

城市道路交通

网络多模态结构动态性研究

Multimodal Dynamics of
Urban Road Traffic Networks

©贾利民 张尊栋 秦 勇 著



科学出版社

城市道路交通网络多模态 结构动态性研究

Multimodal Dynamics of Urban Road Traffic Networks

贾利民 张尊栋 秦 勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

城市道路交通系统作为一类典型复杂系统,蕴含了复杂系统研究领域所有的科学问题。同时,城市道路交通系统复杂动态行为的建模、分析及控制的相关研究能够为改善日益拥堵的城市交通状况提供理论与方法支持。

本书采用复杂系统的一般理论以及复杂网络领域分析方法,结合城市道路交通系统的基本特征,提出了用以分析城市道路交通系统结构随时间演进过程的多模态的思想及相关方法,并以北京市道路交通系统为例做了实验分析。

本书适合交通复杂性领域的科研人员、从事宏观交通控制与诱导工作的工程师及城市交通管理部门工作人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

城市道路交通网络多模态结构动态性研究 = Multimodal Dynamics of Urban Road Traffic Networks / 贾利民, 张尊栋, 秦勇著. —北京: 科学出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-03-036893-5

I. ①城… II. ①贾…②张…③秦… III. ①城市交通网-动态系统-系统建模 IV. ①U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 040689 号

责任编辑: 耿建业 陈构洪 / 责任校对: 宋玲玲

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 3 月第一次印刷 印张: 9 1/2

字数: 256 000

定价: 72.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着城市规模的不断膨胀,各类交通问题,如拥堵、效率低下等,日益突出,严重影响了城市道路交通系统的日常运行,甚至对社会经济发展造成不良的影响。城市道路交通系统中蕴含的问题使复杂系统理论和城市道路交通网络的研究面临新的机遇与挑战。

城市道路交通系统的整体行为特征分析是该领域内研究的难点与重点之一,这一问题映射到复杂系统理论研究层次即为涌现行为的形成与演进过程的特征分析,映射到城市道路交通网络研究层次则为网络动态拓扑特征分析。从不同的抽象层次思考城市道路交通系统中的各种问题能够使我们更清晰地认识到问题的本质和发展方向。

本书在深刻理解复杂系统定义与基本属性的基础上,对涌现作了较为清晰的描述,并对涌现形成和演进过程进行初步探讨,为理解复杂系统本质提供了一种新的框架;同时,为进一步研究复杂系统涌现行为形成和演进过程提供了理论依据。本书指出系统行为在某个时段内受到系统状态空间中若干涌现吸引子的共同作用,正是这种联合作用使系统行为表现出多个模态的特性,每个参与施加影响的吸引子都属于某一种独立的系统模态。在此基础上,本书进一步提出了基于多模态特征的复杂系统动态性建模方法,该方法将多模态联合作用的思想引入系统动态性建模,为研究复杂系统涌现行为的动态演进特征提供了一种新的理论指导,为具体应用领域相关问题的建模分析提供了依据。

网络化模型是城市道路交通领域研究最常用的表达方式之一;同时,复杂网络是复杂系统领域相关研究的重要分支之一。

以图论为基础,复杂网络理论经过几十年的发展已经形成了一个的学科——网络科学。现阶段,网络科学的核心研究内容是通过考察节点间的连通性进而分析网络拓扑性质。

本书通过采用道路服务水平和交通连通性等概念构建了具有可变结构的城市道路交通动态网络模型及其扩展模型,其中后者将道路交通状态的变化与网络拓扑变化紧密关联起来,使网络拓扑更完整地反映真实交通流网络的特性。基于北京市道路交通流数据的实验分析表明:城市道路交通网络具有

三个基本模态,即静态网络模态、随机网络模态和非均衡结构网络模态,这三种基本模态分别定义了对应的系统行为的演进规律,即模态子动态性。城市道路交通系统行为的演进过程受到这三种模态的联合作用,在某个时段内因为产生较为主要的影响而被用于表征该时段内系统动态行为特征的被称为主模态。当主模态产生的影响占有绝对优势地位时,将该模式称为单一作用模式,否则,为联合作用模式。本书将模态的作用模式分为七种,包括三种单一作用模式和四种联合作用模式。模态对系统行为的演进过程产生影响的程度通过模态相似性测度计算方法获得。

