

一种卫星网络拓扑抗毁性评价方法的研究

魏德宾 秦玉帆 于 冉

(大连大学信息工程学院通信与网络重点实验室 大连 116622)

摘 要 从卫星网络高动态、周期性的特点出发,针对现有基于跳面节点法的网络拓扑结构的抗毁性评估方法对相似拓扑结构区分度不高的问题,提出新的抗毁性评估方法。该方法定义了新的修正因子,在理论上统一了基于跳面节点法及其改进方法的数学解析表达式,并且该方法适用于高动态卫星网络拓扑结构的抗毁性评估。仿真实验验证表明,该方法对不同拓扑结构的区分度更高,更具合理性。

关键词 卫星网络,网络拓扑,抗毁性,跳面节点法

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Research on Satellite Network Topologies Survivability Evaluation Method

WEI De-bin QIN Yu-fan YU Ran

(Key Laboratory of Communication Networks, College of Information Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract From the the high dynamic characteristics of satellite network, in view of the existing survivability assessment method, aiming at the shortcoming of the jump-range-node method for network topology survivability assessment, a new survivability evaluation method for satellite network was proposed. The new method defines the new correction factor, unifies the analytic expressions of the topological evaluation method based on jump-range-node method in theory, and this method is applicable to the survivability assessment of high dynamic satellite network topology. Simulation results show that distinguishing degree of this method is more higher and more reasonable to the different topological structure.

Keywords Satellite network, Network topology, Survivability, Jump-range-node method

1 引言

网络抗毁性是指网络在遭受攻击或遇到故障时,在部分节点或链路失效后网络继续维持自身功能状态的能力。为了避免或降低部分节点或链路失效给网络性能带来的损失,在网络设计之初对网络抗毁性进行有效评估具有重要的参考和指导意义。

网络拓扑抗毁性是网络抗毁性研究中的热点问题,也是评价网络抗毁性的重要指标,其含义为网络在遭受攻击或遇到故障和意外事故时仍能能够及时完成其关键任务的能力^[1]。

卫星通信网络是由多颗不同轨道、不同种类、不同性能的卫星形成星座覆盖全球,通过星间、星地链路将地面、海上、空中和深空中的用户密集联合,并进行信息的获取、处理和传输的一体化信息网络。考虑到卫星通信的复杂性和暴露性,以及卫星发射与维护的高额成本,进行网络拓扑结构抗毁性的评估对于网络规划、设计、建设、运行和维护具有十分重要的意义。

关于网络拓扑结构抗毁性评价方法,国内外不少文献都有研究,如跳面节点法^[2]、基于节点抗毁性度量值均方差的评估模型^[3]、最短路径数法^[4]、基于谱测度的评估方法^[5,6]、基于自然连通度的评估方法^[7-9]、基于拓扑路径不相交度量^[10],

这些模型各有其评价侧重点,也各有局限性。

其中跳面节点法不仅计算简单,而且评价结果是归一化的,具有对拓扑结构进行快速直观评价的优势。但卫星网络拓扑结构具有高动态特性和周期性,当两个时间片之间的拓扑结构差异性较小时,跳面节点在区分相似的拓扑结构上计算度量不够准确。本文在详细分析跳面节点法及其改进方法的基础上,针对其对相似拓扑结构区分度不高和对同一节点在不同拓扑结构中无法区分的不足提出了新的改进措施。本文方法从理论上统一了现有跳面节点法及其改进方法的数学解析表达式,进而拓展了基于跳面节点法网络拓扑结构抗毁性评估方法的适用范围,计算结果能更准确地刻画相似的拓扑结构之间抗毁性的差异。

2 跳面节点法的基本原理

跳面节点法的基本思想是:根据某一节点到达其他节点的跳数划分跳面,节点到其所有跳面的可靠性之和即为这个节点的重要性,整个网络的抗毁性由各个节点的重要性的平均值决定。为更加清楚地分析及改进跳面节点法,本文引入如下符号:设 $G(V, E)$ 是一个无向简单图,节点集为 V , 边集为 E , 即

$$E = \{e_{ij} = (v_i, v_j) \mid v_i, v_j \in V\}$$

本文受空间信息网络路由和传输协议优化理论及技术研究(91338104)资助。

魏德宾(1978—),男,硕士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为卫星通信、系统仿真与建模, E-mail: weidebin@dlu.edu.cn; 秦玉帆(1990—),男,硕士生,主要研究方向为卫星通信网络; 于 冉(1983—),男,博士,讲师,主要研究方向为计算数学。

