



Linux 软件网络的结构属性及静态稳健性

王尔申¹, 李宇¹, 宏晨^{2,3}, 孙庆华^{2,3}, 刘畅^{2,3}

(1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136 ;

2. 北京联合大学北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101 ;

3. 北京联合大学机器人学院, 北京 100101)

摘 要: 通过对 Linux 软件源码分析, 分别构建基于函数调用的有向软件网络模型、软件系统的弱耦合网络模型、强耦合网络模型以及强连通子图模型, 并对 4 种网络模型的结构属性及静态稳健性进行研究。研究结果表明, 4 种网络都是“小世界”网络; Linux 网络中 6 个功能模块的出度分布遵循指数分布, 入度分布遵循幂律分布; 选取不同的网络稳健性评价指标, 其最佳的攻击策略存在差异; 对于弱连通稳健性指标, 高入度攻击策略对弱耦合软件网络的破坏最大。

关键词: 软件网络; 网络属性; 网络稳健性; 复杂网络; 耦合网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019273

Structural properties and static robustness of Linux software network

WANG Ershen¹, LI Yu¹, HONG Chen^{2,3}, SUN Qinghua^{2,3}, LIU Chang^{2,3}

1. School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2. Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China

3. College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100101, China

Abstract: The source code of the Linux software was analyzed, and the directed function call network model, the weak coupling network model of software system, the strong coupling network model and the strong connected subgraph model were built. The characteristics and static robustness of the four networks were studied. The results show that four networks all show ‘small-world’ property. The out-degree distribution of the six modules in the Linux network generally

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-10-22

通信作者: 宏晨, hchchina@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571309, No.61841601); 辽宁“百千万人才工程”项目 (No.04021407); 辽宁省自然科学基金资助项目 (No.2019-MS-251); 辽宁省教育厅项目 (No.L201705, No.L201716); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划基金资助项目 (No.LR2016069); 北京市教育委员会科技计划一般项目 (No.KM201811417005, No.KM201711417011, No.KM201911417010); 科技创新 2030——“新一代人工智能”重大项目 (No.2018AAA0100800)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571309, No.61841601), Liaoning Baiqianwan Talents Program (No.04021407), Natural Science Foundation of Liaoning Province (No.2019-MS-251), Scientific Study Project for Liaoning Province Ministry of Education (No.L201705, No.L201716), Liaoning Excellent Talents in University (No.LR2016069), The Beijing Municipal Education Commission Science and Technology Project (No.KM201811417005, No.KM201711417011, No.KM201911417010), The Major Project of Technological Innovation 2030 – “New Generation Artificial Intelligence” (No.2018AAA0100800)



follows the exponential distribution, and the in-degree distribution of the six modules follows the power law. The best attacking strategy was distinct when different robustness evaluation indicator was adopted. For the weak connectivity indicator, high in-degree attacking strategy was of the greatest damage to the weakly coupled software network.

Key words: software network, network property, network robustness, complex network, coupled network

1 引言

复杂网络作为网络科学领域的一个重要研究方向,近年来受到许多研究人员的关注。自然界以及社会经济中的许多复杂系统都可以用复杂网络来描述^[1-4],如计算机网络、航空网络、蛋白质网络、食物链网络等。软件系统是典型的人工复杂系统,现有软件结构复杂性的研究大多基于复杂网络理论对软件系统进行分析^[5-6]。2002年,Valverde^[7]首次构建软件系统网络模型,研究发现软件网络具有明显的“小世界”和“无标度”特性。Myers等^[8]也构建有向网络来表示软件系统的结构,分析软件网络的结构特性,同样得出软件网络具有“小世界”和“无标度”特性。Gao等^[9]将Linux的内核作为复杂网络进行分析,结果表明出度分布服从指数分布,入度分布服从幂律分布。Wang等^[10]分析Linux组件的拓扑耦合关系,结果表明每个组件连接到驱动程序耦合边的数量最多。Xiao等^[11]研究不同版本的Linux操作系统的演变,研究结果发现Linux操作系统网络的大小几乎呈线性增长,而聚类系数单调衰减。Zheng等^[12]从复杂网络的角度研究FreeRTOS(一种无人机实时操作系统),研究结果表明随着版本的发展,FreeRTOS网络的规模几乎呈线性增长。何鹏等^[13]从分组、类和特征3个粒度上构建软件系统的网络模型并分析软件系统演化规律,结果表明分组粒度下系统演化对软件质量影响不大。潘浩等^[14]在代码的层面上对软件网络分形结构特征进行研究,结果表明软件网络的分形维数随着模块功能复杂程度的增加而增加。

