

基于复杂网络的禽流感病毒传播

杨洪勇^{1,2}, 张嗣瀛²

(1. 鲁东大学计算机科学与技术学院, 烟台 264025; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)



摘要: 基于复杂网络理论, 研究了禽流感病毒的传播机制。根据实证数据分析, 建立了一个禽流感病毒传播的小世界网络模型。通过对病毒传播中个体的接触程度、传染概率、潜伏期等因素研究, 分析了现在对禽流感病毒预防措施的有效性。最后, 通过对世界卫生组织公布的各地禽流感病毒爆发的数据进行统计, 说明了用小世界网络模型模拟禽流感病毒传播的可行性。

关键词: 复杂网络; 病毒传播; 禽流感; 预防和控制

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2008) 18-5001-05

Viruses Epidemics of Avian Influenza Based on Complex Networks

YANG Hong-yong^{1,2}, ZHANG Si-ying²

(1. School of Computer Science and Technology, Ludong University, Yantai 264025, China;

2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Based on the dynamics of complex network, the diffusion mechanism of the avian influenza was studied. By analyzing the fact data of the avian influenza, a small-world network model on the viruses epidemics was built. It is proved that the propositions for the avian flu disease control and prevention are valid by analyzing the epidemics of bird flu, infection probability and latent period of the viruses. Finally, from the study on the fact data promulgated at web state of the world health organization, it is showed that the small-world model to simulate the epidemics of avian influenza is feasibility.

Key words: complex networks; virus epidemics; avian influenza; prevention and control

引言

动态复杂网络的研究受到越来越多的关注。一般而言, 网络是由内部互连的大量节点组成的集合, 其中每一个节点是一个基本单元。在科学研究和人类社会的所有领域都存在网络, 比如: 计算机网络、World Wide Web、电话通信网络、国家电力互连网络、科学论文的引文网络、生态系统的食物链、神经网络等等^[1,2]。由于网络的结构经常影响着网络的性能, 例如: 社会网络的拓扑对信息的传播和疾病的传染影响很大, Internet 的网络结构影响着计算机病毒的传播范围。因此可以通过考察网络的结构来了解现实世界网络的许多特性。

基于网络结构的网络动力学研究是对网络上的动态传播行为进行定性和定量的研究, 例如: 传染病在社会人群中的传播、计算机病毒在互联网上的流行、信息或谣言在社会中的扩散都表现为网络上的疾病传播, 等等。常用的疾病传染的经典模型有: SIS 模型和 SIR 模型以及这两类模型的推广^[3]; 其中 S 表示易感人群, 他们不携带疾病病毒, 但容易被病毒感染; I 表示已经染病人群, 他们已经被疾病感染, 而且具有传染性; R 表示免疫人群, 他们被治愈, 并获得对该疾病的免疫能力, 他们不传染疾病也不会被该疾病感染。

科学家研究了疾病病毒在复杂网络上的传播过程及模式^[4,5], 分析了病毒的传播规律, 找出控制疾病流行的有效方法, 得到了若干不同于传统疾病传播理论的结论。

本文基于复杂网络的动力学理论, 分析了现在正在流行的禽流感病毒的传播机制, 建立了禽流感病毒的传播模型, 研究了禽流感病毒的传播特性。最后, 对世界卫生组织公布的禽流感传播数据进行分析, 发现禽流感病毒的防治刻不容缓。

1 复杂网络

复杂网络的研究是现在科学领域研究比较火热的研究领域, 其研究者来自图论、计算机网络、物理学、生态学、社会学、经济学等各个不同领域。传统的研究方法, 网络的结构通常被描述为一种完全随机图, 也就是由 Erdos 和 Renyi 提出的 E-R 随机模型^[6]。然而, 随着对现实社会中不同的复杂网络(如: Internet、World Wide Web、社会关系网络、科学论文引文网络等)研究的深入, 发现了许多 E-R 随机模型无法描述的现象。

