

刘俊杰, 张爱华. 基于屏障模型的事件风险等级评估[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2284–2292.

LIU J J, ZHANG A H. Event risk level assessment based on the barrier model[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2284–2292.

基于屏障模型的事件风险等级评估*

刘俊杰, 张爱华

(中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要:为提升依据事件信息评估航空运输系统安全风险的效能,选取中国民用航空安全信息系统 802 起偏离姿态/高度事件,基于屏障理论和事件风险分类(Event Risk Classification, ERC)构建事件风险屏障模型(Event Risk Barrier Model, ERBM)。该模型依据样本事件确定包含 7 个屏障类型、19 个屏障功能和 37 个屏障因素的屏障分类体系,基于领结图-贝叶斯网络模型量化屏障的有效概率,通过敏感性分析确定各层屏障权重,并将事件风险等级结果与 ERC 方法对比验证。结果表明:依据所构建的屏障分类体系确定样本事件关键屏障因素为机组资源管理、自动油门和飞行技术管理手册等;ERBM 模型与传统 ERC 方法相比,其屏障类型层和功能层的高风险事件评估准确度提升率分别为 47.5% 和 76.5%,触发可控飞行撞地事故后果的概率为 6%。

关键词:安全工程;事件风险分类;安全风险评价;风险等级;屏障模型;贝叶斯网络

中图分类号:X949 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6094(2026)06-2284-09

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1190

0 引言

安全风险等级量化是双重预防机制的核心工作,也是影响风险评估和决策的重要部分^[1]。为有效提升安全管理水平并降低事故风险,在风险量化时引入“屏障”和“安全屏障”等理念逐渐成为风险评估与管理的研究热点。在相关文献中,屏障也被称为“对策、防护措施、保护层和安全栅等”^[2]。

目前,国内外研究在屏障的定义、分类和功能方面基本达成共识,认为屏障是指在系统运行过程中用于防止事件发生或减缓其后果的技术或管理手段,其功能概括为避免、预防、控制事故发生,限制、缓解事故后果^[3]。为实现事件/事故风险等级评估和量化,有研究者利用故障树^[4]和蒙特卡洛^[5]等方法,结合“风险值=概率×严重度”对风险值进行评估。但这种传统的风险量化方法将屏障视为始终存在缺陷的“奶酪片”,低估了屏障的实际效能和可靠性,风险评估结果过于保守。

为此,高风险行业开始引入评估屏障的有效性以改进风险量化结果。工业^[6]和石油^[7]等领域在这方面的方法研究已相对成熟。领结(Bow-Tie, BT)分析方法因可以直观展示系统中预防和控制事件发生的屏障措施得到了广泛应用。典型方法之一是欧

盟委员会开发的工业事故风险分析,引入屏障的有效性、响应时间和置信度,构建了屏障性能评估体系^[8]。而 BT 结构的定性分析无法充分评估系统中多重屏障相互作用的复杂关系,将 BT 与贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)结合逐渐成为目前屏障有效性评估的主流方法^[9]。2024 年,刘正刚等^[6]率先提出了基于 BT-BN 的屏障动态演化机制,为系统中屏障的耦合协调和因果演化研究奠定了研究基础。

在民航安全风险管理领域,屏障量化的相关研究在航空安全报告^[10]和飞机维修^[11]等方面也有所运用并取得了一定成果。有代表性的如欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)于 2020 年开发的事件风险分类(Event Risk Classification, ERC)评估方法,将屏障的有效性量化为事件演化成严重事故的概率,此时“风险值=屏障有效概率×严重度”^[12]。这种方法通过欧盟法规实现了 31 个成员国的事件风险等级评估标准化,但由于屏障分类未能充分考虑复杂飞行运行系统下人为决策过程与屏障功能的交互机制,导致 EASA 在 2023 年的应用中,约 64% 的事件信息难以识别屏障类型及其有效性,无法完成风险等级评估^[13]。

鉴于此,本文以偏离姿态/高度事件为研究样本,综合考虑屏障功能在事件中的作用,提出

* 收稿日期: 2025-07-08

作者简介: 刘俊杰,副教授,硕士生导师,从事航空安全数据挖掘、人为因素研究,13132039969@126.com。

基金项目:中国民用航空局安全管理体系建设项目(HA202509)

结合 BT、BN 和 ERC 方法的事件风险屏障模型 (Event Risk Barrier Model, ERBM), 识别并分析屏障因素, 明确每种屏障的有效性状态和屏障路径, 量化屏障的有效性概率, 并结合事件严重性等级标准评估事件的风险等级, 提高风险评估结果的客观性和准确性, 为实现数据驱动的安全管理实践提供依据和参考。

