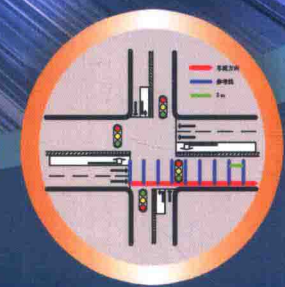
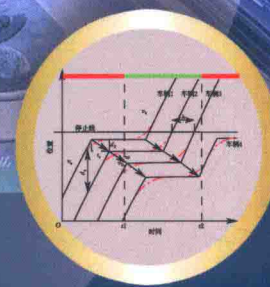
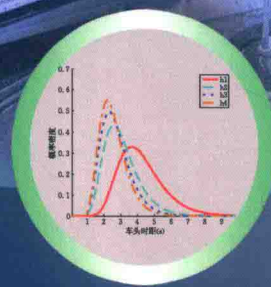
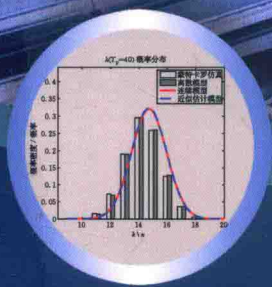


国家自然科学基金资助项目 (61603005 61503007)

北京市自然科学基金资助项目 (4164083)

# 城市交通流演化规律及应用

谭墜元 张 毅 李志恒 王 力 著



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

国家自然科学基金资助项目(61603005 61503007)

北京市自然科学基金资助项目(4164083)

# 城市交通流演化规律及应用

谭骥元 张毅 李志恒 王力 著

中国铁道出版社

## 内 容 简 介

本书通过深入分析和研究国内外典型城市交通流数据,提出了基于车头时距的城市交通流演化规律研究构架,对城市交通流在交通信号控制下的车队状态和车队状态间的演化行为进行深入的研究;针对不同的交通流状态,建立了基于启动车头时距/稳态车头时距的信号控制路口有效流率概率分布模型,从交通流随机性的角度对路口通行能力、交通信号控制效果进行分析;然后在交通流模型理论研究的基础上,探讨交通流动态性、随机性对交通信号控制的影响情况,提出了考虑交通流随机性的信号配时定量分析方法;最后对交通仿真软件产生的交通流随机现象进行对比分析,揭示了微观仿真软件在模拟交通流随机现象中存在的问题。

### 图书在版编目(CIP)数据

城市交通流演化规律及应用/谭璠元等著. —北京:  
中国铁道出版社, 2017. 5  
ISBN 978-7-113-23007-4

I. ①城… II. ①谭… III. ①城市交通—交通流—研究 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 088579 号

书 名:城市交通流演化规律及应用  
作 者:谭璠元 张 毅 李志恒 王 力 著

策 划:金 锋  
责任编辑:金 锋 编辑部电话:010-51873125 电子信箱:jinfeng88428@163.com  
封面设计:崔 欣  
责任校对:王 杰  
责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

版 次:2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:6.75 字数:122 千

书 号:ISBN 978-7-113-23007-4

定 价:39.80 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)  
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

随着城市经济的高速发展与我国城市化进程的深入开展,我国各大城市均面临着不同程度的交通拥堵问题,以及由此导致的交通延误增大、旅行时间增长、交通事故率提高和环境污染问题加重等多项交通及其衍生问题。因此,大城市所面临的交通问题已经成为制约我国城市可持续发展的瓶颈之一。近年来,随着检测技术的发展,智能交通系统在状态感知能力方面也得到了显著的提升。通过先进的检测设备,智能交通系统如今能够获得前所未有的海量交通数据,这些数据覆盖范围更广、内容更丰富、精度更高,包含了大量潜在的有用信息。所以,如何利用海量交通数据,对交通系统进行深入建模,实现对交通系统更加精确、可靠、高效的演化分析,进而指导优化决策过程,成为了进一步提高智能交通系统的应用效果的主要方向。

