

互联网 宏观拓扑结构

■ 张文波 冯永新 滕振宇 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

互联网宏观拓扑结构

张文波 冯永新 滕振宇 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

互联网宏观拓扑结构/张文波,冯永新,腾振宇著.

—北京:国防工业出版社,2012.3

ISBN 978-7-118-07993-7

I. ①互… II. ①张… ②冯… ③腾… III. ①互联网
网络—网络拓扑结构—研究 IV. ①TP393.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 026674 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 4 $\frac{5}{8}$ 字数 116 千字

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

随着科学技术的飞速发展,人类已经进入了信息时代。作为信息获取、信息传输和信息共享的最重要和最基本的技术——互联网技术,也得到了极大的发展。互联网的研究已成为下一代网络技术发展的关键和重要支撑。

互联网是由人类建造的复杂网络,对其宏观拓扑结构演化的研究是目前研究的热点问题,特别是近年来人类在复杂网络研究方面所取得的成果,使人们对互联网宏观拓扑结构的研究取得了很大的进展。从宏观上来看,互联网拓扑结构演化并不是杂乱无章地进行的,而是呈现出明显的混沌特征。揭示互联网宏观拓扑结构的演化规律,对于互联网宏观拓扑结构的建模以及对互联网其他方面的研究,具有重要的意义。

本书首先建立了互联网宏观拓扑结构的演化适应模型,计算了影响互联网宏观拓扑结构演化的序参量,通过对序参量的分析发现,当外力的作用趋近于0或者无穷大时,互联网宏观拓扑的演化主要由长期生存效用起作用,互联网向着规则网络的方向演化;而当外力的作用恰好等于一个不稳定的拓扑演化变量的时候,互联网受短期生存效用的影响,向着星形网络的方向演化。由此发现互联网的宏观拓扑结构具有适应性。

另外本书从互联网的信息代谢、自复制和突变这3个方面,对互联网的宏观拓扑结构进行了研究。

代谢是生命的最基本特征之一,互联网的信息代谢过程,是通过从外界获得负熵流保持了互联网拓扑结构的存在。根据香农信

息熵的基本原理,本书定义了互联网宏观信息熵,利用 CAIDA Skitter 项目提供的全球互联网监测数据,计算了互联网宏观信息熵随时间变化的规律,其中利用 Riesling 节点获得的互联网监测数据计算的互联网宏观信息熵从 2000 年 4 月的最大值 0.379 下降至 2004 年 5 月的 0.318,月平均下降幅度为 0.12%;apan_jp 节点的数据计算结果表明互联网宏观信息熵从 2000 年 4 月的最大值 0.388 下降至 2004 年 5 月的 0.297,月平均下降幅度为 0.18%。这表明互联网宏观信息熵有降低的趋势,宏观拓扑结构的演化过程中存在着信息代谢。

自复制是生命的另一个重要特征,在信息代谢过程中,为了保持其宏观拓扑结构的相对稳定性,互联网必须要保持其拓扑结构信息不会丢失,这个过程是通过其拓扑结构的自复制过程来实现的。对互联网节点的平均连接度的分形维数、最大 Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵的计算发现,分形维数为一个分数值(2.7)并且最大 Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵值大于 0,这表明互联网节点的平均连接度具有混沌和分形的特征,另外通过对互联网节点和边演化的计算发现,节点的连接度越高,与其建立连接的节点数和边数也越多,但新增的节点数和边数与该节点的初始连接度并不具有正比关系。由分析计算的结果可知,互联网的宏观拓扑结构在演化过程中存在着自复制。

自复制是在开放的环境下进行的,必然会受到“噪声”(外界环境)的干扰,因此复制的结果不是也不可能是精确的。自复制过程所产生的复制误差,就是互联网拓扑结构的突变。本书通过对互联网平均最短路径、幂指数等物理量的计算发现,互联网的平均最短路径随时间的增长而趋于降低,当前互联网的平均最短路径为 15.2;节点连接度分布的幂指数在 2.5~2.8 之间波动;互联网节点的平均连接度在缓慢地增加。而如果互联网的拓扑结构进行精确复制,那么平均最短路径应该呈增长的趋势,幂指数应该为

