

基于最多叶子生成树的中国航空网络轴辐结构构建

徐敏政^{1,2}, 许 珺¹, 陈 娱¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 航空网络的轴辐 (Hub-Spoke) 结构是实现规模经济发展的重要交通运输网络结构, 本文为此提出了一种全新的航空网络轴辐结构构建方法。该方法从图论和地理学的角度出发, 引入地理距离约束, 改进了传统的最多叶子生成树 (Maximum Leaf Spanning Tree) 算法, 直接从现有的中国航空网络中抽取树形轴辐结构形成航空支线网络, 然后选取支线网络中度前10的节点作为航空枢纽点, 并将枢纽点之间在原图中的航线抽取为航空干线网络, 最后将支线网络和干线网络合并形成中国航空网络的轴辐结构。在与相关研究的对比分析中, 本文方法虽是从图论角度出发, 但构建的中国航空轴辐结构符合实际地理环境, 划分支线网络距离阈值的选择更加客观合理, 所选的航空枢纽点地理意义更为明显, 干支线网络的覆盖度更为全面。

关键词: 轴辐结构; 中国航空网络; 最多叶子生成树; 距离约束; 图论

DOI: 10.11821/dlxb201412010

1 引言

中国航空网络处于蓬勃发展阶段^[1], 在中国社会经济的空间结构调整中起着重大作用, 维系着客运和物流等几大经济支撑产业^[2]。经过20多年的发展, 虽日趋完善, 但仍然存在东西部发展不平衡的地域性差异^[3], 与西方已基本形成能集中产生、传播和终结网络流的轴辐 (Hub-Spoke) 网络结构相比, 在提高规模经济运输效率和降低运输成本方面存在不足^[4-5]。美国航空网络自20世纪80年代放松运输管制至今, 已经针对美国航空网络的轴辐结构构建^[7-9], 地理位置关系^[10-11], 网络应用^[12], 轴辐结构与点对点 (Point-Point) 结构效益差异^[13], 轴辐结构的适用环境^[14-15], 轴辐结构对具体企业的经济效益影响^[16], 低成本路线的设计^[17]等问题展开了研究。欧洲不少学者探究了欧洲航空网络的轴辐结构特点^[18-19]。然而国内近10年主要集中研究中国航空网络的复杂网络结构特性^[2, 20-23], 虽然研究表明中国航空网络具备轴辐结构发展趋势, 但如何针对轴辐结构进行人工优化调整的研究相对较少, 随着电子商务等业务对航空网络规模化的运输需求, 这种优化又是必要的^[6]。

针对中国航空网络轴辐结构构建, 国内主要由金凤君等人从人文角度出发, 结合经济地理方面的数据人工构建的, 构建效率较低, 人为主观性较强^[6]。考虑到中国航空网络已经具备轴辐结构发展趋势, 本文从图论的角度出发, 考虑了地理距离约束, 改进了Lu在1998年设计的最多叶子生成树算法 (Maximum Leaf Spanning Tree, MLST), 提出了一种

收稿日期: 2013-09-06; 修订日期: 2014-07-28

基金项目: 国家863计划项目 (2012AA12A211, 2012AA12A403); 国家自然科学基金项目 (41371380,

41171296) [Foundation: National High Technology Research and Development Program of China, No.2012AA12A211, No.2012AA12A403; National Natural Science Foundation of China, No.41371380, No.41171296]

作者简介: 徐敏政 (1990-), 男, 江西抚州, 硕士研究生, 主要研究方向为空间网络数据挖掘、地理信息检索。

E-mail: xumz@lreis.ac.cn

通讯作者: 许珺 (1972-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事地理本体、地理认知和地学知识表达方面的研究。

E-mail: xujun@lreis.ac.cn

直接从现有的网络中抽取轴辐结构的新方法。最多叶子生成树是指同一个无向图的所有生成树中叶子节点最多的一棵，该生成树的非叶子节点彼此连通构成最小连通支配集，常用来构成一个图形网络的骨干网，维护图形结构，目前主要应用于通信领域的网络结构设计^[24-28]。该最小连通支配集中，支配节点(非叶子节点)支配叶子节点的网络结构，与航空网络轴辐结构中hub节点支配spoke节点的网络结构极其类似，因此本文将引入航空网络的轴辐结构研究。最多叶子生成树算法主要分为图形结构局部优化(local optimization)算法^[24-26]和固定参数训练的FPT算法^[27-30]两类。然而原始最多叶子生成树算法只考虑拓扑结构上的聚集性，为了形成航空网络空间上的局部聚集性，本文对算法进行改进，引进地理距离约束，从而能够从网络中抽取出Barthelemy利用最优化理论设计的一种树形轴辐结构(Tree-shaped Hub-Spoke)^[31]。该树形轴辐结构是一棵特殊的最多叶子生成树，其中，叶子节点既表现为spoke节点，非叶子节点表现为hub节点，而且各hub节点连接构成了树的骨干网。其中，每一个hub节点与其支配的spoke节点形成局部聚集性，hub的度数大小则体现了层次性，很符合中国现有航空网络空间结构特点。该抽取出树形轴辐结构构成了航空网络轴辐结构的支线网络，而度比较大的节点形成航空枢纽点，枢纽点间的航线形成了干线网络。

本文首先分析了中国航空网络结构特点，简述了树形轴辐结构这种特殊最多叶子生成树与航空网络轴辐结构的关系，然后介绍了距离约束的最多叶子生成树算法，提出了利用最多叶子生成树抽取了中国航空网络树形轴辐结构的构造方法，并构建了中国航空网络的轴辐结构，最后将所得结果与相关研究进行了对比分析。

