

 弘深 科学技术文库

智能车辆队列 纵向与横向控制

LONGITUDINAL AND LATERAL CONTROL OF
THE INTELLIGENT VEHICLE PLATOON

赵 津 王广玮 石 晴 著



重庆大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

智能车辆队列纵向与横向控制/赵津,王广玮,石
晴著.--重庆:重庆大学出版社,2023.5

ISBN 978-7-5689-3102-1

I. ①智… II. ①赵… ②王… ③石… III. ①智能控
制—汽车—研究 IV. ①U46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 266885 号

智能车辆队列纵向与横向控制

ZHINENG CHELIANG DUILIE ZONGXIANG YU HENGXIANG KONGZHI

赵津 王广玮 石晴 著

责任编辑:范琪 版式设计:范琪

责任校对:夏宇 责任印制:张策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:720mm×1020mm 1/16 印张:12.25 字数:176 千

2023 年 5 月第 1 版 2023 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-3102-1 定价:88.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

序 言

在过去的 20 余年中,智能车辆技术的发展得到了研究人员、车企以及各国政府的高度关注。车辆队列控制技术作为自动驾驶领域的一个热门方向,在安全性、交通效率、燃油经济性等方面有着明显的优势和潜力。然而,这种新型的车辆组织和行驶模式,对车辆系统的建模、感知、决策、控制及其在宏观层面对交通流的影响,都提出了新的问题和挑战。

本书作者一直从事智能车辆相关领域的教学与研究,在从事学生指导和课题研究的过程中,发现市面上虽已出版了较多与车辆控制相关的教材与专著,但在车辆队列这一特殊领域,与其相关的感知、决策、控制,以及在交通流宏观视角下,队列车辆控制相关问题的书籍还相对缺乏。本书总结了作者在该领域的主要研究工作,主要涉及了车辆队列相关的建模、纵向与横向控制,分析了队列控制技术对交通流的影响,并介绍了研究团队近年来搭建的相关研究平台和硬件技术。本书可为高校、研究机构、企业相关领域研究人员提供参考,同时也可作为高校本科、研究生相关课程的参考书。

在本书撰写过程中,孙念怡、韩金彪、唐雄、刘照、秦杨军、李淑萍等提供了细致的帮助,在此谨表谢忱。

智能车辆作为一种新兴技术,正处于较快的发展与演化进程中,许多新理论、新方法也在不断涌现和应用。由于作者研究水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者批评斧正。

赵 津

2022 年 10 月于贵州大学崇厚楼

目 录

第1章 自动高速道路系统与智能车辆控制	001
1.1 背景	001
1.2 智能交通系统和自动高速公路系统	003
1.2.1 智能交通系统	003
1.2.2 自动高速公路系统	006
1.2.3 智能车辆	008
1.3 自动驾驶国内外研究现状	010
1.3.1 研究项目	010
1.3.2 AHS 中车辆队列的控制结构	017
1.3.3 纵向控制	019
1.3.4 横向控制	022
1.3.5 纵向与横向联合控制	024
1.4 总结	026
第2章 自动高速公路系统对车辆建模	028
2.1 简介	028
2.2 车辆运动原理和纵向与横向车辆模型	029
2.2.1 车辆运动原理	029
2.2.2 纵向与横向模型	030
2.3 车辆纵向动力学建模	031
2.3.1 纵向动力学	031
2.3.2 传动系统动力学	038

2.3.3 仿真分析	048
2.4 横向车辆动力学的建模	051
2.4.1 横向运动学模型	051
2.4.2 横向动力学	052
2.4.3 仿真分析	058
2.5 总结	061
第3章 车辆队列纵向控制	062
3.1 简介	062
3.2 纵向控制系统的结构	063
3.3 上位控制器	064
3.3.1 引言	064
3.3.2 串稳定性	066
3.3.3 交通流稳定性	068
3.3.4 固定时距策略的分析	071
3.3.5 安全间距策略	075
3.3.6 仿真测试	083
3.4 下位控制器	086
3.4.1 引言	086
3.4.2 加速与制动联合模糊控制器	087
3.4.3 仿真测试	093
3.5 结论	099
第4章 车辆横向控制	100
4.1 简介	100
4.2 多模型控制方法	103

