

中文引用格式:崔铁军,李莎莎,邓文浩. 基于量子思想描述的系统故障演化过程[J]. 中国安全科学学报,2025,35(5):1-7.

英文引用格式:CUI Tiejun, LI Shasha, DENG Wenhao. System fault evolution process based on quantum thought description[J]. China Safety Science Journal,2025,35(5):1-7.

基于量子思想描述的系统故障演化过程^{*}

崔铁军^{1,2}教授, 李莎莎^{**1,2}副教授, 邓文浩³

(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 辽宁省现代安全工程产业学院, 辽宁 沈阳 110159;

3 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030600)

中图分类号:X913

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0671

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(52434007);国家自然科学基金资助(52004120)。

【摘要】 为探究系统故障演化过程(SFEP)及其特性,提出使用量子思想描述 SFEP 的方法。首先,论述 SFEP 与事件功能状态的关系,探究利用量子思想描述 SFEP 的原理;然后,构建 SFEP 的量子描述的数学模型,以实现 SFEP 量子态的测量塌缩;最后,确定故障模式及其发生概率。结果表明:SFEP 具有多样性和不确定性、事件量子态叠加性、测量塌缩性和两极态性,这是通过量子思想研究 SFEP 的基础。SFEP 可分解为多个层次,不同层的对象及其量子态叠加方式不同;通过各层对象量子态的叠加可以得到 SFEP 量子态,SFEP 量子态是各层对象的概率幅的积的多项式构成的,制定了各层对象量子态概率幅构成的限制条件;SFEP 量子态向量的每个维度都是一种故障状态;对因素相值的测量使 SFEP 量子态塌缩,得到可能的各量子态(故障模式)发生概率。

【关键词】 量子思想; 系统故障演化过程(SFEP); 故障模式; 量子态叠加; 测量塌缩

System fault evolution process based on quantum thought description

CUI Tiejun^{1,2}, LI Shasha^{1,2}, DENG Wenhao³

(1 School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning 110159, China; 2 Liaoning Modern Safety Engineering Industry School, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning 110159, China; 3 College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030600, China)

Abstract: In order to study the SFEP and its characteristics, a method for describing SFEP using quantum concepts is proposed. The relationship between SFEP and event function states was discussed. The principle of describing SFEP by quantum thought was studied. The mathematical model of quantum description of SFEP was constructed. The measurement collapse of SFEP quantum states was realized, and the failure mode and its probability were finally determined. The results indicate that SFEP has diversity and uncertainty, event quantum state superposition, measurement collapse, bipolar state, which is the basis of studying SFEP through quantum thought. SFEP can be decomposed into multiple layers, with distinct objects and quantum state superposition modes in each layer. The SFEP quantum states are

* 文章编号:1003-3033(2025)05-0001-07; 收稿日期:2025-01-20; 修稿日期:2025-03-22

** 通信作者:李莎莎(1988—),女,辽宁盘锦人,博士,副教授,主要从事系统可靠性和安全管理等方面的研究。E-mail:lsslntu@163.com。

derived from the superposition of the quantum states of objects at each layer, which is composed of the polynomial product of the probability amplitude of the objects in each layer. The restriction conditions for the formation of the probability amplitude of quantum states of each layer are given. Each dimension of the SFEP quantum state vector is a fault state. The measurement of the factor phase value makes the SFEP quantum state collapse, and the possible failure mode and occurrence probability are obtained.

Keywords: quantum thought; system fault evolution process (SFEP); failure mode; quantum state superposition; measurement collapse

0 引言

任何存在的事物都可以看作为一个系统,只是每个系统实现的功能不同。随着系统在宏观和微观层面复杂性和层次性的增加,系统出现了一些难以解决的问题,其中,最基础的就是系统故障及其可能性。系统失去功能的过程是复杂的,文中将其描述为系统故障演化过程(System Fault Evolution Process, SFEP)^[1-2]。在系统功能状态上,系统实现功能的过程被称为系统的可靠性,而失去功能的过程被称为失效性;而在一般情况下,系统功能状态是可靠和失效2种状态的叠加。因此,在不具体测量时系统状态是难以分辨的;只有测量时才能确定该系统的状态,而测量之前和之后的时间里系统的状态是不确定的。这充分体现了SFEP的不确定性,这种不确定性也是安全和系统科学必须面对的问题。

目前,关于系统故障及风险演化过程的相关研究已有很多。较新的研究包括:交通运营突发事件风险动态演化^[3];风险演化改进功能共振分析^[4];船舶碰撞风险传播演化^[5];配电网故障下电动汽车充电风险演化^[6]等。此外,国外对机械系统及储能电池系统^[7]等具有较大风险系统的事故演化过程的研究相对较多。这些研究在各自领域取得了良好的效果,为各领域SFEP研究奠定了基础。但由于SFEP的结构性、层次性、叠加性和测量性等问题,这些成果仍难以胜任SFEP的描述和分析过程。

