

中文引用格式:李一可,张洪海,石宗北,等. 基于 TM-HFACS-FRAM 的管制运行不安全事件致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(4): 38-48.

英文引用格式:Li Yike, Zhang Honghai, Shi Zongbei, et al. Causation analysis of air traffic control operational unsafe event based on TM-HFACS-FRAM [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 38-48.

基于 TM-HFACS-FRAM 的管制运行不安全事件致因分析*

李一可, 张洪海**教授, 石宗北, 李雯清
(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106)

中图分类号: X949 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0635

基金项目: 国家自然科学基金资助(U2133207); 中国工业和信息化部民用飞机专项科研(MJZ1-7N22)。

【摘要】 为提升民航空中交通管制(ATC)运行安全风险识别的系统性与客观性, 挖掘管制运行不安全事件致因及其相互作用关系, 提出一种融合文本挖掘(TM)、人因分析与分类系统(HFACS)方法以及功能共振分析法(FRAM)的管制运行不安全事件致因分析方法。首先, 采用 TM 技术, 从不安全事件报告进行文本处理, 并通过词频-逆文档频率(TF-IDF)方法中提取与民航管制运行风险相关的高频关键词; 其次, 对关键词进行语义归属, 基于民航管制运行工作特征, 构建改进的管制运行 HFACS 多层级架构, 并确定对应的风险因子; 然后, 引入 FRAM 分析管制运行系统中各个功能模块之间的相互依赖关系, 揭示管制运行复杂系统中交互作用对事件发生的潜在影响; 最后, 面向 2 起管制运行不安全事件开展研究, 分析其风险致因。结果表明: 所提方法能有效挖掘多源致因之间的相互关系, 识别多层风险致因因子, 验证了该方法在多源数据处理、复杂致因结构挖掘中的有效性与科学性。

【关键词】 文本挖掘(TM); 人因分析与分类系统(HFACS); 功能共振分析法(FRAM); 管制运行; 不安全事件; 致因分析

Causation analysis of air traffic control operational unsafe event based on TM-HFACS-FRAM

Li Yike, Zhang Honghai, Shi Zongbei, Li Wenqing

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing Jiangsu 211106, China)

Abstract: In order to improve the systematicity and objectivity of safety risk identification in civil aviation ATC operations and to explore the causes and interaction relationships of ATC unsafe incidents, a causal analysis method for ATC unsafe incidents was proposed, integrating TM, HFACS, and FRAM. Firstly, TM technology was employed to perform text processing on unsafe incident reports, and high-frequency keywords related to ATC operation risks were extracted using the Term Frequency-Inverse

* 文章编号: 1003-3033(2026)04-0038-11; 收稿日期: 2025-10-14; 修稿日期: 2026-01-04

** 通信作者: 张洪海(1979—), 男, 山东菏泽人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空中交通管理、通用航空及无人机管控等方面的研究。
E-mail: honghaizhang@nuaa.edu.cn.

Document Frequency (TF-IDF) method. Secondly, semantic attribution was conducted on these keywords, and an improved multi-level HFACS framework for ATC operations was constructed based on the characteristics of ATC work, and the corresponding risk factors were determined. Then, the interdependent relationships between various functional modules in the ATC operation system were analyzed by introducing FRAM to reveal the potential impact of interactions within the complex ATC system on incident occurrence. Finally, two cases of ATC unsafe incidents were investigated to analyze their risk causes. The results show that the proposed method effectively mines the interrelationships between multi-source causes and identifies multi-level risk causal factors, which verifies the effectiveness and scientific rigor of the method in multi-source data processing and complex causal structure mining.

Keywords: text mining (TM); human factors analysis and classification system (HFACS); functional resonance analysis method (FRAM); air traffic control(ATC) operation; unsafe event; causation analysis

0 引言

空中交通管制(Air Traffic Control, ATC,简称管制)是民航运行中的关键环节,随着航空运输业的不断增长,民航运行环境复杂性持续提升,对空管工作提出更高要求。管制运行中的不安全行为可能会影响航空器运行安全,甚至直接导致严重事故发生,其中,与人相关的失误是导致空中交通管制运行不安全事件的主要诱因^[1]。采取科学合理的风控对策,可在不安全行为发生之前避免和减少风险因素造成的影响,从而有效降低不安全事件的发生概率。因此,准确识别管制运行不安全事件的风险因素及其交互作用关系,对于保障空中交通安全、高效运行具有重要意义。

目前,针对民航管制运行不安全事件致因分析的研究主要集中在关键致因挖掘以及致因体系构建2个方面。致因因素分析中,Chang Yuhern 等^[2]总结了疲劳对管制员的影响,并采用疲劳量表评估管制员的疲劳程度,认为疲劳是引发失误的关键源头;Oge 等^[3]基于空管单位的工作特征,深入研究了工作中领导方式对不安全行为有间接的放大作用;崔湘奇^[4]通过认知模型得出管制员的风险认知水平是不安全行为发生的关键因子。致因体系构建方面,李君尉^[5]使用瑞士奶酪模型构建了航空事故致因网络模型;李耀华等^[6]基于功能共振分析法(Functional Resonance Analysis Method, FRAM)构建了民机系统安全性分析模型;印弘瑀^[7]基于系统理论事故建模方法(Systems Theoretic Process Analysis, STAMP)定性分析了航空器进近复飞的安全。综上,学者们分析了不同因素对管制不安全行为的影响,为复杂系统中风险因素的识别和

传播路径的建模提供了参考,而管制员的不安全行为是由多种因素引起的,且方法多以系统结构或功能失效为切入点,难以深入揭示人因背后的组织管理、认知决策等因素,因此,需要从多角度出发对其全面分析。

