



知诸网

网络科学及其在艺术、
金融和社会学中的应用

刘肖凡 谢智刚 著



科学出版社

知诸网

网络科学及其在艺术、金融和社会学中的应用

刘肖凡 谢智刚 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

在交响乐谱、股票市场和社交网络等看似毫不相关的事物背后，其实隐藏了惊人的共性——它们都是一个个复杂的网络。本书介绍如何通过分析和运用复杂网络的结构特征和演化规律，来进行音乐的创作、分析金融系统全球一体化的进程、理解人际关系的建立和瓦解，以及认识社会共识形成的过程。同时还介绍了利用网络科学解决实际问题的框架，以及网络科学在其他多个领域的成功应用案例。此外，本书还提供了更多相关图片、视频等资料信息的下载(<http://cse.seu.edu.cn/PersonalPage/xfliu/book>)。

本书可作为网络科学的入门参考书，同时也希望能为不同领域的科研人员带来工作的灵感。

图书在版编目(CIP)数据

知诸网：网络科学及其在艺术、金融和社会学中的应用/刘肖凡，谢智刚著. —北京：科学出版社，2015.2

ISBN 978-7-03-043109-7

I. ①知… II. ①刘… ②谢… III. ①计算机网络—研究 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 016772 号

责任编辑：惠 雪/责任校对：郑金红

责任印制：李 利/封面设计：许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 2 月第 一 版 开本：720 × 1000 1/16

2015 年 2 月第一次印刷 印张：11 1/2

字数：160 000

定价：48.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

献给我们的家人

宇菲、芄芄、

崇浩及以正

序

你打开了这本书，大概是因为书的名字吸引了你——《知诸网：网络科学及其在艺术、金融和社会学中的应用》——你可能关心艺术，可能关心金融，可能关心社会科学，也可能只是关心网络技术及其应用。不管怎样，若你希望了解一下这本书将会为你提供什么新的相关知识和信息的话，我建议你把这本书好好地读一遍。

如题所示，这本书是关于网络科学在艺术、金融、社会以及相近领域中的一些成功应用。这是一本由两位研究网络科学的专家为初学者编写的科普读物和入门参考书，当然也为其他相关领域的科研人员提供一些有价值的思想和素材。

这本书以讲故事的形式、用轻松愉快的笔墨写成。第一章和第二章引领读者去了解网络科学的基本理论框架。大家当然知道，今天的世界是一个网络世界：网络无时不在、无处不在。其实网络的概念可以追溯到古代，那时就有了“天罗地网”的说法。不过，把网络作为一门学科来进行研究，则是从数学图论开始的。1736年，欧拉证明了有趣的 Königsberg 七桥问题无解，从而建立了图论。1960年前后，Erdős 关于随机图论的奠基性工作则进一步发展了一套系统而严格的数学图论；他的研究工作形成了后来半个世纪数学图论的核心，其成果在网络科学和技术研究中也获得了很多成功的应用。1998年，当时的博士生 Duncan J. Watts 与其导师数学家 Steven H. Strogatz 在《自然》杂志上发表了一篇原创性论文，在 Erdős 的随机网络

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。1999年，物理学家 Albert-László Barabási 和他当时的女博士生 Réka Albert 在《科学》杂志上发表了另一篇开创性论文，指出许多现实世界中的网络的连接度分布具有无标度特性的幂律形式。这两篇奠基性论文触发了国际上全面开展研究网络科学的热潮。

今天，网络科学的理论和应用研究，其对象主要涉及计算机网络(互联网、万维网)、通信网络、电力网络、传感网络、社会和艺术网络(疾病传播网络、科学家合作网络、商业竞争与合作网络、人群动力学网络、音乐和语言网络)、生命科学网络(大脑神经网络、蛋白质交互作用和折叠网络、生态网络)，研究手段主要是计算机模拟、数学图论、统计物理学方法、社会大数据分析、通信流分析，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属性、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征和结构稳定性等理论核心和技术关键问题。

