软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2011,22(3):381−407 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03934]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

网络化软件的复杂网络特性实证*

马于涛[1,2,3,4+], 何克清[1,2,4], 李 兵[1,2,4], 刘 婧[1,2,4]

[1](武汉大学 软件工程国家重点实验室,湖北 武汉 430072)
[2](武汉大学 计算机学院,湖北 武汉 430072)
[3](中国电子设备系统工程公司研究所,北京 100141)
[4](武汉大学 复杂网络研究中心,湖北 武汉 430072)

Empirical Study on the Characteristics of Complex Networks in Networked Software

MA Yu-Tao[1,2,3,4+], HE Ke-Qing[1,2,4], LI Bing[1,2,4], LIU Jing[1,2,4]

[1](State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)
[2](School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)
[3](Institute of China Electronic System Engineering Corporation, Beijing 100141, China)
[4](Complex Networks Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China)
+ Corresponding author: E-mail: ytma@mail.whu.edu.cn, http://www.sklse.org

Ma YT, He KQ, Li B, Liu J. Empirical study on the characteristics of complex networks in networked software. *Journal of Software,* 2011,22(3):381−407. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3934.htm

Abstract: The popularity of the Internet and the boom of the World Wide Web foster innovative changes in software technology that give birth to a new form of software—networked software, which delivers diversified and personalized on-demand services to the public. With the ever-increasing expansion of applications and users, the scale and complexity of networked software are growing beyond the information processing capability of human beings, which brings software engineers a series of challenges to face. In order to come to a scientific understanding of this kind of ultra-large-scale artificial complex systems, a survey research on the infrastructure, application services, and social interactions of networked software is conducted from a three-dimensional perspective of cyberization, servicesation, and socialization. Interestingly enough, most of them have been found to share the same global characteristics of complex networks such as “Small World” and “Scale Free”. Next, the impact of the empirical study on software engineering research and practice and its implications for further investigations are systematically set forth. The convergence of software engineering and other disciplines will put forth new ideas and thoughts that will breed a new way of thinking and input new methodologies for the study of networked software. This convergence is also expected to achieve the innovations of theories, methods, and key technologies of software engineering to promote the rapid development of software service industry in China.

* 基金资助: 国家自然科学基金(60970017, 60873083, 60803025); 国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB310800); 高等学校博士学科点专项科研基金(20070486065, 20090141120022); 湖北省自然科学基金(2008CDB351, 2008ABA379); 中央高校基本科研业务费专项资金(6082005)

收稿时间: 2009-12-28; 修改时间: 2010-06-10; 定稿时间: 2010-07-28; jos 在线出版时间: 2010-11-01

CNKI 网络优先出版: 2010-11-03 16:21, http://apj.cnki.net/kcms/detail/11-1958_O4.20101103.1621.005.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Key words: networked software; complex network; complexity; empirical study

摘 要: 互联网的普及和万维网的兴起,引发了软件技术的变革,催生了新的软件形态——网络化软件,为大众用户提供多样化、个性化的按需服务.随着应用领域的不断扩展和用户群的日益庞大,其规模与复杂度正以超越人类处理能力的速度增长,使得软件工程不得不面临一系列的挑战.为了科学地认识和理解这类规模庞大的人工复杂系统,从网络化-服务化-社会化的三维视角出发,对其基础设施、应用服务和大众交互三方面的复杂网络特性实证研究进行了综述分析,并系统论述了网络化软件中隐含的“小世界”和“无尺度”复杂网络特性对软件工程今后研究的影响和启示.软件工程与其他学科的交叉汇聚,将迸发新的观点和思想,为网络化软件的研究提供新的思维方式和方法论,有望实现软件工程理论、方法和关键技术的创新,从而推动我国软件服务业的快速发展.

关键词: 网络化软件;复杂网络;复杂性;实证研究

中图法分类号: TP31 **文献标识码**: A

计算机和互联网(Internet)作为 20 世纪最激动人心的科技发明之一,自诞生以来,已经渗透到我们工作和日常生活的各个方面,正在改变并且还将继续改变我们的生产和生活方式,而承载与实现这些转变的核心正是计算机软件的创新.目前,Internet 的普及和万维网(WWW)的快速发展正在引发软件技术的变革,软件的发展呈现出明显的网络化趋势.随着网络技术、服务技术的深入发展,可以预见,网络化应用将成为未来软件技术发展的主导模式[1],而网络化软件(也称为网络式软件)亦将成为未来软件系统的主要形态之一[2,3].简单地说,网络化软件(networked software)是一类以 Internet 为媒介,以网上信息/服务资源为元素,以元素间的协同与互操作(interoperation)为构造手段、拓扑结构和行为可动态演变的软件密集型(software-intensive)混合(cyber-physical-social)系统[3,4].例如, Amazon 作为全球最大的电子零售商,以其基础设施(infrastructure)和 Web services 构建起来的 Amazon.com 就堪称网络化软件系统的应用典范.平台通过不同服务(如 infrastructure as a service, software as a service 等)间的交互与协同,为大众提供多元化、个性化服务以及便捷的用户体验(user experience).因此,以提高用户体验质量为目标,以提供社会交互(性)网络服务为目的,网络化软件将有望成为 Internet 应用的主流,进而推动软件行业乃至信息产业的跨越式发展.

应用领域在深度和广度上不断拓展,加之人们对软件服务的要求和期望越来越高,导致软件系统的规模与复杂度正以超越人类处理能力的速度增长.2005 年 6 月,美国总统信息技术咨询委员会(PITAC)在提交的报告[5]中明确指出,当前的软件科学和技术不足以适应未来软件发展的需求,在软件的设计和演化、调节和控制、监管和评估等多个环节面临着一系列挑战性问题.2006 年 6 月,Carnegie·Mellon 大学软件工程研究所经过近 1 年的调研,发布了名为 Ultra-Large-Scale Systems: The Software Challenge of the Future 的研究报告[6].面对以 Internet 为基础,规模巨大、组成元素交互复杂,持续演化、配置和部署的复杂软件系统,报告认为“目前的开发实践将无法应对 ULS(ultra-large-scale)系统增长的规模和复杂度”,因而“需要转变观点,需要新的思想来应对我们遇到的问题.许多情况下,新的观点、思想和解决方法往往可以由传统软件工程和其他学科的交叉汇聚得到”.

问题的复杂性与软件的易用性之间的矛盾,即处理复杂事物的能力和服务的简洁性与有效性之间的矛盾,与软件技术的发展如影相随.在为大众提供简洁、高效的公共服务能力的同时,网络化软件系统也将变得越来越复杂,可以想象,最终会成为一类典型的 ULS 系统.复杂系统和复杂性科学被国内外许多科学家认为是 21 世纪科学发展的前沿[7],引入复杂系统研究的新视角和新观点,有助于突破软件传统的思维方式[8],为网络化软件甚至 ULS 系统的系统化研究奠定基础.改造世界必须先认识世界,而认识世界必须先描述世界.近年来,复杂网络(complex network)作为复杂系统研究的热点正受到各领域研究人员的密切关注[9,10].从整体的角度来考虑复杂系统,复杂网络可用来描述从技术到生物直至社会等各类开放复杂系统的骨架,而且是研究它们拓扑结构和动力学性质的有力工具.复杂网络的兴起为系统科学研究开拓了视野,也为软件工程的研究提供了全新的视角.

目前,复杂网络与软件工程的交叉研究初露端倪[8,11],相关研究成果[12,13]已发表在软件工程领域的权威期刊上,具有广阔的发展前景.一般科学发展的历史表明:知识和理论来源于实践;要实现认识的飞跃,就必须发现

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

隐藏在观测结果深处的普遍自然法则.因此,面对网络化软件系统纷繁复杂的海量真实数据,实证研究的目的和意义就在于揭示目标系统的重要特性及其行为特征,以便准确地描述和认识该类系统,从而更好地为实践和应用(如系统优化)服务.

本文第 1 节简述网络化软件的主要特点及其给现有软件工程研究带来的问题和挑战.第 2 节从刻画网络化软件复杂性的角度介绍复杂网络特性的含义.第 3 节从网络化软件系统不同视角分析和验证复杂网络特性的研究工作,探索其中的普遍性规律.第 4 节系统阐述实证研究发现对软件工程今后研究的意义和启示.最后总结全文,并展望今后的研究工作.

1 网络化软件及其带来的挑战

网络化软件作为一类部署在 Internet 环境中的复杂软件系统的抽象,其基本组成元素是各种异构的网络信息资源/Web 服务、拓扑结构和行为可动态演变;作为面向服务的计算的典型应用形态之一,网络化软件通过组成元素间的交互与协同(基于互操作)为用户提供随需而变的在线服务[3],因而具备根据用户的需求变更以及网络资源的动态变化进行快速的适应性演化和调整的能力;除了传统的“信息”和“计算”服务,网络化软件突出“以用户为中心”的理念[14],引入真实社会中“人”的主体性和创造性,为用户提供社交网络服务,以便获得更好的用户体验质量.当浏览器开始作为软件功能展现的载体,当软件的升级与维护能够无监管地进行,当异域用户可以便捷地使用网上信息资源并通过软件在线协同工作时,软件的网络化和服务化已经开始悄无声息地影响人们使用软件的方式.可以预见,随之改变的将是软件的开发方法、应用方式、产品形态甚至营销和盈利模式[15].

1.1 网络化软件的主要特点

目前,我们正在迈向面向服务的软件工程时代[16],软件的开发越来越强调以(大众)用户为中心和按需服务(on-demand service).一方面,多元化、个性化的用户需求将为服务构造、软件生产提供明确指导;另一方面,Internet 环境中的动态资源聚合通过实时的虚拟化服务来推动软件柔性生产的实现,而其中的关键是满足用户需求的规模化定制(mass customization)[17].新的开发范式通过需求建模、服务发现和组合、系统部署来快速构建应用系统,以便对业务的改变作出迅速反应,按需、敏捷地应对变化;随后,网络化软件系统进入演化管理(不同于传统的系统维护)阶段,形成永远的β版,动态演化随需而变(见表 1).

Table 1 Comparison between networked software and traditional PC software

表 1 网络化软件与传统 PC 软件主要特点的对比

Item	Type	
	Networked software	PC software
Usage	Devices access to the Internet	PC or portable computer
Interaction	Human-Network interaction	Human-Computer interaction
Development paradigm	Meet-in-the-Middle between requirements and services	Structured or object-oriented programming
Production	Mass customization	Customization
Construction	Agreement-Based loose coupling	Message-Based tight coupling
Delivery	Pay per use	License
Maintenance	Continuous evolution	Periodic or irregular update

传统 PC 软件通常是针对特定用户的需要进行定制化开发,对于企业而言,开发的成本较高、开发周期也相对较长.网络化软件规模化定制以领域工程为依托,基于需求工程和服务/资源聚合技术,降低整体用户解决方案的内部差异性,增加单个用户可体验的外部多样性,通过开放的服务生产和业务过程重组(预案推荐+个性化服务)将软件的定制生产转化或部分转化为(SOA 框架下)标准化的服务即时组合[3],向用户提供低成本、高质量的定制服务.随着规模化定制在电信等新兴服务行业的成功,可以预见,面向具体应用领域进行面向服务的规模化定制将为网络化软件的工业化生产提供一条可行的技术途径.

从计算技术数十年来的发展趋势可以发现,计算资源存储和访问方式的变革决定了人机交互模式的变迁[18].传统 PC 软件的交互模式侧重“人如何与机器打交道”;网络化软件以传统人机交互方式为手段,从桌面延展到网络,通过不确定、多粒度、可共享的网络资源之间的交互与协同来满足用户的需求[3],即强调用户与网络

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

资源之间松散耦合的互操作以及 Internet 环境下人与人之间的(社会化)沟通与协商,网络化、个性化、友好性、易用性、互动性是其核心元素.由此可见,网络化软件系统的开发就是在其开发范式的指导下,通过人网交互进行面向服务的规模化定制的一种新方法.

用户在支付了 PC 软件开发费用后,获得永久性的软件许可证,强调的是“为我所有”的独占性.但面对快速变化的业务需求和日益增长的系统复杂性,用户不得不承担软件运行和维护职责以及高昂的维护、升级费用.网络化软件通过“软件即服务(software as a service,简称 SaaS)”的方式提供随需而变的在线应用服务,用户无须再对软件进行维护和管理,强调的是软件的所有权和使用权的分离.大众用户不仅仅是消费者,同时也是生产者和开发者.从“为我所有”到“为我所用”,用户关注的焦点也从软件本身转移到软件所提供的服务上,有助于提高用户的体验质量,实现软件的增值服务.

1.2 带来的问题和挑战

运行在 Internet 上的网络化软件系统,不仅组成元素间的依赖和交互复杂、代码行规模巨大,而且用户、硬件设备、数据访问与存取的规模也远远超过传统 PC 软件.规模在各个维度上的激增,形成了网络化软件独有的特征.首先,用户数量的日益庞大导致相互冲突、不可预知和多样化的用户需求,迫切需要新的需求获取、分析、建模和验证方法;其次,海量异构信息资源(Web services、软构件、软件系统等)的存在使得元素间的互操作(特别是语义互操作)和协同变得困难,如何按需聚合资源从而提供用户所需的服务是亟待解决的设计难题;再次,组成元素间纷繁复杂的依赖和交互,不仅增加了理解和改造系统的难度,而且其中一个小的故障就有可能引发整个系统的崩溃,研究新的测试、监控和可信保障方法迫在眉睫;最后,动态变化的 Internet 环境和用户需求使得系统演化和配置更加频繁,以适应自身功能和结构的变化,其中涉及的控制和评估问题值得深入研究.

规模激增所导致的复杂性问题犹如达摩克利斯之剑,高悬在软件工程领域研究者头顶.网络化软件的复杂性来源于多个维度:理解问题域中用户目标和意图的复杂性;Internet 环境中自身多状态、多元素带来的构造复杂性;对现实事物的认知与其被计算机实现方式的不同所造成的翻译过程的复杂性;运行过程中组成元素之间交互的复杂性,以及项目组织管理的复杂性等.需求的复杂性、设计的复杂性、交互的复杂性、监控和评估的复杂性、维护和升级的复杂性,给软件工程研究带来诸多问题,时刻困扰着苦苦追寻“银弹”[19]的软件从业人员.

表 2(部分观点来源于文献[6])显示了与复杂性相关的网络化软件的 5 大主要特征,它们对现有软件工程和软件开发方法所基于的基本假设提出了挑战.在过去的 40 年时间里,工程化方法一直是软件生产的指导性方法,自顶向下、计划驱动、定义良好的软件生命周期模型等等,在处理由超大规模而产生的网络化软件的新特征时遭遇挑战,因为我们面对的网络化软件不仅仅是软件,而是一个由人、网络、软件、硬件等构成的混合系统[3],需要新的视角和思维方式来认识和了解它.

Table 2 Challenges of networked software for software engineering

表 2 网络化软件给软件工程带来的挑战

Main features	Today’s assumptions undermined	Challenges
Inherently conflicting, uncertain, and diverse requirements	• Requirements can be known in advance and change slowly • Tradeoff decisions or solutions will be stable	Requirements analysis, modeling, and verification
Heterogeneous, inconsistent, and changing elements	• Components and users are fairly homogeneous • Effect of a change can be predicted sufficiently well • Configuration is accurate and can be tightly controlled	• System design • Multi-Granularity interoperation • High dependability assurance
Continuous evolution and deployment	System improvements or updates are introduced offline at discrete intervals	System evaluation and control
Human-Network interaction based on mass participation	• End users are just the user of a system • Users’ social properties are rarely concerned • Collective intelligence may be trivial	• Requirements elicitation • System design and maintenance
Emergence	The state and behaviors of a system can be predictable	System monitoring

2 复杂性与复杂网络

人工生命(artificial life)之父兰顿(Langton)认为,生命的本质不在具体的物质,而在物质的组织形式[20].如前

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

所述,虽然网络化软件系统的构成复杂,但描述和刻画其组织形式并发现其中蕴含的基本规律,是认识新时期软件复杂性的基础.只有科学了解这类复杂人工系统的结构特性和行为特征,才能有效控制网络化软件系统的复杂性,进而更好地改进和构造更复杂、更可信的 ULS 系统.去繁化简,用网络的观点来审视系统的组织结构,都可以表示为具有复杂拓扑结构和动力学行为、由大量的节点(组成元素)通过相互之间的作用关系连接而成的网络图,为我们从整体和全局的角度研究系统的结构和行为提供了一种有力的工具.

