关联基础设施系统脆弱性分析*

王淑良[1], 岳 昕[2]
(1. 重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400047; 2. 昆明理工大学 信息与自动化学院, 昆明 650504)

摘 要: 鉴于基础设施系统对社会生产和人民生活的重要性,分析基础设施系统的脆弱性,提出相应的抗干扰措施和改进策略,提高基础设施系统的可靠性,成为了当前研究的一个热点课题。基于此,在对基础设施系统脆弱性分析成果的基础上,从方法论的角度探讨了关联基础设施系统的脆弱性,并以华中地区某城市电力—供水网络为例分析了网络在节点级联故障下的脆弱性,为控制基础设施系统的级联故障、增强系统的抗干扰能力提供决策支持。

关键词: 关联基础设施系统; 复杂网络; 脆弱性分析; 基础设施保护
中图分类号: TP301 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2014)04-0976-05
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.04.004

Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems

WANG Shu-liang[1], YUE Xin[2]
(1. *School of Information Science & Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400047, *China*; 2. *School of Information Engineering & Automation, Kunming University of Science & Technology, Kunming* 650504, *China*)

Abstract: In view of the importance of infrastructure systems for social well-being and sustenance, analyzing vulnerability of infrastructure systems has become a focal area for the process of optimizing infrastructure design and protection. On this basis, this paper took power and water systems of a major city in China as example and devoted to develop a framework for the analysis of interdependent infrastructure systems vulnerability. It is helpful to provide decision support on cascading failures control and system improvement.

Key words: interdependent infrastructure systems; complex network; vulnerability analysis; infrastructure protection

0 引言

基础设施是一类为社会生产和居民生活提供公共服务的物质工程设施[1],主要包括电力、供水、天然气、交通运输及通信等,是典型的复杂系统。当今社会越来越依赖于基础设施系统提供的各项服务,它们是保证国家或地区社会经济活动正常开展的前提,是社会赖以生存发展的一般物质条件,是国民经济各项事业发展的基础。基础设施系统对加速社会经济活动、保证各行各业的正常运行起着重要作用。一个国家或地区的基础系统是否完善、安全、可靠,是其经济是否可以长期持续稳定发展的重要基础。美国总统关键基础设施委员会(PCCIP)[2]指出安全的生活方式,甚至工业化世界的生存都离不开电力、通信等基础设施,并定义了八种关键基础设施,即电信、电力、天然气和石油、银行、金融、交通、供水、政府服务和应急服务,并且指出电力是一个尤其重要的基础设施,因为很多的基础设施都依赖于一个可靠的电力供应从而保证其正常运行。

基础设施系统却经常由于各种灾害和威胁而受到破坏,在过去的几十年中,停电、轨道交通设施破坏、卫星通信故障、地震、雪灾、飓风、洪水等自然灾害和人为影响使得基础设施系统遭受过不同程度的冲击和破坏,严重地影响了社会生产和人民生活,并造成了重大经济损失。2003 年北美大停电就是由美国俄亥俄三条超高压输电线路相继过载烧断引起的,并波及到底特律、多伦多、渥太华等地区,造成了重大的影响。高功率需求、管理缺陷、缺乏监控控制以及有效的决策、不遵守产业政策[3](如修剪树木的不足)等一系列的原因共同造成了这次大停电事故。停电事件极大地影响了交通运输、商业、国家安全、医疗、通信、金融、供暖、电子产品、甚至是娱乐和休闲各相关部门,长达 29 小时的停电造成了约 300 亿美元的直接经济损失[4]。地震、雪灾等自然灾害也对基础设施系统造成过重大的破坏,2008 年我国南方雪灾使许多基础设施受到严重破坏,铁路、公路、航空等交通基础设施以及电力等受到影响功能严重下降甚至瘫痪。由于系统之间的相互关联,灾害的影响进一步加剧。例如,雪灾导致交通受限,使得原料不能及时运至电厂,造成电力供应更加的紧张;与此同时交通瘫痪也在很大程度上影响了应急系统,使得救援人员与救援物资很难及时到位,进一步加剧了雪灾的影响,造成了更大的破坏。2008 年我国南方雪灾造成了高达 1111 亿元的经济损失[5]。

由上述例子看出,由于其开放性与复杂性,基础设施系统在运行时经常受到内外各种干扰,导致系统的某些子系统发生故障,故障在系统内部扩散,造成的影响被放大。而关联性又使得初始崩溃在与其相关的基础设施系统之间蔓延,影响可能

收稿日期: 2013-06-08; **修回日期**: 2013-08-13 **基金项目**: 重庆高校创新团队资助项目(KJTD201306);国家自然科学基金资助项目(60903174)

作者简介:王淑良(1981-),男,讲师,博士,主要研究方向为复杂网络、系统建模与仿真、基础设施系统脆弱性分析(shuliang0820@sina.com);岳昕(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统理论、图像处理.

