

潘恒毅. 基于 FRAM-MC 的船员疲劳事故研究 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 206-215.

PAN Hengyi. The study of crew fatigue accidents based on FRAM-MC [J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science), 2023, 47(2): 206-215.

文章编号: 1000-5862(2023)02-0206-10

基于 FRAM-MC 的船员疲劳事故研究

潘恒毅

(上海海事大学交通运输学院, 上海 201306)

摘要: 针对船员疲劳事故, 利用功能共振分析(FRAM)与蒙特卡罗仿真(MC)相结合的方法, 构建了船员疲劳事故致因分析模型(FRAM-MC). 以“深能 1”轮搁浅事故为案例, 通过梳理事件经过和 FRAM-MC 模型计算并实证分析, 结果表明: 基于 FRAM-MC 的船员疲劳事故分析方法可建立清晰事故层次结构, 有助于理清事故致因, 其功能可变性和耦合分析能够准确高效地找出事故发生的关键功能和关键路径, 为功能屏障设置提供依据, 从而制定针对性防控措施, 有效提高海事运输系统安全性, 其研究结果可为海事事故分析提供参考和科学依据.

关键词: 船员疲劳; 功能共振分析; 蒙特卡罗仿真; 航运事故

中图分类号: U 676.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2023.02.14

0 引言

人为因素(如船员疲劳)是造成海事事故的主要原因, 海事事故的结果往往会造成人身伤亡、经济损失和环境污染, 人为因素是船舶航行安全的重大隐患之一. 航运业承担了大量国际货物贸易往来, 其中船员疲劳与船员健康和航行安全息息相关, 也关系到整个行业乃至世界海上贸易的正常运行^[1]. 日本海事会的调查指出, 约 50% 的搁浅和 40% 的碰撞都是由船员睡眠不足和疲劳过度导致的^[2]. 美国海岸警卫队的一项调查显示, 约 16% 的重大事故和 33% 的人身伤亡事故与船员疲劳有关^[3-4]. 国际海事组织(IMO)指出, 在船舶碰撞或搁浅案例中, 有 11% ~ 25% 的事故与疲劳因素有关^[5], 并且有 1/4 的船员曾在值班中打瞌睡或睡着^[6], 其中将近 50% 的船员每周工作时间超过 85 h. 连续疲劳值班不仅对船员身体造成损害, 还会引发海上安全事故和造成海洋环境污染. 例如, 1989

年“Exxon Valdez”油轮溢油事件^[7], 1997 年德国籍集装箱船“Cittas”在英吉利海峡上搁浅^[8], 2003 年“Jambo”轮在苏格兰海岸上发生事故^[9], 2010 年“深能 1 号”在离澳大利亚东海岸 70 km 处搁浅^[5], 这些事故的共同特点是值班人员疲劳当班, 工作表现下降造成失误或疏忽等不安全行为. 因此, 需要对海事事故从致因和演变进行研究, 以避免类似事故再次发生和船员伤亡及财产的损失.

功能共振分析法(Function Resonance Accident Model, FRAM)可用于航运事故风险分析研究. 张靖雯等^[10]构建了功能共振分析方法(FRAM)与模糊层次分析(FAHP)方法相结合的船舶碰撞事故致因分析模型(即 FRAM-FAHP 法). Guo Yunlong 等^[11]将功能共振分析方法(FRAM)与动态贝叶斯网络(DBN)相结合, 建立了船舶碰撞风险演化分析模型. Fu Shanshan 等^[12]结合失效模式和影响分析(FMEA)与功能共振分析方法(FRAM), 提出了核动力破冰船在冰雪覆盖水域上独立、护航和护航作业的概率风险分析方法. E. Salihoglu 等^[13]研究了

收稿日期: 2023-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(52271363)资助项目.

作者简介: 潘恒毅(1990—), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事交通运输规划与管理研究. E-mail: panhybb@sina.com.

FRAM 在航运业务定性风险分析中的应用.

本文通过将 FRAM 与蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 仿真结合,建立船员疲劳事故分析模型,以“深能1”轮搁浅事故为案例,通过耦合分析找出系统关键功能和关键路径,阐述功能间耦合导致功能共振原理,为船员疲劳事故提供可量化的分析方法.从而增强对船员疲劳与海事事故的认识,为船员疲劳事故的成因分析和干预策略提供理论依据,以达到减少海事事故、保障海事安全的目的.

1 FRAM-MCS 研究方法

1.1 FRAM 建模过程

通常 FRAM 分析过程有 5 个步骤^[14-16],它们分别是:1) 确定系统边界,识别并描述功能;2) 分析功能变化;3) 耦合分析并绘制功能网络图;4) 耦合结果分析;5) 层次网络模型.

海上交通运输的因素层包括人员因素、船舶因素、环境因素、管理因素,这些因素可能会影响到 E. Hollnagel^[15] 提出的 6 个特征维度表征功能单元,其包括输入 I (Input)、输出 O (Output)、控制 C (Control)、资源 R (Resource)、前提 P (Precondition)、时间 T (Time) 6 种属性,分为组织、技术、人员 3 种类型^[15,17]. 因素层的变化会导致功能模块性能变化,进而使得功能模块间产生剧烈波动,从而导致在行动系统层中的功能模块的振荡超出正常范围,因此引发海上交通系统风险.

1.2 量化系统功能可变性

为了让系统中的变化耦合情况能够更清晰地识别,可对功能可变性进行量化,输出可以从时间和精度 2 方面衡量.就时间而言,可能有太早、准时、太晚或遗漏几种情况.“遗漏”表示有可能某个输出未发生.在精度方面,输出可以是精确的、可接受的或不精确的.若输出是精确的,则它完全满足下游功能的需要和要求;若可以接受,则下游函数需要进行一些调整;若不精确,则需要进行更大的调整.第 4 类是“错误”,它代表了与预期完全不同的输出,在这种情况下下游功能的可变性放大了.

