

基于有向权值网络的航班运行风险传播与控制

王岩韬[✉], 杨志远, 刘 锐, 谢春生

中国民航大学航空公司人工智能民航局重点实验室, 天津 300300

✉通信作者, E-mail: caucwyt@126.com

摘 要 为了分析航班运行风险传播过程,进而有效控制保障飞行安全,基于复杂网络理论,首先参照民航局咨询通告选取机组、航空器、运行环境共 29 个终端因素作为网络节点,统计民航安全监察记录,根据事件中节点关系,构建无向网络;统计前后节点间的作用关系和发生概率,提出一种有向带权的航班运行风险网络;然后,引入改进感染率和改进恢复率概念,构建一种适用于航班运行风险传播分析的改进 SIR(Susceptible-infected-recovered)模型;定义感染起始范围,最后采取多参数控制方式,大规模计算该有向带权网络的传播和控制过程. 结果表明:有向网的平均最短路径为 1.788,属于小世界网络;参照使用民航常规管控措施,有向网节点感染下降幅度可达到 37.4%;对入度值排序前 3 或前 4 的节点控制后,感染节点峰值下降率高达 50.6% 和 58.1%,网络传播抑制明显. 结果证实:在该航班运行风险有向带权网络中,按入度值控制节点对抑制风险传播最为有效.

关键词 航空运输;航班运行风险;复杂网络;有向带权网络;改进 SIR 模型

分类号 N945.24; U8; V355.2

Flight operation risk propagation and control based on a directional-weighted complex network

WANG Yan-tao[✉], YANG Zhi-yuan, LIU Kun, XIE Chun-sheng

Airlines Artificial Intelligence Key Laboratory of Civil Aviation Administration, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

✉ Corresponding author, E-mail: caucwyt@126.com

ABSTRACT The flight operation risk is equal to the occurrence probability multiplied by the severity of the consequences. Flight operation risks include many types, forms, and numbers, and they frequently change with conditions. In the face of this complex system, through principle analysis, the risk formation mechanism research, and the spreading process, a scientific risk management and control method can be constructed. Based on the risk management technology, an informative and automated management control system can be developed and applied. The overall safety level of flight operations will be effectively improved. To analyze and study the flight operations risk propagation and then effectively control flight safety based on the complex network theory, 29 terminal factors were selected as network nodes according to the Civil Aviation Administration's advisory notice, initially including the flight cabin crew, civil aviation aircraft, and operating environment. Civil aviation safety monitoring records from 2009 to 2014 were counted, and an undirected network was constructed based on node relationships. The relationships and occurrence probability between the nodes were counted, and a directed and weighted network was constructed. The concepts of improved infection rate and improved recovery rate were introduced, and an improved susceptible-infected-recovered (SIR) model suitable for flight operation risks was proposed. Finally, the initial infection range was clearly defined, and a multi-parameter control method was adopted. For directed networks, large-scale propagation and control simulations were calculated. The results indicate that the average shortest path of the directed network was 1.788, which belonged to the small-world network. The directed network infection node decreased to 37.4% with conventional control measures. After controlling top three or four nodes of the entry degree value sequence, the infected nodes peak drop rate was the biggest,

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1933103)

as high as 50.6%/58.1%, the risk spread in the network was significantly suppressed. The results confirm that controlling nodes based on the entry degree value is the most effective method to suppress risk propagation in the directed and weighted network.

KEY WORDS air transportation; flight operation risk; complex network; directional weighted network; improved SIR model

航班运行风险是发生概率与后果严重程度的乘积^[1],其影响种类、形式、数目繁多,且随条件不断改变。面对此复杂系统,通过对风险形成机理、传播过程的原理性分析和研究,从而构建科学的风险管控方法,是提高安全水平的必要措施。国外民航在安全管理研究多集中于风险评估,2000年左右已有实用性成果^[2-3]。国内关于民航风险的研究成果最早见于1999年,孙瑞山教授^[4]基于系统工程构建了航空公司安全评估理论和方法,而后于2013年研发了飞行安全风险评估工具^[5]。王岩韬团队^[6]于2014年以航班运行多因素分析为基础,提出了一套具有普遍性、实用性的风险体系,并用于致险因素推断^[7]。后续,采用机器学习多算法协作方式,于2019年将评估精度提升至95%^[8];并且实现了对起飞、巡航、降落等不同飞行阶段的短时预测^[9],尝试了一周内的短期预测^[10-12]。而后,张继凯^[13]针对不同风险等级提出航班差异化控制策略,并于深圳航空公司实践验证。至此,风险分析与量化评估等应用技术问题已得到较好解决,而风险产生条件、传播过程、控制消散方法等机理性问题尚缺乏研究。

