网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20220624.1113.001.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：伞兵，侯岳，浦金云，等. 舰艇损管指挥信息系统复杂网络结构建模及优化分析 [J]. 中国舰船研究，2022，17(4)：220–227.
SAN B, HOU Y, PU J Y, et al. Analysis of structure modeling and optimization of complex network of warship damage control command information system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 220–227.

舰艇损管指挥信息系统复杂网络结构建模及优化分析

扫码阅读全文

伞兵，侯岳*，浦金云，王康勃
海军工程大学 动力工程学院，湖北 武汉 430033

摘　要：［**目的**］现代舰艇灾害突发性以及蔓延快速性的显著提升，对舰艇损管指挥网络的信息化水平提出了更高要求。基于损管指挥信息系统复杂的网络特性分析，构建该系统的网络拓扑模型。［**方法**］针对当前模型存在的不足，在随机网络化方法的基础上，综合考虑损管指挥信息网络的节点属性和增加网络密度的成本因素，提出一种择优随机网络化的结构优化方法，并通过案例仿真对具体的优化流程予以演示。［**结果**］仿真结果表明：指挥子网和设备子网的结构优化对整体网络性能的影响各异；相比传统的随机网络化方法，择优随机网络化方法的优化效能更高。［**结论**］后续研究可从改变子网之间的连接方式入手，解决末级指挥节点度过高的问题，以进一步改善损管指挥信息网络的综合性能。

关键词：损管指挥；信息系统；复杂网络；拓扑模型；结构优化
中图分类号：U674.7　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.19693/j.issn.1673-3185.02441

Analysis of structure modeling and optimization of complex network of warship damage control command information system

SAN Bing, *HOU Yue**, *PU Jinyun*, *WANG Kangbo*
College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: ［**Objectives**］The suddenness and rapidity of modern warship disasters have significantly intensified, and higher requirements have been put forward for the information level of the damage control (DC) command network. Based on the complex network characteristic analysis of a DC command information system, its network topology model is constructed. ［**Methods**］Aiming at the shortcomings of the current model, based on the stochastic networking method and considering the node attributes of the DC command information network and the cost of increasing network density, a structural optimization method for optimal stochastic networking is proposed, and the specific optimization process is demonstrated by case simulation. ［**Results**］The results show that the command and facilities subnets have different influences on network performance, and the improved random networking method performs better than the traditional random method in network structure optimization. ［**Conclusions**］Subsequent research can start by changing the connection mode between subnets to solve the problem of the terminal node of the command subnet being too high, thereby further improving the comprehensive performance of the DC command information network.

Key words: damage control command；information system；complex network；topology model；structural optimization

收稿日期：2021–07–02　　**修回日期：**2021–11–08　　**网络首发时间：**2022–06–27 09:29
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51409255）

作者简介：伞兵，男，1981 年生，博士，工程师。研究方向：舰艇损管决策技术。E-mail: sanbing1981@163.com
侯岳，男，1982 年生，博士，副教授。研究方向：舰艇损管决策技术。E-mail: houyue1982@126.com
浦金云，男，1961 年生，博士，教授。研究方向：舰船安全技术。E-mail: 671539959@qq.com
王康勃，男，1989 年生，博士，讲师。研究方向：舰艇消防技术，舰艇抗沉技术。
E-mail: wangkangbo1989@163.com
*通信作者：侯岳

downloaded from www.ship-research.com

0　引　言

现代舰艇灾害突发性以及蔓延快速性的显著提升, 给舰艇损管指挥网络的信息化水平提出了更高的要求[1-3]。舰艇损管指挥信息系统包括损害监测分系统、损管指挥分系统和损管控制分系统, 三者通过信息交互组成结构复杂的网络系统[4]。

目前, 有关指挥信息网络的拓扑结构研究主要集中在作战指挥领域[5-7], 而舰艇损管指挥作为一种与舰艇环境下损害进行对抗的指挥行动, 还需要在其信息网络方面进行深入研究。Martin 等[8-9] 针对损管指挥中心这一局部能力的提升开展了研究, 然而损管指挥信息系统的整体性能并不是各子系统性能的简单相加, 子系统之间连接机制的变化会引起整体性能的变化。目前, 有关全舰性损管信息系统的一体化设计问题, 还停留在定性分析阶段, 尚未给出有效的理论模型及计算方法[10]。

因此, 为提升损管指挥信息网络纵向一体化贯通、横向互联互通的能力, 将从复杂网络的角度出发, 分析损管指挥信息网络存在的不足, 并给出结构设计的优化途径, 从而提升舰艇损管指挥的效能。

1　损管指挥信息系统的网络结构

现代舰艇的损管指挥信息系统是一个节点数量庞大、内部联系密切、组织结构复杂的大系统, 其整体网络通常由损害监测网络、损管指挥网络和损管控制网络三部分组成, 如图 1 所示。其中, 损害监测网络由各类火灾、进水、液舱液位以及舰艇姿态传感器组成[11-12], 损管指挥网络通常由全舰、部门、区划损管三级指挥机构组成, 损管控制网络由灭火设备、疏水设备、消防管系的电控阀件等各类损管控制执行单元组成[13]。

