

基于复杂网络的船舶供应链网络建模与结构分析 ——以 J 造船厂船舶供应链为例

张丽霞

(天津理工大学管理学院, 天津 300384)

摘要: 为弥补现有文献构建模型时仅考虑单个权重指标的片面性, 基于复杂网络理论, 构建考虑双权重指标的船舶供应链网络模型。以 J 造船厂船舶供应链为例进行实证研究, 分析其网络结构。经验证, J 造船厂船舶供应链网络具有无标度性、社区结构特征, 但不具有小世界性。结构分析表明: 前三层供应商层级出强度较大, 分段厂和造船厂层级入强度较大; 分段厂层级节点加权介数较大, 在船舶供应链网络中担负着承上启下的重要作用, 需要重点关注; 零部件供应商层级聚集系数较大, 容错能力强, 但网络整体聚集系数较小。借助复杂网络理论对船舶供应链网络进行建模和分析, 对提高船舶供应链网络稳定性具有重要意义。

关键词: 船舶供应链; 结构分析; 复杂网络; 无标度性; 社区结构

0 引言

随着造船由传统简单模式向现代化大规模定制模式发展, 船舶企业供应链结构也呈现出由简单向复杂的演化趋势。船舶供应链作为大型网络, 其相互交织的拓扑结构易受内外部因素的影响。例如, 2020 年上半年, 受到疫情影响, 我国重点造船聚集区产业链供应链安全稳定性受到严重冲击^[1]。结构分析是性能分析的基础, 对供应链结构进行分析, 能更好地应对此类不确定事件的发生, 为提高船舶供应链的稳定性提供方向。

在船舶供应链结构研究方面, 王会等^[2]分析了船舶产业集群内的造船供应链结构, 认为其具有网状和链状结构、链上节点企业地理分布高度集中且竞争激烈等特点; 陶倩^[3]则构建了造船供应链网络及其实例化模型, 将其分别为原材料供应商、船舶设备供应商和造船厂三个层级; 张步华^[4]认为现代造船模式需要根据不同的施工和作业阶段将船舶的组成结构划分为总段、分段、组件、部件、零件等部分; Strandhagen 等^[5]认为造船供应链包

括设计、供应商和物流、制造与装配、产品使用、产品报废等环节。但上述学者的研究不能清晰地描述船舶供应链的全部结构, 仅能从供应链功能角度进行分类并描述各类别之间的简单关系^[6]。借助复杂网络理论构建船舶供应链网络模型, 可以将实际企业节点间的关系及其强度描绘出来, 为研究船舶供应链网络提供了新思路。

对无权网络进行分析可以研究节点之间的相互作用关系, 但不能反映作用关系大小及其功能, 因此, 一些学者基于复杂网络理论构建供应链模型时对边赋予了权重。例如, 宋思颖^[7]、林琳^[8]分别研究了成品油供应链网络, 以成品油交易量为边赋权; 王杏^[9]以交易量为权重构建了农产品供应链网络模型; Silva 等^[10]应用复杂网络理论, 以支付的货币价值为权重, 研究了巴西 6 万家公司组成的新型经济供应链。但是, 以上研究都只考虑了单个指标, 不够全面。

针对已有文献仅从功能角度简单分析供应链结构的局限性及建模时仅考虑单个权重指标的片面性, 本文基于复杂网络理论, 综合考虑产品供

方渠道的可替换性和产品重要等级两个权重指标，借此刻画节点间的相互作用强度，构建船舶供应链模型。以J造船厂船舶供应链为例，验证所构模型的合理性，进一步分析网络结构特征，为提高船舶供应链稳定性提供思路。

1 船舶供应链网络建模与指标选择

1.1 船舶供应链网络建模

综合学者们的观点，考虑船舶建造过程的关键环节，本文所构建的一般船舶供应链模型将节点层分为 L_1 原材料供应商、 L_2 零部件供应商、 L_3 设备供应商、 L_4 分段厂和 L_5 总装厂 5 个层级。各层级的企业节点用 v 表示。

