

中文引用格式:邱佩,罗帆,马成. 基于复杂网络的无人机物流配送安全风险级联失效演化模型[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(3):58-65.

英文引用格式:QIU Pei, LUO Fan, MA Cheng. Cascading failure evolution model of safety risks in UAV logistics distribution based on complex network[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(3):58-65.

基于复杂网络的无人机物流配送安全风险级联失效演化模型*

邱佩¹, 罗帆^{**1}教授, 马成²

(1 武汉理工大学 管理学院, 湖北 武汉 430070; 2 广州中海达卫星导航
技术股份有限公司, 广东 广州 511400)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.0477

基金项目:国家社科基金重大项目资助(23ZDA117);国家自然科学基金资助(72471182)。

【摘要】 为提升无人机(UAV)物流配送安全风险管理水平,基于复杂网络理论构建无人机物流配送安全风险级联失效演化模型,运用仿真演化试验揭示无人机物流配送特定场景中的风险演化特征。针对63份访谈文本分析安全风险因素及其作用关系,对比相关文献的分析结果以验证访谈文本分析结果的可信度;将安全风险因素梳理为人、机、料、法、环(4M1E)5类,构建69个节点、469条连边组成的有向加权复杂网络;基于Gephi平台计算分析复杂网络整体拓扑结构特征,明确风险动态演化分析的必要性;将复杂网络中节点的重要度分为高度、中度、一般,所处的发展阶段划分为潜伏、扩散、发生,为动态级联失效演化模型构建奠定基础;定义风险传播概率、风险负荷重分配规则等,以定量刻画风险演化,设计Python程序进行仿真演化试验;设置关键试验组并构建无人机物流配送安全风险的演化网络,从关键演化节点、关键演化路径等维度分析仿真演化结果。研究结果表明:演化网络中“机”类s15、s17、s18等节点重要度最高,且该类因素为起点的关键演化路径最丰富;“环”类节点s54、s57失控是导致“机”类节点失控的主要源头,故应制定策略重点管控环、机类因素,如外部监管不成熟、设备信号问题等,实现安全风险管控关口前移。

【关键词】 复杂网络; 无人机(UAV); 物流配送; 安全风险; 级联失效; 演化模型

Cascading failure evolution model of safety risks in UAV logistics distribution based on complex network

QIU Pei¹, LUO Fan¹, MA Cheng²

(1 School of Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China;

2 Guangzhou Hi-Target Navigation Tech Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 511400, China)

Abstract: To enhance the safety risk management level of UAV logistics distribution, a cascading failure evolution model for UAV logistics distribution safety risks was constructed based on complex network theory. Through simulated evolution experiments, the risk evolution characteristics in specific scenarios of UAV logistics distribution were revealed. By analyzing 63 interview transcripts, safety risk factors and their

* 文章编号:1003-3033(2026)03-0058-08; 收稿日期:2025-09-14; 修稿日期:2025-12-03

** 通信作者:罗帆(1963—),女,湖南益阳人,博士,教授,主要从事安全风险管理方面的研究。E-mail:sailluof@126.com。

interrelationships were identified, and the credibility of these findings was verified by comparing them with relevant literature analysis results. The safety risk factors were categorized into five types: personnel, machinery, materials, methods, and environment. A directed weighted complex network with 69 nodes and 469 edges was then constructed. Using the Gephi platform, the overall topological structure characteristics of the complex network were calculated and analyzed, confirming the necessity of dynamic risk evolution analysis. The importance levels of nodes in the complex network were classified as high, medium, and general, and the development stages were classified as latent, diffusion, and occurrence, which laid the foundation for the construction of the dynamic cascading failure evolution model. Risk propagation probability and risk load redistribution rules were defined to quantitatively characterize risk evolution. A Python program was designed to conduct simulation evolution experiments. Key experimental groups were defined, and the evolution network of UAV logistics distribution safety risks was constructed. The simulated evolution results were analyzed from dimensions such as key evolution nodes and key evolution paths. The results show that in the evolution network, nodes s15, s17, and s18 in the machinery category are the most important, and the key evolution paths starting from this category of factors are the most abundant. The loss of control of nodes s54 and s57 in the environment category is the primary cause of control failure in the machinery category nodes. Therefore, strategies should be formulated to focus on controlling factors in the environment and machinery categories, such as immature external supervision and equipment signal issues, to achieve forward shifting of safety risk control.