2 数据与模型概述

2.1 中国航空网络结构现状

本文收集了截止2012年12月31日中国国内航班数据如图1所示(台湾目前被分类为国际航线，本文暂不加以考虑)。由于研究尺度是全国范围，因此本文将城市抽象为网络节点，同一城市的机场用该机场所在的城市代表，而有航班往来的城市用无向边连接。中国航空网络共有城市节点167个，航线连边1386条，平均度大小为16.599(度最大的三个城市分别为北京、上海和广州)，平均路径长度为1.958，聚类系数达到0.721。

2.2 轴辐结构

轴辐结构是大部分节点都与少数某些节点连接，如图2a所示，可分为单hub结

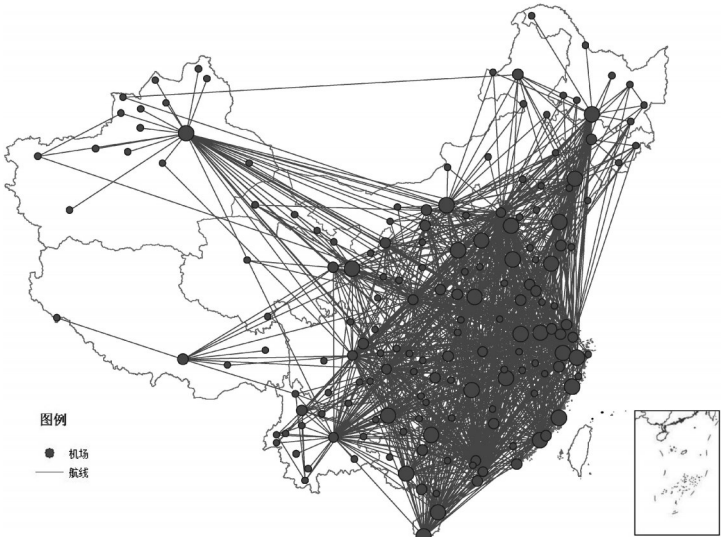


图1 中国航空网络(不含台湾)
Fig. 1 Chinese aviation network (excluding Taiwan)

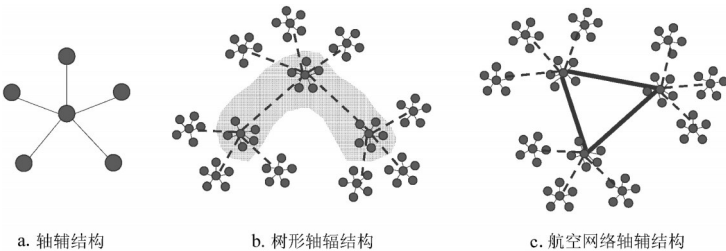


图2 网络轴辐结构

Fig. 2 Hub-spoke structure of network

构和多hub结构,其中多hub结构有种特殊形态,每个hub形成其局部支配中心,而所有hub连接起来又构成一棵具有层次性的树,即引言中提及的Barthelemy在2006年设计的树形轴辐结构(Tree Hub-Spoke),如图2b所示,虚线边连接着各个hub节点,构成一棵树,阴影区域的hub节点相比外围hub节点度数更大,层次更高。在考虑每个节点的地理位置之后,这种树形轴辐结构的局部hub结构即表现为地域性的聚集性,而将度数比较大的hub节点彼此连接成互通的枢纽航线^[6],即能形成图2c所示的航空网络轴辐结构。因此,从现有网络中抽取图2b所示的树形轴辐结构是构建图2c所示的航空网络轴辐结构的重要环节。又因为该树形轴辐结构同时也是一颗最多叶子生成树,因而如何根据航空网络的结构特性修改最多叶子生成树算法构建该属性轴辐结构又成为该重要环节的关键部分。

2.3 本文航线网络轴辐结构构建思路

本文航空网络轴辐结构的抽取思路如图3所示,先用距离约束的最多叶子生成树算法从现有的航空网络中抽取树形轴辐结构形成支线网络,然后从支线网络中抽取hub节点连接成的树形结构,并选取其中度数比较大的hub节点构成航空枢纽点(图3中阴影区域节点)。接下来从原始航空网络中抽取这些航空枢纽点之间的连线关系构成干线网络,最后综合干线和支线网络便形成了航空网络的轴辐结构。

3 距离约束的最多叶子生成树

最多叶子生成树的求解是一个NP难的问题,本文并不深入探讨如何求解最多叶子生成树,而是直接改进了Lu在1998年设计的近似算法,来求解网络的树形轴辐结构。该算法由两个部分构成:① 根据网络现有结构,求解该图的一个最多叶子森林(Maximally Leaf Forest);② 为构成森林中的子图添加连边,形成一棵连通的最多叶子生成树。选择Lu的算法进行改进的主要原因是:该算法是应用最广的图形结构局部优化最多叶子生成树算法,其局部优化的算法思想与航空网络轴辐结构的局部聚集性相一致,只是该局部优化是针对拓扑结构的,而航空网络是空间网络,为了要达到空间上的聚集性,本文引入地理距离约束,改进后的算法也分为2部分,分别是距离约束的最多叶子森林构造和近距离节点优先连接森林成生成树。

