

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03916>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 王铭靖, 何小二, 蒋琛, 等. 基于主客观融合功能共振的舰船任务安全性分析[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(3): 37–44.

WANG M J, HE X E, JIANG C, et al. Ship task safety analysis based on subjective and objective fusion functional resonance[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(3): 37–44 (in both Chinese and English).

基于主客观融合功能共振的 舰船任务安全性分析



扫码阅读全文

王铭靖¹, 何小二², 蒋琛¹, 邱浩波¹, 高亮¹

1 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

2 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205

摘要: [目的] 为了预防舰船在执行任务时发生碰撞、火灾、爆炸等事故, 提出一种主客观融合的功能共振分析方法, 用于分析舰船任务的安全性并识别潜在共振链路。[方法] 首先, 应用层次任务分析法确定任务的主要功能; 其次, 引入区间犹豫模糊加权平均算子和欧氏距离来计算各功能的输出变异性; 然后, 采用 FP-Growth 算法挖掘事故案例中的上下游功能之间的关联规则, 并由提升度计算功能耦合变异性; 最后, 根据耦合变异性得分确定容易导致系统发生功能共振的关键功能和链路, 建立相应的屏障措施进行重点监控。[结果] 以潜艇远海训练任务的安全性分析为例, 研究结果显示存在 2 条产生功能共振的关键链路, 产生的共振可能会引发事故。[结论] 研究成果可为舰船任务的安全保障提供重要的决策依据。

关键词: 舰船; 远海训练; 风险评估; 安全性分析; 关联规则挖掘; 关键功能; 功能共振分析法

中图分类号: U674.7

文献标志码: A

DOI: [10.19693/j.issn.1673-3185.03916](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03916)

0 引言

舰船作为现代海战的主要装备, 结构复杂且涉及多个专业领域, 技术性能要求高。在执行任务时, 舰船通常远离岸上基地, 航程远, 航时长, 而海洋环境变幻莫测, 因此极易发生事故, 对其安全性构成严重威胁^[1]。任务安全性是指在给定的海洋环境下正常使用时, 按照规程执行某项任务过程中, 不发生或不因为出现意外事件而发生碰撞、搁浅、损伤、沉没、火灾、爆炸、人员伤亡等事故的能力^[2]。舰船的任务安全性直接关系到其生命力和作战能力, 因此全面识别舰船任务中的风险因素, 并建立适应综合集成化系统特点的安全性分析模型, 对于保障舰船安全执行任务、降低事故发生率具有至关重要的意义。

目前, 对舰船任务安全性的研究相对较少。付明玉等^[3]提出一种结合故障模式与影响分析 (failure mode and effects analysis, FMEA) 和模糊综合评判法 (fuzzy comprehensive evaluation, FCE) 的

综合评判模型, 应用于 Arrow 号近海支援船 DP2 动力定位控制系统, 提高了动力定位船舶的安全水平。赵翀等^[4]基于 4M1E 原理构建舰艇通信装备风险评价体系, 并采用证据推理算法进行风险评估。沙小进^[5]运用事故树分析法 (fault tree analysis, FTA) 对舰船火灾源进行评估分析。上述方法主要关注的是单一风险因素对事故的影响, 而较少考虑风险因素之间的相互作用。因此, 针对具有人-机-环耦合特性的舰船系统, 应采用非线性系统方法, 深入研究风险因素之间的相互影响, 以此来确定影响系统安全运行的关键因素。

功能共振分析方法 (functional resonance analysis method, FRAM) 是 Hollnagel^[6]提出的一种基于系统致因理论和随机共振理论的安全性分析方法。按照 FRAM 方法, 事故通常是因系统各功能之间的耦合性能变化超过了系统正常运行所能接受的范围所致。该方法通过构建模型来分析系统各功能之间复杂的交互作用及其性能变异性, 并监控系统中不同功能的变异情况, 从而提出具有

收稿日期: 2024-05-08 修回日期: 2024-06-25 网络首发时间: 2024-08-23 16:56

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075194); 湖北省科技计划资助项目 (2021AAB001)

作者简介: 王铭靖, 男, 1999 年生, 硕士生。研究方向: 装备安全性分析。E-mail: 1336359420@qq.com

邱浩波, 男, 1974 年生, 博士, 教授。研究方向: 系统可靠性。E-mail: hobbyqiu@163.com

*通信作者: 邱浩波

针对性的安全措施。因此,FRAM 方法可以被用于识别复杂的社会-技术系统中的潜在危险。

舰船作为一个复杂的社会-技术系统,其功能和活动是由人、技术单元或组织来执行的。运用 FRAM 方法分析舰船系统的安全性,有助于更好地理解系统的非线性和动态特性。尽管 FRAM 方法被广泛应用于航空^[7]、海事^[8]、铁路运输^[9]、建筑施工^[10] 等多个领域的风险分析中,但鲜有关于舰船任务安全方面的应用。此外,FRAM 方法还存在以下两点不足:1)在识别系统功能的性能变异表型时,通常依赖专家经验,因此其带有较强的主观性和不确定性,缺乏一种合理手段来处理评价信息。2)在分析上下游功能之间的耦合关系时,该方法无法定量地给出分析结果,其局限性给识别共振链路带来了较大困难。

