Study on Planning Method for Lateral Networks on The Base of Complex Networks

Fuqing Dai[1], Yaming Tai[2]
Civil Aviation University of China, Tianjin, China
Civil Aviation University of China, Tianjin, China
1. daifuqing@yahoo.com.cn, 2.taiyaming2002@yahoo.com.cn

Abstract: Lateral networks not only effects the regional transportation, but also is very import to the harmony of the trunk and the lateral from the whole country's sight. In recent years, the complex networks have some great improvements, especially the scale-free property and the small world effect. Study on the lateral networks based on this theory can discuss the development in a deeper level. This paper first builds the airline networks gravity space model according to the relative theory so that to explain the Matthew effect and the small world effect, and then builds the nonstop line value model and the transferred line value model. Finally，it works out the planning method of the regional lateral networks.

Key words: Matthew effect, small world effect, airline networks gravity space model, lateral networks

基于复杂网络的地区支线航线网络规划方法研究

戴福青[1] ，台亚明[2]
1. 中国民航大学空中交通管理学院 天津 中国 300300
2. 中国民航大学空中交通管理学院 天津 中国 300300
1.daifuqing@yahoo.com.cn, 2.taiyaming2002@yahoo.com.cn

【摘要】地区支线航线网络结构不仅能够影响本地区的交通通达性，而且从整个国家的航线体系来看，对协调干支线之间的关系也有重要的作用。近些年来，复杂网络研究取得了一些突破性进展，尤其是BA 模型中的优先连接特性、生长特性以及小世界效应，应用复杂网络理论对民航航线网络进行研究，可以从较深层面来探索航线网络的发展，本文首先根据广义相对论中的空间扭曲理论建立了民航引力场空间模型，并根据该模型对 BA 模型中的优先连接特性和小世界效应的进行了力学分析，进而建立了直达航线和中转航线的价值模型，最后得到地区支线航线网络的规划方法。

【关键词】优先连接特性；小世界效应；民航引力场空间模型；支线航线网络

1 引言

近年来，我国民航事业取得了举世瞩目的成就，2005 年我国民航总周转量已经跃居世界第 2 位。支线航空运输也取得了很大的进步，但相比较干线而言还比较滞后，支线航空运输规模和质量与我国国民经济社会发展的需求还存在较大差距，其中在航线网络方面的不足主要体现为：支线航线网络仍停留在较初级的城市对层面上，重布线轻织网等。加快支线航空运输的发展建设，能促进支线航空运输与干线航空运输的协调发展，进一步提高航空运输服务的覆盖水平，满足社会对航空运输的需求。一个地区的支线航线网络相对于整个国家航线体系来看，如同大型网络中的局域网，良好的地区支线航线网络结构不仅能够提高该地区内的交通通达性、更好的满足当地人民的出行需要，而且从整个国家的航线体系来看，也能更好的协调干支线之间的关系。如以新疆地区为例，建设以乌鲁木齐为支线枢纽的良好的支线航线网络，既可以提高疆内旅客出行的便利性，同时可以解决新疆地区其他城市直飞北京等大城市造成的航路阻塞，而且随着客座率的提高，也可以降低飞行的单位成本，对出行人群、航空公司和民航管理单位各方面而言都是有利的。所以对地区支线航线网络的规划方法进行研究是极其有必要的。

2 BA 网络模型、小世界效应

近些年来，复杂网络的研究进展尤其是小世界效应（small-world effects）和无标度特性（scale-free property）激起了物理学、社会学、计算机通信和交通科学领域对复杂网络的研究热潮。复杂网络是大量真实复杂系统的抽象，能刻画复杂系统中的各种动力学行为的影响。复杂网络为我们提供了一种研究的新视角、新方法，其不仅是对网络拓扑结构的研究，更重

978-1-935068-05-1 © 2010 SciRes.

要的是揭示网络的时间和空间的演化规律，最终实现对网络进行有效的设计或者控制。因此可以借鉴复杂网络中适用于地区支线航线网络优化的模型及其特性来进行分析，如 BA 网络模型特性及小世界效应。

2.1 BA 网络模型

BA 网络模型是 1999 年 Barabasi A.L 和 Albert R 提出的一种网络模型，BA 网络模型建立在两个基本假设之上：增长特性和优先连接特性。

