

复杂系统的 Scale-free 性及其宏观调控问题

Scale-free Property of Complex Systems and its Macro-control

戴冠中/DAI Guan-zhong¹, 王 林/WANG Lin^{1,2}, 覃 森/QIN Sen¹

1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710071

2. 西安理工大学自动化学院, 西安 710048

1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710071, China

2. School of Automation, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China

[摘要] 系统研究了复杂系统的 Scale-free 问题,包括复杂系统的 Scale-free 性、幂律分布的分析、Scale-free 性的形成机制、复杂系统的 Scale-free 现象,以及复杂系统 Scale-free 性的宏观调控等问题。研究结果强调:(1)从广义上说,Scale-free 性是描述大量复杂系统整体上严重不均匀分布的一种内在性质;(2)证明了只有当幂律指数在 2~3 之间时,用幂律分布所描述的大量复杂系统才具有严重的不均匀分布特性;(3)对于国计民生有重大影响的复杂系统,提出了 Scale-free 性的宏观调控的原则方法。

[关键词] 复杂系统;复杂网络;Scale-free 性;幂律分布;Scale-free 现象;宏观调控 **[中图分类号]** N94

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)05-0011-05

Abstract: Scale-free issues of complex systems, including scale-free property of complex systems, analysis of power law distribution, the evolving mechanisms for scale-free property, scale-free phenomena of complex systems, and macro-control of scale-free property, are systemically researched in this paper. We emphasize that: ① Generally speaking, scale-free property is one of the intrinsic characteristics of complex systems, which describes their overall extremely uneven asymmetry distributions; ② Various complex systems with power-law distribution are highly heterogeneous only when their scaling exponents are between 2 and 3, which is proved theoretically by the authors; ③ The macro-control principle for the scale-free property of the very important complex systems involved in the national economy and the people's livelihood is proposed.

Key Words: complex system; complex network; scale-free property; power-law distribution; scale-free phenomenon; macro-control

CLC Number: N94

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)05-0011-05

1 问题的提出

自然界、生物界、工程界、经济界和社会界中的大量复杂系统是由在微观层次上的海量个体所组成,个体之间存在着作用,如物理作用、化学作用、实际(real)连接、虚拟(virtual)联系等等。如果把个体抽象为网络节点,而个体之间的作用抽象为节点之间的

边,则复杂系统就可用一个复杂网络来描述。复杂网络描述了复杂系统的拓扑结构特性,研究复杂网络往往是研究复杂系统的一个切入点。

复杂系统主要研究其个体之间相互作用所产生的系统的整体性质与行为。复杂系统的复杂性体现在系统的整体性质与行为

收稿日期:2006-03-08

作者简介:戴冠中,男,西安市友谊西路 127 号 西北工业大学自动化学院,教授,主要研究方向为复杂系统及其控制、信息安全;

E-mail: daigz@nwpu.edu.cn

(致谢:历次珠峰测高都是由国家测绘局和总参测绘局所属大地测量大队在西藏登山队的协助下完成的。本文作者向为这一项目做出牺牲和贡献的测绘队员们、登山队员们表示衷心的感谢。)

参考文献 (References)

- [1] ANGUSLEPPAN P V. The height of Mt. Everest [J]. Survey Rev, 1982, (26): 367-385.
- [2] GULATEE B L. The height of Mt. Everest: A new determination (1952 - 1954)[M]. New Deli: Survey of India, 1954.
- [3] PORETTI G, MARCHESINIE C, BEINAT A. GPS Surveys Mount Everest [J]. GPS World, 1994, (10): 32-44.
- [4] WASHBURN B., New official height of Everest [J]. National Geo-

graphic, 1999, (11): 76.

- [5] 陈俊勇, 庞尚益, 张骥, 等. 对我国 35 年来珠峰高程测定的思考[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 1-5.
- [6] 陈俊勇. 珠穆朗玛峰高程计算[J]. 测绘通报, 1975, (4): 19-27.
- [7] 朱亮. 珠穆朗玛峰高程测定[J]. 中国科学, 1976, 19(2): 74-77.
- [8] CHEN J Y. A new determination of the height of the World Highest Peak[J]. OZIV, 1980, (1): 1-6.
- [9] 陈俊勇, 张骥, 刘允诺, 等. 珠穆朗玛峰高程的一次最新测定[J]. 测绘通报, 1993, (6): 3-6.
- [10] CHEN J Y. The newest height determination for the world's highest peak: Mt. Everest [J]. Bull Di Geod E Scien Affini, 1994, (4): 367-374.
- [11] 陈俊勇, 岳建利, 郭春喜, 等. 2005 珠峰高程测定的技术进展[J]. 中国科学, 2006, 36(3): 280-286.

