

中文引用格式: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.

英文引用格式: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.

# 基于 N-K-FRAM 的空中交通运行安全风险耦合机制\*

李一可<sup>1,2</sup>, 张洪海<sup>\*\*1,2</sup>教授, 石宗北<sup>1,2</sup>, 周锦伦<sup>1,2</sup>

(1 南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106;

2 国家空管飞行流量管理技术重点实验室, 江苏 南京 211106)

中图分类号: X949

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.05.1552

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】** 为探究空中交通运行安全风险耦合演化特征,厘清基于 N-K 模型与功能共振分析方法(FRAM)相结合的空中交通运行系统耦合变异形成机制,首先,收集不安全事件文本数据,归纳事件中的风险因素并归类,得到其历史发生频率以及风险因素之间的耦合关系;其次,利用 N-K 模型求解运行风险因素间的耦合度值;然后,结合输出时间与精度,定量评估 FRAM 功能模块的可变性,分析空中交通运行安全风险耦合机制;最后,分别以区域导航(RNAV)进近不安全事件与偏离航路不安全事件为例,分析其安全风险。结果表明:基于 N-K-FRAM 的风险耦合机制能够合理有效地定量计算功能模块间的变异性,弱化了传统分析方法对主观意识的依赖性,分析结果更为客观科学。

**【关键词】** 空中交通运行; 安全风险耦合; N-K 模型; 功能共振分析方法(FRAM); 不安全事件

## Coupling mechanism of air traffic operation safety risk based on N-K-FRAM

LI Yike<sup>1</sup>, ZHANG Honghai<sup>1</sup>, SHI Zongbei<sup>2</sup>, ZHOU Jinlun<sup>1</sup>

(1 College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211106, China; 2 Key Laboratory of National Air Traffic Control Flight Flow Management Technology, Nanjing Jiangsu 211106, China)

**Abstract:** In order to explore the coupled evolution mechanism of air traffic operation safety risk, clarify the mechanism of coupling and mutation formation in air traffic operation systems based on a combination of the N-K model and FRAM. Firstly, textual data on unsafe incidents was collected. The risk factors involved were categorized, and their historical frequency of occurrence and the coupling relationship between risk factors were obtained. Secondly, the N-K model was used to solve the coupling degree values between air traffic operational risk factors. Finally, based on the output time and accuracy, the variability of the FRAM functional module was quantitatively evaluated, analyzing the coupling mechanism of air traffic operational safety risks, and safety risk analysis was conducted using regional area navigation (RNAV) approach unsafe events and deviation route unsafe events as examples. The results indicate that the evaluation method based on improved FRAM can quantitatively calculate the variability between functional modules in a reasonable and effective manner, weaken the dependence of traditional analysis

\* 文章编号:1003-3033(2024)05-0175-11; 收稿日期:2023-11-20; 修稿日期:2024-02-21

\*\* 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.

methods on subjective consciousness, and make the analysis results more objective and scientific.

**Keywords:** air traffic operations; safety risk coupling; N-K model; functional resonance analysis method (FRAM); unsafe events

## 0 引言

安全是民航运行的第一要义,空中交通运行系统是一个动态的复杂系统,具有多技术、多人及人机交互的特点<sup>[1]</sup>。空中交通不安全事件的发生往往是各种因素综合作用的结果,难以准确地对其量化。因此,从耦合机制角度出发,阐述系统运行耦合变异过程,计算耦合效应,对空中交通运行系统安全风险评估与管理具有重要意义。

近年来国内外学者<sup>[2-4]</sup>十分重视系统运行安全性分析方面的研究,例如:徐远<sup>[4]</sup>利用功能共振分析方法(Functional Resonance Analysis Method, FRAM)分析了空中交通运行中的碰撞事件,通过识别系统潜在风险,评估运行系统的安全性。FRAM法是一种基于随机共振理论的定性型系统事故分析方法<sup>[5]</sup>,可改善复杂系统中确定性与概率性分析的局限性,解释功能共振的产生,并发现复杂系统中的弱点,提出系统运行改进措施,已被应用于铁路交通<sup>[6]</sup>、医疗卫生<sup>[7]</sup>、工业运营<sup>[8]</sup>等多方面的复杂任务环境风险评估或事故调查中。由于FRAM法为定性类的分析方法,因此,学者们<sup>[9-11]</sup>对其加以改进,并分为定性改进和定量改进2类。定性改进的研究重点主要集中在更精确地识别系统功能或定义功能的可变性;对于精确识别系统功能,最初在功能模块的细化上通常是主观定义,无明确的停止规则和分析分辨率,导致了功能模块识别的随机性。为了克服这一局限,有学者通过引入其他方法改进对系统功能识别的效果,如结合行动者网络理论<sup>[12]</sup>、风险矩阵<sup>[13]</sup>、事故因果关系理论<sup>[14]</sup>等;另一方面是定义功能的可变性,有研究在FRAM法中定义了11种可能影响人员绩效的共同绩效条件(Common Performance Conditions, CPCs)<sup>[15]</sup>,将包括弹性系统、预期失效分析<sup>[16]</sup>等在内的CPCs与FRAM法相结合,以定性改进FRAM法。定量改进则主要集中在定量或半定量评估FRAM模型功能的可变性方面,一些学者通过使用其他技术与FRAM相结合进行研究,如定义了考虑耦合的CPCs效应的可变性<sup>[17]</sup>,利用层次分析法<sup>[18]</sup>、认知可靠性与失误分析方法<sup>[19]</sup>、蒙特卡罗模拟方法<sup>[20]</sup>以及应用蒙特卡罗量化可变性识别共振函数<sup>[21-23]</sup>,应用综合动态贝叶

斯<sup>[24]</sup>、人与系统交互<sup>[25]</sup>以及概率分布<sup>[26]</sup>等方法,来弱化传统FRAM法的主观性缺点。

鉴于此,笔者拟研究一种基于N-K模型与FRAM相结合的空中交通运行安全风险耦合变异形成机制,通过引入N-K模型,并基于不安全事件数据,求解风险因素间的耦合性,定量评价FRAM中功能模块的可变性,同时可以更清晰地展现事故发生过程,为安全管理人员开展空中交通运行安全风险耦合机制研究提供参考。

## 1 空中交通运行安全风险耦合分析

### 1.1 N-K模型

N-K模型是一种研究生物进化理论的耦合模型<sup>[27-28]</sup>,其在不同领域的应用证明了在安全风险因素分析方面的可行性<sup>[29]</sup>,同时也为空中交通运行安全风险耦合演化分析提供了理论基础。利用N-K模型分析因素间耦合度时, $N$ 表示因素的数量, $K$ 表示相互作用的因素数量, $0 \leq K \leq N-1$ 。

### 1.2 FRAM的系统功能模块

在FRAM中,复杂系统运行过程在时间维度上可通过多个功能模块进行表述,每个功能模块可用于表述复杂运行系统中的一个子系统。利用输入(Input, I)、输出(Output, O)、时间(Time, T)、前提(Preconditions, P)、资源(Resources, R)以及控制(Control, C)6个属性建立每个功能模块,如图1所示。其中,输入为启动功能模块所需相关事物;前提为功能模块执行前所需具备的条件;资源为功能模块执行时所需相关资源;控制为对功能模块进行检测、控制等;输出为功能模块运行输出的实体或状态结果;时间为对功能模块运行时间的约束条件,如起始时间、结束时间、持续时间。

