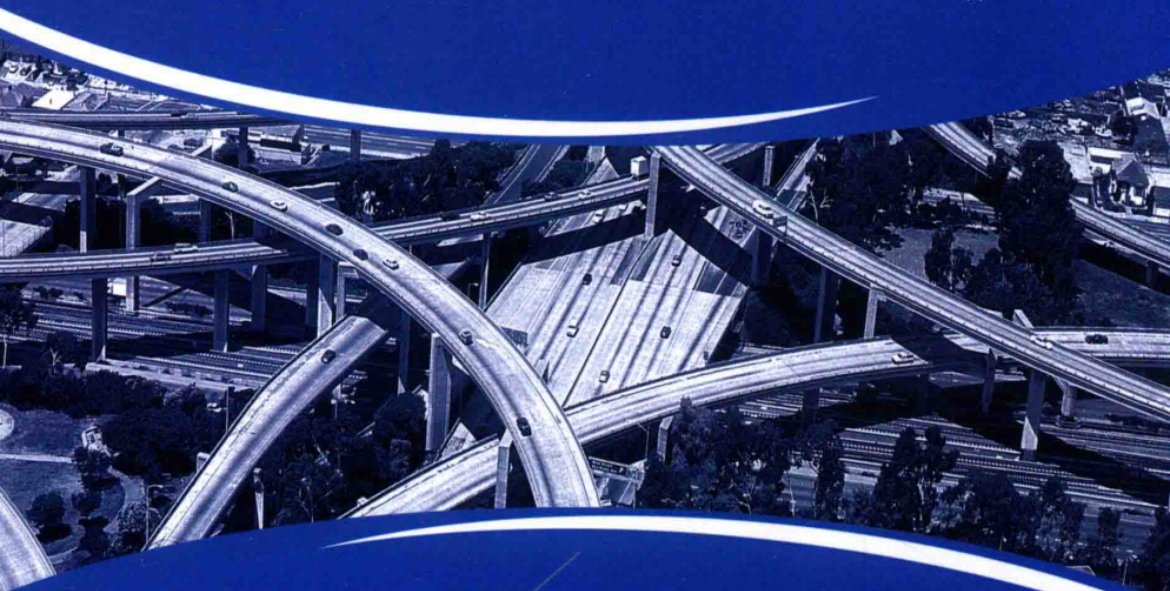


城市公共交通 网络结构与网络均衡研究

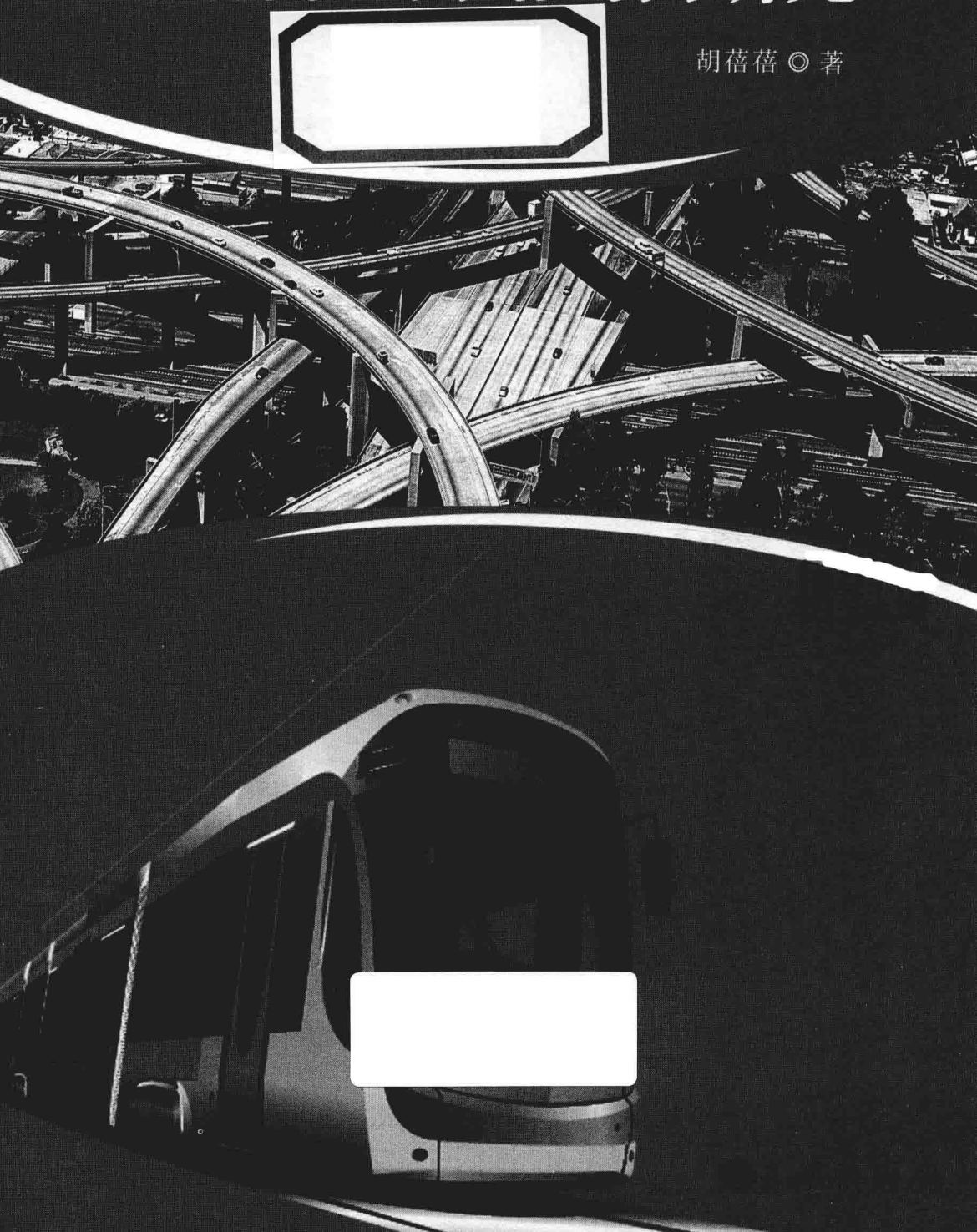
胡蓓蓓 ◎ 著



九州出版社
JIUZHOU PRESS

城市公共交通 网络结构与网络均衡研究

胡蓓蓓 © 著



图书在版编目 (CIP) 数据

城市公共交通网络结构与网络均衡研究 / 胡蓓蓓著.

-- 北京: 九州出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-5108-7427-7

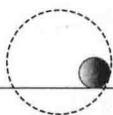
I. ①城… II. ①胡… III. ①城市交通-交通运输管理-研究 IV. ①U491. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 177004 号

城市公共交通网络结构与网络均衡研究

作 者 胡蓓蓓 著
出版发行 九州出版社
地 址 北京市西城区阜外大街甲 35 号 (100037)
发行电话 (010) 68992190/3/5/6
网 址 www.jiuzhoupress.com
电子信箱 jiuzhou@jiuzhoupress.com
印 刷 廊坊市海涛印刷有限公司
开 本 710 毫米×1000 毫米 16 开
印 张 11.5
字 数 200 千字
版 次 2018 年 8 月第 1 版
印 次 2018 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5108-7427-7
定 价 40.00 元

★ 版权所有 侵权必究 ★



