

文章编号: 1674-8190(2026)03-012-10

# 基于改进 SIS 模型的飞行安全风险分析

易子超, 苏艳

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

**摘要:** 航空安全是全球关注的重点, 随着航空系统的日益复杂化, 对其进行系统性的风险分析变得尤为重要。结合危害与可操作性分析(HAZOP)方法和物理—事理—人理(WSR)方法论, 全面识别航空安全中的关键风险节点; 通过构建基于真实案例的复杂网络模型, 模拟风险要素在航空网络中的动态传播过程; 根据风险的差异确定风险等级和传播概率, 基于风险等级异化不同风险间的传播概率, 以此改进易感—感染—易感者(SIS)模型并量化风险传播的动态特性; 通过对 47 起航空案例进行分析, 以受鸟击作为情景, 识别其最可能引起的 10 个高风险节点及其风险传播链。结果表明: 相比于传统的 SIS 模型, 采用改进 SIS 模型的风险传播分析结果风险发生概率跨度更广, 可以更敏感地捕捉不同风险点之间在特定情境传播过程中的相对权重差异, 为有效管理航空安全提供参考。

**关键词:** 航空安全; 风险识别; 风险评估; 复杂网络; SIS 模型

**中图分类号:** V328

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2026.03.02

## Flight safety risk analysis based on improved SIS model

YI Zichao, SU Yan

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Aviation safety is a global focus, and as the aviation system becomes increasingly complex, it becomes particularly important to conduct systematic risk analysis. This paper combines the HAZOP (Hazard and Operability) method with the WSR (Wuli-Shili-Renli) methodology to comprehensively identify critical risk nodes in aviation safety. By constructing a complex network model based on real-life case studies, the dynamic transmission process of risk elements in the aviation network is simulated. The risk grade and transmission probability are determined according to the difference of risks, and the transmission probability among different risks is differentiated based on the risk grade, so as to improve the susceptible-infection-susceptible (SIS) model and quantify the dynamic characteristics of risk transmission. Finally, through the analysis of 47 aviation cases, taking bird strikes as the scenario, the most likely to cause 10 high-risk nodes and their risk transmission chain are identified. The research shows that compared with the traditional SIS model, the risk occurrence probability of the improved SIS model has a wider span, which can more sensitively capture the relative weight difference between different risk points in the transmission process of a specific situation, and provide a reference for effective management of aviation safety.

**Key words:** aviation safety; risk identification; risk assessment; complex networks; SIS model

收稿日期: 2024-09-21; 修回日期: 2024-12-17

通信作者: 苏艳(1974—), 女, 博士, 副教授。E-mail: suyannj@nuaa.edu.cn

引用格式: 易子超, 苏艳. 基于改进 SIS 模型的飞行安全风险分析[J]. 航空工程进展, 2026, 17(3): 12-21.

YI Zichao, SU Yan. Flight safety risk analysis based on improved SIS model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2026, 17(3): 12-21. (in Chinese)

## 0 引言

随着航空技术的迅猛发展和航空网络复杂性的增加,新的风险挑战不断涌现。技术故障、极端天气条件、人为操作失误以及蓄意的恐怖行为等因素相互交织和动态变化,使得系统性风险管理和评估的复杂性进一步提升。因此,开发能够基于当前风险状态,准确预测未来风险演变的技术显得尤为重要。

当前,许多有关航空风险的研究集中于某个具体风险。例如,Hamza等<sup>[1]</sup>分析了飞行中由于飞机失速导致的失控风险;Wang G Z等<sup>[2]</sup>探讨了结冰条件下的飞行风险;Sun J Y等<sup>[3]</sup>则研究了疲劳风险;赵振武等<sup>[4]</sup>通过贝叶斯网络和模糊损失模型,计算了全货机和客机腹舱货物运输的风险值。尽管上述研究在单一风险因素的识别方面取得了显著进展,但均未能充分考虑风险因素的复杂性、多样性及其相互依赖和动态传播的特性。

复杂网络理论<sup>[5]</sup>作为现代系统科学的一个重要分支,专门研究由大量相互作用单元组成的网络系统。它涵盖了从生物系统中的神经网络<sup>[6]</sup>到社会经济中的交通<sup>[7]</sup>和互联网<sup>[8]</sup>,再到技术系统中的电力网<sup>[9]</sup>等。在这些网络中,节点代表个体或元素,边则代表节点之间的相互作用或联系,且边可以表示实体间的多种关系,如捕食<sup>[10]</sup>、信息传递<sup>[11]</sup>和能量流动<sup>[12]</sup>等,使网络模型的应用更加广泛。

黄海清等<sup>[13]</sup>在网络模型基础上,改进了传统重要度评价矩阵并采用模拟退火算法求解,提出了更优的防御资源分配策略;贾宝惠等<sup>[14]</sup>引入复杂网络对体系架构整体性能进行评估;袁乐平等<sup>[15]</sup>通过边介数评估关键风险传播路径,并采用网络效率指标衡量断链后的系统安全性;Zhou D等<sup>[16]</sup>以飞机通信寻址与报告系统(ACARS)数据为基础,提出了一种基于粒子群优化支持向量机(PSO-SVM)的危险识别方法;Memarzadeh等<sup>[17]</sup>提出了一种用于航空数据异常检测的半监督深度学习模型,该模型具有鲁棒性且可解释,并以一种多类异常检测为案例进行应用验证;曾丽君等<sup>[18]</sup>基于深度时域网络(DTN)对Dashlink的离线飞行数据集进行风险辨识。然而,这些研究不仅受数据集的限制,同时也只能识别特定风险,尚未深入探讨风险的动态传播过程。

