

航空维修人因差错分析分类模型的改进与应用

赵彦鹏¹, 段朝钧², 廖扬¹, 卜伟平¹, 柯鹏²

(1. 中国人民解放军空军军医大学 空军特色医学中心, 北京 100142)

(2. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 航空维修人因差错是影响航空安全的重要因素, 传统航空维修人因差错分析与分类模型(HFACS-ME)在维修文化、认知差错等致因维度存在覆盖局限, 对行业实际问题解释力不足。为了对传统HFACS-ME模型进行改进, 提升其对航空维修安全问题的解析能力, 通过对NASA航空安全报告系统2009—2024年的1 084起航空维修事故征候数据的研究分析, 统计分析识别出传统HFACS-ME模型在维度覆盖方面的缺陷, 并构建改进的HFACS-ME模型, 新增“维修文化”“认知/感知差错”分类并细化环境干扰因素, 并采用自然语言处理与结构方程模型对改进模型的有效性进行验证。结果表明: 新增的“维修文化”缺陷在事故中占比达15.1%, “认知/感知差错”占36.5%, “环境干扰”因素占13.0%; 改进模型显著提升了航空维修事故根因的识别精度, 在文化因素与动态认知风险的分析中表现出更强的解释力, 可为航空安全管理提供更系统的干预框架。

关键词: 航空维修人因差错; HFACS-ME模型; 事故征候统计; 维修文化; 认知/感知差错

中图分类号: X913.3

文献标识码: A

Improvement and application of a classification model for human error analysis in aviation maintenance

ZHAO Yanpeng¹, DUAN Chaojun², LIAO Yang¹, BU Weiping¹, KE Peng²

(1. Air Force Medical Center, Air Force Medical University of PLA, Beijing 100142, China)

(2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Human error in aviation maintenance is a critical factor affecting aviation safety. The traditional Human Factors Analysis and Classification System-Maintenance Extension (HFACS-ME) has coverage gaps in causal dimensions such as organizational safety culture and cognitive errors, resulting in insufficient explanatory power for practical industry issues. This study focuses on human error analysis in aviation maintenance, aiming to improve the traditional HFACS-ME model and enhance its analytical capability for aviation maintenance safety problems. Based on 1,084 aviation maintenance incident datasets from NASA's Aviation Safety Reporting System (ASRS) from 2009 to 2024, statistical analysis is conducted to identify the dimensional coverage gaps of the traditional HFACS-ME model. Targeted improvements are made to the HFACS-ME framework: new categories of organizational safety culture and cognitive/perceptual errors are introduced, and environmental interference factors are refined. Meanwhile, natural language processing and structural equation modeling are adopted to verify the validity of the improved model. The validation results indicate that deficiencies in the newly added organizational safety culture account for 15.1% of accidents, cognitive/perceptual errors account for 36.5%, and environmental interference factors account for 13.0%. The improved model significantly enhances the accuracy of root cause identification for aviation maintenance accidents, and exhibits stronger explanatory power particularly in the analysis of cultural factors and dynamic cognitive risks. The study concludes that the improved HFACS-ME model elevates its overall explanatory power by integrating cultural dimensions and technological ecological factors, provides a more systematic intervention framework for aviation safety management.

Key words: human error in aviation maintenance; HFACS-ME; incident statistics; maintenance culture; cognitive/perceptual errors

收稿日期: 2026-02-26; 修回日期: 2026-07-02

通信作者: 柯鹏(1979—), 男, 博士, 教授。E-mail: p.ke@buaa.edu.cn

引用格式: 赵彦鹏, 段朝钧, 廖扬, 等. 航空维修人因差错分析分类模型的改进与应用[J]. 航空工程进展.

ZHAO Yanpeng, DUAN Chaojun, LIAO Yang, et al. Improvement and application of a classification model for human error analysis in aviation maintenance[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

随着航空运输业的迅猛发展和机队规模的持续扩大,航空维修作为保障飞行安全的关键环节,其重要性日益凸显。据统计,约80%的航空事故与人为因素有关,其中维修差错是导致事故征候的重要原因之一^[1]。为了系统地识别和分析维修过程中的人为差错,一套切实可行的人为差错分析模型是必要的。

人为差错分类法的理念继承自事故致因理论,最早可追溯到 Heinrich 的多米诺骨牌理论。1990年,Reason^[2]提出了著名的瑞士奶酪模型,他认为事故的发生与组织环境的影响、不安全的监督管理、不安全行为的征兆、不安全行为4个层面的因素有关。之后FAA基于Reason的瑞士奶酪模型发展建立了人为差错分析与分类模型(HFACS),该模型具有很高的实践价值,将人的失误理论与实践应用相结合,是目前航空事故调查活动中被普遍接受的人因分类分析模型^[3]。结合行业场景,该模型在航空维修领域特化为航空维修人因差错分析与分类模型(Human Factors Analysis and Classification System-Maintenance Extension, HFACS-ME)。Rashid等^[4]将HFACS-ME应用于直升机事故调查中,并给出了差错概率预测思路。