本书通过深入分析和研究国内外典型城市交通流数据,提出了基于车头时距的城市交通流演化规律研究构架,对城市交通流在交通信号控制下的车队状态和车队状态间的演化行为进行深入的研究;针对不同的交通流状态,建立了基于启动车头时距/稳态车头时距的信号控制路口有效流率概率分布模型,从交通流随机性的角度对路口通行能力、交通信号控制效果进行分析;然后在交通流模型理论研究的基础上,探讨交通流动态性、随机性对交通信号控制的影响情况,提出了考虑交通流随机性的信号配时定量分析方法;最后对交通仿真软件产生的交通流随机现象进行对比分析,揭示了微观仿真软件在模拟交通流随机现象中存在的问题。

本书的主要内容及结论如下:

首先,基于北京市、亚特兰大市的交通检测数据的处理与分析,提出了基于车头时距的城市交通流演化规律研究构架;通过车头时距、启动车头时距、稳态速度等关键参数对城市交通流演化过程中的车队状态以及不同稳态状态车队间的演化行为进行研究和分析,揭示了交通流参数的随机特性及其内在关联。

其次,针对饱和排队状态的信号控制路口,建立了基于启动车头时距分布及其相关性的有效启动流率概率分布模型,包括了离散概率分布、连续概率分布模型和近似估计模型,构建了车队演化行为中排队车队启动过程的核心模型。

然后,针对非饱和排队状态的信号控制路口,提出了到达车队下游路口排队概率模型,揭示了不同到达车队以及到达车队与下游排队车队之间的相互作用关系;在此基础上建立了非饱和排队状态下的有效流率概率分布模型,构建了车队演化行为中稳态车队下游排队过程的核心模型。

再者,根据交通流模型研究成果,提出了基于交通流随机性的信号参数定量分析方法;在考虑交通流随机性条件下,分别提出了绿灯时长、相位差、绿灯延时三个参数的配时基本原理及方法。

最后,针对微观交通流仿真软件(VISSIM, TransModeler),对仿真软件产生的启动车头时距分布特性和实际检测启动车头时距分布特征的差异进行了深入研究,指出了二者之间的差异对交通流研究和交通信号控制研究所造成的影响,揭示了微观仿真软件在模拟交通流随机性方面存在的问题。

本书在编写过程中得到了多位交通与控制领域专家教授的支持,特别是北方工业大学城市道路交通智能控制技术北京市重点实验室、清华大学自动化系智能交通联合实验室老师与同学的支持,特此致谢!

本书的写作得到国家自然科学基金(61603005、61503007)和北京市自然科学基金(4164083)项目的资助,特此致谢!

北方工业大学尹凯莉、黄怡斌、施翔匀硕士生材料收集、文字整理及校对方面做了大量工作,一并感谢!

囿于编写者水平和有限的编写时间,本书难免有错误和不足之处。欢迎广大读者批评指正。

作者  
2017年3月





第1章 引言	1
1.1 城市交通问题的产生及发展	1
1.2 交通流理论及其存在的问题	2
1.3 交通流演化规律及其应用前景	5
1.3.1 城市交通流演化过程	6
1.3.2 基于交通流演化规律的有效流率概率分布模型	7
1.3.3 交通流随机性研究在交通信号控制中的应用	8
第2章 交通流理论分类	10
2.1 宏观交通流模型	10
2.2 微观交通流模型	14
2.3 中观交通流模型	18
2.4 启动车头时距模型	21
2.4.1 基于位置的平均启动车头时距	21
2.4.2 启动车头时距概率分布模型	22
第3章 城市交通流演化模型	26
3.1 城市交通流演化过程分析	27
3.1.1 城市交通流时空特性分析	27
3.1.2 城市交通流演化过程关键参数选择	30
3.2 演化过程关键参数特性分析	33
3.2.1 启动车头时距分布及相关性分析	33
3.2.2 稳态车头时距分布及相关性分析	38

