



上海高校一流学科B类交通运输工程项目资助

交通运输规划与管理研究系列

车辆自适应巡航系统的 控制策略研究

CHELIANG ZISHIYING XUNHANG XITONG DE
KONGZHI CELUE YANJIU

罗莉华 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



车辆自适应巡航系统的 控制策略研究

罗莉华 编著



内容提要

车辆自适应巡航控制(ACC)系统在智能交通中被不断推广。本书研究 ACC 系统中的控制策略,分别对自适应巡航系统的间距策略、数学建模和控制算法设计进行研究,并通过仿真实验分析系统性能。

本书可供车辆工程、控制理论与工程、交通信息工程与控制等专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

车辆自适应巡航系统的控制策略研究 / 罗莉华编著。

—上海:上海交通大学出版社,2013

(国际航运中心建设)

ISBN 978-7-313-10488-5

I. ①车… II. ①罗… III. ①汽车-自适应程序-巡航控制系统-研究 IV. ①U463.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 256981 号

车辆自适应巡航系统的控制策略研究

编 者:罗莉华

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:常熟市大宏印刷有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

字 数:130 千字

版 次:2013 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-10488-5/U

定 价:42.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:(021) 64071208



版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52621873

上海高校一流学科 B 类交通运输工程项目资助
交通运输规划与管理研究系列

车辆自适应巡航系统的 控制策略研究

罗莉华 编著

上海交通大学出版社

序

为实现由教学型大学向教学研究型大学转变的目标,上海海事大学一直将学科建设作为学校工作的重中之重,从体制、机制和投入三方面予以支持,以便更好地为国家交通事业的发展和上海国际航运中心建设服务。

交通运输规划与管理学科作为交通部重点学科和学校的传统优势学科,目前设有1个博士点(交通运输规划与管理),3个硕士点(交通运输规划与管理、交通运输工程、港口海岸及近海工程),2个中外合作研究生培养项目(国际航运与物流工程、物流工程与管理)。

长期以来,交通运输规划与管理学科坚持以水路运输为特色,围绕交通运输战略与规划、交通运输现代化管理、海事信息与控制领域中的重大理论、技术和管理问题,注重学科建设和科学研究,取得了一定的学术成果。

《交通运输规划与管理研究系列》丛书收录的学术专著均源自交通运输规划与管理学科的教师近年来所完成的科研成果,从整体上代表了该学科的学术水平。这些专著作者,既有在学术上已卓有成就的资深学科带头人,也有正在快速成长的中青年学科带头人和学术带头人,其中还不乏初出茅庐的青年才俊,这充分显示了交通运输规划与管理学科雄厚的学科人才梯队。更值得一提的是,此次出版的丛书涉

及交通运输领域的方方面面,既有基础理论领域的探索,也有技术层面的应用创新,这表明了交通运输规划与管理学科的发展正逐渐呈现出多学科交叉的特色和优势。

《交通运输规划与管理研究系列》丛书的顺利出版,标志着交通运输规划与管理学科建设又达到了一个新的高度。在此衷心希望交通运输规划与管理学科团队继续振奋精神,努力创新开拓,坚持“理论上有一个高度,应用上有一个落脚点”的发展模式,在理论研究层面能密切跟踪当前国际学术发展前沿动态,并与之相接轨;在应用研究领域,能与海事领域具体应用密切结合,切实解决重大海事管理与规划问题,力争成为国内海事规划与管理领域不可或缺的思想库、专家库、技术库和成果库。

上海海事大学党委书记

於世成教授

前 言

随着智能交通系统的不断推广,车辆自适应巡航控制(ACC)系统因其能有效减轻驾驶员的精神负担,减少因驾驶员失误而造成的交通事故,提高汽车乘坐舒适性和燃油经济性并改善交通流等,近年来已得到了政府、企业以及高校研究机构的广泛关注。

在车辆自适应巡航控制系统中,控制策略是实现系统功能及其实用化的关键所在,其设计的好坏直接决定系统的动态响应。本书作者在分析大量国内外已有科研成果的基础之上,分别针对自适应巡航系统的间距策略、数学建模和控制算法设计进行研究,并通过大量的仿真实验分析系统性能。

