

智能车辆先进技术丛书
普通高等教育“十三五”规划教材

无人驾驶车辆 理论与设计

Theory and Design of Unmanned Ground Vehicle

陈慧岩 熊光明 龚建伟 ◎ 主编

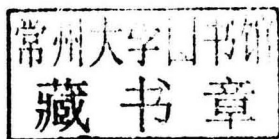
 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材
智能车辆先进技术丛书

无人驾驶车辆理论与设计

Theory and Design of Unmanned Ground Vehicle

陈慧岩 熊光明 龚建伟 主编



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书是在作者已出版的《无人驾驶汽车概论》《无人驾驶车辆模型预测控制》《无人驾驶车辆智能行为及其测试与评价》等专著的基础上,考虑近年来最新发展,着手编写的面向车辆工程专业本科层次的教材。

本书共7章,包括无人驾驶车辆发展历程、应用前景和结构组成;无人驾驶车辆常用感知传感器及其标定方法;无人驾驶车辆环境感知技术;无人驾驶车辆卫星导航定位技术、航迹推算定位技术以及视觉定位技术;无人驾驶车辆路径规划、路径跟踪方法以及无人驾驶车辆设计与测试方法等内容。为了方便教学,书中适当章节增加了 Matlab、V-REP 相关程序,并在附录中提供了 V-REP 仿真软件入门参考材料。

本书可作为高等院校自动化、计算机等专业的参考教材,同时可为各类对无人驾驶车辆感兴趣的人员提供入门参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

无人驾驶车辆理论与设计/陈慧岩,熊光明,龚建伟主编. —北京:北京理工大学出版社,2018.3

ISBN 978-7-5682-5380-2

I. ①无… II. ①陈…②熊…③龚… III. ①汽车驾驶-无人驾驶-研究 IV. ①U471.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第044722号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)

(010) 82562903(教材售后服务热线)

(010) 68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中华美凯印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/11.5

彩 插/4

字 数/279千字

版 次/2018年3月第1版 2018年3月第1次印刷

定 价/32.00元

责任编辑/封雪

文案编辑/封雪

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

无论是在民用领域还是在国防安全领域，无人驾驶车辆技术都得到了广泛的关注和迅猛的发展。在民用领域，无人驾驶车辆作为智能交通系统的重要组成部分，将为人们的出行安全提供便利，为经济社会发展做出贡献。在国防安全领域，无人驾驶车辆能代替人在高危环境下完成各种任务，在保存有生力量、提高作战效能方面具有重要意义，是无人作战系统的重要基础。

与无人驾驶车辆的广阔应用前景和国内外开发无人驾驶车辆的火热势头相比较，有关无人驾驶车辆技术的书籍则显得极不匹配。2014年，我们在总结项目组无人驾驶车辆技术方面长期研究积累及国内外科研成果的基础上编写出版了《无人驾驶汽车概论》一书。作为国内第一本系统阐述无人驾驶汽车的专门书籍，该书的出版对国内相关研发人员全面了解无人驾驶汽车的关键技术，推动我国无人驾驶汽车的发展起到了一定的作用。

3年来，国内外互联网企业、汽车企业、高等院校、研究所等机构持续发力，无人驾驶车辆技术取得了长足的进步。“中国制造2025”对智能网联汽车进行了专门的规划和部署；美国联邦立法者也开始为自动驾驶汽车的未来应用谋划法律依据。

当前无人驾驶车辆的发展最急需的就是人才，高等院校正承担着人才培养的重任。在北京理工大学教务处的大力支持下，北京理工大学车辆工程专业本科生培养方案中将增设“无人驾驶车辆理论与设计”课程，以满足“中国制造2025”“互联网+”背景下工程技术人才的培养需求。我们在已经出版的《无人驾驶汽车概论》《无人驾驶车辆模型预测控制》《无人驾驶车辆智能行为及其测试与评价》等专著的基础上，考虑近几年最新的发展，同时结合本科层次人才培养的特点，着手编写了这本面向本科层次的教材。

经典的无人驾驶车辆总体结构可分为感知层、任务规划层、行为执行层和运动规划层4个主要部分。近年来有学者对其进行拓展延伸，将自动驾驶系统分为感知层、决策层和执行层，并在决策层引入车联网和3D高精度地图。也有学者把人工智能引入无人驾驶系统，通过大数据分析和深度学习等方法，推动无人驾驶技术的发展。本书作为无人驾驶车辆技术的

