



系统多功能状态表达式构建及其置信度研究

崔铁军, 李莎莎

引用本文:

崔铁军,李莎莎. 系统多功能状态表达式构建及其置信度研究[J]. 智能系统学报, 2023, 18(1): 124–130.

CUI Tiejun,LI Shasha. Construction of a system multi-function state expression and its confidence[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2023, 18(1): 124–130.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202111022>

您可能感兴趣的其他文章

基于集对分析的SFT特征函数重构及性质研究

Reconstruction of SFT characteristic function and its properties based on set pair analysis

智能系统学报. 2022, 17(1): 131–136 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202007020>

多因素集对分析的系统故障模式识别方法

System fault-pattern recognition based on set pair analysis with multiple factors

智能系统学报. 2022, 17(2): 387–392 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202011006>

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>

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>

不协调区间值决策系统的最大分布约简

Maximum distribution reduction in inconsistent interval-valued decision systems

智能系统学报. 2018, 13(3): 469–478 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201710011>

DOI: 10.11992/tis.202111022

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20220916.1841.002.html>

系统多功能状态表达式构建及其置信度研究

崔铁军¹, 李莎莎²

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 为研究具有多功能的系统功能状态表达式及状态评价结果的置信度, 提出一种基于集对分析和量子态叠加的系统功能状态表示方法。首先论述了系统功能状态置信度; 其次研究了系统单功能状态表示, 使用集对分析联系数构建表达式确定分量系数, 随后利用量子态叠加构建系统单功能状态表达式; 最后构建了系统多功能状态表达式, 从而确定系统多功能状态的量子叠加态概率幅, 其平方即为该状态的系统功能状态评价结果的置信度。通过实例对所提方法进行了应用, 说明了计算流程和作用。研究可提供系统多功能状态置信度的计算方法。

关键词: 安全系统科学; 智能科学; 多功能系统; 功能状态; 集对分析; 量子态叠加; 概率幅; 置信度

中图分类号: TP18,X913 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2023)01-0124-07

中文引用格式: 崔铁军, 李莎莎. 系统多功能状态表达式构建及其置信度研究 [J]. 智能系统学报, 2023, 18(1): 124-130.

英文引用格式: CUI Tiejun, LI Shasha. Construction of a system multi-function state expression and its confidence [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2023, 18(1): 124-130.

Construction of a system multi-function state expression and its confidence

CUI Tiejun¹, LI Shasha²

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 2. School of business administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: To study the function state expression and the confidence of state evaluation results of a multi-function system, a method for system function state expression is proposed based on set pair analysis and quantum state superposition. First, the confidence of the system function state is discussed; second, the expression of a system single function state is studied, and the component coefficient is determined by using the set pair analysis connection number; third, quantum state superposition is used to construct the expression of the system single function state; finally, the expression of the system multi-function state is constructed to determine the quantum superposition frequency amplitude of the system multi-function state. The square of the frequency amplitude is the confidence of the evaluation result of the system function state. An example is given to illustrate the calculation process and function of the proposed method. This research can provide a calculation method for system multi-function state confidence.

Keywords: safety system science; intelligence science; multi-function system; function state; set pair analysis; quantum state superposition; probability amplitude; confidence

系统功能状态是对系统功能实现程度的描述

收稿日期: 2021-11-12. 网络出版日期: 2022-09-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004120); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKQZ2021157).

通信作者: 崔铁军. E-mail: ctj.159@163.com.

©《智能系统学报》编辑部版权所有

和分析基础。系统功能状态至少包括可靠状态、失效状态和中间状态(不确定状态)等形式。我们通常计算的系统可靠性是衡量系统可靠状态的具体功能状态评价指标, 衡量系统功能状态的指标很多, 比如平均无故障时间、平均故障间隔时

间、故障率等等。系统的功能很多,各功能都有自己的功能状态,称为系统单功能状态;综合在一起形成系统多功能状态,但无论是单功能状态还是多功能状态,都可简单的分为可靠状态、失效状态和中间状态3种。由于系统各功能的实现途径、预定条件和使用时间都不同,导致这些功能的功能状态变化不同,这些不同的功能状态变化综合体现于系统整体之上则更为复杂。同样由于基础数据、系统结构等因素影响,得到的系统功能状态评价结果本身是否与事实相符是更为重要的问题。因此确定多功能情况下的系统功能状态,其充分条件是确定状态评价结果,必要条件是确定该结果与实际的符合程度,即系统功能状态评价结果的置信度(简称为状态置信度)。

