

核科技领域相关的若干复杂网络 研究进展与应用前景

方锦清, 李永, 刘强

(中国原子能科学研究院 核技术应用研究所, 北京 102413)

摘要: 简要总结和评述了核科技领域相关的若干复杂网络的研究进展。这些复杂网络包括: 强流加速器中传统的和混合的束流传输网络及其束晕-混沌的控制方法、核反应中连续渗流演化模型网络、全球核电站网络、化学反应网络、核能武器网络与网络作战中心、核辐射监测与反核恐怖网络和美国核武器综合系统网络等。最后, 指出了网络科学的若干挑战性课题与应用发展前景。

关键词: 束流传输网络; 连续渗流演化网络; 全球核电站网络; 核能武器网络; 核辐射监测与反核恐怖网络

中图分类号: O41; TL48; TL1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)S0-0018-14

Advances in Several Complex Networks Associated With Nuclear Science-Technology and Potential Applied Prospects

FANG Jin-qing, LI Yong, LIU Qiang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-68, Beijing 102413, China)

Abstract: Advances in complex networks of nuclear science and technology were reviewed and summarized. These complex networks include both traditional and mixing beam transport network (BTN) and control methods of halo-chaos, continuum percolation evolving network, global nuclear power station network, chemistry reaction networks, nuclear energy weapon network and network centric warfare (NWC), and radiological monitoring and anti-terror networks, integrated system network of American nuclear weapon, and so on. Some challenge issues and potential applied prospects of network science were pointed out finally.

Key words: beam transport network; continuum percolation evolving network; global nuclear power station network; nuclear energy weapon network; radiological monitoring and anti-terror network

在 20 与 21 世纪之交, 国际上发现了小世界网络^[1]和无标度网络^[2]及其特性, 标志着复

杂网络取得了突破性进展,由此激起了国内外复杂网络研究的热潮,并诞生了一门广泛交叉的新兴科学——网络科学^[3-22]。近年来,网络科学及其应用研究,特别是各种复杂网络的拓扑结构、动力学、功能及其演化特性等问题的探索,日益成为众多领域的重要前沿课题。网络科学的研究正在迅猛发展,特别在互联网、万维网、各种交通网、能源网络、经济网络、社会网络、新陈代谢网、蛋白质网络等方面的研究进展,已极大地影响和促进了众多领域的应用研究,正在突飞猛进。这对于解决人类面临的一系列重要问题有着现实和长远的意义。核科学技术领域也不例外,本文仅就网络科学在核科学技术领域及其相关领域的应用与发展,包括我们的部分研究成果,作一简要概述和评论。

1 强流加速器中的束流传输网络

传统的束流传输线均由数百上千个电磁聚焦单元所组成,因此,束流传输系统是一大类规则网络。但从网络观点看,束流传输系统可称为束流传输网络(BTN, beam transport network)。20世纪90年代以来,强流质子加速器及其离子束传输成为国内外关注的一重要研究课题,它在科学研究、国防领域和经济领域有着广泛的应用和发展前景。这类传统的规则束流传输网络有两种最基本的形式:圆环形和直线形,并可由两者组合成多种多样的网络结构。强流质子加速器有着不同的重要用途,如作为散裂中子源,用于洁净核能系统,用于军用核材料钚和氚等生产、嬗变核废物等;还应用于高能物理、工业和医疗等领域。由于强流离子束或强流电子束中均存在非线性相互作用和空间电荷效应,导致在高密度束核的外围弥散着一定数量的粒子,称为束晕粒子,还会出现混沌运动,统称束晕-混沌现象。实验和理论已发现:束晕-混沌现象是束流损失的主要原因,也是发展强流加速器中的一主要技术困难和应用中面临的重要问题。为此,弄清强流束传输中束晕-混沌现象及其产生的物理机制,以便寻找抑制和控制加速器中束晕-混沌的方法和技术,已成为发展强流加速器及其离子束应用中的最关键问题之一。有关束晕-混沌的物理问题,可参考

文献[6]。

1.1 BTN 中束晕混沌的主要控制方法

多年来,已提出了对于传统的规则的束流传输网络中束晕-混沌控制的许多方法,包括一般非线性反馈控制法、小波反馈控制法、变结构控制法、延迟反馈控制法、参数自适应控制法、正比微分自适应控制法、神经网络自适应控制法和孤立子函数反馈控制法等。表1列出初始束为K-V粒子分布下采用不同方法控制前后束的发射度。从表1可见,控制后,所有的发射度(所有性能)均大为改善。强流离子束实验出现的束晕是相当严重的,不利于实际应用。因此,控制或抑制束晕-混沌是完全必要的和非常重要的。在理论上,为控制束流横向或径向离子发散需在离子运动的径向施加一个向内的径向分力。为此,只需在束晕-混沌离子束包络的径向方程中加入适当的控制器即可达到目的。在这一思想指导下,已提出了一些有效的控制方法^[6,9-14],为解决该领域面临的挑战性课题提供了理论依据和技术基础,这些方法为设计和实验提供了验证方案。把理论方法变成可实现的技术,并推广到实验和设计中去,还有许多工作要做,这是今后的一研究方向。

1.2 网络科学在混合的BTN中的应用研究

值得注意的是,近年来,网络科学的理论方法为BTN课题的研究提供了新思路、新方法和新视角。于是,从网络科学观点来看,理论上可将束流传输网络问题变成构造什么样的具有小世界(SW)或无标度(SF)拓扑特性的束流传输网络(简称BTN-SW或BTN-SF,统称混合的束流传输网络)及如何控制束晕-混沌。

从理论上,混合型束流传输网络BTN-SW/SF系统的控制问题归结为考虑具有 N 个完全相同的、线性耦合束晕-混沌单元组成的复杂网络,构造其小世界(SW)或无标度(SF)的BTN。于是,这样的混合型束流传输网络方程组写成:

$$\dot{x}_i = f(x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, $f(x_i): D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, 这里每个节点为束晕-混沌动力学方程(函数), $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots,$

表 1 束晕-混沌主要控制方法对 K-V 粒子初始分布下控制前后的理论结果

Table 1 Controlling results of main halo-chaos control methods for initial particle K-V distribution

控制方法	控制器形式	控制前/后发射度 $\epsilon_{x,y}$	简评
非线性控制法	$G = -g \sin(r_{rms} - a_m)$	2.87/1.08	好
	$G = -g(r_{rms} - a_m)^2$	2.87/1.06	好
小波反馈法	$G = gu = g[f_{ab}(r_{rms}) - f_{ab}(a_m)]$	2.84/1.00	相当好
	$f_{ab}(x) = \exp[-(x-b)^2/a]$	2.84/1.00	
延迟反馈法	$G(t, \tau) = g[r_{rms}(t-s) - r_{rms}(s)]$	3.03/0.93	相当好
参数自适应法	$\kappa'(s) = \frac{1}{r_b} \left[\kappa(s)r_{b0} + K \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_{b0}} \right) + \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_{b0}^3} \right) \right]$	2.64/1.10	可以,需改进
正比微分自适应法	$G = k\dot{r}_{rms}$	2.64/0.998 3($\eta=0.5$)	很好
变结构控制法	$u_{eq} = r_b^{-1} \left(\frac{k}{r_b} + \frac{1}{r_b^3} - \lambda \frac{dr_b}{dt} \right)$	未计算,其他性能尚好	可以,需改进
孤立波控制法	$G = \frac{17}{8} \left(\operatorname{sech}^2 \frac{5}{4} r_{rms} - \operatorname{sech}^2 \frac{5}{4} a_m \right)$	未计算,其他性能均控制较好	可行
非线性函数	$G = g[f(r_{rms}) - f(a_m)] = 5[f(r_{rms}) - f(a_m)]$ 此处, $f(x) = \frac{1}{(1+x^2)^{3/2}}$	控制较好	可以

