

文章编号:1672-3813(2017)03-0030-015;DOI:10.13306/j.1672-3813.2017.03.003

相互依存网络抗毁性研究综述

董政呈^a, 方彦军^a, 田 猛^b

(武汉大学 a. 动力与机械学院; b. 电子信息学院, 武汉 430072)



摘要:通过文献整理和分类,对近年来相互依存网络抗毁性的研究现状进行了综述。作为相互依存网络抗毁性的研究基础,首先介绍了复杂网络抗毁性常用的研究方法;然后对相关文献进行了梳理和分类,并以电力系统为例介绍了相互依存网络的应用;最后对相互依存网络抗毁性的研究和发展进行了总结和展望。希望能为研究者提供一定的参考和研究思路。

关键词:相互依存网络;抗毁性;级联失效;电力-信息耦合网络

中图分类号:N94

文献标识码:A

Review on Invulnerability of Interdependent Networks

DONG Zhengcheng^a, FANG Yanjun^a, TIAN Meng^b

(a. School of power and mechanical engineering; b. School of electronic and information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Via arrangement and classification of literatures, a review on invulnerability of interdependent networks in recent years is made. As the research foundation of invulnerability of interdependent networks, this paper first introduces some common methods of network invulnerability. Then we make arrangements on related researches from some fields, and take the power system as an example to explain the applications of interdependent networks. In the end, some conclusions and outlook are made for the researches and developments of invulnerability on interdependent networks. We hope this review can provide reference and research idea for researchers.

Key words: interdependent networks; invulnerability; cascading failures; power-communication coupled networks

0 引言

自网络的“小世界”和“无标度”特性被发现以来^[1-2],复杂网络理论得到了长足的发展,相关研究被应用到各个领域。作为重要的动力学特性之一,复杂网络的级联失效过程一直是研究的热点问题^[3]。网络中,一个或几个节点(边)的失效会通过节点之间的相互作用引发其它节点的失效,即产生连锁效应,最终导致相当一部分节点甚至整个网络的崩溃,例如由于潮流重分配导致的大面积停电、由于拥堵导致的通信网和交通网失效等。

近年来,计算机、信息和控制等技术得到了迅猛发展,使得现实世界的各种联系变得更加紧密和错综复杂,系统与系统间相互作用的重要性日益凸显(如图1所示)。早在2008年,美国就发布了《关于国家关键基础设施的电磁脉冲攻击威胁评估报告》(文献4),报告对电力、通讯、银行金融、交通、水资源等基础设施的脆弱性进行了评估,并指出“理解跨部门基础设施系统之间的相互依赖和相互作用,对于评估整个关键基础设施系统的恢复能力或鲁棒性至关重要,亟需理论建模和模拟分析来研究和探索包含大规模但有限数目的相互关联系统的复杂反映情况”。

收稿日期:2016-11-08;修回日期:2017-01-04

基金项目:国家自然科学基金(51707135);中国博士后科学基金(2017M612499);中央高校基本科研业务费专项资金项目(413000057, 2042017kf0037)

作者简介:董政呈(1990-),男,河南周口人,助理研究员,主要研究方向为相互依存网络,物理信息融合电力系统。

与单个网络不同,相互依存网络往往会呈现出更为复杂的动力学特性,如故障和病毒的传播、网络的同步与控制等。基于相互依存网络特有的结构,某一网络的故障传播不仅限于网络内部,也会通过依存关系引起其他相依网络的故障或失效。相关研究指出,不同基础设施之间的相互依赖关系蕴含着很大的脆弱性,如电力-信息网、电力-交通网等^[6-7]。

目前关于相互依存网络抗毁性研究的报道多见于外文文献,中文文献较少,综述较为缺乏^[8]。近年来,相互依存网络抗毁性研究的文献呈逐年上升的趋势,且已被应用到各个领域,延伸出许多新的交叉学科。为此,本文主要对 2010 年以来相互依存网络抗毁性研究的部分文献进行整理和总结,为相关研究者提供一定的参考。

1 复杂网络抗毁性的研究基础

一般来说,网络的抗毁性是指遭受破坏后,网络能维持或恢复其性能到一个可接受程度的能力。这种破坏可能来自于网络内部(故障),也可能来自于网络外部(随机或蓄意攻击)。百变不离其宗,相互依存网络的部分研究仍采用单个网络的方法,因此,本节首先对一些常见的复杂网络抗毁性的研究方法进行介绍,如评价指标、失效模型和攻击方式等。

1.1 抗毁性评价指标

为衡量复杂网络的抗毁性,首先需要建立一个能够准确刻画复杂网络抗毁性的测度指标。早在 1970 年, Frank 等^[9]就提出要建立具有生存性的网络,以抵御攻击或自然灾害,并采用点(边)连通度来表征网络的抗毁性,即使得图变成不连通或平凡图所需去掉的最少节点(边)数。此后,研究者又提出了许多新的测度指标,如坚韧度、完整度、邻近完整度、粘连度、离散数、膨胀系数、核度等等^[10-14]。但这些基于图论的抗毁性测度已不能满足大规模复杂网络的应用背景。2000 年,Albert 等^[3]以最大连通子图和平均最短距离为评价指标对网络的抗毁性进行了研究。此后,大量的文献都采用最大连通子图及其变形来表征网络的抗毁性(如相对值 $G = N/N'$ (其中 N 和 N' 分别表示级联失效发生前后网络中有效节点的数目)、连通子图个数等)。此外, Wu 等^[15-16]提出了自然连通度和谱测量的抗毁性测度; Shang 等^[17-18]跟踪研究了加权网络的自然连通度以及局域自然连通度;针对作战网络,狄等^[19]采用作战环数量的变化表征网络的抗毁性;针对带有负荷和容量的网络, Dong 等^[20]提出以负荷损失来表征网络的抗毁性。针对不同的技术和应用背景,不同的复杂网络表征参数具有不同的实际意义,如交通网和通信网的平均最短路径能够表征其传输和运送能力;电力网的孤岛(某些连通子图)在一定情况下也能满足电力运行;还有诸如介数、聚集系数、网络直径、网路效率以及其他自定义的指标^[21]。因此,在选择抗毁性评价指标时,应根据不同应用背景而确定。

1.2 级联失效模型

相关研究指出,现实世界中存在一类“时空耗散动力学系统”,这类系统可以自发地转换到一种临界状态,此时很微小的扰动都有可能触发连锁反应并导致灾难,即自组织临界性(Self-organized criticality, SOC)^[22-23]。

针对不同的应用背景,研究者们相继提出了多种级联失效模型,如拓扑结构模型、负荷-容量模型(Load-based)、二值失效模型、沙堆模型(Sandpile)、最优潮流方法模型(OPA)、CASCADE 模型以及耦合映像格子模型(Coupled map lattice)等^[24]。其中,拓扑结构模型和负荷-容量模型是复杂网络抗毁性研究中最常用的级联失效模型,且以负荷-容量模型的变型最为多样;而 OPA 和 CASCADE 模型多用于电力系统的级联失效。本节将主要介绍负荷-容量级联失效模型的研究现状。

耦合映像格子模型^[25]是目前研究较多的一类级联失效模型。耦合映像格子是一种时间、空间都离散而状态保持连续的非线性动力学模型。其基本思想是:网络包含 N 个节点,每个节点的状态会受到同时刻其他节点状态的影响。在某时刻 t 对某节点 i 施加扰动 R ,然后观察其他节点的状态变化。该模型常用于描述复杂系统的时空动态行为。

二值失效模型^[26]采用阈值规则,网络节点的状态取决于其相邻节点的状态(0 或 1)。若某个节点的相邻节

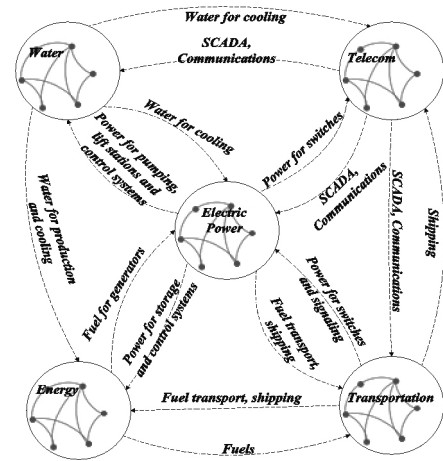


图 1 不同基础设施之间的相互依赖关系^[4,5]

Fig. 1 Interdependency between different infrastructures

点中有超过 φ (阈值) 比例的节点状态为 1, 则此节点为 1, 否则为 0, 即网络节点的状态取决于周围环境。当阈值小到一定值时, 网络的节点基本被 1 占据; 当阈值大到一定值时, 网络节点的状态很难被改变。该模型常用于社交、经济等领域, 如某人的观点会受周围人影响。

沙堆模型^[22]是用来表述自组织临界性质的经典模型。让沙子一次一粒均匀地落在桌上, 形成逐渐增高的小沙堆。在初始阶段, 沙子下落对沙堆整体的影响不大; 而当沙堆的高度达到一定程度后, 一颗沙子的落下就可能引发周围整个沙堆的崩塌。

拓扑结构模型一般假设某些节点失效后, 网络被分割成多个聚类(子网络), 且认为最大聚类(最大连通子图)中的节点具有功能, 而其他节点失效。由于其级联失效过程可被精确解析(生成函数等), 因此拓扑结构模型是目前网络抗毁性研究中最常用的模型之一。该模型可看作是对真实网络失效过程的一种简化, 即认为网络的功能与其拓扑结构有关, 被广泛应用于各种基础设施网络的连锁故障分析。

