

智能交通与智能驾驶系列

智能网联汽车 协同控制技术

□ 王庞伟 王力 余贵珍 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

智能网联汽车协同控制技术

王庞伟 王力 余贵珍 著

RFTD

机械工业出版社

本书讨论的是借助车路协同技术的智能网联汽车系统。借助车路协同技术高效可靠的通信机制,可使交通路网内车辆和基础设施之间形成高效可靠的信息交互机制,进一步提高智能网联汽车的智能控制,有效解决交通拥堵和交通安全问题。

本书基于车路协同体系探讨了智能网联汽车的路径决策和速度引导方法,研究了智能网联汽车动力学模型、编队控制模型及编队切换控制技术和主动安全控制技术,最后介绍了研究采用的智能网联汽车编队控制硬件在环仿真平台。

本书适合从事车路协同技术应用和智能交通研究的人员阅读参考,也可以作为智能交通、人工智能等专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

智能网联汽车协同控制技术/王庞伟,王力,余贵珍著. —北京:机械工业出版社,2019.7

ISBN 978-7-111-62896-5

I. ①智… II. ①王… ②王… ③余… III. ①汽车-智能通信网-协调控制-研究 IV. ①U463.67

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第109183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:王欢 责任编辑:王欢

责任校对:黄兴伟 封面设计:严娅萍

责任印制:张博

三河市国英印务有限公司印刷

2019年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·10.25印张·246千字

0 001—1 900册

标准书号:ISBN 978-7-111-62896-5

定价:39.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

封底无防伪标均为盗版

交通在城市发展中的战略地位极为重要，一个便捷、高效、畅通的交通系统是城市可持续发展的重要保障。随着我国城镇化进程不断加快，汽车保有量逐渐增加，随之出现的交通拥堵和车辆事故问题愈发严重，不仅影响了道路行车的安全性，而且造成了巨大的能源浪费，进而成为制约城市可持续发展的重要因素。因此，如何缓解城市道路交通拥堵及提高交通安全，已经成为亟待解决的重要社会难题。

随着车联网和自动驾驶技术的迅速发展，智能网联汽车技术已成为当今学者用以解决交通问题的重要手段之一。该技术将交通系统所涉及的人、车、道路与移动互联网环境有机地结合在一起，从而使交通系统智能化，更好地实现安全、畅通和低能耗的目的。2018年4月，工业和信息化部、公安部、交通运输部联合发布了《智能网联汽车道路测试管理规范（试行）》；2018年12月，工业和信息化部发布了《车联网（智能网联汽车）产业发展行动计划》。由此可见，智能网联汽车已成为我国政府大力支持的未来交通系统重点发展方向。

本书由王庞伟等合著，从面向智能网联汽车行驶条件下交通评价体系入手，结合车车/车路无线通信技术的优势与城市道路交叉口的特征，详细阐述了面向智能网联汽车的高实时性车路协同体系，创新地提出了利用多源车路信息融合的实时交通运行状态评价方法。同时，基于新型交通评价结果，通过挖掘车路协同交互系统数据，以交叉口交通信号配时和路径转向信息作为影响因素，建立了智能网联汽车实时路径规划理论方法。基于作者的长期研究成果，本书充分考虑了无线通信系统的网络延迟、中断、丢包等情况，创新地提出了时变通信拓扑结构下的智能网联汽车编队控制理论；通过对具有共同行驶目的的所有车辆个体进行统一控制和管理，将交通流调整到最佳状态，使得复杂的交通控制得以简化，交通可组织性也同时增强，起到了缓解交通拥堵、提高道路通行能力的作用。最后，为应对无线通信时变性特征，作者研究了智能网联汽车协同避撞及切换控制方法，车队整体通过协同控制机制调整所有车辆单体性能，实现了队列稳定性，有效地减少了由于个别人为驾驶行为因素所造成的交通事故，保证了车辆行驶安全性。本书是智能网联汽车技术领域研究成果的重要总结，是作者在该领域多年辛勤研究凝练而成的，对智能网联汽车技术实际应用及理论研究具有重要价值。

展望未来，智能网联汽车是集汽车、交通产业与高性能计算芯片、人工智能、物联网等新一代信息技术深度融合的产物。这一发展将变革人们交通出行的行为模式，使其呈现出多元融合、人机协同、模拟思考的新特征。大力发展智能网联汽车技术，不仅是解决汽车社会面临交通安全、道路拥堵、能源消耗、污染排放等问题的重要手段，也是构建智慧出行服务



新型产业生态的核心要素，更是推进交通强国、数字中国、智慧社会建设的重要力量。本书作者在相关技术上已有了前瞻性研究成果，同时也给从事智能交通技术研究人员提出了新的研究课题。

北京航空航天大学副校长，长江学者特聘教授 王云鹏

2019年4月于北京

交通拥堵和交通安全问题，是世界各国亟待解决的两大交通领域难题。近年来，随着车路协同技术在智能交通系统中的广泛应用，借助其高效可靠的通信机制，使得交通路网内车辆和基础设施之间可以进行高效可靠的信息交互，智能网联汽车技术随之应运而生。

智能网联汽车作为当今全球智能交通技术研究的热点，其发展已经超越了传统汽车产业的范畴，与人工智能、信息通信、大数据等新技术和新兴产业跨界融合，构建起新的汽车产业生态。智能网联汽车带来的不仅是汽车产业的深刻变革，也将对出行方式和道路交通系统带来重大变化，是备受关注的方向和焦点。近几年，美国、日本、德国等国家陆续发布各自在自动驾驶领域的法规和鼓励自动驾驶汽车的发展政策，布局智能网联汽车研发。我国也在努力推进智能网联汽车的发展，自2015年国务院发布《中国制造2025》明确将发展智能网联汽车提升至国家战略高度后，国家发展改革委、工业和信息化部 and 科学技术部等各有关部门密集发布了《新一代人工智能发展规划》《智能汽车创新发展战略》《智能网联汽车道路测试管理规范（试行）》等一系列政策促进智能网联汽车的产业化发展。在可预见的将来，智能网联汽车的规模化应用将对交通基础设施、道路交通运行及交通管控方法产生巨大影响。

