

中国电力网的复杂网络共性^{*}

陈洁 许田 何大韧

(扬州大学物理科学与技术学院 江苏扬州 225002)

[摘要] 自然界中许许多多包含大量基本单元的复杂系统可以用复杂网络来描述。近年来发现各种不同领域的复杂网络具有一些共性。本文介绍我们统计得到的中国电力网所具有的符合这些共性的性质,以及基于这些共性所提出的一个可能在这种粗糙程度上再现中国电力网发展历程的动力学模型。这种对电力网极其简化的描述思路,也许可以给电力网建模的研究提供一些启示。

[关键词] 中国电力网 复杂网络 动力学模型 **[中图分类号]** O41 TM7

对具有十分重要的技术和经济价值的电力网的研究已经有很长的历史。研究人员在对电力网的性质和模型的研究中特别注重电力网系统的独特性质,旨在寻求解决某些或某个具体问题的途径,例如电力网运行的稳定性、电力网各处的电流或电压分布、电力网的安全性和控制对策以及电力网的扩展规划,等等。然而,也许可以从一个不同的、极其简化的角度来看电力网,只研究它的一些总体的、基本的性质,而后再慢慢探求它的用处。

如果把电力网看作许多高压输电线的集合,这些高压输电线的连接点就是对电网输电或耗电的“电站”,或者是理想情况下不输电也不耗电、仅仅改变或分配电能的“变电站”。如果不加区分地把它们都称为“顶点”,并且把各种高压输电线都称为“边”,电力网就抽象、简化为一张普遍意义上的“复杂网络”。自然界中具有这种网络结构的系统很多,它们都可以用一张网络,或计算数学的一个分支——图论中的一张“图”来进行一定程度的描述。尽管图论的研究已经有几百年的历史,然而1998年以前的研究都局限于少数顶点(几百个以下)构成的小规模图,研究的方法也局限于类似于几何学中的看图和分析的方法,以及在此基础上的矩阵法和计算机解法。由于现代计算机和通讯网络技术的发展,1998年以来图论(复杂网络)的研究进入了一个新阶段,注意力转到大量的顶点(常常达到几十万个)和边构成的大规模网络的统计性质。相应地,就不再依赖研究者的“感官”,而转为采用统计物理学的各种方法。这种趋势也许会逐渐对各个具体网络系统的研究产生影响。

一、实际网络的共性

已经进行过比较仔细研究的实际网络,有社会网络(亲朋关系网、商业关系网、演员合作网、科研合作网、电子邮件网、电话通话网等)、信息网络(论文引用网、World Wide Web、专利使用网、计算机共享网等)、技术网络(电力网、自然河流网、Internet网、电话线路网等)、生物网络(代谢途径网、蛋白质相互作用网、基因调节网、食物链网、神经网络等)等等。1998年以来发现了这些实际网络的一些共

性。跳出具体的技术问题,探讨一下中国的电力网是不是也具有这些共性,也许有长远的意义。这些共性中最主要的是 Watts 和 Strogats (WS) 指出的小世界特性^[1,2],以及 Barabasi 和 Albert (BA) 指出的无标度特性^[1,3]。描述这些特性的统计参量是:(1) 平均道路长 $\langle l \rangle$ ——沿最短道路连接任意两个顶点的边数的平均值;(2) 分支系数 C ——每个顶点的分支系数为该团簇(即与此顶点有边连接的其它顶点的集合)中实际存在的边数和最大可能边数的比值,网的分支系数 C 是所有顶点的分支系数的平均值;(3) 顶点度 k ——某一个顶点的边数,可用分布函数 $P(k)$ 来描述具有相同顶点度 k 的顶点的出现概率。在双对数坐标上的 k - $P(k)$ 对应曲线为直线,它的斜率即为 $P(k) \sim k^{-\gamma}$ 规律(称为幂律)的标度因子^[1-3]。

