

复杂网络上相继故障研究综述

丁琳^{1,2} 张嗣瀛¹

(青岛大学复杂性科学研究所 青岛 266071)¹ (南开大学计算机科学与技术学院 衡阳 421001)²

摘要 在复杂网络上,由微小扰动引发的大规模相继故障会导致灾难性后果。为了满足人们对各种关乎国计民生的复杂网络的安全性和可靠性的要求,复杂网络上相继故障研究成为近年来复杂网络研究的热点分支。对相继故障的理论建模是分析、预防和控制相继故障的基础和关键。综述了复杂网络上相继故障的研究进展,主要包括几类相继故障模型及相关的研究结果,并指出目前研究中存在的问题及今后的发展趋势。

关键词 复杂网络,相继故障,鲁棒性,无标度网络

中图分类号 N941.3 **文献标识码** A

Survey on Cascading Failures on Complex Networks

DING Lin^{1,2} ZHANG Si-ying¹

(Institute of Complexity Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China)¹

(School of Computer Science & Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)²

Abstract On complex networks, large-scale cascading failures that are triggered by some small disturbances can lead to disastrous consequences. In order to satisfy demand of the people on the security and reliability of complex networks related to the national economy and people's livelihood, the study on cascading failures on complex networks becomes a hot branch of complex networks research in recent years. The theoretical modeling is the basic and key problem for analysis, prevention and control of cascading failures. Main developments of cascading failures on complex networks were surveyed, mainly including several types of cascading failures models and the relevant research results. Both the existing problems at present and the development trend were pointed out.

Keywords Complex networks, Cascading failures, Robustness, Scale free network

1 引言

真实世界中大量功能各异的系统都可以通过网络加以描述。一个典型的网络是由许多节点与连接两个节点之间的一些边组成,其中节点用来代表真实系统中不同的个体,而边用来表示个体间的关系。例如,人类社会是人通过各种社会关系连成的网络,因特网是由路由器和计算机通过通信介质连成的网络,类似的还有电力网络、交通网络等^[1,2]。这些网络具有很高的复杂性,因此被称为“复杂网络”。

自从小世界效应^[3]和无标度特性^[4]发现以来,复杂网络成为了当前最重要的多学科交叉研究领域之一。强调系统的结构并从结构角度分析系统的功能是复杂网络研究的重要思路,其中复杂网络的鲁棒性研究成为近年来的研究热点。Albert等^[5]最早对这一问题进行了探讨,通过仿真分析得到重要的研究结论:在随机攻击下,无标度网络有着很强的鲁棒性;但在针对大度节点的蓄意攻击下,却显得异常脆弱。并且指出其双重特性的根源在于无标度网络中度分布的异质性。Cohen等^[6,7]利用渗流理论解析分析了因特网应对随机攻击和蓄意攻击的鲁棒性,验证了Albert等的结论。Holme等^[8]

仿真分析了不同攻击策略对复杂网络鲁棒性的影响,发现基于重计算的度和介数的蓄意攻击对网络的破坏程度比基于初始的度和介数的蓄意攻击更严重。上述网络鲁棒性的开拓性研究仅基于静态连通性的角度,没有考虑到网络上的动态性过程,即节点(边)的移除仅仅存在于拓扑意义上,对其他节点(边)的存在与否没有任何影响,我们称之为静态鲁棒性。而现实生活中的许多现象,例如大面积的因特网和交通网拥塞、大规模的电网停电等,并非源自网络上很多节点和边同时发生故障,而是因为一个或少数几个节点(边)发生故障,通过节点(边)之间的耦合关系引起其他节点(边)发生故障,从而产生连锁效应,最终导致网络相当一部分甚至全部崩溃,这种现象称为相继故障,有时也被称为级联失效或“雪崩”。例如1986年10月,因特网的第一次拥塞崩溃,在仅相隔200米的劳伦斯伯克利实验室和加州大学伯克利分校之间的网络,因相继故障导致网络速度下降了100倍。再如2003年8月,由于美国俄亥俄州克利夫兰市的超高压输电线路相继过载烧断,造成美国历史上最大规模的停电,使得上千万人断电长达15个小时,经济损失高达数百亿元。诸如此类的灾难事件促使研究人员更加关注网络的鲁棒性,并称其为动态鲁棒性。

到稿日期:2011-10-11 返修日期:2012-01-18 本文受国家自然科学基金(61104075)资助。

丁琳 女,博士生,讲师,主要研究方向为复杂网络、网络拥塞控制, E-mail: dinglin0910@sina.com; 张嗣瀛 男,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要研究方向为复杂系统的相似结构、微分对策。

为了满足人们对各种关乎国计民生的复杂网络的安全性和可靠性的要求,研究人员也做了很多的努力,但是网络上大规模的相继故障仍然时有发生。理论建模是研究相继故障的重要手段,因此,有必要从相继故障模型的角度对相继故障的发生机理、相继故障的预防与控制作深入研究。本文综述了复杂网络上相继故障的研究进展,主要包括几类相继故障的动态模型及相关的研究成果,并对研究中存在的问题和发展趋势进行了总结和展望。

2 负载-容量模型

负载-容量模型的共同点是:赋予网络中每个节点或边一定的初始负载和容量(也称为安全阈值),某节点或边由于某种扰动而发生故障,这会引发负载按照一定的策略在其它节点或边上重新分配。这些节点或边接受了额外的负载,其总负载可能超过其容量而发生故障,导致新一轮的负载重新分配。这个过程反复进行,影响的节点或边有可能逐渐扩散,从而产生相继故障。在模型中,有的只单独考虑节点或边的动态行为,也有将两者结合起来加以考虑。这类模型的构建需解决3个基本问题:节点(边)上初始负载的定义、节点(边)故障后负载重新分配的动力学过程、节点(边)容量的定义。根据容量的定义是否与初始负载相关,将负载-容量模型分成了容量与初始负载相关的负载-容量模型和容量与初始负载不相关的负载-容量模型。