一个常数,并且互联网节点的平均连接度应该保持稳定。由此分析可知,互联网在其拓扑结构的自复制过程存在着突变。

在此基础上,对互联网中的资源发现问题进行了研究,并针对互联网宏观拓扑结构中节点的连接度分布存在“幂律”分布的特征,提出一种新的资源发现算法——基于互联网宏观拓扑结构资源查找算法。

最后分析了互联网宏观拓扑的鲁棒性和抗毁性,并运用互联网效率、平均最短路径和互联网宏观拓扑灰度熵3个指标,定量地测量了互联网宏观拓扑的鲁棒性。

东北大学赵海教授、徐久强教授,沈阳工业大学关沫副教授,沈阳理工大学张德育教授、姜月秋教授、谭小波副教授、田野副教授、赵运弢副教授、田明浩副教授、黄迎春副教授、刘芳副教授以及付立东、刘猛、隋涛、钱博、吴瑞睿、杨秀杰等老师和博士对本书给予了很多帮助,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,作者水平有限,书中难免出现不准确的地方,敬请读者批评指正。随着互联网研究的深入,我们将在汲取读者意见和建议的基础上,不断修改和完善书中相关内容,为推动该领域的发展尽绵薄之力。

作者

2012年1月于沈阳

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 互联网研究现状	1
1.2 互联网的拓扑结构	3
参考文献	6
第 2 章 互联网特征分析	9
2.1 互联网的复杂网络特征	9
2.1.1 网络的图表示	9
2.1.2 复杂网络	15
2.1.3 网络拓扑基本模型	18
2.1.4 互联网的复杂网络特性	24
2.2 互联网的统计特征	28
2.2.1 互联网的统计规律	28
2.2.2 数据来源	30
2.3 本章小结	31
参考文献	32
第 3 章 演化适应模型	38
3.1 BA 模型的特点及其存在的问题	38
3.2 演化适应原理	41
3.3 协同学的基本原理	42
3.3.1 支配原理	44
3.3.2 序参量原理	45
3.4 互联网演化适应模型	46
3.5 本章小结	51

参考文献	51
第4章 拓扑结构的信息代谢	54
4.1 宏观拓扑结构的稳定性	54
4.2 拓扑结构的信息代谢	56
4.3 节点连接度分布	57
4.4 节点的代谢	60
4.5 互联网宏观拓扑信息熵	62
4.5.1 信息熵及其基本性质	62
4.5.2 互联网宏观拓扑信息熵的定义及其性质	66
4.6 本章小结	69
参考文献	70
第5章 拓扑结构的自复制	72
5.1 拓扑结构自复制特性分析	72
5.2 节点平均连接度的分形	75
5.2.1 节点平均连接度的分形维数	75
5.2.2 节点平均连接度的最大 Lyapunov 指数	80
5.2.3 节点平均连接度的 Kolmogorov 熵	81
5.2.4 非线性混沌预测	83
5.3 节点数和边数的演化	87
5.4 本章小结	91
参考文献	92
第6章 拓扑结构的突变	94
6.1 突变分析	95
6.2 平均最短路径的演化	98
6.3 幂指数的演化	102
6.4 互联网节点和边的增长	102
6.5 节点连接度和节点平均连接度的演化	104
6.5.1 节点连接度的演化	104
6.5.2 节点平均连接度的演化	105
6.6 本章小结	107

参考文献	107
第7章 基于互联网宏观拓扑结构资源查找算法	110
7.1 资源发现	110
7.1.1 资源	111
7.1.2 资源发现的概念模型	112
7.2 分布式资源发现算法	115
7.2.1 泛洪请求模型	115
7.2.2 定向广度优先搜索法	116
7.2.3 本地索引法	117
7.3 基于互联网宏观拓扑结构资源查找算法	118
7.3.1 相关概念及定义	119
7.3.2 基于互联网宏观拓扑结构资源查找算法的 基本假设及概述	120
7.3.3 资源查找算法	122
7.4 本章小结	125
参考文献	125
第8章 互联网宏观拓扑的鲁棒性和抗毁性	128
8.1 互联网的鲁棒性和脆弱性	128
8.2 网络鲁棒性的测度	130
8.3 互联网鲁棒性与抗毁性	132
参考文献	136