相比拓扑结构模型, 负荷-容量模型则进一步准确刻画了真实网络的动态特性, 如交通网、电力网的流量转移等, 但相关研究多以数值仿真为主。模型一般假设网络的节点都具有一定的初始负荷 L 和容量 C , 失效节点 i 的负荷会通过一定的方式转移至网络的其他节点; 若某个节点 j 的总负荷大于其能承受的容量极限时 ($L_j + L_{ij} > C_j$, L_{ij} 为节点 j 从失效节点获得的负荷), 则该节点失效。Motter 等^[27]认为负荷常常是沿着最短路径传送的, 因此采用节点的介数定义初始负荷 L , 且容量与初始负荷成正相关 $C = (1 + \alpha)L$, 其中 α 为可调参数。此模型为某些真实网络的研究提供了建模思路, 如通信网、交通网等基础设施。此后, 负荷-容量模型被广泛应用于各类真实网络的级联失效分析中, 并产生了多种改进模型。Wang 等^[28-29]采用节点的度数来定义负荷。李等^[30]提出一种带有应急恢复机理的级联失效模型。Crucitti 等^[31]考虑节点和边的动态行为, 提出一种基于边上传输效率动态更新的模型, 即节点过载时, 边的传输效率降低, 但并不被移除。Wang 等^[32]将每条边 e_{ij} 的负荷定义为 $(k_i k_j)^\theta$, (k_i 和 k_j 分别为边 e_{ij} 两个端点的度, θ 为可调参数)。Bao 等^[33]基于介数负荷的定义, 提出了一种带节点移除概率的级联失效模型。Lehmann 等^[34]提出了一种节点初始负荷随机分配且失效节点负荷随机重分配的级联失效模型。针对不同的网络, 研究者们采用不同的方法定义负荷, 如 Bakke 等^[35]针对电力网络, 提出了一种基于流守恒的负荷分配模型。Zeng 等^[36-37]针对交通网, 引入用户均衡模型来确定网络的初始负荷。Wang 等^[38]提出一种基于基尔霍夫定律和欧姆定律的级联失效模型。Sun^[39]和 Li^[40]等采用节点容量和拓扑结构的函数作为 α 的系数。Kim 等^[41]采用一个二值函数来定义负荷。Kim 等^[42]指出网络的负荷和容量并不一定成线性关系, 由此奚等^[43]提出一种新的负荷-容量模型。王等^[44]提出一种新的负荷局域择优重新分配原则。总的来说, 负荷-容量模型的改进主要集中在以下几点: 1) 初始负荷所在对象, 如节点负荷、边负荷等^[45]; 2) 初始负荷的定义方法, 如介数定义、度数定义、函数定义、随机等; 3) 容量和初始负荷的关系, 如线性、非线性等; 4) 失效负荷的重分配范围, 如邻近分配、全局分配等; 5) 失效负荷的重分配方法, 如容量比例分配、介数变化分配等; 6) 节点的变化过程, 如直接移除、部分失效等。

1.3 攻击方式

目前针对复杂网络级联失效的研究, 一般站在系统级的角度, 对节点(边)的失效机理不做考虑, 即不考虑节点(边)是如何失效的。因此, 复杂网络的抗毁性研究常采用物理攻击的方式移除网络的节点(边)。基本思路为: 删除网络的 n 个(条)节点(边), 使网络发生级联失效, 待网络稳定后, 观察网络特征参数或评价指标的变化。2000 年, Albert 等^[3]研究了随机攻击和蓄意攻击对随机网络和无标度网络抗毁性的影响。此后, Holme 等^[46]不仅研究了节点和边失效对复杂网络的影响, 还考虑了基于静态和动态度数(介数)的攻击策略(动态度数和介数是指, 网络部分节点和边失效, 被移除后得到的新网络的度数和介数)。覃等^[47]分析了攻击策略和平均度、介数紧致系数以及接近度紧致系数的关系。王等^[44, 48]分析了两种边和节点攻击策略对网络的影响, 并指出在某些条件下攻击负荷小的边或节点也能获得较好的效果。吴等^[21]采用一种基于流量的边攻击策略对不同网络的抗毁性进行了分析。Wu 和 Zheng 等^[49-50]研究了考虑攻击代价时网络的抗毁性。然而, 在实际情况下, 网络的全局信息很难被获取, 蓄意攻击者掌握的很有可能是网络的局部信息^[51-52]。为此, Xiao 等^[53]分析了 3 种基于局域拓扑信息的攻击方式: 贪婪的连续攻击 (Greedy sequential)、协同攻击 (Coordinated) 和下限平行攻击 (Low-bounded parallel)。Xia 等^[54]提出一种移除所掌握区域中最大度数节点的攻击方法。陈等^[55]提出了一种局部拓扑结构已知条件下复杂网络的攻击策略。Wu 等^[56]将网络划分为已知区域和未知区域, 并分别实施蓄意攻击和随机攻击。Shao 等^[57]提出一种局部攻击 (Localized attack) 方式, 即失效从某节点的相邻节点开始逐层向外传播。Dong 等^[58]提出一种改进的局部攻击方式, 即网络中受保护的节点不会受到影响。实际上, 有些攻击不会直接导致网

络节点或边的失效,而只会降低这些边或节点的有效功能(称为弱化攻击),比如通信边的信息传输能力、节点的数据处理能力等。总的来说,攻击方式可以做如下分类:按攻击意图不同,可分为随机攻击和蓄意攻击;按攻击对象不同,可分为边攻击和节点攻击;按攻击范围不同,可分为区域攻击和全局攻击;在蓄意攻击中,按网络的特征参数不同,可分为度数攻击、介数攻击以及其他重要节点攻击;按攻击代价,可分为无代价攻击和有代价攻击。

2 相互依存网络的抗毁性研究

随着社会和科技的发展,一个系统无法独立地存在于现实世界中,其往往会与其他系统产生交互或联系,组成复合网络系统,如网络的网络^[59](Networks of networks, NON)或多层网络^[60](Multiplex/Multilayer networks)或耦合网络(Coupled networks)等。这些复合网络可视为由 n 个单网络组成的网络集,且各网络之间有边相连。目前,关于复合网络的定义尚未统一,这些概念之间既有相似性又具有一定的区别。按照网络间连接边性质的不同,可分为相互依存网络^[61](Interdependent networks)、互联网络^[62](Interconnected networks)和依存且互联的网络等。

互联网络是指各子网络在功能上相互弥补和关联,共同组成一个整体。如城市的铁路网和航空网都是交通系统的一部分,它们相辅相成,功能互补。相互依存网络是指子网络间具有一定的依存关系,即一个网络的节点要正常工作,需要其他网络的节点提供支持。最典型的例子如电力网和信息网,一方面,电力网为信息网的正常运行提供能源;另一方面信息网为电力网的正常运行提供信息和数据支持。研究表明^[63],某些系统的子系统内部会同时存在互联边和依存边。本文仅研究相互依存网络,且以包含两个网络的相互依存网络为主。

相互依存网络按依存关系可以分为单向依存网络和双向依存网络。其中,单向依存网络是指 A 网络的正常运行依赖于 B 网络,而 B 网络的正常运行不一定依赖于 A 网络。如电力系统和公路系统,电力系统停电时会导致公路系统无法正常运行,但公路系统失效对电力系统可能没有太大影响。双向依存网络是指 A 网络和 B 网络之间相互依赖,任一方的失效都会对另一方造成影响,甚至失效。最典型的如系统的硬件网络和软件网络,硬件的正常运行需要软件提供支持,而软件则以硬件为平台。按依存节点比例可分为部分依存网络和完全依存网络。其中,部分依存网络是指网络中只有部分节点具有依存节点,而其余节点属于自治节点(自治节点是指依存网络中没有依存边的节点,此类节点不因其依存网络节点的失效而失效);完全依存网络是指网络的所有节点都具有依存节点。此外,按依存方向可以分为节点对无反馈和节点对有反馈。若 A 网络的节点 A_1 依赖于 B 网络的节点 B_1 ,且此时 B_1 也依赖于 A_1 ,则称为有反馈;反之则称为无反馈。

相互依存网络作为一类特殊的网络系统,具有重要的现实意义,但目前与其相关的研究和成果仍较少。作者对三大中文和英文数据库进行粗略统计(如图 2 所示,相关数据为作者 2016 年 1 月 12 日通过中国知网、EI 数据库和 SCI 数据库统计而得。中文搜索关键词为“相互依存网络”,搜索区域为“主题”;EI 数据库搜索关键词为“interdependent networks”,搜索区域为“主题”;SCI 数据库搜索关键词为“interdependent networks”,搜索区域为“Subject/Title/Abstract”。由于相互依存网络的定义和叫法尚未统一,因此搜索结果难免有偏差,也只能象征性表示其热度),发现近几年与相互依存网络相关的文章数量呈现出上升的趋势。

