

文章编号: 1673-1522 (2012) 05-0588-05

# 基于复杂网络的舰艇编队信息关系结构评估

侯向阳, 吴 柱

(海军指挥学院科研部, 南京 210016)

**摘要:** 通过引入复杂网络中的网络分析模型, 建立了一个用于评价舰艇编队信息关系结构的模型, 并从网络拓扑结构的角度对舰艇编队信息关系结构进行了实例分析。所建立的模型可以从多个角度对舰艇编队信息关系结构进行评价, 这为海上舰艇编队通信组网提供了一种新的评价思路。

**关键词:** 舰艇编队; 信息关系; 复杂网络

**中图分类号:** E837; TP311.13

**文献标志码:** A

舰艇编队在海上遂行作战任务时, 编队内部一旦通信组网不合理, 不但可能导致编队信息交互关系结构脆弱性增大, 而且可能会影响编队作战效能, 甚至会威胁整个编队的安全。所以, 如何构建健壮的通信网络是舰艇编队通信组网的一个难点问题, 也是各国军事研究人员热衷研究的课题。本文通过引入复杂网络中的网络分析模型, 建立用于评价舰艇编队信息关系结构的模型, 从拓扑结构的角度对舰艇编队信息交互进行研究, 试图为海上舰艇编队通信网络的组织结构优化提供新思路。

## 1 舰艇编队信息关系结构评估模型

根据舰艇编队信息交互特点, 本文认为可从中心化程度、效率、脆弱性和网络效能 4 个角度来评估舰艇编队信息关系结构。

### 1.1 中心化程度评估模型

由于舰艇编队信息交互网络结构的不同, 往往导致中心化程度会存在一定差异。为了分辨所存在的差异, 可以从节点、链路和整体这 3 个方面来衡量其中心化程度。

#### 1.1.1 节点中心化程度评估模型

根据复杂网络理论, 度数中心度、紧密中心度和介数中心度常用于衡量节点的中心化程度, 虽然都可以衡量节点的中心化程度, 但视角不同, 各有侧重, 具体如下:<sup>[1-4]</sup>

1) 节点度数中心度。设网络有  $N$  个节点, 节点  $x$

归一化后的节点度数中心度为:

$$C_D(x) = C_c(x)/2(N-1) = d(x)/2(N-1), \quad (1)$$

式中,  $d(x)$  表示与节点  $x$  直接相连的节点数。

利用节点的度数中心度对网络进行中心化分析时, 如果某一节点的度值高则表明该节点与周围节点建立直接联系的能力强, 也就是该节点对直接构成控制或被控制关系的节点的影响很大。一旦该类型的节点出现问题, 就会使周围直接构成控制或被控制关系的节点受到牵连, 甚至导致以该节点为中心, 一个单位度值步长的“区域”受到影响。如, 处于星形网络的中心通信节点出现了问题, 则极有可能会对整个通信网络的崩溃。

2) 节点紧密中心度。节点紧密中心度用于刻画网络中的节点通过网络到达网络中其他节点的难易程度。设网络有  $N$  个节点, 节点  $x$  归一化后的节点紧密中心度为:

$$C_C(x) = \frac{N-1}{\sum_{y=1}^N Pa_{xy}(k_{\min})}, \quad (2)$$

式中,  $Pa_{xy}(k_{\min})$  表示节点  $x$  到达节点  $y$  的最短路径长度。

节点度数中心度反映的是一个节点对其直接联系节点的直接影响, 体现的是一种局部影响能力或局部控制能力。节点紧密中心度反映的是一个节点通过网络对其他节点施加的影响, 体现的是一种全局影响能力或全局控制能力。

3) 节点介数中心度。节点介数中心度刻画的是

收稿日期: 2012-05-04; 修回日期: 2012-06-08

作者简介: 侯向阳 (1961-), 男, 教授, 博士。

网络中的节点对于信息流动的影响力。设网络有  $N$  个节点, 节点  $x$  归一化后的介数中心度为:

$$C_B(x) = \left( \sum_{j < k} g_{jk}(x) / g_{jk} \right) / (N-1)(N-2)。 \quad (3)$$

