

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材
普通高等教育“十三五”汽车类规划教材



自动驾驶概论

Fundamentals of Autonomous Driving

陈刚 殷国栋 王良模 © 编著



本书是“十三五”国家重点出版物出版规划项目。

本书比较全面、系统地介绍了近几年出现的自动驾驶技术。全书共6章,主要包括绪论、自动驾驶车辆组成模块、自动驾驶车辆控制系统、无人驾驶机器人车辆、自动驾驶车辆智能水平定量评价、自动驾驶车辆的机遇与挑战。内容除了涵盖经典自动驾驶技术外,还包括车辆驾驶行为、车辆行驶姿态与行驶车速感知、车轮与路面之间摩擦因数估计、车速与转向控制、视野扩展系统、无人驾驶机器人控制系统、无人驾驶机器人车辆控制系统、自动驾驶评价模型及智能水平等级划分、自动驾驶车辆评价指标、智能水平定量评价、车联网与智能交通系统等自动驾驶新技术。

本书既可作为车辆工程、交通工程、机器人工程、装甲车辆工程、机械电子工程、机械设计制造及其自动化等专业的教材,也可作为从事相关专业的工程技术人员的参考书。

本书配有PPT课件,采用本书作为教材的教师,可以登录 www.cmpedu.com 注册下载,或向编辑 (tian.lee9913@163.com) 索取。

图书在版编目(CIP)数据

自动驾驶概论/陈刚,殷国栋,王良模编著.—北京:机械工业出版社,2019.3

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程专业系列精品教材 普通高等教育“十三五”汽车类规划教材
ISBN 978-7-111-62108-9

I. ①自… II. ①陈… ②殷… ③王… III. ①汽车驾驶—自动驾驶系统—高等学校—教材 IV. ①U463.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第035743号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:宋学敏 责任编辑:宋学敏 朱琳琳

责任校对:潘蕊 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.25印张·347千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62108-9

定价:39.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

随着互联网技术的飞速发展，人工智能进入公众视野，现阶段已经应用在多个领域，汽车智能化——自动驾驶技术也随之悄然兴起。作为未来汽车行业发展方向的汽车自动驾驶技术的出现，改变了社会传统出行的方式，使人类从烦琐枯燥的驾驶中解脱出来，不仅可以显著提高城市交通的效率，而且能够有效减少甚至避免交通事故的发生。

自动驾驶技术的初步探索研究始于20世纪中叶，美、日、欧等发达国家和地区通过进行多种试验和竞赛的方式，有效促进了自动驾驶技术的进步。近十余年自动驾驶呈现井喷式发展，根据国际汽车工程师协会发布的针对自动驾驶技术的分级标准J3016，国内外大量研发机构设计出了不同智能化等级的自动驾驶汽车，其中具有代表性的有谷歌的无人驾驶汽车、通用汽车公司的EN-V系列电动联网智能汽车、德国慕尼黑联邦国防军大学的VAMT和VITA智能汽车、欧盟CyberCars/CyberMove智能汽车、中国百度智能汽车等。为了普及自动驾驶技术，培养智能制造领域的创新人才，助力智能制造创新发展，组织了本书的编写。

本书反映了近年出现的一些汽车行业的新知识、新技术、新成果，如车辆驾驶行为、车辆行驶姿态与行驶车速感知、无人驾驶机器人车辆、自动驾驶车辆评价模型、自动驾驶车辆评价指标、智能驾驶水平定量评价、车联网及智能交通系统、车联网技术及其发展、国内外自动驾驶车辆上路行驶相关法案。在内容上与已经出版的同类图书具有一定的互补性，本书具有重要的出版价值。

本书是国家自然科学基金项目（编号：51675281）、江苏省六大人才高峰计划项目（编号：2015-JXQC-003）、中央高校基本科研业务费专项资金项目（编号：30918011101）的研究成果。

本书由南京理工大学陈刚、东南大学殷国栋、南京理工大学王良模编著。分工如下：陈刚编写第2章、第4章、第5章；殷国栋编写第1章和第6章；王良模编写第3章。

由于编著者的水平有限，书中疏漏之处在所难免，欢迎广大读者指正。

编 者

目 录

前 言

第1章 绪论 1

- 1.1 自动驾驶技术的产生 1
- 1.2 自动驾驶汽车的研究状况 4
 - 1.2.1 国外自动驾驶汽车的研究状况 4
 - 1.2.2 国内自动驾驶技术的状况 7
- 1.3 自动驾驶汽车的发展目标与重点 11
- 1.4 本章小结 13

第2章 自动驾驶车辆组成模块 14

- 2.1 自然环境感知模块 14
 - 2.1.1 道路信息感知 14
 - 2.1.2 环境信息感知 22
 - 2.1.3 其他信息感知 27
- 2.2 智能行为决策模块 33
 - 2.2.1 车辆驾驶行为 33
 - 2.2.2 全局路径规划 36
 - 2.2.3 局部路径规划 43
- 2.3 车辆自身状态采集模块 51
 - 2.3.1 车辆行驶姿态与行驶车速感知 51
 - 2.3.2 车轮与路面之间摩擦因数估计 65
- 2.4 车辆控制模块 68
 - 2.4.1 起停控制 68
 - 2.4.2 车速与转向控制 69
 - 2.4.3 车身控制 76
 - 2.4.4 安全保障控制 77
- 2.5 本章小结 80

第3章 自动驾驶车辆控制系统 81

- 3.1 安全预警技术 81
 - 3.1.1 定速巡航控制系统 81
 - 3.1.2 自适应巡航控制系统 88
 - 3.1.3 车辆智能避撞预警技术 91
- 3.2 车辆防撞系统 93
 - 3.2.1 防追尾碰撞系统 94