为了弥补上述不足,本文将以某潜艇远海训练任务为研究对象,提出一种融合主客观因素的 FRAM 方法。该方法结合区间犹豫模糊集理论与关联规则算法,利用专家经验知识和历史事故数据来量化功能和耦合的变异程度,识别潜艇训练任务中的关键功能和链路,从而提高舰船装备系统的任务安全性。

1 主客观融合的 FRAM 方法

主客观融合的 FRAM 方法主要包括如下过程:首先,利用层次任务分析(hierarchical task analysis, HTA)法对任务进行分解,并使用 FRAM 方法的六角图来描述系统功能;其后,通过专家评判评估各功能的输出变异性概率,利用区间犹豫模糊加权平均(interval-valued hesitant fuzzy weighted average, IVHFWA)算子和欧氏距离来确定专家权重,并计算各功能的变异性得分;然后,将事故调查报告作为数据源,通过关联规则中的提升度指标量化上下游功能的耦合变异性;最后,根据耦合变异性得分确定系统的共振链路,并提出屏障措施以提高系统的安全性。

1.1 基于 HTA 方法的功能识别与描述

HTA 方法作为 FRAM 方法分析的初始步骤,其通过目标、次目标、操作的层次结构来描述所分析的活动,最终目的是详述任务活动^[11]。HTA 方法主要包括 3 个步骤:1)定义任务的整体目标;2)将整体目标分解成若干个次目标;3)进一步将这些次目标细化为更具体的目标。HTA 方法的输出结果可能是树状图或表格。

在 HTA 方法的基础上,本文采用 Hollnagel^[6]

所提“功能的六角模型”对各功能予以全面描述。该模型涵盖 6 个维度:输入(I)、输出(O)、时间(T)、控制(C)、资源(R)和前提(P),如图 1 所示。通过分析各功能在这 6 个维度中的交互关系,从而识别出各功能之间的潜在关联链路,并建立功能网络图。

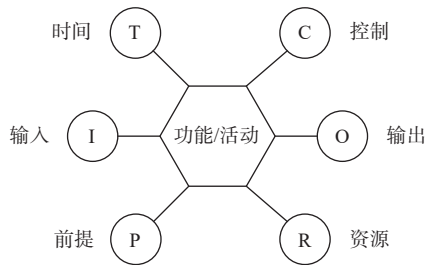


图 1 功能的六角模型表示

Fig. 1 Hexagonal representation of functional models

1.2 基于区间犹豫模糊集理论的功能变异性计算

在识别各功能之间的共振关系之前,需要理清上下游功能之间的作用关系,了解上游功能的输出性能变化^[12]。上游功能变异性表现为多种不同的表型,本文将时间和精度作为上游功能输出的表型^[13]。其中,时间方面包括准时、过早、过晚和不发生 4 个水平,精度方面包括精确、可接受和不精确 3 个水平。将上述功能变异性的语言描述转化成具体的分数,如表 1 所示。

表 1 功能输出的变异性分数
Table 1 Variability scores of functional output

输出表型	功能性能变化表征	分数
时间	准时	1
	过早	2
	过晚	3
	不发生	4
精度	精确	1
	可接受	2
	不精确	4

由于舰船系统各功能变异性通常是动态变化的,且难以直接测量,因此采用专家评估方法来计算功能变异性是一种合理选择。然而,在评估舰船系统各功能潜在的变异性时,专家们往往难以提供精确的概率信息,从而在几个数值之间犹豫不决。为解决这一难题,区间犹豫模糊集作为一种新兴的模糊集拓展形式应运而生,其通过区间值来描述功能输出变异性的概率,这在一定程度上提高了计算的合理性^[14]。相较于传统的模糊

集, 区间犹豫模糊集在处理区间值的不确定性和犹豫信息方面展现出了更高的灵活性, 使得功能单元变异性的量化过程更加全面和准确。

本文提出一种基于区间犹豫模糊集理论的评估方法, 通过修正专家权重值来弱化评估过程中的犹豫性和不确定性。计算各个功能输出变异性的步骤如下:

1) 邀请 l 位专家对各功能的时间与精度变异概率进行评分, 评分范围为 $[0, 1.00]$, 且区间波动不超过 0.20。对于功能 i 和第 k 个专家在 4 个时间的变异水平及 3 个精度的变异水平, 其区间犹豫模糊元分别如式(1)和式(2)所示。

$$\tilde{h}_k^T(i, t) = \{[\tilde{h}_k^T(i, t), [\tilde{h}_k^T(i, t)]]\} \quad (1)$$

$$\tilde{h}_k^P(i, p) = \{[\tilde{h}_k^P(i, p), [\tilde{h}_k^P(i, p)]]\} \quad (2)$$

式中: $\tilde{h}_k^T(i, t)$ 和 $\tilde{h}_k^P(i, p)$ 分别为第 k 个专家关于功能 i 时间与精度变异概率的区间左侧打分; $\tilde{h}_k^T(i, t)$ 和 $\tilde{h}_k^P(i, p)$ 分别为第 k 个专家关于功能 i 时间与精度变异概率的区间右侧打分; t 为时间 T 变异水平序号; p 为精度 P 变异水平序号。各专家关于功能 i 的 7 个变异概率评分集合构成了一个区间值犹豫模糊集 $h_k(i)$ 。

