



SFEP中事件间逻辑关系的可拓表示方法研究

崔铁军, 李莎莎

引用本文:

崔铁军, 李莎莎. SFEP中事件间逻辑关系的可拓表示方法研究[J]. 智能系统学报, 2026, 21(5): 1313-1322.

CUI Tiejun, LI Shasha. Research on extension representation of logical relationships between events in SFEP[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(5): 1313-1322.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202509018>

您可能感兴趣的其他文章

线性熵的系统故障熵模型及其时变研究

System fault entropy model and its time-varying based on linear entropy

智能系统学报. 2021, 16(6): 1136-1142 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202006034>

人工智能系统故障分析原理研究

Research on system fault analysis principle based on artificial intelligence system

智能系统学报. 2021, 16(4): 785-791 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202003046>

空间故障网络的柔性逻辑描述

Flexible logic description of space fault network

智能系统学报. 2021, 16(3): 552-559 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202003029>

少故障数据条件下SFEP最终事件发生概率分布确定方法

Determination method of target event occurrence probability in SFEP under the condition of less fault data

智能系统学报. 2020, 15(1): 136-143 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201911002>

空间故障树与因素空间融合的智能可靠性分析方法

Intelligent reliability analysis method based on space fault tree and factor space

智能系统学报. 2019, 14(5): 853-864 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201807022>

可拓学中相关关系的变换方法研究

Research on the transformation method for the correlation relation in extenics

智能系统学报. 2019, 14(4): 619-626 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811027>

DOI: 10.11992/tis.202509018

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.TP.20260708.1632.008>

SFEP 中事件间逻辑关系的可拓表示方法研究

崔铁军^{1,2}, 李莎莎^{1,2}

(1. 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 沈阳理工大学 辽宁省安全工程产业学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要:为进一步实现系统故障演化过程(system fault evolution process, SFEP)的可拓表示,实现 SFEP 的对立统一分析,论文建立了事件间逻辑关系的可拓表示方法。给出了 SFEP 的可拓学原理,经历事件、影响因素和演化条件的可拓表示方法;实现了事件间逻辑关系和柔性逻辑的可拓表示及系统故障概率计算;讨论了研究意义。研究表明 SFEP 具有矛盾统一性;逻辑关系与演化条件具有本质差异;将原因与结果事件的“与或”逻辑关系分为 4 种类型,得到了它们的可拓表示方法及系统故障概率计算方法;20 种柔性逻辑均能通过“与或”逻辑叠加得到,并实现了可拓表示和系统故障概率计算。研究实现了多原因-结果事件的多样性逻辑关系描述;意义在于通过形式化、量化方法揭示事件间作用机制,为系统故障分析提供方法和技术。

关键词:安全系统工程;事件逻辑;系统故障演化;柔性逻辑;可拓表示

中图分类号: TP181; X913 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2026)05-1313-10

中文引用格式:崔铁军,李莎莎. SFEP 中事件间逻辑关系的可拓表示方法研究[J]. 智能系统学报, 2026, 21(5): 1313-1322.

英文引用格式:CUI Tiejun, LI Shasha. Research on extension representation of logical relationships between events in SFEP[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(5): 1313-1322.

Research on extension representation of logical relationships between events in SFEP

CUI Tiejun^{1,2}, LI Shasha^{1,2}

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, 110159, China; 2. Liaoning Safety Engineering Industry School, Shenyang Ligong University, Shenyang, 110159, China)

Abstract: In order to further realize the extension representation of the system fault evolution process (SFEP) and realize the analysis of the unity of opposites of SFEP, this paper establishes an extension representation method for the logical relationships between events. Firstly, the extension principle of SFEP is provided, and the extension representation of experience events, influencing factors, and evolution conditions is defined. Secondly, the extension representation of the logical relationships between events, the flexible logic, and the calculation of the system fault probability are realized. Finally, the significance of the research is discussed. The research shows that SFEP possesses a contradictory unity; there are essential differences between logical relationships and evolutionary conditions. The "and-or" logical relationships between cause and result events are divided into four types, and their extension representation and system fault probability calculation methods are obtained. All 20 kinds of flexible logic can be obtained by the superposition of "and/or" logic, and their extension representation and system fault probability calculation are realized. The paper realizes the description of multiple logical relationships of multi-cause-result events. The significance lies in revealing the mechanism of interaction between events through formal and quantitative methods, and providing methods and techniques for system fault analysis.

Keywords: safety system engineering; event logic; system fault evolution; flexible logic; extension representation

收稿日期: 2025-09-10. 网络出版日期: 2026-07-09.

基金项目: 辽宁省属本科高校基本科研业务费项目 (LJ212410144051, LJ212410144032); 辽宁省科技计划联合计划 (自然科学基金-面上项目)(2025-MSLH-584).

通信作者: 李莎莎. E-mail: lslnu@163.com.

存在的事物即为系统,任何系统存在的意义都是需要完成预定目标。完成预定目标的能力随着内外部因素的变化而变化。笔者将该过程称为系统故障演化过程(system fault evolution process,

SFEP)^[1]。其包含经历事件、影响因素、逻辑关系和演化条件,本身具有较为复杂的层次和结构^[2]。即便在 SFEP 确定后,经历事件、影响因素和演化条件仍有较大变化,而逻辑关系则相对固定。但逻辑关系表征的事件间的相互作用可能是隐含的,非线性的多重关系叠加,表象上体现为复杂的逻辑关系集合。研究事件间逻辑关系面临诸多问题。传统逻辑分析依赖经验,难以应对多原因—多结果的动态耦合及其不确定性;事件间相互作用复杂,是多重关系叠加,现有方法难以准确描述。同时, SFEP 的系统功能在可靠和失效间变化,传统逻辑难以体现这种对立统一状态。

