

因特网突现行为研究综述

唐红 黄鼎 吴渝

(重庆邮电大学网络与计算研究中心 重庆 400065)

摘要 因特网是一个处在不断演化中的开放复杂巨系统,其复杂性对网络管理、网络新技术和新业务开发带来极大的挑战。突实现象是其重要的行为特征,得到众多研究者的关注。研究因特网的突实现行为对于深入理解因特网运行规律、更好地进行网络及用户管理、设计高效的新网络协议和新业务有着重要的理论和实践指导意义。分析了因特网不同层面的突实现象和主要特征,介绍了网络突实现行为的研究进展及与网络突实现行为相关的计算模型,讨论了进一步研究的方向。

关键词 复杂网络,网络行为,突实现行为,突实现模型

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Overviews on Internet Emergent Behaviour Research

TANG Hong HUANG Ding WU Yu

(Network and Computation Research Center, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract As a constant evolving open complex giant system, Internet brings a big challenge on network management, as well as developing new technology and new business. One of the most important behaviour characters of Internet is emergent phenomena which attracts many researchers' attention. Investigation of Internet behaviour can help to understand the law of Internet, and play a significant role in guiding the theory and practice on effective network and user management, development of new network protocols and services. In this paper, the emergent behaviour and major features in the different layers of Internet were analyzed. Then the current researches about network emergent behaviour and related computing models were summarized. Finally the direction of investigation in this area was discussed.

Keywords Complex network, Network behaviour, Emergent behaviour, Emergent model

1 引言

突实现象(Emergent Phenomena)是指复杂系统内部个体之间通过局部非线性相互作用,在系统层面产生的一些新属性和新现象^[1]。自然界中普遍存在突实现象,如水里的鱼自发形成优美的群聚结构、蚁群寻找通向食物最短的路径、大量脑神经元细胞的活动激发思维。社会系统中也能观测到这种现象,如突发的金融危机、谣言迅速传播等。具体的突实现象虽然各不相同,但都与复杂系统紧密联系。

因特网是一个开放的复杂巨系统。我国著名科学家钱学森院士提出了复杂巨系统的概念^[2,3],并指出信息网络及用户是一个开放的复杂巨系统。后来戴汝为院士等从系统学的角度出发,剖析与揭示了因特网系统的本质,进一步明确了因特网就是一个复杂巨系统^[4]。因特网的复杂性特征有进化和同进化特性、幂律无尺度性、适应性、自相似性、自组织过程、自催化过程、临界性、多发层次特性、相变及混沌的边缘等,其中最重要的就是宏观整体的突现性质。这一结论已经被许多研究结果所证实,得到了许多研究者的认同^[5,6]。所以说,突

现(Emergence)是复杂系统一种公认的共性。

研究因特网中的突实现行为,就是研究构成网络的个体所不具有而网络整体上表现出来的新的功能和现象。其中既有一些有利的突实现行为,如无中心控制的路由协议具有鲁棒性、适应性和可扩展性;也有一些不好的突实现行为,如潜在的级联失效事件,使得网络具有脆弱性。一方面,随着因特网的演进和网络技术的快速发展,使网络呈现出难以预测的复杂性。人们需要创造新的方法来分析和理解大尺度的网络行为。另一方面,现在的社会生活越来越依赖于因特网,深入了解因特网的复杂行为及其形成规律,对构建高可信网络、保证网络安全可靠运行具有重要意义。

2 因特网的突实现行为分析

因特网是一个开放的、与人类社会紧密耦合的复杂巨系统,各种错综复杂的局部交互作用导致网上呈现出大规模网络整体突实现行为,既有网络内部机制产生的,也有网络外部人的因素所引起的。将因特网突实现行为分为 3 类来分析目前的研究情况:包括网络用户行为为主导因素的、由网络用户和网

到稿日期:2009-06-03 返修日期:2009-09-05 本文受 973 计划前期研究专项课题(2008CB317111),国家自然科学基金项目(60873079),重庆市教委科学技术研究项目(KJ070516)资助。

唐红(1957-),女,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为网络流量与测量、网络行为学, E-mail: tanghong@cqupt.edu.cn; 黄鼎(1984-),男,硕士生,主要研究方向为网络行为; 吴渝(1970-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为数据挖掘、小波分析、多媒体技术。

络协议共同作用产生的以及以网络内部协议交互和控制机制为主要因素产生的突现行为。

2.1 以网络用户为主导因素产生的突现行为

因特网上以用户行为为主导因素产生的突出现象,是每个用户利用网络媒介相互协作和共同作用,形成了虚拟网络社会整体上的结构和系统功能。SNS(Social Networking Services)拥有较大的聚集系数;博客社区的虚拟群落可以看作是用户行为的结构突现;维基的知识协作、在网络舆情中的消息迅速传播则可认为是用户行为的功能突现。

