

A Very Short Introduction

牛津通识读本

网络

Networks

[意大利] 圭多·卡尔达雷利 米凯莱·卡坦扎罗 / 著

李果 / 译

牛津通识读本

译林出版社

[意大利]圭多·卡尔达雷利 米凯莱·卡坦扎罗 著 李果 译

网络

牛津通识读本·

Networks

A Very Short Introduction

图书在版编目 (CIP) 数据

网络 / (意) 圭多·卡尔达雷利, (意) 米凯莱·卡坦扎罗著;
李果译. —南京: 译林出版社, 2018.12

(牛津通识读本)

书名原文: Networks: A Very Short Introduction

ISBN 978-7-5447-7438-3

I. ①网… II. ①圭… ②米… ③李… III. ①系统科学—研究

IV. ①N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 147036 号

Copyright © Guido Caldarelli and Michele Catanzaro, 2012

Networks was originally published in English in 2012.

This Bilingual Edition is published by arrangement with Oxford University Press and is for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan, and may not be bought for export therefrom.

Chinese and English edition copyright © 2018 by Yilin Press, Ltd

著作权合同登记号 图字: 10-2012-485 号

网络 [意大利] 圭多·卡尔达雷利 米凯莱·卡坦扎罗 / 著 李果 / 译

责任编辑 何本国
特约编辑 许丹
装帧设计 景秋萍
校对 季林巧
责任印制 董虎

原文出版 Oxford University Press, 2012

出版发行 译林出版社

地址 南京市湖南路 1 号 A 楼

邮箱 yilin@yilin.com

网址 www.yilin.com

市场热线 025-86633278

排版 南京展望文化发展有限公司

印刷 江苏凤凰通达印刷有限公司

开本 635 毫米 × 889 毫米 1/16

印张 16.25

插页 4

版次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5447-7438-3

定价 39.00 元

版权所有 · 侵权必究

译林版图书若有印装错误可向出版社调换, 质量热线: 025-83658316

献给我的家人

——圭多·卡尔达雷利

献给安娜

——米凯莱·卡坦扎罗

序 言

狄增如

著名诗人北岛有一首名为《生活》的一字诗：网。

毫无疑问，我们的世界运行在有形或无形的网络之中，尤其是在信息技术飞速发展的今天。进入21世纪以来，技术进步和社会经济的全球化，把世界更加紧密地联结在一起，系统性和复杂性已经成为各领域核心问题的共性特征。

正像《网络》一书中指出的，系统性和复杂性的现象在我们的生活中比比皆是，大到全球性的金融危机、生态系统的稳定性，小到空手道俱乐部的分裂和足球队场上的表现，其突出表现是系统各单元或要素，通过相互关联和影响所展现出的涌现性行为：在没有中心控制和全局信息的情况下，仅仅通过个体之间的局域相互作用，系统就可以在一定条件下展现出宏观的时空或功能结构，在新的层次上涌现出具有整体性的性质和功能。在这里应该强调的是，非线性的关联和相互作用关系对于系统的涌现性至关重要，它使得系统的整体行为不能通过个体行为的简单叠加而获得。因此，结构决定系统功能，刻画系统中的相

相互作用关系对于认识和理解系统的宏观性质意义重大。

而复杂网络就是对系统结构的最一般和本质的刻画。系统中的个体对应于网络的节点,个体之间的联系或相互作用对应于联结节点的边。网络的抽象,超越了每个系统自身的特殊性质、独特背景和演化机制,让我们可以用统一、普适的网络分析方法去研究系统的性质,进而加深对系统共性的了解。事实上,自18世纪欧拉建立起图与网络的概念,解决了哥尼斯堡七桥问题开始,图与网络就成为刻画结构的重要工具,并于19世纪中叶进入社会学领域,社会网络分析由此成为社会计量学的重要工具。