一个合适的动力学模型可能十分有益于理解网络系统为什么具有这些共性。例如,小世界特性是指网络处在规则与随机之间。这里的“随机”是指网络的拓扑结构没有简单的确定的法则(例如在空间中的周期性),与网络的建设是否经过规划不一定相关。有不少实际网络(例如电力网、交通运输网等)发展的每一步都是经过规划的,但规划取决的因素很多,各个因素又可能非常不同,以至于看不出所建设的网络在拓扑结构上有什么简单、确定的法则。这样的网络结构仍可以说具有随机的成分。WS 提出的小世界网模型是在一个规则局域结构(类似于一个“晶体格子”)的基础上以一定概率去掉一些规则边,加上一些随机跳跃的远程连接边构成的。他们解析并数值地证明了:当此概率为零时,规模展示为一个规则网,具有大的平均道路长 $\langle l \rangle$ 和大的分支系数 C ;当此概率为 1 时,模型展示为一个随机网,具有小的平均道路长 $\langle l \rangle$ 和小的分支系数 C ;当此概率在 0 和 1 之间的一个相当大范围中时,模型展示为一个小世界网,具有小的平均道路长 $\langle l \rangle$ 和大的分支系数 C ^[1,2]。相应地,无标度特性是指 $P(k)$ 遵从幂律 $P(k) \sim k^{-\gamma}$ 。BA 提出的无标度网模型的核心是所谓“线性优选法则”,即新出现的顶点连接一个旧顶点的概率与这个旧顶点的顶点度成正比。也就是说,一个顶点的边越多,越会连接更多的边。BA 解析并数值地证明了这种线性优选法则一定导致 $P(k) \sim k^{-\gamma}$ 幂律,而且这幂律一定是由这种线性优选法则所致^[1,3]。因此,无标度特性就说明这种网络是依照“富的更富,穷的更穷”

^{*}国家自然科学基金资助项目(10275053)。

的法则建设的。 $WS^{[2]}$ 和 $BA^{[3]}$ 都在他们的原始文献中列举了美国西部的电力网作为例子,他们对4941个顶点的统计结果证明美国西部电力网既是一个小世界网,又是一个无标度网^[1-3]。因此,如果能在 WS 和 BA 模型的基础上提出一个综合它们特点的、十分简化的模型,在传统的方法之外另辟蹊径来说明中国电力网的发展过程和统计共性,对中国的电网建设一定具有指导意义上的参考价值。

二、电力网的统计结果: 小世界和无标度性质

我们尽可能地搜集了中国电力网的有关数据^[4-9],按照上述统计方法得到了中国电力网的一些性质,结果如表1所示。与文献[1-3]对普遍模型和美国西部电力网的报道相比,表1所列的分支系数和平均道路长的数据说明中国电力网是典型的小世界网。它具有比较小的平均道路长,说明任意两个顶点(电站或变电所)都可以经过网络比较方便地连接;它具有比较大的分支系数,说明任意一个顶点附近的顶点集团(团簇)内部的网络连接的完备程度比较高。这也就是说中国电力网已经发展到了一个比较合理的状态,便于实现各个位置之间的电能输送或调节。图1、2分别显示了1995和2002年全国电力网的顶点度分布。图中处在“尾部”的各个数据点相当好地落在双对数平面上的一条直线上,表示中国电力网的顶点度分布函数遵从幂律 $P(k) \sim k^{-\gamma}$ 。整个图中数据的分布与美国西部电力网的统计结果非常相似,所以可以肯定中国电力网也是一个无标度网。这说明中国电力网在发

展过程中也曾(至少是部分地)遵从“富的更富,穷的更穷”的法则,已经具有较多连接(输电)线的站点更容易连接新的连接线。我们在资料中也检索到了不少这样的例子^[4-9]。例如:(1)1995年天津市电网接线示意图上,北郊变电站原有15条线路,是天津市的变电站中接线最多的变电站,第二年就在这个变电站增加了7条线路;(2)1995年天津市的吴庄变电站原有10条线路,第二年就增加了5条线路;(3)1995年湖南省电线示意图上,云田变电站原有5条线路,第二年增加了6条线路(以上所说线路均为220kv)以上的高压线路,含220kv的线路)。表1中列出的标度因子(4.9或5.2)显著地高出美国西部电力网相应的统计数据(4.0),然而如果与其它种类的网络相比,仍可以说与美国西部电力网相应的数据接近。现在还未见讨论这种标度因子差别的文章,我们正在对此进行研究。

