

漫谈系统与网络

陈关荣
(香港城市大学)

「系统与网络」是一个比「系统」与「网络」本身更为庞大复杂的论题，其内容一本书也写不完。因此，这篇短文只可能对「系统与网络」漫谈几个零碎片断和细小侧面，写下的基本上只是一些不成熟的个人见解，旨在分享。

像系统有科学与工程之分别一样，网络也有科学与工程之分别。但是，随着今天高尖技术的迅猛发展，科学与工程的分界线日益变得模糊，其中许多概念和内涵说起来亦此亦彼。因此，在这里我们不打算把科学与工程区分开来，而是笼统地糅合在一起加以描述和讨论，并且对其中许多术语不给出明确的哲学或数学定义，只按常识来理解并使用。

首先简单回顾一下「系统」这个相当古老的概念。系统一词来源于希腊语，*συστημα*，整体由部分组成的意思。称之为系统而不是简单的「全体」，其中就蕴含了亚里士多德所说的「整体大于部分之和」的寓意（而今人更强调 $1+1>2$ ）。我国最古老的文献之一《周易》是关于天、地、人及其相互关系的书，其中的《说卦传》把天地人合称「三才」，指它们构成了整个客观世界，可以理解为今天我们说的「系统」。后来在欧洲比较明确和完整地提出「系统」概念和方法的，是熟悉中国哲学思想的莱本尼兹和歌德。20 世纪中叶，对系统理论和方法发展举足轻重的人物有庞加莱、维纳、冯·诺依曼、香农等科学家。特别是，维纳还从希腊语中引进了一个词 *κυβερνητης* (*cybernetics*)，具有今天我们理解的系统、控制以及管理的综合含义。

下面将先说说系统科学与工程，然后再谈谈网络科学与工程，最后议论一下它们之间的一些异同、联系和交互。

I. 系统科学与工程

粗略地说，「系统科学与工程」是一门研究自然界和人类社会中被称为系统、特别是被称为「复杂系统」的对象的内在特性、结构动力学和演化规律并开拓其实际应用的一门学问。其中，系统科学方面注重于基础理论和分析方法的探讨，旨在发现和认识各种类型的系统；系统工程方面则更注重于解决运作和管理中的规划、设计、试验和制造这些应用技术上的实践问题，旨在利用和改造各种类型的系统。系统科学与工程的代表性学科是控制论、信息论、系统论——如所周知，它们既是科学、也是工程，今天已经很难把这两个方面截然分开。随着系统科学与工程往纵深和横向多方面的迅速发展，它们覆盖的范围已经扩展到包括诸如运筹学、博弈论、自动化、协同学、耗散结构论、突变论、搜索论、模糊逻辑和人工智能等等，从物种进化到生物分子的超循环理论，从天体物理和宇航工程到社会文化和经济金融的自组织原理，等等，几乎凡

是与「复杂」和「大型」相关的自然和社会现象，都可以归纳到系统科学与工程的范围里来进行讨论和研究。

稍为回顾一下历史就不难知道，现代的系统科学起源于 20 世纪 20 年代，率先由奥地利生物学家贝塔朗菲（Karl Ludwig von Bertalanffy）所倡导。同时代的英国军事科学家们提出了运筹学以研究和解决雷达阵列的理论和应用问题，开启了实用系统工程学的先河。工业工程管理中系统工程的思想萌芽还可追溯到更早的先驱者、20 世纪初的美国机械工程师泰勒（Frederick W. Taylor）。他的《科学管理原理》一书在 1911 年出版后，工业界就出现了著名的「泰勒系统」模式。「系统工程」一词则可能是 40 年代在美国贝尔实验室工作的 Edward C. Molina 和在丹麦哥本哈根电话公司工作的 Agner K. Erlang 首先使用的。他们在研制电话自动交换机时，意识到要从规划、研发、使用和工程总体建设上来进行，同时还提出了排队论原理并应用到电话通信中。随后，一系列的早期科技革新与突破，特别是 40 年代美国贝尔电话公司发展的通信技术和美国原子弹研制的曼哈顿计划，到 60 年代苏美的登月工程等等，使得系统科学与工程变得十分成熟并获得长足发展。到 70 年代，我国科学家钱学森、关肇直、许国志等人把系统工程看成是系统科学中直接用来改造客观世界的技术手段，促成了 1979 年中国科学院系统科学研究所和 1980 年中国系统工程学会的成立。今天，大家耳熟能详的计算机、互联网、基因、激光、纳米等等高新技术和系统科学与工程之间的相互影响以及它们之间的密切内在联系就不必细说了。值得一提的是，1954 年，由当时在斯坦福大学的《行为科学高等研究中心》工作的贝塔朗菲和他的同事 Kenneth Boulding, Ralph Gerard 以及 Anatol Rapoport 等几位领军人物发起并组建了一个国际系统科学学会（International Society for the Systems Sciences）。两年后，这个学会便与 1848 年创立、现今有约一千万会员的美国科学促进会（American Association for the Advancement of Science）结成了联盟。著名的《Science》杂志就是这个 AAAS 的会刊。

