袁乐平,吴晓雪. 改进 BNT - FRAM 方法在航空器离场过程安全性分析中的应用[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(7): 2506 - 2513.

Yuan Leping, Wu Xiaoxue. Application of improved BNT - FRAM model in aircraft departure process safety analysis[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(7): 2506 - 2513.

改进 BNT - FRAM 方法在航空器离场过程安全性分析中的应用*

袁乐平,吴晓雪

(中国民航大学安全科学与工程学院,天津 300300)

摘 要:为了有效识别民航运行系统中的性能变化和传播,降低民航运行风险,研究运用功能共振模型(Functional Resonance Analysis Model,FRAM)对航空器离场程序的任务流程进行了安全分析。通过层次任务分析识别了关于航空器离场程序的 20 个功能模块,并在描述各功能模块的基础上构建了功能网络图。将盲数理论应用到航空器离场程序风险评估中,有效弥补了由于历史数据不足而产生的主观性偏差,通过风险耦合公式实现了对上下游功能交互的量化,并识别了易发生变化的关键功能及路径,进而制定了性能变化的控制措施。结果显示,在航空器离场过程中申请起飞 F_{14} 等 7 个功能的可变性较大,存在地面滑行 F_{12} -申请起飞 F_{14} -起飞许可 F_{17} -起飞操作 F_{18} -升空 F_{19} -管制移交(塔台到进近) F_{20} 等 3 个关键路径。

关键词:安全工程;体系;起飞离场;功能共振模型;盲数理论

中图分类号:X949 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-6094(2026)07-2506-08

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.1464

0 引 言

民航运行体系庞杂且内部因素关系错综复杂,同时不同组织机构间风险因素会相互耦合、相互作用,在实际操作中,可能面临操作失误、信息传递不准确和监控疏忽等问题,一旦系统功能发生变异,容易导致不安全事件的发生。因此,围绕民航运行安全性问题,研究识别关键环节、阻断风险传播、提高运行安全及效率有较为实际的意义[1]。本文以航空器离场过程为例,结合功能共振模型(Functional Resonance Analysis Model,FRAM)提出一种民航运行体系的安全性分析方法。

近年来,学者在航空器地面运行安全以及分析方法方面开展了大量研究。在航空器状态预测方面,2013 年,牟奇锋等[2]通过优化算法解决了航空器地面滑行碰撞检测问题。Ravizza 等[3-4]结合机场历史滑行数据分别运用 TSK(Takagi-Sugeno-Kang)模糊规则和多元线性回归优化了航空器滑行时间预测模型。2018 年,Yin 等[5]充分考虑进离场航空器耦合交互行为,将滑行数据应用于数学模型中,扩展了预测滑行时间的方法。2023 年,张颖等[6]研究了离场航班推出时隙与其预测滑行时间的概率分布,增强了机场管制的可预测性。以上研究的状态概率预测只考虑了航空器的运动状态,缺少对航空器运行过程中作业环节的风险识别以及控制措施。

在民航运行层面,传统安全性分析方法侧重于风险发生的因果逻辑而忽视其动态传播过程,进而难以合理解释复杂系统间的动态非线性关系及聚合涌现特性,具有一定的局限性。例如,故障模式及影响分析(Failure Modes and Effect Analysis,FMEA)、故障树分析(Fault Tree Analysis,ETA)等从事故的单个原因出发,认为只要消除原因,事故就不会发生,对于复杂系统建模较困难。针对复杂系统提出的系统理论事故过程模型(System Theoretic Accident Model and Processes,STAMP)分析过程复杂、分析过程相对主观且缺乏简单明晰的图表输出,而 FRAM 模型从功能交互角度对系统进行建模,以图形化的方式进行功能耦合分析,在分析复杂系统安全性问题方面具有一定优势。Hollnagel[7]于 2004 年首次提出功能共振分析方法,并从安全分析的角度研究问题。国内外学者对 FRAM 的应用进行了有益的探索,如 Patriarca 等[8]结合抽象层次理论扩展了 FRAM 的分析框架;高扬等[9]通过 FRAM 与层次分析法(Analytic Hierarchy Process,AHP)结合实现了对公务航空事故上下游功能模块的量化,但 AHP 存在主观性较强、排序不连贯等问

* **收稿日期**: 2024 - 09 - 02

作者简介: 袁乐平,副教授,硕士,从事空中交通安全、航空人因工程等研究,lpyuan@cauc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金全民航联合研究基金项目(U2133207)

