

文章编号: 1005-0523(2020)01-0039-08

## 基于复杂网络的航空联盟航线网络鲁棒性分析

邵佳佳, 杨文东, 江海

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:**利用复杂网络方法,以三大航空联盟(星空联盟、天合联盟、寰宇一家)航线网络为研究对象,对三大航空联盟网络的拓扑特性与鲁棒性进行对比分析。研究表明,星空联盟网络辐射的节点数最多、平均度数最大,三大联盟网络都具有无标度特征和小世界网络效应;随机攻击下,三大联盟网络都具有较强的鲁棒性,而蓄意攻击下,各联盟网络的鲁棒性都较弱;蓄意攻击和随机攻击下,网络的鲁棒性都表现为:星空联盟优于天合联盟和寰宇一家。据此为联盟航线网络优化设计的研究提供了一定理论依据。

**关键词:**复杂网络;星空联盟;天合联盟;寰宇一家;航线网络;鲁棒性

中图分类号:U113

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.01.006

随着国际航空运输需求的不断增长,航空公司之间的合作方式逐步向全球航空联盟过渡<sup>[1]</sup>。目前,形成了三大国际航空联盟(星空联盟、天合联盟、寰宇一家),三大联盟运输旅客总量占全球航空市场的一半以上,这表明国际航空联盟已成为当今航空业发展的主流。联盟成员通过签订合作协议,衔接各自主要的航线网络,将自身航线覆盖范围扩展到更多国际目的地,以扩大其网络规模实现全球覆盖。

Lordan 等<sup>[2]</sup>将航空运输网络分为三个层级:全球网络(L1)、联盟网络(L2)和航空公司网络(L3),三者所属的关系如图 1 所示。目前国内外学者关于全球/全国航空网络和航空公司网络复杂性的研究已经相当丰富。在网络拓扑特性方面,Guimerà 等<sup>[3]</sup>证明了全球航空网络属于小世界网络;Bagler<sup>[4]</sup>分析了印度航空公司网络的小世界网络特性;刘宏鲲等<sup>[5]</sup>、曾小舟<sup>[6]</sup>、孙书霞<sup>[7]</sup>研究发现中国航空网络的平均路径较短,集聚系数较大,属于小世界网络;徐凤等<sup>[8]</sup>构建了高铁-民航复合网络并分别研究了高铁子网络、航空子网络和复合网络的拓扑特征。在网络鲁棒性和抗毁性方面,Albert 等<sup>[9]</sup>在 2000 年最早提出复杂网络抗毁性的概念;Holme 等<sup>[10]</sup>将攻击分为节点攻击与边攻击,研究了不同网络类型受攻击后的结构变化情况;姚红光等<sup>[11]</sup>通过仿真模拟随机失效和选择失效对中国航空网络进行了鲁棒性评估;曾小舟<sup>[6]</sup>对中国航空网络在选择攻击下的抗毁性进行了研究;徐凤等<sup>[12]</sup>对中国高铁-民航复合网络进行了网络鲁棒性分析,结果表明无论是随机攻击还是蓄意攻击,复合网络的鲁棒性都优于高铁

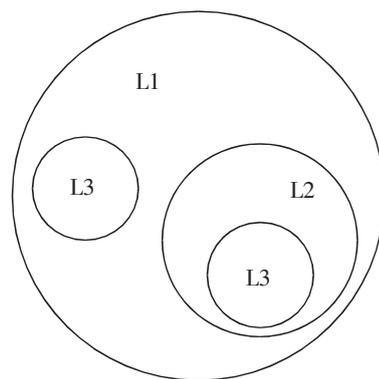


图 1 航空运输网络层级

Fig.1 Air transport network levels

收稿日期:2019-05-24

基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20180716);中央高校基本科研业务费专项资金(NS2016063)

作者简介:邵佳佳(1995—),女,硕士研究生,研究方向为联盟航线网络优化设计。

通讯作者:杨文东(1975—),男,副教授,博士,研究方向为航线网络设计与优化。

子网络和航空子网络;Lordan 等<sup>[13]</sup>通过对比分析低成本航空公司(LCC)与全服务航空公司(FSC)网络的鲁棒性,证明 LCC 网络相比 FSC 网络更稳健。