中国的电力网可以分为几个层次(或“团簇”):最低的层次是“地区电网”;稍高一层是由多处地区电网组成、由省政府经营的“省电网”;再高一层是

表1 1995、2002年中国电网的一些统计性质

项目 年份	顶点数	平均道路长	分支系数	平均顶点度	标度因子
1995	654	2.646	0.638	2.589	4.9
2002	865	3.550	0.634	2.650	5.2

几个省电网联合而成的电力网,称为“大区电网”(华北、东北、华中等)。每个层次(或“团簇”)内部的各项点之间连接比较紧密,各个层次(或“团簇”)之间的连接相对疏松。各个大区电网正在(或将要)进一步联合,形成“分层互包、关系复杂”的团状结构。目前各大区电网之间已经具有若干条互联线,以进一步实现电能的统一调配,并使网络整体更加稳定。因此“团簇性”是电力网的重要性质。为了说明各团簇的代表性质,我们分别对华北和华中这两个大团簇进行了统计研究,如表2和3所示。

表2 华北电网的一些统计性质

项目 年份	顶点数	平均道路长	分支系数	平均顶点度	标度因子
1940	6	1.000	0.789	1.833	0.79
1985	65	5.993	0.596	3.062	1.4
1995	102	2.590	0.691	2.706	4.2
2002	85	5.947	0.568	3.565	3.0

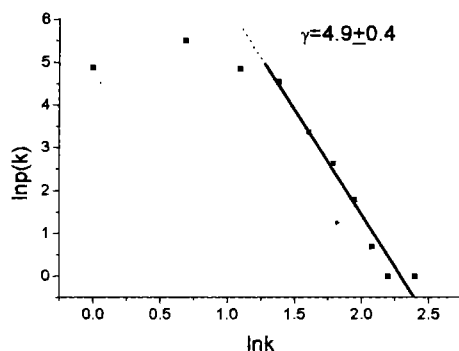


图1 1995年中国电力网顶点度分布

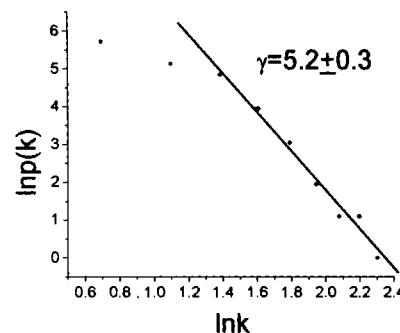


图2 2002年中国电力网顶点度分布

表3 华中电网的一些统计性质

项目 年份	顶点数	平均道路长	分支系数	平均顶点度	标度因子
1985年	55	2.429	0.618	2.673	2.4
1990年	78	3.055	0.608	2.872	2.4
1995年	105	2.960	0.643	2.600	2.6
2002年	165	3.760	0.639	2.612	3.0

相应于图1、2的各个顶点度分布律的图像都与图1、2类似,因此不在此重复画出。这些统计结果说明了每个大区电网也具有无标度性和小世界性,或者说这两个共性对电力网的各个层次都是成立的。对电力网的团簇性拓扑结构如何用适当的统计参数来描述,是我们进一步的研究课题。

三、中国电力网的演化模型

电力网建模的研究已经有很长历史。随具体问题不同,曾经提出过许多种模型,每种模型又随研究的方法、立论角度的不同而产生多个变种。求解

这些模型的方法也经过了长期的研究,不但应用到各种已经成熟的数学、物理方法,而且在电力网研究过程中创建了一些新方法。我们沿着复杂网络的统计共性这条线索提出一个非常简化、具有普适特点下的模型,它的要点如下。