入门教材，把无人驾驶车辆分为初学者更容易理解的四大部分，包括感知、定位导航、路径规划以及路径跟踪。本书各章节正是围绕这四部分展开介绍。

全书共7章。第1章以时间为纵轴、以代表性事件为横轴，介绍了国内外地面无人驾驶车辆发展历程；从智能交通、矿区、园区、国防安全领域的应用等角度介绍了无人驾驶车辆的应用前景；以两款真实的无人驾驶车辆为例解析了无人驾驶车辆结构组成。第2章以激光雷达、毫米波雷达、视觉为例介绍了无人驾驶车辆常用感知传感器及其标定方法。第3章以实际案例的方式介绍了无人驾驶车辆环境感知技术。包括基于视觉的车道线检测，基于三维激光雷达的越野环境可通行区域检测，基于彩色分割、形态学处理、几何形状检测的交通信号灯检测，使用深度学习方法的交通标志检测以及车载视觉与其他传感器融合的前方车辆检测。第4章对常用的无人驾驶车辆定位导航技术进行介绍，如卫星导航定位技术、航迹推算定位技术、卫星导航/航迹推算组合定位技术以及近两年得到广泛应用的网络差分定位技术。对于未来具有重要应用价值的视觉定位技术也进行了介绍。第5章介绍了路径规划的作用和分类以及最基本的路径规划算法。第6章介绍了阿克曼转向和速差转向两种无人驾驶车辆的路径跟踪方法。第7章介绍了无人驾驶车辆的设计与测试方法，包括无人驾驶车辆功能需求分析与总体设计、分系统设计，以及基于公开数据集的测试、基于V-REP的仿真测试和无人驾驶车辆实车测试。为了方便教学，书中案例分析中增加了Matlab、V-REP相关程序，在各章附上习题以增加对基本知识的理解。同时，在附录中提供了V-REP仿真软件入门参考材料。

本书由陈慧岩、熊光明、龚建伟主编。实验室研究生王超、杨天、梁文利、康子怡、尧玲、朱宝昌、丁勇强、丁泽亮、周昌仪、吴孟泽、高天云参加了部分章节的编写及部分文字与图表的修订工作。

本书在编写过程中参考了大量国内外公开发表的资料，在此向相关资料的作者表示感谢。《无人驾驶汽车概论》《无人驾驶车辆模型预测控制》《无人驾驶车辆智能行为及其测试与评价》等书籍出版以来，我们也收到很多意见和建议，在此一并表示感谢。

由于无人驾驶车辆技术正发生日新月异的变化，加之作者水平和能力有限，书中不当之处，望广大读者批评指正。

编者
2017年10月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001
1.1 发展历程	001
1.1.1 国外发展历程	001
1.1.2 国内发展历程	003
1.2 无人驾驶车辆的应用前景	004
1.2.1 无人驾驶车辆在智能交通中的应用	004
1.2.2 无人驾驶车辆在矿区、园区等区域的应用	009
1.2.3 无人驾驶车辆在国防安全领域的应用	009
1.3 无人驾驶车辆结构组成	011
习题	014
第 2 章 无人驾驶车辆常用感知传感器	015
2.1 激光雷达	015
2.1.1 二维激光雷达	017
2.1.2 三维激光雷达	020
2.1.3 激光雷达的标定	022
2.2 毫米波雷达	024
2.3 车载摄像机	026
2.3.1 单目视觉标定	026
2.3.2 双目视觉标定	029
习题	032
第 3 章 无人驾驶车辆环境感知技术	033
3.1 结构化道路车道线检测	033
3.1.1 结构化道路常用基本假设	033
3.1.2 车道线检测	034
3.2 越野环境可通行区域检测	039

3.2.1 地面分割	040
3.2.2 越野环境要素检测	041
3.2.3 可通行区域提取	044
3.3 交通信号灯与交通标志检测	046
3.3.1 交通信号灯检测	046
3.3.2 交通标志检测	052
3.4 前方车辆检测	055
3.4.1 视觉与二维激光雷达融合检测	055
3.4.2 视觉与毫米波雷达融合检测	062
习题	064
第4章 无人驾驶车辆定位导航	065
4.1 全球卫星导航定位	065
4.1.1 GPS 定位的基本原理	065
4.1.2 GPS 定位特性分析	066
4.1.3 差分 GPS	069
4.2 GPS/DR 组合定位	071
4.2.1 航迹推算 (DR) 定位	071
4.2.2 GPS/DR 组合方式	072
4.3 视觉定位技术	075
4.3.1 视觉 SLAM	075
4.3.2 视觉里程计	080
习题	084
第5章 无人驾驶车辆路径规划	085
5.1 路径规划概述	085
5.2 环境地图表示方法	086
5.2.1 度量地图表示法	087
5.2.2 拓扑地图表示法	088
5.3 常用算法介绍	089
5.3.1 Dijkstra 算法	089
5.3.2 经典 A* 算法	090
5.3.3 RRT 算法	094
5.4 应用实例	095
5.4.1 基于栅格地图的搜索算法实例	095
5.4.2 基于拓扑地图的搜索算法实例	099
习题	102
第6章 无人驾驶车辆路径跟踪	103
6.1 阿克曼转向车辆运动学	103
6.2 阿克曼转向车辆路径跟踪算法	104
6.3 速差转向车辆运动分析	108

