

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.08.008

基于复杂理论的作战网络关键边评估方法

邱原, 邢焕革

(海军工程大学管理工程系 武汉 430033)

摘要: 针对复杂的作战网络, 提出基于复杂理论的关键边度量方法。采用复杂网络理论将作战体系结构进行网络拓扑化, 分析以边介数作为评估关键边的重要度指标的片面性, 在充分考虑了边的 2 个端点对其本身重要性影响的情况下, 提出评价度量网络关键边的新方法, 构建了数学模型和计算流程, 并针对作战网络进行了计算分析。结果表明: 该方法合理、有效, 可为指挥员的作战部署工作提供一定的参考。

关键词: 复杂网络; 作战体系; 关键边; 介数

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Evaluation Method for Critical Edge of Operation Networks Based on Complex Theory

Qiu Yuan, Xing Huang

(Dept. of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The approach to evaluate the critical edge is proposed for complex operation networks. The operation architecture is topologized by using the theory of complex networks. The method that edge betweenness is used as the index of evaluating critical edge is incomplete. A new approach is proposed by considering the influence of end nodes. The approach's mathematics model and the main algorithms process are presented. Aimed at the operation network, the method is used in the case. The result indicates that the method is reasonable and effective for the operation disposition.

Keywords: complex networks; operation architecture; critical edge; betweenness

0 引言

随着复杂网络小世界效应^[1]及无标度性^[2]的发现, 复杂网络研究逐渐成为多个学科共同关注的前沿热点, 并在互联网^[3]、交通运输^[4]、通讯网络^[5]、电力系统^[6]、生物系统^[7]和军事^[8]等领域被成功应用。在复杂网络中, 关键边对整个网络的连通性和可靠性具有重要的影响。在作战网络中, 边可看作是作战单元之间的指挥信息传输通道, 关键边对整个作战网络起到了支撑作用, 一旦被摧毁, 将对整个网络的信息传输产生巨大影响, 导致整个网络瘫痪, 从而影响作战进程, 甚至可以决定战争的胜负。为此, 针对作战网络中边的重要度进行评估, 寻找“核心连接”就成为一项有意义的工作。

寻找网络中关键边的方法很多, 1989 年 Ball 等人提出了通过移除网络中某条边后最短路径变化情况的方法^[9]来判断该边的重要性, 但对于节点对之间仅有一条路径连接的情况, 该方法就不适用; 2002 年 Girvan 和 Newman 在介数中心度的基础上, 提出了边介数^[10](edge-betweenness)概念。通过计算网络中边介数的大小来反映边对网络资

源的传输能力和控制能力的强弱。边介数越大, 表明网络中任意节点对经过该条边的次数就越多, 对网络资源的传输能力和控制能力就越强, 在网络中所起到的作用也就越大。因此, 边介数在一定程度上反映了边的重要程度。但仅仅以边介数作为度量关键边的方法^[11]忽视了边的 2 个端点对其本身的影响, 具有片面性。为此, 笔者通过对作战体系进行网络拓扑结构特性分析, 构建了数学模型及基本算法流程, 并针对作战网络进行了计算分析。

1 作战体系的网络拓扑结构描述

作战体系是指由相互依存、相互作用的各种作战要素、作战单元和作战系统在一定环境中组成的实现特定作战功能的整体。由于信息技术的普遍运用, 传统作战体系的形态发生了根本的改变, 使战场对抗呈现出明显的体系化特征, 战场范围延伸到陆、海、空、天、电、磁等多维空间。因此, 信息化条件下的作战体系是以信息系统为基础, 以信息化武器系统为主体, 以指挥控制系统为核心, 以装备、后勤保障系统为条件, 多要素、多平台、多系统、多军种融合而成的一个有机整体, 从而实现了

收稿日期: 2011-04-28; 修回日期: 2011-05-30

基金项目: 军队研究生资助课题(2010JY0684-394)

作者简介: 邱原(1987—), 男, 福建人, 硕士研究生, 从事装备保障运筹及指挥自动化研究。

共同感知战场态势、实时共享战场信息、准确协调战场行动、同步遂行作战任务的目的。因此, 从信息的传输上看, 作战体系是通过信息系统将广泛分布于战场的各种作战单元和作战系统实现有效连接, 形成了信息条件下的作战网络体系结构^[12-13]。