SIS模型<sup>[19]</sup>作为一种经典的传染病传播模型,其核心思想是模拟易感者和感染者之间的转换。在航空安全风险背景下,可将“感染者”定义为已触发的风险因素,而“易感者”则为可能受到其他风险因素影响但尚未触发的风险因素。张晗等<sup>[20]</sup>提出的基于平均场理论的风险预警模型,采用了SIS模型分析风险的传播过程,但未能充分考虑不同风险的恢复率和感染率差异,这与实际风险管理中的复杂情境并不完全一致。

本文为弥补上述研究的局限性,提出改进的SIS模型,引入风险等级差异性并异化风险的传播概率和修复率,进一步探讨航空安全风险在复杂网络中的动态传播过程,以期风险管理提供更加全面的理论支持和预测工具。

## 1 改进的SIS风险传播模型

本文提出一种融合物理—事理—人理(WSR)方法论、危害与可操作性分析(HAZOP)方法和SIS传染病模型的航空安全风险传播模型,如图1所示。

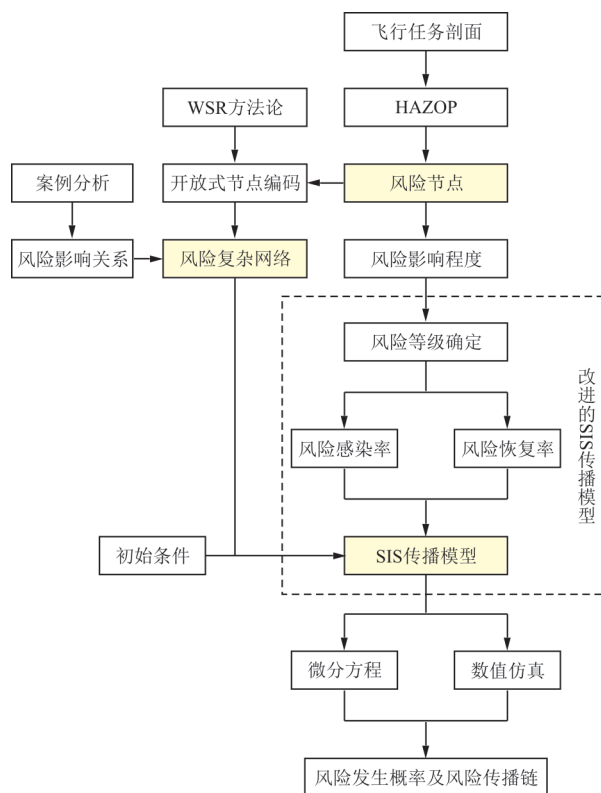


图1 风险传播模型建模求解流程  
Fig. 1 Modeling and solving process of risk communication model

首先,通过 HAZOP 方法<sup>[21]</sup>识别潜在的风险节点;其次,应用 WSR 方法论<sup>[22]</sup>对识别出的风险进行分类与编码,确定每个风险的等级、感染率和恢复率,以体现风险因素的差异性;然后,构建风险复杂网络,分析不同风险之间的相互作用及其传播动态;最后,结合 SIS 模型对风险传播进行模拟,利用微分方程求解和数值仿真方法预测未来的风险状态。

### 1.1 基于案例分析的航空安全风险复杂网络模型构建与分析

基于复杂网络理论,本文构建一个用于航空安全风险分析的复杂网络模型,节点代表风险因素,边代表风险传播路径。模型的构建过程主要包括数据收集、节点定义、风险严重等级确定、边的建立以及网络属性分析,具体过程如下:

首先,通过对历史空难数据和 NASA 航空安全报告系统中的案例进行深入分析,收集详细的航空安全事件信息。为了识别航空安全中的关键风险因素,参考 GB/T 27921—2023《风险管理风险评估技术》附录 B.2 中的 HAZOP 分析方法,并结合 WSR 方法论,将每个风险因素视为网络模型中的节点。

在确定风险因素的同时,本文特别关注风险的严重等级<sup>[23]</sup>。风险等级影响到风险传播的概率和管理措施的选择。为此,依据 2018 年 ICAO 发布的中的风险严重性实例表,综合判断每个节点的风险等级,将其纳入模型的传播参数中。风险严重等级表如表 1 所示。

表 1 风险严重等级表  
Table 1 Risk severity rating table

| 严重性  | 描述                               | 值 |
|------|----------------------------------|---|
| 一级风险 | 可能导致事故的发生,如飞机/设备被毁               | 1 |
| 二级风险 | 可能导致严重事故征候,如起火/冒烟、不稳定进近、擦尾等      | 2 |
| 三级风险 | 可能导致一般事故征候,如航空器地面碰撞、外来物吸入发动机、鸟击等 | 3 |
| 四级风险 | 可能导致其他不安性质的轻微事件                  | 4 |

然后基于案例中的风险因素相互作用,通过分析“导致”“影响”“造成”等关键关系,构建风险传播路径,并将其映射为网络中的边。该模型不仅考虑了风险因素之间的直接作用关系,还兼顾了复杂网络中节点之间的潜在交互。风险传播关系示意如图 2 所示。

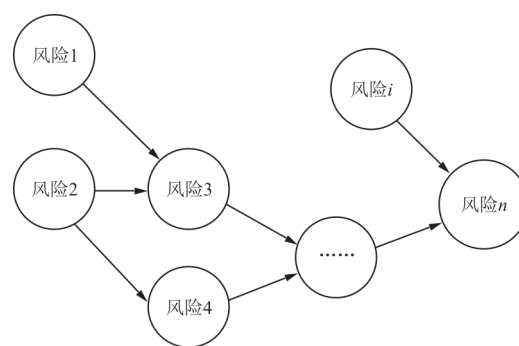


图 2 风险传播关系示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of risk communication relationship

