



智能车辆先进技术丛书



无人驾驶汽车

概论

Introduction to self-driving car

陈慧岩 熊光明 龚建伟 姜岩 主编

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

智能车辆先进技术丛书

无人驾驶汽车概论

陈慧岩 熊光明 龚建伟 姜岩 主编

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书总结了北京理工大学智能车辆研究所长期研究无人驾驶汽车技术的经验和成果，并借鉴了国内外相关科研成果，结合无人驾驶汽车的新发展，对无人驾驶汽车技术涉及的重点内容进行了全面的介绍。

全书共9章，主要包括无人驾驶汽车的产生与发展，无人驾驶汽车的体系结构、无人驾驶汽车环境感知技术，无人驾驶汽车定位导航技术，无人驾驶汽车路径规划技术，无人驾驶汽车运动控制方法，无人驾驶汽车的一体化设计方法，以及无人驾驶汽车发展面临的机遇与挑战等内容。

本书适用于对无人驾驶汽车感兴趣的各类人员，也可作为高等院校车辆工程、自动化、计算机等专业的参考教材，同时，还可为广大从事汽车行业的工程技术人员提供参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

无人驾驶汽车概论/陈慧岩等主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2014. 7
ISBN 978 - 7 - 5640 - 9457 - 7

I. ①无… II. ①陈… III. ①无人驾驶-汽车-概论 IV. ①U469. 79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 140924 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)

82562903 (教材售后服务热线)

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 / 北京地质印刷厂

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 14.5

字 数 / 252 千字

版 次 / 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 39.00 元

责任编辑 / 梁铜华

文案编辑 / 梁铜华

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

前言

2013年，国际知名汽车企业开展了一场无人驾驶汽车的研发竞赛，一些企业研发的无人驾驶汽车相继亮相，并宣称在10~15年的时间内实现量产。无人驾驶汽车之所以能够提上各大汽车企业的研究与开发日程，被国内外相关机构作为研究重点，投入大量的人力和物力，不仅仅因为它代表了高新科技水平，更因为它满足了人类对汽车技术发展的迫切需求。

从长远的角度来看，汽车发展的趋势是实现自动驾驶。无人驾驶汽车是自动驾驶的一种表现形式。从广义上说，无人驾驶汽车是在网络环境下用计算机技术、信息技术和智能控制技术武装起来的汽车，是有着汽车外壳的移动机器人。

本书作为国内第一本系统阐述无人驾驶汽车的专门书籍，是作者在北京理工大学智能车辆研究所无人驾驶汽车技术方面长期研究积累并总结国内外科研成果的基础上编写而成的。北京理工大学在20世纪90年代参与了由我国有关部委“八五”计划支持的“军用地面机器人”项目，在国内首次针对国产手动变速器车辆成功开发车辆自动操纵系统，实现了油门、制动、转向、换挡等的自动控制。2009年，北京理工大学研制的BIT号无人驾驶汽车参加首届“中国智能车未来挑战赛”，获得了第二名和最佳环境感知奖。2013年研制的采用一体化设计方法对汽车电动助力转向系统、发动机电控、自动变速器、电控驻车制动、组合仪表和灯光进行协调控制的Ray无人驾驶汽车，参加第五届“中国智能车未来挑战赛”，获得了第一名。

本书涉及无人驾驶汽车的体系结构、环境感知、定位导航、控制与决策以及一体化设计等方面的内容。全书共9章。其中，第1章对无人驾驶汽车的产生与发展进行了简要的介绍；第2章主要介绍无人驾驶汽车的体系结构；第3章主要介绍无人驾驶汽车环境感知技术基础；第4章介绍了无人驾驶汽车环境感知的相关内容；第5章介绍了无人驾驶汽车定位导航技术；第6章介绍了无人驾驶汽车路径规划技术；第7章介绍了无人驾驶汽车运动控制方法；

