

系统故障演化的模糊逻辑关系确定方法研究

崔铁军, 李莎莎

(沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要:为研究系统故障演化过程中由原因事件导致结果事件发生的模糊逻辑关系,提出了由基本逻辑关系与模糊隶属度叠加形成模糊逻辑关系表达式的方法,即模糊逻辑结构函数。确定模糊逻辑结构函数需要解决两个问题,一是基本逻辑关系的确定,二是模糊隶属度的确定。前者参照柔性逻辑中的14种逻辑关系,作者将它们转化为事件发生逻辑关系式,即可作为基本逻辑关系;后者使用枚举方法来确定模糊隶属度,当适应函数最接近0时即得到最优模糊隶属度。最终得到模糊逻辑结构函数的具体形式。通过实例分析得到原因事件导致结果事件的逻辑关系为蕴含和平均两种逻辑关系,其模糊隶属度达到了80%以上,该方法可解决系统故障演化过程中事件间模糊逻辑关系的确定问题。

关键词:安全系统工程;系统故障演化过程;模糊逻辑关系;模糊隶属度;柔性逻辑

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2025)01-0177-07

doi:10.20165/j.cnki.ISSN1673-629X.2024.0289

Research on Fuzzy Logic Relation and Its Determination Method of System Fault Evolution Process

CUI Tie-jun, LI Sha-sha

(School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract:In order to study the fuzzy logic relation between the cause event and the result event in the system fault evolution process, a method of forming the expression of fuzzy logic relation by superposition of basic logic relationship and fuzzy membership degree is proposed, which is called fuzzy logic structure function. Two problems need to be solved to determine the fuzzy logic structure function. One is to determine the basic logic relation; the other is to determine the fuzzy membership degree. Referring to 14 kinds of logic relations in flexible logic, we transform them into the logic relations of event occurrence, which can be regarded as the basic logic relations; the latter uses enumeration method to change the fuzzy membership degree, and obtains the optimal fuzzy membership degree when the fitness function is closest to 0. Finally, the concrete form of fuzzy logic structure function is obtained. Through the example analysis, it is concluded that the logical relationship between the cause event and the result event is implication and average, and its fuzzy membership degree is more than 80%. The proposed method can solve the problem of determining the fuzzy logic relation between events in the system fault evolution process.

Key words:safety system engineering; system fault evolution process; fuzzy logic relation; fuzzy membership degree; flexible logic

0 引言

对于系统故障演化过程,经历的事件、影响因素和事件间逻辑关系是三个核心要素和问题,但其都难以清晰界定。一是由于事件是系统演化过程各阶段的划分和归类,对它们的分类不但需要相关领域知识,也与人员自身经验有直接关系。因此对于相同的系统故障演化过程,不同的人划分总结的事件往往呈现出不同结果。二是影响因素的确定问题,由于理论与技术水平限制,不同层级系统故障演化的影响因素不同,而对

于系统不同层级的认识是不断变化的,这导致了影响因素的变化。三是逻辑关系确定,直接且简单的逻辑关系仅存在于理论之中,在现实系统故障过程中是难以存在的。更由于事件和因素的不确定性,往往事件间逻辑关系不仅是多个逻辑关系的叠加形式;也难以判断是由哪些逻辑关系叠加而成及叠加程度如何。基于上述原因,最终造成了系统故障演化过程中各事件因果逻辑关系在宏观上存在统计相关性,而在具体研究中更多展现为随机性。

收稿日期:2024-06-08

修回日期:2024-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52004120)

作者简介:崔铁军(1983-),男,教授,博士,博导,研究方向为系统可靠性及系统故障演化理论;李莎莎(1988-),女,博士,副教授,研究方向为安全系统工程、系统可靠性。

关于故障因果逻辑关系的研究已有很多,这些研究包括:陈孟婷等^[1]基于改进 PCA 算法进行了振荡故障根因定位研究;汤良^[2]使用双因果键合图法进行了液压系统故障诊断;何飞等^[3]对比格兰杰因果关系进行了热轧带钢头部拉窄根因诊断;马亮等^[4]综述了工业过程故障根源诊断与传播路径识别技术;崔铁军^[5]综述了空间故障网络与系统故障演化过程;Huang J 等^[6]基于熵研究了故障诊断与因果关系;Yin M 等^[7]基于因果关系建立了大规模非线性过程分布式早期故障检测方法;Zhang X 等^[8]建立了转移熵方法并用于根本原因分析;Chu Q 等^[9]基于动态数据流传递熵分析了工业过程初始故障因果关系;Wang S 等^[10]实现了过程故障根本原因诊断等。这些研究能解决一些具体领域的问题。但得到的逻辑关系往往具有叠加性,而不是基本逻辑关系。这导致了缺乏通用性,难以应用于更广泛的研究。同时也鲜见对于逻辑关系的叠加研究。究其原因还是难以弄清事件、因素和逻辑关系之间的联系。