超出单个基础设施系统的边界造成重大的破坏[6]。因此,基础设施系统的复杂性、基础设施系统之间关联性使基础设施系统在功能更加强大的同时也变得更加脆弱,面临更大的风险[7]。

基于基础设施系统对社会发展的重要性,系统故障对社会生产、人民生活的巨大影响,分析、理解、识别基础设施系统的脆弱性,进而提出相应的抗干扰措施和改进策略,为基础设施系统的设计与保护提供决策支持已经变得日趋紧迫而亟待解决。

最近几年研究者已经逐渐意识到基础设施系统脆弱性分析在工程、社会技术和经济等学科领域的重要性。围绕基础设施系统的脆弱性分析及其应用问题,国内外众多研究机构和学者采用不同模型开展了探讨。现有模型主要包括 agent 仿真模型[8]、系统动力学模型[9]以及投入产出模型[10]等。

Agent 是指在一定的环境下能独立自主地运行、作用于自身生成的环境并受到外部环境影响,不断地从环境中获取知识以提高自身能力的智能实体 。然而,信息的不完备性、对现有信息进行数据挖掘的复杂性、解释的主观性以及进化的管限规则等阻碍了模型研究的发展[11]。

利用系统动力学模型来研究基础设施系统时,该模型用流位、流率等变量来刻画基础设施系统的生产、输送、消费等功能,用系统间流动的服务和产品的数量来描述基础设施系统之间的关联关系[12]。系统动力学模型能很好地从功能和业务流程层面分析基础设施系统的运行特性、灾害爆发后的应急行为并能够进行政策评价,但是该模型的精确度不高,也不能反映系统微观拓扑结构的影响。

投入产出模型(IIM)[13]最早是由美国经济学家 Leontief 提出的,该模型对灾害在宏观基础设施系统中的扩散给出了一种分析思路。模型利用基础设施系统间的经济关联来表示物理关联关系,利用经济量来表示系统的状态,提供了一个能够从宏观上量化多个基础设施系统之间关联度的方法,能宏观地分析灾害在多个基础设施系统间的扩散和造成的影响。模型的不足在于:模型过于抽象,只反映了基础设施系统间的经济统计关系,无法适用于物理关联和经济关联并不十分紧密的基础设施系统;同时,该模型只考虑了系统间的直接影响而没有考虑多次扩散影响,且模型对数据的依赖性强,微观分析能力较弱。

此外由于关联基础设施系统的复杂性,不同类型的基础设施系统具有不同的运行机制和功能特性,很难找到一个普遍的、全方位的模型来解决所有的问题[14]。因此本文在对基础设施系统脆弱性分析成果的基础上,从方法论的角度探讨关联基础设施系统的脆弱性,并以华中地区某城市电力—供水网络为例分析关联基础设施系统网络在节点级联故障下的脆弱性。

1　基础设施系统脆弱性分析框架

在上述分析的基础上,从方法论的角度建立基础设施系统脆弱性分析框架。图 1 给出了基础设施系统脆弱性分析框架。

在对基础设施系统进行脆弱性分析时,首先要对所研究的基础设施系统及其特性有深刻的理解,对系统的运行状态和运行环境给出清晰的描述。此外,基础设施系统遭受的威胁也需要给予识别。基础设施系统经常遭受各种灾害的威胁和破坏,这些灾害有很多种类,大致可以分为三种:自然灾害(如地震、飓风、风暴、冰)、随机故障(如操作失误、老化、动植物破坏等)、蓄意攻击(如恐怖袭击事件)。另外基础设施系统的关联性使得系统功能相互影响,故障也在关联的基础设施系统之间相互传播,对于具体的基础设施系统的关联类型和关联基础设施系统在不同灾害下的响应问题也要进行分析与研究。

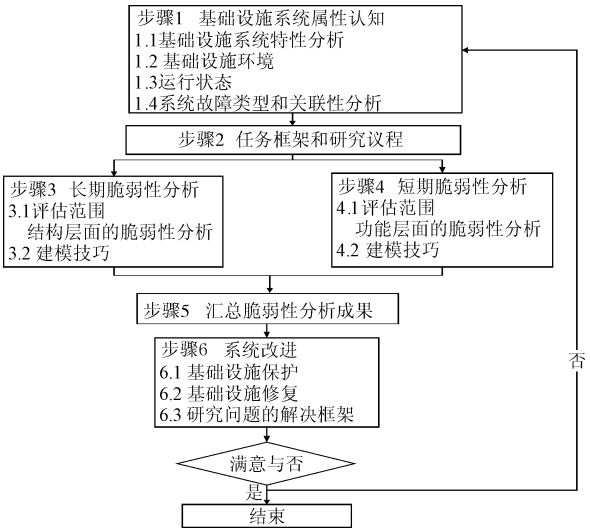

图 1　基础设施系统脆弱性分析框架

其次,对任务框架和研究议程也要进行明确的鉴定,在这里主要是对基础设施系统脆弱性进行分析,全局脆弱性也被考虑进来。全局脆弱性分析是指从一个整体的角度来分析基础设施系统在扰动下状态转变的轨迹,也即系统在脆弱性源作用下的性能变化过程[15]。Little[16]认为基础设施系统的一个整体的脆弱性分析观点是必要的,它可以对系统破坏的类型和幅度给出一个比较好的描述,这与大多数脆弱性分析方法是一致的。通过对系统性能的度量,描述系统在不同类型、不同幅度扰动下的响应,分析扰动幅度与系统性能之间关系,从而刻画基础设施系统的全局脆弱性。