本书分为6章,内容为:绪论;ACC系统的间距策略研究;基于模型预测控制(MPC)的多目标ACC系统上层控制算法研究;考虑驾驶员行驶习惯的ACC上层控制算法研究;执行机构优化切换的多目标ACC系统一体化控制算法研究;结论与展望。

本书可作为车辆工程、控制理论与工程、交通信息工程与控制等专业的硕士生、博士生的参考教材,也可供在车辆动力学和智能交通系统行业从事控制系统研究的工程师们参考。

在本书的编写过程中,得到了浙江大学控制系的李平教授、王慧教授,上海海事大学交通运输学院的施欣教授、韩皓教授、张华歆副教

授、李文娟老师等的支持与帮助,在此表示衷心的感谢。本书内容参考了大量国内外有关论著和文献资料,在此谨向有关资料的原作者表示深深的谢意。

本书的出版得到了国家自然科学基金(61304203)、上海市自然科学基金(12ZR144480)、上海海事大学基金(20120077)、上海市重点学科建设项目(S30601)、上海高校一流学科B类交通运输工程项目以及上海市优秀青年教师项目的资助。

限于作者水平有限,加之时间仓促,书中存在的错误之处,敬请读者批评、指正。

罗莉华

2013年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 车辆自适应巡航控制(ACC)系统	3
1.2.1 车辆自适应巡航控制系统概述	3
1.2.2 车辆自适应巡航控制系统的间距策略	6
1.2.3 车辆自适应巡航控制系统的控制算法	9
1.3 预测控制	12
1.3.1 原理概述	12
1.3.2 数学方程描述	13
1.3.3 预测控制的应用	14
1.4 本书内容	16
2 ACC 系统的间距策略研究	18
2.1 引言	18
2.2 考虑前车速度趋势的可变车头时距策略	19
2.3 间距误差稳定性证明	20
2.4 仿真分析	22
2.5 本章小结	27
3 基于 MPC 的多目标 ACC 系统上层控制算法研究	29
3.1 引言	29
3.2 ACC 系统车间相互纵向运动学建模	30
3.3 ACC 系统上层控制算法研究	33
3.3.1 控制目的分析	33
3.3.2 基于 MPC 的多目标控制算法设计	35

3.4	仿真分析	39
3.5	本章小结	46
4	考虑驾驶员行驶习惯的双模式 ACC 系统上层控制算法研究	47
4.1	引言	47
4.2	考虑驾驶员行驶习惯的双模式 ACC 系统上层控制算法	48
4.2.1	平稳跟车模式	48
4.2.2	快速接近模式	49
4.2.3	基于模糊推理的双模式切换策略	54
4.3	快速接近模式的控制算法求解	56
4.4	仿真分析	61
4.5	本章小结	66
5	执行机构优化切换的多目标 ACC 系统一体化控制算法研究	67
5.1	引言	67
5.2	ACC 系统的一体化控制结构	68
5.3	基于逻辑变量的 ACC 系统一体化模型	68
5.3.1	基于逻辑变量的执行机构模型	69
5.3.2	执行器特性与车间纵向运动学相结合的 ACC 系统一体化模型	70
5.4	执行机构优化切换的多目标 ACC 系统一体化控制算法	72
5.4.1	控制需求分析	72
5.4.2	基于 MPC 的控制算法设计	74
5.4.3	控制率求解	78
5.5	仿真分析	80
5.6	本章小结	89
6	结论与展望	90
6.1	本书小结	90
6.2	未来研究展望	91
	参考文献	92
	名词索引	102

1.1 引 言

交通状况在城市发展中具有举足轻重的作用,它直接影响着城市的社会经济效益和居民的生活幸福。随着经济的迅速发展,世界范围内的汽车量在不断增加,车速也在不断提高,由此带来的交通事故、道路拥挤、环境污染、能源浪费等问题日益突出。

