

量子态叠加的事件发生柔性逻辑统一表达式研究

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: 为了确定原因事件导致结果事件过程中蕴含的多逻辑关系, 提出以多量子态叠加为基础的事件发生柔性逻辑统一表达式。根据任意多事件间逻辑关系可简化为两事件逻辑关系的前提, 研究了 20 种柔性逻辑关系转化为事件发生逻辑表达式的形式, 选择其中 16 种建立了四量子态叠加的事件发生柔性逻辑统一表达式。研究这 16 种逻辑关系, 进一步确定了 8 种无明显相关性的逻辑关系, 最终形成了三量子态叠加的事件发生柔性逻辑统一表达式。研究表明: 所建表达式能同时表达 8 种逻辑关系叠加状态, 可得到结果事件发生概率中不同逻辑的构成形式, 分析了所建表达式的特点和求解过程中可能遇到的问题, 并通过实例分析说明了方法的使用过程和作用。研究成果可用于系统故障演化过程中, 原因事件导致结果事件的逻辑关系统一表达及故障发生概率确定。

关 键 词: 安全系统工程; 量子叠加; 多量子态; 柔性逻辑; 事件发生概率

中图分类号: X913

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758 (2024) 04-0774-09

系统发生故障不是一蹴而就的, 而是一种演化过程。宏观上该演化是按照一定方向发展的, 而微观上则是按照事件间因果关系进行。系统故障演化过程^[1-3]是非常复杂的动态过程, 受到系统内外因素影响, 这些因素导致了演化过程中事件、演化进程、事件间逻辑关系等发生变化。因此对系统故障演化过程的研究必须聚焦于演化经历的事件、影响的因素和事件间的逻辑关系。但对实际系统而言, 不进行实际使用、测量和统计评价, 难以得到系统故障演化的最终结果, 即发生故障的类型、概率都难以确定。更通常的是, 在系统设计或是运行期间都可分析系统故障状态、模式和可能性, 而在未进行实际测量前这些状态、模式和可能性都是并存, 它们的共同作用形成了系统某时刻的功能状态。而测量系统运行情况后才能得到系统可靠或失效的功能状态, 这时系统功能状态不再是众多状态的叠加, 而是塌缩成稳定且确定的状态。上述过程类似于量子态的量子叠加和塌缩过程。另外考虑单一量子态由 2 种极化状态表示, 而一般的量子态则是这 2 种极化态

的线性组合。在系统故障演化过程中, 原因事件导致结果事件的逻辑关系可能是多种逻辑关系的叠加, 而一种逻辑关系也具备 2 种极化态, 即完全符合该逻辑关系和完全不符合该逻辑关系, 而实际情况可能是在这 2 个极化态之间的逻辑状态。进一步地, 原因事件导致结果事件发生的逻辑关系可能有很多种, 不同逻辑关系表现出的程度也不同。需要多种逻辑关系的各自两极化态之间状态的叠加。那么上述描述的问题可总结为: 在系统故障演化过程中, 原因事件以多种逻辑关系导致结果事件发生, 应该表达和研究这些逻辑关系共同作用的叠加状态。即通过单一表达式表达这些状态的叠加, 从而确定结果事件发生概率及蕴含的逻辑关系。

关于系统故障过程中的逻辑关系、状态叠加和确定的相关研究较少。已有研究包括逻辑控制单元输出电路故障原因分析^[4]、系统可靠-失效模型研究^[5]、针对不同故障数据特征的故障概率计算^[6]、故障逻辑的维修案例检索研究^[7]、带式输送机托辊故障诊断^[8]、系统故障检测的扩展数据逻辑分析^[9]、牵引封锁故障分析及优化^[10]、模糊逻辑的 UPFC 线路新型正序故障分量研究^[11]、结合故障逻辑关系的极小冲突集求解方法^[12]、无人机自主故障诊断及应急处理研究^[13]、模糊灰关联分析法的直驱

收稿日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金 (52004120) 资助

作者简介: 崔铁军 (1983—), 教授

通信作者: 李莎莎 (1988—), 副教授 e-mail: lsslntu@163.com

式风电机组故障树研究^[14]、逻辑事故链风险评估研究^[15]、复杂不确定系统可靠性分析^[16]、模糊神经网络的动力电池故障诊断^[17]、二型神经模糊系统的轨道电路故障诊断^[18]、状态事件故障树的信息物理融合系统风险分析^[19]、改进动态因果图与模糊推理融合的故障诊断^[20]、列车空压机故障分析及逻辑优化^[21]等。这些研究在各自具体领域有所进展,但缺乏对故障过程逻辑关系状态叠加的表示能力,也难以同时将多种故障因果关系整合成统一的表达式表达结果事件发生状态,更难以具体计算多逻辑状态下的结果事件发生概率。但上述问题在系统故障演化过程的研究中确实存在,而且居于重要地位,因为表征演化过程的核心要素即为因素、事件及其逻辑关系。

综上,本文结合对泛逻辑理论中柔性逻辑的研究^[22],在构建事件发生逻辑关系表达式^[23]基础上,提出使用多量子态叠加方式表达系统故障演化过程中多原因事件导致结果事件的逻辑叠加关系,并建立量子态叠加的事件发生柔性逻辑统一表达式。该式能同时表示两原因事件导致结果事件过程中所有可能逻辑关系的叠加状态,也可计算结果事件发生概率,为故障演化研究提供了有效方法。