智能网联汽车是指，搭载先进传感器、控制器、执行器等装置，融合现代通信与网络技术，实现车与X（车、路、人等）智能信息交换、共享，具备复杂环境感知、智能决策、车路协同控制等功能，可实现安全、高效、舒适、节能行驶，并最终替代人来操作的新一代智能汽车。智能网联汽车的主要优势在于，可以提供更安全、更节能、更环保、更便捷的出行方式和综合解决方案。智能网联汽车的技术架构主要涉及以下6种关键技术：

1) 环境感知技术，包括利用机器视觉的图像识别技术、利用雷达的周边障碍物检测技术、多源信息融合技术、传感器冗余设计技术等。

2) 智能决策技术，包括危险事态建模技术、危险预警与控制优先级划分技术、群体决策和协同技术、局部轨迹规划技术和驾驶人多样性影响分析技术等。

3) 控制执行技术，包括面向驱动/制动的纵向运动控制技术、面向转向的横向运动控制技术、基于驱动/制动/转向/悬架的底盘一体化控制技术、融合车联网通信及车载传感器的多车队列协同和车路协同控制技术等。

4) V2X 通信技术，包括车辆专用通信系统技术、车路信息共享与协同控制的通信保障机制、移动网络技术、多模式通信融合技术等。

5) 云平台与大数据技术，包括云平台架构与数据交互标准、云操作系统、数据高效存储和检索技术、大数据关联分析和深度挖掘技术等。

6) 信息安全技术，包括汽车信息安全建模技术、数据存储和传输及应用三维度安全体系、信息安全漏洞应急响应机制等。

发展智能网联汽车，可以改善随着汽车保有量的增长带来的能源、环保、安全、拥堵等多方面问题，有利于建立新型社会交通体系和新型智慧城市，建立绿色、共享型汽车社会，有利于推动通信、交通、电子等相关产业的协同发展，有利于推动建设人工智能、大数据、



机器人、工业互联网、智慧城市等多个万亿级产业的深度融合，对于汽车产业经济及社会和国家都具有战略意义。

本书结合车车/车路无线通信技术的优势与城市道路交叉口的特征，设计了面向智能网联汽车的高实时性车路协同体系，并定义了车辆与路侧智能设备间的数据交互方式，基于车路协同体系提出了一种利用多源信息融合的实时交通运行状态评价方法。该方法通过从上述数据交互系统得到的实时数据中选取评价指标进行模糊综合，引入多算子对来构成二级交通评价模型，并根据层次分析法确立指标权重；同时，根据仿真和实验结果建立了适用于各级道路参数的可变隶属度规则，从而融合动态车辆数据与静态路段参数，最终计算得出交通评价结果。基于以上评价结果，本书通过挖掘车路协同交互系统数据，以交叉口交通信号控制和路径转向信息作为影响因素，对传统路径规划系统得到的结果进行进一步的优选。该方法能根据当前时刻各路段的统计数据 and 实时信号机数据来预测各备选路线的行程时间，从而选择行程时间最少的路线。并且，根据智能网联汽车行驶数据，本书验证了该方法的有效性。

本书考虑了传统交通传感器精度上的限制及车辆状态信息获取的滞后性，认为目前交通信号控制系统很难根据实时车流量动态优化配时方案，来达到预期效果。但是，随着车路协同智能网联汽车技术的广泛应用，编队控制技术为未来城市交通控制系统提出了新的解决方案。智能网联汽车编队技术，可以使车辆行驶时保持理想的车距和车速，优化城市干线车流行驶状态，为缓解城市干线拥堵、提高道路通行能力提供新的技术手段和解决方案；同时，车路协同控制技术对具有共同行驶目的的所有车辆进行统一控制和车队化管理，使得复杂的交通控制得以简化，交通可组织性也同时增强，起到了缓解交通拥堵、提高道路通行能力的作用；最后，车辆队列依靠协同控制机制来调整所有车辆性能以保持一致，将交通流调整到最佳状态，有效地减少了由于个别人为驾驶因素造成的交通事故，保证了车辆的行驶安全性。

综上所述，面对新型车路协同体系，智能网联汽车欲达到更好的编队控制效果，需要设计可靠、有效的协同控制模型，来解决车车通信延迟、失效对车辆队列行驶安全性和稳定性造成的影响；充分利用道路条件，弥补传统控制模型缺陷，使智能网联汽车能够根据不同交通状况，准确预测未来交通状态和交通安全事故，进行动态路径优化及控制从而避免可能发生的交通拥堵和交通事故，为解决目前交通问题提供有力的技术保障。

本书第1、3~5、7~10章由王庞伟负责撰写，第2章由王力负责撰写，第6章由余贵珍负责撰写。项目组张名芳老师及研究生邓辉、蒋依伦、于洪斌为本书进行了资料收集和整理，在此表示感谢。同时，还要特别感谢北京航空航天大学副校长王云鹏教授为本书作序。

本书介绍的研究内容得到国家自然科学基金项目61603004、北京市自然科学基金资助项目4174088、北京市科技新星计划Z181100006218076、北方工业大学毓杰人才培养计划18XN154-003的资助，以及北方工业大学“城市道路交通智能控制技术北京市重点实验室”和北京航空航天大学“车路协同与安全控制北京市重点实验室”的大力支持，在此表示深深的感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大专家、学者和读者批评指正。