城市交通系统是一个复杂的巨系统，其持续、稳健的发展，是我国经济社会实现新的跨越的有力支撑。优先发展公共交通是历史的经验，也是城市发展的必然。因此，从整体和系统的角度研究城市公共交通网络结构和均衡问题具有重要的理论和现实意义。复杂网络理论是研究复杂系统的重要工具和方法，本书基于复杂网络理论，从一种新的视角对城市公共交通网络进行了构建。在过去的研究中，对城市公共交通网络的构建基本上都是停留在单独的公交网络或者单独的地铁网络层面上，而本书则是从出行者的主观出行目的出发，基于“公交—地铁”换乘理念，构建组合出行方式下城市公共交通网络。通过分析组合出行方式下城市公共交通网络的结构特性和网络均衡来探索城市公共交通网络的内在规律和发展特点，以向城市公共交通规划者提供新的思路及视角来推动城市公共交通事业的进一步发展。

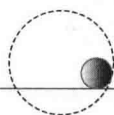
本书首先对所构建的组合出行方式下城市公共交通网络进行了详尽的描述和解释，对各网络指标和定义进行界定和阐述。然后在该网络的基础上，从度及度分布、平均路径长度、集聚系数、网络密度和网络效率这五个网络特性指标来分析城市公共交通网络的宏观结构特征，从网络的强连接成分及派系来分析城市公共交通网络的微观结构特征。进而，结合网络中心性理论，运用非参数方法系统地分析了城市公共交通网络的点度中心性、接近中心性、介数中心性及其演化趋势，研究了城市公共交通网络中心性与其网络结构之间的相互趋势关系。通过改进在不同攻击方式下的网络稳健性算法，研究网络中心性下的城市公共交通网络的稳健性，挖掘城市公共交通网络节点的失效规律和特点，以探索网络结构特征和网络稳健性之间的潜在关系。最后，基于网络均衡理论和网络优化理论构建组合出行方式下城市公共交通网络均衡模型，并对模型进行求解，通过具体的实例验证所提出的网络模型的有效性及实用性。

本书的研究取得了一系列有价值的研究成果:

1) 基于“公交—地铁”换乘理念, 构建组合出行方式下的城市公共交通网络, 通过分析城市公共交通网络的度分布和集聚系数等各个网络指标, 探索了该网络的“小世界”特性, 同时发现城市公共交通的网络规模和网络效率并不一定是正相关的关系。城市公共交通网络中心性的演化趋势与其网络结构的演化特征是相互关联的, 网络中心性的位置参数变化与网络的拓扑结构有关联性, 而网络中心性的尺度参数变化则与城市公共交通的政策、规划及发展速度等方面有关联。

