

【航空管理与安全】

# 基于 HFACS-BN 模型的冲偏出跑道 人为因素分析

白如意, 杜红兵, 王 末, 张 程

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300100)

**摘 要:**为分析冲偏出跑道事件致因,提高风险防范水平,以 2017—2023 年 89 起冲偏出跑道事件为基础,构建 HFACS-BN 模型探究冲偏出跑道人为因素和关键诱发路径。研究得出“组织结构不合理、政策程序不完善、监管不足、计划不当、无效纠正、机组资源管理欠缺、操作者状态不好和情景意识水平低”8 个关键的致因因素,以及“政策程序不完善-监管不足-情景意识水平低-认知差错”、“政策程序不完善-无效纠正-机组管理欠缺-技能差错”、“组织结构不合理-计划不当-操作者状态不好-决策差错”、“组织机构不合理-计划不当-机组管理欠缺-违规”、“组织结构不合理-计划不当-操作者状态不好-不安全行为”5 条关键诱发路径。可通过干预关键致因因素,如优化组织结构、完善政策程序、加强监管、改进机组资源管理、提升飞行员情景意识以及关注其生理与心理动态等措施,来有效降低冲偏出跑道事件的发生率。

**关键词:**冲偏出跑道;人为因素;HFACS-BN;卡方检验;贝叶斯分析

**中图分类号:** V 328 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2025.04.002

国际民航组织在 2023—2025《全球航空安全计划》<sup>[1]</sup>中将冲偏出跑道事件列为 5 大高风险事件类型之一。航空安全网(<https://asn.flightsafety.org/>)数据显示,2017—2023 年共发生了 119 起冲偏出跑道事件,其中 25 起发生在起飞阶段,94 起发生在着陆阶段,冲偏出跑道事件已是民航业位列第二的严重事件类型,其发生不仅造成重大人员伤亡和机体损失,也使公众对航空业安全产生质疑。因此,研究冲偏出跑道事件的致因因素与关键诱发路径,并提出防范措施显得尤为重要。

崔振新等运用事故分析模型和灰色关联分析从人、机、环、管 4 个方面分析冲偏出跑道的影响因素,发现影响最大的前 5 项因素中有 4 项与人的因素相关,这显示出人为因素在冲偏出跑道事件中的重要性<sup>[2]</sup>。Lee 基于模糊逻辑模型(FLM)构建了多维度风险评估体系,量化分析显示监督不足、侧风/顺风、潮湿/污染跑道、机组资源管理(CRM)失效、决策错误和技能错误是关键风险因素<sup>[3]</sup>。刘俊杰等结合文本挖掘与社会网络分析方法,识别出低能见度、未遵守标准操作程序(SOP)、失去情景意识、CRM 不足、训练不足、决策不当、速度过大等冲偏出跑道关键致因<sup>[4]</sup>。齐心歌等基于 2-4 模型构建的风险评价指标体系,通过飞行数据挖掘及飞行操作特征分析,将冲偏出跑道风险指标划分为操作类(如飞行员操作)、环境类(如跑道条件)、数据类(如飞行参数监测)3 个维度<sup>[5]</sup>。Si 等采用故障树与贝叶斯网络结合的方法,揭示了系统故

收稿日期:2025-02-24

第一作者简介:白如意(1998—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事民航运行安全与人因工程研究。

E-mail:alybry317@163.com

通信作者简介:杜红兵(1967—),男,山西河津人,教授,博士,主要从事民航安全与应急管理、航空人因工程研究。

E-mail:hongbin\_du@163.com

障、跑道道面积冰/积水等风险因素的重要性<sup>[6]</sup>。Chang 等基于 SHELLO 模型结合飞行员主观评估,发现情景意识、疲劳、应急处理能力、政策程序明确性、实时跑道/天气变化信息以及信息的可用性和准确性、制动操作状况是冲偏出跑道最为重要的风险因素<sup>[7]</sup>。张粉婷运用蝴蝶结分析法(Bow-Tie)统计归纳出飞机状态评估不足、操作熟练度低、情景意识缺失及 SOP 违规等致因因素<sup>[8]</sup>。王洁宁等从系统理论视角指出,设备状态、操作者身心状态、技能水平、实时信息输入(如天气信息、跑道数据、通信频率、参数、飞机速度及高度等)及机组-管制员协同反馈信息等均可能触发不安全行为<sup>[9]</sup>。过往研究在冲偏出跑道事件致因分析上取得了一定成果,但也存在各自的局限性。在研究方法上,部分研究采用传统模型分析,在量化风险因素上各有成就,但在全面性上有所欠缺。部分研究采用创新性分析,虽为研究提供了新视角,但在量化关键关系、动态呈现事故演进方面存在不足。此外,许多研究未全面考虑组织层面的潜在因素。