2) 根据式(3)和式(4)计算区间犹豫模糊元素的得分函数。

$$s(\tilde{h}_k^T(i, t)) = \frac{1}{2} (\tilde{h}_k^T(i, t) + \tilde{h}_k^T(i, t)) \quad (3)$$

$$s(\tilde{h}_k^P(i, p)) = \frac{1}{2} (\tilde{h}_k^P(i, p) + \tilde{h}_k^P(i, p)) \quad (4)$$

3) 根据文献[14]中定义的 IVHFWA 算子计算决策基准。IVHFWA 算子表达式为

$$f_{IVHFWA}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_k) = \bigoplus_{i=1}^k (w_i \tilde{h}_i) = \left\{ \left[1 - \prod_{i=1}^k (1 - \tilde{\gamma}_i^-)^{w_i}, 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \tilde{\gamma}_i^+)^{w_i} \right], \left[\tilde{\gamma}_1 \in \tilde{h}_1, \tilde{\gamma}_2 \in \tilde{h}_2, \dots, \tilde{\gamma}_k \in \tilde{h}_k \right] \right\} \quad (5)$$

式中: $f_{IVHFWA}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_k)$ 为 $\tilde{H}^k \rightarrow \tilde{H}$ 的映射函数, 代表 k 个区间值犹豫模糊元经过算子集结后, 最后计算结果为 1 个区间值犹豫模糊元; $\tilde{h}_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 为一组区间值犹豫模糊元; $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_k)^T$ 为 $\tilde{h}_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 的权向量; $\tilde{\gamma}_i$ 为区间值隶属函数。

首先, 不考虑各专家之间的差异, 而是将所有专家的权重视为相等, 即 $\mathbf{w} = (1/l, 1/l, \dots, 1/l)^T$; 然后, 由 IVHFWA 算子对所有专家的评分集合 $h_k(i) (k = 1, 2, \dots, l)$ 进行集结; 最后, 得出功能 i 的变异性概率

的决策基准 $h_{\text{mean}}(i)$, 即

$$h_{\text{mean}}(i) = f_{IVHFWA}(h_1(i), h_2(i), \dots, h_l(i)) \quad (6)$$

4) 根据式(7)和式(8)分别计算出各专家对功能 i 变异性概率评分与决策基准 $h_{\text{mean}}(i)$ 之间的欧氏距离和相似度。

$$d(i) = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{2} (|h_k^-(i, j) - h_{\text{mean}}^-(i, j)|^2 + |h_k^+(i, j) - h_{\text{mean}}^+(i, j)|^2) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: $d(i)$ 为第 k 个专家评分集合 $h_k(i)$ 与决策基准 $h_{\text{mean}}(i)$ 之间的欧氏距离; n 表示评价变异性水平个数, $n=7$ 。

$$s(i) = 1 - d(i) \quad (8)$$

式中, $s(i)$ 为相似度。相似度越大, 表明该专家对功能 i 的变异程度把握得越准确, 因此需要给予更大的权重。

5) 根据式(9)计算专家对功能 i 的偏好信息所体现出的权重 w_i^k 。

$$w_i^k = \frac{s(h_k(i), h_{\text{mean}}(i))}{\sum_{k=1}^l s(h_k(i), h_{\text{mean}}(i))} \quad (9)$$

6) 根据式(10)计算功能 i 的变异性分数 B_i 。

$$B_i = \left[\sum_{k=1}^l \sum_{t=1}^4 w_i^k \cdot s(\tilde{h}_k^T(i, t)) \cdot \beta_t \right] \cdot \left[\sum_{k=1}^l \sum_{p=1}^3 w_i^k \cdot s(\tilde{h}_k^P(i, p)) \cdot \beta_p \right] \quad (10)$$

式中: w_i^k 表示的是第 k 个专家对功能 i 评分的权重; $s(\tilde{h}_k^T(i, t))$ 和 $s(\tilde{h}_k^P(i, p))$ 分别表示第 k 个专家关于功能 i 时间变异概率及精度变异概率的评估值; β_t 和 β_p 分别表示时间及精度的评分。

1.3 基于关联规则挖掘的耦合变异性计算

关联规则挖掘是一种数据分析技术, 旨在挖掘和描述数据项之间的统计关系, 从而发现数据中存在的潜在关联关系^[15]。在舰船历史事故中, 可能蕴藏着不同功能之间的关系信息。因此, 利用关联规则挖掘技术, 可以排除主观因素的干扰, 从而准确地揭示出各功能单元变异情况与潜在事故风险之间的紧密联系。此外, 提升度作为关联规则挖掘技术中的重要指标, 其能够反映关联规则的相关性程度。鉴此, 本文利用关联规则中的提升度指标, 从时间和精度两个方面深入挖

掘上下游功能之间的内在联系,以量化功能之间的耦合变异性。具体步骤如下:

1) 将历史事故调查报告转换成功能变异信息的布尔矩阵 T_f 。

$$T_f = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1i} & \cdots & t_{1f} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2i} & \cdots & t_{2f} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: f 为功能的总个数;矩阵中的 t_{1i} 表示在事故中功能 i 在时间上是否发生变化; t_{2i} 表示在事故中功能 i 在精度上是否发生变化。若发生变化,则记为1,否则,记为0。

