



2018

人工智能之 自动驾驶研究报告 (前沿版)

AMiner 研究报告第七期

清华-中国工程院知识智能联合实验室

2018 年 7 月

目录

1 概念篇	2
1.1 自动驾驶汽车概述.....	2
1.2 无人驾驶汽车发展图谱	4
1.3 我国无人驾驶汽车发展图谱.....	8
2 技术篇.....	12
2.1 自动驾驶汽车关键技术	12
2.1.1 环境感知.....	12
2.1.2 精准定位	15
2.1.3 决策与规划	16
2.1.4 控制与执行	17
2.1.5 高精地图与车联网 V2X.....	19
2.1.6 自动驾驶汽车测试与验证技术	19
2.2 人工智能在自动驾驶汽车中的应用	20
3 人才篇.....	23
3.1 学者分布及迁徙.....	23
3.2 代表性研究学者	24
4 应用篇.....	32
5 趋势篇.....	35



订阅公众号

图表目录

图 1 SAE J3016 标准 Copyright © 2014 SAE International.....	2
图 2 无人驾驶技术	3
图 3 无人驾驶技术的价值	4
图 4 国外无人驾驶汽车发展历程	4
图 5 谷歌公司的无人驾驶原型车	7
图 6 Pacifica 混动厢式无人驾驶出租车	7
图 7 Zoox 的无人驾驶汽车	8
图 8 我国无人驾驶汽车发展历程	8
图 9 百度“阿波龙”无人驾驶巴士.....	10
图 10 自动驾驶汽车体系结构	12
图 11 多线激光雷达通过点云来描述三维环境模型（来自 Velodyne 官网）	13
图 12 VLP-16、HDL-64E（来自 Velodyne 官网）	13
图 13 全球首款纯固态激光雷达 Quanergy S3（来自 Quanergy 官网）	14
图 14 自动驾驶领域研究学者全球分布.....	23
图 15 自动驾驶领域研究学者全球分布.....	23
图 16 各国人才逆顺差	24
图 17 自动驾驶汽车将最先应用的行业.....	32
图 18 EasyMile 的自动驾驶巴士 EZ10.....	32
图 19 京东无人配送车（左）和英国 Kar-Go 自动驾驶微型车（右）	33
表 1 三届 DARPA 无人驾驶挑战赛	5

摘要

当今，自动驾驶技术已经成为整个汽车产业的最新发展方向。应用自动驾驶技术可以全面提升汽车驾驶的安全性、舒适性，满足更高层次的市场需求等。自动驾驶技术得益于人工智能技术的应用及推广，在环境感知、精准定位、决策与规划、控制与执行、高精地图与车联网 V2X 等方面实现了全面提升。科研院校、汽车制造厂商、科技公司、自动驾驶汽车创业公司以及汽车零部件供应商在自动驾驶技术领域进行不断地探索，寻求通过人工智能技术来获得技术上的新突破。本报告在此背景下，对自动驾驶汽车进行了简单梳理，包括以下内容：

自动驾驶汽车概念。首先对自动驾驶汽车相关概念、技术以及技术价值进行介绍，接着对国外、国内无人驾驶汽车发展历程及现状进行了梳理。

自动驾驶汽车研究情况。对自动驾驶技术研究中的重要技术进行介绍。

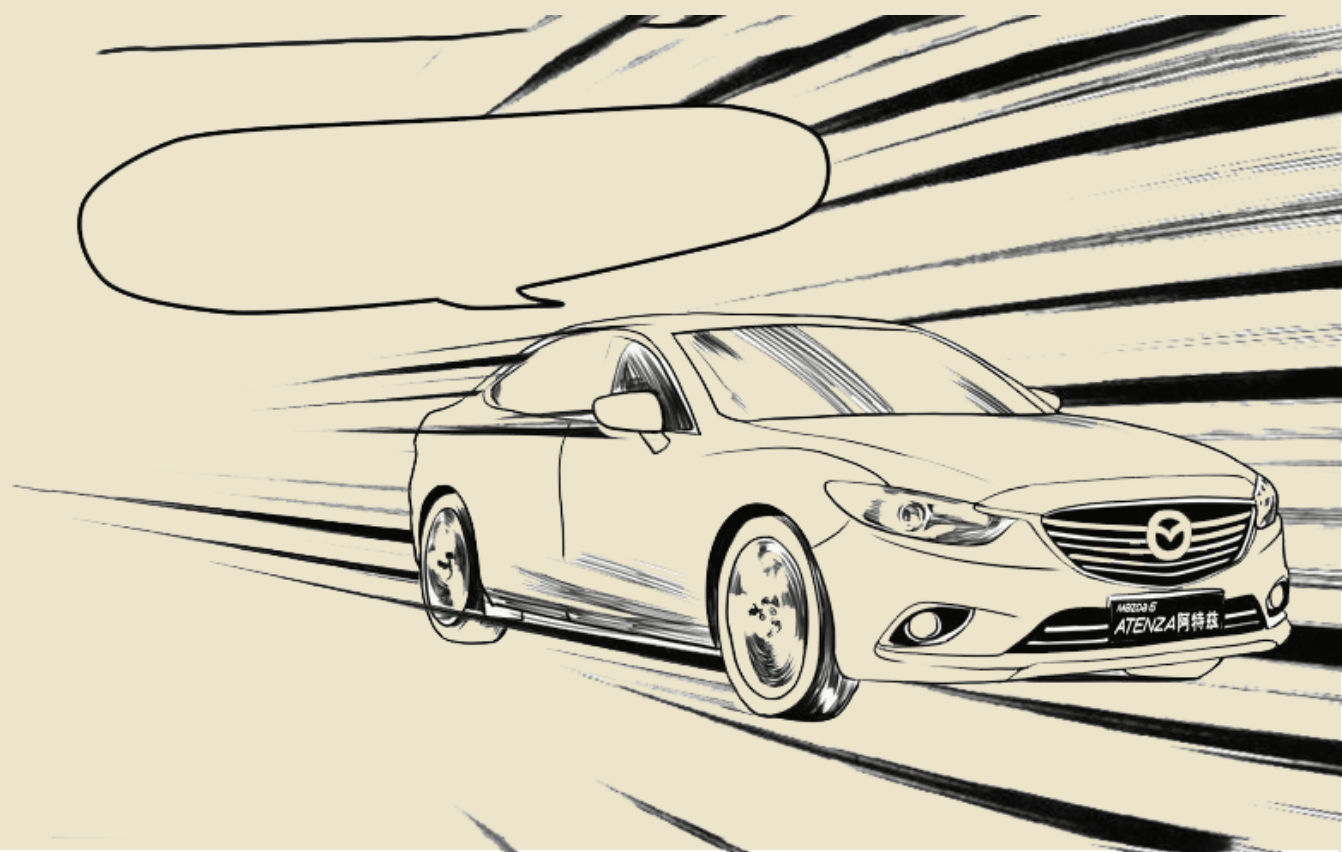
自动驾驶汽车领域专家介绍。通过 AMiner 大数据平台对 AMiner 的自动驾驶人才库进行数据挖掘，统计分析出领域内学者分布及迁徙。同时，介绍了目前自动驾驶汽车领域的国内外代表性研究学者。

自动驾驶汽车应用介绍。自动驾驶汽车已经以交通参与者的身份来到了我们身边，未来主要的应用方向包括公共交通、快递运输、服务于老年人和残疾人等。

自动驾驶汽车趋势介绍。到 2020 年，过去积累的自动驾驶技术科研成果及工程进步都将成为现实。自动驾驶汽车即将进入 10~20 年混合模式的时代。随着自动驾驶汽车与人工智能的深度融合，自动驾驶汽车可以实现高度智能化，真正实现 Level 4+ 级的自动驾驶技术。在享受科技成果的同时，我们也需要认识到，自动驾驶技术可以带来无限憧憬，但也会给社会生活带来巨大的冲击，同时，还面临着巨大挑战。

1 concept

概述篇



1 概念篇

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。

概念篇首先对自动驾驶汽车涉及到的相关概念进行介绍，包括自动驾驶汽车等级标准、智能汽车、无人驾驶汽车等；接着对自动驾驶汽车技术及其技术价值进行概括介绍；重点描绘了国外、国内无人驾驶汽车发展图谱。

1.1 自动驾驶汽车概述

（1）自动驾驶汽车等级标准

在介绍自动驾驶汽车之前，我们先来了解一下 SAE J3016 标准。该标准于 2014 年由美国 SAE International（国际汽车工程师学会）制定，内容如下图所示。该标准将车辆分为 Level 0~Level 5 共 6 个级别，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。

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
Human driver monitors the driving environment						
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
Automated driving system ("system") monitors the driving environment						
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an automated driving system of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes

图 1 SAE J3016 标准 Copyright © 2014 SAE International.

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。

(2) 无人驾驶汽车

目前对于自动驾驶汽车的研究有两条不同的技术路线: 一条是渐进提高汽车驾驶的自动化水平; 另一条是“一步到位”的无人驾驶技术发展路线。由 SAE J3016 标准可以看出, 通常大家谈论的无人驾驶汽车对应该标准的 Level 4 和 Level 5 级。无人驾驶汽车是自动驾驶的一种表现形式, 它具有整个道路环境中所有与车辆安全性相关的控制功能, 不需要驾驶员对车辆实施控制^[3]。

(3) 智能汽车

在我国, 与无人驾驶汽车这个术语相关的概念还有智能汽车。相对于无人驾驶汽车概念, 智能汽车定义涵盖的范围更广。《中国制造 2025》将智能网联汽车定义为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^[5]。

(4) 自动驾驶技术

无人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, 如右图所示。

无人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。本报告会在技术篇进行详解。

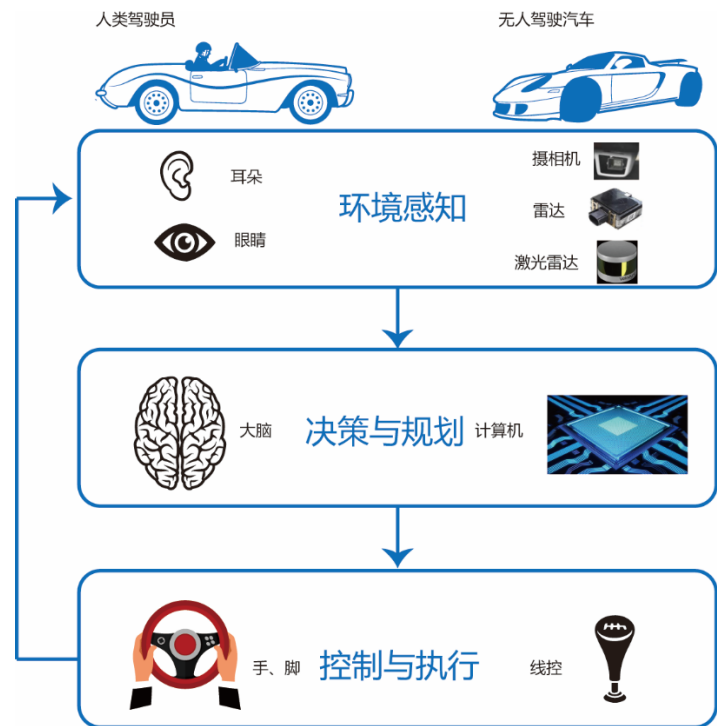


图 2 无人驾驶技术

（5）自动驾驶技术的价值

无人驾驶汽车之所以受到各国政府前所未有的重视，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无人驾驶汽车创业公司也纷纷在这个领域进行布局，它主要具有以下价值，如下图所示。