可以发现,关于航空联盟网络复杂性(L2)的研究很少,尤其在联盟网络的鲁棒性方面,仅 Lordan 等<sup>[14]</sup>提出一种节点选择的反向自适应策略,按照节点顺序依次攻击,得到三大航空联盟网络的鲁棒性对比,但其仅考虑网络受到蓄意破坏,没有考虑节点攻击的随机性,与实际情况相偏离。以星空联盟、天合联盟、寰宇一家为研究对象,在各联盟网络拓扑结构的基础上,得出平均路径长度、最大连通子图相对大小和网络效率这三种鲁棒性测度在随机攻击和蓄意攻击模式下的演化曲线,从而对比联盟网络在两种攻击模式下连通性的变化以及不同联盟网络的鲁棒性,为联盟航线网络优化设计的研究提供一定的理论依据。

## 1 研究方法 with 数据选择

复杂网络是为了研究系统较为复杂、包含大量子系统(复杂系统)的一种工具,它将子系统抽象为节点,将各子系统之间的相互作用抽象为节点间的连接边。对航空联盟而言,其航线网络也可视为一个复杂系统,将复杂网络方法应用于航空联盟网络的分析,有助于更好地刻画网络结构,深入了解联盟航线网络的特征及性能。

依据复杂网络方法,航空联盟航线网络由机场(节点  $V$ )和直飞航线(边  $E$ )两个基本要素组成,联盟网络可以抽象为一个由节点集与边集组成的图  $G(V, E)$ 。其中节点数记为  $N=|V|$ ,边数记为  $A=|E|$ ,边集  $E$  中的任意一条边  $e$  都与点集  $V$  中的一对节点  $(i, j)$  相对应。收集 OAG 数据库中三大联盟 2017 年 7 月的航班数据,分别得到星空联盟:1 129 个机场( $V$ ),8 236 条直飞航线( $E$ );天合联盟:1 074 个机场( $V$ ),6 992 条直飞航线( $E$ );寰宇一家:876 个机场( $V$ ),5 394 条直飞航线( $E$ )。运用 0-1 邻接矩阵的方法来表示联盟复杂网络结构,1 表示两机场间有直飞航线相连,分别得到  $1\ 129 \times 1\ 129$ ,  $1\ 074 \times 1\ 074$  和  $876 \times 876$  三个 0-1 矩阵。

所得矩阵具有如下特点:① 将网络假设为不考虑线路方向的无向网络,即所得的邻接矩阵为对称矩阵。② 不考虑联盟网络中机场间的航线密度与航班频次,即不考虑节点间连接的权重,将网络抽象为非加权网络。

统计三大航空联盟网络中机场节点所在区域的占比,如图 2 所示。可以发现,航空联盟的航线网络都已遍布全球,其中,星空联盟和天合联盟在亚、欧地区部署的航点较为密集,而寰宇一家的网络主要辐射在欧洲和北美洲。

结合一般复杂网络研究的过程,研究结构如下:① 确定研究对象并构建相应网络;② 对比分析不同网络的拓扑结构特征;③ 选择两种攻击模式,对比网络在不同攻击模式下的鲁棒性以及不同网络的鲁棒性;④ 为优化现有联盟航线网络布局提供一定启发。

## 2 三大联盟网络拓扑结构特征

复杂网络的结构特性通常由度与度分布、平均路径长度和集聚系数三大指标来衡量<sup>[15]</sup>,利用 Pajek 软件对三大联盟网络的邻接矩阵进行拓扑建模计算,得到各联盟网络的特征指标值,如表 1 所示。

通过表 1 中的相关特征值可对比三大联盟网络拓扑特征的差异:

1) 星空联盟网络辐射节点数最多、平均度数最大,联盟网络都具有无标度特征。星空联盟辐射的节点数最多,通达全球 1 129 个机场,其网络平均度数约为 14,说明平均每个机场与约 14 个机场间有直飞航班,天合联

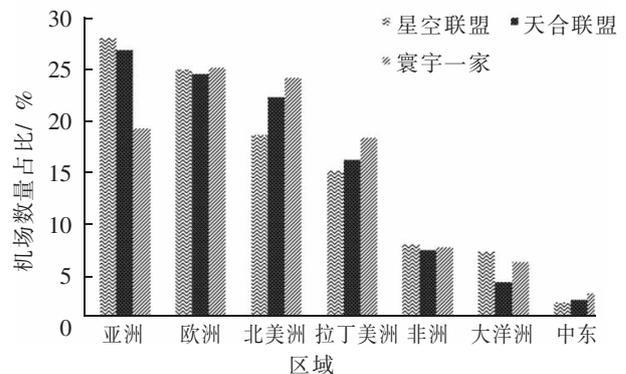


图 2 三大航空联盟机场节点所在区域占比  
Fig.2 Proportion for regions of the three major airline alliances

