

复杂工程系统自组织问题研究综述

李秀波, 王大洲

(中国科学院研究生院工程与社会研究中心, 北京 100049)

摘要: 随着科学技术的发展, 产生了许多复杂的工程活动和复杂工程系统。这类工程的要素十分庞杂, 要素之间的非线性相互作用很强, 传统的工程方法已经难以应付。面对这种情况, 人们开始将复杂性科学中的某些思想尤其是自组织理论应用到工程问题中来, 出现了一些应对复杂工程问题的新思路和新方法。本文通过国内外文献综述, 阐明了复杂工程系统的概念及特点, 从三个层面评述了关于复杂工程系统自组织问题的研究进展: 复杂工程系统的自性能、复杂工程系统的自组织机制以及复杂工程系统中自组织与他组织的关系。作者认为, 目前基于模拟仿真而得到的研究成果在工程实践中是否有效, 尚待检验; 关于复杂工程系统的建构, 还需要探讨一般性的原则和规律; 对于复杂工程系统自性能的研究, 与工程实践也有不小差距; 在复杂工程系统建构过程中, 如何权衡自组织与他组织之间的关系, 需要重点展开研究。对于这些问题的探讨, 不仅需要一般意义上的工程科学研究, 也需要工程哲学研究的介入, 尤其是在工程方法论层面, 工程哲学可以做出自己独特的贡献。

关键词: 复杂工程系统; 自组织; 他组织; 自性能; 工程哲学

中图分类号: N 031

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2012)02-0181-09

工程是技术要素和非技术要素的集成过程和集成结果, 工程活动是人类社会存在和发展的基础性实践活动。随着科学技术的发展, 人类的工程活动也在从简单走向复杂。在传统的工程活动中, 需要集成的要素数量及种类相对较少, 要素之间的相互作用方式也比较单一, 可以称之为简单工程活动。人们在从事这类工程活动时, 逐渐形成了一种还原的、线性的工程思维方法。随着人类社会的发展, 产生了许多复杂的工程活动。这类工程活动的要素十分庞杂, 要素之间的非线性相互作用很强, 作为集成结果的工程系统也越来越需要具有开放性和适应性。面对这种情况, 传统的工程方法已经难以为继。

20 世纪中叶以来, 学术界掀起了探索复杂性

科学的热潮。复杂性科学中渗透着某些崭新的哲学思维方式, 这些新的思维方式不但影响着自然科学、社会科学的研究, 而且为复杂工程问题的解决展示了全新的视野。于是, 人们开始将复杂性科学中的某些思想应用到工程问题中来, 出现了一些应对复杂工程问题的新思路。其中, 自组织理论的发展启示工程师将复杂工程系统 (complex engineering system) 看作具有适应性和涌现性的自组织系统, 进而借鉴自组织理论的某些思想, 为解决复杂工程系统的许多难题寻找新的思路。本文旨在通过对相关文献进行综述, 展示有关复杂工程系统的自组织问题的某些最新研究进展, 厘清复杂工程系统自组织问题的研究线索, 并试图识别当前研究的不足之处, 为下一步

研究探明方向。

1 复杂工程系统与复杂系统工程

1.1 复杂工程系统

对于复杂工程系统, 可以从两个层面来理解其“复杂”之处:

第一, 从简单工程系统与复杂工程系统的对比中理解复杂工程系统。在当今社会, 工程系统逐渐由简单走向复杂。苗东升指出工程系统的复杂化表现为: 工程系统要素(价值要素, 技术要素, 科学要素, 管理要素)的复杂化、工程系统结构(知识结构, 过程结构, 信息结构, 价值结构)的复杂化和工程系统环境(科技环境, 文化环境, 社会环境, 自然环境)的复杂化等三个方面^{[1]168-179}。工程系统的复杂化迫使我们不能再将工程系统还原为简单系统, 而应该去面对其越来越凸显的非线性和涌现性。

第二, 从三类复杂系统——复杂自然系统、复杂社会系统、复杂工程系统的比较中认识复杂工程系统^[2]。一方面, 与前两者相比, 复杂工程系统具有复杂系统的共同特征, 例如, (1)是大尺度的, 包含有大量的组分和相互作用; (2)系统的开放性更强, 与环境的联系更加紧密; (3)是实现物质、能量、信息的转换、传导、交换和管控的网络; (4)是在变动中演化的由适应性主体构成的系统^[3]; (5)系统具有涌现的性质^[4]; (6)初始值敏感, 在特定的条件下, 具有自性能的系统可以具有高效的自主完成任务的能力, 但是当初始条件发生细微的变化时, 系统的自性能或许将大大降低等。另一方面, 与复杂自然系统和复杂社会系统相比, 复杂工程系统还具有目的性、人工性、干预性特征^{[1]19-20}。