结合基础设施系统的全局脆弱性,本文分别从长期和短期的脆弱性进行分析,并进行交叉比较。长期脆弱性分析主要是从基础设施拓扑结构方面着手来进行分析;短期的脆弱性分析主要是从功能层面着手来进行分析。结构层面上的讨论将有助于长远的基础设施系统设计或改善,而功能层面的讨论将有助于短期的基础设施系统保护。

脆弱性分析与系统遭受的扰动是密切相关的,本文通过随机或蓄意地移除基础设施系统组件来描述系统的扰动。扰动的类型和采取哪种类型的攻击策略相对应,攻击的幅度与移除系统组件的数目相对应,这在网络分析中称为攻击策略。在蓄意攻击中,对一些高度和高负载节点进行攻击,通过评估攻击后系统功效性的变化,就可以评估系统的脆弱性。

在系统改进方面,根据所取得的成果和相关反馈,需要确定关键部件、关键位置并对它们进行重点保护,并选择最好的改进基础设施系统性能的选项。本文所做的工作主要是为决策部门提供决策支持,将相关信息进行反馈后,由系统所有者实际执行,对改进的建议作出最后决定。

2　电力—供水关联基础设施系统网络

结合基础设施脆弱性分析框架,本文以华中地区某城市的电力—供水网络为例,从方法论的角度提出关联基础设施系统脆弱性分析的建模方法。分析工作从单个基础设施系统建模出发,首先对每个基础设施系统建立其结构和功能模型,然后对不同基础设施系统组件之间的关联关系用关联边来进行建模,主要对关联基础设施系统网络在节点级联故障下的脆弱性

进行分析。

2.1 基础设施属性认知

在这里以华中地区某城市的电力—供水网络为例(图 2)来分析关联基础设施系统的脆弱性。之所以以电力—供水网络为例,一方面因为它们共享相同的地域可以帮助阐述关联效果,另一方面电力网络、供水网络都是单商品系统[17](single-commodity systems),资源从供应节点在容量的约束下沿着边和传输节点以一种最优的方式到达需求节点。

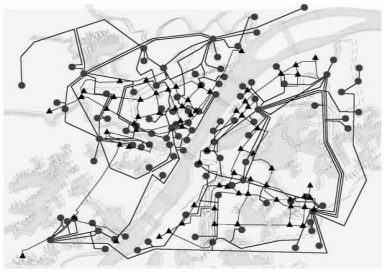

图 2 电网—供水关联网络示意图

复杂网络作为大量真实复杂系统的高度抽象,利用复杂网络的理论和方法能够很好地描述基础设施系统的拓扑特征、功能特性和彼此间的关联关系。基础设施系统可看做是由一系列功能性子系统彼此连接所组成,如果将这些子系统抽象为节点,子系统之间的连接抽象为边,就可以利用复杂网络的方法表示基础设施系统的拓扑结构;当对这些节点和边赋予功能属性时,就可以用来描述基础设施系统的功能特性并由此建立其功能模型。复杂网络理论为基础设施系统研究提供了一个全新的视角和研究方法,因此利用图论和复杂网络理论对电力网络和供水网络进行拓扑化描述。定义一个无向图 $G=\langle V,E,A\rangle$,其中 $V=\{v_i \mid i\in I=\{1,2,\cdots,N\}\}$ 是网络节点集合,$E=\{e_{ij}=(v_i,v_j) \mid i,j\in I\}\subseteq V\times V$ 表示两个节点之间连接边的集合,$A=(a_{ij})_{N\times N}$是网络的邻接矩阵。对电力网络和供水网络作如下抽象:

1)电力网络结构抽象

a)电网拓扑模型中的节点包括发电厂,220 kV 、110 kV 变电站及主要配电节点。

b)输电线以及变压器支路被抽象为电网拓扑模型中的边,且为无向边,即得到的网络为无向网络。忽略传输线的不同物理构造及电气参数的不同。

2)供水网络结构抽象

a)研究只考虑市自来水厂、加压站、配水节点、水网交叉点和其间的主要连线。

b)认为水管的拓扑结构是相同的,忽略传输线的物理构造特性等方面的差异,且所有边皆为无权边。

在上面的网络结构抽象规则下,表 1 中给出了电力和供水网络的相应的拓扑性质,图 3 给出了华中地区某城市电网和供水网络的度分布。

表 1 电力和供水网络的拓扑性质

基础设施	拓扑性质						
	N	E	G	$\langle k\rangle$	C	$\langle l\rangle$	B
电力网络	111	135	11	2.432	0.047	8.247	797
供水网络	71	105	7	2.845	0.1291	6.338	249

2.2 关联性表征

为了对华中地区某城市电力—供水关联网络进行数学化描述,首先对下面一些符号给出定义:

M 表示基础设施系统集合;

W 表示供水网络;

