

“十二五”国家重点出版物出版规划项目



城市交通系列教材

邵春福 总主编

# 城市交通流理论

于雷 宋国华 主编



北京交通大学出版社  
<http://www.bjtu.cn>

“十二五”国家重点出版项目  
城市交通系列教材

# 城市交通流理论

于 雷 宋国华 主编

北京交通大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书试图用数学方法描述车辆、驾驶人和基础设施的相互关系。本书分 11 章, 内容包括绪论、交通流基本参数及调查方法、交通特性的统计分布、驾驶行为与单车运动特性、多车运动的相互作用、交通流参数的关系模型、交通流的波动与交通波模型、宏观交通流模型、交通运行与交通影响模型、典型城市道路的交通流分析方法及交通流仿真。

本书既可作为交通工程专业本科生教材, 也可作为城市交通管理及交通设计工程技术人员的参考书。

版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

城市交通流理论 / 于雷, 宋国华主编. —北京: 北京交通大学出版社, 2016. 4

城市交通系列教材

ISBN 978-7-5121-2694-7

I. ① 城… II. ① 于… ② 宋… III. ① 城市交通-交通流-高等学校-教材 IV. ① U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 071663 号

### 城市交通流理论

CHENGSHI JIAOTONGLIU LILUN

---

责任编辑: 韩素华

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印 刷 者: 北京瑞达方舟印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 mm×230 mm 印张: 21 字数: 470 千字

版 次: 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-2694-7/U·234

印 数: 1~2 000 册 定价: 48.00 元

---

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: [press@bjtu.edu.cn](mailto:press@bjtu.edu.cn)。

# 前 言

随着城镇化与机动化进程的快速推进,城市交通问题正日益引起人们的关注。应对城市交通带来的安全、效率、环境等多角度的挑战,是赋予当前及未来相当一段时期内交通工程专业人员的历史使命。上述问题的剖析与解决,需要科学的理论支撑。作为城市交通工程的基础理论,交通流理论试图用数学方法描述车辆、驾驶人和基础设施的相互关系。学习城市交通流理论,掌握交通拥堵、事故、污染等问题的形成机理和发展规律,进而在规划、设计、管理、控制各阶段形成科学决策和改善方案,将有助于城市各类交通问题的解决,这正是本书编写的意义。

经历了 80 余年的发展历史,大量学者和工程人员正不断完善和丰富着交通流理论的研究成果,科学技术的发展也赋予了交通流理论新的内涵。在保留经典的交通流理论内容的基础上,本书以城市道路交通为主体,结合编者的科研经验与教学体会,尝试从交通工程角度引入更多交通流理论的现实应用,并引入近年来交通流理论研究中被广泛接受的新研究成果。本书既可作为交通工程专业本科生的教材,也可作为城市交通管理和交通设计工程技术人员的参考书。

本书分为 11 章,内容包括绪论、交通流基本参数及调查方法、交通特性的统计分布、驾驶行为与单车运动特性、多车运动的相互作用、交通流参数的关系模型、交通流的波动与交通波模型、宏观交通流模型、交通运行与交通影响模型、典型城市道路的交通流分析方法、交通流仿真。

本书由北京交通大学于雷教授、宋国华副教授主编。在编写过程中,上海工程技术大学的朱琳博士,博士研究生赵琦、黎明、费文鹏、张建波,硕士研究生周溪溪、吴亦政、耿中波、岳圆圆、张凡、王霞、王璐媛、吕超、李祖芬、王静旖、陈娇杨、鲁洪语等提供了帮助,在此表示感谢。天地交而万物通,上下交而其志同,限于编者的能力,本书错漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2016 年 2 月