因此, 需要在认清复杂工程系统的新特点的前提下, 对现有工程方法进行调整和创新, 以适应新时代工程实践的要求。

1.2 复杂系统工程

在现代社会, 越来越多的工程系统表现出复杂系统的特征, 传统的工程方法已不能有效应对复杂工程系统建构中的诸多问题。传统的工程方法适用于建构可还原的系统(reducible systems), 这种可还原的系统不会因分解而有所失, 不会因子系统的组装而带来不可预知的后果。在这样的系统中, 系统的组分(或者子系统)是为人详知的、易于把握的, 而且这些组分(或者子系统)之间的相互作用也是可以预先清楚地加以定义的。相比之下, 具有涌现特质的复杂工程系统, 其某些行为或某些特征是涌现的、不可还原的、不可预知的。所以, 应对复杂工程系统中的问题需要新的工程观和工程方法。

为了更好地建构工程系统, 人们创立了系统工程(system engineering)。作为一门组织管理技术, 系统工程从总体出发, 来统筹协调工程系统的规划、设计、建设、试验和运行^[5]。在应对工程问题时, 系统工程的常规思路是, 回避复杂性、消解复杂性, 忽略系统的涌现特征, 因而这种方法只能适用于相对简单且成熟的工程系统的建构。对于复杂工程系统, 这种思路的局限性越来越明显。为此, 当前许多学者致力于发展复杂系统工程(complex system engineering)^[6], 直面系统的复杂性并利用复杂性, 以便指导复杂工程系统的建构^[7]。这类关于复杂系统工程的方法论探索, 主要受到复杂性科学的启示。人们试图将复杂性科学中的自组织思想运用到复杂工程系统的建构实践中^{[8]6}, 从而找寻解决复杂工程难题的新思路。

可以说, 理清复杂工程系统建构的一般思路, 总结其建构过程中的一般性方法, 不论对工程科学及工程哲学的发展, 还是对工程实践的展开都是很有意义的。然而, 当前的研究还主要集中在科学和工程领域, 而在工程哲学领域, 对复杂工程的反思才刚刚起步^[9]。

2 关于复杂工程系统自性能的研究

系统的自组织过程是系统调节自身以适应环境的过程。系统适应环境时,系统与环境进行稳定有序的互动;一旦这种稳定有序的状态被打破,系统就需要变革自身以重新适应环境,否则就会被迫解体。这样自组织系统在适应环境的过程中表现出某些性能,称为“自性能”(self-property)。自性能是自组织系统所具有的适应环境的能力。因此,建构复杂工程系统,如何使其成为具有自性能的自组织系统,就成为了人们孜孜以求的目标。

由于工程系统尺度变大、复杂性增长所引发的工程问题,促使人们越来越关注系统的可靠性(reliability)、鲁棒性(robustness)、灵活性(flexibility)、进化性(evolvability)等一些系统要求,由于这些术语的英文表达多以“ility”为后缀,西方学者统称之为“ilities”^[10-11]。在传统的工程活动中,人们主要将工程的“功能”作为追求目标,而工程系统研究者认为,人们所追求的并不限于工程系统的功能,还包括“ilities”等非传统的系统属性或目标^[12]。这些“ilities”是工程系统全生命周期的性能(life-cycle property)^[13],是工程实践中系统的功效、性能和架构目标的表征。当然,其中的某些系统要求并不限于复杂工程系统,对一般工程系统也同样适用,如安全性和鲁棒性等。相比之下,目前关于自性能的讨论主要关乎复杂工程系统的建构,所关注的主要是系统的实时应变能力和自组织属性。复杂工程系统的某些自性能的实现无疑有助于其“ilities”的实现,比如说,提升了工程系统的自修复能力,就有助于提高系统的鲁棒性等。

R. Frei 等受到机器人技术和人工智能理论的启示,指出了 12 种对工程有借鉴意义的自性能,包括自适应、自优化、自配置(self-configuration)、自重构(self-reconfiguration)、自组装(self-assembly)、