鉴于此,笔者依据SFEP和事件功能状态的研究成果^[8-9],认为在不同结构和层次上,SFEP是由下层状态逐层叠加形成的多态系统;该多态系统可使用量子力学的波函数和量子态叠加进行描述。因此,文中论述SFEP使用量子力学波函数和量子叠加态实现描述的原理;构建量子描述数学模型并确定故障模式及故障发生概率,以期描述SFEP的特征和其不确定性。

1 SFEP概述

SFEP是描述系统在各因素作用下完成自身功能能力的变化过程^[1-2]。SFEP包含经历事件、影响因素、逻辑关系和演化条件4个要素。这4个要素的共同作用使得SFEP产生离散性、随机性、模糊性和多样性等不确定性特征。与SFEP对应,文中提出事件功能状态和系统功能状态2个概念^[8-9]。在SFEP中某时刻事件完成预定功能的状态被称为事件功能状态。事件功能状态的耦合称为系统功能状态。各事件有各自的故障演化过程,其叠加在一起形成SFEP。事件功能状态代表某时刻该事件所有可能的功能状态特征,而系统功能状态也具有上述性质。系统完成自身功能状态的能力在可靠和失效过程中是上下波动的;该过程导致了系统状态的多样性和不确定性,使得其预测演化的过程变得极其困难。借助当前时刻的精确测量,SFEP可由不确定变为确定。

总结SFEP的特点。①SFEP存在多样性和不确定性;②SFEP是由事件功能状态及其叠加形成的;③只有完备测量后SFEP才具有确定性和唯一性;④在SFEP中实现功能是最终目标,所以完全实现和完全不实现功能是2种极端状态(量子基态)。因此,描述和研究SFEP还是比较困难的。

2 利用量子思想描述SFEP的原理

文中借鉴量子力学的观点和思想探究SFEP。量子描述特点是量子态的叠加和纠缠,它们在有效测量后塌缩为确定状态。量子态的叠加过程即为多个单量子态构成系统量子态的综合过程;波函数代表了各时刻在空间范围内发现粒子的概率;薛定谔方程是在波函数基础上描述量子态时空演化的数学模型。单一粒子的量子态是几个极化态(基态)的叠加,经典的2基态即为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 状态。以 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 状态构建的量子态为 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$,代表了量子的所有状态。波函数为 $\langle\langle(x,y,z,\dots)|$

$\psi(x, y, z, \dots, t)\rangle$, 其 $|\psi|^2$ 表示 t 时刻粒子出现在 $(x, y, z, \dots)$ 位置的概率。量子力学中称具有确定已知状态的量子系统为纯态, 只能用概率密度矩阵描述的量子态称为混合态^[10-11]。

SFEP 的多样性和不确定性对应着 SFEP 量子态的不确定性; 事件功能状态量子态 (简称事件量子态) 在 SFEP 中的叠加过程对应于量子态在形成波函数过程中的量子态叠加过程; SFEP 量子态在测量后的塌缩与波函数的塌缩相对应; 量子态由有限个基态叠加而成, 而 SFEP 的基态只有可靠和失效 2 种。因此, 理论上使用量子思想描述 SFEP 是可行的。将 SFEP 由上至下分解为演化层 (对象是系统)、事件层 (对象是事件)、因素层 (对象是因素)、因素相层 (对象是因素相) 和相值层 (对象是相值)。从 4 要素角度, 经历事件对应于事件层, 影响因素对应于因素层; 逻辑关系和演化条件是事件之间的关系, 包含在事件层中。

不同层对应着不同的量子态和波函数。①演化层受事件层的影响, 量子态可通过下层事件量子态表示。由于 SFEP 量子态是所有事件量子态的同时叠加, 因此, 所有事件量子态的张量积形成了 SFEP 量子态。②事件层受因素层的影响, 事件量子态可以通过下层因素量子态进行表示, 各因素量子态的同时作用形成了事件量子态。③因素层受因素相层的影响, 其量子态可通过下层因素相量子态表示。与上 2 层不同, 因素相之间具有排它性, 1 个因素不能同时具有 2 个相。因素量子态可通过波函数的量子态进行表示, 如 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 。因此, 因素量子态是通过因素相量子态的一般纯态叠加得到的。④因素相层受相值层的影响, 其量子态可通过下层相值量子态表示。因素相不可能同时拥有多个相值, 但可通过波函数的量子态将多个相值叠加形成波函数量子态。因此, 因素相量子态可通过相值量子态的一般纯态叠加得到。可见 SFEP 至少可分为如上 5 个层次, 并通过 4 次量子态叠加进行描述。根据同时性和排它性分别使用了 2 次张量积叠加和 2 次纯态叠加。同时性的张量对应了混合态的量子叠加形式; 排它性的波函数量子态对应了纯态的量子叠加形式^[11]。

