

# 中国加权机场网络结构特征分析

胡雯欣

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2023年4月30日; 录用日期: 2023年5月20日; 发布日期: 2023年5月31日

## 摘要

机场对一个国家来说是重要的基础设施系统, 对其进行研究对我们国家的发展具有重大的意义。目前虽然已有部分学者基于复杂网络理论对其进行了一定的研究, 但大多没有考虑机场之间往来航班量对这个网络的影响。为了进一步完善对机场这一基础设施系统的研究, 本文构建了中国加权机场网络的样例, 并根据复杂网络节点结构特征参数以及网络结构特征参数的相关定义, 计算出相关特征参数的数值, 对中国加权机场网络的结构特征进行了分析, 发现: 中国的机场网络整体布局比较合理; 中国加权机场网络节点的连接紧密程度较高并且有比较高的运行效率。

## 关键词

加权机场网络, 拓扑结构, 特征参数

# Structural Characteristics Analysis of China Weighted Airport Network

Wenxin Hu

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2023; published: May 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

Airport is an important infrastructure system for a country and its research is of great significance to the development of our country. At present, although some scholars have carried out some research based on complex network theory, most of them have not considered the impact of the number of flights between airports on this network. In order to further improve the research on the airport infrastructure system, an example of Chinese weighted airport network is constructed in this paper and according to the relevant definition of the structural characteristic parameter of complex network and its nodes, the value of the relevant characteristic parameters is calculated. And

then the structural characteristics of Chinese weighted airport network are analyzed, and it was found that the overall layout of Chinese airport network is relatively reasonable and the nodes of Chinese weighted airport network have a high degree of tightness and operational efficiency.

## Keywords

Weighted Airport Network, Topological Structure, Characteristic Parameter

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着航班往来得越来越密切,各个机场已经不仅仅是独立存在的一个基础设施,还构成了一个网络。因此,可以运用复杂网络的理论来研究扰动事件对机场这个基础设施系统产生的影响以及分析机场的相关属性。目前已有一些学者对航空领域相关的复杂网络进行了一定的研究,但这些研究大多都没有考虑到机场之间往返的频次对于机场网络的影响,而采用无权的网络来进行研究。然而各个机场间由于来往航班量不同、各个机场本身承载的运输量不同,使得各个机场的连边具有不同属性,即机场网络本身就是一个各临边具有不同权重、各节点具有异质性的网络。因此,本文拟构建一个加权复杂网络研究分析中国机场网络的结构特征。

## 2. 文献综述

复杂网络是一门交叉学科,其对数学、生物学、物理学以及计算机科学等等学科均有涉及。图论的提出与发展,奠定了复杂网络理论的基础[1]。复杂网络是一种基于图论构建出的抽象模型,它将复杂的人类或自然系统抽象为节点与节点之间的连边[2]。其中,节点代表现实系统中的个体,连边代表每个个体之间的关系,连边的权重则表征连边两端的节点之间的关联属性[3]。

人类对于图论和网络的研究已经进行了比较长的一段时间,研究内容从最早的“七桥问题”发展到随机图理论、再发展到无标度网络和小世界网络,网络科学在理论研究方面实现了非常大的飞跃[4]。其中,Watts [5]等人提出了复杂网络具有小世界特性,Albert [6]等人提出复杂网络具有无标度特性,这两个研究将复杂网络理论研究推进到新的发展阶段,并促使复杂网络理论在近几十年得到很大的完善。

复杂网络从通俗上来说就是具有高度复杂性的网络,其复杂性表现在节点多样、连接多样、结构复杂以及动力学复杂等等方面。现实中存在非常多类型的网络,比如电力网络、社会关系网络以及交通运输网络等等,现实中存在的这些网络都有共通之处:该网络由许多的元素组成,各个元素之间存在错综复杂的关系,具有这些特点的网络系统即为复杂网络[7]。