针对上述问题,研究引入人为因素分析与分类系统(HFACS)模型,该模型是由 Shappell 等基于瑞士奶酪模型及美国军队、民航飞行数据,提出“组织影响-不安全监督-不安全行为前提-不安全行为”的 4 层递推框架,突破了传统单一层面分析的局限<sup>[10]</sup>。其优势在于能够系统性解析致因链;通过量化各层级条件概率具备逆向推理的动态风险评估能力,且具有跨领域的适应性。该模型最初用于识别和分析航空事故<sup>[11-12]</sup>,随后在无人机操作<sup>[13]</sup>、危险化学品管理<sup>[14]</sup>、放射治疗<sup>[15]</sup>、船舶碰撞<sup>[16]</sup>等多个领域均成功应用,其实践有效性得到了充分验证。然而,HFACS 在量化分析中亦存在主观性较强、动态性不足的局限。因此,本研究构建 HFACS-BN 模型,结合事故分析数据构建因果网络,通过灵敏度分析识别出关键影响因素后推导出事故发展的动态路径,旨在为冲偏出跑道事件的人为因素分析提供系统性的视角,并通过贝叶斯网络实现致因因素的动态传导分析来识别关键路径,为制定防控策略提供科学依据。

## 1 方法

### 1.1 HFACS 模型

HFACS 模型<sup>[10]</sup>事故因果链为“组织因素-不安全监管-不安全行为的前提条件-不安全行为”。其中,潜在致因因素是指组织因素、不安全监管、不安全行为的前提条件,主要致因因素是指不安全行为,直接导致事故发生。本研究基于文献综述和事故调查报告的系统分析,对拟建立的 HFACS 模型在传统框架基础上进行了针对性优化。通过对冲偏出跑道关键岗位的作业规范、运营管理规定、89 起事故案例的深入剖析以及冲偏出跑道事件致因分析的最新研究成果,在不安全行为的前提条件层面新增了 3 个因素类别:风险评估不足(主要涉及着陆性能评估偏差)、情景意识水平低(包括环境感知和态势理解偏差)、关键信息错误(包括气象/跑道等信息接收错误和信息输入处理错误)。

HFACS 模型共包含 4 个层次、21 个人为因素类别,本文系统梳理出与之相关的 52 项人为因素。第一,组织因素,包括:资源管理不足——人力资源不足、资金/预算资源不足、设备/设施资源不足;组织结构不合理——组织结构分配导致的权威梯度;企业文化——组织内部缺乏法制意识和安全意识;政策程序不完善——上级政策、组织规章制度、SOP 等不完善;组织监督——组织内部对日常工作缺少监督,缺少安全检查。第二,不安全监管,包括:监管不足——没有考察操作员的适任情况,培训考核不足,未能提供有效培训和指导;计划不当——机组人员配对不良,机组调度安排不当,飞行计划不合理,未给予机组人员适当休息等;无效纠正——发生不安全行为后重视程度不足,没有相应政策,整改落实不到位;监管违规——授权不合格机组飞行,如授权无资质的飞行员飞行等。第三,不安全行为的前提条件,包括:机组资源管理欠缺——机组人员之间缺乏团队合作、沟通不到位、机组工作负荷过高、领导失误;人员准备不足——参加培训/知识经验储备不足;操作者状态不好——生理状态差如疾病/身体疲劳,心理状态差如存在焦虑/压力/情绪波动/有害态度/错位动机;风险评估不足——对飞行环境的误判、视觉缺乏导致误判、着陆性能评估不足、对跑道等设施风险评价不足;情景意识水平低——对内外环境感知水平低,导致对当前情景的理解和对未来状态的预见能力低;物理环境恶劣——恶劣天气、能见度低、海拔高、地形复杂等;技术环境不