2) 城市公共交通网络的点度、介数和接近中心性分别表达了网络节点间的直达关系、换乘关系和不受其他节点严重影响的关系。基于网络中心性对整个网络的稳健性进行分析, 发现点度中心性和介数中心性高的节点对网络的整体稳健性影响显著, 也就是说, 城市公共交通网络中具有较多直达关系或者换乘关系的节点对整个网络的稳健性至关重要, 而其中换乘关系又比直达关系更重要。城市公共交通网络受到攻击后, 随着站点被攻击比例的增大, 网络的平均路径长度会经常出现先上升再下降再上升的情形, 直至网络彻底崩溃。造成这种情形的主要原因是某些站点的失效可能会导致原来与最大连通子图相连接的一个或两个小子图从该最大连通子图中被分割出去, 也就是说, 随着站点被攻击, 某些站点的失效会导致某一或某些公共交通子网络被孤立, 同整个混合公共交通网络失去连接。

3) 本书实现了网络均衡模型在组合出行方式下城市公共交通网络中的应用, 根据 Wardrop 理论, 网络流总会自动在现有网络结构和出行需求下自动达到一个最佳的均衡状态, 而网络结构的变化会对整个网络的均衡情况产生较大的影响。武断地增加网络中的节点或者连线并不一定总能提高网络的全局效率(降低平均总成本), 因此在既定的城市公共交通网络中规划新的公交、地铁站点和线路, 需要综合考虑整体公共交通网络的结构特征, 而不能单纯地依靠增加直达线路达到目的。



第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 相关领域研究评述	5
1.3 研究内容与方法	19
第2章 复杂网络理论基础	23
2.1 网络图的基本概念	24
2.2 网络拓扑结构指标	28
2.3 复杂网络模型	33
2.4 网络中心性	39
2.5 网络的鲁棒性与脆弱性	42
2.6 交通网络均衡理论	46
2.7 本章小结	52
第3章 城市公共交通的发展状况分析	53
3.1 城市公共交通的发展历程	53
3.2 城市公共交通的类型及特点	55
3.3 国外城市公共交通发展现状及历史经验	59
3.4 我国城市公共交通的发展现状	62
3.5 我国城市公共交通存在的问题	63
3.6 本章小结	65
第4章 组合出行方式下城市公共交通网络模型的构建	66
4.1 混合城市公共交通网络和组合出行方式	67
4.2 组合出行方式下城市公共交通网络	68

4.3	组合出行方式下网络的节点与边	71
4.4	本章小结	77
第5章	组合出行方式下城市公共交通网络结构特征分析	78
5.1	组合出行方式下城市公共交通网络演化的过程	78
5.2	组合出行方式下城市公共交通网络宏观结构分析	81
5.3	组合出行方式下城市公共交通网络微观结构分析	86
5.4	本章小结	94
第6章	组合出行方式下城市公共交通网络中心性演化趋势分析	96
6.1	组合出行方式下城市公共交通网络的非参数检验含义	96
6.2	组合出行方式下城市公共交通网络的中心性	99
6.3	组合出行方式下城市公共交通网络中心性的趋势分析	104
6.4	网络中心性与网络结构的趋势关系	113
6.5	本章小结	115
第7章	组合出行方式下城市公共交通网络结构稳健性分析	116
7.1	网络稳健性的衡量指标	116
7.2	攻击方式	117
7.3	蓄意攻击下的城市公共交通网络稳健性	119
7.4	随机攻击下的城市公共交通网络稳健性	130
7.5	组合出行方式下城市公共交通网络稳健性演化趋势及对比	131
7.6	本章小结	133
第8章	组合出行方式下城市公共交通网络均衡分析	135
8.1	组合出行方式下城市公共交通网络均衡模型的构建	135
8.2	组合出行方式下城市公共交通网络均衡模型的求解	143
8.3	组合出行方式下城市公共交通网络均衡的实验分析	147
8.4	本章小结	154
第9章	结论与展望	155
9.1	本书的主要结论	155
9.2	本书的主要创新点	157
9.3	有待进一步研究的问题	158
参考文献		159

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

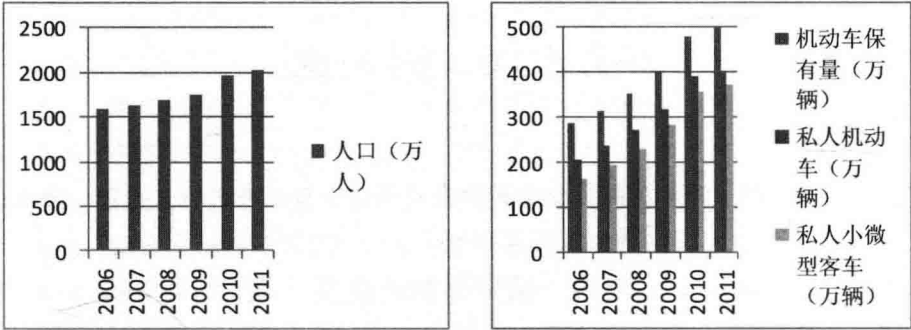
1.1.1 研究的现实背景

随着我国社会经济的发展,全国交通建设、运营管理及服务都呈现出崭新的局面。交通基础设施建设以前所未有的规模稳步推进。城市公共交通的持续、稳健发展,为我国经济社会实现新的跨越式发展提供了有力的支持。在交通供给持续加大的同时,交通需求也正在迅速增长。经济的快速发展是居民生活机动化的最主要驱动力,无可避免。汽车正在快速进入到每个家庭中,由此也促进了居民的出行量以及出行方式的多样化。当交通供给的增长与交通需求的增长不完全匹配,甚至产生矛盾时,城市的交通系统就会面临诸如交通拥堵、交通事故、环境恶化等各种问题。

