



# 智能系统学报

CAAI TRANSACTIONS ON INTELLIGENT SYSTEMS

## 空间故障网络的柔性逻辑描述

崔铁军, 李莎莎

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202003029>

## 您可能感兴趣的其他文章

### 系统可靠-失效模型的哲学意义与智能实现

Philosophical significance and implementation of an intelligent system based on the system reliability–failure model  
智能系统学报. 2020, 15(6): 1104–1112 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202003047>

### SFEP文本因果关系提取及其与SFN转化研究

Causality extraction of SFEP text and its conversion to SFN  
智能系统学报. 2020, 15(5): 998–1005 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201907021>

### 安全科学中的故障信息转换定律

Conversion law of fault information in safety science  
智能系统学报. 2020, 15(2): 360–366 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811004>

### 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>

### 泛逻辑学理论——机制主义人工智能理论的逻辑基础

Universal logic theory: logical foundation of mechanism–based artificial intelligence theory  
智能系统学报. 2018, 13(1): 19–36 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201711033>

微信公众平台



关注微信公众号, 获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.202003029

# 空间故障网络的柔性逻辑描述

崔铁军<sup>1,2</sup>, 李莎莎<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 大连交通大学 辽宁省隧道与地下结构工程技术研究中心, 辽宁 大连 116028; 3. 辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:**为使空间故障网络(space fault network, SFN)描述系统故障演化过程(system fault evolution process, SFEP)时能蕴含信息的不确定性和演化特征,克服因素、数据和演化本身的不确定性,提出使用柔性逻辑对SFN进行描述和改造。首先论述了SFN存在的问题和使用柔性逻辑解决这些问题的可能性。使用柔性逻辑描述SFN,应从SFN的最基本单元、事件发生关系、SFN结构方面进行。给出了SFN中与、或和传递关系的柔性逻辑表示。在柔性逻辑条件下给出了SFN的关系组,进而得到SFN最终事件状态的柔性逻辑表示。实例结果蕴含了SFEP中各事件、因素和演化过程之间的柔性逻辑关系及其不确定性,为SFEP的智能化研究提供了新方法论和理论基础。

**关键词:**智能科学;安全科学;安全系统工程;空间故障网络;柔性逻辑;系统故障演化过程;因素影响;不确定性  
**中图分类号:**TP18;X913;C931.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2021)03-0552-08

中文引用格式: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.

英文引用格式:CUI Tiejun, LI Shasha. Flexible logic description of space fault network[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2021, 16(3): 552-559.

## Flexible logic description of space fault network

CUI Tiejun<sup>1,2</sup>, LI Shasha<sup>3</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Tunnel & Underground Structure Engineering Center of Liaoning, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 3. School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Flexible logic is proposed in this paper to describe and transform the space fault network (SFN) and to describe the system fault evolution process (SFEP) with information uncertainty and evolution characteristics to overcome the factors, data, and evolution uncertainty. The present report discusses the problems of SFN and the possibility of using flexible logic to solve these problems. The use of flexible logic to describe SFN should be based on the basic unit, event occurrence relationship, and SFN structure. Flexible logical representations of the and, or and transfer relationship in SFN are given. Further, under the condition of flexible logic, the relationship set of SFN is given, and the flexible logic representation of the target event state of SFN is obtained. The results show the flexible logical relationship and uncertainty among events, factors, and evolution processes in SFEP and provide a new methodology and theoretical basis for the intelligent research of SFEP.

**Keywords:** intelligent science; safety science; safety system engineering; space fault network; flexible logic; system fault evolution process; factor influence; uncertainty

SFEP<sup>[1-7]</sup>存在于各行各业,无论是自然系统灾害还是人工系统故障都是系统功能性下降或故障性升高的结果。SFEP中蕴含了一系列事件,受到多种因素影响,事件间也存在不同的逻辑关系,

因此SFEP的事先分析极其困难。因为SFEP中各种事件和它们之间的逻辑关系,加之不同因素的影响,使得SFEP存在多样性。事先分析只能得到各种SFEP的可能性,只有发生后才能确定是哪一种SFEP。那么如何智能化地事先分析SFEP成为关键问题。

目前关于系统故障发展和演化过程分析的研究迅速发展。这些研究包括惯性速度差分进化算

收稿日期:2020-03-17.

基金项目:国家自然科学基金项目(51704141);国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC1503102);国家自然科学基金委主任基金(61350003).

通信作者:崔铁军. E-mail: ctj.159@163.com.

法<sup>[8]</sup>、差分进化感应电动机定子故障识别<sup>[9]</sup>、道路网络故障演化分析<sup>[10]</sup>、复杂装备健康状态分类<sup>[11]</sup>、系统故障演化过程<sup>[5]</sup>、稀疏故障演化判别分析<sup>[12]</sup>、面向文本数据的故障模型挖掘<sup>[13]</sup>、电缆短路故障演化机理<sup>[14]</sup>、混联系统连锁故障搜索方法<sup>[15]</sup>、齿轮箱关键零部件故障诊断<sup>[16]</sup>。对于故障过程的智能分析方法研究包括:逻辑斯蒂回归的变压器涌流识别<sup>[17]</sup>、稀疏过滤特征学习的故障检测方法<sup>[18]</sup>、贝叶斯网络时序模拟电力系统可靠性<sup>[19]</sup>、航空发动机启动故障分析<sup>[20]</sup>、结构熵权法与故障树结合的智能变电站保护<sup>[21]</sup>、动态故障树的核反应堆稳压器可靠性研究<sup>[22]</sup>、动态故障树的新型区间占检测系统可用性分析<sup>[23]</sup>、后备保护逻辑建模分析<sup>[24]</sup>、GO图的故障树自动生成方法<sup>[25]</sup>、雷达硬件故障数据识别<sup>[26]</sup>、区域序号的自适应故障处理方法<sup>[27]</sup>。这些方法都基于本行业特征,难以形成系统层面上的分析理论,更难以形成有效的方法论。

