

中文引用格式:柳青,沈恬.基于贝叶斯网络的生物样本无人机运输风险评估[J].中国安全科学学报,2025,35(1):16-24.

英文引用格式:LIU Qing, SHEN Tian. Risk assessment of biological sample transport by UAVs based on Bayesian networks[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1): 16-24.

基于贝叶斯网络的生物样本无人机运输风险评估*

柳青 副教授, 沈恬

(中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.01.0441

基金项目: 民航联合基金资助(U1633123); 中国民航局安全能力项目([2022]266号)。

【摘要】 为量化生物样本无人机(UAV)运输风险,首先,依据国家标准规范和相关研究,在分析生物样本无人机运输流程基础上,从人-机-环-管-危5个维度确定生物样本无人机运输过程的32个风险因素;其次,利用Netica软件构建生物样本UAV运输风险评估贝叶斯网络(BN),利用专家先验知识和模糊集量化分析确定先验概率;然后,利用建立的生物样本无人机运输风险评估模型进行双向推理和情景分析;最后,以深圳某无人机企业为例,评估生物样本无人机运输风险,得出关键影响因素。结果表明:以正向推理计算出的生物样本UAV运输的风险概率约为 2.203×10^{-5} ,造成运输风险的主要原因是危险品因素,其次是设施设备因素;影响生物样本UAV运输风险的核心因素为危险品包装件的尺寸/数量/重量、专用冷链物流箱控温效果、应急预案完善情况、安全应急处置能力、安全教育管理和障碍物因素。

【关键词】 贝叶斯网络(BN); 生物样本; 无人机(UAV)运输; 风险评估; 应急处置

Risk assessment of biological sample transport by UAVs based on Bayesian networks

LIU Qing, SHEN Tian

(School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China,
Tianjin 300300, China)

Abstract: To quantify the transportation risks associated with biological samples using UAVs, this study first identified 32 risk factors across five dimensions-human, machine, environment, management, and hazard-based on national standards and relevant literature. A BN for risk assessment was constructed using Netica software, with prior probabilities determined through expert knowledge and fuzzy set quantitative analysis. The proposed risk assessment model was then used for bidirectional reasoning and scenario analysis. A case study of a UAV company in Shenzhen was presented to evaluate the transportation risks of biological samples and identify key influencing factors. The results indicate that the risk probability of biological sample transportation, as calculated through forward reasoning, is approximately 2.203×10^{-5} . The primary risk factors are related to hazardous materials, followed by equipment and facility-related issues. The core risk factors influencing biological sample transportation include the size, quantity and weight of hazardous material packages, the temperature control effectiveness of specialized cold chain

logistics boxes, the integrity of emergency response plans, emergency handling capabilities, safety management and education, and the presence of obstacles.

Keywords: Bayesian networks (BN); biological samples; unmanned aerial vehicle (UAV) transportation; risk assessment; emergency response

0 引言

近年来,我国无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)物流飞速发展,无人机物流已经成为我国物流领域的一个重要发展方向。生物样本无人机运输是无人机物流发展的新兴领域,它结合了无人机技术和生物医学运输的需求,可大幅提高生物样本的运输效率,从而满足医疗和科研机构对样本及时送达的需求。金城医学与顺丰合作启动无人机进行生物样本运输是国内首创,不仅促进了医疗资源的互通共享,还提升了冷链物流的灵活性,缩短了运输时间,从而提升了检测效率,在广州、杭州、西安、青岛等多个城市已开展相关业务。因此,研究生物样本无人机运输风险具有重大现实价值。

危险品运输风险无时不在,世界各地时常发生危险品运输事故,如 2024 年 12 月 22 日巴西连接阿圭亚尔诺波利斯市和埃斯特雷图市横跨托坎廷斯河的 Juscelino Kubitschek de Oliveira 大桥突然坍塌,从桥上坠落的卡车装有硫酸和杀虫剂,导致 76 t 硫酸和 2.2 万 L 杀虫剂流入了托坎廷斯河,可能有 19 个城市受到污染影响。目前,国内外学者对危险品(生物样本)运输的事故致因分析^[1]、事故后果推断^[2]、事故风险因素指标计算^[3]研究众多。沈小燕等^[4]运用故障树与贝叶斯网络(Bayesian Networks, BN)相结合的方法分析了危险货物道路运输事故致因因素。连奇巍^[5]梳理了铁路危险货物运输现状,从规章制度、安全评价、人员培训、应急预案、救援设备设施、运输环境等方面分析了铁路危险货物运输存在的问题。刘明明等^[6]探究了集装箱化危险品船载运输典型事故案例,辨识出事故风险因子,构建了集装箱化危险品船载运输故障树,推理出风险致因关键因素。杨婷等^[7]将危险品道路运输系统中的风险因素划分为人、机、物、环、管 5 类,应用 N-K 模型分析了系统耦合风险,计算出各耦合的耦合风险值。在无人机物流风险评估研究中,BN 作为一种强大的建模方法,在事件逻辑关系描述和概率推理方面具有优势,已被广泛应用于无人机风险分析。李航等^[8]提炼了物流无人机碰撞过程中的 15 个主要风险因素,构建了 BN 模型,并评估其风险,明确