题。陈芳等[10]与蒙特卡洛模拟结合,实现了对进近管制系统的安全性分析,但功能变化分布概率较单一。贾宝惠等[11]将 FRAM 与系统理论过程分析(System Theoretic Process Analysis,STPA)方法结合,实现了对民机系统的功能建模与耦合分析,但 STPA 更适合于高度复杂且依赖于控制系统的场景。栗婧等[12]通过 FRAM 与时间和事件序列图(Sequentially Timed Events Plotting,STEP)方法相结合构建了管道爆裂事故模型,其中 STEP 的优势为可以表示事件的时间顺序和相互关系。本文采用层次任务分析(Hierarchical Task Analysis,HTA)用于识别和分析目标完成所需的任务和活动,与 STEP 相比更适用于拆解航空器离场作业程序。

鉴于此,为了解决目前研究对于航空器离场程序考虑不足的问题,本文以功能为基本单位构造不同组织之间的任务层次框架,构造 FRAM 网络,并与盲数理论相结合,以期在一定程度上减少由数据不足而导致的主观性偏差,完善功能变化的估算概率方法。此外,本文重点研究功能的可变性特征,进而挖掘航空器在离场过程中的关键风险环节及可能的风险传播链路,旨在从更加贴近运行的角度提出民航运行安全风险分析方法。

1　改进 FRAM 的安全性分析方法

利用 FRAM 方法分析功能和功能之间的相互作用,识别并提出相应措施来预防潜在事故的发生,改进后的 FRAM 方法主要步骤如下。

1.1　基于任务层次分析的 FRAM 功能网络建模

层次任务分析通过结构化方式描述任务和相应子任务的层次系统。将 HTA 用于拆解航空器离场的任务流程,在识别所需流程的全部功能后,用功能六角形的形式进行表示。其中,功能六角形的各个角分别对应 6 个方面:输入 I(Input)、输出 O(Output)、时间 T(Time)、控制 C(Control)、前提 P(Precondition)、资源 R(Resources)。然后,根据功能模块的 6 个方面开展耦合关系分析,上游功能的输出可以作为下游功能特征,如输入、前提、资源、控制和时间,当上游功能的输出发生变化时,会对下游功能产生影响效应[13]。根据功能之间的耦合关系,将相应的六边形模块连接,形成多条路径,并最终聚合成功能共振网络模型。

1.2　基于盲数理论的功能可变性分析

1.2.1　功能模块变化程度建模

在设定功能模块后,对每个功能模块的可变性进行分析。本文用时间和精度两个类别表征上游输出的性能变化,并设定时间和精度不同变化程度的分值。其中,分值越大表示其差异性越大,见表 1。

表 1　时间-精度评分

Table 1　Time-precision score

表型	功能性能变化	分值
时间	适时	1
	过早	2
	过晚	3
	未发生	4
精度	精确	1
	可接受	2
	不精确	4

在实际工作中,在受自身或外界影响可能产生的变异后,每个功能模块都具备能够恢复到正常状态的能力。因此,还需考虑每个功能模块自身吸收干扰的能力。本文将每个功能在面对外界扰动后恢复到正常状态的能力抽象为韧性因子 η,其评判标准见表 2。韧性因子的评判标准主要依据功能的恢复时间和资源依赖性,两者的变化程度分为稳定、可接受和不稳定。恢复时间指的是在面对内、外界扰动后,模块能够恢复到正常操作状态的时间;资源依赖性指的是该功能对外界资源(如地面支持、通信系统、设备等)的依赖程度。韧性因子 η 越大,表明受扰动后该功能恢复到稳定状态的能力越弱,即越容易受其他功能变化的影响。

表 2　韧性因子评价判据

Table 2　Evaluation criteria of resilience factor

评判标准		韧性因子
恢复时间	资源依赖性	
稳定	稳定	0.5
稳定	可接受	0.7
稳定	不稳定	0.9
可接受	稳定	1.0
可接受	可接受	1.1
可接受	不稳定	1.3
不稳定	稳定	1.5
不稳定	可接受	1.7
不稳定	不稳定	1.9

1.2.2 基于盲数理论的时间精度概率计算

在航空器离场作业程序中,由于缺乏历史统计数据,难以确定不同模块在时间和精度变异概率的真实状态,功能模块的变异量难以测量。而盲数理论基于“未确知”的概念,用于处理不确定信息、灰色信息和盲信息等模糊性问题。对模糊信息以区间数及可信度来表示,即将区间数表示为风险概率的灰性,将专家主观及经验信息包含在可信度中,通过综合处理多名专家意见,最终获得较为真实、准确的估算值。盲数的具体定义[14]如下。假设 $G(I)$ 为一系列灰区间 x_i 构成的区间型灰数集合,则 $x_i \in G(I)$。若一般实数 $\alpha_i \in [0,1](i = 1,2,\cdots,n)$,$f(x)$ 为定义在 $G(I)$ 上的灰函数,且