其中, v_i 和 v_j 为集合 V 中的节点, e_{ij} 为 v_i 和 v_j 之间的边, 网络中的路径是指由一组顶点构成的序列, 序列中每两个连续顶点都通过网络中的边连接在一起。一条路径的长度等于该路径经过的边的数目。由节点 v_i 到节点 v_j 的路径记作 L_{ij} , L_{ij} 可以不唯一。其中长度最短的路径称为节点 i 到节点 j 的最短路径, 该路径的长度称为跳数。定义从节点 i 出发, 跳数为 j 的所有节点构成节点 i 的第 j 跳面, 记作 V_{ij} 。设 $S_{ij} = \{e_{st} = (v_s, v_t) \mid v_s, v_t \in V_{ij}\}$ 表示 V_{ij} 内部的边的集合。 L_{ij} 为连接 V_{ij} 与 $V_{i(j+1)}$ 的链路集合, 即

$$L_{ij} = \{e_{st} = (v_s, v_t) \mid v_s \in V_{ij}, v_t \in V_{i(j+1)}\}$$

则 $L_{ij} \subseteq E$ 。设 P_{ij} 为 V_{ij} 中与 $V_{i(j+1)}$ 的节点有边相连的节点集合, 即

$$P_{ij} = \{v_j \mid v_j \in V_{ij}, \text{存在 } v_t \in V_{i(j+1)}, \text{使 } (v_j, v_t) \in L_{ij}\}$$

则 $P_{ij} \subseteq N_{ij}$ 。

在跳面 V_{ij} 内, 不与第 $j+1$ 跳面相连, 但与 P_{ij} 集合内节点存在路径的节点集合为 P'_{ij} , P_{ij} 与 P'_{ij} 集合中的节点会对节点 i 到第 $m+1$ 跳面的连接可靠性产生影响。令 $Q_{ij} = P_{ij} \cup P'_{ij}$, 则 Q_{ij} 集合内节点之间的链路是节点 i 经过第 j 跳面到第 $j+1$ 跳面的迂回链路, 设 $T_{ij} = \{e_{pq} = (v_p, v_q) \mid v_p, v_q \in Q_{ij}\}$ 为 Q_{ij} 集合内节点之间的链路, 则 $T_{ij} \subseteq S_{ij}$ 。

本文采用符号 $|A|$ 表示集合 A 中的元素个数。

基于以上概念, 首先给出跳面节点法中网络抗毁性的定义。

定义 1 网络 $G(V, E)$ 的抗毁性 R_G 为网络中每个节点重要性的算术平均值, 即

$$R_G = \frac{1}{|V|} \sum_{i=1}^{|V|} r_i$$

其中, r_i 为节点 i 的重要性。

定义 2 节点 v_i 的重要性 r_i 为该节点到其所有跳面间的可靠性的和, 即

$$r_i = \sum_{j=1}^m r_{ij}$$

其中, r_{ij} 为节点 v_i 到其第 j 跳面的可靠性, m 为距离节点 i 最远跳面的跳数, 由文献[2]可知, r_{ij} 的计算满足如下联积关系:

$$\begin{cases} r_{i1} = r_{01} \\ r_{i2} = r_{i1} \cdot r_{12} \\ r_{i3} = r_{i2} \cdot r_{23} \\ \dots \\ r_{i(j+1)} = r_{ij} \cdot r_{j(j+1)} \end{cases}$$

其中, r_{i1} 为节点 v_i 到 V_{i1} 的归一化可靠性, $r_{j(j+1)}$ 为 V_{ij} 到 $V_{i(j+1)}$ 的归一化可靠性, 归一化因子为 μ_{ij} , 即

$$r_{i1} = \mu_{i1} \cdot F_{i1},$$

$$r_{j(j+1)} = \mu_{ij} \cdot R_{j(j+1)}$$

其中, $\mu_{ij} = \frac{|L_{ij}|}{|V_{ij}|(|V|-1)}$ 。

定义 3 设 $F_{s(j+1)}$ 为 V_{ij} 内的节点 v_s 到 $V_{i(j+1)}$ 的可靠性, $R_{j(j+1)}$ 为 V_{ij} 到 $V_{i(j+1)}$ 的可靠性, F_s 为 V_{ij} 内节点的可靠性, R_k 为 L_{ij} 中边的可靠性, 则有