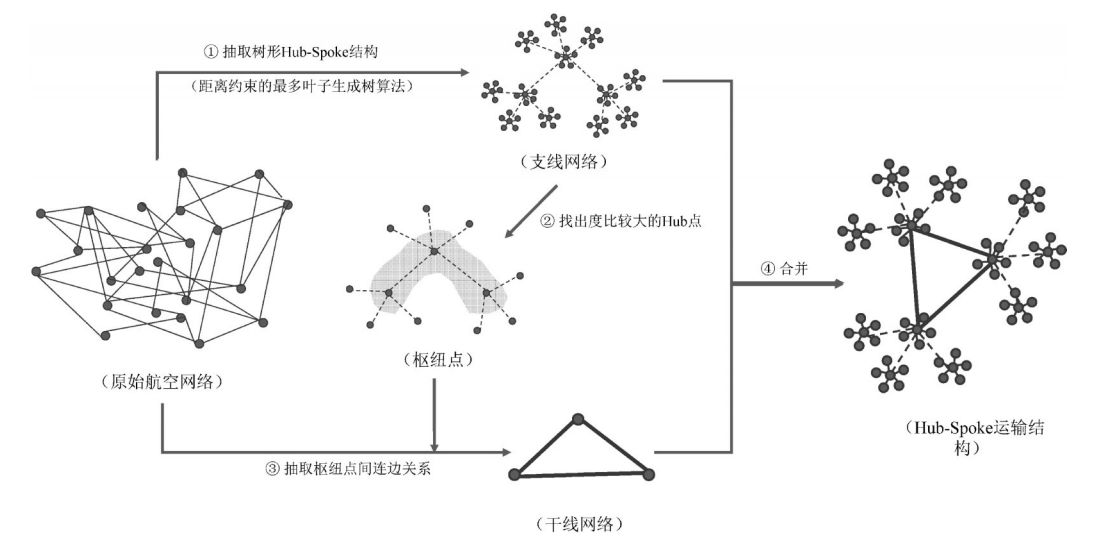


图3 航线网络轴辐结构构建思路

Fig. 3 The flowchart of generating aviation network hub-spoke structure

MAXIMALLY_LEAF_FOREST(G, ds)

```
1  F置为空集
2  对图G中的每一个节点v:
3      S(v) = {v}
4      d(v) = 0
5  对图G中的每一个节点v:
6      S' = {}
7      d' = 0
8  对图G中的每一个与v相连的节点u:
9      如果  $u \notin S(v)$  &  $S(u) \notin S'$  &  $dis(u, v) < ds$  则
10          $d' = d' + 1$ 
11         将S(u) 插入S'
12  如果  $d(v) + d' \geq 3$  则
13     对S'中的每一个S(u):
14         将边 uv 加入 F
15         合并 S(v) 和 S(u)
16         更新  $d(u) = d(u) + 1$  和  $d(v) = d(v) + 1$ 
17  输出 F 为图G的距离约束最大叶子森林
```

图4 距离约束的最多叶子森林求解伪代码

Fig. 4 Pseudo code for creating distance-constraint maximally leafy forest

JOIN_FOREST_INTO_TREE(F, UE)

```
1  ST = F
2  对森林 F 中的每一个节点 v:
3      C(v) = {v}
4  对森林 F 中的每一条边 uv:
5      合并C(u)和C(v)
6  对于未使用边集合 UE 中的每条边 uv:
7      如果 u 和 v 都不是叶子节点, 则
8          将边 uv 插入 II
9      如果 u 和 v 都是叶子节点, 则
10         将边 uv 插入 LL
11     其他情况, 则
12         将边 uv 插入 IL
13 分别对II, IL和LL中的边按其长度 len 排序
14 更新 UE = II + IL + LL
15 对更新的 UE 中的每一条边 uv:
16     如果  $u \notin C(v)$  则
17         将边 uv 插入 ST
18         合并 C(u) 和 C(v)
19 输出 ST为图G的一棵距离约束最多叶子生成树
```

图5 近距离优先连接原则的伪代码

Fig. 5 Pseudo code of principle of preferential connection with short distance

3.1 距离约束的最多叶子森林构造

生成最多叶子森林是算法的第一步, Lu通过一系列的定理证明, 设计出可以在线性时间内生成一系列的叶子节点最多的子图来构成森林F, 这些子图只由3类点构成: 度为1的叶子节点, 度大于等于3的非叶子节点, 以及度为2的节点 (这些节点连接2个度大于3的非叶子节点)。Lu在设计该步骤的原始算法中, 只考虑了图形的拓扑结构, 本文在森林子图的构造过程中进行了距离约束, 在构建森林过程中只考虑了距离小于ds的连边, 其伪代码如图4所示, 下划线加粗部分为算法改进部分。

3.2 近距离节点优先连接原则

连接最多叶子森林构成一棵生成树是算法的第二步, Lu的原始连接思想是: 筛选出原始图G中未在森林F中出现的边集合UE, 判断UE中边的端点在森林F中是否为叶子节点, 将UE中的边分为“非叶子节点连接非叶子节点的边集合II”, “非叶子节点连接叶子节点的边集合IL”和“叶子节点连接叶子节点的边集合LL”三类。然后依次按照II, IL和LL的优先顺序向森林F中添加连边, 直至F构成一棵生成树ST。为了使F中单个点构成的子图能与最近的非叶子节点相连, 维持地域性聚集特征, 本文在给F添加连边前, 分别对II, IL和LL中的边按照其长度len进行了排序, 形成近距离节点优先连接的原则, 伪代码如图5所示, 其中下划线加粗部分为算法改进部分。

