中文引用格式:刘丹, 罗颜声, 李诗轩, 等. 面向飞行全过程的民航事故致因关联网络分析[J]. 中国安全科学学报,2024,34(3):84-92.

英文引用格式:LIU Dan, LUO Yansheng, LI Shixuan, et al. Causes and correlation network analysis of civil aviation accidents for whole flight phases[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 84-92.

面向飞行全过程的民航事故致因关联网络分析*

刘 丹[1,2,3]教授, 罗颜声[1,2,3], 李诗轩**[1,2,3]副教授, 许钢焱[4]助理教授, 李墨潇[1,2,3]副教授

(1 武汉理工大学 湖北隆中实验室,湖北 襄阳 441022; 2 武汉理工大学 中国应急管理研究中心,湖北 武汉 430070; 3 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院,湖北 武汉 430070; 4 香港理工大学 工程学院,香港 999077)

中图分类号:X949 **文献标志码**:A **DOI**: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.03.0679

基金项目:国家社会科学基金一般项目资助(23BGL280);国家自然科学基金青年项目资助(72204194,52209146)。

【摘 要】 为提升我国民航安全水平,面向"滑行—起飞—爬升—巡航—下降—进近与着陆"的飞行全过程,提出一种基于关联规则和社会网络分析(SNA)的致因分析方法。首先,搜集中国民航安全信息系统2010—2022年共1 051起民航事故案例,结合《控制航行服务程序—培训》,建立基于"人—机—环—管"的民航事故致因体系;其次,采用EasyData数据服务平台进行标注,构建面向飞行全过程的民航事故致因数据集,基于FP-Growth算法挖掘以飞行阶段为规则后项的关联规则;最后,考虑关联规则的共现频率,构建民航事故致因关联网络,开展飞行阶段与事故致因的中心性分析。结果表明:进近与着陆阶段是飞行过程中风险最大的阶段,运行失效、跑道安全事故和客舱安全事故是主要事故类型,在挖掘出的10个民航事故关键致因因素中,人为因素4个、设施设备因素2个、环境因素3个、管理因素1个。

【关键词】 飞行全过程; 民航事故; 事故致因; 关联网络; 社会网络分析(SNA)

Causes and correlation network analysis of civil aviation accidents for whole flight phases

LIU Dan[1,2,3], **LUO Yansheng**[1,2,3], **LI Shixuan**[1,2,3], **XU Gangyan**[4], **LI Moxiao**[1,2,3]

(1 Hubei Longzhong Laboratory, Wuhan University of Technology, Xiangyang Hubei 441022, China; 2 China Research Center for Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China; 3 School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China; 4 Faculty of Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: In order to improve the safety level of China Civil Aviation, a cause analysis method, which focused on the whole process of ´taxiing-takeoff-climbing-cruising-falling-approaching and landing´, was proposed based on association rules and SNA. Firstly, a total of 1 051 civil aviation accident cases from 2010 to 2022 were collected from Aviation Safety Information System. Then, a civil aviation accident causation index system based on ´human-machine-environment-management´ was established in combination with ´control navigation service procedure-training´. Secondly, the EasyData data service

* 文章编号:1003-3033(2024)03-0084-09; 收稿日期:2023-09-14; 修稿日期:2023-12-20

** 通信作者:李诗轩(1993—),女,湖北十堰人,博士,副教授,主要从事知识组织与情报分析、应急舆情分析与文本挖掘方面的研究。E-mail: shixuanli@whut.edu.cn。

platform was used for annotation, followed by constructing the data-set of the cause of civil aviation accidents facing the whole process of flight. Furthermore, the FP-Growth algorithm was employed to mine the association rules with the flight phase as the subsequent term of rules. Finally, this study emphasized the co-occurrence frequency of association rules, and developed the correlation network of civil aviation accident causes by applying the centrality analysis of flight phase and accident causes. The results show that the most dangerous phases of flight are the approach and landing. Operation failures, runway safe accidents and cabin safe accidents are the main types. Among the 10 identified causes of civil aviation accidents, there are 4 human factors, 2 facilities and equipment factors, 3 environmental factors and 1 management factor.

Keywords: whole flight process; civil aviation accidents; cause of accident; correlation network; social network analysis(SNA)

0 引　言

民用航空(简称民航)是现代长途运输的重要组成部分之一,是国民经济的重要基础性产业。2010—2022 年民航行业发展统计公报显示,民航旅客吞吐量从 2010 年的 5.64 亿人次增长到 2019 年的 13.52 亿人次,总体呈上升趋势。受疫情影响,近 3 年有所回落,2022 年降至 5.20 亿人次。伴随民航运输的高速发展,民航事故征候呈递增趋势,2018—2022 年,我国年均民航事故征候数 486 起。一旦由事故征候发展成事故,将造成巨大的经济损失或人员伤亡。民航运输的安全事故,涉及机场管理单位、飞机部件生产单位、飞机设计及生产部门、飞行员的驾驶习惯和经验、地面服务与保障人员等多主体,以及“滑行—起飞—爬升—巡航—下降—进近与着陆”等多环节,在多主体、多环节、多要素耦合条件下,分析民航事故致因因素,研究飞行过程和事故致因的关联关系,对于防范化解民航重大风险,具有十分重要的意义。