连边则根据企业节点间的供需关系构建。由于船舶供应链上的企业有单一物品供应商、固定代理商等区分，在构建船舶供应链时必须考虑节点之间的跨层连接，包括邻级连接、跨一级连接、跨二级连接及跨三级连接。

船舶供应链的下游企业对于不同供应商的依赖程度存在差异：对于唯一性供应商的依赖程度不可替换，其所占权重相对较高；而对于竞争性供应商，企业有可选择的余地，其所占权重就相对

较低，因此船舶供应链产生了典型的加权网络特征。本文根据供方提供产品的重要性及对船舶质量的影响程度，将产品重要等级分为 T、A、B、C 四大类。综合考虑产品供方渠道的可替换性和产品重要等级两个指标来确定权重，共分为 10 个等级 [1, 10]。供应商权重赋分表见表 1。

表 1 供应商权重赋分表

供方渠道		产品重要等级			
		T	A	B	C
唯一性供应商		10	9	8	7
竞争性供应商	供应商	7	6	5	4
	代理商	4	3	2	1

综上所述，本文所构建的一般船舶供应链结构图如图 1 所示。

1.2 船舶供应链网络特征指标选取

1.2.1 复杂网络验证指标

Wiedmer 等^[11]研究了美国计算机和电子制造业中的 10 家公司及 11 家跨行业公司的供应链网络数据，结果表明它们具有无标度性和分层社区结构特点，但不具有小世界特性。Neal^[12]在文章中指明小世界结构、无标度分布和模块化群落结构是复杂网络的三个常用拓扑特征。因此，本文从小世界性、

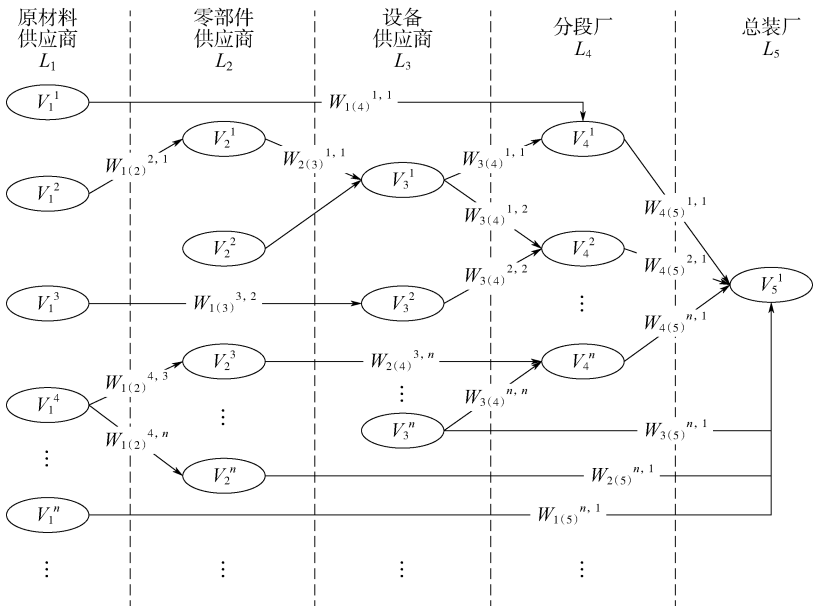


图 1 一般船舶供应链结构图

无标度性和社区结构三个方面来验证所构建的加权船舶供应链网络是否为复杂网络,以便后续利用复杂网络理论进行结构分析。

许多真实网络具有很小的平均最短路径和很高的聚类系数,被称为小世界性。本文采用 Humphries^[13]定义的小世界量化指标来进行判断,公式如下

$$\sigma = \frac{C/C_r}{L/L_r} \quad (1)$$

式中, C 和 L 分别为船舶供应链网络的平均聚类系数和平均最短路径长度; C_r 和 L_r 分别为与其同等规模随机网络的平均聚类系数和平均最短路径长度。当 $\sigma > 1$ 时,认为该网络具有小世界性;当 $\sigma < 1$ 时,认为其不具有小世界性。