用图/网络模型来描述系统的历史由来已久,可以追溯到 1736 年欧拉的七桥问题,甚至更早.Erdös 和 Rényi 在 20 世纪 60 年代建立了著名的随机图理论[21,22],对图论理论研究的影响长达近 40 年之久.直到 20 世纪末,网络研究才迎来新的突破性进展.1998 年,Watts 和 Strogatz 在《Nature》上提出了“小世界(small world)”网络模型[23],阐述了系统涌现出较小平均最短路径的原因;一年以后,Barabási 和 Albert 在《Science》上提出了“无尺度(scale free)”网络模型[24],揭示了复杂网络的“无尺度”特性及其形成机理.这两篇开创性论文的发表,被看作是复杂网络研究热潮兴起的重要标志.从以 Internet 和 WWW 为代表的信息技术网络,到以生命体的新陈代谢系统、蛋白质的相互作用网为代表的自然生命网络,具有“小世界”和“无尺度”特性的复杂网络实例无处不在.

2.1 “小世界”特性

图论中,(非加权)网络中任意两个节点间的距离为连接两者的最短路径的边的数目,而网络的平均最短路径长度 d 则是所有节点对之间距离的平均值,用于描述网络中节点间的分离程度,即网络有多“小”.复杂网络研究中一个重要的发现是,绝大多数大规模真实系统抽象为网络后,其平均最短路径长度比想象的要小得多,这种现象被称之为“小世界”效应.“小世界”的说法起源于著名的 Milgram“小世界”实验[25],该实验通过信件在熟人间的传递发现,社会关系网(social network)的平均最短路径长度仅为 6,促进了“六度分离”理论[26]的发展.

聚集系数又称为簇系数或集聚系数,来源于社会科学,用来描述网络中节点的聚集情况,即网络有多“紧密”[27].比如在社会关系网中,你朋友的朋友可能也是你的朋友.假设节点 v_i 通过 k 条边与其他 k 个节点相连接,E 为这 k 个节点间实际存在的边的数目,那么它与 $k(k-1)/2$ 之比就是节点 v_i 的聚集系数 C_i.网络的聚集系数 C 就是整个网络中所有节点的聚集系数的平均值.有研究表明,大部分大规模真实系统对应的网络中的节点倾向于聚集在一起,尽管聚集系数 C 远远小于 1,但都远比 N^{-1}(完全随机网络中 $C\sim N^{-1}$,其中,N 为网络的规模)大[28].较小的平均最短路径长度和较大的聚集系数(“小世界”特性)成为很多真实系统区别于随机网络的显著特征.

2.2 “无尺度”特性

图论中,节点 v_i 的度 k_i 被定义为与该节点连接的相邻节点的数目(相应地,在有向图中,节点的度为出度 k_{out} 与入度 k_{in} 之和),所有节点的度的平均值称为网络的平均度,记为$\langle k\rangle$.度分布刻画了网络中每个节点的连通性(connectivity),通常用分布函数 $P(k)$来表示.其含义是,一个任意选择的节点恰好有 k 条边的概率,也等于网络中度为 k 的节点的个数占网络节点总数的比值.度分布函数反映了系统结构的统计特征,理论上,利用度分布可以计算出其他全局特征参数(如平均最短路径长度)的量化数值.目前,复杂网络研究的另一个重大发现是,绝大多数大规模真实系统对应的网络的度分布(或累积度分布)都大致服从幂律分布(“无尺度”特性)[29],即 $P(k)\sim k^{-r}$ $(2<r<3)$,而不是泊松分布或正态分布.

3 网络化软件系统的复杂网络特性实证分析

Internet 和 WWW 的飞速发展,极大地改变了传统 PC 软件的形态,并逐步与之融合为一体,网络化软件的“网络化”特性突出了网络基础设施在系统中的基础位置.以按需服务为中心,网络化软件的“服务化”特性展现了软件在系统诸多元素中的核心地位,可以通过多种载体(模块、类、软构件、Web 服务等)来加以实现.大众用户作为系统中的能动性主体,既是个性化需求的提出者,又是系统提供服务的体验者,网络化软件的“社会化”特性体现了用户在系统构建和使用过程中的创新价值.社会性(“人”)和技术性(“软件”和“网络”)的汇聚(convergence)[30],使得网络化软件的各个组成部分构成了一个完整的生态系统(ecosystem):网络是其基础设施,软件服务是其核心元素,大众用户是其创新主体.为了科学、全面地分析网络化软件系统的复杂性,接下来将从

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

网络化、服务化和社会化视角(如图 1 所示)对应地从基础设施(Internet,WWW 和 semantic Web)、应用服务(应用软件系统和 Web 服务)和社会化交互(社会关系网、人类行为动力学[31,32])3 个层面介绍网络化软件系统中复杂网络特性的实证研究工作,以便帮助我们更清晰地认识和了解网络化软件复杂性的本质.

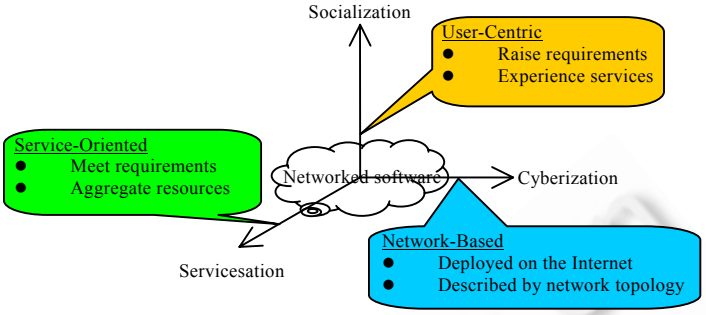


Fig.1 3-Dimensional perspective of networked software

图 1 网络化软件的三维视图

3.1 基础设施

3.1.1 Internet

随着 Internet 的快速发展和广泛应用,对其自身拓扑特性的科学认识日益成为研究热点之一.Internet 拓扑建模是一项复杂的工作,其核心任务是探索看似混乱的 Internet 中蕴含的不为人知的普遍规律[33],以便全面、科学地认识 Internet,从而达到在更高层次上开发利用的目的.1999 年,Faloutsos 等人[34]对 National Laboratory for Applied Network Research 收集的 1997 年 11 月~1998 年 12 月之间的 3 份 Internet 快照(snapshot)和 Pansiot 等人收集的一份 1995 年的 Internet 测量数据进行分析,在自治域级(域抽象为节点,域之间的连接抽象为边)和路由器级(路由器抽象为节点,光纤和其他通信链路抽象为边)发现,Internet 拓扑结构中存在幂律而非传统的随机模型(如泊松分布),使研究取得突破性进展,引起了学术界的广泛关注.

由于实验的样本数据取自以往其他研究人员对 Internet 拓扑的探测结果(存在别名问题且受数据偏差影响),Faloutsos 等人发现的幂律分布规律(主要是针对节点的出度)曾一度受到质疑.2000 年,Govindan 等人[35]开发了 Mercator 程序来解决别名问题,并获得由 15 万个路由器接口和近 20 万个邻接路由构成的 Internet 拓扑图,分析发现节点的度分布遵循幂律分布,确认了 Faloutsos 等人的发现的真实性.在随后的几年中,研究人员不断使用新的 Internet 拓扑探测工具来获取更新、更全的数据样本,并发现 Internet 拓扑结构在自治域级和路由器级均存在幂律分布特性[36−42],进一步验证了 Faloutsos 等人的发现的正确性.与此同时,研究人员还发现 Internet 拓扑结构在自治域级和路由器级也具有明显的“小世界”特性[27,43−46],即与随机图相比,Internet 拓扑图拥有较小的平均最短路径长度和较大的聚集系数.“无尺度”和“小世界”特性的发现,将 Internet 与复杂网络联系起来,为其研究提供了一条崭新的思路.

作为复杂网络实证研究的典型代表,到目前为止,Internet 拓扑建模已经取得了丰硕的研究成果.但是,Internet 拓扑具有的其他复杂网络度量指标与网络性能(如同步、抗毁等)之间相互影响的内在机制还需要研究人员进一步通过大量的数值仿真和实证来加以研究,以便对 Internet 拓扑特性和度量指标作更深入的定性和定量分析[47].这将有利于提高依附于其上的 WWW、软件系统的使用效率以及终端用户的沟通效率,从而提升网络化软件系统的整体性能和用户体验效果.

3.1.2 WWW

目前,随着 Internet 的不断发展,WWW 逐渐成为人们获取和共享信息资源的主要平台,而链接结构分析在 WWW 的众多研究领域起着越来越重要的作用[48].如果把超文本文档作为节点,把文档之间通过 URLs(uniform resource locators)形成的超链接作为边,则可以得到一个规模巨大的 WWW 网络.1999 年底的统计显示,其节点

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

数超过 8 亿;到 2004 年底,则达到了 80 亿.

对 WWW 网络结构特征的研究从超链接数目的分布规律开始,1999 年,Kumar 等人首先分析了源于 Alexa 公司的 Web 数据,发现网页间链入数目的分布是遵从幂律的[49].随后,Albert 等人[50]对由 32.5 万个节点和 147 万条边构成的抽样数据进行了分析,其结果在统计特性上与一年后 Broder 等人[51,52]针对更为完整的数据集(2 亿个节点和 15 亿条边)分析的结果是一致的,即节点的出度分布和入度分布在双对数坐标轴中基本呈现直线关系.与此同时,Adamic 和 Huberman 还发现[53,54],网站中网页数目的分布和网站间链入数目的分布均遵循幂律分布.由于上述发现发表在《Nature》和《Science》等顶级期刊及国际万维网大会上,因而引起了物理、数学、计算机等多个领域研究人员的普遍关注.随后,计算机领域掀起了从理论建模[55]和实证分析[56−58]两方面研究 WWW 网络结构统计特性的热潮,并与网络搜索、数据挖掘等技术结合起来,有力地促进了 WWW 研究的发展.

除了发现 WWW 网络结构具有“无尺度”特性,研究人员还发现其中隐含的“小世界”特性.1999 年,Adamic 在站点级将 Xerox Palo Alto Research Center 的数据(5 千万个页面和约 26 万个站点)抽象为无向图和有向图进行分析[59],发现其聚集系数远远大于对应的随机网络,而平均最短路径长度(d)则和对应的随机网络类似.与此同时,Albert 等人[50]研究了由 HTML(hyper text markup language)文档和 URIs(uniform resource identifiers)构成的网络模型,发现其特征路径长度 d 正比于网页总数 N 的对数,即满足关系 $d=0.35+2.06\log(N)$.WWW“小世界”特性的发现为设计更好的网络搜索引擎及算法提供了新的视角[60],对深入研究 Web 数据挖掘进而发现其中蕴含的机理及普遍规律[61]意义重大.

由于规模庞大、发展迅猛,WWW 逐渐成为各领域研究复杂网络的良好载体,其链接结构分析也日益受到重视[62].在微观层面,应充分利用 WWW 的复杂网络特性及相应的量化指标[63]来优化和改进现有的搜索、评价(如 PageRank)、爬取及社区发现算法和工具;在宏观层面,要综合集成各种应用工具和系统,开展诸如舆情监控、非常规突发事件应急等交叉学科研究,获取 WWW 中隐含的巨大信息潜能.

3.1.3 Semantic Web

1998 年,WWW 创始人 Tim Berners-Lee 提出了 Semantic Web(语义 Web)的概念,其目标是让 WWW 上的信息具有语义,能够被计算机理解和自动处理,从而克服现有 WWW 系统存在的诸多问题.2001 年 5 月,《Scientific American》以特写文章(feature article)形式发表了 Berners-Lee 等人的论文[64],该文对语义 Web 涉及的主要技术进行了简明介绍,并描绘出其美好的应用前景.如今,语义 Web 已被看作是新一代的信息基础设施,其关键技术和实践应用的研究正如火如荼.本体是一种用于描述语义的、概念化的明确的规范说明[65].它起源于哲学,随着语义 Web 研究的兴起,受到了计算机科学领域的广泛关注.本体通过定义属性和关系,将不同的概念及其实例区别和组织起来,形成概念及其关系的公共语义空间,从而消除由于知识背景不同而产生的歧义和误解,促进人-机、机-机的交互与协同.

RDF(resource description framework)和 OWL(Web ontology language)是目前 W3C(the world wide web consortium)推荐的两种本体描述语言.如果将 RDF 三元组中的 subject 和 object 抽象为节点、predicate 抽象为有向边,或将 OWL 中的实体(类和实例)抽象为节点、关系抽象为有向边,那么使用 RDF 或 OWL 描述的本体可表示为一种网络/图模型.近年来,研究人员通过网络爬虫下载了大量的 RDF 和 OWL 定义的本体文件,分析后发现,这类网络/图模型也展现出“无尺度”和“小世界”的复杂网络特性[66−71];不仅如此,这些本体文件的规模、使用频率、所含术语(term,类和属性)的使用频率也大致遵循幂律分布[72−74].在构造本体时,有些术语常常需要依据其他本体中的术语来明确定义,造成不同的术语之间存在依赖关系.Steyvers 等人[75]对 Roget’s thesaurus 和 WordNet 对应的网络进行分析,发现了“小世界”和“无尺度”的结构特征,并认为这种结构反映了人类知识构造的某些普遍机制;Cheng 和 Qu[74]使用 Falcons 搜索引擎收集了约 127 万个术语,对由此构造的术语依赖图进行分析,也发现了其中隐含的复杂网络结构特征.

随着语义 Web 应用的推广,人网交互越来越频繁,研究人员开始从社会性角度分析其结构特征[76].FOAF (friend of a friend)是一种使用 OWL 表示的词汇表,用来描述人的基本信息及社会关系,有望成为一种管理 Internet 中社区的重要工具.对大量 FOAF 文档的研究表明[77−80],由人及其社会关系构建的网络(文档中 *foaf*:

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Person 抽象为节点,*foaf*:*Knows* 抽象为边)同样具有“小世界”和“无尺度”的复杂网络特性,从而验证了“六度分离”理论[26]的正确性.此外,研究人员还对 Blog,Wiki,SNS(social networking services)中基于 tag(标签)进行分类的 folksonomy(大众分类法)[81]进行研究,将 tag 抽象为节点、用边连接同一内容对应的不同 tag,由此构造的网络模型也具有明显的复杂网络特征[82−85],对于研究基于用户活动模式的垃圾邮件(spam)检测以及社区(或用户群)确认很有帮助[86].

本体在语义 Web 中的地位举足轻重,它反映了一种组织或团体意义上的决策行为,以达到共识的目的.以概念/术语为基本组成元素的本体,其结构呈现出复杂网络特征,表明知识的构建也遵循某些自然界和工程领域的普遍规律(如“马太效应”).进一步的研究应从复杂网络角度重点关注本体演化、异构本体集成等关键问题,构造合理、高效的领域本体和面向应用的问题本体(或大众分类法),促进语义 Web 上的信息共享和互操作.

3.2 应用服务

3.2.1 面向对象软件

软件作为一种人工的智能化系统,拓扑结构会影响其功能、性能和可靠性等其他指标.要对软件系统的复杂性进行深入、细致的研究,就必须对软件的结构信息进行合理的描述和有效的量化.然而,结构信息的度量一直以来都是计算机科学面临的挑战性问题之一[87].由于缺乏有效的数学方法,研究人员很少从整体或全局的角度来审视软件的结构及其演化规律,导致对软件的本质缺乏清晰的认识[8,11,88].

如果将系统中的组成元素(如类)视为节点,元素间的相互关系表示为节点间的有向边,软件结构实质上表现为一种内容互连的复杂网络拓扑的形态.用网络的观点来审视软件、用统计的方法来分析软件,将有助于科学、全面地认识和理解软件的本质特征,为量化软件的复杂性奠定基础.目前,使用复杂网络方法对面向对象软件系统进行研究主要是针对开源系统,采用逆向工程方法得到其组织结构进行分析.即从程序代码出发的“反向”研究途径,构建包/类/方法之间的依赖关系网络,然后发现其中的复杂网络特性,从而反映软件系统的一些整体性质,这些特性通常是单个元素的性质累加无法得到的.

