

基于复杂网络的国际航空客运网络结构分析

党亚茹^a, 周莹莹^b, 王莉亚^a, 李雯静^b

(中国民航大学 a. 民航科教评估中心; b. 经济与管理学院, 天津 300300)

摘要: 以 2003—2006 年国际航空旅客运输量和流向为数据构建, 通过可视化软件和复杂网络的理论和方法, 对国家/地区为节点所组成的国际航空客运网络结构进行研究。以平均路径长度、簇系数、度分布和中心性等网络结构特征指标为依据, 分析了国际航空客运网络结构特点和中国航空客运在网络结构中的结构特征。

关键词: 国际航空运输; 航空客运; 网络结构; 复杂网络理论

中图分类号: F561; N945.12

文献标识码: A

文章编号: 1674-5590(2009)06-0041-04

International Air Transport Network Structure Analysis Based on Complex Networks

DANG Ya-ru^a, ZHOU Ying-ying^b, WANG Li-ya^a, LI Wen-jing^b

(a. Civil Aviation S & T Educational Evaluation Research Center; b. Economics & Management College, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Based on the theory and methods of complex networks and visualization software, this paper analyzes the international air transport network structure by the data of international air passenger from 2003 to 2006. With the average path length, clustering coefficient, degree distribution and characteristics of network structures such as central indicators analysis of the international air passenger transport networks of the structural characteristics and China's air passenger in the network structure of the structural characteristics.

Key words: international air transport; air passenger; network structure; complex network theory

复杂网络研究是探索复杂性问题的一个重要研究领域^[1-4], 目前已涉及公路网络^[5-8]、铁路网络^[9-11]和航空网络^[12-14]等交通行业。在国内外航空网络研究中, 有许多科学家采用不同抽象方法从统计物理角度对各类航空网络进行研究^[12-17]。但复杂网络对以国家/地区为节点的国际航空网络的研究文献尚未见到。本文以复杂网络理论和方法, 从国家/地区角度对国际航空客运网络结构进行实证研究, 探讨国际航空客运网络所凸显的结构特征。

1 国际航空客运网络构建

以世界各国/地区间所构成的航空客运网络为研究对象, 设国家/地区为节点、客运关系为边, 组成复杂网络系统。首先, 对 2003—2008 年间 FAA、ICAO、AIAA 等出版的年报、年鉴等^[18-20]进行搜集, 经整理形成一个含 153 个国家/地区航班起讫地一目的地的流

向流量数据库。所统计的各国家/地区数据皆为国际航空客运数据, 不包含本国国内航空客运数据。而后采用邻接矩阵来表征国际航空客运网络: 设矩阵的元素为国家/地区的客运量, 如 k_{ij} 表示国家/地区 i 到国家/地区 j 的航空客运量, 继而形成一个 153×153 的矩阵, 利用复杂网络理论和方法对国际航空客运网络进行研究。

2 国际航空客运网络结构

2.1 主要国际航空客运网络结构概况

为清晰地呈现国际航空客运网络的结构, 采用阈值法对数据进行了基本处理 (分别采用统一阈值 80 万和 100 万)。利用 pajek 绘制出主要国家/地区间国际航空客运网络结构图, 如图 1 所示, 圆形节点和方形节点分别为该年度 80 万阈值和 100 万阈值处理后的国家/地区, 节点间边的粗细表示国家/地区间客运

