

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8874.2011.S0.022

# 系统科学前沿《复杂网络理论》课程建设 及教学方法研究

赵城利, 张雪, 姚静, 易东云

(国防科学技术大学理学院, 湖南长沙 410073)

**[摘要]** 近年来,旨在探索复杂系统结构和功能的复杂网络理论引起了国际科学界的普遍重视,已成为数理科学、生命科学、社会科学、技术科学的研究热点。通过对复杂网络理论课程的特点和规律进行归纳,详细阐述了符合课程特点的教学内容组织、教学方式以及实践性环节等教学模式,并对课程一系列创新性教学方法进行了有益探索。最后指出了复杂网络对系统科学研究教学的重要意义。

**[关键词]** 系统科学; 复杂网络; 课程建设

**[中图分类号]** G642 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-8874(2011)S0-0066-04

## A Study on Teaching Methods and the Construction of Complex Network Theory

ZHAO Cheng-li, ZHANG Xue, YAO Jing, YI Dong-yun

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In recent years, complex network theory, which aims to explore the structure and function of complex systems, attracts widespread attention of the international scientific field and has become the focus for research in mathematical science, life science, social science, and technology science. Based on the summary of its characteristics and law, this paper elaborates on the course content organization, teaching methods and practical aspects, which are in line with the characteristics of the complex network theory. Some useful exploration is also conducted into a series of innovative teaching methods. The final part discusses the significance of complex network for the study and teaching of systems science.

**Key words:** systems science; complex network; construction of courses

### 一、复杂网络理论简介

2000年,当代最富有影响的思想家之一——史蒂芬·霍金指出<sup>[1]</sup>:“我相信,下一个世纪将是复杂性科学的世纪”。复杂性科学及其复杂性研究在世纪之交引起了普遍关注。复杂网络是大量真实复杂系统的拓扑抽象,从Internet到WWW,从大型电力网络到全球交通网络,从生物体中的大脑到各种新陈代谢网络,从科研合作网络到各种经济、政治、社会关系网络等,人们已经生活在一个充满着各种各样的复杂网络的世界中。从20世纪末开始,复杂网络研究正渗透到数理学科、生命学科和工程学科等众多不同的领域,对复杂网络的定量与定性特征的科学研究已成为网络时代科学研究中一个极其重要的挑战性课题,甚至被称为“网络的新科学”<sup>[2,3]</sup>。

1998年6月美国康奈尔大学理论和应用力学系的博士生Watts及其导师、非线性动力学专家Strogatz教授在《自然》上发表了《“小世界”网络的集体动力学》<sup>[4]</sup>,1999年10月美国圣母大学物理系Barabási教授及其博士生Albert在《科学》上发表的《随机网络中标度的涌现》<sup>[5]</sup>,这两篇文章分别揭示了复杂网络的小世界特征和无标度性质,并建立了相应的模型以阐述这些特性的产生机理,标志着复杂网络研究新纪元的开始。

《复杂网络理论》是系统科学系列课程中的前沿课程,旨在系统地介绍复杂网络的基础知识和最新研究进展。同时,本课程是系统科学博士研究生的必修课程。通过本课程的学习,使学员掌握复杂网络的基本理论及其最新研究进展。并通过文献阅读,了解复杂网络在相关学科的应用,

**[收稿日期]** 2011-07-22

**[基金项目]** 国防科技大学研究生重点建设课程项目(1151B008)

**[作者简介]** 赵城利(1979-),男,吉林长春人,国防科技大学理学院讲师,硕士,主要研究方向为复杂系统理论与海量数据处理。

为进一步的科学研究、工程应用提供理论与技术准备。

## 二、课程的组织与实施

### (一) 理论与应用相结合的教学内容组织

《复杂网络理论》课程教学内容主要分为引言、复杂网络模型以及复杂网络上的过程三个部分。三个部分对理论与应用各个环节各有侧重。

(1) 引言：主要介绍复杂网络的一般概念以及复杂网络的研究简史。此部分注重复杂网络历史发展及其作用意义的介绍。

(2) 复杂网络模型：包括随机图模型、拓展的随机图模型、小世界网络、无尺度网络以及演化网络理论。此部分注重复杂网络理论各种基本模型及基于以上模型对复杂网络的理论分析。

