

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.10.013

# 基于抗毁性的军事通信网可靠性和节点重要性分析

马睿<sup>1</sup>, 朱建冲<sup>1</sup>, 杨美玲<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学管理工程系, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91321 部队, 上海 200436)

**摘要:** 针对现有对网络拓扑结构的抗毁性测度研究的不足, 从抗毁性角度对网络可靠性和节点重要性进行分析。通过对在不同节点-链路可靠性条件下的网络聚类生存度进行统计分析, 得到能够反映网络抗毁性和节点抗毁性的指标——网络聚类抗毁度和节点抗毁度, 并进行了仿真分析。仿真分析结果表明, 节点抗毁度对节点重要性的分析克服了现有方法的缺点, 较为科学、准确。

**关键词:** 军事通信网; 抗毁性; 网络可靠性; 节点重要性

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Analysis on Reliability and Nodal Importance of Military Communication Network Based on Invulnerability

Ma Rui<sup>1</sup>, Zhu Jianchong<sup>1</sup>, Yang Meiling<sup>2</sup>(1. Dept. of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;  
2. No. 91321 Unit of PLA, Shanghai 200436, China)

**Abstract:** According to the shortage of the current researches of network invulnerability indices, this paper makes research on network reliability and node importance based on invulnerability. By analyzing statistically about network clustering survivability under different node-link reliability, indices of network invulnerability and node invulnerability-network clustering invulnerability and nodal invulnerability are proposed, based on which simulation are processed. The simulation results indicate that the analysis of nodal importance base on nodal invulnerability overcomes the defect of the current methods and is more scientific and accurate.

**Key words:** military communication network; invulnerability; network reliability; node importance

### 0 引言

作为战时搜集、处理和传发信息的信道, 军事通信网在战斗中的首要任务是保证通信线路的连通, 在信息化作战中发挥着神经触角的作用。由于军事通信网的节点和链路易受到敌方的针对性破坏, 因此对网络节点的重要性进行分析显得尤为重要。从研究问题角度的不同, 可以把现存的网络可靠性指标分成 2 类<sup>[1]</sup>: 图论及概率论意义上的连通性和以网络的某种性能指标为基础的可用度。

在衡量节点重要性时, 通常考察的是节点失效后对网络造成的破坏程度, 按破坏程度大小衡量节点的重要性。军事通信网可靠性包括抗毁性和生存性, 因此其节点重要性可分为在生存性意义下的节点重要性和在抗毁性意义下的节点重要性, 简称节点抗毁性和节点生存性。

节点抗毁性主要从节点在网络中所处的拓扑位置出发分析节点重要性。国内外有不少文献就网络拓扑结构的抗毁性测度进行了论述, 主要有粘聚度和连通度<sup>[2]</sup>、代数连通度<sup>[3-4]</sup>、坚韧度<sup>[5]</sup>、网络结构

熵<sup>[6]</sup>、节点抗毁测度均方差<sup>[7]</sup>、跳面节点法<sup>[8]</sup>以及最大集群尺度<sup>[9]</sup>等, 节点重要性的评价方法主要有平均等效最短路法<sup>[10]</sup>、度数法、介数法<sup>[11]</sup>、生成树法<sup>[12]</sup>、互信息法<sup>[13]</sup>、page rank 法<sup>[14]</sup>等。代数连通度法只能分析连通网络的可靠性; 互信息法只能用来分析节点间的相对重要性而无法分析网络的可靠性; 度数法和介数法对于节点重要性的分析过于粗略; 生成树法无法判断不同割点之间的重要性; 平均等效最短路法在分析大规模网络时非常复杂; 跳面节点法不能反映出节点之间连接的细节。文献[15]对网络聚类生存度的算法进行了改进, 并用改进后的算法对通信网可靠性进行了分析, 证明了改进后算法能够科学准确地分析网络生存性。笔者在文献[15]基础上, 通过对在不同节点-链路可靠性条件下的网络聚类生存度进行统计分析, 得到能够反映网络抗毁性和节点抗毁性的指标, 从抗毁性角度对网络可靠性和节点重要性进行分析。