为此提出研究系统故障演化过程中事件间逻辑关系的方法,即模糊逻辑关系及模糊逻辑结构函数。研究解决了基本逻辑关系和逻辑隶属度问题,得到了模糊逻辑结构函数的具体形式。虽然求解方法和方法本身存在着局限性,但仍可作为确定事件间逻辑关系的有效方法,为后继研究提供参考。

1 系统故障演化与模糊逻辑关系

任何系统的故障发生、发展、高潮和结束都是一个过程。这里的系统包括人工系统和自然系统,前者是人制造的以便完成特定目的系统,例如高铁、飞机等;后者是自然根据自身规律形成的系统,比如岩体系统、气候系统。系统发生故障表现为人工系统的故障和自然系统的灾害,例如高铁、飞机故障和泥石流及洪水等自然灾害。

系统的故障发生过程也可理解为可靠性的降低过程,这是系统工程和安全科学研究的核心问题。那么如何描述系统故障的发生过程成为解决问题的关键。系统故障过程大多会经历一些特定的阶段,这些阶段具有统一的表现形式、特征,可将其归纳为一个或多个事件来表示一个阶段的故障过程。这些事件在故障过程中的作用不同,即多个事件可导致随后的一个事件发生,或一个事件导致后期多个事件发生,或一个事件导致一个事件发生,或多个事件导致多个事件发生。在这些关系之中,起到决定性作用的是逻辑关系。导致其它事件发生的事件为原因事件,被导致的事件为结果事件。逻辑关系则表示了若干个原因事件以何种形式导致结果事件的发生,例如通常的“与或非”逻辑

关系。系统存在于环境之中,不同的内外因素对系统故障过程具有不同的影响。具体体现在不同影响因素条件下,故障过程中的事件状态不同,逻辑关系可能发生变化,导致故障过程的条件可能变化。因此系统故障过程是一个极其复杂且具有多样性的过程。

为研究上述过程作者提出了系统故障演化过程的概念,用于描述系统故障过程,其核心即为事件、逻辑和因素。进一步的为描述系统故障演化过程,进行抽象和研究,提出了空间故障网络理论^[11-12],是空间故障树理论的第三部分^[13]。即用网络拓扑形式表示系统故障演化过程。其中节点表示事件、有向线段表示演化关系,同时考虑影响因素使用了故障概率分布等^[11]。

要解决的是系统故障演化过程中原因事件与结果事件之间的逻辑关系。我们知道实际故障发生过程具有随机性、模糊性和离散性,即不确定性。同种故障发生的数量越小,越难找到对应因果关系,不确定性越大;而当故障发生数量很大时,一般可通过统计来确定因果关系增加确定性。即使在故障演化过程中事件是确定的,也会由于逻辑关系不明确和影响因素的随机造成不确定性增加。因此,少数量故障的不确定性较大,而在大样本情况下充分蕴含了逻辑关系和多种影响因素,其主要的逻辑关系和影响因素将控制故障演化过程,因此具有统计性关系。

聚焦于逻辑关系,特别是故障次数少的小样本情况,当原因事件发生概率变化时结果事件发生概率也将改变。这些关系可用与或非逻辑关系表示,这在系统工程领域很常见。而通常情况下难以将原因事件与结果事件发生关系归结为单一的与或非逻辑关系,而是多种逻辑关系的叠加。其原因在于系统故障过程中,事件和因素具有本质的不确定性,虽具有统计相关性,可以得到基本的逻辑关系,但由于人为经验影响或技术限制导致难以确定^[14]。由于这些逻辑关系可通过多种已知逻辑关系叠加而成,在具有一定统计规律的同时又存在模糊性,故将其定义为模糊逻辑关系。从上述产生该现象的过程分析,模糊逻辑关系在不同类型系统故障演化中具有普遍性,是系统层面的性质。

模糊逻辑关系定义:在系统故障演化过程及空间故障网络中,模糊逻辑关系表示原因事件导致结果事件发生的方式;当事件和因素确定情况下具有统计规律的模糊逻辑关系是可以确定的;引入模糊隶属度将多种逻辑关系叠加为模糊逻辑关系;该叠加表达式为模糊逻辑结构函数。

进一步讨论,原因事件导致结果事件的逻辑关系一般是多种逻辑关系的叠加,系统故障演化过程中因素、事件和逻辑关系由于人为经验和技术的限制认识

不深刻,导致更细观层次系统结构无法确定,因此造成上层系统逻辑关系的模糊性和叠加性。

2 模糊逻辑关系原理及系统构建

根据模糊逻辑关系建立模糊逻辑系统,从而确定模糊逻辑结构函数。根据定义模糊逻辑结构函数是通过引入模糊隶属度将多种逻辑关系叠加为模糊逻辑关系,从而表达原因事件与结果事件发生概率关系的函