城市交通系统作为交通活动的载体,为城市交通活动提供了功能发挥与价值体现的物质基础。改善城市交通系统性能,为城市居民提供良好服务,是国内外学术界与管理者的探索目标。近年来,私家车保有量的快速增长、城市道路的交通拥堵、交通安全等问题成了城市的慢性病,不仅对城市的各项功能实现产生负面影响,而且也使得各大中城市的宜居性下降。

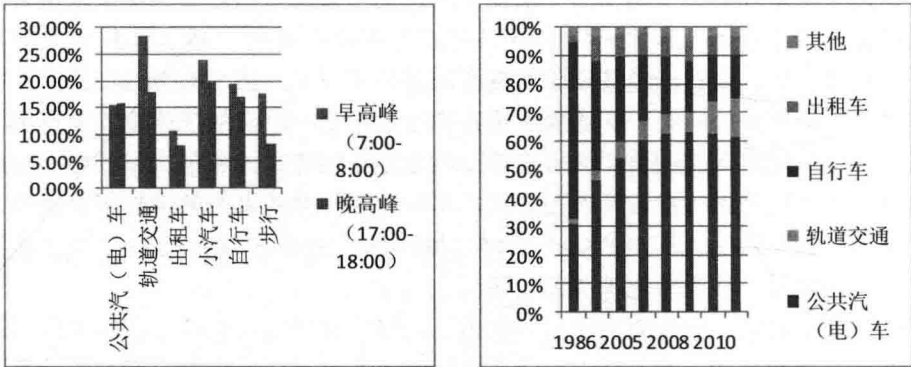
随着我国城市化进程加快、居民收入不断增加,城市人口机械性增长、私家车保有量激增、道路交通量急剧增加等“城市病”不断蔓延。比如北京,近年来常住人口已经从2006年的1581万人达到了2011年的2018.6万人,2011年北京市机动车、私人机动车、私人小微型客车的年平均净增量分别达到11.6%、14.3%和18.2%,如图1-1所示。由此可见,在人口膨胀与私家车保有量增加的双重作用下我国大中城市交通拥堵已逐渐步入常态,而拥堵及其

导致的交通事故增加、环境污染加剧等间接影响，使得我国城市面临更为复杂、更难根治的“城市病”。交通问题，严重影响了城市运行效率，降低了城市居民的工作效率与生活质量，已成为限制城市健康发展的重要瓶颈。



数据来源：北京市统计局与北京交通发展研究中心

图 1-1 2006-2011 年北京市常住人口数量图及北京市机动车与私人机动车保有量发展图
Figure 1-1 The Permanent Population Graph and Motor Vehicles and Development of Private Vehicle Ownership Graph in Beijing (2006-2011)



数据来源：北京交通发展研究中心

图 1-2 早晚高峰出行量占全天出行量的比例与历年交通出行方式构成
Figure 1-2 The Proportion of All trips in Morning and Evening Peak and the Composition of Transportation Way

实现交通均衡的基本问题的基础是用户总是会选择便利、舒适、低成本的出行方式。而现在的实际情况是私家车为居民提供了极大的便利。比如在北京，尽管交通拥堵严重，但是据统计研究表明，私家车出行相比较其他的出行方式，还依然具有便利、舒适和高效的特点。从另一个方面来说，公共交通系统的设计以及运行等在各个方面还有待改进。然而，当城市越来越多的人开始

使用私家车以后,整个城市交通系统就变得越来越低效。也就是说,个体所选择的出行方式通常与私家车、公共交通和行人交通组成的交通系统所能达到的最佳性能状况有差异。事实上,几乎所有的大中城市都没有很好的计划和控制好交通系统,如果大量的交通能被舒适、高效的公共交通取代,那么整个城市的交通效率也将会极大地提高。通过图 1-2 可以看到,北京市早高峰和晚高峰公共交通(公共汽车+轨道交通)的出行量占全天出行量的 43.8%、33.6%。从 1986 年至 2011 年,公共交通的出行比例是稳步提升的,尤其是 2011 年,公共交通(公共汽车+轨道交通)的比例达到了 42%。这也充分验证了我国政府部门已经认识到了发展公共交通对缓解大中城市交通拥堵、降低污染、实现建设宜居城市目标的重要作用。为了缓解城市的交通压力,优先发展公共交通成为世界各大城市解决交通问题的重要有效方案。

随着各大城市积极发展公共交通,公交网络(本书指地上公共汽车的网络)和地铁网络不断完善,从而人们依赖公共交通出行的方式也在逐渐发生变化。在如今的出行活动中,人们有了更多的出行方式选择,人们可以单独依靠公交车、地铁出行或者通过“公交—地铁”换乘方式出行,也就是人们选择组合出行方式成为各大城市居民依靠公共交通出行的普遍现象。所谓组合出行方式,指的是人们在出行过程中需要换乘一种或多种交通工具的出行方式。