1 量子叠加特征和量子叠加态

经典信息存储单元为比特(bit),其基本特征是只能表示0,1这2种状态且互斥。1个比特位可表示2种状态中的1种,2个比特位可以表示4种状态中的1种,3个比特位可以表示8种状态中的1种,以此类推 n 个比特位可以表示 2^n 种状态中的1种。因此不论比特位有多少个,只能同时表示1种状态,且是确定的。

与经典比特不同,1个量子比特状态是1个二维复数向量。利用布洛赫球表示法,量子态的2个极化状态分别为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$,这分别对应于经典比特的0和1状态。一般地,量子比特存在于二维复数空间中经典比特0,1之间的状态,量子比特可用量子叠加态表示,即 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 极态的线性组合方式表示,这种表示方法是连续的、随机的、任意的,更为重要的是可以同时表示 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 构成量子态的全部状态。这时1量子比特位可同时表示2种状态,2量子比特位可同时表示4种状态,3量子比特位可同时表示8种状态,以此类推, n 量子比特位可同时

表示 2^n 种状态。如表示0~15的16个整数需要比特位 4×16 个,而量子比特位只需要4位。因此表示相同信息时,量子比特位与传统比特位数量比为 $n : (n \times 2^n) = 1 : 2^n$,可见量子比特位较传统比特位对多状态信息表示的优势。一般情况下量子态是在 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 状态的线性组合基础上表示的,如(1)式所示。

$$|\mu\rangle = \alpha_0 |0\rangle + \alpha_1 |1\rangle \quad (1)$$

式中: α_0 和 α_1 是任意复数,分别代表2种状态的概率幅,且 $\alpha_0^2 + \alpha_1^2 = 1$ (塌缩概率)。

(1)式给出了单量子态的表示方法,更详尽的说明参见布洛赫球表示法^[24],此处不做详述。(1)式由3个要素组成, $|\mu\rangle$ 代表量子态或量子叠加态, α_0 和 α_1 分别代表 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 出现的概率幅, $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 代表量子的极化状态。那么多量子态叠加后的系统量子态表达也可从这3个方面确定。首先2量子态 $|\mu_1\rangle$ 和 $|\mu_2\rangle$ 表示为叠加态 $|\mu_1\mu_2\rangle$,则 $|\mu_1\mu_2\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle$ 。 $|00\rangle$ 表示2量子态均极化为0的状态, $|01\rangle$ 表示 $|\mu_1\rangle$ 极化为0且 $|\mu_2\rangle$ 极化为1的状态, $|10\rangle$ 表示 $|\mu_1\rangle$ 极化为1且 $|\mu_2\rangle$ 极化为2的状态, $|11\rangle$ 表示两量子态均极化为1的状态。 $\alpha_{00}, \alpha_{01}, \alpha_{10}$ 和 α_{11} 分别为上述4个状态的概率幅,4种状态的出现概率分别为 $\alpha_{00}^2, \alpha_{01}^2, \alpha_{10}^2$ 和 α_{11}^2 ,且满足 $\alpha_{00}^2 + \alpha_{01}^2 + \alpha_{10}^2 + \alpha_{11}^2 = 1$ 。

3量子态 $|\mu_1\rangle, |\mu_2\rangle$ 和 $|\mu_3\rangle$ 的叠加表示为 $|\mu_1\mu_2\mu_3\rangle$,则 $|\mu_1\mu_2\mu_3\rangle = \alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{100}|100\rangle + \alpha_{110}|110\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{011}|011\rangle + \alpha_{101}|101\rangle + \alpha_{111}|111\rangle$ 。同理 $|000\rangle$ 表示3量子态均极化为0的状态, $|010\rangle$ 表示 $|\mu_1\rangle$ 极化为0且 $|\mu_2\rangle$ 极化为1且 $|\mu_3\rangle$ 极化为0的状态,以此类推。 $\alpha_{000}, \alpha_{010}, \alpha_{100}, \alpha_{110}, \alpha_{001}, \alpha_{011}, \alpha_{101}$ 和 α_{111} 分别为上述8个状态的概率幅,8种状态的出现概率分别为 $\alpha_{000}^2, \alpha_{010}^2, \alpha_{100}^2, \alpha_{110}^2, \alpha_{001}^2, \alpha_{011}^2, \alpha_{101}^2$ 和 α_{111}^2 ,且满足 $\alpha_{000}^2 + \alpha_{010}^2 + \alpha_{100}^2 + \alpha_{110}^2 + \alpha_{001}^2 + \alpha_{011}^2 + \alpha_{101}^2 + \alpha_{111}^2 = 1$ 。

同理4状态 $|\mu_1\rangle, |\mu_2\rangle, |\mu_3\rangle$ 和 $|\mu_4\rangle$ 的叠加表示为 $|\mu_1\mu_2\mu_3\mu_4\rangle$,则 $|\mu_1\mu_2\mu_3\mu_4\rangle = \alpha_{0000}|0000\rangle + \alpha_{0100}|0100\rangle + \alpha_{1000}|1000\rangle + \alpha_{1100}|1100\rangle + \alpha_{0010}|0010\rangle + \alpha_{0110}|0110\rangle + \alpha_{1010}|1010\rangle + \alpha_{1110}|1110\rangle + \alpha_{0001}|0001\rangle + \alpha_{0101}|0101\rangle + \alpha_{1001}|1001\rangle + \alpha_{1101}|1101\rangle + \alpha_{0011}|0011\rangle +$