数。在事件和因素确定的情况下,原因事件通过叠加逻辑关系表示结果事件。一般情况下多原因事件导致多结果事件,这可分解为两原因事件导致一结果事件的形式。其它结果事件以不同的模糊逻辑结构函数对应于这两个原因事件。而多个原因事件可进一步合成两原因事件的关系导致结果事件。上述关系如图 1 所示。

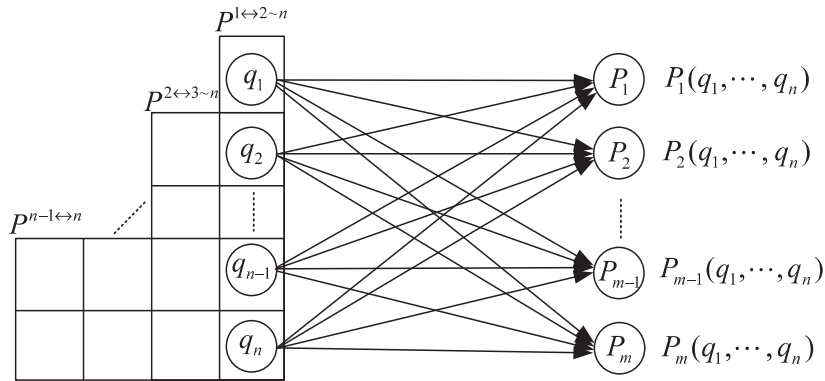


图 1 多原因事件和多结果事件的逻辑对应形式

注: $P_{1\sim m}$ 分别对应于第 1 ~ m 个结果事件的模糊逻辑结构函数; $P^{1↔2\sim n} \sim P^{n-1↔n}$ 分别表示原因事件 1 与原因事件 2 ~ n, 至原因事件 n-1 与原因事件 n 的模糊逻辑叠加形式,由于需要与结构函数区别使用上角标; q_1, q_2, \dots, q_n 分别代表原因事件 1 ~ n 的发生概率。

如图 1 所示,左侧表示多原因事件导致结果事件可分解为两原因事件导致结果事件的叠加形式,如式 1 所示。右侧则表示各结果事件都可以通过相同的形式,即模糊逻辑结构函数确定。

$$P_{1\sim m}(q_1, q_2, \dots, q_n) = P^{1↔2\sim n}((q_1, P^{2↔3\sim n}(q_2, P^{3↔4\sim n}(q_3, \dots, P^{n-1↔n}(q_{n-1}, q_n) \dots))) \quad (1)$$

由上述可知,任何结果事件的产生都可以归结为两个原因事件所导致,因此针对两个原因事件导致结果事件的情况进行研究,其它情况通过叠加即可获得。那么系统故障演化过程中的事件间模糊逻辑关系系统如式 2 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} q_x \in [0, 100\%], q_y \in [0, 100\%] \\ L_b \in [0, 100\%], 1 \leq b \leq B \\ a_b \in [0, 100\%] \\ \alpha_b \in [0, 100\%], \sum_{b=1}^B \alpha_b = 1 \\ \alpha_b = \frac{a_b}{\sum_{b=1}^B a_b} \\ P(q_x, q_y) = \sum_{b=1}^B \alpha_b L_b = \frac{a_b}{\sum_{b=1}^B a_b} L_b \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: q_x 和 q_y 分别表示原因事件 x 和 y 的发生概率; L_b 表示原因事件根据第 b 种逻辑关系导致结果事件的发

生概率; B 表示基本逻辑关系总数; a_b 表示第 b 种基本逻辑关系的绝对影响,范围为 $[0, 100\%]$; α_b 表示第 b 种基本逻辑关系的归一化权重,即模糊隶属度,且满足 $\sum_{b=1}^B \alpha_b = 1$; $P(q_x, q_y)$ 为在原因事件 x 和 y 影响下结果事件发生概率的模糊逻辑结构函数。

对应于图 1 和式 2,图 1 左侧每列最上一格表示 q_x , 该列其余叠加表示 q_y ; 式 1 每层括号内首项表示 q_x , 第二项表示 q_y 。因此,式 2 构建的系统完全可以通过叠加方式表示多原因事件导致多结果事件的模糊逻辑结构函数。

