



# 中国城市航空网络航线连接机制分析

刘宏鲲<sup>①</sup>, 张效莉<sup>②</sup>, 曹崑<sup>③</sup>, 汪秉宏<sup>④⑤</sup>, 周涛<sup>④⑥\*</sup>

① 西南财经大学统计学院, 成都 610074;

② 上海海洋大学经济管理学院, 上海 200090;

③ 东京大学情报理工学系研究科, 日本东京, 153-8505;

④ 中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026;

⑤ 上海理工大学, 复杂性科学研究中心, 上海 200093;

⑥ 弗里堡大学物理系, 瑞士弗里堡, CH-1700

\* E-mail: zhutou@ustc.edu

收稿日期: 2009-03-20; 接受日期: 2009-04-14

国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB705500)、国家自然科学基金重点项目基金(批准号: 10635040)、国家自然科学基金面上项目(编号: 70671097)、国家自然科学基金理论物理前沿问题专项基金(编号: A0524701)、西南财经大学“211 工程三期”统计学国家重点学科建设项目, 西南财经大学 211 工程三期青年教师成长项目和瑞士国家自然科学基金(编号: 205120-113842)资助项目

**摘要** 航空网络具有重要的经济价值和社会价值. 该文研究了中国城市航空网络, 其中城市是节点, 具有直航航班之间的城市相互连接. 实证数据发现, 该航空网络度分布是双段幂律的. 通过对优先连接模型进行数值分析, 该文发现无论是以几何距离还是以城市规模做为优先连接的指标, 都无法再现该网络的度分布特征. 该文猜想城市经济发展程度主要决定了该城市在航空网络中的地位. 偏相关分析表明第三产业产值与航空客运量的相关程度最高. 基于此, 该文建立了以第三产业产值作为优先连接指标的航空网络演化模型, 该模型很好地再现了实证网络的拓扑特征. 该文成功将网络节点的外部特征引入网络演化模型中, 拓广了网络演化模型的研究视野, 不仅提出了航空网络演化机制新的解释, 而且对于网络建模的理论研究具有一定的借鉴价值.

## 关键词

航空网络  
复杂网络  
演化模型  
优先连接  
经济因素

从 1914 年美国首次开辟坦帕到圣彼得斯堡的定期航班开始, 飞机以及相应的航空发动机不断改进和完善, 提高了运载能力、航程和速度, 也推进了世界范围航空网的形成<sup>[1]</sup>. 区域经济利用航空运输, 可以超越地理空间界限, 大跨度地直接参与国际分工和国际经济大循环, 在世界范围内吸纳和集聚生产力的各种能量和要素. 作为 21 世纪的新兴行业和交通运输的基础产业, 航空运输业的发展和在技术与

服务方面所取得的成就使其成为当今最成功的行业之一, 从运输广度、深度和速度上都大大超过了其他运输方式. 考虑到其重大的社会经济价值, 研究航空网络的结构, 特别是航线连接机制具有重要的现实意义.

航空网络结构的研究范围很广, 涉及的学科众多, 包括经济<sup>[2]</sup>、地理<sup>[3]</sup>、交通<sup>[4]</sup>、运筹<sup>[5]</sup>和物理等<sup>[6-10]</sup>, 研究者们分别从不同的角度对航空网络的特征、设

计、不同结构的优劣以及产生的经济社会影响进行了研究. 为了了解航空网络的形成机制, 研究者们设计了模型以重现网络的特征. Guimerà 等人同时考虑优先连接的机制和距离的限制解释了航空网络的度分布和介数分布<sup>[6,10]</sup>, 与传统的仅仅以节点的度为驱动的网络演化模型不同<sup>[11]</sup>, 此模型通过引入距离函数, 充分考虑了拓扑最短距离和几何最短距离的竞争关系, 这也是目前带有几何限制的交通网络建模的一个重要框架<sup>[12]</sup>. Barrat 等人则考虑了点权优先连接机制和边权的动态分配<sup>[7]</sup>.

事实上, 上述模型都只考虑了节点的拓扑和几何性质, 而忽略了航空网络中节点的社会属性和经济属性. 虽然模型能够再现部分航空网络统计结果, 但是偏差很明显<sup>[13]</sup>. 目前还没有文献对影响航线连接的外在因素(指不由网络本身表现出来的性质, 例如相应城市的人口数量、经济发展水平等等)进行系统的研究. 本文发现基于第三产业产值的优先连接机制可以再现真实的中国城市航空网络结构, 而距离和人口的因素并不能导致现有的网络结构. 此结论不仅对航空网络的演化机制提出了新的解释, 而且对于网络建模的理论研究具有重要的借鉴价值.