模态子动态性描述的目的是为了获得某时段网络行为受该模态作用而发生行为改变的程度。通过三种模态子动态性仿真演进,获得某时段三组仿真演进网络数据,包括节点度分布及平均节点度等,利用模态相似性计算公式,获得在任意时段内网络行为演进过程中各模态产生影响的程度,并以此来区分各模态的重要程度和模态的作用模式。

北京市道路交通网络为多模态动态性建模实验与分析提供了完整的数据支持。本书选取具有代表性的五个时段作为考察对象进行了多模态动态性建模实验。北京市道路交通网络动态性建模与分析实验表明:北京市道路交通网络行为在一个以天为单位的周期内呈现出多个模态共同作用的特征;在全天的各时段内,主模态所定义的动态性基本能够描述北京市道路交通网络的行为特征;基于多模态特征的动态性建模方法能够将北京市道路交通网络任意时段内的网络行为通过量化的方法进行解析,并指出各时段的主模态、模态作用模式及主要行为特征,该方法所定义的动态性建模方法为以北京市道路交通网络为代表的城市道路交通网络的动态性建模及行为分析提供了建模与分析工具,同时该方法为分析复杂系统涌现行为的演进规律及动态特征提供了建模与描述工具。

目 录

前言

第 1 章 城市道路交通系统建模	1
1.1 概述	1
1.2 交通系统建模方法综述	3
1.2.1 交通建模方法分类	3
1.2.2 车辆交通行为建模方法	4
1.2.3 基于特征统计的车辆交通行为建模方法	5
1.2.4 交通流统计建模方法	5
1.3 基于复杂系统理论的城市道路交通系统动态性建模研究	6
1.4 研究动机与目标	8
1.5 技术路线	8
第 2 章 复杂系统方法论架构	11
2.1 复杂系统基本概念介绍	11
2.1.1 基本定义	13
2.1.2 基本属性	16
2.1.3 建模与分析	19
2.2 涌现的定义与描述	20
2.2.1 基本概念与定义	20
2.2.2 涌现	22
2.3 网络条件下的系统复杂性	39
2.3.1 概述	39
2.3.2 基本属性	42
2.3.3 城市道路交通网络相关研究	45
第 3 章 多模态动态性建模方法	48
3.1 复杂系统的多模态特征	48
3.2 基于多模态特征的动态性建模方法	50

3.3	网络化模型中的多模态动态性及城市道路交通网络 动态性建模·····	52
3.4	小结·····	54
第4章	城市道路交通系统动态性建模 ·····	55
4.1	概述·····	55
4.2	城市道路交通系统复杂性研究·····	56
4.3	服务水平与交通连通度·····	57
4.3.1	服务水平·····	57
4.3.2	连通度·····	59
4.4	网络模型·····	61
4.4.1	静态模型·····	61
4.4.2	动态模型·····	62
4.5	城市道路交通网络动态性建模·····	66
4.5.1	城市道路交通网络动态性·····	66
4.5.2	模态子动态性描述·····	69
4.5.3	模态相似性评价·····	78
4.6	小结·····	80
第5章	典型特大城市交通网络动态性建模分析 ·····	81
5.1	北京市道路交通系统·····	81
5.1.1	基本介绍·····	81
5.1.2	实验数据说明·····	82
5.2	北京市道路交通网络模型·····	91
5.2.1	静态网络模型·····	91
5.2.2	动态网络模型·····	91
5.2.3	模型分析·····	93
5.3	多模态特征分析·····	99
5.3.1	结构均衡特性验证实验·····	99
5.3.2	基础模态及模态作用模式·····	106
5.4	子动态性演进实验·····	107
5.4.1	静态网络子动态性分析·····	107
5.4.2	随机网络子动态性分析·····	110
5.4.3	非均衡结构网络子动态性分析·····	114

5.5 相似性分析及实验结论	117
5.6 小结	127
第 6 章 结论	130
参考文献	134

第 1 章 城市道路交通系统建模

1.1 概 述

城市道路交通系统是在基础设施(各等级道路、车辆停靠区域等)及其附属设施(交通标志标线、交通监控设备等)基础之上,通过各种协调、控制手段,以实现城区各类型交通参与者空间位移为目标的空间开放的复杂系统。