3 基于柔性逻辑关系的模糊逻辑

根据模糊逻辑关系系统模型(式 2),确定两原因事件导致结果事件的模糊逻辑结构函数的关键是最后一式。该式说明模糊逻辑结构函数是多种逻辑关系根据不同模糊逻辑关系隶属度叠加形成的函数。但 $P(q_x, q_y)$ 的具体形式确定面临两个问题,一是逻辑关系 L_b 的全集 L 如何确定,即逻辑关系的全体形式;二是各种逻辑关系在 $P(q_x, q_y)$ 中的权重,即 $P(q_x, q_y)$ 对于不同逻辑关系 L_b 的模糊隶属度 α_b 。

对于逻辑关系的全体,目前有很多研究。这里需要的是逻辑关系的基本单元,而非叠加形式的逻辑单元。因此何华灿教授提出的柔性逻辑关系是比较适合的。目前柔性逻辑关系已包括 20 种,何教授提出了这

些关系的模式分类及其对应的逻辑描述^[15]。作者根据20种逻辑描述,结合空间故障网络理论中事件发生逻辑关系,给出了事件发生逻辑关系形式^[16]。这些形式即可作为模糊逻辑结构函数的逻辑关系全集。进一步分析各逻辑关系在结构函数中的作用,其中 $Z \equiv 0$ 恒假($P(q_x, q_y) \equiv 0$)、 $Z = \neg(x \leftrightarrow y)$ 非等价($P(q_x, q_y) = 1 - q_x \text{ or } q_y$)、 $Z = x \leftrightarrow y$ 等价($P(q_x, q_y) = q_x \text{ or } q_y$)和 $Z \equiv 1$ 恒真($P(q_x, q_y) \equiv 1$)四种情况在两原因事件导致结果事件过程中的作用对称或相等,在分析中难以进一步区分; $Z = \neg(x \odot y)$ 非组合和 $Z = x \odot y$ 组合两种情况需要引进条件变量,在分析中意义不明确。因此上述六种事件发生逻辑关系不计入逻辑关系全集 L 。那么逻辑关系全集 L 如表1所示。

那么逻辑关系全集 L 如表1所示。

表1 模糊逻辑结构函数的逻辑关系全集

编号	关系模式分类	逻辑描述	事件发生逻辑关系式
1	$1=(0,0);0=(0,1);0=(1,0);0=(1,1)$	$Z = \neg(x \vee y)$ 非或	$L_1(q_x, q_y) = 1 - q_x - q_y + q_x q_y$
2	$1=(0,0);1/2=(0,1);1/2=(1,0);0=(1,1)$	$Z = \neg(x \oplus y)$ 非平均	$L_2(q_x, q_y) = 1 - (q_x/2 + q_y/2)$
3	$0=(0,0);1=(0,1);0=(1,0);0=(1,1)$	$Z = \neg(y \rightarrow x)$ 非蕴含2	$L_3(q_x, q_y) = q_y - q_x q_y$
4	$1=(0,0);1=(0,1);0=(1,0);0=(1,1)$	$Z = \neg x$ 非 x	$L_4(q_x, q_y) = 1 - q_x$
5	$0=(0,0);0=(0,1);1=(1,0);0=(1,1)$	$Z = \neg(x \rightarrow y)$ 非蕴含1	$L_5(q_x, q_y) = q_x - q_x q_y$
6	$1=(0,0);0=(0,1);1=(1,0);0=(1,1)$	$Z = \neg y$ 非 y	$L_6(q_x, q_y) = 1 - q_y$
7	$1=(0,0);1=(0,1);1=(1,0);0=(1,1)$	$Z = \neg(x \wedge y)$ 非与	$L_7(q_x, q_y) = 1 - q_x q_y$
8	$0=(0,0);0=(0,1);0=(1,0);1=(1,1)$	$Z = x \wedge y$ 与	$L_8(q_x, q_y) = q_x q_y$
9	$0=(0,0);1=(0,1);0=(1,0);1=(1,1)$	$Z = y$ 指 y	$L_9(q_x, q_y) = q_y$
10	$1=(0,0);1=(0,1);0=(1,0);1=(1,1)$	$Z = x \rightarrow y$ 蕴含1	$L_{10}(q_x, q_y) = 1 - q_x + q_x q_y$
11	$0=(0,0);0=(0,1);1=(1,0);1=(1,1)$	$Z = x$ 指 x	$L_{11}(q_x, q_y) = q_x$
12	$1=(0,0);0=(0,1);1=(1,0);1=(1,1)$	$Z = y \rightarrow x$ 蕴含2	$L_{12}(q_x, q_y) = 1 - q_y + q_x q_y$
13	$0=(0,0);1/2=(0,1);1/2=(1,0);1=(1,1)$	$Z = x \oplus y$ 平均	$L_{13}(q_x, q_y) = q_x/2 + q_y/2$
14	$0=(0,0);1=(0,1);1=(1,0);1=(1,1)$	$Z = x \vee y$ 或	$L_{14}(q_x, q_y) = q_x + q_y - q_x q_y$

