



北京市高等教育精品教材立项项目

交通流理论

邵春福 魏丽英 贾 斌 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



北京市高等教育精品教材立项项目

交通流理论

邵春福 魏丽英 贾 斌 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书内容共十章,包括绪论,交通流量、速度和密度,交通特性的统计分布,驾驶人行为特性,交通流基本参数的相互关系,元胞自动机模型,车辆跟驰模型,连续交通流模型,车辆排队模型和交通流模拟等。

本书可作为交通工程专业本科生的教材,也可作为从事交通管理和交通设计工程技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

交通流理论 / 邵春福, 魏丽英, 贾斌编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.5

ISBN 978-7-121-16861-1

I. ①交… II. ①邵… ②魏… ③贾… III. ①交通流 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 078144 号

责任编辑: 徐蔷薇 特约编辑: 王 纲

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 16.25 字数: 335 千字

印 次: 2012 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

我国快速的城市化建设，使得城市人口超过了农村人口的数量，大量的农村人口还在不断进入城市。同时，改革开放后持续的经济快速增长，人民生活由贫穷到温饱，再到富裕。人民生活的翻天覆地变化，曾经不敢奢望的小汽车进入或正在进入家庭，带来了大规模的机动车保有量和低驾龄驾驶人，即“新手”；小汽车初次进入家庭，部分或全部代替了自行车出行，形成了类似于“开车打酱油”的小汽车使用模式，“自行车王国”已经成为了过去。智能交通的发展为人们提供了比较好的交通信息获取条件，交通广播、交通情报板 VMS、交通信息发布网站等群体诱导方式，以及车内诱导屏、手机等个体诱导方式的发展，使得人们在出发前和出行途中能够随时获得行进前方的交通状态，改变了仅靠经验行驶的信息获取方式，交通信息的服务和获取随时改变着人们的驾驶行为，从而影响着道路交通流和驾驶安全。然而，我们的城市交通基础设施长期欠账累积，造成了城市交通基础设施体系结构欠合理，道路负荷度过高。

上述因素的综合作用，带来了道路上的机动车、非机动车、行人等多种交通方式混行，不规则、自律程度不高和过于烦躁的交通参与者行为使得交通参与者之间互相干扰，交通流速度低、密度高，甚至带来不必要的剐蹭事故和交通拥堵，这些都是我国当前道路上交通流的显著特征。交通流的低速运行影响了出行效率，带来了汽车的过度排污，影响了人们的生活环境 and 质量。

目前，我国多数大城市交通治理问题处于“头痛医头，脚痛医脚”的被动局面。究其原因，可以归纳为对具有自己城市和区域特征的交通流缺乏深入、细致、科学的研究。

交通流理论早就被定义为“利用数学和物理学的理论描述交通现象的一门学问”，交通信息服务的发展又给交通现象赋予了新的内容。本书力求把握我国道路交通流的规律，介绍典型的交通流模型，并编入最新的研究成果，主要内容有：交通流的流量、密度、速度，交通流特性的统计分布，驾驶人行为特性，交通流基本参数的相互关系，元胞自动机模型，车辆跟驰模型，连续交通流模型，车辆排队模型和交通流模拟。

本书由北京交通大学邵春福担任主编，魏丽英和贾斌担任副主编，赵小梅和赵熠参加编写。邵春福负责整体统稿，并编写了第一章、第二章和第四章，魏丽英编写了第三章和第九章，贾斌编写了第五章、第六章和第八章，赵小梅编写了第七章，赵熠编写了第十章。

由于编者的能力和水平所限，书中难免存在不足和错误，恳请各位读者批评指正。

编 者

2012 年 2 月

完稿于红果园

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 交通流理论的发展历史	2
第三节 交通流理论的主要内容	3
一、流量、速度和密度的测量	3
二、交通特性的统计分布	4
三、交通流模型	4
四、驾驶人行为特性	4
五、车辆跟驰模型	4
六、流体动力学模型	5
七、车辆排队模型	5
八、微观交通流模拟	5
第二章 交通流量、速度和密度	6
第一节 概述	6
第二节 定点测量	6
一、流量	7
二、速度	7
三、密度	9
四、车道占有率	10
第三节 短区间测量	11
第四节 沿路段测量	11
一、密度	12
二、速度	12
三、流量	12
第五节 浮动车测量	12
一、流量	12
二、速度	13

