

中文引用格式:吴煜,吴欣怡,解江. 基于动态贝叶斯网络的客舱颠簸事件应急处置分析[J]. 中国安全科学学报,2024,34(12): 203-212.

英文引用格式:WU Yu, WU Xinyi, XIE Jiang. Analysis of emergency response to cabin turbulence based on dynamic Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(12): 203-212.

基于动态贝叶斯网络的客舱颠簸事件 应急处置分析*

吴煜¹讲师, 吴欣怡¹, 解江²教授

(1 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300; 2 中国民航大学 科技创新研究院, 天津 300300)

中图分类号: X928.03

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.12.0411

基金项目: 天津市技术创新引导专项基金资助(23YDTPJC00010); 天津市大学生创新创业计划项目(202310059017)。

【摘要】 为有效降低客舱颠簸事件造成的人员伤亡与财产损失, 提出基于动态贝叶斯网络(DBN)的客舱颠簸应急处置决策分析方法。首先, 依据国内外相关法律法规, 结合地面、空中的关键人员应急职责, 从航前、航中、航后分析颠簸应急处置流程, 选择24个关键事件构建结构化的蝴蝶结(BT)模型; 其次, 建立映射条件和转换规则, 形成DBN模型; 然后, 统计客观的直接节点先验概率以及三角模糊数专家评判法得到的补充节点模糊概率, 得出所有节点的先验概率; 最后, 选择时间片间隔1和2 min重点对中度、重度颠簸进行仿真推理, 研究各动态要素对客舱颠簸事件处置失效的影响特征。结果表明: 各应急处置节点受颠簸程度和时间变化影响显著, 应急处置最佳时间在5 min之内, 其中, 乘员固定措施不到位的失效概率随颠簸程度加重而加大; 乘员没有系好安全带及客舱乘务人员的过度服务等人为因素是导致处置失效的关键原因。

【关键词】 动态贝叶斯网络(DBN); 颠簸事件; 应急处置; 蝴蝶结(BT)模型; 三角模糊数

Analysis of emergency response to cabin turbulence based on dynamic Bayesian network

WU Yu¹, WU Xinyi¹, XIE Jiang²

(1 School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2 Institute of Science and Technology Innovation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to effectively reduce the casualties and property losses caused by cabin turbulence, a decision analysis method based on a dynamic Bayesian network is proposed for cabin turbulence emergency response. Firstly, according to the relevant laws and regulations at domestic and international, combined with the emergency duties of key personnel on the ground and in the air, the turbulence emergency disposal process is analysed from pre-flight, in-flight and post-flight, and 24 key events are selected to construct a structured BT model. Secondly, the mapping conditions and transformation rules are established to form a DBN model. Then, the objective direct node a priori probability and the

supplementary node fuzzy probability obtained by the triangular fuzzy probabilities of supplementary nodes obtained by the fuzzy number expert judgement method to obtain the a priori probabilities of all nodes. Finally, the time slice intervals of 1 and 2 min are selected to focus on the simulation inference of moderate and heavy turbulence, and to study the characteristics of the influence of each dynamic element on the failure of cabin turbulence event disposal. The results show that: the emergency response nodes are significantly affected by the degree of turbulence and time changes, and the optimal time for emergency response is within 5 min. Among them, the probability of failure for the failure of the crew fixation measures in place increases with the increase of the degree of turbulence, human factors such as the failure of the crew to fasten the seat belts and the over-servicing by the cabin crew are the key reasons for the failure of the response.

Keywords: dynamic Bayesian network (DBN); turbulence event; emergency response; bow-tie (BT) model; triangular fuzzy number

0 引言

颠簸是指航空器在飞行过程中受到扰动气流冲击,造成仪表不准、操作困难的气象灾害。颠簸事件作为客舱的一种典型突发事件,具有实时预警受限、发生时间紧迫、应急处置困难的特点^[1],往往会造成飞机的结构受损、人员伤亡等,严重威胁到航空安全。在航空安全网(Aviation Safety Network, ASN)统计^[2]的2017—2022年全球飞行事件中,颠簸致因事件占比约为56%。颠簸一旦发生,需要机组快速现场决策和应急处置,全体乘员有序配合。因而,如何有效减少不同程度颠簸事件的影响,避免其突发性、持续性引起的事件升级,降低人员伤亡,提升机组成员应急快速响应和应急处置决策能力,明确客舱应急处置关键环节,是国内外民航客舱安全运行的关注重点。

目前,国内外研究主要集中在事件前颠簸预测预警技术及事件后突发事件应急处置方法2方面。一方面,颠簸预测作为事前减少航路天气影响的保障技术,关注飞行前从气象角度分析客舱颠簸成因,开展航前预测。如HU Boyan^[3]通过研究晴空湍流区域和季节变化,探讨了飞机湍流的变化规律;美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)在FAA-H-8083-25C^[4]中要求通过飞行中的天气报告,预测有潜在危险的非对流天气,特别是严重的极端湍流、晴空湍流。颠簸预警是通过气象预警技术和设备设施,由气象部门提供飞行计划预警,利用支持向量机^[5]、G-sensor传感器^[6]、滤波误差^[7]等方法提高颠簸预警的准确度。另一方面,事件发生后的应急处置研究,集中在飞行中发生客舱颠簸、火灾等突发事件后的人员疏散、应急决策和事件致因领域。

杜红兵^[8]研究了燃油泄漏突发事件下客舱火灾的3种乘员疏散方案;张青松^[9]利用案例推理法分析了客舱突发事件应急决策模型;CANKAYA^[10]利用贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)分析了航空事件的根本原因;MUECKLICH^[11]通过分析航空地面操作事件,得出人为因素导致事件失效的关键节点;MA Yaping^[12]构建了客舱人群疏散模型,改进人群疏散应急管理策略。然而,现有研究存在以下问题:一是将客舱突发事件视为静态事件,关注单次事件发生后的事故案例推理和应对策略,忽略了事件等级和持续应对的过程影响;二是现有颠簸预警技术虽可识别大多数的对流性颠簸,但对晴空颠簸却很难实现准确预警,且缺少针对颠簸事件本身的研究,尤其是针对无法准确预警的突发性颠簸。该类事件的后果等级和应急决策往往随持续时间、颠簸等级和处置全过程而动态变化,导致机组应急响应时间紧迫,处置过程复杂。