2002 年,Valverde 等人首先将复杂网络方法引入到软件系统拓扑结构分析中[89],使用无向网络来表示软件系统的结构,即网络模型中的节点代表类,而边是类之间的各种关系(如继承、依赖等).他们分析了 JDK(Java development kit)1.2 和 Ubi Soft ProRally 2002 的统计特性,发现这两个软件系统的结构都展现出非常明显的“小世界”和“无尺度”特征.由于无向网络忽略了类之间关系的方向性,因此实验结果的真实性受到了质疑.2003 年,Myers,Valverde 和 Moura 等人进一步使用有向网络来表示软件系统的结构,并对大量开源软件进行了分析,也发现了同样的现象[90−92](而且在面向对象软件系统中,节点出度分布函数的幂指数往往大于入度分布函数的幂指数),引起了计算机领域研究人员的关注.

随后,根据软件实体粒度的不同,研究人员在不同层次(包、类和方法)对大量开源软件进行了分析,进一步验证了上述结论.比如:LaBelle,Maillart 等人在包级(将包看作网络中的节点)对一些软件系统进行分析[93,94],发现其中蕴含的“小世界”和“无尺度”(近似幂律分布)特性;而更多的研究者是在类级对软件(依赖)网络(包括软件系统的静态结构和运行时得到软件对象网络)进行分析,也同样发现了相似的结果[12,13,95−101];Wood,Liu 和 Bilar 等人则把类的方法(methods of a class)抽象为节点、方法之间的调用关系抽象为边,通过对实际系统的分析发现,此类网络同样也具有“小世界”和“无尺度”特性[102−105].因此,越来越多的软件工程研究者认为软件系统其实代表了一类人工复杂网络[90,106−109],对其结构和行为的研究应当借鉴复杂系统、图论等研究的相关原理和方法[110,111],而这正是传统软件工程所欠缺的.

国内的研究人员从 2005 年开始陆续进行了一些实证研究,但可以参考的中文文献不多.如闫栋、韩明畅、李慧倩、钱冠群等人先后对 Java 编写的若干开源软件系统在类级进行分析,也都发现了软件结构中的“小世界”和“无尺度”特征,并根据偏好性连接/偏好依附(preferential attachment)原理[24]对这类系统“无尺度”特性的形成及演化规律进行了解释和建模[112−116].

国内外的相关工作已经通过建立软件系统的网络模型,揭示了软件网络的一些普遍的拓扑特性[8].但是,现有的软件网络模型也存在着一些问题.例如,已有的软件网络模型很少考虑面向对象软件中类之间关系的差别,

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

因而有学者认为应当考虑用加权有向网络来描述面向对象软件系统的拓扑结构;另外,网络中节点的属性往往被忽视,而单个包/类/方法自身的属性、动力学行为对整个系统结构的影响是不容忽视的.虽然目前的研究还存在诸多问题,但我们相信,上述问题将随着软件网络研究的深入而逐渐得到有效的解决.

3.2.2 Web 服务

Web 服务是一种基于 Web 环境的自描述、模块化的应用程序,通过 Internet 进行发布和访问,(借助规范化的接口)能够提供一组相对独立的功能.从软件技术发展的趋势看,Web 服务技术可以看作是软构件技术的延伸和发展,如两者都需要解决功能封装、消息传送和动态绑定等关键问题.凭借自身的技术优势,Web 服务已成为目前 Internet 上一种非常重要的信息资源.

2005 年,Engelen 从 XMethods(http://www.xmethods.com)下载了该网站当时列出的所有 WSDL(Web services description language)文件,使用 wsdl2h 工具将每个 WSDL 文件转换成 C++头文件格式,以此来对 Web 服务应用的规模进行统计分析.实验结果表明(http://www.cs.fsu.edu/~engelen/powerlaw.html),根据源代码行的数量 Web 服务的出现频率(作者称为 rank)大致呈现出幂律分布.因此作者认为,Web 服务的规模遵循幂律分布体现了程序的复杂性.2007 年,Cai 提出了一种支持用户社区生长成为“无尺度”网络的机制,而其中的实现关键是根据作者提出的 Web 服务资源框架将 WSDL 扩展成为“无尺度”Web 服务[117]来丰富社区中用户的交互.但是,作者并没有给出相应的实证分析.

2008 年,Oh 等人[118]对 WSDL 文件进行了深入分析,提出了参数节点网(有向边连接输入参数和输出参数)、操作节点网(有向边连接两个完全或部分匹配的操作)和 Web 服务节点网(如果两个 Web 服务的操作间存在一条或多条同向边,那么它们之间存在一条有向边)的概念.作者从网站(http://rakaposhi.eas.asu.edu/PublicWebServices.zip)下载了 1 544 个 WSDL 文件,但其中只有 670 个符合 WSDL DTD(document data type)规范,它们构成了实验的数据样本.实验结果表明,这 3 类网络都展现出“小世界”和“无尺度”(出度)的复杂网络特性.根据分析结果,作者进一步提出了 Web 服务发现和组合的基准方法来指导实际应用.随后,在文献[119]中,Oh 等人提出了一种统一的 Web 服务网络模型 $M=(T,S,\theta,I)$,其中,T 是节点的类型,S 和 θ 是参数匹配的相似性度量指标及其阈值,I 是操作调用的类型.针对 25 种不同类型的网络,作者对由 984 个有效 WSDL 文件构成的数据集进行了分析,均发现了其中隐含的“小世界”和“无尺度”(出度)特性;同时还发现,Web 服务和操作的规模、参数名称的出现频率也符合幂律分布.作者由此认为,上述发现将有助于改进现有的 Web 服务发现和组合方法.

由于 Internet 上可用的公共 Web 服务有限,造成数据的收集和分析存在一定困难.与前面介绍的工作相比,该方面的实证研究并未引起研究人员的重视,所以可查阅的文献较少.但其研究对 Web 服务的发现、选择(如基于 Web 服务 rank 的推荐)和组合(如挖掘操作节点网中频繁出现的 motif 模式)意义重大,因此更大数据集(如针对 RESTful Web 服务、Mashup 等)的实证研究有待进一步深入展开.

3.2.3 语义 Web 服务

Web 服务作为当前最主要的一种服务实现技术,缺乏对服务的行为约束和属性描述的语义支持.在这种情况下,Web 服务的发现、选择和组合难以支持机器自动精确处理,阻碍了语义 Web 研究的实用化进程.为了向用户提供可理解的服务资源的描述形式,提高服务选取与推荐的准确性,需要一种更加精确的刻画手段,从语义层面对 Web 服务的能力和属性进行描述.语义 Web 服务是语义 Web 和 Web 服务技术融合的产物,主要是通过基于本体的语义标注技术增加对 Web 服务的描述.二者的结合能够使 Web 服务的描述具备语义信息,便于计算机对服务的相关信息进行精确解释,从而能够实现服务的自动发现、选择、组合和执行.OWL-S(OWL for services)是连接两大技术的桥梁之一,它是一种 Web 服务的本体描述语言,在 OWL 的基础上进行了适当的扩展,可以用来描述 Web 服务的相关语义信息.

虽然研究人员在发现语义 Web 的复杂网络特性方面做了大量的实证研究工作,但关于语义 Web 服务复杂网络特性的实证研究还少有报道.我们相信,随着语义 Web 技术的逐渐成熟,会有越来越多的基于 OWL-S 或其他规范的语义 Web 服务被构造和发布,其复杂网络特性的实证研究将具有广阔的发展空间.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

3.3 社会化交互

3.3.1 社会网络

Facebook,Twitter和YouTube等社交服务(也称为社会网络服务)网站的蓬勃发展,吸引了大批的年轻人参与其中,足不出户就可以与同龄人沟通交流、共享信息甚至交友征婚,构建自己的社交圈子和人脉.根据美国Consumer Internet Barometer 的 Social Media Explosion 调查报告(http://www.consumerinternetbarometer.us/press.cfm),在 2009 年的第 2 季度,有 42.7%的美国 Internet 用户访问社会网络服务网站,其中,年龄在 35 岁以下的用户占 71.5%,而且女性用户的数量远远高于男性.网络化软件系统的社会化,即在功能上能够反映和促进真实的社会关系发展和交往活动的形成,使得人的活动与软件的功能有机地融为一体.可以预见,这种由网络化软件所构建的“弱链接”社会网络,正在人们的生活中发挥越来越重要的作用,并将对未来社会的发展产生深刻的影响.

互动百科将(传统意义上的)社会网络(也称为社会性网络或社会化网络)定义为社会个体成员之间因为互动而形成的相对稳定的关系体系(http://www.hudong.com/wiki/社会网络),通常表示为网络形式.社会网络关注的是人之间的互动和联系,因为社会互动往往会影响人们的社会行为.社会网络的理论基础源于“六度分离”理论[26]和 150 法则[120](即每人可以与之保持社交关系的人数的最大值是 150).在真实的社会关系网中,如科学家合作网、演员合作网等,均已发现“小世界”和“无尺度”特征[24,27,28,121,122],对于分析群体的组织结构和行为很有帮助.

软件的网络化和服务化催生了社交服务网站的出现,促进了虚拟网络和现实社会的结合,在应用广度和深度上拓展了传统社会网络的研究.在这里,用户可以实现个人社会关系管理,可以安全地对信任的人群分享自己的信息和知识,可以利用信任关系拓展自己的社会网络,达成更加有价值的沟通和协作.在虚拟的网络世界中,通过电子邮件通信[123−125]、专题论坛讨论[126]、照片共享(如 Flickr)[127,128]、视频共享(如 YouTube)[127]、博客交流(如 Yahoo! 360)[128]、写作沟通(如 LiveJournal)[127,129]、虚拟社交活动(如 Facebook,MySpace,Orkut,Xiaonei 等)[127,130−133]、即时通信(如 MSN)[134]、开源软件协作开发(如 Sourceforge)[135−138]等方式建立起来的各种在线社会网络,虽然均被发现具有“小世界”和“无尺度”特性,但与现实的社会网络相比存在明显的不同之处,其形成机制还有待探索.相关成果对研究舆论传播、知识共享、在线教育等国计民生问题将具有重要意义.

由于社会化在未来语义 Web 中的重要地位[139],加之社会网络和技术网络在结构特性方面的显著差异[140],其研究受到了计算机领域的广泛关注.如,《IEEE Internet Computing》,《ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data》等期刊就相继出版了关于社会网络的专刊;国际万维网大会和 ACM 知识发现与数据挖掘大会等顶级会议近两年来都设有社会网络的主题讨论,涉及 Web 搜索、服务推荐、交互协作等重要研究问题;ACM 等组织从 2007 年起陆续发起了 Social Network Mining and Analysis,Online Social Networks 等一系列专题讨论会,从计算机科学、认知科学、数学等多学科角度研究社会网络,以期发现和解释群体智能(collective intelligence)的涌现机理,促进和谐、智能的人网交互.

3.3.2 用户行为动力学(dynamics)

人类行为具有高度的复杂性,研究其中的潜在规律,对于经济学、社会学、管理学的研究和应用有着重要价值,因此对人类行为的理解一直是这些学科关注的焦点.长期以来,人类(社会)行为的研究主要为心理学所关注,通过心理学实验的方法,研究人类在各种环境下的心理反应是其主要的研究手段和定性分析方法.然而,这些实验室结论并不能很好地描述人类在真实生活中表现出来的行为特性,进而无法建立定量化的人类行为理论[31],导致在解决舆论传播、城市交通等关系社会安全及国民经济发展的重大问题时缺乏坚实的理论依据.

2005 年,Barabási 在《Nature》上发表的一篇论文[31],基于发现的人类特定活动中行为的阵发和胖尾特性(也就是说,如果个体能够识别工作的重要性并以此作为安排工作顺序的标准,那么工作等待完成的时间分布就会出现胖尾特征——大部分工作很快被处理,而少数工作却需要忍受很长时间的等待),提出了一个新的观点——从记录人类活动历史的数据库中挖掘出人类行为的统计规律,为建立人类复杂行为的量化模型提供了一个可能的起点.基于统计物理的研究方法,近年来人们发现了人类行为中存在的大量特殊的现象和规律[141],引发了

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

对人类社会行为更深层次研究的热潮.

在以往的研究中,个人的行为通常被简化为稳态的,或者完全随机、可以使用泊松过程描述的模型.但是,Barabási 等人的发现[31,32]向这个基本假设提出了挑战.自 2005 年以来,通过对电子邮件通信[31]、金融市场交易[142,143]、网站浏览[144,145]、在线电影点播[146,147]、网络音乐欣赏[148]、在线游戏登陆[149]、消息通讯[150,151]、与计算机相关的专业性事物处理[152−155]、在虚拟社区中的多样化交互[156−161]等等包含了商业行为、娱乐行为、日常使用习惯、社会交互等众多人类行为的时间间隔的分析,研究人员均发现存在满足反比幂函数的胖尾现象(即幂律分布而非泊松分布),表明这些行为的发生过程不能用泊松过程来描述.Barabási 等人对此的解释是基于决策的某种排队过程[162],即这种具有优先级的行为模式是造成幂律分布的重要原因[31].

更为有趣的是,在由虚拟网络世界和真实物理空间构成的现实世界中,人类行为的空间分布中也发现存在非泊松特性的现象.如,González 等人通过统计移动电话用户在不同基站区域的漫游过程[163]来深入研究人的出行轨迹规律,发现其分布具有“无尺度”特性;Rhee 等人研究了 44 个志愿者在不同场所的移动轨迹,基于 GPS 数据的统计结论[164]也表明,人类行程分布中存在“无尺度”特性;Claveirole 等人则分析了 3 个基于 Wi-Fi 的开放泛在(场所)环境下用户的行为模式[165],也发现了类似的现象.这种人类行为的空间分布上的非泊松特性可能影响城市交通、人流控制、紧急避险等复杂系统的运作(http://www.sciencetimes.com.cn/m/user_content.aspx?id=236777),还可能对未来无线网络移动服务商场的设置和服务推荐产生重要影响,因而值得研究者关注.

针对网络化软件,揭示支配各种人类活动时间和空间选择的机制将具有重大的实用化和商业化潜力.一方面,挖掘用户行为对分析基于社会网络构建的虚拟社区中谣言传播、知识共享等重要社会问题是绝对必要的;另一方面,深层次理解用户行为的统计特性,将有助于服务提供商从技术和经济角度更好地进行资源(如网络、服务)分配、设置、定位和推荐.如目前百度发布的框计算(http://boxcomputing.baidu.com/),就将行为分析作为用户需求分析的重要组成部分.

4 对软件工程今后研究的启示

继 20 世纪 80 年代个人计算机和 90 年代 Internet 之后,信息技术孕育着新的重大突破,正处于新一轮重大技术突破的前夜[166].软件实现信息化价值带来核心竞争力,软件产业因而成为国民经济和社会发展的基础性、战略性产业.未来,借助无处不在的 WWW 和按需供给的服务,网络化软件有望成为软件/服务密集型系统、大众用户、政策(policy)、文化和经济相互依赖的网(web),社会对于这类 Internet 级的系统的系统(system of systems)的依赖会逐渐加强.可以预见,人们将以网络化软件为工具,逐步开辟一个由客观自然世界-社会认知世界-虚拟计算世界诸要素构成的三维计算环境,成为社会生产力发展和人类文明进步的强大动力.

10 年来,以“小世界”和“无尺度”模型为核心形成的复杂网络理论正在逐步改变人类对客观世界的认知和思维方式,成为分析和解决超大规模系统诸多问题的基本理念之一,为信息工程技术的变革奠定了基础.如前所述,在网络化软件的技术层面和社会性层面,研究人员经过多年的实证研究,发现了“小世界”和“无尺度”的复杂网络共性特征,丰富和加深了人类对真实系统拓扑结构、演化机制、动态行为的认识和理解.目前,新的理念和理论框架正在形成,网络思维[111,167,168]和网络科学[169−174]扑面而来,将在观念、思维方式、方法论、技术方法和实践多个层面对传统软件工程形成冲击,多学科交叉研究呼之欲出[8,88].