4 中国航空网络的轴辐结构抽取

国内研究学者近10年针对中国航空网络结构进行了深入研究, 得到如下几个研究结果: ① 具有小世界网络的特点^[20], 另外刘宏鲲等进一步研究发现其度分布服从双段幂律分布, 平均路径短, 簇系数比较大^[21]; ② 逐渐发展出一定的层次性, 形成枢纽机场和支线机场, 其中处于顶层结构 (北京, 上海, 广州等地) 的枢纽机场凸显较为明显^[2, 21]; ③ 具

有很强的局部集聚现象,产生地域性“极化”效应^[22],在20年的发展中,平均每个机场的服务半径缩短了27%^[2],而武文杰等人也证实了中国航空网络表现出社群结构特征,邻近城市之间具有一定的空间关联性^[3];④由于网络层次性和地域集聚效应的共同作用,轴辐结构正成为发展趋势^[22]。因此,顺应目前中国航空网络目前已有的轴辐结构发展趋势,直接利用图论算法从现有航空网络中优化轴辐结构也是有意

4.1 约束距离的选取

影响距离约束的最多叶子生成树算法运行结果的关键因素是“约束距离”的确定。如果约束距离选择过大,约束过宽,所求出的结果与不考虑距离约束的拓扑求解结果基本类似,体现不出地域性的聚集;如果约束距离选择过小,则会因为参与构建森林子图的连边过少,生成很多单个点的子图,影响hub的形成。根据现实的航线设计经验,远途的航线少而集中,例如图1中大部分东部的机场都只和西北部的乌鲁木齐相连;而近距离的城市通航的可能性又比较低,例如北京与天津、深圳与广州等。因此,必然有一个最适当通航的距离存在,如果找出该距离作为算法中的“约束距离”,一方面可以保证约束距离不至于过大,形成地域性聚集,另一方面也能保证参与构建森林子图的连边数量,突显hub节点。为了衡量找出最适当通航距离,本文计算了中国航空网络“距离与连接概率关系图”,用于定量衡量城市距离与通航航线出现可能性之间的关系,如图6所示。其计算公式如公式(1)所示,其中 P_d 表示连接概率, d 表示距离, G 表示现有航空网络, K_n 表示由现有航空网络中的节点所生成的完全图,而 $\#G(d)$ 和 $\#K_n(d)$ 分别表示网络 G 和 K_n 中连边长度小于 d 的连边个数。

$$P_d = \frac{\#G(d)}{\#K_n(d)} \tag{1}$$

距离与连接概率关系用于衡量不同距离下,网络中连边出现的概率大小,是空间网络中常用的衡量指标之一^[23]。从计算所得的图6中可以明显发现两个城市距离相距过小和过大,存在航线的可能性都比较小,而中间距离区间600~700 km连接概率最高,并在693 km处取得峰值,连接概率最大为0.163。该概率关系曲线与上文中现实生活航线设计经验相符,因此,本文将693 km作为最优“约束距离”参与中国航空网络树形轴辐结构的抽取。

4.2 最优距离约束下的树形轴辐结构抽取

在最优距离693 km的约束下,抽取中国航空网络的树形轴辐结构,形成支线网络如图7所示,图中节点的大小都表示度的大小。度数排名前10位的节点分别是:北京,上海,广州,长沙,哈尔滨,乌鲁木齐,昆明,西安,成都,贵阳,这些节点构成中国航空网络的航空枢纽点。该10个点在地理分布上都表现为局部hub节点,分别支配着各自区域内的其他机场(如图7阴影区域所示):乌鲁木齐支配着西北地区;哈尔滨支配着东北地区;北京支配着华北地区;长沙和贵阳支配着华中地区;西安、成都和昆明支配着大部分西部地区;广东支配着南部沿海地区;上海则支配着东部沿海地区。从图7中不难发现,

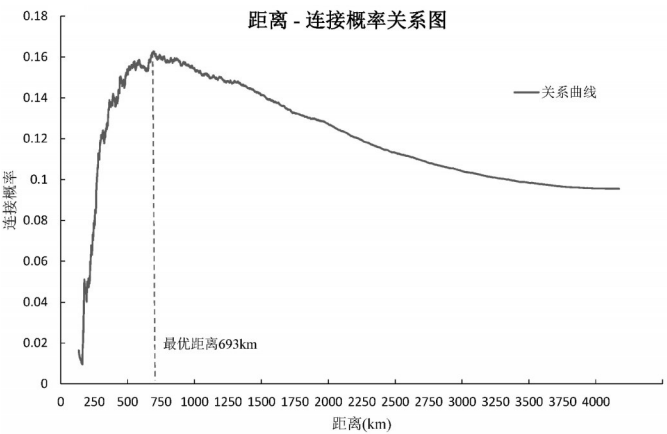


图6 中国城市航线网络距离-连接概率关系
Fig. 6 The relationship between distance and connection-probability of Chinese aviation network

有些节点在地理分布上并没有表现出就近原则，反而与距离较远的点相连，如图中与广州相连的大部分节点，以及西北部未与乌鲁木齐连接的节点。造成这种现象的主要原因是那些不遵循就近原则的节点与最近的hub节点在原图中就不存在航线，因此在抽取出来的树形轴辐结构中自然也不会存在。