2.1 容量与初始负载相关的负载-容量模型

容量与初始负载相关的负载-容量模型主要研究了节点或边受到攻击(随机攻击或蓄意攻击)而引发的相继故障。

2002年,Motter等^[9]最先引入容量和初始负载的线性关系,提出了一个经典模型,简称ML模型。该模型的主要思想包括:将给定 N 个节点的网络抽象成一个无向无权图。基于负载常常是沿着最短路径传送的考虑,节点的负载用介数来定义。考虑节点的负载容量是受成本约束的,以“按需定容”确定这些节点的容量。赋予节点 i 的容量 $C_i = (1 + \alpha)L_i$ 正比于其初始负载 L_i ,其中 $\alpha > 0$ 是一个容限参数,反映了节点 i 对额外负载的承受能力和保护节点 i 的额外成本,显然当 α 足够大时,网络不会发生相继故障。正常情况下,所有节点的负载都小于其容量,网络运行于一种自由流状态。当网络上某个节点受到攻击而发生故障时,立即从网络上移除该节点,这样可能会导致最短路径的分布发生变化,每个节点的负载也可能发生变化,当节点的负载超过其容量时就会因过载而发生故障,这样就可能形成连锁反应。网络性能用最大连通子图相对值 $G = N' / N$ 来衡量,其中, N' 为相继故障发生后最大连通子图的节点数。在两种构造网络(无标度网络和均匀网络)和两个实际网络(自治层Internet和美国西部电网)上应用该模型发现,网络的负载(介数)分布越不均匀,高负载节点的移除就越易导致网络的全局崩溃,并且还发现 G 与 α 之间存在相变现象。随后,Zhao等^[10,11]在无标度网络上,对模型中的相变值 α_c 和 α_c' 进行了解析分析,并用数值仿真验证了理论估计,即当 $\alpha < \alpha_c$ 时,网络几乎完全崩溃;当 $\alpha > \alpha_c$ 时,网络对相继故障完全免疫。Lee等^[12]发现 G 在相变点服从幂率分布。在不同文献中,研究者基于ML模型对不同的网络结构,例如局域世界演化网络^[13]、带有群落结构的无标度网络^[14]和小世界网络^[15]、WS小世界网络^[16]等进行了鲁棒性

分析。总体研究结果似乎都与Motter等所得结果一致,即如果网络本身的度分布或介数分布的异质性增强,网络针对蓄意攻击的脆弱性会随之增强。因此,在蓄意攻击下,介数分布越同质的网络,其鲁棒性越强。还有很多研究者使用ML模型中的容量定义方法,对模型做了以下的各种扩展和变型。

考虑过载节点从网络中移除,与许多现实网络的实际情况不符。以交通网为例,过载节点会导致车辆通行时间变长,而不会破坏网络结构的连通性。Crucitti等^[17]同时考虑节点和边的动态行为,提出了基于边上传输效率动态更新的模型,简称CLM模型。具体来说,该模型用含有 N 个节点的无向加权图来代表网络,其中节点 i 和 j 之间的边权 e_{ij} 代表信息的传递效率。当节点过载时,并不删除节点以及与节点相连的边,只是降低与之相连的边的传输效率,即

$$e_{ij}(t+1) = \begin{cases} e_{ij}(0) \cdot \frac{C_i}{L_i(t)}, & L_i(t) > C_i \\ e_{ij}(0), & L_i(t) \leq C_i \end{cases}$$

式中, $L_i(t)$ 是 t 时刻节点 i 的负载,用加权介数来定义,即 t 时刻通过节点 i 的效率最优路径的条数。相继故障的破坏程度用网络效率 E 来衡量:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} e_{ij}$$

Crucitti等通过研究网络效率得到了与Motter等相似的结论。随后,Kinny等^[18]应用CLM模型对北美电网进行了实证分析,同样验证了Motter等的结论。Ash等^[19]还基于CLM模型,采用进化算法来优化网络拓扑结构,使得网络对相继故障具有好的抵抗力,发现优化后的网络具有少量的中心节点、相对长的平均最短路径、高的聚类系数,而且呈现出模块结构。

为了避开介数定义负载需要网络全局信息的局限性以及考虑比较实际的负载局域重新分配原则,Wang等^[20]将每条边 e_{ij} 的初始负载(权重)定义为 $(k_i k_j)^\theta$ (k_i 和 k_j 为边 e_{ij} 的两个端点的度, θ 为控制权重异质性的参数),并基于加权流局域重新分配原则,提出了加权网络上的相继故障模型。采用归一化的雪崩尺寸 $S_N = \sum_{ij} S_{ij} / N_{edge}$ 来定量网络的鲁棒性,其中 S_{ij} 表示雪崩尺寸,即由移除边 e_{ij} 导致的故障边数, N_{edge} 为网络上的总边数。通过仿真分析发现,当模型中的参数 $\theta=1$ 时,几种典型的复杂网络(如NW小世界网络、BA无标度网络)均达到了最强的抵制相继故障的鲁棒性,该结论被理论解析所证明。并且从理论解析发现,最优权重参数值仅与网络的度无关性有关,而与网络的度分布无关,这使得该结论具有了更大的推广价值。最优权重参数值的存在为相继故障的预防和控制提供了新的研究思路。受上述建模思想的启发,文献[21]定义每个节点上的初始负载(权重)为其度 k 的函数形式,即 k^θ ,研究了加权BA无标度网络上的相继故障。文献[22]又进一步完善了模型,在节点初始负载(权重)定义时,不仅考虑了节点本身的度,也关注了节点的邻居节点度对节点负载的影响;在节点故障时,考虑一些监控及其保护措施的存在,使得一些过载节点并不会立即从网络中移除。

