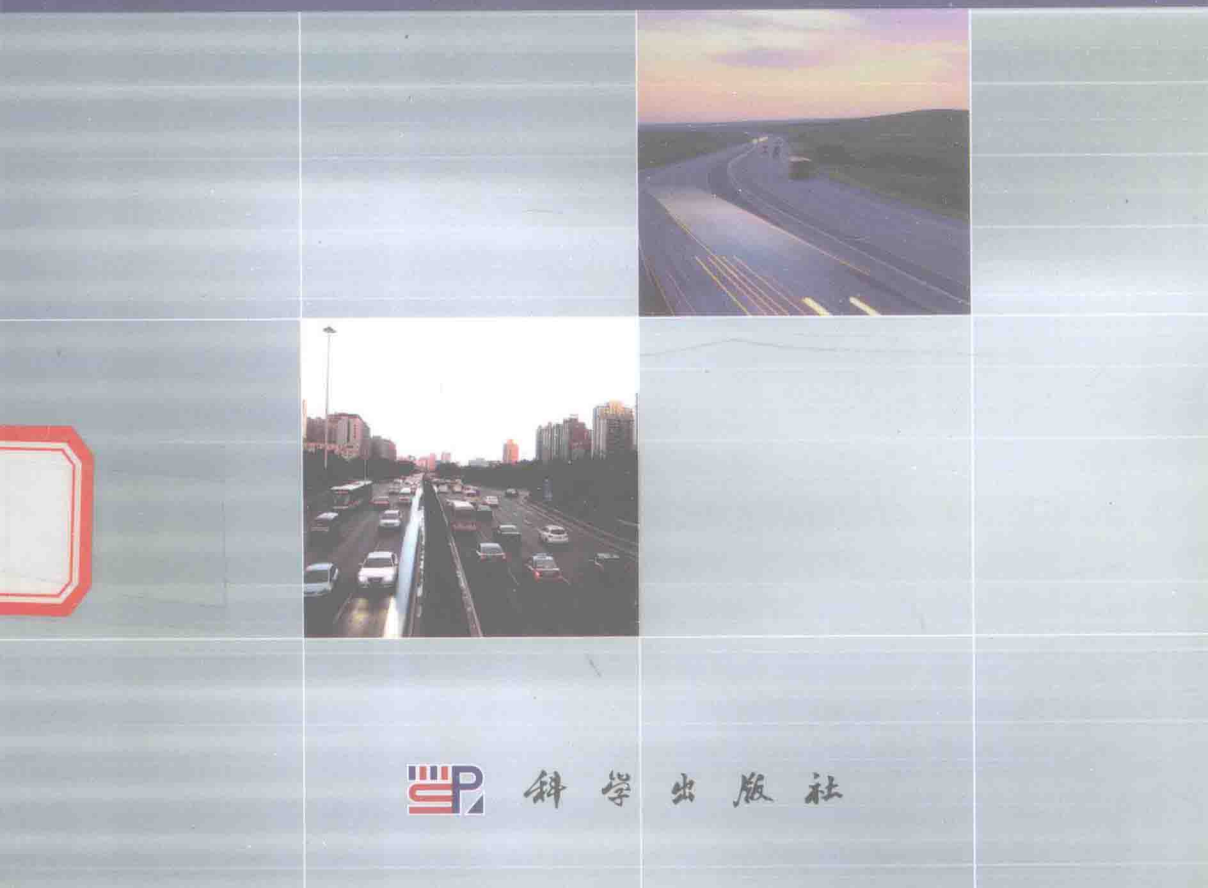




车流运行动态特性及其控制

曲大义 杨 建 张晓靖 杨万三 著



科学出版社

车流运行动态特性及其控制

曲大义 杨 建 著
张晓靖 杨万三

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从车流运行动态特性及其控制角度展示交通流理论及其控制优化方法,系统地阐述了车流分子动力学特性及模型、车辆运行行为模型、车辆运行安全特性、车流运行时空关联特征、车流运行稳定性分析、车流有序运行控制优化策略及其技术案例设计与交通仿真分析。本书所建立的模型和技术案例相对应,具有较强的实用性。