第8章介绍了无人驾驶汽车一体化设计方法；第9章介绍了无人驾驶汽车发展面临的机遇与挑战。

本书由陈慧岩、熊光明、龚建伟和姜岩主编。智能车辆研究所教师翟涌、金辉、席军强、金亚英，博士研究生江燕华、胡玉文、张玉、刘凯，硕士研究生李勇、张瑞琳、刘璐、袁盛玥、李晓芸、王诗源、周帅、肖强、李宁、叶刚和孙银健，参加了部分章节的编写及部分文字、图表的修订工作。

本书能够撰写完成，首先需要感谢的是所有参与研发中国第一辆具有自主识别功能的无人驾驶车辆 ATB-1 的研究人员。正是他们，把机器人和汽车有机地结合在一起，奠定了今天中国无人驾驶汽车研究的基础。其次需要感谢的是，所有关注无人驾驶汽车并为无人驾驶汽车的发展做出努力的人们。正是大家共同的努力，成就了今天我们所看到的无人驾驶汽车。本书在编写过程中参考了大量国内外公开发表的资料，在此也向相关资料的作者一并表示感谢。

由于无人驾驶汽车技术在不断发展之中，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

2014年3月

第1章 无人驾驶汽车的产生与发展 / 1	
1.1 地面无人驾驶车辆的发展 / 2	
1.2 无人驾驶汽车的产生 / 4	
1.3 无人驾驶汽车成为现实 / 7	
1.4 无人驾驶汽车概述 / 11	
参考文献 / 13	
第2章 无人驾驶汽车体系结构 / 15	
2.1 分层递阶式与反应式体系结构 / 15	
2.1.1 分层递阶式体系结构 / 15	
2.1.2 反应式体系结构 / 16	
2.2 4D/RCS / 17	
2.3 JAUS / 23	
2.4 无人驾驶汽车体系结构实例 / 27	
2.4.1 Boss 无人驾驶汽车体系结构 / 27	
2.4.2 BIT 号无人驾驶汽车体系结构 / 29	
参考文献 / 31	
第3章 无人驾驶汽车环境感知技术基础 / 32	
3.1 环境感知中的传感器 / 32	
3.2 激光雷达测距传感器 / 35	
3.2.1 LMS511 激光雷达 / 35	
3.2.2 64 线激光雷达 / 38	
3.3 ESR 毫米波雷达 / 41	
3.4 车载视觉传感器 / 43	
3.4.1 车载视觉 / 43	
3.4.2 彩色空间模型 / 44	
3.4.3 图像预处理 / 47	
3.5 传感器标定 / 51	
3.5.1 激光雷达标定 / 52	
3.5.2 摄像机标定 / 55	
3.5.3 摄像机和激光雷达联合标定 / 61	
参考文献 / 63	
第4章 无人驾驶汽车环境感知 / 65	
4.1 结构化道路检测 / 65	

- 4.1.1 结构化道路常用基本假设 / 66
- 4.1.2 直道检测 / 67
- 4.1.3 弯道检测 / 70
- 4.1.4 复杂环境下车道检测图像预处理 / 74
- 4.2 非结构化道路检测 / 75
- 4.3 行驶环境中目标检测 / 76
 - 4.3.1 行人检测 / 77
 - 4.3.2 车辆检测 / 81
- 4.4 交通信号灯和交通标志的检测 / 86
 - 4.4.1 交通信号灯检测 / 86
 - 4.4.2 交通标志检测 / 89
- 参考文献 / 93
- 第5章 无人驾驶汽车定位导航 / 96**
 - 5.1 电子罗盘与速率陀螺的航向数据融合 / 96
 - 5.2 GPS/罗盘/里程计位置数据融合 / 98
 - 5.2.1 全球导航定位系统 GPS / 98
 - 5.2.2 航迹推算 / 100
 - 5.2.3 GPS/罗盘/里程计组合导航定位系统 / 101
 - 5.3 无人驾驶汽车 GPS/DR 组合定位系统实例 / 104
 - 5.3.1 定位传感器 / 104
 - 5.3.2 GPS/DR 组合方式分析 / 108
 - 5.3.3 互补式组合导航实现 / 110
 - 5.4 同时定位与地图创建 / 111
 - 5.4.1 SLAM 的实现方法 / 112
 - 5.4.2 SLAM 理论发展的关键问题 / 115
 - 5.4.3 SLAM 应用举例 / 117
 - 5.5 视觉里程计 / 119
 - 5.5.1 视觉里程计的基本原理 / 120
 - 5.5.2 视觉里程计算法分类 / 121
 - 5.5.3 两帧视觉里程计算法中的关键问题 / 123
 - 5.5.4 考虑运动学约束的视觉里程计算法 / 125
 - 参考文献 / 128