ML模型中的容量定义方法还被其他一些模型广泛使用。例如文献[23]基于介数的负载定义,以及考虑节点故障是过载的累积效应,提出了一个带节点移除概率的相继故障模型,研究了无标度网络上故障传播过程中的负载动力学;文献[24]提出了一个随机赋予节点初始负载并且负载随机重

新分配的相继故障模型,该模型可以解析分析有关容限参数和拓扑结构的相继故障概率的临界行为。考虑仅由网络结构决定负载分布的相继故障模型对支持多种流的现实系统来说可能过于理想化,因此不少研究者提出了结合系数参数来决定负载分布的相继故障模型,得到了许多有价值的结论。例如文献[25,26]结合电路理论中的流守恒来决定边的负载,研究了美国电网的停电规模分布,以及负载重新分布时的流动力学对美国电网相继故障的影响;文献[27,28]以交通网为背景,引入用户均衡模型来确定网络上的负载分布,研究了拥挤效应和簇效应对相继故障的影响;文献[29]以 Internet 为研究背景,在基于网络拥塞的模型中引入了包的生灭过程,研究了不同的拓扑结构、网络规模、延迟时间、节点处理能力和包产生率之比对拥塞传播的影响。

从上述模型的描述和分析可以看出,模型已越来越较好地展现发生在实际网络上的相继故障,并提出了一些有价值的预防和控制策略。特别是, Motter 等的研究表明了介数分布越同质的网络其鲁棒性越好,并指明了对于介数异质分布的网络,防御相继故障的有效措施是对网络中介数较大或度较大的节点进行重点保护,或使网络上的负载分布得比较均匀。该结论启发了研究者对预防和控制策略作深入的探讨。文献[16-18,30-34]基于相继故障模型对网络上的脆弱点进行识别,大多发现了与 Motter 等相似的结论,即度大或介数大的重要节点(边)故障更易于引发相继故障。然而,文献[32,33]发现,在模型中可调参数的一定取值内,攻击网络上度或介数最小的节点(边)比攻击度或介数最大的节点(边)更易引发相继故障。该结论说明了在现实的一些网络系统中,保护重要节点(边)的同时,不应该忽略看似不重要的节点(边)的保护,否则可能导致惨重的代价。另外,文献[34]还比较了小世界网络和无标度网络应对最大介数节点或边攻击的鲁棒性差异,发现相比于小世界网络,无标度网络应对节点攻击更加脆弱,而对边攻击表现得更鲁棒。最初故障发生后,如何高效控制故障传播是一个富有挑战性的课题。考虑“不重要”节点向网络添加的负载要多于其处理的负载, Motter 等^[35]在无标度网络受到攻击后,通过提前删除一部分低(高)负载节点(边)来有效控制故障传播。随后, Zhao 等^[11]解析分析了该删除策略的最优值,为有效控制相继故障的发生提供了理论上的保障;文献[36]在聚类网络上研究了该删除策略的有效性。除删除策略外,文献[37]在无标度网络上,通过在初始攻击节点的邻节点间添加连边来控制故障的传播。这些策略要求故障传播前改变网络的拓扑结构,因此,在很多情况下可能不易被直接应用。基于此,文献[38]构建了流自适应防御的相继故障模型,并进一步提出了基于流删除的控制策略;文献[39-41]通过优化网络负载传送策略来防御相继故障,这些策略的共同点是:引入基于介数或度的节点权重或边权重,并假定负载按照最小权重路径传送以尽量避免通过大介数或大度节点,使网络的负载分布变得同质;文献[42-44]通过优化负载容量模型以防御相继故障来获得较高的鲁棒性和较低成本,这些负载容量模型的共同点是:定义非均匀的容限参数以给较小介数或较小度的节点不分配或少分配冗余容量,而给较大介数或较大度节点分配更多的冗余容量,这样可以尽可能保护“重要”节点,并且在最初故障发生后,可使“不重要”节点优先发生故障而降低整个网络的负载;文献[45,46]还分别考

虑实际网络中的容量和负载的关系以及负载的波动性,用较低成本设计了有较高鲁棒性的负载容量模型。

2.2 容量与初始负载不相关的负载-容量模型

相继故障的引发除了由攻击(随机或蓄意攻击)引发,另一个主要原因是与不正常的网络负载有关,例如新的和实时的应用会给相对过时的网络设计带来额外负载,这样可能导致网络中的节点(边)过载。容量与初始负载不相关的负载-容量模型主要研究由过载引发的相继故障。

Holme 等^[47,48]从网络演化的角度,仿真研究了由网络增长导致 BA 无标度网络节点过载和边过载而引发的相继故障。在文献[47]中,将节点的负载定义为该节点的介数。节点的容量分两种情况定义:一种情况下容量随着网络中节点数量线性增长(简称为 ICA 模式),另一种情况下容量保持一个常数(简称为 ECA 模式)。仿真结果表明:ECA 模式下相继故障的发生几乎是不可避免的,ICA 模式也有网络崩溃的可能。在文献[48]中,边的负载用边的介数来定义,而边的容量固定为一个常数。仿真结果表明,少数边的过载就可以导致最大连通子图规模大幅度减小,最终达到稳态。因此,为了避免此类相继故障,节点和边的容量必须随着网络规模的增大而增加。

Moreno 等^[49]引入光纤束模型研究了 BA 无标度网络上由节点过载引发的相继故障。在模型中,定义每个节点的初始负载 σ 都相同,并赋予节点一个满足某种统计分布的容量。当节点的初始负载大于容量时立即从网络上移除,并将其负载平均分配给它的邻节点。用最大连通子图相对值 G 来表示网络性能。通过仿真比较不同 σ 时 G 的大小发现,相继故障的规模随着初始负载的增加而增大。另外,容量分布较均匀的网络对相继故障更具鲁棒性。此后,也有研究者基于光纤束模型对不同网络结构上的相继故障现象进行研究,并着重对模型中的相变现象展开讨论^[50,51]。此外,Moreno 等还仿真研究了 BA 无标度网络上由边过载引发的相继故障^[52],发现网络承受的平均负载大小决定了网络有最大连通子图的概率,随着网络的平均负载增加,相继故障的可能性加大。

