



基于集对分析的SFT特征函数重构及性质研究

崔铁军, 李莎莎

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202007020>

您可能感兴趣的其他文章

集对分析在不确定性智能决策中的应用

Application of set pair analysis in the uncertainty intelligent decision making

智能系统学报. 2020, 15(1): 121–135 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201910025>

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>

集对分析在人工智能中的应用与进展

Application and development of set pair analysis in artificial intelligence: a survey

智能系统学报. 2019, 14(1): 28–43 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201803030>

偏联系数的计算与应用研究

The calculation and application of partial connection numbers

智能系统学报. 2019, 14(5): 865–876 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201810022>

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>

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>

微信公众平台



关注微信公众号, 获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.202007020

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20211206.1756.002.html>

基于集对分析的 SFT 特征函数重构及性质研究

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: 为研究系统功能状态中确定(可靠及失效)和不确定状态之间的关系, 本文提出使用联系数重构空间故障树(space fault tree, SFT)的特征函数。确定和不确定状态使用二元联系数特征函数; 可靠、不确定和失效状态使用三元联系数特征函数。本文论述了使用集对分析思想研究系统功能状态的可行性, 得到了元件故障概率分布和系统故障概率分布的联系数表示, 并研究了一些基本特性。特征函数运算可参照集对分析中三元联系数的运算方法和法则。本文研究是基于集对分析研究系统功能状态及重构 SFT 的基础。

关键词: 安全系统工程; 集对分析; 联系数; 空间故障树; 功能状态; 特征函数; 构建与性质; 方法重构

中图分类号: TP18; X913; C931.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2022)01-0131-06

中文引用格式: 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.

英文引用格式: 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.

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

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: In order to study the relationship between certainty (reliability and fault) and uncertain states in system function state, the characteristic function of space fault tree (SFT) is reconstructed by using connection number. The binary connection number characteristic function is used for the certainty and uncertain states, and the ternary connection number characteristic function is used for the reliable, uncertain and fault states. This paper discusses the feasibility of using set pair analysis to study the system function state. The connection number representations of component fault probability distribution and system fault probability distribution are obtained, and some basic characteristics are studied. The operation of characteristic function can refer to the operation method and rule of ternary connection number in set pair analysis. This paper is based on set pair analysis to study system function state and reconstruct SFT.

Keywords: safety system engineering; set pair analysis; connection number; space fault tree; system function state; characteristic function; construction and properties; reconstruct method

任何系统存在的意义在于完成规定时间内、规定条件下的预定功能。完成该功能的能力称为可靠性, 反之失效。系统具有可靠性的状态称为可靠状态, 反之称为失效状态。可靠与失效是对于

系统功能而言的, 可靠和失效状态组成了系统功能状态; 两者组成了功能状态的全集, 之间没有交集, 但可相互转化。因此系统可靠性的变化可理解为系统功能状态在不同因素影响下可靠状态与失效状态的转化过程。系统功能状态至少包括可靠和失效两种状态。进一步的, 在实际的系统功能状态研究中, 更多的是难以判断的功能状态, 无法确定功能状态归属, 即未知或不确定状态。

收稿日期: 2020-07-29. 网络出版日期: 2021-12-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52004120); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKQZ2021157); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJ2020QNL018); 辽宁工程技术大学学科创新团队项目(LNTU20TD-31).

通信作者: 李莎莎. E-mail: lsslntu@163.com.

这种情况下系统功能状态至少包括可靠、不确定和失效 3 种状态。虽然将系统功能状态表示为多状态的叠加方式更具灵活性且反映了真实情况,但如何表示这种系统功能状态成为首要问题。

关于系统功能状态、可靠和失效的表示和研究已有一些。这些研究包括:车辆系统机电设备故障监测及诊断^[1]、电池储能系统 BMS 的功能安全分析^[2]、恶劣环境风光互补电路故障诊断^[3]、城市轨道交通应急指挥系统功能研究^[4]、飞行器电源系统故障可观测性研究^[5]、列控系统等级转换场景功能安全分析^[6]、控制功能失效的微电网系统可靠性评估^[7]、智能变电站保护与控制障碍诊断与预测^[8]、核电厂安全级仪控系统^[9]、设台车液压系统动态特性及故障诊断^[10]等。这些研究一般针对具体行业,由于这些行业各具特点,因此方法缺乏通用性,难以形成连贯的理论方法体系。