但随着技术发展与工作模式转变,传统的人因差错分析方法逐渐不适用于当前产业环境,业内研究着重于差错分析理论发展,并分别从结合新兴技术、发展动态差错预测框架等方向做出了一定探索^[5-7]。比较突出的研究有:Bohrey等^[8]提出的HFACS-ME+模型新增技术生态层将5G-MRO智能维修、AR远程协作等新兴技术纳入分析框架,识别出界面认知负荷突变等新型差错机制;Wu X等^[9]构建的HFACS-SD模型包含18个反馈回路,可以模拟不同层级因素的时变效应;Olaganathan等^[10]开发的Markov-HFACS模型将人员状态划分为正常、认知超载、疲劳累积3阶段,提高了分析精度;Cohen等^[11]将人因分析与可靠性分析方法相结合,形成双轨分析路径,扩充了模型应用范围;罗晓利^[12]研究发现,亚洲航空事故中存在常见的沉默性差错,应增设非对抗性沟通失效指标。

总之,目前航空维修人为差错分析理论研究

虽在各方面皆有一定的探索与发展,但存在技术适配性差、忽视文化特质、理论模型落地难、本土化不足及系统性整合缺失等问题。一些研究虽尝试引入新理论、新技术,但普遍以西方技术生态与维修场景为基础,与我国行业适配度不足。特别是在软环境方面,现有模型多基于西方个体主义文化背景,对亚洲尤其是我国维修场景中的文化特质研究不足。国内,虽有研究指出沟通失效问题,但未系统融入模型架构。因此,为切实提升我国航空维修安全水平,亟需构建融合我国技术生态、文化特质与管理模式的人为差错分析模型。

本文以2009年至今与航空维修相关的事故或征候数据为基础,通过案例分析总结传统模型局限性,并做出针对性改进,形成更贴合产业实践的人为差错分析模型,并使用改进模型进行事故根源分析,以揭示当前航空维修领域的重点问题。

1 基于HFACS-ME事故数据分析

1.1 HFACS-ME基础模型概述

航空维修人因差错分析与分类模型是人因差错分类理论HFACS在航空维修领域中的专门应用^[13-15]。HFACS-ME分类从4个层面分析事故原因:监督条件、维修人员状态、工作条件和不安全行为。其中不安全行为是与事故紧密相关的首要因素,即主动失误,而其他3个层面的因素则是间接导致事故发生的潜在条件。HFACS-ME分类的主要优点包括其系统的方法和对导致不良后果的各种因素进行的全面检查。此外,它可以用来分析维修过程中的偏差,识别改进机会,揭示潜在问题。HFACS-ME能够有效分析事故中存在的潜在条件和主动失误的本质及其关系,为干预策略的发展提供坚实的基础。

1.2 分析数据来源与处理

本研究选择美国国家航空航天局NASA的ASRS航空安全报告系统作为数据来源,选取2009年1月—2024年4月与航空维修相关的由人因差错导致的共计1 084起事故征候。

ASRS数据库数据是航空作业人员上传后由两位分析员进行事故致因分类与整理的,若涉及人因差错,则需要两位分析员独立判定差错类别,

并记录在数据表格中。出于主观因素,两位分析员给出的差错类别一般不同,在正式分析前,需对数据进行预处理,解决两位分析员之间的差异。由于原始数据量巨大,且填报的事故信息存在不完整的现象,由人工逐一复核是不现实的。出于对数据全面性的考虑,为尽可能减少分析过程中对事故相关差错的遗漏,本研究选择取两位分析员给出的人因差错类别的并集作为研究数据。事故数据中涉及的人因差错按照 ASRS 数据库的人因差错分类结构进行类别标识,需将其转换为 HFACS-ME 的差错分类。HFACS-ME 模型中共有 10 个二级因素、38 个三级因素,考虑到统计结果的可信度与代表性,每个分类的事故数据不宜过少。最终选择将 ASRS 差错分类映射到 HFACS-ME 的二级因素。

HFACS-ME 的人因差错分类是基于 Reason 提出的瑞士奶酪模型构建的。该模型将人因错误划分为直接因素和间接因素,并强调人与不同系统对象之间的交互作用。HFACS-ME 在此基础上进一步细化为 10 个二级因素和 38 个三级因素,以更精准地捕捉航空维修活动中的多层次因果链。相对而言,ASRS 数据库的人因差错分类是由航空业多年实践经验归纳而成,虽同样体现了直接因素如注意力分散与间接因素如时间压力之间的关联,但其分类体系并未严格遵循瑞士奶酪模型的层级结构,因而在理论完整性上存在一定局限,难以形成与 HFACS-ME 完全对应的映射关系。

鉴于上述差异,本文采用专家问卷的方式构建两者之间的映射逻辑。对每一条 ASRS 差错标签,邀请航空维修与安全领域的专家学者列举所有可能关联的 HFACS-ME 二级因素。映射原则采用宽容式匹配,即只要专家认为某 HFACS-ME 类别可能与该 ASRS 差错有关,即予以对应。具体来说,即若存在直接对应关系如“沟通障碍”之于“沟通合作”则直接对应;若无直接对应关系如“混乱/理解不清”,则将其当作某差错案例进行分析,逐级分析其直接、间接因素,例如此差错可能与组织层面的流程设计缺陷、监督层面的指导不足,以及执行层面的技能或认知偏差有关。此做法虽不能保证映射的准确性,但能够最大程度地避免因单一对应导致的遗漏或误判,最终获取的映射关