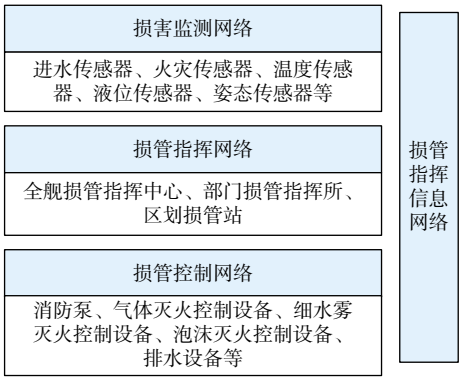


图 1　损管指挥信息系统的物理结构

Fig. 1　The physical structure of damage control command information system

损管指挥信息系统的信息连通情况如图 2 所示。当损害监测网络探测到损害信息时, 首先将损害态势信息传送给损管指挥网络, 由指挥人员制定损管决策, 然后, 再由损管指挥网络将行动方案信息发送给损管控制网络加以执行, 损管控制设备执行完成灭火、抗沉、消防管路的隔离重构等损管动作后, 灾害态势即发生改变, 随后, 损害监测网络再将监测到的新的灾害态势发送给损管指挥网络, 构成循环反馈的监测、决策、执行的信息流通体系。由图可以看出, 网络节点之间纵向连通, 横向孤立, 网络密度小, 内部结构松散, 信息传输路径长, 共享效率低, 度分布差异大, 信息传输路径上的干路节点众多, 一旦损伤, 将导致网络中大量节点通信中断, 造成指挥体系瘫痪。

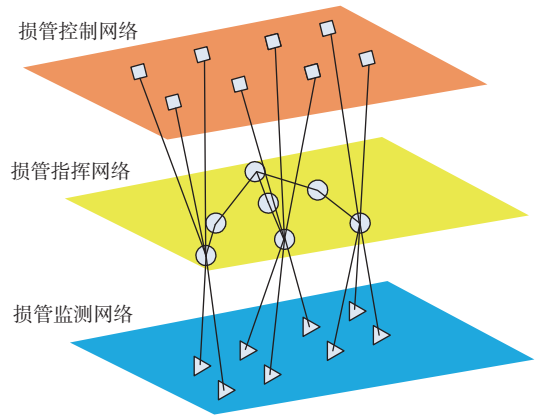


图 2　损管指挥信息系统的结构层次

Fig. 2　The structure level of damage control command information system

2　网络结构的建模方法

从损管指挥功能的角度, 可以将系统内的实体分为感知实体、决策实体和执行实体 3 个部分。其中, 感知实体对应于损害监测网络的监测设备, 决策实体对应于损管指挥网络的指挥机构, 执行实体对应于损管控制网络的控制设备。

复杂网络作为一项新技术, 其本质的特点是从整体的角度解决其拥有海量节点、且节点与节点之间关系动态变化的问题。因此, 利用复杂网络技术分析损管指挥信息系统结构的网络化问题是合理且有效的。将系统中不同的实体对应于复杂网络的“顶点”, 各类实体之间的信息连通关系对应于复杂网络的“边”, 即可构建损管指挥信息系统的网络拓扑模型。该模型的数学表达形式为: 节点之间的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}=\{a_{ij}\}$, 当拓扑模型中节点 i 与节点 j 之间存在邻接关系时, $a_{ij}=1$, 否则, $a_{ij}=0$。

以某个包含全舰和部门这 2 个指挥层次的损

downloaded from www.ship-research.com

管指挥信息系统为例进行建模，如图 3 所示。该系统共有 7 个实体节点，其中圆形节点代表决策实体，三角形节点代表感知实体，方形节点代表执行实体。按照指挥层次上的隶属关系，依次连接指挥节点，然后再按照指挥区域的划分连接末级指挥节点与本区域内的监控设备节点，即形成了典型的树形损管指挥信息网络，该网络对应的邻接矩阵列于表 1。

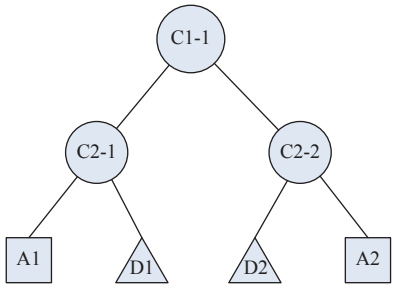


图 3 损管指挥信息系统复杂网络模型示例

Fig. 3 An example of a complex network model for a damage control command information system

表 1 损管指挥信息系统邻接矩阵 *A*

Table 1 The adjacency matrix *A* of the damage control command information system

	C1-1	C2-1	C2-2	A1	A2	D1	D2
C1-1	0	1	0	0	0	0	0
C2-1	1	0	0	1	0	1	0
C2-2	0	0	0	0	1	0	1
A1	0	1	0	0	0	0	0
A2	0	0	1	0	0	0	0
D1	0	1	0	0	0	0	0
D2	0	0	1	0	0	0	0

对损管指挥信息网络而言，紧密的节点连接，顺畅的信息传输，强大的抗损能力是其网络功能得以高效而又稳定发挥的重要保障，这就需要指挥网络具有较高的群聚系数和较短的信息传输路径。本文参考张洪霞[14]在指挥网络性能方面所做的研究，构建损管指挥信息系统网络性能评价指标，为评估及优化损管指挥信息系统的网络结构提供依据。