FRAM的步骤分为:识别、描述空中交通运行过程的基本功能模块;分析功能模块的潜在可变性;发现功能模块之间的共振并构建网络图;基于结果设置屏障,并提出事故或风险控制措施。

### 1.3 空中交通运行系统风险耦合触发分析

从理论上讲,在空中交通运行风险因素的影响下,其功能模块会产生非正常振动并变异,变异性可能会传播并影响与其相关的功能模块,导致相关功

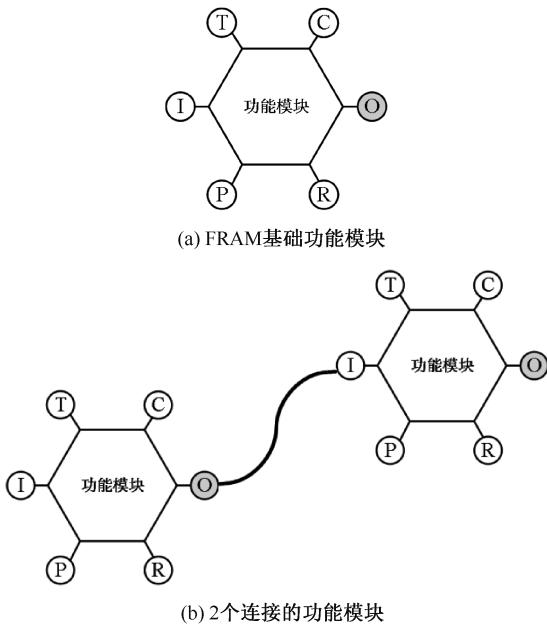


图 1 FRAM 六角功能模块

Fig. 1 FRAM hexagonal function module

能模块出现异常振动。从物理角度来看,上/下游功能模块中的异常振动会引起功能共振,上游功能模块和下游功能模块间的正常连接会被破坏,当功能共振强度超过系统风险事故的临界阈值时,系统将发生事故<sup>[9]</sup>。基于 FRAM 的空中交通系统运行风险耦合演化过程如图 2 所示。

由图 2 可以看出,在时间  $t_1$  时,因空中交通运行系统中,风险因素所带风险能量对系统运行带来扰动,从而造成风险震荡  $S_{t_1}$ ,其对空中交通运行子防御系统  $d_{t_1}$  进行攻击,若  $S_{t_1} \leq d_{t_1}$ ,则未冲破防御系统,系统安全;若  $S_{t_1} > d_{t_1}$ ,则冲破防御系统。随后风险因素与其他风险因素进行耦合,形成新的风险震荡  $S_{t_2}$ ,其对 FRAM 功能模块防御系统  $D_{t_2}$  进行攻击,若  $S_{t_2} \leq D_{t_2}$ ,新的耦合风险震荡冲破防御系统,但系统安全;若  $S_{t_2} > D_{t_2}$ ,则耦合风险震荡冲破总防御系统,并导致系统状态发生变化,FRAM 中的功能模块发生变化。

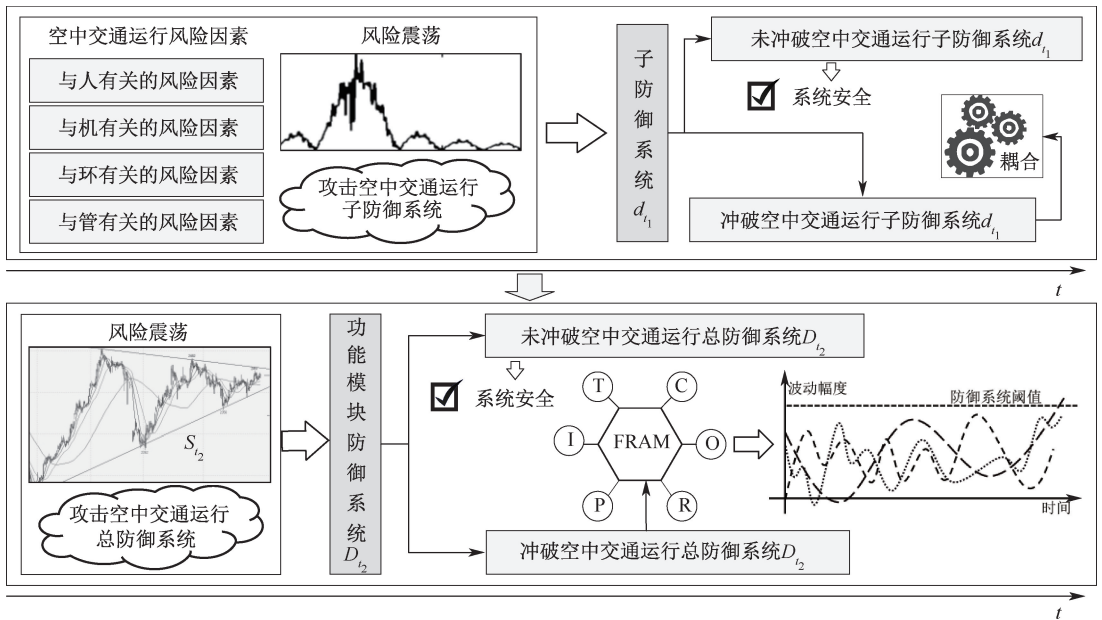


图 2 基于 FRAM 的空中交通运行系统风险耦合演化

Fig. 2 System operational evolutionary mechanism of risk coupling based on FRAM

## 2 安全风险耦合效应度量机制

### 2.1 空中交通运行安全风险因素识别分析

针对空中交通运行安全问题,根据文献[30],结合不安全事件报告文本数据内容,将系统运行过程中每个功能模块中的风险因素进行定性分类,得到人为因素、设备因素、环境因素和组织因素的历史发生频率,接着在每个功能模块中确定风险因素间

的耦合关系,并基于 N-K 模型计算耦合风险度。空中交通运行中的风险因素总结见表 1。

### 2.2 空中交通运行安全风险交互场景

使用  $H, M, E, G$  表示人、机、环和管。 $h, m, e, g$  表示人、机、环和管的状态,其用二进制数 0 和 1 表示。

以人为失误为例,if  $h = 1$  则人为失误的风险震荡冲破了防御系统,if  $h = 0$  则人为失误的风险震荡没有冲破防御系统。交互信息  $U$  表示风险因素间

表 1 空中交通运行系统风险因素

Table 1 Risk factors of air traffic operation system

风险因素	详细内容
人为因素	机务人员:心理感知、行为错误/遗忘/缺少/延迟、计划有误、设备使用不当、身体不适、程序相关知识经验不足等; 机组人员:与理解与解释相关的沟通能力,行为上错误/延迟/遗忘,信息处理/决策判断,设备操作经验不足,心理认知/注意力/个性态度等; 管制人员:语言与口音/通信准确性等沟通问题,不正确行为表现/信息处理、设备使用问题等
机器设备因素	飞机系统:通信系统对讲机故障,防冰/雨/雪系统故障,电力系统故障、起落架系统损坏、飞机控制系统问题、自动飞行系统、数据记录仪、中央警告面板故障等; 飞机结构:挡风玻璃维护不当、尾翼损坏、尾翼维护不当、桁条损坏、短舱结构损坏、座椅损坏等; 飞机动力装置:发动机故障、发动机压缩机磨损、发动机引气系统故障等
环境气象因素	气象环境:晴空湍流,对流湍流,顺风、大风、降雨、闪电等; 物理环境:地面设备、鸟类动物出现、工作空间环境、跑道表面潮湿、跑道表面覆盖雪/雪泥/冰、周边建筑、地形潮湿泥泞等; 运行环境:机场设施(照明等)、航向道信息准确性、交通拥堵、气象服务信息准确性等
组织管理因素	政策管理问题、设备设计问题、培训、文件信息充分性与可用性、文件未记录保存等