在作战网络体系中, 按各作战单元系统所发挥的不同功能, 可以分别定义为侦察警戒单元、指挥控制单元、作战打击单元等类型, 将以上作战单元看成节点, 将构成各作战单元之间联系的信息传输看成边。这样, 就可以运用复杂网络理论来分析研究作战网络体系的结构特性了。依据复杂网络理论, 将作战网络体系定义为由节点集 $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 和边集 $E=(e_1, e_2, \dots, e_n)$ 所组成的网络 $G=(V, E)$ 。其中: 节点 v_i 表示指挥控制单元、侦察警戒单元、作战打击单元等; 边 e_{ij} 则表示为指挥控制单元、侦察警戒单元、作战打击单元等节点之间的信息传递关系^[14], 若某 2 个节点存在信息传递关系, 则认为这 2 个节点有边相连, 否则无边。为便于分析问题, 任意 2 个节点之间最多只存在一条边相连。根据作战网络体系构建原则, 运用 Ucinet 6 网络分析软件绘制了作战体系的网络拓扑图, 如图 1。该作战网络体系网络包括 70 个节点, 242 对节点之间存在信息传递关系。其中: 圆形节点代表侦察警戒单元; 矩形节点代表作战打击单元; 椭圆形节点代表指挥控制单元。

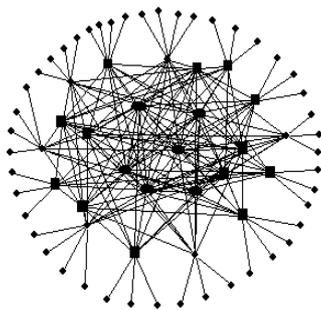


图 1 作战体系的网络拓扑图

在图 1 所示的网络中, 边代表了作战网络体系中各作战单元之间的信息传输关系。其中关键边对整个作战网络体系起到了支撑作用, 直接影响和控制作战网络体系的信息传输, 一旦被敌方摧毁, 将对整个作战网络体系的信息传输产生重大影响, 甚至可以决定战争的胜负。为此, 需要对作战网络体系中边的重要度进行有效评估, 确定关键边的位置, 以便采取有效保护措施。为便于分析问题, 假

设作战网络体系中各节点无指挥级别差异, 且不考虑边的权重, 节点之间信息传递是互对称性的, 即网络是无向、无权的。

2 作战网络体系中关键边的数学模型及计算流程

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 $G=(V, E)$ 。节点 v_i 的度 k_i 表示为与相邻节点连接的数目, 即该节点连接的边数。

节点 v_i 和 v_j 之间的距离 d_{ij} 定义为这 2 个节点之间最短路径的边数, 如果 v_i 和 v_j 之间不存在连接, 则节点 v_i 和 v_j 之间的距离 $d_{ij} \rightarrow \infty$ 。

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, 其中有 $L(g, k; \theta)$ 条经过 θ , 则 θ 的介数 B_θ 可用表示如下:

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

式中 n 表示网络节点的总数。

2.1 边介数作为关键边度量指标的分析

在网络中, 边介数反映了路径对网络资源的传输能力和控制能力。边介数越大, 表明网络中任意节点对经过该条边的次数越多, 对网络资源的传输能力和控制能力就越强, 在网络中所起到的作用也就越大。边介数能否较为准确地衡量边的重要程度可以通过如图 2 所示的网络拓扑结构来分析。

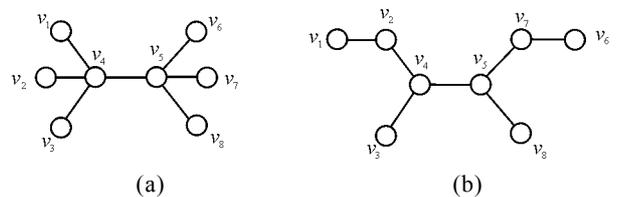


图 2 网络拓扑示意图

图 2 表示的是 2 个简单的网络拓扑结构示意图。为了确定网络中边的重要程度, 可以根据式 (1) 分别计算图 2(a) 和图 2(b) 中各条边的介数大小, 如表 1 所示。从表 1 中可以看出: 图 2(a) 中边 e_{45} 的介数为最大值, 其余 6 条边的介数值为 0.250; 图 2(b) 中边 e_{45} 的介数最大值, 边 e_{24} 和边 e_{57} 介数值次之, 值为 0.429, 其余 4 条边介数值最小, 值为 0.250。