目前关于系统故障、风险、事故等过程中蕴含的逻辑关系研究不多。在复杂系统研究中,故障、风险与事故的演化本质是事件通过逻辑关系的动态耦合。其建模和分析是揭示系统失效机理的关键。故障诊断与逻辑关系方面, Santos 等^[3]引入因果矩阵对船舶控制系统进行模型检验,验证故障传播路径; Bhattacharya 等^[4]将模糊逻辑与因子比较法结合,处理安全评估中的不确定性;崔铁军等^[5]提出基于量子态叠加的柔性逻辑统一表达式,突破二值逻辑限制; Koutsaki 等^[6]利用分类逻辑进行交通事故预测; Balasubramanian 等^[7]整合 ECC 与机器学习实现 UART 故障诊断; Ghafouri 等^[8]开发无量纲特征模糊模型诊断滚动轴承故障; Hoge 等^[9]提出规则引导 Transformer,将逻辑规则嵌入深度学习。风险评估与逻辑关系方面, Li 等^[10]构建多源数据融合模型分析信息安全事件; 杨震等^[11]提出基于混合因果逻辑(HCL)的化工园区雷击风险评估方法; 郭梨等^[12]将 HCL 用于尾矿坝事故知识图谱构建,实现因果逻辑结构化表示; Hu 等^[13]扩展 HCL 方法,提出多灾害 Natech 风险评估框架; Borzooei 等^[14]融合形态学信息与深度学习评估工业废水处理风险; Roccetti^[15]关注逻辑悖论在疫苗风险评估中的影响; Yang 和 Li^[16]耦合贝叶斯网络与马尔可夫链,实现换道风险动态评估。事故分析与逻辑关系方面, 韩广华等^[17]探讨应急管理敏捷能力生成逻辑; 胡锋^[18]分析新污染物管控立法逻辑与进路; 张建等^[19]剖析“弱预防性”生成机制; 单永航等^[20]用集成学习预测事故严重程度; 刘朱紫等^[21]用逻辑回归分析老年行人致伤因素; Balasubramanian 等^[7]、Ghafouri 等^[8]、Habib 等^[22]和 Rahim 等^[23]分别针对通信、轴承、光伏和变压器提出模糊逻辑或机器学习诊断模型,为推演设备故障致灾提供逻辑框架。这些文献通过不同手段对各类系统故障过程

中的各类逻辑关系展开研究。主要方法包括故障数据统计、系统工程方法、数值模拟分析、通用逻辑分析等。这些成果取得了显著成效,但也面临一些问题。正如前述总结, SFEP 本身具有复杂性,特别是其中的事件间逻辑关系,需要考虑 SFEP 的动态变化,以及系统功能状态的矛盾统一情况。因此,需要建立适合的方法对事件间逻辑关系予以定性表示和定量计算。

为解决上述问题,笔者基于前期对经历事件、影响因素和逻辑关系的可拓表示基础上,研究了逻辑关系的可拓表示。并基于此对柔性逻辑形成的事件发生逻辑关系进行了可拓表示。建立了可拓表示方法和系统故障概率计算方法。研究对系统故障演化和柔性逻辑与可拓学的结合有一定贡献。

1 系统故障演化过程的可拓学原理

2018 年笔者提出了 SFEP 及其空间故障网络数学模型,作为空间故障树理论的第 3 部分。概念上 SFEP 包括 4 部分,经历事件、影响因素、逻辑关系和演化条件。SFEP 是系统功能状态的动态过程集合,而系统功能状态是 SFEP 的时间切片。其观察维度不同, SFEP 侧重整体演化趋势,系统功能状态聚焦瞬时状态。相关概念具体请参见笔者文献[1-2]。2020 年笔者在研究 SFEP 时,基于可拓学描述了 SFEP,建立了 SFEP 的可拓学基础^[24]。其核心是通过可拓学的基元理论、拓展分析原理等,构建 SFEP 的形式化表示与分析方法。从核心概念、可拓表示、分析原理 3 方面进行总结如下。

1) 核心概念是 SFEP 的系统功能状态与可拓学结合。系统功能状态的本质在于系统的存在意义,即实现预定功能,其功能状态分为可靠(完成功能)和失效(未完成或功能降低)2 种。两者是矛盾统一的关系,通过物质、能量和信息的传递相互转化。可拓学的三大理论基础(基元理论、可拓集理论和可拓逻辑)提供了形式化 SFEP 的模型与分析工具。基元理论用于描述事件、动作及传递关系;可拓集理论通过关联函数量化状态;可拓逻辑处理矛盾问题的推理规则。

2) SFEP 的可拓表示使用基本单元与传递元。SFEP 的基本单元可分解为原因事件—演化条件—结果事件的三元组,每个单元包含由动作和对象构成的事件。演化条件是原因事件导致结果事件发生的因果关系,其数值为传递概率,表示为复合关系元,称为传递元,表征了演化条件的

作用。上述基本单元、传递元及复合关系元的可拓描述见文献 [24]。

3) 研究了传递元的拓展分析原理。包括发散分析原理、相关分析原理、蕴含分析原理和可扩分析原理, 证明了 SFEP 在可拓表示后仍具有上述性质。SFEP 的可拓学原理研究意义在于为 SFEP 提供普适性的解决矛盾问题的方法论。

2 演化条件的可拓表示

文献 [24] 的核心研究成果是通过关系元建立了传递元, 而传递元是实现演化条件的可拓表示基础。演化条件的可拓表示由原因事件的复合事

元、结果事件的复合事元和复合关系元构成, 公式表示为

$$R = \begin{bmatrix} O_r, & c_{r1}, & (O_a^c, C_a^c, (O_m^c, C_m^c, V_m^c)) \\ & c_{r2}, & (O_a^r, C_a^r, (O_m^r, C_m^r, V_m^r)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R 为复合关系元 (演化条件), O_r 为关系, C_r 为特征, $C_r = \{c_{r1}, c_{r2}\}$, V_r 为量值, $V_r = \{(O_a^c, C_a^c, (O_m^c, C_m^c, V_m^c)), (O_a^r, C_a^r, (O_m^r, C_m^r, V_m^r))\}$ 。 c_{r1} 为前项 (原因), c_{r2} 为后项 (结果), O_a^c 为原因动作, C_a^c 为原因特征 (集合)。 O_m^c, C_m^c, V_m^c 为原因事件物元, O_m^c 为物, C_m^c 为特征 (集合), V_m^c 为量值 (集合); 上角标 c 代表原因事件, 上角标 r 代表结果事件。文献 [24] 给出了实例化的复合关系元表示的演化条件, 公式表示为

$$R = \begin{bmatrix} \text{演化关系, 前项,} & \begin{bmatrix} \text{原因动作,} & \dots \\ \text{接受对象,} & \dots \\ \text{支配对象,} & \begin{bmatrix} \text{原因对象,} & c_1^c & v_1^c \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ & c_i^c & v_i^c \end{bmatrix} \\ \text{发生概率,} & \text{量值} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \\ \text{后项,} & \begin{bmatrix} \text{结果动作,} & \dots \\ \text{接受对象,} & \dots \\ \text{支配对象,} & \begin{bmatrix} \text{结果对象,} & c_1^r & v_1^r \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ & c_i^r & v_i^r \end{bmatrix} \\ \text{发生概率,} & \text{量值} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \\ p_i, & \text{量值} \\ \vdots & \dots \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 p_i 表示传递概率。

式 (2) 为表示 SFEP 演化条件的复合关系元; 是 SFEP 中的最小单元, 即原因事件-演化条件-结果事件的三元组。因此文献 [24] 实现了 SFEP 中经历事件、影响因素和演化条件的可拓表示。

3 逻辑关系的可拓表示

根据前文可知, SFEP 由 4 部分组成。文献 [24]

