

网 络 经 济 译 丛

一个相互连接的时代科学

The Science of a Connected Age

[美] 邓肯·J·瓦茨 (Duncan J. Watts) 著

陈禹 等译

方美琪 校

Six Degrees

六度分隔



中国人民大学出版社

网 络 经 济 译 丛

一个相互连接的时代科学

The Science of a Connected Age

[美] 邓肯·J·瓦茨 (Duncan J. Watts) 著

陈禹 等译

方美琪 校

Six Degrees

六度分隔

图书在版编目 (CIP) 数据

六度分隔/ (美) 瓦茨 (Watts, D. J.) 著; 陈禹等译. —北京: 中国人民大学出版社, 2011. 3

(网络经济译丛)

ISBN 978-7-300-13424-6

I. ①六… II. ①瓦…②陈… III. ①网络理论—研究 IV. ①0157.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 033677 号

网络经济译丛

六度分隔

一个相互连接的时代的科学

[美] 邓肯·J·瓦茨 著

陈禹 等译

方美琪 校

出版发行 中国人民大学出版社

社 址 北京中关村大街 31 号

邮政编码 100080

电 话 010-62511242 (总编室)

010-62511239 (出版部)

010-82501766 (邮购部)

010-62514148 (门市部)

010-62515195 (发行公司)

010-62515275 (盗版举报)

网 址 <http://www.crup.com.cn>

<http://www.ttrnet.com> (人大教研网)

经 销 新华书店

印 刷 北京联兴盛业印刷股份有限公司

开 本 155 mm×230 mm 16 开本

版 次 2011 年 3 月第 1 版

印 张 15 插页 1

印 次 2011 年 3 月第 1 次印刷

字 数 211 000

定 价 46.00 元

版权所有 侵权必究

印装差错 负责调换

序 言

“在朝着自己设定的目标前进时，我决不会中止；但是在需要的时候，我经常暂时停顿一下。”

——道格拉斯·亚当斯（英国著名科学幻想小说作家），*The Long Dark Tea—Time of the Soul*

研究事物是如何运作的，是一件有趣的事情。大约十年前的这个时候，我正在康奈尔大学，一边凝视着长长的走廊，一边苦苦思索着，为什么自己会心血来潮地转过半个地球，跑到这样一个乍一看像是监狱的地方，潜心研究一些难以理解的东西。自那时起，在这段不长的时期中，世界已经变化了好几次，而我自己的世界也随之变化。全世界在互联网的迅速崛起面前目瞪口呆，痛苦地承受着从亚洲到拉丁美洲的一系列金融危机的侵袭，同时还震惊于从非洲到纽约发生着的各种种族暴力和恐怖主义，整个世界正在以没有人能够预见甚至了解的方式艰难地向前发展。

与此同时，在貌似平静的学术界的长廊里，一种新的科学出现了——一种直指我们周围正在发生的重大事件的科学。为了更准确地表述，我称这门新的科学为关于网络的科学，或者简称为网络科学。不像物理学中关于亚原子粒子或宇宙大尺度结构的那些理论那样，网络科学是关于实际世界的科学，即关于人、友谊、流言、疾病、时尚、公司和金融危机等种种日常事物的科学。如果想用最简洁的语言指出目前我们所处的、世界历史中这个特殊时期的特点，那就是它比以往任何时期都更紧密地、更全球性地、更令人无法预料地相互联系成一体。如果想要理解当今时代，这个相互联系的时代，我们就必须首先知道如何科学地描述这种状况，也就是说，我们需要一门关于网络的科学，即网络科学。

本书是关于这门科学的一个故事。它并不是那种十分遥远而且大得无

法简化的故事，以至于任何人都无法在有生之年完全弄明白它。确切地说，它是某个独行者在旅途中发生的种种故事的一些片段，这是一次在奇妙而美丽的地方的旅行。毋庸讳言，每一个故事都是从某种特定的视角去讲述的，不管是否公开说明这点。而这个故事当然是从我个人的视角出发去叙述的。部分原因是因为我参与了这些事件，它们处于我职业轨迹的中心。但也还有另一个更深一层的原因需要说明。一般来说，科学教科书总是干巴巴的、很吓人的样子。从看似不可能的问题出发，进行艰难的逻辑上的跋涉，达到似乎是无可争辩的结论。教科书中的科学实在是令人望而却步、避之不及。即使当科学被认为是一种发现的行动，是人类取得的一种成就的时候，事情发生发展的实际过程仍然被掩盖在一层神秘的面纱后面。我本人关于物理和数学课堂的主要印象，就是一种沮丧感，觉得这实在不是正常人能干的事情。

