

中文引用格式:郭九霞,李虹屹,魏嵩,等.基于多层时序网络模型的中国机场网络特征分析[J].中国安全科学学报,2024,34(10):71-79.

英文引用格式:GUO Jiuxia,LI Hongyi,WEI Song, et al. Analysis of Chinese airport network characteristics based on multi-layer temporal network model[J]. China Safety Science Journal,2024,34(10):71-79.

基于多层时序网络模型的中国机场网络特征分析*

郭九霞¹教授,李虹屹²,魏嵩³高级工程师,叶伟⁴高级工程师,王超⁵教授

(1 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院,四川 广汉 618307;2 海南机场设施股份有限公司 机场建设规划部,海南海口,570204;3 民航局运行监控中心 飞行计划处,北京 100710;
4 中国民用航空飞行学院 空管中心,四川 广汉 618307;5 中国民航大学 空中交通管理学院,天津 300300)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.10.0082

基金项目:四川省社科基金资助(SCJJ23ND186);民航教育人才类项目(MHJY2023010);天津市自然科学基金资助(21JCZDJC00780);中央高校基本科研业务费专项资金(PHD2023-041)。

【摘要】 为克服静态网络模型在分析动态系统时出现网络结构特性反映不全面和数据表达失真问题,引入时间属性,提出一种基于时序复杂网络模型的中国机场网络(CAN)结构分析方法。通过分析节点时序度、时序度中心性、时序介数中心性和时序接近中心性等网络特征指标,探究中国机场时序网络的结构特征,筛选和排序网络中的重要机场节点,并分析异质节点产生的原因。结果表明:CAN结构呈现出无标度网络特性;CAN的平均时序距离值差距较大,最大值是最小值的6.06倍;乌鲁木齐地窝堡国际机场(ZWWW)、呼和浩特白塔国际机场(ZBHH)的时序介数中心性相对其他指标较高,其在网络中起到重要的中心作用,而深圳宝安国际机场(ZGSZ)相对其他指标具有较高的时序度中心性。

【关键词】 时序网络; 中国机场网络(CAN); 多层时序网络模型(MTNM); 网络特征指标; 幂律分布

Analysis of Chinese airport network characteristics based on multi-layer temporal network model

GUO Jiuxia¹, LI Hongyi², WEI Song³, YE Wei⁴, WANG Chao⁵

(1 School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China; 2 Airport Construction Planning Department, Hainan Airport Facilities Co., Ltd., Haikou Hainan 570204, China; 3 Flight Planning Department, Civil Aviation Administration Operation Monitoring Center, Beijing 100710, China; 4 Air Traffic Control Center, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China; 5 School of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To address the problem of incomplete reflection of network structure characteristics and data distortion in static network models used in dynamic systems, an airport network structure analysis method based on a temporal complex network model was proposed by introducing time attributes. Network

characteristic indicators such as nodal temporal degree, temporal centrality, temporal betweenness centrality, and temporal closeness centrality were analyzed. Then, the structural properties of CAN were investigated. Moreover, crucial airport nodes within the temporal network were identified and ranked, and the reasons for the heterogeneous node generation were analyzed. The results indicated that the temporal network structure of Chinese airports presented scale-free network characteristics. The average temporal distance values of CAN vary significantly with the maximum being 6.06 times the minimum. ZWWW (Urumqi Diwopu International Airport) and ZBHH (Hohhot Baita International Airport) represented relatively higher temporal betweenness centrality than other indicators, playing an important central role in the network. However, ZGSZ (Shenzhen Bao'an International Airport) had a higher temporal degree of centrality than other indicators.

Keywords: temporal network; Chinese airport network (CAN); multi-layer temporal network model (MTNM); network characteristics indicator; power distribution

0 引言

2022年,中国(不含港澳台地区)民航客运吞吐量25 171.32万人次、货邮吞吐量607.61万t,国内运输机场数量达到254个^[1]。中国航空业的快速发展对航空机场网络结构提出了更高要求,使用更加有效的方法分析这一动态网络结构,对预测和优化机场网络运行水平及提高机场网络运行效率和安全性有着重要意义。

时序网络模型将关于事件的时间信息从动态系统移动到网络模型中,即动态发生的底层结构,可更加准确地表征物理系统的特性^[2]。时序网络从静态网络演变而来,与静态网络相比,时序网络同样具有时序路径、时序距离、时序度以及聚类系数等网络特征指标,用于分析动态系统的行为^[3-4]。BARRAT等^[5]通过对每条边赋予权重以区分节点之间发生连接的总次数,但仅考虑了节点间连接次数的重要性,忽略了节点连边的时间属性。KEMPE等^[6]提出了一种时序网络模型,该模型中含有时间标记的连边,连边上的路径需要遵循时间先后顺序。KUMAR等^[7]研究了信息在博客传播中的突发性演化事件,发现时序网络可表征动态网络的异质性,即事件在时间维度分布的不均匀特性。CASTEIGTS等^[8]提出一种新的Time-Varying graphs框架来研究时序网络属性的演变。ROSVALL等^[9]通过将动态系统研究的时间窗口切成几个时序片段,但在各片段中依然将其抽象为静态网络分析。KIM等^[10]提出时序图模型,将动态网络简化为定向流的静态网络,并讨论了时间中心性指标在现实世界中的含义。PAN等^[11]将整个时序网络作为一个整体建模,以时序接近中心性、时序介数中心性为指标研究