的耦合风险强度值,  $U(H, M)$  表示人与航空器间的耦合风险强度,  $U(H, M, E)$  表示人、航空器、环之间的耦合风险强度,  $U(H, M, E, G)$  表示人、航空器、环和管间的耦合风险强度。空中交通运行安全风险耦合按组合类型数量分为以下 4 大类:

1) 单因素风险耦合是指空中交通运行安全的单类因素之间相互作用,其耦合风险值分别记为  $U(H)$ 、 $U(M)$ 、 $U(E)$ 、 $U(G)$ 。

2) 双因素风险耦合是指影响空中交通运行安全的 2 类因素之间相互作用,其耦合风险值分别记为  $U(H, M)$ 、 $U(H, E)$ 、 $U(H, G)$ 、 $U(M, E)$ 、 $U(M, G)$ 、 $U(E, G)$ 。

3) 三因素风险耦合是指影响空中交通运行安全的 3 类因素之间相互作用,耦合风险值分别记为  $U(H, M, E)$ 、 $U(H, M, G)$ 、 $U(H, E, G)$ 、 $U(M, E, G)$ 。

4) 四因素风险耦合是指影响空中交通运行安全的 4 类因素之间相互作用,耦合风险值分别记为  $U(H, M, E, G)$ ,总耦合风险值用  $U$  表示。

### 2.3 空中交通运行安全风险耦合效应度量

空中交通运行系统中双因素、三因素与四因素风险耦合效应度量如下:

1) 空中交通运行系统双因素耦合。

$$\begin{cases}
 U(H, M) = \sum_{h \in H} \sum_{m \in M} P_{hm..} \cdot \log_2 [P_{hm..} / P_{h...} \cdot P_{...m}] \\
 U(H, E) = \sum_{h \in H} \sum_{e \in E} P_{h.e.} \cdot \log_2 [P_{h.e.} / P_{h...} \cdot P_{...e}] \\
 U(H, G) = \sum_{h \in H} \sum_{g \in G} P_{h..g} \cdot \log_2 [P_{h..g} / P_{h...} \cdot P_{...g}] \\
 U(M, E) = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} P_{..me} \cdot \log_2 [P_{..me} / P_{...m} \cdot P_{...e}] \\
 U(M, G) = \sum_{m \in M} \sum_{g \in G} P_{..mg} \cdot \log_2 [P_{..mg} / P_{...m} \cdot P_{...g}] \\
 U(E, G) = \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} P_{..eg} \cdot \log_2 [P_{..eg} / P_{...e} \cdot P_{...g}]
 \end{cases}$$

$$H = \{0, 1\}, M = \{0, 1\}, E = \{0, 1\}, G = \{0, 1\}$$

式中  $P_{hm..}$ 、 $P_{..me}$ 、 $P_{h.e.}$ 、 $P_{h..g}$ 、 $P_{..mg}$ 、 $P_{..eg}$  为双因素相互作用的风险因素的风险变化率。以  $P_{hm..}$  为例,计算过程如下:

$$P_{hm..} = \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} P'_{hmg}$$

$$H = \{0, 1\}, M = \{0, 1\}, E = \{0, 1\}, G = \{0, 1\}$$

式中:  $P'_{hmg}$  为飞行员/机组人员/管制员等处于第  $h$  种状态,飞机系统/结构等处于第  $m$  种状态,气象环境/运行环境等处于第  $e$  种状态,组织管理处于第  $g$  种状态 4 种因素风险耦合发生的概率;  $P_{h...}$ 、 $P_{...m}$ 、 $P_{...e}$ 、 $P_{...g}$  分别为空中交通运行系统中各风险因素在不同状态下的概率。以  $P_{h...}$  为例,计算过程如下:

$$P_{h...} = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} P'_{hmg}$$

$$H = \{0, 1\}, M = \{0, 1\}, E = \{0, 1\}, G = \{0, 1\}$$

2) 空中交通运行系统三因素耦合。

$$\begin{cases}
 U(H, M, E) = \sum_{h \in H} \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} P_{hme.} \cdot \log_2 [P_{hme.} / P_{h...} \cdot P_{...m} \cdot P_{...e}] \\
 U(H, E, G) = \sum_{h \in H} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} P_{h.e.g} \cdot \log_2 [P_{h.e.g} / P_{h...} \cdot P_{...e} \cdot P_{...g}] \\
 U(H, M, G) = \sum_{h \in H} \sum_{m \in M} \sum_{g \in G} P_{hm.g} \cdot \log_2 [P_{hm.g} / P_{h...} \cdot P_{...m} \cdot P_{...g}] \\
 U(M, E, G) = \sum_{m \in M} \sum_{e \in E} \sum_{g \in G} P_{..meg} \cdot \log_2 [P_{..meg} / P_{...m} \cdot P_{...e} \cdot P_{...g}]
 \end{cases}$$

$$H = \{0, 1\}, M = \{0, 1\}, E = \{0, 1\}, G = \{0, 1\}$$

式中  $P_{hme.}$ 、 $P_{hm.g}$ 、 $P_{h.eg}$ 、 $P_{.meg}$  为三因素相互作用的风险因素的风险变化率,以  $P_{hme.}$  为例,计算过程如下:

$$P_{hme.} = \sum_{g \in G} P'_{hme.g}$$

$$H = \{0, 1\}, M = \{0, 1\}, E = \{0, 1\}, G = \{0, 1\}$$
(5)

3) 空中交通运行系统四因素耦合。

$$U(H, M, E, G) = \sum_h \sum_m \sum_e \sum_g P_{hme.g} \cdot \log_2 [P_{hme.g} / P_{h...} \cdot P_{...m...} \cdot P_{...e...} \cdot P_{...g...}]$$

$$H = \{0, 1\}, M = \{0, 1\}, E = \{0, 1\}, G = \{0, 1\}$$
(6)

式中  $U(H, M, E, G)$  表示对空中交通运行安全风险耦合效应的综合度量,其值越大则代表发生风险的概率越大。从式(1)、式(4)和式(6)可以发现,耦合次数与系统运行安全相关,耦合次数越多,耦合风险度越大。基于公式计算求得耦合风险度值,对由风险因素

表 2 耦合风险强度值与功能性能可变性在时间与精度间的关系

Table 2 Coupled risk intensity values and functional performance variability between time and accuracy

准确率	时间特征			
	过早	适时	过晚	未发生
精确	$U_{01}: U \in (0, 0.1]$	$U_{02}: U = 0$	$U_{03}: U \in (0.1, 0.3]$	$U_{04}: U \in (0.7, 0.9]$
可接受	$U_{05}: U \in (0.1, 0.3]$	$U_{06}: U = 0$	$U_{07}: U \in (0.3, 0.5]$	$U_{08}: U \in (0.9, 1)$
不精确	$U_{09}: U \in (0.3, 0.5]$	$U_{10}: U \in (0.5, 0.7]$	$U_{11}: U \in (0.7, 0.9]$	$U_{12}: U = 1$

