

复杂社会技术系统事故的定量功能共振分析

王宇莹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7月9日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月24日

摘要

复杂社会技术系统事故通常并非由单一故障直接导致, 而是多个功能在运行中产生偏差并相互作用、逐步放大的结果。针对传统功能共振分析方法在功能偏差量化、偏差传播刻画及专家评价可靠性考虑方面的不足, 本文提出一种定量事故分析方法。该方法采用语言Z数量化功能输出的时间性与精确性变异, 利用站点渗流模型计算变异传播强度, 并通过耦合度模型识别功能共振强度。以加拿大143号航班事故为例, 选取燃油系统加油过程中的8个关键功能, 结合3名专家评价数据。结果表明, 信号处理设备与燃油量显示之间的功能共振是事故形成的关键环节, 维护、告知、加油和飞行员检查等功能也存在较高风险。与已有改进FRAM结果相比, 该方法能够识别相近的关键风险环节, 并进一步发现潜在风险点, 可为复杂社会技术系统事故分析与风险防控提供参考。灵敏度分析表明, 在三角隶属函数支撑区间按 $\pm 10\%$ 扰动以及共振阈值在0.43~0.47范围内变化时, 功能变异排序和核心高风险链条基本保持稳定。

关键词

事故分析, 复杂社会技术系统, 定量功能共振分析, 语言Z数, 站点渗流模型

Quantitative Functional Resonance Analysis of Accidents in Complex Socio-Technical Systems

Yuying Wang¹, 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: July 9, 2026; accepted: September 14, 2026; published: September 24, 2026

*通讯作者。

文章引用: 王宇莹, 黄文成. 复杂社会技术系统事故的定量功能共振分析[J]. 交通技术, 2026, 15(5): 701-712.
DOI: 10.12677/ojtt.2026.155060

Abstract

Accidents in complex socio-technical systems are usually not directly caused by a single failure, but result from deviations in multiple functions during system operation, which interact with each other and are progressively amplified. To address the limitations of the traditional Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in quantifying functional variability, characterizing variability propagation, and considering the reliability of expert evaluations, this paper proposes a quantitative accident analysis method. In this method, linguistic Z-numbers are used to quantify the variability in the timeliness and accuracy of functional outputs; the site percolation model is employed to calculate the propagation intensity of variability; and the coupling degree model is introduced to identify the strength of functional resonance. Taking the Air Canada Flight 143 accident as a case study, eight key functions in the refueling process of the fuel system are selected and analyzed based on evaluation data from three experts. The results show that the functional resonance between signal processing equipment and fuel quantity indication was a critical link in the formation of the accident, while functions such as maintenance, notification, refueling, and pilot inspection also exhibited relatively high risks. Compared with existing improved FRAM results, the proposed method can identify similar key risk links and further reveal potential risk points, thereby providing a reference for accident analysis and risk prevention and control in complex socio-technical systems. The sensitivity analysis shows that the ranking of functional variability and the core high-risk links remain stable when the support intervals of the triangular membership functions are perturbed by $\pm 10\%$ and the resonance threshold varies from 0.43 to 0.47.

Keywords

Accident Analysis, Complex Socio-Technical Systems, Quantitative Functional Resonance Analysis, Linguistic Z-Numbers, Site Percolation Model

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

复杂社会技术系统由人员、组织、技术设备、运行环境和管理规则等多类要素构成,其运行安全并不仅取决于单一设备可靠性或单个操作者行为,而是受到多功能、多主体和多因素动态交互影响。传统事故致因分析多强调故障链条、失效路径和风险概率,对系统正常运行中的功能调整、性能波动和非线性交互解释不足。随着安全科学由“避免失败”转向“保证成功”,Safety-II 理念强调系统在预期和非预期条件下维持成功运行的能力,并将安全理解为动态运行状态[1]-[3]。

在复杂社会技术系统运行过程中,系统管理者和运行人员难以提前穷尽所有运行情境,往往需要根据现场条件进行近似调整,以保证功能持续实现。但当多个功能的性能变异在时间、精度、顺序或资源等方面发生耦合时,局部扰动可能沿功能连接传播并被放大,进而形成风险累积甚至事故。功能共振分析方法(Functional Resonance Analysis Method, FRAM)从功能及其耦合关系出发,分析复杂系统中性能变异的传播、叠加和共振[4]。已有研究表明,FRAM 能够揭示事故形成的非线性机制,已应用于航空、制造、铁路、海事、医疗、油气和环境风险管理等领域[5]-[8]。

围绕 FRAM 的改进主要包括定性改进和定量或半定量改进[5]。定性改进方面,已有研究引入认知联

合系统、事故致因分类模型和物质-能量-信息框架等方法,以增强 FRAM 在功能识别、功能约束和耦合关系判定方面的系统性[9]-[11]。定量和半定量改进方面,已有成果通过蒙特卡洛模拟、元胞自动机、混合仿真、动态贝叶斯网络、N-K 模型、离散事件仿真和强化学习等方法,对功能状态、性能变异和系统韧性进行计算分析[12]-[17]。但现有研究在功能间变异传播刻画、专家评价可靠性处理,以及事故发生后功能共振路径和事故形成机制解释方面仍存在不足。

因此,复杂社会技术系统事故分析仍需回答功能变异如何量化、变异如何在功能间传播、功能之间如何形成共振。语言 Z 数(Linguistic Z-numbers, LZs)能够同时表达语言评价中的限制测度和可靠性测度,可将专家定性判断转化为具有可靠性约束的定量信息[18]。站点渗流模型能够描述节点状态变化在网络结构中的传播特征,可用于刻画功能变异传播强度[19]。将 FRAM、语言 Z 数、站点渗流模型和耦合度计算思路结合,可弥补传统 FRAM 在功能变异、变异传播和功能共振强度量化方面的不足。

