

基于熵方法的计算机网络脆弱性检测和优化

吴 杏¹, 曾康铭²

(1 南宁学院 公共教学部, 广西 南宁 530200; 2 南宁学院 信息工程学院, 广西 南宁 530200)

摘 要: 针对计算机网络中的脆弱性问题, 采取网络化的方法分析了计算机网络的脆弱性, 采用熵方法建立模型, 对计算机网络脆弱性进行检测. 然后, 基于模型检测结果提出优化设计方案, 以减低计算机网络的脆弱性. 最后, 通过数值仿真实验验证了提出的方法的实际应用性, 为有效降低计算机网络在级联失效中的脆弱性提供了新而有效的方法.

关键词: 计算机网络, 脆弱性, 熵, 级联失效, 网络优化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)07-0098-04

DOI:10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2016.07.021

Vulnerability Detection and Optimization of Computer Network Based on Entropy Method

WU Xing¹, ZENG Kang-ming²

(1 General Teaching Department, Nanning University, Nanning 530200, China;

2 College of Information Engineering, Nanning University, Nanning 530200, China)

Abstract: Computer network security is an important support for smooth realization of various network applications. This paper adopts the networked method to analyze the vulnerability of computer networks. The entropy method is used to establish the method, and test the vulnerability of computer network. Furthermore, based on the model test results, the optimization design method is put forward to reduce the vulnerability of computer network. Finally, some numerical simulation results are given to verify the practical application value of the proposed method. The research provides a new and effective method for reducing the vulnerability of computer networks during the cascade failure propagation effectively.

Key words: computer network; vulnerability; entropy; cascading failure; network optimization

1 引言

由于网络安全是一个潜在的不可回避的重要问题, 网络威胁变得更加复杂和严重, 所以越来越多的学者开始研究计算机网络的脆弱性^[1-3]. 而且, 随着计算机网络的快速发展, 网络结构日益复杂, 采用传统的网络模型去研究其脆弱性, 已经显得力不从心, 而复杂网络理论是研究复杂系统的一个强而有力的工具^[4-6], 它可以为计算机网络脆弱性的研究提供一个新的角度和方法.

计算机网络安全策略是目前网络领域的管理中的一个非常重要的研究课题. 由于智能算法对网络

规模很大, 链接和节点数目较多的网络非常有效, 为了得到满意的计算机网络优化方案, 文献^[7, 8]采用遗传算法和其改进算法对计算机网络的可靠性规划问题求解. 郭丹城等引入一种粗粒度并行遗传算法, 从网络可靠度的角度求解优化问题, 进一步比较传统算法和提出的新算法, 验证了该算法的优越性^[9]. 也有一些学者利用不同的智能算法, 诸如模拟退火算法、遗传算法、蚁群群算法等对计算机网络安全问题分析、求解和比较^[10-11]. 此外, 也有研究结合例图和复杂网络理论, 对软件系统的复杂网络特性提出度量方法并给出具体算法进行实例验证^[12]. 或者研究中利用复杂网络方法研究大型软件系统, 并对其

收稿日期: 2015-10-08; 修回日期: 2015-11-22

进行度量^[13].

以往研究从不同的角度和方法对计算机网络的安全进行了探究,然而,计算机网络的最显著的特点是开放性,这样在级联失效下更容易造成巨大损失.级联失效问题在其他应用领域成为一个热点^[14-16].本文基于复杂网络理论研究计算机网络中的脆弱性问题,引入网络化的方法构建计算机网络结构,结合熵方法的优势建立模型,对计算机网络脆弱性进行定量的评估和检测.然后,以提高计算机网络的安全性,降低级联传播所造成的重大损失为目的,基于模型检测结果提出优化的弹性设计方案.最后,结合案例进行数值仿真,结果证明了本文所提方法的正确性以及实际应用价值,为计算机网络的脆弱性研究提供了新的途径.

2 计算机系统的网络描述

复杂网络理论已成为各个不同的学科领域重要的研究方法和分析手段,在网络化方法中,一个网络被看做由很多个节点,以及连接这些节点的边所组成,其中边可以体现网络节点之间的关系,节点表示相应复杂系统中不同的成员.对于计算机复杂系统,可以抽象成为由一些自主工作的计算机,以及相互连接它们的各种通信协议和物理载体所组成的计算机网络,从而把相应的结构称作计算机网络的拓扑结构.本文研究则是把计算机复杂系统视为具有复杂拓扑结构和拥有复杂的动力学行为的计算机网络模型.

