

文章编号:1672-3813(2013)01-0018-08

复杂网络在交通运输网络中的应用研究综述

徐 凤^{1,2}, 朱金福¹, 杨文东¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016; 2. 南京交通职业技术学院, 南京 211188)



摘要:从交通运输网络的拓扑性质研究、交通运输网络的可靠性与结构优化研究两个板块,对铁路网络、航空网络和城市轨道交通网络三种网络在国内外的主要研究成果与进展进行了梳理与总结,以期综合了解交通运输网络领域的研究提供较为全面的视角。

关键词:复杂网络; 交通运输; 研究综述

中图分类号:U113; N94

文献标识码:A

The Complex Networks' Applications in Transportation Networks: a Survey

XU Feng, ZHU Jin-fu, YANG Wen-dong

(1. NanJing University of Aeronautics and Astronautics, NanJing 210016, China;

2. NanJing Communications Institute of Technology, NanJing 211188, China)

Abstract: In this paper, the main research achievements about three kinds of networks——railway networks, air networks and urban track traffic networks——both home and abroad are reviewed, from the two aspects——topological property, reliability and structural adjustment. It is hoped that a general and integrative overview of transportation networks can be presented.

Key words: complex networks; transportation; general overview

0 引言

复杂网络研究的数学基础是图论,目前普遍认为该研究始于 1736 年数学家欧拉研究哥尼斯堡七桥环游问题^[1]。此后,人们发现从拓扑结构的角度看,许多复杂系统都可以抽象成网络,并用网络加以描述^[2],如计算机网络、神经系统网络、电力网络、社会关系网络、交通运输网络、科研合作网络、食物链网络等。

交通运输对经济社会发展的重要性不言而喻,研究交通运输网络,认识其拓扑结构特性,能够为交通运输网络的规划、设计和维护提供重要的参考依据。目前,交通运输网络的研究大多集中在铁路、航空、城市公共交通方面,这些研究大致又可以划分为两大类:一类是对交通网络的拓扑性质的研究;一类是在拓扑性质研究的基础上,进一步考虑网络的可靠性或鲁棒性与结构优化的研究。复杂网络的拓扑统计量在不同的网络中被赋予不同的含义。

收稿日期:2012-07-19

基金项目:中国民用航空局专项基金(KFA1152401)

作者简介:徐凤(1981-),女,江苏徐州人,博士研究生,讲师,主要研究方向为交通运输规划与管理。

1 复杂网络的主要统计量在交通运输网络中的含义

1.1 度和度分布

度定义为节点的邻边数,可记为: $k_i = \sum a_{ij} = \sum a_{ji}$ 。度 k 的分布函数 $P(k)$ 描述具有相同度 k 的节点的出现概率。如果考虑边权,一个节点的点强度 $s_i = \sum w_{ij}$,其中, w_{ij} 表示两个节点 i, j 之间连边上的边权。

交通运输网络中,节点的度反映了该停靠站点的转乘地位及重要性,对度值大的站点的客流去向进行跟踪分析,有利于整个系统的网络建设。点权分布反映了不同停靠站点在整个交通网络中的地位,应该加强那些点权大的站点建设。

1.2 集群系数(或称簇系数)

集群系数指一个节点的所有相邻节点之间的实际连接数目占可能的最大连接边数目的比例,设某节点 i , 度为 k , 其集群系数为 $C_i = \sum E_i / (k_i(k_i - 1)/2)$, 其中 E_i 为节点 i 的邻节点间实际存在的边数。网络的集群系数 C 则是所有节点集群系数的平均值。交通运输网络中,集群系数可以用来描述节点的邻点之间也互为邻点的比例,也就是小集团结构的完美程度^[5]。交通网络呈现出的聚类趋势可以用集群系数来定量描述。

1.3 平均路径长度

网络中任意两点间的距离指连接两点的最短路所包含的边的数目,把所有节点对的距离求平均,就得到了网络的平均路径长度 L 。若任意两个节点间的最短路径长度为 L_{ij} , 则整个网络的平均路径长度 $L = \sum L_{ij} / (N(N-1)/2)$, 其中, N 为网络中总站点数。交通运输网络中,平均路径长度反映任意两个站点之间大致换乘的次数,平均路径长度越短表明使用该交通运输方式到达目的地需要换乘的次数越少。