表 1 三大航空联盟航线网络拓扑结构特征  
Tab.1 Topological structure properties of the three major airline alliance route networks

序号	航空联盟	$N$	$A$	$\langle k \rangle$	度值排名前 3 的机场	$L$	$D$	$C$
1	星空联盟	1 129	8 236	14.59	FRA(168),PEK(155),MUC(134)	3.345 9	7	0.713 2
2	天合联盟	1 074	6 992	13.02	AMS(195),ATL(187),CDG(175)	3.349 5	7	0.724 7
3	寰宇一家	876	5 394	12.29	BCN(144),DFW(139),LHR(135)	3.272 1	6	0.722 5

注: $N$ 为节点数; $A$ 为边数; $\langle k \rangle$ 为平均度数; $L$ 为平均路径长度; $D$ 为网络直径; $C$ 为集聚系数。

盟与寰宇一家网络节点间联系相对较小,平均度数分别约为 13 和 12。表 1 列出了各联盟网络中节点度值最大的前三个机场和括号中对应的度值。星空联盟中度值前 3 的分别为:法兰克福国际机场(FRA)、北京首都国际机场(PEK)、慕尼黑国际机场(MUC);天合联盟中度值前 3 的分别为:阿姆斯特丹国际机场(AMS)、亚特兰大杰克逊国际机场(ATL)、巴黎戴高乐机场(CDG);寰宇一家中度值前 3 的分别为:巴塞罗那机场(BCN),达拉斯-沃思堡国际机场(DFW),伦敦希思罗机场(LHR)。这些机场都是联盟中重要成员的枢纽机场,对整个网络的连接贡献最大。其中,星空联盟中北京首都国际机场的度值达到 155,排名第二,这与星空联盟的重要成员国航有关,其枢纽机场北京首都国际机场在联盟网络中起到重要的连接作用。同样,东航作为天合联盟的成员,其重要基地上海浦东国际机场的度值为 113,排名第 5。

根据度值绘制三大联盟网络的双对数累计度分布图,如图 3 所示。

图 3 中,每个联盟网络的双对数累计度分布图明显都被分成两段,每段分别呈现出近似的线性关系,即各联盟网络的度分布都服从双段幂律分布,证明航空联盟网络具有无标度网络特征。

2) 任一联盟航班平均中转约 2 次。三大联盟网络的平均路径长度区别不大,乘坐任一联盟的航班,平均中转约 2 次就可到达任意目的地,如表 1 所示。网络的平均路径长度较小,说明航空联盟使得机场间的连通性较好,体现了航空联盟运输模式的便捷性。星空联盟和天合联盟网络中的节点都可以通过直达或中转航班相互通达,网络直径(最大路径长度)均为 7,分别为从索契国际机场(AER)到埃洛伊·阿尔法罗国际机场(MEC)和从阿拉卡茹机场(AJU)到马加丹机场(GDX)的路径。寰宇一家的网络直径为 6,最远的拓扑距离是从胡利亚卡机场(JUL)到瓜拉丁加奴机场(TGG)。

3) 三大联盟网络都具有小世界网络效应。航空网络中的集聚系数代表机场节点与相邻节点所形成网络的紧密程度。由表 1 可知,航空联盟网络的集聚系数分别为  $C_1=0.713 2, C_2=0.724 7, C_3=0.722 5$ ,均表现出较强的集聚性。三大航空联盟网络均具有较短的平均路径长度和较大的集聚系数,具有明显的小世界网络特性。

