

航空安全事故及其影响因素的关联分析

李琪^{1*}, 王潮¹, 张紫函¹, 韩瑞玲^{2#}

¹河北师范大学家政学院, 河北 石家庄

²河北师范大学地理科学学院, 河北 石家庄

收稿日期: 2026年3月26日; 录用日期: 2026年5月29日; 发布日期: 2026年6月8日

摘要

航空安全与事故预防一直是行业关注的核心议题。航空安全事故的发生是多个影响因素共同作用的结果, 确定事故各影响因素对事故的影响程度, 对提高航空安全至关重要, 更对事故预防产生着深远影响。基于此, 本文应用机组威胁差错指标体系(TEM)统计分析了2005~2024年全球航空安全事故原因, 并结合关联规则方法挖掘影响因素对特定事故类别的作用强度, 进而判定事故原因的影响因素, 揭示不同事故类型的风险驱动机制, 关联规则挖掘结果表明航空安全事故致因呈现出维度聚焦性、层级传导性、多因素耦合性三大核心特征, 提出提升航空安全水平需聚焦于关键影响因素的防范、强化中间层级致因管控以及提升人员在复杂情境下的应急处置能力, 为航空运输业的可持续发展提供有益的参考。

关键词

航空安全事故, 影响因素, 关联规则, TEM

Association Analysis of Aviation Safety Accidents and Their Influencing Factors

Qi Li^{1*}, Chao Wang¹, Zihan Zhang¹, Ruiling Han^{2#}

¹School of Home Economics, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei

²School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei

Received: March 26, 2026; accepted: May 29, 2026; published: June 8, 2026

Abstract

Aviation safety and accident prevention have always been core issues of concern in the industry. The occurrence of aviation safety accidents is the result of the combined effect of multiple influencing

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李琪, 王潮, 张紫函, 韩瑞玲. 航空安全事故及其影响因素的关联分析[J]. 国际航空航天科学, 2026, 14(2): 70-80. DOI: 10.12677/jast.2026.142009

factors. Determining the degree of impact of each influencing factor on accidents is crucial for improving aviation safety and has profound implications for accident prevention. Based on this, this paper applies the Threat and Error Management (TEM) indicator system for flight crews to statistically analyze the causes of global aviation safety accidents from 2005 to 2024. By combining association rule methods, it explores the strength of the influence of various factors on specific accident categories, thereby identifying the influencing factors of accident causes and revealing the risk-driven mechanisms of different accident types. The association rule mining results indicate that the causes of aviation safety accidents exhibit three core characteristics: dimensional focus, hierarchical transmission, and multi-factor coupling. It is proposed that enhancing aviation safety levels requires focusing on the prevention of key influencing factors, strengthening the management of intermediate-level causes, and improving personnel's emergency response capabilities in complex situations. This provides valuable references for the sustainable development of the aviation transportation industry.

Keywords

Aviation Safety Accidents, Influencing Factors, Association Rules, TEM

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

安全是航空业发展的生命线，航空安全不仅影响航空公司声誉、市场信心，还会影响国民经济以及整个航空业的发展。根据国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)的数据，2024年航空安全事故发生率由2023年的1.09%增至1.13%，2020~2024年间全球商用飞机(乘客和货物)平均每年约发生5起致命事故，造成约144人死亡。虽然飞行事故率较低，但事故伤亡率极高，一旦发生航空安全事故鲜有生还，航空安全的重要性与紧迫性不容忽视[1]。航空安全事故导致的人员伤亡是最直接和悲剧性的后果，这不仅给受害者家庭带来无法挽回的损失，也将涉事航空公司置于巨大的舆论压力和法律风险之下，动摇了公众对其安全基础的信任，导致客户流失[2]，也动摇了行业市场信心[3]。如2025年初美国发生重大安全事故后，达美航空将一季度利润预期削减一半，美国联合航空公司与政府直接相关的出行预订量下降50%。航空安全对区域经济具有重大影响，航空安全事故造成的经济损失不仅限于全球航空运输每年创造的直接成本——经济价值，还包括贸易中断、旅游收入减少等间接成本[4]。国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)理事长威利·沃尔什指出航空运输的客货运量占全球贸易价值的1/3，航空业直接和间接支持着全球8650万个就业岗位，并对全球GDP贡献3.9% [5]。因此，保证航空运输的安全性是促进航空业可持续发展的关键要素。

深入探究事故发生的机理，特别是厘清事故各影响因素与特定事故的复杂关联，对于构建前瞻性、精准化的航空安全风险防控体系具有重要价值。当航空安全事故发生后，无论是航空公司还是相关部门均会开展事故调查，出具事故调查报告，总结事件原因，优化安全管理[6]。根据IATA数据[7]，2005~2024年间航空安全事故复杂且多变，事故率呈波动下降趋势，但部分年份的事故率较高且影响深远，如2014年因马航MH370失踪、MH17被击落等；事故类型发生了结构性转变，早期可控飞行撞地(CFIT)事故是导致人员伤亡的重要原因之一(2024年该类事故已降至为零)，与极端气象相关的事故类型占比上升，新的风险不断涌现，如飞行中失控、跑道偏出/侵入、空中相撞等。航空安全事故中有很大一

