

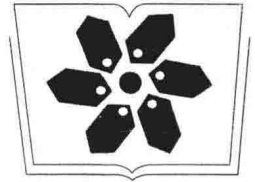
中国科学院科学出版基金资助出版

道路交通流协同行驶 理论与方法

孙棣华 田川 刘卫宁 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

道路交通流协同行驶理论与方法

孙棣华 田 川 刘卫宁 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书面向路段交通的车辆协同行驶问题,在回顾交通流理论发展脉络及其理论方法的基础上,介绍一套新构建的道路交通系统协同行驶理论与方法,旨在为车车协同驾驶下车辆行驶行为的理解和车流状况的分析,提供一定的理论支持和描述工具。全书从内容看,可分为三个部分,第一部分(第1~3章)介绍道路交通流协同行驶理论的基础知识,包括交通流理论的发展、交通流的参数特征和车辆跟驰理论的若干关键问题;第二部分(第4~7章)是基于宏微观层面的路段车辆协同行驶建模方法及其性能分析;第三部分(第8~10章)重点阐述车辆协同行驶模型的自校正方法、交通拥堵控制方法以及交通信息物理系统的发展趋势。这些内容将为智能交通系统中受到广泛关注的车车协同和车路协同的工程实践提供理论支撑。

本书可供从事智能交通系统、交通信息物理系统、交通工程、交通管理与控制、智能汽车、自动驾驶、车联网等相关领域的教学科研人员和工程技术人员阅读,也可作为相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

道路交通流协同行驶理论与方法/孙棣华,田川,刘卫宁著. —北京:科学出版社,2019.8

ISBN 978-7-03-062066-8

I. ①道… II. ①孙…②田…③刘… III. ①交通工程-工程管理-研究-中国 IV. ①U491

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 168404 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:杜子昂

责任印制:吴兆东 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年8月第一版 开本:720×1000 B5

2019年8月第一次印刷 印张:15

字数:303 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

供需失衡导致道路交通问题日趋严峻,由此衍生的交通拥堵、能源消耗、环境污染、安全事故和隐患等一系列问题已引起社会的广泛关注。

智能车路协同系统是近年智能汽车与智能交通技术的前沿领域,被认为是破解交通问题的根本出路。它基于无线通信、传感探测、智能计算、智能控制等先进技术,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、交互与融合的基础上,开展车辆主动安全控制和道路智能协同管理,消解交通系统构成要素间的博弈和冲突,充分实现各要素的有效协同和优化,保障在复杂交通环境下的交通安全和高效的服务通行水平,从而形成安全、高效和环保的新一代智能交通系统。

智能车路协同的引入使交通要素关系的认知获得系统性突破,赋予了交通系统新的科学内涵,变革了管理理念和管理技术手段。相对传统交通环境,人-车-路-环境之间的协同整合关系度,要素的智能化水平,感知的深度和维度,控制和反馈的精度及效用,信息实时、安全及完备性要求等都发生了根本性变化。在此背景下,车与车之间的协同作用机制如何精准表达,新系统各要素及系统动力学特性将发生何种变化等都需要进行深入探索和解答。然而,当前车路协同系统的研究尚处于初级阶段,主要聚焦在智能车辆技术、智能路侧系统技术、车路/车车协同信息交互技术和车路/车车协同控制技术等核心关键技术,多从工程应用的角度进行探索,尚有大量基础理论和关键技术问题亟待解决,特别缺乏车路协同系统内部作用机制和刻画建模的研究工作。《道路交通流协同行驶理论与方法》的出版恰是这方面的有益补充和探索。