了时序网络的中心性,较好地保持了时序网络的特性。张雅宁等^[12]构建了一个时空动态评估模型,分析了传染病背景下各因素对城市韧性的影响。受干扰前后的网络特征指标可有效地反映网络的抗毁性情况^[13-14]。王秋玲等^[15]通过评价高铁时序网络韧性来分析中国高铁系统的结构。郭九霞等^[16]基于历史数据评价了中国机场网络(Chinese Airport Network, CAN)受全球公共卫生事件影响的抗毁性。目前,针对机场网络结构的研究大多将机场网络视为静态网络,而静态网络中节点的连通忽略了连通的持续时间、连通间隔时间、重复连通和连通的时间顺序,因此,高估了连接节点对的数量,低估了路径长度,并未考虑网络的时间属性^[17]。

机场网络其节点和连边的状态会随多种扰动因素影响而变化,如突发事件(极端天气情况、公共安全事件、恐怖袭击事件等),且航路航线的变更也会对网络的拓扑结构产生影响^[18]。机场节点之间的连接依赖于机场间的直飞航班,航班的时间属性就显得尤为重要,然而,静态网络无法反映节点和连边随时间出现和消逝的过程。鉴于此,笔者拟提出一种多层时序网络模型(Multi-layer Temporal Network Model, MTNM),采用功率谱分析(Power Spectral Density, PSD)方法,为网络时间切片提供依据,并将切片后得到的子网络按时间排列,形成多层网络模型,在各层网络内部使用时序网络理论分析,以期真实反映动态系统的网络结构特性。

1 MTNM及网络特征指标

1.1 求解时序样本数据周期

构建MTNM模型,需确定每层网络的时间切片长度,其值的选取目前仍无固定方法^[19]。因此,通

过 PSD 方法分析机场航班数据的时间特征,求解时间数据的固有周期,具体步骤如下:

步骤 1:对于 CAN,其时间属性来自于航班数据的时间参数(即航班的起飞时间,总飞行时间,降落时间)。预处理航班数据,将获取到的网络数据按 $\Delta t_q (q = 1, 2, \dots, Q)$ (Q 为正整数) 的间隔切分(多次试验选取不同的 Δt_q 值),对应第 q 次试验,网络被切为 $H = T / \Delta t_q$ 个片段,对应地将整个网络图 G 切分为片段图 G_1, G_2, \dots, G_H 。

步骤 2:求解平均聚类系数 $C(h)$ 。将 $G_h, h \in (0, H)$ 抽象成静态网络,计算每个片段的平均聚类系数 $C(h)$,绘制平均聚类系数曲线图。

步骤 3:傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)。将平均聚类系数 $C(h)$ 进行快速 FFT,得到 $F(k)$ 。

步骤 4:PSD。为消除节点数量影响,取 $P(k) = \frac{1}{M} |F(k)|^2$, M 为整个时间序列的采样点数量,作为此片段的功率谱的估计值,分析每个 Δt_q 对应的频率分布,取功率值最大的点对应的频率作为其固有周期。

整个数据周期性求解过程见下式:

$$C(h) \xrightarrow{\text{FFT}} F(k) \xrightarrow{\text{PSD}} P(k) = \frac{1}{M} |F(k)|^2 \quad (1)$$

1.2 建立机场时序邻接矩阵

机场时序邻接矩阵定义:

1) 机场节点。 N 为网络中所包含的机场节点集, $N = 1, 2, \dots, n$ 。

2) 边集合 E_T 为包含航班运行间属性的连边集合,即 $E_T = \{E_T^{[1,1]}, E_T^{[1,2]}, \dots, E_T^{[i,j]}, \dots, E_T^{[n,n]}\}$ 。式中 $E_T^{[i,j]}$ 为在时间段 T 中节点 i 到节点 j 对应边的时间属性集合。

3) 机场时序网络邻接矩阵 G_T 。

$$G_T = \begin{pmatrix} E_T^{[1,1]} & E_T^{[1,2]} & \dots & E_T^{[1,j]} & \dots & E_T^{[1,n]} \\ E_T^{[2,1]} & E_T^{[2,2]} & \dots & E_T^{[2,j]} & \dots & E_T^{[2,n]} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_T^{[i,1]} & E_T^{[i,2]} & \dots & E_T^{[i,j]} & \dots & E_T^{[i,n]} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_T^{[n,1]} & E_T^{[n,2]} & \dots & E_T^{[n,j]} & \dots & E_T^{[n,n]} \end{pmatrix} \quad (2)$$

