

交通系统仿真 及应用

(第二版)

吴娇蓉 辛飞飞 编著



*Traffic System
Simulation
and Application*



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

交通系统仿真及应用

(第二版)

吴娇蓉 辛飞飞 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书全面阐述了交通系统仿真技术及其在交通工程学科中的应用。全书共分五章,分别为绪论、交通仿真基础数据采集与处理技术、宏观交通规划仿真理论与技术、微观交通仿真理论与技术、行人交通仿真理论与技术。

本书为普通高等教育交通工程专业、交通运输工程专业的学位课课程教材,也可作为城市规划、土木工程等专业的选修课教材或教学参考书。从事城市规划、交通规划、市政设计、道路规划与设计、公共交通规划与管理等工作的技术人员和管理人员亦可参考。

图书在版编目(CIP)数据

交通系统仿真及应用 / 吴娇蓉编著. -- 2 版. -- 上海: 同济大学出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-5608-4975-1

I. ①交… II. ①吴… III. ①交通运输系统—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①U491.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 215781 号

交通系统仿真及应用(第二版)

吴娇蓉 辛飞飞 编著

责任编辑 高晓辉 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 同济大学印刷厂
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 13.75
字 数 343 000
版 次 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-4975-1

定 价 28.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

二 版 前 言

2004 年至今的 8 年期间,世界交通科技特别是交通仿真技术取得了长足的进步,在信息技术快速发展和现代交通系统的复杂性与日俱增的情况下,伴随智能交通系统进入实质性应用阶段,在交通仿真实论、建模、评价等方面都需要适应更大的交通网络分析范围、更复杂多变的人车交通行为、更丰富多样的建模选项、更灵活的参数设置、更快的计算速度、更精确的计算结果、更加直观的操作界面等要求。为此,2004 年初版的《交通系统仿真及应用》的更新再版势在必行。

教育部 2010 年启动“卓越工程师教育培养计划”后,按照“卓越工程师能够践行技术创新并解决未来工程问题”的要求,本书强调“实践性、实验性”的特点,积极推进创新工程教育的教学理念,在教学大纲不断调整和完善的基础上,为适应交通工程专业、交通运输工程专业的教学需要,自 2011 年 1 月启动《交通系统仿真及应用》第二版的修编工作,采用启发式编写方法。

本版在《交通系统仿真及应用》初版的基础上,基本保持出版框架结构,做了较多的更新、增补、改写与删减。本版共分 5 章。第 1 章由吴娇蓉、辛飞飞共同编写,第 2 章由辛飞飞编写,第 3~5 章由吴娇蓉编写,王晨、陆苏刚、马山、王宇沁参与了文献整理、软件测试、图片和表格制作等工作,在此表示致谢。全书由吴娇蓉统稿。

本版的第 2 章和第 5 章为新增内容,结合了最新的交通仿真技术动向和同济大学交通运输工程学院负责完成的深圳、杭州智能交通信息工程建设工程项目经验,以及上海 2010 世博会、深圳 2011 全运会等大型项目高强客流集疏运与公共安全等项目经验编写而成。主要包括广域动态交通数据采集与处理技术、GIS-T 交通地理信息系统在交通仿真建模和交通分析中的应用、行人交通流分析理论、仿真模型与评价方法等内容。本版第 1 章、第 3 章和第 4 章在初版基础上进行了大规模修编,这 3 章紧密结合同济大学交通运输工程学院负责完成的国内各类城市交通规划、设计、控制等方面的实际工程项目经验,补充完善了小汽车驾驶员、非机动车骑行者行为分析与仿真建模方法;详细梳理了小汽车系统、公交系统、非机动车系统仿真建模技术及应用方法;增加了多种通用交通仿真软件建模与参数设置、仿真效果与适应性比较分析,突出交通仿真应用与实践的特点。

本教材的编写得到了同济大学教材、学术著作出版基金委员会的资助,也被列入同济大学“十二五”规划教材。

本版对初版内容作增、删、修改之后,总体篇幅增加,涉及内容更为广泛。

交通仿真技术及应用还在不断发展,本版修改限于编者浅见寡识,错漏仍多,恭请读者指正。

编 者

2012 年 7 月

初 版 前 言

随着信息技术的高速发展,交通工程专业在世界范围内已从传统的“软科学”迅速地发展为“实验交通工程学”。实验交通工程学是由日本京都大学等首先提出的交通工程学新的发展方向与趋势。交通系统仿真及应用这门课程是实验交通工程学的重要组成部分,是一门收集了大量交通信息后,在计算机上进行灵活交通实验的课程。交通现象十分复杂,而且随机性很强,因此,以计算机为辅助工具,利用交通仿真技术的可重复性、可延续性特点,模拟分析单个车辆(或交通流)、交通规划数据集合体与各种交通环境的相互关系,可以综合得出交通运行状况对公路、城市道路基础设施的交通适应性,实现对未来交通系统行为的再现和预先把握。帮助交通工程专业人员设计出多种交通改善方案和规划方案,以解决目前和将来产生的交通问题。