为了描述从一个常规网络到一个随机网络的转化过程, Watts 和 Strogatz 提出了一个新的“Small-World”(小世界)网络模型^[7], 又称 WS 网络模型: 把一个相邻节点互连的环形网络中的任意一条连接, 按照一定的概率重新与其它节点建立连接(任意两个节点不能多于一条连接)而形成的新的网络模型。现在应用较多的是由 Newman 和 Watts 提出了一个改进的 WS 网络模型^[8]: 在一个相邻节点互连的环形网络中, 按照一定的概率, 在任意两个节点之间增加一条新的连

收稿日期: 2007-05-08

修回日期: 2007-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(60574007), 国家博士后科研基金(20060390972)和山东省教育厅科研基金(J06G03)。

作者简介: 杨洪勇(1967-), 男, 山东庆云人, 教授, 博士后, 研究方向为网络拥塞控制、复杂网络控制、网络安全等; 张嗣瀛(1925-), 男, 山东章丘人, 教授, 博导, 中国科学院院士, 研究方向为复杂系统、微分对策、大系统、非线性控制系统等。

接（两个节点不能多于一条连接）而形成的新的网络模型。WS 网络模型具有常规网络的较高的聚类系数和随机网络的较小的（节点）平均距离。研究发现，许多网络（如：电力网络、社会网络、电影演员的合作网络等）都可以用“Small-World”网络模拟。

另外一个重大发现是由 Barabasi 和 Albert 提出的“Scale-Free”（无尺度）网络模型^[9]。在复杂网络的研究过程中，Barabasi 和 Albert 发现许多现实复杂网络是不断增长的，也就是不断有新的节点加入到网络中；新的节点择优选择网络中度数大的节点产生连接。这样网络结构表现出非一致性^[10,11]：网络中大多数节点只有很少的连接，极少数节点有大量的连接（如 Internet、World Wide Web 等），而且节点的度表现出指数规律特性。

新的复杂网络模型的提出为人们认识复杂网络的动力学行为提供了新的理论根据。复杂网络的动力学研究的主要目的之一就是了解网络的传播行为，也就是为了了解疾病（或者病毒）的传播规律。一般用节点表示疾病传染或感染的个体，如果两个个体之间可以通过某种方式直接发生传染与被传染关系，就认为这两个个体之间存在连接，这样就得到了病毒传播网络的拓扑结构，进而建立相关模型来研究病毒的传播行为。许多学者对复杂网络的动力学行为进行了研究，例如：Moore 和 Newman 对在小世界网络中的 SIR 模型传播特性进行了较系统的研究^[4]，Kuperman 和 Abramson 研

究了 WS 网络上的 SIRS 模型的传播行为^[12]，Pastor 和 Vespignani 则详细研究了无尺度网络中的 SIS 模型的传播特性^[5]，Barthelemy 等细致研究了 SI 模型在无尺度网络中的疾病爆发特性^[13]，我国学者林国基等用小世界网络模型研究了 SARS 病毒的传播行为^[14]，等等。因此新的复杂网络结构的提出改变了对病毒的传播行为的认识，也吸引了越来越多的学者对复杂网络中病毒传播行为的研究^[15-18]，及其参考文献。

2 禽流感病毒的传播模型

禽流感是由 A 型流感病毒引起的家禽和野禽的一种从呼吸病到严重性败血症等多种症状的综合病症。此病又称真性鸡瘟或欧洲鸡瘟，目前在世界上许多国家和地区都有发生，给养禽业造成了巨大的经济损失。然而近年来情况却悄悄地发生了变化，禽流感的传播已经跨越了原先的范围，开始侵袭人类社会(表 1，图 1，图 2)。因此世界卫生组织以及各国政府对此病毒的传染都非常重视。

根据现在对禽流感的了解情况可知，该病毒感染方式以接触传染为主，个体根据体质强弱不同（或者具有免疫等）被感染概率不同，另外有的野禽携带病毒而不发作，但是仍然是病毒的携带者，具有传染性。现在各国政府对付禽流感病毒的策略，除了预先嫁接疫苗之外（但是现在疫苗的生产量非常小），还没有行之有效的治疗方法，对疑似病例和事

