

文章编号: 2095-2163(2021)12-0087-07

中图分类号: O157.5;V352

文献标志码: A

# 航空公司超网络的拓扑结构与鲁棒性分析

术永昊, 郭进利

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 本文基于超网络理论以航空公司为节点, 以民用运输机场为超边形成了航空公司超网络, 分析超网中的关键节点、关键超边以及网络的稳定性。针对建立的航空公司超网络, 首先分析其拓扑特性, 发现网络呈现出小世界特征, 而网络的节点度以及超度分布等并不服从无标度分布; 其次, 采用随机攻击以及蓄意攻击策略, 研究网络的鲁棒性, 使用网络的全局效率和聚类系数测度指标来衡量网络的抗毁程度。经进一步分析, 得到了需要重点保护的航空公司和机场, 提出相应的抗毁建议, 并以此来优化网络。航空公司超网络在遭受恶意袭击下, 可能造成某航司推迟、延误或暂停起飞, 从而无法改签其它航司, 该研究结果可以为应对这种情况提供一些建议, 避免或减小经济损失。

**关键词:** 航空公司; 超网络; 小世界特征; 鲁棒性

## Topology and robustness analysis of airline hypernetwork

SHU Yonghao, GUO Jinli

(School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**[Abstract]** Based on the hypernetwork method, the airline hypernetwork is formed with airlines as nodes and civil transport airports as hyperedges in this paper. The key nodes, key hyperedges and the stability of the network are analyzed. The results show that the network presents Small-World, and the degree and superdegree of node distribution of the network do not obey scale-free distribution. Then random attack and deliberate attack are used to study the robustness of the network, and the global efficiency and clustering coefficient are used to measure the invulnerability of the network. After further analysis, the airlines and airports that need to be protected are found, and the corresponding suggestions are put forward to optimize the network. Under the malicious attack on the hypernetwork of airlines, a certain airline company may delay or suspend the departure, so that it is unable to sign another airline company. The research results can provide some suggestions to deal with this situation, and avoid or reduce economic losses.

**[Key words]** airlines; hypernetwork; Small-World; robustness

## 0 引言

截止到2020年, 中国境内运输机场(不含香港、澳门和台湾地区)共有241个, 其中定期航班通航机场240个<sup>[1]</sup>。这些机场包含许多航空公司, 其中东航2020年旅客运输量实现7458万人次<sup>[2]</sup>; 南航运输9700万人次, 全年航班正常率连续五年在三大国有航司中排名第一<sup>[3]</sup>; 厦门航空运输2141万人次, 是全球唯一保持34年持续盈利的航司<sup>[4]</sup>。随着中国航空公司数量的不断增加, 冲突也在加深, 航空公司所面临的突发事件所带来的一系列反应对航空公司超网络的损毁程度, 严重影响航空运输的高效性和经济性。因此本文对航司超网的拓扑结构与鲁棒性进行分析, 并提出相应的优化网络建议。

## 1 文献综述

在大多数拓扑结构中, 航空网络可以由一组节点(机场或航点)和链接(航班线路或航线段)组成, 其中链接表示两个节点之间的交互。在文献中, 许多作者广泛使用复杂网络理论应用于相关领域的研究, 得出对航空网络静态和动态方面的影响。Song and Yeo采用复杂网络方法, 研究了全球1060个机场的航空运输网络, 采用若干中心性指标来识别具有高中心性指标的机场, 并分析国家层面的航空网络连接结构<sup>[5]</sup>; Lin and Ban从中心性分布和结构属性两个方面分析了1990~2010年美国航空网络的时间演化, 研究发现关键结构特征形成于航空网络发展的早期阶段, 经济和地缘政治因素是决定航空网络发展的主要因素<sup>[6]</sup>; Kim和Yoon研究了亚洲东

**基金项目:** 国家自然科学基金(71571119)。

**作者简介:** 术永昊(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 复杂网络、超网络; 郭进利(1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 复杂网络、超网络。