1.4 介数

节点的介数指网络中所有最短路径中经过该点的数量比例,边的介数概念类似。介数反映了节点或边的影响力,对于发现和保护关键资源具有重要意义。交通运输网络中,各种交通枢纽都是介数较大的节点。

1.5 度的相关性

度的相关性表示度为 k 的节点与度为 k' 的节点邻接的概率,考察度值大的节点是倾向于和度值大的节点还是度值小的节点连接。交通运输网络中,度度相关性可以用来描述节点之间相互选择的偏好特性,若节点优先连接邻接中度大的节点,则意味着交通网络是正相关的,反之则为负相关。

2 交通运输网络的拓扑性质研究

2.1 铁路网的拓扑性质研究

铁路网可以有 P, R, L 3 个空间的网络定义^[1]。在 P 空间中,节点定义为车站,如果至少有一个车次停靠两个车站,则这两个车站之间连接一条边。在 R 空间中,节点定义为车次,如果两个车次停靠至少同一个车站,则这两个车次之间连接一条边。在 L 空间中,节点仍旧定义为车站,如果两个车站在至少一个车次运行中作为相邻的两个站点,则这两个车站之间连接一条边。赵伟、何红生等^[8]提出铁路地理网和车流网,王伟等^[4]提出铁路物理网、运输网和换乘网,通过表 1 比较可知:车流网和铁路换乘网是定义在 P 空间的铁路网,铁路运输网定义在 L 空间,而铁路地理网和物理网只属于基础设施网络,不属于 P, R, L 空间的任何一种。

关于铁路网的拓扑性质的实证研究,数据的截取时间和地理区域不同,但却得到了一致的结论:在 P 空间中,铁路交通网络具有无标度特征(小世界网络特点),即具有较短的平均路径长度和较大的集聚系数。Sen 等^[5]对印度 P 空间铁路运输网的研究表明其网络的平均距离与集聚系数大的节点的数量呈对数关系,

印度铁路网络具有小世界网络的特性。Kurari M 和 Thiran P^[6]对 P, R, L 3 个空间的中欧铁路网和瑞士铁路网进行了实证研究,比较了不同铁路系统在不同空间中的统计性质。赵伟、何红生等^[3]研究中国铁路网,发现以铁路的站点为节点、以轨道为边生成的铁路地理网为树状网络,不具有小世界网络特性;而在 P 空间中定义节点和边,从而生成的车流网,是具有很标度性质的小世界网络。王伟等^[4]从铁路的基础设施、停靠站点和系统换乘 3 个方面构建了物理网、运输网和换乘网 3 种网络模型,结果显示只有定义在 P 空间的铁路换乘网是具有很标度性质的小世界网络。唐芙蓉等^[7]在 P 空间分析中国的铁路网络,同时定义了边的权重,证明了其具有很标度特征(小世界网络特点)。

表 1 各种铁路网的构建描述及其空间归属

Tab. 1 The structural descriptions and adscription of various kinds of railway networks

铁路网名称	构建描述	空间归属
铁路地理网	以铁路的站点为节点、以轨道为边生成的网络 ^[3] 。	不属于 P, R, L 任一空间
车流网	把站点作为网络的节点,任意两个站点间只要有同一列车在这两个站点停靠则认为代表这两个站点的节点间有连线所构建的网络 ^[3] 。	P 空间
铁路物理网	以铁路站点为节点,连接各站点之间的铁路线为边构成的网络 ^[4] 。	不属于 P, R, L 任一空间
铁路运输网	以列车经过的所有站点为节点,同一趟列车路径上的相邻站点之间都存在连线所构成的网络 ^[4] 。	L 空间
铁路换乘网	以列车经过的所有站点为节点,同一趟列车路径上的站点之间存在连线所构成的网络 ^[4] 。	P 空间

