

世界航运网络复杂性分析

田 炜¹, 邓贵仕^{*1}, 武佩剑¹, 车文娇²

(1.大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116024;
2.东北财经大学 国际经济贸易学院, 辽宁 大连 116025)

摘要: 航运系统可以抽象为由港口和航线构成的网络,这个网络的结构与几何性质对港口与航线的规划和管理具有重要的影响.在对复杂网络的形成、特性和代表性研究成果简要总结的基础上,对马士基航运集团下属的航运网络进行了实证分析,研究了国际航运网络表现出的小世界与无标度特性,并对其具有的一些不符合典型复杂网络统计特性的现象进行了分析.可为今后政府和企业的航运线路、港口建设规划及管理提供科学的研究手段和理论支持.

关键词: 复杂网络; 小世界; 无标度; 航运网络
中图分类号: O173; TP39 **文献标识码:** A

0 引 言

真实世界中存在的大量复杂系统都可以用网络来描述,其中网络的节点可以用来表示真实系统中的个体,而边可以用来表示系统中个体间的相互关系.

20世纪50年代,匈牙利数学家 Erdős, Rényi(ER)将无明确设计原理的、具有随机连接关系的大规模网络定义为随机网络,其建立的ER随机网络模型中,首先给定网络中的定点数目,然后任意两点之间以相同的常数概率连接在一起完全随机地构成网络.例如由 n 个点构成的图中,可以存在的边数为 C_n^2 ,从中随机地连接 m 条边所构成的网络就叫随机网络,这就是最简单的复杂网络.该模型自提出后一直在网络研究中扮演重要角色,被广泛应用于社会学和生态学的研究.

复杂网络是描绘和研究复杂系统拓扑结构和行为的关键因素,近年来已逐渐成为科学家们研究的热点之一.随着学科之间的相互交叉和不断融合,科学家们目前已经开始对复杂性科学进行交叉研究,运用图论、统计等方法研究了多种复杂网络各自的特性.

但是近年来,对一些大规模复杂网络的统计研究表明,大量的真实网络(包括社会网络、计算

机网络、生物网络等)并不符合随机网络模型的定义,比如说普遍存在的动态演化系统表现出的“马太效应”(即“富者愈富”现象).同时,国际上两项开创性工作在全球范围内引发了现代意义下复杂网络研究的浪潮,即1998年 Watts等提出的小世界网络模型^[1]与1999年 Barabási等提出的无标度网络模型^[2-3].

在小世界网络与无标度网络的理论背景下,复杂网络的研究进展得非常迅速,国外的研究者有不少领域和行业均提出了一些模型和研究结论,包括 Newman和 Moore、May和 Lloyd等学者在小世界网络中病毒的传播、Internet网络的病毒传播及病毒在无标度网络中的动态传播模型的研究^[4-7]; Guimer等对美国航空线路网络进行的分析^[8]; Sen等对印度铁路网络研究得出的铁路网络的“小世界网络”性质^[9].国内的学者也在复杂系统的理论基础上进行过一些分析,例如周涛等在网络免疫方面以及 SARS病毒传播方面进行的研究等^[10-12].

但是,人们对于复杂网络的拓扑结构、网络宏观性质的微观生成机制以及网络的动力学行为研究并没有得出较完善的结论,所以充分运用调查统计的手段以及现今国际上丰富的数据资源和当

收稿日期: 2006-08-12 修回日期: 2007-06-03.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70272050).
作者简介: 田 炜(1978-),男,博士生;邓贵仕*(1945-),男,教授,博士生导师.
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

前计算机的处理能力,找出现实社会中各种复杂系统结构的拓扑特征,并在其实证研究的基础之上对系统所处的领域对象进行分析,具有非常重要的实质性意义^[13-14].

本文从复杂网络理论的角度出发,通过对世界航运网络的统计与计算机仿真,揭示国际港口间航线分布的一些复杂网络特性,并结合实际的自然社会因素对其进行分析,以期为今后港口建设规划和航线分布的辅助决策提供理论支持.