$\alpha_{0111}|0111\rangle + \alpha_{1011}|1011\rangle + \alpha_{1111}|1111\rangle$ 。 $|0000\rangle$ 表示 4 量子态均极化为 0 的状态, $|0100\rangle$ 表示 $|\mu_1\rangle$ 极化为 0 且 $|\mu_2\rangle$ 极化为 1 且 $|\mu_3\rangle$ 极化为 0 且 $|\mu_4\rangle$ 极化为 0 的状态, 以此类推。 $\alpha_{0000} \sim \alpha_{1111}$ 分别为上述 16 个 状态的 概率幅, 16 种 状态的 出现 概率 分别为 $\alpha_{0000}^2 \sim \alpha_{1111}^2$, 且 满足 $\alpha_{0000}^2 + \cdots + \alpha_{1111}^2 = 1$ 。

对于更多量子态的叠加可依据上述过程扩展, 由于研究的柔性逻辑统一表达式所需基本柔性逻辑只有 16 种, 因此这里只给出 4 个量子位叠加的量子叠加态表达形式。

2 柔性逻辑和事件发生逻辑

何华灿教授提出的泛逻辑是综合考虑非标准逻辑的逻辑描述体系^[25-27]。综合地描述了模糊逻辑、概率逻辑和有界逻辑之间的联系, 是通过相容性相关关系确定的。他提出的命题泛逻辑理论框架结构是一个四维空间 $[0, 1]^4$, 空间中心点 O 代表有界逻辑

辑, 当命题真度由连续值退化为二值时, 即为确定性推理的标准逻辑(刚性逻辑), 在刚性逻辑之外为柔性逻辑。从 O 点延伸的 4 个坐标轴代表 4 种不确定性; 命题真度估计误差的不确定性、命题之间广义相关性的不确定性、命题之间相对权重的不确定性、在组合运算中决策阈值的不确定性^[25]。从上述 4 个维度出发, 这些模式都可用布尔逻辑算子组来描述, 也可用 M-P 模型来描述^[25]。文献[25]中提出了 20 种柔性逻辑关系, 结合空间故障网络理论^[28-31]中的事件间逻辑关系给出了对应的 20 种事件发生逻辑关系形式^[23]。进一步分析各逻辑关系的作用, 其中 $Z = \neg(x \leftrightarrow y)$ 非等价($P(q_x, q_y) = 1 - q_x \text{ or } q_y$) 和 $Z = x \leftrightarrow y$ 等价($P(q_x, q_y) = q_x \text{ or } q_y$) 2 种情况导致事件作用对称或相等, 在分析中难以进一步区分。 $Z = \neg(x \odot^e y)$ 非组合和 $Z = x \odot^e Y$ 组合 2 种情况需要引进条件变量。因此上述 4 种事件发生逻辑关系不属于统一表达式研究范围, 其余 16 种事件发生逻辑关系式如表 1 所示。

表 1 16 种事件发生逻辑关系式

编号	关系模式分类	逻辑描述	事件发生逻辑关系式	叠加态
1	$0 = (0, 0); 0 = (0, 1); 0 = (1, 0); 0 = (1, 1)$	$Z = 0$ 恒假	$L_1(q_x, q_y) = 0$	$ 0001\rangle$
2	$1 = (0, 0); 0 = (0, 1); 0 = (1, 0); 0 = (1, 1)$	$Z = \neg(x \vee y)$ 非或	$L_2(q_x, q_y) = 1 - q_x - q_y + q_x q_y$	$ 0101\rangle$
3	$1 = (0, 0); 1/2 = (0, 1); 1/2 = (1, 0); 0 = (1, 1)$	$Z = \neg(x \textcircled{R} y)$ 非平均	$L_3(q_x, q_y) = 1 - (q_x/2 + q_y/2)$	$ 0011\rangle$
4	$0 = (0, 0); 1 = (0, 1); 0 = (1, 0); 0 = (1, 1)$	$Z = \neg(y \rightarrow x)$ 非蕴含 2	$L_4(q_x, q_y) = q_y - q_x q_y$	$ 1001\rangle$
5	$1 = (0, 0); 1 = (0, 1); 0 = (1, 0); 0 = (1, 1)$	$Z = \neg x$ 非 x	$L_5(q_x, q_y) = 1 - q_x$	$ 1101\rangle$
6	$0 = (0, 0); 0 = (0, 1); 1 = (1, 0); 0 = (1, 1)$	$Z = \neg(x \rightarrow y)$ 非蕴含 1	$L_6(q_x, q_y) = q_x - q_x q_y$	$ 1011\rangle$
7	$1 = (0, 0); 0 = (0, 1); 1 = (1, 0); 0 = (1, 1)$	$Z = \neg y$ 非 y	$L_7(q_x, q_y) = 1 - q_y$	$ 1111\rangle$
8	$1 = (0, 0); 1 = (0, 1); 1 = (1, 0); 0 = (1, 1)$	$Z = \neg(x \wedge y)$ 非与	$L_8(q_x, q_y) = 1 - q_x q_y$	$ 0111\rangle$
9	$1 = (0, 0); 1 = (0, 1); 1 = (1, 0); 1 = (1, 1)$	$Z = 1$ 恒真	$L_9(q_x, q_y) = 1$	$ 0000\rangle$
10	$0 = (0, 0); 1 = (0, 1); 1 = (1, 0); 1 = (1, 1)$	$Z = x \vee y$ 或	$L_{10}(q_x, q_y) = q_x + q_y - q_x q_y$	$ 0100\rangle$
11	$0 = (0, 0); 1/2 = (0, 1); 1/2 = (1, 0); 1 = (1, 1)$	$Z = x \textcircled{R} y$ 平均	$L_{11}(q_x, q_y) = q_x/2 + q_y/2$	$ 0010\rangle$
12	$1 = (0, 0); 0 = (0, 1); 1 = (1, 0); 1 = (1, 1)$	$Z = y \rightarrow x$ 蕴含 2	$L_{12}(q_x, q_y) = 1 - q_y + q_x q_y$	$ 1000\rangle$
13	$0 = (0, 0); 0 = (0, 1); 1 = (1, 0); 1 = (1, 1)$	$Z = x$ 指 x	$L_{13}(q_x, q_y) = q_x$	$ 1100\rangle$
14	$1 = (0, 0); 1 = (0, 1); 0 = (1, 0); 1 = (1, 1)$	$Z = x \rightarrow y$ 蕴含 1	$L_{14}(q_x, q_y) = 1 - q_x + q_x q_y$	$ 1010\rangle$
15	$0 = (0, 0); 1 = (0, 1); 0 = (1, 0); 1 = (1, 1)$	$Z = y$ 指 y	$L_{15}(q_x, q_y) = q_y$	$ 1110\rangle$
16	$0 = (0, 0); 0 = (0, 1); 0 = (1, 0); 1 = (1, 1)$	$Z = x \wedge y$ 与	$L_{16}(q_x, q_y) = q_x q_y$	$ 0110\rangle$

