

中国制造2025 前沿技术丛书

智能交通系统 中的车辆协作控制

郭戈 岳伟 著

电气自动化新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

中国制造 2025 前沿技术丛书

电气自动化新技术丛书

智能交通系统中的车辆协作控制

郭 戈 岳 伟 著



机械工业出版社

本书以智能交通系统为切入点,以车辆的协作控制作为主要内容。立足广义的智能交通系统进行分析讲解,主要内容包括:车联网系统中通信受限、车载传感器测量受限、车辆自身高度非线性以及车队模型高度耦合,并对这四方面问题进行综合设计。首先,从线性车队模型入手,提供传统的控制器设计方法,给出车辆协作控制的基本性能指标。其次,进一步考虑车联网系统中,由于通信信号存在延时、丢包、通信范围有限、车载传感器受限等问题对车队性能造成的影响,并给出问题的解决方法。最后,将上述通信、传感器受限等问题,在非线性车队系统的模型基础上,进一步分析和设计,同时给出大量基于 MATLAB 的仿真和 Arduino 车队实验数据,使读者能充分理解智能交通系统中的各个指标,并让读者能更好地掌握控制算法的应用。

图书在版编目(CIP)数据

智能交通系统中的车辆协作控制/郭戈,岳伟著. —北京:机械工业出版社, 2016. 6

(中国制造 2025 前沿技术丛书 电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-53209-5

I. ①智… II. ①郭…②岳… III. ①车辆调度—智能控制—智能运输系统 IV. ①U495

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 049857 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:江婧婧 责任编辑:江婧婧

责任校对:张玉琴 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·13.25 印张·265 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-53209-5

定价:59.00 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:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主 任：王永骥

副 主 任：牛新国 赵光宙 孙 跃 阮 毅

何湘宁 霍永进 韩芙华

顾问委员：王 炎 孙流芳 陈伯时 陈敏逊

彭鸿才 尹力明

委 员：(按姓氏笔画为序)

王永骥 王 旭 王志良 牛新国

许宏纲 孙 跃 刘国海 李永东

李崇坚 阮 毅 陈息坤 汪 镭

沈安文 张 兴 张 浩 张华强

张承慧 张彦斌 何湘宁 赵光宙

赵 杰 赵争鸣 赵荣祥 查晓明

徐殿国 常 越 韩芙华 霍永进

戴先中

秘 书：王 欢 林春泉

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来,在中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会学会领导和广大作者的支持下,在前5届编辑委员会的努力下,至今已发行丛书53种55多万册,受到广大读者的欢迎,对促进我国电气自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信,表示这套丛书对他们的工作帮助很大,希望我们再接再厉,不断地推出介绍我国电气自动化新技术的丛书。本届编委决定选择一些大家所关心的新选题,继续组织编写出版,欢迎从事电气自动化研究的学者就新选题积极投稿;同时对受读者欢迎的已经出版的丛书,我们将组织作者进行修订再版,以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读,我们将对今后新出版的丛书进行改版,扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函,提出您的宝贵意见和建议,以使本丛书编写得更好。

在本丛书的出版过程中,得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持,在此我们对这些单位再次表示感谢。

第6届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会

2011年10月19日

前 言

蓬勃发展的车联网技术、智慧道路及无人车技术促使以智能车路系统为核心的新一代智能交通技术研究成为近年来的热点领域之一。智能车路系统是典型的信息物理系统,其中大量的车辆通过车联网交换信息,协调和同步车辆流高效通信且平稳安全行驶至关重要。由于高速行驶的车辆实时控制周期和接入网络的时间较短,无线网络状态易受环境及车辆影响,且车联网可容纳有限的车辆同时通信,车载传感器在恶劣条件下感知能力受限甚至失效,因此,智能交通系统中的车辆协作控制极具挑战性。

本书结合复杂车辆动态及智能车路系统中的车联网通信局限性、车载传感器感知能力受限及失效,系统地论述了车辆协作通信及控制的理论、方法和实验验证与分析。具体而言,针对车联网通信带宽限制导致的车辆流反馈信息异质问题,提出分层结构的集中式保性能车辆队列控制方法,将车辆队列描述为多子系统关联的交叠式系统,基于包含原理、解耦和车辆队列稳定性理论,得到分布式车辆队列控制方法体系。针对低能见度条件下的车载传感器测量范围有限问题,综合考虑燃油及制动延时,提出一种变结构保性能车辆队列控制算法;考虑恶劣天气条件下的传感器失效问题,基于切换控制理论中的平均驻留时间法,得到车辆队列稳定性与传感器失效率、采样周期之间的定量关系。最后,综合考虑非线性车辆动态、车联网通信限制和其他不确定性因素,研究了车辆协作自适应巡航控制的变结构PID控制方法、自适应神经网络及反步法等非线性控制方法。在基于Arduino车辆的交通控制实验平台上验证了上述控制方法的实用性。