式(3)中:  $g_{jk}$  表示节点  $j$  和节点  $k$  之间的最短路径数;  $g_{jk}(x)$  表示节点  $j$  和节点  $k$  之间经过节点  $x$  的最短路径数。

节点介数中心度引入了信息流动的概念, 可以用于刻画信息通过最短路径流经指定节点的可能性。值得注意的是: 在几何位置上处于中心地位的节点未必是介数中心度最大的节点。由于介数中心度大的节点所流经的信息量大, 即该点随时可能会影响信息的传递, 如果该类型节点被攻击, 将有可能导致整个网络的信息出现大面积瘫痪。

### 1.1.2 链路介数中心化程度评估模型

链路介数中心度刻画的是网络中的链路对于信息流动的影响力。与节点介数中心度类似, 链路  $L_{a \rightarrow b}$  归一化的链路介数中心度为:

$$C_B(L_{a \rightarrow b}) = 2 \left( \sum_{j < k} g_{jk}(L_{a \rightarrow b}) / g_{jk} \right) / (N-1)(N-2)。 \quad (4)$$

同样, 链路介数中心度可以用于刻画信息通过最短路径流经指定链路的可能性。在网络中, 一个节点往往有多条链路与之相连, 那么利用链路介数中心度可以找到信息负载繁重的链路。由于链路介数中心度大的链路所流经的信息量大, 即该链路随时可能会影响信息的传递, 如果该链路无法正常运行(如被干扰), 将有可能导致整个网络的大面积通信受影响。

### 1.1.3 整体中心化程度评估模型

通过节点中心化评估, 可以帮助寻找网络中的中心节点。但是如果在一个网络中存在多个, 甚至是大量中心节点, 那么中心节点就失去了意义。这个时候衡量整个网络的中心化程度就是一个不错的选择。整个网络的中心化程度大, 说明存在偏差比较大的节点, 即必然存在少数节点中心化程度高(或者必然存在少数网络中心节点)。不难发现, 星形网络的网络中心化程度最高, 中心化程度为 1。而全连通网络的网络中心化程度最低, 中心化程度为 0。由于度量节点中心化程度可以从度数中心度、紧密中心度或介数中心度的角度来衡量, 那么与之相对应的整体中心化程度显然也有 3 个子模型, 具体如下:<sup>[5]</sup>

1) 基于节点度数中心度的整体中心化程度评估

模型。在有  $N$  个节点的网络中, 可用下式度量基于节点度数中心度的网络整体中心化程度:

$$C_{dD}^g(x) = \sum_{i=1}^N \frac{C_{D_{\max}}(j) - C_D(i)}{N-2}。 \quad (5)$$

式(5)中:  $C_{D_{\max}}(j)$  表示网络中归一化后节点度数中心度的最大值;  $C_D(i)$  表示节点  $i$  归一化后的节点度数中心度。

2) 基于节点紧密中心度的整体中心化程度评估模型。在有  $N$  个节点的网络中, 可用下式度量基于节点紧密中心度的网络整体中心化程度:

$$C_{dC}^g(x) = (2N-3) \sum_{i=1}^N \frac{C_{C_{\max}}(j) - C_C(i)}{(N-1)(N-2)}。 \quad (6)$$

式(6)中:  $C_{C_{\max}}(j)$  表示网络中归一化后节点紧密中心度的最大值;  $C_C(i)$  表示节点  $i$  归一化的节点紧密中心度。

3) 基于节点介数中心度的整体中心化程度评估模型。在有  $N$  个节点的网络中, 可用下式度量基于节点介数中心度的网络整体中心化程度:

$$C_{dB}^g(x) = \sum_{i=1}^N \frac{C_{B_{\max}}(j) - C_B(i)}{N-1}。 \quad (7)$$

式(7)中:  $C_{B_{\max}}(j)$  表示网络中归一化后节点介数中心度的最大值;  $C_B(i)$  表示节点  $i$  归一化的节点介数中心度。