图 3 无人驾驶技术的价值

- 改善交通安全。驾驶员的过失责任是交通事故的主要因素。无人驾驶汽车不受人的心理和情绪干扰，保证遵守交通法规，按照规划路线行驶，可以有效地减少人为疏失所造成的交通事故。
- 实现节能减排。由于通过合理调度实现共享出行，减少了私家车购买数量，车辆绝对量的减少，将使温室气体排量大幅降低。
- 消除交通拥堵，提升社会效率。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。
- 个人移动能力更加便利，不再需要找停车场。
- 拉动汽车、电子、通信、服务、社会管理等协同发展，对促进我国产业转型升级具有重大战略意义。

1.2 无人驾驶汽车发展图谱



图 4 国外无人驾驶汽车发展历程

本节内容将梳理国外无人驾驶汽车发展图谱，上图所示为重要时间节点事件。

（1）科研院校对无人驾驶技术的研究

20 世纪 70 年代，科技发达国家开始率先进行无人驾驶汽车的研究。1984 年，美国国防高级研究计划署（DARPA）与陆军合作，发起自主地面车辆（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。

为了推进无人驾驶技术更快、更好地发展，DARPA 于 2004 年—2007 年共举办了 3 届 DARPA 无人驾驶挑战赛，如下表所示。

表 1 三届 DARPA 无人驾驶挑战赛

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、6h53min58s 的总时长夺冠，赢得了 200 万美元，同时，这也标志着无人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 6h 内完成 96km 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 4h10min20s、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无人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。

- 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 Assist-Ware 技术公司合作研制了便携式高级导航支撑平台（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 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。试验车的无人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无人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）汽车制造厂商对无人驾驶技术的研究

除了科研院校在无人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 年开始相继在无人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无人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。

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。预计今年 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 说，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，正式进入无人驾驶领域。后者初创于 2013 年，一直从事具有完全自动驾驶功能的无人驾驶技术研发。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）无人驾驶汽车——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，是真正的无人驾驶汽车。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，以便能够在 2019 年开始初步实际部署无人驾驶车辆。

（3）新技术力量对无人驾驶技术的研究

以谷歌为代表的新技术力量纷纷入局无人驾驶领域。这些企业多采用“一步到位”的无人驾驶技术发展路线，即直接研发 SAE Level 4+级别的无人驾驶汽车。

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，开始研发无人驾驶技术。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无人驾驶汽车的路测许可证。2015 年，谷歌公司的无人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 5 谷歌公司的无人驾驶原型车

2016 年 12 月，谷歌将无人驾驶业务独立出来，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无人驾驶出租车。当地时间 2018 年 5 月 31 日，Waymo 宣布向菲亚特·克莱斯勒（FCA）采购 62000 辆 Pacifica 混动厢式车用于打造无人驾驶出租车队。除车辆采购以外，Waymo 与 FCA 双方还在商讨如何将无人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 共同打造的无人驾驶汽车。2018 年，谷歌还与捷豹路虎合作，计划在 2020 年之前生产另外 20000 辆无人驾驶出租车。



图 6 Pacifica 混动厢式无人驾驶出租车

2016 年 5 月，Uber 无人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 首次路测使用的无人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 无人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无人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。

（4）创业公司对无人驾驶技术的研究

以 nuTonomy 为代表的创业公司也纷纷入局无人驾驶领域。这些企业多采用“一步到位”的 SAE Level 4+ 的无人驾驶技术发展路线。

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状况，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。

Zoox 是硅谷一家神秘的无人驾驶汽车初创公司，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。这种汽车能向任意方向行驶，乘客将面对面而坐。



图 7 Zoox 的无人驾驶汽车

1.3 我国无人驾驶汽车发展图谱

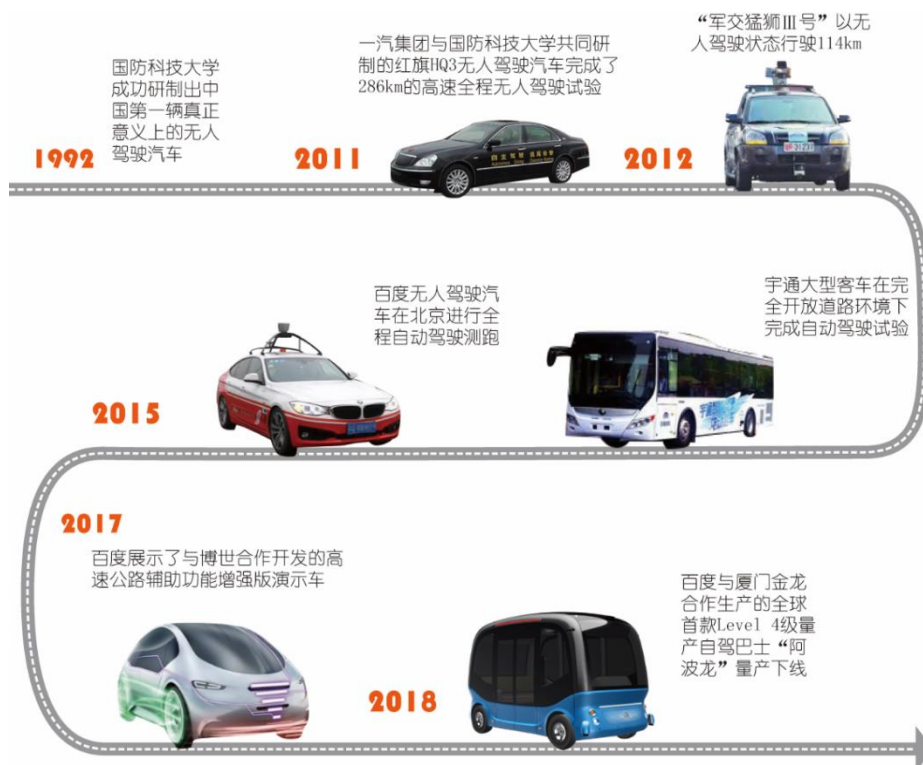


图 8 我国无人驾驶汽车发展历程

本节将介绍我国无人驾驶汽车研究重要时间节点事件，如上图所示。

（1）我国科研院校对无人驾驶汽车的研究

与美、欧等发达国家相比，我国在无人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、高校合作研发无人驾驶技术。

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。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无人驾驶汽车。

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 and 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）我国汽车制造厂商对无人驾驶汽车的研究

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、高校合作研发无人驾驶技术。

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 无人驾驶汽车完成了 286km 的面向高速公路的全程无人驾驶试验，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”以无人驾驶状态行驶 114km，最高时速为 105km/h。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，能够帮助无人驾驶车辆识别路况，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 打造的无人驾驶汽车。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。

（2）我国高科技公司对无人驾驶汽车的研究

除了上述传统的汽车制造厂商在无人驾驶领域的研究外，以百度为代表的高科技公司也相继加入了无人驾驶汽车领域的研究。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 12 月初，百度无人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。

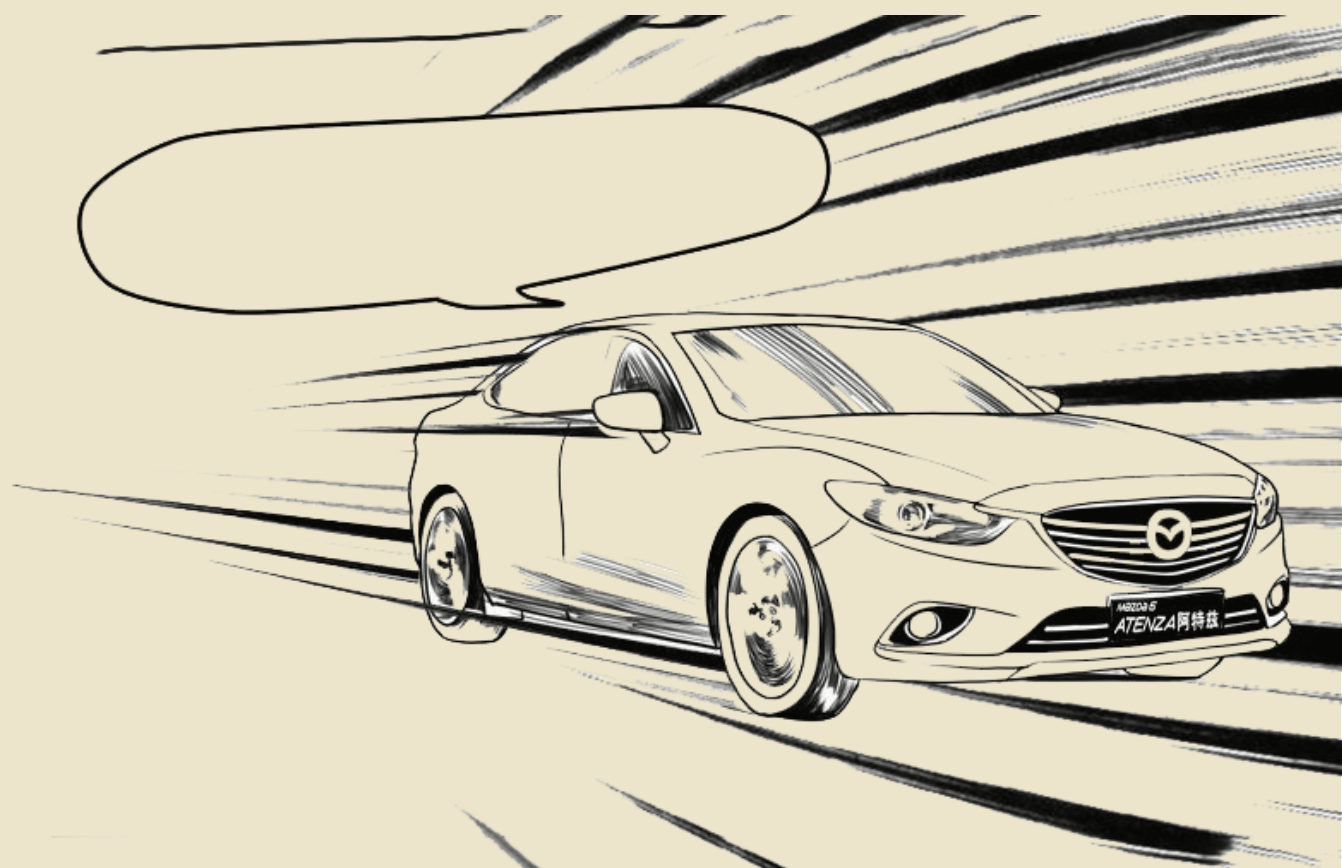
2015 年 12 月 14 日，百度宣布正式成立自动驾驶事业部。2017 年 4 月 17 日，百度展示了与博世合作开发的高速公路辅助功能增强版演示车。2018 年 7 月 4 日，百度在第二届百度 AI 开发者大会（Baidu Create 2018）上宣布，与厦门金龙合作生产的首款 Level 4 级自动驾驶巴士“阿波龙”已经量产下线。这一批次的 100 辆车接下来会被投放到北京、深圳、武汉等城市，在机场、工业园区、公园等行驶范围相对固定的场所开始商业化运营。2019 年年初，百度还会跟日本软银旗下的 SB Drive 合作，将 10 辆“阿波龙”带去包括东京在内的多个日本城市。这款无人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）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。