P 表示电力网络;

$I(W,P)$ 表示供水网络 W 中需要电力网络 P 提供资源输入的节点集合;

$O(P,W)$ 表示电力网络 P 中为供水网络 W 提供资源输出的节点集合;

$I(P,W)$ 表示电力网络 P 需要供水网络 W 提供资源输入的节点集合;

$O(W,P)$ 表示供水网络 W 为电力网络 P 提供资源输出的节点结合。

假设供水网络中的加压站需要电力供应从而确保其正常运行,而水力发电站需要供水节点资源供应保证其能正常发电。在这里,$|I(W,P)|=|O(P,W)|=16$,$|I(P,W)|=|O(W,P)|=3$。令 $i\in I(W,P)$ 表示供水网络 W 中需要电力网络 P 提供资源输入的节点;$j\in O(P,W)$ 表示电力网络 P 中为供水网络 W 提供资源输出的节点。下面给出供水网络对电力网络的一个简单的依赖关系:

$$b_i^w=\begin{cases} b_i^w & b_j^p\neq 0 \\ 0 & b_j^p=0 \end{cases} \quad \forall e_{ij}=1 \tag{1}$$

其中:b_i^w 表示供水网络 W 中节点 i 的负载,b_j^p 表示电力网络 P 中节点 j 的负载。当电力网络节点 j 不能提供资源输出后,相应的供水节点的负载也将变为 0。令 $s\in I(P,W)$ 表示电力网络 P 中需要供水网络 W 提供资源输入的节点,$t\in O(W,P)$ 表示供水网络 W 中为电力网络 P 提供资源输出的节点。下面给出电力网络对供水网络的一个简单的依赖关系;

$$b_s^p=\begin{cases} b_s^p & 0.75\leqslant b_t^w/b_{t,o}^w\leqslant 1 \\ 0 & 0\leqslant b_t^w/b_{t,o}^w<0.75 \end{cases} \quad \forall e_{st}=1 \tag{2}$$

其中:b_s^p 表示电力网络 P 中节点 s 的负载,b_t^w 表示供水网络 W 中节点 t 的负载。假设当供水网络节点为相应的电力网络节点提供资源输出低于正常输出的 3/4 时,电力发电站由于得不到足够的水供应而不能正常运行。

连接变电站、水加压站接口网络的拓扑性质在运行操作和故障传播中有着重要的作用。因此,对电力—供水关联网络进行脆弱性分析时,将它们与接口网络拓扑结构联系在一起对关联基础设施系统进行评估。根据它们在连接公用事业系统和在随机故障与蓄意攻击中的故障传播作用,并结合 Winkler 等人[18]的分析,在这里利用拓扑特性给出了基于介数、聚类系数、节点度、距离等不同的接口设计标准,具体如表 2 所示。

表 2 电力—供水关联基础设施网络接口设计策略

设计策略	连接标准		注记
价数	$\max_i\left[\frac{B(p_i)}{\mathrm{dist}(w_j,p_i)}\right]$	$\forall_j$	w_j 表示供水加压站节点;p_i 表示电力变电站节点;$B(p_i)$ 表示 p_i 的介数;$\mathrm{dist}(w_j,p_i)$ 表示 p_i、w_j 之间的距离
聚类系数	$\max_i\left[\frac{C(p_i)}{\mathrm{dist}(w_j,p_i)}\right]$	$\forall_j$	$B(p_i)$ 表示 p_i 的聚类系数
度	$\max_i\left[\frac{d(p_i)}{\mathrm{dist}(w_j,p_i)}\right]$	$\forall_j$	$d(p_i)$ 表示 p_i 的度

接口网络的构造首先需要电力传输网络中变电站节点性质的评估,从而节点可以优先纳入接口。用节点中心介数 $B(v)$ 这样一个拓扑指标来鉴定对电力网络电流关键的变电站,中心的电力变电站节点有可能成为接口网络集合的供应节点;也可以根据电力网络的局部重要性,通过聚类系数来选择接口节点。与此同时,通过利用节点度的大小,电网中具有较多连接的变电站也可以被纳入接口。大部分电网拓扑性质都受到变电站的度分布影响,本文利用网络效率来直接分析网络

的性能。网络的效率可以捕捉到达遥远的网络部分的一个难易程度,共享流与信息的一个能力,提高网络效率是现实中网络可靠性提高的一种潜在途径。

3　脆弱性分析

本文主要从长期脆弱性分析和短期脆弱性分析着手进行研究。它们是从两个不同角度来进行分析的,长期脆弱性分析有助于从长远的角度设计或改善系统,而短期脆弱性分析从功能方面研究基础设施系统,进而进行重点保护。

3.1　长期脆弱性分析

长期脆弱性分析主要是从基础设施拓扑结构方面着手来进行脆弱性分析,结构层面上的讨论将有助于长远的基础设施系统设计或改善[19]。通过前面分析知道,脆弱性是与攻击相关联的,可以用攻击后效率的降低来度量。对于结构脆弱性,拓扑结构是唯一的信息。