本书可作为高等院校交通工程、交通运输、系统工程、自动化控制、车辆工程及相关领域研究的科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

车流运行动态特性及其控制/曲大义等著. —北京:科学出版社,2016.6
ISBN 978-7-03-048702-5

I. ①车… II. ①曲… III. ①交通流—研究 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 129519 号

责任编辑:杨向萍 张晓娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:328 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着我国国民经济的快速发展和汽车保有量的迅速增长,交通问题越来越受到社会各界的广泛关注。如何实现交通系统的通畅、安全、节能减排、低碳、公平性和高服务水平,是交通工程领域科技工作者关注的重点。为了解决这些问题,有关学者、工程技术人员和交通管理者借助科学的方法和手段对交通系统进行描述、分析和优化,以期发现交通运行规律并对其进行系统设计与优化提升。

行驶车辆动态交互行为的分子动力学特性以及在时空域上的车流波动特性既有渐变,又有突变。某个或某些子系统的突变可能导致各子系统合作关系的变化,从而整体上表现出一些独特的、新的性质,呈现出宏观的形态、特性、行为、功能等。例如,路网车流在一定的范围内是一个渐变过程,随着车流的增加,系统仍能维持正常运转,但当交通流量达到某一个临界值时,随机扰动就可能产生由点到线,由线到面的交通状态突变,最终导致城市系统局部瘫痪。本书通过研究微观车辆运动的分子力学特性和宏观车流的波动特性及其稳态响应机理,归纳总结车流有序运行的变化规律,并结合工程技术案例,提出管控优化方法。

本书是作者及研究团队近五年在车流运行动态特性及其控制方面学术成果的结晶,主要包括车流分子动力学特性及其模型、车辆运行行为模型、车辆运行安全特性、车流运行时空特征、车流运行稳定性分析、车流有序运行控制优化策略及其技术案例与系统仿真分析,同时包含了在交通流理论和交通控制优化研究方向的理论方法和技术应用。撰写中尽力突出本书的系统性、创新性和前瞻性。

在本书的撰写过程中,研究团队的研究生蔡国良、杨建、郝亮、卞晓华、杨万三、王海鹏、郭涛、郝杰、陈文娇、王兹林、曹俊业、万孟飞、李娟、王进展、许翔华等参与了本书有关的研究工作,在此表示感谢。特别感谢张晓靖女士和陈文娇同学对全书的统稿和整理工作。笔者衷心感谢科学出版社张晓娟女士和胡志强先生为本书的编辑出版付出的辛勤劳动。

本书的出版得到国家自然科学基金(51178231)、国家科技支撑计划(2009BAG13A03)和亚洲开发银行技术援助项目(TA-NO. 7308-PRC)的资助。书中科研成果的技术案例和方法应用得到国家智能交通系统工程技术研究中心和青岛海信网络科技股份有限公司等单位的大力支持,在此一并表示感谢。

交通领域的定量分析方法涉及多学科、多领域的相关知识,新理论、新技术和新方法不断涌现与发展,由于笔者水平有限,尽管倍加努力,书中难免存在不足之处,恳请各位专家学者和读者批评指正。

曲大义

2015 年 12 月于青岛

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.1.1 问题的提出	1
1.1.2 研究目的与意义	2
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 车流跟驰特性研究现状	4
1.2.2 车辆换道研究分析	6
1.2.3 车流运行控制研究	10
1.2.4 国内外研究现状评述	12
1.3 研究目标与主要成果	13
1.3.1 研究目标	13
1.3.2 主要研究成果	14
1.4 本章小结	14
参考文献	15
第 2 章 车流分子跟驰特性及其模型	18
2.1 分子力学模型	18
2.2 分子跟驰理论	19
2.3 速度跟驰模型	24
2.3.1 线性跟驰模型的建立	25
2.3.2 非线性跟驰模型	26
2.3.3 速度模型的统一形式	28
2.4 分子跟驰模型	30
2.4.1 减速运动分子跟驰状态方程	30
2.4.2 加速运动分子跟驰状态方程	33
2.4.3 分子跟驰模型状态方程统一表达式	33
2.5 分子跟驰流量密度模型	38
2.6 本章小结	40
参考文献	40