$x_m) \in R^n$ 是节点 i 的 n 维状态变量; $c > 0$ 为网络的耦合强度; Γ 为各个节点状态变量之间的内耦合矩阵, $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in R^{N \times N}$ 表示网络的拓扑结构, 称外耦合矩阵, 满足耗散耦合条件 $\sum_j a_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, N$, 当所有节点状态相同时, 上面方程右边的耦合项自动消失。

对于 BTN-WS 和 BNT-SF 网络, 节点的动力学函数, 即束晕-混沌的包络方程可简化写成:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -(a + b \cos x_3)^2 x_1 + \frac{K}{x_1} + \frac{1}{x_1^3} \\ \frac{dx_3}{dt} = \omega \end{cases} \quad (2)$$

我们计算了网络规模 $N=1\ 000$ 时, WS 模型和 SD(度不变)模型的矩阵特征根, 同时研究了平均最短路径和平均集群系数对两种网络模型同步能力的影响。研究表明: 尽管利用不同小世界网络模型(如 WS 模型和 SD(度不变)模型)而使其生成机制不同, 但它们导致束流传输网络的同步能力随复杂网络特性因子的变化趋势基本相同。

由于小世界网络既具有短程作用, 又具有

长程作用, 因此, BTN-SW 或 BTN-SF 网络可提高束流运输网络中的同步能力, 有利于束晕-混沌的同步和控制。利用 Watts-Strogatz 小世界模型和我们的度不变(SD)小世界模型分别生成了线性耦合的束流运输网络, 每个节点由粒子运动轨道的受控包络(束晕-混沌)方程(2)描述。例如, 我们设计了线性控制器为 $G = c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma x_{j2}, i = 1, 2, \dots, N$ 。计算表明: 对于 BTN-WS 模型, 在适当的耦合强度和所有演化概率下 D_{\max} 趋于 0, 因此, BTN-WS 网络达到了同步。以前, 在无小世界拓扑结构时, 应用线性反馈控制不能实现束晕-混沌同步, 但现在有了小世界拓扑结构, 应用线性控制器即能达到有效控制目的。在 BTN-WS 小世界网络中, 设计了下面两种控制器, 它们均可实现稳定控制。

1) 简单的线性控制器

$$G = c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma x_{j2} - 5(x_2 - 1) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

当取 $c=0.1, N=100, K=6$ 时, 分别在具有 WS 和 SD 拓扑结构的 BTN 中实现了单周期态的稳定控制。

2) 引入一个高斯型噪声 $c\zeta_i(t)$ 驱动项, 使

变量 x_2 的受控方程变为:

$$\frac{dx_2}{dt} = -(a + b\cos x_3)^2 x_1 + \frac{K}{x_1} + \frac{1}{x_1^3} + c\xi_i(t) \sum_{j=1}^N a_{ij} H(x_{j2}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

我们提出的一些控制方法可为束流实验研究和工程设计提供一定参考。

1.3 任意混沌复杂网络及 BTN 中的多目标分区控制

复杂动态网络的节点多种多样,依具体问题而定。所谓“混沌复杂网络”,系指节点为非线性方程或混沌动力学方程,这时,网络的动力学复杂性和整体演化的特性及其控制是令人关注的一重要课题。这类复杂网络中的平衡态和周期态在不同子网络区域的同步与控制正是非线性系统中混沌控制与同步课题研究的延伸和深入发展。

由于混沌系统内奇怪吸引子包含大量的不稳定周期轨道和多个平衡点。因此,控制目标(同步态)应分别为平衡点、周期态和混沌态的多种情形。将连续时间耦合动态网络分为若干子网络(社区),例如,两个局域网络 G_1 和 G_2 ,局域网络规模分别为 N_1 和 N_2 , $N = N_1 + N_2$ 。分别在局域网络 G_1 和 G_2 内选择 I_1 个和 I_2 个节点,在全局耦合下引入局部反馈牵制控制,受控的网络方程组为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f(x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} H(x_j) - cd(x_i - s_1) \\ & \quad i = 1, \dots, I_1 \\ \dot{x}_i &= f(x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} H(x_j) \\ & \quad i = I_1 + 1, \dots, N_1 \\ \dot{x}_i &= f(x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} H(x_j) - cd(x_i - s_2) \\ & \quad i = N_1 + 1, \dots, N_1 + I_2 \\ \dot{x}_i &= f(x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} H(x_j) \\ & \quad i = N_1 + I_2 + 1, \dots, N_2 \end{aligned} \quad (5)$$

根据相关研究得到的 4 个可控性和稳定性定理,可确保在任何混沌复杂网络,包括 BNT-SF 或 BTN-SW 系统中实现多目标控制。

例如,Lorenz 方程就有 3 个平衡点,混沌吸引子内有无无限个不稳定周期轨道。我们将复杂网络分成若干子网络区域,子网络数目

与所要平衡点和所需周期态数目的总和相等,然后,根据需要分别将不同平衡点和周期态稳定控制到所需的子网络内。为此,我们提出了一种适当的全局耦合和局部反馈相结合的方法。数值研究证明了实现这种控制的基本定理和方法是有效的,从理论上可确保在复杂网络中实现上述多目标的控制。我们已分别应用该方法于节点为 Lorenz 方程和束晕-混沌方程的复杂网络中,数值模拟验证了理论方法的正确性。

我们已构造了具有无标度特性(BA)的 Lorenz 混沌网络,规模为 $N = 50$,每个节点是 Lorenz 混沌系统。然后,将整个网络分成节点数目分别为 4、8 和 38 的 3 组子网络,并分别对各个子网络中 1 个节点采用误差增益的线性反馈控制器,在满足全局稳定性定理要求下,仅控制每个子网络中的 1 个节点,即可实现网络分区稳定控制到 3 个平衡点上: $[8.4853, 8.4853, 27]$, $[0, 0, 0]$ 和 $[-8.4853, -8.4853, 27]$ 。

同样,应用上述类似的耦合控制方法选取不同参数,实现了对 BTN-SF 网络中平衡点和周期态的同步控制。这时,设计的控制器(误差耦合函数) $h(x_i, x_j)$ 为:

$$h(x_i, x_j) = (x_j - s) - (x_i - x_{eq}) \quad (6)$$

两个分区反馈控制器为:

$$\begin{aligned} u_1 &= -cd_1(x_{i_1} - x_{eq}) \quad i = 1, 2, \dots, I_1 \\ u_2 &= -d_2(x_{i_2} + 1) \\ & \quad i = N_1 + 1, N_1 + 2, \dots, N_1 + I_2 \end{aligned} \quad (7)$$