1 屏障理论概述

1980 年, Haddon^[14] 首次提出屏障理念, 将屏障视为在能量转移模型中约束能量异常释放的物理防护措施。随后, Reason^[15] 于 1997 年通过瑞士奶酪模型发展并强调了屏障的分层防护作用, 表现为防止事故发生、减少潜在风险。同时, 国内外学者从不同角度提出了不同的屏障类型: 在作用对象的角度, 屏障可划分为人的行为屏障、物的屏障、作业环境屏障和管理屏障^[7]; 根据屏障在事故致因中的作用, 可分为预防屏障和缓解控制屏障^[2]。基于上述分析, 本文将屏障定义为: 在事故的发展过程中实现阻止事件发生或防止演化为严重后果的, 具有避免、预防、控制事故发生, 或具有限制、减少、缓解事故后果危害功能的所有介质和手段。为便于理解屏障在风险控制中的作用, 总结如图 1 所示的屏障管理框架。

2 事件风险屏障模型 (ERBM) 构建

ERC 方法是以瑞士奶酪模型为基础, 从风险的视角看待已经发生的事件, 通过两个关键问题来评估事件的风险: 若该事件升级为事故, 最可能的事故结果是什么; 在该事件与最可能的事故结果之间, 剩余的屏障有效性如何^[15]。然而, 屏障划分和适用范围等缺乏针对性和客观性。本文以我国航空运输的特点和需求为基础, 提出事件风险屏障模型 (ERBM), 对 ERC 方法的屏障识别、权重量化和事件严重性判断进行改进优化, 流程如图 2 所示。

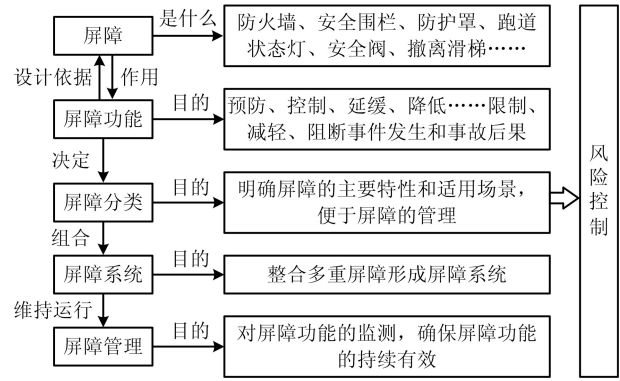


图 1 屏障管理框架

Fig. 1 Barrier management framework

2.1 屏障类型与有效性等级划分

为避免对屏障的理解偏差, 建立统一的屏障类型与状态等级, 以实现不同事件类型间屏障信息的标准化表达、可量化建模与数据复用。

(1) 识别屏障: 由于事件演化过程中往往涉及多个屏障, 因此需要根据选取的研究对象尽可能辨识出所有屏障。屏障识别过程如图 3 所示。为避免结果出现信息颗粒度不一致和屏障冗余等问题, 提出标准化原则统一屏障因素。**a.** 层次分级原则: 建立屏障类型、屏障功能和屏障因素的分类体系;**b.** 一致性原则: 若多个屏障因素指向相同或相近的防护机制, 视为冗余项合并;**c.** 功能等价性原则: 若屏障因素在系统运行过程中具有相同的风险干预路径与作用, 合并为同类屏障;**d.** 建模敏感性原则: 考虑模型的关键屏障识别与敏感性分析, 对部分相同屏障功能、不同作用对象的因素进行保留。

(2) 划分屏障类型: 参考 ERC 方法从系统性和人为操作性两个维度, 自上而下评估民航运输系统中预先定义的屏障, 确定屏障类型, 见表 1。系统性屏障主要针对设备、程序、组织管理等预先设定的结构性安全机制, 操作性屏障则强调人为执行是否及时和有效。

(3) 定义屏障有效性等级: 屏障的有效性是发

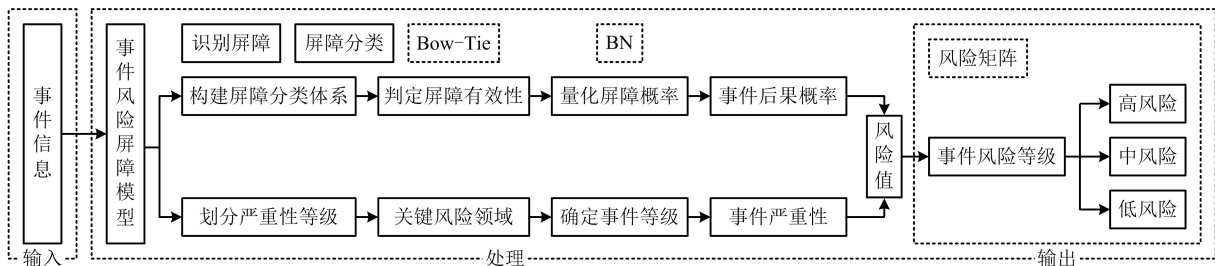


图 2 ERBM 方法流程

Fig. 2 ERBM methodological workflow

表1 屏障类型划分

Table 1 Classification of barrier types

屏障维度	屏障类型	解释
系统性屏障	飞机、设备及基础设施	与事故有关的飞机、空中交通管制中心、机场或其他类型的基础硬件设施
	战术规划	在飞行前减少事故原因的飞行策略
	法规、流程、程序及合规性	相关参与者是否遵守有效的、可理解的法规、程序和流程
操作性屏障	情境感知与行动	涉及对管制员、机组人员或机场人员等操作威胁的态势感知
	预警系统运行与操作	可防止事故发生的预警系统和措施
	恢复行动	对潜在事故情境后期恢复的处理,关注事件后的应对措施
	保护措施	事件发生时,采取合理措施以减轻后果程度或防止事件升级