表 1 中给出了 16 种事件发生逻辑关系式, 这些关系式代表了事件之间在系统故障演化过程中的发生逻辑关系, 即原因事件以何种关系导致结果事件,

是作者根据各逻辑描述转化得到的。任何多元逻辑关系都可表示为二元逻辑关系的叠加, 因此表中只给出了两原因事件 (x 和 y) 导致结果事件的概率表

达形式 L , 例如两原因事件的发生概率分别为 $q_x = 0.1, q_y = 0.2$, 那么根据第16条关系, 由这2个原因事件导致结果事件的发生概率为 $L_{16}(q_x, q_y) = q_x q_y = 0.1 \times 0.2 = 0.02$ 。

进一步分析上述16种关系之间存在的联系。表1中1~8条均为逆向关系, 9~16条是与1~8条分别对应的正向关系。对表1进行第一次划分, 1~8条和9~16条两部分的逻辑关系是线性互补的, 可分析两者之一。选择表1中9~16条的8种逻辑关系分析, 也可分为两部分, $\{9, 10, 12, 13\}$ 条为一组, 对应的 $\{11, 16, 14, 15\}$ 条为另一组。这2组之间存在一定的逻辑对应关系但非线性, 进一步划分则逻辑关系不清。根据上述分析将事件发生逻辑表示为多量子叠加态, 设 $|00\rangle$ 表示 L_9 , $|01\rangle$ 表示 L_{10} , $|10\rangle$ 表示 L_{12} , $|11\rangle$ 表示 L_{13} 。那么 $|000\rangle$ 表示 L_9 , $|010\rangle$ 表示 L_{10} , $|100\rangle$ 表示 L_{12} , $|110\rangle$ 表示 L_{13} , 对应的 $|001\rangle$ 表示 L_{11} , $|011\rangle$ 表示 L_{16} , $|101\rangle$ 表示 L_{14} , $|111\rangle$ 表示 L_{15} 。 $|0000\rangle$ 表示 L_9 , $|0100\rangle$ 表示 L_{10} , $|1000\rangle$ 表示 L_{12} , $|1100\rangle$ 表示 L_{13} , $|0010\rangle$ 表示 L_{11} , $|0110\rangle$ 表示 L_{16} , $|1010\rangle$ 表示 L_{14} , $|1110\rangle$ 表示 L_{15} , 对应的 $|0001\rangle$ 表示 L_1 , $|0101\rangle$ 表示 L_2 , $|1001\rangle$ 表示 L_4 , $|1101\rangle$ 表示 L_5 , $|0011\rangle$ 表示 L_3 , $|0111\rangle$ 表示 L_8 , $|1011\rangle$ 表示 L_6 , $|1111\rangle$ 表示 L_7 , 表1列出了所有事件发生逻辑与量子叠加态的对应关系。

3 事件发生柔性逻辑统一表达式构建

单量子态的 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 表示2种极化状态, 即为2种极端形式, 对应于事件发生逻辑的2种极限状态为完全符合逻辑和完全不符合逻辑。如果设 $|\mu\rangle$ 是 L_{16} , 那么完全符合 L_{16} 逻辑时 $\alpha_0^2 = 1, \alpha_1^2 = 0$, $|\mu\rangle = 1 \times |0\rangle + 0 \times |1\rangle$; 完全不符合 L_{16} 逻辑 $\alpha_0^2 = 0, \alpha_1^2 = 1$, $|\mu\rangle = 0 \times |0\rangle + 1 \times |1\rangle$ 。