针对上述问题,本文构建面向复杂社会技术系统事故的定量功能共振分析框架:首先,采用 FRAM 识别事故演化过程中的关键功能及其输入、输出、前提、资源、控制和时间六类耦合关系;其次,引入语言 Z 数量化功能性能变异;再次,利用站点渗流模型计算功能变异传播强度;最后,结合功能变异程度与变异传播强度,测度相连功能之间的功能共振水平,识别关键共振路径,为事故机理解释、关键功能识别和风险控制措施制定提供定量支撑。

2. 融合 LZs、SPM 和 CDM 的定量 FRAM 方法

在系统风险-事故分析中,传统 FRAM 通常包括以下步骤:(i) 识别并描述系统中的基本功能和正常功能;(ii) 分析功能的潜在变异;(iii) 分析功能之间的共振关系,并构建功能网络图;(iv) 分析结果,设置物理屏障并提出事故/风险控制措施。上述步骤以定性分析为主。例如,在步骤(ii)中,可从时间和精度两个方面定义输出变异:时间方面,输出可能表现为过早、准时、过晚或未发生;精度方面,输出可能表现为精确、可接受或不精确[13]。已有 FRAM 改进研究主要围绕步骤(ii)和步骤(iii)展开,通过引入其他分析技术提升方法能力,但相关技术仍多为定性方法,评分结果可靠性难以充分保证。

为弥补上述不足,提出如下改进思路:(1) 采用语言 Z 数(LZs)测度各功能的变异程度,以替代传统 FRAM 中的定性共同绩效条件(Common Performance Conditions, CPCs) [18],即利用 LZs 对过早、准时、过晚、未发生、精确、可接受和不精确等输出状态进行量化描述;(2) 将各功能变异值作为站点渗流模型(Site Percolation Model, SPM)输入,计算变异由上游功能向下游功能传播的强度;(3) 将上下游功能变异值及其传播强度作为耦合度模型(Coupling Degree Model, CDM)输入,计算功能之间连接失效的概率。定量 FRAM 事故分析的具体步骤如下。

(1) 识别并描述具体运行过程中的基本功能和正常功能

设 $M_i, i=1,2,3,\dots,n, n \geq 2, n \in N^+$ 表示系统具体运行过程中的各项功能。对于每一项功能,需要确定其输入、输出、前提、资源、时间和控制 6 类属性。其中,输入可与其他功能相连接,并能够被某一功能转化生成输出;输出可以是实体或状态变化,也可继续与其他功能相连接。通常,变异由输出产生,并传递至下游功能。最终,全部功能可通过属性之间的连接形成正常运行网络,其中功能为网络节点,属性之间的连接为网络边。该网络是后续分析的基础。

(2) 采用 LZs 计算功能变异值

语言 Z 数由一对有序模糊数表示,即 $Z=(A,B)$ 。其中,第一部分 A 表示专家使用语言变量对功能变异程度作出的模糊评价,第二部分 B 表示专家语言评价结果的可靠性[18]。例如,在方案评价中,“差”表示专家认为该方案较差,“高”表示专家认为“该方案较差”这一评价结果具有较高可靠性。通常, A 和 B 可采用三角模糊数(Triangular Fuzzy Number, TFN)或梯形模糊数(Trapezoidal Fuzzy Number, TrFN)

表示。这里采用三角模糊数表示 $((A, B))$ 。

对于三角模糊数 $A = ((x, \mu_A(x)) | x \in X)$, $\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1]$ 为三角模糊数的隶属函数, 且 $A = (a_1, a_2, a_3)$, 其中 a_1 和 a_2 分别表示下限和上限。隶属函数 $\mu_A(x)$ 可表示为:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x < a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x < a_3 \\ 0, & x \geq a_3 \end{cases}, \forall M_i, i = 1, 2, 3, \dots, n, n \geq 2, n \in N^+ \quad (1)$$

语言 Z 数 $Z = (A, B)$ 由三角模糊数表示, 其中 $A = (a_1, a_2, a_3)$, $B = (b_1, b_2, b_3)$ 。可利用式(2)将可靠性部分 $B = (b_1, b_2, b_3)$ 转化为实数 α , 再利用式(3)将 $Z = (A, B)$ 转化为新的三角模糊数 $Z', Z' = (z_1, z_2, z_3)$ 。

$$\alpha = \int x \mu_B(x) dx / \int \mu_B(x) dx \quad (2)$$

$$Z' = \{ \mu_{Z'}(x) = \sqrt{\alpha} \mu_A(x), x \in [0, 1] \} \quad (3)$$

其中, $\mu_B(x)$ 为三角模糊数 $B = (b_1, b_2, b_3)$ 的隶属函数, $\mu_{Z'}(x)$ 为三角模糊数 $Z' = (z_1, z_2, z_3)$ 的隶属函数。对于每一项功能 $M_i, i = 1, 2, 3, \dots, n, n \geq 2, n \in N^+$, 专家语言评价及其对应的 A_{M_i} 和 B_{M_i} 隶属值见表 1。

Table 1. The experts' linguistic evaluations and their corresponding membership values of A and B of each M_i

表 1. 各功能 M_i 的专家语言评价及其对应的 A 和 B 隶属值

A_{M_i}		B_{M_i}	
专家语言评价	隶属值	专家语言评价	隶属值
无影响	(1, 1, 1)	可靠性很低	(0.1, 0.2, 0.3)
影响很低	(2/3, 1, 3/2)	可靠性较低	(0.3, 0.4, 0.5)
影响较低	(3/2, 2, 5/2)	可靠性中等	(0.5, 0.6, 0.7)
影响中等	(5/2, 3, 7/2)	可靠性较高	(0.7, 0.8, 0.9)
影响较高	(7/2, 4, 9/2)	可靠性很高	(0.9, 1, 1)
影响很高	(9/2, 5, 11/2)		

