



集对分析在安全生产领域的研究优势及若干应用与研究进展

崔铁军, 李莎莎

引用本文:

崔铁军, 李莎莎. 集对分析在安全生产领域的研究优势及若干应用与研究进展[J]. 智能系统学报, 2024, 19(6): 1366-1375.

CUI Tiejun, LI Shasha. Research advantages, applications, and progress of set pair analysis in the safety production field[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2024, 19(6): 1366-1375.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202309022>

您可能感兴趣的其他文章

人工智能系统故障分析原理研究

Research on system fault analysis principle based on artificial intelligence system
智能系统学报. 2021, 16(4): 785-791 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202003046>

空间故障网络的柔性逻辑描述

Flexible logic description of space fault network
智能系统学报. 2021, 16(3): 552-559 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202003029>

系统故障因果关系分析的智能驱动方式研究

Intelligent analysis of system fault data and fault causal relationship
智能系统学报. 2021, 16(1): 92-97 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202003001>

系统运动空间与系统映射论的初步探讨

Preliminary study of system movement space and system mapping theory
智能系统学报. 2020, 15(3): 445-451 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201902011>

安全科学中的故障信息转换定律

Conversion law of fault information in safety science
智能系统学报. 2020, 15(2): 360-366 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811004>

空间故障树与因素空间融合的智能可靠性分析方法

Intelligent reliability analysis method based on space fault tree and factor space
智能系统学报. 2019, 14(5): 853-864 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201807022>

DOI: 10.11992/tis.202309022

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1538.TP.20240709.1017.007>

集对分析在安全生产领域的研究优势及 若干应用与研究进展

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: 安全生产是国民经济发展面临的重要问题, 其核心是保障系统安全。在系统层面上将系统安全抽象为系统功能状态, 而在研究系统功能状态时存在各种不确定性, 这使得研究结果与实际情况有所偏差。为解决这些问题, 需采用适合于系统功能状态不确定性的研究方法, 集对分析理论是其中之一。论文论述了集对分析在处理系统功能状态不确定性问题的优势。解释系统功能状态存在不确定性的原因, 并给出集对分析的研究现状及其在安全领域的应用; 之后介绍集对分析与空间故障网络的结合过程; 说明集对分析应用于系统安全研究的优势。希望通过集对分析理论的综述和解释, 凸显其在处理不确定问题上的优势, 使读者了解其由来、作用和表示形式, 并推动其在各行业安全分析中的应用。

关键词: 系统安全学; 智能科学; 集对分析; 安全领域; 理论应用; 研究进展; 不确定性解释; 空间故障网络

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2024)06-1366-10

中文引用格式: 崔铁军, 李莎莎. 集对分析在安全生产领域的研究优势及若干应用与研究进展 [J]. 智能系统学报, 2024, 19(6): 1366-1375.

英文引用格式: CUI Tiejun, LI Shasha. Research advantages, applications, and progress of set pair analysis in the safety production field[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2024, 19(6): 1366-1375.

Research advantages, applications, and progress of set pair analysis in the safety production field

CUI Tiejun, LI Shasha

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

Abstract: Ensuring safety in production is crucial for the national economy, with a core focus on maintaining system safety. At the system level, safety is viewed as the state function of the system. However, uncertainties in studying these state functions can lead research to deviate from real-world scenarios. To solve these problems, it is necessary to use research methods that accommodate the uncertainties of the system's function states, such as set pair analysis theory. This study discusses the advantages of using set pair analysis to tackle uncertainties in system functional states. First, it explains the causes of these uncertainties. Second, it reviews the current research status of set pair analysis and its application in the safety field. It then outlines the integration of set pair analysis and space fault networks. Finally, it highlights how set pair analysis enhances system safety research. This review aims to underscore the strengths of set pair analysis in handling uncertain problems, helping readers to understand its origins, role, and advantages, ultimately encouraging its application in safety analysis across various industries.

Keywords: system safety; intelligence science; set pair analysis; safety field; theoretical application; research progress; uncertainty explanation; space fault network

收稿日期: 2023-09-12. 网络出版日期: 2024-07-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52004120); 辽宁省属本科高校
基本科研业务费专项资金资助项目 (LJ212410144051).

通信作者: 崔铁军. E-mail: ctj.159@163.com.

安全生产不仅是企业管理的重要内容, 也是
维护公共利益和社会稳定的重要方面。安全生产
无处不在, 安全生产情况因行业而异, 即使在相同

行业内,不同条件也会导致差异。如何研究这些千变万化的安全问题是全社会关心的重点之一。从系统角度,虽然行业、条件、内因和外因都不同,但其本质都是系统安全状态的变化,这取决于外部作用和系统内在响应情况。可将实际故障、事故和灾害等系统故障过程进行抽象,形成较为稳定的数学模型,从而分析变化多端的系统安全状态。但其中存在的不确定性使得研究过程困难,研究结果偏差,进一步导致预防系统故障措施失效,无法阻止系统故障的发生。究其原因在于系统功能状态本身存在不确定性,可以说不确定性充斥在整个研究之中。因此在研究安全领域问题时必须考虑系统功能状态的不确定性,选择能表征、分析和处理该不确定性的分析方法。作者认为集对分析方法^[1-4]是较为适合的。该方法已经广泛应用于各个领域,特别在安全领域中的应用更为广泛,并取得了良好效果,得到了充分认可。

论文目的在于解释、论述和说明集对分析适合于安全领域问题研究的原因。首先,通过系统运动论和量子叠加态解释了系统功能状态存在不确定性的原因;其次概述了集对分析理论的现状并给出了其在安全领域中的应用成果;随后介绍了集对分析与空间故障网络理论^[5-7]结合的发展过程;最后研究了集对分析应用于系统安全研究的优势。论文属于综述性质,希望能为读者在研究系统安全问题时提供有效思路,来处理其中的不确定性。