- 3.2.2 倒车防撞系统 97

3.3 车道保持系统 102

- 3.3.1 车道保持系统的功能 102
- 3.3.2 车道保持系统的组成 102
- 3.3.3 车道保持系统的原理 104

3.4 视野扩展系统 106

- 3.4.1 视野系统原理 106
- 3.4.2 车辆驾驶盲区 107
- 3.4.3 视野扩展方法 109

3.5 紧急报警系统 114

- 3.5.1 车载紧急报警系统 114
- 3.5.2 系统总体设计 115
- 3.5.3 定位技术 115
- 3.5.4 系统接收终端 116

3.6 车载导航系统 116

- 3.6.1 车载导航系统的功能 116
- 3.6.2 车载导航系统的分类 117
- 3.6.3 车载导航系统的特点与组成 118
- 3.6.4 内部信息导航系统 119
- 3.6.5 无线电导航系统 123

3.7 本章小结 132

第4章 无人驾驶机器人车辆 134

4.1 无人驾驶机器人车辆简介 134

4.2 无人驾驶机器人的总体结构 137

- 4.2.1 换挡机械手结构 138
- 4.2.2 加速/制动/离合机械腿结构 139
- 4.2.3 转向机械手结构 140

4.3 无人驾驶机器人控制系统 141

- 4.3.1 示教再现系统 142
- 4.3.2 电磁直驱控制系统 143
- 4.3.3 多机械手协调控制系统 146

4.4 无人驾驶机器人车辆控制系统 151

- 4.4.1 无人驾驶机器人车辆路径控制 152
- 4.4.2 无人驾驶机器人车辆速度控制 154



4.4.3 无人驾驶机器人车辆路径及速度解耦控制	156	5.3.1 成本函数法	198
4.4.4 无人驾驶机器人车辆转向控制	164	5.3.2 模糊综合评价法	204
4.4.5 无人驾驶机器人车辆多模态切换控制	172	5.4 本章小结	211
4.5 本章小结	180	第6章 自动驾驶车辆的机遇与挑战	212
第5章 自动驾驶车辆智能水平定量评价	181	6.1 车联网及智能交通系统	212
5.1 评价模型及智能水平等级划分	181	6.1.1 车联网技术及其发展	212
5.1.1 自动驾驶车辆评价模型	181	6.1.2 智能交通系统概述	215
5.1.2 国外自动驾驶车辆智能水平划分	182	6.2 自动驾驶车辆上路驾驶伦理与法律	222
5.1.3 国内自动驾驶车辆智能水平划分	184	6.2.1 伦理规范方面	222
5.2 自动驾驶车辆评价指标	190	6.2.2 法律法规方面	225
5.2.1 评价指标选取	191	6.3 各国自动驾驶车辆上路行驶相关法案	228
5.2.2 评价指标筛选	193	6.3.1 国外自动驾驶车辆上路行驶相关法案	229
5.2.3 评价指标权重的确定	193	6.3.2 国内自动驾驶车辆上路行驶相关法案	232
5.3 智能水平定量评价	198	6.4 本章小结	234
		参考文献	235

1.1 自动驾驶技术的产生

1.1.1 与相对自动驾驶技术的萌芽

在汽车发明之经过了大约 40 年,人们就开始对自动驾驶这项技术进行探索,最早在 20 世纪 20 年代,美国通用汽车公司 Buick Roadster Queen 就在纽约市上演了一场“魔术表演”,一辆由驾驶员手动打开过离合器的街道,它可以自行启动发动机,换挡并转向,在当时引起了不小的轰动,它就是历史上第一辆有据可查的自动驾驶汽车“American Wonder”(见图 1-1)。其实它只是一辆无线电遥控车辆,在它自动行驶的时候,驾驶员就坐在后面一辆车里,用无线电设备控制它的行动。

到了 1939 年,美国通用汽车公司在纽约世博会上展示了名为“Futurama”的交通模型(见图 1-2),他们设想了未来的高速公路和自动驾驶技术:将建于电路输入高速公路中,利用电路电磁场来给车辆提供能量,并通过无线电来控制运动,当车辆驶入高速公路后,就进入自动驾驶模式,根据“定制车道”来行驶。

经过研究人员的实验,美国 RCA 实验室于 1931 年研发出一种基于“自动公路”的微型车辆,它是依靠设置在车道里的电线来操纵车辆的运动的。在 1938 年, RCA 实验室通过与加利福尼亚州以及通用汽车公司合作,成功实现了在 40 英里(约 64.37km)长道路上的买车试驾。通用汽车公司还在这期间推出了 Firebird 系列自动驾驶汽车(见图 1-3),车上载有“电子导航系统”,它通过电子脉冲与地下的电缆之间进行通信,从而实现了车辆的自动控制。

第1章

绪 论

自从 1886 年世界上第一辆汽车诞生以来, 经过 100 多年的迅速发展, 汽车已成为人们日常生活中必不可少的交通工具之一。随着近年来科学技术的进步, 汽车正朝着全球化、节能化、环保化、电子化、智能化的方向迈进, 其中最具有代表性的就是自动驾驶技术的产生。

人们对自动驾驶的探索由来已久, 但是直到最近几年才出现在人们的视野中, 并且逐渐成为各大社交媒体的报道热点。根据我国最新发布的《智能网联汽车道路测试管理规范(试行)》给出的定义, 智能网联汽车、智能汽车、自动驾驶汽车等是同一概念, 具体是指搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置, 并融合现代通信与网络技术, 实现车与 X(人、车、路、云端等) 智能信息交换、共享, 具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能, 可实现安全、高效、舒适、节能行驶, 并最终可实现替代人来操作的新一代汽车。可以看出, 自动驾驶已经不仅仅局限于汽车这一产品, 它融合了众多新技术于一身, 包括计算芯片、传感器、软件、汽车零部件、出行服务等一整条产业链。

1.1 自动驾驶技术的产生

1. 早期对自动驾驶技术的探索

在汽车发明之后过了大约 40 年, 人们就开始对自动驾驶这项技术进行探索, 最早在 20 世纪 20 年代, 美国无线电设备公司 Houdina Radio Control 就在纽约市上演了一场“魔术表演”, 一辆没有驾驶人的车辆开过繁华的街道, 它可以自行起发动机、换挡并转向, 在当时引起了不小的轰动, 这就是历史上第一辆有据可查的自动驾驶汽车“American Wonder”(见图 1-1)。其实它只能算是一辆无线电遥控车辆, 在它自动行驶的时候, 驾驶人就坐在后面一辆车里, 用无线电设备控制它的行动。