## 1 中国城市航空网络的结构特征

本文研究的中国城市航空网络以通航城市为节点, 两个城市间的直飞航线为边(不包括有经停机场的航线), 共包含 121 个节点和 1378 条边<sup>[14]</sup>. 统计数据涵盖了国内主要航空公司, 包括中国国际航空公司、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, 在 2006 年提供的所有航班. 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. 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.

该网络的平均度为 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. 网络中度最大的 5 个城市是北京、上海、广州、深圳和成都. 网络的平均最短路径长度  $L=2.263$ , 直径  $D=4$ , 簇系数  $C=0.748$ , 表明中国城市航空网络是一个典型的小世界网络. 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 1 可见, 在这个网络中, 节点度服从双段幂律分布. 事实上, 池丽平等人在 2003 年对美国航空网作了统计分析, 并指出其节点度服从双段幂律分布<sup>[9]</sup>; 李炜和蔡勤在 2004 年研究了以机场为节点(本文以城市为节点)的中国航空网, 发现该网络度分布也是双段幂律的<sup>[8]</sup>; Guida 和 Maria 在 2007 年实证研究了意大利的航空网络, 并指出该网络也具有双段幂律的度分布<sup>[15]</sup>. Reed 在 2004 年的文章中讨论了双段幂律分布的物理意义和定义<sup>[16]</sup>, 有兴趣的读者可以参考.

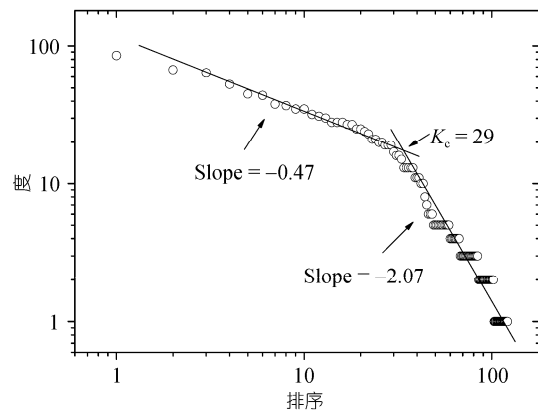


图 1 中国城市航空网络的节点度分布

本图采用 Zipf 画法, 纵坐标为节点的度, 横坐标为该节点的度在所有数据中由大到小的排列顺序<sup>[17]</sup>

## 2 以距离和规模作为优先连接的指标无法再现航空网络度分布特性

自然、技术和社会系统中很多复杂网络幂律度分布的出现都与优先连接机制有关, 最为成功的例子就是 Barabasi-Albert(BA)模型<sup>[11]</sup>, 该模型以节点度为指标, 通过优先连接机制, 生成了幂指数为 3 的度分布. 但是, 中国城市航空网络的度分布服从双段幂律分布(如图 1), 意味着简单的 BA 模型无法很好地再现该网络的度分布特性. 从这个意义上讲, 航空网络的连接机制中必然包含了节点已有连接密度(节点度)以外的其他因素. 事实上, 城市之间总是在持续不断地进行物质、能量、人力和信息的交换. 当两个城市间满足互补性和可运输性并导致某种要素的移动, 同时在这两个城市之间没有中间干扰机会时, 两个城市间就会产生相互作用<sup>[18]</sup>. 城市间的相互作用在

航空运输中体现为城市之间建立航线, 其大小表现为航线上的流量大小. 地理经济学给出了关于城市空间相互作用规律的多种解释模式, 但不论是引力模型、潜力模型还是其他, 影响两个城市空间相互作用的因素都主要包括两个城市之间的几何距离以及两个城市的质量, 其中, 城市的质量既可以用社会指标表示, 如人口等, 也可以用经济指标表示, 如 GDP 等.

下面, 我们在一个一般的优先连接网络模型框架下研究距离和人口对航空网络结构形成的影响. 假设模型具有和实际中国城市航空网络相同的规模 (121 个节点和 1378 条边), 开始的时候这些节点之间没有连边, 之后每次选择两个节点, 并在其间连一条边. 这个操作执行 1378 次, 直到模型和真实网络具有同样多的边. 我们总是保证每一个节点至少连接了一条边, 这可以在网络最初的若干次操作中分别强制选中一个尚未连边的节点来实现. 我们所用的城市人口数据来源于《中国城市统计年鉴—2002~2005》, 而城市间距离是根据城市的经纬度, 通过近似地将地球看作一个标准球体, 并利用球面距离公式求得.

