

基于功能共振与耦合协调的通用航空事故分析

刘悦诗¹, 黄文成^{1,2*}

¹西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都

²西南交通大学系统科学与系统工程研究所, 四川 成都

收稿日期: 2026年6月23日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月24日

摘要

针对通用航空事故致因复杂耦合、现有研究系统性定量分析不足的问题, 本文将功能共振分析方法(FRAM)与耦合协调模型(CCM)相结合, 以耦合度衡量各功能变异程度, 以协调度衡量变异传播强度, 以耦合协调度定量测度功能间共振强度, 构建一种量化的通用航空事故成因分析方法, 并以2025年中国通用航空事故数据进行验证。结果表明, M_{10} (航空器着陆)与 M_{11} (完成飞行活动)、 M_8 (备降机场备降)与 M_9 (着陆许可)、 M_{15} (备降机场)与 M_7 (执行飞行任务)的功能共振强度最高, 且事故发生频率与功能共振强度总体呈正相关。高共振功能连接是事故预防与风险控制的关键节点, 应针对高变异性功能设置防护屏障并加强安全管理。

关键词

航空运输, 耦合协调模型, 功能共振分析方法, 通用航空事故, 事故致因分析

Analysis of General Aviation Accidents Based on Functional Resonance and Coupling Coordination

Yueshi Liu¹, Wencheng Huang^{1,2*}

¹School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²Institute of System Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: June 23, 2026; accepted: September 14, 2026; published: September 24, 2026

Abstract

To address the complex coupling characteristics of general aviation accident causes and the lack of

*通讯作者。

文章引用: 刘悦诗, 黄文成. 基于功能共振与耦合协调的通用航空事故分析[J]. 交通技术, 2026, 15(5): 687-700.
DOI: 10.12677/ojtt.2026.155059

systematic quantitative analysis in existing research, this study integrates the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) with the Coupling Coordination Model (CCM). Coupling degree is used to measure the variability of each function, coordination degree to measure variability propagation intensity, and coupling coordination degree to quantitatively assess functional resonance intensity, thereby establishing a quantitative method for general aviation accident causation analysis. The method is validated using general aviation accident data from China in 2025. Results show that the functional resonance intensity is highest between M_{10} (Aircraft Landing) and M_{11} (Complete Flight Activities), M_8 (Diversion at Alternate Airport) and M_9 (Landing Permission), and M_{15} (Alternate Airport) and M_7 (Implement the Flight), with overall accident frequency positively correlated with functional resonance intensity. High-resonance functional links are identified as critical nodes for accident prevention and risk control, suggesting that protective barriers should be established for high-variability functions alongside strengthened safety management.

Keywords

Air Transportation, Coupling Coordination Model, Functional Resonance Analysis Method, General Aviation Accidents, Accident Causation Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

通用航空(GA)是指除以盈利为目的的定期客运航空运输之外的所有民用航空活动, 涵盖飞行培训、海洋监测、科学实验、气象观测、应急救援以及医疗卫生服务等, 具有灵活性强、效率高等特点[1] [2]。2014年, 美国通用航空事故导致的死亡人数占民用航空死亡总人数的96% [2]。2012年至2018年间, 中国定期客运航空运输未发生任何事故; 然而, 同期通用航空共发生53起事故, 累计造成至少54人死亡[1]。因此, 开展通用航空事故成因分析, 对于识别运行风险、完善安全防控措施具有重要意义。

大量既有研究围绕通用航空事故与飞行员相关问题[3]、飞机超重或重心超限[4]、人为失误与组织因素[1] [2] [5]、飞行中失控[6]、复飞阶段事故[7]等展开研究。全面回顾并重现事故发生过程, 深入分析事故成因, 识别通用航空飞行过程中的潜在风险隐患, 并采取针对性的预防与控制措施以避免类似事故再次发生, 对于提升民航安全水平和促进民航产业发展具有重要意义[8] [9]。

通用航空事故由人为失误[2] [10] [11]、机械故障[4] [6]、恶劣环境[3] [12]、管理失效[13]影响。然而, 相较于人为失误和技术因素, 管理失效因素在通用航空安全研究中未受到足够重视。总体来看, 现有研究多依赖历史数据拟合或统计分析方法, 能够识别关键风险因素, 但对事故形成过程中功能之间的动态交互、非线性耦合和变异传播机制揭示不足。通用航空系统属于典型复杂社会技术系统, 事故致因链并非简单线性关系, 而是多类风险因素在功能运行过程中相互作用、持续传播和耦合放大的结果, 因此有必要构建适用于通用航空事故的系统性定量分析方法。

功能共振分析方法(FRAM)是一种定性的系统性事故致因分析方法, 认为在风险因素作用下, 系统功能会产生异常波动, 多个功能的异常波动相互耦合后会形成功能共振。当这种功能共振超过系统风险-事故的临界阈值时, 功能之间原有的正常连接关系将被破坏, 从而导致事故发生[14]。该方法适合于分析通用航空事故的形成机理和致因过程。虽然已有研究尝试通过引入其他方法对FRAM进行改

进[15],以增强其在定量描述函数相对变异性或函数间相对重要性方面的能力,但这些方法在本质上仍然属于定性的、受主观判断影响的;现有研究中利用定量 FRAM 方法分析通用航空事故成因的相关工作仍较少。

本文提出一种将功能共振分析方法(FRAM) [14] [16]与耦合协调模型(CCM) [17]相结合的定量事故成因分析方法,用于研究通用航空事故的发生机制。FRAM 的功能为构建通用航空飞行活动过程模型,基于人为失误、设备故障、恶劣环境和管理失效等风险因素的统计发生概率,采用耦合度来衡量各功能的变异程度;其次,利用协调度衡量变异从上游功能向下游功能的传播过程;最后,将定量化的耦合度(变异程度)与协调度(变异传播程度)相结合,构建耦合协调度指标,用于定量测度两个相连功能之间的功能共振强度,实现对变异传播和泛函共振强度的量化表达。

2. 建模过程

通用航空运行系统属于典型复杂社会技术系统,可以利用 FRAM 对通用航空飞行活动过程进行建模。FRAM 网络中的每个功能由输入、输出、前提条件、资源、时间、控制组成[14],如图 1 所示。

