

中文引用格式:黄国忠,左志勇,邓青,等. 基于 FRAM-PLTS 扫地机器人-取暖器火灾事故分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12):180-186.

英文引用格式:HUANG Guozhong, ZUO Zhiyong, DENG Qing, et al. Fire accident analysis of sweeping robot-heater based on FRAM-PLTS[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 180-186.

基于 FRAM-PLTS 扫地机器人-取暖器 火灾事故分析*

黄国忠^{1,2}教授, 左志勇^{1,2}, 邓青^{**1,2}副教授, 陈寒熙格^{1,2}, 曹正凯^{1,2}

(1 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2 北京科技大学 大安全科学研究院, 北京 100083)

中图分类号:X928.7

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.0449

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0607100)。

【摘要】 针对智能家电产品安全风险问题,以某地2起扫地机器人-取暖器火灾事故为研究对象,采用基于功能共振分析法(FRAM)和概率语言术语集(PLTS)的集成方法,开展系统性的风险分析。运用FRAM分析事故,得到包括导航模块、避障传感器模块、运动控制模块等在内的9大核心功能模块;通过引入PLTS量化确定功能模块输入端、输出端主要表型,确定扫地机器人-取暖器致灾系统中导致事故的4个功能共振模块。研究结果表明:传感器精度不足和用户未执行“人走断电”等是事故的主要原因;屏障体系包括物理屏障、功能屏障、无形屏障和象征屏障。

【关键词】 扫地机器人; 取暖器; 功能共振分析法(FRAM); 概率语言术语集(PLTS); 火灾事故; 屏障体系

Fire accident analysis of sweeping robot-heater based on FRAM-PLTS

HUANG Guozhong^{1,2}, ZUO Zhiyong^{1,2}, DENG Qing^{1,2},
CHEN Hanxige^{1,2}, CAO Zhengkai^{1,2}

(1 School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Research Institute of Macro-Safety Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To address the safety risk issues of smart household appliance products, a systematic risk analysis was conducted by taking two sweeping robot-heater fire accidents in a certain location as the research subjects. An integrated method combining the FRAM and PLTS was adopted. FRAM was applied to analyze the accidents, through which nine core functional modules were identified, including navigation module, obstacle avoidance sensor module, and motion control module. Subsequently, PLTS was introduced to quantitatively determine the main characteristics of the input and output terminals of each functional module. Based on this quantitative analysis, four functional resonance modules that led to the accidents in the sweeping robot-heater were confirmed. The results show that the primary causes of the

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0180-07; 收稿日期:2025-07-02; 修稿日期:2025-09-20

** 通信作者:邓青(1990—),女,湖北孝感人,博士,副教授,主要从事智能疏散、城市安全与产品安全方面的研究。E-mail:dengqing0415@126.com。

accidents include insufficient sensor accuracy and failure of users to implement the " power-off when leaving" operation. Additionally, the barrier system for risk prevention and control is identified, which consists of physical barriers, functional barriers, intangible barriers, and symbolic barriers.

Keywords: sweeping robots; heaters; functional resonance analysis method (FRAM); probabilistic linguistic term set (PLTS); fire accident; barrier system

0 引 言

扫地机器人的高速发展给家庭生活带来了舒适和便捷,但其使用过程中存在安全问题。2019 年前后,日本东京发生 2 起扫地机器人推动取暖器引发的火灾事故^[1];2024 年 3 月,广东省梅州市某小区扫地机器人锂电池热失控引发火灾^[2]。因此,建立扫地机器人相关的事故分析模型,识别相关安全风险因素,并提出风险防控措施,对保障扫地机器人产品性能、减少事故发生意义重大。