1998年,沃茨-斯托加茨提出小世界网络模型,指出少量的随机捷径会改变网络的拓扑结构,从而涌现出小世界的效应;随后,巴拉巴西提出了无标度网络概念,解释了增长和择优机制在复杂网络自组织演化过程中的普遍性和幂律的重要性。这些开创性的研究工作使我们认识到,实际系统的网络结构存在着许多超越经典随机网络的特殊性质,例如小世界性质、幂律度分布、不同的匹配关系、社团结构等,我们需要建立更加细致、准确的概念,刻画网络结构并进而更加科学地认识系统性质,以促进网络科学的快速发展。

网络描述方法已被广泛应用于实际系统的研究,例如神经元网络、食物链网络、因特网络、赛博空间以及人与人之间交往的社会网络等等,研究结果加深了对这些具体系统的理解,并且提出了一系列新的概念和分析方法。总体上说,网络科学研究包括以下主要内容:一、如何定量刻画复杂网络?通过实证分析,了解实际网络结构的特点,并建立相应概念以刻画网络结构特征;二、网络是如何发展成现在这种结构的?建立网络演化

模型，理解网络结构的产生和涌现；三、网络特定结构的后果是什么？利用基于网络的特定动力学过程，如新陈代谢网络上的物质流、食物链网络上的能量流、万维网上的信息传播、社会网络上的舆论形成等等，探讨网络结构与功能的关系；四、利用网络结构的设计和调整，控制和优化系统功能。

意大利的圭多·卡尔达雷利教授，是网络科学领域的知名专家，在复杂网络研究中，特别是社会、经济网络的分析和应用中颇有建树。《网络》一书，结合许多生动有趣的案例，如六度分隔实验、空手道俱乐部、万维网、食物链网络、基因调控网络等，深入浅出地介绍了网络科学的发展历程、核心概念和最新进展。书中没有一个数学公式，但通过具体案例的解读，能够让大家科学准确地把握网络分析的基本概念，如小世界性质、无标度网络的异质性、网络中的社团结构、无标度网络的脆弱性和鲁棒性、网络结构与传播的关系等，展现了作者强大的学术功力。可以说，《网络》一书，是大家了解和进入网络科学领域的非常好的一本入门读物。

总的来说，复杂系统的涌现现象是具有整体性和全局性的行为，不能通过分析还原的方法去研究，必须考虑个体之间的关联和相互作用。从这个意义上讲，理解复杂系统的行为应该从理解系统相互作用的网络结构开始。2009年，《科学》杂志以“复杂系统与网络”(Complex Systems and Networks)为主题，发表一集专刊，其中巴拉巴西教授的一段话很有启发意义。他指出，由于底层结构对于系统行为有着重大的影响，除非探讨网络结构，否则没有办法去理解复杂系统。希望《网络》一书能够带领大家进入生动有趣的网络科学领域。

目 录

- 第一章 从网络的观点看世界 1
- 第二章 富有成效的方法 7
- 第三章 网络世界 22
- 第四章 连接与闭合 41
- 第五章 超级连接器 54
- 第六章 网络的涌现 66
- 第七章 深入挖掘网络 80
- 第八章 网络中的完美风暴 94
- 第九章 整个世界是否就是一张网? 110
- 索引 115
- 英文原文 125

从网络的观点看世界

网络存在于许多人的日常生活之中。通常的一天里，我们都会查收电子邮件，更新社交网络上的个人资料，打移动电话，使用公共交通工具，乘坐飞机，转移货币和货物，或者开始新的私人和业务关系等等。我们在所有这些情况中——有意或无意地——都会涉及网络及其特性。同样地，网络也会出现在重要的全球现象中。金融危机会在银行和公司的联系网络中产生多米诺效应。流行病，比如禽流感、非典型肺炎或者猪流感，则在机场网络之间蔓延。气候变化能够改变生态系统内部不同物种之间的关系网络，恐怖主义和战争则瞄准了一国之中的基础设施网络。电网内会发生大规模停电，计算机病毒在互联网中传播，政府和企业则会通过人们的社交网络和其他数字通信工具来追踪他们的身份信息。最后，遗传学的各种应用取决于人们对在细胞内部起作用的基因调控网络知识的掌握。