**通讯作者:** 郭进利 Email: phd5816@163.com

**收稿日期:** 2021-09-15

北部航线网络,将航空网络描述为航线段网络,通过网络鲁棒性分析,发现航空网络在一组高中心性的关键节点上比随机故障更容易受到攻击,加强了区域协调以减轻各种风险的必要性<sup>[7]</sup>;吴佳益通过对比历年中国航空网络模型,运用多层复杂网络理论建立以航司为节点的中国航空多层网络,并分析其结构特征与演化规律<sup>[8]</sup>。

通过上述分析发现,当前关于航空方面的研究文献大多数是基于复杂网络方面的观点,但复杂网络在描述协同关系方面有一定的局限性,而在超网络中每条超边可以包含多个节点,并且超边又可以表示节点之间的共同作用。例如:索琪总结了基于超图的超网络的相关概念以及静态拓扑指标<sup>[9]</sup>;陆睿敏将公交站点视为超边,线路视为节点,构建了公交超网络,并分析其网络特性,最后通过分析网络的抗毁性得出随机攻击的稳定性要强于蓄意攻击<sup>[10]</sup>;胡枫等人以蛋白质为节点,复合物为超边构建了超网络,分析网络的结构特征,识别出关键蛋白质,并对其数据进行了验证<sup>[11]</sup>;王志平等人通过利用超网络,将舆论中的关键词作为节点,关键词构成的话题作为超边,构建了舆论演化动态的超网络模型,得出节点超度符合幂律分布这一特征的结论<sup>[12]</sup>。

本文将航空公司作为节点,运输机场作为超边,可以更好地体现各航空公司在机场中的分布情况,分析组成的航空公司超网络的拓扑特性与稳定性,针对网络的抗毁性提出合理的优化建议。

## 2 超网络的相关概念

网络中的节点类型越来越多样,之间的相互作用也越来越复杂,而超网络的提出给出了一种对于高阶相互作用最普遍、最不受约束的一种表达。超网络一般分为两种,基于网络的超网络,基于超图的超网络。前者关注现实网络多层、多级、多维网络流的复杂特性,适合解决多层次网络的建模问题;后者以超图理论为基础,超图中每条超边包含多个节点,节点之间的相互联系可以通过超图清晰的表达。本文选择基于超图的超网络构建模型,研究机场中各航司的拓扑结构及其稳定性。

### 2.1 超图的概念

超图是由节点集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  和超边集  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$  组成,其中  $e_i \neq \Phi (i = 1, 2, \dots, m)$ <sup>[13]</sup>。超图  $H = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ ,同时还满足:  $E_i \subset E_j \Rightarrow i = j$ 。如果某一条超边  $E_p (p = 1, 2, \dots, m)$  同时包含节点  $v_i$  和  $v_j$ ,即这两个节点归属于同一条超

边,则称  $v_i$  和  $v_j (i, j = 1, 2, \dots, n)$  是邻接的,称  $E_p$  与  $v_i$  (或  $v_j$ ) 相关联。若  $E_p \cap E_q \neq \Phi$ ,即两条超边的交集不为空,则称超边  $E_p$  与  $E_q (p, q = 1, 2, \dots, m)$  邻接。

超图的示例如图1所示。节点集  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}$ ,超边集  $E = \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$ ,其中,  $E_1 = \{v_1, v_2, v_5, v_6\}$ ,  $E_2 = \{v_2, v_3, v_6\}$ ,  $E_3 = \{v_4, v_5, v_6\}$ ,  $E_4 = \{v_7, v_8\}$ 。图1中  $E_1, E_2, E_3, E_4$  所包含的节点数不全相同,即为非均匀超图。如果每条超边中的节点数相同,则称为均匀超图或一致超图。

在超图中也可以用关联矩阵来描述节点与超边的关系。如果节点  $v_i$  与超边  $E_j$  相关联,则第  $i$  行和第  $j$  列中的项为1,否则为0<sup>[14]</sup>。于是,得到图1的关联矩阵  $I_{m \times n}$ ,其中每一行代表一个节点  $v_n$ ,列代表每一条超边  $E_m$ ,如图2所示。

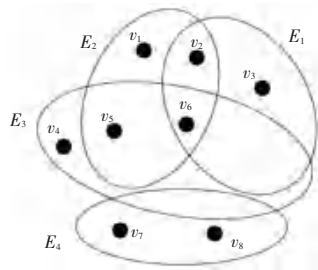


图1 非均匀超图

Fig. 1 Non uniform hypergraph

$$I_{8 \times 4} = \begin{matrix} & E_1 & E_2 & E_3 & E_4 \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

