

系统与控制的今昔与纵横

—纪念控制论创始人诺伯特·维纳诞生120周年（1894—2014）

万百五 西安交通大学 系统工程研究所

在科学的发展上可以得到最大收获的领域是各种已经建立起来的部门之间的被忽视的无人区。正是这些科学的边缘区域，给有教养的研究者提供了最丰富的机会。

——诺伯特·维纳《控制论》

近代意义上的“系统”二字是上世纪30年代对术语“system”的标准译名。然而，成书于战国初期（公元前300—400年）的《国语》中就有“……王之世系也”一句。而这“世系”表示“一个姓氏世代相承的系统”。故远在战国初期就以“系”表示“系统”。中国古代著作《易经》、《尚书》提出含有系统思维的阴阳、五行、八卦等学说。成书于秦、汉时期（公元前200年前后）的经典医书《黄帝内经》把人体看作由各种器官有机地联系在一起的整体。而系统思维也体现在中国著名的古代工程中，如长城、大运河、宫廷建造和都江堰等。

“控制”二字最早出自公元1060年（北宋时代）成书的《新唐书·王忠嗣传》中，书中就有“劲兵重地，控制万里”之说。而中国古代能工巧匠为满足生产、生活和作战的需要曾发明了许多自动装置。其中著名的有指示恒定的方向用的指南车，据公元1345年成书的《宋史·舆服志》记载它是一种齿轮系装置，基于扰动补偿原理工作。还有保持水位恒定的莲花漏计时装置，据公元1155年成书的宋朝杨军的《六经图》转述，它是基于反馈原理的浮子式阀门以控制水位。

人类生产的发达、科学技术的进步、社会的繁荣，自然而然地出现社会行业、技艺的众多分工、科技的专业化、学科的细化。久而久之科学家、学者“往往会把邻近的科学问题看作与己无关的事情，而且认为如果自己对这种问题发生任何兴趣，那是不能容许的侵犯人家地盘的行为”（维纳《控制论》）。但是站得高、看得远、学识渊博、思虑得深入的学术大师，却能从不同学科的现象、事物之间领悟出深层次的共同道理。在学科之间的“无人区”创立新的伟业。这



图1 《控制论》及其中译本

就导致《控制论》(Cybernetics)和《系统论》(systems theory, 或system approach)的诞生。尽管一般学科的研究着重物质、能量和信息三个要素,但这“两论”均着眼于信息,更聚焦于功能、过程和动力学。它们可用来帮助研究当代的各类复杂系统及其种种现象。

1. 过去

控制论这门学科是在20世纪40年代发展起来的。它的诞生是以美国数学家诺伯特·维纳(Norbert Wiener)1948年出版的名著《控制论,或关于在动物和机器中的通讯和控制的科学》(Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine)作为标志(见图1,封面是作者照片)。这里动物意指生命体,机器意指人造的物理系统。1950年维纳在出版的《人有人的用处:控制论与社会》(The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society)小册子中,着重论述了通信、法律、社会政策等等与控制论的联系,进一步认为控制论在社会系统中应用的可能性已经出现。

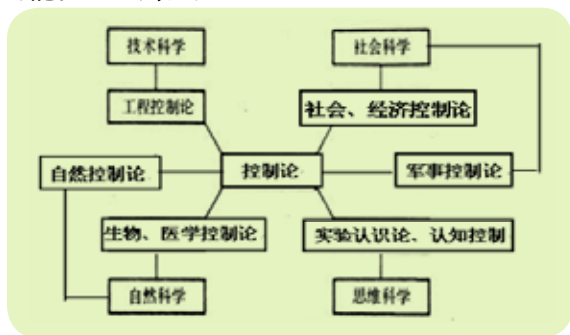


图2 控制论科学体系的六大分支

1956年英国控制论先驱阿什比(Ashby, R.)的重要著作《控制论导论》(An Introduction to Cybernetics)出版。两位控制论大师的主要论点可归纳为:1)闭环和负反馈(循环因果关系);

2)动态系统和动态分析;3)必需的变异度定律;4)自组织系统;5)稳态(生理学中内稳态);6)建模(黑箱)——功能模拟与仿真;7)适应;8)类比研究、移植;9)机器的学习和智能,等等。

控制论的问世震惊了世界学术界。它为现代科学的研究提供了一套新的思想和方法,并促进了当代哲学观念的变革。书中的新颖思想和观点吸引了各领域众多的学者,纷纷研究和在自己的领域引用控制论。这样,控制论逐渐形成多个分支(见图2),成为不少新学科的孵化器。