对于各种系统状态和参数确定的置信度研究已逐渐增多。近期的研究包括:动车组产品可靠性评估^[1],FTA-FPN的动车组塞拉门系统可靠性分析^[2],靶试空空导弹自主飞可靠性置信度分析^[3],Apriori算法的煤矿双重预防^[4],考虑可靠性指标的备件运送路径优化方法^[5],疲劳强度分布的复合材料疲劳验证^[6],改进证据理论的重力坝进度不确定性分析^[7],泥石流对旅游景区生态破坏程度评估^[8],LCF-Kriging模型的结构多失效模式可靠度研究^[9],数据可靠性和区间证据推理的故障检测^[10],非参数的软件可靠性验证^[11],边坡系统可靠度区间估计^[12],不完全数据的大型角钢疲劳性能分析^[13],指数分布统计量试验寿命可靠性评估^[14],故障知识库的机械零部件故障管理^[15]等。国外也有大量研究,例如惯性导航系统置信度评估试验^[16];多状态系统应力强度可信度分析^[17];交互式机器系统可信度的神经模型研究^[18];配电系统可靠性的置信度研究^[19]等。这些研究虽在各自领域取得了良好效果,但也不可避免的面临一些问题。首先基础数据难以获得,这是由于现场人机协同不适应导致的数据收集问题;其次不同样本的不同功能状态千差万别,只具有统计意义的结果,但如何保证和利用这些具有统计意义的数据是关键;再次对多样本多功能构建的样本系统,如何能有效叠加进而表示整体系统的多功能状态特征;最后如何通过已有的统计性样本数据计算整体系统在各种功能状态下的置信度。这些问题已有方法都难以适用,给系统多功能状态置信度研究带来了困难。

笔者也针对系统功能、可靠性和系统故障演化等进行了深入研究,提出了空间故障树理论,包括空间故障树基础理论^[20-21],用于研究系统可靠

性与影响因素之间的关系;智能化空间故障树^[22-23],用于可靠性与因素关系推理和故障大数据处理;空间故障网络^[24-26],用于描述和分析系统故障演化过程;系统运动空间与系统映射论^[27-28],用于度量系统运动及因素流与数据流的关系。

基于笔者对系统可靠性和系统功能状态的研究成果,认为可用集对分析系数表示系统功能状态,并从基础数据中获得状态分量;进而使用量子态叠加形式表示系统单功能状态;最终计算概率幅得到各种状态叠加情况下的系统多功能状态置信度。最后使用该方法对提出的实例问题进行了分析。

1 系统功能状态置信度

系统功能状态是描述和确定系统完成功能程度的基础,目前主要衡量系统功能状态的指标是系统可靠性,因此系统可靠性确定方法和过程中遇到的问题是系统功能状态研究的缩影。系统可靠性问题一直是系统科学和安全科学研究的核心,其确定一般可分为几种途径,包括试验方法、结构方法和推理方法。

试验方法通过对具有成熟样本规模数量的对象进行试验,在规定条件下和规定时间内完成对这些样本的功能测试,统计样本对象的功能完成数量、功能下降数量和功能失效数量,进而对样本进行可靠性统计。试验方法的优点在于实施简单方便,便于后期统计处理,适合于结构简单功能单一的对象;缺点在于成本很大,不适合由多种元素组成的复杂系统,也不适合复杂条件下的系统可靠性确定。

结构方法通过系统中各元件组成系统的结构特征,研究各元件可靠性变化对系统可靠性变化的影响来确定系统可靠性,例如事故树分析法。其优点是能研究结构清晰的复杂系统可靠性特征,缺点是必须清楚系统中所有元件的可靠性及元件组成系统的结构,也需确定不同影响因素情况下的元件可靠性特征,进而确定系统可靠性特征。

推理方法最为高级,利用因素、元件、系统对可靠性的不同关系来确定系统可靠性特征。推理方法首先要制定适合于该系统的逻辑推理系统。推理系统建立可依赖于试验数据和系统结构,也可在这些信息不足的情况下进行可靠性研究。基于因素对元件可靠性的影响、因素对系统可靠性的影响、元件与系统结构关系实现逻辑推理,这本质上是一种因果关系的逻辑推理。方法在数据不完全、系统结构不清、元件可靠性特征模糊情