鉴于此,笔者拟以客舱颠簸应急处置为研究对象,系统考虑颠簸事件的应急处置过程,采用蝴蝶结(Bow-Tie, BT)模型进行事件致因分析,构建动态评估应对决策模型,利用动态BN(Dynamic BN, DBN)分析关键应急处置节点的时间性和重要性,以期提升应急处置的效率,优化处置策略,减少机上人员伤亡与财产损失。

1 颠簸事件处置流程和致因分析

1.1 颠簸事件应急处置流程

颠簸可能发生在航空器飞行的任意阶段,分析2017—2022年的118起颠簸事件报告^[2]可知:导致颠簸发生的致因因素与飞越地区、季节等客观环境有关,与航空公司、飞行高度和机型等没有必然联

系;颠簸事件引发的严重后果,如人员伤亡和结构损坏,大多是由机组应对不当、乘员反应迟缓、保护不足造成的。国际航空运输协会要求飞行人员、客舱乘务人员及航空公司运行控制中心(Air Operator Certificate, AOC)人员开展应对空中颠簸的课程训

练,并要求乘客加强自我保护,以减少人员伤害。结合中国民用航空局《关于制定空中颠簸管理程序防止人员伤害的要求》^[13],从颠簸应急处置的航前、航中和航后的事件发展阶段,得到颠簸应急处置流程,如图 1 所示。

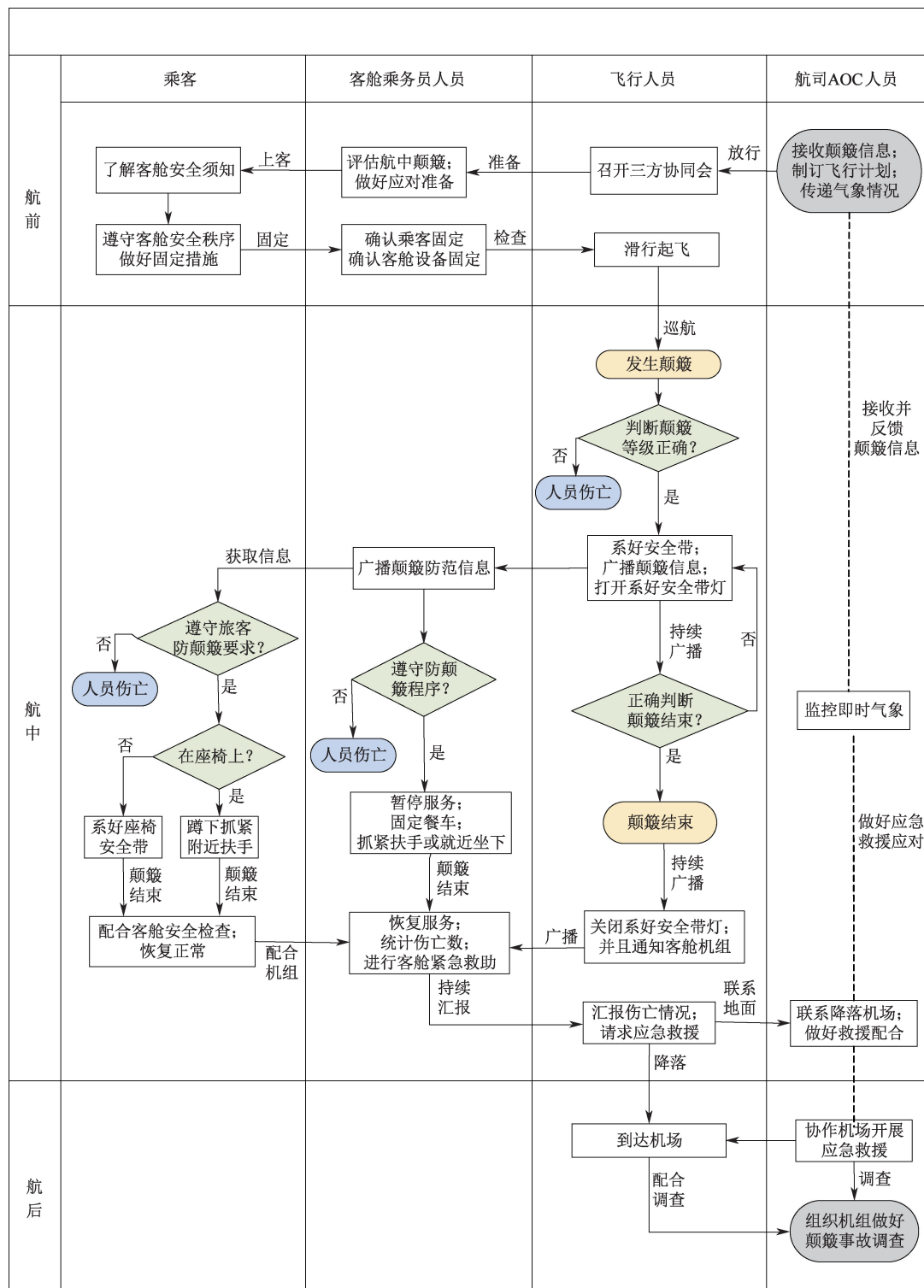


图 1 颠簸事件应急处置流程

Fig. 1 Flow chart of emergency response to in-flight turbulence

其中,飞行人员承担颠簸应急处置决策职责,依据《一般运行和飞行规则》^[14],航前需熟悉航路气象情况,航中颠簸发生时迅速作出正确应急处置决策。AOC 人员承担航空器应急支援和运行控制等职责,依据《航空承运人运行中心政策与标准》^[15],航前需协调飞行计划,向飞行人员提供可能影响飞行安全的所有信息,包括飞行期间的天气预报,航中需要接收和反馈颠簸事件信息,并做好应急救援应对。

客舱乘务人员作为处置颠簸应急事件的直接人员,依据《客舱乘务员的资格和训练》^[16],航前指导乘客遵守客舱安全规则,航中发生颠簸时做好现场响应、维护客舱秩序,颠簸结束后开展应急救助。乘客作为客舱乘员,在飞行全程应遵守客舱安全要求,航前了解客舱安全须知,航中颠簸发生时听从指挥,固定自己并做好保护。