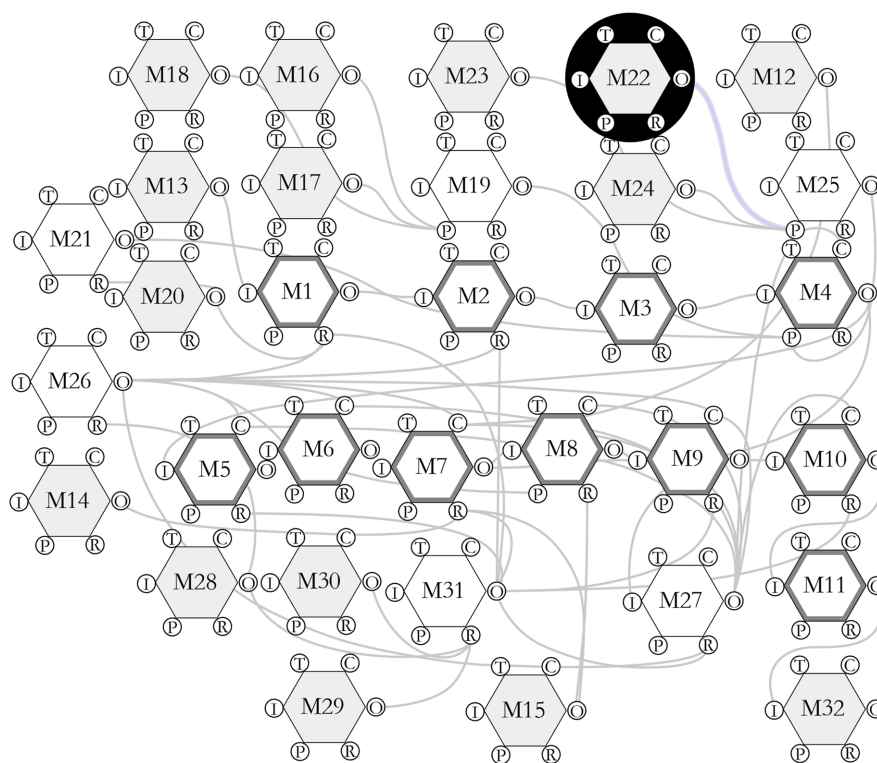


Figure 1. The processes of one GA flight activity based on FRAM

图 1. 基于 FRAM 的一次通用航空飞行活动过程

通常,一次完整的通用航空飞行任务包括三个阶段:飞行前准备、飞行服务以及飞行后评估,据此采用一组相互关联的功能来描述一次通用航空飞行活动的全过程。具体功能包括: M_1 : 制定飞行计划, M_2 : 申报飞行计划, M_3 : 飞行计划审批, M_4 : 执行飞行计划, M_5 : 空中交通管制放行, M_6 : 起飞许可, M_7 : 执行飞行任务, M_8 : 备降机场备降, M_9 : 着陆许可, M_{10} : 航空器着陆, M_{11} : 完成飞行活动, M_{12} : 航路规划, M_{13} : 飞行任务, M_{14} : 告警服务, M_{15} : 备降机场, M_{16} : 飞行执照审查, M_{17} : 人员培训, M_{18} :

健康状况, M_{19} : 机组成员状态, M_{20} : 航空器性能手册, M_{21} : 航空器燃油供应, M_{22} : 起飞检查单, M_{23} : 航空器重量与平衡, M_{24} : 通信与导航设备, M_{25} : 飞行前检查, M_{26} : 气象服务, M_{27} : 空中交通管制(ATC)服务, M_{28} : 机场信息, M_{29} : 航路信息, M_{30} : 航行通告, M_{31} : 航空情报服务, M_{32} : 飞行后评估。上述各功能的六项属性见表 1。基于 FRAM 构建的一次通用航空飞行活动过程如图 1 所示。

Table 1. The six attributes of each function in the processes of one GA flight activity
表 1. 每个功能在一个通用航空飞行活动过程中的六个属性

	输入	输出	前提条件	资源	控制	时间
M_1	收到飞行任务	完成飞行计划	——	航空与气象信息、 飞机性能说明书	——	——
M_2	完成飞行计划	提交飞行计划	——	航空与气象信息	——	飞行计划实施前 一天 15:00 之前
M_3	提交飞行计划	飞行计划批准	——	——	——	飞行计划实施前 一天 21:00 之前
M_4	飞行计划批准	起飞请求	合格燃油量、 合规机组人 员、合格的 飞行前检查	——	空管许可	按飞行计划
M_5	起飞请求	允许起飞	——	航空信息	气象信息、 空管许可	收到起飞许可
M_6	允许起飞	获得起飞许可	——	——	气象信息、 空管许可	收到起飞许可后
M_7	获得起飞许可	请求降落/候补降落	——	航空信息、预警服 务、备降机场	气象信息、 空管许可、 沿规划路线飞行	——
M_8	请求候补降落	请求降落	气象信息	备降机场	空管许可	——
M_9	请求降落	降落许可	——	航空信息	气象信息、 空管许可	——
M_{10}	降落许可	飞机进入机场	——	航空信息	空管许可	——
M_{11}	飞机进入机场	完成飞行活动	——	——	——	——
M_{12}	——	沿规划路线飞行	——	——	——	——
M_{13}	——	收到飞行任务	——	——	——	——
M_{14}	——	预警服务	——	——	——	——
M_{15}	——	备降机场	——	——	——	——
M_{16}	——	持有有效飞行执照	——	——	——	——
M_{17}	——	业务合格培训	——	——	——	——
M_{18}	——	飞行员健康	——	——	——	——
M_{19}	——	合规机组成员	持有有效飞行 执照、业务 合格培训、 飞行员健康	——	——	执行飞行计划前
M_{20}	——	飞机性能说明书	——	——	——	——

续表

M_{21}	---	合格燃油量	---	飞机性能说明书	---	执行飞行计划前
M_{22}	---	符合起飞检查表要求	---	---	---	---
M_{23}	---	合格机重与平衡	---	---	---	---
M_{24}	---	合格的通信与导航设备	---	---	---	---
M_{25}	---	合格的飞行前检查	---	---	---	---
M_{26}	---	气象信息	---	机场信息	---	---
M_{27}	起飞请求	空管许可	---	航空与气象信息	---	生成飞行计划时
M_{28}	---	机场信息	---	---	---	---
M_{29}	---	空中航路信息	---	---	---	---
M_{30}	---	航行通知	---	---	---	---
M_{31}	---	航空信息	---	机场信息、空中航路信息、航行通知	---	执行飞行计划前
M_{32}	完成飞行活动	---	---	---	---	---

3. 基于定量 FRAM 的通用航空事故成因分析

3.1. CCM-FRAM 分析框架与计算步骤

根据传统 FRAM 的分析框架, 系统风险与事故分析通常包括以下四个步骤:

- 1) 识别并描述系统的基本功能和正常功能。
- 2) 分析各功能的潜在变异性。
- 3) 分析功能之间的共振关系, 并构建功能网络图。
- 4) 分析结果并制定事故风险控制措施。

上述各步骤均采用定性分析方法。例如, 在步骤 2 中, 功能输出通常从时间性和精确性两个维度进行描述。就时间性而言, 可能表现为过早、准时、过晚、未发生; 就精确性而言, 可能表现为精确、可接受、不精确[18]。本文将思路由过程分析视角转变为最终事故致因视角, 提出了如图 2 所示的分析框架。

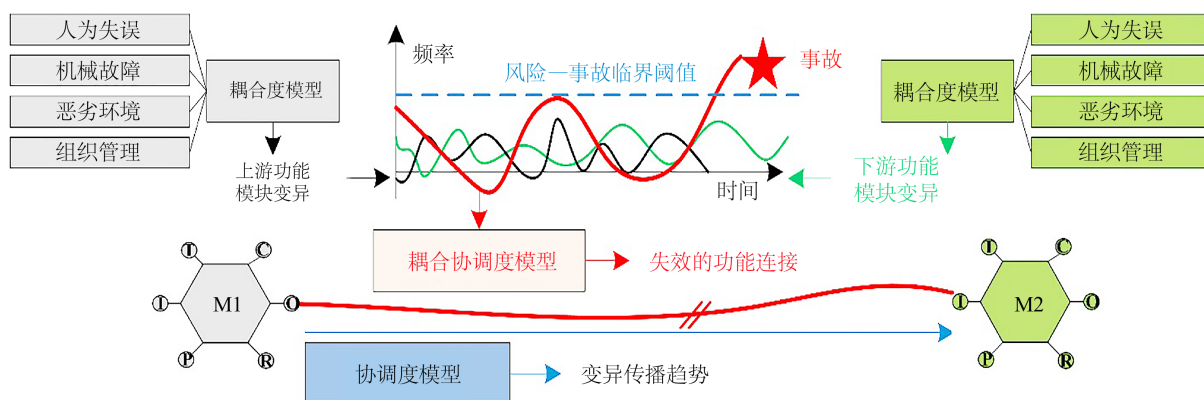


Figure 2. The analysis outlines of CCM-FRAM

图 2. CCM-FRAM 的分析框架

人为失误、机械故障、恶劣环境以及管理失效等风险因素之间的耦合作用, 会直接影响功能的正常运行并导致功能状态发生变化。耦合度可以用于衡量风险因素之间的耦合强度[13][17]。因此, 本文采用耦合度来定量衡量各功能的变异程度。功能变异程度越大, 对功能运行造成的不利影响越明显。