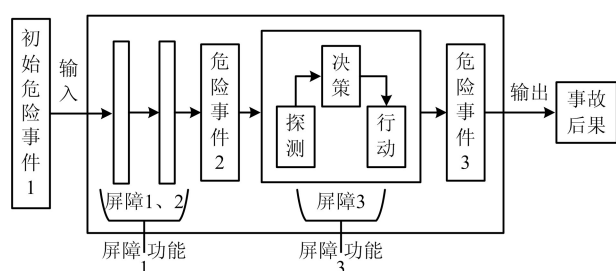


图3 屏障识别过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of barrier identification process

挥事故防控作用的关键。现有研究主要将屏障状态划分为有效(可用)和失效(不可用),或已阻止、已知存在和假定存在等^[2,12]。在ERBM方法中,将每个屏障节点视为离散型变量,设定完全有效、部分有效和无效三种状态,有效状态等级划分为“已阻止、已知存在”两种类别,见表2。

表2 屏障有效性等级

Table 2 Effectiveness rating of barriers

有效性等级	判断依据
完全有效	已阻止 屏障阻止事件升级为严重事故结果
	已知存在 事件信息中明确存在,屏障在事件与潜在的事故结果之间已到位并正常工作
部分有效	屏障工作存在减弱、不完整或效果有限
无效	屏障未能正常工作,导致事件升级为事故

2.2 BT 结构图构建

BT作为风险分析和风险管理的常用方法,结合了故障树分析和事件树,识别各类屏障及屏障在事件链中的位置和作用^[8]。模型中心为风险事件,左侧为各屏障在事件致因中的作用路径,右侧为事件

可能引发的后果及其缓解屏障。

2.3 BT-BN模型建立

BN是一种有向无环的概率图模型,用于表示变量之间的条件依赖关系。在ERBM方法中,以屏障因素及屏障功能为节点,将BT结构中的节点映射到BN,如图4所示。

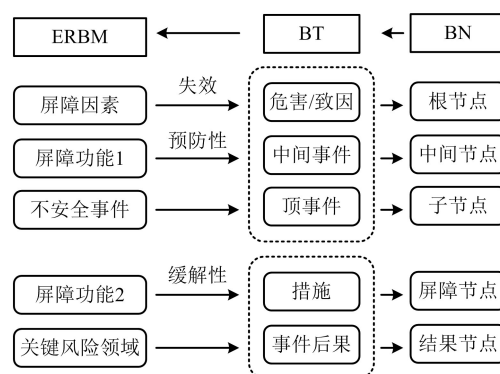


图4 基于ERBM方法的BT-BN映射关系

Fig. 4 BT-BN mapping relationship based on the ERBM method

为了实现对样本事件中各类屏障因素的定量评估与权重分配,基于BN模型的反向推理分析[式(1)~(5)],得到各屏障因素的先验概率、后验概率和敏感度。敏感度越高,表明该屏障对事件的影响越大,因此将各屏障层的敏感度归一化,确定屏障权重^[4,8]。

$$P(Z) = \frac{n}{N} \quad (1)$$

$$P(G_1, G_2, G_3, \dots, G_n) = \prod_{i=1}^n P(G_i | \pi(G_i)) \quad (2)$$

$$P(G_i | Z) = \frac{P(G_i, Z)}{P(Z)} = \frac{P(G_i)P(Z | G_i)}{\sum_{j=1}^n P(Z | G_{ij})} \quad (3)$$

$$ROV(G_i) = \frac{|P(G_i)' - P(G_i)|}{P(G_i)} \quad (4)$$

$$\lambda_i = \frac{|ROV(G_i)|}{\sum |ROV(G_i)|} \quad (5)$$

式中 n 为变量数; N 为样本总数; $P(Z)$ 为节点 Z 的先验概率; $\pi(G_i)$ 为父节点集合; $P(G_i|Z)$ 为 Z 在 G_i 下的条件概率; $P(G_i)$ 为屏障的先验概率; $P(G_i)'$ 为屏障的后验概率; λ_i 为屏障权重; $ROV(G_i)$ 为敏感度。

2.4 事件风险等级评估

根据我国《民用航空器征候等级划分办法》^[16]和《民用航空安全信息管理规定》^[17]等民航运输类事件分类标准,将事件严重性等级划分为事故、征候、一般事件、差错和几乎无影响 5 种等级,分别对应“X、S、M、I、E”。其次,为评估事件的潜在事故严重程度,结合 ERC 方法将民航不安全事件最有可能升级的事故类型统计为关键风险区域(Key Risk Area, KRA),辅助事件严重性等级的确定。KRA 包括“空中碰撞 K_1 、飞机失控 K_2 、跑道碰撞 K_3 、地面损坏 K_4 、飞行中的障碍物碰撞 K_5 、跑道偏出 K_6 、可控飞行撞地 K_7 、火灾/烟雾/加压 K_8 、安保问题 K_9 、其他伤害 K_{10} 和无影响 K_{11} ”。

