

DOI: 10.11992/tis.201807022

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20190527.1353.008.html>

# 空间故障树与因素空间融合的智能可靠性分析方法

崔铁军<sup>1,2</sup>, 汪培庄<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 数学与系统科学研究院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 现有系统可靠性分析方法一般具有针对性, 缺乏广泛的适应性和扩展性。由于智能科学、信息科学和大数据技术的涌现和发展, 使得传统可靠性分析技术难以适应新的需要。因此作者提出了空间故障树理论, 目的是分析多因素影响下的系统可靠性变化特征。将空间故障树理论与因素空间理论、云模型、模糊数学及系统稳定性等相结合, 使其具有智能分析和故障大数据处理能力, 以满足未来技术环境下的分析要求。本文论述了空间故障树和因素空间的发展史及主要理论与功能; 以及两种理论结合, 描述和分析系统演化过程的可行性。研究表明, 空间故障树理论具有良好的扩展性和适应性, 可适应未来技术环境, 也可作为系统演化过程分析的普适框架。

**关键词:** 安全科学; 安全系统工程; 空间故障树; 因素空间; 系统可靠性; 智能科学; 系统演化过程; 普适框架

**中图分类号:** X913; C931.1; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2019)05-0853-12

中文引用格式: 崔铁军, 汪培庄. 空间故障树与因素空间融合的智能可靠性分析方法[J]. 智能系统学报, 2019, 14(5): 853-864.

英文引用格式: CUI Tiejun, WANG Peizhuang. Intelligent reliability analysis method based on space fault tree and factor space[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2019, 14(5): 853-864.

## Intelligent reliability analysis method based on space fault tree and factor space

CUI Tiejun<sup>1,2</sup>, WANG Peizhuang<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. Institute of Mathematics and Systems Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** The existing system reliability analysis methods are generally targeted and lack extensive adaptability and expansibility. Moreover, due to the emergence and development of intelligent science, information science, and big data technology, the traditional reliability analysis technology can hardly meet the new demands. Therefore, the authors propose the space fault tree theory to analyze the reliability change characteristics of systems influenced by multiple factors. The space fault tree theory is combined with factor space theory, cloud model, fuzzy mathematics, and system stability theory to enable it have the ability of intelligent analysis and fault big data processing, so as to meet the analysis requirements in the future technology environment. This paper discusses the development history and the main theories and functions of the space fault tree and factor space, as well as the feasibility of combining these two theories to describe and analyze the system evolution process. The results show that the space fault tree theory has good expansibility and adaptability; it adapts to future technology environment and can also be used as a universal framework for the analysis of a system evolution process.

**Keywords:** safety science; safety system engineering; space fault tree; factor space; system reliability; intelligent science; system evolution process; universal framework

收稿日期: 2018-07-21. 网络出版日期: 2019-05-28.

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

通信作者: 崔铁军. E-mail: [ctj.159@163.com](mailto:ctj.159@163.com).

系统可靠性理论是安全科学的基础理论之一。源于系统工程, 在安全科学领域系统可靠性主要关注于系统发生故障和事故的可能性。由于

近代科学进步和工业化水平逐渐提高,为了追求更大的经济和战略目标,各国加紧研究并建立大型或超大型系统以满足要求。但系统运行过程中人们发现随着系统复杂性的增加,其可靠性下降非常明显。在这种情况下,原始的问题出发型,即事故发生后吸取教训的方法不能满足要求。因为问题出发型的研究方法一般适用于低价值、对系统可靠性要求不高、故障发生后果不严重的系统,而对当今大规模和巨复杂系统而言意义不大。因此,在20世纪50年代的英美发达国家首先提出了安全系统工程理论,当时将系统工程的一些概念引入到安全领域,尤其是可靠性分析方法,并用于军事和航天领域,形成了安全科学的基础理论之一的安全系统工程。

安全系统工程与系统可靠性分析方法发展到今天,已具备了对相对简单、系统复杂性不高、数据规模有限情况下的系统可靠性分析能力。但随着大数据技术、智能科学、系统科学和相关数学理论的发展,现有系统可靠性分析方法也暴露出一些问题,如故障大数据处理、可靠性因果关系、可靠性的稳定性、可靠性逆向工程及可靠性变化过程描述等。同时现有系统可靠性分析方法较多针对特定领域中使用的系统,虽然分析效果好,但缺乏系统层面的抽象,难以满足通用性、可扩展性和适应性。因此需要一种具备上述能力和满足未来科技要求的系统可靠性分析方法。所以系统可靠性分析方法与智能科学和大数据技术结合是必然的,也是必须的。

空间故障树理论<sup>[1]</sup>是笔者2012年提出的一种系统可靠性分析方法。经过5年的发展,初步完成了空间故障树理论框架的基础。可满足对简单系统的可靠性分析,包括故障大数据处理、可靠性因果关系、可靠性的稳定性、可靠性逆向工程及可靠性变化过程描述等,并具有良好的通用性、可扩展性和适应性。发展过程中融合了智能科学和大数据处理技术,包括因素空间理论<sup>[2]</sup>、模糊结构元理论<sup>[3]</sup>、云模型理论<sup>[4]</sup>等。虽然还存在一些问题,但空间故障树理论还有足够的发展空间来解决他们。

本文将介绍空间故障树的现有发展,及其与因素空间的融合研究。空间故障树用于分析影响因素与系统可靠性关系;而因素空间则是帮助空间故障树进行智能处理的理论。两者融合可使空间故障树理论拥有智能故障数据处理能力。本文以综述形式介绍2种理论的特点,及它们结合的可行性、功能及成果。因此使用描述性语言而非

数学模型来说明上述内容。希望本文的介绍能开阔安全科学基础理论研究方向,使读者了解空间故障树理论及因素空间理论,及其在系统可靠性分析中的作用,以面向智能科学和大数据技术寻求可靠性的理论发展。