### 1 网络聚类抗毁度

网络聚类生存度是从生存性角度具体描述网络

收稿日期: 2012-04-29; 修回日期: 2012-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(70471031); 海军工程大学科研基金(HGDSK2012E13)

作者简介: 马睿(1982—), 男, 山东人, 硕士研究生, 工程师, 从事装备保障指挥自动化研究。

可靠性的有效指标, 对于网络  $G$ , 其网络聚类生存度定义为在一定的节点-链路可靠度情况  $C_k$  下, 网络中各个子聚类生存度的加权平均值<sup>[15]</sup>。

计算公式为

$$S_G^{C_k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{F}{F+|d_i-\bar{d}|} r_{ni}^{C_k} \left( 1 - \prod_{j \in E_i} (1 - r_{ej}^{C_k} r_{nj}^{C_k}) \right) \quad (1)$$

$N$  为节点数目,  $d_i$  为节点度,  $\bar{d}$  为节点度平均值,  $F$  为常数取  $F=1\ 000$ ,  $E_i$  是聚类  $i$  中聚枝的集合,  $C_k$  为节点-链路可靠度的一种取值情况,  $r_{ni}^{C_k}, r_{ej}^{C_k}, r_{nj}^{C_k} \in C_k$ , 其中  $r_{ni}^{C_k}, r_{nj}^{C_k}$  为在  $C_k$  情况下节点可靠度,  $r_{ej}^{C_k}$  为在  $C_k$  情况下链路可靠度。

网络聚类生存度综合考虑了网络拓扑结构和节点-链路可靠性对网络可靠性的影响, 在不同的节点-链路可靠度条件下计算得到的网络可靠性结果可能不同, 因此需要对在不同的节点-链路可靠度情况下的聚类生存度分别计算然后分析其统计规律, 这样才能得到反映网络拓扑结构的网络抗毁性结果。

**定义 1** 网络  $G$  的聚类抗毁度等于网络  $G$  在不同的节点-链路可靠度情况下的网络聚类生存度的平均值。

计算公式为

$$I_G = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M S_G^{C_k} (C_k \in C) \quad (2)$$

$C$  表示各种节点-链路可靠度情况的集合;  $C_k$  表示第  $k$  种节点-链路可靠度情况;  $M$  为各种可靠度情况的数量。根据定义可知, 在计算网络聚类抗毁度时考虑的不同节点-链路可靠度情况越多 (即  $M$  越大), 网络抗毁性分析结果就越科学准确。为方便计算, 笔者取  $C=\{0.1, 0.2, 0.3, \dots, 0.9\}$ ,  $M=9$ 。即节点-链路可靠度为 0.1, 0.2, ..., 0.9 总共 9 种情况。

## 2 节点抗毁度

**定义 2** 节点  $i$  在一定的节点-链路可靠度情况  $C_k$  下的生存度等于节点  $i$  失效后造成的网络  $G$  聚类生存度的减少比重。

计算公式为

$$S_i^{C_k} = (S_G^{C_k} - S_{G_i}^{C_k}) / S_G^{C_k} \quad (3)$$

式中:  $G_i$  表示节点  $i$  失效后的网络。

**定义 3** 节点  $i$  的抗毁度等于在不同的节点-链路可靠度情况下节点  $i$  的生存度平均值。

计算公式为

$$I_i = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M S_i^{C_k} (C_k \in C) \quad (4)$$