为评估性能变异, Macchi 等[13]指出, 每一项功能均应从精度和时间两个方面进行表征。在精度方面, 功能输出可分为精确、可接受和不精确; 在时间方面, 功能输出可分为过早、准时和过晚。根据 Macchi 等[13]的相关成果, 并结合表 1, 构建功能变异模糊评价标准, 见表 2。由于已有研究未涉及功能变异评价的可靠性, 本文要求专家在完成功能变异判断后, 进一步对自身判断的可靠性进行分级评价。

受案例资料公开程度限制, 本文未能获得与 8 项功能逐一对应的完整设备维护记录、操作日志等历史数据, 因而无法利用客观观测数据直接标定各功能的变异程度及评价可靠性。为弥补数据不足, 本文以事故调查报告和功能定义为基础, 采用专家评价方法获取相关信息。专家采用目的抽样方式选取, 均具有航空器维修、飞行运行管理、交通运输安全、系统科学、系统安全或 FRAM 等相关背景, 且具有 5 年以上相关工作或研究经历, 能够独立完成 8 项功能评价。最终邀请 3 名专家参与评分, 其中 2 名具有交通运输领域背景, 1 名具有系统科学领域背景, 相关工作或研究年限分别为 13 年、27 年和 10 年。

Table 2. The fuzzy evaluation standards on functional variability A_{M_i} based on Table 1 and Macchi *et al.* [13]**表 2.** 根据表 1 和 Macchi 等[13]构建的功能变异 A_{M_i} 模糊评价标准

		时间		
		过早	准时	过晚
精度	精确	影响很低(2/3, 1, 3/2)	无影响(1, 1, 1)	影响较低(3/2, 2, 5/2)
	可接受	影响较低(3/2, 2, 5/2)	无影响 (1, 1, 1)	影响中等(5/2, 3, 7/2)
	不精确	影响中等(5/2, 3, 7/2)	影响较高 (7/2, 4, 9/2)	影响很高(9/2, 5, 11/2)

评分前, 向专家提供事故案例事实、8 项功能定义、正常功能网络以及表 1 和表 2, 并统一说明功能变异程度与评价可靠性的含义。专家根据事故调查材料和各功能属性, 独立判断功能输出在时间性和精确性方面的变异程度及其评价可靠性, 形成语言 Z 数。随后, 依据式(2)到式(5)完成语言评价转换、专家结果聚合及功能变异值计算。表 1 和表 2 中的三角模糊数参数参考 Macchi 等[13]对功能时间性和精确性变异的划分, 以及 Wang 等[18]关于语言 Z 数的表达方法, 并结合语言等级的相对顺序和相邻等级的重叠关系进行操作性设定, 并非由本案例历史数据直接估计得到。

为检验参数设定对分析结果的影响, 本文进一步开展灵敏度分析。在保持模态值不变的条件下, 将三角隶属函数左右支撑区间调整为基准值的 0.9 倍和 1.1 倍; 同时, 将共振强度阈值设置为 0.43、0.45 和 0.47, 比较不同情景下功能变异排序、高共振连接数量及关键风险连接的变化, 以检验研究结论的稳健性。

设 $k, k=1, 2, 3, \dots, K, K \in N^+, K \geq 2$ 表示决策专家组中的专家。对于每一位专家 k , 其对功能 M_i 变异程度作出的初始语言 Z 数为 $Z_{M_i}^k = (A_{M_i}^k, B_{M_i}^k)$ 。利用式(2)和式(3), 可将专家 k 对 M_i 给出的 $Z_{M_i}^k = (A_{M_i}^k, B_{M_i}^k)$ 转化为三角模糊数 $Z'_{M_i}^k = (Z_{M_i}^{1k}, Z_{M_i}^{2k}, Z_{M_i}^{3k})$ 。随后, 采用求和平均法由专家个体评价结果得到专家组评价结果, 如式(4)所示:

$$Z'_{M_i}{}^1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Z_{M_i}^{1k}, Z'_{M_i}{}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Z_{M_i}^{2k}, Z'_{M_i}{}^3 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Z_{M_i}^{3k} \quad (4)$$

进一步采用式(5)对各 Z'_{M_i} 进行去模糊化处理, 得到功能 M_i 的变异值 V_{M_i} 。 V_{M_i} 越大, 说明该功能的变异程度越高。

$$V_{M_i} = \frac{Z'_{M_i}{}^1 + 2Z'_{M_i}{}^2 + Z'_{M_i}{}^3}{4}, \forall M_i \quad (5)$$

(3) 采用 SPM 计算变异传播强度

FRAM 将复杂社会技术系统表示为由多个功能及其相互作用构成的网络, 功能输出的变异可能沿功能关系向其他功能传递。本文借鉴站点渗流模型关于节点状态、网络连接和连通性的建模思想, 将 FRAM 中的功能视为网络节点, 将功能之间已识别的输入、输出、前提、资源、控制和时间关系视为有向连接, 并将功能输出在时间性和精确性方面的变异作为节点状态变化。式(6)计算功能变异沿相邻连接传播的相对强度, 不代表物理扩散概率或系统事故发生概率。由于功能变异通常通过局部功能关系向多个关联功能传递, SPM 能够用于描述 FRAM 网络中功能变异传播的局部连通性。