了导致无人机发生碰撞事故的关键因素和敏感因素。韩鹏等^[9]通过考虑无人机运行环境和系统故障等因素的影响,从系统故障、运行环境和人为因素 3 方面提取失效诱因,构建了意外坠落事故的 BN 模型。国内外学者针对危险品(生物样本)运输方式多集中在道路运输、铁路运输及船舶运输,鲜有与航空运输相关的研究,且无人机物流的相关研究中,研究对象多局限于普通货物,缺少对危险品的考虑。

因此,笔者拟综合考虑无人机运输危险品(生物样本)的运输过程,建立适用于大多数生物样本无人机运输的风险评估体系,从生物样本无人机运行基本情况出发,确定运行过程中的风险因素作为分析的节点,利用专家知识和模糊集理论确定 BN 的先验条件概率,构建 BN 分析模型,提出有针对性的风险控制措施,以期寻求生物样本无人机运行过程的关键风险因素,为生物样本无人机运输风险管理决策提供技术支持。

1 生物样本无人机运输风险评估

1.1 生物样本无人机运输流程

生物样本无人机运输分为始发作业、途中作业和到达作业 3 部分环节,如图 1 所示。始发作业包括托运、受理、验货、装机、填写标本数量、交接登记表、核对费用和承运货物等环节。首先,在始发作业环节,托运人向承运人提出货物运单和运输要求,托运人需提前将托运货物备好,托运人将生物样本的包装件提交承运人前,需正确地进行包装,加贴标记标签,并提供真实准确的交接文件和运输信息,并将生物样本运输信息提前告知承运人,如包装类型、包装件尺寸/数量/重量、包装件控温时长、外部温度要求、到达时限等,以便进行后续受理、验收、装机、核收运费等环节可以紧密协助作业;在途中作业环节,承运人(机长)应全程监视无人机飞行状态,出现紧急情况应启动应急处置程序,还应全程监视样本的定位和温度。在到达作业环节,无人机达到指定区域后,承运人(卸机人员)应谨慎取下标本运输箱,确认外包装无损后,及时把标本运送箱送达收货人;在收货人核对标本数量准确无误后,承运人在《医学检验中心标本数量交接登记表》签字确认,交接

标本完毕。其中,当包装件从无人机卸下时,承运人或收货人应即刻检查包装件的完整性,如发现包装件存在泄漏或污染,应及时采取应急处置措施。

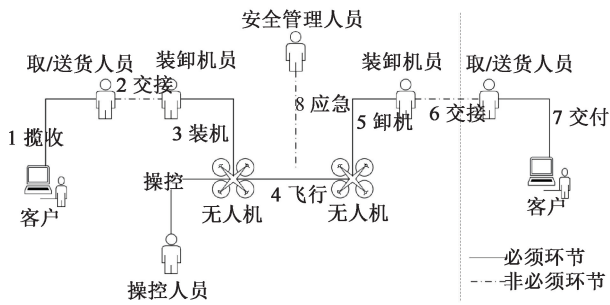


图1 生物样本无人机运输流程

Fig. 1 Flow of UAV transport of biological samples

1.2 建立风险评估指标体系

为确定城市场景下生物样本无人机运输风险因素,在参考现有文献基础上,依据《中华人民共和国民用航空法》《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》(国务院、中央军委国令第761号)、《通用航空经营许可管理规定》(交通运输部令2020年第18号)、《民用航空危险品运输管理规定》(交通运输部令2024年第4号)、中国民航局发布的《通用航空危险品运输管理办法(征求意见稿)》等法律法规和规章,结合专家意见,从人-机-环-管-危5个维度综合分析城市场景下生物样本无人机运输过程中的风险因素,见表1。在归纳风险因素基础上构建风险指标体系,如图2所示。