# 目 录

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 第1章 绪论 .....               | (1)  |
| 第2章 交通流基本参数及调查方法 .....     | (6)  |
| 2.1 概述 .....               | (6)  |
| 2.2 交通流基本参数 .....          | (7)  |
| 2.2.1 流量 .....             | (7)  |
| 2.2.2 速度 .....             | (12) |
| 2.2.3 密度 .....             | (15) |
| 2.3 交通流参数的定点测量 .....       | (19) |
| 2.3.1 流量的定点测量 .....        | (20) |
| 2.3.2 速度的定点测量 .....        | (21) |
| 2.3.3 密度的定点测量 .....        | (21) |
| 2.4 交通流参数的沿路段测量 .....      | (21) |
| 2.5 交通流参数的浮动车测量 .....      | (23) |
| 2.5.1 流量的浮动车测量 .....       | (23) |
| 2.5.2 速度的浮动车测量 .....       | (24) |
| 2.6 交通流参数的测量设备与应用系统 .....  | (25) |
| 2.6.1 机动车辆交通流参数采集技术 .....  | (25) |
| 2.6.2 非机动车辆交通流参数采集技术 ..... | (30) |
| 复习思考题 .....                | (32) |
| 第3章 交通特性的统计分布 .....        | (33) |
| 3.1 概述 .....               | (33) |
| 3.2 交通流参数的离散型分布 .....      | (34) |
| 3.2.1 泊松分布 .....           | (35) |
| 3.2.2 二项分布 .....           | (38) |
| 3.2.3 负二项分布 .....          | (40) |
| 3.2.4 离散型分布的拟合优度检验 .....   | (41) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 3.3 交通流参数的连续型分布 .....        | (45)  |
| 3.3.1 负指数分布 .....            | (45)  |
| 3.3.2 移位负指数分布 .....          | (50)  |
| 3.3.3 埃尔朗分布 .....            | (52)  |
| 3.3.4 韦布尔分布 .....            | (54)  |
| 3.3.5 聚束负指数分布模型 .....        | (56)  |
| 3.3.6 其他车头时距分布 .....         | (57)  |
| 3.4 车速分布模型 .....             | (59)  |
| 3.4.1 基本定义 .....             | (59)  |
| 3.4.2 速度分布的正态性 .....         | (61)  |
| 复习思考题 .....                  | (62)  |
| <b>第4章 驾驶行为与单车运动特性</b> ..... | (64)  |
| 4.1 概述 .....                 | (64)  |
| 4.2 驾驶人对单车运动的影响 .....        | (66)  |
| 4.2.1 驾驶过程分析 .....           | (66)  |
| 4.2.2 驾驶任务的层次分析 .....        | (67)  |
| 4.2.3 驾驶人的刺激-反应过程 .....      | (69)  |
| 4.2.4 驾驶人的离散驾驶行为与模型 .....    | (76)  |
| 4.2.5 驾驶人的连续驾驶行为与模型 .....    | (79)  |
| 4.3 车辆属性对单车运动的影响 .....       | (80)  |
| 4.3.1 车辆类型 .....             | (80)  |
| 4.3.2 影响车辆运动特征的主要参数 .....    | (82)  |
| 4.3.3 车辆的制动特性 .....          | (83)  |
| 4.3.4 速度与加速度控制 .....         | (85)  |
| 4.4 道路与环境对单车运动的影响 .....      | (86)  |
| 4.4.1 道路对车辆运动的影响 .....       | (86)  |
| 4.4.2 天气对车辆运动的影响 .....       | (88)  |
| 4.4.3 其他因素的影响 .....          | (89)  |
| 复习思考题 .....                  | (92)  |
| <b>第5章 多车运动的相互作用</b> .....   | (93)  |
| 5.1 概述 .....                 | (93)  |
| 5.2 车辆跟驰模型 .....             | (94)  |
| 5.2.1 车辆跟驰模型的基本假设及分类 .....   | (95)  |
| 5.2.2 刺激-反应类跟驰模型 .....       | (96)  |
| 5.2.3 安全距离类跟驰模型 .....        | (104) |