在空中交通管制这一以人为主导的工作中,管制员的不安全行为往往是多种隐性人因与组织因素长期叠加演化的结果。人因分析与分类系统(Human Factors Analysis and Classification System, HFACS)正是在此背景下提出的一种层级化人因建模方法,其具备从组织层到操作层的纵向归因能力,能够系统揭示组织失效、操作条件及个体行为之间的耦合关系^[8],HFACS 由航空领域提出,旨在系统解析飞行事故中的人为失效机制,随着其理论不断发展,目前应用范围已拓展至多个高风险行业^[9-10],展现出良好的分析效能。由于传统 HFACS 建模过程高度依赖专家经验和手工编码,尤其在面对大量非结构化的事件报告文本时,存在因子提取效率低、主观性强等问题;同时,HFACS 更侧重于静态的分层归因,难以直接刻画不同因子之间的相互作用与系统耦合关系。FRAM 法是一种用于分析复杂系统中功能单元之间的交互作用以及交互之间如何导致系统性失效的工具^[11],与传统的因果链式分析方法不同,FRAM 强调运行系统中功能间的动态依赖与联动性,通过识别系统中各功能单元的变异性和交互,发现可能引发系统失效的“功能共振”,从而揭示不安全事件的演化路径^[12-13]。

鉴于此,笔者拟提出基于文本挖掘(Text Mining, TM)-HFACS-FRAM 的民航管制运行不安全事件致因分析方法,以为民航运行安全风险研究提供理论依据。

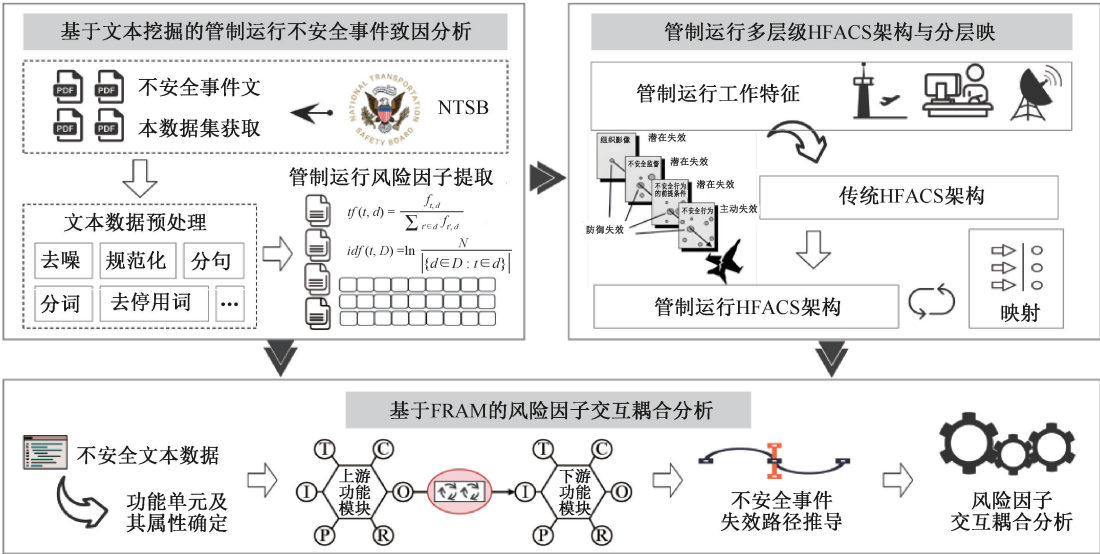
1 基于 TM 的管制运行不安全事件致因分析

管制运行不安全事件致因分析流程如图 1 所示,主要包括管制运行不安全事件 TM、多层次 HFACS 架构定义以及风险因子耦合分析 3 个部分。TM 是研究的基础模块,用于处理非结构化事件文本,提取高频风险关键词;基于原始 4 层 HFACS 架构进行改进,形成适用于管制运行的“多层次 HFACS 架构”,并与 TM 结果结合,通过语义归属与专家标注,构建“关键词-HFACS 因子”映射表;构建 FRAM 功能单元,通过耦合关系实现对不安全事

件演化路径的系统描述,识别功能模块之间的依赖关系,以刻画潜在的功能共振机制。

1.1 不安全事件 TM 流程

为解决传统 HFACS 模型对不安全致因识别高度依赖专家经验与主观判断的不足,实现对民航管制运行不安全事件文本中潜在风险因子的高效识别,采用词频 (Term Frequency, TF) - 逆文档频率 (Inverse Document Frequency, IDF) 方法提取关键词,旨在从大量自然语言描述中提取出语义重要性突出的风险行为、组织问题或个体状态表述,为后续因子映射提供定量支撑,如图 2 所示。



注:美国国家运输安全委员会 (National Transportation Safety Board, NTSB)。

图 1 管制运行不安全事件致因分析流程

Fig. 1 Causation analysis process for ATC operational incidents

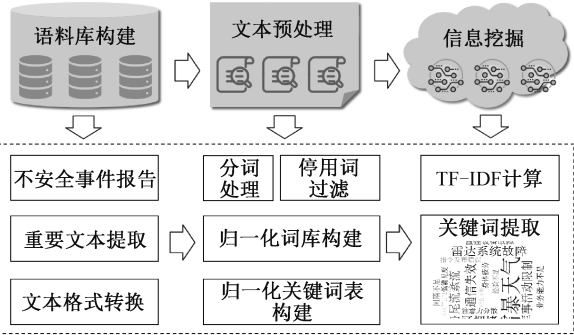


图 2 不安全事件关键词提取流程

Fig. 2 Unsafe event keyword extraction process

1.2 不安全事件 TM 流程

1) 语料库构建。收集来自 NTSB 事故调查局公布的航空运输事故调查报告,通过筛选、复核,删

除过短的事故报告以及管制只作为叙述对象出现但未实际参与事件的报告,最终得到 570 件,为减少无关词组的干扰,只抽取报告中 Report (报告内容)、Probable Cause (合理理由) 和 Findings (调查结果) 3 部分,形成待挖掘语料库。

2) 文本预处理。在语料准备基础上,预处理原始文本数据,包括分词、停用词过滤与归并词库构建。①分词处理。采用 Python 编程语言中的分词工具切分文本。由于管制运行场景中包含大量专业术语,如雷达引导间隔调整可能被错误切分为雷达、引导、间隔、调整,因此,在分词前,结合《民航词典》《民用航空工程术语标准 (征求意见稿)》以及民航术语教材^[14-15]等行业资料,构建适用于研究的管制术语词典,并加入分词自定义词表,从而提高专业语