无标度性是指节点的度分布函数近似幂律分布,具体表现为大部分节点的度值较小,只有少数节点的度值较大^[14]。通过计算节点度与度分布之间的关系,可以检验该网络是否具有无标度性。

社区结构代表了复杂网络中具有相同或相似功能的元素的集合,这些元素相互协作或相互作用,共同完成整个系统中某些相对独立的功能或组成相对独立的组织结构。本文通过贪婪模块度算法对加权船舶供应链网络结构进行社区划分^[15],以验证船舶供应链网络是否具有社区结构特征。

1.2.2 点强度

点强度定义既考虑了节点的近邻数,又考虑了该节点和近邻之间的权重,是该节点局域信息的综合体现,公式如下

$$s_i = \sum_{j \in N_i} w_{ij} \quad (2)$$

式中, N_i 为节点 v_i 的邻近集合; w_{ij} 为节点 v_i 与节点 v_j 间的权重。

1.2.3 节点加权介数

介数用来衡量通过节点 v 的最短路径占总最短路径的比例,公式如下

$$c_B(v) = \sum_{s,t \in v} \frac{\sigma(s,t|v)}{\sigma(s,t)} \quad (3)$$

式中, v 为船舶供应链网络的节点集; $\sigma(s,t|$

$v)$ 为节点 s 到节点 t 的路线中通过节点 v 的最短路径的数量; $\sigma(s,t)$ 为节点 s 到节点 t 所具有的所有最短路径的数量。

加权介数则将边的权重考虑进去,用来衡量一个节点在网络中作为信息传播的关键节点的能力。

1.2.4 加权聚集系数

节点的聚集系数反映了顶点与其一级近邻之间的聚集团特性,聚集系数越高,则其一级近邻的关系越密切,体现节点的局部特征。参考 Onnela 等^[16]对加权聚集系数定义,公式如下

$$c_i^w = \frac{1}{k_i(k_i - 1)} \sum_{i,j} (w_{ij}w_{jk}w_{ki})^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中, $(w_{ij}w_{jk}w_{ki})^{\frac{1}{3}}$ 为节点 v_i 与它的两个相邻节点 v_j 和 v_k 组成的三角形的三条边的归一化权值的几何平均值; k_i 为节点 v_i 的度。该公式考虑了三边权重的几何平均值。

2 J 造船厂船舶供应链网络建模

按照上述规则整理出 J 造船厂船舶供应链网络的关系数据,得到一个包含 596 个节点、1143 条边的船舶供应链网络。将获得的船舶供应链网络关系数据导入 NetworkX 软件进行可视化处理,得到船舶供应链网络可视图,如图 2 所示。

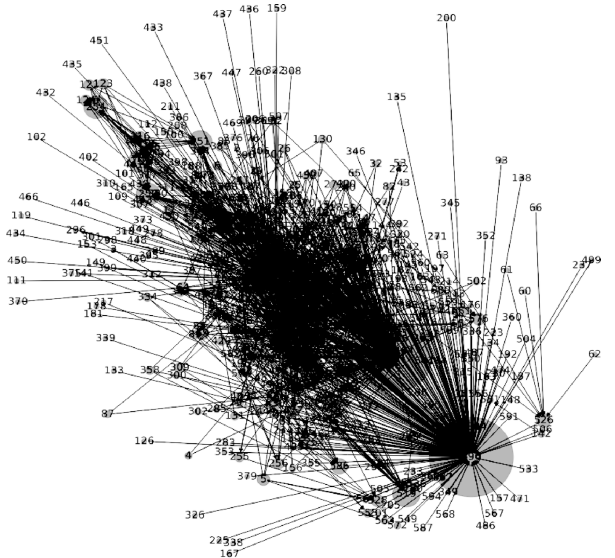


图2 船舶供应链网络可视图(截图)

