基于优化理论的复杂网络节点攻击策略

孙 昱* 姚佩阳 张杰勇 付 凯
(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

摘 要：该文在分析传统复杂网络节点攻击策略不足的基础上提出一种新的攻击策略，该策略的思路是将节点攻击序列的构造问题视为一个优化问题而非传统的评估问题。为了实现该策略，设计了复杂网络抗毁性测度用以衡量节点攻击序列的攻击效果，建立了以最大化攻击效果为目标的节点攻击序列构造模型，提出了基于禁忌搜索的模型求解算法。在真实网络和模拟网络上的实验结果表明，新策略比其它复杂网络节点攻击策略更为有效和优越。

关键词：复杂网络；攻击策略；抗毁性测度；优化模型；禁忌搜索
中图分类号： TP393; N949 **文献标识码**： A **文章编号**：1009-5896(2017)03-0518-07
DOI: 10.11999/JEIT160396

Node Attack Strategy of Complex Networks Based on Optimization Theory

SUN Yu YAO Peiyang ZHANG Jieyong FU Kai
(*Information and Navigation College*, *Air Force Engineering University*, *Xi'an* 710077, *China*)

Abstract: This study proposes a new node attack strategy of complex networks by analyzing the disadvantages of traditional strategies. The idea of the new strategy is to treat the construction problem of node attack sequence as an optimal problem rather than an evaluation problem. To achieve this strategy, the study designs a survivability index of complex networks to measure the attack effect created by a node attack sequence, then establishes a construction model of node attack sequence with the goal to maximize attack effect, and further brings forward an algorithm based on tabu search to solve the model. Experiment results from real networks and simulated networks show that the new strategy is more effective than others.

Key words: Complex networks; Attack strategy; Survivability measurement; Optimization model; Tabu search

1 引言

复杂网络节点攻击是通过破坏目标网络中的节点以使目标网络无法维持其基本功能的行为。在实施复杂网络节点攻击时，目标网络中的节点按被破坏的先后次序可以构成一个序列，该序列称为节点攻击序列。复杂网络节点攻击策略规定了节点攻击序列的构造方式，目的是使目标网络在节点攻击当中迅速崩溃。复杂网络攻击策略的发展有利于促进复杂网络防护策略的完善，因此研究更为有效的复杂网络节点攻击策略具有重要意义。

目前关于复杂网络节点攻击策略的研究已取得不少成果[1]。经典的节点攻击策略包括度优先攻击策略[2]和介数优先攻击策略[3]。为进一步提高这两种策略的攻击效果，文献[4]认为可以综合考虑节点的度大小及其第 2 邻居的数量来实施攻击。文献[5]分别给节点的度和介数赋予权重并选择二者加权和大的节点优先攻击。文献[6]则构造了双重判断准则，即先攻击度大的节点，当节点的度相同时，攻击其中介数大的节点。文献[7]提出了一种邻近攻击策略，其基本思想是若某个节点受到攻击，则其邻居节点接下来更可能被攻击。文献[8]从破坏复杂网络社团结构的角度出发，设计了一种针对高社团成员值节点的多靶向攻击策略。文献[9]和文献[10]分别定义了 Damage 指标和中心性指标以衡量节点在网络中的重要程度，然后优先攻击网络中重要程度高的节点。文献[11]认为通用的节点重要度指标难以准确定义，因此引入优化原理来设计最佳的节点攻击策略。

从目前的研究进展看，大部分节点攻击策略都是基于重要度的理念来构造节点攻击序列，即先选择节点的某种结构特征例如度、介数等作为其重要性度量，然后根据网络中各节点的重要程度将节点排序形成节点攻击序列。此类节点攻击策略往往各有优劣，这是因为复杂网络的结构多种多样(研究较多如随机网络、小世界网络、无标度网络，研究较

收稿日期：2016-04-22；改回日期：2016-10-31；网络出版：2016-12-20
*通信作者：孙昱 suny.z@qq.com
基金项目：国家自然科学基金(61573017)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61573017)

少且未统一命名的网络类型更是不计其数)，很难找到某种结构特征在所有网络中都能较好地度量节点的重要性。文献[11]认识到这一点，尝试以优化的方式解决问题，不足之处是需要事先给出攻击强度等信息。

为了设计更为有效实用的复杂网络节点攻击策略，本文基于优化理论来构造节点攻击序列。首先给出衡量节点攻击序列攻击效果的测度指标，然后建立节点攻击序列构造的优化模型并提出可行的求解算法，最后对比不同攻击策略在真实网络和模拟网络上的攻击效果以验证新策略的有效性和优越性。