上世纪60年代晚期,美国的冯·福埃斯特(Foerster, H. von)提出,应理解观察者(兼动作者)在社会系统中作用的重要性,观察者处在系统之中;提出“二阶控制论”(second-order cybernetics),包括自设定系统(自治系统)等概念。

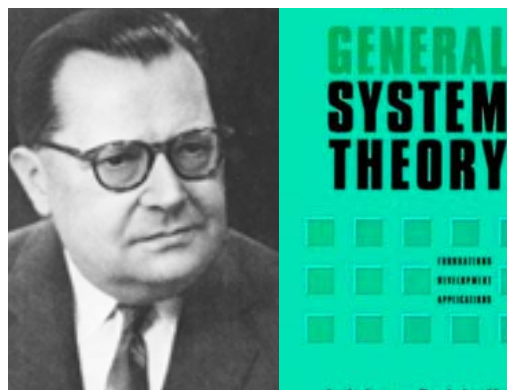


图3. 《一般系统理论》及其作者

同时,奥地利生物学家路德维希·冯·贝塔朗菲(Ludwig von Bertalanffy, 1901-1972)于1968出版的《一般系统理论:基础、发展、应用》(General System Theory: Foundations, Development, Applications)一书,确立了《系统论》这门学科的学术地位(图3)。该书试图建立各类学科

中各种系统的共同属性：不同领域中的系统表现出结构上的相似性或同构性，并将系统的普遍性质总结为整体性、关联（相互作用）性、结构的等级（level）性、动态性和有序性等。

基本思想方法，就是把所研究和处理的对象，当作一个系统，分析系统的结构和功能，研究系统、元素、环境三者的相互关系和变动的规律性，并从系统优化的观点来研究。图4表示系统论的系统思维。

此外，普里戈金（Prigogine, I.）的耗散结构（Dissipative structures）理论，哈肯（Haken, H.）的协同学（Synergetics），艾根（Eigen, M.）的超循环理论（Hypercycle theory），托姆（Thom, R.）的突变论（Catastrophe theory），都在不同程度上揭示了系统深刻的内在性质和规律，使得人们对系统有了更加深入的认识。

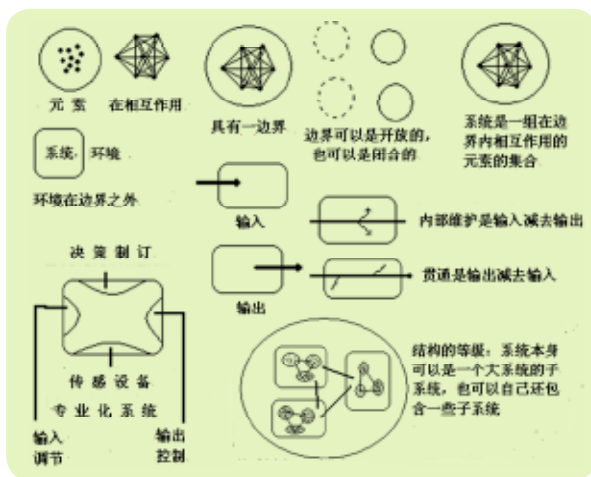


图4. 系统思维

系统和控制的交集就是控制系统，其特点是有反馈，因而能自动调节。用维纳的话来说，就是根据过去的操作业绩去调整未来的行动（维纳《人有人的用处》）。反馈方法已经成为人们观察和处理问题的重要思维和方法之一。中国著名的孟母三迁故事，就可以用控制系统的反馈来加

以阐明（图5）。根据二阶控制论，这是一个自设定的、自组织的社会教育控制系统，其中孟母既是观察者（动作者）又是她所要求孟子模式的设定者。

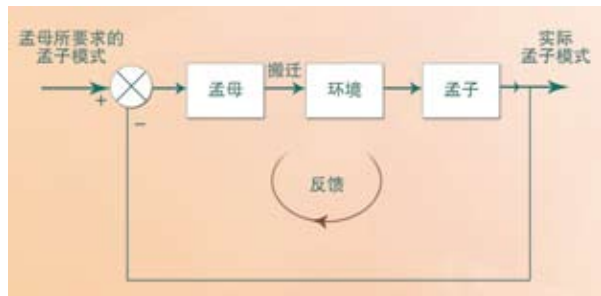


图5. 孟母通过选择环境助子成才

钱学森提炼了属于技术科学的系统论、控制论和信息论的共同基础，对这些分布在不同学科中的科学成就从系统观点进行概括和统一，并借此揭示了系统的普遍规律和深刻性质，从更高层次上奠定了一门新的基础理论科学——系统学（systematology）的理论基础。系统学正在形成和成长之中。