本书汇总了著者及其团队在车辆协作控制领域多年的研究成果,对智能交通系统及车辆控制等领域的研究人员及自动控制和交通系统工程等专业的教师具有较高的参考价值,也适合相关领域的研究生作为开展学术探索的参考书。

本书的撰写得到王丽媛、文世喜、赵园等研究生的大力支持,他们对书中的一些理论和方法做了大量的研究和仿真工作,对本书的出版提出过许多宝贵的建议。本书的研究工作和撰写得到国家自然科学基金、霍英东教育基金、教育部新世纪优秀人才支持计划项目的资助,在此表示衷心感谢。

著者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2016年2月10日

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第6届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

前言

第1章 绪论	1
1.1 智能交通系统的背景与意义	1
1.2 智能交通系统研究的主要内容	3
1.3 车辆协作控制的发展	3
1.3.1 纵向控制研究	4
1.3.2 横向控制研究	9
1.3.3 车辆综合控制研究	10
1.4 全书内容安排	11
1.5 符号说明	12
第2章 智能交通系统中的分层式车辆协作控制	13
2.1 车队建模与问题描述	14
2.1.1 车队模型建立	14
2.1.2 反馈信息异质的影响	16
2.1.3 干扰及不确定性建模	16
2.1.4 通信限制建模	18
2.1.5 控制目标	18
2.2 车队稳定性分析	18
2.2.1 保性能控制器设计	18
2.2.2 H_{∞} 控制器设计	21
2.3 车队队列稳定性分析	25
2.4 数字仿真	27
2.5 小结	34
第3章 分散式车辆协作控制	35
3.1 问题描述	35
3.2 设计分散式保性能控制器	37
3.2.1 交叠系统解耦	38
3.2.2 子系统控制器设计	40
3.2.3 原车队控制器设计	43
3.3 车队队列稳定性分析	44
3.4 数字仿真	45

3.5 小结	49
第4章 传感器测量受限下的车辆协作控制	50
4.1 问题描述	51
4.1.1 协作式车队结构	51
4.1.2 传感器测量受限建模	51
4.1.3 车队控制系统模型	53
4.2 车队稳定性分析	55
4.3 车队队列稳定性分析	60
4.4 仿真与实验	63
4.4.1 数字仿真	63
4.4.2 Arduino 车队实验	66
4.5 小结	69
第5章 传感器失效下的切换式车辆协作控制	70
5.1 建立车队模型	70
5.1.1 协作式自适应巡航控制车队模型建立	70
5.1.2 传感器失效影响	71
5.1.3 控制目标及设计相关定义	72
5.2 切换控制的控制器设计	73
5.3 车队队列稳定性分析及控制算法	79
5.4 仿真及实验	81
5.4.1 数字仿真	81
5.4.2 实验	85
5.5 小结	88
第6章 非线性车辆协作控制	89
6.1 建立车队模型	89
6.2 非线性PID控制器设计	90
6.3 车队稳定性及队列稳定性分析	93
6.4 数字仿真	97
6.5 小结	100
第7章 协作式车辆自适应保性能控制	101
7.1 车队模型建立及问题描述	101
7.1.1 非线性车辆动态模型建立	101
7.1.2 控制目标	103
7.1.3 控制器结构	103
7.1.4 RBFNN 描述	104
7.2 车队稳定性及队列稳定性分析	105
7.3 数字仿真	111
7.3.1 非线性影响的实验	112