6.3.1 车辆转向结构分析	109
6.3.2 转向动力学分析	111
6.3.3 转向控制不确定性分析	113
6.4 速差转向车辆的路径跟踪控制	113
6.4.1 预瞄自适应控制	113
6.4.2 车辆转向的横纵向协同控制方法	115
习题.....	121
第7章 无人驾驶车辆设计与测试	122
7.1 功能需求分析与总体设计	122
7.1.1 功能需求分析	122
7.1.2 总体设计	125
7.2 分系统设计	128
7.2.1 底层系统设计	128
7.2.2 控制系统设计	130
7.2.3 感知系统设计	133
7.2.4 路径规划系统设计	136
7.3 仿真与实车测试	137
7.3.1 基于公开数据集的测试	137
7.3.2 基于 V-REP 的仿真测试	138
7.3.3 实车测试	144
习题.....	147
附录 V-REP 仿真软件入门材料	148
1.1 V-REP 基本操作	148
1.1.1 菜单栏	148
1.1.2 快捷操作栏	156
1.2 V-REP 独立仿真	160
1.3 V-REP 与 Matlab 联合仿真.....	164
1.4 Lua 语法简要说明	167
参考文献	172

第 1 章

绪 论

无人驾驶车辆从广义上可以分为地面、空中、水上及水下等多种形式。在本书中约定，无人驾驶车辆特指所有地面无人驾驶载体，它包括军用平台和民用平台。地面无人驾驶车辆起源于军事需求，无人驾驶车辆在军事应用领域的迅猛发展，极大地促进了世界各国研发无人驾驶车辆的激情，并在智能交通等民用领域也产生了大量的研究成果。本章首先以代表性事件为例介绍国外和国内地面无人驾驶车辆的发展历程，然后介绍无人驾驶车辆的应用前景及其结构组成。

由于术语较多，本书约定，在智能交通领域中的无人驾驶车辆称为无人驾驶汽车，其他领域的地面无人驾驶平台仍统称为无人驾驶车辆。

1.1 发展历程

1.1.1 国外发展历程

国外对于无人驾驶车辆研究起步较早，表 1-1 以时间为纵轴、以代表性事件为横轴，描述了国外无人驾驶车辆的发展历程。

表 1-1 国外无人驾驶车辆发展历程

时间	代表性事件
1939 年	在世界博览会上通用公司展示了世界上第一款无人驾驶概念车“Futurama”
20 世纪 80 年代初	美国卡内基·梅隆大学研发 NavLab-1，其在典型结构化道路上运行速度为 28 km/h
1987 年	美国国防高级研究计划局“星球大战”计划“自主地面车辆”（Autonomous Land Vehicle, ALV）基于视觉导航技术，在一条 4.5 km 长的包括转弯、直线、宽度变化并有障碍物的道路上行驶，平均速度为 14.5 km/h，最高速度为 21 km/h
1992 年（至 2000 年）	1992 年 DARPA 及 JRP（John Robert Powers）资助了 DEMO I 计划，研究高速遥控及简单的“学习”功能等技术。1996 年 JRP 和 DARPA 又联合资助了 DEMO II 计划，改进了地面无人驾驶车辆的自动操控技术，演示了越野自主机动性能。1999 年在阿伯丁靶场进行了 DEMO III A 试验。2000 年进行了 DEMO III B 的自主机动性鉴定试验，车辆白天在有植被的崎岖地形上越野导航的速度达到 32 km/h，夜间及湿地时达 16 km/h。在不太恶劣的气候条件下，该车可以 64 km/h 的速度在道路上行驶，试验车与遥控人员的通信距离为 10~15 km

续表

时间	代表性事件
1997年	美国卡内基·梅隆大学研发 NavLab-5, 首次进行横穿美国大陆的长途自动驾驶实验(横向自主控制, 纵向由人工控制), 其自动驾驶行程为 4 496 km, 占总行程的 98.1%; 最高车速为 102 km/h
1998年	意大利 Parma 大学研发“ARGO”试验车, 沿着意大利的高速公路进行 2 000 km 的道路试验(横向自主控制, 纵向由人工控制), 自动驾驶里程达到总里程的 94%, 最高车速为 112 km/h
2004年	美国国防高级研究计划局和美国卡内基·梅隆大学合作研发“粉碎机(CRUSHER)”无人平台, 装备了用于无人车辆的“混合动力发动机和先进的悬挂系统”, 能够以时速 40 km/h 行走 50 km, 且能够实现中心转向 第一届 DARPA Grand Challenge 无人驾驶车辆挑战赛于 2004 年 3 月在美国莫哈韦沙漠举行。比赛要求参赛车队必须是无人驾驶的自主地面车辆, 不允许远程遥控, 并对每辆参赛车进行实车跟踪。共有 21 支参赛车队参加了资格赛, 有 15 支车队进入了决赛, 但在决赛中, 没有一支车队完成整场比赛。所有车队中, 行驶最远的是卡内基·梅隆大学的 Sandstorm, 共完成了 11.78 km 的路程。但它是首次实现车辆在无人状态下的避障驾驶, 仍然具有里程碑的意义, 极大地引发了人们对于无人驾驶技术的兴趣, 激发了人们在无人驾驶领域的创新意识
2005年	第二届 DARPA Grand Challenge 无人驾驶车辆挑战赛共有 195 支队伍报名, 其中 43 支车队通过审核进入了资格赛。决赛中有 5 辆参赛车完成比赛任务, 冠军是斯坦福大学的“Stanley”, 第 2、3 名是卡内基·梅隆大学的 Sandstorm 和 Highlander
2007年	DARPAG Urban Challenge 无人驾驶车辆挑战赛在加利福尼亚州一个已废弃的空军基地举行。这届比赛任务是参赛车辆在 6 小时内完成模拟的城市道路比赛, 并要求参赛车辆在与其它车辆相互协作、避障和车辆交汇的同时遵守交通规则。冠军是卡内基·梅隆大学的“Boss”, 用时 4 小时 10 分 20 秒, 平均速度为 22.53 km/h
2009年	美国陆军坦克车辆研究开发与工程中心研发自主平台演示(Autonomous Platform Demonstrator, APD)系统, 旨在开发、集成和试验下一代无人平台系统技术, 包括混合电驱动技术、先进悬挂技术、能量管理和无人平台系统安全技术。速度达到 80 km/h, 技术成熟度为 6 级
2010年左右	谷歌成立无人驾驶项目组, 开始研发无人驾驶车辆。一类是由有人驾驶车辆改装成的无人驾驶车辆; 另一类是全新设计的, 没有方向盘、没有制动踏板和油门踏板的无人驾驶车辆
2011年	美国内华达州参众两院通过了第 511 号法案, 为无人驾驶汽车在内华达州内申领执照和驾驶要求提供了法律依据
2012年	美国佛罗里达州众议院通过第 1207 号法案, 在这个法案里“无人驾驶技术”是指安装在机动车辆上, 在没有人主动干预的情况下能够驾驶机动车的技术。无人驾驶汽车是指装备了上面定义的“无人驾驶技术”的机动车辆 美国加利福尼亚州参议院通过第 1298 号法案, 给出了无人驾驶汽车的安全和性能要求。对无人驾驶汽车上路测试作出声明
2013年左右	特斯拉以及奔驰、宝马等汽车企业吹起了进军无人驾驶汽车的号角