第3章 车辆运行行为模型	42
3.1 概述	42
3.2 考虑横向干扰的车辆跟驰模型	45
3.2.1 最大疏散速度和转向时间	45
3.2.2 模型的建立	47
3.3 系统仿真分析	49
3.3.1 仿真原理	49
3.3.2 仿真结果	50
3.4 车辆换道行为分析	54
3.4.1 换道行为产生的原因	54
3.4.2 换道的类型	55
3.4.3 换道可行性分析	56
3.4.4 换道过程分析	62
3.5 综合驾驶行为影响下的车辆行为模型研究	69
3.5.1 概述	69
3.5.2 车辆行为模型的综合框架	70
3.5.3 模型组成部分	72
3.6 本章小结	75
参考文献	76
第4章 车辆运行安全特性	77
4.1 车辆行驶特征分析	77
4.1.1 自由行驶行为	77
4.1.2 跟驰行驶行为	77
4.1.3 换道行为	79
4.2 车辆行驶安全特性分析	81
4.2.1 超速行驶安全性分析	81
4.2.2 跟车行驶安全性分析	82
4.2.3 换道行驶安全性分析	84
4.3 换道安全距离建模	87
4.3.1 换道场景	87
4.3.2 车辆换道的最小纵向安全距离模型	88
4.3.3 仿真分析	92
4.4 换道安全距离模型	102
4.4.1 初始期望安全间距模型	102

4.4.2 数值仿真	105
4.5 本章小结	106
参考文献	107
第5章 道路交通运行时空特征	108
5.1 交通流特性参数分析	108
5.1.1 流量	108
5.1.2 速度	108
5.1.3 密集度	109
5.2 交通流特性调查	110
5.2.1 调查方案	110
5.2.2 调查方法和时间	111
5.2.3 调查位置	111
5.2.4 数据处理	112
5.2.5 数据统计分析	113
5.3 交通流时空特性研究	113
5.3.1 匝道 A 处交通流时空特性分析	113
5.3.2 匝道 B 处交通流时空特性分析	115
5.3.3 匝道 B 交通流对主线交通流的干扰分析	116
5.4 交通流特性分析	118
5.5 车辆运行特性	119
5.5.1 车辆交互行为的动态博弈理论基础	119
5.5.2 车辆交互行为动态博弈特性	120
5.5.3 跟驰特性分析	122
5.5.4 车辆换道动态特性分析	127
5.6 交通仿真分析	131
5.7 本章小结	134
参考文献	135
第6章 车流运行稳定性分析	136
6.1 车流运行动态特性及其密集度模型	136
6.1.1 分子模拟	136
6.1.2 车流密集度模型	139
6.1.3 车流动态特性分析	141
6.2 匝道分合流区交通流波动机理	144
6.2.1 交通流波动现象解析	144

6.2.2 扰动波的产生机理	145
6.2.3 扰动波的传播机理	146
6.2.4 匝道合流区交通波动特性	148
6.3 交通流稳定性分析	150
6.3.1 局部稳定性分析	151
6.3.2 渐进稳定性分析	154
6.4 数值拟合分析	157
6.4.1 局部稳定性仿真分析	158
6.4.2 渐进稳定性仿真分析	159
6.5 交通仿真分析	160
6.6 实例验证分析	162
6.7 本章小结	163
参考文献	163
第7章 基于车流特性的控制策略	165
7.1 自适应控制策略及算法	165
7.1.1 检测器的设置与作用	165
7.1.2 车流检测策略	167
7.1.3 排队统计方法	171
7.2 支路自适应控制策略和算法	173
7.2.1 排队消散	174
7.2.2 支路自适应控制策略	175
7.2.3 支路自适应控制算法	179
7.3 干道自适应控制策略和算法	180
7.3.1 车型换算系数	181
7.3.2 基础绿的计算	183
7.3.3 干道自适应控制策略	185
7.4 匝道控制分析	192
7.4.1 主动引导式交通管控	192
7.4.2 控制策略	193
7.4.3 控制种类	193
7.4.4 入口匝道控制	195
7.4.5 出口匝道控制	201
7.5 本章小结	205
参考文献	205

