

空中危险接近事件致因因素识别和作用机理分析

陈芳¹, 李佳蕊¹, 沈芮宇²

(1. 中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300; 2. 四川川航物流有限公司, 成都 610000)

摘要: 为了帮助安全管理人员认识空中危险接近事件的发生机理, 明晰致因因素之间的作用关系、重要性等, 本文提出了识别空中危险接近事件致因因素并分析其潜在作用机理的模型。利用潜在狄利克雷分配(LDA, latent Dirichlet allocation)主题模型从事件报告和危险源清单中识别致因因素, 构建决策试验和评价试验与解释结构模型(DEMATEL-ISM, decision-making trial and evaluation laboratory and interpretative structural model), 厘清因素间的影响关系, 确定各因素的重要性和属性, 构建多层递阶结构模型, 直观展示事件的直接原因、间接原因和根本原因。结果表明: 识别了非常态运行风险管控不力等33个致因因素, 其中, 指挥席发布指令错误等是直接原因, 直接导致事件发生; 双岗制作用发挥不佳等是间接原因, 直接影响较小, 但与其他因素的交互耦合作用大; 安全和业务培训不到位等是根本原因, 对此改善有利于从根源上降低危险接近事件的发生。空中危险接近事件是直接、间接和根本原因共同作用的结果, 基于此从空中交通管理角度提出了具体对策建议。

关键词: 空中危险接近; 致因因素识别; 空中交通管理; 作用机理

中图分类号: V267; V328 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2025)05-0016-08

Identification of causal factors and analysis of mechanism of action of near mid-air collision incident

CHEN Fang¹, LI Jiarui¹, SHEN Ruiyu²

(1. College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China; 2. Sichuan Chuanhang Logistics Limited Company, Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to help safety managers understand the occurrence mechanism of near mid-air collision incident and clarify the relationship and importance of causal factors, a model for identifying the causal factors of near mid-air collision incident and analyzing its potential mechanism of action is proposed. Latent Dirichlet allocation (LDA) topic model is used to identify causal factors from incident reports and lists of hazard source, the decision-making trial and evaluation laboratory and interpretative structural model (DEMATEL-ISM) is constructed, the influence relationships among factors are clarified, the importance and attributes of each factor are determined, a multi-level hierarchical structure model is constructed to visually display the direct, indirect, and fundamental causes of the incident. The results show that 33 causal factors are identified, including poor risk management and control of abnormal operation, among which wrong instruction issued by command seat is the direct cause, directly leading to the occurrence of the incident. The poor performance of dual position system is an indirect cause, which has a relatively small direct impact, but has a significant interactive coupling effect with other factors. Inadequate safety and operational training are the fundamental causes, and improving them is conducive to reducing the occurrence of near mid-air collision incident from the root. Near mid-air collision incidents are the result of the combined effects of direct, indirect, and fundamental causes, based on this, specific countermeasures and suggestions are proposed from the perspective of air traffic management.

Key words: near mid-air collision; causal factors identification; air traffic management; mechanism of action

空中碰撞被列为五大高风险事故之一^[1], 因其低频、高后果和多属性复杂化成因的特点, 难以采集到

直接事故信息。空中危险接近作为两机相撞事故的必然环节之一^[2], 预防该事件的发生可以有效降低空中碰撞事故的风险。从事故中获得的信息有助于降低未来航班的风险^[3], 据统计, 2015—2019 年中国民航发生了 240 起空中危险接近事件, 其中 2019 年同比增长 22.22%^[4]。为了防止空中危险接近事件的风险升级, 实现安全关口前移, 有必要充分分析和挖掘多起空中危险接近事件的共性原因和影响作用机理。

对于空中危险接近的致因因素分析研究, 学者最初主要基于原因频率分析得到致因因素的重要度: 刘晓红等^[5]利用统计数据得到管制员错误指挥等因素是危险接近发生的主要原因; 罗晓利^[6]以 152 起小于安全间隔飞行事件为数据源, 基于瑞士奶酪模型和人为因素分析与分类系统 (HFACS, human factor analysis and classification system) 模型, 分析得到了不良的机组资源管理是导致小于安全间隔飞行事件的最主要因素; 陈芳等^[7]构建了航空器危险接近事件零膨胀有序概率模型, 以 341 起事件为数据源, 分析得到了机组人员程序执行偏差等 4 个因素会增加航空器危险接近事件的风险。但高频的致因因素不能简单地被视为关键原因, 还需要了解其相互作用关系, 才能避免不良的风险管理。朱磊等^[8]建立了军民航飞行冲突、危险接近事故征候的事故树模型; 吴奇科等^[9]基于危险与可操作性分析 (HAZOP, hazard and operability analysis) 法建立了自由飞行环境下的飞行碰撞事故树模型, 进一步明确了作用路径。但以上简单线性描述无法反映复杂社会技术系统下多因素间的非线性作用^[10], 基于模糊决策试验和评价试验 (DEMATEL, decision-making trial and evaluation laboratory) 法从非线性角度进一步分析确定了空中危险接近事件致因因素相互影响关系和风险因素的重要性^[11]。但在事故发生过程中, 致因因素间既有因果关系, 又有层次结构关系^[12], 而现有研究未能进一步明晰空中危险接近事件致因因素之间的层次结构关系, 揭示其发生的直接、间接和根本原因。