7.3.2 对车辆动态不确定性的实验	113
7.3.3 执行器延时的实验	114
7.4 小结	116
第8章 传感器测量受限下的非线性车辆协作控制	117
8.1 问题描述	117
8.1.1 车队模型建立	117
8.1.2 传感器模型建立	118
8.2 非线性鲁棒控制器设计	119
8.2.1 Back-stepping 控制器设计	119
8.2.2 非线性鲁棒控制器设计	121
8.3 仿真实验	123
8.3.1 数字仿真	123
8.3.2 实验	126
8.4 小结	130
第9章 传感器失效下的切换式非线性车辆协作控制	131
9.1 车队模型建立以及问题描述	131
9.1.1 非线性车辆动态模型建立	131
9.1.2 传感器失效的影响	132
9.1.3 控制目标	134
9.2 切换控制器设计	134
9.3 队列稳定性分析	136
9.4 数字仿真	137
9.5 小结	138
第10章 执行器饱和及延时下的车辆协作控制	139
10.1 问题描述	139
10.2 H_{∞} 控制器设计	142
10.3 车队队列稳定性分析以及控制算法	148
10.4 数字仿真	149
10.5 小结	154
第11章 智能交通系统中的车辆调度与控制协同设计	155
11.1 车队模型建立以及问题描述	155
11.1.1 车队建模	155
11.1.2 无线通信网络能力受限以及数据丢包对车队系统的影响	156
11.1.3 调度函数	157
11.1.4 系统模型变换	157
11.2 车队控制与调度协同设计	159
11.2.1 单个跟随车辆稳定性分析	159
11.2.2 同时稳定性及可调度性	161

11.3 车队队列稳定性与调度协同设计	165
11.3.1 车队稳定性分析	165
11.3.2 控制与调度协同设计算法	166
11.4 数字仿真	167
11.5 小结	170
第12章 基于连续车辆间歇性通信的车辆协作控制	171
12.1 问题描述	171
12.1.1 图论	171
12.1.2 车队模型建立	172
12.2 保证车队稳定的控制器设计	173
12.3 数字仿真	176
12.4 小结	179
第13章 通信受限的车辆协作控制	180
13.1 协作式车队结构描述	180
13.2 协作式车队队列稳定性描述	180
13.3 考虑通信信道受限的车队模型	181
13.4 协作式车队控制器设计	184
13.5 数字仿真	188
13.6 小结	190
参考文献	191

第 1 章 绪 论

1.1 智能交通系统的背景与意义

在过去的三十多年里,世界上大部分贸易大国(美国、中国、日本、德国)的公路系统都得到迅速的发展,车流量大大增加,交通的便利加速了世界经济的发展。但与此同时,一系列恶劣的后果也随之产生,如交通拥挤、环境污染、交通事故等,都直接导致人员丧失生命,同时带来大量的经济损失。在美国和欧洲每年有超过 40000 人因车祸死亡^[1],在日本每年也有超过 8000 人死于车祸^[2],同样的问题也存在于其他大部分国家,如果按这种趋势继续发展下去,到 2020 年,世界上每年估计将有 850 万人直接或间接死于车祸,这仅在美国造成的经济损失就会高达 2300 亿美元^[3]。在这种背景下,运用各种高新技术实现公路系统的自动化,以解决交通问题的思想便应运而生。

智能交通系统^[4]是近几年提出的新概念,是指将先进的控制、通信及计算机技术应用于现有的公路交通系统当中,通过车路通信和车间通信,以达到自动控制车间距离、车辆行驶方向以及车辆速度的目的,实现公路和车辆的双重自动化控制。自动化公路系统研究的本质是通过有效的利用现有的交通设施,使公路系统和车辆系统实现智能化,从而减少人为因素引起的交通事故,不仅可以提高公路系统的运行效率和安全性,同时对降低能耗、减少环境污染起到一定的积极作用,因此,自动化公路系统是公路系统未来的发展方向。美、欧、日是经济高度发达的国家和地区,拥有较高的汽车保有量和先进的交通设施,智能交通系统的应用已相当普及。除此之外,亚洲的韩国、新加坡和我国的香港地区,其智能交通系统发展水平也较高。

1. 美国智能交通系统的发展

美国智能交通系统的雏形为 20 世纪 60 年代末期的电子路径导向系统,它是利用道路车辆双向通信提供路径导向。20 世纪 80 年代中期,加利福尼亚州的交通部门研究开发了 Path Finder 系统。1988 年,一个名为“Mobility 2000”的研究团队组建,提出了新的目标。为实现这一目标并在全美推广应用,1990 年美国运输部成立智能车辆道路系统组织。1991 年国会制定了综合地面运输效率方案,将智能交通作为道路运输政策的中心。在这期间,该团队一直致力于培育实施智能交通的支持环境,其主要任务是制定实施计划。1992 年 5 月,美国智能车辆道路系统战略规划制定出台,作为下一个 20 年改进智能交通系统的总体设计方案。1994 年 9