## 1 当前系统可靠性研究存在的问题

近年来随着信息科学与智能科学的迅猛发展,系统运行、故障检测和设备维护数据量暴涨成为许多行业共同面对的严峻挑战和发展机遇,尤其是在安全科学领域。对美国各个行业在一天内产生的数据量进行统计,结果表明制造业一天内产生的数据最多。如飞机制造过程,需要对飞机各部分的基本元件进行各种测试,包括各种条件下的物理强度、化学腐蚀性及疲劳等测试。这样仅就一个飞机汽轮压缩机叶片的测试,一天可产生588 GB数据。但这些有价值的数据并未得到企业有效利用。这些数据可分析系统基本元件故障原因、可能性和后果严重程度,也能得到基本元件故障与系统故障之间的联系。遗憾的是对这些数据的挖掘程度很低<sup>[5]</sup>。又如最早美国空军网站公布的照片显示一辆外表重新喷涂过的燃料车,其说明写着“F-35战机存在燃料温度阈值,如果燃料温度太高将无法工作”<sup>[6]</sup>。飞机设计阶段似乎都没有考虑飞机使用过程的环境因素(比如温度、湿度、气压、使用时间等)对可靠性的影响,导致实际使用时故障频出,严重影响了原设计试图实现的功能。F-35是信息化作战平台,飞行及维护过程数据是实时记录的,按照最低记录量1 MB/s,那么飞行一天的数量为84 GB。如果实时传输,F35带宽为4 GB/s,飞行一天的最大数据量为336 TB。这些系统运行时记录的数据蕴含着系统故障和可靠性特征,但缺乏相应的可靠性分析方法。上述问题表明,这些信息中蕴含的故障数据并未进行可靠性方面的分析;油温升高影响飞机各元件可靠性变化程度也无法确定;进而无法确定油温因素与飞机可靠性之间的关系。同样的问题也影响我国高铁在高寒高海拔地区的可靠性。高寒高海拔地区运行高铁的速度、时间和运量与一般情况下不同。不同环境对高铁运行的可靠性影响不同,因此高铁前期研制和运行测试阶段累积的大量数据为保证高铁可靠运行起到了关键作用。在深海中高压低温潜航设备可靠性也同样存在这类问题。

上述飞机、高铁、潜航器等设备系统在设计、制造及运行期间已经存储了大量工况数据,但实

际并没有挖掘出这些数据的价值。该问题在系统可靠性研究方面更为突出。可靠性理论是安全科学的基础理论,可靠性研究是安全科学的核心内容。可靠性问题在当今充斥着各种大型复杂系统的社会生产生活中是必须要解决的问题,特别是工矿、交通、医疗、军事等复杂且又关系到生命财产和具有战略意义的领域中更是重中之重。但目前研究存在一些误区和不足。

1) 研究中过分关注于系统内部结构和元件自身可靠性,竭力从提高元件自身可靠性和优化系统结构来保证系统可靠性。但一般忽略了一个事实,各种系统的基本组成元件是由物理材料制造的。这些元件在不同的物理学、力学、电学等环境下的相关性质随着这些因素的变化而变化,而不是恒定的。即执行某项功能的系统元件的功能性在元件制成之后主要取决于其工作环境。原因在于,不同工作环境下元件材料的基础属性可能是不同的,而在设计元件时相关参数基本固定。这就导致了元件在变化的环境中工作时随着基础属性的改变,其执行特定功能的能力也发生变化,致使元件可靠性发生变化。进一步地,即使是一个简单的、执行单一功能的系统也要由若干元件组成,如果考虑每个元件随工作环境变化其可靠性的变化,那么这些元件组成的系统也随着环境因素变化,系统可靠性变化是多样的复杂的。上述事实是存在的,且不应该被忽略。

2) 系统可靠性研究所面对的主要问题是系统如何失效、系统失效的原因是什么、这些原因是否相关、这些失效导致系统失效的可能性如何等。目前相关研究成果主要呈现了元件故障率与系统故障率之间关系,以及元件故障率与因素之间的关系,这些一般使用函数形式表示。另外一些使用定性分析方法,研究故障原因与可靠性之间的因果关系。但这些研究一般针对特定行业,不具有普适性,难以分析多因素并发与可靠性变化关系,难以分析影响因素关联性。而且从实际现场得来的故障数据一般情况数据量较大,且存在由于人机环境导致的数据冗余和确实。现有可靠性分析方法难以解决这些问题,特别是针对故障大数据、原因与可靠性关系推理等且适应计算机处理的算法在安全系统工程领域仍是鲜见的。

3) 在日常系统使用和维护过程中会形成大量的监测数据,属于大数据量级,如安全检查记录、故障或事故的记录、例行维护记录等。这些数据往往反映了系统在实际情况下的功能运行特征。这些特征一般可表示为在某工作环境下,系统运

行参数是多少,或在什么情况下出现了故障或事故。可见,这些监测数据不但能反映工作环境因素对系统运行可靠性的影响,而且其数据量较大,可全面分析系统可靠性。所以应研究适应大数据的方法从而将这些故障数据特征融入系统可靠性分析过程和结果中。

4) 系统设计阶段进行的需求分析难以全面覆盖使用环境带来的对可靠性的影响。即通过设计手段难以保证系统使用过程中的可靠性。所以设计后系统在使用期间会遇到一些问题。特别是航天、深海和地下工程等方面所使用的系统会遇到极端工作环境。只依靠需求分析,在设计阶段进行系统结构冗余或鲁棒设计难以保证系统在使用过程中的可靠性,是不稳妥的设计。该问题可归结为系统可靠性反分析。即知道系统运用过程可靠性特征和基本元件可靠性特征,借助因素变化形成它们的对应关系,分析元件如何组成系统,进而反推系统内部可靠性结构。当然该内部结构是一个等效结构,可能不是真正的物理结构。

5) 系统的基本元件材料在不同环境因素影响时性能不同,导致元件完成特定功能的能力不同,即可靠性发生变化。系统由这些元件组成,在受到不同环境影响时系统可靠性也是改变的,这是普遍现象。但从另一角度看,环境因素变化是原因,系统或元件可靠性或故障率变化是结果,即故障率随着环境变化而变化。将环境影响作为系统受到的作用,而故障率变化作为系统的一种响应,组成一种关于可靠性的运动系统,进而讨论故障率变化程度和可靠性的稳定性。稳定的可靠性或故障率是系统投入实际使用的重要条件,如果可靠性或故障率变化较大则系统功能无法控制。研究使用运动系统稳定性理论对可靠性系统进行描述和稳定性分析是一个关键问题。

上述现象和问题可归结为目前的系统可靠性分析方法对故障大数据和多因素影响分析的不适应。现有方法难以在大数据量级的故障数据中挖掘出有效信息,也难以有效携带这些数据特征进行系统可靠性分析。这些问题是传统可靠性分析方法与故障大数据涌现、多因素分析和智能科学技术适应性的矛盾。

## 2 因素空间理论

1981年在《随机微分方程》论文中首先提出了因素空间的原始定义,用以解释随机性的根源及概率规律的数学实质。1982年笔者在与日本学者菅野道夫合作发表《因素场与fuzzy集的背



