



# 智能系统学报

CAAI TRANSACTIONS ON INTELLIGENT SYSTEMS

## 系统运动空间与系统映射论的初步探讨

崔铁军, 李莎莎

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201902011>

## 您可能感兴趣的其他文章

“范式变革”引领与“信息转换”担纲:机制主义通用人工智能的理论精髓

Leading of paradigm shift and undertaking of information conversion: theoretical essence of mechanism-based general AI  
智能系统学报. 2020, 15(3): 615–622 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202002019>

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>

分布式事件触发多自主体领导跟随一致性研究

Distributed event-triggered consensus control of multi-agent systems with leader-following  
智能系统学报. 2019, 14(5): 991–997 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201809035>

机制主义人工智能理论——一种通用的人工智能理论

Mechanism-based artificial intelligence theory: a universal theory of artificial intelligence  
智能系统学报. 2018, 13(1): 2–18 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201711032>

从人类智能到机器实现模型——粒计算理论与方法

From human intelligence to machine implementation model: theories and applications based on granular computing  
智能系统学报. 2016, 11(6): 743–757 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201612014>

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.201902011

## 系统运动空间与系统映射论的初步探讨

崔铁军<sup>1,2</sup>, 李莎莎<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 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 在研究系统运动的动力和表象问题时, 提出了系统运动空间和系统映射论的思想。由于它们在前期研究中解释了一些系统哲学问题, 因此论文详细给出了它们及关联概念的定义。利用这些概念研究了自然系统和人工系统的特征, 及它们之间的关系。研究表明: 自然系统是因素全集到数据全集的映射; 而人工系统是 measurable 相关数据到可调节因素的映射。研究解释了人工系统得到的实验数据永远与自然系统产生的数据存在误差; 人工系统的功能只是自然系统功能的一部分; 人工系统只能无限趋近于自然系统而无法达到的原因。系统运动空间和系统映射论可以解决一些系统层面的问题, 并拟在系统可靠性研究领域进行实现, 但进一步问题有待研究。

**关键词:** 安全科学; 智能科学; 系统科学; 信息生态方法论; 系统映射论; 系统运动空间; 系统可靠性; 系统结构  
**中图分类号:** X913; C931.1; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2020)03-0445-07

中文引用格式: 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.

英文引用格式: 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.

## Preliminary study of system movement space and system mapping theory

CUI Tiejun<sup>1,2</sup>, LI Shasha<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. School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** In the study of the dynamic representation problems of system movement, the ideas of system movement space and system mapping theory are proposed. These ideas have explained some systemic philosophy problems in previous research. Therefore, this study provides detailed definitions of these ideas and their associated concepts. Using these concepts, we analyze the characteristics of natural and artificial systems and their relationships. This study shows that the natural system involves mapping from the complete set of factors to the complete set of data, whereas the artificial system involves mapping from measurable relevant data to adjustable factors. This study also explains that the experimental data obtained by the artificial system always have error in comparison with the natural system. The functions of the artificial system are only a part of the natural system, and the artificial system can only be infinitely close to the natural system, but cannot reach it. The system movement space and system mapping theory can solve some system-level problems and can be implemented to ensure system reliability. However, some problems need to be investigated further.

**Keywords:** safety science; intelligent science; system science; information ecological methodology; system mapping theory; system movement space; system reliability; system structure

收稿日期: 2019-02-19.

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.

安全科学理论的核心是系统可靠性问题。但研究过程中总是出现建立的模型或系统无法完全对应自然系统的问题。随着研究深入, 逐渐提出

了空间故障树理论、智能化空间故障树和空间故障网络理论。虽然笔者引入了智能科学、数据技术、信息论和系统科学的方法,但仍存在人工系统难以等效自然系统的鸿沟。

对于系统抽象和等效方法的研究不多。马峻<sup>[1]</sup>提出了基于中粒度层面的动态系统多层次映射关系模型;何瑞祥<sup>[2]</sup>对粗粒度可重构计算系统映射与容错机制进行了研究;曾霞<sup>[3]</sup>研究了障碍函数生成混成系统安全验证方法;张连怡<sup>[4]</sup>研究了构件系统模型检测方法;李倩<sup>[5]</sup>对形式化方法的混成系统安全性进行了检验;黄峰<sup>[6]</sup>对系统演化的形式进行了研究。这些研究形成了一些有益成果,但仍缺乏系统层面的更高级抽象,缺乏通用性。