|            |                          |              |
|------------|--------------------------|--------------|
| 5.2.4      | 理想速度类跟驰模型 .....          | (106)        |
| 5.2.5      | 生理-心理类跟驰模型 .....         | (107)        |
| 5.2.6      | 其他车辆跟驰模型 .....           | (112)        |
| 5.2.7      | 跟驰模型的稳定性分析 .....         | (114)        |
| 5.3        | 车辆跟驰模型的应用 .....          | (120)        |
| 5.3.1      | 在驾驶控制中的应用 .....          | (120)        |
| 5.3.2      | 在交通预测和评估中的应用 .....       | (121)        |
| 5.3.3      | 在能耗和尾气排放模型中的应用 .....     | (121)        |
| 5.3.4      | 在交通仿真中的应用 .....          | (121)        |
| 5.4        | 车辆换道模型 .....             | (123)        |
| 5.5        | 间隙接受模型 .....             | (124)        |
| 5.5.1      | 可插车间隙参数的估计方法 .....       | (125)        |
| 5.5.2      | 应用情况分析 .....             | (126)        |
|            | 复习思考题 .....              | (127)        |
| <b>第6章</b> | <b>交通流参数的关系模型 .....</b>  | <b>(128)</b> |
| 6.1        | 概述 .....                 | (128)        |
| 6.2        | 交通流速度-密度模型 .....         | (130)        |
| 6.2.1      | 线性速度-密度关系模型 .....        | (131)        |
| 6.2.2      | 对数速度-密度关系模型 .....        | (133)        |
| 6.2.3      | 指数速度-密度关系模型 .....        | (133)        |
| 6.2.4      | 其他单段式速度-密度关系模型 .....     | (133)        |
| 6.2.5      | 多段式速度-密度关系模型 .....       | (136)        |
| 6.2.6      | Van Aerde 四参数单段式模型 ..... | (136)        |
| 6.3        | 交通流流量-密度模型 .....         | (138)        |
| 6.3.1      | 抛物线形流量-密度关系模型 .....      | (139)        |
| 6.3.2      | 对数流量-密度关系模型 .....        | (140)        |
| 6.3.3      | 指数流量-密度关系模型 .....        | (140)        |
| 6.3.4      | 多段式流量-密度关系模型 .....       | (140)        |
| 6.3.5      | Van Aerde 四参数单段式模型 ..... | (141)        |
| 6.3.6      | 流量-密度曲线的磁滞现象 .....       | (141)        |
| 6.4        | 交通流速度-流量模型 .....         | (144)        |
| 6.4.1      | 抛物线速度-流量关系模型 .....       | (144)        |
| 6.4.2      | HCM 等其他模型 .....          | (145)        |
| 6.5        | 交通流三参数关系及基本特征参数 .....    | (147)        |
| 6.5.1      | 流量-速度-密度基本关系 .....       | (147)        |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 6.5.2 基本特征参数 .....                   | (148) |
| 6.5.3 不利天气对自由流速度、通行能力的影响 .....       | (158) |
| 6.6 三相交通流理论 .....                    | (160) |
| 6.6.1 基本假设 .....                     | (161) |
| 6.6.2 基本内容 .....                     | (161) |
| 6.6.3 移动阻塞的形成 .....                  | (162) |
| 复习思考题 .....                          | (163) |
| <b>第7章 交通流的波动与交通波模型</b> .....        | (165) |
| 7.1 概述 .....                         | (165) |
| 7.2 连续方程 .....                       | (165) |
| 7.2.1 连续方程的建立 .....                  | (165) |
| 7.2.2 连续方程的解析解法 .....                | (167) |
| 7.2.3 连续方程的数值解法 .....                | (168) |
| 7.3 交通波理论 .....                      | (169) |
| 7.3.1 交通波模型的建立 .....                 | (169) |
| 7.3.2 交通流观测中的加速度 .....               | (170) |
| 7.3.3 交通波分析 .....                    | (172) |
| 7.3.4 用于特定的速度-密度关系返回波的特性 .....       | (176) |
| 7.3.5 实例应用 .....                     | (178) |
| 7.4 定量分析——信号交叉口车辆排队的形成和消散 .....      | (179) |
| 7.5 车队离散 .....                       | (182) |
| 7.6 高阶连续模型 .....                     | (183) |
| 7.6.1 动力学方程 .....                    | (183) |
| 7.6.2 高阶模型发展简介 .....                 | (184) |
| 复习思考题 .....                          | (185) |
| <b>第8章 宏观交通流模型</b> .....             | (187) |
| 8.1 概述 .....                         | (187) |
| 8.2 行程时间模型 .....                     | (187) |
| 8.2.1 行程时间等高线图 .....                 | (187) |
| 8.2.2 一般交通特性函数 .....                 | (188) |
| 8.2.3 平均速度函数 .....                   | (189) |
| 8.3 网络容量模型 .....                     | (190) |
| 8.3.1 网络容量 .....                     | (191) |
| 8.3.2 路网的平均速度-平均流量的关系 .....          | (192) |
| 8.3.3 路网性能参数模型—— $\alpha$ 关系模型 ..... | (198) |