1 系统功能状态的不确定性——基于系统运动论解释

系统是一个由若干部分相互联系、相互作用,形成的具有某些功能的整体。对于一个系统,内部包含了元件、结构及其相互作用和相互依赖;但外部呈现出来的是特定功能的有机整体,即实现预期目标的状态和能力。作者将系统能实现功能的状态称为系统功能状态^[8]。这当然

与可靠性相关,但不局限在可靠性的范围内。我们认为系统功能状态的定义应该是系统在受到外界作用后表现出来的实现预定功能的能力状态。进一步解释就是,当系统受到外界的物理化学作用、人为作用等因素的影响时,系统内部结构、元件之间形成的能量、物质和信息交换在系统边界之外表现出来的实现功能的能力;或理解为系统受到外界作用后表现出来的响应;或从外界作用到系统功能状态的映射,映射关系是系统内部结构的能量、物质和信息交换。

虽然系统功能状态也可表示为类似可靠度的0~1的概率形式,但实际上要复杂的多。系统内部由元件和结构组成,而元件在下一层级仍然是一个系统。外部对系统的作用千变万化,其中有些我们无法感知也无法测量。这使得我们难以形成有效的从外界作用到系统功能状态的映射,该映射取决于系统本身的元件和结构。因此,系统本身、外部作用和系统功能状态都是难以完全确定的。我们认为系统功能状态的确定性是瞬时的,不确定状态是恒定的;或者说系统功能状态是不断变化的。这就是系统功能状态的不确定性。

我们在《智能系统学报》上发表了关于系统运动空间与系统映射论的初步探讨的论文^[9],该文从系统结构上讨论了系统存在不确定性的本质原因。

如图1,以系统功能为目标,当系统功能状态向着背离目标的方向运动时,系统功能状态逐渐减弱。系统内元件不能发挥作用,将脱离系统导致系统结构受损,甚至消亡。系统在适合条件下发展,系统功能状态向着目标运动。系统也可能由于庞大和复杂导致系统内部物质、能量和信息传递效率降低,不得不调整自身结构而舍弃或纳入新的结构和元件;或者由于系统目标的改变导致系统重构。因此不管作为元件的子系统还是大系统,其功能状态都是不断变化的。这解释了系统功能状态不确定的变化本质。

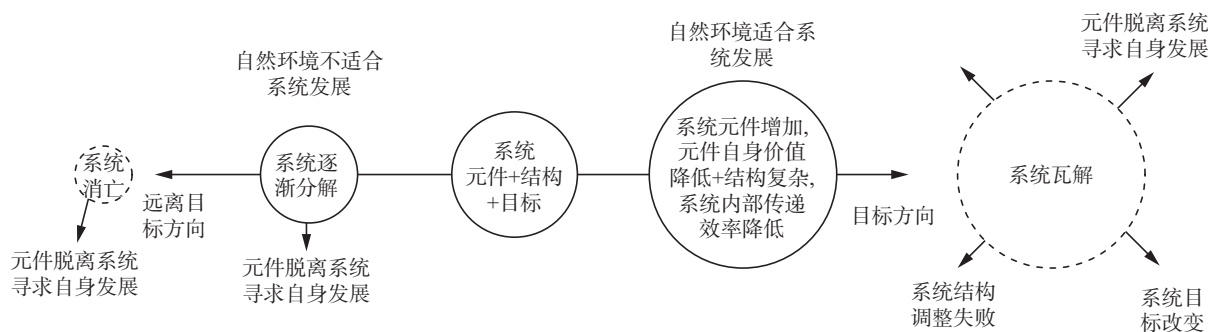


图1 系统运动过程

Fig. 1 System movement process

外界对系统的各种作用可抽象为影响因素,作用的变化就是因素的变化。系统在受到因素作用后产生的数据信息存在是否能全部收集的问题。数据信息的一部分可以感知、检测和获得,是可测数据信息;另一部分则是当前技术无法获得的,甚至可能不在同一维度,是不可测数据信息。可测数据信息可分为相关可测数据信息和不相关可测数据信息。相关可测数据信息是因素作用于系统导致系统运动而散发出来的数据信息;不相关可测数据信息则是系统固有运动特征,或其他因素同时作用后系统运动散发出来的信息。我们只能从相关可测数据信息中获得可能对系统产生作用的一部分因素,即已知因素;那些不能辨识的因素只能作为整体影响,即未知因素。根据是否能调节系统功能目标,已知因素分为相关已知因素和不相关已知因素。由于技术限制,相关已知因素中只有一部分可以调节系统功能,称为可调节相关已知因素;那些可辨识,但无法控

制的因素称为不可调节相关已知因素。可调节相关已知因素只是外部因素的一部分,且永远也无法将所有的外部因素转化为可调节相关已知因素。这解释了系统功能状态不确定的因素本质。

图2为系统运动空间的示意图,与图3进行匹配,从自然系统到人工系统流动的为数据流,从人工系统到自然系统流动的为因素流。也可解释为自然系统是因素流到数据流的映射,人工系统是数据流到因素流的映射。受到数据的感知能力以及因素的控制能力限制,人工系统难以等效为自然系统。这解释了系统功能状态的不可确定性的数据本质。因此得到3条结论:

- 1) 人工系统得到的实验数据永远与自然系统相同状态下得到的数据存在误差。
- 2) 人工系统的功能只能模仿自然系统功能的一部分。
- 3) 人工系统只能无限趋近于自然系统而无法完全达到。