利用上述控制器同样分别实现了对于不动点和周期态的分区控制。

综上所述,多目标控制方法可根据实际网络的需要,将大规模复杂网络分成多个子网络,然后实现不同子网络区域的不同目标控制。这一方法不仅可应用于混合的 BNT 系统,还可应用于任何混沌复杂网络的多目标控制,具有广泛的应用前景,例如,应用与基于束晕-混沌的保密通信等^[12-17]。利用束晕-混沌系统对初始条件的敏感性,设计了 3 种保密通信电路系统,主要特点表现在:1) 利用束晕-混沌设计网络上的通信电路;2) 利用小世界网络特性提高同步能力;3) 可实现多目标控制目的。进而,将在网络上实现网络保密通信。

1.4 与加速器驱动的次临界系统(ADS)的关系

ADS的最大特色是将20世纪最重要的两大核科学装置,粒子加速器和核反应堆巧妙而紧密地结合起来,用以克服常规核电的弊端,解决常规核电产生武器级的核燃料、铀资源利用率低及可能导致超临界事故所产生的放射性泄漏等严重缺点。ADS构成了新的更安全、更干净、更便宜的核能系统,已成为国际上21世纪的极富诱惑力的核能。但它面临着诸多科学、技术与工程等方面的空前挑战,其中,关键的物理技术之一即是强流中能加速器。实验和理论均发现:强流质子流产生了特有的束晕-混沌现象,不论横向还是纵向均产生束晕-混沌现象,且束晕有再生性。这样,将导致离子束极易打到加速器管壁或其它结构上,产生超标的放射性剂量和损坏加速器某些元件,给周围环境和该核能系统造成严重危害而变成不安全和不干净能源。因此,实现洁净核能系统的关键问题之一即须提出一套有效设计新型强流加速器的方法。这不仅须深入研究这类束晕-混沌的特性及其产生物理机制,且需解决如何实现对束晕-混沌的有效控制的新方法和新技术。

当前,控制ADS中强流束晕-混沌已成为国内外核科学技术及其核能应用领域中的一个重要课题。需强调的是,近年来,网络科学的理论与方法为该课题提供了研究的新观点、新思路和新方法。上述分析和计算表明:如能在实验和工程中实现BTN-SW或BTN-SF网络方案,则有望提高束流运输网络的可控性,有利于束晕-混沌的控制。我们利用两种小世界模型分别生成了线性耦合的束流运输网络。研究发现:在线性耦合BTN网络中,选取合适的耦合强度,可控制束流运输网络的束形达到所需的或接近于匹配的要求,对于两种小世界的或无标度的束流运输网络分别达到了很好的控制效果。上节中提出的具有小世界或无标度拓扑结构的束流运输网络中的一些控制方法,诸如线性耦合方法、噪声驱动法和全局耦合法从理论上为束流实验研究和工程设计提供新的参考和新视角。同时,多目标控制方法可应用于任何混沌连接的复杂网络的多目标控制,该法更适用于实

际网络的控制需要。例如,束晕控制有利于生产军用核材料钚和氙及嬗变核废物等。

2 渗流模型网络及其在核反应中的应用

无标度网络的发现者Barabási^[18]讨论了随机图理论和小世界模型各种网络图中的不同渗流行为^[19-20];在文献[21-22]中给出了利用渗流理论解析研究复杂网络容错性与鲁棒性,以及在网络传播中的应用;节点在不同分布下渗流临界值相应不同。渗流模型不仅可描述渗流的许多实际宏观问题,且可应用于用微观原子核多重碎裂等核反应方面,也可研究原子核高能碰撞的各种几何临界现象^[23]。

无限大集团的出现是一典型的连续相变问题。对无限大的网格存在一临界渗流概率 P_c ,当 $P < P_c$ 时,所有集团均是有限大小,不存在无限大的连通集团;当 $P > P_c$ 时,则存在一无限大集团,网格是可逾渗的。随机网络的性质具有像渗流一样的突现特点,存在某些临界连接概率,当连接概率低于这一临界值时,所有的图具有该性质的概率为0;连接概率高于这一临界值时,具有该性质的概率则为1。这种突现性质和渗流中的临界现象完全一致。事实上, N 个结点的随机图相应于最多 N 维空间中的渗流问题,每两个连接的结点是邻居,结点之间的边即是渗流问题的边。由于随机图理论考察 $N \rightarrow \infty$ 时的性质,所以,它类似于无限维渗流问题。

2.1 连续渗流模型网络

在二维正方形网格上,以某一概率 P 随机地占据网格上的点(点渗流)或边(边渗流),当两个被占据的点或边相接触时,称其是连通的,互相连通在一起的所有点或边的集合称为连通集团。很显然,当概率 P 较小时,网格上只会有一些孤立的小的集团(或单点、边),而当 P 较大时(极限情况下 $P=1$),则会形成连通网格边界的无限大集团。无限大集团的出现是一典型的连续相变问题,对无限大的网格,存在一临界渗流概率 P_c ,当 $P < P_c$ 时,所有集团均为有限大小,不存在无限大的连通集团,而当 $P > P_c$ 时,则会存在一无限大集团,网格是可逾渗的。连续渗流^[24]在维数不变情形下可改变网格的类型,只改变临界阈值,还保持临界渗流

指数的普适性。一种常用的连续渗流模型是采用圆盘的形式,其中,圆用来维持输运。圆和圆之间的“周围禁区(excluded volume)”互斥力可用“核硬心(hard core)”来模拟,这种相互作用是一种短程关系,对临界渗流指数不产生影响。在填充因子 η 达到临界值时,重叠的圆盘成一无限大的集团,且系统支持长程流。在二维情形中,有:

$$\eta = n\pi r^2 \quad (8)$$

其中: n 为密度,即单位面积上圆的个数; r 为圆的半径。

重叠的圆盘体积占整个系统的比例 ϕ 可用填充因子计算得到:

$$\phi = 1 - e^{-\eta} \quad (9)$$

文献[24]给出了对应的临界阈值 $\eta_c = 1.128$,此时,根据式(8)和式(9),得到 $\phi = 0.68, n = 0.36$ 。

在实际研究中,不可能模拟无限大的体系,而只能考虑有限规模的系统。这里,选取常用的一种数值模拟结构^[25],连续系统由 N 个单位尺寸的圆盘组成,这些圆盘随机分布在 $\sqrt{2}L \times \sqrt{2}L$ 的长方形区域中。连续渗流模型中生成 N 个圆盘,有孤立状态,有重叠状态。选取生成的圆盘作为网络节点;如果两个圆盘圆心之间距离小于一常数 d ,则在这两个圆盘之间建立连接(边),通常选取 $d = 2$ 。

