

中文引用格式:陈长坤,王思琪,孙凤琳,等. 城市关联基础设施多层网络韧性评估模型[J]. 中国安全科学学报,2024,34(5):204-213.

英文引用格式:CHEN Changkun, WANG Siqi, SUN Fenglin, et al. A resilience assessment model for multilayer networks of urban interdependent infrastructure [J]. China Safety Science Journal,2024,34(5):204-213.

城市关联基础设施多层网络韧性评估模型*

陈长坤 教授,王思琪,孙凤琳,余荣付

(中南大学 防灾科学与安全技术研究所,湖南 长沙 410018)

中图分类号:X956

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.05.1355

基金项目:国家自然科学基金重大项目资助(72091512)。

【摘要】 为了探究城市基础设施系统关联关系对城市韧性的影响,采用理论分析和 python 模拟相结合的方法研究城市关联基础设施系统在扰动下的韧性变化过程。首先,基于韧性机制和多层网络理论,构建城市关联基础设施网络;然后,探究在功能关联下,城市关联基础设施网络受到3种外界扰动后的级联失效过程,并基于基础设施系统机能曲线法,构建城市关联基础设施网络韧性评估模型;最后,以湖南省中部偏北某县作为研究对象进行实例研究。结果表明:关联网络中电力节点的聚类系数明显高于整体平均水平;通信网络的抵御能力和恢复能力是5类基础设施网络中最强的,韧性水平也最高;随着网络中节点失效概率增大和网络层数的增加,整体关联基础设施网络及其子网络的可靠性逐渐降低;网络效率在介数恢复策略下恢复至较高水平时间较短,说明对此基础设施网络使用介数恢复策略更为合适。

【关键词】 城市关联基础设施; 网络韧性; 韧性评估; 评估模型; 级联失效

A resilience assessment model for multilayer networks of urban interdependent infrastructure

CHEN Changkun, WANG Siqi, SUN Fenglin, YU Rongfu

(Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha Hunan 410018, China)

Abstract: In order to investigate the influence of interdependent relationships in urban infrastructure systems on urban resilience, a combination of theoretical analysis and Python simulation was used to study the resilience change process of urban interdependent infrastructure systems under perturbation. Firstly, the network of urban interdependent infrastructure was constructed based on the resilience mechanisms and multilayer network theory. Then, the cascading failure process of the urban interdependent infrastructure network after three kinds of external perturbations under the functional linkage was explored, and the resilience assessment model of the urban interdependent infrastructure network was constructed based on the infrastructure function curve method. Finally, a county in the central north of Hunan Province was taken as the research object to conduct an example study. The results show that the clustering coefficient of power nodes in the interdependent infrastructure network is significantly higher than the overall average. The communications network has the strongest resistance and recovery of the 5 types of infrastructure networks and the highest level of resilience. The reliability of the overall interdependent infrastructure network and its sub-networks gradually decreases as the probability of node failure in the network

increases, and the number of network layers increases. The network efficiency recovers to a higher level in a shorter time with the betweenness recovery strategy, indicating that it is more appropriate to use the betweenness recovery strategy for this infrastructure network.

Keywords: urban interdependent infrastructure; network resilience; resilience assessment; assessment model; cascade failure

0 引言

随着科技的发展,城市基础设施之间形成了紧密而复杂的关联关系,局部问题可能传播扩散,产生大范围的影响^[1]。此外,暴雨、地震等极端灾害愈加频发,对城市和基础设施系统的稳定运行造成威胁^[2]。因此,探究城市基础设施系统之间的相互作用和依赖关系对保障城市安全具有重要意义。

近年来,国内外学者在基础设施韧性研究方面取得了较多成果,例如:赵辰^[3]针对不同类别的基础设施系统,分别建立了韧性优化模型,并基于组合背包问题提出了韧性优化模型的解法。MOHEBBI等^[4]提出了一种联合博弈论的方法,有效解决了相互依赖的配水和道路网络的分散资源分配问题,提升了基础设施网络韧性。现实中的关联基础设施往往呈现出节点多样性、连边异质性、结构嵌套和多层次等特点,多用多层网络理论来研究。周方^[5]通过多层耦合网络级联失效仿真,构建了适用于城市多层关键基础设施耦合网络的脆弱性评估模型,并从多角度探讨了城市基础设施耦合网络级联失效对城市韧性的影响;FATHINAVID等^[6]提出了一个应用于社区网络检测的多层元胞自动机模型,并通过多个多层数据集的仿真结果证明了该模型的有效性和优越性。

上述研究一方面只集中于2个不同类别的基础设施系统或同一类别下多个子系统,而研究3个类别及以上基础设施的则很少,且多考虑基础设施网络的脆弱性,未与城市基础设施韧性机能曲线相结合,构建韧性评估模型。鉴于此,笔者拟在城市韧性概念的基础上,探究城市基础设施系统的关联关系,运用多层网络模拟城市关联基础设施系统在风险扰动下的韧性变化过程,并构建城市关联基础设施网络韧性评估模型,以期提升城市基础设施系统韧性水平提供依据。

1 城市关联基础设施级联失效分析

1.1 构建城市关联基础设施拓扑网络

城市关键基础设施是指关乎国家经济及安全等

重大问题的公共工程,如供水设施中的水厂、电力设施中的变电站、燃气设施中的燃气站、交通设施中的交通枢纽、通信设施中的邮政枢纽和服务设施中的医院等公共服务设施^[7]。若干个城市关键基础设施系统之间,由于存在相互依赖关系而形成的网络化复杂系统,即为城市关联基础设施系统^[3]。首先应构建城市关联基础设施子系统拓扑网络,即城市关键基础设施网络,具体抽象方法如下^[8-9]:

1) 将系统中的各枢纽作为网络中的节点,如交通系统中的各级客运站和电力系统中的发电站、变电站,并按照实际地理位置分布。

2) 将各枢纽之间的联系简化为网络中的无向无权边,若枢纽间有多种联系方式,也只视为一条边。

城市基础设施各子系统拓扑结构建立后,分析不同基础设施子系统间存在的关联,结合 RINALDI等^[10]提出的基础设施关联类型,设置了常见基础设施系统之间的功能关联关系,如图1所示。

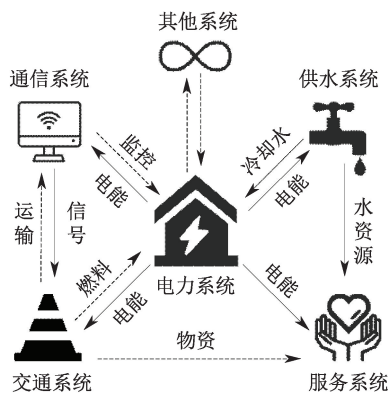


图1 基础设施关联设置情况

Fig. 1 Infrastructure interdependence settings

由于基础设施系统之间的关系复杂多样,在图1的基础上作了一定的简化,只考虑了图中实线部分所代表的功能关联,并将不同关键基础设施网络节点之间的功能关联抽象为有向边,其中由提供功能的节点指向被提供功能的节点。

1.2 复杂网络参数分析

在复杂网络的研究中,网络的特征参数可以从网络结构的角度,反映网络的特点和相关性质。拟选取以下特征参数,分析依据图1所建立的城市关

联基础设施网络的复杂网络参数。

1) 节点度数中心性。网络中节点 v_i 的度数 k_i 表示该节点连接边的数目,即与该节点相邻的节点总数,在有向网络中根据连接边的指向可以分为出度和入度。节点 v_i 的度数中心性 DC_i 表示为该节点的实际连接边数和可能最大连接边数之比。

$$k_i = \sum_{v_j \in V} a_{ij} \quad (1)$$

$$DC_i = \begin{cases} \frac{k_i}{N-1}, & \text{无向网络} \\ \frac{k_i}{2(N-1)}, & \text{有向网络} \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为节点 v_i 和其相邻节点 v_j 间的连接边数; V 为网络中节点的集合; N 为网络中的总节点数。

2) 节点介数中心性。节点介数中心性 BC_i 是指经过节点 v_i 的最短路径数目在所有最短路径数目的占比,反映了节点作为中间连接点的影响大小。

$$BC_i = \sum_{v_j \neq v_i, v_k \in V} \frac{n_{jk}^i}{n_{jk}} \quad (3)$$

式中: n_{jk} 为连接节点 v_j 和节点 v_k 的最短路径数目; n_{jk}^i 为连接节点 v_j 和节点 v_k 的最短路径中经过节点 v_i 的最短路径数目。

3) 节点紧密中心性。节点紧密中心性 CC_i 是指节点 v_i 到其他所有节点最短路径边数平均值的倒数,用于判断节点 v_i 到达网络中其他节点的难易程度。

$$CC_i = \frac{N-1}{\sum_{v_j=1}^N d_{ij}} \quad (4)$$

式中 d_{ij} 为节点 v_i 到节点 v_j 的最短路径。

4) 节点特征向量中心性。节点特征向量中心性 EC_i 可通过与节点 v_i 所连接的节点的重要程度来评价。

$$EC_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{v_j=1}^N (X_{i,j} \cdot EC_j) \quad (5)$$

式中: EC_i 和 EC_j 分别为节点 v_i 和节点 v_j 的特征向量中心性; $X_{i,j}$ 为网络的邻接矩阵 X 中第 i 行第 j 列的元素,表示节点 v_i 和节点 v_j 之间是否有连接,若有则为 1,无则为 0; λ 为邻接矩阵 X 的特征值。

5) 节点聚类系数。节点聚类系数 CC_i 为节点 v_i 相邻节点之间的实际连接边数和节点之间最大可能连接边数的比值。

$$CC_i = \begin{cases} \frac{2CS_i}{n(n-1)}, & \text{无向网络} \\ \frac{CS_i}{n(n-1)}, & \text{有向网络} \end{cases} \quad (6)$$

式中: CS_i 为节点 v_i 的相邻节点之间的实际连接边数; n 为节点 v_i 的相邻节点数目。

1.3 城市关联基础设施网络级联失效分析

1.3.1 网络可靠性

将城市基础设施日常可能受到的冲击扰动,抽象为关联基础设施网络中节点的失效。当节点失效后,经过此节点的连接也会断裂失效。因此,可根据节点失效概率的变化,研究在功能关联下城市关联基础设施网络的可靠性变化情况。

基于复杂网络的级联失效理论,认为只有属于最大连通分量(Giant Connected Component, GCC)的节点才是有效的、可靠的^[11]。因此,采用网络中属于 GCC 节点数目占总节点数的比例表征网络的可靠性 D 。

$$D = \frac{\sum G(p)pN_i}{\sum N_i} \quad (7)$$

式中: N_i 为各层子网络中包含的节点数目,包括正常的节点和失效的节点; p 为网络中正常运行的节点占总节点数的比例,即节点的存在概率; $G(p)$ 为当节点存在概率为 p 时,属于 GCC 的节点占网络中正常节点的比例。

1.3.2 节点失效模拟

模拟网络中的失效过程时,分别以随机攻击、度数攻击和介数攻击 3 种方式攻击网络中的节点,使其失效^[12]。其中,随机攻击是指随机选取网络中的节点,使其失效。而度数攻击和介数攻击是指分别以网络中节点的度数中心性和介数中心性为指标,按从大到小的顺序选择网络中的节点使其失效。其中度数攻击和介数攻击都属于蓄意攻击。失效模拟的具体步骤如下所示:

1) 导入初始的网络参数,包括基础设施网络各节点、各节点的度数中心性和介数中心性、各节点之间的连接关系。先判断网络的层数,当网络只有一层时,导入该网络中的节点及节点间连接关系;当网络不止一层时,导入每个单层网络中的节点及节点间连接关系,以及不同网络层中节点之间的连接关系。再按照节点间的连接关系构建基础设施拓扑网络,最后按照 3 种不同的攻击方式使网络中的节点依次失效。

2) 根据上述 3 种不同的攻击方式,使得网络中的节点存在概率 p 从 1 开始,间隔 Δp , 逐渐下降到 0,令 $\Delta p = 0.02$,即节点失效概率 q 从 0 间隔 0.02 逐渐上升到 1。

3) 将 N_i, p 、以及不同 p 取值下所对应的 $G(p)$ 值代入式(7), 计算每个 p 的取值下, 网络的可靠性 D , 绘制出相应的曲线图。

2 关联基础设施网络韧性评估模型

前文只分析了外界扰动影响下, 城市关联基础设施系统的可靠性变化和失效特征, 缺乏对扰动前期和后期系统可靠性的分析。因此, 基于基础设施机能曲线法, 构建城市关联基础设施网络韧性评估模型。将城市基础设施的韧性变化过程分为抵抗、吸收和恢复^[13] 3 个阶段, 具体分析关联基础设施网络在受到扰动的前、中、后期的情况。3 个阶段中基础设施系统分别会表现出抵御、吸收和恢复 3 种能力, 如图 2 所示。

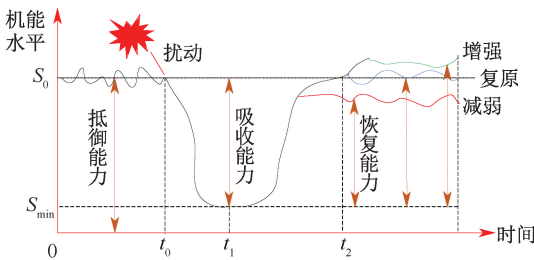


图 2 基础设施韧性机能曲线

Fig. 2 Infrastructure resilience function curve

由图 2 可知: 初始情况下, 基础设施处于正常稳定工作状态, 受到扰动后, 基础设施系统的机能水平开始下降, 并稳定在一定的水平, 经过一定的恢复时间, 基础设施系统机能重新回升到一个新的稳定水平。综合抵御能力、吸收能力和恢复能力, 可以得到最终的系统韧性值^[14]。

2.1 城市关联基础设施网络抵御能力

为合理量化城市基础设施网络的机能水平, 忽略基础设施具体的能量物质交流, 以初始状态下城市基础设施网络的网络效率 E 表示系统的抵御能力。

节点 v_i 到节点 v_j 之间的效率 e_{ij} 与二者之间的最短距离成反比, 即:

$$e_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (8)$$

当节点 v_i 和节点 v_j 之间不存在路径的时候, d_{ij} 为无穷大, 则此时 2 节点之间的效率 e_{ij} 为 0。因此, 整个网络的效率 E 可以定义为^[15]:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{v_i \neq v_j \in V} \frac{1}{d_{ij}} \quad (9)$$

2.2 城市关联基础设施网络吸收能力

利用逐渐增大网络中的节点失效概率, 来模拟外界扰动强度的变化。根据式(9), 可得不同 q 值对应的网络效率 E , 通过基础设施 E 随扰动强度的变化, 来反映基础设施系统的吸收能力 A , 因此, A 表示为:

$$A = \frac{\int_0^q E(q) dq}{E_0} \quad (10)$$

式中: E_0 为系统网络初始效率; $E(q)$ 为网络效率 E 随节点失效概率 q 变化的函数。

2.3 城市关联基础设施网络恢复能力

为研究系统恢复过程的网络效率, 设置步骤如下:

1) 首先, 随机选取网络中的 10 个节点失效(若子网络总节点数不足 10 个, 则令其子网络所有的节点都失效), 代入式(9)计算此时系统被赋予初始扰动后网络效率 E_d 。

2) 之后按照 1 步恢复 1 个节点的方式, 逐步恢复 10 个节点及其相应连接边, 每恢复 1 个节点, 代入式(9)计算出对应的网络效率 E , 得到 $E(p)$, 即网络效率的变化情况。

3) 在恢复过程中将已失效 10 个节点, 分别按照度数和介数由大到小的顺序, 逐个恢复。

因此系统的恢复能力 R_c 表示为:

$$R_c = \frac{\int_0^p (E(p) - E_d) dp}{E_d p} \quad (11)$$

式中: E_d 为网络中的 10 个节点失效后的网络效率; $E(p)$ 为节点存在概率为 p 时的网络效率。

则系统的综合韧性 R 可表示为:

$$R = E + A + R_c \quad (12)$$

3 网络级联失效实例分析

以湖南省某县作为研究背景, 选取该县县域内的电力系统、供水系统、交通系统、通信系统和服务系统, 根据 1.1 节, 简化后得到 5 层结构的城关联基础设施系统网络, 层内连接边代表处于同一个基础设施网络中节点之间的功能关联, 层间连接边代表处于不同基础设施网络中节点之间的功能关联, 箭头由提供功能的节点指向被提供功能的节点, 如图 3 所示。