按照我国《民航安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防工作机制管理规定》^[11],建立 ERBM 风险矩阵对评估结果可视化(见表 3),矩阵单元格对应不同严重程度、屏障有效概率组合下的风险等级。高风险需立即采取措施,中风险需纳入安全问题进一步分析,低风险无需采取措施。例如,当一起事件的严重程度为“X”,事件中涉及的屏障有效性概率为 1 时,由表 3 得到该事件的风险等级为高风险。为进一步量化事件等级,利用 BN 模型量化所得的屏障权重,结合式(6)和(7)计算事件风险值。

$$W = \sum \lambda_i \beta \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$R = W/2 \quad (7)$$

式中 W 为屏障有效性概率; β 为屏障的有效性取值(若屏障有效,则 $\beta = 1$; 若无效,则 $\beta = 0$); R 为事件风险值。

3 模型验证

民航强制报告事件信息包含了大量系统运行中的风险信息,是航空安全风险评估、实施阶段性安全监管的重要依据^[17]。目前国内外机载 GPS 受到不明无线电信号干扰事件高发, GPS 信号丢失或错误

表 3 ERBM 风险矩阵

Table 3 ERBM barrier matrix

严重程度	不同屏障有效性概率风险等级					
	5	4	3	2	1	0
X	低	中	中	高	高	高
S	低	中	中	高	高	高
M	低	低	中	中	高	高
I	低	低	低	中	中	高
E	低	低	低	低	中	中

定位、触发防撞、超速等假告警事件对飞行安全构成了空中失控、颠簸伤人和空中冲突等风险;在偏离姿态/高度事件中,若偏离预定高度或未保持正常姿态高度可能引发可控飞行撞地、空中相撞等严重后果。同时,对强制报告典型事件统计分析发现,此类型事件的信息完整度高、结构清晰,能够为屏障体系提供自下而上的多样化样本信息。因此,选取中国民用航空安全信息系统 2024 年 1 月 1 日至 2025 年 3 月 29 日“偏离姿态/高度”类型事件作为研究样本,共 802 条文本信息,涉及事发阶段分别为起飞/爬升 19 起、巡航 530 起和进近/着陆 253 起。

3.1 屏障识别与分类

为提高从大量非结构化的事件信息文本中识别关键信息的效率与统一性,分别采用 4 种文本挖掘技术识别屏障关键词并比较抽取效果,结果见表 4。由于 Word2Vec + TextRank 算法^[18]准确率较好,选取该算法识别所得的 84 个关键词作为初始屏障因素。

表 4 文本挖掘效果对比

Table 4 Comparison of text mining results

算法	准确率	召回率	F
TF-IDF	0.262	0.265	0.263
TextRank	0.326	0.328	0.327
Word2vec	0.314	0.316	0.315
Word2Vec + TextRank	0.356	0.357	0.356

注:TF-IDF(Term Frequency-Inverse Document Frequency)为词频-逆文档频率; F 为准确率和召回率的调和平均数(F -measure)。

基于屏障标准化原则结合人工监督对初始屏障进行修正合并,如在功能等价性原则下,将情景意识、驾驶舱内沟通、驾驶舱分工、进近简令等归纳为机组资源管理(D_{19})。同时,邀请 2 名民航安全专家及 3 名航空公司安全信息管理员对分类结果打分,

依据 Kappa 系数检验得到具有良好一致性的屏障因素($p < 0.01$),最后构建如表 5 所示的屏障因素分类体系,共 37 个屏障因素。

3.2 BT 结构图构建

以偏离姿态/高度(T)作为 BT 的顶事件,从事件时间链和屏障功能链的角度将屏障 $B_1 \sim B_5$ 作为前因节点,屏障 B_6 和 B_7 作为右侧的缓解措施,构建如图 5 所示的 BT 结构。

3.3 BT-BN 模型建立

(1) 先验概率。

由于研究样本相对较少,选用历史数据统计结合事件信息中的上下文语义,人工标注屏障因素的有效性状态,将各屏障因素在事件中的频率作为先验概率。对人工标注结果随机抽样 20% 进行信度检验,标注一致性系数为 0.82,表明了结果的可靠性。基于 BT-BN 的转换关系,利用 Genle 4.0 软件

输出 BN 网络模型,选取屏障类型层、屏障功能层与部分后果事件进行展示,如图 6 所示。Y、W、N 分别表示各屏障节点在偏离姿态/高度事件中的完全有效、部分有效和无效。

由 BT-BN 模型可知,当各屏障有效时,发生偏离事件的概率为 43%,这是因为机组资源管理屏障、机组排班审核等屏障因素的失效概率较高,如机组因注意力分配不当,错误复诵管制指令并未有效监控飞机状态,最终导致机组资源管理屏障失效,发生偏离管制指令高度事件。而未发生偏离事件的概率为 57%,这是因为航行通告、标准程序和气象雷达在事件中的作用程度强,分别为 84%、71% 和 64%。在进近/着陆阶段,情境感知与行动屏障(B_4)和预警系统屏障(B_5)的权重显著高于其他阶段;机组资源管理在进近阶段敏感性最高;自动驾驶系统相关屏障的效能及权重在不同飞行阶段中未呈