波函数表示的目的在于对 SFEP 中各故障模式实现并行确定及发生概率的并行计算。但这与 SFEP 在某时刻的因素测量密切相关。不测量时能得到 SFEP 的所有可能发生的故障模式, 它们在演化被测量前是并行存在的, 因此无法确定其发生概

率。某时刻所有因素的相值被准确测量后, 这些因素相值就塌缩为确定值。确定了所有因素的相, 从而使得因素量子态发生塌缩, 因素将不再是量子叠加态, 而变为确定态。事件量子态由于因素量子态的塌缩而塌缩为确定态; 最终 SFEP 量子态也塌缩为确定态。在塌缩为确定态时得到了在该测量条件下可能发生的所有故障模式。这些故障模式形成的波函数量子态的概率幅平方和为 1; 将所有故障模式的发生概率归一化得到实际故障的发生概率。所得故障模式是确定的但可能不唯一; 而 SFEP 在某时刻发生的故障模式是确定且唯一的, 其发生概率为 1。

3 SFEP 量子思想描述的数学模型

首先, 建立描述系统; 其次, 描述各层对象的量子态; 最后, 用波函数和量子态叠加实现描述。

3.1 用于量子思想描述的系统构建

设 SFEP 由 N 个事件组成, 事件集合 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$, $e_n \in E, n = 1, 2, \dots, N$; 影响 SFEP 的全部因素集合为 F , 影响事件 e_n 的因素集合为 $F^{(n)} = \{f_1^{(n)}, f_2^{(n)}, \dots, f_M^{(n)}\}$, $f_m^{(n)} \in F^{(n)}, m = 1, 2, \dots, M$, 则 $F = F^{(1)} \cup F^{(2)} \cup \dots \cup F^{(N)} = \bigcup_1^N F^{(n)}$; 因素 $f_m^{(n)}$ 的相的集合为 $X^{(n,m)} = \{X_1^{(n,m)}, X_2^{(n,m)}, \dots, X_{P^{(n,m)}}^{(n,m)}\}$, $X_p^{(n,m)} \in X^{(n,m)}, p = 1, 2, \dots, P^{(n,m)}$, 所有因素的相的集合为 $X = \bigcup_{n=1, m=1}^{n=N, m=M} X^{(n,m)}$; 相 $X_p^{(n,m)}$ 的相值集合为 $Z^{(n,m,p)} = \{Z_1^{(n,m,p)}, Z_2^{(n,m,p)}, \dots, Z_{Q^{(n,m,p)}}^{(n,m,p)}\}$, $Z_q^{(n,m,p)} \in Z^{(n,m,p)}, q = 1, 2, \dots, Q^{(n,m,p)}$, 所有因素的所有相的所有相值的集合为 $Z = \bigcup_{n=1, m=1, p=1}^{n=N, m=M, p=P} Z^{(n,m,p)}$ 。不同层对象的量子态都由下层对象的量子态叠加形成, SFEP 的层次结构如图 1 所示。

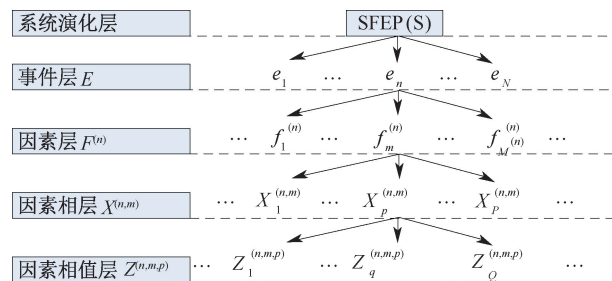


图 1 SFEP 的层次结构

Fig. 1 SFEP hierarchy

3.2 各层对象的量子态表示

由图 1 可看出, 最上层为系统演化层。SFEP 量子态是通过各事件量子态的张量积形式叠加得到

的。设 SFEP 量子态表示为 $|s\rangle$, 各事件量子态表示为 $|e_1\rangle, \dots, |e_N\rangle$ 。由事件量子态叠加可表示 SFEP 量子态。

$$|s\rangle = |e_1\rangle \otimes \dots \otimes |e_N\rangle \quad (1)$$

系统演化层之下为事件层。各事件受所有因素的影响,但直接影响各事件功能状态的因素也是不同的。且这些因素同时作用于事件量子态。因此事件量子态可由因素量子态的张量积表示。设某事件量子态为 $|e_n\rangle$, 影响因素量子态为 $|f_1^{(n)}\rangle, \dots, |f_M^{(n)}\rangle$ 。由因素量子态叠加可表示事件量子态。

$$|e_n\rangle = |f_1^{(n)}\rangle \otimes \dots \otimes |f_M^{(n)}\rangle \quad (2)$$