选取不同密度 n 时,通过边的连结,连通网络的规模将不断增加,其中,网络规模 N 和密度 n 之间满足线性关系:

$$n \equiv \frac{N}{2L^2} \quad (10)$$

计算网络特征量时,选取 L 从10到50,对每个 n 计算25次,然后取平均值。

2.2 渗流模型网络的特征量变化

1) 度分布

网络中节点 i 的度 k_i 是指该点连接边的总条数。所有节点度的平均值定义为网络的平均度,记为 \bar{k} 。分布函数 $P(k)$ 描述了点的度分布,表示的是随机选中的点恰好有 k 条边的概率。网络中节点的度的分布常用累积分布函数 $P_c(k)$ 来描述,即度不小于 k 的节点的概率分布,有:

$$P_c(k) = \sum_{k'=k}^{\infty} P(k') \quad (11)$$

根据式(11)可算得临界密度 $n = 0.36$ 附近不同网络的累积度分布。选取 $L = 100$,计算结果显示网络的累积度分布为伸展的指数分布^[26],随着密度的增加,网络的度分布基本形状不变。该分布用伸展分布进行刻画临界密度时,对应的度分布及其伸展指数 c 值均随密度 n 平稳变化。

2) 群聚系数 C

在复杂网络中,用群聚系数来刻画网络中节点邻居之间的联系(即聚类性)。网络中1个节点 i 的群聚系数定义为 k_i 个节点间实际存在边的条数 E_i 与可能存在的总条数 $k_i(k_i - 1)/2$ 之间的比值,整个网络的群聚系数 C 就是所有节点 i 的 C_i 的平均值,即:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (12)$$

这样, $0 < C \leq 1$ 。对于全耦合网络,即网络中的每个节点均与其它节点相连接, $C = 1$ 。多数大规模真实网络的群聚系数尽管远小于1,但远大于 $O(N^{-1})$,因此,它们有聚类的趋势。

根据式(12)可计算不同 L 时网络的群聚系数 C 。 n 增加, C 随之增加,当 n 在0.3附近时, C 出现相变现象,该相变发生的位置在临界密度附近;另外,随着 L 的增加, C 的曲线形状基本不变,数值略有增加,即相变与 L 大小无关。

3) 相称性系数 r_c

描述网络节点之间连接关系的另一特征量是相称性(匹配)系数(或称度-度关联性)^[27]。如果度大的节点倾向于连接度大的节点,则称网络是正相关的或正匹配(相称性,assortativity)系数;反之,如果度大的节点倾向于与度小的节点连接,则称网络是负相关的或负(异类)匹配(disassortativity)系数。目前,数值计算经常使用Newman^[27]的计算方法,计算得到不同 L 时网络的相称性系数 r_c 。当 n 增加时, r_c 随之增加,且当 n 较小时, r_c 有相变出现,该相变发生的位置在临界密度附近;另外,随着 L 的增加,对特定的 n, r_c 的曲线形状变化较大:当 $n < 0.4$ 时, r_c 增加较快,当 n 较大时,出现涨落,则相变与 L 大小有关联。在 $L = 50$ 时,相变发

生在 $n=0.4$ 附近,随着 L 的增加,该相变逐渐不明显。

当 $n < 0.1$ 时,网络的节点数目较少, r_c 波动较大;当 $n > 0.1$ 时,网络的 r_c 均为正值;根据网络模型,节点的边只在短程内存在。这样,网络中最大度和最小度之间相差不大,网络呈现同配性。

我们还计算了不同 L 时上述网络的 Boltzmann-Gibbs 熵(简称 BGS),给出了网络的 BGS 与密度 n 的关系。结果显示,当 n 增加, BGS 随之平坦增加,未出现相变;另外,随着 L 的增加, C 的曲线形状基本不变,则 BGS 与 L 大小无关。当 n 增加时,网络中节点数变多,大量的节点比少数节点更能体现出节点分布的无序性,因此,网络的熵随密度 n 增加而增加。

从上可见:可从网络科学的角度利用渗流模型建立与核反应有关的渗流模型网络;通过数值计算得到网络的各种网络特性,如度分布、群聚系数、相称性系数、熵等。这些网络特性随着网络密度的增加呈现规律性变化,有的还伴有相变行为。但网络科学的理论方法应用于核反应领域乃是极富挑战性的课题。

3 全球核电站网络

从网络科学的角度,我们首次探索了全球核电站网络及其特性^[28]。

从国际原子能机构(IAEA)网站上获得全球核电站数据。全球共计有 594 台核电机组,这些机组分布在 33 个国家的 170 个地区,由此构建了全球核电站,得到了不同国家各地区机组个数 n 的累积分布图,得到累积分布 $P_c(n) = \sum_{n' \geq n} P(n')$,拟合 $P(n)$ 为幂律分布,幂指数为 $\gamma = 2.7$ 。

基于以上数据和 Barabási^[29] 关于优先权排队的人类动力学模型的思想,我们提出了建立全球核电站增长网络模型。该模型的要点是:1) 节点为全部的核电站机组,共 594 个,包括运营、停堆、在建的;2) 边的连接,每个时间步网络中加入 1 个新节点,新节点在网络节点中选择 m 个已有节点进行连接,选择机制为确定性择优,即首先把节点的属性进行排序,优先次序依次为所属地区、国家、类型、状态(location, country, type, status),同时计数器

(count)赋予值 0;然后把网络中已有节点按照节点加入网络的先后次序,根据第 1 种属性(地区)值逐一与新节点的该属性值进行比对,如果选择的网络中已有节点和新节点属性值相同,则这两个节点之间建立 1 条新连接, count 加 1。如果 $\text{count} < m$,则根据前面确定的属性优先次序,选择后面一种属性继续同样操作,依次类推,直到 count 等于 m 。

我们研究得到的全球核电站无权网络的拓扑特性如下。

3.1 度分布

双对数坐标下的网络度分布和累积度分布 $P_c(k) = \sum_{k' \geq k} P(k')$,均服从幂律分布,度分布幂律为 3.2,累积度分布幂律为 1.6。这说明,网络中节点的度具有显著的不均匀性,绝大部分节点度较小,少数节点度较大,符合无标度网络特性。度最大的前 5 个节点对应为 3 种典型堆型:压水反应堆、沸水反应堆、气冷堆,且前 3 个节点位于美国,后两个节点分布位于法国和英国。这 3 种堆型约占全部核电站机组的 82%,正是大量核电站机组均采用这些成熟的反应堆技术,从而使得它们具有高联结度的特点。

3.2 群聚属性

幂律度分布网络比相应的随机模型具有更高的聚集度^[18]。依据群聚系数的定义,算得核电站网络的群聚系数 $C \approx 0.8$ 。这表明,网络中存在紧密联系的群体。这种聚集性机制可用社会学研究中的社团(community)来说明。利用 CFinder^[30] 软件,算出在核电站网络中, $K = 4$ 社团中节点数目 $N(\text{comm})$ 的累积分布 $P_c(N)$,拟合曲线为幂律分布,幂律指数 $\gamma \approx 0.8$ 。核电站在全球的分布具有明显的地理上的、经济上的、政治上的差异,全球核电站分布具有高度不均性,绝大部分坐落在北半球;发达国家和中等发达国家拥有的核电反应堆大大多于发展中国家。幂律分布说明了核电站网络的不平衡性,最大的社团中节点个数为 159 个,几十倍于 K 的数值,这些大社团覆盖了发达与发展中国家,它的存在致使网络的群聚系数较大;另外,网络中小社团个数较多,大多是发达国家的其它非主流堆型构成。算得核电站网络的相称性系数 $r_c = -0.15 < 0$ 。这说明广泛采用成熟的堆型

