，DARPA 于 2004 年—2007 年共举办了 3 届 DARPA 自动驾驶挑战赛^[3]，如表 1-1 所示。

表 1-1 三届 DARPA 自动驾驶挑战赛

第 1 届	2004 年在美国的莫哈韦沙漠进行。共有 21 支队伍参加赛事，其中 15 支进入了决赛，但决赛中，没有一支队伍完成整场比赛。卡内基·梅隆大学的 Sandstorm 行驶的最远，共行驶了 11.78km。
第 2 届	共有 195 支队伍申报参加，有 5 支队伍（Stanley、Sandstorm、H1ghlander、Kat-5、TerraMax）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、6 小时 53 分钟 58 秒的总时长夺冠，赢得了 200 万美元，同时，这也标志着自动驾驶汽车取得了重大突破。
第 3 届	2007 年，在美国加利福尼亚州一个已关闭的空军基地举行。这届比赛的任务是参赛车辆在 6 小时内完成 96 km 的市区道路行驶，并要求参赛车辆遵守所有的交通规则。这届比赛不仅要求参赛车辆完成基本的无人行驶，检测和主动避让其他车辆的同时，还要遵守所有的交通规则。由于车辆需要根据其他车辆的动作实时做出智能决策，这对于车辆软件来说是一个特殊挑战。来自卡内基·梅隆大学的 Boss 以总时长 4 小时 10 分钟 20 秒、平均速度 22.53km/h 的成绩取得了冠军。

20 世纪 80 年代开始，美国著名的大学如卡内基·梅隆大学、斯坦福大学、麻省理工学院等都先后加入自动驾驶汽车的研究工作中。其中，美国卡内基·梅隆大学研制的 NavLab 系列智能车辆最具有代表性^[3]。

- NavLab-1 系统于 20 世纪 80 年代建成。它的计算机硬件系统由 Sun3、GPS、Warp 等组成，用于完成图像处理、传感器信息融合、路径规划以及车体控制等功能。它在典型结构化道路环境下的速度为 28km/h。
- NavLab-5 系统是 1995 年建成的。卡内基·梅隆大学与 AssistWare 技术公司合作研制了便携式高级导航支撑平台（Portable Advanced Navigation Support, PANS）。该平台为系统提供了计算基础和 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任务。NavLab-5 在实验场环境道路上的自主行驶平均速度为 88.5km/h。Navlab-5 公路实验时进行了首次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，而纵向控制仍由驾驶员完成。
- NavLab-11 系统是该系列最新的平台。其车体采用了 Wrangler 吉普车，车上安装有工业级四核计算机，处理各种传感器传输来的信息，并把信息分送到各个子单元。它的最高车速达到了 102km/h。

意大利帕尔玛大学 VisLab 实验室一直致力于 ARGO 试验车的研制。在 1998 年意大利汽车百年行活动中，ARGO 试验车沿着意大利的高速公路网进行了 2000km 长的距离。试验车行驶的道路既有平坦区域，也包括高架桥和隧道。试验车的自动驾驶里程为总里程的 94%，最高车速达到了 112km/h。2010 年，ARGO 试验车沿着马

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，行程达 15900km。该车装载了 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 计算机和线控驾驶系统，全程应用太阳能作为辅助动力源。2013 年，该实验室研制的车辆在自动驾驶的情况下成功识别了交通信号灯、避开行人、驶过十字路口和环岛等。

2. 传统汽车制造厂商对自动驾驶技术的研究

除了科研院校在自动驾驶领域的积极研究外，奥迪、福特、沃尔沃、日产、宝马等众多汽车制造厂商也于 2013 年开始相继在自动驾驶汽车领域进行了布局。这些传统汽车制造企业多采用渐进提高汽车驾驶自动化水平和同时积极研发自动驾驶技术的并进发展路线。

目前，对于量产商用车辆来说部分自动驾驶功能已经较为普及，表现比较突出的是德、美、日、韩等汽车制造厂商生产的汽车。其中，德国汽车制造厂商处于领先地位，其生产的几乎所有车型都能提供相关驾驶辅助系统功能（包括 SAE Level 2 级）。2018 新款奥迪 A8 是全球首款量产搭载 Level 3 级别的自动驾驶系统的车型，其携带有 12 个超声波传感器、5 个摄像机、5 个毫米波雷达、1 个激光雷达、1 个红外线摄像机共 24 个车载传感器，可以在 60km/h 以下车速时实现 Level 3 级自动驾驶，使驾驶员在拥堵路况下可以获得最大限度的解放^[4]。

2015 年 10 月，特斯拉推出的半自动驾驶系统 Autopilot，Autopilot 是第一个投入商用的自动驾驶技术。目前，特斯拉的量产

车上均已安装 Autopilot 1.0、2.0 或 2.5 硬件系统，其自动驾驶功能可通过 OTA（空中下载）进行从 Level 2 到 Level 4+ 的软件升级，这是在已量产车上完成了自动驾驶硬件准备。预计 2022 年 8 月推出基于视觉深度神经网络的 Tesla Vision 9.0 软件版本，特斯拉的创始人 Elon Musk 希望由此将实现“完全自动驾驶”。

2016 年，通用汽车收购了自动驾驶技术创业公司 Cruise Automation，正式进入自动驾驶领域。后者初创于 2013 年，一直从事具有完全自动驾驶功能的自动驾驶技术研发。2018 年 1 月，作为通用汽车旗下自动驾驶部门的 Cruise Automation 发布了新一代（第四代）自动驾驶汽车——Cruise AV。Cruise AV 没有方向盘、油门踏板和刹车踏板，安装了 21 个普通雷达、16 个摄像机和 5 个激光雷达来感知车辆周围的环境和障碍物，是真正的自动驾驶汽车。通用汽车不仅开始量产 Cruise AV 的测试车，以便在美国各城市甚至全世界各地进行实际路试，并且也已向美国国家高速公路交通安全管理局递交请愿书。

3. 高科技公司对自动驾驶技术的研究

（1）以谷歌为代表的新技术力量

这些企业多采用“一步到位”的自动驾驶技术发展路线，即直接研发 SAE Level 4+ 级别的自动驾驶汽车。

2009 年，谷歌公司宣布，由斯坦福人工智能实验室前主任、谷歌街景的联合发明人 Sebastian Thrun 领导组建一支团队，开始研发自动驾驶技术。Sebastian Thrun 的团队创建了机器人车辆 Stanley，

该车赢得了 2005 年 DARPA 大挑战赛。2012 年，美国内华达州的机动车辆管理部门为谷歌公司颁发了全球首例自动驾驶汽车的路测许可证。2015 年，谷歌公司的自动驾驶原型车上路进行测试，该车没有方向盘、油门踏板与刹车踏板，同时也没有后视镜，只配有启动和停止两个物理按钮，通过很多传感器、车载计算机来控制汽车。



图 1-5 谷歌公司的自动驾驶原型车

2016 年 12 月，谷歌将自动驾驶业务独立出来，成立了独立公司——Waymo。自 2017 年 10 月，Google Waymo 已在美国凤凰城 Chandler 镇 100 平方英里范围内，对 600 辆克莱斯勒插电式混合动力 Level 4 级自动驾驶汽车进行社会公测，这是 Waymo 自动驾驶商业化落地的前奏，首次实现了无驾驶员和安全员的公测自动驾驶出租车。当地时间 2018 年 5 月 31 日，Waymo 宣布向菲亚特·克莱斯勒（Fiat Chrysler Automobiles, FCA）采购 62000 辆 Pacifica 混动厢式车用于打造自动驾驶出租车队。除车辆采购以外，Waymo 与 FCA 双方还在商讨如何将自动驾驶汽车卖给普通用户。这也意味着，在不远的将来，普通用户可以在 FCA 的门店里买到一辆其与 Waymo 共同打造的自动驾驶汽车^[4]。



图 1-6 Pacifica 混动厢式自动驾驶出租车

2016 年 5 月，Uber 自动驾驶汽车在位于美国宾夕法尼亚州匹兹堡市的 Uber 先进技术中心正式上路测试。Uber 首次路测使用的自动驾驶汽车是一款福特 Fusion 混合动力汽车，它同时进行采集测绘数据并试验自动驾驶功能。Uber 自动驾驶汽车配备了各式传感器，包括毫米波雷达、激光雷达以及高分辨率摄像机，以便绘制周边环境的细节。2016 年 9 月 14 日，Uber 在美国匹兹堡市推出城区大范围自动驾驶出租车免费载客服务并试运行；尽管上面有两名安全工程师，但商业模式却是大范围的城区，比 Waymo 公测的小镇要大得多。

（2）以 nuTonomy 为代表的创业公司

这些企业多采用“一步到位”的 SAE Level 4+ 的自动驾驶技术发展路线。nuTonomy 是一家于 2013 年从麻省理工学院分离出来的创业公司。2016 年 8 月，它成为了新加坡第一家在试点项目下推出自动驾驶出租车的公司。在新加坡的测试中，nuTonomy 在自动驾