图 9 百度“阿波龙”无人驾驶巴士

2 technology

技术篇



2 技术篇

技术篇着重对无人驾驶技术研究中的重要技术进行介绍。其中，自动驾驶汽车关键技术包括环境感知、精准定位、决策与规划、控制与执行、高精地图与车联网 V2X 以及自动驾驶汽车测试与验证技术；人工智能在自动驾驶汽车中的应用包括人工智能在环境感知中的应用、人工智能在决策规划中的应用、人工智能在车辆控制中的应用。

2.1 自动驾驶汽车关键技术

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，如下图所示。

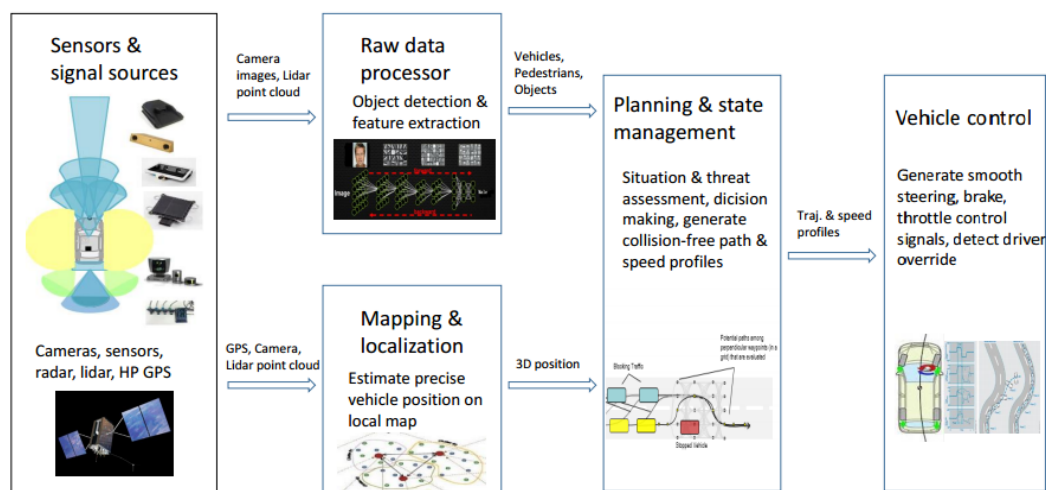


图 10 自动驾驶汽车体系结构

2.1.1 环境感知

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，是实现自动驾驶的前提条件，起着人类驾驶员“眼睛”“耳朵”的作用。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，为自动驾驶汽车的决策规划进行服务。

（1）摄像机

自动驾驶汽车中配置的视觉传感器主要是工业摄像机，它是最接近于人眼获取周围环境信息的传感器。摄像机可以识别车辆行驶环境中的车辆、行人、车道线、路标、交通标志、交通信号灯等。它具有较高的图像稳定性、抗干扰能力和传输能力等特点。

摄像机按照芯片类型可分为 CCD 摄像机和 CMOS 摄像机两种。

CCD 摄像机，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，具有体积小、重量轻、低功耗、无滞后、无灼伤、低电压等特点。

CMOS 摄像机，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，具有传输速率高、动态范围宽、局部像素的可编程随机访问等优点。

（2）激光雷达

激光雷达是以发射激光束来探测目标空间位置的主动测量设备。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，通过发出一束激光扫描线对区域进行旋转扫描，并根据区域内各个点与激光雷达的相对空间距离与方位，返回测量值。

多线激光雷达，通过发出两束或两束以上的激光扫描线对区域进行旋转扫描。多线激光雷达能够检测目标的空间距离与方位，并可以通过点云来描述三维环境模型，可以提供目标的激光反射强度信息，提供被检测目标的详细形状描述，如下图所示。

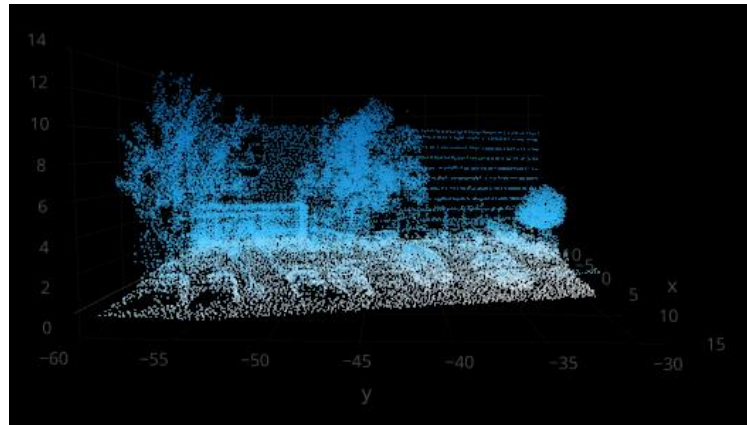


图 11 多线激光雷达通过点云来描述三维环境模型（来自 Velodyne 官网）

目前，国际市场上推出的主要有 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。例如，美国 Velodyne 公司的 16 线激光雷达 VLP-16（Puck）目前售价是 3999 美元，而 64 线激光雷达 HDL-64E 的售价高达 7 万美元。



图 12 VLP-16、HDL-64E（来自 Velodyne 官网）

激光雷达的技术门槛和成本较高。目前，激光雷达已经发展了三代产品，包括第一代机械扫描激光雷达、第二代混合固态激光雷达以及第三代纯固态激光雷达。第三代纯固态激光雷达可以使激光雷达的成本大幅度降低，使激光雷达在自动驾驶汽车上的应用能够普及。

在 CES 2018 上 Velodyne 公司带来两个新产品，分别是固态激光雷达 Velarray 和 128 线激光雷达 VLS-128。在性能方面，Velarray 能够提供 120 度的水平视角和 35 度的垂直视角，能够在 200m 范围内检测到低反射率的物体。VLS-128 的探测距离可达 300m，扫描精度为 3cm，性能是 64 线激光雷达产品的 10 倍，但体积是其 1/3。2018 北京车展上，Velodyne 亚太区负责人翁炜透露，固态激光雷达 Velarray 将于今年第三季度开始投放市场。预计到 2019 年，在 Velodyne 完成 ASIC 工作后，量产化的 128 线激光雷达将会投入市场。价格方面，到 2020 年，128 线激光雷达成本在千元美金级别；固态激光雷达 Velarray 在规模化量产后的价格在百元美金级别。

除了前面提到的 Velodyne 公司，一些初创公司也进入该领域并展现了相当的技术实力，如美国的 Quanergy 公司、Liminar 公司和以色列的 Innoviz 公司。在 CES 2017 上，Quanergy 公司的纯固态激光雷达 Quanergy S3 是世界上首个低成本的固态激光雷达，因其固态扫描技术和无机械旋转部件的解决方案获得了汽车智能类的最佳创新奖。Quanergy 的固态传感器芯片定价仅为 250 美元。2017 年 11 月 1 日，Quanergy 在 Sunnyvale 市的工厂有一条全自动化的生产线开工。Quanergy 联合创始人兼 CEO Louay Eldada 表示，车用级别的 Quanergy 激光雷达芯片 2018 年 9 月就能在市场上买到。他的目标是将激光雷达售价拉低到 100 美元以下。



图 13 全球首款纯固态激光雷达 Quanergy S3（来自 Quanergy 官网）

（3）毫米波雷达

毫米波雷达是指工作在毫米波波段、频率在 30—300GHz 之间的雷达。根据测量原理的不同，毫米波雷达可分为脉冲方式毫米波雷达和调频连续波方式毫米波雷达两种。

脉冲方式毫米波雷达，其基本原理与激光雷达相似，它在硬件结构上比较复杂、成本较高，很少用于自动驾驶汽车，目前大多数车载毫米波雷达都采用调频连续波方式。

调频连续波方式毫米波雷达，具有结构简单、体积小、成本低廉，容易实现近距离探测。

毫米波雷达具有全天候、探测距离远、价格便宜、质量轻、体积小等优点，能够较精确得到目标的相对距离和相对速度。不足之处是分辨率低，在很多场合易受干扰。

（4）超声波传感器

超声波传感器是利用超声波的特性研制而成的，工作在机械波波段，工作频率在 20kHz 以上。超声波雷达的数据处理简单快速，检测距离较短，多用于近距离障碍物检测。超声波具有频率高、波长短、绕射现象小、方向性好、能够成为射线而定向传播等优点。超声波雷达的不足在于距离信息不精准，一般用于精度要求不高的地方，如倒车雷达等。

（5）环境感知关键技术

目前，环境感知技术有两种技术路线，一种是以摄像机为主导的多传感器融合方案，典型代表是特斯拉。另一种是以激光雷达为主导，其他传感器为辅助的技术方案，典型企业代表如谷歌、百度等。前面介绍激光雷达的时候提到，随着第三代纯固态激光雷达产品即将量产面世，特别是成本的大幅降低，激光雷达在自动驾驶汽车上的应用将更加普及。当前业界有许多讨论是围绕着是否可以使用成本较低的摄像机去承担更多的环境感知任务，本文 2.2 节会重点介绍人工智能在基于视觉的自动驾驶技术中的应用。

2.1.2 精准定位

自动驾驶汽车的基础是精准导航，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与方位。

（1）惯性导航系统

惯性导航系统由陀螺仪和加速度计构成，通过测量运动载体的线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、位置和姿态。惯性导航系统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姿态角，再根据加速度计的输出解算出运动载体的速度和位置，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。

（2）轮速编码器与航迹推算

可以通过轮速编码器推算出自动驾驶汽车的位置。通常轮速编码器安装在汽车的前轮，分别记录左轮与右轮的总转数。通过分析每个时间段里左右轮的转数，可以推算出车辆向前走了多远，向左右转了多少度等。由于在不同地面材质（如冰面与水泥地）上转数对距离转换存在偏差，随着时间推进，测量偏差会越来越大，因此单靠轮测距器并不能精准估计自动驾驶汽车的位姿。

（3）卫星导航系统

目前全球卫星导航系统包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、中国的北斗卫星导航系统。

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。

GLONASS 由苏联在 1976 年启动建设，正式组网比 GPS 还早。苏联解体后，GLONASS 由俄罗斯负责运营。空间段由 27 颗工作星和 3 颗备份星组成，27 颗星均匀地分布在 3 个近圆形的轨道平面上。