系如表 1 所示。

表 1 ASRS 与 HFACS-ME 人因差错映射关系
Table 1 Mapping relationship between ASRS and HFACS-ME human error

ASRS 数据人因分类	对应 HFACS-ME 分类
沟通障碍	沟通合作
混乱/理解不清	组织因素,监督因素,维修差错
注意力分散	监督因素,生理状态,维修差错
疲劳	工作设备,生理状态,维修违规
人机交互	工作设备,维修差错
生理因素	生理状态
态势感知	工作环境,工作设备,维修差错
时间压力	组织因素,监督因素,维修违规
人员培训/资质	组织因素,人员准备
故障排除	监督因素,维修差错,维修违规
工作量	组织因素,生理状态,维修差错

1.3 统计结果分析

2009 年 1 月—2024 年 4 月每年航空维修相关事故/事件数量如图 1 所示。具体到各差错相关事故或征候数统计结果如表 2 数据所示,2009—2010 年事故数显著上升,2010 年达到峰值共计 126 起,随后 7 年呈下降趋势;2017—2024 年数据波动,2022 年 91 起与 2024 年截至 4 月 11 起分别为近年高低点。但 2024 年数据覆盖率有所不足,仅考虑全年数据则 2021 年 33 起为近年最低点。整体来看,2009—2024 年事故数呈波动下降趋势,在 2019 与 2022 年有明显回升,反映行业人因管理措施逐步起效,但高频风险仍需持续关注。针对各二级差错相关事故数与事故万时率的统计结果如图 2 所示。

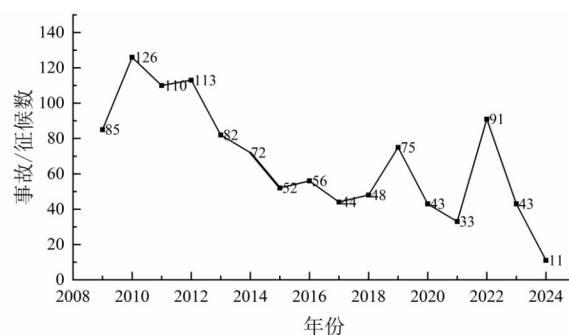


图 1 2009 到 2024 年 4 月航空维修相关事故数
Fig. 1 Number of aviation maintenance-related accidents from 2009 to April 2024

表2 HFACS-ME二级分类相关事故数逐年统计

Table 2 Annual statistics of accidents related to HFACS-ME level-2 categories

年份	组织因素	监督因素	生理状态	沟通合作	人员准备	工作环境	工作设备	工作空间	维修差错	维修违规
总计	615	825	278	672	389	760	90	760	909	232
2009	52	68	38	55	21	71	4	71	78	13
2010	86	105	55	97	31	114	1	114	119	25
2011	83	96	36	87	37	98	1	98	106	27
2012	75	98	41	81	39	91	3	91	104	38
2013	52	63	27	61	30	70	2	70	78	10
2014	41	50	13	52	20	41	1	41	57	7
2015	30	37	11	39	12	35	1	35	42	6
2016	20	34	8	17	15	32	1	32	43	11
2017	12	17	2	16	7	28	1	28	34	5
2018	13	25	6	16	18	22	0	22	33	14
2019	37	63	13	30	45	18	6	18	46	7
2020	13	27	8	17	14	14	5	14	26	11
2021	21	29	6	22	15	20	17	20	27	13
2022	60	78	9	60	59	77	31	77	80	35
2023	19	31	4	20	24	27	16	27	32	9
2024	1	4	1	2	2	2	0	2	4	1

从表2可以看出:高频差错类别集中在维修人员差错(909例,41.6%)、监督因素(825例,37.9%)、工作环境与空间(760例,34.9%),组织因素(615例,28.3%)与沟通合作(672例,30.9%),其余类别占比均低于18%。从数据逐年变化趋势看,各差错相关事故除“生理状态”在2022年万时率均有较大幅度提升。且“人员准备”与“工作设备”类事故万时率在2019年之后上升趋势最为显著,其余类事故率相对平稳或上升较小。2022年航空维修相关事故频发,该现象说明此期间航空维修领域出现了大规模的系统性管理失效。结合时间背景,此时正处于全球疫情后期或恢复期,工作人员可能因之前的停航/减班导致技能生疏、熟练度下降而无法妥善应对航班量的恢复。另一方面,在经历了2015—2021年较长的安全平稳期后,组织内部可能产生了安全疲劳心理,导致对规章制度的执行力度下降。在随后的2023年,业界工作能力恢复使得事故发生次数减少。另外在2019年组织、监督与人员准备等差错相关事故万时率出现了一次高峰,这很可能与当年年末疫情暴发导致的工作混乱与人员健康状态有关。若不考虑近些年疫情的影响,研究各类型事故的发生频率与变化趋势则整体统计结果可总结如下:

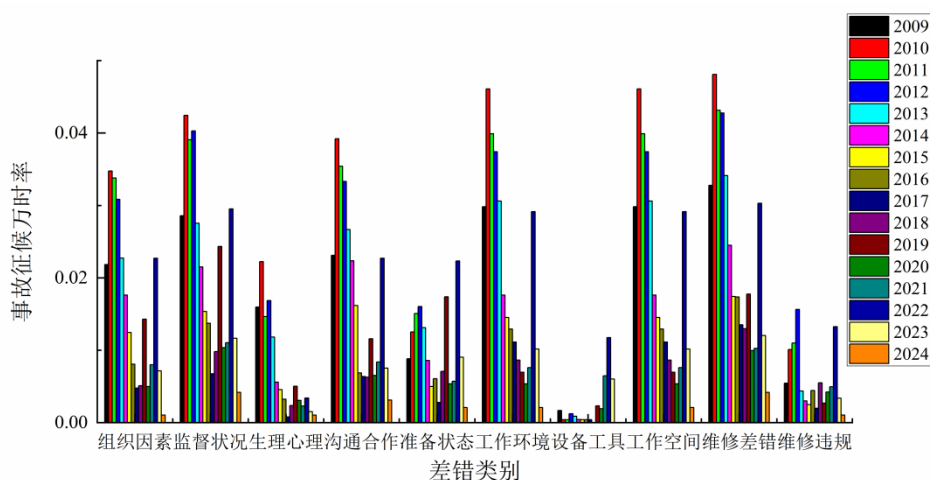


图2 指定差错类别发生万时率逐年统计(单位:起/万小时)

Fig. 2 Annual statistics of occurrence rates per 10,000 hours for specified error categories

1) 人员准备类事故如培训不充分、技能资质不足等在2009—2017年持续下降,但2018年后波动上升,2022年达峰值59例,反映近年行业快速技术迭代可能导致培训体系滞后。

2) 工作设备类事故如设备损坏、不可得等在2009—2018年递减,2019年后显著反弹,以年均12%速率上升,2021与2022年分别达17例、31例。该结果表明智能设备引入可能伴随人机交互设计

缺陷。

3) 工作环境与工作空间类事故数近年也有一定的上升趋势,这可能与新技术设备引入的空间适配问题以及组织管理有关,需要关注维修人员的活动环境与工作空间安排。

4) 除人员准备与设备状态外的其余问题如生理状态、人员违规等整体呈下降趋势,但2022年出现了系统性的管理问题导致各类事故激增,需警惕特殊时期人员准备与工作管理风险。

在使用传统模型进行部分案例分析过程中发现,传统HFACS-ME模型存在两大解释缺口:

1) 维修文化缺失。研究表明32%的维修人员差错背后存在隐瞒故障、监督宽松等文化现象,如某航司因绩效考核压力长期漏报工具校验异常,最终导致17起连锁差错^[4]。但原模型中仅可将此归因为个人问题,忽略了文化软环境对人的塑造作用。

2) 设备设计人因缺陷。人机交互不良如触控界面误操作在“工作设备”类事故中占比58%^[16]。但原模型未将此类技术因素独立分类,而是专注对工作人员行为的纠正。

1.4 模型局限性

数据分析表明,HFACS-ME模型的四级框架组织因素、不安全监督、不安全行为的前提条件、不安全行为仍具有解释力,能有效识别事故背后的组织、监督、环境及人员状态等间接致因。然而,面对航空维修领域的技术革新与文化多样性,其局限性逐渐凸显,主要体现在以下3方面:

1) 组织层面的文化维度缺失

传统HFACS-ME脱胎于早期HFACS理论,未充分纳入安全文化对维修行为塑造作用。已有研究表明,亚洲文化强调诸如和谐、面子与避免冲突等,在职场和团队沟通中普遍出现间接、含蓄的表达方式,导致成员在面对潜在错误时倾向保持沉默,而非主动报告或纠正,这在航空维修、飞行操作等高风险行业尤为突出。例如,在东南亚航司的127起程序偏离事故中,68%源于“权威服从”文化导致的隐患隐瞒,而原模型将此类行为归为“个体违规”,忽视了组织文化对风险感知的系统性影响如追责压力导致的安全沉默^[17]。

2) 技术生态的动态适应性不足

模型的静态分类框架难以应对智能维修技术

带来的新型风险。5G-MRO、AR远程协作等技术引入后,界面认知负荷突变如多模态信息干扰导致的差错占比达19%,但原模型“工作环境”仅覆盖物理空间因素,未包含数字交互风险^[18-20]。波音787维修案例中,备件供应链延迟通过监督失效、任务超时、疲劳累积的动态链引发连锁差错,但原模型缺乏时变效应分析模块,无法捕捉长周期因果关系如培训投入的滞后效应需6个月显现。