笔者在研究 SFEP 时发现,过程中的事件、事件关系和数据都存在一定不确定性。这种不确定性难以使用目前的机械还原论进行分析,使用数理形式逻辑也难以胜任。究其原因在于,还原论消除了事件间、因素间和数据间的联系。而数理形式逻辑将实际问题进行高度抽象,牺牲信息来换取刚性逻辑关系。这些问题使传统的机械还原论和数理形式逻辑在对 SFEP 分析时效果不佳。

柔性逻辑<sup>[28-34]</sup>是数理辩证逻辑,是泛逻辑的重要组成部分。借助柔性逻辑对 SFEP 进行描述,改造 SFN 的事件发生逻辑关系,进而使 SFN 通过柔性逻辑形式表示。泛逻辑是智能科学的新方法论,柔性逻辑有利于 SFEP 的智能分析及 SFN 的数理辩证逻辑表示。这里涉及的 SFN 基本概念请参考文献[1-7]。

## 1 空间故障网络

SFN 是空间故障树理论<sup>[1-7,35-46]</sup>(space fault tree, SFT)的第三研究阶段。SFT 包括 SFT 基础理论<sup>[35-39]</sup>、智能化 SFT<sup>[40-46]</sup>、SFN<sup>[1-7]</sup>、系统运动空间与系统映射论。SFN 用于描述 SFEP。SFEP 代表了系统性能变化过程中各种事件、各种逻辑关系和各种因素的联系。SFN 通过网络拓扑形式表示 SFEP。

SFN 由点和线组成。点表示 SFEP 的事件,线表示 SFEP 的演化途径。在 SFEP 中多个原因事件可能存在不同逻辑关系导致结果事件,最典型的是同时发生的与关系和之一发生的或关系。在理论上使用 SFN 描述 SFEP 是适合的,但在实际过程中存在问题。其中最重要的就是不确定性和演化特征。

首先是因素的不确定性。因素是 SFEP 的动力,不同因素的影响使 SFEP 表现出了多样性。这种多样性只有在实际发生之后才能确定。事先分析只能得到各种多样性故障的发生概率。就因素本身而言,如果信息不能表征所有因素的存在性,那么将会出现多个因素以一个特征表现出来,这样会归结为一个因素来对待。但不同因素终究有不同的信息,这个变异的因素会以隐含的方式改变 SFEP,增加无法预测的演化结果。这种现象称为因素的不确定性。

第二是基础数据的不确定性。系统运动空间与系统映射论认为,系统因素和数据是相关的。系统变化以数据形式展示,而不同数据形式被认为是因素。系统受不同因素的改变通过系统结构以不同的数据表现出来,那么这样的因素与数据的对应关系称为系统映射论。系统运动意味着系统的变化,数据只是表象,因素是系统运动的动力,而系统变化的实质是系统结构的变化。因此系统映射论可以描述系统运动的空间。但数据也有很多种,掌握系统发散的所有数据是不可能的。我们只能获得可感知且可测量的数据,还要根据目的筛选。最终研究 SFEP 的数据必将包含人、机 and 环境的干扰,这些数据充满了不确定性,导致系统结构和因素失真,分析失败。

第三是 SFEP 本身的逻辑关系。SFEP 描述了自然系统和人工系统的性能降低和故障增加的过程。过程中需要划分各种事件和演化阶段。但由于对系统认识的局限性,系统各阶段的划分、各阶段之间的关系和各阶段内的具体事件一般都难以正确获得。这导致 SFEP 本身结构和形态的不确定性。

综上,虽然 SFEP 宏观上有确定的形式和过程,但因素、数据和结构都存在一定不确定性,这给 SFEP 的 SFN 分析带来了困难。这种困难使用传统数理形式逻辑难以解决。

## 2 柔性逻辑

泛逻辑学是何华灿教授提出的数理辩证逻辑方法论<sup>[28-34]</sup>。泛逻辑学研究的最终目标是建立数理辩证逻辑理论体系,而柔性逻辑是泛逻辑学的重要部分。如下论述内容引自何华灿教授<sup>[47]</sup>的相关论著。

与数理形式逻辑的刚性逻辑对应,泛逻辑强调柔性逻辑。柔性逻辑范式:可描述实际问题中包含的各种不确定性和演化过程,进行推理并获得准确结果。因此不需要像数理形式逻辑那样为了分而治之地解决问题将实际情况进行抽象,而



舍弃很多信息。相对于刚性逻辑,柔性推理计算较为复杂,使用不便,但对计算机而言则很简单。更为重要的是在智能分析中,许多信息的价值就在于包含了不确定性和演化过程。那么数理形式逻辑的抽象化将清除掉这些有用的信息。

泛逻辑中的柔性逻辑体系的建立<sup>[28-34]</sup>可表述为:1)从刚性逻辑出发,即布尔算子 $\leftrightarrow$ MP神经元;2)将命题的真值由二值扩张为连续值,建立柔性逻辑的基模型;3)引入 $h \in [0, 1]$ ,形成一维逻辑谱 $L(h)$ ;4)继续引入 $k \in [0, 1]$ ,形成二维逻辑谱 $L(k, h)$ ;5)继续引入 $\beta \in [0, 1]$ ,形成三维逻辑谱 $L(k, h, \beta)$ 。