沙堆模型是为研究沙崩前的自组织临界状态而提出的一个可以用计算机模拟的著名模型。Bonabeau^[53]和 Goh 等^[54]将沙堆模型引入 ER 随机图和 BA 无标度网络,把模型中的安全阈值与网络结构关联(如节点的度),研究了网络在雪崩前的自组织临界现象;文献[55]将 Goh 等所得到的结论进一步推广,从理论解析和数值模拟两方面验证了 BA 无标度网络上雪崩过程的规模 s 和持续时间 t 都具有幂率特性;文献[56]基于沙堆模型的思想,解释了事件数量的增长和事件频率的加快导致了相继故障现象从相继故障事件向相继故障灾难的相变;文献[57]还基于沙堆模型研究了加权网络嵌入的无标度网络的鲁棒性,发现在带有地域限制的无标度网络上,局域连接越紧密的网络,越易导致网络的全局崩溃。

为了能更真实地刻画实际系统中的流的行为, Wang 等^[58]以通信网为研究背景,基于包产生、包路由以及包排序等规则提出了一个交通流的动态演化模型,发现当包产生率增加到某个临界值时,网络发生从自由流态到完全拥塞态的突然相变,并提出了包丢弃的控制策略来缓解网络的全局拥塞。还有许多研究者从复杂网络视角提出了基于电网的相继故障模型,其中较为经典的是 Dobson 等提出的 OPA^[59]和

CASCADE^[60]模型。OPA模型描述了电力系统从初始状态向自组织临界状态的相变,指明了对各种故障的防护性工程反应以及用户负载需求的潜在增长是导致电网状态向自组织临界状态发展的动因。为了更深入地了解电网负载增加对相继故障的影响,Dobson等人又提出了CASCADE模型。在模型中,一个节点的故障导致所有其他节点增加一个固定大小的负载。CASCADE模型可以用解析的方法得到电网在不同负载条件下相继故障频率和故障规模的概率分布特征,并且还能应用到其他的复杂网络,但也存在明显不足,例如故障情况下负载的重分布没有考虑网络结构。也有文献针对CASCADE模型的不足进行改进,使其能够在改变网络拓扑和负载条件下预测级联传播^[61]。

最近,Wang等^[62]提出了基于基尔霍夫定律和欧姆定律的相继故障模型。在模型中,假定边 e_{ij} 的阻力为 R_{ij} ,定义边 e_{ij} 的负载 F_{ij} 为通过该边的所有可能的从输入点 a 到输出点 b 的流的总和,即 $F_{ij} = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1, b < a}^N |f_{ij}^{a \rightarrow b}|$,其中 f_{ij} 是通过边 e_{ij} 的流,其值服从欧姆定律和基尔霍夫定律。考虑边容量是一种固有特性,赋予边容量 $C_{ij} = \alpha/R_{ij}$ 反比于其阻力,其中 α 是一个容量参数,显然如果 α 足够大,网络不会发生相继故障。但在 α 有限的情况下,就可能由过载引发相继故障。此外,该模型还能研究由蓄意攻击引发的相继故障。将该模型应用到加权无标度网络上发现了反常现象,这种反常现象包括两个特点:(1)随着边的容量参数的增大,网络从全局故障到自由流的相变是连续的,但在这两个状态间的某个区域,赋予边更大的容量反而会降低网络的鲁棒性;(2)对大负载(或大度)节点的蓄意攻击,负载分布异质的网络抵制相继故障的能力反而强于同质网络。这与Motter等^[9]的研究结果完全相反。Wang等还进行了理论解析,证明这种反常现象是该模型的固有行为,并非由数值模拟中的误差造成。

3 耦合映像格子模型

除了负载-容量模型^[9-62],耦合映像格子模型也是目前研究较多的一类相继故障模型。耦合映像格子是一个时间、空间都离散而状态保持连续的非线性动力学模型,近年来已经广泛用于研究复杂系统的时空动力学行为,在电力网络、城市交通等很多方面都得到了广泛的推广和应用。2004年,Wang等^[63]最先引入耦合映像格子模型对复杂网络上的相继故障进行研究。模型的基本思想是:包含 N 个节点的CML模型为 $x_i(t+1) = |f(x_i(t)) + \epsilon \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{i,j} f(x_j(t)) / k(i)|$,其中 $x_i(t)$ 表示节点 i 在 t 时刻的状态。 N 个节点的连接信息用邻接矩阵 $A = (a_{i,j})_{N \times N}$ 表示。若节点 i 和 j 之间有边相连,则 $a_{ij} = a_{ji} = 1$,否则等于0。 $k(i)$ 是节点 i 的度, $\epsilon \in (0, 1)$ 表示耦合强度。非线性函数 f 表征节点自身的动态行为,这里选择为混沌Logistic映射: $f(x) = 4x(1-x)$ 。当 $0 \leq x \leq 1$ 时, $0 \leq f(x) \leq 1$ 。上式中的绝对值符号保证各节点的状态非负。如果节点 i 的状态 x_i 在 $(0, 1)$ 范围内,称节点 i 处于正常状态。如果 $x_i \geq 1$,称节点 i 发生故障,且节点 i 在以后的任意时刻状态恒等于零。如果所有节点的初始状态都在 $(0, 1)$ 范围内,并且没有外部扰动,那么所有节点将永远保持正常状态。为了研究由于单个节点受到冲击引发的相继故障,在 m 时刻给某个节点 c 施加一个外部扰动 $R \geq 1$ 。此时,节点 c 发