社会网络服务 SNS 是指帮助人们建立社会关系的应用服务。SNS 的另一种解释为社会网络网站(Social Network Sites)。SNS 是基于网站的服务,允许个人在有限的系统中构建一个公开或半公开的角色,明确其他用户的列表,查看或遍历其他用户生成的列表^[7]。SNS 会帮助陌生人之间建立连接,但大多数情况下在线用户之间经常性的联系往往基于已有的社会关系^[8,9]。Yong-Yeol Ahn 等人通过对 SNS 的好友列表数据进行研究,发现 SNS 更像是一个真实的社会网络,具有类似于社会网络中“物以类聚,人以群分”的小世界特性,拥有较大的聚集系数^[10]。某个用户若添加了新的内容,很短的时间就会收到常关注他的好友的回复。而一个新颖的内容例如生活经验,容易从一个圈子传到另一个圈子,很快被大家知道。

博客(Blog)是一种简单而方便的信息发布方式,使人们更容易在网上发布个人主页,取代了原先需要费时费力设计的个人主页,成为新的个人门户。相似功能的页面也利于在博客间建立相互链接,形成了一个虚拟社会网络。人们在上面发布各种各样的消息,尽管没有公共的空间、清晰的边界、明确的伙伴,优秀博客也能在有相同兴趣爱好的博客的浏览与引用之间突现。L. Efimova 等人提出了一个基于假定社区准则的改进迭代方法,利用网络博客之间的链接来定位一个知识管理博客的社区^[11]。

维基(Wiki)是一种便捷化协作式的超文本写作工具。与博客鼓励内容的原创性不同,维基促使人们进行内容的协作。在维基中,词条稳定解释的形成是众人集合智慧的“突现”,不同于传统百科全书中由少数专家定义的方式,那些能获得最多人共识的部分在重复描绘中因为线条笔墨的加重而“突现”出来,成为共同规范的描述。Jakob Voß 验证了维基文档连接的度分布服从幂律分布,发现维基文档数量的增长明显要慢于网络普遍的增长速率^[12]。

网络舆情是社会舆情的一种表现形式,它的传播是一种网络突现现象。它是公众在因特网上公开表达的对某种社会现象或社会问题的具有一定影响力和倾向性的共同意见,相互影响产生突现。利用即时通信工具、BBS 和新闻组,新鲜事在网友的相互交流中迅速传播。一些学者通过对舆情传播进行建模,在小世界上重现了舆论传播过程^[13]。

目前对因特网用户突现行为的研究还处于初步阶段。因特网用户行为表现规律的研究可为研究因特网突现现象提供包含大量数据的实证,吸引了越来越多的关注网络行为学研究的学者。

2.2 网络应用层的突现行为

网络上存在大量的 PC 节点,应用协议将不同的 PC 节点连接起来,并控制着信息的相互交互,这为突现行为的产生提

供了环境。随着基于 P2P 技术的应用增多,应用层由网络用户和网络协议共同作用产生的突现行为日益明显。基于 P2P 协议的常见应用有 P2P 文件传输、PPStream 视频传输、Skype 语音通信、QQ 即时通信等。

基于 P2P 文件传输的应用主要有 BT, Maze, eDonkey, Thunder 等,它们的流量已成为网络上的主要流量。有实验对江苏省教育网到骨干网的流量测量发现 BT 业务占网络总流量的 60%^[14]。我们在重庆邮电大学校园网学生宿舍节点的测量结果表明 BT 流量超过 80%。因此,P2P 文件传输应用的流量已经影响了网络应用的整体流量特性。

2.2.1 P2P 文件传输应用的性能突现

BT 的显著优点是面对蜂拥而至的用户时具有良好的伸缩性,随着网络规模的扩大,平均文件下载速率不会恶化。但随着对 P2P 网络节点演化进一步深入研究,Guo L 等发现由于节点到达率的指数衰减和种子缺乏,BT 系统中的服务质量会快速下降^[15]。山秀明等构建了 P2P 应用的用户共享行为的复杂网络演化模型(SNET),揭示了用户频繁加入退出行为对网络拓扑结构的影响。用户如果下载文件后迅速退出,将使整个网络连接数较大的节点消失^[16]。陈宝钢等人对 Maze 实测数据进行相关性分析,发现用户流量大小与在线时长具有强相关性,在线长的用户倾向于上传或下载更多的流量^[17]。