综上所述,系统功能状态至少存在 2 种或 3 种状态的相互转化关系,这些状态既对立又统一,同时动态转化。这些特征与集对分析思想是相同的。因此基于集对分析的联系数对 SFT^[11-12]的特征函数进行重构,形成 SFT 可用的联系数特征函数,从而得到元件故障概率分布和系统故障概率分布。最终讨论了这些分布性质及特征函数运算方式和法则,为基于集对分析重构 SFT 奠定基础。

1 集对思想与系统功能的同构关系

集对分析是处理系统确定性与不确定性相互作用的数学理论,是我国学者赵克勤^[13-14]于 1989 年提出的。若用集合表示成对事物中的双方,则该事物就是由两个集合组成的对子,即具有一定联系的两个集合组成的系统称为集对^[13-14]。

集对分析建立在两个原理之上,即成对原理和系统不确定性原理。成对原理认为事物成对存在^[13-14],是事物普遍联系和对立统一的另一种说法。系统不确定性原理认为同一事物的宏观层面与微观层面联系在一起进行系统性的研究时将出现不确定性。不确定性首先源于层次划分的相对性和层次边界的模糊性,其次源于系统层次的变化和转化^[13-14]。进一步的,确定性和不确定性很可能存在于同一层面中。这样即使研究一个系统的一个层次也会面对确定性和不确定性。在该层之上的层次中,该层次的确定性增加,不确定性降低;下层次中,该层次的不确定性增加,确定性降低。

集对分析中使用联系数表示集对的特征函数,是一种结构函数^[13-14]。二元联系数表示为 $\mu=a+$

bi , 其中 $a+b=1, i \in [-1, 1]$ 。 a 和 b 称为二元联系数的联系分量,前者为确定联系分量,后者为不确定联系分量, i 为 b 的不确定系数。三元联系数表示为 $\mu=a+bi+cj$, 其中 $a+b+c=1, i \in [-1, 1], j=-1$ 。 a, b 和 c 称为三元联系数的联系分量,分别为同分量、异分量和反分量, i 为 b 的异分量系数, j 为 c 的反分量系数。进一步可得到无穷元联系数,可参考文献^[13-14]的论述。

SFT 用于研究系统可靠性与故障之间关系,包括空间故障树理论基础^[11-12]、智能化空间故障树^[15-17]、空间故障网络^[18-22]、系统运动空间与系统映射论^[23]。SFT 的核心是确定系统中元件故障概率或称为事件发生概率,这里的事件指元件故障,两种说法等效,论文使用元件故障概率(分布)和系统故障概率(分布)表示。确定元件故障概率分布的方法很多,在 SFT 中主要通过特征函数解决。SFT 中的特征函数表示单一因素变化后影响元件故障发生概率的变化规律,再将所有特征函数叠加确定多因素影响下该元件故障概率分布。因此元件故障概率分布表示了该元件的安全与不安全状态、可靠与不可靠状态、非故障与故障状态等的变化特征。考虑元件组成系统的结构,可得到系统故障概率分布,同样可表示系统的安全与不安全状态变化特征。

进一步的,系统功能即为系统预定的能力,为保持系统在预定时间内完成预定功能的能力即为可靠性。因此任何系统完成预定功能称为可靠,不能完成或者完成能力下降称为失效。同时考虑到存在即为系统的哲学观点,而系统存在的意义就是为了完成功能,那么系统存在的关键就是维持可接受的可靠性。这种保持可接受可靠性的状态称为系统功能状态的可靠状态,对应的状态为失效状态。因此系统功能状态是在不同因素影响下可靠状态与失效状态的相互转化。其具有如下特点:可靠状态和失效状态组成了功能状态的全域;可靠状态与失效状态没有交集;可靠状态和失效状态是相互动态转化的。

将系统功能表示为二元联系数 $\mu=a+bi$, a 表示可靠与失效的确定性分量, b 表示功能状态的不确定性分量。或者将 a 表示成可靠状态分量, b 表示失效状态分量。这两种表示都可使用联系数对系统功能状态进行表示。但使用三元联系数更为恰当,即 $\mu=a+bi+cj$ 。文献^[18-22]研究表明,系统功能状态的确定实际是困难的,即使在因素确定的情况下也较为困难。考虑如下情况,在测试军用移动通信设备时,100 套设备被分配给作