(责任编辑 苏 青)

往往不是系统各个个体的状态的简单综合。因此,复杂系统的研究不能采用还原论的方法^[1],而要从整体上进行研究。

复杂系统中各个个体具有多重属性,通常我们只关注其中部分属性或某属性。设某属性的属性变量为 x , x 可以是连续量,如强度、能量、财富、收入等等; x 也可以是离散量,如人口数、网络连接数、网站访问数、社会关系的联系数等等。这里,连接数、访问数和联系数等在网络中称为节点的度。对于连续量,我们可以按一定的标度进行分级,以作离散化处理。于是,属性变量 $x=0, 1, 2, L, k, L$ 。作为复杂系统的一个整体性质,我们研究系统中海量个体对于属性变量的分布。这就要研究概率分布: $P(k)=Pr[k=x]$, $k=0, 1, 2, L$ 。从直观上说, $P(k)$ 表示复杂系统海量个体中属性变量为 k 的个体数占总体数的比率,因而它描述了复杂系统的一种总体分布,它是复杂系统的一个整体的内在性质。

复杂系统存在着各种不同的总体分布,其中有两类分布比较特殊:一类是比较均匀的分布,另一类是严重不均匀的分布。比较均匀的分布可以用泊松(Poisson)分布或高斯(Gauss)分布来描述,它们是钟形曲线(见图1)。此时,复杂系统中大部分个体的属性变量分布在其均值附近,属性变量远大于或远小于均值的个体数都很少。对于严重不均匀的分布,可以用幂律(Power law)分布来描述:

$$P(k)=CK^{-\gamma} \quad \gamma>0, k=1, 2, L \quad (1)$$

幂律分布是“L”形曲线(见图1)。此时,复杂系统中有少量个体其属性变量值非常大,而系统中大多数个体其属性变量值甚小。若属性变量是指复杂网络中节点的度值,则网络中存在着少量其度值非常大的节点(称为 Hub 点),而网络中大多数节点其度值甚小。

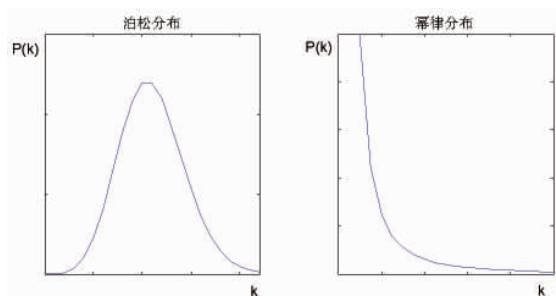


图1 泊松分布与幂律分布

Fig. 1 Poisson distribution and power-law distribution

用幂律分布来描述复杂系统中的严重不均匀分布特性,可追溯到1949年的Zipf定律^[2]。哈佛大学语言学教授Zipf研究了英语中各个词的出现频率,发现英语中有少量词(如 the, and, of...)在文章中极其频繁出现,而大多数词的出现频率甚小。他以词频大小为序进行排列,得到词频大小与排列次序之间的幂律分布关系:

$$y(k) \propto k^{-b}, b>0, k=1, 2, L \quad (2)$$

式中, k 为词频排列次序, $y(k)$ 表示排列为 k 的词相对频率。容易证明, (2) 式中的 b 与 (1) 式中的 γ 之间, 存在关系:

$$b = \frac{1}{\gamma-1}, \text{ 或 } \gamma = 1 + \frac{1}{b} \quad (3)$$

之后,幂律分布的描述又推广到城镇人口分布、社会成员收入分布、地震强度分布等问题之中。然而,用幂律分布来描述复杂系统的严重不均匀分布特性,从而引起世界上不同领域的众多科学家们广泛地关注,是源于美国物理学家 Barabási 教授的团队的工作。1999年,他们通过一年多来对万维网的研究,发现万维网中网页连接的度分布服从幂律分布,即任一网页与其他 k 个网页相连接的概率服从(1)式,而万维网中少数网页(Hub点)具有非常大的连接数,大多数网页的连接数甚小^[3]。Barabási 等把度分布为幂律分布的复杂网络称为 Scale-free 网络,亦即这类网络具有

Scale-free(无标度)性。之所以冠以“无标度”这一如今非常流行的术语,是因为(1)式的幂律分布函数具有标度不变性。

Barabási 等的发现产生了“一石激起千层浪”的效应,科学界立即掀起研究复杂网络 Scale-free 性的热潮。Scale-free 问题之所以受到广泛关注,主要原因有以下3点。