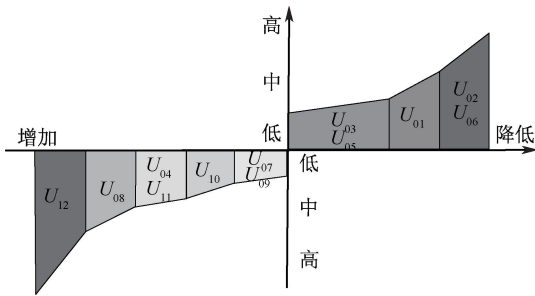


图 3 因素对模块性能可变性的影响

Fig. 3 Factors on function performance variability

### 3 基于民航不安全事件的实证分析

#### 3.1 数据来源

民航不安全运行事件报告是民航领域内所有不正常事件的第一手资料,是不正常事件演化经过真实详细的记录总结<sup>[33]</sup>。

文中对美国国家运输安全委员会航空事故数据库中 2012—2022 年不安全事件报告进行筛选、统计与分类,最终得到共计 518 份报告,根据不安全事件报告文本,以文本主题以及包含事件发生基本情况、发生原因、最终结果等全过程为框架对其进行拆分,

引起的功能模块的可变性进行排序和定量分析。

基于式(1)、式(4)和式(6),求解耦合风险强度值  $U$  后,可定量分析由空中交通运行风险因素引起的功能模块的变异性。一般来说,耦合风险强度值  $U$  在  $[0, 1]$ <sup>[31]</sup>,耦合风险度的数值越大,FRAM 功能模块的可变性概率越大。根据耦合强度将  $U$  的值从高到低划分为 8 个等级,即  $U = 0$ 、 $U \in (0, 0.1]$ 、 $U \in (0.1, 0.3]$ 、 $U \in (0.3, 0.5]$ 、 $U \in (0.5, 0.7]$ 、 $U \in (0.7, 0.9]$ 、 $U \in (0.9, 1)$  和  $U = 1$ 。如果  $U = 0$ ,则风险因素之间没有耦合,功能模块没有变化。如果  $U = 1$ ,风险因素和功能模块的可变性之间一定存在耦合。在 FRAM 的步骤 2 中,通过时间与精度对输出 (Output) 进行定义<sup>[27]</sup>。建立基于 N-K 模型的耦合风险强度值与功能性能可变性在时间与精度间的关系<sup>[32]</sup>,见表 2;耦合风险因素对模块可变性影响度如图 3 所示。

统计“人、机、管、环”4 种风险因素的发生频次,以“0”表示该因素处于安全状态,“1”表示该风险因素突破防御系统。通过筛出与文中研究无关的文本数据信息、拆解不安全事件、总结风险因素、多因素风险耦合组合等步骤对不安全事件进行统计与处理。

区域导航 (Regional Area Navigation, RNAV) 技术是近年来民航导航领域出现的新技术,随着星基导航 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的发展,其有着广泛的应用前景,因此,文中选择 RNAV 进近不安全事件以及较为常规的偏离航路不安全事件为例,进行实例分析。

#### 3.2 RNAV 进近不安全事件

##### 3.2.1 功能模块分析

以 RNAV 进近不安全事件为背景进行案例研究,根据事件报告,有 11 个功能模块,需要基于 FRAM 进行分析,包括 F1:将进近程序编码载入导航数据库;F2:在 A/C 中加载导航数据库;F3:在飞行管理计算机 (Flight Management Computer, FMC) 的飞行计划中添加 RNAV 程序;F4:检查添加的程序是否正确;F5:在侧向导航 (Lateral Navigation, LNAV) 和垂直导航

(Vertical Navigation, VNAV)模式下启动自动驾驶 AP 或飞行指引 FD;F6:导航监视性能;F7:控制飞行技术误差;F8:管理速度使之最晚在决断高着陆;F9:使用决断高的视觉提示使飞机着陆;F10:飞机着陆成功完成;F11:飞机到达机停机位。

利用 FRAM 六角功能模块原则对每个功能模块进行描述,如 F4“检查添加的程序是否正确”中,对其功能模块的具体描述见表 3。

### 3.2.2 FRAM 网络流程图的建立

描述所有模块后,模块之间的正常耦合可以通过描述每个函数的 6 个关系来确定。利用 FRAM 工具进行可视化,基于 FRAM 的 RNAV 进近不安全事件网络流程图如图 4 所示。从图 4 可以看出,主要

表 3 F4 关系描述

Table 3 Relationship description of F4

关系	描述
输入	RNAV 航路点数据
输出	在有效地 FMS 飞行计划中验证程序的正确
时间/s	60
前提	FMC 飞行计划中的 RNAV 程序
资源	RNAV 进场图
控制	PF 和 PNF 验证程序

的关系存在于输出和输入之间,但在输出和资源之间的也会存在关联,即一个模块的输出是另一个模块的资源。此外,耦合关系不代表模块的简单序列,存在一对多和多对一的耦合关系,模块的相对位置不具有任何意义。

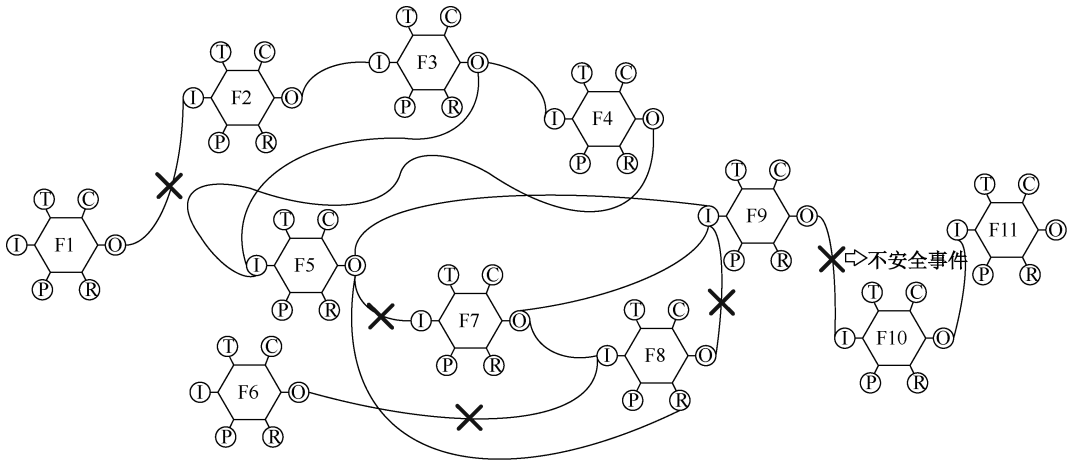


图 4 RNAV 进近流程图中的失误连接

Fig. 4 Failed links in flowchart for RNAV approach

由于功能模块 F1、F5、F6 和 F8 存在潜在连接失败,统计人为失误(H)、机械故障(M)、环境气象(E)和组织管理(G)的历史发生频率,以及上述功能模块的风险因素耦合,并计算出耦合概率。用  $N_{hmeg}$ ,  $h \in \{0,1\}$ ,  $m \in \{0,1\}$ ,  $e \in \{0,1\}$  和  $g \in \{0,1\}$  表示历史发生频率,用  $P_{hmeg}$ ,  $h \in \{0,1\}$ ,  $m \in \{0,1\}$ ,  $e \in \{0,1\}$  和  $g \in \{0,1\}$  表示当 H 处于状态 h, M 处于状态 m, E 处于状态 e, G 处于状态 g 时每个风险因素的耦合概率。据此求解 F1、F5、F6、F8 和 F9 中各风险因素的耦合概率, F1 与 F9 中各风险因素的耦合概率结果及各风险因素的风险变化概率见表 4—表 7。