2) 将布尔矩阵 T_f 当作事故数据集,并通过式(12)~式(14)计算上下游功能的提升度 $L(i \rightarrow j)$ 。

$$S(i \rightarrow j) = P(i \cup j) = \frac{n(i, j)}{N} \quad (12)$$

$$C(i \rightarrow j) = P(j|i) = \frac{S(i \rightarrow j)}{S(i)} \quad (13)$$

$$L(i \rightarrow j) = \frac{P(j|i)}{P(j)} = \frac{C(i \rightarrow j)}{S(j)} \quad (14)$$

式中: $S(i \rightarrow j)$ 为规则 $i \rightarrow j$ 的支持度; $C(i \rightarrow j)$ 为规则 $i \rightarrow j$ 的置信度; $L(i \rightarrow j)$ 为规则 $i \rightarrow j$ 的提升度; $n(i, j)$ 为上游功能 i 和下游功能 j 同时出现变异的事故数量; N 为事故总数; $S(i)$ 为上游功能 i 的支持度; $S(j)$ 为下游功能 j 的支持度。

关联规则形式定义为:对于两个不相交的非空集合 X 和 Y ,若有 $X \rightarrow Y$,则称 $X \rightarrow Y$ 是一条关联规则,表示 X 的出现将导致 Y 的出现^[16]。提升度 L 是指上游功能 i 出现变异对下游功能 j 出现变异的概率提升程度。当 $L(i \rightarrow j) > 1$ 时,表示上下游功能耦合变异性存在放大效应;当 $L(i \rightarrow j) < 1$ 时,表示上下游功能耦合变异性存在阻尼效应;当 $L(i \rightarrow j) = 1$ 时,表示上游功能输出对下游功能输出无影响。

3) 根据式(15)计算上下游功能耦合变异性得分 C_{ij} 。

$$C_{ij} = B_i \cdot L_{ij}^T \cdot L_{ij}^P \quad (15)$$

式中: B_i 为上游功能的变异性分数; L_{ij}^T 和 L_{ij}^P 分别为时间和精度2个方面的提升度。

1.4 防控屏障的建立

为了识别系统中的关键功能和链路,需设定一个耦合变异性得分的阈值。当超过该阈值时,系统将发生功能共振,从而找出可能导致系统共振的关键功能和链路。基于系统思维的FRAM方法针对发生共振的功能单元,制定了包括物理

屏障、功能屏障、象征屏障和无形屏障这4种屏障措施,以降低不期望事件的发生概率或减少其带来的影响^[9]。其中,物理屏障通过物理手段设置隔离,防止不期望事件发生;功能屏障设定前提条件以预防行为发生;象征屏障通过符号、标志或警示提醒系统操作者注意潜在的危险;无形屏障则包括管理制度、法律法规、指南等措施。

2 应用案例

本文以某潜艇的远海训练为例,对其任务安全性进行分析。此次训练的科目内容为单艇对多个海面目标连续攻击。潜艇作战系统包括信息系统、指挥控制系统、武器系统和通信网络系统。**图2**展示了潜艇作战系统的整体构成以及各子系统之间的关系。

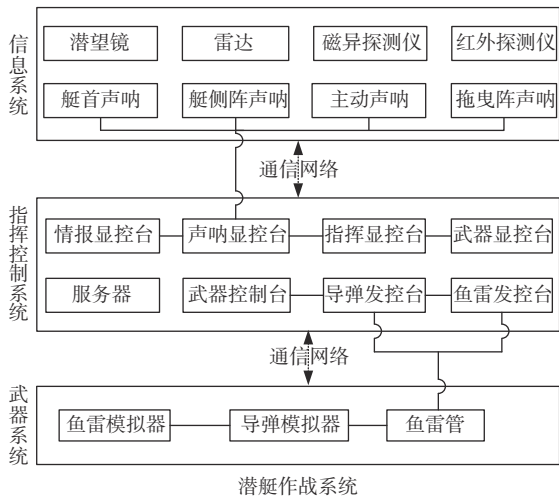


图2 潜艇作战系统组成

Fig. 2 The composition of a submarine combat system

2.1 系统的功能识别与描述

潜艇远海训练任务可以进一步细分为多个关键子任务,使用HTA方法进行系统化的拆解和分析。**图3**展示了这些子任务在潜艇远海训练任务中的层次结构关系。

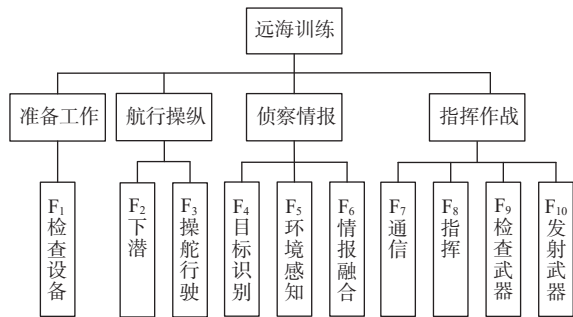


图3 潜艇远海训练任务的层次任务分析

Fig. 3 The hierarchical task analysis diagram of a submarine far-sea training mission