在系统运行过程中, 本文认为上游功能与下游功能之间协调程度的不一致, 是导致功能变异传播的主要原因。一般而言, 功能变异会通过功能之间的连接关系, 由耦合度较高的功能向耦合度较低的功能传播, 最终使各功能之间的相互作用趋于协调和有序[17]。因此, 本文采用协调度描述功能变异在上游功能与下游功能之间的传播趋势。

FRAM 认为, 上游功能与下游功能之间产生的功能共振会导致功能连接关系断裂, 从而引发事故。本文利用耦合协调模型[13][17]对上下游功能之间的功能共振强度进行定量计算。该模型将功能的耦合度与协调度相结合, 耦合协调度越大, 其对系统造成的不利影响越强, 两功能之间连接失效的可能性也越大。

通过上述方法, 本文构建了一种量化的 FRAM 分析框架, 对传统 FRAM 中定性方式描述的功能输出状态进行了量化改进, 同时提供了一种定量计算功能变异传播过程以及功能共振强度的方法。CCM-FRAM 在通用航空事故成因分析中的具体步骤如下:

1) 识别并描述通用航空飞行活动的基本功能和正常功能

本文采用 $M_i, i=1, 2, 3, \dots, 32$ 表示第 3 节中所定义的各项通用航空飞行活动功能, 各功能的详细描述见表 1。假设在某一特定分析周期内(例如一年), R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 表示人为失误、机械故障、恶劣环境以及管理失效所带来的风险。各功能对应风险因素的历史统计频率数据将作为 CCM-FRAM 模型的输入。使用 $u_{M_i}^{R_k}, k=1, 2, 3, 4$ 表示每个功能 M_i 中 R_1 、 R_2 、 R_3 以及 R_4 的发生频率。可构建风险因素发生频率的初始矩阵 M_0 如下:

$$M_0 = \begin{pmatrix} u_{M_1}^{R_1} & u_{M_1}^{R_2} & u_{M_1}^{R_3} & u_{M_1}^{R_4} \\ u_{M_2}^{R_1} & u_{M_2}^{R_2} & u_{M_2}^{R_3} & u_{M_2}^{R_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{M_i}^{R_1} & u_{M_i}^{R_2} & u_{M_i}^{R_3} & u_{M_i}^{R_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{M_{32}}^{R_1} & u_{M_{32}}^{R_2} & u_{M_{32}}^{R_3} & u_{M_{32}}^{R_4} \end{pmatrix}_{4 \times 32} \quad (1)$$

2) 通过使用耦合度模型计算函数的潜在变异

使用式(2)基于初始矩阵 M_0 计算风险因素的概率, 并构建概率矩阵 M_1 :

$$p_{M_i}^{R_k} = u_{M_i}^{R_k} / \sum_{i=1}^{32} u_{M_i}^{R_k}, \forall i, k \quad (2)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} p_{M_1}^{R_1} & p_{M_1}^{R_2} & p_{M_1}^{R_3} & p_{M_1}^{R_4} \\ p_{M_2}^{R_1} & p_{M_2}^{R_2} & p_{M_2}^{R_3} & p_{M_2}^{R_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{M_i}^{R_1} & p_{M_i}^{R_2} & p_{M_i}^{R_3} & p_{M_i}^{R_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{M_{32}}^{R_1} & p_{M_{32}}^{R_2} & p_{M_{32}}^{R_3} & p_{M_{32}}^{R_4} \end{pmatrix}_{4 \times 32} \quad (3)$$

风险因素之间的偏差越小, 风险因素之间的耦合度越高, 安全事故发生的可能性就越大。偏差 d_{M_i} 可计算如下:

$$d_{M_i} = \frac{\sqrt{2}S_{M_i}}{m_{M_i} \sum p_{M_i}^{R_k}} \times \sqrt{1 - \frac{\sum (p_{M_i}^{R_k} \times p_{M_i}'^{R_k})}{m_{M_i} (\sum p_{M_i}^{R_k} / m_{M_i})^2}}, \forall i \quad (4)$$

其中, S_{M_i} 为标准差。 $m_{M_i}, 2 \leq m_{M_i} \leq 4$ 表示每个 M_i 所涉及的风险因素数量。若 $p_{M_i}^{R_k} = 0$, 则对应的风险因素不参与耦合过程。 $p_{M_i}^{R_k} \times p_{M_i}'^{R_k}$ 表示每个 M_i 中成对耦合风险因素的概率乘积, 例如若 M_i 受到 R_2 、 R_3 和 R_4 的影响, ($p_{M_i}^{R_k} = 0$ 时)则 $m_{M_i} = 3$, 并且成对耦合风险因素的概率乘积应当为 $p_{M_i}^{R_2} \times p_{M_i}^{R_3}$ 、 $p_{M_i}^{R_3} \times p_{M_i}^{R_4}$ 以及 $p_{M_i}^{R_2} \times p_{M_i}^{R_4}$ 。令 $\left[m_{M_i} \sum (p_{M_i}^{R_k} \times p_{M_i}'^{R_k}) \right] / (\sum p_{M_i}^{R_k})^2 = C'$, 可以发现 C' 越大, d_{M_i} 越小, 耦合度越大。因此, 本文采用以下公式衡量耦合度 C_{M_i} 以度量功能的潜在变异程度:

$$C_{M_i} = m_{M_i} \sqrt{\frac{m_{M_i} \sum (p_{M_i}^{R_k} \times p_{M_i}'^{R_k})}{(\sum p_{M_i}^{R_k})^2}}, \forall i \quad (5)$$

3) 利用协调度模型计算上游功能与下游功能之间的传播关系

可使用以下公式度量每个 M_i 的协调度。

首先, 本文基于初始矩阵 M_0 , 采用熵权法计算各风险因素 $R_k, k=1,2,3,4$ 的权重, 归一化计算为式(6)。

$$r_{M_i}^{R_k} = \left[(u_{M_i}^{R_k})_{\max} - u_{M_i}^{R_k} \right] / \left[(u_{M_i}^{R_k})_{\max} - (u_{M_i}^{R_k})_{\min} \right], \forall i, k \quad (6)$$

其中, $r_{M_i}^{R_k}$ 为归一化后的属性值, $(u_{M_i}^{R_k})_{\max}$ 为 $u_{M_i}^{R_k}$ 的最大值, $(u_{M_i}^{R_k})_{\min}$ 为 $u_{M_i}^{R_k}$ 的最小值。若 $(u_{M_i}^{R_k})_{\max} = (u_{M_i}^{R_k})_{\min}$, 则令 $r_{M_i}^{R_k} = 0$ 。基于式(6), 每个 $u_{M_i}^{R_k}$ 的归一化概率 $\bar{p}_{M_i}^{R_k}$ 可由式(7)计算:

$$\bar{p}_{M_i}^{R_k} = r_{M_i}^{R_k} / \sum_{i=1}^{32} r_{M_i}^{R_k}, \forall i, k \quad (7)$$