驶汽车上配备了 6 套激光雷达检测系统，前面安装有 2 个摄像机，用于识别障碍物，检测交通信号灯变化。此外，车前座还配备一名司机以应对紧急情况，在后座配备一名研究人员，其职责是观察车载计算机。2017 年 10 月，德尔福宣布收购 nuTonomy^[5]。

Zoox 是硅谷一家神秘的自动驾驶汽车初创公司，目前已经筹集 3.6 亿美元。Zoox 很少向外界介绍其进展。消息显示，Zoox 秘密开发全自动驾驶汽车已有多多年。2013 年，该公司展示了其车辆的渲染图。根据 IEEE 的消息，该公司的车型没有挡风玻璃、方向盘和刹车踏板，如图 1-7 所示。这种汽车能向任意方向行驶，乘客将面对面而坐。



图 1-7 Zoox 的自动驾驶汽车

（二）我国研发历程

我国自动驾驶汽车的研究可追溯自上世纪 90 年代，真正的突破是在最近十年出现。重要时间节点事件如图 1-8 所示。

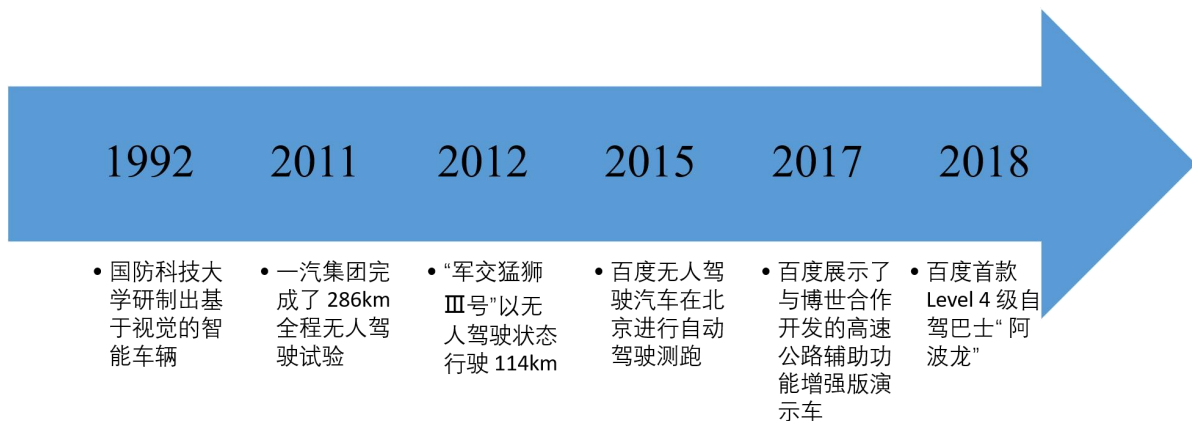


图 1-8 我国自动驾驶汽车发展历程

1. 科研院校对自动驾驶技术的研究

与美、欧等发达国家相比，我国在自动驾驶汽车方面的研究起步稍晚，从 20 世纪 80 年代末才开始。不同于国外车企以自主研发为主，我国汽车制造厂商多采取与国内科研院所、高校合作研发自动驾驶技术。

国防科技大学从 20 世纪 80 年代末开始先后研制出基于视觉的 CITAVT 系列智能车辆。其中，在 CITAVT-I、CITAVT-II 型自动驾驶小车的研制过程中对自动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。直至 1992 年，国防科技大学才成功研制出中国第一辆真正意义上的自动驾驶汽车。

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识别技术，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 20ms，这保证了实际场景下的实时性要求。

2. 传统汽车制造厂商对自动驾驶技术的研究

不同于国外车企以自主研发为主，我国汽车制造厂商多采取与国内科研院所、高校合作研发自动驾驶技术。

一汽集团于 2007 年与国防科技大学合作。2011 年 7 月，由一汽集团与国防科技大学共同研制的红旗 HQ3 自动驾驶汽车完成了 286km 的面向高速公路的全程自动驾驶试验，人工干预的距离仅占总里程的 0.78%。2015 年 4 月，一汽集团正式发布了其“挚途”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。2015 年 4 月 19 日，一汽在同济大学举行了“挚途”技术实车体验会，包含手机叫车、自主泊车、拥堵跟车、自动驾驶等四项智能化技术。

2012 年，军事交通学院的“军交猛狮 III 号”以自动驾驶状态行驶 114km，最高时速为 105km/h，完成了从京津高速台湖收费站到东丽收费站的公路试验，实现了无人干预的自动驾驶。该车装有由 5 个毫米波雷达、3 个摄像机和 1 个 GPS 传感器组成的视听感知系

统，能够帮助自动驾驶车辆识别路况，精确判断与前后左右障碍物的距离。

2015 年 4 月，长安汽车发布智能化汽车“654 战略”，即建立六个基础技术体系平台，开发五大核心应用技术，分四个阶段逐步实现汽车从单一智能到全自动驾驶。

2015 年 8 月，宇通大型客车从郑开大道城铁贾鲁河站出发，在完全开放的道路环境下完成自动驾驶试验，共行驶 32.6km，最高速度为 68km/h，全程无人工干预，为了保障安全，客车上还是配备了司机。这也是国内首次大型客车高速公路自动驾驶试验。2018 年 5 月，宇通客车在其 2018 年新能源全系产品发布会上宣布，已具备面向高速结构化道路和园区开放通勤道路的 Level 4 级别自动驾驶能力。

北汽集团在 2016 年 4 月的北京车展上，展示了其基于 EU260 打造的自动驾驶汽车。车辆通过加装毫米波雷达、高清摄像机、激光雷达和 GPS 天线等零部件识别道路环境，同时配合高清地图进行路径规划实现自动驾驶。北汽自动驾驶汽车目前搭载的自动驾驶感知与控制设备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。

3. 高科技公司对自动驾驶技术的研究

除了上述传统的汽车制造厂商在自动驾驶领域的研究外，以百度为代表的高科技公司也相继加入了自动驾驶汽车领域的研究。百度公司于 2013 年开始了百度自动驾驶汽车项目，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。



图 1-9 百度“阿波龙”自动驾驶巴士

2015 年 12 月初，百度自动驾驶汽车在北京进行自动驾驶测跑，实现多次跟车减速、变道、超车、上下匝道、调头等复杂驾驶动作，完成了进入高速到驶出高速不同道路场景的切换，最高车速达到 100km/h。2015 年 12 月 14 日，百度宣布正式成立自动驾驶事业部。2017 年 4 月 17 日，百度展示了与博世合作开发的高速公路辅助功能增强版演示车。2018 年 7 月 4 日，百度在第二届百度 AI 开发者大会（Baidu Create 2018）上宣布，与厦门金龙合作生产的首款 Level 4 级自驾巴士“阿波龙”已经量产下线，如图 1-9 所示。这一批次的 100 辆车接下来会被投放到北京、深圳、武汉等城市，在机场、工业园区、公园等行驶范围相对固定的场所开始商业化运营。2019 年年初，百度还会跟日本软银旗下的 SB Drive 合作，将 10 辆“阿波龙”带去包括东京在内的多个日本城市。这款自动驾驶巴士是基于百度的阿波罗自驾车开放平台（3.0 版本）。除了能在某些特

定条件下实现无人工介入的自动驾驶，其还加入了自动泊车、面部识别及驾驶者疲劳度检测等功能。另外，在大会现场百度还宣布会与英特尔合作，将 Mobileye 的责任敏感安全模型（Responsibility Sensitive Safety, RSS）及周围计算机视觉套件整合入阿波罗，希望以此来进一步提升该平台的行车安全性。

三、人工智能在自动驾驶汽车中的应用

近年来，随着人工智能技术的不断发展，自动驾驶技术也取得了长足的进展。人工智能在自动驾驶技术中的应用，不仅为自动驾驶研究带来了新的思路，也为自动驾驶技术的实际应用带来了巨大的推动。人工智能在自动驾驶技术中的应用，可以帮助车辆实现对周围环境的实时监测，提高了车辆的安全性。通过人工智能的识别技术，可以识别道路上的障碍物，从而避免事故的发生。本章着重对人工智能在自动驾驶技术研究中的重要应用技术进行介绍，包括环境感知、精准定位、决策与规划、控制与执行^[6]。