汪培庄教授提出的因素空间和人机认知体是一种试图解决上述困境的方法<sup>[7-10]</sup>,被认为是智能科学的数学基础。钟义信教授提出的机制主义信息生态方法论也成为解决上述问题的有效方法论<sup>[11-14]</sup>。笔者在研究系统可靠性过程中对上述问题有了一些见解,并在已有空间故障树研究基础上提出了系统运动空间和系统映射论。利用它们描述自然系统和人工系统之间的关系。

空间故障树理论<sup>[15-26]</sup>包括4个研究阶段:1)空间故障树基础理论,用于研究系统可靠性与影响因素的关系;2)智能化空间故障树,引入因素空间、云模型、模糊结构元理论研究故障大数据的表示、推理和处理;3)空间故障网络,研究系统故障演化过程;4)系统运动空间与系统映射论,用于度量系统运动和确定数据与因素关系。

在空间故障树框架内,使用系统结构分析方法和属性圆方法<sup>[25-26]</sup>,以可靠性为目标研究系统运动状态,可得到适合但不充分的人工系统。

## 1 问题的提出

安全科学不仅囊括了工业、农业、服务业等领域,也兼具了自然科学和社会科学的属性,涉及多方面的技术和理论。简而言之,安全科学就是研究一切与安全相关的事项。那么安全是什么?安全是指没有受到威胁、没有危险、危害、损失,不存在危险、危害的隐患,是免除不可接受的损害风险的状态。安全是在人类生产过程中,将系统的运行状态对人类的生命、财产、环境可能产生的损害控制在人类能接受水平以下的状态。综上,安全应该是系统的一种状态,是在保证系统功能前提下的,不发生人们不能接受情况的一种状态。通俗地讲,安全是保证系统正常运行,而不发生故障和事故的一种状态。而安全科学就

是研究系统保证安全状态的所有思想、理论、方法和措施的集合。那么安全科学的核心问题就是系统所需的安全状态。系统在这种安全状态下,完成规定功能的能力,就是系统科学中的可靠性问题。因此安全科学的核心问题就是系统可靠性问题。系统安全性的变化,即等效为系统可靠性的变化。那么一切安全问题就可抽象为系统可靠性问题。系统安全状态变化抽象为系统可靠性的变化,进一步抽象为系统状态变化,即系统运动过程。

问题是,将系统的安全状态逐步抽象为系统运动后如何研究系统的运动。当然这不能通过微分方程描述系统的运动。这里系统运动指系统受到刺激,系统的形态、行为、结构、表现等的变化。那么在研究系统运动之前,需要解决如下一些问题,包括如何描述系统变化、什么是系统变化的动力、系统变化通过什么表现、系统变化如何度量。这些问题是研究系统运动的最基本问题,其解决涉及众多领域,包括安全科学、智能科学、大数据科学、系统科学和信息科学等。对于系统运动的研究,笔者进行了长期思考,借鉴了汪培庄教授和钟义信教授分别提出的因素空间理论和信息生态方法论,结合笔者提出的空间故障树理论,初步实现了系统运动的描述和度量,并将这些思想用于安全科学的系统可靠性研究。

## 2 系统运动空间

作为描述系统运动的基础,首先给出系统运动空间的定义和示意图,如图1所示。

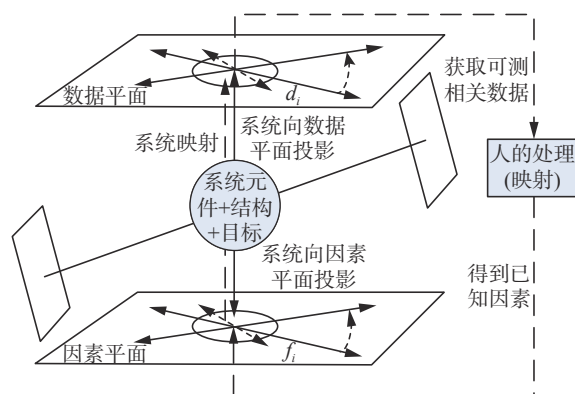


图1 系统运动空间

Fig. 1 System movement space

**定义1** 系统运动:系统受到一些因素的刺激,系统的形式、结构、组成、行为和表象的变化,统称为系统运动。

这里的系统运动与以往系统论和控制论中的系统运动不同,强调受影响后系统变化的过程和状态。而系统本身则是概念系统和实体系统的更



高级抽象,代表系统的最基本共性,包括系统基本组成部分的元件;基于元件组成系统的结构;和系统存在的意义,即系统的目的,也包括影响系统的因素和系统变化产生的数据。

**定义2** 系统运动空间:以系统代表的球型区域为中心,以系统的不同方面或研究角度形成二维平面,这些二维平面围绕系统球,由一个系统球和多个平面组成的空间称为系统运动空间。

系统运动空间由一个系统和多个平面组成。该系统与所要研究的与系统相关的平面组成了研究该系统的空间域。当然一个系统运动空间可以容纳无数个系统和平面,只要系统之间存在联系即可。平面之间除与系统的联系外,不发生其他联系。

**定义3** 系统球:将系统等效为系统运动空间的球体,以便进行系统运动的度量,其半径为1。

系统球内部封装了系统的元件、结构和目的。

**定义4** 平面:系统运动空间中,与系统相关的一类事项或研究方面存在的形式。

如图1中的数据平面和因素平面。

**定义5** 投影:从系统球到平面的投影,代表该系统在平面相关的事项或方面的变化情况。

如图1中,系统受到的作用因素是系统球的向下投影,投影到因素平面得到半径为1的圆;向上投影到数据平面,得到系统散发出的数据,形成半径为1的圆。

**定义6** 属性圆:系统球投影到平面的圆形,半径为1。

属性圆是笔者在空间故障树理论框架下提出的一种表示对象属性的方法。由于属性圆给出了严格的性质和度量方法,因此属性圆可容纳一个对象的无数个因素。进一步地可以进行对象之间关系的定量计算。因此引入属性圆尝试进行系统运动的度量和定性定量分析。在图1中,影响系统的因素很多,因素平面内属性圆中的射线代表这些因素,当然在属性圆中进行了归一化,其范围在属性圆内部;数据平面内属性圆的射线代表各类数据,可以是定性、定量、范围和模糊数据。

系统运动空间提出的目的是在更高抽象程度时表示系统的最一般性。系统内部包括元件、结构和系统目的。而外部则是系统受到的作用和表现出来的响应,虽然这些作用和响应很多。本文研究的影响系统的因素和系统因此表现出的数据是系统的两个事项或方面,前者是作用,后者是响应。系统运动空间可表示多个关联的系统,但这里只研究因素-系统-数据之间的关系。因此

建立了一个系统球和两个平面(因素平面和数据平面)。

### 3 系统映射论与人的智慧活动

#### 3.1 系统映射论

自然状态下的系统指不受任何人主观干扰下的系统,根据自然界自身法则运行的系统。这类系统与人的是否存在无关,根据自身运行机制和规则对自然的影响进行响应。

**定义7** 自然系统:在自然状态下,遵守自然规则调节自身与自然之间的关系的系统。

自然系统是天然存在的,其产生和灭亡都遵循自然规律。自然系统存在于自然环境之中,他接受外部环境因素的作用。由于这些作用使系统产生了变化,包括系统形式、结构、组成、行为和表象的变化。因此环境因素是系统运动的动力。

系统的内在因素,即元件、结构和目标是系统内在的固有因素。由于外部环境因素的作用,使系统内部元件和结构产生变化,才使系统的表象发生变化。而系统表象发生的变化是通过自然系统表现出来的运动形式和存在方式改变显现的。进一步地,系统运行方式和存在的变化是通过数据信息的形式散发出来的。因此人可感知系统存在及变化的途径就是数据信息。根据系统目标,数据信息可分为不相关数据信息和相关数据信息。相关数据信息包括可测相关信息和不可测相关信息。

**定义8** 不相关数据信息和相关数据信息:不相关数据信息指自然系统由于外界因素的作用散发出来的与系统目标不相关的信息;相关数据信息指自然系统由于外界因素的作用散发出来的与系统目标相关的信息。

**定义9** 可测相关信息和不可测相关信息:相关信息中,那些可以被现有技术感知、捕获和分析的信息称为可测信息;那些不能被感知、捕获和分析的信息称为不可测信息。

在图1中,数据平面上的实线代表可测相关数据,虚线代表不可测相关数据。

同理,在因素平面内也存在相关因素和不相关因素,相关因素又可分为可调节因素和不可调节因素。

**定义10** 相关因素和不相关因素:相关因素指影响系统目标,使系统发生运动的因素;不相关因素指虽然使系统产生了运动,但并不影响系统目标。

**定义11** 可调节因素和不可调节因素:在相

关因素中,现有技术水平可以调节的因素为可调节因素;反之,现有技术水平不可调节的因素为不可调节因素。

自然系统的影响因素是所有自然因素的全集,由于影响系统运动散发出来的数据是与系统相关的所有数据。定义8~11都是为了建立人工系统给出的。因此它们都是自然因素全集和数据全集的子集。

综上,图1给出的在数据平面和因素平面及其之间的自然系统,组成了一个映射机制。该机制从因素全集出发,经过系统,转换为数据全集。那么自然系统则可视作从因素全集到数据全集的映射,即系统映射论。

### 3.2 人的智慧活动

人的智慧活动是感知自然、认识自然和改造自然的过程。所谓感知是感知自然系统的存在和运动;认识自然是通过自然系统感知得到数据的处理,形成规律;改造自然则是人们使用这些规律影响和作用自然系统的过程。

**定义12** 人工系统:人们通过感知自然和认识自然得到的规律、知识来建立符合自然规律,且带有明确目的的系统。在系统映射论中的人工系统是概念系统和物质系统的更高抽象。

在图1中,人的智慧活动在因素和数据平面之外。人的智慧活动处理的是可测相关数据,通过智能处理得到知识形成人工系统,最终通过可影响自然的可调节因素作用自然和改造自然。那么,人的智慧过程主要是形成人工系统,人工系统是所掌握知识的一种体现,是人模仿自然规律形成的数学模型、思想、机构等。因此人工系统是自然系统的模仿。

### 3.3 人工系统与自然系统

讨论人工系统与自然系统的关系。自然系统存在于自然之中,无论人是否存在都将按照自然规律运行下去。而人工系统则是人们通过了解自然系统得到知识后的仿制系统。但这种仿制存在着天然缺陷。

由图1可知,人工系统起源于自然系统运动过程中散发数据全集中的可测相关数据。人们通过自身知识和理解对其抽象形成人工系统。人们通过人工系统改造自然,那么人们的现有技术只能利用其中的相关可调节因素。人工系统对天然系统的等效总是存在着误差,与观测到的可测相关数据不同。因此人工系统处理和得到的只是全部自然因素和数据的一小部分。距离展示自然系统,完成人工系统到自然系统的功能逼近相距甚

远。另外,自然系统是因素全集到数据全集的映射,而人工系统是可测相关数据到可调节因素的映射,两者映射方向相反。加之两种系统的数据差距较大,甚至不在同一维度,映射也难以保证满射(一一对应);而且不同的技术水平对系统的认识不同,人们永远无法了解自然系统的因素全集和数据全集。因为随着技术的发展,对自然系统的认识逐渐深入,可了解更多因素和数据,但同时也会出现更多的因素和数据。因此得到如下结论:

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达到。

## 4 人工系统的内部结构

真实的自然系统如何运作,因素全集和数据全集人们无法知晓。在此只能从人工系统入手来研究自然系统。从可测相关数据到可调节因素的映射即为人工系统。可测相关数据通过人的智能认识和处理可形成数学模型。那么该数学模型如何代表人工系统,是值得研究的关键问题。

使用最简单的例子,经过大量的自然观测,发现某个器件的故障率与时间相关。然后统计数据,将时间作为自变量,故障率作为因变量得到了一个拟合多项式。该多项式就是故障率与时间的函数关系,是一个数学模型,也是人工系统。那么多项式中的自变量就是影响系统的因素,而这个多项式的结构就是人工系统本身的结构。该人工系统的目标是研究系统故障率,系统元件和系统结构共同组成了该多项式。

人工系统的实现方法很多,中心思想都是通过可测相关数据与相关因素的对应关系得到的,从而模仿自然系统。如传统的物理学和化学,通过实验数据构造经验公式。公式中的变量即为因素,公式的结构则是系统的结构。进而模拟物理系统和化学系统在自然界中的运动规律。近代的各种数学方法,如模糊数学、集对分析、可拓学、粗糙集等,则是为了满足人们更深层次了解自然系统和构建人工系统而产生的。通过这些数学方法对单纯的物理化学观测数据进行提升,进一步形成层次更深的人工系统来模仿自然系统。进一步发展,出现了当代智能科学的三大流派,他们以人脑为自然系统展开研究<sup>[11-14]</sup>。首先是结构主义流派认为人脑的核心及其处理问题的能力来源



于人脑的结构,因此提出了模拟人脑结构的神经元数理逻辑并最终发展成为神经网络模型。他通过神经元和传递函数模拟人脑结构,通过可测相关数据建立适合的神经网络,从而判断和预测结果。神经网络作为人工系统,主要模拟了系统的结构,而忽略了系统的元件和目标,只能分析可测相关数据不能得到相关因素。随后,由于神经网络的局限和缺点,功能主义流派诞生,认为人脑的功能是核心问题。形成了物理符号系统后逐渐退化为专家系统。处理可测相关数据得到相关因素,但是忽略了系统内部的元件和结构,目标是达到与人脑受到因素作用后的相同响应。进一步,基于客体行为的行为流派诞生,通过感知客体的运行和行为来模拟智能行为。他收集和感知自然系统运动过程的可测相关数据,并模拟自然系统响应,得到可调节因素,从而采取相应的行为调节因素作用于自然系统。

因此经典物理化学方法只完成了可测相关数据的简单分析,得到了最为朴素的数学模型,即人工系统。而现代数学方法是结合可测相关数据和经典科学,进行更深层次的自然系统分析,可得到更为接近的人工系统。智能科学方法从不同角度模拟人脑自然系统的各个方面,虽然不能完全等效,但也实现了对自然系统的进一步逼近。从人类发展角度,他们都是基于机械还原论的分而治之方法;同时也是人类建立人工系统立足点、技术手段和哲学原理限制的原因(如上节论述),因此从根本上得到的人工系统不可能等效自然系统。可见人工系统得到的是基于观测数据的一种拟合和等效。也许自然系统并不是人工系统的结构,而只是一种系统响应的等效。又由于自然系统和人工系统的映射方向不同等原因,必将导致人工系统难以接近自然系统。

## 5 系统可靠性分析的人工系统

笔者在研究系统映射论和系统运动空间之前,主要对安全科学中的系统可靠性问题进行研究,提出了空间故障树理论,进行了智能化改造,并进一步提出了空间故障网络理论。整个理论体系的核心为系统可靠性与影响因素的关系研究。那么空间故障树理论研究自然因素影响后,系统表现出来的变化即为故障数据及其变化。因此想要构建与自然系统相对应的人工系统就必然需要了解系统内部的元件和结构。那么以系统可靠性为系统目标,建立了一套系统结构分析方法。因此研究顺序包括系统结构反分析(因素结构反分

析和元件结构反分析)<sup>[19]</sup>、系统功能结构分析<sup>[21]</sup>、系统功能结构最简式<sup>[27]</sup>和功能结构最小化原理<sup>[28]</sup>。该发展过程也是人工系统在不同层次逼近自然系统的过程。这些工作为人工系统得到适合的系统元件和结构提供了有效方法。

研究系统可靠性的变化,理想的研究对象是自然系统的可靠性,并在系统运动空间中进行研究。但自然系统是无法获得的,只能通过趋近的人工系统进行研究。进一步对系统运动空间中表现出来的系统运动进行定性和定量描述。自然系统是从因素全集到数据全集的映射。但我们无法获得因素全集和数据全集,只能得到可调节因素和可测相关数据,因此通过系统运动空间方法得到的系统仍是人工系统。

该人工系统在因素平面内和数据平面内投影分别得到两个属性圆。属性圆是在空间故障树框架内的对象与因素关系的定性定量表示方法<sup>[25-26]</sup>。人工系统的分析首先通过可调节因素,改变因素状态。那么对应的自然系统将发生运动,散发出数据信息,感知后形成可测相关数据集。可调节因素集和可测相关数据集可表示为在因素和数据平面内的属性圆,在因素变化的同时数据发生相应变化。通过属性圆各个属性的域线变化可实现定性定量分析。进一步通过得到的因素属性圆变化和属性圆的数据变化,结合已有系统结构分析方法可得到系统元件及其结构。该过程即为系统运动空间和映射论在系统可靠性研究领域的实现,是它们在具体科学领域中的应用。由于相关研究篇幅较大,这里不做详述。