表1 生物样本无人机运输影响因素

Table 1 Influencing factors of UAV transportation of biological samples

目标层	因素层	风险层	风险解释
生物样本无人机运输风险水平 X	设施设备因素 X_1	无人机飞行控制系统 X_{11}	无人机飞行控制系统保障飞行安全与稳定,发生故障或失灵可能导致无人机失控、坠毁或偏离预定航线
		无人机通信系统 X_{12}	无人机与地面站之间的即时通信是保证飞行状态实时监控和操作指令传输的关键。一旦通信中断,可能导致无人机失联,增加样本丢失和安全事故风险
		起降场地 X_{13}	无人机对起降场地要求严格,如果起降场地净空条件差或存在障碍物,容易发生事
		专用冷链物流箱控温效果 X_{14}	生物样本运输的存储温度需要满足规范要求,专用冷链物流箱的控温效果决定了样本运输质量。控温效果不佳可能影响样本活性,影响实验结果或样本使用
		无人机电池续航 X_{15}	电池续航决定无人机性能,影响无人机运输距离、运输时间以及配送点的选择
		温度监控设备 X_{16}	温度监控设备用于实时监控运输过程中生物样本的温度。如果设备失灵或数据不准确,温度异常造成生物样本失活,需要做出应急处置
		其他辅助设施 X_{17}	生物样本无人机运输过程需要额外的辅助设施,如飞行数据记录器、样本容器、备用电池等
	人员因素 X_2	人员专业业务水平 X_{21}	无人机操作员和运输管理人员专业水平直接关系到整个运输过程的安全和效率。缺乏经验或技能不足的人员容易导致操作失误和意外事故
		职业道德水平 X_{22}	如果运输管理人员存在失职或违规行为,可能导致生物样本损失或污染。例如:在托运物品中夹带危险品或者将危险品匿报、谎报为生物样本进行托运
		航线规划与控制 X_{23}	运输管理人员和无人机操作员航线规划和设置不当,或空中超视距飞行过程中控制不力,可能导致无人机出现临时不可控情况,增加事故风险
		生物样本运输链条协调性 X_{24}	承运人与托运人沟通不当,各部门未做好协调,可能导致生物样本运输过程中出现各种问题和风险。例如:托运人未能按时准备好样本,或承运人未能及时安排无人机和辅助设备,导致运输延误,影响生物样本的质量和有效性
		安全应急处置能力 X_{25}	运输管理人员、承运人缺少应急预案、应急演练经验以及应急处置能力不足,可能导致未能按照应急程序处理突发事件,扩大事故影响
		特殊装备的包装检查 X_{26}	安全监管人员、承运人在承担含有锂电池、加温装置等包装容器运输任务时,未检查外包装件,相关标记标签不明确或出现问题
		按标准规范的运输情况 X_{27}	承运人在承担生物样本无人机实际运输过程中偏离标准规范的操作,带来潜在的安全隐患
	障碍物因素 X_{32}	鸟类袭击 X_{31}	在低空飞行或复杂环境中,鸟类袭击可能会增加无人机的飞行安全风险
		障碍物因素 X_{32}	在飞行过程中可能遇到各种障碍物,如树木、高压电线、建筑物等,无人机需要避障,避免碰撞风险,防止造成机体损坏或货物掉落,进而引发安全事故

续表 1

目标层	因素层	风险层	风险解释
环境因素 X_3		恶劣天气 X_{33}	低空突发不规则气流(如大风、风切变)、大雾、强降水等恶劣天气对低空航路和航线产生影响
		电磁环境干扰 X_{34}	在飞行过程中受到来自各种电子设备或电磁场的干扰,如无线电信号、雷达波、高压线路等,导致无人机的控制系统失去稳定飞行能力
		空域管理 X_{35}	需要事先提交飞行计划并获得批准。若飞行计划未获批准或临时变更未及时通知相关部门,可能导致空中交通管理混乱,增加碰撞风险
		与其他航空器相撞 X_{36}	随着无人机数量的增加,与有人机、其他无人机之间的碰撞风险增加
管理因素 X_4		法律法规薄弱 X_{41}	在低空运营管理和低空服务保障管理方面,现有法规和规范性文件存在不完善之处,企业对应运行手册也不完善,导致管理和监督不到位
		监测预警管控措施 X_{42}	生物样本无人机运输监管部门和监管流程不完善
		应急预案完善情况 X_{43}	生物样本无人机运输的应急处置流程、紧急事件报告程序不完善
		安全教育管理 X_{44}	无人机操作人员、承运人缺乏系统的安全教育和培训可能导致操作失误、设备损坏
		事故调查与责任追究机制 X_{45}	完善的事故调查与责任追究机制有助于快速查明事故原因,明确责任,规避类似事件重复发生
		地面站运保能力 X_{46}	承运单位地面站运控能力决定了运输飞行过程中能否及时响应特情,影响飞行安全和生物样本运输效率
危险品因素 X_5		标本运输箱未消毒 X_{51}	承运人未对标本箱内部及无人机表面进行喷洒擦拭消毒液,对运输质量有影响
		生物样品包装件存在泄漏或污染 X_{52}	生物样本运输过程中存在包装件泄漏或污染,影响飞行安全
		生物样本的外部温度要求 X_{53}	需要在特定的温度范围内运输,以确保其质量和有效性
		未贴有明显危险品标记标签 X_{54}	生物样本属于危险品,承运人如未贴危险品标记标签,可能导致地面人员或其他飞行器误判,引发安全事故
		生物样品包装件的尺寸/数量/重量 X_{55}	承运人应使用专用包装容器,确保其具有足够缓冲和保护性能
		生物样本种类 X_{56}	不同种类的生物样本对运输条件要求各异,承运人需要根据样本特性制定相应的运输方案

