

文章编号:1006-7736(2009)02-0034-04

## 班轮航运网络拓扑特性\*

牟向伟, 陈燕, 杨明, 李桃迎  
(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**为获得班轮航运网络的结构特点,对现实航线数据进行计算机仿真,并利用复杂网络理论对网络的拓扑特性进行统计与分析.结果表明,班轮航运网络有一定的小世界特性,具有较短的平均路径长度和较大的聚类系数;其度分布服从幂律分布且具有典型的无标度网络特性;班轮航运网络具有富人俱乐部特性;其同配性系数为0.0574,未体现出明显的同配性.

**关键词:**班轮航运网络;复杂网络;小世界;无标度

**中图分类号:**U692.31

**文献标志码:**A

### Topological features of liner shipping network

MU Xiang-wei, CHEN Yan,  
YANG Ming, LI Tao-ying

(College of Transportation Management,  
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Statistical topological features of network were analyzed by combining complex networks theory with computer simulation of actual ship route data to get the structure characteristics of liner shipping network. Simulation and analysis results show that liner shipping network (LSN) is a small-world network with short average path length, high degree of clustering and its degree distribution follows a power law, the rich nodes' connectivity in the network is evidently higher than the others. The assortativity coefficient of LSN is 0.0574 and not obvious assortative.

**Key words:** liner shipping network (LSN); complex networks; small-world; scale-free

## 0 引言

随着世界各国经济的发展和全球经济一体化的进程,班轮运输以其安全、便利操作及方便采用多式

联运等特点,成为海运市场最为重要的组成部分.由港口和班轮航运组成的航运网络数据量大、关系复杂,其分析和处理已不能完全依靠一般的理论和方法.20世纪末,以文献[1]提出的小世界网络和文献[2-3]提出的无标度网络为标志,众多学科都应用复杂网络理论来表述:以个体、事物或组织作为复杂网络中的节点,以它们之间的各种联系作为网络的边,分析系统的各种特性,从而更好地了解各种网络.国内外学者对来自不同领域的大量实际网络的数据进行了研究,并提出了一些有价值的模型和结论,如文献[3]对病毒的传播模型的研究;文献[4]对病毒在无标度网络中的动态传播模型的研究;文献[5]对Internet网络的研究;文献[6]研究并提出了受地缘政治影响的航空网络模型;文献[7]分析了印度铁路网络的“小世界网络”性质;文献[8]对世界航运网络抽象成无向网络的复杂性进行了分析.通过已有的研究可以看出,复杂网络理论很好地解释了复杂系统的形成机理和组织原则,并能够建立恰当的模型去拟合系统的自组织过程.

本文将复杂网络理论应用于班轮航运网络(LSN),利用实际航线数据对网络进行计算机仿真,并分析了班轮航运网络系统结构的静态统计特性,应用航运领域相关理论知识揭示了产生这些特性的原因,为以后分析班轮航运网络统计性质的意义与产生机理提供理论支持.

## 1 班轮航运网络

本文班轮航线数据来自达飞轮船有限公司,网络共255个节点,846条边.达飞班轮航线是挂靠式航线,如:由巴森斯出发,挂靠蒙托伊尔、布雷斯特和

\* 收稿日期:2008-03-20.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200801510001).

作者简介:牟向伟(1982-),男,辽宁大连人,博士研究生.E-mail: Xiangwei.mu@gmail.com.

通信作者:陈燕(1952-),女,辽宁大连人,教授,博士生导师.E-mail: chenyan\_dlmu12@163.com.

勒阿弗尔,最后由勒阿弗尔返回巴森斯.在此班轮航线中,由于巴森斯和蒙托伊尔、蒙托伊尔和布雷斯特等港口间航线的非双向性,本文认为班轮航运网络应该归为有向网络,如图1所示.