1）信息传输效率 *TE*。

即从网络拓扑结构的角度来衡量网络的连通效率，不考虑节点之间实际的连通距离，只考虑节点之间连通所需要的边数。

设节点 i 和节点 j 之间的信息传输效率 e_{ij} 为两节点间距离的倒数，即 $e_{ij}=1/d_{ij}$，其中 d_{ij} 为两节点之间的最短路径长度，定义指挥信息系统的信息传输效率 *TE* 为：

$$TE=\frac{\sum\limits_{i\leqslant j\leqslant N}e_{ij}}{N(N-1)/2} \tag{1}$$

式中，N 为网络中的节点总数。对于节点数量已知的指挥网络而言，节点之间的距离越小，网络的信息传输效率越高。

2）信息连通性 *Co*。

信息连通性用于衡量网络内部信息的共享水平，节点之间直接互连互通的比例越高，指挥信息网络的信息连通性能越好，其定义为：

$$Co=m/APL \tag{2}$$

式中：m 为关键节点失效前（原始状态下）的网络密度；*APL* 为节点之间的平均最短路径长度[15]。

3）系统鲁棒性 *Ro*。

系统结构的鲁棒性是指损管指挥信息系统在受到随机攻击，任意节点失效的情况下能够保持信息共享水平的能力。系统鲁棒性 *Ro* 是网络度均匀性的刻画指标，其值越大，网络越均匀，其定义为：

$$Ro=-\sum_{i=1}^{N}(I_i\ln I_i) \tag{3}$$

$$I_i=\frac{k_i}{\sum\limits_{i=1}^{N}k_i} \tag{4}$$

式中：k_i 为第 i 个节点的度；I_i 为节点的重要程度，其值越大，该节点的信息共享程度越高，在系统结构中也就越重要。

4）系统抗毁性 *F*。

系统抗毁性是指损管指挥信息系统在受到蓄意攻击，关键节点（对于介数大的节点，即信息传输路径上的干路节点，当该节点毁伤后，会导致网络中大量节点间通信中断，从而对网络结构造成严重破坏）失效的情况下，能够保持信息共享水平的能力，其定义为

$$F=m^{\mathrm{o}}/m \tag{5}$$

式中，m^{o} 为关键节点失效后的网络密度。

5）系统紧密性 *Cl*。

系统紧密性用于衡量系统结构的紧密程度，是对系统结构中节点之间信息共享效率的度量，其表达式为

$$Cl=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{j=1}^{N}d_{ij}\right)^{-1} \tag{6}$$

系统紧密性 *Cl* 的值越大，说明系统中节点之

downloaded from www.ship-research.com

间的联系越紧密, 网络化效果越好。

6) 综合性能 Pt。

上述性能指标在网络结构优化的过程中有可能会出现非一致的变化趋势。例如, 在下文的仿真实例中将可以看到, 增加指挥子网的网络密度, 在提高信息传输效率 TE 的同时将会引发系统鲁棒性 Ro 的减小。因此, 需要引入一个综合性能评价指标 Pt, 以实现对最终优化效果的总体权衡。其定义为

$$Pt = \boldsymbol{w} \times [TE,\ Co,\ Ro,\ F,\ Cl]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中, $\boldsymbol{w}$ 为归一化的权重系数向量, $\boldsymbol{w} = [TE\%,\ Co\%,\ R\%,\ F\%,\ Cl\%]$, 反映了综合性能指标中各单项指标的重要程度。$\boldsymbol{w}$ 可以根据优化意图来加以调整, 例如, 当取 $\boldsymbol{w} = [0.9,\ 0,\ 0.1,\ 0,\ 0]$时, 将以提升 TE 为主、兼顾 Ro 的原则为优化目标。

3　优化算法

本文将通过增加网络密度的方法来实现各子网的结构优化, 从而提高整体网络的综合性能。Gozzard 等[15] 指出, 随机网络化方式对整体结构性能的提高最为明显, 是一种较为理想的网络结构优化方式。参考随机网络的构造思路, 本节将采用一种综合考虑了节点自身属性的择优随机网络化方法来增加各子网的网络密度。

节点属性包括节点的静态属性和动态属性。其中静态属性指节点之间的相关性、节点的扩容能力和节点之间的连边距离, 这在结构优化前便可确定; 动态属性为节点在网络中的度, 需要在结构优化过程中不断更新。各自的表征参数依次如下:

1) 节点间的相关系数矩阵 $\boldsymbol{R} = \{r_{ij}\}$, $r_{ij} \in [0,1]$, 代表节点之间潜在的信息连通关系, r_{ij} 越大, 对应节点之间的连边概率越大;

2) 节点的扩容能力向量 $\boldsymbol{C} = \{c_i\}$, $c_i \in (0,1]$, 代表节点 i 的信息处理能力, c_i 越大, 其他节点与节点 i 之间的连边概率越大;

3) 相对连边距离向量 $\boldsymbol{L} = \{l_{ij}\}$, $l_{ij} \in [0,1]$, 节点 j 为节点 i 的相关节点, 相对连边距离 l_{ij} 指节点 i, j 各自所在舱室之间经归一化处理后的最短路径长度, l_{ij} 越小, 节点 i 与节点 j 之间的连边概率越大;

