doi:10.3969/j.issn.1001 - 893x.2013.04.018

基于核与核度理论的网络拓扑结构抗毁性分析*

熊金石**,李建华

(空军工程大学 信息与导航学院,西安 710077)

摘 要:网络抗毁能力是确保信息畅通的重要支撑。给出了网络抗毁性的定义,对网络化信息系统进行图论表示。基于系统的核与核度定义,给出了图的核与核度定义。在此基础上,以某网络化信息系统拓扑结构为例,计算出该网络的核与核度,分析了该网络化信息系统在核度意义下的抗毁性能。计算结果表明,该网络化信息系统不具有核度意义下抗毁性最好的拓扑结构。节点 13 是这个网络化信息系统的"核",应予以重点保护。

关键词:网络化信息系统;抗毁性;图论;核;核度

中图分类号:TN915;TP393 **文献标志码**:A **文章编号**:1001 - 893X(2013)04 - 0467 - 03

Invulnerability Analysis of Networked Information System Topologies Based on Core & Coritivity Theory

XIONG Jin-shi, LI Jian-hua

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Invulnerability of network is the important support for expedite communication. The definition of network invulnerability is given, networked information system is expressed by using graph theory. And on that basis, taking a networked information system topology for example, its core and coritivity are counted, the invulnerability of networked information system in coritivity sense is analyzed. The results indicate that, in coritivity sense, the networked information system topology isn't the best invulnerability topology. Node 13 is the core of this networked information system and it is supposed to be key protected.

Key words: networked information system; invulnerability; graph theory; core; coritivity

随着信息系统的广泛应用,信息系统的安全性成为关注的焦点。系统学认为系统结构决定功能,保持着系统元素之间交互基本性质的网络模型是描述复杂系统的最有效模型[1]。研究网络化信息系统网络模型拓扑结构的抗毁性,对于评估信息系统安全性能具有重要意义。

目前,网络抗毁性研究主要基于两大理论:图论和统计物理[2]。传统图论中有很多图的不变量被用来刻画小规模简单网络的抗毁性,如连通度、坚韧度、完整度、粘连度等。近年来,网络研究的焦点从研究小规模简单网络的精确性质转变为研究大规模复杂网络的统计属性,统计物理的很多方法开始被广泛应用到复杂网络研究中。

1 网络抗毁性

要研究抗毁性问题,首先得搞清楚抗毁性的定义。网络抗毁性(invulnerability)的定义比较多,如美国国家标准化组织给出的抗毁性定义是:在发生自然和人为故障的情况下,网络能够利用各种恢复技术维修或恢复到可接受水平的能力、利用网络的各

* **收稿日期**:2012 - 09 - 28;**修回日期**:2013 - 01 - 28 Received date:2012 - 09 - 28;Revised date:2013 - 01 - 28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174162)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.61174162)
** **通讯作者**:stonedoc@126.com **Corresponding author**: stonedoc@126.com

种预防性技术防止和减缓网络业务损伤的能力。比较公认的定义是 Ellison 等人给出的:网络抗毁性是指网络系统在遭受攻击、故障和意外事故时仍能够及时完成其关键任务的能力。

网络的抗毁性是从图论的概念中提出来的,在通信网可靠性分析中得到了广泛应用[3]。抗毁性从网络连通性的角度描述网络拓扑结构对通信网可靠性的影响,它是可靠性的一种确定性测度,实质是研究网络拓扑结构的可靠性,是网络可靠性的一种静态指标。对于一个网络,抗毁性是指至少需要破坏几个节点或几条链路才能中断部分节点之间的通信,即指出破坏一个网络的困难程度。

2 网络化信息系统的图论表示

网络模型是在合理简化网络化信息系统后,利用适当表现形式对主要特征描绘得到的分析对象。网络模型一般具有 3 种功能[4]:首先,提供一个框架,恰当地整理和统计观察数据,对真实网络的行为、结构和演化做出解释,即解释功能;其次,根据真实网络现在的行为,预测未来行为特性,即预测功能;最后,按照目标规则影响和改变网络行为特性和演化进程,即规范功能。

网络可以用图 $G=(V,E)$表示,假设 G 有 n 个节点,m 条边,用 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$表示 G 的节点集合,$E=\{e_1,e_2,\cdots,e_m\}\subseteq B\times V$ 表示边的集合。图 G 的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}=[a_{ij}]$,其中:

$$a_{ij}=\begin{cases}1, & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 有边相连}\\ 0, & \text{节点 } i \text{ 与节点 } j \text{ 无边相连}\end{cases} \tag{5}$$