2.2 航空网络的拓扑性质研究

研究者们先后对全球航空网络和一些具体国家的航空网络进行了分析,均得到了小世界网络的结论,且簇系数值相似;不同的是,全球航空网络的平均最短路径更长,大约是具体国家航空网络的两倍。Guimera 先后与 Amaral 和 Mossa 合作^[8-9]发现全球航空网络是小世界网络,平均最短路径仅为 4.4,簇系数 0.62。Chi Li-Ping^[10]证明了加权、有向的美国航空网络为小世界网络,最短路径为 2.4,簇系数为 0.618,其点度分布服从双段幂律分布。Bagler G^[11]对印度航空网络的小世界网络特性进行了分析,平均最短路径为 2.259,簇系数为 0.657。Guida Michele 和 Maria Funaro^[12]证明了意大利航空网络为小世界网络,并且发现其点度分布、介数分布均服从截尾幂律分布。对于中国航空网络的拓扑结构, Li Wei 和 Cai Xu^[13]发现其呈现出小世界网络的两大特点,即同时具有较短的平均路径 2.067 和较高的聚层系数 0.733。此后,刘宏鲲和周涛^[14]同样认为中国航空网络是一个小世界网络,其点度分布服从双段幂律分布。

另外,仅仅用拓扑结构来描述网络是不够的,需要考虑权重,Barthelemy 和 Barrat^[15]阐释了全球航空网络中的权重与拓扑的关联,完善了对网络结构的描述。

2.3 城市轨道交通网络的拓扑性质研究

运用复杂网络对城市轨道交通的研究,主要体现在城市地铁网络、城市公共运输网络、城市街道网络、城市慢行交通网络等方面。2002 年 Latora 和 Marchiori 把波士顿地铁抽象为一个无向加权图^[16],研究表明波士顿地铁是一个小世界网络。关于城市轨道交通的特征,Barabasi 和 Bonabeau^[17]指出持续成长并且具有优先连接的特性的网络,的确会发展成无标度网络,节点的分布也遵循幂次定律。在此基础上,2005 年 Sienkiewicz 等^[18]指出波兰的城市公共运输网络的度分布不是服从幂率分布就是服从指数分布。Porter 等^[19]应用复杂网络理论对比分析了 6 种具有不同结构的城市道路网络。Jiang B 和 Claramunt C^[20]证实了城市街道网络是小世界网络,之后又对瑞典中部 4 个城市 50 个出租车进行为期 6 个月的跟踪调查^[21],发现可以根据某时不同街道的人口数来预测人群的运动趋势。

近年来,中国国内对城市轨道交通的研究也日益增多。高自友^[22]分析了城市公交网络的无标度特性及度分布指数;胡君辉等^[23]利用不同网络拓扑抽象方法,研究了上海、北京、南京市公交网络的复杂特性;赵月等^[24]列举了两种将城市交通网络抽象为复杂网络的方法;刘志谦^[25]采用 space L 方法计算分析了广州轨道交通网络具有随机网络的特征;李聪颖等^[26]对城市慢行交通网络进行 P 空间和 L 空间的拓扑结构转换。

3 交通运输网络的可靠性与结构优化研究

3.1 铁路网与城市轨道交通网络的可靠性研究

Albert 和 Barabasi^[27]对于复杂网络的可靠性研究起了先驱作用,用最大簇大小 S 、孤立簇 $\langle s \rangle$ 和平均路径长度 d 来度量网络遭到攻击后的破坏程度。Holme P 和 Kim B^[28]将复杂网络对攻击的响应进行了一个比较全面的总结,并且给出了不同攻击策略下不同网络类型的网络结构变化情况,网络性能由效率 E 和最大连通子图 S 来衡量。

中国有关铁路网可靠性的研究,对评价可靠性的角度和指标有了较多的思考。叶婷婷^[29]从随机性攻击和选择性攻击角度,评价整个铁路网络的连通可靠性,归纳出中国铁路网络在不同攻击模式下的变化规律。江永超^[30]以网络的全局效率作为评判铁路网络复杂网络可靠性的指标,对中国铁路网络模型进行了可靠性分析。李英等^[31]研究了上海的公共汽车交通网络,对其进行复杂性分析,在指标统计的基础上,测试了网络在随机失效和有选择性攻击情况下的抗毁性。高洁,施其洲^[32]从网络拓扑结构的角度研究城市轨道交通网络的抗毁性,并把客流分布纳入了研究范围,建立了抗毁可靠性的评价指标模型。王云琴^[33]分析了北京市轨道交通网络在不同攻击模式下连通可靠性的变化情况,发现其在选择性攻击时抗攻击能力较弱,而对随机性攻击却具有较强的容错性。