第1章 引 论

1.1 互联网研究现状

互联网是一个人工的数字系统,相对于传统的经济系统或生态系统而言,互联网中的统计数据的质量要高得多。通过收集数据包或分析日志文件,可以方便地获得系统准确的运行记录。然而,任何简单地将互联网看做是一个计算机网络甚至是一群相互连接的计算机网络的看法都是错误的。概括而言,计算机网络只是简单的转载信息的载体,而互联网的优越性、实用性和本体性却在于信息本身。

本质上说,一方面互联网不仅仅是一个计算机网络,更为重要的是,它是一个庞大的、实用的、可享受的信息源;另一方面互联网也可看做是一个面向芸芸众生的社会,世界上数以亿计的用户可以通过互联网进行通信,共享信息,可以送出或接收电子邮件,可以与别人建立联系并互相索取信息,可以在网上发布公告,宣传信息;可以参加各种专题小组讨论,可以免费享用大量的信息源和软件资源。因此,互联网远非一个计算机网络或者一种信息服务所能比拟的。

由于互联网所提供的服务种类多样、方便快捷、安全可靠,世界上使用互联网的人数不断增加。目前,互联网的规模正以指数级增长,文献[2]研究表明,互联网^[3]的节点数大约每两年翻一番。信息时代,各国都在竞相大力发展自己的信息产业,开展信息技术的研究,以期在政治、经济、军事等各个领域获取信息优势。各国在注重发展信息产业的同时,不断地完善互联网基础设施的

建设,网络带宽不断增加,服务质量不断提高,收费价格不断降低。互联网已经成为人类生产、生活不可分割的一部分。同时,互联网也体现出明显的军事用途,震网病毒的出现表明,以互联网为工具的网络武器已经初见端倪。

自互联网诞生至今,伴随着信息技术、通信技术、计算机网络技术以及复杂网络技术的发展,众多的学者对互联网进行了广泛深入的研究,并且这些研究打上了时代的烙印。在早期,对互联网的研究主要集中在互联网的体系结构、网络协议^[7],计算机互联以及互联网所提供的服务等方面的研究。随着信息技术的飞速发展和人类对互联网的依赖程度不断提高,越来越多的研究开始关注互联网所提供服务的**安全性、QoS、TCP 流量分析、拥塞处理以及路由算法**等内容,开始了新的探索,取得了相应的研究成果。近年来人们在复杂性科学和复杂网络等领域取得了突破性的进展,使国内外的研究者认识到互联网也是复杂网络之一,由此开始了从复杂性和复杂网络的角度对互联网的研究,掀起了互联网研究的新高潮。

目前,对互联网的理论研究主要集中在拓扑建模^[9-11]、QoS、流量分析、路由算法、拓扑演化^[12]等热点问题上,哈尔滨工业大学张宇博士等对互联网拓扑建模^[13]问题进行了比较系统的研究,提出了目前对互联网研究的一些比较新颖的观点,对互联网建模和深入研究提供了非常有益的探索和尝试;复旦大学刘岩等人对互联网上 TCP 流自相似性与网络性能关系^[14]进行了较深入的研究,使人们充分认识到了互联网中 TCP 流的复杂性,为互联网中网络协议的优化设计提供了重要的理论依据;清华大学周晋博士设计了基于互联网小世界效应的无组织 P2P 系统路由算法^[15],该方法充分考虑了互联网的复杂网络特性和其所具有的小世界效应,在路由算法的设计中引入了少量的随机连接,提高了路由的效率;Georgos Siganos 等人对互联网的演化^[16]问题进行了研究,尤其是对互联网路由节点变化的研究,这充分说明互联网的拓扑结构并不是一成不变的,每个节点都有其产生、存在和消亡的过程;Gkantsidis 等人对互联网的宏观拓扑^[17]结构也进行了分析和研究,揭

