



Comparative Analysis of Domestic Airline Network Risks in Typical Time Periods

Yan Pei LI¹, Hang LI^{1,*}

¹ School of Safety Science and Engineering, Civil aviation university of china, Tianjin 300300

*Corresponding author. Email: lih@cauc.edu.cn

Abstract

With the rapid development of China's civil aviation industry, the scale and complexity of the air transportation network are increasing, and the spatial and temporal heterogeneity of the network structure is becoming more and more prominent. It is of great significance to study the route network structure of a specific time scale for the fine management of civil aviation transportation and the improvement of risk prevention and control level. Based on the complex network theory, the weighted route network is constructed by collecting the route data of China's civil aviation in summer and autumn season, winter and spring season, Spring Festival and National Day respectively, considering the flight volume. The degree distribution, average shortest path, clustering coefficient index at the whole network level, degree centrality and betweenness centrality index at the node level are used to make a comparative analysis of the route network structure in the typical period. The simulation results show that China's airline network shows the characteristics of "dense in southeast and sparse in northwest", and the cumulative distribution shows the characteristics of "long tail", no matter in the season or in important holidays. At the same time, the key airports of the airline network are slightly different in summer and autumn season, winter and spring season, Spring Festival and National Day. According to the network characteristics of specific time periods, it is necessary to improve the risk prevention and control ability of the corresponding key airports in response to disasters and improve the safe operation level of the whole system.

Keywords: *weighted route network, typical time period, degree centrality, Betweenness centrality.*

典型时段国内航线网络风险对比分析

李炎培¹, 李航^{1,*}

¹ 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津, 300300

* 通讯作者. 电子邮箱: lih@cauc.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费/the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China. (3122019057); 中国民航大学科研启动基金项目, (2020KYQD18)

摘要

随着我国民航业的快速发展,航空运输网络规模和复杂性均不断增加,网络结构的时空异质性愈发凸显,研究特定时间尺度的航线网络结构对民航运输的精细化管理和风险控制水平提升都有着重要意义。从航季和重要节假日两个典型时段出发,分别收集我国民航夏秋航季、冬春航季、春节和国庆节的航线数据,基于复杂网络理论,考虑航班量因素构建加权航线网络,运用网络整体层面的度分布、平均最短路径、聚类系数指标和节点层面的度中心性、介数中心性指标对典型时段航线网络结构进行对比分析。仿真结果表明:无论航季时段还是重要节假日时段,我国航线网络都表现出“东南密,西北疏”的特点,累计度分布呈现“长尾”分布特征。同时,夏秋航季和冬春航季,春节和国庆节的航线网络关键机场略有不同,需要根据具体时段网络特征,针对性提高相应关键机场应对灾害时的风险控制能力,提升整个系统安全运行水平。

关键词: 加权航线网络, 典型时段, 度中心性, 介数中心性.

1. 引言

随着经济全球化程度的不断加深,国内和国际间贸易规模逐步扩大,运输业不仅迎来新的发展阶段,而且展现出巨大的经济价值和社会价值。其中,飞机作为重要的运输工具,因其有着更快更安全的特性,无论是在发达国家或是发展中国家都扮演着无法替代的角色^[1]。2021年航空运输报告显示,我国境内运输机场共有248个,全年完成旅客吞吐量90748.3万人次,较上年增长5.9%^[2]。在此背景下,研究我国航线网络的结构能够更加清楚当前的航线网络特征,了解该网络特征下容易发生的风险事故,针对性增强网络对风险的抵抗能力,提升民航系统安全运行水平,推动民航业高质量发展。

