

未来网络科学与工程若干问题综述

李 兵^{1,2,3} 李其锋^{1,4}

(武汉大学软件工程国家重点实验室 武汉 430072)¹ (武汉大学复杂网络研究中心 武汉 430072)²
(武汉大学计算机学院 武汉 430072)³ (湖北大学数学与计算机学院 武汉 430062)⁴

摘 要 从网络计算理论、网络科学和网络设计、网络设计与工程、网络设计与社会价值等方面阐述了构建未来网络面临的若干问题,其中任何一个问题的解决都将极大地推动计算机网络的发展。

关键词 网络科学,网络化计算,网络设计与工程

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Problems in Future Network Science and Engineering: A Survey

LI Bing^{1,2,3} LI Qi-feng^{1,4}

(The State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)¹

(The Research Center of Complex Network, Wuhan University, Wuhan 430072, China)²

(School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)³

(Faculty of Mathematics and Computer Science, Hubei University, Wuhan 430062, China)⁴

Abstract Described the challenges and open problems of theory of networked computation, network science and network design, network design and engineering, network design and societal values in the field of future network. The resolution of any one of the problems will make great progress in computer network.

Keywords Network science, Networked computation, Network design and engineering

1 引言

亚当斯密曾在《国富论》中对生产资源的社会化配置曾有如下定义,在生产资源配置的初期,由于运输能力的限制,资源配置的方式是“沿河流”,随后的工业革命的财富传递则是建立在铁路、公路连接的物流中。而在现在和未来,信息社会的资源分配是“沿互联网”。互联网是 21 世纪最重要的社会性基础设施,其意义相当于 19 世纪的铁路和 20 世纪的高速公路。在过去的 40 多年里,计算机网络(尤其是互联网)取得了长足的发展和巨大的成功,它提供了一个技术革新的平台,其意义远超出它作为研究工具的初衷。互联网及其服务改变了数以亿计的人的生活,改变了人们的生活、工作、娱乐方式,也改变了人们在政治、教育、医疗、商业等方方面面的思想观念,互联网强大的技术价值与应用价值日益显现,已经成为技术革新和社会发展强有力的推动力。然而,随着人们对互联网的依赖性日益增强,由网络所衍生出来的问题也越来越多,如网络性能不稳定,安全得不到保障,个人隐私泄露,网络社会价值不明晰,网络发展不均衡,全球网络普及率仍然低下等等,这些问题已经严重威胁到互联网所取得的成功,人们迫切需要建设一个更好的网络。

2008 年,美国计算社区联盟(Computing Community Consortium, CCC)指示网络科学与工程(Network Science and Engineering, NetSE)委员会提供一份全面的研究报告,以支持开发更好的网络。NetSE 委员会在“全球网络创新环境 Global Environment for Network Innovation (GENI)”科学委员会的前一份报告的基础上,增加了各学科间的参与。2008 年夏、秋,美国网络科学与工程(NetSE)委员会连续组织了一系列研讨会,来自网络科学和其他相关领域的专家共同探讨了研发未来网络所面临的机遇与挑战,最终在 2009 年 9 月形成了一份 100 多页名为《网络科学与工程研究纲要》(以下简称纲要)的报告,这份报告主要集中于以下 4 个论题^[1]。

1. 面对建设一个“更好的”互联网(a better Internet)的挑战,必须更好地认识网络并提高网络技术。为此,需要建设一些可共享的实验基础设施,用于验证新的网络设计。

2. 探索新的数学工具和理论框架,来解决未来网络基础设施中的复杂性和脆弱性等问题。计算机科学领域中的“网络化计算理论(Theory of Networked Computing)”以及新兴的交叉领域“网络科学(Network Science)”的进展,将是希望所在。

3. 与传统的网络工程化设计不同,网络学科的创新,应该

到稿日期:2009-12-31 返修日期:2010-03-16 本文受国家重大基础研究发展计划(973 项目 No. 2006CB708302, 2007CB310801), 国家高技术研究发展计划(863 项目 No. 2006AA04Z156), 国家自然科学基金(No. 60873083, 60803025, 60970017, 60903034), 湖北省青年杰出人才基金(2008CDB351), 湖北省自然科学基金(No. 2005ABA123, 2005ABA240, 2006ABA228), 教育部博士点基金(No. 20070486065)资助。

李 兵(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究方向为软件需求工程、复杂网络与复杂系统等, E-mail: libing@sklsc.org;
李其锋(1981-), 男, 博士生, 主要研究方向为软件工程、复杂网络等。