战人员同时部署。这些设备相当于同时使用, 使用环境相差不多, 但不同人员对系统的功能性有不同评价。80 人认为系统可靠稳定, 5 人认为系统功能缺失无法使用, 剩余 15 人则难以判断。这就明显的形成了一种三态系统功能状态空间, 即可靠状态、不确定状态和失效状态。因此使用三元联系数更为清晰, a 、 b 和 c 分别为可靠状态分量、不确定状态分量和失效状态分量。在该例子中, $a=80/100=0.8$ 、 $b=15/100=0.15$ 、 $c=5/100=0.05$, 三元联系数为 $\mu=0.8+0.05i+0.15j$, 二元联系数为 $\mu=0.95+0.05i$ 。当然也可以将可靠与失效状态划分更多层次使用多元联系数描述。

综上所述, 集对分析与系统功能分析是同构关系。它们都是两个集合之间的关系, 具有全域、不相交和动态转化特征。因此使用联系数描述系统功能状态是可行的。具体的可用联系数重构 SFT 的特征函数, 进而叠加形成元件故障概率分布, 最终得到系统故障概率分布。在得到分布后就可通过数学方法研究系统故障的变化规律, 即系统功能状态特征和规律。以三元联系数特征函数为例, 其优点在于, 特征函数形成期间就将可靠状态、不确定状态和失效状态分开。借助三元联系数运算方法, 在合成及分析元件和系统故障概率分布时三者特征是分开运算的, 所得结果也可以清晰地分辨出不同状态对应结果的影响程度; 以往方法则容易混淆在一起。

2 联系数特征函数重构

首先给出 SFT 中元件故障的特征函数 $P_i(x_n)$ 、元件故障概率分布 $P_i(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 、系统故障概率分布 $P_T(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 。

$$P_i = P_i(x_n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: x_n 表示第 n 个因素; N 为因素总数; i 表示第 i 个元件。

$$P_i(x_1, x_2, \dots, x_N) = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_i(x_n)) \quad (2)$$

$$P_T(x_1, x_2, \dots, x_N) = \prod_{i=1}^N P_i(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3)$$

式 (1) 是重构研究的基础, 实际上确定某元件对于某因素的特征函数的方法很多, 包括简单的拟合方法^[11-12]、因素投影拟合法^[24]、模糊结构元方法^[25]、云模型方法^[13]、神经网络方法^[26]等。这些方法各具特点, 根据不同数据使用不同方法, 但它们都使用了复杂的数学模型并需要大量数据。这对于实际, 特别是现场数据的收集提出了很高要求。

由第 1 节论述可知, 集对分析方法的基本思

想与系统功能状态是同构的, 可使用联系数表示系统功能状态, 即使用联系数表示可靠状态、不确定状态和失效状态。而第 1 节实例也表明这 3 种状态分量的具体数据是较容易获得的。因此可使用联系数重构 SFT 的特征函数, 形成联系数特征函数。这种特征函数具备了集对分析的同异反状态, 分别对应了可靠、不确定和失效状态, 具体定量化也相对简单。使用联系数重构特征函数为

$$P_i(x_n) = \frac{R_n}{N_n} + \frac{U_n}{N_n} l_n + \frac{F_n}{N_n} j_n \quad (4)$$

式中: R_n 表示可靠的元件数; F_n 表示失效的元件数; U_n 表示不确定状态的元件数; N_n 表示元件总数, $N_n = R_n + F_n + U_n$; l_n 表示不确定分量系数, $l_n \in [-1, 1]$; j_n 表示失效分量系数, $j_n = -1$ 。

考虑多因素同时作用于单一元件, 将式 (4) 代入式 (2), 得到元件故障概率分布的联系数表示为

$$\begin{aligned} P_i(x_1, x_2, \dots, x_N) &= 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_i(x_n)) = \\ &= 1 - \prod_{n=1}^N \left(1 - \frac{R_n}{N_n} - \frac{U_n}{N_n} l_n + \frac{F_n}{N_n} \right) = \\ &= 1 - \prod_{n=1}^N \left(\frac{R_n}{N_n} + \frac{U_n}{N_n} + \frac{F_n}{N_n} - \frac{R_n}{N_n} - \frac{U_n}{N_n} l_n + \frac{F_n}{N_n} \right) = \\ &= 1 - \prod_{n=1}^N \left(\frac{U_n}{N_n} (1 - l_n) + \frac{2F_n}{N_n} \right), \quad j_n = -1 \end{aligned} \quad (5)$$