### 3 联盟航线网络鲁棒性分析

#### 3.1 网络鲁棒性测度

网络鲁棒性是指网络在遭受不同程度破坏时,其抵抗破坏的能力。在联盟网络中,除存在天气(台风、雷

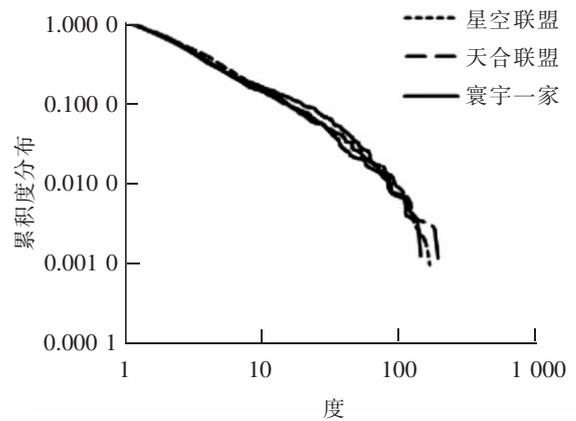


图 3 三大联盟网络双对数累计度分布  
Fig.3 Log - log cumulative degree distributions of the three alliance networks

雨等)、流量控制等突发事件而导致的航班延误或取消外,由于其多涉及国际航线,联盟成员的退出或一些政治、经济因素,也会导致网络的节点或边受到影响,此时网络及节点间能够保持连通的性能即联盟网络的鲁棒性。联盟航线网络的鲁棒性,可以依据网络遭受攻击前后相关结构测度的变化来分析,一般采用平均最短路径长度  $L$ 、最大连通子图相对大小  $S$ 、网络效率  $E$  作为网络的鲁棒性测度,定义如下:

1) 平均最短路径长度(average path length)。最短路径长度反映了网络节点间通达的难易程度。网络中任意两个节点  $i, j$  之间的距离记为  $l_{ij}$ , 表示为两节点间最短路径所包含的边数, 整个网络的平均路径长度表示为所有节点间距离  $l_{ij}$  的平均值, 记作  $L$ , 即

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

2) 最大连通子图相对大小(size of the giant component)。最大连通子图指的是当一个网络逐渐遭到攻击后, 网络分裂出的所有子图中规模最大的。最大连通子图的相对大小表示为最大连通子图中的节点数  $N'$  与初始状态(未遭到攻击)下网络中总节点数  $N$  的比值, 记作  $S$ , 即

$$S = \frac{N'}{N} \quad (2)$$

初始状态时, 网络全连通, 此时  $S=1$ 。随着网络中节点的失效,  $S$  会逐渐变小并趋于 0。通过计算网络受到攻击后  $S$  值的下降幅度, 可以直观地反映网络遭受破坏的程度。

3) 网络效率(network efficiency)。网络效率反映了节点间的连通性和网络的整体效率。网络中节点  $i$  和  $j$  之间的效率可以用  $i$  和  $j$  之间长度  $l_{ij}$  的倒数来表示, 整个网络的效率可以表示为所有节点之间效率的平均值, 记作  $E$ , 即

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{l_{ij}} \quad (3)$$

$E$  的取值为  $[0, 1]$ ,  $E=1$  表示网络中任意两个机场间都有直连航班, 此时网络的整体效率最高;  $E=0$  表示网络中所有机场都是孤立的, 此时网络完全不连通, 效率最差。

### 3.2 联盟航线网络鲁棒性评估实验

网络遭受破坏可看作节点受到攻击, 分为随机攻击和蓄意攻击两种模式。航空联盟网络中的随机攻击包括恶劣天气、节点自身原因等突发性情况, 蓄意攻击包括重要机场节点的堵塞等。将攻击某一节点处理为删除与该机场相连的所有直飞航线。通过以下两种攻击方式从不同的角度对联盟网络的鲁棒性进行评估。

1) 随机攻击(random attack)。随机攻击是指每次无序地删除网络中的某些节点, 在该种攻击模式下, 网络的信息是未知的, 攻击节点的选择是随机的, 与节点自身的重要程度无关。

2) 蓄意攻击(malicious attack)。蓄意攻击是指针对节点重要性进行有意识、有选择的攻击, 在对网络信息全部或部分已知的情况下, 基于网络节点的重要性将节点降序排列, 按照该序列逐一进行攻击, 直至网络失效。衡量节点重要程度的指标可用节点度来表示, 度越大, 节点越重要。

采用上述攻击策略对三大联盟网络鲁棒性评估的实验过程如下:

1) 随机攻击实验中, 从三大联盟网络的初始状态开始, 每次随机删除各网络中一个机场节点, 分别重新计算三个网络的鲁棒性测度, 循环实验直至各网络中的节点都删除完毕。