节点 i 到节点 j 所包含的全部航班运行时间集合,包含 2 种情况。

当节点 i, j 之间有 s 次直飞航班时:

$$E_T^{[i,j]} = [(t_{i,j}^1, \sigma_{i,j}^1), (t_{i,j}^2, \sigma_{i,j}^2), \dots, (t_{i,j}^s, \sigma_{i,j}^s)] \quad (3)$$

式中: $t_{i,j}^s$ 为从节点 i 到节点 j 对应的第 s 次航班起飞时刻; $\sigma_{i,j}^s$ 为从节点 i 到节点 j 对应的第 s 次航班的运行时间。

当节点 i, j 之间有没有直飞航班时:

$$E_T^{[i,j]} = 0 \quad (4)$$

1.3 机场 MTNM

机场网络作为典型的时序网络,节点和连边随时间变化而变化,根据时序数据周期将网络按周期进行切片并分层表达,这样既保证了每层网络结构的完整性,也可根据数据规模灵活调整层数,提高模型的适用性。其实质是将时序网络中研究数据的总时间 U 按其固有周期切分为相应层数,并将对应的时间属性增加到每层网络中,按照时间顺序排列,构建机场 MTNM,各层之间由于航班运行情况不同,其节点间的动态边分布情况也各不相同,各层网络之间为时间流关系,如图 1 所示。

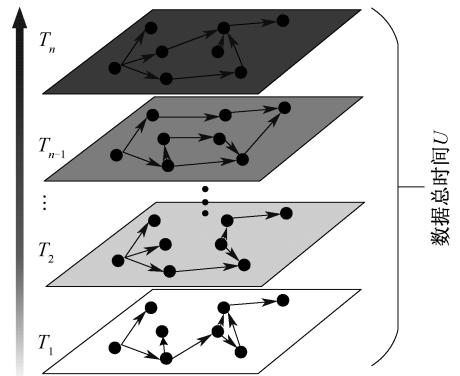


图 1 多层时序网络

Fig. 1 Multi-layer temporal network

1.4 时序网络特征指标

静态复杂网络研究通常只关注网络中的统计参数和拓扑变量,忽略了节点的位置、连边连通的持续时间,节点出现和消失的过程。从时间维度分析,复杂时序网络特征指标包含如下内容。

1) 时序度。在一定时间内,网络中 t 时刻与节点 i 直接相连的边数之和,用 k_t^i 表示。时序网络是一种有向网络,和静态网络相同,将节点 i 第 m 层网络的时序度分为时序入度 $k_{i_t}^{i_m}$ 、时序出度 $k_{i_o}^{i_m}$ 和总时序度 $k_{i_r}^{i_m}$,时序度大的节点表明在各时刻有更多机会与其他节点连接,其重要性也就越高。

$$k_l^i = \sum_{T_{m-1}}^{T_m} k_{l_i}^i \quad (5)$$

$$k_o^i = \sum_{T_{m-1}}^{T_m} k_{l_o}^i \quad (6)$$

$$k_T^i = k_l^i + k_o^i = \sum_{T_{m-1}}^{T_m} k_{l\&o}^i \quad (7)$$

式中: $T_m (m=1,2,\dots,z)$ 为第 m 个观察周期(即第 z 层网络), z 为正整数; $\sum_{T_{m-1}}^{T_m} k_{l\&o}^i$ 为在 T_m 内节点 i 的时序出度与时序入度之和。

2) 平均时序距离。在时序网络中, 时序距离 τ_{ij} 指节点 i 到达节点 j 的时序路径所消耗时间。在 t_1 时刻, 若节点 i 到节点 j 的时序路径消耗时间为 σ_{i1} , 则时序路径为 $\tau_{ij}(t_1) = \sigma_{i1}$, 若此路径为观测时间 T_m 内节点 i 与 j 之间的唯一路径, 则:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t) = (t_1 - t) + \sigma_{i1} & \text{当 } \forall t < t_1 \text{ 时} \\ \tau_{ij}(t) = \infty & \text{当 } \forall t > t_1 \text{ 时} \end{cases} \quad (8)$$

但在一个观测周期内从节点 i 到节点 j 的事件可能发生多次, 则会出现多条时间路径, 例如从北京到上海在一天中有多个航班, 因此, 选用整个观测期间的平均时间距离 $\bar{\tau}_{ij}$ 来表征时序路径, 即从机场节点 i 到达机场节点 j 的平均时序距离为:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{ij}^m = & \frac{1}{T} \left[t_{i,j}^1 \left(\frac{t_{i,j}^1}{2} + \sigma_{i,j}^1 \right) + (t_{i,j}^2 - t_{i,j}^1) \left(\frac{t_{i,j}^2 - t_{i,j}^1}{2} + \sigma_{i,j}^2 \right) \right. \\ & + \dots + (t_{i,j}^s - t_{i,j}^{s-1}) \left(\frac{t_{i,j}^s - t_{i,j}^{s-1}}{2} + \sigma_{i,j}^s + \right. \\ & \left. \left. (T - t_{i,j}^s) \left(\frac{T - t_{i,j}^s}{2} + t_{i,j}^1 + \sigma_{i,j}^1 \right) \right) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