城市人口、车辆的不断增长以及交通网络结构不合理等一系列因素,严重影响了公共交通系统的运行效率,特别是在上下班高峰时段,公共交通出行方式舒适度低、换乘不便及乘客滞留率高等问题凸显。因此,分析组合出行方式下城市公共交通的结构特征和内涵,以促进城市公共交通系统的网络结构优化,提高公共交通系统运营效率、最大程度的满足乘客出行需求成为目前亟须解决的问题。

1.1.2 研究的理论意义

城市公共交通网络系统是一个复杂巨系统,展现出极强的开放性、非线性、不确定性、模糊性、关联性、动态性等各种特性,在交通上主要表现为网络线路的非线性叠加、地面公交与轨道地铁的属性重合与交叉关联、乘客出行路线的随机动态决策、网络内部微扰与外部噪声造成的线路选择模糊、多线路多时段面临客流的快速涨落和线路本身运行的不稳定弛豫等等。要从根本上理解城市公共交通网络系统的复杂性和涌现性,首先要从系统本身出发,刻画系统中的个体与个体以及个体与整体之间的相互作用关系,以理解复杂系统中的宏观行为。然而,复杂系统的涌现性现象并不是单纯的个体行为,而是具有整体性和全局性的特点,因此不能单纯地通过分析的方法去理解复杂系统。因

此,要理解复杂系统的本质和行为,最直接也最简单是从理解复杂系统的拓扑结构开始。从这一点来说,分析和理解城市公共交通网络系统的网络结构是理解城市公共交通系统运行最直接、简单且行之有效的方法。

从复杂网络结构入手研究城市公共交通系统复杂性,首先需要解决城市公共交通网络的构建问题和网络结构的解析问题。网络的拓扑结构是研究复杂网络内在涌现性的前提和基础,然而,城市公共交通系统极其复杂而且网络规模巨大,直接描述并测量整个系统的网络结构并不能让人们直观的了解整个系统的运行机理。因此,将整个网络从整体到局部到个体,从个体开始研究个体的结构行为与整体系统之间的关系,以局部涌现性推断整体涌现性的理解方法是我们理解整个城市公共交通系统的重要参考方法。

从复杂网络的角度分析城市公共交通系统的网络结构,有助于人们发现和获得城市公共交通网络的本质和内在规律。城市公共交通系统的结构优化包含两方面的内容:一是网络拓扑结构的优化可以使复杂系统本身的结构得到优化,从而提高效率,降低成本;二是系统本身在结构优化的前提下具有较强的结构稳健性,可以自动对系统突发事件进行抵抗以及系统自我修复,也就是系统稳定不易破坏。网络结构具有较强的稳健性暗示了复杂系统本身将会具有较强的稳健性,对城市公共交通系统的稳健性的分析有利于探索系统内在规律,从而保证整个公共交通系统能持续、稳定地发挥其功能。

1.1.3 研究的实际意义

城市公共交通系统是一个复杂系统,复杂系统的自身特点诸如非线性关系、涌现性等复杂性具有整体和全局的特征,不能通过传统分析的方法去理解。因此,利用复杂网络科学的方法,将复杂系统抽象为复杂网络,使宏观具象的城市公共交通系统转换为抽象的数理模型,利用统一、一致的复杂网络的研究方法来研究城市公共交通系统,可以加深对公共交通系统的整体认识,理解其内在相互制约、相互关联、相互影响的非线性关系和涌现关系,从而进一步地理解城市公共交通系统的整体运行规则和特点。

在城市公共交通网络中,网络的结构与其网络功能是紧密相关的,其结构决定了现实网络的功能。因此,研究城市公共交通网络的结构也是众多交通网络研究者所关注的问题之一。通过复杂网络的方法,利用网络结构理论认识城市公共交通系统,能够使人们对城市公共交通系统产生整体、全局的正确认识,使人们从抽象的全局角度理解公共交通系统的运行机理,从而建立起对诸如交通拥堵等城市交通系统问题的新认识。

在城市公共交通网络中,如果某些关键节点(如枢纽站点)受到人为因

素或者自然因素影响而失效,这极有可能造成城市公共交通网络的局部拥堵甚至造成网络全面崩溃的局面,因此,研究城市公共交通网络的稳健性对于识别网络中的关键节点、分析网络面临不同攻击方式的稳健性及提出城市公共交通网络优化的方法,对于提高城市公共交通网络设计规划者在设计和优化城市交通线路、站点设计、提高城市公共交通网络的稳健性及畅通性等公交事业的发展具有重要的现实意义。

1.2 相关领域研究评述

1.2.1 复杂网络理论

网络科学不是单个领域方面的学科,而是许多领域汇聚的结果,从而研究其性质和演化等规律的一门交叉理论学科。网络科学的兴起可以看作是图论、控制论、社会网络分析、物理学、生物学以及复杂科学等多种学科发展的结果。网络科学的发展至少经历了两次重大的变迁:从数学理论到图的应用,从应用到“相互连接到一起的所有东西”的一般集合。到目前为止,网络科学的发展可以大致划分为三个主要的阶段:(1)早期的网络发展阶段(1933-1966),网络科学还是数学中的图;(2)中期网络阶段(1967-1998),此时网络科学的一些研究成果已经运用到相关的领域中了;(3)现代阶段(1998-),网络科学的先驱们为网络科学的当前定义打下了基础,并证明这些基础具有现实意义。最近几年对复杂网络的研究显得更加有意义,鉴于计算机数据处理和运算能力的快速发展,研究者发现大量真实的网络大多是兼具规则网络和随机网络统计特性的网络。其中首次提出“小世界”和“无标度”的分别是:Watts 和 Strogatz 和 Barabási 和 Albert。随着“小世界”和“无标度”等概念的提出,从物理学、社会学及生物学等众多学科都纷纷掀起了研究复杂网络的热潮。现实中很多网络具有复杂网络的某些演化特征。Newman 将这些复杂网粗略地分成四类:社会网络、生物网络、技术网络和信息网络。