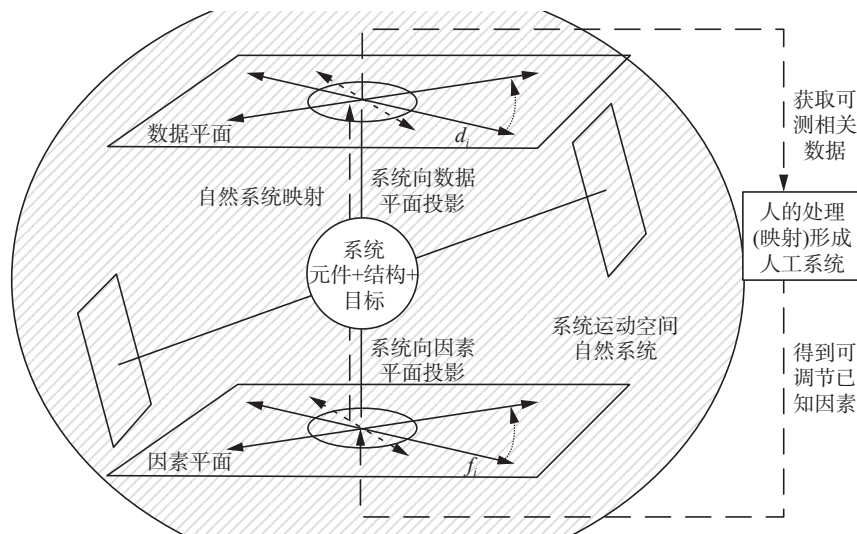


图2 系统运动空间

Fig. 2 System movement space

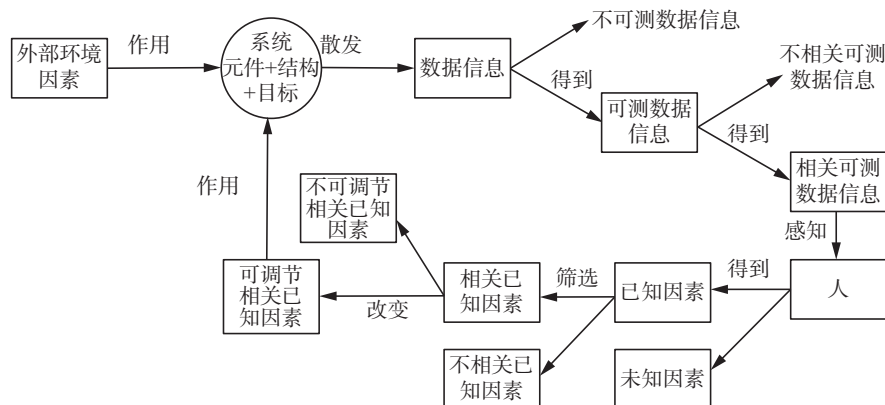


图3 运动系统散发信息过程

Fig. 3 Process of information dissemination by the movement system

2 系统功能状态的不确定性——基于量子叠加解释

系统功能状态实际上是多状态的叠加。当不测量系统时系统功能状态是所有可能状态的叠加,且各状态出现概率不同。而对系统进行测量时这种状态叠加将塌缩为一种确定状态,但该情况只发生在所有因素和数据都被测量到的一瞬间。

系统故障演化过程^[10]是系统功能状态的有序集合。系统故障演化过程在层次上分为演化层、事件层、因素层、因素相层和相值层。每层对象的量子态都是由下层对象的量子态叠加形成的,如图4所示。

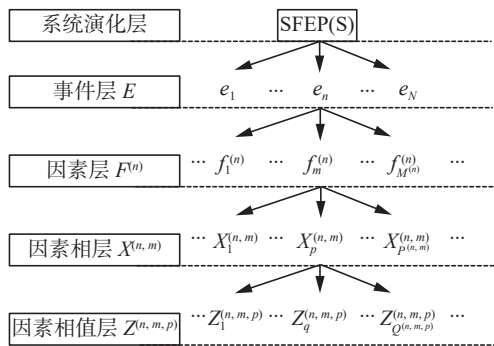


图4 系统故障演化过程的层次结构

Fig. 4 Hierarchy of system fault evolution process

设系统故障演化的量子态为 $|s\rangle$,各事件量子态为 $|e_1\rangle, |e_2\rangle, \dots, |e_N\rangle$,系统故障演化量子态由各事件量子态叠加确定,即 $|s\rangle = |e_1\rangle \otimes |e_2\rangle \otimes \dots \otimes |e_N\rangle$ 。某事件量子态为 $|e_n\rangle$,影响因素量子态为 $|f_1^{(n)}\rangle, |f_2^{(n)}\rangle, \dots, |f_{M(n)}^{(n)}\rangle$,事件量子态由因素量子态叠加表示 $|e_n\rangle = |f_1^{(n)}\rangle \otimes |f_2^{(n)}\rangle \otimes \dots \otimes |f_{M(n)}^{(n)}\rangle$ 。因素量子态为 $|f_m^{(n)}\rangle$,相量子态为 $|X_1^{(n,m)}\rangle, |X_2^{(n,m)}\rangle, \dots, |X_{p(n,m)}^{(n,m)}\rangle$,因素量子态由相量子态叠加表示 $|f_m^{(n)}\rangle = a_1^{(n,m)} |X_1^{(n,m)}\rangle + a_2^{(n,m)} |X_2^{(n,m)}\rangle + \dots + a_{p(n,m)}^{(n,m)} |X_{p(n,m)}^{(n,m)}\rangle$, $\sum_{i=1}^{p(n,m)} a_i^2 = 1$ 。因素相量子态为 $|X_p^{(n,m)}\rangle$,其所有相值量子态为 $|Z_1^{(n,m,p)}\rangle, |Z_2^{(n,m,p)}\rangle, \dots, |Z_{q(n,m,p)}^{(n,m,p)}\rangle$,因素相量子态由所有相值量子态叠加表示: $|X_p^{(n,m)}\rangle = b_1^{(n,m,p)} |Z_1^{(n,m,p)}\rangle + b_2^{(n,m,p)} |Z_2^{(n,m,p)}\rangle + \dots + b_{q(n,m,p)}^{(n,m,p)} |Z_{q(n,m,p)}^{(n,m,p)}\rangle$, $\sum_{i=1}^{q(n,m,p)} b_i^2 = 1$, $b_1^{(n,m,p)}, b_2^{(n,m,p)}, \dots, b_{q(n,m,p)}^{(n,m,p)}$ 为概率幅。得到系统故障演化过程的量子态表示,其结果为 $Q \times M \times N$ 维的张量形式。