图2 关联矩阵

Fig. 2 Incidence matrix

### 2.2 超网络的概念

假设  $\Omega = \{(V, E) \mid (V, E) \text{ 是有限超图}\}$ ,  $G$  是从  $T = [0, +\infty)$  到  $\Omega$  的映射,对于任意给定的  $t \geq 0$ ,  $G(t) = (V(t), E(t))$  是一个有限的超图,指标  $t$  通常被认为是时间。超网络  $\{G(t) \mid t \in T\}$  是指超图的集合,从超网络的定义可以看出:超网络是超图概念的推广,超网络更多的是用来描述网络的动态特征<sup>[15]</sup>。

### 2.3 拓扑参数的定义

(1) 节点度:超网络中,超边包含该节点,则视超边连接了这个节点。同一条超边的节点视为相互连接,包含相同节点的两条超边视为相互邻接。节点度指与节点  $v_i$  邻接的其它节点数量,记为  $d_i$ <sup>[16]</sup>。在图1中,  $d_1 = 3, d_2 = 4, d_3 = 2, d_4 = 2, d_5 = 4, d_6 = 5, d_7 = 1, d_8 = 1$ 。



布情况。超网络的超度分布如图 5 所示,平均超度  $\langle d_H \rangle$  为 10.205,说明每家航司被 10 座机场包含,超度值越大,说明该节点在超网络中具有关键作用,也是网络中脆弱性节点,需要加强对航司的运营保护,保证整个网络的安全。

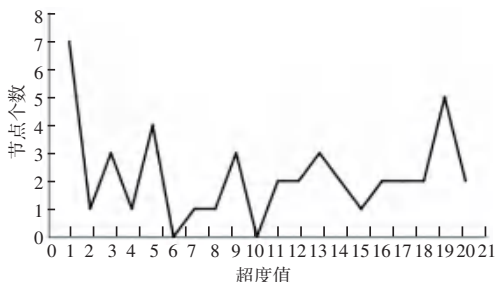


图 5 航空公司超网络节点超度值分布

Fig. 5 Hyperdegree distribution of airline hypernetwork nodes

衡量网络中航司的重要性时,需要同时考虑节点的点度与超度,因此本文做散点图来进行分析,如图 6 所示。当网络中某个节点的点度和超度较大,那么该节点在网络中较为重要,图 6 中位于右上角的节点:东方航空、国际航空为网络中最关键的节点。

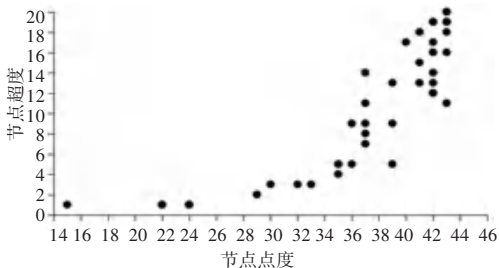


图 6 超网络点度与点超度的散点图

Fig. 6 Scatter graphs of degree and hyperdegree

### 3.2.3 超边超度

超边超度  $d_s(E_j)$  在超网络中指每座机场所包含的航司数量,在航空公司超网络中超边超度的分布情况如图 7 所示。超边超度较大的机场,如:长沙黄花、海口美兰、昆明长水等是中国航空公司超网络中较为重要的机场。

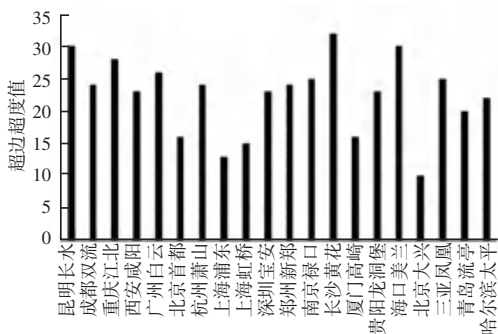


图 7 超网络超边超度分布

Fig. 7 Hyperedge hyperdegree distribution of hypernetwork

### 3.2.4 平均路径长度和聚类系数

本文节点数和超边数分别代表航空公司和民用运输机场的数量。如果两家航空公司同时出现在一个超边中,这时认为这两家航空公司是有连边的。使用 Gephi 软件,将超网络转化为普通的复杂网络,形成航空公司超网络的投影网络,如图 8 所示,计算得出网络的平均路径长度为 1.177 和聚类系数为 0.904。