月美国运输部正式提出了智能交通系统服务系统。与此同时，全美 80 多个地方的现场实验突飞猛进。在政府的参与下，由国家自动化公路系统联盟领导的自动化公路系统（AHS）这一至关重要的关键工程的水平不断在提升和改进。1995 年 3 月，美国智能交通协会正式出版了国家智能交通系统项目计划纲要。

2. 欧洲智能交通系统的发展

20 世纪 70 年代中期，欧洲以德国为主导开发的驾驶员引导信息系统得以改进。1986 年，由私营企业牵头的致力于高效安全的欧洲交通计划以及由公共部门牵头的致力于欧洲车辆安全的道路基础设施计划开始实施。这些计划在欧洲交通系统的机动性和远程信息处理技术应用方面已取得成功。与此同时，智能交通系统的标准化也得到高度重视。为指导这一标准化工作的开展，1990 年欧洲标准化委员会制定了智能交通系统标准，它以 ISO 技术委员会智能交通系统为基础。1991 年，为支持改进和执行欧洲交通远程信息处理计划，成立了欧洲道路运输远程信息通信执行协调组织。

2010 年 7 月 7 日，关于跨欧运输网络的欧盟决议发布，要求到 2020 年前，根据整体规划，通过整合整个欧盟海、陆、空交通运输基础设施网络，逐步建成跨欧运输网络。这个网络必须在最好的社会和安全条件下，确保民众和货物在整个欧洲无边界一体化区域内迁移的便捷；在经济可接受的前提下，提供用户高品质的基础设施，包括所有的运输模式，并使之有旗鼓相当的优势，允许现有设施能力优化利用，尽可能使各种运输模式彼此兼容，并鼓励不同模式之间的联运，尽可能经济可行，覆盖成员国全部疆土，以从根本上促进岛屿、内陆及外围区域与中心区域的联络通道，以及无障碍联络大都会和欧盟各区域；在确保在欧盟利益关切的前提下，能保持与欧洲自由贸易联盟国家、中东部国家以及地中海国家的网络联系，同时改进这些网络的交互性和联络通道。

3. 国内智能交通系统（Intelligent Transport System, ITS）的发展

中国智能交通系统起步较晚，与发达国家相比有较大差距。1988 年，北京市从意大利引进了两套电子监控设备，随后上海、沈阳等大城市陆续从国外引进了一些城市交通道路监控系统。20 世纪 90 年代以来，在科技部、交通部的支持下，我国交通运输界的专业技术人员开始从事智能交通系统技术研究，并取得了长足进步。1999 年 11 月，科技部批准成立了国家智能交通系统工程技术研究中心，承担了“九五”国家重点科技攻关项目“中国智能交通系统体系框架”、国家基础性科研项目“中国智能交通系统标准体系框架研究”、交通部重点科研项目“智能运输发展战略研究”等一批关系中国智能交通系统发展的重点项目，为我国智能交通系统技术打下了良好的基础。2002 年 4 月，“十五”国家科技攻关“智能交通系统关键技术开发和示范工程”重大项目正式启动，北京、上海、天津、重庆、广州、深圳、中山、济南、青岛、杭州共十个城市作为首批智能交通系统应用示范工程的

试点城市，标志着中国智能交通系统进入快速发展时期。

1.2 智能交通系统研究的主要内容

智能交通系统研究的主要内容是在道路设施基础上，集成运用先进的电子信息技术、数据传输技术、传感技术、系统工程技术及计算机处理技术等，从而建立起的一种现代化的综合运输管理系统。一般而言，ITS 产业所涉及的主要内容包括交通信息采集系统、信息处理分析系统和信息发布系统等方面，其宗旨在于科学合理地引导和控制交通流，运用现代科学技术管理和治理城市交通，在保障交通安全的同时提高现行道路网络基础的运行效率，节约土地资源，最大可能地降低能耗，减少交通污染。通过 ITS 技术，交通基础设施能够在更大范围内、更好地发挥作用，交通运输的服务水平也能够得到大幅度提升。从整个社会的角度来看，ITS 产业在提高道路交通安全性和灵活性、减少阻塞、提升即有路网的通行能力、降低道路运输特别是汽车运输对环境的影响等方面都具有积极的促进作用。目前，ITS 产业的主要服务对象为公路交通，但是，从未来的发展趋势来看，随着 ITS 系统的不断优化升级，ITS 产业将不仅仅局限于简单的公路交通系统，而会形成一个智能化的人机交互模型，为现代交通运输的健康发展提供良好的支撑和服务平台。

