

中文引用格式:刘俊杰,贺俊锋. 机务维修人员自愿报告事件风险因素分析[J]. 中国安全科学学报,2025,35(10):8-16.

英文引用格式:LIU Junjie, HE Junfeng. Risk factors of voluntary incident reporting by aircraft maintenance personnel[J]. China Safety Science Journal,2025,35(10):8-16.

机务维修人员自愿报告事件风险因素分析*

刘俊杰 副教授, 贺俊锋

(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1034

资助项目:民航局安全能力建设项目(HA202509)。

【摘要】 为有效防范民航机务相关事件的发生,以2001—2023年美国航空安全报告系统(ASRS)数据库2 687起机务维修人员自愿报告事件为样本,采用CiteSpace等软件分析工作环境因素、人的因素等14类风险因素,运用UCINET、Gephi等软件挖掘各因素间强耦合关系。结果表明:在9类单风险因素中,起落架系统运行故障、光线不足、雨等(频数分别为103、64、45)为关键风险因素;在5类耦合风险因素中,机身维护、沟通中断、人的因素等(共现频次分别为1 646、1 448、1 206)为关键风险因素;全风险因素耦合关系分析发现,机身维护与动力装置维护耦合程度(权重值为3 568)最强,程序与起落架系统不当操作有较强的耦合关系(权重值为118)。

【关键词】 机务维修人员; 自愿报告事件; 关键风险因素; CiteSpace; 耦合关系

Risk factors of voluntary incident reporting by aircraft maintenance personnel

LIU Junjie, HE Junfeng

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

Abstract: In order to effectively prevent the occurrence of civil aviation maintenance related events, a sample of 2 687 voluntary reports from the US Aviation Safety Reporting System (ASRS) database (2001–2023) was examined. Fourteen risk factors, including work environment and human factors, were analyzed using CiteSpace. Strong couplings between these factors were identified through UCINET and Gephi. The results show the following findings: Among the nine single risk factors, key risks are identified as landing gear system malfunctions, poor lighting, and rain (with frequencies of 103, 64, and 45, respectively). Among the five coupled risk factors, key risks are found to be airframe maintenance, communication breakdown, and human factors (with co-occurrence frequencies of 1 646, 1 448, and 1 206, respectively). The analysis of all risk factor couplings reveals that the strongest coupling exists between airframe maintenance and powerplant maintenance (with a weight value of 3 568). Additionally, a significant coupling relationship is observed between procedures and improper landing gear system operations (with a weight value of 118).

Keywords: aircraft maintenance personnel; voluntary incident report; key risk factors; citespace; coupling relationships

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0008-09; 收稿日期:2025-06-17; 修稿日期:2025-08-17

** 通信作者:贺俊锋(1997—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为民航运行安全与人因工程。E-mail:h18559442916@126.com。

0 引言

航空安全自愿报告是收集第一手安全隐患资料的有效方式之一^[1]。机务维修人员自愿报告记录着机务维修保障过程中大量的风险因素信息。这些内容丰富,但具有隐蔽性和滞后性,甚至可能引发灾难性后果。因此,深入分析以报告人为第一视角的机务维修人员自愿报告事件风险因素,可为有效防范相关风险提供基于数据的决策参考。

针对机务相关不安全事件因素的研究,国内外学者主要以事故、不安全事件以及维修差错数据为研究对象。有学者运用统计分析与民航机务维修人因分析分类系统模型等传统分析工具,认为事故中最常见的维修差错是未检查或检查不当,涉及的风险因素主要有流程和文件不足、设计不足,主/尾旋翼、发动机等关键部件^[2];此外,注意力和记忆错误、情景意识不足、技术/技能问题等是维修相关事故的关键风险因素^[3]。运用复杂网络、主题模型等理论或工具分析维修不安全事件风险因素,认为部件损伤、零部件松脱、错装是关键不安全事件,偏离工作手册施工、未落实工作程序要求是关键风险因素^[4];发现人员认知存在偏差、维修过程违规作业、飞机部件出现故障、维修记录不完善等是此类事件的关键风险因素^[5];双因素耦合中的人与管理风险耦合值最大^[6];关键因果路径为监督不当、作业环境、习惯性违章^[7]。运用灰关联熵等量化方法分析维修差错数据致因与影响因素,认为计划与监督、维修环境、身心因素为关键致因^[8];维修差错强关联性影响因素包括团队因素与技能因素、团队因素与行业规章因素^[9]。上述研究对机务维修相关事件风险因素分析主要为单因素分析,对多因素、耦合因素的挖掘分析尚有欠缺,较少涉及自愿报告事件中的多类型风险因素。