（1）增长特性：网络的规模在不断扩大。从一个具有 m_0 个节点的网络开始，每次都引进一个新节点，并将其连到 m（m< m_0 ）个已存在的节点上。

（2）优先连接特性：新增加进来的节点与已有节点建立连接的时候，具有一定的“选优”倾向，即新节点更倾向于与具有较高连接度的“大”节点相连，一个新节点与一个已存在的节点 i 相连的概率 $\prod_i$ 与节点 i 的度 k_i 和节点 j 的度 k_j 之间有如下关系：$\prod_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$。

2.2 小世界效应

小世界是指尽管网络本身很大，但是在大多数网络中任意两个节点之间存在相对短的路径。物理学家把大的簇系数和小的平均距离两个统计特征在一起成为小世界效应，具有这种效应的网络就是小世界网络。大量的实验研究表明，真实的网络几乎都具有小世界效应。

小世界效应的简单理解可以认为是在复杂网络中，当某些节点的度非常大的时候，与这些节点连接的度较大的节点之间会产生直接连接关系，以降低该复杂网络的平均路径长度。

3 基于场论的民航引力场空间

3.1 广义相对论中的引力场

爱因斯坦所阐明的广义相对论中引力场的物理结果可以总结概括如下：时空是一个四维非欧几里得的连续区，这个连续区的弯曲（或翘曲）是本地物质或能量分布的结果。粒子和光线沿这个四维几何的短程线（固定距离）行进。

广义相对论中时空的弯曲是由本地物质（或能量）分布确定的：在一个区域中的物质密度越大，该区域时空的弯曲就越厉害。广义相对论中，引力不再是（牛顿理论中）在一个固定的空间和时间背景中起作用的普遍存在的力了。它反而是由当地质量或能量所引起的空间和时间的一种特性（弯曲或畸变）。质量和能量的一个重要特性就是它们总是正的，这就是为什么引力总是吸力的原因。从来没有检测出排斥的引力。根据广义相对论，时空像一个球的表面一样自身向后弯曲，或者说空间和时间的曲率总是正的。若质量（或）能量是负的或者引力是相斥的，那么空间和时间就会像马鞍形一样有负的曲率，质量造成的空间扭曲如图 1。

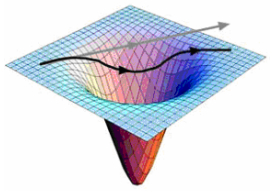

Figure 1. The space twisted by the gravity
图 1 引力造成的扭曲空间

3.2 基于场论的民航引力场空间模型

借鉴场论，这里提出一个新的模型——民航引力场空间。主要有以下几个假设：

（1）民航引力场空间中的机场即各个节点的类似于广义相对论中的质量以它的度来表示，各节点的度在计算的时候每条边以流量加权。这些度都认为是正的质量（或能量），此外，结合民航航线网络属于复杂网络的特点，即具备增长特性，认为随着机场流量的不断增加，机场的度（正质量）也是在不断增加的。

（2）不同于广义相对论中质量（或能量）只有正的，在民航引力场空间中还要考虑负质量（能量），负质量（能量）认为是对民航运输形成阻抗的因素，如发达的地面交通、较高的单位运行成本、较长的时间等等。

（3）在没有考虑机场的时候，将全国民航引力场空间看做是一个欧几里得二维平面。如图 2.

（4）如同广义相对论中质量（能量）引起时空畸变一样，认为民航引力场空间中正质量引起民航引力场空间的正曲率，即产生一个凹面，如图 3。正曲率的大小和半径大小同样类似广义相对论，和引起该曲率的机场的度成正比例关系。

$$\begin{cases} \alpha_i \propto k_i \\ R_i \propto k_i \end{cases} \qquad (3.1)$$

上式中，α_i 是机场 i 引起的民航引力场空间的正曲率的大小，R_i 是机场 i 引起的民航引力场扭曲空间的范围大小，这里简单的认为是一个圆形的半径，k_i 是机场 i 的度。

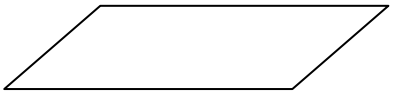

Figure 2. Aviation gravity space without the airport
图 2 不考虑机场的民航引力场空间

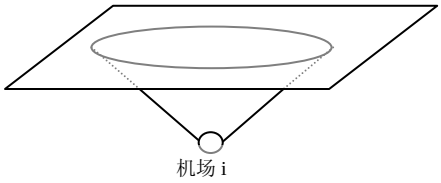

Figure 3. Aviation gravity space with the airport
图 3 .只考虑机场的民航引力场空间

（5）而负质量同样引起民航引力场空间的畸变，不同的是它产生的是负曲率，使空间发生凸起。负质量形成的凸起体现在两节点之间的空间，为了简化，认为和正质量所引起的正曲率叠加以后将在机场附近的小范围内形成一个小平面。同样，负曲率的大小和半径取决于两地间其它交通运输方式的便捷程度，如图 4。

$$\begin{cases} \beta_i \propto Z_{AB} \\ R_i \propto Z_{AB} \end{cases} \qquad (3.2)$$