航空运输网络在时间尺度上是高度动态的,这种动态行为不仅表征了网络的演化机制,还影响着网络的运行。在以往的研究中,航空运输网络是以地方机场网络的基本属性^[3]、群落结构^[4]和连通性^[5]为主要研究对象,同时涉及国家之间的机场网络^[6]和地方航线网络^[7]。在对环南海区域航空网络演化机制的研究中,王波等人^[8]分析了近二十年的客运和货运网络结构,发现该区域整体结构覆盖范围逐步扩大,呈现出“小世界”和“无标度”特征。王娇娥和莫辉辉^[9]两人从复杂网络的角度出发,对1952~2008年间我国航空网络结构演化进行研究。张培文^[10]等人使用标准差椭圆分许方法,对我国近十年的客运航空网络结构进行分析。Aurelien Gautreau^[11]等人根据节点间链接呈现的周期性分布规律构建了一个动态网络模型,以美

国1990年到2000年之间的机场网络为研究对象,该模型所观察到的动态特性再现了大多数人的经验观察。在美国航空网络结构的演化过程分析中,Jingyi Lin^[12]等人基于复杂网络理论还结合了机场系统的地理特征和网络效率因素,探讨了不同度量之间的相关性,为研究网络内部相互作用提供了一种新方法。Aisling Reynolds-Feighan^[13]使用官方数据库资料对北美和欧洲的航空网络结构进行对比分析,研究了两个区域航空网络的发展模式,并对航空公司的网络结构也进行了比较,突出了网络的基本地理特性。

可以发现,一方面传统相关研究主要是从大的时间尺度上对航空网络结构特性的演化过程进行分析,相反高动态的小尺度、典型时段研究相对较少,尤其是国内。在如今越来越复杂的航空网络中,高动态下的小尺度典型时段航空网络分析对未来减少民航安全风险、精细化航线的规划都有着重要作用。另一方面,航班量是机场间航线繁忙程度的一种体现,基于航班量加权能够更加准确的反映当前的网络结构特性^[14]。

鉴于此,本文运用复杂网络理论,对航线网络基于航班量因素进行加权处理,构建出加权航线网络,分别从加权航线网络整体指标和加权航线网络节点指标两个层面对冬春航季和夏秋航季,春节和国庆节两个典型时段进行对比分析,挖掘小尺度下航线网络中关键节点,为典型时段的航线网络风险控制提供有力依据。

2. 加权航线网络构建

2.1 方法介绍

为了真实分析当前航线网络特征, 本文从复杂网络角度出发, 基于航班量因素对传统网络进行加权处理。对于有 m 个机场的航线网络, 用节点代表机场, 链接代表两个机场之间的航线, 并用该航线上的航班数对航线进行加权, 于是, 得到加权航线网络 $V = (A, B, C)$ 。其中, A 代表航线网络中的节点集合, B 代表航线网络中的链接集合, C 则代表航线网络中相应航线的航班量集合。 B 具体可通过建立 $m \times m$ 邻接矩阵 N 表示。当机场 i, j 间有航线连接时表示为 $N(i, j) = 1$, 否则 $N(i, j) = 0$; 若该航线上的航班量为 e , 则 $C(i, j) = e$ 。

2.2 数据来源

本文主要对比夏秋航季和冬春航季, 春节和国庆节两个典型时段航线网络特征。因此, 根据我国民航航季的规定, 从世界航空运输资讯数据库 (Cirium Dashboard) 中选取2021年五月和十二月两个月份航班数据作为构建夏秋航季、冬春航季航线网络的基础数据; 同时, 收集了2019年国庆节和2020年春节期间的航班数据用于构建相应时段的航线网络。

2.3 不同时段加权航线网络

基于以上数据, 分别构建不同典型时段航线网络, 各航线网络节点和链接数统计如表1所示。为便于不同航线网络对比, 对网络数据做了分级处理: 各机场按航班量排名前10.0%、前30.0%和后60.0%分为枢纽机场、干线机场和支线机场; 各航线选取总航班量前1.0%、前5.0%和前10.0%的航线进行显示, 最终结果