目前,对于扫地机器人的研究主要集中在路径规划领域^[3-5],对其安全性的研究则较少,且多聚焦于单一故障风险^[6-8],这些研究难以揭示多设备功能耦合引发的功能共振风险。例如:扫地机器人的自主移动功能与取暖器的加热功能在空间上交叠时,可能因机械碰撞或电源线缠绕,导致取暖器位移接触并引燃易燃物,构成动态交互风险链。功能共振分析法 (Functional Resonance Analysis Method, FRAM) 将事故本质归纳为系统各功能的日常可变性在特定场景下共振放大的结果^[9],非常适合用于多设备功能耦合引发的风险场景。高扬等^[10]结合 FRAM 与层次分析法,确定了导致某公务航空飞机事故的主要原因;潘恒毅^[11]结合 FRAM 与蒙特卡罗仿真,分析船员疲劳事故;王涵宇等^[12]构建了基于 FRAM 的有限空间作业安全职责系统半定量分析模型;栗婧等^[13]采用时间、事件序列图技术和蒙特卡罗模拟方法改进 FRAM 分析管道爆裂事故。传统 FRAM 通过功能共振机制揭示系统脆弱性,但其分析高度依赖专家定性判断,难以量化功能变异的传播概率及影响程度。概率语言术语集 (Probabilistic Linguistic Term Set, PLTS) 通过融合语言术语的概率分布与专家定性判断,可显著提升复杂决策中模糊信息的量化能力^[14]。

基于此,笔者拟利用 FRAM 分析扫地机器人的安全风险,引入 PLTS 量化系统功能的耦合变异性影响,并从系统的角度分析事故致因,分析扫地机器人-取暖器致灾系统 (以下简称致灾系统) 各功能模块间的失效链接,确定事故的主要原因。

1 FRAM-PLTS 方法框架

1.1 FRAM-PLTS 分析方法

FRAM-PLTS 方法能够有效量化上游功能对下游功能的影响。与 AHP 等传统确定系统耦合关系的方法相比,PLTS 通过自然语言术语与概率分布的双重表达机制,直接契合 FRAM 功能变异的固有模糊性特征。PLTS 支持专家以自然语言描述性能波动,用概率分布量化发生概率,精准捕捉功能输出不确定性。可整合不同专家对功能变异的评估,评估维度灵活,无需严格层次结构与判断矩阵,适配 FRAM 复杂非线性耦合关系量化^[15]。

1.2 方法步骤

1) 系统功能模块划分与网络构建。FRAM 的建模过程主要包括:将复杂系统分解为可分析的功能模块、描述功能模块、分析功能可变性、耦合关系建模、共振分析与失效链接识别和屏障措施的制定。将每一个与致灾系统相关的事件作为 1 个功能模块。每个功能模块从 6 个方面进行描述,包括输入 I、输出 O、资源 R、控制 C、前提 P 和时间 T。

通过系统运行流程以及关键活动的识别,将致灾系统划分为可以分析的功能模块,并明确各个模块在安全风险中的角色。采用有向图建模技术,以功能模块为节点,以输入/输出的耦合关系为边,构建出反映系统动态交互的系统功能网络,明确各模块在安全风险传递过程中的时序关联与影响路径。

2) PLTS 评价体系构建。在 FRAM 模型中,将重点功能之前已执行的功能称为上游功能,之后的功能称为下游功能。上、下游并非绝对,会随着对模型的分析而发生改变^[16]。将上游功能的输出端分为 4 个维度的表型变化^[17],分别为力量/距离/方向 F、时机/持续时间 D、目标 A、顺序 Q。下游功能的输入端则有 5 个维度的表型变化,分别为 I、R、C、P 和 T。通过构建 PLTS 评价体系,可以整合多个不同权重专家的不同意见,并量化功能变异的不确定性与专家意见分歧。

3) 功能表型权重计算与功能共振模块识别。

引入改进的得分函数模型,通过 PLTS 的概率集成算法计算各个表型的综合权重。基于权重值筛选上游功能和下游功能的表型,并根据主要表型识别系统功能网络当中的关键耦合路径,确定系统中的失效链接、功能共振模块和事故的主要原因。