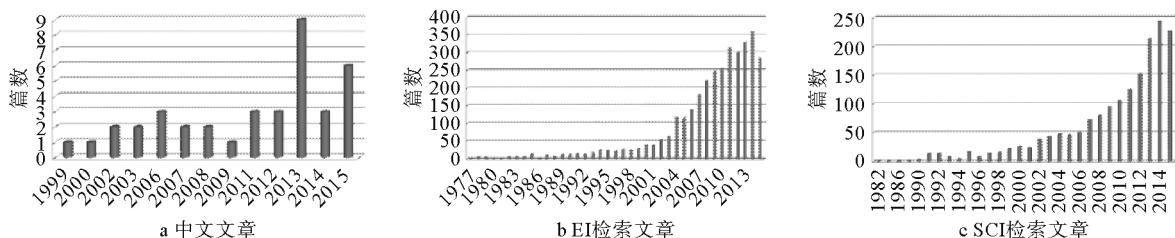


图 2 主题与相互依存网络相关的文章统计

Fig. 2 Statistics on papers of interdependent networks

某相互依存网络模型如图 3 所示,模型包含两个子网络 A 和 B 。网络 $A(B)$ 内部的边称为连接边(Intra-link 或 Connectivity link),网络 A 和网络 B 之间的边称为依存边或耦合边(Inter-link 或 Dependence link)。相互依存网络的研究多与关联基础设施相对应(如图 1 所示),关联基础设施根据其依存关系的不同^[5,64],可以大致分为物理依存、网络依存、地理依存和逻辑依存等 4 类。其中,物理依存是指两个系统之间具有物理的连接关系,且一个系统的状态依赖于另一个系统的输出,如输煤铁路和燃煤电厂;网络依存是指两个系统之间具有网络的连接关

系,一个系统的正常运行需要另一个信息系统的数据传输,如电力网和 SCADA 系统;地理依存是指一个系统的状态会受到周围系统环境事件(如火灾、爆炸等)的影响,如桥梁系统和架设的线路;逻辑依存是指一个系统的状态会受到另一个系统状态的影响,但两者之间的关联又并非以上各种关联方式,这种关联可以是市场、金融等,如电力系统和经济系统。

早在 2008 年, Rosato 等^[65]就对意大利电网和因特网所组成的耦合网络进行了依存性研究。文章假设当因特网节点的供电电压低于某一阈值时,节点失效。实验发现,不仅电力网会对因特网产生影响,而且因特网的失效也会在很大程度上影响电力网络。但 Rosato 等并未对此现象进一步总结,建立统一和通用的相互依存网络级联失效模型。2010 年, Buldyrev 等^[61]在 Nature 上发表了一篇题为《相互依存网络中的灾难性故障级联》(Catastrophic cascade of failures in interdependent networks)的文章,首次运用渗流理论对相互依存网络的级联失效过程进行了数学解析。文章提出一种基于拓扑结构的级联失效模型,并以意大利大停电为例,阐述了研究相互依存网络级联失效的重要性,指出相互依存网络比单个网络更为脆弱。模型假设一个节点要正常工作必须满足两个条件:1)其所依赖的节点正常工作;2)其必须在网络的最大连通子图内。首先删除 $1-p$ 比例的节点,待网络稳定后,记录网络中剩余的最大连通子图的规模 P_∞ ,作为抗毁性评价指标。

对于单个网络^[66],在随机攻击下

$$P_\infty = pg(p) \quad (1)$$

且

$$g(p) = 1 - G(pf(p) + 1 - p) \quad (2)$$

$$f(p) = H(pf(p) + 1 - p) \quad (3)$$

其中, $G(x)$ 和 $H(x)$ 分别为网络的生成函数和分支过程生成函数。

对于 A、B 网络组成的相互依存网络^[67],在删除 A 网络 $1-p$ 比例的节点后,网络 A 剩余的节点比例为 $\phi'_1 = p$, 剩余的最大连通子图的节点比例为 $\phi_1 = \phi'_1 g_A(\phi'_1) = pg_A(p)$;

此时, B 网络的节点由于依存节点的失效而失效,则 B 网络剩余的节点为 $\phi'_1 = \phi'_1 g_A(\phi'_1) = pg_A(p)$, 剩余的最大连通子图的节点为 $\phi_1 = \phi'_1 g_B(\phi'_1)$ 。

在 t 时刻, $\phi'_t = pg_B(\phi'_{t-1})$, $\phi'_t = pg_A(\phi'_{t-1})$ 。当系统达到稳态时,网络的节点数保持不变。此时可有

$$\begin{aligned} x &= pg_B(y) \\ y &= pg_A(x) \end{aligned} \quad (4)$$

则

$$P_\infty = xg_B(x) = yg_A(y) \quad (5)$$

对于任一网络,都存在一个渗流阈值 p_c , 当 $p < p_c$ 时, $P_\infty = 0$, 也即是 p_c 越小的网络抗毁性越强。若 p 与 P_∞ 的关系为连续曲线,则称网络的级联失效出现二阶相变;反之则称为一阶相变(如图 4 所示)。随后, Son 等^[68]指出 Buldyrev 的结论并非对所有拓扑结构的网络都适用,并以稀疏晶格为例进行了验证,指出相互依存的稀疏晶格网络比单个网络具有更强的抗毁性,且会出现一阶相变。Gao 等^[69]指出 3 种增强相互依存网络抗毁性的措施:1)设置高度数节点作为自治节点,尤其是高度数节点^[70];2)以相似高度数节点作为依存边^[71,72]以及 3)保护高度数节点^[73]。

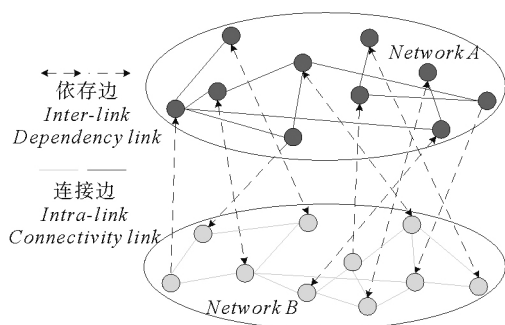


图 3 相互依存网络模型

Fig. 3 Interdependent networks model

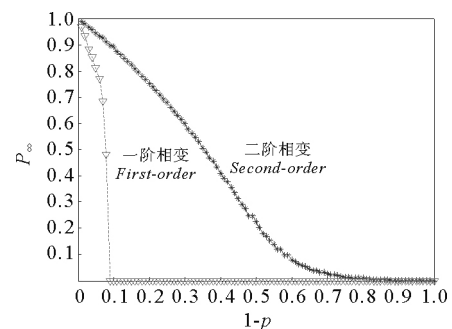


图 4 相互依存网络的相变

Fig. 4 Phase transition of interdependent networks

相互依存网络与单个网络的抗毁性研究方法较为类似。在攻击方面, Huang 等^[74]将蓄意攻击转换为随机攻击,运用渗流理论对无标度相互依存网络的抗毁性进行了研究,发现相互依存网络比单个无标度网络更为脆弱。李等^[75-76]运用渗流理论分析了边攻击对随机和无标度相互依存网络的影响,并指出随机攻击会产生一阶相变,且无标度网络的抗毁性比随机网络差。蒋等^[77]研究了一种介于随机和蓄意攻击之间的攻击方式对相互依存网络的影响,并定义信息广度和信息精度来表示掌握的攻击信息。文章指出信息广度和信息精度对网络抗毁性具有较大的影响。Vespignani 等^[64]将相互依存网络的节点攻击看作是“最少顶点覆盖问题”,并提出了一种基于目标函数和约束条件的优化方法。

2.1 依存边的相关研究

依存边的存在决定了相互依存网络具有某些和单个网络不同的特殊性质,即失效会从一个网络传播至其他网络。因此,对相互依存网络抗毁性的研究多是围绕其依存边展开的,即研究不同的耦合方式对其抗毁性的影响(如图 5 所示)。

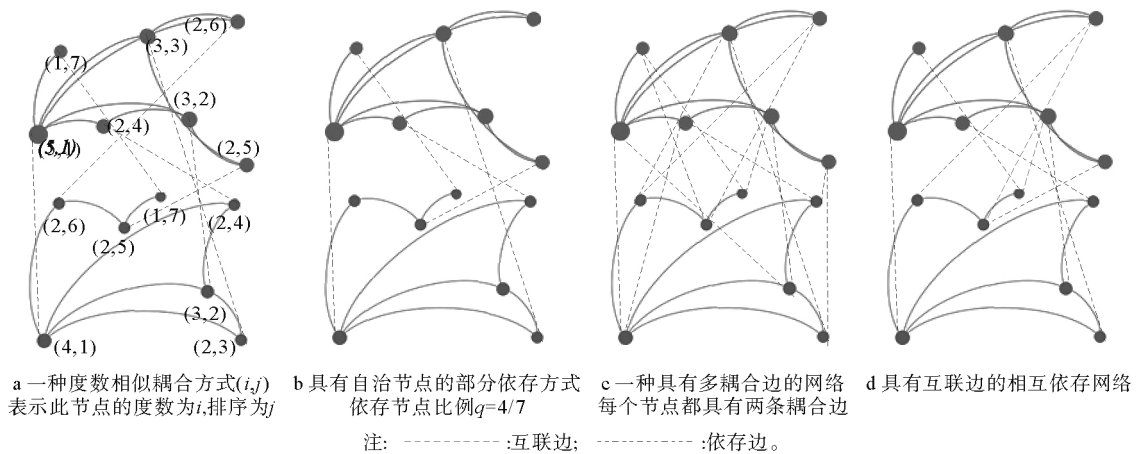


图 5 几种不同的耦合方式

Fig. 5 Some different coupling patterns

2.1.1 内在自相似耦合

相互依存网络的依存边往往不是随机存在的,某些具有相似特性的节点对之间更容易产生依存或耦合关系。Parshani 等^[70]以度-度相关性和聚集系数为参数建立耦合网络,发现内在自相似耦合(Inter-similarity)的网络对于随机攻击具有较强的抵御能力。Buldyrev 等^[71]也采用一种相似度数的耦合方式构建相互依存网络,指出这种耦合方式要优于随机耦合。Hu 等^[78]根据 Parshani 等提出的“内在自相似度”的概念,对随机相互依存网络的级联失效过程进行了数学解析。李等^[79]提出一种网络间同地位节点耦合方式,研究了随机和无标度相互依存网络的抗毁性,发现通过调整参数可使级联失效由一阶相变转变为二阶相变,且在各种攻击下的抗毁性要优于随机耦合。

与一个网络中度数较大节点相依存的节点,在另一个网络中往往也具有较多的连边,即同配耦合。Zhou 等^[80]以度-度相关性作为网络同配性指标,研究了同配性对随机和无标度相互依存网络的影响,发现同配性越强,网络的抗毁性越弱;且在相同同配性条件下,随机网络的抗毁性要强于无标度网络。Watanabe 等^[81]不仅发现网络内度-度相关性对相互依存网络的抗毁性有一定的影响,还研究了网络间依存节点的度-度相关性对网络的影响。文章指出对于蓄意攻击,网络内度-度正相关且网络间度-度负相关可以明显增强网络的抗毁性,但对于随机攻击,效果较差。Igarashi 等^[82]也指出网络间度-度正相关可以增强其抗毁性。Valdez 等^[83]将 α 比例的节点设置为度-度相关依存,发现 p 和 α 平面出现了三相点。王等^[84]以无标度和随机网络为对象,构建了对称(两个网络是同类型网络)和非对称相互依存网络,采用边攻击研究了随机耦合、同配耦合以及异配耦合对网络抗毁性的影响,发现同配耦合能增强网络的抗毁性,且耦合的网络越相似,抗毁性越强。此外,适当增加同配耦合边数目也能增强网络抗毁性。Cheng 等^[85]研究了对称和非对称相互依存网络,指出在随机攻击下,非对称相互依存网络更加脆弱;在蓄意攻击下,保护高度数节点对非对称网络抗毁性的提升效果并不明显。陈等^[86]也指出在随机攻击下,全耦合时($q=1$),度-度正相关网络具有更强的抗毁性;而当 $q<1$ 时,度-度负相关网络则显出更强的

抗毁性。

2.1.2 含有自治节点

相互依存网络中有时会存在一定比例的自治节点,即网络中只有 q 比例的节点具有依存边。Parshani 等^[70]研究了不同 q 对无标度和随机相互依存网络的影响,指出减小 q 可使网络由一阶相变转变为二阶相变。Gao 等^[69]研究了完全依赖($q=1$)和部分依赖($q<1$)网络在随机攻击和蓄意攻击下的抗毁性,指出保护度数大的节点对于相互依存网络来说效果并不显著。Zhou 等^[87]通过研究部分依赖的无标度网络,发现 q 在从 1 降到 0 的过程中会出现两个临界值,将级联失效过程分为 3 个不同的相变区域,即一阶相变、混合相变和二阶相变。Fu 等^[88]研究了依存边方向(有无反馈)和 q 对随机相互依存网络抗毁性的影响,发现双向依存网络比单向依存网络具有更好的抗毁性,且 q 越大,网络的抗毁性越差。Schneider 等^[73]指出增加自治节点可以提升相互依存网络的抗毁性,并通过度数、介数、随机、 k -shell 等进行验证,发现选取介数高的节点作为自治节点具有更好的效果。

2.1.3 具有多耦合边

相互依存网络的节点有时并不是一对一耦合的,某些节点可能具有多条依存边。Yagan 等^[89]提出一种“均匀连接策略(Uniform)”,即网络的每个节点都具有相同数目的依存边 k ,并指出此策略可在网络拓扑未知的情况下,较好地提升网络的抗毁性。Shao 等^[90]提出了一种一对多的耦合方式,研究了随机和无标度相互依存网络的抗毁性,并指出这种耦合方式可提高网络的抗毁性,使级联失效由一阶相变转变为二阶相变。Dong 等^[91-92]研究了多对多部分依赖相互依存网络在各种攻击下的抗毁性,指出弱耦合能够提升网络的抗毁性。此外,文章还发现高度数节点失效更容易引起网络崩溃;且存在一个临界耦合强度值,若大于此值,则级联失效呈现一阶相变。Jiang 等^[93]假设网络的依存边数目服从指数和无标度分布,以此研究了有反馈随机和无标度相互依存网络的抗毁性,并指出依存边数目呈无标度分布的相互依存网络具有更强的抗毁性。此外,文章还发现增加依存边数目会降低无标度网络的抗毁性,但对于随机网络的效果则相反。彭等^[94]基于 CML 研究了攻击策略、耦合强度以及时滞等对多对多无标度相互依存网络的影响。文章指出蓄意攻击的影响要强于随机攻击,且抗毁性会随耦合强度的增大呈现出先增强后减弱的现象,此外时滞也会影响级联失效的传播与规模。

2.1.4 考虑距离的空间依存网络

现实世界的网络往往位于欧几里得空间,因此网络之间的耦合也需考虑依存节点对之间的距离 r 。Li 等^[95]建立方格相互依存网络,研究了 r 对网络抗毁性的影响,发现当 r 小于一个阈值 r_c 时,级联失效会出现二阶相变,而增大 r 则会出现一阶相变。随后,Danziger 等^[96]发现 r_c 与 q 间存在一定的关系,通过对晶格相互依存网络的实验发现,每对应一个 q ,都会存在一个 r_c ,且 r_c 随着 q 的增大而减小。Bashan 等^[97]考虑空间限制,建立了晶格相互依存网络模型,发现耦合晶格网络比单个网络更为脆弱。Shekhtman 等^[98]将空间距离引入 n 个树型相互依存网络中,发现阈值 r_c 随着 n 的增加明显降低,且当 $n>10$ 时, r_c 接近极限值 1。Kornbluth 等^[99]考虑距离约束,研究了距离对随机相互依存网络的影响,发现依存距离较长的网络更为脆弱,会出现一阶相变。Zhang 等^[100]研究了考虑节点生命周期的相互依存空间网络,指出当空间限制较强时,晶格网络的性能要优于随机网络;而当空间限制处于某中间水平时,晶格网络最为脆弱。综上,空间的限制使得网络在面对随机攻击和局部攻击时变得更加脆弱。局部攻击,如地震、海啸、生化攻击等,会引起一定半径范围内网络的失效,并传播至整个相互依存网络^[101-102]。

2.1.5 含有互联边

某些耦合系统会同时存在依存边和互联边,且依存边的存在会降低网络的抗毁性,而互联边则可以增强其抗毁性。Hu 等^[103]结合 Buldyrev 等^[104]提出的依存边和 Leicht 等^[105]提出的互联边,提出一种即互联又相互依存的网络。文章指出互联边的增加使得相互依存网络出现更复杂的混合相变现象。Tian 等^[106]以无反馈部分依存为基础,发现相互依存网络间的互联边数越多,二阶相变的区域越小;而网络内部的连接边越多,二阶相变的区域越大。

2.2 网络的聚集系数

真实网络有时会呈现出一定的聚集现象。Shao 等^[107]以一对一部分依存网络为对象,研究了依存节点数目 q 和网络聚集系数 c 对网络抗毁性的影响。文章指出当 q 一定时,随着 c 的增大,网络的抗毁性越弱;而当 c 一定时,随着 q 的增大,网络的抗毁性也减弱。Tian 等^[106]也对相同的模型进行了研究,发现了类似的结果,即随着 q 的增加,网络逐渐由二阶相变转变为混合相变,最后变为一阶相变。当 q 较小时, c 对网络几乎没有影响;当 q 较大时, c 越大,网络越脆弱。Huang 等^[108]研究了 c 和平均度 $\langle k \rangle$ 对相互依存网络的影响,指出 c 越小, $\langle k \rangle$ 越大,网

网络的抗毁性越强。Li 等^[109]研究了在蓄意攻击下 c 对无标度相互依存网络的影响,发现 c 越大,网络越脆弱。

2.3 多个网络系统 NON

目前,关于相互依存网络的研究多以两个网络为主,而现实世界中相互作用的系统往往有多个。因此,研究者将相关理论推广到多个网络系统中,即 NON。目前研究较多的网络模型有链型网络(Chain-like),星型网络(Star-like),树型网络(Tree-like),环形网络(Loop-like)等,如图 6 所示。Gao 等^[110-112]将一对一完全依存和部分依存网络的理论分析推广到多个网络系统中,解析了不同 NON 拓扑结构、反馈条件以及单元网络拓扑结构下网络的抗毁性。

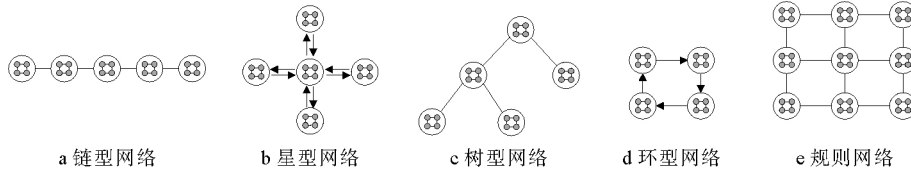


图 6 几种典型的 NONs

Fig. 6 Some typical NONs

1) 对于 n 个 ER 随机网络组成的树型网络或非环型网络^[110-114](无反馈),最后剩余的最大连通子图都满足

$$P_{\infty} = p(1 - \exp(-\bar{k}P_{\infty}))^n \quad (6)$$

由此可以得出,仅当 $n=1$ 时,网络会出现二阶相变;若 $n>1$,则网络出现一阶相变。随着网络个数 n 的增大,临界值 p_c 逐渐增加,即网络的抗毁性越差。此外,当 n 固定时,若平均度 \bar{k} 小于某个临界值 \bar{k}_{\min} ,则 $p_c \geq 1$,意味着即使一个节点失效也会导致整个网络崩溃。

2) 对于 n 个 ER 随机网络组成的星型部分依存网络^[110-112],若移除中心网络的部分节点,则失效会在其他网络与中心网络之间往复传播。此时,星型网络的中心网络和其他网络剩余的最大连通子图分别为 $P_{\infty,1}$ 和 $P_{\infty,2}$,即

$$P_{\infty,i} = -\ln(f_i)/\bar{k}, i=1,2 \quad (7)$$

且

$$\begin{aligned} f_1 &= \exp(p\bar{k}(1-qf_2)^{n-1}(f_1-1)) \\ f_2 &= \exp(\bar{k}(pq(1-f_1)(1-qf_2)^{n-2}-q+1)(f_2-1)) \end{aligned} \quad (8)$$

若耦合强度 $q=1$,则结果与树型网络相同。由此可以看出,其结果还与网络的拓扑结构相关(耦合强度)。

3) 对于 n 个 ER 随机网络组成的环型依存网络^[110-112],若移除每个网络中 $1-p$ 比例的节点,则

$$P_{\infty} = p(1 - e^{-\bar{k}P_{\infty}})(qP_{\infty} - q + 1) \quad (9)$$

若 $q=1$,可得 $P_{\infty}=0$;若 $q=0$,则星型复合网络变为单个网络形式,此时 P_{∞} 最大,也即是随着 q 的增大,临界值 p_c 越小,网络的抗毁性越弱。

4) 对于一对一完全耦合下由 n 个 RR 规则网络组成的非环型 NON^[110,112](无反馈),也得到了某些类似的结果,但 NON 中不存在 \bar{k}_{\min} 。

$$P_{\infty} = p \left(1 - \left(p^{\frac{1}{n}} P_{\infty}^{\frac{n-1}{n}} \left(\left(1 - \left(\frac{P_{\infty}}{p} \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{\frac{\bar{k}-1}{k}} - 1 \right) + 1 \right)^{\frac{\bar{k}}{k}} \right)^n \quad (10)$$

5) 若每个 ER 随机网络都依存于 m 个其他 ER 随机网络^[112](无反馈),则构成规则 NON,此时

$$P_{\infty} = \frac{p}{2^m} (1 - e^{-\bar{k}P_{\infty}}) (1 - q + \sqrt{(1-q)^2 + 4qP_{\infty}})^m \quad (11)$$

当 q 一定,随着 m 的增大,临界值 p_c 越大,网络的抗毁性越弱。若不考虑反馈条件,则^[114]

$$P_{\infty} = p(1 - e^{-\bar{k}P_{\infty}})(qP_{\infty} - q + 1)^m \quad (12)$$

Dong 等^[115]将具有多重支持-依赖关系的相互依存网络理论推广到 n 个网络中,研究了几种典型结构网络的抗毁性,得到了较为类似的结论。对于 ER 星型网络,随着 n 的增大,一阶相变区域逐渐增加,二阶相变区域逐渐减小;对于无标度星型网络,随着 n 的增大,一阶相变区域保持不变,二阶相变区域逐渐减小,即混合相变区域逐渐增大;对于 ER 环型网络,抗毁性则与 n 无关。此外,Dong 等^[116]还研究了蓄意攻击下,ER 和无标度完全依存树型网络以及 ER 部分依存环型网络的抗毁性,分析了不同攻击概率下网络特性的变化。

2.4 考虑网络的负荷和容量

与拓扑级联失效模型类似,负荷-容量模型也被认为是研究相互依存网络抗毁性的重要模型之一,但相关成果仍较少。Zio 等^[117]以 IEEE-96 节点系统构建相互依存网络,假设所有节点都具有相同的初始负荷,且节点失效后,其相邻节点和依存节点的负荷会以一定比例增长,记为 P 和 I 。通过施加一定的扰动,研究了不同依存边数目、 P 、 I 以及初始负荷对相互依存网络的影响,并指出增加依存边数目和 I 可以提高其抗毁性。Brummitt 等^[118]采用一种多型分支过程研究了依存关系、容量以及不均匀负荷对相互依存网络抗毁性的影响,指出容量大的网络更容易出现全局崩溃。Su 等^[119]以介数定义节点的初始负荷,以线性关系定义节点的容量,研究了无标度和随机网络在随机攻击下的抗毁性,指出依存节点比例的增加会降低网络的效率。Su 等^[119]以北京的公交和地铁网络为例,分析了不同攻击策略下网络效率的变化,并解释了在高峰时增加公交数目能够缓解交通压力的原因,指出负荷较大的公交节点和地铁线路对北京的交通系统具有重要的影响。Wang 等^[120]以同样的方式定义了节点负荷和容量,分析了中国某电力-供水相互依存网络在随机和蓄意攻击下的抗毁性。Chen 等^[121]也以同样的方式定义了节点负荷和容量,研究了同配耦合、异配耦合和随机耦合在不同 q 下的特性,指出 q 较小时,异配耦合更为鲁棒;而 q 较大时,同配耦合较为鲁棒。Hong 等^[122]则基于交通流级联失效模型发现同配耦合方式较好。Tan 等^[123]也基于交通流级联失效模型研究了不同耦合方式对随机和无标度相互依存网络的影响,发现同配耦合时,随机网络在随机和蓄意攻击下都具有较好的抗毁性,异配耦合效果较差;而无标度网络则在不同攻击方式和耦合方式下表现出不同的抗毁性。陈等^[124]以无标度、小世界和随机网络为基础,构建了 6 种对称和不对称相互依存网络,并基于负荷容量模型,研究了耦合边权值、连接边权值以及临界成本对网络抗毁性的影响。Ji 等^[125]提出通过增加网络连接边来提高相互依存网络的抗毁性,考虑了常见的介数、度数、代数连通性以及随机添加方式,研究了单个网络添加和双网络添加对抗毁性的不同影响,发现双网络添加的效果要明显优于单网络添加。此外, Ji 等还定义了网络间度-度差异性,并提出了两种新的添加方式,即随机度-度相关性添加和低度-度相关性添加。

3 相互依存网络的应用 以电力系统为例

相互依存网络作为一类特殊的复杂网络,表现出许多单个网络不具有的动力学特性。在众多特性之中,级联失效被认为是研究和理解现实系统的重要方法之一。自 2010 年 Buldyrev 等系统地提出相互依存网络抗毁性研究的模型与失效过程以来,复杂网络的研究又被推向一个新的阶段。作为一种新的手段和方法,经过近几年的发展,相互依存网络抗毁性研究的相关成果已被应用到各个领域,如共生生态系统^[126]、电力-信息系统^[104,127]、电力-供水系统^[128-129]、电力-燃气系统^[130-131]、电力-铁路系统^[132]、硬件-软件系统^[133]、项目组织-任务系统^[134]、供应链网络、银行网络^[135]、铁路-电力-信息系统^[136]等。在众多应用中,电力系统由于其特殊的电力背景而备受关注,其中最典型的例子是电力和信息系统构成的耦合网络,即一类信息物理耦合电力系统(Cyber-physical power grid, CPPG)。随着电力网和电力信息系统之间的交互愈加紧密,相互关联的电力信息系统和电力网将成为未来新一代电网的重要组成部分。孤立地研究电力信息系统或电力网,将不能完整地认识电力系统是由信息网和电力网组成的信息-物理融合系统,而相互依存网络的出现为电力系统的研究提供了新的思路。

2015 年 12 月底,乌克兰国内多个地区的电网遭受黑客攻击,导致国内大规模停电,这也是世界上首次由信息攻击引发的大规模停电事件^[137]。黑客将外部电脑病毒植入到乌克兰电网公司的 EMS(Energy Management System)后,使底层发电机或变电站的控制服务器关机,丧失对相应物理设备的感知与控制功能,导致部分设备运行中断。此外,病毒通过信息网络进行大范围传播,导致电网公司与底层多个发电站及变电站失去联系,进一步丧失了对电网设备的感知与实时控制,导致其无法做出正确的决策与调度,从而引发大范围的停电事故(如图 7 所示)。由此可见,研究电力网和信息网之间的交互过程,寻找提升电力信息耦合网络抗毁性的方法具有重要的现实意义。

将电力网中的发电厂、变电站和负荷看做节点,电力线看做边,就可将电力网抽象为一个复杂网络;同样地,把信息网抽象为复杂网络可将 SCADA 系统、PMU 和调度中心等看做节点,通信线看做边。一般地,我们假设电力网的正常运行需要信息网的调度与控制,即电力节点和信息节点之间存在一定的依存边(如图 8 所示)。依据相互依存网络的级联失效过程,简化模型往往假设信息节点故障会造成相耦合的电力节点的故障,反之电力节点故障也会造成信息节点故障。也即是认为在电力-信息网络中,电力节点的安全运行依靠信息节点的调度,而信息节点的正常运行也需依靠电力节点供电。但相关研究表明,变电站等重要节点广泛使用 UPS 电源,电力节点故障短时间内也不会影响信息网的正常运行。因此,电力节点失效并不一定会造成信息节点失效。同理,信息节