对比 2 图边介数的计算结果可以发现:边 e_{34} 、边 e_{45} 和边 e_{58} 在 2 图中的介数值相同。

表 1 网络拓扑图各条边的边介数计算结果

图号	e_{12}	e_{14}	e_{24}	e_{34}	e_{45}	e_{56}	e_{57}	e_{58}	e_{67}
(a)	—	0.250	0.250	0.250	0.571	0.250	0.250	0.250	—
(b)	0.250	—	0.429	0.250	0.571	—	0.429	0.250	0.250

那么,边介数相同的边在网络中的重要程度就一定相同吗?例如,边 e_{45} 在图 2(a)、(b)中的介数值相同,但支持边 e_{45} 的邻节点拓扑结构是不同的,度值大小也是不一样,在图 2(a)中,边 e_{45} 的端节点 v_4 、 v_5 的度值为 4,而在图 2(b)中,边 e_{45} 的端节点 v_4 、 v_5 的度值为 3,不同度值的端节点对该边的影响程度应该是有所区别的。又如,在图 2(b)中,边 e_{12} 和边 e_{34} 具有相同的介数值,其重要程度是否也是一样的呢?从图 2(b)中可以看出,节点 v_3 通过边 e_{34} 与节点 v_4 相连,节点 v_4 是网络的核心节点之一,对边 e_{34} 的重要性应该具有较大的影响作用。而节点 v_2 的重要性明显要低于节点 v_4 ,其对边 e_{12} 的重要性影响程度应该比节点 v_4 对边 e_{34} 影响程度小。因此,直观上看,边 e_{12} 和边 e_{34} 虽然具有相同的介数值,但重要程度显然不同。所以,仅仅以边介数作为衡量关键边的方法具有片面性,必须考虑边 2 个端点对边的影响大小。

2.2 关键边的评估数学模型

从 2.1 分析可知,网络中边的重要程度除了与边介数有关以外,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;二是端点的影响能力。端点的影响能力越大,端点与该邻点相连的边所受到的支撑作用也就越大。而端点的影响能力又与其邻点的度数有关,端点的邻节点度数越大,端点受到邻节点的影响力就越大。例如,科技合作网络中的“合作效应”^[15],即与权威科学家(度数大的节点)合作的专家学者,其自身的影响力因为与权威科学家合作而得到提高,那么与权威科学家的合作就显得更为重要了。为此,确定网络关键边评估的基本思想是:

节点在网络中的影响力通常受到邻点的影响,即在其邻节点的光环照耀下而显得更加耀眼。如图

3,端点 v_i 受其端点 v_j 的影响力大小可表示为 $\frac{k_j}{k_i+k_j}$,端点 v_j 度数越大,端点 v_i 也就显得更加重要,其对边 e_{ij} 的影响力也就越大。同样道理,端点 v_j 受端点 v_i 的影响力大小可表示为 $\frac{k_i}{k_i+k_j}$ 。而端点

对边支撑作用的大小与端点的点介数和端点对边的影响力有关。为此,将边的介数、端点度值以及端点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。

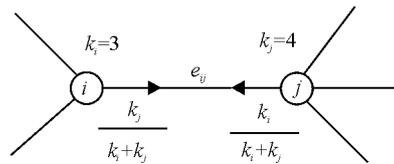


图 3 端点对边影响能力的示意图

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对边影响力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} 的数学模型如式 (2)。

$$I_{ij} = B_{ij} + \frac{B_i k_j}{k_i + k_j} + \frac{B_j k_i}{k_i + k_j} \quad j \neq i \quad (2)$$

式中: 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 的度。

2.3 关键边的计算流程

根据式 (2), 计算流程如下:

- 1) 确定节点 v_i 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;
- 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。

3 案例计算及分析

3.1 示例计算及分析

根据笔者所构建的关键边评估数学模型, 分别计算图 2(a) 和图 2(b) 中各条边的评估值, 其计算结果如表 2。

表 2 网络拓扑图各条边的评估计算结果

图号	边重要度评估方法	e_{12}	e_{14}	e_{24}	e_{34}	e_{45}	e_{56}	e_{57}	e_{58}	e_{67}
(a)	边介数(B_{ij})	—	0.250	0.250	0.250	0.571	0.250	0.250	0.250	—
(a)	关键边评估值(I_{ij})	—	0.357	0.357	0.357	1.107	0.357	0.357	0.357	—
(b)	边介数(B_{ij})	0.250	—	0.429	0.250	0.571	—	0.429	0.250	0.250
(b)	关键边评估值(I_{ij})	0.321	—	0.757	0.375	1.071	—	0.757	0.375	0.321

