

DOI: 10.11992/tis.202003047

系统可靠-失效模型的哲学意义与智能实现

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 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 为适应未来无人化、智能化、数据化和信息化的复杂系统, 必须建立智能系统以代替人的工作。该智能系统的目标是使功能系统达到预定功能并保持功能稳定, 即控制系统可靠与失效状态的转化。因此提出系统可靠-失效模型 (system reliability failure model, SRFM), 并讨论基于 SRFM 实现智能系统的方式, 论述了系统在哲学层面的相关观点; 从哲学角度论述 SRFM 的意义, 包括认识论、矛盾论、系统论和方法论意义。在具有哲学意义基础上, 使用信息生态方法论 (information ecology methodology, IEM)、因素空间理论 (factor space theory, FS) 及泛逻辑理论 (universal logic theory, UL), 并融入空间故障树理论 (space fault tree theory, SFT) 来智能地实现 SRFM。本文是面向未来复杂系统的 SRFM 研究, 是安全科学理论和智能科学研究必须面对的问题, 也是必须尽早完成的工作。

关键词: 安全科学; 智能科学; 信息科学; 系统工程; 可靠与失效; 模型研究; 哲学意义; 智能实现
中图分类号: TP18; X913; C931.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2020)06-1104-09

中文引用格式: 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.

英文引用格式: 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.

Philosophical significance and implementation of an intelligent system based on the system reliability-failure model

CUI Tiejun¹, LI Shasha²

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: To adapt to unmanned, intelligent, data-and information-based future complex systems, it is necessary to establish an intelligent system that is capable of replacing human work. The goal of this intelligent system should be to generate a functional system that realizes predetermined functions and keeps the functions stable, i.e., to control the transformation of system reliability and failure state. Therefore, in this paper, we propose a system reliability-failure model (SRFM) and discuss the implementation of an SRFM-based intelligent system. We also discuss viewpoints related to the philosophical dimensions of the system and philosophical significance of the SRFM with respect to epistemology, contradiction theory, system theory, and methodology. Based on this philosophical significance, we designed an SRFM-based intelligent system using the information ecology methodology, factor space theory, and universal logic theory integrated with the space fault tree theory. Regarding research on SRFMs for future complex systems, we consider that the problems associated with safety science theory and intelligent science research must be immediately addressed.

Keywords: safety science; intelligent science; information science; system engineering; reliability and failure; model research; philosophical significance; intelligent realization

收稿日期: 2020-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52004120, 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.

未来系统必将向着无人化、智能化、信息化和数据化的方向发展。智能系统将代替人作为系统设计、制造和运行的监控者。那么智能系统要

如何完成这些任务是必须思考的问题。需要明确:系统是什么、为什么建立系统。中国学者钱学森教授认为:系统是由相互作用相互依赖的若干组成部分结合而成的,具有特定功能的有机整体,而且这个有机整体又是它从属的更大系统的组成部分。系统存在的意义是完成预定功能,该预定功能是人设置的,进而人消耗资源制造系统。因此,对于人而言系统是完成期望功能的工具,完成程度可用可靠性和失效性表示和度量;进一步系统是否值得存在可通过系统的功能状态(可靠性与失效性)来衡量。可见,建立SRFM是完成这项工作的基础。首先,SRFM是否依靠人对系统的认识程度;其次,是否符合现有哲学观和方法论;再次,如果不符合是否有新的哲学观和方法论;最后,如何实现SRFM,特别是面向未来复杂系统情况下如何智能化地实现SRFM。

目前,关于系统可靠性和失效性的研究很多,但在哲学层面论述较少。这些研究包括:安全观的塑造机理及其方法^[1],社会安全观的人类学分析路径^[2],安全问题的哲学性^[3],事故致因理论与安全思想因素分析^[4],失效学的哲学理念及其应用^[5],哲学视角的风险和安全^[6],人类安全观和风险社会视角^[7],科学发展观的安全哲学思考^[8]。可靠性和失效性方法及技术研究也很多,其中智能科学的应用正在逐渐兴起。例如:电力网络通信和调控^[9-11],机电设备故障分析^[12-15],地铁和高铁等故障检测和诊断^[16-17],轴承故障识别^[18-19],还有一些智能故障信息处理方法^[20-23]。这些研究在各自领域是成功的,但也面临一些共同的问题。如分析方法只针对本领域;智能理论和具体学科结合困难;方法在认识论、矛盾论、系统论和方法论方面存在不足和缺陷;特别是面对复杂系统的智能处理时,现有理论、方法和技术并不恰当。

为解决这些问题,本文提出了SRFM。首先论述了有利于SRFM建立的系统哲学观点;建立SRFM并论述了其哲学意义;最终结合现有的智能科学方法与安全科学基础理论,搭建起可实现SRFM的框架。为迎接智能科学在安全领域的发展奠定基础,从而保障未来系统的安全性。

1 系统的一些哲学观点

对于系统的一般认识,认为系统是由若干部分(组成系统的基本元件,简称元件)组成,且这些元件具有相互关联性,为了完成预定的目标而组成的有机整体。笔者在长期研究系统的过程中

了解到了一些特别的系统性质,在这里进行阐述。

1.1 系统具有物质性和意识性

系统一般可以分为人工系统(artificial system, AS)、自然系统(natural system, NS)和混合系统。AS是为了完成预定功能,由人设计、建造并运行的系统。NS是根据自然规律,按照一定组合并筛选后保留的,能完成一定自然目的的系统。混合系统则是兼有两钟系统特征的系统。

从自然角度分析,自然本身显然不刻意设计系统,而是制定一些筛选条件对系统进行筛选,即自然选择过程。自然通过一些随机性的事件建立数量庞大的NS,再设置一些条件对这些系统进行适应性筛选。自然建立NS的随机性比较广泛,物质随机性、结构随机性、层次随机性,即使完成的功能也是随机性的。这种做法目的在于以数量优势弥补设计不足,从而满足自然的目的。这种现象在1713年伯努利提出的大数定理已经被认识到了。虽然不像人的意识那样直接,但自然也通过自己的方式(随机生成-适应选择)设计并建造了NS。因此NS具有自然意识性,即随机生成-适应选择。同样NS的形成也是基于自然界的物质及其规律,所以NS具备自然物质性。

从人的角度分析,为了完成预期功能,按照人掌握的知识,合理利用自然资源的自然属性,构建起一个有层次、有联系的有机体,即AS,例如机械系统、交通系统、社会系统。人作为AS的设计者,是为了完成预定功能,AS的结构、层次及相互联系是按照人的意志产生的,因此AS具有人的意识,即人的意识决定AS。人作为AS的建造者,是根据物质的自然属性,加入人的意识进行组合而建造系统。因此AS具有自然的物质性,包括实在的物质和抽象的物质,例如岩石性质或社会关系。AS的运行是人和自然共同管理的结果,依赖于人的意志性和自然的物质性。另外AS也具有人的物质性,即AS必须适应人的操作要求和环境适应性。更进一步的,AS的功能性是人的意识性(使系统趋向于可靠,系统熵降低)和自然意识性(使系统趋向于失效,系统熵增加)的博弈决定的。这说明AS具备物质性和认识性。

因此,NS具有自然的物质性和意识性,完全受自然控制。AS具有自然和人的物质性和意识性,同时受到人和自然的控制。但在智能系统代替人后人对系统的物质性消失。物质性和意识性与系统的关系如表1所示。

表1 物质性和意识性与系统的关系

Table 1 Relationships between materiality and consciousness in systems

系统	人的意识性	人的物质性	自然的意识性	自然的物质性
AS	影响	影响	影响	影响
NS	不影响	不影响	影响	影响

1.2 存在即为系统

在人知识和理解的范围内,无论任何事物、物质和现象都是系统,只是存在的层次、规模、结构、功能等有所不同,但都可利用系统的特性进行抽象和泛化。任何系统都可分解成子系统,而子系统仍能继续分解。只是划分用到的工具和技术难以获得,导致人们认为存在最基本的不能划分的系统构成单元。但科学的历史一次又一次地证明了系统的可分性。从显微镜下看到细胞开始,发现了细胞核、核酸、碱基、分子、原子、质子和电子。随着技术手段更新和理论发展,又发现了强子、轻子和传播子。但这并不是最终结果,由1968年 Gabriele Veneziano 和1974年 John Schwarz 提出的弦论认为自然界的基本单元不是电子、光子、中微子和夸克之类的粒子,而是很小很小的弦的闭合圈,不同振动和运动就产生出各种不同的基本粒子。这种论述虽然难以验证,但显然将人理解的基本粒子又重新扩展为一种大系统观。因此人对系统的理解总是不断变化不断深入的。当人认清了当前层次的系统必将导致更深层次系统的出现。人的意识是无限趋近于自然的本质,但始终无法达到。总结该观点:任何存在的事物、物质和现象都是系统,它们可组成更大的系统,也可划分为更小的系统。

1.3 系统的灭亡性

哲学上有两个观点,一是物质不灭论,二是存在必将灭亡。这两种观点看似矛盾,但在系统角度理解则是相通的。物质不灭的物质指的是能量,更是组成系统的子系统或基本元件。存在必将灭亡指事物的形态和结构,即系统不可能长久存在。由于因素影响系统必将走向灭亡,笔者在文献[24]中提出了系统运动空间的思想,认为系统的存在是暂时的,而系统的灭亡是必然的。这里说的灭亡指系统结构的瓦解。

如下证明系统在任何情况下都必将瓦解。当自然条件和因素不适合系统存在,则系统功能性必将降低。这时系统内部元件发挥的功能性必然小于其预定功能性。这将导致这些元件效率降低难以实现价值。这时它们将逃离该系统,寻找新的系统以发挥作用。这说明:在不利于系统存在的条件下系统将瓦解,即存在必将灭亡;但元件逃离系统后会与其他元件组成新系统,即物质不灭。相反的,系统在适合的环境下也会最终走向瓦解。系统在适合的环境下必将不断发展,所消耗的自然资源增加,导致现有自然环境不适合系统发展,则转变为上述情况。进一步的,如果自然资源无限,系统规模会不断增加。这时系统内部元件迅速增加,导致它们之间能量、物质和信息交流成本大幅增加。同样这将导致单元实现功能的效率降低。这些单元会逃离系统,使系统复杂性降低满足自然条件,或者直接使系统瓦解。但维持系统复杂性与自然条件的平衡是困难的脆弱的。

因此上述两个观点并不矛盾,都可在系统层面予以解释。也说明了存在的系统必将灭亡,这种灭亡不是物质的湮灭而是系统结构的瓦解。过程如图1所示,详细解释见文献[24]。

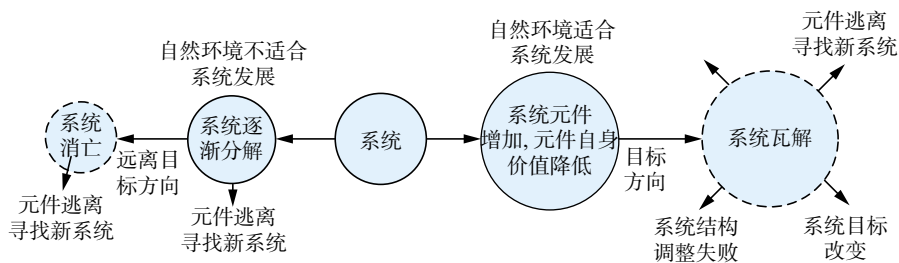


图1 系统演化过程

Fig. 1 Schematic of the system evolution process

2 系统可靠-失效模型及哲学意义

无论是AS完成人的预设目标,还是自然通过随机生成-适应选择得到NS,它们都是为了完成特定目的。目的是系统设计、制造和运行的

最终目标,决定了系统的所有特征和属性。系统的目的就是完成预定功能,其能力即为系统的可靠性。相对的,无法完成预定功能的能力称为失效性。

可靠性与失效性是对立统一的,两者的并集

形成了系统功能状态空间,是统一的存在;两者之间没有交集因此它们是对立的。对于NS而言系统的可靠-失效并不需要刻意追求。因为自然无时无刻都在利用大量随机生成的系统通过适应选择来得到适合的NS。而且自然总是将系统的熵值维持在较高水平,可以说自然对全部系统的最终需求(目标)是将自然的总熵达到最大。这

是自然法则,不受人的影响。对于AS而言,人设计、制造和运行系统的目的是完成预设功能,期间投入的所有成本都必须体现在系统的价值上,即系统能完成预定功能。所以人更关注AS的可靠性和失效性。基于这些考虑提出SRFM,将研究对象划分为人、系统(AS和NS)和自然。SRFM如图2所示。

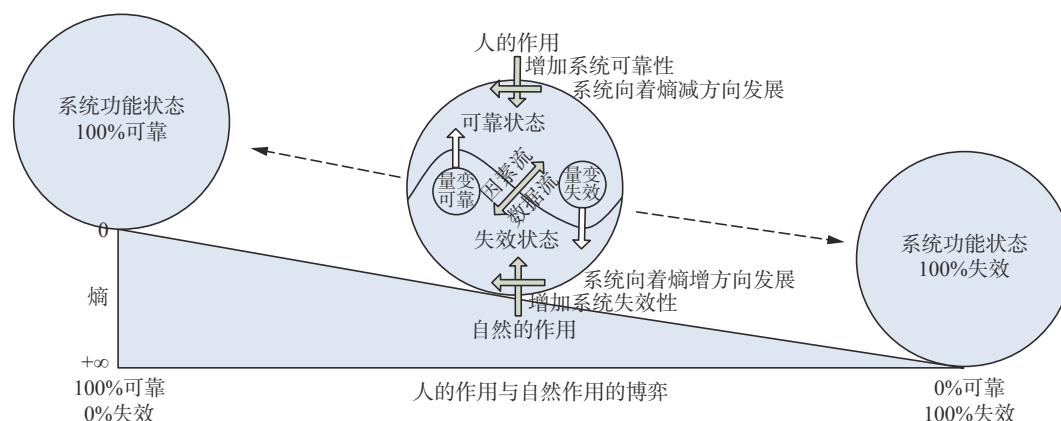


图2 SRFM系统

Fig. 2 Schematic of SRFM

图2中显示的SRFM有如下特点:

1) SRFM具有人的意识性和自然的物质性。人的意识性总是使系统的熵值减小以实现系统功能;自然的物质性总是使系统的熵值增加阻碍系统实现功能。人通过意识活动可以使系统熵值趋近于0,但无法达到,对应于系统可靠性100%,失效性0%;自然通过物质性给系统提供不确定的环境条件,使系统丧失功能性,对应于可靠性0%,失效性100%。人的意识是相对的暂时的状态,自然的物质性是绝对的一般的状态。由于人的意识性对自然的理解取决于自然的物质性,又因为存在即系统,系统的层次是无限分解的,人的意识被现有的理论和技术所限制,因此只能无限接近自然的实质,但无法达到。如1.1节所述,SRFM也具有人的物质性和自然的意识性,但作用不大,特别是AS,即SRFM的认识论。

2) SRFM的可靠性和失效性是对立统一的整体。系统存在的意义是完成功能,其状态只有两种,即可靠状态和失效状态。它们是对立的,相互排斥,具有明显界线;又相互组成了完整的系统功能状态空间。可靠性与失效性可以相互转化。系统很难表示为完全失效或完全可靠,而是一种中间状态。实际所指系统可靠与失效一般是人为设定的阈值。系统运行过程中可能在可靠性状态下涌现出失效状态,这加强了状态空间中失效状态的比例;也可能在失效状态中涌现出可靠

状态,这加强了状态空间中可靠状态的比例(这种情况很少)。系统运行过程是系统整体功能状态的量变到质变过程。当人的意识性干预大于自然的物质性干预时,量变质变向着可靠状态转化;反之向着失效状态转化。文献[24]指出,因素变化是系统可靠-失效状态变化的动力;数据变化是状态变化的表现。人通过分析数据流得到因素流,进而调整因素控制系统状态。但由于技术限制,无法获得全部数据流,也只能在获得数据流中辨识一部分因素;也无法控制全部辨识的因素,只能调整部分因素。因此人的意识性永远无法战胜自然的物质性对系统状态的作用,系统必将向着高熵发展,走向瓦解。系统可靠性与失效性的矛盾和斗争也是人意识性与自然物质性的矛盾和斗争,即SRFM的矛盾论。

3) SRFM是基于系统视角对系统功能状态的分析。对于系统可靠性和失效性的研究必须满足自然界的系统性、整体性、层次性、动态开放性、自组织性,及辩证唯物主义的物质观、运动观和时空观^[5]。文献[24]中提出了系统运动空间和系统映射论。系统运动空间用于度量系统功能状态的变化,该变化集中体现在系统可靠性和失效性的转化,认为系统的内在和外在因素变化是系统功能状态变化的动力。只有相互适应才能达到系统功能稳定,可靠性和失效性达到平衡。系统的内在因素包括了一切影响系统功能状态的事项,

人的意识性属于内在因素。外在因素主要指自然环境对系统功能状态的影响,自然的物质性属于外在因素。但对系统内的物理材料而言自然的物质性也属于内在因素。系统变化是通过数据的变化表现出来的。如果数据流无法收集或辨识将无法确定系统是否存在。从数据流到因素流的转化则是系统的一种等效过程^[24],可体现系统的功能变化。因此考虑系统功能状态需要全面了解影响系统的因素和系统表现出来的数据,进而确定系统结构,这也符合系统观点的要求,即SRFM的系统论。

4)SRFM必须具备适合的分析方法。系统由众多子系统构成,子系统之间必将存在信息、能量和物质的交换。显然用机械还原方法论并不适合^[25-28],需要唯物辩证科学观。研究系统功能状态,分析可靠性与实效性的相互转化,必须能够收集和处理数据流和因素流。进一步能够分析因素间的相关性和因果性,因此方法需要逻辑推理能力。系统功能状态的变化伴随着各种事件的可靠状态和失效状态。众多事件的状态叠加将影响系统的功能状态。方法需要具备分析不同状态之间的逻辑转化能力。系统功能状态变化不是一蹴而就的,而是一种演化过程,涉及

因素、事件、状态传递及过程拓扑结构等事项。方法需要能同时蕴含并分析这些事项的能力,即SRFM的方法论。

上述给出了SRFM及其哲学解释,包括:认识论、矛盾论、系统论和方法论。这些研究最终落脚于SRFM的方法论。必须建立适合的方法满足SRFM。

3 系统可靠-失效模型的智能方法

前文将研究对象划分为人、系统和自然三方面。但对未来复杂系统而言,智能系统必将代替人的作用对系统功能进行控制,保证系统功能稳定,至少应包括对系统功能状态(可靠-失效)的监控、预测、预防、处理和恢复。进一步发展的智能系统更应具备设计系统、监控数据流和因素流、规划系统功能、调整可靠与失效阈值等能力。这时人不再是系统控制者,而转变为智能系统的辅助者。以智能系统(代表人的意识性)为核心,系统改为完成功能的功能系统,人的物质性及自然的意识性和物质性是外在的环境系统。则智能情况下,SRFM可改为智能系统、功能系统(未特殊说明下文简称系统)和环境系统组成的模型。研究对象关系变化如图3所示。

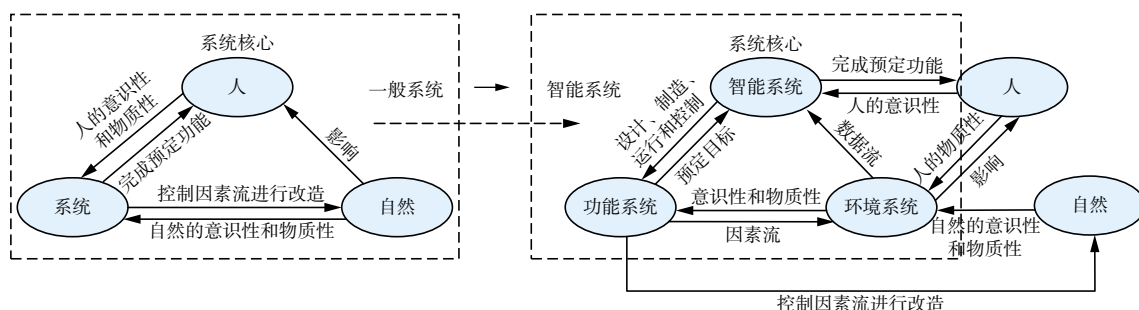


图3 一般系统到智能系统的研究对象关系转变

Fig. 3 Schematic of the transformation of the research object relationship from a general to an intelligent system

智能的SRFM与第2节提到的SRFM特征及哲学意义相同。只是将人的意识性和物质性分开,前者由智能系统代替,后者与自然的物质性和意识性合并由环境系统代替。根据SRFM的方法论,SRFM的智能方法需要具备一些特征,可使用IEM、FS、UL和SFT理论完成SRFM的智能方法构建。

1)信息生态方法论。钟义信教授提出IEM^[25-28]认为:信息(智能是信息的高级产物)研究需要特别关注它的生长演化过程,研究各个生长环节之间的相互关系、信息生长系统与环境之间的相互关系,以保障信息能够生长成为智能。智能系统

需要利用现代信息科学,与机械唯物科学观的机械还原方法论对应,是辩证唯物科学观,强调个体与个体及个体与主体之间的关联性、开放性和演化性。这符合SRFM的认识论、矛盾论、系统论。著名安全学家美国科学院院士Nancy G. Leveson也提出了相同的观点^[29-30]:认为实际系统故障概率远大于现有系统故障分析方法得到的结果。其原因在于:这些方法仍然是机械还原论方法,不考虑子系统之间的能量、物质和信息交换;而大多系统失效和故障都是子系统之间的意外联系造成的,其观点与IEM的观点相似。文献[20]中基于IEM建立了故障信息转化定律,可描述为

本体论故障信息-认识论故障信息-故障知识-智能安全策略-智能安全行为。故障信息即是SRFM中的数据流和因素流。可见通过IEM可对系统功能状态变化过程中的信息进行处理。因此IEM是SRFM实现智能系统在信息处理方面的方法论保障。

2) 因素空间理论。汪培庄教授提出的FS理论认为因素是描述和区分事物的根本要素。他认为FS最突出的优点在于^[31]: 1) 能按目标组织数据, 变换表格形式, 能处理异构海量数据并对大数据进行组织和存放; 2) 用背景关系提取知识, 可分布式处理便于云计算; 3) 实现大幅信息压缩, 实时在线吞吐数据。可见, FS理论适合于智能系统对于无人化、智能化、数据化和信息化的需求。另外, 笔者在FS理论, 特别是FS理论与安全理论结合方面已有一些研究^[32-35]。认为系统安全在一定层面上等同于系统可靠性(一些学者认为有区别^[29])。影响系统可靠性的原因即为因素, 而系统可靠性变化过程则通过数据表达, 即前文提到的因素流和数据流。它们在智能系统中必将是实时监测的大数据形式, 因素之间也必将存在关联性, 这些问题都可使用FS解决。笔者为了研究系统可靠性提出了SFT理论, 并与FS相结合对一些安全问题进行了有效分析。因此FS理论是SRFM实现智能系统在数据处理及因素分析方面的数学基础。

3) 泛逻辑理论。何华灿^[36-38]提出的UL, 给出了柔性信息处理模式, 将关系模式、关系模式分类标准、神经元描述及逻辑描述进行了等价研究和分析。在完备的布尔信息处理逻辑关系基础上, 增加了反应阈值并且在经典布尔逻辑上补充了4种新逻辑关系。这种刚性逻辑的软化对于系统故障, 特别是系统故障演化过程是极为重要的。系统故障是一种演化过程, 不但涉及事件、状态传递和过程的拓扑结构, 因素影响和事件间逻辑关系也非常重要。柔性处理方式对于事件间逻辑分析十分重要。基于目前研究系统功能状态至少存在3种, 即可靠性状态、失效状态和未知状态。而且未知状态在实际中更为常见。具有3种状态的事件逻辑叠加只能使用UL方法建立真值表和运算规则。进而研究系统故障演化过程的拓扑结构和逻辑化简方法, 对系统故障的预测、预防和控制具有重要意义。特别是, 智能系统控制下的系统功能状态分析, 可降低系统故障过程复杂程度, 化简影响因素, 减少数据容量, 对智能系统的成功运行至关重要。因此UL理论是

SRFM实现智能系统在多状态逻辑关系推理方面的逻辑基础。

4) 空间故障树理论。完成SRFM及其智能分析方法需要上述3种理论的配合, 但它们仍然是信息、推理和逻辑方面的理论和方法。SRFM应基于安全科学领域的基础理论实现, SFT理论符合该要求。SFT理论是笔者2012年提出的, 目前研究分为4部分。SFT基础理论^[39]用于研究系统可靠性与影响因素关系; 智能化SFT^[40]用于研究故障大数据处理和故障因果关系推理; 空间故障网络^[41]用于描述和研究系统故障演化过程; 系统运动空间和系统映射论^[24]用于度量系统运动, 研究因素流与数据流关系。文献[20]指出SFT理论与上述3种理论具有天然的结合性。可开放的接纳这些理论, 并有机结合。虽然这种结合目前乃至长时间内仍需大量研究, 但SFT与它们结合可实现智能的SRFM, 是一种面向未来复杂系统的SRFM智能方法实现途径。因此SFT理论是SRFM实现智能系统在安全领域研究的理论平台。

在面对未来复杂系统特征的同时, 也需要面对智能系统涌现的事实。人对系统的不断认识, 也不断刷新着对系统可靠性和失效性研究的方法论。SRFM在系统层面上代表了系统功能状态变化的哲学意义。本文论述了SRFM中人、系统和自然之间的关系。这些关系应从认识论、矛盾论、系统论和方法论角度予以说明, 以建立对应的哲学观点。进入智能时代后智能系统将改变人在系统中的核心地位。人的意识性将被智能系统代替, 而人的物质性将和自然的物质性与意识性并入环境系统。因此SRFM在智能情况下表现为以智能系统为核心, 成为功能系统和环境系统之间的作用关系。这种跨越式的变革将改变现有系统的本质, 也将改变安全科学基础理论中系统功能状态(可靠-失效)的研究方法论, 应该提前进行研究和准备。可参照SRFM的思想, 对各领域的具体智能理论和方法进行发展, 从而实现完整的系统智能化, 高效安全地实现系统功能。

4 结束语

论文提出了SRFM, 在哲学层面进行了解释, 并讨论了实现SRFM的智能方法。具体结论如下:

1) 基于对系统的研究, 提出了一些系统的哲学观点。系统具有物质性和有意识性, 说明了AS和NS与人和自然的物质性及意识性的关系。存在即为系统, 说明了人对系统的认识只能无限深入, 而不能完全理解的事实。系统的灭亡

性,论述了系统无论是否存在于适合的自然环境中,必将走向瓦解的事实。这种灭亡不是物质的灭亡,而是系统结构的瓦解。

2) 提出了SRFM,论述了其哲学意义。将论域划分为人、系统和自然3个部分,研究系统的可靠和失效功能状态变化关系。从认识论、矛盾论、系统论和方法论方面研究了SRFM在这些层面的意义和特点。认为SRFM满足这4方面的要求,在哲学观上是合理的。

3) 论述了通过智能方法实现SRFM的方式。认为将IEM作为SRFM的方法论,FS作为SRFM的数学基础,UL作为SRFM的逻辑基础是合理的。以SFT作为上述理论融合平台,实现SRFM智能,并应用于系统功能状态智能分析是合理的。

参考文献:

- [1] 欧阳秋梅,吴超.安全观的塑造机理及其方法研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(9):14-19.
OUYANG Qiumei, WU Chao. Research on forming mechanism and methods of safety idea[J]. Journal of safety science and technology, 2016, 12(9): 14-19.
- [2] 周玉佳.本体安全与符号的索引性:探究社会安全观的人类学分析路径[J].西南民族大学学报(人文社科版),2015,36(6):60-64.
- [3] 翟安康.“安全问题”的哲学追问[J].苏州大学学报(哲学社会科学版),2015,36(3):21-25.
ZHAI Ankang. Philosophical inquiry on “safety issues”[J]. Journal of Soochow University (Philosophy & Social Science Edition), 2015, 36(3): 21-25.
- [4] 刘国愈,雷玲.海因里希事故致因理论与安全思想因素分析[J].安全与环境工程,2013,20(1):138-142.
LIU Guoyu, LEI Ling. Analysis of Heinrich accident-causing theory and the factors of safety ideology[J]. Safety and environmental engineering, 2013, 20(1): 138-142.
- [5] 钟群鹏,张峥,傅国如,等.失效学的哲学理念及其应用探讨[J].机械工程学报,2011,47(2):25-30.
ZHONG Qunpeng, ZHANG Zheng, FU Guoru, et al. The philosophy and application of failure study[J]. Journal of mechanical engineering, 2011, 47(2): 25-30.
- [6] 斯文·欧威·汉森.技术哲学视阈中的风险和安全[J].东北大学学报(社会科学版),2011,13(1):1-6.
HANSEN S O. Risk and safety from the viewpoint of philosophy of technology[J]. ZHANG Qiucheng, trans. Journal of Northeastern University (Social Science Edition), 2011, 13(1): 1-6.
- [7] 冯昊青.安全之为科技伦理的首要原则及其意义——基于人类安全观和风险社会视角[J].湖北大学学报(哲学社会科学版),2010,37(1):46-51.
FENG Haoqing. Safety: the cardinal principle of scientific ethics[J]. Journal of Hubei University (Philosophy and Social Sciences), 2010, 37(1): 46-51.
- [8] 宁德春,王建平.基于科学发展观的安全哲学思考[J].中国安全科学学报,2009,19(9):71-77.
NING Dechun, WANG Jianping. Philosophical thinking of safety from the perspective of scientific development concept[J]. China safety science journal, 2009, 19(9): 71-77.
- [9] 贾惠彬,盖永贺,李保罡,等.基于强化学习的电力通信网故障恢复方法[J].中国电力,2020,53(6):34-40.
JIA Huibin, GAI Yonghe, LI Baogang, et al. Power communication network recovery from large-scale failures based on reinforcement learning[J]. Electric power, 2020, 53(6): 34-40.
- [10] 尹相国,张文,路致远,等.面向智能变电站二次设备的故障诊断方法研究[J].电测与仪表,2020,57(3):39-45.
YIN Xiangguo, ZHANG Wen, LU Zhiyuan, et al. Research on fault diagnosis method for secondary equipment of intelligent substation[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2020, 57(3): 39-45.
- [11] 范士雄,李立新,王松岩,等.人工智能技术在电网调控中的应用研究[J].电网技术,2020,44(2):401-411.
FAN Shixiong, LI Lixin, WANG Songyan, et al. Application analysis and exploration of artificial intelligence technology in power grid dispatch and control[J]. Power system technology, 2020, 44(2): 401-411.
- [12] 徐红辉,王翀,范杰.基于故障状态演化的高速公路机电设备智能维护系统设计[J].现代电子技术,2019,42(24):112-115.
XU Honghui, WANG Chong, FAN Jie. Design of fault state evolution based intelligent maintenance system for electromechanical equipments on expressway[J]. Modern electronics technique, 2019, 42(24): 112-115.
- [13] BENSALOUCHA S, BESSEDIK S A, AMEUR A, et al. Induction motors broken rotor bars detection using RPVM and neural network[J]. Compel, 2019, 38(2): 596-615.
- [14] NOURELDEEN O, HAMDAN I, HASSANIN B. Design of advanced artificial intelligence protection technique based on low voltage ride-through grid code for large-scale wind farm generators: a case study in Egypt[J]. SN applied sciences, 2019, 1(6): 515.
- [15] 王春影.低温环境下汽车发动机运行故障智能诊断仿真[J].计算机仿真,2018,35(12):131-134.
WANG Chunying. Intelligent diagnosis of automobile engine running fault in low temperature environment[J]. Computer simulation, 2018, 35(12): 131-134.
- [16] ZANG Yu, WEI Shanguan, CAI Baigen, et al. Methods

- for fault diagnosis of high-speed railways: a review[J]. *Proceedings of the Institution of mechanical engineers, part O: journal of risk and reliability*, 2019, 233(5): 908–922.
- [17] 高凯, 宋娜, 王红艳, 等. 基于大数据的地铁车辆智能故障监测系统研究 [J]. *铁道机车车辆*, 2019, 39(S1): 35–39.
- GAO Kai, SONG Na, WANG Hongyan, et al. Research on intelligent fault monitoring system for metro vehicles based on big data[J]. *Railway locomotive & car*, 2019, 39(S1): 35–39.
- [18] 张龙, 吴荣真, 雷兵, 等. 基于多尺度熵的滚动轴承故障可拓智能识别 [J]. *噪声与振动控制*, 2019, 39(6): 200–205.
- ZHANG Long, WU Rongzhen, LEI Bing, et al. Extensible intelligent identification for rolling bearing faults using multiscale entropy[J]. *Noise and vibration control*, 2019, 39(6): 200–205.
- [19] KUNCAN M, KAPLAN K, MINAZ M R, et al. A novel feature extraction method for bearing fault classification with one dimensional ternary patterns[J]. *ISA transactions*, 2020, 100: 346–357.
- [20] 崔铁军, 李莎莎. 安全科学中的故障信息转换定律 [J]. *智能系统学报*, 2020, 15(2): 360–366.
- CUI Tiejun, LI Shasha. Conversion law of fault information in safety science[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2020, 15(2): 360–366.
- [21] LIU Xiaolian, TIAN Yu, LEI Xiaohui, et al. Deep forest based intelligent fault diagnosis of hydraulic turbine[J]. *Journal of mechanical science and technology*, 2019, 33(5): 2049–2058.
- [22] WANG Shiqiang, XING Jianchun, JIANG Ziyan, et al. A novel sensors fault detection and self-correction method for HVAC systems using decentralized swarm intelligence algorithm[J]. *International journal of refrigeration*, 2019, 106: 54–65.
- [23] NASIRI A, TAHERI-GARAVAND A, OMID M, et al. Intelligent fault diagnosis of cooling radiator based on deep learning analysis of infrared thermal images[J]. *Applied thermal engineering*, 2019, 163: 114410.
- [24] CUI Tiejun, LI Shasha. System movement space and system mapping theory for reliability of IoT[J]. *Future generation computer systems*, 2020, 107: 70–81.
- [25] 钟义信, 张瑞. 信息生态学与语义信息论 [J]. *图书情报知识*, 2017(6): 4–11.
- ZHONG Yixin, ZHANG Rui. Information ecology and semantic information theory[J]. *Documentation, information & knowledge*, 2017(6): 4–11.
- [26] 钟义信. 从“机械还原方法论”到“信息生态方法论”——人工智能理论源头创新的成功路 [J]. *哲学分析*, 2017, 8(5): 133–144.
- ZHONG Yixin. From mechanical reductionism to methodology of information ecology: successful approach to innovation for AI theory[J]. *Philosophical analysis*, 2017, 8(5): 133–144.
- [27] 钟义信. 从信息科学视角看《信息哲学》[J]. *哲学分析*, 2015, 6(1): 17–31.
- ZHONG Yixin. Information science and its view on information philosophy[J]. *Philosophical analysis*, 2015, 6(1): 17–31.
- [28] 钟义信. 高等智能·机制主义·信息转换 [J]. *北京邮电大学学报*, 2010, 33(1): 1–6.
- ZHONG Yixin. Advanced intelligence-mechanism approach-information conversion[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, 33(1): 1–6.
- [29] LEVESON N G. Engineering a safer world: systems thinking applied to safety[M]. Cambridge, Mass: MIT Press, 2011.
- [30] 南希·莱文森. 基于系统思维构筑安全系统 [M]. 唐涛, 牛儒, 译. 北京: 国防工业出版社, 2015: 6, 12.
- [31] 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.
- 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.
- [32] 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.
- [33] 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): 2170–2174.
- CUI Tiejun, MA Yundong. Definition of attribute circle in factor space and its application in object classification[J]. *Computer engineering & science*, 2015, 37(11): 2170–2174.
- [34] 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 Teijun, 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.

- [35] 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.
- [36] 何华灿. 重新找回人工智能的可解释性[J]. *智能系统学报*, 2019, 14(3): 393–412.
HE Huacan. Refining the interpretability of artificial intelligence[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2019, 14(3): 393–412.
- [37] 何华灿. 泛逻辑学理论——机制主义人工智能理论的逻辑基础[J]. *智能系统学报*, 2018, 13(1): 19–36.
HE Huacan. Universal logic theory: logical foundation of mechanism-based artificial intelligence theory[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2018, 13(1): 19–36.
- [38] 何华灿. 人工智能基础理论研究的重大进展——评钟义信的专著《高等人工智能原理》[J]. *智能系统学报*, 2015, 10(1): 163–166.
HE Huacan. Significant progress in basic theory of artificial intelligence—on Zhong Yixin’s monograph “principles of advanced artificial intelligence”[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2015, 10(1): 163–166.
- [39] 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.
- [40] 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 & practice*, 2016, 36(8): 2152–2160.
- [41] 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.

作者简介:



崔铁军, 副教授, 博士后, 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, 授权发明专利 22 项, 发表学术论文 100 余篇, 出版学术专著 4 部。



李莎莎, 讲师, 博士, 主要研究方向为安全系统工程及安全管理。提出和建立了空间故障树理论及空间故障网络理论。授权发明专利 5 项, 发表学术论文 20 余篇, 出版学术专著 2 部。