1.2 BT 事件模型分析

为全面分析颠簸事件的致因因素,强调事件发生的多因素性^[17],更好地识别潜在风险,采取应急处置措施,选择结构化的 BT 模型,从天气条件、机械设备、安全监管和人为因素等 4 方面,分析飞行中客舱颠簸应急处置的事件致因过程。

基于图 1 所构建的颠簸应急处置流程,首先,选取人机环管 4 方面辨识总体危险因素,将客舱颠簸导致人员伤亡作为顶事件,从上至下分析确定导致顶事件发生的中间事件和基本事件。根据颠簸事件统计数据 and 国内外航司应急处置的惯例做法,选择 24 个关键处置事件构建事故树,见表 1。其次,将颠簸发生作为初始事件,依据颠簸程度影响、处置失效屏障和事件后果轻重将处置决策分为 7 层,得到颠簸应急处置 BT 模型,如图 2 所示。

表 1 颠簸关键处置事件

Table 1 Turbulence critical disposal events

| 代号 | 事件 | 代号 | 事件 | 代号 | 事件 | 代号 | 事件 |
|-----------------|------------|------------------|-------------|-------------------|------------|------------------|----------|
| A | 颠簸事件发生 | A ₁₁₁ | 判断颠簸等级失误 | A ₁₂₄₁ | 没有固定餐车 | A ₂₁₂ | 乘务人员过度服务 |
| A ₁ | 人为因素 | A ₁₁₂ | 机长没做好固定措施 | A ₁₂₄₂ | 乘务人员没有固定自己 | A ₂₁₃ | 机组人员心理问题 |
| A ₂ | 管理因素 | A ₁₁₃ | 没有对颠簸进行广播 | A ₁₃₁ | 没有遵守安全防护 | A ₂₂₁ | 法规制订缺漏 |
| A ₃ | 环境因素 | A ₁₁₄ | 没有进行三方会议 | A ₁₃₂ | 不在座椅上 | A ₂₂₂ | 监管力度不够 |
| A ₄ | 机载设备因素 | A ₁₁₅ | 机长疲劳飞行 | A ₁₃₂₁ | 没有抓紧扶手 | A ₃₁ | 天气环境恶劣 |
| A ₁₁ | 机长应急处置失效 | A ₁₂₁ | 乘务人员疲劳飞行 | A ₁₃₂₂ | 旅客没有固定自己 | A ₃₂ | 飞机无法绕开 |
| A ₁₂ | 乘务人员应急处置失效 | A ₁₂₂ | 没检查飞机物品固定 | A ₁₃₃ | 旅客没有系好安全带 | A ₄₁ | 固定装置故障 |
| A ₁₃ | 旅客应急失效 | A ₁₂₃ | 没有做好自身防护 | A ₂₁ | 内部原因 | A ₄₂ | 天气雷达故障 |
| A ₅ | 航前阶段 | A ₁₂₄ | 服务中处置失效 | A ₂₂ | 外部原因 | | |
| A ₆ | 航中阶段 | A ₁₂₅ | 乘务人员没有系好安全带 | A ₂₁₁ | 机组成员训练不合格 | | |

2 DBN 构建

2.1 映射条件和转换规则

BT 模型虽能清晰表示客舱颠簸所有关键事件关系,但无法量化事件的重要程度及之间的相互影响。故选择 DBN 将 BT 模型进行转换。

为清晰表示事件之间的依赖性及相关程度^[18],量化分析应急决策路径,构建 BT 模型到 DBN 模型的映射表达式:

$$E_d \in \begin{pmatrix} E_z \\ E_m \\ E \end{pmatrix} \xrightarrow{t=0} X_0 \in \begin{pmatrix} X_z^0 \\ X_m^0 \\ X^0 \end{pmatrix} \xrightarrow{\Delta t} X_t \in \begin{pmatrix} X_z^t \\ X_m^t \\ X^t \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: E 为顶事件; E_d 为 BT 模型中所有关键处置事件的集合; d 为模型中的事件编号, $d \in (1, 2, \dots, d)$; E_z 为底事件, z 为底事件的编号, $z \in (1, 2, \dots, z)$; E_m 为中间事件, m 为中间事件编号, $m \in (1, 2,$

$\dots, m)$ 。DBN 则由初始网络 X_0 和动态网络 X_t 组成, t 为时间片; Δt 为时间片间隔, $t \in (0, 1, \dots, \Delta t, \dots, t)$ 。当 $t = 0$ 时, X_0 为 BN 中所有节点构成的初始集合; X_z^0 为根节点; X_m^0 为中间节点; X^0 为叶节点。当 $t = \Delta t$ 时, X_t 为 t 时间片的节点集合; X_z^t 为其根节点; X_m^t 为其中间节点; X^t 为其叶节点。

在 DBN 中,每个时间片 t 都对应着一个静态 BN,并且后续随着时间变化,节点参数可根据前一时刻的观测数据更新,得到 BT 模型映射 DBN 转换,如图 3 所示。

BT 模型到 DBN 模型的转移规则为:客舱颠簸的 DBN 的转移网络是由多个时间片的 BN 模型组成,并满足马尔可夫假设的平稳性,故客舱颠簸应急决策只受上一个时间片的影响,即节点在时间 t 的概率只受 $t - 1$ 时刻的影响,与 $t - 1$ 之前的时间片段无关^[19-20]。因而,由 BT 模型转换为网络模型中