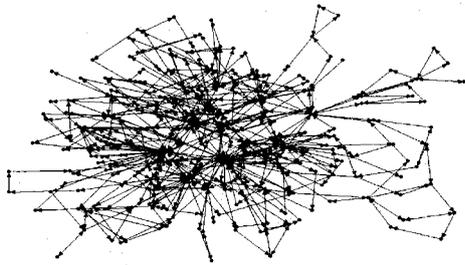


图1 达飞班轮航运网络模拟图

## 2 班轮航运网络的特性分析

### 2.1 平均路径长度

定义网络中任意两点间的距离为连接两点的 shortest path 所包含的边的数目,对所有节点对的距离求平均,得出网络的平均路径长度( $L$ ).网络中两个节点  $i$  和  $j$  间的距离  $d_{ij}$  定义为连接该两个节点 shortest path 上的边数.网络中任意两个节点之间距离最大值称为网络的直径<sup>[9]</sup>,记为  $D$ ,即

$$D = \max_{i,j} d_{ij} \quad (1)$$

网络的平均路径长度  $L$  定义为任意两个节点之间的距离的平均值<sup>[9]</sup>,即

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

其中, $N$  为网络节点数.

对于上述航运网络, $L_{LSN} = 5.156$ .较其他类型交通网络,班轮航运网络平均路径长度较长,如中国航空网络的平均路径长度仅为  $2.067^{[10]}$ .理想的小世界网络之所以在拥有较高聚类系数的同时又具有较短的平均路径长度,是因为网络中捷径的增加使得平均路径长度快速下降.然而,在班轮航运网络中因为海洋气候水文神秘莫测,航线选择与规划要考虑众多因素,如各国间贸易的可能性、港口间贸易货流向、经营性质、港口情况、各国法令政策、当时经济条件和未来趋势等,而且考虑到港口位置的物理条件、货轮续航能力和运输成本等约束条件,使得班轮航运网络不能像航空网络那样可以在全球范围内任意节点间开通直达航线,因此出现了最短路径较大的现象.

文献[8]在对马士基班轮航线网络分析后得到  $L = 3.94$ ,原因在于本文是按照有向网络来计算,而

前者提出的网络是无向网络,在将有向网络转化为无向网络的过程中大大减小了任意两个节点之间的距离,从而使得网络平均路径变小.将本文所描述的有向网络无向化处理,即对网络中每条边用两条有相同端点的对称边代替,得到对称有向图,经过计算得到平均路径长度为  $3.942$ ,航运网络被归为有向网络更符合班轮航线的实际情况.

### 2.2 聚类系数

节点的聚类系数定义为其与所有相邻节点间的实际连接数目占可能的最大连接边数目的比例.网络的聚类系数  $C$  为所有节点聚类系数的平均值.一般的,假设一个网络中的一个节点  $i$  有  $k_i$  条边,将其与其他节点相连,该  $k_i$  个节点称为节点  $i$  的邻居.显然,在该  $k_i$  个节点之间最多可能有  $k_i(k_i - 1)/2$  条边,而这  $k_i$  节点之间实际存在的边数  $E_i$  与总的可能的边数  $k_i(k_i - 1)/2$  之比即定义为节点  $i$  的聚类系数  $C_i^{[9]}$ ,

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

通过计算得到网络的每一个港口节点的聚类系数,并以此求出网络的聚类系数  $C_{LSN} = 0.594$ .小世界网络的典型特征是既拥有较短的平均路径长度又具有较高的聚类系数.在几类典型的小世界网络中,航空网络  $L = 2.2593$ 、 $C = 0.6574^{[10]}$ ,电影演员合作网  $L = 3.48$ 、 $C = 0.78^{[11]}$ .在同等规模的随机网络中,

$$L_{\text{random}} \sim \frac{\ln N}{\ln \langle k \rangle} \approx 2.93$$

$$C_{\text{random}} \sim \frac{\langle k \rangle}{N} \approx 0.026$$

由上述比较结果可以看出,同等规模的随机网络的平均路径长度( $L_{\text{random}}$ )与班轮航运网络平均路径长度( $L_{LSN}$ )相差不大;而班轮航运网络的聚类系数( $C_{LSN}$ )远远大于同等规模的随机网络的聚类系数( $C_{\text{random}}$ ),故班轮航运网络具有一定小世界特性.

造成聚类系数较大的原因是班轮公司为充分利用资源提高船舶经济效益,在制定班轮航线过程中一般遵循“大船大线”理论,即从事长距离国际营运的船舶趋向于大型船舶,虽然“大船大线”的船舶周转量大,但是运输成本高、风险大、航次时间长,所以只有少数大型船舶负责长距离的运输,因此“大线”在班轮航线中出现的频率小,造成在班轮航线的网

络结构中有一定的集聚性和区域性,即某一个区域或地区的港口之间有密集的航线相连,而区域或地区之间的关联边则很少,因此班轮航线网络的聚类系数较高.