- 第 6 章 无人驾驶汽车路径规划 / 130
 - 6.1 路径规划概述 / 130
 - 6.1.1 环境地图表示方法 / 130
 - 6.1.2 路径搜索算法 / 136
 - 6.2 基于启发式搜索算法的路径规划 / 140
 - 6.2.1 经典 A* 路径规划 / 140
 - 6.2.2 改进的 A* 路径规划 / 145
 - 6.3 实时、增量式路径规划 / 152
 - 6.3.1 状态空间表示 / 152
 - 6.3.2 增量式路径规划 / 153
 - 6.3.3 变维度状态空间的实时、增量式路径规划 / 155
 - 参考文献 / 160
- 第 7 章 无人驾驶汽车运动控制 / 163
 - 7.1 无人驾驶汽车的纵向控制 / 163
 - 7.1.1 油门控制 / 164
 - 7.1.2 制动控制 / 165
 - 7.1.3 油门与制动的切换规则 / 170
 - 7.2 基于航向预估的无人驾驶汽车横向控制 / 170
 - 7.2.1 二自由度动力学模型 / 171
 - 7.2.2 航向预估算法原理 / 172
 - 7.3 基于滑模变结构理论的无人驾驶汽车横向控制 / 174
 - 7.3.1 自动转向控制系统结构 / 174
 - 7.3.2 基于曲率的前馈控制 / 177
 - 7.3.3 基于偏差的反馈控制 / 178
 - 7.4 考虑环境信息与车辆约束的无人驾驶汽车路径跟踪 / 186
 - 7.4.1 考虑环境信息与车辆约束的行驶曲线生成 / 186
 - 7.4.2 基于车辆动力学约束的速度规划 / 189
 - 参考文献 / 191
- 第 8 章 无人驾驶汽车一体化设计 / 193
 - 8.1 传统无人驾驶汽车 / 193

- 8.2 无人驾驶汽车一体化设计 / 199
 - 8.2.1 无人驾驶汽车动力学 / 201
 - 8.2.2 无人驾驶汽车一体化体系结构 / 202
 - 8.2.3 无人驾驶汽车底层一体化设计 / 204
- 8.3 无人驾驶汽车仿真平台与实车测试 / 206
 - 8.3.1 无人驾驶汽车仿真平台 / 206
 - 8.3.2 无人驾驶汽车的实车测试 / 210

参考文献 / 211

第9章 无人驾驶汽车的机遇与挑战 / 213

- 9.1 车联网与智能交通系统 / 213
- 9.2 国外无人驾驶汽车 / 217
- 9.3 我国无人驾驶汽车 / 220
- 9.4 无人驾驶汽车发展面临的机遇与挑战 / 222