表1中列出了14个基本逻辑关系,是形成模糊逻辑结构函数的基础。表中左右两部分是对应的,是相反的逻辑关系。由于模糊隶属度是作用于逻辑关系表达式的整体,因此对应相反的事件发生逻辑关系式是不能合并的。综上逻辑关系总数 $B = 14, b \in [1, 14]$,那么这种情况下的原因事件 x 和 y 导致结果事件发生概率的模糊逻辑结构式如式3所示。

$$\begin{aligned}
 P(q_x, q_y) = & \alpha_1 L_1(q_x, q_y) + \alpha_2 L_2(q_x, q_y) + \\
 & \alpha_3 L_3(q_x, q_y) + \alpha_4 L_4(q_x, q_y) + \\
 & \alpha_5 L_5(q_x, q_y) + \alpha_6 L_6(q_x, q_y) + \\
 & \alpha_7 L_7(q_x, q_y) + \alpha_8 L_8(q_x, q_y) + \\
 & \alpha_9 L_9(q_x, q_y) + \alpha_{10} L_{10}(q_x, q_y) + \\
 & \alpha_{11} L_{11}(q_x, q_y) + \alpha_{12} L_{12}(q_x, q_y) + \\
 & \alpha_{13} L_{13}(q_x, q_y) + \alpha_{14} L_{14}(q_x, q_y) \quad (3)
 \end{aligned}$$

进一步,将表1中事件发生逻辑关系式带入式3

得到式4的完整性形式。

$$\begin{aligned}
 P(q_x, q_y) = & \alpha_1(1 - q_x - q_y + q_x q_y) + \alpha_2(1 - (q_x/2 + \\
 & q_y/2)) + \alpha_3(q_y - q_x q_y) + \\
 & \alpha_4(1 - q_x) + \alpha_5(q_x - q_x q_y) + \\
 & \alpha_6(1 - q_y) + \alpha_7(1 - q_x q_y) + \\
 & \alpha_8(q_x q_y) + \alpha_9(q_y) + \\
 & \alpha_{10}(1 - q_x + q_x q_y) + \\
 & \alpha_{11}(q_x) + \alpha_{12}(1 - q_y + \\
 & q_x q_y) + \alpha_{13}(q_x/2 + q_y/2) + \\
 & \alpha_{14}(q_x + q_y - q_x q_y) \quad (4)
 \end{aligned}$$

第二个问题需确定 $P(q_x, q_y)$ 对于不同逻辑关系 L_b 的模糊隶属度 α_b 。如图1中原因事件与结果事件逻辑关系之间的网络结构,需要充分变化原因事件的发生概率(q_x, q_y),同时得到结果事件的发生概率 $P(q_x, q_y)$ 才能获得模糊隶属度 α_b 。因此需要(q_x, q_y)

与 $P(q_x, q_y)$ 具有对应关系。用矩阵形式 J 表示, d_x, d_y 分别作为二维矩阵 J 的位置标记, $P(q_x, q_y)$ 作为该位置的矩阵 $J(d_x, d_y)$ 的单元值。之后需确定具体的 α_b 求解方法。考虑图 1 中的网络结构,可使用神经网络进行求解。 d_x, d_y 分别对应的 q_x, q_y 作为输入值, $J(d_x, d_y) = P(q_x, q_y)$ 作为输出值训练神经网络, L_b 作为核函数,得到的 L_b 权重即为 α_b 。或者将 $P(q_x, q_y)$ 作为函数目标值,变化 (q_x, q_y) 和 α_b ,通过枚举方法确定适合的 α_b 。

上述两种方法的适函数如式 5 所示。

$$F(J_0, J) = \sqrt{\frac{\sum_{d_x=1}^{D_x} \sum_{d_y=1}^{D_y} |J_0(d_x, d_y) - J(d_x, d_y)|^2}{D_x D_y}} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \because 0 \leq L_b(q_x, q_y) \leq 1, \sum_{b=1}^B \alpha_b = 1, \therefore 0 \leq P(q_x, q_y) \leq 1 \\ \Rightarrow 0 \leq J_0(d_x, d_y) \leq 1, 0 \leq J(d_x, d_y) \leq 1 \\ \therefore 0 \leq |J_0(d_x, d_y) - J(d_x, d_y)| \leq 1 \\ \therefore 0 \leq |J_0(d_x, d_y) - J(d_x, d_y)|^2 \leq 1 \\ \therefore 0 \leq \frac{\sum_{d_x=1}^{D_x} \sum_{d_y=1}^{D_y} |J_0(d_x, d_y) - J(d_x, d_y)|^2}{D_x D_y} \leq 1 \end{array} \right. \quad (6)$$