4) 相对度向量 $\boldsymbol{B} = \{b_{ij}\}$, $b_{ij} \in [0,1]$, 节点 j 为节点 i 的相关节点, $b_{ij} = k(j)/\sum k(j)$, 其中 $k(j)$ 为节点 j 的度。b_{ij} 对连边概率的影响需要综合考虑网络特点, 指挥子网中的 b_{ij} 越大, 代表节点 j 的重要性越大, 节点 i 与之连边的概率越大; 对于监测或控制子网, 节点的重要性相当, b_{ij} 越大, 节点 i 与节点 j 的连边概率越小, 以保持网络中节点度的均匀性。

定义任意节点之间的连边概率:

$$p_{ij} = r_{ij} \cdot c_j \cdot (1 - l_{ij}) \cdot f(b_j) \tag{8}$$

式中, $f(b_j)$ 为节点度分布对连边概率的影响因子, 其满足

$$f(b_j) = \begin{cases} b_j, & \text{指挥子网} \\ 1 - b_j, & \text{监测或控制子网} \end{cases} \tag{9}$$

由于监测和控制节点的所有属性都相同, 因此在结构优化过程中, 可以将监测节点与控制节点合并起来, 构成一个设备子网, 这样, 整体网络将仅由指挥子网和设备子网组成。

将具有相关性的节点全部连接起来后, 损管指挥信息网络将具有最佳的综合性能。从实际情况出发, 为限制连边数量, 将利用节点之间的相对连边距离 l_{ij}, 引入优化成本因子 Ct, 使得

$$Ct = \frac{\sum l_{ij} \cdot (a_{ij} - a_{ij0})}{\sum l_{ij} \cdot f(r_{ij})} \tag{10}$$

式中: a_{ij0} 为损管指挥信息系统原始状态下邻接矩阵中的元素, 优化前的 $a_{ij} = a_{ij_0}$, 此时 $Ct = 0$, 即网络中原有的边不计入后续优化成本, 当指挥信息网络中相关节点全部连接时, $Ct = 1$, 此时的优化成本最高; $f(r_{ij})$ 为节点相关性对优化成本的影响因子, 其满足

$$f(r_{ij}) = \begin{cases} 1, & r_{ij} > 0 \\ 0, & r_{ij} = 0 \end{cases} \tag{11}$$

以 $G = Pt \cdot (1 - Ct)$ 表征网络结构优化过程中的动态收益, 任意子网的优化流程如下:

1) 构造原始状态下的网络邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和网络优化表征参数 $\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{L}$, 然后随机选择一个目标节点 i 作为新增边的起点;

2) 计算目标节点与相关节点的连边概率 p_{ij}, 由此确定新增边的终点 j, 同时, 将邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中对应的元素值 a_{ij} 改为 1;

3) 根据当前网络的连通状态, 计算网络综合性能 Pt 和优化成本 Ct, 从而得出动态优化收益 G;