近年来,车路协同关键技术 in 欧美日及我国得到蓬勃发展,各国均在抢占核心前沿技术战略制高点,以打造交通产业链的核心竞争力。我国依据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》,在863计划现代交通技术领域设立了“智能车路协同关键技术研究”主题项目进行专项研究。特别是,在“中国制造2025”要求制造业向智能化转型的背景下,车路协同系统理论及技术的突破将极大地推动智能基础设施、智能车辆、控制技术和通信的产业化和综合集成水平。车队协同驾驶是车路协同技术在智能交通领域中的重要示范与应用。协同驾驶及其复杂作用关系的研究是车车协同研究核心的领域和重要组成部分。该书系统探索了车车协同行驶的刻画模型及交通拥堵控制策略,其相关理论和技术将为智能车路协同系统的工程实践提供有益的指导,具有重要的潜在实践应用价值。

相信该书的出版将对我国智能汽车和智能交通产业发展做出重要贡献。

钟志华
中国工程院院士

前 言

交通需求的急剧增长与交通供给的相对不足,已构成非常突出的世界性矛盾。道路交通问题日趋严峻,引起世界各国的广泛关注。为了有效解决道路交通拥堵问题,世界各国政府对交通基础设施建设的投入与日俱增,然而却难以达到预期的效果。国内外多年实践经验证明,如果缺乏先进的理论指导和系统支撑,单纯依靠修建交通基础设施已不能从根本上解决交通拥堵这一顽疾。

在传统交通系统中,行人、道路、车辆等组成要素分割且未能充分协调优化,这严重制约了交通系统的服务效能,因此建立“知己知彼”和智能协同的车路协同系统作为破解交通难题的根本出路,提升道路交通运输系统效率、安全和环保的重要手段,已经逐渐为发达国家接受和实施。目前欧美日等发达国家及地区和我国都在积极推进相关技术的研究。在此背景下,智能交通系统从信息共享进入智能协同时代。

车车协同是人车路协同的一个核心研究领域和重要组成部分。在车车协同环境下,借助与周边车辆交互交通状态信息,车辆可以合理控制自身运动状态,达到与前后车辆,以及前面更多视线范围外的车辆协同行驶,形成有序流动的车辆行驶队列。与传统车流相比,协同驾驶下的车流由于受到车辆信息交互因素的影响,其特性发生了根本变化。因此,基于传统驾驶环境建立的交通流模型,已难以刻画信息交互环境下的车辆协同驾驶问题及其复杂作用关系。

目前,国内外对车车协同驾驶的研究还处于起步阶段,尚缺乏系统刻画协同驾驶下车流演变规律的理论体系,毫无疑问其关键理论的研究和模型的建立是当前迫切需要解决的核心问题。本书深入分析了路段上车车协同驾驶对车流演化规律的影响,系统阐述了若干具有一定前瞻性的协同驾驶模型,揭示了这些模型在稳定交通流方面的作用机理及车流的时空演化机制,同时本书还介绍了车辆协同模型的自校正方法和交通拥堵控制策略。这些研究成果有望为车路协调系统中协同驾驶下车辆行驶行为的理解和认知,提供相关的描述工具和理论基础。

重庆大学智能交通团队在 ITS 领域的研究已近二十年。《道路交通流协同行驶理论与方法》是本团队研究成果的总结,部分内容参考交通流方面较为经典及最新的研究成果。本书力图为相关领域的科研和工程技术人员、研究生提供一个全面了解当前车车协同领域研究前沿的参考资料。在编写时,考虑取材的自洽性、代表性和新颖性。

全书共 10 章。第 1 章介绍车路协同系统和交通流理论的发展现状,在此基础

上,探讨研究道路交通协同行驶建模理论与方法必要性和研究意义;第2章重点介绍交通流参数特性;第3章系统阐述车辆跟驰理论的若干关键问题,具体包括优化速度函数选取、稳定性、非线性和零动态等几个关键问题,以深化对车辆跟驰理论的系统认知;第4章从微观层面讲述基于跟驰理论的车辆协同行驶建模;第5章从微观层面详细讨论基于元胞自动机理论的车辆协同行驶建模方法,同时讨论协同行驶下车流的能耗时空演化机制;第6章介绍宏观动力学理论,在此基础上展现基于宏观动力学理论的路段协同行驶模型;第7章介绍如何从宏观层面基于格子流体力学理论构建路段协同行驶模型;第8章系统阐述基于跟驰理论的车辆协同行驶模型自校正方法;第9章探讨基于车辆协同行驶模型的交通拥堵控制方法及如何设计反馈控制策略;第10章扼要地从信息物理系统的角度对未来交通系统的发展趋势进行展望。