生故障。那么在 $m+1$ 时刻,所有节点 c 的邻居节点都将受到它在 m 时刻的状态的影响。这样可能会使节点的状态值大于1而发生故障,从而会引起新一轮的节点故障。这个过程反复进行,节点故障可能扩散。第 $(t+1)$ 时刻以前,网络上发生故障的节点总数用 $I(t)$ 来表示,这样可以得到故障规模时序图,从而可以观察到故障在网络上传播的过程。当网络上不再有节点发生故障时,相继故障的最终规模用 I 表示,即 $I = \sum_{t=0}^{\infty} I(t)$ 。通过耦合映像格子模型可以研究的基本问题是:外部扰动强度与相继故障规模的联系,以及不同网络拓扑结构CML中的相继故障的异同点。Wang等在各种典型的复杂网络上应用该模型发现:单个节点的故障足以引起网络发生全局相继故障,并且,与全局CML和最近邻CML相比,WS小世界CML与BA无标度CML更容易引发全局相继故障。随后,文献^[64]观察了指数可调的无标度CML的相继故障。发现随着度分布异质性的增强,网络对随机故障和蓄意攻击都会变得更加脆弱。并且,在给定 R 和幂指数的强异质网络上,蓄意攻击造成的破坏比随机故障更严重,并且扩散速度更快。这说明度分布越同质的网络,对相继故障的抵抗力越强。此外,还有很多研究者采用耦合映像格子方法对相继故障进行研究。例如文献^[65, 66]研究了带有群落结构的小世界网络和无标度网络上的节点的相继故障。在模型中,引入群落结构内部的耦合系数 ϵ_1 以及群落结构之间的耦合系数 ϵ_2 来分别表征网络拓扑结构不同而导致的耦合关系的差异。仿真发现,增大群落结构的模块度能够有效延缓带有群落结构的小世界网络和无标度网络上的相继故障。此外,还发现减少对群落结构之间度数较大的节点的攻击,也可以有效地延缓相继故障行为。文献^[67]研究了随机网络和无标度网络上的边的相继故障。在模型中,假设外部干扰服从正态分布 $R_{ij} \sim N(\mu, \sigma^2)$,其中,变量 μ 是外部干扰的平均值,而变量 σ^2 是外部干扰的方差。可以通过 μ 和 σ^2 的变化来体现外部干扰的强度和外部干扰的稳定性。仿真发现,稳定的外部干扰(σ^2 较小)能够有效缓解相继故障行为,而较大的外部干扰(μ 较大)可以加快相继故障行为。文献^[68]对无标度CML的相继故障传播过程中的协同行为进行了研究。仿真发现,无标度CML的相继故障中的宏观性质受协同学的一般规律支配。文献^[69]提出通过保护初始故障节点的邻近节点能有效控制无标度CML的故障传播。

4 其他相继故障模型

除以上两类主要模型外,还存在其他相继故障模型和相应大量有价值的结论。例如文献^[70]将二值模型应用于随机网络,根据简单的阈值规则,分析了由邻居节点行为的相互影响而导致的相继故障。考虑相继故障发生是由外部和内部扰动共同作用的结果,文献^[71-74]基于网络节点的自修复功能、灾害蔓延机制和内部随机噪声,在有向网络上建立了一个普适性的灾害蔓延模型,研究了不同网络结构对灾害传播的影响;并基于当前的网络状态和网络拓扑结构信息,从资源重新分配的角度,研究了该模型上恢复策略的有效性。

以上研究仅关注单一的网络,复杂网络上相继故障研究的另一思路是考虑复杂网络之间的耦合关系,研究相关网络的相继故障现象^[75-77],如电力网络的故障会引起因特网的故障,而因特网的故障又会进一步导致电力网络故障等一系列

连锁反应。

结束语 从上面的介绍可以看出,复杂网络上相继故障的研究取得了重大的进展,所得结果已经在很大程度上改变和拓展了我们对相继故障现象的认识,但其离现实网络相继故障的传播机理与规律的揭示还有很大距离。综观各方面的研究现状,有以下几方面问题值得深入探讨:

1) 讨论复杂网络几何特征量对相继故障动力学行为的影响,可以为最优的网络设计提供有价值的参考。根据前文,大部分的研究都要在具体的网络中(如无标度网络)讨论特征量的影响,不能直观地告诉我们哪些几何特征量决定了网络的鲁棒性,并且大多研究结果都认为具有同质的介数或度分布的网络更具鲁棒性,但介数或度足够决定网络的鲁棒性吗?其它特征量起到什么样的作用?因此,抛开具体的网络形式,抽象地讨论几何特征量与故障传播临界值和传播范围之间的统计相关性是一个非常具有挑战性的课题。

2) 相继故障的建模虽已涉及到通信网、电力网络、交通网络、新陈代谢网络^[78]、供应链网络^[79]、物流网络^[80]、生态网络^[81]等领域,模型也越来越好地对现实网络上的相继故障机理进行了表达与描述。例如负载-容量模型中的负载分布从起初由基于拓扑的纯网络结构决定,发展到由带权重的网络结构参数和结合系统参数决定。但是大多研究还是从“共性”角度入手,且研究方法过于理想化。例如在很多模型中都假定节点之间通过最短路径在单位时间内发送相同的负载。这是理想化的,没有考虑真实系数中负载传送路径的随机性和动态性、负载发送量时变性,以及节点负载发送能力的差异等因素。因此,以实际网络为背景,考虑系统参数及网络约束条件,建立更加准确、更加符合实际情况的相继故障模型,并对其分析、优化、控制将是未来研究的重要方向。