4) 完成所有相关节点的连接后, 网络密度达到最大值, 此时, 停止计算, 选择动态收益最好时的网络结构作为最终优化方案。

4　仿真分析

某舰艇的舱室布置情况如图 4 所示, 共包含 4 层甲板和 70 个舱室。

该舰的损管指挥体系包含三级指挥层次: 1 个全船指挥中心(C1-1), 3 个部门指挥所

downloaded from www.ship-research.com

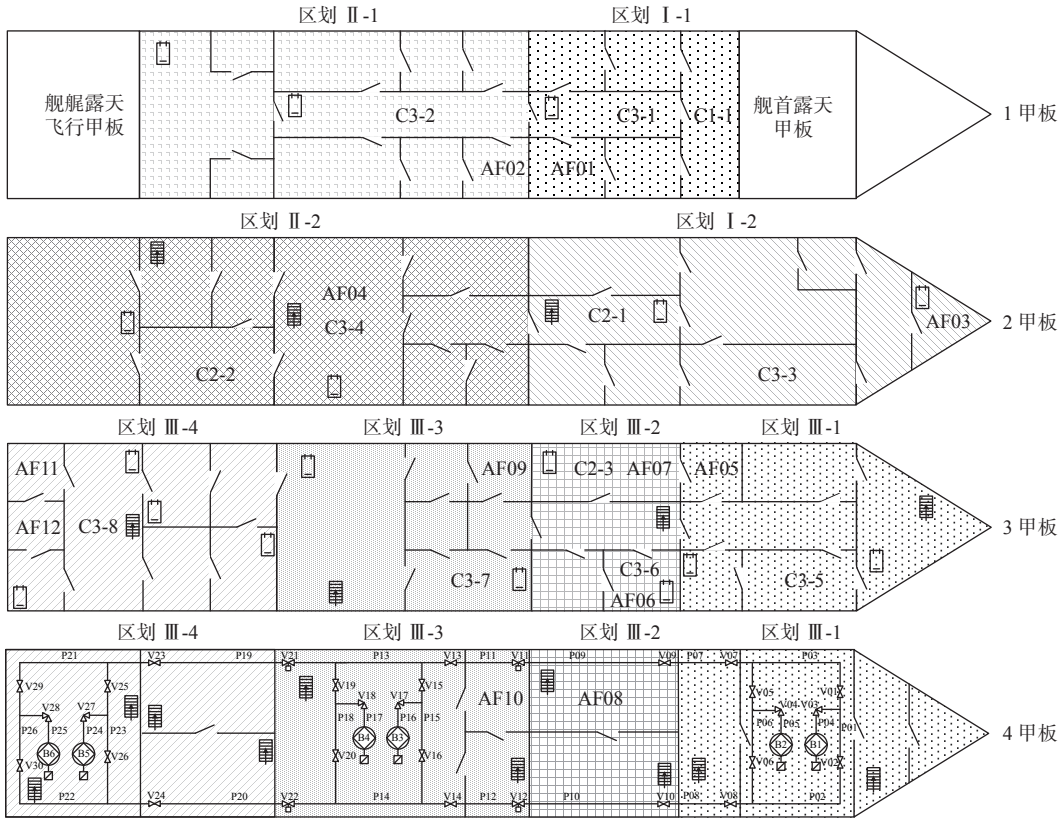


图 4 舱室布置图

Fig. 4 Cabin layout diagram

(C2-1~C2-3)和 8 个损管区划(图 4 中阴影部分)。其中,Ⅰ部门下辖Ⅰ-1(区划指挥所 C3-1)、Ⅰ-2(C3-3)2 个损管区划,Ⅱ部门下辖Ⅱ-1(C3-2)、Ⅱ-2(C3-4)2 个损管区划,Ⅲ部门下辖Ⅲ-1~Ⅲ-4(C3-5~C3-8)4 个损管区划,各级指挥节点所在舱室的位置标于图 4 中。

损管指挥信息系统的设备节点可以分为火灾监控设备节点和消防水监控设备节点两类。其中,火灾监控设备节点包括 70 个火灾监测节点(DF01~DF70),平均分配于每个舱室,12 个火灾控制节点(AF01~AF12)平均布置于 12 个无人舱室,如图 4 所示;消防水监控设备节点包括 26 个消防水压力监测节点(P01~P26)、30 个消防水阀门控制节点(V01~V30)和 6 个消防水泵控制节点(B1~B6),其布置情况见图 4 中 4 甲板内的标注。

综上所述,该舰艇共有实体节点 156 个,其中指挥节点 12 个,设备节点 144 个,指挥节点按照指挥层次依次连接,设备节点按照所在区划与相应的末级指挥节点连接,据此构成损管指挥信息系统复杂网络的原始模型。网络拓扑结构如图 5 所示。

首先,介绍各节点静态参数的设置情况。

1) 相关系数。指挥节点间的相关系数设置情况如图 6 所示,其中虚线代表优化前模型中已经存在的边,对应的相关系数设为 0,实线代表相关但尚未连接的边,实线中的数字为相关系数。

设备节点之间,毗邻舱室中的火灾监测节点相关系数 $r = 0.8$,同一舱室中火灾监控节点之间的相关系数 $r = 1.0$,相邻管段消防水压力监测节点之间的相关系数 $r = 0.8$,同一管段上消防水监控节点之间的相关系数 $r = 1.0$。

2) 节点扩容能力。一级指挥节点的扩容能力为 1.0,二级指挥节点的扩容能力为 0.8,三级指挥节点的扩容能力为 0.5,监测节点的扩容能力为 0.3,控制节点的扩容能力为 0.1。

3) 相对连边距离。由舱室的毗邻关系,可以得出相关节点之间的相对连边距离向量。增加相同数量的边,分别以择优随机网络化方式单独对指挥子网和设备子网进行结构优化,考察整体网络的性能变化情况,其结果如图 7 所示。增加的边数 n 以指挥子网达到全连通状态时所能增加的全部边数(55 条)为准。

相比之下,指挥子网的结构优化对整体网络的信息传输效率和信息连通性提升作用明显,但不利于系统鲁棒性的改善,且对系统抗毁性和系统紧密性的影响也不大;设备子网结构优化后,系统鲁棒性、抗毁性和紧密性均有所提升,尤其是系统紧密性的提升效果显著,但对信息传输效

