



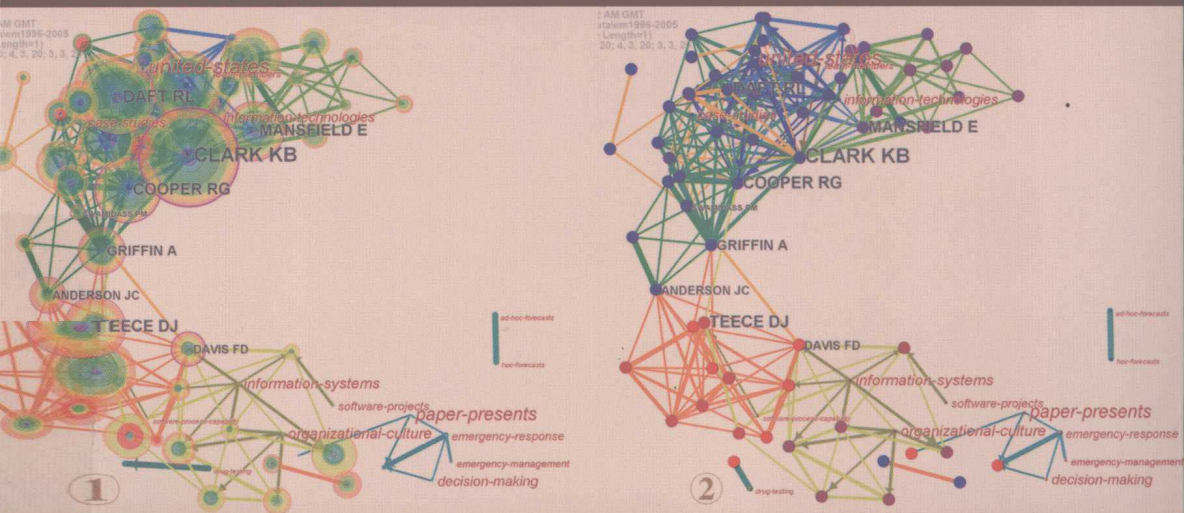
知识计量与知识图谱丛书

主编 刘则渊

MAPPING KNOWLEDGE DOMAINS OF SCIENCE OF SCIENCE

科学学知识图谱

尹丽春 著



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



教育部“985工程”哲学社会科学创新基地
暨辽宁省高校人文社会科学重点研究基地资助

知识计量与知识图谱丛书

主编 刘则渊

MAPPING KNOWLEDGE DOMAINS OF
SCIENCE OF SCIENCE

科学学知识图谱

尹丽春 著



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

科学学知识图谱/尹丽春著. —大连:大连理工大学出版社, 2008. 11

(知识计量与知识图谱丛书)

ISBN 978-7-5611-4502-9

I. 科… II. 尹… III. 科学学—图谱 IV. G301—64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 173979 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:155mm×230mm 印张:9.25 字数:116 千字
2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑:刘新彦

责任校对:杨焕玲

封面设计:宋 蕾

ISBN 978-7-5611-4502-9

定 价:32.00 元



知识计量与知识图谱丛书

编写委员会

丛书主编 刘则渊

大连理工大学教授、博士生导师

副主编 陈超美

计算机科学博士

美国德雷塞尔大学终身教授

大连理工大学长江学者讲座教授

H·克雷奇默

哲学博士及心理学博士

德国 COLLNET 国际网络组织主席

大连理工大学海天学者特聘教授

委员(按姓氏笔画排序)

陈悦 丁堃 侯海燕 姜春林

王续琨 王前 杨中楷 尹丽春

执行编务

侯海燕

引领学科前沿的知识计量学探索

知识,作为人的一切活动的要素,始终贯穿于人的生产与生活之中,影响着人的生存与发展。因此,知识乃是人的一种生存方式。当今世界,知识已经成为经济社会发展的首要资源与第一动力,人类正进入知识革命、知识经济和知识社会的新时代。

当前,我们面临的知识挑战在于:一方面知识非常丰富,并呈爆炸式增长,另一方面知识又格外稀缺,我们生活和淹没在知识海洋中,却难以选择所需要的知识;一方面知识广泛传播,网络改变了知识扩散的空间障碍,另一方面知识又壁垒森严,不同地区及人群的知识差距与数字鸿沟同时并存,并与收入差距相伴而生、互为因果;一方面知识更新加快,更新周期不断缩短,另一方面知识老化也同步加快,知识半衰期急剧下降。因此,如何克服知识稀缺、知识壁垒、知识老化的问题,有目的地追踪知识的演进、趋势与前沿,有效地获取、学习和更新知识,是我们谋求全面、协调和可持续发展的前提与关键。