对应于表1中的16条逻辑关系, 可统一通过概率幅进行表示, $\alpha_{0000} \sim \alpha_{1111}$ 分别为上述16个关系的概率幅, 16种关系的出现概率分别为 $\alpha_{0000}^2 \sim \alpha_{1111}^2$, 且满足 $\alpha_{0000}^2 + \dots + \alpha_{1111}^2 = 1$, 当 $\alpha_{0000}^2 \sim \alpha_{1111}^2$ 大于0且值越大时代表对应逻辑关系越明显, 当 $\alpha_{0000}^2 \sim \alpha_{1111}^2$ 为0时表示没有对应逻辑关系, 那么4量子态叠加的柔性逻辑统一表达式, 对于两事件而言如(2)式所示。

$$P(q_x, q_y) = \alpha_{0000}^2 L_9(q_x, q_y) + \alpha_{0100}^2 L_{10}(q_x, q_y) + \alpha_{1000}^2 L_{12}(q_x, q_y) + \alpha_{1100}^2 L_{13}(q_x, q_y) + \alpha_{0010}^2 L_{11}(q_x, q_y) + \alpha_{0110}^2 L_{16}(q_x, q_y) + \alpha_{1010}^2 L_{14}(q_x, q_y) + \alpha_{1110}^2 L_{15}(q_x, q_y) + \alpha_{0001}^2 L_1(q_x, q_y) + \alpha_{0101}^2 L_2(q_x, q_y) + \alpha_{1001}^2 L_4(q_x, q_y) + \alpha_{1101}^2 L_5(q_x, q_y) + \alpha_{0011}^2 L_3(q_x, q_y) + \alpha_{0111}^2 L_8(q_x, q_y) + \alpha_{1011}^2 L_6(q_x, q_y) + \alpha_{1111}^2 L_7(q_x, q_y) \quad (2)$$

由于(2)式表达了两原因事件导致结果事件的发生概率, 因此 $P(q_x, q_y)$ 必须在 $[0, 1]$ 范围内。由于 $L_{1 \sim 16}$ 表示某一逻辑关系的结果, 而 q_x 和 q_y 代表了两原因事件的发生概率, 因此 $L_{1 \sim 16}$ 通过 q_x 和 q_y 的逻辑运算后其值必定在 $[0, 1]$ 。又由于 $\alpha_{0000}^2 + \dots + \alpha_{1111}^2 = 1$, 那么(2)式得到的 $P(q_x, q_y)$ 的值必然在 $[0, 1]$, 因此符合对事件发生概率的定义。进一步地, 由于表1中1~8条和9~16条的逻辑关系相反, 1~8条事件发生逻辑关系式可用9~16条表示, 因此事件发生柔性逻辑统一表达式中可去掉概率幅下角标最后一位是1的所有项。这不会影响表达式的结果, 同时能减少1个量子位, 因此(2)式可表示为(3)式。

$$P(q_x, q_y) = \alpha_{000}^2 L_9(q_x, q_y) + \alpha_{010}^2 L_{10}(q_x, q_y) + \alpha_{100}^2 L_{12}(q_x, q_y) + \alpha_{110}^2 L_{13}(q_x, q_y) + \alpha_{001}^2 L_{11}(q_x, q_y) + \alpha_{011}^2 L_{16}(q_x, q_y) + \alpha_{101}^2 L_{14}(q_x, q_y) + \alpha_{111}^2 L_{15}(q_x, q_y) \quad (3)$$

(3)式给出了更为简洁且必要的事件发生柔性逻辑统一表达式, 使用3量子态叠加的形式即可进行表达。将表1中对应的事件发生逻辑关系式代入(3)式, 得到最终形式如(4)式所示。

$$P(q_x, q_y) = \alpha_{000}^2 + \alpha_{010}^2 (q_x + q_y - q_x q_y) + \alpha_{100}^2 (1 - q_y + q_x q_y) + \alpha_{110}^2 q_x + \alpha_{001}^2 (q_x/2 + q_y/2) + \alpha_{011}^2 q_x q_y + \alpha_{101}^2 (1 - q_x + q_x q_y) + \alpha_{111}^2 q_y \quad (4)$$

这时 $\alpha_{000}^2 + \alpha_{010}^2 + \alpha_{100}^2 + \alpha_{110}^2 + \alpha_{001}^2 + \alpha_{011}^2 + \alpha_{101}^2 + \alpha_{111}^2 = 1$ 。从上述分析可知, 对于给定的多种柔性逻辑关系, 当考虑两原因事件导致结果事件的逻辑关系, 即通过2个原因事件发生概率确定结果事件发生概率时, 可使用(4)式确定结果事件发生概率。原因在于, 如表1所述, (2)式中的逻辑关系具有相关性。可只考虑其中8种相关性较弱的独立

逻辑关系进行组合,从而形成事件发生柔性逻辑统一表达式。即(4)式代表了由 8 种相关性较弱的逻辑关系叠加形成的总逻辑关系。实际上在系统故障演化过程中,很难完全确定两事件间逻辑关系属于哪一种,多数情况下更偏重于主要属于哪一种或属于哪几种逻辑关系。(4)式具有同时表示这 8 种逻辑关系的能力,当然该式只针对两事件作为原因事件导致的结果事件。当多原因事件导致结果事件时,可根据任意多逻辑关系拆分成两两逻辑关系的性质进行叠加,例如 3 事件 a, b, c 可表示为 $P_{abc}(q_a, P_{bc}(q_b, q_c))$ 的形式进行计算。还有原因事件发生概率的确定问题,其确定方法在安全系统工程领域已有应用,此处不再赘述。另外各事件逻辑关系的出现概率 $\alpha_{000}^2 \sim \alpha_{111}^2$ 值确定也较为困难。作者提出了结合因素空间和空间故障树理论的因素分析法^[32-33]和系统功能结构分析法^[34-35]等可初步解决该问题。