这样就可以给每个性能可变性状态分配一个数值分数,而不是用语言定义来描述一个函数.评分量表可以表达对功能可变性性能的影响:评分越高,输出的变量越大.可以根据实际情况或具体的

过程表现来确定语言和数字分数.因此,上游输出 j 的可变性 O_{V_j} 可定义为这 2 个得分的乘积:

$$O_{V_j} = V_j^T V_j^P, \quad (1)$$

其中 V_j^T 表示上游输出 j 在时间方面变化的得分, V_j^P 表示上游输出 j 在精度方面变化的得分.

为每个功能定义分数的一个主要问题来自于这样一种认识:系统组件的静态行为可能不能完美地反映真实情况.例如,尽管仪器的输出通常是精确和准时的,但它可能在传输中有罕见的不可预测的错误和延迟,导致输出不精确和/或太晚.在静态可变性评分水平不合适甚至错误的组织或人员功能中,这个因素发挥着更重要的作用.为此,可以采用离散概率分布函数来更恰当地定义函数的可变性,每个函数都有自己的离散概率分布.

1.3 聚合功能可变性

1.3.1 抑制和加剧 对于任何通用函数,都可以从可变性的角度定性地定义耦合的影响.例如,表示下游函数的前提条件的上游输出,若到达太晚,则可能会导致时间损失,从而放大了可变性.另外,若及时则相同的输出可能会抑制可变性,若过早则可能导致一个错误的开始和扩大可变性.同样在精确度方面,若不精确,则同样的输出可能会导致误解并放大可变性;若错误,则甚至可能导致消除潜在歧义的时间损失.即使某些特定耦合的典型行为是常见的,E. Hollnagel^[15] 指出,一个准确的分析必须评估每个特定耦合本身的效果.这些定性评价可以演变成半定量评价.根据式(1),一个特定的时间和精度指标可以表示每个耦合的阻尼或放大效应,定义上游输出 j 和下游函数 i 的耦合变化为

$$C_{V_{ij}} = O_{V_j} a_{ij}^T a_{ij}^P,$$

其中 a_{ij}^T 表示就时间而言的上游输出 j 和下游功能 i 的放大因子, a_{ij}^P 表示就精度而言的上游输出 j 和下游功能 i 的放大因子.当上游输出对下游功能具有阻尼作用时, a_{ij}^T (或 a_{ij}^P) < 1 ; 当上游输出对下游功能基本没有影响时, a_{ij}^T (或 a_{ij}^P) $= 1$; 当上游输出对下游功能具有放大作用时, a_{ij}^T (或 a_{ij}^P) > 1 , 通常取值为 0.5、1、2, 若其取值小于 1, 则可认为是抑制, 若大于 1, 则为加剧.

1.3.2 场景实例化 除了可变性和放大因子,还需要考虑实际场景对操作或流程的影响.例如,在海事交通系统中,通常会考虑海况、船员工作量、水域的交通环境、培训考核等具体特点.

为了考虑模型的特定实例化,需要定义特定数量的 m 个变量,能够识别要分析的场景,即场景性能条件 S_{PC}^k ,其中 $k = 1, 2, \dots, m$,以及它们的潜在影响.因此,可以构建场景性能条件影响矩阵,它确定每个 S_{PC}^k 对每个功能的影响,不同场景条件对于不同系统功能的输出也会有加剧、抑制或不产生作用的效果(见表 1).

表 1 系统功能与场景条件关系表

功能	场景条件 1	场景条件 2	...	场景条件 m
功能 1	b_1^1	b_1^2	...	b_1^m
功能 2	b_2^1	b_2^2	...	b_2^m
...
功能 n	b_n^1	b_n^2	...	b_n^m

在表 1 中 b_j^k 表示 S_{PC}^k 对 j 函数的影响,其符合公式(2),通常取值为 1、0.5、0.

$$b_j^k \begin{cases} = 1, & \text{场景条件对功能输出变化有明显作用,} \\ < 1, & \text{场景条件对功能输出变化有轻微作用,} \\ = 0, & \text{场景条件对功能输出变化几乎无作用.} \end{cases} \quad (2)$$

S_{PC}^k 的特殊组合构成了一个操作场景.通过 S_{PCz}^k 可以将每个场景与识别的 S_{PC}^k 联系起来. S_{PCz}^k 表示在 z 场景 $S_z(z = 1, 2, \dots, Z(z \in \mathbf{N}))$ 中的 S_{PC}^k 放大效果(见表 2).

表 2 运行场景与场景条件关系表

场景	场景条件 1	场景条件 2	...	场景条件 m
场景 1	S_{PC1}^1	S_{PC1}^2	...	S_{PC1}^m
场景 2	S_{PC2}^1	S_{PC2}^2	...	S_{PC2}^m
...
场景 Z	S_{PCZ}^1	S_{PCZ}^2	...	S_{PCZ}^m

在不同场景下,场景条件的表现 S_{PCz}^k 可以分为 3 个等级:

$$S_{PCz}^k = \begin{cases} 4, & \text{在场景中的某一场景条件有较大影响,} \\ 2, & \text{在场景中的某一场景条件有较小影响,} \\ 1, & \text{在场景中的某一场景条件几乎无影响.} \end{cases} \quad (3)$$