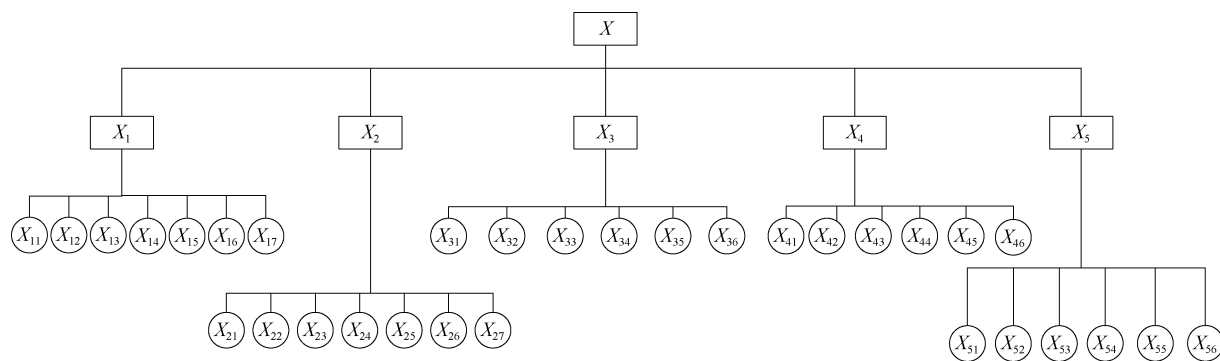


图 2 生物样本无人机运输风险指标体系

Fig. 2 Risk indicator system for UAV transport of biological samples

1.3 构建生物样本无人机运输风险 BN

BN 适合解决复杂的联合概率分布问题,结合

了图论和概率论二者的优点,是用来表达和计算随机变量间概率关系的有向无环图,常用于分析基于

概率和不确定知识的风险^[10]。

1.3.1 建立网络结构

由于评估体系和 BN 均是基于因果逻辑关系建立,故可将评估体系中各个指标作为 BN 节点,按照内在因果关系,构建 BN(图3)。评估指标体系各指标间相互独立,由评估指标体系转为 BN 结构,无需再进行 BN 结构学习。利用 Netica 软件通过手工建模建立生物样本无人机运输风险评估指标 BN 拓扑结构。

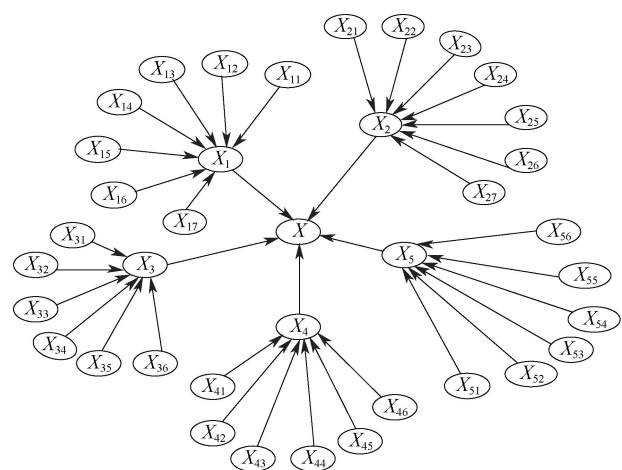


图3 生物样本无人机运输风险 BN 模型
Fig.3 BN model for UAV transport of biological samples

1.3.2 定义节点状态

通过风险概率法来评估生物样本无人机运输的风险水平。每个节点处于 2 种状态:存在风险(Yes)和不存在风险(No),这 2 种状态的取值范围均为 $[0, 1]$ 。在节点状态 Yes 中,数值为 0 表示没

有风险,数值为 1 表示风险必然存在,而 $0 \sim 1$ 之间则反映了风险发生的可能性,数值越高,表示风险可能性越大。相对而言,节点状态 No 的取值范围同样为 $[0, 1]$,但其意义则与节点状态 Yes 相反。