第六节 典型的交通流参数检测技术设备	14
一、机动车辆交通流参数采集技术	14
二、非机动车辆和行人交通流参数采集技术	18
三、混合交通流数据采集与信号交叉口交通控制	22
四、全球定位系统	23
复习思考题	24
第三章 交通特性的统计分布	26
第一节 概述	26
第二节 离散型分布	27
一、泊松分布	27
二、二项分布	30
三、负二项分布	33
四、离散型分布的拟合优度检验	33
第三节 车头时距分布模型（连续型分布）	39
一、负指数分布	39
二、移位负指数分布	47
三、爱尔朗分布	49
四、韦布尔分布	49
五、M3 分布	52
六、其他车头时距分布	53
七、连续型分布的拟合优度检验	55
第四节 车速分布模型	58
一、基本定义	58
二、速度的正态分布	62
三、速度的对数正态模型	63
第五节 可插车间隙模型	64
一、基本理论	64
二、发展趋势	67
复习思考题	69
第四章 驾驶人行为特性	70
第一节 概述	70
第二节 离散驾驶行为	71
第三节 控制移动时间	74
第四节 交通安全设施的识认	76
一、交通信号变化	76

二、交通标志的可见度和易读性	77
三、标志读取时间的分配	78
第五节 其他车辆的动态特性	78
一、前车	78
二、并行	79
第六节 障碍和危险物的察觉、识别与确认	79
一、察觉	79
二、识别与确认	80
第七节 驾驶行为差异	80
一、性别	80
二、年龄	81
三、驾驶人伤害	82
第八节 连续驾驶模型	82
一、驾驶传递函数	82
二、模型特征	84
第九节 车辆制动特性	84
一、开环制动	84
二、闭环制动	85
三、最佳制动减速度	86
第十节 速度与加速度控制	86
一、稳态速度控制	86
二、加速度控制	87
第十一节 驾驶诱导	87
一、四车道同向超车	87
二、对向超车	87
第十二节 间隙接受与合流	87
一、间隙接受	87
二、合流	88
第十三节 停车视距	89
第十四节 交叉口视距	89
一、无控制交叉口	89
二、次要道路的停车让行控制交叉口	90
三、次要道路的停车控制交叉口	90
第十五节 其他特性	90
一、限速值的变化	90
二、注意力分散/靠近街巷驾驶	91

三、驾驶人实时信息输入	91
复习思考题	91
第五章 交通流基本参数的相互关系	92
第一节 概述	92
第二节 速度-密度模型	94
一、线性速度-密度关系模型	94
二、对数速度-密度关系模型	96
三、指数速度-密度关系模型	96
四、广义单段式速度-密度模型	97
五、多段式速度-密度模型	99
第三节 速度-流量模型	99
一、抛物线速度-流量模型	100
二、霍尔等人的模型	100
第四节 流量-密度模型	102
一、抛物线形流量-密度关系模型	102
二、对数流量-密度关系模型	103
三、指数流量-密度关系模型	103
四、非连续流流量-密度曲线模型	103
五、特殊流量-密度关系模型	104
六、流量-时间占有率跟踪曲线	104
七、流量-密度模型的应用	105
复习思考题	107
第六章 元胞自动机模型	108
第一节 概述	108
第二节 元胞自动机的定义、构成和特征	108
一、元胞自动机的物理定义	108
二、元胞自动机的构成	109
三、元胞自动机的特征	111
第三节 单车道元胞自动机模型	112
一、184 号规则	112
二、NaSch 模型	113
三、巡航控制极限模型	116
四、慢启动规则模型	117
五、速度效应模型	120
六、KKW 模型	121