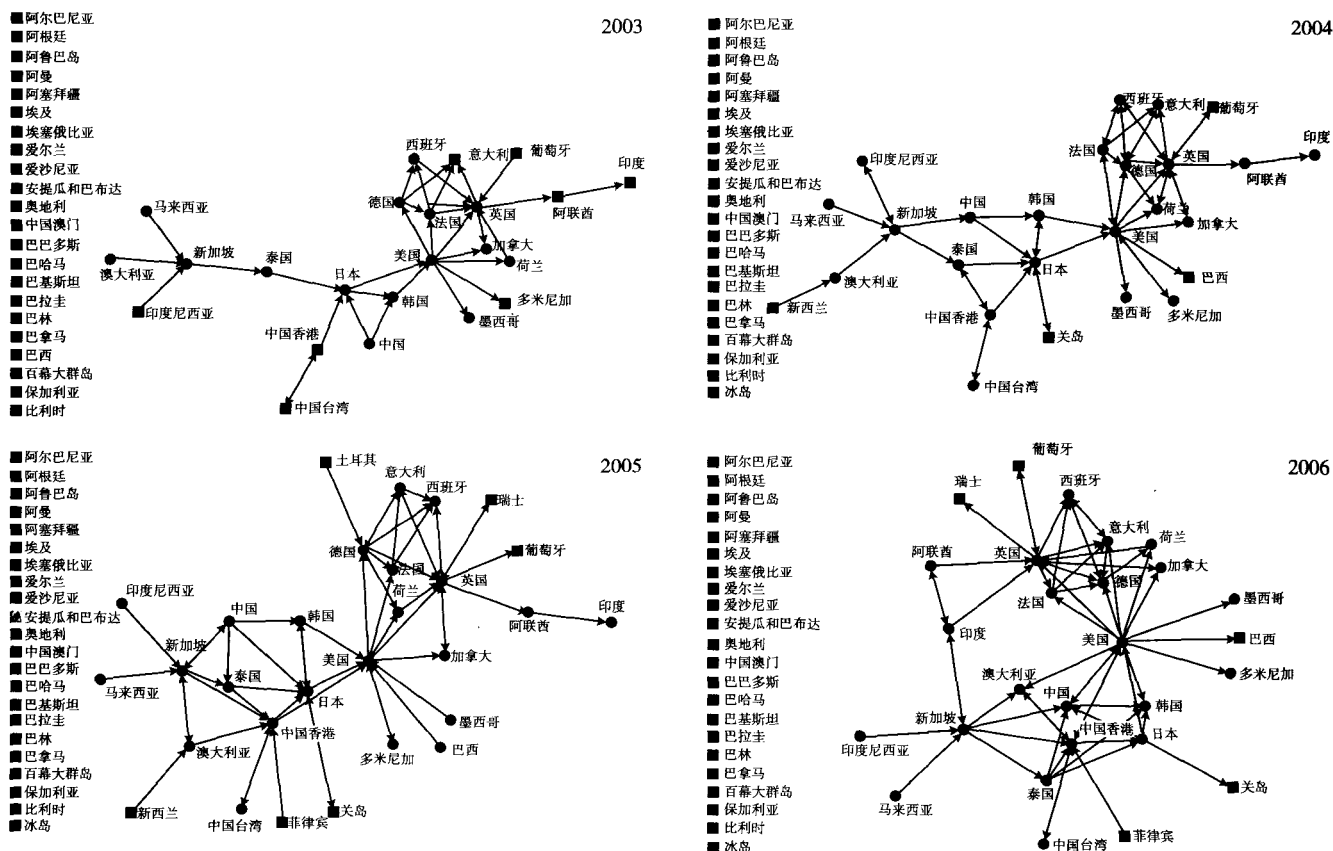


图1 2003—2006年主要国际航空客运网络结构图

Fig.1 Major international air passenger network (2003—2006)

量的大小。

2003—2006年,世界主要航空运输国家以美国为连接中心,北美欧洲、亚洲小集团逐渐形成,并由“两端式小集团”逐渐演化趋向同一集团状。2003年北美欧洲呈现小集团状,并以美国为中心连接,通向亚洲、澳大利亚;2004—2006年间,亚洲逐渐形成小集团,同时以美国为中心的美欧大洲相连的航空网络也逐渐形成。从图1中的增长数量来看,一些发展中国家如印度、墨西哥、巴西等逐渐成为世界主要国际航空客运网络的一部分,规模逐渐扩大且连接强度加强。以中国为例,2003年仅与日本、韩国连接,但在随后的3年里逐渐发展成亚洲及周边国家的中心,并增加了与美国、泰国等的连接。图1客观呈现出2003—2006年间主要国际航空客运网络整体和各节点的结构变化,同时也从流量的角度展现了网络整体和各节点间流量和流向的变化。