3.2.3 稳态速度与启动加速度分布分析 .....	40
3.3 基于车头时距的城市交通流演化规律 .....	41
3.3.1 车头时距演化规律分析 .....	41
3.3.2 基于车头时距的城市交通流演化规律 .....	43
<b>第4章 基于交通流演化规律的有效流率概率分布模型 .....</b>	<b>47</b>
4.1 城市交通流演化场景及定义 .....	48
4.2 饱和排队状态下有效启动流率概率分布模型 .....	49
4.2.1 基于启动车头时距的有效启动流率离散概率分布模型 .....	50
4.2.2 基于启动车头时距的有效启动流率连续概率分布模型 .....	53
4.3 非饱和排队状态下绿灯时间有效流率概率分布模型 .....	64
4.3.1 稳态车队下游排队概率模型 .....	64
4.3.2 基于启动车头时距/饱和车头时距的有效流率模型 .....	67
<b>第5章 交通流随机性研究在交通信号控制中的应用 .....</b>	<b>71</b>
5.1 基于交通流随机性的信号配时优化 .....	72
5.1.1 基于启动车头时距的绿灯时长特性分析 .....	73
5.1.2 基于饱和车头时距的绿灯延时特性分析 .....	77
5.1.3 基于稳态速度/饱和车头时距的相位差特性分析 .....	79
5.2 基于交通流随机性的微观仿真软件性能测试 .....	82
5.2.1 仿真软件生成启动车头时距分布及相关性分析 .....	82
5.2.2 仿真模型参数对启动车头时距的影响分析 .....	87
<b>参考文献 .....</b>	<b>91</b>

# 第 1 章

## 引 言

### 1.1 城市交通问题的产生及发展

城市交通系统作为人类日常工作、生活出行不可或缺的基础,为城市经济、文化可持续发展提供了必要的支撑条件。随着我国城市经济的高速发展与城市化进程的深入开展,各大城市均面临着不同程度的交通拥堵问题,以及由此导致的交通延误增大、旅行时间增长、交通事故率提高和环境污染问题加重等多项交通及其衍生问题。因此,大城市所面临的交通问题已经成为制约我国城市可持续发展的瓶颈之一。2015年北京市机动车保有量达到561.9万辆,全路网高峰时段平均交通指数5.7,比2014年上升3.6%;平均拥堵持续时间3.0h,比2014年增加1h5min<sup>[1]</sup>。

城市交通问题产生的根源在于城市交通需求与交通供给严重失衡,交通供给的提高远远无法满足交通需求的增加。为了解决交通需求与交通供给之间的矛盾,一方面可以从控制需求的角度出发,采用机动车保有量控制政策(如车辆限购<sup>[2-3]</sup>)、出行限行政策(如单双号限行、尾号限行、车种限行等方法<sup>[4]</sup>),另一方面从交通供给的角度出发,通过交通规划新建、扩建、改造道路直接提高交通系统的基础供给能力<sup>[5-7]</sup>。虽然需求控制效果直接、明显,但是治标而不治本,且面临着社会舆论等巨大压力;而交通规划与建设虽然能在一定程度上缓解交通拥堵问题,但是其具有周期长、难度大、灵活性差的缺点,难以解决当前的城市交通问题。

近20年来,随着信息技术的快速发展,自动检测技术、通信技术、控制理论、智能优化理论等多个方面的技术成果和理论成果在城市交通系统中得到广泛的



应用,从而逐步形成了以提高城市交通运行效率为目的的智能交通系统<sup>[8-12]</sup>。通过各类智能交通系统的建设、应用及发展,逐步形成了综合、高效、实时、准确的城市交通智能管理体系,在缓解交通拥堵提高城市道路通行能力的同时,也在一定程度上保障了交通安全、降低了环境污染,对城市产生了巨大的经济效益和社会效益。

智能交通系统一般包括状态感知、建模分析、决策优化三个层次的功能。

状态感知是指系统通过检测数据,对系统业务对象的状态进行不同层次的识别与感知,获取有效的状态数据。随着近年来信息技术和检测技术的突飞猛进,智能交通系统状态感知大多能够满足系统业务需求。

建模分析是指基于状态感知信息,系统根据交通系统(或子系统)的数学模型,对交通系统的响应进行评价分析。从交通管理的角度来说,交通流理论是城市智能交通管理系统建模分析的重要基础之一。

优化决策指的是基于交通系统模型的响应评价分析,系统通过不同的智能算法对各项管理控制策略进行优化。

近年来,随着检测技术的发展,智能交通系统在状态感知能力方面得到了显著的提升。通过先进的检测设备,智能交通系统如今能够获得前所未有的海量交通数据,这些数据覆盖范围更广、内容更丰富、精度更高,包含了大量潜在的有用信息<sup>[13-19]</sup>。所以,如何利用海量交通数据,对交通系统进行深入建模,实现对交通系统更加精确、可靠、高效的演化分析,进而指导优化决策过程,成为进一步提高智能交通系统的应用效果的主要方向。