目前,针对民航事故致因的研究主要集中在致因体系建立和关键致因分析 2 方面。庞兵等[1]使用人的因素分析与分类系统(Human Factors Analysis and Classification System, HFACS)建立了民航事故人因分析模型;于郝欣等[2]采用 HFACS 分析了通用航空飞行事故致因因素;潘杰[3]使用瑞士奶酪模型构建了民航事故致因网络。在建立民航事故致因体系的基础上,学者们进一步量化分析了事故致因之间的关联关系。KOTEESWARAN 等[4]使用数据挖掘方法分析了航空安全体系导致事故的潜在因素;ZHANG Chenyang 等[5]重点分析了飞行员与其他致因因素之间的联合效应,研究了民航事故关键致因;王霞等[6]针对空中管制员的危险感知上的偏差,分析了管制员的危险行为关键致因;岳仁田等[7]使用反向模糊 Petri 网分析了 257 起事故和 21 个民航事故的关键致因因素;GUO Yuanyuan 等[8]从 20 个风险因素出发,使用深度学习分析了事故类型与事故致因之间的隐含关联。上述研究大多聚焦于民航运行过程中的某一飞行阶段或单一主体,未考虑在飞机运行的不同阶段,人员(飞行员、管理员等)和部门(地面保障单位、机场服务单位等)的多主体职责与交互的差异性。

鉴于此,笔者拟面向“滑行—起飞—爬升—巡航—下降—进近与着陆”的飞行全过程,构建民航事故案例库,建立基于“人-机-环-管”民航事故致因体系,形成面向飞行全过程的民航事故致因数据集,采用关联规则算法挖掘以飞行阶段为规则后项的关联规则,构建民航事故致因关联网络,量化分析事故致因、事故类型和飞行阶段间的联系,以期提升民航安全。

1　民航事故致因体系与数据标注

1.1　民航事故致因因素体系的建立

2010 年,伊春空难发生后,民航局发布了《关于进一步加强当前航空安全工作的若干措施》等重要文件,我国民航无重大安全事故持续 4 427 天(约 12 年),直至 2022 年东航坠机事故。以此 2 个标志性事故为时间区间,收集中国民用航空安全信息系统(https://safety.caac.gov.cn/index/initpage.act)国际事故调查跟踪板块中共 1 051 起事故,以此构成案例库,结合《空中航行服务程序-培训》[9]和民航事故致因研究[1,7,10-13],总结出人为因素 H、设施设备因素 F、环境因素 E 和管理因素 M 等 4 个维度 35 个民航事故致因因素,建立基于“人-机-环-管”民航事故致因体系,见表 1。其中,以 * 标注致因因素来自案例库和文献[9]的文件,其余来源于历史文献。对于民航事故致因因素分析,见表 2。根据事故特点及文献[14],将民航事故类型主要分为 7 类,见表 3。

表 1　民航事故致因体系

Tab. 1　Civil aviation accident causation system

维度	致因因素	标签
人为因素 H	管制员工作负荷大	H_1
	管制员情景意识淡薄*	H_2
	管制员工作失误	H_3
	飞行员工作强度大	H_4
	飞行员缺乏情景意识	H_5
	飞行员驾驶经验不足	H_6
	飞行员注意力不集中*	H_7
	飞行员疲劳	H_8
	飞行员视线受阻	H_9
	飞行员决断失误	H_{10}
	飞行员失能	H_{11}
	飞行员操作失误	H_{12}
	飞行员检查和监督不足*	H_{13}
	飞行员违规操作	H_{14}
	地面保障人员操作失误	H_{15}
	机组资源管理不到位	H_{16}
	机组间或机组与其他部门间沟通不足	H_{17}
	乘客异常行为	H_{18}

续表 1

维度	致因因素	标签
设施设备因素 F	起落架故障或折断	F_1
	飞机零部件或系统故障	F_2
	跑道不符合要求*	F_3
	载重失衡	F_4
	发动机故障或起火*	F_5
	燃油泄漏或不足*	F_6
	飞机零部件设计缺陷或技术缺陷	F_7
环境因素 E	跑道道面不佳	E_1
	机场地理环境复杂	E_2
	不利的天气条件	E_3
	鸟击	E_4
管理因素 M	机组培训不足	M_1
	民航管理机构监督不力	M_2
	航空公司监管监督不严	M_3
	航空公司违反规定	M_4
	机场管理混乱	M_5
	标准、规章制度、运行手册等不完善*	M_6