基础设施网络,包含各等级道路、各类型交叉口以及车辆生成和吸收区域,是城市道路交通系统的基础。基础设施网络的规模是衡量城市道路交通系统发展程度最重要的指标之一,能够在一定程度上代表城市发展状况。基础设施网络具有建设周期长、地理环境依赖程度高、结构稳定性高等特点,为车辆通行提供了最基本的保障。道路交通领域的理论与方法研究,如出行分析、路径选择、交通诱导等,都将基础设施网络作为主要的因素进行分析。

车辆在基础设施网络上运行形成车流,并在基础网络结构的基础上形成交通流网络。显然,交通流网络受到基础设施网络空间上的约束。将交通流与基础设施叠加起来的交通流网络一方面具有基础设施网络的静态结构特征,另一方面能够反映交通流的动态特征。交通流网络涵盖了道路交通领域的主要研究对象:微观上车辆行驶行为分析、中观上车辆统计行为分析以及宏观上网络涌现行为分析。交通流网络的宏观特征代表了城市道路交通的整体运行状况,在谈论城市交通的日常交通特点时,通常所指的就是交通流网络。交通流网络是道路交通领域研究的核心,旨在改善日常交通状况的方法和技术都是针对交通流设计并实施的。

交通流依赖基础设施,但交通流网络并不完全受限于基础设施网络。交通流网络的许多特征是基础设施网络所不具有的。交通流网络具有参数性动态性和结构性动态性,其中后者直接导致了交通流网络宏观上的涌现行为的形成,即网络拓扑性质发生改变。而交通流对基础设施的依赖也是显而易见的,车辆在道路上行驶进行路径选择时,由于很难及时准确获得路径上的实时交通状态而更多地依赖基础设施网络,从而对宏观交通流网络状态产生影响。因此,由基础设施网络与交通流网络叠加而产生的宏观交通行为更能表征城

市道路交通系统。

影响城市道路交通宏观动态特征变化的另外一个重要的因素是交通管理与控制。交通管理与控制主要通过标志标线、信号控制、交通信息发布等手段实现交通控制和交通诱导的功能,并进而改善整体交通运行状态。交通管理与控制依据的是充分理解和掌握基础设施网络与交通流网络叠加网络所具有的动态性特征。

进入 21 世纪,中国的城市得到快速的发展,车辆保有量的不断增加,导致大多数城市交通低效率通行与拥堵现象日益严重;同时,交通管理部门为了更好地对城市交通状况进行监控,大规模建设了各类型的交通数据获取装置,为深入进行城市交通系统各方面特性分析提供了数据支持。城市道路交通系统所蕴含的各类问题以及丰富的数据支持使众多研究者和工程师对深入研究这些问题背后的科学规律产生了浓厚的兴趣。

经过多年的发展,城市交通领域的重点和难点主要集中在如何建立能够准确描述微观、中观、宏观交通系统行为的分析模型。交通建模方法分为三个层面:早期的研究者和工程师主要关注车辆交通行为建模,所提出的模型主要是反映微观交通行为的特征;随着研究的深入,研究者建立了主要交通变量之间的关系模型,表明研究关注的对象已经从个体交通行为转移到交通系统本身;复杂网络理论不断发展使交通领域的研究者逐渐关注建立在道路网络之上的交通流网络所展示的复杂网络特性,如无标度特征、小世界现象等,并通过网络拓扑特征研究网络状态动态演进的规律。

复杂系统理论研究是当前以至今后相当长一段时间内的研究热点,复杂网络理论是该领域的重要分支之一。复杂系统理论方法的研究对各学科问题的建模与分析提供了理论和方法支持,反之,不同科学领域所蕴含的科学问题及丰富的数据为复杂系统理论研究提供了研究动机。以图论为基础,复杂网络理论经过几十年的发展已经形成了一个新的学科——网络科学。现阶段,网络科学的核心研究内容是通过考察节点间的连通性进而分析网络拓扑性质。从连通性的角度定义网络拓扑演进过程的诸多方法,如 ER 模型、BA 模型、BBV 模型、NW 模型等,已经成为复杂网络领域主要的研究成果。

本书试图从复杂系统建模方法入手,通过深入考察城市道路交通系统动态性建模中存在的问题,探讨复杂系统涌现行为的建模与分析方法;并通过网络科学中的分析方法,结合城市道路交通连通性动态特征,建立旨在反映城市道路交通网络拓扑性质变化规律的分析模型;在此基础上,根据北京市道路交通系统的拓扑数据和监测数据进行了城市道路交通系统动态性建模与分析。

