

· 学科进展与展望 ·

系统科学与系统工程学科发展战略研究^{*}

王红卫¹ 孙长银^{2,3} 沈轶¹ 余明晖¹

(1 华中科技大学控制科学与工程系, 武汉 430074;

2 国家自然科学基金委员会信息科学部, 北京 100083; 3 东南大学自动化学院, 南京 210096)

[摘要] 本文就系统科学与系统工程学科领域的核心科学问题和发展方向,从系统科学理论、系统工程方法论以及面向国家需求的应用等三个方面,深入研讨了本研究领域的研究热点和趋势。

[关键词] 系统科学,系统工程,复杂系统,科学问题,发展战略

序言

系统科学与系统工程学科在我国历经三十年的发展,其推广和应用已经渗透到社会的各个部门,对我国生产活动和社会生活产生了重大影响。随着科学技术的发展,特别是信息技术的发展,系统科学与系统工程学科所处的地位越来越重要,其新理论和新应用问题层出不穷,迫切需要加以研究和解决。

2007年10月,国家自然科学基金委员会信息科学部在武汉主持召开了2007年中国系统科学与系统工程学科发展战略研讨会。会议就系统科学与系统工程研究领域的发展动态和趋势,从基础研究和学科发展方面研讨学科的发展战略,提炼本领域核心科学问题,引导系统科学与系统工程的研究和发展。

本次研讨会是国内首次举办的系统科学与系统工程领域的学科发展战略研讨会,对于明确系统科学和系统工程的发展方向以及系统科学与系统工程学科的相互促进和协调发展具有重要意义。与会的专家学者就本领域的核心科学问题和发展方向,从系统科学理论、系统工程方法论以及面向国家需求的应用等3个方面,深入研讨了本研究领域的研究热点和趋势。

1 学科研究现状与发展趋势

随着科学技术的飞速发展和进步,越来越多的复杂事物和现象,例如生态、环境、可持续发展、

工程技术等自然和社会经济问题,引起了人们的关注。研究与管理人员在采用传统的理论、技术和方法处理这些问题时,遇到许多根本性的困难。造成这些困难的重要原因是近代科学学科划分过细、条块分割,模糊了人们对事物总体性或全局性的认识。

德国著名物理学家普朗克认为:“科学是内在的整体,实际上它存在着从物理学到化学、通过生物学和人类学到社会学的连续的链条,这是任何一处都不能被打断的链条。”

钱学森认为,系统科学的建立是一次科学革命,它的重要性不亚于相对论和量子力学。从现代科学技术发展趋势来看,如果说量子力学是微观层次研究上的科学革命、相对论是宇观层次研究上的科学革命,那么系统科学则主要是宏观层次研究上的科学革命。在这个层次上出现了生命或生物,产生了人类和人类社会。复杂巨系统的研究以及国外的复杂性研究,都是着眼于这个层次上的。

系统科学主要研究系统的一般属性和运动规律,研究系统演化、转化、协同与控制的一般规律,系统间复杂关系的形成法则,结构和功能的关系,有序和无序状态的形成规律等。对于任何系统来说,系统结构和外部环境决定了系统功能;系统结构及外部环境的改变必然引起系统功能的变化,揭示这些规律便是系统科学的基本任务。系统科学不仅要揭示的系统规律去认识系统,而且还要在认识系统的基础上去控制系统。

系统工程是主要研究人工系统或与人相关的系

^{*} 本文是“系统科学与系统工程学科发展战略研究”调研报告的缩写。
本文于2008年9月2日收到。

统,它是组织与管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法与技术。系统工程的研究涉及自然科学、社会科学与工程技术相互交叉与综合的领域。系统工程的主要任务是:确立工程开发目标,分析工程开发的环境,设计出使工程组态与社会环境和自然环境相融合的总体规划,控制最少的物质、人力和时间的均衡投入。系统工程应用所涉及的领域极为广泛,涉及到各个方面、各个层次,包括军事、工业、农业、交通运输、资源、能源、经济,直至行政、科研、教育、医疗等各个方面。