作者

2019年4月

序	
前言	
第 1 章 智能网联汽车相关技术发展过程	1
1.1 车路协同技术	2
1.2 智能网联汽车技术	6
1.3 车辆编队技术	9
参考文献	13
第 2 章 面向智能网联汽车的车路协同系统	15
2.1 车路协同技术特征分析	15
2.2 面向智能网联汽车的车路协同系统设计	17
2.2.1 系统设计目的	17
2.2.2 车路信息交互场景	17
2.2.3 车路数据实时交互方法	18
2.3 车路数据交互软件系统	19
2.3.1 车路数据交互软件系统总体目标	19
2.3.2 车路数据交互软件系统方案论证	20
2.3.3 车载终端软件系统实现	21
2.3.4 路侧终端软件系统实现	22
参考文献	23
第 3 章 基于车路信息融合的交通运行状态评价方法	24
3.1 车路信息融合技术分析	24
3.2 基于信息融合的交通运行状态模糊评价方法研究	25
3.2.1 目前常用的交通评价方法	25
3.2.2 多级模糊综合方法结构设计	25
3.2.3 一级模糊评价空间	26
3.2.4 基于样本数据的层次分析法	31
3.2.5 二级模糊评价空间	33
3.3 交通状态评价方法实验验证	34
3.3.1 实验设计	34
3.3.2 实验流程	35
3.3.3 实验结果与分析	35
参考文献	38
第 4 章 智能网联汽车实时路径决策方法	40
4.1 路径规划算法分析	40
4.2 智能网联汽车实时路径规划系统设计	42
4.2.1 车路协同场景描述及路径规划系统设计目的	42
4.2.2 智能网联汽车路径规划策略	43



4.3 基于车路协同的路径规划优化方法研究	44
4.3.1 车路信息交互过程	44
4.3.2 路阻计算方法	45
4.3.3 路径选择策略	48
4.4 优化方法实验验证	49
4.4.1 实验设计	49
4.4.2 实验结果与分析	51
参考文献	53
第5章 智能网联汽车速度引导方法	55
5.1 基于车路协同的交通控制系统概述	55
5.2 车路协同环境下车速引导方法	57
5.2.1 车路协同环境下的单车车速引导模型	57
5.2.2 车路协同环境下多车车速引导模型	61
5.2.3 面向智能网联汽车的干线信号优化模型	63
5.3 基于 VISSIM/MATALB 的车速引导仿真验证	65
5.3.1 交通仿真验证场景	65
5.3.2 仿真数据分析	68
参考文献	70
第6章 智能网联汽车动力学模型	71
6.1 智能网联汽车受力分析	71
6.2 智能网联汽车简化纵向动力学分层模型	75
6.2.1 智能网联汽车动力学模型的简化	75
6.2.2 简化纵向车辆动力学模型的分层	76
6.3 基于 CarSim/MATLAB 软件的车辆动力学模型联合仿真验证	78
6.3.1 CarSim 软件仿真环境参数设置	80
6.3.2 CarSim、MATLAB、Simulink 联合仿真验证	82
6.3.3 下层动力学控制模型仿真结果分析	82
参考文献	86
第7章 智能网联汽车编队控制模型	87
7.1 智能网联汽车编队控制系统概述	87
7.1.1 车辆编队控制系统数学模型	87
7.1.2 车辆队列系统控制方法	88
7.1.3 车辆队列控制系统结构	89
7.2 智能网联汽车编队行驶条件	90
7.2.1 车辆行驶安全性条件	90
7.2.2 车辆队列稳定性条件	91
7.3 智能网联汽车编队控制技术	92
7.3.1 智能网联汽车编队控制数学模型	93
7.3.2 智能网联汽车队列稳定性分析	95
7.4 智能网联汽车编队控制模型仿真	97
7.4.1 阶跃紧急减速输入仿真效果	97
7.4.2 正弦加速度输入仿真效果	99
参考文献	100
第8章 智能网联汽车编队切换控制技术	102
8.1 通信异常对智能网联车队控制影响及模型策略调整	102



8.1.1	通信延迟的影响及模型调整策略	102
8.1.2	通信失效的影响及模型调整策略	103
8.2	考虑通信时延的智能网联汽车编队切换控制模型	104
8.2.1	存在通信时延时智能网联汽车编队切换控制模型	104
8.2.2	存在通信时延时保持队列稳定性条件	104
8.3	通信失效下的智能网联汽车编队切换控制模型	105
8.3.1	车辆队列中通信失效车辆及其后车的控制模型	105
8.3.2	通信失效下保持队列稳定性条件	106
8.4	通信异常时智能网联汽车编队控制模型仿真	108
8.4.1	头车阶跃紧急减速输入仿真	108
8.4.2	头车正弦加速度输入仿真	109
	参考文献	111
第9章	智能网联汽车主动安全控制技术	112
9.1	车辆主动安全控制系统概述	112
9.2	传统避撞模型缺陷分析	113
9.3	避撞过程中交通资源非线性规划问题	114
9.3.1	非线性规划函数	114
9.3.2	非线性规划求解方法	115
9.4	智能网联汽车协同主动避撞模型	117
9.4.1	加速度非线性规划模型	117
9.4.2	非线性规划求解条件	118
9.5	协同主动避撞模型应用于车辆队列控制	119
9.6	仿真验证	123
9.6.1	两车协同主动避撞	123
9.6.2	车辆队列协同主动避撞	124
	参考文献	127
第10章	智能网联汽车编队控制硬件在环仿真技术	129
10.1	智能网联汽车编队控制硬件在环仿真平台原理	129
10.1.1	硬件在环仿真系统框架	130
10.1.2	硬件在环仿真平台验证原理	132
10.1.3	硬件在环仿真平台验证可行性验证	133
10.1.4	车辆动力学的微缩车实现	135
10.2	智能微缩车平台硬件结构	136
10.2.1	控制部分电路设计	137
10.2.2	环境感知部分设计	142
10.3	智能微缩车平台软件结构	142
10.3.1	图像处理部分软件结构	142
10.3.2	控制系统部分软件结构	143
10.3.3	数据滤波处理程序结构	144
10.3.4	上位机控制软件结构	145
10.4	仿真结果分析	148
10.4.1	仿真场景环境参数设置	148
10.4.2	智能网联汽车编队控制效果	148
10.4.3	智能网联汽车编队主动安全控制效果	149
	参考文献	151