4) 基于功能共振模块的屏障体系构建。针对系统中的功能共振模块,提出涵盖物理屏障、功能屏障、无形屏障和象征屏障的针对性屏障措施,以避免相关事故再次发生。

2 火灾事故致灾系统建模

某扫地机器人推动取暖器与沙发接触引起火灾^[1]。起火前,取暖器放在距离沙发 0.5 m 的位置,取暖器和扫地机器人处于运行状态。该起事故中涉及的

主要因素有扫地机器人、取暖器和用户,根据事故描述以及相关涉及因素划分致灾系统中的功能模块,结果见表 1。为更清晰地理解每个功能模块的运行机制和潜在风险,以 FM7 为例,分析其 6 要素,结果见表 2。

建立如图 1 所示的火灾事故致灾系统功能网络,六边形代表功能模块,各边标注的 6 要素体现功能的运行机制。模块间连线表示功能交互关系,例如:FM8 的输出“设备监管功能”作为控制 C 连接多个模块,可以体现用户行为对系统安全的关键作用。通过交互关系可梳理风险传播路径,例如:FM2 的“周围环境数据”输出异常,会干扰 FM1 的输出“路径规划指令”,进而影响 FM3 的指令执行。若此时 FM7 因前提 P“险情可感知”不满足,则无法及时断电,最终可能引发事故。

表 1 功能模块及其描述

Table 1 System function modules and their descriptions

来源	简称	功能模块编号	描述
扫地机器人	导航模块	FM1	负责根据传感器数据规划移动路径
	避障传感器模块	FM2	依赖红外、激光或视觉传感器检测障碍物
	运动控制模块	FM3	控制扫地机器人转向和动力输出
	扫地机器人电源模块	FM4	扫地机器人的电源管理模块
取暖器	加热控制模块	FM5	调节温度输出
	取暖器电源模块	FM6	取暖器的电源管理模块
用户行为	用户响应功能	FM7	用户未在出现险情第一时间响应
	设备监管功能	FM8	用户未遵守“人走断电”原则
	设备维护功能	FM9	未定期检查扫地机器人、取暖器

表 2 功能模块 FM7 的 6 要素

Table 2 Six aspects of function module FM7

要素	描述	解释
I	险情信号	传感器检测到异常传递给用户,或者险情本身被用户直接发现
O	险情响应断电	用户通过 APP 远程断电或手动关闭设备,切断电源避免事故
R	感知设备;用户身体机能	设备:传感器、智能终端;机能:视觉/听觉感知、手部操作能力
C	响应优先级	用户接收到不同险情信号后,响应的顺序
P	险情可以被感知;用户处于“可响应状态”	信号未被屏蔽;用户清醒且无行动障碍
T	响应时间窗口	从险情信号输入到用户响应的时间窗口

3 火灾事故风险量化与功能共振模块识别

3.1 基于 PLTS 的火灾事故风险量化

邀请产品安全和风险评估领域内的 3 位专家 Z₁、Z₂ 和 Z₃ 构建 PLTS 评价体系,以确定上游功能的主要输出表型与下游功能的主要输入表型。用 10 分制打分对 3 位专家的工作经验、专业相关程

度、信心指数和教育背景进行评价(表 3),以确定各个专家的评价权重^[18]。

表 3 专家的评价权重

Table 3 Evaluation weights of experts

专家	工作经验	专业相关度	信心指数	教育背景	总分	权重
Z ₁	9	9	9	9	36	36/98
Z ₂	7	8	8	9	32	32/98
Z ₃	8	7	7	8	30	30/98