部分发生在起飞、进近和着陆阶段,其处于近地面,天气条件复杂多变,在导航、飞机配置变化、与空中交通管制、空域拥堵等对机组人员提出了很高的要求,凸显了航空安全需在动态适应中构建多维度防御体系的必要性。

已有研究表明,人为因素[8]、机械故障[9]、天气环境[10]和管理因素是影响航空安全事故发生的主要因素[11]。2010~2019年中国民航商业运输飞行事故中,人为因素是影响航空安全的主要因素[12],主要包括人的差错行为,飞行员的工作负荷增加通信偏差的风险;音频信号的清晰度信号衰减会直接降低语义解析的可靠性,使指令信息在传递过程中出现失真;飞行员与管制员之间的方言差异可能引发语音识别歧义,而机组人员英语语言能力的不足,则会在国际空域通联中加剧信息解码的延迟与误判;未遵循标准化术语,会破坏通信双方的认知共识基础,最终成为诱发误解性操作的潜在诱因[13];从业人员尤其是飞行员的理论知识和风险意识不足,导致在遇到飞行问题时难以准确判断,引发航空安全事故[14]。设备缺失和机械故障则是引发飞行事故的关键因素[15],其对航空安全的威胁直接且致命,从根本上动摇飞行运行基础,当动力系统或操控系统故障时甚至会造成机毁人亡的严重事故后果,常见的飞机设备影响因素主要有系统故障、设计缺陷、结构腐蚀、疲劳损坏和飞机零部件生产质量等[16]。民航运行安全还受环境因素的影响,包括:气象环境、外部入侵、机场设施、驾驶舱因素、外部保障服务、硬件设备、飞机发动机失效、运行压力[17]等,环境因素具有“动态性”与“不完全可控性”,而且单一环境风险可能与其他影响因素叠加,形成更复杂的安全挑战。飞行管理不充分和体制机制缺陷是飞行安全事故频发的根源之一[18],航空公司、机场和空管部门是安全管理和事故防范的主体,各单位在航空安全管理方面应从安全管理主体落实、安全管理体系建设和安全文化氛围建设等方面提升整体的管理水平,才能有效防范管理缺陷导致的民航事故征候,保障航空安全[16]。

航空安全事故影响因素分析常用方法有5个:① SHEL模型由软件(Software)、硬件(Hardware)、环境(Environment)和人(Liveware)4个要素组成[19],表明航空安全并非孤立要素的简单叠加,而是各要素间协调匹配的结果,SHEL模型聚焦“人与其他要素的接口”,可更精准地识别风险、追溯根源、优化管理,为安全管理、风险防控和事故分析提供结构化框架。② Reason模型[20]将组织中事故发生的影响因素分为2个部分:间接导致事故发生的潜在因素(组织因素、不安全监督)、直接导致事件发生的与事故直接相关的行为或人员(不安全行为的前提、不安全行为),将事故事实归于各个层次,识别各层次缺陷的关联,进而探究事故背后的复杂原因。③ 故障树分析[21]通过以“航空事故”为顶事件,逐层追溯导致顶事件发生的“充分且/或必要”条件,以系统性揭示航空安全事故背后的技术、人为、环境及组织管理等多维度关键信息,为事故调查、风险防控和安全改进提供核心依据。④ 系统理论事故模型,强调对系统的功能、结构和控制策略进行分析,通过识别可能导致事故的不良控制行为或故障机制,以进行安全预防分析[22]。⑤ 人为因素分析与分类系统[23],将航空事故中的人为因素按层级拆解为不安全行为、不安全行为的前提条件、不安全监督以及组织影响4个层面,将事故中的人为因素从直接操作失误追溯至深层组织问题,避免将责任简单归咎于飞行员或一线人员,而是从系统层面揭示安全漏洞。

可见,已有研究多关注了航空安全事故的静态要素,但是对其影响因素的具体关联性机制问题关注不多。关注机制能推动航空安全体系精准化升级,提升事故预防的针对性,避免安全投入浪费,还能优化事故调查与责任界定,减少主观偏差,为责任划分提供科学依据。关联规则方法凭借其无监督学习特性,能够从海量数据中挖掘变量间的隐含关联,逐渐成为事故致因分析的新兴工具。基于此,本文基于IATA统计的2005~2024年全球航空安全事故基础资料,首先结合IATA对事故致因的细分状况建立机组威胁与差错管理的三级指标体系,剖析了航空安全事故原因;其次,根据事故性质及结束状态,对事故类型进行划分,并应用关联规则方法进一步分析了各因素对特定事故类别的作用强度,明确各因素对特定事故的风险驱动效应,进而判定事故原因的影响因素;最后,基于研究结果总结事故发生的规律和趋