最后,对构建的复杂网络模型进行拓扑结构分析,重点考察节点度分布、聚类系数和平均路径长度等网络属性,以揭示航空安全风险传播的整体特性。通过这些分析,可以进一步理解不同风险因素在整个网络中的作用,以及它们对航空安全的整体影响。

### 1.2 基于 SIS 模型的动态风险传播模型

为了深入理解和预测航空网络中风险因素的传播动态,引入基于 SIS 模型的风险传播动力学模型,分析特定场景下固定时间段内的风险传播过程及结果。传统的 SIS 模型如式(1)所示,在分析的过程中将不同风险之间的传播概率设定为同一值,不针对风险加以区分。

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t) + \gamma I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) \end{cases} \quad (1)$$

本文基于风险的风险等级差异,异化不同风险的风险传播概率和修复概率如图 3 所示。即不同风险因素之间的传播概率有所不同,且每个风险从“感染”状态恢复到“易感”状态的概率也因风险特性而异。

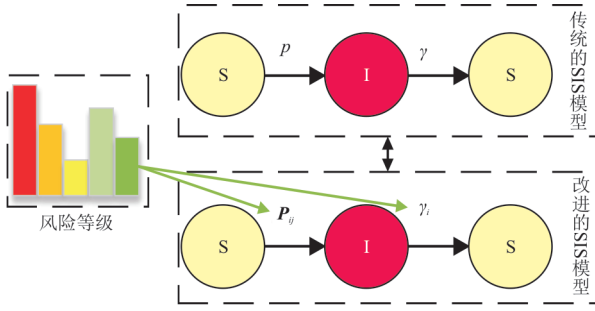


图3 传统 SIS 模型与改进的 SIS 模型对比

Fig. 3 SIS model with risk differences

### 1.2.1 模型假设

假设1:风险可沿有向边按一定概率传播到下一个节点,且传播概率受节点风险等级影响。传播概率由风险传播矩阵  $P$  表示:

$$P_{ij} = p[1 - \lambda(L_i - L_j)] \quad (2)$$

式中: $p$ 为平均传播概率; $L_i$ 、 $L_j$ 分别为节点  $i$  和  $j$  的风险等级; $\lambda$ 为风险等级差系数。当节点  $i$  的风险等级大于节点  $j$  的风险等级时, $P_{ij}$ 将大于平均传播概率,反之亦然。

假设2:已感染的风险因素可以被及时识别并采取措施,其修复概率也与风险等级相关。节点修复概率定义为

$$\gamma_i = \gamma(1 + \beta L_i) \quad (3)$$

式中: $\gamma$ 为平均修复概率; $\beta$ 为风险等级修复系数。

假设3:当一个节点被感染时,它会立即在下一个时间步传播风险。

### 1.2.2 动态微分方程模型及求解

根据上述假设,建立改进的 SIS 模型的动态微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dI_i(t)}{dt} = [1 - I_i(t)] \sum_{j=1}^N P_{ji} I_j(t) - \gamma_i I_i(t) \\ S_i(t) + I_i(t) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\frac{dI_i(t)}{dt}$ 为单位时间内感染概率的改变量; $[1 - I_i(t)] \sum_{j=1}^N P_{ji} I_j(t)$ 为其他被感染节点传播给节点  $i$  的概率; $P_{ji}$ 为节点  $j$  将风险传播给节点  $i$  的概率; $-\gamma_i I_i(t)$ 为该节点从感染状态恢复到易感状态的概率; $dt$ 为传播时间步长。

采用4阶龙格-库塔方法<sup>[24]</sup>用于求解常微分

方程初值问题。对于给定的微分方程组,可以使用此方法进行近似求解。对于4阶龙格-库塔方法的一般形式,给定初值  $y(t_0) = y_0$ ,想要找到  $y(t)$  在  $t = t_n$  的近似值  $y_{n+1}$  可以使用公式(4):

$$\begin{cases} k_1 = h \cdot f(t_n, y_n) \\ k_2 = h \cdot f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 = h \cdot f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 = h \cdot f\left(t_n + h, y_n + k_3\right) \\ y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $h$ 为步长; $f(t, y)$ 为微分方程的右侧函数。

由于这是一个两个方程的系统,需要为每个群体的  $I_i(t)$  和  $S_i(t)$  计算  $k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4$  然后更新。

### 1.2.3 风险传播的数值仿真

在宏观层面,利用微分方程求解能够得到风险感染率随时间变化的趋势,从而理解群体中风险传播的整体特性。为了捕捉节点在微观层面的动态行为,本文采用随机数值仿真<sup>[25-26]</sup>,以反映具体节点的状态变化。一轮仿真可以预测特定时间段后的风险结果,而多次仿真取平均值则可验证其与微分方程解的一致性。数值仿真公式如下:

$$I_i(t) = \begin{cases} 1 & (\text{rand} \leq P_{ji}, I_j(t) = 1) \\ 0 & (\text{rand} > P_{ji}, I_j(t) = 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_i(t)$ 和  $I_j(t)$ 分别为节点  $i$  和节点  $j$  在  $t$  时刻的感染状态; $\text{rand}$ 为生成服从0~1的均匀分布的随机数,1表示感染状态激活,0表示感染状态没被激活。

## 2 算例与分析

经过对历史空难资料的深入分析,本文选取“空中浩劫”节目以及NASA航空安全报告系统中的案例,搜集了涵盖了不同地区、机型、环境以及情景共47起典型事件。基于这些数据,按照1.1节风险网络建模步骤构建了风险节点的相互作用关系。