义识别精度。②停用词过滤。在标准通用停用词基础上,结合民航不安全事件文本语料的语义特征,扩展构建适用于研究的数据驱动停用词库。该词库除包含常规连接词、介词、虚词外,还通过频率分析剔除了如发生、进行等频次较高但信息量不足的词项,保留具备实际致因指向性的信息。③归并词库构建。为统一语义表达,建立归并词典,将具有相近含义但表述形式不同的词项归入统一词元,如将通信异常、通信中断统一归为通信失效,将雷暴、下雨统一归为雷雨天气,避免因语义表达差异造成的因子识别偏差。词库在实际分词与因子抽取过程中采用动态迭代机制,根据样本变化持续调整,确保语义提取的精度与覆盖率。④归一化关键词表构建。为提高关键词提取的准确性和完整性,在归并词库构建的基础上,进一步构建归一化关键词表,通过统一同义词、消解语义歧义并规范术语的表达,避免因同义词或多义性引起的遗漏或冗余。在不安全事件报告中,由于文字的复杂性会出现多个词语表达同一个意思的情况,如分散了注意力与注意力分散、失去情景意识与丧失情景意识等。因此,需要进行同义词转换。对于具有不同语境下含义的词(如间隔既可指垂直间隔也可指水平间隔),将根据上下文语境进行区分,并在归一化关键词表中添加明确的标签。归一化关键词表通过消除同义词和多义性问题,提高文本分析的精度和一致性,从而增强 HFACS 因子映射的准确性。

1.3 基于 TF-IDF 的管制运行风险因子提取

TF-IDF 是一种常用的 TM 技术,主要用于衡量一个词语在一个文本集合(语料库)中的重要性,由 2 部分组成:TF 表示某个关键词在一篇文档中出现的频率;IDF 衡量一个词在整个语料库中出现的稀有程度^[16]。

为避免选取冗余,对不安全事件报告文档中词项的 TF-IDF 值排序,并筛选排名前 28 位高权重词作为管制运行不安全事件致因关键词,见表 1。

表 1 民航管制运行不安全事件致因关键词及 TF-IDF 值
Table 1 Key words and TF-IDF values of unsafe incidents in civil aviation control operation

编号	关键词	TF-IDF	编号	关键词	TF-IDF
1	尾流紊流	0.433	15	未培训	0.110
2	雷暴天气	0.322	16	机场环境	0.107
3	通信失效	0.305	17	心理压力	0.102
4	监控设备故障	0.254	18	沟通不足	0.097
5	扇区拥堵	0.217	19	拿错适配器	0.093

续表 1

编号	关键词	TF-IDF	编号	关键词	TF-IDF
6	雷达系统故障	0.203	20	配合不畅	0.091
7	人手不足	0.181	21	规则未执行	0.085
8	指令发布错误	0.172	22	排班不合理	0.083
9	能力不足	0.164	23	违反规则	0.080
10	身体疲劳	0.137	24	未做工作准备	0.078
11	工作负荷	0.126	25	违反监管程序	0.074
12	视觉感知错误	0.121	26	无安全意识	0.070
13	制度不完善	0.119	27	交接流程错误	0.065
14	注意力不集中	0.115	28	未纠正违规行为	0.060

2 管制运行多层级 HFACS 架构与分层映射

2.1 HFACS 架构

HFACS 强调高层级问题可能会逐层向下传导,最终导致一线工作人员的不安全行为^[17]。因此,非常适用于对管制员不安全行为风险因素的系统识别。尽管目前 HFACS 中的因子层级体系已较为完备,但应用于不同领域时,需结合具体行业特征进行修订^[18]。

研究的目的是识别管制运行不安全行为的风险因素,因而需结合实际场景与空中交通管理的工作特性进行相应调整,在常规 HFACS 中不安全行为层指的是操作人员的不安全行为,在研究中操作人员特指管制员。由于气象条件突变、空中交通流量变化、设备设施故障等外部环境因素对管制员操作行为与风险感知具有直接影响^[19],因此,将第 1 层级定义为环境因素,包括物理环境与技术环境 2 个子项。此外,原模型中不安全行为的先决条件在文中为管制员状态,并将其细化为 4 类因子,在保留 HFACS 原结构的逻辑基础上,增强对管制员个体差异的刻画能力,更加符合空管任务的认知负荷特征与运行机制。管制运行高度依赖团队协作,其核心在于成员间任务的协调与互补,因此,将团队协作纳入其中。改进后的 HFACS 模型结构如图 3 所示,管制运行不安全事件致因被分为 5 个层级。结合管制任务特征,依据已有研究中的划分^[20],并参照现行管制室工作手册,从而确定不安全行为的分类及定义,见表 2。

2.2 关键词-因子对照表构建

为实现不安全事件文本中关键词与 HFACS 多

表 2 管制运行不安全行为类型及对应内容

Table 2 Types of unsafe behaviors in ATC operations and corresponding descriptions

类型	内容
决策错误	指管制员在处置方案、程序选择和决策判断制定过程中出现的不安全行为,主要表现为流程执行不当、处置方案不合理,或基于不完整信息作出错误决策等
感知错误	指因对空间距离、动态趋势或方向的误判而引发的操作失误,如在夜间或复杂气象条件下易受视觉或感知错觉影响,产生高度估计、航迹判断等方面偏差
技能错误	指在无需复杂思维参与的常规操作中,由于技能掌握不牢或注意力分散所导致的疏漏与差错,常表现为清单信息遗漏或重复操作等程序性失误
常规违规	指管制员基于默认操作习惯、自身利益或降低工作量的考量,长期违反规章制度但未被管理体系纠正的违规行为,具有一定的制度性纵容特征
异常违规	指个别管制员在特定情境中作出的临时越权行为,缺乏组织授权或程序依据,具有偶发性和不可预测性,通常不被管理层认可或容忍