分别统计 F1、F5、F6、F8、F9 的发生频率以及风险因素耦合概率,并结合式(1)、式(4)和式(6)得各功能模块的耦合风险度值,见表 8。从中可以看出,人为风险因素和组织风险因素会影响正常的操作,导致 F1 的变异性。人为风险因素、机械故障风险因素以及组织风险因素会影响正常运行,导致

F5、F6 和 F8 的变异性。人为风险因素、机械故障风险因素、环境风险因素和组织风险因素将影响正常运行并导致 F9 的变异性。

### 3.2.3 结果分析

根据计算结果以及表 8、图 3 可以发现, F1 ( $U_{03}$  级, 或  $U_{05}$  级)、F5 ( $U_{03}$  级, 或  $U_{05}$  级) 和 F6 ( $U_{03}$  级, 或  $U_{05}$  级) 的耦合风险强度小, 而 F8 ( $U_{09}$  级, 或  $U_{07}$  级) 的耦合风险强度中等。F9 ( $U_{10}$  级) 具有最高的耦合风险强度。

由不安全事件报告可知: 飞行员在降落过程中忽略了来自 F8 的信息, 所掌握的速度可以降落, 不需要复飞, 这说明 F9 及时收到了 F8 的信息, 但信息不精确, 其结果与表 2 中的  $U_{10}$  级结果一致。由图 4 可以发现, F9 的可变性传输至 F10, 导致 2 个功能模块间的共振, F9 和 F10 之间的联系被打破, 导致了不安全事件的发生。求解所得结果与实际的不安全事件相一致, 说明 N-K 模型能够定量计算 FRAM 中

表 4 F1 中各风险因素的耦合概率

Table 4 Coupled probability of each risk factor in F1

$P_{h=1,m=0,e=0,g=0} = 0.298\ 5$	$P_{h=0,m=1,e=0,g=0} = 0$	$P_{h=0,m=0,e=1,g=0} = 0$	$P_{h=0,m=0,e=0,g=1} = 0.417\ 9$	$P_{h=1,m=1,e=0,g=0} = 0$
$P_{h=1,m=0,e=1,g=0} = 0$	$P_{h=1,m=0,e=0,g=1} = 0.283\ 6$	$P_{h=0,m=1,e=1,g=0} = 0$	$P_{h=0,m=1,e=0,g=1} = 0$	$P_{h=0,m=0,e=1,g=1} = 0$
$P_{h=1,m=1,e=1,g=0} = 0$	$P_{h=1,m=1,e=0,g=1} = 0$	$P_{h=1,m=0,e=1,g=1} = 0$	$P_{h=0,m=1,e=1,g=1} = 0$	$P_{h=1,m=1,e=1,g=1} = 0$

表 5 F1 中各风险因素的风险变化概率

Table 5 Risk change probability of each risk factor in F1

$P_{h=0} = 0.417\ 9$	$P_{h=1} = 0.582\ 1$	$P_{m=0} = 1.000\ 0$	$P_{m=1} = 0.000\ 0$	$P_{e=0} = 1.000\ 0$	$P_{e=1} = 0.000\ 0$	$P_{g=0} = 0.298\ 5$	$P_{g=1} = 0.701\ 5$
$P_{h=0,m=0} = 0.417\ 9$	$P_{h=0,m=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0} = 0.582\ 1$	$P_{h=1,m=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=0,e=0} = 0.417\ 9$	$P_{h=0,e=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,e=0} = 0.582\ 1$	$P_{h=1,e=1} = 0.000\ 0$
$P_{h=0,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=0,g=1} = 0.417\ 9$	$P_{h=1,g=0} = 0.298\ 5$	$P_{h=1,g=1} = 0.283\ 6$	$P_{m=0,e=0} = 1.000\ 0$	$P_{m=0,e=1} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=0} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=1} = 0.000\ 0$
$P_{m=0,g=0} = 0.298\ 5$	$P_{m=0,g=1} = 0.701\ 5$	$P_{m=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{e=0,g=0} = 0.298\ 5$	$P_{e=0,g=1} = 0.701\ 5$	$P_{e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{e=1,g=1} = 0.000\ 0$
$N_{h=0,m=0,e=0} = 0.417\ 9$	$N_{h=0,m=0,e=1} = 0.000\ 0$	$N_{h=0,m=1,e=0} = 0.000\ 0$	$N_{h=1,m=0,e=0} = 0.582\ 1$	$N_{h=0,m=1,e=1} = 0.000\ 0$	$N_{h=1,m=0,e=1} = 0.000\ 0$	$N_{h=1,m=1,e=0} = 0.000\ 0$	$N_{h=1,m=1,e=1} = 0.000\ 0$
$P_{h=0,m=0,e=0} = 0.417\ 9$	$P_{h=0,m=0,e=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=0,m=1,e=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0,e=0} = 0.582\ 1$	$P_{h=0,m=1,e=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0,e=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=1,e=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=1,e=1} = 0.000\ 0$
$P_{h=0,m=0,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=0,m=0,g=1} = 0.417\ 9$	$P_{h=0,m=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0,g=0} = 0.298\ 5$	$P_{h=0,m=1,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0,g=1} = 0.283\ 6$	$P_{h=1,m=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=1,g=1} = 0.000\ 0$
$P_{h=0,m=1,g=0} = 0.124\ 7$	$P_{h=0,m=0,g=1} = 0.293\ 2$	$P_{h=0,m=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0,g=0} = 0.173\ 8$	$P_{h=0,m=1,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0,g=1} = 0.408\ 3$	$P_{h=1,m=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=1,g=1} = 0.000\ 0$
$P_{h=0,e=0,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=0,e=0,g=1} = 0.417\ 9$	$P_{h=0,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,e=0,g=0} = 0.298\ 5$	$P_{h=0,e=1,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,e=0,g=1} = 0.283\ 6$	$P_{h=1,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,e=1,g=1} = 0.000\ 0$
$P_{m=0,e=0,g=0} = 0.298\ 5$	$P_{m=0,e=0,g=1} = 0.417\ 9$	$P_{m=0,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=0,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{m=0,e=1,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=0,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=1,g=1} = 0.000\ 0$
$P_{h=0,e=0,g=0} = 0.124\ 7$	$P_{h=0,e=0,g=1} = 0.293\ 2$	$P_{h=0,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,e=0,g=0} = 0.173\ 8$	$P_{h=0,e=1,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,e=0,g=1} = 0.408\ 3$	$P_{h=1,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,e=1,g=1} = 0.000\ 0$
$P_{m=0,e=0,g=0} = 0.298\ 5$	$P_{m=0,e=0,g=1} = 0.701\ 5$	$P_{m=0,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=0,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{m=0,e=1,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=0,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{m=1,e=1,g=1} = 0.000\ 0$

表 6 F9 中各风险因素的耦合概率

Table 6 Coupled probability of each risk factor in F9

$P_{h=1,m=0,e=0,g=0} = 0.287\ 6$	$P_{h=0,m=1,e=0,g=0} = 0.146\ 7$	$P_{h=0,m=0,e=1,g=0} = 0.245\ 2$	$P_{h=0,m=0,e=0,g=1} = 0.001\ 9$	$P_{h=1,m=1,e=0,g=0} = 0.075\ 3$
$P_{h=1,m=0,e=1,g=0} = 0.094\ 6$	$P_{h=1,m=0,e=0,g=1} = 0.040\ 5$	$P_{h=0,m=1,e=1,g=0} = 0.015\ 4$	$P_{h=0,m=1,e=0,g=1} = 0.023\ 2$	$P_{h=0,m=0,e=1,g=1} = 0.000\ 0$
$P_{h=1,m=1,e=1,g=0} = 0.015\ 4$	$P_{h=1,m=1,e=0,g=1} = 0.021\ 2$	$P_{h=1,m=0,e=1,g=1} = 0.005\ 8$	$P_{h=0,m=1,e=1,g=1} = 0.003\ 9$	$P_{h=1,m=1,e=1,g=1} = 0.023\ 3$