续表

时间	代表性事件
2014年	美国汽车工程师学会 (Society of Automotive Engineers, SAE) 制定自动驾驶汽车分级标准, 将自动驾驶分为驾驶辅助、部分自动驾驶、有条件自动驾驶、高度自动驾驶以及完全自动驾驶五个级别
2017年	汽车科技成了国际消费类电子产品展览会 (International Consumer Electronics Show, CES) 中的重要主题, 众多企业推出自动驾驶原型车 美国众议院通过美国首部自动驾驶汽车法案 (H. R. 3388), 该法案修订了美国交通法典, 规定了美国国家高速公路安全管理局对于自动驾驶汽车的监管权限, 同时为自动驾驶汽车提供安全措施, 奠定了联邦自动驾驶汽车监管的基本框架, 表明联邦立法者开始认真对待自动驾驶汽车及其未来

1.1.2 国内发展历程

在无人驾驶车辆领域, 我国虽然起步较晚, 但是发展迅速, 已经出现很多具有代表性的研究成果, 如表 1-2 所示。

表 1-2 国内无人驾驶车辆发展历程

时间	描述
“八五”期间	南京理工大学、北京理工大学、清华大学、浙江大学和国防科技大学等联合研制出我国第一辆具有自主识别功能的 ATB-1 无人驾驶车辆。其在结构化道路自主行驶的最高速度为 21.6 km/h, 弯路及避障速度为 12 km/h
“九五”期间	研制出我国第二代无人驾驶车辆 ATB-2 系统。具有面向结构化道路环境和越野环境的功能, 同时还具有临场感遥控及夜间行驶、侦察等功能。在结构化道路中最高行驶速度为 74 km/h; 越野环境下白天行驶最高速度为 24 km/h, 夜间行驶最高速度为 15 km/h, 遥控驾驶速度为 50 km/h
2000 年左右	北京理工大学为某单位研制了中国第一辆投入实际使用的无人自动驾驶履带车辆“某炮弹专用遥控靶车”。通过操纵遥控驾驶仪与观察回传视频, 可以实现履带车辆启动、加速、稳速、减速、转向、停车的自动操纵。实现 8 km 范围的遥控与半自主行驶
2001 年	国防科技大学与中国第一汽车集团联合研发“红旗 CA7460”自动驾驶汽车, 在高速公路上, 最高行驶速度可达到 130 km/h
2009 年	国家自然科学基金委首届“中国智能车未来挑战赛”在西安举行。这是我国首次举办的第三方无人驾驶车辆测试赛, 推动了中国无人驾驶车辆驶出实验室、驶向实际环境, 打破了过去那种自行研发、自行测试的无人驾驶车辆研究与开发模式。自 2009 年至 2017 年 10 月, 该赛事已连续举办了 8 届, 极大地推动了中国无人驾驶车辆技术的发展
2011 年	国防科技大学研制的“红旗 HQ3”, 完成了从长沙到武汉 286 km 的高速全程无人驾驶试验, 实测全程自动驾驶平均时速 87 km/h
2013 年	北京理工大学与比亚迪联合研制的“Ray”无人驾驶车辆, 获得 2013 年“中国智能车未来挑战赛”第一名。首次将无人驾驶车辆环境感知、规划决策和控制技术与汽车动力系统、传动系统和电子控制系统进行了一体化融合设计