考虑并识别多起空中危险接近事件的致因因素有助于探究事件发生全过程中的潜在原因和规律。而空中危险接近事件调查报告数据量大, 蕴含原因细节描述等关键信息。基于大量文本数据驱动的潜在狄利克雷分配 (LDA, latent Dirichlet allocation) 主题模型可以客观有效地发现文档潜在结构和隐藏语义信息, 所确定的主题与实际文件记录相关, 在处理航空安全报

告系统数据方面具有普遍适用性^[13], 较专家经验、文献总结更具客观性和全面性。LDA 主题模型分别显示了在民航不安全事件报告危险源识别^[14]、化工生产事故致因主题抽取^[15]和煤矿安全隐患致因规律分布^[16]中的优势。

综上, 本文拟聚焦于空中危险接近事件致因因素之间复杂的层次结构关系, 揭示直接、间接和根本原因的作用机理。首先, 运用 LDA 主题模型识别空中危险接近事件致因因素; 其次, 构建决策试验和评价试验与解释结构模型 (DEMATEL-ISM, decision-making trial and evaluation laboratory and interpretative structural model) 分析致因因素之间影响关系, 确定致因因素的重要度、属性和影响路径; 最后, 构建空中危险接近事件多层递阶结构模型, 直观展示事件发生的直接、间接和根本原因, 以期帮助安全管理人员采取更有针对性的措施来预防空中危险接近事件的发生。

1 空中危险接近事件致因因素识别

首先, 以 2015—2020 年的 104 份空中危险接近事件报告和有关空中危险接近事件“后果”的 107 条危险源清单作为数据源, 从事前和事后两个角度收集整理数据, 完成语料库构建; 然后, 基于 Python 和 Jieba 中文分词组件加载自定义专业词库、停用词表和归并词表, 对事故原因文本进行分词处理, 完成数据预处理; 最后, 通过建立的空中危险接近事件 LDA 主题模型提取主题和关键词, 总结分析得到空中危险接近事件致因因素。

1.1 数据收集及预处理

结合空中危险接近事件相关数据的特点, 根据《民用航空器征候 (征求意见稿)》^[17]等民航行业相关法律法规、企事业单位运行手册及空中危险接近事件报告原始语料得到民航安全工程等领域的专业词汇, 建立了空中危险接近事件自定义词典, 提高分词结果的准确性, 具体如表 1 所示。同时, 采用哈尔滨工业大学停用词表, 并增加“民航”“间隔”“避让”等出现频率高但对实际分析无较大意义的停用词, 构建了符

表 1 自定义词典

Tab.1 Custom dictionary

领域	专业词汇
运行	双岗制、标准仪表离场、指挥席、监控席、协调席、带班主任、偏航、绕飞、陆空通信设备、自动化系统、雷达……
管理	机组资源管理、安全风险、现场运行管理、军民航协议、规章制度、交接班……

合空中危险接近事件特点的停用词库。

1.2 主题及关键词提取

实验过程中考虑到出现频率低的词可能携带更重要的信息,因此,在模型计算前引入词频-逆文件频率(TF-IDF, term frequency-inverse document frequency)算法^[16]进行词向量加权,使得特定单词具有更强地区分不同事件调查报告记录的能力。TF-IDF 表示为

$$f_{\text{TF-IDF}} = f_{\text{TF},i,j} \times f_{\text{IDF},i} \quad (1)$$

式中, $f_{\text{TF},i,j}$ 为关键词 t_i 在文档 d_j 中出现的频率,即

$$f_{\text{TF},i,j} = \frac{n_{i,j}}{\sum_j n_{i,j}} \quad (2)$$

$n_{i,j}$ 表示关键词 t_i 在文档 d_j 中出现的次数; $f_{\text{IDF},i}$ 为关键词 t_i 的反文档频率,即

$$f_{\text{IDF},i} = \log \frac{|D|}{|j: t_i \in d_j| + 1} \quad (3)$$

式中: $|D|$ 为语料库中的文件总数; $|j: t_i \in d_j|$ 表示出现关键词 t_i 的文档总数。

LDA 主题模型是 Blei 等^[18]提出的用于收集离散数据(如文本语料库)的生成概率模型,即文档、主题、词三层贝叶斯概率模型。文档表示为潜在主题的随机混合,每个主题通过词分布表征,即潜在主题是从以文档分布为条件的主题概率和以主题分布为条件的词概率中得出,潜在主题获取过程如图 1 所示。

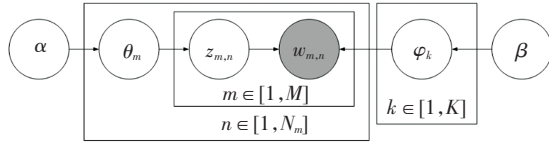


图 1 LDA 主题模型

Fig.1 LDA topic model

LDA 主题模型假设文档-主题和主题-词的先验分布为狄利克雷分布。对于任一文档 m , 文档-主题分布的狄利克雷参数为 α , 对于任一主题 k , 主题-词分布的狄利克雷参数为 β 。 θ_m 为任一文档 m 的主题分布, φ_k 为主题 k 的词分布, $z_{m,n}$ 表示第 m 篇文档第 n 个词的主题编号, $w_{m,n}$ 表示第 m 篇文档第 n 个词, N_m 表示第 m 篇文档的词项总数, N 表示所有文档的词项总数, M 表示总文档数, K 表示主题数^[19]。

影响 LDA 主题模型提取空中危险接近事件报告效果的因素主要包括参数估计和最优主题数的确定。吉布斯抽样算法是 LDA 主题模型参数估计中最常用的算法。本文采用吉布斯抽样算法对 LDA 主题模型进行参数估计, 最优主题数通过困惑度的计算来确定。困惑度^[18]具体计算公式表示为

$$P(D) = \exp \left\{ - \frac{\sum_{m=1}^M \ln p(W_m)}{\sum_{m=1}^M N_m} \right\} \quad (4)$$