具体地,柔性信息处理模式的扩张结果为20种<sup>[29-30]</sup>。这里给出最基本逻辑运算完整簇。

或运算:  $S(x, y, k, h, \beta) = (1 - (\max(0, 2\beta(1-x^n)^m + 2(1-\beta)(1-y^n)^m - 1))^{1/m})^{1/n}$ 。

非运算:  $N(x, k) = (1-x^n)^{1/n}$ 。

蕴涵运算:  $I(x, y, k, h, \beta) = (\min(1, 1 - 2\beta x^{nm} + 2(1-\beta)y^{nm}))^{1/mn}$ 。

等价运算:  $Q(x, y, k, h, \beta) = \text{ite} \{ (1 + |2\beta x^{nm} - 2(1-\beta)y^{nm}|)^{1/mn} | m \leq 0; (1 - |2\beta x^{nm} - 2(1-\beta)y^{nm}|)^{1/mn} \}$ 。

与运算:  $T(x, y, k, h, \beta) = (\max(0, 2\beta x^{nm} + 2(1-\beta)y^{nm} - 1))^{1/mn}$ 。

其中: $k, h, \beta$ 表示了推理的不确定性,分别表示误差系数、广义相关系数和相对权重系数。这些系数代表了信息中包含的不确定性和系统演化过程。

对于SFEP,问题主要在于因素和数据的不确定性和SFEP的演化特征。那么柔性逻辑的3个不确定性参数可以表征来源于SFEP的因素、数据和演化的不确定性。SFEP中的事件逻辑关系最基本的是与、或和传递,这也是柔性逻辑中的最基本关系。在多原因事件导致结果事件时,柔性逻辑也可将这些逻辑拆分为两两逻辑进行分析。原因事件导致结果事件的可能性称为传递概率,也可作为柔性逻辑运算的参数。因此,用于描述SFEP的SFN在理论上可使用柔性逻辑进行描述和分析。这有利于使用泛逻辑方法论来描述SFEP,这也是SFEP使用智能科学研究的基础。因为泛逻辑方法论是智能科学的基础方法论。

### 3 柔性逻辑描述

SFN描述SFEP, SFEP中的事件、传递概率和事件发生关系分别对应SFN中的节点、连接和因果逻辑。但为了说明方便,在论述SFN时也使用事件、传递概率和事件发生关系。SFN的柔性逻辑描述要从几个方面来讨论,包括:SFN最基本单元的柔性逻辑描述、事件发生关系的柔性逻辑

描述、SFN结构的柔性逻辑描述。

#### 3.1 SFN最基本单元的柔性逻辑描述

SFN的基本单元:原因事件 $\rightarrow$ 传递概率 $\rightarrow$ 结果事件,将结果事件作为下一个单元的原因事件继续通过传递概率指向下一个结果事件,如图1(a)所示。整个过程起始于边缘事件(导致SFEP的最基本事件),终止于最终事件(SFEP结束的事件或过程中关心的事件)。将基本单元进一步分解,原因事件与传递概率组成SFN柔性逻辑基本单元。所得结果作为原因事件与下一个传递概率形成柔性逻辑基本单元,如图1(b)所示。因此SFN的基本单元从原来的三元组变为两元组。该变化原因在于柔性逻辑的逻辑运算完整簇形式<sup>[29-30]</sup>。柔性逻辑运算完整簇被规定为一个二元算子,两个输入一个输出,是为了简化逻辑表达,也因为任何逻辑运算都可拆分为二元运算。

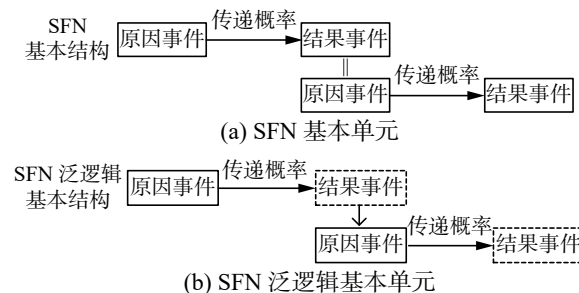


图1 SFN的基本单元

Fig. 1 Basic unit of SFN

在SFN中,原因事件本身有发生概率,使用事件发生概率分布来表示。传递概率则表示原因事件导致结果事件的可能性。如果连接不合理则传递概率为0,否则在(0,1]。因此结果事件是否发生取决于原因事件发生概率分布和传递概率。转化为柔性逻辑运算完整簇,原因事件发生情况和传递概率组成了逻辑运算完整簇的与运算形式。将这两项通过与逻辑运算完整簇可获得对应的结果事件柔性逻辑表达形式,如式(1)所示,得到结果事件柔性逻辑状态,简称结果事件状态:

$$T_{et_p}(e_p, tp_q, k, h, \beta) = (\max(0, 2\beta e_p^{nm} + 2(1-\beta)tp_q^{nm} - 1))^{1/mn} \quad (1)$$

式中: $T_{et_p}$ 表示柔性逻辑与运算完整簇; $et_p$ 表示原因事件和传递概率以综合使用柔性逻辑表示; $e_p$ 代表编号为 $p$ 的事件, $p=1,2,\dots,P$ ;  $tp_q$ 代表编号为 $q$ 的传递概率, $q=1,2,\dots,Q$ ;  $k$ 代表误差系数, $k \in [0, 1]$ ;  $h$ 代表广义相关系数, $h \in [0, 1]$ ;  $\beta$ 代表相对权重系数, $\beta \in [0, 1]$ ;  $n$ 代表 $k$ 对基模型的影响, $n=-1/\log_2 2k$ ;  $m$ 代表广义相关系数 $h$ 对基模型的影响, $m=(3-4h)/(4h(1-h))$ 。