4.1 观念和思维方式的转变

4.1.1 生态系统观

借鉴工程化原理和方法来开发和维护高质量的软件,是软件工程学科创建的初衷.长期以来,软件工程领域的研究人员以“我们是程序员/软件工程师”的工程化观点来审视软件[175],侧重于软件的设计、构造、测试和维护等软件生命周期重要方面的研究,在科学和工程两个层面取得了令人瞩目的成就.例如,历届图灵奖得主中,大多数人的研究工作都集中在计算理论、算法设计、形式语义和程序语言设计与实现领域,属于软件系统自身的范畴.但是,过于狭窄的系统观使得人、硬件、网络等与之交互的情境(context)因素在设计时很难被考虑周全,

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

导致软件质量得不到保证,人们不能充分利用现代信息技术和 Internet 发展所带来的巨大潜力.网络化软件中,人-机-网交互存在的挑战、软件系统对硬件的依赖(虚拟化问题)、网络应用环境的多变(适应性问题)等诸多难题的解决,无不迫切期待引入更广阔的系统视角,即不仅仅是软件自身,还包括硬件、大众用户和网络环境等.这样有助于我们更好地理解新时期、新环境下的网络化软件的本质.

不同于如模块、类、软构件等组成元素构造的传统软件,网络化软件包括人、组织、管理(governance)、社会交互、硬件、网络和软件等基本元素[3],类似于一个由建筑物(软件服务)、人、基础设施(硬件和网络)等构成的城市.城市不是由个体或组织设计和构建的,而是通过许多个体或组织松散的调节和管理而不断变化发展的.Petroski 教授在《Pushing the Limits: New Adventures in Engineering》的书序中写到“要比那些现有的东西做得更好,就必须超越经验”[176].软件工程要实现从单个建筑物构造到城市建设的跨越,就需要有新的系统观和视角[177]——动态的生态系统观.将网络化软件看作是一类处于复杂多变的环境中、组成元素相互依赖又相互竞争的开放复杂系统,复杂性、分散控制、适应性、演化性、变粒度和涌现是其显著特征.

普通生态系统的动力学特征是基于食物链的营养交换和能量流[6],而网络化软件生态系统的动力学特征则是虚拟环境下基于社会交互的经济、文化和其他价值形态的交换和信息流.其中,网络环境(包括各种硬件、物理网络和 WWW)是整个生态系统的基础,其条件的好坏直接决定软件服务的丰富度和大众用户使用的便利度;同时,人和软件反作用于网络环境,促进其不断改进(如更大的网络带宽、Web 2.0 到 Web 3.0 的演进),循环往复形成一个具有丰富功能的有机整体.在网络环境中,个人、组织(如服务提供商)和软件系统既可以是信息/服务的生产者(producer),也可以是信息/服务的消费者(consumer),构成一个信息消费的金字塔结构体系.与普通生态系统最大的区别是,信息/服务无法在物理上被分解,只能被筛选、复制、重用和组合,通过虚拟化、数据挖掘、服务组合和系统集成等技术生成更合适的信息/服务,供生产者和消费者使用.正因为如此,信息的消耗过程呈现出普通生态系统中能量逐级递减现象,体现了虚拟社会交互过程对价值、知识乃至决策的不断追求.

长期以来,人们总是将软件开发和建筑开发做比较,希望能够像盖房子一样来做软件.然而,社会、经济需求和科技进步推动软件形态进入了一个新的技术水平.将网络化软件比作生态系统是一种新的尝试,尽管这种类比不一定完全正确,但是有助于网络化软件系统的开发者认清他们所面临问题的实质——对于如何创建和维护与生态系统具有相似特征的复杂系统这一问题还没有充分理解,导致传统的软件工程方法难以适用基于网络的复杂系统,面临巨大挑战,因而迫切需要新的系统观和思维方式.

4.1.2 网络思维

随着“小世界”和“无尺度”模型的相继提出,刻画真实系统的网络模型和网络动力学模型在过去 10 年间发生了深刻的变化,为人们提供了认识真实世界复杂性的全新的科学知识和视角[178],有望成为改造客观世界的有力武器.《Science》在 2009 年 7 月 24 日出版的“复杂系统和网络”专刊中,邀请了 Barabási,Vespignani 等著名学者共同回顾 10 来该领域的研究进展和应用,并对今后的研究工作进行展望.Barabási 认为[179],(复杂)网络是目前刻画复杂系统的有效工具;在从社会科学、生命科学到技术科学的众多真实系统中均已发现“无尺度”特性,推翻了实际网络是随机网络的假设;网络的拓扑结构(及其所展现出来的统计性质)和其演变过程密不可分;网络的拓扑结构对网络的动态行为具有至关重要的作用,理解发生在网络上的过程(如病毒或谣言在人群中的传播)的动力学将是今后研究的前沿.Vespignani 则认为[180],我们生活在一个科技-社会型(techno-social)系统日益相互关联的世界,预测其行为的挑战源于网络间的相互关联性(interconnectedness)和多尺度(multiscale)特性;网络思维是我们理解这类科技-社会型系统复杂性和行为的有力工具,可以通过自底向上而非传统的平均场(mean-field)或自顶向下策略来研究它们行为中隐含的非线性特征.虽然学者们在更深入的复杂系统行为的认识以及如何基于这些认识来模拟、预测、优化和控制系统的行为方面还没有达成一致的共识,但他们都确信,网络分析有助于从新的有利位置(new vantage points)来理解我们所处的世界是如何工作的.

从功能上划分,网络化软件系统包含 3 个基本层次——基础设施、软件服务和社会化交互(大众交互),是一类典型的科技-社会型复杂系统.长期以来,对 Internet,WWW 和软件等技术性系统的认知需求推动了复杂网络研究的快速发展;另一方面,网络分析方法的理论突破又为我们更好地认识、控制和优化这些真实系统奠定了

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

基础,体现出网络思维的优势[181].然而对于网络化软件系统而言,我们将面对的不仅仅是诸如 Internet 这样的单个系统或网络,而是一个系统的系统.由群体用户行为驱动的各层元素间的错综复杂的联系和交互,构成了一个庞大而又复杂的网,确切地说是一个动态变化的多尺度的网络的网络(network of networks),而且其中的节点(既可以是路由器、网页、Web 服务,也可以是用户或 agent)和边的含义不尽相同.如同马丁•路德•金的名言“我们都身处在一个无法逃避的彼此关联网络中…任何事情,如果直接地影响了一个人,就会间接地影响所有人”[182]所描述的那样,网络化软件系统中任何组成元素(节点)的失效,都有可能引发多米诺效应,导致整个系统出现全局性故障.相对于传统的软件工程方法,网络思维更适合可视化描述和定量分析这种传播过程,类似于人类流行病[183]和计算机病毒[184,185]的传播,便于我们更好地监控和评估系统的实时状态.

不仅如此,近年来研究人员还发现,Internet[40,46,186],WWW[53,56,62,187]和软件系统[90,91,112,114]的开发/发展(过程)都可以抽象为网络的演化过程,在用户需求的驱动下,通过简单的生长和偏好依附机制[24],逐步发展成为一类技术性复杂网络,并展现出一些相似的结构特性[188].不同于传统的研究方法,如软件演化[189],网络思维有助于分析这类复杂系统的结构特性、演化规律和由此产生的行为特征,科学、全面地认识和理解网络化软件设计的本质[4,88,190].更为有趣的是,与网络化软件作类比的城市,作为一种自底向上发展而成的科技-社会型复杂系统,研究人员也开始引入网络思维来研究其演化,并认为此举将会丰富城市规划(city planning)的现有方法,还有可能取代传统的自顶向下的设计策略[191].由此可见,面对复杂软件中设计和演化、调节和控制、监管和评估存在的一系列挑战性问题,网络思维为我们洞察网络化软件整体的基本性质和规律提供了新的视点和见解;同时,网络思维也为解决系统的优化、监控、评估和演化等重要工程化问题提供了有力的数学工具,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[8,88].

4.2 方法论的转变

半个世纪以来,系统和系统论一直是我们认识和刻画客观世界的有力工具.系统论认为,整体性、关联性、动态平衡性、时序性是所有系统共同的基本特征.其中,系统的整体观念是其核心思想:系统整体由(组成)部分构成,并且只能通过分解成部分才能了解[192].由此可见,系统的整体思维,其精髓是它的整体性,而系统其实只是整体的一种表达方式[193].然而,对构成的过分强调使得构成性整体论(constructive holism)可能忽视整体性的两个重要方面[193]:整体不等于(可能大于、小于或等于)部分之和;仅通过分解,从部分了解整体是不充分的,因为部分与部分之间有相互作用.中国古代“盲人摸象”的寓言已经变相指出了构成性整体论的局限,而哥德尔不完备性定理[194]则从数学逻辑上证明了其缺陷.对于网络化软件如此复杂的科技-社会型系统而言,如果将系统功能还原到组成部分(如 WWW,Web 服务)层面来进行分析和建模是远远不够的,更不用说解释计算机病毒爆发、流言传播、网络群体智慧(如维基百科)等涌现现象.

从网络思维的角度看,万事万物都处在普遍联系之网中,现实中的整体也可能只是更大整体(即系统的系统)的部分.按照生成性整体论(generative holism)的观点[193],部分作为整体的具体表达而存在,而不仅仅是整体的组成元素;整体通过连续不断地以部分的形式显现其自身.其中,生成是指一事物源于某物而出现但又不能通过还原方式转化回该物的情况.例如,生物领域的胚胎(整体)之于 DNA(部分)和计算机领域的 Internet(整体)之于路由器和 TCP/IP 协议(部分).另一方面,构成性整体论认为(相对固定的)组成元素的结合和分离引起整体的变化,这种变化可以是“产生”和“消亡”或者“转化”,因而适宜处理当下的随机性问题.生成性整体论则认为,复杂系统中,由若干要素在特定条件下所形成的整体已经具有了新的属性和特征,不能通过还原的方式在各要素中获得解释,这是系统由一种平衡到另一种平衡的突现(涌现)或跃迁[195],因而更适合处理有关整体的层级跃迁或涌现问题.在这种情况下,系统演化的核心问题不再是整体由什么构成,而是整体的基本特性和演化过程如何生成.例如,Internet 从局域网到广域网再发展到现在,WWW 从简单的超文本链接系统发展到如今,都一直处于变化之中,整体和部分的边界日益模糊,关注的核心应该是诸如鲁棒性与脆弱性并存的整体特性的生成机理和演化规律,而不仅仅是网站和路由器/自治域是如何工作和变化的.

如前所述,系统是整体的一种表达方式,而真实系统都可以用网络的形式加以描述和刻画.因此,网络是目前表征整体的一种有效工具.众多(生命、社会、电力、通信、计算机等领域的)真实复杂系统所发现的共同特

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

征——“无尺度”和“小世界”特性,从统计特性上反映了整体的基本属性,这是传统的系统论方法所无法做到的.从本质上说,这类属性是整体在演化过程中的一种涌现特性,网络思维为研究其生成机制和内在机理提供了新的视点.虽然偏好依附生长和重连被普遍认为是“无尺度”和“小世界”网络的主要生成机制,但对于研究复杂的系统动力学行为来说仍然是不够的,因为它们不能从还原论的角度得到解答,只能更多地从整体的角度加以研究,而这正是生成性整体论所擅长的.

Internet 的便利促进了 WWW 的兴起,WWW 的流行则加快了软件的变革,而网络化的软件服务又推动了社会经济和文化的发展.由此可见:网络化软件系统的“部分”是相互依存、协同演化的;“整体”通过“部分”的形式不断显现其自身,在演化中实现系统的平衡态跃迁.网络环境的日新月异、用户需求的频繁变化都要求网络化软件能够随需而变,按需服务,因此,其设计、评估、部署和演化就成为今后研究的重点.当要设计一个更好的网络化软件系统时,如何权衡不同的技术性、社会性目标?什么样的技术和模型能够在评估时模拟真实系统,在较小范围内得到的评估结果是否也适用于更大的系统?技术、经济和文化的因素怎样驱动网络化软件的部署,何种部署方式能够更好地适应环境的快速变化?有哪些可能的演化模式,在这些模式里网络化软件的“部分”如何协调演化以实现持续发展?这些问题的解答都需要借助生成性整体论的新手段去研究和探索.

4.3 复杂性问题的再认识

复杂性是软件的基本属性,如何认识、度量、管理和控制软件的复杂性,是软件工程面临的挑战性问题.为了管理和控制软件的复杂性并科学地评价软件质量,以传统度量学为基础的软件度量(学)(software metric)应运而生.经过近 30 年的发展,软件度量已经成为软件工程领域的一个重要研究方向,并使软件开发逐渐趋向专业化、标准化和工程化.进入新世纪后,软件与 Internet 的结合越来越紧密,大众用户的参与和交互越来越频繁,但软件复杂性度量研究未能跟上时代前进的步伐,致使有的学者认为:与 10 年前相比,现有方法在技术层面上并没有质的突破[196,197],评估和量化网络化软件的复杂性困难重重[11,88].

网络化软件部署和运行在 Internet 瞬息万变的环境中,组成元素间的交互错综复杂,我们缺乏对此类复杂系统的科学认识[3,6].复杂性问题在新需求的拉动下日益加剧,突出表现为从以成熟单元技术为基础的微观层面逐步上升到宏观系统层面(如图 2 所示,该图核心思想源自文献[198]).这种从微观(单个建筑)到宏观(整个城市)再到微观(整个国家的一个城市)的循环往复,导致规模和复杂性激增(无法还原到微观层面),让日趋庞大的网络化软件系统越来越复杂和难以驾驭.频繁变化的个体/用户群需求、持续演化的系统功能和结构、分散的协同控制和交互机制、非线性的行为涌现,使得把握和预测软件的行为并使之满足人们的期望成为挑战,传统软件工程方法(如验证、度量、测试)正在接近其复杂性的极限[88].应对新的挑战,现有的单一理论和方法难以奏效,需要鼓励学科交叉汇聚[199,200],以生态系统观、网络思维和生成性整体论指导分析和研究网络化软件,理解其结构特性和行为特征,突破目前桎梏软件技术发展的瓶颈.

从生态系统观的角度看,网络化软件设计的复杂性在于:在动态变化的 Internet 环境中,如何根据大众的需求合理地规划系统的功能和结构层次以及和谐地分配可用资源?除了原有的技术性因素,还需要考虑经济、文化、政策、法规等因素的限制,以及这些因素之间复杂的约束关系.基于上述观点,网络化软件维护的复杂性表现为:针对外界扰动和内部故障,如何保持整个系统的适应性和鲁棒性,即网络化软件系统的健康(health)?这将是一个持续的演化和改进过程,汇集各个层次的组成元素的协同工作.从这个角度看,在新的历史条件下,演化性和协同性造就了新的复杂性.一方面,借助便利的网络基础设施和互操作协议,异域异构的系统组成元素通过纷繁复杂的交互,实现资源共享与协同服务,这种交互的复杂性是传统的本地对象调用和消息传递所无法比拟的;另一方面,针对环境和需求的变化,网络化软件通过局部和整体的持续动态演化不断地优化完善自身,实现系统状态的跃迁从而达到整个系统的和谐统一,其自身的复杂性也随之剧增.

从 2005 年起,一些基于复杂网络理论的软件结构复杂性度量方法[201−206]被相继提出,拓展和深化了传统的研究方法.不仅如此,网络思维还为系统的演化、动力学行为研究开辟了一条异于传统的研究思路,为理解网络化软件的复杂性提供了新的视点和可实施的研究起点.除了结构复杂性,为了深入探索网络化软件行为的模式、特性、状态以及与结构的相互作用关系,还需要建立在特定范围内(或某些约束条件下)定量化的行为复杂

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

性理论和方法.研究的重点在于,从科技-社会型生态系统角度明确网络化软件复杂性度量的具体内涵,借助网络思维确立多属性约束的复杂性度量空间,实现从问题空间到数值或符号域的科学合理映射.因此,建立科学合理的度量标度体系不仅是理解和量化网络化软件日益增长的复杂性的有力工具,也将为控制软件需求、设计和评估的复杂性、确保软件可信提供理论基础和技术保障.

