

中国城市航空网络的实证研究与分析^{*}

刘宏鲲^{1)†} 周 涛²⁾

1) 西南交通大学经济管理学院 成都 610031)

2) 中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

(2006 年 6 月 27 日收到, 2006 年 8 月 23 日收到修改稿)

以城市为节点, 城市间直航线路为边, 实证地研究了中国城市航空网络的拓扑性质. 研究表明, 中国城市航空网络是一个小世界网络, 具有短的平均路径长度和大的簇系数, 且其度分布服从双段幂律分布. 它的度度相关性质与世界航空网络和北美航空网络都不相同. 当度较小时, 世界航空网络和北美航空网络都是正相关的, 但中国城市航空网络未表现出度度相关性, 而对于度较大的节点, 世界航空网络中其邻点平均度几乎是一个常值, 但中国城市航空网络却呈现出负相关性. 以往的实证研究暗示, 节点具有明确几何位置的网络, 如计算机互联网、电力网络等, 不表现层次性. 但是中国城市航空网络展现出明显的层次性, 表明地理因素对其结构演化的影响并不强烈. 进一步地, 以城市间直航计划每周提供的座位数为边权, 研究了网络的含权性质, 发现该网络节点度权之间是幂律相关, 相关指数为 1.37.

关键词: 复杂网络, 中国城市航空网络, 实证研究, 相关性

PACC: 0560, 0175, 0630C

1. 引 言

从 Watts 与 Strogatz 研究小世界网络^[1]和 Barabási 与 Albert 研究无标度网络^[2]开始, 对复杂网络结构和性质的研究成为一个引人注目的领域^[3-5]. 在自然界中, 从技术到生物直至社会各类系统都可以通过复杂网络加以描述, 其中节点表示个体或组织, 边表示它们之间的联系^[6,7]. 对真实网络进行实证研究不仅有助于帮助我们更好地认识网络的行为、改善网络的性能和有效地管理网络, 而且能够先于理论发现现象, 为进行理论探索打下基础, 或者作为理论适用范围的重要判据. 由于大型数据库的出现和计算机处理能力的提高, 这种实证研究已经遍布各个科学领域. 已经深入研究的真实网络主要包括电影演员合作网^[1, 2, 8-10], 科学家合作网络^[11-14]、万维网^[2, 10, 15-19]、因特网^[10, 20-23]、食物链网络^[24-30]、新陈代谢网^[31-33]、蛋白质相互作用网络^[34, 35]、电力网^[1, 9, 10, 36]等等.

在国内, 很多研究小组在实证研究方面都做出了有影响力的工作. 例如, 狄增如小组开展了经济物

理学科学家合作网、投入产出网和公交网的实证和建模工作^[37-40]; 柯大韧小组则是对合作网络集中了较大的关注和研究, 他们研究的网络包括淮扬菜肴网、公交网、中国的旅游线路网、中药方剂网等广义合作网络. 除此以外他们还还对长江流域河流网、中国电力网进行了实证统计研究^[41-45]; Cai 小组则主要针对运输网络进行了深入而系统的实证研究^[46-48].

自 20 世纪初飞机问世以来, 航空运输网络飞速发展. 与其他运输方式相比, 航空运输具有及时、高效、灵活的优势, 尤其在长距离和国际客运方面的作用愈来愈重要. 而且由于其能够直接反映城市间的交易流和连通度, 国外很早就利用航空运输资料从经济地理学角度来研究城市体系的结构和变化^[49-51]. 在航空网络中有着良好连接的节点和门户被认为能提高所在区域的竞争优势^[52, 53]. 国内也有学者从航空运输这个独特的视角来研究城市体系空间结构^[54-56], 同时也对航空网络本身进行分析^[57-59]. 从 2000 年开始, 物理学家们从另外一个角度来研究世界航空网络的结构特征. Amaral 等人^[9]、Barrat 等人^[14, 60]、Guimerà 等人^[61, 62]以及 Barthélemy 等人^[63]通过对世界航空网络和北美航空网络的研

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 70471033, 70571074)资助的课题.