本书第1、4、6、9、10章由孙棣华负责撰写,第2、3、5、7章由田川负责撰写,第8章由刘卫宁负责撰写。刘辉、张埂、陈栋、赵红专、何宇鑫、李洋和康义容等在材料收集和文献校对等方面做了大量工作。

感谢课题组廖孝勇博士、彭光含博士、李永福博士、周桐博士和唐毅博士在学术上的有益探讨和无私支持,本书部分章节内容源自作者与他们共同合作的研究成果。

本书的研究成果得到国家自然科学基金“V2X环境下近信号控制区车辆行驶的信息物理融合机制研究”(61573075)、国家重点研发计划“智能电动汽车人机共驾交互理论”(2016YFB0100904)、中央高校基本科研业务费科研专项重大项目“T-CPS协同驾驶的机制与评估研究”(106112014CDJZR178801)、重庆市“151”科技重大专项子课题“车辆互联环境下的道路交通运行状态感知与分析”(cstc2013jcsf-zdxxqqX0003)等项目基金的资助。本书得到中国工程院院士、同济大学钟志华教授的鼓励与肯定,同时得到中国科学院科学出版基金的支持,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,欢迎广大读者和同行批评指正。

作者

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 道路交通问题日益严峻	1
1.2 ITS 从信息共享进入到智能协同时代	3
1.2.1 CVIS 在日本的发展现状	4
1.2.2 CVIS 在欧洲的发展现状	4
1.2.3 CVIS 在美国的发展现状	5
1.2.4 CVIS 在我国的发展现状	5
1.3 基于交通流理论的道路交通系统机理认知	6
1.3.1 现代交通流理论及其研究内容	6
1.3.2 现代交通流理论分类	7
1.3.3 交通流理论的发展历史	8
1.4 道路交通系统协同行驶理论与方法	9
1.4.1 协同行驶理论与方法的需求	9
1.4.2 传统交通流理论的再认知	11
1.4.3 协同行驶理论与方法研究的意义	11
参考文献	12
第 2 章 交通流参数特性	15
2.1 交通流参数	15
2.1.1 流量	15
2.1.2 瞬时速度和平均速度	16
2.1.3 车流密集度	17
2.1.4 车头时距和车头间距	18
2.2 交通流参数的统计分布理论	18
2.2.1 离散型分布模型	19
2.2.2 连续型分布模型	20
2.3 交通流基本参数的关系模型	23
2.3.1 流量速度密度之间的关系	24
2.3.2 速度和密度的关系	25

2.3.3	流量和密度的关系	27
2.3.4	流量和速度之间的关系	28
	参考文献	29
第3章	车辆跟驰理论的若干关键问题	31
3.1	车辆跟驰模型的研究概况	31
3.1.1	车辆跟驰行为的特征	32
3.1.2	车辆跟驰模型的分类	32
3.1.3	跟驰模型的发展概况	33
3.2	优化速度函数的研究	44
3.2.1	优化速度函数的类型	44
3.2.2	优化速度函数的特点	45
3.2.3	实际优化速度函数的影响	46
3.2.4	“不现实”的优化速度函数影响	50
3.3	稳定性问题的研究	53
3.3.1	局部稳定	53
3.3.2	渐近稳定	55
3.3.3	Lyapunov 稳定	57
3.3.4	线性稳定性的对比分析	59
3.3.5	非线性稳定性	62
3.4	零动态问题的研究	64
3.4.1	零动态理论	64
3.4.2	FVD 模型零动态方程	66
	参考文献	67
第4章	基于跟驰理论的车辆协同行驶建模	71
4.1	基于前向观测信息的协同行驶模型	71
4.1.1	多前车车头间距信息的协同行驶模型	72
4.1.2	多前车速度差信息的协同行驶模型	74
4.1.3	多前车车头间距和速度差信息的协同行驶模型	75
4.1.4	多前车车头间距、速度差和加速度信息的协同行驶模型	78
4.2	基于后视效应协同行驶模型研究	86
4.2.1	考虑单辆后车车头间距信息的协同行驶模型	87
4.2.2	考虑多辆后车车头间距信息的协同行驶模型	87
4.2.3	单辆后车车头间距和速度差信息综合协同行驶模型	88
4.2.4	考虑优化速度差信息的后视效应协同行驶模型	92
	参考文献	94