表 3 初始关键词-因子对照

Table 3 Initial key words-factor table

关键词	HFACS	因子分类
尾流紊流	环境层	物理环境
雷暴天气		物理环境
扇区拥堵		物理环境
机场环境		物理环境
通信失效		技术环境
监控设备故障		技术环境
雷达系统故障		技术环境
人手不足	组织层	组织流程
交接流程错误		组织流程
无安全意识		组织氛围
制度不完善		资源管理
规则未执行	不安全监督	监督不力
未培训		监督不力
排班不合理		操作规划不当
未纠正违规行为		问题未纠正
违反监管程序		监督层违规
心理压力	管制员状态	心理状态
注意力不集中		心理状态
工作负荷		生理状态
身体疲劳		生理状态
能力不足		专业能力
沟通不足		团队协作
配合不畅		团队协作
拿错适配器	管制员不安全行为	决策错误
视觉感知错误		感知错误
指令发布错误		技能错误
未做工作准备		常规违规
无正当理由情况下违反规则		异常违规

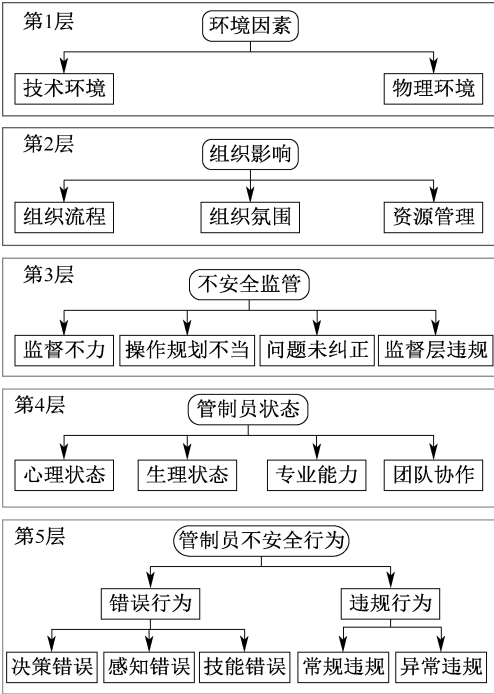


图 3 管制运行 HFACS 架构

Fig. 3 HFACS framework for ATC operations

层级因子之间的有效映射,基于风险因子关键词提取结果以及管制运行 HFACS 架构,构建关键词-因子初始对照表,见表 3,以实现语义表达与结构模型的系统对接。

初始映射结果可应用于文本结构简单的事件中,但由于其存在层级表达不足、因子维度简单等问

题,难以直接用于复杂运行系统的风险演化分析。为此,进一步结合 HFACS 框架的层级逻辑与 FRAM 建模对功能单元的要求,邀请空管领域专家以及一线管制人员对风险因子进行分类整合与结构化提炼,多层级结构化因子映射,见表 4,在保留关键词语义特征的基础上,明确各类因子的层级归属,可为后续系统功能共振分析与风险交互作用识别提供基础。

基于不安全事件因子识别以及事件功能链分析,最终实现“关键词-功能模块-HFACS 层级-HFACS 因子”的 4 层级映射关系:①关键词定位。通过提取的高频关键词,结合事件语句上下文进行句法结构分析,确定关键词出现的位置及其语义指向。②功能模块归属。根据关键词在事件报告中所属的行为场景或动作对象,判断其对应的功能模块,并结合模块六属性辅助验证。③HFACS 层级关联。

表 4 多层级结构化因子映射

Table 4 Multi-level structured factor mapping

层名称	因子分类	风险因子	判别说明
环境因素	物理环境	不良天气	气象突变对航班运行构成直接威胁,超出人为控制范围
		空军活动限制	空域资源分配及军民协调机制造成的限制
		空域拥堵情况	由于航班密度大、空域容量饱和等客观条件造成的拥挤运行状态
		机场作业环境	机场跑道、滑行道等限制对航班调配的影响
	技术环境	设备设施故障	导航、通信、雷达等技术系统异常对运行安全的干扰
		席位设置不合理	席位布局或职责划分存在问题,易造成信息传递延误或职责交叉
		通信故障	地空通信链路中断或质量差直接影响指令传达与确认
组织影响	组织流程	人手不足	对岗位或排班安排不当造成人力资源短缺
		排班不合理	任务安排连续性差或轮班间隔不足导致人员疲劳积累
	组织氛围	安全文化淡薄	组织层面缺乏安全优先理念,导致管制员安全意识薄弱
		安全意识不足	组织未有效传达风险管理理念,造成管制员安全认知偏差
	资源管理	人员配备不合理	未根据岗位要求配置具备资质的人员
		规章制度不健全	制度覆盖不足导致人员缺乏明确执行依据
		职责分工不明确	未对岗位职责进行清晰界定或存在职责交叉、模糊现象
不安全监督	监督不力	规则执行不力	组织未有效落实既定规章,存在监管失效
		安全管理不重视	缺乏系统性的风险管控机制或未设立专职安全岗位等
		安全培训不足	未按期开展针对性培训或培训质量不高
		当班监督不到位	值班监督人员未能及时发现或纠正风险行为,监督失职。
	操作规划不当	任务分配不合理	任务划分不均或未考虑人员能力差异,导致执行效率下降
		未预判风险	运行中未对潜在风险进行预先识别与响应准备,属于管理前瞻性缺失
	问题未纠正	违规行为未纠正	已知的风险行为未被组织及时干预或通报,导致重复发生
		反复问题未处理	相似问题多次发生未形成系统解决方案,闭环机制缺失
	监督层违规	违反监管程序	管制行为或事件处理方式未遵循法定流程或监管要求
		未建立安全机制	组织未设立系统的运行安全监测、评估和响应体系
管制员状态	心理状态	心理压力	高强度工作负荷、突发事件等引发的心理紧张状态
		心理疲劳	长时间保持注意力导致认知消减,影响感知与判断
	生理状态	身体疲惫	由于排班、夜班或体能消耗引发的体力下降状态
		身体疾病	患病状态下执勤可能影响注意力与应变力
		服用药物	特定药物可能影响警觉性与反应速度,构成安全隐患
	专业能力	业务能力不足	基础理论知识或操作规则掌握不牢,影响正确决策与操作执行
		操作技能差	缺乏对复杂或突发情景的操作经验,难以快速应对任务要求
	团队协作	团队协作不足	同事间缺乏有效沟通或协作配合,影响运行信息传递与联合处置
管制员不安全行为	决策错误	程序流程未遵守	未按规定操作流程执行任务,存在规避步骤或随意调整等行为
		操作或决策错误	错误判断航班状态或采取不恰当指令措施
		紧急处置不当	面对紧急情况未能采取有效措施或优先顺序错误
	感知错误	视觉语音感知错误	错误感知飞行器位置、高度、速度等关键运行态势
		态势感知错误	对整体运行态势误判,导致未能准确预判
	技能错误	使用非标准术语	使用不规范的通话术语影响指令的准确传达与理解
		发布错误指令	口误、信息遗漏或指令下达错误等
	常规违反	工作前未做准备	未查阅航班计划、天气、运行预案等必备信息即进入工作
		习惯性失误	长期未被纠正的违规行为转化为默认操作习惯
	异常违反	脱离标准流程	操作中跳过管制环节或绕过审批流程,存在越权或草率行为
		不具备执行任务资质	在未获得相应岗位培训认证或无效资质状态下执行任务