社会网络所表达的是人,不是独立的个体,而是社会中的人,人与人通过各种关系连接起来,比如朋友、婚姻、商业等,这些连接在宏观上会呈现出一定的统一模式。目前看来,研究比较多的是科学合作网络、论文引用网络、演员合作网络等等。比如:1965年,Price 首次对论文引用网络进行了研究,指出网络节点分布服从幂律形式,论文的引文网络具有明显的“无标度”特征;

1998年, Redner 研究了科技论文引用网络, 也得出类似的结论, 认为网络节点度分布服从幂律形式; 2012年, 林友芳等人构建了一种边稳定系数模型并提出了一种能表达个体间关系紧密度的完全信息图模型, 从而开发出一种有效的社区发现算法; 2012年, 徐磊等人将企业规模和网络客体对象的差异作为面向集群企业的情景变量, 考察了多重网络嵌入, 探索了商业集群内外网络和技术网络关系嵌入强度对其创新能力的作用; 2015年, 曹玖新等人基于 k -核研究出了核覆盖算法, 用于解决社会网络规模过大时存在的不可扩展和低效率问题; 戚湧等人以江苏省为例, 基于社会网络分析方法构建了产学研协同创新网络, 探索了江苏产学研协同创新各主体之间的关系情况; 2016年, 马捷等人通过分析社会网络的信息生态链, 基于系统动力学原理研究出了其运行机制, 为社会网络的信息生态链的运行优化提供原理支持; 牟冬梅等人通过分析近五年来国内外基于社会网络分析的文献, 提出了有关社会网络分析的更严谨的研究范式和更明确的研究方法, 并且指出了社会网络分析的未来研究方向; 2017年, 李雷等人使用 K -means 聚类算法、Gills Sampling 方法和 BTM 主题模型构建了一个新的主题模型 U_BTM , 挖掘社会网络中潜在的用户主题及分布情况; 2017年, 张晓琳等人研究出了一种基于 MapReduce 分布式计算模型的算法, 即分布式节点分裂匿名社会网络隐私保护算法 ($D-VSSP$ 算法), 用于解决传统的社会网络隐私保护技术的低效率问题。

随着复杂网络的研究热潮, 生物网络的研究发展也相当的迅速。目前, 生物领域包括的网络主要有新陈代谢网络、蛋白质网络、基因调控网络等。生物网络的研究主要集中于探索活细胞内所有生物分子的行为以及它们的相互作用, 研究其网络的拓扑结构和网络动力学机制。如: 2010年, 许醇穗等人从复制机制与变异机制入手, 讨论了多种随机变异机制, 主要研究了变异机制对生物网络负关联性的影响; 2011年, 高蕾等人对生物网络的研究进展进行了评述, 利用度分布、集聚系数等网络特征值对现阶段生物网络的性质进行了研究, 并进一步对生物网络的聚类算法及主要建模理论做出了概括, 总结了如何构建生物网络模型及深入研究生物网络的结构特征等; 2012年, 丁德武等通过构造一个 ROS 区域蛋白质交互的复杂网络模型, 利用聚类分析方法和中心化分析方法; 从生物学的复杂网络角度研究了蛋白质之间的交互作用; 2016年, 时明等人提出了一种基于基因表达谱的融合生物网络拓扑特性的方法, 用以预测肿瘤患者的辐射敏感性程度, 从而有利于医生对肿瘤患者的医治, 即施行临床肿瘤性化疗; 2016年, 冯春来等人通过对比研究马尔可夫聚类算法、派系过滤算法、分子复合体检测算法、Girvan-Newman 算法这四种经典的生物网络分析方法, 指出其分别适用的领域, 例如, 马尔可夫聚类算法应用于有权

有向网络效果更好,且能发现星形结构模块,生物网络分析有助于在系统水平上理解疾病、中药和药物靶标之间关系;2017年,江珊等人对比分析了多种常用的复杂生物网络可视化的系统,并针对 Cytoscape 系统在可视化的建模过程以及在建模过程中使用到的布局算法进行对比研究,包括对数据进行网络分析和更改、使用 BINGO 插件进行基因注释、使用 AGILENT LITERATURE SEARCH (ALS) 插件搜索基因相互作用文献等;2017年,郭茂祖等人通过合理地引入 lncRNA 组学数据,构建了一个基于多组生物网络的挖掘方法,用以识别分析出癌症关键模块,有助于医学界对癌症的研究。