上式中，β_i 是 A、B 负质量（两地其它交通运输方式）所引起的负曲率的大小，R_i 是负质量引起空间负曲率的范围大小，同样简单的认为是一个圆的半径大小，Z_{AB} 反映的是 A、B 两地其它交通运输方式的便捷程度，或者认为是民航运输的阻抗因素。

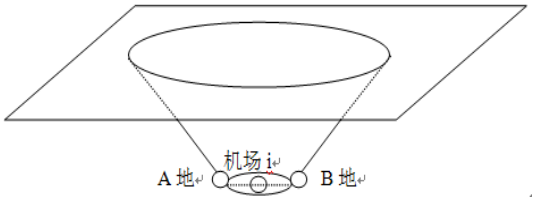

Figure 4. Aviation gravity space with all the factors
图 4 正负质量的单一机场所形成的民航引力场

（6）认为民航引力场空间中的每个节点同时向所在网络的其它所有节点发射粒子（可以认为是相连机场开辟航线的潜力），度越大的两个机场之之间粒子运动的加速度越大，各个机场都对其它机场之间的粒子根据引起负曲率空间的大小，形成类似引力的效果。

$$a_{AB} \propto k_A \cdot k_B \qquad (3.3)$$

$$a_{ACB} \propto k_C \qquad (3.4)$$

上式中，a_{AB} 是运动于机场 A、B 之间粒子的加速度，a_{ACB} 是机场 C 对机场 A、B 之间运动粒子的类似引力的加速度效果，k_A、k_B、k_C 分别是机场 A、B、C 的度的大小。

4 基于民航引力场空间 BA 模型优先连接特性、小世界效应的力学建模分析

首先需要说明的是，因为这里只是分析优先连接效应和小世界特性，所以其它方式对航空运输造成的竞争没有考虑，也就是说，认为机场之间的距离、时间等阻抗因素够大，具备开通航线的条件。

4.1 优先连接特性的力学建模分析

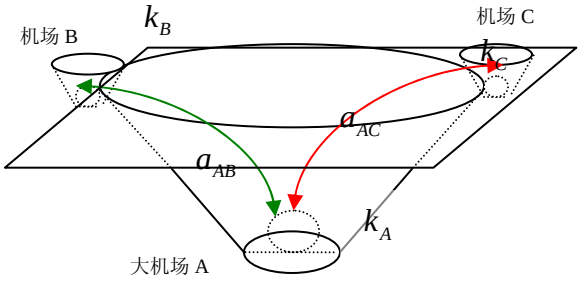

Figure 5. Gravity space in the Matthew effect
图 5．优先连接特性引力场空间

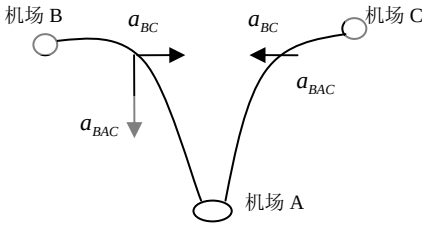

Figure 6. Acceleration in the Matthew effect
图 6. 优先连接特性引力加速度

如图 5，根据建立的民航引力场模型，可以认为在该图中的民航引力场空间具备以下情形：

（1）机场 A、B、C 的度因为是正质量，所以使得该民航引力场空间产生了正曲率的空间。因为机场 A、B、C 的度大小不同，$k_A > k_B \geq k_C$，所以三个机场引起民航引力场空间扭曲的曲率、半径关系如下：

$$\begin{cases} \alpha_A > \alpha_B \geq \alpha_C \\ R_A > R_B \geq R_C \end{cases} \qquad (3.5)$$

（2）在理论上，机场 A、B、C 之间都有开通航线的趋势，即认为机场 A、B、C 之间都有粒子以加速度 a_{AB}、a_{BC}、a_{AC} 相向对应机场运动，同样因为三个机场度大小的不同，在不同机场之间的粒子的加速度是不同的，本图中情形如下：

$$a_{AB} \geq a_{AC} > a_{BC}$$

从上面得到的两个结论来分析优先连接特性，机场 A 造成的民航引力场空间扭曲的程度远远大于机场 B、C，而且机场 A 到 B、C 之间运动粒子的加速度也

978-1-935068-05-1 © 2010 SciRes.