$C, C_k, M$  的定义与式 (2) 中相同。

## 3 仿真计算

### 3.1 网络抗毁性分析

#### 3.1.1 简单网络抗毁性分析

对文献[8]中的 2 个简单网络进行拓扑抗毁性分析, 网络结构如图 1, 结果见表 1。

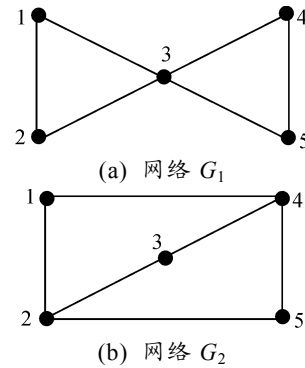


图 1 文献[8]中网络示例 1

表 1 图 1 中网络抗毁性分析

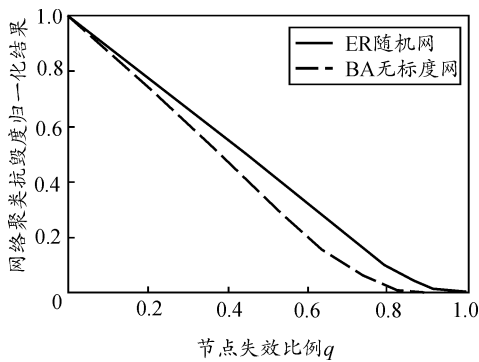
节点-链路可靠度 $p$	网络聚类生存度 $S(G_1)$	网络聚类生存度 $S(G_2)$	$S(G_2)/S(G_1)$
0.1	0.002 4	0.002 4	1.000
0.2	0.018 6	0.018 6	1.000
0.3	0.060 1	0.060 5	1.007
0.4	0.134 3	0.135 8	1.011
0.5	0.243 2	0.246 8	1.015
0.6	0.383 0	0.389 4	1.017
0.7	0.544 5	0.553 3	1.016
0.8	0.713 4	0.722 5	1.013
0.9	0.873 2	0.877 6	1.005
网络聚类抗毁度	$I(G_1)=0.330\ 3$	$I(G_2)=0.334\ 1$	$I(G_2)/I(G_1)=1.012$

网络  $G_1, G_2$  的聚类抗毁度分别为 0.330 3、0.334 1,  $G_2$  的抗毁性好于  $G_1$ , 与文献[8]中分析结果相同。当  $p$  较小时,  $G_1$  与  $G_2$  的网络聚类生存度相同, 随着  $p$  增大,  $G_2$  的网络聚类生存度逐渐高于  $G_1$ , 当  $p=0.6$  时,  $G_2$  与  $G_1$  的网络聚类生存度之比  $S(G_2)/S(G_1)$  达到最大值, 随着  $p$  继续增大, 比值  $S(G_2)/S(G_1)$  逐渐减小。在不同的  $p$  值下,  $G_2$  与  $G_1$  的网络聚类生存度比值不同, 即 2 个网络的生存性差异大小不同, 这说明网络生存性跟节点和链路的可靠性有关。

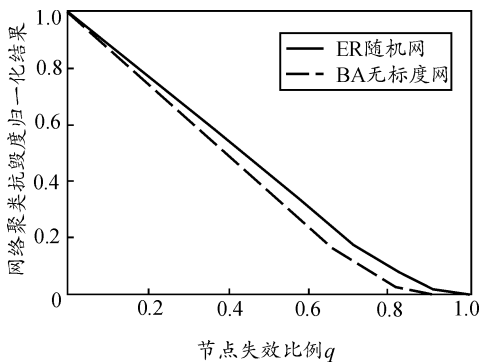
#### 3.1.2 复杂网络抗毁性分析

文献[9]指出, 通信网络在结构上属于复杂网络, 并使用最大集群尺度来描述网络的可靠性。军事通信网作为通信网的一种, 其结构也属于复杂网络, 研究军事通信网的抗毁性可以使用复杂网络作为参考模型。ER 随机网和 BA 无标度网是目前复杂