|            |                          |              |
|------------|--------------------------|--------------|
| 8.4        | 二流模型 .....               | (199)        |
| 8.4.1      | 二流模型的提出 .....            | (200)        |
| 8.4.2      | 二流模型参数的意义及其影响因素 .....    | (201)        |
| 8.5        | 交通流宏观基本图模型 .....         | (203)        |
| 8.5.1      | 宏观基本图 (MFD) 模型的提出 .....  | (203)        |
| 8.5.2      | MFD 的存在性研究 .....         | (204)        |
| 8.5.3      | MFD 模型的参数关系与特征 .....     | (206)        |
| 8.5.4      | MFD 模型的影响因素 .....        | (208)        |
| 8.5.5      | MFD 模型应用 .....           | (210)        |
| 8.6        | 交通运行指数模型 .....           | (212)        |
| 8.6.1      | 基于 V/C 比的交通拥堵评价指数 .....  | (213)        |
| 8.6.2      | 基于出行时间比的交通拥堵评价指数 .....   | (214)        |
| 8.6.3      | 基于严重拥堵里程比的交通运行指数 .....   | (215)        |
| 8.6.4      | 基于时间比的交通运行指数 .....       | (217)        |
| 8.6.5      | 基于混合评价的交通运行指数 .....      | (219)        |
|            | 复习思考题 .....              | (220)        |
| <b>第9章</b> | <b>交通运行与交通影响模型 .....</b> | <b>(221)</b> |
| 9.1        | 交通运行效率评价 .....           | (221)        |
| 9.1.1      | 行程时间及其可靠性 .....          | (221)        |
| 9.1.2      | 延误 .....                 | (225)        |
| 9.1.3      | 排队长度 .....               | (226)        |
| 9.1.4      | 其他机动性相关的指标 .....         | (227)        |
| 9.1.5      | 运行效率和服务水平的评估 .....       | (227)        |
| 9.2        | 交通安全模型 .....             | (230)        |
| 9.2.1      | 交通事故 .....               | (230)        |
| 9.2.2      | 交通流与安全 .....             | (230)        |
| 9.2.3      | 交通安全性能函数 .....           | (231)        |
| 9.3        | 交通能耗排放与空气质量模型 .....      | (234)        |
| 9.3.1      | 道路交通排放 .....             | (234)        |
| 9.3.2      | 交通能耗排放模型 .....           | (235)        |
| 9.3.3      | 城市机动车排放空气质量模型 .....      | (239)        |
| 9.4        | 交通噪声模型 .....             | (242)        |
| 9.4.1      | 道路交通噪声预测模型 .....         | (243)        |
| 9.4.2      | 预测模型中参数的确定 .....         | (243)        |
|            | 复习思考题 .....              | (245)        |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 第 10 章 典型城市道路的交通流分析方法 .....      | (246) |
| 10.1 城市快速路交通流的特性 .....           | (246) |
| 10.1.1 快速路路段和系统 .....            | (246) |
| 10.1.2 快速路的匝道控制 .....            | (252) |
| 10.2 信号控制的交叉口交通流的特性 .....        | (254) |
| 10.2.1 信号控制原则和交通运行 .....         | (254) |
| 10.2.2 关键术语及其定义 .....            | (254) |
| 10.2.3 信号交叉口的通行能力 .....          | (256) |
| 10.2.4 信号交叉口进口道的延误 .....         | (259) |
| 10.3 无信号控制的交叉口交通流的特性 .....       | (261) |
| 10.4 车辆排队分析方法 .....              | (265) |
| 10.4.1 排队系统的基本概念 .....           | (265) |
| 10.4.2 单通道排队服务系统 .....           | (267) |
| 10.4.3 具有指数到达和指数服务次数的多通道情形 ..... | (271) |
| 10.4.4 交通排队理论的应用 .....           | (272) |
| 10.4.5 交通事件排队分析 .....            | (279) |
| 10.4.6 信号交叉口车辆排队分析 .....         | (281) |
| 复习思考题 .....                      | (282) |
| 第 11 章 交通流仿真 .....               | (283) |
| 11.1 概述 .....                    | (283) |
| 11.1.1 交通流仿真的作用 .....            | (284) |
| 11.1.2 交通流仿真的主要研究内容 .....        | (285) |
| 11.2 交通流仿真的分类 .....              | (285) |
| 11.2.1 按描述的细致程度分类 .....          | (286) |
| 11.2.2 按研究对象分类 .....             | (286) |
| 11.2.3 按推进机制分类 .....             | (287) |
| 11.3 微观交通流仿真的随机性原则 .....         | (287) |
| 11.4 微观交通流仿真的模型原理与开发 .....       | (290) |
| 11.4.1 路网表示 .....                | (291) |
| 11.4.2 跟驰模型 .....                | (291) |
| 11.4.3 换道模型 .....                | (292) |
| 11.4.4 间隙接受模型 .....              | (293) |
| 11.4.5 人-车属性 .....               | (293) |
| 11.4.6 运行指标 .....                | (294) |
| 11.4.7 其他要素 .....                | (294) |