3) 认知差错的解析颗粒度粗糙

三级分类存在语义重叠与维度缺失,例如,“判断/决策差错”同时涵盖信息感知失误与逻辑推理错误,导致干预措施无法精准定位认知瓶颈。NASA眼动追踪实验表明,噪声>85 dB时视觉搜索效率下降37%,此类感知层失误需独立分类^[18]。原模型忽视了行为模式的系统性成因。

2 HFACS-ME改进模型

2.1 改进思路

在组织监管层级,新增“维修文化”作为核心指标,涵盖文化对维修人员风险感知与行为选择的塑造作用。这种问题在KLM工程维修部事件中尤为突出:该公司实行占薪资25%的零差错月度奖金制度,维修人员因担忧追责压力,在2003—2006年间系统性隐瞒49起机身蒙皮微裂纹异常中的38起,将其标记为非事件规避上报,导致异常数据未被追溯审查。原模型将其归为“个体违规”,改进后的HFACS-ME通过“维修文化”指标揭示了系统性管理缺陷。该事件后,EASA 19家试点航司推动无惩罚报告制度,结果表明隐患早期干预率提升42%,验证了维修文化指标对风险预警的价值。改进模型中维修文化的引入目的在于将差错分析方向从个体归因导向系统追责,重视安全文化对维修人员行为潜在塑造作用。

在“维修差错”子类中新增“认知/感知差错”并将其与“判断/决策差错”区分开,认知/感知差错指作业人员在信息处理过程中感知、注意力分配、逻辑整合等环节的失误,主要侧重于信息获取与注意力资源分配方面;判断/决策差错则侧重于信息整合与决策制定,如在多个故障并发时,错误选择处理优先级。

另外在“工作环境”子类中细化了环境因素,将噪音、振动等非视觉干扰源定义为“环境干扰”,弥补了原版模型仅涵盖视觉干扰的缺陷,推动工程优化措施如配置防振平台而非单纯依赖技能培训。

2.2 改进的HFACS-ME模型

最终得到改进版 HFACS-ME 模型的差错分类,具体差错分类如表 3 所示。改进模型由 3 层级,共 36 个三级人因差错类别所构成。模型统一了差错文本描述风格,完善了分类维度。

表 3 改进的 HFACS-ME 模型差错分类
Table 3 Error classification of the modified HFACS-ME

第一层级	第二层级	第三层级
不安全维修行为	维修差错	技能差错
不安全维修行为	维修差错	决策差错
不安全维修行为	维修差错	知觉差错
不安全维修行为	维修违规	习惯性违规
不安全维修行为	维修违规	处境违规
不安全维修行为	维修违规	个人利益违规
不安全维修行为	维修违规	蓄意违规
维修人员状态	生理心理	不良生理状态
维修人员状态	生理心理	不良心理状态
维修人员状态	生理心理	体质智力受限
维修人员状态	沟通合作	沟通不畅
维修人员状态	沟通合作	协作不足
维修人员状态	沟通合作	不适应
维修人员状态	准备状态	实施准备不足
维修人员状态	准备状态	状态准备不足
维修人员状态	准备状态	工作前违规
维修环境状况	自然环境	光线不佳
维修环境状况	自然环境	气候恶劣
维修环境状况	自然环境	环境威胁
维修环境状况	维修空间	空间受限
维修环境状况	维修空间	空间遮挡
维修环境状况	维修空间	空间不可达
维修环境状况	设备航材	设备工具风险
维修环境状况	设备航材	航材耗材风险
维修环境状况	设备航材	设计问题
管理监督	复查监察	复查监督不足
管理监督	复查监察	问题不纠正
管理监督	复查监察	监督操作不当
管理监督	复查监察	违规授权
管理监督	组织管理	政策程序不完善
管理监督	组织管理	组织指挥不科学
管理监督	组织管理	资源管理不合理
管理监督	组织管理	培训带教不充分
管理监督	组织管理	清查整治不落实
管理监督	维修文化	维护作风不实
管理监督	维修文化	安全文化欠佳

3 改进模型的验证与应用

改进的 HFACS-ME 模型主要在三级差错类别上做了修改,整体框架与原模型一致,建立了从组织管理到个体行为的因果链。模型应用主要包括事故前预防与事故后调查两个角度。事故前预防主要是针对各层级差错类别一一针对进行防控。事故后调查则是从直接因素即不安全行为层级出发,按照模型框架逐一追根溯源进行根因分析,构建事故完整因果链进而针对性给出防控措施。

本节基于 NASA ASRS 数据库 2009—2024 年 1 084 起航空维修事故数据,采用改进的 HFACS-ME 框架进行根因分析。通过自然语言处理与结构方程模型方法,探讨三级差错类别的单因素分布规律,展示模型的应用方向。

3.1 数据处理

本章节从事事故数据本身出发,利用自然语言模型 DeepSeek 在包括时间、地点、事故经过、涉事人员等信息中识别关键信息,提取事故文本中的实体如未校准力矩扳手和行为动词如隐瞒、误判,采用关键词的形式将事故分类到改进的 HFACS-ME 三级差错类别上,进而可以进行更精细、更深入的统计工作,该部分数据处理流程图如图 3 所示,主要步骤为:

1) 对大模型进行训练,主要训练内容为差错识别关键词与事故/事故征候辨识。首先描述大模型处理数据的整体逻辑方法,即先分别输入与各类差错相关的若干案例,要求大模型总结这些案例描述中所存在的共性词组即关键词。

2) 从事事故征候数据中抽取 200 条作为样本,人工标注形成标注集,采用分组迭代的方式。将样本分为十组,要求大模型根据已总结的关键词识别案例中涉及的差错类型。逐步迭代直至大模型对差错识别的准确率达到 85% 以上。

3) 使用大模型正式进行数据处理。将所有事故征候数据以表格形式输入,要求大模型按照训练好的逻辑进行处理并进行输出。

各差错关联的部分关键词如表 4 所示,关键词处理逻辑如图 4 所示。

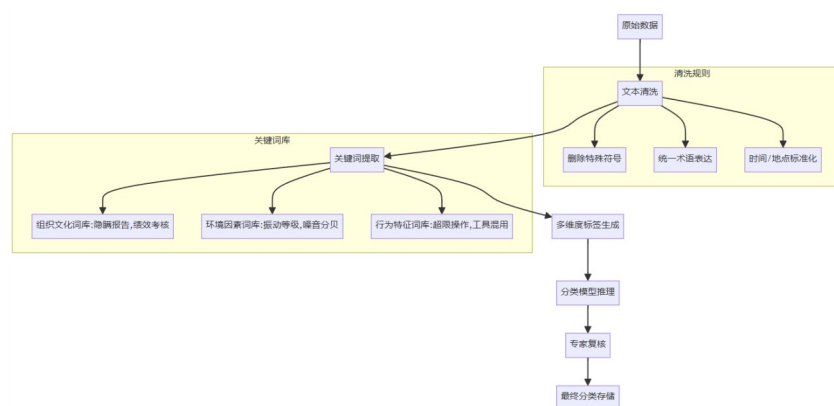


图3 事故数据统计流程图

Fig. 3 Flowchart of accident data statistics

表4 部分关键词对应关系示例

Table 4 Examples of correspondence between selected keywords and errors

人因差错	关键词描述
技能差错	疏忽, 安装错误, 拆卸错误, 测试错误, 检查错误, 测量错误, 操作错误
决策差错	决定, 判断, 评估, 选择, 错误判断, 误判, 错误决策, 不正确的决定
知觉差错	误读, 看错, 听错, 误解, 错误理解, 错误解读, 视觉错误, 听觉错误
习惯性违规	习惯性, 常规, 通常, 一贯, 经常, 反复
处境违规	情况, 环境, 条件, 压力, 时间紧迫, 匆忙, 紧急
个人利益违规	个人, 利益, 私利, 个人原因, 个人因素
蓄意违规	故意, 蓄意, 有意, 明知故犯, 刻意
不良生理状态	疲劳, 不适, 生病, 身体不适, 体力不支
不良心理状态	压力, 焦虑, 紧张, 分心, 注意力不集中, 精神状态
体质智力受限	能力, 知识, 技能, 经验, 培训, 资质, 能力不足, 知识不足
沟通不畅	沟通, 交流, 联系, 信息传递, 通知, 告知, 沟通错误, 信息错误
协作不足	协作, 合作, 团队, 配合, 协调, 协作错误, 配合错误
不适应	适应, 熟悉, 了解, 掌握, 适应能力, 不熟悉, 不了解
实施准备不足	准备, 计划, 安排, 准备不足, 计划不周, 安排不当
状态准备不足	状态, 准备, 就绪, 状态不佳, 准备不足
工作前违规	工作前, 开始前, 准备阶段, 工作前检查, 开工前
光线不佳	光线, 照明, 亮度, 暗, 光线不足, 照明不良
气候恶劣	气候, 天气, 环境, 恶劣, 天气条件
环境威胁	环境, 威胁, 危险, 风险, 环境风险
空间受限	空间, 位置, 空间不足, 空间限制, 空间狭小
空间遮挡	遮挡, 阻碍, 视线, 视野, 遮挡物
空间不可达	可达, 接近, 接触, 无法接近, 无法到达
设备工具风险	设备, 工具, 工具风险, 设备风险, 工具问题
航材耗材风险	航材, 耗材, 材料, 部件, 零件, 材料风险
设计问题	设计, 设计缺陷, 设计问题, 设计错误
复查监督不足	复查, 监督, 检查, 审查, 监督不足, 检查不足
问题不纠正	纠正, 解决, 修复, 不纠正, 不解决, 不修复
监督操作不当	监督, 操作, 指导, 监督不当, 操作不当
违规授权	授权, 许可, 批准, 违规授权, 不当授权
政策程序不完善	政策, 程序, 流程, 制度, 政策不完善, 程序不完善
组织指挥不科学	组织, 指挥, 管理, 组织不当, 指挥不当
资源管理不合理	资源, 管理, 分配, 资源管理, 资源分配
培训带教不充分	培训, 带教, 教导, 培训不足, 带教不足
清查整治不落实	清查, 整治, 落实, 清查不落实, 整治不落实
维护作风不实	维护, 作风, 态度, 维护作风, 工作态度
安全文化欠佳	安全, 文化, 意识, 安全文化, 安全意识