中实现了经历事件、影响因素和演化条件的可拓表示, 这里对逻辑关系的可拓表示进行研究。

首先需要说明, 逻辑关系和演化条件代表的事件间关系有本质区别。前者代表了原因事件之间以及结果事件之间的作用关系。因此, 逻辑关系是同级事件之间的关系。演化条件代表了原因事件导致结果事件的因果关系, 是具有先后顺序的。根据文献 [25] 可总结两者之间的区别, 如表 1 所示。

表 1 逻辑关系和演化条件的区别
Table 1 Differences in logical relationships and evolution conditions

比较维度	逻辑关系	演化条件
数理性质	抽象规则(与/或/非等逻辑运算符)	具体参数(传递概率值)
数学表示	逻辑矩阵(标记事件间作用方式)	结构矩阵(有向线段及其权重)
功能作用	决定演化过程的分支结构和事件叠加方式	决定事件触发的阈值条件和实际发生可能性
作用影响	逻辑叠加对系统功能状态不确定性的影响	条件概率对演化过程定量分析的传递影响

尽管存在上述区别, 但仍可通过演化条件的复合关系元来建立逻辑关系的可拓表示形式。利用可拓方式描述多原因事件之间的作用关系

叠加, 以及叠加后造成的多结果事件的发生情况。逻辑关系的可拓表示方法构建过程如图 1 所示。

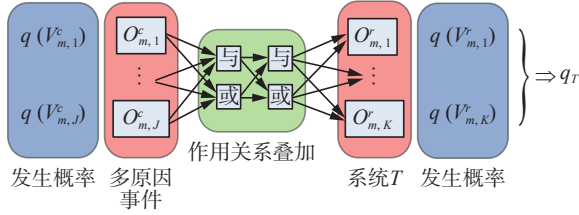


图 1 可拓表示方法构建过程

Fig. 1 Extension representation construction process

这里采用“与或”逻辑关系进行说明。如图 1 所示, $O_{m,1}^c \sim O_{m,J}^c$ 为原因事件, 对应的发生概率分别为 $q(V_{m,1}^c) \sim q(V_{m,J}^c)$; $O_{m,1}^r \sim O_{m,K}^r$ 为结果事件, 对应的发生概率分别为 $q(V_{m,1}^r) \sim q(V_{m,K}^r)$; 结果事件构成的系统 T 的故障发生概率为 q_T 。图 1 中, 原因事件之

间的关系有“与或”2 种, 结果事件之间的关系也是“与或”2 种。它们再次组合得到 4 种逻辑关系类型, 包括原因事件与/结果事件与的 $L_{\text{and/and}}$ 、原因事件与/结果事件或的 $L_{\text{and/or}}$ 、原因事件或/结果事件或的 $L_{\text{or/or}}$ 、原因事件或/结果事件与的 $L_{\text{or/and}}$ 。例如 $L_{\text{and/or}}$ 表示所有原因事件都必须发生才能导致结果事件之一发生。实现事件间逻辑关系的可拓表示, 要解决 2 个问题, 一是 $L_{\text{and/and}}$ 、 $L_{\text{and/or}}$ 、 $L_{\text{or/or}}$ 和 $L_{\text{or/and}}$ 的可拓表示, 二是这 4 种情况下的系统故障概率 q_T 的算法。如下针对这 4 种类型进行讨论, 但在这之前需要对式 (2) 进行化简得到适当的可拓表示结构, 公式表示为

$$L = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} l^c & C_{a,1}^c & \begin{bmatrix} O_{m,1}^c \\ \vdots \\ O_{m,J}^c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} C_{m,1}^c \\ \vdots \\ C_{m,J}^c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} V_{m,1}^c \\ \vdots \\ V_{m,J}^c \end{bmatrix} \\ \hline & & \text{logic} & & \text{value} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} l^c & C_{a,1}^c & \begin{bmatrix} O_{m,1}^c \\ \vdots \\ O_{m,J}^c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} C_{m,1}^c \\ \vdots \\ C_{m,J}^c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} q(V_{m,1}^c) = q(v_{m,1,1}^c, \dots, v_{m,1,J_{m,1}}^c) \\ \vdots \\ q(V_{m,J}^c) = q(v_{m,J,1}^c, \dots, v_{m,J,J_{m,1}}^c) \end{bmatrix} \\ \hline & & \text{logic} & & \text{value} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} l^r & C_{a,1}^r & \begin{bmatrix} O_{m,1}^r \\ \vdots \\ O_{m,K}^r \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} C_{m,1}^r \\ \vdots \\ C_{m,K}^r \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} q(V_{m,1}^r) = q(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,J_{m,1}}^r) \\ \vdots \\ q(V_{m,K}^r) = q(v_{m,K,1}^r, \dots, v_{m,K,J_{m,1}}^r) \end{bmatrix} \\ \hline & & \text{logic} & & \text{value} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{logic value, } C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c \\ \text{logic value, } C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} q(v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,J_{m,1}}^c) \Rightarrow \\ q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,J_{m,1}}^r) \Rightarrow \\ q_T \end{array} \right] \quad (3)$$

式 (3) 由式 (1) 和 (2) 简化得到。 L 为逻辑关系的可拓表示, l^c 表示原因事件逻辑, l^r 表示结果事件逻辑。式 (2) 中的前项与后项分别与原因动作和结果动作一一对应, 可去掉 $C_r = \{c_{r1}, c_{r2}\}$ 。施动对象、接受对象不常出现, 因此, 原因动作与支配对象一一对应^[24]。且支配对象与原因对象一一对应。原因事件由原因对象和原因动作共同表示, 可使用 $O_{m,j}^c$ 表示原因事件。logic 表示逻辑, value 表示逻辑值。那么就得到了式 (3) 的左侧部分。其中原因事件有 J 个, 结果事件有 K 个。对于原因事件 $O_{m,j}^c$ 可能具有多个特征, 其集合为 $C_{m,j}^c$; 对应的多个量值, 其集合为 $V_{m,j}^c$ 。由于 SFEP 的事件发生概率是所有因素 (特征) 的综合作用。因此, 量值 $v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,J_{m,1}}^c$ 共同决定了原因事件 $O_{m,j}^c$ 的发生概率 $q(V_{m,j}^c)$; $I_{m,1}^c$ 表示原因事件的特征数量, 与量值的数量相同; 进而得到式 (3) 中间的部分。进一步简化, 考虑到 $C_{a,j}^c$ 、 $O_{m,j}^c$ 、 $C_{m,j}^c$ 和 $q(V_{m,j}^c)$ 的一一对应关系; 及 $C_{a,j}^r$ 、 $O_{m,j}^r$ 、 $C_{m,j}^r$ 和 $q(V_{m,j}^r)$ 的一一对应关系, 为表达一致, 使用 $C_{a,j}^c$ 表示原因事件, $C_{a,k}^r$ 表示结果事件。可得式 (3) 右侧的逻辑关系可拓表示形式以及系统故障概率 q_T 。