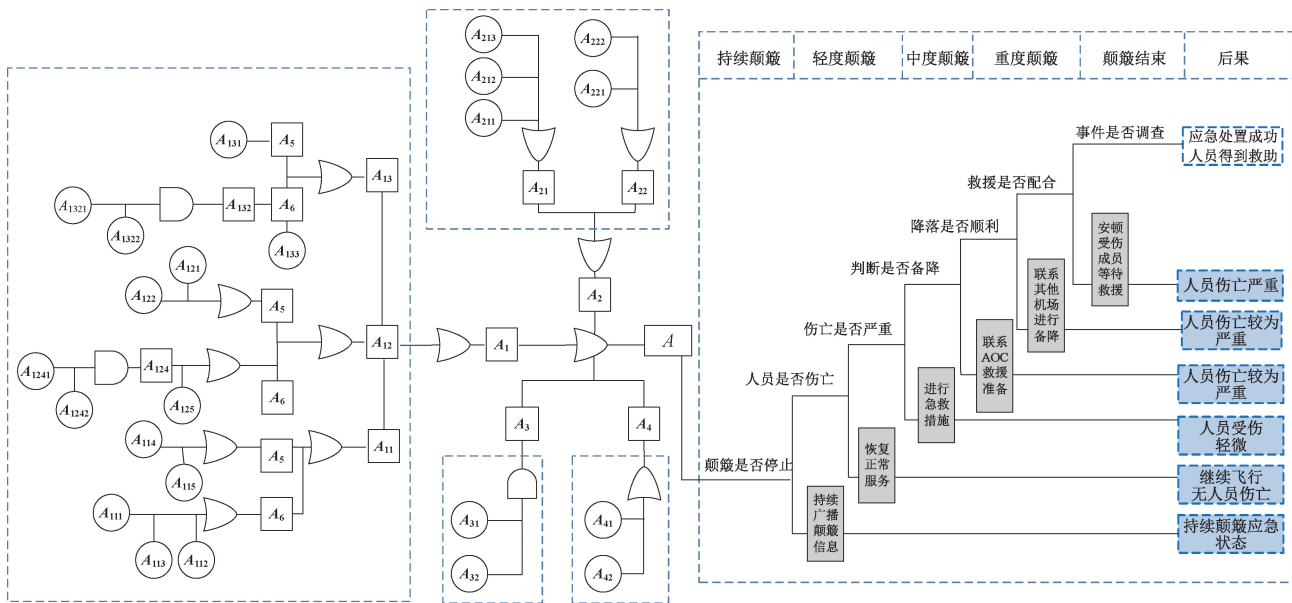


图 2 颠簸应急处置 BT 模型

Fig. 2 BT analysis of turbulence event handling

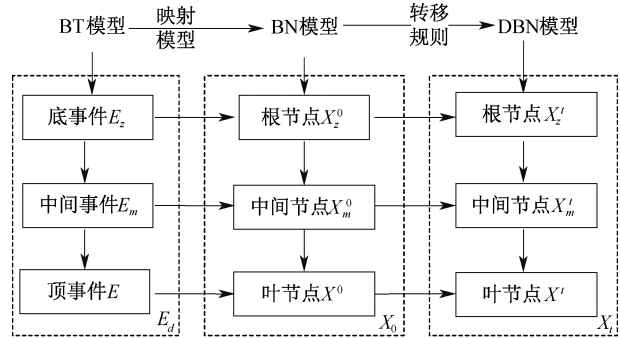


图 3 BT 模型映射 DBN 转移

Fig. 3 BT model mapping DBN transformation

的节点的条件概率与初始网络中完全相同,转移概率在整个 DBN 模型中保持不变。DBN 中任意 2 个相邻时间片段的转移概率,表达如下:

$$D(X_t | X_{t-1}) = \prod_{i=1}^N P(X_t^i | D_e(X_t^i)) \quad (2)$$

式中: X_{t-1} 为 $t-1$ 时间片的节点集合; X_t^i 为第 t 个时间片上的第 i 个节点, $i \in (1, 2, \dots, t)$; $D_e(X_t^i)$ 为 X_t^i 的当前时间片的父节点; N 为每个时间片中节点的总数, $N \in (1, 2, \dots, N)$ 。

根据初始网络 X_0 的先验概率 P_A 和转移网络的转移概率 $P(X_t | X_{t-1})$, 计算出 DBN 中任意节点的联合概率如下:

$$P(X_t^f) = \prod_{i=1}^N P_{X_0}(X_0^i | D_e(X_0^i)) \prod_{i=1}^t \prod_{i=1}^N P_{X_t}(X_t^i | D_e(X_t^i)) \quad (3)$$

式中: X_t^f 为时间片 t 下的任意节点; f 为时间片 t 下

第 f 节点, $f \in (1, 2, \dots, f)$; P_{X_0} 为初始网络的转移概率; P_{X_t} 为转移网络的转移概率。

2.2 DBN 结构构建

根据图 3 客舱颠簸应急处置的 DBN 模型,在构建层级结构的基础上,考虑各节点因素的关联关系,利用 GeNIe 软件构建客舱颠簸应急处置网络,代入先验概率进行数据分析^[21-22]。首先进行正向推理,预测客舱颠簸应急处置时间的动态变化,帮助决策者采取早期干预措施;其次进行反向推理,得到当 t 时刻每个关键节点的后验概率,分析导致颠簸事件发生的关键原因^[23],得到客舱颠簸应急处置 DBN,如图 4 所示。

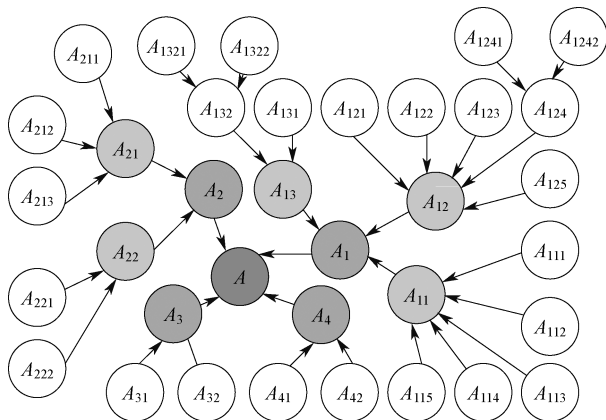


图 4 颠簸应急处置 DBN

Fig. 4 DBN for emergency response to turbulence

其中, DBN 中的箭头由原因因素指向结果因素,即父节点 E_e 指向子节点 E_m , 其中,没有 E_e 的节

点为根节点,各根节点上的有向圆弧用“1”表示,时间片间隔 Δt 为 1 个单位,节点状态根据节点名称采用适当的定性语言描述,如是、否。

2.3 DBN 节点的概率确定

由于颠簸事件的客观统计数据无法覆盖所有节点,故节点先验概率 P_A 由可统计到的直接节点先验概率 $P(C_b)$ 和评价得到的补充节点模糊概率 P_g 共同组成。 $P(C_b)$ 计算如下:

$$P(C_b) = \frac{\sum_{b=1}^n C_b}{\sum_{h=1}^n C_h} \quad (4)$$

式中: C_b 为统计概况下第 b 个节点发生的次数, $b = 1, 2, \dots, n$; $P(C_b)$ 表示第 b 个节点发生的概率; C_h 为所有节点发生的次数总和, $h = 1, 2, \dots, n$ 。