表 1 近年来世界各国禽流感感染和死亡人数

国家	2003		2004		2005		2006		2007		总数	
	确诊	死亡	确诊	死亡	确诊	死亡	确诊	死亡	确诊	死亡	确诊	死亡
亚塞拜疆	0	0	0	0	0	0	8	5	0	0	8	5
柬埔寨	0	0	0	0	4	4	2	2	0	0	6	6
中国	1	1	0	0	8	5	13	8	0	0	22	14
吉布提	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
埃及	0	0	0	0	0	0	18	10	0	0	18	10
印尼	0	0	0	0	19	12	56	46	4	3	79	61
伊拉克	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	3	2
泰国	0	0	17	12	5	2	3	1	0	0	23	17
土耳其	0	0	0	0	0	0	12	4	0	0	12	4
越南	3	3	29	20	61	19	0	0	0	0	93	42
总数	4	4	46	32	97	42	116	80	4	3	267	161

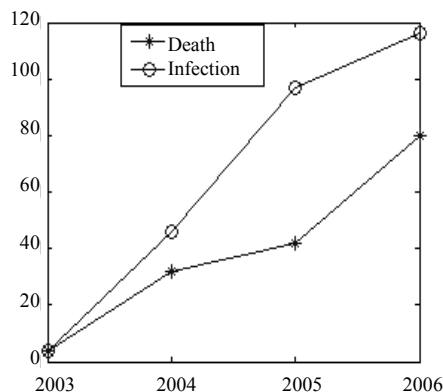


图 1 近年来禽流感感染和死亡人数

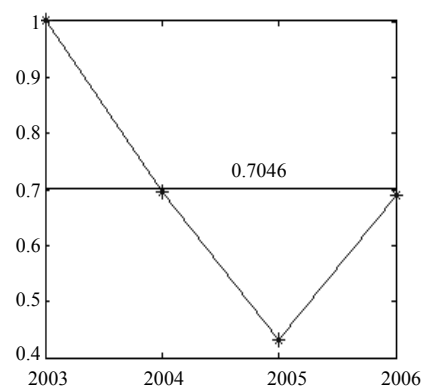


图 2 死亡率（平均值 0.7046）

实病例的处理方法一般采用隔离、焚烧和埋杀。

由于禽流感病毒主要是在局部区域中传播, 远程传播的可能性只是出现在候鸟迁徙或者长途运输。这样根据禽流感病毒的传播特点: 局部区域传播, 可以构建一个规则传播网络; 远程传播可以认为是在规则网络中按照一定的概率随机建立的远程连接。可以看到该病毒传播模型与 Newman 和 Watt 提出的 NW 小世界网络模型完全相符。下面我们应用小世界网络, 建立一个复杂网络模型来模拟禽流感病毒的传播行为。假设网络大小为 5000 个节点(结合现在世界各国的处理方式: 发现一例病毒个体, 方圆几十公里就设为一个疫区), 在该模型中一个节点可以看作一个疫区。按照 Newman 和 Watt 提出的 NW 小世界模型, 以概率 $p=0.01$ 建立一个病毒传染网络模型, 见图 3, 其中图中的远程连接表示病毒通过长途运输或者鸟类迁徙等方式传播。

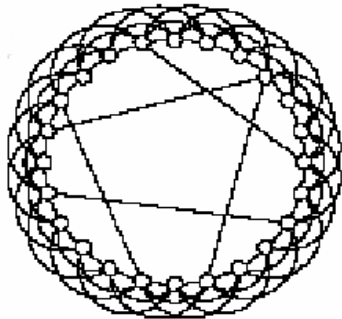


图 3 病毒传染网络模型

根据接触亲密程度, 设置网络的连接权值 k ; 设置病毒接触传染概率 p_1 决定健康的个体与病毒携带者接触后状态; 病毒携带者经过一个潜伏期 T 以后, 按照设定的病毒发作概率 p_2 (通过实际情况求出 0.7) 决定是否发作; 病毒发作后就立即处理(掩埋或者焚烧), 该网络节点变为一个健康节点(由于采用掩埋或者焚烧处理方法, 该健康节点仍然是容易被感染的节点)。这样对于任意一个网络节点, 病毒的传播模型可以看作是: $S \rightarrow I \rightarrow S$, 即 SIS 模型。