影响 P2P 整体行为的另一个原因是 P2P 协议的激励机制,为每个个体设计有效的激励策略能有效地阻止自私用户“搭便车”的行为。每个个体的自主选择策略也为博弈论的实践提供了一个真实的场所。占 P2P 流量主要地位的 BT 采用的是“一报还一报”的激励策略,将流量上传给自己下载最快的种子。利用主动测量方式,黄立辉等人发现下载流量最多的节点与上传最多的节点重合,从个体交互作用角度验证了该策略^[18]。Qiu D 等使用流体模型,分析了 BT 激励机制会导致出现纳什均衡点,从全局角度验证了该策略的有效性^[19]。

2.2.2 P2P 文件传输应用的结构突现

陈亮等人通过测量和分析 BT 流量,认为 BT 流量服从 Weibull 分布,具有自相似性,且 BT 流平均流速慢于 TCP 流速,BT 网络极少数结点有较高的连通度,且传输流量很大,而大部分结点都只贡献很少的连接数和流量^[14]。刘刚等在捕获到的 BT 流量数据中计算了自相似属性 H 值,证实了 BT 流量中呈现出的自相似性^[20]。但 P2P 拓扑结构是否存在幂律分布受到质疑。张国强等认为 P2P 文件协议的节点网络由于协议随机地建立连接和受到各个节点的性能与带宽的限制,因此其不是服从幂律分布,而是服从负指数分布^[21]。

2.3 网络内部传输机制的突现行为

网络内部传输机制引起的突现行为研究的对象是普遍使用的传输层协议、网络路由拓扑结构、路由协议以及整体网络的流量。这些构成了网络正常运行的基础设施,在下面中简称为网络底层。网络上层的应用服务质量密切依赖于网络底层的整体性能。在网络底层中复杂的元素(协议、主机)和动态变化环境(路由、拥塞)给网络引入了难以测量、控制、预测的突现行为。

对这种突现行为的观察和研究通常采用两种方法^[22]:一种是物理统计学方法。由于网络流量数据易于观测,许多学

者从物理统计学角度对宏观的网络流量进行了研究,希望能揭示隐藏在网络流量背后网络突现行为的形成原因。另一种是工程设计方法,因为网络是由众多元素相互作用构成的,包括网络设备、协议、用户行为等,工程人员寻求从工程设计角度来研究网络,利用网络复杂的特征来简化网络设计,提高网络性能。

通过网络数据的实验观测,采用物理统计方法的研究学者发现了流量的自相似性与拓扑的幂律分布特性,提出了自相似系数测量方法和解释幂律的无尺度 BA (Barabasi-Albert) 模型,初步研究了网络底层突现行为的自然属性,如网络拥塞下临界态的相变、自相似的流量突发性、网络拓扑结构形成的原因。物理统计方法吸引了学者广泛的注意,但也遇到了问题。随着深入研究实际的路由器拓扑结构,人们发现实际的的网络结构虽然服从幂律分布,却有不同于 BA 模型的连接方式,使得实际的的网络更能抵御针对度高节点的恶意攻击^[23]。

而采用工程设计方法的研究人员更关注网络中的自组织特征。Prehofer 等研究自组织在通信网络中的设计模式,发现在因特网的设计中广泛采用了自组织方法,使系统呈现出了突现行为特征。比如动态主机配置协议(DHCP)实现的自动获取 IP 地址功能、TCP 协议实现的分散式拥塞控制机制等^[24]。这些突现行为既有设计人员在设计时有意引入的有利于网络运行的整体突现现象,也有意料之外的不良突现现象。

好的突现现象有网络自治域 AS (autonomous system) 之间进行无缝连接与无中心管理、IPv4 地址的动态寻址、TCP 的局部拥塞控制等。

AS 边界路由器利用 BGP 协议发送的路由更新公告相互交换可达路由信息,并将信息存贮在路由表中。利用路由表能获得 AS 层的连通结构。与域内路由协议选择最短路径不同,在 AS 之间进行路由选择是由于 AS 之间存在商业关系。这一特性引入的复杂与微弱的动态性会产生全局的影响。Kihong Park 认为因特网流量工程一个重要的变量是 AS 自治域的自组织行为,它密切影响着路由、QoS、拓扑和流量管理的部署^[25]。卢锡城院士等人从自组织特性的角度,分析域间路由系统的现状、面临问题与发展趋势,认为域间路由的连接是 AS 商业关系的局部利益最大化的结果^[26]。

在 IPv4 地址的动态寻址方面,运行 RIP、OSPF 协议的域内路由器,通过协议发现邻接的节点,周期性地向邻接节点发布链路更新信息,各个路由器自主决定是否更新路由表,最后每个节点都知道如何将到达的 IP 数据包路由到目的地。在这过程中并没有中心控制的服务器,是一种在协议设计时已考虑的自组织现象实例,简化了系统的设计。

TCP 的局部拥塞控制机制是 TCP 端点根据网络环境自发地调节自己的发送量。在网络处于拥塞时,TCP 源端使用线性增加,指数回退机制缓慢适应可用的带宽。事实证明该机制虽然没有中心控制,却避免了整体流量出现的拥塞。