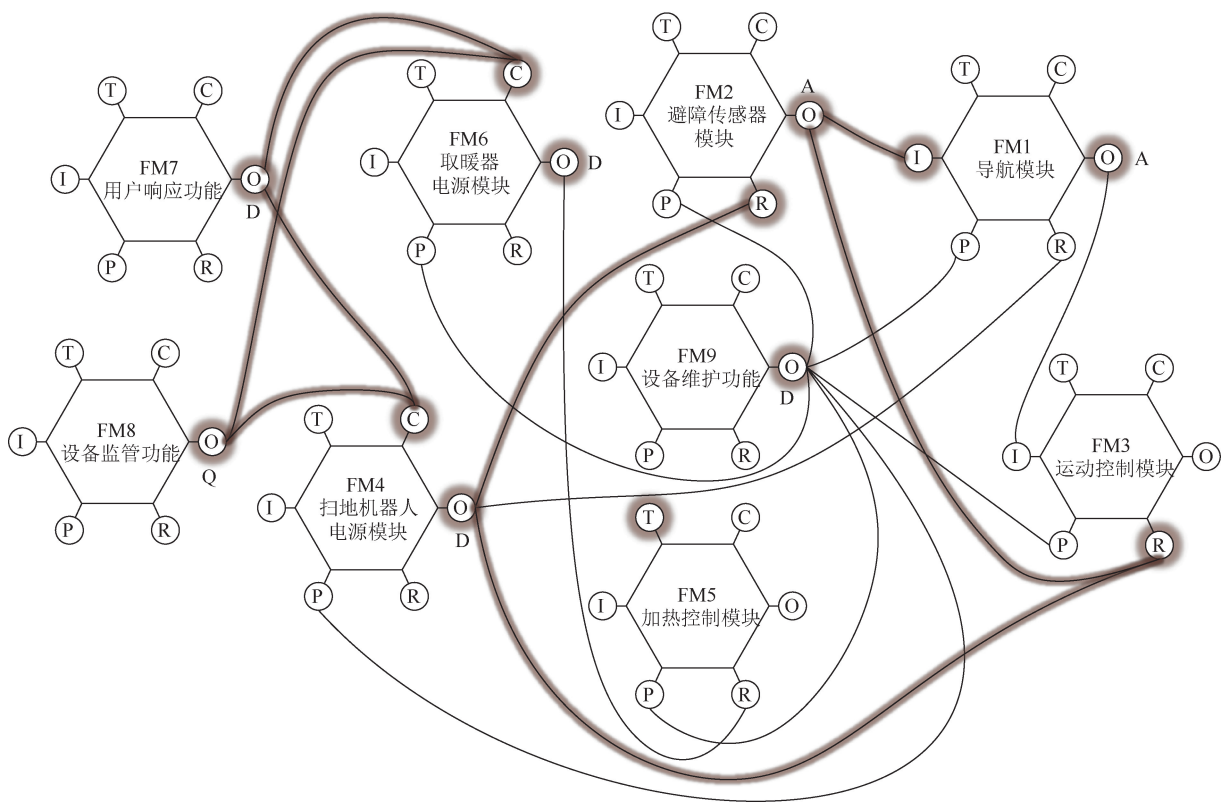


图 1 致灾系统功能网络

Fig. 1 Functional network diagram of hazard-causing system

专家使用 PLTS 方法,评价上、下游功能每个表型,并通过计算得分函数确定主要表型。致灾系统中功能表型的权重用 5 级语言术语集 $S = \{s_{-2}, s_{-1}, s_0, s_1, s_2\}$ 表示^[19], s_{-2}, s_{-1}, s_0, s_1 和 s_2 分别表示低、较低、一般、较高和高。

PLTS($L(p)$) 为^[14]:
$$L(p) = L^{(k)}[p^{(k)}] \mid L^{(k)} \in S, \\ 0 \leq p^{(k)} \leq 1, k = 1, 2, \dots, \mid L(p) \mid \quad (1)$$
式中: $L^{(k)}$ 为第 k 个语言术语; $p^{(k)}$ 为 $L^{(k)}$ 的概率; $L^{(k)}[p^{(k)}]$ 为 $L(p)$ 中第 k 个概率语言术语元; $\mid L(p) \mid$ 为 $L(p)$ 中语言术语集的数量。