1.3.3 节点概率的计算

为解决因模糊性引起的不确定问题,在模糊集理论(Fuzzy Set Theory, FST)中,模糊数通常用模糊集表示,其中, \tilde{U} 表示模糊集,隶属函数 $F_{\tilde{U}}$ 表示在 \tilde{U} 中的隶属度值, $x \in [0, 1]$ 。节点的模糊概率采用梯形模糊数 $\tilde{U} = (a, b, c, d)$ 表示,隶属度函数见下式。其中, a, b, c, d 分别为梯形模糊数的下界、左边界、右边界和上界。

$$F_{\tilde{U}} = \begin{cases} \frac{x - a}{b - a} & x \in [a, b] \\ 1 & x \in [b, c] \\ \frac{x - d}{c - d} & x \in [c, d] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

获得节点条件概率表一般有专家知识和参数学习 2 种方式,由于可用于参数学习的样本不足,难以通过参数学习获取节点的条件概率表,导致 BN 在实际研究中受限^[11]。基于研究对象的实际情况,选择专家知识获取 BN 条件概率表。邀请 10 位无人机运输环节从业与管理人员评价风险状态,结合他们的评价结果计算根节点的模糊数,并确定 BN 根节点的先验概率。引入 7 个级别的自然语言变量,分别是非常低(VL)、低(L)、比较低(ML)、中等(M)、比较高(MH)、高(H)、非常高(VH),并在表 2 中给出了对应的梯形模糊数。专家权重分级见表 3。

表 2 自然语言变量梯形模糊数对应关系

Table 2 Natural language variables trapezoidal fuzzy number correspondence

语言评价	模糊数	语言评价	模糊数
非常低(VL)	(0, 0, 0.000 005, 0.000 01)	较高(RH)	(0.1, 0.2, 0.5, 0.65)
低(L)	(0.000 005, 0.000 01, 0.000 05, 0.000 1)	高(H)	(0.5, 0.65, 0.8, 0.9)
较低(RL)	(0.000 05, 0.000 1, 0.005, 0.01)	非常高(VH)	(0.8, 0.9, 1, 1)
中等(M)	(0.005, 0.01, 0.1, 0.2)	—	—

表 3 专家权重分级

Table 3 Expert weighting scale

标准	级别	得分	标准	级别	得分
职称	正高级工程师/教授	10	教育程度	博士研究生	10
	高级工程师/副教授	8		硕士研究生	8
	工程师/讲师	6		学士	6
	助理工程师	4		大专	4
	技术员	2		中专	2

续表 3

标准	级别	得分	标准	级别	得分
工作年限	>20	10	项目参与数	>15	10
	16~19	8		10~15	8
	10~15	6		6~9	6
	5~9	4		3~5	4
	<5	2		<3	2

计算生物样本无人机运输风险网络各个因素风险等级概率的步骤如下:

步骤 1: 确定主观权重。基于职称、工作年限、教育背景以及项目参与数构建专家主观权重评估指标体系, 每个指标体系分为 5 个等级, 评分为 10、8、6、4 及 2, 其中, 10 表示最为可靠的判断。专家指标体系评分标准见表 3。根据权重标准对每位专家打分, 第 j 位专家的权重系数 w_j 为:

$$w_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (2)$$

式中: W_j 为第 j 个专家的个人总分; w_j 为专家 j 的权重系数。

步骤 2: 将专家评估自然语言转换成模糊数形式。

$$Z_i = \sum_{j=1}^n w_j g_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: Z_i 为事件 i 的模糊聚合值; g_{ij} 为专家 j 对事件 i 的语言值; m 为事件总数; n 为专家总数。

步骤 3: 计算模糊可能性。对于梯形模糊集 $\tilde{U} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, 模糊可能性 X^* 表示为:

$$X^* = \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} dx} = \frac{1}{3} \left(\frac{(a_3 + a_4)^2 - a_3 a_4 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{a_4 + a_3 - a_2 - a_1} \right) \quad (4)$$

步骤 4: 去模糊化。将模糊可能性转化为精确的失效概率 F_i 。

$$F_i = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & X^* \neq 0 \\ 0 & X^* = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$k = \left(\frac{1 - X^*}{X^*} \right) \times 2.301 \quad (6)$$

步骤 5: 归一化处理。归一化处理风险因素的

发生概率。

$$p = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (7)$$

步骤 6: 通过专家评估得到根节点的先验概率和各子节点与父节点的连接概率基础上, 根据 Noisy-or gate 模型计算得到 BN 的条件概率表。基于 Noisy-or gate 模型和模糊理论相结合建立的 BN 与基于专家经验建立的 BN 推理结果整体上没有呈现统计上的显著性差异^[12]。