在看似矛盾的设计目标间进行协调与折衷。基于实验和测试的研究在该学科中将扮演重要角色,起到了检验与修正假设以及验证系统设计方法的作用。

4. 互联网已经不是一个单纯的技术产物,而表现出越来越多的社会现象。对未来网络的研究需要一个广泛的跨学科的研究方法,网络设计人员需要加强与经济学家、政治学家、行为学家、哲学家和法律工作者的合作,研究更广泛的社会和经济问题。

本文主要是结合这份报告,对未来网络科学与工程的关键科学问题进行探讨。

2 网络化计算理论

纲要首先认为未来的网络科学和工程的基础是建立和完善网络化计算理论。传统意义上,计算机科学研究的重点主要集中在如何最佳地设计、构建、分析计算机以及编程。现在,它的重点已经转移到如何最佳地设计、构建、分析和操作网络计算环境,该计算环境正从以 CPU 为中心的图灵模式单机,向以互联网为中心的网络化转变。网络化计算理论在许多领域,如信息检索、网络协议、数据恢复、网络安全等都有显著的成效。但就未来网络而言,面向云计算、物联网等新兴应用,现有的理论和方法并不能完全适用。

正如“高效的解决方案”和“难度”(形式化的观念)影响了单机系统开发一样,一种更普适的网络化计算理论将影响新的网络化系统的发展。网络化计算理论主要围绕未来网络的设计、分析、执行、部署、运转以及修正等方面的问题展开研究。

2.1 网络化计算的定义和模型

一个可计算系统如果能够被称为一个“网络”,那么这个可计算系统必须满足其定义的形式化(明确)表述。已有的网络模型多是针对具体网络的某个方面^[2-6],而网络的种类在不断发展和演化。由于“未来网络”比“下一代网络”的寓意更深刻,其定义和形式化模型也变得多种多样。网络化计算理论涉及的范围包括 DoD's 全球信息网格、传感网络、MANETS (移动 AD-HOC 网)以及内部企业网等等。每一种类型的网络是否都应该独立地形式化,还是可以采用一个具有若干关键参数的基本模型加以描述?如果采用一种基本模型进行描述,那么模型的关键参数和关键属性是什么?在网络化计算中,哪些关键的资源被耗费?一个“有效的”网络化计算的资源耗费的上界是什么?如何将在每个网络类型中有效执行的可计算任务进行分类?如何将实用的网络设计方案加以分类?网络复杂性如何分类?如何证明一个网络化计算问题的难度?这些问题都关系到网络化计算理论的基础和核心,值得关注和深思。

2.2 网络化计算中经济的代理

互联网已经不是一个单纯的技术产品,其社会性和经济性日益突出,因此,需要从网络化计算考虑其经济学行为。计算机科学强调算法和协议,经济行为强调激励政策,纲要认为网络化计算中的经济代理研究主要问题包括:

1) 局域自治系统在互联网体系结构中是否必要?是否有其他的设计方法?如果自治系统是必需的,那么,现在它是最佳的分层的自治系统结构吗?

2) 通过建模和数据分析方法,网络中的一个代理行为能

否对另外一个代理行为做出响应,恰当表现出一些在当时经济条件下的合理行为?

3) 在大型网络中,由于节点和链路的频繁的故障、恢复、加入和掉线,网络化计算的激励机制如何做出相应的反应?如何评价这些反应的合理性?

2.3 基于大数据集的网络化计算

随着通信能力的增强和通信费用的降低,通信不再是一个问题,网络的普遍使用也就成为必然,这也导致了网络化数据的爆炸式增长,数据的格式已不再是纯文本,而是包含了大量图像、音频和视频等的非文本数据,这些非文本数据的存储、提取、处理技术已经受到研究人员的重视,并取得了一定的研究成果。J. Abello, A. Buchsbaum 等人^[7]提出了基于外存和半外存的图形设计算法,通过该算法设计了一个无向图最大匹配算法,提高了图算算法的计算效率,使图形计算更为实际。Luis von Ahn, Laura Dabbish 等人^[8]提出了一种图形标注方法,该标注方法不是通过计算机视觉算法,而是通过一个在线的互动游戏进行,如果在线人数够多,则可以在数月内标注互联网上的大部分图形。F. Ergün, S. Kannan, R. Kumar, R. Rubinfeld 等人^[9]借鉴交通警察在高速公路上设置检查点的方法来拦截违章者的思路提出了一个程序检查模型,该模型通过在程序中植入“检查者”,通过“检查者”的同步运行来减小系统开销,判断程序是否正确。Joan Feigenbaum, Sampath Kannan 等人^[10]提出了一种基于半数据流的图形计算模型,该计算模型将图形视为边的流,从而减小了算法的空间复杂性,解决了大数据图片无法存储在内存中的问题。因此,当数据集相当大时,需要尽可能利用算法能力去理解和运用这些网络化数据,现有的多项式时间和空间复杂度算法也许不再适应,算法的时间复杂度和空间复杂度概念也会转向到线性逼近、线性或者亚线性时间或空间的需求。