Keywords: complex network; unmanned aerial vehicle (UAV); logistics distribution; safety risk; cascading failure; evolution model

0 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)物流配送是以物流无人机为运输工具,将货物从发货地(起飞点)运送到收货地(降落点)的生产运营活动,是解决物流配送“最后一公里”问题的有效方式^[1]。无人机物流配送场景错综交织、复杂多变,体现在:生产要素密集,涉及大量的利益相关方、设备设施、管理、货物等;陆空一体超视距作业,起降场地分布于人口稠密地区^[2]。低空物流配送安全难以预控,可能对地面人员造成伤害和损坏包裹,因此,有必要研究无人机物流配送安全风险及其演化特征,提高其安全风险管理水平,促进低空交通健康有序发展。

目前,主要从技术角度解决以上问题,如 KURU 等^[3]利用强化学习重塑集群智能分发平台,降低了20%能耗;SUSHMA 等^[4]梳理了47种路径算法,却在城市动态禁飞区实时性上留缺口;周鹏等^[5]将符号级预编码与轨迹耦合,对抗性信道下中断概率降低了8 dB,但未涉多机协同丢包;ALTINSES 等^[6]用评分算法平衡续航与交货期,默认了空域静态开放;SHI Yong 等^[7]以异构货舱提升灾后装载率,却忽略了城市峡谷多径与临时管制。这些技术方案难以在

真实复杂场景中给出可证明的安全闭环,因此,还要从管理角度提供解决方案,如通过多维度分析自然环境对货物的影响^[8]、低空监管及相关政策对配送行为的影响^[9]、公众对无人机飞行的影响^[10]等,全面识别人、机、料、法、环(Man, Machine, Material, Method, Environment, 4M1E)5类安全风险因素及其相互作用关系,据此提出管控策略。

复杂网络在辅助理解和分析复杂安全风险因素及其作用关系方面应用广泛,由代表安全风险因素的节点与代表安全风险因素间作用关系的有向或无向连边组成,主要基于复杂网络节点度、中介中心性等统计参数分析复杂网络拓扑分布特征,识别出关键节点并提出断链控制策略^[11]。为进一步刻画风险因素动态演化特性,多基于复杂网络建立级联失效模型、传染病模型实现复杂网络中风险在各条连边中的动态传播。其中,级联失效指的是系统中一个节点的失效通过节点间的相互作用引发一系列失效^[12],能够定量刻画连锁反应的动态过程,检测出系统中关键演化节点和演化路径。级联失效模型相对于传染病模型能更全面地分析和应对网络中的连锁反应,并能通过模型仿真结果分析整个网络风险演化规律^[12-14]。这些研究主要演化分析了地面交通场景,而对无人机物流配送等低空交通场景的研

究较为鲜见。因此,笔者拟综合考虑无人机物流配送特定场景 4MIE 共 5 个方面的关键安全风险因素及其作用关系,构建复杂网络模型,分析其拓扑分布特征,结合复杂网络和级联失效理论构建动态演化模型,通过 Python 软件模拟风险动态演化,多维分析仿真结果,并制定断链控制策略,以期预防无人机物流配送安全风险事件发生,提高低空交通安全管理水平。

1 复杂网络模型构建

复杂网络由节点和连边组成,在刻画与分析复杂问题方面应用广泛。肖琴等^[15]已在通用航空安全风险领域应用了复杂网络模型;陈国荣等^[16]已在物流配送领域应用了复杂网络模型,都将特定场景中的安全风险因素抽象成节点,因素间关系抽象成连边,进而展开分析。无人机物流配送场景中也存在复杂的安全风险因素,且因素间有明确指向关系,引起无人机物流配送安全风险事件发生的因素可能复现,故本文构建有向加权的复杂网络模型。

1.1 复杂网络节点与连边确定

1.1.1 访谈样本说明

因针对无人机物流配送场景的公开可查安全风险结构化数据有限,采用专家访谈法,要求当前属于无人机物流配送利益相关者,在物流配送或无人机领域工作或学习至少 3 年,能够在经费和时间限制内配合完成访谈并清楚表达观点看法。选择 63 位专家,完成 63 段一对一半结构化深度访谈,平均每段访谈用时 75 min。企业、科研院所、监管机构的受访者样本数量分别为:38、14、11。受访者所在单位包括大疆、美团、慧飞、帆陌飞保、东莞通航、云南机场集团等企业,北京航空航天大学、西华大学、重庆警察学院等科研院所,监管机构包括中国民航中南空管局、空管湖北分局、武汉市交通局等。

1.1.2 访谈文本分析

将访谈音频资料转文字,识别安全风险因素及其作用关系,识别步骤如下:①分割段落,标注相关的安全风险因素;②分析每个段落中的安全风险因素之间存在的关系。如访谈文本“有些地方人群密集,可能出现人为干扰无人机配送的情况”,则识别出作用关系“地域场景复杂→人为干扰无人机”。从降低风险管理成本角度出发,去除出现次数小于 3 的风险因素,聚焦于出现次数 ≥ 3 的风险因素。经筛选,共确定 69 个关键安全风险因素与 469 条有向作用关系。