1.1 国家和学科发展需求

恩格斯指出:“技术在很大程度上依赖于科学状况,那么科学却在更大得多的程度上依赖于技术的状况和需要。社会一旦有技术上的需要,这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进。”国家和学科发展需求在很大程度上决定了未来学科的发展走向。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》提出了面向国家重大战略需求的十个基础研究方向,涉及健康与疾病、生态、气候、能源等多个领域,其中“复杂系统、灾变形成及其预测控制”研究方向将重点研究工程、自然和社会经济复杂系统中微观机理与宏观现象之间的关系,复杂系统中结构形成的机理和演变规律、结构与系统行为的关系,复杂系统运动规律,系统突变及其调控,复杂系统不同尺度行为间的相关性,发展复杂系统的理论与方法等。为系统科学与系统工程学科的发展指明了方向。

对于许多复杂系统,特别是涉及社会与人的复杂系统,迄今为止,还无法建立描述其行为的有效方法和模型。而从科学本身来看,各学科关注的一些重要问题都呈现出复杂性的特点,如能源系统涉及政治、经济、社会、环境、气候等多领域,综合考虑能源利用对经济、社会、环境、气候的影响,将是未来能源复杂系统分析与建模的发展趋势。生命起源、生物进化、社会经济、生态环境、社会舆论形成、国家重点工程项目、复杂供应链等系统的分析,都需要从复杂性科学获取理论和方法的支持。采用复杂系统分析方法,分析经济、社会、生态环境、地质、能源等问题,已经形成了一些新的研究方向和新的学科,如生物信息学、系统生物学、社会信息学、信息经济学等。这些新的学科和新的研究方向极大地丰富了系统科学与系统工程学科的研究内容,也对系统科学和系统工程的学科发展提出了新的挑战。

1.2 国内研究基础和条件

从1978年起,清华大学、上海交通大学、西安交通大学、天津大学、华中理工大学、大连理工大学等国内著名大学开始招收了第一批系统工程专业硕士研究生;1980年11月,中国系统工程学会在北京成立。20世纪70年代末以来,应用系统工程理论和方法来研究与解决我国的重大现实问题,在许多领域和方面取得了较好的效果,如:投入产出表的应用(始于20世纪60年代和1976年)、军事系统工程(始于1978年)、水资源的开发利用(始于1978年)、人口问题的定量研究及应用(始于1978年)、全国和地区能源规划(始于1980年)、区域发展战略(始于1982年)、2000年中国的研究(1983—1985年)等。上世纪90年代以来,系统工程通过与现代信息技术结合、与思维科学结合,在国防、经济建设和社会发展等方面取得了丰硕的成果,推动系统工程理论和方法不断深化发展。

国内复杂性科学的研究以钱学森院士提出的“开放的复杂巨系统”及其方法论为代表,具有我国特色。钱学森院士与一批科技人员长期以来对复杂性科学研究进行了积极探索,并取得了重大成就。从上世纪80年代开始的系统科学讨论班、思维科学讨论班,到今天的综合集成研讨厅,中国的复杂性科学研究通过深入讨论和提高认识,走过了“开放的复杂巨系统”、“综合集成法”、“定性定量相结合的综合集成法”、“从定性到定量的综合集成法”、“人机结合、从定性到定量的综合集成研讨厅体系”的发展轨迹。中国复杂性科学研究以系统科学为突破口,从系统科学出发,把“开放的复杂巨系统”的研究作为创建系统科学的基础层次,进而建立起系统科学从基础理论到工程实践的整个体系结构。

复杂性科学的研究得到国家的高度重视,引起了国内众多领域学者的密切关注。例如:国家自然科学基金委员会于1999年批准“支持宏观经济决策的人机结合综合集成体系研究(项目号:79990580)”重大项目;香山科学会议于2004年5月25—27日召开了以“系统、控制与复杂性科学”为主题的第227次学术讨论会,来自不同学科领域的40位专家(包括11位院士)参加了会议,就复杂系统与控制、社会经济与环境复杂系统、网络中的复杂性科学问题以及生命科学与复杂性这4个中心议题进行了广泛交流和讨论,对于复杂性科学的研究以及复杂系统控制框架的建立进行了深入的探讨。

近30年来,我国系统科学与系统工程的研究与

应用取得了重要的成就,为进一步的发展打下了坚实宽厚的基础。协同学创始人哈肯认为“中国是充分认识到了系统科学巨大重要性的国家之一”,这种评价与实际情况是相当一致的。