(节点度较大),发展中国家(节点度较小)从发达国家引进技术,符合技术网络为异配网络的特点。

从上可见:网络科学的理论方法为全球核电站研究提供了一种新视角、新观点和新途径。基于实际数据,我们提出了优先权排队网络模型,构建和研究了全球核电站网络及其拓扑特性(度分布和群聚系数等);揭示了全球核电站网络分布具有无标度特性(即幂律分布),该特性反映出了全球核电站网络的不平衡性和不均匀性。从全球高度看,它对于全球核电站网络的恐怖袭击具有稳定性(安全性、鲁棒性),不会导致全球核电站整体的崩溃,但对于“中心”核电站,如果遭遇恐怖袭击,影响则相当严重。由于核电站的特殊性,各国必须高度重视其安全问题。该网络的拓扑特性基本反映了全球核电站的发展现状,并首次从网络科学高度刻画了全球核电站网的拓扑特性和演化特点,这对我国核电站的发展具有参考价值。

4 (核)化学反应网络及其相关研究

国际上,应用网络科学方法研究(核)化学问题主要集中于(核)化学反应网络(chemical reaction network)。在(核)化学反应中,可把每个分子看作是1个节点,而化学反应之间的关系是连线,根据网络科学的方法,则可将大量化学物质之间的反应构建出化学反应网络,进行网络特性的分析,以了解和评估在什么条件下(核)化学反应能够获得这类网络的小世界效应和无标度特性。

2001年,美国麻省理工大学 Rogier Braakman 与美国哈佛大学,德国马克斯普朗克研究所,德黑兰理工大学(Tehran Polytechnic University, Tehran, Iran)的联合项目组提出报告“化学反应网络的演化和动力学”^[31];2005年,加州大学戴维斯分校 Brian Higgins(布赖恩希金斯)教授提出“探索在科学与技术中的化学反应网络”^[32]。该项目的研究目标是建立1个简单、一般的化学反应网络,通过建模,研究扰动对网络特性的影响和动态网络的行为。因每个化学反应均可建立许多不同变量(反应物质的浓度)的方程和许多参数,当所有参数已知时,通常可得它们的初解。迄今,国际上化学反应

网络的模型及其理论研究取得了长足进展^[32-37]。2004年,《欧洲物理学快报》上发表了一篇文章,名为《天体物理学化学反应网络的大尺度组织结构》^[33]。他们在广泛存在的化学反应 $\text{Cl} + \text{OH}$ 中, HCl 与 Cl 和 OH 之间、 O 与 Cl 和 OH 之间连线,而 HCl 和 O 之间不存在连线, Cl 和 OH 之间也未连线。连线仅表示了反应两端的物质之间的相互关系,由此可构建各种化学物质之间的反应关系网络。研究者已分别检测了地球、火星、土卫六和金星大气、星际介质、巨行星(土星和木星)的碳水化合物反应网络,还检测了星际介质化学反应网络,并与大肠杆菌的化学反应网络进行对照,分析发现4个特性:幂律分布特性,小世界效应,分级群聚性和异配性。研究肯定,所有的化学反应网络均为小世界网络。地球化学反应网络的平均最短路径、平均度和群聚系数均比其他网络更接近于大肠杆菌的化学反应网络。只有地球化学反应网络符合点度幂律分布特征,而其他星体化学反应网络均点度分布均为指数分布,星际介质的化学反应网络则符合多标度分布。

通过分级群集性可分析化学分子网络的模块化特征,并对分子网络进行层次树的分析。只有地球大气的化学反应网络符合模块化特征。在地球化学反应网络中,位于核心位置的最具反应活性的离子是 OH (强氧化性)和 Cl (强还原性),使得化学反应网络呈现模块化。按照网络中参与反应的数量多少来决定的活性顺序从高到低是 OH 、 Cl 、 NO_2 、 O 、 O_2 、 O_3 、 \dots 。因此,地球大气的化学反应网络呈现着以氧化为主的氧化-还原反应特征。

另外,利用测量分子浓度的时间序列也可构建化学反应网络。同样,上述方法也适用于研究核化学反应网络和链式核反应网络。

5 能量核武器复杂网络与中心作战网络

美国核武器研究中心洛斯阿拉莫斯国家实验室埃利奥(R. L. Elliott)在1988年第九届IEEE大规模存储体研讨会上,发表了题为“能源部的核武器复杂网络(Energy Nuclear Weapons Complex Network)”文章^[34],当时他们已从网络观点分析考虑核武器的大规模储存与消化问题。2006年,俄罗斯总统普京在八国

峰会上提出建立全球核网络,负责核燃料浓缩和处理。美国方面提议,全球核网络的职能是保证少数“负责任的国家”掌握核技术,把伊朗等国排除在外。

美国核武器复杂网络、核网络与1998年美国国防部提出的网络中心作战概念框架(NCOCF)有着必然的联系,它是美国军事网络重要特殊组成部分。美国国防部指出,“实现美军向网络中心作战的转型,可能是美国政府历史上最复杂的任务。”美军网络中心作战的核心系统网络包括九大系统:战场感知系统、数据链系统、信息传输系统、敌我识别系统、导航定位系统、电视会议系统、数字地理系统、模拟仿真系统和数据库系统。这些都是错综复杂的相互联系的网络系统。确实,它可同第二次世界大战及对前苏联的冷战相比,“是长期、困难、高费用和高风险的任务。”“这一任务岂止是非常复杂,所需的知识甚至还不存在。这类似当年美国的曼哈顿原子弹工程及阿波罗登月工程,需要长期的、动员全国力量的创新。”2004年9月,美国陆军部和国防部派代表参与美国科学院的“网络科学在未来陆军的应用”项目研究。2005年11月1日,美国科学院国家研究委员会发表“网络科学”研究报告。2009年5月29日,美国《纽约时报》网络版援引美国政府官员的话报道说,美国国防部正在采取措施加强美军网络战能力,包括计划创建一个新的网络战司令部。此举与美国总统奥巴马当天发表的有关加强国家网络安全的讲话相呼应。目前,国防部尚未正式向奥巴马提交有关组建网络战司令部的报告,但预计奥巴马将在未来数周内签署有关成立该司令部的秘密命令。种种事实充分表明:处在世界新军事变革浪潮中的网络科学,正好适应了日益全球化、复杂化的军事指挥控制网络和中心作战网络的前所未有的需求,其应用潜力巨大。

6 核辐射监测与反核恐怖网络

目前,世界各国面临较为严峻的核及辐射恐怖问题。现有以下4种核与辐射恐怖的手段:1)非法获得核武器,制造核恐怖事件,包括盗窃核武器与粗糙核装置的低威力(小当量)核爆炸;2)获得核材料,制造核武器,制造核恐怖