远远大于机场 B、C 之间的运动粒子的加速度，从物理学上来分析，从机场 B、C 发出的粒子都可以很顺利达到机场 A，即具备开辟航线的条件；而 B、C 之间的粒子在运动到对方机场的时候，因为要经过机场 A 所造成的民航引力场的负曲率空间，必然要产生一个向 A 机场下滑的趋势，也可以认为是 A 机场对该粒子产生了一个吸引力的效果，使其运动路径弯曲，这个运动根据简单的矢量分解可以认为具备两个加速度，即 B、C 方向上的加速度 a_{BC} 和由于机场 A 吸引造成的加速度，表示为 a_{BAC}，如图 6，$a_{BC} << a_{BAC}$，很容易看出，该粒子不能从机场 B、C 到达对方机场，因为它不能摆脱机场 A 所引起负曲率空间而表现出的引力，在中途就被拉到机场 A 中去了。所以从效果上看，虽然所有机场都有向其它机场发出连接粒子的潜力或趋势，但度较大的机场更容易实现该运动，度较小的机场之间的粒子运动如果加速度大小不足以摆脱大机场造成的类似引力的效果，就无法真正实现机场之间粒子的实际运动，表现在航线网中即为采取中转航线，而非开通直达航线。这在复杂网络中也很好的揭示了节点更易于和度较高的点相连的优先连接特性，度较小的节点在彼此相连的时候运动粒子被拖到度较大的节点所形成的扭曲空间中没有挣脱出来，不能形成连接。

4.2 小世界特性的力学建模分析

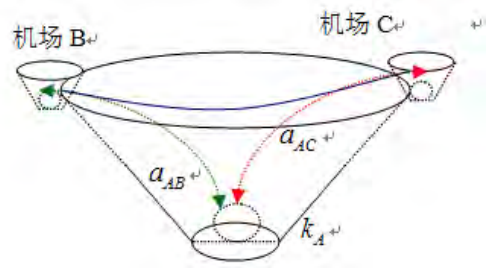

Figure 7. Gravity space in the small world effect
图 7．小世界效应引力场空间

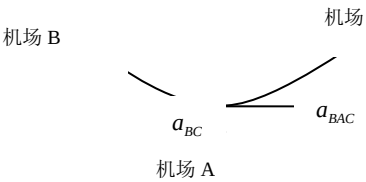

Figure 8. Acceleration in the small world effect
图 8. 小世界效应引力加速度图

首先要说明一点的是，伴随着经济的发展、人民生活水平的提高，各地区之间交流的增加，各个机场的流量也在不断增长，在复杂网络中体现出的是各节点之间度的变大，如图 7 中，k_A、k_B、k_C 不断增大，相应的，各机场之间粒子运动的加速度也在不断增加，但是要注意的是，机场 A 的流量的基数较大，相比较 B、C 机场流量的增大，机场 A 的流量变化可能会相对较小，在建立的民航引力场模型中，表现为 a_{BC} 的增长率将大于 a_{BAC} 的增长率，在粒子运动的过程中表现为机场 B、C 间粒子运动的加速度 a_{BC} 会逐渐增大到和 a_{BAC} 持平乃至超过 a_{BAC}，如图 8，这个时候机场 A 所形成的引力效果则不能将 B、C 之间运动的粒子吸引到 A，此时，B、C 之间粒子的相互通达得到实现，即开辟直达航线变得切实可行。从实际意义上说，一个机场的容量也不是可以无限增加的，因为伴随着流量的增加，航班延误以及流量控制的增加、停机位的数量有限等等必然造成服务质量的下降，所以当两个相互间流量较大的机场开辟直达航线的时候既有助于有服务需求的机场之间的服务，也有助于缓解原来中转机场的流量压力，在复杂网络的理论中，这正是小世界特性的表现。