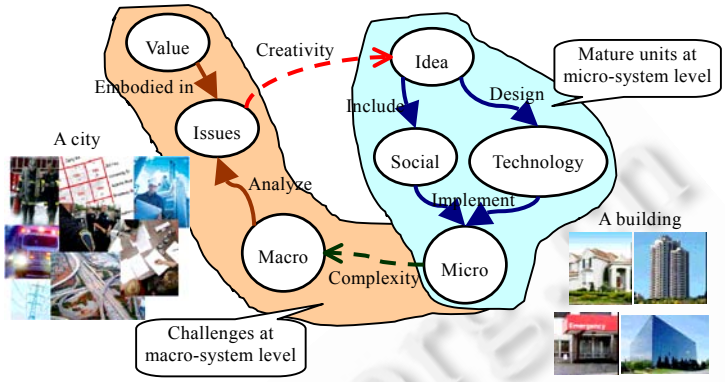


Fig.2 Challenges of complexity from micro-system (single software) to macro-system (networked software)

图 2 从微观系统(单体软件)到宏观系统(网络化软件)的挑战

4.4 今后值得关注的重要研究方向

4.4.1 面向服务的多视角需求建模

通过前文的分析可以发现,网络化软件系统的复杂性除了设计和维护的复杂性,更多的是其需求的复杂性.从客观意义上说,需求领域的专业性与软件设计的通用性之间的矛盾,以及非功能性需求与功能性需求间错综复杂的联系,极大地增加了软件设计的复杂性.从主观意义上说,需求阶段的活动需要方方面面人员的参与,而他们具有不同的观察视点和迥异的知识背景,沟通和理解上的困难会人为增加软件设计的难度;另一方面,用户在使用过程中的体验会萌发新的需求,进一步增加系统维护的复杂性.

目前,网络化软件系统的复杂性剧增、用户规模日益庞大、部署和应用环境趋于复杂,其需求建模问题成为不容回避的关键问题[3].在网络化和服务化背景下,软件生产的主要目标是实现满足个性化与多元化的大众需求的规模化定制[207].对于共性需求,可以充分利用共同认可的领域知识,提供通用化的解决方案和服务资源;对于个性化需求,则在共性的基础上实施差异性定制,即将共性的方案和个性化的需求进行协同整合,形成网络化软件系统的整体需求,实现以规模化的成本和速度满足个性化和多元化的大众需求.这种需求牵引主要来自Internet 环境下大众用户的个性化、多样化的基于服务的体验,比较成功的案例如腾讯公司的即时通讯软件 QQ,而不再是传统的面对面式(face to face)的需求捕获.数量庞大的 Internet 用户在地理位置、请求时间、语言文化、知识背景上的不同,使得用户的角色、需求目标、业务流程以及对于服务资源的要求等存在极大的差异,这给网络化软件规模化定制生产中的需求获取和建模带来了新的挑战[3,14].从角色(who)、目标(what)、流程与服务(how)等 4 个视角出发,建立对应建模元素的元模型与相互关联规则,在元级(而非实例级)为面向领域、用户需求主导的需求获取与分析、需求建模、变更管理、需求模型验证等提供基本的有序化手段[208,209],通过模型驱动方法为进一步提供合适的按需软件服务奠定基础[210].

用户具有其特定的角色(role),角色拥有一些共性需求目标(goal),业务流程(process)在逻辑上实现可操作目标,服务(service)则具体化实现对应的业务流程.这 4 种要素及其之间的关联,构成了一个有机的整体,刻画了从问题域到面向服务的解决方案域的转换过程.角色描述了需求问题空间中组织、参与者(actor)及其之间的交互;目标刻画了对用户意图进行逐层精化的过程,并确定了目标之间的相互约束关系;两者构成了网络化软件的问题域,反映出人的社会化特征.流程描述了用来达成目标的业务流程,定义其控制结构、输入/输出以及前置/后置

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

条件;服务定义了用来实现业务流程的服务链的构造及其所需聚合的网络资源,为用户提供贴合其需求的面向服务的实现方案;两者构成了网络化软件的解空间,反映出软件的服务化和网络化特征.

这种支持面向服务的多视角需求建模方法,通过抽象和规模化定制可以有效简化网络化软件需求的复杂性,构成了网络化软件系统需求的“部分”.在需求建模过程中,通过 4 要素的互相作用不断精化系统需求,并逐步达到稳定状态,从而进一步驱动服务选择和系统构造.同时,在领域本体的支持下,借助语义标识、概念映射、Wiki 等技术,方便大众用户理解、讨论和协商他们的需求,消除歧义和冲突[211]而达成共识,从而为需求模型的互操作提供有力的支持.另一方面,实际的网络化软件系统的需求模型在实例级也存在复杂的关联关系,运用网络思维可以构建多视角的需求层叠网,即用户/角色间的社会网、需求间的目标网、业务流程间的流程网和服务资源间的服务网,通过网络拓扑在更抽象层次刻画网络化软件需求模型的结构.在此基础上,研究在网络拓扑中挖掘和发现重要节点、社区、骨干网等隐含统计规律或知识的网络化数据挖掘方法(networked data mining)[212],为解决大众用户角色分类、面向用户群的共性需求获取和服务推荐、企业业务流程改进等网络化软件需求面临的难题提供不同于传统软件工程方法的指导.

4.4.2 资源受限的博弈设计

借鉴工程化的管理方法,软件工程研究 40 年来取得了巨大的进展,其实际效果是可以构建日益复杂的软件系统.也就是说,对于软件密集型的大型系统,我们可以按照工程原理进行软件开发,但也面临一系列的重大挑战.可以预见,传统的软件工程思维方法将难以成为今后指导超大规模复杂系统开发的主要方法[6].在现实生活中,作为基础设施的电力系统和供水系统已经工程化了,但是城市并没有——尽管它们的形式是由自然的和强加的约束来控制的.类似地,Internet 所基于的协议是被设计出来的,但是网络作为一个整体并没有经过总体设计和详细设计;更为有趣的是,生态系统所呈现出来的高度复杂性和组织性,并不是使用工程化方法的结果.对于软件工程学科而言,更需要探索新的设计方法学——从通过传统的、合理的、自顶向下的工程化方法转变为通过调控复杂的、分散的科技-社会型生态系统来满足大众需求.

就目前情况而言,设计一个高质量的网络化软件系统并使之不断改进和优化存在相当多的问题:首先,对于设计复杂的网络化软件系统来说,有限的网络带宽和可用服务、规定的项目预算和交付期限、紧缺的人力资源等无不表明,长期困扰软件开发的受限设计(constraint-based design)问题[213]仍然没有解决,即使是在信息资源非常丰富的今天.因此,如何合理地分配有限可用的资源来实现大众用户的多样化、个性化需求以达到共赢,就成为一个亟待解决的重要问题;其次,软件设计的本质在于针对现有的可用资源根据设计目标给出一套/几套可实现的解决方案(而非最终系统),网络化软件的设计也是如此.从图 1 所示的三维视角出发,可以发现和提取更多不同层次的设计目标,如从宏观的社会文化和法律法规到微观的个人偏好和行为,从宏观的项目预算到微观的服务成本,从宏观的 Internet 性能到微观的带宽、吞吐率,等等.如何权衡这些相互依存又可能相互制约的设计目标,对于设计高质量的网络化软件系统意义重大;最后,在设计中如何权衡各种设计目标并合理分配可用资源,实质上是一个多方动态博弈的过程.在这类行为中,为了实现各自的目标,利益相关的各方都力图选取对自己最为有利或最为合理的方案[214].在不断的竞争和合作过程中,这种博弈会促使系统的设计达到一种和谐状态(稳态),直到力量失衡的情况发生.对于由此构造的实际系统,还需要一些新的控制策略和规则来指导系统动态演化,使其在运行时能够根据环境和用户需求的变化自适应调整以达到新的动态均衡,实现系统状态的跃迁.

一个网络化软件系统包含了大量处于复杂多变环境中的相互依赖又相互竞争的组成元素,类似于生态系统中动态变化的有机体.网络思维赋予了网络化设计(networked design)更广阔的空间和能力,其中的偏好依附、模块化结构、高聚集性等复杂网络统计特性和由此而产生的动力学行为特征为设计可演化的复杂系统奠定了基础.根据新的设计策略,系统将施加具体的规则以合理有效地使用可用资源,进而实现任务目标.除此以外,系统设计的成功还将在很大程度上依赖于“所有层次的设计(design of all levels)”[6]——从软件制品(artifact)层的微观设计横贯整个科技-社会型生态系统层的宏观设计.这意味着,支配大众用户、软件制品、需求和基础设施、规则、政策、经济等交互的基本原则将被设计成一个整体的“部分”,来驱动构造的系统演化生成一个更大的复杂系统.在微观层面,成熟的传统设计规则和方法依然有效,但也需要随着工具、环境和用户需求的变化与时俱

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

进,如服务的选择规则会依赖于不同的设计者和子系统如何将可用资源用于重要性和紧急程度不同的任务.在宏观层面,首要的任务是设计一个自适应的系统基础设施,用以支持分散式的控制管理、互操作、安全和可信、连续的演化、“所有层次的设计”等基本功能.其次,要从经济、文化和法律的角度研究如何根据大众用户的需求来组织设计活动并最大化其价值,从而提升系统设计的整体质量.具体的研究问题,如竞争性的软件设计、设计风险管理、价值评估等,都需要多学科的深入交叉研究.最后,对于博弈设计来说,还要为系统的不同部分或者不同的目标提供服务质量的全面度量,以实时确定设计动机(incentive)是否如预期工作.如同系统行为的变化要与动机保持一致,设计时动机也需要(通过调控)变化以确保关键的任务目标可以顺利实现.

4.4.3 多层次、跨粒度的系统监测和评估

在 Internet 环境下,网络化软件需求、设计和演化的有效性也需要进行评估,除了软件工程传统的验证(verification)和确认(validation)方法,还需要有能够监视和评价系统状态、行为和整体状况的能力.比如,医疗检测仪器会收集病人的身体状况信息(如血压、心跳频率等),生成相应的量化指标,辅助医生判断其健康状况.监测活动负责侦测和收集具体指标的实时数据,而评估活动则负责定性定量分析这些数据,以明确度量(measurement)的实际意义,为系统的改进提供指导.对于执行简单任务且这些任务很少随系统使用而变化的软件而言,其复杂性、设计质量、系统状态等的评估标准和网络化软件截然不同.例如,对于一个城市建设是否成功的评价准则,与评估城市的电力系统、交通系统等的好坏的准则是不一样的.理解这些多层次、跨粒度的标准是监测和评估网络化软件系统的一个重要方面.

形式化验证、数字化度量和综合性测试是当前研究软件系统监测和评估的主要方法和手段,涵盖从需求、设计、构造到维护的一系列软件生命周期重要阶段,并针对不同阶段软件制品的各种重要特性,如需求的一致性和完整性、程序的正确性和系统的质量,进行系统地分析和评估.然而,对于有效的监测和评估而言,网络化软件的规模、分散化、分布和异构代表了更大的挑战和困难.目前,单一的方法由于其自身的局限性很难能够解决上述问题.例如,现在的软件度量学更适合解决相对成熟的微观系统(如图 2 所示)的量化问题,但是我们需要的是关于网络化软件整体和宏观的可度量综合指标,类似于国内生产总值.为了实现从微观部件(component)到宏观系统的渐进式发展,一方面,需要多种方法结合起来使用,即形式化验证、数字化度量和综合性测试三位一体的监测和评估方法,各种方法在网络化软件整个生命周期中相互衔接、互为补充,共同提供较为全面的评估结果;另一方面,应借鉴生态系统观和网络思维思想,从复杂性角度出发,用新的理论(如复杂网络)和实践来补充和扩展现有的确认、验证、度量和测试方法,丰富软件工程研究的内容,为实际开发提供更有益的工程指导.

由于大众用户的参与,人的社会性因素逐渐融入到软件中,形成一类科技-社会型复杂系统[3,6,180].因此,网络化软件的评估指标不仅要反映其技术的特点(例如,由于网络化软件组成元素的异构性,针对互操作性的评估就显得非常重要[215,216]),更要考虑人文、经济、法律、政治等不同层次的因素及其相互关系.这些不同层次、跨粒度的因素构成了网络化软件监测和评估的复杂属性空间,因而需要建立合理的系统评估指标集来予以分析和量化.在此基础上,需要进一步理解驱使指标值变化的原因以及变化的正常范围/边界.通常而言,跨粒度的变化使得不同层次间的指标不存在简单的线性关系,如 Internet 级拥塞的指标不会等同于路由器级拥塞的指标的线性叠加,关键路由器的拥塞往往产生级联失效,形成宏观层面的涌现现象.因此,评估和预测这些现象需要新的理论和度量方法,其数学基础可能不再是随机理论,而是统计力学(statistical mechanics)[217]、不确定性理论和可能性理论(possibility theory)[218],进而支持超大规模软件系统的管理.

除此之外,为了分析和评估设计实现的细节和网络化软件系统的特性,我们需要新的工具和平台在合适的层次修改、配置、部署和监测系统及其部件,从而搭建网络化软件监测和评估的适应性基础设施,以支持分散化的生产管理、互操作性协同、持续的演化配置和部署.对于传统的软件评估而言,研究始于实验,许多基础的工作和发现都是从建造和使用原始系统、测试已有系统中得到的[219].新的设计思想如果没有实例化,评估就只能停留在猜测阶段.基于实验和测试的研究在该学科中扮演了重要角色,它起到了检验与修正假设以及验证系统设计方法的作用[220].因此,构建一个数据共享、可供研究人员在现实环境中验证其大胆设想和设计的实验平台/基础设施就显得意义重大.在不影响真实系统运行和演化的条件下,借鉴平行系统(parallel systems)[221,222]思

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

想,利用计算机仿真和参考模型进行系统评估和自适应控制.首先,在相当程度上,它要求仿真与模拟的正规化和常态化,即对真实数据的实时监控;其次,它要求经验与知识的数字化、动态化和即时化,即针对评估结果的快速决策;最后是真实系统和仿真系统的互补,即在真实系统出现故障的情况下,仿真系统的数据能够在一定程度上支撑其恢复和运行.只有这样,虚实才能一体,计算实验才能成为真正的分析手段,网络化软件的评估才能真正发挥实际作用,为开发人员提供系统改进的有效依据.

5 结束语

20 世纪 70 年代,Unix 和应用软件程序的成功源于其“免费使用、自由分发”的理念.PC 时代微软的成功之处在于其发现并抓住了大力发展基于 PC 核心基础软件的契机,从而一跃成为软件业的巨头.如今,软件与信息服务业已经成为世界各国争夺科技制高点的关键领域,是国家安全的重要保障及国家综合实力的主要体现[2].在过去的 10 年间,Internet 和 WWW 的飞速发展给软件带来了革命性的转变——软件网络化,这种趋势使 Internet 和 WWW 作为全球性的资源,以网络为媒介向大众用户提供满足其个性化需求的信息资源服务,而不再是单纯的 PC 软件.在这种形势下,一种新的软件形态——网络化软件应运而生.

软件工程自诞生以来,一直致力于开发具有正确性、可用性以及开销合宜的高质量软件产品,40 多年来取得了令人瞩目的成就.但是,以 Internet 为基础、规模巨大、组成元素交互复杂、持续演化和部署配置的网络化软件系统,随着应用领域的不断扩展和用户群的日益庞大,其规模与复杂度正以超越人类处理能力的速度增长,使得软件工程不得不面临一系列的挑战[3,4,207].然而,我们缺乏对此类复杂系统的科学认识和理解,诸如小的缺陷和故障就能使它发生全局负面效应,有时甚至是灾难性的,因而迫切需要新的思维方式和理论方法.10 年来,网络思维和复杂网络理论为我们刻画和分析复杂系统提供了强有力的工具,也为复杂性科学与软件工程的学科交叉奠定了基础[223].从网络化-服务化-社会化三维视角出发,通过大量研究人员的实证探索,在网络化软件的基础设施、应用服务、社会交互方面均发现了复杂网络特性,为软件工程今后的发展提供了新的契机和动力.针对这种变化,本文所提出的主要观点可归纳如下:

(1) 网络化软件是一类科技-社会型开放复杂系统,其核心构件——基础设施、应用服务和社会交互以及相互之间物质和信息的交换构成了一个相对完整的统一整体,应运用更为广阔的系统视角——生态系统观加以分析和理解;

(2) 网络思维和复杂网络理论为洞察网络化软件整体的基本性质和规律提供了异于传统软件工程方法论的新视点,有助于刻画这类复杂系统的结构特性、演化规律及由此产生的行为特征,帮助我们科学地、全面地认识和理解网络化软件的本质;

(3) 软件的复杂性从以成熟单元技术为基础的微观层面逐步上升到宏观系统层面,应从生成性整体论角度重新认识网络化软件的整体性和复杂性,在需求、设计和评估 3 个方面应对 Internet 环境下协同和演化造就的复杂性所带来的一系列挑战;

(4) 面向服务的多视角需求建模和用户体验驱动的需求演化将占据网络化软件生命周期的重要位置,牵引资源受限的博弈设计,规则和策略支配系统不断演变成为复杂系统,对需求和设计的评估需要在多层次、跨粒度上进行,以合理分析系统构造的成功与否.