势，提出提升航空安全水平的对策建议，为航空运输业的可持续发展提供有益的参考。

2. 研究数据与方法

2.1. 数据来源及预处理

本文所使用的数据来源于 IATA 发布的航空安全事故报告统计数据，具体统计了 2005 年 1 月至 2024 年 12 月共计 20 年的共 1468 条关于国际航空安全事故数据，经整理后形成数据集。该数据集涵盖全球范围内商用航空(乘客和货物)发生的航空安全事故记录，涵盖事故基本信息(如发生时间、地点、涉事机型)、事故类型、事故原因、伤亡情况等核心字段，具有权威性、时效性，能够客观反映近 20 国际航空安全事故的整体特征。

为确保数据准确性和可用性，对原始数据进行了系统化预处理，首先针对数据格式不一致问题，进行标准化转换，并从每条事故记录中提取事故类型和影响因素两个核心分析变量。其中，事故类型参照 IATA 事故分类标准，划分为 12 个子类(表 1)；影响因素基于事故调查报告中的诱因描述进行归纳。经预处理后，数据集形成结构化的分析样本，可直接用于航空安全事故类型及影响因素关联统计分析。

Table 1. The final status of the accident

表 1. 航空安全事故类别

维度	分类
事故类别 Q	可控飞行撞地 Q ₁ 、飞行中失去控制 Q ₂ 、跑道损坏 Q ₃ 、空中相撞 Q ₄ 、跑道偏离 Q ₅ 、飞行中损坏 Q ₆ 、地面损坏 Q ₇ 、跑道外接地 Q ₈ 、硬着陆 Q ₉ 、起落架故障 Q ₁₀ 、擦尾 Q ₁₁ 、机场外着陆/迫降 Q ₁₂

2.2. 指标体系

为更深入了解事故成因的本质，基于航空器飞行的复杂系统运行规律，构建机组威胁与差错管理三级指标体系(表 2)，以直观反映不同影响因素之间的层次关系。机组威胁与差错管理指标体系是航空安全管理中以机组为核心的动态框架，旨在通过消除潜在状况，系统性识别、评估和控制“威胁”与“差错”，减少航空器异常状态的发生，从而降低事故风险。其中，潜在状况指隐藏在航空运行系统中，不易被直接察觉，但可能间接诱发威胁、增加差错概率或削弱机组应对能力的系统性缺陷或隐患；威胁指飞行环境中可能增加机组负荷或引发风险的外部因素，涵盖环境、设备、运行、组织等类型；差错则是机组在操作、决策、沟通或监控偏离标准的行为；非预期状态是威胁与差错叠加后的直接后果，即飞行状态偏离安全阈值的临界情形。

Table 2. Indicator system for crew threat and error management

表 2. 机组威胁与差错管理指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
潜在状况	潜在状况或缺陷 A	航空器设计制造缺陷 A ₁ 、监管监督 A ₂ 、管理决策 A ₃ 、安全管理 A ₄ 、变更管理 A ₅ 、选拔系统 A ₆ 、运营规划与排班 A ₇ 、技术与设备 A ₈
	飞行操作 B	标准操作程序和检查 B ₁ 、培训系统 B ₂
	客舱操作 C	标准操作程序及检查 C ₁ 、培训系统 C ₂
	地面操作 D	标准操作程序与检查流程 D ₁ 、培训系统 D ₂
	维护操作 E	标准操作程序及检查 E ₁ 、培训系统 E ₂
	签派 F	标准操作程序及检查 F ₁ 、培训系统 F ₂ 、航班监视 F ₃

续表

威胁	环境威胁 G	气象学 G ₁ 、缺乏视觉参照物 G ₂ 、空中交通服务 G ₃ 、野生动物/鸟类/外来物体 G ₄ 、机场设施 G ₅ 、辅助导航 G ₆ 、地形/障碍 G ₇ 、交通 G ₈ 、跑道道面侵入 G ₉ 、其他 G ₁₀
	航空器故障 H	包容性发动机故障/动力装置故障 H ₁ 、非包容性发动机故障 H ₂ 、起落架/轮胎 H ₃ 、刹车 H ₄
	飞行操纵系统 I	主飞行操纵系统 I ₁ 、辅助飞行操纵系统 I ₂ 、结构失效 I ₃ 、驾驶舱/客舱/货舱起火或冒烟 I ₄ 、电子设备/飞行仪表 I ₅ 、自动驾驶系统/飞行管理系统 I ₆ 、液压系统失效 I ₇ 、发电系统失效 I ₈ 、驾驶舱与电子电气设备 I ₉ 、其他 I ₁₀
	航空公司威胁 J	最低设备清单项目 J ₁ 、运行压力 J ₂ 、客舱事件 J ₃ 、地面事件 J ₄ 、签派/文书工作 J ₅ 、维护事件 J ₆ 、危险品 J ₇ 、手册/图表/检查单 J ₈ 、货物 J ₉ 、地面服务车辆及设备 J ₁₀ 、其他 J ₁₁
	人因威胁 K	疲劳 K ₁ 、光学错觉/视觉误判 K ₂ 、空间定向障碍及空间/体感错觉 K ₃ 、机组失能 K ₄ 、其他心理/生理状况 K ₅
机组人员 差错	飞行操纵差错 L	手动操纵/飞行控制 L ₁ 、地面导航 L ₂ 、自动驾驶管理 L ₃ 、系统/无线电/仪表 L ₄ 、高度表基准设置错误 L ₅ 、机组响应/情景意识 L ₆ 、其他 L ₇
	程序差错 M	标准操作程序遵循/标准操作程序交叉验证 M ₁
	检查单 N	正常检查单 N ₁ 、异常检查单 N ₂ 、喊话 N ₃ 、简报 N ₄ 、文件资料 N ₅ 、该复飞未复飞 N ₆ 、机组响应 N ₇ 、其他程序 N ₈
	沟通差错 O	与空管沟通差错 O ₁ 、与客舱机组沟通差错 O ₂ 、与地面人员沟通差错 O ₃ 、与签派员沟通差错 O ₄ 、和维修人员沟通差错 O ₅ 、飞行员之间沟通差错 O ₆
非预期状态	非预期状态 P	航空器操作 P ₁ 、地面导航 P ₂ 、航空器构型错误 P ₃