定义每个 R_k 的信息熵为:

$$e_{R_k} = -\frac{1}{\ln 32} \sum_{i=1}^{32} (\bar{p}_{M_i}^{R_k} \cdot \ln \bar{p}_{M_i}^{R_k}), \forall k \quad (8)$$

由信息熵获得的每个 R_k 的权重由式(9)表达:

$$\varpi_{R_k} = [1 - e_{R_k}] / [4 - \sum_{k=1}^4 e_{R_k}], \forall k \quad (9)$$

其中, $0 \leq \varpi_{R_k} \leq 1$, $\sum_{k=1}^4 \varpi_{R_k} = 1$ 。令 M_i 表示上游功能, $M_j, j=1,2,3,\dots,32, j \neq i$ 表示下游功能, 每个 M_i 的协调度可由式(10)计算:

$$T_{M_i \rightarrow j} = \frac{\sum_{k=1}^4 (\varpi_{R_k} \times p_{M_i}^{R_k})}{\sum_{i=1}^{32} \sum_{k=1}^4 (\varpi_{R_k} \times p_{M_i}^{R_k})}, \forall i \quad (10)$$

4) 利用耦合协调模型计算上游功能与下游功能之间的共振关系

本文采用耦合协调模型度量上游功能与下游功能之间的功能共振。首先, 计算式(5)提到的上游功能与下游功能之间的耦合度:

$$C_{M_i \leftrightarrow j} = \sqrt{\frac{2C_{M_i} \times C_{M_j}}{(C_{M_i} + C_{M_j})^2}} \quad (11)$$

其中, C_{M_i} 为上游功能的风险耦合度, C_{M_j} 为下游功能的风险耦合度。将耦合度 $C_{M_i \leftrightarrow j}$ 与协调度 $T_{M_i \rightarrow j}$ 结

合, 得到度量上游功能和下游功能之间的功能共振强度的耦合协调度 $D_{M_i \leftrightarrow j}$:

$$D_{M_i \leftrightarrow j} = \left| \sqrt{T_{M_i \rightarrow j} \times C_{M_i \leftrightarrow j}} \right| \quad (12)$$

5) 分析结果并制定事故/风险控制措施

最后, 根据式(5)、式(10)和式(12)得到的最终计算结果, 可以分别对风险因素导致的功能变异、上游功能和下游功能之间的致因传播, 以及它们之间的功能共振强度进行定量分析。此外, 还可以依据定量分析结果, 提出相应的事故预防与风险控制措施。

3.2. CCM-FRAM 耦合的理论基础与指标映射

定量 FRAM 的关键在于三个问题: 第一, 单个功能的变异程度如何度量; 第二, 功能变异如何在上下游功能之间传播; 第三, 两个相连功能之间的共振强度如何计算。本文引入耦合协调模型对上述三个问题进行量化。

首先, 耦合度用于表示单个功能的变异程度。在通用航空运行中, 一个功能可能同时受到人为失误、机械故障、恶劣环境和管理失效等多类风险因素影响。当多类风险因素共同作用于同一功能时, 该功能的运行状态更容易偏离正常状态, 表现出更强的功能变异[19]。因此, 本文用风险因素之间的耦合度刻画功能变异程度。耦合度越高, 表示该功能受多类风险因素共同影响越明显, 其潜在变异程度越大。式(4)、式(5)的计算来源于耦合度的数学定义及[20]。

其次, 协调度用于表示功能变异在上下游功能之间的传播关系。FRAM 中的功能并不是孤立存在的, 上游功能的输出可能成为下游功能的输入、资源、控制或前提条件。因此, 当上游功能发生变异时, 该变异可能沿着功能连接关系影响下游功能。协调度能够反映上下游功能之间状态关系的紧密程度。本文将用于描述变异由上游功能向下游功能传播的强度。协调度越高, 说明两个功能之间的联系越紧密, 变异越容易通过该连接继续传递。式(6)至式(10)的计算来源于熵权法、协调度的数学定义及[20]。

最后, 耦合协调度用于表示功能共振强度。FRAM 中的共振并不是单个功能变异, 而是多个功能变异经过连接关系相互作用后产生的放大效应。因此, 功能共振既取决于功能自身的变异程度, 也取决于变异在功能之间的传播程度。耦合协调度将耦合度和协调度结合起来, 能够同时反映“功能是否存在较强变异”和“变异是否容易传播”两个方面。耦合协调度越高, 说明上下游功能之间越容易形成较强的功能共振, 该连接在事故形成过程中越可能成为关键风险路径。式(11)、式(12)的计算来源于耦合协调度的数学定义及[20]。

由此, 本文建立 CCM 指标与 FRAM 概念之间的对应关系: 耦合度对应功能变异程度, 协调度对应变异传播强度, 耦合协调度对应功能共振强度。该对应关系为后续定量计算提供了理论依据。

4. 案例分析与讨论

4.1. CCM-FRAM 案例分析与讨论

图 3 显示了通用航空飞行活动 FRAM 框架中前 10 名共振强度的功能。接下来, 本文以 2025 年中国发生的通用航空事故为背景开展案例研究。首先, 收集 2025 年通用航空飞行活动中各功能对应的风险因素发生频率数据(见式(1)), 作为 CCM-FRAM 的输入数据, 详见表 2。表 2 数据由中国民用航空局官方网站(<http://www.caac.gov.cn/>)公开发布的 2025 年通用航空事故及不安全事件信息整理得到。本文未采用专家打分, 而是采用人工内容编码与频次统计方法: 逐条阅读事故报告, 提取事故发生阶段、异常表现和致因描述, 并将其映射至 M_1 至 M_{32} 功能节点; 同时按照人为失误、机械故障、恶劣环境和管理失效四类风险因素进行分类, 统计各功能节点中不同风险因素的出现频次。若同一事故涉及多个功能或多类风险

因素, 则分别计入相应类别; 若报告信息不足以判断, 则不进行推断性编码; 重复通报仅保留信息较完整的一条。为保证数据质量, 本文在统计前统一编码规则, 统计后对照原始报告复核, 并交叉检查频次汇总结果与事故记录的一致性。基于式(5)计算得到的各功能潜在变异程度见表3。利用协调度模型(式(10))计算得到的上游功能与下游功能之间的传播强度见表4。需要说明的是, 事故致因(或功能变异)将通过两个功能之间的连接关系进行传播, 而具体的连接关系可由表1和图1获得。基于式(11)计算得到的上游功能与下游功能之间的耦合度见表5。基于耦合协调度模型(式(12))计算得到的上游功能与下游功能之间的功能共振强度见表6。图3展示了通用航空飞行活动 FRAM 框架下排名前10位的共振强度。

Table 2. The risk factor frequency of each function of the GA flight activity during 2025 in China

