



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2303611

引用格式:张兆宁,孟凡淑.基于复杂网络的多机场航班延误传播分析[J].科学技术与工程,2024,24(18):7913-7920.

Zhang Zaoning, Meng Fanshu. Complex network-based analysis of multi-airport flight delay propagation[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(18): 7913-7920.

# 基于复杂网络的多机场航班延误传播分析

张兆宁, 孟凡淑

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

**摘要** 为了研究多机场间航班延误的传播机理,将机场作为节点,航线作为边构成复杂网络。通过分析传染病传播过程与机场间航班延误传播过程的相似性,借鉴经典传染病传播模型(classical infectious disease transmission, SIR)的思想,并考虑不同机场间延误传播的差异,提出机场重要度的概念,构建了多机场航班延误传播模型。对多机场航班延误传播过程的仿真结果表明:在多机场网络中,初始延误机场不同以及机场重要度不同,延误传播效果不同,但延误传播规律保持不变。对网络中重要机场进行相应管控会使发生延误的机场数量峰值下降,且按照介数值确定需进行管控的重要机场,网络中发生延误机场数量峰值下降率最大。可见,该模型可以客观反映多机场间航班延误传播的动态过程和变化规律,并可为延误的预防和恢复提供理论依据。

**关键词** 多机场; 复杂网络; 大面积航班延误; 延误传播

**中图法分类号** V355;

**文献标志码** A

## Complex Network-based Analysis of Multi-airport Flight Delay Propagation

ZHANG Zhao-ning, MENG Fan-shu

(Air Traffic Management Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**[Abstract]** In order to study the transmission mechanism of flight delays among multiple airports, airports were taken as nodes and routes as edges to form a complex network. By analysing the similarity between the transmission process of infectious diseases and the transmission process of flight delays between airports, drawing on the idea of SIR (classical infectious disease transmission model), and considering the differences in the transmission of delays between different airports, the concept of airport importance was proposed, and the multi-airport flight delay transmission model was constructed. The simulation results of the multi-airport flight delay propagation process show that in the multi-airport network, the delay propagation effect is different for different initial delay airports and different airport importance, but the delay propagation law remains unchanged. The control of important airports in the network will reduce the peak number of delayed airports, and the peak number of delayed airports in the network will decrease the most when the important airports to be controlled are determined according to the median value. It can be seen that the model can objectively reflect the dynamic process and changing law of flight delay propagation among multiple airports, and can provide theoretical basis for delay prevention and recovery.

**[Keywords]** multi-airport; complex network; large area flight delay; delay propagation

由于空中交通流量不断增加,以及恶劣天气等不确定因素的存在,空域容量与空中交通流量之间的不匹配问题日益突出,航班延误现象频繁发生。航班延误不仅会引起空中交通拥堵,还会在多个机场之间产生传播效应,形成连锁反应。因此,研究多个机场之间航班延误的传播,明确不同机场之间延误传播的范围以及机场间延误传播的机理和规律,有助于对机场的航班延误进行预测与评估,以便采取相应的缓解措施。

目前,中外针对航班延误传播已有不少研究成

果。Wang等<sup>[1]</sup>提出了一个将可控因素和随机因素分开分析的模型,阐释了航班延误传播的特征。Liu等<sup>[2]</sup>基于贝叶斯网络建立了航班延误传播模型,分析了不同状态下的到达延误和航班取消对延误的影响。Pyrgiotis等<sup>[3]</sup>提出了一个用于研究大型机场延误传播复杂现象的分析排队和网络分解模型,该模型计算各个机场因局部拥堵而造成的延误。Kafle等<sup>[4]</sup>研究了上游航班延误波及下游航班的问题,建立了一种解析模型来量化飞机的延误波及和新生成的延误。Baspinar等<sup>[5]</sup>提出了一个基于流行病

收稿日期: 2023-05-17 修订日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(2233209); 国家重点研发计划(2020YFB1600103)

第一作者: 张兆宁(1964—),男,汉族,河北滦南人,博士,教授。研究方向:空中交通管理。E-mail: zhaoning@263.net。

投稿网址: www.stae.com.cn

传播过程的延误波及模型,该模型能够定义新的性能指标和航空运输网络元素的相互作用率,分析了不同层面网络上的延误波及行为。Que 等<sup>[6]</sup>建立了一个链式航空网络模型,研究了航班初始延误和延误传播的关系。Borsky 等<sup>[7]</sup>研究了突发天气事件和慢性天气事件对离港延误的影响。Montfort 等<sup>[8]</sup>研究了航空公司规模和航班延误的关系。Cai 等<sup>[9]</sup>提出了一个有关延误传播动力学的复杂网络观点,构建了以机场为节点的时空网络,用于计算航班延误的数量和存在延误传播的机场的数量。李俊生等<sup>[10]</sup>提出了基于贝叶斯网络的航班延误传播模型,分析航班延误从局部到全局的传播。荣耀等<sup>[11]</sup>研究了飞行资源对航班延误的影响,定量分析了航班延误问题并提出了相关建议。曹卫东等<sup>[12]</sup>建立了一个贝叶斯网络模型,研究了同一飞机连续航班的延误波及问题。杨秀云等<sup>[13]</sup>建立了一个航班延误总动态排队模型,分析了不同因素对航班延误的影响程度和频率。王晶华等<sup>[14]</sup>基于 SIR 模型的基本思想,建立了大面积航班延误传播模型,为预防和恢复提供理论依据。张兆宁等<sup>[15]</sup>为研究机场大面积航班延误在本场及本场与目的机场之间的传播过程,建立了 O-D 场延误传播的状态空间模型。吴薇薇等<sup>[16]</sup>采用了一个基于贝叶斯网络的比例风险回归模型,研究了飞行资源分离对衔接航班延误的影响。尉炜等<sup>[17]</sup>通过将不同天气类型转换为机场容量概率分布,定量分析了在恶劣天气影响下不同等级机场之间的航班延误波及程度。许保光等<sup>[18]</sup>针对航空公司的航班延误波及问题,分析了机场对于航班延误的影响。张兆宁等<sup>[19]</sup>基于 SEIR 模型的思想建立了大面积航班延误传播模型,分析了大面积航班延误发生时节点的变化规律。