近年来,随着对复杂系统安全性需求的日益提升,复杂网络的稳健性被广泛研究^[15-16]。

Bellingeri等^[17]研究了针对3个实际网络(Gnutella对等网络、邮件网络、免疫球蛋白网络)的攻击策略,结果表明3种网络采用介数中心性递减顺序删除节点为最有效的攻击策略。Nie等^[18]提出RDB(recalculated degree and betweenness)和IDB(initial degree and betweenness)两种攻击策略研究网络的稳健性,实验结果表明WS(watts-strogatz)小世界网络对所提出攻击策略更加敏感。孙昱等^[19]提出了基于禁忌搜索的模型求解算法。在真实网络上的实验结果表明,该策略比其他复杂网络节点攻击策略更为有效。韩丽等^[20]提出一种参数可调的级联失效模型并且对该模型进行研究,结果表明该模型能够准确分析级联失效的各个参数之间的变化,在此基础上,能够增强网络的稳健性。畅兴平等^[21]对确定性复杂网络模型进行了研究,结果表明,在随机打击下该网络具有很强的稳健性。彭兴钊等^[22]构建了双层相依网络级联故障模型并且研究外部度和内部度对负荷贡献比的影响,结果表明当外部度和内部度对负荷贡献比达一定值时,此时相依网络抵抗级联故障的稳健性最强。Cheng等^[23]研究不同类型网络耦合的稳健性,研究结果表明不同类型的耦合网络比相同类型的耦合网络更脆弱。王建伟等^[24]构建相互依赖网络的级联故障负荷模型,分析具有不同耦合模式下的相互依赖网络稳健性,结果表明网络间的连接方式会影响相互依赖网络的稳健性。Wang等^[25]设计一种数值评估相互依赖网络社团稳健性的方法,结果表明该方法对于提高网络社团的稳健性具有一定参考价值。Cui等^[26]研究如何合理地分配有限的成本,实验结果表明添加连接链路可以为相互依赖的网络带来更强的稳健性。李从东等^[27]构建基于介数

耦合的相依网络级联故障模型并研究不同耦合模式下相依网络稳健性规律, 结果表明同配耦合相依网络的稳健性最高。

软件网络的稳健性指软件系统在受到扰动时保持其功能的能力, 是其在异常和危险情况下生存的关键。王小龙等^[28]提出一种软件动态执行加权网络的建模方法, 从动态的角度对其进行分析, 结果表明入点强度大小是影响软件动态执行网络级联故障的关键因素。马迎辉等^[29]利用复杂网络中 SIR (susceptible-infected-removed) 模型对网络化软件上的异常行为传播过程进行分析, 结果表明当传染概率一定时, 异常行为的传播指数随着聚类系数的增加而变小。Wang 等^[30]从复杂网络的角度研究 Linux 内核中的部分管理模块的稳健性, 仿真结果表明临界去除率 (critical removal ratio, CRR) 与平均度呈正相关。周宽久等^[31]基于 CML (coupled map lattice) 相继故障模型研究了软件系统在受到外部干扰时的故障规模, 结果表明点强度越大, 软件系统的故障规模就越大。Ai 等^[32]构建了结构化软件的复杂网络模型, 分析软件网络结构与软件故障传播之间的关系, 提出了基于故障传播的经验关系模型, 为分析软件系统中的故障传播提供了理论依据。

目前, 尚缺少以耦合网络的角度对复杂软件系统特性的深入研究。本文基于开源软件 Linux 源码构建函数调用有向软件网络模型, 在此基础上构建软件系统弱耦合网络模型、强耦合网络模型以及强连通子图模型, 并对 4 种网络的结构属性以及静态稳健性进行研究。

2 Linux 软件网络

2.1 模型

(1) Linux 的函数调用网络

将 Linux 软件源代码中的函数抽象为节点, 函数之间的调用关系抽象为有向边, 网络中节点间的“相连”与“不相连”对应着源码里函数间的“调用”与“不调用”关系。构建基于函数调用的有向软件网络模型具体过程如下。

步骤 1 下载 Linux-2.0.1 源码, 使用 Cflow 工具软件得到函数调用关系。

步骤 2 使用 tree2dotx 工具将函数调用关系转换为 .dot 格式文件。

步骤 3 用 Gephi 工具打开 .dot 格式文件, 得到 Linux 函数调用的有向软件网络图, 共 8 643 个节点, 31 562 条边。图 1 为 Linux-2.0.1 局部的函数调用关系, 其中, 图 1 (b) 中点的大小代表软件网络中度