七、其他单车道 CA 模型	124
第四节 单向多车道元胞自动机模型	125
第五节 双向双车道模型	131
第六节 城市路网交通流中的元胞自动机模型	135
一、BML 模型	135
二、BML 的扩展和衍生模型	137
复习思考题	141
第七章 车辆跟驰模型	142
第一节 概述	142
第二节 车辆跟驰模型的基本假设和分类	143
第三节 线性车辆跟驰模型	144
第四节 交通流的稳定性	145
一、局部稳定性	146
二、渐近稳定性	147
第五节 非线性车辆跟驰模型	150
一、非线性车辆跟驰模型的起源和发展	150
二、非线性车辆跟驰模型的一般表达式	152
三、基于车辆跟驰模型的交通流基本关系式	153
四、经典车辆跟驰模型的局限性	155
第六节 车辆跟驰模型的发展	155
一、刺激-反应模型	156
二、安全距离模型	157
三、心理-生理学模型	158
四、人工智能模型	160
五、优化速度模型及其扩展模型	162
第七节 车辆跟驰模型的应用	163
一、车辆跟驰模型在驾驶控制中的应用	164
二、车辆跟驰模型在交通预测中的应用	164
三、车辆跟驰模型在能耗和尾气排放模型中的应用	164
四、车辆跟驰模型在交通模拟中的应用	165
复习思考题	165
第八章 连续交通流模型	166
第一节 概述	166
第二节 守恒方程	166
一、守恒方程的建立	166

二、守恒方程的解析解法	167
三、守恒方程的数值解法	168
第三节 交通流观测中的加速度	169
第四节 交通中的波	170
一、交通波模型的建立	170
二、交通波的分析	171
三、用于特定的速度-密度关系返回波的特性	173
四、实例应用	175
五、信号交叉口车辆排队的形成与消散	176
第五节 伯格方程	180
第六节 高阶连续模型	180
一、动力学方程	180
二、高阶模型发展简介	181
复习思考题	183
第九章 车辆排队模型	184
第一节 概述	184
第二节 无信号交叉口车辆特性	184
一、无信号交叉口控制方式	184
二、无信号交叉口几何特征	185
三、无信号交叉口车辆组成和速度特征	185
四、无信号交叉口车流运行特性	186
第三节 信号交叉口车辆特性	187
一、交通信号基本参数及类型	187
二、信号交叉口车流的运动特性	189
三、信号交叉口车辆排队分析	191
第四节 车辆排队论	192
一、排队系统基本概念	192
二、单通道排队服务 (M/M/1) 系统	193
三、具有指数到达和指数服务次数的多通道情形 (M/M/N)	199
四、交通排队理论应用	200
五、交通事件的排队分析	210
六、信号交叉口的延误模型	212
复习思考题	216
第十章 交通流模拟	217
第一节 概述	217

一、交通流模拟的应用范围	218
二、交通流模拟的主要研究内容	219
第二节 交通流模拟的分类	220
一、按研究对象分类	220
二、按推进机制分类	221
三、按描述的细致程度分类	222
第三节 交通流模拟程序	222
第四节 微观交通流模拟模型	226
一、微观交通流基础模型	226
二、微观交通流运动模型	228
第五节 微观交通流模拟常用计算机软件系统	230
一、CORSIM	230
二、VISSIM	231
三、Paramics	231
四、SimTraffic	232
第六节 微观交通流模拟的应用	233
一、微观交通流模拟系统的建立	233
二、微观交通流模拟方案比选	235
三、微观交通流模拟结果分析	238
复习思考题	238
参考文献	239

第一章 绪 论

第一节 概 述

经济社会的不断发展使得人民生活水平不断提高,从而带来汽车的保有量逐年增加;城镇化的快速推进使得城市规模扩大和大量人口涌入城市,出行总量增加;快速机动化带来了车辆使用强度的提高。诸如这些因素均为城市交通带来了巨大需求和压力。而因交通基础设施的建设周期长,其建设速度难以赶上出行需求的增长速度,致使城市交通问题严重。