表1 典型时段航线网络数据

典型时段	节点数	链接数
夏秋航季	238	11841
冬春航季	238	11358
春节	234	6221

如图1.1-1.4所示。由图初步分析可知, 无论哪个时段航线网络, 整体上均呈现出“东南密, 西北疏”的特点。



图1.1 夏秋航季航线网络



图1.2 冬春航季航线网络

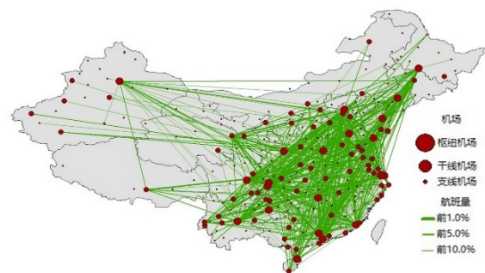


图 1.3 春节航线网络

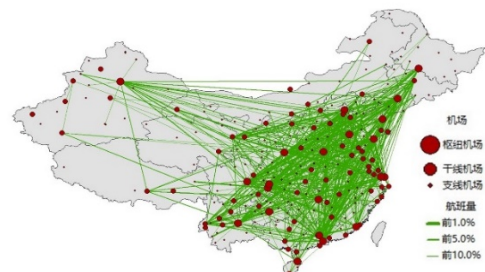


图1.4 国庆节航线网络

3. 航线网络特征指标分析方法

为了全面分析航线网络特征,分别从网络的整体层面选取度分布、平均最短路径和聚类系数三个指标,从网络的节点层面选取度中心性和介数中心性两个指标。其中,为更准确反映网络特征,针对度分布、聚类系数和度中心性基于航班量因素进行加权处理。具体指标定义如下:

3.1 整体指标

3.1.1 度分布

在航线网络中,把机场作为网络的节点,机场间航线作为网络的边。度是指与节点相连边的数目,即与机场相连的航线数。在加权网络中,度则是指基于航班量加权的边的数目总和,其加权度 D_H 的计算为:

$$D_H(i) = \sum_{j=1}^n C_{ij} \quad (1)$$

基于航班量加权的机场节点的度值能够反映出该机场与其他机场的通达性和其在航线网络中的重要性,同时网络平均度 \bar{D} 也是一个经典网络指标,它反映网络中节点的平均连接程度,即网络中所有节点度值的平均值,计算为:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D(i)}{n} \quad (2)$$

为进一步研究节点度的分布,通常引入累计度分布概念,即航线网络中度值为 K 的节点数所占整个航线网络节点总数的比例,记为 $P(k)$ 。计算为:

$$P(k) = \sum_{k'=k}^{\infty} p(k') \quad (3)$$

这里将公式(2)和公式(3)用基于航班量的加权度公式(1)代替,得到相应的加权网络平均度和加权累计度分布。

3.1.2 平均最短路径

网络平均最短路径通常能反映一个网络的效率水平。在网络中,任意两个节点 i, j 之间的最短路径 w_{ij} 表示为连接这两个节点最短路径的边的数目。网

络平均最短路径 L 则表示为网络中任意两个节点之间最短路径的平均值,计算为:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}m(m-1)} \sum_{i>j} w_{ij} \quad (4)$$

3.1.3 聚类系数

网络的聚类系数可以反映网络节点的聚集程度。把网络中反映某一节点的邻居节点之间互为邻点的比例称为节点的聚类情况,节点 i 的聚类系数 F_i 指,所有与节点 i 相连的节点之间实际连接边的数目占最大可能连接边数目的比值,基于航班量的加权聚类系数 F_H 则计算为:

$$F_H(i) = \frac{2E_{Hi}}{k_{Hi}(k_{Hi}-1)} \quad (5)$$

式中, E_{Hi} 为与节点 i 相连的节点个数, k_{Hi} 为 k 个邻居节点 i 间互连接边的数目。同样地,节点的聚类系数基于航班量因素进行加权处理。整个网络的聚类情况则可用节点聚类系数的平均值 F 表示,计算为:

$$F = \frac{1}{m} \sum_{v_i \in V} C_H(i) \quad (6)$$

3.2 节点指标

3.2.1 度中心性

在网络中,度中心性是描述网络节点中心性最直接的指标。一个节点与其他节点间连接数目越多,则这个节点的节点度就越大,其度中心性就越高节点就越重要。在实际航线网络中,由于机场间航班数量的变化对节点重要程度有着很大的影响,因而采用基于航班量加权的方法来反映网络节点重要性。

