

文章编号: 1672 - 3813 (2008) 04 - 0021 - 08

当前复杂系统研究的几个方向

汪秉宏^{1,2}, 周涛^{1,3}, 王文旭⁴, 杨会杰^{2,5}, 刘建国^{1,3},
赵明^{1,6}, 殷传洋⁷, 韩筱璞¹, 谢彦波¹

(1. 中国科学技术大学近代物理系理论物理研究所 复杂系统研究组, 合肥 230026;

2. 上海系统科学研究院及上海理工大学复杂适应系统研究所, 上海 200093;

3. 瑞士弗里堡大学物理系, 瑞士 弗里堡 CH - 1700; 4. 亚利桑那州立大学电子工程系, 美国 亚利桑那州 85287 - 5706;

5. 新加坡国立大学物理系, 新加坡 119077; 6. 香港浸会大学物理系, 香港; 7. 南京信息工程大学, 南京 210044)



摘要: 复杂系统与复杂性科学被誉为 21 世纪的科学, 是吸引跨学科广泛注意的新型交叉科学。简要概述了复杂系统研究的几个重要方向, 包括网络同步、网络交通流、新一代信息网络的结构和动力学、演化合作博弈、生物网络复杂性、人类动力学和信息物理学。

关键词: 复杂系统; 复杂性科学; 复杂网络; 人类动力学; 信息物理学

中图分类号: N94

文献标识码: A

Several Directions in Complex System Research

WANG Bing-hong^{1,2}, ZHOU Tao^{1,3}, WANG Wen-xu⁴, YANG Hui-jie^{2,5},

LIU Jian-guo^{1,3}, ZHAO Ming^{1,6}, YIN Chuan-yang⁷, HAN Xiao-pu¹, XIE Yan-bo¹

(1. Department of Modern Physics, Institute of Theoretical Physics and Group of Complex System,

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Complex Adaptive Systems, Shanghai Academy of System Science and University of

Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. Department of Physics, University of Fribourg, Fribourg CH - 1700, Switzerland;

4. Department of Electronic Engineering, Arizona State University, Arizona 85287 - 5706, USA;

5. Department of Physics, National University of Singapore, 119077, Singapore;

6. Department of Physics, Hong Kong Baptist University, Hong Kong, China;

7. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: As the 21st-century's science, the complexity science is attracting wide attention from the scientific community. In this paper, we highlight some relevant key issues, including network-based synchronization, traffic dynamics on networks, structure and evolution of information networks in the next generation, evolutionary cooperating game, complexity of biological networks, human dynamics and info-physics

收稿日期: 2008 - 10 - 10

基金项目: 国家基础研究计划 973 项目 (2006CB705500); 国家自然科学基金 (60744003, 10635040, 10532060, 10472116); 中国科学院院长基金特别支持项目计划《复杂网络的结构与功能及动力学性质研究》; 高等学校博士学科点专项科研基金 (20060358065)

作者简介: 汪秉宏 (1944 -), 男, 江西婺源人, 教授, 中国科学技术大学理论物理研究所所长, 主要研究方向为复杂系统理论、复杂性科学、统计物理、计算物理和非线性动力学。

Key words: complex systems; complexity; complex networks; human dynamics; infophysics

1 引言

复杂性科学,复杂系统的模型与行为,复杂网络的结构、功能和动力学的研究是从 20 世纪末以来出现的科学研究的新热点。特别是复杂网络,吸引了国内外越来越多的科学工作者的注意^[1]。研究方法是把各种各样复杂系统简化为节点以及连接节点的边的集合。节点代表系统的基本单元,边代表各个单元之间的相互作用。每个节点和每条边的性质都可以加上称为“权重”和“强度”的更多描述。对于复杂系统,这是一种合适的、抓住本质的抽象,因此已经取得了许多瞩目的成就。复杂网络研究的起源可以追溯到数学中的随机图论,随着物理学家的介入,现代统计物理方法、非线性动力学等分析方法被广泛应用于复杂网络的研究工作中,这些方法大大带动了复杂网络的研究工作,并取得了丰硕的成果。当前,复杂网络已经广泛应用于各个科学技术领域,例如道路交通运输网、航空线网、电力网、互联网、万维网、神经网络、生物中的蛋白-蛋白相互作用网和基因调控网络、各种通讯网络、各种社会网络、科学家合作网、科学期刊引文网等等。通过最近几年来对于各种不同复杂网络的结构、功能和动力学的研究,人们已经对于广泛的复杂系统的行为和基本规律获得了前所未有的理解,并在实际的工业技术层面上付诸应用^[2-8]。