3) 理解相继故障动力学的关键是能使用合适的策略对其进行预防和控制。目前,大多数文献都是在 Motter 等^[9,35]研究框架下,基于所掌握的全局网络拓扑信息,纯粹从网络结构对负载动力学影响的角度提出相继故障的防御策略。而全局信息的获取是非常困难的。因此,发展基于局部网络拓扑信息的有效防御策略更具有实际的应用价值。此外,如果把最初扰动作为对弈中的进攻方,系统一般会做出对弈的防御策略,而不是仅仅基于网络拓扑结构的变化被动调整负载传送。在考虑网络上的博弈行为下,如何高效控制故障传播?最近,Wang 等^[82]提出了使用演化博弈中的合作行为来控制雪崩,该方法可以推广到社会和自然系统中,会成为控制故障传播的一个有效途径。

4) 随着各种复杂网络之间的耦合性加强,相关网络上的相继故障现象已引起研究人员的关注,并发现了与单一网络不同的动力学行为。如文献^[75,77]发现宽度分布增加了网络在遭受随机攻击时的脆弱性,并且很难通过保护大度节点来防御相继故障,这和单一网络的研究结果是相反的。这些发现强调了在复杂网络上的相继故障研究时,需考虑相关网络的特征。因此,考察相关网络上的相继故障动力学演化过程是值得深入探讨的一项十分有意义的工作。

5) 复杂网络上的相继故障研究方兴未艾,在这个领域中随时都会有新的研究发现,如文献^[62]的研究结论与前人基于最短路径流量的研究结果完全相反。这些新发现也暴露出复杂网络上相继故障研究在理论和应用上还存在诸多不足和

缺陷,比如缺乏动力学的数学框架,尤其是缺乏深刻且具普遍意义的理论分析。这将促使研究人员重新审视复杂网络抵制相继故障的鲁棒性,寻求新的研究方法来有效处理不断出现的新问题。特别是随着复杂网络理论这门新学科的不断完善和发展,结合系统科学和复杂性科学的研究方法和手段,更加系统深入地对复杂网络上的相继故障进行研究。

参 考 文 献

- [1] Albert R, Barabási A-L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Review of Modern Physics, 2002, 74(1): 47-97
- [2] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45(2): 167-256
- [3] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of “small-world” networks [J]. Nature, 1998, 393: 440-442
- [4] Barabási A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512
- [5] Albert R, Jeong H, Barabási A-L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406: 378-382
- [6] Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, et al. Resilience of the Internet to random breakdowns[J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(21): 4626-4628
- [7] Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D. Breakdown of the Internet under Intentional Attack[J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 86(16): 3682-3685
- [8] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. Phys. Rev. E, 2002, 65(5): 056109
- [9] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks [J]. Phys. Rev. E, 2002, 66(6): 065102
- [10] Zhao L, Park K, Lai Y C. Attack vulnerability of scale-free networks due to cascading breakdown[J]. Phys. Rev. E, 2004, 70: 035101(R)
- [11] Zhao L, Park K, Lai Y C, et al. Tolerance of scale-free networks against attack-induced cascades [J]. Phys. Rev. E, 2005, 72: 025104
- [12] Lee E J, Goh K I, Kahng B, et al. Robustness of the avalanche dynamics in data-packet transport on scale-free networks[J]. Phys. Rev. E, 2005, 71: 056108
- [13] Bao Z J, Cao Y J. Cascading failures in local-world evolving networks [J]. Zhe jiang Univ Sci A, 2008, 9(10): 1336-1340
- [14] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J. Cascade and breakdown in Scale-free networks with community structure[J]. Phys. Rev. E, 2006, 74(6): 066111
- [15] Babaei M, Ghassemieh H, Jalili M. Cascading failure Tolerance of modular small-world networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs, 2011, 58(8): 527-531
- [16] Xia Y X, Fan J, Hill D. Cascading failure in Watts-Strogatz small-world networks[J]. Physica A, 2010, 389(6): 1281-1285
- [17] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Phys. Rev. E, 2004, 69(4): 045104
- [18] Kinney R, Crucitti P, Albert R, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid[J]. Eur. Phys. J. B, 2005, 46: 101-107
- [19] Ash J, Newth D. Optimizing complex networks for resilience against cascading failure[J]. Physica A, 2007, 380: 673-683
- [20] Wang W X, Chen G R. Universal Robustness Characteristic of Weighted Networks Against Cascading Failure[J]. Phys. Rev.