到了 1939 年, 美国通用汽车公司在纽约世博会上展示了名为“Futurama”的交通模型(见图 1-2), 他们设想了未来的高速公路和自动驾驶技术: 将电子电路嵌入高速公路中, 利用电路电磁场来给车辆提供能量, 并通过无线电来控制运动, 当车辆驶入高速公路后, 就进入自动驾驶模式, 根据“定制车道”来行驶。

经过研究人员的实验, 美国 RCA 实验室于 1953 年研发出一种基于“自动公路”的微型车辆, 它是根据设置在道路里的电线来操纵车辆的运动的。在 1958 年, RCA 实验室通过与内布拉斯加州以及通用汽车公司合作, 成功实现了在 400ft (1ft=0.305m) 长道路上的实车试验。通用汽车公司还在这期间推出了 Firebirds 系列自动驾驶汽车(见图 1-3), 车上载有“电子导航系统”, 它通过电子脉冲与地下的电缆之间进行通信, 从而实现了车辆的自动控制。

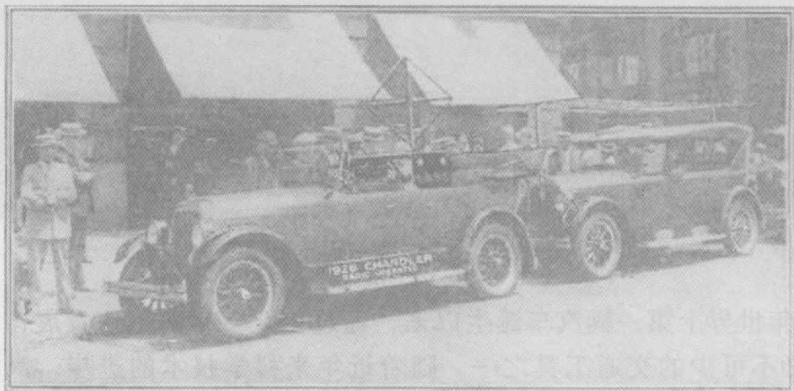


图 1-1 第一辆自动驾驶汽车“American Wonder”

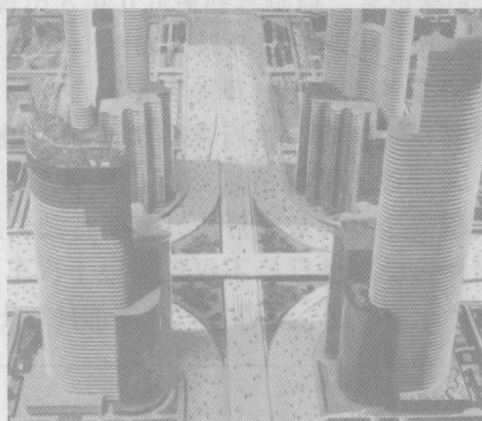


图 1-2 “Futurama” 交通模型

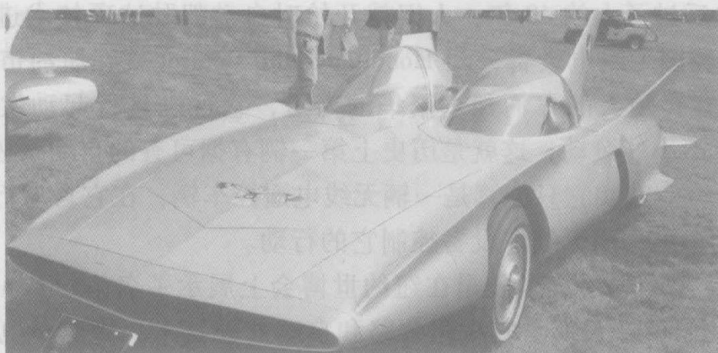


图 1-3 通用汽车公司的 Firebird III 自动驾驶汽车

1960年，美国俄亥俄州立大学通信与控制实验室开始了对无人驾驶项目的研究，同样提出利用内嵌在道路上的电子设备进行控制和引导。该项目的负责人 Cosgriff 博士预测他们的自动驾驶系统可以在 20 世纪 80 年代初得到完善并投入使用。

在 20 世纪 60~70 年代，很多企业公司、科研机构都对这项技术投入了研究。英国 TRL 实验室研发的自动驾驶汽车“雪铁龙 DS”，在任何天气条件下以 80mile/h (1mile =



1609m) 的速度进行测试时, 它的速度和方向都不会偏离, 这远比人类驾驶更加有效和安全; Bendix 公司还通过道路两侧的通信器来传递计算机的控制指令。

但是到了 20 世纪 70 年代中期, 由于对道路修建、改造的要求较高, 添置电子设备、铺设电缆的成本和难度也都不低, 这些项目的研究资金被撤出, 人们逐渐将研究的热情转移到了其他方向, 这种技术逐渐在人们的视野中消失了。

2. 现代自动驾驶技术的产生

20 世纪 70 年代中期, 人们陆续开始对智能逻辑算法进行研究。1977 年, 第一个使用摄像头来感知前方道路环境的自动驾驶汽车在日本筑波工程实验室研发成功, 车上搭载了两个摄像头用于环境感知, 检测道路上的交通标记, 再通过视觉算法来控制车辆行动, 而不再需要埋在道路下的电子设备的支持, 这代表着自动驾驶技术的研究进入了全新的篇章。

现代自动驾驶技术产生于 20 世纪 70~80 年代。

这一时期, 德国的慕尼黑联邦国防军大学研发了一辆由视觉引导驾驶的奔驰汽车 (见图 1-4), 它以 39mile/h 的速度在没有交通的道路上完成了测试。

同时, 美国国防部高级研究计划局开始 ALV 计划, 与美国多所大学和科研机构共同研究, 集成了激光雷达、计算机视觉和自动机器人技术, 研发出了时速 19mile 的自动驾驶汽车 (见图 1-5), 首次在车上搭载了便携式计算机; 1987 年, 美国 HRL 实验室使用越野地图结合传感器让汽车实现自主导航, 在各种复杂的地形上以 1.9mile/h 的速度驶过了 2000ft。