结合构建的 HFACS 结构,对每个功能模块中所体现的语义内容,匹配其层级。④因子最终映射。通过专家标注与语义归一化方法,建立最终的关键词与

HFACS 因子(风险因子)之间的一对一或多对多映射关系。

3 基于 FRAM 的风险因子交互耦合分析

3.1 系统功能模块

在 FRAM 中,空中交通管制系统的复杂运行过程可在时间维度上通过多个功能模块进行表述,每个功能模块用于刻画复杂运行系统中的一个子系统或基本作业单元。FRAM 功能模块的建构基于 6 个核心属性:输入(Input, I)、输出(Output, O)、时间(Time, T)、前提条件(Preconditions, P)、资源(Resources, R)以及控制(Control, C)^[21],如图 4 所示。

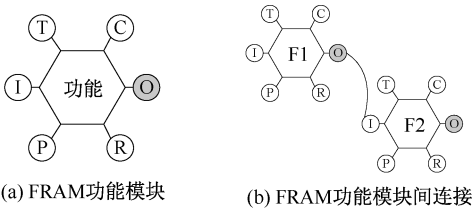


图 4 FRAM 功能模块
Fig. 4 FRAM functional modules

基于 FRAM 原则,在分析不安全事件报告时,将文本中所描述的内容,依据功能独立性进行语义拆分,提取出构成事件演化过程的基本操作单元,并据此构建功能模块集。

3.2 管制运行系统风险因子耦合分析

管制运行系统失效往往源于多个功能模块间变异的叠加与相互作用,在 FRAM 中,功能模块的失效不仅影响其自身的输出,还可能通过输出链路或控制依赖等影响与其相关的模块,此依赖关系在复杂运行环境中形成连锁效应,当多个功能模块的变异性在时序或空间上发生重叠或放大时便导致功能共振。功能共振体现为风险因子的非线性耦合效

应,当累积失效突破系统容错的临界阈值时将发生事故^[22],如图 5 所示。

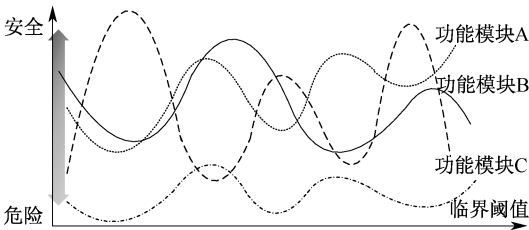


图 5 功能共振
Fig. 5 Functional resonance

4 管制运行不安全事件实例分析

4.1 管制不安全事件报告案例 1

以“管制员指挥着陆航空器爬升至安全高度”的管制运行不安全事件报告为例,其不安全事件报告的原始文本与翻译文本如图 6 所示。

报告12:
I noticed Aircraft X was establishing himself on the localizer at 2,000, while minimum safe altitude for the localizer is 3,000. I told Aircraft X that minimum safe altitude was 3,000 and climbed him back to 3,000. Aircraft X stated I told him 2,000, I don't think I've ever issued, the distance between aircraft and other is too small, to avoid risk, I request him to go around. If this is a hearback/readback issue, I was probably just fatigued. Although it was later discovered that communication system issue had caused the poor voice communication, the root cause lay in the short staffing at the HCF. I am fatigued, as are my coworkers, I am on the no list for overtime, but I was forced to stay an extra two hours and work a ten hour day, the date of this incident. On the night in question, flights is heavily congested, management staffed a D-Side only as a controller, but she was limited to where and what times she can work, so this caused long periods on position for all of the controllers.

(a) 原始报告文本

报告12:
我注意到航班A正在以2000英尺的高度在本场仪表着陆系统上建立航向道,而最低安全高度为3000英尺,因此立即告知A航班最低安全高度是3000英尺,并指示其爬升回3000英尺,但飞行员称是我向他发出保持在2000英尺的指令,我不认为自己曾经下达过,此时航空器与其他航空器间隔太小,为避免风险,我选择要求航班复飞。如果飞行员将3000英尺听成了2000英尺并回读错误,这与当时我的疲劳状态有关,尽管后面发现是通信系统问题导致语音不畅,但根源在于航管中心严重人手不足,当时我和同事都处于极度疲劳状态,我不在加班名单上,但当天仍被强制要求延长工作两小时,总工作十小时。发生事件当晚,航班拥堵,上级层安排了一名管制员上岗,但他的工作时间和岗位范围受限,导致其他管制员不得不连续长时间工作,加重了疲劳负担。