上述参数是连接SFN与柔性逻辑的桥梁,如

下对这些参数进行解释。 $T_{et_p}$ 代表了原因事件 $e$ 和传递概率 $t_p$ 的柔性逻辑与关系。在柔性逻辑表示下, 原因事件和传递概率均有两种状态,  $e=\{0 \text{ 不发生}, 1 \text{ 发生}\}$ ,  $t_p=\{0 \text{ 不传递}, 1 \text{ 传递}\}$ 。 $T_{et_p}$ 作为这个原因事件和传递概率导致的结果事件状态。 $k$ 在SFN中的意义在于, 如果原因事件状态和结果事件状态相等,  $k=0.5$ 表示没有误差; 如果不相等, 这时的 $k \approx (x+z)/2$ ; 一般情况下不相等因为传递概率小于0;  $k=1$ 表示最大正误差,  $k=0.5$ 表示无误差,  $k=0$ 表示最大负误差。 $h$ 描述原因事件与结果事件相关程度:  $h=1$ 是最大相吸关系,  $h=0.75$ 是独立相关关系,  $h=0.5$ 是最大相斥关系,  $h=0.25$ 是僵持关系,  $h=0$ 是最强对立关系。 $h$ 的计算方法有与算子体积法和标准尺测量法<sup>[29,30]</sup>。 $\beta$ 描述原因事件与结果事件重要关系程度;  $\beta=1$ 表示最大偏左,  $\beta=0.5$ 表示等权,  $\beta=0$ 表示最小偏左。 $k$ 、 $h$ 、 $\beta$ 称为不确定性系数。 $n$ 和 $m$ 分别通过 $k$ 和 $h$ 计算得到。

上述完成了SFN三元基本单元到SFN柔性逻辑二元基本单元的转化。这部分解决了原因事件与传递概率与逻辑关系情况下的柔性逻辑表示。其结果可表示柔性逻辑结果事件状态。

### 3.2 事件发生关系的柔性逻辑描述

根据柔性逻辑, 事件发生逻辑关系有20种。在SFN中也存在这20种柔性逻辑, 但一般使用与、或和传递关系。与关系表示多个原因事件同时导致结果事件; 或关系表示原因事件之一即可导致结果事件; 传递关系表示有且只有一个原因事件导致结果事件。使用SFN柔性逻辑表示它们的关系, 如图2所示。

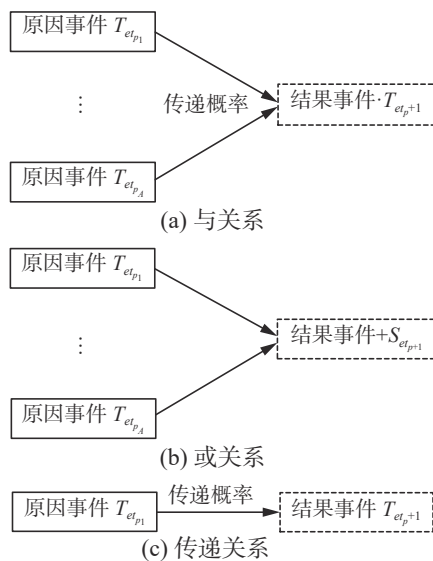


图2 柔性逻辑表示的SFN事件发生关系

Fig. 2 SFN event occurrence relationship represented by flexible logic

图2中结果事件后的·和+表示原因事件之间的逻辑关系, ·表示与; +表示或; 传递不表示。图2(a), 当有多个原因事件同时发生导致结果事件时, 柔性逻辑与关系的结果事件状态如式(2)所示。

$$\begin{cases} T_{et_p+1} = T(T(\cdots(T(T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}), T_{et_{p_3}}) \cdots), T_{et_{p_A}}) \\ T(T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}) = T(T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}, k, h, \beta) = \\ (\max(0, 2\beta T_{et_{p_1}}^{nm} + 2(1-\beta)T_{et_{p_2}}^{nm} - 1))^{\frac{1}{nm}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}, \cdots, T_{et_{p_A}}$ 表示本次 $A$ 个柔性逻辑原因事件状态;  $T_{et_p+1}$ 表示 $T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}, \cdots, T_{et_{p_A}}$ 导致的与关系柔性逻辑结果事件状态,  $et_p+1$ 表示本次传递的结果事件和下次传递的原因事件编号。

式(2)也说明了当多个原因事件导致结果事件时可使用柔性逻辑方法拆分为两两逻辑计算<sup>[29,30]</sup>。在图2(b), 当有多个原因事件至少其一发生导致结果事件时, 柔性逻辑或关系结果事件状态如式(3)所示。

$$\begin{cases} S_{et_p+1} = S(S(\cdots(S(T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}), T_{et_{p_3}}) \cdots), T_{et_{p_A}}) \\ S(T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}) = S(T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}, k, h, \beta) = \\ (1 - (\max(0, 2\beta(1 - T_{et_{p_1}}^n)^m + \\ 2(1-\beta)(1 - T_{et_{p_2}}^n)^m - 1))^{\frac{1}{n}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $S_{et_p+1}$ 表示 $T_{et_{p_1}}, T_{et_{p_2}}, \cdots, T_{et_{p_A}}$ 导致的柔性逻辑或关系结果事件状态。

图2(c), 当有且只有一个原因事件导致结果事件时, 传递关系结果事件状态如式(4)所示。

$$\begin{cases} T_{et_p+1} = T_{et_{p_1}} \\ T_{et_p}(e_p, t_{p_q}, k, h, \beta) = \\ (\max(0, 2\beta_{e_p}^{nm} + 2(1-\beta)t_{p_q}^{nm} - 1))^{\frac{1}{nm}} \end{cases} \quad (4)$$