(3) 复杂网络上的过程：复杂网络上的传播动力学（复杂网络的传播临界值理论、复杂网络的免疫策略、复杂网络的传播动力学、计算机病毒在 Internet 上的传播、复杂网络中的其他传播现象）、相继故障（复杂网络相继故障的动态模型分析、基于耦合映象格子的相继故障模型）、复杂网络上的搜索（社会网络搜索、几种复杂网络搜索策略分析、P2P 网络中的搜索、复杂网络中的搜索和拥塞）、复杂网络中的社团结构（Kernighan - Lin 算法、谱平分法、分裂算法、凝聚算法、派系过滤算法）和复杂网络上同步与控制（复杂网络的同步判据、改进复杂网络同步的方法、规则网络时空混沌的牵制控制、无标度动态网络的牵制控制等）。此部分注重复杂网络的应用。

### (二) 课上讲授与课后实践相补充的教学方式

在教学方式上，根据复杂网络理论的特点和一般教学规律，本课程采用教师课堂讲授、学生课后实践相结合、相互补充的教学方式。努力做到课上教学与课后实践互为补充，真正实现教学指导实践，实践促进教学的良性循环。

课上讲授过程中，我们一方面注重复杂网络本身的基本概念、基础理论和主要模型方法的全面讲解和深入剖析，如复杂网络中包括随机图理论、拓展的随机图模型、小世界网络、无尺度网络以及演化网络理论等基础理论的详细阐述和分析；另一方面我们也注重理论联系实际、理论应用方法的介绍。以实际案例出发，以复杂网络理论为指导，去分析和解决实际中的复杂网络问题。如实际复杂网络中的传播问题、搜索问题、社团结构发现问题以及网络中的同步与控制问题。

课后实践过程中，鼓励学生依据课上讲授的复杂网络理论与方法以及复杂网络解决实际问题的一般过程，去分析自己实际科研项目中的相关复杂网络问题，抽象成相关的复杂网络数学模型，用复杂网络的度量去测量实际的问题，最终解决实际问题。使学生真正了解复杂网络在相关学科的应用，真正为进一步的科学研究、工程应用提供理论与技术准备。

同时，由于复杂网络理论前沿性的特点，为使学生能够了解到国际复杂网络研究的最新动向与咨询，课程还将

特别邀请享有声誉的国际国内专家前来讲学报告，进一步丰富本课程的教学内容。特邀专家的讲学报告在学期前就提前规划好，例如：2009 年秋季，邀请了美国麻省理工学院群体智能中心的 Peter Gloor 教授作了“合作创新网络”（Collaborative Innovation Network）方面的系列报告；2010 年秋季，邀请了北京大学数学科学学院姚远研究员作了“数据与拓扑”（Topology and Data）方面的系列报告。

### (三) 互动论文与综合项目并行的实践性环节

在实践性教学环节方面，注重学员切实掌握系统科学的基本理论的同时，大幅提高了实践性教学比例，强化实验教学环节，使得实践性教学环节的学时比例达到 20%。借鉴国外知名大学的教学先进模式，增设了互动论文报告与综合实践项目。

(1) 互动论文报告（Reaction paper）环节要求学生一次阅读不少于两篇与课程相关的论文，并写出一篇 3 页左右的精短报告，在报告中需要包含阅读论文的主要内容、主要贡献和进行总结；对阅读论文与本课程相关性的讨论；对阅读论文的缺点不足的讨论以及可能未来发展方向的预测。互动论文报告一学期内组织三次，每次每名学生课上报告 20 分钟，并展开讨论。