4.2.1	引言	103
4.2.2	工作区间法与多模型控制方法	104
4.3	横向控制系统的结构	109
4.4	车辆横向动力学分析	110
4.4.1	自行车模型	110
4.4.2	参数变化的开环响应	111
4.5	横向控制器的设计	113
4.5.1	抗饱和 PID	113
4.5.2	车辆横向模糊控制	118
4.5.3	多模型模糊控制	122
4.5.4	变道策略的虚拟期望轨迹	127
4.6	仿真测试	129
4.6.1	测试 1: 不同速度下的车道保持控制 (1)	130
4.6.2	测试 2: 不同速度下的车道保持控制 (2)	131
4.6.3	测试 3: 不同负载和轮胎侧偏刚度下的车道保持控制	133
4.6.4	测试 4: 不同速度下的变道操作	134
4.6.5	测试 5: 不同负载和侧偏刚度下的变道操作	135
4.7	总结	136
第 5 章 车辆纵横向耦合控制		138
5.1	简介	138
5.2	系统集成	138
5.2.1	纵向与横向解耦控制	138
5.2.2	纵、横向集成控制系统	139
5.3	仿真实验	140
5.4	结论	144

第6章 车辆状态观测与多传感器智能车平台	145
6.1 简介	145
6.2 车辆状态的观测	146
6.2.1 简介	146
6.2.2 面向线性时变系统的卡尔曼-布西滤波器	147
6.2.3 基于卡尔曼-布西滤波器的横摆角速度及横向速度估计	148
6.2.4 状态估计结果	151
6.3 多传感器智能车实验平台介绍	153
6.3.1 缩小比例的多传感器智能车原型介绍	153
6.3.2 基于 dSPACE 的快速原型与测试	157
6.3.3 基于轮毂电机驱动的线控智能底盘	163
6.4 结论	167
参考文献	168

第1章 自动高速道路系统与智能车辆控制

1.1 背景

随着汽车工业的发展,世界汽车产量逐年上升,已成为支撑世界各国重要的经济支柱之一。在1950年,全世界汽车产量就已达到1 000万辆,到2000年,这一数据突破5 800万辆,2018年全球汽车产量为9 563万辆,2019到2020年虽然有略微下降趋势,但全球汽车产量仍然高达7 800万辆,如图1.1所示^[1,2]。据公安部统计,截至2021年9月,我国机动车保有量达3.90亿辆,其中汽车2.97亿辆;全国机动车驾驶人4.76亿人,其中汽车驾驶人4.39亿人^[3],交通需求增长趋势明显。

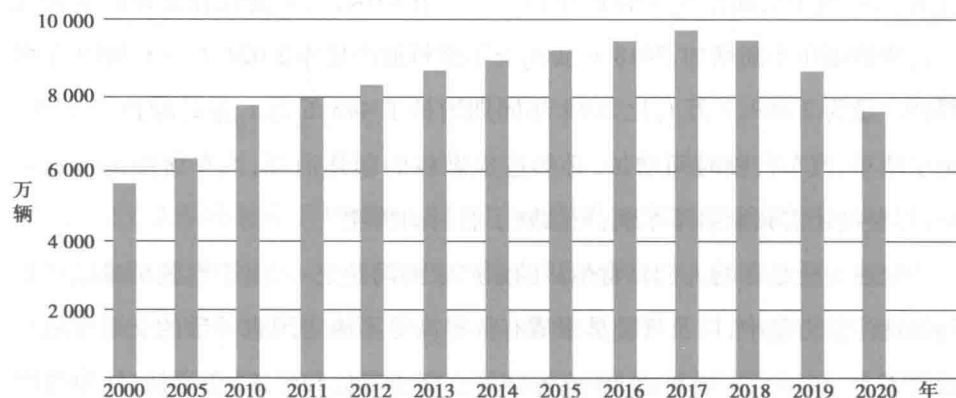


图1.1 世界汽车年产量

随着汽车产量的不断增长,人类在越来越多的方面享受到了汽车带来的益处。近十年,我国公路总里程和公路密度呈稳定上升趋势,2020年末全国公路总里程519.81万km,比上年末增加18.56万km。2020年我国的公路营业性客运量在全国营业性客运量中占比71.3%,公路营业性货运量在全国营业性货运量中占比73.8%^[4]。在欧盟,道路运输是整个内陆运输业的主要途径,2018年占比为75.3%,且该数据仍在持续增长^[5]。