图 1-4 视觉引导驾驶的奔驰汽车



图 1-5 美国 ALV 计划发明的自动驾驶汽车

最具代表性的是 20 世纪 80 年代末, 由美国卡内基梅隆大学研制的 Navlab 系统, 搭载于一辆雪佛兰厢式货车上 (见图 1-6)。他们率先采用了神经网络算法来控制 and 引导车辆, 在车上安装了若干摄像头、激光测距仪、激光雷达、陀螺仪等设施, 具备惯性导航系统和卫星定位系统, 车厢内部是计算机房, 整个计算系统由 Wrap 超级计算机和 Sun3/Sun4 工作站组成, 还采用了 Intel 80386 实时处理



图 1-6 卡内基梅隆大学研发的自动驾驶汽车



器来处理传感器信息和发出控制指令。受到当时计算机软硬件条件的限制，时速大约只有 20mile，但是它为现代自动驾驶技术奠定了基础。

至此，自动驾驶技术的雏形已经基本形成。进入 20 世纪 90 年代后，它的发展速度越来越快，国内外投入研究的学者越来越多，各种新的技术层出不穷，自动驾驶技术的研究进入了一个新的阶段。

1.2 自动驾驶汽车的研究状况

1.2.1 国外自动驾驶汽车的研究状况

1. 发达国家的相关政策

国外对自动驾驶技术的研究最早可以追溯到 20 世纪 60 年代，主要集中在美国、欧洲、日本等少数发达国家。

为了促进自动驾驶技术的发展，美国国防部高级研究计划局从 2004 到 2007 年共举办了三届 DARPA 无人驾驶挑战赛，吸引了包括卡内基梅隆大学、斯坦福大学、弗吉尼亚大学在内的多个研究团队参赛，并引起了广泛关注。2011 年，美国内华达州立法委员会通过了第一部允许测试无人驾驶汽车的法案，并于 2012 年 5 月该州的机动车辆管理局 (DMV) 向谷歌发出首张无人驾驶许可证，允许其上路测试。2015 年 7 月美国密歇根大学 M-City 正式开放，这是世界上首个测试自动驾驶汽车的封闭测试场，由该校移动交通研究中心负责建设运营。2016 年 11 月，美国交通部公布“自动驾驶试验场试点计划”，并于 2017 年 1 月 19 日确立了 10 家自动驾驶试点试验场。这一系列的举措表明了美国政府对自动驾驶领域研究的大力支持。

从 2015 年开始，英国政府开始陆续出台自动驾驶的相关政策，尽力为智能车辆的发展提供宽松的环境。2015 年 2 月，英国政府发布了无人驾驶汽车上路测试的官方许可。四个获批的测试城市分别为布里斯托、米尔顿·凯恩斯、考文垂和格林尼治。2016 年 1 月，英国交通部宣布，准许自动驾驶汽车在伦敦街头上路测试，并将在 2017 年允许无人驾驶汽车在高速公路与重要道路上进行测试。2017 年 8 月 6 日，为了确保将网络安全纳入智能车辆的设计、开发及制造过程的考虑范围中，英国运输部与英国国家基础设施保护中心 (CPNI) 共同制定了一套新的网络安全原则，全称为《联网和自动驾驶汽车网络安全关键原则》。虽然相较于美国，英国在自动驾驶领域起步较晚，但投入的资金却不少。早在 2014 年，英国政府就建立了专项基金，要投资 2 亿英镑（约合 18 亿元人民币）来推行英国自动驾驶相关的研究、开发、演示与部署等工作。2018 年 2 月，英国政府宣布，投资 2240 万英镑（约合 2 亿元人民币）在 22 个新互联和自动驾驶汽车 (CAV) 研发项目上。此外，英国政府还在 2017 年推出道路测试项目，耗资 1.5 亿英镑（约合 13 亿元人民币）在道路上测试雷达及无线信息技术，同时测试和研发自动驾驶汽车。

日本政府及汽车制造商在自动驾驶技术方面一直保持谨慎的态度。随着东京奥运会的申办成功，日本政府在“日本再兴战略 2016”中提出，要在 2020 年东京奥运会之前实现无人驾驶交通服务，为此日本政府计划开始在公共道路上测试自动驾驶系统。2016 年 2



月12日,日本经济产业省制造产业局汽车课正式公布“无人驾驶评价据点整備项目”并征集承接单位,最终该项目落户筑波市茨城县的日本机动车研究所(JARI),并于2016年开始建设。

2017年5月,德国议会两院通过了一项由运输部提出的法案,修改现行的道路交通法规,允许高度或全自动驾驶系统代替人类自主驾驶,给予其和驾驶人同等的法律地位。积极拥抱自动驾驶是德国汽车工业保持领先的重要举措。

在各国政府的大力支持下,国外众多研究机构、传统车企、互联网企业纷纷投入到自动驾驶的研究中来,为自动驾驶的实现与普及做出了重要贡献。

2. 各发达国家的研究状况

美国卡内基梅隆大学从1987年左右开始研究自动驾驶技术,其研制的NavLab系统代表了世界自动驾驶的发展方向。其中,NavLab-1系统是于1986年基于雪佛兰的一款厢式货车改装而成的,装有Sun3、GPS、Warp等计算机硬件,但由于软件的局限性,直到20世纪80年代末,它的最高速度也只有32km/h。NavLab-5系统(见图1-7)是1995