在所有这些情况中，我们都会处理大量不同元素（个人、公司、机场、物种、发电站、计算机、基因……）的集合，它们通过无

序的多种相互作用模式而彼此关联，即它们都有着某种潜在的网络结构。通常，这种隐含的网络结构是理解前述重要现象的关键所在。其中一个很好的例子便是上世纪80年代大西洋西北海域鳕鱼种群的衰竭。当时，鳕鱼的短缺给加拿大水产业造成了巨大的经济危机。加拿大境内的利益相关者吁求更多地猎捕海豹，他们认为控制鳕鱼捕食者的数量有助于阻止鳕鱼种群的衰竭。大量的海豹在上世纪90年代遭到猎杀，但鳕鱼种群并未恢复。与此同时，生态学家们则对关联鳕鱼和海豹的不同食物链进行了研究。到上世纪90年代末期，他们已经为研究发现的关联这两个物种的大量不同食物链条绘制了一幅详尽的网络图（图1）。根据这个复杂的网络图，捕杀鳕鱼捕食者并不必然有助于鳕鱼种群的恢复。比如，海豹捕食大约150种猎物，其中也包括鳕鱼的其他捕食者。因此，海豹种群数量的减少便增加了其他鳕鱼捕食者对其种群数量所造成的压力。

生态系统乃复杂的物种网络：如果我们想要理解并管理这些物种，将这种底层的网络结构纳入考虑范围则至关重要。我们对其他一些基于网络结构的系统也必须采取类似的谨慎态度。例如，像艾滋病之类的传染病的蔓延就受到某些人群内部无保护性关系模式的强烈影响。同样，流动性冲击则取决于银行间货币交换网络的相互交织。

上述所有例子都是所谓**涌现现象**的例子。此种现象乃无法通过观察构成系统的单个元素而进行预测的集体行为。通常，呈现这些现象的系统被称为**复杂系统**。比如，单个的蚂蚁是相对笨拙的昆虫，但众多蚂蚁一起则能够进行如修建蚁冢或者储存大量食物这样复杂的活动。而在人类社会，社会秩序产生