好——飞行超载、飞行操作涉及的飞行器、仪表、通信设备、跑道等状况不好;关键信息错误——气象变化/跑道参数/飞机速度及高度等信息接收错误、输入处理失误或更新不及时。第四,不安全行为,包括:认知差错——在信息处理、感知、记忆、判断和推理等认知过程中出现的错误;技能差错——在执行具体操作技能时可能出现忽略操作程序、欠缺知识技能与经验、操作失误造成的差错;决策差错——在面对各种情况和选择或计划有变时,做出不合理、不恰当或错误的决策;违规——偶然性违规、习惯性违规。

根据 HFACS 模型对以上人为因素做出细致分类,构建适用于冲偏出跑道事故的人为因素分析模型。

### 1.2 贝叶斯网络

贝叶斯网络(BN)亦称信度网络,广泛应用于不确定知识表达和推理领域。该网络由 Pearl 于 1988 年首次提出,其核心是一个由节点和有向边链接组成的有向无环图<sup>[17]</sup>。节点代表随机变量,有向边表示节点间的相互关系(由父节点指向其子节点),节点间的依赖关系通过条件概率(CPT)来表达。无父节点的变量的条件概率用先验概率表示,可直接由 89 起冲偏出跑道事故的统计频率确定。有父节点的变量,其条件概率则按公式  $P(X=x|Y_1=y_1, \dots, Y_n=y_n)$  计算。此外,还可计算变量的总体概率:  $P(X=x) = \sum_{y_1, \dots, y_n} P(Y_1=y_1, \dots, Y_n=y_n) \cdot P(X=x|Y_1=y_1, \dots, Y_n=y_n)$ 。式中: $x$  是子节点  $X$  的可能状态(如  $x \in \{Y, N\}$ );  $y_1, y_2, \dots, y_n$  是父节点  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  的具体状态组合。

## 2 数据统计与分析

### 2.1 样本统计

本文所使用的数据样本来源于航空安全网和 SKYbrary(<https://skybrary.aero/>)中 119 起冲偏出跑道事件,经筛选最终选定具备官方事故调查报告的 89 起事故作为研究对象。

### 2.2 冲偏出跑道事件人因统计分析

根据冲偏出跑道 HFACS 模型,对 89 起事故调查报告的直接原因和间接原因进行分类统计,分别计算各人为因素发生的次数和占比,统计结果见表 1。

表 1 HFACS 模型各人为因素占比

层级	人为因素	发生次数	占比/%	层级	人为因素	发生次数	占比/%
组织因素 A	资源管理不足 A1	40	44.94	不安全前提 C	操作者状态不好 C3	18	20.22
	组织结构不合理 A2	9	10.11		风险评估不足 C4	29	32.58
	企业文化 A3	13	14.61		情景意识水平低 C5	26	29.21
	政策程序不完善 A4	37	41.57		物理环境恶劣 C6	38	42.70
	组织监督 A5	32	35.96		技术环境不好 C7	38	42.70
不安全监管 B	监管不足 B1	45	50.56		关键信息错误 C8	34	38.20
	计划不当 B2	19	21.35		认知差错 D1	33	37.08
	无效纠正 B3	16	17.98		不安全行为 D	技能差错 D2	54
监管违规 B4	3	3.37	决策差错 D3	25		28.09	
不安全前提 C	机组资源管理欠缺 C1	29	32.58	违规 D4		40	44.94
	人员准备不足 C2	43	48.31				

由表 1 看出,冲偏出跑道事件的人为因素主要涉及资源管理不足、人员准备不足、物理技术环境恶劣、关键信息错误;不安全行为层最常见的人为因素是技能差错,各层人为因素之间的影响作用需进一步做相关性分析。

### 2.3 HFACS 层间相关性分析

根据 HFACS 模型,只有相邻层级间存在关联,不相邻的层级间视为不存在关联,所以只对相邻层间

的因素进行卡方检验和让步比分析。

由 SPSS27.0 软件输出的不同层间相关性分析的  $P$ 、 $OR$  与  $\Phi$ , 筛选出满足  $P < 0.05$ ,  $OR > 1$  且  $\Phi > 0.1$  条件的具有相关性的人为因素 ( $P < 0.05$  表示因素之间存在关联,  $OR > 1$  表示上层因素的产生会增加下层因素产生的概率, 即表明上下层间相关,  $\Phi > 0.1$  表示因素之间存在弱相关关系,  $\Phi > 0.3$  表示因素之间存在中等相关关系)。按照上述筛选标准, 对 A 层与 B 层、B 层与 C 层、C 层与 D 层的相关性分析结果进行整理, 见表 2。结果表明, 没有列出的监管违规因素 B4 与 A 层(组织因素)不存在相关性。