可见系统故障演化过程是不断变化的,只有在某一时刻的系统功能状态才可确定。但通过第1节可知即便在一瞬间也无法得到所有参数。因为在叠加态条件下,即便一个参数不确定,也可能出现无数种情况。这是基于量子力学叠加的

系统功能状态不确定性解释。当然还可通过形象的几何描述系统功能状态的不确定性。但需要使用因素空间理论^[11-12]、系统故障演化理论和量子力学的相关概念。

通过上述分析,我们知道系统功能状态是不确定的,这表明系统实现功能的状态是不确定的,这导致了现有安全科学得到的结果都有很大的不确定性。即便我们使用概率表示系统安全性,其概率数值本身仍然是不确定的。因此,了解、表示和处理安全领域、系统领域中各类系统功能研究中的不确定性,是完全掌握和解释系统故障过程的关键,也是实现系统安全的关键所在。

3 集对分析理论概况

集对分析是我国学者赵克勤于1989年提出的,源于罗素悖论。集对分析理论是一种不确定性理论,它旨在处理和分析由随机性、模糊性、不完整性等不确定因素引起的不确定系统。该理论将系统内确定性与不确定性予以辩证分析和数学处理,具有系统、辩证、数学3个特点。认为不确定性是事物的普遍属性,任何事物及系统都是确定性和不确定性的矛盾统一体。确定性包括“同一”与“对立”两个方面,不确定性指“差异”,通过同一性、差异性、对立性这3方面来分析事物及系统。三者相互联系、相互影响、又相互制约,且在一定条件下相互转化。其基本思想是将具有一定联系的两个集合组成对子进行分析,其中一个集合是确定性集合,另一个集合是不确定性集合。通过数学方法将确定性集合与不确定性集合对比分析,从而获得系统的不确定性信息。集对分析理论已经应用于多个领域,可有效处理不确定性问题,并提供决策支持。如下总结集对分析的现有概况。

基本原理^[13]包括成对原理、不确定原理、相互作用原理、生成原理、信息能转化与守恒原理。

基本理论^[14-17]包括不确定性系统理论和同异反系统理论。

基本思想方法包括自然辩证法、系统分析法、综合集成法、具体分析法和实践检验法。

基本算法包括联系数的普通四则运算、复联系数的向量运算、赵森烽克勤概率计算、几何计算和不确定性的系统分析等。

集对分析的优点在于:

1) 处理不确定性和模糊性:集对分析理论能有效处理不确定性和模糊性问题,而大多数其他方法不能处理。

2)适用范围广泛:集对分析理论可用于各种领域,例如自然和社会科学、工程、医学、经济等。

3)反映系统特性:集对分析理论能够准确揭示系统特性,例如系统稳定性、可靠性、安全性等。

4)确定性与不确定性融合:集对分析理论将确定性和不确定性融合从而更好地理解系统本质。

5)简单易行:集对分析理论方法简单易行,容易掌握,一般问题处理不需复杂数学知识和计算能力。

缺点在于:对于某些复杂问题和大规模数据集,集对分析计算复杂度较高,需借助计算机。

目前赵克勤教授及其追随者深入研究集对分析理论基础和算法逻辑基础。

4 集对分析在安全领域的若干应用

前两节论述了系统功能状态的不确定性,认为这种不确定性是本质属性,是不可改变的。系统功能状态描述了系统实现预定功能的能力,能力的高低变化显然影响到了系统可靠性,而可靠性是安全科学关注的基本问题。所以研究系统安全就是在研究系统可靠性,研究系统实现预定功能的能力。那么从本质上说系统的安全性也是不确定的,也是系统的基本属性。同时安全问题在生产和生活中普遍存在,几乎所有系统都面临安全问题,并受到不确定性的干扰。而第3节论述了集对分析理论的特点,即研究系统的不确定性。所以集对分析理论广泛应用于安全、可靠性、故障、事故、风险及灾害等广义安全问题的研究,并得到了广泛认可和好评。以下对集对分析在上述广义安全领域的部分研究者工作的总结,从而阐述集对分析的作用。

龚士良教授基于集对分析的辩证思维与分析方法,实现了地下水、土地等自然资源管理及其生态安全评价^[18-20],地质环境合理开发利用^[21],地质灾害风险评价及其监测预警^[22-23],灾害数据测量与数据处理^[24-25]等研究。研究是开创性且卓有成效的工作,极大推进了集对分析的发展与进步。

金菊良教授^[26-31]是集对分析领域的专家之一,他在集对分析的基本理论方面进行了大量研究,应用于河流生态健康评价、旱情动态预测、水资源空间均衡评价、水资源承载力、流域水安全等领域。

许开立教授^[32-35]主要从事安全理论研究。他使用集对分析理论对化工危险源、气化站安全、尾矿库坝体稳定性、城市燃气管道危险性、石化

企业火灾、地质灾害辨识、建筑火灾等方面进行研究,并对集对分析理论进行了发展。

王文圣教授^[36-39]使用集对分析理论进行了一些研究,包括熵权模糊集对分析法、改进集对分析-可变模糊集耦合模型等。这些方法被广泛应用于水库汛期分期、水资源承载力评价、城市防洪标准方案优选、降雨相似性评价等方面。

