

江苏省公路网络复杂性分析

马杰良¹ 曹祥¹ 周旭辉¹

摘要

通过对江苏省路网进行抽象建模,分别对其建立了2种网络模型,从复杂网络的角度,研究了它们的拓扑结构与静态参数,得出了不同网络模型的拓扑特性;最后对2种网络模型分别进行了稳定性研究,从另一个视角为江苏省的公路建设与发展提供了参考依据。

关键词

复杂网络;图论;抗毁性;公路路网

中图分类号 TP311.5

文献标志码 A

0 引言

随着复杂网络的小世界效应^[1]及无标度性^[2]的提出,利用复杂网络理论来研究各种网络的特征成为一种趋势.例如,Amaral等^[3]研究了航空网络的拓扑结构.Latora等^[4]对波士顿地铁的网络特性进行了初步研究.Sienkiewicz等^[5]分析了波兰的21个城市的公共运输网络的拓扑结构特性,发现它们的度分布不是服从幂率分布就是服从指数分布.高自友等^[6]研究了城市公交网络的无标度特性及度分布指数,并以北京市公交网络为例完成了实证分析.王志强等^[7]以上海市2020年远景规划路网为例,标定了其网络类型,并对该路网的连通可靠性进行了仿真分析研究,得出了该路网既是一个小世界网络,也是一个无标度网络.金雷^[8]对我国西部某地域路网进行了建模,稳定性仿真研究,得出该路网是一个随机网络.

江苏省际陆地边界线3 383 km,全省面积10.26 km²,占全国的1.06%,总人口7 438万人,居全国第5位,人口密度为725人/km²,居全国各省区之首.在这样一个人口众多、经济繁荣的大省中,公路是现代社会必需的基础设施,是各种经济社会活动联系的纽带,是兼具出行方便性与机动性的最佳交通方式.因此,研究江苏的公路交通系统具有重要的现实意义.

本文以复杂网络为建模工具,建立了江苏公路网的2种不同的拓扑结构,通过计算网络的静态参数分别分析了相应的网络特性,并进一步研究了2种模型的稳定性,为江苏道路发展规划与发展提供了新的参考依据.

1 数据抽象处理及建模方式

1.1 建模方式

1.1.1 邻接城镇网络模型(A模型)

公路经过的城镇为节点,建立基于邻接城镇的网络模型,若2个邻接城镇之间有同一条公路经过,则2个城镇之间连1条边,所构造的网络接近于自然形成的路网结构.由于一个城镇会被不同的公路同时经过,度代表这个城镇节点有不同公路经过的次数,度值越大,说明此路网节点的交通枢纽作用越显著.如图1所示,大丰至方强只有1条公路,所以2点之间有1条边相连.大丰到裕华一共有3条公路相通,故这2点之间连3条边.经统计,用此方式建立的模型共有节

收稿日期 2010-10-12

作者简介

马杰良,男,副教授,主要从事复杂网络,离散系统与图论方面的研究. njkjmjl@163.com

¹ 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京,210044

点 426 个,边 1 337 条。

1.1.2 公路线路网络模型(B模型)

公路线路为节点,若 2 条公路线路有交叉路口相连,则 2 个节点之间有条边连接.节点的度表示为 1 条公路和多少条其他公路相交,相连 2 节点边的边权则表示为 2 条道路交叉的次数.如图 2 所示,扬高线与宝洋线和白江线相交且分别只相交 1 次,2 节点连 1 条边,其边权为 1,裕连线与南连线和扬高线分别交叉且相交 2 次,它们之间连成 1 条边,其边权值为 2.经统计分析,用此方式建立的公路线路网络模型共有节点 284 个,边 1 553 条。