城市道路交通问题逐渐成为影响市民出行和经济可持续发展的重大问题。交通拥堵、交通环境污染和交通事故三大问题困扰着城市的发展,甚至被称为“城市病”。据统计,在我国 660 多座城市中,约有三分之二的城市交通在“高峰”时段出现拥堵。我国一些大城市市区,机动车平均时速已经下降到 12 km,而在市中心,机动车时速只有 8~10 km。如此拥堵的城市道路交通影响城市居民的出行质量、交通安全和生活幸福。据美国得克萨斯州运输研究所估算,全美 39 个主要城市每年因交通拥堵造成的经济损失约为 410 亿美元。欧洲每年因交通拥堵造成的经济损失为 5 000 亿欧元。日本因道路交通拥堵造成的年经济损失达 15 兆日元。据我国相关部门统计分析,2003 年我国因交通拥堵造成的经济损失为 2 000 亿元人民币;我国大城市 78%的一氧化碳(CO)、46%的氮氧化物(NO_x)和 83%的碳氢化物(HC)污染,是机动车排放的尾气造成的。机动车排放的尾气中,CO、NO_x、HC 和 PM_{2.5} 等有害物质对人的健康和城市环境造成了巨大的危害;2010 年我国道路交通事故件数、受伤人数、死亡人数和直接经济损失四项指标分别达到了 39.06 万多起、25.4 万多人、6.52 万多人和 9.3 亿多元人民币,尽管这些数字正在逐年下降,但是我国道路交通安全局势依然严峻。如何有效地提高道路交通安全是关系到人民生活能否和谐和幸福的关键问题之一。世界上每年有几十万人死于交通事故,相当于一场战争的死亡人数!交通拥堵在我国和世界的大城市已经成为了一个普遍问题。

因此,减少和缓解道路交通带来的上述问题,充分发挥道路的功效,使其为人民生活和社会经济发展服务,是摆在交通领域工作者面前的重要而艰巨的任务和历史使命。

在现代信息化社会中,智能交通的发展为交通流理论的发展带来了新的内涵。各种交

通信息采集设备，如磁感线圈式、超声波式、远程红外线式、光学式等，采集信息的快速传输和处理技术，以及各种交通信息服务和诱导技术，为出行者提供了出行前和出行中的动态信息服务，从而使得出行者根据自己的情况合理选择交通方式、重构出行链和行进路径，进而优化交通结构和道路交通流。因此，现代交通流理论因交通信息服务的介入发生了变革。

交通流理论是交通工程专业的基础理论，为了很好地完成上述历史使命，必须学习、研究和把握交通流中各种要素的基本特性以及交通拥堵的机理和规律，不失时机地提出有效的预防措施和解决方案。

第二节 交通流理论的发展历史

交通流理论，起初被定义为“运用物理学与数学的定律来描述交通特性的学问”。交通流理论的研究者多为数学和物理学者，如 J.G.Wardrop、R.Herman、M.Bechmann、T.Sasaki（佐佐木纲）、G.F. Newell 等都是如此。

随着概率论及交通流量和车速的第一批模型的应用，交通流理论在 20 世纪 30 年代才开始发展起来。在 20 世纪 40 年代，由于第二次世界大战，交通流理论的发展不多。20 世纪 50 年代初期，交通流理论的研究主要是车辆跟驰、交通波理论和车辆排队理论。研究人员来自各种学科，包括理论物理学、应用数学、控制理论、心理学、经济学以及工程领域。到 20 世纪 50 年代末期，交通流理论已经发展到需要举行一次国际会议的关键时刻。因此，1959 年 12 月 7 日和 8 日在美国通用汽车研究所的邀请下，于美国汽车城底特律市举行了第一届国际研讨会，有 100 多人出席，提出了 15 篇学术论文，并多次进行了激烈讨论。当时参加人员普遍认为这次国际研讨会很有收获，并建议应该继续举办下去，于是，决定每 3 年举行一次。表 1.1 列出了该国际研讨会的举行情况。该国际研讨会是世界上交通流理论研究最权威的会议，它以少而精闻名，每次会议限定论文篇数。