● Scale-free 性质的普遍性:在自然界、生物界、工程界、经济界和社会界等领域,众多科学家用实证研究方法,相继发现大量复杂网络的度分布均具有幂律分布特性,因此,这种描述复杂系统严重非均匀分布的 Scale-free 性具有普遍性。

● Scale-free 现象的非寻常性:具 Scale-free 性质的复杂系统在内、外部作用下的动力学行为,可称为 Scale-free 现象。初步研究表明,此类复杂系统具有一系列非同寻常的 Scale-free 现象。

● Scale-free 问题的重要性:一些具有 Scale-free 性的复杂系统,特别是工程界、经济界、社会界的一些复杂系统对国计民生有重要意义,我们必须对其加强研究。

本文系统地研究了复杂系统的 Scale-free 问题,包括复杂系统的 Scale-free 性、幂律分布的分析、Scale-free 性的形成机制、复杂系统的 Scale-free 现象,以及复杂系统 Scale-free 性的宏观调控等问题。本文期望起到抛砖引玉的作用,促进不同领域的科学工作者密切注视复杂系统的 Scale-free 问题,深入对其进行研究。

2 复杂系统的 Scale-free 性

1998年,Barabási 等利用网络机器人对万维网中网页之间连接的拓扑关系进行递归搜索。万维网是一个有向图,节点是位于网站服务器中的超文本,边是从一个超文本指向另一个超文本的超连接(URLs)。他们惊讶地发现^[4]:万维网中超过80%的网页的连接数小于4个,而占总数不到0.01%的少数网页却有1000个以上的连接数。更有甚者,有一网页竟与200万个其他网页相连接。通过实证研究,他们发现,无论是节点的出度(从该节点指向其他节点的连接数),还是节点的入度(从其他节点指向该节点的连接数),均服从幂律分布;其中,入度幂律指数为2.1,出度幂律指数为2.45。他们称这种网络为 Scale-free 网络,或具有 Scale-free 性的网络。

Scale-free 网络具有严重的异质性,其各节点之间的连接状况(度数)具有严重的不均匀分布性:网络中少数称之为 Hub 点的节点拥有极其多的连接,而大多数节点只有很少量的连接。少数 Hub 点对 Scale-free 网络的运行起着主导的作用。

从广义上说,Scale-free 性是描述大量复杂系统整体上严重不均匀分布的一种内在性质。事实上,在各种不同的复杂系统中,我们所关注的属性变量可以是地震强度、词的出现频率、城镇人口数、个人财富或收入、学生的智商水平、网络服务器的访问数等等。大量的实证研究表明,各种形式多样和性质迥异的复杂系统都受到 Scale-free 性质的制约。我们列举一些典型实例来说明。

地震网 Abe 和 Suzuki 等研究了地震网络^[5],他们将所考察的地理区域划分成若干个方格区域,地震网络的节点是指发生过地震的方格。在时间上相继发生震动的两次地震若分属不同的方格区域,则在这两个方格区域所对应的节点之间连上一条边;若属于同一方格区域,则在对应的节点上加上一个自环。随着时间的进展,地震网络中节点数量显然将会增加。他们的研究表明,地震网是一个 Scale-free 网络。这一结论与传统的 Gutenberg-Richter 定律是吻合的,即地震强度服从幂律分布。

食物链网络 Montoya 和 Sole 对3种不同类型的食物链网络(Ythan estuary web, Silwood web 和 Little Rock lake web)进行了研究^[6],发现其中节点的度值服从幂律分布。这说明一些生态系统也具有 Scale-free 性质。

蛋白质网络 蛋白质网络探讨的是生物体中蛋白质的相互作用问题,其中网络的节点是蛋白质,若两个蛋白质之间存在相

互作用,则在相应的节点之间连上边。Jeong 和 Barabási 等分析了蛋白质网络的结构,发现蛋白质网络也是 Scale-free 网络^[7]。这说明 Scale-free 性质也存在于生物界。

互联网 互联网可以在两种意义上形成复杂网络:路由器层和自治系统(Autonomous system)层。路由器层次上的节点是路由器,边是连接路由器的物理链路;自治系统表示互联网中遵循共同的路由策略且受同一个实体控制的 IP 网络及路由器的集合,自治系统层上的节点是自治系统,边是自治系统间的物理链路。M.Faloutsos、P.Faloutsos 和 C.Faloutsos 三兄弟对上述两种层次上互联网的结构进行了研究,发现了两个层次的互联网均具有 Scale-free 性质^[8]。

科学引文网 引文网络中的节点是所发表的文章,如果一篇文章引用了另一篇文章,则在相应的两个节点之间连上一条边。Redner 发现引文网络具有 Scale-free 性质^[9]。