在上述研究和方案中,存在一种通用假设,即风险因素间关系呈现树状结构。然而,运行风险实则与气象条件、机组资质、机场设施、障碍物、飞机维修甚至政策保障等多因素相关,而各因素间通过逻辑关系互相作用,错综交汇最终形成网络结构。欧美对于民航领域中复杂网络理论已有一定研究,具有代表性的成果包括:Belkoura等^[14]通过航空网络拓扑结构,从机场、机型、航空公司三方面分析了网络动态特性,并提出网络结构优化方法;Voltes-Dorta等^[15]构建了以机场为节点,航线为边的航空网络;近年在国内,武喜萍等^[16]研究了空中交通流量网络的静态特性、抗毁性和延误传播模型;王兴隆等^[17]与齐雁楠和高经东^[18]基于空管规则与网络层间逻辑关系,建立相依网络模型;吴明功等^[19]则采用独立主元分析在线识别空中交通复杂性;王岩韬团队^[20]于2019年首次将复杂网络应用于航班运行风险研究,使用SIR(Susceptible-infected-recovered)病毒传播模型分析了风险传播阈值和变化规律,但其使用的无向网络忽略了风险节点间实则较多的单向作用关系。

进一步分析和总结发现:①节点间存在单向和双向作用关系;②不同节点间传播的可能性和作用强度差异较大;③以往研究中传播初始点随机选择,是有悖于真实情况的。这三点问题需要改进和解决。

鉴于以上,依据民航规章选取风险要素,统计安全监察数据用以改造无向网络,首次构建了航班运行风险的有向加权网络;然后,引入改进感染率和改进恢复率概念,提出一种改进SIR模型;定义传染起始范围,综合安全管理方法和网络参数分析,制定多种控制方案,并进行大量仿真计算;最后,以风险传播感染数量作为评价标准,旨在得到具备理论支撑和实践价值的风险管控措施。

1 复杂网络节点选取

网络是指由节点和连接节点的边组成,构建航班运行风险网络,就是将运行中的风险因素作为节点,因素之间的相互关系作为连线。鉴于民航局咨询通告AC-121-FS-2015-125于2015年在全国实施至今,已有54家运输航空公司实践多年且验证有效^[21],因此选取其作为风险分析体系,具体包括机组、航空器和运行环境3方面共5级风险因素。其中,终端因素可与运行数据一一对应,可作为后文建网数据依据,因此将第5级的终端因素作为网络节点,如表1。其中,节点编号1~13隶属机组风险类,节点14~26隶属运行环境风险类,节点27~29隶属航空器风险类。

以节点1为例:机组级别一般分为学员、二副、一副、机长、教员和检查员。经由2009年至今的民航不安全事件分析可得,当机组级别差距过大时交叉检查效果会显著降低,甚至出现过技术级别高的正驾驶操作不符程序,副驾驶已发现却不敢提示的事例。因此,级别搭配不合理是潜在风险点。而节点2:因现今主力机型的系统提示是全英文的,国内主干和国际航路的空地通话也使用英文,通话能力对安全影响明显;国际民航英语等级低于3级的机组英语通话能力很弱,民航不安全事件记录中发生过飞行员听不懂提醒的状况。