[†] E-mail: liu_hongkun@yahoo.com.cn

究得到相类似的结论：世界航空网络是一个小世界网络，有着幂律下降的度分布。国内蔡勳研究小组的池丽平等^[46]和王茹等^[48]以美国航空网络作为研究对象，而李炜等^[47]则研究了以机场为节点的中国航空网络。与国外学者把航空网络的边权定义为乘客的数量不同，Cai 研究小组定义边的权重是以一个星期中某一天的航班数作为基数，并进行标准化。事实上，由于飞机机型不同，所能提供的运输能力将呈现出很大的差异，因此用座位数作为边的权重比用航班数作为边的权重更能细致地表达航空网络的特征。

中国航空运输自 20 世纪 20 年代初创建以来，规模不断壮大，网络不断扩展。改革开放之初的 1980 年全国只有 69 个民用机场，到了 2005 年全国的民用机场已增加到 141 个。与此同时，航空网络布局也打破了 20 世纪 70 年代以前以北京为中心的结构，初步形成了以若干大城市为枢纽的多中心航空网络^[64]。航空网络的设计和组织是以城市为对象，所以本文将通航的城市而非机场作为研究的节点，以每周所能提供的飞行座位数作为边的权重，对中国城市航空网络的结构特征进行研究。

2. 网络的描述

本文研究的中国城市航空网络由 121 个通航城市、1378 条直飞航线组成，统计在非节假日国内主要航空公司（中国国际航空公司、东方航空公司、南方航空公司、上海航空公司、山东航空公司、四川航空公司、海南航空公司和厦门航空公司）为每条航线每周提供的座位数总和，所有数据全部来源于互联网。如果有从城市 A 飞到城市 B 的航班，相应地就有航班从城市 B 飞回城市 A，而且机型相同。因此，从城市 A 到城市 B 每周所能提供的座位数等于从城市 B 到城市 A 每周所能提供的座位数，说明中国城市航空网络是一个对称网络。

对数据有以下说明：

1) 本数据只考虑直飞航线，不包括有经停机场的航线。

2) 本研究以通航的城市作为研究的节点，对于城市有一个以上机场的将其数据合并。例如，上海有虹桥机场和浦东机场，重庆有江北机场和万州梁平机场。

3) 统计数据中只包括行政级别为县级市及以上

的城市，但不包括香港和澳门。

4) 以一周作为计时单位。

5) 网上提供的资料只是航班飞行计划，与实际飞行可能会有出入，考虑到实时统计的变化性和困难性，这里只根据飞行计划进行统计和计算。

3. 网络的基本统计特征

节点的度是指与此节点连接的边的数量，本文研究的中国城市航空网络共有 121 个节点，北京是网络中度最大（为 85）的节点，上海、广州、深圳和成都都是另外四个度最高的城市。一般说来，城市的规模（以人口数表示）越大，该城市越有可能与更多的城市发生联系，即度越大，航空服务能力越强。在城市人口达到一定规模时，中国城市航空网络中城市的度与城市体系的规模等级基本上呈正相关趋势^[56]，但并不是完全对应，如图 1 所示（各城市人口数据除拉萨外均来源于文献^[65]，拉萨人口数根据其 2003 的数据推算得到）。例如，重庆的市辖区人口数仅次于北京和上海，与它连接的空港城市数量却低于人口数仅为其一半的成都和西安，甚至低于人口数只有其五分之一的昆明。成都的人口数也赶不上杭州、南京、天津和武汉，这并不妨碍它成为度最高的城市之一。昆明、长沙和厦门是另外三个典型的例子，城市规模都不大，但是度却排在 121 个城市的前列。虽然文献^[65]给出深圳 2004 年的人口数只有 165 万，但是其“常年平均人口”已达到 1200 万，其中 85% 是外来人口，因此导致该城市的度较大。整个网络的平均度为 11.388，也就是说，平均每个城市与其他 11 个城市有直接的航空联系。

网络的平均最短路径长度表示如下：

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

其中 $N = 121$ 为网络节点数， d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短路径长度，网络的平均最短路径长度为 2.263。

网络的簇系数是用来衡量网络节点聚类情况的参数。一个节点 i 的簇系数是指它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，