(2) 综合实践项目（Project）为学生提供了较大的自主性，本环节学生可以结合自己的研究领域进行实践学习研究。实践项目分为三种类型：一是实验分析：对某一具体网络应用已知的度量算法或模型进行实验分析。此项实验分析可基于现有的开源数据进行实验，更鼓励自己收集数据进行分析；二是理论分析：对与复杂网络密切相关的某一算法或模型进行严格的理论分析，这项要求学生有较强的理论分析与推导能力；三是有深度的综述：对复杂网络研究中的某一方向进行有深度的综述，综述中应包括该方向国内外研究现状、已有方法的对比分析以及未来发展趋势。综合实践项目将组织学生在课程开始时即着手进行选题，在学期末提交一篇英文撰写的 10 - 15 页的研究报告，并力争通过修改发表在国际相关期刊上。

## 三、教学方法探索

在《复杂网络理论》的教学过程中，我们根据复杂网络理论的特点，努力进行教学方法的探索，增强学生对复杂网络理论本身的理解，进一步利用复杂网络这一崭新的研究范式，深刻理解系统科学中的一系列关键核心概念。

### (一) 复杂网络的演进

#### 1、随机网络

欧拉哥尼斯堡问题的解决无意中开创了一个新的数学领域——图论。欧拉富有启发性的工作完成两个多世纪以后，科学界才从研究不同图形的属性转到研究图形或网络的形成原因上。真正的网络是如何形成的？控制网络外观和结构的规则是什么？

直到 20 世纪 50 年代，两个匈牙利的数学家 Paul Erdos 和 Alfred Renyi 对图论做出了革命性的贡献，在历史上首次探讨了理解我们所处的相互关联的宇宙最基本的问题——

网络是如何形成的?他们的解答奠定了随机网络理论的基础。Eros 和 Renyi 忽略不同系统之间的相异性,他们用一个单一的结构描述复杂的网络图,得到了自然界所能提供的最简单解答:随机连接节点。Eros 和 Renyi 认为网络图和它们所代表的世界从根本上来讲是随机的。这一理论对人们思考网络产生了深远的影响。

一直以来,图论是我们用以描述相互链接的宇宙唯一的理论。自从1959年随机网络理论问世以来,它就主宰了有关网络的科学思考。因此,在随机网络成了网络模型的主导的情况下,人们认为真实的复杂网络从根本上来讲都是随机的,复杂性等同于随机性。

## 2、小世界网络

20世纪90年代中期,Watts和他的导师Steven Strogatz开始研究一个问题:我的两个朋友相互认识的可能性有多大?Watts和Strogatz引入了群集系数以说明朋友圈有多紧密,发现社会系统中确实存在群集现象。社会网络的某个属性,只有当它能反映出自然界大多数网络的某种一致属性的时候,科学家才会对它感兴趣。群集现象无所不在(万维网、互联网、公司合资关系网、物种捕食关系的食物链、细胞中分子构成的网络),这使得群集现象由以前认为的独一无二的社会网络特性,变成了复杂网络的共同特性,并对真实的网络都是随机的这一观点提出了挑战。

Watts和Strogatz<sup>[4]</sup>提出了与Eros和Reny的随机网络不同的新模型,首次将群集现象和随机网络的偶然性统一起来,它对于理解小世界问题起到了独一无二的作用,引起了物理学家和数学家的广泛关注。“小世界”是所有网络都具备的一种遗传属性,较小的间隔并不是人类社会特有的属性,大多数网络都具有此特点,这一特点根植于网络的结构之中。

## 3、无尺度网络

从经济体系到细胞等许多复杂系统中都存在中心节点,即具有大量链接的节点。中心节点是大多数网络的基本组成部分,这一事实引起了完全不同科学领域专家的兴趣,从生物学、电脑科学,到生态学,无不如此。他们的发现颠覆了我们对于网络的所有知识。群集现象是Eros和Reny的随机世界观的第一个裂隙,Watts和Strogatz的模型暂时解决了这一危机,使得六度分隔能够成立,而中心节点现象则是对这两种模型的致命打击。为了解释这种具有大量链接的中心节点的存在,必须抛弃随机世界观。