第 8 章 工程技术案例与系统仿真分析	207
8.1 分子跟驰理论的数据验证	207
8.2 单点自适应控制方法模拟分析	210
8.2.1 干道先左后直相序控制策略分析	211
8.2.2 干道先直后左相序控制策略分析	213
8.2.3 干道路口单放相序控制策略分析	214
8.3 交叉口信号系统仿真	216
8.3.1 Synchro 软件仿真分析	216
8.3.2 VISSIM 软件仿真分析	218
8.4 匝道交通系统仿真	218
8.4.1 示范匝道系统分析	218
8.4.2 入口匝道仿真	219
8.4.3 出口匝道仿真	222
8.5 干线动态协调控制优化	224
8.5.1 周期优化	225
8.5.2 相位相序优化	226
8.5.3 绿信比优化	230
8.5.4 相位差优化	234
8.5.5 干线协调控制动态优化	236
8.6 技术案例分析	241
8.6.1 现状分析	242
8.6.2 绿波协调控制方案设计	243
8.6.3 绿波协调控制优化效果	247
8.7 本章小结	250
参考文献	250

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的与意义

1.1.1 问题的提出

国民经济的快速发展使城市化进程明显加快,城市人口规模和城市空间规模成倍扩大,城市交通需求也呈现加速增长的趋势,交通压力问题已经成为城市进一步发展的瓶颈。路口交通拥挤和缺乏有效的交通组织使车辆通过效率偏低,增加了燃油消耗率,不利于低碳减排的环保要求。研究交通自适应控制策略是缓解交通压力、提高通行效率的有效途径。城市干道和交叉口作为城市交通的重点,是研究和实施自适应控制的首要目标。

鉴于当前日益加剧的城市交通拥挤和环境污染,为解决日益繁重的交通压力,许多国家都开发了交通信号控制系统,如英国的 SCOOT(split cycle offset optimization technique)、澳大利亚的 SCATS(Sydney co-ordinated adaptive traffic system)、日本的 KATNET 等。我国的信号控制系统起步较晚,近几年也有不少公司或科研单位从事交通控制系统的开发或研究,如海信的 HICON 系统、大为科技 DW-UTC2000 等。但我国的交通信号控制水平与国外相比还比较低,竞争力偏弱,尤其是控制系统的关键技术和先进算法还不完善。SCOOT 已经开发了基于小步调优化的实时自适应控制技术,SCATS 也开发了基于方案优选的实时自适应控制技术。但各个企业从公司利益角度出发将其关键技术列为商业机密,限制了技术流通和商业开发。国外对控制系统技术专利的保密,使技术引进和维护都需要较大的投资,且系统二次开发困难。因此,有些城市受投资能力的限制,无力承担引进费用,而有些则在引进系统后无法进行很好的维护,使系统资源有所浪费。

选取干道与支路交叉口为对象研究单点自适应控制策略,目标在于畅通干道直行车流和疏导支路排队车流;实现自适应控制的基本方法是压缩或延长相位时间和调整相序。车辆之间的跟驰现象与分子之间的力学关系很相似,基于这种相似性提出分子跟驰理论。应用图示和数学演算方法建立分子跟驰模型方程和流量密度方程,并予以数学论证。应用分子跟驰理论研究基础绿的计算方法、车队检测方法、路口排队统计方法和排队消散方法。综合考虑各个相位车流在时间上

的匹配关系,重塑各种相序方案,使干道直行达到绿波效果。依照控制策略逻辑框架,给出了交叉口支路方向和干道方向自适应控制策略的算法,为信号机控制程序的制定提供基础。应用路口实地调查数据对分子跟驰模型进行验证,应用 Synchro 和 Vissim 交通仿真软件对单点自适应控制策略进行仿真分析。单点自适应控制策略的设计,优化了单点交通控制体系,同时为线协调控制提供理论参考。