参考文献 / 223

第 1 章

无人驾驶汽车的产生与发展

无人驾驶平台包括无人机、无人艇、无人潜水器和地面无人驾驶车辆。地面无人驾驶车辆也称自主地面移动平台、自主地面车辆等。本书探讨的无人驾驶汽车是地面无人驾驶车辆的一种。它主要偏重于民用领域。目前，国际上对于无人驾驶车辆和无人驾驶汽车，尚缺乏统一的定义。在本书中约定，所有地面无人驾驶载体统称地面无人驾驶车辆。它既包括军用平台和民用平台，也包括各种不同形式的移动机构，如轮式、履带式和腿式。从广义上来看，无人驾驶汽车是在网络环境下用计算机技术、信息技术和智能控制技术武装起来的汽车，或者可以说是有着汽车外壳兼顾汽车性能的移动机器人。

与无人驾驶汽车这一术语相关的概念有辅助驾驶、主动安全、自动驾驶汽车以及智能车辆等。其中，智能车辆包含的范围最广。它涵盖了辅助驾驶、主动安全以及自动驾驶等各个方面。它在向智能化发展过程中逐渐实现了辅助驾驶和主动安全。自动驾驶是智能车辆发展的最终方向。美国加利福尼亚州制定的关于自动驾驶汽车的法案指出，“自动驾驶汽车”是指使用计算机、传感器和其他技术和设备，使车辆在没有驾驶员的主动控制和连续监测下可以安全行驶的机动车辆。可以看出，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。

从发展历程来看，地面无人驾驶车辆起源于军事应用。本章首先简要介绍国外军用地面无人驾驶车辆的发展。其次，以 NavLab 系列、VaMoRs - P 系列

和 ARGO 系列为例,介绍无人驾驶汽车兴起初期国外的发展情况,并简要介绍同一时期国内无人驾驶汽车的发展状况。再次,以美国国防部高级研究计划局(The Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)挑战赛和“中国智能车未来挑战赛”为例说明无人驾驶汽车已经在一定程度上成为现实。本章最后阐述无人驾驶汽车研究内容与发展趋势。

1.1 地面无人驾驶车辆的发展

从 20 世纪 70 年代开始,西方发达国家就开展了地面无人驾驶车辆的研究,并且取得了一系列研究成果。国外军用地面无人驾驶车辆的发展主要经历了 3 个阶段:在 20 世纪 80 年代之前,受限于硬件技术和计算机、图形处理、数据融合等关键技术,地面无人驾驶车辆的发展侧重于遥控。20 世纪 80 年代以后,随着自主车辆技术及其他相关技术突破性的进展,地面无人驾驶车辆得以进一步发展,出现了各种自主和半自主移动平台;但是由于受定位导航设备、障碍识别传感器、计算控制处理器等关键部件性能的限制,同一时期的自主车辆虽然在一定程度上实现了自主行驶,但行驶速度低,环境适应能力弱。这些平台主要用于执行扫雷、排爆、侦察等任务。自 20 世纪 90 年代以来,由于在计算机、人工智能、机器人控制等技术方面的突破,半自主型地面无人驾驶车辆得到了进一步发展。部分地面无人驾驶车辆参与了实战,检验了地面无人驾驶车辆的作战能力,使各国看到了地面无人驾驶车辆的前景,大大激发了各国研发地面无人驾驶车辆的热情,掀起了研究高潮。

下面以美国未来作战系统(Future Combat Systems, FCS)以及 FCS 计划中发展的多用途通用/后勤装备(Multifunctional Utility/Logistics and Equipment, MULE)车辆和美国国防部智能侦察车 DEMO III 系列演示平台为例进行介绍。

1) 美国未来作战系统

美国未来作战系统是一个高度信息化的陆军综合作战系统,是一种按网络中心战理念设计,由多种系统集成的高度信息化的武器系统。美国国防部于 1997 年 5 月首次提出了军队转型的概念。美国陆军的转型计划是美国军队转型的有机组成部分。它的最终目标是在 2030 年前后,将陆军逐步改造为一支全新的,能在各种军事行动中取得主导地位的,信息时代的战略反应部队——未来部队,而未来部队的核心装备就是 FCS。