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_i & x = x_i(i = 1,2,\cdots,n) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

式中 $x_i(i = 1,2,\cdots,n)$ 为互不相等的 n 个灰区间;α_i 为 $f(x)$ 中 x_i 的可信度,且 $\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_n = \alpha \leqslant 1$,函数 $f(x)$ 为一个盲数;α 为 $f(x)$ 的总可信度;n 为 $f(x)$ 的阶数。

盲数的数学期望定义如下。设 a 和 b 为实数,且 $a \leqslant b$,称 $\frac{a+b}{2}$ 为有理灰数 $[a,b]$ 的心,并记作 $\Theta[a,b] = \frac{a+b}{2}$。盲数的均值(即期望值)表示为

$$E[f(x)] = \begin{cases} \alpha & x = \dfrac{1}{\alpha}\left(\Theta \sum\limits_{i=1}^{n} \alpha_i x_i\right) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

根据盲数定义,可以将功能模块在时间和精度上的变异概率描述为发生概率区间的可能值。本文用专家打分进行评估,采用盲数来表示专家的评估结果,可以弱化专家主观性,即让每位专家对所有功能模块的时间和精度变化给出在[0,1]的概率区间。另外,在使用盲数理论进行估算时,为了使估算结果更加准确、合理,本文引入了“专家可信度”的概念[15]。可信度主要与专业职称、学历学位、工龄等因素相关,专家可信度用[0,1]中的某个值来表示,数值越大,表示可信度越高。

若专家组成员 E_1,E_2,…,E_n 的可信度分别为 $\overline{\alpha}_1$,$\overline{\alpha}_2$,…,$\overline{\alpha}_n$,则专家 E_i 关于专家组 E_1,E_2,…,E_n 的综合可信度 β_i 可表示为

$$\beta_i = \overline{\alpha}_i / \sum_{i=1}^{n} \overline{\alpha}_i \tag{3}$$

式中 $\overline{\alpha}_i$ 为第 i 个专家可信度;β_i 为第 i 个专家综合可信度。

将专家可信度与综合可信度相结合量化专家意见,进而处理不确定性决策。由于专家组打分存在区间交叉重叠,因此需将端点值从小到大进行无交叉处理,重新排列并划分新的区间序列,进而结合专家可信度按比例分布法计算新区间的可信度。最后,得到盲数 $f_i(x)$ 并用式(2)对盲数 $f_i(x)$ 求期望,以得到每个功能模块分别在时间(4 个维度)和精度(3 个维度)的发生概率估算结果。

第 i 个功能模块的可变性可表示为

$$B_i = \left(\sum s_i^{\mathrm{P}} w_i^{\mathrm{P}} + \sum s_i^{\mathrm{T}} w_i^{\mathrm{T}}\right)\eta_i \tag{4}$$

式中 s_i^{P} 为第 i 个功能模块的精度变化评分数值;w_i^{P} 为第 i 个功能模块的精度变化概率;s_i^{T} 为第 i 个功能模块的时间变化评分数值;w_i^{T} 为第 i 个功能模块的时间变化概率;η_i 为第 i 个功能模块的韧性因子。

1.3 功能模块耦合性分析

功能共振阐述了功能模块在工作过程中根据变化而进行的适应性调整。本文利用风险耦合度表征功能模块的耦合性,其计算公式为

$$R = \sum \xi_i B_i \tag{5}$$

式中 R 为功能模块耦合性;ξ_i 为待定系数,指第 i 个功能模块在系统中的重要程度。

1.4 制定风险控制措施

分析功能共振耦合结果,一旦确定关键功能以及风险链路,结合系统中可能发生的功能耦合变化影响因素制定对应的风险控制措施,包括增加设备、优化程序、人员培训等,以确保系统安全高效运行。