机务维修活动是复杂的系统工程,涉及人员、设备工具、生产环境、自然环境和组织管理等诸多相互影响的风险因素,决定了机务类事件具有多因素耦合特征^[6]。相比于事故等高后果事件,机务维修人员自愿报告事件往往是无后果事件或情形,事件中的风险因素往往隐蔽、不易被发现。因此,需要分析无后果的自愿报告事件,挖掘其中隐藏的风险因素及其耦合关系,可避免无后果事件演变成高后果事件。

鉴于此,笔者拟采用美国航空安全报告系统(Aviation Safety Reporting System, ASRS)数据库中的机务维修人员自愿报告事件为样本,基于已有文

献等内容确定样本事件风险因素类型,结合样本事件内容特点,将样本事件中的风险因素分为单风险因素与耦合风险因素,运用 FineBI6.0 软件从频数的角度挖掘与分析单风险因素项的关键因素,运用 CiteSpace 软件从共现频次的角度挖掘与分析耦合风险因素项的关键因素,采用 UCINET 与 Gephi 软件构建全风险因素耦合网络,从权重值的角度挖掘与分析因素间的强耦合关系,以期为预防此类事件的再次发生提供决策与建议。

1 样本选取及风险因素类型确定

1.1 自愿报告事件样本选取

考虑到自愿报告数据库的开放性和内容的全面性,选择美国 ASRS 数据库中的机务维修人员自愿报告事件作为研究样本,以“报告人(Detector)”模块下的“维修(Maintenance)”为关键词检索出 2 687 起样本事件,时间范围为 2001—2023 年。样本主要来自机务维修人员自愿报告。

1.2 确定样本事件风险因素类型

为分析样本事件中风险因素,基于文献[10–12],依托人为、设备、环境和管理等安全系统工程理论筛选样本数据因素项,结合机务维修人员的工作特点确定风险因素类型。

为更好地进行样本数据分析,对数据进行规范化处理。

1) 数据离散化处理。根据《民用航空气象地面观测规范》^[13]规定的能见度增量报告等级,将能见度数值因素进行离散化处理为 3 个区间,[0,5)、[5,10]和>10 m。

2) 参照文献[14],将机务维修人员工作年限划分为[0,3]、(3,6]、(6,10]、>10。得到最终风险因素类型及其内容见表 1。

表 1 样本事件风险因素

Table 1 Risk factors of sample events		
序号	风险因素类型	风险因素
1	天气因素/ 能见度	雨; [5,10](能见度); 雪等
2	工作环境 因素	过高的湿度; 眩光; 光线不足等
3	光照	黎明; 白天; 黄昏等
4	维修状态/ 涉及的维护项目	修理; 测试; 安装等
5	航空器部件	涡轮发动机; 应急滑梯; 主起落架等

续表 1

序号	风险因素类型	风险因素
6	制造商	波音; 空客; 普惠等
7	部件问题	设计; 运行故障; 失效等
8	人员所在位置	吊架/基地; 登机门/停机坪/航线; X 航空器等
9	所在航空器内位置	驾驶舱; 其他外部区域; 门区域等
10	资质	机身维护; 维修修理员; 飞行机组仪表等
11	经验	工作[0,3]年的维修技术员; 工作[0,3]年的维修检查员; 飞行机组总飞行[0,1 000]h 等
12	人的因素	沟通中断; 时间压力; 工作负荷等
13	诱因/情形	设备/工具; 公司政策; 人员配备等
14	事件结果	航空器受损; 飞行机组改航; 一般性疏散等

1.3 样本事件风险因素分析流程

为深入分析样本事件涉及风险因素及其耦合关系,将风险因素分为单风险因素与耦合风险因素。单风险因素是指在某风险因素类型下,样本事件主要涉及单个因素,如工作环境因素等;耦合风险因素是指样本事件主要涉及多个因素,如资质等;全风险因素包括单风险因素与耦合风险因素。样本事件风险因素挖掘与分析过程如图 1 所示。