(b) 报告中译文文

图 6 管制运行不安全事件报告文本
Fig. 6 ATC operation unsafe event report text

将此不安全事件分为 12 个事件功能模块,详细说明见表 5。

表 5 管制不安全事件报告 12 对应功能模块及其属性

Table 5 Functional module and its attributes of the ATC event report12

序号	模块名	输入 I	输出 O	条件 P	资源 R	时间 T	控制 C
M1	工作任务分配	管制员调度计划	岗位轮换安排	排班规则、人员资质认证等	排班系统、人力资源系统	当日航班运行前 3—5 日完成	管理层批准规定程序
M2	加班轮换管理	人员轮换信息与岗位空缺	轮换调整或加班通知	轮换规则与工时时长上限等	管制排班表、人力应急信息	在轮换前及时完成	劳动合同、法律规定等
M3	提前准备工作	航班计划、天气信息、空域状况等	任务准备完成	航班与天气资料等信息	情报系统、航行情报服务	上班前半小时内完成	值班长检查交接制度等
M4	空域运行状态	航班流量信息	空域负荷状态	雷达正常流量预判	流量管理系统、雷达显示器	实时更新	区域流控程序
M5	雷达数据监视	监视航班信息	实时航班动态感知	雷达正常、数据无延迟	雷达终端、辅助监控设备	连续实时	设备状态监测、故障报警系统

续表 5

序号	模块名	输入 I	输出 O	条件 P	资源 R	时间 T	控制 C
M6	异常航班感知	雷达数据与航班计划等	异常航班标识	对比标准航路航高信息	电子航图、雷达目标标签	3 s 内反应	监控提醒规则
M7	安全高度保障	当前航班位置与计划信息数据	高度偏差警示或纠正指令准备	安全高度要求	MSA 图、雷达叠加图层	实时监测	运行高度限制
M8	发布爬升指令	航班异常信息	爬升指令发出	通信链路、航班响应正常	语音通信系统	10 s 内完成	通信频率
M9	指令复述核对	飞行员回读内容	正确确认或纠正回读	注意力集中、通信正常	语音通信系统	指令发布后即刻完成	听回规范要求
M10	管制自我确认	指令下达记录	自我检查确认	个人经验与注意力等自身状态	指令记录工具	指令发布后 10 s 内	个人工作规范
M11	通信系统失效	指令发送接收记录	通信失效确认	系统监测报警	通信设备系统诊断工具	故障出现后尽快处理	通信故障应急程序
M12	发布复飞指令	复述核对结果航班实际位置	新指令发布	初次指令可能错误或通信异常	语音通信系统	发现异常后立即发布	指令发布程序

注:最小安全高度(Minimum Safe Altitude,MSA)。

FRAM 可视图如图 7 所示,M1 与 M2 共同作用于 M3,形成任务启动条件;随后 M3 与 M4 共同作用于 M5,在状态依赖下触发监视链条。M5 与 M7 通过协同控制连接至 M6,实现对异常运行态势的识

别。M6 与 M11 构成共同影响 M8。在指令链条中,M8 与 M9 及 M10 形成多重验证环节,但由于通信环节的不确定性,可能导致指令链条的脆弱化。最终,该链条与 M12 叠加触发功能共振。

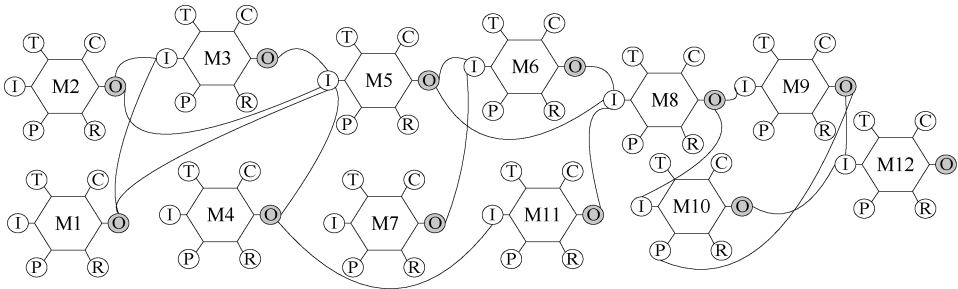


图 7 管制员指挥着陆航空器爬升至安全高度的 FRAM

Fig. 7 Controller directs the landing aircraft to climb to a safe altitude on the FRAM chart

结合文本关键词挖掘结果及构建的多层级 HFACS 架构,形成“关键词-功能模块-HFACS 层级-HFACS 因子”映射关系,见表 6。

表 6 不安全事件报告 12 映射关系

Table 6 Mapping relationship of event report12			
关键词	功能模块	HFACS 层级	HFACS 因子
人手不足	M1	第二层	资源管理失效
岗位范围受限	M1	第四层	任务分配不合理
长时间工作	M2	第二层	排班不合理
航班拥堵	M3	第一层	空域拥堵
极度疲劳	M5	第四层	身体疲劳
不认为下达过	M10	第五层	指令感知不足
通信问题	M11	第一层	空地通信干扰

根据 FRAM 图,进而推导出得出案例的主要系统功能共振失效链条如下:M1→M2→M3→M5→M8

+ M12→M9→M10→M12。此链条表明:资源管理失效、人因疲劳以及通信技术问题的耦合,共同导致此次不安全事件的发生。

4.2 管制不安全事件报告案例 2

案例 2 为引导进近航班不安全事件,将其分为 13 个事件功能模块,引导进近航班不安全事件报告文本译文如图 8 所示。

事件功能模块详细说明见表 7;FRAM 可视图如图 9 所示,N1、N2 与 N3 通过运行压力叠加共同作用于 N4,使进近引导环节处于高负荷状态。N4 产生出 2 条风险链:一方面作用于 N5,并通过异常识别触发 N6;另一方面作用于 N7,进而通过指令干预触发 N8。同时,N9 导致 N10,并经由信息传递链引发 N11,使飞行员在运行中不断更新与操作。