所以 $F(J_0, J)$ 在 $[0, 1]$, 且越接近 0 代表 J_0 和 J 越接近, 这时 $P(q_x, q_y)$ 中的 α_n 值越准确。当 $F(J_0, J)$ 值在所有的 d_x, d_y 变化过程中最小, 这时得到的 $\alpha_b (b = 1, 2, \dots, B)$ 即为所求。

4 实例分析

设一系统的故障过程如下:由两个原因事件 x 和 y 作为输入, 一个结果事件作为输出;即输入数据为 $q_x,$

式中: D_x, D_y 分别表示 q_x, q_y 的总取样点数; d_x, d_y 代表在 J_0 和 J 矩阵中对应元素的位置, $1 \leq d_x \leq D_x, 1 \leq d_y \leq D_y$; $J_0(d_x, d_y)$ 为原始 $P(q_x, q_y)$ 得到的目标矩阵, $J(d_x, d_y)$ 为计算过程中 $P(q_x, q_y)$ 形成的矩阵。

例如 $q_x, q_y \in [0, 100\%]$, q_x, q_y 在范围内均匀取十个点, $D_x, D_y = 10, q_x, q_y \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$, 对应的 $d_x, d_y \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$, 因此矩阵 $J(1, 1)$ 的值为函数 $P(0.1, 0.1)$ 的值。

进一步证明式 5 的范围在 $[0, 1]$, 越接近 0 得到的 α_b 越准确, 如式 6 所示。

q_y , 输出数据为 $P(q_x, q_y)$ 。分别枚举 q_x, q_y 按顺序分别取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 时, 得到 100 种原因事件发生概率组合, 其对应结果事件发生概率为 $P(q_x, q_y)$ 的 100 个数值。这时 $D_x, D_y = 10, d_x, d_y \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$, 建立原始数据矩阵 $J_0(d_x, d_y)$, 如式 7 所示。

式 7 中数据是按照一定规律随机生成的, 用于说明算法过程。

$$J_0(d_x, d_y) = \begin{bmatrix} 0.429\ 3 & 0.465\ 6 & 0.501\ 9 & 0.538\ 2 & 0.574\ 5 & 0.610\ 9 & 0.647\ 2 & 0.683\ 5 & 0.719\ 8 & 0.756\ 1 \\ 0.414\ 9 & 0.455\ 7 & 0.496\ 5 & 0.537\ 2 & 0.578\ 0 & 0.618\ 7 & 0.659\ 5 & 0.700\ 2 & 0.741\ 0 & 0.781\ 8 \\ 0.400\ 6 & 0.445\ 8 & 0.491\ 0 & 0.536\ 2 & 0.581\ 4 & 0.626\ 6 & 0.671\ 8 & 0.717\ 0 & 0.762\ 2 & 0.807\ 4 \\ 0.386\ 3 & 0.435\ 9 & 0.485\ 5 & 0.535\ 2 & 0.584\ 8 & 0.634\ 5 & 0.684\ 1 & 0.733\ 7 & 0.783\ 4 & 0.833\ 0 \\ 0.371\ 9 & 0.426\ 0 & 0.480\ 1 & 0.534\ 2 & 0.588\ 2 & 0.642\ 3 & 0.696\ 4 & 0.750\ 5 & 0.804\ 6 & 0.858\ 6 \\ 0.357\ 6 & 0.416\ 1 & 0.474\ 6 & 0.533\ 1 & 0.591\ 7 & 0.650\ 2 & 0.708\ 7 & 0.767\ 2 & 0.825\ 8 & 0.884\ 3 \\ 0.343\ 2 & 0.406\ 2 & 0.469\ 1 & 0.532\ 1 & 0.595\ 1 & 0.658\ 0 & 0.721\ 0 & 0.784\ 0 & 0.846\ 9 & 0.909\ 9 \\ 0.328\ 9 & 0.396\ 3 & 0.463\ 7 & 0.531\ 1 & 0.598\ 5 & 0.665\ 9 & 0.733\ 3 & 0.800\ 7 & 0.868\ 1 & 0.935\ 5 \\ 0.314\ 5 & 0.386\ 4 & 0.458\ 2 & 0.530\ 1 & 0.601\ 9 & 0.673\ 8 & 0.745\ 6 & 0.817\ 5 & 0.889\ 3 & 0.961\ 2 \\ 0.300\ 2 & 0.376\ 5 & 0.452\ 8 & 0.529\ 1 & 0.605\ 3 & 0.681\ 6 & 0.757\ 9 & 0.834\ 2 & 0.910\ 5 & 0.986\ 8 \end{bmatrix} \quad (7)$$