式中, $p(W_m)$ 表示第 m 篇文档中每个单词的概率。

困惑度即对于文档 m , LDA 主题模型对该文档属于哪个主题的不确定程度, 因此, 困惑度越小, 主题的区分效果越好。为了避免仅以困惑度为指标确定主题数而造成 LDA 主题模型过拟合, 基于困惑度-主题数目曲线中的拐点, 结合 pyLDAvis 主题可视化的效果确定最佳主题数, 再利用 LDA 主题模型提取空中危险接近事件报告主题及关键词。

困惑度随主题数变化趋势如图 2 所示, 在主题数为 6、7、8、9、11、14、15 时出现拐点。对不同主题数进行实验, 发现主题数为 6 时, 主题重叠现象最小, 最终确定主题数为 6。

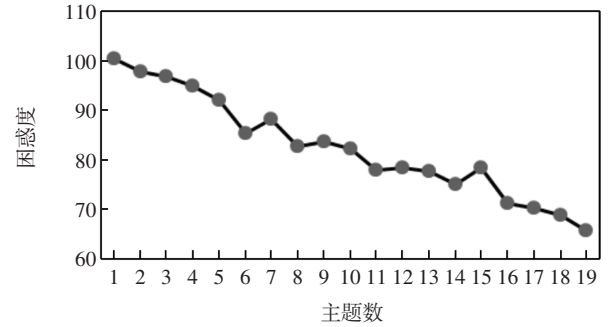


图 2 不同主题数对应的困惑度

Fig.2 Perplexity corresponding to different numbers of topics

利用 pyLDAvis 工具将主题提取结果可视化, 最终确定主题数为 6 时的致因主题及关键词如表 2 所示。

1.3 空中危险接近事件致因因素的确定

主题下的关键词被视为隐藏在主题中的功能, 关键词反映其与主题的相关性^[15], 即关键词出现在主题中的概率越大, 关键词与主题相关性越强。通过分析关键词, 结合民航运行情况, 总结得到空中危险接近事件发生的若干致因因素, 如组织因素这一主题中的关键词“非常态”反映天气影响、空军活动、流量等因素导致的非正常情况对于安全运行的影响; “规章制度”“业务”“培训”反映在安全教育与业务培训方面存在的问题; “交接班”“职责”“遗漏”“监督”反映交接班职责履行不到位, 可能会导致重要信息遗漏; “排班”“不合理”“实施”反映排班模式不合理, 可能会导致各个席位之间配合不力, 影响接班人员下一步指挥工作的实施与开展。同理得到其他主题相关的致因因素, 最终确定了 33 个致因因素, 如表 3 所示。

表 2 空中危险接近事件致因主题及其关键词

Tab.2 Causal topics and their keywords of near mid-air collision incident

主题	关键词
组织因素	交接班、程序、掌握、培训、职责、业务、非常态、规章制度、遗漏、实施、排班、有效、不合理、监督
运行环境	航班量、故障、相似航班号、工作量、雷达、失效、标牌、旺季、流量、雷雨、高峰、军航、陆空通信设备、自动化系统、训练
管制现场运行	指挥席、带班主任、教员、学员、发现、监控席、协调席、见习、现场运行管理、岗位、不到位、放手量、现场、不足、提醒、繁忙、监听、监控、双岗制
管制指挥	错误、指令、协调、监听、纠正、发布、忽视、更正、发错、通话、沟通、询问、听清、不当、纠错、时间、用语
外部接口影响	复述、军民航、复诵、计划、偏航、绕飞、飞行员、飞错、误入、偏出、军民航协议、动态、信息、通报、违章操作
人为因素	负荷、处置、麻痹、人为失误、松懈、遗忘、能力、心理、口误、情景意识、冲突解脱、应急、缺乏、预见性、判断、失去、预判、精力

表 3 空中危险接近事件致因因素

Tab.3 Causal factors of near mid-air collision incident

主题	致因因素
组织因素	非常态运行风险管控不力 a_1 ; 安全和业务培训不到位 a_2 ; 交接班职责履行监督不到位, 存在交接遗漏现象 a_3 ; 管制排班不合理 a_4
运行环境	相似航班号 a_5 ; 设备故障 a_6 ; 扇区航班量较多 a_7 ; 军航训练活动频繁 a_8 ; 雷雨等恶劣天气影响 a_9
管制现场运行	带班主任现场运行管理不足 a_{10} ; 监控席监控监听提醒不到位 a_{11} ; 协调席忙于协调 a_{12} ; 管制教员对学员的岗位见习放手量过大, 没有有效监控 a_{13} ; 双岗制作用发挥不佳 a_{14}
管制指挥	指挥席发布指令错误 a_{15} ; 指挥席通信用语不规范 a_{16} ; 指挥席监听机组复诵不到位 a_{17} ; 指挥席更正指令不及时 a_{18} ; 管制指令发布时机不当 a_{19}
外部接口影响	军民航协议规定不明确 a_{20} ; 军民航信息通报传递不到位 a_{21} ; 机组掌握飞行计划不到位 a_{22} ; 机组复诵指令错误 a_{23} ; 机组违章操作 a_{24} ; 机组偏出计划航路 a_{25}
人为因素	管制员口误 a_{26} ; 管制员工作负荷大 a_{27} ; 管制员精力分配不当 a_{28} ; 管制员丧失情景意识 a_{29} ; 管制员产生松懈麻痹心理 a_{30} ; 管制员特情处置能力不足 a_{31} ; 管制员缺乏预见性, 预判不足 a_{32} ; 管制员遗忘飞行动态 a_{33}