其中, L_1 原材料层级有 89 个企业节点, L_2 零部件层级有 155 个企业节点, L_3 设备供应商层级有 265 个节点, L_4 分段厂层级有 86 个节点, L_5 总装厂层级只包含 1 个节点。图 2 中, 节点大小表示该节点的度, 即与其他节点间的连边数量; 线条粗细则表示连边权重大小。其中, L_1 原材料、 L_2 零部件、 L_3 设备供应商这三个层级所跨范围较大, 基本覆盖了整个船舶供应链网络, 而度值较大的节点基本都属于 L_4 分段厂和 L_5 总装厂层级, 这说明前三个层级的节点更多地与这两个层级相连, 而前三者之间的连边较少, 这也符合船舶供应链的实际情况。

3 J 造船厂船舶供应链网络结构分析

3.1 复杂网络验证

根据式 (1) 计算得 $\sigma \approx 0.097 < 1$, 说明本文所构建的船舶供应链网络不具有小世界性。原因是本文构建的船舶供应链网络方向一致, 且同级之间不存在连边关系, 很难到达其他顶点, 所以网络整体的聚集系数很小, 不是强连接。

船舶供应链网络度分布如图 3 所示。为了便于分析船舶供应链网络的无标度特性, 图 3 只显示了度值小于等于 35 的节点。由图 3 可以看出, 度值为 1 的节点所占比率约为 0.509 2, 而度值为 21 的节点所占比率约为 0.006 7, 体现出复杂网络的无标度特性, 即大部分节点的度值较小, 小部分节点的度值较大, 反映出船舶供应链的无标度特性。

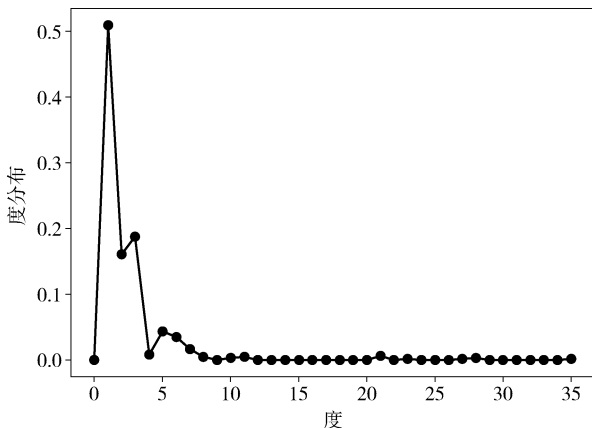


图3 船舶供应链网络度分布

通过计算, 该船舶供应链网络共被划分成 8 个社区结构。船舶供应链网络社区结构如图 4 所示。图 4 中企业节点数量大于 35 的共有 4 个社区。

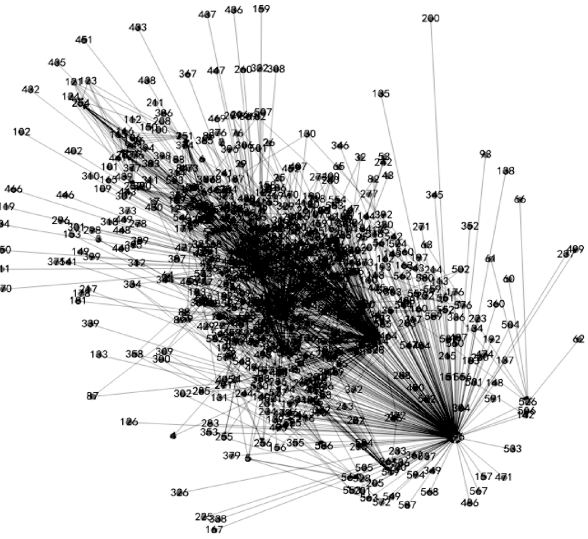


图4 船舶供应链网络社区结构 (截图)

其中, 划分出第一大社区, 共包含 233 个节点, 主要是位于 $L_2 \sim L_5$ 层级的企业节点; 第二大社区主要包含了 $L_1 \sim L_3$ 层级的企业节点; 第三大社区则主要是 L_4 分段厂层级的企业节点, 以及少量供应商层级节点; 第四大社区主要包含了位于 L_2 、 L_3 层级的节点。这些社区与企业间上下游的供应关系紧密相关。