据统计,全世界每年死于道路交通事故的人数约为 50 万人,而我国则是世界上交通事故最严重的国家。面对严峻的交通形势,政府管理者、高校研究所以及汽车企业都在积极采取措施,以电子、通信、控制及信息技术为基础的智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)应运而生。智能交通系统将先进的信息技术、数据通信传输技术、电子传感技术、电子控制技术以及计算机处理技术等有效地集成并运用于整个交通运输管理体系,从而提高交通运输效率、缓解交通阻塞状况、提高路网通行能力、减少交通事故发生、降低能源消耗、减轻环境污染等^[1]。发展智能交通系统已成为世界各国交通研究领域的热点和重点^[2]。

ITS 是由日本、美国、欧洲率先发展起来的,早期研究主要集中在道路的基础设施和功能完善,随后扩展到车辆智能化、道路交通运输的全过程及相关服务机构,最后深化到整个道路交通运输的“智能化”和“现代化”。而我国在这方面起步较晚,虽然在 20 世纪 70 年代就已将电子和信息技术应用于交通领域,但直到 90 年代才引入了 ITS 的概念^[3]。

早在 1989 年,美国制定了最早的 ITS 发展战略,随后又相继颁布了两部 ITS 法案,即 ISTE(A Inter-modal Surface Transportation Efficiency Act)和 TEA-21 (Transportation Equity Act for the 21st Century),确定了智能交通系统的结构,如图 1-1 所示^[4]。ITS 作为一个复杂的现代工程系统,主要由先进的出行信息系统(advanced traveler information system, ATIS)、先进的交通管理系统(advanced traffic management system, ATMS)、先进的公共交通系统(advanced public transportation system, APTS)、先进的车辆控制和安全系统(advanced vehicle control and safety system, AVCSS)、自动公路系统(automated highway system,

AHS)、先进的乡村交通系统(advanced rural transportation system, ARTS)以及商用车辆管理系统(commercial vehicle operation system, CVOS)等几个部分组成。

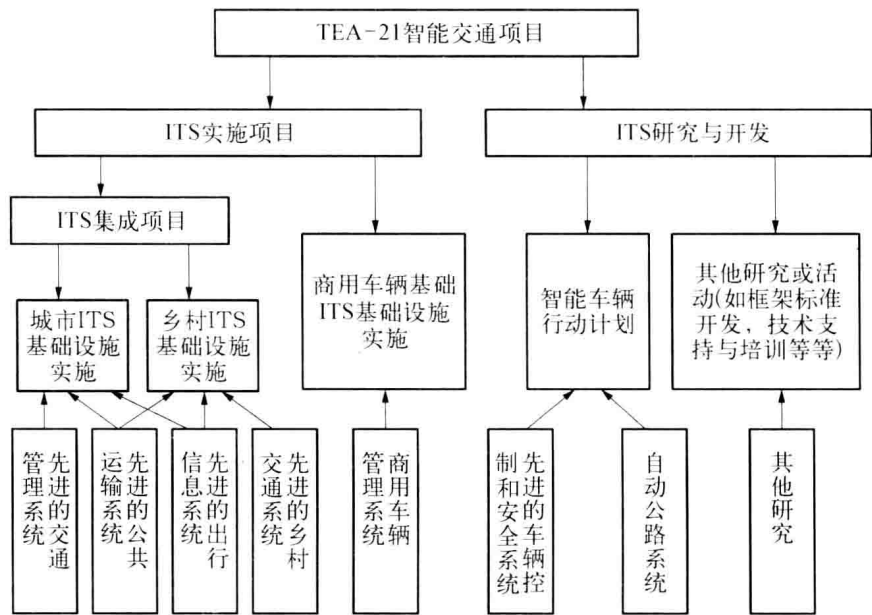


图 1-1 美国 TEA-21 智能交通系统结构框架

在智能交通系统中,先进的车辆控制和安全系统(AVCSS)以车辆作为研究对象,开发协助驾驶员对车辆进行控制的各种辅助驾驶技术,从而使汽车的行驶更加安全、高效。它包括车辆自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)系统、冲突避撞系统(collision avoidance system, CAS)、冲突警告系统(collision warning system, CWS)、车道保持控制系统(lane keeping systems, LWS)、车道偏离警示系统(lane departure warning system, LDWS)等^[5]。其中,自适应巡航控制系统是目前应用最广泛也是研究学者最关心的汽车辅助驾驶系统^[6~11],基本上所有的大型汽车企业都在对它进行大力研发。