2　复杂网络抗毁性测度

复杂网络抗毁性测度用来衡量节点攻击序列的攻击效果。当事先构造一个节点攻击序列 K 并按照 K 中的节点排序逐个攻击网络 G 中的节点时，随着攻击的进行，网络 G 最大连通分量的规模将不断降低，因此网络 G 在攻击序列 K 下的抗毁性测度 $R(G,K)$ 通常被定义为[12]

$$R(G,K)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}S(i) \tag{1}$$

其中，n 是网络 G 最初包含的节点数，$S(i)$ 是网络 G 中 i 个节点被移除后，其最大连通分量的规模。$R(G,K)$ 越小，说明网络 G 在遭受攻击时越容易崩溃，也即节点攻击序列 K 的攻击效果越好。虽然式(1)中定义的网络抗毁性测度应用广泛[13,14]，但是由于网络最大连通分量的规模仅能在一个较粗的粒度上刻画网络的连通程度，因此利用该测度来衡量节点攻击序列攻击效果的准确程度还不够高。

为了克服其不足，本文首先设计能在更为细致的粒度上反映网络整体连通状况的指标，然后在此基础上定义新的网络抗毁性测度。在一个网络中，若两个节点之间存在一条可达路径，则称这对节点是连通的。网络中连通的节点对数越多，网络的整体连通程度越好。若网络 G 中共有 m 个连通分量，第 $i\,(1\le i\le m)$ 个连通分量包含的节点数为 n_i，则网络 G 中连通节点对的数量为 $\sum_{i=1}^{m}n_i(n_i-1)/2$，考虑到网络 G 中节点对的数量最多为 $n(n-1)/2$ (其中 $n=\sum_{i=1}^{m}n_i$ 是 G 中的节点总数)，因此定义网络 G 的可用性指标 U 为

$$U=\frac{\sum_{i=1}^{m}n_i(n_i-1)/2}{n(n-1)/2}=\frac{\sum_{i=1}^{m}n_i(n_i-1)}{n(n-1)} \tag{2}$$

需要指出的是，当网络 G 中的节点总数 $n\le 1$ 时，规定此时网络的可用性指标 $U=0$。由可用性指标 U 的定义方式可知 $0\le U\le 1$，当 $U=1$ 时说明网络处于全连通状态，此时网络的可用性最好，当 $U=0$ 时说明网络中不存在一条边，此时网络的可用性最差。网络的可用性指标相对网络最大连通分量的规模而言包含了更为丰富的信息，因而能更为细致地刻画网络的整体连通状况。

当网络中的节点遭受攻击而被移除出网络时，网络的可用性指标值不一定单调减少，如图 1 所示的网络中，若 7 号节点遭到攻击而被移除，网络的可用性指标值将由 0.71 变为 1。网络受到了攻击其可用性反而更好了，这显然与人们的直觉认识不相符合，也为网络抗毁性测度的定义造成了困难。

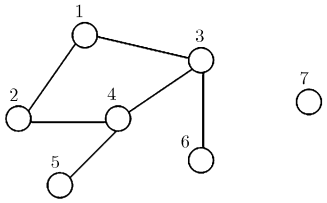


图 1 网络示例图

由于将 1 个节点移除出网络在效果上等价于将连接到该节点的边都移除出网络，因此为了使网络可用性指标值随着攻击的进行而单调减少，作如下规定：当网络中节点被攻击时，并不将该节点移除出网络，而是将网络中连接到该节点的所有边都移除出网络。根据这一规定，当网络中的孤立节点如图 1 中的 7 号节点受到攻击时，网络可用性指标值将维持不变，当网络中的非孤立节点如图 1 中的 1 号节点至 6 号节点受到攻击时，网络可用性指标值将降低。

当按照一个节点攻击序列 K 攻击含有 n 个节点的网络 G 时，基于可用性的网络抗毁性测度 $R'(G,K)$ 定义为

$$R'(G,K)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}U(i) \tag{3}$$

其中，$U(i)$ 是网络 G 中 i 个节点遭到攻击后网络的可用性指标值。$R'(G,K)$ 越小，说明节点攻击序列 K 的攻击效果越好。

3　节点攻击序列构造

若目标网络 G 中有 n 个节点，且标号分别为 1～n，那么一个节点攻击序列可表示为 $(k_1,k_2,\cdots,k_n)$，其中 $k_1,k_2,\cdots,k_n$ 是 $1,2,\cdots,n$ 的一个排列。网络节点攻击策略规定了节点攻击序列的构造方式，不同网络节点攻击策略构造出的节点攻击序列 K 并不相同。基于优化理论的复杂网络节点攻击策略的目标是构造出攻击效果最佳的节点攻击序列 K，因此其构造