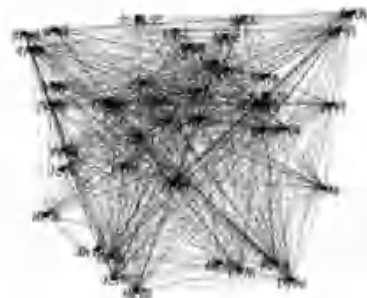


图 8 航空公司超网络的投影网络

Fig. 8 Projection network of airline hypernetwork

### 3.2.5 航司网络的特性

由于航空公司超网络的平均路径长度与聚类系数接近于 1,说明网络的航司与航司之间传播迅速,节点分布较为密集,大多数节点可以经过少量的边到达另外某个节点。这意味着航空公司超网络所对应的投影网络极为稠密,连通程度高,节点近似全连接,在这种网络上传播的速度极快,节点与节点之间可以通过某几个节点相互到达,因此该航司超网络具有小世界特性。

另外一种特性则是网络中的幂律分布,其显著特征是大部分节点的节点度值较小,少部分节点度值较大,也就意味着绝大多数的事件重要性都很小,只有极少数的事件重要性很大,而幂律分布又称无标度分布。根据网络中的数据分析航空公司超网络的节点的双对数度分布如图 9 所示,得到拟合幂函数,式(2):

$$y = 3E - 6x^{3.2801} \tag{2}$$

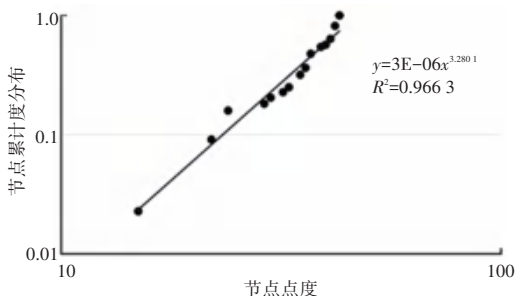


图 9 双对数坐标下节点度累计分布图

Fig. 9 Cumulative distribution of node degree in double logarithmic coordinates

同时得到图 10 的节点超度的累计概率分布图, 拟合幂函数, 式(3):

$$y = 0.124 4x^{0.637} \quad (3)$$

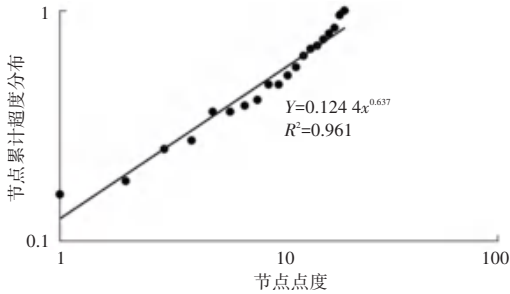


图 10 双对数坐标下节点超度累计分布图

Fig. 10 Cumulative distribution of node hyperdegree in double logarithmic coordinates

由式(2)可知, 节点度累计概率分布的指数为 -3.280 1, 小于 0, 并不服从幂律分布的定义, 并且在式(3)节点超度的累计概率分布函数中指数为 -0.637, 同样小于 0, 因此认为航空公司超网络的拓扑结构不具备无标度特性。

通过分析航空公司超网络的拓扑结构指标, 认为航空公司超网络具有明显的小世界特性, 网络本身节点通过较少的转换就能连通, 网络聚集程度高, 连通效率高。

### 4 航空公司超网络鲁棒性分析

通过分析航空公司超网络的基本拓扑性质, 进而了解航空公司在各座机场的分布。现实民用运输机场的稳定性及抗毁能力不仅会受到航空公司的影响, 同样也会受到外界环境对网络的影响, 如航空器故障、危险物品污染、挟持、爆炸物威胁等。因此本文从网络的鲁棒性指标出发, 分析不同情况下航空公司超网络的稳定性。