综上所述,我国系统科学与系统工程学科发展面临着一个重要机遇期,确立正确的发展方向和发 展策略,对于本学科未来的发展具有重大的战略价值。

2 重要科学问题与优先发展方向

本领域将围绕系统科学与系统工程的重大前沿课题,结合我国在系统科学和系统工程研究方面的现有工作基础和所积累的优势,拟在“十一五”期间就系统科学理论与方法、系统工程理论与方法和复杂系统应用研究等方面的重点科学问题部署力量,深入开展若干基础性研究工作。

这些科学问题或研究领域包括:复杂系统结构和功能的涌现机制及其演化、进化规律;复杂群体系统的行为机制、建模、模拟与调控;复杂网络的结构功能性质及其应用;复杂性研究方法及方法论;复杂系统的计算机仿真和模拟;大型集成系统的体系结构;面向复杂任务的规划、调度与决策的理论及方法;复杂供应链系统的理论及应用研究等。由此产生的研究成果对于提高我国系统科学与系统工程学科的整体实力,推动社会经济的可持续发展,促进和谐社会的建立,具有不可低估的价值,其战略意义不言而喻。

2.1 复杂系统结构和功能的涌现机制及其演化、进化规律

涌现(Emergence)是复杂性科学的核心议题之一。涌现现象的研究体现了系统科学的基本思想:即整体大于部分之和,并进而研究如何由此而产生新的和更高层次的结构和功能。

(1) 涌现的基本规律和演化机制

对涌现现象的基本规律进行深入研究,在大量来自各学科的实例的基础上,努力寻找和总结涌现现象的共同特点和普遍规律,包括外部条件、内部机制、演变的过程、转折点的识别和可能的普适常数等等。

(2) 新层次的产生、形成和稳定发展的机制

层次问题是复杂性科学的另一个重要议题,且与涌现问题密切相关。重点研究:层次的界定与区分方法;层次的形成与出现的条件;层次之间的相互作用机理;层次的稳定条件和机制。

(3) 涌现和演化过程的管理、引导和控制

涌现和演化过程的管理、引导和控制,是涌现和实际应用相结合的桥梁。对于有人参与的复杂系统的设计、管理、引导、控制,是实际工作中迫切需要解决的议题。要从根本的理论和实际的方法给予启发和支持,研究对于人机结合的复杂系统进行影响、诱导、管理、控制的方法和机制。其中的重点是对策论(博弈论)的运用,复杂适应系统(CAS)理论可以作为突破点。

(4) 各种不同类型系统中的具体涌现现象研究

由于涌现现象的普遍性,涌现研究的实践意义也就非常清楚。针对各种不同类型的实际系统的涌现现象,例如环境、经济、文化、安全等领域的各种不同类型系统,通过理论和实际相结合的方法,揭示涌现的普遍规律。其普遍规律可在许多学科中得到有效应用。

2.2 复杂群体系统的行为机制、建模、模拟与调控

自然界以及人类社会的活动(运动)都可看作是由个体组成的群体所展现的整体行为。自然界与人类社会中呈现的群体行为是与个体的属性有关,但群体所表现的行为、功能绝非个体能力的总和。群体行为的建模、机理、模拟及调控近年来已成为系统科学领域的一个重要课题。

用系统科学的观点与方法对群体行为的研究,对于理解自然与社会中的复杂现象具有非常重要的意义。这方面研究的重大进展能够更加深刻的阐释、了解并揭示自然的秘密;另一方面,群体行为的研究帮助人类不断完善、发展新技术。

群体系统是一类典型的复杂系统。用系统科学的方法对工程群体、自然群体、社会群体,定量地建立群体行为的(数学)模型,并研究如何对这些群体实施有效的控制,使整个群体涌现出我们所期望的行为是当前研究群体行为的主要目标。

(1) 群体行为的建模和支撑理论的探索

个体与周边个体及周边环境之间的相互作用导致了一些群体行为的涌现,但是这些群体行为到底是如何产生的呢?对这个问题的研究也就是对群体行为产生机制的理解,需要建立精确的数学模型以及发展相应的支撑理论。研究新的更加具有普适性的数学模型,包括基于数据库、知识库、决策系统等的数学模型以及混杂系统模型;提出一个更加普适的理论框架和系统方法,对群体行为做精确的分析,包括多智能体系统在不同场合中的行为机制和特性。