表 7 管制不安全事件报告 150 对应功能模块及其属性

Table 7 Functional module and its attributes of the ATC event report150

序号	模块名	输入 I	输出 O	条件 P	资源 R	时间 T	控制 C
N1	机场作业环境	天气监测数据和跑道数据	跑道当前状态	跑道检测与清理规定	地面除冰设备、气象雷达	进场时段内实时更新	环境监控系统与指挥调度
N2	空域拥堵情况	航班数量飞行计划	空域负荷	航班调度与流量控制	飞行流量管理系统	高需求时段持续监控	流量控制
N3	气象条件	天气信息	气象更新及影响评估	天气对航班的影响	气象服务雷达图像	实时更新	自动更新系统
N4	航班进近引导	飞行计划信息 航班进近信息	引导至 28R 跑道	飞行计划确认 进近航道验证	进近引导系统	立即反应	引导标准程序验证
N5	发现 X 航班高度异常	雷达信息数据	异常航班标识及告警	最低安全高度	雷达、监控设备 飞行员回报	立即反应	高度警告触发监控系统
N6	发布告警指令	异常高度	向航班发送告警信息	确认高度过低	通信设备、飞行员回报记录	立即发布	通信流程
N7	发现 Y 航班高度异常	雷达信息数据	异常航班标识及告警	最低安全高度	雷达、监控设备 飞行员回报	立即反应	引导标准程序验证
N8	发布复飞指令	异常确认	发布复飞指令	复飞判断与风险评估	通信设备、飞行员回报记录	立即发布	通信程序复飞机制
N9	下滑道停止使用	下滑道信息	停用通知发布	维护与故障	雷达、通信系统、维护人员	立即通知	停用标准
N10	ATIS 更新	设备故障 气象变化信息	ATIS 系统更新	设备、天气变化	ATIS 系统	特殊情况下 即时更新	通知频率广播控制
N11	新信息通知飞行员	新的 ATIS 信息	飞行员接收到信息更新	管制员及时接收到更新内容	ATIS 系统	更新后立即通知	更新流程 飞行员确认
N12	未与塔台协调	管制员工作情况	飞行员与塔台协调指令	管制员任务负载高	通信设备	及时沟通协调	沟通标准与流程
N13	造成安全问题	X、Y 航班状态	潜在风险识别	多因子交互作用	监视设备	发现后立即处理	安全操作规程 预警机制

注:自动终端情报服务(Automatic Terminal Information Services,ATIS)。

此外,受 N2 与 N3 叠加作用,N12 环节出现遗漏,削弱了跨部门的安全缓冲机制。最终在 N13 处发生功能共振,表现为 XY 航班近乎低于安全高度。

对应的映射关系见表 8。

表 8 管制不安全事件报告 150 映射关系

Table 8 Mapping relationship of the ATC event report150

关键词	功能模块	HFACS 层级	HFACS 因子
持续积冰状态	N1	第 1 层	机场作业环境
航班需求量大	N2	第 1 层	空域拥堵情况
空域已非常繁忙	N2	第 1 层	空域拥堵情况
不利的冬季天气	N3	第 1 层	不良天气
具有挑战性	N4	第 4 层	业务能力不足
超负荷工作	N4	第 4 层	身体疲劳
下滑道已停用	N9	第 1 层	设备故障
未与塔台协调	N12	第 5 层	程序流程未遵守
最低高度以下	N13	第 1 层	设备故障

此事件中的主要系统功能共振失效链条为:N1

报告150:
我当时负责西区的进近工作,负责将航班引导至ORD机场28C跑道。此时地区内出现不利的冬季天气,导致ORD机场只能进行双跑道进场,因此航班需求量大且持续不断,一整天28R由于天气原因暂停。在交通繁忙的时段,因为持续积冰状态,要求对28C跑道进行除冰、清理和检查,此时28R恢复使用,我收到通知要求开始将进场航班引导至新跑道,并告知我该跑道已完全恢复运行。更换跑道对我具有挑战性,我立即将航班引导至新跑道,距离约为40海里。我注意到X航班出现了低高度警告,并及时发布了告警,X航班停止下降并表示他们下滑遇到了问题。此时我发现Y航班也明显低于下滑道要求并立即指挥Y爬升,并发布了复飞指令。很明显下滑道存在问题,因此我继续执行重新发布28R跑道的进近任务。空域已非常繁忙,X航班和Y航班都因进近不稳定需要复飞,我因忙于管理航班,未与塔台进行协调,此时下滑道已停用并认为不可靠,导致了数次ATIS更新,反映设备故障和进近变化,天气快速变化导致我超负荷工作,将新的ATIS和天气条件通知飞行员,似乎没有措施来修复问题,这几乎导致X和Y航班在IFR下穿越芝加哥市区时下降至最低高度以下,这是一个严重的安全问题,在恢复使用该设备前,应确保有更可靠的设备正常工作。

图 8 引导进近航班不安全事件报告文本
Fig. 8 Unsafe events report text in guide approach flights

→N2→N3→N4→N9→N12→N13。此链条表明:繁忙空域与复杂机场作业环境加剧了管制员的工作难度与工作负荷,而管制员疲劳状态以及机场作业环境不佳间的风险因素耦合,叠加下滑道故障、未与塔台及时协调最终导致此不安全事件的发生。

对比案例可以看出,案例 1 的链条由组织资源不足、人因疲劳以及通信技术问题所驱动,致因模式

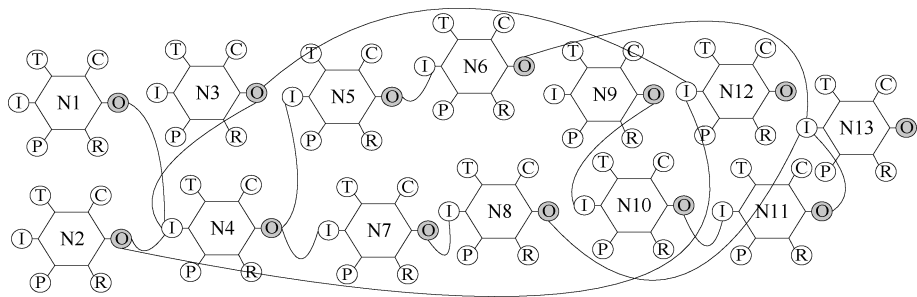


图 9 引导进近航班不安全事件的 FRAM 图

Fig. 9 FRAM diagram of unsafe events in approach flights

可概括为“组织资源失效+人因疲劳+技术故障”;案例 2 的链条由环境压力、机场设备故障、以及操作协调缺失共同作用,核心特征在于外部环境与技术设备的不确定性显著加大了管制员操作难度,从而触发近乎突破安全边界的风险。二者对比表明:不同运行场景下的风险成因具有差异性,但均可通过 FRAM 方法识别出关键的共振路径。