景结构》中给出了因素空间的严格定义,并转向对概念的内涵与外延的解释。因素空间理论为知识的表述提供了一个自然合理的描述框架,并被广泛应用于概念表达、语义分析、数据挖掘、知识获取、机器学习、管理决策、安全分析等领域中。

因素空间理论源于模糊数学研究,进而描述人类认识活动,建立了知识表示的数学理论。近年又提出了因素库,为大数据智能化表示、分析、处理和归纳奠定了数学基础,成为目前三大智能科学基础理论之一。因素空间是数据信息的普适分析框架,能简明表示智能问题并提供快捷的处理方法。因素库的基本单元是认知包,可在线吞吐数据。数据转换和处理中增值数据,融合数据形成背景关系,这些背景关系组成知识基。知识基决定知识包内所有推理句;它对大数据进行吞吐并始终保持自己的低维度状态;它按因素藤进行连接,形成人机认知体,引领大数据的时代潮流。相关理论发展见文献[7-25]。目前因素空间得到了国内外广泛的研究和承认,相关研究如下:

1) 背景关系的信息压缩:文献[26]为利用托架空间作了初步工作,利用因素逻辑化简可得到精炼的背景关系。因素逻辑化简方法与布尔代数逻辑不同,因此这里称为因素逻辑。

2) 因素空间分析非结构化数据:石勇<sup>[27]</sup>提出了因素库框图,因素库可以容纳结构化数据、非结构化数据及异构数据,并考虑增添半结构性数据表征因素。

3) 因素藤、因素粒化空间及数据认知生态系统:因素是区别对象的标准,而数据这是标准值;因素粒化的嵌套和细化形成了数据认知生态系统;因素藤是为数据认知生态系统所提供的一种知识表示构架,它是因素空间的概念树。

4) 变权评价与决策理论:综合评价及贴近度和最大隶属原则始于文献[10-28]。李洪兴<sup>[29]</sup>提出了因素空间的权重决策理论,及因素位势的3种动态微分方程<sup>[30]</sup>。这符合李德毅院士对数据空间要建立认知物理学的思想<sup>[31]</sup>。曾文艺等<sup>[32-36]</sup>研究了变权综合决策评价方法,并应用于各领域,取得了良好效果。

5) 因素空间与公共安全:因素空间理论已应用于公共安全管理。在治安方面,何平<sup>[37-42]</sup>提出了非优理论并与因素空间进行结合,形成了犯罪过程推理理论。

6) 代数、拓扑、微分几何、范畴理论的综合研究:欧阳合<sup>[43]</sup>提出因素空间应结合拓扑结构来描

述人类思维活动,并用微分几何和代数拓扑对因素空间理论再次进行了描述。冯嘉礼<sup>[44]</sup>将基于物理思想的属性论引入到因素空间进行研究,应用于模式识别领域,提出了许多有效方法。袁学海等<sup>[45-46]</sup>在代数、范畴等方面与因素空间理论相结合进行了深入研究。

因素空间理论处理大数据的优势在于:

1) 现有的关系数据库不能处理异构的海量数据,无法对大数据进行组织和存放,因素空间能按目标来组织数据,变换表格形式。

2) 因素空间用背景关系来提取知识,可分布式处理,便于云计算。

3) 将背景关系化为背景基,实现大幅度的信息压缩,可以实时地在线吞吐数据,将对大数据的分析始终掌控在可操作层面。

原中国人工智能学会理事长、参与国家人工智能十年发展规划起草工作的钟义信教授对因素空间理论的评价:因素空间理论是对信息和知识进行有效表示与复杂演绎的数学方法,是人工智能研究不可或缺的理论基础。可见因素空间在智能科学和大数据处理方面的重要地位。

### 3 空间故障树理论

空间故障树理论(space fault tree, SFT)前期称为多维空间故障树,重点在于解决多因素影响下的系统可靠性分析问题。其主要内容包括连续型空间故障树、离散型空间故障树、空间故障树的数据挖掘方法。进一步地,在空间故障树基础理论上,加入大数据和智能科学技术,以使空间故障树理论适合未来的可靠性分析。包括SFT的云模型改造、可靠性与影响因素关系、系统可靠性结构分析、可靠性变化特征研究等。

目前空间故障树理论的具体研究内容如下:

1) 给出空间故障树SFT理论框架中,连续型空间故障树(continuous space fault tree, CSFT)的理沦、定义、公式和方法,及应用这些方法的实例<sup>[1]</sup>。定义了连续型空间故障树、基本事件影响因素、基本事件发生概率特征函数、基本事件发生概率空间分布、顶上事件发生概率空间分布、概率重要度空间分布、关键重要度空间分布、顶上事件发生概率空间分布趋势、事件更换周期、系统更换周期、基本事件及系统的径集域、割集域和域边界<sup>[47]</sup>、因素重要度和因素联合重要度分布<sup>[46-49]</sup>等概念。

2) 研究元件和系统在不同因素影响下的故障概率变化趋势;系统最优更换周期方案及成本方

案<sup>[50]</sup>;系统故障概率的可接受因素域;因素对系统可靠性影响的重要度;系统故障定位方法<sup>[51]</sup>;系统维修率确定及优化<sup>[52]</sup>;系统可靠性评估方法<sup>[53]</sup>;系统和元件因素重要度<sup>[54]</sup>等。

3) 给出空间故障树 SFT 理论框架中,离散型空间故障树 (discrete space fault tree, DSFT) 的理论<sup>[55]</sup>、定义、公式和方法,及应用这些方法的实例。提出离散型空间故障树概念,并与连续型空间故障树进行了对比分析。给出在 DSFT 下求故障概率分布的方法,即因素投影拟合法<sup>[56]</sup>,并分析了该方法的不精确原因。进而提出了更为精确的使用 ANN 确定故障概率分布的方法,同时也使用 ANN 求导得到了故障概率变化趋势<sup>[57]</sup>。同时提出了模糊结构元理论与空间故障树的结合,即模糊结构元化特征函数及空间故障树<sup>[58-61]</sup>。

4) 研究系统结构反分析方法,提出了 01 型空间故障树表示系统的物理结构和因素结构,及结构表示方法,即表法和图法。提出了可用于系统元件及因素结构反分析的逐条分析法和分类推理法,并描述了分析过程和数学定义<sup>[62-63]</sup>。

5) 研究从实际监测数据记录中挖掘出适合于 SFT 处理的基础数据方法。研究定性安全评价和监测记录的化简、区分及因果关系<sup>[64]</sup>;工作环境变化情况下的系统适应性改造成本<sup>[65]</sup>;环境因素影响下系统中元件重要性;系统可靠性决策规则发掘方法及其改进方法<sup>[66-67]</sup>;不同对象分类和相似性<sup>[68]</sup>及其改进方法<sup>[69]</sup>。