续表

时间	描述
2013 年左右	百度研发无人驾驶车辆，开展城市、环路及高速道路混合路况下的全自动驾驶，获得美国加州政府颁发的全球第 15 张无人车上路测试牌照。同一时段，国内其他互联网公司、传统汽车企业也纷纷部署无人驾驶车辆技术发展规划
2014 年	总装备部举办“跨越险阻-2014”首届地面无人平台挑战赛。比赛全程无人车辆均自主行进，对路障、街垒、倒塌墙体、损毁装备、弹坑、壕沟、水坑以及动态障碍物等进行自主避让、绕行，并通过隧道。10 余家科研院所的 21 辆无人车展开角逐
2015 年	《中国制造 2025》提出推动节能与新能源汽车产业发展的战略目标，在智能网联汽车方面：到 2020 年，掌握智能辅助驾驶总体技术及各项关键技术，初步建立智能网联汽车自主研发体系及生产配套体系；到 2025 年，掌握自动驾驶总体技术及各项关键技术，建立较完善的智能网联汽车自主研发体系、生产配套体系及产业群，基本完成汽车产业转型升级 宇通客车研制无人驾驶大客车，在开放道路环境下完成自动驾驶试验，共行驶 32.6 km，最高时速 68 km/h 中国科协举办“地面无人机动平台技术未来发展趋势”新观点新学说学术沙龙
2016 年	陆军装备部举办“跨越险阻-2016”地面无人系统挑战赛，40 多家军内外科院所、高校、企业参赛 北京理工大学研制成功中国第一辆无人自主驾驶履带车辆，并参加“跨越险阻-2016”地面无人系统挑战赛，自主感知识别环境、自主规划路线、自主决策控制，在规定时间内完成 15 km 的比赛任务 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”封闭测试区正式开园运营
2017 年	无人驾驶创业公司百家争鸣、百花齐放

1.2 无人驾驶车辆的应用前景

无人驾驶车辆拥有异常广阔的应用前景。通过车辆与车辆（Vehicle to Vehicle, V2V）以及车辆与基础设施（Vehicle to Infrastructure, V2I）的通信，可以实现无人驾驶车辆与其他车辆、基础设施以及人类之间的交互。凭借这种优势，多个无人驾驶车辆之间可以完成编队，通过交叉口、多任务分配等多种方式的协作，从而形成一种全新的智能交通方式，为现有的交通系统注入新的血液，促进智能交通系统的进一步升级与发展；同时在一些工作环境恶劣，劳动强度较大的领域，如矿区环境，无人驾驶车辆也已崭露头角；另外，无人驾驶车辆还可以应用在军事领域，节省人力，提高作战效率，减少人员伤亡。

1.2.1 无人驾驶车辆在智能交通中的应用

无人驾驶汽车之所以能够提上各大汽车企业的研究日程，被国内外科研机构作为研究重点投入大量的人力物力，带来军民融合的发展，不仅仅因为它代表了高新科技水平，更因为它满足了人们对汽车技术发展的迫切需求。公路等级的不断提高，高速公路的迅速发展，汽

车行驶速度的大幅提高，汽车保有量的大量增加，都意味着交通系统对人们驾驶技术的要求越来越高。在汽车技术开发领域人们普遍认为，智能技术比人类更可靠。欧洲的一项研究表明：汽车驾驶员只要有碰撞危险的0.5 s前得到“预警”，就可以避免至少60%的追尾撞车事故、30%的迎面撞车事故和50%的路面相关事故；若有1s的“预警”时间，将可避免90%事故的发生。该研究还表明如果用机器代替人开车，有望将交通事故减为零。尤其是无人驾驶汽车与车联网相结合，形成一个庞大的移动车联网，再加上现有的智能交通系统（Intelligent Transportation System, ITS）提供的丰富的道路交通信息，无人驾驶汽车便可更加自由安全地行驶在城市道路环境中，反过来将形成更加智能的交通系统。

1. 自动驾驶分级

汽车的智能化发展是逐步推进的，2014年美国汽车工程师学会（Society of Automotive Engineers, SAE）将汽车自动化等级定义为以下六个层次：

L0. 无自动驾驶（Level 0 Driver only）：完全由驾驶员持续控制着汽车的速度和方向，没有辅助系统的干预。

L1. 辅助驾驶（Level 1 Assisted）：驾驶员持续控制着汽车的纵向或横向的驾驶任务，另一方向的驾驶任务由辅助驾驶系统控制，如辅助泊车系统。

L2. 部分自动驾驶（Level 2 Partial Automation）：驾驶员必须持续监测动态驾驶任务及驾驶环境。在一定的条件下，自动驾驶系统控制汽车的纵向和横向动态驾驶任务，如交通拥堵辅助系统。

L3. 有条件自动驾驶（Level 3 Conditional Automation）：驾驶员不需要持续监测驾驶任务和驾驶环境，但是驾驶员必须时刻处于一个可以随时恢复对汽车控制的位置。自动驾驶系统在一定的条件下可以控制汽车的纵向和横向驾驶任务，但是自动驾驶系统的性能有限，要保证驾驶员有足够的反应时间恢复对汽车的控制，如高速公路自适应巡航控制（Adaptive Cruise Control, ACC）系统。