downloaded from www.ship-research.com

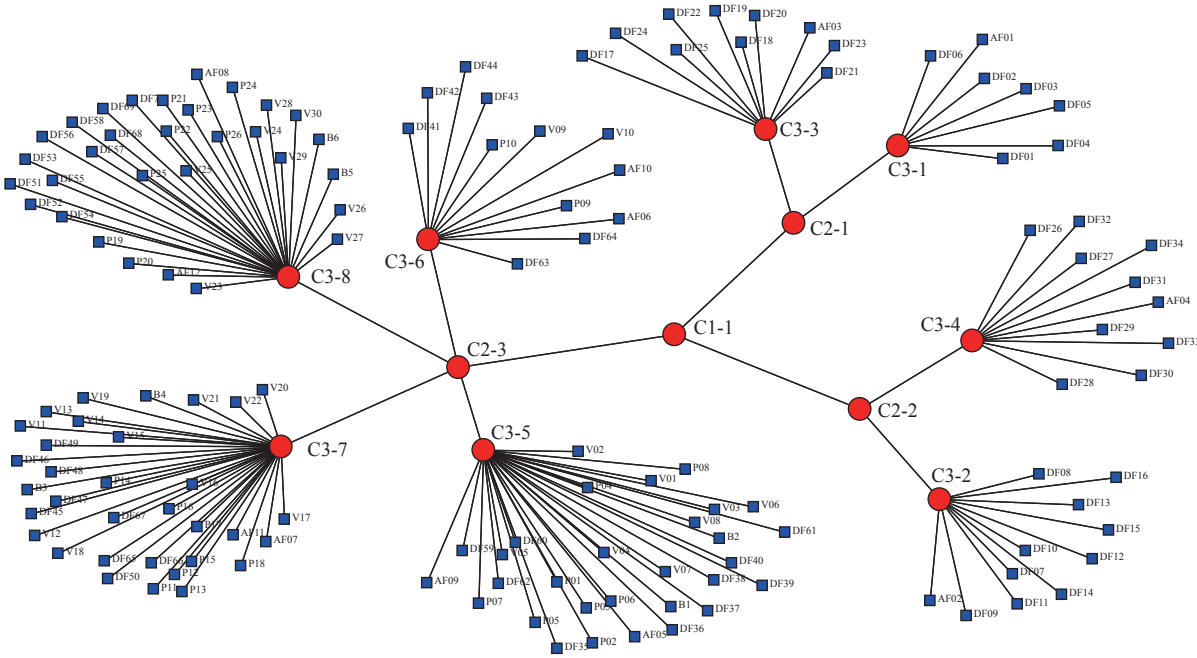


图 5　损管指挥信息系统原始网络结构

Fig. 5　The original network structure of the damage control command information system

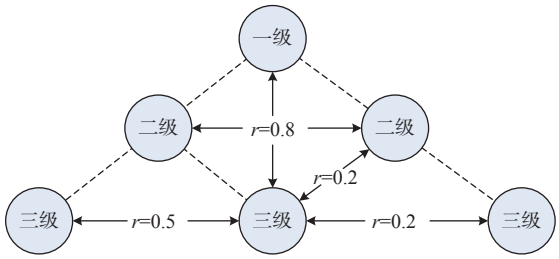
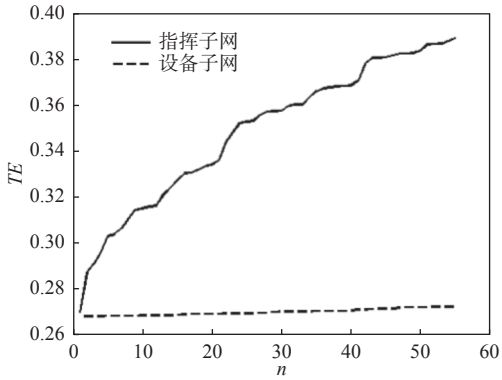
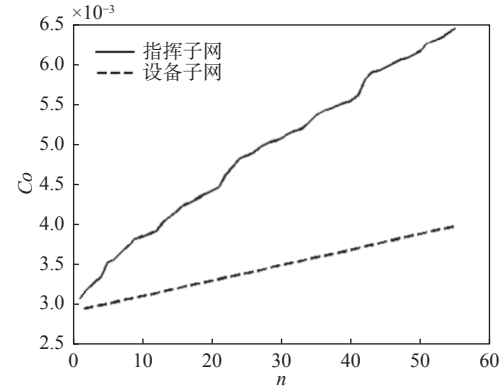


图 6　指挥节点相关系数设置规则

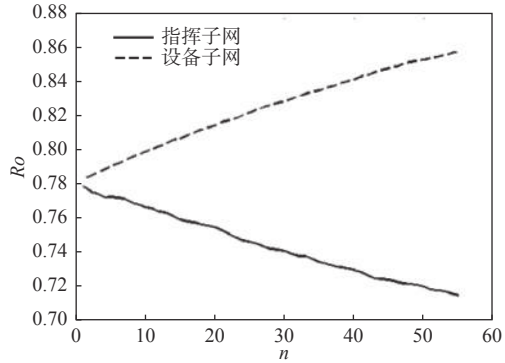
Fig. 6　Command node correlation coefficient setting rules