2 无向与有向网络构建

2.1 网络构建

根据文献[7]中2009—2014年民航安全监察

表1 风险网络节点

Table 1 Risk network node

Node type	Node number	Node name	Node type	Node number	Node name
Crew risk factors	1	Crew qualification level matching	Operational environment risk factors	14	Temporary air diversion
	2	Crew English level		15	Controller's radiotelephone communication level
	3	Crew collaboration		16	Large areas of thunderstorms, moderate or severe icy areas, and turbulence in the airway
	4	Crew technical characteristics		17	Rain, snow, fog, and other weather in airport
	5	Captain flight experience		18	Runway friction effect
	6	Captain's familiarity with the airport		19	Airport landing standards
	7	Copilot flying experience		20	Flight procedure complexity
	8	Copilot's familiarity with the airport		21	Approach terrain and obstacles
	9	Transient fatigue		22	Airport equipment and facilities status
	10	Cumulative fatigue		23	Runway length and slope
	11	Special passenger pressure		24	Airport temporary restriction notice
	12	Flight inspection		25	Destination airport busyness
	13	Change route before takeoff		26	Alternate airport busyness
Aircraft risk factors	27	Landing approach involves equipment failure			
	28	Aircraft failure rate			
	29	Navigation database encoding			

中特殊事件、工作差错及不安全事件总计 25401 起的统计资料,当事件记录中显示节点间存在作用关系时,即进行连线。举例,如描述中出现了“因...空中临时改航,使得机组操纵时间拉长,...短期疲劳程度加重”,这种情况则认为节点 14 和 9 这两个因素间是相关的,进行连线;反之,没有相关记录,就不连线^[22]。连线后发现,节点 28 和 29 是网络外的孤立节点。分析可知,现今运行规章已将节点 29 作为起飞基本条件之一,即航班飞行均满足此条件,失去了风险产生和传播的可能

性,因此予以清除.关于节点 28,当前民航主力机型故障率极低,如最为临界的一台发动机故障发生概率仅为 10^{-6} .鉴于统计数据中没有体现出影响,也同样删除.由此,构建该无向网络对应的邻接矩阵 N ,建立网络如图 1 所示.限于数据年限,未包含 737MAX 数据.而 737MAX 因设计缺陷,存在操纵失控状态,本质上是不满足适航标准的,是没有资格进入运行范畴的.此外,鉴于数据未反映出发动机故障率的影响,则使用其发生概率 10^{-6} 作为无影响区间判断的阈值.

[illegible]

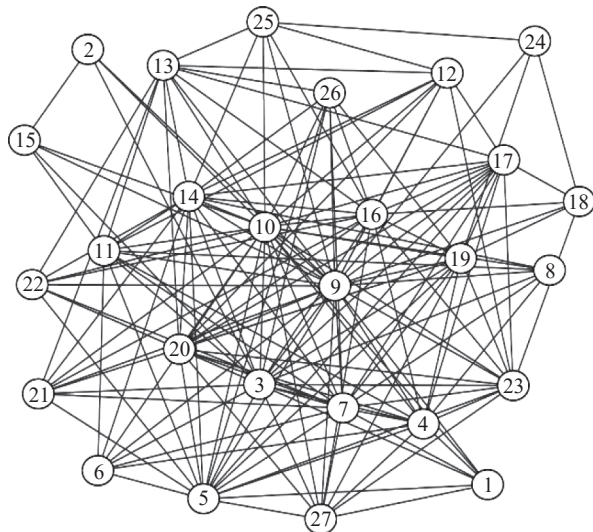


图1 无向网络
Fig.1 Undirected network

因实际运行中风险因素间作用具有方向,且不同节点间传播概率差别很大. 因此,在无向网基础上,构建有方向、带权值的网络,步骤为:

(1)定义传播方向. 如前述“...空中临时改航,使得短期疲劳程度加重”,即设为节点14单向指向节点9.

(2)定义权值. 在步骤(1)的基础上,统计不安全事件中前一节点影响下一节点的频次,并转化为单向影响发生概率. 根据频次及对应概率区间,定义有向网权值,具体如表2.

(3)专家评议. 来自国航、南航、东航等国内6家航空公司,共18位飞行、机务、运控专家对步骤(1)和(2)进行轮流评议,再集中讨论各组意见,最终决定删去与业务逻辑有悖的连线14条,定义权值取值区间如表2. 最终建立邻接矩阵 M , 构建有向网络如图2.