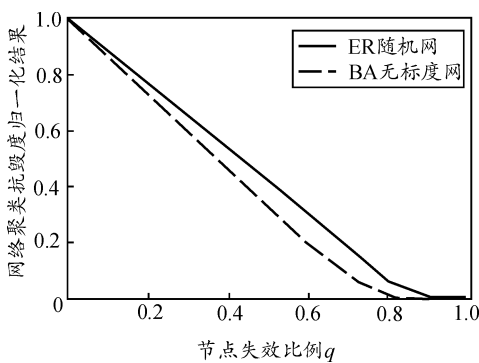
网络中研究得比较多的典型网络，由于军事通信网遭到的攻击主要是针对性攻击，下面对节点规模为 200、250、300 的 BA 无标度网和 ER 随机网络在针对性攻击情况下的抗毁性进行分析。针对性攻击策略是根据节点度大小确定节点重要程度，按照一定比例  $q$  攻击最重要的节点且假设链路不受到攻击，该攻击策略与文献[9]中一致。由于当网络完好时，BA 网与 ER 网的抗毁度不同，故将 2 个网络的抗毁度分析结果归一化，即认为当网络完好时，2 个网络的抗毁性最好均为 1，并与文献[9]中 10 000 个节点的随机网和无标度网在针对性攻击情况下的网络可靠性分析结果比较，如图 2 所示。



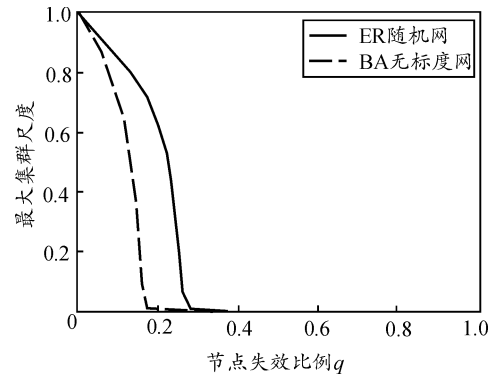
(a) 200 个节点的网络抗毁性



(b) 250 个节点的网络抗毁性



(c) 300 个节点的网络抗毁性



(d) 10 000 个节点的网络可靠性

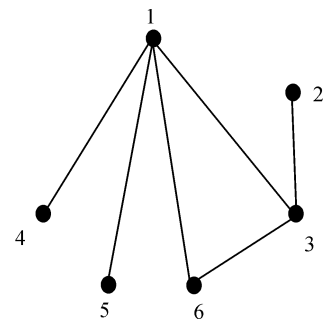
图 2 复杂网络抗毁性分析结果

用网络抗毁度分析在针对性攻击情况下 200、250、300 个节点的随机网和无标度网抗毁性得到的结果均为 ER 随机网好于 BA 无标度网，该结论与文献[9]中网络可靠性结论一致。随着网络中节点失效比例的增大，网络会变为不连通，可见聚类抗毁度可应用于不连通网络的可靠性分析。

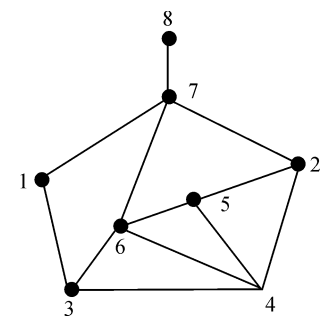
### 3.2 节点抗毁性分析

#### 3.2.1 有割点的网络

对文献[10]中如图 3 所示的网络，计算各个节点的抗毁度，结果如表 2、3 所示。



(a) 网络  $G_3$



(b) 网络  $G_4$

图 3 文献[10]中网络示例 2

表 2  $G_3$  中各个节点抗毁度

节点编号	1	2	3	4	5	6
节点抗毁度	0.606 2	0.159 7	0.446 7	0.150 4	0.150 4	0.270 1

表 3  $G_4$  中各个节点抗毁度

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8
节点抗毁度	0.150 4	0.200 1	0.210 3	0.254 9	0.200 1	0.249 6	0.300 7	0.085 1

$G_3$  中节点抗毁度结果是节点 1 比节点 3 重要,  $G_4$  中节点 7 比节点 6 重要, 以上结论均与文献[10]一致。该结果说明节点抗毁度克服了生成树法和跳面节点法的缺点, 可以比较不同割点的重要性并且反映了节点之间连接的细节。