表 1.1 交通流理论国际研讨会的举行情况

届数	地点、日期	会刊
第 1 届	美国密执安州底特律市，1959 年	“Theory of Traffic Flow” (R. Herman) Elsevier Publishing Co., 1961
第 2 届	英国伦敦市，1963 年	“Proceedings of The Second International Symposium on The Theory of Traffic Flow” (J. Almond), OECD, Paris, 1965
第 3 届	美国纽约市，1965 年	“Vehicular Traffic Science” (L.C. Edie, R. Herman, R. Rothery) American Elsevier Publishing Co.1967
第 4 届	西德 Karlsrub, 1968 年	“Beitrage Zur Theorie des Verkehrsflusses” (W.leutzbach and P.Baron) Strassenbau und Strasseverkehrstechnik, n.86, Bundesanstalf fur Strassenwessen, 5 Raderthal, Bruhler Strasse 324, West Germany

(续表)

届 数	地点、日期	会 刊
第 5 届	美国加利福尼亚州伯克利市, 1971 年	“Traffic and Transportation”(G.F. Newell), American Elsevier Science Publishing Co.1972
第 6 届	澳大利亚悉尼市, 1974 年	“Transportation and Traffic Theory”(D.J. Buckley), American Elsevier Science Publishing Co., 1974
第 7 届	日本京都市, 1977 年	“Transportation and Traffic Theory”(E.Kometani and T. Sasaki), American Elsevier Science Publishing Co., 1977
第 8 届	加拿大多伦多市, 1981 年	“Transportation and Traffic Theory”(S.Yager), American Elsevier Science Publishing Co., 1981
第 9 届	荷兰德尔福特市, 1984 年	“Transportation and Traffic Theory”, American Elsevier Science Publishing Co., 1984
第 10 届	美国波士顿市, 1987 年	“Transportation and Traffic Theory”, American Elsevier Science Publishing Co., 1987
第 11 届	日本横滨市, 1990 年	“Transportation and Traffic Theory”(M.Koshi), American Elsevier Science Publishing Co.1990
第 12 届	美国伯克利大学, 1993 年	“Transportation and Traffic Theory”(C.F.Daganzo), American Elsevier Science Publishing Co.1993
第 13 届	法国巴黎市, 1996 年	“Transportation and Traffic Theory”(Jean-Baptiste Lesort), American Elsevier Science Publishing Co.1996
第 14 届	以色列耶路撒冷市, 1999 年	“Transportation and Traffic Theory”(Avishai Ceder), American Elsevier Science Publishing Co.1999
第 15 届	澳大利亚阿德莱德市, 2002 年	“Transportation and Traffic Theory”(Taylor M.A.P.), American Elsevier Science Publishing Co.2002
第 16 届	美国马里兰大学, 2005 年	“Transportation and Traffic Theory”(Hani S Mahmassani), American Elsevier Science Publishing Co.2005
第 17 届	英国伦敦市, 2007 年	“Transportation and Traffic Theory”(R.E. Richard Allsop), American Elsevier Science Publishing Co.2008
第 18 届	中国香港特别行政区, 2009 年	“Transportation and Traffic Theory”(W.H.K. Lam), American Elsevier Science Publishing Co.2009
第 19 届	美国伯克利市, 2011 年	“Transportation and Traffic Theory”(R. Birgeneau), American Elsevier Science Publishing Co.2011

第三节 交通流理论的主要内容

交通流理论一般包含以下内容。本书也将从以下几方面进行详细论述。

一、流量、速度和密度的测量

流量、密度和速度被称为交通流三要素, 是交通流理论的基本要素。在研究流量、速

度和密度的基本特性之前，首先需要给出这些交通要素的定义和测量方法，以及计算平均值的方法等。

交通特性的测量可能利用的工具，最初只有跑表和人工操作计数器。因而，重要的测量只能通过某一定点的流量和车头时距，再采用每辆车通过“固定测站”的计时方法来测量车速作为补充。