绘制支线网络的拓扑结构如图8所示，阴影区域为10个枢纽点在拓扑上构成的树形结构，节点的大小表示度的大小。图中处于外圈的节点是上海、广州、昆明、乌鲁木齐和哈尔滨，这五个地方在地理上都处于航线网络的边缘地带；而另外五个节点不仅拓扑上处于树形结构的内层，在地理上也处于中国内陆地区。形成这种拓扑结构和地理分布相吻合的现象，是由构建过程中先进行距离约束构建子图，再次依次根据近距离优先连边原则连边的构造过程所决定的。然而，更关心的是这10个节点在原图中的连接关系，即骨干网的构建。

4.3 中国城市航线网络的轴辐结构构建

从图1所示的原始航空网络中抽取10个航空枢纽点之间的连边，构成图9所示的中国城市航线网络的骨干网。将此干线网络与图7的树形轴辐结构结合即得到了中国城市航线网络的轴辐结构，其拓扑结构如图10所示。图9显示的干线网络形如中国疆土，基本覆盖了整个中国，而图10的航线网络的轴辐结构中枢纽点高度耦合，每一个枢纽点都支配着相近地域内的其他节点，非常适合网络流在hub节点集中产生、传播和终结，降低整个网络流的消耗，形成一种有序的规模化运输体系。

5 与相关研究的对比分析

为了更加客观地评价本文所构建中国航空网络轴辐结构的地理意义，将其与文献[6]

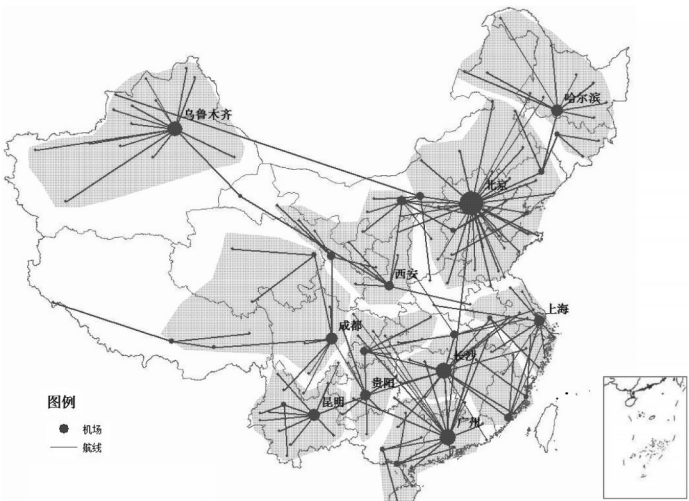


图7 中国城市航线网络的树形轴辐结构
Fig. 7 The tree-shaped hub-spoke structure of Chinese aviation network



图8 中国城市航线网络的树形轴辐结构拓扑图
Fig. 8 The tree hub-spoke topology structure of Chinese aviation network

中金凤君等人构建的中国航空网络轴辐结构进行对比,分别从航空枢纽点的选择、干线和支线网络构建、构建思路和各自优缺点等方面进行了讨论,其主要不同见表1所示。以下重点讨论两种方法所构建轴辐结构中3个组成部分的差异:

5.1 航空枢纽点对比分析

本文是考虑了机场在国内航线中的连接关系,筛选了10个支配Spoke点数比较多的Hub节点作为枢纽点,而金凤君等人根据机场的国内地位、国际地位及枢纽动态性等方面筛选了9个符合实际经济发展情况的的城市作为航空枢纽点,两者的结果对比如表1所示。以下重点讨论航空枢纽点选择的不同之处,对应枢纽点地理分布,本文所筛选的长沙和哈尔滨分别对应于金凤君等人筛选的武汉和沈阳,而且新增了贵阳为航空枢纽点。

(1) 长沙和武汉在原图中航班数分别为50和54,在原图中的航空地位基本相当。结合其他交通运输方式的综合运输能力来看,武汉是九省通衢,铁路、公路和河运等交通枢纽都非常发达,尤其是近两年开通的高铁,处于横纵线的交汇点,极大的替代了航空网络的运输地位;而长沙相比武汉而言更需要航空网络来支持发展,因此从此角度来看将枢纽点设在长沙具有一定的发展意义。然而从地理空间分布来看,长沙离广州过近,反而武汉的地理位置更加合理。然而本文算法选择长沙的主要原因是:原图中与武汉通航的大部分机场都与其他几个航空枢纽点相连,因此与武汉连接的大部分节点都已被其他航空枢纽点支配,而使得长沙在支线网络中的度数更大,被选中成为航空枢纽点。由于本文只是提出一种轴辐结构构建的通用方法,建议决策者在实际网络优化中再根据经济发展布局等其他因素做局部调整,而本文在后续研究中也会进一步根据航空网络的“空间结构特性”对算法做进一步的优化。