因此,在某一场景 Z 下对于特定功能 j 的影响,场景效应 e_j^z 可以由公式(4)^[18-19] 表达:

$$e_j^z = \sum_{k=1}^m S_{PCz}^k b_j^k / m. \quad (4)$$

但是,由于考虑到对于任何的 S_{PC}^k 某一功能的 b_j^k 为 0 的情况,此时运行场景不对系统功能产生影响,即 $e_j^z = 1$,所以本文构建的场景效应 e_j^z 由公式(5)^[18] 所示:

$$e_j^z = \max \left\{ 1, \sum_{k=1}^m S_{PCz}^k b_j^k / m \right\}. \quad (5)$$

因此,在操作场景 z 中,每个耦合的总体指数(根据时间和精度表型处理其可变性)可导出:

$$V_{PNI,j}^z = V_j^T V_j^P a_{ij}^T a_{ij}^P e_j^z. \quad (6)$$

通过蒙特卡罗模拟,公式(6)的乘积也变成了一个离散的概率分布,将 V_j^T 和 V_j^P 中的不确定性传播为 $V_{PNI,j}^z$ 中的不确定性.

1.4 监测和管理可变性

考虑到上游可变性,上游-下游链接和操作场景,之前的步骤定义了每个耦合的可变性.因此,固定 1 个阈值 V_{PN} 和 1 个置信度 P ,可以定义所有在阈值下的累积分布概率小于置信度的耦合为临界.

为了定制适当的缓解措施,而不是简单独立的关键耦合,可以将关键路径定义为:关联相同功能的反向或事后关键耦合链.当在对应阈值下的累积概率分布大于 $1 - P$ 时,系统出现功能共振,进而确定了事故演变的关键路径以及干预的优先性.通过提出消除、预防和抑制性能变化的方法来达到降低风险的目的.

2 案例分析

本节首先对事故基本情况介绍,识别事故相关的系统功能;然后,通过量化和聚合系统功能的可变性,构建关于功能变化和事故发生的量化模型;最后,通过运用 FRAM-MC 的仿真结果得出共振路径,并提出相应措施,以消除或减弱系统的功能共振现象.

2.1 事故概况和系统功能识别

2010 年 4 月 3 日 17:05 时,中国籍散货船“深能 1”轮,在从澳大利亚道格拉斯港装载 68 052 t 煤开往中国鲅鱼圈途中,因船员工作疏忽而导致船舶在澳大利亚大堡礁国家公园禁航区内搁浅^[5,20-21].

根据事故报告,通过梳理事件经过和事故相关因素,将其按照组织、技术、人员进行分类,并对相应功能模块进行描述,从而更详细地展示事件的实际运行功能及其之间的关系,为构建事故功能网络图奠定基础.

因此,根据梳理事故经过和相关因素,可以归纳出事故相关功能(见表 3).

表 3 事故功能模块及其描述

编号	简称	描述
F1	替代(工作)措施	采取替代工作措施应对工作时间过长,改善船员超时工作问题
F2	管理体系	更改航线相关问题应列入安全管理体系,并完善交接班体系
F3	培训考核	增强业务能力和熟练度,特别是安全管理能力
F4	工作负荷	主要指工作量和类型,其次还包括工作计划
F5	睡眠时长	一般指一天内的睡眠持续时间,另外还包括由睡眠中断、障碍等睡眠质量问题
F6	业务能力	相关技能的掌握程度、熟练度,安全管理能力
F7	调整计划	更改航线应分析更改航线对航行安全的影响,并提醒驾驶人员引起注意
F8	驾驶	主要指二副驾驶过程中的操作,包括定位、输入转向点等
F9	交接班	主要指大副接替二副的交接班,包括任务交接、沟通等方面
F10	配载图	大副为应对停靠港口期间的装卸任务准备配载图,还有停靠期间一些其他任务
F11	睡眠 1	大副完成配载图等任务到起锚之间的睡眠
F12	起锚	包括起锚、停靠、水尺检测、监督排水和装卸任务等
F13	睡眠 2	大副完成监督工作到船舶离港之间的睡眠
F14	离港	包括水尺检测、计算装货量、准备有关文件和离港等
F15	睡眠 3	大副从离港到交接班之间的睡眠
F16	观察(航线和环境)	大副接班后观察航线和相关环境
F17	定位	按规定航行期间每隔一定时间需要定位一次
F18	转向	驾驶船舶中的操作,包括转舵、输入转向点等

事故功能网络图可分为几个层面. 在组织抽象功能层面,分为管理层面和事故影响因素层面. 在具体行动功能层次方面,主要包括大副和二副的行

动及其交互. 各层次功能单元分别用灰色深浅不同的图案表示. 使用可视化软件 (FRAM Model Visualizer, FMV), 可构建事故功能网络图(见图 1).