式中: $t_{i,j}^1$ 为第一个航班的起飞时刻; $\sigma_{i,j}^1$ 为该航班运行时间; T 为航班周期。

3) 时序网络中心性指标。

①时序度中心性指一个节点的时序度越高时, 其在时序网络中的影响力也就越大, 时序度中心性越高。为了在网络规模变化的情况下准确衡量节点的重要性, 需要标准化处理节点度中心性, 使其不受网络规模的影响, 故节点 i 的时序度中心性为:

$$D_T^i = \frac{1}{N_s - 1} \sum_{i=0}^T k_{l\&o}^i \quad (10)$$

式中 N_s 为节点集合所包含的节点个数。

②时序介数中心性是评价节点“桥梁”作用的指标, 通过计算网络中任意节点对的最短路径经过某节点的数量来定量衡量, 节点时序介数中心性为:

$$B_k^{T_m} = \sum_{j \neq i} \sum_{\substack{k \neq j \\ k \neq i}} \frac{d_{i,j}^k}{d_{i,j}^k} \quad (11)$$

式中: $\sum_{j \neq i} \sum_{\substack{k \neq j \\ k \neq i}} d_{i,j}^k$ 为在观察时段 T_m 中经过 k 节点的最短路径数量; $\sum_{j \neq i} \sum_{\substack{k \neq j \\ k \neq i}} d_{i,j}^k$ 为网络中所有节点对的最短路径总数。

③时序接近中心性指某一节点到其他节点的时序距离, 节点时序接近中心性高则说明该节点到其他节点的时序距离小, 则节点 i 的时序接近中心性为:

$$C_i^{T_m} = \frac{N_s - 1}{\sum_{j, i \neq j} \tau_{ij}} \quad (12)$$

式中 $\sum_{j, i \neq j} \tau_{ij}$ 为 i 到所有其他节点的最短平均时序距离之和。

2 实例验证与网络特征分析

采集国内 245 个机场的客运航班时刻数据, 采样时间为 2021 年 10 月 1 日—14 日, 构建时序复杂网络, 共 245 个节点, 76 727 条连边。根据航班数据周期性试验结果, 并考虑避免跨时间切片航班出现, 将每层网络切片时间确定为, 从第 1 天 5 h—第 2 天 5 h(24 h 制) 的连续 24 h。通过使用 Gephi 软件可视化处理 MTNM, 其中, 机场节点大小以时序度值排序, 时序度值越大其节点越大颜色越深, 机场间连线表示机场间的通航情况, 如图 2 所示。

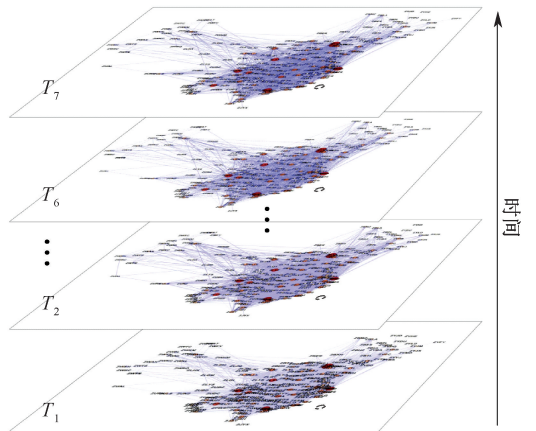


图 2 中国机场多层时序网络

Fig. 2 Multi-layer temporal network for Chinese airport

2.1 机场网络数据周期性分析

通过统计分析客运航班信息可知: 国内客运航班运行时间大多为 2~3 h, 为保证数据周期内分析

尽量少出现跨试验间隔情况,首先从每天 0 h 开始采用 2~3 h 的间隔,对数据进行切片试验,计算每个时序片段的平均聚类系数,生成不同时间间隔对应的聚类系数序列,绘制聚类系数曲线图,随后运用功率谱分析得到功率谱图,通过识别功率值最大点,确定信号周期。

图 3 为按时间间隔分别为 1、4、6 和 16 h 进行切片试验后得到的结果。当 $\Delta t = 1$ h 时,大功率值的点数和噪声点较多,周期性不明显,需要进一步增大间隔进行试验。当 $\Delta t = 4$ h 时,识别到功率值最大

点对应周期为 $t = 24.263$ h,此时干扰点较少。为防止该结果是试验切片后产生的偶发情况,需继续增加试验间隔,并进一步验证。当 $\Delta t = 6$ h 时,识别到功率值最大点所对应周期为 $t = 23.566$ h,主信号突出明显,已达到试验目的。为验证当切片间隔超过 6 h 时,试验结果是否均一样,选取结果 $\Delta t = 16$ h 继续试验,结果显示此时信号点过于稀疏,只能表现出少量的数据,没有较好的代表性。由此可得,航班数据的固有周期 24 h,符合航班运行的实际情况和人类的作息规律。