矩阵中的各元素为 0 或 1,其中 0 代表两节点之间无直接连接,1 代表两节点之间有直接连接。

3 网络拓扑结构抗毁性测度

抗毁性测度是网络抗毁性的度量指标,选取的指标是否合理对于客观评估网络化指挥信息系统抗毁能力而言是至关重要的[2]。

给定一个图 G,用 $V(G)$和 $E(G)$分别表示它的顶点集合和边集合。图 G 的点割集 $C\subset V(G)$是指去掉顶点子集 C 后,图 G 就不连通了;图 G 的边割集 $C\subset E(G)$是指去掉边子集 C 后,图 G 就不连通了。如果一个图 G 是连通的,那么它的连通性如何?一般的刻画方法是点连通度和边连通度来进行刻画的[5-6]。但是随着问题的深入研究,人们发现连通度并不考虑一旦图被破坏后,余下的子图的连通情况。所以后来人们提出用图的糙度、散度以及完整度来刻画图的连通性,再后来提出了系统的核与核度的方法来刻画图的连通性[7-8]。

首先给出系统的核和核度的定义。

定义 1 对于给定系统 X,假设去掉或者破坏掉该系统的若干个主要素,对于该系统的破坏性最大,则把这"若干个主要素"称为该系统的核,记为 S^*。

定义 2 对于给定系统 X,若该系统的核为 S^*,则记该系统的核度为 $h(X)$:

$$h(X)=\omega(X-S^*)-|S^*| \tag{1}$$

其中,$\omega(X)$表示系统 X 的连通分支数。

准则 1 对于一个给定的系统 X,该系统的核 S^*必须满足:

$$h(X)=\max\{\omega(X-S')-|S'|\} \tag{2}$$

其中,S'是由 X 中若干个主要素构成。

由于网络化信息系统的连通性完全取决于其拓扑图 G 的连通性,而根据网络抗毁性的定义,对于抗毁性度量的选择可采用网络连通性的方法,而网络的连通性又可以用网络的核和核度来刻画。因此,用网络化信息系统所对应的拓扑结构图的核和核度来刻画网络化信息系统的抗毁性问题。

下面给出图的核与核度的定义。

定义 3 对于给定的图 G,定义该图的核度,记为 $h(G)$:

$$h(G)=\max\{\omega(G-S)-|S|;S\in C(G)\} \tag{3}$$

定义 4 对于给定的图 G,若 S^*满足

$$h(G)=\omega(G-S^*)-|S^*| \tag{4}$$

则称 S^*为图 G 的核。其中 $\omega(G)$表示图 G 的连通分支数。

准则 2 对于图 G_1 和 G_2 而言,如果 $h(G_1)<h(G_2)$,则图 G_1 的抗毁性比图 G_2 的高。

准则 3 具有 p 个顶点、q 条边的连通图可具有的最小的核度为(也就是抗毁性最好的图)

$$\min_{G\in G(p,q)}h(G)=2-\left[\frac{2q}{p}\right] \tag{5}$$

其中,q 满足 $p-1\leqslant q\leqslant C_2^p$,并且$[x]$表示小于等于 x 的最大整数。

4 实例分析

图 1 为某网络化信息系统拓扑结构(局部)。其中,圆圈"○"代表各信息实体,连线代表两信息实体之间有直接的信息联系。为方便后续讨论,将各信息实体进行依次编号。

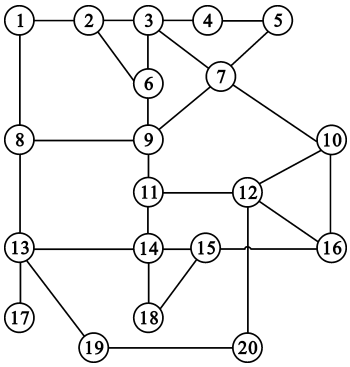

图 1　某网络化信息系统拓扑结构(局部)
Fig.1 Topological structure of a networked information system (partial)

很明显,这是一个由 20 个顶点、29 条边构成的拓扑图。由准则 3,此连通图可具有的最小的核度为(也就是抗毁性最好的图)

$$\min_{G\in G(p,q)} h(G) = 2 - \left[\frac{2q}{p}\right] = 2 - \left[\frac{2\times 29}{20}\right] = 0$$