$$C_i = \frac{1}{k_i(k_i-1)} \sum_{j \neq k} a_{ij} a_{ik} a_{jk}, \quad (2)$$

其中 k_i 表示节点 i 的度， a_{ij} 为邻接矩阵元，当节点 i, j 相邻时值为 1，否则为 0。整个网络的簇系数 C

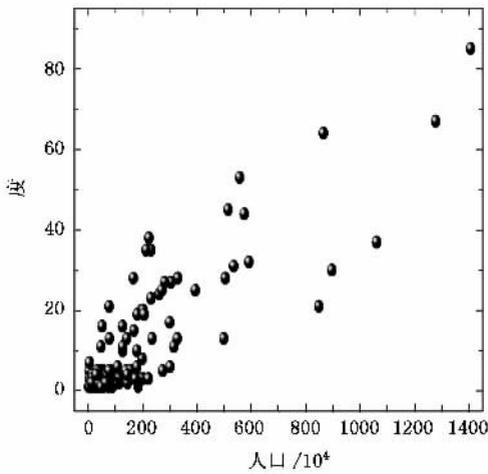


图 1 城市体系的规模等级与城市度的关系

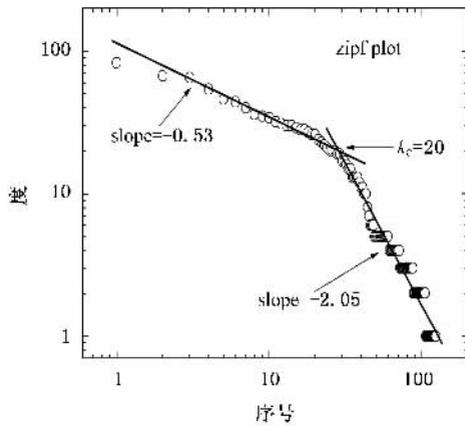


图 2 节点度分布图

是所有顶点簇系数的平均值, $C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$, 中国城市航空网络的簇系数为 0.748, 表现出强集聚性. 由于该网络同时具有很小的平均最短路径长度和很大的簇系数, 因此可以认为它是一个小世界网络^[166-69].

网络中节点的度分布 $P(k)$, 描述的是一个任意选择的节点恰好有 k 条边的概率. 由图 2 可见, 在这个网络中, 节点度服从双段幂律分布. 关于双段幂律分布的数学细节和物理意义, 可以从文献 [70, 71] 中找到, 此处不再赘述.

我们将度最大的 10 个城市和航空运输能力最强的 20 条航线标注在图 3 中, 实心圆点表示度最大的 10 个城市. 这里, 航线的运输能力, 也就是边权 w_{ij} , 定义为从城市 i 到城市 j 航空公司每周提供的座位数, 而点权 s_i 定义为与节点 i 连接的所有边的

权重之和, 即 $s_i = \sum_{j \in \nu(i)} w_{ij}$ ^[11, 72], 其中 $\nu(i)$ 为 i 的邻点的集合.

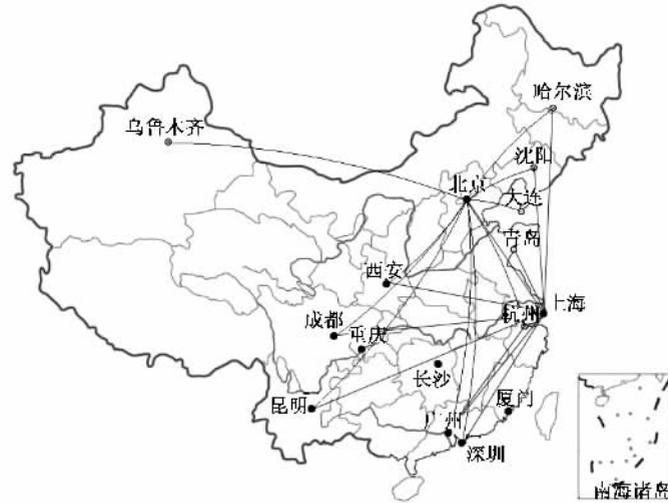


图 3 中国城市航空网络运输能力最强的航线

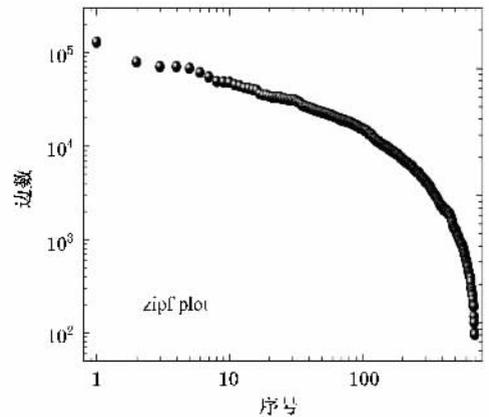


图 4 边权分布图

图 4 和图 5 分别给出了网络边权和点权的 zipf 分布. 尽管这两个分布都不是典型的幂律分布, 但是分布曲线前者跨越了 3 个数量级, 后者跨越了 4 个数量级, 都是非常广的分布, 具有和幂律分布类似的性质^[73].