第 5 章 基于元胞自动机理论的车辆协同行驶建模	96
5.1 元胞自动机的构成及特征	97
5.1.1 元胞自动机模型的构成	97
5.1.2 元胞自动机模型的特征	99
5.2 经典交通流元胞自动机模型	99
5.2.1 一维单车道交通流元胞自动机模型	99
5.2.2 一维多车道元胞自动机模型	105
5.2.3 二维道路交通流元胞自动机模型	106
5.3 基于元胞自动机理论的车辆协同行驶模型	107
5.3.1 LMDDR 模型的提出	108
5.3.2 LMDDR 模型的数值模拟	109
5.4 LMDDR 模型能耗演变机理	114
5.4.1 车流能耗研究现状概述	114
5.4.2 能耗的定义及估计公式	115
5.4.3 能耗的数值模拟及结果分析	116
参考文献	120
第 6 章 基于宏观动力学理论的路段协同行驶模型	124
6.1 LWR 模型	124
6.2 单车道宏观动力学模型	126
6.2.1 密度梯度类模型	126
6.2.2 速度梯度类模型	128
6.3 两车道宏观动力学模型	130
6.3.1 Daganzo 两车道模型	130
6.3.2 两车道耦合效应	130
6.4 考虑前方多车诱导信息的宏观协同行驶模型	139
6.4.1 模型的提出	139
6.4.2 线性稳定性分析	141
6.4.3 数值仿真	142
参考文献	145
第 7 章 基于格子流体力学理论的路段协同行驶模型	147
7.1 经典格子流体力学模型	147
7.1.1 单车道交通流格子模型	147
7.1.2 经典的两车道交通流格子模型	150
7.2 基于前方多个格点信息的协同行驶模型	152
7.2.1 模型的提出	152

7.2.2	线性稳定性分析	153
7.2.3	非线性分析	155
7.2.4	数值模拟	157
7.3	考虑前后格点信息的协同行驶模型	159
7.3.1	模型的提出	159
7.3.2	结果的分析与讨论	160
7.4	基于驾驶员延迟效应的两车道协同行驶模型	163
7.4.1	模型的提出	164
7.4.2	理论分析和数值仿真	165
	参考文献	170
第8章	基于跟驰理论的车辆协同行驶模型自校正方法	172
8.1	跟驰模型参数标定研究现状	173
8.1.1	GM模型参数标定	173
8.1.2	智能驾驶模型参数标定	174
8.1.3	交通流仿真软件参数标定	175
8.2	跟驰模型参数标定自校正方法的设计	175
8.2.1	经典参数标定方法描述	176
8.2.2	最大似然估计参数标定法	176
8.2.3	最小二乘参数标定法	177
8.2.4	自校正参数标定方法的设计	179
8.3	CI-CF协同行驶模型的参数标定及检验	181
8.3.1	CI-CF协同行驶模型的参数标定	181
8.3.2	CI-CF模型参数标定的检验	183
	参考文献	191
第9章	基于车辆协同行驶模型的交通拥堵控制方法	193
9.1	经典交通拥堵控制方法描述	194
9.1.1	KKH交通拥堵控制方法	194
9.1.2	考虑前后车速度差的交通拥堵控制方法	195
9.1.3	基于双速度差信息的交通拥堵控制方法	195
9.1.4	基于ITS的交通拥堵控制方法	195
9.1.5	考虑双车头间距的交通拥堵控制模型	195
9.1.6	无隔离带场景考虑非机动车影响的交通拥堵控制方法	196
9.2	考虑多前车稳态期望速度效应的交通拥堵控制方法	196
9.2.1	方法提出	196
9.2.2	模型稳定性分析	197