方式可以视为一个优化问题，即

$$\left.\begin{aligned}\min \quad & R'(G,K)\\ \text{s.t.} \quad & K\in \text{Set_K}\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

其中，Set_K 是针对目标网络 G 的所有节点攻击序列构成的集合。

该问题是一组合优化问题，当目标网络 G 中含有 n 个节点时，解空间的规模也即集合 Set_K 中的元素数量为 $n!$。这意味着即使一个网络仅包含 20 个节点，其解空间的规模就已达到 10^{18}，而复杂网络包含的节点数显然不止如此，因此考虑采用智能搜索算法求解该问题。

禁忌搜索是一种求解组合优化问题的有效算法[15]，具有参数少、通用性强等特点，其基本思想是从一个初始解出发，然后在其邻域中搜索较好的解并移动到该解，重复上述步骤直至算法满足终止准则，为了避免搜索过程陷入循环，设置禁忌列表来禁忌可能导致循环发生的搜索行为。本文首先基于禁忌搜索设计式(4)中所建模型的求解算法，然后进一步优化算法性能。

3.1 模型求解

一个节点攻击序列 $K=(k_1,k_2,\cdots,k_n)$ 也称为模型的一个解。

定义 1 交叉算子 $\text{CS}(K,i,j)$ 是将节点攻击序列 K 中第 i 个位置的元素和第 j 个位置的元素相互交换以产生新解。例如 $K=(2,3,1)$，则 $\text{CS}(K,1,2)=(3,2,1)$，$\text{CS}(K,1,3)=(1,3,2)$。

定义 2 解 K 的邻域 $\text{NB}(K)$ 是节点攻击序列 K 在交叉算子的作用下产生的所有新解构成的集合，即

$$\text{NB}(K)=\{\text{CS}(K,i,j)\,|\,1\le i<j\le n\} \tag{5}$$

例如 K=(2,3,1)，则 $\text{NB}(K)$=$\{(3,2,1),(1,3,2),(2,1,3)\}$。

定义 3 禁忌列表是用于记忆信息的一块存储区域，其每一个表项可以存储模型的一个解。

基于禁忌搜索的模型求解算法具体步骤如下：

步骤 1 随机产生一个初始的节点攻击序列 K，初始化一个空的禁忌列表，设置模型的最优解 $K_{\text{b}}=K$，当前解 $K_{\text{c}}=K$；

步骤 2 判断 K_{c} 的邻域 $\text{NB}(K_{\text{c}})$ 中是否有优于 K_{b} 的解，若是则执行步骤 3，否则执行步骤 4；

步骤 3 将 $\text{NB}(K_{\text{c}})$ 中所有优于 K_{b} 的解构成一个集合，该集合中的最优解记为 K'。令 $K_{\text{b}}=K'$，$K_{\text{c}}=K'$，执行步骤 5；

步骤 4 将 $\text{NB}(K_{\text{c}})$ 中所有劣于 K_{b} 且未被禁忌列表存储的解构成一个集合，该集合中的最优解记为 K'。令 $K_{\text{c}}=K'$，执行步骤 5；

步骤 5 将 K_{c} 保存到禁忌列表中，当禁忌列表已满时，按先进先出的原则更新禁忌列表；

步骤 6 在一定的迭代步数内 K_{b} 是否更新，若是则返回步骤 2，否则结束搜索并将 K_{b} 作为模型的最优解输出。

下面分析求解算法的收敛性。式(4)中优化模型的可行域为 Set_K，当可行域中的一个解是另一个解的邻域中的元素时，称这两个解相邻。由可行域 Set_K 和解之间的相邻关系可以构造一个图 A，A 中的节点表示 Set_K 中的解，A 中的边表示 Set_K 中解的相邻关系，因此求解算法的搜索过程可以看作是从图 A 中的一个节点出发，沿着图 A 中的边进行移动。

算法从图 A 中的一个节点移动到另一个节点，称算法进行了一次迭代。算法每移动到一个节点都将访问该节点及其邻居节点以探索更好的解，算法迭代 i 次后访问过的所有解构成的集合记为 V_i。

定理 1 存在整数 j 使得当 $i\ge j$ 时，V_i 收敛于某一集合 V。

证明 由 V_i 的构造方式可知，$\forall i$ 有 $V_i\subseteq V_{i+1}$，即序列 $\{V_i\}$ $(i\ge 1)$ 是非降的。由于可行域 Set_K 中解的数量有限，因此必然 $\exists j$，使得算法迭代次数 $i\ge j$ 时，V_i 收敛于某一集合 V。 证毕