4. 网络的关联性质

为了细致完整地描述网络的结构, 还要进一步考察度度相关、簇度相关以及度权相关的水平. 一个节点 i 所有邻近节点的平均度记为

$$k_{nn, i} = \frac{1}{k_i} \sum_{j \in \nu(i)} k_j, \quad (3)$$

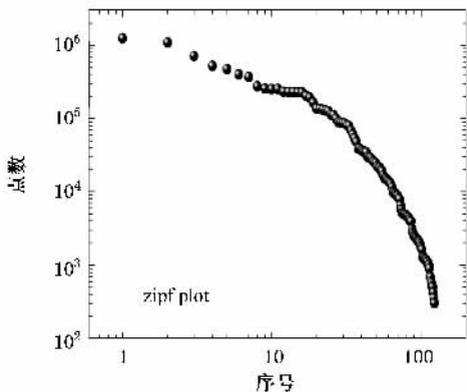


图5 点权分布图

那么, 度为 k 的所有节点的邻点平均度为

$$k_{m}(k) = \frac{1}{N_k} \sum_{k_i=k} k_{m,i} \quad (4)$$

其中 N_k 是度为 k 的节点数目。

度度相关性表现的是节点之间相互选择的偏好性. 如果 $k_m(k)$ 随 k 递增, 即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 $k_m(k)$ 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^[21, 22]. Newman 给出了一种方便的量化方法判断网络相关性, 即计算网络节点度的 Pearson 相关系数 r ^[74, 75],

$$r = \frac{M^{-1} \sum_i j_i k_i - \left[M^{-1} \sum_i \frac{1}{2} (j_i + k_i) \right]^2}{M^{-1} \sum_i \frac{1}{2} (j_i^2 + k_i^2) - \left[M^{-1} \sum_i \frac{1}{2} (j_i + k_i) \right]^2} \quad (5)$$

其中 j_i 和 k_i 分别是第 i 条边两个端点的度, $i = 1, \dots, M$, M 为网络的边数, $-1 \leq r \leq 1$. 当 $r > 0$ 时, 网络是正相关的; 当 $r < 0$ 时, 网络是负相关的; 当 $r = 0$ 时, 网络无相关性. 中国城市航空网络的 Pearson 相关系数 $r = -0.408$, 但当 $k < 10$ 时并未表现出相关性, 仅当 $k \geq 10$ 时, 这个网络展现出了明显的负相关, 如图 6 所示.

中国城市航空网络是一个小网络(节点数少), 而且有接近三分之二的城市度都小于 10, 因此表现出来度大的城市总是更多地和度小的城市连接, 这是由网络规模和自身特点所决定的. 由于中国城市航空网络的规模远远小于世界航空网络, 所以与世界航空网络度度相关性的特征完全不同. 对世界航空网络而言, 当度较小时 ($k \leq 10$), 它是正相关的; 而当度较大 ($k > 10$) 时, $k_m(k)$ 几乎是一个常值^[14].