网络突现也有一些不好的现象,如以太网捕获效应,导致首次获得信道的主机更容易获得信道;路由更新自发的同步,路由抖动抑制在路由退出过程与维护路由稳定机制的相互影响下,大大延长路由聚集的时间;TCP 的发送端 Nagle 算法与接收端的延迟反馈机制会导致不好的通信现象,而这在大

文件传输下显得更为严重^[27]。

3 因特网复杂性特征研究

近年来,国内外广泛开展了因特网复杂性研究。因特网复杂性的研究主要集中在网络拓扑结构的幂律分布、流量的自相似性、拥塞相变以及混沌、多重分形等非线性特征上。因特网上的复杂性特征是网络突现行为的宏观表现,各种复杂性的度量从不同的方面刻画了复杂网络的整体功能与性能,为网络突现行为的研究提供了理论基础。

Willinger 等人首次提出自相似过程的概念,通过对 Bell-core 的以太网进行长时间的观测,发现网络流量中存在自相似现象,并表现为长相关 LRD (Long Range Dependence)^[28]。自相似性是指随机过程的尺度不变(统计特性不随时间变化)和自相关函数衰减缓慢的特性。在此基础上,Paxson 等在 FTP 传输的突发规模、TELNET 包到达时间^[29],Crovela 在 WWW 文件大小均发现了自相似性^[30]。山秀明等利用元胞模型发现路由由节点队列在非拥塞下呈现不相关与短相关,拥塞下呈现长相关^[31]。对于流量自相似产生的原因,人们普遍认为网络文件大小的重尾分布是流量自相似性的主要原因,TCP 非线性流量控制是自相似产生的次要原因,路由更新的周期同步以及拥塞导致路由的来回震荡也会导致突发的自相似流量^[25]。Guo Liang 等怀疑 TCP 机制是自相似产生的原因,认为 TCP 引起的自相似只在中小时间尺度上存在^[32]。傅雷扬等对普通网络流量与视频流的自相似值进行计算,发现视频流的自相似性特征明显^[33]。

研究人员通过实验观测,发现大量真实的网络包括 WWW、因特网自治域、电话网、某些生物与社会网^[34,35] 都呈现幂律分布^[36,37]。网络的幂律分布是指网络的邻居节点数高度可变,并且大多数节点只有较小的度。这些现象不能用 Erdos, Renyi 描述的随机网络和 Watts, Strogatz 论述的小世界模型来解释。Barabasi 与 Albert 指出网络中普遍存在无尺度性,并提出了网络动态演化的 BA 模型^[36],将幂律的形成过程解释为节点动态成长、优先连接两个根本原因。科学家们还用自组织临界(SOC, Self-Organized Criticality)^[38],HOT (Highly Optimized Tolerance) 理论^[39] 等来解释幂律。自组织临界是指大量相互作用的耗散系统会使系统在宏观层面上达到临界状态,其特征事件就是一旦到了临界状态,即服从幂律分布。HOT 理论认为相连的系统在人为设计时引入微小的鲁棒性考虑,系统整体将产生意料之外的现象。HOT 理论的观点解释了工程设计在考虑系统功能和性能平衡下,很容易产生幂律事件。

自相似是网络流量特征,幂律分布是网络的拓扑特征,但它们又相互联系。自相似与幂律分布的发现,都是通过观测网络的数据。自相似产生的一个主要原因被认为是网络文件大小的幂律分布,而网络拓扑的一个随机子图也继承了原图的分布特征在不同规模上具有的统计的自相似性。其他解释提及概念如混沌、分形、自组织临界,主要因为这些概念与无尺度和幂律密切相关^[40]。科学家一方面仍在提出新的网络模型或概念试图解释观察到的现象,另一方面也希望能用已有的结论来改善网络设计。

4 研究因特网突现行为的模型

实际网络规模庞大,增长迅速,虽然一些组织机构,如

CAIDA 提供因特网的拓扑数据,但仍需巨大的计算能力处理海量的数据。对因特网真实数据的研究在宏观上取得了一些成果,如刻画因特网的拓扑结构、预测网络的平均直径^[41],但难以从网络的微观交互机制深入研究网络行为的产生原因及其对性能的影响。另一些学者则通过观测网络各个层次涌现出来的各种突现行为,建立网络模型来研究网络突实现象。通过模型来研究网络突现,可以从复杂的网络对象中分解出某一功能模块,保留了网络交互的机制,简化了研究网络复杂巨系统的问题域。由于网络模型的参数可调,现象易于观察,学者利用各种模型来进行网络突现行为研究,虽然还只是初步阶段,但已获得了一些成果。研究网络突实现行为的模型可从两个视角来看:从智能计算模型出发,其主要研究手段被称为突现计算模型^[42];而从网络行为出发,也有一系列模型被用于网络的动态演化建模。不过,以上两个视角并非是二分关系。