事件,近几年,IAEA已证实的核走私事件已多达175起,其中包括核材料的非法运输;3)获得其他放射性材料,造成核危害;4)袭击核设施,造成核与辐射危害。根据美国国防部绝密报告:《1950年至1980年涉及美国核武器事故简报》透露,在短短30年期间,被列为“断箭级”的核武器事故多达32起。所谓的“断箭级”核事故是美军最严重的核武器事故,包括核武器丢失、核武器着火、核武器误射、核武器高爆炸弹误引爆。核事故则分为两类:一类是不得不公开的核武器事故,另一类是放射性物质溢出美军基地范围的事故。这些核武器事故既有发生在美国本土基地的,也有发生在某国的美军基地。每次发生事故时,只要放射性物质不超出美军基地,美国人就掩而不说。比如,1981年发生的核武器事故中,至少有7起直到今天仍未公开。能了解美国核武器事故真相的恐怕也就只有美国总统了。据透露,肯尼迪总统1961年曾接到国防部报告说,从第二次世界大战结束到20世纪60年代,美国先后发生60起核武器事故,其中最严重的两起是误射两枚“装有核弹头的防空导弹”。1988年至今,至少发生了96起核武器事故,事故的严重程度从弹体外部撞坏到高爆炸药被引爆不等。这些核事故无一例外地被隐瞒了,而隐瞒这些事故的手段就是把它们列为美国“最高国家机密”,以此成了掩盖重大核武器事故的挡箭牌。世界各国面对如此严重的挑战性,建立和完善核与辐射监测以及全球反核恐怖网络势在必行,迫在眉睫。因此,发达国家和有核国家大都已建立了(反)核辐射监测网络。例如,加拿大卫生部的“加拿大辐射监测网络”(Canadian Radiological Monitoring Network, CRMN)是全国性的监测网络站^[37]。CRMN始于1959年,用以监测大气核试验和核设施向环境释放的放射性物质。从该网络可找到加拿大各地一系列环境放射性测量数据。我国建立的全国性核辐射监测网主要依托全国环境监测站,针对核与辐射恐怖事件,从国家核与辐射事故应急中心到地方环境监测站,建立全国性核与辐射恐怖事件核辐射监测网。国家核与辐射应急监测中心具有应急通信网络、核设施安全参数获取及显示系统、核与辐射恐怖事件和核电厂事故工况诊断预测系统、

适用于十几、几百 km 乃至全球范围内的核与辐射恐怖事件后果评价与预测计算机系统,可接受全国及全球范围气象信息的网站与全国性核辐射监测网(台)监测数据信息以及完备的地理、交通、人口等方面的计算机数据库。同时,对周边国家乃至全球范围内的突发性核与辐射恐怖事件和严重的放射性环境污染事故对我国的影响进行监测和评价。全国各地地方核辐射监测台(网)作为国家核与辐射事故应急中心的技术支持并提供所需的信息、数据,具备应急监测设备与手段。以层次管理模式建立国家核应急组织、省(自治区、直辖市)核应急组织和地方单位应急组织的三级应急组织体系,各级组织都有明确的职责,对全国范围内的核安全实施组织统一领导和管理。各层次组织中包括核安全、辐射监测、污染去除、运输、医疗、警察、消防、通讯等方面的技术专家组或技术专业组,作为组织领导决策、咨询的技术支持。我国香港特区辐射监测网络由 10 个固定监测站组成,用以监测香港的环境伽马辐射水平。每个监测站均装有 1 个高压电离室,不断测量环境伽马辐射水平,并将数据经两个独立的通讯网络传送回天文台总部。

我国积极参与世界核安全、辐射环境与放射性废物管理方面的国际合作与交流,目前已与美、法、日、俄、加拿大等 10 个国家核安全当局签署了核安全协议,并与国际原子能机构等国际组织保持密切的合作关系。通过联合审评、咨询、信息交换和人员培训、交流等广泛的国际合作,有效地促进了我国的核安全网与辐射环境监督管理水平的提高。通过加强国际合作形成一个反核与防辐射恐怖网,以有效地消灭国际核与辐射恐怖主义。

7 美国核武器综合系统网络

这是一个由相互联系的美核设施与计算机联合的复杂网络^[38-39],从 20 世纪 40 年代至今,随着国际上政治形势的变化,该网络处在不断演化之中。核武器设施包括科研机构(试验室)、试验靶场和生产企业。它们的任务是研制、试验、生产核弹药,使核弹药在服役期内保持战备状态;拆卸从武器上拆下来的核弹药,生产特种核材料(²³⁵U, ²³⁹Pu, 氚, ⁶Li)。这些

设施按功能可分为两类相互联系的部分:试验设施和生产设施。1942—1943 年,美国开始建设核武器综合系统第 1 批设施,包括里奇兰生产综合体(华盛顿州)、奥克里奇工厂(田纳西州)、洛斯-阿拉莫斯试验室(新墨西哥州)和位于阿尔伯克基地区的桑迪亚试验室(新墨西哥州)。20 世纪 50 年代,美国核武器综合系统发生显著变化,随着设施数量的增加,形成了其最终结构,增加了内华达试验靶场(拉斯维加斯)。到 1957 年以前,在执行核试验任务时,试验室分为两组:洛斯-阿拉莫斯试验室和位于利弗莫尔的劳伦斯试验室(加利福尼亚州)研制核弹药的核装置,两个桑迪亚试验室(分别位于阿尔伯克基和利弗莫尔)设计核弹药的非核装置。它们进行相互独立的研究,根据研究结果设计和生产核弹药试验样品及其试验必需的诊断设备。桑迪亚试验室在托诺帕(内华达州)和卡瓦伊岛(夏威夷群岛)还有进行核弹药弹道试验和其他非核试验的靶场。20 世纪 50 年代,美国实际已将全部生产企业投入使用,包括根据核弹药生产能力扩大计划投入使用的以下工厂:位于堪萨斯城(密苏里州)的电子、电机、机械和塑料生产厂,位于迈阿密堡(俄亥俄州)的“孟德”自动化爆炸元件厂,位于圣彼得斯堡(佛罗里达州)的“皮内拉斯”高压设备厂,位于丹佛市附近洛基-弗莱茨地区(科罗拉多州)的钷生产厂,位于艾肯市附近萨凡纳河镇(南卡罗莱纳州)的氙生产厂,位于奥克里奇的 Y-12 热核装置生产厂,位于巴灵顿(依阿华州)和阿马里洛(得克萨斯州)的核弹药总装厂。通过改造,美国核武器综合系统的核弹药生产能力到 20 世纪 50 年代末达到每年 7 000 件左右。美国核潜力数量的扩张一直持续到 20 世纪 60 年代中期,当时的美国核武库中共有 30 多种核弹药约 35 000 件。此后,核弹药年产量下降,直到 20 世纪 80 年代末的平均每年为 3 000 件左右。美国政府十分重视在质量上加强国家的核潜力,主要在两个方向上进行:更新老化弹药,完善核武库;研制更有效的投送工具。总之,到该阶段结束之前,由于国际局势稳定和美苏之间军事战略平衡的实现,该网络系统未发生大的变化,各种设施共计有 20 处。20 世纪 80 年代,根据新的安全要求对各设施进行的检查表