补充节点模糊概率 P_g 采用的三角模糊数由专家评价法得出^[24],计算如下^[25]:首先邀请航司客舱管理的 8 位资深专家,根据从业年限、飞行时间、行业资格等行业相关性,赋值经验程度权重。然后根据颠簸处置流程建立中度颠簸和重度颠簸的问卷,对每个问题从不发生到一直发生,依据发生概率分 5 个语言变量供专家打分。最后通过问卷计算每个节点的模糊总数 G_j :

$$G_j = \sum_{v=1}^8 W_v G_{vj} \quad (5)$$

式中: G_j 为第 j 个节点的模糊总数, $j = 1, 2, \dots, 24$;

W_v 为第 v 个专家的权重系数, $v = 1, 2, \dots, 8$; G_{vj} 为第 v 个专家对第 j 个节点的评分;将 G_j 带入下式,得到相关节点的三角模糊数。

$$\mu(G) = \begin{cases} 0, & G_j \leq k \\ \frac{(G_j - k)}{(l - k)}, & k < G_j \leq u \\ \frac{(u - G_j)}{(u - l)}, & l < G_j \leq u \\ 0, & G_j > u \end{cases} \quad (6)$$

式中: $G = (k, l, u)$ 为三角模糊数,其对应的隶属度函数为 $\mu(G)$; k, u 分别为三角模糊数的上限值和下限值; l 为模糊数隶属度为 1 时的取值。

根据统计计算得到的三角模糊数,利用平均法去模糊化补充节点模糊概率 P_g :

$$P_g = \frac{k + l + u}{3} \quad (7)$$

为方便后续模拟仿真,统计概率 $P(C_b)$ 赋予权重 0.7,而三角模糊数得到的先验概率 P_g 赋予权重 0.3。根据先验概率^[26],利用条件概率 $P(E_m | E_z)$ 计算 DBN 图中的非根节点:

$$P(E_m | E_z) = \frac{P(E_m E_z)}{P(E_z)} \quad (8)$$

E_m 作为 E_z 的子事件, $P(E_m | E_z)$ 表示仅当 E_m 发生时 E_z 发生的概率,先验概率结果汇总见表 2。

表 2 节点先验概率

Table 2 Node prior probability table

| 节点 | 直接节点先验概率 $P(C_b)$ | | 三角模糊数 $G = (k, l, u)$ | | 补充节点模糊概率 P_g | | 先验概率 $P_A = 0.7P(C_b) + 0.3P_g$ | |
|------------|-------------------|-------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------|---------------------------------|-------|
| | 中度 | 重度 | 中度 | 重度 | 中度 | 重度 | 中度 | 重度 |
| A_{111} | — | — | (0.012, 0.010, 0.005) | (0.100, 0.150, 0.050) | 0.009 | 0.100 | 0.009 | 0.100 |
| A_{112} | 0.120 | 0.260 | (0.100, 0.020, 0.039) | (0.400, 0.450, 0.320) | 0.053 | 0.390 | 0.100 | 0.300 |
| A_{113} | 0.070 | 0.100 | (0.210, 0.100, 0.107) | (0.150, 0.100, 0.050) | 0.136 | 0.100 | 0.090 | 0.100 |
| A_{114} | — | — | (0.011, 0.100, 0.107) | (0.110, 0.130, 0.060) | 0.009 | 0.010 | 0.009 | 0.010 |
| A_{115} | — | — | (0.120, 0.800, 0.055) | (0.050, 0.150, 0.100) | 0.085 | 0.010 | 0.085 | 0.010 |
| A_{121} | — | — | (0.120, 0.050, 0.100) | (0.120, 0.120, 0.060) | 0.090 | 0.100 | 0.090 | 0.010 |
| A_{122} | 0.090 | 0.120 | (0.100, 0.120, 0.149) | (0.180, 0.240, 0.240) | 0.123 | 0.220 | 0.100 | 0.150 |
| A_{123} | 0.150 | 0.360 | (0.350, 0.354, 0.244) | (0.400, 0.450, 0.620) | 0.316 | 0.490 | 0.200 | 0.400 |
| A_{125} | 0.100 | 0.200 | (0.120, 0.100, 0.060) | (0.520, 0.490, 0.580) | 0.100 | 0.530 | 0.100 | 0.300 |
| A_{1241} | 0.200 | 0.420 | (0.280, 0.310, 0.310) | (0.500, 0.530, 0.530) | 0.200 | 0.520 | 0.200 | 0.450 |
| A_{1242} | 0.160 | 0.260 | (0.300, 0.340, 0.330) | (0.420, 0.380, 0.370) | 0.290 | 0.390 | 0.200 | 0.300 |
| A_{131} | 0.100 | 0.200 | (0.100, 0.120, 0.080) | (0.180, 0.250, 0.170) | 0.100 | 0.200 | 0.100 | 0.200 |
| A_{1321} | 0.100 | 0.250 | (0.120, 0.120, 0.060) | (0.400, 0.380, 0.468) | 0.100 | 0.416 | 0.100 | 0.300 |
| A_{1322} | 0.140 | 0.350 | (0.210, 0.208, 0.100) | (0.350, 0.320, 0.479) | 0.173 | 0.383 | 0.150 | 0.360 |