3.2.2 介数中心性

介数中心性是衡量一个节点在网络中扮演枢纽桥梁作用的表征。节点 i 的介数中心性定义为网络中经过节点 i 的最短路径数目占该网络中最短路径总数的比例。节点 i 的介数中心性数值越大,说明该节点在

网络中越重要。介数中心性 B_H 计算为:

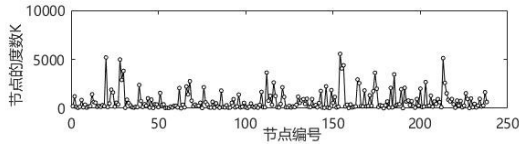


图 2.1 夏秋航季加权节点度

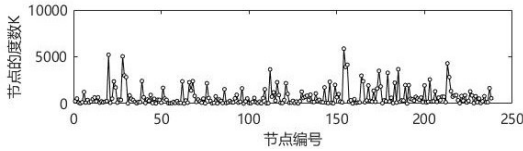


图 2.2 冬春航季加权节点度

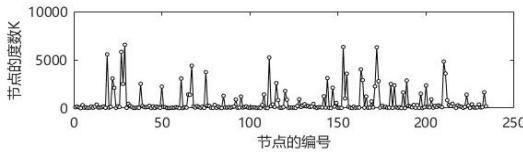


图 2.3 春节加权节点度

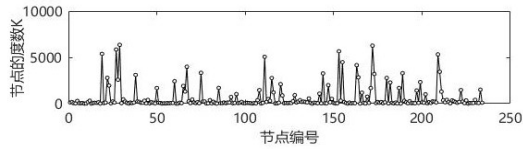


图 2.4 国庆节加权节点度

$$B_H(i) = \sum_{k \neq i \neq j \in V} \frac{1}{m^2} \frac{\sigma_{Hkj}(i)}{\sigma_{Hkj}} \quad (7)$$

式中 m 为航线网络中节点数, σ_{Hkj} 表示节点 k 和 j 之间最短路径总数目, $\sigma_{Hkj}(i)$ 表示节点对最短路径之间通过节点 i 的总次数。

4. 仿真对比实验

在构建好的航线网络中, 带入各个时间段的航线数据, 使用matlab软件进行编程, 求出相应的邻接矩阵, 在此基础上计算出整体和节点两个层面的指标值, 最后对得到的数据进行汇总, 并画出累计度分布和加权节点度图。仿真结果如表2、表3、图2.1-2.4和图3.1-3.4所示。