1 世界航运网络的复杂性

面对全球一体化和海上贸易的迅速发展,全球范围内的许多港口,包括我国的各大港口城市均作出了积极的反应,投入巨额的资金建设新的港口配套设施,并加快相关产业部门的现代化进程,力争成为当今港口业的霸主.

港口业的许多决策都要依赖于航线的形成和发展,在船舶吨位以及相应的港口规模大型化趋势趋于缓和的情况下,能否成为主要航线的重要停靠港已成为港口规划一个至关重要的决策因素.同时,航线的运量以及费率的变化,也影响着港口的正常运营.著名的海事咨询公司 Howe Robinson 最新统计显示,2004 年全球东西主干航线累计新增运力 50.2 万 TEU(国际标准箱单位),供给超过需求约 7.9 万 TEU,同期在南北航线和支线上,新增货运需求 65 万 TEU,而供给仅为 13.6 万 TEU. Howe Robinson 指出,2005 年主干航线供过于求,南北航线和支线服务供不应求的现象仍在继续,而且呈现进一步加剧的趋势.班轮公司将不但可能为此蒙受损失,而且还可能对供应链运转的效率构成巨大威胁.

如何在现代竞争激烈的港口、航运业内进行港口间复杂航线网络的合理规划,提高供应链运转效率是急需解决的一个世界性问题.从复杂网络的角度出发,对世界航运网络进行分析,将有可能为港口、航线的规划问题提供必要的决策信息.

在对世界航运网络进行分析前,有必要对复杂网络的小世界效应和无标度特性进行简要的概述.

(1) 小世界效应指网络既具有与规则网络类似的聚类性,又具有与随机网络类似的较小的平均路径长度.

网络的聚类性指网络包含了许多群落,在群落内具有较高的连线密度,但群落间的连线密度

却比较低.网络中节点的聚集情况可以用聚集系数 C 来描述,例如节点 i 与其他 k_i 个节点相连接,且这 k_i 个节点间的实际连接数为 E_i ,则节点 i 的聚集系数 $C = 2E_i / k_i(k_i - 1)$,而网络的聚集系数为网络中所有节点聚集系数的平均值.显然,在全连通网络中,聚集系数 $C = 1$,而在随机网络中,聚集系数 C 远小于 1.

网络研究中,一般定义两个节点间的距离为连接两者的最短路径的边的数目.在小世界网络中,两点之间最短路径的长度一般远远小于整个网络的大小.网络平均路径长度 l 定义为所有节点对之间距离的平均值,即 $l = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n l_{\min}(i,j)$,其中 n 为网络中节点数目, $l_{\min}(i,j)$ 为任意两节点间距离,用网络平均路径长度可以描述网络中节点间的分离程度.

(2) 无标度特性指复杂网络的节点连接度分布具有幂律形式,即网络中任意一个节点恰好有 k 条边的概率 $P(k) \sim k^{-\gamma}$.由于幂律分布没有明显的特征长度,该类网络被称为无标度网络.度分布刻画了网络的连接程度和连接水平,将影响网络的弹性.如果随机地去掉无标度网络中的一些节点,那么网络的直径及其平均路径长度几乎不变;而有目的地去掉无标度网络中的一些节点(如 Hub 节点),其网络的直径将会大幅度增大,同时将有可能使网络中的其他节点之间大面积丧失通信和交互能力,从而降低了网络的有效性.

现实网络的无标度特性源于众多网络所共有的两种生成机制:① 网络通过增添新节点而连续扩张,即增长性;② 新节点择优连接到具有大量连接的节点上,即偏好依附性.而世界航运网络的成长就一般感性认识而言,同样具有相同的特点:不断会有班轮公司设定新的航线,且新的航线更倾向于连接主要的航班停靠港.因此,以复杂网络的方法研究世界航运网络的成长和现状具有重要的现实意义.