**模型 1** 只考虑人口的因素. 在两个已存在节点  $i$  和  $j$  间建立新边时, 这两个节点被选择的概率正比于两个城市人口之积:

$$\Pi_{ij} \propto P_i P_j, \quad (1)$$

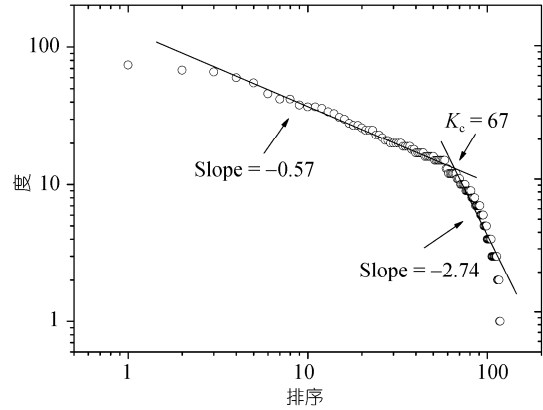
这里,  $P_i$  代表城市  $i$  的人口.

可以看出, 数值模拟结果 (图 2) 与真实网络的度分布图 (图 1) 相差甚远.

**模型 2** 只考虑距离的因素. 在两个已存在节点  $i$  和  $j$  间建立新边时, 这两个节点被选择的概率为

$$\Pi_{ij} \propto \frac{1}{F(r_{ij})}, \quad (2)$$

这里  $F(r_{ij})$  是两个城市间地理距离  $r_{ij}$  的增函数. 本文研究两类距离函数形式: (i) 幂函数  $F(r_{ij}) = r^{\alpha}$  [6], 其中参数  $\alpha$  不能取太大的值, 否则长距离的航线都没有办法建立, 网络就只包含最近邻连接; 参数  $\alpha$  也不能取太小的值, 否则距离长短与否影响不显著. 本文在仿真中对幂指数  $\alpha$  取了相当广泛的一个范围, 包括从 0.1 到 10 多个值. 在  $\alpha = 0.1$  的时候, 距离影响基本消失, 网络生长类似于仅具有优先连接机制的内部连



**图 2 以人口作为优先连接概率因素的模型度分布**

本图对应于 2004 年人口数据, 由于 2001~2004 年的人口规模较稳定, 采用其他年份的数据所得模拟结果类似

边生长网络, 与航空网真实情况相去甚远; 当  $\alpha = 10$  的时候, 网络中只有短程连接, 更不符合航空网络结构特点. 论文中呈现  $\alpha = 2$  的结果, 是在这个区间内相对而言符合较好的情况. (ii) 指数函数  $F(r_{ij}) = \exp(r/r_x)$  [19], 其中  $r_x$  是特征距离, 此处我们取两个例子  $r_x = 637$  公里及  $r_x = 6371$  公里 (地球平均半径  $R = 6371$  公里). 考虑更大的特征距离缺乏合理性. 如图 3 所示, 无论是指数还是幂律形式, 模型得到的度分布都与真实网络相去甚远, 事实上, 图 3(a) 和 (b) 所显示的度分布无法用双段幂律形式拟合. 我们也在合理范围尝试了其他的  $\alpha$  和  $r_x$  值, 以及更复杂的  $F(r_{ij})$  形式, 均不能得到与实际网络相符的度分布. 当然, 完全有可能精心设计一个非常复杂的仅仅包含距离因素的函数形式, 根据该函数控制网络的生长可以再现重要的统计特征. 但是, 真实的网络并不是按照某种精心预设的函数在生长, 当变量之间的相互作用足够复杂的时候, 我们也很难从这个“成功的函数”里面获得真正的关于演化机制的认识. 这一点也适用于后面的关于模型机制的讨论.