自适应巡航控制系统是一种构想于 20 世纪 70 年代末期的车辆安全辅助驾驶系统,它在传统的定速巡航控制(cruise control)基础上结合安全车间距保持系统(safety distance keeping system, SDKS),既具有定速巡航功能,又可以通过位于车身前部的雷达传感器测量前方行驶环境,如前方有无车辆、两车间距、相对速度等,通过控制相应的节气门(油门)驱动和刹车制动装置自动调整车速,保证本车以一个安全的车间距行驶^[8,11],如图 1-2 所示。

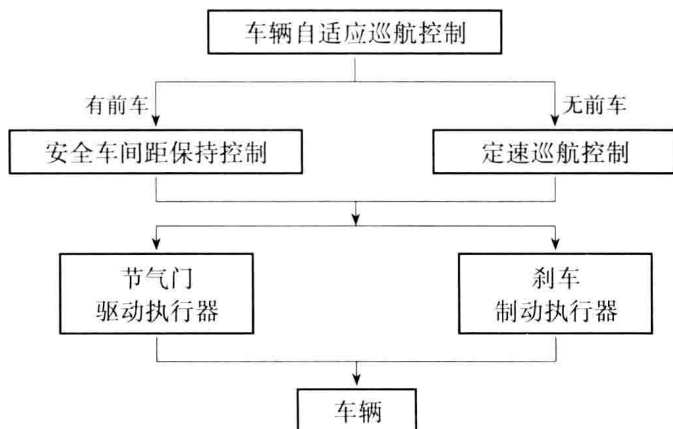


图 1-2 车辆自适应巡航控制系统示意图

通过分析,车辆自适应巡航控制系统具有如下优点:

(1) 在长途驾驶中代替驾驶员对车辆进行自动控制,避免驾驶员长时间紧踩加速踏板或制动踏板,减轻驾驶员的操作负担。

(2) 避免因驾驶员疏忽(醉酒驾驶、疲劳驾驶、误操作等)造成的交通事故,提高行驶过程的安全性。

(3) 通过平稳控制行驶过程中的车速,提高乘坐舒适性、降低油耗。

(4) 避免由于新手频繁地加减速带来的机械磨损,延长车辆零部件的使用寿命。

(5) 由于自适应巡航控制系统的反应时间明显小于驾驶员的反应时间,行驶过程中可采用较小的车间距,因而有利于增大道路的交通流量。

(6) 当道路上的车辆广泛采用 ACC 系统辅助驾驶时,有利于进行车队控制,规范车辆的行驶,避免乱插队现象,改善交通流量。

车辆自适应巡航控制系统近年来已成为企业界和学术界的一个热门研究课题,它对改善车辆行驶状况,推进交通智能化和现代化具有极其重要的意义^[12]。

1.2 车辆自适应巡航控制(ACC)系统

1.2.1 车辆自适应巡航控制系统概述

自适应巡航控制(ACC)系统自提出以来,得到了政府、高校研究所以及汽车制造商的广泛关注。起初,由于传感器技术、信号处理技术、汽车电子技术以及交通设施等方面的因素,限制了自适应巡航控制系统的发展,因而只停留在理论研究的

准备阶段,随着各项技术的进步以及道路智能化的大力推广,车辆自适应巡航控制系统的研究与应用有了突破性的发展,纵观其发展历史,大致可以分为如下三个阶段:

1) 理论准备阶段(1950—1985)