纲要认为,基于大数据集的网络化计算的研究目标包括:

1) 为 Web 上的图像、视频、音频、数据库和其他非文本的复杂数据开发搜索技术,如在 Web 上实现支持非文本数据的数据结构。

2) 研究人类辅助的网络化计算的理论基础。通过汇聚群体智慧的网络智能,如维基百科、社会化标注等方式,可以在网络计算中自然地提供反馈信息,以辅助搜索,进而极大地提高搜索效率。

2.4 网络建设研究中的实验严格性

在大规模的、复杂的计算机网络中发现规律非常困难,仅知道一个系统,对整个系统的群体行为的理解和预测显然不够,系统的聚集对整个系统的规模和复杂性的影响很大,网络用户的行为也会加大网络的整体复杂性。

一种已经被证明富有成效的建模和分析方法,将实验分为 5 个阶段^[11]:观测(收集网络行为的数据),解释(在相关环境下,解释这些观测数据的重要性),建模(为观察到的行为提出原始模型),验证(找到数据来验证,如果必要的话,具体化或修改模型),控制(在已经建立的模型基础上,设计方法来控制网络行为)。

近年来,观测和解释方面的研究进展较快,并有一些普适性的研究结果,例如,随着复杂网络研究的异军突起,研究发现只要有网络化计算的地方,就有幂律分布和对数正态分布的出现,不仅在科学计算领域(文件大小、下载时间、网络拓

扑、Web图等),而且在其他各个领域(收支分配、城市规划、词语频度、文献统计、学科门类、类属学等)都观测到此类统计规律。尽管这些结论在网络化数据研究中无处不在,但仍然不能完全理解、解释并利用这些观测到的统计分布结果。在网络行为建模中,这一问题尤为突出。纲要认为,网络建设实验研究主要内容包括:研究一些新的技术来验证网络行为模型,扩展网络建模和分析的范围,尤其是开发整体的模型,同时捕获许多网络的特征和分析方法。

3 网络科学、网络设计和网络工程

长期以来,人们对网络的拓扑结构性质知之甚少。直到世纪之交,得益于计算机数据处理和运算能力的飞速发展,科学家们通过大量的数值计算发现,大量的、真实系统的网络模型既不是规则网络,也不是随机网络,而是呈现出出乎意料的统计特征,这样的网络是真实复杂系统的拓扑抽象,因此被称为复杂网络。1998年发现了小世界网络及其小世界特性^[12],1999年发现无标度网络及其幂律特性^[13],以此为标志,诞生了网络科学。网络科学是专门研究自然和社会中复杂系统的定性和定量规律的一门广泛交叉的科学^[14,15],它以丰富多彩的真实复杂网络为研究对象,分析复杂网络的各种拓扑结构及其性质,探索复杂网络系统的各种现象(涌现、突变、同步等)产生的机制,研究复杂网络上的各种动力学行为与控制方法,并应用于科学研究和工程实践。网络科学不仅涵盖了数学、物理科学、信息科学^[16,17]、生命科学等众多自然科学,而且横跨社会、经济和人文科学,成为整个科学的前沿,可以让我们以外在形式的相对有限性去把握无限丰富的客观内容。2009年7月24日出版的美国《科学》杂志刊登《复杂系统与网络》专题,充分表明网络科学进一步向众多学科的深入研究和应用发展^[18]。从网络科学的视角来看,自然界和人类社会里,网络无处不在,正在深刻而广泛地影响着我们的日常生活和科学技术等各种活动。

网络科学是一个飞速发展的新兴学科,其特征就在于网络科学在本质上是分析型的,可以构建数学模型来分析网络的共同特性和有关统计数据特性;网络科学所研究的特性是领域无关的,目的在于推进理解和构建一般网络的模型,而不是适用于某一特定领域的问题^[19]。与网络科学不同,网络设计在本质上是系统化的,目的是构建一个新的网络来满足需求,而不是来观察和研究这些已经存在的网络;网络设计关注的是领域相关的具体问题,适用于某一特定领域。