毋庸讳言,人类对于复杂系统的认识和理解还只是万里长征刚刚走出第一步。对于复杂网络的结构和机理的探究也是方兴未艾,远未穷尽。当前,人们关注的复杂网络研究课题有:如何对于更广泛的实际复杂系统和大量真实复杂网络的各种统计参量进行实证研究并提取它们的共性?如何建立导致一类网络共性的网络演化模型?如何确定网络上的流动性(例如流行病的传播路径和速度)?如何刻画传输网络对于扰动和袭击的抵抗能力与恢复能力?什么是互联网等通讯网络上的信息发送和信息搜索的最佳策略和方案?各种网络可能具有怎样的级联动力学过程?如何疏解实际通讯网络和交通运输网络的瓶颈堵塞问题?网络的动力学同步如何依赖于其拓扑结构?等等。

基于如上考虑,中国科学技术大学复杂系统研究组近年来围绕以下 12 个研究课题开展了关于复杂系统及复杂网络的理论与应用的一些研究工作,取得若干初步的成果:

- 1) 非线性系统与复杂网络的相互作用、同步及其优化控制理论。
- 2) 网络的级联过程与抗毁性。
- 3) 自然和社会中合作的产生与进化及博弈模型的刻画。
- 4) 人类行为频率间隔分布的实证统计及动力学模型。
- 5) 自驱动个体的群集运动的形成、演化、控制模型。
- 6) 信息物理学。
- 7) 城市交通瓶颈的时空结构演化。
- 8) 基于网络结构的交通流、舆论传播、流行病扩散。
- 9) 新一代互联网的结构、动力学与信息传输协议的可能改进方案。
- 10) 生命复杂系统、生物复杂网络。
- 11) 复杂适应系统。
- 12) 金融物理。

我们的研究方法是:把网络上的交通流、信息流、同步、传播、级联和相应的复杂系统动态演化模型结合起来进行研究。着重研究了:交通网络和信息传输网络上拥堵形成与传播的机制、交通动力学的微观描述、互联网最佳路由的选择、网络结构的优化设计以及传输增强策略。希望理解:网络拓扑结构及网络节点局域动力学对级联行为有什么影响?级联动力学过程可否进行预报和控制并应用于抗灾变、抗攻击策略及网络同步性能控制策略的设计?广义同步与复杂系统之斑图有怎样的关系?如何理解生物群体中的部分同步化与间歇同步化现象?为了重现真实复杂系统的统计特征,本文提出一些具有网络结构的复杂系统模型,特别

是提出了复杂适应系统的一些自组织演化模型,例如生物网络模型、大脑功能网络模型、经济统计模型等等。并对这些模型的协同、博弈和共存行为进行了动力学与统计物理方法的探讨。

以下,分 7 个专题作较为详细的阐述。

2 关于网络同步的研究

迄今为止,虽然还不能得到网络结构与网络同步性质之间精确的数值关系,但已经获得了一些网络的结构特征量对网络同步能力影响的定性结论,利用这些结论,各种各样提高网络同步能力的方法纷纷涌现。这些方法要么是在网络结构不变的情况下通过调节节点间耦合方式的方法使得网络的同步能力得以提高,要么是在对称耦合情况下通过对网络结构的微扰来实现提高网络同步的目的。这些研究都基于网络上全同振子的精确同步问题,但在实际系统中,动力学系统往往是非全同的,网络中还有可能存在多种类型的振子,并且真实的网络通常具有群落结构,该结构的存在会使得网络的同步性质更为复杂。另外,真实的动力学网络更多的是处于部分同步状态,网络中存在多个各自演化的同步簇……,要完成上述问题的解答还需要如下几方面的工作:

- 1) 选择有效的同步非全同振子的耦合方式。
- 2) 分析存在多种振子类型的网络的部分同步规律。
- 3) 寻找群落网络的细致同步规律。
- 4) 确定网络的结构与网络的部分同步状态之间的关系。

关于同步方面的研究进展,有兴趣的读者可以参考综述文献 [9 - 11]。

3 关于交通网络及通讯网络上的交通流研究

通讯网络,例如互联网、电话网络、点对点网络在当今世界起着极其重要的作用。随着通讯网络的日益增大,信息交通的拥塞越来越频繁地出现。在有限资源的条件下如何缓解拥塞,保证信息交通正常和高效地传输成为越来越紧迫的问题。到目前为止,信息网络这种庞大的复杂系统的动力学特性还未被充分地了解和认识,这是摆在研究人员面前的首要问题。通过建立信息交通模型来重现实证观测成为研究信息交通的动力学特性重要的手段之一。在过去几年中,由于复杂网络理论的迅猛发展,人们发现通讯网路普遍具有小世界特性和无标度特性。在同时具有小世界特性和无标度特性的网络上研究信息交通动力学成为必然的途径。目前信息交通研究所面临的问题还很多,主要有:

- 1) 如何获得更详细和全面的通讯网络的实证数据。以前的实证研究获得的绝大部分是通讯网络局部的数据,这对于研究通讯网络上的信息交通动力学的整体性质存在局限性。
- 2) 如何建立更加精确、更加符合实际情况的信息交通模型。信息交通建模既要精确,能够反映信息交通的本质特性,同时又要尽量简单,便于对交通流的动力学特性进行分析,这是信息交通建模面临的挑战之一。
- 3) 在信息交通建模的基础上如何提出更加准确的动力学量来刻画交通动力学的特性是有待解决的问题。提出更本质的动力学量来刻画交通行为更深层次的本质特性对于人们认识了解,进而控制交通拥塞具有很重要的意义。
- 4) 如何提出更加有效的交通拥塞控制是最终目标。在充分深刻地理解上述问题的基础上才有可能提出更加切合实际、行之有效的信息交通拥塞控制策略。

目前人们对信息交通动力学的认识还远远不够,还有很多有意义的问题等待我们去探索。关于网络上的信息交通动力学,有兴趣的读者可以参考综述文献 [9 - 11]。

4 新一代信息网络的结构与动力学研究

从十五计划开始,中国已经开始着手建设下一代高性能信息网络。下一代高性能信息网络的特点有 T

比特级光传输、T比特级自动交换和 T比特级路由。新一代多业务运营管控协同支撑环境,依托分布式、层次化的网络结构,提供对多种业务的支持,而且需要具有高可靠性和良好的可扩展性。随着网络用户及业务种类的增长,下一代高性能信息网络应该具有什么样的拓扑结构,网络面临的各种动力学行为对结构会提出什么样的要求?明确这些问题,对于定量地分析下一代信息网络的可靠性,以及可扩展性至关重要。近年来兴起的复杂网络理论可以使我们从还原论和系统论结合的角度,对下一代高性能信息网络的结构及其动力学特性进行定量研究。