自然界的大多数数量序列都呈钟形的正态分布,这和随机网络的峰状分布很相似。然而在某些情况下,自然界产生的数量序列会按照幂律分布。幂律分布最突出的特点,不仅是其中有许多小事件,而且是许多小事件伴随着少数极大的事件。这种超乎寻常的大事件是不可能存在于钟形的正态曲线内的。在随机网络中,分布中的峰值意味着大多数节点的链接数量都相当,偏离此数量的节点极其少见,因此,随机网络的节点连通性具有自身的尺度特征。在幂律分布的网络中,分布中却缺乏峰值,这说明幂律分布的网络中,不存在具有普遍性的典型节点。我们看到的是连

续的有等级差别的节点,从罕见的中心节点到无数的小节点一级一级分布开来,最大的中心节点后面紧紧跟着两三个较小的中心节点,然后是十几个更小的节点,以此类推,直到最后的无数的小节点。在连续的等级分布中,我们无法找出一个特定的节点,说它能代表其他节点的特性,这样的网络不存在内在的尺度。因此,符合幂律的网络可描述为“无尺度”。经研究发现,自然界中绝大多数真实的网络都符合幂律分布。

## (二) 网络的观点看复杂性

以复杂网络的观点看待复杂系统,系统的复杂性主要体现在以下几个方面:

### 1、结构复杂性

网络连接结构错综复杂,极其混乱。而且网络连接结构随时间变化,如WWW上每天都不停地有页面和连接的产生和删除。此外,节点之间的连接可以具有不同的权重和方向,如神经系统中的突触有强有弱,可以是抑制的也可以是兴奋的。

### 2、节点的复杂性

网络中的节点可能是具有分岔和混沌等复杂非线性行为的动力系统。例如,基因网络中每个节点都具有复杂的时间演化行为。而且,一个网络中可能存在多种不同类型的节点。例如,控制哺乳动物中细胞分裂的生化网络就包含各种各样的基质和酶。

### 3、各种复杂性因素的相互影响

实际的复杂网络受到各种各样因素的影响和作用。例如,耦合神经元重复地被同时激活,那么它们之间的连接就会加强,这被认为是记忆和学习的基础。此外,各种网络之间也存在着密切的联系。例如,电力网络的故障可能会导致Internet流量变慢、金融机构关闭、运输系统失去控制等一系列不同系统之间的连锁反应。

复杂网络是大量复杂系统得以存在的拓扑基础,因此它的研究被认为有助于理解“复杂系统之所以复杂”这一至关重要的问题。

## (三) 复杂系统的形成本质

### 1、富者愈富

Eros和Reny的随机模型是建立在两个简单的假设基础之上:首先,网络节点总数确定,而且在网络的生命周期内都不会改变。其次,所有的节点都是一样的。节点间无差别,随机地相连。真实网络受两个定律的控制:增长和偏好依附。两者必须同时具备,才会生成无尺度网络。没有偏好依附作用的增长网络,会呈现指数等级分布,这和禁止中心节点出现的钟形曲线有些相似。如果网络不增长,就又回到了静态模型,自然无法产生幂律。

演化网络理论体现了网络形成中的单向性,通过把网络看作是随时间延续不断变化的动态系统,无尺度模型就蕴含了新的网络生成理念。由Eros和Reny创建的经典静态模型,是简单地把固定数目的节点和链接组合起来,使模型看起来和所研究的网络的最终形态相似。了解网络的生成机制,就能够正确地模拟网络的构建方式,自然地创

建复杂系统的每一个过程，最终得到的网络模型就会和真实网络相当接近。

## 2、适者生存

Google 打破了对无尺度模型的基本预言，即先到者具有优势。大多数网络中都存在这种“新星效应”。但在无尺度模型中，不存在这种后来者升到主宰地位的空间，因为无尺度模型中所有的节点都是同样的（除链接数量外）。但是在大多数复杂系统中，每个节点都有自己独一无二的节点链接就多。节点永远在为获得联系而竞争，因为在相互联系的世界中，链接数量就代表了生存能力。如公司争夺客户，演员争夺角色，普通人争夺的是社会链接。其他系统中的动态关系更加微妙，如细胞中的分子争夺链接是为了整个生物体的利益。我们都是一个复杂的竞争中的一部分，周围的网络通过等级分布的节点和链接，都反映出这种竞争的特点。