表 2　民航事故致因分析

Tab. 2　Causes analysis of civil aviation accidents

维度	主体	职责与致因分析	代表因素
人为因素	飞行员	飞机操作和驾驶的主体,飞行员的操作、驾驶经验、决策决断、情景意识等对飞行安全均有影响,是飞机运行过程中危险性因素出现最多的主体	H_4
	管制员	对飞机运行提供空中交通管制服务,为飞行员提供必要的空域信息和管制信息,是飞行安全的重要保证	H_1
	地面保障人员	包括航空器维修人员、机场服务人员等,为飞机运行提供必要的技术支持。其工作失误严重影响飞行的安全,尤其是航空器维修人员,若故障隐患未排除或未检查出已有隐患,将对飞行安全产生致命威胁	H_{15}
	旅客	民航飞机运行服务的主要对象,旅客在飞机运行过程中,未系紧安全带、将不满足规定的锂电池或含锂电池的产品带入飞机等行为不利于飞机的安全运行	H_{18}
设施设备因素	飞机本身	飞机划分为起落架、发动机、燃油系统、其他系统或零部件 4 部分,任一部分出现故障或零部件存在设计缺陷,对安全运行的影响是毁灭性的	F_5
	机场跑道	机场跑道上的标线、灯光等是保障民航安全的重要手段。跑道灯光系统的故障、设计不规范、跑道标线的缺失或模糊都在一定程度上影响飞行安全	F_3
环境因素	机场跑道环境	主要包括跑道道面环境以及跑道地理环境,跑道道面环境是指跑道道面上的干净整洁,没有金属碎片、轮胎碎片等污染物;跑道地理环境是指机场位于高海拔、多雨、多雾等对飞行安全不利的自然环境	E_1
	天气	飞机所处空域的天气状况,如下雨、多云、大风等不利于飞机运行的天气状况	E_3
	空域环境	在飞行的空域是否有鸟类,防止发生鸟击事故	E_4
管理因素	航空公司	主要负责航空运输业务的航线、对飞行员的管理等工作,若航空公司对其管理和监督不当,可能增加飞行冲突发生的风险,进而导致飞行事故的发生	M_2
	机场管理	综合管理机场内的飞机、车辆、跑道、滑行道等,完成对飞机起飞和降落的保障。若管理调度失误,可能会发生跑道入侵事故	M_5
	机组培训	对飞行员进行定期培训或复训,确保其技术可靠,工作稳定	M_1
	民航主管部门的监督	负责管理和监督民航公司、机场管理单位等机构或部门监督监管不严,可能导致民航事故的发生	M_4
	文件的不合理	民航运输有关的标准、运行手册、规则制度等设置不合理或不符合实际要求,对民航运输产生威胁	M_6

表 3　民航事故类型

Tab. 3　Types of civil aviation accidents

事故类别	类型
飞机起火 A_1	由于事故撞击或非事故撞击引起的飞机起火或冒烟
运行失效 A_2	飞机的系统、部件发生故障、失控,或者飞机危险接近、相撞等
失控 A_3	失控/失速
地面安全 A_4	飞机与地面障碍物碰撞等
跑道安全 A_5	冲偏出跑道、野生动物撞击、跑道侵入、跑道外接地等
可控飞行撞地 A_6	可控飞行撞地、起飞着陆期间与障碍物相撞等
其他事故 A_7	客舱安全、机长失能、鸟击、油料相关问题、数据错误等

1.2　民航事故案例数据标注

采用百度 EasyData 数据服务平台,对民航事故案例库按“滑行(P)—起飞(T)—爬升(CL)—巡航(CR)—下降(D)—进近与着陆(AL)”的飞行全过程、事故类型和致因体系标注数据,构建面向飞行全过程的民航事故致因数据集,数据标注见表 4。各民航事故致因因素出现的次数及各致因因素的占比情况,见表 5;不同飞行阶段发生事故次数的占比情况,如图 1 所示;“人-机-环-管”出现总次数的占比情况,如图 2 所示;民航事故类型的占比情况,如图 3 所示。

表 4　数据标注

Tab. 4　Annotation of data

时间	事故标题	事故原因	案例标签
2010-05-04	阿维安卡航空 F100 波哥大起飞(起飞)起落架故障(运行失效)	起飞滑跑过程中起落架的过度振动导致扭转阻尼器连杆固定销剪断(起落架故障或折断)	T,F_1,A_2
2011-07-17	阿伦航空 AT72 香侬着陆(进近与着陆)时前起落架折断(运行失效)	在恶劣的大风条件下(不利的天气条件),侧风着陆时的进近速度过大,飞机俯仰姿态控制不当(飞行员操作失误)	AL,H_{12},E_3,A_2
2012-07-31	美联航 B739 丹佛遭鸟击空速指示失效(其他事故)	飞机下降过程(下降)中与鸟发生碰撞(鸟击),导致左侧空速管损坏、左右两侧主飞行显示器的空速指示失效(飞机零部件或系统故障)	D,E_4,F_2,A_7
2012-02-15	捷克航空 AT42 布拉格进近(进近与着陆)机长失能死亡(其他事故)	准备着陆阶段机长的猝死(飞行员失能)是由于一种罕见的、隐藏性较强的心血管系统疾病所致	AL,H_{11},A_7