## 1.2 效率评估模型

在有  $N$  个节点的网络中, 将任意 2 个节点间最短路长度倒数之和的平均值定义为网络的效率<sup>[6]</sup>:

$$E_0 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} e_{ij}, \quad (8)$$

式中,  $e_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的最短路径长度倒数。

效率高, 说明网络中的节点的连接越紧密, 反之说明节点的连接越疏松。如果节点  $i$  和节点  $j$  之间没有路径, 则  $e_{ij} = 0$ , 当网络是完全连通网络的时候, 网络效率等于  $E = 1$ 。效率高通常表现为在网络中传递信息更容易。网络在演化的过程中, 如果网络效率下降很快, 说明网络受损程度越大, 健壮性越差。显然, 通过网络效率变化曲线, 不但衡量节点的重要性(即哪些节点受损对网络带来的破坏性更大), 还可以看出采取哪种策略删除节点使网络崩溃的速度更快。

## 1.3 脆弱性评估模型

将节点  $i$  的脆弱性定义为:<sup>[5]</sup>

$$V_i = (E_0 - E_{\text{删除}i}) / E_0 \quad (9)$$

式(9)中： $E_{\text{删除}i}$ 表示从初始网络中去掉节点*i*后，所形成的新网络的效率； $E_0$ 表示整个网络初始的效率。

用网络中脆弱性最大的节点的 $V_{\text{max}}$ 来衡量整个网络的脆弱性，即整个网络的脆弱性为

$$V_{\text{max}} = \max \{V_i\} \quad (10)$$

显然，网络的 $V_{\text{max}}$ 越大，网络健壮性越差。

### 1.4 网络效能度量模型

在有*N*个节点的网络中，由各链路的连通概率组成的连通概率矩阵为*A*，那么可以用该矩阵的最大非负特征值 $\lambda_{\text{PFE}}$ 来表示该网络的网络效能<sup>[7-8]</sup>。为了便于比较不同网络的网络效能的差异，需要进行归一化处理：

$$\lambda = \lambda_{\text{PFE}} / N \quad (11)$$

式(11)中： $\lambda$ 表示网络的归一化网络效能； $\lambda_{\text{PFE}}$ 表示网络的网络效能。

显然，网络的 $\lambda$ 越大，说明网络健壮性越好。在舰艇编队信息交互网络中，如果某一节点被“干扰”，则可能导致的编队整体信息交互能力下降。如果该值增大时，说明网络中存在链路连通概率提升；反之当该值减小时，说明存在链路连通概率降低。

## 2 舰艇编队信息关系结构分析模型运用

### 2.1 舰艇编队信息关系设置

假设为完成某项任务，组建由 6 艘水面舰艇组成的编队，同时成立编队指挥所。编队指挥所设于舰艇 4，舰艇 3 前出侦察。将该编队各舰艇抽象为节点，并且将各舰艇之间信息交互关系抽象为链路，那么可得该编队的信息交互网络如图 1 所示。

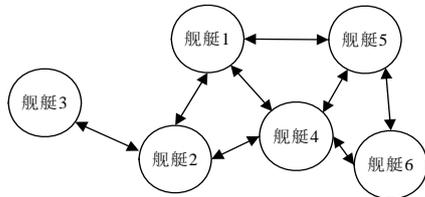


图 1 舰艇编队信息关系拓扑结构图

### 2.2 舰艇编队信息关系结构评估

#### 2.2.1 中心化分析

1)节点中心化分析。调用前文节点中心化程度

评估模型，可以得出该编队的节点中心化数据，如表 1 所示。

表 1 编队节点中心化数据

	舰艇 1	舰艇 2	舰艇 3	舰艇 4	舰艇 5	舰艇 6
节点度数	0.6	0.6	0.200	0.800	0.6	0.4
中心度	0.714	0.714	0.455	0.833	0.625	0.556
节点介数中心度	0.1	0.4	0.0	0.35	0.05	0.0

由表 1 数据不难发现，无论从哪一个指标(视角)，舰艇 3 的数值都较其他舰艇小，处于网络的末梢——仅从信息关系结构的角度来说，末梢节点对整个网络的影响往往较小。而舰艇 4 除了介数中心度外，其他 3 个指标所解算的结果均是最大，处于网络的中央。这说明舰艇 4 不但对局部信息的控制能力强，而且对整个编队全局的信息掌控能力也强。一旦舰艇 4 被击毁或无法与外界进行信息交互，将会导致整个编队的信息交互能力急剧下降。值得注意的是：舰艇 2 也扮演了很重要的角色，这是因为其他舰艇和舰艇 3 发生信息交互均需要通过舰艇 2 的缘故，它扮演了“中间人”的角色。