5 区域支线航行网络规划方法

5.1 直达、中转航线价值模型

根据上述建立的民航引力场模型，在某城市之间建立直达航线的质量（优劣程度）同样的和开通航线两城市间的度（吞吐量）成正比，而和两地区之间的出行阻抗系数成反比。由此，仿照引力模型建立区域内直达支线航线的价值模型：

$$S_{ij} = K\frac{M_i M_j}{f(t_{ij}, c_{ij}, l_{ij})} \qquad (3.6)$$

上式中，M_i、M_j 表示在城市 i、j 两城市开通航线的有利因素，可以是地区内城市 i、j 的流量，也可以是该地区的 GDP、人口等，可以通过做相关性分析获得该地区决定民航流量的决定因素。$f(t_{ij}, c_{ij}, l_{ij})$ 为 i 区和 j 区的出行阻抗函数，其中 t_{ij} 是从城市 i 到 j 的飞行时间，c_{ij} 是从城市 i 到 j 的单位里程费用，l_{ij} 是城市 i 到 j 的距离。

不同地区间的出行阻抗函数可能不同，具体应用的时候应该根据实际情况进行分析，如可以通过目前地区支线航线网络现状等得到。

同样的，区域内如果从城市 i 到城市 j，中间需要经过城市 k 转机，建立转机支线航线的价值模型：

$$Z_{ikj} = \frac{K}{\alpha}\left(\frac{M_i M_k}{f(t_{ik}, c_{ik}, l_{ik})} + \frac{M_k M_j}{f(t_{kj}, c_{kj}, l_{kj})}\right) \qquad (3.7)$$

上式中，同样的，M_i、M_k、M_j是表示在城市 i、k、j 城市开通航线的重要性系数，可以是地区内城市 i、j 的流量，也可以是该地区的 GDP、人口等，具体可以通过做相关性分析获得该地区决定民航流量的决定因素。$f(t_{ik},c_{ik},l_{ik})$为 i 城市和 k 城市的出行阻抗函数，其中t_{ik}是从城市 i 到 k 的飞行时间，c_{ik}是从城市 i 到 k 的总费用，l_{ik}是从城市 i 到 k 的距离，$f(t_{kj},c_{kj},l_{kj})$中参数的表示意思同理可得。因为中转所花费的时间并不仅仅是两段航线的代数和，而需要一定的中转延误时间，必然使得开通该航线的价值下降，所以采用$\frac{K}{\alpha}$来表示，其中α>1，大小由中转时间、候机环境等决定。

5.2 区域支线航行网络规划方法

综上得出建立地区支线航线网络的方法：假设，某地区有 n 个城市，按其度的大小排列，度依次表示为：M_1，M_2，…，M_n

步骤 1：假设只有一个地区枢纽，按照“马太效应”法则，确定城市 1 为该地区枢纽，其它城市均和城市 1 直接相连。如果遇到实际情况中有较偏远城市，其流量也较小，离枢纽城市的距离偏长，可以考虑采用“甩辫子”航线的方式，通过临近的较大城市中转和枢纽机场相连。

步骤 2：不考虑城市 1，此时，在其余的 n-1 个城市中城市 2 的流量最大，再分析从城市 3 到城市 n 考虑是否需要建立到城市 2 的直达航线，此时，从城市 i 到城市 2，可以考虑建立直达航线，也可以考虑从城市 1 中转，这个时候就要比较哪种方式更优，即比较S_{i2}和Z_{i12}的大小，如果$S_{i2}>Z_{i12}$，说明建立直达航线的价值比通过 1 中转的价值大，应该建立直达航线，反之，如果$S_{i2}<Z_{i12}$，则说明城市 i 和城市 2 的连通还是通过城市 1 中转更加合适。此外还需要兼顾最低开通航线成本，即必须满足$c_{ij}>c_{ij_{\min}}$的时候才有开通直达航线的必要。

步骤 3：同样的，不考虑城市 1、2，同样按照上面第 2 步的方法，确定从城市 4 到 n 是否建立到城市 3 的直达航线。

步骤 4：以此类推至M_n结束，最终得到该地区内的支线航线网络结构。

此外，如果在该地区内的某新建机场开始投入使用，即 BA 模型中的节点增加，可预先按照较为准确的预测“度”提前对该地区内的支线航线网络结构重新进行优化。

6 算例分析

以新疆地区 2007 年流量最大的七个机场为例，M 取每个城市机场的客运吞吐量如表 1（数据源于《从统计看民航 2008》），阻抗函数$f(t_{ij},c_{ij},l_{ij})$取两城市之间的距离l_{ij}如表 2（数据源于低空航路图）。乌市即乌鲁木齐市。此外，因为所取 7 个城市之间距离最短的乌鲁木齐-库尔勒已经开通航线，证实了其开通航线的可行性，所以这 7 个城市之间进行连接的时候没有考虑公路、铁路对支线航空的价格竞争。

Table 1. volume of passenger of the cities in Xinjiang region (10 thousands)
表 1 2007 年新疆地区 7 城市客流量（单位：万人）