经济网络 社会中个人收入以及个人财富均服从幂律分布,这说明幂律关系在经济生活中也是存在的。澳大利亚学者 Matteo 和 Aste 等构造财富交换网络,把个人收入及个人财富视为网络中节点的度值,他们从理论和实证研究两方面论证了个人收入或财富服从幂律分布,即财富交换网络具有 Scale-free 性质^[10]。

上述各个例子说明,Scale-free 性质普遍出现在自然界、生物界、工程界以及人类社会界的复杂系统之中,无论是在人造系统中,还是在自然形成的系统中,Scale-free 性质均会显现出来。可以认为,Scale-free 性是复杂系统的一种普遍存在的内在性质。

3 幂律分布的分析

本节我们着重指出,幂律分布(1)式中,只有当幂律指数 γ 在 2~3 之间时,幂律分布所描述的复杂系统才具有严重的不均匀分布性。幂律分布有下列特点。

1) 无标度性。改变(1)式中离散化的标度(度量单位),其函数形式不变,幂律指数仍为 γ 。因此,幂律分布具有不依赖于度量单位的无标度性。

2) 具有 Hub 点。幂律分布曲线呈“L”状,这是具有长尾(heavy-tailed)特征的衰减曲线(见图 1)。下面研究 γ 在 2~3 之间时 Hub 点的情况。设 K 为非常大之数值,此时, $P(k) \propto k^{-\gamma}$ 甚小,它属于小概率事件,因而属性变量非常大的 K 值所对应的 Hub 点数

甚少。然而,可以证明(作者将另撰文发表详细证明过程):

$$P(k \geq K) \propto k^{-(\gamma-1)} \quad (4)$$

当 γ 在 2~3 之间时,(4)式表明, $P(k \geq K)$ 已不可忽视,它不再是小概率事件。此时,“L”状曲线的长尾拖得很长,使得大于等于 K 值的所有 Hub 点已有一定数量。

3) 幂律指数 γ 。(1)式的幂律分布主要由幂律指数 γ 所确定。事实上,设属性变量的最大值为 M (对节点总数为 N 的复杂网络, $M=N-1$),于是存在关系:

$$\sum_{k=1}^M P(k) = 1 \quad (\text{完备性}) \quad (5)$$

(1)式可改写为:

$$P(k) = \left(\sum_{i=1}^M i^{-\gamma} \right)^{-1} k^{-\gamma} \quad (6)$$

设属性变量的均值为 μ , 方差为 σ^2 , 则:

$$\mu = \left(\sum_{i=1}^M i^{-\gamma} \right)^{-1} \sum_{i=1}^M k^{-\gamma-1} \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \left(\sum_{i=1}^M i^{-\gamma} \right)^{-1} \sum_{i=1}^M k^{-\gamma-2} - \mu^2 \quad (8)$$

因此,均值 μ 、方差 σ^2 也主要由幂律指数 γ 所确定。虽然(7)、(8)式均不是解析式,但 μ 和 σ^2 的数值关系易于计算确定。当 $M \rightarrow \infty$ 时,均值 μ 和方差 σ^2 则由 γ 完全确定。

下面分析 γ 不同取值的各种情况。为使物理概念清晰,我们研究复杂网络,即属性变量为节点的度值。本文仅给出结论,其数学证明作者将另撰文发表。

● $0 < \gamma < 1$ 。当网络规模 $N \rightarrow \infty$ 时,度值的均值和方差均发散。网络的总边数与完全网络的总边数 $N(N-1)/2$ 处于同一数量级。实际的复杂网络都是稀疏网络,故此情况在实际网络中往往是不存在的。

● $\gamma = 1$ 。同上述情况,但网络总边数的数量级为 $N^2/\ln N$,这在实际网络中也总是不存在的。

● $1 < \gamma < 2$ 。当网络规模 $N \rightarrow \infty$ 时,度值的均值与方差均发散,说明此种情况下网络的 Hub 点较多。网络总边数的数量级为 $N^{3-\gamma}$,仍属于边数较多的网络。对于工程类网络而言,若 Hub 点偏多,意味着建设成本大为提高,这是不可取的。

这类网络有:Ythan estuary($\gamma=1.05$), Silwood Park($\gamma=1.13$), IP Backbone ($\gamma=1.867$), BBS 会员网 ($\gamma=1.6:1.9$), 等等。食物链网络 Ythan estuary 和 Silwood Park 的 γ 略大于 1,这说明相应网络的边数很多,意味着动物的捕食范围较为广泛。IP Backbone 虽属于工程类网络,但为保证骨干节点之间通讯的顺畅,骨干节点之间的链路就较多,网络的 Hub 点也将偏多,从而网络的 γ 小于 2。BBS 会员网络是一个会员之间的虚拟网络,会员之间的虚拟(virtual)联系不受技术资源的制约,而是受到社会思潮的影响,其小于 2 说明存在相当比例的 Hub 点会员,也间接说明热点话题较多。