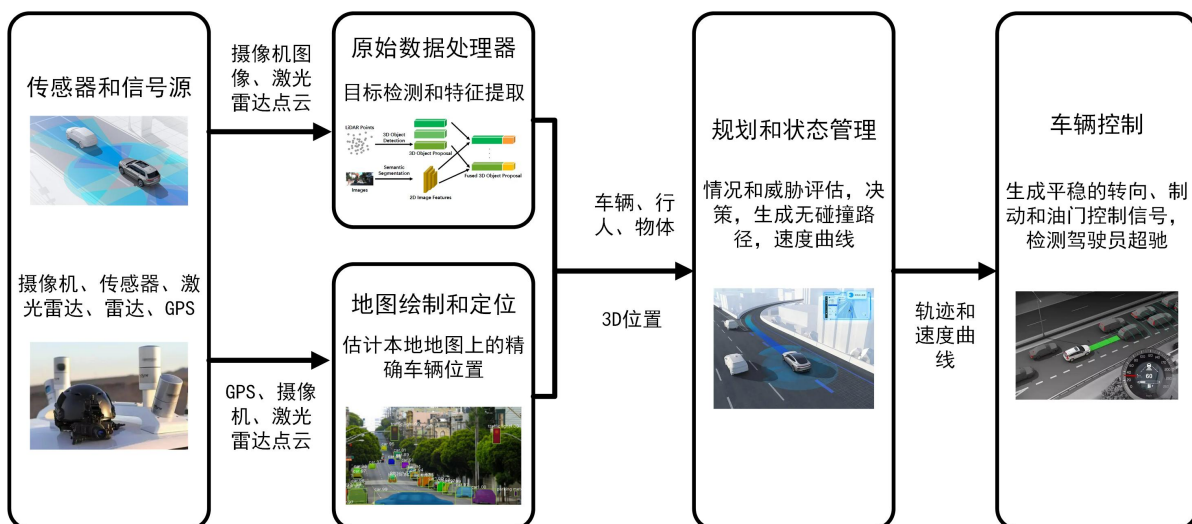


图 2-1 自动驾驶汽车体系结构

自动驾驶汽车通过摄像机、激光雷达、毫米波雷达、超声波等车载传感器来感知周围的环境，依据所获取的信息来进行决策判断，由适当的工作模型来制定相应的策略，如预测本车与其他车辆、行人等在未来一段时间内的运动状态，并进行避碰路径规划。在规划好路径之后，接下来需要控制车辆沿着期望的轨迹行驶。车辆控制系统包括横向控制（转向）与纵向控制（速度）。当然，上述的动作都是基于传感器实时获取环境信息所做的局部路径规划下的动作，还需要与基于完整环境信息的全局路径相结合^[6]，如图 2-1 所示。

（一）人工智能在环境感知中的应用

环境感知作为其他部分的基础，处于自动驾驶汽车与外界环境信息交互的关键位置^[7]，是实现自动驾驶的前提条件。环境感知指对于环境的场景理解能力，例如障碍物的类型、道路标志及标线、行车车辆的检测、交通信息等数据的语言分类。定位是对感知结果的后处理，通过定位功能从而帮助车辆了解其相对于所处环境的位置。环境感知包括：可行驶路面检测、车道线检测、路缘检测、护栏检测、行人检测、机动车检测、非机动车检测、路标检测、交通标志检测、交通信号灯检测等。对于如此复杂的路况检测，环境感知技术是利用摄像机、激光雷达、毫米波雷达、超声波等车载传感器，以及 V2X 和 5G 网络等获取汽车所处的交通环境信息和车辆状态信息等多源信息^[8]。

深度学习技术可以让车辆准确感知和理解周围环境，从而带来彻底的自动驾驶领域变革。该领域出现的关键技术^[9]，其中包括卷积

神经网络（Convolutional Neural Networks, CNN）、循环神经网络（Recurrent Neural Network, RNN）、长短期记忆网络（Long Short Term Memory, LSTM）、深度置信网络（Deep Belief Network, DBN）和自编码器（Autoencoder, AE）等 5 种类型，如图 2-2 所示。

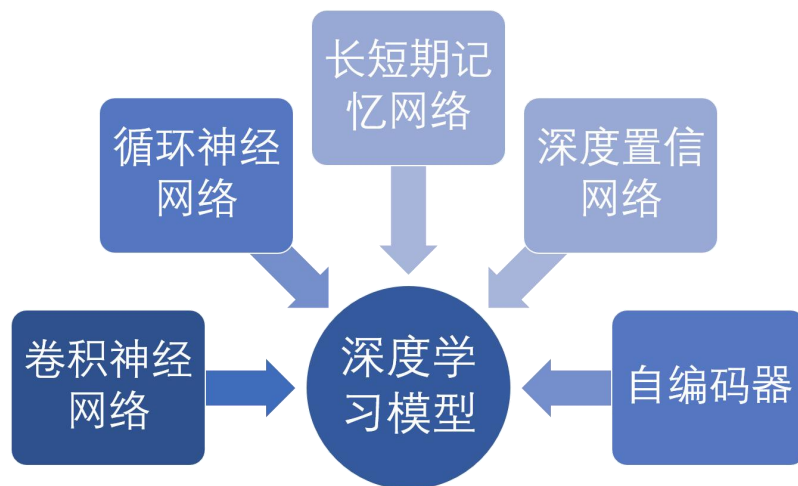


图 2-2 环境感知应用中使用的深度学习模型

深度学习中有 4 种类型的神经网络层，包括输入层、卷积层、池化层和输出层。网络的结构可以 10 层甚至上百层，一般层数越多检测精度越精准。随着网络层数和节点数的增加，可以表达更细、更多的识别物的特征，为检测精度的提高奠定基础。其中，卷积层和池化层是深度学习的核心处理层：卷积层主要是用于负责物体特征的提取，池化层主要是负责采样。

自动驾驶技术中，CNN 被用于分析摄像头和激光雷达数据，以便快速、准确地识别和分类出环境中的物体。这些网络使用带注释图像的大型数据集进行训练，能够学习数据中的复杂特征和模式。基于 CNN 的自动驾驶系统的一个例子是 YOLO（You Only Look

Once) 算法, 它能够高精度地实时识别和分类物体。另外, 在自动驾驶中, RNN 用于随时间分析传感器数据以预测未来事件和行为。例如, 基于 RNN 的系统可能会分析其他车辆的轨迹以预测它们的预期动作或分析传感器数据以预测行人过马路的可能性。

为了确保自动驾驶汽车能够正确理解周围的环境并做出相应的规划和决策, 需要利用传感器获取大量的周围环境信息, 这就是所谓的环境感知。通过实时拍摄车辆周围的环境, 采用计算机视觉 (Computer Vision, CV) 技术对所拍摄图像进行分析, 实现车辆周围的车辆和行人检测以及交通标志识别等功能。摄像头的主要优点在于其分辨率高、成本低。但在夜晚、雨雪雾霾等恶劣天气下, 摄像头的性能会迅速下降。此外摄像头所能观察的距离有限, 不擅长于远距离观察。毫米波雷达也是自动驾驶车辆常用的一种传感器, 毫米波雷达是指工作在毫米波段 (波长 1-10 mm, 频域 30-300GHz) 的雷达, 其基于飞行时间 (Time of Flight, ToF) 技术对目标物体进行检测。毫米波雷达向外界连续发送毫米波信号, 并接收目标返回的信号, 根据信号发出与接收之间的时间差确定目标与车辆之间的距离。因此, 毫米波雷达主要用于避免汽车与周围物体发生碰撞, 如盲点检测、避障辅助、泊车辅助、自适应巡航等。毫米波雷达的抗干扰能力强, 对降雨、沙尘、烟雾等离子的穿透能力要比激光和红外强很多, 可全天候工作。但其也具有信号衰减大、容易受到建筑物、人体等的阻挡, 传输距离较短, 分辨率不高, 难以成像等不足。激光雷达也是通过 ToF 技术来确定目标位置与距离的。激光雷达是通过发射激光束来实现对目标的探测, 其探测精度和灵敏度更

高，探测范围更广，但激光雷达更容易受到空气中雨雪雾霾等的干扰，其高成本也是制约其应用的主要原因。自动驾驶环境感知通常采用“弱感知+超强智能”和“强感知+强智能”两大技术路线。其中“弱感知+超强智能”技术是指主要依赖摄像头与深度学习技术实现环境感知，而不依赖于激光雷达。这种技术认为人类靠一双眼睛就可以开车，那么车也可以靠摄像头来看清周围环境。如果超强智能暂时难以达到，为实现自动驾驶，那就需要增强感知能力，这就是所谓的“强感知+强智能”技术路线。相比“弱感知+超强智能”技术路线，“强感知+强智能”技术路线的最大特征就是增加了激光雷达这个传感器，从而大幅提高感知能力。特斯拉采用“弱智能+超强智能”技术路线，而谷歌 Waymo、百度 Apollo、Uber 等人工智能企业、出行公司、传统车企都采用“强感知+强智能”技术路线。