针对信息网络研究的领域主要有搜索引擎网络、网页关联网络和引文网络。此外,作为一个复杂网络,互联网在实际网络中呈现出小世界网络的特性。如:2002年,Yook 和 Moreno 研究了在 1997 年和 1999 年之间互联网在域名层次上的连接结构,研究表明网络呈现小世界网络的特性;2013年,赵蓉英等人采用社会网络分析方法,对国内外的高频作者合著网络以及高频关键词共享网络进行了分析比较,结果揭示了国内外该领域科学合作网以及该领域研究热点的异同点,促进知识的交流与学科发展;2013年,和振华等人通过分析中国科技法学校园视频点播系统 10 个月的点播日志,利用 gossip 协议和视频之间的社会网络关系属性,设计了一种新颖实用的基于社会网络的分布式视频推荐机制;同样,在 2013 年,罗文伯利用社会网络分析,针对围绕微博的新进研究分别以关系群体和微博应用功能为导做出综述,在此基础上讨论了未来社交媒体视角下的微博研究发展方向;2015年,穆丽文等人针对传统检测算法,对含有干扰频率成分的异常数据检测效率低下的问题,通过构建自适应陷波级联模型检测算法,以提高对异常数据的检测效率;2016年,李风华等人通过介绍天地一体化信息网络架构,以及卫星节点暴露、信道开放、异构网络互连等特征,并从物理层、运行层、数据层 3 个层面分析了天地一体化信息网络面临的威胁,并从物理安全、运行安全、数据安全 3 个层面对抗损毁、抗干扰、安全接入、安全路由、安全切换、安全传输、密钥管理等安全保障技术的研究现状进行了阐述。

复杂网络理论对很多现实中的技术网络结构给出了恰当的描述,互联网、计算机网络和交通等领域都受益于复杂网络理论与实践的进步。在了解网络结构特性的基础上进一步提高和改善网络的效能,已广泛应用在诸如提升网络搜索能力、强化网络抵抗恶意攻击能力以及提高抵抗拥塞能力等方面;1998年,Toru 对计算机网络中的拥堵现象进行了研究,结果表明发生拥堵的相变点取决于各个路由器对数据包采取的路由选择方式;随后,2001年,Arenas 等提出了一种描述通行网络结构的分层模型,分析了在不同条件下该模型的动态行

为;同样,在2007年,雷霆综述了当前基于复杂网络理论计算机网络拓扑研究的状况并指出了其中存在的问题,强调了将复杂网络理论应用到计算机网络,拓扑研究当中的必要性;2012年,郭仁东通过研究计算机网络的拓扑结构的概念和分类的分析,具体探讨了网络拓扑的形成机制;2017年,李向明研究出了一种能够智能监控计算机安全的方法,该方法能够把对计算机安全造成威胁的因素进行分类,然后利用智能监控系统对症下药,从而提高计算机安全智能监控的效率。

研究复杂网络时,过去科研人员通常把现实生活中的系统抽象为一个独立的网络,但是人们发现现实世界中几乎不存在独立的系统,很多系统之间都有着千丝万缕的联系。因此,近年来科研人员在研究复杂网络时,开始着力于研究多层网络。例如,研究社交网络时,人们会把现实生活中的人际关系网与互联网上虚拟世界中的人际关系网复合成一个多层的复杂网络;研究计算机网络时,人们会把服务器网络与终端系统网络复合成一个多层的复杂网络;研究交通系统时,人们会把航空、地铁与公交运输网络复合成一个多层的复杂网络。多层网络还包括多维性多层网络和依存性多层网络。在多维性多层网络中,每一层都有一个独立的网络,但每层网络间的节点之间不存在连边,或者只有当不同层次网络的节点相同时,才存在连边。2010年,Buldyrev S V首次提出依存性多层网络这一概念。

依存型多层网络是在多维型多层网络的基础上突破网络的节点必须具有相同的质这一限制产生的,从而延伸了多层网络的发展方向,以使人们能够更加深入、更加细致地研究多层网络的性质。在依存性多层网络中,尽管在每个独立的网络内部,它们的节点都分别具有相同的质,每个独立的网络间的节点却具有不同的质,且连边也具有不同的质。后来,研究者们又提出在不同层次的网络中,它们的节点之间可能存在一对一、一对多、多对多的关系。2015年,张欣指出多层网络的理论模型不是单个的独立网络的简单叠加,而是这些单个的独立网络互相依存和交互的体现。

不管是依存型多层网络,还是多维型多层网络,它们都只是多层网络的两个分支,即两个特例,如何提出一个能够概括不同类型的多层网络的概念模型就成了该领域的研究热点。多层网络是近年来刚刚兴起的一个研究方向,现在还处于起步阶段。尽管如此,却已研究出了一系列非常有价值的成果,为网络理论的发展做出了贡献。

1.2.2 城市公共交通网络结构与稳健性研究

1.2.2.1 城市公共交通网络结构的复杂性研究

使用复杂网络理论研究复杂系统的主要目标是借助对复杂系统的结构特殊性研究,解释其内在动力学行为及其涌现规律。城市公共交通网络是一个复杂的巨系统,城市公共交通网络的时空演化的复杂性吸引了来自不同领域的学者对其网络特性进行研究。