|        |                               |       |
|--------|-------------------------------|-------|
| 11.5   | 微观交通流仿真的应用 .....              | (295) |
| 11.6   | 微观交通流仿真常用计算机软件系统 .....        | (297) |
| 11.6.1 | VISSIM .....                  | (297) |
| 11.6.2 | SYNCHRO/SimTraffic .....      | (298) |
| 11.6.3 | CORSIM .....                  | (299) |
| 11.6.4 | PARAMICS .....                | (299) |
| 11.7   | 微观交通流仿真的应用实例（以首都国际机场为例） ..... | (300) |
| 11.7.1 | 数据采集 .....                    | (300) |
| 11.7.2 | 平台搭建 .....                    | (303) |
| 11.7.3 | 仿真方案设计 .....                  | (304) |
| 11.7.4 | 模型参数标定 .....                  | (304) |
| 11.7.5 | 分析和评价 .....                   | (307) |
| 11.8   | 仿真是正确的工具吗 .....               | (308) |
|        | 复习思考题 .....                   | (309) |
|        | 英文缩写的中英文解释 .....              | (310) |
|        | 参考文献 .....                    | (312) |

# 第 1 章

## 绪 论

在城镇化和机动化快速发展的背景下,我国城市交通正面临着规划、设计、建设、管理、控制等多阶段,以及安全、效率、环境等多角度的多重问题与挑战。交通拥堵、交通环境污染和交通事故已经成为被广泛关注的“城市病”问题。许多大城市高峰时间的平均行程速度为 10 km/h 左右,我国 15 个城市每天因交通拥堵造成的经济损失达 10 亿元。道路交通是北京等大城市  $\text{PM}_{2.5}$  污染的首要污染源,并贡献了超过一半的一氧化碳( $\text{CO}$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和碳氢化合物( $\text{HC}$ )等污染。解决这些问题,是当前及未来相当一段时期内交通工程专业人员的历史使命。对这些问题的科学分析,需要科学的理论支撑。

交通流理论是交通工程的基础理论,为了科学地分析上述问题,必须学习和研究城市交通流中各种要素的基本特性及其相互关系,掌握交通拥堵、事故、污染等问题的形成机理和发展规律,进而在规划、设计、管理、控制各阶段形成科学决策和改善方案。而这正是编写本书的目的与意义所在。

如果将 Greenshields 博士提出的交通流速度-流量曲线看作交通流理论的奠基之作,交通流理论至今已经发展了 80 余年。几十年中,这个依然年轻的学科吸引了大量优秀的科学家和工程师,催生了多学科的交叉融合,产生了丰富、灿烂的研究成果,并广泛应用到了交通工程各类实践中。这些学者于 1959 年在底特律召开了第一届交通流理论国际研讨会(International Symposium on Transportation and Traffic Theory, ISTTT),1963 年在美国交通运输研究委员会(TRB)成立了交通流理论分委会(Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics, AHB45)。直到今天,这些组织仍然活跃并吸引着越来越多来自交通工程、物理学、应用数学、控制理论、经济学等各领域的学者。ISTTT 会议已由开始的每 3 年一次改为每 2 年一次,第 21 届会议于 2015 年 8 月在日本神户召开,第 22 届会议将于 2017 年在美国西北大学召开。TRB 每年 1 月在美国华盛顿特区召开年会,已经连续召开了 95 届。这些学者和学术活动正在不断完善和丰富着交通流理论的研究成果。