1) 单风险因素分析。天气因素/能见度、工作环境因素、光照等类型涉及的风险因素较少,而且在每一事件下主要以单个因素为主,运用 FineBI6.0 数据分析软件,从频数的角度分析关键风险因素。

2) 耦合风险因素分析。维护状态/涉及的维护项目、资质、经验等类型涉及的风险因素较多,而且在每一事件下主要以多个因素为主,采用 CiteSpace 软件,从共现频次的角度分析关键风险因素与耦合关系。

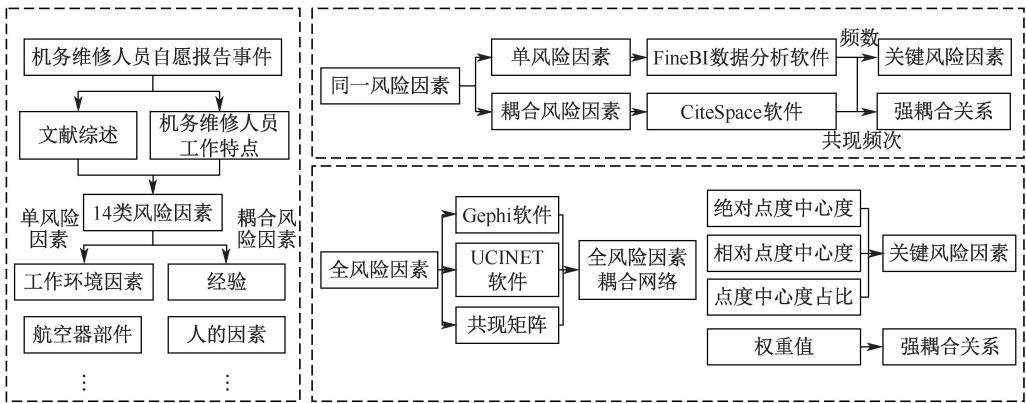


图 1 样本事件风险因素挖掘与分析过程

Fig. 1 Sample event risk factor mining and analysis process

3) 全风险因素分析。为挖掘全风险因素下的关键因素与强耦合关系,采用 Gephi 软件和 UCINET 软件构建耦合网络,从网络中心性与权重值的角度分析关键风险因素与耦合关系。

2 样本事件关键风险因素分析

2.1 单风险因素分析

为识别单风险因素类型中的关键因素,借助 FineBI6.0 软件,利用分组汇总功能,统计由大到小排序前 3 的关键风险因素,如图 2 所示。

1) 天气因素/能见度、工作环境因素与光照。天气因素/能见度主要为雨、[5,10](能见度)、雪,分别为 45、24、15 起,占比分别为 1.67%、0.89%、

0.56%;工作环境因素主要为光线不足、极端温度,分别为 64、50 起,占比分别为 2.38%、1.86%;光线主要为白天、夜晚,分别为 864、630 起,占比分别为 32.15%、23.45%。

2) 航空器部件、部件制造商与部件问题。事件发生涉及的主要部件为涡轮发动机、应急滑梯、氧气系统/机组等,分别为 75、53、45 起,占比分别为 2.79%、1.97%、1.67%;涉及的主要制造商为波音、空客、普惠等,分别为 286、113、38 起,占比分别为 10.64%、4.21%、1.41%;涉及的主要部件问题为运行故障、不当操作、失效等,分别为 783、584、150 起,占比分别为 29.14%、21.73%、5.58%。

为揭示航空器部件、系统与部件问题之间的对应关系,依据样本事件叙述内容与飞机维护手册

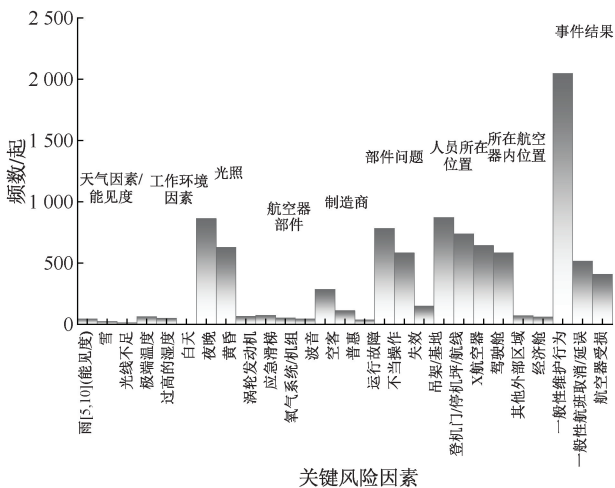


图 2 单风险因素类型中的关键风险因素(前 3)