6) 引入云模型改造空间故障树。云化空间故障树继承了 SFT 分析多因素影响可靠性的能力,也继承了云模型表示数据不确定性的能力<sup>[70]</sup>。从而使云化空间故障树适合于实际故障数据的分析处理。提出云化概念包括:云化特征函数,云化元件和系统故障概率分布,云化元件和系统故障概率分布变化趋势<sup>[71]</sup>,云化概率和关键重要度分布<sup>[72]</sup>,云化因素和因素联合重要度分布<sup>[73]</sup>,云化区域重要度<sup>[74]</sup>,云化径集域和割集域<sup>[75]</sup>,可靠性数据的不确定性分析<sup>[76]</sup>。

7) 给出了基于随机变量分解式的可靠性数据表示方法<sup>[77]</sup>。研究了从不同侧面分析影响因素和目标因素之间逻辑关系的状态吸收法和状态复现法。构建了针对 SFT 中故障数据的因果概念分析方法<sup>[78]</sup>。

参照故障数据特征,提出了故障及影响因素构建背景关系的分析方法<sup>[79]</sup>。根据因素空间中的信息增益法,制定了 SFT 的影响因素降维方法。提出了基于内点定理的故障数据压缩方法,其适

合 SFT 的故障概率分布表示,特别是对离散故障数据的处理。提出了可控因素和不可控因素的概念及其分析方法。

8) 提出基于因素分析法的系统功能结构分析方法<sup>[80]</sup>,指出因素空间能描述智能科学中的定性认知过程。基于因素逻辑具体建立了系统功能结构分析公理体系,给出了定义、逻辑命题和证明过程。提出系统功能结构的极小化方法<sup>[81]</sup>。简述了空间故障树理论中系统结构反分析方法,论述了其中分类推理法与因素空间的功能结构分析方法的关系。使用系统功能结构分析方法分别对信息完备和不完备情况的系统功能结构进行了分析<sup>[82]</sup>。

9) 提出作用路径和作用历史的概念。前者刻画了在不同环境因素变化过程中系统及元件经历的各种状态的集合,是因素的函数。后者描述经历作用路径过程中的可积累状态量,是累积的结果。尝试使用运动系统稳定性理论描述可靠性系统的稳定性问题,将系统划分为功能子系统、容错子系统、阻碍子系统。对这 3 个子系统在可靠性系统中的作用进行了论述。根据微分方程解的 8 种稳定性,解释了其中 5 种对应的系统可靠性含义。

10) 提出基于包络线的云模型相似度计算方法<sup>[83]</sup>。适用于安全评价中表示不确定性数据特点的评价信息,对信息进行分析、合并,进而达到化简的目的。为使云模型能方便有效地进行多属性决策,对已有属性圆进行改造,使其适应不确定性特点,并能计算云模型特征参数<sup>[84]</sup>。提出可考虑不同因素值变化对系统可靠性影响的模糊综合评价方法<sup>[85]</sup>。依靠云模型对专家所提供的评价数据蕴含的不确定性的分析能力,结合云模型和 AHP,对 AHP 进行云模型改造<sup>[86]</sup>。构建合作博弈-云化 AHP 算法<sup>[87]</sup>,根据专家对施工方式选择的自然思维过程的两个层面,在算法中使用了两次云化 AHP 模型。提出了云化 ANP 模型及其步骤<sup>[88]</sup>。

11) 研究了元件维修率确定方法,分析不同环境因素对同类元件维修率分布影响情况<sup>[89]</sup>。结合 Markov 状态转移链和 SFT 特征函数推导了串联系统和并联系统的元件维修率分布。研究异类元件的并联、串联和混联形式系统,提出元件维修率分布计算方法并给出了限制条件<sup>[90]</sup>。

## 4 空间故障树与因素空间的融合

空间故障树理论认为在实际环境中工作的系统,由于组成系统的元件的物理材料性质受因素

影响而变化,因此由这些材料组成的元件在因素变化过程中实现功能的能力也发生变化,即可靠性变化。因此在元件制成后,可靠性是随环境因素变化而变化的变量。系统由多个子系统多个元件通过一定的连接方式组成。那么分析系统可靠性的关键问题就集中在两方面:一是元件组成系统的结构;二是元件可靠性的确定。

对于第一个问题可从两方面分析。一是从系统功能出发,在系统内部研究系统组成结构,构建可完成系统功能的物理元件结构。这种方法根据系统功能进行分解,得到元件所需功能,进而选择适当元件组成系统。其优点是直观简便,缺点是难以避免系统冗余和重复。二是从系统功能出发,在系统外部研究系统的等效结构。由于某些原因导致系统内部结构不可见,或需要逆向工程仿制系统。在这种情况下只能按照系统功能和可能组成系统元件的功能来反向推导系统的结构。其优点是通过系统和元件功能反演可得到系统的逻辑结构,避免系统冗余和重复;缺点是只能得到等效的逻辑结构而不是物理结构。前者在空间故障树中可使用连续型空间故障树和离散型空间故障树完成;后者可使用系统结构反分析和系统功能结构极小化理论完成。

第二个问题涉及的方面较多。元件的可靠性是确定系统可靠性的基础。最基本的方法是通过实验室对元件故障进行测试得到,并且保证实验室内各种因素变化保持一定规律。但实际使用过程中,元件的可靠性受到很多因素影响,这些因素对元件可靠性或故障发生影响程度不同。因此,多因素影响下的系统可靠性分析问题必须得到解决。具体解决方案即为连续型空间故障树和离散型空间故障树。更基本的问题,如何得到元件对于某一因素的故障变化情况,在空间故障树中使用特征函数表示这种变化。对于实验室内规整的数据使用连续型空间故障树的一般特征函数表示。对于实际数据,具有离散性、随机性和模糊性,根据理论发展先后顺序提出了拟合方法的特征函数、因素投影拟合法特征函数、模糊结构元法特征函数及云化特征函数等。

进一步地,随着研究的深入,发现一些系统的可靠性变化难以表示成特征函数,而只能表示为可靠性与影响因素之间的因果关系和关联程度。因此必须寻找一种能完成因果关系分析和大数据处理的智能理论方法,即因素空间理论,那么空间故障树理论与因素空间理论相结合的基础就是因素。