（二）人工智能在精准定位中的应用

自动驾驶车辆需要定位来获取其相对于外界环境的精确位置，这是其正常运行的基础。在复杂的地市道路行驶，定位精度要求误差不超过 10 厘米。例如：只有准确知道车辆与路口的距离，才能进行更精确的预判和准备；只有准确对车辆进行定位，才能判断车辆所处的车道。如果定位误差较高，严重时会造成交通完全事故。深度学习是自动驾驶同步定位与地图构建（Simultaneous Localization and Mapping, SLAM）系统中的一项关键技术。它涉及使用人工神经网络（Artificial Neural Networks, ANN）实时处理和分析大量数据，从而实现智能和自动驾驶车辆的开发。

在自动驾驶 SLAM 领域，有一个典型的例子是使用 CNN 技术进行对象识别和分类。在自动驾驶系统中，CNN 可用于分析车辆传感器（例如摄像头和激光雷达）收集的数据，并识别周围环境中的物体。这包括识别其他车辆、行人、交通标志和其他可能与车辆运行相关的物体。一旦对象被识别和分类，CNN 就可以将此信息提供给车辆的控制系统，然后该系统可以根据这些数据做出决策。例如，如果 CNN 检测到车辆前方有行人，则控制系统可以采取避免碰撞。

深度学习技术不仅可以用于物体识别，在自动驾驶领域还可以应用于 SLAM 系统，实现路线规划和地图创建等其他任务。例如，车辆的传感器可以收集有关周围环境的数据，然后可以使用这些数据创建该区域的 3D 地图。车辆的控制系统可以使用该地图来规划安全高效的到达目的地的路线。自动驾驶 SLAM 系统的另一项关键技术是机器学习，它涉及使用算法来分析数据并从中学习。机器学习算法可用于训练车辆的控制系统，以根据从传感器接收到的数据做出更好的决策。

自动驾驶 SLAM 中机器学习的一个例子是强化学习（Reinforcement Learning, RL）算法的使用。这些算法使用试错法来教导车辆的控制系统如何根据接收到的数据采取最有效和最安全的行动。例如，可以训练控制系统根据遇到的交通状况调整速度。如果车辆在高速公路上行驶，则可能需要以比在城市中行驶更高的

速度行驶。强化学习算法可用于训练控制系统根据从传感器接收到的数据进行这些调整。

自动驾驶汽车中，深度学习和机器学习技术不仅可以用于物体识别和路线规划，还可以应用于 SLAM 系统，从而实现车道检测和未来动作预测等任务。例如，车辆的传感器可以收集有关周围环境的数据，这些数据可用于检测和分类车道。然后，控制系统可以使用此信息来帮助车辆保持在其车道内并避免碰撞。

深度学习和机器学习技术是自动驾驶 SLAM 系统的核心组成部分。它们允许车辆实时分析和处理大量数据，使其能够根据周围环境做出智能和安全的决策。这些技术对于自动驾驶汽车的发展至关重要，并可能在未来的自动驾驶中继续发挥核心作用。

（三）人工智能在决策与规划中的应用

自动驾驶汽车的决策规划是至关重要的，它包括多传感器信息的融合、根据驾驶需求进行任务决策、避开障碍物的约束条件、选择多条安全路径和最优路径等步骤。最终，自动驾驶汽车会选择一条最优路径作为车辆的行驶轨迹。

人工智能在自动驾驶汽车领域中，行为决策与路径规划是另一个重要的应用领域。深度学习在自动驾驶中的关键技术之一是目标检测。这涉及使用神经网络来识别和分类车辆环境中的对象，例如行人、其他车辆和交通标志。物体检测对于自动驾驶汽车做出有关如何安全行驶道路和避免碰撞的明智决策至关重要^[8]。前期决策树、贝叶斯网络等人工智能方法已有大量应用。近年来兴起的深度卷积

神经网络与深度强化学习，能通过大量学习实现对复杂工况的决策，并能进行在线学习优化，由于需要较多的计算资源，当前是计算机与互联网领域研究自动驾驶汽车的决策与规划处理的热门技术^[10]。

自动驾驶汽车的规划分为全局规划和局部规划两种。全局规划是根据获取到的地图信息，规划出一条无碰撞最优路径，以满足特定的行驶条件。例如，从上海到北京有很多条路，规划出一条作为行驶路线即为全局规划。如栅格法、可视图法、拓扑法、自由空间法、神经网络法等静态路径规划算法。局部规划的则是根据全局的规划，在一些局部环境信息的基础之上，能够避免碰撞一些未知的障碍物，最终达到目的目标点的过程。例如，在全局规划好的上海到北京的那条路线上会有其他车辆或者障碍物，想要避过这些障碍物或者车辆，需要转向调整车道，这就是局部路径规划。局部路径规划的方法包括：人工势场法、矢量域直方图法、虚拟力场法、遗传算法等动态路径规划算法等。

随着深度强化学习技术的不断发展，越来越多的企业和研究机构开始将其应用到自动驾驶汽车的行为与决策中，取得了显著的成果。Mobileye 公司是其中的典型代表，根据其最新发表的论文，其设计的车辆模型已经能自如地应对一些复杂的交通任务，如双向通道变线、复杂十字路口等场景。Mobileye 将行为决策分解成两个部分，可学习部分和不可学习部分，可学习部分是由强化学习来决策行驶需要的高级策略，不可学习部分则是按照这些策略利用动态规划来实施具体的路径规划。

无人车的可学习部分将环境映射为一系列抽象策略，以辅助无人车的决策。这个过程包括设计一张策略选项图，其中包含无人车的加减速、转向以及对周围车辆的反应等选项，并利用策略网络来选择最合适的应对选项。其中，策略网络在给定的车辆环境下，评估每一种应对的可能影响，从而选择最合适的策略。不可学习部分则是将学习到的抽象策略转化成对车辆的实际控制动作。该部分主要对车辆动作进行具体规划，检查抽象策略是否可执行，或者执行满足策略的动作，从而充分保证系统的安全性。

深度学习在交通预测中扮演重要角色。具体来说，我们可以利用神经网络来预测其他车辆在道路上的运动轨迹，并及时作出反应。这可以包括预测其他车辆的轨迹，以及根据它们相对于自动驾驶车辆的速度和位置来预测它们的意图。深度学习在自动驾驶中的另一项关键技术是路线规划。这涉及使用神经网络分析有关道路网络、交通状况和其他因素的数据，以确定到达目的地的最有效和最安全的路线。路线规划对于优化自动驾驶车辆的性能和最大限度地降低事故风险非常重要。

自动驾驶技术中，深度学习在风险评估（认知）子环节得到了广泛应用。在这个阶段，系统需要识别出车辆驾驶中的风险状态，并为决策进行预测。为了实现这一目的，深度学习技术已经提出了两种重要的方法：基于深度学习的风险状态识别和基于时间序列算法的风险预测。首先，基于深度学习的风险状态识别是一种高效的方法。它基于大量的数据，以分类、识别、识别视觉、声音等信息

为目标。深度学习网络通过多层的神经元网络结构，对驾驶中的环境、交通状况、车辆状态等多维数据进行分析。从而识别出风险状态，如高危道路、超速、疲劳驾驶等。其次，基于时间序列算法的风险预测是一种有效的方法。该算法通过对历史数据的分析，来预测未来的风险情况。时间序列算法可以利用驾驶行为的时间信息，对车辆的驾驶状态进行推演。从而预测出风险状态，提前发现风险并采取相应的措施。这样，系统可以在风险出现之前进行预防，从而提高驾驶的安全性。举例来说，如果系统通过时间序列算法预测出某车辆驾驶员在过去一段时间内经常驾驶时出现疲劳驾驶现象，那么系统可以在未来的驾驶中，通过辅助驾驶系统提醒驾驶员休息，从而避免因疲劳驾驶造成的危险。

总之，深度学习可使车辆能够随着时间的推移学习和适应其环境。这可以包括了解不同道路和交通模式的特征，以及适应道路上其他驾驶员的行为。通过不断学习和适应，自动驾驶汽车可以提高其决策能力，并在道路行驶时变得更加高效和安全。

（四）人工智能在控制与执行中的应用

自动驾驶的控制核心技术涵盖车辆的纵向、横向、驱动和制动控制。其中，纵向控制负责车辆前后运动的控制，而横向控制则负责方向盘角度和轮胎力的调整。只有同时实现纵向和横向自动控制，才能使车辆按照预设目标和约束自主行驶。车辆按照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。

相对于传统的车辆控制方法，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，如图 2-3 所示，包括神经网络控制和深度学习等方法，这些算法已逐步在车辆控制中广泛应用^[11]。