表2 权值设置规则

Table 2 Weight setting rules

Weight setting	Probability of previous node affecting the next node	Statistical frequency/probability
1	High probability	Statistical frequency ≥ 100 , occurrence probability $\in (3.94 \times 10^{-3}, 1]$
0.8	More likely	$[50, 100; 1.97 \times 10^{-3}, 3.94 \times 10^{-3}]$
0.5	May occur	$[10, 50; 3.94 \times 10^{-4}, 1.97 \times 10^{-3}]$
0.2	Low probability	$[1, 10; 3.94 \times 10^{-5}, 3.94 \times 10^{-4}]$
0	Typically does not affect the next node	Statistical frequency = 0; $[0, 3.94 \times 10^{-5}]$

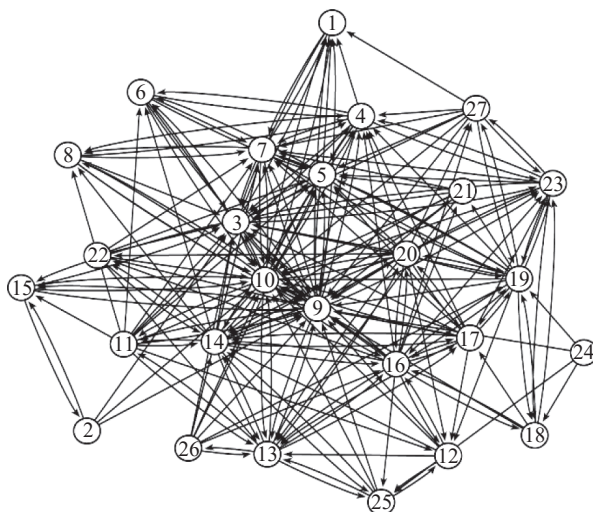


图2 有向带权网络
Fig.2 Directional weighted network

度值,两者加和等于总度值. 一般情况下,度值越高,代表该节点对网络的影响越大.

度分布是指不同度值的节点总数占网络总节点的百分比,用于描述网络中不同度数的分布情况. 将网络 N 个节点中度值为 α 的节点数记为 $\text{Freq}(k)$, 则计算度分布 $P(k)$ 如式(1):

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

(2)聚类系数.

点的聚类系数(Clustering coefficient)反映了该节点的一级近邻间的集团性质,近邻间联系越紧密,节点的聚类系数越高. 将节点 i 与相邻 n 个节点间实际存在连边条数记为 e_i , 而 e_i 与这些相邻节点间最大可能存在的连边条数的比值,称为节点 i 的聚类系数,记作 C_i , 如式(2):

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

(3)介数.

点的介数(Betweenness)是一个重要的全局几何量参数. 在有向网络中,将任意节点 j 到节点

2.2 网络参数

(1)度值及度分布.

在有向网络中,点的总度值(Degree value)是指与该节点相连边的总数. 指向该节点的连边数量称为入度值,由该节点发出的连边数量称为出

[illegible]

k 的所有最短路径的权值求和记为 σ_{jk} , 节点 j 到节点 k 的最短路径中经过节点 i 的路径权值求和记为 $\sigma_{jk}(i)$, 两者比值称为节点 i 的介数, 记作 $B(i)$, 如式(3):

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

计算网络度分布及每一节点的总度值、入度值和出度值、聚集系数和介数,见表3。分析该有向网络,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,不属于无标度网络;网络直径是3,平均聚集系数达到0.5783,而平均最短路径仅为1.7880,可划分至小世界网络^[23]。

总度值和入度值前3节点均为9、10、3;入度值第4、5节点为7和5;出度值靠前节点是16、10、14、20;聚集系数前3节点为2、1、8;介数前3节点为10、9、14.

3 改进 SIR 传播模型

SIR 模型除了成功应用于 2003 年 SARS 病毒传播^[24], 还广泛应用于计算机网络病毒、社会舆论谣言等传播分析. 经典的 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 β 被感染; 而 I 以概率 γ 恢复为 R 且不再感染^[25].