3.2.2 无割点的网络

APAR 网 (APARNET) 是美国国防部高级研究计划局于 1968 年组建, 最初服务美国国防部的军事通信网, 1975 年移交美国国防部通信局管理并向非军用部门开放, 是现在英特网 (Internet) 的雏

形。文献[13]对 21 个节点 26 条边的 APAR 网进行了分析, 该网络无割点。采用笔者提出的方法对各节点抗毁度进行计算, 并将结果与文献[13]中现有方法结果进行比较。APAR 网结构如图 4, 比较结果见表 4。

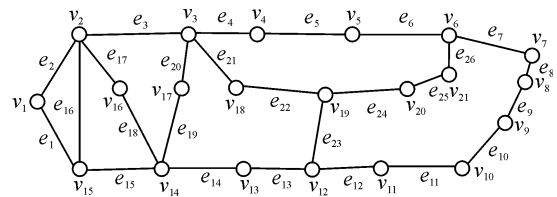


图 4 APAR 网结构

表 4 APAR 网络节点重要程度对照表

编号	度数法	介数法	生成树法	page rank 法	互信息法	节点抗毁度
v1	2	0.000	0.626 2	0.036	-1.099	0.064 0
v2	4	0.025	0.972 1	0.067	1.674	0.117 9
v3	4	0.030	0.993 0	0.070	2.079	0.122 0
v4	2	0.005	0.838 7	0.040	-0.693	0.068 1
v5	2	0.005	0.838 7	0.041	-0.405	0.070 3
v6	3	0.015	0.983 6	0.061	1.216	0.102 6
v7	2	0.005	0.879 7	0.043	-0.405	0.070 3
v8	2	0.005	0.879 7	0.045	0.000	0.074 5
v9	2	0.005	0.879 7	0.045	0.000	0.074 5
v10	2	0.005	0.879 7	0.044	0.000	0.074 5
v11	2	0.005	0.879 7	0.042	-0.405	0.070 3
v12	3	0.015	0.978 0	0.057	0.811	0.098 4
v13	2	0.005	0.805 1	0.038	-1.099	0.064 0
v14	4	0.030	0.986 4	0.069	2.367	0.124 3
v15	3	0.010	0.878 7	0.051	-0.170	0.089 8
v16	2	0.005	0.663 9	0.036	-1.386	0.061 7
v17	2	0.005	0.697 7	0.037	-1.386	0.061 7
v18	2	0.005	0.770 1	0.038	-1.099	0.064 0
v19	3	0.015	0.967 1	0.057	0.811	0.098 4
v20	2	0.005	0.827 9	0.041	-0.405	0.070 3
v21	2	0.005	0.827 9	0.042	-0.405	0.070 3

按照节点抗毁度对节点重要性排序所得结果与互信息法结果基本相同。度数法、介数法、生成树法对节点 7、8、9、10、11 的重要性评价相同, page rank 法、互信息法和节点抗毁度详细判断出上述节点之间重要性的差别。节点抗毁度判断节点 15 的重要性比 8、9、10 要高, 这与互信息法、生成树法相矛盾, 但是与 page rank 法、度数法、介数法结果相同, 这是因为聚类生存度强调了聚核节点的核心作用, 聚核节点度数越高则核心作用越明显, 而互信息法和生成树法更侧重于网络中节点间的相互作

用。由分析结果可见, 节点抗毁度对节点重要性的分析科学、准确。

4 结语

仿真结果表明: 笔者提出的网络聚类抗毁度和节点抗毁度克服了现有方法的缺点, 能科学、准确地对网络可靠性和节点重要性进行分析。

参考文献:

[1] 罗鹏程, 金光, 周经伦, 等. 通信网可靠性研究综述[J]. 小型微型计算机系统, 2000, 21(10): 1073-1077.