综上所述,现有的关于延误传播问题的研究多从航班角度进行考虑,从机场角度考虑延误在多机场网络中的传播还处于初步阶段,对于延误传播的研究中尚未考虑不同机场间延误传播概率和作用强度的差异,因此,需要进一步研究机场间延误传播的内在机理和变化规律。

因此,对于以机场为节点、航线为边的多机场网络,考虑航班在网络中航行时的延误时间,根据不同机场间航班延误时间确定边的权值,构建多机场航班延误网络。

现通过分析网络中延误传播过程与传染病传播过程的相似性,借鉴经典的传染病传播模型(classical infectious disease transmission, SIR)的建模思想,并考虑不同机场间延误传播的差异,提出机场重要度的概念,构建多机场航班延误传播模型。该

模型旨在分析初始延误机场不同以及机场重要度不同对延误在网络中传播过程的影响,并进一步研究机场间延误传播规律。

## 1 多机场航班延误网络

### 1.1 多机场航班延误网络的构建

#### 1.1.1 复杂网络理论在多机场网络分析中的适用性

复杂网络<sup>[20-21]</sup>是一门跨学科的研究领域,专注于研究自然和社会中的复杂系统,分析其各种拓扑结构、探索现象产生机制、研究动力学行为与控制方法,并将其应用于科学研究和工程实践。

多机场网络作为在社会生活中发挥着巨大作用的现实网络结构,无论是网络结构、网络功能还是与外界环境的相互作用都极其复杂,是现实生活中典型的复杂网络。随着多机场网络化的趋势日趋明显,人们逐渐发现对单个机场孤立地开展研究,往往难以指导生产实践的开展。只有将各个机场连接在一起,构造出整个机场网络,弄清各个机场在机场网络中的结构与功能,才能更好地揭示机场网络的运行机理。结构、功能、影响因素的复杂性使多机场网络整体性研究具有较大难度,传统的技术方法往往不能很好地解决这一问题,复杂网络技术正好是为解决上述问题应运而生的技术手段。因此,复杂网络技术在多机场网络分析中具有较强的适用性。

#### 1.1.2 多机场航班延误的传播过程

机场作为空中交通网络的节点,是构成整个网络的重要组成部分。每个航班将机场作为始发点,在此完成整个航程的准备工作,但机场容量有限,所能容纳的飞机数量与单位时间内接待的航班数量均有限。因此,出现一个航班延误,必然导致机场容量与需求不平衡,打乱原有的安排,导致其他航班无法正常离港,使该机场发生航班。同理,起飞延误也会影响到下一个抵达机场,在该延误航班的目的机场,与该航班实际降落时间一致的其他正常航班可能由于该延误航班占用机场资源而无法在同一时刻降落,不得不推迟起飞,从而导致延误,由此,延误又传播至另一个起飞机场。

#### 1.1.3 多机场航班延误网络的构建

根据空中交通的运行及其特征,以机场作为节点( $N$ ),航线为边( $E$ ),并根据航班延误传播的方向确定边的方向,构建多机场航班延误网络模型。即,如果机场  $i$  ( $i \in N$ ) 发生的延误会影响机场  $j$  ( $j \in N$ ),那么边  $E(i, j)$  的权值  $w_{i,j} = 1$ , 否则为  $w_{i,j} = 0$ 。由此,得到多机场网络初始邻接矩阵

$A(A \in \mathbf{R}^{N \times N})$ 。

考虑延误在机场间传播可能性和作用强度的差异,以航班在不同机场间航行时产生的延误时间大小定义边的权值,构建多机场航班延误网络。一般来说,航班延误时间越长,代表延误传播的概率越高,影响的机场数越多,权值越大。

《民用航空运输飞行正常管理规定》将航班延误定义为航班实际到港轮挡时间或出港撤轮挡时间,晚于计划到港时间或出港时间超过 15 min 的情况。因此,延误 15 min 以下的航班,可以认为是正常运行的,不需要对旅客进行赔偿或安排,而延误 15 min 以上的航班,则可能给旅客带来不便和损失,需要对旅客进行相应的服务和补偿。所以,从延误超过 15 min 起定义网络的权值,本文研究以 20 min 作为阈值,区分不同程度的延误。