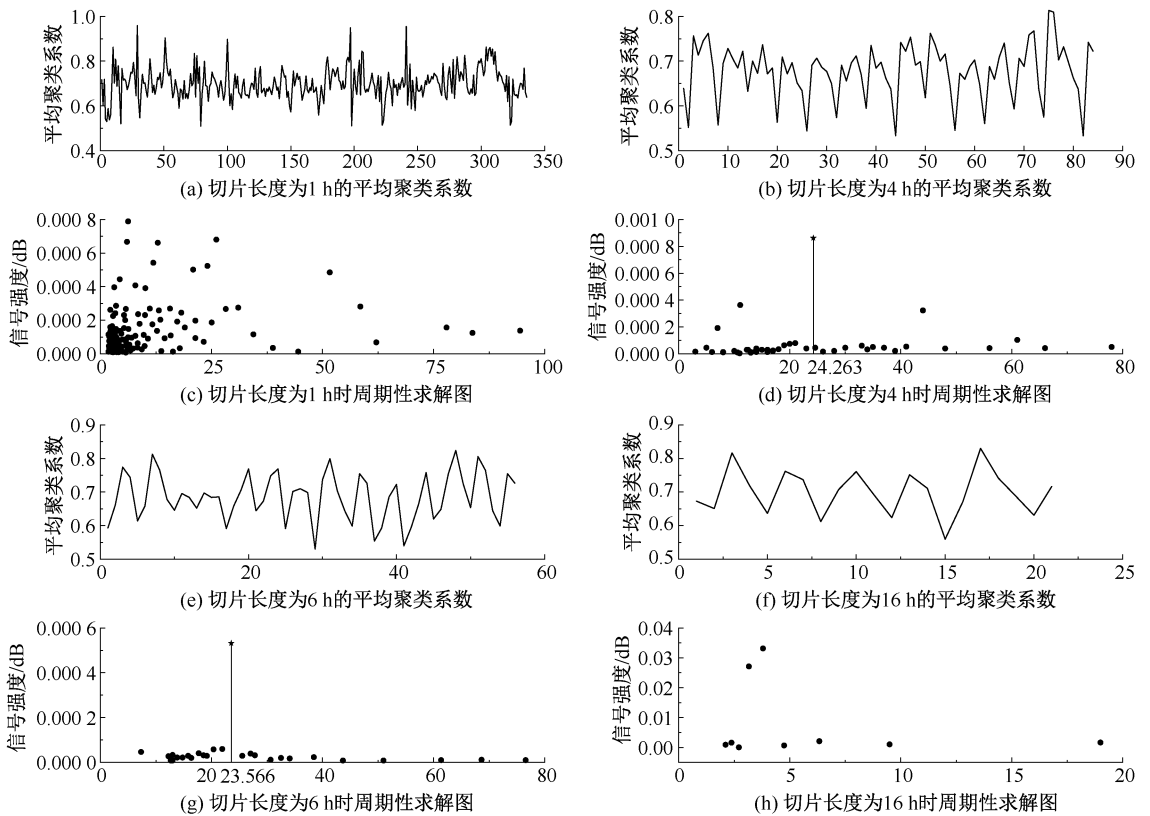


图 3 机场网络数据周期性分析

Fig. 3 Periodic analysis of airport network data

2.2 时序网络特征分析

根据式(5)一(7)计算中国机场多层时序网络特征指标中节点的时序入度/出度,可得出其概率分布。设 k_i^m 为第 m 层网络节点 i 的时序入度值, $P(k_i^m)$ 为第 m 层网络中节点时序入度值为 k 的机场节点概率,其幂律分布函数为:

$$P(k_i^m) = A_i^m k^{\lambda_i^m} + B_i^m \quad (13)$$

同理,其时序出度幂律分布函数为:

$$P(k_o^m) = A_o^m k^{\lambda_o^m} + B_o^m \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)可得各层网络的时序入度/出度幂律分布函数,见表 1。其对应的时序网络节点时序出度与入度概率分布拟合情况如图 4、图 5 所示。

从图 4、图 5 看出,幂律分布函数可对各连续时间周期内机场节点的时序出度、入度分布情况进行很好的拟合。因此,中国机场时序网络的时序度分布符合幂律分布规律,即大部分节点具有较小的度值,极少数节点具有较大度值,表明中国机场时序网络具有明显的无标度网络的特性。

表 1 各网络层时序入度、出度幂律分布函数

Table 1 Power-law distribution function of temporal indegree and outdegree of each network layer