有效正确的网络管理可以保障计算机网络的正常运行.不同于传统方法中基于结构简单的随机网络刻画计算机网络结构,现实生活中规模和用户较大,而且关联复杂、联系紧密,计算机系统中用户之间的竞争合作、网络攻击等各方面都使得计算机复杂系统已经不适合于用以往的随机模型来描述.在计算机网络中,节点可能包括用户或者组织,边代表两成员之间的关系合作竞争关系.如图1所示,计算机系统中的用户通过又由于他们之间的某种特定合作关系,而产生了具备其自身特征的子系统,如 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 .

根据计算机系统的特征,把图1的系统结构图抽象为网络图的表示方式: $G = (C, L)$.其中计算机系统成员构件集合 $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}\}$.

另外,由于计算机系统成员构建关系类型多样,而且关系之间权重难以统一单位,这里网络拓扑图仅侧重于成员构建之间的关联情况,网络化结构如图2所示.

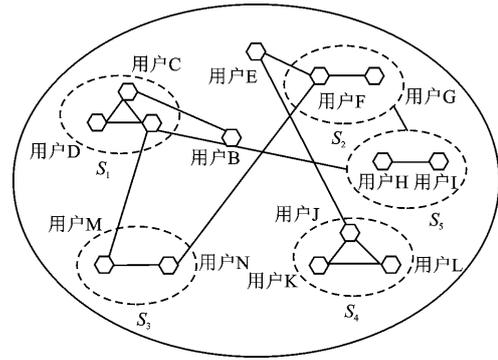


图1 计算机复杂系统的简化结构图

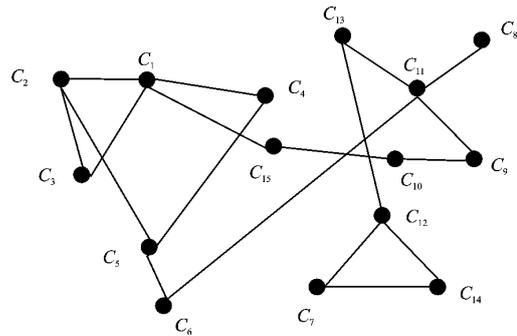


图2 计算机网络的简化拓扑图

从分析中得到,图2中15个节点的网络度分别为: $k_1 = 4, k_2 = 3, k_3 = 2, k_4 = 2, k_5 = 2, k_6 = 2, k_7 = 2, k_8 = 1, k_9 = 2, k_{10} = 2, k_{11} = 4, k_{12} = 3, k_{13} = 2, k_{14} = 2, k_{15} = 2$.其中,有1个节点的度为1,两个节点的度为4,其余节点的度都为2.

3 基于计算机网络信息熵的脆弱性评估模型

3.1 计算机网络的信息流量熵

熵可以刻画复杂系统能力分布的均匀性,因而也能够体现系统所处的状态的稳定性,以及复杂系统的变化趋势.一般来说,对于能力分布越均匀的复杂系统,它的熵越大,反之,当复杂系统分布越异质时,相应的熵会越小.熵定义为

$$E_k = - \sum_{k=1}^{N-1} r(k) \log r(k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中, $r(k)$ 指度为 k 的节点数目在网络节点中所占的比例, N 为复杂网络中节点的总数量.

通过式(1),熵 $E(k)$ 能够从网络度分布的角度描述网络整体的不确定程度.考虑到计算机网络的每个主体不可能无止境地承担信息流量,而应该有各自最大的承受范围,为了全面地刻画计算机网络的特征,并对其脆弱性进行预测和控制,这里引入经过节点的最短路径介数,来定义不同节点 i 的信息

传递流量如下：

$$FL_i = \gamma f_i + (1 - \gamma) \sum_{j \in \Omega_i} f_j \quad (2)$$

这里

$$f_i = \frac{\sum_{j \neq k \in C} m_{jk}(i)}{n(n-1)} \quad (3)$$

式中, $m_{jk}(i)$ 表示节点 C_j 和 C_k 之间经过节点 C_i 的最短路径的数量, m_{jk} 表示节点 C_j 和 C_k 上的所有最短路径的数量, 式(2)中参数 γ 为权重系数, 模型中用来刻画相应计算机网络的信息流量分配比例. 此外, 定义节点的所承担的最大的信息流量负载为

$$\begin{aligned} MFL_i &= (1 + \rho) FL_i \\ &= (1 + \rho) \left[\gamma f_i + (1 - \gamma) \sum_{j \in \Omega_i} f_j \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, 参数 ρ 为计算机网络的耐受性参数, 该参数值体现了网络节点对于信息流量负载的最大承受能力. 进一步, 由式(2)和式(3), 进一步定义计算机网络模型的信息熵为