$$F_{s(j+1)} = F_s \cdot \left[1 - \prod_{k=1}^{|L_{ij}|} (1 - R_k)\right],$$

$$R_{j(j+1)} = 1 - \prod_{s=1}^{|V_{ij}|} [1 - F_{s(j+1)}]$$

若不考虑节点自身可靠性和边自身可靠性(即节点和链路只要存在抗毁性就为 1), 则 $F_{is(j+1)}$ 和 $R_{ij(j+1)}$ 也均为 1。

综上所述, 只要图 $G(V, E)$ 给定节点和链路的可靠性以及网络的拓扑结构, 即可计算出节点 i 的重要性 r_i 以及网络的抗毁性 R_G 。反映了网络节点和链路的不可靠因素, 同时当 $F_{is(j+1)}$ 和 $R_{ij(j+1)}$ 均为 1 时, 反映了网络拓扑结构的抗毁性。

3 基于跳面节点法的改进算法

由跳面节点的原理可知, 归一化 μ_{ij} 的选择决定了跳面节点法对网络抗毁性评估的准确性以及适用范围。文献[2]给出的 μ_{ij} 的计算公式为:

$$\mu_{ij} = \frac{|L_{ij}|}{|V_{ij}|(|V|-1)}$$

该因子表明了节点 v_i 到 $V_{i(j+1)}$ 的可靠性主要由跳面间链路数 L_{ij} 决定。该方法虽然可以简单、快速、直观地对网络的抗毁性进行评估和区分, 但在计算节点重要性时, 文献[2]存在着两点不足。

(1) 没有将跳面内节点间的链路考虑在内, 即没有考虑集合 S_{ij} 对归一化因子 μ_{ij} 的贡献。文献[2]认为, 同一跳面内的链路在计算该跳面内任意节点到它所有跳面间的可靠性时, 必然会将其考虑进去。虽然同一跳面内链路数的增加最终会体现为网络整体抗毁性 R_G 的提高, 但跳面内链路的增加, 会改变网络的拓扑结构, 从而造成同一节点在不同拓扑结构中的重要性无法区分。如图 1 所示, 对节点 1 进行跳面划分并评估其重要性, 利用文献[2]的方法计算得到 G_1 和 G_2 中 r_1 的值均为 0.889, 这显然是不准确的。

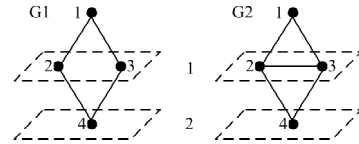


图 1 拓扑结构 G_1, G_2 中节点 1 跳面示意图

(2) 文献[2]的方法也没有考虑跳面间链路的构成情况, 即集合 P_{ij} 与 L_{ij} 的关系。更精确地说, 对于具有相同链路数的集合 L_{ij} , 构成这些边的节点集 P_{ij} 所包含的节点数可能不相等。如图 2 所示, 使用文献[2]的方法计算得到 G_3 和 G_4 中 r_1 的值均为 0.625。在评估节点 1 的重要性时, G_3 中的集合 L_{11} 与 G_4 中的集合 L'_{11} 均含有两条链路, 即 $|L_{11}| = |L'_{11}|$, 但相对应的 P_{11} 中含有 2 个节点, 而 P'_{11} 只含有 1 个节点, 即 $|P_{11}| \neq |P'_{11}|$ 。

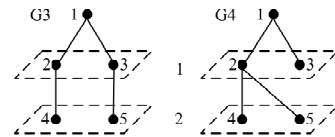


图 2 拓扑结构 G_3, G_4 中节点 1 跳面示意图

针对第一点不足, 文献[11]将归一化因子修改为:

$$\mu_{ij} = \frac{|L_{ij}|}{|V_{ij}|(|V|-1)} \cdot \left(1 + \frac{|S_{ij}|}{C_{|V_{ij}|}^{|V|-1}}\right)$$

该因子不仅考虑了跳面间链路, 即 V_{ij} 对节点 v_i 到 $V_{i(j+1)}$ 可靠性的影响外, 还考虑了跳面内链路, 即 S_{ij} 对节点 v_i 到 $V_{i(j+1)}$ 可靠性的影响。因此, 利用文献[11]的方法计算