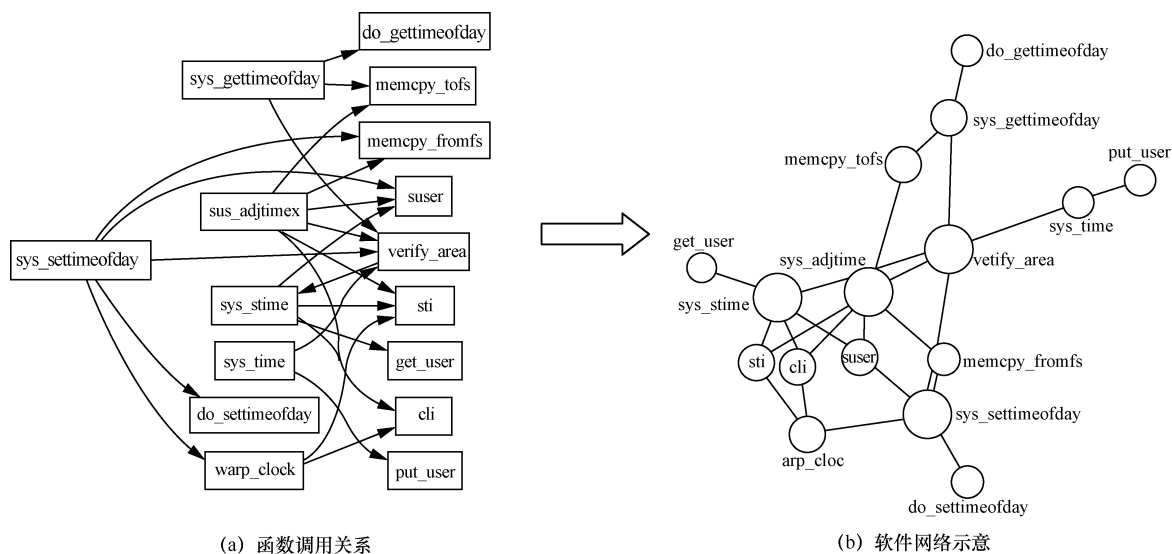


图 1 Linux-2.0.1 局部的函数调用关系



的大小,图2(a)为Linux的函数调用网络(function call network of Linux, FCNL)的结构示意。

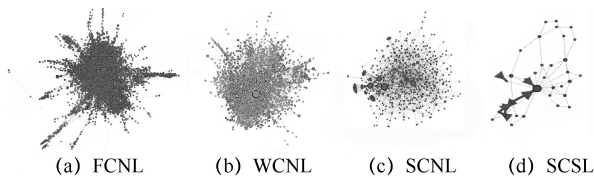


图2 Linux软件中4种网络的结构示意

(2) Linux的弱耦合网络

根据Linux软件中各个功能模块间的联系,构建弱耦合软件网络模型。Linux软件由6个功能模块组成,各模块间的关联关系通过耦合节点建立,将耦合节点提取,共635个耦合节点,将635个耦合节点在总的边依赖关系中用斜体字标记,图3为Linux软件系统得到的耦合网络的示例。弱耦合网络为source node与target node两列中都不含有耦合节点的边去掉,将pal_init和halt节点及其连边去掉,剩余的节点及连边组成弱耦合网络,即弱耦合网络中每条边至少包含一个耦合节点。耦合节点cleanup_module与printk通过普通节点load建立联系,弱耦合网络中只有一部分节点是耦合节点,另一部分节点属于非耦合节点。弱耦合网络共有5282个节点,16763条边。图2(b)为弱耦合网络(weakly coupled network of Linux, WCNL)的结构示意图。

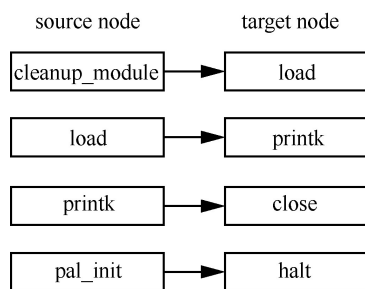


图3 Linux软件系统得到耦合网络的示例

(3) Linux的强耦合网络

在已有Linux弱耦合网络模型的基础上, Linux的强耦合网络(strongly coupled network of Linux, SCNL)为只保留printk与close这种耦合

节点形成的网络,即保留两端节点均为耦合节点的边。强耦合网络的每个节点都属于耦合节点,共528个节点,1946条边。图2(c)为SCNL的结构示意图。

(4) Linux的强连通子图

Linux强连通子图(strongly connected subgraph of Linux, SCSL)指网络中任意一对节点 u 和 v ,既存在一条从节点 u 到节点 v 的有向路径,也存在一条从节点 v 到节点 u 的有向路径。将Linux函数调用有向软件网络中的强连通子图提取,共36个节点、69条边。图2(d)为SCSL的结构示意图。

2.2 攻击策略

为了研究软件网络静态稳健性,本文引入如下攻击策略。

(1) HODS策略

在有向网络中,节点 i 的出度 k_i^{out} 指 i 指向其他节点的边的数目。给定一个包含 N 个节点的有向网络 G ,记 $A=(a_{ij})_{N \times N}$ 为该有向网络对应的邻接矩阵,如果有从节点 i 指向节点 j 的边,则 $a_{ij}=1$,否则 $a_{ij}=0$ 。节点 i 的出度通过邻接矩阵表示为 $k_i^{\text{out}}=\sum_{j=1}^N a_{ij}$ 。在HODS策略(high

out-degree strategy)中,将初始网络中节点的出度由大到小排序,出度大的节点先移除,节点移除时该节点的连边也同时移除。

(2) HIDS策略

在有向网络中,节点 i 的入度 k_i^{in} 指从其他节点指向节点 i 的边的数目。节点 i 的入度通过邻接矩阵表示为 $k_i^{\text{in}}=\sum_{j=1}^N a_{ji}$,在HIDS策略(high

in-degree strategy)中,将初始网络中节点的入度由大到小排序后依次移除。

(3) RS策略

在RS策略(random strategy)中,随机选择网络中的节点进行移除。

(4) HAS 策略 (high authority strategy)

在超文本敏感标题搜索 (hyperlink-induced topic search, HITS) 算法中, 每个节点有两个度量值: 权威性 (authority) 指标和枢纽性 (hub) 指标。给定一个包含 N 个节点的有向网络, 记 $A=(a_{ij})_{N \times N}$ 为该有向网络对应的邻接矩阵, 当且仅当有一条从节点 i 指向节点 j 的有向边, 则 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。HITS 策略 (high authority strategy) 中权威值描述如下。

步骤 1 初始步。设定初始网络中所有节点的权威值和枢纽值的初始值为 $x_i(0), y_i(0), i=1, 2, \dots, N$ 。

步骤 2 迭代过程。在第 k 步 ($k \geq 1$) 进行如下操作。

权威值校正规则: 每一个节点的权威值校正为指向它的节点的枢纽值之和, 即:

$$x'_i(k) = \sum_{j=1}^N a_{ji} y_j(k-1) \quad (1)$$

权威值归一化:

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k)}{\|x'(k)\|} \quad (2)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N$ 。HAS 策略是通过超文本敏感标题搜索算法将初始网络中节点的权威值计算出来, 然后由大到小排序后依次移除。

