

文章编号: 1000-5862(2015)03-0326-05

基于复杂网络的城市综合交通网络 特征分析与优化研究

吴样平^{1,2} 郭飞³ 曾明华⁴

(1. 上海大学管理学院, 上海 200444; 2. 江西省人民政府办公厅, 江西 南昌 330046;
3. 抚州职业技术学院, 江西 抚州 344099; 4. 华东交通大学轨道交通学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 基于复杂网络理论与方法, 结合高速公路、国道道路、铁路、水运等5个交通网络, 构建南昌九江综合交通网络; 定量计算与分析除航空网络外共计5个交通网络的拓扑特征. 在对各方式的交通复杂网络提出优化措施的基础上, 探讨了南昌九江综合交通网络的优化设计, 并给出了相应的改进建议.

关键词: 长江经济带; 昌九一体化; 综合交通; 复杂网络

中图分类号: U 491; N 94 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2015.03.19

0 引言

以复杂网络理论为工具, 探讨如何构建优化南昌九江综合交通网络, 冀以此为切入点, 积极推进对“长江经济带”和“昌九一体化”两大战略.

复杂网络理论与方法及其应用在国内外引起了广泛重视. D. J. Watts 等^[1]在《Nature》杂志上首次提出 WS 小世界网络模型. A. L. Barabási 等^[2]在《Science》上提出了 BA 无标度网络模型. 他们通过对万维网、合作网络和电力网络的研究发现这些网络是无标度网络. 小世界网络和无标度网络开创了复杂网络研究的新纪元. 文献[3]提出了对原始的 Master 方程进行修正, 用修正后的主方程计算 BA 模型度分布. 文献[4]研究了新浪微博名人堂用户所形成的用户关系网络.

运用复杂网络理论来研究交通网络是一个多学科交叉研究热点. V. Latora 等^[5]研究了波士顿的地铁网络特征. Wu Jianjun 等^[6]通过构建 O-D 网络分析了北京市公交网络的无标度及小世界特征. J. Sienkiewicz 等^[7]研究了波兰 22 个城市的公交系统, 采用 2 种网络模型对其进行分析. K. A. Seaton 等^[8]计算了 Boston 和 Vienna 等 2 个城市铁路线路网络的拓扑特征, 并将该结果与相应的随机二部图的理论预测结果进行比较. P. Angeloudis 等^[9]对世界地

铁网络复杂性进行了研究.

利用复杂网络理论与方法, 构建了南昌九江各交通方式的复杂网络以及基于此的综合交通复杂网络, 并计算分析了拓扑特征, 通过特征分析, 提出了优化综合交通网络的改进建议.

1 复杂网络的主要特征指标

将交通复杂网络用无向无权图 $G = (V, E)$ 表示, 其中 V 是节点集且 $|V| = N$, 边集 $E = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\}$ 且 $|E| = M$, 图 G 的邻接矩阵为 $A = (a_{ij})$. 若 i 与 j 相连则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$.

平均最短路径长度(记为 L), 即任意 2 个节点之间距离的平均值, 通常表示为

$$L = \frac{\sum_{i > j} d_{ij}}{N(N-1)/2},$$

其中 d_{ij} 表示节点 i 与 j 之间的距离, $d_{ii} = 0$.

在用对偶方法表示的复杂网络中, 网络的平均最短路径长度表示连接交通网络中任意 2 条道路之间最短关系链中的道路条数, 其计算方法可以用广度优先搜索算法(BFS)确定.

节点平均 n 阶度 $\langle k^n \rangle = \sum_{i \in V} k_i^{(n)} / N$, 当 $n = 1$ 时节点平均度为 $\langle k \rangle = 2M/N$, 其中 k_i 表示与节点 i 相连的节点数. 节点平均 n 阶度越大, 与该节点相联系

收稿日期: 2014-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(51468020)和江西省自然科学基金(20142BAB207016)资助项目.

作者简介: 吴样平(1978-), 男, 江西贵溪人, 高级工程师, 主要从事管理科学与工程的研究.

