

doi: 10.7690/bgzdh.2013.07.015

舰艇编队协同反导网络关键边评估

夏昱¹, 滕克难¹, 高飞²

(1. 海军航空工程学院训练部, 山东 烟台 264001; 2. 海军驻南京地区航空军事代表室, 南京 210002)

摘要: 为评估构建的舰艇编队协同反导作战网络的各条边, 设计一种改进的关键边度量方法。综合分析舰艇编队协同反导作战网络的拓扑结构, 综合考虑边介数和边的 2 个端点对边的支撑作用, 给出关键边评估模型及基本算法流程, 并针对作战网络进行分析计算。结果表明: 该方法克服了以边介数作为评估关键边的重要度指标的片面性, 能提高网络的传输能力, 增强网络重连能力, 大大提高网络的鲁棒性和抗毁性。

关键词: 复杂网络; 舰艇编队; 关键边; 介数

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Evaluation for Critical Edge of Warship Fleet Cooperation Anti-Missile Network

Xia Yu¹, Teng Kenan¹, Gao Fei²

(1. Department of Training, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Military Representatives Bureau of Navy in Nanjing, Nanjing 210002, China)

Abstract: Now the warship fleet cooperation anti-missile network has been the hotspot. In order to evaluate the edges for the warship fleet cooperation anti-missile network, an improved critical edge evaluation method was designed. Comprehensive analysis the topology structure of the anti-missile warship fleet cooperation network, considering the influence of end nodes, gives the critical edge evaluation model and the basic algorithm flow. And analysis and calculation aims at operational networks. Result shows the method overcomes the edge betweenness is used as the index of evaluating critical edge is incomplete. It can improve the transmission capacity of the network, enhance network reconnection capability, and greatly improve network robustness and survivability.

Key words: complicated network; warship fleet; critical edge; betweenness

0 引言

复杂网络小世界效应^[1]及无标度性^[2]的发现, 使复杂网络问题的研究成为前沿热点。研究表明^[3-4], 不同拓扑结构的网络对不同的打击表现出不同的抗毁性, 在随机打击下, 无标度网络比随机网络具有更强的容错性; 但在选择性打击下, 无标度网络却又比随机网络显得脆弱, 一旦有 5% 的核心节点被摧毁, 该网络就基本瘫痪^[5]。选择性打击^[6-7]即先攻击网络中重要的“核心节点”或“核心连接”。一旦找出那些重要的“核心连接”, 既能方便重点保护这些“核心连接”来提高整个网络的可靠性, 又可以攻击这些“薄弱环节”来达到摧毁整个网络的目的。而边的重要度评估正是用于解决该问题的。

在舰艇编队协同反导作战网络中, 边可理解为作战单元之间的信息传输通道, 关键边支撑着作战网络, 对整个作战网络起到了关键作用。如果关键边被摧毁, 将影响整个网络的信息传输, 从而导致整个网络瘫痪, 影响作战进程, 战争结果也必然受到巨大的影响。所以, 如何对舰艇编队协同反导作战网络进行评估, 分析作战网络中边的重要度, 寻

找“核心连接”是非常重要的。

Ball 等^[8]提出通过移除网络中某条边, 随后将最短路径变化作为依据从而判断该边的重要性。Girvan 和 Newman 提出边介数^[9](edge-betweenness)的概念, 通过边介数反映边的控制及传输能力的强弱。边介数越大, 说明该网络中任意节点对经过该边的次数就越多, 该边的控制及传输能力就越强, 在网络中发挥的作用就越大; 因此, 边介数在一定程度上反映了边的重要程度。分析上述 2 种方法, 可以发现前者不适用于节点对之间仅有一条路径连接的情况, 后者则忽视了边的 2 个端点对其本身的影响^[10], 具有一定片面性。基于此种情况, 笔者综合分析舰艇编队协同反导作战网络的拓扑结构, 构建了关键边评估模型及基本算法流程, 并针对作战网络进行了分析计算。