在具体计算中, 本文假设单一分析时段内功能连接网络保持不变, 功能变异主要沿已识别的有向连接传播, 并以相邻功能之间的局部作用为基本计算单元。传播强度由相邻功能的变异值及其连接关系共同确定, 不预设唯一的线性传播路径。SPM 计算结果主要用于比较功能连接的变异传播强度、识别潜在高风险连接, 并为后续耦合度计算提供输入, 而不适用于预测系统总体事故发生概率。

在上述网络映射和基本假设的基础上, 本文进一步刻画功能变异在相邻功能之间的传播关系。在系统运行过程中, 各功能之间不同且不一致的变异是引发变异传播的重要原因, 也可视为潜在传播因素。通常情况下, 变异会由高变异功能向低变异或无变异功能传播, 并通过功能连接关系实现传递, 最终使功能之间的相互作用趋于协调有序。FRAM 中的各功能可视为节点, 属性之间的连接可视为边, 因此, 变异传播可转化为网络中的站点渗流问题。站点渗流模型是相变问题中常见的模型之一, 关注网络中节点发生小变化时引发的整体状态变化。不同于扩散过程等常见随机过程, SPM 主要从概率分析角度关注网络中不同结构之间的连通性。若功能 M_i 的变异值为 V_{M_i} , 则由该功能 M_i 向与其相连的其他功能 M_j 传播的概率 $P_{M_i \rightarrow M_j}$ 可表示为[19]:

$$P_{M_i \rightarrow M_j} = 1 - \exp\left[-\left(V_{M_i}\right)^2\right], \forall i, j = 1, 2, 3, \dots, n, n \geq 2, n \in N^+, i \neq j \quad (6)$$

(4) 采用 CDM 计算上下游功能之间的功能共振

当变异由上游功能 M_i 传播至下游功能 M_j 时, M_j 会受到来自 M_i 的变异影响而产生变化; 同时, 其他影响因素也可能导致 M_j 本身发生变异。FRAM 认为, 上下游功能之间的功能共振可能导致功能连接关系断裂, 并进一步诱发事故。因此, 可采用耦合度模型定量计算上下游功能之间的功能共振强度[20]。该模型综合考虑上游功能变异值 V_{M_i} 、下游功能变异值 V_{M_j} 以及变异传播概率 $P_{M_i \rightarrow M_j}$ 。功能共振强度 $R_{M_i \leftrightarrow M_j}$ 越大, 说明相连功能之间的连接失效可能性越高, 系统风险越大。通过上述方法, 可对传统 FRAM 中关于过早、准时、过晚、未发生、精确、可接受和不精确等输出状态的定性描述进行量化, 并进一步计算变异传播强度和功能共振强度。 $R_{M_i \leftrightarrow M_j}$ 可表示为:

$$R_{M_i \leftrightarrow M_j} = \left| \frac{V_{M_j} \times \left| \sqrt{V_{M_i} \times P_{M_i \rightarrow M_j}} \right|}{\left(\left| V_{M_j} + \left| \sqrt{V_{M_i} \times P_{M_i \rightarrow M_j}} \right| \right| \right) \times \left(\left| \sqrt{V_{M_i} \times P_{M_i \rightarrow M_j}} \right| + V_{M_j} \right)} \right| \quad (7)$$

(5) 分析结果并制定事故/风险控制措施

最后, 根据式(5)、式(6)和式(7)的计算结果, 可定量分析各功能的变异程度、上下游功能之间的变异传播强度, 以及上下游功能之间的功能共振强度。同时, 可根据定量分析结果制定相应的事/风险控制措施。

3. 案例分析与讨论

以加拿大航空 143 号航班事故为例进行案例分析。1983 年 7 月 23 日, 143 号波音 767 飞机计划由蒙特利尔飞往埃德蒙顿。飞行前, 维修人员发现燃油显示系统无显示, 但排故工作被中断, 导致系统未能及时修复, 飞行员也未获知其最新状态。机组认为飞机状态与上一航段相同, 继续采用人工计算方法确定加油量, 并使用燃油测量尺核查燃油数量。由于该型 767-233 飞机采用公制单位, 而相关人员误将英制换算参数代入公制计算公式, 导致实际加油量不足所需燃油量的一半。机长复核加油记录时同样误用英制换算系数, 未能发现问题。随后, 机组将错误数据输入机载飞行管理计算机并起飞。起飞后, 飞机出现燃油量低告警, 发动机随后停车, 最终滑翔至废弃空军基地并完成紧急迫降[21]。

该事故由燃油显示系统失效后燃油加注量计算错误所致。因此, 正常燃油系统加油过程的功能可划分为 8 项: M_1 为燃油加注; M_2 为燃油量传感器; M_3 为信号处理设备; M_4 为燃油量显示; M_5 为加油操作; M_6 为维修检查; M_7 为飞行员检查; M_8 为飞机正常起飞。8 项功能的具体内容见表 3, 正常功能图如图 1 所示。邀请 3 名专家根据表 2 对各功能的变异程度进行评分, 并根据表 1 对各功能变异评价的可靠性进行评分。根据式(5)计算得到各功能变异值 V_{M_i} , 结果见表 4。根据式(6)计算 8 项功能之间有连接关

系的变异传播概率 $P_{M_i \rightarrow M_j}$, 结果见表 5。根据式(7)计算功能共振强度 $R_{M_i \leftrightarrow M_j}$, 结果见表 6。