2 空中危险接近事件致因因素作用机理分析

考虑到空中危险接近事件致因因素涉及面较广, DEMATEL 模型借助矩阵和图论工具, 不仅可以确定每个因素对其他因素的影响程度和被影响程度, 还可以分析各因素之间的原因或结果属性, 有效提高致因因素分析的科学性及准确性, 但该模型无法有效识别系统中致因因素的层级结构^[20]。ISM 基于布尔代数运算, 通过构造多级递阶有向拓扑图, 具有将系统中众多因素分析成清晰的多层递阶结构, 并建立因素间顺序、方向的优点^[21]。通过 ISM 划分空中危险接近事件致因因素的结构层次, 可揭示直接、间接和根本原因内在作用机理。但 ISM 以定性分析为主, 无法将因素间的关系进行量化, DEMATEL 能弥补 ISM 中无法量化因素间关联程度的不足。因此, 将二者相结合, 构建基于 DEMATEL-ISM 的空中危险接近事件致因因素作用机理分析模型, 从系统角度处理层次结构关系, 揭示直接、间接和根本原因的作用机理, 如图 3 所示。

基于 DEMATEL-ISM 的空中危险接近事件致因因素作用机理分析模型构建的具体步骤如下。

步骤 1 基于 LDA 主题模型识别空中危险接近事件致因因素, 确定系统中致因因素为 a_1, a_2, \dots, a_L , 其中, $a_i \in A, A$ 为致因因素的总集合, L 为致因因素的数目。

步骤 2 建立初始直接影响关系矩阵 D 。通过咨询专家可以获得致因因素之间的直接影响矩阵 $D^p =$

$(d_{ij}^p)_{L \times L}, d_{ij}^p$ 为第 p 个专家确定的因素 a_i 对 a_j 的影响程度, 其分值 0、1、2、3、4 分别代表无影响、弱影响、中等影响、强影响和很强影响。利用平均值法综合所有专家的评价结果, 获得初始直接影响关系矩阵 $D = (d_{ij})_{L \times L}$, 其元素 d_{ij} 表示为

$$d_{ij} = \frac{1}{Q} \sum_{p=1}^Q d_{ij}^p \quad (5)$$

式中, Q 为专家数量。

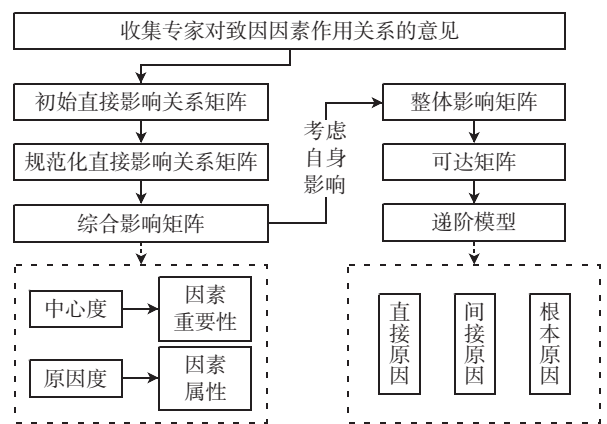


图 3 DEMATEL-ISM 模型

Fig.3 DEMATEL-ISM model

步骤 3 将初始直接影响矩阵进行规范化处理, 得到规范化直接影响关系矩阵 C , 即

$$C = (c_{ij})_{L \times L} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq L} \sum_{j=1}^L d_{ij}} D \quad (6)$$

式中, $\max_{1 \leq i \leq L} \sum_{j=1}^L d_{ij}$ 表示每一行相加得到和的最大值, 规范化处理使得 $0 \leq c_{ij} \leq 1$ 。

步骤 4 计算综合影响矩阵 T , T 是致因因素间的直接和间接影响关系的综合表征, 即

$$T = C + C^1 + C^2 + \dots + C^L \quad (7)$$

因 $0 \leq c_{ij} \leq 1$, 当 $L \rightarrow \infty$ 时, $C^L \rightarrow 0$, 可采用式(8)进行近似计算

$$T = (I - C)^{-1} - I \quad (8)$$

式中, I 为单位矩阵。

步骤 5 评估各致因因素的影响度 r_i 和被影响度 k_i , 分别表示为

$$r_i = \sum_{j=1}^L t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (9)$$

$$k_i = \sum_{j=1}^L t_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (10)$$

式中: r_i 表示第 i 个因素对其他因素的直接和间接影响综合程度; k_i 表示第 i 个因素受其他因素的直接和间接影响综合程度。

步骤 6 计算中心度 E_i 和原因度 F_i , 分别表示为

$$E_i = r_i + k_i \quad (11)$$

$$F_i = r_i - k_i \quad (12)$$

式中: E_i 表示因素 i 受其他因素的影响, 即表示因素 i 在系统中的重要性程度; F_i 表示因素 i 对其他因素的影响, 即致因因素间的因果逻辑关系重要性程度。

步骤 7 计算整体影响矩阵 $H = (h_{ij})_{L \times L}$, 可在综合影响矩阵的基础上考虑自身因素影响得到, 即

$$H = I + T \quad (13)$$

步骤 8 确定适当的临界值 λ 构建可达矩阵, $O = (o_{ij})_{L \times L}$, 其元素 o_{ij} 表示为

$$o_{ij} = \begin{cases} 1 & h_{ij} \geq \lambda \\ 0 & h_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (14)$$