(5) HHS 策略

HITS 算法枢纽值描述如下。

步骤 1 初始步。设定初始网络中所有节点的权威值和枢纽值的初始值为 $x_i(0), y_i(0), i=1, 2, \dots, N$ 。

步骤 2 迭代过程。在第 k 步 ($k \geq 1$) 进行如下操作。

枢纽值校正规则: 每一个节点的枢纽值校正为它所指向的节点的权威值之和, 即:

$$y'_i(k) = \sum_{j=1}^N a_{ij} x'_j(k) \quad (3)$$

枢纽值归一化:

$$y_i(k) = \frac{y'_i(k)}{\|y'(k)\|} \quad (4)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N$ 。HHS 策略 (high hub strategy) 是通过 HITS 算法将初始网络中节点的枢纽值计算出来, 然后由大到小排序后依次移除。

(6) HPS 策略

PageRank 算法步骤可简述如下。

步骤 1 初始步。初始时刻给定所有节点的初始 PageRank (简称 PR) 值 $PR_i(0), i=1, 2, \dots, N$ 满足 $\sum_{i=1}^N PR_i(0)=1$, 其中 $i=1, 2, \dots, N$ 。

步骤 2 PageRank 校正规则。把每个节点在第 $k-1$ 步时的 PR 值平分给它所指向的所有节点。即如果节点 i 的出度为 k_i^{out} , 那么节点 i 所指向的每一个节点分得的 PR 值为 $PR_i(k)=PR_i(k-1)/k_i^{out}$ 。每个节点新的 PR 值为其所获得的 PR 值之和。在此基础上, 引入一个随机跳转概率 s 。每一步, 其 PR 值以 s 的概率均分给网络的所有节点, 以 $1-s$ 的概率均分给指向它的节点, 以保持网络总 PR 值为 1, 即有:

$$PR_i(k) = (1-s) \sum_{j=1}^N a_{ji} \frac{PR_j(k-1)}{k_j^{out}} + \frac{s}{N} \quad (5)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N$ 。在 HPS 策略 (high pagerank strategy) 中, 将初始网络中节点的 PR 值由大到小排序后依次移除。

(7) HDS 策略

依赖度: 设 $x, y \in V(G)$, 如果从 x 到 y 有一条任意长度的有向路径, 那么称 x 可以到达 y 。 $T(x)$ 表示网络 G 中 x 可以到达的所有节点 (不含 x) 的集合。节点 x 的依赖度定义为集合 $T(x)$ 中元素的个数, 记为 $D_G(x)=|T(x)|$ 。在 HDS (high dependency strategy) 策略中, 将初始网络中的节点按照其依赖度由大到小排序后依次移除。



(8) HIS 策略

影响度：设 $x, y \in V(G)$ ，如果从 y 到 x 有一条任意长度的有向路径，那么称 y 可以到达 x 。 $D(x)$ 表示网络 G 中可以到达 x 的所有节点（不含 x ）的集合。节点 x 的影响度定义为集合 $D(x)$ 中元素的个数，记为 $I_G(x) = |D(x)|$ 。在 HIS (high influence strategy) 策略中，将初始网络中的节点按照其影响度由大到小排序后依次移除。

Linux 网络中局部函数攻击策略具体算法模拟流程如图 4 所示。假设选取 HODS 策略攻击 Linux 网络，即 `vsprintf` 节点遭受攻击（如图 4 (a) 所示），节点 `vsprintf` 失效的同时，与节点 `vsprintf` 直接相连的边也随之失效（如图 4 (b) 所示）。软件网络中相关函数的依赖度和影响度可能会受影响，函数的调用链路可能会中断，从而造成软件故障的全局性传播。计算每次节点攻击后网络的弱连通子图与强连通子图相对值，该攻击过程反复进行，直到网络崩溃。如果采用随机攻击策略 (RS) 攻击 Linux 网络，假设 `skip_atol` 遭受攻击，显然不会对软件网络造成很大的破坏。如果 Linux 软件系统中的重要函数遭受攻击（如病毒、木马等），会导致软件系统中某些模块不能正常运行，如果能够提前对这些重要函数进行测试，就可以提高软件系统的稳健性。此外，当对软件操作系统进行设计时，可以帮助开发人员了解软件中的

具体函数结构，从而提高软件系统稳定性。

2.3 网络稳健性评价指标

本文采用有向网络弱连通指标 W 和强连通指标 S 衡量软件网络的静态稳健性。

弱连通指标：网络遭攻击后的最大弱连通子图的节点个数 N_w 与初始网络节点的总数 N 的比值，即 $W = N_w / N$ 。弱连通子图是指在有向网络 G 中的所有有向边都看作无向边后得到的连通子图。弱连通指标 W 的值越大，网络的稳健性就越强。

强连通指标：网络遭攻击后的最大强连通子图的节点个数 N_s 与初始网络节点的总数 N 的比值，即 $S = N_s / N$ 。强连通子图是指在有向网络 G 中，任意两个节点 u 和 v ，既存在一条从节点 u 到节点 v 的有向路径，也存在一条从节点 v 到节点 u 的有向路径。强连通指标 S 的值越大，则网络的稳健性就越强。

3 仿真结果与分析

首先，列出 FCNL、WCNL、SCNL 与 SCSL 4 种网络的结构属性见表 1，其中 N 为网络节点数， M 为网络边数， $\langle k \rangle$ 为网络平均度， $\langle L \rangle$ 为网络平均路径长度， C 为网络聚类系数， d 为网络直径^[3]， $\langle I \rangle$ 为网络平均影响度， $\langle D \rangle$ 为网络平均依赖度。随着网络规模的不断减少，FCNL 与 WCNL 网络的平均路径长度 $\langle L \rangle$ 变化