综上, 本文所构建的加权船舶供应链网络具有无标度性和社区结构的特征, 但不具有小世界性, 与 Wiedmer 的结论相同, 说明该网络具有一定的复杂网络特征, 因此, 可以利用复杂网络理论进行下一步分析, 同时也证明了按照该方法所构建的加权船舶供应链网络存在一定的合理性。

3.2 网络结构分析

3.2.1 点强度

节点出强度如图 5 所示, 展示了船舶供应链网络各节点の出强度。相较于其他层级, L_1 原材料供应商层级的节点拥有最大的出强度, 位于整个图的上部。 L_1 原材料供应商位于整个船舶供应链的第一级层, 它不存在入强度, 只存在出强度, 可以与下游的 $L_2 \sim L_5$ 共 4 个层级的节点建立供需

关系,且 L_1 原材料供应商提供的大多数是用途广泛的原材料,产品重要等级高,因此它的出强度最大。 L_5 总装厂处在船舶供应链的最后一级,无法再与其他企业节点建立供需关系,因此出强度为0。

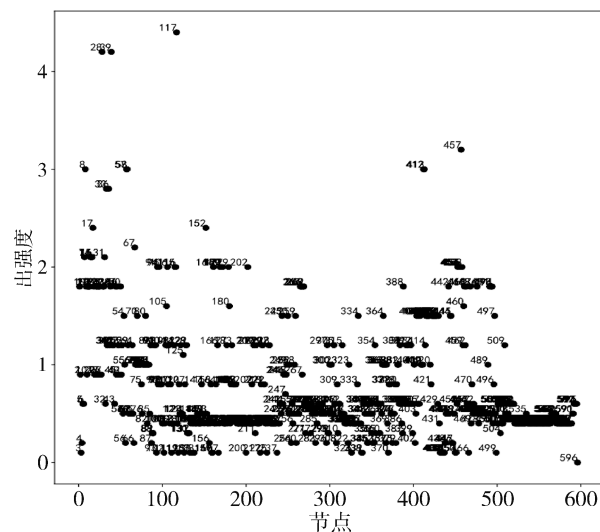


图5 节点出强度 (截图)

节点入强度如图6所示。图6中左侧和中间部分大量节点的入强度为0,这部分节点主要是位于 $L_1 \sim L_3$ 层级的节点。在实际的船舶供应链网络中, L_1 原材料、 L_2 零部件、 L_3 设备供应商之间很少存在供需关系,主要向 L_4 分段厂和 L_5 总装厂层级提供产品,这与图2表现出来的关系一致。

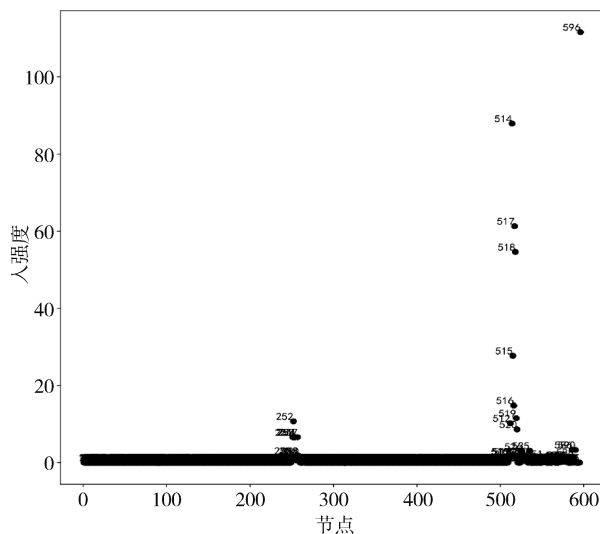


图6 节点入强度 (截图)