通过 HTA 方法识别潜艇远海训练的 10 个典型子任务, 并以这些子任务为基础, 构建相应的安全性分析模型。这些子任务并非按照固定的顺序逐一执行, 而是在同一任务剖面中灵活穿插进行。每个子任务都对应一个特定的功能单元, 包括检查设备(F_1)、下潜(F_2)、操舵行驶(F_3)、目标

识别(F_4)、环境感知(F_5)、情报融合(F_6)、通信(F_7)、指挥(F_8)、检查武器(F_9)以及发射武器(F_{10})。这些功能单元并非简单地串联连接, 而是以输入输出的形式产生交互, 共同构成了潜艇训练任务的复杂网络。潜艇训练任务的 FRAM 功能网络图如图 4 所示。

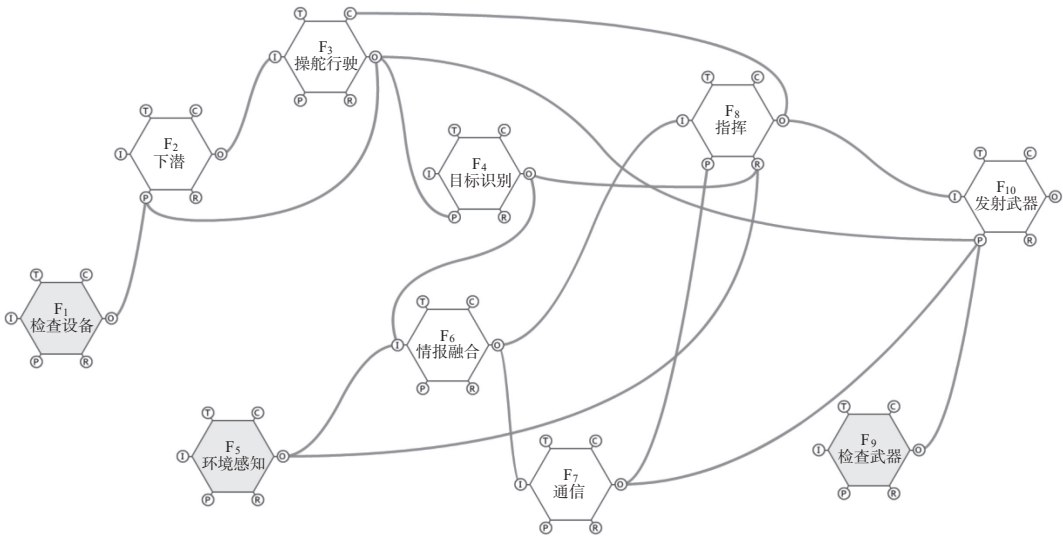


图 4 潜艇训练任务的 FRAM 模型图

Fig. 4 FRAM model diagram of submarine training mission

2.2 功能变异性的评估

本文研究中邀请 5 位在潜艇设计领域具有丰

富经验的专家, 评估了 10 个功能单元的输出变异性。这些专家对时间和精度 2 个方面的变异概率进行区间打分, 以 F_2 “下潜”为例, 结果如表 2 所示。

表 2 专家区间打分结果						
Table 2 Expert validation interval score range						
变异表型	变异水平	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5
时间	准时	[0.2, 0.3]	[0.3, 0.5]	[0.2, 0.3]	[0.3, 0.4]	[0.2, 0.3]
	过早	[0.5, 0.6]	[0.5, 0.7]	[0.4, 0.6]	[0.5, 0.6]	[0.4, 0.5]
	过晚	[0.1, 0.3]	[0.1, 0.2]	[0.1, 0.3]	[0.1, 0.3]	[0.2, 0.3]
	不发生	[0, 0.1]	[0, 0.1]	[0, 0.1]	[0, 0.1]	[0, 0.2]
精度	精确	[0.4, 0.5]	[0.4, 0.6]	[0.3, 0.4]	[0.3, 0.5]	[0.5, 0.6]
	可接受	[0.5, 0.6]	[0.4, 0.5]	[0.4, 0.6]	[0.5, 0.6]	[0.3, 0.5]
	不精确	[0.1, 0.3]	[0.2, 0.4]	[0.3, 0.5]	[0.1, 0.2]	[0.2, 0.3]

结合表 1 中的分值, 将所有专家的概率评估结果代入式(6)~式(9)中, 得出各功能单元下的专家权重, 然后再根据式(10)计算出各功能的输出变异性, 如表 3 所示。

2.3 功能变化的耦合分析

本文从多种渠道, 包括但不限于官方事故报告、学术期刊、网络资料等, 广泛收集 1938 年~2023 年间发生的 89 起潜艇事故案例, 并建立了功能变异信息的布尔数据集。然后, 利用关联规

则学习方法挖掘上下游功能变化间的内在联系, 为功能变化的耦合分析奠定了基础。FP-Growth

表 3 各功能的变异性得分			
Table 3 Variability scores for each function			
功能单元	变异性	功能单元	变异性
F_1	5.1724	F_6	4.2078
F_2	5.4308	F_7	3.1151
F_3	5.2092	F_8	5.2814
F_4	3.8835	F_9	4.2365
F_5	3.1721	F_{10}	4.6021

算法是一种经典的关联规则学习方法,在 Python3.2 平台中实现了对潜艇事故案例的有效挖掘。设置最小支持度阈值为 0.06,最小置信度阈值为 0.3^[17],