况下比较适用,例如因素空间理论^[29-30]、空间故障树理论等。

系统存在的意义是能完成预定功能,也就是确保系统实现功能的功能性,使用功能状态评价指标来衡量。那么首先要解决试验样本统计问题,其次是系统功能特征界定,最后计算功能状态评价指标,但实际上这三步往往难以实现。进一步的,即使完成计算得到了评价指标,但该过程中使用的统计数据、模糊的推理关系和系统结构等,会造成功能状态评价指标计算结果本身的置信度问题。即对于获得的评价结果,其与事实完全相同的概率、完全不同的概率和不确定性的概率,从而度量评价结果的真实性。

为说明问题,现给出某款特种手机在预定环境下规定时间内的使用情况统计。手机样本数量为 10 000 部,该手机由于特定需要必须保证 3 种功能,包括通话、照明和照相。在预定环境和规定时间内使用,以是否出现功能失效为判断依据,但最终结果仍然依靠使用者对手机功能性的判断,因此将功能性划分为可靠、不确定和失效。对这 10 000 部手机的使用者进行调查,统计结果如下:对于通话功能,可靠样本数量为 6 812、不确定数量为 389、失效数量为 2 799;对于照明功能,可靠样本数量为 5 563、不确定数量为 1 989、失效数量为 2 448;对于照相功能,可靠样本数量为 4 370、不确定数量为 3 598、失效数量为 2 032,需确定该种手机三种功能都可可靠的概率,两种功能可靠一种不可可靠的概率等类似问题。从上述统计结果中确定该种手机的可靠性面临的问题在于:数据具有统计特征,需要分析多个功能的综合可靠性,各手机的功能情况并未标注。这种情况下试验方法、结构方法和推理方法都难以处理,更不能得到各功能状态和系统功能状态的置信度。

系统的多功能状态置信度问题的特点是对样本进行不同功能的功能状态统计,统计过程缺乏各样本功能情况的具体记录,只具有宏观统计性;且对系统功能状态的确定是基于多个功能状态的统计结果;现有方法不能计算多功能状态置信度。对该问题笔者将使用集对分析和量子态叠加予以解决。

2 系统单功能状态表示及置信度

集对分析是赵克勤教授提出的解决确定和不确定性问题的思想和方法。对于系统功能状态的判断至少可以分为可靠和失效,它们都是确定性判断;但进一步的,可分为可靠、不确定、失效形式;

更一般的,可分为可靠、较可靠、一般可靠、轻微失效、严重失效等形式。无论何种分类,在功能状态的判断上都可分为确定性和不确定性两种情况,前者是可靠和失效状态,后者是其余状态。

集对分析的联系数可表示研究对象间的同异反功能状态。这里定义同状态为可靠状态、反状态为失效状态,介于可靠和失效之间的对象为异状态,这构成了三元联系数。设样本集有 N 个对象,其中可靠状态的对象数量为 A ,失效状态对象数量为 C ,剩余对象数量为 B ,则 $N=A+B+C$ 。使用三元联系数表示同异反关系,系统功能状态表达式如式 (1) 所示,即系统功能状态的联系数表示。

$$\mu = \frac{A}{N} + \frac{B}{N}i + \frac{C}{N}j \quad (1)$$

式中: i 表示异关系标记, j 表示反关系标记,它们只用于标记。

为研究系统功能状态的置信度问题,必须将系统功能状态表示为确定性和不确定性的形式,而非同异反形式。上述已说明,功能状态的同(可靠)和反(失效)都是经过定义确定的确定性状态,而异则表示介于可靠和失效之间,即同和反之间的不确定状态。因此 $A+C$ 可表示对象集中具有确定性功能状态的对象数量; B 则是不确定功能状态的对象数量。因此式 (1) 的三元联系数系统功能状态表达式可转化为二元联系数系统功能状态表达式:

$$\mu = \frac{A+Cj}{N} + \frac{B}{N}i \quad (2)$$

式中:系统功能状态的确定分量系数为 $(A+C)/N$,不确定分量系数为 B/N 。使用式 (2) 的二元联系数表示系统功能状态的确定性和不确定性,其优点在于 A 、 B 和 C 的数量可直接通过使用过程功能情况统计获得,这是最为直接的基础数据获得方法。

对于单一功能的系统而言,系统功能状态只针对一个功能展开,即是功能状态在确定和不确定状态之间的转化过程。对于一个实例系统,其功能状态总是由确定状态和不确定状态同时构成的。说明系统在未经过观察时,系统可能是可靠或失效的确定状态,也可能是无法判断的不确定状态,只有经过观察使用后才能确定,即为量子力学的状态塌缩过程。当面对大量同类对象的功能状态分析时,所获得的功能状态评价结果需要有置信度加以衡量,即获得的系统可靠性概率或失效性概率(评价结果)有多大的可能性正确(确定状态)或不正确(不确定状态)。