第1章

智能网联汽车相关技术发展过程

汽车现已成为人们日常生活不可或缺的一部分，全世界汽车保有量持续增长。随着经济持续稳定发展，我国的汽车工业得到了发展机遇。特别是改革开放以来，汽车工业产值加速增长，汽车产业在我国经济发展中起到了支柱作用和战略地位。截至2018年6月底全国机动车保有量已达3.19亿辆。

在汽车总量不断增长带动经济发展和提高生活水平的同时，能源消耗、环境污染、交通拥挤、交通事故等诸多问题（见图1-1）随之产生，直接影响着人民的生命安全，也导致巨额的经济损失。相关文献数据表明，对于世界上大多数国家，交通拥堵和交通安全事故（见图1-1）严重影响着人们的日常生活。在美国和欧洲，每年有超过40 000人因车祸死亡。我国2016年涉及人员伤亡的路口交通事故为21.284 6万起，共造成6.3万人死亡和22.643万人受伤，比2014年分别上升8.2%、8.6%、6.9%。以上国内外数据表明，随着道路交通环境的发展和汽车保有量的增长，道路交通事故造成的伤亡人数和财产损失对社会的影响十分恶劣。这引起各国政府高度关注^[1]。

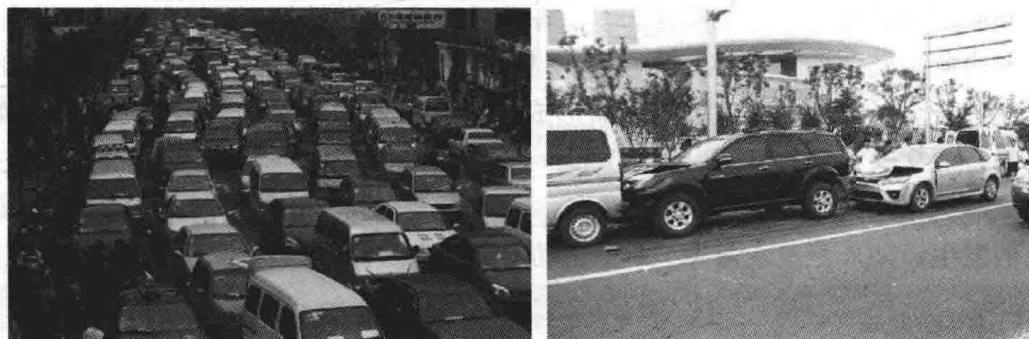


图1-1 车辆的增多带来交通拥堵和事故

根据公安部交通管理局的数据，近年来发生在我国境内的交通事故中，不同类型事故的占比及其对应经济损失的占比如图1-2所示^[2]。

如图1-2所示，车辆碰撞事故的数量占比最高，相应财产损失占比也最大。所以避免碰撞事故可以最大限度地减少交通事故数量，避免财产损失。通过有关文献分析可知，驾驶人操作失误、道路状况信息获取不及时是导致碰撞事故的主要原因^[3]。

如何利用最新的科技手段解决交通安全问题备受关注。世界各国相继出现了很多解决交通碰撞事故的车辆安全控制技术，如驾驶辅助安全系统，包括超速提醒、盲点监测、车距提醒、辅助换道等以及车辆主动避撞控制系统（或主动制动系统）等。其中很有代表性的是车辆主动避撞控制技术。该技术通过先进的传感器技术（雷达、超声波传感器等测距）检测车辆前方障碍物的距离信息和前方车辆的距离、速度信息，控制车辆在遇到紧急情况时自动制动。该技术受到了汽车行业的广泛关注。