的 n 阶邻居数量越多。

聚类系数描述交通网络中节点的聚集情况,平均聚类系数反映了整个交通网络中节点的密集程度。平均聚类系数越大,节点密度越大。

节点 i 有 k_i 条边将它和其它节点相连,称这 k_i 个节点为节点 i 的邻居,这 k_i 个节点之间最多有 $k_i(k_i - 1)/2$ 条边,实际 k_i 个节点之间的边数为 E_i ,则局部聚类系数为 $C_i = E_i / [k_i(k_i - 1)/2]$ 。

整个网络的聚类系数 C 就是所有节点 i 的聚类系数 C_i 的平均值,即 $C = \sum_{i \in V} C_i / N = \sum_k P(k) C(k)$,其中 $P(k)$ 表示节点度为 k 的概率,它是度为 k 的节点与邻居节点之间存在边的概率; $C(k)$ 是度为 k 的节点的平均聚类系数。

2 综合交通网络的构建及特征

构建复杂交通网络的方法主要有原始方法和对偶方法2种,前者将交通网络的交叉口和路段分别映射为复杂网络的节点和边,符合人们日常思维却无法直接描述各路段之间的关联性;后者将交通网络的交叉口和路段分别映射为复杂网络的节点和边,直接反映了各路段与其它路段的联系。

2.1 构建南昌九江综合交通网络

1) 各交通模式的复杂网络。根据南昌九江地区高速公路网络图(交通厅提供)、国省道网络图、货运铁路网络图(南昌铁路局提供)、水运网络图(港航局提供)抽象后运用 Gephi 软件,依据原始方法分别构建了各交通方式的复杂网络。限于篇幅,只给出国省道复杂网络,如图1所示。

2) 综合交通复杂网络。在构建了南昌和九江两地的高速公路、国省道、货运铁路、水运等4种复杂网络并分析了南昌九江航空网络的基础上,按照对偶方法,以各路段(高速公路以枢纽间的高速公路路段、国省道以各交叉口相连的路段、货运铁路以2个编组站之间的铁路路段、水运以2个港口之间的航段、航空以机场的综合航班)为节点,以这些路段、航段、航班与其它不同的段的交叉口为边,构建综合交通复杂网络。根据4种复杂网络图以及对南昌九江公路、铁路、水运图的抽象,并运用 Gephi 软件生成如图2所示的综合交通复杂网络。