1. 中国电力网在初始($t=0$)时刻已有一定数量(N_0)的顶点,这些顶点之间随机地连接了 n_0 条边。这里令 $N_0=30$ 、 $n_0=10$,给每个顶点(包括以后出现的新顶点)随机地赋予了一个团簇编码 D ,它可以取1到10之间的整数,表示顶点位于哪一个团簇中。

2. 每年建立 m 个顶点、 n 条边(这里令 $m=1$ 、 $n=20$)。每个新顶点与位于同一个团簇中的旧顶点 i 的连边法则是:以概率 P 按照法则 $\Pi_i = \frac{k_i + 1}{\sum k_i + 1}$ 来连接顶点 i ,这里 Π_i 表示新顶点与旧顶点 i 的连接几率, k_i 表示旧顶点 i 的顶点度。这种选择法则说明原来顶点度高的顶点被连接的几率也大;同时,以概率 $1-P$ 随机连接位于同一个团簇中的旧顶点。另外,每个新顶点与位于另外一个团簇中的旧顶点随机地连接 r 条边(这里令 $r=1$)。

3. 如此演化到各个统计参数达到稳定为止(这时总顶点数大约达到10 000)。

当 $P=0$ 时,按照这个模型生长出一个完全的随机网。当 $P=1$ 时,按照这个模型生长出的每个团簇都是无标度网,随机性的大幅度跳跃边只在团簇之间发生。参数 P 在0和1之间时,生长出的每个团簇是无标度网和随机性的跳跃边的结合体,整个电力网既是一个无标度网,又是一个小世界网。

图3中用小圆点显示了用此模型在 $P=0.25$ 时对顶点度分布律的模拟结果,它与用十字显示的1995年电力网实际统计结果符合得相当好,这时的计算表明,表1中所列各个参数的变化都达到最终稳定时,大约总共有10 000个顶点,而且这些参数的稳定值都与表1所列的1995年实际统计值比较好地符合。图4则显示了用此模型在 $P=0.30$ 时对顶点度分布律的模拟结果,它与用十字显示的2002年电力网实际统计结果符合得相当好。这时的计算表明,表1中所列各个参数的变化都达到最终稳定时总共有13 226个顶点,这些参数的稳定值和表1所列的2002年实际统计值都同样比较好地符合。据此,我们认为这些模拟结果倾向于说明上述的模型虽然极其简单,但有可能抓住了中国电力网发展的一些关键特征,从而在只对比复杂网络共性的粗糙程度、在一个参数(概率 P)变化的过程中就可以再现中国电力网发展的进程。自然,这个模型还可以再深化、丰富化,从而可能说明一些实际问题。

四、讨论

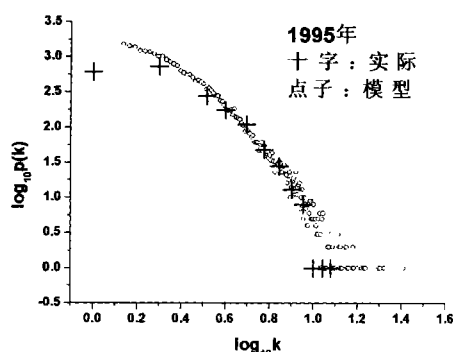


图3 $P=0.25$ 时模型对顶点度分布律的模拟结果

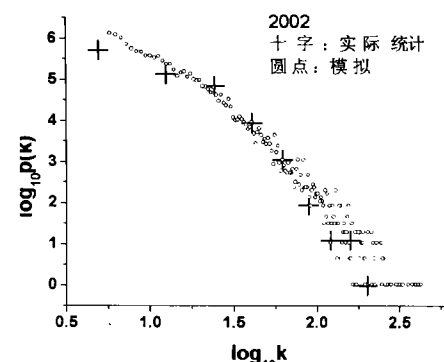


图4 $P=0.30$ 时模型对顶点度分布律的模拟结果

本文通过介绍我们的一些统计和计算结果,提醒大家注意图论研究的最新潮流,即使用统计物理学的方法研究大规模网络的共性(对如何使用统计物理学的方法,可参考文献[1])。虽然这种研究为时尚短,但大规模、复杂的网络存在着共性,而且可以被这种研究揭示,应该已经不是问题。如果搞清楚所有大规模、复杂网络必须遵守的根本规律以及这些规律的机制,这种认识必然会有助于甚至指导每个具体网络的研究。这类似于研究电路时麦克斯韦方程组和基尔霍夫定律所起的不同作用。