网络层	时序出度幂律分布函数	时序入度幂律分布函数
第 1 层	$P(k_o^{i1}) = 0.1777_0 k_0^{-0.9108_0^1} + 0.0032_0^1$	$P(k_i^{i1}) = 0.1817_1 k_1^{-0.9281_1} + 0.00029_1^1$
第 2 层	$P(k_o^{i2}) = 0.1672_0 k_0^{-0.9782_0^2} + 0.00366_0^2$	$P(k_i^{i2}) = 0.1627_1 k_1^{-0.9497_1^2} + 0.00383_1^2$
第 3 层	$P(k_o^{i3}) = 0.1773_0 k_0^{-0.9213_0^3} + 0.00366_0^3$	$P(k_i^{i3}) = 0.1043_1 k_1^{-0.763_1^3} + 0.0032_1^3$
第 4 层	$P(k_o^{i4}) = 0.154_0 k_0^{-0.8354_0^4} + 0.00319_0^4$	$P(k_i^{i4}) = 0.1366_1 k_1^{-0.8874_1^4} + 0.00355_1^4$
第 5 层	$P(k_o^{i5}) = 0.1155_0 k_0^{-0.8075_0^5} + 0.0029_0^5$	$P(k_i^{i5}) = 0.1157_1 k_1^{-0.7975_1^5} + 0.00336_1^5$
第 6 层	$P(k_o^{i6}) = 0.1056_0 k_0^{-0.8175_0^6} + 0.0031_0^6$	$P(k_i^{i6}) = 0.1247_1 k_1^{-0.8932_1^6} + 0.00365_1^6$
第 7 层	$P(k_o^{i7}) = 0.127_0 k_0^{-0.8677_0^7} + 0.00331_0^7$	$P(k_i^{i7}) = 0.127_1 k_1^{-0.8592_1^7} + 0.00362_1^7$

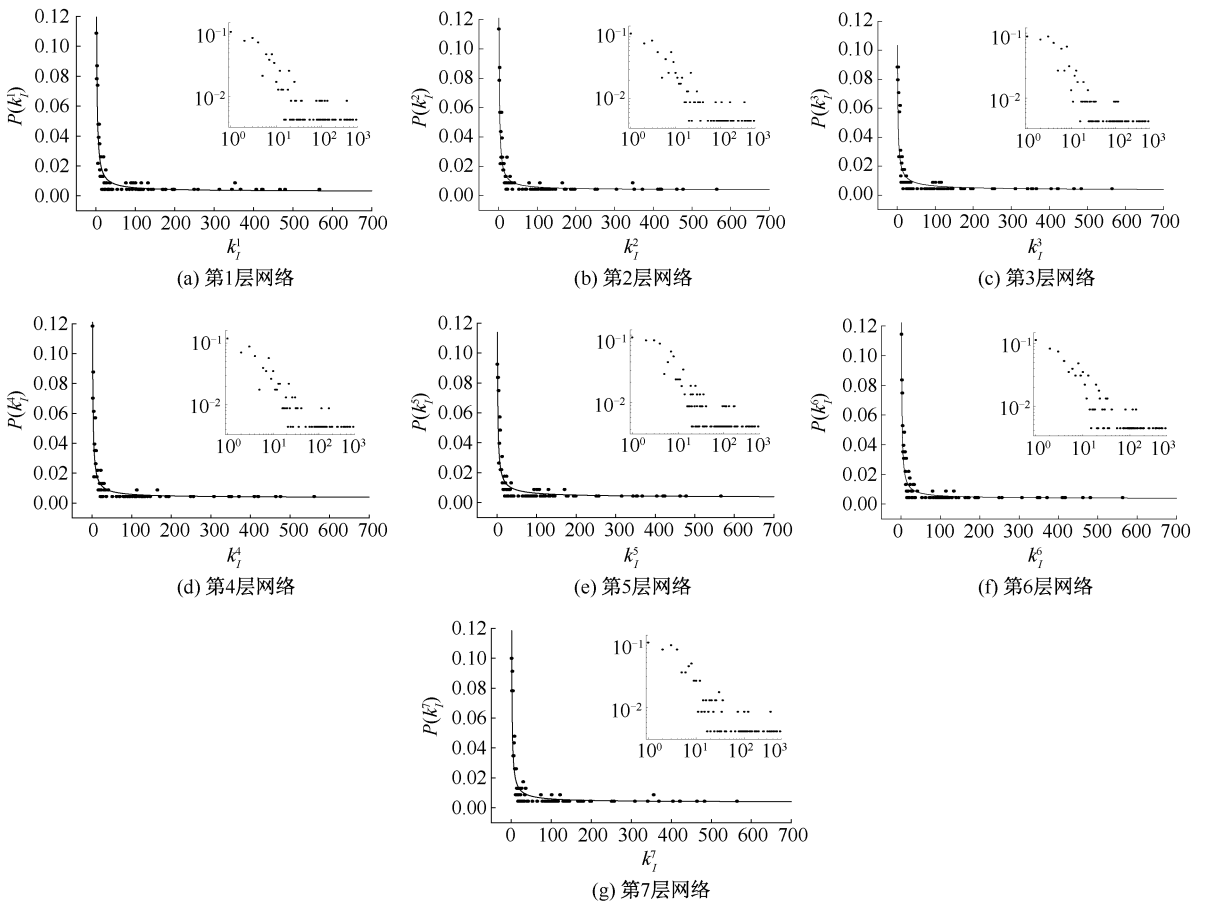


图 4 各层网络时序入度概率分布拟合

Fig. 4 Temporal outdegree probability distribution fitting

2.3 平均时序距离

根据式(9)计算各机场节点之间平均时序距离,其分布如图6所示。可以看出,中国机场时序网络的平均时序距离值差距较大,用机场四字代码表示时序距离较小的前5,即:广州白云机场(ZGGG)-