由图 3 可知: 电力系统网络由 32 个节点, 51 条连接边组成。供水系统网络由 13 个节点, 12 条连接边组成。交通系统网络由 25 个节点,

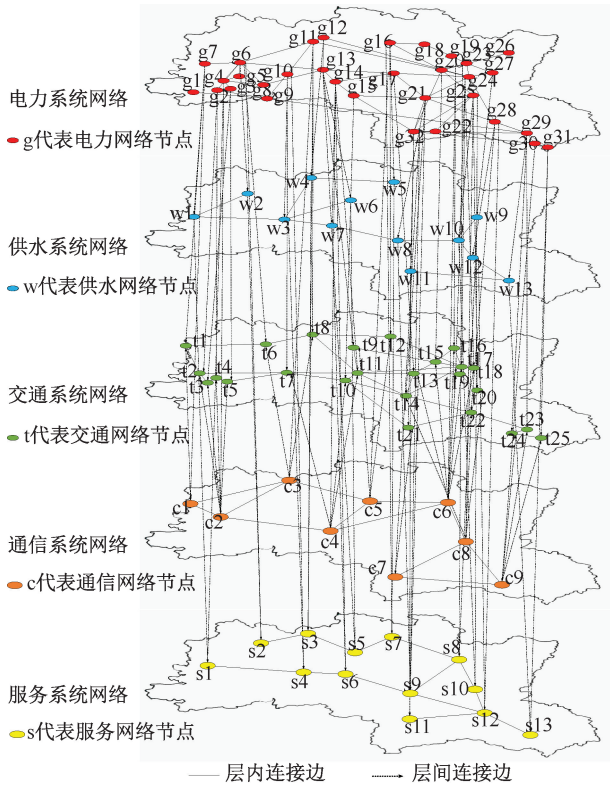


图3 城市关联基础设施网络

Fig. 3 Urban interdependent infrastructure networks

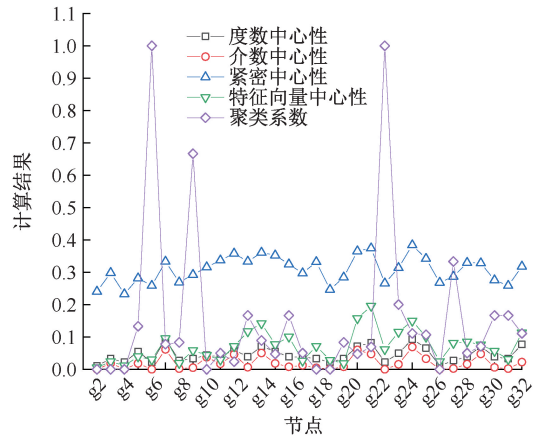
36条连接边组成。通信系统网络由9个节点,12条连接边组成。服务系统网络由13个节点,13条连接边组成。

3.1 城市关联基础设施网络参数分析

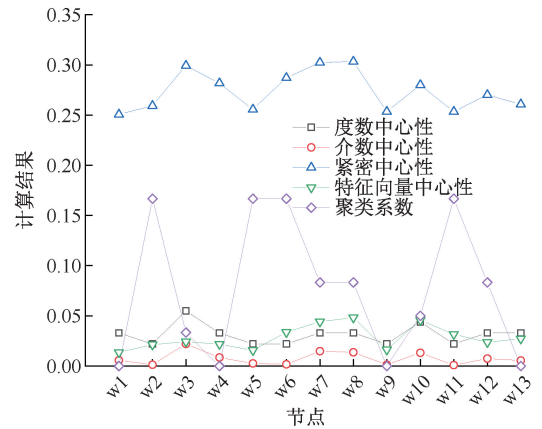
在前文5个独立网络的基础上根据节点之间的关联关系,添加各层子系统之间的节点之间的连接边,能够进一步得到基础设施关联网络。

结合式(1)一式(6)以及网络节点之间的连接情况,获得各子网络节点的度数中心性、介数中心性、紧密中心性、特征向量中心性以及聚类系数的计算结果,如图4所示。

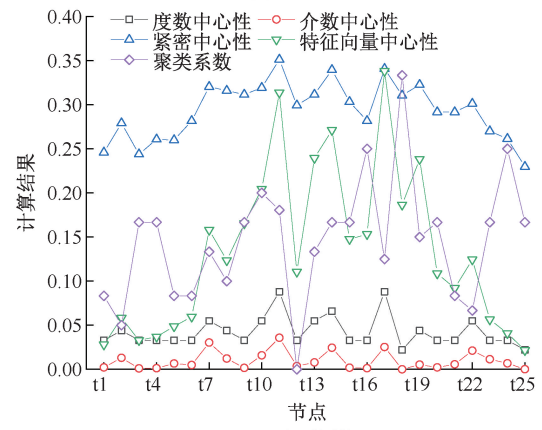
由图4可知:关联之后各层子系统中节点的度数中心性、介数中心性以及紧密中心性相差不大,度数中心性均近似0.05,介数中心性接近0.02,紧密中心性近似0.30。但是电力网络中的节点聚类系数明显高于整体平均水平,这反映了围绕电力网络中的节点形成了关系紧密的小集体,也表明了在此基础设施网络中,电力节点的重要性和中心地位,其余子系统因电力系统而出现关联,进一步说明电力系统对于整体网络的能量传输和信息物质传递起到关键作用,即维持电力系统的正常运营对整体网络的稳定至关重要。