1.2 交通系统建模方法综述

交通系统(交通流系统)建模是指运用力学、物理学、数学知识和计算机技术对交通流特性进行描述,通过建立能描述实际交通一般特性的交通流模型,揭示车辆行为、交通流行为以及交通系统行为的基本规律,从而更好地为指导交通工程及管理部门进行规划设计和完善日常交通控制措施服务。

道路交通流理论的研究从20世纪30年代开始,30~40年代主要以自由流理论为主,即研究交通密度低、各车之间的车头间距较大、车辆处于自由形式状态下的交通流特征。1933年,Kinzer首次提出并论述了将泊松分布应用于交通分析的可能性^[1];1936年,Adams发表了数值例题,表明了交通流理论研究的起步^[2];Greenshields在1934年提出了线性平衡速度密度关系模型,其被称为交通流理论鼻祖^[3]。这一时期的理论基础主要是概率论和数理统计方法。

20世纪50年代以后,随着道路交通流量的剧增,交通流中车辆的独立性越来越弱,交通现象的随机性随之降低,交通流主要研究对象转变为密度较高、各车间距很小、车辆行驶受头车影响和限制的非自由流交通流。这一时期内,各种新的模型纷纷涌现。20世纪50~60年代运动学模型和车辆跟驰模型占统治地位;70~80年代流体力学学说大发展,动力学模型崭露头角;90年代以来,以现代科学技术为主要研究方法和手段,如计算机模拟技术、神经网络法和模糊控制技术等,其中元胞自动机模型为主要代表,交通流理论及方法进入大规模发展阶段。

1.2.1 交通建模方法分类

在传统的交通工程理论中,通常将交通模型分为三类:微观模型、中观模型和宏观模型。建模方法分类所依据的是建模对象的范围。微观建模方法只考虑车辆个体行为;宏观建模方法忽略个体行为的具体描述,而考虑交通流的统计行为;中观建模方法介于前两者之间。从建模的对象及使用的建模工具角度可以将传统的三种交通建模方法分别归纳为车辆交通行为模型(微观模型)、基于特征统计的车辆交通行为模型(中观模型)和交通流统计模型(宏观模型)。

本书在讨论城市道路交通网络动态性建模中所提到的微观、中观以及宏观是一个相对的概念。在讨论道路以及路段上交流通特征时所指的是微观层

面;在以道路交通流为基础讨论区域交通流特性时所指的是宏观层面;当所讨论的区域交通流特性既考虑到子区域交通流特性也包含道路交通流特性时,子区域交通流即为中观层面。本书的粒度划分可以和城市交通区域划分甚至行政管理区域划分相一致。城市交通可以分为多个交通区域,交通区域包含多个路段或道路。宏观层面指整个城市交通路网交通,中观层面指区域路网交通,微观层面即是道路交通。这种粒度划分方法便于使交通特性分析模型和实际城市交通管理对应起来,同时使研究成果更方便地服务于具体的城市交通各个级别的交通管理。

1.2.2 车辆交通行为建模方法

车辆交通行为建模方法对交通流的描述是以单个车辆为基本单元的,这类模型是以车辆在车道上的跟车、超车及车道变换等微观行为为参数建立的模型,因此,这类模型也称为基于行为的模型。模型的建立多是以车辆跟驰行驶作为基础的,主要分为三类:安全距离模型、刺激-反应模型以及心理-物理间距模型。还有的模型考虑了车辆的不同类型等。跟驰模型假设车队中的每一辆车必须与前车保持一定的距离以免发生碰撞,后车的加速或减速取决于前车,考虑车辆对刺激的反应滞后的阻尼效应以及车辆运动的随机性,建立前车与后车的相互关系。

最早的跟驰理论是 Reuschel 在 1950 年提出的^[4],随后物理学家 Pipes 提出了一种经典的跟驰模型^[5]。Chandler 等通过研究认为车辆在延迟时间内通过调整前后的速度差来获得加速度^[6]。Herman 提出一种包含前方两个位置上车辆反应的双倍视距模型^[7]。Newell 提出一个考虑了车辆间的相对速度和车头间距的新模型^[8],但不适合于处理车辆在红灯转绿灯时加速等情形。Bando 等提出的优化速度模型^[9,10]解决了 Newell 模型的问题,但模型会产生较高的加速度以及不切实际的减速度,且有可能出现车辆碰撞现象。Helbing 和 Tilch 提出了广义模型^[11],新模型得到的结果更符合交通实测数据,且模型及其参数的含义更加确切,解决了前面模型中可能出现的车辆碰撞问题。