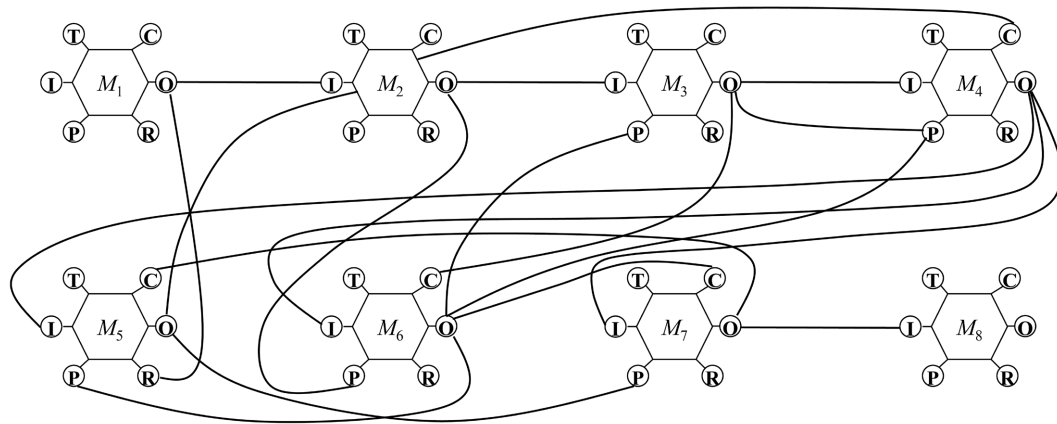


Figure 1. The normal functional diagram of normal fuel system refueling process
图 1. 正常燃油系统加油过程的正常功能图

Table 3. The contents of 8 functions

表 3. 8 个功能的内容

	输入	控制	资源	时间	前置条件	输出
M_1	—	—	—	—	—	加注燃油
M_2	—	—	—	—	—	将油量信息传输至信号处理设备
M_3	—	—	—	—	维修检查完成	燃油正常电信号
M_4	燃油正常电信号	加油量	—	—	燃油正常电信号, 维修检查完成	燃油显示
M_5	燃油显示	飞行员检查完成	加油量	—	维修检查完成	加油量
M_6	燃油显示	燃油正常电信号	—	—	将油量信息传输至信号处理设备	维修检查完成
M_7	燃油显示	维修检查完成	—	—	加油量	飞行员检查完成
M_8	飞行员检查完成	—	—	—	—	—

Table 4. The experts' scores of variability and reliability of each function

表 4. 各功能变异程度和评价可靠性的专家评分

	专家 1		专家 2		专家 3		V_{M_i}
	A_{M_i}	B_{M_i}	A_{M_i}	B_{M_i}	A_{M_i}	B_{M_i}	
M_1	(1, 1, 1)	(0.1, 0.2, 0.3)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.2, 0.3)	(1, 1, 1)	(0.3, 0.4, 0.5)	0.508961
M_2	(1, 1, 1)	(0.3, 0.4, 0.5)	(1, 1, 1)	(0.1, 0.2, 0.3)	(1, 1, 1)	(0.5, 0.6, 0.7)	0.618089
M_3	(1, 1, 1)	(0.5, 0.6, 0.7)	(1, 1, 1)	(0.3, 0.4, 0.5)	(1, 1, 1)	(0.7, 0.8, 0.9)	0.76716
M_4	(1, 1, 1)	(0.9, 1, 1)	(1, 1, 1)	(0.7, 0.8, 0.9)	(1, 1, 1)	(0.9, 1, 1)	0.953604
M_5	(7/2, 4, 9/2)	(0.7, 0.8, 0.9)	(7/2, 4, 9/2)	(0.9, 1, 1)	(7/2, 4, 9/2)	(0.9, 1, 1)	3.814415
M_6	(9/2, 5, 11/2)	(0.7, 0.8, 0.9)	(9/2, 5, 11/2)	(0.9, 1, 1)	(9/2, 5, 11/2)	(0.9, 1, 1)	4.768019
M_7	(7/2, 4, 9/2)	(0.7, 0.8, 0.9)	(7/2, 4, 9/2)	(0.9, 1, 1)	(7/2, 4, 9/2)	(0.7, 0.8, 0.9)	3.696062
M_8	(7/2, 4, 9/2)	(0.5, 0.6, 0.7)	(7/2, 4, 9/2)	(0.9, 1, 1)	(7/2, 4, 9/2)	(0.7, 0.8, 0.9)	3.536288

Table 5. The variability propagation probability $P_{M_i \rightarrow M_j}$ among the 8 functions

表 5. 8 项功能之间的变异传播概率 $P_{M_i \rightarrow M_j}$

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
M_1	0	0.228209	0	0	0.228209	0	0	0
M_2	0	0	0.317528	0	0	0.317528	0	0
M_3	0	0	0	0.44486	0	0	0.44486	0
M_4	0	0	0	0	0.597218	0.597218	0.597218	0
M_5	0	0	0	1	0	0	1	0
M_6	0	0	1	1	1	0	1	0
M_7	0	0	0	0	1	0	0	1
M_8	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 6. The functional resonance intensity $R_{M_i \leftrightarrow M_j}$ among the 8 functions

表 6. 8 项功能之间的功能共振强度 $R_{M_i \leftrightarrow M_j}$

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
M_1	0	0.478639	0	0	0.274394	0	0	0
M_2	0	0	0.48173	0	0	0.278903	0	0
M_3	0	0	0	0.485359	0	0	0.343303	0
M_4	0	0	0	0	0.371331	0.343475	0.375245	0
M_5	0	0	0	0.469513	0	0	0.475605	0
M_6	0	0	0.438628	0.459969	0.481163	0	0.483174	0
M_7	0	0	0	0	0.47203	0	0	0.477652
M_8	0	0	0	0	0	0	0	0