Fig. 2 Key risk factors in category of single-factor risks(top3)

(Aircraft Maintenance Manual, AMM)等资料,结合美国 ATA100 规范,绘制对应关系如图 3 所示。报告涉及的航空器系统主要为起落架系统、飞行操纵系统、发动机系统等,分别为 320、208、168 起,占比分别为 11. 91%、7. 74%、6. 25%。在起落架系统中,主要涉及的部件为主起落架和起落架机轮;在飞行操纵系统中,主要涉及的部件为后缘襟翼和减速板/扰流板;在发动机系统中,主要涉及的部件为涡轮发动机和风扇叶片。此外,系统与问题对应关系主要集中在起落架系统运行故障和不当操作、飞行操纵系统运行故障和不当操作,分别为 103、83、81 与 58 起,占比分别为 3. 83%、3. 09%、3. 01%、2. 16%。

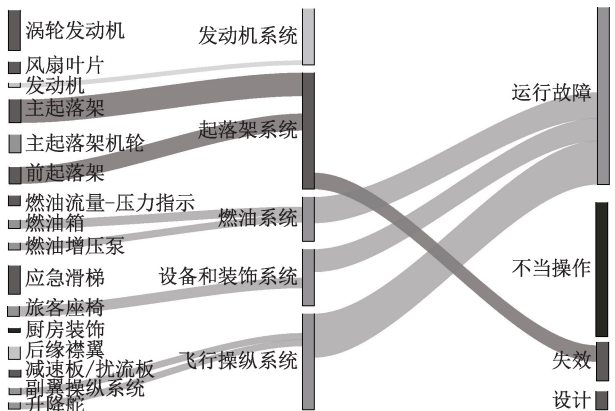


图 3 航空器部件、系统与部件问题对应关系分布(部分)

Fig. 3 Distribution of correspondence between aircraft components and system/component problems(partial)

3) 人员所在位置、所在航空器内位置与事件结果。人员所在位置主要集中在吊架/基地、登机门/

停机坪/航线、X 航空器,分别为 874、740、644 起,占比分别为 32. 53%、27. 54%、23. 97%;人员所在航空器内位置主要集中在驾驶舱、其他外部区域、经济舱,分别为 584、73、62 起,占比分别为 21. 73%、2. 72%、2. 31%;事件结果主要为一般性维护行为、一般性航班取消/延误、航空器受损,分别为 2 047、518、410 起,占比分别为 76. 18%、19. 28%、15. 26%。

2. 2 耦合风险因素分析

为挖掘耦合风险因素中关键风险因素及因素间强耦合关系,采用 CiteSpace 可视化图谱分别分析 1 653 起维护状态/涉及的维护项目、2 281 起资质、2 395 起人的因素、2 680 起诱因/情形与 572 起经验有效数据,以 1 年为 1 个时间切片,通过共线频次大小表征关键风险因素,连线粗细表征风险因素间耦合程度的强弱。

2. 2. 1 维护状态/涉及的维护项目、资质、人的因素与诱因/情形

维护状态/涉及的维护项目分布图谱中检查与工作单卡、安装与工作单卡、安装与检查耦合程度较强;资质分布图谱中机身维护与动力装置维护、飞行机组仪表与飞行机组工程师、多发飞行机组与飞行机组工程师耦合程度较强;人的因素分布图谱中沟通中断与情景意识、沟通中断与培训/资质耦合程度较强;诱因/情形分布图谱中人的因素与公司政策、公司政策与图表或出版物耦合程度较强。

为明确关键风险因素,以节点的共现频次>100 作为关键风险因素,见表 2。关键风险因素主要为检查、机身维护、沟通中断以及人的因素,占比分别为 26. 03%、42. 27%、34. 98%、55. 81%。