目前,国内交通学界对交叉口自适应控制仅考虑到单个交叉口的交通特性,多采取固定配时的方式,不能做到与相邻交叉口相互协调,更难做到线路和区域上的绿波协调控制。基于绿波协同控制的思想,研究干线、匝道和交叉口自适应控制方法和策略,统筹考虑周边交叉口交通流的运行情况对本路口的影响,使本路口的控制策略与上下游路口相互协同,以期最终达到绿波协同控制的效果。

作者提出“车流运行特性及其控制”,研究车流运行状态的实时动态判别方法,探讨各子系统之间的耦合关系、各子系统内部要素的协同机理以及引发系统失稳的相关因素,从而发现交通问题的症结,寻找处于支配地位的变量,研究车流有序运行的优化方法。为了把握系统的变化规律,从而进一步为宏观决策提供理论依据,就是要将城市交通流的跟驰理论和动态流特性分析方法应用于交通信号控制系统,包括跟驰-换道模型、交通流三参数(速度-流量-密度)动态模型、排队模型等,以此建立交通信号自适应控制方法,实现道路交通自适应控制的目标。

1.1.2 研究目的与意义

1. 为交通仿真提供理论方法支撑

电子科技的迅速发展促进了交通仿真的与时俱进。对交通复杂现象模拟分析的技术方法就是交通仿真的一种,是计算机技术在交通领域的具体应用,也是智能交通的重要组成部分,它能够模拟绝大多数的交通状态。交通仿真时刻记录交通流的时空演化过程,对交通系统组成元素和交通特征深入分析,其研究结果可为交通管控和城市规划提供方案支持。交通现场调查费用大且受时间、天气等限制,而交通仿真与之不同,可反复操作并可模拟不同状况下的交通流状态,既经济又方便。

利用车辆行为模型是交通仿真的一个重要方面,仿真的真实性取决于这些模型。因此,只有不断地对车辆行为模型进行优化改进,交通仿真才可以更加真实和有效地模拟交通状态,才能进一步提高仿真软件的准确性和真实性。

2. 为道路交通安全提供理论依据

道路交通安全一直是学者研究的重点,而分析车流运行特性是此领域的基础

与核心。交通事故的发生大多数是由于驾驶员对周围场景做出错误判断与操纵失误导致的,所以,积极探索驾驶员对交通场景的认知规律,获取假定交通场景下驾驶员正常的反应时间及习惯的应对措施,基于此在合理的位置设置适当的交通基础设施(如减速带、限速和警示标志等),以此来提高道路行驶的安全性。本书侧重分析宏观交通流的运行特征,研究不同密度下的道路服务水平,据此来评价交通管理与控制措施的实施对交通流状态的影响作用。

3. 为交通管理与控制提供技术支持

实际的交通场景通过一些方法(如技术、法规等措施)对道路上的运行车辆进行指引、组织和限制的措施称为交通管理,主要手段包括交通标志、标线的设置,专用道、单向车道的划分等。交通控制是通过设置交通信号灯对道路上不同方向的车流进行分流,以满足驾驶员的驾驶需求,这样可以充分利用各方向的道路资源,从而保障交通安全和畅通。

交通管理与控制方案制定的必要前提和基础就是对车辆行为的研究和建模。驾驶员在跟驰过程中选择的车头时距以及实施换道/超车的次数等均会对道路通行能力产生影响,只有深入研究车辆运行特征才能制定相对有效和准确的解决方案。此外,在行驶过程中,车辆的客观运行特征(如转弯半径、制动加速度等)也会对道路交叉口通行能力产生影响。全面了解这些行为运行特性不但可制定出有利于提高道路通行效率的交通管控方案,还可以兼顾驾驶员的行驶舒适性,真正实现个体与系统的资源分配平衡。