续表 2

| 节点 | 直接节点先验概率 $P(C_b)$ | | 三角模糊数 $G = (k, l, u)$ | | 补充节点模糊概率 P_g | | 先验概率 $P_A = 0.7P(C_b) + 0.3P_g$ | |
|-----------|-------------------|-------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------|---------------------------------|-------|
| | 中度 | 重度 | 中度 | 重度 | 中度 | 重度 | 中度 | 重度 |
| A_{133} | 0.160 | 0.420 | (0.310, 0.320, 0.486) | (0.400, 0.390, 0.490) | 0.293 | 0.353 | 0.200 | 0.400 |
| A_{211} | — | — | (0.100, 0.100, 0.100) | (0.100, 0.100, 0.100) | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 |
| A_{212} | 0.27 | 0.460 | (0.310, 0.320, 0.486) | (0.400, 0.390, 0.490) | 0.372 | 0.426 | 0.300 | 0.450 |
| A_{213} | — | — | (0.100, 0.100, 0.100) | (0.150, 0.210, 0.240) | 0.100 | 0.200 | 0.100 | 0.200 |
| A_{221} | 0.010 | 0.010 | (0.010, 0.010, 0.010) | (0.001, 0.001, 0.001) | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| A_{222} | — | — | (0.030, 0.040, 0.080) | (0.030, 0.040, 0.080) | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| A_{31} | 0.100 | 0.300 | (0.100, 0.150, 0.050) | (0.250, 0.300, 0.350) | 0.100 | 0.300 | 0.100 | 0.300 |
| A_{32} | 0.060 | 0.080 | (0.020, 0.032, 0.029) | (0.042, 0.030, 0.066) | 0.027 | 0.046 | 0.050 | 0.070 |
| A_{41} | 0.100 | 0.100 | (0.120, 0.100, 0.080) | (0.120, 0.100, 0.080) | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 |
| A_{42} | 0.010 | 0.010 | (0.010, 0.010, 0.010) | (0.010, 0.010, 0.010) | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |

注:—表示不能直接统计到的数据;三角模糊数中的语言变量 0~1 分为 5 个等级。

3 应急处置仿真分析

3.1 颠簸事件选取

受限于预测预警技术,突发性的单次颠簸一般持续几秒到几十秒不等,颠簸应急处置时长会受到等级判断、响应时间、决策应对和保护措施等多重影响。国际民用航空公约《附件 3 国际空中航行气象服务》将颠簸划分为轻度、中度、重度 3 个等级,事件统计结果表明:轻度颠簸危害较小,而中、重度颠

簸则会带来结构损坏和人员伤亡的严重事件后果。考虑到颠簸事件发展的动态性和持续性,依据式(1)一式(8)选取中、重度颠簸,对不同时间片下的应急处置节点进行 DBN 仿真分析:首先将中度、重度颠簸的先验概率 P_A 导入已构建的 DBN 网络中,通过调整时间片间隔 Δt ,得到各个节点输出的后验概率以及相关性变化;继而根据机上颠簸应急处置的客观响应时间,选择时间片的单位时间为 1 min;而后观察时间片从 1~10 min 的变化程度。