有别于以往的 SIR 模型改进研究, 此处引入改进感染率 β' 和改进恢复率 γ' 概念. 与 2019 年新冠

表3 网络参数(部分)

Table 3 Network parameters (partial)

Node number	Total degree value	In-degree value	Out-degree value	Clustering coefficient	Betweenness
1	11	7	4	0.803571	0.000374
2	5	1	4	0.809524	0.000220
3	28	21	7	0.380952	0.037671
4	22	13	9	0.528571	0.013475
5	23	16	7	0.455882	0.016636
...	...	...	...	...	...
9	39	26	13	0.304615	0.152202
10	39	24	15	0.336957	0.182254
...	...	...	...	...	...
20	25	9	16	0.411765	0.066644
...	...	...	...	...	...
25	10	5	5	0.619048	0.005644
26	10	1	9	0.680556	0.001102
27	13	4	9	0.700000	0.001223

疫情类似, 病毒传播在“个体重视”和“个体无重视”的人群中差异极大. 个体重视是指实施了预防措施, 如戴口罩物理隔离; 感染后得到对症的医疗手段而快速恢复. 对应航班运行, 当节点被重点关注成为控制节点时, 一方面, 前置的培训和政策支持可有效防止被感染进而出现差错, 表现为较低的感染率, 定义为改进感染率 β' ; 另一方面, 即便被感染, 在管控系统和专家人力支持下可迅速恢复即纠正差错, 表现为较高的恢复率, 定义为改进恢复率 γ' .

改进 SIR 模型传播过程如图 3: 第一阶段, 占比 p 的控制节点 S 以概率 β' 感染, 占比 $1-p$ 易的非控制节点以概率 β 感染; 第二阶段, 控制节点 I 以概率 γ' 恢复, 非控制节点 I 以概率 γ 恢复, 恢复后均不再感染^[15].

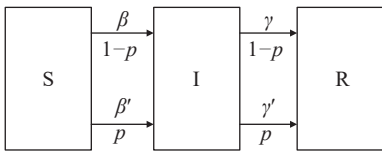


图 3 改进 SIR 模型原理图

Fig.3 Schematic of the improved SIR model

在以往研究中, 经典 SIR 模型用以仿真无控制网络的传播过程; 在本文后续计算中, 采用改进 SIR 模型用以仿真控制节点的网络传播过程。由于传染过程具有小尺度上的随机性, 每次计算结果有微小差别。为保证结果稳定可信, 同一条件进行 1000 次仿真再取平均值作为结果。

4 有向网络传播分析

与专家组分析节点实际含义, 定义初始感染范围。其中, 节点 14、16~26 是起飞后、落地前影响安全的因素, 故不作为初始感染节点。剩余节点 1~13、15、27 在飞行前即有可能产生影响, 因此将该 15 个节点依次设为初始感染节点。此处, 设定感染率 $\beta=0.5$, 恢复率 $\gamma=0.2$, 进行 15000 次传播后发现, 尽管初始点不同, 但传播过程和最终结果的变化规律一致, S 节点持续下降, R 持续上升, I 先上升后下降, 最终达到稳定状态。将 15000 次传播结果取均值, 如图 4 可见感染节点峰值约为 12.7329 个。

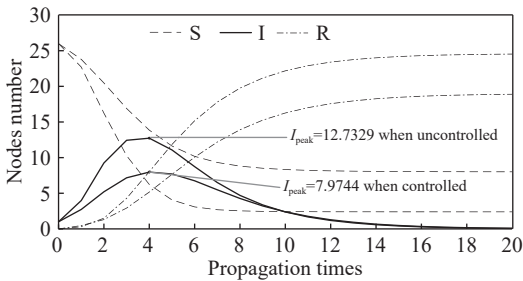


图 4 控制节点后有向带权网络传播结果

Fig.4 Directed network propagation results after controlling the nodes

依照中国民航长期实施的安全管理经验, 包括强化机组驾驶舱管理与交叉检查程序以提升机组间配合协作, 对机长经验与资质的高标准筛选, 对复杂机场的模拟机与试飞严格训练以降低起降程序难度、增强熟练程度。对应选取节点 3、5、