II. 网络科学与工程

网络和系统一样，无时不在、无处不在。网络的概念可以追溯到古代，但网络的科学研究通常认为是从图论开始的。欧拉 1736 年证明了 Koningsberg 七桥问题无解从而建立了现代数学意义下的图论。关于图论的系统而严格的主要数学理论及其在网络上的成功应用可以认为是从 Paul Erdős 在 1960 年前后发表的深刻研究工作开始的。Erdős 关于随机网络的生成及演化的奠基性工作形成了后来半个世纪数学图论的核心。

1998 年，当时的博士生 Duncan J. Watts 与其导师数力学家 Steven H. Strogatz 在《Nature》杂志上发表了一篇原创性论文，在随机网络基础上引入了小世界网络模型，描述了从规则网络到随机网络的过渡。小世界网络既具有与规则网络类似的高群集性态，又具有与随机网络类似的短路长特征。1999 年，物理学家 Albert-László Barabási 和他的博士生 Réka Albert 在《Science》上发表了另一篇开创性的文章，指出许多现实世界中的网络的连接度分布具有幂律形式。由于幂律分布没有明显的特征长度，该类网络又称为无标度网络。这两篇奠基性的论文触发了国际上全面研究复杂网络的热潮。这个领域随后十年中的发展成果和现状，在 Mark E. J. Newman 2010 年 772

页的新书《Networks: An Introduction》中有一个很全面的介绍和总结，其中也介绍了2006年获得世界数学家大会应用数学最高奖（Nevanlinna Prize）的 Jon M. Kleinberg 的小世界模型及其搜索算法。

「复杂网络」是相对于简单的规则网络（如星形、环形、格子、完全连接网络等）而言的、具有非平凡的拓扑结构（即相对稀疏但却纵横交错连接而成）的网络。如果不对其中的节点和连边赋予物理意义的话，它们就描述了包括从大型规则图到随机图、特别是在它们中间过渡的各种各样的非规则数学图的全体。「复杂」这个词在这里一般而言具有多重意义：首先是指节点之间连接方式的多样性——特别是随机、小世界、无标度连接；其次是指节点本身作为一个动力系统其个体行为的多样性——特别是高维、非线性、分形混沌等特性；更重要的是指这些动力学节点通过不同方式连接起来以后所表现出来的整体行为的多样性——特别是自适应、自演化、自组织、自同步、自涌现。

和 21 世纪同时起步，我国学术界近十年来开展了越来越广泛也越来越深入的关于复杂网络的学术和应用研究。可以说，我国复杂网络研究工作的铺开和发展基本上是与世界同步的。这个新领域的研究人员主体来自数学图论、统计物理学、计算机网络、电子工程、结构力学、生态系统、以及军事、经济和社会科学。主要研究对象涉及计算机网络（特别是互联网）、通信网络、传感网络、电力网络、生命科学网络（如大脑神经网络、细胞网络、蛋白质相互作用和折叠网络、生态网络）、社会网络（如疾病传播网络、科学家合作网络、商业竞争与合作网络、语言和音乐网络、人类社会动力学网络）。主要的研究手段是计算机模拟、数学图论、统计物理学方法、社会网络分析方法、通信数据流分析方法，以及系统控制论方法。研究内容主要包括网络的代数与几何性质、网络的形成机制和演化规律、网络的建模和性能分析以及网络的动力学特性和结构稳定性等问题。网络研究的基本测度包括节点的度及其分布和相关性、群集结构及其程度和特征、最短平均路径长度、连接度、核数、介数、相配程度，以及它们的一些重要的统计分布；这些特征量从不同的角度反映和刻画了复杂网络的拓扑和动力学性态。