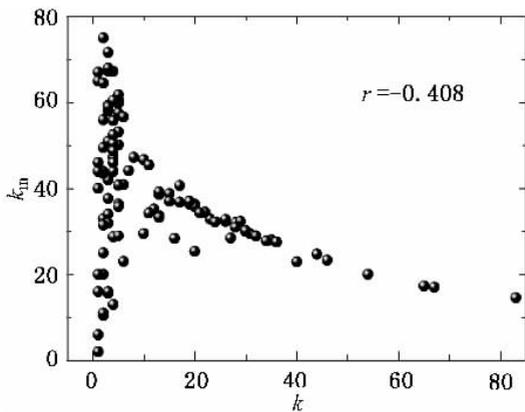


图6 所有节点的度和其邻点平均度的关系

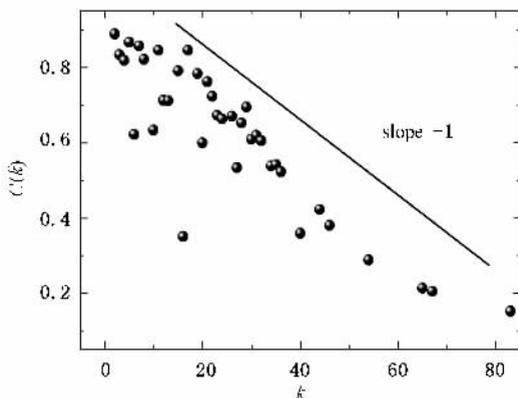


图7 度与簇系数的相关性

而且中国城市航空网络与北美航空网络也不一样. Barrat 等人对北美航空网络的研究结果显示, 当 $k < 30$ 时 $k_m(k)$ 随 k 递增, 当 $k \geq 30$ 时 $k_m(k)$ 却出现递减趋势. 究其原因, 可能是大型机场到其他集散中心有许多国际航线, 但是这些集散中心却因为是在北美之外而未被考虑进这个区域性的网络之中, 因此当度大时网络呈现负相关趋势^[60]. 总的来说, 尽管都是一个国家内部的航空网络, 但中国城市航空网络具有和北美航空网络不同的度度相关性质. 当然, 这种区别能否用于表征不同经济发展水平国家的航运能力, 还需要大量的实证资料和更深入的研究.

簇度相关性是指度为 k 的节点的平均簇系数与 k 的关系^[10]. 从图 7 可见, 中国城市航空网络具有负的簇度相关性, 说明度小的城市比度大的城市更倾向于集聚成团. 簇系数与度的关系可以近似表示为 $C(k) \sim k^{-1}$, 意味着该网络具有层次性^[10]. 文献 [10] 认为, 受地理因素强烈影响的网络缺乏层次性, 例如美国西部电力网和路由层因特网, 这样的地理

网络在两个节点间建立连接的成本与距离成比例. 从这个意义上讲, 城市航空网络表现出层次性, 说明地理因素的限制在其中并不是非常的重要. 尽管已经存在很多可以再现层次性的网络模型^[10, 76-80], 但是这些模型都没有考虑几何效应. 对于节点具有明确定义的几何位置的网络模型, 还没有看到有关层次性的系统研究, 本文的实证结果对于这方面的研究有一定的借鉴意义.

在中国城市航空网络中, 节点的度和节点单位时间的运输能力之间不是简单的线性关系, 类似于世界航空网络和北美航空网络^[14, 60, 63], 度为 k 的节点的平均权重和度呈现出非线性相关, 它随着度 k 而增长: $S(k) \sim k^{1.37}$ (如图 8 所示), 节点的权重比度增加得快, 意味着城市越大, 就会有交易量越大的连接. 以交通流为驱动的经典含权网络演化模型认为节点的权和度是线性相关的^[81], 因此这种非线性相关性的存在必然会推动含权网络演化模型研究的进展^[82], 最近已经有文献专门讨论这种非线性相关的可能起源^[83].

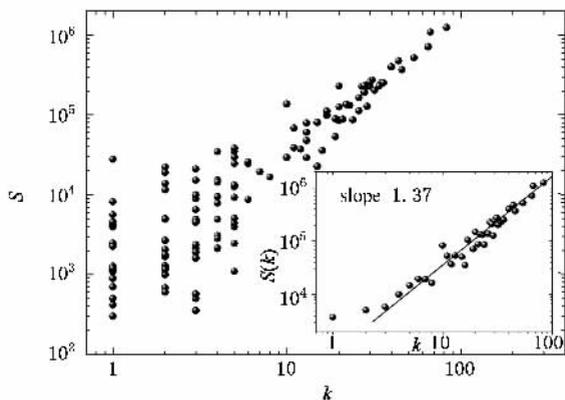


图 8 点权和度的相关性

5. 结 论

我国所有的超大城市、接近 90% 的特大城市以及半数以上的大城市都是空港城市, 因此可以说城

市航空网络的空间格局在很大程度上代表了城市体系空间结构的特征^[56]. 通过研究中国城市航空网络, 不仅可以了解网络本身的特征, 而且可以揭示中国城市体系空间结构的网络特征.

以城市为节点的中国城市航空网络是一个小世界网络, 具有短的平均路径长度和大的簇系数, 且其度分布服从双段幂律分布. 由于网络规模的差距, 它的度度相关性特征与世界航空网络完全不同, 与同样是区域性网络的北美航空网也不尽相同. 当度较小时, 世界航空网络与北美航空网是正相关的, 但中国城市航空网络未表现出度度相关性; 当度较大时, 对世界航空网络而言, $k_{in}(k)$ 几乎是一个常值, 说明即使是度大不相同的节点, 也有着非常相似的邻点, 而中国城市航空网络却呈现负相关性.