但是真正的科学不是这样的。最终我明白了，真正的科学就出现在杂乱的、含糊不清的实际的世界里。科学家力图搞清楚这个世界；他们和所有人一样遭遇着同样的局限和混乱，但是仍然向这个目标努力前进。这个故事里的所有人物都是极有才能的人，他们作为科学家，通过终生的努力工作，最后取得了成功。但是，他们也是人。我很清楚这一点，因为我认识他们，和他们一起努力过，也经常一起经历失败，然后自己爬起来，重新再去尝试。我们的论文一遍遍地被退回；我们的观点不被接纳；我们有时还错误地理解那些后来看起来很明显的事情。很多时候我们觉得很受挫，或觉得自己很傻，但是我们仍然没有放弃，继续奋斗，目标在一步一步接近。研究科学和做任何别的事情是一样的，但是当科学走进更广阔的世界，每个人都可以通过阅读书本去了解它时；科学已经过了不断地重建和改进，并具有了在形成过程中无法具备的光环。这就是科学形成中的故事。

当然，任何故事都不是发生在真空中的。在这本书里我想说明的是：网络科学从何而来，它在科学进步中占什么位置，关于这个世界，网络科学能告诉我们些什么。由于已经有许多人对“网络”进行了长期的思考，所以除了我所提到的，还有很多方面可以讨论。但是即使在这里不得不有所省略（而且恐怕已经省略了很多），我还是希望能强调这样一个观点，

即这个相互连接的时代不能被塞进某一个世界模型，或按某一个单独的规则来理解。一句话，这些问题实在太多、太复杂，坦白地说是太难了。

同样，坦率地说，现在网络科学对这些问题仍然还没给出答案。面对过分夸大我们发现的重要性的诱惑，我们必须清楚地认识到，许多实际的科学都是在用极其简化的手法，去描述极其复杂的现象。事实上，从简单处开始是弄清任何复杂事物的第一步，从简单模型中得到的结论经常不仅强有力，而且非常吸引人。通过排除复杂世界里不容易理清的细节，通过找出一个问题的核心，我们可以更深入地了解这些具有紧密联系的系统；由此了解到的信息是不可能通过对这些系统的直接研究推测出来的。这样做的代价在于，由于研究的方法比较抽象，所以很难直接运用于实际应用中。如果我们想要有所改进或进步，这种代价是必需的，事实上也是不可避免的。在设计师能够建造飞机以前，物理学家需要首先知道飞行的基本原理，网络系统也是一样。在本书的开始，我们会先思索一些简单网络模型的著名应用——努力去想象一个很庞大的飞行器看起来更像什么。但是今天我们必须诚实，并且要能够区分推测和科学本身。所以，如果你正在寻找这些答案，可以去看看第一章。只有将科学定义为它可以解释什么而不是它不能解释什么，科学才会更有力量，如果理论混淆了这两个方面，那它就只会给我们帮倒忙。

网络科学能做什么？它为我们提供了另一种思考世界的方式，并且也帮助我们用新的思想来考虑旧的问题。这本书实际上讲了两个故事。首先，这是网络科学本身的一个故事——网络科学从哪来，它已经指明了什么，它是怎么指明的。其次，它是关于现实世界里的现象的故事，例如疾病流行、文化时尚、金融危机、体制创新等等，网络科学尝试去了解和解释它们。这两个故事在本书里是平行讲述的，但是一些章节会对某个方面有所偏重。第2至5章主要是介绍了解现实网络世界的不同方法，学术理论是如何为发现过程提供帮助的；在和史蒂文·斯道格兹（Steven Strogatz）合作的关于小世界网络研究中我自己的那部分工作是如何开始的，最近几年又是如何发展和扩大的等等。第6至9章则更多地侧重于用网络的观点来思考世界，它的应用如疾病传播、文化时尚、商业创新，而不是将网络科学本身作为研究的对象。