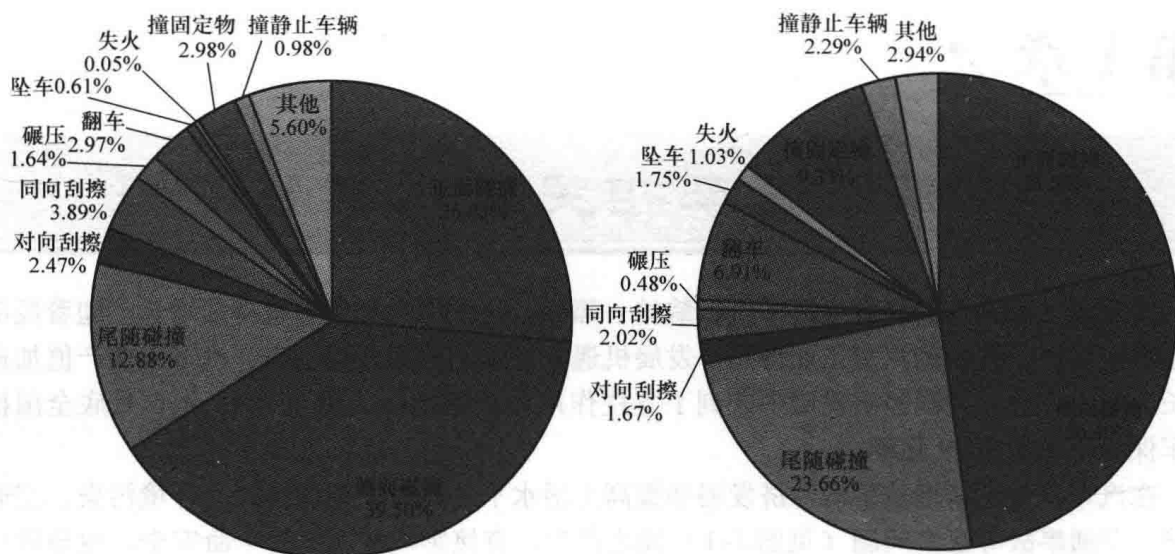


图 1-2 不同类型事故的占比及其对应经济损失的占比

1.1 车路协同技术

车路协同系统 (Cooperative Vehicle Infrastructure System, CVIS) 是采用先进的无线通信和新一代互联网等技术, 全方位实施车车、车路动态实时信息交互, 并在全时空动态交通信息采集与融合的基础上开展车辆主动安全控制和道路协同管理, 充分实现人车路的有效协同, 保证交通安全, 提高通行效率, 从而形成安全、高效和环保的道路交通系统, 如图1-3所示。作为智能交通系统 (Intelligent Transportation System, ITS) 发展的主要方向之一, 车路协同系统的应用范围非常广泛。基于车路、车车通信的车路协同系统不仅能有效减少各种碰撞事故的发生, 如人车主动避障、车车主动避障、危险路段预警等, 且能够在较大范围内

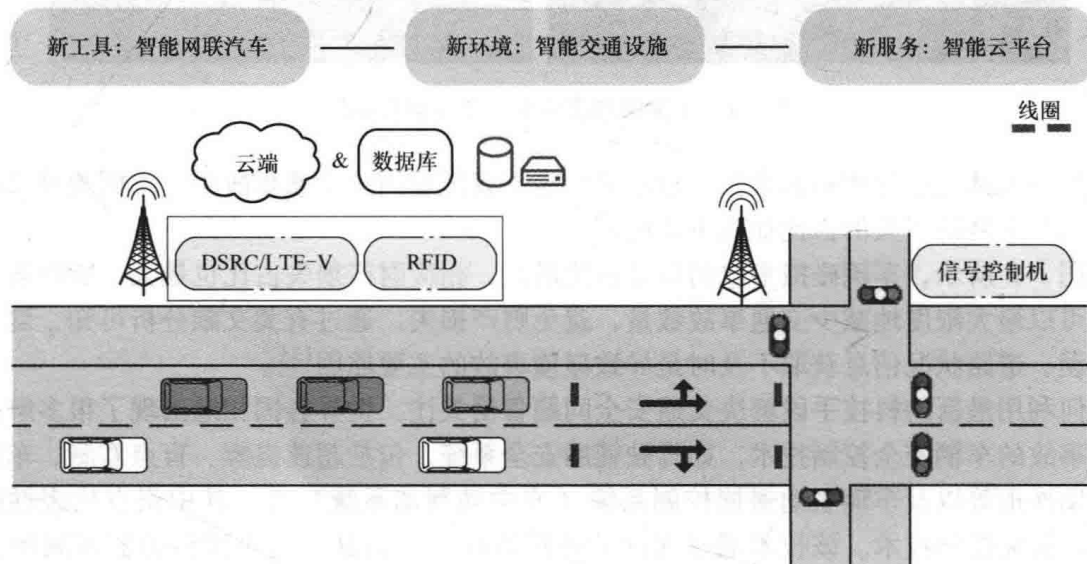


图 1-3 车路协同系统架构



实现交通协调控制，如交通信号协调控制、实时路径诱导、公交优先控制等。车路协同技术在提高交通运输效率、缓解交通拥堵、减少尾气排放等方面可发挥重要作用^[4]。

车路协同系统通过开发和集成各种车载和路侧设备及通信技术，让驾驶人在驾驶中能够更好地和更安全地进行决策。当其与车辆自动安全系统结合应用时，在面对危险的情况下，如果驾驶人不能或没有及时做出响应，则会自动响应并进行操作，在增强了安全预防的同时减轻了碰撞损失。此外，运输系统管理者、车辆运营商、出行人都能得到所需数据，为机动性、安全性、运输成本等做出动态决策。建立车路协同系统，实现车路协同控制，改善交通安全，提高通行能力，达到安全高效、节能环保的目的。车路协同技术结构框图如图 1-4 所示。