2 航空器离场过程安全性分析

2.1 航空器离场程序 FRAM 构建

利用层次任务分析方法拆解航空器离场的任务流程。首先,根据航空运输系统的组织机构以及不同组织之间的任务流程,从微观的角度划分能够表征民航系统运行过程的功能模块。其中,功能模块划分的标准为根据地面阶段和运行阶段将航空器运行过程划分为飞行前准备、推出开车、地面滑行、起飞滑跑 4 个阶段,再根据不同组织机构在这 4 个阶段的任务流程,共提取 20 个功能模块,即驾驶舱准备工作 F_1、ATC 放行许可 F_2、申请推出 F_3、推出许可 F_4、推出 F_5、地面牵引 F_6、申请开车 F_7、开车许可 F_8、开车 F_9、申请滑行 F_{10}、滑行许可 F_{11}、地面滑行 F_{12}、管制移交(机坪到塔台) F_{13}、申请起飞 F_{14}、接收航空器 F_{15}、指挥航空器进入跑道 F_{16}、起飞许可 F_{17}、起飞操作 F_{18}、升空 F_{19}、管制移交(塔台到进近) F_{20}。其次,对每一个功能从输入、输出、前提

条件、控制、时间、资源 6 个方面进行描述。以功能“F_9 开车”为例,其功能描述见表 3。最后,根据对各个功能的分析,绘制航空器离场程序 FRAM 功能网络图,见图 1。

表 3　“开车 F_9 ”的六角要素

Table 3　Hexagonal elements for “ driving F_9 ”

要素	内容
输入(I)	收到管制员开车许可
输出(O)	发动机启动
前提(P)	开车前检查单
资源(R)	燃油
控制(C)	飞行操作手册和程序
时间(T)	通常在 5 min 内完成

2.2　功能可变性分析

本文采用第 1.2 节步骤进行功能可变性定量计算。邀请 5 名熟悉民航一线运行的专家,组成风险评估专家组,采用区间数对航空器在离场程序中建立的 20 个功能模块对时间与精度变异的可能性进行区间值概率估算。以“开车 F_9 ”为例,结果见表 4。5 位专家的基本情况和可信度见表 5。

表 5　专家基本情况

Table 5　Basic information of experts

专家	职称	工龄/a	学历	可信度	综合可信度
1	商照飞行驾驶员	5	本科	0.70	0.175 0
2	四级管制员	21	本科	0.75	0.187 5
3	航线飞行驾驶员	11	本科	0.80	0.200 0
4	三级管制员	20	本科	0.85	0.212 5
5	航线飞行驾驶员	23	本科	0.90	0.225 0

从表 4 可以看出,各专家对 F_9 功能在时间和精度变化程度的发生概率估算结果存在区间交叉重叠现象。根据盲数理论,将概率端点值按照由小到大的次序重新排列,使新的区间序列间不相交。

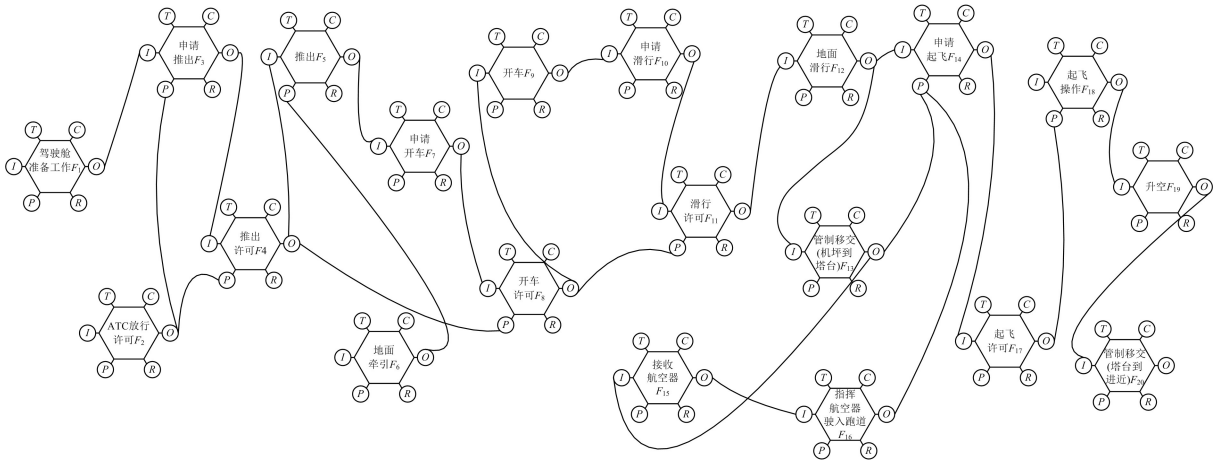

图 1　航空器离场程序功能网络图

Fig. 1　Network diagram of aircraft departure procedure function

表 4　专家对F_9功能在时间和精度变化的概率估算

Table 4　Estimated by experts is the probability of F_9 function changes in time and precision