(2) 哈尔滨和沈阳在原图中航班数分别为35和37,在原图中的航空地位也基本相当。

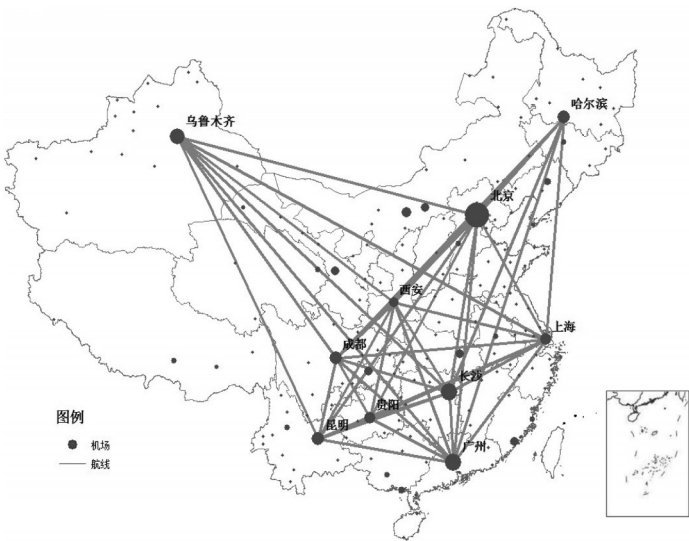


图9 中国城市航线网络的骨干网
Fig. 9 The backbone of Chinese aviation network

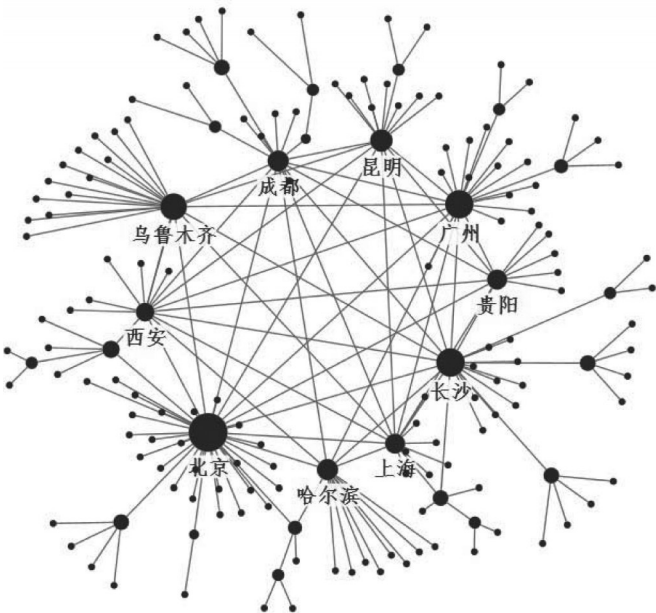


图10 中国城市航线网络的轴辐结构拓扑图
Fig. 10 The hub-spoke topology structure of Chinese aviation network

从图9中可以发现,哈尔滨在东北区域控制的范围更加广阔,而沈阳还有海上航线的运输通道,而且沈阳支配的区域也处于北京的支配区域范围内,因此相比而言将枢纽点设在哈尔滨也更加能协助东北内陆地区的经济发展。

(3) 本文新增的贵阳枢纽点处于中国海拔的第二梯度,而且是内陆地区,铁路、公路和海运都无法满足其周边的发展,只能依靠航空,而且贵阳所支配的节点也较多,在原网络中航班数也达到35的中上等水平,贵阳和昆明一起覆盖了第二梯度的云贵高原地区。而中国海拔第一梯度的青藏地区,本文还未构建出一个强有力的枢纽点,主要是由于航班数还不足以形成枢纽点,但随着发展的趋势,拉萨很有可能发展为西藏区域的枢纽点,而青海地区要么被兰州支配,要么独立形成西宁为枢纽点,这些都要随航空网络的发展进一步调整。

5.2 干线网络对比分析

(1) 从干线网络构建方法来看,金凤君等人将干线网络细分为国内主干线、国内干线和一般干线;而本文是直接各枢纽点在原图中现有的所有航线都抽取出来,并没有进一步细分。如图10所示,各枢纽点间连接构建的干线网络应该尽量接近完全图,两两之间都通航,以加快网络流的集中交换。如果需要进一步划分等级,本文认为应该利用各枢纽点间的航班数来确定会更加合理,航班数大的为主干线,应该重点关注,航班数小的为一般干线,应尽力维护使其尽快升级为主干线。

(2) 从构建的干线网络结果对比来看,由于两种方法选取的航空枢纽点基本相同,而干线网络又是航空枢纽点间的航线,因此两种方法所构建的干线网络外部形态基本相同,整体形如中国疆土。另外,由于本文航空枢纽点中哈尔滨取代了沈阳,使得本文所构建的干线网络在东北部覆盖更加全面;而长沙和武汉地理位置基本相当,并没有对中部的干线网络造成过大的差异。除此之外,从两种方法构建的干线网络中都能发现,中国西南部的青藏地区由于缺少一个强有力的枢纽点,并未被干线网络覆盖,建议重点加强该地区应的航空建设。

5.3 支线网络对比分析

(1) 从支线网络的划分距离来看,金凤君等人参考了其他学者的一些研究成果,直接将构建支线网络的距离阈值设置为800 km;而本文从网络航线距离与其连接概率的关系出发,选取了连接概率最大所对应的距离693 km作为划分距离,更加客观,符合现有网络的特点。连接概率最大,表示在当前网络中这种连边关系出现的概率最大,那么在这个距离点上各城市间形成航线的可能性也就更大,加之本文算法的最多叶子保证,将其设为截断阈值所能划分出的地域支配集合和Hub节点会更加明显。

(2) 从构建的支线网络结果对比来看,同样由于两种方法选择的航空枢纽点基本相同,而支线网络是围绕航空枢纽点的局部聚集性支配性航线网络,因此两种方法所构建的支线网络大部分结构相同。然而,金凤君等人所构建的支线网络在黑龙江、甘肃、西藏、内蒙古和新疆等多个地区都存在较多城市串航的网络,而本文所构建的支线网络一方面由于选择黑龙江作为航空枢纽点,另一方面也受最多叶子生成树的连通特性作用(如甘肃地区的偏远点,同时与乌鲁木齐和西安两个航空枢纽点相连),使得城市串航这种低效运输情况大大减少,只在西藏和甘肃等地出现。