表 2 不同层间相关性分析结果

致因因素	人为因素	卡方检验		95%置信区间			$\Phi$
		$\chi^2$	$P$	$OR$	下限	上限	
A 层与 B 层因果关系	资源管理不足 * 计划不当	8.064	0.005	4.738	1.530	14.674	0.301
	资源管理不足 * 无效纠正	4.468	0.035	3.338	1.050	10.610	0.224
	组织结构不合理 * 计划不当	6.978	0.008	5.893	1.402	24.765	0.280
	企业文化 * 计划不当	5.579	0.018	4.154	1.198	14.400	0.250
	政策程序不完善 * 监管不足	7.326	0.007	3.333	1.374	8.089	0.287
	政策程序不完善 * 无效纠正	5.931	0.015	3.977	1.246	12.694	0.258
B 层与 C 层因果关系	组织监督 * 无效纠正	5.969	0.015	3.864	1.250	11.947	0.259
	监管不足 * 人员准备不足	12.276	0.001	4.769	1.946	11.688	0.371
	监管不足 * 操作者状态不好	4.235	0.040	3.169	1.021	9.833	0.218
	监管不足 * 情景意识水平低	7.449	0.006	3.863	1.419	10.514	0.289
	计划不当 * 机组资源管理欠缺	4.420	0.036	2.982	1.051	8.466	0.223
	计划不当 * 人员准备不足	3.911	0.048	2.889	0.984	8.481	0.210
	计划不当 * 风险评估不足	7.045	0.008	3.972	1.381	11.428	0.281
	计划不当 * 技术环境不好	4.134	0.042	2.901	1.015	8.296	0.216
	无效纠正 * 操作者状态不好	10.719	0.001	6.300	1.925	20.616	0.347
无效纠正 * 情景意识水平低	4.076	0.044	3.056	1.002	9.320	0.214	
C 层与 D 层因果关系	无效纠正 * 关键信息错误	4.878	0.027	3.403	1.106	10.468	0.234
	机组资源管理欠缺 * 认知差错	6.036	0.014	3.113	1.238	7.831	0.260
	机组资源管理欠缺 * 决策差错	11.895	0.001	5.357	1.979	14.500	0.366
	机组资源管理欠缺 * 违规	10.032	0.002	4.444	1.715	11.519	0.336
	人员准备不足 * 技能差错	6.587	0.010	3.174	1.295	7.779	0.272
	操作者状态不好 * 认知差错	5.586	0.018	3.500	1.197	10.233	0.251
	操作者状态不好 * 决策差错	5.362	0.021	3.438	1.169	10.109	0.245
	操作者状态不好 * 违规	4.303	0.038	3.071	1.033	9.130	0.220
	风险评估不足 * 决策差错	5.966	0.015	3.250	1.235	8.551	0.259
	情景意识水平低 * 认知差错	9.419	0.002	4.329	1.647	11.378	0.325
	物理环境恶劣 * 决策差错	6.449	0.011	3.394	1.292	8.917	0.269
	技术环境不好 * 违规	8.891	0.003	3.750	1.547	9.092	0.316
关键信息错误 * 技能差错	5.754	0.016	3.134	1.209	8.124	0.254	