明,一些工厂的土地被有毒和放射性废料所污染,一些企业严重违反了安全与环保要求。因此,美国在20世纪90年代初之前,首次遇到了对核武器综合系统进行根本完善的问题。1987年末,美国能源部开始研究制订核武器综合系统长期完善计划。1989年初,向国会提交了相应的计划——《核武器综合系统完善报告》。1991年1月,美国能源部提出了名为“综合系统-21”的新的核武器综合系统长期完善计划。计划到2010年前建设一系列新企业,对现有全部设施实现自动化和计算机化,采取措施消除设施污染,对放射性废料进行回收利用。根据新计划,核武器综合系统网络结构包括3个功能部分:非核装置生产综合体;核装置生产综合体;科研和试验综合体。近年来,华盛顿在核武器综合系统领域的政策方向是推广新技术和提高核武器综合系统企业网络的自动化水平。该领域的重点之一是建立统一的计算机网络的计划,该网络联接全部试验室及内华达试验靶场。该系统能使每位研制者获得全部必要信息,并采用计算机技术能借助于模拟进行一系列试验,在强大的超级计算机上建立现实模型。目前,IBM制造的1台超级计算机的运算速度达每秒280.6万亿次,运算速度为世界最快。BlueGene/L就是用来确保上述目标的实现和核武器的存放安全可靠。

在新的条件下,能源部根据RRW计划(可靠替换弹头计划)正在生产可列装的高可靠性核弹药逐步取代传统核弹药。到2030年前,将只拥有这种高可靠性弹药。新的核武器综合系统完善计划取名为“综合系统-Complex-2030”。2030年后,所有核材料的工作应集中在3个专业化生产中心进行,未来建成的美国和武器综合体网络是基于科学技术能力,能帮助促成“维持能满足国家安全需要的最小数量的核武库的设想,最终美国要建成一个更小、更安全、更高效、更具响应性和维护费用更低的核武器综合体”网络,以便保持美国的基本核能力,确保核威慑的前提下,能够适应目前已改变了的现实情况。

8 网络科学的挑战性课题

展望未来,网络科学的理论及其应用的研究面临着许多挑战性的课题,这正是网络科学

深入开展研究和继续发展的强大推动力。概括说来,网络科学值得进一步研究的重大课题集中在以下几个方面^[6-9,15-22,40-46]。

1) 国家及国防急需的相关课题的理论基础和应用基础研究课题

网络科学的研究具有基础性、前瞻性、交叉性和应用性,对国家不仅有着极为现实的迫切意义,而且具有长远重大的国防战略利益。21世纪是互联网和信息时代,下一代的互联网的发展必然进一步带动整个国家国民经济和国防事业各个领域的飞速发展。这对于我国核网络安全问题同样特别重要,需要加强这方面研发工作,只有确保国家及核科技的网络安全,才能在21世纪激烈的国际竞争和国家安全事务中立足于不败之地,加快我国国防和国民经济的现代化进程。

2) 密切关注军民两用的复杂网络安全课题的研究

从国家核安全考虑,提出的主要问题有:应对核辐射与反核恐怖网络以及核能武器网络安全问题,全球核电站网络安全问题,这些复杂网络上的灾变发生或网上级联效应问题;防止计算机病毒在网络上传播和流行,提高这些网络的抗攻击和抵御故障的能力等。这一系列课题直接密切关系到军民两用,即与国家和社会的迫切利益密切相关,需要加强复杂网络工程的研究、设计、防护和应用。

3) 开展若干重大复杂网络工程的设计、实证和应用研究工作

这方面的重大课题包括全球反核恐怖与防核辐射网络,核武器综合系统网络,全球生态环境网络,全球核电-火电联合网络,世界能源网络,军事指挥网(网络中心战),国际金融网络,综合国民经济网络,各种军民通信网等。这些网络均涉及复杂网络上信息传输、安全通讯及网络上动力学特性的控制和利用等重要课题。

4) 开展与核科学技术相关的复杂网络课题的研究

一些重要的核科学与技术问题,包括束流传输网络链式核裂变与聚变反应、量子信息相干与强关联网络、重离子反应动力学、重离子碰撞中多重碎裂、核化学反应、天体核反应、量子宇宙时空网络等,其中既有老课题又有前沿新

课题,有些课题需要理论与实验研究以及工程开发紧密结合,以便从网络科学与工程的角度重新认识和揭示这些课题中隐藏的新特点、新现象和新规律。

最后,我们要特别指出,2009年9月美国把“网络科学与工程”的研究突出地提到议事日程,由美国麻省理工大学等十所著名大学联合组成了“美国网络科学与工程委员会”。该委员会提出了一个专题报告:“网络科学与工程的研究议事日程”^[46],该报告空前强调美国今后加强网络科学与工程研究的重大意义和研究方向,并要求政府必须加大这方面的研究经费的投入力度。为此,委员会向美国政府的基金机构推荐必须大力支持研究的四大方面:未来互联网技术的实验研究工作;重建和扩大实验室规模、改善实验方法与技术,加大奖励制度以促进网络工作者发挥重大作用;大力培养和支持网络工程设计有关的科技活动,并包括理论计算机科学、网络科学新课题和其他相关的理论课题的研究;支持更广泛的交叉科学研究活动,以便深刻理解和设计未来的各种网络(包括互联网在内)等。

综上所述,网络科学已引起了国内外不同学科的高度重视和密切关注,它正面临着理论和应用研究的艰巨挑战。同样,在核科学技术领域及相关领域中的应用研究刚刚揭开序幕,探索课题任重道远,具有很大的应用潜力和发展前景。

参考文献:

[1] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks [J]. Nature, 1998, 393: 440-442.

[2] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5 439): 509-512.

[3] WATTS D J. Six degrees: The science of a connected age [M]. New York: W. W. Norton & Company, 2003.

[4] BARABÁSI A L. The new science of networks [M]. Cambridge: Perseus, 2002.

[5] Committee on network science for future army applications, board on army science and technology, division on engineering and physical science,

national research council of the national academies; Network science [M]. Washington, D. C.: National Academic Press, 2005.

- [6] 方锦清. 驾驭强流束晕与探索网络科学 [M]. 北京: 原子能出版社, 2008.
- [7] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚, 等. 一门崭新的交叉科学: 网络科学(上篇) [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(in Chinese).
- [8] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚, 等. 一门崭新的交叉科学: 网络科学(下篇) [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(in Chinese).
- [9] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚. 非线性网络的动力学复杂性研究 [J]. 物理学进展, 2009, 29(1): 1-74.
FANG Jinqing, WANG Xiaofan, ZHENG Zhigang. Dynamical complexity of nonlinear networks [J]. Progress in Physics, 2009, 29(1): 1-74(in Chinese).
- [10] 方锦清. 驾驭混沌与发展高新技术 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [11] 方锦清, 陈关荣. 束晕-混沌的复杂性理论与控制方法及其应用前景 [J]. 物理学进展, 2003, 23(3): 321-388.
FANG Jinqing, CHEN Guanrong. Complexity theory of beam halo-chaos and its control methods with prospective application [J]. Progress in Physics, 2003, 23(3): 321-388(in Chinese).
- [12] 刘强, 方锦清, 李永. 具有小世界和无标度拓扑的束流传输网络中束晕-混沌的同步与控制 [J]. 自然科学进展, 2009, 17(10): 1 418-1 427.
LIU Qiang, FANG Jinqing, LI Yong. The Synchronization and control of halo-chaos in beam transport network with the small world and the scale free topology [J]. Progress in Natural Science, 2009, 17(10): 1 418-1 427(in Chinese).
- [13] 方锦清, 刘强. 束流传输网络中束晕-混沌的控制与同步方法的若干进展 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(1): 1-12.
FANG Jinqing, LIU Qiang. Advances in synchronization and control of halo-chaos in beam