看到这里，你可能对“网络科学”兴趣更高了？如是，就请读读这本好书吧。

这本书的第三章至第六章分别介绍了如何利用网络知识和技术来作曲，如何分析网络化的全球股票市场的动态，如何理解人类社会的自我修复功能，以及如何看待人际关系网络对社会共识产生的影响，等等；第七章介绍了网络科学在其他领域中的一些成功应用例子。本书从多个不同侧面来介绍了网络科学的各种美好应用，令人鼓舞、令人兴奋。本书适合于对各种网络有一定兴趣的广大读者，从中学生、大学生到研究生，以及从事自然科学、社会科学、艺术科学的研究工作者，均可阅读参考，以助增长网络科学知识，拓广思维空间，提高解决实际问题的兴趣和能力。

如果你真能把本书认真地读一遍，那么你大概会同意我个人的简单评

价：本书内容新颖、文笔生动活泼，虽然篇幅不长，但是读后很受启发。
为此，我向广大读者推荐这本新书。

陈荣

香港城市大学讲座教授
混沌与复杂网络学术研究中心主任

2014年8月16日

前 言

网络科学的开端可以追溯到 18 世纪著名的 Königsberg 七桥问题。在过去的 200 年间，网络科学以多种形式广泛存在于图论、物理学、控制论等多个学科的交叉体系中。直到 21 世纪初，以复杂网络为内涵的“网络科学”这一概念才开始形成。从 2006 年开始的由网络科学创始人 Albert-László Barabási 组织的 NetSci (Network Science) 系列会议，到 2009 年 9 月由美国普林斯顿大学和麻省理工学院等十所著名高校联合组成的“美国网络科学与工程委员会”提出的专题报告“网络科学与工程研究路线图”，再到 2010 年美国国家防务委员会发布的报告中重新提出网络科学这一概念，短期内，网络科学领域已经发展成物理学家、数学家、社会学家、工程师们济济一堂的盛会。

网络科学发展至今虽然仅仅经过了十几年的时间，但是却已经建立了一套完整的理论体系，能够从宏观、微观及动态等多个视角分析世界上最复杂的一些系统。可以说，这门年轻的学科已经取得了令世人瞩目的成就。我们预测，在接下来的十年至二十年里，科学家们将会把网络科学完善的理论基础从象牙塔中解放出来，运用到各行各业中去解决实际的问题。本书中展现的内容，就是我们在过去的几年里，将网络科学的理论运用到艺术、金融以及社会学领域中所取得的先期成果。我们希望本书起到一个抛砖引玉的作用，向读者们展示网络科学的广阔应用前景，并鼓励更多的读者加入我们的探索行列。

本书的第一章为读者打开网络科学的大门，将我们身边各种错综复杂的系统展现出来，从而引入网络的概念。第二章概括性地总结网络科学的理论基础，包括网络严格的表示形式、网络的拓扑特征、网络的理论模型

和网络中的动力学现象。并且，这一章的最后提出了运用网络科学的理论工具解决实际问题的基本框架。而接下来的 4 章内容是我们对网络科学应用的初步探索：第三章运用音乐中的网络进行作曲；第四章从网络的动力学视角审视全球股票网络中的各种金融现象；第五章运用网络理论分析人类社会自我修复的特征；第六章分析社会网络的复杂结构对社会共识形成过程产生了什么样的影响。最后，第七章介绍网络科学在其他多个领域中的成功应用案例。

本书的适用范围很广。无论文科还是理科，只要具有一定数学基础的高年级中学生、大学生、研究生，均可以通过本书领略网络科学广阔的应用前景。同时我们也希望博士生、学者们能够从本书中获得灵感，与我们一起共同推动网络科学的发展。本书中所使用的编程工具，以及与本书内容相关的图片、视频等信息资料均可以在网页 <http://cse.seu.edu.cn/PersonalPage/xfliu/book> 中获取。

最后，感谢我们的好友 Michael Small 教授和许小可教授对我们工作的支持和协助。作者刘肖凡还要感谢父母和妻子对他一直以来的关心和支持。作者谢智刚衷心感谢陈关荣教授和刘重明教授多年来给予他的启发和工作上的支持。