20 作为控制节点, 即机组协作程度, 机长飞行经验, 飞行程序复杂程度, 设节点改进感染率 $\beta'=0.1$, 改进恢复率 $\gamma'=0.9$, 即选派的机组经验丰富、配合多次表现良好, 且对机场飞行程序的操作有充分训练。仿真取均值后如图 4, 感染峰值降为约 7.9744 个, 下降率 37.4%, 说明控制节点后, 风险传播得到显著抑制。对应实践, 中国民航正是通过对机组、机场、飞机等关键点的安全管控, 大幅降低了航班起降等运行风险, 实现了至今连续安全飞行 8000 多万小时的世界最佳纪录。

5 有向网络控制分析

选取度值、聚集系数和介数等各参数排名靠前的节点, 图 5 中结果以控制前 3 个节点为例。

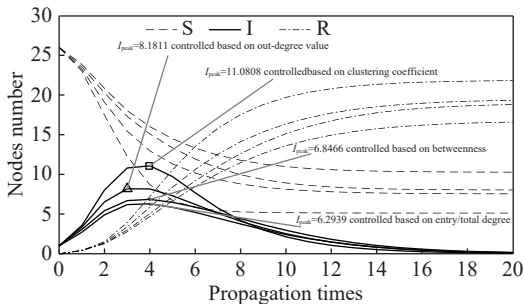


图 5 按不同控制方式的改进 SIR 模型变化趋势图

Fig.5 Change trend of the improved SIR model based on different control methods

- (1)按度值控制。因总度值和入度值前 3 节点相同, 控制 3、9、10 即机组协作、短暂和累积性疲劳后, 感染节点峰值降为 6.2939 个, 下降率为 50.6%。
- (2)按介数。控制节点 9、10 和 14 即短暂和累积性疲劳和临时改航, 感染节点峰值降为 6.8466, 下降率 46.2%。
- (3)按出度值。控制节点 10、14 和 20, 即累积性疲劳、空中临时改航和飞行程序复杂度, 感染节点峰值降为 8.1811 个, 下降率为 35.7%。
- (4)按聚集系数。控制节点 1、2 和 8, 即机组资质搭配、国际民航英语等级和副驾驶机场熟悉度, 感染节点峰值降为 11.0808 个, 下降率 13.0%, 控制效果较差。而从运行经验看, 副驾机场熟悉度与英语等级并非保证安全的关键因素。

以上控制前 3 节点时, 按总度值和入度值控制效果表现最好。鉴于前 3 节点完全相同, 再比较控制前 4 个节点的效果。按入度值, 增加控制节点 7 以后, 感染峰值下降高达 58.1%, 高出按总度值控制结果 3.5%; 同样, 抑制效果远高于按照其他参数控制结果。如果控制入度值前 5 节点, 网络传播

抑制效果仍然最好, 感染峰值下降可高达 65.9%。鉴于控制节点越多, 在航班运行有限时间内可实施性越低, 即期望风险与可行性需要平衡。由上, 入度值是该网络中最有效的控制指标。

此外, 按入度控制结果比第 5 节中安全管理经验方法(控制节点 3、5、20)效果更好。差别在于, 改变控制节点 5 和 20, 变为优先控制节点 9 和 10。分析数据发现, 节点 9 和 10 的入度值和出度值都很高, 且统计所得权值普遍在 0.8 或 1, 表现出很强的受感染和向外传播能力; 而节点 5, 虽然其总度值高, 但表现为入度值 16, 出度值仅为 7, 且统计不安全事件后所得的标称权值不高, 说明对外传播不强。分析原因, 此结果源于中国民航对飞行机组的高标准要求。从标准操作程序、应急处置程序、特殊机场运行等各方面, 中国民航对机组训练与考核的标准远高于世界民航。其作用同样体现在节点 20, 针对复杂机场从全动模拟机到实地试飞等各项严格要求, 使得节点 20 体现出的边权值远比节点 9 和 10 的权值要低。

通过改变不同的感染率和恢复率条件后发现, 上述结论保持不变。以上结果与实际运行吻合度很高, 短暂性和累积性疲劳是近年民航业显现的致险重要因素。2019 年期间机组疲劳指数超过 1.0 的航空公司超过 20 家。即使受 2020 年初的疫情影响, 2020 年 6 月仍有福州航空等 8 家航空公司飞行疲劳指数接近 0.9, 疲劳管理逐渐成为世界与中国民航着力研究和改革的重点(中国民航局规定: 疲劳指数 = {当月总飞行小时数/当月可用机组数}/64。该指数适宜范围为 0.6 ~ 0.8, 1.0 为疲劳的临界值)。