满足以上两个要求的项集被选为频繁项集。根据式(12)~式(14)计算出上下游功能之间的耦合系数 L_{ij}^T 和 L_{ij}^P ,如表 4 所示。

表 4 上下游功能输出变异性的耦合系数

Table 4 Coupling coefficients of upstream and downstream functional output variabilities							
序号	上下游功能耦合	耦合系数 L_{ij}^T	耦合系数 L_{ij}^P	序号	上下游功能耦合	耦合系数 L_{ij}^T	耦合系数 L_{ij}^P
1	$F_1 \rightarrow F_2$	1.7115	1.0988	9	$F_5 \rightarrow F_8$	1.5505	0.9303
2	$F_2 \rightarrow F_3$	0.8298	0.5993	10	$F_6 \rightarrow F_7$	1.2109	1.0114
3	$F_3 \rightarrow F_2$	0.8298	0.5933	11	$F_6 \rightarrow F_8$	1.7831	1.7103
4	$F_3 \rightarrow F_4$	1.8671	1.9478	12	$F_7 \rightarrow F_8$	1.1370	1.0854
5	$F_3 \rightarrow F_{10}$	0.4816	0.4994	13	$F_7 \rightarrow F_{10}$	1.0595	1.2361
6	$F_4 \rightarrow F_6$	1.5893	1.6481	14	$F_8 \rightarrow F_3$	1.3156	1.0525
7	$F_4 \rightarrow F_8$	1.3358	1.4472	15	$F_8 \rightarrow F_{10}$	1.0854	0.8844
8	$F_5 \rightarrow F_6$	2.0434	1.9264	16	$F_9 \rightarrow F_{10}$	1.5893	1.4127

图 5 所示为由式(15)计算出的所有上下游功能耦合变异性得分并绘制出的柱状图。

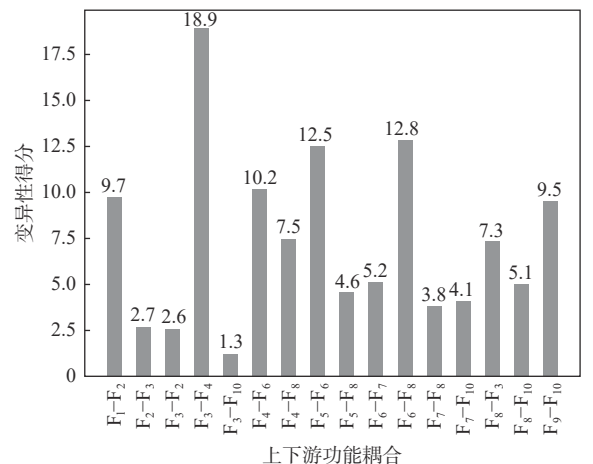


图 5 上下游功能耦合变异性得分

Fig. 5 Histogram of variability scores for upstream and downstream functional couplings

根据耦合变异性得分结果取临界值,若该值超过 10,则可认为存在功能共振。最终,得到 F_3 “操舵行驶”、 F_4 “目标识别”、 F_5 “环境感知”、 F_6 “情报融合”和 F_8 “指挥”出现共振。此外,还观察到了 2 条共振链路: $F_3 \rightarrow F_4 \rightarrow F_6 \rightarrow F_8$ 和 $F_5 \rightarrow F_6 \rightarrow F_8$,这些链路上的功能性能变化聚集可能引发潜艇事故。

2.4 结果分析与建议

为了确保潜艇训练任务的安全性,必须对系统的关键功能和链路进行深入的分析 and 监控。图 6 展示了潜艇训练任务中容易引发事故的共振链路,其中 X 标识了功能之间存在的共振现象。

从图 6 中可见,系统中存在 5 个关键功能,分别是 F_3 “操舵行驶”、 F_4 “目标识别”、 F_5 “环境感知”、 F_6 “情报融合”和 F_8 “指挥”。潜艇在水下操

纵过程中,遭遇横浪时易产生横摇,而遭遇迎浪时可能发生纵摇。若驾驶员反应迟缓或操舵错误,潜艇可能偏离航线,导致声呐等探测设备无法准确获取目标位置,从而增加本艇与其他船舶或海底障碍物发生碰撞的风险,故 F_3 与 F_4 之间可能产生功能共振。另外,若海图资料未及时更新或未充分了解周边环境,经艇员处理的情报可能存在准确性和可信度不足的问题,导致航线规划错误,增加碰撞和触礁事故的风险,故 F_5 与 F_6 之间可能形成功能共振。此外,在目标识别时,由于雷达、红外、光电、声呐、ESM 等传感器发生故障或探测距离受限,可能导致情报中心在信息融合处理时产生错误,形成不安全的航迹,故 F_4 与 F_6 之间可能产生功能共振。潜艇接收的情报信息可能来自多个传感器和数据源,需要综合处理以建立全面的态势认知。然而,情报人员的技术失误或与指挥部之间沟通不足都会影响到指挥决策,可能导致潜艇误入危险水域或发生触雷事故,故 F_6 与 F_8 之间可能形成功能共振。