这里主要就随机攻击和蓄意攻击进行研究。其中,随机攻击是指随机移出节点,而蓄意攻击则是指有侧重地移除网络中的重要节点。假定一个节点失效后,仅删除与该节点相连的所有边。如果一个电力节点被攻击,则由此电力节点供应的水节点都将被移除。类似地,如果一个水节点受到攻击,则基于供水节点的电力发电站都会被移除,这样就改变了网络拓扑结构,可以计算结构效率和进一步分析结构脆弱性。用基础设施系统的平均最短路径长度的倒数来度量结构效率。当基础设施遭受攻击的时,系统的效率降低。效率下降得越快,灾害对基础设施系统的影响程度就越严重,这样就可以分析它们的脆弱性了。图 4 表示了网络中节点被移除后引起的网络效率变化情况。

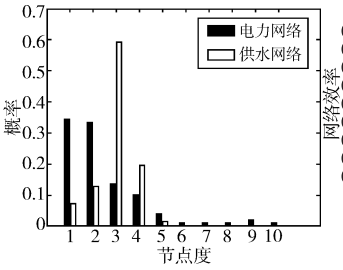

图 3　电网和供水网络的度分布

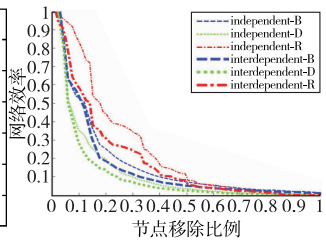

图 4　电力网络效率随节点移除比例的变化

随着节点移除比例的增加,网络效率显著下降。在不同的节点攻击策略下网络效率下降的速度是完全不同的,在最大负载攻击下,网络效率下降的速度最快;在最大度攻击策略下,网络效率下降的速度次之;在随机攻击下,网络效率下降的速度最慢。另外也可以清楚地发现,在关联情况下攻击造成的网络效率损失要高于独立情况。

3.2　短期脆弱性分析

短期脆弱性分析主要从功能层面来描述基础设施系统的脆弱性,功能层面的讨论有助于短期的基础设施系统保护[19]。

1)电力网络、供水网络功能模型

对于电力网络,这里还是采用复杂网络学者们为探索基础设施系统结构与功能间的关系提出的 Motter 模型来建立电力网络负载模型[20]。

a)假设电力能量总是沿着节点与节点之间的最短路径进行交换传递;

b)定义节点所承担的负载为通过节点最短路径的条数,即节点的介数;

c)每个节点的负荷都有一定的容量,各节点承担的负荷受其容量的约束,如果超过运行容量则该节点发生故障被从网络中移除,其相应连接的边也从网络中移除;

d)当某个节点发生故障而从网络中移除时,网络中各节点的负载将重新分配,直到网络达到平衡为止。

利用 Motter 模型对电力网络建模时,对电力网络中任意节点 i 与 j,设 (i,j) 为连接节点 i 与 j 的最短路径。对电力网络中任意节点 k,设 $L_k^{(i,j)}$ 来表示连接节点 i 与 j 的最短路径 (i,j) 是否通过节点 k,当连接节点 i 与 j 的最短路径 (i,j) 通过节点 k 时,则 $L_k^{(i,j)}=1$;否则 $L_k^{(i,j)}=0$。由此可知对电力网络中任意节点 k 而言,通过其最短路径的数目可以表示为 $L_k=\sum_{i,j}L_k^{(i,j)}$,$L_k$ 即为电力节点 k 正常工作时的负荷。设节点所能承受的最大负荷为 C_k,有 $C_k=(1+\alpha)L_k$,$k=1,2,3,\cdots,N$,其中常数 $\alpha\geqslant 0$ 为节点的容量冗余系数。当节点 k 承载负荷超过 C_k 时,节点将因过载而失去功能,从网络中移除。

对于供水网络,研究主要考虑自来水厂、加压站、主要配水节点和其间的主要连线。利用图论和复杂网络的知识,用一个无向图 G_W 来表示供水网络 $G_W=(V_W,E_W)$,水厂、加压站以及配水节点构成了供水网络的节点集合 V_W,其中水厂节点集合记为 $V_{W,+}$,加压站节点集合记为 $V_{W,=}$,配水节点集合记为 $V_{W,-}$。水厂、加压站以及配水节点的所有连接构成了边集 E_W。采用线性规划模型对供水网络进行建模,假设供水网络节点的资源传输量为 b_i^W。当扰动发生后,各节点输入、输出水量在满足一定约束的情况下将在水网中重新分配。水网状态转移目标函数记为

$$\min\Big(\sum_{i\in V_{W,+}}c_0^W\,|\,b_{i,0}^W-b_i^W\,|\,+\sum_{i\in V_{W,-}}100c_0^W\,|\,b_{i,0}^W-b_i^W\,|\Big)\tag{3}$$

其中:c_0^n 为生产节点单位供水量改变的代价,$\sum_{i\in V_{W,+}}c_0^W\,|\,b_{i,0}^W-b_i^W\,|$ 为供水网络生产节点状态改变量,$\sum_{i\in V_{W,-}}100c_0^W\,|\,b_{i,0}^W-b_i^W\,|$ 为供水网络消费节点状态该变量。