汪明武教授^[40-43]将集对分析理论应用于岩土力学领域,包括联系累积前景理论、联系矩阵、联系隶属、联系期望和于粗糙集对势等理论。这些理论在基坑支护方案决策、围岩稳定性组合评价、城市需水量预测、膨胀土和改良土胀缩性评价、优势断裂评价等方面得到了广泛应用。

李凡修教授^[44-46]在安全与环境领域也进行了相关研究,将集对分析理论应用于污水处理厂改造决策、营养化评价、煤矿安全评价、土壤肥力评价、煤矿开采条件安全评价等方面。

同时国内一些年轻学者和国外的集对分析研究在安全领域的应用也在逐渐增加,这里不再一一列举。集对分析理论能分析系统的不确定性,即系统功能状态的不确定性。而多数系统安全研究都是通过评价分析系统安全状态实现的,在评价依据、评价过程和评价结果中都存在不确定性。因此,使用集对分析理论研究系统安全问题是适合的,它能有效处理研究中的不确定性。在广义安全领域,集对分析已得到广泛应用,也必将发展壮大。

5 集对分析与空间故障网络理论结合的发展历程

空间故障网络理论是作者提出的空间故障树理论中的一部分^[47-48],是用于描述系统故障演化过程的数学模型。系统故障演化过程在前文中已有所介绍,将系统功能状态按照时刻顺序排列,就构成了系统故障演化过程;而通过对系统故障演化过程在某时刻测量,我们可以得到该时刻的系统功能状态。

上文已经证明集对分析可用于系统安全的研究,其基本本质就在于能表征系统功能状态的不确定性。该研究过程是空间故障网络与集对论不断融合的过程。这里以发表在《智能系统学报》上的文章为主线来论述这一研究过程。

多因素集对分析系统故障模式识别^[49]。其是根据故障背景建立的故障模式识别系统。它主要分析故障样本模式与故障标准模式,确定联系系数和联系分量,计算联系系数和识别度,并通过确定

故障样本模式与故障标准模式关系来完成识别。以三元联系数中各分项系数在故障状态空间中的变化,通过数值比较完成识别。

联系数和属性多边形实现系统故障模式识别^[50]。属性多边形是作者提出的以图形化表示系统所有因素变化程度的工具。系统的每个因素都对应属性多边形中的一个坐标轴,不同系统的相同因素的变化都可标注在对应坐标轴上。如果重合说明两个因素作用相同,如果两个系统所有因素都相同则两个系统故障模式相同,从而实现辨识系统故障模式的目标。当然需要样本故障首先形成标准故障属性多边形。

通过集对分析重构特征函数^[51]。首次研究了集对思想与系统功能状态的同构关系,并通过同构关系重构了特征函数;同时给出了基于集对分析的特征函数性质和基本运算方式。该研究具有重要意义,因为无论是空间故障网络或还是之前的空间故障树理论基础,都是通过特征函数构建的,用于表征单一因素与系统故障概率的关系。因此,可另行建立一套基于集对分析的空间故障网络数学模型。

系统多功能状态表达式构建及其置信度^[52]。首次结合量子态叠加和集对分析方法来研究系统多功能状态问题。因为集对分析中的联系数横向代表了系统的不同功能状态,是一种多项式。波函数代表的量子态是一种纵向的同时存在的叠加态,呈现一种并行形式。将两种方式结合,可实现系统多功能状态的不同状态叠加,从而表达所有状态在同一时刻的情况,即该时刻的系统功能状态全体。

多因素波动影响下事件状态联系数^[53]。目标是研究在多因素波动影响下事件状态变化和不同状态出现的可能性。将语义划分与集对分析联系数的多级状态对应,建立事件状态联系数。研究了单因素、两因素和多因素波动下的事件状态联系数。将系统中的多个事件状态叠加就能表示系统功能状态。

使用联系数和系统功能状态建立因素联系分布式^[54]。为确定不同因素对系统功能状态的影响趋势,提出并建立了因素联系分布式。其核心目标是以因素变化为坐标形成故障空间,然后建立可靠、不确定和失效的三元因素联系分布式。这里的分布是各分项系数受到所有因素影响后表现出来的变化形式。这就解决了联系数构建的关键问题,即分项系数的确定问题。

除上述研究外,仍有一部分新的研究成果等

待出版,也有一些研究正在进行中。集对分析与空间故障网络结合的基础是对系统功能状态的不确定性表示。空间故障网络提供研究系统功能状态的框架,集对分析理论则表征系统功能状态的不确定性。当然作者也有一些研究围绕集对分析展开,虽然不与空间故障网络直接相关,但也都是围绕系统安全展开的。

6 集对分析应用于系统安全研究的优势

形式上集对分析理论是通过联系数表示的。联系数的形式是变化多样的,从二元联系数到多元联系数,他们的意义也是不同的。二元联系数比较特别,是系统的确定和不确定状态的对立统一形式,也是最基本形式。三元联系数是二元联系数的发展,其中同和反分项系数数值上等于二元联系数中的确定性分项联系数。而三元联系数中的异分项与二元联系数的不确定分项数值相同。这表明三元联系数是二元联系数在系统目标维度上的进一步展开。展开后以系统目标为方向出现了同、异和反3种状态。同部分与目标相同,反部分与目标相反,而异部分则是不确定的。在进一步五元联系数中,中间的3个分项系数之和与三元联系数异分项系数数值相同。这说明三元联系数中的异分项系数被进一步细化为3个分项系数,这3个分项系数表示了异的程度不同。随后七元联系数中间的3个联系数的数值仍然以五元联系数的中间分项系数为拆分对象。因此,奇数的联系数都以这种形式逐渐细化异状态,达到表征系统功能状态从不确定性向确定性发展的目的。上述联系数构造过程与系统功能状态研究思路是一致的。因此一般情况下看到的系统安全、故障、风险和可靠性分级标准都是奇数的,很少出现偶数。因为偶数联系数没有中间非对称的异分项,因此在评价等级细化时就要拆分中间的两个分项。这种操作难度较大而且麻烦,结果不准确。基于此原因,集对分析在形式上可方便地应用于系统安全研究。