L4. 高度自动驾驶（Level 4 High Automation）：在一定使用条件下，汽车驾驶不需要驾驶员存在，自动驾驶系统控制着汽车的纵向和横向驾驶任务，如城区环境下的自动驾驶系统。

L5. 完全自动驾驶（Level 5 Full Automation）：在所有工况行驶过程中，自动驾驶系统控制着汽车的纵向和横向驾驶任务，不需要驾驶员存在。

2016年9月，SAE对这套分级标准进行了修改，使自动驾驶汽车的分级更加细化。新版的分级标准充分考虑系统失效的可能性，并定义失效时的最小化风险路径，不同等级系统的特性很大程度上取决于它是否能提供这个路径，还是需要人类驾驶员的协助。其中主要修改是对动态驾驶任务（Dynamic Driving Task, DDT）的细节定义，如L2级除了要求自动驾驶车辆可以控制方向盘和加减速，还应能执行部分目标检测功能，并且L3、L4和L5级继续对这一功能进行了细化。L3级要求在遇到紧急情况时，自动驾驶系统不能立即退出，应由系统的DDT fallback-ready user进行干预，给予驾驶员足够的时间来接管方向盘和制动踏板。L4级要求在遇到系统故障时，自动驾驶汽车在自动召唤紧急援助之前，应通过打开危险闪光灯，操纵车辆行驶到路边并停车，以使风险降到最低。

《中国制造2025》关于智能网联汽车一节的描述中指出，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，具备复杂环境感知、智

能化决策、自动化控制功能，使车辆与外部节点间实现信息共享与控制协同，实现“零伤亡、零拥堵”，达到安全、高效、经济行驶的下一代汽车。并明确指出，到2020年，掌握智能辅助驾驶总体技术及各项关键技术，减少交通事故30%以上，减少交通死亡人数10%以上；到2025年，掌握自动驾驶总体技术及各项关键技术，实现可完全自动驾驶，无人驾驶最高安全车速达到120 km/h，综合能耗较常规汽车降低10%以上，减少排放20%以上。

从SAE的层次划分可以看出，无人驾驶是智能汽车发展的最终目标，《中国制造2025》的描述也印证了这一点。虽然完全意义上的无人驾驶汽车还没有能够走进普通人的生活，但是综合了自适应速度控制、自动紧急制动等多种辅助驾驶功能的汽车已经出现在市场上了，这使得半自动驾驶汽车在许多地区的汽车市场第一次成为现实。《MIT科技评论》将“自动驾驶卡车”选入2017年十大突破性技术榜单。美国的Otto、中国百度与福田合作的自动驾驶卡车赫然在列。自动驾驶卡车有望成为自动驾驶技术最早商业化的形态。

2. 无人驾驶与车联网

无人驾驶汽车替代传统汽车还需要一定的时间，而这期间必然会存在无人驾驶汽车和传统汽车并行的时期。无人驾驶汽车不仅要实现有人驾驶和无人驾驶的无缝接合，能够实现良好的人机交互，还要具有车与车交互的特点。车联网通常是指车与车（V2V）、车与路面基础设施（V2I）、车与人（V2P）、车与传感设备的交互，实现车辆与公众网络通信的动态移动通信系统，如图1-1所示。它利用通信、互联网、物联网技术将各种车辆进行广泛联网进而展开各种综合应用，包括智能交通、汽车（移动）互联网及其应用、汽车通信网及其应用等，通过车与车、车与人、车与路互联互通实现信息共享，收集车辆、道路和环境的信息，并在信息网络平台上对多源采集的信息进行加工、计算、共享和安全发布。

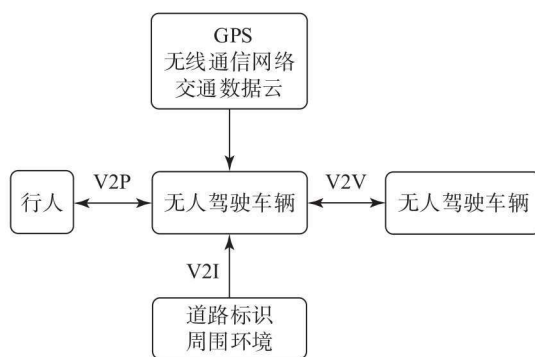


图 1-1 车联网结构示意图

无人驾驶汽车之间的通信，可以大大降低交通事故的发生率。如图1-2所示，在公路上正常行驶的一辆汽车突然制动，后面有一辆汽车跟随，车中驾驶员从发现制动灯亮起到踩下制动踏板，这个过程需要一段时间，若注意力不集中，则需要的时间更长。当这两辆车可以进行通信时，只要前车踩下制动，就可以同时向后车发出信号，后车接收到信号后能迅速采取减速甚至紧急制动措施。