2 航运网络的小世界效应与无标度特性分析

本文的世界航线数据来自于马士基(Maersk-Sealand)集团.该集团是世界最大的航运集团,约占全球市场份额的 18%,服务网络遍布六大洲.其世界航线数据的统计基本可反映目

前全球的国际航运状况。本文对其航运网络下的 180 多个港口及近千条航线组成的网络进行了无权处理,并作了如下的统计和分析^[15]。

马士基集团航运网络拓扑结构如图 1 所示。



图 1 马士基集团国际航运网络拓扑结构示意图

Fig. 1 Topological structure of courses network of Maersk-Sealand global shipping network

(1) 为了找出该网络的 Hub 节点,将其航线分布较密集的港口列举如表 1 所示。

表 1 马士基国际航运网络航线较密集港口列表

Tab.1 Ports with dense courses of Maersk-Sealand global shipping network

港口	国家(地区)	航线数量
Alg eciras	西班牙	32
Kaoh siung	中国台湾	18
Hong Kong	中国	16
Balboa	巴拿马	15
Gioia Tauro	意大利	15
Salalah	澳门	14
Suez Canal	埃及	14
Bremerhaven	德国	13
Los Angeles	美国	13
Tanjung Pelepas	马来西亚	13
Yantian	中国	13

从上表可以找到马士基国际航运网络中连接程度最高的节点是位于西班牙南部沿海直布罗陀海峡东北侧的阿尔赫西拉斯 (Alg eciras) 港。由于地处大西洋与地中海之间的要道,该港年货物吞吐量约 3 500 万吨,在地中海沿岸的各集装箱港口中名列第一,是集装箱中转往地中海沿岸和非洲地区的关键港口。

同时,从表中可以看出网络中航线连接较密集的港口(即网络中的 Hub 节点)在其辐射面积、自然资源分布以及经济状况等因素的影响下呈现

出一种地域散落状态,其位置分散于亚、欧、美等各大洲并在其地域辐射范围附近呈现出一种网络的多群落性。从现实情况下分析,某个子群落的 Hub 节点(即港口)的运转状况将会同时影响其所在群落的节点以及群落外节点的运转效率。

(2) 为了找出马士基航线网络中任意两个节点间的最短路径,首先将 180 多个港口之间的近千条航线关系转化为邻接矩阵予以存储和表示,以“layer-layer”的模式对网络图进行宽度优先搜索,求解出任意两节点间的最短路径。

宽度优先搜索以一种系统的方式探寻图 1 的边,从而计算某源顶点 s 到某终点 d 的距离,同时生成一棵根为 s 顶点为 d 的优先树。虽然在人工智能中,宽度优先搜索算法属于盲目搜索算法,但是由于航线网络的有限性与较强的局部连通性,同时为避免产生大量的重复搜索,运用宽度优先搜索算法仍然是高效且易行的方法。

经过计算机仿真,计算出马士基国际航运网络的网络平均路径 $l = 3.94$,其网络中任意节点间最短路径数量 N_{sp} 统计结果如图 2 所示。

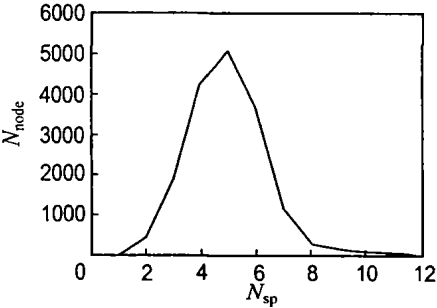


图 2 马士基国际航运网络最短路径分布示意图

Fig. 2 Distribution of shortest path between ports of Maersk-Sealand global shipping network

从图中可以看出,对于马士基航运网络来说,大部分港口节点之间的连接都可以在 6 步 (89.8% 的节点) 至 7 步 (96.4% 的节点) 间实现,基本符合“六度分离”的感性描述。同时,现实世界中港口位置的确定性与货轮续航能力的制约使得船舶航运网络不能像航空航运网络那样,可以在全球范围内任意节点间开通直达航线,所以出现了局部节点间最短路径过大的现象。

(3) 通过计算机仿真计算,求解出任意节点的聚集系数,并依此求出网络的聚集系数 $C = 0.49$ 。由仿真结果可以看出,大部分节点都具有

较大的聚集系数,如图 3所示.