虽然本书每一章都是基于前面的内容，但是并不是必须将书从头看到尾。本书第1章给出故事的背景，第2章进一步充实这个背景。如果你想跳过这些章节直接到新科学，你完全可以这样做。第3、4、5章总体上可以归到一起，它们主要描述网络系统中不同模型的创建和内涵，特别是最近研究比较多的小世界网络和无标度网络模型。第6章讨论疾病和计算机病毒的传播，这一章对前面章节的涉及比较少。第7、8章处理相关但是不同的社会对象，讨论关于文化时尚、政治动乱、金融泡沫等告诉了我们什么。第9章讨论组织的坚固性和它对现代公司企业的启示。最后第10章对故事给予总结，提出一个简要的概括。

就像它提到的故事，本书也有一个故事，这个故事里包含了很多。在过去的这几年来里，我的合作者和同事们——特别是 Duncan Callaway, Peter Dodds, Doyne Farmer, John Geanakoplos, Alan Kirman, Jon Kleinberg, Andrew Lo, Mark Newman, Charles Sabel 和 Gil Strang——已经组成了一个包括观点交流、相互鼓励、提供动力和娱乐的固定的资源网络。如果没有他们，本书的编写将会很难，缺少了他们就将缺少很多写作的素材，即使是最熟悉的内容也会写得不充分。没有诺顿的 Jack Repcheck 和珀尔修斯的 Amanda Cook 的鼓励，我不会开始本书的写作。如果没有我在诺顿的编辑 Angela von der Lippe 的耐心指导，我也不可能完成此书。我还要感谢 Karen Barkey, Peter Bearman, Chris Calhoun, Brenda Coughlin, Priscilla Ferguson, Herb Gans, David Gibson, Mimi Munson, Mark Newman, Pavia Rosati, Chuck Sabel, David Stark, Chuck Tilly, Doug White, 特别是 Tom McCarthy, 他审读了不同版本的草稿，并给出了评述。在准备数据时，Gueorgi Kossinets 给予了非常宝贵的帮助，Mary Babcock 在拷贝编辑方面做了大量工作。

在更大的范围内，我要深深感谢哥伦比亚大学的许多人——Peter Bearman, Mike Crowe, Chris Scholz 和 David Stark——同时还要感谢圣菲研究所的 Murray Gell-Mann, Ellen Goldberg 和 Eric Jen, 美国麻省理工学院的 Andrew Lo 给予我的自由和支持，让我有机会去追求我的梦想。感谢国家科学基金会、英特尔公司、圣菲研究所和哥伦比亚地球学院给予我的经济支持，让我能够教授和研究，能够在圣塔菲和纽约有一系列的研

究室，没有它们大量的合作，项目就不会存在了。无论得益于机构还是个人，在这许多的重要影响中，有两个人我必须格外指出。首先是史蒂文·斯道格兹，一个在这么多年中鼓舞人心的指导者，一个珍贵的合作者，一个好朋友。另一个是哈里森·怀特（Harrison White），是他带我来哥伦比亚，让我第一次接触了圣菲研究所，最终带我走进社会学领域。没有他们两位，这些研究就不可能存在。

最后，还要感谢我的父母。讨论一个人的成长对其生活的影响可能是很傻的，但是对于我一些事情似乎很明显。我的父亲——我所知道的第一个科学家，也是第一个指导我经历基础研究的快乐和痛苦的人，他的行事方式指导了整本书的思想。我的母亲不仅教会我怎样写作，更在我小时候就让我意识到只有当人们了解思想，思想才能发挥它的作用。通过他们不平凡生活的例子，给了我勇气，去尝试我原以为永远不可能实现的事物。所以，本书当然也是献给我的父母的。

邓肯·J·瓦茨
2002年5月于纽约

序言	1
第 1 章 相互连接的时代	1
涌现	4
网络	7
同步	9
没人走过的路	12
关于小世界的问题	15
第 2 章 一门新科学的诞生	20
随机图论	20
社会网络	24
动力学问题	25
从随机性出发	30
物理学家来了	34
第 3 章 小世界	40
从朋友那里获得帮助	41
从穴居野人到索拉利人	44
小世界	47
尽可能地简单	51
真实的世界	58
第 4 章 超越小世界	65
无标度网络	67