根据表 6 计算结果, 该阈值并非预先假定的普适常数, 而是依据本案例证据进行校准: 以事故调查报告[21]和已有改进 FRAM 结果[22]识别的关键与非关键连接为参照, 低共振连接中的最大值为 0.438628 ($M_6 \rightarrow M_3$), 高共振连接中的最小值为 0.459969 ($M_6 \rightarrow M_4$), 两者中点为 0.449299, 取两位小数后为 0.45。因此, 本文将 0.45 限定为本案例的分类阈值, 不将其解释为适用于所有系统的固定理论常数。结果表明, 维修人员未及时修复燃油显示系统, 且未将其最新状态告知机长和加油人员; 加油人员未按要求向飞机加入足够燃油; 飞行员虽确认了燃油量, 但起飞前未充分检查正常燃油显示状态。这些因素均对系统运行产生了重要影响。

基准情景下, 表 6 共有 10 条连接的功能共振强度超过 0.45。将三角隶属函数的支撑区间按 $\pm 10\%$ 扰动后, 8 项功能的变异值排序均保持为 $M_6 > M_5 > M_7 > M_8 > M_4 > M_3 > M_2 > M_1$, 功能变异值的最大相对变化约为 0.12%, 且基准阈值下的高共振连接及核心高风险链条未发生实质改变。当共振阈值分别取 0.43、0.45 和 0.47 时, 高共振连接数量分别为 11、10 和 8; 变化主要来自 0.45 附近的边界连接, 但 $M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4$ 以及 M_6 、 M_7 与 M_5 之间的核心高风险关系均被识别。上述结果表明, 本案例关于关键功能和核心共振路径的判断对隶属函数支撑区间和阈值的小幅变化不敏感, 具有一定稳健性; 但 0.45 仍应在更多案例和客观运行数据中进一步校准。具体灵敏度分析结果见表 7, 高功能共振强度连接关系见图 2。

Table 7. Sensitivity analysis of key parameters and thresholds
表 7. 关键参数和阈值的灵敏度分析

参数	情景设置	高共振连接数	功能变异排序	核心高风险链条及稳健性判断
三角隶属函数	支撑区间-10%	10	$M_6 > M_5 > M_7 > M_8 > M_4 > M_3 > M_2 > M_1$	核心高风险链条未发生实质改变, 结果稳定
三角隶属函数	基准情景(0%)	10	$M_6 > M_5 > M_7 > M_8 > M_4 > M_3 > M_2 > M_1$	作为比较基准
三角隶属函数	支撑区间+10%	10	$M_6 > M_5 > M_7 > M_8 > M_4 > M_3 > M_2 > M_1$	核心高风险链条未发生实质改变, 结果稳定
共振强度阈值	0.43	11	—	$M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4$ 及 M_6 、 M_7 与 M_5 之间的核心关系仍被识别
共振强度阈值	0.45 (基准)	10	—	识别结果与案例校准结论一致
共振强度阈值	0.47	8	—	核心高风险链条仍被识别, 边界连接数量减少

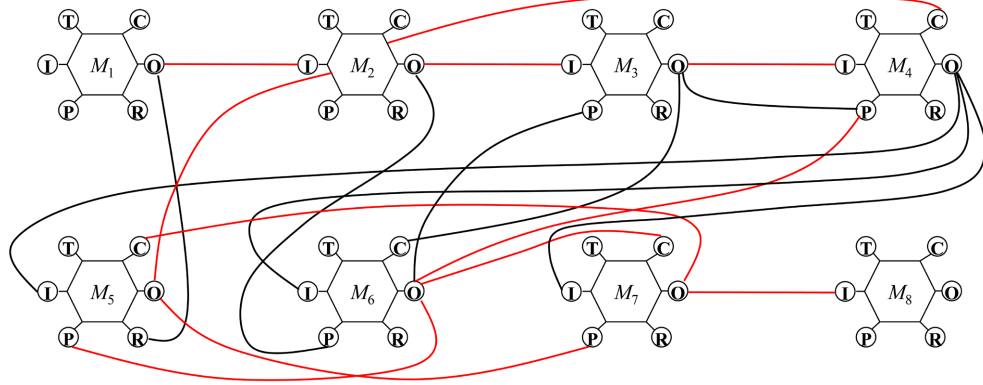


Figure 2. The connections with high functional resonance intensity
图 2. 高功能共振强度连接关系

进一步将本案例计算结果与相关学者[22]的分析结果进行对比。该研究同样采用 FRAM 分析该事故, 并结合功能变异描述规则和层次分析法进行定量改进。对比结果显示, 两种定量 FRAM 方法结论较为一致: M_4 是危害程度最高的功能, 即“燃油量显示”对正常燃油加注过程影响最为显著; 加油人员未按要求加注足够燃油、飞行员确认燃油量、飞行员检查维修状态, 以及剩余燃油由正常燃油显示器传输至数据处理器等因素, 也对系统运行产生了重要影响。由此可见, M_3 与 M_4 之间的功能共振是该事故中最主要的致因关系之一, 该结论也可从事故调查报告中得到印证[21]。

从事故预防角度看, 提高剩余燃油显示系统的可靠性有助于避免类似事故再次发生。同时, 融合语言 Z 数、站点渗流模型和耦合度模型的定量 FRAM 方法还能够识别更多潜在风险, 如维修人员未及时修复燃油显示系统、未向机长和加油人员告知燃油显示系统状态等。总体来看, 该方法能够较好解释事故中功能变异传播和功能共振形成过程, 具有一定合理性和有效性。