示了互联网的宏观拓扑^[18]结构的规律,为相关研究提供了有益的尝试。中国科学技术大学近代物理系汪秉宏教授领导的复杂系统研究组通过研究,在国际上首次提出通信网络日益增大的交通吞吐量需求是驱动网络宏观拓扑结构演化的内在动力,他们所提出的模型在国际上首次再现了真实含权网络具有幂律的连接度分布、度度负相关、簇度负相关和度权幂律相关的四大特征,对理解互联网的宏观拓扑结构具有非常重要的意义。2005年初,在东北大学赵海教授的领导下,东北大学嵌入式技术实验室成功申请并加入了互联网结构与数据研究机构,并获得 CAIDA(The Cooperative Association for Internet Data Analysis,一个对全球范围互联网结构及数据进行研究的国际合作机构)认证,其研究团队对互联网的分割度的时间敏感性问题、互联网的网络密度和互联网节点平均连接度等问题进行了深入的研究,这些研究对分析互联网的性质,开展互联网建模等研究具有重要的参考价值。

当然还有相当多的研究者,从不同的角度开展了对互联网的研究^[18-20],如对互联网的鲁棒性和脆弱性的研究,对互联网提供服务的 QoS 的研究,等等。

分析目前国内外对互联网的众多研究成果不难发现,对于互联网这个既复杂又巨大的网络系统而言,虽然它的应用给人类生活带来了无穷的方便,并已经深入到人类生活的方方面面,但是人类对它的认识和研究还是非常肤浅的,所看到的也只是冰山的一角而已,为此要想充分地认识互联网,掌握互联网的发展规律,让它充分地为人造福,还需要付出更多的金钱、智慧、努力和耐心,需要人类用新的视角和新的思维去审视。用新的理论和新的方法去研究。对互联网的研究仍然是一个具有时代性、前沿性和先进性的课题。

1.2 互联网的拓扑结构

互联网宏观拓扑结构的研究是通过将互联网作为一个整体,

利用统计学方法^[21]对其整个拓扑结构进行的研究,本书正是在这样的基础上,通过对互联网拓扑结构的抽象,即忽略一些与互联网拓扑结构无关的属性,如网络协议^[22]、互联网上的服务、网络带宽等,而重点考虑其拓扑结构的相关属性^[23],如节点的连接度、度分布等,通过对属性的分析去揭示互联网宏观拓扑结构的内在特性。

互联网宏观拓扑结构的研究是互联网发展到一定阶段的必然结果,也是互联网研究过程的必然阶段,它的研究将为下一代网络的规划、建设以及应用提供重要的理论依据和基础^[24,25]。

首先,作为当今人类社会信息化的标志,互联网的规模增长非常迅速^[26]。但现在人类对其宏观拓扑结构的研究和认识还处于探索阶段,在互联网这个看似混沌的网络^[27]之中还蕴涵着一些不为人知的规律,有待人们进行深入的挖掘。研究互联网宏观拓扑结构演化及其内在机制是在较高层次上开发利用互联网的基础^[28]。虽然互联网的形成被认为是无限定原则的,但是它却展现了一些重要而且普适的宏观拓扑结构特征^[29]。因此,对互联网宏观拓扑结构的研究,是进一步认识互联网规律,有效地发现并利用互联网资源和高效开发互联网应用的基石。

其次,对互联网宏观拓扑的研究是计算机网络^[30]自身发展的要求。计算机网络经过几十年的发展,传统的网络技术已经日趋成熟^[31],网络的微观细节已经不再是人们关注的焦点,而网络的宏观整体性却得到越来越多的关注。而对传统的计算机网络技术而言,无论从网络协议还是从体系结构上来说,已经成为束缚互联网未来发展的桎梏。人类对未来互联网所提供的服务提出了更高的要求^[32],因此,通过对互联网宏观拓扑结构的研究,从中发现互联网拓扑结构演化的宏观规律,可为设计新一代互联网的体系结构和网络协议栈等工作提供有价值的参考。