事件层之下是因素层。各因素一般有多个相,但因素相同时,则该因素有且只有 1 个相,因此同一因素的相具有排它性。由因素相量子态表示因素量子态是通过因素相量子态的一般纯态叠加实现的。设某因素量子态为 $|f_m^{(n)}\rangle$, 所有相量子态为 $|X_1^{(n,m)}\rangle, \dots, |X_{p^{(n,m)}}^{(n,m)}\rangle$, 其对应概率幅为 $a_1^{(n,m)}, \dots, a_{p^{(n,m)}}^{(n,m)}$ 。由因素相量子态叠加表示的因素量子态如下:

$$|f_m^{(n)}\rangle = a_1^{(n,m)} |X_1^{(n,m)}\rangle + \dots + a_{p^{(n,m)}}^{(n,m)} |X_{p^{(n,m)}}^{(n,m)}\rangle, \quad \sum_{i=1}^{p^{(n,m)}} a_i^2 = 1 \quad (3)$$

因素层之下是因素相层。各因素相一般有很多相值,其可是连续的也可是离散的。同样因素相同时只能有且只有 1 个相值,且具有排它性。相值量子态表示因素相量子态的过程可以通过因素相值量子态的一般纯态叠加实现。设因素相量子态为 $|X_p^{(n,m)}\rangle$, 所有相值量子态为 $|Z_1^{(n,m,p)}\rangle, \dots, |Z_{Q^{(n,m,p)}}^{(n,m,p)}\rangle$, 对应概率幅为 $b_1^{(n,m,p)}, \dots, b_{Q^{(n,m,p)}}^{(n,m,p)}$ 。由相值量子态叠加表示的因素相量子态如下:

$$|X_p^{(n,m)}\rangle = b_1^{(n,m,p)} |Z_1^{(n,m,p)}\rangle + \dots + b_{Q^{(n,m,p)}}^{(n,m,p)} |Z_{Q^{(n,m,p)}}^{(n,m,p)}\rangle, \quad \sum_{i=1}^{Q^{(n,m,p)}} b_i^2 = 1 \quad (4)$$

$$|e_n\rangle = \begin{pmatrix} f_1^{(n)}(a_p, b_1) \\ \vdots \\ f_1^{(n)}(a_p, b_Q) \end{pmatrix} \otimes \dots \otimes \begin{pmatrix} f_M^{(n)}(a_p, b_1) \\ \vdots \\ f_M^{(n)}(a_p, b_Q) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1^{(n)}(a_p, b_1) f_M^{(n)}(a_p, b_1) \\ \vdots \\ f_1^{(n)}(a_p, b_Q) f_M^{(n)}(a_p, b_Q) \end{pmatrix}_{(Q \times M) \times 1} \quad (9)$$

$$|s\rangle = \begin{pmatrix} f_1^{(1)}(a_p, b_1) f_M^{(1)}(a_p, b_1) \\ \vdots \\ f_1^{(1)}(a_p, b_Q) f_M^{(1)}(a_p, b_Q) \end{pmatrix} \otimes \dots \otimes \begin{pmatrix} f_1^{(N)}(a_p, b_1) f_M^{(N)}(a_p, b_1) \\ \vdots \\ f_1^{(N)}(a_p, b_Q) f_M^{(N)}(a_p, b_Q) \end{pmatrix} =$$

3.3 SFEP 量子态表示

使用式(1)一式(4)表示对象用量子态,形成由 $|Z_q^{(n,m,p)}\rangle$ 表示 $|s\rangle$ 的波函数和量子态表达式。设某因素相值量子态为 $|Z_q^{(n,m,p)}\rangle$, 其向量如下:

$$|Z_q^{(n,m,p)}\rangle = (\underbrace{0001}_{q-1 \uparrow 0} \underbrace{000}_{q \uparrow 0})' \quad (5)$$

式中 $|Z_q^{(n,m,p)}\rangle$ 为矢量,其中,第 q 个维度的数值为 1,代表 $|Z_q^{(n,m,p)}\rangle$ 是该维度的基态。将所有该因素相的所有相值的量子态进行叠加,根据式(4)得到该因素相量子态形式如下:

$$|X_p^{(n,m)}\rangle = (b_1^{(n,m,p)} \quad b_2^{(n,m,p)} \quad \dots \quad b_{Q^{(n,m,p)}}^{(n,m,p)})' \quad (6)$$