在这 5 个关键功能中, F_3 与 F_5 对潜艇安全具有根源性影响,可能是事故发生的潜在源头。历史经验表明,碰撞是潜艇事故中发生频率最高的类型之一,其主要原因是水文信息保障不足以及驾驶员对周围情况反应不及时^[18]。这与本文方法研究的结论一致,验证了方法的有效性。因此,需要对 F_3 与 F_5 进行重点监控,并采取相应的屏障措施以抑制其性能波动。例如,针对 F_3 可以采取如下措施:引入自动化操纵系统、集中控制系统等智能辅助系统作为物理屏障;采用路径规划和动态避障等人工智能算法保持航行稳定作为功能屏障;设计偏航预警系统,辅助驾驶员修正航向偏离作为象征屏障;鼓励驾驶员参与模拟演练

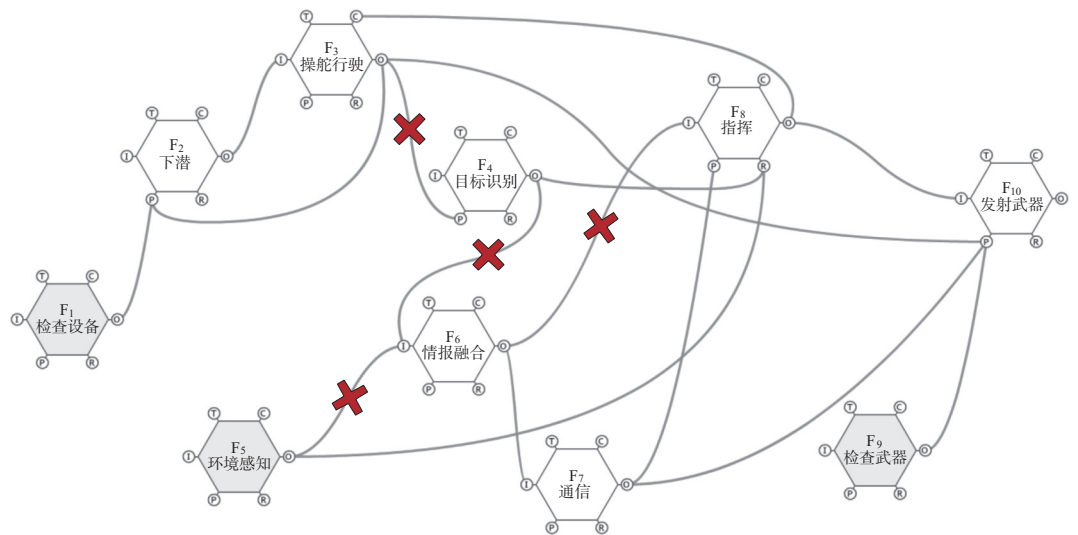


图 6 潜艇训练任务中的共振链路
Fig. 6 Resonant links in submarine training mission

和实际应急处置演练,提高操舵能力和应变能力等作为无形屏障。针对 F_5 可以采取如下措施:引入先进的雷达系统监控周围水域作为物理屏障;建立环境大数据中心和健全海图测绘工作等作为功能屏障。

F_6 连接的共振链路最多,受到上游功能输出的影响较大,故性能波动容易在该功能单元处聚集。为预防事故发生,须采取相应的屏障措施,即建立严格的情报筛选和验证机制作为物理屏障,加强情报人员与指挥部间的沟通作为功能屏障,优化情报显控台界面,提升情报人员对态势的认知效率作为象征屏障,以及定期开展情报人员的技能培训及安全意识培训等作为无形屏障。

3 结 论

本文将 FRAM 方法与区间犹豫模糊集理论和关联规则挖掘算法相结合,通过定性分析和定量推理识别系统中的薄弱环节,为舰船任务的安全保障提供决策依据。得到的主要结论如下:

- 1) 通过引入区间犹豫模糊集理论中的 IVHFWA 算子和欧氏距离,可以减少专家评估功能变异性时的经验差异。同时,将关联规则中的提升度作为上下游功能变异性的耦合系数,可以更客观地描述各功能单元之间的相互影响,从而得出更准确的分析结果。
- 2) 应用本文方法对潜艇远海训练任务进行安全性分析,发现了 2 条关键链路。这些链路产生功能共振可能会引发潜艇事故,因此应对这些关键链路上的功能采取相应的管理措施。
- 3) 本文方法未考虑天气状况、海况、敌方活动场景性能条件,而不同的场景性能条件会对

功能之间的耦合产生不同的影响,因此,构建考虑不同场景条件下的 FRAM 模型是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] 原宗. 基于任务流程的舰船 RMS 建模与仿真 [J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 5–11, 26.
YUAN Z. Warship's RMS modeling and simulation based on the task process[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(2): 5–11, 26 (in Chinese).

[2] 李炜, 崔鲁宁. 舰船装备安全性与生命力对比分析 [J]. 舰船科学技术, 2012, 34(4): 107–110, 115.
LI W, CUI L N. Comparative analysis on the ship safety and the ship survivability[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(4): 107–110, 115 (in Chinese).

[3] 付明玉, 宁继鹏, 魏玉石, 等. FMEA 和 FCE 方法在动力定位控制系统中的应用 [J]. 中国造船, 2012, 53(2): 138–148.
FU M Y, NING J P, WEI Y S, et al. FMEA and fuzzy comprehensive evaluation method in dynamic positioning control system[J]. Ship Building of China, 2012, 53(2): 138–148 (in Chinese).