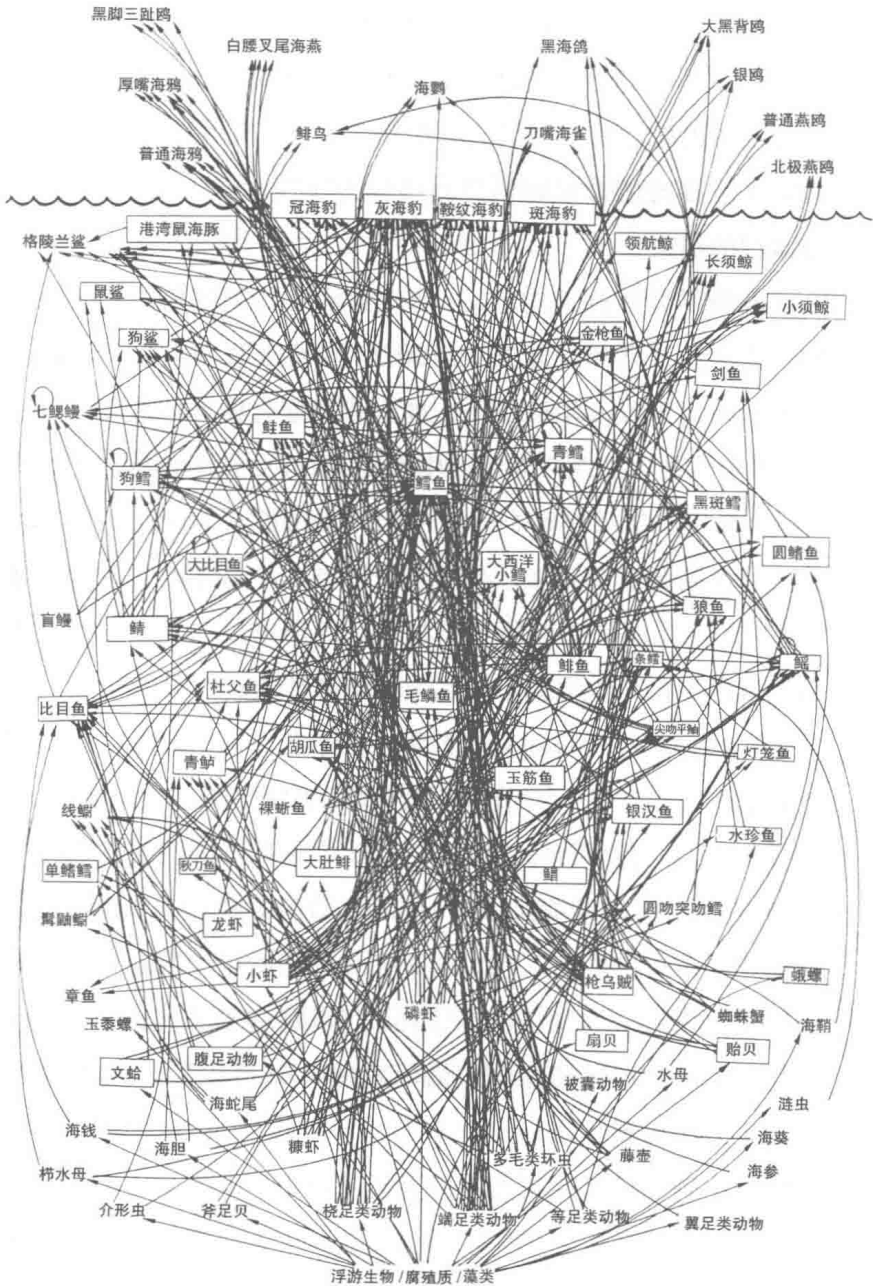


图1 加拿大东部西北大西洋“斯科舍大陆架”食物网局部图。箭头方向从捕食者指向猎物

- 2 于自主个体的结合，尽管他们的利益往往相互冲突，但最终仍然合力执行凭一己之力无法完成的任务。类似地，某个鲜活有机体的生命力来自其不同组分的相互作用；互联网应对错误、攻击和信息量高峰的非凡弹性是网络作为整体的性能，而非单个机器运行的结果。

网络及其所强调的互动，乃理解诸多此类现象的关键。设想两支足球队的玩家水准十分相近，最终表现却差异甚远。这种差异很可能取决于球员们在场上相互配合的好坏程度。类似地，单个球员可能在联盟球队中表现尚好，而在国家队中却表现欠佳，因为该球员在两个团队中的相对位置有所不同。团队的表现是某种涌现现象，它不仅取决于单个参与者的才能或个体技艺的总和，而且还取决于参与者之间所形成的互动网络。许多涌现现象都严重依赖于其底层的网络结构。

网络方法将所有注意力都集中在了单个系统内相互作用的全局结构之上，而每个组成部分的具体属性均被忽略。结果，像计算机网络、生态系统或者社会群体等十分不同的系统都用同一种工具来描绘，那就是图（graph），即由多种关联所结成的一种单一的节点架构。这个方法最初由莱昂哈德·欧拉在数学领域发展起来，之后扩展至广泛的学科领域，包括大量使用这种方法的社会学，以及最近的物理学、工程学、计算机科学、生物学和其他诸多学科领域。

- 4 使用同一种工具来表现差异显著的不同系统只能以某种高度抽象的方式完成。系统细节描述的缺失在普适形式中得到弥补，即将十分不同的系统视作相同理论结构的不同实现形式而加以考虑。由此观之，计算机病毒的传播可能与流感类似；劫持