图1-7 卡耐基梅隆大学 NavLab-5 智能驾驶汽车

年建成的,卡内基梅隆大学与 Assist-Ware 技术公司合作开发研制的便携性高级导航支撑平台 PANS 为系统提供计算基础和 I/O 功能,并能控制转向执行机构,同时进行安全报警。它使用了一台便携式工作站 Spare Lx,能够完成传感器信息的处理与融合、路径的全局与局部规划。NavLab-5 以 Pontiac 运动跑车作为基础,在试验场环境道路上的自主行驶平均速度达到 88.5km/h,首次进行了横穿美国大陆的长途自动驾驶公路试验,自主行驶里程为 4496km,占总行程的 98.1%。车辆的横向控制实现了完全自动控制,而纵向导航控制仍由驾驶人完成。NavLab-11 系统是该系列最新的智能汽车平台,车体采用了 Wrangler 吉普车,最高车速达到 102km/h。装备的传感器包括差分 GPS、激光雷达、摄像机、陀螺仪和光电码盘等。

意大利帕尔玛大学 VisLab 实验室一直致力于 ARGO (见图1-8) 项目的研究,利用计算机视觉完成车道标线识别,控制车辆行驶。于1998年沿着意大利的高速公路网进行了2000km的长距离道路试验,整个试验途经平原和山区,也包括高架桥和隧道,试验车的无人驾驶里程为总里程的94%左右,最高车速达到了112km/h。2010年,ARGO 试验车装载了5个激光雷达、7个摄像机、GPS 全球



图1-8 ARGO 智能驾驶汽车

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,同时将太阳能作为辅助动力源,沿着马可·波罗的旅行路线,全程自动驾驶来到中国上海参加世博会,行程15900km,经历了多种极端环境条件。2013年,意大利帕尔玛大学的自主车 BRAiVE,在



帕尔玛城区自主行驶，顺利通过单向双车道等狭窄的城郊道路，其间涉及行人横穿马路、交通灯、人工凸起路面、行人区、急转弯等，同时实现全程无人工干预。

2011年，英国牛津大学研制出的自动驾驶汽车 Wildcat 使用激光雷达和相机监控路面状况、交通状况以及行人和其他障碍物，在崎岖山路上能够实现自主行驶、堵车绕道，如图 1-9 所示。2016年10月，牛津大学公布了 Robot Car（使用日产 LEAF 自动驾驶汽车）自动驾驶数据集，该数据集包含一年内英国牛津市内固定驾驶路线 100 次的重复驾驶数据。该数据集捕捉了许多不同的天气、交通、行人结合出来的路况，也包含建筑道路施工这样的长期变化。



图 1-9 牛津大学自动驾驶汽车 Wildcat

日本丰田公司于 2018 年年初的 CES（电子消费展）上，发布了一款无人驾驶的厢式电动概念车 e-Palette。新车将在 2020 年东京奥运会上试运行，并有望在 2030 年正式向大众推广。2018 年 3 月 3 日丰田公司宣布将与两家供应商爱信精机以及电装公司成立一家新的位于日本东京的合资公司，取名为丰田高级开发研究院，并表示将出资 3000 亿日元（约合 185 亿元人民币）用于研发自动驾驶汽车软件。丰田公司表示 2020 年左右实现可在“汽车专用道路”上的自动驾驶。为建立无人驾驶所需的高精度地图，丰田公司推出了一套“地图自动绘制系统”，该系统可以充分利用汽车本身所搭载的摄像头及 GPS，自动绘制汽车自动驾驶所必需的高精度地图，该项技术有望为将来的自动驾驶汽车提供行驶支持，未来还有望扩充应对“一般道路”及“道路障碍物”等方面的功能。

早在 2013 年，宝马集团就与汽车零部件供应商大陆集团合作开发无人驾驶汽车，主要目的是为 2020 年之后将自动驾驶技术投入应用做准备。2014 年，宝马集团展示了其研发的无人驾驶技术，该技术不仅可以帮助车主在交通拥堵的城市找到便捷畅通的行驶路线，同时又不会剥夺驾驶人对车辆的掌控权。宝马集团将其命名为“UR: BAN research”（城市空间），该技术是以用户为主的网络管理和辅助系统，致力于帮助驾驶人避开路上的行人，通过预测交通信号灯的变化方式使出行更加顺畅、高效。2016 年，宝马集团与英特尔公司以及 Mobileye 公司建立起行业第一个开放式的自动驾驶研发平台。截止到 2017 年下半年，宝马集团在全球共投入了 40 辆自动驾驶测试车辆。2018 年 4 月，宝马集团正式启动自动驾驶研发中心，为最终实现无人驾驶提供技术支持。2018 年 5 月 14 日，上海市智能网联汽车道路测试推进工作小组为宝马集团颁发了上海市智能网联自动驾驶测试牌照。由此，宝马集团成为首家在中国获得自动驾驶路试许可牌照的国际整车制造商。

2016 年 1 月，通用汽车公司宣布成立自动驾驶汽车团队。2016 年和 2017 年，通用汽车公司陆续收购自动驾驶汽车初创公司 Cruise Automation 和激光雷达技术公司 Strobe，在自动驾驶的道路上快速前进。2018 年 1 月 12 日，通用汽车公司官方公布了第四代 Cruise 自动驾驶汽车 Cruise AV。Cruise AV 没有转向盘、加速踏板和制动踏板，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。通用汽车公司不仅开始量产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，并且也向美国国家高速公路交通安全管理局递交了请愿书，以便能够在2019年开始初步实际部署无人驾驶汽车。

2018年新款奥迪A8是全球首款量产搭载L3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个激光雷达和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L3级的自动驾驶，使驾驶人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系统。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。2018年10月推出了基于视觉深度神经网络的Tesla Vision 9.0软件版本，特斯拉创始人Elon Musk说，由此将实现“完全自动驾驶”。

以谷歌公司为代表的IT公司在自动驾驶领域的表现也十分活跃。谷歌公司于2009年开始研发无人驾驶技术。2012年，美国内华达州机动车辆管理部门为其无人驾驶汽车颁发了首例驾驶许可证。2015年，谷歌公司的无人驾驶原型车上路进行测试，该车只配有启动和停止两个物理按钮，通过若干传感器、车载计算机来控制车辆。2016年12月，谷歌公司将无人驾驶业务独立出来，成立了独立公司Waymo。自2017年10月，Waymo已在美国凤凰城Chandler镇100mile²范围内，对600辆克莱斯勒插电式混合动力L4级自动驾驶汽车进行社会公测。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混合动力厢式车用于打造无人驾驶出租车队。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。