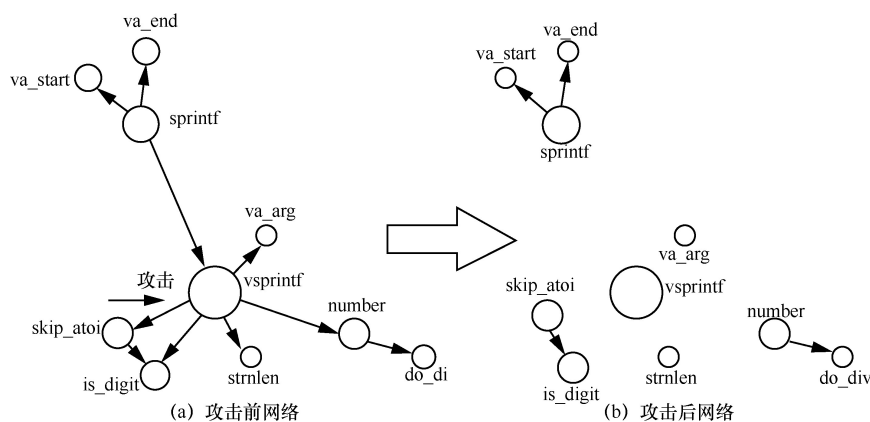


图 4 Linux 网络中局部函数攻击策略具体算法模拟流程

表 1 4 种网络的结构属性

网络	N	M	$\langle K \rangle$	$\langle L \rangle$	C	d	$\langle I \rangle$	$\langle D \rangle$
FCNL	8 643	31 562	6.785	6.960	0.136	13	86.986	86.986
WCNL	5 282	16 763	5.620	6.950	0.105	10	71.441	71.441
SCNL	528	1 946	5.689	3.213	0.066	7	12.680	12.680
SCSL	36	69	3.389	7.583	0.108	5	35	35

较小, 减少了 0.01; 平均聚类系数 C 变化较大, 减少了 0.31, 见表 1。SCNL 网络的平均路径长度小于 3.3, 聚类系数大于 0.06, 明显具有较小平均路径长度与较高聚类系数, 即“小世界”特征。另外, SCSL 网络规模最小, 只有 36 个节点, 但平均路径长度 $\langle L \rangle$ 最大为 7.583, 同样明显具有“小世界”特征。4 种网络中 SCNL 网络的平均路径长度 $\langle L \rangle$ 最小为 3.213, 表明该网络间函数调用效率较高, 函数间连接相对较强。每个网络的平均影响度与平均依赖度均相等, 其中 FCNL 网络的平均依赖度和平均影响度最大为 86.986, 表明该网络的复杂性明显高于其他网络。

FCNL 网络中各个模块的结构属性见表 2。FCNL 网络由 6 个功能模块组成, 此处 d 为每个软件模块中最大连通子图的直径。由表 2 可以得出 6 个功能模块中最大聚类系数为 0.080, 远小于整个 FCNL 网络聚类系数 (0.136), 表明各个模块之间相互耦合才提高整个 FCNL 网络的聚类系数。drivers 是 FCNL 网络第一大功能模块, 比最小的功能模块 kernel 大 20 倍左右, 相对于整个

FCNL 网络, drivers 功能模块的平均路径长度、聚类系数、网络直径、平均影响度和平均依赖度均有显减少, 说明 drivers 功能模块的复杂性明显低于整个 FCNL 网络。另外, mm 功能模块的聚类系数 C 最小, 表明其相邻函数之间的紧密程度较低。

度分布是网络最基本的拓扑特性。FCNL 网络中 6 个功能模块的度分况如图 5 所示。结果表明, FCNL 网络中 6 个功能模块的出度分布遵循指数分布如图 5 (a) 所示, 入度分布遵循幂律分布如图 5 (b) 所示。

FCNL 网络在 8 种攻击策略下稳健性指标 (弱连通指标 W 和强连通指标 S) 与攻击比率 $f = N' / N$ 的关系如图 6 所示, N' 代表被攻击节点的总数, N 代表初始网络的节点总数。由图 6 可得, 随着 f 值的增加, 网络的稳健性指标逐渐减少。对于弱连通指标 W , HIDS 攻击策略最好, 当 $f > 0.65$ 时, FCNL 网络完全崩溃 (如图 6 (a) 所示); 对于强连通指标 S , HODS 攻击策略效果最好, 当 $f > 0.35$ 时, FCNL 网络完全崩溃 (如图 6 (b) 所示)。具有高入度的节点通常是软件

表 2 FCNL 网络中各个模块的结构属性

模块序号	模块名	N	M	$\langle K \rangle$	$\langle L \rangle$	C	d	$\langle I \rangle$	$\langle D \rangle$
1	drivers	4 795	17 873	7.039	3.020	0.080	15	14.950	14.950
2	arch	1 773	4 691	4.343	2.175	0.042	7	6.301	6.301
3	fs	1 329	4 475	6.518	2.747	0.037	11	13.625	13.625
4	net	931	2 761	5.908	4.116	0.042	18	18.189	18.189
5	mm	302	776	5.126	3.017	0.025	10	10.560	10.560
6	kernel	230	421	3.661	2.726	0.035	9	7.065	7.065