值得说明的是,因为高速公路的货运量在南昌九江综合网络占非常大的比重(60%左右),本文研究的目的主要是如何充分发挥九江港(5个港区)通

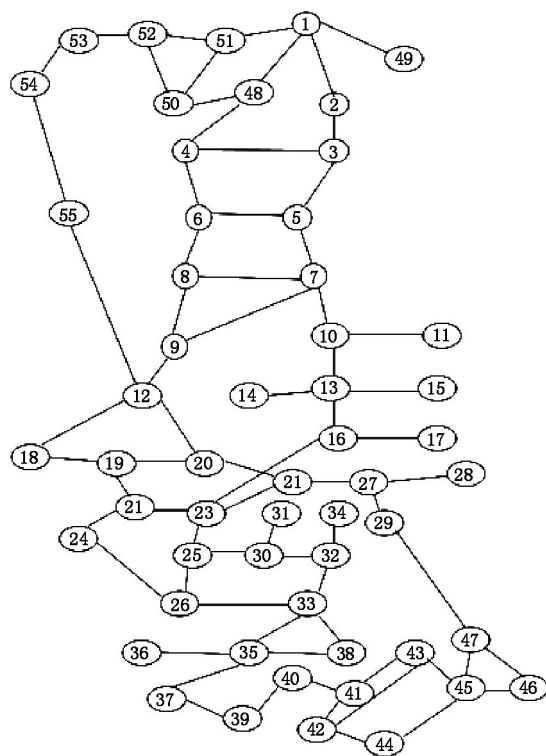


图1 南昌九江国省道复杂网络

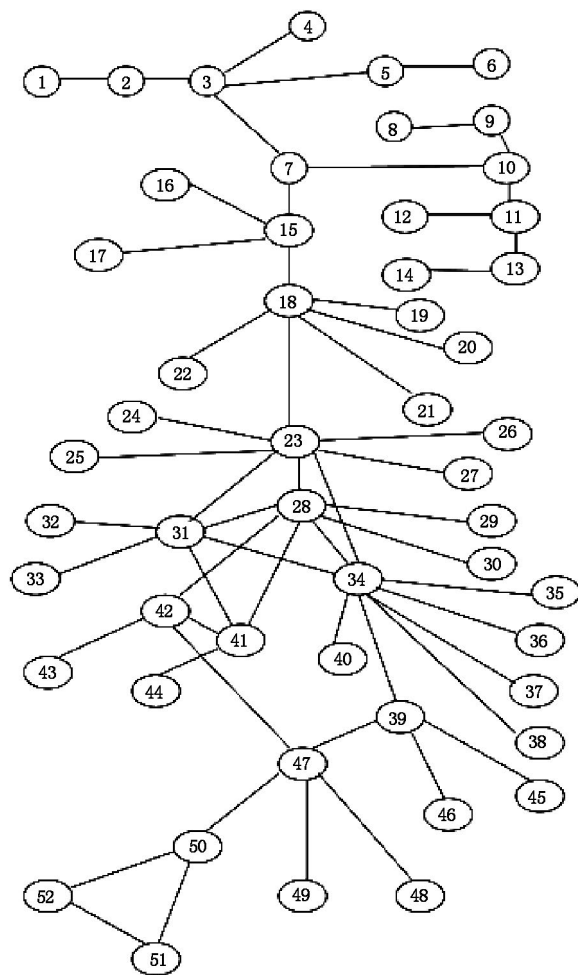


图2 南昌九江综合交通复杂网络

达长江的优势,所以,在南昌九江综合网络的构建中,只有高速公路的路段以及九江港 5 个港区之间的航段与同类的路段、航段的交叉口也作为边,其它路段都是以其它不同的段相交的交叉口才作为边。

表 1 5 个交通复杂网络的拓扑特征

网络类型	N	M	L	$\langle k \rangle$	$\langle k^2 \rangle$	C
高速公路网络	11	11	3.109	2.000	4.545	0
国省道路网络	55	71	6.205	2.582	7.800	0.103
铁路网络	21	20	6.152	1.905	4.333	0
水运网络	11	11	2.400	2.200	6.667	0.203
综合交通网络	52	58	5.020	2.192	8.846	0.064

3 综合交通网络的分析及优化

3.1 南昌九江综合交通网络的基本特征分析

由于高速公路、国省道路、铁路、水运网络采用传统方法构建,而综合交通网络采用对偶方法构建,所以先分析前 4 个交通复杂网络,再分析综合交通复杂网络。

对高速公路、国省道、铁路、水运复杂网络进行基本特征分析,可以得到如下结论:

1) 从特征路径长度看,国省道路网络最长,水运网络最短;从聚类系数看,高速公路网络和铁路网络均为 0,水运网络最高。这说明,只有南昌九江水运网络是小世界网络,其主要原因是港口集中在九江(5 个港区连在一起),且其余港口均只能从湖口港区进出。

2) 从平均度及 2 阶平均度看,国省道路网络最大,这说明南昌九江国省道路具有较好的连通性;铁路网络最小,这是因为铁路是主干线,不可能像国省道 4 处开花。

3) 从各节点度及其相应节点数的关系看,该 4 个交通复杂网络中,只有少数节点的度比较大,绝大多数节点的度较小。这说明很多节点是边缘或末梢节点,只有少数节点是中心节点。这少数节点也是关键节点,其也符合现实规律。

4) 从该 4 个交通复杂网络的局部聚类系数看,国省道路的局部聚类系数明显要高于其它 3 个网络,这说明国省道路的连通性要优于其它 3 个网络。这也符合现实状态:高速公路只有枢纽互连,铁路只能通过为数不多的编组火车站相连,水运也只能通过港口相连,而国省道路可以纵横交错、穿针引线。

对综合交通复杂网络进行特征分析,可以得到如下结论:

2.2 南昌九江综合交通网络的拓扑特征

由 Matlab 编程且结合 Gephi 软件计算得到上述 5 个交通复杂网络的拓扑特征(见表 1)。

1) 特征路径长度较短,其值小于 6 度分离推断,且聚类系数较大,从而该网络是小世界网络。

2) 节点平均度较大,2 阶平均度很大,这说明网络中各个路段相互连接性较好,即整个网络具有很好的连通性,也就是说,该网络中各种运输方式具有良好的互相衔接的基础。

3) 大部分路段只与少数路段相连,这说明大部分路段是末端路(这是相对于昌九之间的连接,如果从全省看,这些路段其实也与南昌九江辖区外的路段相连,并非末端路),只有少数路段是关键路段、核心路段。

4) 局部聚类系数为 0 的路段不多,但局部聚类系数为 1 的路段也不多,这说明与大部分路段相交的路段都保持一定的互通性,但没有达到完全互通的程度,同时还存在单边路(或称断头路)。