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。该车配备了各式传感器，包括毫米波雷达、激光雷达和高分辨率摄像机，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。

综上所述，国外在自动驾驶领域已经进行了较为深入的研究，并且成果显著。各国政府都在陆续制定相关政策为自动驾驶的发展营造良好的环境，企业、研究机构、高校之间形成了良好的合作、竞争关系，这些都将加快国外自动驾驶技术的发展。

1.2.2 国内自动驾驶技术的状况

我国在自动驾驶方面的研究起步稍晚于国外。20世纪90年代初期，由南京理工大学、国防科技大学、清华大学、浙江大学和北京理工大学等高校联合研制成功了我国第一辆自动驾驶汽车ATB-1(Autonomous Test Bed)型。该车集成了彩色相机、陀螺仪、超声波雷达等，信息融合及决策控制采用两台PC协同工作。算法流程采用水平式“感知-建模-规划-执行”结构，该车在校园内自主行驶躲避障碍，最高速度达到21.6km/h。20世纪90年代后期，研制成功了第二代自动驾驶汽车平台ATB-2型，最高速度可达70km/h，车辆还具备临场感遥控驾驶和战场侦察等功能。



在国防科学技术委员会和国家“863”计划的资助下，清华大学于21世纪初开始研发 THMR (Tsinghua Mobile Robot-V) 系列自动驾驶汽车。THMR-V 自动驾驶汽车(见图 1-10) 经过实验研究已经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和道路停障、视觉临场感遥控驾驶等功能。在车道线自动跟踪研究中，清华智能车 THMR-V 课题组提出了基于扩充转移网络(ATN)的道路理解技术和基于混合模糊逻辑的控制方法，攻克了车道线图像处理、横向控制和方向传感器传动机构精密设计等关键技术。

这一阶段自动驾驶汽车更多的是在封闭环境进行测试，单一依赖视觉导航，沿清晰车道线行驶。西安交通大学人工智能与机器人研究所研制的 Springrobot 智能车，着重利用机器视觉感知周边道路环境，利用 DSP 芯片处理图像信息，完成车道线识别、障碍物检测、行人检测等。

2012年11月26日，由陆军军事交通学院改装的“猛狮3号”自动驾驶汽车(见图 1-11)，完成了从北京台湖收费站到天津东丽收费站共 114km 的无人驾驶试验，自主超车 12 次，换道 36 次，总自主驾驶时间 85min，平均速度为 79.06km/h，最高速度为 105km/h，全程无人工干预。



图 1-10 清华大学“THMR-V”自动驾驶汽车



图 1-11 陆军军事交通学院“猛狮3号”自动驾驶汽车

2016年6月初，同济大学在上海国际汽车城无人驾驶汽车测试基地的开业仪式上展示了其协同创新中心研发的自动驾驶电动清扫车。该车在同济大学低速电动车自动驾驶技术、上海司南导航北斗高精度定位技术、上海丁研三元锂电池组与管理技术研究成果的基础上，搭载了可区域示范运行的低速自动驾驶汽车环境感知系统、驱动/制动/转向线控系统及北斗高精度定位系统等自动驾驶控制关键技术。自动驾驶电动清扫车集成了智能决策与控制、环境感知、线控驱动/制动/转向、北斗高精度定位、远程监控、V2I 等技术，具备在区域 ITS 环境下运行的工程化有人/无人双模驾驶清扫车平台。

截至 2017 年，由国家自然科学基金委员会主办的中国智能车未来挑战赛已举办了 9 届赛事。其中比较有代表性的有清华大学“睿龙号”无人驾驶汽车和北京理工大学“RAY”无人车。清华大学无人驾驶汽车“睿龙号”采用 1 个 Velodyne HDL-64E 激光雷达，用来动态实时创建高精地图，4 个车载相机，用来对前方障碍物、车道线和彩色交通标示进行识别，车身周围包含 3 个 IBEO LUX 4 激光雷达和 Delphi 24/77GHz 毫米波雷达，以及惯性导航系统，共同完成车辆周围环境信息的检测。车辆控制部分采用分层递进体系结构，主体包



含智能级、协调级和执行级三层结构，智能级主要用于路径规划，包含全局路径的预规划及全局路径发生变故时路径的重规划。协调级对车辆信息及传感器信息进行融合，将融合后的信息传入智能级进行路径重规划，并对规划结果向执行级发出控制命令。执行级根据上层控制命令，控制车辆完成相应动作。北京理工大学“RAY”无人车系统组成如图 1-12 所示，按功能可将其分为环境感知系统、规划决策系统、底层控制系统、数据采集系统、危险停车系统、数据通信系统以及预留功能系统。