集对分析理论还注重初始状态时确定的联系数首项(同部分)与末项(反部分)的细化展开,从而使集对分析联系数对系统安全状态的分析在安全目标空间中可以达到足够的精度,这对于安全工程有非常重要的实际指导意义,有助于把生产作业过程中安全目标细化和各项安全措施精准到位的提出和落实。另外集对分析在生态环境安全等非传统安全领域也有广泛应用^[55]。

7 结束语

1) 系统功能状态的不确定性是系统存在的本质特征。通过系统运动论和量子力学解释了系统存在不确定性本质原因。前者认为人工系统得到的数据缺失且不能完全控制因素,从而导致人工系统无法等效于自然系统,进而使得系统不确定。后者通过5个层次的多个对象的状态叠加说明系统功能状态同时存在多种可能,一个因素改变将衍生出多个状态,说明系统不确定。因此,只有能表征系统功能状态不确定性的方法,才能应用于安全领域研究。

2) 总结了集对分析的概况、应用和发展。研究认为集对分析目前已形成了较为完善的体系,并随着需求进一步发展。在各类广义安全领域都进行了应用,取得了良好效果,发挥了巨大作用。结合作者提出的空间故障网络与集对分析的研究,论述了该方向的研究历程和进展。论证了两种理论的融合是可行且富有成效的。

3) 阐述了集对分析应用于系统安全研究的优势。集对分析的数学工具是联系数,而联系数的构成形式与系统功能状态的等级划分是一致的。这保证了通过联系数可表示和解决广义安全领域的众多安全评价、分析和计算问题。

参考文献:

- [1] 赵克勤. 集对分析与熵的研究[J]. 浙江大学学报(社会科学版), 1992, 22(2): 65-72.
ZHAO Keqin. Research on set pair analysis and entropy[J]. Journal of Zhejiang University (social sciences edition), 1992, 22(2): 65-72.
- [2] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [3] 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述和处理[J]. 信息与控制, 1995, 24(3): 162-166.
ZHAO Keqin. Description and treatment of uncertainty by set pair analysis[J]. Information and control, 1995, 24(3): 162-166.
- [4] 赵克勤, 宣爱理. 集对论: 一种不确定性理论与方法[J]. 系统工程, 1996, 14(1): 18-23, 72.
ZHAO Keqin, XUAN Aili. Set pair theory: an uncertainty theory and method[J]. Systems engineering, 1996, 14(1): 18-23, 72.
- [5] 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.
- [6] 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. Revision of the space fault tree and the space fault network system[J]. Journal of safety and environment, 2019, 19(2): 399-405.
- [7] 崔铁军, 李莎莎, 朱宝艳. 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.
- [8] 崔铁军, 李莎莎. 系统故障演化过程的可拓学原理[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(5): 1-6.
CUI Tiejun, LI Shasha. An extension theory of system fault evolution process[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2020, 37(5): 1-6.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 赵克勤. 成对原理及其在集对分析(SPA)中的作用与意义[J]. 大自然探索, 1998(4): 91.
ZHAO Keqin. Pairwise principle and its function and significance in set pair analysis (SPA)[J]. Discovery of nature, 1998(4): 91.
- [14] 赵克勤. 集对论在人工智能中的若干应用与进展综述[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(2): 383-407.
ZHAO Keqin. Some applications and progress of set pair theory in artificial intelligence[J]. Journal of electronics & information technology, 2024, 46(2): 383-407.