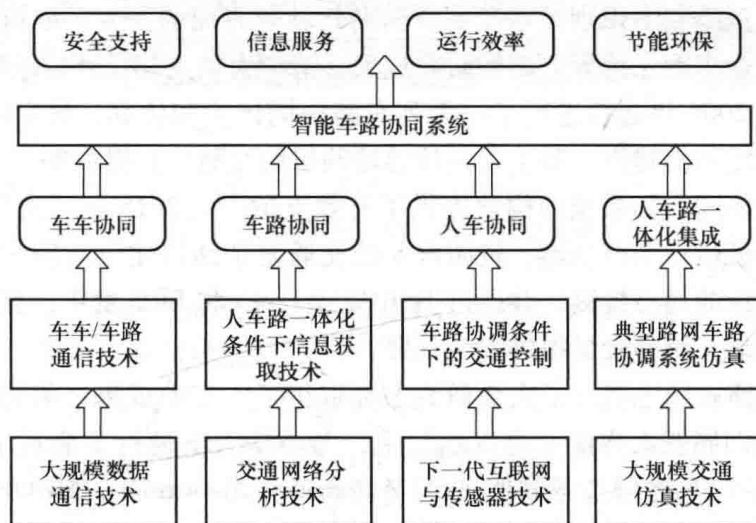


图 1-4 车路协同技术结构框图

车路协同技术在国内外都是近几年才发展起来的新技术，对缓解交通拥堵及改善交通安全都有很大帮助，因此备受关注。

1997 年，美国（加州）进行了自动公路系统的演示，并于 1998 年开始组织智能车先导（Intelligent Vehicle Initiative, IVI）计划、协同式车辆 - 公路自动系统（Cooperative Vehicle - Highway Automation Systems, CVHAS）以及车路协同（Vehicle Infrastructure Integration, VII）计划的研究。2007 年，VII 计划被美国交通部（Department of Transportation, DOT）更名为 IntelliDrive。2009 年 11 月 8 日，美国交通部发布了《智能交通系统战略规划 2010—2014》，为之后五年的智能交通系统（Intelligent Traffic System, ITS）研究项目提供战略引导。2012 年，相关部门在美国加州、密歇根州等地建立了相应的车路协同城市平台。2014 年 2 月，专用短程通信技术（Dedicated Short Range Communications, DSRC）被美国交通部确认为 V2V 通信的标准。美国 ITS 关键的安全性应用领域要求采用 5.9GHz DSRC。

2001 年，欧盟发表白皮书《面向 2010 年的欧盟交通政策：时不我待》（European Transport Policy for 2010: Time to Decide），提出到 2010 年道路死亡人数减少 1/2 的宏伟目标。为实现这个目标，欧盟启动了 eSafety 计划。2004 ~ 2010 年，欧洲投入了大量经费研究车路协同，解决了一系列车路协同系统关键技术，并先后推出了 PReVENT、SAFESPOT、CVIS、COOPERS 等项目。但欧洲对车路协同的研究并未就此止步，2011 年启动了面向 2020 年的

DRIVE C2C 项目，重点研究车车通信环境下的交通安全技术及应用。

1991 年，日本政府组织警察厅、通产省等部门开始研发 VICS 并投入运行。1994 年，日本警察厅、运输省等 5 个部门联合成立日本路车交通智能协会（Vehicle Road and Traffic Intelligence Society, VERTIS；已更名为日本智能交通协会，即 ITS Japan）。2001 年，日本开始安装使用 ETC。2004 年，日本提出了 SmartWay 项目。2011 年，以 SmartWay 的研究为基础，在全日本高速公路上开始安装部署 ITS 的设备和系统。VICS、VERTIS 和 ETC 是车路协同的初级阶段，从 SmartWay 项目开始，日本进入了系统研究车路协同技术的新阶段^[5]。

我国的科研机构从交通的组成要素人、车、路三个不同角度，开展了车路协同的研究工作，取得了许多有价值的成果。针对车辆的辅助驾驶，开展了基于机器视觉和雷达技术的道路环境感知技术、危险状态识别技术及安全辅助驾驶等方面的研究，取得了车道偏离报警、前向危险报警、安全车距保持等方面的研究成果。清华大学是较早开始进行车路协同技术研究的单位之一。从 2008 年起就进行了一系列车路协同试验和仿真，研究内容涉及基于 NS2 的城市交通环境无线通信建模、基于无线传感器网络的交通信息提取等。这些研究所取得的一系列成果为车路协同实际系统的构建提供了有效支持^[6]。2015 年，清华大学校园成为我国车路协同首个园区运行示范基地，校园内 8 处交通复杂路口建设应用车路协同路侧系统，实现对周边环境目标的动态检测，并通过 DSRC、Wi-Fi 和 LED 发布；在 30 辆校园公交车安装一体化车载终端，给驾驶员提供安全预警^[7]。

企业方面对车路协同也展开了大量研究，并取得了一定的成果。华为公司于 2015 年在南京举办的“第十四届亚太智能交通论坛”上，与清华大学进行了演示车路协同的技术展示。2017 年底，5G 汽车通信技术联盟（5G Automotive Association, 5GAA）上海会议期间，华为公司公布了 LTE-V2X 近期的测试结果。测试结果显示，LTE-V2X 直连通信覆盖达到 1km 以上，能有效提供两车面对面相对时速达 500km/h 下的卓越性能；高密度拥堵的交通场景下（400 辆车在十字路口），通信时延小于 20ms，消息发送成功率超过 90%。2018 年 7 月，华为公司发布了全球首款支持 Uu+PC5 并发的路侧产品（Road Side Unit, RSU）。2018 年 10 月，“世界智能网联汽车大会”成功召开，车路协同技术再次成为热门。阿里巴巴公司推出自己的自动驾驶车+路侧“感知基站”+云控平台，实现云端、路端、车端一体的智能方案^[8]。

LTE-V 车联网系统如图 1-5 所示。我国车路协同技术的发展路线如图 1-6 所示。

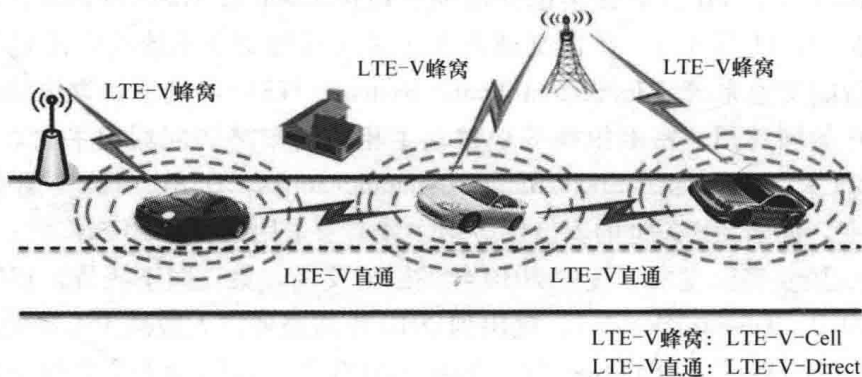


图 1-5 LTE-V 车联网系统^[9]