### 3.3 SFN结构的柔性逻辑描述

根据SFN描述SFEP的基本单元。最终事件是需要研究的事件, 在SFN中可将与最终事件相关的事件按照基本单元组成关系组RS。一般情况下, SFN有与、或和传递3种关系蕴含在连接中。用柔性逻辑表示事件间与、或及传递关系, 得到柔性逻辑关系组RS如式(5)所示。

$$\begin{aligned} RS = \{e_{CE} \rightarrow e_{RE} | e_{RE} = S_{et_p+1}, \text{or}; e_{RE} = T_{et_p+1}, \text{and}; \\ e_{RE} = T_{et_{p_1}}, \text{trans}; e_{CE}, e_{RE} \in \{0, 1\}\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $e_{CE}$ 表示原因事件状态;  $e_{RE}$ 表示结果事件状态。SFEP起源于边缘事件, 因此边缘事件作为第一个原因事件; SFEP结束于最终事件, 因此最终事件是最后一个结果事件。利用RS得到柔性逻辑最终事件状态, 是通过RS中的关系组实现的。过程为从最终事件出发寻找其原因事件, 将该原因事件作为结果事件按照传递的反方向寻找其原因事件, 直到原因事件为边缘事件时停止。当SFN使用柔性逻辑表示后, 事件转化为柔性逻辑事件状态。因此可完全使用柔性逻辑描述SFEP, 进而

分析 SFN。边缘事件的柔性逻辑状态在 SFN 表示的 SFEP 中演化, 根据关系组 RS 得到柔性逻辑最终事件状态表达式, 得到最终事件状态。

#### 4 SFN 的柔性逻辑描述举例

给出一个简单的 SFN, 如图 3 所示。

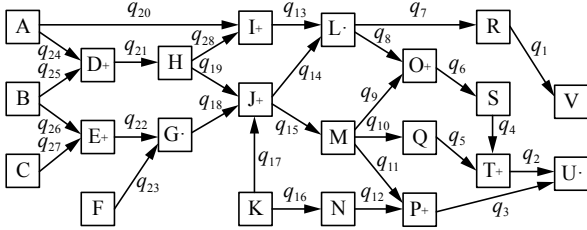


图 3 空间故障网络

Fig. 3 Space fault network(SFN)

图 3 中有 22 个事件和 28 个连接。传递概率用  $q_{1-28}$  表示。其中事件 A、B、C、F 和 K 都是边缘事件, 柔性逻辑状态用  $e_A$ 、 $e_B$ 、 $e_C$ 、 $e_F$ 、 $e_K$  表示; 事件 V 和 U 是最终事件, 柔性逻辑状态用  $e_V$ 、 $e_U$  表示; 其余为过程事件。事件状态分为 0、1 两种。根据对 SFN 关系组 RS 的建立方法得到  $RS = \{e_V = T_{etp}(e_R, q_1), e_R = T_{etp}(e_L, q_7), e_L = T_{etp}(T_{lq13}, T_{lq14}), e_I = S_{etp}(T_{Aq20}, T_{Hq28}), e_J = S_{etp}(S_{etp}(T_{Hq19}, T_{Gq18}), T_{Kq17}), e_H = T_{etp}(e_D, q_{21}), e_G = T_{etp}(T_{Eg22}, T_{Fq23}), e_E = S_{etp}(T_{Bq26}, T_{Cq27}), e_D = S_{etp}(T_{Aq24}, T_{Bq25})\}$ 。其中不包括边缘事件状态,  $T_{lq13} = T_{etp}(e_I, q_{13})$ , 其余同理。得到的柔性逻辑最终事件 V 状态表达式为

$$e_V = T_{etp}(T_{etp}(T_{etp}(T_{etp}(S_{etp}(T_{etp}(e_A, q_{20}), T_{etp}(T_{etp}(S_{etp}(T_{etp}(e_A, q_{24}), T_{etp}(e_B, q_{25})), q_{21}), q_{28})), q_{13}), T_{etp}(S_{etp}(S_{etp}(T_{etp}(T_{etp}(S_{etp}(e_A, q_{24}), T_{etp}(e_B, q_{25})), q_{21}), q_{19}), T_{etp}(T_{etp}(T_{etp}(S_{etp}(T_{etp}(e_B, q_{26}), T_{etp}(e_C, q_{27})), q_{22}), T_{etp}(e_F, q_{23})), q_{18})), T_{etp}(e_K, q_{17})), q_{14})), q_7), q_1) \quad (6)$$

式 (6) 是一种柔性逻辑表达式的简化写法, 因为在柔性逻辑中与或关系运算模型的完整簇除了二元参数, 还有不确定性参数  $k$ 、 $h$ 、 $\beta$ 。实际上应在式 (6) 中每个  $q$  之后加上  $k$ 、 $h$ 、 $\beta$  这 3 个参数, 也需要根据 SFN 柔性逻辑基本结构确定  $k$ 、 $h$ 、 $\beta$  的数值。这 3 个值的具体计算方法请参见文献 [29-30]。在 SFN 不同传递阶段  $k$ 、 $h$ 、 $\beta$  的数值不同, 式 (6) 省略了这 3 个参数, 只给出传递的主要过程。将所有事件状态 (0,1) 及其对应的不确定参数 ( $k$ 、 $h$ 、 $\beta$ ) 数值代入式 (6) 即可求得最终事件状态。

当然柔性逻辑基本形式有 16 种, 后通过推理又增加了 4 种。与或关系是这 20 种柔性逻辑运算中最基础的, 也是 SFN 中最常用的事件发生逻辑关系。需要说明的是, 式 (2)、(3) 是为了展示 SFN