在跟驰模型的研究过程中,从传统的经典物理学、统计学、心理学到控制论、模糊数学、计算机仿真技术等,都得到了广泛应用并开发出了诸如基于期望间距的模型、基于驾驶员的心理反应的模型、模糊逻辑模型和神经网络模型等各种模型,跟驰模型的研究不断深化、精度不断提高。

此外,元胞自动机模型作为粗粒化的方针方法,也从车辆交通行为角度描述了车辆状态更新模型。将元胞自动机理论应用于交通系统,最早由 Cremer

和 Ludwig 于 1986 年提出^[12]。现有的元胞自动机交通流模型又可以分为两类:研究高速公路交通的模型和研究城市网络交通的模型。这两类模型中最为著名的分别是由 Nagel 与 Schreckenberg 于 1992 年提出的 NaSch 模型^[13]和由 Biham 等在同一年提出的 BML 模型^[14]。而这两个模型都是在以 Wolfram 命名的 184 号模型的基础上发展而来的^[15]。

1.2.3 基于特征统计的车辆交通行为建模方法

基于特征统计的车辆交通行为建模方法,介于车辆交通行为、交通流统计建模方法之间,其仍然是以单个运行的车辆作为研究对象,但车辆的行驶规则不像微观模型中的跟驰换道那么精密,也不按照宏观的模拟方法将交通流作为可压缩流体来处理。相反,对车辆的控制根据不同的建模方法而异,其中主要代表有车头时距分布模型和基于概率描述的气体动理论模型。

车头时距分布模型是 Buckley 在三个主要阶段原有的泊松模型的基础上进行改进而提出的,该模型认为车头时距为服从某种分布的独立随机变量^[16]。车头间距分布模型的最大缺陷在于,其假定了所有的车辆都是一样的,这样车头间距所服从的概率分布函数独立于车辆类型、驾驶员和行驶过程等因素,后来 Hoogendoorn 等提出了基于多辆类别的车头间距模型^[17],对其进行了完善。

气体动理论模型以描述交通流中车辆的速度分布函数的动态变化为主,是由 Prigogine 和 Herman 于 1971 年首次提出的^[18]。模型采用气体动力论的思想来描述交通流,将车辆看成是相互作用的粒子,该方法通过积分相关相空间密度分布函数的 Boltzmann 方程,然后引入近似关系来封闭方程组。在该模型中,期望速度分布由道路性质决定,与驾驶员无关。随后,Paaveri-Fontana 对模型进行了改进,将驾驶员对期望车速的影响考虑其中^[19]。1996 年,Helbing 在考虑车辆加速度和相互作用的基础上研究了驾驶员的个人行为,提出了基于动力论的连续介质模型。2001 年,Hoogendoorn 和 Bovy 提出了广义气体动力论交通流模型^[20],建立了统一的建模框架,该模型形式化地描述了交通中涉及的所有因素,包括汽车、自行车、行人等各种交通实体混合的交通情形。

1.2.4 交通流统计建模方法

交通流统计建模方法将交通流作为大量车辆组成的可压缩连续流体介质,研究车辆集体的综合平均行为,其单个车辆的个体特性并不显示出现。因

此,采用宏观方法建立的交通流模型也称为连续模型。

1955年,Lighthill和Whitham根据流体力学理论,建立了第一个交通流统计模型^[21],1956年,Richards也独立提出了类似的理论^[22],后人称之为LWR模型。他们首先根据一阶连续介质模型论证了交通激波的存在并讨论其特性,然后根据相应理论建立起交通流的连续方程,从而解决了在一定条件下的交通流问题。但该理论认为车辆速度始终满足平衡速密关系,因而不能正确描述实际上多数处于非平衡状态的车流运动,无法得到车流在一定条件下失稳、形成时走时停等交通现象。为了解决此问题,1971年,Payne在LWR理论的基础上,引入一个动力学方程构建了一个新模型^[23],允许速度偏离平衡速密关系,能更准确地描述实际车流运动,可以得到非线性波传播特性,如堵塞的形成和疏导,又能分析车流的小扰动失稳、走走停停的形成等特性,推进了连续模型的研究。随后,Whitham也建立了类似的模型,称之为PW模型^[24]。