9.2.3 数值仿真	201
9.3 考虑前后车稳态期望速度协同效应的交通拥堵控制方法	206
9.3.1 方法提出	206
9.3.2 模型稳定性分析	207
9.3.3 数值仿真	211
参考文献	213
第 10 章 交通信息物理系统	215
10.1 信息物理系统概述	216
10.2 交通信息物理系统概述	219
10.2.1 T-CPS 的基本架构	219
10.2.2 T-CPS 层次功能	220
10.2.3 T-CPS 特点	221
10.2.4 T-CPS 的关键技术	223
10.2.5 T-CPS 的应用展望	225
参考文献	226

第 1 章 绪 论

导致道路交通拥堵和效率不足的原因是复杂的和多方面的。随着交通需求的增加,道路交通流密度越来越大,其与早期低密度交通的本质性差异表现在,车与车的协同关系已经成为影响道路交通效率的一个决定性因素。因此,在车与车协同关系基础上实现道路交通系统各要素的充分协调与优化,是解决日益严峻交通问题的重要途径,迫切需要新的理论和系统支撑。

本章首先介绍道路交通拥堵及其衍生问题的危害,回顾车路协同系统在欧美日及我国的发展历程,阐明智能交通系统已开始从信息共享进入智能车路协同时代。鉴于交通流理论是刻画交通系统作用机理及演化规律的重要工具,现有交通流理论成果将为车车协同行驶行为认知的深化提供理论基础,为此本章对交通流理论研究成果进行了必要的回顾。在此基础上,讨论道路交通系统协同行驶理论与方法研究的必要性和意义。

1.1 道路交通问题日益严峻

交通系统是承载人类活动和现代经济社会繁荣的基本构件之一。随着城市化进程的不断加快和国民经济的飞速发展,交通需求急剧增长与交通供给相对不足的矛盾日益凸显,交通拥堵、交通污染和交通安全等一系列问题已成为社会各界广泛关注的问题。

近年来,车多路少的矛盾更加突出,缓解大中城市交通拥堵日益困难。据统计,截至 2012 年 8 月,北京市机动车保有量已突破 510 万辆,驾驶员总计 720 万人^[1]。然而,在城市机动车数量快速增长的同时,城市道路建设速度却未能同步增长,导致供求关系严重失衡。据统计^[2],在道路建设力度较大的上海市,从 2001~2005 年,其城市道路面积的年均增长速度为 11.95%,而民用汽车数量的年均增长速度却为 14.86%,道路面积的扩张速度远远赶不上汽车数量的增长速度。类似的现象在国外发达国家也不例外,数据显示^[3,4]:从 1982~2000 年,美国的公路运输量增加了 72%,人口增长了 19%,但新增的公路里程却只有 6%,将近 30%的公路存在拥堵现象。由此,纵观国内外城市交通的发展历程可以发现,无论是发展中国家,还是发达国家,交通供需失衡的矛盾普遍存在,都不同程度受到交通拥堵问题的困扰。解决交通拥堵已成为世界各国现代大中城市发展面临的共同问题。