3 禽流感病毒传播分析

本节我们通过计算机仿真来研究对禽流感病毒传播的控制方法, 以及现在各国政府采用的禽流感病毒的预防和控制措施的合理性。

在模拟过程中, 记录了每天病毒携带的总的个体数(去除了病毒发作个体数) S_1 , 以及每天被感染的个体数 S_2 。假设参数设置 $k=1.1$, $p_1=0.05$, $p_2=0.7$, $T=3$ 。我们得到如下数据, 病毒在传播一段时间后, 逐渐消失(图 4)。在后面的实验中我们分别测试各个参数对传播模型的影响, 当其中一个参数变化时其它参数不变(除非特别说明)。

首先考察连接强度 k 对病毒传播的影响。对于网络模型的病毒传播研究发现存在连接强度阈值 $k_0 \approx 1.15$, 当 $k < k_0$ 时, 病毒传播一段时间后逐渐消失(如图 4, $k=1.1$)。我们

增加 k 值, 使得 $k > k_0$, 对于小的扰动当 $k=1.2$ 时, 病毒传染一段时间后, 个体被感染数量达到一个平衡值(图 5), 但是该平衡值接近于个体总数量的 60%, 可见病毒传播范围波动非常大。由于连接强度表示的是两个节点之间接触的亲密程度, 如果进一步增大连接强度(接触越来越频繁), 发现感染个体总数量逐渐接近网络中的个体总数。

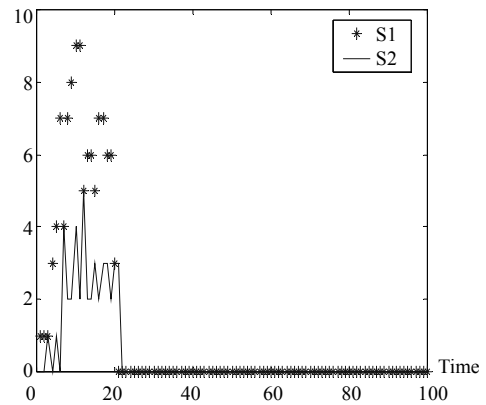


图 4 初始参数对病毒传播的影响

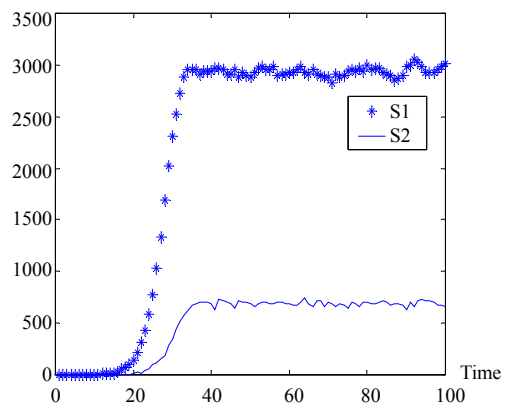


图 5 连接强度对病毒传播的影响

考察感染概率 p_1 对病毒传播的影响。存在感染概率临界值 p_0 (约为 0.055), 当 $p < p_0$ 时, 病毒传播一段时间后逐渐消失(如图 4, $p_1=0.05$)。逐渐增加 p_1 的值, 使得 $p > p_0$, 对于小的扰动当 $p=0.06$ 时, 病毒传染个体数量达到一个平衡值(图 6), 该平衡值接近于个体总数量的 50%。如果进一步增大连接强度, 发现感染个体总数量快速接近网络中的个体总数。当 $p_1=0.09$ 时, 平衡值接近个体总数量的 60%。由于感染概率表示的是健康个体对病毒的抵抗能力, 按照常规, 增加个体的免疫力(或者实行有效的控制措施), 可以有效减少个体发病率, 从而减少了病毒的扩散范围。

考察潜伏期 T 对病毒传播的影响。存在潜伏期临界值 T_0 (约为 4), 当 $T < T_0$ 时, 病毒传播一段时间后逐渐消失(如图 2, $T=3$)。逐渐增加 T 的值, 使得 $T > T_0$, 当 $T=5$ 时, 病毒传染个体数量达到一个平衡值(图 7), 该平衡值接近于总数量的 70%。由于病毒的潜伏期表示的是个体被病毒