2. 现在

几十年来，控制论各分支（见图2）都已成长为独立的学科，并取得不同的进展。目前，控制论和系统论都聚焦于复杂系统的研究，它涉及自然科学以及社会科学的许多领域，当然着眼点有所不同。前者聚焦于对复杂系统的控制，后者着重于对系统规律的认识，也兼及应用。

核电站（图6）、大城市的交通体系（图7）、东西方争夺背景下2014年3月乌克兰的政局（图8）、尚未从2008年世界经济危机中复苏的全球经济、互联网、大脑神经网络体系、现代数字化信息化立体战争和人类持续发展前景等都是复杂系统的典型例子。



图6. 广东大亚湾核电站

尽管复杂系统具有多样性，它们也有许多共同的结构和功能特性：多元素（部件、子系统、神经元、主体、细胞等）、高维状态、相互关联（依存）、自主性、智能性、适应（对环境）、演化（发展）、动态性、非线性（出现混沌）、涌现、反馈、自组织、竞争、复杂性、合作（协同性）、自我复制性、不平衡性、不稳定性、随机性、有序性等等。因此，在一系列假设和条件下可以通过建模和仿真探索复杂系统的本质及其动力学行为。



图7. 北京市公安交通指挥中心

采用“大数据”和计算机对许多复杂的生

物、社会、经济系统可以建模、仿真，并比较、验证不同模型的成效，包括数十或数以百万计的变量及交互的模型以及大型的多维空间模型。

人脑和人类社会是两个迄今最复杂的系统。首先，控制论研究脑神经网络的信息处理问题，包括神经元与神经网络模型的研究、感觉信息处理的研究、人脑如何融合各种信息，脑理论与脑模型的研究。这是对和维纳一起创建控制论的MIT教授麦克卡洛（McCulloch, W.）“实验认识论”（Experimental Epistemology）工作的继承。

网络理论、基于人工适应主体模型（artificial-adaptive-agent based model）的对经济和社会的研究、进化动力学（evolutionary dynamics）等也都是这个时期复杂性研究的进展。而人们正力图用人工适应主体来建立能预测金融、经济危机的基于主体可计算的大型宏观经济模型，以替代受到责难的宏观经济数学模型。其他成功的应用覆盖生物学、生态学、社会系统及计算机科学等。

经过控制论60多年和系统论40多年的广泛传



图8. 乌克兰的局势

播, 现在学者们讨论系统时, 不一定引用冯·贝塔朗菲的名字。同样, 许多控制论的概念被使用, 但并不提到控制论的名字。两论的许多思想、方法都仿佛已经融入了人们的方法论和世界观。例如, 位于美国麻省剑桥的新英格兰复杂系统研究所 (New England Complex Systems Institute) 所长巴-亚姆 (Bar-Yam, Y.) 学派的许多有影响的复杂系统的研究著作便是如此。

复杂系统的普遍性和由此产生的技术和研究成果正在改变人们生活的社会。

3. 未来

控制论和系统论的重要发展必定与复杂系统的研究联系在一起, 必将与我国的建设、世界及人类的发展和进步联系在一起。

图9表示脑和计算设备的连接界面 (脑机接口) 和用意念来控制设备或计算机等的示意图。这对研究脑的功能和帮助脑残者恢复某些功能有极重要的意义。实验认识论还与人类行为学 (praxiology) 在一起为残疾者研制脑意识控制的假肢。

脑机接口是一个跨学科的研究领域, 涉及神经科学、心理认知科学、康复工程、生物医学工程、计算机科学以及信号处理、模式识别等等。这项技术还只取得初步成果, 有待继续研究与开发。

其次, 世界正面临全球气候变暖, 大自然和环境遭受严重破坏, 生物多样性的减少, 即所谓全球变化 (global change) 等的威胁 (图10)。由于贫国和富国差异的扩大, 出现贫穷、骚乱、人道主义危机、霸权主义、极端组织和恐怖活动等影响