迄今为止,对于存储在著作和期刊中的文献知识,我们可以借助经典文献检索方法来查询重要文献中的专业知识;对于存储在计算机数据库中的各种数字化知识,我们可以通过网络、搜索引擎与浏览器等工具去查找有关的知识;而对于存储在人的活载体身上的隐性知识,我们仍然是通过师徒传承方式来直接体验式获取,或聘任专家来直接利用和发挥其隐性知识的才能。但是,面对海量的文献数据与知识的复杂多变,凭借传统的文献检索方法和网络搜索工具,已难以保证查找到关键性文献和前沿知识;同行专家和师徒传承的方式虽然至今仍是判断知识前沿、获得隐性知识的主要途径,然而要在不断更新、交叉的知识领域及其众多专家群体中遴选出高水平专家,并不容易。

现在,一种有效获取知识、发现知识和探索知识前沿的新领域与新手段——以知识单元为分析基础的知识计量学和科学知识图谱,正在蓬勃兴起。知识计量与知识图谱,不仅能够引领我们从海量文献中进入学科前沿领域,而且可以改变我们观察世界的方式。

知识计量学(knowmetrics),是我在1998年北京举办的“科研评价暨科计量学与情报计量学国际研讨会”上提出的一个新学科设想。当时,我在《赵红州与中国科学计量学》的发言中,讲到我国已故著名科学计量学家赵红州曾谈及科学计量学和经济计量学两门姊妹学科的关系,二者结合对于知识经济时代开展知识经济学研究具有特殊意义,并指出:“看来很有必要将科学计量学拓展为‘知识计量学’,并与经济计量学结合起来,对知识生产和应用,知识投入和产出,知识存量和流量,知识分配与转移,知识价值和价格等,进行广泛的跨学科的量研究。”^①

其后,我们对知识计量学的涵义和应用做了进一步的探讨^{②③④},并定义“知识计量学是以整个人类知识体系为对象,运用定量分析和计算技术对社会的知识能力(生产、流通、消费、累积和增殖等)和知识的社会关系(组织形式、协作网络、社会建制等)进行综合研究的一门交叉学科,是正在形成的知识科学中的一门方法性的分支学科。”^⑤这个定义只是依据科学学和科学计量学的传统,提出了知识计量学的一般研究范式;而对于知识计量学关键的知识单元计量方法,涉及甚少。这时,恰好科学知识图谱和信息可视化技术的产生,为知识计量学的发展提供了契机。

科学知识图谱(Mapping Knowledge Domains),是以科学知识为对象,以可视化形式显示科学知识的发展进程与结构关系的一种图形。科学知识图谱研究,是以科学学为研究范式,以引文分析方法和信息可视化技术为基础,涉及数学、信息科学、认知科学和计算机科学诸学科交叉的领域,是科学计量学和信息计量学的新发展^⑥。科学知识图谱具有“图”和“谱”的双重性质与特征:既是可视化的知识图形,又是序列化的知识谱系,显示了知识

① 刘则渊. 赵红州与中国科学计量学. 科学学研究, 1999, 17(4): 104-109.

② Liu Zeyuan. On Scientometrics-Based Institutional Science studies, Second Berlin Workshop on Scientometrics and Informetrics/Collaboration in Science and in Technology and First COLLNET Meeting, 1-4 September, 2000. Freie Universität Berlin, Germany. 刘则渊. 基于科学计量学的制度科学学. 科研评价与大学评价. 北京: 红旗出版社, 2001.

③ Liu Zeyuan. Knowmetrics and its Application in the Measurement of Knowledge Economics(知识计量学及其在知识经济测度中的应用). Nistads International Workshop on Emerging Trends in Science Technology Indicators of Collaboration and Second COLLNET Meeting, 20-25 February 2001 New Delhi, India.

④ 刘则渊, 冷云生. 关于创建知识计量学的初步构想. 见: 王战军, 蒋国华. 科研评价与大学评价(国际会议论文集). 北京: 红旗出版社, 2001. 401-405.