表 5　民航事故致因因素统计

Tab. 5　Statistics of civil aviation accident causative factors

维度	事故致因因素	数目	占比/%	维度	事故致因因素	数目	占比/%
人为因素 H	H_1	16	1.04	设施设备因素 F	F_1	85	15.15
	H_2	62	4.01		F_2	199	35.47
	H_3	131	8.48		F_3	14	2.50
	H_4	28	1.81		F_4	12	2.14
	H_5	77	4.98		F_5	167	29.77
	H_6	28	1.81		F_6	26	4.63
	H_7	64	4.14		F_7	58	10.34
	H_8	35	2.27	环境因素 E	E_1	56	22.58
	H_9	41	2.65		E_2	9	3.63
	H_{10}	118	7.64		E_3	169	68.15
	H_{11}	15	0.97		E_4	14	5.65
	H_{12}	353	22.85	管理因素 M	M_1	74	25.00
	H_{13}	74	4.79		M_2	16	5.41
	H_{14}	241	15.60		M_3	59	19.93
	H_{15}	98	6.34		M_4	29	9.80
	H_{16}	38	2.46		M_5	28	9.46
	H_{17}	101	6.54		M_6	90	30.41
	H_{18}	25	1.62				

由图 1 可知:在不同的飞行阶段发生事故的数量由多到少依次为 AL(374 起)→T(180 起)→CL(164 起)→CR(163 起)→D(144 起)→P(26 起),其中,进近与着陆阶段发生事故的数量是其他阶段的 2 倍有余,是飞行过程中风险最大的阶段。

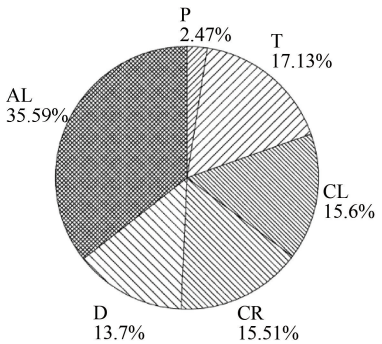

图 1　飞行全过程各阶段占比统计

Fig. 1　Proportion statistics of each phase during whole flight

由表 5 和图 2 可知:在“人-机-环-管”4 个方面,人为因素比其他 3 方面因素的总和多 16%;其中,致因因素 H_{12} 和 H_{14} 占人为因素的 40%,是人为因素中的主要致因因素。

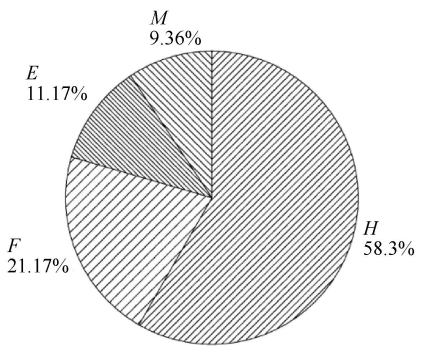

图 2　“人-机-环-管”四大因素占比统计

Fig. 2　Proportion statistics of four factors of ´man-machine-environment-management´

由表 5 可知:F_2 和 F_5 是 F 的主要致因因素,共占 F 的 65.24%;环境因素中最主要致因因素是 E_3;M_6 和 M_1 共占管理因素的 55.41%,是管理因素中的主要致因因素。

由图 3 可知:A_2、A_5 和 A_7 共占事故类型的 85.06%。对其他事故进一步标注分析,客舱安全事故共 131 起,占其他事故的 50.58%,占案例库的 12.46%,在所有事故类型中排第 3,因此,有必要将客舱安全事故单独作为一类,其标签为 A_8。A_2、A_5 及 A_8 这 3 种共占案例库的 72.88%,为主要事故类型。

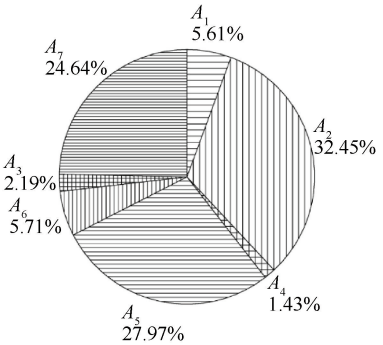

图 3　事故类型占比统计

Fig. 3　Proportion statistics of accident types

2　民航事故致因关联规则挖掘

2.1　FP-Growth 算法

2001 年,韩家炜等[15]提出采用分治策略的频繁模式增长(Frequent Pattern Growth, FP-Growth)算法,将飞行全过程和民航事故致因数据集中的关联信息压缩到一棵频繁模式树。关联分析是指形如 $X \rightarrow Y$ 的表达式,其中,X 和 Y 是不交项集,衡量关联性的 2 个指标分别是置信度和支持度。支持度(Support)是指在数据集中前项 X 与后项 Y 同时出现的项集数与总项集数的比值,表示其在事务总项集中出现的频率,其计算式为:

$$\text{Support}(X \Rightarrow Y) = \text{Support}(X \cup Y) = P(XY) \quad (1)$$

式中:X 为前项;Y 为后项;Support$(X \cup Y)$ 为支持度;$P(XY)$ 为 X 和 Y 同时出现的概率。

置信度(Confidence)是指在项集中同时出现 X 和 Y 的项集数与仅出现 X 的项集数的比值,表示包含 X 的事务中出现 Y 的条件概率,其计算式为:

$$\text{Confidence}(X \Rightarrow Y) = \frac{\text{Support}(X \cup Y)}{\text{Support}(X)} \quad (2)$$

式中:Support(X) 为 X 的支持度;Support$(X \cup Y)$ 为 $X \Rightarrow Y$ 的支持度。

基于 FP-Growth 算法挖掘飞行全过程和民航事故致因关联规则分为构建频繁模式树(Frequent Pattern tree, FP-Tree)和 FP-Growth 挖掘 2 部分。构建 FP-Tree 的伪代码如下:

```
create_fptree (data_set,min_support)
输入:面向飞行全过程的民航事故致因数据集 data_set,
最小支持度 min_support
输出:飞行全过程与民航事故致因数据集的 FP-Tree
```

(1)统计各项次数 item_count
(2)for t in data_set:
(3)　for item in t:
(4)　　判断 item 是否在 item_count 中,若 item 在 item_count 中,item_count 为 1,否则为 item_count= item_count+1
(5)for k in item_count:
(6)　删除不满足最小支持度的项
(7)用 freqItemSet 保存 1-item. count
(8)if freqItemSet ==0
(9)　return None, None
(10)for k in headerTable:
(11)　保存 count 并初始化头指针和布尔值
(12)初始化 FP-Tree 创建一个节点 Null
(13)for t in data_set:
(14)　for item in t:
(15)　　过滤小于最小支持度的频繁项
(16)　　根据全局频数对单样本排序和更新树

FP-Growth 挖掘算法的伪代码如下:

FP-Growth(data_set,min_support,min_conf)
输入:面向飞行全过程的民航事故致因数据集 data_set,最小支持度 min_support,最小置信度 min_conf
输出:频繁模式 freqItemSet,关联规则 rule_list

(1)创建频繁项集集合 freqItemSet
(2)创建 data_set 的 FP-Tree
(3)找到所有满足最小支持度 min_support 的频繁项集 freqItemSet
(4)for i in freqItemSet:
(5)　将频繁项根据大小保存到 L 中
(6)生成关联规则列表 rule_list
(7)判断频繁项集的置信度是否大于 min_conf,若大于 min_conf,保存关联规则到 rule_list,否则不保存

2.2　关联规则挖掘与结果

为确保挖掘出的关联规则的可信性,参照文献[15],设置置信度为 0.80,支持度为 2~7,挖掘出以其他节点为规则后项的关联规则数量和以飞行阶段为关联规则后项的关联规则数量,如图 4 所示。

为充分挖掘在不同的飞行阶段导致民航事故发生的关键致因因素,得到尽可能多的以飞行阶段为关联后项的关联规则,设支持度为 2,共得到 4 996 条飞行阶段和民航事故致因的频繁项集,选取 10 条频繁项集示例,见表 6。

表 6　频繁项集示例

Tab. 6　Examples of frequent itemsets

序号	频繁项集	序号	频繁项集
1	AL, E_3, A_5, H_{12}, H_9	6	H_{10}, AL, M_1, A_5, E_1
2	H_{14}, AL, H_{17}, H_8, A_6	7	AL, H_{12}, M_6, A_5
3	CL, H_{12}, H_{14}, A_7, H_{13}	8	H_7, A_7
4	H_{14}, M_1, H_{13}, A_5	9	H_{14}, H_9, A_6
5	H_7, AL, H_{17}, A_5, H_{12}	10	H_3, H_2, M_2, AL

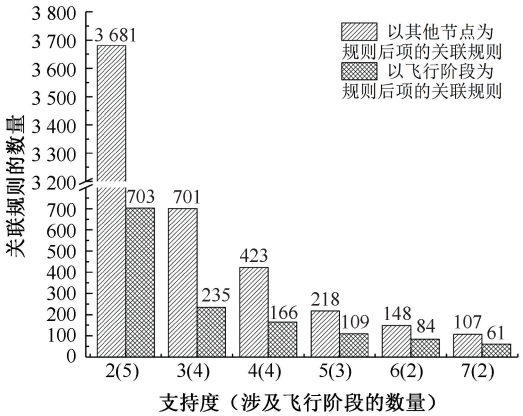

图 4　不同支持度下关联规则的数量

Fig. 4　Numbers of association rules under different supports

共挖掘出 4 384 条关联规则,其中,以飞行阶段为规则后项的关联规则有 703 条。由于飞行全过程和民航事故致因数据集中在滑行阶段发生的事故数量较少,涉及到以起飞、爬升、巡航、进近与着陆、下降 5 个飞行阶段为关联后项的关联规则,部分关联规则见表 7。