1.2 数据处理

1) 只采集省道、国道、县道数据,并且在处理时视为相同等级.等级以下乡村道路及铁路、水路、航空路线暂不考虑在研究范围内。

2) 将公路做无向化处理.如果能从 A 节点通过某一条公路到达 B 节点,则也能够从 B 节点沿同一条公路到达 A 节点。

3) 在模型 A,如公路经过城镇,则将城镇视为节点,如靠近城镇,则将最靠近的城镇视为节点.同时根据研究需要,将城镇进行了抽象化处理。

4) 在模型 B,如公路经过交叉路口,则将交叉路口视为节点。

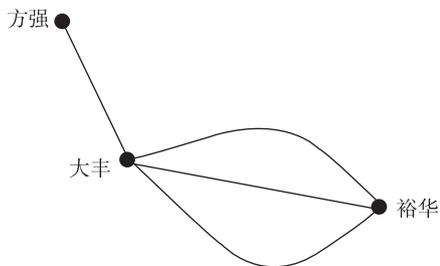


图 1 A 模型部分结构示例

Fig. 1 Example of connection mode of network A

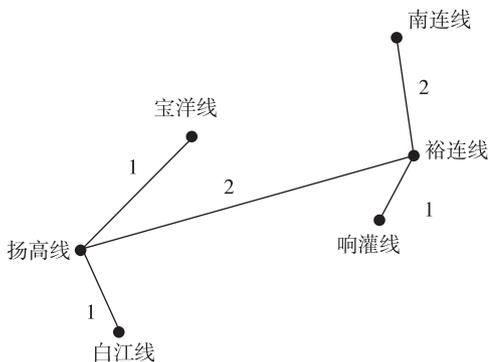


图 2 B 模型部分结构示例

Fig. 2 Example of connection mode of network B

2 江苏路网网络模型静态参数计算与分析

2.1 数据处理

在经过统计分析取得大量原始数据后,为了便于将数据转化为邻接矩阵在计算机中进行仿真研究,我们对原始数据进行了如下处理。

在模型 A 中,以城镇为节点,每个节点可用 C_i 来表示,所有路网节点以集合 M 表示, $M = \{C_1, C_2, C_3, C_4, \dots, C_m\}$,若 2 节点间存在 T 条公路相通,则连接相应 2 节点的边用数字 T 表示,否则用 0 表示.接着对网络节点编号,构成数据集 $S\{a, b, k\}$,其中 a, b 是路网节点编号, k 取值为 0 或 T .经过以上抽象处理,将模型 A 原始数据转化为拓扑数据集。

在模型 B 中,以公路为节点,每个节点以 D_j 来表示,所有公路节点以集合 N 表示, $N = \{D_1, D_2, D_3, D_4, \dots, D_n\}$,若 2 节点间有交叉,则连接相应节点的边用 1 表示,否则用 0 表示.接着同样对节点编号,构成数据集 $U\{e, f, h\}$,其中 e, f 是公路节点编号, h 取值为 0 或 1.经过以上处理,也将模型 B 原始数据转化为相应的拓扑数据集。

2.2 A, B 模型的静态参数分析

2.2.1 连通情况分析

A 模型的连通为 100%,说明网络中没有孤立点,也就是说江苏的任何一个城镇都有公路通达。

B 模型的连通也为 100%,即由此模型建立的网络也没有孤立点存在,表示某一条公路都至少与另一条公路相交叉,进一步可以说明,可以从任一条公路到达省内的任意另一条公路.综合 2 种模型的连通情况可以看出,江苏公路的通达性较好,基本满足了社会发展各方面的交通需求。

2.2.2 度与平均度分析

度(degree)是描述一个网络图的最基本的术语,节点 v_i 的度定义为与该节点相连边的数目,网络中所有节点 v_i 的度 k_i 的平均值称为网络的节点平均度,记为 $\langle k \rangle$ 。

A 模型中,节点度表示一个城镇有多少条公路与邻接的城镇通达,度越大,说明这个城镇的交通越便捷,此城镇对公路网中通达起着比较重要的交通枢纽作用.经统计,该模型的平均节点度为 3.893,即表示任一城镇平均接近有 4 条公路与邻近城镇相连.其中节点度最大的为徐州,节点度值为 9,表示其与邻近城镇有 9 条公路相连。

B 模型中,节点度表示一条公路和其他多少条公路相交叉,度越大,说明这条公路在整个公路网中

就越重要,这条公路对所经区域的交通影响作用就越大. 统计发现,此模型的平均节点度为 7.197,即每条公路平均与其他 7 条公路相交叉. 其中度最大的为沿海高速,节点度值为 48,表示其与 48 条其他公路相交,由此看出,此条高速公路对途经区域的交通影响作用很大.