- E, 2008, 77(2):026101
- [21] Wu Z X, Peng G, Wang W X, et al. Cascading Failure Spreading on Weighted heterogeneous Networks[J]. J. Sta. Mech, 2008, 05013
- [22] Wang J W, Rong L L. A model for cascading failures in scale-free networks with a breakdown probability[J]. Physica A, 2009, 388:1289-1298
- [23] Bao Z J, Cao Y J, Ding L J, et al. Dynamics of load entropy during cascading failure propagation in scale-free networks[J]. Phys. Lett. A, 2008, 372:5778-5782
- [24] Lehmann J, Bernasconi J. Stochastic Load-Redistribution Model for Cascading Failure Propagation[J]. Phys. Rev. E, 2010, 81: 031129
- [25] Bakke J, Hansen A, Kertesz J. Failures and avalanches in complex networks[J]. Europhys. Lett. , 2006, 76(4):717-723
- [26] Simonsen I, Buzna L, Peters K, et al. Transient dynamics in increasing network Vulnerability to Cascading Failures[J]. Phys. Rev. Lett. , 2008, 100:218701
- [27] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Modeling Cascading Failures in Congested Complex Networks[J]. Physica A, 2007, 385(2): 700-706
- [28] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Clustering and congestion effects on cascading failures of scale-free networks[J]. Europhys. Lett. , 2007, 79:58002
- [29] 王健, 刘衍衍, 张程, 等. Internet 级联动力学分析与建模[J]. 软件学报, 2010, 21(8):2050-2058
- [30] Albert R, Albert I, Nakarado G L. Structural Vulnerability of the North American Power Grid[J]. Phys. Rev. E, 2004, 69: 025103(R)
- [31] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J. Effects of the cascading failures on scale-free traffic networks[J]. Physica A, 2007, 378:505-511
- [32] Wang J W, Rong L L. Cascade-based attack vulnerability on the US power grid[J]. Safety Science, 2009, 47:1332-1336
- [33] Wang J W, Rong L L. Edge-based-attack induced cascading failures on scale-free networks[J]. Physica A, 2009, 388: 1731-1737
- [34] Bao Z J, Cao Y J, Ding L J, et al. Comparison of cascading failures in small-world and scale-free networks subject to vertex and edge attacks[J]. Physica A, 2009, 388:4491-4498
- [35] Motter A E. Cascade control and defense in complex networks[J]. Phys. Rev. L, 2004, 93(9):098701
- [36] Huang L, Lai Y C, Chen G R. Understanding and preventing cascading breakdown in complex clustered networks[J]. Phys. Rev. E, 2008, 78:036116
- [37] Hayashi Y, Miyazaki T. Emergent rewirings for cascades on correlated networks[J]. e-print arXiv:cond-mat/0503615, 2005
- [38] Hu K, Hu T, Tang Y. Model for cascading failures with adaptive defense in complex networks[J]. Chinese Phys. B, 2010, 19: 080206
- [39] Schafer M, Scholz J, Greiner M. Proactive robustness control of heterogeneously loaded networks[J]. Phys. Rev. Lett. , 2006, 96:108701
- [40] Yang R, Wang W X, Lai Y C, et al. Optimal weighting scheme for suppressing cascades and traffic congestion in complex networks[J]. Phys. Rev. E, 2009, 79:026112
- [41] Zhao H, Gao Z Y. Cascade defense via navigation in scale free networks[J]. Eur. Phys. J. B, 2007, 57:95-101
- [42] Wang B, Kim B J. A high-robustness and low-cost model for cascading failures[J]. Europhys. Lett. , 2007, 78:48001
- [43] Li P, Wang B H, Sun H, et al. A limited resource model of fault-tolerant capability against cascading failure of complex network[J]. Eur. Phys. J. B, 2008, 62(1):101-104
- [44] Sun H J, Zhao H, Wu J J. A robust matching model of capacity to defense cascading failure on complex networks[J]. Physica A, 2008, 387(25):6431-6435
- [45] Dou B L, Wang X G, Zhang S Y. Robustness of networks against cascading failures[J]. Physica A, 2010, 389:2310-2317
- [46] Heide D, Schäfer M, Greiner M. Robustness of networks against fluctuation-induced cascading failures[J]. Phys. Rev. E, 2008, 77:056103
- [47] Holme P, Kim B J. Vertex overload breakdown in evolving networks [J]. Phys. Rev. E, 2002, 65(6):066109
- [48] Holme P. Edge overload breakdown in evolving networks[J]. Phy. Rev. E, 2002, 66(3):036119
- [49] Moreno Y, Gomez J B, Pacheco A F. Instability of scale-free networks under node-breaking avalanches [J]. Europhys. Lett. , 2002, 58(4):630-636
- [50] Kim B J. Phase transition in the modified fiber bundle model[J]. Europhys. Lett. , 2004, 66(6)
- [51] Kim D H, Kim B J, Jeong H. Universality Class of the fiber bundle model on complex networks[J]. Phys. Rev. Lett. , 2005, 94: 025501
- [52] Moreno Y, Pastor-Satorras R, Vazquez A. Critical load and Congestion instabilities in scale-free networks[J]. Europhys. Lett. , 2003, 62:292-298
- [53] Bonabeau E. Sandpile dynamics on random graphs[J]. J. Phys. Soc. Japan, 1995, 64:327-328
- [54] Goh K I, Lee D S, Kahng B, et al. Sandpile on scale-free networks [J]. Phys. Rev. Lett. , 2003, 91:148701
- [55] Lee D S, Goh K I, Kahng B, et al. Sandpile avalanche dynamics on scale-free networks[J]. Physica A, 2004, 338:84-91
- [56] Zou S R, Gu A H, Liu A F, et al. Characteristics for two kinds of cascading events[J]. Physica A, 2010, 390(8):1440-1446
- [57] Huang L, Yang L, Yang K Q. Geographical effects on cascading breakdowns of scale-free networks[J]. Phys. Rev. E, 2006, 73: 036102
- [58] Wang W X, Wu Z X, Jiang R, et al. Abrupt transition to complete congestion on complex networks and control[J]. Chaos, 2009, 19:033106
- [59] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts[C]//34th HICSS, 2001
- [60] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[C]//36th HICSS, 2003
- [61] Sansavini G, Hajj M R, Puri I K, et al. A deterministic representation of cascade spreading in complex networks[J]. Europhys. Lett, 2009, 87:48004
- [62] Wang W X, Lai Y C. Abnormal cascading on complex networks [J]. Phys. Rev. E, 2009, 80:036109
- [63] Wang X F, Xu J. Cascading failures in coupled map lattices[J]. Phys. Rev. E, 2004, 70:056113
- [64] Xu J, Wang X F. Cascading failures in scale-free coupled map lattices[J]. Physica A, 2005, 349:685-692