由于航空运输活动在各国的经济发展中都占据了重要的地位,航空运输网络(Air Transportation Network, ATN)吸引了大量学者的关注。2000年,复杂网络理论首次应用于航空领域的研究,Amaral [8]等人应用复杂网络理论研究航空运输系统,证明了全球机场网络符合小世界网络的分布特征。2004年,Barrat [9]等人以聚类系数和相邻节点的平均度作为特征指标研究全球机场网络,并得出结论:全球机场网络的权重和强度符合幂律分布特征,并且全球机场网络机场节点的强度和度不是线性相关的。2005年,Guimera [10]等人仍然将全球航空网络作为研究对象深入研究其全局拓扑结构,得到的研究结论与Amaral的研究结论相似,全球机场网络是具有明显无标度特性的小世界网络。此后,国内外学者将复杂网络理

论作为对航空网络进行分析和研究的主要方法，研究内容包括全球、美国、中国等等航空网络的仿真研究与实例分析[11] [12]。王姣娥[13]等人构建以机场所在城市为网络节点的中国航空网络，并且从网络度分布、网络平均路径长度、网络簇系数、网络簇相关性等复杂网络指标分析该网络的空间结构，结论是中国航空网络结构具有小世界特性，并且没有明显的层级结构。2012年，曾小舟[14]等人研究了机场网络(CAN)的网络特性，分析得出中国机场网络具有较大的网络簇系数和较小的网络平均最短路径长度，并且其网络度分布服从幂律分布特征，这证明了中国机场网络是典型的小世界网络。

以上这些对机场网络的研究主要构建的是无权网络，这忽略了：由于往来航班量的不同，各个机场节点的连边是具有不同权重的。因此，应该考虑各个机场节点之间的航班往来，构建加权机场网络来进一步研究中国机场运行系统的结构特点。