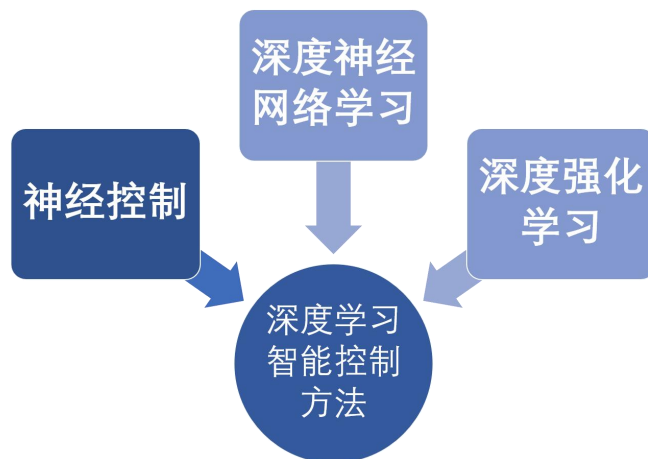


图 2-3 深度学习智能控制方法

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。利用神经网络，可以把控制问题看成模式识别问题，被识别的模式映射成“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^[12]。

深度神经网络学习可以通过获取深层次的特征表示来避免人工选取特征的繁琐和高维数据的维度灾难问题。这一技术可以让您更加轻松地进行数据分析和模型训练。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。自动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自动驾驶系统的研究中具有先天的优势^[12]。

强化学习的灵感来自于动物行为训练，训练员通过奖励和惩罚教导动物学习某种行为与状态之间的联系规则。强化学习就是要解决这类问题：一个能够感知环境的智能体怎样通过学习选择达到其目标的最优动作^[12]。强化学习允许人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 系统通过反复试验来学习，并随着时间的推移逐渐提高其性能。这项关键技术越来越多地用于自动驾驶控制和执行领域，因为它允许自动驾驶汽车适应不断变化的路况，并就如何在交通中导航做出智能决策。

强化学习在自动驾驶控制中的一个关键方面是奖励系统的使用。该系统奖励 AI 系统的成功行为，例如顺利通过十字路口或避免碰撞，并惩罚它的负面行为。通过这种强化，人工智能系统能够了解哪些行动会带来积极的结果，哪些不会，从而使其在未来做出更明智的决策。RL 在自动驾驶汽车中的另一个重要方面是模拟的使用。这些模拟允许 AI 系统在安全和受控的环境中练习不同的场景并犯错误，而不是在真实的道路上。这使系统能够从错误中吸取教训并随着时间的推移提高性能，并测试新的驾驶策略和方法。RL 中用于自动驾驶控制的另一项重要技术是传感器的使用。这些传感器（例如激光雷达、雷达和摄像头）允许人工智能系统收集有关环境的信息并根据这些数据做出决策。例如，激光雷达传感器可以检测环境中物体的距离和位置，而雷达传感器可以检测物体的移动。通过使用这些

数据，人工智能系统可以就如何在交通中导航和避免碰撞做出明智的决定。最后，自动驾驶控制中的 RL 还需要使用能够分析从传感器和模拟中收集的数据的算法。这些算法必须能够适应不断变化的条件并从错误中吸取教训，以便随着时间的推移不断提高其性能。

总的来说，RL 是自动驾驶控制和执行领域的一项关键技术，因为它可以让自动驾驶汽车学习并适应不断变化的道路状况。通过利用奖励系统、模拟、深度学习、传感器和算法，RL 使 AI 系统能够就如何安全地通过交通和避免事故做出明智的决定。随着这项技术的不断进步，RL 很可能在自动驾驶汽车的发展和未来的交通运输中发挥越来越重要的作用。

（五）基于人工智能的自动驾驶研发中关键性技术竞争点

自动驾驶行业的数据数字化近年来呈现大幅增长。然而，数字化带来的挑战是如何应用这些数据来解决复杂的实际应用问题。这激发了人工智能的使用，因为它可以通过增强的自动化处理大量数据。人工智能是一个以技术为基础的系统，包括各种先进的工具和网络，可以模仿人类的智能。人工智能利用能够解释和学习输入数据的系统和软件，为实现特定的目标做出独立的决定。

人工智能是当前技术发展的重要方向之一，它的应用可以使汽车具备高效信息处理、感知理解和交互表达等重要能力。人工智能技术的进步，使得汽车能够通过语音识别、图像识别、自然语言处理等技术，实现对周围环境的更加精确的感知和理解，同时能够更加便捷地与人类进行交互。在人工智能技术的推动下，新型需求如

“一芯多屏”、“定制开发”、“开放共享”等正在推动自动驾驶能力的迭代。随着汽车行业的不断发展，越来越多的汽车厂商和技术公司正在投入研发，使得自动驾驶技术不断成熟。在此背景下，要想占据竞争点，必须针对能力和需求，结合算力、算法、数据采集以及用户数据等多方面因素进行分析，研发出更加先进、更加智能化的自动驾驶技术。针对当前的需求和竞争环境，要想在人工智能领域取得竞争优势，必须不断研发出更加先进的技术，提升自动驾驶技术的能力，以满足不断变化的市场需求。

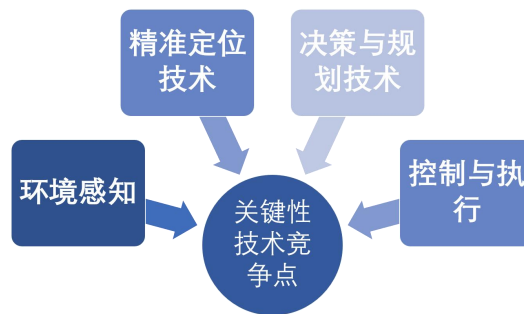


图 3-1 基于人工智能的自动驾驶所需要的条件及关键性技术竞争点

图 3-1 显示了基于人工智能的自动驾驶研发所需要的条件及关键性技术竞争点。算力、算法、数据采集以及用户数据是人工智能的发展依赖于四个基本要素，在自动驾驶市场中对应于 AI 芯片、决策软件、传感器、用户数据等。

AI 芯片在自动驾驶技术中具有重要作用。自动驾驶汽车需要进行大量的数据处理和分析，以便对周围环境进行感知，并做出适当的决策和行动。这就要求自动驾驶汽车具有高性能的 AI 芯片，以便能够快速处理大量的数据并做出决策。AI 芯片可以实现边缘计算，使自动驾驶汽车能够进行实时决策。它们还可以提供高度能效的运

算能力，使自动驾驶汽车能够以最小的能耗完成所需的计算。此外，AI 芯片还可以提供安全性，保证自动驾驶汽车的安全运行。它们可以采用安全隔离技术，将不同功能的软件隔离开来，以防止单个软件故障导致整个系统崩溃。首先，车规级芯片作为人工智能芯片的一种，在自动驾驶技术中起到了非常关键的作用。这类芯片配备了高度集成的计算资源和专门的自动驾驶技术，能够提供高效、稳定的计算能力，从而实现自动驾驶车辆的智能化控制。其次，计算平台核“芯”——自主芯片也是人工智能芯片的重要组成部分。这类芯片不仅拥有强大的计算能力，还具有高度的灵活性和可扩展性。通过使用自主芯片，自动驾驶技术可以更加完善，从而实现更高效、更稳定的自动驾驶功能。在自动驾驶技术中，人工智能芯片还具有高度的安全性，从而保证自动驾驶车辆的安全运行。例如，当发生紧急情况时，人工智能芯片可以快速判断并采取相应的应对措施，以防止发生事故。在未来，人工智能芯片将继续在自动驾驶技术中发挥关键作用，并为智能化汽车的发展带来更多的机会和挑战。有关人工智能芯片在自动驾驶技术中的应用，仍然有很多未知的领域需要我们去探索和开发。

决策软件负责分析来自传感器的信息，并根据这些信息做出决策。这些决策可能包括转弯、加速、减速等。决策软件对于自动驾驶市场来说非常重要，因为它能够提高自动驾驶汽车的安全性和可靠性。当自动驾驶汽车遇到紧急情况时，决策软件能够快速做出反应，避免发生事故。决策软件还可以帮助自动驾驶汽车更好地适应

环境变化。例如，当遇到施工标志或者障碍物时，决策软件能够快速做出决策，使自动驾驶汽车能够安全通过。

传感器可以检测车辆前方的障碍物、车流、交通信号灯等信息，从而帮助车辆做出正确的刹车、加速和转弯决策。它们还可以检测车辆内部的气压、温度、湿度和人体运动等信息，从而保证车辆的安全性和舒适性。传感器的发展也促进了自动驾驶技术的进步。目前，市场上已经有了各种各样的传感器，包括摄像机、激光雷达、毫米波雷达、超声波等车载传感器等。其中，激光雷达是在自动驾驶领域里头用的最多的传感器。目前，国际市场（主流公司有美国 Velodyne 公司、美国的 Quanergy 公司、Luminar 公司和以色列的 Innoviz 公司）上推出的主要有 4 线、8 线、16 线、32 线和 64 线。激光雷达发出的线束越多，每秒采集的点云越多，同时造价也越高。