3.2 航空网络的枢纽辐射结构及其优化研究

航空网络主要有点对点、线型跳跃和枢纽辐射 3 种模式^[34]。枢纽辐射结构有增加航班密度、增加通航点、提高飞机的载运率、增加机场非航空收入等许多优点^[35],因此近年来,对航空网络结构及其优化的研究大多集中于枢纽辐射结构模式。

国外学者在设计和优化枢纽辐射网络时主要考虑枢纽的个数、枢纽的选址和不同的节点怎样与枢纽连接等问题,在枢纽的选址问题上,大多通过启发式算法来解决。O'Kelly^[36-37]首次运用启发式算法为不连续的单一配置枢纽选址设计了二次整数方程,建立了以航线网络总成本最小为目标函数的线性规划模型。之后,枢纽的选址问题成为被广泛研究的领域。Campbell 提出了 4 种整数规划模型来解决离散枢纽的选址问题^[38],后又提出可以用贪婪—交换启发式算法解决单一配置枢纽的选址^[39]。Skorin-Kapov D 和 Skorin-Kapov J^[40]、Ernst 和 Krishnamoorthy^[41]分别采用了基于禁忌搜索的启发式算法和退火启发式算法;除枢纽选址的研究之外,O'Connor K^[42]、Bowen J^[43]和 Homer M W^[44]先后进一步指出,轴心城市和枢纽机场是具有动态性的,由于地理、政治等因素,老的轴心会衰落而新的轴心会不断出现。

国内在设计和优化枢纽辐射网络时,金凤君和王成金^[45]分层次对中国枢纽机场进行甄选,依据枢纽机场及相关标准,构筑了中国的中枢辐射航线网络体系。柏明国^[46]通过建立中枢辐射航线网络设计的数学模型,用最短路优化算法求解模型,构建了基于中国 15 城市的中枢辐射航线网络。此后,姜涛等^[47-48]在离散有限的情景集的基础上建立了无容量限制的网络鲁棒优化模型,结合精确算法或人工智能算法进行求解,但由于现实的复杂性及不确定性,依据有限情景集所建立的模型并不能保证其鲁棒解具有很好的鲁棒性。

4 结论与展望

复杂网络是研究交通运输网络的一个有力工具。结构和功能是复杂网络理论研究两个核心问题^[49],复杂网络研究的最终目的是通过研究结构来了解和解释基于这些网络之上的系统运作方式,进而预测和控制网络系统的行为^[50]。通过上述文献梳理可知,目前,复杂网络理论在交通运输中的应用,主要集中在以下两个方面:一是通过实证方法对各种交通网络的拓扑结构特性分析;二是基于拓扑结构的交通网络动力学分析,即预测网络系统的行为,包括网络的演化、网络的可靠性、容错性和鲁棒性等。已有的实证研究一般表明交通网络可能具有小世界特性或无标度特性;交通网络动力学分析,则对于优化交通网络、防备网络遭到攻击和破坏、防治交通拥堵和提高网络可靠性等都具有现实意义。然而,运用复杂网络理论研究交通网络也有其局限性:首先,交通网络是建立在地理空间上的,如何衡量政治环境、出行者的心理等因素对网络结构的影

响就比较困难;其次,交通网络是基于城市已有的交通基础设施所构建的,虽然可以预测一些网络行为,但对交通网络的控制属于事后控制或反馈性控制。

复杂网络在交通运输领域的应用虽然已经比较广泛,但复杂网络的部分理论尚未完全成熟^[51];另外,复杂网络在公路网和综合交通网络方面的应用相对来说还比较少。尤其是综合交通网络方面,潘四军^[52]曾运用复杂网络的理论来研究中国公路、铁路、航空、水运的客运交通复合网,但更倾向于4种运输网络与复合网络的网络特性的比较,没有进一步展开如何设计和优化复合运输网络。杨年、朱金福^[53]针对枢纽机场运营能力短缺问题,提出了空铁联运网络设计,证明了以高铁替代或补充现有的支线航班对于释放枢纽机场国内容量是可行的,但对于高铁与民航网络的合作动力及具体的合作模式没有进一步深入研究。