2.3. 关联规则方法

关联规则方法是数据挖掘领域中用于发现数据集中变量之间潜在关系的一种重要技术，反映 1 个事件与其他事件存在一定程度上的依赖或者关联，核心是从大量数据中挖掘“如果 A 发生，那么 B 也很可能发生”的关联模式，如果确定两项或多项属性之间存在关联，就可以根据前项事件 A 预测后项事件 B 发生的概率[24]。在航空安全研究领域，关联规则方法可以在大量的历史数据中快速发现航空安全事故的发生模式，并能深入挖掘航空安全事故与其影响因素之间的关联[25]，与传统的人工分析相比，关联规则技术在挖掘隐含信息方面更具优势[26]。例如，当同一事故类别的多次事故在相似环境下出现相同影响因素时，关联规则能够快速揭示这些重复的事故致因模式，找出影响不同事故的关键因素，为事故预防和安全管理提供数据支持。由于航空安全事故中所包含的因素维度多样、层次复杂，应用关联规则方法则能很好地应对此问题[27]。公式如下：

$$Support(A \rightarrow B) = \frac{P(AB)}{P(T)} \quad (1)$$

$$Confidence(A \rightarrow B) = P(A/B) \quad (2)$$

$$Lift(A \rightarrow B) = \frac{P(A/B)}{P(B)} \quad (3)$$

式中， T 为数据总量， A 称为前项，是规则的条件； B 称为后项，是规则的结果。前项 A 为机组威胁与差错管理指标，后项 B 为事故类别指标， $Support(A \rightarrow B)$ (支持度)为前项 A 与后项 B 同时出现的数据量与总数据量的比值，用以表示其在事故总项集中出现的频率； $Confidence(A \rightarrow B)$ (置信度)为总数据同时出现 A 和 B 的数据量与仅出现 A 的数据量的比值，用以表示包含 A 的事故中出现 B 的条件概率；

$Lift(A \rightarrow B)$ (提升度)为事故中置信度与支持度之比。提升度反映了关联规则中的 A 与 B 的相关性,提升度 > 1 则表示 A 与 B 为正相关,提升度 > 5 为较强相关,提升度 > 10 为极强相关,提升度越高表明两者相关性越强,提升度 < 1 且越低表明负相关性越高,提升度 $= 1$ 表明没有相关性,本研究剔除支持度 < 0.002 、置信度 < 0.5 、提升度 < 1 的弱关联规则,保留强关联结果用于分析。

3. 航空安全事故影响因素与事故类别关联分析

将每种航空安全事故类别和影响因素视为 1 个项,统计每 1 项在统计数据中出现的次数,先计算出每 1 项的支持度,根据 2.3 中所述步骤筛选出频繁 k 项集,获取项集的所有真子集,以排列组合方式形成关联规则,最后通过计算每条关联规则的置信度及提升度,提取出符合要求的关联规则。为平衡规则数量和规则强度,经过反复试验,本文分别定义了 7 种事故类型的最小支持度和最小置信度,且所有事故类型的最小提升度设置为 1。此外,为了探索影响因素对事故类别的关联模式,将前项设定为影响因素,后项为事故类别。通过计算影响因素与事故类别的支持度、置信度以及提升度,得到各类事故的风险驱动因素及关联强度(表 3)。

Table 3. Association rules between influencing factors of aviation safety accidents and accident categories