如果因素相只有 1 个相值,则 $|Z_q^{(n,m,p)}\rangle = 1$ 且对应的概率幅为 1。

以某因素量子态 $|f_m^{(n)}\rangle$ 为研究对象,将其对应的所有因素相量子态进行叠加,根据式(3)得到式(7),对式(7)中各因素相量子态的向量进行运算,得到统一向量的表示形式。为表达简便在不产生歧义的情况下将式(7)简写为式(8)。

$$|f_m^{(n)}\rangle = a_1^{(n,m)} (b_1^{(n,m,1)}, \dots, b_{Q^{(n,m,1)}}^{(n,m,1)})' + \dots + a_{p^{(n,m)}}^{(n,m)} (b_1^{(n,m,P^{(n,m)})}, \dots, b_{Q^{(n,m,P^{(n,m)})}}^{(n,m,P^{(n,m)})})' = \left(\sum_{p=1}^{p^{(n,m)}} (a_p^{(n,m)}, b_1^{(n,m,P)}), \dots, \sum_{p=1}^{p^{(n,m)}} (a_p^{(n,m)}, b_{Q^{(n,m,P^{(n,m)})}}^{(n,m,P^{(n,m)})}) \right)' \quad (7)$$

$$|f_m^{(n)}\rangle = (f_m^{(n)}(a_p, b_1) \quad \dots \quad f_m^{(n)}(a_p, b_Q))' \quad (8)$$

式中 $f_m^{(n)}(a_p, b_1)$ 为 $\sum_{p=1}^{p^{(n,m)}} (a_p^{(n,m)}, b_1^{(n,m,P)})$ 的函数表示,其变量为概率幅 a 和 b 。将式(8)带入式(2)得到式(9)的事件量子态的张量形式,其张量具有 $Q \times M$ 维。最后将式(9)带入式(1)得 SFEP 量子态表示,如式(10)所示。其结果是张量形式,为 $Q \times M \times N$ 维。

$$\begin{pmatrix} f_1^{(1)}(a_p, b_1) f_M^{(1)}(a_p, b_1) f_1^{(N)}(a_p, b_1) f_M^{(N)}(a_p, b_1) \\ \vdots \\ f_1^{(1)}(a_p, b_Q) f_M^{(1)}(a_p, b_Q) f_1^{(N)}(a_p, b_Q) f_M^{(N)}(a_p, b_Q) \end{pmatrix}_{(Q \times M \times N) \times 1} \quad (10)$$

由于因素相值层和因素相层使用量子纯态进行了叠加,因此,SFEP量子态只与概率幅 a 和 b 相关。其中相值概率幅 b 是将实际环境条件与SFEP量子态联系在一起的关键。式(10)中, $|s\rangle$ 是 $Q \times M \times N$ 维向量。即在不考虑实际情况时,SFEP有 $Q \times M \times N$ 种故障模式。设 $\Gamma = Q \times M \times N$,对应着 $|s\rangle$ 的各维度(每行),将式(10)简化为下式:

$$|s\rangle = (f^1(a^*, b^*) \cdots f^{\Gamma}(a^*, b^*))', \quad \Gamma = Q \times M \times N \quad (11)$$

在系统运行环境测量后,所有 $Q \times M \times N$ 种可能将塌缩为少数几个具有实际可能性的故障模式(确定的但不唯一),而系统实际发生的故障模式是他们之一(确定且唯一)。

4 测量塌缩与故障模式确定

测量SFEP运行环境中的影响因素数值,测量值(相值)为 $Z_R = \{Z^1, Z^2, \dots, Z^{|Z|}\}$, $|Z|$ 为 Z_R 中的元素数量,对应 $Z = \bigcup_{n=1, m=1, p=1}^{n=N, m=M, p=P} Z^{(n, m, p)}$ 。如果 $Z^i \in Z_R$ 能被测量到($i=1, \dots, |Z|$),则 Z^i 对应的式(11)中的 b 为1,且与 Z^i 属于同一相的其他 Z^i 对应的式(11)中的 b 都为0。只有1个因素相值的因素相量子态概率幅 $b=1$;只有1个因素相的因素量子态概率幅 $a=1$ 。同时因素相值和因素相量子态

都是纯态的叠加,需加上条件 $\sum_{i=1}^{p(n, m)} a_i^2 = 1, \sum_{i=1}^{Q(n, m, p)} b_i^2 = 1$ 。在上述条件限制下简化 $|s\rangle$ 。在测量条件下, Γ 种故障模式中, $|s\rangle$ 中向量不为0的行($f(a^*, b^*), \dots, f^{\Gamma}(a^*, b^*) \neq 0, \Gamma'$ 为非0行总数,即可能的故障模式数)都对应着可能发生的故障模式。这些非0行的值的平方与所有非0行的值的平方和比值即为在测量条件下各故障模式的发生概率。第 i 个故障模式发生概率 $G(f^i(a^*, b^*))$ 如下:

$$G(f^i(a^*, b^*)) = f^i(a^*, b^*)^2 / \sum_{i=1}^{\Gamma'} f^i(a^*, b^*)^2, i=1, 2, \dots, \Gamma' \quad (12)$$