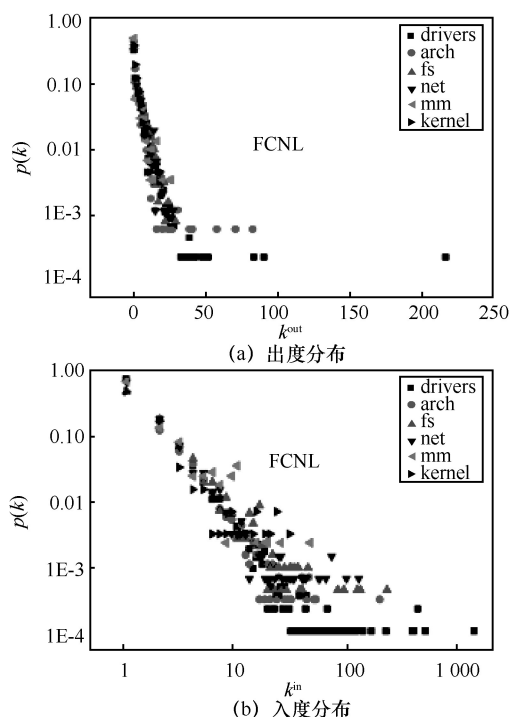


图5 FCNL 网络中 6 个功能模块的度分布

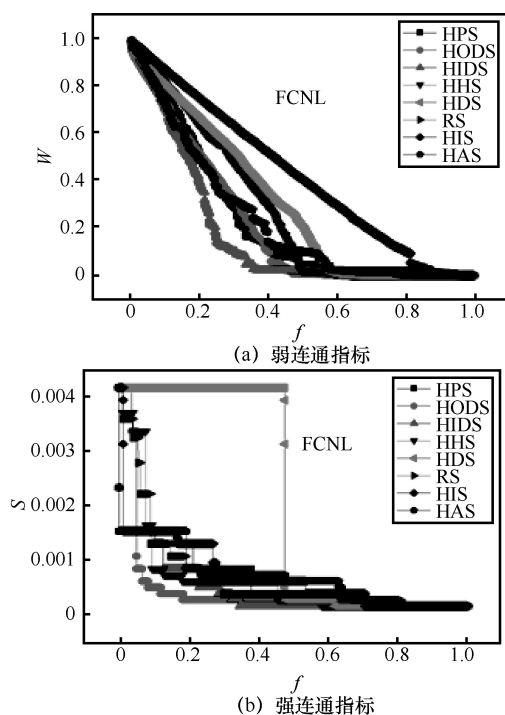


图6 FCNL 网络的稳健性

系统中被频繁调用较基础的部分, 当这些节点受攻击时, 将会导致严重的网络瘫痪。同理, 具有高出度的节点通常需要调用其他多种函数来实现自身的功能, 与外界交互比较复杂, 当这些节点

受攻击时, 也会导致严重的网络瘫痪。

WCNL 弱耦合软件网络在 8 种攻击策略下的静态稳健性如图 7 所示。由图 7 可得, 随着 f 的增加, 网络变得越来越脆弱。对于弱连通指标 W , HIDS 攻击策略效果最好, 当 $f > 0.26$ 时, WCNL 网络完全崩溃 (如图 7 (a) 所示); 对于强连通指标 S , HIDS 攻击策略效果最好, 当 $f > 0.09$ 时, WCNL 网络完全崩溃 (如图 7 (b) 所示)。

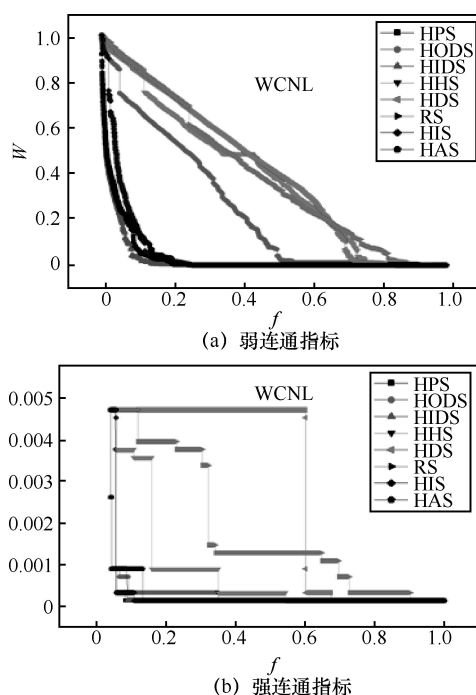


图7 WCNL 弱耦合软件网络的稳健性

SCNL 强耦合软件网络在 8 种攻击策略下的静态稳健性如图 8 所示。由图 8 可得, 对于弱连通指标 W , HODS 攻击策略效果最好, RS 攻击策略效果最差, 当 $f > 0.48$ 时, SCNL 网络完全崩溃 (如图 8 (a) 所示); 对于强连通指标 S , HIDS 攻击策略效果最好, 当 $f > 0.05$ 时, SCNL 网络完全崩溃 (如图 8 (b) 所示)。

SCSL 网络在 8 种攻击策略下的静态稳健性如图 9 所示。该网络采用的稳健性评价指标为强连通指标, 对于强连通指标 S , 当 $0 < f < 0.083$ 时, HODS 攻击策略效果最好; 当 $f > 0.083$ 时, HIDS 攻击策略效果最好; 当 $f > 0.11$ 时, 网络完全崩溃。