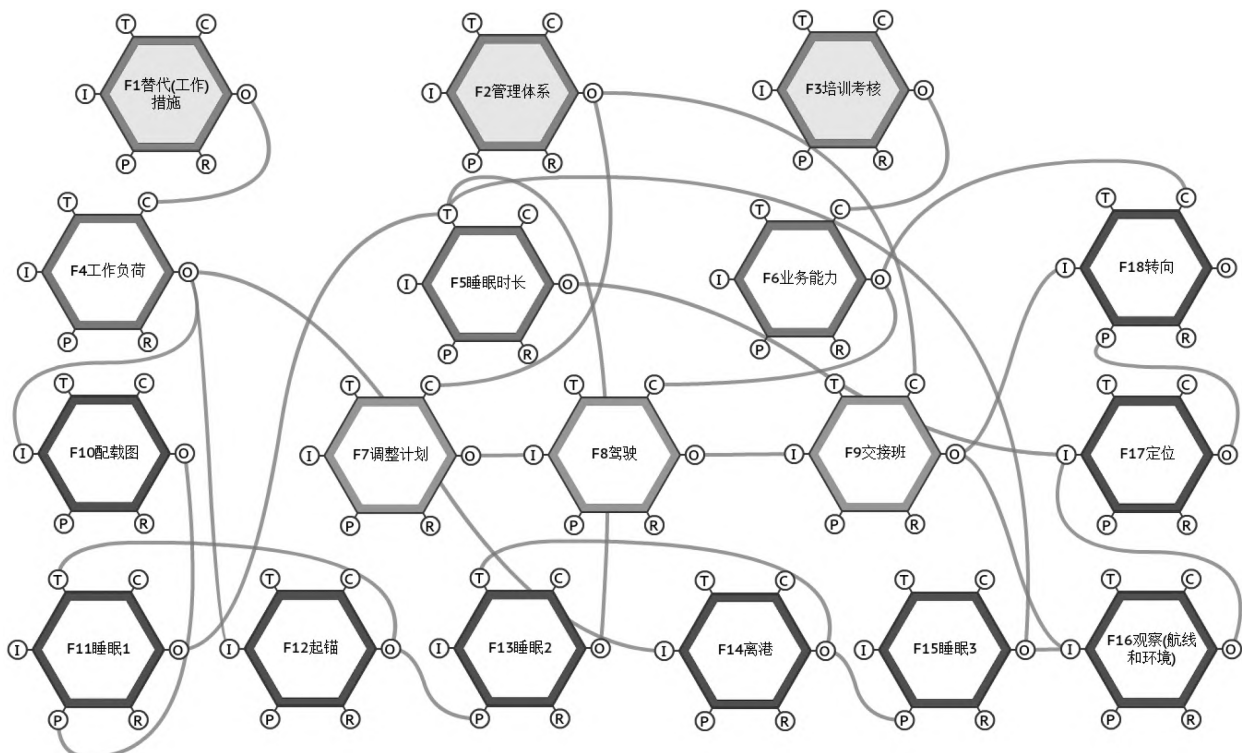


图 1 事故功能层次网络图

2.2 量化和聚合系统功能可变性

为量化系统功能可变性,需要定义系统功能相应维度的概率分布.系统上游功能在时间上的变化 V_j^T 和在精度上的变化 V_j^P 的评分取值为1、2、3、4,其时间和精度可变性得分对应的概率分布为 $[p_1, p_2, p_3, p_4]$.文献[22]根据E. Hollnagel对系统功能输出

在时间和精度上变化的总结,对时间和精度变化的可能性进行了概率分配,其离散概率分配是基于E. Hollnagel提出的典型功能行为的可能性,对于一般系统有一定代表性,符合将系统的动态行为变化进行初步数字化展示的要求^[18,22].本文在此基础上根据实际情况进行调整,作为系统的假定值(见表4).

表4 时间和精度变化评分的概率分布

类型	概率	评分	技术	人员	组织	准时/精确	太早/可接受	太晚/不精确	遗漏/错误
时间	准时	1	0.70	0.60	0.60	0.70	0.15	0.15	0.10
	太早	2	0.10	0.20	0.10	0.15	0.70	0.05	0.05
	太迟	3	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.70	0.15
	遗漏	4	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.10	0.70
精确度	精准	1	0.80	0.15	0.10	0.70	0.05	0.05	0.10
	可接受	2	0.10	0.60	0.50	0.20	0.70	0.20	0.10
	不精准	3	0.05	0.15	0.25	0.05	0.20	0.70	0.10
	错误	4	0.05	0.10	0.15	0.05	0.05	0.05	0.70

另外,就时间而言的上游输出 j 和下游功能 i 的放大因子 a_{ij}^T 和就精度而言的上游输出 j 和下游功能 i 的放大因子 a_{ij}^P 可能随上下游功能的评分不同对应不同效果,其取值与相应评分对应.因此,将系统所

有的上下游功能进行评分和概率分配,可得系统各功能得分及其分数的概率分布,表5展示了部分功能可变性的概率分布和放大因子.

表5 系统各功能变化的得分概率分布

下游		上游		得分		放大因子	
功能	方面	功能	类型	V_j^T	V_j^P	a_{ij}^T	a_{ij}^P
F9 交接班	输入	F8 驾驶	技术	[0.7,0.1,0.15,0.05]	[0.7,0.2,0.05,0.05]	1	[0.5,1,2,2]
	控制	F2 管理体系	组织	[0.6,0.1,0.15,0.15]	[0.05,0.2,0.7,0.05]	[0.5,0.5,1,2]	[0.5,1,2,2]
F10 配载图	输入	F4 工作负荷	人员	[0.6,0.2,0.15,0.05]	[0.05,0.2,0.7,0.05]	1	[0.5,1,2,2]

根据功能变化及事故场景的半量化定义,以及对于单个的功能变化识别,结合场景实例化,需考虑实际事故场景对系统功能耦合的影响.参照事件经过以及FRAM功能网络图,根据有关部门和人员的划分以及时间顺序,提取出4个主要的事故发生场景,包括:管理、停靠、二副驾驶和大副驾驶,分别用 $S_1 \sim S_4$ 表示.

大,因为这2个场景属于船舶驾驶环节.根据式(3)和表2,场景条件对各场景的影响如表7所示.

根据海事运输系统的场景特点,归纳出人员情况、航线情况、环境影响以及管理水平4个场景条件,以实例化相应的不同运行场景,根据表1和公式(2),对于不同功能受场景条件的作用如表6所示.

通过识别功能变化和事故场景实例化,就能对事故中功能变化的聚合有初步认识,以各个上游功能对应的场景作为场景效应,可计算出各功能的场景效应,进而算出每个耦合的总体指数 V_{PN} .