类别	变异程度	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
时间	适时	[0.85, 0.95]	[0.80, 0.95]	[0.80, 0.95]	[0.75, 0.80]	[0.85, 0.90]
	过早	[0.10, 0.20]	[0.00, 0.20]	[0.00, 0.20]	[0.10, 0.20]	[0.50, 0.60]
	过晚	[0.10, 0.20]	[0.00, 0.40]	[0.20, 0.40]	[0.15, 0.25]	[0.10, 0.15]
	未发生	[0.00, 0.05]	[0.00, 0.10]	[0.00, 0.10]	[0.00, 0.15]	[0.00, 0.01]
精度	精确	[0.85, 0.95]	[0.80, 0.95]	[0.80, 0.95]	[0.75, 0.80]	[0.70, 0.80]
	可接受	[0.90, 0.95]	[0.40, 0.60]	[0.20, 0.40]	[0.10, 0.15]	[0.30, 0.40]
	不精确	[0.00, 0.05]	[0.00, 0.10]	[0.00, 0.10]	[0.15, 0.20]	[0.10, 0.30]

以 F_9 在“时间-适时”的变化为例,该变化程度用“ F_{91} ”表示,重新划分的区间为 0.75 ~ <0.8,0.8 ~ <0.85,0.85 ~ <0.9,0.9 ~ 0.95,新区间对应的新可信度分别为 0.213、0.129、0.442、0.217。根据式(1)确定盲数 $f^{F_{91}}(x)$ 为

$$f^{F_{91}}(x)=\begin{cases}0.2130 & 0.75\leqslant x<0.8\\0.129 & 0.8\leqslant x<0.85\\0.442 & 0.85\leqslant x<0.9\\0.217 & 0.9\leqslant x\leqslant 0.95\\0 & \text{其他}\end{cases}\tag{6}$$

由式(2)求数学期望 $E[f^{F_{91}}(x)]$ 为

$$E[f^{F_{91}}(x)]=\begin{cases}1 & x=0.859\\0 & \text{其他}\end{cases}\tag{7}$$

F_9 在“时间-适时”上发生的概率为 0.859,同理可计算其他功能模块分别在时间和精度变化的概率,其结果归一化处理后见图 2 和 3。各功能韧性因子赋值及由式(4)运算得到功能模块变异量见图 4。

系统中功能可变性程度较大的是申请起飞 F_{14}、接收航空器 F_{15}、管制移交(塔台到进近) F_{20}、管制移交(机坪到塔台) F_{13}、起飞操作 F_{18}、指挥航空器进入跑道 F_{16}、起飞许可 F_{17}。这些功能模块的功能可变性程度大,表明在受自身或外界干扰后,恢复到正常状态的能力较差,除了受韧性因子影响外,也存在输出精度差异性较大等特点,进而导致功能可变性较高,容易发生变化。当系统处于正常工作状态时,这些功能模块较易与所连接的模块产生功能共振,甚至会导致功能连接断裂而酿成事故,因此应当重点关注这些环节并制定相应的风险控制措施。