进一步的, 将式 (5) 代入式 (3) 得到系统故障概率分布的联系数表示为

$$P_T(x_1, x_2, \dots, x_N) = \prod_{i=1}^N \left(1 - \prod_{n=1}^N \left(\frac{U_n}{N_n} (1 - l_n) + \frac{2F_n}{N_n} \right) \right) \quad (6)$$

式 (4)~(6) 是重构的基于集对分析方法的 SFT 特征函数 (联系数特征函数)、元件故障概率分布和系统故障概率分布, 是构建基于集对分析的 SFT 方法的基础。

3 联系数特征函数的性质与基本运算

如式 (4) 所示, $P_i(x_n) = \frac{R_n}{N_n} + \frac{U_n}{N_n} l_n - \frac{F_n}{N_n} j_n = \frac{R_n - F_n}{N_n} + \frac{U_n}{N_n} l_n$, 联系数特征函数的性质认为可靠状态和失效状态都是确定性状态, 只是确定性分类不同; 不确定状态是改变系统功能状态, 即特征函数数值的唯一动力。

如式 (5) 所示, 可知元件故障概率分布使用联系数表示后, 其分布与可靠分量系数无关, 同时失效分量系数变为 2 倍, 又因为 $l_n \in [-1, 1]$, 因此有: $1 - 2^N \prod_{n=1}^N \frac{F_n}{N_n} \leq P_i(x_1, x_2, \dots, x_N) \leq 1 - 2^N \prod_{n=1}^N \left(\frac{F_n}{N_n} - \frac{U_n}{N_n} \right)$ 。

如式 (6) 所示, 同理可得: $\prod \left(1 - 2^N \prod_{n=1}^N \frac{F_n}{N_n} \right) \leq$
 $P_T(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \prod \left(1 - 2^N \prod_{n=1}^N \left(\frac{F_n}{N_n} - \frac{U_n}{N_n} \right) \right)$ 。

在 SFT 的基本运算中, 涉及特征函数的加法、乘法、积分和微分等形式。

联系数特征函数的加法为

$$P_i(x_n) + P_i(x_{n+1}) = \frac{R_n}{N_n} + \frac{U_n}{N_n} l_n + \frac{F_n}{N_n} j_n + \frac{R_{n+1}}{N_{n+1}} + \frac{U_{n+1}}{N_{n+1}} l_{n+1} + \frac{F_{n+1}}{N_{n+1}} j_{n+1} =$$

$$\frac{R_n N_{n+1} + U_n l_n N_{n+1} + F_n j_n N_{n+1} + R_{n+1} N_n + U_{n+1} l_{n+1} N_n + F_{n+1} j_{n+1} N_n}{N_n N_{n+1}}$$

转化为确定不确定的表达方式

$$P_i(x_n) + P_i(x_{n+1}) = \frac{R_n N_{n+1} - F_n N_{n+1} + R_{n+1} N_n - F_{n+1} N_n}{N_n N_{n+1}} + \frac{U_n N_{n+1} + U_{n+1} N_n}{N_n N_{n+1}} l$$

联系数特征函数的乘法为

$$P_i(x_n) \times P_i(x_{n+1}) = \left(\frac{R_n}{N_n} + \frac{U_n}{N_n} l_n + \frac{F_n}{N_n} j_n \right) \times \left(\frac{R_{n+1}}{N_{n+1}} + \frac{U_{n+1}}{N_{n+1}} l_{n+1} + \frac{F_{n+1}}{N_{n+1}} j_{n+1} \right) =$$

$$\frac{R_n R_{n+1} + R_n U_{n+1} l_{n+1} + R_n F_{n+1} j_{n+1} + U_n l_n R_{n+1} + U_n l_n U_{n+1} l_{n+1} + U_n l_n F_{n+1} j_{n+1} + F_n j_n R_{n+1} + F_n j_n U_{n+1} l_{n+1} + F_n j_n F_{n+1} j_{n+1}}{N_n N_{n+1}}$$

转化为确定不确定的表达方式

$$P_i(x_n) \times P_i(x_{n+1}) = \frac{R_n R_{n+1} - R_n F_{n+1} + F_n j_n R_{n+1} - F_n j_n F_{n+1}}{N_n N_{n+1}} + \frac{R_n U_{n+1} + U_n U_{n+1} - U_n F_{n+1} + F_n U_{n+1} + U_n R_{n+1}}{N_n N_{n+1}} l$$

上述的计算方法来源于三元联系数的计算方法, 读者可参考文献 [13-14] 确定进一步的运算规则和法则。对于联系数特征函数的积分和微分可按照一般代数形式处理, 异分量系数 i 和反分量系数 j 在运算过程中不变。甚至可以对 i 和 j 求偏导研究系统功能状态随着不确定性变化的变化规律。