最后,复杂网络的研究成果表明互联网是一个复杂网络^[33-36],利用复杂网络的基本理论,对互联网进行定量研究具有很大的可操作性。目前,国内外有众多的大学和研究机构,提供了具有权威性的全球互联网监测数据,为针对互联网宏观拓扑结构

的研究提供了数据基础。网络作为系统的抽象,虽然每一个网络都有其自身的特殊性质,有其紧密联系在一起的独特现象,有其自身的演化机制,但是由于都可以使用网络分析的方法,所以有其共性。例如关于节点连接度、介数的分析方法以及大量不同网络中存在的相同的统计特征,再如随机取出节点与选择性攻击对网络拓扑结构的影响及其分析方法。最新研究趋势表明,研究网络的几何性质^[37]、网络的形成机制^[38],网络演化的统计规律^[39]以及网络的结构稳定性,并把它拓扑结构与具体系统结合起来是复杂网络研究的中心内容^[40,41]。因而,对互联网宏观拓扑结构的研究也可以为其他类型复杂网络的相关研究提供一个有价值的原型基础。

由此可见,对互联网宏观拓扑结构的研究具有重要而现实的意义。

在时间和空间的有限结合中,互联网拓扑结构的巨大重复性破坏了系统的平衡,却要求平稳地选择生成新的拓扑结构。然而这个选择过程只对中间状态起作用,中间状态是由高熵值向低熵值的拓扑状态演化。以此为目的,使互联网拓扑结构具有有序化的能力,本书称其为互联网拓扑结构的信息代谢。

为了保证互联网在拓扑结构的演化过程中不会导致拓扑结构信息丢失,在其拓扑结构的信息代谢过程中,存在着一种自催化的作用,使其在宏观拓扑结构演化过程中呈现出一种自相似^[42]。互联网宏观拓扑结构的这种内在的自催化的能力,称为互联网拓扑结构的自复制能力。

另外互联网在其拓扑结构的自复制过程中要受到外界的影响(噪声),使得其拓扑结构的自复制必然存在着复制误差。互联网在其拓扑结构的自复制过程中所产生的误差,称为互联网拓扑结构的突变。

因此,本书将通过验证互联网宏观拓扑结构中存在的信息代谢、自复制和突变^[43]特性,来验证了互联网的宏观拓扑结构具有生命特征。

参考文献

- [1] 操龙兵,戴汝为. 集智慧之大成的信息系统——互联网[M]. 北京:科学出版社, 2001,121-130.
- [2] 郭晓春,阳爱民. 互联网生态系统可持续发展研究[J]. 株洲工学院学报, 2002,16(6): 55-57.
- [3] Li J, Sung M, Xu J, et al. Large-scale IP traceback in high-speed Internet: practical techniques and theoretical foundation[C]. California Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy, 2004.
- [4] Subramanian L, Padmanabhan V N, Katz R H. Geographic properties of Internet routing [A]. Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference[C], 2002,6.
- [5] Akella A, Seshan S, Balakrishnan H. The impact of false sharing on shared congestion management[C]. In Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols, 2003,11.
- [6] Jose M, Barcelo, Juan I, et al. Study of Internet autonomous system interconnectivity from BGP routing tables[J]. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2004, 45(3): 333-344.
- [7] Agarwal S, Subramanian L, Rexford J, et al. Characterizing the Internet hierarchy from multiple vantage points[C]. In Proc. IEEE INFOCOM, 2002.
- [8] 姜誉,方滨兴,胡铭曾,等. 大型 ISP 网络拓扑多点测量及其特征分析实例[J]. 软件学报, 2005,16(5):846-856.
- [9] Bu T, Towsley D. On distinguishing between Internet power law topology generators [C]. The 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, 2002.
- [10] Gao L. On inferring autonomous system relationships in the Internet[C]. In Proc. IEEE Global Internet Symposium, 2000.
- [11] Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Evolution of networks[J]. Adv Phys, 2002, 51(4): 1079-1187.
- [12] 张宇,张宏莉,方滨兴. 互联网拓建模综述[J]. 软件学报, 2004,15(8):1220-1226.
- [13] 刘岩,韩良秀,杨骏,等. TCP 流自相似性与网络性能关系的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(4):550-554.
- [14] 周晋,路海明,李衍达. 用 small world 设计无组织 P2P 系统的路由算法[J]. 软件

学报. 2004, 25(6):915-923.