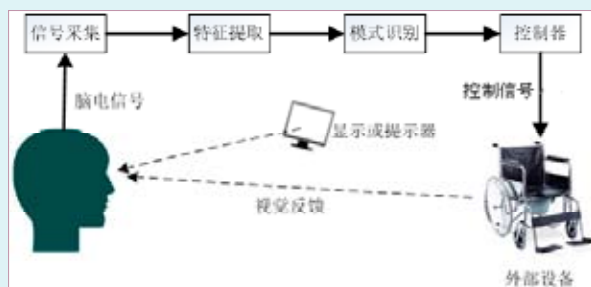


图9. 脑机接口系统示意图

世界安全的问题，21世纪充满挑战，全球化导致各国子系统越来越多地相互依存。因此如何建设一个和谐世界的问题亟待解决。

要像以复杂系统理论研究“占领华尔街”运动那样，来研究像乌克兰的政局，也研究中国的反恐问题以及“藏独”和“东突”问题。在这些研究中要注意利用各种渠道的统计数据，着重定量研究，并使得结论是经得起验证的。由于问题的复杂性，研究中要根据必需变异度律，采取多种解决方法、措施和手段，不是仅一种武力手段。

我国正处在向后工业化时代过渡的关键转折点上，情况复杂、矛盾众多。控制论和系统论应为建设经济“持续、平稳、协调增长”，构建“资源节约型、环境友好型”的和谐社会提供科学的决策方案。“两论”有望运用于协助对整个社会的治理和调节，包括经济、人口、财富分配、治安、医疗保障、居民寿命、资源、污染、生态环境等。这就是把整个社会看作一个特大的具有多种反馈的复杂控制巨系统，法律、舆论、道德、习俗、宗教等都是控制或反馈或约束的具体社会形式，通过决策和执行机构（国家行政部门）实现其治理、调节作用。

控制论和系统论应有所作为，并在解决这些问题中发展和提高自身。特别要指出，二阶控制论和必需变异度律的应用，人在社会系统中不仅是

“观察者”，更是“行动者”，对于特别复杂的社会、经济大系统，人们的控制策略和措施也应该是特别复杂。

伦理、美学和哲学的有些分支，已采用了自然主义的研究方法，应用了系统思维。未来应加强控制论和系统论与人文学科的关系。

维纳1960年访问前苏联时，对于控制论面临的重要研究课题的提问，回答说：首先研究自组织系统，然后是非线性系统，以及“生命是什么”有关的那些问题，并提到这三者是一回事。显然，生命体是有自组织性、是非线性的。控制论和系统论学者应参与化学、生物学、生命科学者的研究团队，共同研究无生命元素如何转变为有生命的元素。

控制论和系统论已经为这类研究提供了共同的视野和语言（思想和方法）。未来对“两论”是机遇也是挑战。

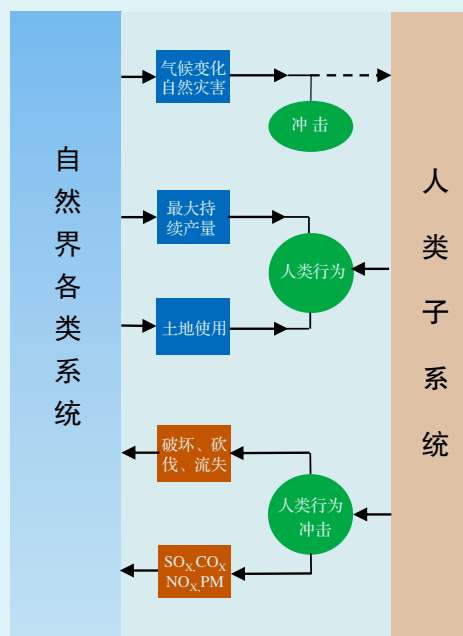


图10. 全球变化的复杂系统

参考文献

- [1] 万百五. 中国古代自动装置(条目). 中国大百科全书总编辑委员会[自动控制与系统工程]编辑委员会主编, 中国大百科全书‘自动控制与系统工程卷’, 北京: 中国大百科全书出版社, 1991.
- [2] 陈中基. 中国古代系统思想(条目). 同上书.
- [3] Carlos Gershenson, Peter Csermely, Peter Frdi, Helena Knyazeva and Alexander Laszlo. The past, present and future of cybernetics and systems research, <http://arxiv.org/abs/1308.6317v3/>, 2013.
- [4] Robert Gregory. General systems theory: A framework for analysis and social change, wsarch.ucr.edu/archive/papers/gregory/gensysTh.html, 2011-09-15.
- [5] 万百五, 韩崇昭, 蔡远利. 控制论—概念、方法与应用(第2版). 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [6] Mihajlo Mesarovic, David McGinnis and Dalton West. Cybernetics of global change: Human dimension and managing of complexity. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1996.
- [7] 胡作玄. 维纳与控制论. 百科知识, 1996, (6): 13-14.
- [8] Brian Davenport. Occupy complexity: Using complexity to examine The Occupy Wall St. Movement. E: CO Issue, 2011, 13(4): 87-93.