识别出的风险节点及其严重度等级如表2所示。

表2 结合 WSR 和 HAZOP 方法分析的风险节点表  
Table 2 Lists the risk nodes analyzed by combining WSR and HAZOP methods

| 节点编号 | 物理方面的风险    | 节点编号 | 事理方面的风险            | 节点编号 | 人理方面的风险    |
|------|------------|------|--------------------|------|------------|
| W1   | 警告失效       | S1   | 航线规划错误             | R1   | 机组人员个性心理不好 |
| W2   | 燃油不足       | S2   | 安全检查不严格            | R2   | 机组人员技术水平不足 |
| W3   | 空气动力学不稳定   | S3   | 疲劳驾驶               | R3   | 机组人员生理状态不佳 |
| W4   | 重大结构损坏     | S4   | 安全方针不合理            | R4   | 机组人员安全意识薄弱 |
| W5   | 软件故障       | S5   | 冒险降落               | R5   | 机组人员沟通不恰   |
| W6   | 液压系统故障     | S6   | 违反空中交通管制规定         | R6   | 机组人员配合不当   |
| W7   | 电气系统故障     | S7   | 维护记录不清             | R7   | 机组人员决策失误   |
| W8   | 燃油泄露       | S8   | 无法转场               | R8   | 送机员个性心理不好  |
| W9   | 鸟击         | S9   | 操作程序错误             | R9   | 送机员技术水平不足  |
| W10  | 地面相撞       | S10  | 机务操作失误             | R10  | 送机员生理状态不佳  |
| W11  | 失去空速指示     | S11  | 乘客非法行为             | R11  | 送机员安全意识薄弱  |
| W12  | 起落架故障      | S12  | 乘客装载不当             | R12  | 送机员沟通不恰    |
| W13  | 冲突或恐怖袭击    | S13  | 飞机维护不当             | R13  | 送机员配合不当    |
| W14  | 空中相撞       | S14  | 不良天气下起飞            | R14  | 送机员决策失误    |
| W15  | 风切变        | S15  | 高度偏差               | R15  | 机务个性心理不好   |
| W16  | 飞机结构疲劳     | S16  | 航班调度错误             | R16  | 机务技术水平不足   |
| W17  | 机场障碍物未清理   | S17  | 维修程序失误             | R17  | 机务生理状态不佳   |
| W18  | 雷达故障       | S18  | 操作会带来经济损失          | R18  | 机务安全意识薄弱   |
| W19  | 大风或龙卷风影响飞行 | S19  | 空管未提醒机组            | R19  | 机务沟通不恰     |
| W20  | 大雾导致能见度降低  | S20  | 坠毁                 | R20  | 机务配合不当     |
| W21  | 飞机冰冻       | S21  | 机组培训不足             | R21  | 机务决策失误     |
| W22  | 飞机失速       | S22  | 机务培训不足             | R22  | 空管个性心理不好   |
| W23  | 引擎失效       | S23  | 送机员培训不足            | R23  | 空管技术水平不足   |
| W24  | 飞行中冰雹袭击    | S24  | 空管培训不足             | R24  | 空管生理状态不佳   |
| W25  | 无仪表着陆设备    | S25  | 安全门未及时打开           | R25  | 空管安全意识薄弱   |
| W26  | 机场天气恶劣     | S26  | 未能从失速中改出           | R26  | 空管沟通不恰     |
| W27  | 航路天气恶劣     | S27  | 机组操作失误             | R27  | 空管配合不当     |
| W28  | 天气寒冷       | S28  | 出现非指令性滚转           | R28  | 空管决策失误     |
| W29  | 飞机设计缺陷     | S29  | 机组未意识到故障原因         |      |            |
| W30  | 传感器故障      | S30  | 乘客携带危险物品进入         |      |            |
| W31  | 遭受雷击       | S31  | 飞机失火               |      |            |
| W32  | 通讯装置故障     | S32  | 乘客受惊乱窜             |      |            |
| W33  | 导弹袭击       | S33  | 可控飞行撞地             |      |            |
| W34  | 装置/值不在正确位置 | S34  | 复飞                 |      |            |
| W35  | 数据库超期      | S35  | 系统根据错误的传感器进行了错误的调整 |      |            |
| W36  | 尾迹湍流相遇     | S36  | 迫降未能成功             |      |            |
| W37  | 在跑道上滞留     | S37  | 未按手册操作             |      |            |
| W38  | 机场施工灯光影响   | S38  | 偏航                 |      |            |
|      |            | S39  | 俯冲                 |      |            |
|      |            | S40  | 未从俯冲中改出            |      |            |
|      |            | S41  | 手动操作与自动控制冲突        |      |            |
|      |            | S42  | 机舱失压               |      |            |
|      |            | S43  | 推出时牵引杆剪切销断裂        |      |            |
|      |            | S44  | 危险姿态飞行             |      |            |
|      |            | S45  | 客舱遗留手电             |      |            |
|      |            | S46  | 飞机推出不到位            |      |            |
|      |            | S47  | 推出后未及时取下转弯销        |      |            |
|      |            | S48  | 救援不及时              |      |            |
|      |            | S49  | 态势感知异常             |      |            |