基于式 (3) 对 $L_{\text{and/and}}$ 、 $L_{\text{and/or}}$ 、 $L_{\text{or/or}}$ 和 $L_{\text{or/and}}$ 建立可拓表示方法及系统故障概率计算方法。

1) 原因事件与/结果事件与

物理意义为所有原因事件同时发生导致多个结果事件同时发生。根据式 (3), logic value 分别为与“and”和与“and”。那么 $L_{\text{and/and}}$ 逻辑关系的可拓表示为

$$L_{\text{and/and}} = \left[\begin{array}{c} \text{and, } C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c \\ \text{and, } C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \frac{\text{and, } C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{C_{a,1}^r} + \frac{\text{and, } C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{C_{a,2}^r} \\ + \dots + \frac{\text{and, } C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{C_{a,K}^r} \end{array} \right] \quad (4)$$

$$q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,J_{m,1}}^r) = \prod_{j=1}^J q(V_{m,j}^c) = \prod_{j=1}^J q(v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,J_{m,1}}^c)$$

$$q_T = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,J_{m,1}}^r))$$

式 (4) 说明, $C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c$ 同时发生, 造成 $C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r$ 同时发生。这时 $C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c$ 均同时发生并分别导致 $C_{a,1}^r, C_{a,2}^r, \dots, C_{a,K}^r$ 分别发生。 $\prod_{j=1}^J q(v_{m,j,1}^c, \dots,$

$v_{m,j,I_{m,1}}^c$) 表示所有原因事件同时发生的概率, 与结果事件 $q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ 的发生概率相同; 同时就系统故障而言, $q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ ($k=1, 2, \dots, K$) 的 K 个结果事件之一发生可导致系统故障发生, 得到 $q_T = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r))$ 。因此, 逻辑关系 $L_{\text{and/or}}$ 的可拓表示如式 (4) 所示, 系统故障概率为 $q_T = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r))$ 。

2) 原因事件与/结果事件或

物理意义为所有原因事件同时发生导致结果事件之一发生。根据式 (3), logic value 分别为与“and”和或“or”。那么 $L_{\text{and/or}}$ 逻辑关系的可拓表示为

$$L_{\text{and/or}} = \left[\frac{\text{and}, C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{\text{or}, C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r} \right] = \left[\frac{\text{and}, C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{C_{a,1}^r} \right] / \left[\frac{\text{and}, C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{C_{a,2}^r} \right] / \dots / \left[\frac{\text{and}, C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{C_{a,K}^r} \right] \quad (5)$$

$$q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r) = \prod_{j=1}^J q(V_{m,j}^c) =$$

$$\prod_{j=1}^J q(v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,I_{m,1}}^c)$$

$$q_T = q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r), k \in [1, 2, \dots, K]$$

式 (5) 说明, $C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c$ 同时发生, 造成 $C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r$ 之一发生。 $\prod_{j=1}^J q(v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,I_{m,1}}^c)$ 表示所有原因事件同时发生的概率, 与有且只有一个结果事件的发生概率 $q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ 相同; 同时就系统故障而言, $q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ ($k=1, 2, \dots, K$) 的 K 个结果事件只能发生一个, 导致系统故障发生, 得到 $q_T = q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ 。因此, 逻辑关系 $L_{\text{and/or}}$ 的可拓表示如式 (5) 所示, 系统故障概率为 $q_T = q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ 。

3) 原因事件或/结果事件或

物理意义为所有原因事件之一发生导致结果事件之一发生。根据式 (3), logic value 分别为或“or”和或“or”。那么 $L_{\text{or/or}}$ 逻辑关系的可拓表示为

$$L_{\text{or/or}} = \left[\frac{\text{or}, C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{\text{or}, C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r} \right] = \left[\frac{C_{a,1}^c}{C_{a,1}^r} \right] / \left[\frac{C_{a,2}^c}{C_{a,2}^r} \right] / \dots / \left[\frac{C_{a,J}^c}{C_{a,J}^r} \right] / \dots / \left[\frac{C_{a,K}^c}{C_{a,K}^r} \right] \quad (6)$$

$$q_T = q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r) = q(v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,I_{m,1}}^c), k \in [1, 2, \dots, K], j \in [1, 2, \dots, J]$$

式 (6) 说明, $C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c$ 之一发生, 造成

$C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r$ 之一发生。 $q(v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,I_{m,1}}^c)$ 表示所有原因事件之一发生的概率, 与有且只有一个结果事件的发生概率 $q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ 相同; 同时就系统故障而言, $q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ ($k=1, 2, \dots, K$) 的 K 个结果事件只能发生一个, 导致系统故障发生, 得到 $q_T = q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ 。因此, 逻辑关系 $L_{\text{or/or}}$ 的可拓表示如式 (6) 所示, 系统故障概率为 $q_T = q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ 。

4) 原因事件或/结果事件与

物理意义为原因事件之一发生导致所有结果事件同时发生。根据式 (3), logic value 分别为或“or”和与“and”。那么 $L_{\text{or/and}}$ 逻辑关系的可拓表示为

$$L_{\text{or/and}} = \left[\frac{\text{or}, C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c}{\text{and}, C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r} \right] = \left[\frac{C_{a,1}^c}{C_{a,1}^r} \right] + \left[\frac{C_{a,2}^c}{C_{a,2}^r} \right] + \dots + \left[\frac{C_{a,J}^c}{C_{a,J}^r} \right] + \dots + \left[\frac{C_{a,K}^c}{C_{a,K}^r} \right] \quad (7)$$

$$q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r) = q(v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,I_{m,1}}^c), j = \{1, 2, \dots, J\} \forall j, k \in [1, 2, \dots, K]$$

$$q_T = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)), j \in [1, 2, \dots, J]$$

式 (7) 说明, $C_{a,1}^c, \dots, C_{a,J}^c$ 之一发生, 造成 $C_{a,1}^r, \dots, C_{a,K}^r$ 同时发生。 $q(v_{m,j,1}^c, \dots, v_{m,j,I_{m,1}}^c)$ 表示原因事件之一发生的概率, 与所有结果事件的发生概率 $q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ 相同; 同时就系统故障而言, $q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r)$ ($k=1, 2, \dots, K$) 的 K 个结果事件同时发生导致系统故障发生, 得到 $q_T = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r))$ 。因此, 逻辑关系 $L_{\text{or/and}}$ 的可拓表示如式 (7) 所示, 系统故障概率为 $q_T = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - q(v_{m,k,1}^r, \dots, v_{m,k,I_{m,1}}^r))$ 。