1.3.4 推理分析

1) 因果推理。设子节点 A_i 有 $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$ 共 k 个相互作用的节点, 则 A_i 发生风险的概率为:

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^k [P(A_i | x_{ij}) p(X_{ij})] \quad (8)$$

式中: $P(A_i)$ 为子节点 A_i 发生风险的概率; $P(A_i | X_{ij})$ 为父节点 X_{ij} 发生条件下子节点 A_i 的发生概率; $P(X_{ij})$ 为父节点 X_{ij} 发生风险的概率。

2) 诊断推理。设子节点 A_i 已经发生变化, 识别引起 A_i 发生变化的可能原因 $(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik})$, 具体由 X_{ij} 引起 A_i 发生变化的概率称为后验概率, 后验概率公式为:

$$P(X_{ij} | A_i) = \frac{P(A_i | X_{ij}) P(X_{ij})}{P(A_i)} = \frac{P(A_i, X_{ik})}{P(A_i)} \quad (9)$$

2 无人机运输风险评估实例分析

2.1 案例背景

以深圳地区某无人机企业的生物样本无人机运输业务为研究对象, 对其进行风险评估研究, 验证方法的应用步骤与效果。邀请了无人机企业、政府管理部门、研究机构和高校的 10 位专家, 提供有关生物样本无人机运输的管理资料, 并组织专家实地走访运输现场, 加深对该企业生物样本无人机运输现状的认识。最后邀请各位专家使用模糊语言分别对表 1 中生物样本无人机运输风险因素打分。

2.2 节点概率求解

根据 10 位专家的评判结果,计算生物样本无人机运输的 32 个风险因素的先验概率。专家权重系数见表 4。根据式(3)一式(7)计算先验概率,结果见表 5。

表 4 专家权重系数

专家编号	1	2	3	4	5
权重 w_j	0.100	0.121	0.136	0.114	0.079
专家编号	6	7	8	9	10
权重 w_j	0.093	0.129	0.050	0.079	0.100

表 5 生物样本无人机运输风险因素的先验概率

Table 5 Priori probability of risk factors for UAV transport of biological samples

影响因素	模糊可能性	先验概率	影响因素	模糊可能性	先验概率	影响因素	模糊可能性	先验概率
X_{11}	0.020	3.801×10^{-9}	X_{25}	0.292	8.105×10^{-4}	X_{43}	0.252	4.933×10^{-4}
X_{12}	0.068	3.114×10^{-6}	X_{26}	0.136	5.475×10^{-5}	X_{44}	0.192	1.928×10^{-4}
X_{13}	0.091	1.108×10^{-5}	X_{27}	0.021	5.231×10^{-9}	X_{45}	0.029	3.834×10^{-8}
X_{14}	0.290	7.920×10^{-4}	X_{31}	0.029	3.834×10^{-8}	X_{46}	0.070	3.550×10^{-6}
X_{15}	0.017	1.265×10^{-9}	X_{32}	0.261	5.556×10^{-4}	X_{62}	0.029	3.834×10^{-8}
X_{16}	0.135	5.324×10^{-5}	X_{33}	0.142	6.442×10^{-5}	X_{52}	0.129	4.477×10^{-5}
X_{17}	0.020	3.801×10^{-9}	X_{34}	0.043	3.370×10^{-7}	X_{53}	0.224	3.299×10^{-4}
X_{21}	0.150	7.902×10^{-5}	X_{35}	0.108	2.233×10^{-5}	X_{54}	0.060	1.747×10^{-6}
X_{22}	0.011	4.918×10^{-11}	X_{36}	0.026	1.999×10^{-8}	X_{55}	0.292	8.105×10^{-4}
X_{23}	0.030	4.672×10^{-8}	X_{41}	0.052	8.790×10^{-7}	X_{56}	0.024	1.222×10^{-8}
X_{24}	0.061	1.888×10^{-6}	X_{42}	0.064	2.360×10^{-6}	—	—	—

邀请领域专家评估生物样本无人机运输模糊 BN 中节点的关联关系,得到 BN 中子节点和父节点单独影响的关联强度。通过 1.3.3 节所述方法建立 FBN 中的条件概率表。同时,在运输实际中存在即使所有风险因素均未发生,系统也有可能出现异常的情况。因此,计算条件概率时引入 Leaky 节点,并假设其对事故发生的作用一直存在,即当模型中所列风险因素均未发生时,事故仍有可能发生。将节点对生物样本无人机运输的影响强度统一设置为 0.005。如 $X_{51} \sim X_{56}$ 均为正常时, X_5 也可能出现异常情况,即

$$P(X_5 = 1 | X_{51}, X_{52}, \dots, X_{56} = 0) = 0.005。$$

2.3 推理分析

1) 正向推理。在生物样本无人机运输事故发生前,即事前阶段及时得知事故发生的概率,有利于管理人员及时采取必要措施预防事故发生。基于构建的生物样本无人机运输的 BN 模型,根据变量的先验概率和条件概率,利用 Netica 仿真软件进行推理分析,得到风险发生概率为 2.203×10^{-5} 。当前无人机运行可接受的每飞行小时事故率为 10^{-8} ^[13],通过计算得到生物样本无人机正常运行时发生安全事故的概率高于无人机运行风险阈值。