为检验基于访谈文本的安全风险因素与作用关系识别是否可靠、充分,以无人机、物流配送、安全风险、演化为关键词,检索研究主题相关的国内外文献,分析文献关键词与摘要。对比分析结果表明文献与访谈文本分析结果有相似性,体现在:涉及 64 个共同的安全风险因素,访谈文本分析得到的 469 条有向作用关系中 289 条与文献分析结果一致。180 条有向作用关系未在文献关键词与摘要中出现。一方面受访者基于无人机物流配送相关工作学习提出最新的关联关系,另一方面无人机技术与应用快速发展,而文献刊出有一定滞后性,文献时效性受到影响,且由于时间限制,人员未对文献正文展开分析,导致文献分析得到的相互作用关系少于访谈文本分析得到的数量。以上分析结果表明:基于访谈文本识别的安全风险因素与作用关系比较可靠。

站在无人机物流配送运营企业角度,基于 4M1E 原则梳理 69 个关键安全风险因素^[17](图 1)。初步定性梳理每个关键风险因素的 4M1E 属性后,通过专家咨询方式矫正,人、机、料、法、环关键风险因素,分别为图 1 中的 s_1 — s_{11} 、 s_{12} — s_{26} 、 s_{27} — s_{36} 、 s_{37} — s_{49} 、 s_{50} — s_{69} 。环境关键风险因素个数最多,共 20 个。

基于 4M1E 原则梳理无人机物流配送各关键风险因素后直接开展风险管理方式较为粗犷,不能充分揭示关键风险因素间相互作用关系或风险叠加机制,故依据复杂网络理论,将关键安全风险因素抽象为节点,将有向作用关系抽象为有向连边,连边被提及次数抽象为连边权重,构建有向加权复杂网络,为无人机物流配送安全风险演化分析奠定基础。

1.2 复杂网络拓扑结构分析

1.2.1 整体拓扑结构分析

将复杂网络节点与连边数据输入 Gephi 软件,计算结果如下:网络直径 6,平均路径长度 2.512,小于网络半径,说明网络节点间联系紧密,易出现级联失效情况。网络平均度 7,平均加权重 27.209,密度 0.106,平均聚类系数 0.328,大于 Erdős-Rényi 随机复杂网络的集聚系数 0.200,说明网络集聚程度高,具有小世界特性^[18]。复杂网络中风险演化在由少部分节点和连边构成的子网内快速演化,演化分析必要性大。