表 2. 2025 年中国通用航空飞行活动各功能的风险因素发生频率

	R_1	R_2	R_3	R_4		R_1	R_2	R_3	R_4		R_1	R_2	R_3	R_4
M_1	5	0	0	5	M_{12}	6	1	15	5	M_{23}	8	16	2	5
M_2	2	1	0	2	M_{13}	10	0	0	4	M_{24}	6	15	9	4
M_3	3	1	0	4	M_{14}	9	12	6	5	M_{25}	12	1	0	2
M_4	8	1	0	3	M_{15}	5	8	16	6	M_{26}	8	5	1	3
M_5	5	4	2	4	M_{16}	13	2	0	2	M_{27}	12	2	0	4
M_6	4	2	1	2	M_{17}	15	5	1	5	M_{28}	5	2	7	2
M_7	6	8	2	3	M_{18}	8	0	2	1	M_{29}	2	0	12	4
M_8	9	12	13	4	M_{19}	9	0	0	1	M_{30}	9	1	8	1
M_9	3	1	2	4	M_{20}	8	2	0	6	M_{31}	6	2	7	1
M_{10}	8	10	18	2	M_{21}	8	9	5	3	M_{32}	4	0	0	5
M_{11}	1	1	0	1	M_{22}	14	8	2	7	$\sum R_i$	231	132	131	110

Table 3. The potential variability of each function

表 3. 各功能的潜在变异程度

C_{M_1}	0.1712	C_{M_5}	0.5552	C_{M_9}	0.5121	$C_{M_{13}}$	0.1988	$C_{M_{17}}$	0.6276	$C_{M_{21}}$	0.6375	$C_{M_{25}}$	0.3848	$C_{M_{29}}$	0.4602
C_{M_2}	0.3156	C_{M_6}	0.4888	$C_{M_{10}}$	0.7021	$C_{M_{14}}$	0.6762	$C_{M_{18}}$	0.3683	$C_{M_{22}}$	0.6588	$C_{M_{26}}$	0.5659	$C_{M_{30}}$	0.4889
C_{M_3}	0.3546	C_{M_7}	0.5789	$C_{M_{11}}$	0.2721	$C_{M_{15}}$	0.7112	$C_{M_{19}}$	0.1214	$C_{M_{23}}$	0.6260	$C_{M_{27}}$	0.4540	$C_{M_{31}}$	0.5221
C_{M_4}	0.3937	C_{M_8}	0.7175	$C_{M_{12}}$	0.6264	$C_{M_{16}}$	0.4161	$C_{M_{20}}$	0.4533	$C_{M_{24}}$	0.6941	$C_{M_{28}}$	0.5512	$C_{M_{32}}$	0.1584

功能变异性表示多种风险因素耦合作用对单一功能产生的影响强度。根据表3结果可以发现, 功能 M_8 、 M_{10} 和 M_{15} 的变异性较高, 这意味着这些功能会受到多种风险因素耦合作用的显著影响, 其输出结果不稳定, 容易造成功能失效, 并将失效传递至下游功能, 甚至引发通用航空系统的局部运行停滞。

由表4可知, 功能 M_8 、 M_{10} 和 M_{15} 向其他功能传递变异的传播强度较高, 这是因为这三个功能本身具有较高的变异性。这意味着, 这三个功能最容易将变异影响传播至其他功能, 因此可被视为所谓的根本原因, 需要对其进行重点控制和监测[13]。

Table 4. The propagation intensity between upstream function and downstream function
表 4. 上游功能与下游功能之间的传播强度

T_{M_1}	0.0064	T_{M_5}	0.0218	T_{M_9}	0.0130	$T_{M_{13}}$	0.0114	$T_{M_{17}}$	0.0314	$T_{M_{21}}$	0.0459	$T_{M_{25}}$	0.0152	$T_{M_{29}}$	0.0429
T_{M_2}	0.0048	T_{M_6}	0.0125	$T_{M_{10}}$	0.0911	$T_{M_{14}}$	0.0575	$T_{M_{18}}$	0.0152	$T_{M_{22}}$	0.0410	$T_{M_{26}}$	0.0236	$T_{M_{30}}$	0.0385
T_{M_3}	0.0064	T_{M_7}	0.0316	$T_{M_{11}}$	0.0035	$T_{M_{15}}$	0.0778	$T_{M_{19}}$	0.0096	$T_{M_{23}}$	0.0522	$T_{M_{27}}$	0.0180	$T_{M_{31}}$	0.0343
T_{M_4}	0.0113	T_{M_8}	0.0806	$T_{M_{12}}$	0.0596	$T_{M_{16}}$	0.0185	$T_{M_{20}}$	0.0143	$T_{M_{24}}$	0.0709	$T_{M_{28}}$	0.0335	$T_{M_{32}}$	0.0054

Table 5. The coupling degree between upstream function and downstream function
表 5. 上游功能与下游功能之间的耦合度

$C_{M1\leftrightarrow 2}$	0.6753	$C_{M16\leftrightarrow 19}$	0.5914	$C_{M26\leftrightarrow 7}$	0.7071	$C_{M31\leftrightarrow 1}$	0.6099	$C_{M10\leftrightarrow 11}$	0.6345	$C_{M24\leftrightarrow 25}$	0.6774
$C_{M14\leftrightarrow 7}$	0.7050	$C_{M26\leftrightarrow 5}$	0.7071	$C_{M29\leftrightarrow 31}$	0.7057	$C_{M8\leftrightarrow 9}$	0.6972	$C_{M22\leftrightarrow 25}$	0.6823	$C_{M27\leftrightarrow 7}$	0.7019
$C_{M26\leftrightarrow 1}$	0.5972	$C_{M28\leftrightarrow 26}$	0.7070	$C_{M6\leftrightarrow 7}$	0.7046	$C_{M20\leftrightarrow 21}$	0.6970	$C_{M27\leftrightarrow 5}$	0.7035	$C_{M31\leftrightarrow 10}$	0.6994
$C_{M27\leftrightarrow 9}$	0.7058	$C_{M4\leftrightarrow 5}$	0.6968	$C_{M19\leftrightarrow 3}$	0.6165	$C_{M26\leftrightarrow 27}$	0.7028	$C_{M31\leftrightarrow 7}$	0.7062	$C_{M13\leftrightarrow 1}$	0.7051
$C_{M2\leftrightarrow 3}$	0.7059	$C_{M17\leftrightarrow 19}$	0.5212	$C_{M26\leftrightarrow 8}$	0.7022	$C_{M31\leftrightarrow 2}$	0.6853	$C_{M11\leftrightarrow 32}$	0.6820	$C_{M25\leftrightarrow 4}$	0.7071
$C_{M15\leftrightarrow 7}$	0.7071	$C_{M26\leftrightarrow 6}$	0.7052	$C_{M30\leftrightarrow 31}$	0.7067	$C_{M9\leftrightarrow 10}$	0.6984	$C_{M23\leftrightarrow 24}$	0.7062	$C_{M27\leftrightarrow 8}$	0.6890
$C_{M26\leftrightarrow 2}$	0.6780	$C_{M28\leftrightarrow 31}$	0.7068	$C_{M7\leftrightarrow 8}$	0.7031	$C_{M21\leftrightarrow 4}$	0.6871	$C_{M27\leftrightarrow 6}$	0.7066	$C_{M31\leftrightarrow 27}$	0.7054
$C_{M27\leftrightarrow 10}$	0.6906	$C_{M5\leftrightarrow 6}$	0.7057	$C_{M20\leftrightarrow 1}$	0.6309	$C_{M27\leftrightarrow 4}$	0.7053	$C_{M31\leftrightarrow 9}$	0.7071		
$C_{M3\leftrightarrow 4}$	0.7061	$C_{M18\leftrightarrow 19}$	0.6107	$C_{M26\leftrightarrow 9}$	0.7062	$C_{M31\leftrightarrow 5}$	0.7068	$C_{M12\leftrightarrow 7}$	0.7066		