另外, 同时考虑人口和距离的作用, 在两个已存在节点  $i$  和  $j$  间建立新边时, 这两个节点被选择的概率为

$$\Pi_{ij} \propto \frac{P_i P_j}{F(r_{ij})}. \quad (3)$$

我们进行了大量数值实验, 发现在 (3) 式的框架

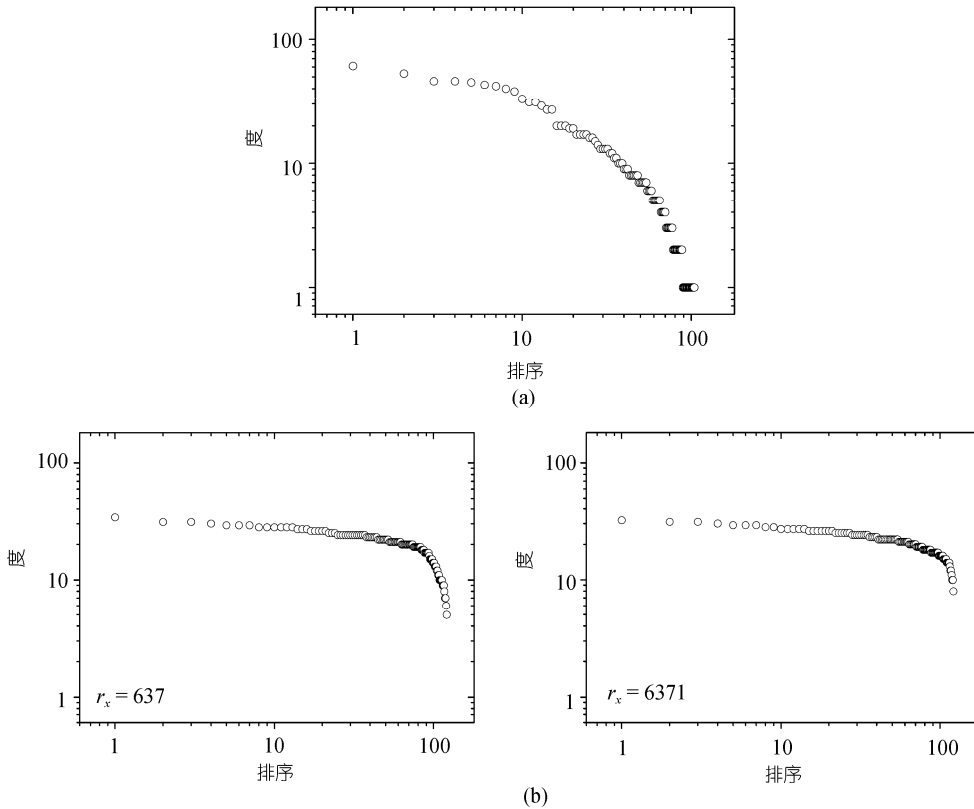


图3 以距离作为优先连接概率因素的模型度分布图  
(a) 幂函数形式距离, 其中 $\alpha=2$ ; (b) 指数函数形式距离

下也无法重现真实网络的度分布特征。

### 3 经济因素决定了城市在航空网络中的地位

本文将经济总量分解为三次产业的产值, 分别讨论全国 1989~2004 年三次产业的产值与航空客运之间的相关性(用 Pearson 相关系数进行分析), 并进行偏相关分析。

Pearson 相关系数  $r$  是用来检验两个变量  $x$  和  $y$  是否相关的参数, 定义为:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad -1 \leq r_{xy} \leq 1, \quad (4)$$

其中  $x_i$  与  $y_i$  为变量  $x$  和  $y$  的样本,  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  为变量  $x$  和  $y$  在给定样本下的均值.  $r$  为正值时, 两变量间为正相关;  $r$  为负值时, 两变量间为负相关; 相关系数的绝对值  $|r|$  愈大, 两变量间相关程度愈密切. 但由于会受到其他因素的影响, 这种相关系数反映的往往是非

本质的联系. 要准确地反映两个经济变量之间的内在联系, 需要进行偏相关分析(关于相关性分析、偏相关分析和双尾  $t$  检验的细节可参考文献[20]).

偏相关分析是指, 在诸多相关的变量中, 剔除了(控制了)其中的一个或若干个变量的影响后, 两变量之间的线性相关关系. 剔除了一个变量  $Z$  的影响后, 两个变量  $X$  和  $Y$  之间的偏相关系数是

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)}\sqrt{(1-r_{yz}^2)}}. \quad (5)$$

三次产业产值和航空客运量数据来源于《中国统计年鉴—1990~2005》, 分析中所用 3 次产业的产值都已剔除价格因素的影响(1985 年不变价). 第一、第二产业产值与航空客运量的相关分析以及偏相关分析见表 1.