城市航空网络的结构不仅和城市自身规模有关, 同时也受到诸如地理、政治和经济等内外部因素甚至是历史偶然事件的影响, 而且这些因素使城市在自增强机理的作用下, 成为一个具有局部正反馈的动态系统. 自增强使系统的某个结果具有积累优势, 并且这种因果积累的结果将放大锁定成为一种良性循环^[84]. 特别值得强调的是, 中国城市航空网络显示出的层次特征表明, 随着科学技术的发展, 在当今世界经济网络化特性日益显著的背景下, 城市在地理上的接近性已经没有以往那么重要.

经典含权网络演化模型认为节点的权和度是线性相关的, 本文对中国城市航空网络含权性质的研究却显示, 网络节点度权之间是非线性相关的. 理论模型是对现实理想化的抽象, 实证研究的意义之一正是在于为进行理论探索打下基础, 真实网络节点度权非线性相关性将会拓展经典含权网络演化模型的假设条件, 使之与现实更加接近.

本文只是对中国城市航空网络的一个初步研究, 还有一些网络的性质在本文中尚未涉及到, 我们将在以后继续这方面的工作. 除此以外, 还将具体讨论影响城市航空网络结构的因素, 比如飞行距离以及城市人口数所扮演的作用.

[1] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440

[2] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509

[3] Liu F, Shan X M, Ren Y, Zhang J, Ma Z X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 373 (in Chinese) [刘 锋、山秀明、任 勇、张 军、马正新 2004 物理学报 **53** 373]

[4] Li J, Wang B H, Jang P Q, Zhou T, Wang W X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4051 (in Chinese) [李 季、汪秉宏、蒋品群、周 涛、王文旭 2006 物理学报 **55** 4051]

[5] Pan Z F, Wang X F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4058 (in Chinese) [潘灶烽、汪小帆 2006 物理学报 **55** 4058]