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，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。

（4）SLAM 自主导航系统

SLAM（Simultaneous Localization And Mapping，即时定位与地图构建），也称为 CML（Concurrent Mapping and Localization，并发建图与定位）。SLAM 最早由 Smith、Self 和 Cheeseman 于 1988 年提出。SLAM 起源于机器人领域，SLAM 问题可以描述为：机器人在未知环境中开始启动，并尝试从一个未知位置开始移动，在移动过程中根据自身位姿估计和地图匹配进行自身定位。然后在自身定位的基础上实现运动中拓展地图，最终实现全局机器人的自主定位和导航。

目前主流有两种 SLAM 策略。第一种是基于激光雷达的 SLAM，以谷歌汽车为例。车辆携带有 GPS，通过 GPS 对位置进行判断，并以激光雷达 SLAM 点云图像与高精度地图进行坐标配准，匹配后确认自身位姿。

第二种是基于视觉的 SLAM，以 Mobileye 为例。Mobileye 提出一种 SLAM 的变种定位方法——REM。车辆通过采集包括信号灯、指示牌等标识，得到了一个简单的三维坐标数据，再通过视觉识别车道线等信息，获取一个一维数据。摄像机中的图像与 REM 地图中进行配准，即可完成定位。

2.1.3 决策与规划

自动驾驶汽车的行为决策与路径规划是指依据环境感知和导航子系统输出信息，通过一些特定的约束条件如无碰撞、安全到达终点等，规划出给定起止点之间多条可选安全路径，并在这些路径中选取一条最优的路径作为车辆行驶轨迹。

通常情况下，自动驾驶汽车的决策与规划系统主要包含以下几点内容：

路径规划：即路径局部规划时，自动驾驶车辆中的路径规划算法会在行驶任务设定之后将完成任务的最佳路径选取出来，避免碰撞和保持安全距离。在此过程中，会对路径的曲率和弧长等进行综合考量，从而实现路径选择的最优化。

驾驶任务规划：即全局路径规划，主要的规划内容是指行驶路径范围的规划。当自动驾驶汽车上路行驶时，驾驶任务规划会为汽车的自动驾驶提供方向引导方面的行为决策方案，通过 GPS 技术进行即将需要前进行驶的路段和途径区域的规划与顺序排列。

目前，自动驾驶汽车主要使用的行为决策算法有以下 3 种。

基于神经网络：自动驾驶汽车的决策系统主要采用神经网络确定具体的场景并做出适当的行为决策。

基于规则：工程师想出所有可能的“if-then 规则”的组合，然后再用基于规则的技术路线对汽车的决策系统进行编程。

混合路线：结合了以上两种决策方式，通过集中性神经网络优化，通过“if-then 规则”完善。混合路线是最流行的技术路线。

感知与决策技术的核心是人工智能算法与芯片。人工智能算法的实现需要强大的计算能力做支撑，特别是深度学习算法的大规模使用，对计算能力提出了更高的要求。随着人工智能业界对于计算能力要求的快速提升，进入 2015 年后，业界开始研发针对人工智能的专用

芯片，通过更好的硬件和芯片架构，在计算效率上进一步带来大幅的提升。

目前，市场上采用的自动驾驶主流芯片主要分为两种，一种是英特尔-Mobileye 开发的 Mobileye® EyeQX™系列车载计算平台。另一种是英伟达提供的 NVIDIA Drive PX 系列车载计算平台。

（1）英特尔-Mobileye

Mobileye 公司作为开发高级辅助驾驶系统的全球先行者，是由 Amnon Shashua 和 Ziv Aviram 于 1999 年创立。Mobileye 的目标是开发和推广协助驾驶员在驾驶过程中保障乘客安全和减少交通事故的视觉系统。

Mobileye 公司的获奖产品 EyeQ™和 EyeQ2™视觉处理器是一项重大突破，具有高性能、低成本以及多应用整合于一个平台上等特点。它们可提供面向所有细分市场的高端功能组合。

英特尔在 2017 年以 153 亿美元收购了 Mobileye 公司，并且将其作为自动驾驶技术的研发战略核心。包括菲亚特-克莱斯勒、宝马等多家汽车厂商都已经计划在未来的产品中使用英特尔-Mobileye 提供的自动驾驶技术。

目前，英特尔-Mobileye 公司已宣布正式加入自动驾驶汽车研发的竞争中，并且在耶稣撒冷投放一组测试车队，在没有使用激光雷达的情况下在城市街道上测试行驶。

（2）英伟达

英伟达（NVIDIA）是一家人工智能计算公司，创立于 1993 年，黄仁勋（Jensen Huang）是该公司的创始人兼首席执行官。

1999 年，英伟达发明了 GPU，这极大地推动了 PC 游戏市场的发展，重新定义了现代计算机图形技术，并彻底改变了并行计算。

2010 年英伟达开始布局人工智能产品，2014 年宣布了新一代 PASCAL GPU 芯片架构，这是英伟达的第五代 GPU 架构，也是首个为深度学习而设计的 GPU，它支持所有主流的深度学习计算框架。

2016 年上半年，英伟达又针对神经网络训练过程推出了基于 PASCAL 架构的 TESLA P100 芯片以及相应的超级计算机 DGX-1。

GTC 2017 大会上，英伟达正式发布了新一代处理器架构 Volta，以及使用新架构的第一款设备——适用于深度学习任务的加速卡 Tesla V100，英伟达将这块显卡称为全球最先进的数据中心 GPU。

GTC 2018 大会上，英伟达发布了新一代超级计算机 DGX-2，DGX-2 是英伟达首款 2-petaFLOPS 系统，其在两块独立的 GPU 板卡上配备了 16 块 Tesla V100 GPU，每块 V100 拥有 32GB HBM 2 显存。

2.1.4 控制与执行

自动驾驶汽车的车辆控制系统是自动驾驶汽车行驶的基础，包括车辆的纵向控制和横向

控制。纵向控制，即车辆的驱动与制动控制，是指通过对油门和制动的协调，实现对期望车速的精确跟随。横向控制，即通过方向盘角度的调整以及轮胎力的控制，实现自动驾驶汽车的路径跟踪。

（1）纵向控制

自动驾驶汽车采用油门和制动综合控制的方法来实现对预定车速的跟踪，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算法相结合，构成了各种各样的纵向控制模式。

（2）横向控制

车辆横向控制主要有两种基本设计方法：基于驾驶员模拟的方法和基于车辆动力学模型的控制方法。

基于驾驶员模拟的方法：一种是使用较简单的动力学模型和驾驶员操纵规则设计控制器；另一种是用驾驶员操纵过程的数据训练控制器获取控制算法。

基于车辆动力学模型的方法：需要建立较精确的汽车横向运动模型。典型模型如单轨模型，该模型认为汽车左右两侧特性相同。

（3）车辆控制平台

车辆控制平台是无人车的核心部件，控制着车辆的各种控制系统。其主要包括电子控制单元（ECU）和通信总线两部分。ECU 主要用来实现控制算法，通信总线主要用来实现 ECU 与机械部件间的通信功能。

ECU：又称“行车电脑”“车载电脑”等，从用途上讲则是汽车专用微机控制器，也叫汽车专用单片机。它和普通的单片机一样，由微处理器（CPU）、存储器（ROM、RAM）、输入/输出接口（I/O）、模数转换器（A/D）以及整形、驱动等大规模集成电路组成。发动机在运行时，它采集各传感器的信号进行运算，并将运算的结果转变为控制信号，控制被控对象的工作。它还实行对存储器（ROM、RAM）、输入/输出接口（I/O）和其他外部电路的控制；存储器 ROM 中存放的程序是经过精确计算和大量实验获取的数据为基础，这个固有程序在发动机工作时，不断地与采集来的各传感器的信号进行比较和计算。把比较和计算的结果用来控制发动机的点火、空燃比、怠速、废气再循环等多项参数。它还有故障自诊断和保护功能。RAM 也会不停地记录行驶中的数据，成为 ECU 的学习程序，为适应驾驶员的习惯提供最佳的控制状态，这个程序也叫自适应程序。

通信总线：目前，车用总线技术被国际自动机工程师学会（SEA）下的汽车网络委员会按照协议特性分为 A、B、C、D 共 4 类，A 类总线面向传感器或执行器管理的低速网络，它的位传输速率通常小于 20Kb/s，以 LIN 规范为代表；B 类总线面向独立控制模块间信息共享的中速网络，位传输速率一般在 10~125Kb/s，以 CAN 为代表；C 类总线面向闭环实时控制的多路传输高速网络，位传输速率一般在 125Kb/s ~1Mb/s；D 类总线面向多媒体设备、高速数据流传输的高性能网络，位传输速率一般在 2Mb/s 以上。

2.1.5 高精地图与车联网 V2X

（1）高精地图

高精地图拥有精确的车辆位置信息和丰富的道路元素数据信息，起到构建类似于人脑对于空间的整体记忆与认知的功能，可以帮助汽车预知路面复杂信息，如坡度、曲率、航向等，更好地规避潜在的风险，是自动驾驶汽车的核心技术之一。

高精地图相比服务于 GPS 导航系统的传统地图而言，最显著的特征是其表征路面特征的精准性。传统地图只需要做到米量级的精度就可以实现基于 GPS 的导航，而高精地图需要至少十倍以上的精度，即达到厘米级的精度才能保证自动驾驶汽车行驶的安全。

同时，高精地图还需要有比传统地图更高的实时性。由于道路路网经常会发生变化，如道路整修、标识线磨损或重漆、交通标识改变等。这些改变都要及时反映在高精地图上，以确保自动驾驶汽车的行车安全。

（2）车联网 V2X

V2X 表示 Vehicle to X，其中 X 表示基础设施（Infrastructure）、车辆（Vehicle）、行人（Pedestrian）、道路（Road）等。V2X 网联通信集成了 V2N、V2V、V2I 和 V2P 共四类关键技术。

V2N（Vehicle to Network，车-互联网），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。

V2V（Vehicle to Vehicle，车-车），指不同车辆之间的信息互通。

V2I（Vehicle to Infrastructure，车-基础设施），包括车辆与路障、道路、交通灯等设施之间的通信，用于获取路障位置、交通灯信号时序等道路管理信息。

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。

2010 年美国颁布了以 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。2015 年我国开始相关的研究工作，2016 年国家无线电委员会确定了我国的 V2X 专用频谱。2016 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，《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。

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 和 LTE-V2X 两个标准和产业阵营。

2.1.6 自动驾驶汽车测试与验证技术

自动驾驶汽车测试与验证技术如下。

（1）实测

让车辆行驶数百万公里，以确定设计的系统是否安全并按照预期运行。该方法的困难在

于必须累积的测试里程数，这可能要花费大量的时间。

（2）软件在环或模型在环仿真

另一种更可行的方法是将现实世界的测试与仿真相结合。在仿真软件所构建的各种场景中，通过算法控制车辆进行相应的应对操作，来证明所设计的系统确实可以在各种场景下做出正确的决定，这可以大大减少必须完成的测试里程数。