目录

CONTENTS



富者更富	71
成为富人会很困难	73
再次引入组织结构	75
隶属关系网络	78
首长和科学家	81
复杂化	84
第 5 章 在网络中搜索	88
米尔格拉姆究竟向我们展示了什么	90
六这个数字是大还是小?	93
小世界里的搜索问题	96
社会学反击	102
在 P to P (点对点) 网络中搜索	110
第 6 章 疾病流行和系统失效	115
酷热地带	115
互联网上的病毒	117
流行病中的数学	120
小世界中的流行病	125
疾病的渗透模型	131
网络、病毒和微软	134
故障和坚固性	136
第 7 章 决策、错觉、群体癫狂	140
郁金香泡沫经济	141
恐惧、贪婪和理性	142

集体决策	145
信息级联 (Information Cascade)	147
信息的外部性	149
强制外部性	152
市场外部性	153
合作外部性	154
社会决策的制定	155
第 8 章 阈值、信息级联和可预测性	157
决策的阈值模型	158
捕获差异	162
社会网络中的信息级联	165
相变和信息级联	172
跨越鸿沟	174
非线性的历史观	176
人群的力量	179
再谈坚固性	180
第 9 章 创新、适应和恢复	183
TOYOTA - AISIN (丰田—爱信) 危机	184
市场和层次	188
产业的分化	191
模糊性	194
第三种方式	196
应对模糊性	198
多尺度网络	202
从灾难中恢复	207

目 录

CONTENTS

目 录 CONTENTS	第 10 章 开端的结尾·····	212
	“9·11”事件·····	214
	相互连接的时代的教训·····	219
	译后记·····	225

相互连接的时代

1996 年的夏天，水银柱居高不下，达到了创纪录的高温，默默地表明着气候的不可预测性，全国一片哗然。美国人躲在自己的小窝里，忙着填充自己的冰箱，开启空调，而且毫无疑问还紧盯着不断报告着高温的坏消息的电视机。事实上，不管在什么季节，美国人已经变得更加依赖于越来越多的、难以置信的、各种各样的设备、设施和服务，使得任何时候人们在家里都处在舒适的环境之中。如果说所有这些带来了更多的休闲、更多的自由、更加享受的物质生活，那么这些创造和努力都不算过分。从争论车辆的大小到讨论小城市中的使用大量空调的购物中心的大小，当今美国层出不穷的各种十字军运动，并没有给这个任性的、有时甚至是自负的星球带来严谨的秩序。

驱动着这个无情的文明机器的发动机，是一种和大地一样平常的东西——电力系统，正是它和人类的其他发明一起，从根本上改变了人们的生活。像蜘蛛网一样覆盖了整个北美大陆的这个巨大网络，用高压

电缆连接着众多电站和变电所。它们沿着乡村的小径，绕过阿巴拉契亚山脉的陡峭山崖，像一排排士兵一样穿过广袤的西部大平原，今天，这个巨大的电力传输网络已经成为经济的命脉，成为文明社会的软肋。

在 20 世纪较为平静的年代中，花费巨资建立的这个电力系统，可以说是当代社会最基本的技术设施。电力技术比公路和铁路还要普遍，比汽车、飞机、计算机更为基础，它为所有这些技术提供动力，它是工业和信息社会大厦真正的基石。没有电力，我们简直什么都不能做，什么都不能用，什么都不能消费；没有电力，所有这些用品或服务，或者是根本就不存在，或者是无法提供，要么就是极不方便、极其昂贵。电力已经成为生活的基础，以致我们无法想象，没有它我们该如何生活，一切都要退回到最原始的状态，就像纽约在 1977 年经历的那 25 小时的可怕时光。那时还没有多少计算机，当时的汽车、工厂、家用电器也还远远没有像今天这么依赖电子设备。由一些没有预计到的微小错误和系统的薄弱环节的巧合，导致了停电，使纽约陷入了一片黑暗。它的 900 万居民陷入了骚乱、抢劫和惊恐造成的混乱之中。当光明重现，清扫残局之后，损失的账单已经达到 3 500 万美元。这场灾难向政治家和管理当局发出了警告，他们齐声承诺，决不允许这样的事情再次发生，并且提出了一系列的方法实现这个承诺。正像我们已经看到的，在复杂的、相互连接的系统中，最精心安排的计划也很难有所作为，就像人们比方的那样，这只不过是在泰坦尼克号的灾难中重新安排一下甲板上的椅子而已。