得到 G_1 中 r_1 的值为 0.889, G_2 中 r_1 的值为 0.963。可以看出,文献[11]的方法在评价节点重要性时考虑了跳面内边情况,提高了评估的准确度。

虽然文献[11]是在文献[2]的基础上考虑了集合 S_{ij} 对归一化因子 μ_{ij} 的贡献,但在评价节点重要性时依然存在无法区分的情况。如图 3 所示,根据文献[11]方法计算得到: G_5 中和 G_6 中 r_1 的值均为 0.818,这是因为文献[11]虽然考虑了集合 S_{ij} 对归一化因子 μ_{ij} 的贡献,但集合 S_{ij} 内并不是所有的边都会对节点 i 到 $N_{i(j+1)}$ 的可靠性做出贡献。 G_5 中节点 2 与节点 4 之间的链路会对节点 1 到 V_{12} 的可靠性做出贡献,但 G_6 中节点 4 与节点 3 之间的链路并没有对节点 1 到 V_{12} 的可靠性做出贡献。

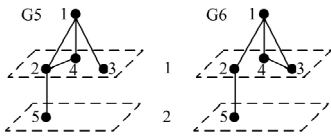


图 3 拓扑结构 G_5, G_6 中节点 1 跳面示意图

针对第二点不足,文献[11]的方法也无法区分。为此,本文在归一化因子的选择中不仅考虑了文献[2]和文献[11]的影响因素,还考虑了跳面间节点连接数量以及跳面内链路对下层跳面可靠性的影响。因此,本文定义归一化因子如下:

$$\mu_{ij} = \frac{|L_{ij}|}{|V_{ij}|(|V|-1)} \cdot \frac{|Q_{ij}|}{|V_{ij}|} \cdot (1 + \frac{|T_{ij}|}{C_{|V_{ij}|}^2}) \quad (1)$$

修改后的 μ_{ij} 对图 1 中 G_1 而言,因为跳面 1 内所有节点都与跳面 2 相连接,所以 $|Q_{ij}|$ 与 $|V_{ij}|$ 比值为 1,而且节点 2 与节点 3 没有链路相连接,即 $|T_{ij}|$ 为 0,此时式(1)退化为文献[2]中的 μ_{ij} 。对图 1 中 G_2 而言,因为跳面 1 内所有节点都与跳面 2 相连接,所以 $|Q_{ij}|$ 与 $|V_{ij}|$ 比值为 1,此时节点 2 和节点 3 有边相连接,且节点 2 和节点 3 与下层跳面相连接,所以 $|Q_{ij}|$ 与 $|V_{ij}|$ 比值为 1, $|T_{ij}|$ 与文献[11]方法中的 $|S_{ij}|$ 相等,此时式(1)退化为文献[11]中的 μ_{ij} 。

利用本文方法对图 2 中节点 1 可靠性进行计算,并与文献[2]与文献[11]中的两种方法进行比较,计算结果如表 1 所列。

表 1 对 G_3, G_4 中节点 1 计算结果的比较			
节点	文献[2]	文献[11]	本文方法
G_3 中 r_1	0.625	0.625	0.625
G_4 中 r_1	0.625	0.625	0.563
能否区分	不能	不能	能

对图 3 中节点 1 的可靠性进行计算,并与文献[2]与文献[11]中的两种方法进行比较,计算结果如表 2 所列。

表 2 对 G_5, G_6 中节点 1 计算结果的比较			
节点	文献[2]	文献[11]	本文方法
G_5 中 r_1	0.813	0.818	0.806
G_6 中 r_1	0.813	0.818	0.771
能否区分	不能	不能	能

可以看出,本文方法对图 2 和图 3 中的拓扑结构节点 1 的重要性进行了有效区分。

4 仿真及结果分析

用 STK 构建卫星网络如图 4 所示。

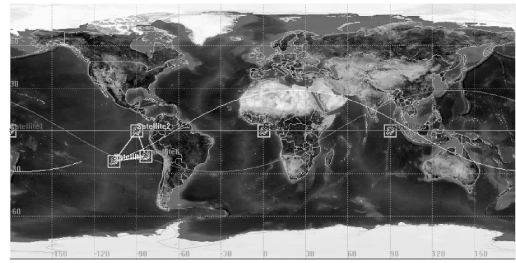


图 4 卫星网络 2D 拓扑结构示意图

卫星参数如表 3 所列。

表 3 卫星参数

卫星编号	轨道高度(km)	轨道倾角(°)	真近点角(°)	升交点赤经(°)
1	6678.14	28.5	310	120
2	6678.14	28.5	240	220
3	10000	0	0	0
4	10000	0	90	0
5	10000	0	180	0
6	10000	0	270	0