FCS 中最主要的地面无人作战平台为武装机器人车(Armed Robotic Vehicle, ARV)。美国专门设立了挂靠在卡内基·梅隆大学(Carnegie Mellon Uni-

versity, CMU) 机器人研究所的国家机器人工程研究中心, 由它成立专门团队开发 ARV 的轮式机动平台样机, 并攻关 ARV 的自主控制技术, 包括越野环境感知技术与自主导航系统, 先后成功开发了 3 代轮式 ARV 样机: Spinner、Crusher 和 APD。

自 2009 年 4 月以来, FCS 项目作为一个整体被取消, 但该项目中一些技术的研发还在继续, 其中包括无人驾驶车辆。

2) 多用途通用/后勤装备 (MULE) 车辆

MULE 是一种集运输、补给、监视、侦察和作战等多种功能于一体的“自动化步兵支援系统”。MULE 车辆长 4.57 m, 宽 1.83 m。其基本功能是替士兵运送各类军用设备。MULE 还有多种其他功能, 包括净化水源、为单兵作战系统充电、无线下载最新作战数据等。其前部装有热像仪和生化武器监测传感器等先进设备, 车内通信系统可与前线的无人机系统实现联网, 共享信息, 为作战小分队提供战场 360°全视景图像等。

整套 MULE 系统以“共用机动平台”(Common Mobility Platform, CMP) 为核心。该平台重约 2.5 t, 采用柴/电混合动力驱动系统, 每侧各有 3 个车轮, 每个车轮的轮毂内均装有独立的伺服电机来驱动车轮。这些设计赋予了 MULE 出色的越野机动性。另外, CMP 还配有中央轮胎充放气系统, 以适应地形或在轮胎中弹时调整胎压。按照模块化的设计思想, CMP 搭配模块化的“任务装备套件”, 可以执行各种不同的任务。

3) DEMO 计划

1992 年 DARPA 及 JRP (John Robert Powers) 整合了之前取得的机器人技术成果, 资助了 DEMO I 计划, 研究高速遥控及简单的“学习”功能等技术, 如自动返回能力。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。它采用立体视觉探测障碍物。

DEMO III 项目用来解决在 DEMO II 项目试验当中出现的操控局限性问题。它主要研究感知、智能控制及人机接口技术, 以便使车辆以 32 km/h 的速度自主越野行驶。计划包括 3 个部分: ①技术开发; ②技术集成; ③建模、仿真和试验。该计划在规划、研究、开发及评估等各个阶段, 特别强调用户的参与, 以保证所提供的技术能够满足未来的军事需求。

1999 年在阿伯丁靶场进行了 DEMO III A 试验。试验采用了通用动力机器人系统公司的两辆试验性无人驾驶车辆 (eXperimental Unmanned Vehicle, XUV)。陆军研究实验室还进行了 XUV 侦察车与无人机及微型无人机的协同作战试验。试验的目的是要评价无人机对提高部队杀伤力及生存能力的作用, 弄

清无人驾驶车辆的侦察盲区,以及需要使用多少架次微型无人机及其成功率是多少。2000年10月进行了 DEMO III B 的自主机动性鉴定试验,白天车辆在有植被的崎岖地形上越野行驶的速度达到 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。

1.2 无人驾驶汽车的产生

实现无人驾驶是人类一直以来的梦想。在军事应用需求的推动下,无人驾驶车辆技术得到了不断发展和完善。在这方面,美、德、意等国走在世界前列。在2000年之前,以美国卡内基·梅隆大学研制的 NavLab 系列和意大利的 ARGO 项目最具代表性,德国的 VaMoRs - P 系统也涉及了很多无人驾驶车辆技术。下面分别介绍这些无人驾驶车辆项目,并简单说明同一时期我国无人驾驶车辆研究工作。

1) NavLab 系列

美国卡内基·梅隆大学机器人研究所研制了 NavLab 系列智能车辆。其典型代表有 NavLab - 1 系统、NavLab - 5 系统和 NavLab - 11 系统。