## 1.2 交通流理论及其存在的问题

城市交通系统是由人、车、路相互作用而共同形成的复杂系统,系统内不同组成元素相互影响、相互制约。交通流理论通过流体力学理论、波传输理论、统计理论、实验分析等多种理论或方法对交通流特性进行建模和分析<sup>[20-27]</sup>。传统的交通流理论一般具有明确的物理意义、严谨的推导过程,是一种基于稳态交通流状态理论,长期以来一直是城市规划、交通控制管理等领域的基础性理论。交通流模型从其对交通系统描述的精细程度一般可以分为宏观交通流模型、中观交通流模型和微观交通流模型三种类型。

①宏观交通流模型采用流体模型描述交通流的时空变化,其模型关注车流的整体运动规律,一般不涉及具体的单个车辆的行驶状态。最早的研究者包括了 Lighthill、Whitham 和 Richards,其研究成果主要是形成了 LWR 模型理

论<sup>[28-30]</sup>。LWR模型基于车辆数守恒原理描述交通流的流体特征。之后,1994年 Daganzo 首次提出了元胞传输模型(Cell Transmission Model, CTM),利用有限差分方法对一维交通波方程(即 LWR 模型)进行近似处理<sup>[31-35]</sup>。而后多个学者对 CTM 模型进行了改进,形成了 LTCM(Lagged Cell Transmission Model)<sup>[36]</sup>、MCTM(Modified Cell Transmission Model)<sup>[37]</sup>、ACTM(Asymmetric Cell Transmission Model)<sup>[38-39]</sup>以及 ELCTM(Enhanced Lagged Cell Transmission Model)<sup>[40]</sup>等。此外,基本图模型<sup>[41-48]</sup>也是宏观交通流模型的主要研究内容之一,基本图模型描述交通流的三个基本参数(流量、密度、速度)之间的关系,是刻画交通流特性的最直接和简便的方式。此类模型一般假设速度和流量之间存在特定的对应关系,然后结合特定交通参数值,通过连续或者分段函数进行拟合<sup>[49-53]</sup>。

②微观交通流模型描述车辆之间的相互关系,以单个车辆为基本元素,通过跟驰模型与换道模型对交通流演化过程进行建模描述。其中,跟驰模型主要描述前后车辆之间的相互作用关系,其基本思想是通过前后车辆当前时刻的速度、位置、加速度等参数来确定下一时刻的加速度或者速度。跟驰模型主要包括了刺激反应模型、驾驶心理模型、优化速度模型、安全距离模型等多种模型<sup>[54-67]</sup>。换道模型包括了自由换道行为和强制换道行为两类,前者是由于驾驶员期望更快的行驶速度或者更舒适的驾驶环境而产生的换道行为;后者是由于车辆路径选择过程中进行的转向、匝道出入行为或者是前方车道变化影响而产生的换道行为。微观模型可以通过仿真得到每个车辆的详细运行情况,如速度、车头时距、旅行时间等参数。不过由于其受到仿真速度的限制难以在大规模路网上进行在线运行。微观仿真软件包括了研究型仿真软件和商业仿真软件,其中常用的商业微观仿真软件有 VISSIM、TransModeler、Paramics 等。

③中观交通流模型研究覆盖范围较广,一方面研究车头时距/车辆间距等参数的分布规律,另一方面研究以车队为基础的时空状态演化规律。既可以描述宏观交通流模型所使用的流量、密度、速度等状态参数,同时也保留了微观交通流仿真中的速度、车头时距、旅行时间等结果。中观交通流模型的研究一般通过对交通流参数的统计分布特征,建立速度、车头时距、车辆间距等参数的分布拟合模型。由于中观模型一方面通过分布模型描述交通流的随机特性,比宏观交通流模型具有更加丰富的信息,另一方面避免了微观模型带来的巨大的计算压力,因此中观交通流模型已经成了当前国际上的研究热点。最早的中观交通流研究多集中于车头时距分布模型<sup>[71-77]</sup>,常见的模型包括了负指数分布、移位负指数分布、Erlang 分布、对数正态分布、M3 分布等概率分布模型。不同的模型采