由于系统单功能状态只是单一功能状态的确定

定性和不确定性的叠加, 利用单量子状态即可表示。具有功能 n 的系统单功能状态可表示为 $|\mu_n\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$, 即系统功能状态的量子表示。 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 表示量子的两种状态分别对应于确定和不确定状态, α_0 和 α_1 是两种状态的概率幅, 且 $\alpha_0^2 + \alpha_1^2 = 1$ (塌缩概率)。基于集对理论的联系数复运算形式, 文献 [31,32] 提出了确定-不确定空间 (D-U) 概念。认为联系数 μ 可在 D-U 空间中形成一个向量 \mathbf{r} 表示一个不确定量的大小和位置, 那么 $|\mathbf{r}| = \sqrt{\left(\frac{A+C}{N}\right)^2 + \left(\frac{B}{N}\right)^2}$, 与 x 轴夹角为 $\arctan \frac{B}{A+C}$ 。向量 \mathbf{r} 在 x 上的投影为 $A+C$ 代表确定性, 这时 $|0\rangle$ 的概率幅为 μ 中确定性分量与向量 \mathbf{r} 的比值, 即 $\frac{A+C}{N} / \sqrt{\left(\frac{A+C}{N}\right)^2 + \left(\frac{B}{N}\right)^2} = \frac{A+C}{\sqrt{(A+C)^2 + B^2}}$; 同理 $|1\rangle$ 的概率幅为 μ 中不确定性分量与向量 \mathbf{r} 的比值, 即 $\frac{B}{N} / \sqrt{\left(\frac{A+C}{N}\right)^2 + \left(\frac{B}{N}\right)^2} = \frac{B}{\sqrt{(A+C)^2 + B^2}}$ 。对于功能 n 的系统单功能状态可表示为 $|\mu_n\rangle = \frac{A_n + C_n}{\sqrt{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}}|0\rangle + \frac{B_n}{\sqrt{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}}|1\rangle$, 式中 $\alpha_0^2 = \frac{(A_n + C_n)^2}{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}$ 为系统单功能状态中确定性的置信度, $\alpha_1^2 = \frac{B_n^2}{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}$ 为系统单功能状态中不确定性的置信度, $\alpha_0^2 + \alpha_1^2 = 1$ 。即可通过量子态叠加形式表示系统单功能状态, 其基本数据可从集对分析二元联系数表达式中的状态分量获得。

3 系统多功能状态表示及置信度

进一步的, 第一节实例问题中, 系统的功能显然不是一个, 需要具备通话、照明和照相 3 个功能。那么本节研究两功能到多功能的系统功能状态表示及其置信度确定方法, 最终总结形成系统多功能状态表示及置信度。

对于具有两功能状态 n 和 $n+1$ 的系统功能状态分析, 其系统功能状态可表示为 $|\mu_n \mu_{n+1}\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle$ 。 $|00\rangle$ 表示两功能状态为确定, $|01\rangle$ 表示 n 为确定 $n+1$ 为不确定的状态, $|10\rangle$ 表示 n 为不确定 $n+1$ 为确定的状态, $|11\rangle$ 表示两功能状态都不确定; α_{00} 、 α_{01} 、 α_{10} 和 α_{11} 分别为上述 4 个状态的概率幅, $\alpha_{00}^2 + \alpha_{01}^2 + \alpha_{10}^2 + \alpha_{11}^2 = 1$ 。同单功能状态各参数的确定过程相同, $|00\rangle$ 的概率幅为

$$\frac{A_n + C_n}{\sqrt{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}} \times \frac{A_{n+1} + C_{n+1}}{\sqrt{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}}, |01\rangle \text{ 的概率幅}$$

为 $\frac{A_n + C_n}{\sqrt{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}} \times \frac{B_{n+1}}{\sqrt{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}}$, $|10\rangle$ 的概率幅为 $\frac{B_n}{\sqrt{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}} \times \frac{A_{n+1} + C_{n+1}}{\sqrt{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}}$, $|11\rangle$ 的概率幅为 $\frac{B_n}{\sqrt{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}} \times \frac{B_{n+1}}{\sqrt{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}}$; $\alpha_{00}^2 = \frac{(A_n + C_n)^2}{(A_n + C_n)^2 + B_n^2} \times \frac{(A_{n+1} + C_{n+1})^2}{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}$ 为两功能状态都确定的置信度, $\alpha_{01}^2 = \frac{(A_n + C_n)^2}{(A_n + C_n)^2 + B_n^2} \times \frac{B_{n+1}^2}{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}$ 为 n 确定 $n+1$ 不确定的置信度, $\alpha_{10}^2 = \frac{B_n^2}{(A_n + C_n)^2 + B_n^2} \times \frac{(A_{n+1} + C_{n+1})^2}{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}$ 为 n 不确定 $n+1$ 确定的置信度, $\alpha_{11}^2 = \frac{B_n^2}{(A_n + C_n)^2 + B_n^2} \times \frac{B_{n+1}^2}{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}$ 为两功能状态都不确定的置信度。