1.2.2 节点重要度分析

利用熵值法评估基于复杂网络中节点加权重、聚类系数等 10 个统计参数的权重,计算每个节点综

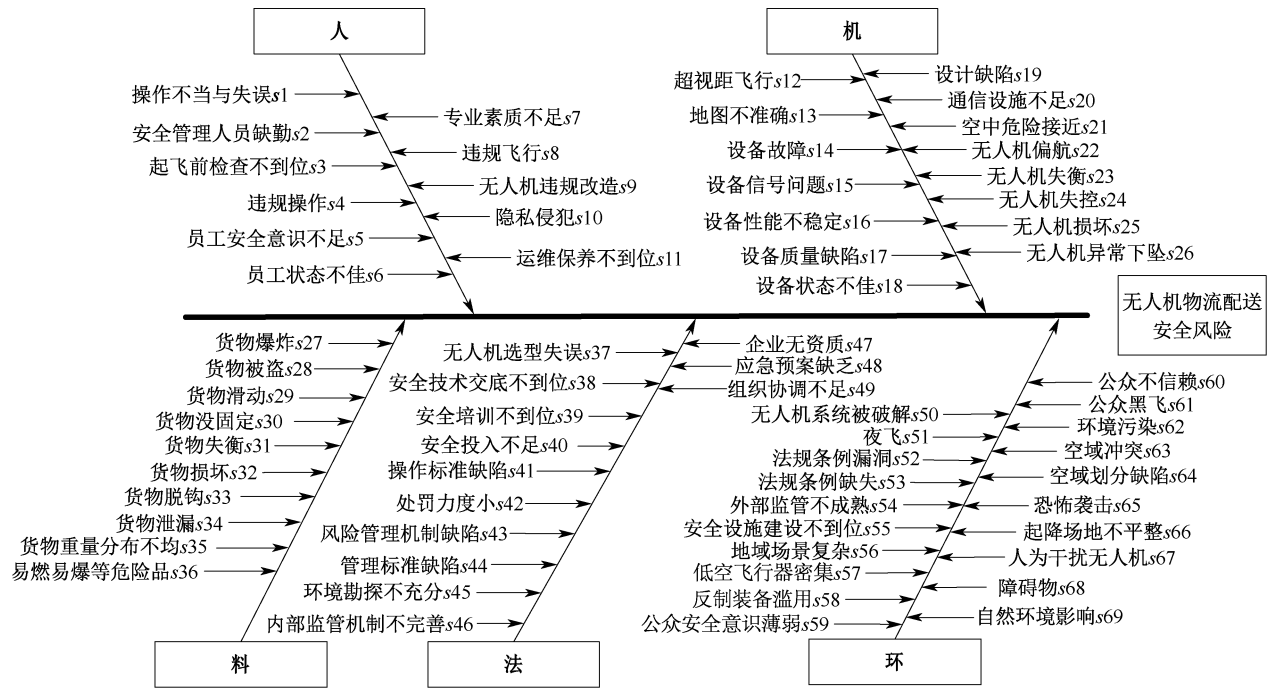


图 1 无人机物流配送关键安全风险因素的鱼骨图

Fig. 1 Fishbone diagram of key safety risk factors in UAV logistics distribution

合重要度,划分风险因素重要程度等级。

1) 网络参数权重计算。熵值法定权是客观评估不确定场景中各参数权重的常用方法,参数熵值越大,风险信息越多,则该参数权重也越大^[19]。操作步骤依次为各节点各统计参数值标准化、计算每个参数信息熵、计算每个参数权重。选取的统计参数及每个参数权重如下:度为 0.08,加权重为 0.18,接近中心性为 0.01,调和接近中心性为 0.01,中介中心性为 0.20,权威性为 0.13,Hub 度为 0.07,聚类系数为 0.05,特征向量中心性为 0.13,Pagerank 为 0.15。

2) 节点综合重要度计算。每个节点每个参数原始值与每个参数权重乘积作为节点综合重要度,如节点 s15 每个参数原始值如下:度为 41,加权重为 225,接近中心性为 0.550,调和接近中心性为 0.643,中介中心性为 506.761,权威性为 0.244,HUB 度为 0.236,聚类系数为 0.217,特征向量中心性为 0.716,Pagerank 为 0.049,依次乘以每个参数权重,得到该节点重要度 0.725。按以上方法完成每个节点重要度计算,重要度降序排列结果见表 1。

3) 节点重要程度等级划分。节点重要度降序排列,发现排名第 10 与 11、第 20 与 21 的节点之间重要度有较大变化,故将排名 1—10、11—20 的节点划分为高度重要、中度重要节点,其他节点为一般重要节点。

表 1 复杂网络节点重要度

Table 1 Node importance in complex networks

节点	重要度	节点	重要度	节点	重要度
s15	0.725	s17	0.614	s19	0.424
s23	0.714	s24	0.599	s8	0.365
s26	0.707	s25	0.566	s14	0.342
s54	0.639	s21	0.534	s53	0.342
s18	0.626	s1	0.507	...	...

1.2.3 节点所处阶段分析

为进一步刻画网络级联失效特征,基于节点加权入度、加权出度占该节点加权重度值比例,将风险因素所处阶段分为潜伏、扩散、发生 3 类,加权入度占比小于 0.333 的 31 个节点为潜伏类节点,大于 0.667 的 13 个节点为发生类节点,其余为扩散节点。

基于上述分析,在 Gephi 软件中实现复杂网络拓扑分布特征可视化处理,共分为 9 类,复杂网络如图 2 所示,节点大小表征节点加权重度大小,连边粗细表征连边权重大小,不同颜色代表鱼骨图中不同类别的安全风险因素。图 2 中,潜伏节点比扩散、发生节点少,一般重要的发生类节点数量最多,共 24 个,并且加权重度值不大,说明少数因素可能不直接对配送安全造成显著影响,但若未受到有效管控,将引发一系列问题。高度重要的节点数量不多但每个节点