（3）硬件在环仿真

为了验证真实硬件的运行情况，硬件在环仿真可以对其进行测试，并将预先记录的传感器数据提供给系统，此种技术路线可以降低车辆测试和验证的成本。

2.2 人工智能在自动驾驶汽车中的应用

（1）人工智能在环境感知中的应用

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，深度学习能够满足视觉感知的高精度需求。基于深度学习的计算机视觉，可获得较接近于人的感知能力。有研究报告指出深度学习在算法和样本量足够的情况下，视觉感知的准确率可以达到 99.9%以上，而传统视觉算法的检测精度极限在 93%左右，人感知的准确率一般是 95%左右。

深度学习按照模型的不同可以分为 CNN、RNN、LSTM、DBN 和 Autoencoder 等 5 种类型，其中 CNN（卷积神经网络）在处理图像和视频上拥有很好的效果。

深度学习一般包括输入层、卷积层、池化层、输出层等 4 种类型的神经网络层。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。

深度学习的工作一般可以分为两部分，即训练和测试。训练一般是将采集到的样本输入到线下的训练网络中，训练网络进行前向输出，调整参数让输出误差在接受范围内从而得到模型。将训练好的模型进行测试和性能评估。测试时网络可以对输入的图像和视频等进行检测和识别。通常情况下，样本的数量越多，识别的精度越高，所以样本的数量是影响深度学习精度重要的一个因素。由此可见，深度学习需要大数据平台提供支撑。

（2）人工智能在决策与规划中的应用

行为决策与路径规划是人工智能在自动驾驶汽车领域中的另一个重要应用。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。

随着深度强化学习的兴起，越来越多的公司和研究者把强化学习应用到无人车的行为与决策中，并取得了不错的效果。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。

可学习部分是将无人车所处的环境映射成一系列抽象策略的过程。他们设计了一张策略选项图，主要包含无人车的加减速、转向以及对周围车辆的反应，并利用策略网络来选择合适的应对选项。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。

（3）人工智能在车辆控制中的应用

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，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。

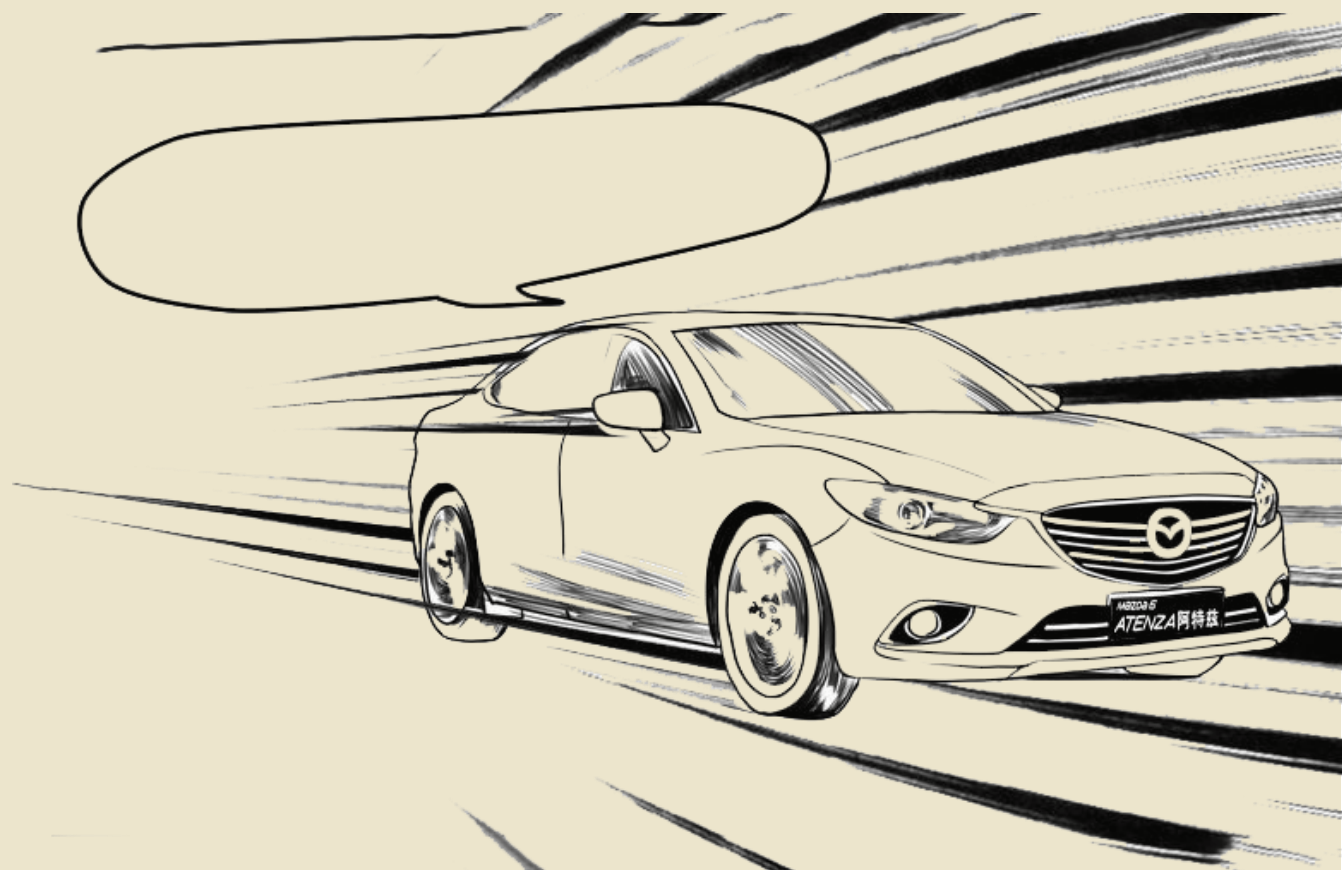
神经控制，是研究和利用人脑的某些结构机理以及人的知识和经验对系统的控制。利用神经网络，可以把控制问题看成模式识别问题，被识别的模式映射成“行为”信号的“变化”信号。神经控制最显著的特点是具有学习能力。它是通过不断修正神经元之间的连接权值，并离散存储在连接网络中来实现的。它对非线性系统和难以建模的系统的控制具有良好效果。

深度神经网络学习，源于神经网络的研究，可理解为深层的神经网络。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。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。

深度强化学习，强化学习的灵感来源于生物学中的动物行为训练，训练员通过奖励与惩罚的方式让动物学会一种行为与状态之间的某种联系规则。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。

3 talent

人才篇



3 人才篇

本报告 3.1 节通过 AMiner 大数据平台对 AMiner 的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及迁徙。3.2 节介绍了目前自动驾驶汽车领域的国内外代表性研究学者。文中排名不分先后。

3.1 学者分布及迁徙

通过统计分析 AMiner 的自动驾驶人才库，我们得到了全球自动驾驶领域学者分布图，如下图所示。从图中可以看到，自动驾驶领域的学者主要分布在美国，其次是欧洲。中国对自动驾驶汽车的研究紧跟其后，南美洲、非洲和大洋洲则人才相对比较匮乏。



图 14 自动驾驶领域研究学者全球分布

按国家进行统计来看美国是自动驾驶汽车科技发展的核心。中国的人数紧排在美国之后。其他的专家主要分布在英国、加拿大、德国和意大利。

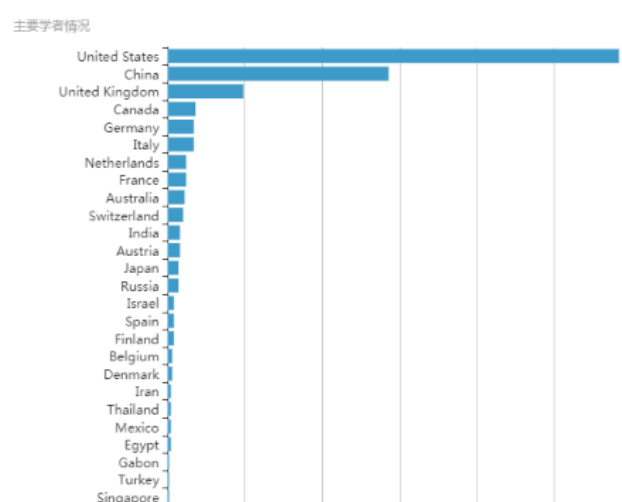


图 15 自动驾驶领域研究学者全球分布

AMiner 对全球自动驾驶汽车领域最具影响力的 1000 人的迁徙路径进行了统计分析，得出下图所示的各国人才逆顺差对比图。

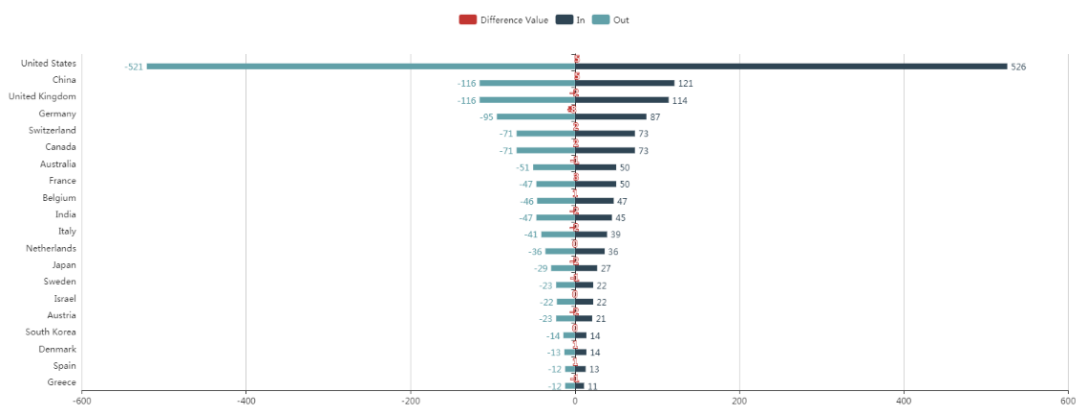


图 16 各国人才逆顺差

由图中可以看出，各国人才的流失和引进是相对比较均衡的，其中美国为人才流动大国，人才输入和输出幅度都大幅度领先。中国、英国、德国和瑞士等国次于美国，但各国之间人才流动相差并不明显。

3.2 代表性研究学者

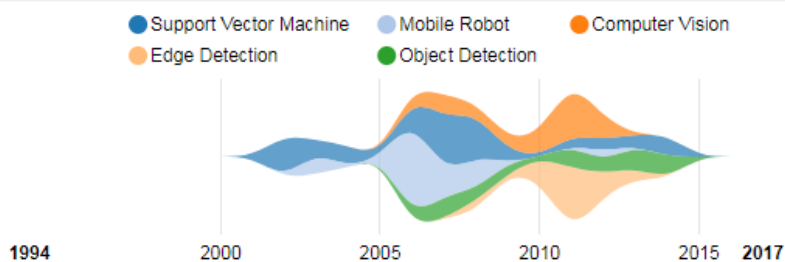
自动驾驶技术领域的国内代表性研究学者包括贺汉根、李德毅、杨静宇、郑南宁等，国外包括 Sebastian Thrun、Chris Urmson、Elon Musk、Amnon Shashua 等。