2) 蓄意攻击实验中, 从三大联盟网络的初始状态开始, 按照每个网络中节点度从大到小的顺序每次各删除一个机场节点, 分别再次计算各网络的鲁棒性测度, 循环实验直至每个网络中的节点都删除完毕。

实验可运用 MATLAB 编程实现, 得到不同攻击策略下网络受到不同程度破坏时的各个鲁棒性测度, 从而在不同角度对三大航空联盟网络的鲁棒性进行对比分析。

### 3.3 实验结果分析

#### 3.3.1 随机攻击和蓄意攻击下的平均最短路径长度分析

图 4 演示了三大联盟网络受到不同攻击后,各自平均路径长度的变化。图中横坐标  $f$  表示受攻击节点数占初始网络总节点数的比例。可以看到在两种攻击模式下,随着失效节点数量的增加,三大联盟网络的平均路径长度都在有起伏的下降。 $L$  的下降趋势并不能表明网络的连通性变好,而是由于网络中孤立节点的增多,在下降过程伴随有  $L$  的增大,说明当网络遭受攻击而没有产生孤立节点时,连通性有所下降。同时可以看出蓄意攻击产生孤立节点的速度要远高于随机攻击,当失效节点数不到 10% 时 ( $f_1=0.09, f_2=0.08, f_3=0.07$ ),所有网络中的平均路径长度都已趋近于 0,说明此时各网络中的节点基本都处于孤立状态,网络快速瘫痪。而随机攻击需攻击超 70% 的节点 ( $f_1=0.78, f_2=0.73, f_3=0.70$ ),三个网络才会趋于不连通。因此,通过  $L$  的变化可以说明相比随机攻击,蓄意攻击对网络的破坏程度更大,大型国际枢纽机场对联盟航线网络的整体连通起着重要作用。此外,根据三大联盟在两种攻击模式下,网络不连通时需攻击节点的比例,可以得到两种攻击模式下的比例大小关系都为  $f_1 > f_2 > f_3$ 。

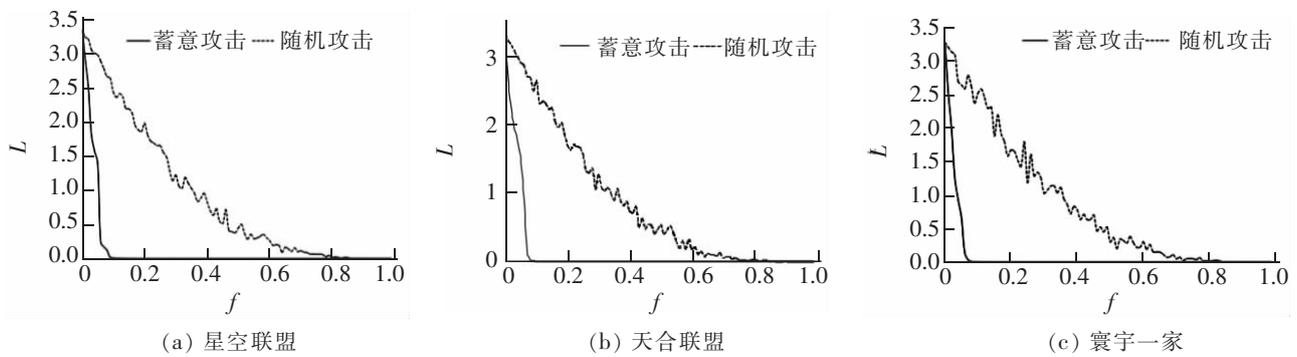


图 4 三大联盟网络平均路径长度演化

Fig.4 Evolution of average path length of the three alliance networks

#### 3.3.2 随机攻击和蓄意攻击下的最大连通子图相对大小分析

图 5 演示了不同攻击策略下三大联盟网络各自最大连通子图相对大小的变化。可以看出,三个网络初始状态下的最大连通子图相对大小  $S$  都为 1,当被攻击节点数增加,最大连通子图的规模都不断减小,且相比随机攻击,蓄意攻击下  $S$  的下降速度明显更快。在蓄意攻击下,当  $f_1=0.18, f_2=0.17, f_3=0.16$ ,即不到 20% 的节点失效时,三个网络的  $S$  都已趋近于零,此时网络几乎瘫痪。而在随机攻击下,只有当  $f$  接近 1(约 0.9)时,三个网络的最大连通子图相对大小  $S$  才趋于 0。由此可见,联盟航线网络在机场遭受随机攻击下的鲁棒性较强,在蓄意攻击下的脆弱性较大,易瘫痪。