定理 2 若 $\forall K\in V$，有 $\text{NB}(K)\subseteq V$，则 $V=$ Set_K，即算法具有全局收敛性。

证明 采用反证法，假设 $V\ne$ Set_K，由于 Set_K 是整个可行域，故有 $V\subseteq$ Set_K，因此可以在 Set_K 中找到一个解 K' 满足 $K'\notin V$。假设解 $K\in V$，那么通过有限次交叉算子可以在 K 的基础上生成 K'，即 $K\xrightarrow{\text{CS}}K_1\xrightarrow{\text{CS}}K_2\xrightarrow{\text{CS}}\cdots\xrightarrow{\text{CS}}K'$。由于 K_1 是 K 邻域中的元素，而根据已知条件 K 的邻域是 V 的子集，故 $K_1\in V$。同理可知 $K_2,\cdots,K'\in V$，而这与 $K'\notin V$ 相矛盾，因此定理 2 成立。 证毕

由定理 1 和定理 2 知，只要算法在迭代过程中不在图 A 的任一条闭合回路上陷入循环，那么算法就容易找到全局最优解。算法设立禁忌列表的目的就是为了禁忌可能导致循环发生的搜索行为，禁忌列表的长度越长循环现象越不可能发生，然而禁忌列表过长将导致算法存储开销过大，因此需要选择合适的列表长度以平衡算法性能和算法开销。

3.2 性能优化

为了进一步提高求解算法的性能，本文从初始解构造和邻域搜索两个方面来优化算法。

(1)初始解构造： 较好的初始解有利于提高算法的收敛速度。求解算法在步骤 1 中通过随机的方式产生初始解难以保证初始解的质量，因此本文根据问题信息针对性地构造较好的初始解。在攻击一个网络时，攻击其核心节点比攻击边缘节点造成的

破坏性更大，故可以先评价网络中各节点的中心性程度，然后再构造初始解。

若网络中有 n 个节点，标号分别为 $1,2,\cdots,n$，则节点 $i\,(1\le i\le n)$ 的度中心性 $\mathrm{DG}(i)$ 定义为

$$\mathrm{DG}(i)=h_i \tag{6}$$

其中，h_i 是与节点 i 直接相连的边的数量。

节点 $i\,(1\le i\le n)$ 的介数中心性 $\mathrm{BT}(i)$ 定义为

$$\mathrm{BT}(i)=\sum_{1\le i,p,q\le n;\ i\ne p\ne q} c_{pq}^{i}\,/\,c_{pq} \tag{7}$$

其中，c_{pq} 是节点 p 和节点 q 之间最短路径的条数，c_{pq}^{i} 是节点 p 和节点 q 之间的最短路径经过节点 i 的条数。

节点 $i\,(1\le i\le n)$ 的接近中心性 $\mathrm{CL}(i)$ 定义为

$$\mathrm{CL}(i)=\sum_{1\le i,j\le n;\ i\ne j} 1\,/\,d_{ij} \tag{8}$$

其中，d_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间最短路径的长度，需要指出的是，当节点 i 和节点 j 之间不连通时，$d_{ij}=\infty$。

节点 $i\,(1\le i\le n)$ 的脆弱中心性 $\mathrm{FR}(i)$ 定义为

$$\mathrm{FR}(i)=e-e_i \tag{9}$$

其中，e 是网络的效率[16]，e_i 是将与节点 i 直接相连的边从网络中移除后形成的新网络的效率。

根据节点的中心性程度构造初始解的方式如下。选择一种节点中心性度量方式，计算网络中所有节点的中心性测度值，将中心性程度最高的节点作为节点攻击序列中的第 1 个目标，将该节点从网络中移除，重新计算剩余节点的中心性测度值，其中中心性程度最高者作为节点攻击序列中的第 2 个目标，重复上述步骤直至构造出一个完整的节点攻击序列。若各种中心性度量方式构造出的初始解不同，则在搜索时采取并行搜索思想为每个初始解开启一个搜索任务。

(2)邻域搜索：　求解算法在步骤 2 中需要判断当前解 K_{c} 的邻域中是否有优于 K_{b} 的解，因此算法需对 K_{c} 的邻域进行一次搜索，遍历 $\mathrm{NB}(K_{\mathrm{c}})$ 中的每一个元素以判断其是否优于 K_{b}，由定义 2 可知一个解的邻域中有 $n(n-1)/2$ 个元素(n 为目标网络中节点数)，故算法每进行一次邻域搜索，就需执行 $n(n-1)/2$ 次判断操作。由于算法在求解过程中将不断进行邻域搜索直至算法终止，故若能减少每一次邻域搜索中判断操作的次数，将可以有效降低整个算法的时间开销。