表 2 耦合风险因素的共现频次分布(部分)		
Table 2 Distribution of co-occurrence frequencies of coupled risk factors(partial)		
耦合风险因素类型	风险因素	共现频次
维护状态/涉及的维护项目	检查	1 708
	工作单卡	1 488
	安装	1 468
资质	机身维护	1 646
	动力装置维护	1 642
	飞行机组仪表	154
	多发飞行机组	146
人的因素	沟通中断	1 448
	情景意识	1 399
	培训/资质	523
	时间压力	447

续表 2

耦合风险因素类型	风险因素	共现频次
诱因/情形	人的因素	1206
	公司政策	451
	图表或出版物	267
	设备/工具	157
经验	工作 25 年的维修技术员	26
	工作 15 年的维修技术员	20
	工作 10 年的维修技术员	17
	工作 20 年的维修技术员	16

2.2.2 经验

1) 机务维修人员经验分布。为明确关键风险因素,仅选取共现频次>10 作为关键风险因素(表 2)。经验因素涉及的关键机务维修人员主要为工作 25 年的维修技术人员与工作 15 年的维修技术人员,占比分别为 4.79%、3.68%,共现频次越高,表明这 2 个风险因素在分布图谱中越重要。

为进一步了解机务维修人员自愿报告事件中机务维修人员经验区间分布,按照 1.2 节维修人员工作年限的划分,得出的统计结果见表 3。维修技术员、维修领班、维修检查员、电子设备维修员、维修修理员的工作年限主要分布在 10 年以上,占比分别为 47.38%、9.09%、7.69%、2.27%、1.22%。

表 3 机务维修人员经验分布

Table 3 Maintenance person experience distribution				
机务维修人员经验类型	[0,3]	(3,6]	(6,10]	>10
维修技术员	22	21	41	271
维修领班	32	19	12	52
维修检查员	23	12	17	44
电子设备维修员	1	3	5	13
维修修理员	2	2	1	7

2) 分析机务维修人员工作 10 年以上经验者报告风险因素。样本涉及机务维修人员经验主要集中在 10 年以上。根据《维修差错管理:实用指南》^[15]划分人员不安全行为的描述,采用美国波音公司制定的维修差错辅助决策系统将风险因素分为维修人员的不安全行为和诱因,见表 4。

根据上述风险因素分类,对应分析 307 起 10 年以上经验者报告事件,如图 4 所示。人员不安全行为主要是技术性差错与例行式/常规式违规,分别为 102、82 起,占比分别为 33.22%、26.71%;诱因主要是初始批准的维修文件与组织机构,分别为 61、39 起,占比分别为 19.87%、12.70%。技术性差错

表 4 10 年以上经验者报告风险因素分类及解释(部分)

Table 4 Classification and explanation of risk factors as reported by individuals with over 10 years of experience (partial)		
风险因素分类	风险因素	内容解释及举例
维修人员的不安全行为	技术性差错	过错、疏忽、犯错、疏漏,具体体现在感知/认知/识别失效、记忆失效、判断/决策差错、基于技能的过错,如遗忘/遗漏、未发现问题(检查和监控失败)等
	例行式/常规式违规	故意偏离程序或良好做法,避免不必要的努力,希望快速完成工作,如使用不正确的设备、人员违反程序/手册等
	特殊性违规	该违规行为往往与管理有关,如人员迫于管理压力违反程序、人员未经检查即签字等
诱因	初始批准的维修文件	由管理当局和制造商提供书面资料,包括结构修理手册等,比如内容不易理解、不正确/不完善等
	组织机构	主要涉及组织管理问题,如安全管理不足、管理层对不安全问题置之不理等
	设备和工具	无损探伤测试设备、扭矩扳手等特殊设备和工具,如设备和工具不安全、不适用等

体现的是人无意识的行为,经验丰富的维修人员在面对熟悉的工作任务与场景,往往不需要思考便可进行操作^[15],一旦个别风险因素出现,便会导致差错的发生,同时,工作 10 年以上的维修人员经历倒班制度的时间较久,注意力和记忆力衰退^[16],也容易导致差错的发生;经验丰富的维修人员(如 10 年以上)因其技能熟练,往往运用经验和技能快速完成工作,而轻视维修任务的文件/程序要求^[15],进而对人员或航空器造成潜在危害。从样本事件来看,也会存在维修场景下文件流程或内容不完善、内容复杂难懂等问题;在组织管理方面,除安全管理不足、维修人员反映公司程序有缺陷等问题外,还包括 10 年以上维修人员经常会发现影响维修安全的问题,进而上报给管理部门,但管理部门对一线人员反馈的不完全问题采取忽视态度的问题。