根据这些结果,风险严重度等级被划分为4个等级,从严重到轻微,风险定级的统计直方图如图4所示。

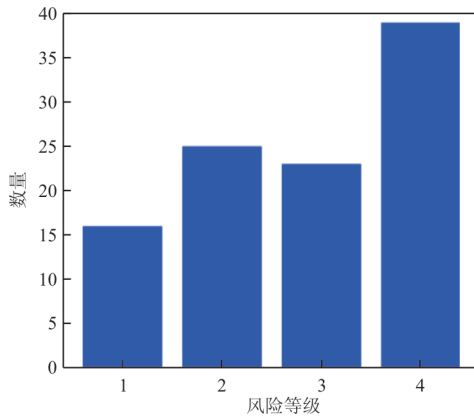


图4 风险等级分布直方图

Fig. 4 Histogram of risk level distribution

在识别的风险节点中,四级风险的数量最多,一级风险最少,且各等级之间的差异不大。随后,将47个案例进行整合,并利用 Gephi 软件构建了风

险复杂网络模型,如图5所示。该网络包含103个节点和293条不重复的边。

分析网络的拓扑结构,包括节点度分布、聚类系数和平均路径长度等。节点度分布如图6所示,可以看出:网络的度分布斜率为 $-1.07$ ,略高于典型无标度网络的斜率(通常在 $-2 \sim -3$ 之间),表明该网络的度分布并不完全符合幂律分布。然而,度分布趋势依然暗示该网络具备与无标度网络的相似性。从网络特性来看,实际网络的聚类系数为 $0.086$ ,平均最短路径长度为 $1.945$ 。相比之下,随机网络的聚类系数为 $0.0519$ ,平均最短路径长度为 $2.818$ ,表明该风险网络不具备典型小世界网络的特征。统计分析得到卡方统计量为 $108\,523.088$ ,对应的 $p$ 值为 $0$ ,表明网络的度分布显著偏离泊松分布。此外,随机网络的聚类系数和平均最短路径长度分别为 $0.0431$ 和 $2.832$ ,实际网络的聚类系数更高,而平均最短路径长度更短,表明网络也不属于随机网络。

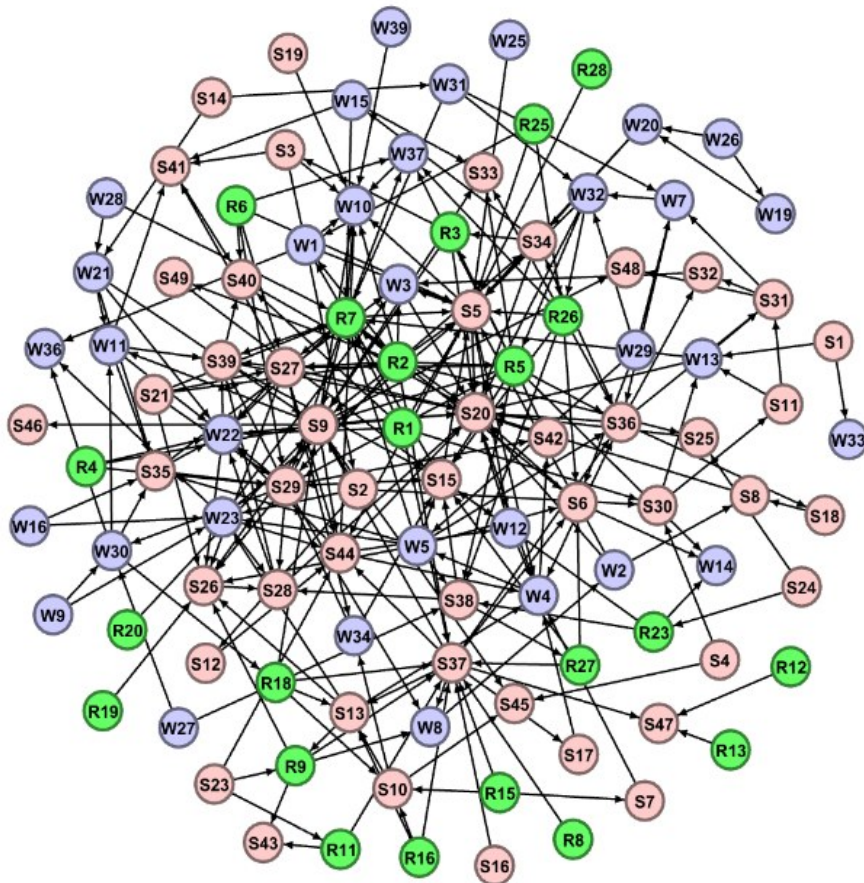
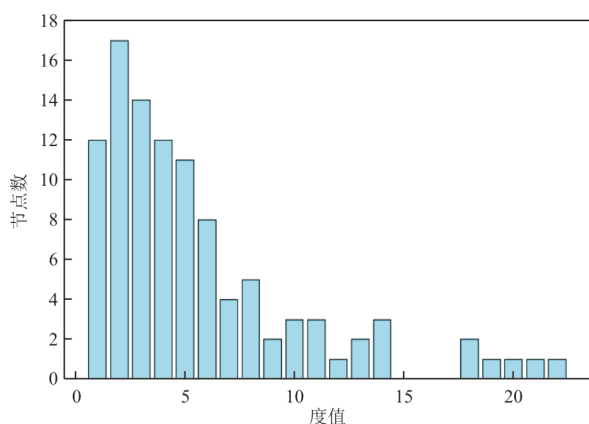
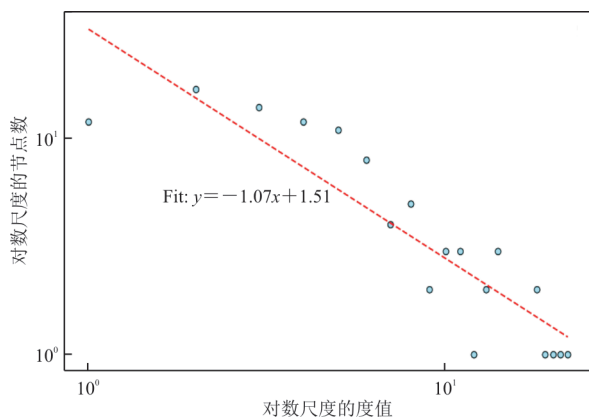