国外学者将复杂网络理论应用到城市交通领域是从21世纪开始的。比如,2002年,Parongama利用复杂网络理论研究了印度的铁路网络,结果表明其铁路网络具有小世界特性;2002年,Latora也研究了波士顿的地铁网络,结果表明当地的地铁网络也具有复杂网络的“小世界”特性;随后,2004年,Seaton对波士顿和维也纳的铁路线网进行了拓扑特性分析,得出两个铁路线网都具有“小世界”特性的结论。与此同时,借助于复杂网络理论对城市公共交通的研究也取得了一定的进展。并且,城市公共交通网络的构建方式主要是基于公交线路、公交站点及公交换乘建立的,比如,2005年,Sienkiewicz对波兰的22个城市的公共运输网络的拓扑结构进行了分析,结果认为公共运输网络的网络度分布服从指数分布;2005年,Park等也构建了城市交通网络,分析了其网络的基本特性,并研究了网络交通关系与其拓扑结构之间的相关性;2007年,Zheng等研究了无标度网络上拥挤效应的流量动态特性;Wu等则对不同拓扑结构网络上的拥挤动态模型进行了研究。2009年,Von Ferber等对德国柏林及法国巴黎的城市公交网络的结构特性进行了分析,其结果表明在L空间和P空间下,这些城市的公共交通网络的度分布均服从指数分布。

同样,国内也有不少学者对我国城市的公共交通网络也进行了一系列的研究,得出了不错的研究成果。2006年,Li等也对中国十大城市的公交网络的拓扑特性也进行了研究,分析总结了公交网络的结构特征。在此之后,2007年,Lu等也应用复杂网络理论研究了城市公交网络的整体框架。2008年,莫辉等研究了城市交通运输网络复杂性的根源;2009年,王波以实际网络为基础建立了加权网络演化模型和无标度网络模型,研究了公交网络的拓扑统计特性,并基于此,设计了公交换乘的算法,研究了整个公交网络的社团结构和网络的传播行为。2011年,赵凯通过运用复杂网络方法,分析了包含城市公交线路网络和公交站点网络的城市公交网络的几何性质,总结出了公交线路网络具有“小世界”特性所需要满足的条件;王波通过网络机器人搜集了杭州公交网络的真实数据,分别用Space L、Space P和Space R三种方法对其该网络

进行建模,随后分析了其基本的网络统计特征。2012年,符光梅等人针对公交网络路径搜索问题,从复杂网络的角度进行研究,根据出行者的实际需求,提出一种基于节点可达度的公交多路径搜索算法;张兰华也从复杂网络拓扑学角度对泰安市的公交网络进行了分析,从平均路径长度、聚类系数及节点度等指标上分析了现行公交网络中存在的问题。

2013年,王勇通过实证分析中国大陆2个公交网络中的度和最短路径之间的拓扑关系,发现物理基础设施层中节点的度和最短路径之间呈现出很强的负相关关系;黄爱玲以乘客动态行为的城市公共交通系统作为研究对象,运用复杂网络理论和公交系统规划理论,对城市公交加权网络的拓扑结构特征和动力学行为进行了研究。在总结公交网络系统特性的基础上,探索了形成这些网络结构的演化机制,为提高公交网络的稳定性提供了理论支持。2014年,赵鹏利用复杂网络理论分析了城市公共交通网络的可达性,研究了城市道路网络与轨道交通网络的协调发展问题。2015年,左磊以南京市常规公交为例,构建了南京市公交站点网络模型和换乘网络模型,利用 Gephi 网络分析软件,分别统计分析了站点网络和换乘网络的各指标值的分布情况。并以网络效率为衡量指标,给出了复杂网络分析结果的应用方向,即对网络枢纽节点的布设进行规划。

2016年,张志锋运用复杂理论方法,对公交网络中的公交站点布局和换乘进行深入研究,建立公交换乘网络模型和公交站点网络模型;李子木以复杂网络理论为基础,研究城市轨道交通网络的拓扑结构特征。通过构建基于L空间改进的S空间模型,分析不同主体的轨道交通网络整体拓扑特征以及单主体各个发展时期的拓扑特征,研究轨道交通网络拓扑结构的发展演化规律;李思骞选取北京市公交官方网站数据,根据公交网络的累积度分布曲线及双对数累积度分布、平均最短路径、集聚系数等测度的比较,验证了该网络的无标度特性和小世界性。根据分析结果,可以直观的提取到公交网络中每个公交站点重要性的程度,进而可以重点对关键站点进行保障;张琳以复杂网络理论为基础理论、城市公交网络为研究对象,从公交网络的抽象建模、抗毁性模型构建、实例仿真验证三个方面,给出不同视角下公交网络抗毁性研究的一般方法、算法及仿真程序,得出城市公交网络抗毁性的复杂动力学演化机理,为公交网络的运营管理、改造设计提供指导;李树启针对北京地铁客流网络结构特性和抗毁性展开研究,建立了地铁客流有向无权复杂网络模型,分析了其拓扑结构特征。结果发现,不同阈值下的客流网络结构特征有所不同,北京地铁客流分布具有有序性和“小世界”特征,地铁站点和乘车行为路线在客流网络中具有媒介作用。2017年,付鑫基于出租汽车运行GPS轨迹数据,构建了一