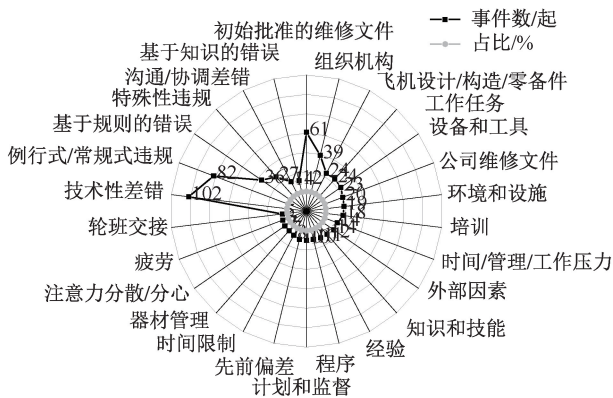


图 4 10 年以上经验者报告事件风险因素 (部分)

Fig. 4 Report on risk factors of events by those with over 10 years of experience (partial)

3 样本事件全风险因素社会网络分析

3.1 耦合网络构建及可视化分析

为明确样本事件风险因素间相互作用关系,采用共现矩阵构建共现网络的方式分析事件因素间的耦合性。采用分析事件风险因素间两两配对共同出现次数,判定 2 因素间耦合关系;通过统计共现频次,建立耦合网络以明确各节点间关系。

为优化耦合网络呈现效果,对样本风险因素进行编码。按照离散化处理结果替代数值型风险因素,并将航空器部件与部件问题,按照航空器系统的方式合并成一个风险因素。利用 Python 编程工具得出 373×373 风险因素共现矩阵,选取 20×20 的共现矩阵为例,如图 5 所示。图中各风险因素释义见表 5。

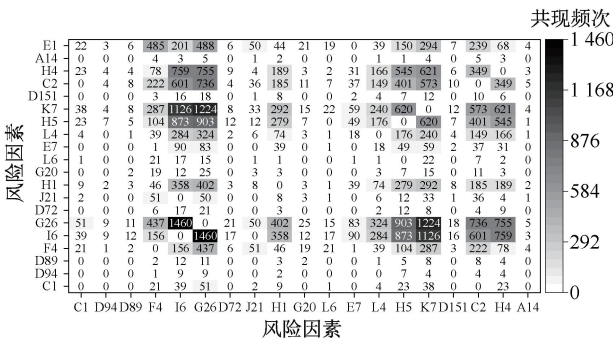


图 5 样本事件风险因素共现矩阵 (部分)

Fig. 5 Co-occurrence matrix of risk factors for sample events (partial)

将共现矩阵导入 Gephi 软件,得到样本事件风险因素耦合网络关系,如图 6 所示。网络节点大小与节点间连线粗细代表风险因素间的重要性与耦合程度。图中一般性维护行为 G26、航空器 L8、程序

表 5 样本事件风险因素释义	
Table 5 Interpretation of risk factors for sample events	
风险因素类型	风险因素释义
天气因素/能见度 A	[5,10](能见度) A2; 雨 A10; 雪 A11; 风切变 A14 等
工作环境因素 B	光线不足 B3; 极端温度 B4 等
光照 C	黎明 C1; 白天 C2; 夜晚 C4 等
航空器系统问题 D	飞行操纵系统运行故障 D32; 起落架系统运行故障 D56; 起落架系统不当操作 D57; 起落架系统其他问题 D58; 氧气系统不当操作 D72; 门系统不当操作 D89; 机身系统不当操作 D94; 发动机润滑油系统运行故障 D151 等
人员所在位置 E	X 航空器 E1; 吊架/基地 E4; 登机门/停机坪/航线 E5; 维修设施 E7 等
所在航空器内位置 F	驾驶舱 F4; 经济舱 F6 等
事件结果 G	航空器受损 G5; 飞行机组返回出发机场 G20; 一般性维护行为 G26; 一般性航班取消/延误 G25 等
维修状态/涉及的维护项目 H	修理 H1; 安装 H2; 工作单卡 H4; 检查 H5 等
资质 I	飞行机组仪表 I3; 动力装置维护 I6; 机身维护 I22; 多发飞行机组 I27 等
经验 J	飞行机组人员近 90 天飞行时长 [0, 100]h J21; 工作>10 年的电子设备维修员 J4; 工作>10 年的维修检查员 J8; 工作>10 年的维修领班 J12; 工作>10 年的维修修理员 J16; 工作>10 年的维修技术员 J20 等
人的因素 K	人员困惑/混乱 K1; 培训/资质 K2; 时间压力 K3; 情景意识 K7; 沟通中断 K10 等
诱因/情形 L	不正确/未安装/不可用的部件 L4; 程序 L5; 机场 L6; 航空器 L8; 公司政策 L9; 设备/工具 L12; 图表或出版物 L13 等