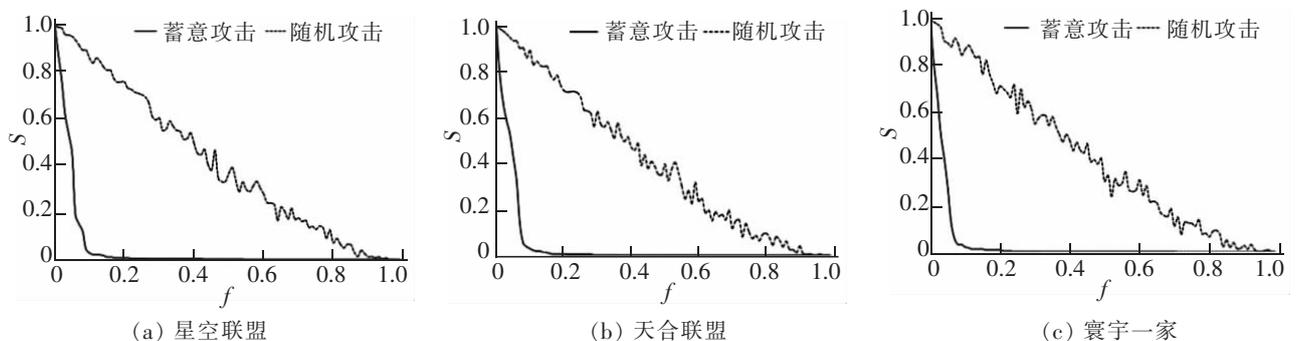


图 5 三大联盟网络最大连通子图相对大小演化

Fig.5 Relative size evolution of the largest connected subgraph of the three alliance networks

### 3.3.3 随机攻击和蓄意攻击下的网络效率分析

图6为两种攻击模式下三大联盟网络各自网络效率的演化曲线。初始状态下星空联盟、寰宇一家、天合联盟的网络效率分别为 $E_1=0.3204, E_2=0.3206, E_3=0.3269$ 。随着被攻击节点数的增加,网络效率总体上都是变小直至为0。网络效率 $E$ 在蓄意攻击下的变化都更剧烈,当有约10%度值较大的节点失效时( $f_1=0.12, f_2=0.11, f_3=0.10$ ),三个网络中的 $E$ 值都已趋于0,此时网络的连通性已变很差,根据网络失效需攻击节点的比例,也可知星空联盟的鲁棒性最优,天合联盟次之,寰宇一家最弱。而在随机攻击下,演化曲线下下降缓慢,当网络中超过80%的节点( $f_1=0.86, f_2=0.85, f_3=0.84$ )受到攻击时网络才会趋于瘫痪。这也表明度值较大的枢纽机场对联盟网络的整体效率起着重要作用。

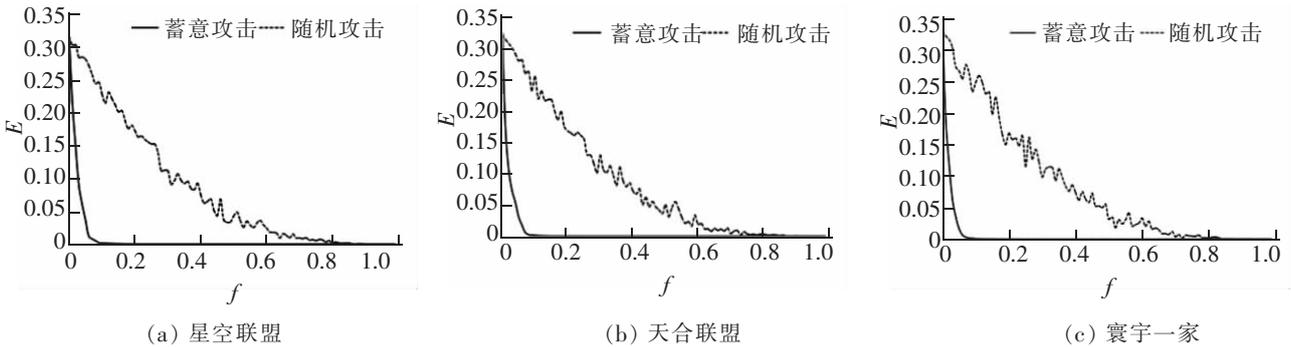


图6 三大联盟网络的网络效率演化  
Fig.6 Evolution of network efficiency of the three alliance networks