网络结构和网络设计的理论基础,首先是建立一套网络结构的理论,这套理论允许我们严格地分析和系统地设计复杂网络化系统,包括接口、分层等组织的抽象方法,然后通过建模和仿真等评估方法来验证度量 and 数据的正确性,并评估技术在小规模试验中的有效性,进而改进和完善其理论基础。最终目标是构建大规模、鲁棒的、高效和可演化的网络化系统,控制网络基础结构的复杂性和脆弱性。

纲要认为,将两个以前没有很好地联系起来的领域联系起来是很重要的:1)不断演化的网络科学学科;2)传统的网络设计领域。网络结构的理论包括网络协议层和网络模块的研究,也包括网络控制和网络动力学、安全、鲁棒性和演化性。

一个精心构造的系统结构往往有两个层次,一是设计原则,二是根据这些设计原则组织构建的真实的系统结构。互

联网依靠分层、共享命运、边缘论、尽力而为、网络内部软状态、沙漏模型这样一些设计原则发展至今,对于设计和协议的验证主要是通过仿真和模型来进行的,而不是通过严格的数学证明来保证的。云计算、物联网、移动互联网等技术愿景日益强调泛在的通讯、计算和信息物理系统(CPS)控制,网络化系统更加需要高度自治、高度自适应、鲁棒性、演化能力、可扩展和可验证,也更加需要一个更严格的、一致的、完整的数学理论基础。因此,基于理论推导的网络结构设计将是一个挑战。如果能够将要解决的网络结构相关的元素置于一个这样的统一理论框架下,就可以用分层和模块化方法来分解全局优化问题^[20]。网络的分层和协议的模块化可以看成是将这个大的优化问题分解成子问题,不同层次的子问题在决策变量的不同子集上相互迭代,使用局部的信息来完成各自的优化,通过局部的算法来实现全局目标。

纲要认为网络设计的另一项挑战是基于约束的网络设计,它关注随时间变化的群体行为,特别是对有目的性的“涌现”进行研究。在网络科学领域,人们常常会碰到这样一种说法,即:没有人设计互联网,互联网是涌现的。然而,与网络科学模型相反,互联网服务提供商构造和操作他们的网络并不是随意和随机的,而是有目的性的。

网络科学领域的研究者早已以图的形式来表示路由级的互联网结构,并致力于通过各种度量试验来识别图中结构上的关键特性和行为的统计特性,并构建简单的机理来复现这些特性,进而研究互联网的涌现现象^[13]。然而对于像互联网这样的复杂系统,仅仅研究节点的连接特性是远远不够的。事实是,期望结构的统计特性和标志是一种不完全的描述,从简单的、不受意图约束的模型和产生过程出发,是难以获得一种良好的设计结果的。例如,两个在图结构上表现出类似的统计特性的网络,在实际的性能、可靠性和费用等特性上可能完全相反。因此,纲要认为基于约束的网络设计的主要研究内容包括:理解群体(如互联网)是如何由局域网和约束来构造、研究一种可识别和部署局部特征和约束的方法,以实现预期的结果。将科学有效的度量作为基础,以计算机网络为研究对象,在领域无关的网络科学和领域相关的网络科学之间建立桥梁,从而整体提高网络科学的质量。

网络设计不同于其它的大多数工程实践,对大多数工程实践,只需要遵循一些实际制约因素,一项工程即能满足一系列的需求,而像互联网这样的演化产生的复杂网络,不是交响乐,也没有总指挥,没有人为它规定开始、中间和结尾。虽然在互联网发展史的任一时刻,都有协议和规范来定义它的架构,可是这一架构从来没有完整的规划,没有所谓的顶层设计,万维网也是如此。也正因为这种架构的开放性和多样性,给网络的发展带来了勃勃生机,使得互联网发展成为一个全球性基础设施,为各种各样的科学实践和生产生活提供了展现想象力的舞台,并不断满足商业、教育、医疗、通信以及娱乐等方面的需求。同时,也为网络设计与工程提出了很多挑战,如安全、隐私、能耗效率以及更高的可靠性等。因此,未来网络的架构应该是一个框架,这个框架能够使得异构网络和异构资源在分布式环境下,及时适应不同的、随时间变化的需求,并在带有相互冲突的目标之间取得平衡。由于操作和控制这些网络的系统是可编程的,这些网络就能够不断演化,并不断采用新的技术来满足新的社会需求。

例如,今天大部分的网络技术设计为支持固定的终端设备之间的通信,如地址结构和路由协议。而未来网络的设计应当以移动性为标准,支持终端设备、主机的移动,以及“虚拟”服务器从一个物理计算机(或数据中心)迁移到另一个等。实际上,流动性尽管会使路由协议更复杂,但也提供了一种运输数据的替代方法——数据随计算机自身迁移。最近的理论工作表明,移动性实际上会增加网络的容量。