6 结论

本文提出了一种直接从现有网络中抽取的中国航空网络的轴辐结构的构建方法,从图论领域引入树形轴辐结构,改进了一种最多叶子生成树,增加了距离约束的限制条件,并将其应用到中国航空网络的轴辐结构的构建过程中,最后解释这种图论抽取结构的地理意

表1 轴辐结构构建对比

Tab. 1 Comparative analysis with related research		
角度	本文实验	金凤君等人的实验 ^[6]
航空枢纽点	北京,上海,广州,成都,乌鲁木齐,昆明,西安,长沙,哈尔滨,贵阳	北京,上海,广州,成都,乌鲁木齐,昆明,西安,武汉,沈阳
干线网络	由航空枢纽点之间的所有连边构成	由航空枢纽点之间的所有连边构成
支线网络	由抽取的树形轴辐构成,同时考虑了现有航线和距离约束所形成的地域性聚集	只考虑了距离约束的地域性聚集
构建思路	从图论和地理学的角度出发,直接从现有网络中抽取,先构建支线网络,找出枢纽点,再构建干线网络	从人文地理和经济地理角度出发,采用人工手动构建方式,先找出枢纽点,构建干线网络,再构建支线网络
优缺点	便于根据现有网络快速进行调整,效率高,但为了更好的经济发展需做局部的人工调整	更加适合经济发展,但人工构建主观性强,效率较低

义。在航空枢纽点方面,本文所得到的航空枢纽点分别为北京,上海,广州,长沙,哈尔滨,乌鲁木齐,昆明,西安,成都和贵阳,其中,长沙和哈尔滨分别取代了人文领域筛选的武汉和沈阳,而且新增了贵阳为航空枢纽点,在地理环境方面和空间分布两方面都表现出一定的优势,尤其是哈尔滨的选择。在干支线构建方面,本文的构建方法不管是在干线网络的设计上,还是支线距离划分的选择上都表现得比较客观;而且由于哈尔滨航空枢纽点的选择,本文所构建的干线网络在增加东北地区的覆盖度,以及减少支线网络中低效的城市串航结构方面也都表现得比较好。另外,在构建航空网络轴辐结构过程中,发现中国西南部的青藏地区由于缺少一个强有力的枢纽点,干支线网络覆盖不全面,建议重点加强该地区应的航空建设。本文的主要贡献有:①从现有航空网络结构出发,利用图论算法直接抽取航空网络的轴辐结构,计算性能高效而客观,避免了人文地理中人工构建的主观性影响;②引入地理距离约束,改进了图论中传统的最多叶子生成树算法,使其具备抽取树形轴辐结构这种特殊生成树的能力;③在构建航空网络轴辐结构的支线网络中,划分距离由连边的连接概率最大所对应的距离决定,而非人工确定,符合现有航线网络的特点;④构建出的中国航线网络轴辐结构,虽和人文地理领域构建的结构大部分相同,但针对两者不同的枢纽点和支干线网络,在经过空间分布和地理环境等对比分析后,本文所构建的网络结构更符合地理环境上的经济发展需求。

虽然目前我国航空网络的轴辐结构还未完全形成,而且当前较为严格的航空管制也形成了一定的阻碍性,但本文所提出的构建方法在一定程度上能给航空网络调整的决策者提供一种较为直观的参考意见。本文下一步的研究是将此种航空网络轴辐结构的构建方法应用于全球航空网络,构建全球航空网络的轴辐结构,为中国航空网络的国际部署提供可靠的建议,提高中国航空网络的国际地位。

参考文献 (References)

[1] Wang Chengjin, Jin Fengjun. Spatial evolvement of china international relation through analyzing aviation international networks. *Economic Geography*, 2005, 25(5): 667-672. [王成金, 金凤君. 从航空国际网络看我国对外联系的空间演变. *经济地理*, 2005, 25(5): 667-672.]

[2] Wang Fahui, Jin Fengjun, Zeng Guang. Geographic Patterns of Air Passenger Transport in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(5): 519-525. [王法辉, 金凤君, 曾光. 中国航空客运网络的空间演化模式研究. *地理科学*, 2003, 23(5): 519-525.]

[3] Wu Wenjie, Dong Zhengbin, Zhang Wenzhong et al. Spatio-temporal evolution of the China's inter-urban organization network structure: Based on aviation data from 1983 to 2006. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(4): 435-445. [武文杰, 董正斌, 张文忠 等. 中国城市空间关联网络结构的时空演变. *地理学报*, 2011, 66(4): 435-445.]

[4] O'kelly M E. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 1987, 32(3): 393-404.