表 3. 航空安全事故影响因素与事故类别关联规则

关联规则	支持度	置信度	提升度
F ₃ 航班监视失误→Q ₁ 可控飞行撞地	0.002	0.75	15.51
K ₃ 空间定向障碍及空间/体感错觉→Q ₂ 飞行中失去控制	0.006	0.56	6.94
P ₂ 地面导航错误→Q ₅ 跑道偏离	0.028	0.5	2.2
G ₅ 机场设施缺陷→Q ₅ 跑道偏离	0.068	0.63	2.87
H ₄ 刹车故障→Q ₅ 跑道偏离	0.004	0.64	2.9
G ₉ 跑道道面侵入→Q ₅ 跑道偏离	0.045	0.87	3.97
I ₃ 飞机结构失效→Q ₅ 跑道偏离	0.004	1	5.47
H ₂ 非包容性发动机故障→Q ₆ 飞行中损坏	0.012	0.86	10.06
O ₁ 与空管沟通差错→Q ₇ 地面损坏	0.006	0.64	5.42
D ₁ 地面标准操作程序与检查流程缺陷→Q ₇ 地面损坏	0.01	0.63	5.31
D ₂ 地面培训系统缺陷→Q ₇ 地面损坏	0.01	0.71	6.03
J ₄ 地面事件→Q ₇ 地面损坏	0.034	0.81	6.8
G ₈ 交通→Q ₇ 地面损坏	0.012	0.82	6.97
E ₁ 维护标准操作程序及检查→Q ₁₀ 起落架故障	0.03	0.50	3.17
E ₂ 维护培训系统→Q ₁₀ 起落架故障	0.01	0.50	3.21
H ₃ 起落架/轮胎故障→Q ₁₀ 起落架故障	0.076	0.84	5.37

3.1. 事故影响因素与事故类别关联规则结果分析

3.1.1. 事故致因的关联规则结果

可控飞行撞地(Controlled flight into terrain, CFIT)与航班监视关系较大。所有因航班监视缺陷导致的风险场景中,有 75%的概率会引发可控飞行撞地事故,CFIT 事故的发生概率是航班监视正常时的 15.51 倍,而 15.51 属于极高数值,远超一般关联分析中的强关联阈值(通常提升度 > 3 即视为显著),表明在发

生航班监视失误的情况下,发生可控飞行撞地的概率显著提高。航班监视的核心功能在于为机组提供精确的飞机位置、高度及周边地形信息。一旦监视系统出现缺陷,飞行员将失去对地形接近状态的实时感知能力,难以在仪表条件下及时识别碰撞风险。尽管飞机仍处于可控状态(故称“可控飞行”),但缺乏有效监视支持的情境认知不足,直接导致了撞地后果。因此,航班监视作为防止CFIT的最后一层技术防护,其失效会显著削弱机组的地形避障能力。

造成飞行中失去控制(LOC-I)与机组人员空间定向障碍及错觉强相关。空间定向指飞行员在三维空间中准确感知飞机姿态、位置和运动的能力,是飞行员操控飞机的基础,一旦出现障碍或错觉,直接破坏了飞行控制的感知与决策基础,飞行员的操作指令极可能与实际飞行状态背离,从而显著放大失控风险。

跑道偏离(RE)与多个因素相关,其中飞行操作系统结构失效与跑道偏离呈现完全相关(置信度为1,提升度为5.47),飞行操纵系统包括主飞行操纵面及其控制链路,其结构的完整性是确保在起飞、着陆阶段维持方向控制和滑跑轨迹的根本,若该系统失效,飞机将立即丧失横向或纵向操控能力,极易偏出跑道边界。除上述主导因素外,其他相关因素包括机场设施威胁、航空器刹车、地面导航、跑道道面侵入,体现其致因的复合性以及事故链的复杂性。

飞行中损坏(FD)与非包容性发动机故障强相关。非包容性发动机故障指发动机转子等高速旋转部件发生故障时,产生的碎片击穿发动机机匣,并抛射至飞机机体、燃油系统、操纵面或客舱等关键区域。非包容性故障产生的高能碎片会直接破坏飞机结构、系统或油箱,引发结构损伤、燃油泄漏、系统失效或快速释压,造成严重的飞行中损坏甚至灾难性后果。该类故障因其破坏范围的不可控性而成为飞行中安全的重要威胁。

地面损坏(GD)与地面标准操作程序与检查流程、地面培训系统、地面事件、交通以及与空管沟通差错相关,其中交通与地面损坏呈现强相关。地面运行阶段环境复杂,活动单元多,且协调依赖通话、程序及目视观察。通信误解、程序执行偏差、盲区或注意力疏漏极易引发地面相撞或刮擦。因此,地面交通管理及情景意识是预防地面损坏的关键环节。地面标准操作程序与检查流程的缺陷、培训不足、以及空管沟通差错等因素也常参与其中,构成地面安全的多重隐患。

起落架故障(LG)与维护标准操作程序与检查流程、维护培训系统以及起落架/轮胎故障强相关。起落架系统结构复杂,涉及机械、液压、电气等多个子系统,且承受高频次、高冲击载荷。若维护程序不严或检查流程疏漏,或维护人员培训不足导致操作不当,都会直接降低其可靠性。同时,起落架及轮胎作为直接与地面接触的部件,其材料疲劳、磨损、腐蚀等固有故障也会随时间显现。因此,这类故障反映了人为维护因素与部件自然退化共同作用的结果。