2.2.3 度分布 $p(k)$ 分析

网络中节点的度分布情况可以用分布函数 $p(k)$ 来描述. 度分布函数反映了网络系统的宏观统计特征, $p(k)$ 表示的是一个随机选定的节点度恰好为 k 的概率分布. 在模型 A 中度分布表明与各个城镇直接相连的公路的条数,在模型 B 中度分布反映的是与一条公路相交的其他公路的数目.

如图 3 所示,模型 A 的度分布近似以峰值 5 呈泊松分布,说明节点度分布较均匀,而从图 4 可以看出,B 模型的节点分布就极不均匀,网络中只有极少的节点的度在 20 及以上,而大部分节点的度在 5 左右,并且节点度分布明显呈现幂律分布,满足无标度网络特征.

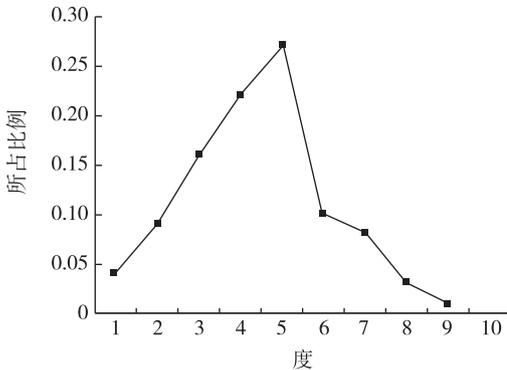


图 3 网络模型 A 的度分布

Fig. 3 Degree distribution of network A

2.2.4 平均最短路径分析

网络的平均路径长度是指网络中所有节点之间距离的平均值,它描述了网络中任意 2 点之间所经过的最小边数. d_{ij} 定义为连接这 2 个节点的最短路径的边数, N 为网络节点数. 网络的平均路径长度也称为网络的特征路径长度 (characteristic path length).

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

在模型 A 中,平均最短路径表示,任 2 个城镇要经过多少其他城镇才能到达,其平均最短路径为 15.208. 表示江苏任一城镇到达另一城镇平均要经过 15 个其他的城镇才能到达. 而模型 B 中,平均最

短路径表示,任 2 条公路要经过多少条其他公路可以通达,其值为 3.863,即江苏任 2 条公路平均经过约 4 条其他公路就可到达.

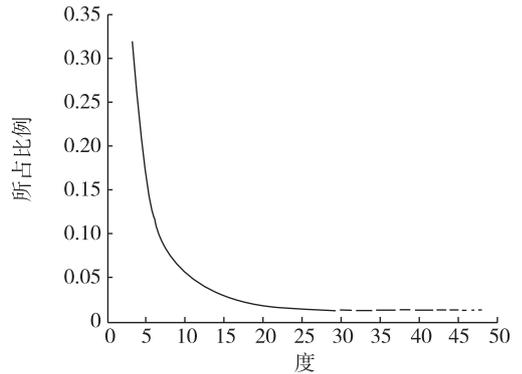


图 4 网络模型 B 的度分布

Fig. 4 Degree distribution of network B

2.2.5 集聚系数分析

集聚系数 (clustering coefficient) 在网络中的意义是线路 A 与线路 B 相交,线路 B 与线路 C 相交,那么线路 A 与 C 也相交的概率. 假设复杂网络中的一个节点 i 有 k_i 条边将和其他节点相连,这 k_i 个节点就是节点 i 的邻居. 显然,在这 k_i 个节点之间最多可能有 $k_i(k_i-1)/2$ 条边,而这 k_i 个节点之间实际存在的边数和总的可能存在的边数 $k_i(k_i-1)/2$ 之比就定义为节点的集聚系数,即

$$C_i = \frac{2E(i)}{k_i(k_i-1)} \quad (2)$$

经过统计计算,A 模型的集聚系数比较小,只有 0.186,说明与一节点相邻城镇间的公路直接通达率较小. 相比之下,B 模型的集聚系数比较高,达到 0.782,其值说明,与一公路交叉的公路间,它们之间也互相交叉的情况很多.