并且满足如下约束条件:

a)对于生产和消费节点,节点流出的资源量等于流入的资源量与生产或消费资源量之和。对于传输节点,节点流出的资源量等于流入的资源量。

$$\sum_{e\in\delta_{W,-}(i)}x_e^W=\sum_{e\in\delta_{W,+}(i)}x_e^W+b_i^W\quad\forall i\in(V_{W,+}\cup V_{W,-})\tag{4}$$

$$\sum_{e\in\delta_{W,-}(i)}x_e^W=\sum_{e\in\delta_{W,+}(i)}x_e^W\quad\forall i\in V_{W,=}\tag{5}$$

其中:x_e^W 表示线路 e 上输送的资源量,$\delta_{W,+}(i)$,$\delta_{W,-}(i)$ 分别表示节点 i 输入和输出边的集合。

b)供水网络的生产或消费的服务资源量要满足上下限约束,边 e 传输的服务资源量满足上下限约束,传输节点传输的资源量的上下限约束。

$$b_{i,\min}^W\leqslant b_i^W\leqslant b_{i,\max}^W\quad\forall i\in(V_{W,+}\cup V_{W,-})\tag{6}$$

$$0\leqslant x_e^W\leqslant x_{e,\max}^W\quad\forall e\in E_W\tag{7}$$

$$0\leqslant z_i^W\leqslant z_{i,\max}^W\quad\forall i\in V_{W,=}\tag{8}$$

2)模拟结果分析

在电力—供水关联基础设施系统网络中,根据前面的介绍给出了三种攻击模式:随机攻击、最大度攻击和最大负载攻击。按照不同的攻击模式攻击电力网络节点,通过观察电力网络性能在关联网络中的变化来分析关联基础设施系统网络脆弱性。在前面已经介绍过,供水网络加压节点依赖于电力变电站以维

持其正常运行。假设初始情况下电网水网所有节点均工作在额定状态,在给定的攻击模式下当电网中的某个节点崩溃时,初始崩溃发生,按照电网运行模型进行负载重分配直到电网达到稳定状态。在此过程中,可能有其他的电力节点由于过载而在负载重分配过程中被移除。电网达到稳定状态后,如果电网中某个为供水节点提供资源输出的变电站节点被移除,那么它服务的供水节点将停止工作、崩溃,这就可能使得水网中的用户端节点不能接收到资源而崩溃。当提供发电的供水节点不能提供资源时,相应的发电站节点将崩溃,这将再次引起电网负载重分配,循环往复直到两个网络均达到稳定状态。

图 5 给出了在随机攻击、度攻击和负载攻击三种攻击模式下,电网效率随节点移除比例的变化而变化的过程。为了便于比较,这里同时给出了独立情况下的效率变化情况,仅考虑了基于距离的接口设计标准,并以此为例进行分析。当电力节点被移除后,负载将会在网络中重新进行分配,这时节点所承担的负载就会发生变化,如果其值超出最大容量值,则相应的节点被移除,这会使得相应的供水节点由于没法得到足够的电力供应而从网络中移除,这时又会导致流在供水网络中重新分配,当提供发电的供水节点不能提供足够的资源时,相应的发电站节点将崩溃从而导致新的性能损失。

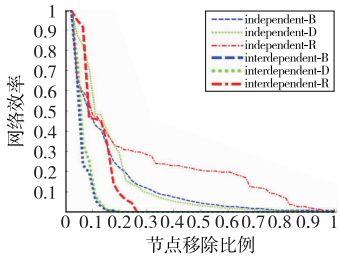

图 5 电网效率随节点移除比例的变化

由图 5 可以看出,在关联情况下电网效率的下降远大于独立情况下效率的下降程度,并且在不同的攻击策略下网络效率的下降速度也是不同的。在最大负载攻击下,网络效率下降的速度最快;在最大度攻击策略下,网络效率下降的速度次之;在随机攻击下,网络效率下降的速度最慢。这是由于在随机攻击下节点移除具有随机性,对网络的结构及负载影响均较小,网络效率下降相对较小。与普通节点相比,度大的节点和负载较大的节点承担了网络中较多的负载,一旦它被移出后,它所承担的负载将会被分配到其他的网络节点中。由于其承担的负载较普通节点要多,其他节点接收其分配的负载后很可能会超过节点容量而被移出,网络效率出现最大幅度的下降。因此,在电力网络中对于高度节点和高负载节点应该给予重点保护,以免由于级联故障使得电力网络受到重大破坏。

图 6 给出了在不同的接口设计标准和不同的攻击策略下,关联电网效率随节点移除比例的变化情况。随机攻击、最大度攻击、最大负载攻击策略都被考虑了进来,同时考虑了基于介数、聚类系数、节点度和距离等不同的接口设计标准。