1 舰艇编队协同反导作战网络模型

1.1 作战单元及作战过程的抽象

基于网络中心战的舰艇编队具有较好的协同作战能力, 可以将该编队反导作战网络抽象为一个由链路连接节点的集合, 节点是网络中基本元素, 节

收稿日期: 2013-01-10; 修回日期: 2013-02-15

基金项目: 海军装备部预研项目(4010804040201)

作者简介: 夏昱(1984—), 男, 浙江人, 博士研究生, 从事海军航空装备保障研究。

点和链接分别相当于图论中的顶点和边。敌方的飞航式反舰导弹作为目标节点 T；舰艇上的雷达、声纳、光电传感器、参与作战的预警机、岸基雷达和天基侦察卫星等作为探测传感器节点 S；编队内各个舰艇的指挥控制中心作为决策器节点 D；舰艇上的导弹、舰炮、鱼雷、水雷、各种干扰设备与参与作战的飞机、潜艇上的武器等作为影响器节点 I，由目标节点 T、传感器节点 S、决策器节点 D 及影响器节点 I 组成整个信息网络，从而极大提高了信息共享能力和部队行动速度。各节点的功能如下：

- 1) T(目标节点)：具有军事价值的节点，如反舰导弹等；
- 2) S(传感器节点)：接收各种可观测信息(如目标方位和速度)，随后将信息传递给决策者；
- 3) D(决策器节点)：接收来自传感器的相关信息，并做出相应的决策；
- 4) I(影响器节点)：接收决策者相关指令，与其他节点相互作用从而影响其他节点状态。

1.2 模型仿真真例

假设有一个舰艇编队由 10 艘舰艇组成，将单艘舰艇的指控中心抽象为决策器 D；舰艇上的导弹系统、前后主炮、深弹、火箭弹等武器装备及作战飞机、潜艇上的作战武器可以抽象为 20 个影响器 I；舰艇上的雷达、声纳、光电传感器、参与作战的预警机、岸基观通站雷达和天基侦察卫星等抽象为 20 个传感器 S；敌方发射 5 枚飞航式反舰导弹抽象为 5 个目标 T。假设 T、S、D、I 4 类节点的数目分别为 $N_T=5, N_S=20, N_D=10, N_I=20$ 的一个作战网络；各节点间连接概率为： $P_{ST}=0.3, P_{DI}=0.8$ ，传感器 S 之间和影响器 I 之间采用 NW 小世界网络，加边概率 $P_{SS}、P_{II}$ 分别取 0.4，决策器 D 之间采用 BA 无标度网络进行连接。

1.3 模型参数分析

在舰艇编队协同反导作战网络中，传感器之间和影响器之间采用 NW 小世界网络连接，且决策器之间采用 BA 无标度网络连接后，该网络传感器节点、决策器节点及影响器节点的度都增加，各节点的度分布如图 1 所示。

利用 Pajek 软件得到网络模型特征参数。表 1 给出了作战网络模型的特征参数，目标与传感器之间、传感器与决策器之间、决策器与影响器之间以及影响器与目标之间都采用了随机连接。从表 1 可见，该网络虽然增加了节点的平均度，使得通信或

传输成本增加，但具有更小的平均路径长度和更大的平均聚集系数，提高了网络的传输能力，增强了网络重连能力，能大大提高网络的鲁棒性和抗毁性。

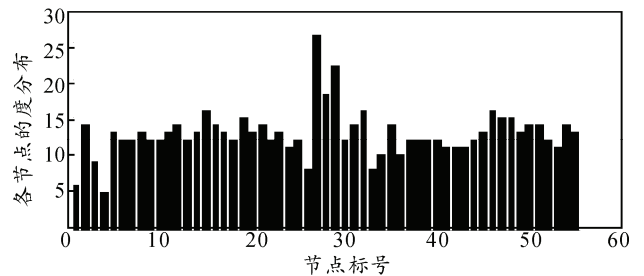


图 1 构建的舰艇编队协同反导作战网络的度分布

表 1 舰艇编队协同反导网络作战模型参数

特征参数	数值	特征参数	数值
N(节点数)	55	平均度	6.418
L(边数)	353	C(介数)	0.134
CPL(平均路径长度)	2.44	平均聚集系数	0.11