(1) NavLab - 1 系统。NavLab - 1 系统于 20 世纪 80 年代建成。其计算机系统由 Warp、Sun3 和 Sun4 组成,用于完成图像处理、图像理解、传感器信息融合、路径规划和车体控制;采用的传感器主要包括彩色摄像机、ERIM 激光雷达、超声、陀螺、光码盘、GPS 等。NavLab - 1 系统在典型结构化道路情况下运行速度为 28 km/h,而使用神经网络控制器 ALVINN 控制车体的最高速度可达 88 km/h。

(2) NavLab - 5 系统。NavLab - 5 系统于 1995 年建成。卡内基·梅隆大学与 Assist - Ware 技术公司合作,在 NavLab - 5 上开发了便携式高级导航支撑平台 (Portable Advanced Navigation Support, PANS),以及快速自适应车体定位处理器——RALPH 视觉系统。PANS 平台为系统提供计算基础和 I/O 功能,并能控制转向执行机构并进行安全报警。该平台的计算机系统包括一台 Sparc Lx 便携式工作站。该工作站能完成传感器信息处理与融合,以及全局与局部路径规划任务。

NavLab - 5 在实验场环境道路上自动驾驶的平均速度为 88.5 km/h。公路实验时首次进行了横穿美国大陆的长途自动驾驶实验。其自动驾驶行程为 4 496 km,占总行程的 98.1%。车辆的纵向导航控制由驾驶员完成,而车辆的横向控制完全实现自动控制。尽管所行驶的道路绝大部分为高速公路,但仍有

一部分路况复杂的市区公路以及路面条件较差的普通道路，同时还包括清晨、夜晚和暴雨等恶劣气候条件。

(3) NavLab - 11 系统。NavLab - 11 系统是 NavLab 系列最新的平台。其车体采用 Wrangler 吉普车。安装在车身上的传感器包括差分 GPS、陀螺仪和光电码盘、激光雷达、摄像机等。其中，差分 GPS 系统用的设备是 Trimble Ag-GPS 114，采用广域增强系统，可以实现实时亚米级精度；陀螺仪和光电码盘，采用 Crossbow 的 VG400CA 惯性姿态测量系统，可以在动态环境当中的全姿态测量；激光扫描仪 SICK LMS 221 - 30206，最大检测范围为 50 m，分辨率为 10 mm，最大扫描角为 180°，角分辨率为 0.5°；SONY EVI - 330 彩色摄像机一台。

NavLab - 11 的车上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，包括对象侦测器、路肩侦测器、防撞子单元、控制子单元等。它的最高车速为 102 km/h。

2) ARGO 项目

ARGO 试验车由意大利帕尔玛大学研制。它装有视觉系统，以获得道路环境信息，并有不同的控制设备，以实现车辆无人驾驶功能。它采用通用芯片、商用 MMX Pentium 2 车载计算机系统。其传感器系统也采用普通适用性传感器。该车视觉系统采用商用低成本的 CCD 摄像机，应用立体视觉检测和定位车辆前方的障碍，通过单目图像来获取车辆前方道路的几何参数，通过 I/O 板来获得车辆的速度及其他数据。车道检测算法是从单目灰度图像中提取出道路特征，采用直线道路模型进行匹配。

在 1998 年意大利汽车百年行活动中，ARGO 试验车由通用障碍和车道检测 (Generic Obstacle and Lane Detection, GOLD) 系统驾驶，沿着意大利的高速公路网进行了 2 000 km 的道路试验。在试验中 ARGO 试验车行驶的道路既有平坦区域，也有高架桥和隧道丘陵区域。ARGO 的无人驾驶里程达到总里程的 94%。在试验中，ARGO 试验车的最高车速为 112 km/h。