基于距离的接口设计标准是将水加压节点连接到地理上最近的变电站节点中,这是一种最简单也是最现实的接口设计策略,该设计策略主要出于经济上的考虑,可以将花费降低到最低,然而该标准并没有考虑系统的其他特性。基于介数、聚类系数和度的接口设计标准将水加压节点连接到变电站节点从而使得拓扑指标与距离的比值最大。由模拟结果可以看出,在介数接口下网络具有比较好的性能,即具有较好的故障容忍性。因为在设计中考虑了拓扑接口和功能信息,在基于介数和聚类系数的设计标准下网络是高效的,可以尽量减少级联故障影响,产生高效的拓扑结构并易于运行。

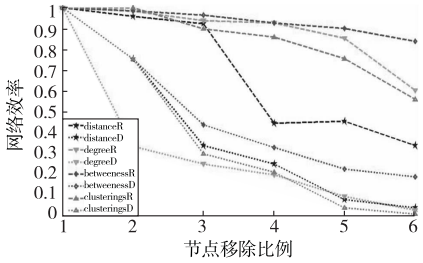

图 6 关联电网效率随节点移除比例的变化

4 结束语

基础设施系统脆弱性研究的是系统由于系统结构和外界干扰所引发的安全性问题,本文在脆弱性相关研究的基础上给出了基础设施系统脆弱性分析框架,运用复杂网络理论对基础设施系统进行网络化描述,建立基础设施系统的复杂网络基本模型,从长期脆弱性分析和短期脆弱性分析角度给出基础设施系统脆弱性的研究方法。本文以华中地区某城市的电力—供水网络为案例分析了关联基础设施系统网络在节点级联故障下的脆弱性。通过分析发现,扰动对关联网络造成的影响远大于独立网络,并且网络对于蓄意攻击都是非常脆弱的,而对随机攻击具有相对较好的故障容忍性。对于不同的接口设计策略,在节点级联故障下,介数接口网络具有比较好的性能。在进行网络设计时可以考虑将这些策略优先纳入到接口设计中。利用基础设施系统脆弱性分析框架,可针对现实中不同类型的关联基础设施系统来建立研究模型,分析关联基础设施系统在不同扰动下的脆弱性,从而为基础设施系统的保护和再设计提供可靠性信息和决策支持。

参考文献:

[1] President's Commission on Critical Infrastructure Protection. Critical foundations: protecting America's infrastructures[EB/OL]. (1997-10). http://www.fas.org/sgp/library/pccip.pdf.

[2] The Clinton Administration. Presidential decision directive 63 [R]. 1998.

[3] DUEÑAS-OSORIO L A. Interdependent response of networked systems to natural hazards and intentional disruptions[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.

[4] U S-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[R]. 2004.

[5] 史培军. 从南方冰雪灾害成因看巨灾防范对策[J]. 中国减灾, 2008(2): 12-15.

[6] 毛子骏, 费奇, 欧阳敏, 等. 关联基础设施网络模型研究综述[J]. 计算机科学, 2009,36(3):5-9.

[7] 尹项根, 陈庆前, 王博, 等. 基于四层集合模型的复杂电力系统脆弱性评估体系[J]. 电工技术学报, 2013,28(1):225-233.

[8] 陈国炎, 张哲, 尹项根. 基于 HLA/agent 的广域后备保护仿真平台设计[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(1):1-8.

[9] BORSHCHEV A, FILIPPOV A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools [C]//Proc of the 22nd International Conference on System Dynamics Society. 2004.

(下转第 996 页)

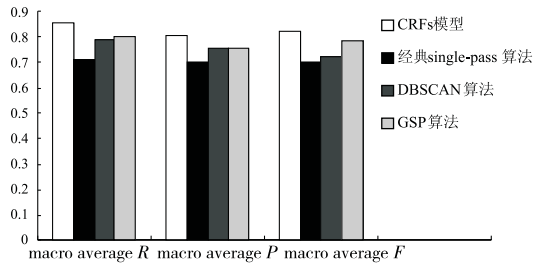

图 5 CRFs 模型和经典 single-pass 算法实验结果对比表

实例验证结果表明,本文提出的基于 CRFs 模型的敏感话题识别研究算法能够更加准确地对网络文本进行敏感话题识别,其漏检率 P_{miss}、错检率 P_{fault} 以及耗费函数 C 都低于经典 single-pass 算法和 DBSCAN 算法以及 GSP 算法,且准确率 P、召回率 R 以及 F 度量的宏平均值也比经典 single-pass 算法和 DBSCAN 算法以及 GSP 算法高。

3 结束语

本文将敏感话题识别问题看做是 CRFs 的计算问题,提出了基于 CRFs 模型的敏感话题识别方法。首先,将随机挑选出的一篇待检测文本 s 和剩余的待检测文本分别作为 CRFs 模型的观察序列和状态序列来计算文本 s 和其余待检测文本间的相关性概率值;然后,将相关性最高的那篇文本和文本 s 合并表征一个类别;同时,将相关性最低的那篇文本作为另一个类别,这样将这两个类别作为 CRFs 模型新的状态序列,剩余的待检测文本作为新的观察序列进行迭代,据此实现敏感话题的识别。在数据集上进行的实验中,该方法的代价函数以及宏平均 F 度量都取得了很好的效果。

参考文献:

[1] 冯颖. 网络舆情敏感话题发现平台的研究[D]. 北京:北京交通大学电子信息工程学院,2009.