图5 飞行风险复杂网络模型

Fig. 5 Complex network model of flight risk



(a) 正常尺度下的网络度分布



(b) 对数尺度下的网络度分布

图6 网络节点度分布

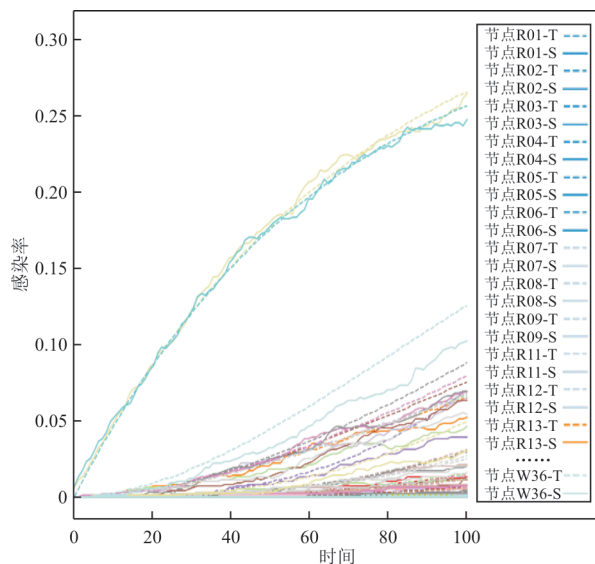
Fig. 6 Network node degree distribution

上述网络属性分析表明,该网络的度分布和网络特性的整体在一定程度上更接近于无标度网络。

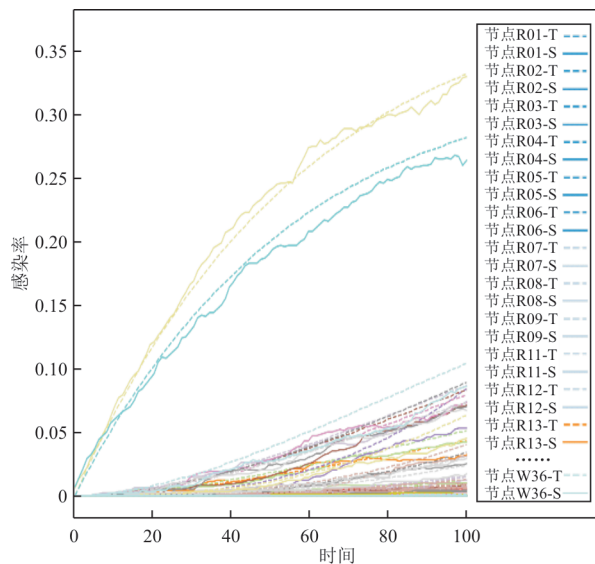
本文假设飞机遭受鸟击,将风险节点W9的感染概率初始化为1,即 $I_{W9} = 1$ ,其他节点的初始感染概率为0。设定参数平均传播概率 $p = 0.005$ ,风险等级差系数 $\lambda = 0.2$ ,平均修复概率 $\gamma = 0.005$ ,风险等级修复系数 $\beta = 0.05$ 。基于第2节所述的传播模型,包括微分方程求解和数值仿真,本文采用四阶龙格—库塔方法对每个节点的状态进行求解。计算结果如图7所示,其中虚线“-T”代表微分方程的计算结果,实线“-S”表示数值仿真的计算结果。可以看出:两者趋势一致,验证了两种方法的正确性。

在以100个时间单位为计算区间的模拟中,本文对除鸟击风险之外的其他风险进行排序,概率

最高的前10个风险及其发生概率如表3所示,可以看出:在鸟击发生后的100 s内,按照假设的感染率和恢复率,引擎失效的发生概率最高,为0.332;飞机失速的发生概率为0.110。风险发生概率的跨度为 $[0.063, 0.332]$ ,而不考虑风险差异的情况下,排序结果的跨度为 $[0.066, 0.265]$ 。引入风险差异后,虽然整体风险排序未发生剧烈变化,但改进的SIS模型识别的风险发生概率跨度更广,且某些节点的相对重要性提高或降低。



(a) 不考虑风险等级差异的风险传播结果



(b) 考虑风险等级差异的风险传播结果

图7 不同节点风险概率随时间变化趋势图

Fig. 7 Trend chart of risk probability of different nodes over time

表 3 风险传播结果对比表  
Table 3 Comparison of risk transmission results

| 节点  | 不具有风险差异的风险排序       | 微分方程<br>计算概率 | 节点  | 具有风险差异的风险排序        | 微分方程<br>计算概率 |
|-----|--------------------|--------------|-----|--------------------|--------------|
| W23 | 引擎失效               | 0.265        | W23 | 引擎失效               | 0.332        |
| W30 | 传感器故障              | 0.256        | W30 | 传感器故障              | 0.282        |
| W36 | 尾迹湍流相遇             | 0.125        | W36 | 尾迹湍流相遇             | 0.104        |
| W03 | 空气动力学不稳定           | 0.088        | W03 | 空气动力学不稳定           | 0.089        |
| S44 | 危险姿态飞行             | 0.079        | S28 | 出现非指令性滚转           | 0.087        |
| S35 | 系统根据错误的传感器进行了错误的调整 | 0.075        | S20 | 坠毁                 | 0.084        |
| S20 | 坠毁                 | 0.070        | S35 | 系统根据错误的传感器进行了错误的调整 | 0.083        |
| S28 | 出现非指令性滚转           | 0.068        | S44 | 危险姿态飞行             | 0.079        |
| S05 | 冒险降落               | 0.067        | W11 | 失去空速指示             | 0.073        |
| W11 | 失去空速指示             | 0.066        | W22 | 飞机失速               | 0.063        |