规模改变一切!我们需要转变视角,需要新的思想来应对遇到的挑战性问题[6].利用复杂性科学、复杂系统和软件工程的学科交叉与汇聚,催生新的理论、方法与技术,提升软件工程师认识软件和开发软件的能力,比以往任何时期都显得更加急迫、更加重要.我们应该抓住发展 Internet 时代软件产业的有利时机,运用新的思维方式应对新形势所带来的挑战,重新认识网络化软件的内在本质、演化规律和控制机理,实现软件工程理论、方法和关键技术的自主创新,进而提升整个软件产业的竞争力,推动我国软件产业的跨越式发展,促进国家信息化创新社会的建设.

致谢 衷心感谢本项目首席科学家李德毅院士的指导和宝贵建议.诚挚感谢武汉大学陆君安教授,中国科学院

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

数学与系统科学研究院吕金虎副研究员,中国电子设备系统工程公司研究所陈桂生高级工程师、尹峻松博士后、刘玉超工程师、博士生张海粟、硕士生张松林,武汉大学软件工程国家重点实验室应时教授、彭蓉教授、刘进副教授、梁鹏副教授、何扬帆副教授、王健博士、王翀博士、冯在文博士,以及国家 973 计划项目“需求工程——对复杂系统的软件工程的基础研究”各课题组老师的帮助和有益讨论.非常感谢匿名审稿人宝贵的修改意见,帮助作者很好地提高了本文的质量.

References:

[1] Huai JP. Views about future networked software technologies. Communications of the CCF, 2008,4(1):19−26 (in Chinese).
[2] Wang CW. Thoughts on innovative development of computer technologies. Communications of the CCF, 2007,3(1):8−13 (in Chinese).
[3] He KQ, Peng R, Liu W, Wang J, Li B. Networked Software. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese).
[4] He KQ, Peng R, Liu J, He F, Liang P, Li B. Design methodology of networked software evolution growth based on software patterns. Journal of Systems Science and Complexity, 2006,19(2):157−181. [doi: 10.1007/s11424-006-0157-6]
[5] President’s information technology advisory committee (PITAC). Report to the President on Computational Science: Ensuring America’s Competitiveness. 2005. http://www.nitrd.gov/pitac/reports/20050609_computational/computational.pdf
[6] Northrop L, Feiler P, Gabriel RP, Goodenough J, Linger R, Longstaff T, Kazman R, Klein M, Schmidt D, Sullivan K, Wallnau K. Ultra-Large-Scale systems: The software challenge of the future. 2006. http://www.sei.cmu.edu/uls/uls.pdf
[7] Zhang B. Networks and complex systems. Scientific Chinese, 2004,10(10):37 (in Chinese).
[8] He KQ, Ma YT, Liu J, Li B, Peng R. Software Networks. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese).
[9] Guo L, Xu XM. Complex Networks. Shanghai: Shanghai Sci-Tech Education Publishing House, 2006 (in Chinese).
[10] Newman MEJ, Barabási AL, Watts DJ. The Structure and Dynamics of Networks. Princeton: Princeton University Press, 2006.
[11] Ma YT. Towards metrics for software structural properties: A set of specific measurements based on complex networks [Ph.D. Thesis]. Wuhan: Wuhan University, 2007 (in Chinese with English abstract).
[12] Concas G, Marchesi M, Pinna S, Serra N. Power-Laws in a large object-oriented software system. IEEE Trans. on Software Engineering, 2007,33(10):687−708. [doi: 10.1109/TSE.2007.1019]
[13] Louridas P, Spinellis D, Vlachos V. Power laws in software. ACM Trans. on Software Engineering and Methodology, 2008,18(1): Article 2. [doi: 10.1145/1391984.1391986]
[14] He KQ, Liang P, Peng R, Li B, Liu J. Requirement emergence computation of networked software. Frontiers of Computer Science in China, 2007,1(3):322−328. [doi: 10.1007/s11704-007-0031-2]
[15] Li B, Huang YF. Development of on-demand service of networked software. Communications of the CCF, 2009,5(12):17−26 (in Chinese).
[16] Li MS. Software engineering: Toward 21st century. Communications of the CCF, 2007,3(11):1−3 (in Chinese).
[17] Davis S. Future Perfect. Reading: Addison Wesley Longman Publishing Co., 1987.
[18] Sears A, Jacko JA. Handbook for Human-Computer Interaction: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications 2nd ed., New York: Lawrence Erlbaum Associates, 2007.
[19] Brooks PF. No silver bullet: Essence and accidents of software engineering. IEEE Computer, 1987,20(4):10−19. [doi: 10.1109/MC.1987.1663532]
[20] Li JH. Toward Computationalism. Beijing: China Book Publishing House, 2004 (in Chinese).
[21] Erdös P, Rényi A. On random graphs I. Publicationes Mathematicae, 1959,6:290−297.
[22] Erdös P, Rényi A. On the evolution of random graphs. Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960,5:17−61.
[23] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of small-world networks. Nature, 1998,393(6684):440−442. [doi: 10.1038/30918]
[24] Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999,286(5439):509−512. [doi: 10.1126/science.286.5439.509]
[25] Milgram S. The small world problem. Psychology Today, 1967,1:61−67.
[26] Guare J. Six Degrees of Separation: A Play. New York: Vintage Books, 1990.
[27] Newman MEJ. The structure and function of complex networks. SIAM Review, 2003,45(2):167−256. [doi: 10.1137/ S0036144503 42480]
[28] Albert R, Barabási AL. Statistical mechanics of complex network. Review of Modern Physics, 2002,74(1):47−97. [doi: 10.1103/RevModPhys.74.47]
[29] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chavezf M, Hwanga DU. Complex networks: Structure and dynamics. Physics Reports, 2006,424(4-5):175−308. [doi: 10.1016/j.physrep.2005.10.009]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[30] Kleinberg J. The convergence of social and technological networks. Communications of the ACM, 2008,51(11):66−72. [doi: 10.1145/1400214.1400232]
[31] Barabási AL. The origin of bursts and heavy tails in human dynamics. Nature, 2005,435(7039):207−211. [doi: 10.1038/nature03459]
[32] Oliveira J, Barabási A. Human dynamics: The correspondence patterns of darwin and einstein. Nature, 2005,437(7063):1251−1251. [doi: 10.1038/4371251a]
[33] Zhang Y, Zhang HL, Fang BX. A survey on Internet topology modeling. Journal of Software, 2004,15(8):1220−1226 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1220.htm
[34] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 1999. New York: ACM Press, 1999. 251−262. [doi: 10.1145/316188.316229]
[35] Govindan R, Tangmunarunkit H. Heuristics for Internet map discovery. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2000, Vol.3. Piscataway: IEEE Press, 2000. 1371−1380. [doi: 10.1109/INFCOM.2000.832534]
[36] Magoni D, Pansiot J. Analysis of the autonomous system network topology. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2001,31(3):26−37. [doi: 10.1145/505659.505663]
[37] Broido A, Claffy KC. Internet topology: Connectivity of IP graphs. In: Proc. of the SPIE ITCom, Vol.4526. Washington: SPIE Press, 2001. 172−187. [doi: 10.1117/12.434393]
[38] Spring N, Mahajan R, Wetherall D. Measuring ISP topologies with rocketfuel. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2002. New York: ACM Press, 2002. 133−145. [doi: 10.1145/633025.633039]
[39] Yook SH, Jeong H, Barabási AL. Modeling the Internet's large-scale topology. Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002,99(21):13382−13386. [doi: 10.1073/pnas.172501399]
[40] Siganos G, Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. Power laws and the AS-level Internet topology. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(4):514−524. [doi: 10.1109/TNET.2003.815300]
[41] Dimitropoulos XA, Krioukov DV, Riley GF. Revisiting Internet AS-level topology discovery. In: Proc. of the PAM 2005, LNCS 3431. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 177−188. [doi: 10.1007/978-3-540-31966-5_14]
[42] Mahadevan P, Krioukov D, Fomenkov M, Huffaker B, Dimitropoulos X, Claffy KC, Vahdat A. The Internet AS-level topology: Three data sources and one definitive metric. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006,36(1):17−26. [doi: 10.1145/1111322.1111328]
[43] Newman MEJ. Models of the small world. Journal of Statistical Physics: Theory and Experiment, 2000,101(3/4):819−841.
[44] Bu T, Towsley DF. On distinguishing between Internet power law topology generators. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2002, Vol.2. New York: IEEE Press, 2002. 638−647. [doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019309]
[45] Jin S, Bestavros A. Small-World Internet topologies: Possible causes and implications on scalability of end-system multicast. Technical Report of Computer Science Department (No. BUCS-TR-2002-004), Boston University, 2002.
[46] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Evolution and Structure of the Internet: A Statistical Physics Approach. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
[47] Zhou M, Yang JH, Liu HB, Wu JP. Modeling the complex Internet topology. Journal of Software, 2009,20(1):109−123 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/3309.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03390]
[48] Wang XY, Zhou AY. Linkage analysis for the World Wide Web and its application: A survey. Journal of Software, 2003,14(10): 1768−1780 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1768.htm
[49] Kumar R, Raghavan P, Rajagopalan S, Tomkins A. Trawling the Web for emerging cyber-communities. Computer Networks, 1999, 31(11-16):1481−1493. [doi: 10.1016/S1389-1286(99)00040-7]
[50] Albert R, Jeong H, Barabási AL. Diameter of the World-Wide Web. Nature, 1999,401(6749):130−131. [doi: 10.1038/43601]
[51] Broder A, Kumar R, Maghoul F, Raghavan P, Rajagopalan S, Stata R, Tomkins A, Wiener J. Graph structure in the Web. Computer Networks, 2000,33(1/6):309−320. [doi: 10.1016/S1389-1286(00)00083-9]
[52] Kumar R, Raghavan P, Rajagopalan S, Sivakumar D. The Web as a graph. In: Proc. of the ACM PODS 2000. New York: ACM Press, 2000. 1−10. [doi: 10.1145/335168.335170]
[53] Huberman BA, Adamic LA. Growth dynamics of the World-Wide Web. Nature, 1999,401(6749):131−131. [doi: 10.1038/43604]
[54] Adamic LA, Huberman BA. Power-Law distribution of the World Wide Web. Science, 2000,287(5461):2115−2115. [doi: 10.1126/science.287.5461.2115a]
[55] Cooper C, Frieze A. A general model of Web graphs. Random Structures and Algorithms, 2003,22(3):311−335. [doi: 10.1002/rsa.10084]
[56] Dill S, Kumar R, Mccurley KS, Rajagopalan S, Sivakumar D, Tomkins A. Self-Similarity in the Web. ACM Trans. on Internet Technology, 2002,2(3):205−223. [doi: 10.1145/572326.572328]
[57] Kumar R, Raghavan P, Rajagopalan S, Tomkins A. The Web and social networks. IEEE Computer, 2002,35(11):32−36. [doi: 10.1109/MC.2002.1046971]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[58] Thelwall M, Wilkinson D. Graph structure in three national academic Webs: Power laws with anomalies. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2003,54(8):706−712. [doi: 10.1002/asi.10267]
[59] Adamic LA. The small world Web. In: Proc. of the ECDL 1999, LNCS 1696. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 443−452. [doi: 10.1007/3-540-48155-9_27]
[60] Kleinberg J. Navigation in a small world. Nature, 2000,406(6798):845−845. [doi: 10.1038/35022643]
[61] Adamic LA, Huberman BA. The Web's hidden order. Communications of the ACM, 2001,44(9):55−60. [doi: 10.1145/383694.383707]
[62] Kleinberg J, Lawrence S. The structure of the Web. Science, 2001,294(5548):1849−1850. [doi: 10.1126/science.1067014]
[63] Dhyani D, Ng WK, Bhowmick SS. A survey of Web metrics. ACM Computing Surveys, 2002,34(4):469−503. [doi: 10.1145/592642.592645]
[64] Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The semantic Web. Scientific American, 2001,284(5):35−43.
[65] Gruber TR. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993,5(2):199−220. [doi: 10.1006/knac.1993.1008]
[66] Gil R, García R, Delgado J. Measuring the semantic Web. AIS SIGSEMIS Bulletin, 2004,1(2):69−72.
[67] Hoser B, Hotho A, Jäschke R, Schmitz C, Stumme G. Semantic network analysis of ontologies. In: Proc. of the ESWC 2006, LNCS 4011. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 514−529. [doi: 10.1007/11762256_38]
[68] Ma J, Chen H. Complex network analysis on TCMLS sub-ontologies. In: Proc. of the SKG 2007. Washington: IEEE Computer Sciety Press, 2007. 551−553. [doi: 10.1109/SKG.2007.25]
[69] Li B, Li Z, He KQ. Complex network characteristics in ontologies. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems (Series B: Applications & Algorithms), 2007,14(S6):59−62.
[70] Zhang H. The scale-free nature of semantic Web ontology. In: Proc. of the WWW 2008. New York: ACM Press, 2008. 1047−1048. [doi: 10.1145/1367497.1367649]
[71] Theoharis Y, Tzitzikas Y, Kotzinos D, Christophides V. On graph features of semantic Web schemas. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 2008,20(5):692−702. [doi: 10.1109/TKDE.2007.190735]
[72] Ding L, Finin T. Characterizing the semantic Web on the Web. In: Proc. of the ISWC 2006, LNCS 4273. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 242−257. [doi: 10.1007/11926078_18]
[73] Berners-Lee T, Kagal L. The fractal nature of the semantic Web. AI magazine, 2008,29(3):29−34.
[74] Cheng G, Qu Y. Term dependence on the semantic Web. In: Proc. of the ISWC 2008, LNCS 5318. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 665−680. [doi: 10.1007/978-3-540-88564-1_42]
[75] Steyvers M, Tenenbaum JB. The large-scale structure of semantic networks: Statistical analyses and a model of semantic growth. Cognitive Science, 2005,29(1):41−78. [doi: 10.1207/s15516709cog2901_3]
[76] Finin T, Ding L, Zhou L, Joshi A. Social networking on the semantic Web. The Learning Organization, 2005,12(5):418−435. [doi: 10.1108/09696470510611384]
[77] Mika P. Bootstrapping the FOAF-Web: An experiment in social network mining. In: Proc. of the FOAF Workshop 2004. Galway, 2004. http://www.w3.org/2001/sw/Europe/ events/foaf-galway/papers/fp/bootstrapping_the_foaf_web
[78] Ding L, Zhou L, Finin T, Joshi A. How the semantic Web is being used: An analysis of FOAF documents. In: Proc. of the HICSS 2005, Vol.4. Washington: IEEE Computer Society Press, 2005. Article 113c. [doi: 10.1109/HICSS.2005.299]
[79] Staab S, Domingos P, Mika P, Golbeck J, Ding L, Finin T, Joshi A, Nowak A, Vallacher RR. Social networks applied. IEEE Intelligent Systems, 2005,20(1):80−93. [doi: 10.1109/MIS.2005.16]
[80] Bachlechner D, Strang T. Is the semantic Web a small world? In: Proc. of the ITA 2007. Wrexham: North East Wales Institute, 2007. Article 48. http://elib.dlr.de/47899/
[81] Harry H, Valentin R, Hana S. The complex dynamics of collaborative tagging. In: Proc. of the WWW 2007. New York: ACM Press, 2007. 211−220. [doi: 10.1145/1242572.1242602]
[82] Shen K, Wu L. Folksonomy as a complex network. arXiv: CS/0509072, 2005. http://arxiv.org/abs/cs.IR/0509072
[83] Cattuto C, Schmitz C, Baldassarri A, Servedio VDP, Loreto V, Hotho A, Grahl M, Stumme G. Network properties of folksonomies. AI Communications, 2007,20(4):245−262.
[84] Valentin R, Harry H, Hana S. Emergence of consensus and shared vocabularies in collaborative tagging systems. ACM Trans. on the Web, 2009,3(4): Article 14. [doi: 10.1145/1594173.1594176]
[85] Liu F. An experiment on the complex network properties of folksonomy. Digital Library Forum, 2007,3(11):32−34 (in Chinese with English abstract).
[86] Cattuto C, Loreto V, Pietronero L. Semiotic dynamics and collaborative tagging. Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007,104(5):1461−1464. [doi: 10.1073/pnas.0610487104]
[87] Brooks FP. Three great challenges for half-century-old computer science. Journal of the ACM, 2003,50(1):25−26. [doi: 10.1145/602382.602397]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[88] Li B, Ma YT, Liu J, Ding QW. Advances in the studies on complex networks of software systems. Advances in Mechanics, 2008,38(6):805−814 (in Chinese with English abstract).