● $\gamma = 2$ 。与 $1 < \gamma < 2$ 情况类似。

● $2 < \gamma \leq 3$ 。当网络规模 $N \rightarrow \infty$ 时,度值的均值收敛而方差发散。这两点说明了网络中节点度分布的严重不均匀性。事实上,度值的方差发散,说明网络中出现了度值非常大的 Hub 点;度值的均值有限,一方面说明 Hub 点是少量的,另一方面说明网络中必定存在其度值甚小的大量节点。

Barabási 等所指的 Scale-free 网络,就是指幂律指数 γ 在 2~3 之间的复杂网络^[4]。Barabási 等在文献[4]中提出,为何 Scale-free 网络的 γ 在 2~3 之间,其原因尚不明。我们另将发表的论文中给出的证明,从数学上解释了这一问题。

这类网络有:Internet AS ($\gamma=2.2$), Internet Router ($\gamma=2.48$), Phone call($\gamma=2.1$), Movie actors($\gamma=2.3$), 等等。Internet AS 和 Internet Router 是工程类网络,为了保证通信效率,必须建设 Hub 节点,但由于受到成本的制约,Hub 节点又不能太多,总的线路(边)也不能太多,因而其 γ 位于 2 和 3 之间。Phone call 是某一天的电话呼叫所形成的网络,虽然它不是工程类网络,但由于受到通信成本(话费)的制约,其 γ 的范围与工程类网络类似。Movie Actors 的 γ 位于 2 和 3 之间,说明存在一定数量的 Hub 明星演员,但其数量不是特别多,原因之一还是受到明星演员的成本的制约。这或许从一个侧面说明,为什么在大量影片中总会出现那么几个熟悉面孔(少数几个 Hub 明星演员)。

● $\gamma > 3$ 。当网络规模 $N \rightarrow \infty$ 时,度值的均值和方差都收敛,并随着 γ 的增加,均值和方差都减小。此时复杂网络中大多数节点的度值很接近,网络中即使存在高度值的节点,其数量也极少,因此,这类网络类似于随机网络。这类网络不宜用作通讯,一方面由于它不能抵御网络的随机故障(因其类似于随机网络),另一方面其通讯效率极低(因高度值的节点非常罕见,即通讯枢纽奇缺)。

Sexual Contacts($\gamma=3.4$)属于这类网络,事实上,该种网络类似于随机网络。

4 Scale-free 性的形成机制

前面已指出,描述复杂系统严重非均匀分布的 Scale-free 性无论在自然界,还是在工程界(人造系统),以及经济界和社会界(人参与的系统)中都是非常普遍的。另一方面,具有 Scale-free 性

的复杂系统所遵循的数学定律(幂律分布)是如此难以置信地简单。下面我们研究隐藏在其后的 Scale-free 性的形成机制。

Barabási 等认为,万维网之所以具有 Scale-free 性质是因为两个要素:一是万维网中超文本的数量随时间不断增加,即增长性;二是新增超文本倾向于添加指向知名超文本的链接,即择优性。可以看出,按照这两个要素进行演化,指向万维网中少数几个知名超文本的链接数不断膨胀;而绝大多数超文本由于知名度极低,因而除少数知情者以外,很少有超文本与之链接。因此,演化的结果必然会形成少数链接数极高的超文本(Hub 点),而绝大多数超文本的链接数很低。Barabási 等据此建立了一个具有 Scale-free 性的复杂网络的演化模型(BA 模型),模型仿真结果与实证结论基本吻合。

上述两个因素中,增长性意味着复杂系统形成 Scale-free 性的过程是一个动态演化过程;而择优性则是复杂系统形成严重不均匀分布的本质原因。万维网、互联网、科学引文网等等人造网络很明显地具备了这一要素,其中更深层次的原因应该是成本、效率等因素。如在万维网中,一个超文本若要具有很大的链接数,就必须增加投入(如广告费)以提高知名度,这就是成本问题。