2.2 国际航空客运网络结构

簇系数、平均路径长度以及度分布通常作为复杂网络研究的基本几何量,其在国际航空客运网络中也有其具体的实际含义。

2.2.1 簇系数

簇系数反映国际航空客运网络的聚集程度,是某

个节点与所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例。利用 Barrat 等人定义公式为

$$C_i = \frac{1}{s_i(s_i - 1)} \sum_{j,k} \frac{w_{ij} + w_{jk}}{2} a_{ij} a_{jk} a_{ki} \quad (1)$$

式中: $s_i = \sum w_{ij}$ 为节点的点权; n_i 表示与节点 i 相邻的节点数; a_{ij} 为连接标志。整个网络的簇系数为网络中所有节点簇系数的均值。如表1所示,2003—2006年间网络的平均簇系数在 0.62 ~ 0.64,说明在 2003—2006年间国际航空客运网络的集团化程度已稳定保持在较高的水平。

表1 2003—2006年国际航空客运网络

Tab.1 Characteristics of international air passenger transport network (2003—2006)

年份	国家/地区数	连接	平均簇系数	平均路径长度
2003	152	1 679	0.640	2.486
2004	151	1 686	0.627	2.513
2005	149	1 722	0.633	2.500
2006	149	1 698	0.641	2.477

2.2.2 平均路径长度

平均路径长度说明的是国际航空客运网络中任意两个国家/地区之间大致要经过多少条边才能到达。

路径是指从某一国家/地区 i 通向其他国家/地区 j 所需要经过的边的条数 d_{ij} 。将 N 定义为网络节点数,即

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

对于航空客运网络,其路径越长,则说明国家/地区间的旅客需要通过更多的边才能到达其他国家/地区。2003—2006 年间网络平均路径如表 1 所示,国家/地区间平均经过边的数量逐渐降低,整体网络可达能力逐年转好。

2.2.3 度分布

度分布表明每个国家/地区直接相连的国家/地区的客运量。在国际航空客运网络中,节点的度又可分为节点的入度和出度,入度即航空客运的总输入量,出度则为航空客运的总输出量。图 2 分别为 2003—2006 年国际航空客运网络的出度分布(入度分布结果与其近似),可以看出其均近似为双幂律分布,这说明国际航空客运网络已具有无标度网络的特性。同时,在国际航空客运网中大多数的国家/地区拥有少量的客运量,而少数的国家/地区则拥有大量的连接。

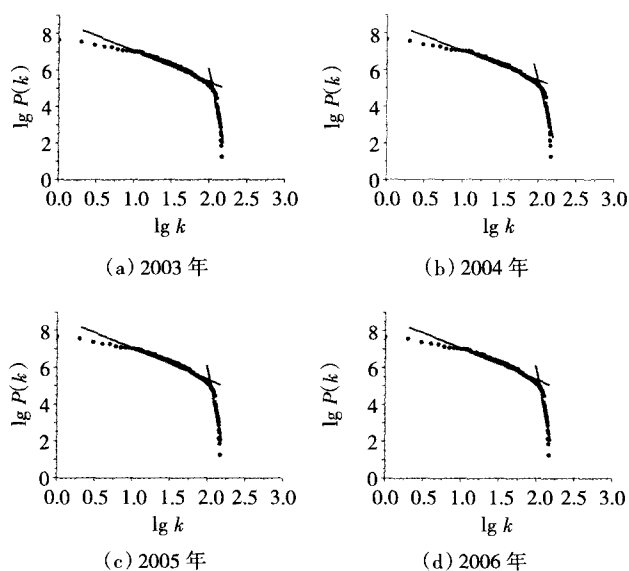


图 2 2003—2006 国际航空客运网络度分布

Fig.2 Distribution of international air passenger transport network degree (2003—2006)

通过上述分析看出,2003—2006 年间国际航空客运网络是一个约有 153 个国家/地区的复杂网络,平均经过约 2.5 个国家即可到达世界任意两个国家/地区,同时网络已经形成较为稳定的 0.62 ~ 0.64 间的簇系数。较高的平均簇系数和较小的平均路径长度,可以说明该网络同样具备“小世界”网络的性质^[1],并且也是一个无标度网络^[2]。