系统将支持各类业务所需的功能分解为若干具有适当颗粒度的、定义良好的功能节点。物理网络上的若干具有特定功能的功能节点以一定的方式连接,构成某类业务流程。功能节点及其之间的连接形成了逻辑网络。功能节点之间的连接由业务流程和上下文关系确定,决定了网络的逻辑拓扑结构。业务需求的变化(用户对不同种类业务需求的改变、新业务需求的出现)和系统自身状态的改变(如网络部分链路的拥塞、某个节点的失效或部分失效)驱动业务流程的重新组织,从而导致逻辑网络拓扑结构的改变系统结构决定系统功能,新一代多业务运营系统的拓扑结构直接决定了其可以提供的各种服务的质量、安全性和可靠性。系统具有怎样的拓扑结构?与一般的互联网具有怎样的本质区别?这样的结构能否承载如此之多的业务服务?随着用户和提供的服务种类的增多,网络是否还具有高度的可靠性和安全性?这些问题的解决都需要我们从理论角度建立新一代多业务运营系统的动态演化模型,刻画系统的独特结构特征,并且研究系统上的各种动力学行为与拓扑结构之间的关系^[12]。例如网络上的鲁棒性、同步能力和高可靠性等动力学行为对网络结构有何影响与要求?如何构建新一代多业务运营系统在固定逻辑结构下的双层有向加权网络模型?新一代多业务运营系统上的最佳路由策略是什么?流量负载均衡与网络结构有什么关系?新一代多业务运营系统的同步能力、抗毁性与网络结构有何关系?新一代多业务运营系统上的级联效应与网络结构有何关系?等等。

5 关于合作进化与基于网络的博弈模型的研究

自 1950年 Nash所做出的开创性工作以来,博弈成为了一门系统理论,并被广泛应用到人类社会、特别是经济行为当中。美国的反托拉斯法案就是基于 Nash的理论提出的。博弈论被认为是研究自然和人类社会中普遍存在的合作行为最为有力的手段,理解各种复杂系统中合作和竞争关系的演化以及合作产生的条件是一个具有深远意义且备受关注的课题。

虽然博弈论以及各种博弈模型是基于社会经济中存在的现象提出的,但是由于博弈模型刻画的合作竞争机制也普遍存在于自然生态系统中,因此也引起了越来越多生物学家们的关注。在生物界,任何生命体生存的最终目标是使其自身的基因得到延续。自私的个体相对于倾向利他的个体往往能够获得更多的资源,从而在生存竞争中占有优势。依据达尔文进化论中适者生存的观点,获得生存优势的生物个体更容易将自身的基因延续下去。从这个角度讲,人和动物的本质都是自私的。博弈模型恰好反映了自私的个体之间的合作竞争关系,能够很好地刻画生物系统中生物体之间的相互作用关系及演化动力学。

然而,不论在自然或是社会系统中,博弈论告诉我们自私个体博弈的结果必然是背叛。这显然是一个和实际情况不完全吻合的结论。社会经济活动中的绝大多数任务不可能由单人完成,需要群体的分工和合作。在自然界中,同种以及异种生物体之间的合作也是一种普遍的现象,例如蚂蚁、蜜蜂、群居哺乳动物等。那么自然要提出一个很重要的问题:为什么自私的个体组成的群体会产生合作行为,存在什么样的机制,以及什么样的条件才会有合作行为涌现?这是一个跨领域和跨学科的问题。解答这个问题对理解自然界从生态层次甚至基因层次的演化意义深远。

到目前为止,博弈行为的研究还远未成熟,很多问题有待解决,包括合作涌现的条件、以及促进合作的方式等。另一方面,因为博弈无处不在,例如经济系统、交通系统等,如何将博弈论应用到这些系统中,使经济系统更加稳定,经纪人的行为更加健康,缓解拥塞从而使交通系统更加高效是博弈论关注的更加具有实际意义的重要课题。

6 关于生物学复杂网络研究

还原论思想指导下的生命科学领域取得了辉煌的进展,成为当前最具有活力的研究领域之一。无论是科技论文数量和质量,还是各国对该领域的资金支持都处于众学科领域的前列。但是,随着研究的深入,还原论思想的缺陷日益暴露无遗。从众多元素之间的相互关系、从系统动力学角度重新审视生命科学中的问题,成为当前该领域的共识。统治生命科学的中心法则,在近年来的系统生物学研究中被抛弃。实际上生物网络的问题是复杂网络理论发生发展的客观基础,也是复杂网络理论的核心归宿之一。