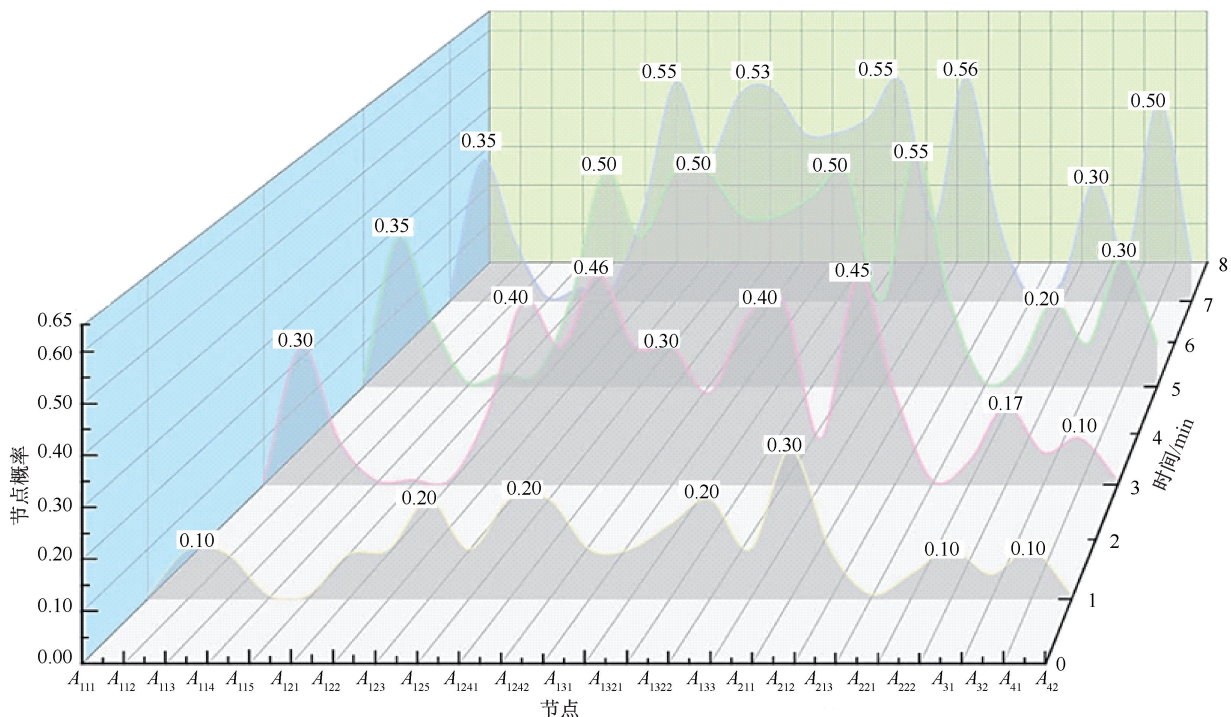


图 5 中度颠簸下各节点的时间片变化分布

Fig. 5 Distribution of time slice changes during moderate turbulence

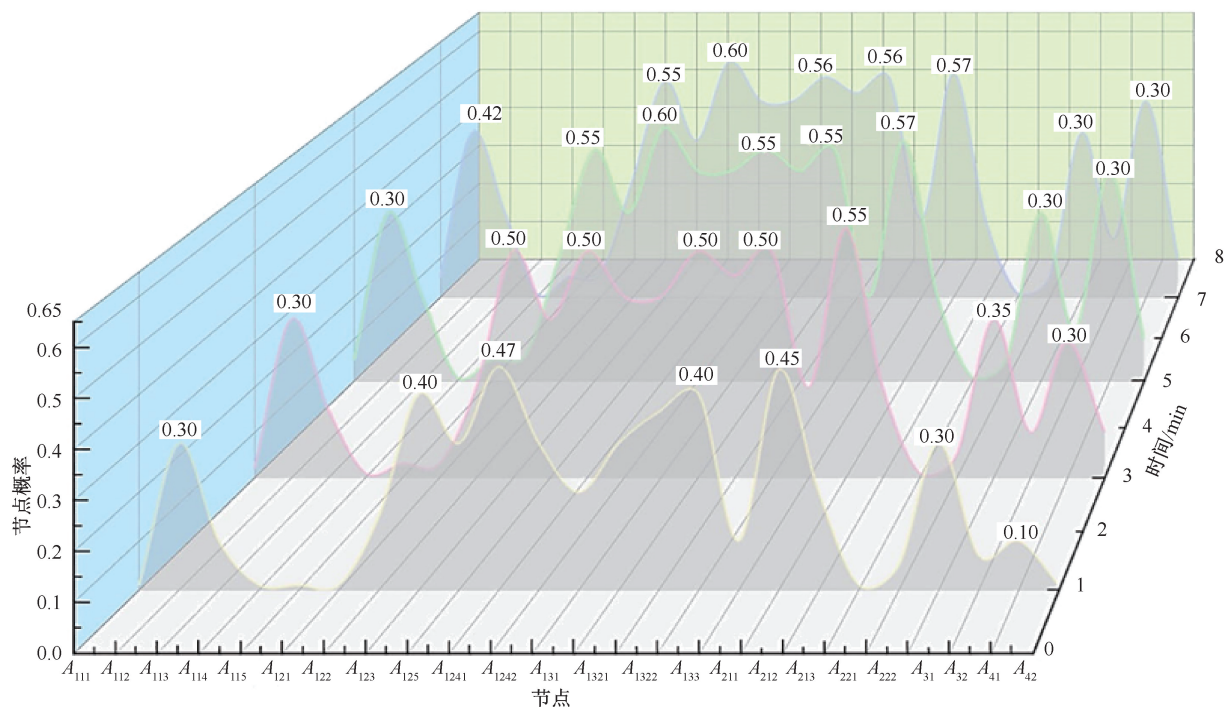


图6 重度颠簸下各节点的时间片变化分布

Fig. 6 Distribution of time slice changes during severe turbulence

通过数据仿真模拟,时间片每2 min的变化幅度较为显著,故选择从 $t=1$ min开始每2个时间片进行节点结果分析。当 $t \geq 8$ min,其变化程度与 $t=7$ min时几乎重合,不再显著。因而,得到中度和重度颠簸在 $t=1$ 、 $t=3$ 、 $t=5$ 、 $t=7$ min时间片变化下的各节点的概率分布结果,分别如图5、图6所示。

由图5、图6可知:颠簸事件在不同时间维度、不同颠簸程度下的概率呈现出:

1) 应急处置具有时间敏感性,存在最佳处置时间。在中度颠簸下,节点失效概率随处置时间增加而增加。同样,重度颠簸下的处置节点失效概率变化与中度颠簸呈现相同趋势。如在 $t=1$ min时,各节点应急处置的重度颠簸比中度颠簸的失效概率高,但随着时间增加,在 $t=7$ min时,两者失效概率几乎相等。中度和重度颠簸在 $t=5$ 和 $t=7$ min时处置失效概率几乎相同,趋于平稳,表明最佳应急处置时间是在 $t=5$ min之前。

2) 应急处置策略受颠簸程度影响,具有差异性。在 $t=1$ min时,横向对比中度与重度颠簸的节点,乘务员没有做好自身防护 A_{123} 、乘务人员与旅客没有系好安全带 A_{125} 和 A_{133} 、没有固定餐车 A_{1241} 和天气环境恶劣 A_{31} 的概率变化显著,变化幅度超过0.2。表明颠簸程度加重后,人员固定措施不到位是导致应急处置失效的主要原因。

3) 人为因素导致的各节点的应急处置失效概率最高。在所有致因因素中, A_{123} 、 A_{1241} 、 A_{1242} 、 A_{133} 和 A_{212} 是导致客舱颠簸事件处置失效的关键节点,其在不同时间片,不同程度颠簸的失效概率都处于较高水平。表明乘员没有系好安全带及客舱乘务人员的过度服务是导致处置失效的关键原因。

4 结论

1) 仿真结果表明:缩短颠簸应急处置时间可有效减少人员伤亡,5 min内是最佳的应急处置时间;固定措施不到位和人为因素会导致应急处置失效。故机组成员需要强化颠簸事件演练,提升应急快速响应效率;同时,需政策支持以规范客舱服务程序;强化乘客的颠簸安全教育,引导遵守客舱秩序,进而减少颠簸事件带来的人员伤亡与财产损失。

2) 在模型构建时,系统考虑了颠簸该类突发事件的无预警性、程度影响、时间变化等特性,通过构建动态评估模型,科学分析事件的关键节点和应急策略,以减少人员伤亡等事件后果,可为类似的封闭空间、救援困难和动态处置的突发事件提供方法参考。

3) 仿真结论虽可结合专家打分补充数据来源,但受颠簸事件统计数据限制,下一步可开展动舱颠簸试验,对不同程度、不同时间片间隔下的颠簸事件开展试验复核,以修正节点概率,验证关键处置事