作为对未来研究方向的展望,交通运输网络的研究还可以从以下几个方面进行思考。

1)从单一网络研究可以转向复合网络的研究。实际社会生活中,各种交通运输方式不是单独割裂开的,而是多种交通运输方式结合起来,为人们提供出行服务。从上述文献梳理可知,目前的已有研究大多只是针对其中某一种交通网络进行研究,因此,研究多种交通方式所构成的复合网络将是一个较新的视角。相对于单一网络,复合网络研究的难点之一,是如何把不同交通方式所形成的各单一交通网络统一并包络起来,使之成为一个整体的复合系统。另外,研究内容上,单一网络研究大多是基于实证的网络拓扑特性分析,以及网络的连通性、可靠性与鲁棒性等问题;复合交通网络的研究除了上述研究外,还可以考虑复合网络所特有的一些问题,比如:复合网络与子网络、子网络与子网络之间的关系与功能比较;复合的交通网络内部存在怎样的竞争,是否有合作的空间与合作的动力,如何合作等。而复合网络的这些研究所基于的理论方法与单一网络一样,仍然是基于图论和几种典型的网络结构及演化模型的。

2)从单纯计算网络的拓扑特征值,可以转向一些临界值的研究。研究和描述交通网络,需要计算许多拓扑统计量,来说明其网络是否符合小世界网络特征、是否具有无标度特性。但是,交通运输网络具备怎样的拓扑特征值才是最理想的,这些拓扑统计量是否存在一个评判交通网络优劣的临界值,是值得进一步思考的。

3)从以节点与边为主角的研究,可以转向以网络上粒子为主角的研究。若令复杂网络的节点为粒子的居留场所,节点间的连边为粒子运动的轨道,当在各节点上随机放一些粒子,并让它们按一定的游戏规则运动时,粒子在网络上的运动就是某种扩散过程^[1]。交通运输网络中,节点与边一般就是站点与路线(或机场与航线),粒子则是旅客。已有研究大多从节点与边所构成的复杂网络的拓扑特性方面着手,继而研究其可靠性、连通性、鲁棒性及结构优化;如果从粒子(即旅客)的行为出发,研究粒子的传输与扩散,也可以从另一个角度解释一些交通现象。

参考文献:

- [1] 何大韧,刘宗华,汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京:高等教育出版社,2010:278.
- [2] 周涛,柏文洁,汪秉宏,等. 复杂网络研究概述[J]. 物理,2005,34(1):31—36.
Zhou Tao, Bai Wenjie, Wang Binghong, et al. A brief review of complex networks [J]. Physics, 2005, 34(1):31-36.
- [3] 赵伟,何红生,林中材,等. 中国铁路客运网网络性质的研究[J]. 物理学报,2006, 55(8):3906-3911.
Zhao Wei, He Hongsheng, Lin Zhongcai, et al. The study of properties of Chinese railway passenger transport network [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8):3906-3911.
- [4] 王伟,刘军,蒋熙,等. 中国铁路网的拓扑特性[J]. 北京交通大学学报,2010,34(3):148-152.
Wang Wei, Liu Jun, Jiang Xi, et al. Topology properties on Chinese rail network [J]. Journal of Beijing Jiao Tong University, 2010, 34(3):148-152.
- [5] Sen P, Dasgupta S, Chatterjee A, et al. Small-world properties of the Indian railway network [J]. Phys Rev E, 2003, 67(3): 036106.
- [6] Kurant M, Thiran P. Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks [J]. Phys Rev E, 2006, 74(3):036114.