### 3.3.4 三大联盟网络鲁棒性对比

由前三小节中,三个网络在蓄意攻击下瘫痪时需攻击节点的比例可知,大小关系均为 $f_1 > f_2 > f_3$ ,联盟网络的鲁棒性从优到次依次为:星空联盟、天合联盟、寰宇一家。为更清楚地对比三大联盟网络受到攻击时网络性能的变化,本节模拟 $f \leq 0.02$ 时的蓄意攻击实验,得到三大网络在各测度下变化的详细对比图,如图7所示。可以看出星空联盟相比天合联盟和寰宇一家,其网络的三种鲁棒性测度曲线都最为平缓。当网络中2%的节点失效时, $L_1=2.51, L_2=2.19, L_3=1.99$ ,星空联盟网络的 $L$ 值下降程度最小,说明其网络中产生孤立节点的比例最少; $S_1=0.76, S_2=0.67, S_3=0.67$ ,星空联盟网络的 $S$ 值最大,说明其网络连通程度最大; $E_1=0.1487, E_2=0.1027, E_3=0.1177$ ,星空联盟网络的 $E$ 值下降程度最小,说明其网络连通性受攻击影响最小。这三种测度的变化表明,在蓄意攻击相同比例的节点时,星空联盟网络受到的影响最小,其网络的连通性明显优于天合联盟和寰宇一家。在 $f \leq 0.02$ 的情况下,天合联盟与寰宇一家网络的鲁棒性差异较不明显,即在少部分度值较大的节点,遭到破坏时,天合联盟与寰宇一家网络的鲁棒性相似。结合前三节的分析结果,可得出在两种攻击下,星空联盟网络的鲁棒性最优。

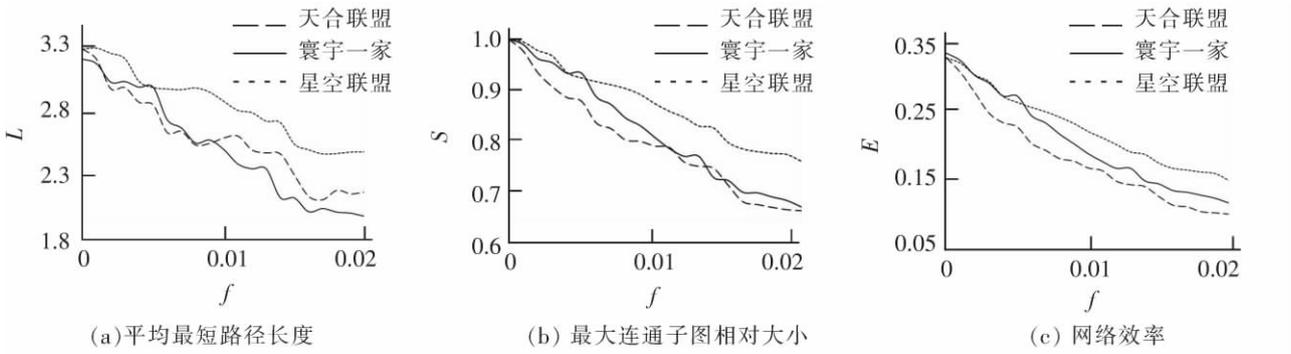


图7 三大联盟网络鲁棒性对比

Fig.7. Comparison of the robustness of the three alliance networks

通过上述分析可知,少数度值较大的枢纽机场对联盟网络的整体连通性起着至关重要的作用,这些关键机场出现故障更容易导致联盟网络系统的整体瘫痪。基于此特点,可对航空公司及其合作伙伴优化现有联盟航线网络布局提供一定的启发:① 在网络规划的总成本中考虑枢纽机场的流量溢出成本,减少枢纽机场过度拥堵导致网络运行能力的下降;② 在大型枢纽机场周围选择区域枢纽机场作为候补机场,将大型枢纽机场的流量分流到附近机场,缓解枢纽机场的运输压力;③ 适当增加除枢纽机场外其他机场间的直飞航线,尽量减小机场间度值的差距。