表 7　关联规则示例

Tab. 7　Examples of association rules

序号	置信度	规则前项	规则后项
1	1.000	M_4, F_5	CL
2	1.000	H_1, E_3	CR
3	1.000	M_3, F_1	AL
4	1.000	H_8, A_2	AL
5	1.000	H_8, F_3	AL
6	0.900	M_4, A_5	AL
7	0.833	A_7, H_{15}	T
8	0.818	M_1, E_3	AL
9	0.800	H_{15}, F_4	T
10	0.800	H_7, A_6	D

3　基于 SNA 的民航事故致因分析

3.1　民航事故致因网络的构建

计算 703 条以飞行阶段为规则后项的关联规则中事故致因和飞行阶段的共现频率,得到关联规则的共现矩阵,见表 8。共现矩阵中任意 2 个节点的共现值越大,则关联性越强。根据共现矩阵,使用 UciNet 中的 NetDraw 工具绘制面向飞行全过程的民航事故致因关联网络,如图 5 所示。节点间连线表示民航事故致因之间、民航事故致因和飞行阶段之间存在关联关系,节点之间的连线越粗表示关联越紧密。

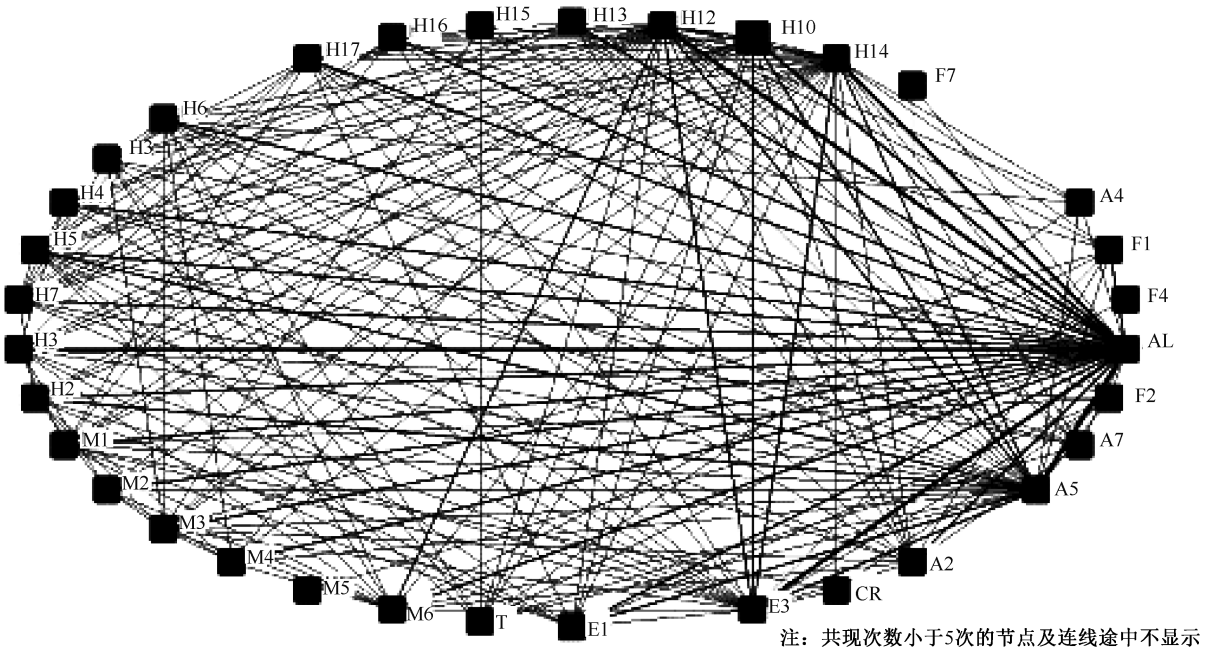

图 5　面向飞行全过程的民航事故致因关联网络

Fig. 5　Causation correlation network of civil aviation accident for whole flight phases

表 8　关联规则共现矩阵

Tab. 8　Association rules co-occurrence matrix

标签	AL	E_1	E_3	F_1	H_{12}	H_{14}	H_8	M_3	A_5
AL	0	87	148	62	200	180	91	81	234
E_1	87	0	22	0	28	15	10	0	43
E_3	148	22	0	10	58	46	8	16	71
F_1	62	0	10	0	22	20	0	22	5
H_{12}	200	28	58	22	0	75	24	27	83
H_{14}	180	15	46	20	75	0	28	23	70
H_8	91	10	8	0	24	28	0	4	24
M_3	81	0	16	22	27	23	4	0	18
A_5	234	43	71	5	83	70	24	18	0