用户数据对于自动驾驶技术来说非常重要，因为它可以帮助自动驾驶技术更好地理解道路环境、驾驶行为和交通规则，从而使自动驾驶系统能够在更复杂的道路环境中更安全地行驶。通过收集和分析大量用户数据，可以帮助自动驾驶技术更好地理解道路环境、驾驶行为和交通规则，从而使自动驾驶系统能够在更复杂的道路环境中更安全地行驶。例如，通过收集用户数据，可以了解更多关于如何在各种道路条件下安全行驶的信息，从而使自动驾驶技术能够在不同的道路条件下更好地适应。此外，用户数据还可以帮助自动驾驶技术更好地理解人类驾驶员的行为，从而使自动驾驶技术能够

更好地与人类驾驶员协作，并在遇到意外情况时采取适当的应对措施。

四、自动驾驶市场与国内外企业调研

（一）人工智能在自动驾驶领域的市场情况

智能化自动驾驶汽车是人工智能技术落地的最大应用场景之一。智能化汽车可能成为未来万物互联的终端，成为继智能手机之后，深刻改变社会形态的产品。智能化将会迎来快速发展期，主要源于以下几个方面：（1）半导体技术的提升与成本的下降：随着半导体制造商向汽车领域逐渐发展，规模化生产有利于成本的降低，从而推动销量扩大形成正反馈，汽车半导体有望复制手机半导体领域的发展规模和速度；（2）电动化的不断普及加速了智能化：电动车的电机电控特性，相较于燃油车更有助于智能化的控制系统发展；（3）对安全性便捷性和高效出行的要求：为了提升车辆差异化的竞争力，汽车厂商将继续增加在先进驾驶辅助系统（Advanced Drive Assist System, ADAS）方面的投入，提升自动避险刹车、自动泊车、道路领航等能力，以提升车辆的安全性与便捷性；随着自动驾驶能力的不断提高，自动驾驶将有效缓解交通拥堵，大大提高出行的效率。

（二）国际顶级公司在人工智能自动驾驶上的最新研发成果

Waymo 于 2009 年 1 月开启的一项自动驾驶汽车计划，其主要负责人为参与过 DARPA 挑战赛的 Sebastian Thrun（斯坦福大学人工智能实验室 SAIL 负责人）和 Anthony Levandowski（自动驾驶公司 510 Systems 的创立者）。2016 年 12 月由 Google 独立出来，成为

Alphabet 公司旗下的子公司，专注于研发最高级别 L4~L5 的自动驾驶技术。加州车管所公布了 2020 年自动驾驶的路测数据，Waymo 在平均接管两次间可行驶里程这个指标中排名第一，在测试里程中排名第二。Waymo 的有效专利数也是常年领先，近三年增速降低，但仍排在前三位。目前的商业化模式有：自动驾驶出租（凤凰城的 Robotaxi）、卡车货运、物流配送、软件授权服务四大业务场景。

Waymo 的自动驾驶研发实力公认为全球最强，其软件算法和雷达系统、摄像头等硬件均实现自研。与很多自动驾驶公司不同的是，Waymo 不仅在软件算法领域投入很大，其在实现自动驾驶的关键传感器激光雷达等硬件的研发实力也非常强大，是软硬件平衡度很好的技术公司。目前全球已上市的自动驾驶企业见下表 4-1，重点关注美国和中国。

表 4-1 全球已上市的人工智能自动驾驶企业

自动驾驶公司	国别	研发技术	技术来源	研发合作情况
Waymo	美国	自动驾驶领域的软硬件核心技术	自研	自动驾驶技术的标杆企业，路测数据及专利数量常年保持领先。Waymo 的自动驾驶研发实力公认为全球最强，其软件算法和雷达系统、摄像头等硬件均实现自研。Waymo 自研激光雷达，掌握核心硬件开发能力。
Cruise	加拿大	自动驾驶领域的软硬件核心技术	自研	自动驾驶研发实力强，多项核心测试指标与 Waymo 相当。Cruise 的基本路线与 Waymo 类似，都是采用自上而下的模式，目前通用 Cruise 的 L5 级自动驾驶技术和路测里程可以与 Waymo 一争高下，2020 年加州公布的路测数据显示，Cruise 的测试里程最多，接管两次间平均可行驶里程仅次于 Waymo，排名第二。

Mobileye	以色列	L2 级视觉解决方案和毒性预测	自研	致力于用单目视觉来解决三维立体环境中的测距问题。自创立公司以来，Mobileye 获得了视觉辅助驾驶领域的多项第一并提供了包括行人检测、车道保持和自适应巡航等辅助驾驶技术。Mobileye 最新的 L2 级自动驾驶系统称为 SuperVision，使用 11 枚摄像头、2 颗 EyeQ5 芯片来完成 L2+级别的自动驾驶。
英伟达	美国	算法工具链及仿真软件提供商	自研	在自动驾驶领域，公司已经形成了分层解耦、全栈式的自动驾驶产品解决方案，并覆盖 L2-L5 级自动驾驶应用场景，配套软件方案包括：Constellation（仿真系统）、Drive OS（底层开发平台）、Driveworks（服务器平台配套解决方案）、Drive AV（自动驾驶功能）和 Drive IX（人机交互）等。其配套工具链易于使用，已经有基于英伟达的小鹏 Xpilot 系统搭载在其量产车型中，是为数不多已经经受车规级考验的芯片提供商。
Luminar	美国	激光雷达硬件设计	自研	主打半固态激光雷达，车规级优势大过机械式激光雷达；掌握了低成本 1550nm 激光发射及接收技术，使激光雷达的性能得到质的提升。计划于 2022 年量产激光雷达 Iris，同时推出自动驾驶软件套装 Sentinel，软硬件同时发力，确保量产能够如期达成。
百度 Apollo	中国	自动驾驶领域的软硬件核心技术	合作开发	中国自动驾驶研发的先行者与技术的领跑者：百度早在 2013 年就已启动无人车项目，并于 2015 年下半年推出自动驾驶汽车，一个月后，Apollo 面世。百度采用了和 Waymo 类似的自动驾驶解决方案，即直接研发载有激光雷达+摄像头+毫米波雷达的 L5 级自动驾驶方案，以算法和解决方案研发为主。
小鹏	中国	自动驾驶领域的软硬件核心技术	合作开发	视觉算法能力无法超越特斯拉，因此采用激光雷达+高精地图+摄像头等多传感器共同判断，依靠中国强大的基建实力以及领先的 5G 基站数量可以实现车辆网的优势，达到安全冗余来实现自动驾驶的方案。优势是安全系数高，以目前的技术能力来看是商业化达到 L5 的较为可靠的路径。

与美、欧等发达国家相比，我国在自动驾驶汽车方面的研究起步稍晚，国内汽车企业的市场开发最近五年才开始出现。不同于国外车企以自主研发为主，我国汽车制造厂商多采取与国内科研院所、高校合作研发自动驾驶技术，其核心技术大多来自创业团队的自主研发以及与院校合作研发。表 4-2 展示了国内外重点 AI 自动驾驶企业的概况以及相应的融资信息。

表 4-2 国内外重点 AI 自动驾驶企业的概况以及相应的融资信息

公司	成立时间	融资信息
Waymo	2009 年	Waymo 在 3 轮融资中总共筹集了 55 亿美元。他们的最新资金于 2021 年 6 月 16 日从私募股权融资中筹集。 2021 年 6 月 16 日：私募股权融资：25 亿美元 2020 年 5 月 12 日：私募股权圆桌会议：7.5 亿美元 2020 年 3 月 2 日：风险投资圆桌会议：23 亿美元 *更多的融资信息请查询网址： https://www.crunchbase.com/organization/waymo/company_financials
Cruise	2013 年	Cruise 在 13 轮融资中总共筹集了 151 亿美元。他们的最新资金于 2022 年 3 月 18 日从二级市场融资。 2022 年 3 月 18 日：二级市场-Cruise：21 亿美元 2022 年 3 月 18 日：公司轮-Cruise：14 亿美元 2021 年 6 月 15 日：债务融资-Cruise：50 亿美元 *更多的融资信息请查询网址： https://www.crunchbase.com/organization/cruise/company_financials
Mobileye	1999 年	英特尔公司 Mobileye 在 5 轮融资中总共筹集了 5.15 亿美元。他们的最新资金于 2014 年 8 月 4 日从 IPO 后的一轮股权融资中筹集。 2014 年 8 月 4 日：IPO 后股权-英特尔公司 Mobileye 2013 年 7 月 7 日：私募股权回合-英特尔公司 Mobileye：4 亿美元 2007 年 10 月 12 日：私募股权回合-英特尔公司 Mobileye：1