2 关键边数学模型及计算流程

2.1 边介数的计算

由节点集 $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 和边集 $E=(e_1, e_2, \dots, e_n)$ 所组成的网络 $G=(V, E)$ 。 θ 代表网络 $G=(V, E)$ 中的一个节点或一条边， θ 的介数定义为：假设节点对 v_g 和 v_k 之间的最短路径有 $L=(g, k)$ 条($g \neq k$)，其中有 $L=(g, k, \theta)$ 条经过 θ ，则 θ 的介数 B_θ 可表示为：

$$B_\theta = \frac{\sum_g \sum_k L(g, k, \theta)}{n(n-1)/2} \quad (1)$$

式中， n 表示网络节点的总数。

2.2 关键边的评估数学模型

网络中边的重要程度除了与边介数有关外，还依赖于 2 个端点的影响力对边的支撑作用。端点对边支撑作用的大小主要有 2 个因素：一是端点的介数，端点的介数越大，对相连边的支撑作用也就越大；二是端点的影响力，它与端点在网络中的重要度有关，端点的重要度越大，端点的影响力越大。

假设 $d(v_i, v_j)$ 表示以节点 v_i 为起点，节点 v_j 为终点的最短路径长度，则节点 v_i 的重要度 K_i 定义为

$$K_i = 1 / \sum_{j=1}^n d(v_i, v_j), \quad j \neq i \quad (2)$$

根据式 (2) 可知，节点重要度 K_i 越大，节点在全局网络中越重要。

端点对边支撑作用的大小与端点的点介数和端点的影响力有关。将边介数、端点重要度及端点介数结合起来评估网络中边的重要程度，从而确定网络中关键边的位置，其结果可能更接近于真实情况。

网络关键边的数学模型构建方法：将边 e_{ij} 的介

数作为该边的初值，将端点的点介数与端点重要度的乘积作为该端点对边 e_{ij} 的支撑作用。因此，评估网络关键边 e_{ij} 的数学模型为：

$$I_{ij} = B_{ij} + \frac{B_i K_i}{K_i + K_j} + \frac{B_j K_j}{K_i + K_j} \quad (3)$$

其中： I_{ij} 表示关键边 e_{ij} 的评估值； B_{ij} 表示边 e_{ij} 的介数； B_i 、 B_j 表示节点 v_i 和 v_j 的点介数； K_i 和 K_j 分别表示节点 v_i 和 v_j 的重要度。

2.3 关键边评估的计算流程

根据式 (3)，关键边评估的计算流程如下：

- 1) 确定节点 v_i 的重要度 K_i ；
- 2) 确定网络中所有节点对 v_g 和 v_k 之间的最短路径有 $L=(g, k)$ 条；
- 3) 确定网络中所有节点对 v_g 和 v_k 之间的最短路径经过节点 v_i 有 $L=(g, k, v_i)$ 条；

4) 确定网络中所有节点对 v_g 和 v_k 之间的最短路径经过边 e_{ij} 有 $L=(g, k, e_{ij})$ 条^[6]；

- 5) 计算节点 v_i 的介数 B_i ；
- 6) 计算边 e_{ij} 的介数 B_{ij} ；
- 7) 计算边 e_{ij} 2 个端点对该边的支撑作用；
- 8) 计算关键边 e_{ij} 的评估值 I_{ij} ；
- 9) 比较网络上所有边的关键边评估值的大小，确定关键边。

2.4 评估结果与分析

根据所构建的关键边评估数学模型，计算构建的舰艇编队协同反导网络中各条边的评估值，其计算结果如表 2，构建的舰艇编队协同反导作战网络中共有 353 条边，由于版面所限，笔者只给出了关键度最大的前 40 条边。表 2 中每一条边由节点 1 和节点 2 组成。