$$\begin{aligned} E_i &= - \sum_{k=1}^{N-1} r(i) \log r(i), \quad i = 1, 2, \dots, N \\ &= - \sum_{k=1}^{N-1} \left[\gamma f_i + (1 - \gamma) \sum_{j \in \Omega_i} f_j \right] \log \left[\gamma f_i + (1 - \gamma) \sum_{j \in \Omega_i} f_j \right], \\ &= - \sum_{k=1}^{N-1} \left[\gamma \frac{\sum_{j \neq k \in C} m_{jk}(i)}{n(n-1)} + (1 - \gamma) \sum_{j \in \Omega_i} \frac{\sum_{i \neq k \in C} m_{ik}(j)}{n(n-1)} \right] \\ &\quad \log \left[\gamma \frac{\sum_{j \neq k \in C} m_{jk}(i)}{n(n-1)} + (1 - \gamma) \sum_{j \in \Omega_i} \frac{\sum_{i \neq k \in C} m_{ik}(j)}{n(n-1)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

在式(5)中, 充分利用计算机网络各个节点之间关联所构成的网络拓扑特征, 定义计算机网络的信息熵. 由于在现实计算机复杂系统中, 难以获取系统实际的信息负载情况, 本文基于网络拓扑结构的信息流量熵, 来研究计算机网络的脆弱性是有依据, 且合理有效的.

3.2 计算机网络的脆弱性评估

当节点 C_i 失效, 可能会导致网络中其他节点失效, 整个计算机网络的拓扑结构将随之发生改变. 假设级联失效结束后, 网络中剩余有效节点集合为 C' , 利用失效前后网络上信息流量熵分布的改变来衡量计算机网络的脆弱性, 即

$$R = 1 - \frac{\sum_{m \in C'} \tilde{E}_m}{\sum_{m \in C} E_m} \quad (6)$$

式(6)中, E_m 和 \tilde{E}_m 分别是计算机网络级联失效

前后, 由节点 C_m 故障所触发相应网络承担的信息流量熵. 显然, 当 $R \approx 1$ 时, 计算机网络遭受到严重破坏, 几乎崩溃; 而当 $R \approx 0$ 时, 网络遭受很小的影响, 几乎是正常的.

4 计算机网络脆弱性的仿真分析

随着计算机技术的大力发展, 某城市在省经济扶持下开发了网络商城空间信息服务系统, 其中包括农业、水利、服饰、装修材料、饮食、日用品等六个子系统, 分别为不同行业服务. 由于网络商城信息服务部的开发, 使得不同服务部门相互之间能够及时了解信息和共享信息. 由于该网络系统规模较大, 本文的实证研究基于该系统中基于服务平台和管理平台的主要成员. 仿真实验中使用 65 个节点所构成的网络拓扑.

基于上述计算机网络的脆弱性评估模型, 在数值仿真中, 通过移除关联最多的节点引发级联失效传播现象, 进而分析对计算机网络的脆弱性的影响, 得到仿真实验结果如如图 3~5 所示. 图 3~5 分别给出耐受参数 ρ 分别取 0.0, 0.1, 0.3 时, 节点失效所带来计算机网络脆弱性的不同影响. 从图 3~5 可