此外, “空中临时改航”虽然在安全监察记录中出现频次很少, 但其总量较大且影响范围广, 在该网络中已体现出重要性。2019 年中国民航返航备降航班总数接近 9000 班, 仅 7 月因全国大范围雷雨就导致 926 起返航备降发生。并且, 改航会触发天气标准调整、剩余油量计算、落地超重校核、可用保障机位等一系列复杂判断, 对应出度值 15(排名第 2)和部分 0.8 及以上的高权值, 容易产生衍生风险并向外传播, 其影响不容忽视。幸运的是, 疲劳可以通过科学排班和休息来控制, 改航可以由全程监控和交叉校核来管理, 是运行中可实施风险缓解的因素。

6 结论

基于民航不安全事件统计数据, 改造无向网,

提出一种有向带权的航班运行风险网络; 构建一种改进 SIR 模型, 并重新定义感染起始范围; 综合安全管理和参数计算两种控制方法, 经大规模仿真得到:

(1) 有向网络直径为 3, 平均聚集系数达到 0.5783, 平均最短路径为 1.788, 属于小世界网络。

(2) 依照民航安全管理成功经验, 从机组配合、经验以及起降复杂度控制网络节点, 有向网络传播受到抑制, 其感染峰值下降幅度为 37.4%。

(3) 当控制入度值前 3、4 节点后感染峰值下降率高达 50.6% 和 58.1%, 入度值是控制该有向网络传播的最有效指标。

(4) 控制机组短暂和累积性疲劳、空中临时改航, 可有效抑制运行风险传播。

需要说明的是, 在传播规则设定方式与第 5 节相符的基础上, 感染率与恢复率、改进感染率与改进恢复率的具体赋值可变化。经反复验证, 所得结论与第 6 节中规律相同。

此外, 文中使用的是民航业汇总数据, 因此结论带有广泛性; 如用于具体航空公司, 应针对其历史记录, 修改网络中边的方向和权值。后续研究拟从空管、机场、航空公司、监管机构等多社团进一步扩充网络规模, 寻求更丰富数据以提升网络质量, 探索更多具有理论和实践价值的结论。

参 考 文 献

- [1] Coleman M E, Marks H M. Qualitative and quantitative risk assessment. *Food Control*, 1999, 10(4-5): 289
- [2] Janic M. An assessment of risk and safety in civil aviation. *J Air Transp Manage*, 2000, 6(1): 43
- [3] Bolczak C N, Fong V, Jehlen R. NextGen flight security risk assessment information concept//2009 IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference. Orlando, 2009: 6
- [4] Sun R S, Liu H H. Assessment theory and practice for airline safety. *China Saf Sci J*, 1999, 9(3): 69
(孙瑞山, 刘汉辉. 航空公司安全评估理论与实践. 中国安全科学学报, 1999, 9(3): 69)
- [5] Sun R S, Tang P. Rapid assessment tool for flight safety risk. *J Transp Inf Saf*, 2013, 31(2): 88
(孙瑞山, 唐品. 航班飞行安全风险快速评估工具研究. 交通信息与安全, 2013, 31(2): 88)
- [6] Wang Y T, Li R, Lu F, et al. Risk assessment system of flight operation based on multiple factor analysis. *J Tianjin Polytech Univ*, 2014, 33(3): 84
(王岩韬, 李蕊, 卢飞, 等. 基于多因素分析的航班运行风险评估体系. 天津工业大学学报, 2014, 33(3): 84)
- [7] Wang Y T, Li R, Lu F, et al. Flight operation key risk factors