耦合度越大, 说明两个功能之间发生功能共振的可能性越高。根据表 5 和图 3 的计算结果, 可以发现: 1) 当其他功能与 M_{26} 、 M_{27} 、 M_{28} 或 M_{31} 的输出相连接时, 功能耦合现象极有可能发生。2) 当其他功能与 M_2 、 M_3 、 M_5 、 M_6 、 M_7 、 M_8 、 M_{12} 、 M_{14} 、 M_{15} 、 M_{26} 、 M_{27} 或 M_{31} 的输入或输出相连接时, 功能耦合现象极有可能发生。这些功能之间通过直接连接关系紧密相连, 其输入与输出也会受到直接影响。由于它们之间存在持续且强烈的功能耦合作用, 因此构成了系统中的高强度耦合功能群。特别是当上游功能与 M_6 、 M_7 或 M_{31} 连接时, 上游功能产生的变异性很容易传递至 M_6 、 M_7 或 M_{31} , 导致 M_6 、 M_7 或 M_{31} 的变异, 并最终产生功能耦合。

Table 6. The functional resonance intensity between upstream function and downstream function
表 6. 上游功能与下游功能之间的功能共振强度

$D_{M1\leftrightarrow 2}$	0.0659	$D_{M16\leftrightarrow 19}$	0.1047	$D_{M26\leftrightarrow 7}$	0.1293	$D_{M31\leftrightarrow 1}$	0.1445	$D_{M10\leftrightarrow 11}$	0.2405	$D_{M24\leftrightarrow 25}$	0.2191
$D_{M14\leftrightarrow 7}$	0.2014	$D_{M26\leftrightarrow 5}$	0.1293	$D_{M29\leftrightarrow 31}$	0.1741	$D_{M8\leftrightarrow 9}$	0.2370	$D_{M22\leftrightarrow 25}$	0.1672	$D_{M27\leftrightarrow 7}$	0.1124
$D_{M26\leftrightarrow 1}$	0.1188	$D_{M28\leftrightarrow 26}$	0.1538	$D_{M6\leftrightarrow 7}$	0.0938	$D_{M20\leftrightarrow 21}$	0.0999	$D_{M27\leftrightarrow 5}$	0.1125	$D_{M31\leftrightarrow 10}$	0.1548
$D_{M27\leftrightarrow 9}$	0.1127	$D_{M4\leftrightarrow 5}$	0.0888	$D_{M19\leftrightarrow 3}$	0.0770	$D_{M26\leftrightarrow 27}$	0.1289	$D_{M31\leftrightarrow 7}$	0.1555	$D_{M13\leftrightarrow 1}$	0.0897
$D_{M2\leftrightarrow 3}$	0.0584	$D_{M17\leftrightarrow 19}$	0.1280	$D_{M26\leftrightarrow 8}$	0.1289	$D_{M31\leftrightarrow 2}$	0.1532	$D_{M11\leftrightarrow 32}$	0.0491	$D_{M25\leftrightarrow 4}$	0.1038
$D_{M15\leftrightarrow 7}$	0.2346	$D_{M26\leftrightarrow 6}$	0.1291	$D_{M30\leftrightarrow 31}$	0.1648	$D_{M9\leftrightarrow 10}$	0.0953	$D_{M23\leftrightarrow 24}$	0.1920	$D_{M27\leftrightarrow 8}$	0.1113
$D_{M26\leftrightarrow 2}$	0.1266	$D_{M28\leftrightarrow 31}$	0.1538	$D_{M7\leftrightarrow 8}$	0.1491	$D_{M21\leftrightarrow 4}$	0.1777	$D_{M27\leftrightarrow 6}$	0.1127	$D_{M31\leftrightarrow 27}$	0.1554
$D_{M27\leftrightarrow 10}$	0.1115	$D_{M5\leftrightarrow 6}$	0.1241	$D_{M20\leftrightarrow 1}$	0.0950	$D_{M27\leftrightarrow 4}$	0.1126	$D_{M31\leftrightarrow 9}$	0.1556		
$D_{M3\leftrightarrow 4}$	0.0670	$D_{M18\leftrightarrow 19}$	0.0964	$D_{M26\leftrightarrow 9}$	0.1292	$D_{M31\leftrightarrow 5}$	0.1556	$D_{M12\leftrightarrow 7}$	0.2051		

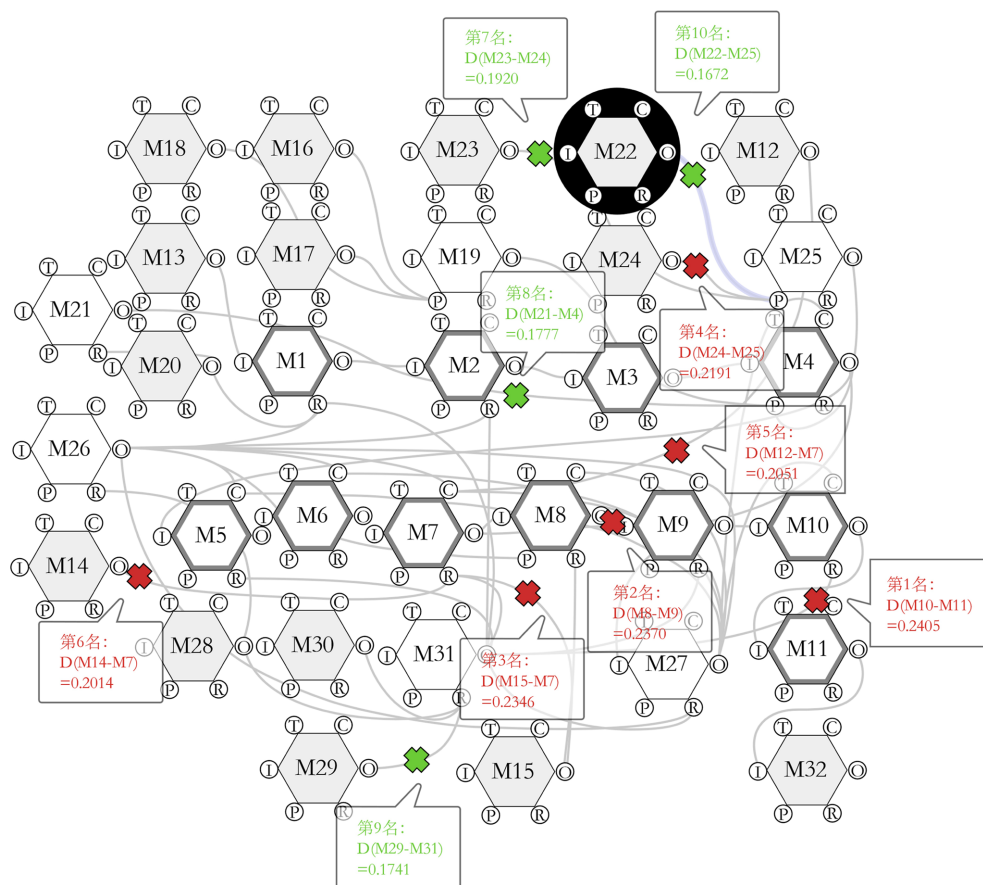


Figure 3. Function diagram of the top 10 resonance intensity in FRAM framework of GA flight activity
图 3. 通用航空飞行活动 FRAM 框架中前 10 名共振强度的功能示意图