1.3 车辆协作控制的发展

智能交通系统是一项具有挑战性和广阔应用前景的研究课题。该系统的开发涉及智能交通管理系统、先进的交通信息系统以及车辆协作控制系统等，可以说，智能交通系统是以上技术的综合应用。尤其是在达到车辆以车队的形式相互合作自动驾驶这一目标上，车辆的协作控制系统的研究和开发起着关键性的作用。

车辆协作控制系统^[5]是把进入公路系统的车辆组成车队，并维持一定的队形自动行驶，由无线网络和车载传感器获得领队车辆和周围车辆的信息，基于此信息产生控制命令实现车辆的自动跟随，并且使车间距离始终保持在规定的范围内。鉴于车辆协作控制系统能够有效提高公路系统的容量，减少交通事故，因此成为智能交通研究的热点领域之一。

目前，车辆协作控制方面的研究已有很多，主要集中在以下三个方面：①车辆纵向控制，其目的是通过设计车队纵向控制系统，使一系列车辆在一条线上以一定的车间距离安全行驶。如果车间距离可以维持在某一个安全可靠的距离，则可以有效避免追尾等交通事故的发生，增加交通容量。②车辆横向控制，其功能是使车队中车辆准确跟踪道路的中心行驶，如果跟踪性能足够好，则可以降低对公路宽度的需求，可以在现有的公路系统上建更多的车辆行驶通道。③综合控制，该系统是车辆在高速行驶时做急转弯、避障以及换道等比较复杂的动作时，将车辆横向控制器和纵向控制器结合起来，使车辆在行驶轨道上保持转弯，同时能量消耗最少。

1.3.1 纵向控制研究

纵向控制主要是对车辆的节气阀系统和制动系统进行控制，即在没有司机操作的情况下，实现车辆的自动加速或减速。就目前车辆控制系统的研究来看，它们大都是通过传感器和无线通信等装置，如雷达、红外、超声波以及局域网等来获取周围车辆、障碍物以及交通状况等信息，使跟随车辆能够在给定的车速和车况下（车辆制动、空气阻力、轮胎牵引力及车辆重量等），与周围其他车辆保持安全的车间距离行驶，以此来增加公路的利用率。

车辆纵向控制研究主要有以下三个方向：①自适应巡航控制。车辆通过车载传感器，如：雷达、红外或超声波等测量与前面车辆的距离和距离变化率，从而设计巡航控制器来决定车辆是继续采用期望的速度行驶或是转为车间距离控制，以保证车辆的安全行驶，如图 1.1 所示。②避障系统。如果前车距离太近，以期望的速度难以维持车辆的安全行驶，此时避撞系统通过降低节气阀或者启动制动以降低车速，保证车辆的安全行驶。③车辆协作控制系统。在该框架下车辆以排列紧密的车队形式安全行驶，车辆间除了有传感器测量距离、速度变化以及加速度变化外，还可以通过无线网络等使跟随车辆获得领队车辆及周边信息。目前已有很多项目专门进行车辆协作控制系统的研究，最著名的是加利福尼亚大学的 PATH^[6]，以期实现车队的完全自动化，如图 1.2 所示为项目中车队行驶的照片。以下将对上述三个方向的研究现状进行详细分析讨论。



图 1.1 自适应巡航控制

1. 自适应巡航控制系统

目前对自适应巡航系统的控制方法的研究主要集中在固定时间间隔的策略上^[7,8]，而对于固定车间距离的控制策略现在国内相关研究很少，因其难以保证车队队列的稳定性^[9,10]。自适应巡航控制系统有两种控制模式：速度控制模式和车间距离控制模式^[11]。速度控制模式是在距离前车较远时采用，这也是大多传统自适应巡航控制中所采用的控制方式。当车辆的车间距离较小时，速度控制难以保证车辆安全行驶，此时采用车间距离控制模式（该模式也称车辆跟踪模式），在这种模式下，自适应巡航控制系统通过同时控制车辆节气阀和制动系统以维持车间距离在设定的距离上。据此，基于固定时间间隔策略采用车间距离控制模式的系统是目