乌市 M_1	喀什 M_2	伊宁 M_3	阿勒泰 M_4	库尔勒 M_5	和田 M_6	阿克苏 M_7
6169981	502591	312637	281644	131697	131549	86657

Table 2. Distance of different cities in Xinjiang region (kilometers)
表 2 新疆地区 7 城市间航段距离（单位：公里）

	乌市	喀什	伊宁	阿勒泰	库尔勒	和田	阿克苏
乌市	0	1162	456	400	294	754	1074
喀什	1162	0	750	1562	900	436	408
伊宁	456	750	0	667	530	817	667
阿勒泰	400	1562	667	0	550	1474	1154
库尔勒	294	900	530	550	0	846	492
和田	1074	436	817	1474	846	0	471
阿克苏	754	408	667	1154	492	471	0

将上两表中数据代入上面得出的地区支线航线网络规划方法，通过观察发现乌鲁木齐的客运吞吐量相比较其它城市数值太大，为了能较好的消除这个数据的影响，尽量发掘在其它城市之间建立直达航线的可能性，将公式（2）、（3）中的 K 取值为 1，公式（3）中的α

978-1-935068-05-1 © 2010 SciRes.

从 1 到 16 进行取值，发现在α <10 的时候，S_{ij}（i，j 都≠1）都远远小于Z_{i1j}，即除了和乌鲁木齐建立直达航线外，其余任何两个城市之间建立直达航线的价值都远远小于通过乌鲁木齐中转的中转航线价值，此时新疆地区的支线航线网络表现为以乌鲁木齐为枢纽、没有其它城市对航线，其它城市之间都要通过乌鲁木齐进行中转，这和新疆地区现实情况相符。当α >20 时，S_{23}（209.505）≈Z_{213}（259.868），表现为在伊宁和喀什两城市之间建立直达航线价值和通过乌鲁木齐中转航线价值已经很接近，随着流量的继续增加和乌鲁木齐机场容量的限制，伊宁到喀什成为未来最可能先开通的潜在直达航线，而其它城市对建立直达航线的价值因为较小的流量和较远的距离即使α从 10 继续增大到 16，也没有接近通过乌鲁木齐中转航线价值的数量级，所以其它城市对建立直达航线暂时意义不大，表现为整个支线航线网络结构没有变化。得到这 7 个机场所构成的航线网络如图 9。

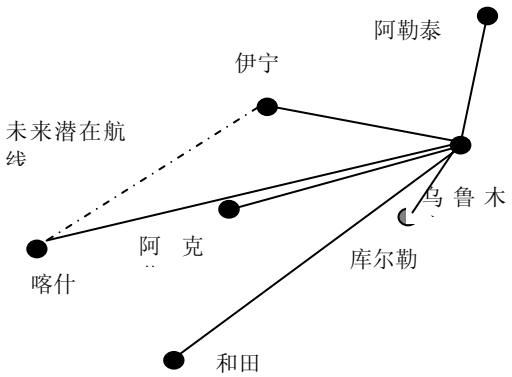

Figure 9. Xinjiang regional networks

图 9. 新疆地区航线网络

7 结束语

一个地区内的支线航线网络的规划相比较全国航线网络而言流量及范围较小，但是需要考虑的因素相应的也会更具体，如本文建立的在两城市通过直达或通过转机相连的航线价值模型中的 M 以及阻抗函数在不同地区的意义可能相差甚远，这些都要根据实际情况确定。此外，航线网络的建设不仅仅是通过一定的数学算法就可以得到，尤其在西部、高原及山区等，还应该结合该地区的地形、通信导航监视等覆盖范围及用于运输的飞机机载设备性能等考虑，总而言之，必须对其实际情况进行尽可能详尽准确的分析，才能真正切实做好对某地区支线航线网络的规划。

References（参考文献）

[1] Barabasi A-L. Albert R. Emergence of scaling in random networks[J].Nature，1998，393，440-442

[2] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. SLAM Review，2003，45(2)，167-256

[3] 爱因斯坦著，杨润殷译，狭义与广义相对论浅说，北京大学出版社[Z]，2006

[4] 刘宏鲲.中国航空网络的结构及其影响因素分析[D].西南交通大学.2007

[5] 张嗣瀛.自聚集、吸引核与聚集量[J].复杂系统与复杂性科学[J]，2005，2，（4），84-92

[6] 中国民用航空总局规划发展司编，从统计看民航 2008.中国民航出版社[Z], 2009.