经统计计算,得到 2 种网络的静态参数统计表,如表 1 所示.

2.3 静态参数分析结果与讨论

A 网络模型不具有小世界效应,且集聚系数小,度分布接近于泊松分布,呈现出明显的随机网络特征,因此可以确定用此模型建立的网络属于随机网络. 此网络模型特征说明,尽管江苏省各城镇在规划自己地区的公路网时,考虑到当地的具体情况,进行了有选择性、有针对性的路网布局,但是,从全省路网模型来看,整体仍然呈现出了随机网络特性,而随机网络一显著特点,就是集聚系数较小,在实际情况

表1 江苏省公路网络拓扑特性静态参数统计

Table 1 Statistical table of topologic static parameters of Jiangsu road network

项目	邻接城镇网络模型 (A 模型)	公路线路网络模型 (B 模型)
节点数	426	284
边数	1 337	1 553
连通情况	100	100
平均度(k)	3. 893	7. 197
度分布 $p(k)$	泊松分布	幂律分布
平均路径长度 L	15. 208	3. 863
集聚系数	0. 186	0. 782

中表现为各城镇之间互相直达的路网情况还不够理想,往往去一目的城镇要绕道其他城镇的情况. 根据公路建设应超前于社会经济理论,江苏作为全国著名的经济大省与强省,适度地加快各城镇之间直达路网建设,增强路网密度,将是公路发展的一个重要方向.

B 网络模型表现为较小的平均路径长度,集聚系数大,度分布接近于幂律分布,且具有明显的小世界效应,可以认定其为典型的无标度网络. 该类型网络具有 2 个明显特点:增长特性和优先连接特性. 在本文中表现为各较低等级公路更倾向于与高速,国道、省道等主干线路相连接,而级别较低的公路,与其交叉相连的公路非常稀少;同时尽管选取了全省 284 条够级别的公路作为研究对象,结果发现全省这些公路间平均只需跨越不到 4 条,就可到达江苏省内的任一公路线,表现出了极其显著的小世界性.

3 江苏省公路网可靠性研究

3.1 路网可靠性测度指标

结合江苏路网模型的静态参数分析,我们选择如下的量化测度指标作为江苏路网模型可靠性的评价指标.

1) 网络的全局效率 E_{glob}

$$E_{\text{glob}}(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

其中, N 表示路网节点总数, d_{ij} 表示网络中任意 2 个节点间的最短路径长度. 路网的全局效率说明江苏路网模型的整体连通性,其中 $0 \leq E_{\text{glob}}(G) \leq 1$. 当 $E_{\text{glob}}(G) = 1$ 时,说明路网模型中任意 2 个节点都直接相连,此时网络的连通可靠度最高;当 $E_{\text{glob}}(G) = 0$ 时,说明网络中的所有节点都是孤立的,网络的

连通可靠性最差,因此 $E_{\text{glob}}(G)$ 越接近 1,江苏公路网络的连通可靠性越好.

2) 网络整体效能降低比例 S

$$S = \frac{N'}{N} \quad (4)$$

其中 N' 表示江苏路网模型遭到攻击后的节点的数目, N 表示的是未遭到攻击时江苏公路网络的节点总数. 网络整体效能降低比例说明的是网络遭到破坏前后网络拓扑结构变化情况,通过比较网络遭到攻击前后的网络整体效能降低比例能够直观明了地反映网络遭到攻击与破坏的程度. S 越接近 0,说明网络遭到攻击后破坏程度越大.