2.3 国际航空客运网络结构中心

通过对国际航空客运网络进行强度中心性和介

数中心性测度,能够准确地发现国际航空运输结构中心国家/地区,并比较其在网络结构中的地位。

2.3.1 强度中心性

度通过测量具体国家/地区与其他国家/地区的关联数来判断其国际航空客运网中的重要性。若某国家/地区为航空客运输出和输入的主要连接点,则为网络的中心节点。航空运输的中心国家/地区主要体现在“航空客运输出关联”和“航空客运输入关联”。某一国家/地区的航空客运输输入输出在航空旅客运输量影响下关联越高,则强度值越大。图 3 为部分国家/地区 2003—2006 年强度比重计算结果。可以发现,中国与其他国家/地区的关联比重呈增长状态,且比亚洲及周边国家/地区发展速度要快,逐年超越新加坡、韩国、泰国、中国香港等国家/地区。其次,对比美、英整体亚洲及周边各个国家/地区的强度比重仍然相对较低,仅日本强度比重略高,严格意义上亚洲地区并没有形成具有绝对优势的强度中心。此外,中国、印度的强度比重正逐年增加,与航空运输强度比重较高的国家/地区间差距正在缩小,且与英国逐年下降的趋势形成鲜明地对比。网络强度中心性计算结果如表 2 所示。

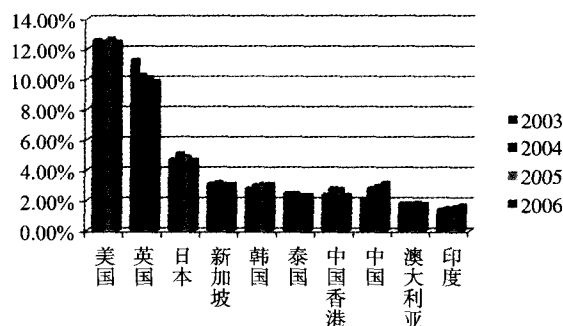


图 3 2003—2006 年部分国家/地区强度比重

Fig.3 Strength degree proportion of some countries/regions (2003—2006)

表 2 2003—2006 年国际航空客运网络中心性结果

Tab.2 Centrality of international air passenger network (2003—2006) (%)

	2003	2004	2005	2006
网络强度中心性	3.58	3.98	4.12	4.26
网络介数中心性	19.43	19.80	20.94	20.29

由表 2 可知,国际航空客运网络的中心性逐年加强,中心性国家/地区(群)的能力在国际航空客运网络连接中,所扮演的角色越来越重要。但强度中心性仅在 4% 左右, 较低的强度中心性说明目前国际航空客运网络中具有较高连接的国家/地区群仍为少数,各国家/地区的航空发展十分不均衡。

2.3.2 介数中心性

介数是衡量一个节点作为中介的能力,即占据在其他两个节点路径上的能力。在网络中,一个具有相

对较小强度值的国家/地区却可能在网络中起到重要的中介作用,因此,介数中心性也是衡量网络结构中心位置的重要指标。在国际航空客运网络中,介数代表经停或中转数。部分国家/地区 2003—2006 年介数计算结果如图 4 所示。

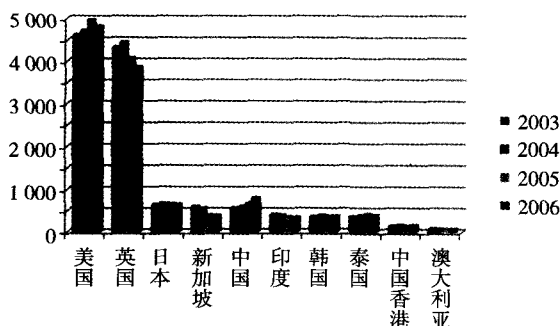


图 4 2003—2006 年部分国家/地区介数

Fig.4 Betweenness of some countries/regions (2003—2006)

从图 4 来看,中国在国际航空客运网络中的中介地位逐年提升,在网络中有越来越多的国家/地区通过中国来实现国际航空旅客运输,已逐步超越日、韩等亚洲国家/地区。此外,与欧美国家/地区比较,中国乃至亚洲地区中介能力仍差距明显,美国、英国等处于国际航空客运网络中的绝对中介中心地位。