4 实例分析

由于 16 种事件发生柔性逻辑关系式基本为二元运算符。因此设系统由 2 个原因事件和 1 个结果事件构成,即由 3 个事件构成系统,但事件之间的作用关系不清。设两原因事件的发生概率为 $q_x = 0.2$, $q_y = 0.3$ 。将其代入(4)式,可得到(5)式。

$$P(q_x, q_y) = \alpha_{000}^2 + 0.44\alpha_{010}^2 + 0.76\alpha_{100}^2 + 0.2\alpha_{110}^2 + 0.25\alpha_{001}^2 + 0.06\alpha_{011}^2 + 0.86\alpha_{101}^2 + 0.3\alpha_{111}^2 \quad (5)$$

(5)式展示了由 $q_x = 0.2, q_y = 0.3$ 这 2 个事件导致的结果事件发生柔性逻辑统一表达式。从表达式的结构看,可了解该系统中原因事件导致结果事件时,原因事件以各种逻辑方式导致结果事件的程度。即 $\alpha_{000}^2: \alpha_{010}^2: \alpha_{100}^2: \alpha_{110}^2: \alpha_{001}^2: \alpha_{011}^2: \alpha_{101}^2: \alpha_{111}^2 = 1: 0.44: 0.76: 0.2: 0.25: 0.06: 0.86: 0.3$, 可表示在未测量系统故障情况下,系统所有可能逻辑关系的重要度。也可理解为未测量且 $q_x = 0.2, q_y = 0.3$ 时,结果事件出现上述 8 种逻辑关系的相对比例。

当对系统进行测量时,最一般的情况,原因事件之间只有一种逻辑关系导致结果事件,则(5)式将塌缩为一种柔性逻辑。例如只存在 $Z = x \textcircled{R} y$ 平均柔性逻辑,即 $\alpha_{001}^2 = 1$, 则(5)式塌缩为(6)式。

$$P(q_x, q_y) = 0.25 \quad (6)$$

这时测量结果事件,如果其发生概率为 0.25,则预想与测量对应。如不是则可能存在多种柔性逻辑。当出现 2 种柔性逻辑关系并存时,例如 $Z = x \textcircled{R} y$ 平均和 $Z = x \vee y$ 或的柔性逻辑,这时 $\alpha_{001}^2 + \alpha_{010}^2 = 1$, 则(5)式塌缩为(7)式。

$$P(q_x, q_y) = 0.44\alpha_{010}^2 + 0.25\alpha_{001}^2 \quad (7)$$

这时如果测量结果事件发生概率为 0.6 即可得到方程组,如(8)式所示。

$$\begin{cases} 0.44\alpha_{010}^2 + 0.25\alpha_{001}^2 = 0.35 \\ \alpha_{010}^2 + \alpha_{001}^2 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

这时 $\alpha_{010}^2 = 0.53, \alpha_{001}^2 = 0.47$, 表明在上述过程中的总体逻辑关系为 53% 的“或”逻辑关系以及 47% 的平均逻辑关系组合而成。如果 α_{010}^2 或 α_{001}^2 小于 0 或大于 1, 则不存在实际意义,说明可能不存在其他柔性逻辑。这可作为验证逻辑关系合理性和存在性的方法。

那么存在 3 种柔性逻辑关系时,就需要将(8)式扩充为 3 个方程。第三个方程必须重新测量 q_x, q_y 和结果事件的发生概率,得到与原有方程线性无关的方程。从而解出这 3 种柔性逻辑在总体逻辑中的作用程度。以此类推增加测量次数应对多种柔性逻辑的耦合。

进一步地,也可将(5)式对应的结果事件作为原因事件,继续与其他事件的柔性逻辑表达式再次叠加。这就实现了对系统故障演化过程的事件发生柔性逻辑的整体统一表达。为系统故障演化过程中的事件逻辑关系提供有效研究方法。

与传统方法相比,事件发生柔性逻辑统一表达式的特点在于具有同时表达能力和可传递能力。同时表达能力是通过一个柔性逻辑统一表达式可同时表示导致该事件的所有柔性逻辑关系。可传递能力是在系统故障演化过程中,事件的柔性逻辑可通过与其他事件柔性逻辑的叠加继续传递下去,从而表示整个系统故障演化过程最终结果事件的柔性逻辑情况。这些能力目前尚未有类似方法可以实现。

在安全科学中,通过量子态叠加的思路研究系统安全或失效状态是一种极其重要的思想和途径。安全科学重在实现对失效的预测和预防,但当事故、故障和失效发生前并不能实质性确定发生的情况。这与量子态从叠加到塌缩的过程有相似性。即在系统正常运行时所有可能的故障模式或状态是叠加的,只是发生的可能性随着系统运行不断变化。当

系统故障发生或者有意测量系统故障状态时,系统故障模式或状态将塌缩为确定态。因此,利用所有可能的故障模式或状态的叠加可提前研究系统存在的故障模式及其可能性,为保障系统安全,提前预防提供支持。

5 结 论

本文研究了基于量子态叠加的事件发生柔性逻辑统一表达式的构建方法和一些性质。主要结论如下:

1) 讨论了柔性逻辑和事件发生逻辑的关系。根据柔性逻辑的20种逻辑关系特点,选择了16种常用的柔性逻辑关系进行分析,对应构建了事件发

生逻辑关系式。再将这16种逻辑关系根据相关性进行划分,用4量子态叠加形式进行表示,从而得到事件发生逻辑关系式与量子态的对应关系。

2) 构建了事件发生柔性逻辑统一表达式。通过单一表达式同时表示两原因事件导致结果事件的多逻辑关系并存状态,构建了事件发生柔性逻辑统一表达式,证明了所得结果事件发生概率满足 $[0, 1]$ 的要求。同时考虑到16种逻辑关系中,有8种关系与另外8种关系直接对应,可通过正向的8种关系表达逆向的8种关系,进而化简得到使用3量子态叠加表示的事件发生柔性逻辑统一表达式。最后分析了该表达式的特点和求解问题。并通过实例分析说明了方法的使用过程、作用和意义。

参考文献:

- [1] 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): 1254-1262
CUI Tiejun. Profound trace and exploration into the space fault network theory and the system fault evolution process[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1254-1262 (in Chinese)
- [2] 崔铁军, 李莎莎. 少故障数据条件下 SFEP 最终事件发生概率分布确定方法[J]. 智能系统学报, 2020, 15(1): 136-143
CUI Tiejun, LI Shasha. Determination method of target event occurrence probability in SFEP under the condition of less fault data[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(1): 136-143 (in Chinese)
- [3] 崔铁军, 李莎莎. 空间故障网络中边缘事件结构重要度研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(5): 1705-1710
CUI Tiejun, LI Shasha. Probe into the structure importance of the edge events in the space fault network[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(5): 1705-1710 (in Chinese)
- [4] 汪婷, 肖曦, 彭冬良. 逻辑控制单元输出电路故障原因分析及改进措施[J]. 机械设计, 2020, 37(增刊2): 224-226
WANG Ting, XIAO Xi, PENG Dongliang. Fault analysis and improvement measures of logic control unit output circuit[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(suppl 2): 224-226 (in Chinese)
- [5] 崔铁军, 李莎莎. 系统可靠-失效模型的哲学意义与智能实现[J]. 智能系统学报, 2020, 15(6): 1104-1112
CUI Tiejun, LI Shasha. Philosophical significance of system reliability-failure model and intelligent implementation[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(6): 1104-1112 (in Chinese)
- [6] 崔铁军, 李莎莎. 针对不同故障数据特征的 SFN 最终事件发生概率计算方法研究[J]. 系统科学与数学, 2020, 40(11): 2151-2160
CUI Tiejun, LI Shasha. Research on computing method of target event occurrence probability based on different fault data characteristics in SFN[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2020, 40(11): 2151-2160 (in Chinese)
- [7] 王苗, 肖明芳, 康凯, 等. 基于灰色关联和故障逻辑的维修案例检索方法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(8): 289-295
WANG Miao, XIAO Mingfang, KANG Kai, et al. Maintenance case retrieval method based on grey correlation and fault logic[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(8): 289-295 (in Chinese)
- [8] 刘芬. 基于大数据技术的带式输送机托辊故障诊断[J]. 煤矿机械, 2020, 41(8): 177-179
LIU Fen. Fault diagnosis of roller of belt conveyor based on big data technology[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(8): 177-179 (in Chinese)
- [9] 孙中建, 杨博, 齐楚, 等. 面向工业混杂系统故障检测的扩展数据逻辑分析方法[J]. 化工学报, 2020, 71(11): 5237-5245