3.1.2. 事故致因的关联特征分析

以上关联规则挖掘出了各类事故与其关键影响因素之间的强关联对,并揭示了其作用机制,发现航空安全事故的致因并非随机分布,航空安全事故致因呈现出维度聚焦性、层级传导性、多因素耦合性三大核心特征,既反映了事故发生的内在逻辑,也揭示了航空运行系统中风险演化的关键规律,为靶向制定防控策略提供了依据。

事故致因具有维度聚焦性特征,核心因素主导特定事故类型。根据关联结果表明,每类事故均存在1~3个高关联度的核心致因(提升度 >5),且致因维度与事故发生场景高度匹配,一类事故对应一类核心风险源,特定场景下的核心功能失效,直接导向特定事故类型。^①在飞行阶段事故中,可控飞行撞地(Q_1)与航班监视(F_3)的关联强度最高(提升度15.51),且置信度达0.75,这一特征源于CFIT事故的发生场景:该类事故多发生于复杂气象或夜间飞行环境,机组对地形、障碍物的视觉感知受限,需依赖航班监视系统获取外部环境信息,当航班监视存在缺陷时,机组无法及时识别危险接近状态,导致感知延迟、决策

滞后、操作失当的连锁反应，最终引发可控飞行撞地事故。飞行中失去控制(Q₂)与空间定向障碍(K₃)的强关联(提升度 6.94)，进一步印证了飞行阶段事故的致因聚焦性，空间定向能力是飞行员维持飞行姿态的核心技能，一旦出现空间定向障碍，飞行员对高度、速度、姿态的判断极易偏离实际状态，进而触发飞行中失去控制事故。② 在地面及起降阶段事故中，致因聚焦性同样显著。地面损坏(Q₇)的核心致因集中于地面运行维度，如地面事件(J₄，提升度 6.8)、交通(G₈，提升度 6.97)、地面操作培训(D₂，提升度 6.03)，此类因素均直接作用于地面滑行、停靠等场景，表明地面场景风险源于地面管理失效。起落架故障(Q₁₀)则与维护维度高度绑定，起落架/轮胎故障(H₃，提升度 5.37)、维护培训(E₂，提升度 3.21)的关联结果表明，起落架故障事故的核心矛盾在于维护质量与设备可靠性的匹配失衡，维护环节的疏漏直接导致起落架这一关键部件的功能失效。

基于机组威胁与差错管理(TEM)三级指标体系的关联结果，事故致因呈现出潜在状况 - 威胁 - 差错 - 非预期状态的层级传导特征，即系统深层缺陷通过多环节传递，最终转化为直接引发事故的操作或状态失效，引发航空安全风险的链式反应机制。① 从传导路径来看，可分为管理和技术双路径传导。在管理路径中，潜在状况维度的缺陷是风险传导的起点，地面操作的标准程序(D₁，提升度 5.31)与培训系统(D₂，提升度 6.03)均属于潜在状况中的操作保障类指标，其缺陷会直接导致地面人员的操作差错，进而引发地面损坏(Q₇)事故。这一过程中，管理层面的程序设计和人员培训缺陷，通过“标准程序缺失 - 人员技能不足 - 人员操作失误”的路径，最终传导至事故层面。在技术路径中，威胁维度的设备故障是风险传导的核心节点。飞行中损坏(Q₆)类事故中，非包容性发动机故障(H₂，提升度 10.06)属于航空器故障威胁，其本质是动力系统的技术缺陷，该故障发生后，若机组未能通过系统监控及时识别(飞行操纵差错 L₆)，或未能执行应急程序(程序差错 M₁)，则会从设备威胁转化为飞行中损坏的事故状态。此外，跑道偏离(Q₅)与飞行操作系统结构失效(I₃，提升度 5.47)的关联，也体现了技术路径的传导逻辑，结构失效这一技术威胁，通过破坏飞机的操控能力，导致非预期的跑道偏离状态。② 风险传导的层级性还体现在强关联致因多处于中间层级。关联结果中，提升度 >5 的致因多属于威胁(G₈、H₂、H₃、I₃、J₄、K₃)或差错(O₁)维度，而非潜在状况或非预期状态维度，表明中间层级的致因是风险演化的关键枢纽，潜在状况的缺陷需通过威胁或差错才能转化为事故，而非预期状态则是威胁与差错叠加的结果。因此，管控中间层级的致因，可有效切断风险传导链条。