纲要认为,网络设计与工程的研究内容包括:

1)在看似矛盾的设计目标之间寻找平衡点。既能允许创新又能确保安全的网络,既能在经济上可接受又能提高网络可靠性的网络设计,既能支持固定终端的通信又能支持移动终端扩展的网络。

2)设计可编程的基础设施。“边缘论”和面向非连接的设计思想保障了高效的互通,协议层使用模块化来管理复杂性,通过提高抽象水平建立网络化服务。随着云计算的兴起,资源服务向网络中转移,基于网络的不同需求快速增长,安全可靠问题突出,同时网络中基础设备的智能化程度和可编程能力更高,IP(和 TCP、UDP)成为阻止新的应用程序利用低层协议创新的障碍,亟需改变这种“一刀切”的设计。因此,需要考虑在新的应用层和相对不变的较低的协议层之间提供一个共同的、间接的接口,并重新审视协议层次,以适应增长的各种应用和网络管理的需要。

3)网络的社会化需求。进入 21 世纪,围绕气候/环境的低碳经济、绿色能源、清洁技术等可持续发展概念成为国际政治关注的中心问题。如何充分利用网络技术来帮助减少全球能源消耗量,以及减少网络自身能耗的“绿色网络”将是未来网络设计与工程需要考虑的重要因素,如通过远程协作来减少人们远行的需求,或者通过分布式来监测和控制建筑内能源的控制,底层网络可以通过新的低能耗设备和技术来选择性地关闭交互机和路由器而不影响网络正常运行等等。

正在发生的云计算变革将把信息产业变成绿色环保和资源节约型产业,将 IT 基础设施变成如水电一样按需使用和付费的社会公用基础设施,将软件产业变成如传统工业流水线一样的高效产业,极大地简化了企业的 IT 管理,有效地降低了企业的 IT 基础设施成本,全面提高了社会整体的信息化水平。云计算的集中化资源整合可以有效地降低能源消耗,提高电能利用率(PUE, Power Usage Effectiveness)。实践表明,较传统数据中心,云计算能够节省约 70% 的电能消耗,节能效果显著。据统计,2007 年中国 IT 设备大约消耗 300 亿~500 亿度电能。如果采用云计算技术提供数据中心服务,那么全国一年将节省 210 亿~350 亿度电能,能够有力地支持节能减排目标的实现。纲要认为,尽管在云计算的发展过程中会遇到许多困难,但目前还处于定义云计算的早期阶段,仍有机会进行研究,以确保云计算架构能提供它所保证的价值和效益。

4 网络中人参与的计算与网络的社会价值

随着 Web2.0 运动的影响,现今的互联网环境中,人人既是信息服务的消费者,也是信息服务的提供者。对于互联网这样一个涉及社会与人的复杂系统,还没有一个描述其行为的有效方法和模型。GENI 组织了来自计算机科学、经济学、博弈论和社会学等领域的研究人员对一些交叉理论课题进行

大量研究,这些交叉理论主要有类行为的计算和算法模型,人类行为、实验和仿真,社会、组织和科技构成的网络组织结构如何与个人和集体的行为相结合。未来的研究将试图构建一个能有效控制交互和策略的组织和系统^[21]。具体研究内容有:

1) 统一算法模型和行为的博弈论模型

1944 年,冯·诺依曼和摩根斯坦的划时代巨著《博弈论与经济行为》奠定了博弈论这一学科的基础和理论体系。今天,博弈论中的算法和行为理论已逐渐成熟,理想情况下这两种途径应该统一并且精炼,行为模型精确地考虑计算问题,算法模型根据实验证据加以评价和改进。在这两种不同的途径之间存在着数学、方法和文化上的很大差异,这是二者统一面临的巨大挑战。

2) 行为实验的网络和系统基础设施

纲要认为,有效地设计和实现一个通用的网络基础实验平台将会给行为研究带来变革性影响,同时带来资源整合等多种挑战,这需要社会学家、经济学家和计算机科学家紧密合作。

3) 同侪生产的理论和设计原则

同侪生产(peer production,也有译为对等生产)是指系统中大量分布式的个体志愿者协同解决集体问题或者构造有影响有实用价值的人工产品^[22],如 Wikipedia, the ESP Game, del.icio.us, Amazon Mechanical Turk, NASA click workers, Galaxy Zoo, 市场预测, 社会关系网等。在《维基经济学》一书中,Don. Tapscott 是这样给出定义的:人们可以自由地在每个经济部门参与革新和财富创造^[23]。未来网络的行为方式将从单纯的点击+吸引眼球,转向社区十大规模协作。然而现在还没有同侪生产网络系统的设计和行为方式的成熟理论,还存在一些基本问题,比如贡献群体大小与集体输出结果的质量之间的关系,如何处理不易将其分解为若干单元子任务的问题等等,目前解决这些挑战正确的途径应该是学科间交叉研究,如人类计算、社会计算、大众分类等研究都取得了部分有价值的成果。