		亿美元 *更多的融资信息请查询网址： https://www.crunchbase.com/organization/mobileye-vision-technologies/company_financials
英伟达	1993 年	NVIDIA 在 5 轮融资中总共筹集了 1 亿美元。他们的最新资金于 2022 年 8 月 9 日从 IPO 后的一轮股权融资中筹集。 2022 年 8 月 9 日：上市后股权-英伟达：6500 万美元 2017 年 5 月 24 日：私募股权回合-NVIDIA：1000 万美元 2010 年 8 月 9 日：DARPA 拨款-英伟达：2500 万美元 *更多的融资信息请查询网址： https://www.crunchbase.com/organization/nvidia/company_financials
Luminar	2012 年	Luminar 在 11 轮融资中总共筹集了 10 亿美元。他们的最新资金于 2022 年 1 月 20 日从 IPO 后的一轮股权融资中筹集。 2022 年 1 月 20 日：首次公开募股后股权-Luminar：2030 万美元 2021 年 2 月 3 日：上市后股权-Luminar:1.54 亿美元 2020 年 12 月 2 日：上市后股权-Luminar：4.2 亿美元 *更多的融资信息请查询网址： https://www.crunchbase.com/organization/luminar-technologies/company_financials
百度 Apollo	2017 年	百度的阿波罗基金于 2017 年 11 月 28 日投资了 SmartReye。这项投资-A 系列-SmarterEye-价值 1500 万美元。 2017 年 11 月 28 日：A 轮-SmarterEye：1500 万美元
小鹏	2014 年	Xpeng Motors 在 10 轮融资中总共筹集了 57 亿美元。他们的最新资金于 2022 年 4 月 27 日从 IPO 后债务融资中筹集。 2022 年 4 月 27 日：IPO 后债务-Xpeng Motors：75 亿元人民币 2021 年 1 月 11 日：IPO 后债务-Xpeng Motors：人民币 128 亿元 2020 年 8 月 3 日：C 系列-Xpeng 汽车：4 亿美元 *更多的融资信息请查询网址： https://www.crunchbase.com/organization/xiaopeng-motors/investor_financials

本节通过网络平台对自动驾驶人才库进行数据挖掘，统计分析出领域内学者分布，并介绍了目前自动驾驶汽车领域的国内代表性

研究学者，文中排名不分先后。基于中国国内院校学者的调研及文献报道，国内学者的研究重点同样集中在算法技术层面上（表 4-3），目前尚未查询到学者科技成果转化的相关信息：

表 4-3 自动驾驶技术中国学者研发优势定位

单位及姓名	技术优势
清华大学，王建强教授	清华大学是中国首屈一指的研究型大学，以其卓越的学术科研成果和知识转移能力而享誉国内外。王建强教授作为清华大学自动驾驶领域的专家，在该领域有着广泛的研究与应用。在自动驾驶领域，王建强教授以其领先的技术实力和创新精神，在多项科研领域取得了显著的成果。在自动驾驶车辆的感知技术方面，研发出了高精度的激光雷达系统，实现了对环境的高效感知。其次，在自动驾驶车辆的控制技术方面，开发了一套高效的自动驾驶算法，实现了对车辆的稳定控制。在自动驾驶车辆的安全保障方面，研发了一系列先进的安全技术，以确保自动驾驶车辆的安全运行。
清华大学、国防大学兼职教授，李德毅教授	李德毅教授作为清华大学和国防大学的兼职教授，在自动驾驶领域有着广泛的研究和实践经验。李教授在视觉感知技术方面有着深厚的学识和丰富的经验。他曾领导团队开展多项关于视觉感知的研究，如视觉检测、识别和跟踪技术。这些研究成果为自动驾驶系统的实际应用提供了有力的技术支持。其次，李教授在自动驾驶决策技术方面也有着出色的表现。他的研究团队开展了大量关于自动驾驶决策的研究，如道路识别、避障决策和路径规划等。这些研究成果为自动驾驶系统提供了强有力的技术支撑。他的团队开展了大量关于自动驾驶系统的研究，如系统架构设计、性能评估和实际应用等。这些研究成果为自动驾驶系统的实际应用提供了全面的技术指导。
南京理工大学，杨静宇教授	南京理工大学是国内一所以工科为主的综合性大学，在汽车技术领域享有很高的声誉。杨静宇教授是南京理工大学汽车工程学院的资深教授，在自动驾驶领域有着丰富的研究经验，并在视觉感知技术、道路识别、路径规划等方面有着丰富的研究经验，为自动驾驶系统的研发提供了有力的支持。杨教授研制的我国第一套自主式地面自动驾驶平台，被称为是“在我国智能机器人领域具有开创性，是我国科技战线，特别是高技术领域的一项重大科技成果”。杨静宇教授通过多年的研究，为自动驾驶领域的发展做出了卓越的贡献，是国内自动驾驶领域的重要人物。
西安交通大学，郑南宁	郑南宁院士建立的视觉场景理解的立体对应计算模型与视觉注意力统计学习方法成为该领域代表性工作，为构造计算机视觉系统和基于图

院士	像信息的智能控制系统，提供了理论指导和关键技术，提出图像分析和视觉知识描述新方法，为构造计算机视觉系统和基于图像信息的智能控制系统，提供了理论指导和关键技术。完成了“精密装配机器人机器视觉系统”研究。发明了一种图像边缘曲线拟合的新方法。完成了“高性能机器视觉及车型与牌照自动识别系统。提出在线交互式立体测深方法，研制出“X线数字减影血管造影系统”及“DSA1250 数字减影血管造影系统”。研制出具有自主知识产权的数字电视扫描制式转换及视频处理芯片。
国防科技大学，贺汉根教授	贺汉根教授于 2000 年国防科学技术大学以一辆老式北京吉普车为平台的自动驾驶汽车进行了 75.6km/h 的高速公路车道跟踪实验。2003 年 6 月，国防科学技术大学与一汽集团合作研制成功红旗 CA7460 自动驾驶轿车。该车在正常交通状况下，高速公路上最高稳定自动驾驶速度为每小时 130km，最高峰值自动驾驶速度为每小时 170km，并具备超车功能，其总体技术性能达到了当时世界先进水平。2006 年 8 月，国防科技大学与一汽集团合作研制成功红旗 HQ3 自动驾驶轿车，在硬件系统小型化、控制精度和稳定性等方面都有明显提高。该自主车于当年 9 月参加了在吉林长春举办的东北亚博览会。2007 年 3 月，该车又被国家商务部选送到莫斯科参加“俄罗斯—中国年”展览。2011 年 7 月 14 日，智能化自动驾驶系统在红旗 HQ3 轿车平台上研发成功，获准进入京珠高速长沙至武汉段，开展我国首次自动驾驶汽车高速公路长途自动驾驶试验。2017 年 3 月 6 日，经有关部门批准同意，新一代红旗自动驾驶汽车获准在长沙绕城高速公路上开展试验。

（三）本章小结

虽然自动驾驶汽车的发展势头良好，但因为中国自主研发企业的技术基础薄弱等缘故，我国在传感器感知、控制决策、车辆交互、路况识别等核心技术方面都存在瓶颈。特别是路况识别方面，车辆需要完成对周围障碍、交通信号、行人以及其他车辆状态的掌控与识别，迄今为止，能够达到这一效果的自动驾驶汽车很少。目前，要达到 L4 等级以上的自动驾驶，技术依然不成熟；而 L2 级高级驾驶辅助驾驶水平的 ADAS 系统已经成熟。L2 级高级驾驶辅助驾驶水

平的自动驾驶也逐步量产，预计 L4 等级的自动驾驶将会在 2025 年以后逐步向市场推广。

五、专业术语解析

人工智能（Artificial Intelligence, AI）

是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。

人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）

是由大量处理单元互联组成的非线性、自适应信息处理系统。它是在现代神经科学研究成果的基础上提出的，试图通过模拟大脑神经网络处理、记忆信息的方式进行信息处理。

自主地面车辆（Autonomous Land Vehicle, ALV）

采用专家系统的计划功能、计算机视觉、自主导航及先进的并行处理等技术，能独立进行判断和计划，可以用自然语言接受任务，根据要求，计划出执行任务的方法以及不断修改计划。

卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）

是一类包含卷积计算且具有深度结构的前馈神经网络，是深度学习的代表算法之一。

深度学习（Deep Learning, DL）

是学习样本数据的内在规律和表示层次，这些学习过程中获得的信息对诸如文字，图像和声音等数据的解释有很大的帮助。它的

最终目标是让机器能够像人一样具有分析学习能力，能够识别文字、图像和声音等数据。

深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）

将深度学习的感知能力和强化学习的决策能力相结合，可以直接根据输入的图像进行控制，是一种更接近人类思维方式的人工智能方法。

惯性测量单元（Inertial Measurement Unit, IMU）

是测量物体三轴姿态角(或角速率)以及加速度的装置。

激光雷达（Laser Radar, LR）

是以发射激光束探测目标的位置、速度等特征量的雷达系统。其工作原理是向目标发射探测信号（激光束），然后将接收到的从目标反射回来的信号（目标回波）与发射信号进行比较，作适当处理后，就可获得目标的有关信息。