进一步的, 3 个功能状态 n 、 $n+1$ 、 $n+2$ 的系统功能状态可表示为 $|\mu_n \mu_{n+1} \mu_{n+2}\rangle = \alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{100}|100\rangle + \alpha_{110}|110\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{011}|011\rangle + \alpha_{101}|101\rangle + \alpha_{111}|111\rangle$ 。 $|000\rangle$ 的概率幅为 $\frac{A_n + C_n}{\sqrt{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}} \times \frac{A_{n+1} + C_{n+1}}{\sqrt{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}} \times \frac{A_{n+2} + C_{n+2}}{\sqrt{(A_{n+2} + C_{n+2})^2 + B_{n+2}^2}}$, \dots , $|111\rangle$ 的概率幅为 $\frac{B_n}{\sqrt{(A_n + C_n)^2 + B_n^2}} \times \frac{B_{n+1}}{\sqrt{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2}} \times \frac{B_{n+2}}{\sqrt{(A_{n+2} + C_{n+2})^2 + B_{n+2}^2}}$, 共 8 种; 对应的 8 种置信度为 $\alpha_{000}^2 = \frac{(A_n + C_n)^2}{(A_n + C_n)^2 + B_n^2} \times \frac{(A_{n+1} + C_{n+1})^2}{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2} \times \frac{(A_{n+2} + C_{n+2})^2}{(A_{n+2} + C_{n+2})^2 + B_{n+2}^2}$ 为 3 功能状态都确定的置信度, \dots , $\alpha_{111}^2 = \frac{B_n^2}{(A_n + C_n)^2 + B_n^2} \times \frac{B_{n+1}^2}{(A_{n+1} + C_{n+1})^2 + B_{n+1}^2} \times \frac{B_{n+2}^2}{(A_{n+2} + C_{n+2})^2 + B_{n+2}^2}$ 为 3 功能状态都不确定的置信度, $\alpha_{000}^2 + \alpha_{010}^2 + \alpha_{100}^2 + \alpha_{110}^2 + \alpha_{001}^2 + \alpha_{011}^2 + \alpha_{101}^2 + \alpha_{111}^2 = 1$ 。

总结规律, M 个功能的系统多功能状态表达式具有如下特征: $|\mu_1 \mu_2 \dots \mu_{M-1} \mu_M\rangle = \sum [\alpha_{b_1 b_2 \dots b_{M-1} b_M} |b_1 b_2 \dots b_{M-1} b_M\rangle]$, 其中 $|b_1 b_2 \dots b_{M-1} b_M\rangle$ 的概率幅为

$$\prod_{m=1}^M \alpha_{b_m} = \begin{cases} \frac{A_m + C_m}{\sqrt{(A_m + C_m)^2 + B_m^2}}, & b_m = 0 \\ \frac{B_m}{\sqrt{(A_m + C_m)^2 + B_m^2}}, & b_m = 1 \end{cases}, \text{ 共 } 2^M \text{ 个};$$

各功能状态下的系统功能状态置信度为 $\alpha_{b_1 b_2 \dots b_M}^2 =$

$$\prod_{m=1}^M \alpha_m, \alpha_m = \begin{cases} \frac{(A_m + C_m)^2}{(A_m + C_m)^2 + B_m^2}, & b_m = 0 \\ \frac{B_m^2}{(A_m + C_m)^2 + B_m^2}, & b_m = 1 \end{cases}, \text{共 } 2^M \text{ 个};$$

$$\sum \alpha_{b_1 b_2 \dots b_M}^2 = 1, \forall b_m = \{0, 1\}, m = 1, 2, \dots, M.$$

本节得到了最具一般性的系统多功能状态表达式,即系统功能状态确定和不确定的叠加形式,及多功能状态叠加形成的多功能状态置信度。当所有功能状态都确定时,得到的系统功能状态是确定的,即状态评价结果完全正确;当所有功能状态都不确定时,得到的系统功能状态完全不确定,即状态评价结果完全错误;它们之间的状态同时包含确定和不确定状态,是难以判断正确性的状态。