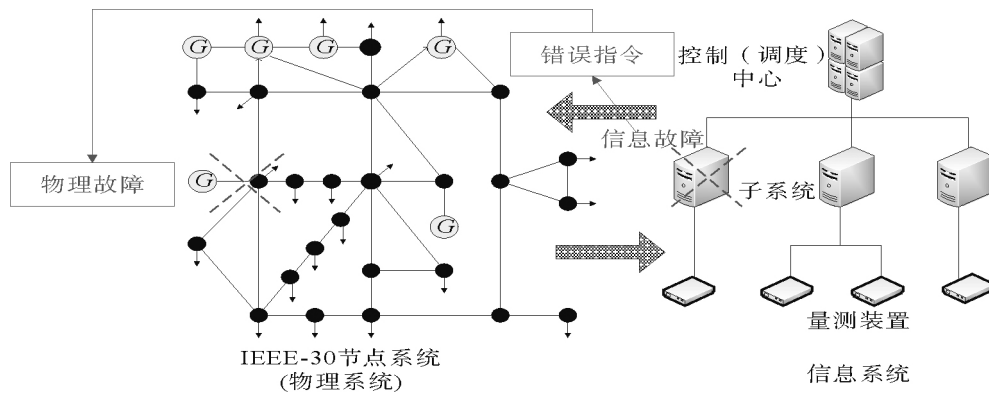
图 7 乌克兰大停电电力网和信息网的交互过程示意图^[137]

Fig. 7 Diagram of interactions between power and information network in the blackout of Ukraine

点失效,调度中心无法掌握相应的电力节点信息,无法对电力网进行正确控制,但不一定会有线路断开。

复杂网络的兴起为电力系统的研究提供了新的思路,但目前对于 CPPG 级联失效的研究仍较少。多数研究都是基于拓扑结构或负荷-容量级联失效模型的,并未考虑实际电力网络的潮流分配和通信网的调度功能。与电力系统相同,现实世界的系统之间多存在复杂的耦合关系。研究相互依存网络的抗毁性能更好地帮助人们理解现实系统的级联失效/连锁故障过程,以提高相应关联基础设施系统的可靠性。

图 8 意大利电网和通信网构成的相互依存网络^[104]

Fig. 8 Interdependent networks of power grid and communication network in Italy

4 结束语

正如 Barabási 所说,复杂网络是一种工具,它可被用来解决各个领域的问题。若脱离实际背景和物理意义,复杂网络也就变得没有意义了。单个复杂网络向相互依存网络/多层网络的发展本就是为了模拟现实世界中各系统之间日益增强的依赖和耦合关系。相关文献表明,研究者在很早之前就提出相互依存或依赖等概念,用以描述基础设施或现实系统之间的关联。研究复杂网络或相互依存网络抗毁性的主要目的也是为了理解真实网络中个体之间的交互过程,寻找抑制或减少网络连锁故障的方法,提高网络的服务性能。在近几年的研究中,无论是多耦合边、相似耦合或空间耦合,都是为了更好地模拟真实网络,具有明显的物理意义,但部分研究仍与真实情况相距较远,无法解决所描述的问题,如前述的电力系统建模。因此在未来的研究中,研究者应多结合自身领域经验,以实际系统出发,建立面向真实网络的模型。

一方面,多数文献虽在引言中充分说明了模型或研究的物理意义,但并未在数值仿真过程中采用真实网络数据,而往往采用随机生成的网络模型,与实际系统有一定的差距。另一方面,研究采用的解析方法(如渗流理论)仅适用于某些简化的失效模型(如拓扑结构级联失效模型),并不适用于复杂的、多约束的真实系统。对于这些问题,仅能采用数值仿真的方法进行研究,即无法对结论给予严格的证明和解释。因此,应着力于真实网络的分析和研究,寻找适用于真实网络的解析方法,以解决实际问题。

从图 1 所示的基础设施关联性可以看出,多个相互依存网络的研究具有重要的现实意义。虽然 NON 系统已受到学者的广泛关注,但目前关于相互依存网络抗毁性的研究仍多以两个网络为主,且部分结论无法直接推广到 NON 系统中。此外,关于 NON 的研究也多局限于某些具有简单且特殊拓扑结构的系统(如星型、树型、环型等),而现实系统的拓扑复杂性要远高于此。研究者应深入分析多系统之间的关联性,研究复杂且具有一般拓扑结构的 NON 系统的抗毁性。

关于相互依存网络的抗毁性研究,本文所列文献仅是以偏概全,仅列出了几个涉及比较广泛的领域,还有一些未成体系的研究并未列出。作者希望通过对相关文献的整理与总结,为研究者提供一定的参考和思路。

参考文献:

- [1] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [2] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [3] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382.
- [4] William R Graham. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack: Critical National Infrastructures[B]. McLean: Congressional EMP Commission, 2008: 9-12.
- [5] Rinaldi S M, Peerenboom J P, Kelly T K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. IEEE Transactions on Control Systems, 2001, 21(6): 11-25.
- [6] Ouyang M, Duenas-Osorio L. Efficient approach to compute generalized interdependent effects between infrastructure systems[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 25(5): 394-406.
- [7] Wang S, Hong L, Ouyang M, et al. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies[J]. Safety Science, 2013, 51(1): 328-337.
- [8] 李国颖, 成柏松, 张鹏, 等. 相互依存网络鲁棒性研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(1): 23-28.
Li Guoying, Cheng Bosong, Zhang Peng, et al. Review of the Interdependent Networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(1): 23-28.
- [9] Frank H, Frisch I T. Analysis and design of survivable network[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1970, 18(5): 567-662.
- [10] Barefoot C A, Entrinfer R C, Swart H C. Vulnerability in graphs-A comparative survey[J]. Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing, 1987, 58: 101-114.
- [11] Bassalygo L A, Pinsker M S. The complexity of an optimal non-blocking commutation scheme without reorganization[J]. Problemy Peredaci Informacii, 1973, 9(1): 84-87.
- [12] Chvátal V. Tough graphs and hamiltonian circuits[J]. Discrete Mathematics, 1973, 5(3): 215-228.
- [13] Jung H A. On a class of posets and the corresponding comparability graphs[J]. Journal of Combinatorial Theory, Series B, 1978, 24(2): 125-133.
- [14] 许进, 席酉民, 汪应洛. 系统的核与核度[J]. 系统科学与数学, 1993, 13(2): 102-110.
Xu Jin, Xi Youmin, Wang Yingluo. On system core and coritivity(I)[J]. Journal of System Science & mathematical science, 1993, 13(2): 102-110.
- [15] Wu J, Barahona M, Tan Y J, et al. Natural connectivity of complex networks[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(7): 078902.
- [16] Wu J, Barahona M, Tan Y J, et al. Spectral measure of structural robustness in complex networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2011, 41(6): 1244-1252.
- [17] Shang Y L. Perturbation results for the Estrada index in weighted networks[J]. Journal of Physics A, 2011, 44(7): 075003.
- [18] Shang Y L. Local natural connectivity in complex networks[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(6): 068903.
- [19] 狄鹏, 胡涛, 胡斌, 等. 基于复杂网络的作战网络模型抗毁性研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 56-60.
Di peng, Hu Tao, Hu Bin, et al. Research on invulnerability of combat net model based on complex networks[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(1): 56-60.
- [20] Dong Z C, Fang Y J, Tian M, et al. Approaches to improving the robustness of interdependent networks against cascading failures with load-based model[J]. Modern Physics Letters B, 2015, 29(32): 1550210.
- [21] 吴艾, 刘心松, 刘丹. 基于流量攻击和边失效的复杂网络脆弱特性[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12): 2997-3000.
Wu Ai, Liu Xinsong, Liu Dan. Frangibility of complex networks based on flow attack and edge failure[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(12): 2997-3000.
- [22] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of the $1/f$ noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(4): 381-384.
- [23] 曹一家, 江全元, 丁理杰. 电力系统大停电的自组织临界现象[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 1-5.
Cao Yijia, Jiang Quanyuan, Ding Lijie. Self-organized criticality phenomenon for power system blackouts[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 1-5.
- [24] 丁琳, 张嗣瀛. 复杂网络上相继故障研究综述[J]. 计算机科学, 2012, 39(8): 8-13.
Ding Lin, Zhang Siying. Survey on cascading failures on complex networks[J]. Computer Science, 2012, 39(8): 8-13.
- [25] Wang X F, Xu J. Cascading failures in coupled map lattices[J]. Physical Review E, 2004, 70(5): 056113.
- [26] Watts D J. A simple model of global cascades on random networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(9): 5766-5771.
- [27] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(6): 065102.
- [28] Wang J W, Rong L L. A model for cascading failures in scale-free networks with a breakdown probability[J]. Physica A, 2009, 388(7): 1289-1298.
- [29] Wu Z W, Peng G, Wang W X, et al. Cascading failure spreading on weighted heterogeneous networks[J]. Journal of Statistical Mechanics-Theory and Experiment, 2008, (5): 202-205.
- [30] 李钊, 郭燕慧, 徐国爱, 等. 复杂网络中带有应急恢复机理的级联动力学分析[J]. 物理学报, 2014, 63(15): 417-428.
Li Zhao, Guo Yanhui, Xu Guoai, et al. Analysis of cascading dynamics in complex networks with an emergency recovery mechanism[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(15): 417-428.