步骤 9 确定可达集合 R_i 和前因集合 S_i , 分别表示为

$$R_i = \{a_j | a_j \in A, o_{ij} = 1\} \quad (15)$$

$$S_i = \{a_j | a_j \in A, o_{ji} = 1\}$$

步骤 10 确定递阶层级结构模型中每一层的致因因素集合 R'_i , 即

$$R'_i = R_i \cap S_i \quad (16)$$

如果满足式(1)—式(15), 说明 R'_i 中的要素均可能在 S_i 中找到前因, 则 a_i 为最高层元素, 在矩阵 O 中划去第 i 行和第 j 列, 重复此步骤, 直至确定所有的层级, 即构建完成空中危险接近事件递阶层次结构模型。

3 实证分析

根据 1.3 节确定的 33 个致因因素, 进行专家意见收集, 通过构建的 DEMATEL-ISM 空中危险接近事件致因因素分析模型, 分析致因因素之间的相互作用关系, 明确各因素的属性、重要性及层级结构。

3.1 专家意见收集及模型计算

邀请 7 位行业专家(涉及机场、空中交通管制和航空公司 3 个领域)对致因因素两两间作用强度打分, 得到初始直接影响关系矩阵。根据式(6)—式(8)得到综合影响矩阵, 在此基础上, 根据式(9)—式(12)计算各致因因素的中心度和原因度, 确定各致因因素的属性, 计算结果如表 4 所示。

表 4 DEMATEL 计算结果

Tab.4 Calculation result of DEMATEL

致因因素	影响度	被影响度	中心度	原因度	属性	中心度排序
a_1	2.451 6	3.179 1	5.630 7	-0.727 4	结果	9
a_2	2.695 4	1.000 0	3.695 4	1.695 4	原因	26
a_3	1.934 4	1.545 6	3.480 0	0.388 9	原因	27
a_4	3.033 5	1.041 0	4.074 5	1.992 5	原因	23
a_5	2.326 0	1.046 8	3.372 7	1.279 2	原因	29
a_6	2.281 2	1.090 1	3.371 2	1.191 1	原因	30
a_7	3.020 9	1.212 9	4.233 8	1.808 0	原因	21
a_8	2.309 9	1.000 0	3.309 9	1.309 9	原因	31
a_9	2.706 1	1.000 0	3.706 1	1.706 1	原因	25
a_{10}	2.417 9	2.725 2	5.143 1	-0.307 3	结果	14
a_{11}	3.136 2	3.769 2	6.905 4	-0.632 9	结果	3
a_{12}	3.066 8	2.606 5	5.673 3	0.460 2	原因	8
a_{13}	3.341 0	1.084 4	4.425 4	2.256 6	原因	20
a_{14}	2.202 4	4.300 5	6.502 8	-2.098 1	结果	4
a_{15}	1.893 1	3.821 0	5.714 1	-1.927 8	结果	6
a_{16}	1.771 0	2.317 8	4.088 7	-0.546 8	结果	22
a_{17}	1.937 2	3.017 9	4.955 2	-1.080 7	结果	17
a_{18}	1.750 0	3.439 3	5.189 3	-1.689 3	结果	13
a_{19}	1.912 6	3.212 0	5.124 7	-1.299 4	结果	15
a_{20}	1.608 7	1.126 1	2.734 8	0.482 7	原因	33
a_{21}	2.197 8	2.340 3	4.538 1	-0.142 5	结果	19
a_{22}	2.081 9	1.104 7	3.186 6	0.977 2	原因	32
a_{23}	2.158 7	1.751 1	3.909 8	0.407 6	原因	24
a_{24}	1.710 0	1.682 1	3.392 1	0.027 9	原因	28
a_{25}	1.778 0	3.207 7	4.985 6	-1.429 7	结果	16
a_{26}	2.107 9	2.569 3	4.677 2	-0.461 4	结果	18
a_{27}	2.698 1	3.549 7	6.247 8	-0.851 7	结果	5
a_{28}	3.447 1	3.549 4	6.996 6	-0.102 3	结果	1
a_{29}	3.468 0	3.512 9	6.980 9	-0.044 9	结果	2
a_{30}	2.601 9	2.844 8	5.446 7	-0.242 9	结果	10
a_{31}	2.288 5	2.985 7	5.274 2	-0.697 2	结果	12
a_{32}	2.259 8	3.020 0	5.279 9	-0.760 2	结果	11
a_{33}	2.383 1	3.323 8	5.706 9	-0.940 7	结果	7

根据式(13),在综合影响矩阵的基础上考虑自身因素影响得到整体影响矩阵。根据整体影响矩阵构建解释结构模型时,确定的 λ 值遵循两条原则:一是根据所确定的 λ 值,计算各致因因素的节点度,确保节点度适中且关联关系符合实际;二是基本确保节点度较大的致因因素在确定的重要因素之中^[21]。选取0.040、0.055、0.070、0.085、0.100、0.115共6个 λ 值,分别计算其对应的节点度值,节点度衰减如图4所示,当 $\lambda =$