在目前,虽然说明中国电力网遵从复杂网络的共性还很难有什么直接的应用,但可能有助于对一些问题的理解。例如,本文中介绍的结果说明,从几条非常简单、抽象的法则出发就可以在一个粗糙程度上再现中国电力网的发展过程。这种“再现”虽然只能用几条统计性质来检验,但可以说明这几条性质是重要的,可能体现了中国电力网所包含的复杂网络共性。这种不同角度的思路也许可以给电网扩展规划的研究提供一些参考。又例如,近来对网络耐受“干扰”(随机地令一定比例顶点停止工作)和“袭击”(选择一定比例最高顶点度的顶点,令其停止工作)的鲁棒性的研究说明^[1]:网络的无标度性越强,耐受干扰的能力越强,而耐受袭击的能力越弱。也就是说,网络的无标度性越强,越依赖于少数高顶点度的顶点来工作,越怕对它们的袭击,但也越不怕对其它大量的低顶点度的顶点的干扰。我们的统计和模型的模拟结果说明:中国电力网的无标度性还比较低,还在缓慢地逐渐提高,因此中国电力网耐受干扰的能力较弱;可能相对于发达国家来看,小规模电网停电事故还较多,但耐受袭击的能力较强,因此大规模事故的可能性要小得多。

复杂网络的共性研究才刚刚开始,有待与各个具体网络的研究进行结合。我们相信,电力网专家和统计物理学工作者的研究工作的结合必将取得辉煌的成果。

参考文献

- [1] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47
- [2] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "Small-world" networks[J]. Nature, 1998, 393: 440
- [3] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509
- [4] 国家电力信息网(网址: <http://www.sp.com.cn>); 中国

禽流感的现实危害与潜在威胁

童光志¹ 付朝阳²

(中国农业科学院哈尔滨兽医研究所、兽医国家生物技术重点实验室, 研究员¹; 副研究员² 哈尔滨 150001)

〔摘要〕 本文探讨了有关禽流感的基本概念, 描述了其特点、变异机制、现实危害、对人类的潜在威胁和直接感染, 并对该病的出现和流行所引发的思考进行了归纳和总结。

〔关键词〕 禽流感 现实危害 潜在威胁 〔中图分类号〕 Q95 S8

禽流感是由 A 型流感病毒引起的一种烈性禽类病毒性疾病。易感动物包括鸡、火鸡、珠鸡、野鸡、鹌鹑、鸬鹚、燕鸥、鸽、鸭、鹅等。表现形式由低致病性禽流感的不明显到高致病性禽流感的急性或高死亡率不等。禽流感, 尤其是高致病性禽流感的历次流行和重复出现, 均给养禽业造成了严重损失, 加之禽流感病毒不仅作为人流感病毒的庞大基因库, 同时还可突破种间障碍, 直接感染人并且致人死亡, 凸现了禽流感的公共卫生意义。2004 年初发生在周边国家及国内的高致病性禽流感, 使我们认识到, 禽流感已经成为我国养禽业乃至人民健康的大敌。剖析其现实危害、潜在威胁, 将有助于提高社会各界对该病的认识和了解, 同时将有助于相关部门采取一系列措施, 开展对该病的有效防治。