[2] ZHANG Kuo, ZI Juan, WU Li-lang. New event detection based on indexing-tree and named entity[C]//Proc of the 30th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information on Retrieval. New York: ACM Press, 2007: 215-222.

[3] 薛晓飞,张永奎,任晓东. 基于新闻要素的新事件监测方法研究[J]. 计算机应用, 2008, 28(11): 2975-2977.

[4] 王颖颖,张骞,胡乃静. 在线新事件检测系统中国的性能提升策略[J]. 计算机工程, 2008, 34(15): 72-74.

[5] ALSUMAIT L S. Online topic detection, tracking and significance ranking using generative topic models[M]. Fairfax: Georage Mason University, 2009.

[6] 闵可锐,赵迎宾,刘昕,等. 互联网话题识别与跟踪系统设计与实现[J]. 计算机工程,2008,34(19):344-352.

[7] 鲁明羽,姚晓娜,魏善岭. 基于模糊聚类的网络论坛热点话题挖掘[J]. 大连海事大学学报,2008,34(4):146-153.

[8] 宁伟,蔡东风,张桂平,等. 基于条件随机场的冠词选择研究[J]. 中文信息学报, 2008, 22(6): 116-122.

[9] SALTON G, BUCKLEY B. Term-weighting approach in automatic text retrieval [J]. Information Processing and Management, 1988,24(5): 513-523.

[10] 薛峰,周亚东,高峰,等. 一种突发性热点话题在线发现与跟踪方法[J]. 西安交通大学学报,2011,45(12):64-70.

[11] LAFFERTY J, McCALLUM A, PEREIRA F. Conditional random fields: probabilistic models for segmenting and labeling sequence data [C]//Proc of the 18th International Conference on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001: 282-289.

[12] 周俊生,戴新宇,尹存燕,等. 基于层叠条件随机场模型的中文机构名自动识别[J]. 电子学报, 2006,34(5):804-809.

[13] NOCEDAL J. Updating quasi Newton matrices with limited storage [J]. Mathematics of Computation, 1980,35(151):773-782.

[14] ALLAN J, FENG Ao, BOLIVAR A. Flexible intrintic of evaluation hierarchical clustering for TDT[C]//Proc of the 12th International Conference on Information and Knowledge Management. 2003: 263-270.

[15] ALLAN J, CARBONELL J, DODDINGTON J, *et al.* Topic detection and tracking pilot study final report[C]//Proc of DARPA Broadcast News Transcription and Understanding Workshop. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998: 194-218.

[16] 殷风景,肖卫东,葛斌,等. 一种面向网络话题发现的增量文本聚类算法[J]. 计算机应用与研究, 2011, 28(1):54-57.

[17] ESTER M, KRIEGEL H P, SANDER J, *et al.* A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases[C]//Proc of International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 1996: 226-231.

[18] 薛玮. 网络舆情信息挖掘系统的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2008.

[19] VITERBI A J. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1967, 13(2): 260-269.

[20] 罗铁坚,王文杰,刘务华. 文本聚类算法的质量评价[J]. 中国科学院研究生院学报,2006, 23(5): 640-646.

(上接第 980 页)

[10] 朱勤, 彭希哲, 吴开亚. 基于投入产出模型的居民消费品载能碳排放测算与分析[J]. 自然资源学报,2012,27(12):2018-2029.

[11] JOHANSSON J. Risk and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures[D]. Lund: Lund University, 2010.

[12] 顾洁, 秦玥, 包海龙,等. 基于熵权与系统动力学的配电网规划动态综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2013(1):1-7.

[13] LEONTIEF W. Input-output economics[M]. Oxford: Oxford University Press, 1986.

[14] EUSGELD I, KROGER W, SANSAVINI G, *et al.* The role of network theory and object-oriented modeling within a framework for the vulnerability analysis of critical infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(5): 954-963

[15] JOHANSSON J, JÖNSSON H, JOHANSSON H. Analysing the vulnerability of electric distribution systems: a step towards incorporating the societal consequences of disruptions[J]. International Journal of Emergency Management, 2007, 4(1): 4-17.

[16] LITTLE R G. A socio-technical systems approach to understanding and enhancing the reliability of interdependent infrastructure systems [J]. International Journal of Emergency Management, 2004, 2(1): 98-110.

[17] EARL E L, JOHN E M, WILLIAM A W. Restoration of services in interdependent infrastructure systems: a network flows approach[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Application and Reviews, 2007, 37(6): 1303-1317.

[18] WINKLER J, DUEÑAS-OSORIO L, STEIN R, *et al.* Interface network models for complex urban infrastructure systems[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2011, 17(4): 138-150.

[19] OUYANG Min, HONG Liu, MAO Zi-jun, *et al.* A methodological approach to analyze vulnerability of interdependent infrastructures[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, 17(5): 817-828.

[20] MOTTER A, NISHIKAWA T, LAI Ying-cheng. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 66(6): 065102.