2)链路中心化分析。调用前文链路中心化程度评估模型，可得出整个网络所有的链路介数中心度，如表 2 所示。

表 2 编队网络所有链路介数中心度

	舰艇 1	舰艇 2	舰艇 3	舰艇 4	舰艇 5	舰艇 6
舰艇 1	0	0.30	0	0.15	0.25	0
舰艇 2	0.30	0	0.50	0.50	0	0
舰艇 3	0	0.50	0	0	0	0
舰艇 4	0.15	0.50	0	0	0.20	0.35
舰艇 5	0.25	0	0	0.20	0	0.15
舰艇 6	0	0	0	0.35	0.15	0

由表 2 数据不难发现，舰艇 2 与舰艇 3、舰艇 4 之间的链路均存在最大值 0.5，是整个网络的关键链路。值得注意的是：舰艇 3 处于网络的末梢，舰艇 3 与其他舰艇的信息交互均需要通过舰艇 2 来中转，舰艇 2 扮演了“桥墩”的角色，舰艇 2 与舰艇 3 之间的信息交互链路扮演了“桥”的角色。

3)整体中心化分析。调用前文整体中心化程度评估模型，可得出整个网络的中心程度，具体如表 3 所示。

表 3 整个网络的中心程度

名称	基于节点度数中心度的网络整体中心化程度	基于节点紧密中心度的网络整体中心化程度	基于节点介数中心度的网络整体中心化程度
数据	0.400	0.496	0.300

由表 3 数据不难发现, 无论是基于哪一个中心度指标的分析结果均不大于 0.5, 这说明该编队的信息关系结构整体中心化程度不高(尚未超过 50%)。如果不考虑占用资源的问题, 通过采取一定的措施, 该编队的整体中心化程度还可以进一步降低, 以利于提高整个信息交互网络的生存能力。

2.2.2 效率分析

用  $E_0$  表示初始网络的效率, 用  $E_i$  表示“删除”舰艇  $i$  后网络的效率, 那么根据“删除策略”的不同, 可能会有不同的结果。基于节点度数中心度排序实施打击的网络效率变化见表 4, 基于节点紧密中心度排序实施打击的网络效率见表 5, 基于节点介数中心度排序实施打击的网络效率变化见表 6。

表 4 打击的网络效率

$E_0$	$E_4$	$E_1$	$E_2$	$E_5$	$E_6$	$E_3$
0.744	0.642	0.133	0.067	0	0	0

表 5 打击的网络效率变化

$E_0$	$E_4$	$E_1$	$E_2$	$E_5$	$E_6$	$E_3$
0.744	0.642	0.133	0.067	0	0	0

表 6 打击的网络效率变化

$E_0$	$E_2$	$E_4$	$E_1$	$E_5$	$E_3$	$E_6$
0.744	0.550	0.417	0.333	0	0	0

通过以上数据可以看出, 基于节点度数中心度和基于节点紧密中心度的变化趋势完全一样, 前 3 次打击后网络效率下降幅度很大, 而基于介数中心度的变化趋势相对较缓。由此可见, 采用不同的打击模式, 对该编队的信息关系结构影响不同。基于节点度数中心度和基于节点紧密中心度的节点中心化程度排序结果的打击模式导致该编队信息关系结构崩溃速率相对较快。

2.2.3 脆弱性分析

采取逐一删除节点的方式, 可以求出各节点的脆弱性以及网络总的脆弱性, 如表 7 所示。

表 7 节点及网络总的脆弱性

舰艇 1	舰艇 2	舰艇 3	舰艇 4	舰艇 5	舰艇 6	网络脆弱性
0.037	0.261	-0.142	0.138	0.015	-0.052	0.261

由表 7 可见, 删除舰艇 2 节点时, 网的脆弱性最大, 删除舰艇 6 节点时, 网的脆弱性最小。值得注意的是删除舰艇 3 节点和舰艇 6 节点时, 网络的脆弱性数值上出现了负值, 这说明删除该节点后网络的健壮性提高了, 该节点是“末梢节点”, 删除该类型节点有利于提高网络的健壮性。值得注意的是在该编队的信息关系结构中, 舰艇 2 和舰艇 4 具有举足轻重的地位。