交通拥堵导致巨大社会经济损失。根据美国得克萨斯州运输研究院的一项研

究报告^[2],在过去的20年中,交通堵塞使美国人年均浪费23亿加仑(1加仑=3.785升)汽油,造成的经济损失高达630亿美元。我国的统计资料表明,2003年交通拥堵导致的经济损失高达2000亿元。交通拥堵所造成的环境污染问题也不容忽视。交通不畅将造成高排放。当车辆速度从每小时40千米降到每小时15千米时,尾气排放平均增加250%^[5]。机动车尾气是PM_{2.5}颗粒的重要来源之一。PM_{2.5}是造成雾霾污染最主要的原因。在欧洲^[2],机动车排放的SO₂、NO_x、CO、CO₂、粉尘颗粒、烟雾,以及释放的噪声,已经达到甚至超过日常生活和工业生产的总排放水平。国际能源机构2001年的统计数据表明^[6]:交通领域消费的石油占全球总消耗量的57%,预计到2020年,其消耗油量将达到62%以上。由此可见,有效缓解交通拥堵,减轻环境污染,降低社会经济损失和降低能耗意义重大。

交通拥堵带来的安全问题也不容忽视。根据公安部交管局公布的2009年全国道路交通事故情况,我国每年交通事故死亡人数超过10万,平均每5分钟就有1人死亡。2009年,全国共发生道路交通事故238351起,造成67759人死亡,275125人受伤,直接财产损失9.1亿元^[7]。据2012年统计,我国交通事故致死率为23.9%。在数量众多的交通事故中,相关数据显示^[8],与人有关的因素占到交通事故总因素的90%左右,而人为因素导致交通事故死亡占78%。

为了有效解决日益严峻的交通问题,世界各国政府对交通基础设施建设的投入与日俱增,然而却未达到预期的效果,各大城市仍然被交通拥堵问题困扰。究其原因大致可以归纳成以下两点^[9]:一方面,交通需求持续过快增长,现有设施和服务能力已经不能满足这些需求;另一方面,现有交通资源未能得到合理配置和优化,对应的规划、设计和管控等措施不能适应现代交通系统发展的需要。当前,我国高标准的大型交通工程比比皆是,尽管新增交通基础设施会在短时间内缓解交通拥堵,但对于急剧增加的机动车辆数量来说,基础设施的改善会诱发和刺激新的增长,使道路交通拥堵状况重新出现。由此,道路交通陷入了当斯定理描述的“小汽车增长—环境恶化—修建道路—小汽车继续增长—再建路—再恶化”的怪圈。此外,我国的交通基础设施资源的配置和扩张缺乏系统的科学规划、设计和管控,往往依赖“大经验、小科学”的理念^[10],现有交通资源未能得到充分挖掘和利用,造成极大的资源浪费。例如,计划道路的通行能力为每车道每小时1500辆车,然而实际通行的车辆超过每小时500辆时就会发生拥堵^[10,11]。由于缺乏先进的交通科学指导,诸多城市出现“大动脉畅通,微血管堵塞”的现象。城市快速干道的高架桥成为奢侈停车场的现象也比比皆是。

国内外实践经验证明^[12,13],如果缺乏先进的理论指导,单纯依靠修建交通基础设施和采用传统的管理办法已不能从根本上解决交通拥堵这一顽疾。特别是,在人口集聚的城市区域,由于土地资源、建设成本和环境空间等制约因素,已难以靠大量拆迁和扩建道路基础设施的方式来解决交通问题。同时,现代环境日益恶

化,迫使人们更多关注环境保护和能源节约以谋求社会可持续发展。基于此,如何以科学的方法准确认知交通现象,如何充分有效地利用有限的交通基础设施,并最大限度地挖掘它们的潜力,如何以先进的技术构建交通控制系统,以有效缓解交通拥堵、降低排放/能耗和提高行驶安全,已成为目前亟待解决的问题。在这种背景下,交通流理论和先进智能交通系统的研究应运而生。