然而,在汽车给社会带来经济效益的同时,也产生了交通拥堵问题,它一直被视为是造成严重的社会、经济和环境问题的原因。欧盟联合研究中心的报告指出,许多国家的主要城市(法国巴黎、德国柏林、葡萄牙里斯本)交通拥堵时间均呈逐年上升趋势,交通拥堵进一步增加了公路运输成本,因道路拥堵导致的损失大约超过1100亿欧元/年^[5]。根据高德地图发布的《2020年度中国主要城市交通分析报告》^[6],2020年我国361个城市中,有40.16%的城市在通勤高峰时处于拥堵或缓行状态。因此,我们不得不面对如交通拥堵、安全、污染、能源损耗等一系列日益严重的问题。

2018年,欧盟国家的内陆运输业燃油消耗量达到287百万吨油当量,占总能源消费量的30.5%。公路运输量占内陆运输量的76.7%,公路运输的燃油消耗量占运输业消耗量的32.8%。同年,欧盟国家的道路运输的CO₂排放量达11亿t,占整个交通排放量的87%以上^[5]。在中国,汽车能耗在总体燃料消耗中的比例逐年不断增加,2018年我国全年燃料油产量为2024.1万t,2019年燃料油产量为2469.7万t,比2018年同期增长了445.6万t,累计增长了22%。由于堵车,汽车行驶时间增加,必然造成燃料的额外消耗,汽车缓慢运行的同时,驾驶员还需频繁启停车辆,更加剧了燃料的消耗。

交通安全是影响人们日常生活的最严重的问题之一,由于驾驶员难以长时间保持注意力集中,以及驾驶员素质有待提高等不确定因素导致的交通事故率居高不下,如道路交通事故、环境污染等。交通事故和疟疾、艾滋病、战争等问题成为导致死亡和残疾的主要原因。据统计,欧盟2019年的交通事故数量达

到 93.52 万起,事故导致死亡人数超过 2.2 万^[7]。近年来,我国道路交通体系在运输能力供给、设施总量规模以及服务质量等方面获得了显著成就,道路交通事故的总量较大,但机动车交通事故在逐年减少。2018 年涉及人员伤亡的道路交通事故数为 24.49 万起,2019 年道路交通事故数为 24.76 万起,其中,汽车交通事故发生数为 15.9 万起,同比下降 4.5%^[8]。

有学者建议通过修建更多的公路和街道来解决交通问题。然而,无论从经济还是环境角度来看,修建道路的难度在逐渐增加。数据显示,每年通过建设道路增加的车辆容纳能力远远滞后于社会的需求,所以才导致交通拥堵问题的日益严重。因此,解决交通拥堵问题,必须寻求更为有效的解决办法。其中一种方法是通过对公路和燃料资源的优化利用,提供安全、舒适的交通,同时将对环境的影响降到最小。然而,开发出能够满足这些种类繁多又相互制约的多样性需求的车辆,无疑是一个巨大的挑战。对于迎接这一挑战,智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)已显示出其在提高交通安全、减少交通拥堵、改善驾驶条件等方面的巨大潜力。早期研究表明,借助于 ITS,可以将意外事故降低 18%,污染气体排放减少 15%,耗油量降低 12%^[9]。

1.2 智能交通系统和自动高速公路系统

1.2.1 智能交通系统

智能交通系统起源于 1940 年纽约世界博览会上展出的名为“Futurama”的概念运输系统。经过 1980—1990 年大量的项目研究和实施,在欧洲、北美和日本,ITS 已成为当今的研究主流。对人、车、路而言,ITS 是一个先进的信息和通信网络。ITS 可以共享信息,使人们获得更多的交通信号,提供更高的安全性和效率的同时降低对环境的影响。ITS 的原理如图 1.2^[10] 所示。

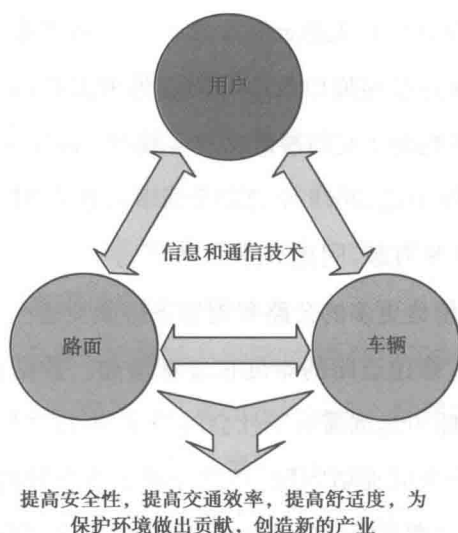


图 1.2 智能交通系统原理图

ITS 是将先进的科学技术(信息技术、计算机技术、数据通信技术、传感器技术、电子控制技术、自动控制理论、运筹学、人工智能等)有效地综合运用于交通运输、服务控制和车辆制造,加强车辆、道路、使用者三者之间的联系,从而形成一种保障安全、提高效率、改善环境、节约能源的综合运输系统。根据中国基本实现现代化的战略部署和国民经济发展的阶段性要求,综合考虑我国交通运输业的总体发展水平和智能交通的发展现状和水平,智能交通在中国的发展主要经历了以下 3 个阶段。