表 5 偏离姿态/高度事件屏障分类体系

Table 5 Barrier classification system of deviated attitude/altitude event

屏障类型	屏障功能	屏障因素
飞机、设备及基础设施 B_1	飞行自动控制 C_1	自动驾驶系统 D_1
	推力控制 C_2	自动油门 D_2
	气象探测 C_3	气象雷达 D_3
	通信导航监控 C_4	空管自动化系统 D_4 、飞行指引系统 D_5
战术规划 B_2	航前风险识别 C_5	航行通告 D_6
	机组资质管理 C_6	机组排班审核 D_7 、机组资质评估 D_8
	应急预案准备 C_7	颠簸预案 D_9 、风切变预案 D_{10}
	飞行任务规划 C_8	航路规划 D_{11} 、绕飞方案 D_{12}
法规、流程、程序及合规性 B_3	操作规程遵循 C_9	标准程序 D_{13}
	文档与记录管理 C_{10}	飞行记录 D_{14} 、维修记录 D_{15} 、机组训练手册 D_{16} 、飞机使用手册 D_{17} 、飞行技术管理手册 D_{18}
情境感知与行动 B_4	情境意识与决策 C_{11}	机组资源管理 D_{19} 、空管指令 D_{20}
	飞行姿态控制 C_{12}	修正高度 D_{21} 、操纵减速板 D_{22}
预警系统运行与操作 B_5	系统预警 C_{13}	防撞告警 D_{23} 、超速警告 D_{24} 、偏离高度告警 D_{25} 、横滚权限警戒 D_{26}
	客舱预警 C_{14}	安全带灯 D_{27} 、广播提示 D_{28}
	辅助增强预警系统 C_{15}	地面载荷减缓故障警告 D_{29} 、平衡警告 D_{30}
恢复行动 B_6	参数检查 C_{16}	飞机参数检查 D_{31} 、机务故障检查(飞后) D_{32}
	舱内确认 C_{17}	客舱异常检查 D_{33}
	安全组织建设 C_{18}	安全文化 D_{34} 、安全绩效 D_{35}
保护措施 B_7	培训教育 C_{19}	安全教育 D_{36} 、模拟训练 D_{37}