通过对比不同联盟航线网络的鲁棒性,可以为联盟及航空公司带来一些思考:不同航空联盟在寻求合作伙伴时,需同时考虑网络覆盖带来的增益以及其联盟网络鲁棒性的变化,将二者相平衡;寻求入盟的航空公司应考虑加入不同联盟后,其自身航线网络鲁棒性的增加或减小,为联盟的选择提供一定决策依据。

#### 4 结语

利用复杂网络理论,首先,运用节点间邻接矩阵分别构建了星空联盟、天合联盟、寰宇一家航线网络的拓扑结构,并进行了拓扑特性对比;然后,提出平均路径长度、最大连通子图相对大小、网络效率三种网络鲁棒性测度,对三大联盟网络分别采取随机攻击和蓄意攻击,得出各网络的鲁棒性测度在两种攻击模式下的演化。得到以下结论:

1) 星空联盟网络辐射的节点数最多、网络的平均度数最大,三大联盟网络都具有无标度特性和小世界网络特性;

2) 三大联盟航线网络在随机攻击下都具有较强的鲁棒性,而在蓄意攻击下的鲁棒性都较弱;

3) 两种攻击模式下,都表现出星空联盟网络的鲁棒性优于天合联盟和寰宇一家。

对联盟网络拓扑性与鲁棒性的分析为后续联盟航线网络优化设计的研究提供了一定的指导作用,给联盟及航空公司带来了一些思考。但部分内容仍不全面,仅考虑了网络的通达性,未考虑机场间航线密度及航班频次对网络性能的影响,如可能出现当联盟在节点布局的航线较为密集时,联盟网络受该节点破坏的影响也较大的现象,后续可以就此展开工作。

#### 参考文献:

- [1] 顾颖菁,周海花. 基于多阶段动态组合拍卖的联盟舱位分配研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(6):48-54.
  - [2] LORDAN O,SALLAN J M,SIMO P. Study of the topology and robustness of airline route networks from the complex network approach:a survey and research agenda[J]. Journal of Transport Geography,2014,37:112-120.
  - [3] GUIMER R,MOSSA S,TURTSCHI A,et al. The worldwide air transportation network: Anomalous centrality,community structure,and cities' global roles[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2005,102(22):7794-7799.
  - [4] BAGLER G. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network[J]. Physica A:Statistical Mechanics & Its Applications,2008,387(12):2972-2980.
  - [5] 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,2007,56(1):106-112.
  - [6] 曾小舟. 基于复杂网络理论的中国航空网络结构实证研究与分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
  - [7] 孙书霞. 中国航巧运输网络巧朴性研究[D]. 德阳:中国民用航空飞行学院,2016.
  - [8] 徐凤,朱金福,杨文东. 高铁-民航复合网络的构建及网络拓扑特性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学,2013,10(3):1-11.
  - [9] ALBERT R,JEONG H,BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature,2000,406(6794):378-382.
- (C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- [10] HOLME P, KIM B J, YOON C N, et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. *Physical review E Statistical nonlinear and soft matter physics*, 2002, 65(5/2):056109.
- [11] 姚红光, 李智忠. 中国航空网络鲁棒性的牵制控制研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2012, 36(5):907-910.
- [12] 徐凤, 朱金福, 苗建军. 基于复杂网络的空铁复合网络的鲁棒性研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2015, 12(1):40-45.
- [13] LORDAN O, SALLAN J M, ESCORIHUELA N, et al. Robustness of airline route networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & its Applications*, 2016, 445:18-26.
- [14] LORDAN O, SALLAN J M, SIMO P, et al. Robustness of airline alliance route networks[J]. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2015, 22(1-3):587-595.
- [15] 何大韧, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

## Robust Analysis of Airline Alliance Route Network Based on Complex Network

Shao Jiajia, Yang Wendong, Jiang Hai

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Based on complex network theory, the route networks of the three major airline alliances (Star Alliance, SkyTeam, Oneworld) are taken as the research objects. The topological characteristics and robustness of the three alliance networks are compared and analyzed. The results include the following points: the route network of Star Alliance radiates the largest number of airport nodes with the largest average degree; the three major alliance networks all have scale-free features and small-world network effects; the robustness of the three alliance networks is better under random attacks, and weaker under deliberate attacks; no matter under deliberate or random attacks, the robustness of Star Alliance network is better than that of Sky Team and Oneworld. This study may provide a theoretical basis for the optimization design of alliance route network.

**Key words:** complex network; Star Alliance; SkyTeam; Oneworld; route network; robustness