和其他的基础设施，包括从公路系统到互联网在内都一样，电力网并不是一个简单的东西，它是由多个地区网络，按照约定俗成的方式连接在一起而形成的。其最大的管理机构，西部电力系统协调委员会管辖着 5 000 多个电站、15 000 多条线路，它属下的电站和电力分销公司为洛杉矶以西，从墨西哥边境到北极圈的所有人和所有事情提供着电力。在 1996 年的炎夏中，每一个人都把空调开到最大，每家后院的烧烤都要配上冰冻的百威啤酒，这一切都要从电力网中获取它们所需要的能量。夏季旅游的人群转向东部，滞留在海边的城市，例如洛杉矶、旧金山和西雅图，使陈旧的、已经负担过度的电力网不得不承担更大的压力。

与造成的巨大灾难相比，最初的火花，8 月 10 日发生的事件实在是一

件比较小的事情。在西俄勒冈州波特兰以北，由于一条电缆拉得不够紧，下垂下来搭到了树上，引起了火花。位于博纳维尔的电力管理部门发现了这个问题，但是并没有把它当回事。然而，随后会怎么样呢？这实在是让人很吓人的，完全没有预测到的。

出问题的线路，Keeler-Allston 电缆，是从西雅图向波特兰送电的平行电缆之一，应付故障的机制能够自动地把负载转到另外的线路上去。不幸的是，其他线路的负载也已经接近它们的极限，额外的负担超出了它们的能力。于是，一条接一条，多米诺骨牌开始倒下。先是邻近的 Pearl-Keeler 电缆中断了。紧接着，五分钟以后，St. Jones-Merrin 电缆也出现了故障。需要转移的负载从东向西席卷而来，导致了极其危险的、大范围的电压振荡。

当电缆过载的时候，它就会变热并垂下来。在八月份，树木生长得很快。到下午四点钟的时候，即使是负载较轻的线路，也已经开始下垂了。过载的 Ross-Lexington 电缆，就像两小时以前的 Keeler-Allston 电缆一样，终于触到了无处不在的树木。这些对于附近的 McNary 电站以及相邻的 13 个电站来说，已经远远超出了这些系统在设计时所考虑的应对事故的能力范围。就这样，在最初的电压振荡开始以后的 70 秒钟内，加利福尼亚—俄勒冈地区电网的所有三条电缆，西海岸电力传输的咽喉，全部停止了工作。

电力的一个基本规律是很难存储。你可以用电池给你的手机或便携机提供几个小时的电力。但是，至今还没有人发明为城市存储电力的方法。因此，只能在需要电力的时候发电，并及时送到需要的地方。换句话说，一旦电生产出来了，就必须准确地送到某个地方去，例如北加利福尼亚。加利福尼亚局部电网的失效，造成电力像潮水一样涌向东部和南部，席卷了爱达荷、犹他、科罗拉多、亚利桑那、新墨西哥、内华达以及南加利福尼亚等州，影响了几百条线路和几百座电站，把整个西部分割成了四片孤岛，750 万人受到了影响。入夜，旧金山的天空变黑了。幸运的是没有发生抢劫，这也许是因为旧金山人和纽约人的不同。但是，由于这个影响，175 台发电机组停止了工作，其中有些核反应堆需要花费几天时间才能重新启动，总的损失估计达到 20 亿美元。

这是怎么发生的呢？是的，在一定意义上我们很清楚地知道事情的经过。博纳维尔的工程师和管理部门马上开始工作，于10月中旬提交了报告，详细说明了事情的经过。问题在于，太多的人要问太多的问题，而事实就这这一点。实际上，报告说了一大堆其他的问题，例如维护马虎、没有足够的钱去设置警告标志等等，运气不好也被包括在内。系统中某些本来可以起缓冲作用的单位，或者是由于维修而停止了服务，或者是由于环境保护法不准水电站截断三文鱼赖以生活的河流而被关闭了。总之，报告指出了系统中难以理清的、种种复杂的相互关系。