⑤ 刘则渊, 刘凤朝. 关于知识计量学研究的方法论思考. 科学学与科学技术管理, 2002, (8): 5-8.

⑥ 陈悦, 刘则渊. 悄然兴起的科学知识图谱. 科学学研究, 2005, 23(2): 149-154.

元或知识群之间网络、结构、互动、交叉、演化或衍生等诸多复杂的关系^①。

科学知识图谱,源远流长,形成于上世纪90年代,进入新世纪而突飞猛进,其形式多样,主要的形成途径和形式是:其一,在引文分析的基础上,运用多元统计方法及相关可视化软件,绘制的多维尺度分析知识图谱;其二,把复杂网络系统和社会网络分析结合起来,应用于引文网络中,绘制的社会网络分析知识图谱;其三,运用融合了人机交互、数据挖掘、图像技术、图形学、认知科学等诸多学科原理和方法的信息可视化技术,绘制的多元、分时、动态网络分析知识图谱。

我们注意到,源于科学计量学的知识计量学与科学知识图谱两个研究领域,有着不可分割的紧密联系。二者均以知识领域为研究对象,以知识单元为分析基础,以引文分析为基本方法,以信息可视化技术为研究手段;绘制知识图谱总是以知识计量分析为前提,而知识计量研究的结果越来越以知识图谱形式来展现。在学科的意义,知识图谱作为知识计量学的表现形式,属于知识计量学的学科范畴。我们也可以这样说:

知识计量与知识图谱,是科学学及科学计量学进入学科发展新阶段的标志,也是为人们探索学科前沿提供知识服务与导向的指南。而这正是《“知识计量与知识图谱”丛书》著作的知识背景和出版的根本宗旨所在。

正是在这样的学术背景下,我们大连理工大学科学学与科技管理专业博士点的学科建设进行了重大调整。2004年,我们紧紧盯住科学知识图谱技术的国际前沿先进水平,开展基于知识计量和知识图谱的科学学与科技管理学科建设。

此时,恰逢“985工程”二期教育部哲学社会科学创新基地暨辽宁省高校人文社会科学重点研究基地——大连理工大学科技伦理与科技管理研究中心,依托科学学与科技管理、科学技术哲学两个专业正式成立。其中,科学学与科技管理博士点的专业教师和博士生们一起组成科研团队,结合专业跨学科的特点,创办了集网络计量学(Webometrics)、信息计量学(Informetrics)、科学计量学(Scientometrics)、经济计量学(Econometrics)于一体的网络-信息-科学-经济计量实验室(WISE LAB),隶属于创新基地。这个名称赋予“智慧”(wise)创意的实验室,确立了“科学可量,智慧无限,中西合璧,少长咸集”的理念。在学校的支持下,

^① 刘则渊,陈悦,侯海燕. 科学知识图谱:方法与应用. 北京:人民出版社,2008.

基地开展了热火朝天的学科建设和 WISE 实验室建设,聘任了美国著名信息可视化专家陈超美博士(Dr. Chaomei Chen)为长江学者讲座教授和著名科学计量学家克雷奇默博士(Dr. Hildrun Kretschmer)为大连理工大学海天学者特聘教授,开展了广泛的国际、国内及海峡两岸之间的学术交流与合作,开展了面向学科前沿的知识计量、知识图谱和知识可视化研究。

几年来,我们明确地把科学知识图谱作为跟踪科技前沿、选择科研方向、开展知识管理与辅助科技决策的普适工具,参与了王众托院士主持的国家自然科学基金重点项目“企业(组织)知识管理的若干基础问题研究”,承担了其中部分任务;连续获得大连理工大学人文社会科学研究基金重大项目、国家自然科学基金项目、国家社会科学基金项目和教育部博士点基金项目的资助,不断拓展学科知识前沿领域的知识图谱与知识可视化分析。由我们 WISE 实验室团队著述的学术专著《科学知识图谱:方法与应用》^①,就是其中的标志性研究成果之一。更重要的是,我们博士点、创新基地及 WISE 实验室造就和形成了一支以长江学者和海天学者为领军人物的高水平研究队伍,锻炼和培养我国第一批科学计量学博士。