海口美兰机场(ZJHK)其平均时序距离值为178.246 min,德宏芒市国际机场(ZPMS)-昆明长水机场(ZPPP)其平均时序距离值为184.375 min,ZJHK-ZGGG其平均时序距离值为186.145 min,ZPPP-ZPMS其平均时序距离值为186.927 min,

表 2 时序度中心性值

Table 2 Temporal degree centrality value

机场	时序出度中心性	时序出度中心性	时序度中心性
ZGGG	2.480 3	2.476 0	4.956 3
ZSPD (上海浦东)	2.091 7	2.096 1	4.187 8
ZBAA (北京首都)	2.034 9	2.039 3	4.074 2
ZGSZ	1.851 5	1.847 2	3.698 7
ZBAD (北京大兴)	1.821 0	1.838 4	3.659 4
ZPPP	1.777 3	1.777 3	3.554 6
ZUCK (重庆江北)	1.607 0	1.602 6	3.209 6
ZLXY (西安咸阳)	1.545 9	1.541 5	3.087 3
ZUTF (成都天府)	1.541 5	1.541 5	3.083 0
ZSSS (上海虹桥)	1.519 7	1.506 6	3.026 2

分别为 ZGGG、ZSPD、ZBAA、ZGSZ、ZBAD、ZPPP、ZUCK、ZLXY、ZUTF、ZSSS。

根据式(11)和式(12)计算节点的时序介数中心性和时序接近中心性,其关系如图7和图8所示。由图7和图8可知:大部分节点的时序度中心性和时序接近度中心性与时序介数中心性的关系可以表征为正相关的特性,但也存在部分异质点,如 ZWWW、ZBHH、ZGSZ,分析其原因如下:

1) ZWWW 是国内 8 大区域枢纽航空港之一,而新疆区域面积广阔,自治区内各支线机场与国内其他省份之间开通的航线数量相对较小,因此,旅客若有跨省出行需求,需经 ZWWW 中转。ZBHH 是内蒙古自治区的省会机场,是省内第一大航空枢纽机场,其他中小机场航线大多与 ZBHH 连接,经由 ZBHH 中转是最佳路线。而且 2 机场所处省份人口和经济发展水平相比东南沿海城市较低,航班量也较低,使得其出现时序度中心低而介数中心性很高的反常现象。

2) 对于 ZGSZ,深圳经济发展快航班需求量大且与多城市都有直飞航班,所以时序度中心性大,但其位置在东南沿海,省内有广州机场等多座大型枢纽机场可与全国其他机场进行连通,选择经此节点转到其他机场节点并非最短路径,所以其时序度中心较高而介数中心性较低。

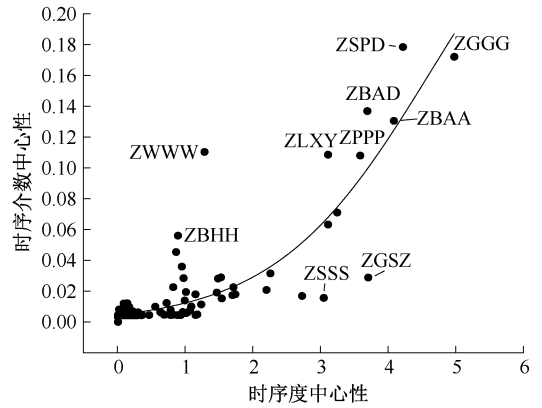


图 7 时序度中心性、介数中心性对比

Fig. 7 Comparison of temporal degree centrality and betweenness centrality

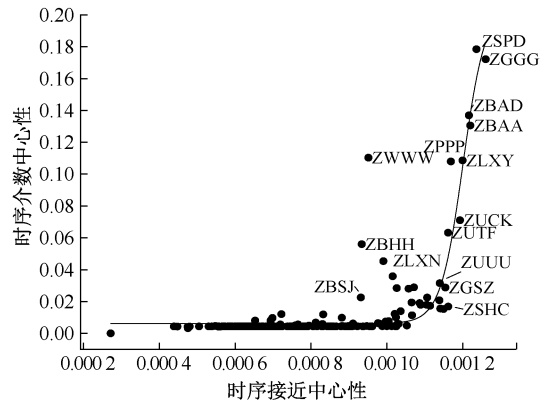


图 8 时序接近中心性、介数中心性对比

Fig. 8 Comparison of temporal closeness centrality and betweenness centrality

3 结论

1) 中国机场时序网络结构呈现出和静态网络相似的无标度网络特性,少数节点拥有较高时序度值,大部分节点拥有较低的时序度值。

2) 中国机场时序网络的平均时序距离值差距较大,最大值是最小值的 6.06 倍,影响平均时序距离的因素包含机场节点之间的航班架次、航班时间分配均匀程度以及航班运行时间。