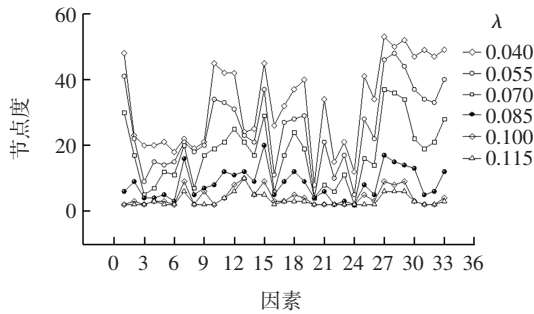


图 4 不同 λ 下节点度衰减图

Fig.4 Attenuation diagram of node degree under different λ

0.085 时,节点度适中,且节点度较大的致因因素在确定的重要因素之中。根据式(14)将整体影响矩阵转化为可达矩阵。

根据式(15)确定了每个致因因素的可达集 R_i 和前因集 S_{i_0} 。依据式(16)中的 $R'_i = R_i \cap S_{i_0}, i = 15, 18, 22, 23, 24, 25$ 满足要求,因此, $L_1 = \{a_{15}, a_{18}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{25}\}$, 将最高级的因素去掉。重复以上过程,直至推至最深层次的因素,最终将致因因素划分为 8 层,其他各层因素集合表示如下:

$$L_2 = \{a_{14}, a_{16}, a_{17}, a_{19}, a_{20}, a_{21}, a_{26}, a_{31}\}$$

$$L_3 = \{a_6, a_{11}, a_{29}\}$$

$$L_4 = \{a_4, a_{10}, a_{28}, a_{33}\}$$

$$L_5 = \{a_3, a_5, a_{30}, a_{32}\}$$

$$L_6 = \{a_{27}\}$$

$$L_7 = \{a_1, a_9, a_{12}, a_{13}\}$$

$$L_8 = \{a_2, a_7, a_8\}$$

最终确定的空中危险接近事件致因因素递阶模型如图 5 所示。

型如图 5 所示。

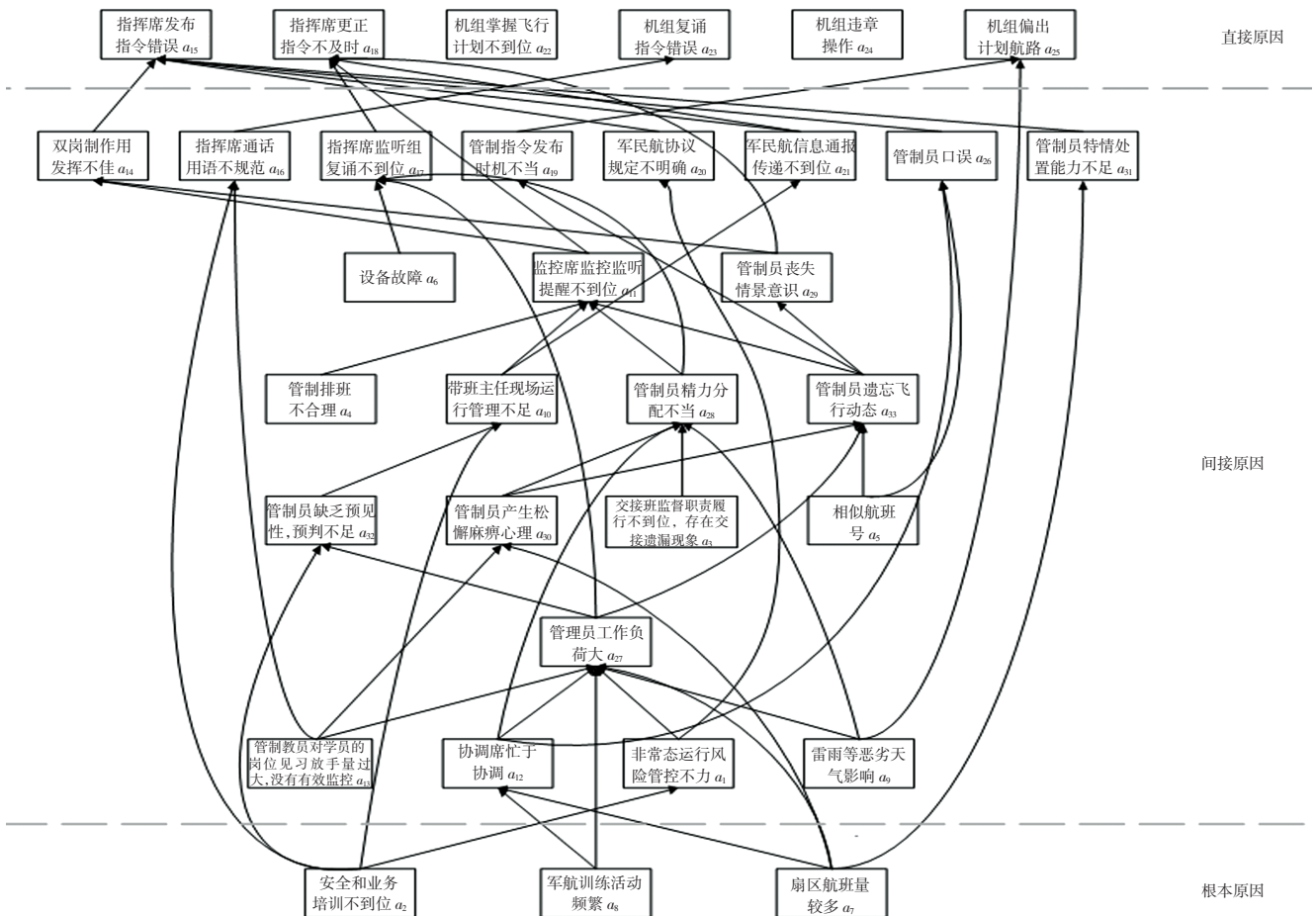


图 5 空中危险接近事件致因因素递阶模型

Fig.5 Hierarchical model of causal factors of near mid-air collision incident

3.2 致因因素作用机理分析

1) 重要性和属性分析

各致因因素的中心度越大,重要度越高,由表4可知: a_{28} 、 a_{29} 、 a_{11} 、 a_{14} 、 a_{27} 、 a_{15} 、 a_{33} 、 a_{12} 、 a_1 、 a_{30} 、 a_{32} 、 a_{31} 、 a_{18} 、 a_{10} 、 a_{19} 共15个致因因素在空中危险接近事件中的重要性较高; a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 、 a_7 、 a_8 、 a_9 、 a_{12} 、 a_{13} 、 a_{20} 、 a_{22} 、 a_{23} 、 a_{24} 为14个原因属性的致因因素,这些因素对其他因素的影响大于其他因素对自身的影响; a_1 、 a_{10} 、 a_{11} 、 a_{14} 、 a_{15} 、 a_{16} 、 a_{17} 、 a_{18} 、 a_{19} 、 a_{21} 、 a_{25} 、 a_{26} 、 a_{27} 、 a_{28} 、 a_{29} 、 a_{30} 、 a_{31} 、 a_{32} 、 a_{33} 为19个结果属性的致因因素,这些因素受其他因素影响大于自身对其他因素的影响。

2) 层级分析

根据空中危险接近事件致因因素递阶模型,所有致因因素分布在8层,并呈现出同级或跨层级联系等较为复杂的关系(如图5所示),层级1为直接原因,层级2~7为间接原因,层级8为根本原因。

直接原因主要涉及指挥席在调配过程中的不安全行为,机组在操作航空器过程中的不安全行为,管制员在监听机组复诵、监控航空器动态等方面存在的漏洞,其中,“指挥席发布指令错误 a_{15} ”在直接原因层中的中心度最高,是最重要的因素,受间接原因层的“双岗制作用发挥不佳 a_{14} ”“军民航协议规定不明确 a_{20} ”“军民航信息通报传递不到位 a_{21} ”“管制员口误 a_{26} ”“管制员特情处置能力不足 a_{31} ”的直接影响。采取有效措施控制直接原因对预防空中危险接近事件的发生起到显著的效果。

间接原因主要涉及人的不安全行为、环境的不安全条件、物的不安全状态。间接原因既受根本原因的影响,同时又影响直接原因,如“管制员特情处置能力不足 a_{31} ”既受根本原因中“扇区航班量较多 a_7 ”的影响,也影响直接原因中的“指挥席发布指令错误 a_{15} ”。表明间接原因起到承上启下的作用,与其他因素发生非线性交互耦合作用的可能性较大,通过控制这些核心节点可以有效切断事故传播路径,是未来预防空中危险接近事件发生的重点。

根本原因主要涉及管理缺陷和环境的不安全条件两方面。根本原因中,“安全和业务培训不到位 a_2 ”“扇区航班量较多 a_7 ”与其他节点的连接最多,对其他节点的影响较大。“安全和业务培训不到位 a_2 ”将会影响间接原因中的“指挥席通话用语不规范 a_{16} ”“管制员缺乏预见性,预判不足 a_{32} ”“带班主任现场运行管理不足 a_{10} ”“非常态运行风险管控不力 a_1 ”。“扇区航班量较多 a_7 ”“军航训练活动频繁 a_8 ”是导致空中危险接近事

件发生的环境因素,也是空管运行面临的变化和挑战,主要反映在空域用户多样性和空中交通容量方面。根本原因对于其他致因因素及空中危险接近事件的发生具有较强和较深的影响,控制根本原因有利于从根源上降低空中危险接近事件的发生。

3) 作用机理分析

以根本原因中中心度最高的“扇区航班量较多 a_7 ”为例,确定了其作用机理:扇区航班量较多 a_7 →协调席忙于协调 a_{12} →管制员工作负荷大 a_{27} →管制员缺乏预见性,预判不足 a_{32} →带班主任现场运行管理不足 a_{10} →监控席监控监听提醒不到位 a_{11} →双岗制作用发挥不佳 a_{14} →指挥席发布指令错误 a_{15} 。基于此路径,从致因因素中的根本原因出发,深层次地揭示出空中危险接近事件发生的影响机理是在运行环境因素为“扇区航班量较多 a_7 ”的根本原因影响下,“协调席忙于协调 a_{12} ”“带班主任现场运行管理不足 a_{10} ”“监控席监控监听提醒不到位 a_{11} ”“双岗制作用发挥不佳 a_{14} ”等管制现场运行因素和“管制员工作负荷大 a_{27} ”“管制员缺乏预见性,预判不足 a_{32} ”等人为因素间交互耦合作用下,产生了“指挥席发布指令错误 a_{15} ”,直接造成了空中危险接近事件的发生。

4 对策建议

依据直接、间接和根本原因共同作用造成空中危险接近事件发生的作用特点,分别提出具体对策。

为了立即遏制事件的发生并控制直接原因,主要涉及席位之间配合、个人技能、军民航沟通协作和管制员在监听监控等方面问题。应加强排班制度的优化落实,充分考虑管制员的生理因素、心理活动和性格搭配、新老搭配等,积极优化排班制度;严抓资质能力的排查工作,制定并落实资质能力排查工作方案,细化资质能力排查内容和提高资质能力排查标准,适时采取停岗培训、调离岗位等措施;深化军民两方的沟通协作,健全军民航两方协调机制和长效沟通机制。