交通仿真技术在国外发展已趋于成熟,而在我国只是近十多年才被普遍认识和接受。为了促进这一技术的发展,在国内建立起实验交通工程学,我们将历年来交通仿真研究成果、教学工作和实际工程课题中的一些浅略的体会与初步的经验,以及所了解的国内外发展情况进行汇总,编撰成这部教材。本教材也可以作为相关学科研究生和有关技术人员的参考书。

本书酝酿于2001年,动笔于2002年。本教材从初稿形成至今的几年间,部分内容曾在同济大学向本科生讲授。本教材的编写主要受益于2000年在德国DR. BRENNER+MUENNICH Ingenieurgesellschaft mbH(布莱纳博士+慕尼黑工程事务有限公司)和PTV(Planungsbuero Transport und Verkehr, Karlsruhe)公司的进修学习、2004年在美国加州大学埃文分校(University of California, Irvine)的进修学习以及大量工程实践经验的积累。

本教材共分七章,第一、五、七章由吴娇蓉编写,第二、三章参考了刘运通等编著的《交通系统仿真技术》,第四、六章由叶彭姚、陈锦秀、吴娇蓉共同编写。全书由吴娇蓉统稿。

在本教材的编写过程中,李林珠参与了录入工作,在此表示致谢。

本书参阅了国内外大量的文献资料,涉及内容较为广泛、复杂,限于作者水平,可能有引用与理解不当之处,错误之处也在所难免,恳请读者提出宝贵的意见。

编 者

2004年4月于上海

目 录

二版前言

初版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 实验交通工程学简介	1
1.1.1 交通工程学的发展趋势	1
1.1.2 实验交通工程学	2
1.2 交通仿真技术及其发展	3
1.2.1 交通仿真的概念	3
1.2.2 交通仿真技术的发展	5
1.2.3 交通仿真技术展望	7
1.3 交通系统仿真流程	8
第 2 章 交通仿真基础数据采集与处理技术	12
2.1 静态交通数据	12
2.1.1 交通地理信息系统数据要素	12
2.1.2 GIS-T 数据收集和处理流程	16
2.1.3 GIS 数据维护与更新技术	16
2.2 动态交通数据	18
2.2.1 动态交通数据的发展和特征	18
2.2.2 动态交通数据结构设计	21
2.2.3 动态交通数据库实现	23
2.3 仿真软件与交通数据库的综合应用	27
2.3.1 交通仿真与数据库综合应用平台结构	28
2.3.2 综合应用平台的主要功能	29
参考文献	41
第 3 章 宏观交通规划仿真理论与技术	42
3.1 宏观交通规划软件发展现状与性能比较	42
3.1.1 宏观交通规划软件的发展使用现状	42
3.1.2 宏观交通规划软件性能比较	43

3.2 交通系统网络基础数据模型	47
3.2.1 基础数据模型精度要求	47
3.2.2 供应数据模型	48
3.2.3 公共交通和机动车网络模型比较	55
3.3 交通需求数据模型	56
3.3.1 交通需求模型元素	56
3.3.2 需求模型种类和构建方法	58
3.4 交通分配技术及应用	62
3.4.1 交通流分配模型的数据准备	62
3.4.2 机动车交通分配模型	62
3.4.3 公共交通分配模型	70
3.5 应用扩展功能	81
3.5.1 局部路网拆分	81
3.5.2 OD 反推	84
3.5.3 编程扩展	91
3.5.4 GIS 功能	92
参考文献	93

第4章 微观交通仿真理论与技术	95
4.1 微观交通仿真系统的结构和软件简介	95
4.1.1 交通微观仿真系统的结构组成	95
4.1.2 交通微观仿真系统的特点	96
4.1.3 微观交通仿真系统简介	96
4.2 微观路网模型	98
4.2.1 机动车路网模型	98
4.2.2 公共交通路网	103
4.3 驾驶员行为模型	105
4.3.1 跟车行为	105
4.3.2 车辆换道行为	110
4.3.3 超车行为	114
4.3.4 其他行为	116
4.3.5 各种微观仿真模型比较	117
4.3.6 驾驶行为仿真模型未来研究方向	123
4.4 非机动车车辆属性和骑行者行为	125
4.4.1 车辆基本属性	125
4.4.2 骑行者行为模型	126
4.4.3 交叉口非机动车交通仿真设置方法	129

4.5 交通管理与控制策略设置方法	132
4.5.1 小汽车运行管理措施及仿真设置方法	132
4.5.2 公交专用道仿真设置方法	139
4.5.3 交叉口信号灯控制及仿真设置方法	141
4.5.4 匝道控制及仿真设置方法	145
4.6 微观交通仿真评价指标与方法	147
4.6.1 评价指标	148
4.6.2 评价方法	150
4.6.3 微观交通仿真分析评价案例	153
参考文献	155
 第5章 行人交通仿真实理论与技术	 157
5.1 行人交通研究综述及仿真模型	157
5.1.1 行人交通相关研究概述	157
5.1.2 行人交通仿真模型介绍	161
5.1.3 行人仿真软件	166
5.2 建筑空间分类及行人交通特性	169
5.2.1 建筑空间行人行为特性	169
5.2.2 建筑空间分类及客流交通特性	171
5.3 行人数据采集与行人仿真建模	177
5.3.1 行人数据采集方法	178
5.3.2 行人仿真建模	180
5.4 行人疏散行为及仿真技术	192
5.4.1 行人疏散行为及其影响因素	192
5.4.2 行人疏散相关规范要求	194
5.4.3 行人疏散时间计算方法	195
5.4.4 疏散通道设计和评价案例	198
参考文献	208