使用式 4 和式 5, 按照枚举的方法变换 α_{1-14} 的数值, 变化范围为 $[0, 100\%]$, 按照顺序间隔为 0.01%。通过枚举算法得到 α_{1-14} 的值分别为 0.0、0.0、0.0、0.011 8、0、

0.047 1、0.105 9、0.0、0.411 8、0.423 5、0 时, $F(J_0, J)$ 的值最小(为 0.002 3), 这时 $J(d_x, d_y)$ 如式 8 所示。 $J_0(d_x, d_y)$ 与 $J(d_x, d_y)$ 的对应关系如图 2 所示。

$$J(d_x, d_y) = \begin{pmatrix} 0.429\ 2 & 0.465\ 4 & 0.501\ 6 & 0.537\ 9 & 0.574\ 1 & 0.610\ 4 & 0.646\ 6 & 0.682\ 8 & 0.719\ 1 & 0.755\ 3 \\ 0.414\ 8 & 0.455\ 5 & 0.496\ 2 & 0.536\ 9 & 0.577\ 6 & 0.618\ 4 & 0.659\ 1 & 0.699\ 8 & 0.740\ 5 & 0.781\ 2 \\ 0.400\ 5 & 0.445\ 6 & 0.490\ 8 & 0.536\ 0 & 0.581\ 2 & 0.626\ 4 & 0.671\ 5 & 0.716\ 7 & 0.761\ 9 & 0.807\ 1 \\ 0.386\ 1 & 0.435\ 8 & 0.485\ 4 & 0.535\ 1 & 0.584\ 7 & 0.634\ 4 & 0.684\ 0 & 0.733\ 6 & 0.783\ 3 & 0.832\ 9 \\ 0.371\ 8 & 0.425\ 9 & 0.480\ 0 & 0.534\ 1 & 0.588\ 2 & 0.642\ 4 & 0.696\ 5 & 0.750\ 6 & 0.804\ 7 & 0.858\ 8 \\ 0.357\ 4 & 0.416\ 0 & 0.474\ 6 & 0.533\ 2 & 0.591\ 8 & 0.650\ 4 & 0.708\ 9 & 0.767\ 5 & 0.826\ 1 & 0.884\ 7 \\ 0.343\ 1 & 0.406\ 1 & 0.469\ 2 & 0.532\ 2 & 0.595\ 3 & 0.658\ 4 & 0.721\ 4 & 0.784\ 5 & 0.847\ 5 & 0.910\ 6 \\ 0.328\ 7 & 0.396\ 2 & 0.463\ 8 & 0.531\ 3 & 0.598\ 8 & 0.666\ 4 & 0.733\ 9 & 0.801\ 4 & 0.868\ 9 & 0.936\ 5 \\ 0.314\ 4 & 0.386\ 4 & 0.458\ 4 & 0.530\ 4 & 0.602\ 4 & 0.674\ 4 & 0.746\ 4 & 0.818\ 4 & 0.890\ 4 & 0.962\ 4 \\ 0.300\ 0 & 0.376\ 5 & 0.452\ 9 & 0.529\ 4 & 0.605\ 9 & 0.682\ 4 & 0.758\ 8 & 0.835\ 3 & 0.911\ 8 & 0.988\ 2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

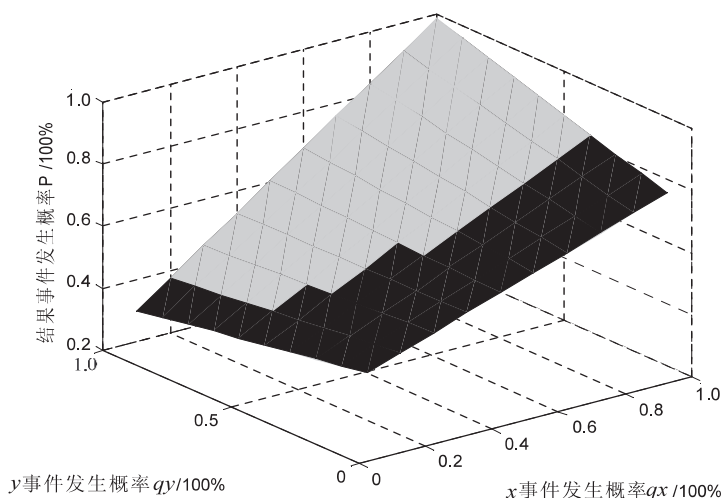


图 2 $J_0(d_x, d_y)$ 与 $J(d_x, d_y)$ 的对应关系

注:图中浅色部分表示 $J(d_x, d_y) > J_0(d_x, d_y)$, 深色部分 $J_0(d_x, d_y) > J(d_x, d_y)$ 。

这说明 $\alpha_5 = 1.18\%$ 、 $\alpha_8 = 4.71\%$ 、 $\alpha_9 = 10.59\%$ 、 $\alpha_{12} = 41.18\%$ 、 $\alpha_{13} = 42.35\%$ 。具体的,例中两个原因事件导致结果事件的逻辑关系中,包含 1.18% 的非蕴含关系、4.71% 的与关系、10.59% 的指关系、41.18% 的蕴含 2 关系、42.35% 的平均关系。可以看出,最终的主要逻辑关系为蕴含 2 和平均关系。因此可以断定上述原因事件导致结果事件是通过蕴含 2 和平均关系实现的。