- ACM workshop on Scalable trusted computing. ACM; Alexandria, Virginia, USA, 2007; 2-6
- [6] Dietrich K. Anonymous Credentials for Java Enabled Platforms: A Performance Evaluation [C] // Proceedings of INTRUST 2009, 2010. Oxford, UK, Springer-Verlag, 2010; 88-103
- [7] Microsystems S. Java Card(TM) Specification 2. 2. 2[S]. Final Release. March 2006
- [8] Dietrich K. Anonymous RFID authentication using trusted computing technologies[C] // Proceedings of the 6th international conference on Radio frequency identification; security and privacy issues. Istanbul, Turkey; Springer-Verlag, 2010; 91-102
- [9] Aaraj N, Raghunathan A, Jha N K. Analysis and design of a hardware/software trusted platform module for embedded systems[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2009, 8(1): 1-31
- [10] Ekberg J-E, Bugiel S. Trust in a small package: minimized MRTM software implementation for mobile secure environments[C] // Proceedings of the 2009 ACM workshop on Scalable trusted computing. ACM; Chicago, Illinois, USA, 2009; 9-18
- [11] Dietrich K, Winter J. Towards customizable, application specific mobile trusted modules [C] // Proceedings of the fifth ACM workshop on Scalable trusted computing. ACM; Chicago, Illinois, USA, 2010; 31-40
- [12] Othman H, Hashim H, Razmi Y M A, et al. Forming Virtualized Secure Framework for Location Based Services(LBS) using Direct Anonymous Attestation(DAA) protocol[C] // 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). IEEE; Washington DC, USA, 2010; 622-629
- [13] TCG, TCG Mobile Reference Architecture[S]. TCG. 2007
- [14] Kostianen K, Reshetova E, Ekberg J E, et al. Old, new, borrowed, blue -: a perspective on the evolution of mobile platform security architectures[C] // Proceedings of the first ACM conference on Data and application security and privacy. ACM; San Antonio, TX, USA, 2011; 13-24
- [15] Khan S, Khan S, Nauman M, et al. Realizing dynamic behavior attestation for mobile platforms[C] // Proceedings of the 7th International Conference on Frontiers of Information Technology. ACM; Abbottabad, Pakistan, 2009; 1-6
- [16] 郑宇, 何大可, 何明星. 基于可信计算的移动终端用户认证方案[J]. 计算机学报, 2006, 29(8): 1255-1264
- [17] 李建, 何永忠, 沈昌祥, 等. 基于可信移动平台的跨身份标志域访问模型[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 321-324
- [18] 李涛, 胡爱群. 可信模块与强制访问控制结合的安全防护方案[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(3): 513-517
- [19] 孙丽娜, 常桂然, 王兴伟. 无线网络下可信移动节点接入认证方案[J]. 计算机应用, 2011, 31(11): 2950-2953
- [20] 吴振强, 周彦伟, 乔子芮. 移动互联网下可信移动平台接入机制[J]. 通信学报, 2010, 31(10): 158-169
- [21] 余鹏飞, 吴俊军, 王同洋, 等. 基于智能卡技术的移动存储安全管理研究[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(4): 29-32
- [22] Ekberg J E, Kylänpää M. MTM emulator[OL]. <http://mtm.nrsec.com/index.html>
- [23] Oracle. Java Card Development Kit 2. 2. 2[OL]. <http://www.oracle.com/technetwork/ava/javacard/overview/index.html>

(上接第 13 页)

- [65] Cui D, Gao Z Y, Zhao X M. Cascades in Small-World modular networks with CML's method[J]. Modern Phys. Lett., 2007, 21: 2055
- [66] Cui D, Gao Z Y, Zhao X M. Cascades with coupled map lattices in preferential attachment community networks [J]. Chin. Phys., 2008, 17(5): 1703-1708
- [67] Cui D, Gao Z Y, Zheng J F. Tolerance of edge cascades with coupled map lattices methods[J]. Chin. Phys., 2009, 18(3): 992-996
- [68] Bao Z J, Cao Y J, Ding L J, et al. Synergetic behavior in the cascading failure propagation of scale-free coupled map lattices[J]. Physica A, 2008, 387: 5922-5929
- [69] Fan W, Yeung K H. Protection against Cascading Failures in Scale-free Networks[C] // Proceedings of the 7th Asian Control Conference. 2009; 27-29
- [70] Watts D J. A simple model of global cascades on random networks[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 2002, 99: 5766-5771
- [71] Buzna L, Peters K, Helbing D. Modelling the dynamics of disaster spreading in networks[J]. Physica A, 2006, 328: 132-140
- [72] Weng W G, Ni S J, Yuan, H Y, et al. Modeling the dynamics of disaster spreading from key nodes in complex networks [J]. Int J Mod Phys C, 2007, 18(5): 889-901
- [73] Guo Q, Li L X, Chen Y H, et al. Modeling dynamics of disaster spreading in community networks[J]. Nonlinear Dyn, 2011, 64: 157-165
- [74] Buzna L, Peters K, Ammoser H, et al. Efficient response to cascading disaster spreading[J]. Phys. Rev. E, 2007, 75: 056107
- [75] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464: 1025
- [76] Parshani R, Buldyrev S V, Havlin S. Interdependent Networks: Reducing the Coupling Strength Leads to a Change from a First to Second Order Percolation Transition [J]. Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 048701
- [77] Huang X Q, Gao J X, Buldyrev S V, et al. Robustness of interdependent networks under targeted attack[J]. Phys. Rev. E, 2011, 83: 065101
- [78] Smart A G, Amaral L A N, Ottino J M. Cascading failure and robustness in metabolic networks [J]. PNAS, 2008, 105(36): 13223-13228
- [79] Yan Y, Liu X, Zhuang X T. Analyzing and identifying of Cascading failure in supply chain networks[C] // ICLSIM. 2010; 1292-1295
- [80] Jin C, Huang Y Y, Gao P. Analysis on Cascading Failure Propagation in Logistics System under Emergency [C] // ICEEE. 2010; 5660604
- [81] Sahasrabudhe S, Motter A E. Rescuing ecosystems from extinction cascades through compensatory perturbations[J]. Nature Communication, 2011(1)
- [82] Wang W X, Yang R, Lai Y C. Cascade of elimination and emergence of pure cooperation in coevolutionary games on networks [J]. Phys. Rev. E, 2010, 81: 035102