加权重度都较大,且大都与“机”类安全风险密切相关,说明无人机物流配送安全风险管控应重点关注无人机相关因素。

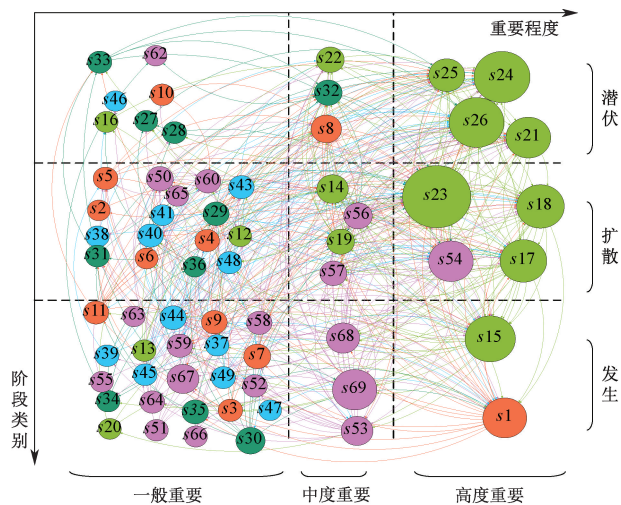


图2 无人机物流配送安全风险的复杂网络

Fig. 2 Complex network of safety risks in UAV logistics distribution

2 安全风险级联失效演化模型构建

基于复杂网络模型构建级联失效模型,将实现复杂网络拓扑结构动态变化,从而更好地理解复杂系统在面对外部干扰或者内部失调时的动态行为。

2.1 级联失效演化模型说明与假设

将网络中节点级联状态划分为活跃节点 s 、易感节点 s' 、失效节点 s'' 等3种,将模型演化时间记为 t 。级联失效过程概括为以下阶段: $t=0$ 时,所有节点风险负荷初始化,均为易感节点 s' ; $t=1$ 时,在网络中随机选取一个或多个易感节点,作为种子节点(活跃节点),触发风险演化过程;当网络中活跃节点数量为0,网络停止演化。

假设仅易感节点接收活跃节点传递的风险;一旦活跃节点将风险传递出去,将成为失效节点;一旦易感节点接收风险后的风险负荷不小于其安全阈值,将成为活跃节点,否则,风险负荷累积,仍为易感节点。假设任意单位时间内,网络中的风险至少在一条连边中传播,否则该演化过程停止;风险在任意一条边中传播所需时间为1,活跃节点将风险递给其他每个节点的概率不随时间变化。假设1.1节已充分识别该场景中的重要安全风险因素及这些因素之间的连边,且风险演化过程中不产生新的节点或连边。

2.2 动态级联失效演化模型构建

1) 风险负荷初始化。 $t=0$ 时,定义网络中所有易感节点 s' 的风险值为 $R_0^{s'}$,等于其在复杂网络中的重要性。

2) 安全阈值设定。定义风险传播调节因子 α ,反映节点间风险传递的基础概率,取值范围 $(0, 1)$,由专家经验确定,用于平衡模型敏感性与稳定性。一旦易感节点 s' 风险负荷不小于其安全阈值 $Y_{s'}$,变为活跃节点^[12]。安全阈值不随时间变化,按下式计算:

$$Y_{s'} = R_0^{s'}(1 + \alpha) \quad (1)$$

3) 种子节点设定。 $t=1$ 时,选取图2中一个或多个潜伏节点为种子节点,种子节点负荷 $R_1^s = Y_{s'}$ 。

4) 风险传播概率设定。活跃节点 s 将风险递给易感节点 s' 的概率与两者的风险负荷相关,还与其加权出度有关,不随时间变化,按下式计算:

$$P(s, s') = \delta(R_0^s + R_0^{s'})/2 + (1 - \delta)dw_{ss'}/w_s^{\text{out}} \quad (2)$$

式中: δ 为相关性系数,范围为 $(0, 1)$; R_0^s 和 $R_0^{s'}$ 依次为节点 s 和 s' 在 $t=0$ 时的风险负荷; d 为节点 s 在复杂网络中所处阶段类别,图3中潜伏、扩散、发生类节点对应 d 值依次为1.2、1、0.8; $w_{ss'}$ 为 s 指向 s' 的连边权重; w_s^{out} 为节点 s 加权出度。

5) 风险负荷重分配规则设定。

规则1: t 时刻,易感节点接收单一活跃节点传递而来的风险时,其风险负荷增加,设定累积系数 β ,此时潜伏节点的风险负荷如下:

$$R_t^{s'} = R_{t-1}^{s'} + P(s, s')\beta R_{t-1}^s \quad (3)$$

式中 R_{t-1}^s 、 $R_{t-1}^{s'}$ 依次为节点 s 、 s' 于 $t-1$ 时刻风险负荷。

规则2:易感节点接收多个活跃节点传递而来的风险时,考虑风险因素之间的耦合作用,耦合作用分为正耦合、负耦合、零耦合3种。正耦合表示易感节点的风险进一步放大,负耦合代表风险减小,零耦合代表不增加或减小。在依据式(3)增加每个活跃节点递给易感节点的风险负荷基础上,设定耦合系数 χ 矫正易感节点的风险负荷,计算方式如下:

$$J_t^{s'} = R_t^{s'}\chi \quad (4)$$

式中 χ 为耦合系数,当 $\chi > 1$ $\chi = 1$ 、 $0 < \chi < 1$ 时,分别表示正耦合、零耦合、负耦合作用。

规则3:易感节点的风险负荷随时间变化,且仅在风险抵达瞬间发生改变;一旦活跃节点将风险递出去,不论该活跃节点是否成功传递风险或是否存

在直接指向的易感节点,都将变为失效节点;失效节点的风险负荷不随时间变化;风险终止传递时刻为 t_e ,将演化过程中风险最大递次数限制为 $t_{\max}$,即要求 $t_e \leq t_{\max}$ 。