在生物样本无人机运输过程中往往会伴随着因素事件的动态变化,而基于时间的累加作用下,整体发生安全事故的可能性会实时变化,由于各节点间耦合结果共有 2^{38} 种情况,逐一分析既繁复又不切

实际,且其中部分情况的影响可忽略不计。因此,针对生物样本无人机运输中常见的 2 种实际情境,通过正向推理有效评估运输过程的安全风险。

情景 1:在无人机运输过程中,由于城市场景的复杂性,建筑物、树木、电线等障碍物因素常常会对无人机的正常飞行造成不同程度的干扰或潜在威胁,可能引发碰撞风险,从而危及无人机和其所载货物以及地面人员等的安全。同时,作业人员在应对这些紧急情况时,若存在安全应急处置能力不足,如反应不及时、操作不当等,将进一步加剧飞行风险,可能导致无人机失控、坠毁等严重后果。此时,根节点 X_{24} 与 X_{32} 同时发生,将 $P(X_{25} = \text{Yes}) = 1, P(X_{31} = \text{Yes}) = 1$ 代入网络模型中,更新概率得到 BN,在人员因素与环境因素双重耦合作用下事故发生概率值为 88.19%,事故率大幅度增高。

情景 2:在无人机运输过程中,安全监管人员专业未能充分履行其监察职责,对生物样本无人机的关键组件——电池的状况监测出现疏漏,导致电池潜在故障未被及时识别与处理。这一失误直接影响了无人机的飞行稳定性,引发了危险品包装件的泄露与污染问题,即 $P(X_{15} = \text{Yes}) = 1, P(X_{42} = \text{Yes}) = 1, P(X_{52} = \text{Yes}) = 1$ 动态数据更新到模型中,在人员因素、设施设备因素及危险品因素的 3 因素耦合作用下,事故发生的概率为 75.62%,事故率显著提升。

2) 诊断推理。通过将生物样本无人机运输的风险发生节点状态设为 $P(X = \text{Yes}) = 1$,按逆向推

理当生物样本无人机运输风险已经产生情况下各个风险节点的后验概率,从而判定对其影响最大的因素。各风险因素层概率大小排序为:危险品因素>设施设备因素>人员因素>管理因素>环境因素。造成生物样本无人机运输风险的主要原因是危险品因素,根据仿真结果进一步推理得出,当生物样本无人机运输的风险值为 1 时,风险概率值最大的前 6 个风险因素排序依次为:危险品包装件的尺寸/数量/重量、专用冷链物流箱控温效果、应急预案完善情况、安全应急处置能力、安全教育管理和障碍物因素。

2.4 措施与建议

1) 对于生物样本危险品运输,要严格按照相关规定进行包装和标识。严格控制包装件的尺寸、数量和重量,建立严格的危险品运输操作流程和监管机制,关注运输过程每个环节、每个细节。对于不符合规定的运输行为,要及时纠正和处理。

2) 选择性能优、保温效果良好的专用冷链包装容器,确保生物样本在运输过程中温度恒定。在冷链箱内放置温度监控设备,实时监控并记录运输过程中的温度变化。如发现温度异常,及时采取措施调整。同时,定期检查和维护冷链箱,确保其正常运行和控温效果。

3) 根据生物样本无人机类型、飞行环境及可能遇到的风险,制定详细、全面的应急预案,涵盖飞行前安全检查、飞行中风险控制、应急响应流程以及事故处理等内容。定期组织应急演练,提高人员对应急预案的熟悉程度和应对突发事件的能力。同时,加强对操作员的培训,使其能够熟练掌握应急操作技能。与相关部门建立联动机制,确保在无人机发生紧

急情况时,能够及时启动应急响应,有效处置事故。

4) 飞行前应充分勘察和评估飞行区域,了解天气状况、地形和人员密度等情况。为无人机配备先进的环境感知设备,如雷达、摄像头等,提高无人机对环境变化的主动感知能力。在飞行前进行科学的航路航线规划,避开障碍物密集区。根据实时飞行数据,动态调整飞行路线,降低与障碍物碰撞的风险。加强飞行监控和预警,建立完善的飞行监控系统,实时监测无人机的飞行状态和环境变化。