随机网络模型将网络理解为静态的；无尺度模型使得我们了解到网络是动态系统，由于节点和链接的增加而不断变换；适应性模型使我们能够用竞争系统的概念来描述网络。

## 四、结束语

复杂网络理论的创立，对于系统科学的研究具有重要的意义。网络不但是许多复杂系统的结构形态，还可以作

(上接第 62 页)

展方向和趋势。

## 五、课程建设措施

课程将从理论教学、实践教学、教学研究等方面进行建设。

### 1、理论教学

教师从知识传授型向“传授、引导、激发”型转变。使学员在获取武器战斗部基本知识和基本技能的同时，获得独立思考、独立探索和自我创新的能力，激发学习武器弹药的兴趣；

加强传统教学和现代 CAI 技术的有机结合。课程拟采用传统课堂教学、演示教学及实物讨论教学相结合的授课方式。演示教学是指在讲授理论知识的课堂上，把实物、模型等展示给学生，学生通过观察以获得知识的教学方法，这是一个从感性认知到引入理论知识并掌握知识的学习过程。

### 2、实践教学

组织学员就某些典型问题进行课堂或课外讨论，锻炼学员分析问题、解决问题以及团结协作、相互交流的能力；

组织学员观摩战斗部实物模型教室和武器毁伤效应仿真演示互动中心，利用武器战斗部与毁伤效应中心的战斗部结构模型和毁伤仿真结果进行实践教学，体验武器战斗部与现代战争实际的关联，培养学员的联合作战的思想。

为系统结构拓扑特性的模型。一切事物都是相互作用的表现，系统可以认为是相互作用的稳态，物理学研究物体间的最基本的相互作用，化学研究分子间的相互作用，生物学研究生物体之间的相互作用，社会科学研究人和各种人类组织间的相互作用。因此，事物作为系统，其结构可以抽象为网络，各类作用体抽象为网络节点，各种相互作用抽象为节点之间的连接。这样，就可以运用图论和网络分析的理论、方法和工具进行系统结构的拓扑特性研究。系统结构可以描述成网络结构，大多数的复杂系统是动态演化的，是开放自组织的，是规则和随机件并行的。复杂网络的研究成果反映了大多数复杂系统的这些基本特性，使得对这些系统的研究取得了实质性的突破。

## [参考文献]

- [1] Stephen Hawking. Unified theory's getting closer, Hawking predicts. San Jose Mercury News, 2000.
- [2] Albert-László Barabási. Linked: The New Science of Networks, Massachusetts: Persus Publishing, 2002.
- [3] Watts D J. The 'new' science of networks, Annual Review of Sociology, 2004, 30: 243-270.
- [4] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks, Nature, 1998.
- [5] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks, Science, 1999, 286(5439):509-512.
- [6] 许国志等. 系统科学[M]. 上海:上海科技教育出版社,2000.
- [7] 汪小帆等. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

(责任编辑:林聪榕)

## 3、教学研究

开展提高教学效果、教学效率的课堂教学方法与课外训练方法研究。实现传统教学方法与现代教育技术的相互融合，发挥各自优势，创建效果好、效率高的教学方法。

采取走出去、请进来的做法，实地了解我军基层部队的情况和需求，准确定位课程内容，及时把握装备发展动态，不断充实教学内涵。

## 六、结论

本文阐述了“武器战斗部投射与毁伤”课程的地位和作用，通过与国内外相关课程开设情况对比分析，认为开设该门课程对于提高我校人才培养质量非常重要。基于课程建设目标和建设内容，提出了具体建设措施。

## [参考文献]

- [1] 王云峰, 定松柏. 强化军事基础素质, 培养新型初级指挥人才[J]. 解放军理工大学学报(综合版), 2006, 7(4): 77-79.
- [2] 冯旭哲, 张冠. “基础合训”专业基础课程教学研究[J]. 高等教育研究学报, 2004, 27(1): 66-67.
- [3] 要振生, 张波. 加强学历教育合训阶段人文素质教育[J]. 解放军理工大学学报(综合版), 2007, 8(6): 68-70.

(责任编辑:林聪榕)