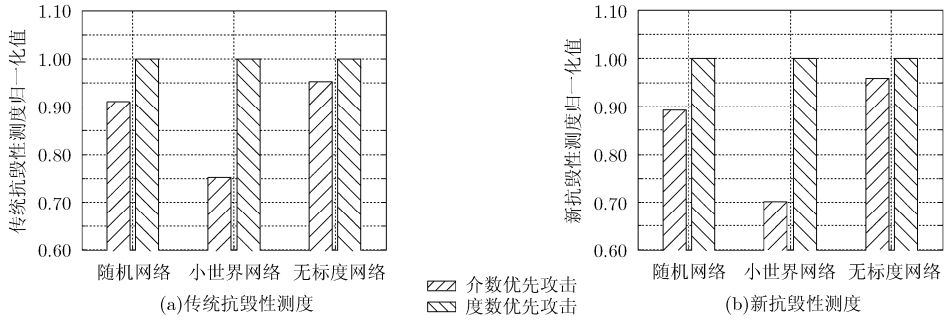
当按照一个节点攻击序列 $K=(k_1,k_2,\cdots,k_n)$ 攻击目标网络 G 时，随着受攻击节点数量的增加，网络 G 的可用性指标值将不断降低，若攻击完节点 $k_a\,(1\le a\le n)$ 后网络 G 的可用性指标值降为 0，则继续攻击网络 G 时其可用性指标值也将是 0。换而言之，若将序列 K 中节点 k_a 后的两个节点交换位置，该序列的攻击效果不会受到影响，也即解 $K'=\mathrm{CS}(K,i,j)\,(a<i<j\le n)$ 不优于解 K。

当求解算法执行步骤 2 搜索解 K_{c} 的邻域，判断 $\mathrm{NB}(K_{\mathrm{c}})$ 中的元素是否优于 K_{b} 时，若 $K_{\mathrm{c}}=(g_1,g_2,\cdots,g_n)$ 且按 K_{c} 实施攻击时攻击完节点 $g_d\,(1\le d\le n)$ 后网络的可用性指标值为 0，则由上述分析知集合 $\mathrm{ST}(K_{\mathrm{c}})=\{\mathrm{CS}(K,i,j)\mid d<i<j\le n\}$ 中的解不优于 K_{c}，由于 K_{c} 不优于 K_{b}，故 $\mathrm{ST}(K_{\mathrm{c}})$ 中解也不优于 K_{b}，因此在搜索解 K_{c} 的邻域时只需判断集合 $\mathrm{NB}(K_{\mathrm{c}})-\mathrm{ST}(K_{\mathrm{c}})$ 中的元素是否优于 K_{b} 即可。通过这种方式能更快地完成邻域搜索，从而改善算法的时间开销。

4　实验验证

本节通过实验证明所提复杂网络抗毁性测度的有效性以及节点攻击策略的优越性。本文实验平台为 Pentium(R) Dual-Core CPU 3.0 GHz 计算机和 MATLAB R2010a。

仿真实验 1　为对比式(1)中定义的传统复杂网络抗毁性测度和式(3)中定义的新复杂网络抗毁性测度，利用随机网络模型，小世界网络模型(重连概率为 0.2)和无标度网络模型生成节点数为 50，边数为 100 的模拟网络，采用经典的介数优先攻击策略和度数优先攻击策略[1−3]攻击这些网络，各类型网络均进行 30 组实验，计算网络抗毁性测度的均值并进行归一化处理，结果如图 2 所示。