[89] Valverde S, Cancho R, Solé R. Scale free networks from optimal design. Europhysics Letters, 2002,60(4):512−517. [doi: 10.1209/epl/i2002-00248-2]

[90] Myers CR. Software systems as complex networks: Structure, function, and evolvability of software collaboration graphs. Physical Review E, 2003,68(4): Article 046116. [doi: 10.1103/PhysRevE.68.046116]

[91] Valverde S, Solé RV. Hierarchical small worlds in software architecture. Working paper of Santa Fe Institute (No.SFI/03-07-44), 2003.

[92] Moura A, Lai YC, Motter AE. Signatures of small-world and scale-free properties in large computer programs. Physical Review E, 2003,68(1): Article 017102. [doi: 10.1103/PhysRevE.68.017102]

[93] LaBelle N, Wallingford E. Inter-Package dependency networks in open-source software. arXiv: cs.SE/0411096, 2004. http://arxiv.org/abs/cs/ 0411096

[94] Maillart T, Sornette D, Spaeth S, Krogh GV. Empirical tests of zipf's law mechanism in open source Linux distribution. Physical Review Letters, 2008,101(21): Article 218701. [doi: 10.1103/PhysRevLett.101.218701]

[95] Wheeldon R, Counsell S. Power law distributions in class relationships. In: Proc. of the SCAM 2003. Washington: IEEE Computer Society Press, 2003. 45−54. [doi: 10.1109/SCAM.2003.1238030]

[96] Marchesi M, Pinna S, Serra N, Tuveri S. Power laws in smalltalk. In: Proc. of the ESUG Conf. 2004 Research Track. Köthen, 2004. 27−44. http://stephane.ducasse.free.fr/Web/Demoes/ESUG2004Proceedings.pdf

[97] Potanin A, Noble J, Frean M, Biddle R. Scale-Free geometry in OO programs. Communications of the ACM, 2005,48(5):99−103. [doi: 10.1145/1060710.1060716]

[98] Liu B, Li DY, Liu J, He F. Classifying class and finding community in UML metamodel network. In: Proc. of AMDA 2005, LNAI 3584. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 690−695. [doi: 10.1007/11527503_81]

[99] Baxter G, Frean M, Noble J, Rickerby M, Smith H, Visser M, Melton H, Tempero E. Understanding the shape of Java software. In: Proc. of the OOPSLA 2006. New York: ACM Press, 2006. 397−412. [doi: 10.1145/1167515.1167507]

[100] Concas G, Marchesi M, Pinna S, Serra N. On the suitability of Yule process to stochastically model some properties of object-oriented systems. Physica A, 2006,370(2):817−831. [doi: 10.1016/j.physa.2006.02.024]

[101] Ichii M, Matsushita M, Inoue K. An exploration of power-law in use-relation of Java software systems. In: Proc. of the IEEE ASWEC 2008. Washington: IEEE Computer Society Press, 2008. 422−431. [doi: 10.1109/ASWEC.2008.60]

[102] Hyland-Wood D, Carrington D, Kaplan S. Scale-Free nature of Java software package, class and method collaboration graphs. Technical Report, No.TR-MS1286, University of Maryland College Park, 2006.

[103] Liu J, He KQ, Peng R, Ma YT. A study on the weight and topology correlation of object oriented software coupling network. In: Proc. of the ICCSA 2006. Waterloo: Watam Press, 2006. 955−959.

[104] Bilar D. On callgraphs and generative mechanisms. Journal in Computer Virology, 2007,3(4):285−297. [doi: 10.1007/s11416-007-0057-x]

[105] Cai KY, Yin BB. Software execution processes as an evolving complex network. Information Sciences, 2009,179(12):1903−1928. [doi: 10.1016/j.ins.2009.01.011]

[106] Wen L, Kirk D, Dromey RG. Software systems as complex networks. In: Proc. of the IEEE ICCI 2007. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. 106−115. [doi: 10.1109/COGINF.2007.4341879]

[107] Jenkins S, Kirk SR. Software architecture graphs as complex networks: A novel partitioning scheme to measure stability and evolution. Information Sciences, 2007,177(12):2587−2601. [doi: 10.1016/j.ins.2007.01.021]

[108] Sudeikat J, Renz W. On complex networks in software: How agent-orientation effects software structures. In: Proc. of the CEEMAS 2007, LNAI 4696. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 215−224. [doi: 10.1007/978-3-540-75254-7_22]

[109] Zheng X, Zeng D, Li H, Wang FY. Analyzing open-source software systems as complex networks. Physica A, 2008,387(24):6190−6200. [doi: 10.1016/j.physa.2008.06.050]

[110] Chatzigeorgiou A, Tsantalis N, Stephanides G. Application of graph theory to OO software engineering. In: Proc. of the ACM WISER 2006. New York: ACM Press, 2006. 29−36. [doi: 10.1145/1137661.1137669]

[111] Li DY, Han YN, Hu J. Complex network thinking in software engineering. In: Proc. of the CSSE 2008. Washington: IEEE Computer Society Press, 2008. 264−268. [doi: 10.1109/CSSE.2008.689]

[112] Yan D, Qi GN. The scale-free feature and evolving model of large-scale software systems. Acta Physica Sinica, 2006,55(8): 3799−3084 (in Chinese with English abstract).

[113] Han MC, Li DY, Liu CY, Li H. Networked characteristics in software and its contribution to software quality. Chinese Journal of Computer Engineering and Applications, 2006,42(20):29−31 (in Chinese with English abstract).

[114] Zheng XL, Zeng DJ, Li HQ, Mao WJ, Wang FY, Dai RW. Analyzing and modeling open source software as complex networks. Complex Systems and Complexity Science, 2007,4(3):1−9 (in Chinese with English abstract).

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[115] Li HQ, Zeng DJ, Zheng XL, Wang FY, Mao WJ. Analyzing package dependencies in open source software using a directed random graph. Complex Systems and Complexity Science, 2008,5(1):6−13 (in Chinese with English abstract).
[116] Qian GQ, Zhang L, Zhang L, Lew P. Modeling method and characteristics analysis of software dependency networks. Chinese Journal of Computer Science, 2008,35(11):239−243 (in Chinese with English abstract).
[117] Cai H. Scale-Free Web services. In: Proc. of the IEEE ICWS 2007. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. 288−295. [doi: 10.1109/ICWS.2007.156]
[118] Oh SC, Lee D, Kumara RT. Effective Web service composition in diverse and large-scale service networks. IEEE Trans. on Services Computing, 2008,1(1):15−32. [doi: 10.1109/TSC.2008.1]
[119] Kil H, Oh SC, Elmacioglu E, Nam W, Lee D. Graph theoretic topological analysis of Web service networks. World Wide Web, 2009,12(3):321−343. [doi: 10.1007/s11280-009-0064-6]
[120] Kudoa H, Dunbar R. Neocortex size and social network size in primates. Animal Behaviour, 2001,62(4):711−722. [doi: 10.1006/anbe.2001.1808]
[121] Barabási AL, Bonabeau E. Scale-Free networks. Scientific American, 2003,289(5):50−59.
[122] Clauset A, Shalizi CR, Newman M. Power-Law distributions in empirical data. SIAM Review, 2009,51(4):661−703. [doi: 10.1137/070710111]
[123] Culotta A, Bekkerman R, McCallum A. Extracting social networks and contact information from email and the Web. In: Proc. of the CEAS 2004. Published on the Web, 2004. http://ceas.cc/2004/176.pdf
[124] Kossinets G, Watts DJ. Empirical analysis of an evolving social network. Science, 2006,311(5757):88−90. [doi: 10.1126/science.1116869]
[125] McCallum A, Wang X, Andres CE. Topic and role discovery in social networks with experiments on enron and academic email. Journal of Artificial Intelligence Research, 2007,30(1):249−272. [doi: 10.1613/jair.2229]
[126] Zhang J, Ackerman MS, Adamic L. Expertise networks in online communities: Structure and algorithms. In: Proc. of the WWW 2007. New York: ACM Press, 2007. 221−230. [doi: 10.1145/1242572.1242603]
[127] Mislove A, Marcon M, Gummadi KP, Druschel P, Bhattacharjee B. Measurement and analysis of online social networks. In: Proc. of the ACM SIGCOMM IMC 2007. New York: ACM Press, 2007. 29−42. [doi: 10.1145/1298306.1298311]
[128] Kumar R, Novak J, Tomkins A. Structure and evolution of online social networks. In: Proc. of the ACM SIGKDD 2006. New York: ACM Press, 2006. 611−617. [doi: 10.1145/1150402.1150476]
[129] David LN, Novak J, Kumar R, Raghavan P, Tomkins A. Geographic routing in social networks. Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005,102(33):11623-11628. [doi: 10.1073/pnas.0503018102]
[130] Caverlee J, Webb S. A large-scale study of myspace: Observations and implications for online social networks. In: Proc. of the AAAI ICWSM 2008. AAAI Press, 2008. 36−44. http://www.aaai.org/Library/ICWSM/2008/icwsm08-012.php
[131] Ahn YY, Han S, Kwak H, Moon S, Jeong H. Analysis of topological characteristics of huge online social networking services. In: Proc. of the WWW 2007. New York: ACM Press, 2007. 835−844. [doi: 10.1145/1242572.1242685]
[132] Fu F, Chen X, Liu L, Wang L. Social dilemmas in an online social network: The structure and evolution of cooperation. Physics Letters A, 2007,371(1-2):58−64. [doi: 10.1016/j.physleta.2007.05.116]
[133] Lewisa K, Kaufmana J, Gonzaleza M, Wimmer A, Christakis N. Tastes, ties, and time: A new social network dataset using Facebook.com. Social Networks, 2008,30(4):330−342. [doi: 10.1016/j.socnet.2008.07.002]
[134] Leskovec J, Horvitz E. Planetary-scale views on a large instant-messaging network. In: Proc. of the WWW 2008. New York: ACM Press, 2008. 915−924. [doi: 10.1145/1367497.1367620]
[135] Xu J, Gao Y, Christley S, Madey G. A topological analysis of the open souce software development community. In: Proc. of the HICSS 2005, Vol.7. Washington: IEEE Computer Society Press, 2005. Article 198a. [doi: 10.1109/HICSS.2005.57]
[136] Singh PV. The small world effect: The influence of macro level properties of developer collaboration networks on open source project success. SSRN, 2008. http://ssrn.com/abstract=1112860
[137] Bird C, Pattison D, D'Souza R, Filkov V, Devanbu P. Latent social structure in open source projects. In: Proc. of the ACM FSE 2008. New York: ACM Press, 2008. 24−35. [doi: 10.1145/1453101.1453107]
[138] Wolf T, Schroter A, Damian D, Nguyen T. Predicting build failures using social network analysis on developer communication. In: Proc. of the IEEE ICSE 2009. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. 1−11. [doi: 10.1109/ICSE.2009.5070503]
[139] Mika P. Flink: Semantic Web technology for the extraction and analysis of social networks. Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2005,3(2-3):211−223. [doi: 10.1016/j.websem.2005.05.006]
[140] Newman M, Park J. Why social networks are different from other types of networks. Physical Review E, 2003,68(3): Article 036122. [doi: 10.1103/PhysRevE.68.036122]
[141] Castellano C, Fortunato S, Loreto V. Statistical physics of social dynamics. Reviews of Modern Physics, 2009,81(2):591−646. [doi: 10.1103/RevModPhys.81.591]
[142] Masoliver J, Montero M, Weiss GH. Continuous-Time random-walk model for financial distributions. Physical Review E, 2003, 67(2): Article 021112. [doi: 10.1103/PhysRevE.67.021112]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[143] Jiang ZQ, Chen W, Zhou WX. Scaling in the distribution of intertrade durations of Chinese stocks. Physica A, 2008,387(23): 5818−5825. [doi: 10.1016/j.physa.2008.06.039]

[144] Dezsö Z, Almaas E, Lukács A, Rácz B, Szakadát I, Barabási AL. Dynamics of information access on the Web. Physical Review E, 2006,73(6): Article 066132. [doi: 10.1103/PhysRevE.73.066132]

[145] Gonçalves B, Ramasco JJ. Human dynamics revealed through Web analytics. Physical Review E, 2008,78(2): Article 026123. [doi: 10.1103/PhysRevE.78.026123]

[146] Zhou T, Kiet HA, Kim BJ, Wang BH, Holme P. Role of activity in human dynamics. Europhysics Letters, 2008,82(2): Article 28002. [doi: 10.1209/0295-5075/82/28002]

[147] Zhou T. Human activity pattern on on-line movie watching. Complex Systems and Complexity Science, 2008,5(1):1−5 (in Chinese with English abstract).

[148] Hu HB, Han DY. Empirical analysis of individual popularity and activity on an online music service system. Physica A, 2008, 387(23):5916−5921. [doi: 10.1016/j.physa.2008.06.018]

[149] Henderson T, Bhatti S. Modelling user behaviour in networked games. In: Proc. of the ACM Multimedia 2001. New York: ACM Press, 2001. 212−220. [doi: 10.1145/500141.500175]

[150] Dewes C, Wichmann A, Feldmann A. An analysis of Internet chat systems. In: Proc. of the ACM SIGCOMM IMC 2003. New York: ACM Press, 2003. 51−64. [doi: 10.1145/948205.948214]

[151] Hong W, Han XP, Zhou T, Wang BH. Heavy-Tailed statistics in short-message communication. Chinese Physics Letters, 2009,26(2): Article 028902. [doi: 10.1088/0256-307X/26/2/028902]

[152] Paxson V, Floyd S. Wide area traffic: The failure of Poisson modeling. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1995,3(3):226−244. [doi: 10.1109/90.392383]

[153] Kleban SD, Clearwater SH. Hierarchical dynamics, interarrival times, and performance. In: Proc. of the ACM/IEEE SC 2003. Washington: IEEE Computer Society Press, 2003. Article 28. [doi: 10.1109/SC.2003.10040]

[154] Hardera U, Paczuski M. Correlated dynamics in human printing behavior. Physica A, 2006,361(1):329−336. [doi: 10.1016/j.physa.2005.06.079]

[155] Baek SK, Kim TY, Kim BJ. Testing a priority-based queue model with Linux command histories. Physica A, 2008,387(14): 3660−3668. [doi: 10.1016/j.physa.2008.02.021]

[156] Grabowski A, Kruszewska N. Experimental study of the structure of a social network and human dynamics in a virtual society. Int'l Journal of Modern Physics C, 2007,18(10):1527−1535. [doi: 10.1142/S0129183107011480]

[157] Grabowski A. Interpersonal interactions and human dynamics in a large social network. Physica A, 2007,385(1):363−369. [doi: 10.1016/j.physa.2007.06.005]

[158] Grabowski A, Kruszewska N, Kosiński RA. Dynamic phenomena and human activity in an artificial society. Physical Review E, 2008,78(6): Article 066110. [doi: 10.1103/PhysRevE.78.066110]

[159] Cattuto C. Semiotic dynamics in online social communities. European Physical Journal C, 2006,46(s02):33−37. [doi: 10.1140/epjcd/s2006-03-004-4]

[160] Valverde S. Crossover from endogenous to exogenous activity in open-source software development. Europhysics Letters, 2007, 77(2): Article 20002. [doi: 10.1209/0295-5075/77/20002]

[161] Oliveira JG, Vazquez A. Impact of interactions on human dynamics. Physica A, 2009,388(2-3):187−192. [doi: 10.1016/j.physa.2008.08.022]

[162] Cobham A. Priority assignment in waiting line problems. Journal of the Operations Research Society of America, 1954,2(1):70−76.