自拆解(self-disassembly)、自诊断(self-diagnosis)、自修复(self-healing)、自复制(self-reproduction)、自保护(self-protection)、自控制(self-control)、自我管理(self-management)等^[14]。然而,这些自性能之间的关系很复杂,或为包含关系,或为并列关系。其涵义也很模糊,比如自组织就有自我管理之意,而自我管理也有自适应之意,因而需要对这些自性能做进一步梳理。De Wolf 基于分散式自主计算(decentralised autonomic computing)的思路,根据自性能的特征和功能性,提出了几种分类方式,讨论了如何利用恰当的协调机制和测试方法来设计和测试系统的自性能^[15]。

鉴于实际的工程需要和工程系统所处的环境,人们会侧重建构复杂工程系统的一种或几种自性能。这样,实际的工程系统往往因需要具有特定的自性能而各有特点,也各有不同的设计思路。比如 Rzevski 在智能可变形压气机(Intelligent Variable Geometry Compressor)的设计中,引入智能网络的建构思路,旨在形成系统的自适应、自诊断和自修复的能力^[16];H. Gupta 等提出一种基于集中与分布算法来搜索一个节点子集的算法,这种节点子集的优点是能够同时保障网络的覆盖范围和连通性,他将这种算法应用于传感器网络(sensor networks)的建构中,使其具有自组织和自优化能力以降低系统的能源消耗^[17];S.B. Cools 等研究了如何使交通控制系统具有自适应性能的问题,基本目标是,信号灯能根据某一路口的实际情况来决定下一时刻的亮灯方案,从而具有实时反应能力^[18]。可以看出,在设计工程系统时,问题不在于使系统具有尽量多的自性能,而是要依据工程需要和环境条件,突出强调系统的某几种自性能。

在营造工程的自性能时,工程师们需要考虑系统对于其初始状态的敏感性,并试图降低系统的自性能所受到的影响^[8]^[33]。另外,系统要想确保

平稳运行,就必须恰当设定系统的各种参数,而工程师需要监管系统参数的设定过程。这些问题,已经涉及复杂工程系统的自组织机制问题。实际上,复杂工程系统之所以具有某些自性能,正是因为该系统已经具备了某种自组织机制。

3 复杂工程系统自组织机制的研究

复杂工程系统是具有自适应能力的动态演化系统。研究复杂工程系统的自组织机制,有助于引导工程演进方向以符合用户的功能需求,丰富人们建构复杂工程系统的思路。

为了对复杂工程系统进行研究,人们借用了复杂系统的某些研究方法,比如基于 Agent 的建模方法、遗传算法、蚁群优化算法、群集智能 (swarm intelligence)^[19]等。这类研究表明,要形成复杂工程系统的自组织机制,通常需要满足以下前提条件^[20-23]:第一,组成系统的单元必须是自治的,且彼此间存在相互作用;第二,来自系统外部的限定和控制较弱;第三,存在正反馈和负反馈的信息回路;第四,具有防范系统出现有害行为的安全保障;第五,系统内的个体之间除了存在等级关系外,还应存在平等关系。

有关研究特别关注工程系统各单元之间的关系和作用方式。例如,Y. Bar-Yam 指出,为了形成自组织过程,工程系统内的个体既要有个体目标,也要有群体目标,而且个体之间要同时存在基于某种信任的合作和竞争关系^{[24]11}。M. Schut 从群集智能的视角提出,系统建构过程中要善于激发系统的群集智慧,而流言传播(gossip)对于群集智慧的产生发挥着重要作用^[25]。这是因为,个体间直接交流的困难之一是必须事先知道自己交流的对象,而流言传播却可以解决这个问题,允许信息随意传播,这有利于信息以最自然的方式实现共享。通过这样一种协同机制(stigmergy)^[26],就可以使系统在没有外部控制的情况下产生智能

结构,从而进入某种自组织过程。

许多研究将复杂工程系统看作多主体系统,而人或系统中的功能单元可以被看做是系统的主体。工程系统中的主体(agents)通常具有如下几个特征^{[2]267}:第一,自治性,主体能够在没有外界直接操纵的情况下,感知到外部的环境信息,并根据自身状态调整自身行为;第二,交互性,主体能够遵循特定的规则,通过特定媒介,与其他对象进行各种交互行为;第三,多样性和异质性,系统中存在多个主体且具有不同的能力和特征。基于这种认识,有人通过计算机模拟研究了人工生态系统^[27-28]和数字生态系统^[29],得到许多很有启发性的结论。例如,为了形成复杂工程系统的自组织机制,系统内部要存在一定的冗余度,系统在应对特定问题时要同时存在多种方法,或者系统内部要同时存在多个可以发挥同一功能的功能单元;系统内部的管理要分散,避免过于集权,还主体以自主行动的空间;注重自下而上的适应性调整,通过调整局部来影响整体;尽量避免主体间的直接交流,转而使主体通过信息共享平台获取信息;成功的策略可以系统各层级间推广,从而实现自相似的策略结构;倡导渐变,避免突变,使系统的进化过程平稳有序;系统的目的指向要多样化,以便使系统同时去实现多个目标等。这些结论对于复杂工程系统的建构同样具有重要意义。

如何在现实世界使得一个工程系统能够真正进入自组织过程,或者说如何在复杂工程系统的实际设计过程中体现出自组织原则?对于这个问题的解答,仍然离不开模型仿真方法。例如,Gardelli 提出了主体-人造物元模型。该模型将主体作为具有目的导向的实体,而人造物则被主体建构出来为主体服务^[30]。该模型中,特定主体的环境包括人工物和其他主体,该主体需要与其环境中的其他主体实现信息反馈。他认为,在建模

阶段,主体的行为是设定的,系统的结构只有粗略的框架。在模拟阶段,需要核实主体与结构的吻合度。在调整阶段,系统参量需要为实现系统行为最优化的过程而调整。通过模拟,有可能找到营造自组织机制的基本策略。类似的,Rzevski认为,在复杂工程系统的设计中,不能将其看作简单的集成装置,而应该被看做是具有自适应能力的智能网络^{[16]1-2}。基于这种认识,他提出复杂工程系统的运行包含三个步骤:感知阶段,能够检测和预知环境的变化;识别阶段,判断所感知到的变化,并决定要采取的最优行动;执行阶段,具体采取有关行动。他将这种思想具体应用于智能变形压气机和空间探索机器人群的设计过程中。尽管通过计算机建模得到的结论不易直接应用到工程实践中,但是对于理解复杂工程系统的自组织机制还是颇有裨益的。

复杂工程系统作为人工系统,是动态发展和演化的系统^[31]。如何从系统/环境间关系的角度找到复杂工程系统自组织机制的突破口,是一个显而易见的问题。在这方面,Bar-Yam 从生物进化论得到启发,提出“进化工程”(evolutionary engineering)^{[24]8[32]}的概念。进化工程强调系统内的竞争和创新环境的营造,强调主体的学习能力的提升,在进化中优化自组织系统。他指出,在复杂工程的情况下,为了实现某种功能需求,要有多个竞争主体,而不是像传统工程那样,一个主体对应一种功能需求。这样,通过设计者以及执行者内部的竞争,可以找到工程问题的满意解决方案。另外,他还提出,当系统某个组分或者部件需要更新或者升级时,不要鲁莽更替组分或元件,而是使老组分和新组分共同存在,以便在竞争中将优良组分逐步引入系统之中。这种“开明的”(enlightened)进化工程注重营造进化的环境,强调进化的过程而不是进化的具体结果。据此,Bar-Yam 提出了以下原则:(1)通过改变系统所处的环境条件,来影响工程系统的演化方向;(2)根据

系统演化所处的阶段采取不同的作用方式;(3)为促进发展建立激励机制,比如建立赏罚机制和满意标准等;(4)确保能准确及时地获取系统所处的状态信息,这有利于个体及时做出判断以保持与系统的演化进程相一致;(5)建立并实施系统内部的安全措施。

还有一种研究复杂工程系统的自组织机制的思路,就是在特定的工程系统的设计和建构实践中,通过具体的案例研究,找寻和验证有关自组织原则。例如,C. Prehofer 等讨论了通讯网络中的自组织过程,以及自组织通讯网络的基本原理和设计模式^[33]。G. Baldassarre 基于玻尔兹曼熵理论,对分散机器人群的自组织过程进行研究,认为分散机器人群中的自组织过程可以看做一种相变过程^[34]。他们的工作使复杂工程系统自组织机制的建构理论开始具有了实用性。国内学者高金吉等,则从工程安全出发,研究了复杂工程系统灾害形成的过程,讨论了系统如何通过自身的自组织过程实现其自愈防范能力^[35]。

不论是哪种思路,都是从不同角度寻找建构复杂工程系统的一般原则或规律,都有助于使复杂工程系统的自组织机制逐渐清晰,从而有利于人们建构更加合意的工程系统。

4 复杂工程系统建构中自组织与他组织的关系

工程系统是一种人工系统,是人类设计、制造、运行和控制的系统,本身渗透着人的目的取向,具有典型的他组织特征,因此,工程系统首先是他组织系统。而复杂工程系统的出现,则要求营造自组织机制。人对工程过程的他组织,是引导工程演进方向符合人的功能需求的手段,而自组织则是利用系统的自组织特征来实现这一需求的必要策略。复杂工程系统的建构与演化,既离不开他组织,也离不开自组织。因此,正如 J. Buchli 所指出的,自组织与他组织之间的权衡问题是思考复杂工程系统建构的基本问题之一^{[36]1}。

对于复杂工程系统来说, 自组织固然重要, 但是, 如果过分强调自组织, 系统也有可能存在问题^[37]: 其一, 不能利用系统的各种整体信息, 是资源的严重浪费。其二, 自组织建立在个体间的自发性基础上, 完全靠自发行为去协调行为、把握系统的整体目标, 属于一种随机搜索, 效率低下。其三, 个体的自发行为必然导致系统整体行为的波动, 这种波动可能被系统自身和环境的非线性因素放大, 导致系统失稳, 甚至崩溃。因此, 在系统自组织过程中施加适当的他组织作用, 有利于限制和克服自组织的缺陷, 使系统产生出最佳的整体涌现行为。因而, 复杂工程系统的建构过程中, 既需要自组织, 也需要他组织。

那么, 自组织和他组织之间究竟是什么关系? 具有自组织能力的系统, 在建构之初, 设计者通过设定系统的参数和规则来使系统行为在设计者的预期范围内, 能够体现人的目的指向。当系统形成后, 系统通过自身的自组织来实现自我调节。但是, 由于系统的自组织过程具有一定的盲目性, 其行为或许会超出人的预期范围, 这时, 就需要工程师及时识别系统的行为趋向, 随时通过改变规则或参数来影响系统。因而, 自组织系统需要具有可修改性。复杂工程系统的可修改性是解决自组织与他组织关系的必要条件。为此, J. Buchli 将描述复杂工程系统行为的参量定义为有序参量, 将影响有序参量的因素定义为控制参量, 进而将控制参量分为约束参量和非约束变量——前者由工程师设定(他组织), 而后者则由系统内部自行决定(自组织)^{[36]3-5}。根据这个思路, 如果进一步将这些参数形式化, 甚至用计算机语言来表达, 对于工程师而言将会非常易于操作。不过, 如何在现实工程实践中运用这一思路, 厘定各个参量并施加控制, 还有待于进一步探讨。

从复杂工程系统的行为分类入手, G. Di Marzo Serugendo 讨论了系统自组织与他组织的权衡^[38]。

他将系统的行为分为预想行为(desired performance)、容许行为(allowed performance)和可能行为(possible performance)三类。当系统行为表现为预想行为时是一种理想状态; 当表现为容许行为时, 则通过系统的自组织能力回到“预想行为”中; 当表现为可能行为时, 则通过他组织来调节系统并回到“容许行为”中。这样, 通过监测和调节系统行为, 平衡自组织与他组织, 就可以使系统满足人的要求。不过, 要将允许行为调节到预想行为, 将可能行为调节到容许行为, 需要相应的“自组织能力”或“他组织能力”, 而这些能力如何构建, 则是一个尚待探讨的问题。

自组织和他组织之间的平衡问题, 也可以理解为关于复杂系统的管理问题。T. Choi 等分析了作为复杂适应系统的供应网络, 他提出, 管理者要恰当平衡网络控制与系统功能涌现之间的关系^[39]。M. Ulieru 认为复杂工程系统内的组分应该具有自组装—自拆解—再组装的进化能力, 从而使工程系统能随着环境的变化而进行适应性调整。他进而提出, 可以利用工程系统中组分层次的正反馈与负反馈机制, 来实现系统的自我控制。这样, 设计者可以通过设定规则来影响组分的行为, 进而影响系统的自组织过程^[40]。

人们在设计工程系统时, 总是试图寻找最优的设计方案, 消除冗余, 实现系统的简约。但是, D. J. Fisk 根据网络理论指出, 缺乏冗余的系统, 其恢复力(resilience)也会不足, 也就不能具有适应力, 最优性与恢复力之间的权衡是许多网络系统(如通讯网络和电力网络)是否可以良性运行的决定性因素之一^[41]。从这个意义上看, 最优性与恢复力之间的权衡问题, 是解决自组织与他组织之间的权衡问题的突破口, 也是营造复杂工程系统自组织机制的基本路径之一。

上述研究对于思考复杂工程系统建构过程中自组织与他组织之间的权衡问题, 非常有启发意义, 为进一步研究和思考指明了可能的方向。

5 总结

综上所述,目前关于复杂工程系统的自组织机制的研究尚处于起步阶段,还没有形成完整的理论体系,存在着许多尚待进一步思考的问题:

(1) 工程实践所需要的是可信赖的、成熟的方法。只有确保系统的行为能被有效控制,自组织方法才可能在工程中的应用。而这些新思路和理论多来自于自组织理论以及人工智能等领域的研究成果,在工程实际应用中是否能真正有效?尚需要进一步检验^{[8]33}。

(2) 对于复杂工程系统的建构理论,尚缺乏一般性的原则和定律,虽然 J. Buchli 试图进行梳理和总结^{[36]5-8},但还是比较初级,相信这方面的努力将有利于复杂系统工程研究走向成熟。

(3) 对于复杂工程系统的自性能的研究,虽然有所进展,但是这些自性能之间关系混乱,也不容易识别和利用,与工程应用尚有差距。

(4) 复杂工程系统建构过程中,自组织与他组织之间的权衡问题,仍然需要进一步研究。这个问题既关系到系统的自组织过程能否平稳进行,也关系到复杂工程系统的建构能否合乎人们的需要。

这些方面应该成为下一步研究的重点问题。对于这些问题的探讨,不仅需要一般意义上的工程科学研究,也需要工程哲学研究的介入。尤其是在工程方法论层面,工程哲学可以做出自己独特的贡献。的确,对于复杂工程系统的建构,工程方法论探索具有十分重要的意义^[42]。当前,对于复杂工程系统建构问题的探讨,最主要的方法还是计算机建模,这是比较可行且必不可少的方法。但是,由于建模与工程实际之间具有不可消除的距离,这就决定了计算机建模方法具有诸多缺陷。为此,借鉴针对蚁群、社会系统以及人工生态系统的研究成果,根据复杂工程系统的特征做进一步探索,仍然是一个基本研究策略,至少可以增进计算机建模以及物理模拟的可靠性。接下来,为了得到可靠的结果,还需要将由此得到

的某些结论应用到实际工程系统的建构中,在工程实践中加以检验,在验证理论有效性的同时,加深对复杂工程系统建构方法的认识。在这样一个探索进程中,包含着许多方法论问题,例如复杂工程系统建模的基本原则和有效性问题、计算机模型和物理模型的关系问题、工程模型与现实工程的关系问题等,都需要从工程哲学层面展开深入研究。对于这些问题的解答,无论是对复杂系统工程的发展,还是对于复杂工程系统的建构,都将具有重要的启发意义。

参考文献

- [1] 李喜先. 工程系统论[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 李士勇, 田新华. 非线性科学与复杂性科学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 161-162.
- [3] 霍兰 J H. 隐秩序: 适应性造就复杂性[M]. 周晓牧, 韩晖, 译. 上海: 上海世纪出版集团, 2011: 40.
- [4] 霍兰 J H. 涌现: 从混沌到有序[M]. 陈禹, 等, 译. 上海: 上海世纪出版集团, 2006: 231.
- [5] 孙东川, 林福永, 孙凯. 系统工程引论: 第2版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 19.
- [6] Kuras M L. Complex-System Engineering[R/OL]. [2012-04-05]. <http://cs.calstatela.edu/wiki/images/c/c5/Kuras.pdf>.
- [7] 费奇, 王红卫, 陈学广, 等. 复杂系统工程研究[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 641-650.
- [8] Frei R, Serugendo, Giovanna Di Marzo. Advances in complexity engineering[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2011, 3(4).
- [9] 秦书生. 论复杂性工程观[J]. 系统科学学报, 2007, 15(1): 97-100.
- [10] ESD Symposium Committee. ESD Terms and Definitions: version12[R/OL]. MIT, 2001. <http://esd.mit.edu/wps/esd-wp-2002-01.pdf>.
- [11] Moses J. Foundational Issues in Engineering Systems: a Framing Paper[R]. Engineering Systems Symposium, 2004: 6.
- [12] Olivier L De Weck, Daniel Roos, Christopher L. Magee. Engineering Systems: Meeting Human Needs in a Complex Technological World[M]. MIT Press, 2011: 65-96.
- [13] 秦咏红, 吕乃基. 工程系统的复杂性特征研究初探[J]. 系统科学学报, 2011, 19(4): 18-20.
- [14] Frei R, Barata J. Distributed systems-from natural to engineered: three phases of inspiration by nature[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2010, 2(3/4): 258-270.
- [15] De Wolf T, Holvoet T. A taxonomy for self-*properties in

- decentralised autonomic computing[M]//Parashar M, Hariri S. *Autonomic Computing: Concepts, Infrastructure, and Applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007: 101-120.
- [16] Rzevski G. Designing complex engineering systems[R]. Samara, Russia: Volga Conf. on Complex Adaptive Systems, 2004.
- [17] Gupta H, Das S, Gu Q. Connected sensor cover: Self-organization of sensor networks for efficient query execution[J]. In Proc. of Mobihoc, 2003.
- [18] Prokopenko M. *Self-Organization: Applied Multi-Agent Systems*[M]. London: Springer, 2007: 41-49.
- [19] Kennedy J, Eberhart R C. *Swarm Intelligence*[M]. 2001. <http://euler.nmt.edu/~jstarret/530/AgentBasedModels/SITutorial1205.pdf>.
- [20] Heylighen F. The science of self-organization and adaptivity[M]//Kiel E. *The Encyclopedia of Life Support Systems: Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity*. Oxford, UK: EOLSS Publishers, 2003:1-26.
- [21] Di Marzo Serugendo G, Gleizes M P, Karageorgos A. Self-organisation and emergence in MAS: An overview[J]. *Informatica*, 2006, 30: 45-54.
- [22] Correia L. Self-organised systems: fundamental properties[J]. *Revista de Ciencias da Computacao*, 2006, 1(1): 1-10.
- [23] De Wolf T, Holvoet T. Emergence versus self-organisation: Different concepts but promising when combined[G]//Brueckner S A, Di Marzo Serugendo G, Karageorgos A, et al. *Engineering Self-Organising Systems: Methodologies and Applications*. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 1-15.
- [24] Bar-Yam Y. About engineering complex systems: Multiscale analysis and evolutionary engineering[G]//Brueckner S A, Di Marzo Serugendo G, Karageorgos A, et al. *Engineering Self-Organising Systems: Methodologies and Applications*. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [25] Schut M. On model design for simulation of collective intelligence[J]. *Information Sciences*, 2010, 180: 132-155.
- [26] Bonabeau E. Editor's Introduction: Stigmergy[J]. *Special issue of Artificial Life on Stigmergy*, 1999, 5(2): 95-96.
- [27] Brueckner S. Return from the ant-synthetic ecosystems for manufacturing control[D]. Berlin: Institute of Computer Science, Humboldt-University, 2000: 126-128.
- [28] Paruna H V D, Sauter k J, Clark S. Toward the specification and design of industrial synthetic ecosystems[R]. London: 4th Int. Workshop on Intelligent Agents IV, Agent Theories, Architectures, and Languages(ATAL), 1998: 45-59.
- [29] Wu C, Chang E. Exploring a digital ecosystem conceptual model and its simulation prototype[R]. Vigo, Spain: IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics, 2007: 2933-2938.
- [30] Gardelli L, Viroli M, Casadei M, et al. Designing self-organising environments with agents and artifacts: A simulation-driven approach[J]. *Int. Journal of Agent-Oriented Software Engineering*, 2008, 2(2): 171-195.
- [31] 刘刚, 王越, 周思永. 基于人工系统的系统理论提纲[J]. *系统工程与电子技术*, 1998(7): 27-31.
- [32] Bar-Yam Y. When systems engineering fails- toward complex systems engineering[J]. *IEEE Int. Conf. on Systems, Man & Cybernetics*, 2003, 2: 2021-2028.
- [33] Prehofer C, Bettstetter C. Self-Organization in Communication Networks: Principles and Design Paradigms[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(7): 78-85.
- [34] Prokopenko M. *Self-Organization: Applied Multi-Agent Systems*[M]. London: Springer, 2007: 127-146.
- [35] 高金吉, 杨剑锋. 工程复杂系统灾害形成与自愈防范原理研究[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(9): 15-22.
- [36] Buchli J, Santini C. Complexity Engineering, Harnessing Emergent Phenomena as Opportunities for Engineering[R/OL]. New Mexico: Santa Fe Institute Complex Systems Summer School, 2005. <http://www.buchli.org/jonas/publications.html>.
- [37] 苗东升. *系统科学精要*[M]. 第3版. 北京: 中国人民大学出版社, 2010: 170.
- [38] Di Marzo Serugendo G. Robustness and dependability of self-organising systems: a safety engineering perspective[R]// *International Symposium on Stabilization, Safety, and security of Distributed Systems*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 254-268.
- [39] Choi T, Dooley K, Rungtusanatham M. Supply networks and complex adaptive systems: Control versus emergence[J]. *Operations Management*, 2001, 19: 351-366.
- [40] Uliuru M, Doursat R. Emergent engineering: a radical paradigm shift[J]. *Int. J. Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 2011, 4(1): 39-60.
- [41] Fisk D J. Engineering complexity[R]. *Interdisciplinary Sci. Rev.* 29, 2004: 151-161.
- [42] 宋国宁, 张宇. 大型复杂工程系统研究开发中的方法论问题[J]. *模式识别与人工智能*, 2000, 6, 13(2): 170-173.

A Review of Researches on the Self-organization Issue Concerning Complex Engineering Systems

Li Xiubo, Wang Dazhou

(Center for Engineering and Society, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the development of science and technology, engineering practices have become more and more complex, which have resulted in a great deal of complex engineering systems. The elements of such systems are so numerous and jumbled, and the nonlinear interaction between the elements is so strong that traditional engineering methodology is no longer suitable to cope with such kind of engineering practices. Under such circumstances, some thoughts from complexity science, especially those of self-organization theory, have been drawn to solve the complex engineering problems. And some new ideas and methods have thus sprung out. Based on the literature review, the authors of this thesis clarify the concept of complex engineering system and its features. Besides, they also discuss the latest progress of the research on self-organization issue concerning complex engineering system from three aspects: on the self-property of complex engineering system, on the self-organizing mechanism of complex engineering system and on the relationship between self-organization and hetero-organization in complex engineering system. The effectiveness of the research from simulation still needs to be tested through the real engineering practice. The general principles and laws of constructing complex engineering system still need to be explored. The research on self-property of complex engineering system could not satisfy the need of engineering practice. And the problem of how to balance the relationship between self-organization and hetero-organization in constructive process of complex engineering system needs to be further studied. Dealing with all these problems requires not only the advancement in engineering science, but also the contribution of engineering philosophy, which is especially useful to the development of engineering methodology.

Key words: complex engineering system; self-organization; hetero-organization; self-property; engineering philosophy

书 讯

《像工程师那样思考》一书出版

时逢我国工程教育专业认证试点工作的展开与卓越工程师计划的实施之际,由潘云鹤主编的《跨学科工程研究丛书》中的一本——《像工程师那样思考》日前在浙江大学出版社出版,该书为中文版,30万字,定价48元,ISBN 978-7-308-09445-0。

该书作者戴维斯(Michael Davis)是伊利诺斯州理工大学的哲学教授,也是一位高产的作家。他共发表了上百篇工程伦理方面的文章,其中最新的著作有《职业、章程与伦理》和《工程伦理学》。2006年,他曾为中文读者撰写论文《工程职业与伦理章程》,发表在《工程研究——跨学科视野中的工程》第三卷年刊上。

该书英文版是牛津大学《实践与职业伦理系列丛书》中的一本,网络图书馆 Netlibrary 收录了其电子版。中文版译者为浙江大学丛杭青教授等。

该书有两大特点:首先,内容覆盖面较全,涉及近10年来工程伦理的热点问题;其次,作者对问题的思考有一定的深度,而且作为工程伦理界的元老级人物,他的观点在学术界有广泛的认同度。

(沈琪 供稿)