3.2 江苏省公路网可靠性分析

复杂网络面临着 2 种攻击:1) 随机性攻击,通常的随机性攻击指的是网络中的节点以某种概率被随机的攻击与破坏;2) 选择性攻击,所谓的选择性攻击是指网络中节点按一定的策略进行攻击,通常是指从网络中度最大的节点开始移除. 本文分别采用 2 种攻击方式对 A, B 网络模型进行攻击仿真研究.

A 网络模型. 1) 随机性攻击. 将 A 模型的城镇节点进行 1 至 426 进行编号,通过计算机产生 1 至 426 的随机数,按顺序对相应的节点进行去节点攻击. 2) 选择性攻击. 按城镇节点度的大小进行选择性攻击,当度相同时,以编号由小到大的顺序进行相应的去节点攻击操作.

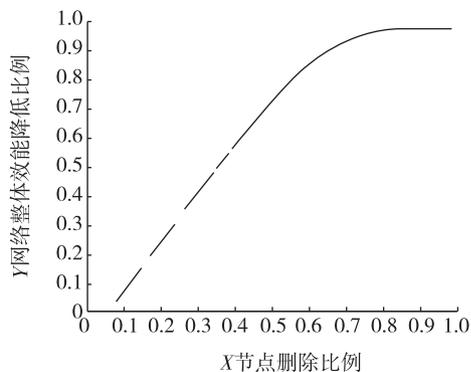


图5 网络模型 A 随机性攻击时网络整体效能变化

Fig. 5 Efficiency curves of network A under random attack

图 5、6 为模型 A 在随机攻击和选择性攻击下的模拟结果. 可以看出:模型 A 在随机攻击下,表现出较弱的鲁棒性,这与其具有的网络特征有着密切关联;同时发现,2 种攻击下,在某些节点,网络整体效能发生跳跃式的变化,与这些节点的度值较大,为网络关键节点,其移除对网络整体效能影响较大有关.

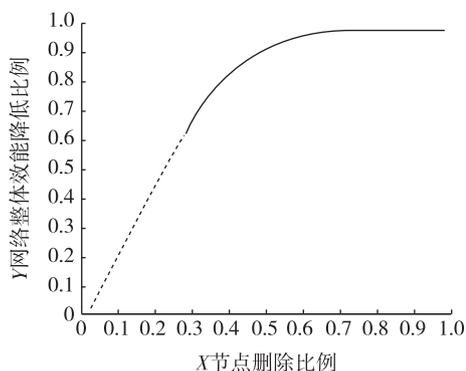


图6 网络模型 A 选择性攻击时网络整体效能变化

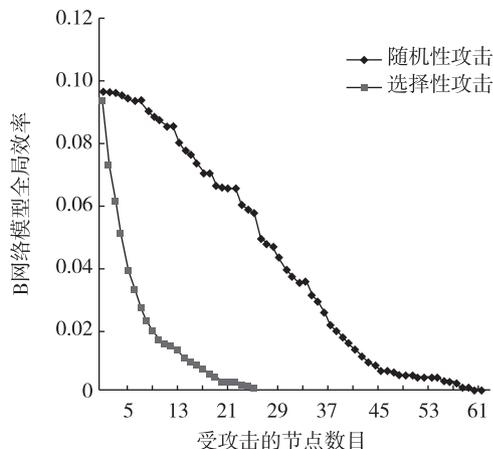
Fig.6 Efficiency curves of network A under selective attack

B 网络模型. 1) 随机性攻击. 将 B 模型的城镇节点进行 1 至 284 进行编号, 通过计算机产生 1 至 284 的随机数, 按顺序对相应的节点进行去节点攻击. 2) 选择性攻击. 按城镇节点度的大小进行选择性攻击, 当度相同时, 同样以编号由小到大的顺序进行相应的去节点攻击操作.