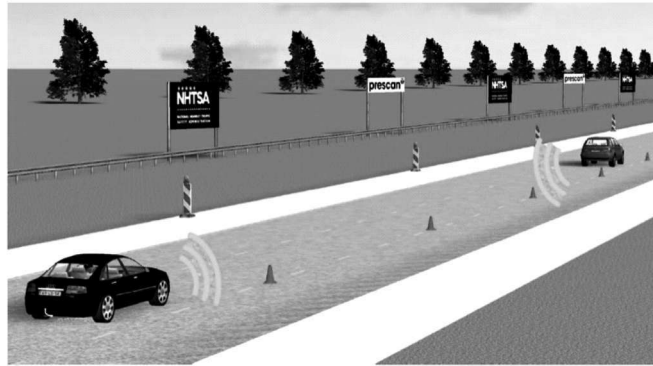


图 1-2 无人驾驶汽车之间的通信 (V2V) (见彩插)

无人驾驶汽车与道路基础设施之间的通信技术可以使汽车提前得知路口交通信号灯的状态，且道路旁的通信装置也能侦测附近一段路的拥堵情况，并发送信号给较远距离的车辆，从而使汽车绕开拥堵路段。道路信号也可以上传到网络，再传送给更远的车辆，以便更多的汽车合理规划出行路线，如图 1-3 所示。

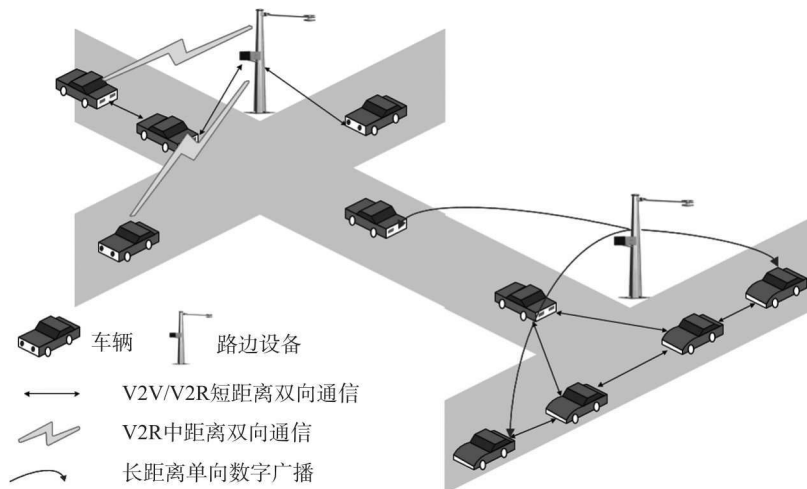


图 1-3 无人驾驶汽车与基础设施之间的通信 (V2I) (见彩插)

在未来的车联网时代，无线通信技术和传感技术之间会是一种互补的关系，当无人驾驶车辆处在转角等传感器的盲区时，无线通信技术就会发挥作用；而当无线通信的信号丢失时，传感器又可以派上用场。车联网帮助所有车辆与网络互联，做到车与车、车与路侧设施、车与人之间信息的实时交互，不仅提高了交通效率，更有效保证了驾驶安全。

3. 无人驾驶与智能交通系统

智能交通系统是将先进的信息技术、通信技术、传感技术、控制技术以及计算机技术等有效地集成运用于整个交通运输管理体系，从而建立起一种在大范围内全方位发挥作用的、实时、准确、高效的运输和管理系统。它以信息的收集、处理、发布、交换、分析、利用为主线，为交通参与者提供多样性服务，即利用高科技使传统交通模式变得更加智能化，更加安全、节能、高效率。

在技术支持方面，智能交通系统能够为无人驾驶汽车提供先验信息，提高无人驾驶汽车的识别效率和识别准确率，促进无人驾驶汽车的安全可靠运行。例如，现在的无人驾驶汽车在识别交通标志方面仍然存在一定的困难，如果仅依靠车载视觉，现在的计算机技术无法百分之百准确识别，此时可以引入 V2X，通过通信将交通标志的信息主动发给无人驾驶车辆（图 1-4）。



图 1-4 交通标志检测（见彩插）

在未来的智能交通系统中，无人驾驶汽车的行程线路可以在其出发前就已经在网络计算中心得到统筹计算规划。行程中关键信息是实时地理位置坐标，通过远距离射频识别信号不断与沿途网络天线交流，告诉车辆位置信息并连续不断地获取和执行新的直行或转向、速度等位置移动信息指令，其车载电脑仅需实时通过传感器或激光雷达对行进前方及周边物体的间距信息作监控判断，一旦判断在对应速度的行进方向位移可能会与前方物体发生触碰，即刻优先执行制动或转向指令，之后再继续执行位移指令。这样对其车载计算机的计算工作量就减轻了许多，使无人驾驶汽车实际上是在覆盖城市道路交通信息网络系统中，只是众多末端细胞之一。其技术水平并非需要如同人类大脑具有独立思维能力，而是依靠基础设施的“团队合作”，无人驾驶车辆在移动中不断发出车辆身份信息，以及速度多少、是否加速或减速、方向及预转向的偏向角多少的状态信息，告诉路边沿途信息，同时亦接收网络传输的移动各项指令，使得此车辆在众多行进在该路段车辆中，一方面按照信息网络统筹调度，另一方面也与周围车辆彼此间都相互了解当前和下一步移动意向。通过周围不同位置和角度的各车辆及道路旁或上方的传感器构成的全方位立体信息网络，就能够使无人驾驶车辆提前预知而采取预防措施，避免追尾、剐蹭等事故的发生，无人驾驶车辆的行驶安全性将会比有人驾驶的更高。对比之下，在一体化的系统中各车辆及沿途诸多传感器都会将各自观察到的信息连续不断地实时报告会智能交通信息网络，同时也获取网络通过无线传输的有关行进前方和周围信息并与车载传感器观察到的信息进行综合计算判断，执行最为安全可行的行驶指令。