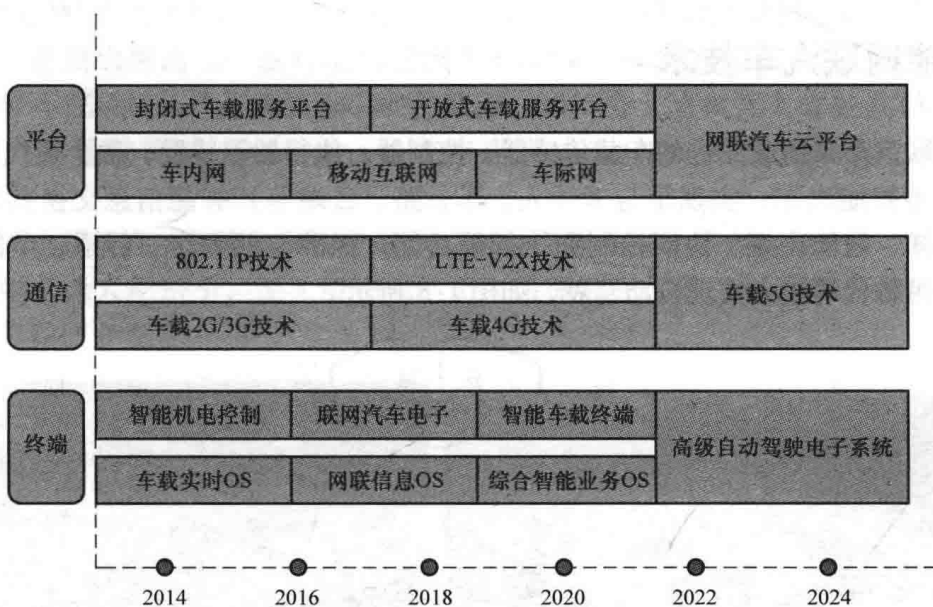


图 1-6 我国车路协同技术的发展路线

智能网联汽车作为物联网浪潮下的典型应用，市场规模已具备，并且有着巨大的发展空间。2018年，每年新车出货量可能超过1亿台，而其中60%的新车可实现联网（见图1-7）。到2020年，所有出厂汽车均必须装前联网模块。目前这一比例为20%。从全球看，GSMA与SBD预计，到2018年，全球车联网的市场总额有望达390亿欧元，互联网连接将成为未来汽车的标配，到2025年100%的汽车将具备移动互联网接入功能。据美国Gartner集团的Machina Research公司预计，到2024年，汽车领域连接数将达1.2亿。而Business Intelligence公司的估计更加乐观：2021年，连接的汽车数量将达3.8亿。就我国而言，近几年，我国车联网产业的市场规模可能发展到千亿人民币级别。

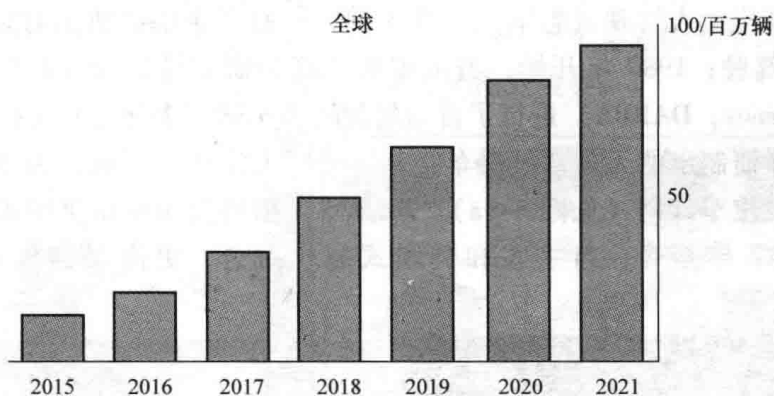


图 1-7 网联汽车数量预测^[10]

总体而言，目前我国的车路协同系统研究仍处于初级阶段，和国外研究相比有一定差距。早期我国的车路协同技术，大多是采用日本汽车电子巨头电装公司和澳大利亚Cohda无线公司的设备，但现在从芯片到终端，都有国产设备，而且一些终端设备都支持DSRC和LTE-V两种感知通信技术，在车路协同的全球市场建立了自己的优势。



1.2 智能网联汽车技术

智能网联汽车是搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置，融合现代网络通信技术的一种新型智能汽车，实现车与 X（人、车、路、云端等）智能信息交换共享，拥有复杂的环境感知、智能决策、协同控制和执行等功能，保障车辆安全、舒适、节能、高效行驶，并最终可替代驾驶人实现自动驾驶，如图 1-8 所示。