4.1 突现计算视角

突现计算又称涌现计算(Emergent Computation),是多主体系统(multi-agent system, MAS)在处理复杂问题时所展现出来的一种思路逻辑。它是通过利用多个简单模块的相互沟通和协作来自我突现出更加复杂行为的系统。与传统的线性模型相比,这是一种非线性的计算模型。用于研究网络突实现行为的突现计算模型主要有元胞自动机(CA, Cellular Automata)和群集智能(Swarm Intelligence)模型等。

一维元胞自动机^[43]是一种时间、空间和变量均离散的数字模型,规则网格中的每一个元胞取有限的离散状态,遵循同样的作用规则,依据确定的局部规则做同步更新。这里的规则是根据具体的应用而人为决定的。大量元胞通过简单的相互作用而构成动态系统的演化,体现出突现行为。其优点是模型简单,应用广泛。受元胞自动机在交通流中应用的启发,学者也借用元胞自动机模型来研究和分析网络的各种行为,如网络舆情的传播趋势研究^[44]、网络数据包传输研究^[45]。其缺点是没有对应的连续性模型,每个元胞的状态有限,一维元胞自动机形成的拓扑结构与实际网络拓扑结构存在较大差异。

二维元胞自动机一般是一个 $n \times n$ 的二维网格,每个节点有 4 个邻居节点。与一维元胞自动机相比,二维元胞自动机考虑了网络拓扑结构对网络突实现行为的影响,也继承了一维元胞自动机时间与空间离散化,便于模拟大量的网络节点。二维元胞自动机常被用于网络底层的流量仿真,实际中有各种改进的模型。Toru Ohira 等人将边缘元胞节点作为网络终端,中间节点作为路由器,只有边缘节点产生数据包,通过调节数据包注入数率来观察模型的拥塞现象,研究认为网络效率在拥塞临界态是最优的^[46]。但在该模型中网络数据包分布不均。Ricard V. Sole 等改进了这个模型,在元胞中随机选择节点作为终端节点^[47]。Henryk Fuks 等则将元胞中的每个节点设为既可传输包亦可路由包,改善了二维元胞的性能^[48]。Newman 等针对二维元胞网络平均距离偏长,在元胞节点中随机加边,形成小世界网络来调节模型的性能^[49]。Jian Yuan 等利用二维元胞模型研究通信网络中的突实现象,使用功率谱密度分析了网络的长相关性,发现在相同的规模下,长相关性随着时间粒度的增加而衰减,并认为研究网络整体行为需要使用足够大规模的网络建模^[50]。

群集智能 Swarm 模型^[51]强调具有一定智能行为的个体通过相互作用所形成的集群能力或现象,蜂群、蚁群、鸟群都是其典型的例子。群集智能是模仿个体的某种简单和单一的行为,也可以让它们拥有学习的能力,以解决具体的问题。它们具有高度的自组织、自适应性,并表现出非线性、突现的系统特征。由于 Swarm 模型有能够较好地再现突实现行为的优点,学者们也用它来研究网络的突实现行为。伊春华等在 Swarm 平台上构建了一个基于多 Agent 的随机网络流量动态模型,模拟的网络流量在网络带宽的 50% 附近振荡,与实际测量的流量一致^[52]。将 Swarm 模型用于网络行为研究的缺点是缺乏固定的网络拓扑结构,将网络中各实体的行为转化为 Swarm 模型的个体行为,相对其他模型较为困难。

4.2 网络动态演化视角

网络动态演化模型反映网络结构的某些突现特性,而不是完全还原因特网的拓扑结构。利用该模型作为网络建模的底层,能研究网络宏观整体功能与性能受突现结构影响产生的新现象。这一类模型主要有小世界(Small World)模型、无尺度网络(Scale-free Network)模型等。

小世界(Small World)模型是一个基于社会网络的模型,该网络具有与规则网络类似的较大的聚集系数和与随机网络类似的较小的平均距离这两种特性^[53],综合起来称为“小世界效应”。为小世界模型设定一些规则,通过系统在一定环境下自发地演化,可考察系统演化过程中突现出来的若干性质。其缺点是该模型构建的网络的节点度分布与随机网络类似,均服从 Poission 分布,这与网络中普遍存在的节点度成幂律不符合。尽管该模型在拓扑结构存在缺陷,但小世界模型提出的网络具有较高聚集系数和较短平均距离的理论还是获得了学者的肯定。该模型已经在病毒传播、危机传播研究中取得了不少成果^[54,55]。同时,部分学者已开始利用该模型从事网络舆情等网络行为的初步研究^[13]。