利用科学手段来破解交通问题,其首要工作是揭示和掌握交通拥堵的内在机理,唯有这样才可望实现交通拥堵问题的标本兼治。交通流理论是交通科学的基础,其理论成果和方法体系在交通系统的前期规划设计、中期的运行管控和后期的评估改进方面均发挥着先导作用,具有重要工程应用价值,因此备受多个学科领域专家的关注。另外,如何实现交通系统资源的充分协调和优化也是一个重要课题。随着计算机技术、通信技术和控制技术的飞速发展,发达国家相继投入巨资,在道路交通基础上相继构建了智能交通系统(intelligent transportation system, ITS),为道路交通系统中人-车-路-环境要素的充分协调优化奠定了基础。ITS是人们将先进的信息技术、通信技术、电子技术和系统集成技术等有效地应用于交通运输系统,从而建立起大范围内发挥作用的实时、准确、高效的交通运输管理系统。ITS的诞生和在世界各地的普及应用,已成为交通现代化的重要标志。其早已是国际公认的破解交通问题的根本出路,改善行车安全、提高运输效率、减少空气污染等的最佳途径,是全世界交通运输领域研究的前沿课题。

1.2 ITS从信息共享进入到智能协同时代

随着研究的深入,ITS不仅仅关注车路信息的共享,而是进入一个车与人、车与基础设施、车与车更安全、更高效地协同运行的时代,构建一个智能的车路协同一体化系统成为ITS努力的新方向。车路协同系统(cooperative vehicle infrastructure system, CVIS)是基于先进的传感器和无线通信等技术,能够实现车内(in-vehicle)、车间(vehicle to vehicle, V2V),以及车路(vehicle to infrastructure, V2I)动态信息的实时交互,完成全时空动态交通信息采集和融合,从而保障在复杂交通环境下车辆的安全行驶、实现道路交通主动控制、提高路网运行效率的新一代智能交通系统^[14]。在传统交通系统中,由于行人、道路、车辆等组成要素分割且未能充分协调优化的问题严重弱化了交通系统的服务效能,因此建立“知己知彼”和智能协同的CVIS作为智能交通的发展理念和解决交通问题的重要手段,在许多发达国家已经被广为接受和实施。目前,欧美日等发达国家及地区和我国都在积极推进相关技术的研究和应用。

1.2.1 CVIS 在日本的发展现状

日本在车路协同的研究上起步较早,获得广泛应用的项目有^[15]:车载信息及通信系统(vehicle information and communication system, VICS)、电子不停车收费(electronic toll collection, ETC)系统和智能公路系统。1994年,20个公司和机构共同发起成立道路交通信息中心筹备处。1995年, VICS中心正式成立,并在第二届 ITS大会上展示了装有 VICS的车辆。1996年, VICS先后在东京和大阪投入应用^[15,16]。VICS是车路协同在日本交通领域的首次尝试,截至2012年,已有3000万余辆车安装了 VICS,减少二氧化碳排放250万吨^[17]。2001年,作为车路协同系统服务功能之一的 ETC在日本投入应用,有效缓解了高速公路收费站的交通拥堵问题。2007年,日本推出 SmartWay项目并成功示范,至此日本进入系统研究车路协同的新阶段。SmartWay的目标是整合零散的智能交通系统功能,建立一个车路一体化基础下的车载集成平台,形成车路协同感知和协同运行。SmartWay的研究遵循系统集成理念,从2007年开始,先后集成 VICS、ETC、先进安全车辆(advanced safety vehicle, ASV)等众多系统^[18]。总体来说,日本已经走在车路协同研究的前列。