现在呈现在读者面前的《“知识计量与知识图谱”丛书》一套五部著作,就是从基于知识图谱或知识计量的博士学位论文中精选出来,经过进一步补充加工而成的学术专著。从中我们不独看到这五位作者在著作中通过一幅幅知识图谱或表格的解读,形象地展示出某一门学科的学术前沿、代表人物和演化图景,而且了解到博士们通过攻读博士学位、撰写博士论文过程的自述,生动地表现出自己站在该学科奠基人和先驱者的肩膀上,跨入学科知识前沿,力求有所发展创新的征程。这套丛书具有如下几个特点:

学科的前沿性 这套丛书分别以科学计量学、管理学、科学学、专利计量与专利制度、隐性知识计量与管理为研究对象,作者都力图进入这些学科的前沿领域。例如,《科学计量学知识图谱》一书作者侯海燕博士,率先吃透多维尺度分析的可视化软件,利用国际权威期刊《科学计量学》(*Scientometrics*)的文献数据,绘制出各个阶段和总量的科学计量学知识图谱,不仅从总体知识图谱揭示出科学计量学的主流领域、热点前沿,以及

^① 刘则渊,陈悦,侯海燕等. 科学知识图谱:方法与应用. 北京:人民出版社,2008.

活跃在前沿领域的学术群体及其代表人物,而且通过不同时期的知识图谱展现出科学计量学前沿领域的演变历程。

数据的完整性 知识计量与知识图谱分析结果的可信度,首先取决于研究对象文献数据样本的完整性。因此,丛书作者们都在文献数据、统计数据或调查数据上下了很大功夫。例如,陈悦博士在《管理学知识图谱》一书中,通过国内外管理学界的广泛调研,选择出国际公认的管理学期刊群,获取了完整的文献数据,运用多维尺度分析和社会网络分析绘制出管理学知识图谱,展示了管理学的学科演进与最新前沿,管理学与其相关学科关系的深刻变化,同时还意外发现中外管理学与管理科学的语义差别,运筹学与管理科学的细微差异。

方法的先进性 这套丛书的名称是以知识计量与知识图谱的方法为标识的,尤为突出研究工具与方法的先进性。如《科学学知识图谱》作者尹丽春博士,把统计物理的复杂网络分析和社会学领域的社会网络分析二者结合起来,作为知识计量与知识图谱研究的新方法,用于科学学引文网络的结构分析,揭示出科学学引文网络具有复杂网络的“无标度”、“小世界”等普遍特性;并提出以反映引文网络知识流动和网络节点重要地位的中心性、中介性、亲近性指标,构建了网络节点上论文的评价指标体系,开辟了一条论文评价方法的新途径。

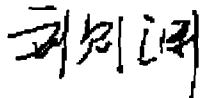
内容的创新性 一部著作的价值在于内容创新,避免述而不作。这套丛书五部著作的主要内容若干方面,都有独到创新之处。例如,杨中楷博士的《专利计量与专利制度》,创造性地把专利计量方法引入专利制度分析,展现出专利制度的基本功能向创新激励等一系列新功能的延伸与拓宽;通过专利文献引证分析,揭示出专利技术的来龙去脉、技术演进的时空结构、专利人的传承关系、技术之间和科学与技术之间的知识流动。李作学博士的《隐性知识计量与管理》,敢于选择难以言传的隐性知识测度与管理这个硬骨头来啃,作出了可贵的创造性探索。

但是,开创性的探索,往往是不完善的东西。这套丛书涉及的知识计量学问题尚不成熟,绘制知识图谱的工具只是静态的第一代信息可视化技术。因此,鉴于出版这套丛书的根本宗旨,我们希冀有志于以知识计量与知识图谱作为引领学科前沿指南的读者,密切关注基于新一代动态可视化技术的知识计量学新进展。

现在,我们 WISE 实验室团队正在长江学者陈超美教授带领下,制定了长江学者研究计划:宏观与微观知识计量学的理论和方法及其在知识

管理中的应用。也就是在陈超美开发的 CiteSpace 多元、分时、动态的新一代可视化技术基础上,深入开展知识计量和知识图谱研究,构建以知识单元为分析基础、具有统一研究范式、引领学科前沿功能更强的知识计量学。事实上,陈超美的《科学前沿图谱:知识可视化探索》等代表作^{①②③},已为宏观与微观知识计量学做了大量的奠基性工作;他不断改进与更新 CiteSpace 软件,使其成为更具智能型的知识可视化技术;我们在应用 CiteSpace 可视化技术探索学科前沿方面,已取得更令人信服的成果。总之,这表明新一代智能型的知识可视化技术,完全可以作为基于知识单元分析的知识计量学普遍应用的新工具;基于智能型可视化的知识计量学具有广阔的应用价值,并且已在应用实践中彰显出新兴学科的诱人魅力与光辉前景。