● 贺汉根



国防科技大学机电工程与自动化学院教授、博士生导师，中国智能驾驶与自动驾驶技术领军人物。

📊 Research Interests



■ 学习经历、获得荣誉

完成国家自然科学基金重点项目、国家 863 计划、国际合作等课题 20 余项，先后获国家科技进步三等奖 1 项、国防科工委科技进步一等奖 1 项、教育部科技成果一等奖 1 项等奖励。在国际期刊及国内核心期刊发表论文多篇，享受国务院政府特殊津贴。

■ 科研成果

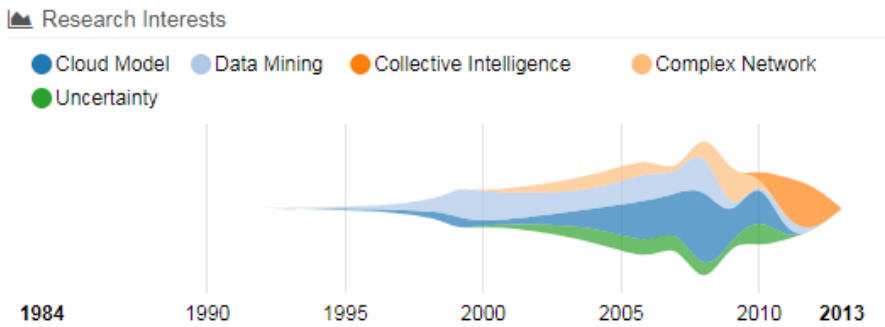
2000 年国防科学技术大学以一辆老式北京吉普车为平台的自动驾驶汽车进行了 75.6km/h 的高速公路车道跟踪实验。2003 年 6 月，国防科学技术大学与一汽集团合作研制

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。

● 李德毅



指挥自动化、计算机工程和人工智能专家，深入研究云计算和人工智能领域，独创出自动驾驶感知认知理论体系及“驾驶脑”产品，被称为是“中国自动驾驶产学研界的代表”。



■ 学习经历、获得荣誉

1983 年获英国爱丁堡海里奥特·瓦特大学博士学位。1996 年被授予少将军衔，1999 年当选中国工程院院士，2004 年当选为国际欧亚科学院院士。指挥自动化、计算机工程和人工智能专家，中国人工智能学会理事长，中国指挥与控制学会名誉理事长。清华大学、国防大学兼职教授、博士生导师。长期从事不确定性人工智能、大数据和智能驾驶领域研究。

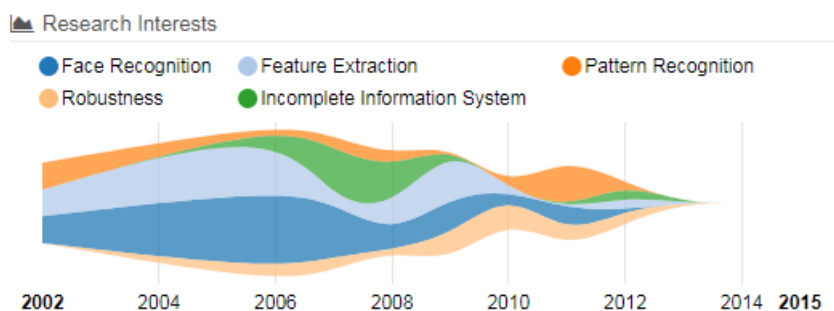
■ 科研成果

参加了多项电子信息系统重大工程的研制和开发。最早提出控制流—数据流图对理论和一整套用逻辑语言实现的方法；证明了关系数据库模式和一阶谓词逻辑的对等性；提出云模型和发现状态空间，用于不确定性知识表示和数据控制；在智能控制“三级倒立摆动平衡”实验中取得显著成效。先后获得国家科技进步奖，军队科技进步奖，获得发明专利 10 项，发表论文 130 多篇，出版中文著作 5 本、英文专著 3 本，在国际上享有极高声誉。

● 杨静宇



南京理工大学“模式识别与智能系统”国家重点学科学术带头人、计算机科学与工程学院博士生导师。



■ 学习经历、获得荣誉

1982年2月—1984年4月，在美国伊利诺斯大学 CSL 实验室 T.S.Huang 指导下进行计算机视觉领域的合作研究，1993年6月—1994年3月在美国密苏里大学堪萨斯分校计算机系担任访问教授，1997年12月—1998年4月在加拿大康科迪亚大学国际知名的模式分析与机器智能研究中心担任访问教授。1998年在加拿大 Concordia University 的模式分析与机器智能中心担任客座教授。全国优秀留学回国人员，享受国务院特殊津贴。目前担任南京理工大学计算机科学与工程学院的国家重点学科“模式识别与智能系统”学术带头人，同时是教育部信息领域规划专家组成员、国防科工局“微小型系统技术”规划组成员、中国人工智能学会常务理事。

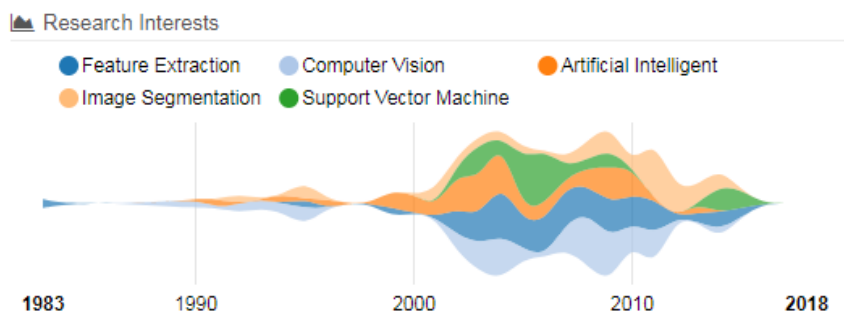
■ 科研成果

2009年，主持的“特征抽取理论与算法研究”理论研究成果被评为国家自然科学二等奖，实现了南京理工大学在自然科学技术奖上零的突破。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”。获得国家级科技成果奖2项，省部级科技进步奖15项。在国际学术刊物发表论文67篇，其中56篇被SCI收录。出版论著和译著7部。获得国家发明专利2项。

● 郑南宁



现任西安交通大学教授，陕西省科学技术协会主席。1996 年，获中国青年科学家奖。1999 年，当选为中国工程院院士。



■ 学习经历、获得荣誉

1985 年获日本庆应大学博士学位。现任西安交通大学教授，陕西省科学技术协会主席。1993 年被授予全国优秀教师称号。1996 年获中国青年科学家奖。1999 年当选为中国工程院院士。

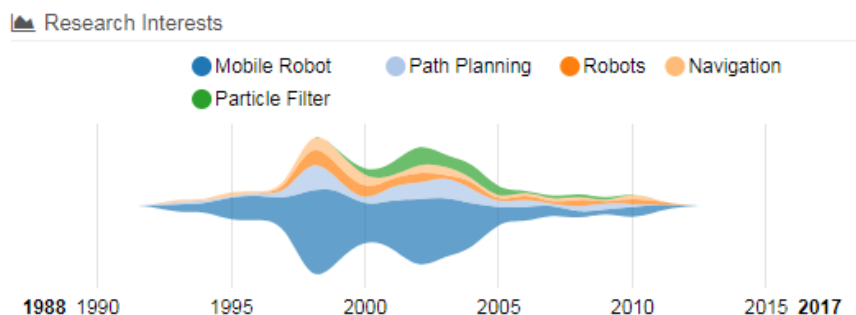
■ 科研成果

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“精密装配机器人机器视觉系统”研究，获 1996 年国家科技进步奖二等奖。发明了一种图像边缘曲线拟合的新方法，获 1995 年国家发明奖四等奖。“高性能机器视觉及车型与牌照自动识别系统”获 1991 年国家科技进步奖二等奖。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；获已授权的中国发明专利七项。发表论文 100 余篇，著作 2 部。

● Sebastian Thrun



2003 年，加入斯坦福大学，开始自动驾驶汽车的研究。2011 年，获得 Max Planck Research Award 和首届 AAAI Ed Feigenbaum Prize。世界顶级人工智能专家。



■ 学习经历、获得荣誉

1995 年获得波恩大学计算机与统计学双博士学位，后任教于卡内基·梅隆大学。2003 年，加入斯坦福大学，开始自动驾驶汽车的研究。2011 年，获得 Max Planck Research Award 和首届 AAAI Ed Feigenbaum Prize。世界顶级人工智能专家，2007 年当选美国国家工程院院士，目前是斯坦福大学和佐治亚理工学院的兼职教授。

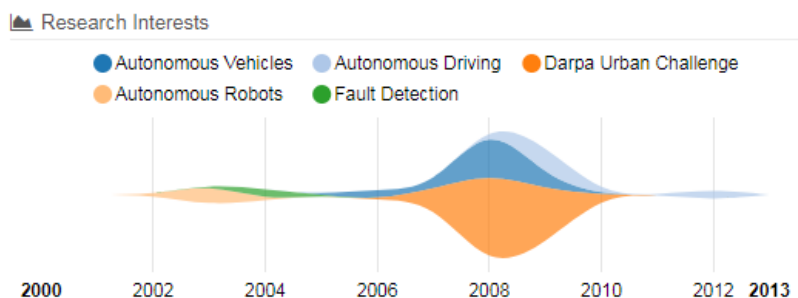
■ 科研成果

2005 年，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，并在史密森尼美国国家历史博物馆展出。2007 年，应谷歌的 Larry Page 和 Sergey Brin 邀请，在谷歌内部主导建立了一个硬件创新实验室，也就是后来的 Google X 实验室，产出了包括自动驾驶汽车、谷歌眼镜在内的众多标志性项目。2012 年初，受到可汗学院启发，参与创立了 Udacity。

● Chris Urmson



于 2009 年加入 Google X，并于 2013 年接替 Sebastian Thrun 担任项目负责人。



■ 学习经历、获得荣誉

2005 年，获得卡内基·梅隆大学机器人方向（Robotics）博士学位。卡内基·梅隆大学的助理研究教授。参加的卡内基·梅隆大学团队赢得了 2007 年 DARPA 大挑战赛。

■ 科研成果

于 2009 年加入 Google X，并于 2013 年接替 Sebastian Thrun 担任项目负责人，于 2016

年离任。与 Sterling Anderson 以及 Drew Bagnell 共同创立了一家致力于自动驾驶汽车软件、数据和硬件的创业公司 Aurora Innovation。

● Elon Musk



企业家、工程师、慈善家，现担任太空探索技术公司（SpaceX）CEO 兼 CTO、特斯拉公司 CEO 兼产品架构师、太阳城公司（SolarCity）董事会主席，自动驾驶汽车产业的先驱。