从表 2 介数中心性来看,网络介数中心性基本呈现缓慢上升,在 2006 年略有下降的基本趋势,基本可以表明国际航空网络中已有越来越多的国家/地区通过核心国家/地区(群)来实现旅客运输。同时,达到 20%左右的网络介数中心性,表明目前核心中介地位的国家/地区在整个网络占有一定的比例,在各自辐射区域以及整个网络中起着至关重要的中介作用。

3 结语

本文将复杂网络研究方法应用于以国家/地区为节点的国际航空客运网络,并得出如下结论:①在对所构建的国际航空客运网络结构属性,如平均路径长度、簇系数、度分布、强度中心性和介数中心性的测度,得出国际航空客运网络是一个复杂网络,在网络中任意 2 个国家/地区间平均需经过 2.5 条边即可完成航空旅客运输,且网络已基本形成较高的聚集集团。②在 2003—2006 年,网络的连接和中介能力都呈现集中化趋势,并呈现少数核心国家/地区为连接中心,与此不同的是网络中介中心的国家/地区却相对较大的情况。③虽然中国与其他国家/地区的连接和作为中介的能力均发展较快,呈现出较好的网络结构发展态势,但同欧美等一些航空运输起步较早的国家相比

仍有较大差距。④亚洲及周边地区网络的连接和中介优势无显著差别,日本、韩国、中国、泰国、新加坡等国家在整个国际航空客运网络中节点结构水平相当。

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] 吴金闪, 狄增如. 从统计物理看复杂网络研究[J]. 物理学进展, 2004, 24(1):18-46.
- [4] 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.
- [5] ROSVALL M, TRUSINA A, MINNHAGEN P, et al. Networks and cities: an information perspective[J]. Phys Rev Lett, 2005(94):028701.
- [6] GASTNER M T, NEWMAN M E J. The spatial structure of networks[J]. Eur Phys J B, 2006(49):247-252.
- [7] PORTA S, CRUCITI P, LATORA V. The network analysis of urban streets: a dual approach[J]. Physica A, 2006(369):853-866.
- [8] CARDILLO A, SCELLATO S, LATORA V, et al. Structural properties of planar graphs of urban street patterns[J]. Phys Rev E, 2006(73):066107.
- [9] SEN P, DASGUPTA S, CHATTERJEE A, et al. Small-world properties of the Indian railway network[J]. Phys Rev E, 2003(67):036106.
- [10] KURANT M, THIRAN P. Layered complex networks[J]. Phys Rev Lett, 2006(96):138701.
- [11] KURANT M, THIRAN P. Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks [J]. Phys Rev E, 2006(74):036114.
- [12] AMARAL LAN, SCALA A, BARTHELEMY M, et al. Classes of small-world networks[J]. Proc Natl Acad Sci, 2000(97):11149-11152.
- [13] GUIMERA R, AMARAL LAN. Modeling the world-wide airport network[J]. Eur Phys J B, 2004(38):381-385.
- [14] BARRAT A, BARTHELEMY M, VESPIGNANI A. The effects of spatial constraints on the evolution of weighted complex networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, J Stat Mech, 2005(5):P05003.
- [15] LI W, CAI X. Statistical analysis of airport network of China[J]. Phys Rev E, 2004(69):046106.
- [16] WANG RU, CAI XU. Hierarchical structure, disassortativity and information measures of the US[J]. Chin Phys Lett, 2005(22):2715-2718.
- [17] 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(1):106-113.
- [18] FAA. FAA Aerospace Forecast 2003-2008[EB/OL]. [2009-03-16]. <http://www.stuckmic.com/atc-chatter4673-2009-2025-faa-aerospace-forecast.html>.
- [19] ICAO. Annual Report of the Council [EB/OL]. [2009-03-16]. <http://www.icao.int/>.
- [20] AIAA. 2003-2008 AIAA annual report[EB/OL]. [2009-03-16]. <http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=6>.

(责任编辑:黄月)