改进的模型可以更敏感地捕捉不同风险点之间在特定情境传播过程中的相对权重差异。上述

10 个高风险节点在网络结构中的可视化结果如图 8 所示。

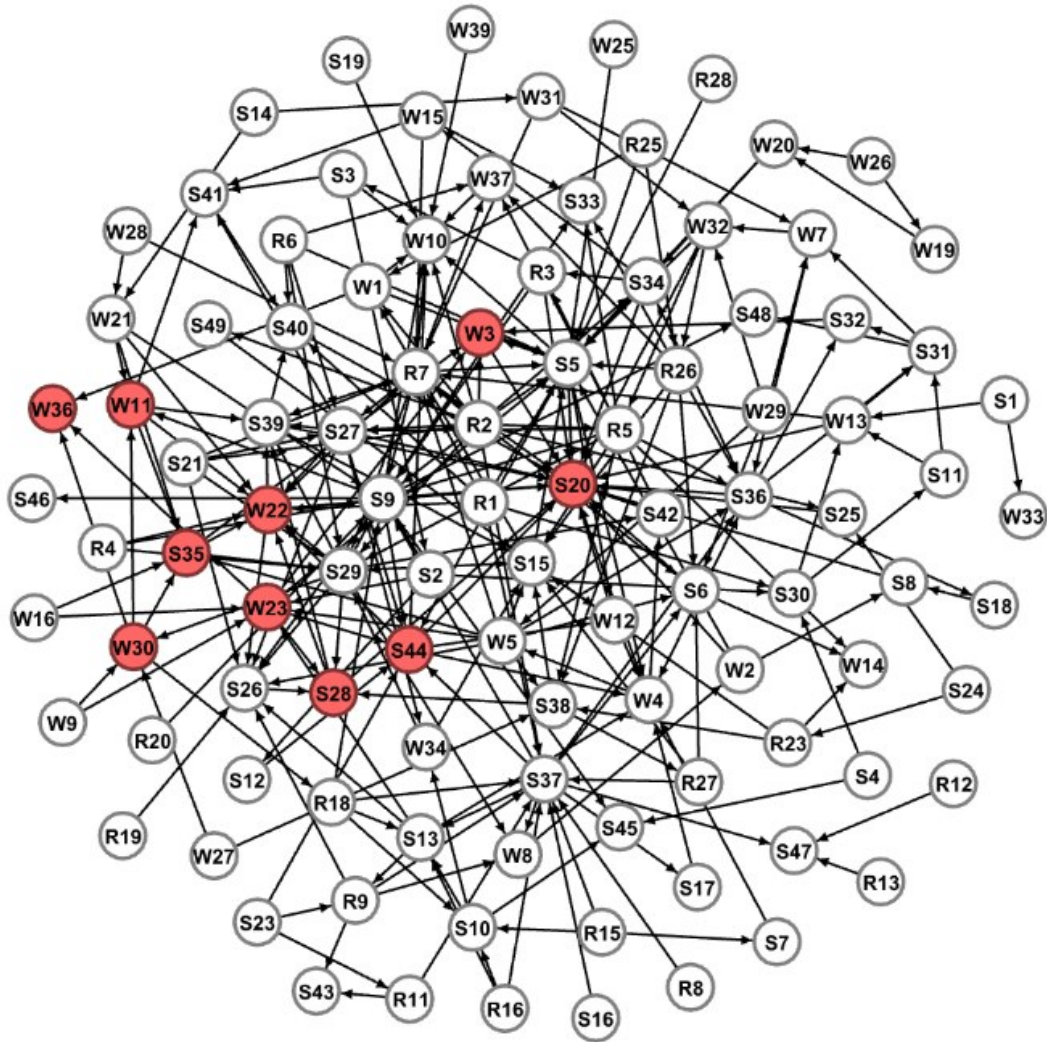


图 8 鸟击风险带来的十个最高概率风险  
Fig. 8 The ten highest probability risks associated with bird strike risk

从图 8 和表 3 可以看出: 概率最高风险组成的风险传播链: “鸟击→引擎失效→尾迹湍流相遇”; “鸟击→引擎失效→空气动力学不稳→坠毁”; “鸟击→引擎失效→出现非指令性滚转→坠毁”; “鸟击→引擎失效→危险姿态飞行→坠毁”; “鸟击→传感器故障→系统根据错误的传感器进行了错误的调整”; “鸟击→传感器故障→失去空速指示→系统根据错误的传感器进行了错误的调整”; “鸟击→传感器故障→失去空速指示→飞机失速→坠毁”; “鸟击→传感器故障→尾迹湍流相遇”。该风险传播链可为风险管控提供参考。

### 3 结 论

本文采用改进的 SIS 模型在飞行安全风险传播过程中对风险更敏感, 能够更真实地反映风险传播过程, 并生成了更符合实际情况的风险传播链。该模型的应用不仅提高了对风险传播机制的理解, 还为优化决策过程提供了有力支持。研究成果可为制定更加有效的风险预防和缓解策略提供重要参考, 进而提升航空安全管理整体水平。