尽管大量的生物网络文章在 Nature, Science 等刊物上发表,人们对生物网络的一些基本结构和动力学特征有了粗浅的认识,但是系统生物学仍然处于起步阶段,一系列的基本问题需要澄清。

1) 生物网络的重构问题。生物网络研究的技术基础是高通量测试技术。从高通量数据取得诸多元素之间的网络关系,是当前面临的基本挑战之一。由于测试技术以及诸多环节带来的噪声的影响,以及测试数据量远小于海量的元素之间的关系,使得该问题不只是一个数学意义上的反问题,必须引入生物信息知识对该问题进行有效限制。实际上我们现在采用的生物网络,可靠性难于满足研究要求。

2) 生物网络结构决定功能,而网络动力学是结构和功能的桥梁。生物网络功能的实现过程,是物质、能量、信号、信息等在网络上的传播过程。因此网络结构如何影响动力学过程是另一个基本挑战。这里需要引入具有生物意义的网络结构测量量、网络不同尺度上的动力学行为以及动力学特征与生物功能的关系。

3) 生物网络在医学上的应用。癌症、糖尿病、艾滋病等当前人类面临的疑难医学问题,采用生物网络方法技术进行研究,有望取得长足进展。这里需要澄清一个概念,复杂网络作为一个崭新的研究思想,不仅仅限于生物网络。实际上现在的任务是从复杂网络的观念出发,重新认识生物问题。因此,系统生物学的含义不仅仅是生物相关的网络问题,而是从复杂网络观点认识生命科学中的问题,其地位应该与还原论相当。

7 关于人类行为的动力学模型研究

对人类行为进行科学而系统的研究,或始于 Waston 和 Skinner 的行为主义流派——如此算来,也不过百年历史。尽管这 100 年里,对人类行为的理解一直是社会学、心理学和经济学共同关注的焦点,但人类自身的复杂性和多样性,对一切科学的尝试来说都是巨大的挑战。事实上,到目前为止,绝大多数研究报道都是基于临床个体资料或者实验室数据,绝大多数命题和结论都是定性描述的。因此,至少有两个问题是亟待解决的:这些实验室结论是否能够很好地描述人们在真实生活中表现出来的行为特性?能不能建立定量化的行为理论?

Barabási 在 2005 年发表于《自然》的一篇论文为解决这两个问题提供了一个可能的起点^[13]: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。Barabási 发现人们从事特定活动的行为具有阵发和胖尾的特性:在非常长的时间内可能了无一事,而这些长长的空白与空白之间则被阵发的密集活动所填充。从电邮应答到信件回复,从期货交易到图书借阅,从网页浏览到在线游戏……,这样的例子比比皆是——这些发现开辟了名为人类动力学的一个新方向^[14-15]。当前在风险评估和通讯问题中使用的人类动力学模型都假设人类行为的时发性质可以用泊松过程描述,Barabási 等人的发现向这个基本假设提出了重大挑战,具有特别重要的理论意义。除了巨大的理论价值,揭示支配各种人类活动时间选择的机制还具有重大的实用化和商业化潜力。首先,模拟人类行为对于建立诸如虚拟社区、谣言传播和市场行为等大规模社会组织模型是绝对必要的。其次,深层次理解人类行为的统计特性对于电话公司更好的资源分配和定价、网络和街区零售业改进仓储和服务设置等等都是至关重要的。人类动力学这个方向从提出到现在不过两年,虽尚处襁褓之中,却隐现远大前景。两年内仅在《自然》和《物理评论》上就发表了近 20 篇相关研究论文,是今后复杂性科学研究可能的焦点问题。

特别地,我们认为以下 4 个问题是重点:1) 进一步深入挖掘真实人类动力学系统的统计特性,注意其共性和个性;2) 给出非泊松统计现象出现的理论解释;3) 人类行为非泊松统计的时间特性是如何影响人类群