从4个场景条件的描述可以发现, S_1 场景受管理水平的影响效果较大.这是因为在该场景中的功能与管理因素直接相关,加之一些管理措施未充分实施,所以使得相关人员承担过多任务、业务不熟练或不规范.而 S_3 和 S_4 场景受人员和航线影响较

2.3 监控和管理系统功能可变性

为了对关键耦合进行排序,首先需要定义可变性阈值.在这种情况下,需要定义一个关键的情况.在此将时间和精度的变化最大值4、没有功能变化放大效应的耦合值1以及平均场景效应(1.514 \approx 1.5)作为判断系统是否出现功能共振的依据,即最小阈值是 $V_{PN} = 4 \times 4 \times 1.5 = 24$,在10 000次蒙特卡罗迭代中分配95%的置信水平.若 $V_{PNi,j}^c > 24$ 的累积分布概率 > 0.05 ,则判定为共振路径.图2以在场景4中从上游功能F5到下游功能F17的变化耦合

为例,可以发现,当 $V_{PN} > 24$ 时,对应的累积分布概率为 $0.161 > 0.05$,即认为它们是共振的。

表 6 事故场景条件对系统功能的影响

场景	功能	人员情况	航线情况	环境情况	管理水平
S_1	F1	0.5	0	0	1
S_1	F2	0	0.5	0	1
S_1	F3	0.5	0	0	1
S_1	F4	1	0.5	0.5	1
S_4	F5	0.5	0.5	0.5	1
S_1	F6	1	0	0	1
S_3	F7	0	1	1	1
S_3	F8	1	0.5	0.5	0
S_3	F9	1	0.5	0.5	1
S_2	F10	1	0	0.5	0.5
S_2	F11	1	0	1	0.5
S_2	F12	1	0	0.5	0.5
S_2	F13	1	0	1	0.5
S_2	F14	1	0	0.5	0.5
S_2	F15	1	0	1	0.5
S_4	F16	1	1	1	0
S_4	F17	1	1	1	0
S_4	F18	1	1	1	0

表 7 事故场景相关条件

场景	人员情况	航线情况	环境情况	管理水平
S_1	2	1	1	4
S_2	2	1	2	2
S_3	4	4	2	2
S_4	4	4	2	2

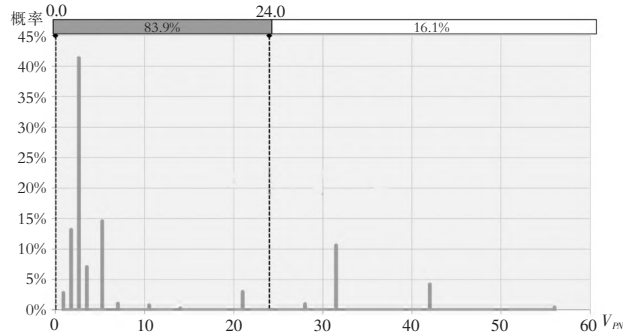


图 2 在场景 4 中的从上游 F5 到下游 F17 变化耦合的概率分布

每个功能都有各自的特性,并受到场景可变性(场景效应)的不同影响,而且设置不同的阈值可能会导致不同的结果.因此,分别使用 24 和 30 作为阈值,使用当 $V_{PNi,j}^z$ 大于阈值时对应的累积分布概率与 0.05 比较来判定是否共振,通过 @ risk 插件进行迭代次数为 10 000 的蒙特卡罗仿真,其结果如表 8 所示。

表 8 系统的上下游功能可变性耦合结果

功能			$V_{PNi,j}^z > 24$ 的累积分布率				$V_{PNi,j}^z > 30$ 的累积分布率			
下游	上游	场景	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1	S_2	S_3	S_4
F4 工作负荷	F1 替代措施	$S_1 \rightarrow S_1$	0.303				0.101			
F5 睡眠时长	F11 睡眠 1	$S_2 \rightarrow S_2$		0.043				0.030		
	F13 睡眠 2	$S_2 \rightarrow S_2$		0.044				0.030		
	F15 睡眠 3	$S_2 \rightarrow S_2$		0.048				0.020		
F6 业务能力	F3 培训考核	$S_1 \rightarrow S_1$	0.230				0.230			
F7 调整计划	F2 管理体系	$S_1 \rightarrow S_3$	0.121		0.008		0.008		0.008	
	F8 驾驶	$S_3 \rightarrow S_3$			0.078				0.078	
F8 驾驶	F6 业务能力	$S_1 \rightarrow S_3$	0.149		0.149		0.045		0.045	
	F9 交接班	$S_3 \rightarrow S_3$			0.025				0.021	
F9 交接班	F2 管理体系	$S_1 \rightarrow S_3$	0.120		0.113		0.113		0.113	
	F4 工作负荷	$S_1 \rightarrow S_2$	0.160	0.150			0.150	0.045		
F10 配载图	F10 配载图	$S_2 \rightarrow S_2$		0				0		
	F12 起锚	$S_2 \rightarrow S_2$		0				0		
F11 睡眠 1	F4 工作负荷	$S_1 \rightarrow S_2$	0.154	0.146			0.146	0.043		
	F12 起锚	$S_2 \rightarrow S_2$		0				0		

表 8(续)