从表 2 可以看出, 在图 2(a) 中边 e_{45} 的关键边评估值最大, 其余边的关键边评估值相同, 说明在图 2(a) 中边 e_{45} 是最关键的连接; 在图 2(b) 中边 e_{45} 的关键边评估值最大, 边 e_{24} 和边 e_{57} 次之, 边 e_{12} 和边 e_{58} 关键边评估值最小。边 e_{12} 和边 e_{34} 在图 2(b) 中虽然具有相同的介数, 但却有不同的关键边评估值。由于节点 v_1 和节点 v_3 都是末梢节点(度为 1 的节点), 其介数均为 0, 对边 e_{12} 和边 e_{34} 没有支撑作用。边 e_{12} 和边 e_{34} 关键边评估值就取决于节点 v_2 和节点 v_4 对边的支撑作用。显然节点 v_4 对边的支撑作用强于节点 v_2 , 故边 e_{34} 的关键边评估值大于边 e_{12} 。对比图 2(a) 和图 2(b) 可以发现: 边 e_{45} 在 2 图中均为最关键的边, 且具有相同的边介数值, 但是其关键边评估值却不同。相比于后者, 图 2(a) 中边 e_{45} 的关键边评估值更大, 边 e_{45} 在图 2(a) 中的关键程度也更大。这说明在网络拓扑结构发生变化之后, 边介数值不变并不意味着该边在网络中的重要度不发生变化。通过对示例的计算及分析, 可以反映出笔者所提出的关键边评估方法的合理性和有效性。

3.2 作战网络分析

根据一般作战体系分布情况, 将作战体系进行网络化, 如图 4。图 4 中, 节点表示指挥控制单元、侦察警戒单元、作战打击单元等, 边表示各单元之间的信息传递关系, 包括指挥命令的下达, 战场态势信息的传输共享, 作战效果的反馈等。在作战网络中, 哪些作战单元之间的联系程度高? 哪些边的

重要度高? 依据笔者提出的方法进行分析, 找出网络中的关键边, 并进行重点保护, 就可为指挥员的作战部署工作提供一定的参考。

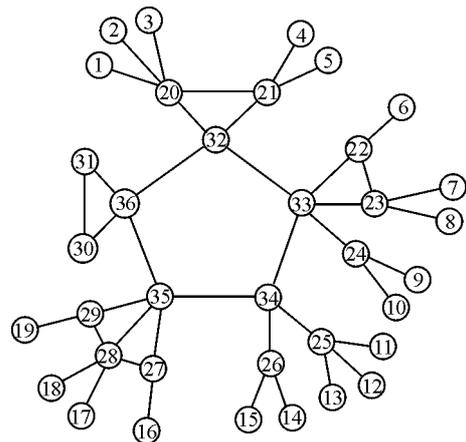


图 4 作战网络图

运用笔者提出的关键边评估方法计算网络中各边的评估值, 所计算的结果如表 3。从表 3 中可以发现, 运用介数法计算出的关键边是指令控制单元 v_{34} 与指令控制单元 v_{35} 之间的路径 $e_{34,35}$ 。而运用笔者提出的方法计算出的关键边是节点 v_{33} 与节点 v_{34} 之间的路径 $e_{33,34}$ 。节点 v_{33} 和节点 v_{34} 是作战网络中影响力最大的 2 个节点, 因此这 2 个节点之间的边也应当是最重要的。指令控制单元之间的信息传递一般被认为是很重要的, 因为指令控制单元是指挥命令下达、信息传输共享、作战效果反馈的枢纽节点, 枢纽节点之间的连接对整个网络起到了支撑作用。通过对比边介数方法可以看出, 利用该方法计算的关键边评估值排序靠前的边都是指令控制单元之间的联系, 这也符合客观实际。说明关键边评估