说到底，报告是在准确地指出问题和避免招致不满之间摇摆。它没有回答应该回答的中心问题：是什么导致系统出现了这样的问题？正是在这个问题上，我们完全没有得到答案。电力系统之所以出现这样的问题，根源在于它是由许多部分组成的，这些部分各自的行为是非常清楚的（关于发电和送电的物理学知识属于19世纪），问题是它们的集体行为。这就像在足球场上的球员和股票市场上的交易者，他们的行为有时候是有序的，有时候则是混乱的、令人费解的，甚至是破坏性的和毁灭性的。回顾1996年8月发生的震撼西部的事件，这并不是一些互不相关的偶然事件的简单组合造成的，而是开始的问题导致第二个问题的发生，第二个问题又导致第三个问题的发生，依此类推下去。

这里还要说明一点，其实需要确切了解的是：在什么条件下，哪种故障会发生；说得再确切一点，就是在何种条件下，哪些故障同时出现就会导致灾难。我们需要考虑的并不只是单个故障的后果，而是故障的组合，这就使问题变得更加复杂。8月10日的这场停电告诉我们，要防止这种多米诺骨牌式的连环故障，就需要添置备用的发电机，准备随时替换的机制，这样才能减少个别部分的故障对整个系统造成严重破坏的危险。问题的出现在于：系统的设计者没有把系统作为一个整体来进行规划。

涌现

请考虑一下，我们是如何理解下面这些问题的。究竟是什么原因使得相互连接的系统如此难以理解？是什么使得有机组成的系统具有完全不同于各部分简单堆砌所形成的集合？萤火虫群的闪光、蟋蟀群的鸣叫、心脏

里起搏细胞的跳动，所有这些都是怎样在没有集中指挥的情况下达到同步的？个别的病例是怎样发展成为疫病大流行的？个别的想法是如何发展成为社会时尚的？在通常很谨慎的投资人中，如何会出现很狂野的投资泡沫，以及一旦传播开来将会如何影响金融系统？像电力网络和互联网这样大型的、脆弱的网络，如何应对随机的故障和有意的攻击？人类社会中的规范和习俗是怎样进化和维系的，又是怎样被推翻和取代的？我们是如何在没有完整的中心信息库的情况下，在一个无比复杂的世界中，安排人力和资源或者回答问题的？公司是如何在其成员普遍没有足够的信息，甚至对于公司面临的问题都不甚了解的情况下，能够有所创新，甚至取得成功的？

这些问题之间的区别很大，但是，实际上都是同一个问题的不同版本而已。即个体行为是如何集成为集体行为的？尽管这个问题非常简单明了，但是它是整个科学最基本的、无处不在的问题之一。例如，人的大脑是上万亿神经元组成的、具有电化学功能的人体器官。但是我们每个人都清楚地知道，它并不只是一个器官，它具有感觉、记忆、个性等许多特性，这些都不是能够简单地用神经的集合来说明的。

正如诺贝尔奖得主菲利普·安德森（Phillip Anderson）在 1971 年发表的著名论文《多就是困难》中所说的，物理学已经相当成功地对于基本粒子进行了分类，描述了它们的个别行为和相互关系，达到了原子的尺度。但是当一大堆原子集中到一起的时候，情况一下子就变得完全不同了。这就是为什么化学是一门独立的科学，而不只是物理的一个分支。沿着规模增大的阶梯再向上看，分子生物学不能简单地归结为有机化学，而医学也要比分子生物学的直接应用要丰富得多。在更高的层次上，我们遇到更多的领域，从生态学到流行病学、社会学、经济学，它们中的每一个领域都有各自的规律和原则，这些并不能简单地还原为心理学和生物学的指示。

在经过了几百年的顽固拒绝以后，科学终于接受了用这样的观点去看待世界。19 世纪的法国数学家拉普拉斯曾有这样的梦想，整个宇宙可以利用足够巨大的计算机，通过化简到基本粒子物理学的方式，得到完全的理解。这个梦想使得科学界花费了 20 世纪的大部分时光和难以估量的精