#### 参 考 文 献

- [1] HAMZA M H, POLICHSHUK R, LEE H, et al. Aircraft post-upset flight risk region prediction for aviation safety management[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 54: 101804.
- [2] WANG G Z, XU H J, PEI B B. An intelligent approach for flight risk prediction under icing conditions[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(6): 109-127.
- [3] SUN J Y, LIAO Y, LU F, et al. Assessment of pilot fatigue risk on international flights under the prevention and control policy of the Chinese civil aviation industry during the COVID-19 [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2023, 112: 102466.
- [4] 赵振武, 李艳娇. 数据驱动的航空货物全货机和客机腹舱运输风险分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2024, 20(8): 226-234.  
ZHAO Zhenwu, LI Yanjiao. Data-driven risk analysis on all cargo plane transportation and passenger plane belly cabin transportation of air cargo[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2024, 20(8): 226-234. (in Chinese)
- [5] 安沈昊, 于荣欢. 复杂网络理论研究综述[J]. *计算机系统应用*, 2020, 29(9): 26-31.  
AN Shenhao, YU Ronghuan. Review on complex network theory research [J]. *Computer Systems & Applications*, 2020, 29(9): 26-31. (in Chinese)
- [6] GUO L, MAN R X, WU Y X, et al. Anti-injury function of complex spiking neural networks under targeted attack [J]. *Neurocomputing*, 2021, 462: 260-271.
- [7] 黄辉, 李瑞琪. 基于复杂网络的航空制造供应链关键节点识别研究[J]. *航空工程进展*, 2023, 14(6): 167-177.  
HUANG Hui, LI Ruiqi. Research on key nodes identification of aviation manufacturing supply chain based on complex network [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, 14(6): 167-177. (in Chinese)
- [8] MA B, LU Q, FANG X X, et al. ARGCN: An intelligent prediction model for SDN network performance [J]. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2024, 17(3): 1422-1441.
- [9] ZHAO M, YE J H, LI J Y, et al. NRD: A node importance evaluation algorithm based on neighborhood reliance degree for power networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2023, 624: 128941.
- [10] XING M Y, WANG Q, LI X C, et al. Selection of key-stone species based on stable carbon and nitrogen isotopes to construct a typical food web on the shore of Xingkai Lake, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108263.
- [11] MA Z W, WANG H J, HU Z L, et al. DISLPSI: A framework for source localization in signed social networks with structural balance [J]. *Physics Letters A*, 2024, 523: 129772.
- [12] REN B, LI H J, SHI J L, et al. Identifying the key sectors and paths of the embodied energy in BRICS nations: a weighted multilayer network approach [J]. *Energy*, 2022, 239: 122091.
- [13] 黄海清, 甘旭升, 蒋旭瑞, 等. 考虑机场位置与航线流量影响的航空网络防御资源优化策略[J]. *航空工程进展*, 2020, 11(1): 85-91.  
HUANG Haiqing, GAN Xusheng, JIANG Xurui, et al. Defense resource optimization strategy of aviation networks considering the impact of airport location and route traffic flow [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(1): 85-91. (in Chinese)
- [14] 贾宝惠, 杨丽晨, 王玉鑫. 民用飞机持续安全性评估体系架构设计与分析[J]. *航空工程进展*, 2023, 14(1): 47-56.  
JIA Baohui, YANG Lichen, WANG Yuxin. Design and analysis of ongoing safety assessment system architecture of civil aircraft [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, 14(1): 47-56. (in Chinese)
- [15] 袁乐平, 谷泽坤, 李东琪. 复杂网络城市空中交通生态下 eVTOL 运行风险演化分析[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(3): 192-199.  
YUAN Leping, GU Zekun, LI Dongqi. Risk evolution analysis of eVTOL operation in UAM ecosystem based on complex networks [J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(3): 192-199. (in Chinese)
- [16] ZHOU D, ZHUANG X, ZUO H F, et al. Deep learning-

- based approach for civil aircraft hazard identification and prediction[J]. IEEE Access, 2020, 8: 103665-103683.
- [17] MEMARZADEH M, AKBARI ASANJAN A, MATTHEWS B. Robust and explainable semi-supervised deep learning model for anomaly detection in aviation[J]. Aerospace, 2022, 9(8): 437.
- [18] 曾丽君, 丁松滨, 陈晨. 基于深度时域网络的飞行流数据风险辨识[J]. 航空工程进展, 2026, 17(1): 132-140.  
ZENG Lijun, DING Songbin, CHEN Chen. Risk identification of streamed flight data based on deep temporal network[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2026, 17(1): 132-140. (in Chinese)
- [19] 陈玉婷, 晏启鹏, 毛剑楠, 等. 基于 SIS 传播理论的城市交通拥堵传播模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 103-110.  
CHEN Yuting, YAN Qipeng, MAO Jiannan, et al. Urban traffic congestion propagation model based on SIS propagation theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2023, 42(6): 103-110. (in Chinese)
- [20] 张晗, 王强, 闵桂龙. 基于平均场理论的航空安全风险预警模型[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(1): 210-216.  
ZHANG Han, WANG Qiang, MIN Guilong. Aviation safety risk early warning model based on mean field theory[J]. Systems Engineering & Electronics, 2025, 47(1): 210-216. (in Chinese)
- [21] 孙新丹. 基于 HAZOP 和本体技术的跑道入侵危险分析方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.  
SUN Xindan. Research on runway incursion hazard analysis method based on HAZOP and ontology technology [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)
- [22] 文军, 薛天伟, 胡海坤, 等. 基于 WSR 方法论的航空公司安全风险评估[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(12): 151-154.  
WEN Jun, XUE Tianwei, HU Haikun, et al. Airline safety risk assessment based on WSR methodology[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(12): 151-154. (in Chinese)
- [23] 冯霞, 桑潇, 左海超. 基于 ECSDNN 的航空安全事件风险等级预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(4): 1117-1128.  
FENG Xia, SANG Xiao, ZUO Haichao. Prediction of aviation safety event risk level based on ensemble cost-sensitive deep neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(4): 1117-1128. (in Chinese)
- [24] 翁顺, 雷奥琦, 陈志丹, 等. 基于模型嵌入循环神经网络的损伤识别方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(7): 21-29.  
WENG Shun, LEI Aoqi, CHEN Zhidan, et al. Model-embedding based damage detection method for recurrent neural network[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(7): 21-29. (in Chinese)
- [25] 苏强, 朱敏, 祝延红, 等. 基于多维连续时间马尔科夫链的院感传播及管控策略[J]. 系统管理学报, 2021, 30(4): 743-751.  
SU Qiang, ZHU Min, ZHU Yanhong, et al. Propagation and control of nosocomial infection based on multidimensional continuous-time Markov chain[J]. Journal of Systems & Management, 2021, 30(4): 743-751. (in Chinese)
- [26] 王坤. 多平衡点切换流行病模型稳定性分析[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.  
WANG Kun. Stability analysis of multi-equilibrium switching epidemic model[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024. (in Chinese)

(编辑:马文静)