空间故障树的空间指系统可靠性影响因素作为维度构成的空间,那么元件和系统的可靠性和故障情况就可表示为此空间中的连续曲面或者离散点。因此,空间故障树表示系统或元件可靠性的最基本条件是有明确的因素。在系统结构不变时,因素的变化是导致元件和系统可靠性变化的基本动力。从另一个角度,如果影响系统可靠性或故障的因素都可确定,系统可靠性或故障的发生是非概率的。

因素空间理论也具有类似的观点,“当所考虑的因素足够充分时,钱币落地的面向便可以确定,否则必存在某种有影响的因素没有被考虑到。把它发现出来并添加进去,在这样一个以诸因素为轴的坐标空间里,钱币的朝向便可以被划分成正、反两个确定的子集,必然性便战胜了偶然性。”因此因素空间认为因素是区分事物的基本方式、基本尺度和事物变化的源泉。

可见空间故障树理论与因素空间理论具有相同的出发点——因素。因素空间的数学基点在于因素,所有分析围绕着因素展开,认为因素是一种映射关系,具有定量相空间和定性相空间。定量因素构成因素空间,是笛卡尔空间,但维数可变;基于因素对因素空间公理化;因素空间的核心是因素联系建立的背景关系,是因素交织形成的分布,既是原子内涵之集,也是原子外延在相空间中表征,可表示全体概念布尔代数;是建立概念的基础,也决定了因素间的所有推理句;背景关系的概念随机化和模糊化,得到背景分布和模糊背景关系。可见因素空间的所有理论、概念和方法都是围绕因素展开的。因此将因素空间与空间故障树结合具有天然的适应性和优势。

目前两种理论已经进行结合用于系统可靠性研究。如第3章中的4)、5)、7)、8)部分都是因素空间思想在空间故障树中的具体实现。随着空间故障树和因素空间理论研究的深入,两种理论的继续发展和结合必将进一步为系统可靠性研究做出贡献。

## 5 空间故障树与系统演化过程表示

因素空间理论是事物及认知描述的普适性框架,可用于事物的表示和区分等工作。目前空间故障树理论只用于系统可靠性分析。但是否能作为了解系统演化过程特征的一种普适框架?答案是肯定的。实际上目前的空间故障树理论是一种多输入单输出的系统结构表示方法。多输入指影响因素,单输出指系统可靠性或故障概率。整个



空间故障树理论的发展目标并不限于安全系统工程和系统可靠性分析领域;而是向着表示更为广泛的系统演化过程方向努力。系统演化过程实质上是在众多因素影响下的一连串因果事件的链式反应。可从两方面进行描述,一是影响因素,二是因果关系。因素是系统演化的动力,因果关系变迁则是系统演化的过程。所以抓住这两点便可描述任何系统的演化过程。空间故障树理论可描述影响因素作用下系统演化过程,不限于系统可靠性,而是更为广泛的目标。同时借助因素空间理论描述因素间因果关系,并融入空间故障树,使后者具备智能分析和大数据处理能力。这一融合过程已得到论证是可行的。

举例来说,使用空间故障树可描述安全系统工程的主要研究对象,即人、机、环境和管理四部分。对于人而言,可描述人的心情,将心情作为系统,由好到不好的演化过程可能受到多因素影响,比如当天的天气、路上的交通等因素。当然该系统演化过程因人而异,因为不同的人考虑的因素和权重不同。因此空间故障树理论提供了基于ANN的方法确定因素权重,也提供了系统功能结构反分析方法解决该问题。对于机而言则相对简单,主要保证机器正常运转,即保证系统可靠性。可考虑机器的使用时间、温度和电压等因素,研究该机器系统可靠性演化过程,可采用连续型和离散型空间故障树。对于环境而言,可描述空气中粉尘的浓度,将粉尘散发量、空气流通速度、温度和湿度等作为因素,将空气中粉尘浓度作为系统研究其演化过程。对于管理,可将人员绩效作为系统进行研究,将出勤时间、工作效率、奖金数额等作为因素研究系统演化过程。所以空间故障树理论虽然源于安全系统工程的系统可靠性分析,但并不妨碍使用该理论框架对更为广泛的系统演化过程进行分析。因为系统演化过程可抽象为因素的推动和因果关系的发展。空间故障树理论可完成多因素与系统变化关系的定性定量分析。与因素空间、云模型、系统稳定性理论和拓朴理论的融合,更使其具备了逻辑分析和大数据处理能力。因此空间故障树理论可作为系统演化过程分析的普适性框架,并具有良好的适应性和扩展性。

## 6 结束语

作为安全科学基础理论之一的系统可靠性理论,虽然发展时间不长,但已成为各行业维持正常生产功能的重要保障。当前正是大数据和智能

技术快速发展阶段,安全科学理论和技术也应适应这些发展。作为保障系统正常运行的系统可靠性分析方法更应满足和适应智能科学、信息科学和大数据技术。空间故障树理论的提出本身可满足系统可靠性的多因素分析,且与因素空间等智能理论结合后,也具备了逻辑推理分析和故障大数据处理能力。这表明空间故障树理论是一种开放性理论,具有良好的扩展性和适应能力。已形成了连续型空间故障树、离散型空间故障树、空间故障树的数据挖掘方法等基础理论;及云化空间故障树、可靠性与影响因素关系、系统可靠性结构分析、可靠性变化特征研究等智能化可靠性分析方法。相信随着空间故障树理论及相关智能科学的发展,空间故障树理论必将形成独具特色且自成体系的先进系统可靠性分析方法,最终成为系统演化过程分析的普适性框架。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 袁学海, 汪培庄. 因素空间中的一些数学结构[J]. 模糊系统与数学, 1993, 7(1): 44-54.  
YUAN Xuehai, WANG Peizhuang. Some mathematical structures in factor spaces[J]. Fuzzy systems and mathematics, 1993, 7(1): 44-54.
- [3] 郭嗣琮. 模糊分析中的结构元方法(I)[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(5): 670-677.  
GUO Sicong. Method of structuring element in fuzzy analysis(I)[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(5): 670-677.
- [4] 李德毅, 杜鹑. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.  
LI Deyi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2005.
- [5] 张学欣. 基于大数据的设备故障全矢预测模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017: 5.  
ZHANG Xuexin. Research on equipment fault full vector prediction model based on big data[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017: 5.
- [6] 崔铁军. 空间故障树理论研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015: 6.  
CUI Tiejun. The construction of space fault tree theory and research[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015: 6.
- [7] 汪培庄. 统计物理学进展[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [8] WANG Peizhuang. Fuzzy contactibility and fuzzy vari-