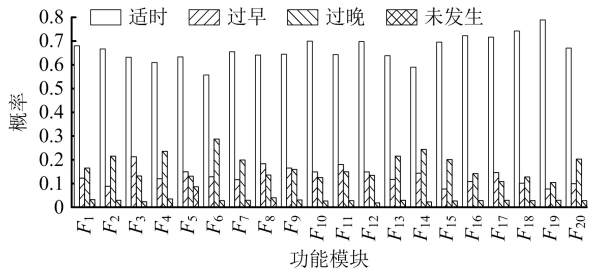

图 2 各功能模块时间变异概率

Fig. 2 Time variation probability of each function module

2.3 功能模块耦合性分析

根据式(5)计算模块间的耦合性。由于每个功能模块在系统中都不可缺少,因此认为重要程度相等, ξ_i 取 0.05,计算结果见图 5。

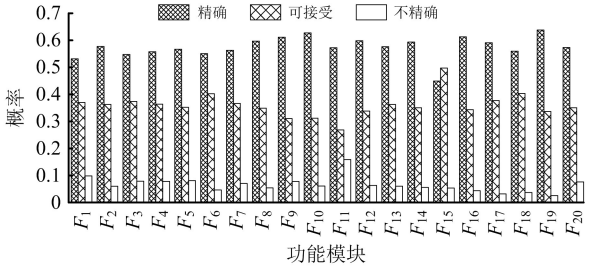

图 3 各功能模块精度变异概率

Fig. 3 Precision variation probability of each function module

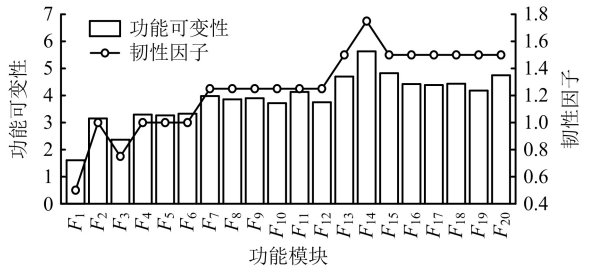

图 4 各功能模块韧性因子和功能可变性

Fig. 4 Resilience factor and functional variability of each function module

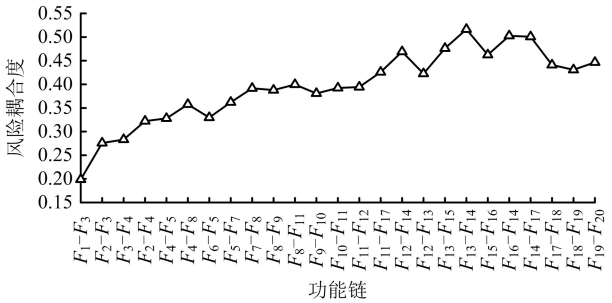

图 5 各功能模块的耦合性

Fig. 5 Coupling of each functional module

通过功能模块耦合性式(5)可以得到,值越大,表明各功能模块之间潜在耦合越强烈,功能共振强度以及风险程度越高,更容易发生不安全事件甚至事故。本文得到的功能模块耦合性强度由大到小依次是管制移交(机坪到塔台) F_{13} -申请起飞 F_{14}、指挥航空器进入跑道 F_{16} -申请起飞 F_{14}、申请起飞 F_{14} -起飞许可 F_{17}、管制移交(机坪到塔台) F_{13} -接收航空器 F_{15}、地面滑行 F_{12} -申请起飞 F_{14}、接收航空器 F_{15} -指挥航空器进入跑道 F_{16}、升空 F_{19} -管制移交

(塔台到进近) F_{20} 、起飞许可F_{17} –起飞操作 F_{18} 、起飞操作F_{18} –升空 F_{19} 、地面滑行 F_{12} –管制移交(机坪到塔台) F_{13} 。航空器在离场程序中可能失效的关键路径用虚线表示,见图 6。

2.4　制定风险控制措施

根据功能链的风险耦合强度可以得到航空器离场程序的 3 个关键连接:地面滑行 F_{12} –申请起飞 F_{14} –起飞许可 F_{17} –起飞操作F_{18} –升空 F_{19} –管制移交(塔台到进近) F_{20} 、地面滑行 F_{12} –管制移交(机坪到塔台) F_{13} –接收航空器 F_{15} –指挥航空器进入跑道 F_{16} 、管制移交(机坪到塔台) F_{13} –申请起飞 F_{14} –起飞许可 F_{17} 。其中,管制移交(机坪到塔台) F_{13} 、申请起飞 F_{14} 、起飞许可 F_{17} 在受上游功能扰动产生变异后,若没有及时恢复到正常状态,会带着变异传入下游功能,可能造成功能链失效进而导致不安全事件发生。在实际运行中,这些过程涉及的系统功能交互多,容易发生变异,产生不安全行为,此时对管制员和飞行员的配合以及时间和精度的要求较高。在进行管制移交的过程中,很可能由于信息遗漏、管制席位之间时序不协调、工作负荷大等问题影响管制移交的流畅性和安全性。当管制员下达指令不清楚或通讯失误时,可能使飞行员受误导或混淆,导致飞行员未能清楚地表达起飞请求,影响起飞准备,在接下来的交接中又会增加管制员误解的风险,导致起飞许可指令存在偏差,一环接一环的失误会导致不安全事件的发生。这表明人员在突发情况下需提升应急处理能力,应定期对其进行培训演练,以便及时判断环境变化并增强决策力。除此之外,地面滑行 F_{12} 同时影响申请起飞 F_{14} 和管制移交(机坪到塔台) F_{13} ,这也表明人员应加强标准作业程序,在交接过程中要不断明确指令,完善信息传递机制,增强人员的互动协作。

3　结　论

(1)本文基于改进的 FRAM 方法提出了一种面向民航运行的安全性分析方法,以航空器起飞离场程序为例进行了方法验证。首先,用 FRAM 构建航空器离场过程的功能耦合网络模型,通过盲数理论和风险耦合度量化功能模块变异程度,识别了易发生变化的关键耦合,包括:申请起飞 F_{14} 、接收航空器 F_{15} 、管制移交(塔台到进近) F_{20} 、管制移交(机坪到塔台) F_{13} 、起飞操作 F_{18} 、指挥航空器进入跑道 F_{16} 、起飞许可 F_{17} ,并确定了可能失效的关键路径。之后,制定了针对性的安全控制措施。

