

文章编号: 1000-8152(2005)04-0604-05

复杂系统研究中几个值得关注的问题

王成红¹, 王飞跃², 宋 苏¹, 贺建军³

(1. 国家自然科学基金委员会 信息科学部, 北京 100085; 2. 中国科学院 自动化研究所 北京 100080;

3. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 阐述了作者关于复杂系统、复杂性特征、复杂性科学研究的对象以及复杂系统的控制等若干问题的看法, 讨论了非线性系统、混沌系统和不确定系统等与复杂系统之间的关系, 指出了复杂系统的控制与传统意义下的控制的区别, 强调复杂性科学研究的对象应重点面向具有复杂性特征的真实系统.

关键词: 复杂系统; 复杂性特征; 复杂系统的控制

中图分类号: N94 **文献标识码:** A

Some key issues in studying complex systems

WANG Cheng-hong¹, WANG Fei-yue², SONG Su¹, HE Jian-jun³

(1. Department of Information Science, Committee of National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China;

2. Institute of Automation, Chinese Academy, Beijing 100080, China;

3. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: This paper presents some of our perspectives on complex systems, characteristics of complexity, objectives and controls of the studying science of complexity. The relationship among nonlinear systems, chaotic systems and uncertain systems etc. is investigated. The difference between the control of complex systems and the control in conventional sense is revealed. It is emphasized that the objectives of the studying science of complexity should be some real systems possessing characteristics of complexity.

Key words: complex system; characteristics of complexity; control of complex systems

1 引言 (Introduction)

复杂性科学是一门研究复杂系统及其复杂性现象的新兴科学. 那么, 什么是复杂系统呢? 欧洲学派称^[1,2]: 耗散结构系统 (普利高津), 非平衡相变系统 (哈肯) 和自组织进化系统 (艾根); 美国学派称^[3]: 基于秩序和混沌边缘的系统 (朗顿等) 和复杂适应系统 (霍兰德等); 中国学派称^[4,5]: 复杂的开放巨系统 (钱学森、戴汝为和于景元等). 上述 3 种观点虽然彼此之间相互联系, 但研究的侧重点各不相同. 粗略地讲: 欧洲学派侧重于从能量和相变的角度研究复杂系统; 美国学派侧重于从秩序和规则的角度研究复杂系统; 中国学派则侧重于从系统整体以及系统与外部联系的角度研究复杂系统. 值得说明的是, 尽管普利高津、特别是哈肯和艾根等所研究的系统属于复杂系统, 以及他们所建立的概念体系和方法论在现代复杂系统的研究中常会用到, 但他们并没有强调自己所研究的系统就是复杂系统. 真正强调或明

确表明自己所研究的系统为复杂系统的是圣菲研究所的创始者——考温和盖尔曼等 (1984 年) 以及复杂开放巨系统学说的创始人钱学森、戴汝为和于景元等 (1986 年).

复杂性科学虽然在过去 40 多年、特别是近 20 年的研究中取得了一些进展, 但总的说来还处于初创期. 自然界和人类社会中复杂系统的多样性以及复杂现象的难于理解性, 使得人们至今仍无法给出“复杂性”和“复杂系统”的确切定义. 然而这并没有妨碍复杂性科学的发展, 越来越多的科学家正在对“复杂性”和“复杂系统”产生兴趣, 一个大范围、跨学科的研究局面正在形成. 但是应当看到, 不同学科领域科学家的加盟一方面拓宽了复杂性科学的研究范围, 丰富了人们对复杂系统的认识, 另一方面却使得本来就不太确切的“复杂性”概念更加模糊不清. 因此, 及时地对复杂性科学研究中的一些概念加以归纳和总结、并不断地澄清一些模糊认识就显得尤为

重要.正是基于此目的,本文阐述了作者对复杂性科学研究中几个值得关注的问题的看法.