用不同分布形式,其描述的车头时距分布参数及适用范围也各不相同,如何选择车头时距模型需要考虑多种因素,其中主要是考虑模型的精度、时耗及用途。简单的模型较为容易进行参数的估计,但是其精度可能一般;而复杂的模型虽然提高了精度,但是其参数的拟合较为复杂。

驾驶员在驾驶车辆的过程中受到多种内外部随机因素的影响,既包括路况、天气等外部因素的影响,也包括车辆性能、驾驶行为等内部因素的影响,从而造成了确定型交通流模型在交通流演化规律研究方面难以对其进行准确的估计和预测。因此,近年来在传统交通流模型研究的基础上,研究人员更加关注交通流的动态性与随机性特征,这也成为现代交通流理论研究的热点问题之一<sup>[78-85]</sup>。目前,交通流随机性的研究范围覆盖了宏观、中观、微观交通流模型。其中宏观交通流模型涉及了动力学方程的随机化处理、元胞传输模型的随机化处理以及基本图模型的随机化处理;微观交通流模型方面,主要通过速度、加速度等参数的随机化处理以及换道行为的随机化处理来模拟交通流随机性现象;中观交通流模型方面,基于车头时距等参数的分布模型,更多地进行不同随机变量之间的关系以及由基本参数建立的通行能力、旅行时间模型的随机化特征研究。

城市交通系统是一个由多种元素相互作用构成的复杂系统,具有动态性与随机性的特点。随着越来越多的交通信息的获取,传统的交通流模型已经无法满足新一代智能交通系统对于交通系统动态性与随机性的建模分析需求。在此背景下,现代交通流理论通过信息技术、人工智能技术、仿真技术对交通流动态性、随机性进行深入的研究。其中,交通流动态性主要是指由于交通系统有多种元素构成,且不同元素间相互作用、相互影响,交通流始终处于不断变化的过程之中。而这些动态性不同程度的体现在交通流参数的变化上,如宏观交通流参数(如流、密、速等)、微观交通流参数(车头时距、间距、可接受间隙等)。交通流随机性是指由于驾驶行为、交通环境等因素的影响,交通流所体现的明显的随机特性。相同驾驶员驾驶相同车辆在同一条道路上多次行驶,其行驶速度等参数也不尽相同,但是这些交通流参数往往具有一定的分布规律。虽然近年来各国学者对交通流随机性的研究开展了一定的工作,但是目前对于城市交通流随机特性的研究还存在以下几个问题:

首先,在研究方法上,虽然交通流随机性的研究成为当前的热点研究内容,但是现有的研究未能充分分析交通流随机性产生机理及相互关系。目前较为常用研究方法是在传统交通流模型上增加随机项,虽然易于研究且在特定的条件下取得一定的效果,但是其缺少对于交通流随机性产生机理的系统性分析,不利于后续研究的开展。

其次,在研究内容上,当前交通流随机性的研究多集中于高速公路交通流,对于城市交通流随机性的研究较少,且集中于若干交通流参数的统计分布特性研究,未能对不同变量的因果关系及相关性进行深入探讨,因此也无法形成系统的城市交通流随机性研究体系。

最后,在研究应用上,虽然对城市交通流的研究取得了一定的成果,但多限于理论研究。而如何将交通流随机性的理论研究成果应用于实际的城市交通管理,如交通信号控制、交通诱导等方面,尚未形成有效的研究成果。

因此,本书重点围绕城市交通流演化规律及其应用展开,通过对国内外不同城市交通流数据分析,确定城市交通流演化过程中的关键参数,提出基于车头时距的城市交通流演化规律研究构架,确立了车头时距和有效流率在城市交通流演化过程中的核心地位;在此基础上,针对饱和排队和非饱和排队两种典型状态,基于启动车头时距等关键参数分布及相关性特征,建立信号控制路口有效流率概率分布模型;最后在理论研究的基础上探讨了交通流随机性研究在交通信号控制中的潜在应用及研究意义。