(2) 模拟群体行为的大型、高效的软件与平台

由于现实生活中遇到的群体行为往往是非常复杂的,很难掌握群体行为的产生机理。仿真为研究群体行为机理提供了一种非常有效的途径。开发具有自主知识产权的基于多个体模型的通用模拟平台,为研究复杂系统提供辅助工具。针对不同对象,例如交通运输、社会经济、生态系统等,开发面向特殊对象的群体行为仿真平台。

(3) 群体行为的协调控制

探讨群体协作的机制和调控在工程应用上具有极其重要的意义。这项研究将为不断出现、发展的新技术和新应用,如移动机器人系统、无人驾驶机、车群、分布式传感器阵列等复杂系统在设计上提供了必要的理论基础。这类系统的研究对象大多是人造系统(机器人、无人驾驶机群等),研究的主要任务是建立正确反映群体动力学特性的解析数学模型,确定个体间必要的信息交互及耦合结构及制定相应的分布式控制策略,使群体能实现既定目标,甚至具有自主决策能力。

2.3 复杂网络的结构功能性质及其应用

复杂网络是指具有复杂拓扑结构和复杂节点行为的网络系统,它是对现实世界中各种各样的大规模复杂网络的抽象。复杂网络理论所要研究的是各种看上去互不相同的复杂网络之间的共性科学问题和处理它们的有效方法。复杂网络应用研究则是期望把理论成果用于具体的实际网络的分析与性能改进。

目前复杂网络研究存在的主要问题是对于网络结构性质及其演化机理仍然缺乏系统性理论,对于网络结构与功能之间的关系研究仍然具有较强的片面性,对于如何从网络结构调整角度改善网络性能缺乏有效方法。不同学科的研究人员往往是从不同的角度研究同一个问题,从而使得复杂网络研究中存在许多不相容的、矛盾的、甚至是完全相反的结果。

(1) 复杂网络的基本结构性质及其度量方法

关于网络拓扑性质刻画的一个基本问题是:哪些拓扑性质对于刻画网络结构具有基本的重要性?同时对于大规模网络的结构性质的有效度量方法也是一个值得关注的重要课题。对大规模实际复杂网络的结构性质进行分析的第一步是要能够有效获得网络结构数据,如何获得高质量的网络结构数据?如何科学地分析数据质量?基于对不完整的网络结构数据所做的分析在多大程度上能够推广到整个网

络?对于随时间演化的网络的结构性质分析应引起更多的关注。

(2) 复杂网络结构的产生机理及其建模

建立合适的网络模型,以理解网络结构的产生机理以及网络拓扑性质的意义,并用于预测和控制网络行为。网络建模的一个关键问题是:基于对实际网络的理解,找到既有一般理论意义又能反映实际网络的各种拓扑性质的模型。至今为止,图论仍然是描述复杂网络拓扑的一个统一的工具。但是,许多实际网络的拓扑结构都是随时间变化的,甚至不少网络的结构的变化还与节点状态的变化密切相关。因此,值得考虑的一个重要问题是建立适于处理这类演化网络新的描述与分析工具。

(3) 复杂网络的结构与功能之间的关系以及改善网络功能的有效方法

研究复杂网络结构性质与建模的目的之一就是为了了解网络结构对网络功能的影响,并在此基础上考虑改善网络功能的有效途径。如何把网络的动力学行为与网络结构性质之间的关系研究建立在更为科学的基础上是值得探讨的重要课题。此外,不少实际网络的拓扑与节点动力学之间存在着相互影响的反馈关系。如何分析这类网络的行为至今仍然缺乏有效的框架。如何针对实际网络的期望性能,按照合适的重要性指标选择节点并通过允许的控制手段达到控制的目标应该是下一步研究的重点。

(4) 复杂网络理论的典型应用

(i) 关键基础设施网络:通信网络、交通网络和电力网络等的安全、稳定和有效运行与人类生活和生产休戚相关,对这些日益复杂的网络的科学理解变得愈益重要。

(ii) 生物网络:20世纪的生命科学研究主流是建立在还原论基础上的分子生物学,它极大地促进了人类对单个分子功能的认识,然而绝大多数生物特征都来自于细胞的大量不同组分之间的交互作用。对这些极其复杂的交互作用网络的结构和动力学的分析与调控是21世纪生命科学面临的挑战之一。

(iii) 经济与社会网络:经济控制论一直就强调用整体的、动态的、相互联系和协调发展的观点来研究经济系统。随着复杂网络理论的发展和人们对复杂经济网络结构的更好地了解,将有助于人们更好地认识经济网络结构与系统行为之间的关系,并进而研究更为有效的经济调控方法。此外,随着网络和计算技术的发展,大规模社会网络分析也将受到