第一阶段(2006—2010 年):交通系统技术体系和智能型综合交通系统形成期,在几个应用领域达到和接近发达国家同类项目 2000 年的水平。具体是以城市和城间道路运输系统为核心,兼顾其他运输方式,在城市交通信号系统、公交调度和服务系统、区域联网不停车收费系统、综合交通信息集成系统、公众出行信息服务系统等方面形成效用明显、规模大、使用范围广的实际应用系统;在北京奥林匹克运动会、上海世界博览会和广州城市综合交通中形成智能交通系统应用的典型系统;在交通信息采集与处理、新型定位系统技术、新型交通安全技术、智能车路系统等方面初步形成自主研究和创新体系,开发可为企业和

政府所应用的先导技术。

第二阶段(2010—2015年):完善的智能交通技术体系已经形成,智能型综合交通体系已经开始发挥效用,并日渐完善,达到发达国家2005年ITS发展水平,即国际上所称的第二代发展水平。各种交通运输方式完成自身的智能化建设,智能交通综合系统已初步形成并发挥效应,各地区在国家ITS体系框架和标准的指导下,建成便于今后全国联网、互通共享的智能交通综合信息平台系统,能够实现全国范围内的快速客运系统和货运物流系统,达到人流、物流、信息流的无缝衔接,智能型综合交通体系开始发挥明显作用。

第三阶段(2015年至今):智能交通系统已经成为人们生活的必要组成部分,人、车、路之间已经形成稳定、和谐的智能型整体,进入智能交通发展的成熟期,接近发达国家的发展水平。通畅、便捷、安全、经济、可持续发展的智能型综合交通体系已全面建成,智能交通系统已经成为人们生活中必不可少的组成部分,建立于一般服务和特殊服务基础之上的智能交通各子系统能够满足人们各种各样的出行要求,在交通量持续增加的情况下,智能交通系统能够实现自身的动态调节,交通与人、与社会、与环境更加和谐^[11]。

ITS智能交通系统在自动驾驶领域一般包括以下几类:

- ①Vehicle to Vehicle(V2V)。
- ②Vehicle to Infrastructure(V2I)。
- ③Infrastructure to Vehicle(I2V)。
- ④Vehicle to Pedestrian(V2P)。
- ⑤Vehicle to Everything(V2X)。

V2V一般描述为在ITS系统中车与车之间的通信,实现车辆信息传输;V2I一般描述为在ITS系统中车与基础设施之间的通信,基础设施一般为路边的通信设备,用于收集ITS整体系统的各类交通信息;I2V一般描述为在ITS系统中基础设施与车之间的通信,实现基础设施与车辆之间的信息传输;V2P一般描述为在ITS系统中车与各类行人的通信,包括骑电车的人、行人、骑自行车的人

等,他们被视为可携带通信设备的通信来源。在最高层次上,ITS 中车辆被描述为 V2X,用于车辆对任何东西,类似于“物联网”,每一个设备都可以连接到任何其他设备。

1.2.2 自动高速公路系统

自动高速公路系统(Automated Highway System,AHS)是 ITS 不同研究专题中最重要的项目之一,用来表示车辆和公路基础设施之间的新型关系。自动高速公路系统假设具有专用的高速公路车道,所有的车辆均由计算机控制其转向、制动、节气门,采用通信、传感和障碍物检测技术来与外界基础设施交互,以实现车辆的完全自动化^[12]。简而言之,AHS 将车载智能和通信技术结合在一起,实现车辆与公路基础设施的互联。AHS 控制框架如图 1.3 所示。