复杂网络一开始是以科学的名份而被加以研究的，但是近年来则开始显露出其向工程技术扩展的倾向。「网络科学与工程」的名称首先出现在 2009 年 9 月由美国普林斯顿和麻省理工等十所著名高校联合组成的「美国网络科学与工程委员会」和他们提出的一个专题报告“网络科学与工程研究路线图”。这个专有名词的出现表明，就像系统科学与系统工程两者不可截然分割一样，今天大家亦有了一个共识：网络科学与网络工程也是不可严格分家的。

III. 系统与网络的异同和交互

「系统」与「网络」毕竟不是同义词：虽然相似，却不相同。应该说，它们谁也不包含谁，谁也不取代谁。一方面，一个网络可以理解为是一种特殊的系统，而且几乎所有系统里面都包含有多种不同性质的网络；另一方面，一个网络也可以是许多系统的联结。在后一种情况下，虽然整个网络可以被看成是一个更大的系统，但是把它看成是网络则能更清楚地表达这个大系统内部连接的骨架和脉络。

系统与网络的研究有许多共同之处：它们都基于物理原理并借助于数学手段来进行建模、识别、分析、控制，并且一般都采取局部和分散式处理（包括设计、调整、管理、优化），但最终关心的都是全局和整体行为（例如稳定性、收敛性、同步性、协调性、一致性，特别是自适应、自组织和大范围涌现）。在传统的系统科学领域里（控制论与自动化、运筹与管理、规划与优化等），对系统的研究有一个通用的框架——状态空间理论；类似地，在网络科学领域里（拓扑建模与演化规律、社团结构与功能表现、统计数据与实证分析等），对网络的研究也有一个通用的框架——图论。此外，在很多情况下两者都可以用耦合的高维微分方程从数学上来加以刻画和作出分析，并用统计物理方法的手段来给予描述和进行仿真。

但是，系统与网络研究的差异也很明显：系统强调外部整体；网络强调内部结构。一般来说，相对于系统而言，网络研究更注重多尺度下的性能和表现——因此，阈值以及多尺度的识别和选择显得特别重要（例如：网络局部结构明显影响网络连接矩阵的特征值，从而影响网络同步，但对网络整体的统计特性影响却很小）。另外，网络研究特别注重拓扑结构特征：社团结构、层次结构、内部相关性（例如：群集、模块、核心、枢纽、流量与带宽、拓扑适配性）。还有，两者的研究方法和视角也有许多不同：系统科学侧重于整体表述、整体行为、整体设计、整体功能，而网络科学则更关心局部特性如连接度、内部相互作用、子群之间的竞争与合作，以及内部自组织、演化、涌现、突变，等等。一般来说，网络科学比系统科学更加重视演化的过程。

科学研究关心的通常是复杂系统而不是简单系统，是复杂网络而不是简单网络。复杂系统和复杂网络都是规模巨大、错综缠绕、动态演变、内部外部息息相关并且互相影响的实体，而且一般都是难以预测和控制、甚至难以精确表达的对象。对它们的研究使得通常的所谓「复杂性」研究变得更加具体。Barabási 在 2009 年《Science》中关于无标度网络研究十年之总结与展望的一篇文章里的最后一句话很精辟：“Interconnectivity is so fundamental to the behavior of complex systems that networks are here to stay.” 换句话说，只有深入探讨复杂网络的内在关联结构及其对网络整体的影响才能深刻理解复杂系统的各种宏观行为和表现。这句话也可以用来总结我这个段落的论题：系统与网络的异同和交互。

最后，作为全文的小结，我想简略地提及一下：在系统与网络的科学研究及其工程应用中，还存在着许多重要而又极具挑战性的课题。例如，网络拓扑结构有图论作为统一的数学框架和工具去进行研究，那么网络动力学是否也具有普适性的、区别于单个动力系统的框架和分析方法呢？网络结构与功能的研究如何深入发展（结构如何影响功能，功能又如何影响结构）？以及「网络的网络」应该如何进行建模、分析和研究？（例如：「物联网」（Internet of Things）的概念就是一个由通过传感器网络以互联网为基本构架而把交通网、电力网、物流网等多种性质很不一样的网络组成的网络）。希望再过一个十年以后，我们能得到一些哪怕是不完全的答案——此希望寄托在今天的年轻人身上。