#### 4.1 鲁棒性指标

网络鲁棒性直观地来说是指网络在受到外部不确定干扰或者内部不稳定因素时, 能够保持其功能正常工作的能力<sup>[20]</sup>。在航空公司超网络中, 鲁棒性体现在民用运输机场在遭遇突发事件时保持其稳定的能力, 通常采用的衡量指标包括聚类系数、全局网络效率、最大连通子图和平均最短路径等。全局网络效率用来衡量网络的有效性, 聚类系数通常用来衡量具有相同邻居节点之间的连通性, 所有的系数都在 0-1 之间, 其值高说明聚类系数高, 网络的连通性强。因此本文选取全局网络效率和聚类系数作为航空公司超网络的鲁棒性指标进行分析。

聚类系数公式如式(1), 节点聚类系数的变化

幅度大小可以衡量网络的鲁棒性。全局网络效率的公式如式(4):

$$GE = \frac{\sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}}{\frac{1}{2}(N(N-1))} \quad (4)$$

其中,  $N$  表示超网络中航空公司的数量,  $d_{ij}$  表示节点与节点间的距离(最短路径)。

由于本文为非加权超网络, 因此节点与节点间的最短距离为两节点间的最少超边数量。

#### 4.2 攻击策略

本文对于航空公司网络的鲁棒性分析, 主要体现在随机攻击和蓄意攻击两种攻击策略对网络效率与聚类系数的变化情况, 同时对网络的鲁棒性进行评价优化。具体来讲, 航空公司超网络可能会面临如危险物品污染、临时取消航班、改签等随机攻击, 或者发生爆炸物威胁、挟持等蓄意攻击事件, 分析其稳定性, 并提出优化意见。

#### 4.3 鲁棒性分析

##### 4.3.1 随机攻击

将超网络中每家航空公司进行随机排序, 依次选择 4 个节点进行删除, 计算网络的网络效率与聚类系数的指标。为了保证实验的准确性, 该实验重复随机进行 50 次, 取 50 次实验中的平均值作为最后结果。

##### 4.3.2 蓄意攻击

为了分析基于蓄意攻击策略的航空公司超网络的鲁棒性, 首先将超网络中节点的度和超度从大到小排序, 依次攻击, 再用同样的方法计算网络的鲁棒性指标。本文分析随机攻击与蓄意攻击对航空公司超网络的网络效率与聚类系数所产生的影响, 仿真计算这两种策略下网络的聚类系数与网络效率的变化曲线, 如图 11 和图 12 所示。

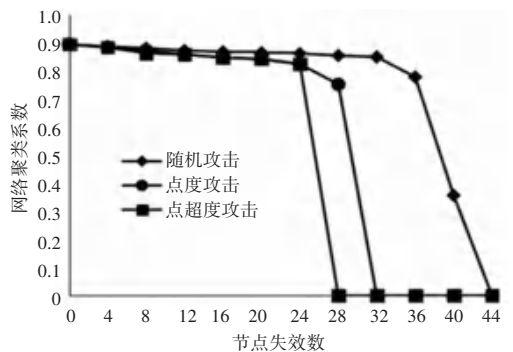


图 11 随机攻击与蓄意攻击聚类系数对比

Fig. 11 Comparison of clustering coefficient between random attack and deliberate attack

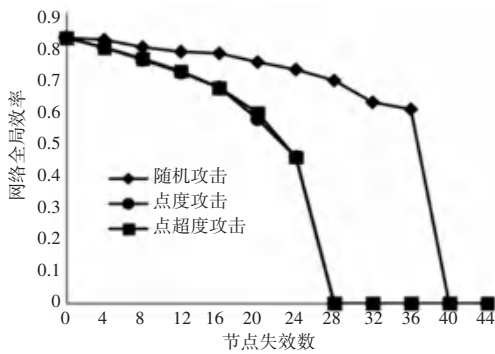


图 12 随机攻击与蓄意攻击网络效率对比

Fig. 12 Comparison of network efficiency between random attack and deliberate attack

当某家航空公司或者机场受到攻击时,网络中节点和超边数量的减少,节点的邻居节点之间互连的概率同样也会减少,导致航空公司超网络的聚类系数降低。又由于网络的连接程度降低,两家航空公司无法进行中转或改签服务,最终导致网络的全局效率降低。