5 结 论

1) 所构建的融合 TM、HFACS 与 FRAM 的管制运行不安全事件致因分析框架,能够实现从非结构化文本中提取关键风险因素,并通过多层次因子建模与系统耦合关系刻画,提升致因识别的系统性与

层级逻辑。

2) 在 HFACS 模型中引入适配于管制运行场景的多层级因子体系,可增强模型对组织流程、个体状态及不安全行为等关键人因的解释,细化“管制员状态”维度,提升其对不同类型不安全行为发生机制的刻画能力;将 FRAM 方法嵌入致因分析流程,有助于揭示功能单元间因果关系与变异性耦合的系统演化路径。

3) 研究主要依赖人工标注语料进行关键词因子映射,缺乏大规模自动化语义建模与深度学习支持的因子识别机制。未来可引入大语言模型与图神经网络等技术,进一步拓展复杂网络结构下风险传播路径的智能识别能力。

参 考 文 献

[1] Kate R, Rebeca C. Understanding teamwork errors in royal air force air traffic control[J]. Safety Science, 2018, 109: 36–45.

[2] Chang Yuhern, Yang Huihua, Hsu Wanjou. Effects of work shifts on fatigue levels of air traffic controllers[J]. Journal of Air Transport Management, 2019, 76: 1–9.

[3] Oge E, Çetin M, Top S. The effects of paternalistic leadership on workplace loneliness, work family conflict and work engagement among air traffic controllers in Turkey[J]. Journal of Air Transport Management, 2018, 66: 25–35.

[4] 崔湘奇. 基于认知的空中交通管制员人因可靠性分析方法研究[D]. 天津:中国民航大学, 2023.

Cui Xiangqi. Research on human factor reliability analysis method of air traffic controller based on cognition[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2023.

[5] 李君尉. 基于复杂系统理论的航空事故致因分析与控制技术研究[D]. 天津:中国民航大学, 2021.

Li Junwei. Research on cause analysis and control technology of aviation accident based on complex system theory[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021.

[6] 李耀华, 巩子瑜. 基于改进 FRAM 的民机系统安全性分析[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 308–318.

Li Yaohua, Gong Ziyu. Safety analysis of civil aircraft system based on improved FRAM[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(12): 308–318.

[7] 印弘瑀. 基于 STPA 方法的航空器进近复飞安全性分析[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.

Yin Hongyu. Safety analysis of aircraft approach and go-around based on the STPA method[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2024.

[8] Chauvina C, Lardjaneb S, Morela G, et al. Human and organizational factors in maritime accidents: analysis of collisions

- at sea using HFACS[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2013, 59: 26–37.
- [9] Liu Rulin, Cheng Weimin, Yu Yanbin, et al. An impacting factors analysis of miners' unsafe acts based on HFACS-CM and SEM[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 122: 221–231.
- [10] Zhang Xinxin, Chen Weijiong, Xi Yongtao, et al. Dynamics simulation of the risk coupling effect between maritime pilotage human factors under the HFACS framework[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(2): DOI: 10.3390/jmse8020144.
- [11] 梁玉瑾. 基于 FRAM-BN 的塔吊施工安全风险评估研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
Liang Yujin. Research on construction safety risk assessment of tower crane based on FRAM-BN method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [12] 李一可, 张洪海, 石宗北, 等. 基于 N-K-FRAM 的空中交通运行安全风险耦合机制[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(5): 175–185.
Li Yike, Zhang Honghai, Shi Zongbei, et al. Coupling mechanism of air traffic operation safety risk based on N-K-FRAM[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(5): 175–185.
- [13] Wang Yuhong, Li Pengchang, Hong Cheng, et al. Causation analysis of ship collisions using a TM-FRAM model[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2025, 260: DOI: 10.1016/j.res.2025.111035.
- [14] 张怀兴. 英汉民航词典[M]. 北京: 中国民航出版社, 2011: 55–75.
- [15] 朱波. 基于事故调查的民航术语认知与翻译研究[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2024: 180–200.
- [16] Zhou Jing, Ye Zhanliang, Zhang Sheng, et al. Investigating response behavior through TF-IDF and Word2vec text analysis: a case study of PISA 2012 problem-solving process data[J]. *Heliyon*, 2024, 10(16): DOI: 10.1016/J.HELIYON.2024.E35945.
- [17] 李磊, 李江娥, 任俞霏, 等. 基于 HFACS 模型的城轨列车延误风险致因研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(5): 152–157.
Li Lei, Li Jiang'e, Ren Yufei, et al. Research on causes of urban rail delay risk based on HFACS model[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(5): 152–157.
- [18] Xie Xuecai, Guo Deyong. Human factors risk assessment and management: process safety in engineering[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 113: 467–482.
- [19] 康瑞, 杨凯. 航空器离场管制关键环节识别及风险传播研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2023, 60(1): 93–102.
Kang Rui, Yang Kai. Key node identification and risk propagation of aircraft departure control[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2023, 60(1): 93–102.
- [20] 王超, 徐楚昕, 董杰, 等. 基于 ST-GCN 的空中交通管制员不安全行为识别[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(5): 42–48.
Wang Chao, Xu Chuxin, Dong Jie, et al. Unsafe behavior recognition of air traffic controllers based on ST-GCN[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(5): 42–48.
- [21] 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: DOI: 10.1016/j.res.2022.108850.
- [22] Qiao Weiliang, Ma Xiaoxue, Liu Yang, et al. Resilience evaluation of maritime liquid cargo emergency response by integrating FRAM and a BN: a case study of a propylene leakage emergency scenario[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 247: DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110584.

作者简介: 李一可 (1997—), 女, 甘肃临夏人, 博士研究生, 主要研究方向为空中交通安全管理。E-mail: lyk1028@nuaa.edu.cn。