再举经济网络中的一个例子。网络节点包括个人或单位,在具有经济往来的两节点之间连上一条边。在市场经济下,强大的企业高薪聘任优秀的员工,而优秀的员工也选择能支付高薪的强大企业。一个员工能进入支付高薪的企业的条件应是良好的教育背景、恰当的关系资源与合适的机会,即他获得高薪的条件往往是要预先支付教育成本、关系成本或机会成本,这一特征又会通过亲戚关系、朋友关系进行递归,最终形成富者越富的局面。因此,促使经济网络形成幂律长尾的深层次原因还是与成本有关。地震网络具有 Scale-free 性的原因,是由于一次强力地震可以引发一系列强度较弱的余震,从而使地震强度服从幂律分布。而食物链网络的 Scale-free 性则来源于进化论的学说,即弱肉强食、适者生存。

总之,不同类型复杂系统的 Scale-free 性具有不同的根源,但择优连接、强者越强、富者越富等等的正反馈因素是其共同的特征,即形成 Scale-free 性的复杂系统一定具有明显的“马太效应”。

应当指出,复杂系统在其形成 Scale-free 性的动态演化过程中,其个体之间正反馈的“马太效应”不可能是无限制的。事实上,一旦演化过程达到稳态,其严重不均匀分布特性亦已确定,而用幂律分布来描述,进一步说,用其幂律指数 γ 来描述。

还应当指出,虽然形成 Scale-free 性的动态演化过程是长期过程,但对于有人参与的复杂系统,随着外界信息的越加丰富,人们越加容易找到“择优”的对象,从而加快了复杂系统 Scale-free 性的形成,缩短了动态演化阶段的时间。

5 复杂系统的 Scale-free 现象

Scale-free 性是大量复杂系统的一种内在性质。具有 Scale-free 性的复杂系统在外界作用下所呈现的行为,称为复杂系统的 Scale-free 现象。

我们仍研究物理概念清晰的 Scale-free 网络,这些网络的幂律指数 γ 在 2~3 之间,其中少量 Hub 点控制了网络中绝大多数的连接,它们由此主导了网络的 Scale-free 现象。

1) Scale-free 网络对随机攻击或故障具有很强的鲁棒性。例如,对于 Internet 网、万维网、科学引文网、新陈代谢网、电话呼叫网等等,由于大多数节点所拥有的连接数很少,这些节点发生故障或遭受攻击将不会对整个网络产生根本性的影响。因而,Scale-free 网络对意外故障具有极强的容错性。

2) Scale-free 网络对定向攻击具有极大的脆弱性。对于上述复杂网络,由于少量 Hub 点拥有大多数的连接,因而 Internet 网

的攻击者只须花费极少的代价去攻击部分的 Hub 点,就可能造成整个网络的崩溃。一般来说,只要同时毁坏所有 Hub 点的 5%~10%,Internet 网的整体连通性就被破坏,整个系统就将崩溃。

3) Scale-free 网络的一个负面效应是对“病毒”传播的不可抗拒性。这里是指广义的“病毒”,它可以是传染病病毒、计算机病毒、流言等。Scale-free 网络中只要存在“病毒”节点,这些节点就可能连接到至少 1 个 Hub 节点,一旦 1 个 Hub 节点被感染,就会将“病毒”大量传染至其他节点,包括其他 Hub 点,从而造成大面积的危害。理论上已经证明^[11],幂律指数 γ 在 2~3 之间的 Scale-free 网络对于“病毒”的传播,其阈值为零。因此,为防止病毒传播,Hub 点应该作为重点防范对象。

4) Scale-free 网络中 Hub 点的经济性和高效性。对于 Internet 网或万维网等等工程类网络,少量高带宽的 Hub 点构成了 Scale-free 网络的通讯枢纽或信息资源集散地,因而 Scale-free 网络的制造、维护成本低,通讯效率或资源共享能力高。

应当指出,由少量 Hub 点所主导的复杂系统的 Scale-free 现象,具有正面或负面的作用,这取决于具体问题。例如上述 2),若高水平的黑客攻击通讯网络的 Hub 点,这就是严重问题;然而,若药物学家能创造出定向药物,专门攻击有害细胞或细菌的 Hub 点,则对人类是一大福音。对于 3),Scale-free 通讯网络既易于传播流言,但也十分有利于正面的思想、文化和广告的传播^[12]。

关于复杂网络的 Scale-free 现象的研究,包括发生在 Scale-free 网络上的过程与行为动力学的研究,目前仍处于初级阶段。当前,该领域最成功之处在于对计算机网络和社会网络上传染过程的研究,以及网络节点故障对通讯网络性能影响的研究等^[13]。事实上,上述 1)、2)、3)就是 Scale-free 网络上的渗流动力学的具体应用。