- [15] 赵克勤. 集对分析的不确定性系统理论在 AI 中的应用[J]. 智能系统学报, 2006, 1(2): 16–25.
ZHAO Keqin. The application of uncertainty systems theory of set pair analysis (SPU) in the artificial intelligence[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2006, 1(2): 16–25.
- [16] 赵克勤. SPA 的同异反系统理论在人工智能研究中的应用[J]. 智能系统学报, 2007, 2(5): 20–35.
ZHAO Keqin. The application of SPA-based identical-discrepancy-contrary system theory in artificial intelligence research[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2007, 2(5): 20–35.
- [17] 赵克勤. 基于集对分析的对立分类、度量及应用[J]. 科学技术与辩证法, 1994, 11(2): 26–30.
ZHAO Keqin. Classification, measurement and application of opposites based on set pair analysis[J]. Science technology and dialectics, 1994, 11(2): 26–30.
- [18] 龚士良. 上海地下水资源管理集对分析[J]. 地下水, 1998, 20(1): 9–11.
GONG Shiliang. Set pair analysis of groundwater resources management in Shanghai[J]. Groundwater, 1998, 20(1): 9–11.
- [19] 俞俊英, 龚士良. 基于集对分析的地下水水质评价[J]. 地下水, 1999, 21(2): 54–55, 87.
YU Junying, GONG Shiliang. Groundwater quality evaluation based on set pair analysis[J]. Groundwater, 1999, 21(2): 54–55, 87.
- [20] 刘慧, 龚士良. 地下水环境质量评价集对分析方法[J]. 上海地质, 2000, 21(2): 21–23.
LIU Hui, GONG Shiliang. The set pair analysis method to environmental quality evaluation of groundwater[J]. Shanghai geology, 2000, 21(2): 21–23.
- [21] 龚士良. 地质环境合理开发利用集对论准则[J]. 地质灾害与环境, 2003, 14(2): 34–38.
GONG Shiliang. Set pair theory norms for reasonable exploitation of geological environment[J]. Journal of geological hazards and environment preservation, 2003, 14(2): 34–38.
- [22] 龚士良. 地震次生地质灾害风险评估集对态势分析[J]. 四川地质学报, 2010, 30(1): 118–122.
GONG Shiliang. SPA of risk assessment of secondary disasters of earthquake[J]. Acta geologica Sichuan, 2010, 30(1): 118–122.
- [23] 龚士良. 地质灾害防治集对论优态共存准则[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 16–21.
GONG Shiliang. Superior coexistence criterion of geological disaster control on set pair theory[J]. Journal of catastrophology, 2009, 24(3): 16–21.
- [24] 刘慧, 龚士良. 基于集对分析的上海地面沉降监测数据处理[J]. 勘察科学技术, 2000(3): 23–28.
LIU Hui, GONG Shiliang. The monitoring data processing of the ground settlement in Shanghai based on the set pair analysis[J]. Site investigation science and technology, 2000(3): 23–28.
- [25] 龚士良. 工程测量精度评价集对分析方法[J]. 岩土工程技术, 1998, 12(4): 56–59.
GONG Shiliang. Jidui method of appraisal of engineering survey precision[J]. Geotechnical engineering technique, 1998, 12(4): 56–59.
- [26] 金菊良, 李蔓, 周戎星, 等. 减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 198–204.
JIN Juliang, LI Man, ZHOU Rongxing, et al. Application of subtraction set pair potential method in river ecological health evaluation and diagnosis[J]. Water resources protection, 2022, 38(1): 198–204.
- [27] 金菊良, 李征, 崔毅, 等. 基于联系数和马尔可夫链耦合的山东省旱情动态预测评价[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 1–8.
JIN Juliang, LI Zheng, CUI Yi, et al. Dynamic prediction and evaluation of drought in Shandong Province based on connection number and Markov chain coupling[J]. Journal of catastrophology, 2021, 36(2): 1–8.
- [28] 金菊良, 徐新光, 崔毅, 等. 基于联系数和洛伦兹曲线的水资源空间均衡评价方法[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 387–395.
JIN Juliang, XU Xinguang, CUI Yi, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation method based on connection number and Lorenz curve[J]. Advances in water science, 2021, 32(3): 387–395.
- [29] 金菊良, 沈时兴, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 507–520.
JIN Juliang, SHEN Shixing, CUI Yi, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation district based on semipartial subtraction set pair potential[J]. Journal of hydraulic engineering, 2021, 52(5): 507–520.
- [30] 金菊良, 赵行玥, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在区域旱灾风险评估中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 36–44.
JIN Juliang, ZHAO Xingyue, CUI Yi, et al. Application of semipartial subtraction set pair potential method to the dynamic assessment of regional drought risk[J]. Hydro-science and engineering, 2021(1): 36–44.
- [31] 金菊良, 李征, 陈梦璐, 等. 基于五元减法集对势的山东省旱情动态评价[J]. 人民黄河, 2021, 43(3): 63–68, 83.
JIN Juliang, LI Zheng, CHEN Menglu, et al. Dynamic