随着交通信息采集技术的发展，开发了各种新型交通数据采集装置，例如，远程微波交通数据检测器（Remote Traffic Microwave Sensor, RTMS）、图像数据传感器 Autoscope 等，这些都是近年研究开发的尖端交通测量设备，也是智能交通系统发展中必不可少的设备。

二、交通特性的统计分布

在设计新的交通设施或交通组织方案时，需要检测和预测交通流的性能，例如，关于某特定车辆的车头时距出现的频率，在一定时间间隔内可能达到的车辆数，以及超过一定值的车速。统计分布模型能使交通技术人员用最少的数据资料做出准确的预测。

统计分布用于描述有高度随机性的交通现象。交通流随机分布分为离散型分布和连续型分布，在描述车速、可插车间隙以及收费站车辆缴费排队等时一般被采用。

三、交通流模型

当交通流量或交通密度增加时，车速将降低。实际上，通常可以从已知的或容易测量的车流特性参数计算其他未知车流特性参数。例如，负荷度可以用车速或密度的观测值来计算。速度-流量、速度-密度以及流量-密度是交通流三要素的基本关系模型。元胞自动机近年来也被应用于交通流模型中，本书对此也将进行比较详细的介绍。

四、驾驶人行为特性

车辆的驾驶人是参与交通的主要因素之一，人各有自己的价值观念（又称效用理念），交通系统也因为有了人（机动车驾驶人、非机动车和行人）的参与而变得异常复杂，因此交通特性模式的建立，必须考虑驾驶人的行为特性。交通流模型包括一些参数，这些参数在驾驶人-车辆系统中常用于说明驾驶人的各种特性。

五、车辆跟驰模型

驾驶人的动作限于纵向加速、匀速、制动和横向左右转动。当驾驶人驾驶车辆前后列队行驶，调整他们的加速度达到平顺安全行驶时，将形成交通流的动态特性。

车辆跟驰分析将交通流看成由车辆粒子组成，从而分析车辆粒子之间的相互作用，分析的方法与自动控制系统的方法相同。研究的主要目标是试图通过检验车队中一辆跟随另一辆的运行方式，了解单车道交通流特性。此类研究用于改进瓶颈路段车流的交通特性，并检验交通管控与通信技术，以期在高密度交通中尽量减少追尾交通事故。

六、流体动力学模型

交通流三要素包括流量、速度和密度，人们自然会试图利用流体特性分析交通流。在车辆跟驰模型中，尽管把交通流看成非连续粒子间的相互作用，然而本模型将交通流看成连续流体。因此，在这里人们关心的是交通流的统计特性，而不是粒子之间的相互作用。

七、车辆排队模型

交通技术人员的目标是规划、设计和管理交通设施，以减少交通参与者的交通延误。车辆在高速公路收费匝道的等待，行人在人行横道前排队等候机动车流的间隙或在公共汽车站处排队，左转车道车辆的等待等，这些均会造成交通拥堵，带来交通延误。在实际运行中，交通技术人员面临回答上述交通参与者必须等候多长时间，排队等候的车辆或行人的数量有多少，管理设施是否能充分发挥作用等问题。人们自然会想到应用基于概率论和统计学的排队模型解决这些问题。

八、微观交通流模拟

网络状态下的道路交通系统是一个复杂的巨系统，往往难以用理论模型进行精确预测，因此常采用计算机模拟的方法，尤其是近年来，随着计算机技术和并行计算方法的出现，微观交通流模拟研究获得了快速发展。例如，Paramics、NetSim 和 VISSIM 等微观模拟系统在工程中获得了比较广泛的应用。

最后，网络条件下的交通流也交通流理论的内容之一，但是考虑到网络交通流无论从其理论，还是从论述的篇幅上均难以在本书中论述清楚，并且一般在《交通规划》中有属于它的位置，因此本书不做论述。