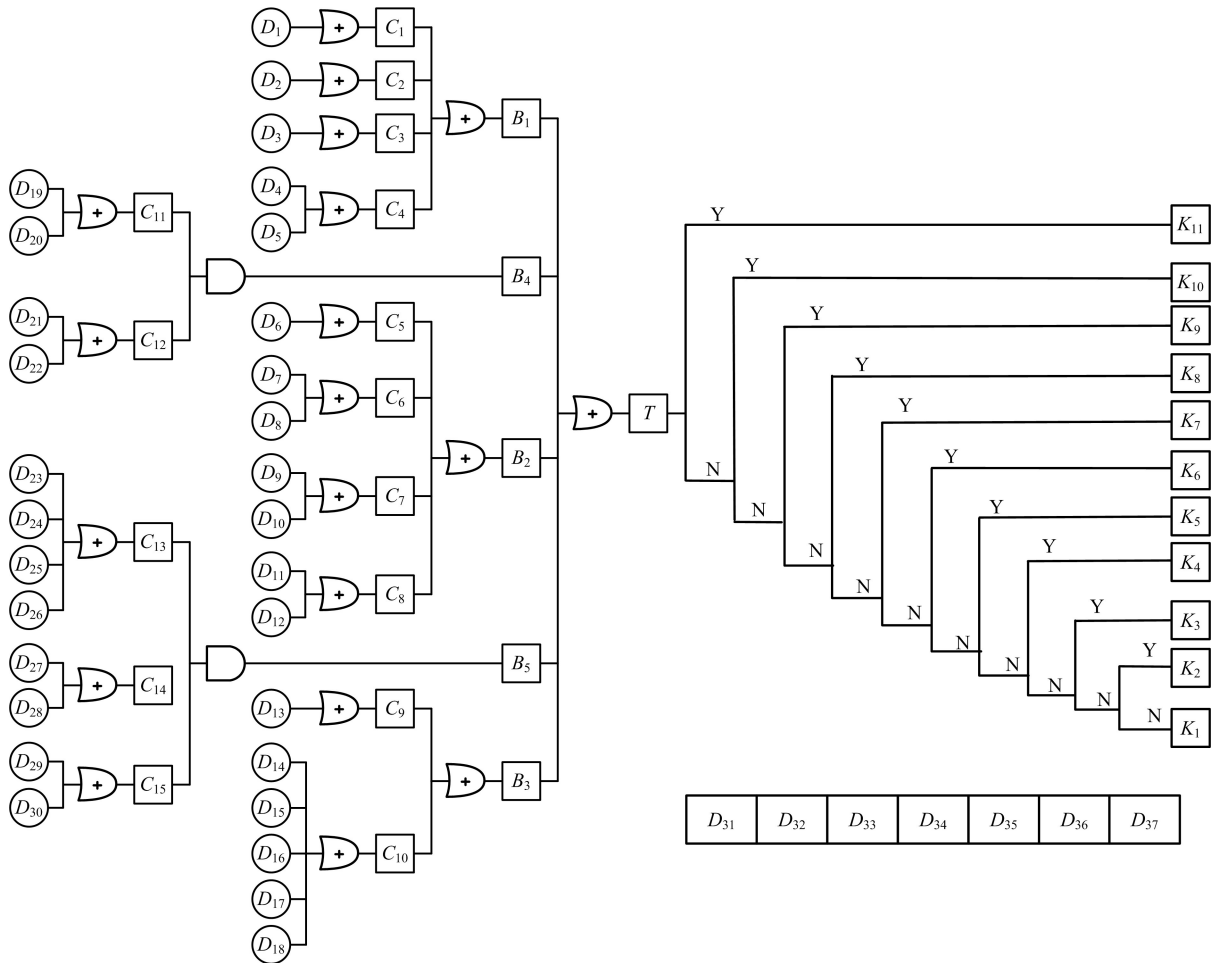


图5 偏离姿态/高度事件 BT 结构

Fig.5 BT structure of deviated attitude/altitude event

现显著差异。

在后果事件中,触发无影响后果的概率为 52%,表明样本事件虽发生偏离但因屏障作用,未升级为严重事故;触发可控飞行撞地的事故后果概率为 6%。

(2) 屏障权重确定

将事件 T 调整为“Y 为 100%,M 为 0,N 为 0”,反向推理当屏障失效导致发生偏离事件时各结点的后验概率,并利用敏感性分析得到屏障功能层和屏障类型层权重,见表 6。

由敏感度可知,当预警系统运行与操作屏障(B_5)失效时, T 事件风险概率将上升 3.80%;而当飞机、设备及基础设施(B_1),情境感知与行动(B_4)和法规流程、程序及合规性(B_3)有效时,事件风险概率将分别降低 7.87%、7.97% 和 6.42%。其中,最大屏障链为:“法规、流程、程序及合规性(B_3)—文档与记录管理(C_{10})—机组训练手册(D_{16})”,即当机组训练手册失效或缺失时,将导致偏离姿态/高度

事件发生。关键屏障因素分别是机组资源管理(D_{19})、自动油门(D_2)、飞行技术管理手册(D_{18}),当这些因素有效时事件风险概率将分别降低 17.15%、16.22% 和 9.62%。

3.4 事件风险等级评估

从屏障类型 B 层(ERBM-B)和屏障功能 C 层(ERBM-C)计算样本事件的风险等级,并结合表 3 的风险矩阵对结果进行统计。为对比验证 ERBM 方法的可靠性,邀请航司已充分熟悉并已实践 ERC 方法的 3 名安全信息管理员(具备 5 a 以上航空安全评估经验)评估样本数据的风险等级,并利用一致性检验得到 Kappa 系数为 0.72($p < 0.01$),表明结果一致性良好。基于 ERC 评估结果,将评估结果的准确度提升率定义为 Q ,具体为 ERC 与 ERBM 事件数之差的绝对值与 ERC 事件数的百分比。因此统一专家结果,作为与 ERBM 方法对比的基准,结果见表 7。