从表 1 可以看到, 第一产业产值和航空客运量的相关系数为 0.972,  $t$  检验显著性概率为 0.000; 第二产业产值和航空客运量的相关系数为 0.989,  $t$  检验显著

表 1 第一、第二产业产值与航空客运量相关系数表

		与航空客运量直接 Pearson 相关系数	双尾 $t$ 检验显著性概率
第一产业产值	直接相关	0.972	0.000
	偏相关(控制变量为第三产业产值)	0.137	0.626
第二产业产值	直接相关	0.989	0.000
	偏相关(控制变量为第三产业产值)	0.322	0.261

性概率为 0.000, 说明第一、第二产业产值与航空客运量之间都高度相关。

但是剔除第三产业影响后做的偏相关分析却发现, 第一产业产值和航空客运量的相关系数为 0.137,  $t$  检验值为  $0.626 > 0.05$ , 说明没有显著的可能性认为第一产业产值与航空客运量之间有相关关系. 说明第一产业通过第三产业与航空客运量相关. 同样地, 在不考虑第三产业后, 第二产业产值和航空客运量的相关系数为 0.322,  $t$  检验值为  $0.261 > 0.05$ , 也没有显著说明第二产业产值与航空客运量之间有相关关系. 表明第二产业依然是通过第三产业与航空客运量相关。

以上结果说明: 城市的流通和服务业的规模对于航空客运的重要程度将可能会对航空公司计划安排航线产生作用。

既然第一、第二产业都通过第三产业与航空客运量相关, 那么第三产业产值是否会对中国航空网络的结构也产生主要的影响呢?

**模型 3** 只考虑第三产业产值的作用. 在两个节点  $i$  和  $j$  间建立新连边时, 这两个节点被选择的概率为

$$\Pi_{ij} \propto TI_i \times TI_j, \quad (6)$$

这里  $TI$  (Tertiary Industry) 表示第三产业产值。

图 4 给出了按照(6)式进行数值模拟的结果, 将此图与真实网络的度分布图相比较, 发现结果拟合很好(见图 5). 该结果暗示第三产业产值影响了两个城市之间航线的连接, 如果两个城市的第三产业产值都高, 那么在这两个城市之间建立航线的概率就大, 反之则小。

表 2 总结了真实网络和仿真网络双段幂律的拟合效果. 由于以距离为优先连接指标的仿真网络无法用双段幂律拟合, 故此处我们只比较了以人口和第三产业产值为优先连接指标的两个仿真网络. 通过表 2 可以看到, 以第三产业产值为优先连接指标可以更好地模拟真实的网络。

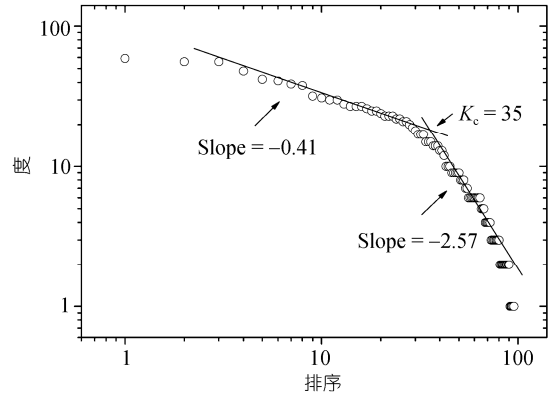


图 4 以第三产业产值作为优先连接指标得到的航空网络度分布图

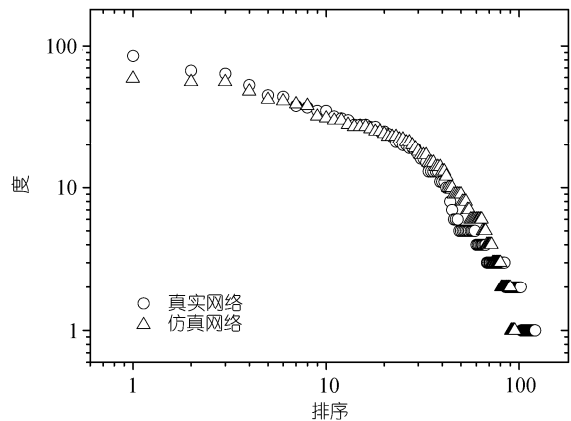


图 5 度分布对比图

表 2 双段幂律拟合效果比较<sup>a)</sup>

	以人口为优先连接指以第三产业产值为优先		
	真实网络	标的仿真网络	连接指标的仿真网络
$K_c$	29	67	35
$\gamma_1$	-0.47	-0.57	-0.41
$\gamma_2$	-2.07	-2.74	-2.57

a)  $K_c$  表示交点横坐标,  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  表示幂指数