4 实例分析

根据第 1 节给出的实例,设手机样本总数 $N=10\,000$,通话为功能 μ_1 ,照明为功能 μ_2 ,照相为功能 μ_3 ;对于 μ_1 , $A_1=6\,812$, $B_1=389$, $C_1=2\,799$;对于 μ_2 , $A_2=5\,563$, $B_2=1\,989$, $C_2=2\,448$;对于 μ_3 , $A_3=4\,370$, $B_3=3\,598$, $C_3=2\,032$ 。

3 个功能的系统单功能状态表达式的联系数形式分别为 $\mu_1 = \frac{(A_1 + C_1j)}{N} + B_1i/N = (6\,812 + 2\,799j)/10\,000 + 389/10\,000$; $\mu_2 = \frac{(A_2 + C_2j)}{N} + B_2i/N = (5\,563 + 2\,448j)/10\,000 + 1\,989/10\,000$; $\mu_3 = \frac{(A_3 + C_3j)}{N} + B_3i/N = (4\,370 + 2\,032j)/10\,000 + 3\,598/10\,000$ 。其系统多功能状态表达式的量子形式为 $|\mu_1\mu_2\mu_3\rangle = \alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{100}|100\rangle + \alpha_{110}|110\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{011}|011\rangle + \alpha_{101}|101\rangle + \alpha_{111}|111\rangle$, 其中 $\alpha_{000}^2 = \frac{(A_1 + C_1)^2}{(A_1 + C_1)^2 + B_1^2} \times \frac{(A_2 + C_2)^2}{(A_2 + C_2)^2 + B_2^2} \times \frac{(A_3 + C_3)^2}{(A_3 + C_3)^2 + B_3^2} = 0.714\,7$, $\alpha_{010}^2 = 0.044\,1$, $\alpha_{100}^2 = 0.001\,2$, $\alpha_{110}^2 = 0.000\,072\,17$, $\alpha_{001}^2 = 0.225\,7$, $\alpha_{011}^2 = 0.013\,9$, $\alpha_{101}^2 = 0.000\,369\,79$, $\alpha_{111}^2 = 0.000\,022\,796$, 上述置信度和为 1。

$\alpha_{000}^2 = 71.47\%$ 表明针对上述样本集合的对象在规定的条件下和规定时间内,统计得到的系统功能状态评价结果为确定的置信度为 71.47%, α_{111}^2 代表系统功能状态评价结果为不确定的置信度为 0.002 279 6%, 其余 28.53% 是功能状态评价结果难以确定的情况。进一步具体化含义,如果通过上述给定数据确定了系统可靠性,那么该可靠性有 71.47% 的可能是完全正确的,与事实相符;有 0.002 279 6% 的可能是完全错误的;有 28.53% 的可能无法判断是否正确。

系统多功能状态置信度的研究主要是为了获得系统状态评价结果后判断其真实性。如果评价结果完全正确,则置信度为 100%;如果完全不确定则置信度为 0%。具体实现过程是首先使用三元集对分析联系数确定各功能不同样本的可靠、不确定和失效数量;其次使用二元联系数表示为确定和不确定两种状态;随后将二元联系数转化为系统功能状态的量子表示形式;最终通过多量子叠加形式表示系统多功能状态置信度。应注意的是所得结果只具有统计意义,对单个样本意义不大。研究可为大样本多功能的系统功能状态评价结果的置信度分析提供理论和方法。

5 结束语

1) 论述了系统多功能状态评价结果的置信度问题。对系统可靠性或失效性的确定实际是对系统某种功能状态的确定性分析。这种确定性中必然包含由于数据及系统结构造成的误差,导致了系统功能状态评价结果的不确定性。那么当需要分析系统的多个功能时,这种不确定性更为复杂,因此如何确定该情况下系统多功能状态评价结果是否与实际情况相符即为系统多功能状态置信度问题。

2) 给出了系统单功能状态表示及其置信度确定方法。表示方法有两种,其一是联系数的系统功能状态表示,各功能都有自己的表达式,使用三元联系数表达式确定同异反分量,使用二元联系数表达式得到确定和不确定分量;其二是量子态叠加的系统功能状态表示,将功能状态叠加为一个表达式,通过确定和不确定分量得到该功能状态置信度。

3) 研究了系统多功能状态表达式及置信度确定方法。基于系统单功能状态量子表达式,研究了两、三功能的量子表达式特点,进而总结了系统多功能状态表达式,并以状态概率幅的平方作为对应状态的置信度。最终通过实例计算了系统功能状态评价结果的置信度。