更多的关注。

2.4 复杂性研究方法及方法论

从上世纪 60 年代贝塔朗非提出一般系统理论,到上世纪 90 年代出现复杂系统理论,人们已对复杂性研究方法及方法论进行了广泛而深入的讨论。特别是上世纪 90 年代末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(system of systems)出现,为系统工程应用开创了新的领域。

(1) 关于复杂系统定义

开放复杂巨系统和复杂自适应系统以及其他复杂系统的提法都需要进一步完善、精确和可度量。

(2) 复杂系统研究方法

对于一般简单系统的研究方法,涉及系统的结构表示和描述,系统的建模和仿真,系统的演化,系统的优化,系统的评价,系统的决策,系统的控制、协调、实施和管理等已有系统地论述。复杂系统研究方法重点研究:复杂网络、复杂系统建模方法、挖掘方法、复杂系统软优化计算方法、复杂系统集成方法、复杂系统综合集成研讨厅、复杂系统的控制与协调、复杂系统的管理与实施。

(3) 东方系统方法论

国内外从上世纪 50 年代到 70 年代一直是以定量模型和优化为主的系统方法论为主,后来切克兰特称之为硬系统方法论。上世纪 80 年代由于处理社会系统的一批软的系统方法论出现,这些软的方法论比较着重定性、概念模型,不再过分追求最优解,而只要能找到可行满意解就可以,强调的是不断学习的过程。上世纪 90 年代日本提出了西诺雅卡方法论,中国提出了综合集成方法论和物理事理人理系统方法论,还有旋进原则方法论、元决策、和谐理论和规范化管理理论等,这些方法论强调东方自己的哲学、文化和传统,因而冠以东方系统方法论。我们应该完善这种系统方法论。

2.5 复杂系统的计算机仿真和模拟

本世纪以来,复杂系统问题的研究日益引起人们的广泛兴趣,复杂性科学的研究需要应用定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观综合相结合、还原论与整体论相结合、科学推理与哲学思辨相结合的方法,由于复杂系统的不可分解和层次性,使得计算机仿真和模拟方法得到广泛关注。

(1) 复杂系统计算机仿真和模拟的新方法研究

面向复杂系统的计算机仿真的新方法是目前的研究热点,特别是基于人工社会的复杂系统仿真,从思想和方法上为复杂系统的研究带来新的研究思路

和活力。其研究重点是:(i) 采用人工社会、计算实验方法如何实现微观与宏观的结合;(ii) 研究人工社会、计算实验方法和其他研究方法的集成;(iii) 计算仿真到计算实验的修正过度方法;(iv) 研究基于涌现的观察和解释方法及其各种核心算法;(v) 研究人工社会、计算实验的设计方法及其标定、分析和验证算法。

(2) 个体特征的抽象和行为的界定

在复杂系统的计算机仿真和模拟中,无论是人工社会还是多智能体系统(MAS),规则的简单可行是研究者们共同追求的目标,同时也是仿真有效进行的必不可少的条件之一。然而,现实世界中的个体是复杂的,尤其是有人参与的系统,人的行为更为复杂,这就为在计算机建模和仿真中个体特征的描述和行为的界定带来一定的难度,并由此引出一系列研究问题:(i) 特征的抽象和行为的界定如何能够满足计算机仿真和模拟的需要,同时又能够成功的表示现实世界中个体的特征和行为;(ii) 代理的学习和进化算法;(iii) 代理决策的计算智能算法。

(3) 仿真可信度研究

目前,基于多代理技术以及基于代理计算实验等方法得到国内外学者的关注,这类方法采用自下而上的建模思路,通过计算机生长和培育出一个“现实系统”,通过对这一系统的研究,进而得出对现实系统的评价和指导。这一新的计算方法与基于数值的仿真方法有很大不同,因此对其可信度进行评价也会带来新的问题。研究针对计算实验方法的可信性评价理论与方法,完善复杂系统计算机仿真和模拟的可信性评价体系。