## 2.4 基于 HFACS 模型的贝叶斯分析

### 2.4.1 HFACS-BN 概念模型

根据人为因素间的相关性, 以不同层级间存在的关联因素作为贝叶斯网络中的关联节点, 按照

HFACS 模型由上层指向下层的结构,在 HFACS 模型基础上建立冲偏出跑道事件的 HFACS-BN 概念模型,见图 1。

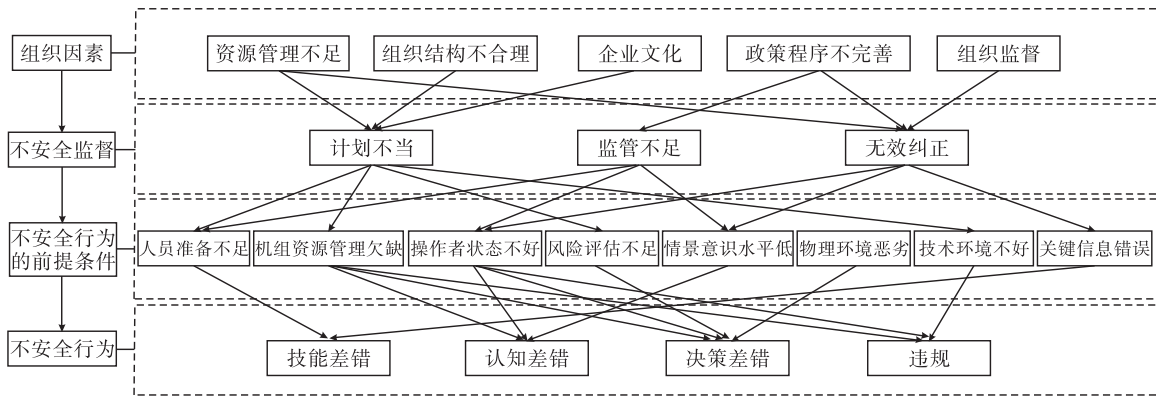


图 1 冲偏出跑道事故 HFACS-BN 概念模型

2.4.2 人为因素条件概率

确定贝叶斯网络结构后,选择贝叶斯估计法确定各子节点的条件概率。其中,基于 HFACS 模型的冲偏出跑道事故的人为因素在实际中有两种状态,即发生(用 Y 表示)或者不发生(用 N 表示)。组织因素层级的 5 个因素是 HFACS 模型最基本的人为因素,也就是事故发生的父节点,不受其他因素的影响。因此,将 89 起事故的发生频率作为条件概率,可得到组织因素层级中各个因素的条件概率: $P(A1=Y) = 0.449, P(A1=N) = 0.551; P(A2=Y) = 0.101, P(A2=N) = 0.899; P(A3=Y) = 0.146, P(A3=N) = 0.854; P(A4=Y) = 0.416, P(A4=N) = 0.584; P(A5=Y) = 0.360, P(A5=N) = 0.640$ 。

由于 B 层、C 层与 D 层上下间存在联系,其条件概率受层间相关性的影响。因此,采用层间关联概率计算该因素的条件概率。以图 1 中不安全监督中的 B3(无效纠正)为例得到该人为因素的条件概率计算结果见表 3。

表 3 B3 的条件概率表

A1	A4	A5	B3=Y	B3=N	A1	A4	A5	B3=Y	B3=N
A1=Y	A4=Y	A5=Y	0.556	0.444	A1=N	A4=Y	A5=Y	0.429	0.571
		A5=N	0.333	0.667			A5=N	0.067	0.933
	A4=N	A5=Y	0.200	0.800	A4=N	A5=Y	0.071	0.929	
		A5=N	0.133	0.867		A5=N	0.048	0.952	

在计算 B3 的条件概率时,B3 与 A 层的 3 个因素有联系,分别为 A1、A4、A5。因此,B3 发生与否存在 8 种情况,在计算该因素的条件概率时对每种情况都进行计算。事故致因的统计数据表明,A1、A4、A5 全发生的事(即 Y-Y-Y 情况)共 9 起,其中 B3 发生的有 5 起,即

$$P(B3=Y|A1=Y, A4=Y, A5=Y) = 0.556,$$

以及总体概率

$$P(B3=Y) = \sum P(A1=Y, A4=Y, A5=Y) \cdot P(B3=Y|A1=Y, A4=Y, A5=Y) = 0.1816.$$

同理可得其他 7 种情况的条件概率以及 C 层、D 层中各因素的条件概率。

2.4.3 灵敏度分析

使用 GeNIe4.1 工具构建 HFACS-BN 模型的贝叶斯网络拓扑结构,并导入各因素条件概率,得到初始贝叶斯网络,见图 2。

本文采用节点的后验概率相对于先验概率的变化率作为灵敏度分析的衡量指标。假定不安全行为 D1、D2、D3、D4 发生与否相互独立,通过设置不安全行为层(D1~D4)的发生状态,分析 A、B、C 层各人为因素后验概率的变化情况,以此确定各人为因素的重要程度。