集行为的动力学特征,例如社会疾病的传播和交通运输问题;4)如何将这一新发现应用到实际服务系统中去。有兴趣的读者可以参考文献[16-20]。

8 基于互联网的信息物理研究

信息技术的快速发展带来了理论研究和实际应用上的巨大挑战,其重大的社会经济价值吸引了来自各个学科的共同关注。最近,很多理论物理学家,特别是原来从事统计力学和非线性动力学研究的物理学家,开始致力于信息系统的研究。事实上,信息系统,如互联网和万维网,都是典型的多体关联系统。分析这类系统的群集动力学,恰恰正是统计力学的强项。信息物理所描述的是一个正在形成的交叉科学的新方向——利用物理学,特别是统计力学和非线性动力学的概念和方法研究信息系统。信息物理学不仅仅给传统的信息科学开辟了新的视野,从而在概念上获得一些更深入的认识,而且,它能够切实有效地解决一些信息科学中的重大理论及实践问题。总的来说,信息物理研究的对象与信息科学别无二致,如果说有什么不同,就是前者更关注与计算机互联网和万维网直接相关的理论和应用。从方法论上来说,信息物理虽然汲取和继承了传统信息科学的成果,但是两者的差异是明显的——信息物理主要是应用统计力学和非线性动力学的方法和概念。而正是这种差异,使得信息物理的研究有望发现传统信息理论未曾发现或未曾注意的现象,解释传统信息理论难以解释的现象,提出解决传统信息理论难以解决的问题的全新方案和思路。信息物理的研究内容较为广泛,事实上,一切利用物理手法研究信息系统的工作都可以称之为信息物理。此处列出一些研究相对集中的方向。

8.1 数据挖掘与个性化推荐

在当今信息爆炸的时代,互联网(Internet)和万维网(World Wide Web,简称WWW)都以指数形式在增长,各种各样的信息随时随地包围着我们,人们越来越难以在信息的海洋中找到自己感兴趣的信息。推荐系统是唯—有希望解决信息泛滥的手段。推荐问题本质上就是通过统计分析用户选择和评估产品的历史信息,猜测用户的喜好,并代替用户自动评估他从未看过的产品。借鉴统计物理的理论和方法,设计精确的个性化推荐算法,是本方向研究的中心。另外,如何对算法精确性和个性化程度进行评估,也是重要的研究课题。传统的推荐算法大都是基于协同过滤技术或基于文本获取技术,具有时间复杂性高,算法精确度低和难以处理动态数据的缺点。最近,一些经典的物理理论,包括热传导和物质扩散被应用于推荐算法中,得到了复杂性低且精确度高的算法^[21-24]。进一步地,统计力学中的中心概念,熵和自由能,也被引入来衡量算法的个性化程度。

8.2 Web中的用户行为分析

定量研究Web用户行为有助于进一步理解人类行为,并为更好地设计基于Web的社区提供借鉴。这方面的研究主要包括4个方面:1)分析人们网上行为的时间特性,最近的研究发现用户回复电子邮件和浏览网页的回复时间和间隔时间都服从幂律分布,该发现有助于理解Web访问量的统计特征;2)网络社区中的意见动力学,也就是观察一个意见或一个谣言是如何在网络社区中传播或消散的,这对社会心理学相关研究和舆情监控有重大意义^[25];3)如何通过对用户行为统计分析来判断和识别哪些用户是正常用户,哪些用户是希望通过网络社区获得不正当利益的欺骗者;4)定量研究信誉度在网络社区中扮演的重要角色,以及如何设计相关的策略以提高用户对网站的黏合度^[26]。

8.3 Internet与WWW的结构与演化机制

Internet的体系结构直接决定了其可以提供的各种服务的质量、安全性和可靠性。WWW的超链接结构则极大影响了信息导航的质量。Internet具有怎样的拓扑结构?这样的结构能否承载越来越多的服务?随着用户和提供的服务种类的增多,网络流量的增加,网络是否还具有高度的可靠性和安全性?WWW的演化是向着更易搜索更易导航的方向发展,还是相反?这些问题的解决都需要深入认识Internet和WWW的拓扑特征,以及其演化行为。相关的研究将在3个层次上展开。最底层是提出量化Internet和WWW网络结构的特征量以及如何精确获取其网络结构的抽样算法,中间层面是通过对静态和动态网络结构的分析,初步