4. 为辅助驾驶系统的建立提供理论依据

近年来,智能辅助驾驶系统大大降低了交通事故的发生率,它能够辨识交通场景内其他客体对行车安全可能造成的影响并及时做出警告,在一些突发的紧急情况下,辅助系统的作用尤为明显,它会主动地干预操作来保证行驶安全。目前,许多驾驶辅助系统已经得到广泛应用及推广,如自适应巡航系统(adaptive cruise control, ACC)、车道偏离警示系统(lane departure warning system, LDWS)、泊车入位辅助系统(parking distance control, PDC)等。技术的快速发展必然会推动辅助系统的不断升级,功用也会多样化,进一步减轻驾驶员的操作负担,更重要的是,当驾驶员操作失误时,辅助系统会主动干预和操作避免事故发生,有利于提高交通运行效率和保障道路交通安全。在驾驶辅助系统中,车辆行为模型是其理论基础和核心技术,且车辆运行的相关研究能够为智能控制提供依据,更好地为辅助系统服务。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 车流跟驰特性研究现状

1. 国外跟驰理论研究现状

车辆跟驰行驶安全研究主要集中在跟车安全间距的建模,这类模型是从制动过程来分析车辆间的动态关系,利用经典运动学理论,计算出一个特定的安全跟车距离:假设前导车突然执行一个跟随车驾驶员意识不到的动作,而前后车的间距又小于计算出的安全跟车距离,这时就可能会发生碰撞。这类模型最早由 Kometoni 等^[1]提出,又称为追尾模型,数学表达式为

$$\Delta x(t-T) = \alpha v_{n-1}^2 + \beta_1 v_n^2(t) + \beta v^2(t) + b_0 \quad (1.1)$$

式中, $\alpha, \beta_1, \beta, b_0$ 分别为待定的参数。

其根据所建立的模型在不同的速度下做实验,发现其参数值变化较大,且与实际情况存在较大误差。

在此之后,交通学者对车辆跟驰的安全距离模型研究越来越深入和复杂。匹兹堡大学 Bullen^[2]提出 Pitt 跟驰模型的思想:仿真过程中跟随车与前导车始终保持一定的间距,数学表达式为

$$G(t) \geq L + kv_n(t) + 10 + bk[v_{n-1}(t) - v_n(t)] \quad (1.2)$$

式中, L 为车长, m; k 为驾驶员敏感系数; b 为待定系数; 10 为附加缓冲距离, m。

后来 Wicks 等^[3]提出的 INTRAS 是在 Pitt 模型上做了一些改动,简化为

$$G(t) \geq L + kv_n(t) + 10 \quad (1.3)$$

由于安全距离模型计算简单且实用,其主要应用在微观交通仿真软件上,如 CORSIM(美国联邦公路管理局资助开发的仿真软件)^[4],其综合考虑到 NETSIM 模型(用于城市道路仿真)和 FRESIM 模型(用于高速公路仿真)。FRESIM 和 INTRAS 跟驰模型思想基本相同,只是参数稍有变化。NETSIM 采用的安全距离跟驰模型的基本思想是:仿真时刻从 t 持续到 $t+T$,前导车(第 $n-1$ 辆车)从 $x_{n-1}(t)$ 行驶到 $x_{n-1}(t+T)$ 时,跟驰车(第 n 辆车)从 $x_n(t)$ 行驶到 $x_n(t+T)$ 。此时 $x_n(t+T)$ 需满足:即便前导车从 $t+T$ 时刻以最大减速度制动,也可以及时减速来避免碰撞。

Benekohal 等^[5]考虑驾驶员的启动延误、反应时间的产生、期望速度以及不同密度下最大加/减速度的差异等因素,结合 INTRAS 模型和 NETSIM 模型的思想,提出了 CARSIM 跟驰模型,之后他们采用收集到的数据对 CARSIM 模型进行标定,实验表明,该安全距离模型能够很好地描述驾驶员操作车辆的行为。

1981 年, Gipps^[6]提出了著名的 Gipps 安全距离模型,此模型综合分析先前几

个研究中忽略的次要因素,对车辆跟驰安全距离模型实现了较大的突破。此后,安全距离模型在计算机仿真中得到广泛的应用。

$$v_n(t+\tau) \leq b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n \{2[y_{n-1}(t) - s_{n-1} - y_n(t)] - v_n(t)\tau - [v_{n-1}(t)]^2 / \bar{b}\}} \quad (1.4)$$