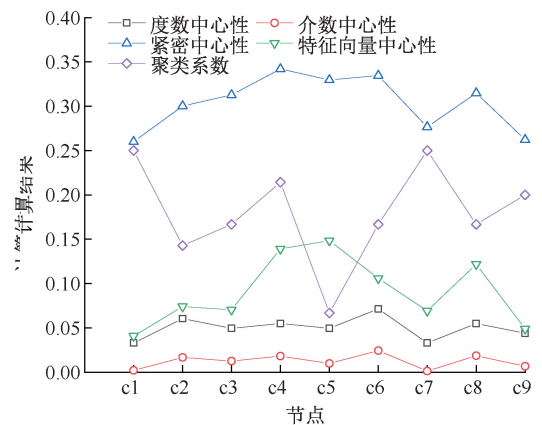
(a) 电力网络



(b) 供水网络



(c) 交通网络



(d) 通信网络

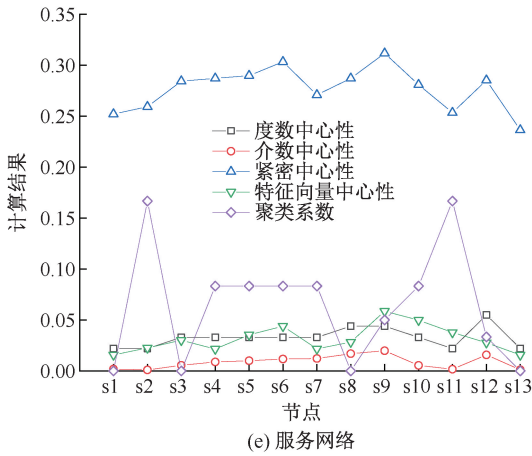


图 4 基础设施子网络基本参数

Fig. 4 Infrastructure sub-network basic parameters

3.2 城市关联基础设施网络级联失效过程

3.2.1 整体关联网络失效分析

参考 1.3 节中的步骤,得到随机攻击、度数攻击和介数攻击 3 种不同攻击方式下,整体网络的可靠性变化情况,如图 5 所示。

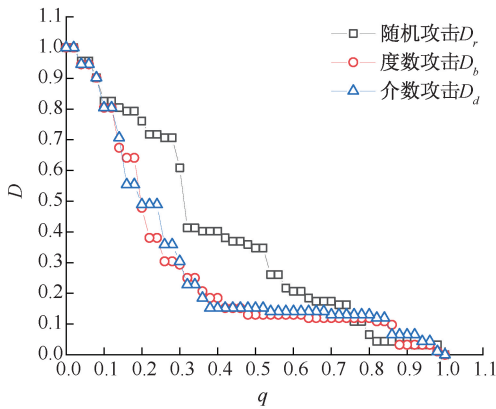


图 5 整体网络的可靠性

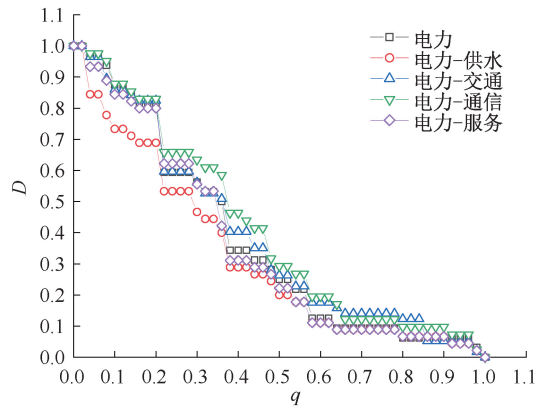
Fig. 5 Overall network reliability

由图 5 可知:在 3 种不同攻击情况下,网络的可靠性在节点失效概率为 (0.2, 0.4) 时,存在明显的突变情况。相较而言,网络在介数攻击下发生突变时的节点失效概率大于度数攻击下发生突变时的节点失效概率。因此,在这 3 种攻击模式下,城市关联基础设施网络可靠性的情况分别为 $D_r > D_b > D_d$ (D_r 、 D_b 和 D_d 分别为随机攻击、介数攻击和度数攻击下网络的可靠性)。

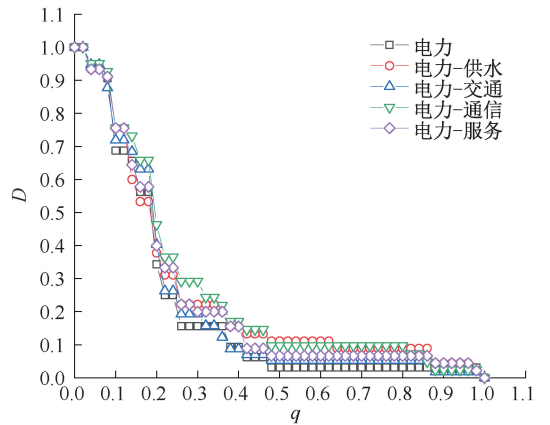
3.2.2 双层耦合网络失效分析

电力网络作为网络中的重要关联层,和其余 4 个基础设施子网络都存在关联,因此为了进一步分析不同关联网络的可靠性,参考 1.3 节中的步骤,分别模拟在随机攻击、度数攻击和介数攻击 3 种不同攻击情况下,独立的电力网络、电力-供水网络、

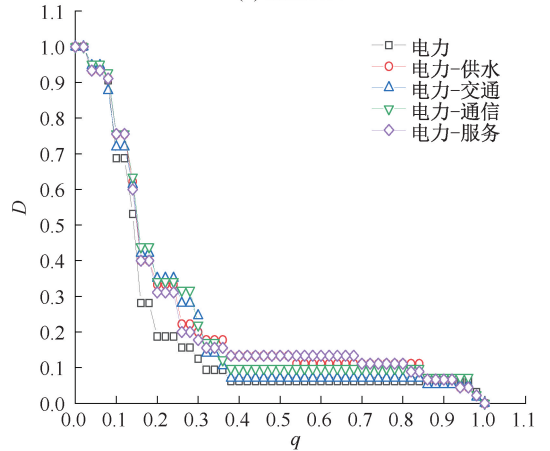
电力-交通网络、电力-通信网络以及电力-服务网络的失效过程,如图 6 所示。



(a) 随机攻击



(b) 度数攻击



(c) 介数攻击

图 6 双层网络失效过程

Fig. 6 Failure processes in two-layer networks

由图 6 可知:随机攻击下网络的可靠性变化较为连续,而在 2 种蓄意攻击的情况下都出现了二阶相变。综合来看,在随机攻击下网络的可靠性最高,其次是度数攻击,介数攻击下的可靠性最差。比较单层和双层网络的情况,可以看出双层耦合网络的可靠性低于单层的电力网络。而对比不同的攻击情况可以得出,同一网络在随机攻击情况下的可靠性,