- [7] 唐芙蓉,杨先清,唐刚,等. 中国铁路交通网络的拓扑研究及客流分析[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(6):935-940.
Tang Furong, Yang Xianqing, Tang Gang, et al. Study of the topology of Chinese rail network and its passengers flow [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6):935-940.
- [8] Guimerà R, Amaral L A N. Modeling the world-wide airport network. [J]. Eur Phys JB, 2004, 38(2): 381-385.
- [9] Guimerà R, Mossa S, Turtleschi A, et al. The world-wide air transportation network: anomalous centrality, community structure, and cities' global roles [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, 102(22):7794-7799.
- [10] Chi L P; Wang R, Su H, et al. Structural properties of US flight network [J]. Chinese Physics Letters, 2003, 20(8): 1393-1396.
- [11] Bagler G. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network [J]. Physica, 2008, 387(12): 2972-2980.
- [12] Michele G, Funaro M. Topology of the Italian airport network: a scale free small world network with a fractal structure? [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2007, 31(3): 527-536.
- [13] Li W, Cai X. Statistical analysis of airport network of China [J]. Physical Review E, 2004, 69(4): 046106.
- [14] 刘宏鲲,周涛. 中国城市航空网络的实证研究与分析[J]. 物理学报,2007,56(1): 106-112.
Liu Hongkun, Zhou Tao. Empirical study of Chinese city airline network [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 106-112.
- [15] Barthelemy M, Barrat A, Pastor-Satorras R, et al. Characterization and modeling of weighted networks [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(17):178701.
- [16] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small-world network? [J]. Physica A. 2002, 314(1-4):109-113.
- [17] Barabasi A L, Bonabeau E. Scale-free networks [J]. Scientific American, 2003, 5:60-69.
- [18] Sienkiewicz J, Holyst J A. Public transport systems in Poland: from Bialystok to Zielona Gora by bus and tram using universal statistics of complex networks [J]. Acta Physica Polonica B, 2005, 36(5): 1771-1778.
- [19] Porta S, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets: a dual approach [J]. Physica A, 2006, 369(2): 853-866.
- [20] Jiang B, Claramunt C. Topological analysis of urban street networks [J]. Environment and Planning B, 2004, 31:151-162.
- [21] Jiang B, Yin J J, Zhao S J. Characterizing the human mobility pattern in a large street network [J]. Physical Review E, 2009, 80(2):021136.
- [22] 高自友,吴建军,毛保华,等. 交通运输网络复杂性及其相关问题的研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2005, 5(2):79-83.
Gao Ziyu, Wu Jianjun, Mao Baohua, et al. Study on the complexity of traffic networks and related problems [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5(2):79-83.
- [23] 胡君辉,徐新平,杨永翔. 三组城市公共汽车运输网的小世界性质[J]. 广西师范大学学报,2006, 24(2):10-14.
Hu Junhui, Xu Xinping, Yang Yongxu. The small-world characteristic of three groups of urban transit networks [J]. Journal of Guangxi Normal University, 2006, 24(2):10-14.
- [24] 赵月,杜文,陈爽. 复杂网络理论在城市交通网络分析中的应用[J]. 城市交通,2009,7(1):57-65.
Zhao Yue, Du Wen, Chen Shuang. Application of complex network theory to urban transportation network analysis [J]. Urban Transport of China, 2009, 7(1):57-65.
- [25] 刘志谦,宋瑞. 基于复杂网络理论的广州轨道交通网络可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2010,10(5):194-200.
Liu Zhiqian, Song Rui. Reliability analysis of Guangzhou rail transit with complex network theory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(5):194-200.
- [26] 李聪颖,马荣国,王玉萍,等. 城市慢行交通网络特性与结构分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(2):72-78.
Li Chongying, Ma Rongguo, Wang Yuping, et al. Characteristics and structure analysis of urban slow mode traffic network [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(2):72-78.
- [27] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Attack and error tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406(6794):