一个路由器可能与某个物种在生态系统中的灭绝有着相同的影响；而万维网的增长则能与科学文献的增长放在一起比较。

这条推理线索提供了诸多洞见。比如，把系统呈现为图能让我们察觉到那些将明显不相关元素囊括在内的大规模结构。2003年，瑞士电网中的一个小事故触发了一场大规模停电事件，其影响波及1000公里之外的西西里岛。专注网络结构让我们看到，遥远事物之间最终可能通过难以置信的关系或传播短路径而强烈地关联着。地理和社会上相互隔离的两个个体——比如某个热带雨林中的居民和伦敦金融城中的某位经理——仅通过六度分隔（six degrees of separation）就能相互关联，这个最近的观察与现实相去不远。并且，这种现象可用社会关系的网络结构加以解释。

网络方法还揭示出系统的另一个重要特征，即某些不受外部控制而发展起来的系统仍然能够随机发展出某种内部秩序。细胞或生态系统并非“设计”而成，但仍以某种牢固的方式起作用。类似地，社会群体及社会趋势源于大量不同的压力和动机，但仍然展现出清晰和确定的图景。而互联网和万维网则在缺乏任何监管机构的情况下兴盛起来，并由大量不相关的因素所推动，但它们通常还是按照一致且有效的方式运转。所有这些现象都是**自组织过程**，即系统内部秩序和组织并非外部干预或整体设计的结果，而是局部机制或倾向在成千上万次相互作用中迭代产生的现象。网络模型能够以清楚和自然的方式描述自组织在诸多系统中是如何产生的。同样，网络让我们能够更好地理解诸如计算机病毒的快速传播、大规模流行病、基础设施的突然崩溃，以及社交恐惧症或音乐流行之爆发等各种动态过程。

在复杂、涌现以及自组织系统的研究领域（即关于复杂性的现代科学）中，网络作为通用的数学框架而变得愈发重要，涉及大量数据时尤其如此。这通常体现于个人在搜索引擎中的累积查询、社交网站的更新、在线支付、信用卡数据、金融交易、移动电话中的GPS（全球定位系统）位置等情况中。在所有这些情形下，网络对于整理和组织这些数据，进而将个人、产品和新闻等相互关联而言是重要的工具。类似地，分子生物学则越来越依赖计算策略以便在其自身产生的大量数据中找到秩序。科学、技术、健康、环境和社会等许多其他领域也是如此。在所有

6 这些情况中，网络正成为揭示复杂性之隐藏结构的典范。

富有成效的方法

穿越欧拉之桥

在俄罗斯的加里宁格勒市，一座名为奈佛夫的岛屿坐落于普雷格尔河内。该市300年前曾隶属于普鲁士王国，彼时唤作哥尼斯堡，而奈佛夫岛与该市其余部分则由七座桥相互连接（图2上）。当时的城里流行着一个谜题：是否可能在不重复走过一座桥的情况下，遍历所有七座桥？之前没有任何人成功做到这一点。另一方面，对这种走法的可行性，当时也不存在任何形式证明。而其解决方案来自古往今来最著名的数学家之一。1736年，莱昂哈德·欧拉以一种不寻常的方式画出了哥尼斯堡市的地图。他将陆地和岛屿的部分表示为点，而桥则为连接各点的线（图2下）。