件,为机组成员提供更为科学规范的防颠簸训练程序,减少事件伤害。

参 考 文 献

- [1] DESKOS G, CARRE A D, PALACIOS R. Assessment of low-altitude atmospheric turbulence models for aircraft aeroelasticity[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 95: DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.102981.
- [2] Aviation safety network (2017–2022)[DB/OL]. [2023–11–21]. <https://asn.flightsafety.org>.
- [3] HU Boyan, HUI Pinghong, DING Jinfeng, et al. Spatiotemporal characteristics of clear-air turbulence (CAT) potential in China during 1979–2020[J]. *Climate Dynamics*, 2023, 61: DOI: 10.1007/s00382-023-06684-z.
- [4] FAA-H-8083-25C, Pilot's handbook of aeronautical knowledge[S], 2023.
- [5] 李朝璐,吴俊杰,万连成. 基于支持向量机的飞机颠簸预测方法研究[J]. *西安航空学院学报*, 2022, 40(3):24–28.
LI Chaolu, WU Junjie, WAN Liancheng. Research on aircraft turbulence prediction method based on support vector machine[J]. *Journal of Xi'an Aeronautics University*, 2022, 40(3):24–28.
- [6] 曾兵,肖子龙,董理,等. 基于 G-sensor 实报的空中颠簸管理系统设计[J]. *民航学报*, 2022, 6(4):77–81.
ZENG Bing, XIAO Zilong, DONG Li, et al. Design of turbulence management system based on G-sensor actual report[J]. *Journal of Civil Aviation*, 2022, 6(4): 77–81.
- [7] WANG Qing, ZHENG Fengqi, QIAN Weiqi, et al. A practical filter error method for aerodynamic parameter estimation of aircraft in turbulence[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(2):17–18.
- [8] 杜红兵,张世博,李弘毅,等. 火灾场景下民机客舱人员疏散仿真及优化[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(2):187–194.
DU Hongbing, ZHANG Shibo, LI Hongyi, et al. Simulation and optimization of personnel evacuation in civil aircraft cabin under fire scenario[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(2): 187–194.
- [9] 张青松,魏祥宇,吴煜. 智能化民航安保的研究热点与发展趋势[J]. *交通信息与安全*, 2023, 41(5):1–11.
ZHANG Qingsong, WEI Xiangyu, WU Yu. A review of focus and development trends in intelligent civil aviation security[J]. *Traffic Information and Security*, 2023, 41(5):1–11.
- [10] CANKAYA B, TOPUZ K, DELEN D, et al. Evidence-based managerial decision-making with machine learning: the case of Bayesian inference in aviation incidents[J]. *Omega*, 2023, 120: DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.102906.
- [11] MUECKLICH N, SIKORA I, PARAKEVAS A, et al. The role of human factors in aviation ground operation-related accidents/incidents: a human error analysis approach[J]. *Transportation Engineering*, 2023, 13: DOI:10.1016/j.treng.2023.100184.
- [12] MA Yaping, YUAN Jinfeng, TAN Lingling, et al. A model for aircraft cabin evacuation considering passenger type[J]. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2024, 5(1): 83–90.
- [13] AC-121-FS-2009-35,关于制定空中颠簸管理程序防止人员伤害的要求[S].
- [14] CCAR-91-R4,一般运行和飞行规则[S]. 2022.
- [15] AC-121-FS-2011-004R1,航空承运人运行中心(AOC)政策与标准[S].
- [16] AC-121-FS-27-R3,客舱乘务员的资格和训练[S]. 2020.
- [17] 余稼洋,郭建胜,周楚涵,等. 基于 Bow-tie-DT-FTA 的航空安全事故预防措施决策分析[J]. *火力与指挥控制*, 2022, 47(8):158–164.
YU Jiayang, GUO Jiansheng, ZHOU Chuhan, et al. Decision-making analysis of preventive measures for aviation safety accidents based on Bow-tie-DT-FTA[J]. *Fire Control & Command Control*, 2022, 47(8): 158–164.
- [18] 刘保占,靳卫卫,安伟,等. 基于模糊 Bow-tie 模型的深水钻井平台井喷溢油风险评价[J]. *船海工程*, 2020, 49(2): 1–5.
LIU Baozhan, JIN Weiwei, AN Wei, et al. Oil spill risk assessment for blowout of deepwater drilling platform based on fuzzy Bow-tie model[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2020, 49(2):1–5.

- [19] 杨文安,李佳欣. 基于动态贝叶斯网络的装配式建筑吊装施工安全风险[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1 328-1 336.
YANG Wenan, LI Jiaxin. Safety risk analysis of hoisting construction of prefabricated buildings based on dynamic Bayesian network [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 24(4):1 328-1 336.
- [20] 陈志煌,刘国恒,王莹莹,等. 基于动态贝叶斯网络的水下连接器故障诊断[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(5): 81-87.
CHEN Zhihuang, LIU Guoheng, WANG Yingying, et al. Fault diagnosis of subsea collet connector based on dynamic Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(5):81-87.
- [21] 张健,罗鑫悦,黎宗孝,等. 基于动态贝叶斯网络的无人机航迹模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(11):188-193.
ZHANG Jian, LUO Xinyue, LI Zongxiao, et al. Research on UAV trajectory modeling based on dynamic Bayesian network[J]. China Safety Production Science and Technology, 2023, 19(11):188-193.
- [22] 岳文静,杜丽敬,陈先锋,等. 基于 DBN 的气体泄漏事故情景推演与节点分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增 1):165-170.
YUE Wenjing, DU Lijing, CHEN Xianfeng, et al. Scenario deduction and node analysis of gas leakage accidents based on DBN[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S1):165-170.
- [23] GUO Yunlong, JIN Yongxing, HU Shenping, et al. Risk evolution analysis of ship pilotage operation by an integrated model of FRAM and DBN[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 229:1-18.
- [24] KIZIELEWICZ B, DOBRYAKOVA L. Stochastic triangular fuzzy number (S-TFN) normalization: a new approach for nonmonotonic normalization[J]. Procedia Computer Science, 2023, 225:4 901-4 911.
- [25] 张健健,郭继坤,费青竹. 基于主成分分析和三角模糊数的应急物资供应能力指标体系[J]. 兵工自动化, 2023, 42(11):68-72.
ZHANG Jianjian, GUO Jikun, FEI Qingzhu. Index system of emergency material supply capacity based on principal component analysis and triangular fuzzy number[J]. Ordnance Industry Automation, 2023, 42(11):68-72.
- [26] GHAFFARI A, SAADAT R, MESIAR R. Fuzzy number-valued triangular norm-based decomposable time-stamped fuzzy measure and integration[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2022, 430(28):144-173.

作者简介: 吴煜 (1979—),女,山东曹县人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事民航安全与应急管理、危险品运输等方面的研究。E-mail:y_wu@cauc.edu.cn。