因此,我们期待学术界广大研究者和管理者把知识计量与知识图谱方法作为追踪学科前沿、选择科研方向、辅助科技决策的有效工具。在此,把我主编的《“知识计量与知识图谱”丛书》,推荐给学术界的广大朋友,推荐给对此有兴趣的广大读者朋友。这套丛书能够为你提供知识计量、知识图谱和知识可视化技术及其应用的入门指南,能够使你在阅读、学习中领略这个新兴学科领域的神奇天地,能够引领你在尝试绘制自己所在领域知识图谱的过程中充满别样的乐趣。



2008年10月27日

① Chen, C. Mapping Scientific Frontiers: The Quest for Knowledge Visualization. Springer. 2003. ISBN: 1-85233-494-0.

② Chen, C. Information Visualization: Beyond the Horizon. Springer. 2nd ed. 2004. ISBN: 1-85233-789-3.

③ Chen, C. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3), 359-377.

目 录

第0章 网络改变生活 / 1

第1章 绪 论 / 7

1.1 探索科学学引文网络的背景和方法 / 7

1.1.1 问题的提出 / 7

1.1.2 研究科学学引文网络的意义 / 9

1.2 研究背景 / 11

1.2.1 大规模引文网络的形成 / 11

1.2.2 探讨大规模网络结构的复杂网络研究方法 / 13

1.2.3 网络结构的复杂性和相似性 / 15

1.2.4 社会网络分析方法的兴起 / 17

1.2.5 社会网络分析与统计方法在引文网络结构研究中的结合与应用 / 19

1.3 科学学与其他学科关于引文网络研究的文献综述 / 21

1.3.1 科学学关于引文网络的研究 / 21

1.3.2 其他学科关于引文网络的研究 / 25

第2章 网络研究的理论、方法和工具 / 32

2.1 网络研究中的基本概念及理论方法 / 32

2.1.1	网络研究中的基本概念 / 32
2.1.2	引文网络研究的理论与方法 / 36
2.1.3	社会网络分析的理论与方法 / 40
2.1.4	复杂网络研究的理论与方法 / 46
2.2	数据来源以及数据处理说明 / 52
2.2.1	数据来源说明 / 52
2.2.2	数据处理说明 / 54
2.3	本研究使用的主要工具软件 / 57
第3章	科学学引文网络的整体结构和演化过程 / 59
3.1	科学学领域内六种期刊间的引用情况 / 59
3.1.1	六种期刊的引文情况 / 59
3.1.2	期刊间的引用情况 / 61
3.2	科学学引文网络的整体结构 / 65
3.2.1	总体入度、出度分布 / 65
3.2.2	科学学内部引文网络的无标度特性 / 70
3.2.3	科学学内部引文网络的小世界特性 / 72
3.2.4	科学学内部引文网络的高集聚特性 / 73
3.3	科学学引文网络的动态演化过程 / 75
第4章	科学学引文网络的知识流通与中心度分析 / 80
4.1	网络知识流通 / 81
4.1.1	科学学引文网络中的连通组 / 81
4.1.2	科学学引文网络的直径、平均度、密度 / 84
4.2	科学学引文网络中心度分析 / 86
4.2.1	度中心度、亲近中心度、中介中心度 / 87
4.2.2	基于知识流通的论文评价 / 93
第5章	科学学引文网络的小团体及内容分析 / 98
5.1	网络的小团体分析 / 98
5.1.1	k 核分析 / 100
5.1.2	高入度网络的群落分析 / 105
5.2	从关键词共现网络看科学学的研究内容 / 113
第6章	结 语 / 123
	参考文献 / 127

第 0 章

网络改变生活

“若夫乘天地之正，而御六气之辩，以游无穷者，彼且恶乎待哉！”

两千多年前，中国最重要的思想家之一，庄子的《逍遥游》以其诡秘绮丽的幻想，成为思想界旷世不朽的名篇。庄子为世人创造了一个自由自在，无所束缚的世界。直到现在，这依然是“心意自得，畅游无限”的顶级冥想。