高于蓄意攻击下的可靠性。

3.2.3 3层耦合网络失效分析

在此基础上,继续研究不同攻击策略下3层网络的失效过程和可靠性变化特征,以电力-通信-交通这3层子网络构成的网络作为研究对象,参考1.3节中的步骤,分别模拟了随机攻击、度数攻击和介数攻击3种不同攻击情况下,不同层数网络的失效过程,如图7所示。

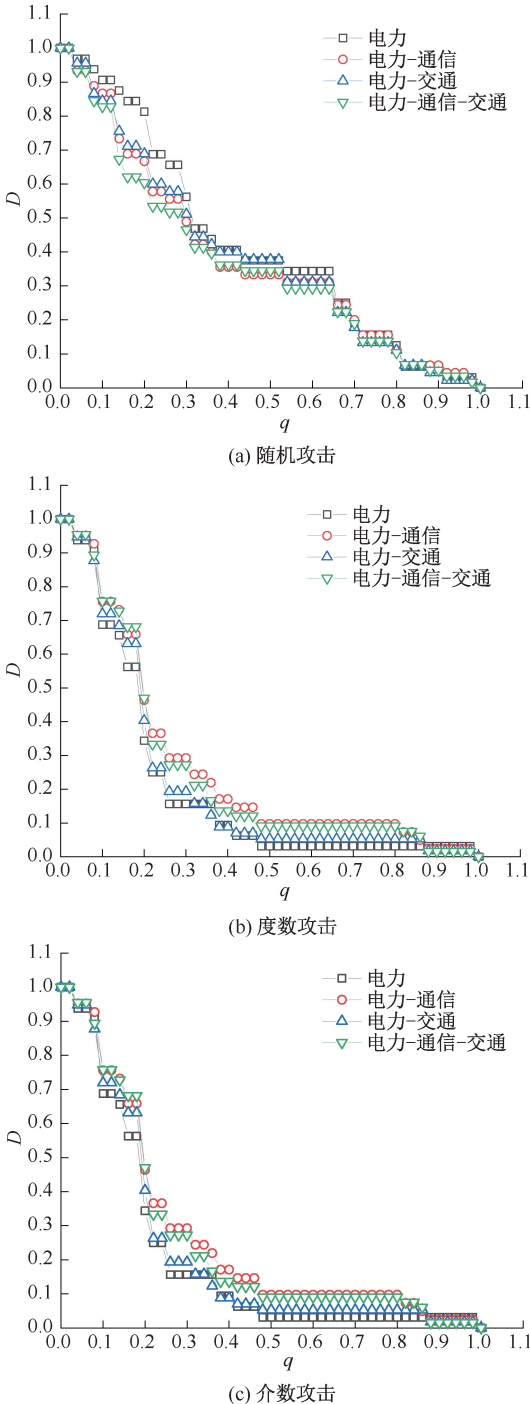


图7 3层网络失效过程

Fig. 7 Failure processes in three-layer networks

由图7可知:单独的电力网络的可靠性最强,其次是双层网络,3层网络表现出的可靠性最差。因此,对于此关联基础设施网络来说,随着网络层数的增加,网络的可靠性下降,即城市基础设施系统越复杂,包含的子网络越多,网络的可靠性越差,城市基础设施系统面临的风险也就越大。

3.3 城市关联基础设施网络韧性评估结果分析

3.3.1 抵御能力计算

根据式(9)可以计算得到初始网络的抵御能力和各基础设施子系统抵御能力,如图8所示。

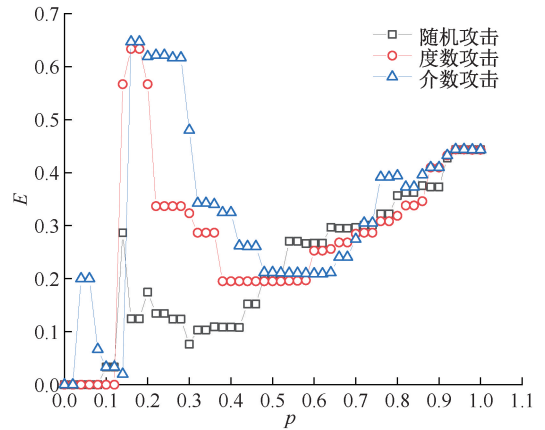


图8 城市关联基础设施网络效率

Fig. 8 Efficiency of urban interdependent infrastructure networks

由图8可知:在蓄意攻击的2种不同情况下,网络效率E都发生了突变,而在随机攻击的情况下,网络效率的变化则较为连续。计算得到该城市基础设施网络的抵御能力为0.443。

分别分析各类基础设施系统的抵御能力,各基础设施系统抵御能力见表1。由表1可知:各类基础设施网络的抵御能力按大小排序为:通信系统>电力系统>服务系统>交通系统>供水系统。