式中, $v_n(t+\tau)$ 为跟随车在时间 $t+\tau$ 的速度; b_n 为跟随车的减速度; τ 为反应时间; $y_{n-1}(t)$ 为前导车在 t 时刻的位置; s_{n-1} 为前导车车长, m ; $\bar{b}$ 为跟随车感知前导车的减速度,为简单起见,本书假设其值与 b_{n-1} 相同, b_{n-1} 是前导车的减速度。

Gipps 在模型中对相关参数没有用实测数据进行标定,而是通过假定一系列服从正态分布的参数值来模拟车辆跟驰,以再现实际的交通现象。但是驾驶员在实际交通中观察的不止一辆前导车,还需关注前方交通流运行状态以及交通管控信息,驾驶员根据这些信息及时做出响应。因此,实际交通中很少会用这种挡墙式制动,因为按照此模型计算出的通行能力远小于实际的交通流量。

一些学者从驾驶员的生理-心理行为角度研究车辆安全跟驰。比较著名的是 Wiedemann^[7] 在 1974 年提出的生理-心理跟驰模型,而此模型也成为著名微观交通仿真软件 Vissim 的核心。该模型的主要思想是:跟驰车的驾驶员发现其与前导车车间距小于心理安全距离时,跟驰车就开始减速,由于跟随车无法准确地判断前导车的速度,跟驰车速度会在一段时间内一直小于前导车,等到两车的车间距达到另一个心理安全距离时,跟驰车才开始缓慢加速,如此形成一个加速、减速、再加速的循环过程。

国际交通安全领域经常利用碰撞时间(time to collision, TTC)^[8] 来描述行车安全及控制碰撞,这是一种对交通冲突技术的研究。经多年的探索,此技术已趋于成熟完善。TTC 指两车若保持目前的速度和运动轨迹时,距离事故发生的时间。由于车辆是以一定的距离跟驰的,可以用时间间隔(time gap, TG)来描述。一般来说,时间间隔最好为 2s,且不应该小于 1.2s。TTC 取决于前车发生碰撞时的较低速度,如图 1.1 所示。

Vander Hosrt 根据 TTC 的长短来划分冲突的严重性,当 $TTC \leq 1.5s$ 时,交通冲突为严重冲突,之后学者将冲突技术系统化、程序化,并将其广泛地应用于实际道路交通安全改造。

20 世纪 90 年代以后,人工智能领域的各种方法开始在车辆行驶安全研究领域得以应用。其中,模糊论和人工神经网络^[9] 应用得最多。模型中使用模糊推理的优点主要是,可直接用人类的语言来描述跟驰驾驶规则以及一些难以用精确数学表达的驾驶员行为安全特性。由于方法相对简单和实用,人工智能类模型研究越来越受交通学者的青睐。

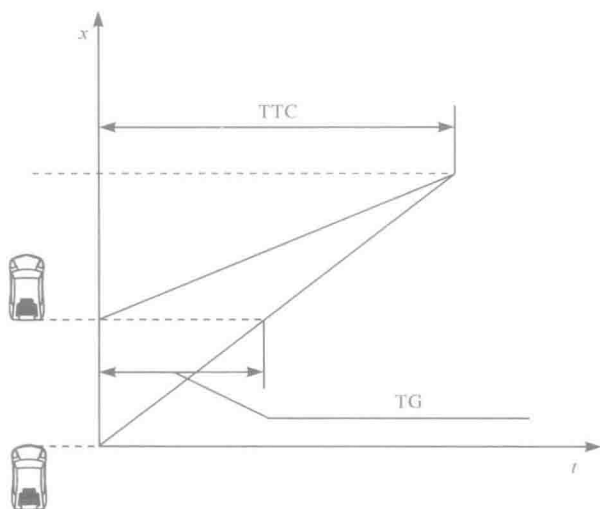


图 1.1 TTC 的定义

2. 国内跟驰理论研究现状

蒋礞等在 1983 年翻译的《交通流理论》可以说是开拓了国内交通学者研究车辆跟驰理论之路,所以国内在跟驰理论研究方面起步相对较晚,但在 20 世纪 90 年代以后发展较快,尤其针对我国特有的一些交通现象进行理论研究,提出了一些能够解决现实交通问题的跟驰模型^[10]。而国内对车辆安全跟驰的研究集中在安全距离模型上。