- [15] Gkantsidis C, Mihail M, Zegura E. Spectral analysis of Internet topologies[C], In Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM03), IEEE Computer Society, New York, 2003, 364-374.
- [16] Albert A, Jeong H, Barabasi A L. Diameter of the world wide web[J]. Nature, 1999, 401:130-131.
- [17] 魏进武, 邱江兴, 陈庶樵. 网络流量的联合多重分形模型及特性分析[J]. 电子学报, 2004, 32(9):14591463.
- [18] 王林, 戴冠中. 互联网拓扑中连接率的研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(2): 9-15.
- [19] Wang X F, Chen G. Complex networks: small-world, scale-free and beyond[J]. IEEE Control & System Magazine, 2003, 3(1):6-20.
- [20] 徐野, 赵海, 苏威积, 等. 互联网的 IP 基密度分析. 通信学报. 2005, 26(11):125-131.
- [21] Hal Burch, Bill Cheswick. Mapping the Internet[J]. Computer, 1999, 32(4): 97-98.
- [22] Alderson D, Doyle J, Govindan R, et al. Towards an optimization-driven framework for designing and generating realistic Internet topologies [J]. ACM Computer Communication Review, 2003, 33(1).
- [23] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology[C]. Proceedings of ACM Sigcomm, 1999, 8.
- [24] Glance N S, Huberman B A. The dynamics of social dilemmas[J]. Scientific American, 1994, 270, 76-81.
- [25] Charkaluk E, Bigerelle M. Fractals and fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 61, 119-139.
- [26] 王焯, 李乐民, 王晟. IP over WDM 网络结构和生存性研究[J]. 电信科学, 2000, 11: 25-30.
- [27] Comer D E. Computer Networks and Internets: With Internet Applications[M]. New Jersey: Prentice Hall. 2001.
- [28] Dimitropoulos X A, Riley G F. Large-scale simulation models of BGP[C]. 12th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS04), 2004:287-294.
- [29] Magoni D, Pansiot J J. Analysis of the autonomous system network topology[A]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review[C], 2001. 31(3):129-135.
- [30] Sole R V, Valverde S. Information Theory of Complex Networks On Evolution and Ar-

chitectural Constraints. <http://citeseer.ist.psu.edu/701297.html>. 2004.

- [31] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. *Reviews of modern physics*. 2002,74:47–97.
- [32] Newman M. The structure and function of complex networks[J]. *SIAM Review*. 2003, 45:167–256.
- [33] 吴金闪,狄增如. 从统计物理学看复杂网络研究[J]. *物理学进展*, 2004,24(1): 18–46.
- [34] Boschetti F, Prokopenko M, Macreadie I, et al. Defining and detecting emergence in complex networks[A]. *The 9th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems* [C]. 2005.
- [35] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in complex networks. *Science*. 1999, 286(5439):509–512.
- [36] Sporns O, Tononi G. Classes of network connectivity and dynamics[J]. *Complexity*, 2002, 7, 28–38.
- [37] Sporns O. Complex neural networks as future tools in imagery analysis[A]. In: *Emerging Technologies and Applications for Imagery Pattern Recognition* [C]. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA. 2005:67–72.
- [38] Yook S H, Jeong H, et al. Modeling the Internet's large-scale topology[A]. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2002:382–386.
- [39] 赵海. 基于数据融合思想的FCS体系结构研究及其一个模型系统的设计和实现[D]. 东北大学博士论文. 1995:29–31.