柔性逻辑关系给出的具体转化实例。剩余的 18 种柔性逻辑关系表达式也可转化为 SFN 中的逻辑关系, 但形式和转化方式与式 (2) 和式 (3) 相同, 这里不给出。当 20 种柔性逻辑关系运算都转化为 SFN 的事件发生逻辑关系, 再加上式 (1)、(4) 和 (5) 就组成了完整的 SFN 柔性逻辑表示方法。当然式 (5) 的关系类型要扩展为第 21 种。由于篇幅有限这里不做详述。

泛逻辑学与钟义信教授的信息生态方法论<sup>[48]</sup>和汪培庄教授的因素空间<sup>[49]</sup>统称为智能科学的三大基础理论。笔者提出的 SFN 理论描述了 SFEP, 过程中的各种逻辑关系表示、因素影响和演化过程的研究可充分利用这三大原理。研究内容就是其中之一, 为 SFEP 的智能化分析提供基础理论和方法。

#### 5 结束语

本文研究了 SFN 的柔性逻辑表示方法, 建立了 SFEP 的智能分析理论基础。主要结论如下:

1) 论述了使用 SFN 描述和研究 SFEP 存在的问题。由于 SFEP 自身特点, 对其进行描述和研究存在的问题主要包括因素的不确定性、数据的不确定性和 SFEP 本身的逻辑关系, 及它们出现的原因。

2) 论述了柔性逻辑情况。给出了泛逻辑学的基本目的和基本形式, 论述了使用柔性逻辑描述和研究 SFEP 的优势, 从而对 SFN 进行了柔性逻辑表示。

3) 论述了 SFN 的柔性逻辑具体描述方法。根据 SFEP 和 SFN 特征, 给出了柔性逻辑描述方法, 包括 SFN 最基本单元描述、事件发生关系描述、SFN 结构描述。研究了 SFN 中与、或和传递关系转化为柔性逻辑关系的方式。将原因事件和传递概率设置为 SFN 柔性逻辑基本单元, 其结果作为本次结果事件状态和下次原因事件状态。再结合 SFN 柔性逻辑关系组, 即可得到 SFN 最终事件状态。柔性逻辑的 20 种形式都可进行类似转化, 在丰富 SFN 事件发生逻辑关系的同时, 也使 SFN 具备了使用泛逻辑方法论的基础。

4) 使用实例 SFN 得到了柔性逻辑最终事件状态表达式。这种表达式可以表达 SFEP 中各事件、各因素和演化过程之间的柔性逻辑关系, 并表示它们的不确定性。

本文研究只是 SFN 智能分析理论之一, 也是首次将柔性逻辑算子引入 SFN 理论对 SFEP 进行描述和分析。



## 参考文献:

- [1] 崔铁军, 李莎莎, 朱宝岩. 空间故障网络及其与空间故障树的转换[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(8): 2400–2403.  
CUI Tiejun, LI Shasha, ZHU Baoyan. Construction space fault network and recognition network structure characteristic[J]. Application research of computers, 2019, 36(8): 2400–2403.
- [2] 崔铁军, 李莎莎, 朱宝岩. 含有单向环的多向环网络结构及其故障概率计算[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7): 19–24.  
CUI Tiejun, LI Shasha, ZHU Baoyan. Multidirectional ring network structure with one-way ring and its fault probability calculation[J]. China safety science journal, 2018, 28(7): 19–24.
- [3] CUI Tiejun, LI Shasha. Research on complex structures in space fault network for fault data mining in system fault evolution process[J]. IEEE access, 2019, 7: 121881–121896.
- [4] 崔铁军, 李莎莎. 空间故障树与空间故障网络理论综述[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 399–405.  
CUI Tiejun, LI Shasha. Revision of the space fault tree and the space fault network system[J]. Journal of safety and environment, 2019, 19(2): 399–405.
- [5] 崔铁军. 系统故障演化过程描述方法研究[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(10): 3006–3009.  
CUI Tiejun. Research on description method of system fault evolution process[J]. Application research of computers, 2020, 37(10): 3006–3009.
- [6] CUI Tiejun, LI Shasha. Research on basic theory of space fault network and system fault evolution process[J]. Neural computing and applications, 2020, 32(6): 1725–1744.
- [7] CUI Tiejun, LI Shasha. Deep learning of system reliability under multi-factor influence based on space fault tree[J]. Neural computing and applications, 2019, 31(9): 4761–4776.
- [8] QIU Xiaohong, HU Yuting, LI Bo. Sequential fault diagnosis using an inertial velocity differential evolution algorithm[J]. International journal of automation and computing, 2019, 16(3): 389–397.
- [9] GUEDES J J, CASTOLDI M F, GOEDEL A, et al. Differential evolution applied to line-connected induction motors stator fault identification[J]. Soft computing, 2019, 23(21): 11217–11226.
- [10] 万蔚, 黄雨晨, 王振华, 等. 突发状况下的道路网络故障演化分析——以通州市区道路网络为例[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 14–20, 40.  
WAN Wei, HUANG Yuchen, WANG Zhenhua, et al. Evolution analysis of road network faults under emergency conditions—taking Tongzhou urban road network as an example[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural sciences), 2019, 38(1): 14–20, 40.
- [11] 张保山, 张琳, 张搏, 等. 基于故障风险标尺的复杂装备健康状态分类模型[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(2): 489–496.  
ZHANG Baoshan, ZHANG Lin, ZHANG Bo, et al. Equipment health classification model based on failure risk scale[J]. Systems engineering and electronics, 2020, 42(2): 489–496.
- [12] 范海东, 王玥, 李清毅, 等. 基于稀疏故障演化判别分析的故障根源追溯[J]. 控制工程, 2019, 26(7): 1239–1244.  
FAN Haidong, WANG Yue, LI Qingyi, et al. Sparse fault degradation oriented fisher discriminant analysis based fault trace[J]. Control engineering of China, 2019, 26(7): 1239–1244.
- [13] 于洋洋. 面向文本数据的故障模型挖掘技术研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.  
YU Yangyang. Research on text-oriented fault model mining technology[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2019.
- [14] 曾振城. 海底电缆短路故障演化机理和诊断方法研究[D]. 厦门: 集美大学, 2019.  
ZENG Zhencheng. Research on evolution mechanism and diagnosis method of submarine cable short circuit fault[D]. Xiamen: Jimei University, 2019.
- [15] 李文博. 交直流混联系统连锁故障搜索方法及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.  
LI Wenbo. Research on search method and its application for cascading failures in AC/DC hybrid system[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [16] 张冕. 行星齿轮箱关键零部件故障诊断[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.  
ZHANG Mian. Fault diagnosis of key components in planetary gearboxes[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [17] 丁晓兵, 周红阳, 黄佳胤, 等. 基于逻辑斯蒂回归的变压器涌流识别[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12): 77–84, 94.  
DING Xiaobing, ZHOU Hongyang, HUANG Jiayin, et al. Transformer inrush current identification based on logistic regression[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(12): 77–84, 94.
- [18] 江升, 旷天亮, 李秀喜. 基于稀疏过滤特征学习的化工过程故障检测方法[J]. 化工学报, 2019, 70(12): 4698–4709.  
JIANG Sheng, KUANG Tianliang, LI Xiuxi. A chemical process fault detection method based on sparse filtering feature learning[J]. CIESC journal, 2019, 70(12): 4698–4709.
- [19] 高立艾, 霍利民, 黄丽华, 等. 基于贝叶斯网络时序模拟的含微网配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,