(a)传统抗毁性测度　　(b)新抗毁性测度

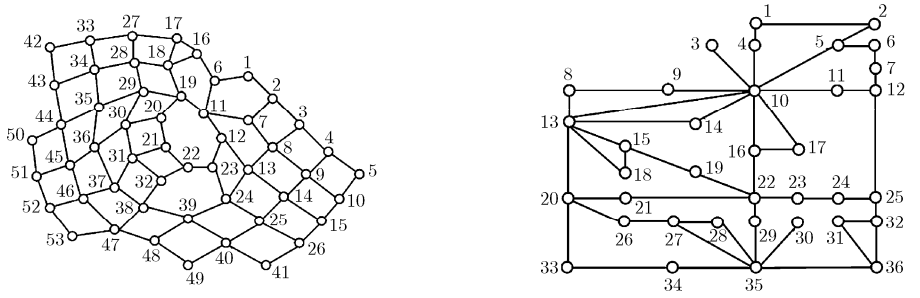
图 2 复杂网络抗毁性测度对比

从图 2 中可以看到，介数优先策略的攻击效果要优于度数优先策略，在用传统抗毁性测度衡量时，介数优先策略在随机网络、小世界网络和无标度网络上的攻击效果要比度数优先策略分别优 8.89%, 24.79%和 4.65%，用新抗毁性测度衡量时，介数优先策略分别优 10.69%, 29.79%和 4.11%。新测度说明了介数优先策略在随机网络和小世界网络上的攻击效果比以往料想得要更为有效一些，而在无标度网络上的攻击效果要比以往料想得弱一些，这是因为在无标度网络这种节点度接近幂律分布的网络中，各攻击策略都能比较容易地确定其重要节点，因此攻击效果比较接近，而在随机网络和小世界网络这类节点度近似泊松分布的网络中，确定重要节点并不像在无标度网络中那么简单，此时介数优先策略作为全局性策略的攻击效果就比度数优先策略这种局部性策略更容易显现出来。图 2 中的实验结果表明新测度更加细致地刻画了网络的整体状态，因此该测度是可行有效的。

仿真实验 2 为验证本文所提攻击策略的优越性，首先对比不同攻击策略在图 3 所示真实网络上的攻击效果，其中图 3(a)是西安市莲湖区的城区道路网，图 3(b)是中国教育和科研计算机网(CERNET)的主干网络。实验结果如图 4 所示。

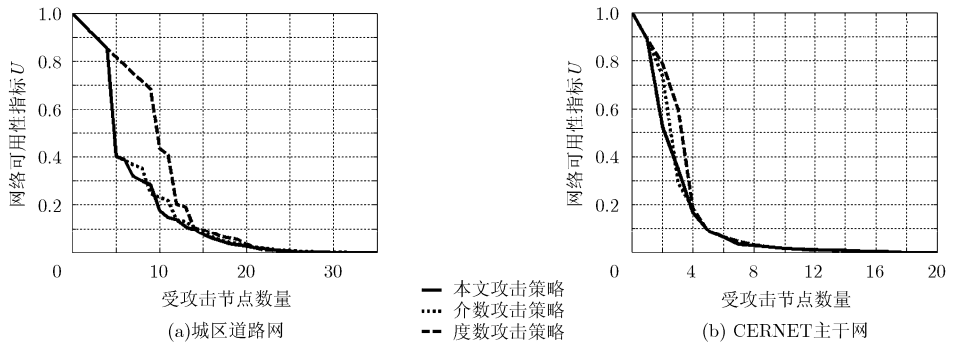
从图 4 中可以看到，无论采用哪种攻击策略，随着受攻击节点数量的增加，网络的可用性都越来越差，横向对比这 3 种策略可以发现，本文提出的攻击策略能使网络的可用性指标值下降得更为迅速。由式(3)计算得到的城区道路网在本文攻击策略、介数攻击策略和度数攻击策略下的抗毁性测度值分别为 0.1195, 0.1247, 0.1730, CERNET 主干网在这 3 种攻击策略下的抗毁性测度值分别为 0.0619, 0.0671, 0.0769，即本文所提策略在城区道路网上的攻击效果要比介数优先策略和度数优先策略分别优 4.17%和 30.92%，在 CERNET 主干网上的攻击效果分别优 7.75%和 19.51%。继续在模拟网络上进行验证，利用随机网络模型，小世界网络模型(重连概率为 0.2)和无标度网络模型生成节点数为 50，边数为 100 的模拟网络，计算模拟网络在不同攻击策略下的抗毁性测度，各类型网络均进行 30 组实验，结果如图 5 所示。

在图 5 中，本文攻击策略所得的数据分布相对于其它两种攻击策略而言总体偏低，其中随机网络在本文攻击策略、介数攻击策略和度数攻击策略下的抗毁性测度均值为 0.1347, 0.1495, 0.1674，小世界网络在这 3 种攻击策略下的抗毁性测度均值为 0.1300, 0.1390, 0.1980，无标度网络在这 3 种攻击策略下的抗毁性测度均值为 0.1034, 0.1113, 0.1161，即本文所提策略在随机网络上的攻击效果比介数攻