设带权值的多机场航班延误网络的邻接矩阵为  $B(B \in \mathbf{R}^{N \times N})$ 。权值与延误时间的具体对应关系如表 1 所示。

表 1 权值与延误时间的关系

权值 $w_{i,j}$	延误传播概率	延误时间/min
1	极高	[75, $\infty$ )
0.8	高	[55, 75)
0.5	中	[35, 55)
0.2	低	[15, 35)

## 1.2 机场重要度指标

在实际运行过程中,当机场经常性发生延误或发生延误的可能性比较高时,相关部门通常会对该机场进行管控,以降低其发生延误的概率或提高延误恢复概率,如增加备用飞机或者缩短停留时间等。由于管控的存在以及机场本身的特点,不同机场发生延误和延误恢复的概率通常不同,由此提出机场重要度的概念,并用多机场网络中机场的度值及度分布、机场的聚类系数和机场的介数作为评定机场在网络中的重要度的指标。

参考复杂网络中描述节点特征参数的定义,将多机场网络的机场重要度指标做如下定义。

(1) 机场的度值及度分布。在多机场网络中,机场的总度值是指机场起飞和降落的航班总量。其中由机场起飞的航班数量为机场的出度值;在机场降落的航班数量为机场的入度值。

度分布是指网络中不同度值的机场数占总机场数的百分比,用于描述网络中不同度数的分布情况。将  $N$  个机场中度值为  $k$  的机场数记为  $\text{Freq}(k)$ ,则计算度分布  $P(k)$  为

$$P(k) = \frac{\text{Freq}(k)}{N} \quad (1)$$

对于多机场网络,度分布代表了机场之间航班运行延误时间的分布情况。如果一个机场的度数很高,那么该机场就有更多的航班与其他机场相连,即该机场更容易受到其他机场延误时间的影响。

(2) 机场的聚类系数。机场的聚类系数反映机场的一级近邻间的集团性质,近邻间联系越紧密,机场的聚类系数越高。将机场  $i$  与相邻  $n$  个机场间实际运行的延误航班数量记为  $e_i$ ,而  $e_i$  与这些相邻机场间最大可能运行的延误航班数量的比值,称为机场  $i$  的聚类系数,记作

$$C_i = \frac{2e_i}{n(n-1)} \quad (2)$$

多机场网络中,聚类系数用来描述机场之间联系的紧密程度,即机场之间延误时间相似性的高低。

(3) 机场的介数。机场的介数是一个重要的全局几何量参数。在多机场网络中,将任意机场  $j$  到机场  $k$  的所有最短路径的权值求和记为  $\sigma_{j,k}$ ,机场  $j$  到机场  $k$  的最短路径中经过机场  $i$  的路径权值求和记为  $\sigma_{j,k}(i)$ ,两者比值称为机场  $i$  的介数,记为

$$B(i) = \sum_{j \neq k} \frac{\sigma_{j,k}(i)}{\sigma_{j,k}} \quad (3)$$

多机场网络中,机场的介数值也可以用来描述机场之间联系的紧密程度,表示为机场之间延误时间相似性的高低。

## 2 多机场航班延误传播模型

### 2.1 多机场航班延误传播模型与改进 SIR 模型的相似性

经典 SIR 模型认为网络节点状态包括易感染状态 S(susceptible)、已感染状态 I(infected)和恢复状态 R(recovered)。传播过程为:S 与 I 接触,以概率  $\alpha$  被感染;而 I 以概率  $\mu$  恢复为 R 且不再感染。改进的 SIR 模型<sup>[20]</sup>有别于以往的 SIR 模型改进研究,引入了改进感染率和改进恢复率的概念,当控制节点时,该节点的感染率变为  $\beta$ ,恢复率变为  $\gamma$ 。

在多机场网络中,机场的状态分为 3 种:发生延误状态、未发生延误状态以及延误恢复状态,在特定条件下,机场的 3 种状态之间可以相互转化。并且在实际运行中,对重要度较高的机场,机场相关部门通常会采取相应管控措施,降低其发生延误概率或者提高延误恢复效率,进而一定程度上减少大面积航班延误的发生。

通过上面分析,航班延误在多机场间的传播过程与传染病传播过程具有相似性。具体地,多机场航班延误的传播与传染病传播过程的类似特点如下。

(1)起飞机场将延误传播到目的机场。起飞机场为发生延误的机场,相当于 SIR 模型中的已感染者 I;目的机场相当于 SIR 模型中的易感染者 S,延误由 I 传播到 S。

(2)目的机场的延误不会反向传播到起飞机场造成影响,这相当于 SIR 模型中的已感染者 I 不会传染其他已感染者。

(3)机场的延误状态恢复后,不会再被该延误事件影响(但是可能被其他延误事件影响),这相当于 SIR 模型中的移出者 R,延误恢复后的机场将从这个系统中移出。

而上面这些特征决定着传播过程,因此可以引入传染病传播过程模型的思想到航班延误的传播过程分析,从而给出多机场航班延误传播模型。

## 2.2 多机场航班延误传播模型

### 2.2.1 模型假设

(1)研究的机场总数不变,总数为  $N$ 。设时刻  $t$  网络中未延误机场、延误机场、延误恢复机场数量分别为  $S(t)$ 、 $I(t)$  和  $R(t)$ 。