2.6 大型集成系统的体系结构

近 10 年来,大型集成系统已经成为系统科学和系统工程领域的重要学科研究方向,它是面向这样一类依托网络技术而集结的“结构松散、联系紧密”的“系统的系统工程(SoSE: System of Systems Engineering)”。这里所指的大型集成系统(SoS: System of Systems)是一个地域分布广泛,没有固定的系统组织结构和系统边界,主要依靠一系列组织和协议标准,通过信息交互、互动而集成的大型系统工程。

体系结构是大型集成(SoS)系统构成的基础,是集成系统可靠运行和演进的依据,也是区别与传统系统工程的一个重要特征。体系结构是组件和组件间关系的结构,是管理它们的设计和与时演进的原则及指导方针。大型集成系统的体系结构主要研究

体系结构框架、体系结构设计、“人-系统集成”、系统互操作性和集成体系结构评价等。

(1) 体系结构框架

从系统要执行的使命、任务、功能、活动出发,研究系统间的交互机制,获得构建体系结构框架的总体思路。建议研究:(i) 体系结构框架的通用性、完备性和科学性;(ii) 体系结构框架标准化内涵与体系结构设计诸因素的关系;(iii) 体系结构描述的各类视图和产品的选择;(iv) 视图和产品的构成和产品间的内在联系;(v) 集成字典和核心体系结构数据模型构成等。

(2) 体系结构设计

面对复杂的集成系统体系结构设计,需把对象属性、作业规则和数据封装到一起,构成系统体系结构模型,从而研究出一种新的集成体系结构设计方法。主要研究:(i) 以集成系统互操作性为中心,继承旧系统,开发新系统的集成体系结构设计方法;(ii) 集成体系结构产品设计的标准化流程和步骤;(iii) 以系统间的无缝交互为目的,研究集成体系结构一体化理论模型;(iv) 以构建体系结构可集成性为目的,研究系统能力与功能的配置结构,能力与活动、事件、信息交互的关系;(v) 支持体系结构设计过程的知识库系统等。

(3) “人-系统集成”

“人-系统集成”问题的重点是系统中人的认知行为,主要研究:(i) 集成体系结构中人与其他系统的通信结构、人-机界面描述,人与系统的相互作用;(ii) 系统中扮演不同角色的人的高层决策推理模型,包括基于经验(Experience)、基于模态(Modal)和基于规则(Rule)的模型;(iii) 系统环境或态势变化中的人-系统互动作业流程,系统中人的行为建模与仿真;(iv) 人的操作能力的体系结构描述、支持和度量;(v) 研究嵌套(Nesting)、刺激(Stimulus)和理解(Understanding)的认知机理。

(4) 系统互操作性

互操作性问题的核心是“数据一致性”,涉及系统操作方面、互操作系统族方面、操作域和系统组织机制方面的数据一致性问题,主要研究:(i) 实现互操作性的静态(动态)数据一致性;(ii) 集成体系结构中的数据获取、语言分类、消息转换、事务处理和互操作控制机制;(iii) 消息传递标准、系统接口技术标准、数据应用程序标准、操作程序化标准;(iv) 面向互操作服务和能力的体系结构,即功能互操作性和状态互操作性体系结构;(v) 系统互操作性测试

和论证等。

(5) 集成体系结构评价

集成(SoS)系统“能力”依赖于 SoS 涌现的系统行为,“涌现”是集成(SoS)系统自组织互操作所呈现的特征行为。其重点是集成系统体系结构能力构成问题,主要研究:(i) 基于集成体系结构的系统能力形成过程;(ii) 集成体系结构成熟度模型;(iii) 体系结构可执行模型;(iv) 体系结构评价体系和满意度量化评价指标;(v) 集成系统能力设计和构建,能力关联分析,能力定量、定性分析和系统能力评价方法等。

2.7 面向复杂任务的规划、调度与决策的理论及方法

复杂任务广泛存在于诸多领域。复杂任务的规划、调度与决策问题的研究应源于实践并以应用为宗旨,这类问题通常是多目标、多约束、多阶段和多主体的问题,具有很强的动态性、模糊性、随机性和不确定性。目前,国内外学术界的相关研究主要集中在生产规划与调度、复杂产品开发、资源受限(特别是柔性资源)的项目调度、航空调度、电力调度、港口调度、处理机调度、供应链调度等领域。解决具有重大应用需求的复杂任务的规划、调度与决策问题涉及很多重大科学问题,主要包括:

(1) 面向具有不确定性、定性及定量信息共存、多决策目标等特征的复杂任务规划与决策问题的多领域知识的表达与知识获取理论和方法;