上述过程实现了 4 种逻辑关系类型的可拓表示和系统故障概率计算。对上述逻辑关系的可拓表示方法构造过程, 需要说明如下几点。1) 由于式 (2) 中没有事件的对应表示, 而对象和动作可构成事件; 同时 $C_{a,j}^c$ 、 $O_{m,j}^c$ 、 $C_{m,j}^c$ 和 $q(V_{m,j}^c)$ 是一一对应的; $C_{a,j}^r$ 、 $O_{m,j}^r$ 、 $C_{m,j}^r$ 和 $q(V_{m,j}^r)$ 也是一一对应的, 因此在分析过程中统一使用了 $C_{a,j}^c$ 和 $C_{a,j}^r$ 表示原因事件和结果事件。2) 可拓表示和系统故障概率计算中未考虑传递概率 p_i , 即设 $p_i=1$ 。如果需要可设 $q = p_i \times q$ 代入进行修正, 但 p_i 是否存在并不改变逻辑关系的可拓表示。3) 上述可拓表示和系统故

障概率计算只考虑了“与或”逻辑关系。因为任何复杂的逻辑关系都可使用“与或”逻辑进行叠加得到。目前 SFEP 中最复杂的事件间逻辑关系可使用柔性逻辑表示,而文献 [5,26] 证明了 20 种柔性逻辑关系可使用“与或”逻辑变形得到。

上述事件间逻辑关系的可拓表示分析流程见图 2 所示。

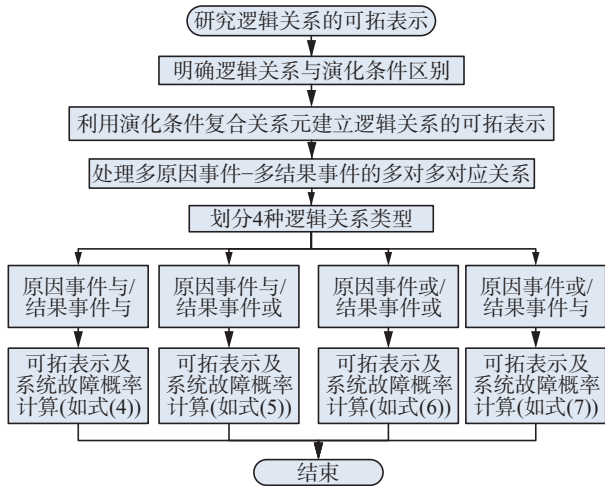


图 2 逻辑关系的可拓表示分析流程

Fig. 2 Extension representation analysis flow of logical relationships

4 柔性逻辑的可拓表示

文献 [5,26] 指出, SFEP 中的事件间关系可能是复杂的,这种复杂性体现在各原因事件对结果事件发生的作用不同上。该情况可使用泛逻辑学中的柔性逻辑表示。根据文献 [5,26-27],可总结柔性逻辑在描述事件间逻辑关系时的优点,包括如下几方面。

1) 能处理不确定性。柔性逻辑通过引入误差系数、广义相关系数和相对权重系数参数,能表征不确定性。包括因素不确定性:不同因素可能隐含多种特征,柔性逻辑通过参数调节反映因素的变异影响;数据不确定性:信息不完整或冲突时,允许结果事件的发生概率呈现非刚性逻辑;

演化不确定性:SFEP 中事件关系和传递概率的动态变化可通过三维逻辑谱描述。

2) 能保留完整原始信息。与数理形式逻辑需要抽象问题不同,柔性逻辑无需牺牲信息来构建刚性逻辑,这对智能分析尤为重要。

3) 支持多逻辑关系的动态叠加。柔性逻辑可同时处理 20 种逻辑关系,并通过量子态叠加描述事件间的复杂作用交互。在 SFEP 中,原因事件可能通过多种逻辑关系导致结果事件发生,柔性逻辑统一表达式能综合各独立逻辑并实现作用叠加。

4) 能适应复杂演化过程。SFEP 中事件的多层网络结构和动态演化特征可通过柔性逻辑的“运算完整簇”建模。

可见柔性逻辑在保留信息、处理动态不确定性和支持复杂逻辑关系等方面显著优于传统数理逻辑,为系统故障智能分析与预测提供了有效工具。

目前柔性逻辑有 20 种,笔者在文献 [28] 中将这 20 种柔性逻辑进行转化,得到了对应的 20 种事件发生逻辑关系。他们给出了事件发生逻辑关系描述,都是两原因事件与一结果事件之间的逻辑关系。文献 [26] 指出,任何多原因事件导致结果事件的发生过程都可转化为两两原因事件造成结果事件过程的叠加。因此,当有多个原因事件出现时,可根据不同原因事件两两关系运用事件发生逻辑关系进行分别描述,再进一步叠加得到所需结果。虽然式 (4)~(7) 是多原因事件与多结果事件的逻辑关系描述,但也可表示为两两事件的逻辑关系叠加。另外,由表 2 的事件发生逻辑关系描述可知,尽管柔性逻辑表示的事件间逻辑关系有 20 种,但这些都可通过简单的“与或”逻辑变化而成。那么,多原因事件与多结果事件的“与或”逻辑关系可用可拓表示;而多对多的逻辑关系又可拆分为简单的两两“与或”关系;同时考虑到 20 种柔性逻辑同样可表示为简单的两两“与或”关系。因此,表 2 中的 20 种柔性逻辑同样可使用可拓表示。

表 2 20 种事件发生逻辑关系

Table 2 Logical relationship of 20 kinds of events

编号	逻辑描述	事件发生逻辑关系描述	编号	逻辑描述	事件发生逻辑关系描述
1	$Z=\square 0$ 恒假	$P(q_x, q_y)=0$	11	$Z=x \wedge y$ 与	$P(q_x, q_y)=q_x q_y$
2	$Z=\neg(x \vee y)$ 非或	$P(q_x, q_y)=1-q_x-q_y+q_x q_y$	12	$Z=x \odot y$ 组合	$P(q_x, q_y)=\begin{cases} P \leq q_x q_y, q_x, q_y > e \\ P \geq q_x + q_y - q_x q_y, q_x, q_y < e \\ q_x q_y \leq P \leq q_x + q_y - q_x q_y, q_x = q_y = e \end{cases}$
3	$Z=\neg(x \otimes y)$ 非平均	$P(q_x, q_y)=1-(q_x/2+q_y/2)$	13	$Z=x \leftrightarrow y$ 等价	$P(q_x, q_y)=q_x \text{ or } q_y$
4	$Z=\neg(y \rightarrow x)$ 非蕴含 2	$P(q_x, q_y)=q_x - q_x q_y$	14	$Z=y$ 指 y	$P(q_x, q_y)=q_y$