勾勒出 Internet 和 WWW 的结构特性和演化规律,最终的目标是建立较精确的 Internet 和 WWW 的演化模型,并基于此进行预测,甚至调控。

8.4 Internet 与 WWW 上的动力学行为研究

本方向关注发生在 Internet 和 WWW 上的动力学行为。一方面,大量的研究集中在对互联网流量和网页访问量的时间序列分析上,通过这种分析揭示深层次的动力学,或至少为动力学模型建立评价标准。另一方面,研究人员在真实的 Internet 和 WWW 或相应网络模型上研究病毒的传播动力学^[27]、信息包的交通动力学^[12]、故障的级联动力学^[28]等等,分析网络上病毒的爆炸性增长、网络交通的突发性拥塞、路由器故障造成级联反应等等。进一步地,在这些研究的基础上,可以设计有效地控制病毒传播,提高信息包交换效率的新策略。在这些研究中,很多物理理论,例如相变与临界性理论,逾渗理论等等,发挥了越来越重要的作用。特别地,中国科学技术大学复杂系统研究组将相变理论引入网络交通动力学的分析中,提出了一种衡量网络信息包吞吐量的度量方法,并在此基础上提出了一种高效的路由算法。此路由算法复杂性和最短路算法一致,但在模拟真实互联网的网络模型中,其吞吐量可以达到最短路算法的 10 倍或以上^[29]。该工作是国际上首篇讨论复杂网络路由算法的论文,2006 年发表于《美国物理评论 E》后,受到了广泛的重视。截止到 2008 年 10 月 SC 引|用达到了 50 次,在 2006 年该期刊发表的 2 452 篇论文中引用排名第 2。该文所提出的算法被休斯顿小组誉为网络路由的三大基准算法之一。

参考文献:

- [1] 汪秉宏,周涛,何大韧. 统计物理学与复杂系统研究最新发展趋势分析 [J]. 中国基础科学, 2005, 3: 37 - 43.
Wang Binghong, Zhou Tao, He Daren. Development trend analysis of the statistical physics and complex systems [J]. Chinese Basic Science, 2005, 3: 37 - 43.
- [2] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2006
- [3] 郭雷,许晓鸣. 复杂网络 [M]. 上海:上海科技教育出版社,2006
- [4] 陈关荣,许晓鸣. 复杂网络理论及应用 [M]. 香港:上海系统科学出版社,2008
- [5] 吴金闪,狄增如. 从统计物理学看复杂网络研究 [J]. 物理学进展, 2004, 24: 18 - 46.
Wu Jinshan, Di Zengru. Research of complex networks from the viewpoint of statistical physics [J]. Progress in Physics, 2004, 24: 18 - 46.
- [6] 周涛,柏文洁,汪秉宏,等. 复杂网络研究概述 [J]. 物理, 2005, 34: 31 - 36.
Zhou Tao, Bai Wenjie, Wang Binghong, et al. Complex network research [J]. Physics, 2005, 34: 31 - 36.
- [7] 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.
Fang Jinqing, Wang Xiaofan, Zheng Zhigang, et al. New interdisciplinary science: network science (I) [J]. Progress in Physics, 2007, 27 (3): 239 - 343.
- [8] 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.
Fang Jinqing, Wang Xiaofan, Zheng Zhigang, et al. New interdisciplinary science: network science (II) [J]. Progress in Physics, 2007, 27 (4): 361 - 448.
- [9] 赵明,汪秉宏,蒋品群,等. 复杂网络上动力系统同步的研究进展 [J]. 物理学进展. 2005, 25: 273 - 295.
Zhao Ming, Wang Binghong, Jiang Pinqun, et al. Progress in the synchronization on complex networks [J]. Progress in Physics, 2005, 25: 273 - 295.
- [10] 赵明,周涛,陈关荣,等. 复杂网络上动力系统同步的研究进展 II——如何提高网络的同步能力 [J]. 物理学进展, 2008, 28 (1): 22 - 34.
Zhao Ming, Zhou Tao, Chen Guanrong, et al. Progress in the synchronization on complex networks (II) [J]. Progress in Physics, 2008, 28 (1): 22 - 34.
- [11] Zhao M, Zhou T, Chen G, et al. Enhancing the network synchronizability [J]. Front Phys China, 2007, 2 (4): 460 - 468
- [12] Wang B H, Zhou T, Traffic flow and efficient routing on scale-free networks: a survey [J]. J Korean Phys Soc, 2007, 50: 134 - 141.