汪培庄教授的因素空间理论提到了人机认知体的概念,该概念是另一条使人工系统趋近于自然系统的途径。另外,钟义信教授提出的机制主义信息生态方法论也将人工系统逼近自然系统。这两种方法也值得我们研究和借鉴,这里不再详述,见文献[7-14]。

上述只研究了系统运动中的一些基本问题。提出了系统运动空间和系统映射论。系统运动空间的建立解决了一些科学研究过程中的系统层面问题。比如:文中论述的人们建立的人工系统为何总是存在误差,为何人工系统无法等效于自然系统。

系统运动空间是系统的高度抽象,是描述系统运动的普适框架,是笔者长期研究系统科学、智能科学及安全科学后得到的模型。下一步将具体落脚于安全科学中的系统可靠性领域,使用系统运动空间对其进行定性定量研究。

## 6 结束语

在前期研究基础上,给出了系统运动空间与系统映射论的具体定义。主要结论如下:

1) 给出了系统运动空间的定义和性质,即系统运动空间中的运动系统、系统运动空间、系统球、平面、投影等定义。系统运动空间可表示一个系统与多个方面的关系和多个系统之间的关系。

2) 给出了系统映射论思想。认为自然系统是因素全集到数据全集的映射。给出了相关数据信息和不相关数据信息,及可测相关信息和不可测相关信息;相关因素和不相关因素,及可调节因素和不可调节因素等概念。而人工系统是可测相关数据到可调节因素的映射。

3) 讨论了自然系统和人工系统的差别。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;人工系统的功能只是想要模仿的自然系统功能的一部分;人工系统只能无限趋近于自然系统而无法达到。

4) 论述了系统运动空间和映射论在系统可靠性领域的实现和方法。借助可测相关因素和可调节因素,及空间故障树理论中系统结构分析和属性圆方法,可初步实现研究系统可靠性的人工系统。

系统运动空间和系统映射论可以解决一些系统层面上的问题,进一步研究有待展开。

## 参考文献:

- [1] 马峻. 基于中粒度层面的动态系统多层次映射关系模型[J]. 系统科学与数学, 2018, 38(8): 866–880.  
MA Jun. Research on multi-level mapping relationship model of dynamic system based on medium granularity[J]. Journal of systems science and mathematical sciences, 2018, 38(8): 866–880.
- [2] 何瑞祥. 粗粒度可重构计算系统映射与容错机制研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2018.  
HE Ruixiang. Research on mapping and fault-tolerant mechanisms for coarse-grained reconfigurable computing system[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2018.
- [3] 曾霞. 基于障碍函数生成的混成系统安全验证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.  
ZENG Xia. Safety verification of hybrid systems based on barrier certificate generation[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [4] 张连怡. 构件系统模型检测方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.  
ZHANG Lianyi. Model checking of component-based systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [5] 李倩. 基于形式化方法的混成系统安全性检验[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.  
LI Qian. Safety verification of hybrid systems based on formal method[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [6] 黄峰. 系统演化的形式化与具体化应用研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.  
HUANG Feng. A study on formalization and materialization application of system evolution[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [7] 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 data-bases[J]. Journal of Liaoning Technical University (natural science edition), 2013, 32(10): 1297–1304.
- [8] WANG Peizhuang, LIU Zengliang, SHI Yong, et al. Factor space, the theoretical base of data science[J]. Annals of data science, 2014, 1(2): 233–251.
- [9] 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 edition), 2014, 33(7): 865–870.
- [10] 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 edition), 2015, 34(2): 273–280.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] CUI Tiejun, LI Shasha. Deep learning of system reliability under multi-factor influence based on space fault tree[J]. *Neural computing and applications*, 2019, 31(9): 4761–4776.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] CUI Tiejun, LI Shasha. Study on the construction and application of discrete space fault tree modified by fuzzy structured element[J]. *Cluster computing*, 2019, 22(3): 6563–6577.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] LI Shasha, CUI Tiejun, LI Xingsen, et al. Construction of cloud space fault tree and its application of fault data uncertainty analysis[C]//*Proceedings of 2017 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Ningbo, China, 2017: 195–201.
- [23] LI Shasha, CUI Tiejun, LIU Jian. Study on the construction and application of cloudization space fault tree[J]. *Cluster computing*, 2019, 22(3): 5613–5633.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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): 27–30, 57.
- CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. Simplest formula analysis method of system function structure[J]. *Application research of computers*, 2019, 36(1): 27–30, 57.
- [28] 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.

#### 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 20 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。