[163] González MC, Hidalgo CA, Barabási AL. Understanding individual human mobility patterns. Nature, 2008,453(7196):779−782. [doi: 10.1038/nature06958]

[164] Rhee I, Shin M, Hong S, Lee K, Chong S. On the levy-walk nature of human mobility. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2008. Piscataway: IEEE Press, 2008. 924−932. [doi: 10.1109/INFOCOM.2008.145]

[165] Claveirole T, Boc M, Amorim MD. An empirical analysis of Wi-Fi activity in three urban scenarios. In: Proc. of the IEEE PERCOM 2009. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. 1−6. [doi: 10.1109/PERCOM.2009.4912876]

[166] Jiang ZM. Development of IT industry in china in the new age. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008,42(10):1589−1607 (in Chinese with English abstract).

[167] Proulx SR, Promislow D, Phillips PC. Network thinking in ecology and evolution. Trends in Ecology & Evolution, 2005,20(6):345−353. [doi: 10.1016/j.tree.2005.04.004]

[168] Mitchell M. Complex systems: Network thinking. Artificial Intelligence, 2006,170(18):1194−1212. [doi: 10.1016/j.artint.2006.10.002]

[169] Committee on Network Science for Future Army Applications, National Research Council. Network Science. Washington: The National Academies Press, 2005.

[170] Zeng XZ. Network Science. Beijing: Military Science Press, 2006 (in Chinese).

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[171] Fang JQ, Wang XF, Zheng ZG, Bi Q, Di ZR, Li X. New interdisciplinary science: Network science (I). Progress in Physics, 2007,27(3):239−343 (in Chinese with English abstract).
[172] Fang JQ, Wang XF, Zheng ZG, Li X, Di ZR, Bi Q. New interdisciplinary science: Network science (II). Progress in Physics, 2007,27(4):361−448 (in Chinese with English abstract).
[173] Fang JQ. Mastering Beam Halo and Exploring Network Science. Beijing: Atomic Energy Press, 2008 (in Chinese with English abstract).
[174] Lewis TG. Network Science: Theory and Applications. New York: Wiley, 2009.
[175] Denning PJ, Riehle RD. The profession of IT: Is software engineering engineering? Communications of the ACM, 2009,52(3): 24−26. [doi: 10.1145/1467247.1467257]
[176] Petroski H. Pushing the Limits: New Adventures in Engineering. New York: Knopf, 2004.
[177] Notkin D. Unconventional views on conventional wisdom about software engineering research. In: Proc. of the IEEE ICSM 2006. Washington: IEEE Computer Society Press, 2006. 201−201. [doi: 10.1109/ICSM.2006.71]
[178] Barabási AL. The architecture of complexity. IEEE Control Systems Magazine, 2007,27(4):33−42. [doi: 10.1109/MCS.2007.384127]
[179] Barabási AL. Scale-Free networks: A decade and beyond. Science, 2009,325(5939):412−413. [doi: 10.1126/science.1173299]
[180] Vespignani A. Predicting the behavior of techno-social systems. Science, 2009,325(5939):425−428. [doi: 10.1126/science.1171990]
[181] Li DY, Xiao LP, Han YN, Chen GS, Liu K. Network thinking and network intelligence. In: Proc. of the WICI WImBI 2006, LNAI 4845. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 36−58. [doi: 10.1007/978-3-540-77028-2_3]
[182] Jr MLK. Letter from Birmingham jail. Liberation Magazine, 1963,8(6):10−16.
[183] Eubank S, Guclu H, Kumar VS, Marathe MV, Srinivasan A, Toroczkai Z, Wang N. Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks. Nature, 2004,429(6988):180−184. [doi: 10.1038/nature02541]
[184] Kleinberg J. Computing: The wireless epidemic. Nature, 2007,449(7160):287−288. [doi: 10.1038/449287a]
[185] Nekovee M. Epidemic spreading of computer worms in fixed wireless networks. In: Proc. of the BIOWIRE 2007, LNCS 5151. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 105−115. [doi: 10.1007/978-3-540-92191-2_10]
[186] Park S, Cho IS, Kim B. An evolution process model for the Internet topology. In: Proc. of the ICCS 2006, Part III, LNCS 3993. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 1040−1047. [doi: 10.1007/11758532_142]
[187] Ding Y, Xu L, Embley D. A model of World Wide Web evolution. In: Proc. of the WebSci 2009: Society On-Line. Athens, 2009. Article 146. http://journal.webscience.org/146/
[188] Caldarelli G. Scale-Free Networks: Complex Webs in Nature and Technology. New York: Oxford University Press, 2007.
[189] Lehman MM, Ramil JF. Software evolution—Background, theory, practice. Information Processing Letters, 2003,88(1-2):33−44. [doi: 10.1016/S0020-0190(03)00382-X]
[190] Valverde S, Solé RV. On the Nature of Design. In: Braha D, Minai A, Bar-Yam Y (Eds.) Complex Engineered Systems: Science Meets Technology. New York: Springer-Verlag, 2006. 72−100.
[191] Batty M. The size, scale, and shape of cities. Science, 2008,319(5864):769−771. [doi: 10.1126/science.1151419]
[192] Cilliers P, Wrote; Zeng GP, Trans. Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House, 2006 (in Chinese).
[193] Jin WL. Generative Holism. Baoding: Hebei University Press, 2000 (in Chinese).
[194] Gödel K. Über formal unentscheidbare sätze der principia mathematica und verwandter systeme, I. Monatshefte für Mathematik und Physik, 1931,38(1):173−198.
[195] Xiao XJ, Yang HL. From mechanism to holism: Necessarily demand of science development and environment protection. Journal of Renmin University of China, 2007,21(3):10−16 (in Chinese with English abstract).
[196] Fenton NE, Krause P, Neil M. Software measurement: Uncertainty and causal modeling. IEEE Software, 2002,19(4):116−122. [doi: 10.1109/MS.2002.1020298]
[197] Basili VR, Boehm BW, Davis A, Humphrey WS, Leveson N, Mead NR, Musa JD, Parnas DL, Pfleeger SL, Weyuker E. New year's resolutions for software quality. IEEE Software, 2004,21(1):12−13. [doi: 10.1109/MS.2004.1259165]
[198] Hendler J, Shadbolt N, Hall W, Berners-Lee T, Weitzner D. Web science: An interdisciplinary approach to understanding the Web. Communications of the ACM, 2008,51(7):60−69. [doi: 10.1145/1364782.1364798]
[199] Barabási AL. Taming complexity. Nature Physics, 2005,1(2):68−70. [doi: 10.1038/nphys162]
[200] Merali Y. Complexity and information systems: The emergent domain. Journal of Information Technology, 2006,21(4):216−228. [doi: 10.1057/palgrave.jit.2000081]
[201] Ma YT, He KQ, Du DH. A qualitative method for measuring the structural complexity of software systems based on complex networks. In: Proc. of the IEEE APSEC 2005. Washington: IEEE Computer Society Press, 2005. 257−263. [doi: 10.1109/APSEC.2005.14]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

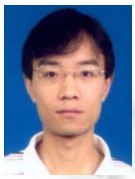
[202] Ma YT, He KQ, Du DH, Liu J, Yan YL. A complexity metrics set for large-scale object-oriented software systems. In: Proc. of the IEEE CIT 2006. Washington: IEEE Computer Society Press, 2006. Article 189. [doi: 10.1109/CIT.2006.3]
[203] Cai W, Zhao H, Zhang HH, Zhao M, Luo GL. Static structural complexity metrics for large-scale software. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems (Series B: Applications & Algorithms), 2007,14(S6):12−17.
[204] Zhang HH, Zhao H, Cai W, Zhao M, Luo GL. A qualitative method for analysis the structure of software systems based on *k*-core. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems (Series B: Applications & Algorithms), 2007,14(S6):18−24.
[205] Xu G, Gao Y, Liu F, Chen AG, Zhang M. Statistical analysis of software coupling measurement based on complex networks. In: Proc. of the FITME 2008. Washington: IEEE Computer Society Press, 2008. 577−581. [doi: 10.1109/FITME.2008.62]
[206] Gao S, Li C. Complex network model for software system and complexity measurement. In: Proc. of the WRI CSIE 2009, Vol.7. Washington: IEEE Computer Society Press, 2009. 624−628. [doi: 10.1109/CSIE.2009.135]
[207] Li DY. Research progress on requirement engineering: Basic research on software engineering for complex systems. China Basic Science, 2009,11(2):4−8 (in Chinese with English abstract).
[208] Wang J, He KQ, Li B, Liu W, Peng R. Meta-Models of domain modeling framework for networked software. In: Proc. of the IEEE GCC 2007. Washington: IEEE Computer Society Press, 2007. 878−886. [doi: 10.1109/GCC.2007.84]
[209] Wang J, He KQ, Gong P. RGPS: A unified requirements meta-modeling frame for networked software. In: Proc. of the ICSE2008-IWAAPF. New York: ACM Press, 2008. 29−35. [doi: 10.1145/1370811.1370817]
[210] Wang J. Research on requirements meta-modeling framework and key techniques of networked software [Ph.D. Thesis]. Wuhan: Wuhan University, 2008 (in Chinese with English abstract).
[211] Zhu XF, Jin Z. Managing the inconsistency of software requirements. Journal of Software, 2005,16(7):1221−1231 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1221.htm [doi: 10.1360/jos161221]
[212] Li DY, Chen GS, Cao BH. Complex networks and networked data mining. In: Proc. of the ADMA 2005, LNAI 3584. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 10−12. [doi: 10.1007/11527503_2]
[213] Gross M. Design as exploring constraints [Ph.D. Thesis]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1986.
[214] Myerson R. Game Theory: Analysis of Conflict. Cambridge and London: Harvard University Press, 1991.
[215] Nelson MR. Building an open cloud. Science, 2009,324(5935):1656−1657. [doi: 10.1126/science.1174225]
[216] Dikaiakos MD, Pallis G, Katsaros D, Mehra P, Vakali A. Cloud computing: Distributed Internet computing for IT and scientific research. IEEE Internet Computing, 2009,13(5):10−13. [doi: 10.1109/MIC.2009.103]
[217] Chandler D. Introduction to Modern Statistical Mechanics. Oxford: Oxford University Press, 1987.
[218] Dubois D, Prade H. Possibility theory, probability theory and multiple-valued logics: A clarification. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2001,32(1):35−66. [doi: 10.1023/A:1016740830286]
[219] Basili VR, Elbaum SG. Empirically driven SE research: State of the art and required maturity. In: Proc. of the IEEE ICSE 2006. New York: ACM Press, 2006. 32−32. [doi: 10.1145/1134285.1134291]
[220] Network Science and Engineering Council. Network science and engineering (NetSE) research agenda, Version 1.1. 2009. http://www.cra.org/ccc/docs/NetSE-Research-Agenda.pdf
[221] Wang FY. Parallel system methods for management and control of complex systems. Control and Decision, 2004,19(5):485−489 (in Chinese with English abstract).
[222] Wang FY. On the modeling, analysis, control and management of complex systems. Complex Systems and Complexity Science, 2006,3(2):26−34 (in Chinese with English abstract).
[223] Wen L, Dromey RG, Kirk D. Software engineering and scale-free networks. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics Part B: Cybernetics, 2009,39(3):845−854. [doi: 10.1109/TSMCB.2009.2020206]

附中文参考文献:

[1] 怀进鹏.对未来网络化软件技术的几点认识.中国计算机学会通讯,2008,4(1):19−26.
[2] 汪成为.对计算机技术创新发展的思考.中国计算机学会通讯,2007,3(1):8−13.
[3] 何克清,彭蓉,刘玮,王健,李兵.网络式软件.北京:科学出版社,2008.
[7] 张钹.网络与复杂系统.科学中国人,2004,10(10):37.
[8] 何克清,马于涛,刘婧,李兵,彭蓉.软件网络.北京:科学出版社,2008.
[9] 郭雷,许晓鸣.复杂网络.上海:上海科技教育出版社,2006.
[11] 马于涛.基于复杂网络的软件结构特性度量方法的研究[博士学位论文].武汉:武汉大学,2007.
[15] 李兵,黄永峰.按需服务的网络化软件开发.中国计算机学会通讯,2009,5(12):17−26.
[16] 李明树.软件工程:面向 21 世纪.中国计算机学会通讯,2007,3(11):1−3.
[20] 李建会.走向计算主义.北京:中国书籍出版社,2004.
[33] 张宇,张宏莉,方滨兴.Internet 拓扑建模综述.软件学报,2004,15(8):1220−1226. http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1220.htm
[47] 周苗,杨家海,刘洪波,吴建平.Internet 网络拓扑建模.软件学报,2009,20(1):109−123. http://www.jos.org.cn/1000-9825/20/109.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.00109]
[48] 王晓宇,周傲英.万维网的链接结构分析及其应用综.软件学报,2003,14(10):1768−1780. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1768.htm
[85] 刘菲.自由分类法的复杂网络特性实证研究.数字图书馆论坛,2007,3(11):32−34.
[88] 李兵,马于涛,刘婧,等.软件系统的复杂网络研究进展.力学进展,2008,38(6):805−814.
[112] 闫栋,祁国宁.大规模软件系统的无标度特性与演化模型.物理学报,2006,55(8):3799−3084.
[113] 韩明畅,李德毅,刘常昱,李华.软件中的网络化特征及其对软件质量的贡献.计算机工程与应用,2006,42(20):29−31.
[114] 郑晓龙,曾大军,李慧倩,毛文吉,王飞跃,戴汝为.开源软件的复杂网络分析及建模.复杂系统与复杂性科学,2007,4(3):1−9.
[115] 李慧倩,曾大军,郑晓龙,王飞跃,毛文吉.基于开源软件的有向图研究.复杂系统与复杂性科学,2008,5(1):6−13.
[116] 钱冠群,张莉,张林,Philip Lew.软件静态结构的依赖网络建模方法与特性分析.计算机科学,2008,35(11):239−243.
[147] 周涛.在线电影点播中的人类动力学模式.复杂系统与复杂性科学,2008,5(1):1−5.
[166] 江泽民.新时期我国信息技术产业的发展.上海交通大学学报,2008,42(10):1589−1607.
[170] 曾宪钊.网络科学.北京:军事科学出版社,2006.
[171] 方锦清,汪小帆,郑志刚,毕桥,狄增如,李翔.一门崭新的交叉科学—网络科学(上).物理学进展,2007,27(3):239−343.
[172] 方锦清,汪小帆,郑志刚,李翔,狄增如,毕桥.一门崭新的交叉科学—网络科学(下).物理学进展,2007,27(4):361−448.
[173] 方锦清.驾驭强流束晕与探索网络科学.北京:原子能出版社,2008.
[192] Cilliers P,著;曾国屏,译.复杂性与后现代主义——理解复杂系统.上海:上海科技教育出版社,2006.
[193] 金吾伦.生成哲学.保定:河北大学出版社,2000.
[195] 肖显静.从机械论到整体论:科学发展和环境保护的必然要求.中国人民大学学报,2007,21(3):10−16.
[207] 李德毅.需求工程——对复杂系统软件工程的基础研究.中国基础科学,2009,11(2):4−8.
[210] 王健.网络式软件的需求元建模框架及关键技术研究[博士学位论文].武汉:武汉大学,2008.
[211] 朱雪峰,金芝.关于软件需求中的不一致性管理.软件学报,2005,16(7):1221−1231. http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1221.htm [doi: 10.1360/jos161221]
[221] 王飞跃.平行系统方法与复杂系统的管理和控制.控制与决策,2004,19(5):485−489.
[222] 王飞跃.关于复杂系统的建模、分析、控制和管理.复杂系统与复杂性科学,2006,3(2):26−34.



马于涛(1980－),男,湖北潜江人,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为软件工程,复杂网络.

李兵(1969－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为软件工程,云计算,复杂网络.

何克清(1947－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为软件工程基础设施及技术标准.

刘婧(1979－),女,博士,副教授,主要研究领域为软件工程,复杂网络.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn