

级联失效的时空传播

随着人类社会的发展，诸如信息网络、交通网络和电力网络等基础设施的可靠性正面临着来自各类威胁的愈发严峻的挑战。仅从某个局部故障开始，级联失效能够以多米诺效应的方式传播，从而导致我们在现实生活中时常听说的大规模网络瘫痪。比如 2015 年 3 月，土耳其超过半数的省份遭遇大停电事故，对交通、航空、居民生活用电等方面均造成巨大且不可恢复的损失。相似的级联失效也可能发生于信息网络。2014 年 1 月，从腾讯公司服务器崩溃开始，中国超过三分之二的 DNS 服务器在极短的时间内发生连锁故障，导致大量网页不能被用户访问。这些级联故障大都在传播初期难以被发现，并往往以不可预见的方式快速传播，导致维护者难以对其进行精准的预测和控制。

从故障原因的角度来说，一些故障源自结构的相关性，而另外一些故障则是由于过载。与第一种故障不同，由于系统内的交互作用，过载故障常常通过不可见的路径传播。在结构性失效中，故障传播依赖节点在网络中的直接连接，而过载失效则通过传播路径的变化造成更多节点过载并失效。这种具有蝴蝶效应的级联过载失效甚至能从一个微小的扰动发展成灾难性的破坏。然而不幸的是，虽然上述故障的时空传播特性至关重要，对其在学术上的研究到目前仍是空白。因此，这也成为了复杂网络可靠性中的一个重要问题。

我们的研究关注空间嵌入式网络中由于局部故障导致的级联失效。这种初始时仅发生于局部区域的故障在自然灾害和恶意攻击中十分常见。为了研究其时空传播特性，我们引入了 $r_c(t)$ 和 $F_r(t)$ 两个参量。其中 t 是阶段数。其中 $r_c(t)$ 表示新失效节点距初始故障中心的平均距离，而 $F_r(t)$ 表示该阶段时的新失效节点数目。 $r_c(t)$ 可以帮助系统维护者在距原始受击点合适的距离处设置防火墙，而 $F_r(t)$ 告诉系统维护者防火墙应该建多高。

本文研究的主要结果如下三图所示。在图 1 中，我们展示了模拟不同阶段级联失效传播的快照。可以看出，级联失效以初始故障为中心近似放射状地传播，直至系统边界。具体地，空间上距离初始故障较近的节点率先失效，这样每一阶段新失效的节点形成一个环形，且该环形随失效传播而膨胀直至系统边界。

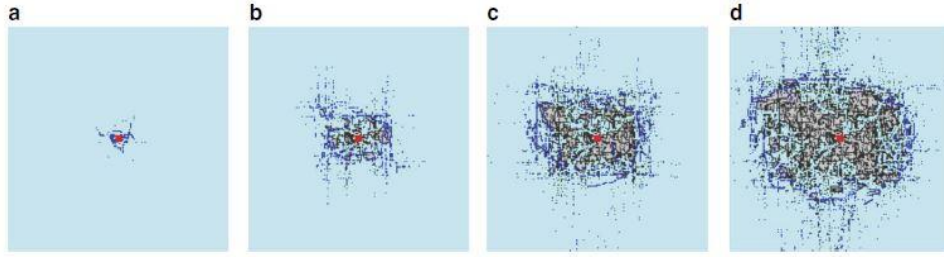


图 1 我们在 200×200 的晶格网络上展示了第一、三、五、七阶段级联传播情况。abcd 四幅图中，深蓝色节点代表在当前一个阶段当中刚刚失效的节点，黑色节点代表本阶段之前就已经失效的节点，青色的节点代表目前尚未失效的节点。

如图 2a 所示，我们意外地发现，级联失效在空间传播的速度几近恒定。在图 2b 中，对于不同规模的网络，失效节点数目 $F_r(t)$ 在几乎相似的时间点达到最大值，这意味着规模大的系统中级联失效传播的速度会快。图 2c 和 2d 则表明随着系统容忍能力的上升，级联失效传播速度持续降低，即大的容忍能力可以延缓系统的崩溃速度，带来更长的防控窗口。

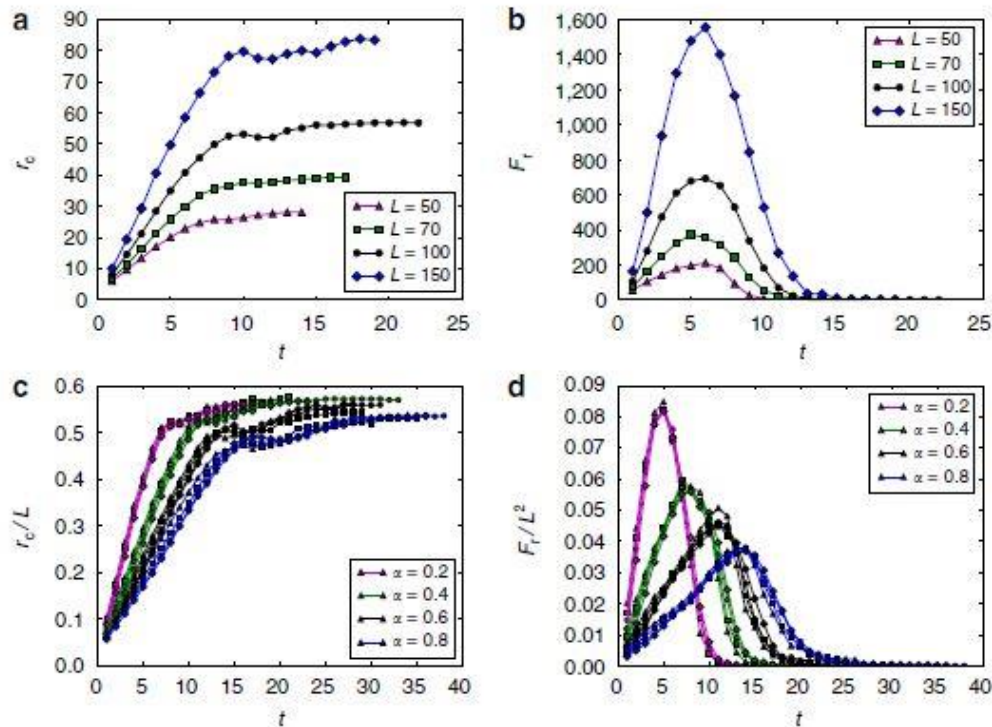


图 2a 和 2b: 传播过程中, 每一步骤上 $r_c(t)$ 和 $F_r(t)$ 的情况。图 2c 和 2d 反应了 $r_c(t)$ 和 $F_r(t)$ 与网络规模的关系, 不同大小网络在途中用不同符号表示: $L=70$ (三角形), $L=80$ (方形), $L=90$ (圆形), $L=100$ (菱形)。

上述讨论主要针对仿真结果, 除此之外, 我们也进行了理论建模。在图 3

当中，我们比较了模拟结果和理论计算结果，证明我们建立的理论模型能够很好地估计级联故障传播的速度，对于不同的系统容忍参数，仅需一个常量修正。无论是理论计算值还是模拟仿真值都揭示了在给定系统规模和容忍能力的基础上，当前失效规模并不影响级联失效的传播速度。另外，我们也证明了上述结论在多种网络模型和现实网络当中均是适用的。

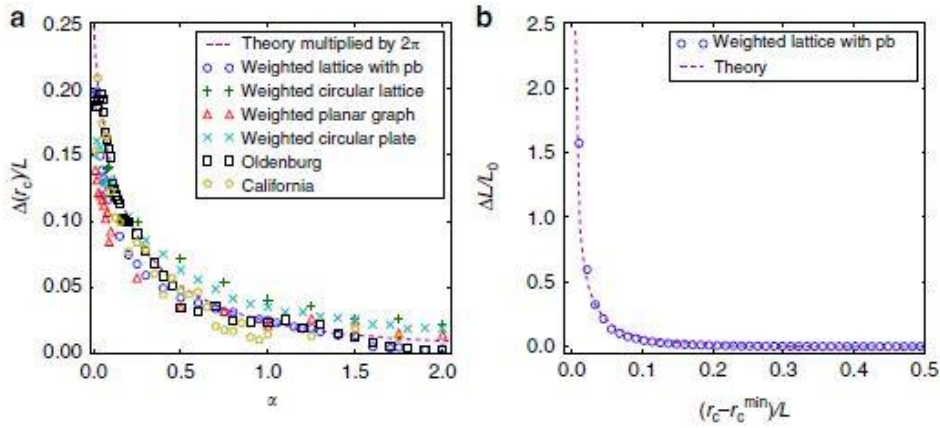


图 3a: 模型和实际结构中相对速度与容忍能力的函数关系。相对速度用 $\Delta(r_c)/L$ 来衡量。可以看出它是随 α 增加而减少的。图 3b: 平均负载与据故障起始点相对距离的函数关系。故障发生之后，加权晶格网络和理论计算分别用小圆圈和虚线来表示。

同时，以这些结果为桥梁，我们甚至可以将级联失效传播问题与依赖网络渗流模型关联起来，也即不同特征长度的依赖链接可以作为更为简洁的模型来描述级联过载失效。建立该关联的重要意义在于，级联失效往往需要大量计算，极大的限制了所能研究的系统规模，而依赖网络渗流的讨论则仅需要较少的计算，使得讨论极大规模网络成为可能。

在实际应用中，当一个网络中扰动被检测到时，级联失效时空传播特性的相关知识对于预测和抑制网络故障不可或缺。与此同时，也需要注意到，现实系统中的级联失效常常源自不同动态过程，如过载或操作的复杂交互，因此从该意义上讲，本文亦是探索级联失效背后所隐藏普适规律的万里长征的第一步。

李大庆，可靠性与系统工程学院，副教授，卓越百人，E-mail: daqingl@buaa.edu.cn

参考文献

- [1] Jichang Zhao, Daqing Li, Hillel Sanhedrai, Reuven Cohen & Shlomo Havlin (Eds.). Spatio-temporal propagation of cascading overload failures in spatially embedded networks. *Nature Communications* 497, 51–59 (2013).
- [2] Daqing Li, Bowen Fu, Yunpeng Wang, Guangquan Lu, Yehiel Berezin, H. Eugene Stanley, and Shlomo Havlin. Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks. *PNAS* 112, 669-672 (2015).
- [3] Jianxi Gao, Xueming Liu, Daqing Li, Shlomo Havlin. Recent Progress on the Resilience of Complex Networks. *Energies* 8, 12187-12210 (2015).
- [4] Feilong Wang, Daqing Li, Xiaoyun Xu, Ruoqian Wu. Percolation properties in a traffic model. *EPL* 112, 38001 (2015).
- [5] Daqing Li, Qiong Zhang, Enrico Zio, Shlomo Havlin and Rui Kang. Network Reliability Analysis based on Percolation Theory. *Reliability Engineering & System Safety* 142, 556-562 (2015).
- [6] Yehiel Berezin, Amir Bashan, Michael M. Danziger, Daqing Li, and Shlomo Havlin. Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies. *Nature Scientific Reports* 5, 8934 (2015).