(2)未延误机场被延误机场影响的概率为  $\alpha$ ,延误机场的延误恢复概率为  $\mu$ 。

(3)重要机场被发生延误的机场影响的概率设为  $\beta$ ,延误恢复概率设为  $\gamma$ 。

### 2.2.2 模型构建

以机场为节点的航班延误的传播过程如图 1 所示。图 1 反映了机场状态之间的转化关系。第一阶段,占比为  $p$  的机场(重要机场)被其他延误机场影响的概率为  $\beta$ ,其余机场被延误机场影响的概率为  $\alpha$ ,其中  $\beta < \alpha$ 。第二阶段,当占比为  $p$  的机场(重要机场)发生延误后,延误恢复的概率为  $\gamma$ ,而其余机场延误恢复的概率为  $\mu$ ,其中  $\gamma > \mu$ ,机场延误恢复后将不会再次发生延误。

设初始时刻延误机场和未延误机场数量分别是  $S_0(S_0 > 0)$  和  $I_0(I_0 > 0)$ ,延误恢复后的机场数量为  $R_0(R_0 = 0)$ 。

由假设(1)显然有

$$S(t) + I(t) + R(t) = N \quad (4)$$

由假设(1)、假设(2)和假设(3),给出传播模

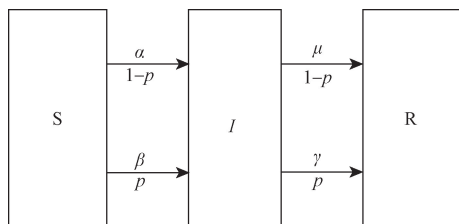


图 1 航班延误传播过程

Fig. 1 Flight delay propagation process

型为

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{d(t)} = -\alpha(1-p)S(t)I(t) - \beta pS(t)I(t) \\ \frac{dI(t)}{d(t)} = \alpha(1-p)S(t)I(t) + \beta pS(t)I(t) - \mu(1-p)I(t) - \gamma pI(t) \\ \frac{dR(t)}{d(t)} = \mu(1-p)I(t) + \gamma pI(t) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $dS(t)/d(t)$ 为每单位时间内发生延误机场的数量变化; $dI(t)/d(t)$ 为未延误机场的数量变化; $dR(t)/d(t)$ 为延误恢复机场的数量变化; $\alpha$ 与航路设计、机场规划等系统结构有关; $\mu$ 与机场及终端区的容量、流量管理效率有关;而 $\beta$ 和 $\gamma$ 与机场的延误缓解措施有关。

## 3 算例分析

选取美国 30 个主要机场一天的航班数据进行分析,并以每条边的平均延误时间确定网络权值大小。只考虑符合航班延误定义的数据,以此探究各个机场之间的延误传播情况,部分数据如表 2 所示。

表 2 航班平均延误时间

Table 2 Average delay time of flights

起飞机场	目的机场	平均起飞延误时间/min	平均到达延误时间/min
v <sub>9</sub>	v <sub>1</sub>	18	25
v <sub>9</sub>	v <sub>4</sub>	28	38
v <sub>5</sub>	v <sub>4</sub>	31	32
v <sub>2</sub>	v <sub>14</sub>	18	28
v <sub>1</sub>	v <sub>14</sub>	74	48
v <sub>26</sub>	v <sub>8</sub>	59	26
v <sub>29</sub>	v <sub>7</sub>	47	15
v <sub>26</sub>	v <sub>7</sub>	59	29
v <sub>1</sub>	v <sub>3</sub>	47	25
v <sub>2</sub>	v <sub>8</sub>	46	58
v <sub>5</sub>	v <sub>29</sub>	71	77
v <sub>28</sub>	v <sub>1</sub>	120	127
v <sub>10</sub>	v <sub>26</sub>	83	65
v <sub>12</sub>	v <sub>24</sub>	119	154
v <sub>9</sub>	v <sub>4</sub>	39	27
v <sub>1</sub>	v <sub>12</sub>	136	126
v <sub>20</sub>	v <sub>1</sub>	83	87
v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>	112	93
v <sub>30</sub>	v <sub>7</sub>	251	241
v <sub>20</sub>	v <sub>14</sub>	25	17
v <sub>1</sub>	v <sub>29</sub>	23	24
⋮	⋮	⋮	⋮

### 3.1 多机场航班延误网络

根据航班的延误时间,以 20 min 作为阈值,确定多机场航班延误网络的权值大小,经计算,该网络的带权邻接矩阵  $B$  为

$B =$

0	1	0.5	0.8	0.5	0.2	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.8	0	0.2	0.8	0	0	0	0.2	0.2	0	0.2	0.2	1	0	0.8	0.2			
0	0	0	0	0	0.8	0.2	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0.2	0.5	0.5	0	1	0.2	0	0	0.5	0.2	0	0.5	0.2		
0	1	0	0	0.8	0	0	0.2	0.2	0	0	0.2	0.5	0	0.5	0	0.8	0.2	0	0.2	0	0.8	0	1	0.2	0	0	0	0.2	0		
0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0.2	1	0.8	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	1	0	0		
0	0.2	0	0.5	0	0	0.5	0	0	0	0	1	0	0	0.2	0.2	0.2	0	1	0	0.8	0	0.8	0.8	0	0	1	0.5	0.8	0		
0	0	1	1	0.5	0	0.5	0	0.5	0	0	0	0	0.5	1	0.8	0	0	0	0.5	0.2	1	0.8	0	0	0	0.2	0	1	0.5		
0.8	0	1	0.5	0	0	0	0	0	0	1	0	0.5	0	0	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0.5	0.5	0.2	0	0.5	0	0	0.8	0	0.2	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5		
0.5	0.8	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0	1	0	
1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0.2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	1	0	0	0.5	0	
0	0	0.2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.8	0	
0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
0	0	0	0.2	0.8	0	0.8	0	0.2	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	
1	0.2	0	0.2	0	0	0.5	1	0	0.2	0	0	1	0	0	0	0	0.5	0	1	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0.2	0	
0	0.2	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0.5	1	0	0.5	0.2	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.8	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	1	1	0.5	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0.8	0	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	1	0	0.2	0	0	0	0	0.2	0	0	0.5	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.8	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0.5	
0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0.8	0.8	0	0.5	0	0.5	0	0	0.5	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0
0	0.5	0	0	0.5	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0
1	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.2	0.2	0	0	0	0	0
0	0	0	0.2	0	0	0.5	1	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(6)

根据网络的带权邻接矩阵  $B$ , 构建多机场航班延误网络, 并使用 Gephi 软件模拟该网络, 网络图如图 2 所示, 计算该网络中机场的重要度指标, 指标值如表 3 所示。由表 3 可以得知, 该多机场航班延误网络, 度分布不均且不服从正态分布, 不属于规则网络和随机网络; 取双对数后不符合线性关系, 不属

表 3 机场重要度指标值

Table 3 Airport importance indicator value

机场	入度	出度	总度	聚类系数	介数
v <sub>1</sub>	22	21	43	0.394 928	0.091 753
v <sub>2</sub>	18	22	40	0.426 667	0.055 146
v <sub>3</sub>	20	24	44	0.451 087	0.063 970
v <sub>4</sub>	16	15	31	0.484 211	0.029 851
v <sub>5</sub>	16	19	35	0.424 901	0.054 428
v <sub>6</sub>	15	21	36	0.400 362	0.057 686
v <sub>7</sub>	18	15	33	0.436 759	0.043 105
v <sub>8</sub>	12	14	26	0.460 784	0.025 929
v <sub>9</sub>	15	13	28	0.522 876	0.021 488
v <sub>10</sub>	6	12	18	0.583 333	0.003 551
v <sub>11</sub>	8	6	14	0.555 556	0.003 514
v <sub>12</sub>	8	6	14	0.545 455	0.005 677
v <sub>13</sub>	16	16	32	0.455 263	0.034 087
v <sub>14</sub>	12	15	27	0.612 500	0.014 748
v <sub>15</sub>	9	14	23	0.540 441	0.013 046
v <sub>16</sub>	12	12	24	0.623 810	0.010 837
v <sub>17</sub>	10	7	17	0.634 615	0.003 299
v <sub>18</sub>	13	12	25	0.566 667	0.014 915
v <sub>19</sub>	10	12	22	0.375 000	0.024 815
v <sub>20</sub>	9	7	16	0.554 545	0.004 588
v <sub>21</sub>	6	7	13	0.277 778	0.007 940
v <sub>22</sub>	9	5	14	0.583 333	0.003 039
v <sub>23</sub>	5	5	10	0.589 286	0.002 103
v <sub>24</sub>	12	11	23	0.434 066	0.022 605
v <sub>25</sub>	11	5	16	0.568 182	0.005 215
v <sub>26</sub>	13	10	23	0.580 952	0.010 257
v <sub>27</sub>	7	5	12	0.625 000	0.002 915
v <sub>28</sub>	4	4	8	0.738 095	0.000 727
v <sub>29</sub>	13	11	24	0.535 948	0.017 623
v <sub>30</sub>	8	7	15	0.627 273	0.006 315