毫米波雷达（Millimeter-Wave Radar, MWR）

是工作在毫米波波段探测的雷达。与红外、激光、电视等光学导引头相比，毫米波导引头穿透雾、烟、灰尘的能力强，具有全天候(大雨天除外)全天时的特点。另外，毫米波导引头的抗干扰、反隐身能力也优于其他微波导引头。

自动驾驶汽车（Self-driving Autonomous vehicle, SdA）

又称自动驾驶汽车、电脑驾驶汽车、或轮式移动机器人，是一种通过电脑系统实现自动驾驶的智能汽车。

即时定位与地图构建 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)

机器人在未知环境中从一个未知位置开始移动,在移动过程中根据位置和地图进行自身定位,同时在自身定位的基础上建造增量式地图,实现机器人的自主定位和导航。

参考文献

- [1] Hermann Winner, “Introducing autonomous driving: an overview of safety challenges and market introduction strategies,” *Autom. Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, vol. 66, no. 2, pp. 100–106, 2018.
- [2] A. Boukerche and X. Ma, “Vision-based autonomous vehicle recognition: A new challenge for deep learning-based systems,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 54, no. 4, pp. 1–37, 2021.
- [3] L. Wan, Y. Sun, L. Sun, Z. Ning, and J. J. P. C. Rodrigues, “Deep learning based autonomous vehicle super resolution DOA estimation for safety driving,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 7, pp. 4301–4315, 2020.
- [4] S. Kuutti, R. Bowden, Y. Jin, P. Barber, and S. Fallah, “A survey of deep learning applications to autonomous vehicle control,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 712–733, 2020.
- [5] Y. Jeong, S. Son, E. Jeong, and B. Lee, “An integrated self-diagnosis system for an autonomous vehicle based on an IoT gateway and deep learning,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 7, p. 1164, 2018.
- [6] Z. Zhu, Z. Hu, W. Dai, H. Chen, and Z. Lv, “Deep learning for autonomous vehicle and pedestrian interaction safety,” *Saf. Sci.*, vol. 145, p. 105479, 2022.
- [7] F. Hui, C. Wei, W. ShangGuan, R. Ando, and S. Fang, “Deep encoder–decoder-NN: A deep learning-based autonomous vehicle trajectory prediction and correction model,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 593, p. 126869, 2022.
- [8] Ö. Gültekin, E. Cinar, K. Özkan, and A. Yazıcı, “Multisensory data fusion-based deep learning approach for fault diagnosis of an industrial autonomous transfer vehicle,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 200, p. 117055, 2022.

- [9] S. Kuutti, S. Fallah, R. Bowden, and P. Barber, “Deep learning for autonomous vehicle control: Algorithms, state-of-the-art, and future prospects,” *Synth. Lect. Adv. Automot. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 1–80, 2019.
- [10] S. Narayanan, E. Chaniotakis, and C. Antoniou, “Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 111, pp. 255–293, 2020.
- [11] P. Koopman and M. Wagner, “Challenges in autonomous vehicle testing and validation,” *SAE Int. J. Transp. Saf.*, vol. 4, no. 1, pp. 15–24, 2016.
- [12] J. Fayyad, M. A. Jaradat, D. Gruyer, and H. Najjaran, “Deep learning sensor fusion for autonomous vehicle perception and localization: A review,” *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4220, 2020.

行业图谱研究项目

一、项目目标和定位

行业图谱是资本市场与公司金融研究中心基于科技成果转化研究的一项子课题，聚焦于科技成果这一核心要素，从技术链视角切入展开的研究项目。科技成果的转化需要对科技成果有清晰、准确、深刻的认识和理解，能够解析科技成果所包含的学术价值、社会价值、经济价值和人文价值等，从而探索科技成果的未来应用场景，以跨越从0到1的商业性转化，通过不断理解优化实现社会产业化，并最终成为科技推动社会发展的历史进程。

然而，由于科技天然具有强大的认知壁垒，其先进性、创新性的特点，使得科技成果面临非专业人士看不懂、不敢判断的知识窘境。在成果转化的操作路径中，执行者可分类为三方：成果供给方、成果接收方及连接双方的中介服务机构。除了成果供给方之外，成果接收方和中介服务机构都面临着知识窘境。成果供给方是科技成果的发明人、创造者，对科技成果的学术价值拥有深度认知，但缺乏商业经验和分析社会需求的能力，很难独立实现成果的成功转化；成果接收方是进行成果商业化、产业化的企业，对社会需求敏感，善于进行商业价值的探索，但由于不具备深厚的科研基础，不能对科技成果进行技术层面的准确分析和判断，影响执行效率；中介服务机构虽然具备政策分析、法律服务等领域的专业能力，但同样面临看不懂技术的知识窘境，导致出现无效推介、不合理的专利布局、未来的专利纠纷等潜在危机。这一需求的断层也间接性地影响经济学称之为成果转化“死亡之谷”时期的存在。因此，如何准确认识科技成果，正确判断科技成果的技术领先度，理解科技成果所处的行业地位和产业链发展格局，对于提高科技成果转化具有极其重要的价值。

本研究以国家十四五规划为导向，重点关注与国家战略需求发展相关的重大创新领域。集中在人工智能、量子信息、集成电路、生命科学、生物育种、空天科技、深地深海、现代能源等前沿领域。对基础科研方向进行应用场景的细分，将相关可转化/转化中的科技成果进行技术链条的梳理，通过专业性的技术解构和解析，形成高逻

辑性、易理解性的技术图谱；并在此基础上，对科技成果产业化应用现状进行行业研究和分析，以全球视野定位领先梯队中的科创企业和学术团队的技术实力。通过行业图谱的研究，不仅可以清晰定位高新科技企业的技术竞争力，而且能够对我国相关行业现状和未来方向有更准确的认识。既为科技成果转化提供了专业性知识体系支撑，也有助于指导城镇产业化发展布局、推动产业链融通创新、引导创业投资基金对“硬科技”的积极性及鼓励金融支持创新体系的建设。

二、研究方法

方法学上，行业图谱研究将进行学科领域分级细化，再对技术在应用场景方向上进行详细分级和解构：

（一）一级分类：从应用产业所属学科的角度，以国家十四五规划为导向，重点关注影响国家安全和全局的基础核心领域，包括人工智能、量子信息、集成电路、生命科学、生物育种、空天科技、深地深海、现代能源等。

（二）二级分类：对技术对象进行分类。比如生命科学中包括疫苗、新生物材料、细胞治疗、人工智能、基因技术等技术对象，择一进行技术应用方向分析和流程解析。

1、应用方向的技术流程全景

即对某一技术对象在一个应用方向上的技术流程全景图，从研发到生产、上市的全流程。如新药的研发生产及上市的整体概况图。

2、应用方向的技术产品细分类

对技术对象在此应用方向上所形成的产品种类进行细分，并提炼属性/功能的特点。比如机器学习和深度学习算法在多肽合成、虚拟筛选、毒性预测、药物监测和释放、药效团建模、定量构效关系、药物重定位、多药理和生理活性等药物发现过程。

3、应用方向上某一细分产品的技术开发流程

从上一级分类产品中选定一个细分产品，一般是现阶段技术发展最先进的产品，针对其所应用的场景相关技术开发/生产全流程进行解析和描述。比如：新药研发中蛋白质折叠和蛋白质相互作用的人工智能预测技术，其生产流程及其中核心技术环节。

4、领先级国际科创企业及学者团队定位

将国际国内最领先的科创企业进行技术平台和产品性能的比较分析，并将其所具备的技术优势定位于上述图谱中。将国内外学者团队的领先性研究成果/转化状态进行分析，并定位于上述图谱中。比如：国际先进的自动驾驶企业如 Waymo、Cruise、Mobileye、Luminar 的优势技术平台。

三、研究报告形式

行业图谱以结构化脑图为基础形式，辅以文字报告进行解释说明。文字报告的内容框架包括：

概览：概述图谱传递的信息内容、解答的技术问题和目的。

科学背景简述：描述图谱行业背景、技术流程、关键技术平台和竞争点的细节、技术应用的例证及国内外行业发展现状，对图谱做详细内容的补充说明。

专业术语解析：针对重点专业术语进行概念解释。

参考文献。

免责声明

本报告由清华大学五道口金融学院国家金融研究院，资本市场与公司金融研究中心（以下统称“研究中心”）编写。本报告仅供研究使用，并非为提供咨询意见而编写。本报告中的信息均来源于本研究中心认为可靠的已公开资料，但研究中心及其关联机构对信息的准确性及完整性不做任何保证。本报告的版权仅为研究中心所有，如需转载，请注明本文为本研究中心的著作。

（作者：朱雅姝为清华大学国家金融研究院资本市场与公司金融研究中心高级研究专员。刘碧波为清华大学五道口金融学院院长助理、副教授、清华大学国家金融研究院资本市场与公司金融研究中心联席主任。）

联系人：朱雅姝

邮箱：zhuysh@pbcfsf.tsinghua.edu.cn