在图 11 中,当节点失效数逐渐增加时,基于节点超度攻击的网络聚类系数下降最快,节点度攻击次之,说明以某机场为攻击对象进而攻击其它机场,导致网络的聚类系数下降快于点度攻击,点度攻击通过攻击航空公司来破坏网络,因为本身网络是小世界网络,其中一家航空公司被攻击,与之相互有连接关系的航空公司之间没有影响,因此,点度攻击对聚类系数的影响要小于点超度攻击,而随机攻击下降最慢。网络被随机攻击 36 个节点后,开始呈现断崖式下降,当网络的所有节点全部失效后,网络的聚类系数为 0;而点超度攻击在节点失效数为 24 时开始下降,直到失效 28 个节点时,网络的聚类系数为 0。因此对于网络的聚类系数而言,随机攻击的鲁棒性要强于蓄意攻击。

在图 12 中,网络的点度攻击和点超度攻击对全局效率的影响相差不大,基于随机攻击的鲁棒性要优于蓄意攻击,随机攻击 36 个节点网络的全局效率呈断崖式下降,当达到 40 个失效数时,网络已达到崩溃状态。而蓄意攻击在节点失效数达到 28 时,网络的全局效率为 0,网络完全失去作用。

最后,由于图 11 中网络的全局效率与聚类系数变化情况在随机攻击与蓄意攻击对网络抗毁程度方面的分析基本一致,说明了上述分析结果更加可信。

## 5 结束语

本文运用超网络理论构建了航空公司超网络模型,分析模型的拓扑结构与特性,以及超网络模型的鲁棒性。得出下述结论:

(1) 航空公司超网络中节点有较短的平均路径与较大的聚类系数,具有明显的小世界网络特性,但并不是无标度网络。网络中各航空公司之间连接程度与聚集程度高;

(2) 超网络中东方航空、国际航空等航空公司具有较大的节点度与点超度,说明这些节点对超网络起着至关重要的作用;

(3) 通过分析航空公司超网络的鲁棒性,超网络在遇到随机攻击时具有较好的稳定性,对于网络的聚类系数而言,点超度攻击对网络的破坏性要大于点度攻击,而对于网络的全局效率来说,点超度攻击与点度攻击对网络的破坏性基本一致。

针对上述结论给出以下建议:

(1) 目前中国的机场数量严重不足,是制约中国航空业发展的关键因素之一,对于航空公司数量较多的机场,如果条件允许,可以扩建机场规模,部分城市也可以考虑修建第二机场;

(2) 对于超网络超边超度较大的城市,如:昆明、成都等。这些城市的旅游资源丰富,但受制于交通限制,旅游业的发展也较为滞后,如昆明长水国际机场所拥有的航空公司数量最多,但本地的交通并不发达,加大投入建设交通基础设施,也可以给这座城市带来新的生机;

(3) 不断加强机场的安全管理,提高航空设备的可靠性。对于节点度或节点超度较大的航空公司,需要加强员工的整体素质以及安全意识,在遇到突发事故或紧急事件时,需要保持沉着冷静的态度做出准确判断。

## 参考文献

- [1] 中国民用航空局. 2020 年民航机场生产统计公报[EB/OL]. (2021-04-09) [2021-6-1] [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202104/t20210409\\_207119.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202104/t20210409_207119.html).
- [2] 中国东方航空. 2020 年度社会责任报告[EB/OL]. (2021-03-16) [2021-6-1] <http://www.ceairgroup.com/channels/21.html>.
- [3] 中国南方航空. 2020 年度报告[EB/OL]. (2021-03-31) [2021-6-1] <http://data.eastmoney.com/notices/detail/600029/AN202103301478474936.html>.
- [4] 中国厦门航空. 2020 年度报告[EB/OL]. (2021-04-30) [2021-6-1] <http://data.eastmoney.com/notices/detail/163004/AN202105011488202105.html>.
- [5] Min Geun Song, Gi Tae Yeo. Analysis of the Air Transport Network Characteristics of Major Airports[J]. The Asian Journal of Shipping and Logistics, 2017, 33(3).
- [6] LIN Jingyi, BAN Yifang. The evolving network structure of US airline system during 1990 - 2010 [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 410.

(下转第 96 页)