除了 ISTTT 和 TRB 的各次会议论文集外, 这些组织整理研究成果, 先后发布了一系列具有时代特征的交通流理论的报告或专著。

- 1964 年美国公路研究委员会 (HRB, 是 TRB 的前身) 发布了 *An Introduction to Traffic Flow Theory*, 被视为交通流理论的第一部专著。当时的研究者多为数学和物理学者, 专著的章节安排也体现了那个时代的研究特征: 第 1、2、3 章分别为流体力学、跟驰模型、排队论。

- 1975 年 TRB 将 *An Introduction to Traffic Flow Theory* 更新为 *Traffic Flow Theory: A Monograph*。在此专著中, 交通工程学的特征有了鲜明的体现, 交通流量、速度、密度的检测和统计特征, 以及驾驶行为分析被置于专著的开始位置。

- 2001 年 TRB 联合美国联邦公路局 (FHWA) 和橡树岭国家实验室 (ORNL) 发布了 *Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report*。此版基本保持了 1975 版的内容结构, 并突出了交通流理论在信号、非信号交叉口控制中的应用。该书仍然是目前交通流理论领域影响力最大的专著, 其篇章结构和主要内容被各国交通流理论相关的书籍所借鉴。

科学技术的发展正不断赋予交通流理论新的内涵。例如, 自动驾驶和联网车辆条件下的交通流理论、三相交通流理论、交通流宏观基本图 (macroscopic fundamental diagrams, MFD) 等。除了专著之外, 一些新的专题报告对此进行了较为系统的整理, 包括 TRB 发布的 *75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory: Greenshields Symposium* 等。感兴趣的读者也可以查阅 ISTTT 和 TRB 交通流分会 AHB45 的各次会议论文集。

在保留经典的交通流理论内容的基础上, 本书以城市道路交通为主体, 尝试从交通工程角度引入更多交通流理论的现实应用, 并引入近年来交通流理论研究中被广泛接受的新的研究成果。本书后续的章节内容如下。

## 第 2 章: 交通流基本参数及调查方法

从流量、速度、密度等交通流参数的基本定义入手, 介绍参数概念及其在城市交通流中的基本特征, 包括参数在时间和空间上的变化特性、时间平均速度和空间平均速度的区别、密度和时间占有率及车头时距之间的关系。

交通流数据采集是交通工程分析的基本要求, 本章从检测原理和设备等生活中容易观察到的现象出发, 讨论电磁感应、压力、视频、射频、GPS 等交通流数据采集方式。结合智能手机应用程序, 介绍基于手机的交通数据采集技术。

交通流数据的采集方式不仅决定了其数据类型和物理属性, 也影响着数据的质量控制和分析处理方法。针对断面数据、区间数据、瞬时数据或轨迹数据, 分别有不同的应用方式。

## 第 3 章: 交通特性的统计分布

随机性是现实交通流参数表现出的一个基本特性。例如, 单车道 1 800 辆/h 的流量, 在实际中所对应的一定不是车头时距均为 2 s 的交通流。

车辆车头时距的分布 (或者单位时间到达数量的分布) 特征直接影响交通流的控制方式, 或影响与其相交道路的通行能力。由此, 本章从单位时间到达数量的分布 (离散型分

布)和车头时距分布(连续型分布)两方面讨论了车辆到达的统计特性,并以观测数据为例,介绍了分布参数的估计和拟合优度检验方法。

由于车辆之间存在最小的安全车头时距,因此移位负指数分布在逻辑上比负指数分布更为合理。在城市交通中,由于受到大量信号灯的影响,交通流被分为两类:一类车流成排队(或拥堵)状态行驶,另一类正常行驶。因此,有人提出了聚束负指数分布来描述城市道路交通流。

本章最后讨论了速度的分布特性及其意义。

#### 第4章:驾驶行为与单车运动特性

人的驾驶行为和车辆的动量特性是构成交通流特征的最基本单元要素。只有理解了人的感知反应和控制运动延迟,才能理解跟驰行为的迟滞性,才能理解自动驾驶和联网车辆条件下的交通流特性。只有理解驾驶任务的3个层次,才能理解交通仿真模型和自动驾驶车辆的实现逻辑。