如果说庄子对于自由世界的幻想是唯心的，那么我们目前看到的人类社会走进“无处不在的网络”时代却是有着坚实的物质基础的。我们所处的时代常在报刊文章中被冠以“网络时代”的头衔。这个时髦的词本来只是为了强调计算机互联网对这个世界的巨大影响，但现在我们对它的理解远不止于此。不断增长的多维的交通网络和交流网络正在改变每个人交际网的范围，并为人类的活動提供了无限巨大的可能性；日趋成熟的物流网络使得人类的生活越来越

越多样化,曾经的珍稀已经变成了家常便饭;我们现在能够运动与思考,应该归功于规模宏大的神经网络组织万亿计的神经细胞和肌肉组织有条不紊地协同工作。从这种意义上讲,我们生活的世界可以看做是具有无穷层次的网络的嵌套组合。

网络最早的研究源于著名的“欧拉七桥”问题。18世纪,俄国的哥尼斯堡有一条小河叫勒格尔河,河有两条支流,一条叫新河,一条叫旧河,它们在市中心汇合,在合流的地方中间有一座小岛,在小岛和两条支流上建有七座桥。人们长期生活在河畔、岛上,来往于七桥之间。有人提出这样一个问题:能不能一次走遍所有的七座桥,而每座桥只准经过一次?问题提出后,很多人对此很感兴趣,纷纷进行试验,但在相当长的时间里,始终未能解决。最后,人们只好把这个问题向俄国科学院院士欧拉提出,请他帮助解决。公元1737年,欧拉接到了“七桥问题”,当时他三十岁。欧拉想出一个巧妙的办法,即用图形中的点和线来表示岛屿和桥梁。欧拉集中精力研究了这个图形,终于证明了,要想一次不重复地走完七座桥,那是不可能的。在解决该问题的过程中,欧拉创立了一个数学分支,即后来人们所熟知的图论。

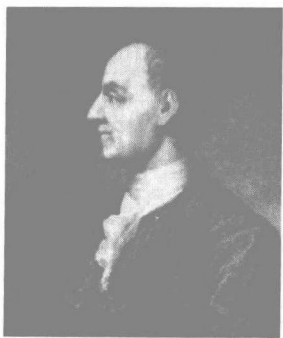


图1 欧拉

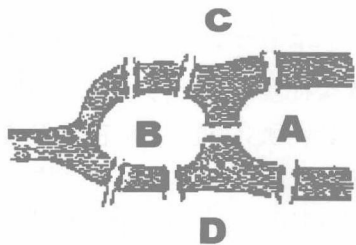


图2 “欧拉七桥”问题

在随后的200多年间,多个领域的科学家一直致力于发现和解

释现实中的许多以网络形式存在的真实系统。

社会学家在对社群结构的研究中发现了社会网络的“小世界”特性,也就是六度分隔理论(Six Degrees of Separation),这对后来的网络研究提供了一个重要的理论基础。这个理论来自于对人际关系对信息扩散效果影响的试验。这个试验的设计者米尔格兰姆(Milgram)要求美国内布拉斯加州的试验者把一封信交给一位他不认识的堪萨斯州的人,并且要以最少的中转次数送到目的地。而这个最少的中转次数在社会网络分析中就是最少距离(Geodesic Distance)的概念。结果十分惊人,除去一些传递失败的信件以外,成功的传递者往往不超过转手六次就能将信件传递到目的地。“六度分隔”说明了社会中普遍存在的“弱纽带”却发挥着非常强大的作用。通过弱纽带,人与人之间的距离变得非常“接近”。我们经常在与新朋友碰面的时候说“世界真小”,因为可能往往大家有共同认识的人。这就是著名的“小世界”网络的原型。

管理学的研究者们则对从欧洲发源的“赫特兄弟会”格外感兴趣。“赫特兄弟会”是一个自给自足的农民自发组织,这些组织在维持民风上发挥了重要作用。有趣的是,他们有一个不成文的严格规定:每当聚居人数超过 150 人的规模,他们就把它变成两个,再各自发展。“把人群控制在 150 人以下似乎是管理人群的一个最佳和最有效的方式。”邓巴(Robin Dunbar)认为这和人脑的进化程度有关:这是人类最大的社会关系处理能力。但是如果社会圈子的数量增加,人脑的智力负担显然要呈现级数变化。而邓巴提出的一个模型方程中,用以计算某种动物所拥有的活动群体的最大值。如果输入智人(现代人)的比率,这个数值为 147.8,大约为 150。有人把 150 法则形象定义为:在一次不期而遇的聚会上,你不会感到尴尬的人数最大值。150 成为管理学家们普遍公认的“我们可以与之保持社交关系的人数的最大值。”