(2)本文考虑航空器在离场过程中不同组织机构在实际工作中细节历史数据的缺失,将盲数理论应用到航空器离场程序风险评估中,减少了专家主观性。通过风险耦合度实现对 FRAM 方法的量化,进一步拓展了民航运行安全性分析的思路。但该方法并不能完全预测功能连接的实际断裂情况,后续需进一步优化功能共振的识别。

(3)基于盲数理论的概率估算方法仍然存在一定的主观性,功能变化的识别可能与实际功能变化存在一定差异,后续将结合实时客观数据展开进一步研究。

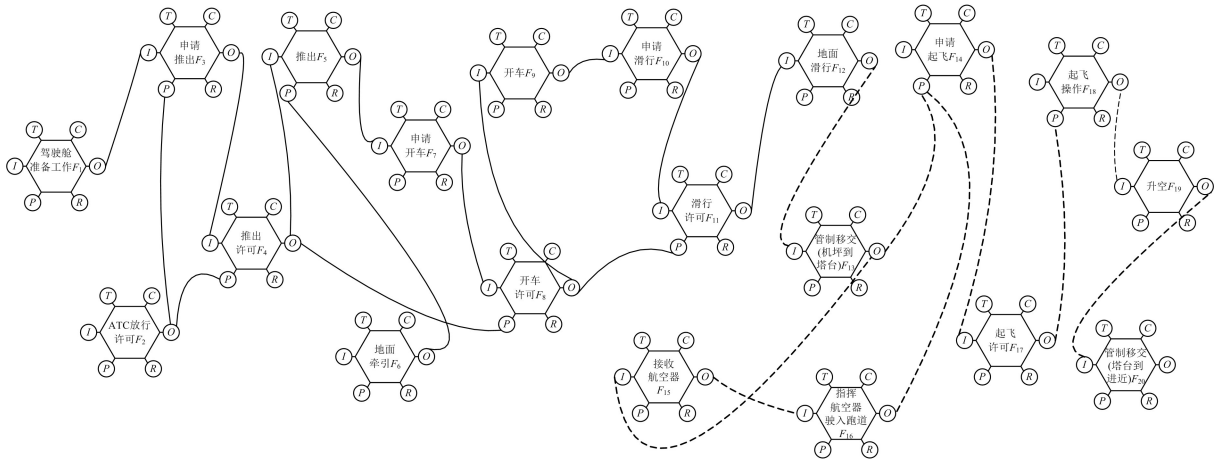

图 6　航空器离场程序中可能失效的关键路径

Fig. 6　Critical path that may fail during the aircraft departure procedure

参考文献(References):

[1] 康瑞, 杨凯. 航空器离场管制关键环节识别及风险传播研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2023, 60(1): 93-102.
Kang Rui, Yang Kai. Research on key link identification and risk propagation of aircraft departure control[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2023, 60(1): 93-102.

[2] 牟奇锋, 冯晓磊. 航空器地面滑行碰撞检测方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 84-89.
Mou Qifeng, Feng Xiaolei. Research on aircraft ground taxiing collision detection method[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2013, 23(12): 84-89.

[3] Ravizza S, Chen Jun, Atkin J D, et al. Aircraft taxi time prediction: comparisons and insights[J]. Applied Soft Computing, 2014, 14: 397-406.

[4] Ravizza S, Atkin J D, Maathuis M H, et al. A combined statistical approach and ground movement model for improving taxi time estimations at airports[J]. Journal of the Operational Research Society, 2013, 64(9): 1347-1360.

[5] Yin Jianan, Hu Minghua, Ma Yuanyuan, et al. Spatial-temporal topology and performance analysis of airport taxi network[C]//Transportation Research Board 97th Annual Meeting, January 7-11, 2018, Washington, America. Washington DC: TRB, 2018: 1-8.

[6] 张颖, 黎晓英, 尹嘉男, 等. 基于概率滑行时间的航空器离场推出柔性控制[J]. 航空学报, 2023, 44(10): 212-225.
Zhang Ying, Li Xiaoying, Yin Jianan, et al. Aircraft departure push-out flexible control based on probabilistic taxiing time[J]. Aeronautical Journal, 2023, 44(10): 212-225.

[7] Hollnagel E. Barriers and accident prevention[M]. Aldershot, UK: Ashgate Publishing Company, 2004: 167-176.