- 2019, 39(7): 2033–2040.
- GAO Liai, HUO Limin, HUANG Lihua, et al. Reliability evaluation based on bayesian networks time sequence simulation for distribution systems containing microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(7): 2033–2040.
- [20] 姜新瑞, 王赫, 唐震. 某型航空发动机起动故障试验 [J]. *航空动力学报*, 2019, 34(4): 813–820.
- JIANG Xinrui, WANG He, TANG Zhen. Test on starting failure for an aero-engine[J]. *Journal of aerospace power*, 2019, 34(4): 813–820.
- [21] 王洪彬, 徐亨, 童晓阳, 等. 基于结构熵权法与故障树的智能变电站保护系统扰动度在线评估方法 [J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1772–1780.
- WANG Hongbin, XU Heng, TONG Xiaoyang, et al. The online disturbance degree assessment method of protection systems in intelligent substation based on the structure entropy weight method and fault trees[J]. *Power system technology*, 2019, 43(5): 1772–1780.
- [22] 钱虹, 古雅琦, 刘鑫杰. 基于动态故障树的核反应堆稳压器数字压力控制装置可靠性研究 [J]. *核动力工程*, 2019, 40(3): 103–108.
- QIAN Hong, GU Yaqi, LIU Xinjie. Reliability of digital pressure control device of nuclear pressurizer based on dynamic fault tree[J]. *Nuclear power engineering*, 2019, 40(3): 103–108.
- [23] 海宁, 张彩珍, 孙国营, 等. 基于动态故障树的新型区间占检系统可用性分析 [J]. *计算机应用与软件*, 2019, 36(6): 47–53.
- HAI Ning, ZHANG Caizhen, SUN Guoying, et al. Availability analysis of interval occupancy checking system based on dynamic fault tree[J]. *Computer applications and software*, 2019, 36(6): 47–53.
- [24] 陈万勋, 于楠, 黄景光, 等. 广域后备保护与传统后备保护配合逻辑建模分析研究 [J]. *智慧电力*, 2019, 47(5): 78–83.
- CHEN Wanxun, YU Nan, HUANG Jingguang, et al. Logical modeling analysis of wide area backup protection and traditional backup protection cooperation[J]. *Smart power*, 2019, 47(5): 78–83.
- [25] 宛伟健, 黄志球, 沈国华, 等. 一种基于 GO 图的故障树自动生成方法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2019, 40(8): 1775–1780.
- WAN Weijian, HUANG Zhiqiu, SHEN Guohua, et al. Automatic generation method of fault tree based on GO model[J]. *Journal of Chinese computer systems*, 2019, 40(8): 1775–1780.
- [26] 郑朝阳, 张天舒, 董云升, 等. 颗粒物激光雷达硬件故障数据的识别 [J]. *光电工程*, 2019, 46(7): 190100.
- ZHENG Zhaoyang, ZHANG Tianshu, DONG Yunsheng, et al. Identification of hardware fault data of particle LiDAR[J]. *Opto-electronic engineering*, 2019, 46(7): 190100.
- [27] 李兆拓, 金松茂, 张华. 基于区域序号的自适应就地型馈线自动化故障处理方法 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 179–184.
- LI Zhaotuo, JIN Songmao, ZHANG Hua. Adaptive fault processing method for local type feeder automation based on region sequence numbers[J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(19): 179–184.
- [28] 汪培庄, 周红军, 何华灿, 等. 因素表示的信息空间与广义概率逻辑 [J]. *智能系统学报*, 2019, 14(5): 843–852.
- WANG Peizhuang, ZHOU Hongjun, HE Huacan, et al. Factorial information space and generalized probability logic[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2019, 14(5): 843–852.
- [29] 何华灿. 重新找回人工智能的可解释性 [J]. *智能系统学报*, 2019, 14(3): 393–412.
- HE Huacan. Refining the interpretability of artificial intelligence[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2019, 14(3): 393–412.
- [30] 何华灿. 泛逻辑学理论——机制主义人工智能理论的逻辑基础 [J]. *智能系统学报*, 2018, 13(1): 19–36.
- HE Huacan. Universal logic theory: logical foundation of mechanism—based artificial intelligence theory[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2018, 13(1): 19–36.
- [31] 刘城霞, 何华灿, 张仰森, 等. 基于泛逻辑的泛容差关系的研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2016, 34(3): 473–479.
- LIU Chengxia, HE Huacan, ZHANG Yangsen, et al. The study of universal tolerance relation based on universal logic[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2016, 34(3): 473–479.
- [32] 何华灿. 人工智能基础理论研究的重大进展——评钟义信的专著《高等人工智能原理》[J]. *智能系统学报*, 2015, 10(1): 163–166.
- [33] 何智涛, 何华灿, 刘超. 基于统一无穷理论的软件测试可穷尽性研究 [J]. *智能系统学报*, 2014, 9(6): 641–652.
- HE Zhitao, HE Huacan, LIU Chao. Research on exhaustive character of software testing based on the unified infinity theory[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2014, 9(6): 641–652.
- [34] 何华灿. S 型超协调逻辑中的一项重大研究突破——评张金成《逻辑及数学演算中的不动项与不可判定命题》[J]. *智能系统学报*, 2014, 9(4): 511–514.
- [35] 崔铁军. 空间故障树理论研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
- CUI Tiejun. Research on space fault tree theory[D]. Fuxin: Liaoning Technology University, 2015.
- [36] 崔铁军, 马云东. 基于多维空间事故树的维持系统可靠性方法研究 [J]. *系统科学与数学*, 2014, 34(6): 682–692.
- CUI Teijun, MA Yundong. Research on the maintenance