根据表 6 和图 3 的计算结果, 可以发现: 1) M_{12} 、 M_7 、 M_8 、 M_9 和 M_{10} 之间的连接关系失效的概率相对较高, 这是因为功能 M_7 对其他功能具有较高的耦合效应, 并与具有高变异性的其他功能相连。因此, 在 M_{12} 、 M_7 、 M_8 、 M_9 和 M_{10} 之间的连接关系中可能有持续性的失效。2) M_{10} 与 M_{24} 具有低耦合强度与高传播能力, 此类功能的变异性可能不会直接导致系统失效, 但会将上游功能的异常输出传递至下游功能, 并放大下游功能接收到的异常输出, 最后导致系统失效与连接关系失效。3) M_{12} 、 M_{14} 、 M_{15} 和 M_{23} 具有高耦合强度与高传播能力, 此类功能的变异性容易传播到其他下游功能, 最终表现为多个连接关系的严重失效。4) M_{10} 与 M_{11} 之间的耦合协调度最高, 具有最高的功能共振强度(0.2405), 其次是 M_8 与 M_9 (0.2370), 再次是 M_{15} 与 M_7 (0.2346), 即, 上述三组功能之间的功能共振最有可能导致通用航空事故的发生, 因此需要重点监控和控制。

最后, 为验证本文提出的 CCM-FRAM 模型的有效性, 本文收集了 2025 年中国通用航空事故中因连接关系失效而导致事故发生的频次数据作为对照基准。相关数据来源于中国民用航空局官方网站 (<http://www.caac.gov.cn/>)。比较结果如图 4 所示。根据图 4 可以发现, 在航空器着陆阶段发生的事故频率最高(8 次), 其对应的功能共振强度也最高(0.2405)。其次是因备降机场相关问题导致的事故(6 次), 其对应的功能共振强度为 0.2346。总体来看, 通用航空事故发生频率与功能共振强度之间呈现正相关关系。FRAM 能够构建通用航空完整的飞行活动过程, 而 CCM 则能够定量计算事故致因之间的耦合强度, 以及定量计算 FRAM 框架下功能之间的变异程度和功能共振强度。

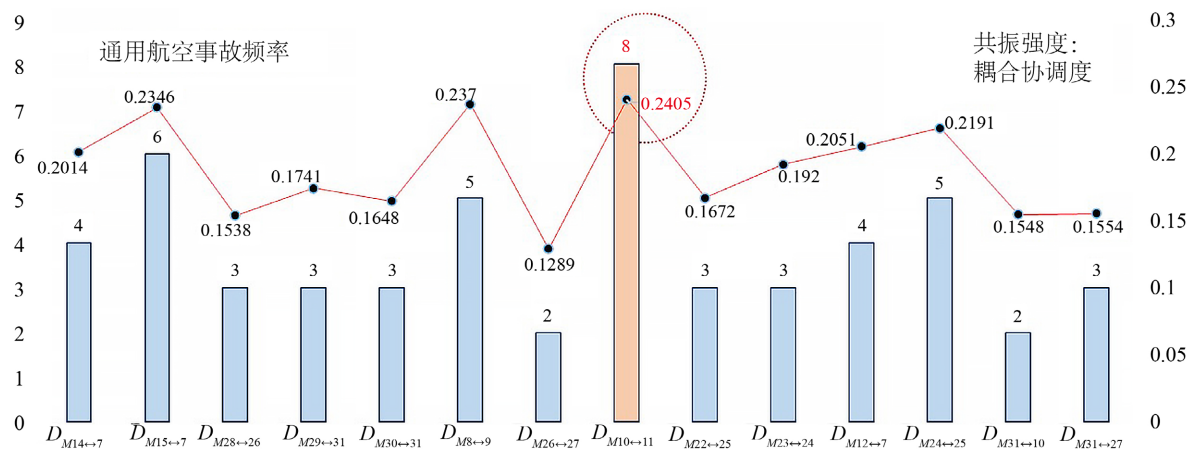


Figure 4. The comparison results of the relationship between frequency of GA accidents and resonance intensity
图 4. 通用航空事故频率与共振强度之间的关系比较结果

4.2. 与专家打分法的对比

为进一步验证本文结果的合理性, 引入专家打分法作为对照。专家打分法不参与模型计算, 仅用于对功能共振强度排序结果进行比较。本文邀请 5 名具有通用航空运行、安全管理或事故分析经验的专家, 对 FRAM 网络中存在连接关系的上下游功能进行评价。评分内容为“该功能连接在事故形成过程中产生共振风险的可能性及影响程度”, 评分采用 1 至 5 级量表, 其中 1 表示极低, 2 表示较低, 3 表示中等, 4 表示较高, 5 表示极高。对于功能连接 $M_i \leftrightarrow M_j$, 专家平均评分计算如式(13)所示:

$$E_{ij} = \frac{1}{5} \sum_{num=1}^5 E_{ij}^{num} \quad (13)$$

其中, E_{ij}^{num} 为第 num 位专家对功能连接 $M_i \leftrightarrow M_j$ 的评分; 考虑到 5 位专家均具备扎实的专业背景, 本文赋予各位专家同等权重。最终评分结果如表 7 所示。

Table 7. The expert grading method scoresheet
表 7. 专家打分法计分表

功能连接	含义	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	平均分
$M_{10}-M_{11}$	航空器着陆 - 完成飞行活动	5	3	2	4	2	3.2
M_8-M_9	备降机场备降 - 着陆许可	5	4	4	3	3	3.8
$M_{15}-M_7$	备降机场 - 执行飞行任务	3	4	3	3	3	3.2
$M_{24}-M_{25}$	通信与导航设备 - 飞行前检查	5	2	5	5	4	4.2
$M_{12}-M_7$	航路规划 - 执行飞行任务	3	3	4	4	2	3.2
$M_{14}-M_7$	告警服务 - 执行飞行任务	3	3	3	4	2	3.0
$M_{23}-M_{24}$	航空器重量与平衡 - 通信与导航设备	1	1	1	5	4	2.4
$M_{21}-M_4$	航空器燃油供应 - 执行飞行计划	4	5	5	2	4	4.0
$M_{29}-M_{31}$	航路信息 - 航空情报服务	5	2	3	4	4	3.6
$M_{22}-M_{25}$	起飞检查单 - 飞行前检查	5	2	4	5	4	4.0

由表 7 可知, 专家评分的前 5 位功能连接为: M_{24} 与 M_{25} , M_{21} 与 M_4 , M_{22} 与 M_{25} , M_8 与 M_9 , M_{29} 与 M_{31} ; 对比表 7 的专家打分结果与本文 CCM-FRAM 计算结果(表 6 和图 3), 可以发现二者既有共性, 又存在显著差异。

首先, 两种方法均识别出 M_8 - M_9 (备降机场备降 - 着陆许可)是极高风险的功能连接。这表明本文基于数据驱动的 CCM-FRAM 模型结果与专家的行业经验判断具有良好的一致性, 验证了本文方法的可靠性。

其次, 在差异性方面, 专家打分排名前列的主要是 M_{24} - M_{25} (通信与导航设备 - 飞行前检查, 4.2 分)、 M_{21} - M_4 (航空器燃油供应 - 执行飞行计划, 4.0 分)和 M_{22} - M_{25} (起飞检查单 - 飞行前检查, 4.0 分)。可以看出, 专家凭借主观经验, 往往更关注飞行前期的准备阶段、机械设备状态以及规章检查环节。然而, 专家对 M_{10} - M_{11} (航空器着陆 - 完成飞行活动)和 M_{15} - M_7 (备降机场 - 执行飞行任务)的评分相对一般(均为 3.2 分), 但在本文 CCM-FRAM 计算中, 这两组连接的功能共振强度却是极高的。这种差异恰好体现了本文方法的独特价值。在通用航空实际运行中, 着陆阶段(M_{10})处于复杂动态环境中, 往往同时耦合了多源风险, 其非线性变异和共振放大的概率极高。传统专家打分容易受限于直觉经验, 难以定量捕捉这种多要素动态耦合的放大效应。而 CCM-FRAM 方法通过引入真实事故报告中的风险频率数据, 并利用耦合协调度公式进行计算, 补充主观经验的局限, 识别出复杂动态运行过程中的系统性共振路径。因此, 相比于传统专家判断, 本文方法在揭示多因素非线性耦合致因机制方面具有显著优势。