假设卫星间可见即可相互通信,由于卫星网络的高动态特性,卫星网络的拓扑结构是周期性变化的,虽然这个卫星网络只有 6 个节点,但一个周期内就有十几种拓扑结构,其中很多不同的拓扑结构非常相似。

以该卫星网络中 3 个比较相似的拓扑结构(见图 5)为例,分别利用文献[2]、文献[11]和本文的方法对 G_7, G_8 和 G_9 3 个拓扑结构的抗毁性进行评估,计算结果如表 4 所列。

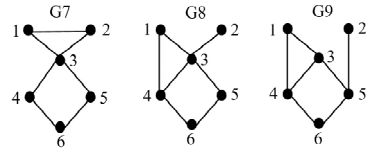


图 5 卫星网络拓扑变化周期内的 3 个拓扑结构示意图

表 4 对 3 个拓扑采用 3 种方法计算网络可靠性的结果

拓扑结构	文献[2]	文献[11]	本文方法
R_{G_7}	0.5840	0.5908	0.5645
R_{G_8}	0.5913	0.5977	0.5974
R_{G_9}	0.5813	0.5870	0.5794

由于 3 个拓扑结构很相近,评估方法的“区分度”成为了关注的重点。所谓“区分度”就是对于拓扑结构相近的网络,一个方法越能定量区分各自的抗毁性,该方法的区分度就越好^[12]。类似于概率论中方差的概念,取两个评估指标的差值与两者均值的百分比来度量区分度。设 G_i 和 G_j 的区分度记为 $C(i, j)$,则

$$C(i, j) = \frac{2|R_{G_i} - R_{G_j}|}{R_{G_i} + R_{G_j}} \times 100\%$$

分别用 3 种方法对 3 个拓扑结构进行差异度比较,结果如图 6 所示。

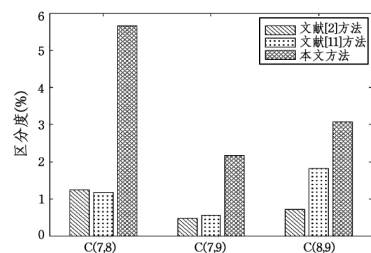


图 6 3 种方法对 3 种拓扑结构区分度的比较

(下转第 310 页)

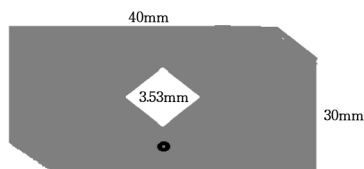


图 5 RFID 天线的尺寸图

图 5 中的黑色小圆圈为直径为 0.5mm 的同轴电缆馈电点。

用有限元法仿真该天线,得到的回波损耗 S11 曲线如图 6 所示。

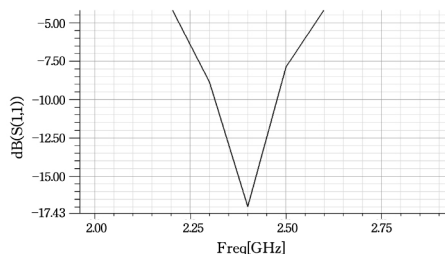


图 6 RFID 天线的回波损耗 S11

仿真的谐振频率为 2.4GHz,3D 方向图如图 7 所示。

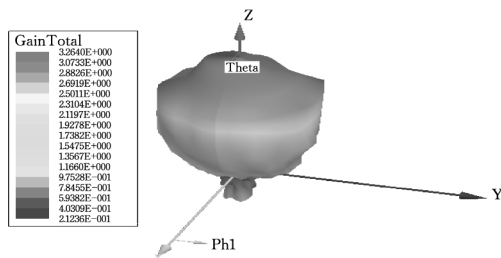


图 7 RFID 天线的增益

其形状像一束玫瑰花,最大增益为 3.264,驻波比 VSWR $\leq$ 2 时,带宽为 160MHz,相对带宽为 6.7%,如图 8 所示。

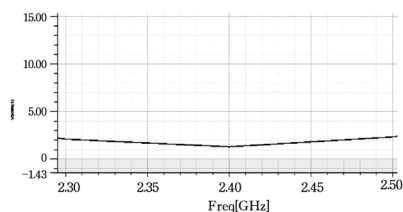


图 8 RFID 天线的驻波比

结束语 RFID 实际应用的关键在于天线的设计上,特别是对于具有非常大市场容量的物流标签来说,要求 RFID 能够实现全方向的无线数据通讯,且需要价格低廉、体积小、读取信息的效益高。因此,从上面各个参数的数据来看,文中所设计的这种半全向型的贴片天线的结构简单、易于批量加工制造,可以满足实际物流系统的应用要求。