(a)城区道路网 (b) CERNET主干网

图 3 真实网络拓扑



(a)城区道路网 (b) CERNET主干网

图 4 真实网络上的攻击效果

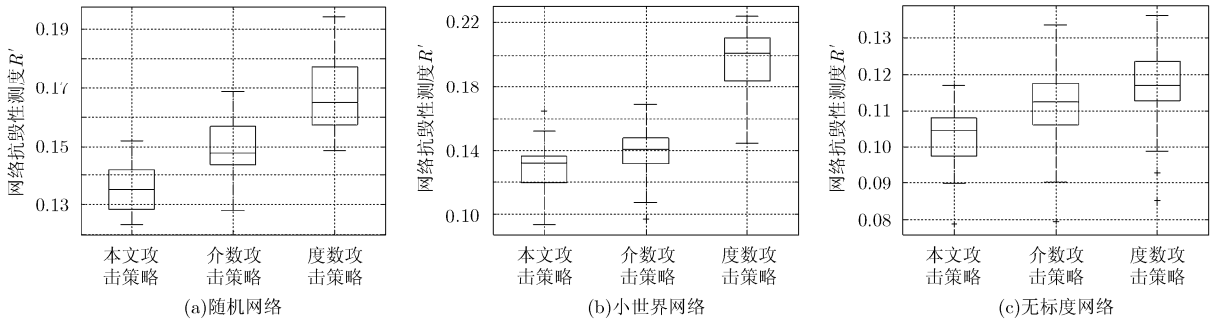


图 5 模拟网络上的攻击效果

击策略和度数攻击策略分别优 9.90%和 19.53%，在小世界网络上的攻击效果分别优 6.47%和 34.34%，在无标度网络上的攻击效果分别优 7.10%和 10.94%。图 4 和图 5 中的实验结果表明本文攻击策略不仅优越，而且适用于不同类型的网络之中，这证明基于优化思想的节点攻击策略鲁棒、高效。

仿真实验 3　复杂网络节点重要度排序与复杂网络节点攻击策略之间具有密切联系，当将节点重要度排序结果视为一个节点攻击序列时，这种重要度排序方法就转化成了一种攻击策略，当将攻击策略构造出的节点攻击序列视为一种重要度排序结果时，这种攻击策略就转化成了一种节点重要度排序方法。因此本文选取几种典型的复杂网络节点重要度排序方法[17−19]作为节点攻击策略来与本文攻击策略进行对比。考虑到 APAR 网[20]是节点重要度排序中常用的实验对象，故本文选择 APAR 网实施攻击，实验结果如图 6 所示。

在图 6 所示的 4 种攻击策略中，本文攻击策略能更快地使 ARPA 网的可用性降低，该网络在本文攻击策略、文献[17]、文献[18]和文献[19]下的抗毁性测度分别为 0.0857, 0.0980, 0.1095 和 0.1721，即本文所提策略的攻击效果比其它策略分别优 12.55%, 21.74%和 50.20%。实验结果表明本文所提策略同样优于基于节点重要度排序思想导出的攻击策略，换而言之，本文策略也能较好地应用于节点重要度排序工作中。

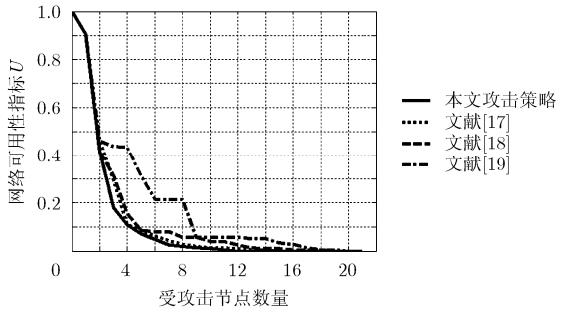


图 6　ARPA 网上的攻击效果

5　结束语

研究更为有效的复杂网络攻击策略是促进复杂网络防护措施发展完善的重要途径。本文分析了传统攻击策略存在的不足并引入优化思想设计了一种新策略，主要有以下几点工作：(1)基于网络可用性指标提出了节点攻击序列攻击效果的测度方式；(2)以最大化攻击效果为目标建立了节点攻击序列构造的优化模型；(3)基于禁忌搜索设计了模型的求解算法。不同类型网络上的实验结果证明了本文所提攻击策略的有效性和优越性。本文下一步工作是在此基础上研究网络结构的抗毁性设计问题。

参 考 文 献

[1] JIANG Y and WANG Y B. Analysis of attack and defense strategies on complex networks[C]. Proceedings of International Conference on Sensor Network Security Technology and Privacy Communication System, Harbin, China, 2013: 58–62.

[2] ALBERT R, JEONG H, and BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406: 378–382. doi: 10.1038/35019019.

[3] HOLME P, KIM B J, YOON C N, *et al*. Attack vulnerability of complex networks[J]. *Physical Review E*, 2002, 65(5): 056109. doi: 10.1103/PhysRevE.65.056109.