- [5] O'Kelly M E. A geographer's analysis of hub-and-spoke networks. *Journal of Transport Geography*, 1998, 6(3): 171-186.
- [6] Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub-and-spoke system and China aviation network organization. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 774-784. [金凤君, 王成金. 轴—辐侍服理念下的中国航空网络模式构筑. *地理研究*, 2005, 24(5): 774-784.]
- [7] Bryan D L, O'Kelly M E. Hub-and-spoke networks in air transportation: An analytical review. *Journal of Regional Science*, 1999, 39(2): 275-295.
- [8] Oum T H, Zhang A, Zhang Y. A note on optimal airport pricing in a hub-and-spoke system. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1996, 30(1): 11-18.
- [9] Hendricks K, Piccione M, Tan G. Equilibria in networks. *Econometrica*, 1999, 67(6): 1407-1434.
- [10] Campbell J F. A survey of network hub location. *Studies in Locational Analysis*, 1994, 6: 31-49.
- [11] Campbell J F. Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 1994, 72(2): 387-405.
- [12] Aykin T. Networking policies for hub- and- spoke systems with application to the air transportation system. *Transportation Science*, 1995, 29(3): 201-221.
- [13] Kawasaki A. Network effects, heterogeneous time value and network formation in the airline market. *Regional Science and Urban Economics*, 2008, 38(4): 388-403.
- [14] Alderighi M, Cento A, Nijkamp P et al. Network competition: The coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management*, 2005, 11(5): 328-334.
- [15] Pels E. Network competition in the open aviation area. *Journal of Air Transport Management*, 2009, 15(2): 83-89.
- [16] Bowen Jr. J T. A spatial analysis of FedEx and UPS: hubs, spokes, and network structure. *Journal of Transport Geography*, 2012, 24: 419-431.
- [17] Lin M H. Airlines- within- airlines strategies and existence of low- cost carriers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(3): 637-651.
- [18] Burghouwt G, Hakfoort J. The geography of deregulation in the european aviation market. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 2002, 93(1): 100-106.
- [19] Adler N. Hub-spoke network choice under competition with an application to Western Europe. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 58-72.
- [20] Wang Jiao'e, Mo Huihui, Jin Fengjun. Spatial structural characteristics of Chinese aviation network based on complex network theory. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 899-910. [王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性. *地理学报*, 2009, 64(8): 899-910.]
- [21] Liu Hongkun, Zhou Tao. Empirical study of Chinese city airline network. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(1): 106-112. [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.]
- [22] Jin Fengjun. A study on network of domestic air passenger flow in China. *Geographical Research*, 2001, 20(1): 31-39. [金凤君. 我国航空客流网络发展及其地域系统研究. *地理研究*, 2001, 20(1): 31-39.]
- [23] Barthélemy M. Spatial networks. *Physics Reports*, 2011, 499(1-3): 1-101.
- [24] Solis-Oba R. 2-approximation algorithm for finding a spanning tree with maximum number of leaves. *Lecture Notes Computer Science*, 1998, 1461: 441-452.
- [25] Lu H I, Ravi R. Approximating maximum leaf spanning trees in almost linear time. *Journal of Algorithms*, 1998, 29(1): 132-141.
- [26] Lu H, Ravi R. The power of local optimization: Approximation algorithms for maximum-leaf spanning tree. *Thirtieth Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, 1992, 30: 533-542.
- [27] Bonsma P S, Brueggemann T, Woeginger G J. A Faster FPT Algorithm for Finding Spanning Trees with Many Leaves. *Berlin and Heidelberg: Springer*, 2003, 259-268.
- [28] Bonsma P, Dorn F. Tight bounds and a fast FPT algorithm for directed max-leaf spanning tree. *Berlin and Heidelberg: Springer*, 2008: 222-233.
- [29] Fujie T. An exact algorithm for the maximum leaf spanning tree problem. *Computers & Operations Research*, 2003, 30(13): 1931-1944.
- [30] Fujie T. The maximum leaf spanning tree problem: Formulations and facets. *Networks*, 2004, 43(4): 212-223.
- [31] Barthélemy M, Flammini A. Optimal traffic networks. *J. State. Mech.*, 2006, (7): L07002.

Construction of Chinese aviation hub-spoke structure based on maximum leaf spanning tree

XU Minzheng^{1,2}, XU Jun¹, CHEN Yu¹

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Aviation hub-spoke structure is an important transportation network to achieve economies of scale development. As regards to its construction, most of methods are proposed by human geography scientists, whose efficiencies are affected by the authors' experience. In this paper, we present a novel graph method to extract hub-spoke structure from aviation network directly, which is more objective and efficient. Taking Chinese aviation network as a case study, we integrate a constraint distance into the conventional maximum leaf spanning tree algorithm to extract tree-shaped hub-spoke structure. The tree-shaped hub-spoke structure forms the branch airlines, and the top 10 degree nodes selected as aviation hubs are Beijing, Shanghai, Guangzhou, Chengdu, Urumqi, Kunming, Xi'an, Changsha, Harbin and Guiyang. The ten hubs dominate other non-hubs in different regions of China. For example, Urumqi dominates Northwest China and Shanghai dominates eastern China. The airlines among the hubs form the trunk airline network, which covers most of China's territory except the southwestern part because of lacking of a powerful hub. The aviation hub-spoke structure is generated by merging the branch airlines and the trunk airline network. Compared with the result of previous research, the hub selection of our method is more reasonable in some cases, such as selecting Harbin instead of Shenyang in Northeast China; the branch airlines and trunk airlines generated by our method have broader coverage; the division of branch and trunk airlines is more objective due to the use of constraint distance. In addition, our hub-spoke structure fits the real geographical situation better than the previous results. To sum up, the contributions of this paper are: (1) developing a novel maximum leaf spanning tree algorithm with distance constraint; (2) proposing a novel aviation hub-spoke structure construction method based on the algorithm; (3) applying the method to extract the hub-spoke structure of Chinese aviation in 2012, and it performs quite well.

Key words: hub-spoke; Chinese aviation network; maximum leaf spanning tree; distance constraint; graph theory