一、禽流感病毒的毒力和遗传变异机制

禽流感病毒属于正粘病毒科 A 型流感病毒属, 依据表面结构蛋白血凝素 (HA) 和神经氨酸酶 (NA) 抗原性的不同, 可分为 15 种 HA(H) 亚型和 9 种 NA(N) 亚型。同一亚型内的不同毒株及同一毒株感染不同宿主的毒力不尽相同。病毒的致病力是各基因共同作用的结果, 其中 HA 起着重要的作用。将高致病力 H5 和 H7 型毒株进行核苷酸和氨基酸序列分析, 发现高致病力毒株的 HA 在裂解位点附近有 4 个或更多的碱性氨基酸, 而低致病力毒株的 HA 仅有 1 个精氨酸。因此高致病力毒株的 HA 可被多种细胞内蛋白酶所识别, 这就增加了 HA 被裂解为 HA1 和 HA2、形成病毒囊膜和细胞膜间通道、促使两膜融合病毒核酸入侵宿主细胞的可能性, 即增加了病毒株在机体内的广嗜细胞性, 一旦感染就会迅速突破器官屏障, 从而造成机体的全身感染, 引发高致病性流感的发生。由此可见, HA 的可裂解性的大小决定了禽流感病毒毒力的强弱, 而其识别和结合宿主细胞受体的特性, 决定了宿主的范围。

禽流感病毒众多血清亚型是其遗传变异频繁的结果, 其机理涉及分子水平的抗原转移和漂移。抗原漂移是指由于基因组自发的点突变引起的小幅度变异。当导致氨基酸改变并积累到一定的程度, 或突变的氨基酸正好使抗原决定簇改变时, 可引起抗原性的变异。抗原转移是由于较大幅度的突变导致新的亚型出现, 原因之一是 RNA 聚合酶缺乏校正功能, 病毒基因组复制时容易出错; 另一个原因是由于病毒基因组的节段性, 即当不同的毒株同时感染同一细胞时, 其核酸片段可发生同源交换, 从而导致了抗原性的改变。病毒的频繁变异, 使得以前不发病的带毒海鸟和水禽在感染 H5N1 病毒后发病死亡。另外, 不同地区禽流感病毒间的重组能不断产生新的血凝素 (HA) 及神经氨酸酶 (NA) 基因。这种变化伴随着病毒毒力的改变, 使感染发病禽类的致死率急剧上升。

二、禽流感流行及对养禽业的危害

自 1878 年 Perroncito 首次报道意大利鸡群中禽流感暴发至今的 100 多年历史中, 禽流感呈广泛性传播和全球性分布, 世界范围内许多国家和地区, 包括美国、英国、澳大利亚、爱尔兰、比利时、苏格兰、荷兰、法国、前苏联、加拿大、以色列、匈牙利、泰国、日本、巴基斯坦、墨西哥等国均有禽流感暴发流行的报道; 1975 年以来, 几次禽流感的大流行都给流行区的养禽业带来了毁灭性打击, 造成了巨大的经济损失。

1. 高致病性禽流感特点及对养禽业的危害

高致病性禽流感常以突然死亡和高死亡率为主要特征, 常导致感染鸡群的全军覆灭, 造成严重的经济损失。1983 年 4 月, 在美国北部鸡群发生了伴随着死亡率增加、产蛋下降的急性呼吸道系统疾病综合征。至 1983 年 10 月, 在宾夕法尼亚、弗吉尼亚、新泽西等州, 疾病转变为严重的全身系统疾病,

电力年鉴网站 (网址: <http://hvdc.chinapower.com.cn/membercenter/yearbookcenter/>)

[5] 李代耕. 中国电力工业发展史料 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1983, 92

[6] 张彬. 当代中国的电力工业 [M]. 北京: 当代中国出版社, 1994, 525 - 543, 621 - 635

[7] 程忠智, 孙嘉平. 中国电力工业 [M]. 北京: 中国电力

出版社, 1996, 彩页

[8] 中国电力百科全书编辑委员会. 中国电力百科全书 (综合卷) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995, 彩页, 1 - 30

[9] 中国大百科全书总编辑委员会《电工》编辑委员会, 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书 (电工) [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992, 329

(责任编辑 邱夜明)