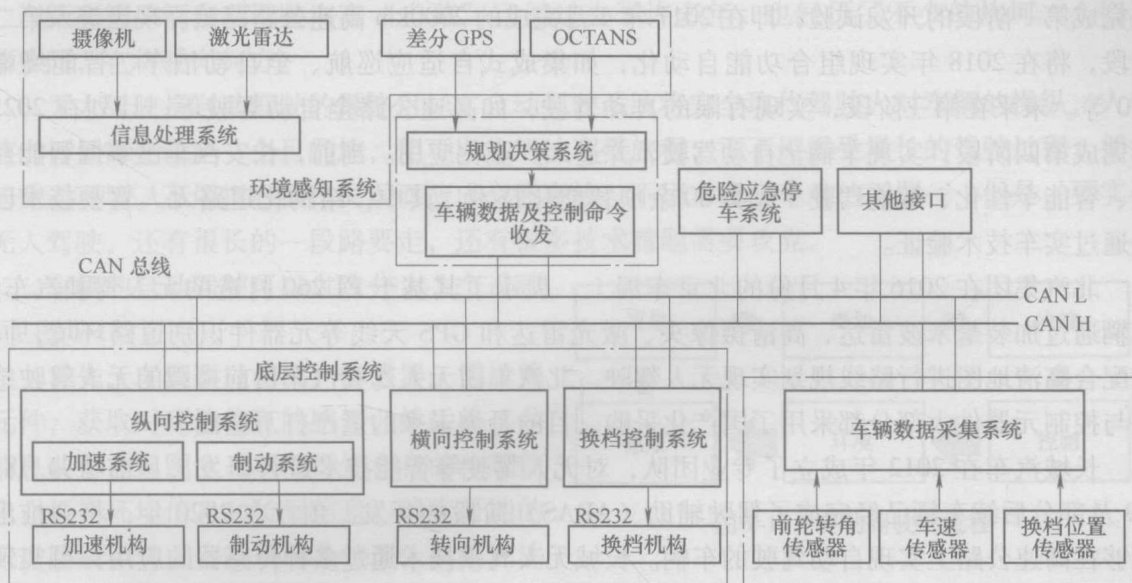


图 1-12 “RAY”无人驾驶汽车系统组成

2018年4月，由上海交通大学-青飞智能园区无人系统联合实验室开发的上海交通大学校园无人小巴系统试运行正式开始。该系统是标准的Level 4级自动驾驶系统，无转向盘和加速踏板，通过多传感器融合方式实现自动驾驶。用户可通过微信呼叫、触摸屏交互、语音交互等多种途径方便快捷地使用该系统。与此同时，该系统还具备完整的系统调度、远程监控、运行维护等多种功能。

在欧美车企加快自动驾驶技术研发和应用的同时，我国自主车企也已开始逐步涉足自动驾驶这一领域。2015年4月，一汽集团正式发布了其“擎途”技术战略，标志着一汽集团的互联智能车辆技术战略规划正式形成。根据该战略的十年发展计划，“擎途”战略将从当前的1.0发展到4.0。目前“擎途”1.0已经于2013年应用到红旗轿车上，具备紧急制动、防撞预警、车道偏离等驾驶辅助功能。在2020年实现“擎途”3.0，可以实现V2X功能，能够整合高速代驾及深度感知和城市智能技术。在2025年实现“擎途”4.0，实现高度自动驾驶技术整车产品渗透率达50%以上。2015年4月19日，一汽集团在同济大学举行了“擎途”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”四项智能化技术。手机叫车功能可在视距范围内通过手机发出叫车指令，车辆自动行驶到指定地点，中途可自动躲避行人；自主泊车可通过手机界面寻找车位，输入停车指令，完成平行或垂直泊车任务；拥堵跟车功能可在堵车时自动跟随前车走停、转弯、加减速，可识别交通标识和车间危险，降低拥堵驾驶的疲劳和烦躁。



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

长安汽车在 2015 年 4 月发布了智能化战略“654”,即建立 6 个基础技术体系平台,开发 5 大核心应用技术,分 4 个阶段逐步实现车辆从单一智能到全自动驾驶。目前长安汽车已经完成第一阶段的开发试验,即在 2017 年 4 月完成的 2000km 高速公路路试。现已进入第二阶段,将在 2018 年实现组合功能自动化,如集成式自适应巡航、全自动泊车、智能终端 4.0 等。未来在第三阶段,实现有限的自动驾驶,如高速公路全自动驾驶等;计划在 2025 年完成第四阶段,实现车辆全自动驾驶,并进入产业化应用。当前,长安汽车已掌握智能互联、智能个性化、智能驾驶 3 大类 60 余项智能化技术,其中,结构化道路无人驾驶技术已经通过实车技术验证。

北汽集团在 2016 年 4 月份的北京车展上,展示了其基于 EU260 打造的无人驾驶汽车。车辆通过加装毫米波雷达、高清摄像头、激光雷达和 GPS 天线等元器件识别道路环境,同时配合高清地图进行路线规划实现无人驾驶。北汽集团无人驾驶汽车目前搭载的无人驾驶感知与控制元器件大部分都采用了国产化采购,目的是为未来的量产打下基础。

长城汽车在 2012 年成立了专业团队,对无人驾驶等智能技术进行研发。目前哈弗 H8、H9 及部分后续车辆已经完成了驾驶辅助(ADAS)阶段的开发。预计在 2020 年,将会推出能够在高速公路上实现自动驾驶的车辆。长城无人驾驶技术通过多种传感器的应用,可实现对道路情况与周围环境的全方位探测,并经过内部智能电子控制单元高速运算,直接控制车辆的电子转向系统、发动机管理系统及制动系统等机构,实现车辆加减速、变换车道、跟随车辆以及超车等动作。

百度公司于 2013 年开始了百度无人驾驶汽车项目,其技术核心是“百度汽车大脑”,包括高精度地图、定位、感知、智能决策与控制 4 大模块。2016 年 12 月,百度无人驾驶汽车在国内首次实现了城市、环路和高速公路混合路况下的全自动驾驶,测试时的最高速度达 100km/h。2017 年 4 月 17 日,百度宣布与博世正式签署基于高精地图的自动驾驶战略合作,开发更加精准实时的自动驾驶定位系统。2018 年, Apollo 与金龙客车自主研发的“百分百国产”无人驾驶小巴“阿波龙”进行了试运行,并进入运营阶段。

无人驾驶汽车国内发展的关键时间节点总结如下:

2011 年 7 月,国防科技大学与一汽集团合作开发的自动驾驶汽车红旗 HQ3,完成了从长沙到武汉,共计 286km 的高速无人驾驶试验,平均速度为 87km/h。

2015 年 8 月,宇通客车在郑开大道城际快速路,完成了开放环境下的无人驾驶试验,全程 32.6km,最高速度为 48km/h。

2015 年 12 月,百度完成北京开放高速路的自动驾驶测试,其核心技术集中在“百度汽车大脑”,在高精地图、感知决策方面均有突破,试验最高速度为 100km/h。

2016 年 4 月,长安汽车完成了超过 2000km 的无人驾驶汽车测试,计划在 2025 年实现城市复杂路况下的自动驾驶。

2016 年 6 月,上海“国家智能网联汽车试点示范区”封闭测试区正式开园,标志着在



国家战略高度上,支持自动驾驶汽车技术发展。

2018年3月,北京发放首批自动驾驶测试试验用临时号牌,在33条、总计105km的开放路段用于自动驾驶测试。

1.3 自动驾驶汽车的发展目标与重点

距离第一辆自动驾驶汽车“上路”已经过去了许多年,也经历了不少的坎坷,人们不禁要问,它将驶向何方?