1.2.2 CVIS 在欧洲的发展现状

欧洲国家车路协同技术的发展是在欧盟诸国的协同参与下进行的,在数据交互的整体框架制定时尽可能兼容现有的通信制式,使车路协同系统能够在欧洲得到最大范围的开展^[19]。欧洲智能交通协会在2003年9月提出 eSafety的概念,标志着欧洲车路协同系统发展的开始^[14]。该系统期望通过信息和通信技术作为智能解决方案,开发出更安全的智能汽车安全系统。2004年,欧盟启动 PreVENT项目,该项目主要通过车车、车路信息交互,感知危险状态,对车辆速度控制、安全跟车时距、横向安全辅助驾驶、动态实时对驾驶员驾驶行为进行监控,以及交叉口安全辅助驾驶等方面为驾驶员提供行车危险预警和车辆辅助驾驶,从而更有效地消除道路行车冲突^[15,20,21]。从2004年开始,欧盟又确立了 SAFESPOT、COOPERS 和 CVIS 三大项目,来加大对车路协同技术的研究力度,并对车路协同的通信技术进行开发、标准化和推广。这三大项目构成现阶段欧洲车路协同技术研究的主要内容^[18]。SAFESPOT(2006~2010年)是由欧盟资助3790万欧元启动的研究项目^[15],其主要研究内容是:安全车速和安全车距维持、交叉口安全辅助、危险区域警示和避免碰撞行人及非机动车辆。COOPERS项目的主要成果包括研发车载单元、路侧单元、车路通信系统、路侧数据采集系统和交通控制中心。COOPERS项目的研究内容是:车路通信功能、车辆作为移动探测器和安全高速的通信工具。CVIS项目的核心是车路多种方式混合通信解决方案,该项目的研究对车

路协同技术的发展产生了深远影响。2010年后,欧洲的车路协同研究并没有停下脚步。2011年,欧洲启动了DRIVE C2X项目继续开展车路协同技术的研究。协同的对象也不再限于车车、车路之间,而是扩展到一切和交通相关的交通参与者及基础设施,是C2X的协同^[15]。

1.2.3 CVIS在美国的发展现状

1970年,通用汽车公司在美国交通部的支持下开始自动公路(automated highway, AHW)项目的研究实验,这标志着ITS从构想进入研发阶段^[15]。1998年,美国提出IVI(Intelligent Vehicle Initiative)计划,并开始组织实施。2000年,美国加利福尼亚州交通局提出CVHAS项目,以作为IVI项目的补充^[22]。2003年,美国交通部宣布启动车辆协同VII(Vehicle Infrastructure Integration)计划^[23],并在2005年发布了VII体系架构和功能需求1.1版本。美国ITSJPO(Intelligent Transportation Systems Joint Program Office)把VII计划定位为可以显著减少由交通事故导致的人员伤亡和经济损失,计划到2030年将交通事故量减少90%以上^[24]。2008年末到2009年初,美国运输部调整了已经执行5年的VII计划项目,并提出新的IntelliDriveSM计划^[14]。IntelliDriveSM是VII项目的演进,是车路协同控制的深化,其重点是提供车辆主动安全应用,确立了“safer”、“smarter”、“greener”的通行理念。在车路协同系统试验道路建设方面,Caltrans(California Department of Transportation)和MTC(Metropolitan Transportation Commission)从2007年开始致力于10英里(1英里=1.609千米)车路协同系统试验路段的研发和VII测试系统的部署。这条美国最重要的测试线部署在加利福尼亚公路82号和101号美国国道上^[25]。现阶段美国车路协同研究的重点是CICAS和CVISN两个项目。前者表示交叉口避碰系统,以辅助驾驶员安全通过交叉口。后者表示营运车辆信息系统与网络,其主要目标是提高机动车辆、商业运输车辆和驾驶员的安全性,并通过强制标准的实施提升运营车辆安全标准的实施效能,最终实现各州之间营运车辆的数据共享,降低国家和企业的管理费用^[20]。

1.2.4 CVIS在我国的发展现状

我国对智能车路协同系统的研究较欧美国家及日本起步晚,还处于研究的初级阶段。从2000年开始,国家ITS中心开始关注车路协同领域,并展开相应的研究工作。目前我国已基本掌握智能汽车安全驾驶、车辆运行状态辨识、高精度定位及导航、高可靠信息融合与交互等核心技术,为智能车路协同系统的研究奠定了基础。2010年,依据《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020)》,863计划现代交通领域围绕提高我国道路交通安全保障水平的重大需求,设立了“智能车路协同关键技术研究”主题项目。该项目针对我国日益严重的交通安全问题,重点