4.1 夏秋航季和冬春航季对比

由表 2 和表 3 可以看出, 整体上, 夏秋航线网络节点度和平均度都大于冬春航季, 说明夏秋航季的航

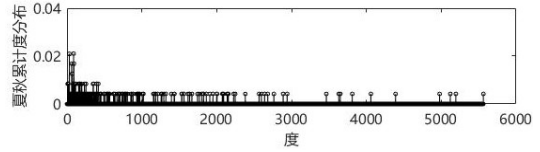


图 3.1 夏秋航季累计度分布

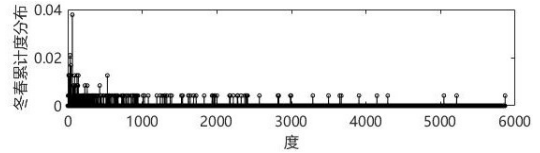


图 3.2 冬春航季累计度分布

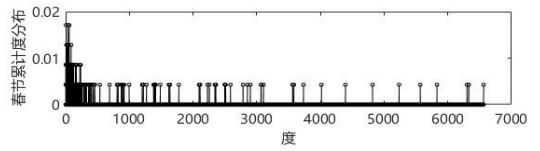


图 3.3 春节累计度分布

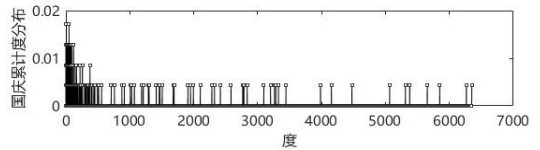


图 3.4 国庆节累计度分布

线和航班量更多。从图2.1中可以看出夏秋航季度值 K 较大 ($K > 2000$) 的节点占总节点的11.34%, 度值 K 较小 ($K < 1000$) 的节点占总节点的77.73%, 同理, 冬春航季分别为11.34%和76.89%。两个航季的累计度分布图都有明显的“长尾”分布特点, 即度值大的机场节点所占比例较少, 以上数据均说明两个航季的航线网络“无标度”特征显著。平均最短路径均说明各自的航线网络中任意两个机场之间需要转机2次就可以相互连通, 展现了航线网络较高的连通性。两个航季的加权聚类系数均在0.5以上, 说明两者的航线网络都有着较高的聚集性。

节点层面, 在度中心性指标下, 夏秋航季排名前三的机场为首都机场、白云机场和咸阳机场, 冬春航季有着与夏秋航季相同的首都机场和白云机场, 除此之外还有江北机场。结合图1.1和图1.2可以看出, 夏

秋航季中航线较密集的咸阳机场区别于冬春航季航线密集的江北机场,两个航季对比中表现出了明显的

表2 整体指标结果

典型 时段	度中心性		介数中心性	
	机场名称	指标值	机场名称	指标值
夏秋	首都机场	5563	咸阳机场	0.1149
	白云机场	5195	大兴机场	0.0876
	咸阳机场	5121	双流机场	0.0859
冬春	首都机场	5865	咸阳机场	0.0965
	白云机场	5215	大兴机场	0.0799
	江北机场	5044	天府机场	0.0741
春节	双流机场	6562	双流机场	0.1107
	首都机场	6329	咸阳机场	0.0900
	宝安机场	6301	首都机场	0.0785
国庆	双流机场	6350	双流机场	0.1091
	宝安机场	6262	江北机场	0.0775
	江北机场	5849	白云机场	0.0623
典型 时段	节点度	平均度	平均最短 路径	聚类系数
夏秋	180261	757.3992	2.0886	0.5804

冬春	176981	743.6176	2.1258	0.5672
春节	145915	623.5684	2.0510	0.4128
国庆	146912	627.8291	1.9750	0.4184

表3 节点指标结果

地理特征。在介数中心性指标下,夏秋航季排名前三的机场为咸阳机场、大兴机场和双流机场,而冬春航季排名前三的为咸阳机场、大兴机场和天府机场,说明夏秋航季和冬春航季航线网络中的枢纽机场并不相同。

4.2 春节和国庆节对比

整体上,春节航线网络节点度和网络平均度数值都要小于国庆。春节度值较大($K > 2000$)的节点占比11.97%,较小($K < 100$)的占比82.48%。同理,国庆节度值较大的节点占比10.68%,较小的占比81.20%。且从图3.3和图3.4中也可以看出“长尾”分布特点,以上数据说明春节和国庆节的航线网络也有明显的“无标度”特征。国庆节的平均最短路径要小于春节,即在航线网络中任意两个机场间需要转机次数国庆节要少于春节,但两个重要节假日航线网络都展现出了较高的网络连通性。聚类系数指标值都小于0.5,主要是因为春节和国庆节的旅客多为返乡和出行旅游,因此其分布相对于航季航线较为分散。