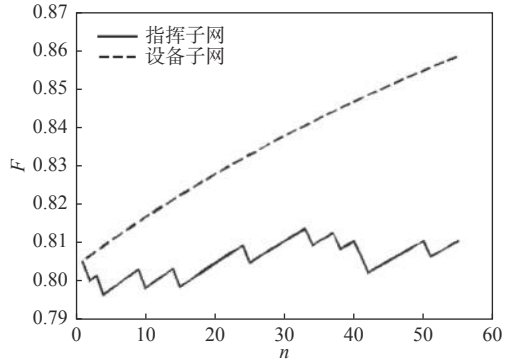
(a) 信息传输效率 *TE*



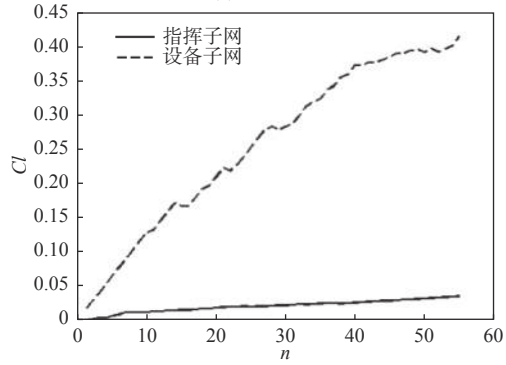
(b) 信息连通性 *Co*



(c) 系统鲁棒性 *Ro*

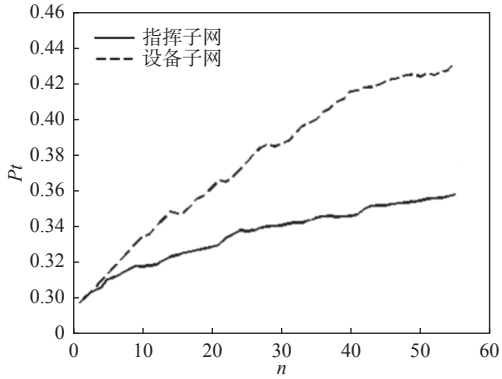


(d) 系统抗毁性 *F*



(e) 系统紧密性 *Cl*

downloaded from www.ship-research.com



(f) 综合性能 *Pt*

图 7 子网优化效果对比

Fig. 7 Comparison of subnet optimization effects

率和信息连通性的影响不大。

在原有的网络结构中，指挥子网的层次较多，节点数量较少，优化前缺少横向和越级的纵向连接，是网络传输距离大的主要原因。设备子网节点处于同一层次，但节点数量众多，且相互之间仅通过三级指挥节点连接，以每个三级指挥节点为中心形成的多个星形结构是网络结构松散的主要原因。同时，如果不建立设备节点之间的联系，单方面增加三级指挥节点的连边数量，必然导致系统鲁棒性和抗毁性的恶化。图 7(f) 和图 8 表明，增加相同数量的边，设备子网的结构优化将更有助于提升整体网络的综合性能，且优化成本更低，因此动态收益更好。

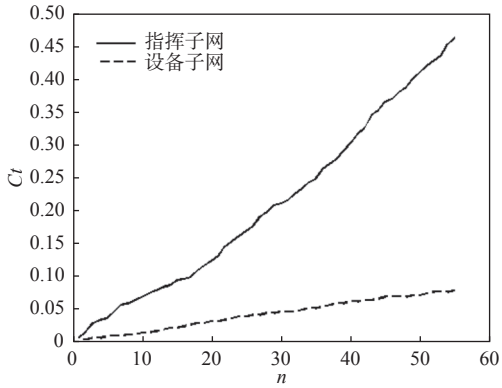


图 8 子网优化成本对比

Fig. 8 Comparison of subset optimization cost

设计人员可以根据自身意图选择子网的优化顺序。本文选择首先对设备子网进行结构优化，记录整体网络动态收益最大时设备节点的连通情况，然后再在此基础上进行指挥网络的结构优化。

仿真结果表明，优先在设备子网增加 89 条边后，继续在指挥子网中增加 6 条边，也即合计增加 95 条边后整体网络的动态优化收益 *G* 达到最大值，如图 9 所示。优化前、后损管指挥信息网络的各项性能指标列于表 2，同时表中还列出了采用传统的随机网络化方法，按照相同的顺序在设备子网和指挥子网增加相同数量的边后，整体网络的性能指标变化情况。

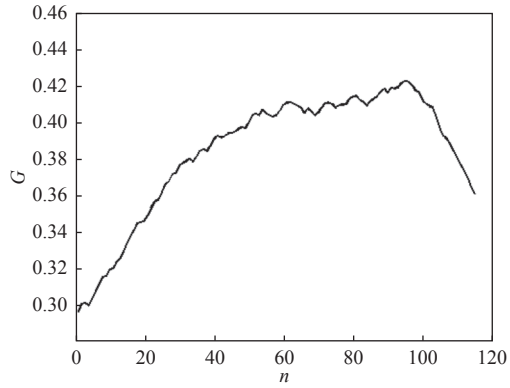


图 9 网络优化动态收益

Fig. 9 Dynamic benefits of network optimization

表 2 整体网络优化前、后性能对比

Table 2 Performance comparison of the whole network before and after optimization

优化方法	原始结构	择优连接		随机连接
		设备子网	指挥子网	
TE	0.267 9	0.276 1	0.310 7	0.337 0
Co	0.002 9	0.004 7	0.005 6	0.006 3
Ro	0.781 1	0.888 2	0.882 7	0.874 1
F	0.803 9	0.880 1	0.879 3	0.863 1
Cl	0.001 5	0.532 4	0.539 4	0.062 2
Pt	0.292 5	0.474 6	0.494 3	0.360 9
Ct	0	0.117 5	0.142 5	0.857 5

从表 2 中可以看出，采用传统的随机网络化方式时，整体网络的各单项指标与择优随机网络化方式相当，甚至是略占优势，但系统紧密性指标明显落后，导致网络总体性能的提升幅度不足。其原因在于择优随机网络化方式更倾向于连接相邻节点，而传统的随机网络化方式却不受此限制，因此，当连边数较少时，择优随机网络化方式能够更加快速地提升系统紧密性。而考虑到结构优化成本时，择优连接的优越性更加明显，当增加 95 条边时，其优化成本因子为 0.142 5，仅为传统随机网络化方式的 16.6%。