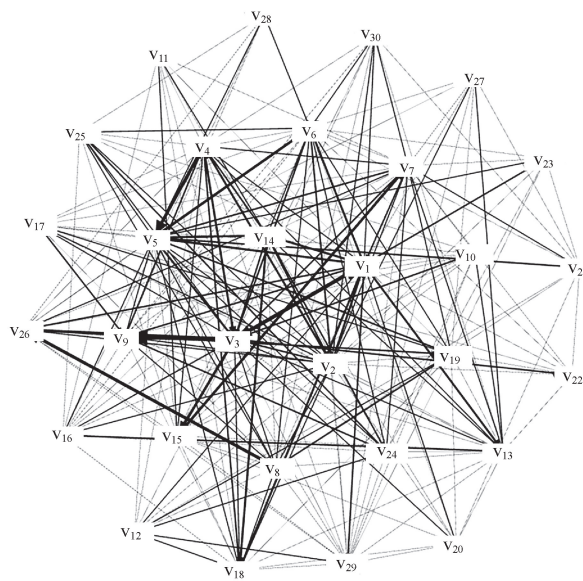


图 2 多机场航班延误网络

Fig. 2 Multi-airport flight delay network

于无标度网络;网络直径是 3,平均聚集系数为 0.52,平均最短路径仅为 1.611,属于小世界网络。

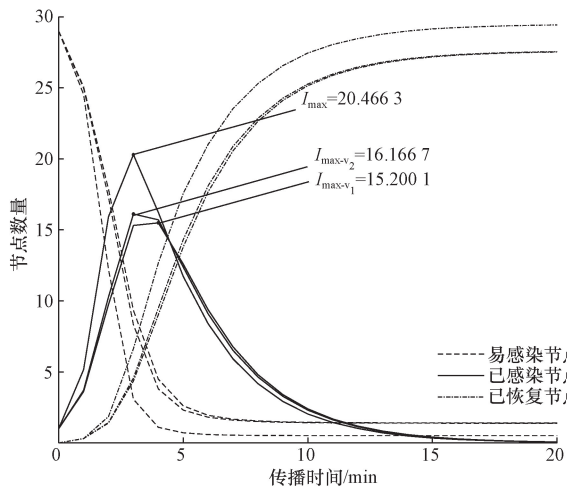
总度值排序前三的机场分别为  $v_3$ 、 $v_1$ 、 $v_2$ ,入度值排序前三的机场分别为  $v_1$ 、 $v_3$ 、 $v_2$ ,出度值排序前三的机场分别为  $v_3$ 、 $v_2$ 、 $v_1$ ,聚类系数排序前三的机场分别为  $v_{28}$ 、 $v_{17}$ 、 $v_{30}$ ,介数排序前三的机场分别为  $v_1$ 、 $v_3$ 、 $v_6$ 。

### 3.2 初始延误机场不同时延误在网络中的传播规律

通过分析 30 个机场之间的航班延误数据,发现每个机场都可能成为初始延误机场。因此,将这 30 个机场依次作为初始延误机场,观察相同情况下发生延误的机场数量、未延误的机场数量和延误后恢复的机场数量变化。设定延误传播率  $\alpha = 0.5$ ,延误恢复率  $\mu = 0.2$ ,进行 1 000 次的传播结果取均值,如图 3 所示,可见发生延误机场数量的最大值约为 20.466 3。

图 3 显示了初始延误机场不同时延误在网络中的传播过程,可以发现,虽然初始延误机场不同,但延误在网络中传播规律都是一致的:未延误机场数量逐渐减少,延误恢复机场数量逐渐增加,延误机场数量先增多后减少,并最终趋于稳定。

考虑延误在机场间传播的差异性,分别将机场  $v_1$  和机场  $v_2$  作为网络中的重要机场进行管控,设管控后机场  $v_1$  和机场  $v_2$  发生延误的概率为 0.1,延误恢复概率为 0.9。在相同条件下进行模拟,结果显示,当对机场  $v_1$  进行管控后,网络中延误机场数量的峰值降为 15.200 1;当对机场  $v_2$  进行管控后,网络中延误机场数量的峰值降为 16.166 7,这表明对不



$I_{\max}$  为网络中已感染节点数量的峰值;  $I_{\max-v_1}$  为管控节点  $v_1$  后网络中已感染节点数量的峰值;  $I_{\max-v_2}$  表示管控节点  $v_2$  后网络中已感染节点数量的峰值

图 3 网络中各状态机场数量变化趋势

Fig. 3 Trends in the number of airports in each state of the network

同机场进行管控时延误在机场间传播效果不同,并且对机场进行管控,可以有效降低网络中发生延误机场数量的峰值。基于此,下面进一步分析了机场重要度不同时延误在网络中传播的规律。

### 3.3 机场重要度不同时延误在网络中的传播规律

按照机场重要度指标值,分别选取不同机场作为重要机场,探究重要机场不同时延误在网络中的传播规律以及网络中发生延误机场数量的峰值变化情况。

(1)度值排序前三的机场( $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ )为重要机场时延误在网络中的传播情况。

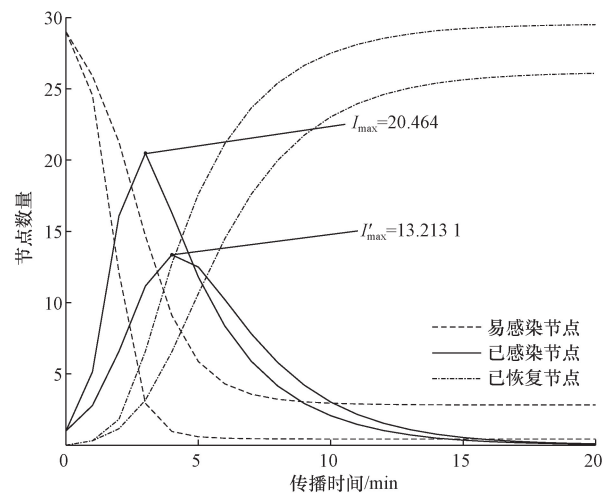
由图 4 可知,度值排序前三的机场为重要机场时,延误在网络中传播规律为:未延误机场数量逐渐减少,延误恢复机场数量逐渐增加,延误机场数量先增多后减少,并最终趋于稳定。网络中延误机场数量的峰值从 20.464 降为 13.213 1,峰值下降率为 54.88%。