最早的 ACC 系统起源于 20 世纪 50 年代,在提出的初期只能通过固定油门踏板的位置来完成定速巡航的功能^[13]。1960 年,Michigan 大学的 Diamond 和 Lawrence^[14]针对交通拥堵问题提出了“智能高速公路”的概念,随后,Levine 和 Athans^[15]提出了智能车队的理念,即队列中的所有车辆自动地对其前车进行跟车、适应前车的速度变化。自适应巡航控制一词中的“自适应”也就由此而来。这个理念得到了当时美国交通部门的大力支持。从 1964 年至 1971 年,美国俄亥俄州立大学对自适应巡航控制进行了深入的研究^[16~18],他们通过分析,指出 ACC 系统的控制不仅应该满足单车稳定,还应该满足队列稳定(间距误差随着车队传递的收敛稳定),并将车间距-速度曲线划分为不同区域,针对不同区域设计了不同的 ACC 系统控制策略。此后,一些学者针对这个控制结构进行了一定的分析和仿真^[19, 20]。欧洲则从 1970 年开始进行相关研究,如德国的 Cabinentaxi 智能运输系统^[21],法国的 ARAMIS 系统^[22]均对 ACC 系统的理论研究做了不少工作。然而,受自动控制、通信、电子及传感器技术的限制,这些早期的研究都未取得实质性的成功。尽管如此,它为后期的研究发展积累了一定的理论背景和实践基础。

2) 技术研发阶段(1986—2000)

伴随着通信、计算机以及传感技术的大力发展,欧洲、美国、日本从 20 世纪 80 年代开始大力对 ACC 系统进行技术研发。

在欧洲,由 16 家汽车制造商联合 56 家电子和供应商公司以及 115 所研究机构在 1986 年发起了长达 8 年的 PROMETHEUS 项目^[23],该项目致力于研究与开发 ACC 系统。其中,Broqua 等人^[24]对 ACC 系统作了更加详尽的定义与设计,并利用 SPACES 仿真技术对其进行了模拟与评估;Zhang 等人^[25]则设计了一个评价 ACC 系统行驶安全性的模型框架,Joachim 等人^[26]将行驶场景分为自由行驶、普通跟车、换道插入等,并针对不同的行驶场景设计了简单的线性控制算法。

在美国,针对日益严重的交通拥堵,加利福尼亚交通部门于 1986 年成立了一个名为 PATH 的组织,致力于对智能交通系统中的若干问题进行研究^[27]。在 PATH 的众多项目中,MOU32 计划^[28]由 PATH 和福特汽车公司联合资助,主要针对 ACC 系统的设计与仿真展开研究;MOU248 计划则由加州大学智能交通研究中心担任,对 ACC 系统的特性及其对交通流的影响进行评估^[29];MOU390 计划则是由美国德克萨斯大学的 Darbha 等人^[30]完成,分析车辆在使用 ACC 系统下的队列稳定性以及交通流稳定性。此外,美国的 IVI(Intelligent Vehicle Initiative)

项目也对 ACC 系统展开了为期 9 年的深入研究^[27]。从 1996 年 7 月至 1997 年 9 月,由美国 NHTSA、UMTRI 组织和密歇根大学联合展开了一项针对 ACC 系统评估的真车实验^[31]。在该实验中,108 名志愿者使用 ACC 系统在密歇根州的高速公路上行驶,根据数据分析以及调查问卷等形式评估了 ACC 系统行驶过程中的安全性及人们对 ACC 系统的接受度和满意度。

日本则从 20 世纪 80 年代开始展开了 IVHS(Intelligent Vehicle Highway System)项目^[32],致力于智能汽车、交通信息采集以及交通管理等方面的研究。此外,日本的 ASV(Advance Safety Vehicle)计划也针对主动安全系统进行了研究,其中包括如何通过车辆 ACC 系统减少因驾驶员失误造成的交通事故,基本上日本所有的汽车生产商均参与了这项计划。在 1995 年,日本推出了第一代 ACC 系统,而 Mazda、Mitsubishi 以及 Toyota 等企业也分别研发了自己的车辆 ACC 系统^[33]。由于这些工作都是汽车制造商和供应商为提高企业自身竞争力而在内部展开,因此多数研究成果并未公开。