纲要还报告了美国国家自然科学基金委员会 NSF 和 NetSE 组织的网络设计和社会价值专题讨论会的重要主题和论题。这个研讨会汇集了一批人文、社会科学、法律和政策方面的学者和研究者以及科学家和工程师,主要研究人文、社会科学、法律和政策、过去和将来的问题,这些问题都和道德、政治、价值、网络设计、发展及部署相关联。从网络科学技术和社会价值(重点是道德、政治和某些文化价值)复杂的相互作用出发,主要研究和网络科学、计算机信息系统设计、开发和部署相关的人文、社会科学、法律和政策以及道德问题。具体内容包括网络安全,标识和身份,开放性,信任机制,监管、控制、执行机制,隐私。M. Flanagan, D. Howe 等人^[24]将网络设计上升到哲学高度,提出了一种能充分反映设计价值的分析方法和指导方法,该方法力图体现网络设计和社会价值之间的关系以及社会价值如何融入并恰当表达在设计方法中。H. Nissenbaum^[25]将当今社会的网络安全分为两种,一种是个人所关注的安全,另一种是国家、政府、社会团体所关注的安全,文中利用“安全化”理论对这两种安全进行了比较,指出对于不同种类的安全,在网络设计中应该区别对待。L. Introna^[26]指出网络搜索问题不仅是技术问题,而且是政治问

题,通过对搜索引擎的研究,作者发现有些网站、有些特定内容被系统地排除在搜索结果之列,而有些网站又被刻意地突出显示,作者认为这种不公正的搜索与 Web 设计及价值理念相违背,并建议将法规引入到搜索领域中,同时质疑市场机制在其中的作用。该交叉领域的主要研究内容有:

1)网络的可见性和透明性。网络的可见性和透明性可以描述为在网上进行的个人信息暴露和自我展示,用户在网络的不同层次(MAC 地址,IP 地址,账户等)透露自身信息的程度,网络中用户的信任建立经常需要某种程度的信息暴露,如同在社交网络站点一样。

2)网络的激励机制。一个好的激励机制可以揭示网络设计和网络行为之间的关系,激励机制的设计要考虑到网络用户的安全、隐私、社会习惯以及行为目的等。

3)实验网络环境的营造。互联网和 Web 已成为个人学习和社会行为极为重要的环境,在设计未来网络时,需要用户的参与,有如下问题需要考虑:使用系统的人和这些系统的设计和开发者之间有什么联系?网络用户是不是必须同意参与?当设计师和工程师拿出的系统只是“实验性的”时候,用户会有什么样的行为?网络工程师怎样才能对那些有可能参与实验的人最好地传达他们的研究价值?如果大规模的实验无法与各方协商一致,网络实验如何进行?

5 克服破坏性网络建设创新过程中的壁垒

纲要记录了 2005 年 1 月,美国国家自然科学基金委员会 NSF 组织的题为“关于克服破坏性网络创新障碍的研讨会报告”的专题研讨会主要内容。研讨会认识了研发更好网络的必要性和达到此目标所遇到的困难,特别强调了建立一个实验性网络的必要性,最终形成了建立全球网络创新环境试验基础设施(GENI)的提议。研讨会认为,研发未来网络的方法归纳起来有两种:增量式发展和破坏性发展。增量式发展指在原先互联网的基础上进行扩展,添加新的应用,满足新的需求;而破坏性发展指摒弃现有网络设计理念,研发一个满足多种设计目标的未来网络。

目前的互联网是基于增量式的,取得了很大成功,但这种“打补丁”的方法也直接导致网络复杂度的增长,使得互联网更加难于管理,更加脆弱,并且更加容易受到威胁,体系结构的限制可能最终导致当前增量式的方法走进死路。

GENI 建议应采取一种破坏性发展思路,通过破旧立新,促进网络破坏性创新,具体研究计划有:开展网络实验性体系结构研究计划,对新的网络体系结构研究进行实验性验证,政府为开发和部署合适的实验平台提供资金,多学科交叉,并启动相应研究计划,促进不同的体系结构计划间的协同和汇聚,多与来自商业领域应用的专家学者进行交流。