表1 各基础设施系统抵御能力

Table 1 Resistance of infrastructure systems

系统	电力	供水	交通	通信	服务
抵御能力	0.500	0.404	0.406	0.611	0.421

3.3.2 吸收能力计算

根据式(10)可以得到初始网络的吸收能力和各基础设施系统的吸收能力,如图9所示。

计算得到城市关联基础设施网络的吸收能力为0.225。

分别分析5类基础设施系统的吸收能力,各基础设施系统吸收能力见表2。由表2可知:各类基础设施网络的吸收能力按大小排序为:电力系统>

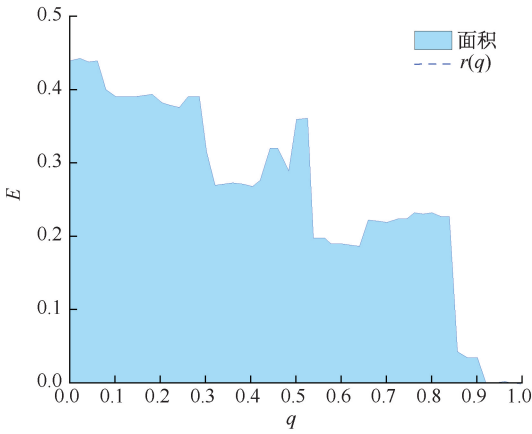


图 9 城市关联基础设施系统吸收过程

Fig. 9 Absorption process in urban interdependent infrastructure system

表 2 各基础设施系统吸收能力

Table 2 Absorptive capacity of infrastructure systems

系统	电力	供水	交通	通信	服务
吸收能力	0.227	0.217	0.223	0.218	0.172

交通系统>通信系统>供水系统>服务系统。

3.3.3 恢复能力计算

根据式(11)可以计算得到初始网络的恢复能力和各基础设施子系统在不同恢复策略下的恢复能力,如图 10 所示。

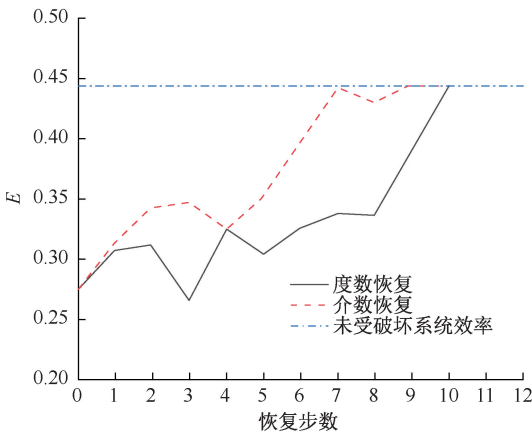


图 10 城市关联基础设施系统恢复过程

Fig. 10 Recovery process in urban interdependent infrastructure system

由图 10 可知:此城市关联基础设施系统在度数恢复策略下的恢复能力为 0.262,在介数恢复策略下的恢复能力为 0.369。在介数恢复策略下,网络的效率更早地恢复到较高的水平,说明对此基础设施网络,介数恢复策略更为合适。

分别分析 5 类基础设施网络的恢复能力,各基础设施系统恢复能力见表 3,由表 3 可知:在度数和

介数 2 种恢复策略下,各类基础设施网络的恢复能力排序相同,均为:通信系统>服务系统>交通系统>电力系统>供水系统,但是比较同一网络在不同恢复策略下的恢复能力可知,电力网络、交通网络和服务网络在度数恢复情况下的恢复能力更优,供水网络和通信网络则相反。

表 3 各基础设施系统恢复能力

Table 3 Recovery of infrastructure systems

系统	电力	供水	交通	通信	服务
恢复能力	0.292	0.258	0.301	0.464	0.391
介数	0.278	0.264	0.291	0.564	0.373

综上所述,可以得到此城市关联基础设施系统在度数恢复策略下的韧性值为 0.930,在介数恢复策略下的韧性值为 1.037。因此,针对此系统选用介数恢复策略更优。计算得到各类基础设施系统的韧性值见表 4。

表 4 各基础设施系统韧性

Table 4 Resilience of infrastructure systems

系统韧性	电力	供水	交通	通信	服务	整体
度数	1.019	0.879	0.930	1.293	0.984	0.930
介数	1.005	0.885	0.920	1.393	0.966	1.037

由表 4 可知:对于整体网络而言,不同恢复策略下,系统在恢复阶段的恢复能力不同,导致系统表现出不同强度的韧性,因此在基础设施系统的韧性建设过程中,需要根据基础设施系统的特点进行优化。

4 结 论

1) 关联网络中电力节点的聚类系数明显高于整体平均水平,表明电力网络是该城市基础设施系统网络中的关键子网络,维持电力系统的正常运营对整体网络的稳定至关重要。

2) 研究发现,通信网络的抵御能力和恢复能力是 5 类基础设施网络中最强的,韧性水平也最高,电力网络的吸收能力最强。

3) 随着网络中节点失效概率的增大,整体关联基础设施网络及其子网络的可靠性也逐渐降低,并且在蓄意攻击(度数攻击和介数攻击)下网络整体可靠性更低,同时随着网络层数的增加,网络可靠性呈现下降的趋势。