第1章 绪 论

1.1 实验交通工程学简介

1.1.1 交通工程学的发展趋势

交通工程学是研究交通系统的组成、结构、运行与演化规律的一门工程学科。交通工程学的形成源自对交通系统进行科学认识并解决交通问题的实际需求,交通系统自身的发展变化是交通工程学理论创新与技术革新的主要推动力。

与机械、电信、土木等传统的工程学科不同,交通工程学并不具备一个非常明确的、能够准确规定其内涵和外延的统一概念,这与研究对象“交通系统”本身的复杂性和抽象性,以及系统发展形式的多样性有直接关系。随着经济发展和社会进步,现代交通系统的复杂性与日俱增:交通设施网络已经从单一的平面道路网络发展到由高架、地面、地下通道组成的立体道路网络,从以道路为主的网络发展到轨道、地面公交、道路交通组成的多方式复合交通网络;交通信号控制系统已经从简单的单点信号控制逐渐升级扩展成为区域实时自适应控制;交通信息系统的应用更是直接对出行者的交通选择行为产生影响。此外,交通系统的复杂性还体现在交通决策目标的多元化方面,各种交通问题及其对策涉及的利益群体更多、决策过程更复杂。

交通系统日趋复杂的发展趋势对传统的交通工程学理论与方法均提出了挑战。交通工程学形成于汽车交通开始盛行的时代,主要研究道路交通现象并以避免道路交通拥堵作为研究对象,许多经典模型在多方式复合交通网络条件下并不适用。在研究方法上,由于缺乏收集大量交通基础数据并进行高效处理的技术手段,传统交通工程学在很多时候倾向于使用比较成熟且简化的理论模型,例如最典型的流体力学模型。此类模型的研究和应用在交通工程学发展初期起到了重要的作用,弥补了交通工程学缺乏自身理论体系的不足。然而随着交通系统复杂性的不断增加,开始越来越多地体现出复杂系统的特征如多样性、随机性和非线性,以及骤变、震荡和自组织等现象,这些都是传统的交通工程学难以解决的问题,必须寻求更加科学有效的理论体系与技术方法。

智能交通系统(ITS)的出现为传统交通工程学提供了新的发展机遇。ITS的发展一方面为交通工程各研究方向提供了海量的基础数据,包括各种先进的定点流量检测数据、视频检测数据、探测车 GPS 数据、智能交通卡数据等,使研究者开始具备对复杂交通网络进行多角度、连续观察的能力,通过大范围连续观测交通网络运行状态的变化特征,更全面、精细、准确地识别交通问题,掌握交通系统演化规律。另一方面,借助先进的计算机技术、系统仿真分析技术,使交通工程研究者逐渐具备了对于复杂系统进行建模分析的能力。

智能交通系统出现之后,从基础数据和技术方法两方面对交通工程学的发展开始产生

影响。得益于海量交通数据和先进的计算机模拟技术,交通工程学可以通过类似“实验”的模拟计算方法对交通系统进行更加精细化、可视化的分析,这将极大地提高对于复杂交通现象的深入研究,有助于发现复杂交通系统的演化规律。

1.1.2 实验交通工程学

不少学者都面向 ITS 提出了交通工程学新的发展方向、研究内容和技术手段,其中“实验交通工程方法”(experimental traffic engineering methodology)是比较有代表性的一种观点。

实验方法原本是进行科学研究的基本方法之一,特别是对于随机性强、复杂度高的问题,采用实验方法非常有效。但传统的交通工程学中却鲜见“实验”的概念和提法,究其原因主要在于交通系统的特殊性使其难以像其他典型工程学科一样制作模型开展实验,尤其是物理模型实验。在不能制作实物模型的情况下,也缺乏有效的技术手段对交通系统进行模拟。

依托先进技术和交叉学科研究的优势,智能交通系统的发展使得实验方法正在成为一种有效的交通工程研究手段。以最基本的道路行程时间函数为例,传统交通工程学方法依据经验观测值拟定几种常用的简化模型供研究者选用,而通过实验交通工程方法可以收集不同类别、不同断面形式、不同交通流组成道路上的动态交通数据,根据实际情况对模型分别进行标定,而且能够根据不同时段的交通特征动态标定参数。再以 OD 数据为例,在传统的四阶段模型中 OD 数据是静态的,研究者通过经验数据利用全天 OD 得到高峰时段的 OD 再进行分配,而实验交通工程方法能够利用动态交通数据实现对 OD 数据的动态调整和分析,经过反复配流和修正实现对网络交通流状态的更为精确的模拟。同时,计算机图形处理技术和仿真技术的发展,使研究者能够在计算机中建立复杂的交通网络模型代替实物模型进行实验,通过构造不同的交通网络模型对交通理论模型进行辅助验证,对各种交通规划方案进行反复评估和比选。

“实验交通工程学”是近年来适应交通信息化与智能化发展,逐渐形成的交通工程学新的发展方向。其基本出发点是基于大量的客观交通数据,解析交通现象、构筑交通模型,特别侧重于借助交通系统仿真技术进行动态、随机的交通现象及交通行为研究,成果更切合实际,更具有实用性。

实验交通工程学并不是一门新的学科,而是在传统交通工程学的基础上引入实验方法开展研究。实验交通工程学是在智能交通系统的发展背景下,针对复杂交通系统研究需求和应用需求产生的。通过交通工程学与信息采集与处理技术、多源数据融合技术、仿真建模技术、计算机系统集成技术等先进技术的结合,建立用于大范围复杂交通系统分析的综合交通信息实验平台。通过平台的数据整合作用,汇集多源广域、动态交通数据,精确、动态刻画复杂交通系统的运行状态,对复合交通流的运行机理和相变机制进行科学分析。依靠强大的计算机建模仿真能力,能够建立多尺度、多方式的大型交通系统模型,将人、车、路、环境因素全面地纳入到模型体系当中,能够更加科学地评价交通运输体系的综合效益以及重大交通建设项目对复杂系统产生的影响。

交通系统仿真是实验交通工程学的重要组成部分,是仿真理论与技术在交通工程领域的应用,其发展过程可以看作是实验交通工程学思想方法的典型体现。在信息技术快速发

展的推动下,交通仿真始终朝着更加精细化和复杂化的方向发展。从微观层面看,交通仿真技术对现实交通现象模拟的逼真程度越来越高,依托海量的动态交通数据和三维图形建模技术,已经能够对行人、非机动车、汽车等各种交通流进行动态再现,通过这种模拟计算能力能够对局部区域内的各种复杂交通流现象进行精确跟踪与分析。从宏观层面看,交通仿真系统的模拟对象已经从最简单的平面道路网络交通流逐步转向包括行人、非机动车、机动车、道路、轨道、地面公交等诸多要素的复合交通系统网络交通流,评估指标体系已经从单一的交通效率指标扩展到环境指标、安全指标等。

1.2 交通仿真技术及其发展

1.2.1 交通仿真的概念

仿真(simulation),也称为模拟,是指为了求解复杂问题而人为地模仿真实系统的部分或者整个运行过程。如果所研究的问题足够简单,那么可以用通常的微积分、概率论、代数方程等解析方法求解。但真实系统往往非常复杂,很难或者无法用理论方法求解,这时就不得不借助于仿真模型,利用仿真算法求解。不管是手工仿真还是计算机仿真,都不是利用数学解析方法或者物理实验方法,而是利用仿真模型产生一个人为的系统的经历,在仿真过程中获得数据,以便描绘或推断出与实际系统有关的运行特征或行为结果。经过几十年的发展,仿真已成为运筹学和系统分析中应用最广泛和最可接受的工具之一。之所以如此,是因为它的优点是明显的:

(1) 有些数据通过普通意义上的实验方法获得难度较大,或者是实验过程代价非常昂贵,这种情况下,仿真是唯一的求解算法。

(2) 具有可重复性。一旦建立了一个仿真模型,可以任意重复仿真过程,这是普通的实验方法所无法比拟的。

(3) 借助于仿真模型,可以对所仿真的物理过程有更深入的了解。换句话说,仿真模型追求的是过程,而解析模型讲究的是结果。

(4) 仿真模型对原始数据的依赖性不强,即使输入的数据有些粗糙,仿真方法也可用于帮助分析一个所建议的系统,而且用户可以通过不断地修正输入,逐步获得合理的结果。

(5) 解析模型通常需要许多简化假设,以便在数学上容易处理,而仿真模型则没有这么多限制。对于解析模型,分析者只能计算有限的系统性能指标(measures of performance);而对于仿真模型,产生的数据可用于估计任意可想到的性能指标。

系统仿真是一门新兴技术学科,它与各门技术学科、管理学科、经济学科以至社会学科都有着紧密的联系,这正是系统仿真得到日益广泛应用的原因。仿真技术在航天、航空、军事、科研、工业生产、环境保护、医学、经济规划、商业经营、金融流通等各个方面都获得了成功的应用,取得了显著的经济效益。我国自20世纪80年代初以来,也在管理领域中开始推广系统仿真技术,在高技术项目的论证、大型工程项目的研制进度和预算、造船计划安排、机械制造企业计划和排序、城市交通管理、医院管理、商业服务、技术政策制定等方面都曾利用仿真技术进行预报预测、政策分析、计划安排、经济分析和调度配置等。仿真技术在交通工程中有着广泛的应用。从20世纪60年代起,国外就开始利用计算机对各种交通现象和交

通特征进行仿真,到目前为止,已经开发出一些相当优秀的且实用性很强的软件。利用交通仿真模型,人们可以动态地逼真地仿真交通流和交通事故等各种交通现象,深入地分析车辆、驾驶员和行人、道路以及交通流的交通特征,有效地进行交通规划、交通组织与管理、交通能源节约以及物资运输流量合理化等方面的研究。此外,通过计算机仿真方法,可以避免进行一些费用昂贵而且周期长的交通调查和现场实验,以很小的代价获得难以调查的数据,并再现多种交通现象,即可以从一个崭新的视角展开对问题的研究。

交通仿真是指用系统仿真技术来研究交通行为,它是一门对交通运动随时间和空间的变化进行跟踪描述的技术。从交通系统仿真所采用的技术手段以及所具有的本质特征来看,交通系统仿真是一门在数字计算机上进行交通实验的技术,它含有随机特性,可以是微观的,也可以是宏观的,并且涉及描述交通运输系统在一定期间实时运动的数学模型。通过对交通系统的仿真研究,可以得到交通流状态变量随时间与空间的变化、分布规律及其与交通控制变量间的关系。

在交通仿真技术出现之前,交通工程师多采用经验方法和数学分析方法来分析交通现象。然而交通系统是一个典型的复杂系统,系统内要素的状态及其相互作用规律受多维随机因素的影响,往往难以用经验模型或数学分析模型来准确地描述。传统交通分析方法的局限性在 20 世纪 60 年代计算机的交通信号控制系统出现以后显得尤为突出,当时的交通工程师们希望找到一种更有效的交通分析方法来优化交通控制的信号参数设计,从而开始了交通仿真的研究。相对于传统的数学解析分析方法,交通系统仿真技术具有如下优点:

(1) 不需要真实系统的参与,因此具有经济方便的优点,特别适用于对尚不存在的、规划中的交通系统行为的研究。

(2) 通过系统仿真,能清楚地了解交通流中哪些变量是重要的,以及它们是如何相互作用的。

(3) 系统动态模型的时间标尺可以与实际系统的时间标尺不同,因此,既可以进行实时仿真,也可以进行非实时仿真。

(4) 对于交通系统中的某些危险情况或灾难性后果,系统仿真是很有效的研究手段,可以开展道路交通事故的仿真研究等。

(5) 能重复提供同样的道路交通条件,从而可以对不同的规划设计、交通组织改善方案进行公正的比选。

(6) 能不断改变系统运行条件,从而可以预测道路交通系统在各种情况下的行为。

(7) 能够随时间和空间改变交通需求,从而对道路交通拥堵做出预报。

(8) 能够处理相互影响、相互作用的复杂的排队过程。

尽管交通系统仿真技术具有很多优点,但也存在许多缺陷和局限性,如:

(1) 仿真模型需要大量的交通设施、网络、行为等方面输入数据,对于某些实际问题,这些数据很难或根本无法获得。

(2) 仿真模型需要验证、标定、进行有效性检验,如果忽视这一点,仿真结果将会失实。

(3) 建立仿真模型不仅需要大量的知识,如交通流理论、计算机程序设计、概率论、决策论、统计分析等,而且需要对研究的道路交通系统有充分的了解,具备丰富的交通工程实践与应用经验。

(4) 如果只是简单套用交通仿真模型,而对于模型的限制条件和基本假设并不清楚,或

将其视为“黑箱”，对其中含义不了解，都极可能导致错误的结论。

(5) 交通系统仿真技术对于系统模型有着极强的依赖性，而要建立系统模型，就必然要对真实系统进行简化和抽象，这必然要引起某种程度的“失真”。对于道路交通这样一个随机的、动态的、复杂的大系统，这一问题显得尤为突出。

应当指出，交通仿真只是为数众多的交通分析技术中的一个手段，既不是唯一的也不是最好的，因此具体的交通工程问题，应采取切实有效的交通分析技术，可以是多种分析技术的综合。正如美国系统科学家 Zadeh 在其著名的“不相容定理”中所指出的，复杂性和精确性是互相矛盾的，随着系统复杂性的增加，人们对其进行精确描述的能力就要下降，直至达到这样一个阀限，即精确的描述失去了意义。在这种情况下，人们只能寻求某种“折衷”的办法，在精确性和有效性之间达成某种“妥协”。

1.2.2 交通仿真技术的发展

交通系统仿真技术是随着电子计算机和系统仿真技术的发展而发展起来的，大体上经历了三个阶段。

第一阶段为诞生期，指 20 世纪 50 年代至 60 年代初。

1951 年，英国道路研究实验室(road research laboratory)完成了交叉口的交通仿真。在美国，第一份关于交通仿真的研究报告发表于 1953 年，介绍了加利福尼亚大学洛杉矶分校(University of California at Los Angeles)关于交叉口和高速公路的交通仿真模型。紧随其后，密执根大学(University of Michigan)进行了交叉口交通仿真；在菲尔科(Philco)进行了主干道交通仿真；纽约港务局(Port of New York Authority)进行了公交终端站车辆跟车模型的仿真研究；中西部研究所(Midwest Research Institute)应用仿真技术开展了有关高速公路立交桥和匝道汇流交通的研究。

但是，上述工作大多讨论的是如何进行交通流仿真，直到大约 1960 年，用仿真技术研究交通流状态的可能性和可行性才得到普遍承认，并且开始开发一些交通系统仿真软件。

第二阶段为发展期，指 20 世纪 60 年代初至 80 年代初。

交通仿真技术在 20 世纪六七十年代得到了迅速的发展，这一期间，发表了大量的论文和专著。

在美国，Gerlough 和 Capelle 于 1964 年出版了名为《交通流理论导论》的专题论著，其中一章专门论述了交通仿真，该书于 1975 年修订，其中的交通流仿真一章增加了不少新的内容。1967 年，Fox 和 Lehman 在《交通季刊》上发表了一篇科学技术发展动态的文章，介绍了交通系统仿真的发展情况。1975 年加利福尼亚大学伯克利分校(University of California at Berkeley)出版了关于运输系统计算机仿真应用的文献汇编，并于 1977 年进行了增补和修订。

在欧洲，这一期间有三本重要的专题论著发表，一本是 Wigan 编著的文献汇编，于 1969 年由英国道路研究实验室出版；第二本文献汇编于 1972 年由经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)出版；第三本是德国卡尔斯鲁厄大学(University Karlsruhe)交通研究所(Institute fuer Verkehrswesen)的 Wiedemann 于 1974 年所著的《道路交通流的计算机仿真》一书，该书系统地介绍了交通流仿真方法及其模型建立。

与此同时,大量的交通系统仿真应用软件被开发出来,这些软件可以分为两种类型,一类以宏观交通仿真模型为基础,另一类则以微观交通仿真模型为基础。

20 世纪 60 年代初期,宏观交通仿真模型首先用于交通系统仿真。1963 年,美国 Gerlough 提出随机问题可以用扫描时间可变的时间扫描法解决,并以此出发推出了 TRANS 程序,用以评价道路网的信号配置。美国联邦公路局(Federal Highway Administration)在 1965—1966 年间研制的 SIGOP 系统采用了宏观的确定性优化模型,用以研究定时信号参数的最优化问题。其他比较重要的宏观交通仿真软件还有用于信号交叉口的 CAPCAL,用于城市干道网的 SPAN, MAXBANSSTOP, DASSER, TRANSYT 以及用于高速公路的 FREQ, FRECON 等。

20 世纪 60 年代末以来,基于微观仿真模型的交通系统仿真开始迅速发展起来。1971 年,Lieberman 提出了以随机时间扫描的方法描述单个车辆的运动,并以此出发,推出了 UTCS-1,用以评价路网的信号配置。1977 年,他又在 UTCS-1 的基础上开发了 NETSIM 系统,并且得到了广泛的应用。这一时期出现的其他比较著名的微观交通仿真软件还有由美国研制的用于信号交叉口的 TEXAS 和 SIGSIM、用于城市干道网的 NETSIM、用于高速公路的 INTRAS,以及用于乡村道路的由瑞典研制的 VTI 和由澳大利亚研制的 TRARR 等。

这一时期,德国人在微观交通仿真软件的开发研制方面做了大量的工作。早在 1968 年,Wiedemann 就推出了 SIM-2,用以进行定时信号控制的城市双车道道路的仿真实验;1969—1970 年间,Ziegler 对其进行了改进,推出了 SIM-2/S。1974 年 Wiedemann 提出了车辆运动相互作用的微观模型即 INTAC 并开发了单车道仿真程序 INTAC-1,1975—1978 年间,Willemann 将其扩展到双车道情况,推出了 INTAC-2。1977 年,Hubschneider 对 INTAC-2 进行了重新标定,强化了其功能,开发出 MISSIS,用来对德国高速公路推荐车速 130 km/h 的情况进行了仿真实验。同年,Brilon 开发出 SIMLA/1,用以研究乡村道路平直路段的交通状况,1981—1983 年间,Brannolte 将其推广到有曲线和纵坡的情况,推出了 SIMLA/2,在此之间的 1980 年,他还提出了丘陵地区高速公路的微观仿真模型 STEIGSIM。1975—1980 年间,Wettering 开发了 SIM-2, 3/F,用来分析双车道或三车道公路上的车道转换规律。

第三阶段为成熟期,指 20 世纪 80 年代初至今。

到 20 世纪 80 年代初,交通系统仿真技术在美国已经得到了迅速的发展和广泛的应用,为了总结以往的研究成果,确定未来的研究方向,在美国运输局(U. S. Department of Transportation)支持下,由运输研究院(TRB)主持召开了一个专题研讨会,会议历时 3 天,有大约 75 人出席。会议有两个主要的议题,一是通报已开发出的和将要研制的交通系统仿真软件的功能和效用;二是反馈用户需求信息。会议得出结论:交通系统仿真技术已经具备了强大的功能,并且可以预计,今后仍将进一步发展,功能还将进一步加强。这次会议标志着交通系统仿真技术进入了一个新的发展阶段。

目前广泛使用的主流交通仿真软件大都起源于这一时期。交通系统仿真技术的发展呈现如下特征:

(1) 系统建模开始突破微观模型与宏观模型的界限,出现了混合模型。一个典型的例子是由 Schwerdtfeger 在 1984 年提出的 DYNEMO 仿真模型,采用交通流的一般关系来描

述车流运动,而将每辆车看作是一个基本单元,这一模型应用在车辆驶出高速公路的仿真实验中取得了很好的效果。另外,由 Van Aerde 于 20 世纪 80 年代中期开发的 INTEGRATION,混合使用了微观和宏观交通流模型,被认为是准微观模型。

(2) 仿真软件开始向大型化、综合性方向发展。例如,由 Hubschneider 从 1983 年开始研制的 MISSION 软件,既可用于高速公路,又可用于城市道路;既可用于一般的交通流仿真,又可用于公共交通系统的仿真实验。这个软件在 1989—1991 年间还被成功运用于欧洲联盟 DRIVE 计划的研究中。再如,由英国 MVA 公司开发的 TRIPS 和美国 Caliper 公司推出的 TransCAD 软件包,都是以四阶段模型为基础,用于区域交通规划。

(3) 研究重点从软件开发逐渐转向了系统模型的改进,包括模型的精炼,如加入优化子模型和加入有效性测定、仿真模型集成等。软件厂商非常活跃,已开发出的软件不断推出新的版本。

(4) 新的技术开始用于交通系统仿真,主要表现在仿真界面更加友好,人机交互更加方便。另外,计算机图形技术的应用使得仿真过程更加透明和直观。其中一个典型的例子是德国卡尔斯鲁厄交通运输与规划公司(PTV—Planungsbuero Transport und Verkehr, Karlsruhe)于 20 世纪 80 年代末开始研制逐渐改进的系列软件,由用于道路网交通分配的 Visum、用于交通需求预测的 VISEM、用于交叉口和立交等交通运行分析的 Vissim 三个独立的软件组成。这套软件采用了人机交互的图形化界面,1994 年后推出的软件版本均可在 Windows 环境下运行,可以同时观察多个交叉口的交通状况,并支持三维动画显示。另外,西班牙 TSS 公司近 10 年逐步发展起来的 AIMSUN2,为用户提供了十分友好的图形界面。

在我国,用系统仿真技术进行道路交通的仿真实验开始于 20 世纪 80 年代,并且主要集中在北京工业大学、同济大学、东南大学、西南交通大学、上海交通大学、华南理工大学、北京理工大学、天津大学、中国科学技术大学、吉林大学、长安大学等高校研究机构。

1.2.3 交通仿真技术展望

1. 以信息技术为支撑,面向智能交通系统发展需求

从交通工程应用的角度来讲,更大的交通网络分析范围、更丰富多样的建模选项、更灵活的参数设置、更快的计算速度、更精确的计算结果、更加直观的操作界面始终是交通仿真技术革新的方向,而信息技术的快速发展为此提供了有效支撑。例如:计算机并行处理技术和处理能力的发展,可以使交通仿真从简单的物理道路和交通条件的描述发展到在复合交通网络和复杂管控策略条件下的仿真;软件开发环境的发展促使多种分析工具能够通过连接和嵌套技术交互使用来解决复杂问题;图形图像处理技术的发展能够在交通仿真过程中实现对周边环境的三维动态逼真再现等。

新世纪以来智能交通系统进入了实质性的应用阶段。ITS 的发展推动了交通仿真技术的进步,但同时也对交通仿真软件的功能提出了更高的要求。从 ITS 应用角度来讲,要求交通仿真能够融合于整个智能交通系统之中。比如:能够接入外场交通数据并用于实时仿真计算,将结果发布至交通信息服务系统;能够与实时自适应信号控制系统进行对接,利用其详细的控制策略进行仿真;能够进行动态在线仿真,对交通需求进行短时动态预测并将仿真结果用于动态交通控制;能够支持跨平台的应用,与 GIS 系统和数据库系统进行整合开发;等等。交通仿真已经从单纯的交通工程专业技术分析工具,转变为

大型智能交通应用系统的核心组件。此外,对 ITS 应用系统的效益评估,也逐渐成为交通仿真的必要功能。

2. 面向人性化、可持续的发展需求

对道路交通网络上的交通流进行分析一直是各类交通仿真软件的核心功能,交通仿真模型对于道路上各类车流现象的模拟能力也是评估其性能的主要标准。然而,随着可持续发展、节能减排理念在交通规划、设计、管理中得到公认和接受,对于交通系统的分析已经从以道路交通为主,逐步转向道路、公交、慢行交通等多方式的复合交通体系;从单纯地评价是否堵车,转变为对交通系统中各类出行者交通效率的评价;从单一的交通效益,转变为交通、安全、环境甚至舒适度的综合效益评价。

因此,交通仿真技术必须逐步具备对复杂化、大型化的复合交通网络以及细分交通方式的模拟能力。仿真对象除传统的机动车以外,必须注重提高对非机动车和行人的仿真能力,以及各种混合交通流及其行为的模拟能力。

3. 吸收交通理论研究的新成果

目前交通流分析中的宏观理论模型有一些新的进展,对基本的流密速关系提出了新的见解,尤其是“两相流(two-fluid)理论”正逐步应用于城市路网集合流(车辆群)的交通状况研究。传统的交通流描述都是基于连续的速度和距离变量,但目前在交通仿真系统中引入了一种离散概念,即建模时将道路网络离散为在一个时间单元内仅能容纳一辆车,这种方法称为元胞自动机方法。在遵循驾驶员行为准则和车辆运动基本物理规律的前提下,车辆的运动是通过从前一个单元跳到下一个单元来实现的。

相关科学理论如模糊数学的发展和应用为人们提供了崭新的思维模式,在应用于交通领域描述驾驶员行为时,从根本上打破了传统经典数学“二值”逻辑的局限。不同的驾驶员基于自身经验对驾驶规则有不同的应用方式,并且同一驾驶员在不同环境条件下对规则的应用模式并不相同,因此采用模糊逻辑和近似理论方法来建立驾驶员行为的模糊模型是比较合理的。

在宏观交通研究领域,对个体出行链及非集计模型的研究已经形成了基本理论体系,以此为基础的交通出行需求仿真也在快速发展。交通出行需求仿真使用 GIS 数据库和工具进行基本的数据输入和结果显示。该仿真方法不仅在城市集中化地区、拥堵区域的高峰小时交通分析中较为有效,而且在交通服务需求比较低的交通规划中也非常有用。

1.3 交通系统仿真流程

交通系统仿真的对象是含有多种随机成分和各种逻辑关系的复杂的交通系统,因此,它本身就是一个复杂的系统工程。它包括问题分析、模型建立、数据采集、程序编制、仿真运行、输出结果处理等过程,必须按一定的程序和步骤进行。图 1-1 为一般的交通系统仿真流程图,其中包括 11 个基本步骤,对此将在下面分别进行讨论。

第一步:明确问题

交通系统仿真的第一个步骤是对拟要研究的问题进行详细的了解和描述,明确研究目的,划定系统的范围和边界,以便对各种交通分析技术的适应性作出判断。举例来说,此时要回答下列问题:

(1) 希望得到什么样的输出结果? 什么样的输入将对输出结果产生影响?

(2) 所讨论问题的空间界限和时间界限是什么?

(3) 是否存在重要的随机因素?

(4) 交通条件是否随时间变化?

(5) 车辆到达或离去是否服从经典的数学分布?

第二步:确定仿真方法的适用性

这一步工作的核心是确定在各种交通系统分析技术中,系统仿真对于所讨论问题是最适宜的方法。应当回答的问题有:

(1) 如果不用仿真方法,所讨论问题如何解决?

(2) 为什么仿真方法可以较好地解决所讨论的问题?

(3) 是否有仿真研究所需的足够的时间和物质支持?

(4) 所讨论问题是否真的可以解决?

第三步:问题的系统化

一旦确定系统仿真对于所讨论问题是最好的解决方法,就要着手构造一个仿真模型的第一级流程图,其中包括输入、处理、输出三个组成部分。特别要对输入和输出进行详尽的说明,以便收集和处理下一步的数据。一般说来,输入数据包括交通设施设计参数、交通需求方式、运行规则、控制类型、环境条件等。而输出数据则依赖于所讨论问题的类型,通常包括行程时间、车速、延误、排队长度、停车次数、交通事故、燃油消耗、尾气污染、交通噪声等。

第四步:数据的收集和处理

这一步工作的主要内容是根据输入和输出要求,收集和处理所需的数据。为此,应当制定观测计划,确保满足最小样本量要求,以便于模型进行标定和有效性检验。接下来是对所收集的数据进行处理,使之符合仿真模型的需要。数据处理通常包括计算均值和方差、确定分布形式和相互关系、进行回归分析和单位转换等。

第五步:建立数学模型

建立数学模型是系统仿真中最关键的一步,也是最费时间的一项工作。通常采用自上而下循序渐进的方法进行。以前面提到的第一级流程图出发,将注意力放在连接输入和输出的处理过程上,建立第二级流程图,确定构成处理过程的主要模块及其相互关系,每一模块的输入和输出;然后,建立第三级流程图,对每一个模块的功能进行详细的描述。

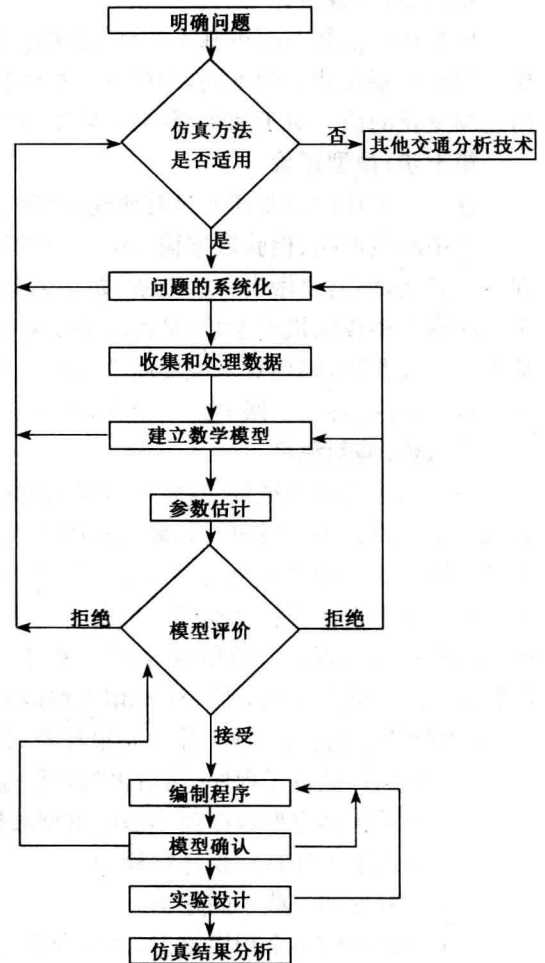


图 1-1 交通系统的仿真流程图