图4 关键词处理逻辑
Fig. 4 Keyword processing logic

3.2 模型应用案例

使用改进模型的事故或征候根因分析结果如表5所示。

表5 改进的HFACS-ME三级差错类别事故数据统计
Table 5 Results of accident statistics using the modified HFACS-ME

改进的HFACS-ME差错类别	案例数	百分比
政策程序不完善	147	13.5%
组织指导偏差/组织筹划不充分	89	8.2%
资源配给不佳	203	18.6%
管理问题	118	10.8%
维修文化	165	15.1%
问题未纠正/纠错不彻底	238	21.8%
监督不足	94	8.6%
监督操作不当	76	7.0%
违规授权	127	11.6%
不良生理状态	132	12.1%
不良心理状态	87	8.0%
体质性格智力限制	53	4.9%
不良沟通	165	15.1%
过度/缺乏自信	72	6.6%
适应性/灵活性不足	48	4.4%
培训不充分	98	9.0%
技能资质不足	76	7.0%
工作前违规	64	5.8%
光线/照明不佳	76	7.0%
气候恶劣	63	5.8%
环境危害	89	8.2%
环境干扰	142	13.0%
空间受限	41	3.8%
空间阻塞/场所混乱	37	3.4%
空间不可达	29	2.7%
损坏	118	10.8%
不充分/不合适/不可得	165	15.1%
过期/未证明/未鉴定	92	8.4%
技能/规则差错	203	18.6%
认知/感知差错	398	36.5%
判断/决策差错	142	13.0%
习惯性违规	165	15.1%
偶发性违规	53	4.9%
变通规则	72	6.6%
蓄意违规	29	2.7%

航空维修事故中涉及维修文化缺陷的问题占比达15.1%，例如隐瞒事故压力、匿名报告机制缺失等，这暴露了传统HFACS模型在“组织影响”分类上的理论缺陷，佐证了改进的HFACS-ME模型改进的合理性与必要性。原模型未区分硬件资源分配与文化软环境的差异，导致实际管理中难以针对性地建立心理安全机制或优化追责制度。

在环境层级中，设备工具不充分/不合适/不可得如工具未校准和环境干扰振动、噪声分别占据主导。改进的HFACS-ME旨在利用人因分析结果引导工程设计优化，强调通过防震、降噪等工程措施降低相关事故发生概率，而非单纯依赖对维修人员的技能培训。

针对不安全维修行为，认知/感知差错的占比显著高于其他因素。传统模型未区分信息感知错误与决策逻辑错误，易导致干预措施失效。改进模型基于注意力资源理论分离两类差错，分别对应信息获取与处理、形势判断与决策环节，倾向于精准识别差错类型进而针对性提出改进措施。

统计结果表明，改进的HFACS-ME模型新增的差错分类“维修文化”“环境干扰”“认知/感知差错”等问题发生频率较高。这说明改进的HFACS-ME模型相对原模型的改进是基于行业高频问题的，扩充了差错覆盖范围。

3.3 结构方程验证

本文对模型进行了结构方程验证，主要是验证性因子分析。具体分析步骤如下：

1)将事故征候与差错类别对应表转化为矩阵形式，形成事故征候—差错类别数据矩阵表格以作输入。

2)建立分析模型，定义潜变量并指定变量间的逻辑关系，包括旧模型与新模型。

3)使用大模型按分析模型进行分析计算，输出拟合系数。

模型应以三级差错类别为观测对象，其中组

织监管、人员状态、维修环境三个层级的差错类别为外生潜变量,不安全维修行为层级差错为内生潜变量,构建模型路径。从宏观层面来说,组织监管影响人员状态、维修环境与不安全维修行为;人员状态受组织监管与维修环境影响,同时影响不安全维修行为;维修环境受组织监管影响,同时影响不安全维修行为。整个模型建立目标是为了验证各路径之间的因果关系,改进模型相对原模型添加了维修文化、环境干扰等潜变量,将维修差错分为技能/规则差错、认知/感知差错、判断/决策差错三个潜变量,从而构建了新的结构方程路径。

改进模型中的36个人因差错类别多为难以量化其发生概率或严重程度的变量,无法直接以矩阵的形式表达。为进行结构方程验证,不计差错严重程度,将该类差错发生记为1、未发生记为0,生成 $1\ 084 \times 36$ 的0/1数据矩阵。由于该方法涉及到对事故/征候中第三级差错的鉴别,需要借助前节对事故征候数据的分析结果。基于观测数据计算其样本协方差矩阵,作为模型拟合的目标。采用最大似然估计法进行模型求解。

经统计计算,改进的HFACS-ME模型拟合指标RMSEA为0.048、比较拟合指数CFI为0.94、复判定系数 R^2 为0.71,这表示71%的不安全行为可由模型中的潜变量解释。而原HFACS-ME模型复判定系数 R^2 为0.48,显著低于改进模型。即改进后HFACS-ME模型相较原模型对不安全行为的解释程度提升了48%。SEM验证结果表明改进模型拟合精确、提升显著,整体处于可接受水平。