上述研究对于确定系统故障演化过程中原因事件导致结果事件的关系是极为重要的。但方法也有不成熟之处。(1) 基本逻辑关系确定需要进一步探讨,当然这属于数理逻辑范畴;(2) 模糊隶属度的确定比较困难,虽然文中给出了枚举的方法但实现困难,计算量很大,需进一步寻求更为高效的方法;(3) 在扩大枚举范围时,不排除可能出现两个和多个适应度很小的情况,即有多个最优解,这时需要增加数据或通过其他方法进一步详细确定。尽管存在这些缺点,但该方法目前仍然可以解决模糊逻辑关系的确定问题。

5 结束语

论述了故障演化与模糊逻辑关系原理,构建了模

糊逻辑系统。定义了模糊逻辑关系,认为宏观上事件间具有统计性逻辑关系,引入模糊隶属度配合基本逻辑关系叠加形成模糊逻辑结构函数。得到了模糊逻辑结构函数形式,建立了系统故障演化过程中的事件间模糊逻辑系统,可表示多原因事件导致多结果事件的模糊逻辑结构函数。

基于柔性逻辑建立了模糊逻辑结构函数。使用了 20 种柔性逻辑中的 14 种逻辑表示基本逻辑关系;使用神经网络或枚举方法对模糊逻辑结构函数与每种基本逻辑关系的模糊隶属度进行确定,给出了对应的适函数。实例分析说明,两个原因事件导致结果事件的逻辑关系中,包含 1.18% 的非蕴含关系、4.71% 的与关系、10.59% 的指关系、41.18% 的蕴含 2 关系、42.35% 的平均关系。因此原因事件导致结果事件是通过蕴含和平均关系实现的。最后总结了方法的缺点。

参考文献:

[1] 陈孟婷,付晓薇,李 曦. 基于改进 PCA 算法的振荡故障根因定位方法[J]. 计算机应用与软件,2020,37(11):35-40.

- [2] 汤 良. 基于双因果键合图法液压系统故障诊断[J]. 现代机械, 2020(5): 60-65.
- [3] 何 飞, 杜学飞, 王朝俊. 基于对比格兰杰因果关系的热轧带钢头部拉窄根因诊断[J]. 中国机械工程, 2020, 31(19): 2340-2346.
- [4] 马 亮, 彭开香, 董 洁. 工业过程故障根源诊断与传播路径识别技术综述[J]. 自动化学报, 2022, 48(7): 1650-1663.
- [5] 崔铁军. 空间故障网络理论与系统故障演化过程研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1255-1262.
- [6] HUANG J, GHALAMSI AH N, PATHARKAR A, et al. An entropy-based causality framework for cross-level faults diagnosis and isolation in building HVAC systems[J]. Energy & Buildings, 2024, 317: 114378.
- [7] YIN M, WANG W, TIAN J, et al. Distributed incipient fault detection with causality-based multi-perspective subblock partitioning for large-scale nonlinear processes[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 492-510.
- [8] ZHANG X, HU W, YANG F, et al. A new transfer entropy approach based on information granulation and clustering for root cause analysis in complex industrial processes[J]. Control Engineering Practice, 2023, 140: 105669.
- [9] CHU Q, YILIN S, JINCE L, et al. The causality analysis of incipient fault in industrial processes using dynamic data stream transfer entropy[J]. Journal of Process Control, 2023, 128: 103022.
- [10] WANG S, ZHAO Q, HAN Y, et al. Root cause diagnosis for process faults based on multisensor time-series causality discovery[J]. Journal of Process Control, 2023, 122: 27-40.
- [11] 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.
- [12] CUI Tiejun, LI Shasha. Research on disaster evolution process in open-pit mining area based on space fault network[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(21): 16737-16754.
- [13] 崔铁军, 马云东. 多维空间故障树构建及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 32-37.
- [14] 崔铁军, 李莎莎. 系统运动空间与系统映射论的初步探讨[J]. 智能系统学报, 2020, 15(3): 445-451.
- [15] 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.
- [16] 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.