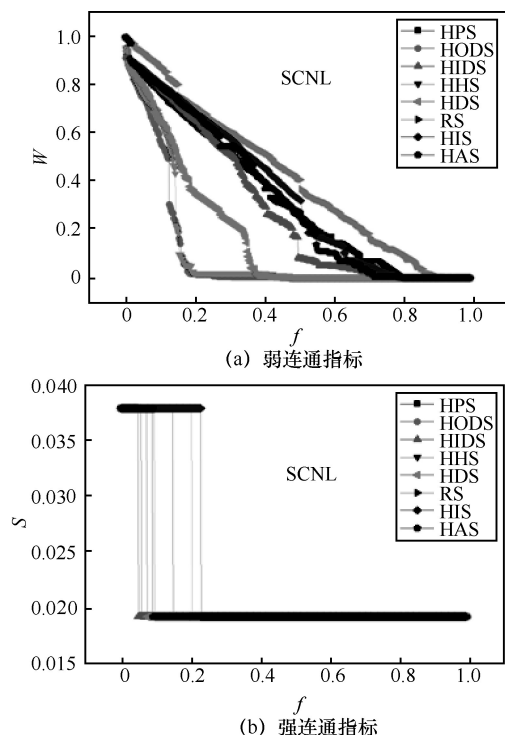


图8 SCNL 强耦合软件网络的稳健性

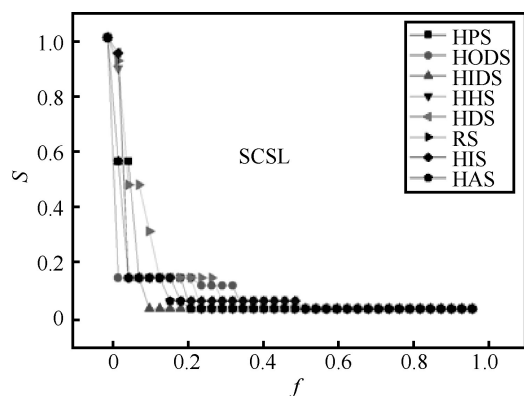


图9 SCSL 网络的强连通指标稳健性

上述仿真结果表明:4种网络的最佳攻击策略通常为 HIDS 攻击策略或 HODS 攻击策略。对于 FCNL 与 SCNL 网络,选取不同的网络稳健性评价指标,其最佳的攻击策略存在差异。当选取弱连通指标 W 时,FCNL 网络与 WCNL 网络最佳攻击策略均为 HIDS 策略,在 HIDS 攻击策略下,WCNL 网络比 FCNL 网络更脆弱。

4 结束语

基于 Linux 软件的源码,应用复杂网络理论

构造函数调用有向软件网络模型,并构建软件系统弱耦合网络模型、强耦合网络模型以及强连通子图模型,分别对4种网络的结构特征进行分析,以有向网络稳健性的强连通和弱连通指标作为网络稳健性度量指标,引入8种攻击策略研究4种网络的静态稳健性。实验结果表明:(1)Linux的4种网络都具有“小世界”特征;(2)FCNL网络中6个功能模块的出度分布遵循指数分布,入度分布遵循幂律分布;(3)对于FCNL与SCNL网络,选取不同的网络稳健性评价指标,其最佳的攻击策略存在差异;(4)对于弱连通指标,高入度攻击策略对弱耦合软件网络的破坏最大。

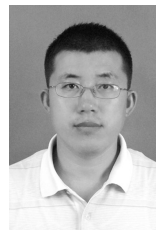
参考文献:

- [1] ERDOS P, RÉNYI A. On random graphs[J]. Publications Mathematics, 1959(6): 290-297.
- [2] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [3] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393 (6684): 440-442.
- [4] 胡赛,熊慧军,李学勇.多关系蛋白质网络构建及其应用研究[J].自动化学报,2015,41(2):2155-2163.
HU S, XIONG H J, LI X Y. Research on multi-relational protein network construction and its application[J]. Journal of Automation, 2015, 41 (2): 2155-2163.
- [5] 李兵,王浩,李曾扬.基于复杂网络的软件复杂性度量研究[J].电子学报,2006,34(12):2372-2375.
LI B, WANG H, LI Z Y. Research on software complexity measurement based on complex network[J]. Electronic Journal, 2006, 34(12): 2372-2375.
- [6] 汪金祥.基于复杂网络的软件执行函数调用网络分析[D].秦皇岛:燕山大学,2014.
WANG J X. Network analysis of software execution function call based on complex network[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [7] VALVERDES S, CANCHO R F, SOLÉ R V. Scale-free networks from optimal design[J]. Europhys Lett, 2002, 60(4): 512-517.
- [8] MYERS C. Software systems as complex networks: structure, functions, and evolvability of software collaboration graphs[J]. Physical Review E, 2003 (4): 1-15.
- [9] GAO Y C, ZHENG Z, QIN F Y. Analysis of Linux kernel as a complex network[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2014(69): 246-252.
- [10] WANG H Q, CHEN Z, XIAO G P, et al. Network of networks in Linux operating system[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016(447): 520-526.
- [11] XIAO G P, ZHENG Z, WANG H Q. Evolution of linux operating system network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017(446): 249-258.
- [12] ZHENG Z, XIAO G P. Evolution analysis of a UAV real-time operating system from a network perspective[J]. Chinese Jour-