为了避免间接原因的交互耦合,控制间接原因,可以不同程度地减少各致因因素间的相互作用影响,切断事故的发生路径。影响程度最大节点主要反映了工作负荷等人为因素和雷雨等天气因素,因此,应发挥技术安全防范手段的支撑作用,加快实施空中交通管制防护、冲突探测和进港管理系统等技术安全防范手段的应用;强化运行现场的安全监督,明晰运行现场各岗位人员的监管责任和界限,持续开展现场纠违

和无后果违章查处工作, 加强空管疲劳监测系统研究和防控。

为了从本质上降低根本原因的影响, 主要涉及管制指挥、特情处置、现场运行管理、个人工作技能等方面, 提出加大各类培训的开展力度, 健全规范的培训制度, 完善管制员等关键专业人员培训管理体系, 强化管制基础培训和管制岗位培训; 推动运行环境的优化改善, 加大流量管理的资金投入、加快流量管理系统技术提升、流量管理人员配备, 强化预战术流量管理; 着力安全风险的防范化解, 针对短时超能力超负荷运行、军航训练活动频繁等情况, 结合运行环境和态势变化, 最大化识别对安全运行有影响的各种情形, 做好阶段性风险防控。

5 结语

为了明晰空中危险接近事件各致因因素之间的层次结构和作用机理, 首先, 利用 LDA 主题模型确定非常态运行风险管控不力、安全和业务培训不到位、相似航班号、设备故障、扇区航班量较多等 33 个空中危险接近事件致因因素。其次, 基于 DEMATEL-ISM 的空中危险接近事件的致因因素分析模型, 确定 14 个原因属性因素和 19 个结果属性因素, 分析得到 8 级 3 阶的递阶结构模型, 其中, 指挥席发布指令错误等 6 个致因因素是直接原因, 双岗制作用发挥不佳等 24 个致因因素是间接原因, 安全和业务培训不到位等 3 个致因因素是根本原因, 直接、间接和根本原因共同作用造成了空中危险接近事件的发生。最后, 针对直接、间接和根本原因, 分别提出了加强排班制度的优化落实、发挥技术安全防范手段的支撑作用和加大各类培训的开展力度等对策。但由于本文数据主要来源于空管原因为主的空中危险接近事件, 大多基于空管角度分析, 关于机组、军航等原因的空中危险接近事件分析的颗粒度较为粗糙, 因此未来可以将航空公司中相关数据收集补充完善, 以使模型更加客观合理。

参考文献:

- [1] ICAO. 2020 Safety Report [R]. Montreal: ICAO, 2020.
- [2] 秦绪林. 相撞事故调查分析与防相撞空管策略研究[J]. 空中交通管理, 2009(4): 12-14.
- [3] ZHANG X G, MAHADEVAN S. Bayesian network modeling of accident investigation reports for aviation safety assessment[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 209: 107371.
- [4] 中国民用航空局. 2019 年中国民用航空安全信息统计分析报告[R]. 北京: 中国民用航空局, 2019.
- [5] 刘晓红, 杨 婕. 我国双机空中相撞事故及事故征候统计分析[J]. 中国民用航空, 2012(12): 70-72.
- [6] 罗晓利. 1990—2003 年中国民航 152 起小于间隔飞行事件的分类统计研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(12): 26-32.
- [7] 陈 芳, 韩美佳, 陈 茜. 基于零膨胀模型的航空器危险接近事件安全影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(2): 147-151.
- [8] 朱 磊, 梁晓龙, 张佳强. 基于事故树和贝叶斯的军民航飞行冲突风险研究[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41: 53-56.
- [9] 吴奇科, 姚登凯, 甘旭升, 等. 基于 HAZOP 法的飞行冲突故障树的建立[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(2): 124-129.
- [10] WANG L L, CAO Q G, ZHOU L J. Research on the influencing factors in coal mine production safety based on the combination of DEMATEL and ISM[J]. Safety science, 2018, 103: 51-61.
- [11] 陈 芳, 韩美佳. 空中危险接近事件中的空管风险因素识别[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(4): 1583-1591.
- [12] 傅 贵, 索 晓, 贾清淞, 等. 10 种事故致因模型的对比研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(2): 58-63.
- [13] TANGUY L, TULECHKI N, URIELI A, et al. Natural language processing for aviation safety reports: from classification to interactive analysis[J]. Computers in Industry, 2016, 78: 80-95.
- [14] 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.
- [15] 牛 毅, 樊运晓, 高 远. 基于数据挖掘的化工生产事故致因主题抽取[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(10): 165-170.
- [16] 谭章禄, 王 泽, 陈 晓. 基于 LDA 的煤矿安全隐患主题发现研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(6): 123-128.
- [17] 中国民用航空局. 民用航空器征候(征求意见稿) [EB/OL]. (2021-06-21)[2022-12-22]. https://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202106/t20210621_208023.html.
- [18] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I. Latent dirichlet allocation[J]. the Journal of Machine Learning Research, 2003, 3: 993-1022.
- [19] SUNG Y Y, KIM S B. Topical keyphrase extraction with hierarchical semantic networks[J]. Decision Support Systems, 2020, 128: 113163.
- [20] YAZDI M, KHAN F, ABBASSI R, et al. Improved DEMATEL methodology for effective safety management decision-making [J]. Safety Science, 2020, 127: 1-17.
- [21] 孟 超, 李晓萌, 孙玉岭, 等. 基于 ISM 和信息熵的铁路隧道塌方风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(S1): 64-70.

(责任编辑: 孟 欣)