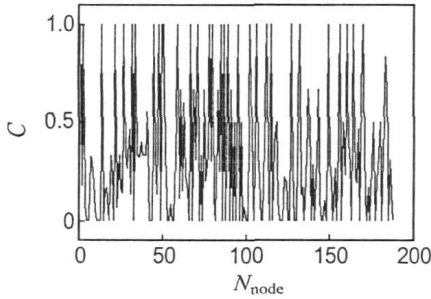


图 3 马士基国际航运网络节点聚集系数示意图

Fig. 3 Clustering coefficient of nodes in Maersk-Sealand global shipping network

而部分节点聚集系数较小的原因可以从航线的规划及运行成本得出结果,即为了最大化航运利益和减小航运成本,航线制定者不会在距离较近且已存在于某条航线中的某些港口城市间开通直达货运航线.

例如由于已存在航线贯通 Istanbul—Ambarli—Izmir这 3个均位于土耳其境内且距离接近的港口,Istanbul与 Izmir间将不再开通直达航线.如图 4所示.

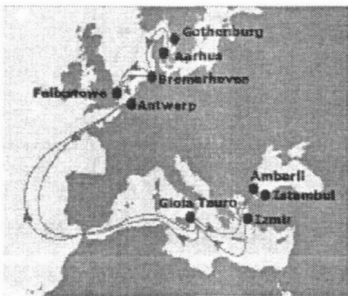


图 4 Istanbul—Ambarli—Izmir间航线示意图

Fig. 4 Course between Istanbul—Ambarli—Izmir

这种做法在现实世界中保证了航运公司的利益,减小了航运能力超过实际需求的可能性,但同时也降低了其航线拓扑网络的局部连通性及节点的聚集系数.

(4) 无标度网络的标志性特征在于其度分布符合幂律分布,而不同于过去的网络中度分布符合的泊松分布性质.对马士基航运网络中的节点度分布作统计后,描绘出其实际的度分布如图 5 所示.

从图示可以直观看出,马士基航运网络的节点度分布基本符合幂律分布的特性.为进一步求

证这一特性,本文通过计算机仿真进行幂律曲线的拟合.

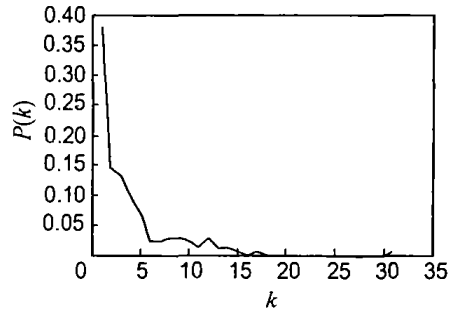


图 5 马士基国际航运网络节点度分布示意图

Fig. 5 Degree distribution of nodes of Maersk-Sealand global shipping network

首先设节点分布概率 $P(k) = T k^{-V}$,通过对数变换得到 $\log(P(k)) = \log T + (-V) \log k$. 对此对数表达式进行拟合得到 $T = 0.225, V = 1.76$, 即该网络的节点分布概率为 $P(k) = 0.225 k^{-1.76}$,拟合结果如图 6所示 (实线为幂律分布拟合曲线).

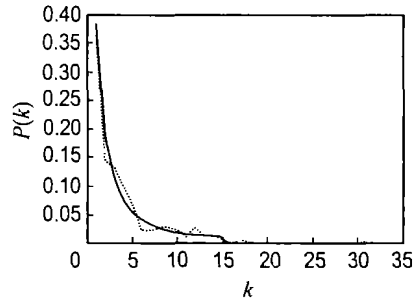


图 6 度分布幂律曲线拟合示意图

Fig. 6 Power law propensity of degree distribution

3 结 语

从上述仿真及统计结果可以看出国际航运网络具有的某些小世界和无标度特性,包括较短的网络平均路径和节点度分布的幂律特性.其网络的聚集系数虽然不是很大,且存在局部节点聚集系数偏小的问题,与理想的无标度网络存在一定差距,但这也恰好证实了航线网络的现实性,说明航线的制定和规划受到现实世界中政治、地理、经济等方面因素的影响.这种影响对复杂网络的形成及其内部运转机制具有较大的约束作用.