20世纪70~90年代,学者们发展了不同形式的高阶连续模型,如在PW模型中加入了黏性项,该模型可用于表现拥挤状态的交通流分析^[25]。Michalopoulos等在动力学方程中加入了摩擦项,该模型考虑了道路几何形状对交通流的影响^[26]。吴正针对低速混合交通情况,提出了一维管流模型^[27],该模型引入了交通流状态指数,能够实现与实测交通流数据紧密结合。但这些模型存在普遍问题,就是后车的扰动会影响前车的行为,导致在某些条件下,车辆会出现速度小于零的情况。姜锐等针对这一问题,提出了一种速度梯度模型^[28]。Huang采用流体力学的方法研究了连续模型中的时走时停交通和交通拥堵^[29],Gupta和Katiyar提出了一种基于跟驰模型的连续模型^[30]。

1.3 基于复杂系统理论的城市道路交通系统 动态性建模研究

随着城市道路交通系统的不断发展,城市交通管理与控制工作面临着越来越复杂的各类城市道路交通系统日常运行中存在的问题;传统的分析理论与方法在这些方面存在的不足使城市道路交通领域的研究者们将复杂系统理论引入城市道路交通系统各类问题的解决。复杂系统理论为解决城市道路交通系统各类问题提供了新的思路、理论与方法;同时,城市道路交通系统为复杂系统科学中的理论与方法提供了应用背景与平台。

复杂系统理论属于基础学科的范畴,它所关心的科学问题存在于几乎所

有的学科研究领域。因此,对复杂系统理论的研究是各个学科所共同关注的。普适化的复杂系统理论的研究目前处于初级阶段。来自各个研究领域的研究者从各自的领域出发对复杂系统进行了定义和特征描述,这些定义与描述紧紧依附于某个研究领域而导致普适性的缺乏。因此,复杂系统仍然缺乏一种被广泛接受的基础性描述。在复杂系统理论研究中,当前的研究重点仍然集中在理解复杂系统和解释个体与整体之间的关系等方面。

涌现是复杂系统理论中最为重要的概念之一,它不仅揭示了系统组件与系统整体之间的联系,而且是复杂系统区别于其他系统最主要的特征之一。理解涌现是理解复杂系统的最主要的任务之一。涌现的定义和描述更是当前各领域研究中的难点;同时,在理解涌现的基础上,如何定义涌现相关的方法、实现个体和相互作用关系以及系统整体行为之间的形成机制是涌现理论相关研究的难点。

大型城市道路交通系统是一类典型复杂系统,为复杂系统理论的研究提供了问题来源与应用平台。近年来,随着各大城市规模的不断增大,城市道路交通系统所面临的问题日益突出:交通系统效率持续下降,拥堵现象不断增加等。从本质上认识并解决这些问题已经成为日常交通管理的当务之急;同时,正确认识城市道路交通系统的本质是交通系统行为分析、交通状态预测与交通管理措施制定的基础。传统的交通流理论已无法有效应对当前城市道路交通系统中亟待解决的问题,从复杂系统理论角度出发认识城市道路交通系统所面临的问题已成为当前研究城市道路交通领域的趋势。

当前,城市道路交通系统中较多地采用建立网络化模型的方式进行行为建模与分析等相关研究。大型城市道路交通网络的动态特征分析是城市交通运行状态评估、宏观交通管理与决策支持等研究的重点。北京市道路交通系统近年来得到了爆炸式的快速发展,机动车保有量已突破 500 万辆,并且仍以惊人的速度增加;系统整体日常运行状态的评估及态势预测等问题的解决已经迫在眉睫;同时,完善的交通流数据监测网络为各种类型的建模与分析方法提供了较完整的数据支持。如何利用北京市道路交通网络的数据实现对城市道路交通网络的动态性建模与分析、交通网络的运行行为特征分析及描述是现阶段人们所关心的热点。

综上所述,复杂系统理论、城市道路交通网络及北京市道路交通网络所面临的各类抽象的、具体的问题为这些领域的研究者提供了前所未有的机遇和挑战;这些问题的解决将会为上述各领域的发展做出极有意义的贡献。

