

doi: 10.7690/bgzdh.2016.01.022

联勤保障网络模型建立与分析

李超亚¹, 曹彪², 张金春¹, 王帅磊¹

(1. 海军航空工程学院基础部, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院基础实验部, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对现有模型生成机制的局限性, 构建一种有约束条件下基于长距离连接加边规则的保障网络演化模型。从层次结构网络入手, 对长距离连接加边规则进行改进, 从而生成保障网络, 并对该模型进行仿真分析, 从度分布、平均路径长度、聚类系数这 3 个统计参数对网络的拓扑性质进行了描述。分析结果证明: 该模型能准确地体现保障网络最重要的层级结构特征, 可以真实地反映保障网络所具有的 3 种保障关系。

关键词: 层次结构; 联勤保障网络; 长距离连接; 复杂网络

中图法分类号: TP393 **文献标志码:** A

Joint Logistics Networks Modeling and Analysis

Li Chaoya¹, Cao Biao², Zhang Jinchun¹, Wang Shuailei¹

(1. Department of Basic Sciences, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;

2. Department of Basic Experiment, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

Abstract: Because of the limitations of existing generation mechanisms models for joint logistics network, the model with constraint based on long-rang connections rule is established. Starting from a hierarchical tree structure of the network, based on the actual properties of the network's nodes and edges, this paper builds the model of joint logistics networks under restrictive conditions on long distance connections with the introduction of various parameters of the mechanisms in the network generating. Simulation analysis of the model shows that the network model not only reflect the actual features of the network, but also have a certain degree of small-world effect of complex network.

Keywords: hierarchical structure; joint logistics network; long-rang connections; complex network

0 引言

保障网络是以装备保障设施为依托, 将各种保障资源按照一定的要求和原则合理部署而最终形成的一个网络化布局的保障体系, 是各级保障部门完成保障任务的物质基础^[1]。伴随着我军保障体制的发展, 特别是联勤体制改革取得的重大成就, 保障网络的结构及组织形式发生了翻天覆地的变化。如何建立一个可以准确描述保障网络中数量繁杂的节点以及节点之间关联的保障网络模型, 是保障网络研究中一项极其重要的基础性工作。

陈牧等^[2]提出一种确定性的层次结构网络模型, 能反映保障网络严格的层次结构特点, 在为数不多的保障网络建模中得到了广泛的应用。在该模型的基础上, 张勇等^[3-5]通过引入节点随机连接机制, 生成了一类保障网络, 并进一步分析了该网络的拓扑特性; 王铁宁等^[6]以网格化的层级网络为基础, 随机加入一定数量的连接节点, 通过设置连接节点的连接半径构建保障网络模型, 并主要分析了该模型的抗毁性问题。上述几个模型的生成机制都是在节点连边无约束的条件下提出的, 然而无约束的连边往往会生成网络模型接近全连接网络,

不符合现实保障网络的实际情况, 模型的应用存在一定的局限性。有必要建立一个存在一定约束条件, 能更加准确地反映保障网络现实特性的模型。有鉴于此, 笔者构建一个符合保障网络实际特征、存在约束条件的保障网络模型, 并对该模型进行仿真分析, 研究参数变化对网络拓扑特性的影响。

1 模型的建立

在网络模型建立之前, 有必要对保障网络的基本特征以及网络模型中元素的含义进行简要说明:

1) 节点是指在地域空间上具有相对固定的位置关系, 在一定的时间内能发出或者接收一定量装备保障资源的保障实体, 如: 各级装备保障中心以及基层装备使用单位。

2) 边代表节点(对象)之间的相互作用、相互关联^[7]。在联勤保障网络中, 边表示节点之间通过一定的交通方式(公路、铁路等)具有的保障与被保障的直接关系。由于不考虑边的方向性问题, 构建的网络为无向网络。

3) 现实保障网络中节点之间的保障关系有建制保障、调剂保障、越级保障 3 种形式。其中建制保障是主体, 同时存在一定程度的调剂和越级保障。

收稿日期: 2015-08-18; 修回日期: 2015-09-22

作者简介: 李超亚(1990—), 男, 河南人, 硕士, 从事复杂系统建模与仿真研究。

1.1 层次结构网络模型

我军的后勤保障体制是依托作战编制体制存在的，每一级的作战单位有其相应的保障中心，联勤保障网络的“骨架”就是由各级的保障中心之间的建制保障关系构成的确定性层次结构网络，是一种典型的树状结构。根据我军“3-3制”的部队编制体制，即一个上级保障中心负责其对应的3个次一级保障中心的模式，借鉴文献[2]构建确定性层次结构网络模型的思想，建立层次结构网络的生成机制：

- 1) 生成一个源节点，该节点所属层级 $h=0$ ；
- 2) 在 $h=1$ 层生成 3 个节点，依次与源节点相连；
- 3) 在上一层的每个节点下生成 3 个子节点并与其相连接，这些子节点所在层级 $h=2$ ；
- 4) 重复上述的过程，直至生成的节点规模满足要求。

按照上述机制生成的层次结构网络如图 1 所示，该网络中只存在上下层级之间的直接联系，同级节点之间毫无关联，呈现出较长的平均路径、零聚类的特征。

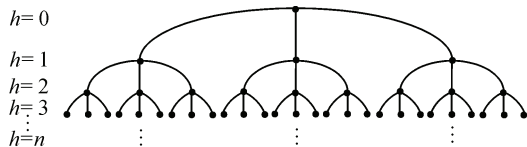


图 1 层次结构网络模型

1.2 保障网络生成机制

层次结构网络是保障网络生成的基础。为了模拟现实保障网络同级节点之间的调剂保障关系以及跨级节点之间的越级保障关系，还需要按照一定的规则在基础网络的节点之间进行加边，从而最终生成保障网络。借鉴 G. Li 等^[8-9]在晶格网络结构下研究如何优化交通网络时提出的长距离连接(long-rang connections)加边规则，笔者对该规则进行适当的改进，提出了基于长距离连接加边的保障网络生成机制。

长距离连接加边规则：在基础的层次结构网络中，若任意两点 v_i 、 v_j 之间不存在直接连边，那么在这 2 个节点之间以概率 $p=r_{ij}^{-\alpha}$ 进行连边。其中 r_{ij} 表示连边之前节点 v_i 、 v_j 之间的路径长度， α ($\alpha \in [0, \infty)$) 为连接控制参数。需要注意的是，当 α 足够小 ($\alpha \approx 0$) 或者网络规模足够大时，层次结构网络中新加入的边就会过多，生成的保障网络就会接近全连接网络。为了避免这类错误情况的出现，需要在长距离连接加边规则的基础上加入一定的约束条件，限制网络加边的数目；因此，引入 A 作为网

络加边的约束条件，且

$$A = \sum r_{ij} \leq \beta N. \tag{1}$$

其中： N 为网络中节点的总数； β 为约束参数 ($\beta > 0$)。式 (1) 表明了网络中加入边的总长度与网络规模成一定比例，从而能形成有效的反馈机制，防止某些条件下网络中加入过多边出现全连接网络的情况，符合现实保障网络的情况。特别地，由于 $N = 3^0 + 3^1 + \dots + 3^h$ ，也就说明在 β 一定时，网络中加入边的总长度最终是受规模控制参数 h 的影响。

1.3 保障网络生成算法步骤

有了基础的层次结构模型以及保障网络的生成机制，笔者将保障网络的生成算法步骤描述如下：

- 1) 确定要生成的网络规模的大小，赋予规模控制参数 h 相应的值，生成层次结构网络。
- 2) 遍历网络中的节点对，找出没有直接相连的节点对，并计算其路径长度 r 。
- 3) 根据需要分别确定 α 、 β 的值，遍历没有直接连边的节点对。赋予 A 一定的初始值，根据其路径长度确定连边概率，每次连边后更新 A 的值并判定 A 是否为真，若 A 为假，连边结束，生成了最终的保障网络；若 A 为真，连边继续，直至遍历所有节点，生成最终的保障网络。

图 2 所示为当 $h=4$ ， $\alpha=2$ ， $\beta=1$ 时基于 Matlab 和 pajek 生成的保障网络拓扑结构图。

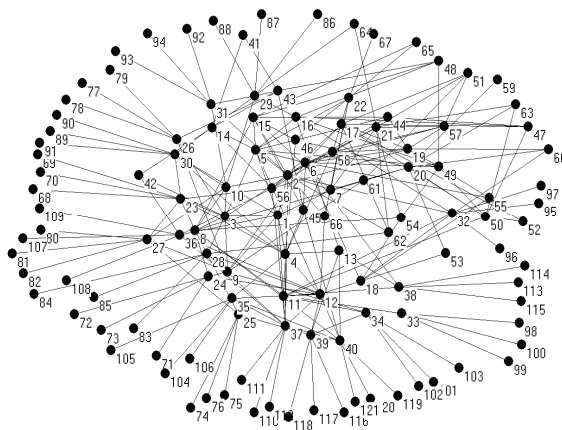


图 2 联勤保障网络拓扑结构

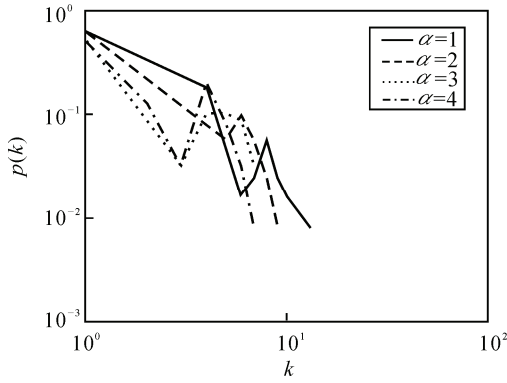
2 模型特征参数分析

复杂网络的各个统计特征值从不同角度对网络的拓扑性质进行了描述，这些参数对了解网络的结构特性具有十分重要的意义。在此选择度分布、平均路径长度、聚类系数这 3 个统计参数对网络进行详细分析。在对模型的进行参数分析时，如不做特

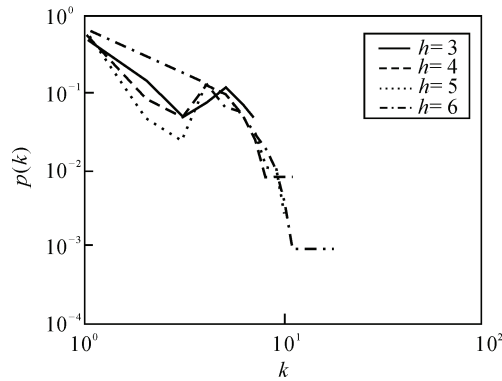
殊说明，默认 $\beta=1$ 。

2.1 度分布

网络中节点 v_i 的度 k_i 定义为与该节点相连的边数。整个网络中节点的度分布情况可用分布函数 $p(k)$ 来描述， $p(k)$ 表示的是网络中 degree 为 k 的节点在整个网络中所占的比率。近年来在复杂网络研究上的一个重大发现就是许多复杂网络的连接度分布具有幂率形式，称这类网络具有无标度特性^[10]。



(a) $h=4$ 时网络的度分布



(b) $\alpha=3$ 时网络的度分布

图 3 网络度分布

图 3 为保障网络的度分布随参数 h 、 α 的变化曲线。其中，图 3(a)表示在网络层级固定，连接控制参数 α 取不同值时保障网络在双对数坐标下的度分布曲线。从图中可以看出：不论 α 如何变化，网络的度分布曲线都存在转折点，在转折点前后网络的度分布分别呈直线下降。图 3(b)表示连接控制参数 α 固定，规模控制参数 h 变化时保障网络在双对数坐标下的度分布曲线。图中网络度分布的分段下降特征依旧十分明显，但在 $h=6$ 时网络的度分布出现明显的幂率分布特性 ($\gamma=1.6$)。分析图 3 可知：整体上网络中度值较大的节点相对比较少，度值较小的节点数目非常多，网络的平均度 $\langle k \rangle$ 不超过 4。出现这种情况的原因是基础的层级网络中有大量

$k=1$ 和 $k=4$ 的节点，引入加边规则后，网络的度分布有一定程度的改变(某些条件下出现幂率分布)，但没有整体上改变这 2 类节点在数量上的优势。

2.2 平均路径长度

网络中任意 2 个节点 v_i 、 v_j 间的最短路径上的边数定义为这 2 点间的距离，用 d_{ij} 表示，它的倒数 $1/d_{ij}$ 称为节点 v_i 、 v_j 间的效率，记为 ϵ_{ij} 。通常用效率还衡量节点间信息的传递速率。网络的平均路径长度 L 则定义为任意 2 个节点间距离的平均值，即

$$L = \frac{1}{C_N^2} \sum_{1 \leq i < j \leq N} d_{ij} \quad (2)$$

由于路径长度与效率成反比，平均路径长度就可以从整体上衡量保障网络的传输效率。

调节模型中的参数 α 、 h ，得到保障网络模型的平均路径变化图，如图 4 所示。由图分析可知：在网络规模确定的情况下，随着 α 的逐渐变大，网络的平均路径长度整体上呈上升趋势；虽然网络规模不同，连接控制参数 $a \approx 2$ 时，保障网络取得平均路径的最小值。对比加边前后网络平均路径长度的变化，取网络规模一定时不同 α 对应的各个保障网络平均路径长度的平均值，与同等规模层次结构网络平均路径长度进行对比，其结果如表 1 所示。通过表中数据可知，保障网络规模从 121 到 364，网络规模增大 3 倍，平均路径长度增大不足 2；网络规模继续增大到 1 093，规模扩大近 10 倍，平均路径长度增加不足 3。也即网络模型的平均路径长度随网络规模的增长呈比对数 ($L \sim \ln N$) 更小的增长，说明了保障网络满足小世界网络中具有较小平均路径长度的特征。

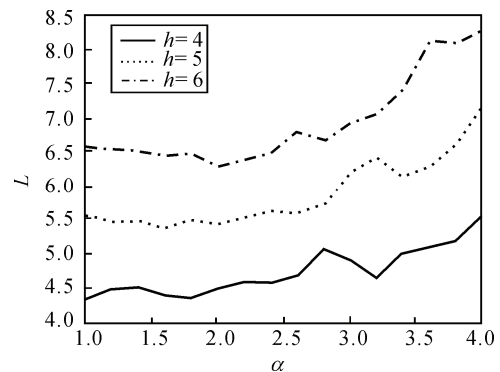


图 4 保障网络的平均路径长度

表 1 平均路径长度对比

网络	121($h=4$)	364($h=5$)	1 093($h=6$)
保障网络	4.80	6.08	7.20
层次结构网络	6.16	8.07	10.02

2.3 聚类系数

一个人的 2 个朋友之间很可能也是朋友，这种属性在复杂网络理论里称为网络的聚类特性。一般地，假设网络中的一个节点 v_i 有 k_i 条边将它和其他节点相连，这 k_i 个节点就称为节点 v_i 的邻居。显然，在这 k_i 个节点之间最多可能有 $C_{k_i}^2$ 条边。而这 k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 和总的可能的边数 $C_{k_i}^2$ 之比就定义为节点 v_i 的聚类系数 C_i ， $C_i = E_i / C_{k_i}^2$ 。整个网络的聚类系数 C 就是所有节点 v_i 的聚类系数 C_i 的平均值，即

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i, \quad (3)$$

聚集系数是专门用来衡量网络节点集聚程度的一个重要参数，属局部特征量^[11]。网络的聚类系数越大，表明网络中各个节点之间的联系越紧密。

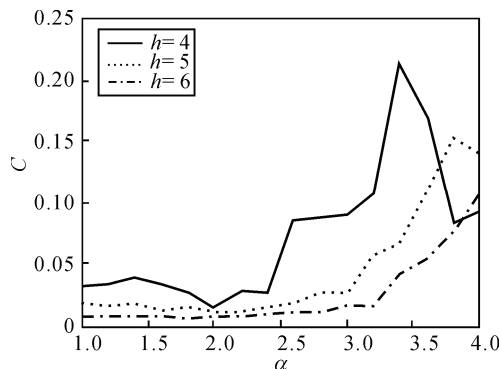


图 5 保障网络的聚类系数

图 5 所示为保障网络聚类系数 C 随模型参数 α 、 h 的变化图。从图中可以看出：一开始接连控制参数 α 较小时，保障网络的聚类系数 C 较小；随着 α 的增大， C 逐渐增大，并且会出现明显的拐点。出现这类情况的原因是：当 α 较小时，层次结构网络中加入长距离边的数量较多，由于有连接总长度 L 的约束，致使网络中加入的总边数较小，从而出现保障网络聚类系数 C 较低的情况；随着 α 的增大，层次结构网络中加入短距离边的数量逐渐增多，网络中加入的总边数随之上升，保障网络的聚类系数开始回升；当 α 增大到一定程度时，层次网络中加入的边全是 $r=2$ 的短边，网络中总边数达到最大值， C 同时取得最大值；之后 α 继续增大，加边概率 p 变得过于小，短边的数量开始下降，进而导致网络中总边数下降， C 随之开始下降。虽然保障网络聚类系数 C 随着参数变化有一定程度的波动，但总体上仍大于同等规模随机网络的聚类系数，满足小世界网络中

的较大聚类系数的特性。由于具有较大聚类系数及较小平均路径长度的特征，反映保障网络具有小世界网络特性。

3 结束语

为了建立能准确模拟现实保障网络的网络模型，笔者提出了一种保障网络的生成机制并描述了模型生成相应的算法步骤，通过对模型的分析可以得出以下几点结论：

- 1) 该模型能准确地体现保障网络最重要的层级结构特征，可真实地反应保障网络所具有的 3 种保障关系，引入的连接控制参数 α 、规模控制参数 h 可较为精确地对网络模型的各项指标进行控制。
- 2) 通过对该网络模型各项特征参数的仿真分析可知，保障网络平均度较小、具有较为明显的小世界特性可以在保障网络的实证性研究中进行验证，并根据实证研究结果对模型进行调整。
- 3) 由于该模型只能对保障网络的拓扑结构进行模拟，而实际的保障网络是加权有负载并存在负载级联效应的网络，如何描述现实保障网络中节点的地理位置以及负载将是下一步研究的重点。

参考文献：

- [1] 李勇. 物流保障网络级联失效抗毁性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [2] Chen Mu, Yu Boming, Xu Peng, et al. A new deterministic complex network model with hierarchical structure[J]. Physica A, 2007, 385: 307-317.
- [3] 张勇, 杨宏伟, 杨学强, 等. 基于复杂网络理论的装备保障网络模型研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(5): 429-434.
- [4] 张勇, 杨宏伟, 白勇, 等. 基于复杂网络理论的装备保障网络实证研究[J]. 装备学院学报, 2014, 25(1): 83-87.
- [5] 张勇, 孙栋, 刘亚东, 等. 基于复杂网络的装备保障网络结构脆弱性分析[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(1): 92-95.
- [6] 王铁宁, 于双双, 梁波. 装备器材保障网络仿真与抗毁性测度[J]. 装备学院学报, 2014, 28(6): 8-13.
- [7] 张嗣瀛. 复杂网络的演化过程 $n(n-1)$ 律, 自聚律[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(3): 84-90.
- [8] Li G, Reis S D S, Moreira A A, et al. Towards Design Principles for Optimal Transport Networks[J]. Physical Review Letters, 2010, 104, 018701.
- [9] Li G, Reis S D S, Moreira A A, et al. Optimal transport exponent in spatially embedded networks[J]. Physical Review E, 2013, 87, 042810.
- [10] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. 1999, Science 286: 509-512.
- [11] Almaas E, Kullkarni R V, Stroud D. Characterizing the structure of small-world networks[J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(9): 98-101.