本章进一步从人的感知反应过程,讨论了驾驶人主体差异及其对交通设施、障碍和危险及其他车辆的识认和处理。这些特征最终都反映到了交通流特征及交通设计和管控中,例如,交通流的期望速度分布、加减速分布、停车时距检查和交通标识设计等。

#### 第5章:多车运动的相互作用

车辆的相互影响是城市交通流的另一个重要特征,体现在3个方面:跟驰行为、换道行为和间隙接受行为。本章主要从两车之间的关系来分析多车运动的相互作用。显而易见,如果车辆行驶不受前方车辆约束,那么将加速直到达到自己的期望速度为止。如果受前方车辆约束,则根据前方车辆的距离和速度状态来调整自己的加减速;如果侧方车道可以提供更接近于期望速度或更快的速度,则车辆有可能通过换道来获取更高的行车速度。是否能够成功换道,则取决于侧方车道的交通流是否能够提供足够的可插车间隙来完成安全换道。

以上是多车运动相互作用的基本逻辑。本章重点从安全距离、刺激-反应、生理、心理等分类讨论了车辆跟驰模型,并从解析和数值仿真角度介绍了跟驰模型的稳定性分析的目的、原理和过程。

#### 第6章:交通流参数的关系模型

与单车运动特性、跟驰模型、换道模型等不同,本章不再以车辆为主体分析交通流,而是将交通流看作一定范围内可压缩的流体,从流体整体的角度来分析其流量、速度、密度之间的相互关系。本章内容是交通流研究的一个核心命题,Greenshields提出的速度-流量曲线被看作交通流理论的奠基之作。之后Greenberg、Underwood、Edie、Van Aerde等提出了线性/非线性、单段式/多段式等不同形式的交通流参数关系模型,分别有各自的适用条件。

需要指出的是,三参数关系模型中的速度特指空间平均速度。这些关系模型描述的是稳态交通流所展示出的特性。三参数关系曲线可按照一个交通状态变化过程来理解。例如,从凌晨到早高峰,到平峰、晚高峰,再到夜间等交通需求从小变大,又从大变小的过程,分别

对应曲线上不同位置的点。交通流参数的关系曲线上边界条件和极值对应的参数值代表了所描述路段的物理属性,包括自由流速度、通行能力、阻塞密度。本章进一步讨论了自由流速度和通行能力的影响因素和获取方法。

本章对流量-密度曲线的“磁滞”(hysteresis)现象、交通流陡降(breakdown)现象,以及三相交通流等近期热点问题进行了介绍。

### 第7章:交通流的波动与交通波模型

波动是流体的典型特性,交通流亦如此。两个不同状态(密度、速度、流量不同)的流体相遇时,便产生了波。

道路交通中,不同状态交通流相遇产生的交通波,可以用来描述交通拥堵(或排队)的形成、蔓延和消散。道路瓶颈处、交通事故发生地、施工区或信号灯在不同交通需求条件下引起的交通流的波动特征,是交通管理控制对策的重要依据。例如,根据某时刻快速路交通事故导致的拥堵蔓延的速度来制定上游入口匝道的控制策略。

交通波的波速方程是描述交通流波动的重要工具,而守恒方程是推导波速方程的依据。在不同的条件组合下,交通波可以解释一些有趣的拥堵现象:拥堵向上游蔓延、向下游蔓延,或是整体向上游移动(对应三相交通流理论的宽移动阻塞)。然而,由于将交通流看作整体忽略了驾驶行为的感知反应时间、车辆的加减速特性,因此简单连续流模型在微观层次(短时间)的交通流分析应用上存在局限性。

### 第8章:宏观交通流模型

本章交通流分析的主体既不是单个或多个车辆,也不是路段上的交通流整体,而是将整个路网纳入分析体系。分析从两方面展开:①路网在不同交通需求下表现出的性能,属于路网自身的静态物理属性,包括路网容量、平均行程速度与平均流量的关系,以及路网性能随交通需求增大而恶化的速度等;②路网的交通运行评价模型,属于路网运行的动态运行属性,主要围绕国内外各大城市应用的交通运行指数模型展开。