3) VaMoRs - P 系统

在无人驾驶自主导航的研究上，德国联邦国防大学研制的 VaMoRs - P 系统也具有一定的代表性。VaMoRs - P 的计算机系统由并行处理单元和两台 PC - 486 组成。传感器系统包括由 4 个小型彩色 CCD 摄像机构成的两组双目视觉系统、3 个惯性线性加速度计和角度变化传感器、测速表及发动机状态测量仪等。除传感器系统外，底层执行器还包括用于驾驶控制的力矩电机、电子油门、液压制动器等设备。

VaMoRs - P 系统在高速公路和普通标准公路上进行了大量实验。实验内

容包括跟踪车道线、躲避障碍以及自动超车等。车辆前进速度由驾驶员根据交通信号、环境条件和目标进行选择。该系统 1995 年公布的最高时速为 130 km/h。

4) ATB 系列

由我国有关部委“八五”和“九五”计划支持的“军用地面机器人” Autonomous Test Bed (ATB) 系列 (如图 1-1 所示), 代表了同一时期 (20 世纪 90 年代) 国内无人驾驶车辆技术研究领域的先进水平。

在“八五”期间, 由南京理工大学、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的 ATB-1 无人驾驶车辆 (如图 1-1 (a) 所示), 其车体选用国产跃进车, 车上集成了二维彩色摄像机、陀螺、超声波雷达等传感器。计算机系统采用两台 Sun Spark 10 完成信息融合、黑板调度、全局和局部路径规划。两台 PC486 负责路边信息的提取识别和激光信息处理。8098 单片机负责定位计算和车辆自动操控驾驶系统。其体系结构以水平式结构为主, 采用传统的“感知-建模-规划-执行”算法流程。实际演示表明, 该车能在结构化及非结构化的野外道路上自主行驶、跟踪道路、避障、越野及岔路转弯。在直路上自主行驶的最高速度达 21.6 km/h, 弯路速度也可达 12 km/h。

“九五”期间, 我国继续组织研究了第二代无人驾驶车辆 ATB-2 系统 (如图 1-1 (b) 所示)。ATB-2 系统的车体改装自德国奔驰 Sprinter414 厢式货车, 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。实验结果表明, 该车在结构化道路中最高行驶速度为 74 km/h, 平均速度为 30.6 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。



图 1-1 ATB-1 系统和 ATB-2 系统

1.3 无人驾驶汽车成为现实

为了激发相关技术的研究热情,推动无人驾驶汽车相关技术的发展,国内外都举办过无人驾驶汽车相关比赛,其中最有代表性的当属美国 DARPA 无人驾驶车辆挑战赛和中国智能车未来挑战赛。下面简要介绍美国 DARPA 比赛和中国智能车未来挑战赛的发展历程。这些比赛的一个共同点是:车辆在自主行驶时,不允许任何人员乘坐在车内。从一定意义上说,它们实现了真正的无人驾驶。

1) 美国 DARPA 比赛情况

2004—2007 年美国共举办了 3 届 DARPA 无人驾驶挑战赛。2012—2013 年美国举办了两届机器人挑战赛。参赛队伍汇聚了包括高校、企业和其他组织的研究人员,涉及技术涵盖了人工智能、计算机技术、汽车设计等方面。每一届比赛的顺利进行对无人驾驶车辆技术的发展都起到了极大的推动作用。

(1) 2004 年 DARPA 挑战赛。第 1 届 DARPA 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。

第 1 届赛事共有 21 支参赛车队在加利福尼亚的高速公路上进行了一英里^①长路程的自主导航与障碍测试的资格赛,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。

第 1 届比赛结果显示,比赛中一些无人驾驶车辆能够准确进行 GPS 导航,但未能成功感知前方障碍物;而一些车辆则能很好地感知障碍物,但在 GPS 导航方面有较多困难。它们或在行进途中受到自身干扰,或检测到虚假障碍物。第 1 届参赛车辆配备的感知系统都庞大而且昂贵,整车系统不够稳定,没有一支队伍能够完成比赛;但它是首次实现车辆在无人状态下的避障驾驶,极大地激发了人们对于无人驾驶汽车以及无人驾驶技术的兴趣,提高了人们在无人驾驶领域的创新意识,具有里程碑的意义。