数学家们一直致力于对网络进行抽象的数学分析,规则网络模型、厄多斯(Erdos)随机网络模型、沃兹(Watts)和斯托克兹(Strogatz)的小世界网络以及无标度网络模型等等都能从某个角度对一些真实网络的形成机制进行解释。最简单的网络模型为规则网络,其特点是每个节点的近邻数目都相同。20世纪50年代末,厄多斯和雷尼(Renyi)提出了一种完全随机的网络模型,它由 N 个节点构成的图中以概率 P 随机连接任意两个节点而成。研究表明,规则网络具有大的簇系数和大的平均距离,随机网络则具有小的簇系数和小的平均距离。规则网络和随机网络并不能很好地展现真实网络的性质,这说明现实世界既不是完全确定的也不是完全随机的。沃兹和斯托克兹是两位物理学家,他们在研究晚上青蛙叫到最后为什么会变成和声和萤火虫最后为什么会一起发光的问题时,偶然发现青蛙叫声的互动网络与人际互动网络十分相像,都是米尔格兰姆的所谓的“小世界”网络。之后他们以规则网络为基础,在一些节点间随机加上几条线,一个奇妙的现象出现了。这个网络的簇系数与一般的规则网络没有太大的变化,但是平均距离却变得短了许多。这个模型虽然不能完全符合真实网络的所有特性,但却是对真实网络建模研究的一个重大突破。“小世界”网络是在规则网络的基础上加入随机性产生的,即对规则网络的每一个顶点的所有边,以概率 P 断开一个端点,并重新连接,连接的新端点从网络中的其他顶点里随机选择,如果所选的顶点已经与此顶点相连,则再随机选择别的顶点来重连。其生成方法见图3,其中左图为规则网络,右图为随机网络,中间是一个典型的“小世界”网络。

除了“小世界”效应外,大量实际网络还存在着另一个突出的结构特征——幂律(Power-Law)分布,称其为“无标度网络”。科学计量学家普赖斯(Price)1965年发表的论文第一次对科学论文的引用关系所形成的网络进行了研究,提出了“无标度网络”的最早模型。

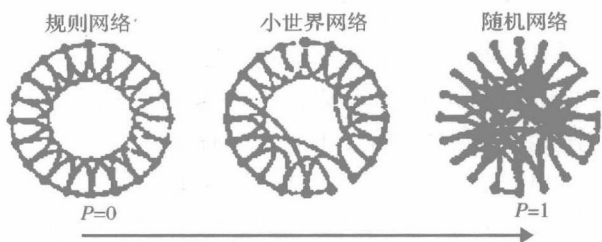


图 3 主要的网络模型

后来多个被研究过的网络,即便是几乎毫无瓜葛的网络都表现出了相似的分佈。财富分佈、河流分佈、因特网、好莱坞电影演员合作网、新陈代谢网、捕食网、电力网、合作网等,都有相似的特征。“无标度网络”的特点是度分佈的自相似结构及其高度弥散性。网络中的大部分节点度值都很低,但存在着度数非常高的中枢节点。幂律度分佈使网络在小世界特征的基础上又具有了许多新的性质。如对网络攻击的研究结果表明,随机攻击基本上不会破坏无标度网络的连通性,但在有目的的最大度攻击下,很小比例的顶点移除就会对网络的连通性造成根本性的破坏。

结构决定功能,自然界中的网络无处不在,而网络的结构对网络的功能会产生巨大的影响,因此研究网络结构对于了解网路特性具有重要意义。例如仅仅改变网络的平均度,就会极大地改变信息的传输速度。计算机网络的结构是在设计有效的交流系统时首先要考虑到的关键问题。与此相似,网络交流和导航的有效性与 Internet 和 World Wide Web 的网络拓扑结构具有重要关系。对互联网的结构研究为防范互联网有害信息的入侵提出了新的思路和方法,对开展病毒免疫模型和大规模网络入侵检测系统的研究和开发工作提供了基础;人类的联系方式形成的人际交往网络也会影响到思想观念的传播路径,同样也会影响到传染病的传染途径。对于人类病毒的传播研究,传统理论的基本假设把社会中人与人的关系看