同时, 作为补充对比, [19]使用的 FRAM 方法为定性的、事后倒推的方法, 本文提出的 CCM-FRAM 方法则是定量的、具有预防能力的方法, 它不仅克服了定性分析中较强的主观依赖性, 更重要的是, CCM-FRAM 能够利用历史事故统计数据, 直接量化并计算出不同功能连接的共振强度。通过这种数据驱动的量化排序, 安全管理人员可以在类似事故再次发生前, 前瞻性地识别出系统中潜伏的高风险耦合路径, 从而为有限安全资源的精准投放和事前风险阻断提供更为客观的决策依据。

5. 结束语

大多数通用航空事故分析研究主要集中于利用历史数据拟合或统计分析方法识别风险因素, 而采用系统性方法分析通用航空事故成因的研究相对较少。本文将分析视角由过程分析转向最终事故致因分析。利用 FRAM 构建了通用航空完整的飞行活动过程, 引入耦合协调模型后, 为传统 FRAM 中过早、准时、过晚、未发生、精确、可接受、不精确等功能变异状态提供了定量解释, 并建立了功能变异传播及功能共振强度的定量计算方法。最后, 本文以 2025 年中国发生的通用航空事故为背景开展案例研究。为了验证本文提出的 CCM-FRAM 模型的有效性, 收集了 2025 年中国因连接关系失效而导致的通用航空事故频次数据作为验证基准。研究结果表明, 通用航空事故发生频率总体上与功能共振强度呈正相关关系。其中, M_{10} 与 M_{11} 之间的耦合协调度最高, 其次为 M_8 与 M_9 之间的耦合协调度, 第三位为 M_{15} 与 M_7 之间的耦合协调度。这表明, 上述三组功能之间的功能共振最有可能导致通用航空事故, 需要重点关注和控制; 为降低事故概率, 应针对高变异性功能和高共振连接设置防护屏障, 重点监测功能输出, 并加强人员培训、气象预警、维修保障和安全标准化建设。

6. 研究局限性

本文仍存在一定局限性。首先, CCM-FRAM 模型基于年度事故频率数据计算, 主要反映特定时期内功能变异、传播和共振关系的总体状态, 具有静态特征, 难以刻画事故演化过程中的时序变化。其次, 模型将人为失误、机械故障、恶劣环境和管理失效作为相对独立的风险类别处理, 而实际运行中各风险因素可能存在因果依赖、反馈作用和叠加效应。未来可引入动态贝叶斯网络、系统动力学等方法, 进一

步描述功能变异的动态传播过程。

参考文献

- [1] Xue, Y.J.Y. and Fu, G. (2018) A Modified Accident Analysis and Investigation Model for the General Aviation Industry: Emphasizing on Human and Organizational Factors. *Journal of Safety Research*, **67**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.09.008>
- [2] Burns, K. and Bonaceto, C. (2020) An Empirically Benchmarked Human Reliability Analysis of General Aviation. *Reliability Engineering & System Safety*, **194**, Article ID: 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.07.028>
- [3] Bazargan, M. and Guzhva, V.S. (2011) Impact of Gender, Age and Experience of Pilots on General Aviation Accidents. *Accident Analysis & Prevention*, **43**, 962-970. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.11.023>
- [4] Boyd, D.D. (2016) General Aviation Accidents Related to Exceedance of Airplane Weight/Center of Gravity Limits. *Accident Analysis & Prevention*, **91**, 19-23. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.02.019>
- [5] Erjavac, A.J., Iammartino, R. and Fossaceca, J.M. (2018) Evaluation of Preconditions Affecting Symptomatic Human Error in General Aviation and Air Carrier Aviation Accidents. *Reliability Engineering & System Safety*, **178**, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.05.021>
- [6] Rao, A.H. and Marais, K. (2020) A State-Based Approach to Modeling General Aviation Accidents. *Reliability Engineering & System Safety*, **193**, Article ID: 106670. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106670>
- [7] de Voogt, A., Kalagher, H., Santiago, B. and Lang, J.W.B. (2022) Go-Around Accidents and General Aviation Safety. *Journal of Safety Research*, **82**, 323-328. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.06.008>
- [8] Zhuang, Z.B., Gong, J.W., Fan, J.C., Hou, Y.K. and Wang, L. (2026) Data-Driven Modeling and Application of General Aviation System Safety Theory: From Topics to Factor Analysis and Application Processes. *Reliability Engineering & System Safety*, **275**, Article ID: 112791. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112791>
- [9] Zarei, E., Roggow, B.J., Gholamizadeh, K., Hansen, K. and Langel, C. (2026) A Data-Driven Model of Human Factors Contributing to Loss of Control In-Flight and on the Ground in General Aviation. *Reliability Engineering & System Safety*, **269**, Article ID: 112124. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.112124>
- [10] Li, G.H., Baker, S.P., Grabowski, J. and Rebok, G.W. (2001) Factors Associated with Pilot Error in Aviation Crashes. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, **72**, 52-58.
- [11] Gramopadhye, A.K. and Drury, C.G. (2000) Human Factors in Aviation Maintenance: How We Got to Where We Are. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **26**, 125-131. [https://doi.org/10.1016/s0169-8141\(99\)00062-1](https://doi.org/10.1016/s0169-8141(99)00062-1)
- [12] Kearney, P.J. and Li, G.H. (2000) Geographic Variations in Crash Risk of General Aviation and Air Taxis. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, **71**, 19-21.
- [13] Huang, W.C., Shuai, B., Zuo, B.R., Xu, Y.F. and Antwi, E. (2019) A Systematic Railway Dangerous Goods Transportation System Risk Analysis Approach: The 24 Model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **61**, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.05.021>
- [14] Hollnagel, E. (2014) Functional Resonance Analysis Method: Modeling of Complex Social Technical System. CRC Press.
- [15] Huang, W.C., Yin, D.Z., Xu, Y.F., Zhang, R. and Xu, M.H. (2022) Using N-K Model to Quantitatively Calculate the Variability in Functional Resonance Analysis Method. *Reliability Engineering & System Safety*, **217**, Article ID: 108058. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108058>
- [16] Li, T.F. and Huang, W.C. (2025) Risk-Accident Emergence and Prevention Method of High-Speed Railway System: Based on an Improved Functional Resonance Analysis Method. *Reliability Engineering & System Safety*, **264**, Article ID: 111438. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111438>
- [17] 黄文成, 帅斌, 孙妍, 李美霖, 庞璐. 熵-TOPSIS-耦合协调法评价铁路危险品运输系统风险[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 134-138.
- [18] Patriarca, R., Di Gravio, G.D. and Costantino, F. (2017) A Monte Carlo Evolution of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Assess Performance Variability in Complex Systems. *Safety Science*, **91**, 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.016>
- [19] 徐远. 基于功能共振模型的通用航空碰撞事故致因分析研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [20] 黄文成, 帅斌, 庞璐, 杨卓倩. 基于耦合协调度的道路危险品运输系统风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(6): 117-122.