经分析,ERBM 通过分层为 ERBM-B 和 ERBM-C

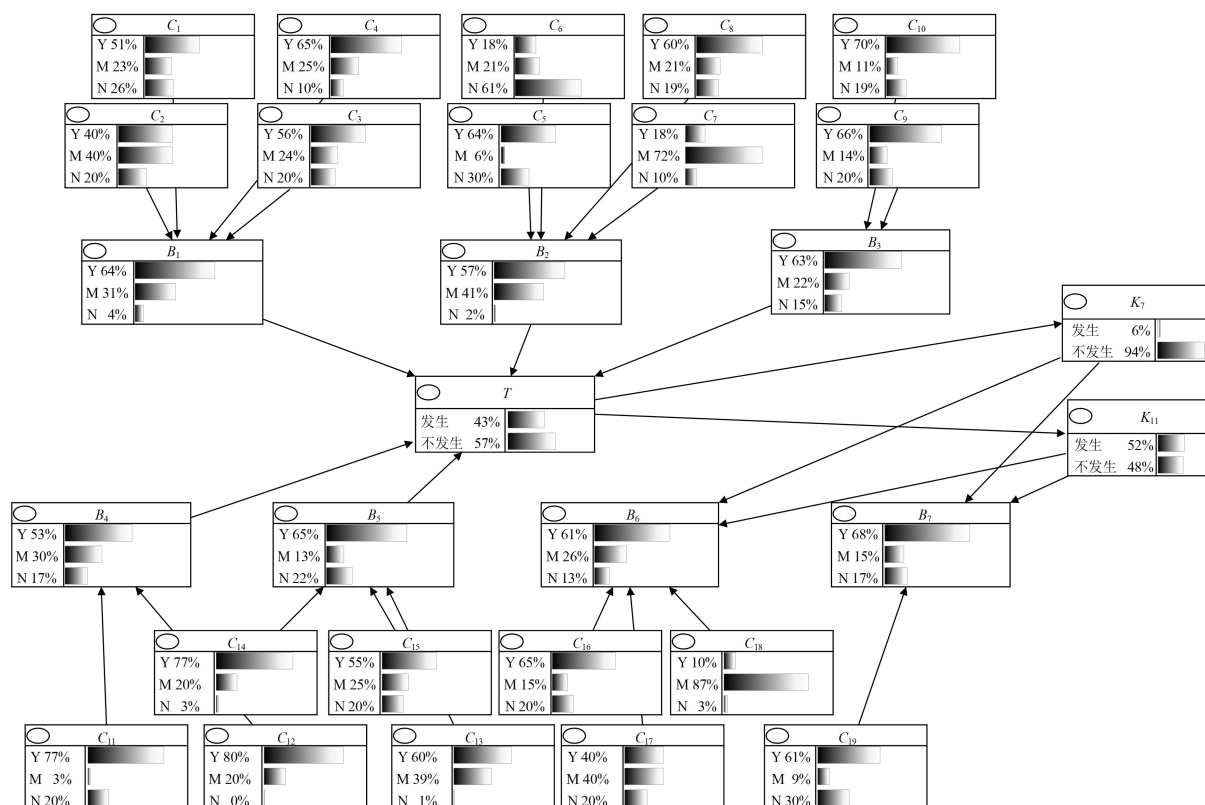


图6 偏离姿态/高度事件 BT-BN 模型

Fig. 6 BT-BN model of deviated attitude/altitude events

表6 屏障权重

Table 6 Sensitivity of barrier

屏障功能/类型	敏感度/%	权重	屏障功能/类型	敏感度/%	权重	屏障功能/类型	敏感度/%	权重
C ₁	-14.69	0.10	C ₁₁	-17.15	0.11	B ₁	-7.87	0.29
C ₂	-16.22	0.11	C ₁₂	-8.01	0.05	B ₂	-3.46	0.12
C ₃	-4.40	0.03	C ₁₃	3.83	0.03	B ₃	-6.42	0.09
C ₄	-8.09	0.05	C ₁₄	3.79	0.03	B ₄	-7.97	0.16
C ₅	-4.63	0.03	C ₁₅	3.82	0.03	B ₅	3.80	0.09
C ₆	-3.77	0.03	C ₁₆	-8.61	0.06	B ₆	-1.46	0.14
C ₇	-3.17	0.02	C ₁₇	-7.69	0.05	B ₇	-2.78	0.11
C ₈	-5.37	0.04	C ₁₈	-4.51	0.03			
C ₉	-4.96	0.03	C ₁₉	-12.39	0.08			
C ₁₀	-9.62	0.06						

C,高风险事件的评估准确度提升率(Q)分别达到47.5%和76.5%,如将ERC方法判定的8起自动驾驶设备因颠簸而短暂断开的事件从高风险修正为中风险,将5起存在手册管理缺陷但未直接影响机组操作的低风险事件修正为中风险。此外,ERBM通

过功能层的进一步量化,识别出4起机组资质管理的潜在风险。通过对比可知,ERBM方法的风险等级评估结果较为客观,能够避免不必要的资源浪费。ERBM-B可作为初步风险等级筛选,ERBM-C进一步为风险管理决策提供参考。

表 7 风险等级结果对比
Table 7 Comparison of risk level results

风险等级	事件数/起			$Q_B/\%$	$Q_C/\%$
	ERC	ERBM-B	ERBM-C		
高风险	80	42	19	47.5	76.5
中风险	112	80	99	28.6	12.5
低风险	619	680	684	11.5	12.1

4 结 论

(1) 提出不安全事件风险等级评估方法, 将 BT 结构的定性屏障链转化为可量化的 BN 网络, 实现数据驱动的屏障识别、关键屏障分析及事件风险等级定量评估, 补充当前风险评估方法缺乏统一量化标准和高效评估模型的局限性。

(2) 在偏离姿态/高度事件中, 最大屏障链为“法规、流程、程序及合规性—文档与记录管理—机组训练手册”, 风险管理应注意关键屏障因素: 机组资源管理、自动油门和飞行技术管理手册。

(3) 所建立的 ERBM 方法也适用于其他领域的安全分析, 研究仅选取了民航偏离姿态/高度事件, 未来可选取其他类型事件结合机器学习、人工智能等技术提高屏障识别效率, 丰富屏障分类体系。

参考文献 (References):

- [1] 中国民用航空局. 民航安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防工作机制管理规定: AC-398-03[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
Civil Aviation Administration of China. Civil aviation safety risk hierarchical control and hidden danger investigation and management dual prevention work mechanism management provisions: AC-398-03[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022.
- [2] LIU Y L. Safety barriers: research advances and new thoughts on theory, engineering and management[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 67: 104260.
- [3] MISURI A, LANDUCCI G, COZZANI V. Assessment of risk modification due to safety barrier performance degradation in Natech events[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 212: 107634.
- [4] 陈雍君, 李晓健, 张丽, 等. 故障树和模糊贝叶斯网络在管廊运维风险评估中的应用研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 857-866.
CHEN Y J, LI X J, ZHANG L, et al. Research on the

application of fault tree and fuzzy Bayesian network in utility tunnel operation and maintenance risk assessment[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(3): 857-866.