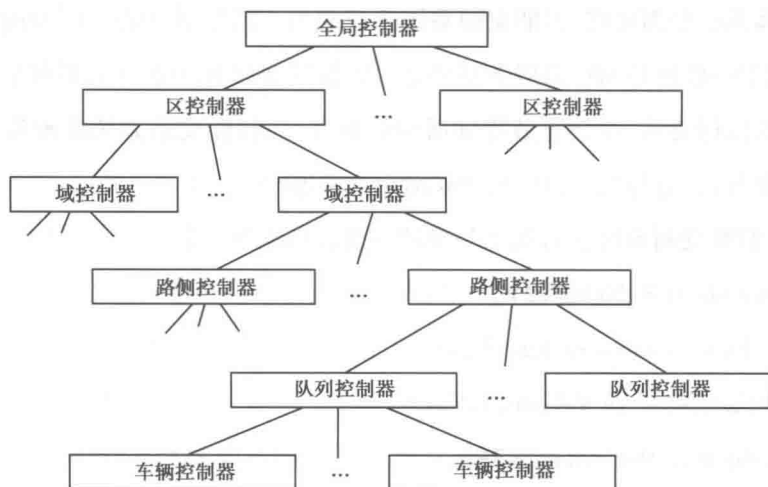


图 1.3 AHS 分层控制框架

AHS 主要包括车辆控制器、队列控制器、路侧控制器、域控制器、区控制器以及全局控制器。其中,车辆控制器是指个体车辆中均存在接收来自平台命令的控制器,并将这些命令(如期望轨迹、期望速度及期望侧偏角等)转换为车辆执行机构的控制信号(如节气门、制动和转向机构的操作);队列控制器是指接

收路侧控制器的指令,并负责控制和协调队列内各车辆间的关系,主要涉及车辆队列间的操作(如与其他队列合并、分离和车道变化)和车辆队列内各车辆间的活动(如保持安全车距);路侧控制器是公路基础设施的一部分,主要任务是为各车辆队列分配速度、安全距离,以避免各队列产生碰撞,此外还会发出对车辆队列的合并、分离和车道改变的指令。高级控制器包括域控制器、区控制器和全局控制器,为低级和中级控制器提供网络范围的协调控制。特别地,域控制器为各个平台提供全区范围的动态路径指导,并通过提供预瞄点和控制目标来监督协调路侧控制器,全局控制器对区控制器进行监督或控制。AHS 使用通信、传感和障碍物检测技术对外部基础设施条件进行识别和交互。车辆和高速公路相互合作,协调车辆移动,避开障碍物并改善交通流量,提高安全性和减少交通堵塞。AHS 的概念结合了一系列车载智能技术、公路基础设施的智能设备,以及连接车辆对公路基础设施的通信技术。自动驾驶系统中的智能车辆(Intelligent Vehicles, IVs)可以使用传感器感知驾驶环境,并向驾驶员提供帮助(通过提示或警告),也可以对车辆本身进行完全控制,以实现有效的车辆操作^[13]。

AHS 的实施可带来的潜在益处详见表 1.1。需要注意的是,有些益处目前仍处于推测状态,具体体现取决于系统在实际中的应用。

表 1.1 AHS 的潜在益处

因素	优势
道路通行能力	AHS 中车辆可以以队列行驶,减小了车间距离,交通流量可达普通高速公路的 3 倍 ^[14]
安全性	人为错误导致的交通事故占比高达 93%,而由车载设备故障、环境条件(如湿滑路面)引发的事故只占很小比例 ^[5] 。自动化系统能够减轻驾驶员负担,并提供辅助驾驶,提高行车安全
天气	虽然雾、霾、灰尘、雨、雪、低角度日晒、黑暗等都会影响驾驶员的能见度,但 AHS 能降低天气和环境条件对驾驶安全的影响

续表

因素	优势
可移动性	AHS 能为所有驾驶员提供安全高效的交通体验,可为老年和新手驾驶员提供较高的可移动性
燃料消耗与排放	从短期看,由于减少了交通堵塞,车辆处于高效运行状态,车辆的节能减排可以达成。从长期看,AHS 能够支持未来车辆的驱动系统设计
土地使用	AHS 帮助人们有效地使用道路,使土地利用率更高
出行时间	AHS 可以减少城市的交通拥堵,并允许更高的巡航速度,从而减少出行时间
商业和中转效率	AHS 能够提供更高效商业运输和中转操作。货运卡车能够实现更好的运输可靠性和中转业务的自动化,在增加客运量的同时,扩展了运输服务的灵活性和方便性

1.2.3 智能车辆

AHS 的实施需要智能车辆与之匹配。如今,汽车配备了越来越多采用传感器、执行器、通信系统和反馈控制的机电子系统,这些子系统的使用使得汽车变得越来越“智能”。过去 20 年里,固体电子学、传感器技术、计算机技术和控制系统的进步,使得智能交通系统有了可靠的技术保证。据文献统计^[15],现在汽车通常需要 500 ~ 600 颗芯片,平均需要的传感器数量为 60 ~ 100 个,随着汽车向智能化、电动化发展,所需芯片数量仍有大幅增长的趋势^[16]。