为降低专家的认知负担,允许专家提供不完全的语言概率信息。这种方式既保留了决策过程的灵活性,又可有效平衡评估效率与信息完整性之间的关系。因此,存在 $\sum_{k=1}^{\mid L(p) \mid} p^{(k)} < 1$ 的情况。采取风险中立型决策方法^[20]归一化不完全语言概率信息,并通过语言尺度函数将 S 中代表不同等级的 s_i 映射到连续的数值区间上^[21]:

$$\bar{p}^{(k)} = \frac{1 - \sum_{k=1}^{\mid L(p) \mid} p^{(k)}}{\mid L(p) \mid} + p^{(k)} \quad (2)$$

$$g(s_i) = \frac{i + \tau}{2\tau} \quad (3)$$

式中: $\bar{p}^{(k)}$ 为 $L^{(k)}$ 归一化后的概率; s_i 为下标为 i 的语言术语; $g(s_i)$ 为 s_i 对应的语言尺度函数值; τ 为界定 S 中元素下标取值范围的正整数,这里取 $\tau=2$ 。

通过得分函数^[22] $E[L(p)]$ 计算所研究表型的权重:

$$E[L(p)] = \sum_{i=1}^{\mid L(p) \mid} \frac{g[L^{(k)}] p^{(k)}}{\sum_{k=1}^{\mid L(p) \mid} p^{(k)}} \quad (4)$$

以 FM1 的输入端表型资源为例说明各表型权重的计算。专家 Z_1, Z_2 和 Z_3 对 R 表型的 PLTS 评价分别为 $\{s_1(0.6)\}, \{s_2(0.7)\}$ 和 $\{s_2(0.6)\}$ 。对于专家 Z_1 , 已知概率和为 0.6, 未知概率和为 0.4, 分配量为 0.08。由式(2)归一化后, s_1 对应概率为 0.68, 其他术语对应概率均为 0.08。即专家 Z_1 的评价经归一化后变为 $\{s_{-2}(0.08), s_{-1}(0.08), s_0(0.08), s_1(0.68), s_2(0.08)\}$; 同理, 专家 Z_2 和 Z_3 的评价归一化后变为: $\{s_{-2}(0.06), s_{-1}(0.06), s_0(0.06), s_1(0.06), s_2(0.76)\}$ 和 $\{s_{-2}(0.08), s_{-1}(0.08), s_0(0.08), s_1(0.08), s_2(0.68)\}$; 由式(3)得

$g(s_{-2}) = 0, g(s_{-1}) = 0.25, g(s_0) = 0.5, g(s_1) = 0.75, g(s_2) = 1.0$ 。据式(4),专家 Z_1 的 PLTS 评价得分 $E_1 = 0.68 \times 0.75 + 0.08 \times 0 + 0.08 \times 0.25 + 0.08 \times 0.5 + 0.08 \times 1.0 / (0.68 + 0.08 \times 4) = 0.65$;同理,专家 Z_2 、 Z_3 的 PLTS 评价得分 E_2 和 E_3 分别为 0.85 和 0.80,则 R 的表型权重为:

$$\frac{36 \times 0.65 + 32 \times 0.85 + 30 \times 0.80}{98} = \frac{74.6}{98} \approx 0.761$$

上游功能输出表型权重和下游功能输入表型权重结果见表 4 和表 5,功能模块输出端与输入端的各表型中,权重最大者即为对应输出端或输入端的主要表型^[10]。

表 4 上游功能输出表型权重

Table 4 Weights of upstream functional output characteristics

功能模块编号	F	D	A	Q	主要表型
FM1	0.739	0.244	0.787	0.561	A
FM2	0.752	0.373	0.809	0.329	A
FM4	0.074	0.876	0.256	0.454	D
FM6	0.106	0.859	0.262	0.439	D
FM7	0.101	0.738	0.385	0.443	D
FM8	0.234	0.615	0.454	0.731	Q
FM9	0.357	0.632	0.451	0.242	D