进一步分析, 仿真网络的平均距离  $L=2.10$ , 直径  $D=4$ , 簇系数  $C=0.511$ , 尽管和真实网络的簇系数 0.784 有差距, 但已经表明该网络具有明显的聚类特

性. 表 3 是真实网络和仿真网络统计性质的对比.

**表 3 真实网络与仿真网络的统计特征对比**

	真实网络	仿真网络
	双段幂律分布	双段幂律分布
度分布		
网络平均距离	2.22	2.10
网络直径	4	4
网络簇系数	0.784	0.511

这些网络的统计性质表明, 在中国城市航空网络中, 节点的第三产业产值是影响网络结构的重要因素. 事实上, 一个城市的流通和服务业越发达, 就越有可能以各种方式与其他城市发生联系.

#### 4 结论

通过对人口和距离建立优先连接的概率模型进行仿真, 结果发现, 人口和距离对中国城市航空网络航线连接的影响都不显著. 如果从层次性的角度来看, 受地理因素强烈影响的网络是缺乏层次性的<sup>[21]</sup>. 但文献[14]分析网络的簇度相关性时发现, 中国城市航空网络表现出明显的层次性, 说明距离对中国城市航空网络的作用并不显著. 也从另一个角度说明了尽管距离在中国城市航空网络中是一个重要的参数, 但是它的作用并不足以影响网络的结构. 然而, 在世界航空网络中, 同时包含度和距离的优先连接模型<sup>[6]</sup>以及包含点权和距离的优先连接模型<sup>[7]</sup>却重现了真实网络的重要性质, 意味着节点的度、权重和节点间的距离在影响航线连接上扮演了重要的作用. 当然, 需要注意的是, 目前所研究的世界航空网络的节点数多达 3800 个, 度分布为幂律分布<sup>[6,7,10,22]</sup>; 而中国<sup>[8,14]</sup>、美国<sup>[9]</sup>和意大利<sup>[15]</sup>的航空网络节点数从 42~215 不等, 度分布都是双段幂律分布; 印度航空网络的节点数虽然小于 100, 度分布却又类似世界航空网络<sup>[23]</sup>. 可见, 全球航空网络和一国的航空网络在拓扑结构上是有明显区别的, 不同国家的航空网络在结构特征上也表现出巨大的差异性. 这既有可能是规模带来的差异, 也有可能是因为不同国家地区航空运输业处在不同的发展水平. 由于航空网络真实生长动力学机制在很大程度上又是一个黑匣子, 目前尚无法断言国内航空连接和国际间航空连接以及其他国家航空连接是否在产生机制上存在本质的不同.

以城市的第三产业产值作为优先连接概率模型

的因素进行仿真, 结果发现, 以城市的第三产业产值为驱动因素生成的航空网络与真实网络非常类似. 这个结果表明, 现有的中国城市航空网络在网络规模的不断扩大中, 实际上遵循了一个隐含的规律: 在考虑航线连接时, 城市的流通和服务行业的规模是一个重要的指标, 其影响超过了城市的人口数和城市之间的距离. 该结论有重要意义, 可以为中国航空公司建立新航线提供理论借鉴. 在以前关于网络模型的研究中<sup>[24,25]</sup>, 节点连边的影响因素都主要来源于网络自身几何和拓扑的因素, 一般不考虑外在于网络的其它属性. 这是因为传统物理学的模型, 讲究自洽和自证. 也就是说, 如果要通过一个模型再现一个系统的某些几何特征, 那么模型所能够使用的参数就应该只是一些几何参数和一些自由参数, 而不倾向于引入一些外在于几何特征的参量. 但是, 真实系统, 或者说复杂系统, 往往没有经典的物理系统那么简单. 而且, 复杂系统的主要特征之一, 就是开放性, 和外界有相互作用, 受外界环境影响. 航空网络本身是一个社会经济产物, 社会经济因素必然是其中非常重要的内在驱动因素, 因此本文选择用经济因素作为模型演化生长的重要动力. 通过引入第三产业产值, 本文成功再现了真实城市航空网络的结构特征, 展现了利用外部属性建立网络模型的可行性和重要性. 这种尝试体现了网络建模方法论的新思路——从封闭系统的建模到开放系统的建模. 它可以拓展网络建模研究的视野, 具有重要的理论价值.