- [31] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(4): 045104.
- [32] Wang W X, Chen G R. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failures[J]. *Physical Review E*, 2008, 77(2): 026101.
- [33] Bao Z J, Cao Y J, Ding L J, et al. Dynamics of load entropy during cascading failure propagation in scale-free networks[J]. *Physics Letters A*, 2008, 372(36): 5778-5782.
- [34] Lehmann J, Bernasconi J. Stochastic load-redistribution model for cascading failure propagation[J]. *Physical Review E*, 2010, 81(3): 031129.
- [35] Bakke J, Hansen A, Kertesz J. Failures and avalanches in complex networks[J]. *Europhysics Letters*, 2006, 76(4): 717-723.
- [36] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Modeling cascading failures in congested complex networks[J]. *Physica A*, 2007, 385(2): 700-706.
- [37] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Clustering and congestion effects on cascading failures of scale-free networks[J]. *Europhysics Letters*, 2007, 79(5): 58002.
- [38] Wang W X, Lai Y C. Abnormal cascading on complex networks[J]. *Physical Review E*, 2009, 80(3): 036109.
- [39] Sun H J, Zhao J, Wu J J. A robust matching model of capacity to defense cascading failure on complex networks[J]. *Physica A*, 2008, 387(25): 6431-6435.
- [40] Li P, Wang B H, Sun H, et al. A limited resource model of fault-tolerant capability against cascading failure of complex network[J]. *European Physical Journal B*, 2008, 62(1): 101-104.
- [41] Wang B, Kim B J. A high-robustness and low-cost model for cascading failures[J]. *Europhysics Letters*, 2007, 78(4): 48001.
- [42] Kim D H, Motter A E. Resource Allocation pattern in infrastructure networks[J]. *Journal of Physics A*, 2008, 41(22): 224019.
- [43] 窦炳琳, 张世永. 复杂网络上级联失效的负载容量模型[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(7): 1459-1463.
Dou Binglin, Zhang Shiyong. Load-capacity model for cascading failures of complex networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(7): 1459-1463.
- [44] 王建伟, 荣莉莉. 基于袭击的复杂网络上的全局相继故障[J]. *管理科学*, 2009, 22(3): 113-120.
Wang Jianwei, Rong Lili. Universal cascading failures on complex networks based on attacks[J]. *Journal of Management Science*, 2009, 22(3): 113-120.
- [45] 韩传峰, 张超, 刘亮. 关键基础设施网络连锁反应模型[J]. *系统仿真技术*, 2010, 6(2): 121-125.
Han Chuanfeng, Zhang Chao, Liu Liang. Critical Infrastructure network model of chain reaction[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 6(2): 121-125.
- [46] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(3): 035101.
- [47] 覃俊, 吴泓润, 易云飞, 等. 代价下复杂网络攻击策略有效性研究[J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(1): 67-72.
Tan Jun, Wu Hongrun, Yi Yunfei, et al. Effectiveness of attack strategies of complex networks with cost[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(1): 67-72.
- [48] 王建伟, 荣莉莉. 面向相继故障的复杂网络上边袭击策略研究[J]. *系统工程学报*, 2011, 26(1): 1-8.
Wang Jianwei, Rong Lili. Study of cascading failure-oriented attack on the edges of complex networks[J]. *Journal of System Engineering*, 2011, 26(1): 1-8.
- [49] Zheng B J, Huang D. Some scale-free networks could be robust under selective node attacks[J]. *Europhysics Letters*, 2011, 94(2): 28010.
- [50] 吴泓润, 覃俊, 郑波. 基于代价的复杂网络抗攻击性研究[J]. *计算机科学*, 2012, 39(8): 224-227.
Wu Hongrun, Tan Jun, Zheng Bojin. Anti-attack ability based on costs in complex networks[J]. *Computer Science*, 2012, 39(8): 224-227.
- [51] Agoston V, Csermely P, Pongor S. Multiple weak hits confuse complex systems: a transcriptional regulatory network as an example[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(5): 051909.
- [52] Yin Y P, Zhang D M, Tan J, et al. Continuous weight attack on attack on complex network[J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2008, 49(3): 797-800.
- [53] Xiao S, Xiao G. On intentional attacks and protections in complex communication networks[C]//Global Telecommunications Conference, San Francisco (IEEE), 2006: 1-5.
- [54] Xia Y, Fan J. Efficient attack strategy to communication networks with partial degree information[C]//International Symposium of Circuits and Systems, New York (IEEE), 2011: 1588-1591.
- [55] 陈盼, 吴晓锋, 李怡, 等. 局部信息条件下复杂网络的攻击策略[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(12): 4622-4623+4629.
Chen Pan, Wu Xiaofeng, Li Yi, et al. Attack Strategy for uncertain topology of complex networks[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(12): 4622-4623+4629.
- [56] Wu J, Deng H Z, Tan Y J, et al. Vulnerability of complex networks under intentional attack with incomplete information[J]. *Journal of Physics A*, 2007, 40(11): 2665-2671.
- [57] Shao S, Huang X Q, Stanley H E, et al. Percolation of localized attack on complex networks[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17: 023049.
- [58] Dong G G, Du R J, Hao H F, et al. Modified localized attack on complex network[J]. *Europhysics Letters*, 2016, 113(2): 28002.
- [59] 方锦清. 大数据浪潮冲击下网络科学与工程面临的挑战与机遇[J]. *自然杂志*, 2013, 35(5): 345-354.
Fang Jinqing. Network science and engineering faced with a new challenge and developing opportunity under the wave impact of big data[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(5): 345-354.
- [60] Kivela M, Arenas A, Barthelemy M, et al. Multilayer networks[J]. *Journal of Complex Networks*, 2014, 2(3): 203-271.

- [61] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failure in interdependent networks[J]. *Nature*, 2010, 464(15): 1025-1028.
- [62] Radicchi F, Arenas A. Abrupt transition in the structural formation of interconnected networks[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(11): 717-720.
- [63] Hu Y Q, Ksherim B, Cohen R, et al. Percolation in interdependent and interconnected networks: Abrupt change from second- to first-order transitions[J]. *Physical Review E*, 2011, 84(6): 066116.
- [64] Vespignani A. Complex networks: the fragility of interdependency[J]. *Nature*, 2010, 464(7291): 984-985.
- [65] Rosato V, Issacharoff L, Tiraticco F, et al. Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models[J]. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2008, 4(1/2): 63-79.
- [66] Newman M E J, Strogatz S H, Watts D J. Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications[J]. *Physical Review E*, 2001, 64(2): 026118.
- [67] 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]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(4): 048701.
- [68] Son S, Grassberger P, Paczuski M. Percolation transitions are not always sharpened by making networks interdependent[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(19): 195702.
- [69] Gao J X, Buldyrev S V, Stanley H E, et al. Networks formed from interdependent networks[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(1): 40-48.
- [70] 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]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(4): 048701.
- [71] Buldyrev S V, Shere N W, Cwlich G A. Interdependent networks with identical degrees of mutually dependent nodes[J]. *Physical Review E*, 2011, 83(1): 016112.
- [72] Parshani R, Rozenblat C, Ietri D, et al. Inter-similarity between coupled networks[J]. *Europhysics Letters*, 2010, 92(6): 688002.
- [73] Schneider C M, Yazdani N, Araújo N A M, et al. Towards designing robust coupled networks[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1969.
- [74] Huang X Q, Gao J X, Buldyrev S V, et al. Robustness of interdependent networks under targeted attack[J]. *Physical Review E*, 2011, 83(6): 065101.
- [75] 李稳国, 崔宪普, 邓曙光, 等. 目的边攻击和防御下的相互依存网络相继故障[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(9): 69-72.
Li Wenguo, Cui Xianpu, Deng Shuguang, et al. Cascade of failures in interdependent networks under targeted attack and defense of interdependent links[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(9): 69-72.
- [76] 李稳国, 邓曙光, 崔治, 等. 相互依存网络边攻击下的相继故障研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2013, 34(3): 576-579.
Li Wenguo, Deng Shuguang, Cui Zhi, et al. Cascade of failures in interdependent networks under attack of interdependent links[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2013, 34(3): 576-579.
- [77] 蒋宇翔, 吕晨, 虞红芳. 信息缺失条件下的相互依存网络抗毁性分析[J]. *计算机应用*, 2015, 35(5): 1224-1229, 1254.
Jiang Xiangyu, Lv Chen, Yu Hongfang. Survivability analysis of interdependent network with incomplete information[J]. *Journal of Computer Application*, 2015, 35(5): 1224-1229, 1254.
- [78] Hu Y Q, Zhou D, Zhang R, et al. Percolation of interdependent networks with intersimilarity[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(5): 052805.
- [79] 李稳国, 邓曙光, 杨冰, 等. 相互依存网络间的拓扑构建方法[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(11): 85-89.
Li Wenguo, Deng Shuguang, Yang Bing, et al. Topological coupling method between interdependent networks[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(11): 85-89.
- [80] Zhou D, Stanley H E, D'Agostino G, et al. Assortativity decreases the robustness of interdependent networks[J]. *Physical Review E*, 2012, 86(6): 066103.
- [81] Watanabe S, Kabashima Y. Cavity-based robustness analysis of interdependent networks: Influences of intranetwork and internetwork degree-degree correlations[J]. *Physical Review E*, 2014, 89(1): 012808.
- [82] Igarashi A, Kuse T. Percolation of interdependent networks with degree-correlated inter-connections[C]//International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences. Madrid (IOP Publishing LTD), 2014: 012003.
- [83] Valdez L D, Macri P A, Stanley H E, et al. Triple point in correlated interdependent networks[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(5): 050803.
- [84] 王建伟, 蒋晨, 孙恩慧. 耦合网络边相继故障模型研究[J]. *管理科学*, 2014, 27(6): 132-142.
Wang Jianwei, Jiang Chen, Sun Enhui. Study on cascading failures' model of edge in coupled networks[J]. *Journal of Management Science*, 2014, 27(6): 132-142.
- [85] Cheng Z S, Cao J D. Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks[J]. *Physica A*, 2015, 430: 193-200.
- [86] 陈世明, 吕辉, 徐青刚, 等. 基于度的正/负相关相依网络模型及其鲁棒性研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(4): 48902.
Chen Shiming, Lv Hui, Xu Qinggang, et al. The model of interdependent network based on positive/negative correlation of the degree and its robustness study[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(4): 048902.
- [87] Zhou D, Gao J X, Stanley H E, et al. Percolation of partially interdependent scale-free networks[J]. *Physical Review E*, 2013, 87(5): 052812.
- [88] Fu G H, Dawson R, Khoury M, et al. Interdependent networks: Vulnerability analysis and strategies to limit cascading failure[J]. *European Physical Journal B*, 2014, 87(7): 148.
- [89] Yaan O, Qian D J, Zhang J S, et al. Optimal allocation of interconnecting links in cyber-physical systems: interdependence, cascading failures, and robustness[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(9): 1708-1720.
- [90] Shao J, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations[J]. *Physical*