L5 与情景意识 K7 等 4 个节点均偏大且居于网络图中间,表明其在耦合网络中的重要地位。计算得到样本事件耦合网络密度为 0.171 1 (大于 0.100 0),表明耦合网络中各节点之间联系紧密,认为样本事件各风险因素间存在较强耦合关系。

3.2 风险因素重要性分析

中心性分析反映节点在网络中的重要性程度。为量化各风险因素的重要程度,采用 UCINET 软件分析样本事件耦合网络中风险因素的中心性。网络总体中心度排名前 10 结果如图 7 所示。Degree 列

及人员的培训水平和资质能力;公司政策与人的因素和图表或出版物联系密切,程序和航空器等因素对一般性维护行为的发生起着重要作用。优化培训和沟通机制,落实关键岗位人员的责任划分,确保信息实时沟通和传递,以避免多种人的因素相互叠加;严格执行程序、工作单卡制度,做到“看一项、做一项、签一项”。

3) 防范 10 年以上机务维修人员关键风险。工作年限较长的维修人员具备经验丰富、操作技能熟练等特点,人员往往会凭借自身优势快速完成工作,违反手册程序的规范化要求,衍生出技术性差错和违规等行为风险,同时,也暴露出维修文件流程或内容的不足以及组织管理中的潜在缺陷。针对工作年限较长的维修人员,定期开展程序手册标准化复训和考核,树立规范意识,减少因习惯性操作导致的技术性差错;优化组织管理与反馈机制,简化维修文件和流程,帮助人员快速准确获取关键信息。

4) 削弱人的因素和诱因/情形与航空器系统问题间的耦合传递。情景意识缺失和沟通中断等不安全状况对起落架系统运行故障等问题以及飞行操纵系统运行故障产生影响,人员困惑/混乱也会对航空器系统问题产生耦合传递效应;程序操作不当和图表或出版物内容的不完善易导致起落架系统不当操作等问题以及飞行操纵系统运行故障。维修人员需

重点检查和测试起落架系统和飞行操纵系统,优化航空器系统维护流程,加强人员培训和知识共享,并通过提升情景意识和程序标准化降低耦合风险,增强系统的安全性和可靠性。

4 结 论

1) 从一线机务维修人员自愿主动报告事件出发,基于样本数据特点,将风险因素类型划分为单风险因素和耦合风险因素,挖掘出雨、光线不足、起落架系统运行故障、机身维护、沟通中断等关键风险因素,同时,发现检查与工作单卡、沟通中断与情景意识、人的因素与公司政策等因素联系紧密。

2) 工作 10 年以上经验者报告事件涉及的人员不安全行为主要为技术性差错与例行式/常规式违规,诱因主要为初始批准的维修文件与组织机构;机身维护和动力装置维护耦合程度最强,机身维护、动力装置维护、航空器、程序、沟通中断等与一般性维护行为有较强的耦合关系;在实际生产运行中,重点关注人员资质、程序文件与沟通中断等人的因素之间的联系,避免发生一般性维护行为。