- method of system reliability based on multi-dimensional space fault tree[J]. *Journal of systems science and mathematical sciences*, 2014, 34(6): 682–692.
- [37] 崔铁军, 马云东. 系统可靠性决策规则发掘方法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(12): 3210–3216.  
CUI Tiejun, MA Yundong. The method research on decision criterion discovery of system reliability[J]. *Systems engineering—theory & practice*, 2015, 35(12): 3210–3216.
- [38] 崔铁军, 马云东. DSFT 的建立及故障概率空间分布的确定[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(4): 1081–1088.  
CUI Tiejun, MA Yundong. Discrete space fault tree construction and failure probability space distribution determination[J]. *Systems engineering—theory & practice*, 2016, 36(4): 1081–1088.
- [39] 崔铁军, 马云东. DSFT 中因素投影拟合法的不精确原因分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(5): 1340–1345.  
CUI Tiejun, MA Yundong. Inaccurate reason analysis of the factors projection fitting method in DSFT[J]. *Systems engineering—theory & practice*, 2016, 36(5): 1340–1345.
- [40] LI Shasha, CUI Tiejun, LIU Jian. Study on the construction and application of Cloudization Space Fault Tree[J]. *Cluster computing*, 2019, 22(3): 5613–5633.
- [41] CUI Tiejun, LI Shasha. Study on the construction and application of discrete space fault tree modified by fuzzy structured element[J]. *Cluster computing*, 2019, 22(3): 6563–6577.
- [42] 崔铁军, 汪培庄, 马云东. 01SFT 中的系统因素结构反分析方法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(8): 2152–2160.  
CUI Tiejun, WANG Peizhuang, MA Yundong. Inward analysis of system factor structure in 01 space fault tree[J]. *Systems engineering—theory & practice*, 2016, 36(8): 2152–2160.
- [43] CUI Tiejun, WANG Peizhuang, LI Shasha. The function structure analysis theory based on the factor space and space fault tree[J]. *Cluster computing*, 2017, 20(2): 1387–1399.
- [44] 崔铁军, 马云东. 基于因素空间的煤矿安全情况区分方法的研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(11): 2891–2897.  
CUI Tiejun, MA Yundong. Research on the classification method about coal mine safety situation based on the factor space[J]. *Systems engineering—theory & practice*, 2015, 35(11): 2891–2897.
- [45] CUI Tiejun, LI Shasha. Study on the relationship between system reliability and influencing factors under big data and multi-factors[J]. *Cluster computing*, 2019, 22(4): 10275–10297.
- [46] LI Shasha, CUI Tiejun, LIU Jian. Research on the clustering analysis and similarity in factor space[J]. *Computer systems science and engineering*, 2018, 33(5): 397–404.
- [47] 王万森, 何华灿. 基于泛逻辑学的逻辑关系柔性化研究[J]. *软件学报*, 2005(5): 754–760.  
WANG Wansen, HE Huacan. Research on flexibility of logic relation based on universal logics[J]. *Journal of software*, 2005(5): 754–760.
- [48] 钟义信. 从“机械还原方法论”到“信息生态方法论”——人工智能理论源头创新的成功路[J]. *哲学分析*, 2017, 8(5): 133–144.
- [49] 汪培庄. 因素空间与概念描述[J]. *软件学报*, 1992(1): 30–40.  
WANG Peizhuang. Factor space and description of concepts[J]. *Journal of software*, 1992(1): 30–40.

#### 作者简介:



崔铁军, 副教授, 博士, 主要研究方向为系统可靠性及力学系统稳定性。提出和建立了空间故障树理论及空间故障网络理论。获授权发明专利 20 项, 出版专著 4 部, 发表学术论文 100 余篇。



李莎莎, 讲师, 博士, 主要研究方向为安全管理及其智能分析。获授权发明专利 5 项, 出版专著 2 部, 发表学术论文 20 余篇。