另外，本书也得到了国家自然科学基金(61374170、61304167)以及江苏省基础研究计划(BK20131301)的大力支持。

刘肖凡 谢智刚

2014 年夏



目 录

序

前言

第一章 你我身边的网络	1
工程网络	3
信息网络	6
人际网络	9
生物网络	12
网络的网络	15
本章小结	16
文献注记	17
第二章 网络是一门科学	19
网络的抽象表示	21
网络的拓扑特征	24
建立一些物理模型	31
网络动力学	35
网络科学的应用框架	40
本章小结	43
文献注记	44
第三章 利用网络作曲	47
音乐	49
音乐中的复杂网络	51

音乐网络的结构分析	55
从网络中作曲	60
音乐动机与网络模体	64
利用网络模体作曲	69
本章小结	72
文献注记	74
第四章 网络化的全球股票市场	75
全球股票市场	77
全球股票市场的网络构建	78
全球股票市场的一体化过程	81
全球股票市场的板块划分	84
网络化波动性溢出	89
本章小结	95
文献注记	96
第五章 自我修复的社会关系网	99
演化中的网络	101
科学家合作网络的建立	102
合作网络的演化过程	104
自我修复的力量	109
本章小结	114
文献注记	115
第六章 社会中的共识形成	117
共识的形成机制	119
DeGroot 共识模型	122
度分布对共识结果的影响	124
度混合对共识形成速度的影响	129
本章小结	136
文献注记	137

第七章 其他成功的应用案例	139
股票市场结构及其健康状况分析	141
疾病传播的预测.....	144
传统通信网络流量分析	147
互联网的路由控制.....	150
万维网中的知识获取	152
蛋白质功能预测.....	153
本章小结	155
文献注记.....	156
第八章 结语	159
参考文献	163
索引	169



第一章
你我身边的网络

“网”(图 1.1), 在《说文解字》中的解释为: 庖牺所结绳以渔。意思是古时候有一个人叫庖牺, 这个人把许多绳子交叉打上结, 两端用棍子挑起来, 织成了一张网。最初, “网”是用来捕鱼和捕鸟的工具。“络”其本意是指用来制绳索、织布的干枯麻类植物。堆在一起的枯麻, 看起来纵横交错, 非常混乱。“网”和“络”这两个字, 都可以引申指代纵横交织、错综复杂的物体。现在, 人们用“网络”这个词来表示由多个相同或相似的事物连接而成的复杂系统。大家耳熟能详的包含“网”或“网络”的词有: 互联网、万维网、社交网络、神经网络, 等等。在这一章里, 我们将会介绍一些与生活息息相关的网络, 以及这些网络的组成部分是如何连接在一起的。



图 1.1 甲骨文中的“网”字

工程网络

人类迄今为止最伟大的两项工程成就, 是第二次工业革命中诞生的电网和第三次工业革命中诞生的互联网。

第二次工业革命是以电力的广泛应用为标志的。蒸汽机、内燃机等发机器通过燃烧化石燃料而产生能量, 而能量以电力的形式从发电站输出, 通过高压交流电线流向城市中的各式变压器, 再转为低压交流电后走进千家万户。电力通过输电线路在发电站、变压器、用户之间流通, 并形成了一张网络。在电力刚刚被发明的 19 世纪, 电网还是一种孤立的小型结构。随着 20 世纪多国工业的快速发展, 如今的电网已经是一个几乎覆盖全世界的巨型网络。由于电力涉及人类生活的方方面面, 是一个不可或缺的重要战略资源, 因此各个大国的电力网

络基本上还是互不联通的。世界上最大的几个独立电力输送网络包括：北美东部电网、北美西部电网、澳大利亚国家电网、欧洲大陆电网、俄罗斯国家电网，以及中国的国家电网和南方电网等。直到1965年，公众才认识到电网已经发展为一个庞大的结构。1965年11月9日，美国东北地区电网因维护失误，一条主要的输电线路运行中断，导致其他的输电线路因电量过剩而过载，使得这些输电线路主动或被动地从电网中分离开来，造成大面积停电。人们由此认识到，电网中的每个组成部分都是息息相关的，一个组成部分的故障往往会导致其他部分的连锁反应。21世纪初的10年间，南欧、北美、印度、印尼、巴西等地相继发生了涉及上千万甚至上亿人口的大面积停电，这一波电网故障的浪潮也促进了电网研究的发展。时至今日，在地理范畴上跨越千山万水的电网往往被看作一个由千千万万个电气元件连接而成的网络状整体，在人类的生产生活中扮演着至关重要的角色。