值的方法能更加合理、有效地找寻作战网络中的关键边。

表 3 作战网络关键边评估值计算结果

排序	边	介数	边	关键边评估值	原排序
1	$e_{34,35}$	0.330	$e_{33,34}$	0.785	2
2	$e_{33,34}$	0.259	$e_{32,33}$	0.663	3
3	$e_{32,33}$	0.254	$e_{34,35}$	0.657	1
4	$e_{25,34}$	0.203	$e_{32,36}$	0.463	6
5	$e_{20,32}$	0.184	$e_{35,36}$	0.459	7
6	$e_{32,36}$	0.183	$e_{25,34}$	0.454	4
7	$e_{35,36}$	0.178	$e_{20,32}$	0.451	5
8	$e_{24,33}$	0.157	$e_{23,33}$	0.415	10
9	$e_{26,34}$	0.157	$e_{26,34}$	0.408	9
10	$e_{23,33}$	0.148	$e_{24,33}$	0.399	8

4 结束语

计算结果表明：关键边评估值方法综合考虑了边介数和边 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。下一步，还将考虑在加权作战网络条件下边的重要度，以及根据节点之间指挥信息、战场信息传递交互的不对称性，来确定节点之间边的重要度。

参考文献：

[1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393: 440-442.

[2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286: 509-512.

[3] Pastor-Satorras R, Vazquez A, Vespignani A. Dynamical and correlation properties of the Internet [J]. Phys. Rev.

Lett. 2001, 87, 258701.

[4] Ganesh Bagler. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network [J]. Physica A, 2008, 387: 2972-2980.

[5] Onnela J P, Saramaki J, Hyvonen J, Szabo G, Lazer D, Kaski K, Kertesz J, Barabasi A L. Structure and tie strengths in mobile communication networks [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 2007, 104: 7332-7336.

[6] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. A topologic analysis of the Italian electric power grid [J]. Physica A, 2004, 338: 92-97.

[7] Gulmera R, Amaral L A N. Functional cartography of complex metabolic networks [J]. Nature, 2005, 433: 895-900.

[8] 沈寿林, 张国宁, 牡丹. 基于复杂网络的作战系统结构研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30(4): 155-158.

[9] Ball M O, Golden B L, Vohra R V. Finding the most vital arcs in a network [J]. Oper Res Lett, 1989, 8: 73-76.

[10] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks [J]. Proc. Natl. Acad. Sci., 2002, 99: 7821-7826.

[11] Scellato S, Cardillo A, Latora V, Porta S. The backbone of a city [J]. Eur. Phys. J. B, 2006, 70: 221-225.

[12] 严正峰. 海军战役作战体系研究[D]. 南京: 海军指挥学院, 2007: 138.

[13] 李茂林, 龙建国, 张德群. 基于复杂网络理论的作战体系节点重要性分析[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(3): 15-17.

[14] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 10-11.

[15] Newman M E J. Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks and centrality [J]. Phys. Rev. E, 2001, 64, 016132.

(上接第 3 页)

5 总结与展望

基于风险因子的模糊综合评价模型，不仅可以对武器装备体系建设风险进行比较全面系统的定量分析和综合评价，而且可以对类似系统进行分析比较，具有一定的通用性。下一步，将加强对武器装备研制、维修、保障、退役以及报废的项目风险的评价。

参考文献：

[1] 狄鹏, 胡涛, 黄涛. 武器装备体系建设风险分析及评估模型研究[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(3): 71-76.

[2] 黎放, 王悦, 等. 基于容弱分析的武器装备体系耦合风险仿真研究[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(6): 42-44.

[3] 王治涛, 王蕾. 武器装备体系建设风险评估框架研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(7): 18-20.

[4] Dr John Porter1, Mr. Matthew Squair, and Mr. Amar Singh. Risk & Safety Aspects of Systems of Systems. Jacobs Sverdrup Australia, Canberra, ACT, 2601.

[5] Andrew P. Sage. "Conflict and Risk Management in Complex System of Systems Issues." Department of Systems Engineering and Operations Research. George Mason University. Fairfax, VA, USA.

[6] 周林, 王君. 军事装备管理预测与决策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 135-159.

[7] 李英华, 申之名, 李伟, 武器装备体系研究的方法论[J]. 军事运筹与系统工程, 2004(1): 17-20.

[8] 李忠民, 汤淑春. 武器装备采办风险管理评价指标体系研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2005, 19(2): 17-20.

[9] Baccarini D, Archer R. The risk ranking of projects: a methodology[J]. International Journal of Project Management, 2001, 19: 139-145.

[10] 董沛武, 赵凤学, 等. 型号项目风险因子测度方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(21): 131-133.

[11] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990: 34-67.

[12] 张杰, 等. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 45-75.

[13] 谭跃进, 陈英武, 等. 系统工程原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 193-199.