

# 智能复杂体系研究

吕淳朴, 王焕钢, 张涛\*, 蒋文兰

清华大学自动化系, 北京 100084

**摘要** 介绍了体系研究的历程与现状, 提出当下该领域的研究重点是复杂度及智能性更高的智能复杂体系。阐述了智能复杂体系的概念、特征、建模、涌现和应用。提出今后的研究方向主要集中在智能复杂体系的建模、智能涌现与牵引控制等。

**关键词** 智能复杂体系; 建模; 智能涌现; 牵引控制

随着互联网、大数据、人工智能等技术的快速发展, 原来孤立的系统之间实现了紧密互联, 一系列具有智能性的系统进行动态组合, 构成了智能复杂体系。对智能复杂体系的研究可以帮助解决现有体系中存在的环境污染、能源浪费、资源配置不合理等问题, 从而减轻污染, 节约能源, 提高资源利用率。智慧城市、智慧园区、智慧工厂、未来战场都可以视为某种特殊的智能复杂体系。

在智慧城市中, 针对城市中存在的交通拥堵、环境恶化等问题, 智慧城市可以通过物理系统、社会系统和信息系统的动态智能组合, 使多个系统协同运转, 为城市提供包括规划、节能、环保、安全在内的一系列服务。在智慧园区中, 根据功能, 园区体系划分为能源、物流、安防、环保和地理信息等系统。目前这些系统之间往往互不关联, 无法发挥体系的最大效用。如果系统能够互联互通, 园区的实时监控、优化调度、安全生产和智慧运输等功能将得以实现。在智慧工厂中, 针对现有工厂存在的不合理资源调度, 智慧工厂将工艺环节、生产流程、物

料调配和运输视为不同的系统, 通过统筹调度这些系统, 达到生产效率最大化, 提高企业生产效益。对于未来战场, 面对瞬息万变的形势, 海、陆、空、天作战域与侦察、装备、打击、运输、后勤保障等系统紧密配合, 形成作战体系, 实现统一指挥, 协同作战, 为打赢未来战争保驾护航。

开展智能复杂体系的研究意义重大。传统的复杂系统研究重在研究某个特定系统的性能, 而对于系统构成的网络, 即体系的全貌, 缺乏充分的认识。体系由系统发展而来, 也是系统向越来越复杂、越来越智能化发展的必然产物。当系统论的思维模式无法满足现有的发展时, 体系的思想便应运而生。近年来, 人工智能的研究进入了蓬勃发展的时期, 以大数据、机器学习、深度学习等新技术为代表的科技成果层出不穷。这些成果对系统与体系的复杂性研究有一系列行之有效的途径和方法。因此, 人工智能新成果的出现, 给智能复杂体系相关问题的解决开辟了新的道路。

收稿日期: 2020-03-21; 修回日期: 2020-07-04

作者简介: 吕淳朴, 博士研究生, 研究方向为智能系统与复杂体系, 电子信箱: lvcp16@mails.tsinghua.edu.cn; 张涛(通信作者), 教授, 研究方向为智能系统与复杂体系, 电子信箱: taozhang@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 吕淳朴, 王焕钢, 张涛, 等. 智能复杂体系研究[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 27-37; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.21.003

## 1 智能复杂体系的概念与特征

### 1.1 体系的概念与特征

在现代汉语中,体系的含义十分宽泛,指的是“若干有关事物或思想意识互相联系而构成的一个整体”。工业体系、思想体系、作战体系、市场体系、管理体系等,都可以称为体系。在这个概念下的大部分体系,与本文探讨的内容有潜在的联系,但同时有很大的区别。“体系”对应的英文为 system of systems (SoS),最早出现在 1964 年一篇讨论城市系统的文章中<sup>[1]</sup>。

长期以来,系统思维一直专注于系统的成员、内部设计及其关系。与此同时,外部设计、整体环境以及这些在系统影响力、所有权和适应性等方面的意义都被忽略或简化<sup>[2]</sup>。20 世纪 90 年代末以来,系统工程规模变得更大更复杂,以复杂自适应系统为理论指导的体系出现,体系及体系工程逐渐成为系统工程、管理科学等诸多学科的新研究领域<sup>[3]</sup>。尽管在体系与体系工程的认识上还没有形成统一的、为学术研究领域广泛接受的概念定义,但关于体系与系统、体系工程与系统工程的区别已经得到众多学者的认可<sup>[4]</sup>。

从综合的体系概念分析,体系是由组分系统构成的系统,但与普通的系统形成了对立的观念<sup>[2]</sup>。体系可以看作“元系统”,组分系统通过自主嵌入的方式形成体系,这些自主的、嵌入的系统在技术、环境、地理区域、运作方式以及概念框架等方面是不同的<sup>[5]</sup>。较早提出体系特征的 Maier M W 认为,体系是相互协作的系统的集成,这些组成系统具备两种附加特性,即运作的自主性与管理的自主性<sup>[6]</sup>。也有学者认为,体系方法并不倡导某种工具、方法手段或实践,相反它追求一种新的思维模式,这种思维模式能够迎接体系问题的挑战<sup>[4]</sup>。