3 级联失效演化试验与结果分析

3.1 级联失效演化试验

1) 基础数据准备。基于构建的复杂网络,依据式(1)计算 69 个节点的初始风险负荷 R_0^s ,令 $\delta = 0.5$,计算 469 条连边的风险传播概率 $P(s, s')$,为风险动态演化仿真奠定基础。

2) 仿真演化试验程序设计。基于现有文献以及实际情况,初步设定 3 个系数的取值范围: $\alpha \in (0, 0.2]$, $\beta \in [0.5, 1]$, $\chi \in [0.5, 1.5)$ 。考虑计算资源和时间成本限制, α 取值 0.01、0.05、0.1、0.15、0.2, β 取值 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1, χ 取值 0.5、0.55、0.6、0.65、 $\cdots$ 、1.45,设置共 $5 \times 6 \times 20 = 600$ 个试验组,每组演化周期 $T = 1\,000$,即一个演化周期 T 包含 1 000 次往复的演化过程,600 个试验组共计执行 60 万次网络演化。每次演化过程随机选择图 2 中的 1 个潜伏节点作为种子节点,即演化过程的起点($t = 1$)。考虑时间成本,限制单次演化过程中风险最大递次数不大于 15,即 $t_{\max} = 15$ 。

统计每个试验组内每个演化过程历经时间的平均值 A_i 、方差 V_i ,以及每个试验组内每个演化过程产生失效节点个数的平均值 A_n 、方差 V_n 。方差较小时,说明试验组的试验结果比较集中、稳定、可靠。以方差较小的试验组为关键试验组切入,以发现和总结风险演化一般性规律,揭示风险演化机制。

3.2 级联失效演化结果多维分析

3.2.1 演化网络构建

代码运行 59.04 s 后,仿真演化试验结束,得到 60 万条演化过程仿真结果,以及 600 条试验组对应的 A_i 等 4 个统计参数值。以 V_i 或 V_n 最小的 100 个试验组为筛选条件,得到 146 个关键试验组,84 组 $A_i = 4$ 且 $A_n = 11$ 。以上分析说明:无人机物流配送安全风险传播速度快,1 个潜伏节点失控,平均 4 步,即导致网络中 11 个节点失控,安全风险管控关口前移以避免损失的迫切性、必要性大。以演化过程最大步数等于 4、失效节点数量等于 11 为条件,从关键试验组中筛选共 42 个代表性的演化过程,构建基于复杂网络理论的演化网络,该演化网络包含 48 个节点与 190 条连边,演化网络如图 3 所

示。其中,节点大小代表重要度大小。

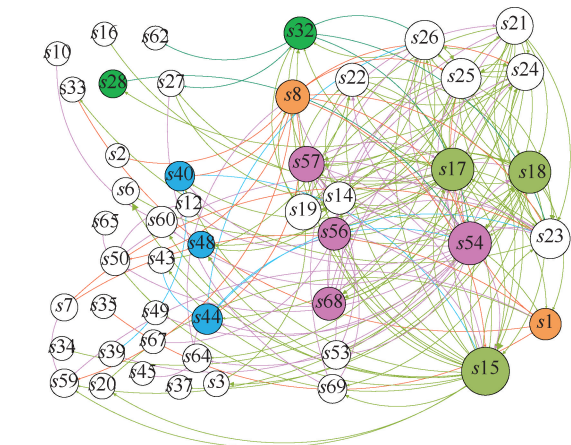


图 3 无人机物流配送安全风险演化网络
Fig. 3 Evolution network of safety risks in UAV logistics distribution

3.2.2 关键演化节点分析

依据 1.2.2 节方法计算风险演化之后,得到演化网络中各个节点的重要度,依据二八定律,将 4MIE 各类节点中重要度前 20% 的节点定义为关键演化节点,见表 2。“机”类节点 s_{15} 、 s_{17} 、 s_{18} 重要度最高,其次是“环”类节点,说明这 2 类节点需要重点管控。

表 2 关键演化节点					
Table 2 Key evolutionary nodes					
类别	节点	重要度	类别	节点	重要度
人	s_8	0.348	法	s_{44}	0.236
	s_1	0.268		s_{40}	0.205
机	s_{15}	0.821		s_{48}	0.107
	s_{17}	0.637	环	s_{54}	0.566
	s_{18}	0.627		s_{57}	0.400
料	s_{32}	0.300		s_{68}	0.314
	s_{28}	0.146		s_{56}	0.301