尽管在不同时期宏观交通流模型有着不同的命名和表现形式,这些研究展现出了清晰的发展脉络和传承关系。从出行时间的等高线图、路网容量、路网速度-流量关系、二流模型到宏观基本图(MFD)模型,其关键解释变量均是围绕影响路网性能的路网等级结构、路网密度、信号灯密度等因素展开的。宏观基本图模型和交通运行指数模型是近年来的研究热点。

### 第9章:交通运行与交通影响模型

本章主要介绍与交通流模型相关的交通效率、安全、环境分析方法。在交通效率分析中,除了延误、排队长度、停车次数等经典指标外,还重点阐述了行程时间可靠性概念、意义,以及典型的行程时间可靠性指标。交通安全模型围绕交通安全性能函数展开,讨论特定道路交通流特性下的事故与流量之间的关系。交通能耗、排放与空气质量模型描述交通能耗排放与交通流速度、车型构成之间的关系,并进一步介绍了污染物排放与空气质量之间的关系模型。交通噪声模型用于描述噪声与交通流及道路属性之间的关系。

## 第 10 章：典型城市道路的交通流分析方法

道路交通管理与控制是交通流理论分析的主要应用领域。本章以典型的城市道路连续流和间断流分析为主题，阐述了城市快速路、信号控制交叉口、非信号控制交叉口及车辆排队的方法。

在城市快速路分析中，出入口匝道引起的交通流合流、分流、交织，以及相应的匝道控制是关键分析要素，而从系统的角度将快速路上出入口匝道，合流、分流、交织段，以及基本段作为整体分析是重要的分析理念。在信号和非信号控制交叉口的分析中，通行能力和延误计算是重点内容，且与车头时距分布、插车间隙等前面章节的内容有紧密联系，建议读者能够关联思考。

## 第 11 章：交通流仿真

交通流仿真是交通流理论应用于现实交通分析的重要工具，是连接理论研究和现实应用的重要纽带。

本章以驾驶人的感知反应时间、车辆加减速特性、跟驰模型、换道模型、间隙接受模型等交通流理论分析的主要内容对象，建立起它们与常见交通仿真模型（VISSIM 和 PARAMICS）中各模块之间的关联关系，有助于理解交通流仿真模型的原理和结构。

随机性是真实世界交通流的重要特性，本章从上述主要内容论述了随机性在交通流仿真中的具体体现和实现方式。从仿真模型开发的角度，时间推进和事件推进是两类不同的推进机制；从仿真模型应用的角度，数据采集和模型标定是改善仿真精度的关键因素，由此也引出了本章最后对仿真模型正确性及其适用条件的讨论。

## 第 2 章

# 交通流基本参数及调查方法

### 2.1 概 述

在早期的研究中,为了能够描述交通流的特性,使用了交通流 3 个重要的参数:流量、速度和密度,并利用钟表和计数器等进行实际测量。随着科学技术的发展,测量方法越来越丰富,测量精度也逐渐提高。

需要注意另外两个重要的交通流参数(车头时距、车头间距)与流量和密度之间的关系。车头时距与流量呈倒数关系,车头间距与密度呈倒数关系。

本章首先介绍交通流的基本参数及其衍生的其他参数,参数的定义主要从 Wardrop、Lighthill、Whiteham 和 Edie 的著作中提出。为了能够获取 3 个参数值,需要进行交通调查。常见的交通调查方法有定点调查(point method)、沿路段调查(along a length method)、浮动车调查(moving observe)、小距离调查(short section method)等,可在车辆的行驶时间-距离图中表示,如图 2-1 所示。随着遥感卫星影像精度的提高,基于遥感技术的测量逐渐获得应用。

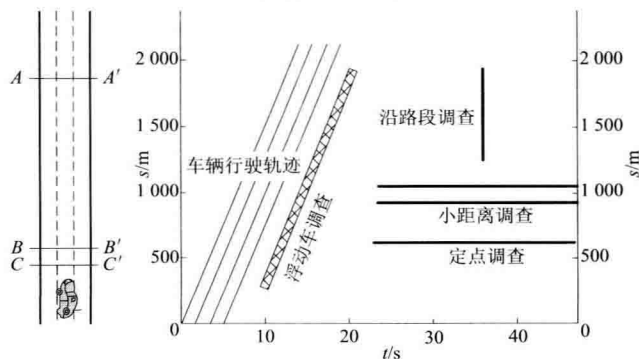


图 2-1 交通流常规调查方法