3.2.2 加权介数

各节点的加权介数如图7所示,可以看出,船舶供应链网络中大多数节点的介数值较小,只有少部分节点拥有较大的介数值。

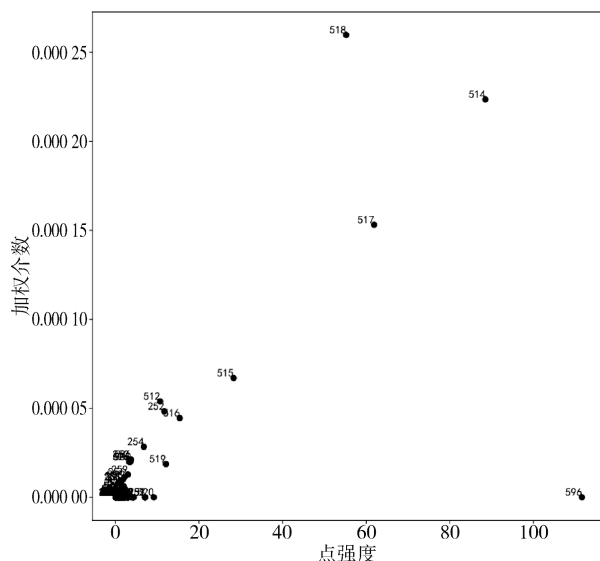


图7 各节点加权介数 (截图)

介数反映了对应节点在整个网络中的作用和影响力,因而少数企业节点对船舶供应链的平稳运行起到重要作用。介数值较大的几个节点分别是515、514、517、518,它们都是位于 L_4 分段厂层级负责分段制造的企业。众多原材料、零部件、设备供应商首先需要送到这里进行船舶的初步组装,然后再送到总装厂完成总装,因此在船舶供应链网络中担负着承上启下的重要作用。如果这些节点遭到蓄意攻击,网络将会受损严重,因此需要重点关注。

3.2.3 加权聚集系数

节点加权聚集系数如图8所示,聚集系数较大的几个节点分别是142、222、531、104、108、114、122。除节点531位于 L_4 分段厂层级,其是负责外场机械加工的企业,其余均位于 L_2 零部件供应商层级,这表明这些节点与其他节点关系密切,容错能力较强,如果 L_2 层级企业节点遭到破坏,网络还能维持较好的连通性。

网络整体的平均聚集系数约为0.14,表明该船

船舶供应链网络有一定的聚类程度,但比较小,这主要是因为构建网络时同级之间不存在连边的特定连接方式。对于大多数供应链网络来说,同行业的供应商、零售商之间存在竞争关系,而缺少交易关系,但它们提供同种类的产品,如果增加连边关系,实现同级之间的产品调配,一定程度上能扩大网络的聚集系数,提高船舶供应链的稳定性。

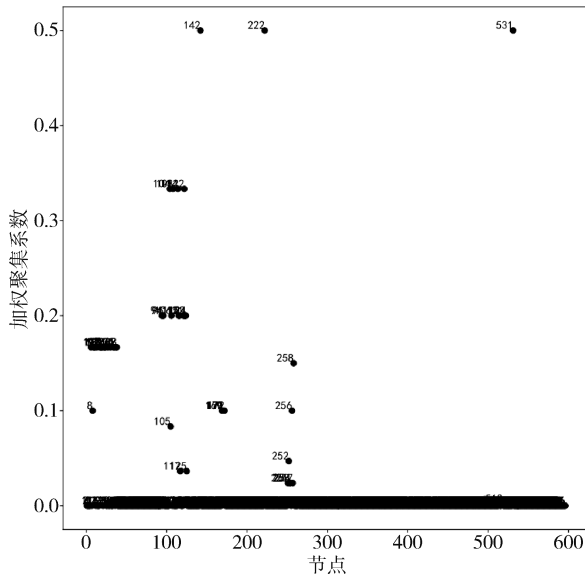


图8 节点加权聚集系数(截图)

4 结语

本文基于复杂网络理论构建一般船舶供应链网络模型,并以J造船厂船舶供应链验证该模型的可靠性,分析其网络结构。许多大型网络都具有复杂网络的特征,船舶供应链网络作为大型网络,结果表明,J造船厂船舶供应链网络具有无标度性、社区结构特征,但不具有小世界性。进一步对其网络结构分析,得出以下结论:

(1) J造船厂船舶供应链 $L_1 \sim L_3$ 供应商层级入强度较小,出强度较大,主要向 L_4 、 L_5 层级提供产品。 L_5 总装厂位于本文所构建船舶供应链的最后一级,出强度为0。参考节点强度,可以帮助企业分析自身在同类竞争者中的地位,寻找合适目标进行标杆管理,助力企业发展。

(2) 加权介数较大的节点均位于 L_4 分段厂层级,它们在船舶供应链网络中担负着承上启下的重要作用,是网络中的关键节点,需要重点维持该类企业的生存发展。

(3) L_2 零部件供应商层级的聚集系数较大,容错能力较强,但网络整体聚集系数较小,主要原因是构建网络时同级之间不存在连边的特定连接方式。如果实现同级同种产品之间的横向调配,一定程度上能提高船舶供应链的稳定性。

本文通过实例分析,验证了船舶供应链网络的复杂网络特征,对其网络结构进行初步分析,并从结构分析角度出发,给出提高船舶供应链网络稳定性的建议。在此基础上,面对内外部众多的不确定因素,如何进一步优化船舶供应链管理,仍有待研究。

参考文献

- [1] 刘志良. 防风险解难题 我国船舶工业迎接挑战顶住冲击 [N]. 中国船舶报, 2022-07-22 (5).
- [2] 王会, 张光明, 谢平顺. 船舶产业集群内的造船供应链结构特点和竞争优势分析 [J]. 造船技术, 2007 (1): 4-6, 33.
- [3] 陶倩. 基于合作共生模式的造船供应链网络风险管理 [J]. 上海管理科学, 2017, 39 (2): 64-72.
- [4] 张步华. 船舶分段建造工程工期、成本、质量综合均衡优化研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2014.
- [5] STRANDHAGEN J W, BUER S V, SEMINI M, et al. Sustainability challenges and how Industry 4.0 technologies can address them: a case study of a shipbuilding supply chain [J]. Production Planning & Control, 2022, 33 (9-10): 995-1010.
- [6] 戈钢, 赵金楼. 基于供应链的区域船舶制造产业集群网络模型研究 [J]. 科技管理研究, 2016, 36 (6): 124-128, 134.
- [7] 宋思颖. 基于复杂网络理论的成品油供应链网络实证研究 [D]. 成都: 西南财经大学, 2010.
- [8] 林琳. 基于复杂网络理论的成品油配送网络结构特征及鲁棒性研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- [9] 王杏. 基于复杂网络的农产品供应链建模与网络风险传播研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [10] SILVA T C, AMANCIO D R, TABAK B M. Modeling supplychain networks with firm-to-firm wire transfers [J]. Expert Systems with Applications, 2022 (190): 116162.

[11] WIEDMER R, GRIFFIS S E. Structural characteristics of complex supply chain networks [J] . Journal of Business Logistics, 2021, 42 (2): 264-290.

[12] NEAL Z. The devil is in the details: differences in airtraffic networks by scale, species, and season [J] . Social Networks, 2014 (38): 63-73.

[13] HUMPHRIES M D, GUMEY K. Network ‘small-world-ness’: a quantitative method for determining canonical network equivalence [J] . Plos One, 2008, 3 (4): e0002051.

[14] 张轶, 钱晓东. 基于复杂网络的供应链建模及仿真研究 [J] . 科技管理研究, 2014, 34 (22): 183-186.

[15] CLAUSET A, NEWMAN M E J, MOORE C. Finding community structure in very large networks [J] . Physical Review E, 2004, 70 (6): 066111.

[16] ONNELA J P, SARAMAKI J, KERTÉSZ J, et al. Intensity and coherence of motifs in weighted complex networks [J]. Physical Review E, 2005, 71 (6): 065103. **PMT**

收稿日期: 2024-04-15

作者简介:
张丽霞 (1999—), 女, 研究方向: 供应链质量管理。