(2)聚类系数排序前三的机场( $v_{28}$ 、 $v_{17}$ 、 $v_{30}$ )为重要机场时延误在网络中的传播情况。

由图 5 可知,聚类系数值排序前三的机场为重要机场时,延误在网络中传播规律为:未延误机场数量逐渐减少,延误恢复机场数量逐渐增加,延误机场数量先增多后减少,并最终趋于稳定。网络中延误机场数量的峰值从 20.378 3 降为 15.214 5,峰值下降率为 33.94%。

(3)介数值排序前三的机场( $v_1$ 、 $v_3$ 、 $v_6$ )为重要机场时延误在网络中的传播情况。

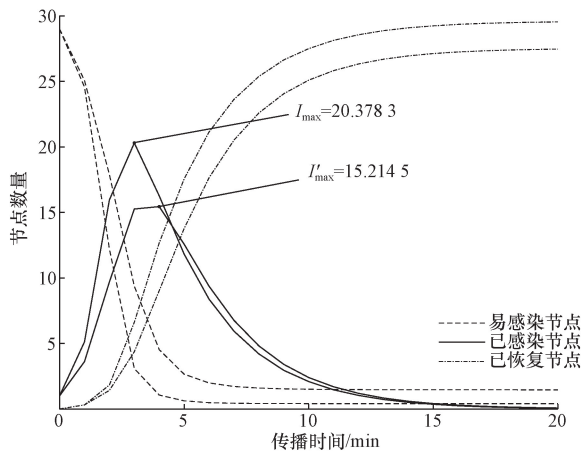
由图 6 可知,介数值前三的机场为重要机场时,延误在网络中传播规律为:未延误机场数量逐渐减



$I_{\max}$  为网络中已感染节点数量的峰值;  $I'_{\max}$  为管控节点后网络中已感染节点数量的峰值

图 4 网络中各状态机场数量变化趋势

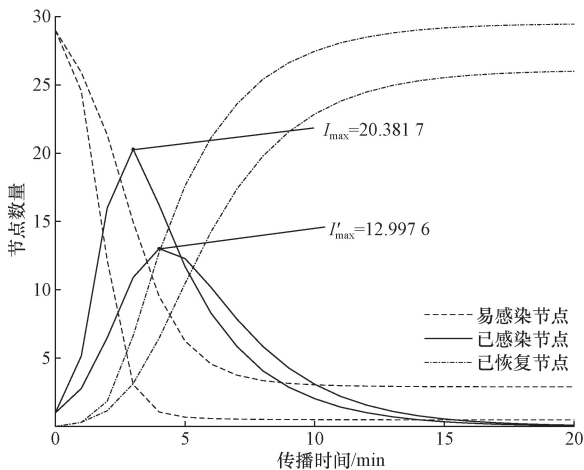
Fig. 4 Trends in the number of airports in each state of the network



$I_{\max}$  为网络中已感染节点数量的峰值;  $I'_{\max}$  为管控节点后网络中已感染节点数量的峰值

图5 网络中各状态机场数量变化趋势

Fig. 5 Trends in the number of airports in each state of the network



$I_{\max}$  为网络中已感染节点数量的峰值;  $I'_{\max}$  为管控节点后网络中已感染节点数量的峰值

图6 网络中各状态机场数量变化趋势

Fig. 6 Trends in the number of airports in each state of the network

少,延误恢复机场的数量逐渐增加,延误机场数量先增多后减少,并最终趋于稳定。网络中延误机场数量的峰值从 20.3817 降为 12.9976,峰值下降率为 56.81%。

因此,机场重要度不同时,延误在网络中传播的规律依然保持不变,即未延误机场数量逐渐减少,延误恢复机场数量逐渐增加,延误机场数量先增多后减少,并最终趋于稳定。通过对比得知,将重要度指标为介数的机场作为重要机场时,可以使延误机场数量的峰值下降率达到最大,这说明介数值是确定网络中重要机场的最优指标。改变重要机场发生延误概率和延误恢复概率,上述结论依然成立。

## 4 结论

首先构建了以机场为节点、航线为边,并且以机场间航班航行延误时间作为边权的多机场航班延误网络。进而通过分析网络中延误传播过程与传染病传播过程的相似性,借鉴经典的传染病传播模型(SIR)的建模思想,并考虑不同机场间延误传播的差异,提出了机场重要度的概念,构建了多机场航班延误传播模型。最后,通过数据进行算例分析,得到以下结论。

(1)多机场航班延误网络直径为3,平均聚集系数为0.52,平均最短路径为1.611,属于小世界网络。

(2)在多机场网络中,初始延误机场不同以及机场重要度不同,延误传播效果不同,但延误传播规律保持不变。

(3)引入机场重要性的概念,对重要机场进行管控,可以使网络中延误机场数量的峰值下降,且按照介数值确定重要机场时,网络中延误机场数量峰值的下降率最大,这说明介数值是确定网络中重要机场的最优指标。