[4] 赵翀, 杜荔红, 赵靖. 基于 RIMER 的舰艇通信装备状态风险评价 [J]. 舰船电子工程, 2022, 42(2): 130–135.
ZHAO C, DU L H, ZHAO J. Risk assessment of warship communication equipment condition based on RIMER [J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(2): 130–135 (in Chinese).

[5] 沙小进. 风险模态下的舰船火灾源评估分析 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36(12): 157–160, 165.
SHA X J. Ship's fire source evaluation and analysis under the risk of the mode[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(12): 157–160, 165 (in Chinese).

[6] HOLLNAGEL E. Barriers and accident prevention[M]. London: Routledge, 2016: 34–56.

[7] 李耀华, 巩子瑜. 基于改进 FRAM 的民机系统安全性分析 [J]. 航空学报, 2020, 41(12): 308–318.
LI Y H, GONG Z Y. Safety analysis of civil aircraft system based on improved FRAM[J]. Acta Aeronautica et

- Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 308–318 (in Chinese).
- [8] SALIHOGLU E, BAL E. The use of functional resonance analysis method (FRAM) in a maritime accident: a case study of prestige[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108223.
- [9] 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 Y, SHUAI B, HUANG W C, et al. Accident evolution mechanism of railway dangerous goods transportation based on FRAM[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(2): 171–176 (in Chinese).
- [10] LI J, WANG H W. Modeling and analyzing multiteam coordination task safety risks in socio-technical systems based on FRAM and multiplex network: application in the construction industry[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 229: 108836.
- [11] 陈农田, 王帅, 高文韬, 等. 基于层次任务分析理论的飞行员进近着陆操纵任务分析 [J]. *民航学报*, 2018, 2(6): 84–87.
- CHEN N T, WANG S, GAO W T, et al. Pilot approaching and landing manipulating task analysis based on HTA theory[J]. *Journal of Civil Aviation*, 2018, 2(6): 84–87 (in Chinese).
- [12] 阎奕帆, 甘旭升, 吴亚荣, 等. 基于改进 FRAM 方法的飞机着陆安全品质分析 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(8): 1964–1973.
- YAN Y F, GAN X S, WU Y R, et al. Aircraft landing safety quality analysis based on modified FRAM method [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(8): 1964–1973 (in Chinese).
- [13] PATRIARCA R, DI GRAVIO G, COSTANTINO F, et al. The functional resonance analysis method for a systemic risk based environmental auditing in a sinter plant: a semi-quantitative approach[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2017, 63: 72–86.
- [14] CHEN N, XU Z S, XIA M M. Interval-valued hesitant preference relations and their applications to group decision making[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 37: 528–40.
- [15] 刘尧, 陈改革, 刘振国, 等. 关联规则挖掘驱动的盾构机刀盘健康评估方法 [J]. *中国机械工程*, 2023, 34(11): 1326–1334, 1342.
- LIU Y, CHEN G G, LIU Z G, et al. Health assessment method of shield machine cutterheads driven by association rule mining[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(11): 1326–1334, 1342 (in Chinese).
- [16] 尚弘, 徐平平, 姚湘. 船舶管理中基于负载平衡的并行 FP-growth 算法研究 [J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(21): 184–187.
- SHANG H, XU P P, YAO X. Parallel FP-growth algorithm based on load balancing in ship management[J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(21): 184–187 (in Chinese).
- [17] LI S, YOU M J, LI D W, et al. Identifying coal mine safety production risk factors by employing text mining and Bayesian network techniques[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 162: 1067–1081.
- [18] 李方正, 张玮, 周晗, 等. 国外潜艇事故原因分析及启示 [J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(2): 170–173.
- LI F Z, ZHANG W, ZHOU H, et al. The summaries and revelation of foreign submarine accidents[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(2): 170–173 (in Chinese).

Ship task safety analysis based on subjective and objective fusion functional resonance

WANG Mingjing¹, HE Xiaoe², JIANG Chen¹, QIU Haobo^{*1}, GAO Liang¹

¹ School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

² Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China

Abstract: [**Objective**] To prevent accidents such as collisions, fires, and explosions during ship operations, a functional resonance analysis method (FRAM) that integrates subjective and objective factors is proposed and employed to analyze the safety of ship missions and identify potential resonant links. [**Methods**] First, hierarchical task analysis (HTA) is employed to determine the main functions of the task. Next, the output variability of each function is calculated using the interval-valued hesitant fuzzy weighted average (IVHFWA) operator and Euclidean distance. The FP-growth algorithm is then employed to mine the association rules of upstream and downstream functions in accident cases, and the variability of function coupling is calculated based on the lift. Finally, based on the coupling variability scores, key functions and links that are prone to functional resonance in the system are identified, and corresponding barrier measures are established for focused monitoring. [**Results**] Taking the safety analysis of a submarine far-sea training mission as an example, the results indicate the existence of two critical links that generate functional resonance and may lead to accidents. [**Conclusion**] The results of this study can provide vital decision-making support to ensure the safety of ship's missions.

Key words: naval vessels; offshore training; risk assessment; safety analysis; association rule mining; key functions; functional resonance analysis method