表 7 F9 中各风险因素的风险变化概率

Table 7 Risk change probability of each risk factor in F9

$P_{h=0} = 0.436\ 3$	$P_{h=1} = 0.563\ 7$	$P_{m=0} = 0.675\ 6$	$P_{m=1} = 0.324\ 4$	$P_{e=0} = 0.596\ 4$	$P_{e=1} = 0.403\ 6$	$P_{g=0} = 0.864\ 8$	$P_{g=1} = 0.135\ 2$
$P_{h=0,m=0} = 0.247\ 1$	$P_{h=0,m=1} = 0.189\ 2$	$P_{h=1,m=0} = 0.428\ 5$	$P_{h=1,m=1} = 0.135\ 2$	$P_{h=0,e=0} = 0.171\ 8$	$P_{h=0,e=1} = 0.260\ 6$	$P_{h=1,e=0} = 0.424\ 6$	$P_{h=1,e=1} = 0.139\ 1$
$P_{h=0,g=0} = 0.407\ 3$	$P_{h=0,g=1} = 0.029\ 0$	$P_{h=1,g=0} = 0.472\ 9$	$P_{h=1,g=1} = 0.090\ 8$	$P_{m=0,e=0} = 0.330\ 0$	$P_{m=0,e=1} = 0.345\ 6$	$P_{m=1,e=0} = 0.266\ 4$	$P_{m=1,e=1} = 0.058\ 0$
$P_{m=0,g=0} = 0.627\ 4$	$P_{m=0,g=1} = 0.048\ 2$	$P_{m=1,g=0} = 0.252\ 8$	$P_{m=1,g=1} = 0.071\ 6$	$P_{e=0,g=0} = 0.509\ 6$	$P_{e=0,g=1} = 0.086\ 8$	$P_{e=1,g=0} = 0.370\ 6$	$P_{e=1,g=1} = 0.033\ 0$

续表 7

$P_{h=0} = 0.436\ 3$	$P_{h=1} = 0.563\ 7$	$P_{m=0} = 0.675\ 6$	$P_{m=1} = 0.324\ 4$	$P_{e=0} = 0.596\ 4$	$P_{e=1} = 0.403\ 6$	$P_{g=0} = 0.864\ 8$	$P_{g=1} = 0.135\ 2$
$P_{h=0,m=0,e=0} = 0.001\ 9$	$P_{h=0,m=0,e=1} = 0.245\ 2$	$P_{h=0,m=1,e=0} = 0.169\ 9$	$P_{h=1,m=0,e=0} = 0.328\ 1$	$P_{h=0,m=1,e=1} = 0.019\ 3$	$P_{h=1,m=0,e=1} = 0.100\ 4$	$P_{h=1,m=1,e=0} = 0.096\ 5$	$P_{h=1,m=1,e=1} = 0.038\ 7$
$P_{h=0,m=0,g=0} = 0.245\ 2$	$P_{h=0,m=0,g=1} = 0.001\ 9$	$P_{h=0,m=1,g=0} = 0.162\ 1$	$P_{h=1,m=0,g=0} = 0.382\ 2$	$P_{h=0,m=1,g=1} = 0.027\ 1$	$P_{h=1,m=0,g=1} = 0.046\ 3$	$P_{h=1,m=1,g=0} = 0.090\ 7$	$P_{h=1,m=1,g=1} = 0.044\ 5$
$P_{h=0,e=0,g=0} = 0.146\ 7$	$P_{h=0,e=0,g=1} = 0.025\ 1$	$P_{h=0,e=1,g=0} = 0.260\ 6$	$P_{h=1,e=0,g=0} = 0.362\ 9$	$P_{h=0,e=1,g=1} = 0.003\ 9$	$P_{h=1,e=0,g=1} = 0.061\ 7$	$P_{h=1,e=1,g=0} = 0.110\ 0$	$P_{h=1,e=1,g=1} = 0.029\ 1$
$P_{m=0,e=0,g=0} = 0.287\ 6$	$P_{m=0,e=0,g=1} = 0.042\ 4$	$P_{m=0,e=1,g=0} = 0.339\ 8$	$P_{m=1,e=0,g=0} = 0.222\ 0$	$P_{m=0,e=1,g=1} = 0.005\ 8$	$P_{m=1,e=0,g=1} = 0.044\ 4$	$P_{m=1,e=1,g=0} = 0.030\ 8$	$P_{m=1,e=1,g=1} = 0.027\ 2$

表 8 RNAV 进近不安全事件中各模块的耦合风险度

Table 8 Coupling risk intensity of each functional module in unsafe RNAV approach events

功能模块	$U(H,M)$	$U(H,E)$	$U(H,G)$	$U(M,E)$	$U(M,G)$	$U(H,M,E)$	$U(H,M,G)$	$U(H,E,G)$	$U(M,E,G)$	$U(H,M,E,G)$
F1	—	—	0.097 6	—	—	0.017 1	—	0.297 6	—	—
F5	0.030 0	—	0.008 3	—	0.031 7	—	0.234 1	—	—	—
F6	0.073 6	—	—	—	0.125 2	—	0.285 7	—	—	—
F8	—	0.018 2	—	—	0.027 4	—	0.335 9	—	—	—
F9	0.030 3	0.088 7	0.017 4	0.077 9	0.032 6	0.444 1	0.097 3	0.137 8	0.152 3	0.542 8

功能模块的可变性,FRAM 与 N-K 的结合模型是合理有效的。根据数据结果可以发现,耦合次数越频繁,耦合概率就越大,耦合度的计算可认为是耦合频率的层叠过程。

### 3.3 偏离航路不安全事件

根据不安全事件报告,偏离航路不安全事件有以下 12 个功能模块:①飞行员驾驶航空器沿规定航路飞行;②航空器在某台偏置进入某扇区;③导航监视性能;④管制员发现航空器偏离指定航迹,询问原因;⑤地空通信性能;⑥机组回复导致偏离航迹的原

因;⑦管制员指挥航空器左/右偏置;⑧管制员指挥航空器归航;⑨飞行员回复管制员;⑩管制员指挥飞行员沿指令飞行并通报前方;⑪飞行员收到指令;⑫飞机恢复正常飞行。

依据统计到的人、机、环、管因素的历史发生频率,以及潜在连接失败功能模块风险因素间的耦合关系,计算出耦合概率,进而求解模块中各风险因素的耦合概率,模块⑨中各风险因素的耦合概率与风险变化概率结果分别见表 9 与表 10,偏离航路不安全事件中功能模块的耦合风险度见表 11。

表 9 偏离航路不安全事件模块⑨中各风险因素的耦合概率

Table 9 Coupling probability of each risk factors in function⑨ of unsafe deviation from route events