- 378-382.
- [28] Holme P, Kim B J. Attack vulnerability of complex networks [J]. Physical Review E, 2002, 65(6):066109.
- [29] 叶婷婷. 基于复杂网络的全国铁路网络连通可靠性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
Ye Tingting. Research on reliability of countrywide railway network based on theory of complex network [D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2009.
- [30] 江永超. 基于复杂网络理论的铁路网可靠性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
Jiang Yongchao. Study on reliability of railway network based on complex network theory [D]. Chengdu: Southwest Jiao tong University, 2011.
- [31] 李英, 周伟, 郭世进. 上海公共交通网络复杂性分析[J]. 系统工程, 2007, 25(1): 38-43.
Li Ying, Zhou Wei, Guo Shijin. Study on complexity of Shanghai urban transportation network [J]. Systems Engineering, 2007, 25(1): 38-43.
- [32] 高洁, 施其洲. 城市轨道网络抗毁可靠性定义及评价指标模型研究[J]. 铁道学报, 2007, 29(3): 29-30.
Gao Jie, Shi Qizhou. Definition and evaluation modeling metro network invulnerability [J]. Journal of the China railway society, 2007, 29(3): 29-30.
- [33] 王云琴. 基于复杂网络理论的城市轨道交通网络连通可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
Wang Yunqin. Research on connectivity reliability of urban transit network based on theory of complex network [D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2008.
- [34] 刘宏鲲. 中国航空网络的结构及其影响因素分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
Liu Hongkun. Analyzing the structure of Chinese aviation network and impact factors [D]. Chengdu: Southwest Jiao tong University, 2007.
- [35] 刘宏鲲, 周涛. 航空网络研究综述[J]. 自然科学进展, 2008, 18(6): 601-608.
Liu Hongkun, Zhou Tao. Research overview of airline network [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(6): 601-608.
- [36] O'Kelly M E. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities [J]. European Journal of Operational Research, 1987, 32(3): 393-404.
- [37] O'Kelly M E. A geographer's analysis of hub-and-spoke network [J]. Journal of Transport Geography, 1998, 6(3): 171-186.
- [38] Campbell J F. Integer programming formulations of discrete hub location problems [J]. European Journal of Operational Research, 1994, 72(2): 387-405.
- [39] Campbell J F. Hub location and the p-hub median problem [J]. Operations Research, 1996, 44(6): 923-935.
- [40] Skorin-Kapov D, Skorin-Kapov J. On tabu search for the location of interacting hub facilities [J]. European Journal of Operational Research, 1994, 73 (3): 502-509.
- [41] Ernst A, Krishnamoorthy M. Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem [J]. Location Science, 1996, 4: 139-154.
- [42] O'Connor K. Airport development in Southeast Asia [J]. Journal of Transport Geography, 1995, 3(4): 269-279.
- [43] Bowen J. Airline hubs in Southeast Asia: national economic development and nodal accessibility [J]. Journal of Transport Geography, 2000, 8(1): 25-41.
- [44] Horner M W, O'Kelly M E. Embedding economies of scale concepts for hub network design [J]. Journal of Transport Geography, 2001, 9(4): 255-265.
- [45] 金凤君, 王成金. 轴-辐服务理念下的中国航空网络模式构筑 [J]. 地理研究, 2005, 24(5): 774-784.
Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub-and-spoke system and China aviation network organization [J]. Geographical Research, 2005, 24(5): 774-784.
- [46] 柏明国, 朱金福, 姚韵. 枢纽航线网络的构建方法及应用 [J]. 系统工程, 2006, 24(5): 29-34.
Bai Mingguo, Zhu Jinfu, Yao Yun. Design and application of hub and spoke network [J]. Systems Engineering, 2006, 24(5): 29-34.
- [47] 姜涛, 朱金福, 覃义. 基于最短路的中枢辐射航线网络鲁棒优化方法 [J]. 系统工程, 2007, 25(1): 53-59.

- Jiang Tao, Zhu Jinfu, Tan Yi. Robust optimization of hub-and-spoke airline network design based on shortest path algorithm [J]. Systems Engineering, 2007, 25(1): 53-59.
- [48] 柏明国,姜涛,朱金福. 基于禁忌算法的中枢辐射航线网络鲁棒优化方法[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(13): 60-69.
Bai Mingguo, Jiang Tao, Zhu Jinfu. The Robust optimization of the hub and spoke airline network design based on Tabu search [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(13): 60-69.
- [49] 方爱丽,赵继军. 复杂网络:结构和动力学[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(3): 56-94.
Fang Aili, Zhao Jijun. Complex networks: structure and dynamics [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2006, 3(3): 56-94.
- [50] 吴建军,高自友,孙会君,等. 城市交通系统复杂性——复杂网络方法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2010:46.
Wu Jianjun, Gao Ziyu, Sun Huijun, et al. The Complexity of Urban Traffic System—The Complex Network Theory and Application [M]. Beijing: Science Press, 2010:46.
- [51] Lun Li, Alderson D, Tanaka R, et al. Towards a theory of scale-free graphs definition properties and implications [J]. Internet Mathematics, 2005, 46(2): 431-523.
- [52] 潘四军. 中国城市客运交通网络的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2008.
Pan Sijun. Study on Chinese city passenger transportation network [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.
- [53] 杨年,朱金福. 枢纽容量分配下的空铁联运网络设计[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(166): 134-138.
Yang Nian, Zhu Jinfu. Air-rail network design based on hub capacity allocation [J]. Traffic Information and Security, 2012, 30(166): 134-138.