3) 未来可将自愿报告事件与其他机务安全事件类型风险因素进行对比分析,结合自然语言处理等方法,识别与分析多信息来源的机务安全事件风险因素。

参 考 文 献

- [1] 刘俊杰,李华明,梁文娟,等. 基于内容分析法的航空安全自愿报告信息分析[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4): 90-96.
LIU Junjie, LI Huaming, LIANG Wenjuan, et al. Analysis of information in voluntary aviation safety reports based on a content analysis approach[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(4): 90-96.
- [2] 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.
- [3] ILLANKOON P, TRETEN P, KUMAR U. A prospective study of maintenance deviations using HFACS-ME[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019, 74(1): DOI:10.1016/j.ergon.2019.102852.
- [4] 曹博阳. 基于复杂网络的民航维修不安全事件风险因素分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(8): 143-149.
CAO Boyang. Complex network-based risk factor analysis of civil aviation maintenance unsafe events[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(8): 143-149.
- [5] 刘伟伟,王华伟,倪晓梅,等. 基于 TG-LDA 模型的民航机务风险要素识别研究[J]. 航空计算技术, 2023, 53(6): 45-49, 54.
LIU Weiwei, WANG Huawei, NI Xiaomei, et al. Research on the identification of civil aviation mechanical risk elements based on the TG-LDA model[J]. Aerospace Computing Technology, 2023, 53(6): 45-49, 54.
- [6] 陈勇刚,熊升华,贺强,等. 民航机务维修不安全事件 N-K 风险耦合分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 104-109.
CHEN Yonggang, XIONG Shenghua, HE Qiang, et al. N-K risk coupling analysis of civil aviation aircraft maintenance

- unsafe events[J]. China Safety Science Journal, 2018,28(2):104-109.
- [7] 谭鑫, 郭豫桐, 张凡, 等. 基于卡方检验的航空维修不安全事件致因分析[J]. 航空计算技术, 2021,51(6):51-54.
TAN Xin, GUO Yutong, ZHANG Fan, et al. Causal analysis of aviation maintenance unsafe events based on chi-square test[J]. Aerospace Computing Technology, 2021,51(6):51-54.
- [8] 陈农田, 马婷, 李瑞. 基于灰关联熵的航空维修差错致因量化分析[J]. 航空计算技术, 2016,46(2):19-22.
CHEN Nongtian, MA Ting, LI Rui. Quantitative analysis of aviation maintenance error causation based on gray correlation entropy[J]. Aerospace Computing Technology, 2016,46(2):19-22.
- [9] 闫妍, 贾晓亮. 基于距离相关分析的航空维修差错影响因素分析[J]. 航空计算技术, 2016,46(2):84-87.
YAN Yan, JIA Xiaoliang. Analysis of factors influencing aviation maintenance errors based on distance correlation analysis[J]. Aerospace Computing Technology, 2016,46(2):84-87.
- [10] NATALIA D, SALVATORE L. Apriori algorithm for association rules mining in aircraft runway excursions[J]. Civil Engineering and Architecture, 2020, 8(3):206-217.
- [11] 单晶晶. 民航不安全事件数据的预测推理与风险识别[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
SHAN Jingjing. Predictive reasoning and risk identification for civil aviation unsafe event data[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [12] 王洁宁, 张聪俊, 张钰涵. 民航不安全事件报告危险源识别模型[J]. 安全与环境学报, 2020,20(1):186-192.
WANG Jiening, ZHANG Congjun, ZHANG Yuhan. Hazard identification model for civil aviation insecurity event reporting[J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(1):186-192.
- [13] AP-117-TM-02R1, 民用航空气象地面观测规范[S]. 2012.
- [14] 李丽, 赵营, 曹玉宽, 等. 民航机务维修人员不安全行为传播影响因素及作用研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(12):4 435-4 441.
LI Li, ZHAO Ying, CAO Yukuan, et al. A study on the influencing factors and role of the spread of unsafe behavior among civil aviation maintenance personnel[J]. Journal of Safety and Environment, 2023,23(12):4 435-4 441.
- [15] REASON J, HOBBS A. Managing maintenance error: a practical guide[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2021:42-63.
- [16] 王燕青, 冯贺. 航空维修人员疲劳影响指标研究[J]. 安全与环境工程, 2015,22(6):139-142,150.
WANG Yanqing, FENG He. A study of fatigue impact indicators for aviation maintenance personnel[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015,22(6):139-142,150.

作者简介: 刘俊杰 (1971—),女,天津人,硕士,副教授,主要从事民航安全、人为因素、飞行性能等方面的研究。E-mail:13132039969@126.com。