功能			$V_{P_{Ni,j}}^z > 24$ 的累积分布率				$V_{P_{Ni,j}}^z > 30$ 的累积分布率			
下游	上游	场景	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1	S_2	S_3	S_4
	F14 离港	$S_2 \rightarrow S_2$		0				0		
F14 离港	F4 工作负荷	$S_1 \rightarrow S_2$	0.061	0.051			0.051	0.019		
F15 睡眠 3	F14 离港	$S_2 \rightarrow S_2$		0				0		
F16 观察	F9 交接班	$S_3 \rightarrow S_4$			0.311	0.311			0.174	0.174
(航线和环境)	F15 睡眠 3	$S_2 \rightarrow S_4$		0.053		0.088		0.053		0.053
F17 定位	F5 睡眠时长	$S_2 \rightarrow S_4$		0.046		0.161		0.004		0.152
	F16 观察	$S_4 \rightarrow S_4$				0.060				0.029
F18 转向	F9 交接班	$S_3 \rightarrow S_4$			0.299	0.299			0.160	0.160
	F17 定位	$S_4 \rightarrow S_4$				0.156				0.086
	F6 业务能力	$S_1 \rightarrow S_4$	0.150			0.150	0.047			0.047

通过判定各功能的关键耦合是否共振,就可以观察它们相互作用和创建共振路径,即由 2 个或更多的关键耦合连接 3 个或更多的功能。

将在场景 1 中以阈值 24 作为判定共振条件的关键路径(见图 3)。由此发现:1)在场景 1 中有 3 组共振路径,其中 F1→F4 出现共振的频率最高(0.303),这说明在不采取替代工作措施的情况下

将导致工作负荷增大,从而显著增加系统的不稳定性;2)F3→F6 的累积分布率达到了 0.230,这说明培训考核对于业务能力也有一定影响,培训考核的欠缺也会放大系统的波动。另外,F6→F8(0.149)和 F6→F18(0.150)也作为共振路径并与 F3→F6 相连,这可能形成连锁反应并加剧系统波动(见图 3 粗连接线)。

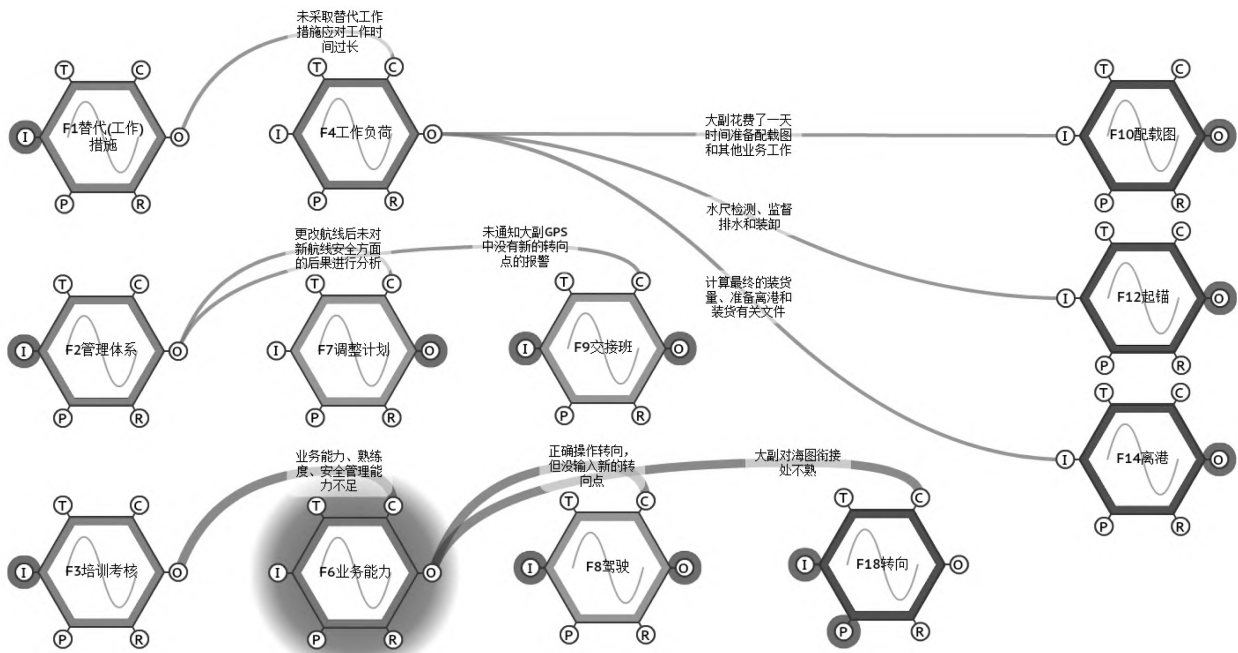


图 3 在场景 1 中功能共振的关键路径

将在场景 2 中以阈值 24 作为判定共振条件的关键路径。与场景 1 类似的是,F4→F10 和 F4→F12 的累积分布率较大(0.150 和 0.146),这说明工作负荷对人机互动中的实际活动来说会加剧系统波动。

对于场景 3,一方面是 F6→F8(0.149)和 F7→

F8(0.078)的环节为事故埋下隐患;另一方面,交接班是其中重要环节,管理体系对于交接班要求的疏忽(0.113)使得二副只和大副说明了调整航线计划,而未向大副说明未输入新的转向点(0.311),且手动取消转向点报警也未向大副说明(0.299)。

对于场景 4 (见图 4),除了在之前场景出现过的共振路径以外,有 2 条路径出现共振的频率较高: 1)大副本来计划 16:30 在海图上定位,但轮机长此时来到驾驶室查看航行信息,然后大副忘记了定位,即 F5→F17(0.161),这说明睡眠不足引起疲劳降低了记忆力;2)由于没有在海图上定位,再加上其他在之前场景提到的原因,所以最终没有即时转向,即 F17→F18(0.156),与之前的路径连在一起形成连锁反应;3) F5→F17 (0.161) 和 F16→F17 (0.06)都与 F17→F18(0.156)相连,可能放大系统波动(见图 4 粗连接线).