喻丹等^[11]根据现有跟驰模型把期望车头时距视为常量,提出了一种动态期望车头时距跟驰模型,用韦布尔分布拟合车头时距,使其成为随跟驰车辆性能差异和驾驶员自身差异而变化的动态变量。

卢文玉等^[12]认为高速公路上前后车的相对速度对临界安全距离存在影响,根据道路上车辆制动过程以及最大减速度的变化,合理设定了驾驶员的反应时间、制动协调时间及减速度增长时间,从而建立高速公路临界安全车距模型。

1.2.2 车辆换道研究分析

车辆换道是车辆之间最基本且具有挑战性的操纵,是交通领域研究重要的组成部分。不同领域的专家学者运用各自的理论方法,试图从自己的理论视角来诠释车辆的换道行为。与国内外对跟驰行为的研究相比,对换道行为的研究起步较晚,且大都是在跟驰行为研究的基础上发展起来的。目前,国内外对换道行为的研究主要集中在以下三个方面:换道行为特性分析;换道模型研究;换道行为对车

流特性影响。

1. 换道行为特性分析

换道行为特性分析侧重于微观驾驶行为的表达与微观数据的标定。通过对影响车辆换道的因素进行分析,建立适当的模型来诠释车辆换道行为与因素变量之间的变化规律,使之能够较为准确地反映现实的交通流状况。

1) 基于决策理论的车辆换道行为

国外学者 Ahmed 等^[13,14]基于离散选择框架建立概率选择模型来描述换道决策过程,解释了换道过程中驾驶员换道策略及操纵的连续性;国内学者刘小明等^[15]利用动态重复博弈原理对每个阶段的车辆博弈过程以及车辆行为策略进行描述;彭金栓等^[16]基于有限零和灰色博弈理论对车辆换道决策进行分析,为车辆换道过程中交通冲突的行程机制和路权分配提供相应的理论支持。

2) 考虑驾驶员特性角度

2002年,多伦多州立大学的 Jerry 等^[17]在对驾驶员的心理特性分析的基础上,将其分为易怒和普通两种类型进行定量描述,为进一步探究驾驶员心理特性与车辆换道之间的关系奠定理论基础。华雪东等^[18]在建立双车道元胞自动机模型的基础上,针对驾驶员驾驶过程中不同决策行为的不同心理,研究分析了考虑驾驶心理的城市道路交通流特性。

3) 考虑交通环境角度

Dario 等^[19]在高速公路多车道环境模拟器研究基础上,深入研究了换道行为与视点变化特性,但是对不同的道路因素与换道行为的研究并没有深入;国内李迎峰等^[20]结合蒙特卡罗仿真和快车道行驶环境对当前车辆的影响分析,提出一种新的换道随机决策模型,在不同流量条件下对模型仿真值与实测值进行显著性差异分析以验证模型的有效性。

2. 换道模型研究

换道模型引入描述实际交通流基本特性的一些本质的因素,建立其微观换道模型。模型的理论分析和计算机仿真,不仅能够对模型进行深入的理解,还能保证更好地理解观察到的实际交通流复杂现象。

1) 间隙接受模型

Kita^[21]利用 logit 模型评价高速路车辆汇入的间隙接受模型,发现可利用间隙的长度、换道车相对主线车辆的速度和离加速车道终点的距离对换道有着至关重要的影响。

国内学者孙剑等^[22]利用间隙理论对车辆自由换道和协作换道的前后关键距离进行建模,分析不同类型的换道协商机制;贾洪飞等^[23]在合流区换道过程中引