续表 2

编号	逻辑描述	事件发生逻辑关系描述	编号	逻辑描述	事件发生逻辑关系描述
5	$Z=\neg x$ 非 x	$P(q_x, q_y)=1-q_x$	15	$Z=x \rightarrow y$ 蕴含1	$P(q_x, q_y)=1-q_x+q_x q_y$
6	$Z=\neg(x \rightarrow y)$ 非蕴含1	$P(q_x, q_y)=q_x-q_x q_y$	16	$Z=x$ 指 x	$P(q_x, q_y)=q_x$
7	$Z=\neg y$ 非 y	$P(q_x, q_y)=1-q_y$	17	$Z=y \rightarrow x$ 蕴含2	$P(q_x, q_y)=1-q_y+q_x q_y$
8	$Z=\neg(x \leftrightarrow y)$ 非等价	$P(q_x, q_y)=1-q_x \text{ or } q_y$ $P(q_x, q_y)=$	18	$Z=x \oplus y$ 平均	$P(q_x, q_y)=q_x/2+q_y/2$
9	$Z=\neg(x \odot y)$ 非组合	$\begin{cases} P \leq 1-q_x q_y, q_x, q_y > e \\ P \geq 1-q_x-q_y+q_x q_y, q_x, q_y < e \\ 1-q_x q_y \leq P \leq 1-q_x-q_y+q_x q_y, q_x=q_y=e \end{cases}$	19	$Z=x \vee y$ 或	$P(q_x, q_y)=q_x+q_y-q_x q_y$
10	$Z=\neg(x \wedge y)$ 非与	$P(q_x, q_y)=1-q_x q_y$	20	$Z=1$ 恒真	$P(q_x, q_y)=1$

如表 2 中逻辑描述 $Z=x \vee y$ 或, 对应的事件发生逻辑关系描述为 $P(q_x, q_y)=q_x+q_y-q_x q_y$, 其可拓表示可使用式 (7) 实现, 过程为

$$L_{\text{or/and}} = \left[\frac{\text{or}, C_{a,x}^c, C_{a,y}^c}{\text{and}, C_{a,1}^r} \right] = \left[\frac{C_{a,x}^c}{C_{a,1}^r} \right] / \left[\frac{C_{a,y}^c}{C_{a,1}^r} \right]$$

$$\begin{aligned} q_x(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,l_{m,1}}^r) &= q(v_{m,x,1}^c, \dots, v_{m,x,l_{m,1}}^c), \\ q_y(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,l_{m,1}}^r) &= q(v_{m,y,1}^c, \dots, v_{m,y,l_{m,1}}^c), \\ j &= \{x, y\} \forall j, k=1 \end{aligned} \quad (8)$$

$$q_T = 1 - \left(1 - q_x(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,l_{m,1}}^r) \right) \times \left(1 - q_y(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,l_{m,1}}^r) \right) =$$

$$q_x(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,l_{m,1}}^r) + q_y(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,l_{m,1}}^r) - q_x(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,l_{m,1}}^r) \times q_y(v_{m,1,1}^r, \dots, v_{m,1,l_{m,1}}^r)$$

则逻辑描述 $Z=x \vee y$ 或的可拓表示为式 (8) 中的 $L_{\text{or/and}} = \left[\frac{\text{or}, C_{a,x}^c, C_{a,y}^c}{\text{and}, C_{a,1}^r} \right]$, 系统故障概率为式 (8) 中的 q_T 。同理, 可对表 2 中的 20 种柔性逻辑进行可拓表示。通过上述过程可实现 SFEP 中, 多原因事件导致多结果事件发生的逻辑关系可拓表示; 同时也实现了事件发生逻辑关系的柔性逻辑可拓表示。前者解决了事件多样性问题, 后者解决了逻辑多样性问题, 都实现了可拓表达。

上述柔性逻辑的可拓表示分析流程见图 3 所示。

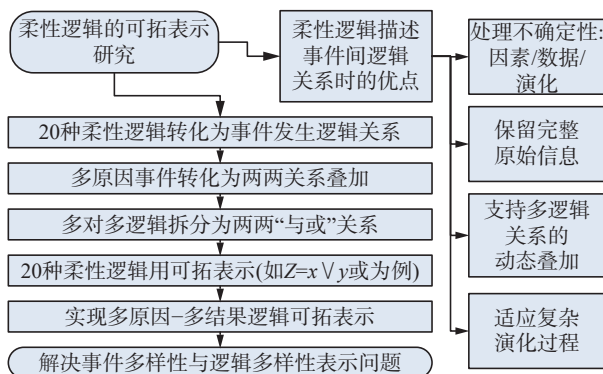


图 3 柔性逻辑的可拓表示分析流程

Fig. 3 Extension representation analysis flow of flexible logic

5 讨论

SFEP 中事件间逻辑关系的可拓表示是基于可拓学理论解决复杂系统故障分析难题的关键技术, 其核心意义在于通过形式化、定量化方法揭示事件间作用机制, 为系统故障分析提供普适性框架。

1) 有助于消除传统逻辑分析局限, 构建统一描述体系, 解决了复杂逻辑关系的形式化表达问题。SFEP 中事件间逻辑关系是演化的核心驱动。传统方法依赖的经验性逻辑符号或简化模型难以描述多原因-多结果的动态耦合作用及不确定性。可拓通过复合关系元与传递元, 将逻辑关系转化为可计算的数学结构 (如式 (4)~(7)), 实现了对多逻辑的统一建模。融合矛盾统一规律, 建立了系统故障研究范式。SFEP 是可靠与失效的矛盾统一体, 逻辑关系的可拓表示通过基元理论, 将事件视为“物元+事元”的复合单元, 逻辑关系视为“关系元”的衍生形式, 使可靠性与失效性在同一模型中相互关联 (如式 (3)), 为研究“可靠-失效”博弈提供了方法。

2) 有助于量化逻辑的不确定性, 实现智能分析与推理。建立了处理多类型逻辑关系的普适性框架, 实现了基础逻辑的标准化建模。通过“与/或”逻辑的可拓表示, 将复杂演化过程拆解为基本单元的組合, 实现对 SFEP 的分层分析。实现了柔性逻辑的定量化表达。针对 SFEP 中事件作用的不确定性, 可拓表示结合泛逻辑学的柔性逻辑, 通过引入误差系数、广义相关系数等参数, 将柔性逻辑转化为可计算的概率表达式。保留了原始信息, 避免了传统数理逻辑抽象过程中的信息损失。逻辑关系的可拓表示与传递元的拓展分析原理相结合, 实现了故障路径搜索、概率传播计算和不确定性分析等能力, 能支撑 SFEP 的动态推演与预测。