4) 通过对比介数恢复和度数恢复 2 种恢复策略发现,网络效率在介数恢复策略下恢复至较高水平时间较短,说明对此基础设施网络,介数恢复策略更为合适。

参 考 文 献

- [1] 周方, 赵伟, 胡翔奎, 等. 基于关键基础设施耦合关系的城市韧性评价研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(4): 1 014-1 021.
ZHOU Fang, ZHAO Wei, HU Xiangkui, et al. Research on the urban resilience assessment for critical infrastructure interdependency[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(4):1 014-1 021.
- [2] 刘昭阁, 李向阳, 朱晓寒. 城市关键基础设施网络脆弱性关联分析的知识本体配置[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(1):222-233.
LIU Zhaoge, LI Xiangyang, ZHU Xiaohan. Knowledge ontology configuration for vulnerability association analysis of urban critical infrastructure networks[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2023, 43 (1):222-233.
- [3] 赵辰. 城市关联基础设施系统网络建模及韧性优化[D]. 北京:清华大学, 2018.
ZHAO Chen. Urban interdependent infrastructure system network modeling and resilience analysis[D]. Beijing:Tsinghua University, 2018.
- [4] SHIMA M, KATHERINE B, BABAK A. Decentralized resource allocation for interdependent infrastructures resilience: a cooperative game approach[J]. International Transactions in Operational Research, 2021, 28(6):3 394-3 415.
- [5] 周方. 城市多层关键基础设施耦合网络级联失效研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
ZHOU Fang. Cascading failures of interdependent multilayer network for urban critical infrastructures[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2019.
- [6] AMIRHOSSEIN F. Multilayer cellular learning automata: a computational model to solve multilayer infrastructure problems with its application in community detection for multilayer networks[J]. Journal of Computational Science, 2022, 61: DOI:10.1016/j. jocs.2022. 101683.
- [7] 毛丁, 王芃, 倪龙. 供热及其关联基础设施网络脆弱性研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 155-162.
MAO Ding, WANG Peng, NI Long. Research review on vulnerability of district heating system and its interdependent infrastructure network[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11):155-162.
- [8] 杨景峰, 朱大鹏, 赵瑞琳. 城市轨道交通网络特性与级联失效鲁棒性分析[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(7):250-258.
YANG Jingfeng, ZHU Dapeng, ZHAO Ruilin. Analysis on characteristics of urban rail transit network and robustness of cascading failure[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(7):250-258.
- [9] 霍非舟, 梅依云, 吕伟, 等. 考虑拥堵指数的城市群复杂交通网络级联失效模型[J]. 公路交通科技, 2022, 39(10):162-170,190.
HUO Feizhou, MEI Yiyun, LYU Wei, et al. Cascading failure model of complex transport network in urban agglomeration considering congestion index[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(10): 162-170,190.
- [10] RINALDI S M, PEERENBOOM J P, KELLY T K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(6):11-25.
- [11] LIU Xueming, PAN Linqiang, STANLEY H E, et al. Controllability of giant connected components in a directed network[J]. Physical Review E, 2017, 95(4):DOI:10.1103/physreve.95.042318.
- [12] 周冬玥, 胡福年, 陈军. 基于复杂网络的电力系统鲁棒性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1):72-80.
ZHOU Dongyue, HU Funian, CHEN Jun. Robustness analysis of power system based on a complex network [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1):72-80.
- [13] 唐少虎, 朱伟, 程光, 等. 暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 143-150.
TANG Shaohu, ZHU Wei, CHENG Guang, et al. Safety resilience assessment of urban road traffic system under rainstorm waterlogging[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7):143-150.
- [14] CHEN Changkun, ZHAO Dongyue, HE Fan, et al. A comprehensive multi-hazard risk assessment model for an urban agglomeration with multiple factors[J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2023, 4(1):43-51.
- [15] 张雯婕, 胡军红, 闻成维, 等. 考虑网络韧性的城市轨道交通故障恢复研究[J]. 中国安全科学学报, 2023,

33(4):179-186.

ZHANG Wenjie, HU Junhong, WEN Chengwei, et al. Research on urban rail failure recovery considering network resilience[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4):179-186.

作者简介: 陈长坤 (1977—),男,福建福安人,博士,教授,主要从事火灾科学与智慧消防、城市公共安全及应急管理等方面的研究。E-mail:cckchen@csu.edu.cn。

2024年《中国安全科学学报》征订启事

荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus) 收录期刊
安全科学领域高质量科技期刊分级目录 T1 级
中国科技期刊卓越行动计划入选期刊
中国科学引文数据库(CSCD) 核心期刊

全国中文核心期刊
中国科技核心期刊
世界期刊影响力指数(WJCI) Q2 区
美国化学文摘社(CAS) 数据库收录期刊

学术性 权威性 应用性 信息性 国内外公开发行
增强全民族安全科技文化意识 促进安全减灾环保科学综合发展

本刊竭诚为从事安全生产、应急管理、职业安全与卫生、防灾防损、个体防护等方面的专业人员,为注册安全工程师、科研人员、管理干部、安技人员,为高等院校有关师生,为与安全科学技术有关的专家、学者以及职业安全健康中介机构的评价师等服务。刊登栏目有:

1. 安全科学理论与安全系统科学(含安全学科科学、安全人才培养、安全科学原理、安全系统模型、安全系统管理学、应急科学理论等)。
2. 安全社会科学与安全管理(含安全行为、经济、文化、法规、心理、人因、风险管理、舆情管理等)。
3. 安全工程技术(含矿山、石油、化工/危险化学品、建筑、交通、民爆、机械、特种设备等重点行业安全及数字化、智能化、物联网、大数据、云计算等新兴技术在上述领域的应用)。
4. 公共安全(含城市消防、避险、疏散、城市管网、城市道路交通、城市轨道交通、城市风险评估、社区安全、城市地下空间等)。
5. 防灾减灾技术与工程(含地质、气象、洪涝等自然灾害的防灾减灾、预防工程等)。
6. 应急技术与管理(含应急预案、应急指挥、应急决策、应急资源、应急技术、应急装备等)。
7. 职业卫生(又称职业健康,含尘毒和物理因素(噪声、振动、高低温、高湿)等职业危害、职业危害风险评估、职业病、职业流行病、职业危害防护、工程治理及个体防护、人类工效学、职业健康心理学等)。

《中国安全科学学报》(CN 11-2865/X;ISSN 1003-3033;CODEN ZAKXAM),全年12期,每月底出刊,大16开本,国内每册售价40.00元,全年480.00元。

【订阅方法】方式1:邮局订购。邮发代号:82-454。

方式2:下载征订回执单(见附件),按要求填写清楚后发送至编辑部邮箱。

联系人:秦编辑 电话:86-10-64464783

电子信箱:csstlp@263.net 网址:www.cssjj.com.cn

【银行汇款】户名:中国职业安全健康协会

账号:0200006309026400165

开户行:中国工商银行股份有限公司北京惠新支行