- ables[J]. *Fuzzy sets and systems*, 1982, 8(1): 81–92.
- [9] 汪培庄, SUGENO M. 因素场与模糊集的背景结构[J]. 模糊数学, 1982(2): 45–54.
- WANG Peizhuang, SUGENO M. The factors field and background structure for fuzzy subsets[J]. *Fuzzy mathematics*, 1982(2): 45–54.
- [10] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海: 上海科技出版社, 1983.
- [11] 汪培庄, 李洪兴. 模糊系统理论与模糊计算机[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [12] 汪培庄. 模糊集与随机集落影[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985.
- [13] 汪培庄, 张大志. 思维的数学形式初探[J]. 高等应用数学学报, 1986, 1(1): 85–95.
- WANG Peizhuang, ZHANG Dazhi. An exploratory study on mathematical form of ideology[J]. *Applied mathematics a journal of chinese universities*, 1986, 1(1): 85–95.
- [14] WANG Peizhuang. A factor spaces approach to knowledge representation[J]. *Fuzzy sets and systems*, 1990, 36(1): 113–124.
- [15] WANG Peizhuang. Fuzziness vs randomness, falling shadow theory[J]. *Bulletin sur les sous ensembles flous et leurs applications*, 1991(48): 123–141.
- [16] 汪培庄. 因素空间与概念描述[J]. 软件学报, 1992, 3(1): 30–40.
- WANG Peizhuang. Factor space and description of concepts[J]. *Journal of software*, 1992, 3(1): 30–40.
- [17] WANG Peizhuang, LOE K F. Between mind and computer: fuzzy science and engineering[M]. Singapore: World Scientific Publishing, 1994.
- [18] 汪培庄, 李洪兴. 知识表示的数学理论[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994.
- [19] 汪培庄, 李洪兴. 模糊系统理论与模糊计算机[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [20] WANG Peizhuang, ZHANG Xinghu, LU Hochuong, et al. Mathematical theory of truth-valued flow inference[J]. *Fuzzy sets and systems*, 1995, 72(2): 221–238.
- [21] WANG Peizhuang, JIANG A. Rules detecting and rules-data mutual enhancement based on factors space theory[J]. *International journal of information technology and decision making*, 2002, 1(1): 73–90.
- [22] 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.
- [23] WANG Peizhuang, LIU Zengliang L, SHI Yong, et al. Factor space, the theoretical base of data science[J]. *Annals of data science*, 2014, 1(2): 233–251.
- [24] 汪培庄, 郭嗣琮, 包研科, 等. 因素空间中的因素分析法[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(7): 865–870.
- WANG Peizhuang, GUO Sicong, BAO Yanke, et al. Causality analysis in factor spaces[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2014, 33(7): 865–870.
- [25] 汪培庄. 因素空间与数据科学[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2): 273–280.
- WANG Peizhuang. Factor spaces and data science[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2015, 34(2): 273–280.
- [26] 汪培庄. 因素空间与因素库简介(特约报告)[R]. 智能科学与数学论坛, 葫芦岛, 2014: 6.
- [27] 石勇. 大数据与科技新挑战[J]. *科技促进发展*, 2014, 10(1): 25–30.
- SHI Yong. Big data and new challenges for science and technology[J]. *Science and technology for development*, 2014, 10(1): 25–30.
- [28] 陈永义, 刘云丰, 汪培庄. 综合评判的数学模型[J]. 模糊数学, 1983(1): 63–69.
- CHEN Yongyi, LIU Yunfeng, WANG Peizhuang. The mathematical model of comprehensive evaluation[J]. *Fuzzy mathematics*, 1983(1): 63–69.
- [29] LI Hongxing, LI Lingxia, WANG Jiayin, et al. Fuzzy decision making based on variable weights[J]. *Mathematical and computer modelling*, 2004, 39(2/3): 163–179.
- [30] 李洪兴. 因素空间理论//因素空间理论及其应用[C]//智能科学与数学论坛. 葫芦岛, 中国, 2014.
- [31] 李德毅. 认知物理学(特约报告)[C]//东方思维与模糊逻辑—纪念模糊集诞生五十周年国际会议. 大连, 中国, 2015: 8.
- [32] ZENG Wenyi, FENG Shuang. Approximate reasoning algorithm of interval-valued fuzzy sets based on least square method[J]. *Information sciences*, 2014, 272: 73–83.
- [33] ZENG Wenyi, FENG Shuang. An improved comprehensive evaluation model and its application[J]. *International journal of computational intelligence systems*, 2014, 7(4): 706–714.
- [34] LI Deqing, ZENG Wenyi, LI Junhong. Note on uncertain linguistic Bonferroni mean operators and their application to multiple attribute decision making[J]. *Applied mathematical modelling*, 2015, 39(2): 894–900.
- [35] LI Deqing, ZENG Wenyi, ZHAO Yibin. Note on distance measure of hesitant fuzzy sets[J]. *Information sciences*, 2015, 321: 103–115.
- [36] LI Deqing, ZENG Wenyi, LI Junhong. New distance and similarity measures on hesitant fuzzy sets and their ap-