[4] BELLINGERI M, CASSI D, and VINCENZI S. Efficiency of attack strategies on complex model and real-world networks [J]. *Physica A*, 2014, 414: 174–180. doi: 10.1016/j.physa.2014.06.079.

[5] NIE T Y, GUO Z, ZHAO K, *et al*. New attack strategies for complex networks[J]. *Physica A*, 2015, 424: 248–253. doi: 10.1016/j.physa.2015.01.004.

[6] 聂廷远, 郭征, 李坤龙. 复杂网络的攻击策略研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(7): 286–289. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2015.07.063.

NIE Tingyuan, GUO Zheng, and LI Kunlong. A study of attack strategies for complex networks[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(7): 286–289. doi: 10.3969/j.issn.1006-

9348.2015.07.063.

[7] XIAO S and XIAO G. On intentional attacks and protections in complex communication networks[C]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, CA, USA, 2006: 1–5.

[8] 李涛, 裴文江. 针对重叠社团结构的复杂网络多靶向攻击策略[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 34–39. doi: 10.3969/j.issn.1007-5321.2010.03.007.
LI Tao and PEI Wenjiang. Multi-targets attack strategy based on the overlapping community structure of complex networks[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, 33(3): 34–39. doi: 10.3969/j.issn.1007-5321.2010.03.007.

[9] WANG H, HUANG J Y, XU X M, *et al*. Damage attack on complex networks[J]. *Physica A*, 2014, 408: 134–148. doi: 10.1016/j.physa.2014.04.001.

[10] ANURAG S, RAHUL K, and YATINDRA N S. Impact of structural centrality based attacks in complex networks[J]. *Acta Physica Polonica B*, 2015, 46(2): 305–324. doi: 10.5506/APhysPolB.46.305.

[11] DENG Y, WU J, and TAN Y J. Optimal attack strategy of complex networks based on tabu search[J]. *Physica A*, 2016, 442: 74–81. doi: 10.1016/j.physa.2015.08.043.

[12] HERRNANN H J, SCHNEIDER C M, MOREIRA A A, *et al*. Onion-like network topology enhances robustness against malicious attacks[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2011, 1: P01027. doi: 10.1088/1742-5468/2011/01/P01027.

[13] SCHNEIDER C M, MOREIRA A A, ANDRADE J S, *et al*. Mitigation of malicious attacks on networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences, of the United States of America* 2011, 108(10): 3838–3841. doi: 10.1073/pnas.1009440108.

[14] LOUZADA V H P, DAOLIO F, HERRMANN H J, *et al*. Smart rewiring for network robustness[J]. *Journal of Complex Networks*, 2013, 1(2): 150–159. doi: 10.1093/comnet/xxx000.

[15] BURKE E K and KENDALL G. Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques[M]. New York: Springer, 2005: 165.

[16] LATORA V and MARCHIORI M. Efficient behavior of small-world networks[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(19): 198701. doi: 10.1103/PhysRevLett.87.198701.

[17] 陈勇, 胡爱群, 胡啸. 通信网中节点重要性的评价方法[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 129–135. doi: 10.3321/ j.issn:1000-436X.2004.08.018.
CHEN Yong, HU Aiqun, and HU Xiao. Evaluation method for node importance in communication networks[J]. *Journal on Communications*, 2004, 25(8): 129–135. doi: 10.3321/j.issn:1000-436X.2004.08.018.

[18] 于会, 刘尊, 李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 1–9. doi: 10.7498/aps.62.020204.
YU Hui, LIU Zun, and LI Yongjun. Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 1–9. doi: 10.7498/aps.62.020204.

[19] 秦李, 杨子龙, 黄曙光. 复杂网络的节点重要性综合评价[J]. 计算机科学, 2015, 42(2): 60–64. doi: 10. 11896/j.issn.1002-137X.2015.2.013.
QIN Li, YANG Zilong, and HUANG Shuguang. Synthesis evaluation method for node importance in complex networks [J]. *Computer Science*, 2015, 42(2): 60–64. doi: 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.013.

[20] PAGE L and PERRY J. Reliability polynomials and links importance in networks[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1994, 43(1): 51–58. doi: QK.IEL.1994.0000024.0007056.00285108.

孙 昱： 男，1989 年生，博士生，研究方向为指挥信息系统.

姚佩阳： 男，1960 年生，教授，博士生导师，研究方向为指挥控制理论与技术.

张杰勇： 男，1983 年生，讲师，博士，研究方向为指挥控制系统建模与分析.

付 凯： 男，1987 年生，博士生，研究方向为复杂系统建模与仿真.