无尺度网络模型是 Barabasi 和 Albert 为解释网络中存在的幂律现象提出的一种动态演化网络模型,简称 BA 模型^[56]。该模型认为网络节点的动态增长和有限连接是无尺度网络中呈现幂律的两个根本原因。通过研究 BA 模型的节点度的动力学特征,该模型生成的网络拓扑服从幂律为 3 的节点度分布。BA 模型使人们对网络的拓扑结构认识更进一步,也促使学者采用这一新的模型重新研究网络中存在的老问题。陈振毅和汪小帆利用无尺度网络研究路由器的拥塞控制,证实了增加路由缓存不能根本改变拥塞,而增强关键路由的处理性能就会得到较好的效果^[56]。李幼平院士等基于无尺度网络用户获取网络的内容集中在少数的节点,提出了一个将常用的节点路由距离缩短为 1 的播存网络与因特网并存的双层网络模型,能明显降低全网的带宽资源消耗^[57]。BA 模型也有不足,人们逐渐发现特定网络的内部新增链接、链接重排、节点和链接动态消失、节点老龄化、新增连接的非线性效应也会影响网络的拓扑结构。张立等人发现虚拟社区网络的演化过程中时间早的帖子不一定要有较大的连接度,与传统的 BA 模型不符合^[58]。尽管如此,无尺度网络模型及其改进模型仍是研究网络突实现行为的一个较好的演化模型。根据实际的网络问题调整该模型,将对突实现行为的现象认识和形成机理进行更加深入的研究。

结束语 因特网是一个大规模、异构的和不断演化的复

杂系统,由路由器、主机、协议和用户行为等各种元素组成。我们已经分析了因特网在不同层次的突出现象,尽管具有不同的表现,但都离不开大规模实体的参与和非线性的相互作用。对网络突实现行为的研究最早是从观察和研究网络复杂性特征开始的,有关复杂性的研究为网络突实现行为提供了理论基础。随着研究的深入,人们需要利用模型来认识因特网的突实现行为,而直接对现实网络进行仿真模拟面临很多困难,借助现有的模型作为建模工具,从个体简单规则出发,观测宏观突实现行为,是行之有效的办法。

网络中的突实现现象已经成为了计算机网络研究中的一个前沿领域与热点课题,吸引了许多不是网络技术领域的跨学科研究人员。尽管对网络突实现行为的研究还处于初步的阶段,围绕网络的宏观突实现特征研究,如网络的幂律分布无尺度性、自相似性等已获得丰富的理论成果。但是人们也发现在将突实现理论用于具体的网络问题中,由于网络的复杂性,一些理论并不完全符合真实的环境。而且从网络技术角度研究网络节点的协议交互作用对网络突实现行为的影响还较少。在网络不同的突实现层次上,网络的用户行为如何影响网络应用协议的工作、网络应用协议的设计与网络底层的流量存在怎样的关系,对这些问题的研究会有助于设计新协议和新业务,对构建下一代网络有着重要的指导意义。

进一步的研究可以从以下几个方面展开:(1)研究因特网突实现行为的观测和实验方法,为因特网突实现行为研究提供实验手段。(2)研究面向因特网突实现行为的突实现计算模型,为因特网突实现行为研究提供定量的理论分析方法。模型设计应兼顾模型的抽象性和网络模拟的真实性,并寻找突实现评价指标对突实现行为进行定量分析。(3)研究因特网内部节点间通信协议和交互机制与突实现行为的关联性,探索网络运行机制对因特网突实现行为的作用和影响。在这些方面上取得的研究成果将会使人们对因特网突实现行为的认识更加深入。