(2) 面向具有大规模、非线性、强耦合、约束复杂、不确定性、多决策目标且相互冲突等特征的复杂任务规划与决策问题的建模、分析与优化理论和方法;

(3) 面向具有半结构化/非结构化、定性与定量信息共存、不确定性、多决策目标且相互冲突等特征的复杂任务决策问题的决策理论和方法;

(4) 面向具有分层、递阶、群决策等特征的复杂任务决策问题的决策理论和方法;

(5) 在复杂任务的规划、调度与决策中,由于任务的连续性和时变性,重调度(Rescheduling)或动态调度成为了一个瓶颈问题。目前大多是凭人的经验来修正,或是用启发式方法来解决,这显然是不能适应工业管理现代化的需要。而动态进化算法,则是解决这一问题的很好手段。面向动态调度问题的动态进化计算方法的科学问题主要是针对环境变化,研究增加种群多样性的方法、调用保留信息的方法、超级变异和随机迁徙策略的组合运用

方法等。

基于仿真的优化方法是解决复杂任务规划和调度中复杂优化问题的最新手段,主要面向那些复杂的难以用解析函数或简单的计算机程序表达的系统优化问题。这些系统大概包括以下几种类型:(i)人们对系统的特性和内在规则还不完全清楚,缺乏必要的相关知识,只能把系统当作黑箱来处理;(ii)系统中因素多、关联多,很难用数学模型来表述,或者即使表述出来也难以处理;(iii)系统中含有大量的不确定性,只能用仿真加统计的方法才能对系统性能进行评估。基于仿真的优化的科学问题主要包含两个方面,其一是基于仿真的优化的基本理论,研究仿真优化算法的解的存在性、一致性和收敛性的理论,研究计算复杂性问题与计算代价的估算理论等;其二是基于仿真的优化的计算方法,研究采用基于案例的推理(CBR)方法存储仿真过的案例,研究用“猜想-推理-插值”的方法来精心设计仿真案例的方法,研究控制仿真采样次数和仿真计算代价分配的方法,研究采用并行计算的方法来缩短计算时间的方法。

2.8 复杂供应链系统的理论及应用研究

近年来供应链系统的复杂性问题已经引起了国内外学术界的高度重视。由于供应链系统中存在相当多的复杂性因素,因此很多学者从不同的角度研究和分析了供应链复杂性的构成和原因。供应链的复杂性主要表现为下列三个方面:(1)供应链系统中存在大量的异构性的不确定信息;(2)供应链系统是一种典型的复杂网络,具有复杂网络的共性和特性;(3)供应链系统是高度动态性的系统。

(1) 供应链信息不确定性研究

供应链中存在大量的不确定性因素,这些不确定性信息主要来自供应链的各个环节,是供应链管理和控制复杂性和困难性的主要原因。

供应链中的不确定性信息是多样化的,有些可以通过区间估计、概率估计、随机变量或者随机过程等方式表达不同的不确定性程度,有些信息往往是定性的、残缺不全的、模糊的,是难以量化的强不确定信息。研究重点是如何表示供应链中包括强不确定信息、定性数据等在内的各种不确定信息?如何对这些信息进行分析和综合?

信息不确定环境下的供应链优化与控制的研究重点:(i)不确定性信息在供应链中是怎样传播的?对供应链的性能有怎样的影响?(ii)信息不确定性

导致的风险和供应链系统的鲁棒控制问题;(iii)在不确定环境下,多供应源、多分销渠道的复杂供应链网络结构下的控制和优化方法。

(2) 供应链系统的网络复杂性研究

供应链系统是一种典型的复杂网络,供应链各个组成要素之间相互作用,存在复杂的交互关系。供应链网络复杂性的研究主要包括:(i)如何量化供应链的复杂性?供应链复杂性与供应链系统性能指标之间存在怎样的关系?(ii)如何描述供应链网络的鲁棒性、脆弱性和弹性?如何评估和分析供应链网络的脆弱性?(iii)增强供应链鲁棒性的策略,面对供应链内外部的突发事件,如何增强供应链的弹性、降低供应链的脆弱性、使供应链具有较强的鲁棒性?