■ 学习经历、获得荣誉

本科毕业于宾夕法尼亚大学，获经济学和物理学双学位。2013 年 11 月 21 日，美国《财富》揭晓了“2013 年度商业人物”，荣登榜首。2016 年 9 月 22 日，彭博全球 50 大最具影响力人物排行榜，排第 11 名。2016 年 12 月 14 日，荣获“2016 年最具影响力 CEO”荣誉。2017 年 12 月 4 日，位列《彭博商业周刊》2017 年度全球 50 大最具影响力人物榜单第 43 位。

■ 科研成果

2015 年 10 月，特斯拉推出了自动驾驶系统 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。

● Amnon Shashua



耶路撒冷希伯来大学的计算机科学教授，Mobileye 的联合创始人兼首席技术官以及 OrCam 的联合创始人。自 2017 年英特尔收购 Mobileye 后，担任 Mobileye 的首席执行官兼 CTO 以及英特尔公司高级副总裁。

■ 学习经历、获得荣誉

1985 年，在以色列特拉维夫大学的专业是数学和计算机科学。1989 年，在魏兹曼科学研究所获得计算机科学学位，后在麻省理工学院取得脑与认知科学博士学位。

■ 科研成果

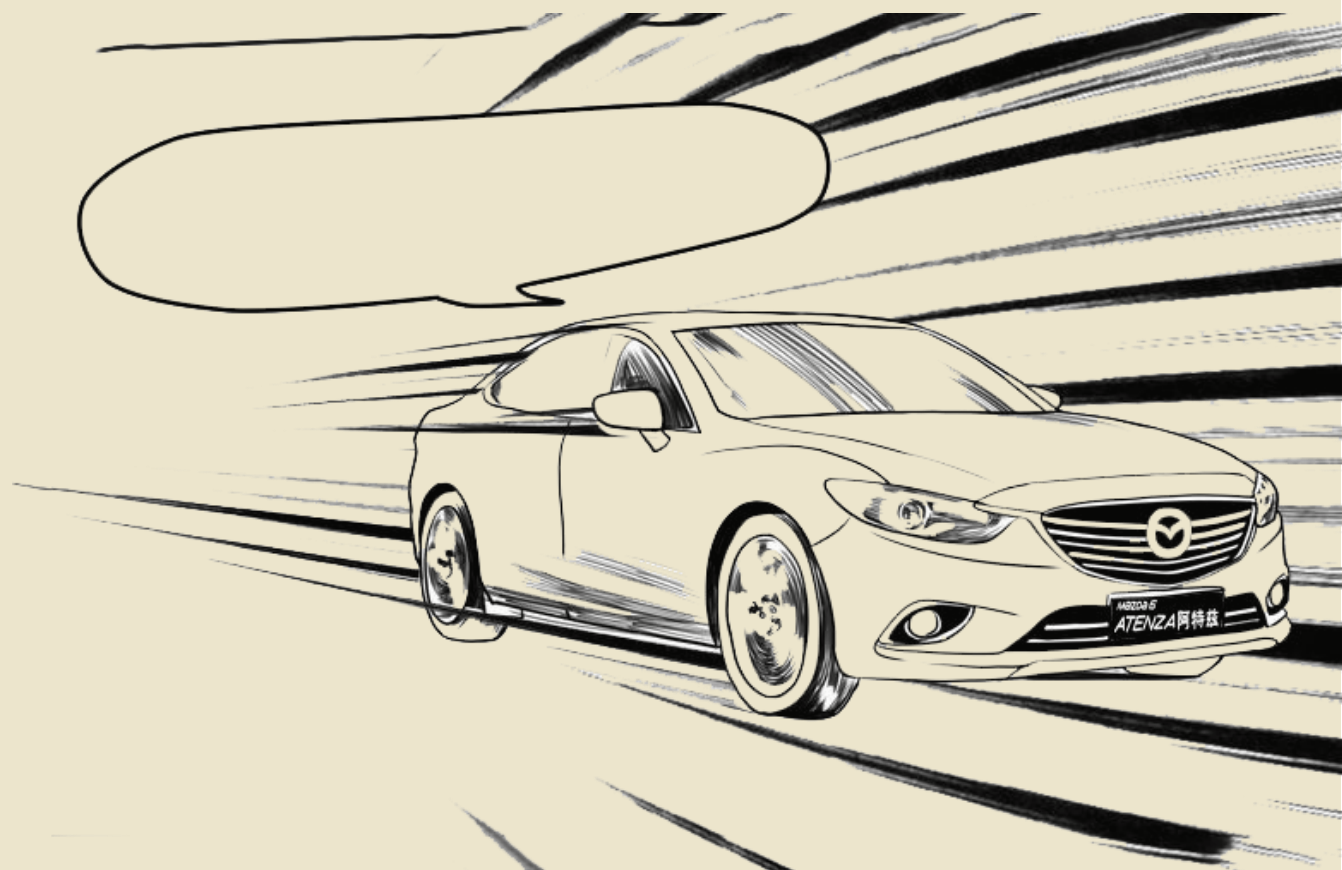
自 1996 年以来，一直担任耶路撒冷希伯来大学的计算机科学系教员。1999 年，被任命为副教授，2003 年为全职教授。在 2002—2005 年间，是希伯来大学工程和计算机科学学院的负责人。多年来，在机器学习和计算机视觉领域发表了超过 100 篇论文。

1999 年，创立 Mobileye，专注于自动驾驶视觉系统，开发了一款鼠标大小的辅助驾驶系统。该设备的摄像机和定制芯片卡在汽车后视镜后面，提供的算法和计算机芯片能够根据

图像（由车辆上的摄像机拍摄）预测潜在碰撞事故。2017 年 3 月 13 日，英特尔宣布以每股 63.54 美元现金收购 Mobileye，股权价值约 153 亿美元。这是以色列有史以来金额最大的一笔交易，也是英特尔发展史上的重大一步。

4 application

应用篇



4 应用篇

业界普遍认为，自动驾驶技术在公共交通领域和特定场所的使用将早于在个人乘用车市场的普及。自动驾驶汽车将最先应用的行业包括公共交通、快递运输、服务于老年人和残疾人，如下图所示。



图 17 自动驾驶汽车将最先应用的行业

(1) 公共交通

相比于小汽车，公共交通更能惠及普通群众，让民众感受到人工智能、自动驾驶带来的技术革新和便利，这也是该项技术最初的出发点。

自动驾驶巴士被认为是解决城市“最后一公里”难题的有效方案，大多用于机场、旅游景区和办公园区等封闭的场所。前面我们提到百度 Level 4 级量产自驾巴士“阿波龙”已经量产下线。阿波龙能够载客 14 人，没有驾驶员座位，也没有方向盘和刹车踏板，最高时速可达 70km，充电两小时续航里程达 100km。这批成车将会被投放到北京、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。在阿波龙之前，今年 3 月，法国的 EasyMile 的自动驾驶巴士 EZ10 成为了首辆在加州道路上运营的完全没有司机座驾的汽车。EasyMile 也是第一家受益于加州自动驾驶新政的公司。



图 18 EasyMile 的自动驾驶巴士 EZ10

自动驾驶汽车在公共交通领域的另一个重要应用是出租车。前面提到 nuTonomy 于 2016 年 8 月，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。Waymo 于当地时间 2018 年 5 月 31 日，宣布向菲亚特·克莱斯勒（FCA）采购 62000 辆 Pacifica 混动厢式车用于打造自动驾驶出租车队。

（2）快递运输

快递用车和“列队”卡车将是另外一个较快采用自动驾驶汽车的领域。随着全球老龄化问题的加剧，自动驾驶技术在快递等行业的应用将极大地弥补劳动力不足的问题，并且随着自动驾驶技术的成熟与市场普及程度的提高，无人配送将成为必然的趋势。

2017 年“6·18”，京东首批试点运营的无人配送车在中国人民大学进行快递投递。2018 年“6·18”，在京东的北京上地配送站，20 余台配送机器人整齐列阵。随着调度平台命令发出，首批载有“6·18”货物订单的 3 辆配送机器人依次出发，自动奔向订单配送的目的地。目前，京东已经在北京、上海、天津、广州、贵阳、武汉、西安等 20 多个国内城市和泰国曼谷、印尼雅加达就配送机器人项目的应用开展布局，共投放了 100 多台机器人，明年计划投放至万余台。

2017 年 6 月，一款名为 Kar-Go 的自动驾驶微型车开始在英国公共道路进行路测。该车可在居民区无标记的道路和人行横道上驾驶，自动送货上门，将削减“最后一公里投递”90% 的成本，大大节省运输费用。