### 3. 中国加权机场网络模型构建

根据民航局发布的《2021年全国民用运输机场生产统计公报》显示，2021年，中国境内运输机场(港

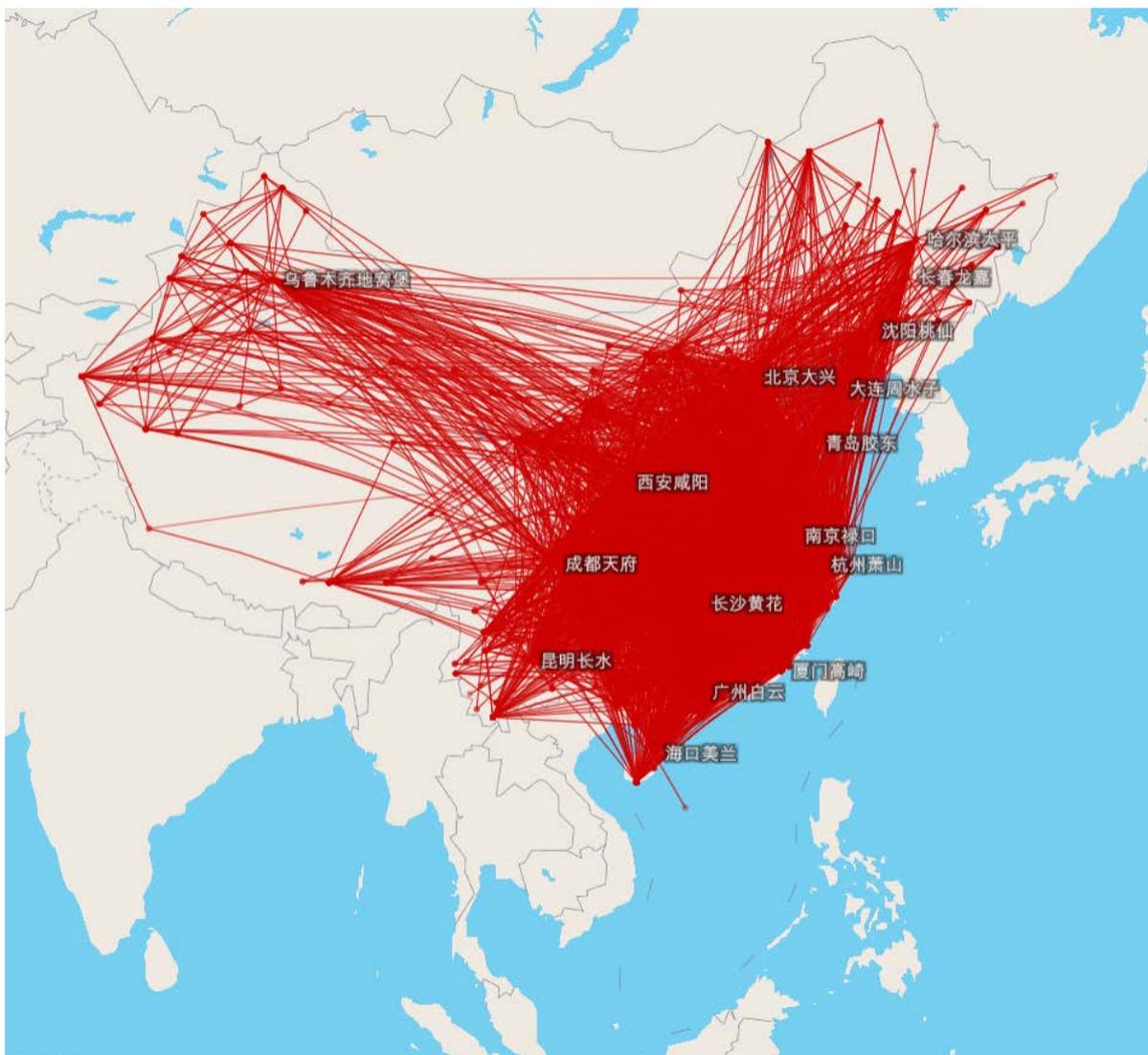


Figure 1. Figure of China's weighted airport network  
图 1. 中国加权机场网络图

澳台地区除外)共有 248 个。随着航班的往来, 让各个独立的机场之间有了沟通、联系, 往来航班量的多少让机场之间的关系有了权重, 进而形成了一个加权的航空网络。因此, 本文选取“飞常准”网站查询到的中国境内 2022 年 8 月 30 日至 9 月 29 日这 31 天的航班运行数据作为基础, 以《2021 年全国民用运输机场生产统计公报》中提及的中国境内(港澳台地区除外)各个机场为节点, 在有航班往来的两个机场之间形成连边, 并且以各个机场之间往来航线的航班量为权重, 构建中国加权机场网络模型。设中国加权机场网络  $G = (V, E, W)$ , 其中  $V$  是中国加权机场网络节点的集合,  $E$  是中国加权机场网络边的集合,  $W$  是中国加权机场网络边权的集合。所建立的中国加权机场网络一共有 248 个节点, 6014 条连边。中国加权机场网络如图 1 所示。

图 1 展示了在中国地图上中国机场网络节点和连边的空间分布情况。根据图 1 所示, 整体上来看中国的机场及航线在华东、中南分布较为密集、西部较为稀疏。这样的分布情况与我国目前的发展状况以及人口的分布较为一致。

## 4. 中国加权机场网络结构统计特征分析

### 4.1. 中国加权机场网络节点结构统计特征参数分析

根据度[15]、强度[16]、介数[17]这三个复杂网络基本结构特征指标的相关定义, 计算出所构建的中国加权机场网络的基本拓扑特征指标。用 Python 程序计算并输出机场节点的基本拓扑特征指标数值, 指标包括度、强度、介数。分别选取各个基本拓扑特征指标数值最大的 10 个机场节点列出, 如表 1, 表 2, 表 3 所示。

**Table 1.** Table of top ten node degrees of China's weighted airport network

**表 1.** 中国加权机场网络节点度数值前十节点表

城市编号	城市名称	节点度
XIY	西安咸阳	145
TFU	成都天府	134
PVG	上海浦东	131
PKX	北京大兴	126
CKG	重庆江北	125
CAN	广州白云	117
PEK	北京首都	115
SZX	深圳宝安	111
HGH	杭州萧山	104
CSX	长沙黄花	91