2.2.4 网络效能分析

设网络中各链路的连通概率均为 0 或 1, 通过链路连通概率矩阵可求出该编队信息交互网络的网络效能(归一化):

$$\lambda = \frac{\lambda_{PFE}}{N} = \frac{2.9809}{6} = 0.4968。$$

依次求解各链路被干扰后, 使其连通概率降低了 50%, 而其他链路的连通概率不发生改变的效能值, 如表 8 所示。

表 8 网络效能值

	舰艇 1	舰艇 2	舰艇 3	舰艇 4	舰艇 5	舰艇 6
舰艇 1	0	0.482	0	0.475	0.479	0
舰艇 2	0.482	0	0.493	0.479	0	0
舰艇 3	0	0.493	0	0	0	0
舰艇 4	0.475	0.479	0	0	0.475	0.481
舰艇 5	0.479	0	0	0.475	0	0.484
舰艇 6	0	0	0	0.481	0.484	0

由以上结果可见, 如果舰艇 1 和舰艇 4 之间的信息交互链路被干扰, 编队的信息交互网络效能值下降幅度最大, 由此可见舰艇 1 和舰艇 4 之间的信息交互链路对网络效能的影响最大, 这是值得引起重视的链路。显然, 在实际作战中, 无论是进攻或防御, 下降幅度大的链路都应该是重点关注的对象。

2.3 分析结论

通过前文分析可见: ① 虽然用于评价舰艇编队信息关系结构的各子模型视角不同, 侧重也有所差异, 但从多个角度均看出舰艇 4 在整个编队的信息关系结构中都处于相当重要的位置; ② 除了网络整体中心化程度评估结果外, 其他各子模型均可以用于分辨各节点(舰艇)在信息关系结构中所处的位置; ③ 该编队各舰艇所占有的信息资源处于“偏斜”状态, 其中舰艇 4 占据了大量信息资源——处于网络的中央, 而舰艇 3 占据的信息资源少——处于网络的末梢; ④ 采用不同的打击模式, 对该编队的信息关系结构影响不同——崩溃的速率不同。在实际

作战中,可以运用前文的模型对各节点、各链路的重要性进行排序,从而制定相应的打击或防御方案。

### 3 结束语

本文采取引入复杂网络中的网络分析模型方式,建立了用于评价舰艇编队信息关系结构的模型,从网络拓扑结构的角度对舰艇编队信息关系结构进行了实例探讨。研究发现,所建立的模型可以从多个角度对舰艇编队信息关系结构进行评价。这不但可以为海上舰艇编队通信组网提供新的优化思路,而且可以为后续开展基于复杂网络的海上联合机动编队作战体系结构分析、优化,以及体系对抗等问题的研究工作提供参考。

### 参考文献:

- [1] 王林,张婧婧. 复杂网络的中心化[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006,3(1):13-20.
- [2] 张婧婧,李全胜,达新民. 一种评定复杂网络中心化程度的新方法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(3):68-72.
- [3] 吴柱,李斌,许腾. 舰艇编队通信网络中心化研究[J]. 指挥控制与仿真, 2012,34(2):13-17.
- [4] 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.
- [5] 王林,戴冠中. 复杂网络的 Scale-free 性、Scale-free 现象及其控制[M]. 北京: 科学出版社, 2009:104-144.
- [6] 阮树朋,赵文杰,雷盼飞,等. 基于复杂网络的防空武器系统目标选择研究[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(1):23-28.
- [7] 于全. 分布式网络化作战——网络中心战基础[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006:74-78.
- [8] JEFFREY R CARES. An information age combat model[C]//the 9th ICCRTS. 2004.

## Evaluation on Information Relationship Structure of Warship Formation Based on Complex Network

HOU Xiang-yang, WU Zhu

(Department of Scientific Research, Navy Command College, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** By introducing the models of complex network in this paper, a model of the information relationship structure of warship formation analysis was established, and an example was gave from the view of topologic structure. The results showed that this model could not be only used to evaluating the information relationship structure of warship formation from several angles, but also provide a new way for evaluating communication network of warship formation.

**Key words:** warship formation; information relationship; complex network