通过测量可将SFEP的故障模式大幅塌缩,测量后所有可能的系统故障模式被保留。即便量子态塌缩为确定态,可能发生的故障模式也不唯一。采用该方法也能得到测量后保留的所有故障模式发生

概率。但具体是哪个故障模式只能通过其发生概率确定。而对某次故障,其故障模式发生概率为100%。 $|s\rangle$ 中向量非0行对应着某个故障模式。数学中这些故障模式是由概率幅组成的多项式。通过概率幅对应的各层次对象量子态能将故障模式转化为具有实际意义的表述形式。方法为:利用概率幅值判断 $|s\rangle$ 中等于0的行向量或向量多项式中的某个项;在 $|s\rangle$ 中去掉这些向量和多项式,剩余的向量多项式就是故障模式;将故障模式还原成原始概率幅形式;通过概率幅对应的各层对象量子态得到故障模式的实际意义。该过程是一个多层量子态叠加的过程,经测量后塌缩为确定态,SFEP量子描述的数学方法构建全过程如图2所示。

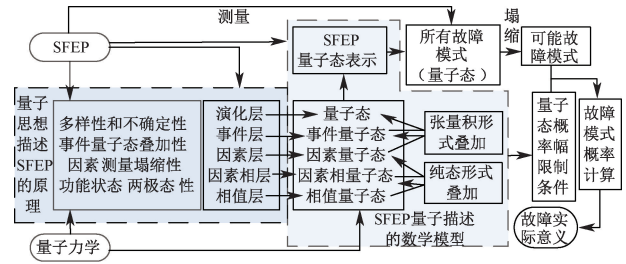


图2 方法构建全过程

Fig. 2 Whole process of method construction

5 实例分析

实例中测量了系统温度,但未观测到火焰形态,由于测量数据不足,系统处于火灾和非火灾2种状态的叠加。设SFEP为系统火灾过程,只包含1个事件 e_1, e_1 表示为系统开始出现火焰;该火焰的出现以2个因素作为依据,即火焰形态 $f_1^{(1)}$ 和火焰温度 $f_2^{(1)}$; $f_1^{(1)}$ 有2个相(基态),分别为 $X_1^{(1,1)}$ 存在和 $X_2^{(1,1)}$ 不存在,概率幅分别为 $a_1^{(1,1)} = 0.6$ 和 $a_2^{(1,1)} = 0.8$ (2个相叠加); $f_2^{(1)}$ 只有1个相,即为温度 $X_1^{(1,2)}$,概率幅为 $a_1^{(1,2)} = 1$ (不叠加), $f_2^{(1)}$ 状态确定; $X_1^{(1,1)}$ 和 $X_2^{(1,1)}$ 由于未测量到火焰形态,2个基态分别为 $|Z_1^{(1,1,1)}\rangle = (1, 0)'$ 和 $|Z_1^{(1,1,2)}\rangle = (0, 1)'$; $X_1^{(1,2)}$ 已被测量,其值是确定的,为 $|Z_1^{(1,2,1)}\rangle = 1$ 。该系统火灾的层次结构如图3所示。

根据3.2节表示各层对象的量子态。根据图3和实例背景,各层对象量子态表示如下:

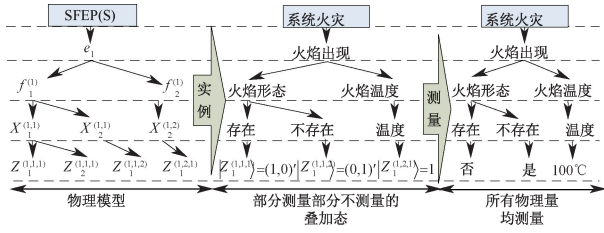


图3 实例系统火灾的层次结构

Fig.3 Hierarchy of system fire

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 |s\rangle &= |e_1\rangle \\
 |e_1\rangle &= |f_1^{(1)}\rangle \otimes |f_2^{(1)}\rangle \\
 |f_1^{(1)}\rangle &= a_1^{(1,1)} |X_1^{(1,1)}\rangle + a_2^{(1,1)} |X_2^{(1,1)}\rangle \\
 |f_2^{(1)}\rangle &= a_1^{(1,2)} |X_1^{(1,2)}\rangle \\
 |X_1^{(1,1)}\rangle &= b_1^{(1,1,1)} |Z_1^{(1,1,1)}\rangle + b_2^{(1,1,1)} |Z_2^{(1,1,1)}\rangle \\
 |X_2^{(1,1)}\rangle &= b_1^{(1,1,2)} |Z_1^{(1,1,2)}\rangle \\
 |X_1^{(1,2)}\rangle &= b_1^{(1,2,1)} |Z_1^{(1,2,1)}\rangle
 \end{aligned} \right. \\
 \Rightarrow & \left\{ \begin{aligned}
 |s\rangle &= |e_1\rangle \\
 |e_1\rangle &= |f_1^{(1)}\rangle \otimes |f_2^{(1)}\rangle \\
 |f_1^{(1)}\rangle &= a_1^{(1,1)} |X_1^{(1,1)}\rangle + a_2^{(1,1)} |X_2^{(1,1)}\rangle \\
 |f_2^{(1)}\rangle &= a_1^{(1,2)} |X_1^{(1,2)}\rangle \\
 |X_1^{(1,1)}\rangle &= |Z_1^{(1,1,1)}\rangle = (1,0)^{\wedge} \\
 |X_2^{(1,1)}\rangle &= |Z_1^{(1,1,2)}\rangle = (0,1)^{\wedge} \\
 |X_1^{(1,2)}\rangle &= |Z_1^{(1,2,1)}\rangle = 1
 \end{aligned} \right. \\
 \text{测量} \Rightarrow & \left\{ \begin{aligned}
 |s\rangle &= |e_1\rangle \\
 |e_1\rangle &= |f_1^{(1)}\rangle \otimes |f_2^{(1)}\rangle \\
 |f_1^{(1)}\rangle &= |X_1^{(1,1)}\rangle \\
 |f_2^{(1)}\rangle &= |X_1^{(1,2)}\rangle \\
 |X_1^{(1,1)}\rangle &= |\text{是}\rangle \\
 |X_2^{(1,1)}\rangle &= |\text{是}\rangle \\
 |X_1^{(1,2)}\rangle &= |100^{\circ}\text{C}\rangle
 \end{aligned} \right. \quad (13)
 \end{aligned}$$

根据 3.3 节的波函数量子态表示,设相值层的所有因素相值量子态表示为 $|Z_1^{(1,1,1)}\rangle = (1,0)^{\wedge}$ 、 $|Z_1^{(1,1,2)}\rangle = (0,1)^{\wedge}$ 和 $|Z_1^{(1,2,1)}\rangle = 1$ 。因素相层的所有因素相的量子态为 $|X_1^{(1,1)}\rangle = |Z_1^{(1,1,1)}\rangle$ 、 $|X_2^{(1,1)}\rangle = |Z_1^{(1,1,2)}\rangle$ 、 $|X_1^{(1,2)}\rangle = |Z_1^{(1,2,1)}\rangle$ 。因素层的所有因素的量子态为 $|f_2^{(1)}\rangle = a_1^{(1,2)}$ 、 $|f_1^{(1)}\rangle = a_1^{(1,1)}(1,0)^{\wedge} + a_2^{(1,1)}(0,1)^{\wedge}$ 。事件层的所有事件的量子态为 $|e_1\rangle = (a_1^{(1,1)}a_1^{(1,2)}, a_2^{(1,1)}a_1^{(1,2)})^{\wedge}$, 又由于 $a_1^{(1,2)}=1$, 则 $|e_1\rangle = (a_1^{(1,1)}, a_2^{(1,1)})^{\wedge}$ 。系统火灾的量子态 $|s\rangle = |e_1\rangle$ 。其 2 种模式的概率分别为 $(a_1^{(1,1)})^2 / ((a_1^{(1,1)})^2 + (a_2^{(1,1)})^2) = 36\%$,

$(a_2^{(1,1)})^2 / ((a_1^{(1,1)})^2 + (a_2^{(1,1)})^2) = 64\%$ 。这时由于未测量到火焰的形态,系统火灾状态仍然是发生和不发生 2 种状态的叠加,只不过他们的可能性不同。

观测系统火焰形态,观测后火焰形态因素只可能具有存在或不存在二者之一的相。它们的值也是对立的。这时原有叠加状态将完全塌缩为 1 种状态,如图 3 中为火焰形态不存在的状态。最终被研究系统状态塌缩为火焰不出现,系统火灾状态塌缩为不发生火灾的状态。而测量前的结果实际上是一种叠加态,该叠加态是火焰出现和火焰不出现的状态叠加,这种叠加态只是根据已有数据可知它们的发生概率不同。如果对火焰形态进行观测,则被研究系统状态将塌缩为火焰出现或不出现之一的状态。同理,如果对温度没有测量则将出现 4 种状态叠加。

当然,上述实例只研究了系统中 1 种故障事件过程。在系统中火焰出现事件之前和之后可能还有其他事件关联。如火焰出现之前可能有泄漏事件,火焰出现之后可能有爆炸事件。泄漏和爆炸事件都可使用上述方法独立分析完成,再根据演化逻辑关系进行量子态的叠加^[12]。