(3) 供应链系统的动力学分析

实际的供应链系统中存在巨大的动态性。供应链系统的产生、运作、最终消亡一直到重新形成等等是一个动态变化的过程,供应链组成和供应链组织中都存在复杂的动态性行为。其主要研究包括:(i)多级网络结构情况下的供应链系统的控制问题;供应链动态信息和扰动的预测问题;利用非线性理论、切换系统理论等工具研究供应链中的复杂非线性动力学行为;(ii)针对复杂供应链网络的动态性博弈模型,研究动态博弈中的非理性决策行为、动态博弈的学习模式和策略的挖掘和分析方法、博弈中系统动态行为及其演化过程的动力学分析;(iii)针对复杂供应链网络动态行为的仿真,基于仿真的供应链优化研究。

(4) 供应链应急与干扰管理问题研究

供应链系统处在复杂多变的环境当中,供应链的各个参与主体跨地域、多环节的特征,使得供应链系统容易受到来自系统外部环境和系统内部合作伙伴等众多干扰事件的影响,从而使得事先制定好的最优计划不可行。供应链干扰管理需要针对各种实际问题和干扰事件的性质,建立相应的优化模型和有效的求解算法,快速、及时地给出处理干扰事件的最优调整计划。其主要研究包括:(i)突发事件或扰动的度量方法、影响分析与评价方法;(ii)供应链系统的应急与干扰管理模型与算法;(iii)供应链系统的应急与干扰管理仿真优化。

3 相关建议

为促进我国系统科学与系统工程学科的发展,针对本学科的发展实际,提出以下相关建议:

3.1 面向国家和学科发展需求,重视复杂系统与复杂性科学的研究

自动化学科的发展呈现出数字化、网络化、集成化、智能化、信息化、系统化的特点,所研究系统的复杂程度越来越高,迫切需要在理论指导和研究方法方面的突破,因此复杂性科学在自动化学科中的地位和作用越来越明显。

3.2 注重真实复杂系统的研究

复杂性科学研究的重点应放在:(1)研究具有复杂性特征的真实系统;(2)揭示产生具体复杂性特征的机理;(3)寻求描述和分析复杂系统演化进化的方法;(4)将研究复杂性科学的方法寓于研究具有复杂性特征的真实系统当中。只有面对真实系统,复杂性科学的研究才可能逐步具体和深入,才可能做出具有原创性的研究成果。

3.3 注重本学科与其他学科的交叉和融合,形成新的学科增长点

复杂性科学的研究对象涉及自然、社会、经济、人文、国家安全等多个领域,使得本学科成为一种宏观层面上的具有一定基础性的学科,其学科自身的发展应当不断吸收其他学科的成果,与其他学科进行交叉和融合,促进本学科不断取得新的突破。

3.4 明确系统科学、系统工程学科与自动化学科中的定位

系统科学与系统工程学科的研究更多地强调一般性的理论和方法,这与自动化学科作为应用基础学科的定位是相符的,而且许多本学科研究的基础理论和方法与自动化学科有很大的共同性。

鉴于上述理由,建议国家自然科学基金委员会信息科学部每年在重点项目方面对于本学科给予必要的扶持,同时保持和适当提高面上项目和青年基金的支持力度,优先支持具有一定研究基础和共性的发展方向,稳定研究队伍,吸引更多的学者投入到本学科的研究中来。

(说明:在充分听取本研究领域专家学者及相关科研管理部门的意见和建议的基础上,形成了本调研报告。调研报告中八个科学问题分别由陈禹、郑毓蕃、汪小帆、顾基发、盛昭瀚、王明哲、汪定伟和郭敏等撰写,调研报告由王红卫、余明晖、沈轶和孙长银等统稿。调研报告刊登于《系统科学理论与实践》2008年第28卷增刊。本调研报告着力反映现阶段我国系统科学与系统工程学科的发展现状和未来的发展方向,以期对从事系统科学与系统工程研究领域的专家学者提供一定的借鉴和参考。)

DEVELOPMENT STRATEGY OF SYSTEMS SCIENCE AND SYSTEMS ENGINEERING

Wang Hongwei¹ Sun Changyin^{2,3} Shen Yi¹ Yu Minghui¹

(1 Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

2 Department of Information Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100083;

3 School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract The paper discusses the core scientific issues and development direction of systems science and systems engineering. And the hot areas of research and trends in this field are studied in-depth from the point of view of systems scientific theories, systems engineering methodology and application of demand-oriented nation.

Key words systems science, systems engineering, complex system, scientific problems, development strategy