在共现矩阵和社会网络分析法(Social Network Analysis, SNA)网络中,飞行阶段 AL 与其他的 35 个节点(5 个事故类型和 30 个事故致因因素节点)有联系,是飞行阶段中与其他节点联系最紧密的节点。根据共现矩阵,飞行阶段 AL 和致因因素 H_{12}、H_{14} 和 E_3 同时出现的次数远超其他节点,且飞行阶段 AL 和这 3 个事故致因节点之间的连线也最粗,表明在进近与着陆阶段,H_{12}、H_{14} 和 E_3 这 3 个民航事故致因因素关系最紧密。飞行阶段 AL 和事故类型 A_5 同时出现 234 次,远超其他的事故类型,在进近与着陆阶段,应重点防范跑道安全事故。

飞行阶段的其他节点与民航事故致因之间的联系明显弱于进近与着陆阶段,飞行阶段 D 和 24 个节点(4 个事故类型和 20 个民航事故致因节点)有联系,其中,与事故类型 A_6 同时出现 25 次,和致因因素 H_7 同时出现 24 次,和其他节点的共现次数均在 5 次左右;飞行阶段 T 和 29 个节点(4 个事故类型和 25 个民航事故致因节点)有联系,但共现次数的平均值为 6 次,关联性较弱;飞行阶段 CR 共和 13 个节点(2 个事故类型和 11 个事故致因节点)有联系,且和事故类型 A_8 同时出现 13 次,巡航时应注重关注客舱的情况;飞行阶段 CL 共和 17 个节点(2 个事故类型和 15 个事故致因节点)有联系,联系次数均小于 5。

3.2　网络中心性分析

在民航事故致因关联网络中,运用 SNA 的节点中心性量化评估各民航事故致因因素或飞行阶段在网络中的重要性。度数中心度表示一个节点直接相连的节点个数,度值越大表明该节点和其他节点联系越紧密。中间中心度表示一个节点在多大程度上控制其他点对关系的能力,度值越大表明该节点越处于网络的核心位置。接近中心度又称整体中心度,表示一个节点与其他节点的最短路径之和,度值越大表示该节点越不是网络的核心节点。飞行阶段和民航事故致因之间的联系越紧密或飞行阶段节点越处于核心位置,在该飞行阶段导致事故发生的致因因素越多。使用 UciNet 计算关联网络的度数中心度、中间中心度和接近中心度,筛选飞行阶段节点、度数中心度和中间中心度最大的 5 个节点以及

接近中心度最小的 5 个节点,飞行阶段与关键事故致因的中心度见表 9。

表 9　飞行阶段与关键事故致因的中心度

Tab. 9　Centralities of flight phases and key causes of civil aviation accidents

序号	标签	度数中心度	中间中心度	接近中心度
1	AL	35	39.746	80.702
2	H_{12}	40	84.323	88.462
3	H_{14}	37	45.959	83.636
4	E_3	33	35.338	77.966
5	H_{10}	32	20.624	76.667
6	M_6	32	36.958	76.667
7	D	24	16.106	67.647
8	T	29	53.543	73.016
9	CR	14	4.797	58.228
10	CL	17	13.040	61.333
11	F_4	5	0.050	52.273
12	F_6	7	1.545	52.874
13	H_{18}	7	0.216	52.273
14	E_2	7	0.085	54.118
15	E_4	3	0	51.111

由表 9 可知:

1) 飞行阶段的度数中心度以“AL→T→D→ CL→CR”的顺序依次减小,中间中心度以“T→AL→D→CL→ CR”的顺序依次减少,表明它们与各事故致因因素的联系也依次减弱;度数中心度的排序和中间中心度的排序差异在于 AL 和 T 节点。然而,飞行阶段 AL 发生的事故数量为飞行阶段 T 的 2.1 倍,且 AL 节点与事故类别或致因因素的连接数量均多于起飞节点。因此,认为飞机在 AL、T、D、CL、CR 飞行阶段与事故致因因素之间的联系依次减弱。

2) 事故致因节点度数中心度最大的 5 个依次是“H_{12}→H_{14}→E_3→M_6→H_{10}”;中间中心度最大的 5 个依次是“H_{12}→H_{14}→M_6→E_3→H_{10}”;接近中心度最小的 5 个依次为“E_4→F_4→H_{18}→F_6→ E_2”,未涉及度数中心度和中间中心度前 5 的节点。

因此,民航事故关键致因因素共 10 个:人为因素为 H_{12}、H_{14}、H_{10}、H_{18};设施设备因素为 F_4、F_6;环境因素为 E_3、E_4、E_2;管理因素为 M_6。对比文献[5,7,17],挖掘出 5 个新的关键致因因素,分别是 F_6、M_6、E_4、F_4 和 H_{18}。

4　结　论

1) 构建面向飞行全过程的民航事故致因体系,补充了 6 个事故致因因素,通过统计分析得到,进近与着陆阶段是飞行过程中风险最大的阶段,运行失效、跑道安全事故和客舱安全事故是主要事故类型,人为因素是主要的致因因素。