- [6] Zhou T, Bai W J, Wang B H, Liu Z J, Yan G 2005 *Physics* **34** 31 (in Chinese) [周 涛、柏文洁、汪秉宏、刘之景、严 钢 2005 物理 **34** 31]
- [7] Wu J S, Di Z R 2004 *Progress in Physics* **24** 18 (in Chinese) [吴金闪、狄增如 2004 物理学进展 **24** 18]
- [8] Albert R, Barabási A L 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 5234
- [9] Amaral L A N, Scala A, Barthélemy M, Stanley H E 2000 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **97** 11149
- [10] Ravasz E, Barabási A L 2003 *Phys. Rev. E* **67** 026112
- [11] Newman M E J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 016131
- [12] Newman M E J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 016132
- [13] Newman M E J 2001 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **98** 404
- [14] Barrat A, Barthélemy M, Pastor-Satorras R, Vespignani A 2004 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **101** 3747
- [15] Adamic L A, Huberman B A 2000 *Science* **287** 2115
- [16] Albert R, Jeong H, Barabási A L 1999 *Nature* **401** 130
- [17] Huberman B A, Adamic L A 1999 *Nature* **401** 131
- [18] Barabási A L, Albert R, Jeong H 2000 *Physica A* **281** 69
- [19] Broder A, Kumar R, Maghoul F, Raghavan P, Rajagopalan S, Stata R, Tomkins A, Wiener J 2000 *Computer Networks* **33** 309
- [20] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C 1999 *Computer Communications Review* **29** 251
- [21] Pastor-Satorras R, Vázquez A, Vespignani A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 258701
- [22] Vázquez A, Pastor-Satorras R, Vespignani A 2002 *Phys. Rev. E* **65** 066130
- [23] Yook S H, Jeong H, Barabási A L 2002 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **99** 13382
- [24] Solé R V, Montoya J M 2001 *Proc. R. Soc. London B* **268** 2039
- [25] Camacho J, Guimerà R, Amaral L A N 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 228102
- [26] Dunne J A, Williams R J, Martinez N D 2002 *Ecology Letters* **5** 558
- [27] Dunne J A, Williams R J, Martinez N D 2002 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **99** 12917
- [28] Montoya J M, Solé R V 2002 *J. Theor. Bio.* **214** 405
- [29] Williams R J, Berlow E L, Dunne J A, Barabási A L, Martinez N D 2002 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **99** 12913
- [30] Jordano P, Bascompte J, Olesen J M 2003 *Ecology Letters* **6** 69
- [31] Jeong H, Tombor B, Albert R, Oltvai Z N, Barabási A L 2000 *Nature* **407** 651
- [32] Wagner A, Fell D 2001 *Proc. R. Soc. London B* **268** 1803
- [33] Stelling J, Klamt S, Bettenbrock K, Schuster S, Gilles E D 2002 *Nature* **420** 190
- [34] Jeong H, Mason S, Barabási A L, Oltvai Z N 2001 *Nature* **411** 41
- [35] Maslov S, Sneppen K 2002 *Science* **296** 910
- [36] Bai W J, Wang B H, Zhou T 2005 *Complex Systems and Complexity Science* **2** 29 (in Chinese) [柏文洁、汪秉宏、周 涛 2005 复杂系统与复杂性科学 **2** 29]
- [37] Fan Y, Li M, Chen J, Gao L, Di Z, Wu J 2004 *Int. J. Mod. Phys. B* **18** 2505
- [38] Li M, Fan Y, Chen J, Gao L, Di Z, Wu J 2005 *Physica A* **350** 643
- [39] Zhang P, Li M H, Wu J S, Di Z R, Fan Y 2005 *Complex Systems and Complexity Science* **2** 30 (in Chinese) [张 鹏、李梦辉、吴金闪、狄增如、樊 璞 2005 复杂系统与复杂性科学 **2** 30]
- [40] Zhao J S, Di Z R, Wang D H 2005 *Complex Systems and Complexity Science* **2** 45 (in Chinese) [赵金山、狄增如、王大辉 2005 复杂系统与复杂性科学 **2** 45]
- [41] He Y, Zhu X Y, He D R 2004 *Int. J. Mod. Phys. B* **18** 2595
- [42] Xu T, Chen J, He Y, He D R 2004 *Int. J. Mod. Phys. B* **18** 2599
- [43] Zhang P P, Hou W, He Y, He D R 2005 *Complex Systems and Complexity Science* **2** 49 (in Chinese) [张培培、侯 威、何 阅、何大韧 2005 复杂系统与复杂性科学 **2** 49]
- [44] Zhang P P, He Y, Zhou T, Su B B, Chang H, Zhou Y P, Wang B H, He D R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 60 (in Chinese) [张培培、何 阅、周 涛、苏蓓蓓、常 慧、周月平、汪秉宏、何大韧 2006 物理学报 **55** 60]
- [45] Zhang P P, Chen K, He Y, Zhou T, Su B B, Jin Y D, Chang H, Zhou Y P, Sun L C, Wang B H, He D R 2006 *Physica A* **359** 835
- [46] Chi L P, Wang R, Su H, Xu X P, Zhao J S, Li W, Cai X 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1393
- [47] Li W, Cai X 2004 *Phys. Rev. E* **69** 04610
- [48] Wang R, Cai X 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2715
- [49] Taaffe E J 1962 *Economic Geography* **38** 1
- [50] Murayama Y 1982 *Geographical Review of Japan* **55** 380
- [51] Goetz A R 1992 *Growth and Change* **23** 217
- [52] Irwin M D, Kasarda J D 1991 *American Sociological Review* **56** 524
- [53] Debbage K G 1999 *Journal of Air Transport Management* **5** 211
- [54] Gu C L 1992 *China Cities and Towns System-History, Status Quo and Prospect* (Beijing : The Commercial Press) p275 (in Chinese) [顾朝林 1992 中国城镇体系——历史、现状、展望(北京 : 商务印书馆) 第 275 页]
- [55] Guo W J, Bai M Y 1999 *Human Geograph* **14** 27 (in Chinese) [郭文炯、白明英 1999 人文地理 **14** 27]
- [56] Zhou Y X, Hu Z Y 2002 *Geographical Research* **21** 276 (in Chinese) [周一星、胡智勇 2002 地理研究 **21** 276]
- [57] Jin F J 2001 *Geographical Research* **20** 31 (in Chinese) [金凤君 2001 地理研究 **20** 31]
- [58] Wang F H, Jin F J, Zeng G 2003 *Scientia Geographica Sinica* **23** 519 (in Chinese) [王法辉、金凤君、曾 光 2003 地理科学 **23** 519]
- [59] Jin F J, Sun W, Shaw S L 2005 *Progress In Geography* **24** 59 (in Chinese) [金凤君、孙 炜、萧世伦 2005 地理科学进展 **24** 59]
- [60] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A 2005 *J. Stat. Mech.* **5** P05003
- [61] Guimerà R, Amaral L A N 2004 *Eur. Phys. J. B* **38** 381
- [62] Guimerà R, Mossa S, Turttschi A, Amaral L A N 2005 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **102** 7794
- [63] Barthélemy M, Barrat A, Pastor-Satorras R, Vespignani A 2005 *Physica A* **346** 34
- [64] Chen H, Zhang W C, Jin F J *et al* 1993 *Transportation Geography of China* (Beijing : Science Press) p120 (in Chinese) [陈 航、张文尝、金凤君等 1993 中国交通运输地理(北京 : 科学出版社) 第 120 页]