- [13] Barabási A L. The origin of bursts and heavy tails in human dynamics[J]. *Nature* 2005, 435: 207 - 211.
- [14] 郭进利,周涛,李季明,等. 人类动力学模型 [M]. 香港:上海系统科学出版社, 2008
- [15] Zhou T, Han X P, Wang B H, Towards the understanding of human dynamics[C]//Burguete M, Lam L. *Science Matters-Humanities as Complex Systems* Singapore: World Scientific Publishing, 2008: 207 - 233.
- [16] 韩筱璞,周涛,汪秉宏. 基于自适应调节的人类动力学模型 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2007, 4(4): 1 - 5.
Han Xiaopu, Zhou Tao, Wang Binghong Human dynamical model based on the adaptive adjustment[J]. *Complex Systems and Complexity Science* 2007, 4(4): 1 - 5.
- [17] 周涛. 在线电影点播中的人类动力学模式 [J]. *复杂系统与复杂性科学*. 2008, 5(1): 1 - 5.
Zhou Tao Human activity pattern on on-line movie watching[J]. *Complex Systems and Complexity Science* 2008, 5(1): 1 - 5.
- [18] Han X P, Zhou T, Wang B H. Modeling human dynamics with adaptive interest[J]. *New J Phys*, 2008, 10: 073010.
- [19] Zhou T, Kiet H A T, Kim B J, et al Role of activity in human dynamics[J]. *Europhys Lett*, 2008, 82: 28002
- [20] Li N N, Zhang N, Zhou T. Empirical analysis on temporal statistics of human correspondence patterns[J]. *Physica A*, 2008, 387: 6391 - 6394.
- [21] Zhang Y C, Blattner M, Yu Y K Heat conduction process on community networks as a recommendation model[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 154301.
- [22] Zhang Y C, Medo M, Ren J, et al Recommendation model based on opinion diffusion[J]. *Europhys Lett*, 2008, 80: 68003
- [23] Zhou T, Ren J, Medo M, et al Bipartite network projection and personal recommendation[J]. *Phys Rev E*, 2007, 76: 046115.
- [24] Zhou T, Jiang L L, Su R Q, et al Effect of initial configuration on network-based recommendation[J]. *Europhys Lett*, 2008, 81: 58004
- [25] Jiang L L, Hua D Y, Zhu J F, et al Opinion dynamics on directed small-world networks[J]. *Eur Phys J B*, 2008, 65: 251.
- [26] Masum H, Zhang Y C. Manifesto for the reputation society[DB/OL]. [2008 - 06 - 20]. http://www.firstmonday.org/issues/issue_9_7/masum.
- [27] 周涛,傅忠谦,牛永伟,等. 复杂网络上传播动力学研究综述 [J]. *自然科学进展*. 2005, 15(5): 513 - 518
Zhou Tao, Fu Zhongqian, Niu Yongwei, et al Complex networks dynamics research[J]. *Progress in Nature Science*, 2005, 15(5): 513 - 518
- [28] Zhou T, Wang B H. Catastrophes in scale-free networks[J]. *Chin Phys Lett*, 2005, 22: 1072 - 1075.
- [29] Yan G, Zhou T, Hu B, et al Efficient routing on complex networks[J]. *Phys Rev E*, 2006, 73: 046108