从分领域的体系概念分析,各类文献中关于体系的概念与定义层出不穷,体系的典型概念与定义不下 40 种,描述了研究者对体系在信息、网络、企业、军事等不同领域下的理解与认识<sup>[3-4]</sup>。以企业信息系统为应用背景,体系是大规模分布、并发系统的集成体,组成体系的系统本身是复杂单元<sup>[7]</sup>。

以未来战场环境信息系统为应用背景,体系是系统的综合,系统综合以系统的演化发展、协同与优化为目的,最终达到提高整体效能的宗旨<sup>[8]</sup>。在交通系统、军事体系和空间探索等领域的探索中,体系是分布环境中异构系统组成网络的集成,体系中这些异构系统表现出独立运作、独立管理和区域分布特征,体系的组成不同于一般系统的内部结构<sup>[9-10]</sup>。从网络中心战的需求出发,体系的框架包括健壮的物理、社会、信息网络,这 3 个网络可以加强网络化与信息共享,改善态势感知与理解,增强协作与交互,体系元素具有自主与敏感型,实现体系效能的提高<sup>[11]</sup>。

在对体系概念进行描述时,通过特征理解体系可能是一种更理想的方法<sup>[12]</sup>。Maier M W 较早提出了体系的 5 个关键特性,包括构件系统运行独立性、构件系统管理独立性、地理分布、涌现行为、进化的发展过程<sup>[6]</sup>。随着对体系了解的加深,体系的特征逐渐加入了新的内容。Boardman 和 Sauser 认为,虽然关于体系的特征可能还未完全达成共识,但已经出现了趋同性,并为体系特征加入了归属性、互联性、异构性等<sup>[2]</sup>。国内学者为体系的特征增加了边界模糊与动态、影响的关联性、自组织与适应性等特征<sup>[3-4]</sup>。

### 1.2 智能时代下的体系

当今随着大数据和人工智能技术的发展,使构成体系的组分系统的智能性、自组织性在逐步增强,组分系统间物质、能量、信息的交互越来越充分。研究者从数据运行与流动的角度探索体系的发展与演化,在不同领域进行了新的尝试与探索。智慧城市是智能时代下的体系典型代表,世界各地的城市都在寻求基于信息和通信技术的智能解决方案,以应对城市化带来的挑战<sup>[13]</sup>。在以网络为中心的企业体系中,云计算环境可以为企业服务质量提供监控、管理和响应<sup>[14]</sup>。商务流程的现代化使得软件密集信息系统和赛博物理系统、无人机系统、卫星和移动通讯系统等密切合作,形成了新的信息体系<sup>[15]</sup>。智能电网和智能建筑中应用的体系数字孪生策略成为智能化的新策略和新架构<sup>[16]</sup>。在医疗补助计划中,信息技术体系在微观、中观、宏观 3

个层次上整合物联网技术并为医疗补助提供服务<sup>[17]</sup>。

因此,在智能时代下,体系研究工作的重点对象将发展为智能复杂体系。智能复杂体系拥有体系的基本概念和基本特征,同时将展现自己独特的特征,特征的核心在于智能性。综合以上描述,本文给出智能复杂体系的概念与特征。

#### 1) 智能复杂体系的概念。

智能复杂体系是一系列智能系统的动态组合。智能系统之间以数据为表现形式,以物质、能量、信息为载体进行复杂多变的联接、交互、协同、优化,使智能复杂体系能够涌现出组分系统不具备的能力,集中表现为具有更强的智能性,从而完成更高层次的任务和使命。

2) 智能复杂体系的特征:(1) 组分系统具有独立性、异构性、复杂性、分布性、智能性。独立性表明组分系统是可以独立运行的单元。异构性表明组分系统之间的差异可能很大,数据形式和系统运行模式千差万别。复杂性表明组分系统是复杂系统,组成体系之后复杂性将成倍甚至成指数型增加。分布性表明各组分系统可能分布在不同的空间位置。智能性表明组分系统可以根据环境和需求的变化进行自我组织、管理、调节。(2) 智能复杂体系运行和管理具有动态性。动态包含两层含义,既指组分系统为动态的、可变的系统;也指体系具有开放性和动态调整性,允许系统的进入、退出、动态演化。(3) 组分系统间通过数据进行复杂多变的联接与交互。数据作为“流通货币”,贯通整个体系,反映体系内的联接、交互、协同、优化、涌现等动作的过程与结果。(4) 智能复杂体系具有强涌现特性。组分系统间通过一系列交互动作,使智能复杂体系出现组分系统不具备的能力,集中表现为层次更高、水平更高的智能性。

### 1.3 智能复杂体系与多智能体系统、复杂网络

在系统复杂性的研究中,多智能体系统(multi-agent system, MAS)和复杂网络(complex network)是两个重要的概念,也形成了重要的方法体系。

多智能体系统指的是可以相互协作的多个简

单智能体为完成某些全局或者局部目标使用相关技术组成的分布式智能系统。多智能体系统的特点包括自主性、容错性、灵活性和可扩展性、协作能力等,应用方向包括机器人控制、无线传感器网络、智能电网控制等<sup>[18]</sup>。