3.2.3 关键演化路径分析

演化网络中 190 条权重 ≥ 6 的连边占比 13.68%, ≥ 5 的连边占比 23%,共 44 条,依据二八定律,将权重 ≥ 5 的连边定义为关键演化路径,见表 3。关键演化路径大部分以“机”类演化节点为起点,是无人机物流配送安全风险管控级联失效的主要起点,“机”类风险因素失控将造成各类损失。其次,“环”类风险因素是造成“机”类风险因素失控的主要原因,故风险管控关口前移应从“环”类风险因素管控开始。

3.2.4 关键演化网络分析

以演化起点、终点均为关键演化节点为条件,筛选出 10 条关键演化路径,构建出关键演化网络,如

图 4 所示。图中连边上数字表示权重,发现这些连边权重差异不大,但节点重要度差异明显。

表 3 关键演化路径

Table 3 Key evolutionary paths

演化起点	演化终点
s15	s14、s17、s18、s20、s22、s23、s24、s32、s43、s48、s6、s60、s69
s18	s15、s17、s23、s24、s26、s3
s21	s23、s24、s25、s26、s54、s68
s22	s18
s24	s28
s25	s15、s19、s23、s24、s48、s57
s26	s15、s19、s25、s57、s68
s54	s15、s18、s22、s57
s57	s17、s21

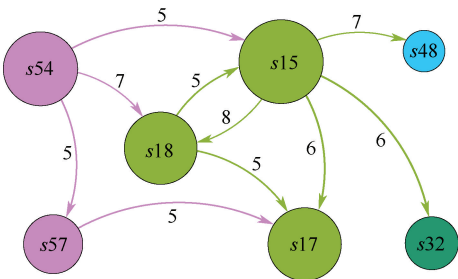


图 4 关键演化网络

Fig. 4 Key evolutionary network

3.3 断链控制策略

从多维分析仿真演化结果得到,提出针对“环”“机”类安全风险因素的断链控制策略是实现无人机物流配送安全风险管控关口前移的关键。

1) 针对“环”类安全风险因素。s54 是导致风险演化的关键源头,可能导致 s15、s18、s57 等问题,地方要强化低空经济发展的统筹协调工作。体制方面,要明晰空军、空管局、各级政府间的监管界限,建立高效的沟通渠道,为无人机物流配送企业等主体提供更优的监管服务。机制方面,以“低空一张图”为切入点构建完善的智能管控系统,与通信、气象等单位加强合作并合理分配通信资源、空域资源,进而优化低空航线网,实现行业级无人机、消费级无人机全线跟踪,保障物流无人机配送环境的安全性。法制方面,要完善针对飞手、无人机企业的法律法规,

明确违规飞行等行为的处罚措施,减少物流无人机由于局部低空飞行器密集等原因引发的信号干扰等问题。

2) 针对“机”类安全风险因素。s15 是导致风险演化的关键中介,可能导致 s17、s18、s32 等问题,还将放大 s48 带来的危害。可从无人机研发设计优化、出厂标准完善、通信基站增设等方面入手,提升无人机的通信能力,降低无人机在配送过程出现信号中断、图传延迟等问题的可能性。此外,物流无人机配备 4G 模块将增强无人机在配送过程中的数据传输能力,这将有效减少设备信号问题。企业还应加强设备信号问题应急管理,例如完善无人机信号监测与预警机制、建立备用通信基站、定期开展相关的应急演练并强化作业人员在应急场景中迅速排障能力等。若无人机或中继通信基站的信号管理失控,可能直接导致货物损坏等损失,可在无人机机身配备降落伞等缓冲设施,减小突发场景中无人机俯冲动能,也可定制防爆货舱,防止货物掉落受损。

4 结 论

1) 通过访谈文本分析识别出现次数 ≥ 3 的重要安全风险因素 69 个,有向作用关系 469 条。对比分析相关文献并结合多轮编码校验,文献与访谈文本分析结果有充分的相似性,说明基于访谈文本识别的安全风险因素与作用关系比较可靠。

2) 基于复杂网络构建出动态级联失效演化模型,通过仿真分析得到 14 个关键演化节点、44 条关键演化路径。关键演化路径大部分以“机”类演化节点为起点,是无人机物流配送安全风险管控级联失效的主要起点。“环”类风险因素是造成“机”类风险因素失控的主因,故风险管控应从“环”类风险因素管控开始。针对环、机类安全风险因素采取断链控制策略,有助于减少无人机失联、失控等风险事件发生。

3) 由于公开可查的无人机物流配送安全风险数据有限,故文中主要基于访谈数据确定复杂网络节点与连边。随着无人机物流配送业务发展,未来可根据无人机物流配送安全实际数据丰富基础数据再展开深入研究。

参 考 文 献

[1] 钟罡,励瑾,张晓玮,等. 物流无人机对地风险评估方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4): 246-254.