我们可以计算该网络化信息系统拓扑结构图的核度,由定义 3、定义 4 很容易计算出来:

$$h(G) = \max\{\omega(G-S) - |S|; S\in C(G)\} = \omega(G-S^*) - |S^*| = 2-1 = 1$$

其中,$S^* = \{13\}$,也就是节点 13。

从计算结果可以看出,该网络化信息系统的拓扑结构并不是核度意义下抗毁性最好的拓扑结构。节点 13 对于该系统抗毁性而言是主要的矛盾,是这个网络化信息系统的"核"。一旦该"核"处于瘫痪,信息系统的完整性就遭到破坏,最直观的表现就是节点 17 成为悬浮点,失去与整个系统其他实体之间的联系。

5　结束语

本文从网络化信息系统拓扑结构的完整性出发,引入系统的核与核度理论,对网络化信息系统拓扑结构的抗毁性进行分析。研究结果表明,网络化信息系统的拓扑结构并不是核度意义下抗毁性最好的拓扑结构。这个结论符合网络化信息系统拓扑结构特征与抗毁性的关系,同时要求必须充分重视网络化信息系统核与核度的评估工作。通过尽早发现系统的核与核度,能够采取措施重点保护这些系统的"核"来提高整个网络化信息系统的抗毁性。

本文工作对网络化信息系统拓扑结构设计和功能优化有一定的参考价值和指导意义。本文下一步研究的重点是如何在核与核度理论下,通过优化现有网络拓扑,提高网络化信息系统的抗毁能力。

参考文献:

[1] Albert R,Jeong H,Barabasi A L. Error and Attack Tolerance of Complex Networks[J]. Nature,2000,406(6):378 – 382.

[2] 吴俊, 谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究[J]. 系统工程学报,2005,20(2):128 – 131.
WU Jun,TAN Yue-jin. Study on measure of complex network invulnerability[J]. Journal of Systems Engineering,2005,20(2):128 – 131.(in Chinese)

[3] 路兰, 杨洪勇. 互联网络模型及其抗毁性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2009,39(Sup.1):168 – 171.
LU Lan, YANG Hong-yong. Internet model and survivability analysis[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2009,39(Sup.1):168 – 171.(in Chinese)

[4] 曾宪钊. 网络科学[M]. 北京:军事科学出版社,2007.
ZENG Xian-zhao. Network Science[M]. Beijing: Press of Military Science, 2007. (in Chinese)

[5] 王欣,姚佩阳,周翔翔,等.网络中心战指挥信息系统抗毁性研究[J]. 计算机工程,2011,37(5):97 – 99, 102.
WANG Xin, YAO Pei-yang, ZHOU Xiang-xiang, et al. Research on Command Information System Invulnerability in Network-Centric Warfare[J]. Computer Engineering, 2011, 37(5):97 – 99,102. (in Chinese)

[6] 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. (in Chinese)

[7] 许进. 系统的核与核度理论(VII)—子核与核度的计算[J]. 系统工程学报,1999,14(3):243 – 246, 257.
XU Jin. The Core and Coritivity of a System (Ⅶ) – Sub core and an Algorithm of Coritivity[J]. Journal of Systems Engineering, 1999, 14(3):243 – 246,257.(in Chinese)

[8] 张胜贵, 王自果. 系统的核度与边连通度[J]. 系统工程与电子技术, 1995(6):42 – 49.
ZHANG Sheng-gui, WANG Zi-guo. On the System Coritivity and Edge Connectivity[J]. Systems Engineering and Electronics,1995(6):42 – 49.(in Chinese)

作者简介:

熊金石(1985—),男,湖北随州人,2009 年于空军工程大学获工学硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为信息系统基本理论与规划建设;

XIONG Jin-shi was born in Suizhou, Hubei Province, in 1985. He received the M. S. degree from Air Force Engineering University in 2009. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns basic theory and programming of information systems.

Email:stonedoc@126.com

李建华(1965—),男,陕西白水人,1988 年于空军电讯工程学院获学士学位,1991 年于通信指挥学院获军事学硕士学位,2008 年于空军工程大学获军事学博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为信息系统规划与评估。

LI Jian-hua was born in Baishui, Shaanxi Province, in 1965. He received the B. S. degree from Air Force Telecommunication Engineering College, the M. S. degree from Communication Command College, and the Ph. D. degree from Air Force Engineering University in 1988,1991 and 2008, respectively. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include programming and evaluation of information systems.