$P_{h=1,m=0,e=0,g=0} = 0.111\ 1$	$P_{h=0,m=1,e=0,g=0} = 0.092\ 6$	$P_{h=0,m=0,e=1,g=0} = 0.074\ 1$	$P_{h=0,m=0,e=0,g=1} = 0.037\ 0$	$P_{h=1,m=1,e=0,g=0} = 0.055\ 6$
$P_{h=1,m=0,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0,e=0,g=1} = 0.055\ 6$	$P_{h=0,m=1,e=1,g=0} = 0.000\ 0$	$P_{h=0,m=1,e=0,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=0,m=0,e=1,g=1} = 0.000\ 0$
$P_{h=1,m=1,e=1,g=0} = 0.055\ 6$	$P_{h=1,m=1,e=0,g=1} = 0.166\ 7$	$P_{h=1,m=0,e=1,g=1} = 0.129\ 5$	$P_{h=0,m=1,e=1,g=1} = 0.000\ 0$	$P_{h=1,m=1,e=1,g=1} = 0.222\ 2$

根据不安全事件报告可知:飞行员对来自功能模块⑨的信息未接收完整或对其忽略,而当前已接收到的信息可以进行归航,这说明模块⑪及时收到

了模块⑩的信息,但信息内容并不完整或信息内容不够精准,其结果与表 2 中的等级  $U_{10}$  一致。

表 10 偏离航路不安全事件模块⑨中各风险因素的风险变化概率

Table 10 Risk change probability for each risk factors in function⑨ of unsafe deviation from route events

$P_{h=0} = 0.203\ 7$	$P_{h=1} = 0.796\ 3$	$P_{m=0} = 0.407\ 3$	$P_{m=1} = 0.592\ 7$	$P_{e=0} = 0.518\ 6$	$P_{e=1} = 0.481\ 4$	$P_{g=0} = 0.389$	$P_{g=1} = 0.611$
$P_{h=0,m=0} = 0.111\ 1$	$P_{h=0,m=1} = 0.092\ 6$	$P_{h=1,m=0} = 0.296\ 2$	$P_{h=1,m=1} = 0.500\ 1$	$P_{h=0,e=0} = 0.129\ 6$	$P_{h=0,e=1} = 0.074\ 1$	$P_{h=1,e=0} = 0.389$	$P_{h=1,e=1} = 0.407\ 3$
$P_{h=0,g=0} = 0.166\ 7$	$P_{h=0,g=1} = 0.037\ 0$	$P_{h=1,g=0} = 0.222\ 3$	$P_{h=1,g=1} = 0.57\ 4$	$P_{m=0,e=0} = 0.203\ 7$	$P_{m=0,e=1} = 0.203\ 6$	$P_{m=1,e=0} = 0.314\ 9$	$P_{m=1,e=1} = 0.277\ 8$

续表 10

$P_{h=0}=0.203\ 7$	$P_{h=1}=0.796\ 3$	$P_{m=0}=0.407\ 3$	$P_{m=1}=0.592\ 7$	$P_{e=0}=0.518\ 6$	$P_{e=1}=0.481\ 4$	$P_{g=0}=0.389$	$P_{g=1}=0.611$
$P_{m=0,g=0}=0.185\ 2$	$P_{m=0,g=1}=0.222\ 2$	$P_{m=1,g=0}=0.203\ 7$	$P_{m=1,g=1}=0.388\ 9$	$P_{e=0,g=0}=0.259\ 3$	$P_{e=0,g=1}=0.259\ 3$	$P_{e=1,g=0}=0.129\ 6$	$P_{e=1,g=1}=0.351\ 8$
$N_{h=0,m=0,e=0}=0.037\ 0$	$N_{h=0,m=0,e=1}=0.074\ 1$	$N_{h=0,m=1,e=0}=0.092\ 6$	$N_{h=1,m=0,e=0}=0.166\ 7$	$N_{h=0,m=1,e=1}=0.000\ 0$	$N_{h=1,m=0,e=1}=0.129\ 5$	$N_{h=1,m=1,e=0}=0.222\ 3$	$N_{h=1,m=1,e=1}=0.277\ 8$
$P_{h=0,m=0,g=0}=0.074\ 1$	$P_{h=0,m=0,g=1}=0.037\ 0$	$P_{h=0,m=1,g=0}=0.092\ 6$	$P_{h=1,m=0,g=0}=0.111\ 1$	$P_{h=0,m=1,g=1}=0.000\ 0$	$P_{h=1,m=0,g=1}=0.185\ 1$	$P_{h=1,m=1,g=0}=0.111\ 2$	$P_{h=1,m=1,g=1}=0.388\ 9$
$P_{h=0,e=0,g=0}=0.092\ 6$	$P_{h=0,e=0,g=1}=0.037\ 0$	$P_{h=0,e=1,g=0}=0.074\ 1$	$P_{h=1,e=0,g=0}=0.166\ 7$	$P_{h=0,e=1,g=1}=0.000\ 0$	$P_{h=1,e=0,g=1}=0.222\ 3$	$P_{h=1,e=1,g=0}=0.055\ 6$	$P_{h=1,e=1,g=1}=0.351\ 7$
$P_{m=0,e=0,g=0}=0.111\ 1$	$P_{m=0,e=0,g=1}=0.092\ 8$	$P_{m=0,e=1,g=0}=0.074\ 1$	$P_{m=1,e=0,g=0}=0.148\ 2$	$P_{m=0,e=1,g=1}=0.129\ 5$	$P_{m=1,e=0,g=1}=0.166\ 7$	$P_{m=1,e=1,g=0}=0.055\ 6$	$P_{m=1,e=1,g=1}=0.222\ 2$

表 11 偏离航路不安全事件中各模块的耦合风险度

Table 11 Coupling risk intensity of each functional module in unsafe deviation from route events

功能模块	$U(H,M)$	$U(H,E)$	$U(H,G)$	$U(M,G)$	$U(E,G)$	$U(H,M,E)$	$U(H,M,G)$	$U(H,E,G)$	$U(H,M,E,G)$
F②	—	—	0.186 5	—	—	—	—	—	—
F③	—	—	0.057 8	0.103 1	—	—	0.216 5	—	—
F⑧	0.035 4	—	—	0.125 2	—	—	0.295 8	—	—
F⑨	—	—	—	0.292 7	—	—	0.432 3	—	—
F⑩	0.014 4	0.030 5	0.144 6	—	0.041 0	0.307 5	—	0.245 2	0.552 9

### 4 结 论

1) 引入 N-K 模型,利用民航运行不安全事件数据,求解分析风险因素间的风险变化率与功能模块的可变性,避免了空中交通运行安全风险耦合研究的主观性和片面性,大大提升了评估结果的客观性与科学性。

2) 基于上述分析,提出对空中交通运行安全的相关建议:空中交通运行中人员因素对不安全事件发生有较大影响,因此,需将空中交通运行相关工作人员的行为规范放在首位,减少人因失误;对于常见

的气象风险因素,需制定完善的应对方案,以便工作人员及时应对,减轻气象环境因素对系统安全运行的影响;风险因素耦合度的定量计算可视为耦合频率叠加的过程。耦合次数越多,耦合概率越大,耦合度越大,进而风险越大,事故发生概率也越大,因此,应尽量避免多因素耦合风险事件。

3) 文中针对 N-K 模型,只考虑了风险因素间没有耦合、功能模块没有变化,以及风险因素和功能模块的可变性之间一定存在耦合等 2 种状态,对于中间状态未作考虑,后续应考虑多种或连续状态对耦合概率的影响并加以改进。

### 参 考 文 献

[1] 陈磊, 焦健, 赵廷弟. 基于模型的复杂系统安全分析综述[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(6): 1 287-1 291. CHEN Lei, JIAO Jian, ZHAO Tingdi. Review for model-based safety analysis of complex safety critical system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(6): 1 287-1 291.

[2] CHEREDNICHENKO K, IVANNIKOVA V, SOKOLOVA O, et al. Model of transport safety assessment [J]. Transport, 2023, 38(4): 204-213.

[3] 张宏宏, 甘旭升, 孙静娟, 等. 基于 STPA-TOPAZ 的低空无人机冲突解脱安全性分析[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 262-274. ZHANG Honghong, GAN Xusheng, SUN Jingjuan, et al. Analysis of low altitude UAV conflict resolution safety based on STPA-TOPAZ [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 262-274.

[4] 徐远. 基于功能共振模型的通用航空碰撞事故成因分析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022. XU Yuan. Research on the causes analysis of navigation collision accidents based on function resonance model [D].

Chengdu;Southwest Jiaotong University, 2022.

- [5] HOLLNAGEL E. Functional resonance analysis method: modeling of complex social technical system [M]. Burlington: Ashgate, 2013:21-31.
- [6] 张玥, 帅斌, 黄文成, 等. 基于 FRAM 的铁路危险品运输事故演化机制研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(2):171-176.  
ZHANG Yue, SHUAI Bin, HUANG Wencheng, et al. Accident evolution mechanism of railway dangerous goods transportation based on FRAM [J]. China Safety Science Journal, 2020,30(2):171-176.
- [7] SUJAN M, PICKUP L, VOS M S D, et al. Operationalising FRAM in healthcare: a critical reflection on practice[J]. Safety Science, 2023; DOI: 158: 10. 1016/j. ssci. 2022. 105994.
- [8] SUDIARNO A, MAARIJ A M D. System safety assessment of the warehouse operation using functional resonance analysis method and resilience analysis grid[J]. National Public Health Journal, 2023, 18(4):271-278.
- [9] PATRIARCA R, GRAVIO G D, WOLTJER B, et al. Framing the FRAM: a literature review on the functional resonance analysis method [J]. Safety Science, 2020, 129:195-230.
- [10] CONG Kun, JIAO Jian, ZHAO Tingdi. An improved method for FRAM functional variation identification and analysis[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2023, 2470(1): DOI:10. 1088/1742-6596/2470/1/012005.
- [11] OUYANG Wenjian, GAN Xusheng, WU Yarong, et al. Human factors analysis of the improved FRAM method for take-off quality lateral shift[J]. Applied Sciences, 2023, 13(8): DOI:10. 3390/app13085216.
- [12] MASYS A. Radicalization and recruitment: a systems approach to understanding violent extremism-new developments through FRAM [M]. Hershey: IGI Global, 2018:322-348.
- [13] ALBERY S, BORYS D, TEPE S. Advantages for risk assessment: evaluating learnings from question sets inspired by the FRAM and the risk matrix in a manufacturing environment [J]. Safety Science, 2016, 89:180-189.
- [14] LI Weijun, HE Min, SUN Yibo, et al. A proactive operational risk identification and analysis framework based on the integration of ACAT and FRAM [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 186:101-109.
- [15] SAWARAGI T, Horiguchi Y, HINA A. Safety analysis of systemic accidents triggered by performance deviation [C]. 2006 SICE-ICASE International Joint Conference Proceedings, 2006: 1 778-1 781.
- [16] JENSEN A, AVEN T. Hazard/threat identification: using functional resonance analysis method in conjunction with the anticipatory failure determination method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O. Journal of Risk and Reliability, 2017, 231(4):383-389.
- [17] FUKUDA K, SAWARAGI T, Horiguchi Y, et al. Applying systemic accident model to learn from near-miss incidents of train maneuvering and operation [J]. IFAC Papers OnLine, 2016, 49:543-548.
- [18] FRANCA J E M, HOLLNAGEL E, SANTOS E, et al. FRAM AHP approach to analyse offshore oil well drilling and construction focused on human factors [J]. Cognition, Technology and Work, 2020, 22:653-665.
- [19] ROSA L V, FRANCA J E M, HADDAD A N, et al. A resilience engineering approach for sustainable safety in green construction [J]. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2017, 5(4): 480-495.
- [20] SLIM H, NADEAU S. A proposal for a predictive performance assessment model in complex sociotechnical systems combining fuzzy logic and the functional resonance analysis method (FRAM) [J]. American Journal of Industrial and Business Management, 2019, 9(6):1 345-1 375.
- [21] PATRIARCA R, GRAVIO G D, COSTANTINO F, et al. FRAM to assess performance variability in everyday work: functional resonance in the railway domain [C]. ANNE-SOPHIE N, 7<sup>th</sup> REA Symposium, 2017:141-146.
- [22] PATRIARCA R, FALEGNAMI A, COSTANTINO F, et al. Resilience engineering for socio-technical risk analysis: application in neuro-surgery [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 180:321-335.
- [23] PATRIARCA R, GRAVIO G D, COSTANTINO F. A monte carlo evolution of the functional resonance analysis method (FRAM) to assess performance variability in complex systems [J]. Safety Science, 2017, 91:49-60.
- [24] ZINETULLINA A, YANG Ming, KHAKZAD N, et al. Quantitative resilience assessment of chemical process systems using functional resonance analysis method and dynamic Bayesian network[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021; DOI:10. 1016/j. ress. 2020. 107232.
- [25] LEE J, CHUNG H. A new methodology for accident analysis with human and system interaction based on FRAM: case

- studies in maritime domain [J]. *Safety Science*, 2018,109:57-66.
- [26] SMO CZYNSKI P, KADZINSKI A, GILL A. Simulating the world described with the functional resonance analysis method [J]. *Safety and Reliability-Safe Societies in a Changing World*, 2018(6):1 247-1 252.
- [27] 王岩韬, 唐建勋, 赵巍飞. 航班运行风险因素耦合性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2017,27(7):77-81.  
WANG Yantao, TANG Jianxun, ZHAO Yifei. Coupling analysis of risk factors in flight operation [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(7):77-81.
- [28] 方俊, 郭佩文, 朱科, 等. 基于 N-K 模型的地铁隧道施工安全风险耦合演化分析[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(6):1-9.  
FANG Jun, GUO Peiwen, ZHU Ke, et al. Coupling evolution analysis of subway tunnel construction safety risk based on N-K model [J]. *China Safety Science Journal*, 2022,32(6):1-9.
- [29] 吴贤国, 吴克宝, 沈梅芳, 等. 基于 N-K 模型的地铁施工安全风险耦合研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(4):96-101.  
WU Xianguo, WU Kebao, SHEN Meifang, et al. Research on coupling of safety risks in metro construction based on N-K model[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(4):96-101.
- [30] 姜宁. 基于风险耦合的交通安全应急管理系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.  
JIANG Ning. The research on traffic safety emergency management system based on risk coupling [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [31] KAUFFMAN S A. *The origins of order: self-organization and selection in evolution*[M]. New York: Oxford University Press, 1993:517-519.
- [32] MACCHI L, HOLLNAGEL E, LEONHARD J. Resilience engineering approach to safety assessment: an application of FRAM for the MSAW system [C]. *Eurocontrol, Air Traffic Management Safety R&D Seminar 2009*, 2009: 51-62.
- [33] 曾亮. 多层次模糊评估法在民航不安全事件风险评估中的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2008,18(1):131-138.  
ZENG Liang. Application of multi-layer fuzzy evaluation method to risk assessment in civil aviation [J]. *China Safety Science Journal*, 2008,18(1):131-138.

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