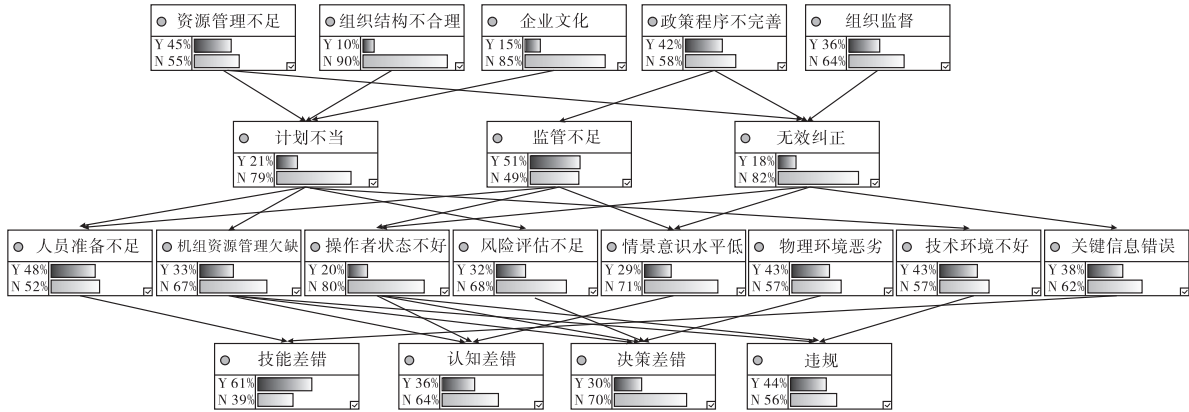


图 2 人为因素初始贝叶斯网络

以 D1 为例,将 D1 设为目标节点,状态设置为 Y(发生),运行贝叶斯网络,得到各节点的灵敏度,见表 4。在 D1 状态发生后,A 层因素 A4 的灵敏度最高,A1 次之;B 层 B1 灵敏度最高;C 层 C5 灵敏度最高,C1、C3 次之。同理,D2~D4 及 D 层状态发生后,其灵敏度排序见表 4。

表 4 D1~D4 及 D 层全因素发生的各人为因素灵敏度及重要程度排序

节点	D1 发生		D2 发生		D3 发生		D4 发生		D 层发生	
	灵敏度/%	排序	灵敏度/%	排序	灵敏度/%	排序	灵敏度/%	排序	灵敏度/%	排序
A1	1.87	2	2.33	4	6.95	3	5.03	3	18.41	3
A2	0.43	5	3.15	2	11.49	1	9.21	1	27.62	1
A3	0.47	4	2.42	3	8.95	2	7.08	2	20.89	2
A4	3.13	1	3.92	1	4.09	4	2.13	4	15.76	4
A5	0.90	3	0.89	5	2.18	5	0.99	5	7.43	5
B1	6.65	1	7.60	3	4.94	3	2.43	3	22.84	3
B2	2.57	3	8.53	2	31.75	1	25.12	1	78.36	1
B3	4.46	2	10.03	1	19.75	2	10.29	2	68.51	2
C1	12.33	2	75.87	1	50.10	2	45.83	1	129.93	2
C2	3.40	4	23.04	2	5.07	5	4.02	5	33.78	7
C3	5.85	3	5.34	4	56.33	1	27.83	3	136.18	1
C4	0.84	6	1.82	6	46.25	3	5.29	4	48.83	3
C5	19.48	1	4.45	5	4.04	7	2.08	6	39.98	4
C6	0	8	0	8	38.83	4	0	8	37.64	5
C7	0.68	7	1.12	7	4.11	6	36.88	2	37.62	6
C8	1.33	5	22.42	3	2.70	8	1.48	7	29.80	8

2.5 事故诱发路径

基于上述灵敏度分析,将每层中灵敏度最高的因素集合称为关键诱发路径,其他高灵敏度因素集合为

非关键诱发路径,在“( )”中表示,由此可得出导致 D 层因素发生的 5 条关键诱发路径,见表 5。

表 5 不安全行为诱发路径

不安全行为因素	诱发路径	关键诱发路径
D1	A4, B1, C5(C1, C3), D1	路径 1
D2	A4(A2), B3(B2), C1(C2, C8), D2	路径 2
D3	A2(A1, A3), B2(B3), C3(C1, C4, C6), D3	路径 3
D4	A2(A1, A3), B2(B3), C1(C3, C7), D4	路径 4
D 层全因素	A2(A3), B2(B3), C3(C1), D	路径 5