参考文献

- [1] Islam M A, Karmakar N C. Compact Printable Chipless RFID Systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(11): 3785-3793
- [2] 马良花, 刘晓亮, 韩云. 基于移动物联网的校园平安卡 RFID 天线设计与安装[J]. 襄阳职业技术学院学报, 2016, 15(1): 30-31
- [3] 赵文婧, 厉丹, 黄为勇, 等. RFID 电子车牌用树脂缝隙天线的设计[J]. 现代电子技术, 2016(5): 73-77
- [4] 郑杰, 徐晶. RFID 读写器天线的设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(23): 228-229
- [5] 郭明昱. RFID 标签天线的设计研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009
- [6] 李明洋, 刘敏, 等. HFSS 天线设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013
- [7] Balanis C A. Antenna Theory-Analysis and Design [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997
- [8] 陈华君. RFID 技术原理及其射频天线设计[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(S1): 312-315

(上接第 303 页)

由图 6 可以看出,本文对 3 种拓扑结构的区分度明显优于文献[2]和文献[11]中的方法。

另外在节点重要性评估方面,利用 3 种方法对 G_7 和 G_8 中节点 3 的重要性进行计算并比较,结果如表 5 所列。

表 5 对 G_7 、 G_8 中节点 3 计算结果的比较

节点	文献[2]	文献[11]	本文方法
G_7 中 r_3	0.880	0.883	0.840
G_8 中 r_3	0.880	0.883	0.888
能否区分	不能	不能	能

可以看出,本文方法对 G_7 和 G_8 中拓扑结构节点 3 的重要性进行了有效区分。

结束语 网络拓扑结构抗毁性是网络设计时需要考虑的一个重要因素。本文从卫星网络拓扑结构高动态、周期性的特点出发,以能够快速评估网络抗毁性的跳面节点法为基础,针对跳面节点及其改进算法存在的对相似拓扑结构区分度不高的缺点,提出了改进的归一化因子,并指出本文算法是对文献[2]和文献[11]算法的推广,适用于卫星拓扑结构的抗毁性评估。

参考文献

- [1] Ellison B, Fisher D A, Linger R C, et al. Survivable network systems an emerging discipline, CMU/SEI-97-TR-013[R]. Pitts-

burgh: Carnegie Mellon University, 1997

- [2] 郭伟. 野战地域通信网络可靠性的评价方法[J]. 电子学报, 2000, 28(1): 3-6
- [3] 陈建国, 张永静. 通信网络拓扑抗毁性评估算法研究[J]. 无线电通信技术, 2006, 32(1): 6-7
- [4] 饶育萍, 林竞羽, 侯德亭. 基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J]. 通信学报, 2009, 30(4): 113-117
- [5] 齐新社, 宋晓峰, 杨东升, 等. 基于谱测度的地域通信网节点重要性评估[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(7): 51-53
- [6] Wu J, Barahona M, Tan Y J, et al. Spectral measure of structural robustness in complex networks[J]. IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics Part A, 2011, 41(6): 1244-1252
- [7] Estrada E, Hatano N, Benzi M. The physics of communicability in complex network[J]. Phys Rep, 2012, 514(3): 89-119
- [8] 吴俊, 谭索怡, 谭跃进, 等. 基于自然连通度的复杂网络抗毁性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(1): 77-86
- [9] Shang Y L. Local natural connectivity in complex networks[J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(6): 68903-68906
- [10] 包学才, 戴伏生, 韩卫占. 基于拓扑的不相交路径抗毁性评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(1): 168-174
- [11] 王亮, 王新增, 王英泓. 基于改进跳面节点法的地域通信网抗毁性评价[J]. 现代电子技术, 2013, 36(13): 13-15
- [12] 何旭. 基于抗毁性的卫星通信系统可靠性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010