- Review E, 2011, 83(3): 036116.
- [91] Dong G G, Gao J X, Tian L X, et al. Percolation of partially interdependent networks under targeted attack[J]. Physical Review E, 2012, 85(1): 016112.
- [92] Dong G G, Tian L X, Du R J, et al. Analysis of percolation behaviors of clustered networks with partial support-dependence relations[J]. Physica A, 2014, 394: 370-378.
- [93] Jiang J, Li W, Cai X. The effect of interdependence on the percolation of interdependent networks[J]. Physica A, 2014, 410: 573-581.
- [94] 彭兴钊,姚宏,杜军,等. 负荷作用下相互依存网络中的级联故障[J]. 物理学报, 2015, 64(4): 048901.
Peng Xingzhao, Yao Hong, Du Jun, et al. Load-induced cascading failure in interdependent network[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(4): 048901.
- [95] Li W, Bashan A, Buldyrev S V, et al. Cascading failures in interdependent lattice networks: the critical role of the length of dependency links [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(22): 228702.
- [96] Danziger M M, Bashan A, Berezin Y, et al. Interdependent spatially embedded networks: Dynamics at percolation threshold[C]//International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems. Kyoto (IEEE), 2013: 614-620.
- [97] Bashan A, Berezin Y, Buldyrev S V, et al. The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks[J]. Nature Physics, 2013, 9(10): 667-672.
- [98] Shekhtman L M, Berezin Y, Danziger M M, et al. Robustness of a network formed of spatially embedded networks[J]. Physical Review E, 2014, 90(1): 012809.
- [99] Kornbluth Y, Lowinger S, Cwlich G, et al. Cascading failures in networks with proximate dependent nodes[J]. Physical Review E, 2014, 89(3): 032808.
- [100] Zhang L M, Li D Q, Qin P J, et al. Reliability analysis of interdependent lattices[J]. Physica A, 2016, 452: 120-125.
- [101] Berezin Y, Bashan A, Danziger M M, et al. Spatially localized attacks on interdependent networks: the existence of a finite critical attack size [J]. 2013, arXiv:1310.0996.
- [102] Gao J X, Li D Q, Havlin S. From a single network to a network of networks[J]. National Science Review, 2014, 1(3): 346-356.
- [103] Hu Y Q, Ksherim B, Cohen R, et al. Percolation in interdependent and interconnected networks: abrupt change from second- to first-order transitions[J]. Physical Review E, 2011, 84(6): 066116.
- [104] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failure in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(15): 1025-1028.
- [105] Leicht E A, DSouza R M. Percolation on interacting networks[J]. 2009, arXiv:0907.0894.
- [106] Tian L X, Huang Y, Dong G G, et al. Robustness of interdependent and interconnected clustered networks[J]. Physica A, 2014, 412: 120-126.
- [107] Shao S, Huang X Q, Stanley H E, et al. Robustness of a partially interdependent network formed of clustered networks[J]. Physical Review E, 2014, 89(3): 032812.
- [108] Huang X Q, Shao S, Wang H J, et al. The robustness of interdependent clustered networks[J]. Europhysics Letters, 2013, 101(1): 18002.
- [109] Li R Q, Sun S W, Ma Y L, et al. Effect of clustering on attack vulnerability of interdependent scale-free networks[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2015, 80(SI): 109-116.
- [110] Gao J X, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Robustness of a network formed by n interdependent networks with a one-to-one correspondence of dependent nodes[J]. Physical Review E, 2012, 85(6): 066134.
- [111] Gao J, Buldyrev S V, Havlin S, et al. Robustness of a network of networks[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(19): 195701.
- [112] Gao J X, Buldyrev S V, Stanley H E, et al. Networks formed from interdependent networks[J]. Nature Physics, 2012, 8(1): 40-48.
- [113] Gao J X, Buldyrev S V, Stanley H E, et al. Percolation of a general network of networks[J]. Physical Review E, 2013, 88(6): 062816.
- [114] Gao J X, Liu X M, Li D Q, et al. Recent progress on the resilience of complex networks[J]. Energies, 2015, 8(10): 12187-12210.
- [115] Dong G G, Tian L X, Zhou D, et al. Robustness of n interdependent networks with partial support-dependence relation[J]. Europhysics Letters, 2013, 102(6): 68004.
- [116] Dong G G, Gao J X, Du R J, et al. Robustness of network of networks under targeted attack[J]. Physical Review E, 2013, 87(5): 052804.
- [117] Zio E, Sansavini G. Modeling interdependent network systems for identifying cascade-safe operating margins[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(1): 94-101.
- [118] Brummitt C D, DSouza R M, Leicht E A. Suppressing cascades of load in interdependent networks[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2012, 109(12): 680-689.
- [119] Su Z, Li L, Peng H, et al. Robustness of interrelated traffic networks to cascading failures[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5413.
- [120] Wang S L, Hong L, Chen X G. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: a methodological framework[J]. Physica A, 2012, 391(11): 3323-3335.
- [121] Chen Z, Du W B, Cao X B, et al. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2015, 80(SI): 7-12.
- [122] Hong S, Wang B Q, Ma X M, et al. Failure cascade in interdependent network with traffic loads[J]. Journal of Physics A, 2015, 48(48): 485101.
- [123] Tan F, Xia Y X, Wei Z. Robust-yet-fragile nature of interdependent networks[J]. Physical Review E, 2015, 91(5): 052809.

- [124] 陈世明, 邹小群, 吕辉, 等. 面向级联失效的相依网络鲁棒性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(2): 028902.
Chen Shiming, Zou Xiaoqun, Lv Hui, et al. Research on robustness of interdependent network for suppressing cascading failure[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(2): 028902.
- [125] Ji X P, Wang B, Liu D C, et al. Improving interdependent networks robustness by adding connectivity links[J]. Physica A, 2016, 444: 9-19.
- [126] Albrecht J, Berens D G, Jaroszewicz B, et al. Correlated loss of ecosystem services in coupled mutualistic networks[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3810.
- [127] Chopade P, Bikdash M. Structural and functional vulnerability analysis for survivability of smart grid and SCADA network under severe emergencies and WMD attacks[C]//International Conference on Technologies for Homeland Security, Waltham, MA(IEEE), 2013: 99-105.
- [128] 雷璐宁, 石为人, 熊庆宇, 等. 基础设施网络关联模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2660-2665.
Lei Luning, Shi Weiren, Xiong Qingyu, et al. Research on correlative model of infrastructure network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(12): 2660-2665.
- [129] 毛子骏, 费奇, 廖元文, 等. 城市基础设施网络关联响应研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 64-67.
Mao Zijun, Fei Qi, Liao Yuanwen, et al. Interdependent response of urban infrastructure's networks[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(2): 64-67.
- [130] Wang S L, Hong L, Chen X G. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: a methodological framework[J]. Physica A, 2012, 391(11): 3323-3335.
- [131] Ouyang M, Duenas-Osorio L. An approach to design interface topologies across interdependent urban infrastructure systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(11): 1462-1473.
- [132] Johansson J, Hassel H. An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(12): 1335-1344.
- [133] 孟令中, 陆民燕, 黄百乔, 等. 网络控制系统的连锁失效影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(3): 353-356+432.
Meng Lingzhong, Lu Minyan, Huang Baiqiao, et al. Chain failure impact analysis for network control system[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(3): 353-356+432.
- [134] 杨婧, 陈英武, 沈永平. 基于相互作用网络的大型工程项目组织结构风险分析[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 1966-1973.
Yang Jing, Chen Yingwu, Shen Yongping. Interdependent network based risk analysis of organizational structures for large-scale engineering project[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(10): 1966-1973.
- [135] Roukny T, Bersini H, Pirotte H, et al. Default cascades in complex networks: topology and systemic risk[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2759.
- [136] Zhang J H, Song B, Zhang Z J, et al. An approach for modeling vulnerability of the network of networks[J]. Physica A, 2014, 412: 127-136.
- [137] 郭庆来, 辛蜀骏, 王剑辉, 等. 由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-4.
Guo Qinglai, Xin Shujun, Wang Jianhui, et al. Comprehensive security assessment for a cyber physical energy system: a lesson from Ukraine's blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-4.

(责任编辑 耿金花)