结束语 这份报告认为,网络科学和工程作为一个不断发展的领域,其研究工作将为创建一个体系化的学科奠定基础,这一学科的目标是设计、解释、实现和维护大规模的复杂网络化系统。

很多国家都已经开始行动,如欧盟的 FIRE 计划,德国的 G-LAB 计划,日本的 JGN2plus+ Akari 计划。2007 年 5 月 21 日,美国国家自然科学基金委宣布 BBN 科技公司(BBN 为互联网前身的研发公司)为全球网络创新环境试验基础设施(GENI)项目办公室,与 GENI 科学理事会、NetSE 委员会一

起着手开始建设未来网络。

本文介绍和探讨未来网络建设与发展的若干问题,旨在引起相关领域研究者的重视,对这些问题进行深入研究和解决,以推动我国网络的发展。

参考文献

- [1] <http://www.cra.org/ccc/docs/NetSE-Research-Agenda.pdf>
- [2] Culler D, Karp R, Patterson D. LogP: towards a realistic model of parallel computation[C]//Proceedings of the 4th Symposium on Principles and Practice of Parallel Programming. New York: ACM Press, 1993: 1-12
- [3] Harris T. A Survey of PRAM Simulation Techniques[J]. ACM Computing Surveys, 1994, 26: 187-206
- [4] Lamport L, Shostak R, Pease M. The Byzantine Generals Problem[J]. ACM Transactions on Programming Languages and Systems, 1982, 4: 382-401
- [5] Valiant L G. A bridging model for parallel computation[J]. Communications of the ACM, 1990, 33: 103-111
- [6] Vishkin U. A Case for the PRAM as a Standard Programmer's Model[C]//Proceedings of the Workshop on Parallel Architectures and Their Efficient Use, State of the Art and Perspectives (First Heinz-Nixdorf Symposium), LNCS Volume 678. Berlin: Springer, 1993: 11-19
- [7] Abello J, Buchsbaum A, Westbrook J. A Functional Approach to External Graph Algorithms[J]. Algorithmica, 2002, 32: 437-458
- [8] Ahn L, Dabbish L. Labeling images with a computer game[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2004: 319-326
- [9] Ergün F, Kannan S, Kumar R, et al. Spot checkers[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2000, 60: 717-751
- [10] Feigenbaum J, Kannan S. On Graph Problems in a Semi-Streaming Model[J]. Theoretical Computer Science, 2005, 348: 207-216
- [11] Mitzenmacher M. Editorial: The Future of Power Law Research [J]. Internet Mathematics, 2006, 2: 525-534
- [12] Watts D J, Strogatz S H. Collective Dynamics of 'Small-World' Networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442
- [13] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512
- [14] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚, 等. 一门崭新的交叉科学—网络科学(上) [J]. 物理学进展, 2007, 27(3): 239-343
- [15] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚, 等. 一门崭新的交叉科学—网络科学(下) [J]. 物理学进展, 2007, 27(4): 361-448
- [16] 何克清, 马于涛, 等. 软件网络[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-20
- [17] 李兵, 马于涛, 刘婧, 等. 软件系统的复杂网络研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(6): 805-814
- [18] Barbara R. Complex Network[J]. Science, 2009, 325(5939): 405-432
- [19] 周华任, 马亚平, 马元正, 等. 网络科学发展综述[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(24): 7-10
- [20] Feigenbaum J. Theory of Networked Computing (ToNC)[C]//Workshop of the GENI Engineering Conference. Boston, MA, 2008: 19-20