图 19 京东无人配送车（左）和英国 Kar-Go 自动驾驶微型车（右）

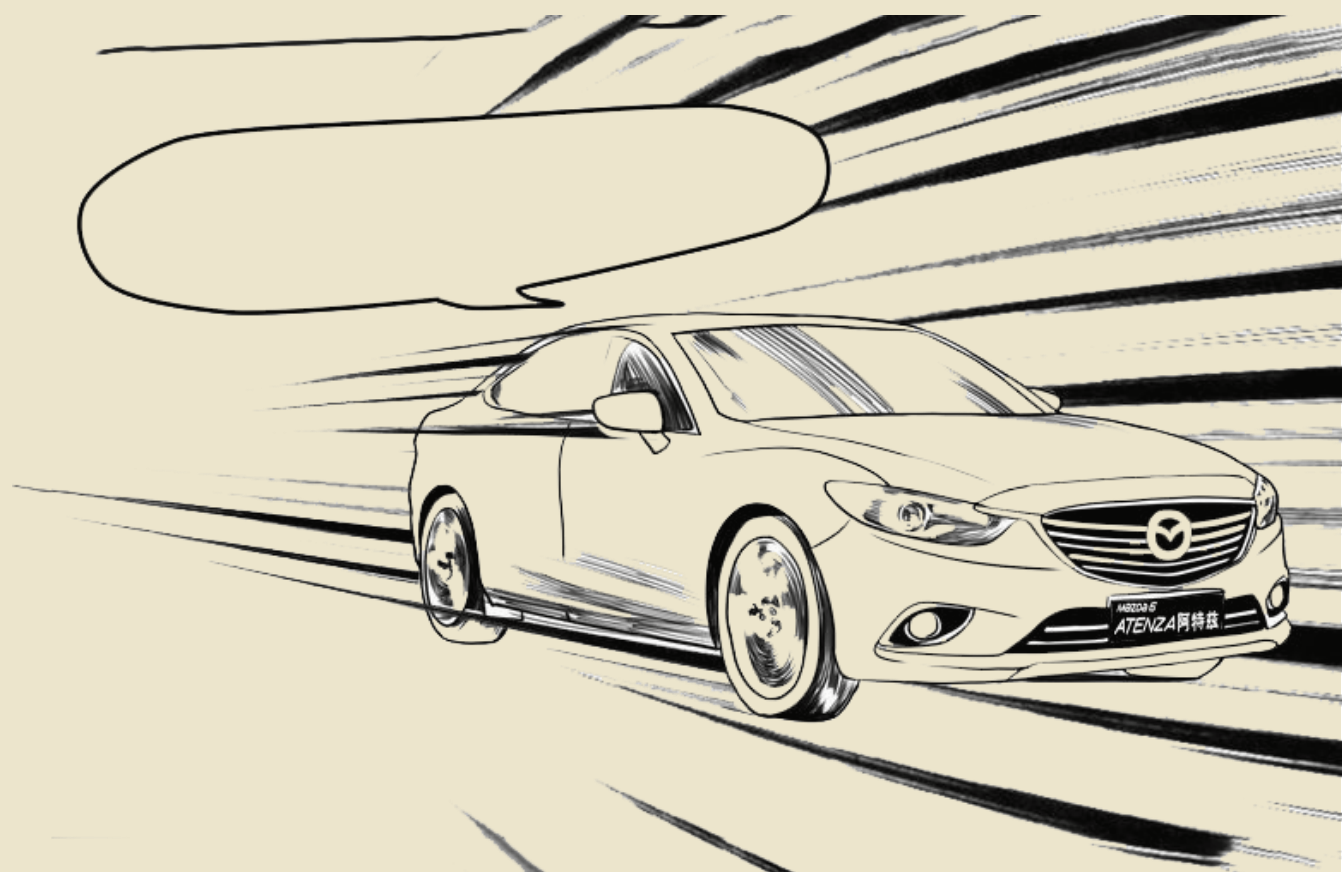
（3）服务于老年人和残疾人

自动驾驶汽车已经开始在老年人和残疾人这两个消费群体中有所应用。自动驾驶汽车不仅可增强老年人的移动能力，也能帮助残疾人旅行。美国老龄人口到 2050 年预计超过 8000 万人，占总人口数的 20%。到 2050 年，中国老龄人口预计将占总人口数的 33%。而在日本，到 2060 年，65 岁及以上人群将占总人口数约 40%。残疾人的市场也很庞大，如在美国，约 5300 万成年人有残疾，占成年人人口数的 22% 左右。约 13% 的美国成年人有出行障碍，约 4.6% 的成年人有视力障碍。这些有关老年人和残疾人士的庞大数据为无人车提供了现成的市场。

2012 年，谷歌展示了自动驾驶技术的巨大潜力，谷歌员工让失去 95% 视力的 Steve Mahan 坐上谷歌自动驾驶车，体验其中的乐趣。随后，谷歌公司为他颁发了“首位无人汽车驾驶者”的称号。自动驾驶技术将使得残疾人变得更加独立。

5 trend

趋势篇



5 趋势篇

（1）未来设想与目标实现

据《日本经济新闻》5月18日报道，欧盟的欧洲委员会当地时间5月17日公布的自动驾驶时间进度表指出，计划到2020年在高速公路上实现自动驾驶，在城市中心区域实现低速自动驾驶；到2030年普及完全自动驾驶。为了助力自动驾驶，到2022年，欧盟所有新车都将具备通信功能，实现100%“车联网”。委员会呼吁成员国和汽车企业制定确保安全和明确事故责任的通用规则。力争在国际规则出台之前制定出地区标准，在新一代产业领域掌握主导权。

此前，我国发布的《节能与新能源汽车技术路线图》指出，到2020年，驾驶辅助/部分自动驾驶车辆市场占有率将达50%；到2025年，高度自动驾驶车辆市场占有率将达约15%；到2030年，完全自动驾驶车辆市场占有率将近10%。

目前，各大自动驾驶技术研发企业与传统汽车制造厂商均在努力加速实现自动驾驶汽车的商业化进程。百度计划2020年实现自动驾驶汽车的全面量产；宝马计划2021年推出完全自动驾驶汽车；福特计划在2021年推出自动驾驶汽车；戴姆勒称，普通道路上实现自动驾驶的卡车将在2020年研发成功。

到2020年，过去积累的自动驾驶技术科研成果及工程进步都将成为现实。我们即将进入10~20年混合模式的时代。随着人工智能的飞速发展及自动驾驶汽车与新技术的深度融合，自动驾驶汽车可实现高度智能化，真正实现Level 4+级的自动驾驶技术。在享受科技成果时，我们还需认识到，自动驾驶技术给我们带来无限憧憬的同时，也会给社会生活带来巨大的冲击，如汽车驾照与保险可能会消失，出租车可能不再需要“的哥”等。

（2）自动驾驶汽车面临的挑战

美国当地时间2018年3月18日晚，优步自动驾驶测试车在亚利桑那州坦佩市郊区，与一名横穿马路的中年妇女相撞，事故导致该女子不幸身亡。这是人类历史上第一起自动驾驶汽车致人死亡事件。

美国当地时间2018年3月23日，在加利福尼亚州山景城101高速公路上一辆高速行驶中的特斯拉Model X与路边隔离带相撞，导致车头部分完全损毁，并引发电池起火，驾驶员不幸遇难。

以上这些自动驾驶车辆事故表明，自动驾驶技术距离成熟应用还有一段漫长而艰辛的发展历程，这不是一蹴而就的。目前，国内自动驾驶技术取得了长足的进步，自动驾驶汽车也逐步得到了公众的认可，但是要实现自动驾驶汽车的普及化仍然需要很长的路要走。核心技术水平不高，关键零部件非国产化严重，政策法规需要逐步完善等问题依然需要不断努力。

① 技术问题

目前自动驾驶技术在“人不多、规定车道、车速不快”的前提条件下确实可以实现，但是面对真正的复杂交通环境，自动驾驶汽车的安全性还需要更长时间来完善。如人类驾驶员能判断前方车辆的驾驶员是老司机还是新手，从而决定与前车保持多远的距离才合适，而自

自动驾驶技术要理解这些细微的预行为就显得很困难。

精确定位和导航是实现自动驾驶最为重要的部分之一，只有实现精确定位和导航的精细化才能保证自动驾驶的安全性与可靠性。目前，我国自主研发的北斗导航系统在性能上与美国的 GPS 相比还存在一定的差距。

高精度激光雷达、毫米波雷达等车载传感器作为自动驾驶汽车的眼睛，国内近几年虽有快速的进步，但与国外先进水平相比仍有相当的差距。自动驾驶技术要大规模普及，一方面有待在低成本、高性能的传感技术方面取得突破，还需要大幅提升自动驾驶的计算能力，而这两方面都是国内仍需努力的。

② 政策法规

自动驾驶汽车要想合法上路行驶，首先要解决政策法规的问题。自动驾驶汽车实际行驶过程中难免会因为某些原因而产生事故，如何划分事故责任，如何做到公正裁决等这些都是要进行深入讨论与验证的问题。目前并没有哪些国家对自动驾驶汽车专门制定完善的政策法规，要想真正的实现自动驾驶汽车的普及化，这是一个必须解决并且需要格外小心的问题。

③ 困难和挑战

自动驾驶的一个很重要的用途是用于某些特殊的环境下，由于在某些特殊的环境下，人员生存困难，自动驾驶能克服这些问题，但是其也要解决如极寒、道路条件复杂等各种极端环境的影响，这同样也是自动驾驶未来发展所应面临的困难。

由于人工智能的大量应用，自动驾驶技术更依赖于网络，如通过云端获取的高精地图、精准导航等的的数据，其安全性显得尤为突出。如何打造安全可靠的数据链路，不被黑客侵扰等也将是需要长期面临的困难与挑战。

参考文献

- [1] SAE International. Automated Driving - Levels of Driving Automation are Defined in New SAE International Standard J3016.
- [2] 陈虹, 郭露露, 边宁. 对汽车智能化进程及其关键技术的思考 [J]. 科技导报, 2017, 35 (11): 52-59.
- [3] 陈慧岩, 熊光明, 龚建伟, 等. 无人驾驶汽车概论. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [4] 刘少山, 唐洁, 吴双, 等. 第一本无人驾驶技术书. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [5] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 《中国制造 2025》. 2015.
- [6] Wolfgang Bernhart, Marc WinTerhoff, Christopher Hoyes, etc. Autonomous Driving. Roland Berger, 2014, 11.
- [7] 班智飞, 黄波. 无人驾驶: 在腾飞的前夜. 中关村, 2018, 1.
- [8] 乔维高, 徐学进. 无人驾驶汽车的发展现状及方向[J]. 上海汽车, 2007(07).
- [9] 晏欣炜, 朱政泽, 周奎, 彭彬. 人工智能在汽车自动驾驶系统中的应用分析. 湖北汽车工业学院学报. 2018, 3.
- [10] 夏伟, 李慧云. 基于深度强化学习的自动驾驶策略学习方法. 集成技术, 2017, 5.
- [11] 国家发展改革委办公厅. 智能汽车关键技术产业化实施方案. 2017, 12.
- [12] 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车 (ICV) 技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8 (1): 1-14.
- [13] 丁毅. 浅析无人驾驶汽车环境感知技术. 数字技术与应用, 2018, 1.
- [14] 贺汉根, 孙振平, 徐昕. 智能交通条件下车辆自动驾驶技术展望. 中国科学基金会, 2016.
- [15] 陈帅. 无人驾驶汽车安全行驶的三大系统. 中小企业管理与科技, 2018, 4.

版权声明

AMiner 研究报告版权为 AMiner 团队独家所有，拥有唯一著作权。AMiner 咨询产品是 AMiner 团队的研究与统计成果，其性质是供用户内部参考的资料。

AMiner 研究报告提供给订阅用户使用，仅限于用户内部使用。未获得 AMiner 团队授权，任何人和单位不得以任何方式在任何媒体上（包括互联网）公开发布、复制，且不得以任何方式将研究报告的内容提供给其他单位或个人使用。如引用、刊发，需注明出处为“AMiner.org”，且不得对本报告进行有悖原意的删节与修改。

AMiner 研究报告是基于 AMiner 团队及其研究员认可的研究资料，所有资料源自 AMiner 后台程序对大数据的自动分析得到，本研究报告仅作为参考，AMiner 团队不保证所分析得到的准确性和完整性，也不承担任何投资者因使用本产品与服务而产生的任何责任。



AMiner

科技情报大数据挖掘服务平台

AMiner 平台由清华大学计算机系研发，拥有我国完全自主知识产权。系统 2006 年上线，吸引了全球 220 个国家和地区 800 多万独立 IP 访问，数据下载量 230 万次，年度访问量 1000 万，成为学术搜索和社会网络挖掘研究的重要数据和实验平台。

项目团队与中国工程科技知识中心、微软学术搜索、ACM、IEEE、DBLP、美国艾伦研究所、圣母大学、英国南安普顿大学等国际知名机构建立了良好的合作关系，共享数据及技术资源。系统相关核心技术申请专利 20 余项，发表论文 300 余篇，其中顶级期刊和会议（CCFA 类）60 篇，编著英文论著两部，Google 引用超过 8000 次，SCI 他引超过 1000 次。

项目成果及核心技术应用于工程院、科技部、自然科学基金委、华为、腾讯、阿里巴巴、百度等国内外 20 多家企事业单位，为各单位系统建设及产品升级提供了重要数据及技术支持。