无人驾驶是自动驾驶的最终目标。自动驾驶系统将完全取代驾驶人对车辆的操纵,人们的出行只需要设定一个目的地,便可以悠闲地享受旅程,而不用忍受漫长的驾驶过程、拥挤的交通环境,不用担心操作失误而造成交通事故,不用考虑停车难的问题……但是,要实现无人驾驶,还有很长的一段路要走,还有很多技术难题需要攻克。

车辆的自动驾驶可以大致分为5个过程(见图1-13):

首先,车辆通过相机、传感器、雷达等元件,获取对环境信息的感知,然后将这些信息映射在地图上,从而得知自身的位置信息;根据环境信息和位置信息,确定可能的行进路线,转交由决策部分处理,决策算法



图1-13 自动驾驶的流程

根据这些路径,综合当前道路信息、车辆状态、环境信息等,计算出最佳的路线,最后由控制模块采取行动。在车辆运动期间,感知部分会不断扫描和监控周围的环境并更新信息,后续模块处理也不断进行,这样就完成了车辆的自动驾驶。这五个部分相辅相成,是促进自动驾驶技术发展的核心。

1) 感知是整个系统运行的第一步。虽然环境感知技术目前已大体完善,但是要实现最高级的无人驾驶,还有很多地方需要改进。例如,在恶劣的天气条件下、在不断变化和不利的光照条件下,各种元件不可避免地会受到影响。

许多基于计算机视觉的感知系统,依赖于通过相机获取周围道路的交通信息,这会受到极端天气和光照条件的影响,有暂时失效的可能;而感知精度较高的激光雷达,也会受到空气中的悬浮颗粒物的影响,造成错误的感知信息;传统的雷达虽然在恶劣天气条件下表现良好,但是它的感知不够准确、不够稳定,所以不能完全依赖雷达来感知环境。

目前常见的解决思路是使用融合相机、激光雷达和雷达传感器来检测环境,综合分析它们获取的信息,弥补各自的缺点,以获得在任何恶劣的条件下的良好感知。但是目前的信息融合还不够稳定和一致,该系统仍然需要改进;也有学者致力于改善视觉算法,试图模拟生物的视觉系统构造出车辆的感知系统等。

2) 在定位部分,目前的自动驾驶方案太过于依赖“先验信息”,地图就是最重要的先验信息之一。它详细记载了周围环境的静态信息,目的是减轻自动驾驶过程中实时定位的高计算量,它可以给定位系统提供参考,并指导路线规划。这样自动驾驶系统就可以将主要的计算力放在环境的动态信息,如实时的车辆、行人、障碍物等。但是,先验信息会限制自动



驾驶系统对新的、突发的情况进行适应和安全反应的能力，如出现了地图上没有的建筑区、道路损坏等。

为了避免这种情况，人们需要大规模地对地图信息进行预先采样和更新，以使车辆能够适应新情况。一种解决方法是建立云端的地图共享系统，它与离线的地图共享并且是动态更新的，但是这对系统的通信能力也提出了更高的要求；也有学者提出“即时定位与地图构建”（SLAM）技术，它并不严重依赖于先验信息，允许自动驾驶系统持续观察环境并适应新情况，但是这项技术需要更多的计算密集型算法，并且根据所使用的传感器和周围环境可能会受到更多不确定性的影响。

3) 人工智能算法是自动驾驶的核心。它直接关系到自动驾驶的智能化程度。在驾驶过程中，它要实现诸多复杂的功能，如行人检测、物体识别、多传感器融合、路径规划、行为决策等。不同于智能手机、计算机等，自动驾驶因为涉及人身安全，任何可能造成交通事故的故障都是不可接受的。

借助于目前机器学习和深度学习的研究，人工智能已经能实现越来越多的自动控制，高级别的自动驾驶还需要把智能算法与传统的车辆动力学控制结合起来，对智能算法的稳定性和准确性有着极高的要求；智能算法的道德性和合法性也是人们需要考虑的，“在不可避免的情况下，要撞向一个人的一侧还是撞向一群人的一侧？”类似这样的问题发生了以后处理困难，就需要在技术层面上让它不会发生。因此，人工智能算法的研究任重道远。

4) 车联网通信是借助新型信息通信技术，实现“Vehicle to Everything”的全面网络互联，包括人、车、路、通信、服务平台这五类要素，能够有效提升车辆的智能程度和自动驾驶水平，提高交通效率。

车联网的关键技术包括4G/5G车载蜂窝通信技术、LTE-V2X和802.11p直连无线通信技术等的应用，与自动驾驶技术的发展紧密相关，但是这些技术目前只是初步成熟，还需要集中研究力量重点突破，而且车联网信息的安全保护也是一个亟待关注的问题，车联网的过程会产生一定的操纵数据、位置信息等，涉及个人隐私权益的保护，此外，还需要考虑到应用领域的经济效益问题等。

根据 Jessica Van Brummelen 等人对自动驾驶汽车从出现至今所存在的问题和问题的解决情况做了一个总结，见表 1-1。

表 1-1 自动驾驶存在的问题和解决情况

项目或竞赛	出现的问题	问题的解决情况
PROMETHEUS (1987—1995)	自主车道保持	大部分已解决
	自适应巡航	大部分已解决
	自动紧急呼叫	大部分已解决
No Hands Across America (1995), Munich to Odense UBM Test (1995), ARGO (1998)	基于视觉的物体检测/追踪	大部分已解决
	复杂光照条件下的感知	部分解决
	改善障碍和道路标志检测	部分解决
	复杂的城市交通	大部分未解决
	恶劣天气下的环境感知	大部分未解决