表 5 下游功能输入表型权重

Table 5 Weights of downstream functional input characteristics

功能模块编号	I	R	C	T	P	主要表型
FM1	0.817	0.761	0.745	0.278	0.347	I
FM2	0.443	0.798	0.732	0.249	0.307	R
FM3	0.673	0.781	0.711	0.306	0.352	R
FM4	0.210	0.370	0.828	0.754	0.436	C
FM5	0.640	0.637	0.516	0.742	0.197	T
FM6	0.114	0.185	0.803	0.740	0.312	C

3.2 功能共振模块确定及事故原因分析

下游功能输入端与上游功能输出端的主要表型链接即形成失效链接。表 6 为致灾系统功能共振模块^[17]和失效链接。可以看出,FM2、FM4、FM7、FM8 是导致发生共振的功能模块。

1) FM2 因传感器精度不足或算法缺陷,将取暖器判定为“非障碍物”,导致 FM1 输入 I 接受错误信息、FM3 资源 R 分配错误,错误靠近并推动取暖器向沙发方向位移。

2) FM4 未根据异常状态切断供电,导致 FM2 和 FM3 资源 R 持续供应,持续缩短取暖器与沙发的安全距离。

3) 当险情已出现,FM7 未及时响应,导致 FM4 和 FM6 控制 C 无法因人工干预触发断电,加剧火灾风险。

4) FM8 未按“人走断电”的正确顺序操作,导

致 FM4 和 FM6 控制 C 失去人工监管约束,持续供电引发过热。

表 6 功能共振模块和失效链接

Table 6 Functional resonance modules and failure links

功能共振模块	失效链接
FM2	FM2(A)–FM1(I)
	FM2(A)–FM3(R)
FM4	FM4(D)–FM2(R)
	FM4(D)–FM3(R)
FM7	FM7(D)–FM4(C)
	FM7(D)–FM6(C)
FM8	FM8(Q)–FM4(C)
	FM8(Q)–FM6(C)

3.3 基于功能共振模块的屏障体系构建

根据识别得到的功能共振模块确定得到的屏障体系,见表 7。

表 7 基于功能共振模块的屏障体系

Table 7 Barrier system based on functional resonance modules

功能共振模块	物理屏障	功能屏障	无形屏障	象征屏障
FM2	加装传感器保护罩, 防污染影响检测	双传感器互校, 异常时阻断错误信号	实时监测传感器健康度, 预警维护需求	贴警示标识, 提示用户保护传感器
FM4	串联断路器, 过载、异常位移断供电	多条件触发断电, 如进入危险区、设备异常等	分析供电数据, 预警用电风险	标供电警示, 提示异常断电机制
FM7	装声光报警器, 强化险情提示	险情分级处置, 超时自动断电源	评估用户响应能力, 推送培训内容	贴响应流程图, 指引应急操作
FM8	装感应插排, 无人时自动断电	按场景设监管规则, 替代人工管控	记录监管行为, 推送安全案例	贴断电警示, 离家弹窗提醒

4 结 论

1) 火灾事故致灾系统中包含导航模块、避障传感器模块、运动控制模块、扫地机器人电源模块、加热控制模块、取暖器电源模块、用户响应功能、设备监管功能和设备维护功能在内的 9 大核心功能模块。

2) 集成 PLTS 与 FRAM 识别出避障传感器模块、扫地机器人电源模块、用户响应功能和设备监管功能是功能共振模块。

3) 传感器精度不足或算法缺陷、用户未执行“人走断电”等是扫地机器人推动取暖器与沙发接触引起火灾事故的主要原因。

参 考 文 献

[1] 日本东京今冬发生数起扫地机器人引发的火灾[EB/OL]. (2019-02-19). <http://japan.people.com.cn/n1/2019/0219/c35421-30806049.html>.

[2] 出趟门回家被烧了, 火场“真凶”竟是扫地机器人[N/OL]. 广州日报, 2024-03-19. <https://news.qq.com/rain/a/20240319A09CKL00>.