在度中心性指标下,春节排名前三的机场为双流机场、首都机场和宝安机场,国庆节为双流机场、宝安机场和江北机场。两者的不同在于春节的首都机场和国庆节的江北机场,表明随着不同节假日旅客出行目的的变化,其航线网络中的关键机场也在发生变化。在介数中心性指标下,春节排名前三的机场为双流机场、咸阳机场和首都机场,国庆节则除了双流机场之外的江北机场和白云机场均与春节不同,说明重要节假日航线网络中的枢纽机场也相应的在发生变化。

通过对航季和重要节假日两个典型时段的仿真对比分析,可以看出四个时间段的航线网络都呈现出“长尾分布”特征,且有着较好的连通性和较高的聚集性,说明网络中重要度较高的机场受灾害影响发生

失效能够快速影响整个航线网络。同时,加强节点层面识别出的不同关键机场的风险防控能力,能够有效降低网络脆弱性,增强在风险情形下的抵抗能力。

5. 结论

针对冬春航季和夏秋航季,春节和国庆节两个典型时段航线网络,运用基于航班量加权的复杂网络方法,网络整体和节点两个层面对其网络特征进行对比分析,可以发现:

1) 从整体层面来说,无论夏秋航季和冬春航季,还是春节和国庆节,各个典型时段的航线网络均具有“东南密,西北疏”的特点,累计度分布都有着“长尾”分布特点,反映出无标度网络特征,使网络在遭受蓄意打击时表现出一定的脆弱性。

2) 从节点层面来说,无论度中心性、介数中心性指标下,不同时段航线网络识别的关键机场均有所不同,体现出这些网络在结构上存在差异,针对性提高其关键机场的风险防控能力,对提升民航安全运输水平有着重要意义。

参考文献

- [1] Zhang J, Cao X B, Du W B, et al. Evolution of Chinese airport network[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2010, 389(18): 3922-3931.
- [2] 中国民用航空局. 2021年全国民用运输机场生产统计公报[EB/OL] (2022-03-22) [2022-04-15] http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202203/20220322_212477.html
- [3] Wang J, Mo H, Wang F. Evolution of air transport network of China 1930–2012[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 40: 145-158.
- [4] Gegov E, Postorino M N, Atherton M, et al. Community structure detection in the evolution of the United States airport network[J]. *Advances in Complex Systems*, 2013, 16(01): 1350003.
- [5] Allroggen F, Wittman M D, Malina R. How air transport connects the world—A new metric of air connectivity and its evolution between 1990 and 2012[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 80: 184-201.
- [6] Wandelt S, Sun X. Evolution of the international air transportation country network from 2002 to 2013[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 82: 55-78.
- [7] Cai K Q, Zhang J, Du W B, et al. Analysis of the Chinese air route network as a complex network[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(2): 028903.
- [8] 王波, 雷雅钦, 张琪. 环南海区域跨境航空网络空间结构演化[J]. *人文地理*, 2022, 37(1): 164-170.
- [9] 张培文, 杜福民, 王雪, 等. 近十年中国客运航空网络空间结构演化及分析研究[J]. *世界地理研究*, 2021.
- [10] 王姣娥, 莫辉辉. 中国航空网络演化过程的复杂性研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(1): 71-80.
- [11] Gautreau A, Barrat A, Barthélemy M. Microdynamics in stationary complex networks[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2009, 106(22): 8847-8852.
- [12] Lin J, Ban Y. The evolving network structure of US airline system during 1990–2010[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 410: 302-312.
- [13] Reynolds-Feighan A. Characterisation of airline networks: A North American and European comparison[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2010, 16(3): 109-120.

- [14] Chung H M, Kwon O K, Han O S, et al. Evolving network characteristics of the asian international aviation market: A weighted network approach[J]. *Transport Policy*, 2020, 99: 299-313

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