SFEP 是复杂的,存在结构性、层次性、叠加性和测量性等;而 SFEP 是任何系统都存在且必须面对的问题。虽然 SFEP 是宏观现象,但其性质与量子力学的微观世界特征大体一致。结构性和层析性将 SFEP 分解为不同层次,这些层次包含一类对象,并赋予对象量子态;不同层次对象之间的关系可通过量子叠加进行表示,该过程是量子态的叠加和扩张过程;SFEP 量子态向量中各维度都是 1 个故障模式;对因素相值的测量使 SFEP 量子态塌缩,得到所有可能的故障模式;根据故障模式的概率幅值,可以计算故障发生概率;最终通过故障模式中的概率幅反向得到故障模式的实际物理意义。文中研究是基于 SFEP 理论和量子力学实现的,虽尚不完善但可解决所提问题。同时实例中也可引入多个事件,如增加因素、因素相和相值,但基本计算过程不变。综上,所提方法为 SFEP 的研究提供了新路线,可制定故障预防措施方案,可依次减少事件、因素、因素相和相值,其预防作用逐渐减小。

6 结 论

1) SFEP 包括多样性和不确定性、事件量子态叠加性、测量塌缩性、两极态性等特点,为通过量子思想研究 SFEP 奠定了基础。

2) 论证了利用量子力学方法描述 SFEP 的原

理和可行性。SFEP 分为演化层、事件层、因素层、因素相层和相值层,对应量子态、事件量子态、因素量子态、因素相量子态和相值量子态。各层对象量子态可通过下层对象量子态叠加获得,最终得到 SFEP 的量子态;该量子态由各层对象的概率幅的积的多项式构成,SFEP 量子态向量中每个维度代表 1 个故障模式,通过测量可使叠加态塌缩得到故障模式。

3) 使用 SFEP 的量子描述数学模型能实现系统的量子态测量塌缩研究。事件层和因素层对象使

用张量积进行叠加;因素相层和相值层使用纯态叠加,最终得到了 SFEP 的量子态表示方法。通过测量引起的塌缩确定了故障模式及发生概率。给出了各层对象量子态概率幅构成的限制条件;故障模式概率计算方法及故障实际意义。根据设定得到实例中的 2 种系统火灾模式,根据约束条件和概率幅值,这 2 种情况的可能性分别为 36% 和 64%。如果观测火焰形态,则叠加态塌缩为火灾发生或不发生的确定态之一。

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.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.
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): 1255-1262.
- [3] 范博松,邵春福,赵丹,等.城市轨道交通运营突发事件风险动态演化模型[J].交通信息与安全,2024,42(3):122-130.
FAN Bosong, SHAO Chunfu, ZHAO Dan, et al. Modelling on the risk dynamic evolution of urban rail transit operation emergency[J]. Journal of Transport information and Safety, 2024, 42(3): 122-130.
- [4] 时统宇,马煜森,曹宇杰,等.基于改进功能共振分析法的 SPO 风险演化[J].中国安全科学学报,2024,34(6):29-38.
SHI Tongyu, MA Yusen, CAO Yujie, et al. SPO risk evolution based on improved functional resonance analysis method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 29-38.
- [5] 乔卫亮,邓婉怡,马晓雪,等.复杂网络下船舶碰撞风险传播演化分析[J].中国安全科学学报,2024,34(5):101-110.
QIAO Weiliang, DENG Wanyi, MA Xiaoxue, et al. Evolutionary analysis of ship collision risk propagation under a complex network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 101-110.
- [6] 吴赋章,杨军,柯松,等.考虑电力-交通交互的配电网故障下电动汽车充电演化特性[J].电力系统自动化,2024,48(5):88-98.
WU Fuzhang, YANG Jun, KE Song, et al. Evolution characteristics of electric vehicle charging under distribution network faults considering interactions between power and transportation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 88-98.
- [7] SONG Shuang, TANG Xisheng, SUN Yushu, et al. Fault evolution mechanism for lithium-ion battery energy storage system under multi-levels and multi-factors[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 80: DOI: 10.1016/J. EST. 2023.110226.
- [8] 崔铁军,李莎莎.基于集对分析的 SFT 特征函数重构及性质研究[J].智能系统学报,2022,17(1):131-136.
CUI Tiejun, LI Shasha. Reconstruction of SFT characteristic function and its properties based on set pair analysis[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2022, 17(1): 131-136.
- [9] 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 and implementation of an intelligent system based on the system reliability-failure model[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(6): 1104-1112.
- [10] 俞礼钧.纯态、混合态及其纠缠态[J].江汉大学学报,2002,19(1):34-37.
YU Lijun. Pure state, mixed state and entangled state[J]. Journal of Jiangnan University, 2002, 19(1): 34-37.
- [11] 费少明.量子态的可分性与纠缠度量[J].现代物理知识,2016,28(6):9-13.
FEI Shaoming. The divisibility and entanglement metrics of quantum states[J]. Modern Physics, 2016, 28(6): 9-13.
- [12] 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.

作者简介: 崔铁军 (1983—),男,辽宁沈阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事系统故障演化理论等方面的研究。E-mail:ctj.159@163.com。