事故的发生是多因素耦合作用的结果(表 4)。① 事故致因多因素叠加放大事故风险。除单一核心致因外，部分事故类型的发生是主因 + 次因的耦合结果，即核心致因与次要致因在特定场景下叠加，显著提升事故发生概率，体现出“1 + 1 > 2”的风险放大效应。在跑道偏离(Q₅)事故中最为典型，跑道偏离的致因既包括核心致因——飞行操作系统结构失效(I₃，置信度 1.0)，也包括次要致因——机场设施(G₅，提升度 2.87)、跑道道面侵入(G₉，提升度 3.97)、刹车故障(H₄，提升度 2.9)。其致因的耦合场景可分为恶劣环境 + 设备故障和地面干扰 + 操作失误两类。在恶劣环境 + 设备故障场景中，若机场设施因恶劣天气失效(G₅)，同时飞机刹车系统出现故障(H₄)，则机组在着陆滑跑阶段既无法清晰判断跑道边界，也无法有效控制滑行速度，导致跑道偏离的风险大幅提升。在地面干扰 + 操作失误场景中，跑道道面侵入(G₉)会迫使机组紧急调整着陆姿态，若此时飞行操作系统存在结构失效(I₃)，则极易因操控响应延迟引发跑道偏离。② “人 - 机 - 环”三要素的交互作用。地面损坏(Q₇)事故中，其核心致因是地面事件(J₄)，而次要致因包括与空管的沟通差错(O₁，提升度 5.42)、交通状况(G₈，提升度 6.97)。在“沟通延迟(人) + 车辆故障(机) + 交通拥堵(环)”的耦合场景中，地面车辆出现故障后，若驾驶员与空管的沟通存在延迟(O₁)，无法及时获得滑行路线调整指令，且机场地面交通处于拥堵状态(G₈)，则故障车辆易与其他飞机或车辆发生碰撞，引发地面损坏事故。这种“人 - 机 - 环”的耦合，打破了单一要素的风险边界，形成了更复杂的事故诱因网络。③ 多因素耦合性还表现在时间和空间的双重约束。从时间维度看，耦合多发生于起飞、着陆

等飞行关键阶段,此时机组工作负荷高、操作容错率低,次要致因的存在会进一步压缩机组的处置时间;从空间维度看,耦合多发生于环境干扰多、设备依赖度高的山区航线等复杂场景,核心致因与次要致因的叠加概率更高。在山区或复杂地形区域执行的进近阶段,是可控飞行撞地(CFIT)事故(Q₁)风险最高的场景之一,此时航班监视(F₃)的缺陷与地形障碍(G₇)的叠加,会直接导致事故发生。

Table 4. Coupling risk table for aviation safety accident causation

表 4. 航空安全事故致因耦合风险表

飞行阶段	典型事故	主要耦合因素	风险等级	特征
起飞/爬升	可控飞行撞地(Q ₁)	航班监视缺陷(F ₃) + 地形障碍(G ₇)	中高	低高度、复杂程序、地形靠近
进近/着陆	跑道偏离(Q ₅)	结构失效(I ₃) + 环境因素(G ₅ /G ₉)	极高	高工作负荷、低容错率、环境多变
地面滑行	地面损坏(Q ₇)	沟通差错(O ₁) + 交通(G ₈) + 地面事件(J ₄)	高	高密度运行、多主体交互、视线受限
巡航	飞行中损坏(Q ₆)	非包容性发动机故障(H ₂)	中	长时间运行、系统疲劳、应急资源有限

3.2. 提升航空安全水平的对策建议

基于关联规则分析所揭示的航空安全事故致因的维度聚焦性、层级传导性与多因素耦合性特征,因此,为了预防事故的发生,在今后的民航安全管理工作中,需构建更完善的航空安全防御体系,具体可采取如下措施:

(1) 针对不同类型事故的核心致因,实施精准化、差异化的安全管理策略,提升防控效率与资源利用率。针对 CFIT 与航班监视强关联,推动航班监视系统的智能化升级。针对地面损坏与地面事件、交通、沟通等因素的强关联,优化滑行路线,加强地面车辆管理与驾驶员培训,提升空地协同效率。针对跑道偏离事故,需提升刹车系统与飞行操纵系统的可靠性检测频率,完善复杂气象条件下的跑道运行标准。

(2) 从风险传导链条的关键节点入手,实现从潜在状况到非预期状态的全过程治理。强化中间层级致因管控,重点关注威胁维度与差错维度的防控。对空间定向障碍、航班监视等强关联因子实施动态监测与实时干预。基于 TEM 指标体系,绘制典型事故类型的风险传导路径图,识别关键传导节点,制定针对性的阻断策略,如加强维护程序审查、优化机组培训、提升设备可靠性等。

(3) 面对多因素耦合性带来的复杂风险,应提升航空安全系统的整体韧性,使其在面临多因素扰动时仍能维持基本功能并快速恢复。构建“人-机-环-管”协同防御网络,实现飞行操作、空管指挥、地面保障等多系统信息融合,提升对耦合风险的识别与响应能力。开展多因素耦合情景演练,提升人员在复杂情境下的应急处置能力。

4. 结论与讨论

4.1. 结论

(1) 应用关联规则方法对事故影响因素进行关联规则挖掘,实现对各类致因因素的量化评价,得出 CFIT 与航班监视关系较大;造成飞行中失去控制与机组人员空间定向障碍及错觉;跑道偏离主要与机场设施威胁、航空器刹车、地面导航、跑道道面侵入以及飞行操作系统结构失效关系较大,其中结构失效与跑道偏离为强相关;飞行中损坏与非包容性发动机故障强相关;地面标准操作程序与检查流程、地面培训系统、地面事件、交通以及与空管沟通差错等是地面损坏的重要风险指标,其中交通与地面损坏呈现强相关;起落架故障与维护标准操作程序与检查流程、维护培训系统以及起落架/轮胎故障强相关。