图 1.2 车队在 NAHSC 中的示范

前自适应巡航控制系统研究的主要方向。

1993 年, Ioannou 和 Chien^[12] 最早设计一种基于线性固定时间间隔的车队控制策略, 基于该策略设计的车辆控制器可以有效地将连续两辆车的车间距离误差联系起来, 继而设计 PD、PID 及滑模类型控制器^[13] 对车辆的稳定性进行分析研究。而后 1995 年, Swaroop 等基于该方法针对车队队列稳定性进行分析^[14], 并得到满足队列稳定的充分必要条件^[15]。同年, Yanakiev 等人开始针对自适应巡航控制系统设计基于变时间间隔的非线性控制器^[16], 该控制器与常规固定时间间隔相比, 控制性能更好, 而且可以克服线性控制器在最小固定时间间隔方面的限制, 但文章中并没有对该控制器的鲁棒性能进行分析。以上自适应巡航控制方法都是基于理想线性车辆模型, 实际车辆的控制中, 无论是刹车或是燃油过程都需要一定时间, 尤其是几辆车组成的车队, 该延时会在车队中积累。因此, 执行器的延时问题引起了学者的重视, 并由 Rajamani 等人于 1997 年在文献 [17] 中首次提出, 并通过一系列的实验得到车辆的执行器、传感器和燃油等纯延时的数值。而后文献 [18] 通过对比实验结果得到执行器的延时会很大程度上降低车队的控制性能, 但是并没有给出理论分析, 文献 [19] 虽然对车辆存在执行器延时的问题进行研究, 但并不适用于巡航控制。文献 [5-7] 对固定时间的车间距方法进行改进, 分别提出非线性的车间距离策略和自适应车间距离策略, 统称变车间距离策略, 它通过对前车速度特性进行分析, 实时改变与车间距离相关的时间参数设计方式, 使得车队协作控制更加灵活。目前对自适应巡航控制系统的研究仍是一个热点问题。

2. 协作式自适应巡航控制系统

该方法自适应巡航控制方法的进一步扩展, 文献 [31] 提出一种半自主式

自适应巡航控制,即协作式自适应巡航控制。该方法更有利于在人口密度较高的城市中应用。但是变车间距离策略仅仅依赖于车间距离和速度误差信息,而在低能见度等恶劣自然环境下,距离传感器和速度传感器都存在不同程度的受限,甚至完全失效的问题^[32,33],急需新的理论方法来加以改进。文献[34,35]分别通过使用最少数量的车载传感器设计滑膜控制器,为协作式自适应车队在行驶中某些传感器失灵提供新的思路。文献[36]考虑执行器延时和传感器延时问题,对车队队列稳定性进行了定量分析。文献[37]从距离传感器测量受限模型进行分析讨论,并设计保证车队在极端情况下安全行驶的变结构保性能控制器。研究传感器测量距离受限、传感器失效及传感器延时等问题,也是协作式自适应巡航控制研究的重要内容之一。

3. 避障系统

避障系统是车辆协作纵向控制的一个重要方向,尤其是在车辆技术应用方面,避障系统是解决车辆追尾的有效手段。当车辆前面没有其他车辆时,避障系统可以看作标准的自适应巡航控制,即车辆保持期望的速度安全行驶。如果行驶过程中前面出现其他车辆,以期望的速度难以保证车辆的安全时,避障系统通过控制节气阀或应用刹车系统进行减速。

1996年,Y.Tomioka等人开始对汽车防止追尾方面的问题进行研究,文献[20]给出了追尾系统的整个框架的描述,并设计了前车识别系统和潜在的碰撞危害评估方法。文献[21]将同一条线路上两辆车之间的安全距离误差和相对速度考虑为一个圆盘结构,并将该圆盘分为四个区域,每个区域设计不同的控制器,由统一的权参数连接起来,该算法由于基于精确线性化方法而缺少一般性,因此应用较少。文献[22]设计了一种分层结构的控制器,即决策层和控制层。决策层可以有效处理各种不同的情况。控制层是一个基于精确线性化的预测器,该算法存在一定的逻辑错误,导致车队性能并不令人满意,需要改进。文献[23]在文献[24]的研究基础上对其进行逻辑上的修改,并结合分层控制的思想,设计了一种可以克服线性化控制以及滑模控制缺点的终端滑模控制算法,有着较好的应用前景。

神经网络和模糊控制等人工智能技术的发展也促进了追尾系统的发展,文献[25]提出一种基于模糊神经网络算法的车辆控制器,用雷达来模仿司机对车间距的控制行为,已在雪弗莱汽车上应用了该控制器,并在菲尼克斯51高速公路上进行了成功测试。文献[26]也提出了一种模糊网络控制器,用它来控制车辆速度和车间距,利用雷达来检测车辆速度误差和车辆之间的距离。并将该控制器安装在林肯汽车上,在圣地亚哥的I-15高速公路上进行了实验。文献[27]提出了三层自动控制的模型,采用模糊逻辑控制方法,文献[28]对该模型和控制方法进行了测试。