6 复杂系统 Scale-free 性的宏观调控

许多具有 Scale-free 性的复杂系统是涉及国计民生的重大系统。前面已指出,复杂系统的 Scale-free 性确定了系统的 Scale-free 现象,而 Scale-free 现象可具有正面作用或负面作用。因此,我们提出这样的问题:是否可以通过调控复杂系统的 Scale-free 性,使系统的 Scale-free 现象朝着加大正面作用或减少负面作用的方向改变呢?这即复杂系统 Scale-free 性的宏观调控问题。

对于人造系统(如工程类复杂系统)和人参与的系统(如经济类系统、社会类系统等),我们认为也存在着宏观调控其 Scale-free 性的可能性。事实上,系统既然是人所设计的,或者由人作为个体所参与的,那么,不论在形成复杂系统 Scale-free 性的动态演化阶段,或者复杂系统 Scale-free 性业已形成的稳态阶段,都有可能人为地对系统施加调控作用。

6.1 称之为“宏观调控”的原因

6.1.1 宏观调控目标

从复杂系统的宏观层面上制订整体性的调控目标,这种宏观调控目标不一定与所有个体或个体群的自身目标完全一致。复杂系统在整体上的 Scale-free 性决定了系统只具有一个关键参数,即幂律指数 γ 。因此,系统 Scale-free 性的宏观调控问题实际上就是对 γ 的调控。但是,幂律指数 γ 通常缺乏物理意义,应当寻找其他可替代的且具有物理意义的参数。当幂律指数 γ 在 2~3 之间时(绝大多数具有 Scale-free 性的复杂系统均具备这一特点),属性变量的均值 μ 是存在的,由(7)式确定。可以证明, μ 关于 γ 单调递减。在许多实际系统中, μ 可以统计获取,因此它是可以替换 γ 的一个参数。

另一方面,属性变量方差 σ^2 通常是衡量系统中个体的属性值偏离均值 μ 的平均程度。但是对于 γ 在 2~3 之间的复杂系统而言,方差是发散的。然而,由于实际系统中个体的数量总是有限的,因而其方差还是存在的,只不过是更大一些。也可以证明,方差

σ^2 关于 γ 单调递减,而且,一旦 γ 超过 3,方差将收敛。同样, σ^2 也可以统计获取,也可替换 γ 。

因此,我们可以利用复杂系统幂律分布的均值 μ 和方差 σ^2 作为被调控变量,来对系统进行宏观调控。

6.1.2 宏观调控手段

对复杂系统 Scale-free 性的调控可以在宏观层次上,或者在微观层次上进行。微观调控手段是一种直接作用于个体或个体群的调控,它是局部性的“硬调控”。很明显,微观层次上只有针对 Hub 点的调控才能奏效。例如,通讯网络中对其 Hub 点实施严格防护,因而对计算机病毒传染的动力学而言,可以认为这些 Hub 点已移除,从而改变了网络的拓扑结构,即改变了幂律指数。

我们主要研究宏观调控。与微观调控手段不同,宏观调控手段是为了达到宏观调控目标所采取的一种间接影响全体或绝大部分个体或个体群的调控,它是全局性的“软调控”。以经济系统为例,宏观调控可以有政策、法律、法规、规则等等“软调控”手段,它们以引导、限制、约束、鼓励等等方式,通过利益调节和行为引导的调控,间接影响经济系统中的个人、单位和集团,从而使整体的经济系统逐步达到宏观调控的目标要求。