4. 复杂社会技术系统事故/风险控制体系

前述结果表明, 功能共振强度能够定位系统中具体的风险放大连接。因此, 本节以表 6 中的功能连接及其共振强度为依据, 将风险连接、功能含义与控制措施进行对应。以 0.45 作为本案例的分类阈值, 表 6 中共有 10 条功能连接超过该阈值, 应优先配置独立测量、双人确认、状态交接和起飞放行锁定等强

控制屏障。需要说明的是, 共振强度表示功能变异在连接上的相对传播强度, 不等同于事故发生概率, 主要用于确定风险控制的优先顺序和具体位置。

(1) 对信号处理设备与燃油量显示之间的连接设置独立测量屏障

信号处理设备向燃油量显示传递的共振强度最高, 为 0.485359, 表明燃油信号处理异常可能直接造成燃油显示失真。对此, 应在加油前和起飞前分别采用燃油测量尺等独立物理方式测量实际燃油量, 并与燃油传感器、信号处理设备及电子显示结果进行交叉核对。若物理测量结果与电子显示不一致, 或燃油显示系统未恢复正常, 则不得直接进入加油完成确认和起飞放行环节, 必须由维修人员查明原因并完成复核, 以避免将单一电子显示结果作为后续决策的唯一依据。

(2) 对燃油测量信号链实施分段校验

燃油量传感器向信号处理设备传递的共振强度为 0.481730, 燃油加注向燃油量传感器传递的共振强度为 0.478639, 二者与信号处理设备向燃油量显示传递的连接共同构成燃油数量信息的连续风险链。对此, 应分别对实际加注量、传感器状态、信号处理结果和显示结果设置独立校验记录, 不以单一环节的检查结果代替整条信号链的有效性确认。加油完成后, 还应对实际加注量、燃油测量尺读数和电子显示值进行三方核对。对于加油操作向燃油量显示传递的连接, 其共振强度为 0.469513, 也应加强加油记录与显示结果的一致性确认, 防止实际加油量不足或显示结果异常未被及时发现。

(3) 将维修状态通报转化为强制性交接屏障

维修检查向飞行员检查、加油操作和燃油量显示传递的共振强度分别为 0.483174、0.481163 和 0.459969, 说明维修状态和故障信息传递不充分时, 可能进一步影响加油、飞行员检查和燃油显示判断。对此, 应建立书面或电子化的维修状态交接记录, 明确记载燃油显示系统的故障状态、维修进度、是否采用替代测量方式及其复核结果, 并由维修人员、加油人员和飞行员分别完成接收确认。维修工单未关闭或燃油显示系统未通过功能测试时, 应保留异常标识, 启动独立燃油测量和人工复核程序, 不得直接进入起飞放行环节。

(4) 对加油、飞行员检查和起飞放行实施独立核验

加油操作向飞行员检查、飞行员检查向加油操作以及飞行员检查向飞机正常起飞传递的共振强度分别为 0.475605、0.472030 和 0.477652, 表明加油人员与飞行员之间若缺少独立复核, 错误信息可能在相互确认过程中被进一步强化。对此, 应由加油人员和飞行员分别核对所需燃油量、计量单位、换算系数、加油记录和实际测量结果, 不得仅依据对方填写或提供的数据完成确认。起飞前应设置明确的放行闸门, 只有在燃油显示、独立物理测量、加油记录和维修状态四项信息一致, 或已按照批准的替代程序完成复核并由机长确认后, 方可批准起飞。

(5) 依据共振强度实施差异化控制和效果验证

对于超过 0.45 阈值的 10 条功能连接, 应优先配置强制性控制屏障, 并建立连接级效果验证指标。例如, 重点检查信号处理设备与燃油量显示之间的物理测量和电子显示交叉验证是否完成, 维修检查与飞行员检查、加油操作之间的状态交接及三方确认是否落实, 加油操作与飞行员检查之间的记录复核以及起飞放行闸门是否执行。维修检查向燃油量传感器传递的共振强度为 0.438628, 虽未超过 0.45, 但已接近设定阈值, 应纳入重点监测范围。其他共振强度相对较低的连接, 如信号处理设备向飞行员检查、燃油量显示向加油操作、燃油量显示向维修检查、燃油量显示向飞行员检查、燃油加注向加油操作以及燃油量传感器向维修检查等, 可采用定期抽查和趋势监测方式进行管理。

5. 结束语

针对传统 FRAM 在功能变异量化、变异传播测度和功能共振强度计算方面的不足, 本文构建融合语

言 Z 数、站点渗流模型和耦合度模型的定量功能共振分析方法。该方法利用语言 Z 数对功能输出的时间变异和精度变异进行量化, 并考虑专家评价可靠性; 采用站点渗流模型计算功能变异由上游功能向下游功能传播的概率; 再结合功能变异值和变异传播概率, 计算相连功能之间的功能共振强度。与传统 FRAM 相比, 该方法能够对“过早、准时、过晚、未发生、精确、可接受、不精确”等功能输出状态进行定量表达, 并进一步刻画功能变异传播和功能共振形成过程。