将上述理论应用于实际问题的过程, 较原有方法更为简单。应用的关键是确定式 (4) 中的各参数, 而不需要使用解析方法确定函数。式中 l_n 和 j_n 是固定的或具有范围值; R_n 、 F_n 和 U_n 分别表示可靠、失效和不确定状态的元件数, 可通过对元件故障过程的统计获得, 例如第 1 节给出的例子; N_n 为 R_n 、 F_n 和 U_n 之和。所以只要掌握故障元件分类后各状态的数量即可实施上述分析过程。

本文论述了使用集对分析的联系数重构 SFT 特征函数的方法。从确定和不确定角度, 可表示为二元联系数, 前项为可靠和失效分量系数和, 后项为不确定状态分量系数。从系统功能状态角度, 可表示为三元联系数, 前项为可靠分量系数、中项为不确定分量系数, 后项为失效分量系数。对于系统功能状态的研究, 二元联系数具有理论研究意义, 研究确定与不确定性关系; 三元联系数具有实际研究意义, 研究 3 种功能状态关系。

特征函数是 SFT 理论的基础。以往特征函数一般通过解析获得, 从而建立解析表示方式的 SFT。但对于更为广泛的实际故障过程和数据使用解析方法是困难的, 而集对分析提供了对故障数据的分类方法, 进而确定具有统计意义的特征

函数。这种特征函数虽然不及解析方法准确, 但蕴含了故障数据的不确定性。因此通过集对分析构造的特征函数更具有统计意义, 基于此重构 SFT 可使原有各种方法具有该能力, 进一步解决系统功能状态的矛盾关系。这些方法的重构也是进一步需要展开的研究内容。

4 结束语

利用集对分析的联系数重构了 SFT 特征函数, 为使用集对分析思想研究系统功能状态及建立适应的 SFT 理论奠定基础。

1) 研究了集对分析思想与系统功能状态的关系, 认为两者是同构的, 集对分析可用于系统功能状态的研究。二元联系数表示系统的确定和不确定功能状态关系; 三元联系数表示系统可靠、不确定和失效的功能状态关系。

2) 建立了基于联系数的特征函数。使用三元联系数重构了 SFT 特征函数, 并得到了元件故障概率分布的联系数表示及系统故障概率分布的联系数表示。

3) 研究了特征函数的性质与基本运算, 包括联系数特征函数、元件故障概率分布和系统故障概率分布的一些性质。联系数特征函数的各种运算可参照集对分析中三元联系数的运算方法和法则。

参考文献:

- [1] 高臻, 王嵩, 齐海娟, 等. 车辆基地机电设备故障监测及诊断系统 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12):