智能车辆控制是 AHS 应用中的关键部分,有多种不同的车辆控制系统正处于不断研发之中。在本书中,我们将主要介绍两个最基本的车辆运动控制系统,即纵向控制和横向控制。在介绍纵横向控制的最新研究之前,我们先简要介绍现阶段主流的与纵横向控制相关的机械电子反馈控制技术。

● 自动泊车系统 (Automated Parking System, APS) 能够协助或是替代驾驶员完成车辆停车入位的操作,能够在更小的空间内实现泊车操作。市场已经出现了一些产品,它们依靠汽车遥控钥匙或是安装在智能手机上的应用程序,在驾驶员的全程监控下,实现停车入位的操作。在近期,有望出现新一代系统,它们能够完全脱离驾驶员监控,通过与停车场的相关装置共同配合,减小操作风险,提高停车效率。最终,自动停车系统能够延伸到所有类型的停车操作。

● 自适应巡航控制 (Adaptive Cruise Control, ACC) 通过控制节气门和制动实现纵向控制,使得被控车辆和前车保持所期望的车距。ACC 的应用可以避免车辆追尾事故的发生,自营职业收入支持计划 (Self-Employment Income Support Scheme, SEISS) 研究表明,2010 年欧洲如果有 3% 的车辆配备了 ACC 系统,便可以减少 4 000 起事故^[17]。根据美国道路安全保险协会 (Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) 调查,这套 ACC 系统可以减少约 40% 的追尾事故。此外,美国国家公路交通安全管理局 (National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA) 的研究显示,只要驾驶员能提前刹车 1 s,就能减少约 90% 的追尾概率。

● 横向控制包括车道偏离预警 (Lane Departure Warning, LDW) 和车辆换道辅助系统 (Lane Change Assistant System, LCA)。如果驾驶车辆无意中偏离其所在车道,LDW 系统将提醒驾驶员;而 LCA 系统能够在车辆换道的过程中对障碍物进行检测。

● 防撞系统 (Collision Avoidance, CA) 与巡航控制系统类似,使车辆在前方无障碍物时保持恒定的期望速度行驶,如果前方出现障碍物,CA 系统将判断车辆运行速度是否安全,若否,将通过控制加速或者制动进行加速或减速,同时向驾驶员发出警告。

● 线控技术 (Driven-by-Wire) 通过利用机电执行器、人机交互接口 (如踏板和转向传感器) 的电子控制系统代替传统的机械和液压控制系统。电子技术的应用可提高驾驶性能、安全性和可靠性,同时降低生产和运营成本。一些新车型上已经采用了线控技术。

- 车辆导航系统(Vehicle Navigation System, VNS)通常使用GPS获取位置信息,并使用数字地图对使用者进行定位。通过使用数字地图,可为车辆提供导航信息。

- 车辆识别(Automated Vehicle Identification, AVI)和车辆定位系统(Automated Vehicle Location, AVL)。AVI系统首次应用在电子不停车收费(Electronic Toll Collection, ETC)系统中,以确定通过收费站的车辆身份。目前大多数AVI系统依赖于无线射频识别,AVI车辆上的应答器与收费口的天线通过专用短程通信(Dedicated Short Range Communication, DSRC)进行信息交互。而AVL系统将自动确定车辆的位置并将信息发送给请求者。通常情况下,GPS和无线通信系统都是必需的。AVI和AVL的使用,使得实时处理车辆位置信息成为可能。这些技术将在第3章中详细介绍。

1.3 自动驾驶国内外研究现状

1.3.1 研究项目

(1) 美国项目研究现状

自动驾驶在美国拥有相对较长的发展历程,其间经历了多次波荡起伏。自动驾驶概念最早出现在1940年纽约世界博览会上由通用公司展示的Futurama原型。随后其发展经历了大致4个阶段。第一阶段是20世纪50年代,由通用汽车公司(General Motors Company, GM)与美国无线电公司(Radio Corporation of America, RCA)合作提出的自动高速公路系统的概念。第二阶段,是由俄亥俄州立大学Robert Fenton教授带领的一系列研究工作,从1964年一直延续到1980年。第三个阶段是由加利福尼亚州运输部(California Department of Transportation, CALTRANS)和美国加州大学交通研究中心(The University of California Institute