- [5] WANG C H J, TAN S K, LOW K H. Three-dimensional (3D) Monte-Carlo modeling for UAS collision risk management in restricted airport airspace[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 105: 105964.
- [6] 刘正刚, 刘晨曦, 阮渊鹏. 区块链技术应用中的安全屏障模式研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(10): 105-115.
LIU Z G, LIU C X, RUAN Y P. Review on safety barrier models for blockchain technology applications[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 105-115.
- [7] 宋张君. 发电企业风险管控 4M 屏障理论模型构建及其机制研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(增刊 1): 1-7.
SONG Z J. Research on 4M barrier theory model construction and mechanism for risk management and control of power generation enterprises[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(Suppl. 1): 1-7.
- [8] WU X G, HUANG H R, XIE J Y, et al. A novel dynamic risk assessment method for the petrochemical industry using bow-tie analysis and Bayesian network analysis method based on the methodological framework of ARAMIS project[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 237: 109397.
- [9] YUAN S Q, YANG M, RENIERS G, et al. Safety barriers in the chemical process industries: a state-of-the-art review on their classification, assessment, and management[J]. Safety science, 2022, 148: 105647.
- [10] JAUSAN M, SILVA J, SABATINI R. A holistic approach to evaluating the effect of safety barriers on the performance of safety reporting systems in aviation organisations[J]. Journal of air transport management, 2017, 63: 95-107.
- [11] MENDES N, VIEIRA J G V, MANO A P. Risk management in aviation maintenance: a systematic literature review[J]. Safety Science, 2022, 153: 105810.
- [12] LANGEJAN E K. A system safety perspective of “Gross Negligence” as introduced in regulation (EU) 376/2014[D]. Lund: Lund University, 2023.
- [13] LIEB T J, SELVAM P K, WENDT K. Validation of EASA’s airspace risk assessment guidelines for implementing a U-space area in Germany[C]// Proceedings of the 24th Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS 2024). Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and

- Electronics Engineers, 2024; 1–8.
- [14] HADDON W. The basic strategies for reducing damage from hazards of all kinds[J]. Hazard Prevention, 1980, 16(1): 8–12.
- [15] REASON J T. Managing the risk of organizational accidents[M]. London: Ashgate, 1997.
- [16] 中国民用航空局. 民用航空器征候等级划分办法: AC-395-AS-01 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2021.
- Civil Aviation Administration of China. Civil aircraft drafting classification scheme: AC-395-AS-01[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2021.
- [17] 中国民用航空局. 民用航空安全信息管理规定: CCAR-396-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
- Civil Aviation Administration of China. Provisions on the management of civil aviation safety information: CCAR-396-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2022.
- [18] 刘俊杰, 于佳楠, 王懿. 基于文本挖掘的冲/偏出跑道事故致因网络分析[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(6): 16–25.
- LIU J J, YU J N, WANG Y. Text mining-based causal network analysis of runway overrun/excursion accidents [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(6): 16–25.

Event risk level assessment based on the barrier model

LIU Junjie, ZHANG Aihua

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: This study presents a barrier classification system that integrates both operational and systemic dimensions, grounded in the principles of barrier theory. An enhanced risk assessment model is proposed through the incorporation of the Event Risk Classification (ERC) methodology, which utilizes event-based information. The research focuses on “altitude/attitude deviation” events as case studies, employing text mining technology alongside a customized barrier lexicon to identify existing barrier factors embedded within incident reports. The Bow-Tie methodology is utilized to establish the barrier structure, analyze the causation paths of incidents, and simultaneously evaluate the effectiveness of each barrier. By incorporating incident case studies and historical data, the severity of events is systematically assessed. A Bayesian Network (BN) model is developed to convert qualitatively defined barrier effectiveness paths from the Bow-Tie analysis into quantitative probabilistic relationships. This BN model quantifies the effectiveness probability of each barrier, while sensitivity analysis determines the weighting coefficients of barriers across various hierarchical levels, thereby enabling the calculation of incident occurrence likelihood. An enhanced risk matrix is then employed to classify risk levels, with comparative validation conducted against the conventional ERC method. The research findings demonstrate that the proposed Event Risk Barrier Model (ERBM) significantly improves high-risk identification accuracy compared to the traditional ERC approach, achieving enhancements rates of 47.5% at the barrier type level and 76.5% at the functional level. The probability of triggering a Controlled Flight Into Terrain (CFIT) accident is estimated at 6%, while the likelihood of no consequential impact is calculated at 52%. Critical barrier elements identified through this system include crew resource management, safety training, aircraft maintenance inspection protocols, autothrottle systems, and flight technical management manuals. During the approach and landing phases, situational awareness/action barriers and early warning system barriers are found to carry significantly higher weights compared to other flight phases. Notably, crew resource management exhibits the highest sensitivity during approach operations. In contrast, the effectiveness and weighting of autopilot system-related barriers show no statistically significant variations across different flight phases.

Key words: safety engineering; event risk classification; safety risk assessment; risk level; barrier model; Bayesian network