3) 有助于复杂系统可靠性设计与安全防控, 实现故障诊断智能化。SFEP 常呈现多源并发、链式传播的特点, 传统方法难以实时解析复杂逻辑。可拓表示提供了快速建模工具和故障诊断算法。通过标准化的逻辑关系模板快速构建 SFEP, 结合传递元的相关分析原理, 识别关键事件与薄弱环节, 提升故障定位效率, 也能挖掘隐性逻辑关系, 支持动态风险评估。

除上述优点外, 所提方法也存在不足之处。模型复杂度较高: 复合关系元与传递元的数学模型涉及多参数耦合, 需依赖精确的传递概率和逻辑参数, 实际数据获取与参数校准难度较大。柔性逻辑局限: 尽管 20 种柔性逻辑可通过“与或”逻辑叠加实现, 但部分复杂逻辑的参数调节需依赖领域经验, 可能影响模型泛化能力。动态演化实时响应: 对 SFEP 中影响因素动态变化的实时响应能力尚未完全明确, 需进一步提升适应性。

解释 20 种柔性逻辑基于逻辑关系的可拓表示过程。逻辑关系的可拓表示基于演化条件的可拓表示(复合关系元); 演化条件的可拓表示由原因事件的复合事元、结果事件的复合事元和复合关系元构成; 复合事元、结果事件的复合事元是由基本物元和事元表示的。进一步地由已有研究可知, 20 种柔性逻辑关系可由简单的与或逻辑关系表示, 而与或逻辑关系可由逻辑关系的 4 种可拓形式表示。因此可得“表 2 中的 20 种柔性逻辑同样可使用可拓表示”的结论, 式 (8) 也给出了逻辑描述 $Z=x \vee y$ 或的可拓表示。对于基元与复合事元、结果事件的复合事元的关系, 在文献 [24] 中进行了说明, 这里不给出具体表示。

综上, SFEP 中事件间逻辑关系的可拓表示具有重要意义。它基于可拓学, 以形式化、量化方法揭示事件间作用机制, 构建普适框架。SFEP 能建立统一描述体系, 量化逻辑不确定性, 实现智能分析推理, 有助于复杂系统设计与故障防控。

6 结束语

该论文基于可拓学原理, 建立了 SFEP 中事件间逻辑关系及 20 种柔性逻辑的可拓表示方法, 给出了系统故障概率计算方式, 为复杂系统故障分析提供了形式化、量化工具。具体结论如下:

1) 总结了可拓学在 SFEP 方面的研究成果。系统功能状态的可靠与失效是矛盾统一的整体, 可拓学的基元、可拓集、可拓逻辑为其形式化建模提供工具。基本单元为原因事件-演化条件-

结果事件三元组, 事件是复合事元, 演化条件是复合关系元, 传递元具有发散、相关、蕴含及可扩性。演化条件通过关系元建立传递元表示, 实现了经历事件、影响因素和演化条件的可拓表示。为复杂系统故障分析奠定基础。

2) 研究了 SFEP 中逻辑关系的可拓表示。论述了逻辑关系与演化条件的本质差异, 并构建了逻辑关系的可拓表示方法和系统故障概率计算方法。研究认为以“与/或”逻辑为基础, 可将原因与结果事件的逻辑关系组合为 4 种类型。针对这些类型的逻辑关系, 建立了可拓表示方法; 同时, 通过可拓基元将各可拓表示转化为包含事件和逻辑关系的系统故障概率计算方法。

3) 研究了 SFEP 中事件间柔性逻辑的可拓表示。针对事件间复杂逻辑关系, 引入泛逻辑学的柔性逻辑进行表示。其优势在于处理因素、数据、演化的不确定性, 并能保留原始信息。实现了 20 种柔性逻辑及复杂演化过程建模, 并转化为事件发生逻辑关系。它们均能通过“与/或”逻辑叠加进行表示; 实现了柔性逻辑的可拓表示和系统故障概率计算。本研究能解决多原因-结果事件的多样性逻辑描述问题, 并讨论了研究意义。

根据可拓学特点, 研究在解决系统故障演化过程中的矛盾问题时具有广泛应用, 可将系统故障演化过程使用可拓学方法表示。进而对接可拓学已有研究成果、分析工具和方法, 实现故障演化过程中的矛盾分析。同时该研究也在一定程度上统一了系统故障演化、可拓学和泛逻辑的数学模型。未来可以进一步细化的研究方向包括: 1) 可拓学与 SFEP 矛盾适配研究。结合可拓基元理论, 细化故障事件可拓表示, 构建故障矛盾形式化模型, 探索不同故障矛盾的可拓推理规则。2) 可拓工具与 SFEP 应用。将可拓分析工具用于故障路径挖掘与概率计算, 构建可拓方法在 SFEP 矛盾分析中的应用流程。3) 三者数学模型统一。优化 SFEP、可拓学、泛逻辑兼容性, 细化柔性逻辑与可拓元转换, 构建一体化定量分析框架。

参考文献:

- [1] 崔铁军, 李莎莎. 系统故障演化过程最终事件状态及发生概率研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 1-7.
CUI Tiejun, LI Shasha. Study on target event state and occurrence probability of system fault evolution process[J]. China safety science journal, 2021, 31(8): 1-7.
- [2] 崔铁军, 李莎莎. 系统故障演化过程的内在因素-时间关系研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025,