3.2 南昌九江综合交通网络的无标度性分析

以上是对南昌九江 5 个复杂网络的基本特征进行了分析。为了进一步了解这 5 个复杂网络,分析了它们的无标度性。

先通过计算并画出这 5 个交通复杂网络节点的累积度分布 $p(k) = \sum_{x \geq k} P(x)$ 的 $\log \log$ 散点图;然后,对各散点图作回归分析,得出 5 条拟合曲线及相应的方程(其中 x 表示 $\log k$, y 表示 $\log p(k)$) 如下:

1) 高速公路复杂网络方程 $y = 0.0366 - 0.117x - 3.165x^2$;

2) 国省道路复杂网络方程 $y = -0.0159 + 1.425x - 4.466x^2$;

3) 铁路复杂网络方程 $y = -0.0032 + 1.808x - 11.28x^2 + 8.674x^3$;

4) 水运复杂网络方程 $y = -0.00115 + 0.2466x - 1.646x^2$;

5) 综合交通复杂网络方程 $y = -0.00247 - 2.102x + 1.646x^2 - 3.333x^3$ 。

为节省篇幅,给出国省道和综合交通复杂网络的相应拟合曲线图,分别如图3与图4所示。这些方程都很好拟合了5个交通复杂网络中CDD的双对数散点图。根据这些拟合方程和曲线,可以看出这5个网络都不具有无标度性,即高速公路、国省道路、铁路和水运网络不存在某个节点具有很强的吸引力,综合交通网络中也不存在哪个路段很容易与其它路段相连,整个网络均具有一定的均匀性。

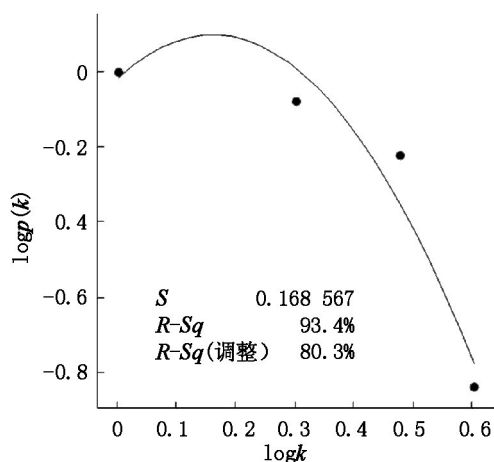


图3 国省道复杂网络中累积度分布双对数图及拟合曲线

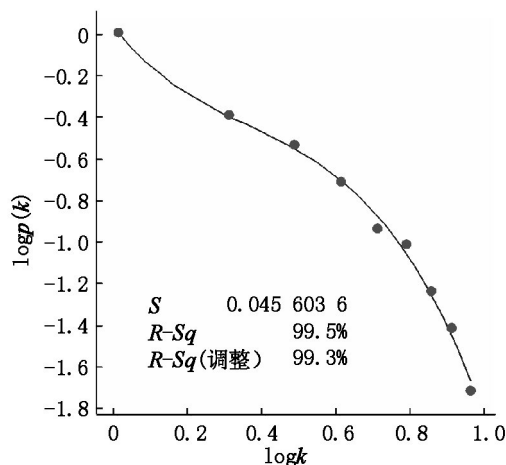


图4 综合交通复杂网络中累积度分布双对数图及拟合曲线

3.3 南昌九江综合交通网络的优化与改进建议

按照《昌九一体化综合交通发展规划》提出的“形成完善的快速道路系统、多层次的轨道系统、无缝衔接的综合交通枢纽”标准,对南昌九江综合交通网络优化。

基于南昌九江各交通方式的复杂网络的基本特征分析,分别提出它们的优化与改进建议:

1) 增加港口的数量,充分发挥水运的潜力;对“九江港”这个关键节点进行分流与扩容,即实施拆分管理,建设多个港区。

2) 加强高速公路连接线的建设,拓展各个节点

连接的途径,并强化各高速公路枢纽的衔接,强化枢纽互联互通,以提升高速公路网络密度。对这少数几个关键节点进行分流或对与这些关键节点相连的关键路段进行扩容,如昌九高速公路实施“4车道改8车道”措施。

3) 国省道路网络分布广泛但衔接度不够,应该强化合理的布局设计,在强调全面通达的基础上,也尽可能形成几个大型的国省道枢纽。

4) 铁路网络铁路编组站分散且线路较少,考虑到铁路网的实际情况,应该增加编组站的数量,同时合理衔接与布局线路网络。区域铁路不像公路有很好的可达性,但可以建设并发挥铁路专用线的效应,用里程较小的铁路路段对国铁干线进行补充。