## 2.6 分析讨论及建议

### 2.6.1 结果分析

从表 4 中灵敏度分析结果可看出, A、B、C 层对 D 层的影响逐渐增强,表明越接近不安全行为层的因素对最终行为的影响越大,事件发生的可能性越高。其中 A2、A4、B1、B2、B3、C1、C3、C5 是关键潜在致因因素。表 5 揭示了 5 条关键诱发路径,这阐明了各类不安全行为背后的前置因素如何相互作用,最终可能导致冲偏出跑道事故的发生。虽然 A3 因素并非关键致因因素,但亦在诱发路径中频繁出现,足见其对不安全行为的发生所起到重要的推动作用。

### 2.6.2 建议

基于上述分析,建议的风险管理策略如下:

优先考虑上述关键致因因素并采取措施在各层级中实施,旨在从源头阻断事故致因链的发展。A3 频数高但非关键致因因素,企业应倡导“零容忍”不安全行为理念,发展积极的安全文化,培养安全责任意识,确保安全管理贯穿运营的各环节。

针对路径 1 提出:涉及航空安全的各方均有责任确保其相关政策与 SOP 明确、准确、清晰、易于理解、一致、定期更新且具有科学性与实用性;应定期组织飞行员培训,模拟各种复杂天气条件(如暴雨、大雾、强风切变等)、机械故障(如发动机失效、液压系统故障等)以及空中交通管制冲突等场景,对飞行人员的操作表现、应急处理能力、情景意识等方面进行评估,根据评估结果为飞行人员制定个性化的改进计划,有针对性地提升其知识技能与应对复杂情况的能力。

针对路径 2 提出:首先,建立完善的整改跟踪机制,在问题发生后,及时明确整改,过程中实时跟踪整改进度并定期评估整改效果;其次,建立机组排班的科学匹配机制,收集机组人员资质、飞行经验、技能特长、健康状况、航班计划、航线特点等多维度信息,采用数据分析算法,综合考虑法规要求、飞行安全、工作负荷以及航班延误的时间裕度等因素,实现机组与航班的精准匹配;最后,可定期组织团队建设活动,如户外拓展训练等,提升团队沟通协作水平。

针对路径 3 和 5 提出:应合理调整组织结构与权责分配,如扁平化管理模式以减少飞行机组与高层管理之间的中间层级,降低因层级过多导致发声被弱化的可能,并详细规定机长与副驾驶在飞行决策中的职责范围,以降低任务中权威梯度对飞行决策的影响;同时,应完善心理健康支持体系,通过线上预约咨询或开展包括压力管理、情绪调节、心理韧性培养的心理培训课程,帮助飞行员管理焦虑情绪和缓解压力,提升应对事件的心理素质。

针对路径 4 提出:应提高机组资源管理能力和应急能力,加强对机组人员的训练,包括不同类型突发状况的应对流程、沟通技巧、团队协作等内容;同时管制员等应实时监控飞机动态,以便发生异常情况时可及时提供具体、可操作的指导建议。

## 3 结论

(1) 本研究聚焦 89 起冲偏出跑道事故,借助 HFACS 模型展开深入剖析,建立了包含“组织因素-不

安全监管-不安全行为的前提条件-不安全行为”4个层级,囊括“风险评估不足、情景意识水平低、关键信息错误”等21个人为因素的冲偏出跑道的 HFACS 模型。

(2) 构建贝叶斯网络结构并进行灵敏度分析,辨识出在不同的不安全行为发生条件下的关键致因,得出“组织结构不合理、政策程序不完善、监管不足、计划不当、无效纠正、机组资源管理欠缺、操作者状态不好和情景意识水平低”8个关键致因因素,以及“政策程序不完善-监管不足-情景意识水平低-认知差错”等5条关键诱发路径与针对不同不安全行为的其他非关键诱发路径。

(3) 针对不同关键因素和不安全行为发生的关键诱发路径提出优化组织结构、完善政策程序、加强监管、改进机组资源管理、提升飞行员情景意识以及关注其生理与心理动态等相应的建议措施,以减少人因失误的可能性,提升航空运行安全水平。