智能交通技术和无人驾驶技术的相互促进，传感器技术和信息技术的不断发展，处理器与芯片性能的不断提高，都可能为未来出行提供新的解决方案。无人驾驶汽车将会是未来智能交通中的重要组成部分，而无人驾驶技术和车联网技术的发展将助推智能交通迈向新的阶段。

对于实现高等级的无人驾驶，理解人类意图是根本挑战。人脑具有因果关系的理解能力，但人工智能在短时间内还达不到这么高的水平。例如，在通过路口时，传感器可以识别出存在的行人和车辆，但对于这些行人和车辆下一步的行动却无法准确预测。因此，建立完善的车联网和智能交通网络，实现无人驾驶车辆与各种交通参与者的信息交互是实现真正无

人驾驶所必不可少的环节。

1.2.2 无人驾驶车辆在矿区、园区等区域的应用

无人驾驶车辆在复杂的交通环境下使用可能仍需时日，但是在一些特定场景，如矿区、景区、庄园、度假村、停车场等，无人驾驶车辆已经崭露头角。因为这些地方均属于局部封闭场所，地图信息已知且环境信息相对简单，实现无人驾驶功能并不复杂。在这些封闭区域投入无人驾驶车辆还具有降低人力成本，提高生产效率的优点。

在进行矿山开采时，工作环境较为艰苦，且运输过程中由于工人疏忽或过度疲劳经常会发生严重事故，造成巨大的人力物力损失。矿区属于局部封闭区域，环境信息较为简单，可以在此区域引入无人驾驶车辆，不仅有效减少采矿过程中的事故发生率，还可以降低人力开支在运输成本中的比重，节约开支。此外，无人驾驶车辆可快速、安全地运输矿石，更高效地使用燃料，降低能源成本，从而直接推动提高生产率。目前国外很多公司都已经在矿区投入无人驾驶车辆，以加快生产。在澳大利亚西北部，矿业公司 Rio Tinto 正在积极采用自动化技术提高生产效率，该公司目前在用无人驾驶运输卡车有 73 辆，在四个矿井上每天 24 个小时连续作业。世界上最大的矿业公司，必和必拓（BHP Billiton）也在开发无人驾驶卡车，在澳大利亚开钻铁矿。加拿大最大的石油公司 Suncor 也开始在位于 Alberta 的油田中测试无人驾驶车辆。

驭势科技在 CES 2017 发布一种全新的交通工具——城市移动包厢。内部座椅呈环形排列，所有传感器都自然融入车的流线型外形。整体设计聚集于城市出行、工作与娱乐一体化的消费需求场景。在人类与车辆的交互方面，移动包厢头部外侧装有 LED 显示屏，作为与行人的交互组件。当移动包厢想让面前的行人先过的时候，显示屏上会提示行人先走。在车厢内部同样装有与车内乘客交互所用的大屏幕和摄像头，乘客可以通过这块屏幕选择去哪里、开视频会议、玩直播、查看当地的风土人情介绍等。同时在车内装有紧急制动按钮。为了降低成本，采用 16 线激光雷达，通过与双目立体摄像头、超声波雷达以及毫米波雷达的融合，实现了 360°无死角的传感器覆盖，且每个角度都有冗余，互为备份，以保证安全。

停车场是建设在公园、道路或广场等中的专用停车场所，面对日益增多的车辆，它可以集中存放车辆，有效利用城市空间，方便车辆的统一管理，正在发挥着越来越重要的作用。停车场分为地上停车场和地下停车场，因为地下停车场具有使用管理方便，不占用城市表面用地，无须拆迁、征地等优点，正逐渐代替地上停车场成为城市建设中的重要一环。在地下停车场中，环境较为简单，场景相对封闭，地图信息可知，因此成为现阶段科技公司投入无人驾驶车辆的首选之地。在地下停车场引入无人驾驶车辆摆渡车，车主可以通过终端查询自己车辆的位置，然后呼叫摆渡小车，把车主送到自己停车的车位上，这样不仅可以减少人们找不到车的烦恼，而且可以大幅增加停车场面积与容量，提高停车场使用效率。

1.2.3 无人驾驶车辆在国防安全领域的应用

无人驾驶车辆在近年的阿富汗战争和伊拉克战争中得到了广泛的应用，在未爆弹药处理、预警侦察、安全巡逻、战场救护、简易爆炸装置探测、探扫雷、城区辅助作战和后勤保障等很多战术作战领域发挥了重要作用，大大节省了人力，减少了伤亡。在未来地面作战