第三次工业革命是以电子计算机的广泛应用为标志的。1955年，世界第一台电子机——电子数字积分计算机¹(electronic numerical integrator and computer, ENIAC)的正式开机标志着电子计算机时代的来临。在过去的十几年间，电子计算机技术飞速发展，计算机变得更小、更快，用户也从军队、研究机构拓展成世界上的每一个普通人。一台孤立的计算机仅仅能进行数值计算和简单的智能推理，它的价值是有限的。但是如果将全世界的计算机连接在一起，计算机之间可以相互通信，那么这个庞大的系统所蕴含的价值便是无限的。计算机互联的系统，被称为互联网(the Internet)。互联网的建设始于1969年，由美国国防部牵头，美国西南部几所著名大学里的计算机被连接在一起，并开始互相传递消息。1989年，全世界联入互联网的计算机仅有10万台。随着3G、4G通信技术的普及，2013年全世界人口的40%都可以使用互联网，也就意味着全世界网民的数量超过20亿。接入互联网的计算机设备早已不计其数，约42.9亿个IPv4地址已经分配殆尽。互联网

1 亦有说世界上第一台电子计算机是阿塔纳索夫-贝瑞计算机(Atanasoff-Berry computer)。

的结构非常复杂。首先，小型计算机、移动设备等终端设备通过有线、无线等多种方式由路由器连接起来，组成一个本地网络。若干个小型的本地网络通过光纤等高通量传输设备汇聚起来，再通过大型的路由服务器联入互联网的主干。这些物理连接通常是光纤线路，一些光纤线路可以横跨海洋连接几个大洲。目前最长的海底光缆是 SEA-ME-WE 3(亚欧)海底光缆，长达 39 000 千米。它从澳大利亚和东亚开始，途经东南亚，路过中东，通过苏伊士运河抵达欧洲。当一个中国用户需要访问一台位于伦敦的计算机时，数据往往会经过多个服务器的中转，通过海底光缆传输才能到达目标主机。

除了电网、互联网以外，人类在地球上还留下了许多其他的大型工程。现代交通系统是人类在过去的两个世纪里慢慢建立起的伟大工程。交通系统中离我们的生活最近的是公路网络，只要有一辆汽车，人们便可以到达世界上的每一个角落。铁路网络是由铁轨连接而成的，特别适合运送重型物资。欧亚大陆桥是连接欧洲和亚洲的铁路系统，由 3 条线路连接而成，总长四万多千米，途径四十多个国家。航空网络是一个从平面转向立体的大型交通网络。飞机是 20 世纪发展起来的快速交通工具，在万米高空将旅客和货物快速地运往遥远的地方。据统计，世界上的飞机场和可供飞机降落的跑道共有 44 000 余处，其中大部分的飞机场都有航班路线常规起降。交通网络的建设使得人类的活动没有边界，在最近 100 年内的种族交融，要比过去 1000 年加起来都多。

从微观角度来看，电路也是一个复杂的工程网络。它是由电阻、电感、电容、电源和开关等电子元件组成的回路。将电子元件及导线制作在一小块半导体晶片上，然后封装在一个微型的结构中形成一个整体，就制成了集成电路。计算机的 CPU 就是一个大型的集成电路，集成电路中的晶体管越多，CPU 的计算能力就越强。1971 年，Intel 公司的 4004 型微处理器只有 2300 个晶体管，此后，每 2 年集成电路中的晶体管数目就会翻一番，这一现象也被称为“摩尔定律”。近来由于制造工艺的提升，集成电路中电路的宽度已经达到了以原子为单位的级