- 39(1): 62–66.
- CUI Tiejun, LI Shasha. Research on the internal factor-time relationship of system fault evolution process[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (natural science)*, 2025, 39(1): 62–66.
- [3] SANTOS D C R, LÁZARO S D F, QUEIROZ D H M, et al. Model checking-aided design of ship control and monitoring system based on cause and effect matrix[J]. *Ocean engineering*, 2025, 342(P3): 123059–123059.
- [4] BHATTACHARYA K, SARKAR D, TRIPATHI K K. Assessing road safety challenges in rapidly urbanizing cities: a fuzzy logic and factor comparison method approach[J]. *Journal of legal affairs and dispute resolution in engineering and construction*, 2026, 18: 05025011.
- [5] 崔铁军, 李莎莎. 量子态叠加的事件发生柔性逻辑统一表达式研究[J]. *西北工业大学学报*, 2024, 42(4): 774–782.
- CUI Tiejun, LI Shasha. Study on unified expression of event occurrence flexible logic based on superposition quantum states[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2024, 42(4): 774–782.
- [6] KOUTSAKI E, VARDAKIS G, PAPADAKIS N. Event prediction using spatial-temporal data for a predictive traffic accident approach through categorical logic[J]. *Data*, 2025, 10(6): 85.
- [7] BALASUBRAMANIAN A, PRITICK V, PRAVINRAM T, et al. Autonomous UART recovery: integrating Hamming ECC with ML-driven fault diagnosis and shadow channel failover[J]. *Engineering research express*, 2026, 8(9): 095231.
- [8] GHAFOURI M, ARGHAND H A, MOHAMMADI S, et al. Dimensionless features and comprehensive fuzzy-based models for fault diagnosis of rolling element bearings under varying operating conditions[J]. *ISA transactions*, 2026, 173: 510–521.
- [9] HOGEA E, ONCHIS D M, YAN Ruqiang, et al. Rule guided transformers for dynamic knowledge adaptation in rotating machinery fault diagnosis[J]. *Advanced engineering informatics*, 2026, 72: 104444.
- [10] LI Zhenbo, ZHAO Yang. A multi-source data fusion model for real-time information security incident analysis and processing[J]. *Journal of circuits, systems and computers*, 2025, 34(8): 2550171.
- [11] 杨震, 梁峻铭, 郭梨, 等. 基于混合因果逻辑的化工园区雷击储罐风险评估[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(9): 174–182.
- YANG Zhen, LIANG Junming, GUO Li, et al. Risk assessment of chemical industrial park storage tanks struck by lightning based on hybrid causal logic methodology[J]. *China safety science journal*, 2024, 34(9): 174–182.
- [12] 郭梨, 高元, 吴昊, 等. 基于混合因果逻辑的尾矿坝事故知识图谱构建与应用[J]. *金属矿山*, 2025(1): 233–242.
- GUO Li, GAO Yuan, WU Hao, et al. Construction and application of tailings dam accident knowledge graph based on hybrid causal logic[J]. *Metal mine*, 2025(1): 233–242.
- [13] HU Xiangyang, SONG Xuanyu, TONG Ruipeng. A hybrid causal logic methodology for multi-hazard Natech risk assessment[J]. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2026, 103: 106063.
- [14] BORZOOEI S, SCABINI L, ZHU Junjie, et al. Morphology-informed deep learning for risk assessment of filamentous bulking in a full-scale industrial wastewater treatment plant[J]. *Environmental research*, 2026, 301: 124520.
- [15] ROCCETTI M. Logical paradoxes and epidemiologic inconsistencies in vaccine-related vitiligo risk assessment[J]. *Journal of allergy and clinical immunology*, 2026: 1.
- [16] YANG Quantao, LI Peikun. A dynamic risk assessment system for expressway lane-changing: integrating Bayesian networks and Markov chains under high-density traffic[J]. *Systems*, 2026, 14(3): 306.
- [17] 韩广华, 钱伟宏. 灾害风险应急管理敏捷能力的生成逻辑[J]. *上海交通大学学报 (哲学社会科学版)*, 2025, 33(3): 64–78.
- HAN Guanghua, QIAN Weihong. The logic of agile capabilities in disaster risk and emergency management[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (philosophy and social sciences)*, 2025, 33(3): 64–78.
- [18] 胡锋. 新污染物环境风险管控立法的逻辑与进路[J]. *环境污染与防治*, 2025, 47(3): 1–5.
- HU Feng. The logic and approach of legislation for environmental risk management and control of emerging contaminants[J]. *Environmental pollution and control*, 2025, 47(3): 1–5.
- [19] 张建, 胡春艳. 事故风险治理历程中的弱预防性生成机制[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(12): 24–33.
- ZHANG Jian, HU Chunyan. Generation mechanism of weak prevention in process of accident risk governance[J]. *China safety science journal*, 2024, 34(12): 24–33.

- [20] 单永航, 张希, 胡川, 等. 基于集成学习的交通事故严重程度预测研究与应用[J]. 计算机工程, 2024, 50(2): 33–42.
SHAN Yonghang, ZHANG Xi, HU Chuan, et al. Traffic accident severity prediction research and application based on ensemble learning[J]. Computer engineering, 2024, 50(2): 33–42.
- [21] 刘朱紫, 赵云龙, 邹铁方. 基于逻辑回归的老年行人事故致伤因素研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(8): 177–184.
LIU Zhuizi, ZHAO Yunlong, ZOU Tiefang. Study on accident causing factors of elderly pedestrians based on logistic regression[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2023, 40(8): 177–184.
- [22] HABIB K, EHSAN M S, MURTAZA A F. A novel and low-cost mechanism for comprehensive PV fault diagnosis using optocouplers[J]. Renewable energy, 2026, 261: 125268.
- [23] EL-RAHIM A G A, IBRAHIM K H, IBRAHIM M S, et al. Fuzzy logic-based transformer fault diagnosis employing roger's and IEC techniques[J]. Journal of engineering and applied science, 2025, 72(1): 265.
- [24] 崔铁军, 李莎莎. 系统故障演化过程的可拓学原理[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(5): 1–6.
CUI Tiejun, LI Shasha. An extension theory of system fault evolution process[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2020, 37(5): 1–6.
- [25] 李莎莎, 崔铁军. 基于三支决策和联系数的 SFEP 传递概率计算方法研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(7): 2483–2489.
LI Shasha, CUI Tiejun. Study on calculation method of SFEP transfer probability based on three branch decision and connection number[J]. Journal of safety and environment, 2024, 24(7): 2483–2489.
- [26] 崔铁军, 李莎莎. 空间故障网络的柔性逻辑描述[J]. 智能系统学报, 2021, 16(3): 552–559.
CUI Tiejun, LI Shasha. Flexible logic description of space fault network[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2021, 16(3): 552–559.
- [27] 何华灿, 何智涛. 泛逻辑学: 逻辑学的大一统理论[J]. 智能系统学报, 2025, 20(1): 185–197.
HE Huacan, HE Zhitao. Universal logic theory: the comprehensive theory of logic[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2025, 20(1): 185–197.
- [28] 崔铁军, 李莎莎. SFN 结构化表示中事件的柔性逻辑处理模式转化研究[J]. 应用科技, 2020, 47(6): 36–41.
CUI Tiejun, LI Shasha. Research on conversion of flexible logical processing pattern for events in the structure representation of SFN[J]. Applied science and technology, 2020, 47(6): 36–41.

作者简介:



崔铁军, 教授, 博士生导师, 博士, 博士后, 北京大学访问学者, 主要研究方向为系统安全学、智能理论、系统故障演化理论。主持和参与国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目等 8 项。获辽宁青年科技奖、辽宁省优秀科技工作者等; 以第一完成人获省部级及学会科技进步奖一等奖 2 项、二等奖 2 项、三等奖 5 项。获发明专利授权 30 项, 出版学术专著 10 部。E-mail: ctj.159@163.com。



李莎莎, 副教授, 博士, 博士后, 清华大学访问学者, 中国人工智能学会终身会员, 国家自然科学基金项目评审专家, 主要研究方向为系统可靠性、安全管理理论。主持和参与国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目等 4 项。获省部级科技进步奖 10 项, 获发明专利授权 17 项, 出版学术专著 6 部。E-mail: lsslntu@163.com。