基于4种方式的交通网络的优化与改进建议以及综合交通复杂网络的特性分析,重点探讨并提出南昌九江综合交通网络的优化与改进建议:

1) 强化综合网络一体化建设。大部分路段既没有完全孤立也不是绝对相连,除了一些路段受制于客观因素(例如公路的一端是鄱阳湖且无水运港口)外,其余路段都有优化空间。可以强化与其它的或相同的交通方式路段的衔接,尽量避免断头路,打通衔接并缩短特征路径长度,这需要统筹做到高速公路、国省道路、铁路、水运和航空的无缝衔接。

2) 提高综合网络的鲁棒性与可靠性。综合交通网络中存在极少数关键路段,可能极大损害网络鲁棒性。因此,一方面,通过扩容和加强调度等提升关键路段的抗风险能力,以增强整个网络鲁棒性;另一方面,寻找替代路段,降低这些路段在网络中的影响,例如,规划建设的昌九综合大道,可以削弱昌九高速公路的重要性,以提高整个网络的鲁棒性。南昌九江综合交通网络的各个路段相互连接性较好,但某些关键节点(如昌九高速公路中军山至昌北段)的度并不大,还有某些具有特殊作用的节点(如与港口相连的铁路路段)的度也不大。对于度不大的关键节点,除了扩容以外,要通过将其与同类或不同类路段相连,降低其作为关键路段的重要性;对于度不大的具有特殊作用的节点,要根据实际情况提供后备节点,或在成本允许的情况下新建另外一个可供选择的节点,提高该节点的度及其保障性。

4 结论

以复杂网络理论为工具,构建了南昌九江高速公路、国省道路、铁路、水运、以及综合交通等5个交

通复杂网络,分别计算并分析了各网络的拓扑特征和无标度性.分别对南昌九江的4种交通方式的复杂网络和综合交通复杂网络提出了优化与改进策略,同时将优化措施与实际的情况进行了相互印证.研究表明,运用复杂网络理论对江西省南昌九江综合交通网络的分析与优化,可以在定量计算网络特征指标值的基础上提出更能反映交通网络实际情况的优化策略,将为相关决策提供科学依据,为促进长江经济带发展与实现“昌九一体化”战略提供重要支撑.

5 参考文献

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of “small-world” networks [J]. *Nature*, 1998, 393 (6684): 440-442.
- [2] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [3] 李永成, 黄曙光, 杨斌, 等. 新浪微博名人堂用户关系网络分析 [J]. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 37 (4): 376-381.
- [4] 王双进, 李凌云, 李佳. 用修正后的主方程计算 BA 模型度分布的探讨 [J]. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(3): 221-224.
- [5] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway as small-world network? [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2002, 314(1/2/3/4): 109-113.
- [6] Wu Jianjun, Gao Ziyu, Sun Huijun, et al. Urban transit system as a scale-free network [J]. *Modern physics Letters B*, 2004, 18(19): 1043-1050.
- [7] Sienkiewicz J, Holyst J A. Statistical analysis of 22 Public transport networks in Poland [J]. *Physical Review E*, 2005, 72(4): 046127.
- [8] Seaton K A, Hackett L M. Stations, trains and small-world networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2004, 339(34): 635-644.
- [9] Angeloudis P, Fisk D. Large subway systems as complex networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 367(5): 553-558.

The Characteristic Analyses and Optimization of Urban Integrated Transport Network Based on Complex Network

WU Yangping^{1,2}, GUO Fei³, ZENG Minghua⁴

(1. School of Management of Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. The General Office of the People's Government of Jiangxi Province, Nanchang Jiangxi 330046, China;

3. Fuzhou Vocational and Technical College, Fuzhou Jiangxi 344099, China;

4. School of Railway Tracks and Transportation, East China Jiao Tong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: Based on the theory and method of complex network, the Nanchang-Jiujiang integrated transport network is constructed through combining the subnetworks of motorway, national and provincial highway, railroad and waterway. The topological characteristics of the five networks, such as networks of motorway, national and provincial highway, railroad, waterway and integrated transport network, are analyzed after quantitative calculation. In terms of the results and analyses, optimization measures for the five complex transport networks are proposed. The optimization design method for the Nanchang-Jiujiang integrated transport network are explored, which will provide scientific decision-making.

Key words: the Yangtze River economic belt; the integration of Nanchang-Jiujiang; integrated transport; complex network

(责任编辑: 曾剑锋)