图 7 为模型 B 在随机攻击和选择性攻击下的模拟结果. 图中红色线表示选择性攻击, 蓝色线表示随机性攻击. 从图 7 可以明显看出, 网络模型 B 在选择性攻击破坏时, 全局效率下降地非常快, 当选择性攻击网络中 5 个节点即近 1.76% 公路后, 此时网络的全局效率为 0.048, 网络的全局效率已下降为原来的一半, 说明此时的网络效率已经比较差了, 而随机性要攻击 26 个节点即 9.15% 的公路后才能达到这样的破坏程度. 当选择性攻击网络 8.8% 的节点后, 网络的效率变为 0, 说明此时江苏的路网已经崩溃, 而要随机性攻击 21.48% 的公路后, 江苏的路网才失效. 产生这种情况的原因是由于选择性攻击都是选择度比较大的节点进行攻击, 当我们攻击这些关键节点时, 网络的拓扑结构就会发生剧烈的变化, 从而产生较多的孤立节点, 造成网络失效; 而在随机性攻击时, 攻击这些关键节点的概率较小, 因此要攻击较多的节点, 才能造成网络的崩溃.

4 总结与展望

根据复杂网络与图论的相关理论, 通过将江苏路网建立了邻接城镇网络模型 (A 模型) 与公路线路网络模型 (B 模型) 后, 分别对其进行了拓扑特征分析, 结果表明 A 网络模型较接近于随机网络, 通过进一步分析, 发现其拓扑结构比较满足随机网络的一些典型特征; B 网络模型较接近于无标度网络, 并

图7 网络模型 B 随机性攻击与选择性攻击时
网络全局效率变化Fig.7 Efficiency curves of network B under
random attack or selective attack

具有典型的小世界效应, 进一步研究发现江苏省公路网平均只需跨越不到 4 条, 就可到达省内的任一公路线, 具体相关结论内容在文中相关综述中均做了一系列的阐述. 最后, 分别就 2 种方式建立的模型进行了稳定性分析, 结果表明, A 网络模型对随机性攻击表现出了较弱的抗毁性; B 网络对随机性攻击显示了较强的鲁棒性, 而对选择性攻击时, 网络的抗攻击能力表现极差.

虽然目前对复杂网络与图论的研究取得了一系列的进展, 本文也对江苏省路网进行了一定程度的分析与研究, 得出了一些结论, 但人们对复杂网络与图论的认识, 还只是冰山一角, 在相关领域的研究还将大有作为. 在交通综合运输体系中, 公路是基础中的基础, 先导中的先导, 目前国内利用复杂网络与图论相关理论知识研究路网问题的工作相对而言还较少, 本文对路网相关问题研究进行了初步的尝试, 希望能够起到抛砖引玉的作用, 吸引更多的专家与学者参与到相关问题的研究中来.

参考文献

References

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393: 440-442
- [2] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286: 509-512
- [3] Amaral L A N, Scala A, Barthélemy M, et al. Classes of behavior of small-world networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 21: 11149-11152

- [4] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small world network[J]. *Physica A*, 2002, 314: 109-113
- [5] 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
- [6] 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): 79-84
GAO Ziyou, WU Jianjun, MAO Baohua, et al. Study on the complexity of traffic networks and related problems [J]. *Communication and Transportation Systems Engineering and Information*, 2005, 5(2): 79-84
- [7] 王志强, 徐瑞华. 基于复杂网络的轨道交通路网可靠性仿真分析[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(20): 6670-6674
WANG Zhiqiang, XU Ruihua. Reliability simulation analysis of urban rail transit networks based on complex network[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(20): 6670-6674
- [8] 金雷. 基于复杂网络的地域公路交通网抗毁性分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学计算机学院, 2008
JIN Lei. Survivability analysis of road traffic network in the area based on the complex network [D]. Changsha: College of Computer, National University of Defense Technology, 2008

Complexity analysis of Jiangsu road network

MA Jieliang¹ CAO Xiang¹ ZHOU Xuhui¹

¹ School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract This article makes an abstraction of the transportation network in Jiangsu province, a town connecting network model and a bus route network model are both established here. Complex network, graph theory and related theories used to analyse the topological structure of the two models. By calculating and analysing the static parameters of two models, we can find topological properties of different models; at last, we study the anti-destroying ability of two models. We hope it can provide some new references for the road construction and development of Jiangsu province from another angle.

Key words complex network; graph theory; survivability; highway network