- nal of Aeronautics, 2019, 32(1): 176-185.
- [13] 何鹏, 王鹏, 李兵. 基于多粒度软件网络模型的系统演化分析[J]. 电子学报, 2018, 46(2): 258-267.
HE P, WANG P, LI B. Evolution analysis of software system based on multi-granularity software network model[J]. Electronic Journal, 2018, 46(2): 258-267.
- [14] 潘浩, 郑巍, 张紫枫, 等. 软件网络分形结构特征研究[J]. 计算机科学, 2019, 46(2): 166-170.
PAN H, ZHENG W, ZHANG Z F, et al. Research on fractal characteristics of software network[J]. Computer Science, 2019, 46(2): 166-170.
- [15] HONG C, HE N, LORDAN O, et al. Efficient calculation of the robustness measure R for complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2017(478): 63-68.
- [16] WANG E S, HONG C, ZHANG X H, et al. Cascading failures with coupled map lattices on Watts-Strogatz networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2019(525): 1038-1045.
- [17] BELLINGERI M, CASSI D, VINCENZI S. Efficiency of attack strategies on complex model and real-world networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 414(10): 174-180.
- [18] NIE T Y, GUO Z, ZHAO K, et al. New attack strategies for complex networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015(424): 248-253.
- [19] 孙昱, 姚佩阳, 张杰勇, 等. 基于优化理论的复杂网络节点攻击策略[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(3): 518-524.
SUN Y, YAO P Y, ZHANG J Y, et al. Complex network node attack strategy based on optimization theory[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(3): 518-524.
- [20] 韩丽, 刘彬, 邓玉静, 等. 加权无标度网络的级联失效模型[J]. 软件学报, 2017, 28(10): 2769-2781.
HAN L, LIU B, DENG Y J, et al. Cascade failure model for weighted Scale-Free networks[J]. Journal of Software, 2017, 28(10): 2769-2781.
- [21] 畅兴平, 夏清华. 确定性复杂网络的稳定性受随机打击影响的研究[J]. 电信科学, 2010, 26(7): 109-113.
CHANG X P, XIA Q H. Study on the influence of random attack on the stability of deterministic complex networks[J]. Telecommunications Science, 2010, 26(7): 109-113.
- [22] 彭兴钊, 姚宏, 杜军, 等. 负荷作用下相依网络中的级联故障[J]. 物理学报, 2015, 64(4): 1-8.
PENG X Y, YAO H, DU J, et al. Cascading faults in dependent networks under load[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(4): 1-8.
- [23] CHENG Z S, CAO J D. Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015(430): 193-200.
- [24] 王建伟, 蔡琳, 蒋晨. 考虑边权重和耦合强度的相互依赖网络级联故障模型研究[J]. 管理工程学报, 2018, 32(4): 149-157.
WANG J W, CAI L, JIANG C. Research on interdependent network cascading failure model considering edge weight and coupling strength[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2018, 32(4): 149-157.
- [25] WANG S, LIU J. Community robustness and its enhancement in interdependent networks[J]. Applied Soft Computing Journal, 2019(77): 665-677.
- [26] CUI P S, ZHU P D, WANG K, et al. Enhancing robustness of interdependent network by adding connectivity and dependence links[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018(497): 185-197.
- [27] 李从东, 李文博, 曹策俊, 等. 面向级联故障的相依网络稳健性分析[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 538-548.
LI C D, LI W B, CAO C J, et al. Robustness analysis of dependent networks for cascading failures[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 538-548.
- [28] 王小龙, 侯刚, 任龙涛. 软件动态执行网络建模及其级联故障分析[J]. 计算机科学, 2014, 41(8): 109-114.
WANG X L, HOU G, REN L T. Software dynamic execution network modeling and its cascading failure analysis[J]. Computer Science, 2014, 41(8): 109-114.
- [29] 马迎辉, 彭成, 张文佳, 等. 网络化软件中的异常行为传播研究[J]. 微型机与应用, 2016, 35(5): 18-21.
MA Y H, PENG C, ZHANG W J, et al. Research on abnormal behavior propagation in networked software[J]. Microcomputer & Applications, 2016, 35(5): 18-21.
- [30] WANG L, WANG X C, WU D Y. Correlation between complex network features and robustness in Linux kernel modules[C]//2017 International Conference on Software Analysis, Testing and Evolution, November 3-4, 2017, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2017: 80-89.
- [31] 周宽久, 兰文辉, 冯金金. 基于耦合映像格子的软件相继故障研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(5): 129-131.
ZHOU K J, LAN W H, FENG J J. Research on software successive faults based on coupled image lattice[J]. Computer Science, 2011, 38(5): 129-131.
- [32] AI J, HUANG L Z, WANG F, et al. Research on relations between software network structure and fault propagation[C]//IEEE International Conference on Software Analysis, Testing and Evolution, Kunming, November 3-4, 2016, Kunming, China. Piscataway: IEEE Press, 2016.

[作者简介]



王尔申 (1980—), 男, 博士, 沈阳航空航天大学教授, 主要研究方向为卫星导航数据处理、复杂网络。

李宇 (1994—), 女, 沈阳航空航天大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为复杂网络。

宏晨 (1974—), 男, 博士, 北京联合大学机器人学院讲师, 主要研究方向为复杂网络、机器学习、计算机视觉。

孙庆华 (1963—), 男, 北京联合大学机器人学院讲师, 主要研究方向为复杂网络、计算机网络、数据库系统。

刘畅 (1978—), 女, 博士, 北京联合大学机器人学院副教授, 主要研究方向为复杂网络、机器学习、计算机视觉。