感染后被发现的时间延迟, 如果发现及时 (T 较小), 采取合理的防治措施可以有利于病毒的扩散; 反之, 发现不及时, 病毒传染的时间越长, 危害越大。

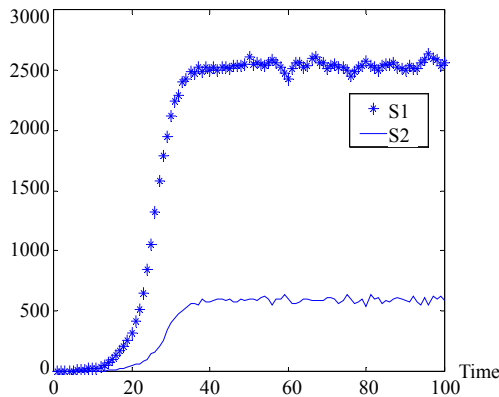


图 6 传染概率对病毒传播的影响

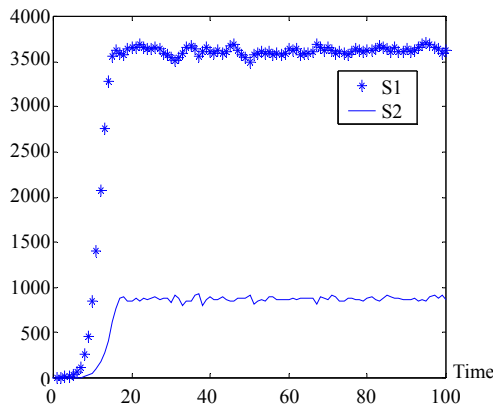


图 7 潜伏期对病毒传播的影响

最后我们考察了个体增加免疫情况, 首先对网络中的 50% 的个体增加免疫, 修改传播模型的参数 $k=1.5$, $p1=0.09$, $p2=0.7$, $T=5$ 。尽管仿真参数设置连接强度 k 、感染概率 $p1$ 、潜伏期 T 都大于前面测试得到的临界值, 但是病毒在传染一段时间后, 逐渐消失了 (图 8)。

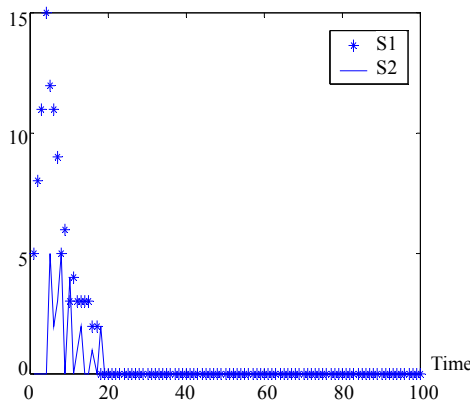


图 8 50% 的个体免疫后病毒传播情况

根据前面的研究, 我们可以看到:

- 不加控制的病毒传播是非常迅速的;

• 减少个体之间的接触, 或者实行局部疫区的隔离, 可以有效地抑制病毒的传播;

• 加大宣传力度, 尽早发现感染个体, 减少带毒个体的传染时间, 可以有效的减少被传染个体的数量;

• 预先对个体增加免疫, 可以预防病毒的大面积传播。

这些基于小世界网络模型的系统仿真研究结果, 与实际对禽流感疾病的防御措施是一致的, 也就是说, 现在我们对禽流感病毒的预防和控制措施是合理的。

4 禽流感病毒的传播状况

本节根据现在世界卫生组织公布的各地禽流感病毒传播的统计数据 (数据摘自世界卫生防护中心网络: www.info.gov.hk/info/flu/chi), 分析禽流感病毒传播的情况。我们选取了自 2005 年 9 月 4 日一直到 2005 年 12 月 10 日, 世界卫生组织公布的发生禽流感病毒的地区以及人类感染病毒的每周统计数据。在图 9 中用“o”表示每个星期发生禽流感病毒的地区数, 曲线是对数据趋势的拟和, 可以看到现在禽流感病毒传播正是逐渐扩散。我们修改上一节的仿真参数, 网络规模为 1000 个节点, 病毒传播概率 $p1=0.06$, 传播周期 $T=7$, 连接强度 $k=1$, 取出其中第 55 周到第 95 周的病毒感染的总个体数 (见图 10), 发现与图 9 的曲线非常接近。可见前面建立的病毒传播模型是有效的。