[8] Patriarca R, Bergstrom J, Di Gravio G. Defining the functional resonance analysis space: combining abstraction hierarchy and FRAM[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 165: 34-46.

[9] 高扬, 徐佳迪, 武文涛, 等. 基于FRAM-AHP法的公务航空飞行事故分析[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 754-760.
Gao Yang, Xu Jiadi, Wu Wentao, et al. Analysis of official aviation accidents based on FRAM-AHP method[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(3): 754-760.

[10] 陈芳, 陈茜. 基于FRAM的进近管制安全分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(5): 1788-1794.
Chen Fang, Chen Qian. Safety analysis of approach control based on FRAM[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(5): 1788-1794.

[11] 贾宝惠, 张勃, 高源. 基于改进FRAM-STPA的民机系统安全性分析[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-12[2024-09-02]. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0670.
Jia Baohui, Zhang Bo, Gao Yuan. Safety analysis of civil aircraft system based on improved FRAM-STPA[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: 1-12[2024-09-02]. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0670.

[12] 栗婧, 柳慧妍, 宫梓超, 等. 采用改进FRAM模型方法的管道爆裂事故分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1460-1468.
Li Jing, Liu Huiyan, Gong Zichao, et al. Pipeline burst accident analysis using improved FRAM model method[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(4): 1460-1468.

[13] Hollnagel E. 功能共振分析方法: 复杂社会-技术系统建模[M]. 田瑾, 吴居宜, 杨启舶, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2015.
Hollnagel E. FRAM: the functional resonance analysis methods: modelling complex socio-technical systems[M]. Tian Jin, Wu Juyi, Yang Qibo, et al, tran. Beijing: National Defence Industry Press, 2015.

[14] 王立忠, 郑均杰, 张镭. 基于盲数理论的风险发生概率估算方法研究[J]. 无线互联科技, 2014(3): 159-160, 240.
Wang Lizhong, Zhang Junjie, Zhang Lei. Research on risk probability estimation method based on blind number theory[J]. Wireless Internet Technology, 2014(3): 159-160, 240.

[15] 王瑞强, 许永莉, 杜军, 等. 基于盲数与成熟度理论的化工园区火灾爆炸事故应急能力评估[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(2): 30-35, 43.
Wang Ruiqiang, Xu Yongli, Du Jun, et al. Emergency capability assessment of fire and explosion accidents in chemical industrial parks based on blind number and maturity theory[J]. Journal of Safety and Engineering, 2021, 28(2): 30-35, 43.

Application of improved BNT－FRAM model in aircraft departure process safety analysis

Yuan Leping, Wu Xiaoxue

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

Abstract: To effectively identify and manage performance changes and propagation within the civil aviation operation system, this paper employs the functional resonance model to analyze the task flow involved in aircraft departure procedures. Utilizing the hierarchical task analysis method, we decompose the task flow based on the organization of the air transport system and the interactions among different entities. A total of 20 functional modules have been identified, including cockpit preparation (F_1), ATC clearance (F_2), push back request (F_3), push back permit (F_4), push back (F_5), ground traction (F_6), startup request (F_7), and startup permit (F_8), among others. It is important to note that this paper employs blind number theory to estimate the probability distribution of the 20 functional modules concerning changes in time and accuracy. This approach mitigates bias introduced by expert subjectivity. Additionally, this paper abstracts the ability of each functional module to return to a normal state when it confronted with internal and/or external perturbations into a resilience factor. This resilience factor is then used to calculate the variability of each functional module. Finally, the functional coupling value is calculated using the risk coupling formula, enabling the quantification of upstream and downstream functional interactions. This approach identifies key functions and paths that are susceptible to change and formulates risk control measures for managing performance variations. The results indicate that seven functional modules-takeoff request (F_{14}), receipt of aircraft (F_{15}), hand over from tower to approach control (F_{20}), hand over from ramp to tower control (F_{13}), takeoff (F_{18}), instructing aircraft to enter the runway (F_{16}), and takeoff permit (F_{17})-exhibit greater variability during the aircraft departure process. Ground taxiing (F_{12}) – takeoff request (F_{14}) – takeoff permit (F_{17}) – takeoff(F_{18}) – airbone(F_{19}) – hand over from tower to approach control (F_{20}) and other two key paths are identified. When the system encounters disturbance, these functional modules are more likely to resonate with connected function modules, thereby highlighting potential failure nodes and critical paths within the process is valuable for operation analysis.

Key words: safety engineering; system of systems; takeoff and departure; functional resonance analysis model; blind number theory