- [23] Li Yun, Li Xin, Liu Qilie, et al. E-PROPHET: A Novel Routing Protocol for Intermittently Connected Wireless Networks[C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing. Leipzig, Germany: ACM, 2009; 452-456
- [24] Musolesi M, Mascolo C. CAR: Context-aware Adaptive Routing for Delay-Tolerant Mobile Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(2): 246-260
- [25] Burns B, Brock O, Levine B N. MV Routing and Capacity Building in Disruption Tolerant Networks[C]// 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Miami, Florida, USA; IEEE, 2005; 398-408
- [26] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, et al. MaxProp: Routing for Vehicle-based Disruption-Tolerant Networks[C]// 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Barcelona, Spain; IEEE, 2006; 1-11
- [27] Tan Kun, Zhang Qian, Zhu Wenwu. Shortest Path Routing in Partially Connected Ad Hoc Networks[C]// Global Telecommunications Conference, 2003. San Francisco, California, USA; IEEE, 2003; 1038-1042
- [28] Liu Cong, Wu Jie. Routing in a cyclic MobiSpace [C]// Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. Hong Kong, China; ACM, 2008; 351-360
- [29] Ding Li, Gu Bo, Hong Xiaoyan, et al. Articulation Node Based Routing in Delay Tolerant Networks[C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Galveston, Texas, USA; IEEE, 2009; 1-6
- [30] Daly E, Haahr M. Social Network Analysis for Routing in Disconnected Delay-Tolerant MANETs[C]// Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. Montréal, Québec, Canada; ACM, 2007; 32-40
- [31] Pan Hui, Crowcroft J, Yoneki E. BUBBLE Rap: Social-based Forwarding in Delay Tolerant Networks[C]// Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. Hong Kong, China; ACM, 2008; 241-250
- [32] Pan Hui, Yoneki E, Shu Y, et al. Distributed community detection in delay tolerant networks[C]// Proceedings of 2nd ACM/IEEE International Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture. Kyoto, Japan; ACM, 2007; 1-8
- [33] Abdulla M, Simon R. Controlled Epidemic Routing for Multicasting in Delay Tolerant Networks [C] // IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computers and Telecommunication Systems. Baltimore, USA; IEEE, 2008; 1-10
- [34] Xi Y, Chuah M. Performance Evaluation of an Encountered Based Multicast Scheme for Disruption Tolerant Networks[C]// IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Atlanta, USA; IEEE, 2008; 353-358
- [35] Chuah M, Peng Yang. Context-aware Multicast Routing Scheme for Disruption Tolerant Networks[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2009, 4(5): 269-281
- [36] Greifenberg J, Kutscher D. Efficient Publish/Subscribe-based Multicast for Opportunistic Networking with Self-organized Resource Utilization [C] // Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Application. Okinawa, Japan; IEEE, 2008; 1708-1714
- [37] Peng Yang, Chuah M. Efficient Interdomain Multicast Delivery in Disruption Tolerant Networks[C]// The 4th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Wuhan, China; IEEE, 2008; 81-88
- [38] Farrell S, Symington S, Weiss S, et al. Delay-Tolerant Networking Security Overview [Z]. draft-irtf-dtnrg-sec-overview-06, 2009
- [39] Wesley M, Eddy M, Wood L, et al. Reliability-only Ciphersuites for the Bundle Protocol[Z]. draft-irtf-dtnrg-bundle-checksum-05, 2009
- [40] Shi Minghui, Almotairi K, Shen Xuemin, et al. Credit-based User Authentication for Delay Tolerant Mobile Wireless Networks [C] // International Conference on Communications. Beijing, China; IEEE, 2008; 2752-2756
- [41] Zhu Haojin, Lin Xiaodong, Lu Rongxing. BBA: An Efficient Batch Bundle Authentication Scheme for Delay Tolerant Networks [C] // Global Telecommunications Conference. New Orleans, USA; IEEE, 2008; 1-5
- [42] Asokan N, Kostianen K, Ginzboorg P. Applicability of Identity-based Cryptography for Disruption-Tolerant Networking[C]// Proceedings of the 1st International MobiSys Workshop on Mobile Opportunistic Networking. San Juan, Puerto Rico; ACM, 2007; 52-56
- [43] Zhang Zhensheng. Routing in intermittently connected mobile AD Hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006, 8(1): 24-37
- [44] Islam A, Waldvogel M. Reality-Check for DTN Routing Algorithms[C] // The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Washington, USA; IEEE, 2008; 204-209

(上接第 11 页)

- [21] Kearns M, Camerer C. Behavior, Computation and Networks in Human Subject Experimentation (WBCN) [C]// Workshop of the GENI Engineering Conference. Del Mar, CA, July 31, August 1, 2008; 31-35
- [22] Li Yung-ming, Kao Chien-pang. TREPPS: A Trust-based Recommender System for Peer Production Services[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 3263-3277
- [23] Tapscott D, Williams A D. Wikinomics: How Mass Collaboration Changes Everything. Expanded edition [M]. Portfolio Hardcover, 2008; 10-13
- [24] Flanagan M, Howe D, Nissenbaum H. Values in Design: Theory and Practice[M]// van den Hoven J, Weckert J, eds. Information Technology and Moral Philosophy. Cambridge: Cambridge University Press, 2008; 1-31
- [25] Nissenbaum H. Where Computer Security Meets National Security[J]. Ethics and Information Technology, 2005, 7(2): 61-73
- [26] Introna L, Nissenbaum H. Shaping the Web: Why the Politics of Search Engines Matters[J]. The Information Society, 2000, 16(3): 1-17