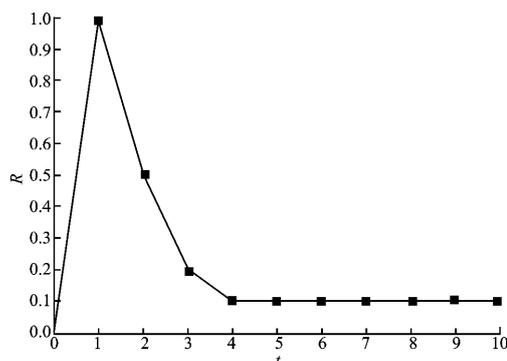


图 3 当 $\rho=0.0$ 时, 计算机网络度量指标 R 和运行时间 t 的关系

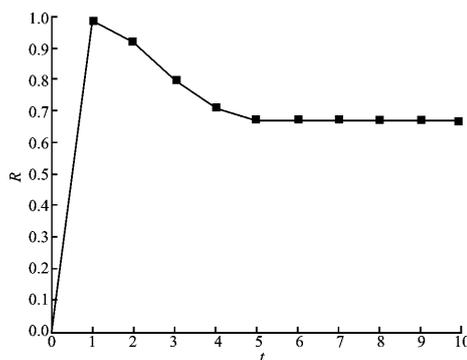


图 4 当 $\rho=0.1$ 时, 计算机网络度量指标 R 和运行时间 t 的关系

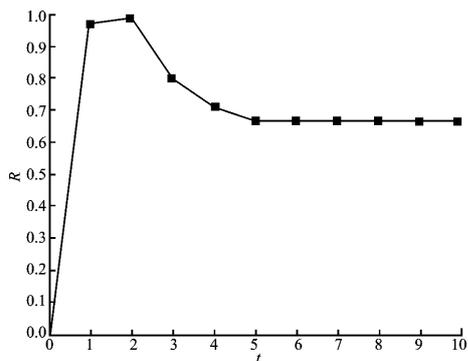


图5 当 $\rho=0.3$ 时,计算机网络度量指标 R 和运行时间 t 的关系

可以看出,耐受参数值和计算机网络脆弱性紧密相关。比图3,图4和图5,耐受参数 ρ 的值越小,节点失效给计算机网络带来的拓扑结构,以及信息流量负载分布带来的改变更大。 ρ 越小,计算机网络越脆弱,为了优化计算机系统的脆弱性,对该参数下的资源分配和管理优化。这对计算机网络安全管理和资源规划具有很好的指导作用。

此外,图3~5给出了 $\rho=0.0,0.1,0.3$ 的情况下,计算机网络在级联失效传播中计算机网络脆弱性度量指标 R 随时间 t 的变化曲线。可以看出,在故障初期 R 的变化很大,急剧增加,然后渐渐趋于稳定值。根据现实计算机系统的实际情况,一旦出现故障整个网络非常不稳定,如果相关网络部门能够及时解决,会逐渐稳定,只是网络性能会根据不同情况有一定下降。因此,本文提出的计算机网络模型能够有效地刻画计算机网络的脆弱性,为深入研究大规模计算机复杂系统的脆弱性,解决目前存在的诸多安全隐患问题提供了新的思路和新的方法。

5 结束语

本文利用复杂网络理论,把计算机复杂系统看做由不同类型节点和节点之间各种关联构成的网络,从其拓扑结构的角度建立网络模型,对计算机网络脆弱性进行检测。利用建立的模型进行案例分析,仿真实验结果证明了所提方法可以很好地检测计算机网络的脆弱性,并得到对模型中参数进行优化能够有效降低计算机网络在级联失效中的脆弱性,本文研究结果有助于计算机网络的深入研究,为提高计算机系统的安全提供了新的途径。

参考文献:

[1] H Haroonabadi, M R Haghifam. Generation reliabili-

ty assessment in power markets using monte carlo simulation and soft computing[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8): 5292-5298.

- [2] S G Chen, Y K Lin. Search for all minimal paths in a general large flow network[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(4): 949-956.
- [3] 李扬. 基于智能计算的计算机网络可靠性分析研究[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(8): 77-82.
- [4] 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.
- [5] 刘志谦, 宋瑞. 基于复杂网络理论的广州轨道交通网络可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 194-200.
- [6] 苏慧玲, 李扬. 从电力系统复杂网络特征探讨元件的脆弱性[J]. 电力系统自动化, 2013, 36(23): 12-17.
- [7] 叶剑, 席裕庚, 曲润涛. 基于遗传算法的可靠性网络规划设计[J]. 通信技术, 1999, 32(2): 15-16.
- [8] 到强, 李积源. 基于遗传算法的通信网络可靠性优化设计[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(6): 102-106.
- [9] 郭丹城, 慕春隶. 并行遗传算法在一类计算机网络可靠性优化问题中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(1): 31-36.
- [10] 高尚, 杨静宇, 吴小俊. 可靠性优化的蚁群算法[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(12): 94-96.
- [11] W C Yeh, Y C Lin, Y Y Chung, et al. A particle swarm optimization approach based on monte carlo simulation for solving the complex network reliability problem[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(1): 212-216.
- [12] 秦怀斌, 郭理. 基于用例图的软件系统复杂网络特性度量[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(7): 72-75.
- [13] 王树林, 顾庆, 陈焘, 等. 基于复杂网络的大型软件系统度量[J]. 计算机科学, 2009, 36(2): 287-290.
- [14] 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.
- [15] 段东立, 吴俊, 邓宏钟, 等. 基于可调负载重分配的复杂网络级联失效模型[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 203-208.
- [16] 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.

作者简介:

吴杏女, (1982-), 硕士研究生, 副教授, 信息系统项目管理师. 研究方向为普适计算、计算机网络技术.

E-mail: 109709526@qq.com.

曾康铭 男, (1983-), 硕士, 工程师. 研究方向为计算机网络技术.