系统功能状态是对系统存在意义和系统变化的度量和表征,利用量子态叠加表示系统功能状态是可行的。系统功能状态至少可拆解为两种对立状态,对应于量子态的两个基态,在此基础上的量子态叠加就能表示系统功能状态的全貌。因此下一步笔者将论证系统功能状态是否符合量子态的基本性质和特征;同时也包括量子纠缠反应的系统功能状态内涵研究;以及利用量子叠加表示系统功能状态逻辑的统一理论研究等。量子力学的相关理论并不只限于微观力学范畴,其思想

也可拓展于类似领域,系统功能状态的研究就是主要方向之一。

参考文献:

- [1] 王华胜,朱庆龙,钱小磊,等.动车组产品可靠性评估与验证[J].中国铁道科学,2021,42(1):116–122.
WANG Huasheng, ZHU Qinglong, QIAN Xiaolei, et al. Reliability evaluation and verification of EMU products[J]. China railway science, 2021, 42(1): 116–122.
- [2] 段毅刚,齐金平,周亚辉.基于FTA-FPN的动车组塞拉门系统可靠性分析[J].模糊系统与数学,2020,34(4):100–107.
DUAN Yigang, QI Jinping, ZHOU Yahui. Reliability analysis of sliding plug door system of EMU based on FTA-FPN[J]. Fuzzy systems and mathematics, 2020, 34(4): 100–107.
- [3] 李根成,郭威威,李沛萱.基于靶试的空空导弹自主飞可靠性置信度分析[J].火力与指挥控制,2020,45(12):177–180.
LI Gencheng, GUO Weiwei, LI Peixuan. Analyzing on confidence degree for a missile's self-flying reliability based on firing test[J]. Fire control & command control, 2020, 45(12): 177–180.
- [4] 黄玉鑫,闫振国,范京道,等.基于Apriori算法的煤矿双重预防信息系统[J].工矿自动化,2020,46(10):92–98,118.
HUANG Yuxin, YAN Zhenguo, FAN Jingdao, et al. Coal mine dual prevention information system based on Apriori algorithm[J]. Industry and mine automation, 2020, 46(10): 92–98,118.
- [5] 赵瑞,陈浩然,葛子阳.一种考虑可靠性指标的备件运送路径优化方法[J].南京理工大学学报,2020,44(4):441–445.
ZHAO Rui, CHEN Haoran, GE Ziyang. Optimization method for spare parts transportation route considering reliability index[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(4): 441–445.
- [6] 郝新超,薛斌.基于疲劳强度分布的复合材料疲劳验证载荷放大系数[J].科学技术与工程,2020,20(21):8510–8516.
HAO Xinchao, XUE Bin. Composite fatigue verification load enhancement factor based on fatigue strength distribution[J]. Science technology and engineering, 2020, 20(21): 8510–8516.
- [7] 王思辰,余佳,吴斌平,等.基于改进证据理论的重力坝进度不确定性分析[J].水力发电学报,2020,39(9):99–110.
WANG Sichen, YU Jia, WU Binping, et al. Uncertainty analysis of gravity dam schedule based on modified evidence theory[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2020, 39(9): 99–110.
- [8] 陈丽荣.突发性泥石流对旅游景区生态破坏程度评估方法[J].灾害学,2020,35(2):30–33.
CHEN Lirong. Assessment method of eco-damage degree of sudden debris flow to tourist scenic spots[J]. Journal of catastrophology, 2020, 35(2): 30–33.
- [9] 赵维涛,陈欢,祁武超.基于LCF-Kriging模型的结构多失效模式可靠度计算[J].固体力学学报,2020,41(4):379–390.
ZHAO Weitao, CHEN Huan, QI Wuchao. Structural reliability calculation with multiple failure modes using LCF-Kriging model[J]. Chinese journal of solid mechanics, 2020, 41(4): 379–390.
- [10] 周志杰,刘涛源,胡冠宇,等.一种基于数据可靠性和区间证据推理的故障检测方法[J].自动化学报,2020,46(12):2628–2637.
ZHOU Zhijie, LIU Taoyuan, HU Guanyu, et al. A fault detection method based on data reliability and interval evidence reasoning[J]. Acta automatica sinica, 2020, 46(12): 2628–2637.
- [11] 马振宇,吴纬,张威,等.基于非参数的软件可靠性验证测试方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(02):103–108.
MA Zhenyu, WU Wei, ZHANG Wei, et al. Research on software reliability demonstration testing method based on non-parameter[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(natural science edition), 2020, 48(02): 103–108.
- [12] 王禹玺,李典庆,唐小松.边坡系统可靠度区间估计方法[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(11):941–950.
WANG Yuxi, LI Dianqing, TANG Xiaosong. An interval estimation method of slope system reliability[J]. Engineering Journal of Wuhan University(engineering edition), 2019, 52(11): 941–950.
- [13] 张春涛,王汝恒,李正良.基于不完全数据的Q345大型角钢疲劳性能研究[J].建筑结构学报,2020,41(10):173–181.
ZHANG Chuntao, WANG Ruheng, LI Zhengliang. Fatigue properties of Q345 large equal angles with incomplete test data[J]. Journal of building structures, 2020, 41(10): 173–181.
- [14] 牟园伟,陆山.基于指数分布第K次序统计量试验寿命可靠性评估方法[J].航空发动机,2019,45(4):16–19.
MU Yuanwei, LU Shan. Reliability assessment method of test life based on Kth order statistics of exponential distribution[J]. Aeroengine, 2019, 45(4): 16–19.
- [15] 吴康清,黄利平,李伯舒,等.基于故障知识库的机械零部件故障管理支持系统[J].图学学报,2019,40(3):623–630.
WU Kangqing, HUANG Liping, LI Boshu, et al. Failure