参 考 文 献

- [1] 李夏,戴汝为. 突现(Emergence)—系统研究的新观念[J]. 控制与决策,1999,14(2):97-102
- [2] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域—开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志,1990,13(1):3-10
- [3] 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统[J]. 模式识别与人工智能,1991,4(1):1-4
- [4] 戴汝为. “再谈开放的复杂巨系统”一文的影响[J]. 模式识别与人工智能,2001,14(2):129-134
- [5] Li Z, Sim C H, Low M Y H. A Survey of Emergent Behavior and Its Impacts in Agent-based Systems[C]// 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2006:1295-1300
- [6] Standish R K. On Complexity and Emergence[J]. Complexity International, 2001
- [7] Boyd D M, Ellison N B. Social Network Sites: Definition, History, and Scholarship[J]. Journal of Computer-Mediated Communication, 2008, 13(1): 210-230
- [8] Haythornthwaite C. Social networks and Internet connectivity effects[J]. Information Communication and Society, 2005, 8(2): 125-147
- [9] Ellison N, Steinfield C, Lampe C. The benefits of Facebook “Friends”: Explore the relationship between college students’ use of online social networks and social capital[J]. Journal of Computer-Mediated Communication, 2007, 12(3)
- [10] Ahn Y-Y, Han S, Kwak H, et al. Analysis of Topological Characteristics of Huge Online Social Networking Services[C]// International World Wide Web Conference. 2007:835-844
- [11] Efimova L, Hendrick S. In search for a virtual settlement: An exploration of weblog community boundaries [EB/OL]. https://doc.telin.nl/dscgi/ds.py/Get/File46041/weblog_community_boundaries.pdf, 2005
- [12] Voß J. Measuring Wikipedia[C]// Proceedings of 10th International Conference of the International Society for Scientometrics and Informetrics. 2005
- [13] 刘常昱,胡晓峰,司光亚,等. 基于小世界网络的舆论传播模型研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3608-3610
- [14] 陈亮,龚俭. 大规模网络中 BitTorrent 流行为分析[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2008, 38(3): 390-395
- [15] Guo L, Chen S, Xiao Z, et al. Measurements, Analysis, and Modeling of BitTorrent-like Systems[C]// Internet Measurement Conference. 2005
- [16] 山秀明. P2P 应用系统用户共享行为的复杂网络模型[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(6): 1853-1855
- [17] 陈宝钢,张凌,许勇,等. P2P 文件共享系统行为特性分析和研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(12): 2809-2812
- [18] 黄立辉,李之棠,柳斌. BitTorrent 协议的主动测量[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38: 167-170
- [19] Qiu D, Srikant R. Modeling and Performance Analysis of Bit-Torrent-like Peer-to-Peer Networks[C]// Proc. of ACM SIGCOMM. 2004
- [20] 刘刚,方滨兴,胡铭曾,等. BitTorrent 流量的捕获方法及自相似性的评价[J]. 计算机应用研究, 2006, 23(5): 205-209
- [21] 张国强,袁斌,张国清. 重新认识 P2P 网络的拓扑[EB/OL]. <http://www.ict.ac.cn/grope/download/07-09/1189329961.doc>, 2009
- [22] Alderson D, Willinger W. A contrasting look at selforganization in the Internet and next-generation communication networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2005
- [23] Doyle J C, Alderson D, Li L, et al. The “robust yet fragile” nature of the Internet[J]. Proc. Nat. Acad. Sci., 2005, 102(41): 14497-14502
- [24] Prehofer C, Bettstetter C. Self-organization in Communication Networks: Principles and Design Paradigms[J]. IEEE Communications Magazine, 2005: 78-85
- [25] Park K. The Internet as a Complex System: Scaling, Complexity and Control[EB/OL]. <http://www.santafe.edu/sfi/research/focus/network-dynamics/projects/internet.html>, 2000
- [26] 卢锡城,赵金晶,朱培栋,等. 域间路由系统自组织特性[J]. 软件学报, 2006, 17(9): 1922-1932
- [27] Mogul C J. Emergent (Mis) Behavior vs Complex Software Systems[C]// EuroSys’06. 2006: 293-303
- [28] Leland W E, Taqqu M S, Willinger W. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994: 1-15
- [29] Paxson V, Floyd S. Wide-area Traffic: The Failure of Poisson Modeling[C]// ACM SIGCOMM’94. 1994: 257-268
- [30] Stallings W. High-speed network TCP / IP and ATM design principle[M]. Prentice Hall, 1998
- [31] 王磊,周淑华,袁坚,等. 虚拟网络行为对互联网整体特性的影响[J]. 物理学报, 2007, 56(1): 36-41