但是,正由于海上贸易的运输距离长、环节多且面临各种复杂条件(包括地理、气候等各方面因

素) 的特点,在以复杂网络的思想来研究国际航运网络时就需要考虑更多的社会因素. 同时,其网络特性的揭示也说明,作为一种研究方法,从复杂网络理论基础出发,建立港口-航线网络模型和优化算法,结合航线的运力以及港口的吞吐量,为港口、航运业领域内航线的分布以及港口的规划提供辅助决策,并对全球范围内的航线运力(集装箱量等)进行分析以实现最终的对具体港口城市的吞吐量预测并提高供应链运转效率的思路是可行的.

参考文献:

- [1] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small world networks [J]. **Nature**, 1998, **393**: 440-442
- [2] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks [J]. **Science**, 1999, **286**: 509-512
- [3] ALBERT R, BARABASI A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. **Rev of Modern Phys**, 2002, **74**: 47-97
- [4] NEWMAN M E J. Spread of epidemic disease on networks [J]. **Phys Rev E**, 2002, **66**: 016128
- [5] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks [J]. **SIAM Rev**, 2003, **45**(2): 167-256
- [6] MOORE C, NEWMAN M E J. Epidemics and percolation in small-world networks [J]. **Phys Rev E**, 2000, **61**: 5678-5682
- [7] MAY R M, LLOYD A L. Infection dynamics on scale-free networks [J]. **Phys Rev E**, 2001, **64**: 066112
- [8] GUIMERA R, AMARAL L A N. Modeling the world-wide airport network [J]. **Eur Phys J B**, 2004, **38**: 381-385
- [9] SEN P, DASGUPTA P, CHATTERJEE A, *et al.* Small-world properties of the Indian railway network [J]. **Phys Rev E**, 2003, **67**: 036106
- [10] YAN G, ZHOU T, WANG J, *et al.* Epidemic spread in weighted scale-free networks [J]. **China Phys Lett**, 2005, **22**(2): 510-513
- [11] 周 涛,傅忠谦,牛永伟,等. 复杂网络上传播动力学研究综述 [J]. 自然科学进展, 2005, **15**(5): 513-518
- [12] LI W, CAI X. Statistical analysis of airport network of China [J]. **Phys Rev E**, 2004, **69**: 046106
- [13] 车宏安,顾基发. 无标度网络及其系统科学意义 [J]. 系统工程理论与实践, 2004, **24**(4): 11-16
- [14] 刘 涛,陈 忠,陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述 [J]. 系统工程, 2005, **23**(6): 1-7
- [15] Maersk Line. [2005-09-12]. [Http://www.maersksealand.com](http://www.maersksealand.com)

Analysis of complexity in global shipping network

Tian Wei¹, Deng Gui-shi^{*1}, Wu Pei-jian¹, Che Wen-jiao²

(¹Inst. of Syst. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

²College of Int. Econ. & Trade, Dongbei Univ. of Finan. & Econ., Dalian 116025, China)

Abstract Shipping system can be defined abstractly as a network composed of ports and sea routes. The structure and the geometric characteristics of the network have important effects on the layout and management of ports and sea routes. Based on the brief summarization of the development, properties and representative research achievements of complex networks, an empirical analysis in Maersk-Sealand group's global sea routes network is made. It focuses on the small-world effect, scale-free properties, analyzing the reasons accounting for some individuality of the network. The research is designed to provide the government and shipping enterprises with scientific research methods and theoretical support for the management of the ports and the programming of sea routes in the future.

Key words complex network; small-world; scale-free; shipping network