(2) 2005 年 DARPA 挑战赛。第 2 届 DARPA 挑战赛共有 195 支队伍申报。其中,43 支车队通过审核进入了资格赛。资格赛按所用时间、通过项目数、绕障碍物表现,以及比赛完成程度 4 个方面来进行排名,其中 23 支队伍进入了决赛。在决赛中,有 5 支队伍(Stanley, CMU's Sandstorm, Highlander,

^① 1 英里 \approx 1.609 千米。

Gray Team's Kat-5 和 Oshkosh Truck's Terramax) 通过了全部考核项目。

组委会在比赛前 2 个小时发放路网文件。路网文件中包括平均每间隔 72 m 的一个 GPS 点, 根据路况复杂程度会调整 GPS 点的密集程度。第 2 届 DARPA 挑战赛越野环境道路比较恶劣, 如图 1-2 所示。

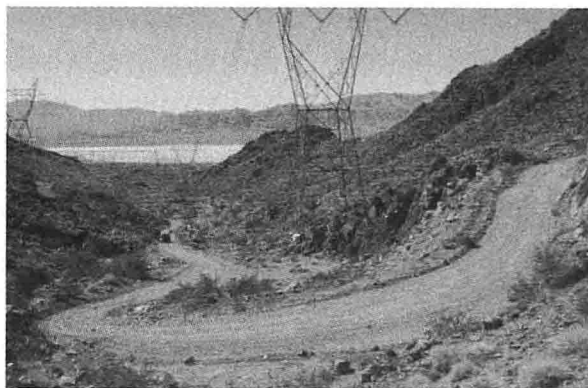


图 1-2 2005 年的比赛环境

第 2 届参赛车辆依然装备了大量的传感器, 但已经有车队采用线控技术来控制参赛车辆。这相对于第 1 届比赛来说是一个很大的提高。另外, 参赛车辆的功能也得到了完善, 并且在稳定性上也有了相对的提高。比赛中比较有代表性的队伍是来自斯坦福大学的 Stanley 以及来自卡内基·梅隆大学的 Sandstorm 和 Highlander。其中, Stanley 以平均速度 30.7 km/h, 总时长 6 h 53 min 8 s 夺得了冠军; 卡内基·梅隆大学的 Sandstorm 和 Highlander 紧随其后, 平均速度分别为 29.9 km/h 和 29.3 km/h。Stanley 由大众途锐 R5 改装而成, 装备了各种感知环境和自身定位传感器。Sandstorm 是在第 1 届比赛用车基础上改装而成, 车上装备了 1 个长距离激光雷达、5 个短距离激光雷达、1 个 360°雷达、1 个彩色摄像机和 1 个 GPS/INS 设备, 并且在参赛之前经过了超过 5 000 km 的测试。测试环境包括松软的沙地和高速路面。卡内基·梅隆大学在往届平台上进一步改装, 使得技术能够被很好地传承, 比赛前的大量测试, 保证了车辆在比赛中具有较好的稳定性。

第 2 届 DARPA 挑战赛是无人驾驶汽车雏形基本形成、无人驾驶汽车功能基本完成的阶段。虽然车辆所用的传感器数量比较多, 价格也都比较昂贵, 但这也正是研究无人驾驶的必经阶段。从功能实现到降低成本需要一个过程。5 辆无人驾驶汽车能够完成比赛任务, 说明了无人驾驶成为现实的可行性。

(3) 2007 年 DARPA 挑战赛。2007 年 11 月, DARPA 城市挑战赛在加利福尼亚州一个已关闭的空军基地举行。资格赛分为 3 个独立的测试区域: 测试 A 区域要求车辆能够安全地并入复杂的双向交通道路, 测试 B 区域要求车辆通