6.2 复杂系统 Scale-free 性的宏观调控的一般原则

1) 确定宏观调控的目标。由复杂系统 Scale-free 现象的需求,映射为复杂系统 Scale-free 性的均值 μ 、方差 σ^2 的目标值。

2) 统计复杂系统的现状。对复杂系统中相关的大量数据进行统计处理,获得复杂系统 Scale-free 性的均值 μ 、方差 σ^2 的统计值。

3) 给出复杂系统 Scale-free 性的目标与现状的差距。即给出复杂系统 Scale-free 性的均值 μ 、方差 σ^2 的目标值与统计值的差值。

4) 持续地采取恰当的宏观调控手段,以有效地改变复杂系统 Scale-free 性的均值 μ 、方差 σ^2 的实际值,从而逐步地减小或消除上述差值。

很明显,上述宏观调控原则是一种闭环负反馈的调控方式,如图 2 所示。

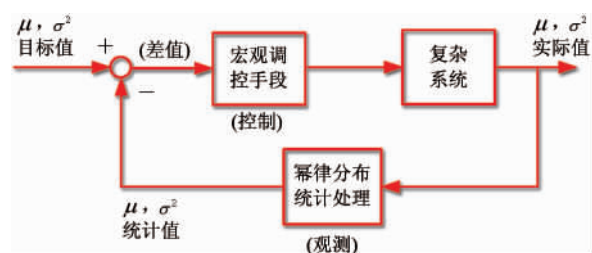


图 2 宏观调控方式示意图

Fig. 2 The scheme of macro-control principle

以经济系统为例,我们可以统计得到人均收入(均值),同时我们还可以统计得到基尼系数(与方差 σ^2 具有正比关系)。对于经济系统的宏观调控应该达到两个目标:大的均值和恰当的方差。其中,大的均值尤为重要,它直接关系到国家的总体实力。前面已指出,均值 μ 的增加意味着幂律指数 γ 的减小,可是 γ 的减小引起方差 σ^2 及基尼系数的增加,这不利于社会的稳定。因此,在这两者之间必须加以权衡,亦即必须采用合适的宏观政策持续地加以调控,使得均值 μ 和方差 σ^2 满足经济发展的需要。

6.3 实现上述原则所面临的挑战

以上我们仅仅提出了复杂系统 Scale-free 性的宏观调控的一般原则和方法。要使上述原则和方法在具体的复杂系统上得以

实现,我们还面临着以下一系列的挑战。

1) 确定宏观调控的均值 μ 、方差 σ^2 的目标值,是极其困难而复杂的问题。

2) 可观测问题。对有些复杂系统,我们难以甚至无法获得全局性的海量统计数据,从而得不到系统 Scale-free 性的均值 μ 、方差 σ^2 的统计值。这样的系统称为“不可观测”的系统。

3) 可控制问题。对有些复杂系统,我们难以甚至无法给出合适的宏观调控手段,以有效地改变系统 Scale-free 性的均值 μ 、方差 σ^2 的实际值。这样的系统称为“不可控制”的系统。

4) 超长时滞的闭环控制系统。对于用宏观调控手段以改变复杂系统 Scale-free 性的“控制环节”,以及搜集复杂系统中相关的大量数据以进行统计处理的“观测环节”,两者均是超长时滞的环节,且时滞的大小是不确定的,因而这种闭环系统的调控是非常复杂的。

以上我们研究了复杂系统在稳态阶段的 Scale-free 性的宏观调控问题。有些复杂系统在形成其 Scale-free 性的动态演化过程中,也可以进行宏观调控,包括:① 对“增长性”的宏观调控,以加速或减缓动态演化过程;② 对“择优性”的宏观调控,以影响稳态阶段的幂律指数 γ 值。但这些都不是反馈型的调控,而是预测型的调控,在实施中可辅以数字仿真方法。

7 结语

广泛存在于各个领域中的复杂系统的 Scale-free 性、Scale-free 现象及其宏观调控问题,是当前复杂系统研究中具有普遍性和重大意义的前沿交叉课题,需要自然科学工作者、社会科学工作者和工程技术人员通力合作,针对一个个具体的复杂系统,从“多因素、多层次、多方面入手研究”。这也是落实科学发展观的一项重要研究课题。

参考文献(References)

- [1] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志,1990,13(1): 3-10.
- [2] ZIPF G K. Human Behavior and the Principle of Least Effort[M]. Cambridge: Addison-Wesley,1949.
- [3] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999,286(5 439):509-512.
- [4] BARABÁSI A L, BONABEA E. Scale-Free Networks [J]. Scientific American, 2003, 5: 50-59.
- [5] ABE S, SUZUKI N. Scale-free network of earthquakes [J]. Europhys Lett, 2004, 65(4): 581-586.
- [6] MONTOYA J M, SOLE R V. Small World Patterns in Food Webs [J]. J theor Biol, 2002, 214: 405-412.
- [7] JEONG H, TOMBOR B, et al. The large-scale organization of metabolic networks[J]. Nature, 2000, 407:651-654.
- [8] FALOUTSOS M, FALOUTSOS P, et al. On power-law relationships of the Internet topology [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1999,29(4): 251-262.
- [9] REDNER S. How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution[J]. Eur Phys J B, 1998,4:131-134.
- [10] MATTEO T D, ASTE T, et al. Exchanges in complex networks: income and wealth distributions[EB/OL]. cond-mat/0310544.
- [11] PASTOR-SATORRAS R, VESPIGNANI A. Epidemic spreading in scale-free networks[J]. Phys Rev Lett,2001(86):3 200-3 203.
- [12] 李幼平. 无尺度现象引发的思考 [EB/OL][2006-02-12].//http://news.xinhuanet. com/newmedia/ 2005-03/17/ content_2710396. htm.
- [13] NEWMAN M E J.The structure and function of complex networks[J].SIAM Rev, 2003(45):167.

(责任编辑 苏 青)