### 1.3 交通流演化规律及其应用前景

在理论研究方面,现代交通流理论使用人工智能、仿真等现代分析手段,结合实际观测的交通流数据,对交通流的动态特性、随机特性进行分析研究。本书使用概率统计、随机过程等数学理论,分析城市交通车队车头时距/启动车头时距等关键参数的概率分布及相关性,提出了基于车头时距的城市交通流演化规律研究构架,确立了车头时距和有效流率在演化过程中的核心地位,并建立信号控制路口有效流率概率分布模型,这对于丰富现代交通流理论,特别是丰富城市交通流理论具有一定的意义。

在实际应用方面,随着 ITS 的快速发展,结合车联网相关技术的成熟与应用,交通信息更为丰富精确,一方面极大地提高了系统对交通状态的感知能力,另一方面也对新一代智能交通系统的理论模型提出了更高的要求。因此,城市交通流演化规律的研究,对于揭示城市交通流演化过程关键参数及其随机特性、构建交通流演化规律研究构架、建立面向信号控制的有效流率概率分布模型具有重要的意义,这也是新一代智能交通系统深入挖掘和综合利用日益完备的交通数据的理论基础。同时,基于交通流随机性研究的交通信号配时基本原理及方法的研究,以及微观仿真软件性能评价及分析研究,探讨了交通流随机特性研究成果的实际应用意义。交通流演化规律框架如图 1.1 所示。