根据复杂网络节点的度的定义可知, 机场网络节点度值表示与该机场节点有直接航班往来的机场数量。如表 1 所示, 节点度值最大的机场是西安咸阳机场, 度值为 145, 则与西安咸阳机场有直接航班往来的机场有 145 个。除此之外, 这十个城市的 GDP 均位于全国所有城市排行的前列, 可以发现经济越发达的城市的机场, 与其有直接航班往来的机场数量也相对较多。与机场有直接航班往来的机场数量越多, 则越能够提高该机场所在城市居民的交通出行的便利度和效率, 有利于该城市经济的发展。因此应该提升经济相对落后地区机场的节点度值, 即增加与其有直接航班往来的机场数量, 从而提升该城市交通出行便利度和效率, 促进其经济的发展。

**Table 2.** Table of top ten node strength of China's weighted airport network  
**表 2.** 中国加权机场网络节点强度数值前十节点表

城市编号	城市名称	节点强度
CAN	广州白云	16,955
PVG	上海浦东	15,814
CKG	重庆江北	14,166
XIY	西安咸阳	14,071
SZX	深圳宝安	13,589
PKX	北京大兴	13,267
PEK	北京首都	12,691
TFU	成都天府	12,318
HGH	杭州萧山	11,209
SHA	上海虹桥	10,043

如表 2 所示，强度最大的机场是广州白云机场，机场节点强度为 16,955，根据复杂网络节点强度的定义，节点强度反映的是节点的负载，即广州白云机场在 8 月 30 日至 9 月 29 日这 30 天内有 16,955 次航班起落。这些机场起落班次较多，如果机场受到扰动而导致机场暂时关闭，则会造成大量从该机场起落的飞机航班延误或无法降落并需要备降其他机场，将造成非常严重的经济损失。因此，在分配资源来提升机场抗干扰能力时，资源分配的规则应该将机场节点的强度值考虑在内，即应考虑机场网络中各个机场节点所有连边的航班数量。

**Table 3.** Table of top ten node betweenness of China's weighted airport network  
**表 3.** 中国加权机场网络节点介数数值前十节点表

城市编号	城市名称	节点介数
XIY	西安咸阳	0.107
TFU	成都天府	0.078
PVG	上海浦东	0.076
PKX	北京大兴	0.067
CKG	重庆江北	0.059
KMG	昆明长水	0.056
URC	乌鲁木齐地窝堡	0.052
PEK	北京首都	0.045
CAN	广州白云	0.045
XNN	西宁曹家堡	0.039

复杂网络节点的介数表征该节点对复杂网络中各个节点的关联作用。根据复杂网络节点介数的定义可知，机场网络中机场节点介数数值越大，则机场网络中任意两个机场节点之间所有最短路径中经过该机场节点的数量就越大。如表 3 所示，中国机场网络中机场节点介数数值最大的是西安咸阳机场，介数为 0.107，说明机场网络任意两个机场节点之间的最短路径有多条经过西安咸阳机场，即西安咸阳机场具有比较强的中枢性，并且在整个机场网络中有较大的影响力和作用。若西安咸阳机场受到不可抗力作用

导致该机场中的航班无法正常起落，则有可能影响到整个中国机场网络中较多没有直接航班联系的机场之间的通行效率，造成严重损失。因此，考虑机场节点重要性时，也应考虑机场节点对整个机场网络的影响。

## 4.2. 中国加权机场网络结构统计特征参数分析

在复杂网络的相关研究中，描述该网络整体的结构统计特征常用网络的节点数量、网络的连边数量、网络的平均度[18]、网络平均最短路径长度[19]以及网络簇系数[5]这五个指标。根据各个指标的相关定义，在 Python 中计算出了相应的结果，列于表 4。

**Table 4.** Table of structural statistical characteristic parameters of China's weighted airport network

**表 4.** 中国加权机场网络结构统计特征参数表

	节点	连边	平均度 $\langle k \rangle$	平均最短路径长度 L	网络簇系数 C
中国加权机场网络	248	6014	23.87	2.17	0.66