- SUN Zhongjian, YANG Bo, QI Chu, et al. An extended logical analysis of data approach to fault detections of industrial hybrid systems[J]. CIESC Journal, 2020, 71(11): 5237-5245 (in Chinese)
- [10] 陈卓群. 地铁列车总风压力低的牵引封锁故障分析及优化[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 175-178
CHEN Zhuoqun. Analysis of traction blocking fault caused by low metro vehicle total wind pressure and optimization scheme[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 175-178 (in Chinese)
- [11] 郑涛, 王赞鹏, 马家璇, 等. 基于模糊逻辑的 UPFC 线路新型正序故障分量方向元件[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 145-152
ZHENG Tao, WANG Yunpeng, MA Jiaxuan, et al. Fuzzy logic based novel directional relay using positive-sequence fault component for line equipped power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 145-152 (in Chinese)
- [12] 欧阳丹彤, 高菡, 徐旖旎, 等. 结合故障逻辑关系的极小冲突集求解方法[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(7): 1472-1480
OUYANG Dantong, GAO Han, XU Yini, et al. Minimal conflict set solving method combined with fault logic relationship[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(7): 1472-1480 (in Chinese)
- [13] 蒙文跃, 杨延平, 温阳, 等. 一种临近空间太阳能无人机自主故障诊断及应急处理策略[J]. 航天控制, 2020, 38(2): 56-61
MENG Wenye, YANG Yanping, WEN Yang, et al. An autonomous fault diagnosis and emergency treatment strategy for solar-powered UAVs in near space[J]. Aerospace Control, 2020, 38(2): 56-61 (in Chinese)
- [14] 焦杰, 文泽军. 基于模糊灰关联分析法的直驱式风电机组故障树分析[J]. 湖南科技大学学报, 2020, 35(1): 62-70
JIAO Jie, WEN Zejun. Fault tree analysis of direct-drive wind turbines based on fuzzy grey correlation analysis[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2020, 35(1): 62-70 (in Chinese)
- [15] 宫建锋, 屈高强, 靳盘龙, 等. 基于逻辑事故链风险评估的复杂网络关键线路识别[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 105-110
GONG Jianfeng, QU Gaoqiang, JIN Panlong, et al. Critical line identification in complex networks based on risk assessment of accident chain[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 105-110 (in Chinese)
- [16] 王海朋, 段富海. 复杂不确定系统可靠性分析的贝叶斯网络方法[J]. 兵工学报, 2020, 41(1): 171-182
WANG Haipeng, DUAN Fuhai. Bayesian network method for reliability analysis of complex uncertainty systems[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(1): 171-182 (in Chinese)
- [17] 李晓辉, 张向文, 周永健, 等. 模糊神经网络的动力电池故障诊断系统[J]. 电源技术, 2019, 43(8): 1391-1394
LI Xiaohui, ZHANG Xiangwen, ZHOU Yongjian, et al. Power battery fault diagnosis system based on fuzzy neural network[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(8): 1391-1394 (in Chinese)
- [18] 王梓丞, 张亚东, 郭进, 等. 基于区间二型神经模糊系统的轨道电路故障诊断[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 190-196
WANG Zicheng, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. Fault diagnosis for track circuit based on interval type-2 neural-fuzzy system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(1): 190-196 (in Chinese)
- [19] 徐丙凤, 何高峰, 张黎宁. 基于状态事件故障树的信息物理融合系统风险建模[J]. 计算机科学, 2019, 46(5): 105-110
XU Bingfeng, HE Gaofeng, ZHANG Lining. Risk modeling for cyber-physical systems based on state/event fault trees[J]. Computer Science, 2019, 46(5): 105-110 (in Chinese)
- [20] 毛彪, 杨松, 李英顺. 改进动态因果图与模糊推理融合故障诊断方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(3): 259-265
MAO Biao, YANG Song, LI Yingshun. Improved dynamic causality diagram and fuzzy inference fusion fault diagnosis method[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(3): 259-265 (in Chinese)
- [21] 胡方阳. 地铁列车空压机故障分析及逻辑优化[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(1): 108-110
HU Fangyang. Fault analysis and logic optimization of the air compressor for metro train[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(1): 108-110 (in Chinese)
- [22] 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 Trans on Intelligent Systems, 2021, 16(3): 552-559 (in Chinese)
- [23] 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 (in Chinese)
- [24] 陈汉武. 量子信息与量子计算简明教程[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006
- CHEN Hanwu. Concise course of quantum information and quantum computing[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2006 (in Chinese)
- [25] 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. Refinding the interpretability of artificial intelligence[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2019, 14(3): 393-412 (in Chinese)
- [26] 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 (in Chinese)
- [27] 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
- HE Huacan. Significant progress in basic theory of artificial intelligence——on Zhong Yixin' monograph "principles of advanced artificial intelligence"[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(1): 163-166 (in Chinese)
- [28] 李莎莎, 崔铁军. 基于 SFN 故障模式的最终事件故障概率分布确定方法[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(6): 9-16
- LI Shasha, CUI Tiejun. The determination method for fault probability distribution of target event based on fault mode of SFN [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2020, 37(6): 9-16 (in Chinese)
- [29] 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. A survey of space fault tree and space fault network[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2): 399-405 (in Chinese)
- [30] 李莎莎, 崔铁军. 空间故障网络中单向环转化与事件发生概率计算[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 457-463
- LI Shasha, CUI Tiejun. Unidirectional ring transformation and the event probability calculation in the space fault network[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(2): 457-463 (in Chinese)
- [31] 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 (in Chinese)
- [32] 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 (in Chinese)
- [33] 李莎莎, 崔铁军, 马云东. 基于云模型的变因素影响下系统可靠性模糊评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(2): 132-138
- LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong. Method research on fuzzy comprehensive evaluation of system reliability based on cloud model considering variable factors[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(2): 132-138 (in Chinese)
- [34] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 完备与不完备背景关系中蕴含的系统功能结构分析[J]. 计算机科学, 2017, 44(3): 268-273
- CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. System function structure analysis in the complete and incomplete background relationship[J]. Computer Science, 2017, 44(3): 268-273 (in Chinese)
- [35] 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 (in Chinese)

Study on unified expression of event occurrence flexible logic
based on superposition quantum states

CUI Tiejun, LI Shasha

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

Abstract: To determine the multi logical relationship in the process of cause event leading to result event, a unified expression of flexible logic of event occurrence based on the superposition of multi quantum states is proposed. According to the premise that the logical relationship between any numbers of events can be simplified to the logical relationship between the two events, 20 kinds of flexible logical relationships are studied, and 16 of them are selected to establish the unified expression of flexible logic of event occurrence. By studying those 16 kinds of logical relationships, 8 kinds of logical relationships without obvious correlation are further determined, and finally the unified expression of event occurrence flexible logic of superposition of three quantum states is formed. The result shows that the expression can express 8 kinds of superposition states of logical relationships at the same time, and the different logical forms in the probability of occurrence of result events can be obtained. Finally, the characteristics of the expression and the problems that may be encountered in the process of solving are analyzed. And through the example analysis, the usage process and function of the present method were explained. It can be used to express the logical relationship between the cause event and the result event in the system fault evolution and determine the probability of fault occurrence.

Keywords: safety system engineering; quantum superposition; multiple quantum states; flexible logic; event probability

引用格式: 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 (in Chinese)