综上,通过研究机场间航班延误的传播机理,对网络中重要机场进行管控,可以有效抑制延误在网络中的传播过程,为进一步探究大面积航班延误控制问题提供了一定的理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] Wang P T R, Schaefer L A, Wojcik A L A. Flight connections and their impacts on delay propagation [C]//Digital Avionics Systems Conference. New Jersey: IEEE, 2003: 1-9.
- [2] Liu Y J, Ma S. Flight delay and delay propagation analysis based on bayesian network [C]//International Symposium on Knowledge Acquisition & Modeling. Wuhan: IEEE, 2008: 318-322.
- [3] Pyrgiotis N, Malone K M, Odoni A. Modelling delay propagation within an airport network [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2013, 27(2): 60-75.
- [4] Kafle N, Zou B. Modeling flight delay propagation: a new analytical-econometric approach [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 93: 520-542.
- [5] Baspinar B, Koyuncu E. A Data-driven air transportation delay propagation model using epidemic process models [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2016, 2016: 1-11.
- [6] Que Z F, Yao H G, Yue W. Simulation analysis of the effect of initial delay on flight delay diffusion [J]. IOP Publishing, 2018, 108(3): 032037.
- [7] Borsky S, Unterberger C. Bad weather and flight delays: the impact of sudden and slow onset weather events [J]. Economics of Transportation, 2019, 18: 10-26.
- [8] Montfort J V, Berg V V D. The total size of an airline and flight delays [J]. Journal of Transport Economics and Policy, 2019, 53

- (2): 150-174.
- [9] Cai Q, Alam S, Duong V N. A spatial-temporal network perspective for the propagation dynamics of air traffic delays[J]. *Engineering*, 2021, 7(4): 89-117.
- [10] 李俊生, 丁建立. 基于贝叶斯网络的航班延误传播分析[J]. *航空学报*, 2008, 29(6): 1598-1604.  
Li Junsheng, Ding Jianli. Analysis of flight delay propagation using bayesian networks [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(6): 1598-1604.
- [11] 荣耀, 王建东. 基于关键飞行资源的航班延误波及 DAG 模型的研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2009 (11): 2243-2247.  
Rong Yao, Wang Jiandong. Research on flight delay propagation DAG based on critical flight resources [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2009 (11): 2243-2247.
- [12] 曹卫东, 贺国光. 连续航班延误与波及的贝叶斯网络分析[J]. *计算机应用*, 2009, 29(2): 606-610.  
Cao Weidong, He Guoguang. Bayesian networks analysis for sequence flight delay and propagation[J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(2): 606-610.
- [13] 杨秀云, 王军, 何建宝. 航班延误关键影响因素及影响程度识别——基于动态排队模型的分析[J]. *统计与信息论坛*, 2014, 29(4): 88-95.  
Yang Xiuyun, Wang Jun, He Jianbao. The identification of flight delay' determinants and their impact degree; based on the analysis of dynamic queues model [J]. *Statistics & Information Forum*, 2014, 29(4): 88-95.
- [14] 王晶华, 张兆宁, 马兰. 基于 SIR 模型的大面积航班延误传播研究[J]. *航空计算技术*, 2017, 47(6): 41-44.  
Wang Jinghua, Zhang Zhaoning, Ma Lan. Study on large-scale flight delay propagation based on infectious diseases model [J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2017, 47(6): 41-44.
- [15] 张兆宁, 王晶华. 机场大面积航班延误传播的状态空间模型[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(31): 241-245.  
Zhang Zhaoning, Wang Jinghua. State space model of airport delay propagation under large-area flight delay [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(31): 241-245.
- [16] 吴薇薇, 张皓瑜, 孟婷婷. 基于飞行资源分离的航班延误传播研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(5): 653-660.  
Wu Weiwei, Zhang Haoyu, Meng Tingting. Flight delay propagation based on flight resource distribution [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50 (5): 653-660.
- [17] 尉炜, 邵荃, 向红奕, 等. 基于复杂网络的恶劣天气对航班延误影响的研究[J]. *航空计算技术*, 2018, 48(2): 48-51, 56.  
Ting Wei, Shao Quan, Xiang Hongyi, et al. Research on impact of bad weather based on complex network on flight delay [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2018, 48(2): 48-51, 56.
- [18] 许保光, 刘倩倩, 高敏刚. 基于机场繁忙程度的航班延误波及分析[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(8): 87-95.  
Xu Baoguang, Liu Qianqian, Gao Mingang. The flight delay propagation analysis based on airport busy state [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(8): 87-95.
- [19] 张兆宁, 张佳. 基于 SEIR 模型的大面积航班延误传播[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(8): 3356-3361.  
Zhang Zhaoning, Zhang Jia. Large-scale flight delays propagation based on SEIR model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(8): 3356-3361.
- [20] Newman M, Barabási A L, Watts D J. *The structure and dynamics of networks* [M]. Princeton; Princeton University Press, 2011.
- [21] Voltes-Dorta A, Rodríguez-Déniz H, Suau-Sanchez P. Vulnerability of the European air transport network to major airport closures from the perspective of passenger delays; ranking the most critical airports [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 96: 119-145.