表 2 舰艇编队协同反导网络关键边的评估结果

边重要度排序	节点 1	节点 2	边重要度大小	边重要度排序	节点 1	节点 2	边重要度大小
1	D ₄	D ₂	0.141 0	21	D ₂	S ₅	0.110 5
2	D ₂	D ₄	0.137 3	22	I ₁₄	D ₂	0.107 7
3	D ₇	D ₂	0.135 4	23	I ₆	D ₂	0.107 5
4	D ₃	D ₂	0.133 5	24	I ₁₈	D ₂	0.106 3
5	D ₂	D ₇	0.132 0	25	I ₇	D ₂	0.105 9
6	D ₂	D ₆	0.131 5	26	D ₁	D ₂	0.105 3
7	D ₂	D ₃	0.131 0	27	D ₄	D ₆	0.103 5
8	S ₆	D ₂	0.126 9	28	D ₇	D ₄	0.097 9
9	D ₁₀	D ₂	0.126 8	29	D ₄	D ₇	0.097 9
10	D ₂	D ₁₀	0.126 8	30	D ₄	D ₁₀	0.097 7
11	D ₆	D ₂	0.126 7	31	D ₆	D ₄	0.095 9
12	D ₂	H ₄	0.119 8	32	D ₃	D ₄	0.094 8
13	S ₂₀	D ₂	0.119 3	33	D ₁₀	D ₄	0.094 3
14	S ₅	D ₂	0.117 9	34	D ₄	D ₃	0.094 2
15	D ₂	I ₁₈	0.113 0	35	S ₇	D ₆	0.089 0
16	D ₂	S ₂₀	0.112 9	36	D ₄	D ₉	0.084 3
17	D ₂	I ₇	0.112 3	37	S ₁₀	D ₄	0.082 3
18	D ₂	D ₁	0.111 6	38	S ₉	D ₄	0.080 6
19	D ₂	I ₆	0.110 8	39	D ₃	I ₁₆	0.077 9
20	D ₂	S ₆	0.110 7	40	D ₄	D ₅	0.077 5

从表 2 中可见，重要度大小排在前 40 的边，主要由决策器节点连接而成，这与决策器之间的协同在网络中的作用重要度一致。表明笔者提出的评估舰艇编队协同反导作战网络关键边的方法有效。

3 结论

笔者针对构建的舰艇编队协同反导网络作战模型，研究了该网络中关键边的评估方法。该方法综合考虑边介数和边的 2 个端点对边的支撑作用，如果一条边的介数越大，其 2 个端点的支撑作用越大，边也就越重要，这与直观上判断边的重要度是一致的。计算结果验证了该方法的有效性和可行性。

参考文献：

[1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(2): 440-442.
 [2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random

networks[J]. Science, 1999, 286(3): 509-512.
 [3] 丁琳, 谭敏生, 肖炜. 复杂网络抗毁性研究综述[J]. 网络通讯及安全, 2009, 5(1): 51-61.
 [4] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟, 等. 复杂网络抗毁性研究综述[J]. 系统工程, 2006, 24(10): 1-5.
 [5] Onnela J P, Saramaki J, Hyvonen J, et al. Structure and tie strengths in mobile communication networks[C]. Proc. Natl. Acad. Sci., 2007, 104(4): 7332-7336.
 [6] 邱原, 邢焕革. 基于复杂理论的作战网络关键边评估方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(8): 22-26.
 [7] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 11(11): 79-83.
 [8] Ball M O, Golden B L, Vohra R V. Finding the most vital arcs in a network[J]. Oper Res Lett, 1989, 8(9): 73-76.
 [9] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 2002, 99(1): 7821-7826.
 [10] Scellato S, Cardillo A, Latora V, et al. The backbone of a city[J]. Eur. Phys. J. B, 2006, 70(4): 221-225.