3) 投产阶段(2001 年至今)

进入到 21 世纪,政府、汽车制造商、交通管理者大力推进 ACC 系统的应用,如今 ACC 系统已逐渐成为国内外一些高档轿车上的标准配件,表 1-1 列出了现有市场上配有 ACC 系统的部分车型^[27]。

表 1-1 现有市场上装配 ACC 系统的部分车型

地 区	装配 ACC 系统的车型
欧 洲	Audi A6, Audi A8, BMW 3 Series, BMW 7 Series, Jaguar XK-R, Mercedes-Benz S-Class, Volkswagen Phaeton, Volvo S80
美 国	Cadillac DTS, Cadillac STS, Chrysler 300C
日 本	Honda Legend, Nissan Infiniti M, Toyota Lexus ES-350, Toyota Avalon

经历了半个多世纪的发展,车辆 ACC 系统的架构已趋于标准化,它通常由信息采集单元、信号控制单元、执行单元和人机交互界面等 4 部分组成,如图 1-3 所示^[34]。信息采集单元主要用于检测本车状态及周围行车环境等信息,如两车间距、相对速度等;信号控制单元则根据车载传感器检测到的当前行驶状况,决策出车辆的控制作用,并输出给油门驱动或刹车制动执行单元;执行单元主要由油门踏板、刹车踏板以及车辆传动系等执行器组成,执行信号控制单元发出的命令;人机交互界面主要用于驾驶员对 ACC 系统的功能选择及参数设定。

可见,信号控制单元是 ACC 系统的“大脑”。在这个模块中,间距策略和 ACC 系统控制算法是其两个核心组成部分,如图 1-4 所示。间距策略根据当前行驶环

境决定期望的安全车间距,为 ACC 系统控制算法的间距控制提供参考输入值;ACC 系统控制算法则通过控制相应的驱动或制动执行机构,使得车辆在实际行驶过程中保持期望的安全间距^[35, 36]。

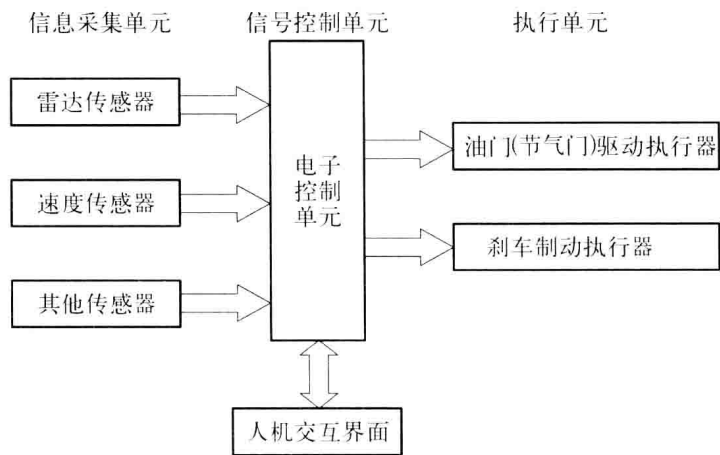


图 1-3 自适应巡航控制系统的架构

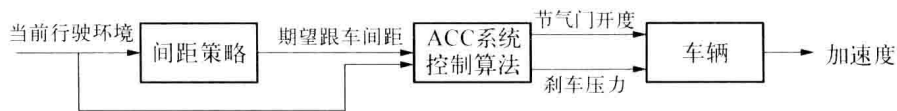


图 1-4 自适应巡航控制系统的信号控制单元框图

在 ACC 系统的实际应用中,主要包括平稳跟车(car following)、前车换道插入(cut in)、前车换道离开(cut out)、远处接近前车(approaching)以及急刹车(hard brake)这 5 种典型的交通场景,如图 1-5 所示。在现实生活中,实际的交通场景无论多复杂,基本都是由这 5 种场景组合而成。因而一个 ACC 系统控制策略设计的好坏,在于它能否适应这 5 个典型的交通场景并表现出不错的动态特性。本书在后续的研究工作中也主要针对这 5 种典型的交通场景进行仿真实验,分析 ACC 系统控制的有效性。