4 结 论

1) 本文研究基于事故数据统计,系统揭示了传统HFACS-ME模型在差错分类与描述上的局限性。

2) 本文对传统模型进行改进,形成改进的航空维修人因差错分析分类模型,克服了原有缺陷。

3) 回顾了近15年与航空维修相关的事故征候,识别出维修文化、工作违规、沟通合作等高频差错类型。

参考文献

- [1] Tong E K, Feng R P, Tang J W. Human errors study based on the professionalization of social division[C]// Proceedings of the 2017 7th International Conference on Education, Management, Computer and Society (EMCS 2017). Shenyang, China: Atlantis Press, 2017: 1-9.
- [2] Reason J. Managing the risks of organizational accidents [M]. London, UK: Routledge, 1990.
- [3] Shappell S A, Wiegmann D A. The human factors analysis and classification system-HFACS: DOT/FAA/AM-00/7 [R]. Washington, DC: U. S. Department of Transportation, FAA, 2000.
- [4] Rashid H S J, Place C S, Braithwaite G R. Helicopter maintenance error analysis: Beyond the third order of the HFACS-ME [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2010, 40(6): 636-647.
- [5] 孙志强, 史秀建, 李欣欣, 等. 基于认知模型的人为差错分类方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1): 73-77, 93. Sun Zhiqiang, Shi Xiujian, Li Xinxin, et al. A framework for classifying human errors based on cognitive model [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1): 73-77, 93. (in Chinese)
- [6] Braun M, Schmidt A. NLP-HFACS: Automated risk signal extraction from maintenance logs using BERT [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 60: 102312.
- [7] Airbus. Neuro-HFACS: Cognitive load threshold detection via EEG in aircraft maintenance: TR-2024-007 [R]. Toulouse, France: Airbus, 2023.
- [8] Bohrey R, Kumar S, Lee J. HFACS-ME+: a dynamic framework for maintenance error analysis in smart MRO [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 241: 108768.
- [9] Wu X, Chen L, Wang H. HFACS-SD: A system dynamics approach for aviation maintenance risk prediction [J]. Safety Science, 2023, 158: 105939.
- [10] Olaganathan R, Smith T. Markov-HFACS: A stochastic model for human error state transition in maintenance tasks [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2024, 54(2): 213-221.
- [11] Cohen J, Fleming K. Integrating HFACS-ME and CREAM for aviation accident analysis: A case study of SpaceX ground operations [J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2015, 86(9): 789-796.
- [12] 罗晓利. 人因(HF)事故与事故征候分类标准及近十二年中国民航HF事故与事故征候的分类统计报告[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(5): 55-62. Luo Xiaoli. Categorization norm for human factor accidents

- and accidental signs and the statistics of China civil aviation in recent twelve years [J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(5): 55-62. (in Chinese)
- [13] FAA. Human factors guidelines for aircraft maintenance manuals: AC 120-77B[S]. US: FAA, 2024.
- [14] International Air Transport Association. Global aviation maintenance human factors survey 2024: GAM-HF-2024 [R]. Montreal, Geneva: International Air Transport Association, 2024.
- [15] 刘凤强, 孙志强, 谢红卫, 等. 航空维修人为差错影响因素分析中的模糊层次分析法[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(7): 43-48.
- Liu Fengqiang, Sun Zhiqiang, Xie Hongwei, et al. Analysis of human error influence factors in aviation maintenance based on group fuzzy analytical hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(7): 43-48. (in Chinese)
- [16] 武耀罡, 徐建新, 马超, 等. 基于改进HFACS的飞机维护维修人为因素分析[J]. 中国民航大学学报, 2018, 36(5): 43-47.
- Wu Yaogang, Xu Jianxin, Ma Chao, et al. Human factors analyses in aircraft MRO based on improved HFACS [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(5): 43-47. (in Chinese)
- [17] 陈勇刚. 风险矩阵在民航机务维修质量风险管理中的应用 [J]. 工业工程与管理, 2014, 19(1): 138-142.
- Chen Yonggang. Application of risk matrix in civil aviation maintenance quality risk management [J]. Industrial Engineering and Management, 2014, 19(1): 138-142. (in Chinese)
- [18] 李孟杰, 孙瑞山. 基于认知可靠性的飞行差错影响因素体系的构建[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(12): 148-154.
- Li Mengjie, Sun Ruishan. Establishment of impact factor system for flight error based on cognitive reliability[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(12): 148-154. (in Chinese)
- [19] 陈高杰, 杨晖. 基于HFACS的航空器维修不安全行为研究 and 应用[J]. 航空维修与工程, 2022(3): 66-68.
- Chen Gaojie, Yang Hui. Research and application of aviation maintenance unsafe act based on HFACS [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(3): 66-68. (in Chinese)
- [20] 贺鹏程. 人的可靠性分析方法及其在军事活动中的应用 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31(12): 25-29.
- He Pengcheng. Human reliability analysis methods and the application in military activities [J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(12): 25-29. (in Chinese)

(编辑:马文静)