对世界各地人类感染禽流感的病例进行分析。图 11 用

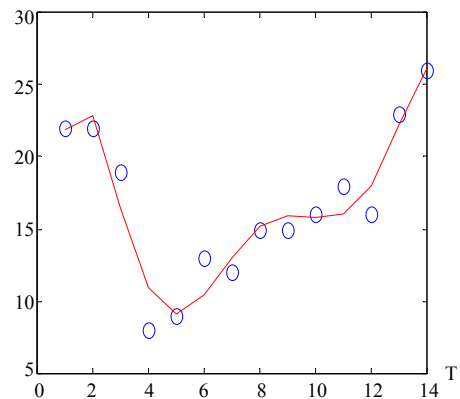


图 9 禽流感病毒发生地区数

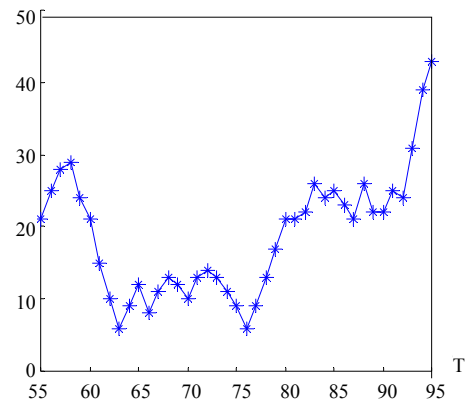


图 10 病毒传播仿真数据

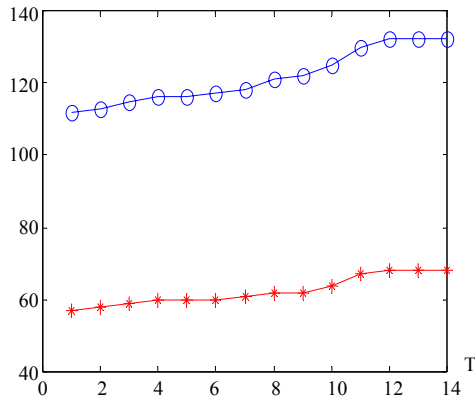


图 11 人类感染病毒总数变化图

“O—”表示的是自 2004 年 1 月起累计的个体病例总数,“*—”表示累计的感染个体死亡总数,在图中曲线变化非常小,可以看出各国政府非常重视控制禽流感病毒的传播,但是病毒仍在逐渐扩散。在近 14 周有 20 人被感染,其中 10 人死亡,可见病毒已经在人类社会已经开始扩散,而且死亡率很高。因此,对禽流感的防治刻不容缓。

5 结论

本文应用复杂网络的动力学理论来研究禽流感病毒的传播过程。基于复杂网络的特点,通过分析禽流感病毒的传播途径和传播机制,建立了一个小世界网络模型来模拟病毒的传播。以禽流感病毒的传播模型为基础,分析了连接亲密程度、传染概率、潜伏期等因素对病毒传播范围的影响。系统仿真数据的研究结论表明,现在我们对禽流感病毒的预防和控制措施是合理的。最后,研究了世界卫生组织公布的各地禽流感病毒爆发的统计数据,发现现在禽流感病毒在人类社会正在逐渐扩散。实际数据曲线和我们建立的病毒模型的传播曲线非常接近,从而说明了病毒传播模型的有效性。

(上接第 5000 页)

5 结论

仿真结果表明:提出的基于多模型内模控制策略对非线性动态系统、工作点大范围变化的系统具有较好的控制效果,且设计简单、方便,为复杂非线性系统的控制提供了一条新途径。

参考文献:

[1] Hassan Salarieh, Mohammad Shahrokhi. Indirect adaptive control of discrete chaotic systems [J]. *Chaos, Solitons & Fractals* (S0960-0779), 2007, 34(4): 1188-1201.