以 1983 年加拿大航空 143 号航班事故为案例, 对正常燃油系统加油过程中的 8 项功能进行分析。结果表明, 维修人员未及时修复燃油显示系统并告知其最新状态、加油人员未按要求加入足够燃油、飞行员起飞前未充分检查正常燃油显示状态等因素均对系统运行产生重要影响; 其中, 信号处理设备与燃油量显示之间的功能共振是关键致因关系之一, 结论与已有改进 FRAM 分析结果和事故调查报告基本一致。研究同时发现, 维修检查、燃油量显示、加油操作和飞行员检查等功能之间存在潜在风险连接, 说明事故并非单一功能失效直接导致, 而是多个功能变异相互耦合并逐步放大的结果。灵敏度分析表明, 当隶属函数支撑区间在 $\pm 10\%$ 范围内扰动时, 功能变异排序基本保持不变; 当功能共振强度阈值在 0.43~0.47 范围内变化时, 核心高风险连接仍能够被识别, 说明主要结论具有一定稳健性。但本文仍存在专家样本数量较少、历史案例客观运行数据不足、单一案例验证以及静态网络难以反映耦合异质性、传播时滞和反馈回路等局限。因此, 站点渗流模型结果主要用于比较功能变异的相对传播强度和识别关键风险连接, 不宜直接解释为事故发生概率。后续研究可结合多案例及时序运行数据, 进一步校准专家评价、传播参数和共振强度阈值, 并引入动态模型刻画功能变异的演化、时滞传播与反馈共振过程。

参考文献

- [1] Aven, T. (2019) The Call for a Shift from Risk to Resilience: What Does It Mean? *Risk Analysis*, **39**, 1196-1203. <https://doi.org/10.1111/risa.13247>
- [2] 黄磊, 郭淼, 姚莹, 秦雅琴, 苏雨欣. 高速公路交通风险多因素叠加作用与特征解析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2026, 24(3): 51-68.
- [3] 尹德志, 帅斌, 黄文成. 基于 STAMP-PageRank 的铁路危险品运输事故分析方法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(1): 71-80.
- [4] Hollnagel, E. (2014) Functional Resonance Analysis Method: Modeling of Complex Socio-Technical Systems. 1st Edition, CRC Press.
- [5] Patriarca, R., Di Gravio, G., Woltjer, R., Costantino, F., Praetorius, G., Ferreira, P., et al. (2020) Framing the FRAM: A Literature Review on the Functional Resonance Analysis Method. *Safety Science*, **129**, Article 104827. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104827>
- [6] de Carvalho, P.V.R. (2011) The Use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a Mid-Air Collision to Understand Some Characteristics of the Air Traffic Management System Resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, **96**, 1482-1498. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.05.009>
- [7] Albery, S., Borys, D. and Tepe, S. (2016) Advantages for Risk Assessment: Evaluating Learnings from Question Sets Inspired by the FRAM and the Risk Matrix in a Manufacturing Environment. *Safety Science*, **89**, 180-189. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.06.005>
- [8] 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>
- [9] Adriaensen, A., Patriarca, R., Smoker, A. and Bergström, J. (2019) A Socio-Technical Analysis of Functional Properties in a Joint Cognitive System: A Case Study in an Aircraft Cockpit. *Ergonomics*, **62**, 1598-1616. <https://doi.org/10.1080/00140139.2019.1661527>
- [10] Li, W.J., He, M., Sun, Y.B. and Cao, Q.G. (2019) A Proactive Operational Risk Identification and Analysis Framework Based on the Integration of ACAT and FRAM. *Reliability Engineering & System Safety*, **186**, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.02.012>
- [11] Moskon, M., Tkalec, M., Zimic, N. and Mraz, M. (2019) Towards the Declaration of Inter-Functional Protocol for FRAM. 2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Orlando, 28-31 January 2019, 1-6.

- <https://doi.org/10.1109/rams.2019.8768953>
- [12] Patriarca, R., Di Gravio, G. 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>
 - [13] Macchi, L., Hollnagel, E. and Leonhard, J. (2009) Resilience Engineering Approach to Safety Assessment: An Application of FRAM for the MSAW System. *EUROCONTROL Safety R&D Seminar*, Munich, October 2009, 1-12. <https://hal.science/hal-00572933>
 - [14] Hirose, T. and Sawaragi, T. (2020) Extended FRAM Model Based on Cellular Automaton to Clarify Complexity of Socio-Technical Systems and Improve Their Safety. *Safety Science*, **123**, Article 104556. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104556>
 - [15] Zinetullina, A., Yang, M., Khakzad, N., Golman, B. and Li, X. (2021) Quantitative Resilience Assessment of Chemical Process Systems Using Functional Resonance Analysis Method and Dynamic Bayesian Network. *Reliability Engineering & System Safety*, **205**, Article 107232. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107232>
 - [16] Huang, W., 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 108058. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108058>
 - [17] Liu, X., Meng, H., An, X. and Xing, J. (2024) Integration of Functional Resonance Analysis Method and Reinforcement Learning for Updating and Optimizing Emergency Procedures in Variable Environments. *Reliability Engineering & System Safety*, **241**, Article 109655. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109655>
 - [18] Wang, J.Q., Cao, Y.X. and Zhang, H.Y. (2017) Multi-Criteria Decision-Making Method Based on Distance Measure and Choquet Integral for Linguistic Z-Numbers. *Cognitive Computation*, **9**, 827-842. <https://doi.org/10.1007/s12559-017-9493-1>
 - [19] Balankin, A.S., Martínez-Cruz, M.A., Álvarez-Jasso, M.D., Patiño-Ortiz, M. and Patiño-Ortiz, J. (2019) Effects of Ramification and Connectivity Degree on Site Percolation Threshold on Regular Lattices and Fractal Networks. *Physics Letters A*, **383**, 957-966. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2018.12.018>
 - [20] 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.
 - [21] Lockwood, G.H. (1985) Final Report of the Board of Inquiry: Investigating the Circumstances of an Accident Involving the Air Canada Boeing 767 Aircraft C-GAUN That Effected an Emergency Landing at Gimli, Manitoba on the 23rd Day of July, 1983. Canadian Government Publishing Centre.
 - [22] Li, Y.H. and Gong, Z.Y. (2020) Safety Analysis of Civil Aircraft System Based on Improved FRAM. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, **41**, Article 324083.