尽管本文所讨论的是交通运输网络的建模, 但是本文所设计的模型, 并不能用来解释公路网络<sup>[26,27]</sup>和铁路网络<sup>[28]</sup>. 这是因为公路和铁路网络的边是实际的物理连接, 而在航空网络中, 边是虚拟的, 并无物理连接. 事实上, 对公路和铁路网络来说, 由于距离带来的成本对网络拓扑性质有明显的影响, 度分布不是无标度的, 而呈指数下降. 我们认为, 复杂网络的研究正在经历从发现不同网络共性到深入挖掘具有代表性的典型网络的特性这一过程. 在开展复杂网络研究的最初几年, 推动研究的主要力量是隐藏在各种各样网络中的统计共性, 例如小世界现象、无标度效应、社团结构等等; 最近两三年, 大量的研究开始关注一些有代表性的网络具有的不同于其他网络的独特的性质, 例如公路网的强几何约束条件

[29], 计算机互联网独特的外围增长激励机制<sup>[30]</sup>, 科学家合作网的富者俱乐部<sup>[31]</sup>现象, 等等. 正是受这种从一般到特殊, 从共性到个性的研究趋势的影响, 我们深入研究了我国城市航空网络的连接机制. 共性和个性是辩证的统一体, 发现共性很重要, 凸显个性也很重要, 如果只强调普适性, 那么“天下网络一般黑”, 就没有意思了. 所以说, 本文的意义, 并不在于发现了适用于所有网络, 或者所有航空网络的某种“普适性”, 而是在于以一种简单新颖且具有启发性的方法, 解释或部分解释了我国城市航空网络的连接形成机制.

收集更多世界航空网络和其他各国航空网络的

相关数据, 特别是与之对应的社会经济指标(人口, 经济发展水平等等), 并对这些网络进行类似的分析, 找出这些航空网络生成机制的共同性和差异性, 是我们进一步研究的计划. 另外, 本文是基于一维数据分析航空网络的平面特征, 航空网络具有的空间效应还没有被研究到, 在今后的研究中, 将利用城市的二维空间数据分析空港城市间的相互作用和空间结构特征, 亦即建立我国航空网络的空间计量经济学模型. 将外在的经济因素与其他的优先连接模型结合, 以及考虑航线建立对节点城市的经济推动从而探讨网络结构演化与节点特征以及网络功能的反馈和互动作用, 也是我们未来研究的兴趣和焦点.

## 参考文献

- 1 胡思继. 交通运输学. 北京: 人民交通出版社, 2001. 6
- 2 Debbage K G. Air transportation and urban-economic restructuring: competitive advantage in the US Carolinas. *J Air Transp Manage*, 1999, 5(4): 211—221
- 3 Horner M W, O'Kelly M E. Embedding economies of scale concepts for hub network design. *J Transp Geography*, 2001, 9(4): 255—265
- 4 Wojahn O W. Airline network structure and the gravity model. *Transp Res Part E-Logist Trans Rev*, 2001, 37(4): 267—279
- 5 Aykin T. The hub location and routing problem. *Eur J Oper Res*, 1995, 83(1): 200—219
- 6 Guimerà R, Amaral L A N. Modeling the world-wide airport network. *Eur Phys J B*, 2004, 38: 381—385
- 7 Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A. The effects of spatial constraints on the evolution of weighted complex networks. *J Stat Mech*, 2005, (05): P05003
- 8 Li W, Cai X. Statistical analysis of airport network of China. *Phys Rev E*, 2004, 69: 046106
- 9 Chi L P, Wang R, Su H, et al. Structural properties of US flight network. *Chin Phys Lett*, 2003, 20: 1393—1396
- 10 Guimerà R, Mossa S, Turtschi A, et al. The world-wide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102(22): 7794—7799
- 11 Barabási A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286: 509—512
- 12 Xie Y B, Zhou T, Bai W J, et al. Geographical networks evolving with optimal policy. *Phys Rev E*, 2007, 75, 036106.
- 13 刘宏鲲, 周涛. 航空网络研究综述. *自然科学进展*, 2008, 18(6): 601—608
- 14 刘宏鲲, 周涛. 中国城市航空网络的实证研究与分析. *物理学报*, 2007, 56(1): 106—112
- 15 Guida M, Maria F. Topology of the Italian airport network: A scale-free small-world network with a fractal structure? *Chaos Solitons Fractals*, 2007, 31: 527—536
- 16 Reed W J, Jorgensen M. The double Pareto-lognormal distribution—A new parametric model for size distribution. *Com Stats-Theory Methods*, 2004, 33: 1733—1753
- 17 Zipf G K. *Selective Studies and the Principle of Relative Frequency in Language*. Cambridge: Harvard University Press, 1932
- 18 华东师范大学, 北京师范大学, 东北师范大学, 等合编. *经济地理学导论(修订四版)*. 上海: 华东师范大学出版社, 2004. 38—40; 234—236
- 19 Barthélemy M. Crossover from scale-free to spatial networks. *Europhys Lett*, 2003, 63(6): 915—921