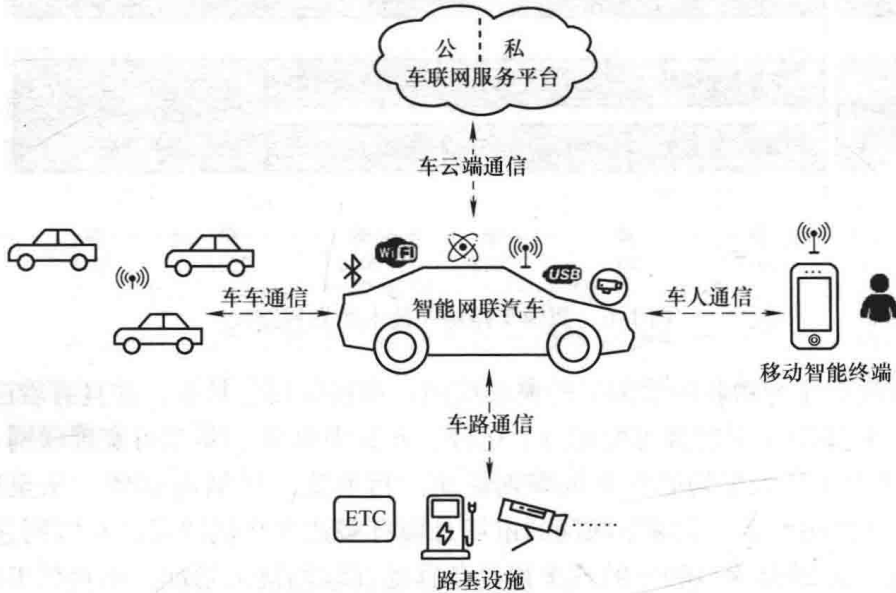


图 1-8 智能网联汽车系统结构图^[11]

从发展历史来看，1885 年，卡尔·本茨制造出世界上首辆三轮汽车；1939 年，美国通用汽车公司首次展出无人驾驶概念车；1970 年前，一些车企尝试使用射频和磁钉的方式引导车辆实现自动驾驶；1980 年开始，美国国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）进行了自动驾驶陆地车辆军事化应用的研究；1995 年，美国卡耐基梅隆大学研制出的无人驾驶汽车在州际公路上完成了测试；2009 年，美国谷歌公司推出了无人驾驶汽车计划（见图 1-9a）。2015 年，福特公司获得美国加州的自动驾驶车辆测试许可。2017 年至今，自主式和网联式加速融合，更高级别驾驶辅助技术逐渐成熟^[12]。

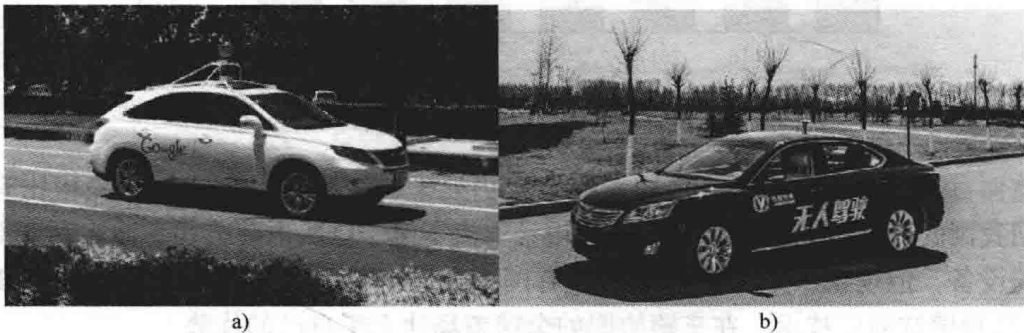


图 1-9 智能驾驶汽车



从20世纪90年代开始,我国各高校及车企也展开了对自动驾驶技术的研发。1992年,国防科技大学研制出国内第一款自动驾驶汽车CITAVT-I型自主车。2011年,一汽红旗HQ3无人驾驶车完成从长沙至武汉286km的路测。2015年,百度无人驾驶汽车完成北京开放高速路的自动驾驶测试。2016年,长安汽车完成2000km超级无人驾驶测试(见图1-9b)^[13]。

百度公司也积极推动智能汽车技术进步,全力提升Apollo平台(见图1-10)安全性的同时,也催生了无人配送车、无人清扫车、无人微循环巴士等“自动驾驶新物种”出现,促进了自动驾驶产业发展^[14]。

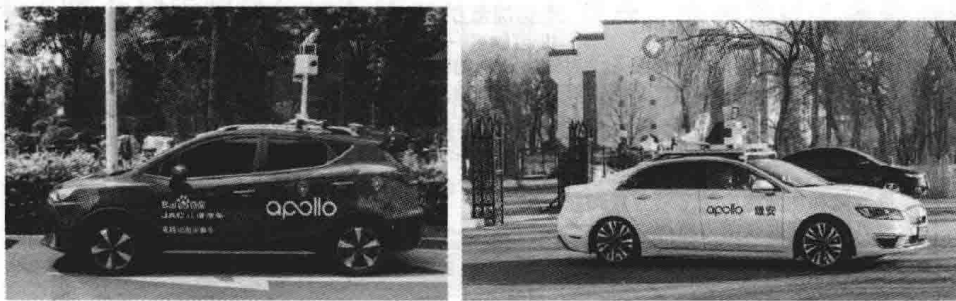


图1-10 百度 Apollo 无人驾驶汽车

智能网联汽车融合了多项关键技术,如环境感知技术、无线通信技术、智能互联技术、信息融合技术、人机界面技术和信息安全与隐私保护技术等。智能网联汽车主要包括环境感知系统、决策与控制系统和执行系统(见图1-11)。感知主要可分为自主式感知和网联式感知。通过车载传感器获得的对复杂环境的感知,称为自主式感知;借助现代通信和网络技术来感知环境,称为网联式感知。在大数据时代,自主式感知可以由通信设备传播至互联网络,同时网络式感知也可分发至智能网联汽车,这是一个交互的过程。存在于互联网络中的智能网联汽车,通过这样的密切交互,形成了一种特定的新型网络系统——车联网。而车联网并不只是一般意义上的信息服务,它除了包括车车通信、车路通信和车内部的通信外,还包括了在移动互联网下能提升安全和节能等方面指标的信息服



图1-11 智能网联汽车主要组成