- transport network [J]. *Complex System and Complexity Science*, 2009, 6 (1): 1-12 (in Chinese).
- [14] 刘强,方锦清,李永. 探索基于束晕-混沌同步的网络保密通信[J]. *原子能科学与技术*, 2009(待发表).
- LIU Qiang, FANG Jinqing, LI Yong. Exploring network secure communications based on beam halo-chaos[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009(in press).
- [15] 方锦清,李永. 网络科学中统一混合理论模型的若干研究进展[J]. *力学进展*, 2008, 38(6): 663-678.
- FANG Jinqing, LI Yong. Advances in unified hybrid theoretical models of network science[J]. *Advances in Mechanics*, 2008, 38 (6): 663-678 (in Chinese).
- [16] FANG J Q, BI Q, LI Y. Advances in theoretical models of network[J]. *Frontiers of Physics in China*, 2007, 2(1): 1-15.
- [17] 汪秉宏,周涛,王文旭,等. 当前复杂系统研究的几个方向[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2008, 5 (4): 21-28.
- WANG Binghong, ZHOU Tao, WANG Wenxu, et al. Several directions in complex system research[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2008, 5(4): 21-28(in Chinese).
- [18] ALBERT R, BARABÁSI A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. *Rev Mod Phys*, 2002, 74: 47-97.
- [19] NEWMAN M, WATTS D. Scaling and percolation in the small-world network model[J]. *Phys Rev E*, 1999, 60(6): 7 332-7 342.
- [20] NEWMAN M, JENSEN I, ZIFF R. Percolation and epidemics in a two-dimensional small world [J]. *Phys Rev E*, 2002, 65(2): 21904.
- [21] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks[J]. *SIAM Review*, 2003, 45: 167-256.
- [22] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics [J]. *Physics Reports*, 2006, 424(4-5): 175-308
- [23] SATZ H. Parton percolation in nuclear collisions [J]. *High Energy Physics-Phenomenology*, 2002; 0212046.
- [24] SANDER L, WARREN C, SOKOLOV I, et al. Percolation on disordered networks as a model for epidemics[J]. *Math Biosci*, 2002, 180: 293-305.
- [25] GAWLINSKI E, STANLEY H. Continuum percolation in two dimensions: Monte Carlo tests of scaling and universality for non-interacting discs [J]. *J Phys A: Math Gen*, 1981, 14: L291-L299
- [26] LAHERR RE J, SORNETTE D. Stretched exponential distributions in nature and economy: "fat tails" with characteristic scales [J]. *Eur Phys J B*, 1998, 2(4): 525-539
- [27] NEWMAN M E J. Assortative mixing in networks [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89 (20): 208701.
- [28] 李永,方锦清,刘强. 探讨全球核电站网络及其若干特性[J]. *原子能科学与技术*, 2009(待发表).
- LI Yong, FANG Jinqing, LIU Qiang. Exploring global nuclear plant network and its characteristics[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009(in press).
- [29] BARABÁSI A L. The origin of bursts and heavy tails in human dynamics[J]. *Nature*, 2005, 435 (7 039): 207-211.
- [30] PALLA G, DERENYI I, FARKAS I, et al. Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society [J]. *Nature*, 2005, 435(7 043): 814-818.
- [31] BRAAKMAN R, MAR J, BANERJEE A, et al. Evolution and dynamics of chemical reaction networks[R]. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [32] FEINBERG M. An introduction to chemical reaction network theory IP2[M]. YN, USA: Department of Chemical Engineering, University of Rochester, 1995.
- [33] SOLE R V, MUNTEANU A. The large-scale organization of chemical reaction networks in astrophysics[J]. *Euro Phys Lett*, 2004, 68(2): 170-176.
- [34] Digest of Papers. Ninth IEEE Symposium on Mass Storage Systems. Storage Systems: Perspectives [J/OL]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?isnumber=2470&arnumber=72769&count=28&index=0.
- [35] GLASS L. Synchronization and rhythmic processes in physiology[J]. *Nature*, 2001, 410: 277-284.
- [36] KURAMOTO Y. Scaling behavior of turbulent

- oscillators with non-local interaction [J]. Prog Theoret Phys, 1995, 94(3): 321-330.
- [37] Canadian Radiological Monitoring Network, CRWMN[EB/OL]. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/contaminants/radiation/crmn-rcsr/index-eng.php>.
- [38] 焦晓静. 从“综合体改革”和 RRW 计划透视美国核武器发展动向[J]. 现代军事, 2009(3):1-3. JIAO Xiaojing. Development trend of American nuclear weapon from synthesis reform and RRW [J]. Modern Military, 2009(3): 1-3 (in Chinese).
- [39] 中国网 2009-08-24 评论(china.com.cn 2009-0824 review)[EB/OL]. http://www.china.com.cn/military/txt/2009-08/24/content_18393104.htm.
- [40] 方锦清. 国家自然科学基金重点项目:“非线性网络的动力学复杂性研究”的突出进展和创新成果[J]. 中国科学基金杂志, 2009, 23(4): 203-208. FANG Jinqing. The key project of national natural science foundation of China: Highlighting the advances and creative achievements in the “research on dynamical complexity of nonlinear network”[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2009, 23(4): 203-208(in Chinese).
- [41] 方锦清. 非线性网络的动力学复杂性研究的若干进展[J]. 自然科学进展, 2007, 7(4):29-47. FANG Jinqing. Some advances in dynamical complexity in nonlinear network[J]. Progress in Nature Science, 2007, 7(4): 29-47(in Chinese).
- [42] 赵耿, 方锦清. 现代信息安全与混沌保密通信应用研究的进展[J]. 物理学进展, 2003, 23(2): 212-255. ZHAO Geng, FANG Jinqing. Modern information safety and advances in application research of chaos-based security communication [J]. Progress in Physics, 2003, 23(2): 212-255(in Chinese).
- [43] 刘强, 方锦清, 李永. 具有小世界和无标度拓扑的束流运输网络中束晕-混沌的同步与控制[J]. 自然科学进展, 2007, 17(10):1 418-1 426. LIU Qiang, FANG Jinqing, LI Yong. Synchronization and control of halo-chaos in beam transport network with small-world and scale-free[J]. Progress in Nature Science, 2007, 17(10): 1 418-1 426(in Chinese).
- [44] 方锦清, 汪小帆, 郑志刚. 网络科学的理论模型及其应用课题研究的若干进展[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(4):1-20. FANG Jinqing, WANG Xiaofan, ZHENG Zhigang. Several advances in theoretical modeling and related application subjectes for network science[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2008, 5(4): 1-20(in Chinese).
- [45] FANG J Q, LI Y, BI Q. From a harmonious unifying hybrid preferential model toward a large unifying hybrid network model[J]. International Journal of Modern Physics B, 2007, 21(30): 5 121.
- [46] Network science and engineering (NetSE) research agenda. A Report of the Network Science and Engineering Council, Release Version 1.1[M]. [S.l.]:[s.n.], 2009.