当我们以这种方式看待该问题，事情就变得更加容易了。通过展示城市的网络结构，欧拉证明了谜题中的走法不可能。他的解释基于以下观察：若此种走法可行，则路程沿线所有点的

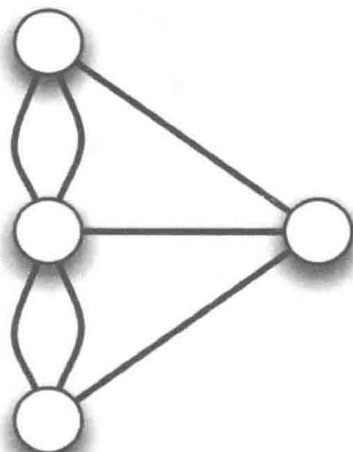
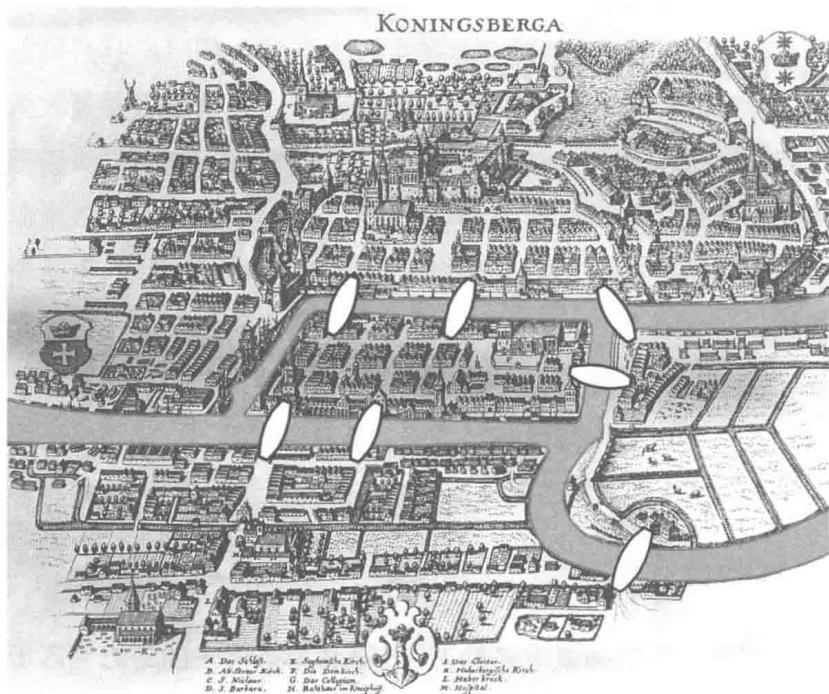


图2 版画中的哥尼斯堡(上),即现在的加里宁格勒,它表现了哥尼斯堡七桥之谜,莱昂哈德·欧拉将其表示为一幅简图(下)

连接数必为偶数。这是因为每当某人通过一座桥进入该市的任何部分时，他必须通过另外一座不同的桥离开。总之，每个区域必须有偶数座桥，比如2座、4座、6座等等。只有起点和终点可以有奇数个连接数：起点只能有一座桥，终点亦复如此。不幸的是，哥尼斯堡地图所有顶点的连接数均为奇数。因此，人们不可能一次性遍历所有桥而不重复。

哥尼斯堡地图这种简单的数学图是图的首个例子。数学家将构成这幅图的点和线分别称为**顶点**和**边**。如今，欧拉已经因为开启了一整个建立在图解分析基础之上的数学分支而被人们铭记。他的这种直觉可被认为是网络科学的首个创立契机。在他之后，许多数学家都曾研究过网络的形式特征，科学家则将它们应用于更加广泛的问题之中：1845年G.R.基尔霍夫的电路，1857年A.凯利的有机成分异构体，1858年由W.R.哈密顿提出的“哈密顿圈”，等等。其中一个著名的应用是于19世纪中期提出的“地图着色问题”。当时，地理学家正在设法计算出绘制地图所需的最小颜色数量，其中相邻的国家应有不同的颜色。这不仅仅是个理论问题：考虑到为数众多的国家和印刷行业中数量有限的不同油墨，使用最少数量的颜色显得至关重要。从经验角度看，三种颜色不够用，四种颜色则似乎很奏效。人们直到1976年才证实了解决方案确为四种颜色。证明基于将一张地图以图的方式呈现出来，其中的节点为国家，边则画在两个共享一个边界的国家之间。

出走的女孩，澳大利亚人和芝加哥工人

1932年的秋天，在两个星期内有14名女孩从位于纽约州的哈德森女子学校中出走。这种出走率不同寻常。学校管理