中国加权机场网络的机场节点的数量是 248，连边数量是 6014。中国加权机场网络的平均度 $\langle k \rangle = 23.87$ ，即中国加权机场网络中任意节点平均与将近 24 个机场有直接的航班往来，即中国加权机场网络节点互相联通的机会平均来看较多。中国加权机场网络任意两个机场节点之间的平均最短路径长度  $L = 2.17$ ，说明网络中任意两个机场节点平均最少通过 3 个班次的航班飞行就能够相连接，可见中国加权机场网络的运行效率较高。

复杂网络的网络簇系数 C 是量化复杂网络节点聚集程度的参数。中国加权机场网络的网络簇系数  $C = 0.66$ ，说明中国加权机场网络中大部分机场节点的相邻机场节点互相之间连接比较紧凑，该网络节点有比较高的连接紧密程度，其聚集性比较好。

## 5. 结语

本文通过构建中国加权机场网络来对中国机场运行系统的结构进行了分析：分别计算了中国加权网络节点的度、强度、介数这 3 个节点结构统计特征参数；还计算了节点数量、连边数量、网络的平均度、网络平均最短路径长度以及网络簇系数这 5 个网络整体的结构统计特征参数。对计算结果进行分析之后发现：1) 中国的机场网络整体布局比较合理；2) 中国加权机场网络节点的连接紧密程度较高并且有比较高的运行效率。但还可以在布局和管理方面做出一些优化，让整个机场网络的运行更加稳定，也能进一步促进中国经济的发展。

## 参考文献

- [1] 刘颖. 基于复杂网络理论的我国航空货运网络鲁棒性优化研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2021. <https://doi.org/10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.002436>
- [2] 邹欣妍. 基于机场终端空域交通复杂网络的时空模式挖掘与预测[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2022. <https://doi.org/10.27379/d.cnki.gwhdu.2022.000060>
- [3] 刘涛, 陈忠, 陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程, 2005, 23(6): 1-7.
- [4] Barabási, A.-L. (2003) The New Science of Networks. *Physics Today*, **6**, 243-270.
- [5] Watts, D.J. and Strogatz, S.H. (1998) Collective Dynamics of 'Small-World' Networks. *Nature*, **393**, 400-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- [6] Barabási, A.-L. and Albert, R. (1999) Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, **286**, 509-512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- [7] Lu, Z.-M. and Li, X.-F. (2016) Attack Vulnerability of Network Controllability. *PLOS ONE*, **11**, e0162289.

- 
- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162289>
- [8] Amaral, L.A.N., Scala, A., Barthelemy, M. and Stanley, H.E. (2000) Classes of Small-World Networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **97**, 11149-11152. <https://doi.org/10.1073/pnas.200327197>
- [9] Barrat, A., Barthélemy, M., Pastor-Satorras, R. and Vespignani, A. (2004) The Architecture of Complex Weighted Networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **101**, 3747-3752. <https://doi.org/10.1073/pnas.0400087101>
- [10] Guimerà, R. and Nunes Amaral, L.A. (2005) Functional Cartography of Complex Metabolic Networks. *Nature*, **43**, 895-900. <https://doi.org/10.1038/nature03288>
- [11] Zanin, M. and Lillo, F. (2013) Modelling the Air Transport with Complex Networks: A Short Review. *The European Physical Journal Special Topics*, **215**, 5-21. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01711-9>
- [12] 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.
- [13] 王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性[J]. 地理学报, 2009, 64(8): 899-910.
- [14] 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]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [15] 陈楠. 基于级联失效的空域扇区网络结构实证及抗毁性研究[D]: [硕士学位论文]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2021. <https://doi.org/10.27722/d.cnki.gzgmh.2021.000119>
- [16] 高经东. 基于复杂网络的空域扇区网络分析及抗毁性研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2018.
- [17] 彭璐易. 航空公司应急管理体系抗毁性研究[D]: [硕士学位论文]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2020. <https://doi.org/10.27722/d.cnki.gzgmh.2020.000009>
- [18] 陈舒伟. 空中交通运行网络韧性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2020. <https://doi.org/10.27239/d.cnki.gnhhu.2020.001231>
- [19] 许欣华. 航空网络鲁棒性及延误传播相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.