[2] Alvarez J, Zazueta S. An internal model controller for a class of single-input single-output nonlinear systems: Stability and robustness [J]. *Dynamics and Control* (S1672-6553), 1998, 8(2): 123-144.

参考文献:

[1] Albert R, Barabási A. Statistical Mechanics of Complex Networks [J]. *Rev. Modern Phys.* (S0034-6861), 2002, 74(1): 47-97.

[2] Newman M J. The Structure and Function of Complex Network [J]. *SIAM Review* (S0036-1445), 2003, 45(2): 167-256.

[3] Hethcote H. The Mathematics of Infections Diseases [J]. *SIAM Review* (S0036-1445), 2000, 42(4): 599-653.

[4] Moore C, Newman M J. Epidemics and Percolation in Small-World Networks [J]. *Phys. Rev. E* (S1063-651x), 2000, 61(5): 5678-5682.

[5] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemic Spreading in Scale-Free Networks [J]. *Phys. Rev. Lett.* (S0031-9007), 2001, 86(14): 3200-3203.

[6] Erdos P, Renyi A. On the Evolution of Random Graphs [J]. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci.* (S1103-467x), 1960, 5(1): 17-60.

[7] Watts D, Strogatz S. Collective Dynamics of “Small World” Networks [J]. *Nature* (S0028-0836), 1998, 393(4): 440-442.

[8] Newman M J, Watts D. Renormalization Group Analysis of the Small-World Network Model [J]. *Phys. Lett. A* (S0375-960), 1999, 263(5): 341-346.

[9] Barabási A, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. *Science* (S0036-8075), 1999, 286(5439): 509-512.

[10] Albert R, Jeong H, Barabási A. Diameter of the World Wide Web [J]. *Nature* (S0028-0836), 1999, 401(9): 130-131.

[11] Barabási A, Albert R, Jeong H, Bianconi G. Power-Law Distribution of the World Wide Web [J]. *Science* (S0036-8075), 2000, 287(5461): 2115.

[12] Kuperman M, Abramson G. Small World Effect in an Epidemiological Model [J]. *Phys Rev Lett.* (S0031-9007), 2001, 86(14): 2909-2912.

[13] Barthelemy M, Barrat A, Pastor-Satorras R, et al. Velocity and Hierarchical Spread of Epidemic Outbreaks in Scale-Free Networks [J]. *Phys Rev Lett.* (S0031-9007), 2004, 92(1): 178-701.

[14] 林国基, 贾珣, 欧阳颀. 用小世界网络模型研究SARS病毒的传播 [J]. *北京大学学报(医学版)*, 2003, 35(S1): 66-69.

[15] 刘涛, 陈忠, 陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. *系统工程*, 2005, 23(6): 1-7.

[16] 王旻, 郑应平. 基于复杂网络的疾病传播[J]. *科技导报*, 2005, 23(5): 21-24.

[17] 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.

[18] Hayashi Y, Minoura M, Matsukubo J. Oscillatory Epidemic Prevalence in Growing Scale-Free Networks [J]. *Phys Rev E* (S1539-3755), 2004, 69(2): 016-112.

[3] 张智焕, 王树青. 非线性系统的多内模控制[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2003, 37(1): 56-59.

[4] 刘红军, 赵鑫, 薛浩洋. 采用 Adaline 神经网络实现增益自适应内模控制[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(8): 1955-1958.

[5] 陈娟, 潘立登, 曹柳林. 时滞系统的滤波器时间常数自适应内模控制[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(6): 1630-1633.

[6] 廖明, 吴宁, 谢品芳. 神经网络内模控制算法的研究[J]. *电气传动自动化*, 1998, 20(4): 24-29.

[7] Awad El-Gohary, A S Al-Ruzaiza. Chaos and adaptive control in two preys, one predator system with nonlinear feedback. [J]. *Chaos, Solitons & Fractals* (S0960-0779), 2007, 34(2): 443-453.

[8] 董文瀚, 孙秀霞, 林岩. 模型参考鲁棒控制的重新设计与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(4): 799-804.

[9] 张乃尧, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998, 10: 127-132.