5 结 论

损管指挥信息系统具有复杂网络的基本特性。本文建立了损管指挥信息系统的复杂网络模型，分析了原始树形网络的结构缺陷，然后在此基础上提出一种择优随机连接的网络结构优化方法，并通过案例仿真演示了该方法的操作流程，主要得到以下结论：

1）指挥子网的结构优化对提升整体网络的

downloaded from www.ship-research.com

信息传输效率和信息连通性作用显著，但对其他性能指标的改善不明显，而且还会降低网络的鲁棒性。

2）设备子网的结构优化有助于整体网络性能的全面提升，尤其是对增强系统紧密性作用显著。

3）设计人员可以根据自身的优化意图选择子网的优化顺序，在成本受限的情况下，最好首先优化设备子网的动态收益。

4）相比传统的随机网络化方式，择优随机网络化方法在提升系统紧密型、降低优化成本方面优势明显。

需要指出的是，末级指挥节点是衔接指挥子网与设备子网的媒介，设备节点网络化后，末级指挥节点可以通过设备子网连接任意设备节点，不必保持与辖区内所有设备节点的直接连接，这就为解决末级指挥节点度过高的问题创造了条件。但是，改变子网之间的连接方式必将影响到整体网络的各项性能，进而影响到子网自身的网络化进程。因此，深入分析子网网络化程度与子网连接方式之间的耦合关系，设计出更具效能的结构优化路径，将是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] 董晓明, 石朝明, 黄坤, 等. 美海军 DDG-1000 全舰计算环境体系结构探析 [J]. 中国舰船研究, 2012, 7(6): 7–15.
DONG X M, SHI C Y, HUANG K, et al. Analysis on the architecture of USN DDG-1000 total ship computing environment[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(6): 7–15 (in Chinese).

[2] SUH R J. Wireless content repurposing architecture for DC command and control[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2003.

[3] TORENVLIET G, JAMIESONG A, COURNOYER L. Functional modelling, scenario development, and options analysis to support optimized crewing for damage control. Phase 1: functional modelling[M]. Ottawa: CMC Electronics Inc. , 2006.

[4] 韩伟, 周佳宇, 刘克荣. 舰船损管监控系统的设计考虑 [J]. 中国舰船研究, 2007, 2(5): 58–62, 71.
HAN W, ZHOU J Y, LIU K R. Design considerations of damage control and monitoring system for ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007, 2(5): 58–62, 71 (in Chinese).

[5] 田旭光, 朱元昌, 罗坤, 等. 基于复杂网络理论的指挥控制系统自适应重构模型 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 91–96.
TIAN X G, ZHU Y C, LUO K, et al. Adaptive reconstruction model for command and control system under information age based on complex network theory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(1): 91–96 (in Chinese).

[6] 颜骥, 李相民, 刘立佳, 等. 机群多编队作战网络自同步 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(8): 1566–1572.
YAN J, LI X M, LIU L J, et al. Combat network synchronization of air fleet formation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(8): 1566–1572 (in Chinese).

[7] 朱林, 方胜良, 胡卿, 等. 卫星时变拓扑网络节点重要度评估方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(6): 1274–1279.
ZHU L, FANG S L, HU Q, et al. Evaluation method for time-varying satellite topology network node importance[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(6): 1274–1279 (in Chinese).

[8] MARTIN S, OTTOF F. Integrated monitoring and control system for German navy K130 corvettes[C]//14th International Ship Control Systems Symposium (SCSS). Ottawa, Canada, 2009.

[9] CHUBB D, LEE K. The support challenge for the Royal navy's Albion class landing platform docks[C]//14th International Ship Control Systems Symposium (SCSS). Ottawa, Canada, 2009.

[10] CALABRESE F, CORALLO A, MARGHERITA A, et al. A knowledge-based decision support system for shipboard damage control[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(9): 8204–8211.

[11] 吴松, 李华. 人工神经网络在舰船火灾探测中的应用 [J]. 中国舰船研究, 2007, 2(6): 55–58.
WU S, LI H. Application of artificial neural network in the fire detection of naval vessel[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007, 2(6): 55–58 (in Chinese).

[12] ZAHN P B, ROSBOROUGH J, CARLSTROM R. Shipboard damaged stability assessment: the flooding casualty control software[J]. Naval Engineers Journal, 2010, 105(3): 152–166.

[13] 杜一村, 杨晨, 李玉峰. 某舰用安全监控系统模拟训练软件的设计与实现 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(4): 155–160.
DU Y C, YANG C, LI Y F. Design and implementation of simulation training software for naval security monitoring system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(4): 155–160 (in Chinese).

[14] 张洪霞. 基于复杂网络的指挥信息系统结构分析与网络化方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
ZHANG H X. Research on C4ISR structural analysis and networking methods based on complex networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013 (in Chinese).

[15] GOZZARD A, WARD M, DATTA A. Converting a network into a small-world network: fast algorithms for minimizing average path length through link addition[J]. Information Sciences, 2018, 422: 282–289.

downloaded from www.ship-research.com