3) 通过分析机场节点的中心性发现,机场节点时序度中心性和时序接近度中心性越高,时序介数中心性越大。但也存在部分异质点如乌鲁木齐地窝堡国际机场、呼和浩特白塔国际机场、深圳宝安国际机场,异质点的存在主要是由于机场所处的特殊地理位置和经济发展情况所导致。

参 考 文 献

- [1] 中国民用航空局. 2022 年民航业发展统计公报[EB/OL]. (2023-05-30). <https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/202305/P020230530540257290212.pdf>.
- [2] HOLME P, SARAMAKI J. Temporal networks [J]. *Physics Reports*, 2012, 519(3): 97-125.
- [3] COSTA L F, RODRIGUES F A, TRAVIESO G, et al. Characterization of complex networks: a survey of measurements [J]. *Advances in Physics*, 2007, 56(1):167-242.
- [4] BARRAT A, BARTHELEMY M, VESPIGNANI A. *Dynamical processes on complex networks* [M]. London: Cambridge University Press, 2008:35-47.
- [5] BARRAT A, BARTHELEMY M, PASTOR-SATORRAS R, et al. The architecture of weighted complex networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(11):3 747-3 752.
- [6] KEMPE D, KLEINBERG J, KUMAR A. Connectivity and inference problems for temporal networks [C]. *Proceedings of the Thirty-Second Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 2000:504-513.
- [7] KUMAR R, NOVAK J, RAGHAVAN P, et al. On the bursty evolution of blogspace [C]. *Proceedings of the 12th International Conference on World Wide Web*,2003:568-576.
- [8] CASTEIGTS A, FLOCCINI P, QUATTROCIOCCI W, et al. Time-varying graphs and dynamic networks [J]. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 2012, 27(5): 387-408.
- [9] ROSVALL M, BERGSTROM C T. Mapping change in large networks [J]. *PloSOne*, 2010, 5(1): DOI:10.1371/journal.pone.0008694.
- [10] KIM H, ANDERSON R. Temporal node centrality in complex network[J]. *Physical Review E*, 2012, 85(2): DOI: 10.1103/PhysRevE. 85. 026107.
- [11] PAN R K, SARAMÁKI J. Path lengths, correlations, and centrality in temporal networks [J]. *Physical Review E*,2011, 84(1): DOI: 10.1103/PhysRevE. 84. 016105.
- [12] 张雅宁,司鹤. 城市综合韧性能力时空动态评估模型:以传染病为例[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(10): 39-45.
ZHANG Yaning, SI Hu. Spatial-temporal dynamic evaluation model of urban comprehensive resilience: taking infectious diseases as an example[J]. *China Safety Science Journal*,2023,33(10):39-45.
- [13] HOLME P, KIM B J, YOON C N, et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 65(5): DOI: 10.1103/PhysRevE. 65. 056109.
- [14] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. *Nature*, 2000, 406(6794):378-382.
- [15] 王秋玲,柯宇昊,高诣民,等. 灾害时空属性下高铁时序网络韧性分析[J]. *西安电子科技大学学报*, 2022, 49(4): 156-166.
WANG Qiuling, KE Yuhao, GAO Yimin, et al. Analysis of resilience of the high-speed rail temporal network under disaster temporal and spatial attributes[J]. *Journal of Xidian University*,2022, 49(4):156-166.
- [16] 郭九霞,杨宗鑫,夏正洪,等. 新冠疫情前后机场加权网络抗毁性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(8): 91-97.
GUO Jiuxia, YANG Zongxin, XIA Zhengong, et al. Invulnerability analysis for airport weighted networks before and after COVID-19[J]. *China Safety Science Journal*,2022,32(8): 91-97.
- [17] HOLME P. Modern temporal network theory: a colloquium [J]. *The European Physical Journal B*, 2015,88(9):1-30.
- [18] JANIĆ M. Reprint of modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81:77-92.
- [19] 陈诗,任卓明,刘闯,等. 时序网络中关键节点的识别方法研究进展[J]. *电子科技大学学报*, 2020, 49(2): 291-314.
CHEN Shi, REN Zhuoming, LIU Chuang, et al. Identification methods of vital nodes on temporal networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2020, 49(2):291-314.

作者简介: 郭九霞 (1981—),女,山西安泽人,博士,教授,主要从事复杂系统韧性、空中交通管理等方面的研究。E-mail:didiyes@163.com。