1.2.2 车辆自适应巡航控制系统的间距策略

在 ACC 系统的信号控制单元中,间距策略决定了行驶过程中采取的安全跟车间距,为后续的 ACC 控制算法提供参考间距输入值,是设计 ACC 系统控制系统的第一步。过小的间距策略容易引发交通事故,而过大的间距策略不仅损失了道路的交通通行能力,而且容易导致邻近车道车辆的换道插入。可见,间距策略设计的

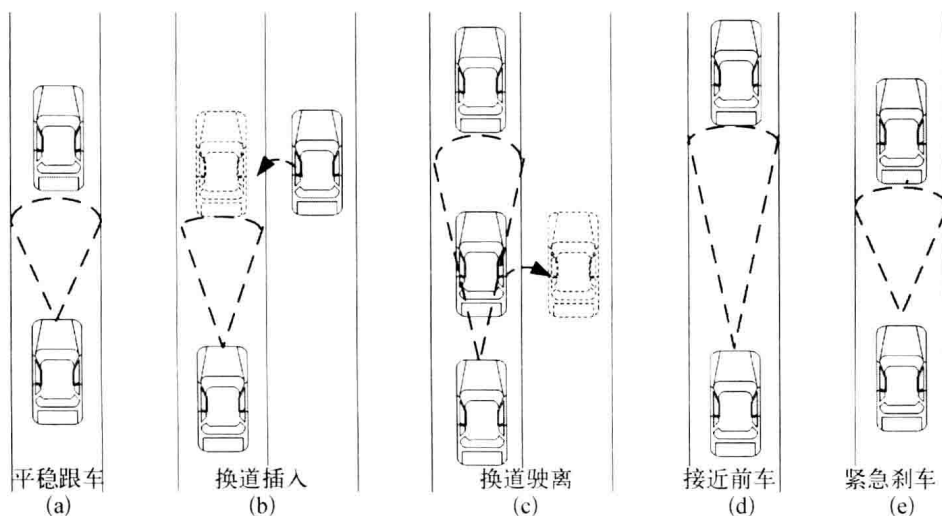


图 1-5 自适应巡航控制系统的 5 种典型交通场景

好坏直接决定了行驶过程中的安全性、跟车性以及道路的使用效率等。

现有的间距策略主要可以分为两大类：固定间距策略^[37, 38]和可变间距策略。固定间距策略，顾名思义，就是在行驶的过程中始终保持一个恒定的车间距，而与当前行驶环境无关。这种间距策略结构简单，计算量少，但对间距值的选择提出了极大的挑战，既要兼顾到各种复杂的行驶环境，又要尽可能地保证行驶的安全并改善交通流。不少学者^[39, 40]通过研究指出：这种固定的间距策略无法适应一些复杂多变的行驶环境，无法平衡行驶过程中的多个控制目的，在缺乏车-车通信的情况下会导致 ACC 系统队列的不稳定。针对固定间距策略的不足与缺点，研究学者提出了随行驶环境变化的可变间距策略。

在可变间距策略中，具有代表性的主要有基于车头时距的安全间距策略以及仿人间距(human factor distance, HFD)策略。其中，基于车头时距的间距策略又可分为恒定车头时距(constant time headway, CTH)策略和可变车头时距(variable time headway, VTH)策略。

CTH 策略最早起源于针对微观手动驾驶行为提出的安全距离模型^[41]：

$$\Delta x_{\text{des}} = h_1(v^2 - v_p^2) + t_h v + \Delta x_0 \quad (1-1)$$

式中， Δx_{des} 为期望的安全距离； v 、 v_p 分别代表本车和前车速度； h_1 为参数，主要取决于车辆的最大减速能力； t_h 称为车头时距； Δx_0 为最小安全间距，一般包括一个车身长度及车间最小距离。

而在 ACC 系统的行驶过程中，车辆一般处于紧随状态，因此可认为前后两车