- 20 马庆国. 管理统计——SPSS 数据收集、获取及应用. 北京: 科学技术出版社, 2000
- 21 Ravasz E, Barabási A-L. Hierarchical organization in complex networks. *Phys Rev E*, 2003, 67: 026112
- 22 Barrat A, Barthélemy M, Pastor-Satorras R, et al. The architecture of complex weighted networks. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101(11): 3747—3752
- 23 Bagler G. Analysis of the Airport Network of India as a complex weighted network. *Physica A*, 2008, 387(12): 2972—2980
- 24 Albert R, Barabási A-L. Statistical mechanics of complex networks. *Rev Mod Phys*, 2002, 74(1): 47—97
- 25 Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Evolution of networks. *Adv Phys*, 2002, 51: 1079—1187
- 26 Long J C, Gao Z Y, Ren H L, et al. Urban traffic congestion propagation and bottleneck identification. *Science China Ser F-Inform Sci*, 2008, 51(7): 948—964
- 27 Si B F, Long J C, Gao Z Y. Optimization model and algorithm for mixed traffic of urban road network with flow interference. *Sci China Ser E-Technol Sci*, 2008, 51(12): 2223—2232
- 28 Sen P, Dasgupta S, Chatterjee A, et al. Small-world properties of the Indian railway network. *Phys Rev E*, 2003, 67: 036106
- 29 Barthélemy M, Flammini A. Modeling urban street patterns. *Phys Rev Lett*, 2008, 100, 138702
- 30 Zhang G Q, Yang Q F, Cheng S Q, et al. Evolution of the internet and its cores. *New J Phys*, 2008, 10: 123027
- 31 Colizza V, Flammini A, Serrano M A, et al. Detecting rich-club ordering in complex networks. *Nat Phys*, 2006, 2: 110—115

## Analysis on the connecting mechanism of Chinese city airline network

LIU Hongkun<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoli<sup>2</sup>, CAO Lang<sup>3</sup>, WANG Binghong<sup>4,5</sup>, ZHOU Tao<sup>4,6</sup>

<sup>1</sup> School of Statistics, South Western University of Finance and Economics, Chengdu 610074, China;

<sup>2</sup> College of Economics & Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China;

<sup>3</sup> Department of Mathematical Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan;

<sup>4</sup> Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

<sup>5</sup> Research Center for Complex System Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>6</sup> Department of Physics, University of Fribourg, CH-170 Fribourg, Switzerland

**Airline network is of significant importance in economic and society. We investigate the Chinese city airline network, where nodes and edges denote cities and direct flights, respectively. Empirical data shows a double power-law degree distribution. Extensively numerical study on preferential attachment mechanism indicates that neither the shorter geographical distance nor the larger city size could be considered as the preferential ingredient. We think the economic level mainly determines the role of a city in the airline network. Partial correlation analysis demonstrates that the size of tertiary industry has the highest correlation with the throughput of air-transportation of a city. Accordingly, we propose a model for airline network with the output value of tertiary industry the preferential ingredient, which can reproduce the double power-law degree distribution very close to what we observed in the real network. Our work highlights the role of external features of nodes in determining the network topology, which not only provides a**



**new explanation of the underlying connecting mechanism of Chinese city airline network, but also extends the horizon of the theoretical studies of network modeling.**

airline network, complex networks, evolution model, preferential attachment, economic ingredient