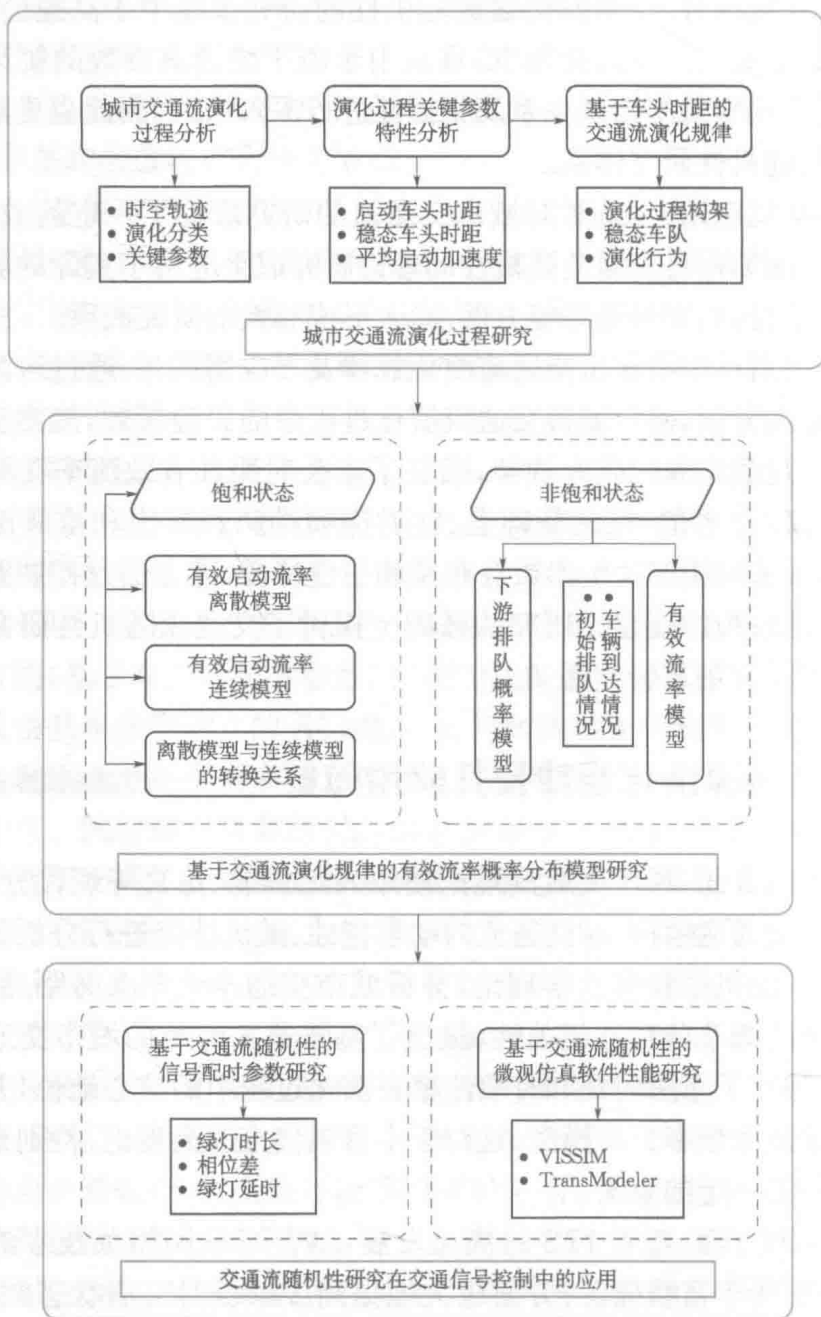


图 1.1 交通流演化规律框架

### 1.3.1 城市交通流演化过程

交通流研究是指运用物理、数学知识研究道路车辆运行规律,从而对道路工程建设、交通管理措施的应用效果进行科学的评估与分析。不同于高速公路交通流,城市交通流由于受到城市道路交叉口信号控制的周期性影响,是典型的间



断型交通流,车流在城市路网中往往存在频繁往复的行驶和排队状态转换。针对城市交通流的这种特点,本书首先介绍城市交通流演化规律,主要包括下面三个部分:

### 1. 城市交通流演化过程分析

城市道路网络是一个由大量路段、路口等单元组成的一个复杂系统,且相邻路段、路口的交通状态并不独立,是具有较强的耦合联系。车辆在城市路网中行驶,不仅受到周边其他车辆的影响,也要受到交通信号控制等交通管理设施的影响。因此,城市路网中运行的车辆往往以车队的形态存在。车队主要存在停止排队状态和稳态行驶两种状态,且两种状态处在不断的转换过程之中。因此,利用城市道路车辆时空轨迹数据,对城市路网中交通流演化过程进行综合分析,结合经典交通流模型,确定交通流演化过程中的关键参数。

### 2. 城市交通流演化关键参数特性分析

通过对城市交通流演化过程进行分析,选择了启动车头时距、稳态车头时距、稳态速度和启动加速度作为关键参数。本书介绍一种使用概率统计等数学工具对上述四个关键参数进行分析的方法。基于多个城市的实测数据研究启动车头时距、稳态车头时距、稳态速度和启动加速度四个参数的分布规律;同时考虑到城市路网中车辆组成的车队形态,进一步研究车队中不同位置启动车头时距/车头时距的相关性,并对不同相关性情况下的基于启动车头时距分布特征所得到的启动损失时间模型进行定性和定量的分析。

### 3. 城市交通流演化规律研究构架

在城市交通流演化过程以及关键参数的随机特性的研究方面,本书通过提出基于车头时距的城市交通流演化规律研究构架,以车队为基本研究对象,重点研究演化过程中车队的两种稳定状态以及稳定状态之间的演化行为。其中,稳定状态包括了停止排队状态和稳定行驶状态,通过关键参数对其进行描述;而演化行为包括了排队车队启动行为和稳定行驶车队下游排队行为两类,通过分析确立了车头时距和有效流率在演化行为中的核心地位。

## 1.3.2 基于交通流演化规律的有效流率概率分布模型

交通流演化规律研究构架中稳态车队之间的演化行为主要由车头时距和有效流率两个参数所决定,因此该部分重点研究不同状态下有效流率概率分布模型。对于信号控制路口,当信号灯变为绿灯后,停止线后排队的车辆将依次启动并通过停止线进入路口和下游路段行驶。以停止线为观测点,在启动过程中,流率将由零逐步增至某一个稳定数值,即饱和流率。而当排队车辆完全通过停止



线,流率则会根据后续到达车辆的状态不断变化。而有效流率则是指整个绿灯时间内通过停止线进入路口的车辆数与绿灯时间的比值,即绿灯时间内的平均流率。有效流率一方面受到驾驶行为的影响,如行驶速度、加速度、期望车头时距、期望车间距等;另一方面,有效流率更受到排队车辆数量以及到达车辆时空分布情况的影响。因此,本书重点介绍饱和排队状态/非饱和排队状态下信号控制路口绿灯时间内有效流率的概率分布模型。