- evaluation and analysis of drought in Shandong Province based on five-element subtraction set pair potential[J]. *Yellow river*, 2021, 43(3): 63–68, 83.
- [32] 闫放, 张舒, 许开立. 化工危险源定量保护层分析[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(1): 100–105.
YAN Fang, ZHANG Shu, XU Kaili. Research on quantitative layer of protection analysis for chemical industry hazards[J]. *China safety science journal*, 2019, 29(1): 100–105.
- [33] 王贝贝, 孙家伟, 许开立, 等. 基于 RS-SPA-Markov chain 的生物质气化站安全评价与预测模型研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(2): 59–62.
WANG Beibei, SUN Jiawei, XU Kaili, et al. Research on safety assessment and prediction model of biomass gasification station based on RS-SPA-Markov chain[J]. *Industrial safety and environmental protection*, 2016, 42(2): 59–62.
- [34] 魏勇, 许开立. 集对分析法在尾矿坝稳定性安全评价中的应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(9): 101–105.
WEI Yong, XU Kaili. Application of set pair analysis on safety evaluation of tailing dam stability[J]. *Journal of safety science and technology*, 2012, 8(9): 101–105.
- [35] 亢永, 郑欣, 许开立. 多元联系系数的集对分析法在城市燃气埋地管道系统危险性评价中的应用[J]. *工业安全与环保*, 2012, 38(9): 52–55.
KANG Yong, ZHENG Xin, XU Kaili. Application of multi-contact number set pair analysis model in risk assessment of urban buried gas pipelines system[J]. *Industrial safety and environmental protection*, 2012, 38(9): 52–55.
- [36] 刘浅奎, 王文圣, 余思怡, 等. 熵权模糊集对分析法在溪洛渡水库汛期分期中的应用[J]. *水利水电工程学报*, 2020(6): 16–22.
LIU Qiankui, WANG Wensheng, YU Siyi, et al. Application of fuzzy set pair analysis method based on entropy weight in flood season staging of Xiluodu Reservoir[J]. *Hydro-science and engineering*, 2020(6): 16–22.
- [37] 刘永安, 王文圣, 赵益平. 基于改进集对分析-可变模糊集耦合模型的水资源承载力评价[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(4): 17–20.
LIU Yongan, WANG Wensheng, ZHAO Yiping. Evaluation of water resources carrying capacity based on modified set pair analysis-variable fuzzy set coupling model[J]. *Water resources and power*, 2019, 37(4): 17–20.
- [38] 刘永安, 王文圣. 集对分析法在城市防洪标准方案优选中的应用[J]. *华北水利水电大学学报 (自然科学版)*, 2018, 39(1): 77–80.
LIU Yongan, WANG Wensheng. Set pair analysis and its application to optimization of standard schemes of urban flood control[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (natural science edition)*, 2018, 39(1): 77–80.
- [39] 汤静静, 王文圣, 万阳, 等. 降雨相似性评价的集对分析法[J]. *成都工业学院学报*, 2014, 17(2): 65–68.
TANG Jingjing, WANG Wensheng, WAN Yang, et al. Assessment of rainstorm similarity based on set pair analysis method[J]. *Journal of Chengdu Technological University*, 2014, 17(2): 65–68.
- [40] 汪明武, 赵奎元, 朱其坤, 等. 基于联系累积前景理论的基坑支护方案决策[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S2): 622–628.
WANG Mingwu, ZHAO Kuiyuan, ZHU Qikun, et al. Decision-making of foundation pit support scheme based on contact cumulative prospect theory[J]. *Rock and soil mechanics*, 2016, 37(S2): 622–628.
- [41] 汪明武, 魏东方, 周欣玮, 等. 基于联系矩阵的围岩稳定性组合评价模型[J]. *应用数学和力学*, 2015, 36(3): 294–302.
WANG Mingwu, WEI Dongfang, ZHOU Xinwei, et al. Connectional matrix-based combination evaluation method for surrounding rock stability[J]. *Applied mathematics and mechanics*, 2015, 36(3): 294–302.
- [42] 汪明武, 蒋辉, 张立彪, 等. 基于联系隶属度的城市需水量预测模型[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(1): 12–15, 24.
WANG Mingwu, JIANG Hui, ZHANG Libiao, et al. Forecast model of urban water demand based on connectional membership degree[J]. *Journal of water resources and water engineering*, 2015, 26(1): 12–15, 24.
- [43] 汪明武, 赵奎元, 张立彪. 基于联系期望的膨胀土和改良土胀缩性评价模型[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(8): 1553–1557.
WANG Mingwu, ZHAO Kuiyuan, ZHANG Libiao. A novel evaluation model based on connectional expectation for swelling-shrinkage grade of untreated and treated expansive clay[J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2014, 36(8): 1553–1557.
- [44] 彭良, 李凡修, 郭曦. 综合权重的集对分析模型在污水处理厂改造决策中的应用[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(5): 3327–3333.
PENG Liang, LI Fanxiu, GUO Xi. Application of set pair analysis model based on comprehensive weight in upgrading decision of sewage treatment plants[J]. *Chinese journal of environmental engineering*, 2017, 11(5): 3327–3333.
- [45] 鲁冕, 李凡修. 集对分析在湖泊富营养化评价中的应用研究: 区间数与三角模糊数组合的集对分析[J]. *环境保*

- 护科学, 2015, 41(3): 153–158.
- LU Mian, LI Fanxiu. Application of set pair analysis model in evaluation of lake eutrophication: based on combination of interval number and triangular fuzzy number[J]. *Environmental protection science*, 2015, 41(3): 153–158.
- [46] 鲁冕, 李凡修. 基于 Vague 集的集对分析在湖泊富营养化评价中的应用[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(6): 3058–3062.
- LU Mian, LI Fanxiu. Application of set pair analysis model in evaluation of lake eutrophication based on Vague set[J]. *Chinese journal of environmental engineering*, 2015, 9(6): 3058–3062.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 崔铁军, 李莎莎. 多因素集对分析的系统故障模式识别方法[J]. *智能系统学报*, 2022, 17(2): 387–392.
- CUI Tiejun, LI Shasha. System fault-pattern recognition based on set pair analysis with multiple factors[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2022, 17(2): 387–392.
- [50] 崔铁军, 李莎莎. 联系数和属性多边形的系统故障模式识别[J]. *智能系统学报*, 2022, 17(3): 568–575.
- CUI Tiejun, LI Shasha. System fault pattern recognition based on the connection number and attribute polygon[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2022, 17(3): 568–575.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 崔铁军, 李莎莎. 多因素波动影响下事件状态的联系数表示研究[J]. *智能系统学报*, 2023, 18(4): 833–840.
- CUI Tiejun, LI Shasha. Research on the connection number representation of event states under the influence of multi-factor fluctuations[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2023, 18(4): 833–840.
- [54] 崔铁军, 李莎莎. 基于联系数和系统功能状态的因素联系分布式构建与应用[J]. *智能系统学报*, 2023, 18(6): 1305–1311.
- CUI Tiejun, LI Shasha. Construction and application of factor connection distributed formula based on connection number and system function status[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2023, 18(6): 1305–1311.
- [55] 赵克勤, 米红. 非传统安全与集对分析[M]. 北京: 知识产权出版社, 2010.

作者简介:



崔铁军, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为系统可靠性及系统故障演化理论。获得省部及协会科学技术奖、青年科技奖 19 项。任 17 个期刊主编、副主编、编委等; 牵头制定团体标准 1 项, 参与 2 项。主持和参与国家级项目 6 项, 获授权发明专利 26 项。发表学术论文 300 余篇, 出版学术专著 12 部。E-mail: ctj.159@163.com。



李莎莎, 副教授, 博士, 主要研究方向为安全系统工程、系统可靠性。参与制定标准 3 项。获得省部及协会科学技术奖 7 项。主持和参与 4 项国家自然科学基金、国家重点研发计划项目, 获授权发明专利 10 项。发表学术论文近 100 篇, 出版学术专著 8 部。E-mail: lsslntu@163.com。