### 2.3 度分布

定义节点度  $k$  为该点所连接的边数,即出度与入度之和.可用分布函数  $P(k)$  来描述具有相同度  $k$  的节点的出现概率.度是描述网络局部特性的基本参数,度分布函数则反映了网络系统的宏观统计特征.根据数据抽象出班轮航运网络模型,统计度为  $k$  的节点的频数,重复若干次取其平均值,然后以频率代替概率,即以网络中度数为  $k$  的点数占总点数的比例(频率)作为概率  $P(k)$  的近似值.由图 2 可见,节点度服从幂率分布.去除噪音点后经过拟合计算  $P(k) \sim 0.714k^{-1.4}$ ,拟合效果如图 3 所示.

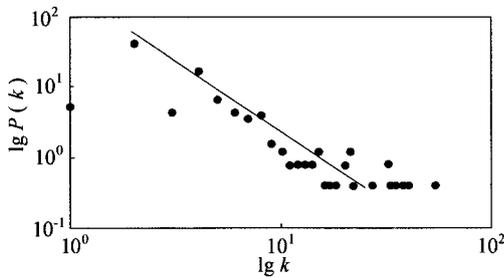


图 2 达飞班轮航运网络度分布

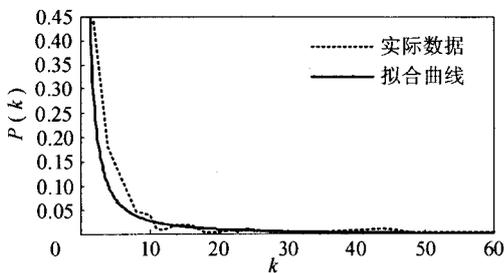


图 3 去除噪音点的航线网络度分布及拟合曲线

### 2.4 富人俱乐部特性

有些节点在网络中具有大量的边,这些节点称为“富节点”,这些“富节点”倾向于彼此之间相互链接,构成“富人俱乐部(rich-club)”<sup>[12]</sup>.用富人俱乐部的连通性来描述,其表示的是网络中前  $r$  个度最大的节点之间,实际存在的边数  $L$  与这  $r$  个节点之间总的可能存在的边数的比值,即

$$\Phi(r/N) = \frac{L}{r(r-1)/2} = \frac{2L}{r(r-1)} \quad (5)$$

如果  $\Phi = 1$ ,则前  $r$  个最富的节点组成的富人俱乐部为一个完全连通的子图.班轮航运网络具有明显的富人俱乐部特性,前 10% 的节点之间连通性较高,如图 4 所示.表 1 为达飞班轮航运网络中前 5 个航线

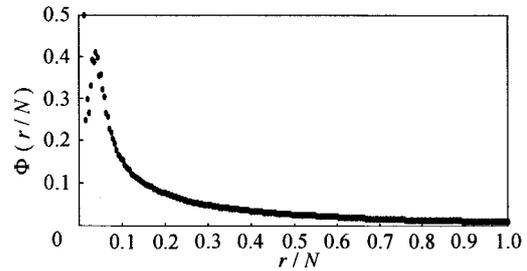


图 4 富人俱乐部连通性示意图

最为密集的港口节点.

表 1 达飞班轮航线密集港口列表

港口名称	所属国家	出度	入度
巴生港	马来西亚	24	30
勒阿弗尔	法国	18	22
香港	中国	38	27
鹿特丹	荷兰	35	11
汉堡	德国	12	22

网络中这些富节点的航线结构直观地表现出了轮辐式的特点,航空网络中轮辐式航线网络明显具有无标度特性.班轮运输航线形式有两种:多港挂靠和干线/支线.多港挂靠,即船舶在每个往返航次顺序挂靠若干港口;轮辐式航线在班轮航线中体现为干线/支线形式的航线,即在航线两端各选一个主干港,两个主干港之间构成航线干线.主干港必须条件优越,并配备大吨位集装箱船,支干港选择规模小的,可以充分发挥规模经济作用,这种方式虽然具有成本上的节约和效率上的提高,然而也会带来系统安全和稳定性方面的问题.