1.4 研究动机与目标

城市道路交通系统所具有的静态拓扑约束的动态交通流网络特征是本书的研究重点。城市道路交通网络动态性建模的核心是描述从微观涌现的宏观行为特征,并对此类宏观行为的主要特征进行分析。宏观上观测到的现象很显然不是微观行为的简单映射。比如,交通流分配不均衡导致了拥堵,进而影响整个交通网络的结构变化,这不能简单地认为是某条路段上的车辆或某个车辆的行为直接影响产生的,而是涉及对城市道路交通系统这一类复杂系统的建模问题。从复杂系统理论的角度认识并分析城市道路交通系统的行为特征,建立能够对城市道路交通系统宏观状态进行分析的模型和方法,能使我们从本质上认识城市道路交通网络结构性特征及其演进过程。

复杂系统研究领域当前的热点是涌现形成与演进描述理论与方法的相关研究。本书针对复杂系统理论中对涌现理论相关方面理解的不足,试图通过抽象的定义方法提供对系统涌现行为的清晰理解。本书在深刻理解涌现及其形成机制和演进模式的基础上,提出完整的解释涌现形成机制及演进过程的方法;使涌现的相关理论得到清晰的说明,同时也能够为具体应用领域的研究工作提供指导。

城市交通网络的运行状态评价及态势分析方法是本书研究的核心与重点。本书针对近年来城市道路网络动态性建模与分析研究中存在的问题,以复杂系统涌现行为分析理论为出发点,试图通过描述交通网络行为演进的内在规律,提出一种适用于城市道路交通网络的行为评价和态势分析模型,为城市道路交通网络的复杂性分析研究奠定理论基础。

同时,本书以北京市道路交通网络作为城市道路交通网络行为复杂性分析理论和方法的研究平台,试图通过北京市道路交通流数据得到一类大型城市道路交通网络行为演进的基本规律;并以北京市道路交通网络为例深入探讨城市道路交通网络行为演进过程中的特征与态势,形成可扩展可移植的城市道路交通网络行为建模与分析的理论与方法,最终实现复杂系统涌现行为的动态性建模与分析这一研究目标。

1.5 技术路线

本书所完成的工作面向解决具体、抽象层次上的问题,这些问题相互关

联、互为支撑,使本书的内容形成从抽象到具体、从理论到应用的有机整体。

图 1.1 较为简洁地展示了本书在各抽象层次上完成的主要工作和它们之间的相互关系,其中包括较高抽象层次的复杂系统中涌现形成与演进过程的讨论,网络整体的拓扑特征与动态性建模的研究,以及具体的面向北京市道路交通网络的动态行为特征建模与分析方法及实验。

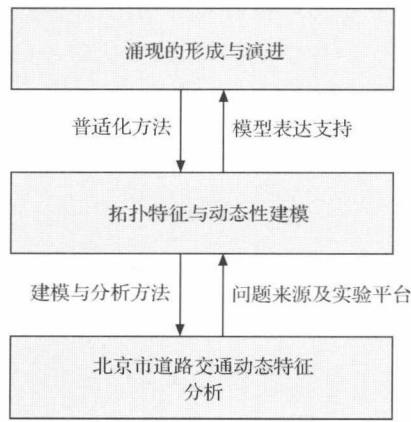


图 1.1 各抽象层次上的主要研究内容及关系

自下而上的问题发现与抽象过程和自上而下的方法描述与数据验证过程是本书所完成工作的整个过程,其中包含了对复杂系统层次、城市道路交通网络层次和北京市道路交通网络层次各种问题的阐述与分析。

首先,本书通过对抽象层次较高的复杂系统理论作了较为完整的综述;在此基础上,本书对复杂系统及涌现作了清晰的描述与自然语言定义。通过构造涌现相关的一系列概念,本书对涌现的形成和演进作了基本的定义,指出了涌现行为在系统状态空间中演进的基本特征和构建基于这些特征的建模与分析方法的基本过程。

在城市道路交通网络行为特征和态势分析工作中,引入本书提出的涌现行为演进过程建模与分析理论,结合近年来复杂网络的研究成果,进一步提出面向城市道路交通网络的网络动态性建模与分析方法。该方法通过模态辨识的方法获得城市道路交通网络运行的基本模态和模态作用模式,并对每个模态作了网络子动态性定义,同时分别建立了对应的基于演进过程的网络子动态性模型,最终通过模态相似性测度评价方法实现对任意时段内各模态对网络行为演进所产生影响的评价,获得该时段网络行为演进的主模态和模态作