- ZHONG Gang, LI Jin, ZHANG Xiaowei, et al. A risk assessment method of logistics drones on ground[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022,22(4):246-254.
- [2] WANKMÜLLER C, KUNOVJANEK M, MAYRGÜNDTER S. UAVs in emergency response-evidence from cross-border, multi-disciplinary usability tests[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021,65:DOI:10.1016/j.ijdr.2021.102567.
- [3] KURU K, ANSELL D, KHAN W, et al. Analysis and optimization of unmanned aerial vehicle in swarms in logistics: an intelligent distribution platform[J]. IEEE Access, 2019,7:15 804-15 831.
- [4] SUSHMA M B, MASHHOODI B, TAN W, et al. Spatial UAV path planning: a systematic review of parameters and algorithms[J]. Journal of Transport Geography, 2025,125:DOI:10.1016/j.jtrangeo.2025.104209.
- [5] 周鹏,樊晔,马为鑫,等. 面向对抗性通信环境的无人机群轨迹与符号级预编码联合优化策略[J]. 信号处理, 2025,41(4):656-667.
- ZHOU Peng, FAN Ye, MA Weixin, et al. Joint optimization strategy of unmanned aerial vehicle group trajectory and symbol-level precoding in an adversarial communication environment[J]. Journal of Signal Processing, 2025,41(4):656-667.
- [6] ALTINSES D, TORRES D O S, SCHWUNG M, et al. Optimizing UAV logistics: a scoring algorithm for enhanced decision making across diverse domains in UAV airlines[J]. UAVs, 2024,8(7):DOI:10.3390/UAVs8070307.
- [7] SHI Yong, YANG Junhao, HAN Qian, et al. Optimal decision-making of post-disaster emergency material scheduling based on helicopter-truck-UAV collaboration[J]. Omega-International Journal of Management Science, 2024,127:DOI:10.1016/j.omega.2024.103104.
- [8] LAMMERS D T, WILLIAMS J M, CONNER J R, et al. Airborne! UAV distribution of blood products and medical logistics for combat zones[J]. Transfusion, 2023,63:96-104.
- [9] 张斌. 中国低空经济发展促进法的理据与图景[J]. 北京航空航天大学学报:社会科学版,2025,38(1):71-84.
- ZHANG Yu. Rationale and vision of the law on promoting the development of China's low-altitude economy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics:Social Sciences Edition, 2025,38(1):71-84.
- [10] JEONG H Y, YU D J, MIN B C, et al. The humanitarian flying warehouse[J]. Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review, 2020,136:DOI:10.1016/j.tre.2020.101901.
- [11] 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.
- [12] 程明,梅傲然. 冲偏出跑道事件演化网络构建与分析[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(12):77-84.
- CHENG Ming, MEI Aoran. Construction and analysis of evolution network of runway excursion events[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(12):77-84.
- [13] QU Chenrui, ZHOU Jiaxin, SUN Heying, et al. Vulnerability evolution of a container shipping network in an uncertain environment: the case of China-united states connections[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024,12(10):DOI:10.3390/jmse12101780.
- [14] SUN Ranran, ZHU Guangyu, LIU Bing, et al. Vulnerability analysis of urban rail transit network considering cascading failure evolution[J]. Journal of Advanced Transportation, 2022:DOI:10.1155/2022/2069112.
- [15] 肖琴,罗帆. 基于复杂网络的通用航空安全监管演化博弈研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2022,19(3):33-43.
- XIAO Qin, LUO Fan. Study on evolutionary game of general aviation safety supervision based on complex network[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2022,19(3):33-43.
- [16] 陈国荣,鄢萍,彭军,等. 一种基于成长的物流网络建模方法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2008,36(5):24-29,37.
- CHEN Guorong, YAN Ping, PENG Jun, et al. A growth based modeling method of logistics network[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition, 2008,36(5):24-29.
- [17] 孙宇博. 卷烟包装纸箱再循环物流系统关键问题研究[J]. 物流技术, 2016,35(8):170-172.
- SUN Yubo. Study on key issues in recycling logistics system of cigarette packaging cartons[J]. Logistics Technology, 2016,35(8):170-172.
- [18] SHAHRAEINI M. Modified Erdős-Rényi random graph model for generating synthetic power grids[J]. IEEE Systems Journal, 2024,18(1):96-107.
- [19] 贾晓珊,高扬. 改进集对分析模型在公务航空运行控制风险评价中的应用[J]. 科学技术与工程, 2020,20(26):10 973-10 978.
- JIA Xiaoshan, GAO Yang. Application of improved set pair analysis model to risk evaluation of business aviation operation control[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(26):10 973-10 978.

作者简介: 邱佩 (2000—),女,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向为安全风险与应急管理等方面。E-mail:3516771628@qq.com。