- 168–171.
GAO Zhen, WANG He, QI Haijuan, et al. Fault monitoring and diagnosis system of mechanical and electrical appliances in vehicle base[J]. Urban mass transit, 2019, 22(12): 168–171.
- [2] 朱伟杰, 史尤杰, 雷博. 锂离子电池储能系统 BMS 的功能安全分析与设计 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 271–278.
ZHU Weijie, SHI Youjie, LEI Bo. Functional safety analysis and design of BMS for lithium-ion battery energy storage system[J]. Energy storage science and technology, 2020, 9(1): 271–278.
- [3] 郭怡婷, 王俊年. 恶劣环境中风光互补电路故障在线检测系统设计 [J]. 电源学报, 2019, 17(6): 137–144.
GUO Yiting, WANG Junnian. Design of on-line detection system for wind-solar complementary circuit fault in harsh environment[J]. Journal of power supply, 2019, 17(6): 137–144.
- [4] 贾文峥, 宋晓敏, 廖理明, 等. 基于情景分析的城市轨道交通应急指挥系统功能需求研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2): 46–51.
JIA Wenzheng, SONG Xiaomin, LIAO Liming, et al. Function demand of urban rail transit emergency command system based on scenario analysis[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2019, 19(2): 46–51.
- [5] 张翔, 姜爽, 赵岩, 等. 飞行器电源系统故障可观测性研究 [J]. 电源技术, 2019, 43(3): 412–414.
ZHANG Xiang, JIANG Shuang, ZHAO Yan, et al. Research on fault observability for aircraft power system[J]. Chinese journal of power sources, 2019, 43(3): 412–414.
- [6] 盛昭君, 米根锁. CTCS-3 级列控系统等级转换场景功能安全分析 [J]. 控制工程, 2019, 26(2): 336–342.
SHENG Zhaojun, MI Gensuo. Functional safety analysis of level transition process of CTCS-3 system[J]. Control engineering of China, 2019, 26(2): 336–342.
- [7] 郭经, 刘文霞, 张建华, 等. 计及控制功能失效的微电网信息物理系统可靠性评估 [J]. 现代电力, 2019, 36(2): 73–80.
GUO Jing, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Reliability evaluation of microgrid cyber physical system considering control function failure[J]. Modern electric power, 2019, 36(2): 73–80.
- [8] 吴杰, 姜振超. 智能变电站保护与控制障碍在线诊断与预测方法研究 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 70–76.
WU Jie, JIANG Zhenchao. On-line diagnosis and prediction method of protection and control obstacles in smart substations[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2019, 56(5): 70–76.
- [9] 靳津, 肖安洪, 刘玲霜. 核电厂安全级仪控系统软件概念 V&V 探讨 [J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(S1): 122–132.
JIN Jin, XIAO Anhong, LIU Lingshuang. Discussion on concept V&V for software in safety-level instrument and control system[J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2018, 52(S1): 122–132.
- [10] 陈昭明, 徐泽宇, 邹劲松, 等. 多功能铺设台车液压系统动态特性及故障仿真 [J]. 液压与气动, 2018(9): 63–69.
CHEN Zhaoming, XU Zeyu, ZOU Jinsong, et al. Dynamic characteristics and fault simulation of hydraulic system for multi-functional laying trolley[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2018(9): 63–69.
- [11] 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.
CUI Tiejun, MA Yundong. Research on multi-dimensional space fault tree construction and application[J]. China safety science journal, 2013, 23(4): 32–37.
- [12] 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.
- [13] 蒋云良, 赵克勤. 智能科学技术著作丛书人工智能集对分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [14] 刘秀梅, 赵克勤. 区间数决策集对分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [15] 崔铁军, 马云东. 基于因素空间的煤矿安全情况区分方法的研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(11): 2891–2897.
CUI Tiejun, MA Yundong. Research on the classification method about coal mine safety situation based on the factor space[J]. Systems engineering-theory & practice, 2015, 35(11): 2891–2897.
- [16] 李莎莎, 崔铁军, 马云东. 基于云模型的变因素影响下系统可靠性模糊评价方法 [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(2): 132–138.
LI Shasha, CUI Tiejun, MA Yundong. Method research on fuzzy comprehensive evaluation of system reliability based on cloud model considering variable factors[J]. China safety science journal, 2016, 26(2): 132–139.
- [17] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 完备与不完备背景关系中蕴含的系统功能结构分析 [J]. 计算机科学, 2017, 44(3): 268–273.
CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. System function structure analysis in complete and incomplete back-

- ground relationship[J]. Computer science, 2017, 44(3): 268–273.
- [18] 崔铁军. 系统故障演化过程描述方法研究 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(10): 3006–3009.
CUI Tiejun. Research on description method of system fault evolution process[J]. Application research of computers, 2020, 37(10): 3006–3009.
- [19] CUI Tiejun, LI Shasha. Research on complex structures in space fault network for fault data mining in system fault evolution process[J]. IEEE access, 2019, 7: 121881–121896.
- [20] 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.
- [21] 崔铁军, 李莎莎, 朱宝岩. 含有单向环的多向环网络结构及其故障概率计算 [J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7): 19–24.
CUI Tiejun, LI Shasha, ZHU Baoyan. Multidirectional ring network structure with one-way ring and its fault probability calculation[J]. China safety science journal, 2018, 28(7): 19–24.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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 & practice, 2016, 36(5): 1340–1345.
- [25] 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): 144–152.
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.
- [26] 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.

作者简介:



崔铁军, 副教授, 博士, 主要研究方向为系统可靠性及系统故障演化理论研究。提出和建立了空间故障树及空间故障网络理论。主持国家自然科学基金项目 1 项。获得 7 项国家、省部级及协会奖励。授权发明专利 25 项, 发表学术论文 200 余篇, 出版学术专著 7 部。



李莎莎, 副教授, 博士, 主要研究方向为安全管理及其智能分析。10 个国际、国内著名期刊审稿专家。主持国家自然科学基金项目 1 项。授权发明专利 7 项, 发表学术论文 30 余篇, 出版学术专著 2 部。