2 复杂系统与复杂性特征 (Complex system and characteristics of complexity)

尽管不同人对复杂系统的理解存在差异,但有一点却是“共识”的,即:复杂系统是由众多组分(或子系统)组成的,系统的整体行为或特性(特征)不能由其组分的行为或特性来解释.这种“共识”通常被人们粗略地说成为“整体不等于部分之和”.这种“共识”暗示着自然界和人类社会中的全部系统可以分成两类:一类是“系统的整体行为或特性可由其组分的行为或特性来解释”;另一类是“系统的整体行为或特性不能由其组分的行为或特性来确定”.进一步地,这种“共识”还暗示着,前一类系统可称为“简单系统”,后一类系统则可称为“复杂系统”.从方法论上讲,简单系统可由“还原论”方法来处理,复杂系统则不能用“还原论”方法来解释.既然还原论方法不再有效,那用什么方法来处理复杂系统呢?普利高津和哈肯等提出了“序参量”方法,圣菲研究所的创始者们提出了“规则加计算机模拟”^[6]的方法,钱学森和戴汝为等提出了“从定性到定量综合集成的研讨厅体系”^[4,5]方法,而欧阳莹之则提出了“自上而下的综合微观分析”^[7]方法.上述“共识”抓住了复杂系统的本质,也有利于人们对复杂系统有一个比较清楚的认识.

一般地讲,复杂系统具有多种整体行为或多种整体特性,“共识”中所讲的整体行为或特性是指全部整体行为或全部整体特性的总和.就一个具体系统来说,若至少有一种整体行为或特性不能由其组分的行为或特性来解释就可称作复杂系统,而不是所有的整体行为或特性都不能由其组分的行为或特性来解释才可称为复杂系统.例如,先天性聋哑人是一个复杂系统,其宏观(整体)特征之一是聋哑,其微观解释是基因(组分)的相应片段发生了变异,或简单地说,先天性聋哑可由基因变异来解释;但先天性聋哑人的社会行为(一种整体行为)就不能用其基因的行为来表述.因此,“共识”还可以作为复杂系统的一个判据.上面的例子说明,简单系统只具有简单性(总体等于部分之和);复杂系统不仅具有复杂性(总体不等于部分之和),而且还可能具有简单性.这就提出了一个问题:对于一个给定的复杂系统,哪些整体行为或特性可由其组分的行为或特性来解释,哪些整体行为或特性则不能由其组分的行为或特性来描述?

复杂系统的组分具有多层次性或多尺度性^[8].不同层次或不同尺度的组分不仅有各不相同的结构,而且有各不相同的特性.同层次或同尺度的组分之间具有较强的相互作用,不同层次或不同尺度的组分之间的相互作用的规律大不相同.因此,不同层次或不同尺度的组分的行为或特性一般需要不同的概念来刻画;处于某一层次的概念与相隔很远的层次上的概念几乎没有什么关系^[7].例如,人是由生物大分子、细胞和器官等不同层次和不同尺度的组分组成的,描述上述各组分概念分别由分子生物学、细胞学和组织学等来确定,且这些概念一般不能相互套用.因此,对于一个复杂系统来说,正确区分和界定不同层次的组分并建立相应的概念来刻画它们是至关重要的.

由众多组分组成的复杂系统可能产生涌现特征.在自然界和人类社会,涌现的含义包括两个方面:1)有序和结构的自发形成,如大气中的“台风”、互联网中的“小世界”以及人类社会中的“经济组织”和“政党”等都是涌现;2)从一种序和结构变成另外一种序和结构,如物理系统中的相变等.涌现特征更多属于系统的结构方面,是系统的组分通过自组织产生的.涌现特征往往具有新奇性和特殊性,因为它与其组分的特征不仅定量而且定性不同.欧阳莹之在其著作《复杂系统理论基础》^[7]中给出了涌现特征的3个判据:“首先,一个整体的涌现特征不是其部分的特征之和;第二,涌现特征的种类与组分特征的种类完全不同;第三,涌现特征不能由独自考察组分的行为中推导或预测出来.”需要说明的是,组合大系统更容易产生涌现特征.例如,人类发展史上不少小民族和部落只有自己的语言却没有自己的文字(文字的产生和使用可以看作为一种涌现现象),而几乎所有的大民族不仅有自己的语言同时也有自己的文字;一个实验室中的几台计算机连接在一起不能算作复杂系统,但数千万台计算机连成的互联网络就会出现“小世界”现象.

谈到涌现一般会谈到自组织.涌现的形成伴随着系统新结构的出现,是系统部分或全部组分自组织的结果.可以说,没有自组织就没有涌现.欧阳莹之在其著作《复杂系统理论基础》^[7]的第8章中讲到:“在平衡系统对称破缺过程中,新结构的自发形成常常称为自组织.”自然界和人类社会已知的现象告诉我们,涌现和自组织是一对“双胞胎”,所不同的是,涌现强调的是系统的宏观结构,而自组织强调的是系统组分之间的相互作用.

复杂系统具有进化特征.系统进化指的是系统的组分、规模、结构或功能等随着时间的推移朝着更有利于自身存在的方向发展变化.作者不笼统地讲复杂系统具有演化(演化与变化在概念上很难区别)特征是因为演化特征不为复杂系统所独有,或者说任何系统(不论简单系统还是复杂系统)都具有演化特征.复杂系统的进化是复杂系统自我调整、自主适应内外环境变化的结果.

3 复杂系统与其它几类系统之间的关系 (Relationship among complex systems and other kinds of systems)

有人将“非线性系统”和“复杂系统”看作为一回事,或者将非线性特征看作为复杂系统的特征.其实,非线性仅仅是复杂系统的必要条件而不是充分必要条件^[1].换句话说,任何复杂系统都是非线性的,但不是所有的非线性系统都是复杂系统.严格地讲:自然系统和人造系统都是非线性系统,但不能说他们都是复杂系统;一个稳压电源是一个非线性系统,但不能说它是一个复杂系统;否则,人们研究和发非线性科学就够了,还有什么必要再创立和研究复杂性科学?

有人将混沌系统看作为一类复杂系统,其理由是:1)混沌系统的行为具有长期不可预测性;2)混沌系统具有宏观结构.米歇尔·沃尔德罗德普在《复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学》^[3]一书的序言中指出:“每一个这样自我组织的、自我调整的复杂系统都具有某种动力”,“这种特殊的动力对离奇古怪的、无法预测的螺旋运转,即被称之为混沌的状态,却还相距遥远”.伍尔弗雷姆从动力学角度出发,将系统分成四类.他认为混沌系统属于第3类系统,而复杂系统属于第4类系统^[3].朗顿称复杂系统为处于秩序与混沌边缘的系统^[3].总之,上述3人均认为混沌系统不是复杂系统.我们认为,混沌系统不应算作复杂系统,至少确定性混沌系统(由确定性微分方程或差分方程描述的混沌系统)不应算作复杂系统;理由是:1)对于一个给定的混沌系统和一个足够大的时间 T 或迭代步数 N ,虽然作者在开始的时候并不知道系统处于什么状态,但知道 T 时刻或 N 步之后系统必定处于状态空间中一个确定的状态;2)混沌系统虽然具有宏观结构,但这种结构不是自发涌现出来的.

有人认为“子系统众多的大系统或巨系统就是复杂系统”.其实,判断一个系统是否为复杂系统应根据该系统的整体行为是否具有复杂性特征,而不

是根据该系统所包含的子系统的数量和度量尺度上的大小.有的系统包含的子系统并不多,但各子系统之间的相互作用关系却非常复杂,这样的系统有可能成为复杂系统,如天体中的双星系统和日、地、月系统(三体问题)等.生物大分子和细胞不能算大,但却是复杂系统.另一方面,由复杂子系统组成的小系统还是复杂系统,如一个家庭、一个猴群等.相反地,由众多种类单一、相互作用关系单一和行为特性单一的子系统所组成的大系统也可能是简单系统,如一杯纯净的水(由众多水分子组成).需要注意的是,上述论述只是理论上的.在自然界,子系统足够多的大系统更容易演变成为复杂系统,如湿地和海洋等;另一方面,就同类复杂系统而言,子系统多的复杂系统较子系统少的复杂系统具有更高的复杂性,如大国与小国、Internet网络与局域计算机网络等.原因在于,自然界中的大多数系统不可能象理论假设的那么简单.有人将“强耦合和高度不确定性系统”视为复杂系统.子系统或组分之间的耦合太强就会形成刚性的、毫无生气的机械系统;耦合太弱不利于产生自组织和涌现现象,因而也很难形成复杂系统.因此,复杂系统各子系统或各组分之间的耦合既不可能太强也不会太弱,究竟强或弱到什么程度要视具体系统而论.严格地讲,任何自然系统和人造系统都是不确定的,即不确定性是一切系统的普遍特征.如同非线性性一样,不确定性只是复杂系统的必要条件而非充分必要条件.由已有的观测和研究可知,复杂系统是一类既非确定又非高度不确定的系统.综上所述,我们还没有足够的证据可以说明“强耦合和高度不确定性系统”就是复杂系统.

有人把“动力学方程复杂且阶数高的系统”当作复杂系统.系统的方程复杂是否就一定意味着系统的行为复杂,系统的行为复杂是否就一定意味着系统的行为具有复杂性特征(自组织、自调整、自适应和涌现等),或者说动力学方程复杂的系统就是复杂系统?已有的研究表明:一个简单的动力学方程可以导致复杂的动力学行为;一个复杂的动力学方程可能只有几个孤立的解.因此,方程是否复杂既不是复杂系统的必要条件也不是复杂系统的充分条件.

有人认为“已被认识的系统就是简单系统,未被认识的系统就是复杂系统”.“往石灰水中吹一口气,就有白色碳酸钙粉末生成”是一个早被认识的化学反应过程.但这个化学反应过程却是一个复杂系统,一是因为有了新的物质——碳酸钙生成,二是因为碳酸钙的化学性质不能由其组分碳和钙的化学性质来

确定.在人类已经认识的系统当中,的确有许多系统是简单系统,如单摆系统和大多数实际运行的人造机械系统等,另外也有许多系统是复杂系统,如各种化学反应系统等.同样,在人类还未认识的更多系统当中、特别是非线性系统当中,肯定既有复杂系统也有简单系统.还是那句话,判断系统是否为复杂系统,不能以是否被“认识”作为标准,而只能以是否具有复杂性特征作为标准.

4 复杂性科学研究的对象 (Studying objectives of complexity science)

复杂性科学从诞生到现在已有 20 多年的历史了,现在还问“复杂性科学研究的对象是什么”似乎可笑,但这个问题并没有解决.按说复杂性科学研究的对象应该是复杂系统,但复杂系统到现在还没有一个统一的定义,换句话说,作者还说不清楚什么是复杂系统.但这并不妨碍对复杂系统开展研究,因为作者对“复杂系统”并非一无所知,实际上,作者已经掌握了“复杂系统”的一些特征.因此,复杂性科学研究的对象应该是具有复杂性特征的系统.

本文的第 2 部分已列出了复杂系统的一些特征,这些特征既不全面且在内涵上也不完全独立,随着研究的深入,人们还会发现新的特征.目前,复杂性科学研究的现状是方法论层面的研究偏多,针对具有复杂性特征的真实系统的研究偏少.作者认为今后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.

5 复杂系统的控制 (Controls of complex system)

复杂系统的控制在概念上与传统意义下的控制有什么不同?为了搞清这个问题,先回顾一下传统意义下的控制.传统控制的目的是:根据被控对象和环境的特性,通过能动地采集、运用信息并施加控制作用,使系统在变化和不确定条件下,按照预期的行为过程运行并具有和保持预定的功能.这里需要特别强调的是:虽然被控对象和环境特性是变化的和不确定,但“预期的行为过程”和“预定的功能”却是已知(事先设计好)和确定的;传统控制并没有明确强调系统内部各子系统或各组分在外界控制作

用下会产生自组织和涌现现象.复杂系统控制的目的是:根据被控对象和环境的特性,通过能动地采集、运用信息并施加控制作用,使系统内部各子系统或各组分在外界控制作用下产生自组织和涌现现象,这种自组织和涌现现象的结果具有某种功能且是控制者所期望的.复杂系统的控制并不强调一定要预先知道自组织和涌现现象的行为过程,而更强调自组织和涌现现象的结果是否满足控制者的要求.这方面的一个典型的例子就是酿酒系统(具有生化反应的复杂系统)的控制,酿酒人员主要关心的是酒的质量与产量,而并不关心酵母菌在发酵过程中的自组织行为.

人类在认识和改造自然的过程中已经学会和发明了许多控制方法,这些控制方法主要包括:1) 直接控制方法,即对与希望结果直接相关的量施加控制,如各种液体的液位控制(直接控制相应的液体);2) 间接控制方法,即对与希望结果间接相关的量施加控制,如直流电机的转速控制(为了控制电机转速而控制定子绕组的端电压);3) 改变环境状况和系统组分的控制方法,如大多数化学反应系统的控制;4) 改变系统结构或更换子系统的控制方法,如现代工业中多层分布式控制系统;5) 改变运行规则和运行程序的控制方法,如政府和企业中的工作流程与人员控制;6) 利益引导或诱惑的控制方法,如银行通过改变存贷款利率来实现对民间的消费或投资进行控制.因前 5 种方法具有主动性(对控制者来说)及直接或间接的强制性(对被控对象来说),所以称前 5 种方法及其组合为“干预控制”方法;第 6 种方法不具有主动性和强制性,且主要发生在生物、特别是动物界,所以称它为“诱导控制”方法.就复杂系统来讲,既可以用“干预控制”、也可以用“诱导控制”、还可以用“干预控制”和“诱导控制”相结合的方法加以控制.但无论采用什么样的方法,复杂系统控制的目的是使系统内部产生有利于控制者的自组织和涌现现象,这就是复杂系统控制在概念上与传统意义下的控制的本质区别.

本文是作者关于复杂性科学研究中的若干问题的看法和思考.这些看法不可能全面,也不一定妥帖,仅供同行们参考.

致谢 (Acknowledgement):

本文的部分观点是在同程代展研究员、王龙教授、楚天广教授等人的多次讨论并受到启发后而逐

渐形成的,在此对他们表示感谢.

参考文献(References):

- [1] 克劳斯·迈因策尔. 复杂性中的思维: 物质、精神和人类的复杂动力学[M]. 曾国屏, 译. 北京: 中央编译出版社, 1999.
(MAINZER K. *Thinking in Complexity—The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind* [M]. Translated by ZENG Guoping. Beijing: Central Compilation & Translation Press, 1999.)
- [2] 金吾伦, 郭元林. 复杂性科学及其演变[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 1-5.
(JIN Wulun, GUO Yuanlin. Sciences of Complexity and their evolution [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(1): 1-5.)
- [3] 米歇尔·沃尔德罗普. 复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学[M]. 陈玲, 译. 北京: 生活·读书·新知三联书店, 1997.
(WALDROP M. *Complexity—The Emerging Science at The Edge of Order and Chaos* [M]. Translated by CHEN Ling. Beijing: SDX Jiont Publishing Co., 1997.)
- [4] 于景元, 周晓纪. 综合集成方法与总体设计部[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 20-26.
(YU Jingyuan, ZHOU Xiaoji. Meta-syntheses and department of integrative system design [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(1): 20-26.)
- [5] 李耀东, 崔霞, 戴汝为. 综合集成研讨厅的理论框架、设计与实现[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 27-32.
(LI Yaodong, CUI Xia, DAI Ruwei. The Framework, Design & Implementation of Hall for Workshop of Meta-Synthetic Engineering [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(1): 27-32.)
- [6] 王飞跃, 史帝夫·兰森. 从人工生命到人工社会——复杂社会系统研究的现状和展望[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 33-41.
(WANG Feiyue, LANSING F S. From artificial life to artificial societies—new methods for studies of complex social systems [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(1): 33-41.)
- [7] 欧阳莹之. 复杂系统理论基础[M]. 田宝国, 周亚, 樊瑛, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2002.
(AUYANG Yingzhi. *Foundation of Complex-System Theories* [M]. Translated by TIAN Baoguo, ZHOU Ya, FAN Ying. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing, 2002.)
- [8] 王崇愚. 多尺度模型及相关分析方法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(1): 9-19.
(WANG Chongyu. Multi-scale modeling and related resolution approach [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(1): 9-19.)

作者简介:

王成红 (1955—), 男, 博士, 研究员, 现任国家自然科学基金委员会信息科学三处处长, 中国自动化学会理事, 主要研究方向为控制理论、系统可靠性理论和复杂系统理论, 已发表各类学术论文 40 余篇;

王飞跃 (1961—), 男, 博士, 教授, 中国科学院自动化研究所研究员, 中国科学院复杂和智能科学重点实验室主任, 主要研究领域为智能系统和复杂系统建模和控制;

宋苏 (1963—), 男, 博士, 教授, 国家自然科学基金委员会信息科学三处项目主任, 主要研究领域为自适应控制、人工智能和复杂系统理论等, E-mail: songsu@nsc.gov.cn;

贺建军 (1965—), 男, 博士, 副教授, 中南大学信息科学与工程学院教师, 主要研究领域为生产过程控制、复杂系统建模与优化控制.