- [65] National Bureau of Statistics of China 2006 *China City Statistical Yearbook* 2005 (Beijing : China Statistics Press) p17 (in Chinese)
[国家统计局 2006 中国城市统计年鉴 2005(北京 :中国统计出版社 第 17 页]
- [66] Hayes B 2000 *American Scientist* **88** 9
- [67] Hayes B 2000 *American Scientist* **88** 104
- [68] Newman M E J 2000 *J. Stat. Phys.* **101** 819
- [69] Strogatz S H 2001 *Nature* **410** 268
- [70] Reed W J 2003 *Physica A* **319** 469
- [71] Reed W J , Jorgensen M 2004 *Com. Stats -Theory & Methods* **33** 1733
- [72] Yook S H , Jeong H , Barabási A L , Tu Y 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5835
- [73] Newman M E J 2005 *Contemporary Physics* **46** 323
- [74] Newman M E J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 208701
- [75] Newman M E J 2003 *Phys. Rev. E* **67** 026126
- [76] Holme P , Kim B J 2002 *Phys. Rev. E* **65** 066109
- [77] Andrade J S Jr , Herrmann H J , Andrade R F S , Silva L R da 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 018702
- [78] Zhou T , Yan G , Wang B H 2005 *Phys. Rev. E* **71** 046141
- [79] Zhou T , Wang B H , Hui P M , Chan K P 2006 *Physica A* **367** 613
- [80] Gu Z M , Zhou T , Wang B H , Yan G , Zhu C P and Fu Z Q , 2006 *Dynamics of Continuous , Discrete and Impulsive Systems B* **13** 481
- [81] Barrat A , Barthélemy M , Vespignani A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 228701
- [82] Wang W X , Hu B , Zhou T , Wang B H , Xie Y B 2005 *Phys. Rev. E* **72** 046140
- [83] Ou Q , Jin Y D , Zhou T , Wang B H , Yin B Q 2006 arXiv : physics/ 0603081
- [84] Lu J 2001 *The Evolution of Urban External Space and Regional Economy* (Beijing :China City Publishing House) p53 (in Chinese)
[陆 军 2001 城市外部空间运动与区域经济(北京 :中国城市出版社)第 53 页]

Empirical study of Chinese city airline network^{*}

Liu Hong-Kun^{1)†} Zhou Tao²⁾

¹⁾ *Economy & Management College ,Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)*

²⁾ *Department of Modern Physics , University of Science and Technology of China , Hefei 230026 ,China)*

(Received 27 June 2006 ; revised manuscript received 23 August 2006)

Abstract

We investigate the empirical properties of Chinese city airline network , where nodes and edges denote cities and direct flights. The present network is a small-world network with short average path length and high degree of clustering , and its degree distribution follows a double power law. The degree-degree correlation of the present network is different from that of the world airport network and the North American air network : The small-degree nodes of the world airport network and the North American air network are positively correlated , whereas those of the present network don 't exhibit correlation behavior. And for large-degree nodes , the average neighboring degrees approach a constant in the world airport network , while the present network shows negatively correlated behavior. Previous studies suggested the absence of hierarchical structure in geographical networks , such as the Internet , the electrical power grids , and so on. However , the present network displays an obviously hierarchical property , which provides us an evidence that the geographical ingredient may have no effect on the structural evolution of Chinese city airline network. Furthermore , by setting the number of available seats per week as the edge weight , we investigate the correlation between weight and degree , and find a power-law weight-degree correlation with exponent 1.37.

Keywords : complex networks , Chinese city airline network , empirical study , correlation

PACC : 0560 , 0175 , 0630C

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 70471033 and 70571074).

[†] E-mail : liu_hongkun@yahoo.com.cn