2) 运用 FP-Growth 算法分析事故致因关联关系,得到置信度为 0.8,支持度为 2,以飞行阶段为规则后项的关联规则 703 条。

3) 运用 SNA 构建民航事故致因网络,网络分析得到 10 个关键致因因素,分别是人为因素 4 个、设施设备因素 2 个、环境因素 3 个、管理因素 1 个。

参 考 文 献

[1] 庞兵, 于雯宇. 基于改进的 HFACS 和模糊理论的航空事故人因分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1 886-1 890.
PANG Bing, YU Wenyu. On the improvement of HFACS model based on the association rules and GeNIe[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5): 1 886-1 890.

[2] 于郝欣, 谢中朋. 基于 HFACS 模型的通用航空飞行事故致因研究[J]. 安全, 2021, 42(12): 31-35.
YU Haoxin, XIE Zhongpeng. Research on causes of general aviation flight accidents based on HFACS model[J]. Safety & Security, 2021, 42(12): 31-35.

[3] 潘杰. 基于组态视角的空难事故致因与安全绩效影响研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2020.
PAN Jie. Research on the causes of air crash accidents and safety performance effect based on configuration perspective[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2020.

[4] KOTEESWARAN S, MALARVIZHI N, KANNAN E, et al. Data mining application on aviation accident data for predicting topmost causes for accidents[J]. Cluster Computing-The Journal of Networks Software Tools and Applications, 2019, 22: 11 379-11 399.

[5] ZHANG Chenyang, LIU Chenglin, LIU Haiyue, et al. Incorporation of pilot factors into risk analysis of civil aviation accidents from 2008 to 2020: a data-driven Bayesian network approach[J]. Aerospace, 2023, 10(1): 1-17.

[6] 王霞，孙石磊. 民航空中交通管制员危险感知差异研究[J]. 中国安全科学学报，2015，25(12)：22-26.
WANG Xia，SUN Shilei. Study on risk perception differences between airtraffic controllers based on Apriori algorithm[J]. China Safety Science Journal，2015，25(12)：22-26.

[7] 岳仁田，李君尉. 基于反向模糊 Petri 网的航空事故致因分析[J]. 安全与环境学报，2021，21(6)：2 423-2 429.
YUE Rentian，LI Junwei. Causative analysis for the aviation accidents based on the reverse fuzzy Petri net[J]. Journal of Safety and Environment，2021，21(6)：2 423-2 429.

[8] GUO Yuanyuan，SUN Youchao，HE Yide，et al. Deep-learning-based model for accident-type prediction during approach and landing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems，2023，59(1)：472-482.

[9] 国际民航组织. 空中航行服务程序-培训：Doc 9868 [Z]. 2020.

[10] HE Peng，SUN Ruishan. Trends and characteristics of incidents in China civil aviation：1994-2020[J]. Transportation Research Records，2022，37(5)：420-431.

[11] 黄正. 机组资源管理与飞行安全关系研究[J]. 科技创新与应用，2017(35)：125-127.

[12] 陈俊. 基于威胁与差错管理理论的安全管理系统设计[D]. 成都：电子科技大学，2011.
CHEN Jun. Security management system design based on threat and error management theory[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology，2011.

[13] 靳慧斌，朱孟昌，马明霞. 基于 ACE-BN 的通勤飞行事故/事件诱因分析[J]. 中国安全科学学报，2023，33(2)：96-102.
JIN Huibin，ZHU Mengchang，MA Mingxia. Cause analysis of commuter flight accidents/incidents based on ACE-BN[J]. China Safety Science Journal，2023，33(2)：96-102.

[14] 杜红兵，张庆庆. 民航飞行事故统计及原因分析[J]. 工业安全与环保，2016，42(8)：17-20.
DU Hongbing，ZHANG Qingqing. Statistics and causes analyses of flight accidents [J]. Industrial Safety and Environmental Protection，2016，42(8)：17-20.

[15] 韩家炜，堪博. 数据挖掘概念与技术(第 2 版)[M]. 北京：机械工业出版社，2012：223-246.

[16] ZHANG Xuecen，LIU Qiang，TANG Yi，et al. A FP-Growth algorithm based fault analysis method for distribution terminal unit[J]. Applied Sciences，2021，11(11)：1 463-1 467.

[17] CHEN Nongtian，SUN Youchao，WANG Zongpeng，et al. Identification of flight accidents causative factors base on SHELLO and improved entropy gray correlation method[J]. Heliyon，2023，9(2)：DOI：10.1016/j.heliyon.2023.e13534.

作者简介： 刘 丹 (1985—)，男，湖南邵阳人，博士，教授，博士生导师，主要从事公共安全与应急管理、机器学习与智能计算、风险评估与应急决策方面的研究。E-mail：liudan8575@whut.edu.cn。