复杂网络介于完全规则和完全随机之间,并呈现出小世界效应和无标度的统计特征。复杂网络的特征还包括了自组织、自相似、吸引子等方面,应用方向包括技术网络、社会网络、交通运输网络、生物网络等<sup>[19]</sup>。

智能复杂体系与上述二者的区别体现在基本单元、单元独立性和能力涌现等方面。智能复杂体系的基本单元是可以独立运行的智能系统,每一个组分系统都拥有自身的目标、任务和需求,在体系之外,可以独立完成目标。这些智能系统集成体系后,涌现出更强大的体系能力,以能力为体系智能的表现形式,完成更高层次的任务。多智能体系统的基本单元是智能体,但其本身独立性和智能性较低,目标和任务相对简单,在形成多智能体系统后可以集群完成复杂的目标和任务。因此,多智能体系统是以完成系统任务为目标,而不是能力的涌现和构造。复杂网络的基本单元是网络节点和连接节点的边,在系统研究的层面可以理解为系统的网络抽象。节点和边本身的独立性较低,需要与网络的其他要素合作完成目标任务。

但与此同时,多智能体系统和复杂网络是系统复杂性研究的重要概念与方法,其研究成果也必然可以为智能复杂体系铺设基础,提供借鉴。

## 2 智能复杂体系的建模

### 2.1 复杂系统建模

在复杂性研究中,仿真技术已成为了一种有效可行的方法和工具。无论是微观世界的可视化、宏观世界的变迁机理,还是人的生理机能、社会的变迁,都可以通过对复杂系统进行建模与仿真来进行研究。仿真技术经历了发展阶段(约1940—1960年)、成熟阶段(约1970—1980年)和高级阶段(大约自1980年开始)之后,现在又进入了以复杂仿真

系统为主的新阶段<sup>[20]</sup>。智能复杂体系来源于复杂系统,因此体系建模势必也要从系统建模说起。

复杂系统的建模方法大致分为5类,分别为基于智能技术的复杂系统建模、基于数学手段的复杂系统仿真、基于离散事件动态系统的建模、定性建模与仿真、复杂网络建模与仿真。基于智能技术的复杂系统建模,指的是采用人工智能,控制专家的知识、经验和技巧,建立系统的模型。主要的建模方法有神经网络建模、基于Agent的建模、基于CGP的建模、遗传算法、粒子群优化算法等。基于数学手段的复杂系统仿真包括参数优化方法、模糊仿真方法、宏观仿真方法等。基于离散事件动态系统建模,主要是研究人造的系统,如柔性加工系统、大规模计算机和通信网络、机场交通管理系统等。这类系统的特点是对系统进程起决定作用的是一些离散事件,所遵循的是一些复杂的人为规则。主要的建模方法有Petri网、任务/资源图建模法、基于知识的建模法和基于系统理论形式化的建模法等。定性建模与仿真,指的是建立定性物理模型的过程,由经验规则、专家知识、模糊关系等定性描述手段建立知识库等。主要建模方法有定性因果方法系统动力学、归纳推理方法等。复杂网络建模与仿真,包括随机图、小世界网络、无标度网络、加权网络、空间网络等。

## 2.2 智能复杂体系建模概述

仿真和建模无疑是智能复杂体系面临的首要问题。Hallo等<sup>[21]</sup>对仿真在系统工程和体系工程这两个学科领域进行了比较分析,引入了新的术语:基于建模与仿真的体系工程,认为仿真是体系建模的重要组成部分,强调在体系工程建模应用中融入仿真的重要性。

对于智能复杂体系的建模,部分研究者们借鉴复杂系统、多智能体系统、复杂网络等已存在的方法理念进行了研究。其中,基于Agent、Petri网和图论等的建模方法得到了较多尝试。通过基于Agent的模型,体系的Agent-Group-Role层次结构将体系的静态和动态特征,以及由目标或组分系统容量变化而引起的体系重组纳入考虑范围内<sup>[22]</sup>,并基于空间的交互作用函数模拟体系中组分系统的空间特

性和交互作用,用于评估智能体之间的物理和通信交互<sup>[23]</sup>。利用集合论与基于Agent相结合的方法进行体系建模,对期刊出版物的作者之间的协作进行了模拟,验证了该方法对体系的模拟行之有效<sup>[24]</sup>。有研究者将其应用于移动赛博-物理体系,将体系元素抽象为用智能体Agent表示的逻辑组件,并使用托盘装载系统来描述该模型<sup>[25]</sup>。通过基于Petri网的模型,可以在DoDAF元模型层次上定义通用模型转换规范,提出了一种新的体系结构的可执行建模方法<sup>[26]</sup>。基于图论的算法和图形数据库固有的可扩展性和关系表示能力,可能会发展为体系工程领域的重要工具<sup>[27]</sup>。神经网络模型的特点与复杂系统的特征与建模方法论要求相适应,是复杂系统建模的重要途径,并逐步应用于文本语言处理、语音识别、图像处理、故障诊断等<sup>[28]</sup>。此外,基于聚类的多因子建模可以为生活社区体系提供集成方法,进行集成分析<sup>[29]</sup>。系统建模语言可以表示企业体系结构的统一体系结构框架<sup>[30]</sup>,也可以进行战场制图开发和无人机部署,为无人机群体系工程提供指导<sup>[31]</sup>。

除了对已有理念和方法的迁移应用,也有研究者提出,由于体系空间的复杂性,传统的方法对于学习、探索和理解这些复杂交互作用是不够的,呼吁开发新方法,并提出了新技术必须改进的具体领域<sup>[32]</sup>。很多研究者提出了体系建模的新范式,架构方法是解决大型复杂信息系统分析设计问题的一种行之有效的,可以为复杂体系的设计提供新范式<sup>[33]</sup>。在紧急响应体系研究中,Mihret等<sup>[34]</sup>提出一种包含重要体系特征的通用、可扩展、自顶向下的协作策略建模方法,为组分系统定义为一组规则,引导组分系统交互达到体系共同目标。Outline方法,将体系的功能需求作为半正式的建模行为来处理,将体系需求与建模相结合<sup>[35]</sup>。工程系统多域矩阵建模框架可以对疾病监测系统的流程和体系结构进行建模<sup>[36]</sup>。基于能力驱动的体系核心竞争力公式模型考虑组分系统的核心作用能力,在无人机系统担任火灾扑救任务中进行了实验<sup>[37]</sup>。Explorer模型作为对多目标网络安全复杂体系进行架构、建模和优化的工具,通过威胁抑制系统实现安

全防范<sup>[38]</sup>。有学者提出,体系可视化动态行为是体系架构设计变化和改进的方向,建议在整个体系生命周期中维护和使用可视化<sup>[39]</sup>。也有学者认为,组分系统的加入或离开改变了体系的结构配置,可能会影响整个体系的性能、安全性和可靠性,因而体系动态建模依然存在困难<sup>[40]</sup>。

### 3 智能复杂体系的涌现

涌现的概念由来已久,其背后的思想可以追溯到亚里士多德著名的“整体大于部分之和”。人类在发展过程中,已经认识并总结出很多自然界的涌现行为,比如最古老的原生生命的形成,智慧生物的产生与大脑的进化等。

系统科学把整体具有,孤立部分及其总和不具有的性质称为整体涌现性。涌现性由组成成分按照系统结构方式相互作用、相互补充、相互制约而激发出来,是一种组成成分之间的相干效应,即结构效应。涌现并不破坏单个个体的规则,但是用个体的规则却无法加以解释。不同的结构方式,不同的相互激发产生不同的整体涌现性。系统科学对整体涌现性的研究已开展多年。涌现性的开创者 Bertalanffy,不但最先在现代系统科学引进涌现概念,还明确指出要把研究涌现现象作为系统科学的根本问题,意在给后继者指明系统科学的发展方向<sup>[41]</sup>。

体系来自于系统,关键区别在于二者在涌现行为上的不同。系统涌现可以人为设计,体系涌现则超出了可预见范围。一个体系需要多种多样的涌现行为来提升能力。因此,体系的设计者需要为体系创造合适的环境,使涌现行为充分发生,同时能够迅速地检测和中止意外行为<sup>[2]</sup>。一些研究者给出了对体系涌现进行设计和指导的方法<sup>[42-43]</sup>,探索了涌现的边界,提出了涌现结构框架,以解决组分系统间“预期结果”与“意外行为”的矛盾<sup>[44]</sup>。在涌现本质的探索上,研究者也进行了尝试和努力。有学者从本体论角度讨论了涌现的实质,描述了一个一致、内聚和预测性的框架,通过集成和互操作的语法和语义来表示部分-整体关系,用函数和行为

构建对象和过程的本体,揭示了由于改变物理对象的交互作用而产生的涌现的真实本质<sup>[45]</sup>。McDermott 等<sup>[46-47]</sup>认为,涌现通常是体系内部创新的结果,代表了利益系统、创新系统和环境的汇合,提出了一套适用于体系工程和“人为中心”的设计方法和工具,可用于体系演化的战略设计和规划,并应用于城市交通体系和社区体系设计。

在智能复杂体系的涌现研究中,智慧城市因其广阔的应用前景一直备受关注。未来的智慧城市将表现出由“生理智能”、“社会智能”和广义“人工智能”等3种智能形式综合形成的“整体谐生智能”。3种智能共同演化,逐步交汇形成整体层面的“融合”式智能<sup>[48]</sup>。尽管目前的城市尚未发展出整体谐生智能,但 Zheng 等<sup>[49]</sup>提出的“城市计算”对来自多系统的信息融合已经产生了“整体大于部分之和”的效果,给智能复杂体系的涌现提供了例证研究。城市计算是对城市空间中多种多样的数据源产生的异构大数据进行获取、集成、分析的过程,这些数据源包括传感器、设备、汽车、建筑和人类活动等,其目的是解决城市面临的主要问题,例如空气污染,持续增长的能源消耗和交通拥堵等<sup>[49]</sup>。融合环保、交通,地理信息系统的 U-Air 方法,可以实现空气质量实时预测,方便城市居民的出行<sup>[50]</sup>。地理信息系统和交通系统的结合,可以发现城市的功能区域,挖掘城市道路布局的不足之处,辅助城市规划<sup>[51]</sup>。交通系统产生的实时出租车轨迹数据和地理信息系统结合产生的 T-Drive 系统,可为出租车司机动态规划路线,减轻城市拥塞<sup>[52]</sup>。CityNoise 方法结合了地理信息系统和通信信息系统中的签到数据,分析城市各区域在不同时间段上不同类别噪声的污染指数,缓解城市噪音污染<sup>[53]</sup>。信息系统和物理系统交互产生的新功能还体现在社交、娱乐、经济、安全等方面。在社交和娱乐方面主要表现为各种推荐系统<sup>[54]</sup>;在经济方面,地理信息系统中的道路数据,兴趣点数据和交通系统中的人口流动数据,可以用于辅助商业选址和房价估值<sup>[55]</sup>;来自物理系统和信息系统的信息,特别是社交媒体数据融合可用于发现城市中的突发事件,保障城市安全<sup>[56]</sup>。利用城市中由通讯网络反映的人群密度数

据和GPS反映的危险品运输车辆的数据进行融合,可测算出城市中的危险区域<sup>[57]</sup>。

关于涌现行为是体系的重要特征这一点,已经形成了共识。但在现有的文献中,对体系涌现性的描述并非特别充分,主要原因是对于体系涌现的实现较为困难,更遑论对涌现的控制、引导与调节。如今,深度学习等数据处理技术得到了广泛的研究和使用,虽然其理论解释尚不明确,但可以看到数据耦合和融合的概念时有出现。未来,智能复杂体系的涌现行为将通过数据的配合、耦合与融合,互相渗透与弥散,逐步深入,能够自发地出现更强的信息与知识。同时,逐步解开涌现发生的机理,进而实现对智能复杂体系涌现行为的控制与引导。

## 4 智能复杂体系的应用

尽管智能复杂体系的概念、特征与建模还处于研究阶段,但研究者已经在实际体系中进行了大量探索。

在智慧城市复杂体系中,体系概念被应用于智慧城市交通中的挑战<sup>[13]</sup>,城市交通新的体系治理框架可以辅助智慧城市的高效运作,在新加坡的城市实践中得到了体现<sup>[58]</sup>。在企业和社会复杂体系中,体系理念结合云计算环境可以为提供计算服务的企业系统的服务质量进行监视、管理和响应<sup>[14]</sup>。体系与物联网技术结合,可用于管理医疗补助服务<sup>[17]</sup>。体系理念应用于社区体系的构建,从描述区域内因子价值组合类型的数据中,发展出系统社区类型学<sup>[29]</sup>。在战场智能复杂体系中,体系思想已应用于无人飞行器群的工程设计<sup>[31]</sup>。研究者分析了体系在网络为中心的系统性战争的应用,提出了一种基于超网络模型的作战体系架构和方案空间探索算法,用于设计和选择最佳战斗系统<sup>[59]</sup>。体系还可以应用于武器系统组合选择,从多维度建立分层多准则价值模型来衡量武器系统贡献率,利用分类优化选择策略,在一定的成本约束下得到最优的武器系统投资组合<sup>[60]</sup>。

空气质量预测问题连接着城市中的环境保护系统、交通系统和地理信息系统3大系统。传统的

模型通常考虑单个系统的影响,无法提供准确的预测。因此,蒋文兰等收集了城市的出租车交通轨迹数据、天气数据、路网数据、POI数据和空气监测站数据,利用半监督机器学习的方法框架Co-Training和Tri-Training进行细致的城市空气质量预测,提高了预测精度<sup>[61]</sup>。

在智慧园区复杂体系中,危险货物的运输和储存具有潜在的威胁。传统的危险识别方法依赖于单一的系统数据源,难以满足目前的安全评估状态。窦珊等从智能复杂体系的角度整合了不同系统的数据,主要包括危险品监控系统的危险品储罐监控传感器数据、物流系统的危险品运输车辆轨迹数据、地理信息系统的地图数据。基于这些数据提取特征,提出了一种多系统多源异构数据融合的危险识别方法,实现了化工园区的危险态势感知,实时显示整个化工园区的潜在危险区域。通过某化工园区的实际数据验证了该方法的有效性<sup>[62]</sup>。

## 5 智能复杂体系的研究方向

### 5.1 智能复杂体系的建模

系统复杂性研究和数据技术的不断发展给建模提出了新的需求。建模的复杂度和难度也将逐渐提升,并将随着体系概念的更新而逐渐升级换代。基于本文提出的智能复杂体系概念及特征,智能复杂体系的建模应当满足如下条件。

1)智能复杂体系内各组分系统需要统一的建模框架与方法,实现组分系统间的数据共融。处理异构数据将是建模过程中的关键技术之一;

2)组分系统之间和系统内各主体之间的关系描述准确、全面;

3)模型能够体现智能复杂体系运行和管理的动态性,允许系统的进入、退出和动态演化,能够清晰地反映数据的联接、交互、协同、优化;

4)模型能够展示智能复杂体系的涌现特性,并能够将人纳入体系运行之中,使对体系涌现的引导与控制成为可能。

### 5.2 智能复杂体系的涌现与牵引控制研究

涌现是公认的体系重要特征,但现阶段关于涌

现的研究,理论层面或简单实例形式较多,对涌现机理的解释研究较少。因此,智能复杂体系的涌现行为及其主动牵引或控制将会是未来研究的热点。研究者需充分利用当前时代下大数据和人工智能研究的热点,从数据流动的视角分析涌现的形成机理与发展模式,并尝试对涌现做出符合需求的引导与控制。

涌现的形成和发展与体系组分系统间的数据交互息息相关。在模型建立过程中系统间和系统内成员间的关系已经得到了初步描述,但组分系统间的数据连接模式仍需要选择并建立,从而使来自各个系统的数据能够充分接触和交互,为涌现创造平台和空间。在此过程中,赋予体系和组分系统以较为充分的智能,并通过需求导引,不断调整、反馈不同系统间连接与交互的紧密程度,自主探索、产生满足给定需求的涌现结果。通过对涌现结果的分析验证,可以了解体系内哪些组分系统间可能有、或需要有较强的连接、交互与耦合,哪些组分系统间的关系较为薄弱和松散。利用数学语言度量与描述这些关系,判断关系的强度是否会随着需求与环境的变化而变化,总结智能涌现的激发条件。

通过探索智能复杂体系涌现机理,体系内部的关系得到了更清晰的展现。体系面临的外部环境是动态变化的,人工体系所需要达到的目的与需求也是在持续更新的,需要对涌现进行引导和控制。对体系涌现的引导控制体现在能够使智能复杂体系自发调节内部系统间、系统成员间的连接关系,调整连接的紧密程度,调整数据的连接、交互与融合方式,使得体系能够涌现出新的、与环境与需求变化相适应的能力,具有更强的鲁棒性。这个过程与强化学习的思路不谋而合。强化学习把学习看作试探评价过程,智能体选择一个动作作用于环境,环境接受该动作后状态发生变化,同时产生一个强化信号(奖或惩)反馈给智能体,智能体根据强化信息和环境当前状态再选择下一个动作,选择的原理是使受到正强化的概率增大。因此,在涌现的牵引控制上,可以利用强化学习的方法,当外部环境和体系目标发生变化的时候,使体系自主、自发地改变内部的连接,同时不断接收环境和目标给予的反馈信息,使体系得到的正反馈概率增大,以适应环境,满足新目标。

智能复杂体系研究的整体架构如图1所示。

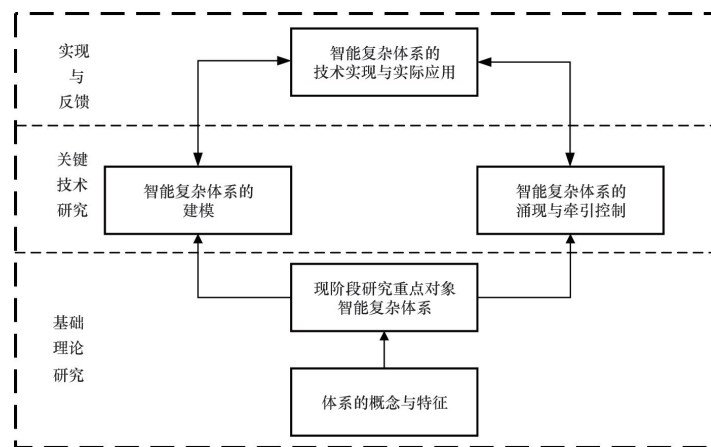


图1 智能复杂体系研究的整体架构

## 6 结论

随着系统的复杂度与智能性越来越强,传统方法与理论已经不适应当今需要。在云计算、机器学习、人工智能等数据科学发展的推动下,体系的概

念得到了更广泛的推广与应用。总结了自体系思想出现以来的概念和特征描述,提出了智能复杂体系的概念与需要具备的重要特征,并阐述了智能复杂体系的建模、涌现、应用的研究现状。提出今后研究应重点关注智能复杂体系的建模,智能涌现与

牵引控制。

体系的发展给科学研究与工程实践展示了广阔的研究空间,也是数据科学向未来发展的重要验证和推动力量。因此,对体系尤其是智能复杂体系的研究,将在可预见的将来成为研究的热点,与此同时,也迫切需要从体系的概念、特征、建模、牵引控制等角度,全面理解和了解体系,为未来的发展奠定良好的基础。

### 参考文献(References)

- [1] Berry B J L. Cities as systems within systems of cities[J]. Papers of regional sciences association, 1964, 13: 147-163.
- [2] Boardman J, Sauser B. System of systems - the meaning of of[C]//2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering. Los Angeles, CA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2006: 119-123.
- [3] 顾基发. 系统工程新发展——体系[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 10-19.
- [4] 阳东升, 张维明, 刘忠, 等. 信息时代的体系概念与定义[J]. 国防科技, 2009, 30(3): 18-26.
- [5] Keating C, Rogers R, Unal R, et al. System of systems engineering[J]. Engineering Management Journal, 2003, 15(3): 36-45.
- [6] Maier M W. Architecting principles for systems-of-systems[J]. INCOSE International Symposium, 1996, 6: 267-284.
- [7] Kotov V. Systems-of-systems as communicating structures [J]. Hewlett Packard Computer Systems Laboratory Paper HPL-97-124, 1997: 1-15.
- [8] Pei R S. Systems-of-systems integration (SoSI) - a smart way of acquiring army C4I2WS systems[C]//Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference. Ottawa Ontario Canada: Society for Computer Simulation International, 2000: 574-579.
- [9] Delaurentis D, Callaway R K. A system-of-systems perspective for public policy decisions[J]. Review of Policy Research, 2004, 21(6): 829-837.
- [10] Delaurentis D. Understanding transportation as a system-of-systems design problem[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2005.
- [11] Dagli C, Kilicay N. Understanding behavior of system of systems through computational intelligence techniques [C]//2007 1st Annual IEEE Systems Conference. Honolulu, HI: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2007: 1-7.
- [12] Gorod A, Sauser B, Boardman J. System-of-systems engineering management: a review of modern history and a path forward[J]. IEEE Systems Journal, 2008, 2(4): 484-499.
- [13] Axelsson J, Nylander S. An analysis of systems-of-systems opportunities and challenges related to mobility in smart cities[C]// 2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018: 132-137.
- [14] Hershey P C, Rao S, Silio C B, et al. System of systems for quality-of-service observation and response in cloud computing environments[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(1): 212-222.
- [15] Teixeira P G, Lopes V H L, Santos R P, et al. The status quo of systems-of-information systems[C]//2019 IEEE/ACM 7th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems (SESoS) and 13th Workshop on Distributed Software Development, Software Ecosystems and Systems-of-Systems (WDES), Montreal, QC, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 34-41.
- [16] Borth M, Verriet J, Muller G. Digital twin strategies for SoS 4 challenges and 4 architecture setups for digital twins of SoS[C]// 2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 164-169.
- [17] Randall R G, Heffner M. Medicaid IT as a system of systems[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 254-259.
- [18] 李杨, 徐峰, 谢光强, 等. 多智能体技术发展及其应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(9): 13-21.
- [19] 王翠君, 王红. 复杂网络的研究进展综述[J]. 科技信息(科学教研), 2007, 31: 419-420.
- [20] 王子才. 仿真科学的发展及形成[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1279-1281.

- [21] Hallo L, Payne B, Gorod A. Model-based approach to system of systems engineering: reevaluating the role of simulation[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 266-271.
- [22] Soyez J B, Morvan G, Merzouki R, et al. Multilevel agent-based modeling of system of systems[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(4): 2084-2095.
- [23] Lanier B, Petnga L. Spatial functions for modeling and analysis of safety-critical systems of systems[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 352-357.
- [24] Baldwin W C, Sauser B. Modeling the characteristics of system of systems[C]//2009 IEEE International Conference on System of Systems Engineering (SoSE), Albuquerque, NM: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2009: 1-6.
- [25] Adams C, Giachetti R. Agent modeling to support allocation decisions in mobile cyber-physical systems[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 57-62.
- [26] Ge B, Hipel K W, Yang K, et al. A novel executable modeling approach for system-of-systems architecture [J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(1): 4-13.
- [27] Harrison W K. The role of graph theory in system of systems engineering[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1716-1742.
- [28] 张国宁, 黄湘远. 神经网络在复杂系统建模中的应用 [J]. 科技导报, 2018, 36(12): 66-70.
- [29] Khayal I. Modeling a community as a system of systems: a methodology for data integration[C]//2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018: 387-391.
- [30] Eichmann O C, Melzer S, God R. Model-based development of a system of systems using unified architecture framework (UAF): a case study[C]//2019 IEEE International Systems Conference (SysCon), Orlando, FL, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 1-8.
- [31] Kerr C, Jaradat R, Hossain N U I. Battlefield mapping by an unmanned aerial vehicle swarm: applied systems engineering processes and architectural considerations from system of systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 20892-20903.
- [32] Kernstine K H. Inadequacies of traditional exploration methods in systems-of-systems simulations[J]. IEEE Systems Journal, 2013, 7(4): 528-536.
- [33] 张维明, 刘俊先, 陈涛, 等. 一种复杂体系架构设计新范式[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 27-31.
- [34] Mihret B Z, Jee E, Baek Y, et al. A collaboration policy model for system of systems[C]//2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018: 1-8.
- [35] Wrigley J C. Behaviour modelling in the design of systems of systems[C]//2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018: 163-168.
- [36] Okami S, Kohtake N. Transitional complexity of health information system of systems: managing by the engineering systems multiple-domain modeling approach[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 952-963.
- [37] Petnga L, Gasque T. Capability-driven formulation of system of systems core competencies[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 119-124.
- [38] Ashiku L, Dagli C. Cybersecurity as a centralized directed system of systems using SoS explorer as a tool[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 140-145.
- [39] Muller G, Falk K, Syverud E. Systems of systems architecting and integration; visualizing dynamic behavior and qualities[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 376-381.
- [40] Mohsin A, Janjua N K, Islam S M S, et al. Modeling approaches for system-of-systems dynamic architecture: overview, taxonomy and future prospects[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 49-56.
- [41] 魏巍, 郭和平. 关于系统“整体涌现性”的研究综述[J]. 系统科学学报, 2010, 18(1): 24-28.

- [42] Giammarco K. Practical modeling concepts for engineering emergence in systems of systems[C]//2017 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE). Waikoloa, HI: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2017: 1–6.
- [43] Cherfa I, Sadou S, Belloir N, et al. Involving the application domain expert in the construction of systems of systems[C]// 2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018: 335–342.
- [44] Oquendo F. On the emergent behavior oxymoron of system-of-systems architecture description[C]// 2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018: 417–424.
- [45] Langford G, Langford T. The making of a system of systems: ontology reveals the true nature of emergence[C]// 2017 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE). Waikoloa, HI: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2017: 1–5.
- [46] McDermott T, Nadolski M. Emergence as innovation in systems of systems — a three systems model[C]//2017 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE). Waikoloa, HI: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2017: 1–6.
- [47] McDermott T. Applying systems-of-Systems principles to purposeful design of human systems[C]//2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). Paris: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2018: 150–156.
- [48] 夏昊翔, 王众托. 从系统视角对智慧城市的若干思考[J]. 中国软科学, 2017, 7: 66–80.
- [49] Zheng Y, Capra L, Wolfson O, et al. Urban computing: concepts, methodologies, and applications[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems & Technology, 2014, 5(3): 1–55.
- [50] Zheng Y, Liu F, Hsieh H P. U-Air: when urban air quality inference meets big data[C]//Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Chicago Illinois: Association for Computing Machinery, 2013: 1436–1444.
- [51] Yuan J, Zheng Y, Xie X. Discovering regions of different functions in a city using human mobility and POIs[C]// Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Beijing China: Association for Computing Machinery, 2012: 186–194.
- [52] Yuan J, Zheng Y, Zhang C, et al. T-drive: driving directions based on taxi trajectories[C]//Proceedings of the 18th SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. San Jose California: Association for Computing Machinery, 2010: 99–108.
- [53] Wang Y, Zheng Y, Liu T. A noise map of New York City [C]//Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. Seattle Washington: Association for Computing Machinery, 2014: 275–278.
- [54] Gandhi S.R, Gheewala J. A survey on recommendation system with collaborative filtering using big data[C]// 2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications(ICIMIA). Bangalore: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2017: 457–460.
- [55] Karamshuk D, Noulas A, Scellato S, et al. Geo-spotting: mining online location-based services for optimal retail store placement[C]//Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Chicago Illinois: Association for Computing Machinery, 2013: 793–801.
- [56] Xuan S, Zhang Q, Sekimoto Y, et al. Modeling and probabilistic reasoning of population evacuation during large-scale disaster[C]//Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Chicago Illinois: Association for Computing Machinery, 2013: 1231–1239.
- [57] Wang J, Chao C, Wu J, et al. No longer sleeping with a bomb: a duet system for protecting urban safety from dangerous goods[C]//Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Halifax NS Canada: Association for Computing Machinery, 2017: 1673–1681.
- [58] Lee O L, Tay R I, Too S T, et al. A smart city transportation system of systems governance framework: a case study of Singapore[C]//2019 14th Annual Conference System of Systems Engineering (SoSE). Anchorage, AK, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2019: 37–42.
- [59] Wang T, Zhou X, Wang W, et al. An optimal approach for combat system-of-systems architecture search under

- uncertainty[J]. IEEE Access, 2019, 7: 119140–119150.
- [60] Dou Y, Zhou Z, Zhao D, et al. Weapons system portfolio selection based on the contribution rate evaluation of system of systems[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(5): 905–919.
- [61] 蒋文兰, 吕淳朴, 王焕钢. 基于多源异构数据融合的半监督城市空气质量预测[C]//2018 中国自动化大会(CAC2018)论文集. 西安: 中国学术期刊电子出版社, 2018: 235–241.
- [62] 窦珊, 张广宇, 熊智华, 等. 基于多源数据融合的化工园区危险态势感知[J]. 化工学报, 2019, 70(2): 460–466.

## Review on intelligent complex system of systems research

LÜ Chunpu, WANG Huangang, ZHANG Tao\*, JIANG Wenlan

Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** With the development of artificial intelligence, more and more complex and intelligent systems appear constantly. Traditional theories and methods of system science and system engineering are no longer suitable for the need of the situation. System of systems(SoS) has thus come into being. This paper reviews the concepts and characteristics of SoS, introduces its history and current research status, and argues that the research focus in this field should be intelligent complex system of systems(ICSoS) with higher complexity and intelligence. The paper also describes the concept, characteristic, modelling, emergence and application around ICSoS. On this basis, this paper suggests that future research directions should focus on modeling, intelligent emergence and pinning control of ICSoS.

**Keywords** ICSoS; modelling; intelligent emergence; pinning control ●



(责任编辑 祝叶华)