3 结 论

1) 以贝叶斯理论为基础,构建 BN 推理模型。以深圳某无人机企业为例,评估生物样本无人机运输风险,得出关键影响因素。研究表明通过正向推理得出得到生物样本无人机运输的风险发生概率为 2.203×10^{-5} ,造成生物样本无人机运输风险的主要原因是危险品因素,其次是设施设备因素。主要影响因素为危险品包装件的尺寸/数量/重量、专用冷链物流箱控温效果、应急预案完善情况、安全应急处置能力、安全教育管理和障碍物因素等。

2) 本文提出的方法有一定局限性,确定 BN 节点条件概率表的过程较烦琐,很大程度依赖领域专家且邀请专家数量较少。在未来研究中,将着眼于利用机器学习和人工智能技术,从历史数据和实际操作中自动提取相关知识,与主客观知识相结合,使风险评估模型更接近实际,同时邀请更多的一线从业者参与研究,比较不同无人机企业在生物样本无人机运输中的实践经验和风险因素,以制定更具普适性的风险控制措施。

参 考 文 献

- [1] 张玥,帅斌,尹德志,等. 基于 STAMP-ISM 的铁路危险品运输系统风险-事故分析方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(9): 147-153.
ZHANG Yue, SHUAI Bin, YIN Dezhi, et al. Risk-accident analysis method of railway dangerous goods transportation system based on STAMP-ISM[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(9): 147-153.
- [2] 虞仕杰,张明广,朱鹏飞,等. 危险品运输事故消防处置时间研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(3): 381-385.
YU Shijie, ZHANG Mingguang, ZHU Pengfei, et al. Research on fire emergency rescue disposal time for hazardous materials transportation accidents[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(3): 381-385.
- [3] 王艾迪,邢莹莹,张诗雯,等. 基于关联规则的危险品公路运输事故风险因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 159-165.
WANG Aidi, XING Yingying, ZHANG Shiwen, et al. Research on risk factors of hazardous material highway transport accidents based on association rules[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 159-165.
- [4] 沈小燕,肖丹蕾,魏珊珊,等. 基于 FTA-BN 的危险货物道路运输事故分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1):

338-346.

SHEN Xiaoyan, XIAO Danlei, WEI Shanshan, et al. Analysis of road transportation accidents of dangerous goods based on fault tree analysis and Bayesian network[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 338-346.

- [5] 连奇巍. 铁路危险货物运输安全监管体系的思考与建议[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(增1): 1-5.

LIAN Qiwei. Thoughts and suggestions on safety supervision system of railway dangerous goods transportation[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(S1): 1-5.

- [6] 刘明明, 胡基平, 郭云龙, 等. 集装箱危化品船载运输风险因子辨识[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10): 168-174.

LIU Mingming, HU Shenping, GUO Yunlong, et al. Risk factors identification of containerization dangerous goods on board[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(10): 168-174.

- [7] 杨婷, 帅斌, 黄文成. 基于 N-K 模型的道路危险品运输系统耦合风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 132-137.

YANG Ting, SHUAI Bin, HUANG Wencheng. Coupling risk analysis of road dangerous goods transportation system based on N-K model[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(9): 132-137.

- [8] 李航, 聂芳艺. 基于贝叶斯网络的物流无人机碰撞风险评估[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6700-6706.

- [9] 韩鹏, 王梦琦, 赵云飞. 基于贝叶斯网络的物流无人机失效风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(11): 178-183.

HAN Peng, WANG Mengqi, ZHAO Yifei. Failure risk assessment of logistics UAV based on Bayesian network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(11): 178-183.

- [10] 黄影平. 贝叶斯网络发展及其应用综述[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(12): 1211-1219.

HUANG Yingping. Survey on Bayesian network development and application[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(12): 1211-1219.

- [11] 李金蓉, 杨玉中. DS 理论-贝叶斯网络下的煤矿通风系统风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 146-153.

LI Jinrong, YANG Yuzhong. Risk assessment of ventilation system in coal mines based on DS theory and Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 146-153.

- [12] LU Yunmeng, WANG Tiantian, LIU Tiezhong. Bayesian network-based risk analysis of chemical plant explosion accidents[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(15): DOI: 10.3390/ijerph17155364.

- [13] 黄静洋, 潘璇, 付小蓉, 等. 中低空通用航空飞行计划安全风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 23-30.

HUANG Jingyang, PAN Xuan, FU Xiaorong, et al. Safety risk assessment for low and medium altitude general aviation flight plans[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 23-30.



作者简介: 柳青 (1979—), 男, 安徽合肥人, 博士, 副教授, 主要从事无人机安全等方面的研究。E-mail: 15206296179@163.com。