(2) 航空安全事故致因呈现出维度聚焦性、层级传导性、多因素耦合性三大核心特征。在今后的民航安全管理工作中应将研究重点聚焦于关键影响因素的防范、强化中间层级致因管控以及提升人员在复杂

[bc%9a%e8%81%9a%e7%84%a6%e5%ae%89%e5%85%a8%e3%80%81%e5%8f%af%e8%b4%9f%e6%8b%85%e5%92%8c%e5%8f%af%e6%8c%81%e7%bb%ad%e5%8f%91%e5%b1%95/](https://doi.org/10.12677/jast.2026.142009), 2025-06-04.

- [6] 汪磊, 韦子欣, 邹颖. 民航飞行员不安全行为中的差错与违规分类管理方法[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(12): 8-15.
- [7] IATA Safety Report. <https://www.iata.org/en/publications/safety-report/references/>
- [8] Zimmermann, N. and Mendonca, F.A.C. (2021) The Impact of Human Factors and Maintenance Documentation on Aviation Safety: An Analysis of 15 Years of Accident Data through the PEAR Framework. *Collegiate Aviation Review International*, **39**, 1-25. <https://doi.org/10.22488/okstate.22.100230>
- [9] Bastola, D.P. (2020) The Relationship between Leadership Styles and Aviation Safety: A Study of Aviation Industry. *Journal of Air Transport Studies*, **11**, 71-102. <https://doi.org/10.38008/jats.v11i1.155>
- [10] de Voogt, A., Kalagher, H., Santiago, B. and Lang, J.W.B. (2022) Go-Around Accidents and General Aviation Safety. *Journal of Safety Research*, **82**, 323-328. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.06.008>
- [11] Nogueira, R.P.R., Melicio, R., Valério, D. and Santos, L.F.F.M. (2023) Learning Methods and Predictive Modeling to Identify Failure by Human Factors in the Aviation Industry. *Applied Sciences*, **13**, Article 4069. <https://doi.org/10.3390/app13064069>
- [12] 李炎, 公超, 何吉波. 2010-2019 年中国民航商业航空运输飞行事故中人的因素分析[C]//中国航空学会. 第六届中国航空科学技术大会论文集. 上海: 东航技术应用研发中心有限公司科研管理部; 北京: 清华大学社会学学院心理学系, 2023: 1507-1521.
- [13] Molesworth, B.R.C. and Estival, D. (2015) Miscommunication in General Aviation: The Influence of External Factors on Communication Errors. *Safety Science*, **73**, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.11.004>
- [14] Lyu, Q., Fu, G., Wang, Y., Ban, D., Wu, Z. and Xie, X. (2024) Insufficient Safety Capability among General Aviation Practitioners: Evidence from Chinese Accident Data. *Safety Science*, **180**, Article 106655. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106655>
- [15] 杨小杰, 赵茁会, 马渐涵. 通航事故影响因素分析及安全管理对策研究[J]. 今日消防, 2024, 9(3): 1-5.
- [16] 米志鑫, 朱玉, 罗颜声, 等. 基于鱼刺图分析的民航事故征候影响因素研究[J]. 科学技术创新, 2021(3): 161-162.
- [17] 马文婷. 民航事故致因理论之人的因素和环境因素作用模型研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2024.
- [18] 张玉娟. 人为因素对航空安全的影响与对策探析[J]. 中国航务周刊, 2022(44): 73-75.
- [19] 陈帮. 从 SHELL 模型角度探索减少航空维修人为差错的方法[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(9): 29-32+37.
- [20] 郑嘉韬, 丁溢周. 基于改进 Reason 模型的航空事故人为维修差错解析与预防[J]. 科技风, 2024(17): 145-148.
- [21] 崔铁军, 马云东. 多维空间故障树构建及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 32-37+62.
- [22] Leveson, N. (2004) A New Accident Model for Engineering Safer Systems. *Safety Science*, **42**, 237-270. [https://doi.org/10.1016/s0925-7535\(03\)00047-x](https://doi.org/10.1016/s0925-7535(03)00047-x)
- [23] Zavila, O. (2025) Human Factors Analysis and Classification System-Positive Experience (HFACS-PE): New Approaches to Aviation Accident and Incident Investigation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **94**, Article 105578. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105578>
- [24] 田延飞, 何琪, 滑林, 等. 海上船舶碰撞事故关联规则挖掘及致因分析[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(5): 1682-1688.
- [25] 马明焕, 王新浩, 许晓辉, 等. 基于数据挖掘技术的事故隐患预警方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(7): 11-17.
- [26] 韩子威, 朱建生, 王辉, 等. 基于数据驱动的动车组行车故障处置与后续影响因素关联规则研究[J]. 铁道学报, 2025, 47(5): 31-38.
- [27] 袁乐平, 张文东, 赵力梵, 等. 基于 TEM 模型的民航不安全事件关联规则挖掘与分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(10): 31-36.