### 1. 饱和排队状态下有效启动流率概率分布模型

饱和排队状态即指给定绿灯时间内排队车辆无法全部通过路口的情况。在此情况下,排队车辆将会以相对稳定的状态依次启动并通过路口,且流率从零逐步上升至饱和流率并基本持续至绿灯时间结束。本书基于启动车头时距分布及不同位置启动车头时距相关性,建立饱和排队状态下有效启动流率概率分布模型,包括离散型模型和连续型模型,通过蒙特卡洛仿真对两种模型的误差及适用范围进行分析验证。

### 2. 非饱和排队状态下绿灯时间有效流率概率分布模型

对应于饱和排队状态,非饱和排队状态指的是绿灯时间内排队车辆能够完全通过路口的情况。不同于饱和排队状态,非饱和排队状态下绿灯时间有效流率受到更多因素的影响,如排队车辆数量、上游到达车辆的情况。因此,该部分首先研究到达车队下游排队概率模型,对到达车辆是否能够不受下游排队车辆影响顺利通过路口的概率进行建模分析,再结合有效启动流率模型的研究结论,建立非饱和排队状态下绿灯时间有效流率概率分布模型,并对模型中主要参数对有效流率模型的影响进行分析。

## 1.3.3 交通流随机性研究在交通信号控制中的应用

城市交通信号控制对于交通流的影响是直接和显著的,其在保障了交叉口安全的同时,对各个方向的交通流产生了阻滞作用,从而造成了车辆延误。因此,交叉口的交通流理论主要研究不同交通信号控制方式下交叉口通行能力、车辆排队长度、车辆延误等问题。而另一方面,交通流理论又是交通信号控制配时与优化的基础理论,交通信号配时需要根据交通流特性进行设计及优化。出于安全及效率等因素的考虑,交通信号配时及控制算法一般在实际应用之前需要通过交通流仿真软件对其应用效果进行评估和验证。对于城市交通信号控制来说,微观仿真软件是最为常用的仿真软件,也是最精确的评价工具。

本书首先对基于交通流随机性的信号配时参数进行介绍,重点讨论在考虑

交通流随机性的情况下,绿灯时长、相位差、绿灯延时三个参数的配时原则,并给出信号配时参数的定量分析方法。另一方面,针对交通信号控制的常用的测试评价平台,即微观仿真软件(以 VISSIM 和 TransModeler 为例),分析仿真软件产生的交通流随机性特征与实测数据之间的差异及其影响,揭示了微观仿真软件在模拟交通流随机性方面存在的问题。

## 第 2 章

### 交通流理论分类

一般而言,交通流理论是研究高速公路交通流和城市道路交通流运行规律和特征的理论,其使用物理、数学等基础知识研究和揭示交通现象产生的根源、分析交通演化行为的规律,为交通管理措施的制定和优化提供必要的理论基础<sup>[20-27]</sup>。

#### 2.1 宏观交通流模型

宏观交通流不关注于单个车辆的具体运动规律,而将车流作为研究的基本对象,通过流体力学、概率统计等理论及方法对其进行分析研究。宏观交通流模型引入  $t$  时刻  $x$  位置的车辆密度  $\rho(x,t)$  和平均速度  $u(x,t)$  等概念,并由此建立了  $\rho(x,t)$  与  $u(x,t)$  的偏微分方程或方程组,以此来研究交通流动力学特性。

##### 1. LWR 模型

宏观模型的发展始于 Lighthill 和 Whitham 以及 Richards 提出的 LWR 模型<sup>[28-30]</sup>。LWR 模型建立的根据是车辆数目守恒这一基本原则,其模型方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = s \quad (2.1)$$

其中,  $q = \rho u$  是流量;  $s$  表示匝道出入流量。

由于方程并不封闭,因此 LWR 模型中假设车流处于平衡状态,即在模型中引入了车流稳定状态的速度密度关系,如式(2.2)所示。

$$u = u_e(q) \quad (2.2)$$

将式(2.2)代入式(2.3),得到

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q_e(\rho)}{\partial x} = s \quad (2.3)$$