- plications in multiple criteria decision making[J]. *Engineering applications of artificial intelligence*, 2015, 40: 11–16.
- [37] 何平. 基于因素空间的直觉推理系统研究 [C]//模糊集与智能系统国际会议论文集. 北京, 中国, 2014.
- [38] 何平. 犯罪空间分析理论与防控技术研究 [M]. 北京: 现代教育出版社, 2008.
- [39] 何平. 犯罪空间分析与治安系统优化 [M]. 北京: 中国书籍出版社, 2013.
- [40] HE Ping. Design of interactive learning system based on intuition concept space[J]. *Journal of computer*, 2010, 5(3): 479–487.
- [41] HE Ping. Crime pattern discovery and fuzzy information analysis based on optimal intuition decision-making[M]//CAO Bingyuan, ZHANG Chengyi, LI Taifu. *Fuzzy Information and Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 426–439.
- [42] HE Ping. Crime knowledge management approach based on intuition concept space[C]//Proceedings of 2008 International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops. Shanghai, China, 2008: 555–559.
- [43] 欧阳合. 不确定性理论的统一理论: 因素空间的数学基础 (特约报告)[C]//东方思维与模糊逻辑——纪念模糊集诞生五十周年国际会议. 大连, 中国, 2015: 8.
- [44] 冯嘉礼. 思维与智能科学中的性质论方法 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
- [45] YUAN Xuehai, LI Hongxing, ZHANG Cheng. The set-valued mapping based on ample fields[J]. *Computers & mathematics with applications*, 2008, 56(8): 1954–1965.
- [46] 袁学海, 李洪兴, 孙凯彪. 基于超群的粒计算理论 [J]. *模糊系统与数学*, 2011, 25(3): 133–142.
- YUAN Xuehai, LI Hongxing, SUN Kaibiao. Granular computing theory based on hypergroups[J]. *Fuzzy systems and mathematics*, 2011, 25(3): 133–142.
- [47] 崔铁军, 马云东. 空间故障树的径集域与割集域的定义与认识 [J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(4): 27–32.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Defining and understanding both size set domain and cut set domain for multi-dimensional space fault tree[J]. *China safety science journal*, 2014, 24(4): 27–32.
- [48] 崔铁军, 马云东. 连续型空间故障树中因素重要度分布的定义与认知 [J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(3): 23–28.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Definition and cognition of factor important degree distribution in continuous space fault tree[J]. *China safety science journal*, 2015, 25(3): 23–28.
- [49] CUI Tiejun, LI Shasha. Deep learning of system reliability under multi-factor influence based on space fault tree[J]. *Neural computing and applications*, 2018, 13: 1–16.
- [50] 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.
- [51] 崔铁军, 马云东. 基于空间故障树理论的系统故障定位方法研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2015, 45(21): 135–142.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Research on the method of system fault location based on Space Fault Tree[J]. *Mathematics in practice and theory*, 2015, 45(21): 135–142.
- [52] 崔铁军, 马云东. 基于 SFT 和 DFT 的系统维修率确定及优化 [J]. *数学的实践与认识*, 2015, 45(22): 140–150.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Determine the system repair rate and optimization based on SFT and DFT[J]. *Mathematics in practice and theory*, 2015, 45(22): 140–150.
- [53] 崔铁军, 马云东. 基于 SFT 理论的系统可靠性评估方法改造研究 [J]. *模糊系统与数学*, 2015, 29(5): 173–182.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Reliability assessment method based on space fault tree[J]. *Fuzzy systems and mathematics*, 2015, 29(5): 173–182.
- [54] 崔铁军, 马云东. 宏观因素影响下的系统中元件重要性研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2014, 44(18): 124–131.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Research on the importance element in the system under the influence of the macro factors[J]. *Mathematics in practice and theory*, 2014, 44(18): 124–131.
- [55] 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 and practice*, 2016, 36(4): 1081–1088.
- [56] 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 and practice*, 2016, 36(5): 1340–1345.
- [57] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. 基于 ANN 求导的 DSFT 中故障概率变化趋势研究 [J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(2): 449–452.
- CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Research on method for trend of failure probability in DSFT based on ANN derivation[J]. *Application research of computers*,

- 2017, 34(2): 449–452.
- [58] 崔铁军, 马云东. 基于模糊结构元的 SFT 概念重构及其意义 [J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(7): 1957–1960.  
CUI Tiejun, MA Yundong. SFT concept reconstruction and its significance based on Fuzzy structured element[J]. *Application research of computers*, 2016, 33(7): 1957–1960.
- [59] 崔铁军, 马云东. DSFT 下模糊结构元特征函数构建及结构元化的意义 [J]. *模糊系统与数学*, 2016, 30(2): 144–151.  
CUI Tiejun, MA Yundong. The construction of fuzzy structured element characteristic function and the significance of structure elemented in DSFT[J]. *Fuzzy systems and mathematics*, 2016, 30(2): 144–151.
- [60] 崔铁军, 马云东. SFT 下元件区域重要度定义与认知及其模糊结构元表示 [J]. *应用泛函分析学报*, 2016, 18(4): 413–421.  
CUI Tiejun, MA Yundong. The definition of components area important degree in SFT and fuzzy structured element representation[J]. *Acta analysis functionalis applicata*, 2016, 18(4): 413–421.
- [61] CUI Tiejun, LI Shasha. Study on the construction and application of discrete space fault tree modified by fuzzy structured element[J]. *Cluster computing*, 2018(10): 1–15.
- [62] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 基于因素逻辑的分类推理法重构 [J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(12): 3671–3675.  
CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. Classification reasoning method reconstruction based on factors logic[J]. *Application research of computers*, 2016, 33(12): 3671–3675.
- [63] 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 and practice*, 2016, 36(8): 2152–2160.
- [64] 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 and practice*, 2015, 35(11): 2891–2897.
- [65] 崔铁军, 马云东. 状态迁移下系统适应性改造成本研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2015, 45(24): 136–142.  
CUI Tiejun, MA Yundong. Study on renovation cost of system adaptability under state transition[J]. *Mathematics in practice and theory*, 2015, 45(24): 136–142.
- [66] 崔铁军, 马云东. 考虑范围属性的系统安全分类决策规则研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(11): 5–9.  
CUI Tiejun, MA Yundong. Study on classification decision rules of system security considering the scope attribute[J]. *Journal of safety science and technology*, 2014, 10(11): 5–9.
- [67] 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.
- [68] 崔铁军, 马云东. 因素空间的属性圆定义及其在对象分类中的应用 [J]. *计算机工程与科学*, 2015, 37(11): 2169–2174.  
CUI Tiejun, MA Yundong. Definition of attribute circle in factor space and its application in object classification [J]. *Computer engineering and science*, 2015, 37(11): 2169–2174.
- [69] 崔铁军, 马云东. 基于因素空间中属性圆对象分类的相似度研究及应用 [J]. *模糊系统与数学*, 2015, 29(6): 56–63.  
CUI Tiejun, MA Yundong. Research on the similarity of object classification of Attribute Circular and application based on Factors Space[J]. *Fuzzy systems and mathematics*, 2015, 29(6): 56–63.
- [70] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. SFT 中云模型代替特征函数的可行性分析与应用 [J]. *计算机应用*, 2016, 36(S2): 37–40, 53.  
CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Feasibility analysis and application of cloud model instead of characteristic function in SFT[J]. *Journal of computer applications*, 2016, 36(S2): 37–40, 53.
- [71] 李莎莎, 崔铁军, 马云东, 等. SFT 下的云化故障概率分布变化趋势研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(3): 60–65.  
LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong, et al. Research on change trend of cloudization fault probability distribution in SFT[J]. *Journal of safety science and technology*, 2016, 12(3): 60–65.
- [72] 李莎莎, 崔铁军, 马云东, 等. SFT 下的云化概率和关键重要度分布的实现与研究 [J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(7): 1971–1974.  
LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong, et al. Realization and research on cloud of probability importance distribution and key importance distribution in SFT[J]. *Application research of computers*, 2017, 34(7): 1971–1974.
- [73] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. SFT 下云化因素重要度和因素联合重要度的实现与认识 [J]. *安全与环境学报*,