通过对以上各场景的分析可以发现,部分路径在不同场合重复出现.这是因为路径连接的功能模

块被划分为不同场景,且场景效应接近.相反地,部分路径的共振频率可能受场景效应的影响产生明显差别.1)功能 F2→F7,在场景 1 中被判定为共振(0.121),但在场景 3 中则没有(0.008),这说明“管理体系”→“调整计划”这条路径在管理场景下容易被察觉,而在驾驶场景中则容易被忽视;2)功能 F5→F17,在停靠场景中没有被判定为共振(0.046),而在驾驶场景中被判定为共振(0.161),这说明当出现睡眠不足的情况时,可能不会立即引起显著后果,或其负面效应可能通过一些活动(如补充睡眠)得到缓解,但若持续缺乏睡眠形成“睡眠债”,则会对人体功能造成显著影响,从而引发不安全行为.

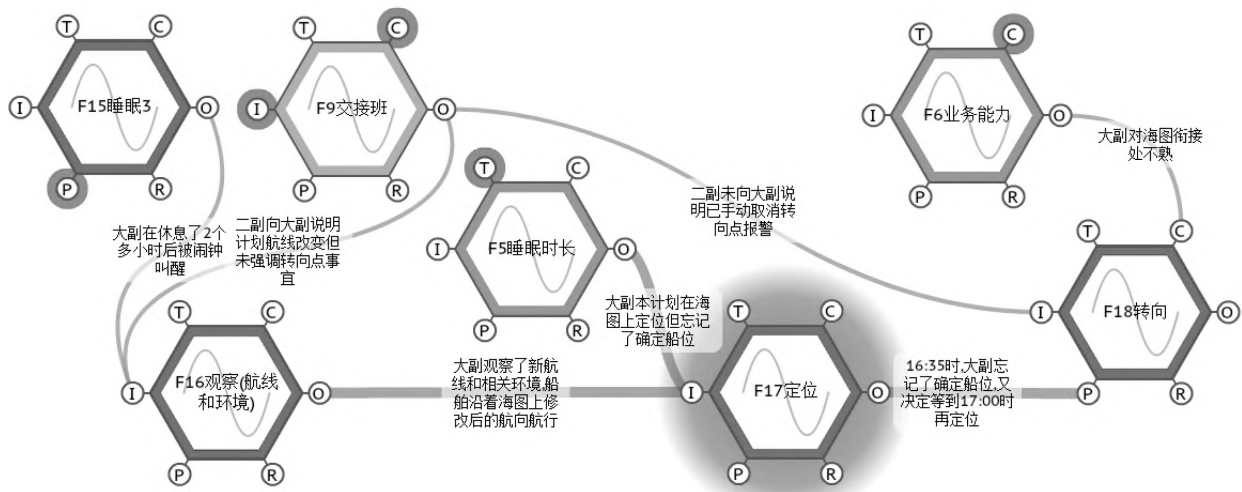


图 4 在场景 4 中功能共振的关键路径

此外,由表 8 知,设置不同阈值对于系统判定共振也会产生不同结果,当阈值从 24 提升至 30 时,相当于提高了系统对于波动的容忍度,少数路径共振频率几乎不变,多数路径共振频率明显下降,其中一些原先被判定为共振的路径变为不共振.具体分析如下:

1)共振频率几乎不变.路径 F3→F6,F7→F8 的共振频率保持不变.路径 F2→F9,F15→F16,F5→F17 的共振频率整体呈现小幅下降.这是因为它们共振频率分布的波峰有 2 个或更多,而阈值的 2 种取值都在它们的波峰之间,这表明这些路径的共振是加剧系统波动的主要原因,且一旦超出系统安全范围,其波动幅度往往较大.因此,需要格外注意这些路径对系统波动造成的影响.

2)共振频率显著下降,但仍然被判定为共振路径.路径 F1→F4,F9→F16,F9→F18,F17→F18 的共振频率下降了一半左右甚至更多,但仍是共振路径.这是因为这些路径的共振幅度较大,且频率分布相较于上一种类型更加均匀.因此,当增大阈值时,会导致累积分布概率下降较快.

3)共振频率在不同场景中下降程度不同.(i)场景 1 中的路径 F2→F7,从 0.121 变成和场景 3 中的一样(0.008),原本在场景 1 才能被察觉的环节被彻底忽视,正如事故中发生的一样,即“事故发生前,该轮航线进行了更改,但未对新航线可能造成航行安全方面的后果,即新航线直接对着浅礁航行可能发生搁浅事故进行分析”;(ii)路径 F4→F10,F4→F12,F4→F14 的共振频率在场景 1 只略微下

降,在场景 2 中迅速下降为非共振路径,这说明了工作负荷的影响可能不会立即显现而被发现,这使得其负面效果往往不能及时发现。

4) 从被判定为共振路径到非共振路径。(i) 场景 1 和场景 3 中的路径 $F6 \rightarrow F8$, 从 0.149 变成 0.045, 类似地, 二副在驾驶过程中虽然正确转向但未输入新的转向点, 这种“小问题”在放松要求后难以发现; (ii) 场景 1 和场景 4 中的路径 $F6 \rightarrow F18$, 从 0.150 变成 0.047, 这说明当放松要求时, 和“业务能力”相关的一些环节上存在的问题更容易被忽视; (iii) 路径 $F16 \rightarrow F17$ 的共振频率从 0.060 到 0.029, 这说明该路径的共振幅度较小。

3 结论

本文基于 FRAM 框架, 与蒙特卡罗仿真结合, 提出了可用于分析海事事故的 FRAM-MC 模型, 并将其用于分析“深能 1 号”搁浅事故, 主要结论如下:

1) 工作负荷过大可能引起睡眠不足, 这 2 种情况都会对船员产生负面影响, 但可能无法及时察觉其后果, 或其负面效应可能通过一些活动(如补充睡眠)得到缓解, 但若持续缺乏睡眠形成“睡眠债”, 则会对人体功能造成显著影响, 从而引发不安全行为;

2) 驾驶人员要有足够的休息时间, 若不满足规定的休息时间, 则应采取替代工作措施, 这种替代工作措施应纳入船舶安全管理体系文件中, 应尽力保障船员睡眠, 以避免疲劳对一些正常的工作产生疏忽;

3) 加强培训考核来增强船员的业务能力, 船长应认真分析由更改航线产生的航行安全问题, 提醒驾驶员注意, 交接班的具体工作既要写入安全管理体系文件, 又要有监督检查制度, 在交接班时信息沟通需充分、准确, 以避免遗漏事项。

4 参考文献

[1] 赵志葳, 朱云琪, 郑恩希, 等. 基于欧洲航运公司的船员疲劳影响因素分析 [J]. 大连海事大学学报, 2017,

43(2):39-44.

- [2] 赵贵竹. 船舶驾驶员疲劳致因因素分析 [J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(9):64-65.
- [3] MCCALLUM M C, RABY M, ROTHBLUM A M. Procedures for investigating and reporting human factors and fatigue contributions to marine casualties [J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 1996, 41(2):988-992.
- [4] 徐伯民, 秦臻. 海上船舶碰撞事故原因探讨: 疲劳的剖析 [J]. 中国航海, 2009, 32(4):115-119.
- [5] 韩力. 船员疲劳对海上安全的危害及其解决对策 [J]. 产业创新研究, 2019(4):119-120.
- [6] WADSWORTH E K J, ALLEN P H, WELLENS B T, et al. Patterns of fatigue among seafarers during a tour of duty [J]. American Journal of Industrial Medicine, 2006, 49(10):836-844.
- [7] LütZHÖFT M, DAHLGREN A, KIRCHER A, et al. Fatigue at sea in Swedish shipping: a field study [J]. American Journal of Industrial Medicine, 2010, 53(7):733-740.
- [8] REYNER L A, BAULK S D. Fatigue in ferry crews: a pilot study [C]. Fremantle, Western Australia: Managing Fatigue in Transportation. Proceedings of the 3rd Fatigue in Transportation Conference, 1998.
- [9] MARINE ACCIDENT INVESTIGATION BRANCH. Bridge watchkeeping safety study [R]. Southampton: Department of Transportation, 2004.
- [10] 张靖雯, 马晓雪, 刘阳, 等. 基于 FRAM-FAHP 法的船舶碰撞事故致因分析 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28(1):29-35.
- [11] GUO Yunlong, JIN Yongxing, HU Shenping, et al. Risk evolution analysis of ship pilotage operation by an integrated model of FRAM and DBN [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 229:108850.
- [12] FU Shanshan, YU Yuerong, CHEN Jihong, et al. Towards a probabilistic approach for risk analysis of nuclear-powered icebreakers using FMEA and FRAM [J]. Ocean Engineering, 2022, 260:112041.
- [13] SALIHOGLU E, BE IK I E B. The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a maritime accident: a case study of prestige [J]. Ocean Engineering, 2021, 219:108223.
- [14] GAO Yuan, FAN Yunxiao, WANG Jing, et al. Evaluation of governmental safety regulatory functions in preventing ma-

- for accidents in China [J]. Safety Science, 2019, 120: 299-311.
- [15] HOLLNAGEL E. FRAM(the functional resonance analysis method): modelling complex socio-technical systems [M]. Farnham: Ashgate Publishing Limited, 2012.
- [16] HOLLNAGEL E. Safety-I and safety-II: the past and future of safety management [M]. London: CRC Press, 2014.
- [17] 冯珺妍, 蔡爽, 吴弘飞, 等. 基于 FRAM 的轨道交通系统调度岗位安全职责分析 [J]. 安全, 2021, 42(8): 57-64.
- [18] PATRIARCA R, DI GRAVIO G, 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.
- [19] 郑大威. 基于 FRAM 的铁路事故分析研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [20] 王焕新, 王新建. 基于文献综述的船员疲劳研究 [J]. 世界海运, 2017, 40(11): 13-19.
- [21] 中华人民共和国海事局. “深能 1” 轮在澳大利亚昆士兰道格拉斯浅滩 (Douglas Shoal of Australia Queensland) 搁浅事故安全调查报告 [R]. 北京: 中华人民共和国海事局, 2011.
- [22] 张杨薇. 基于 FRAM 的危险化学品道路运输系统恢复力提升研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2018.

The Study of Crew Fatigue Accidents Based on FRAM-MC

PAN Hengyi

(College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Focusing on the crew fatigue accidents, a causal analysis model of crew fatigue accidents (FRAM-MC) is constructed by combining functional resonance analysis (FRAM) with Monte Carlo simulation (MC). Taking “SHENNENG 1” ship grounding accident as a case, by combing the event process and the FRAM-MC model calculation and empirical analysis, the results show that the FRAM-MC based crew fatigue accident analysis method can establish a clear accident hierarchy and help clarify the causes of accidents. Its function variability and coupling analysis can accurately and efficiently find out the key functions and critical paths of accidents, providing a basis for the setting of functional barriers, so as to formulate targeted prevention and control measures and effectively improve the safety of maritime transport system. The research results can provide reference and scientific basis for maritime accident analysis.

Key words: crew fatigue; Function Resonance Accident Model (FRAM); Monte Carlo simulation; shipping accident

(责任编辑:王金莲)