### 参考文献:

- [1] International Civil Aviation Organization. Global aviation safety program 2023-2025: ICAO-20[R]. Canada: ICAO, 2022.
- [2] 崔振新,陆正,汪磊. 基于灰色关联的飞机着陆冲出跑道事故影响因素研究[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(3): 99-104.
- [3] LEE Y. Causal Factors analysis of runway excursion occurrences through fuzzy logic modeling method[J]. Transportation engineering, 2023, 14: 100204.
- [4] 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.
- [5] 齐心歌,毕晟,张楠,等. 冲偏出跑道事件风险影响指标分析[J]. 航空工程进展, 2024, 15(1): 61-68.
- [6] SI Q M, ZHAO Y H, LI J Y, et al. Risk cause analysis of runway excursion accidents in the aircraft landing stage through integrated FTA-BN method[J]. Journal of engineering science & technology review, 2024, 17(1): 178-186.
- [7] CHANG Y H, YANG H H, HSIAO Y J. Human risk factors associated with pilots in runway excursions[J]. Accident analysis & prevention, 2016, 94: 227-237.
- [8] 张粉婷. 基于 Bow-Tie 模型飞机冲偏出跑道的风险研究[J]. 科技视界, 2023(17): 69-71.
- [9] 王浩宁,张钰涵,张聪俊. 基于 STPA 冲偏出跑道不安全控制行为分析[J]. 中国民航大学学报, 2019, 37(6): 46-50.
- [10] SHAPPELL S A, WIEGMANN D A. The human factors analysis and classification system: HFACS[R]. American: FAA, 2000.
- [11] WIEGMANN D A, SHAPPELL S A. Human error analysis of commercial aviation accidents: application of the human factors analysis and classification system (HFACS)[J]. Aviation, space, and environmental medicine, 2001, 72(11): 100616.
- [12] 张宇辉,胡思睿,常鑫. 飞机雷雨情景着陆冲偏出跑道的贝叶斯网络风险分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(10): 3709-3718.
- [13] 崔佳雨,秦奎元,张昕祎,等. 基于 HFACS 的无人机事故人因分析[J]. 人类工效学, 2022, 28(6): 69-75.
- [14] 陈星霖,郭勇,阳富强. 基于 HFACS-BN 模型的危险化学品事故人因路径分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(9): 27-34.
- [15] HE H P, PENG X D, LUO D S, et al. Causal analysis of radiotherapy safety incidents based on a hybrid model of HFACS and Bayesian network[J]. Frontiers in public health, 2024, 12: 1351367.

- [16] WANG H, CHEN N, WU B, et al. Human and organizational factors analysis of collision accidents between merchant ships and fishing vessels based on HFACS-BN model[J]. Reliability engineering & system safety, 2024, 249: 110201.
- [17] PEARL J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1988.

## Human factor analysis of runway excursion based on HFACS-BN model

BAI Ruyi, DU Hongbing, WANG Mo, ZHANG Cheng

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China,  
Tianjin 300100, China)

**Abstract:** In order to analyze the causes of runway excursion events and enhance risk prevention, in this study, 89 Runway Excursion cases from 2017 to 2023 were analyzed, and the human factors and critical triggering pathways were explored based on constructed Human Factors Analysis and Classification System-Bayesian Network model (HFACS-BN) and sensitivity analysis. The research identified eight most critical influencing factors (e. g. unreasonable organizational structure, imperfect policy procedures, inadequate supervision, improper planning, ineffective Remediation, inadequate crew resource management, poor operator status and low levels of situational awareness) and five critical triggering pathways (e. g. imperfect policy procedures-inadequate supervision-low levels of situation awareness-cognition error, imperfect policy procedures-ineffective remediation-deficiency in crew resource management-skill error, irrational organizational structure-inappropriate planning-poor operator condition-decision error, irrational organizational structure-inappropriate planning-deficiency in crew resource management-violation, irrational organizational structure-inappropriate planning-poor operator condition-unsafe behavior). The incident of Runway Excursions could be effectively reduced with the aid of the intervention of key influencing factors, e. g. optimizing organizational structure, improving policy procedures, strengthening supervision, improving crew resource management, enhancing situational awareness of pilots, paying attention to their physiological and psychological changes. The research can provide theoretical support for reducing the occurrence of Runway Excursion.

**Keywords:** runway excursion; human factors; HFACS-BN; Chi-square analysis; Bayesian analysis

(责任编辑:唐立平)

**引用格式** 白如意,杜红兵,王末,等. 基于 HFACS-BN 模型的冲偏出跑道人为因素分析[J]. 山东航空学院学报, 2025, 42(4): 11-19.

BAI R Y, DU H B, WANG M, et al. Human factor analysis of runway excursion based on HFACS-BN model[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2025, 42(4): 11-19.