### 2.5 同配性

图 5 为达飞班轮航运网络所有具有给定度的节点的邻居节点平均度分布,即

$$K_{nn}(k) = \sum_{k'=1}^{k_{\max}} k'P(k'|k) \quad (6)$$

其中,条件概率  $P(k'|k)$  为度为  $k$  的节点连接到度为  $k'$  节点的概率.可见,一个节点的度越高,其邻居的平均度越低.这是因为网络中存在极少量的高连接度节点,而大多数节点的度比较低.对于高连接度的节点而言,尽管存在富人俱乐部现象,但其绝大多数邻居节点的度数很低.同时异配性也表现出节点之间相互选择的偏好性:如果  $K_{nn}(k)$  随  $k$  递增,度大的节点优先连接别的度大的节点,则网络是正相关的;反之,如果  $K_{nn}(k)$  随  $k$  递减,度大的节点优先连接度小的节点,则意味着网络是负相关的. LSN 的给定度节点的邻居节点平均度分布如图 5 所示.

但图 5 并不能明显展现网络的相关性,须通过计算同配性系数来进一步描述网络的相关性.同配

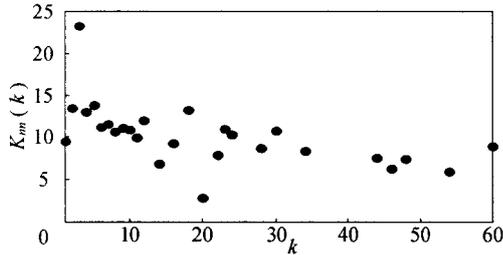


图5 给定度节点的邻居节点的平均度分布  
性系数定义为<sup>[11]</sup>

$$\gamma = \frac{M^{-1} \sum_i j_i k_i - [M^{-1} \sum_i \frac{1}{2}(j_i + k_i)]^2}{M^{-1} \sum_i \frac{1}{2}(j_i^2 + k_i^2) - [M^{-1} \sum_i \frac{1}{2}(j_i + k_i)]^2} \quad (7)$$

其中:  $j_i, k_i$  分别为第  $i$  条边的两个端点的度数;  $M$  为网络中边的条数;  $-1 < \gamma < 1$ . 若  $\gamma > 0$ , 则网络是同配的或正相关的; 若  $\gamma < 0$ , 则网络是异配的; 若  $\gamma = 0$ , 则网络无相关性. 通过计算得出  $\gamma_{LSN} = 0.0574$ .

### 3 结 语

研究表明,以港口为节点的班轮航运网络是一个小世界网络,在具有较短的平均路径长度的同时拥有较大的聚类系数,且其度分布服从幂律分布;班轮航运网络也具有富人俱乐部特性,体现出较弱的同配性.班轮航运网络与理想的小世界网络或无标度网络相比有一定的差距,这是因为在制定航线及航班时刻表的过程中不仅要考虑港口城市自身规模及所连接航线的多少,同时也要关注地理、政治、经济甚至是历史偶然事件等各种因素的制约和影响.

### 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] MOORE C, NEWMAN M E J. Epidemics and percolation in small-world networks[J]. Phys Rev:E, 2000, 61:5678-5682.
- [4] MAY R M, LLOYD A L. Infection dynamics on scale-free networks [J]. Phys Rev: E, 2001, 64:066112/1-066112/4.
- [5] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, et al. Complex networks: structure and dynamics[J]. Phys Rep, 2006, 424: 175-308.
- [6] GUIMERA R, AMARAL L A N. Modeling the world-wide airport network [J]. Eur Phys J B, 2004, 38(2):381-385.
- [7] SEN P, DASGUPTA S, CHATTERJEE A, et al. Small-world properties of the Indian railway network[J]. Phys Rev: E, 2003, 67: 036106/1-036106/5.
- [8] 田 炜, 邓贵仕, 武佩剑, 等. 世界航运网络复杂性分析 [J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(4):606-607.
- [9] 汪小帆. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [10] BAGLER G. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network [J]. Physica A, 2008, 387 (12):2972-2980.
- [11] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks [J]. SIAM Review, 2003, 45:167-256.
- [12] ZHOU S, MONDRAGON R J. The rich-club phenomenon in the internet topology[J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(3):180-182.