- [32] Guo L, Crovella M, Matta L. How does TCP generate pseudo-self-similarity? [C]//Proc. of MASCOTS '01, 2001, 8
- [33] 傅雷扬, 王汝传, 王海艳, 等. R/S方法求解网络流量自相似参数的实现与应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(3): 358-362
- [34] Jeong H, Tomber B, Albert R, et al. The large-scale organization of metabolic networks[J]. Nature, 2000; 378-382
- [35] Newman M. The structure of scientific collaboration networks [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 2001(4): 404-409
- [36] Barabasi A, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999; 509-512
- [37] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology[C]//Proc. ACM SIGCOMM'99, 1999; 251-262
- [38] Bak P. How Nature Works; the Science of Self-organized Criticality[J]. Copernicus, 1996
- [39] Carlson J M, Doyle J. Highly optimized tolerance; A mechanism for power laws in designed systems[J]. Physical Review E, 1999, 60(2): 1412-1426
- [40] Willinger W, Govindan R, Jamin S, et al. Scaling phenomena in the Internet; Critically examining criticality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(S1): 2573-2580
- [41] 徐野, 赵海, 苏威积, 等. Internet网络的访问直径分析[J]. 计算机学报, 2006, 29(5): 690-698
- [42] 吴渝, 周凯, 刘群, 等. 突现计算的研究进展[C]//中国人工智能学会年会第12届全国学术年会论文集: 中国人工智能进展. 2007, 12: 974-979
- [43] Hordijk W. Dynamics, Emergent Computation, and Evolution in Cellular Automata[D]. University of New Mexico, 1999
- [44] 曾祥平, 方勇. 基于元胞自动机的网络舆论激励模型[J]. 计算机应用, 2007, 27(11): 2686-2688
- [45] 袁坚, 任勇, 山秀明. 一种计算机网络的元胞自动机模型及分析[J]. 物理学报, 2000, 49(3): 398-402
- [46] Ohira T, Sawatari R. Phase transition in a computer network traffic model[J]. Phys. Rev. E, 1998, 58: 193-195
- [47] Sole R V, Valverde S. Information transfer and phase transitions in a model of Internet traffic[J]. Physica A, 2001, 289: 595-605
- [48] Fuks H, Lawniczak A T. Performance of data networks with random links[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1999, 51: 101-117
- [49] Newman M E J, Jensen I, Ziff R M. Percolation and epidemics in a two-dimensional small world[J]. Phys. Rev. E, 2002, 65: 3109-3113
- [50] Yuan J, Mills K. Exploring Collective Dynamics in Communication Networks[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2002, 107(2): 179-191
- [51] Rouff C, Vanderbilt A, Hinchey M, et al. Verification of emergent behaviors in swarm-based systems[C]//Proceedings of 11th IEEE International Conference and Workshop, 2004
- [52] 伊春华, 方福康. 复杂适应系统 Internet 中的网络流量仿真研究[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 139-142
- [53] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442
- [54] Zou C C, Towsley D, Gong W. Email worm modeling and defense[C]//Proc. 13th Int. Conf. Computer Communications and Networks (ICCCN'04), 2004: 409-414
- [55] Lind P G, Silva L R D, Jr J e S A, et al. Spreading gossip in social networks[J]. Phys. Rev. E, 2007, 76: 036117
- [56] 陈振毅, 汪小帆. 无尺度网络中的拥塞以其控制[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2): 132-138
- [57] 李幼平, 任勇. 双结构互联网[C]//中国复杂系统论坛. 2005
- [58] 张立, 刘云. 虚拟社区网络的演化过程研究[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5419-5424

(上接第 33 页)

- [25] Zhou D, Lai T H. A scalable and adaptive clock synchronization protocol for IEEE 802. 11-based multihop ad hoc networks[C]//Proc. Second IEEE Int'l Conf. Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, 2005; 551-558
- [26] Sheu J P, Chao C M, Sun C W. A clock synchronization algorithm for multihop wireless ad hoc networks[C]//Proc. 24th IEEE Int'l Conf. Distributed Computing Systems, 2004; 574-581
- [27] Cao G T, Welch J L. Accurate multihop clock synchronization in mobile ad hoc networks[C]//Proceeding of the 2004 International Conference on Parallel Processing Workshops, 2004; 13-20
- [28] Ebner A, Rohling H, Lott M, et al. Decentralized slot synchronization in highly dynamic ad hoc networks[C]//The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2002: 494-498
- [29] Zhu B, Miyano T, Hidekazu M, et al. Study on correlation based timing synchronization algorithm for ad hoc networks[C]//The 5th International Conference on Communications and Signal Processing, 2005; 593-597
- [30] Qi Y, Shi J H. An interference elimination method for decentralized slot synchronization in TDMA-based wireless ad hoc networks[C]//International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2007; 236-239
- [31] Hong Y W, Scaglione A. Time synchronization and reach-back communications with pulse-coupled oscillators for UWB wireless ad hoc networks[C]//2003 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003; 190-194
- [32] Tyrrell A, Auer G, Bettstetter C. Fireflies as role models for synchronization in ad hoc networks[C]//Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems, 2006; 1-7
- [33] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]//Proc. of the 5th Symp. on Operation Systems Design and Implementation, 2002; 1-7
- [34] Sivrikaya F, Bulent Y. Time synchronization in sensor networks; a survey[J]. IEEE Network, 2004, 18(4): 45-50
- [35] Saurabh G, Ram K, Mani S. Timing synchronization protocol for sensor networks[C]//Proc. of 1st International Conference on Embedded Network Sensor Systems, 2003; 138-149
- [36] 肖琳, 程利娟, 王福豹. 一种低功耗无线传感器网络的时间同步算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 126-130
- [37] Li L, Liu Y P, Yang H Z, et al. A precision adaptive average time synchronization protocol in wireless sensor networks[C]//Proceeding of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automations, 2008; 65-70