- inference based on operation data. *J Transp Syst Eng Inf Technol*, 2016, 16(1): 182
(王岩韬, 李蕊, 卢飞, 等. 基于运行数据的航班运行关键风险因素推断. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(1): 182)
- [8] Wang Y T, Zhao Y F. Research on flight operations risk identification based on multi-algorithm collaboration. *China Saf Sci J*, 2018, 28(6): 166
(王岩韬, 赵巍飞. 基于多算法协作的航班运行风险辨识研究. 中国安全科学学报, 2018, 28(6): 166)
- [9] Wang Y T, Liu H, Tang J X, et al. Dynamic prediction technology in the application of flight operation risk. *Control Decis*, 2019, 34(9): 1946
(王岩韬, 刘宏, 唐建勋, 等. 动态预测技术在航班运行风险中的应用. 控制与决策, 2019, 34(9): 1946)
- [10] Wang Y T, Li J L, Gu R P. Flight operation risk prediction model based on the multivariate chaotic time series. *Chin J Eng*, 2020, 42(12): 1664
(王岩韬, 李景良, 谷润平. 基于多变量混沌时间序列的航班运行风险预测模型. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1664)
- [11] Lalis A, Socha V, Kraus J, et al. Conditional and unconditional safety performance forecasts for aviation predictive risk management//2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2018: 1
- [12] Zhang X G, Mahadevan S. Ensemble machine learning models for aviation incident risk prediction. *Decis Support Syst*, 2019, 116: 48
- [13] Zhang J K. *Study of Flight Operations Risk Management on Shenzhen Airlines* [Dissertation]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019
(张继凯. 深圳航空公司航班运行风险管理研究[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019)
- [14] Belkoura S, Cook A, Maria Pena J, et al. On the multi-dimensionality and sampling of air transport networks. *Transp Res Part E*, 2016, 94: 95
- [15] Voltes-Dorta A, Rodriguez-Deniz 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. *Transp Res Part A*, 2017, 96: 119
- [16] Wu X P, Yang H Y, Han S C. Analysis of properties and delay propagation of air traffic based on complex network. *Acta Aeron Astron Sin*, 2017, 38(Suppl1): 108
(武喜萍, 杨红雨, 韩松臣. 基于复杂网络的空中交通特征与延误传播分析. 航空学报, 2017, 38(增刊1): 108)
- [17] Wang X L, Pan W H, Zhao M. Vulnerability of air traffic interdependent network. *Acta Aeron Astron Sin*, 2018, 39(12): 268
(王兴隆, 潘维煌, 赵末. 空中交通相依网络的脆弱性研究. 航空学报, 2018, 39(12): 268)
- [18] Qi Y N, Gao J D. Cascading failure invulnerability and optimization strategy of airspace sector network. *Acta Aeron Astron Sin*, 2018, 39(12): 349
(齐雁楠, 高经东. 空域扇区网络级联失效抗毁性及优化策略. 航空学报, 2018, 39(12): 349)
- [19] Wu M G, Ye Z L, Wen X X, et al. Air traffic complexity recognition method based on complex networks. *J Beijing Univ Aeron Astron*, 2020, 46(5): 839
(吴明功, 叶泽龙, 温祥西, 等. 基于复杂网络的空中交通复杂性识别方法. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(5): 839)
- [20] Wang Y T, Liu Y. Flight operation risk propagation based on complex network. *J Transp Syst Eng Inf Technol*, 2020, 20(1): 198
(王岩韬, 刘毓. 基于复杂网络的航班运行风险传播分析. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(1): 198)
- [21] Flight Standard Administration of CAAC. *Air Carrier Operation Control Risk Control System Implementation Guidelines*. 2015-09-28
(中国民用航空总局飞行标准司. 航空承运人运行控制风险管控系统实施指南, 2015-09-28)
- [22] Zhao Y Q, Qin X, Li Z X, et al. Dynamic modeling and simulation of hazard and risk evolution for mine tailing ponds. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 36(9): 1158
(赵怡晴, 覃璇, 李仲学, 等. 尾矿库隐患及风险演化系统动力学模拟与仿真. 北京科技大学学报, 2014, 36(9): 1158)
- [23] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286(5439): 509
- [24] Ni S J. *Research on Modeling of Infectious Disease Spreading Based on Complex Network Theory* [Dissertation]. Beijing: Tsinghua University, 2009
(倪顺江. 基于复杂网络理论的传染病动力学建模与研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2009)
- [25] Reluga T C, Medlock J. Resistance mechanisms matter in SIR models. *Math Biosci Eng*, 2007, 4(3): 553