- 2017, 17(6): 2109–2113.
- CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Identification and realization of the cloud factor significance and the factor integration significance of the space fault tree[J]. *Journal of safety and environment*, 2017, 17(6): 2109–2113.
- [74] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. 云化元件区域重要度的构建与认识[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(12): 3569–3572, 3647.
- CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Construction and understanding of cloud component area importance[J]. *Application research of computers*, 2016, 33(12): 3569–3572, 3647.
- [75] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. 云化 SFT 下的径集域与割集域的重构与研究[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(12): 3582–3585.
- CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Reconstruction and research on size set domain and cut set domain in cloud SFT[J]. *Application research of computers*, 2016, 33(12): 3582–3585.
- [76] 李莎莎, 崔铁军, 马云东. 基于云模型和 SFT 的可靠性数据不确定性评价[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(12): 3656–3659.
- LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong. Uncertainty evaluation of reliability based on cloud model and SFT[J]. *Application research of computers*, 2017, 34(12): 3656–3659.
- [77] LI Shasha, CUI Tiejun, LIU Jian. Study on the construction and application of Cloudization Space Fault Tree[J]. *Cluster computing*, 2017.
- [78] 李莎莎, 崔铁军, 马云东, 等. SFT 中因素间因果概念提取方法研究[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(10): 2997–3000, 3009.
- LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong, et al. Research on concepts extraction method of causal relationship of factors in SFT[J]. *Application research of computers*, 2017, 34(10): 2997–3000, 3009.
- [79] 李莎莎, 崔铁军, 马云东, 等. SFT 中故障及其影响因素的背景关系分析[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(11): 3277–3280, 3284.
- LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong, et al. Analysis of background relationship between fault and its influencing factors in SFT[J]. *Application research of computers*, 2017, 34(11): 3277–3280, 3284.
- [80] 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.
- [81] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 系统功能结构最简式分析方法[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(1): 33–36, 63.
- CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. The simplest formula analysis method of system function structure[J]. *Application research of computers*, 2019, 36(1): 33–36, 63.
- [82] 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, 306.
- CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. System function structure analysis in complete and incomplete background relationship[J]. *Computer science*, 2017, 44(3): 268–273, 306.
- [83] 李莎莎, 崔铁军, 马云东, 等. 基于包络线的云相似度及其在安全评价中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(4): 1267–1271.
- LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong, et al. Cloud Similarity based on the Envelope and Its application to the safety assessment[J]. *Journal of safety and environment*, 2017, 17(4): 1267–1271.
- [84] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 基于属性圆的多属性决策云模型构建与可靠性分析应用[J]. *计算机科学*, 2017, 44(5): 111–115.
- CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. Multi-attribute decision making model based on attribute circle and application of reliability analysis[J]. *Computer science*, 2017, 44(5): 111–115.
- [85] 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. Research on method for evaluating fuzzily reliability of variable factors influenced system based on cloud model[J]. *China safety science journal*, 2016, 26(2): 132–138.
- [86] 崔铁军, 马云东. 基于 AHP-云模型的巷道冒顶风险评价[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(10): 2973–2976.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Risk evaluation of roadway roof fall based on AHP-cloud model[J]. *Application research of computers*, 2016, 33(10): 2973–2976.
- [87] 李莎莎, 崔铁军, 马云东. 基于合作博弈-云化 AHP 的地铁隧道施工方案选优[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(10): 156–161.
- LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong. Optimum selection of construction scheme for subway tunnel based on cooperative game and cloudization AHP[J]. *Journal of safety science and technology*, 2015, 11(10): 156–161.
- [88] 崔铁军, 马云东. 基于云化 ANP 的巷道冒顶影响因素重要性研究[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(11): 3307–3310.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Study on importance of factor of roadway roof fall based on ANP-ECM[J]. *Application*



research of computers, 2016, 33(11): 3307–3310.

- [89] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. 有限条件的异类元件构成系统的元件维修率分布确定 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34(11): 3251–3254.

CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Determine heterogeneous components maintenance rate distribution in limited conditions[J]. Application research of computers, 2017, 34(11): 3251–3254.

- [90] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. 不同元件构成系统中元件维修率分布确定 [J]. 系统科学与数学, 2017, 37(5): 1309–1318.

CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Determine component maintenance rate distribution in the system with different components[J]. Journal of systems science and mathematical sciences, 2017, 37(5): 1309–1318.

#### 作者简介:



崔铁军, 男, 1983 年生, 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。获得多项优秀论文奖, 取得发明专利 17 项, 发表学术论文 100 余篇, 出版学术专著 4 部。



汪培庄, 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为模糊数学及其在人工智能中的应用。提出和创立了模糊集的随机落影表示、真值流推理和因素空间等数学理论, 获得多项国家级和部委级奖励及国际奖 1 项。发表学术论文 200 余篇, 出版学术著作 4 部。

## 2019 第二届算法、计算和人工智能国际会议 (ACAI 2019) 2019 2nd International Conference on Algorithms, Computing and Artificial Intelligence (ACAI 2019)

ACAI 2019 将于 2019 年 12 月 20—22 日在中国三亚召开, 本会议主要围绕“算法、计算和人工智能”的最新研究领域而展开, 致力于促进世界顶尖创新者、科学家、学者、研究人员和思想领导者之间的交流和探讨, 促进数据科学与信息技术领域的发展, 在会议的这三天里, 您将有机会聆听到前沿的学术报告, 见证该领域的成果与进步。

ACAI 2018 已于 2018 年成功在中国三亚召开, 会议论文集由 ACM 出版, 并已成功被 EI 和 Scopus 检索 (<http://www.acai2019.net/history.html>)。

#### 出版与检索:

所有被接收的文章将被收录在 ACAI 2019 会议论文集中, 并提交 Ei Compendex、SCOPUS、DBLP and Semantic Scholar 等数据库检索。优秀论文可推荐至国际期刊上发表。

#### 征文投递方式:

1. 通过 CMT 投稿系统提交 PDF 版本: <https://cmt3.research.microsoft.com/ACAI2019>

2. 直接将您的文章或摘要投到我们的会议邮箱, 我们收到后会第一时间回复您。

投稿邮箱: [acai@aiase.net](mailto:acai@aiase.net)

接受/拒稿通知: 论文投稿后 1~2 周。

#### 联系方式:

会议官网: <http://www.acai2019.net/>

邮箱: [acai@aiase.net](mailto:acai@aiase.net)

QQ 咨询: 3268368942

电话: +852 53465620