- management and support system of mechanical parts based on failure knowledge-base[J]. *Journal of graphics*, 2019, 40(3): 623–630.
- [16] WANG Dan, YANG Gongliu, LI Mingming, et al. Research on the test-times selection method for the accuracy evaluation of inertial navigation system[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2022, 2187: 012060.
- [17] BAI Xuchao, LI Xiangrong, Balakrishnan Narayanaswamy, et al. Reliability analysis for dependent stress-strength reliability of multi-state system using improved generalized survival signature[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 165: 107941.
- [18] Navarro Ángel, Casacuberta Francisco. Neural Models for Measuring Confidence on Interactive Machine Translation Systems[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1100.
- [19] CAI Xia, YAN Liang, LI Yan, et al. Fiducial lower confidence limit of reliability for a power distribution system[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(23): 11317.
- [20] 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, 62.
CUI Tiejun, MA Yundong. Research on multi-dimensional space fault tree construction and application[J]. *China safety science journal*, 2013, 23(4): 32–37, 62.
- [21] 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 Tiejun, 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.
- [22] 崔铁军, 李莎莎. 人工智能系统故障分析原理研究 [J]. *智能系统学报*, 2021, 16(4): 785–791.
CUI Tiejun, LI Shasha. Research on system fault analysis principle based on artificial intelligence system[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2021, 16(4): 785–791.
- [23] 崔铁军, 李莎莎. 基于因素空间的人工智能样本选择策略 [J]. *智能系统学报*, 2021, 16(2): 346–352.
CUI Tiejun, LI Shasha. Sample selection strategy of artificial intelligence based on factor space[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2021, 16(2): 346–352.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
CUI Tiejun, LI Shasha. Preliminary study of system movement space and system mapping theory[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2020, 15(3): 445–451.
- [29] 汪培庄. 因素空间与因素库 [J]. *辽宁工程技术大学学报 (自然科学版)*, 2013, 32(10): 1297–1304.
WANG Peizhuang. Factor spaces and factor databases[J]. *Journal of Liaoning Technical University (natural science)*, 2013, 32(10): 1297–1304.
- [30] 汪培庄. 因素空间与概念描述 [J]. *软件学报*, 1992(01): 30–40.
WANG Peizhuang. Factor space and description of concepts[J]. *Journal of Software*, 1992(01): 30–40.
- [31] 蒋云良, 赵克勤. 人工智能集对分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [32] 刘秀梅, 赵克勤. 区间数决策集对分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

作者简介:



崔铁军, 副教授, 博士生导师, 博士后。主要研究方向为安全科学理论、系统故障演化。主持国家自然科学基金、省部级项目多项及国家重点研发计划项目, 获国家科学技术学术著作出版基金, 授权发明专利 25 项。获省部级及社会团体科技进步及青年科学奖 10 项。出版学术专著 10 部, 发表学术论文近 200 篇。



李莎莎, 副教授, 博士后, 国家自然科学基金项目评审专家。主要研究方向为安全管理及系统可靠性。参与了空间故障树及因素空间理论的研究。主持国家自然科学基金及辽宁省教育厅项目, 参与国家重点研发计划项目。授权发明专利 10 项, 发表学术论文 21 篇。