[3] 王超. 基于 ROS 的移动机器人全遍历路径规划研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
WANG Chao. Research on full traversal path planning of mobile robot based on ROS[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

[4] 申浩阳. 面向复杂空间的移动机器人路径规划问题研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
SHEN Haoyang. Research on path planning for mobile robots in complex space[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.

[5] 刘琪亮, 叶哲闽, 吴圣龙, 等. 基于 LoRa 协议的扫地机器人路径区域规划[J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(33): 21-24.

[6] 谢志利, 裴广福, 魏明然. 扫地机器人跌落风险评估与测试[J]. 家电科技, 2018, 394(11): 75-77, 85.
XIE Zhili, PEI Guangfu, WEI Mingran. Sweeping robot drop risk assessment and testing[J]. Journal of Appliance Science and Technology, 2018, 394(11): 75-77, 85.

[7] 邹伟, 梅飞翔, 王健, 等. 扫地机器人滚刷防缠绕技术研究[C]. 2022 年中国家用电器技术大会论文集, 2023: 2 051-2 060.

[8] ZHANG Yanxi, LIU Tiezhong. Risk assessment based on a STPA-FMEA method: a case study of a sweeping robot[J]. Risk Analysis, 2023, 43(3): 590-604.

[9] HOLLNAGEL E. Barriers and accident prevention[M]. London and New York: Routledge, 2016: 34-56.

[10] 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 for the accidents of business aviation flight based on the FRAM-AHP method[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(3): 754-760.

[11] 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.
- [12] 王涵宇, 谭钦文. 基于 FRAM 的有限空间作业安全职责半定量分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 88–95.
WANG Hanyu, TAN Qinwen. Semi-quantitative analysis of safety duties in confined space operations based on FRAM[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 88–95.
- [13] 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): 1 460–1 468.
LI Jing, LIU Huiyan, GONG Zichao, et al. Analysis of pipeline burst accident based on improved FRAM model[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(4): 1 460–1 468.
- [14] PANG Qi, WANG Hai, XU Zeshui. Probabilistic linguistic term sets in multi-attribute group decision making[J]. Information Sciences, 2016, 369: 128–143.
- [15] 连猛猛. 基于 PLTS 的多属性群决策方法及其在医疗决策中的应用研究[D]. 开封: 河南大学, 2024.
LIAN Mengmeng. Research on multi-attribute group decision-making method based on PLTS and its application in medical decision-making[D]. Kaifeng: Henan University, 2024.
- [16] 王怡君. 基于改进的 FRAM 地铁车站施工安全事故致因分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
WANG Yijun. Safety accident cause analysis in subway station construction based on improved FRAM[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023.
- [17] 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(北京), 2018.
ZHANG Yangwei. Research on resilience improvement of road transportation system of dangerous chemicals based on FRAM[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [18] YANG Jinhui, ZHAO Jin, SHAO Liangshan. Risk assessment of coal mine gas explosion based on fault tree analysis and fuzzy polymorphic Bayesian network: a case study of Wangzhuang coal mine[J]. Processes, 2023, 11: DOI:10.3390/pr11092619.
- [19] XU Zeshui. Deviation measures of linguistic preference relations in group decision making[J]. Omega, 2005, 33(3): 249–254.
- [20] 谭谨. 有关模糊语言的多属性决策方法研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2023.
TAN Jin. Research on multi-attribute decision-making method of fuzzy language [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2023.
- [21] GOU Xunjie, XU Zeshui. Novel basic operational laws for linguistic terms, hesitant fuzzy linguistic term sets and probabilistic linguistic term sets[J]. Information Sciences, 2016, 372: 407–427.
- [22] WU Xingli, LIAO Huchang. A consensus-based probabilistic linguistic gained and lost dominance score method[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 272(3): 1 017–1 027.



作者简介: 黄国忠 (1972—),男,黑龙江双鸭山人,博士,教授,主要从事产品缺陷判定与风险评估、智慧化电气火灾预警技术、公共安全与应急管理等方面的研究。E-mail: hjxhuanggz@163.com。