

半导体供应链的脆弱性研究分析

张亦舒¹, 王嘉敏¹, 苏旭颖²

¹北方工业大学理学院, 北京

²北方工业大学人工智能与计算机学院, 北京

收稿日期: 2025年10月21日; 录用日期: 2025年11月12日; 发布日期: 2025年11月24日

摘要

本研究基于已公开供应链数据对国内半导体行业的相关公司构建供应链网络模型, 使用复杂网络理论, 分析网络的拓扑特性, 确认网络中的关键节点, 通过移除供应链网络节点的方式模拟蓄意攻击和随机攻击两种不确定风险事件, 据此分析供应链的脆弱性。最终得出结论: 半导体供应链网络整体呈现出“小世界”特征; 核心企业大多分布于产业链的中游, 分布具有集群效应, 且核心企业的资本实力更强; 网络在关键节点受到攻击时表现出更大的脆弱性, 因此核心企业在维持供应链的稳定性方面起到不可或缺的作用。

关键词

供应链, 复杂网络理论, 半导体

The Research and Analysis on the Vulnerability of Semiconductor Supply Chain

Yishu Zhang¹, Jiamin Wang¹, Xuying Su²

¹College of Science, North China University of Technology, Beijing

²College of Artificial Intelligence and Computer Science, North China University of Technology, Beijing

Received: October 21, 2025; accepted: November 12, 2025; published: November 24, 2025

Abstract

This study constructs a supply chain network model for relevant companies in the domestic semiconductor industry based on publicly available supply chain data. Using complex network theory, the study analyzes the network's topological characteristics and identifies key nodes within the network. By removing nodes from the supply chain network, the study simulates two types of uncertain

risk events: deliberate attacks and random attacks. The analysis is then used to assess the vulnerability of the supply chain. The conclusion drawn is as follows: The semiconductor supply chain network overall exhibits a “small-world” characteristic; core enterprises are mostly distributed in the midstream of the industry chain, with a clustering effect in their distribution, and these core enterprises have stronger capital strength. The network shows greater vulnerability when key nodes are attacked, indicating that core enterprises play an indispensable role in maintaining the stability of the supply chain.

Keywords

Supply Chain, Complex Network Theory, Semiconductor

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

半导体行业作为现代科技发展的核心驱动力，其发展状况直接关乎国家的科技实力和经济竞争力水平。半导体不仅是信息技术的物理载体，更是驱动数字经济、智能社会与绿色能源转型的核心力量。其供应链的稳定性更直接影响着多个产业的运作，尤其是在信息技术、汽车制造、通信设备等领域。中国作为世界第二大半导体市场，十分重视半导体产业，陆续出台了多项集成电路扶持政策。作为电子产品的核心基石，集成电路不仅是推动产业转型升级和技术革命的关键力量，更是衡量一个国家核心竞争力的重要指标。近年来，受国际贸易摩擦、地缘政治冲突、自然灾害及公共卫生事件等因素的影响，全球半导体供应链频繁遭遇中断，中国半导体产业面临核心技术受限、供应链依赖海外厂商等问题。这一现象暴露出国内半导体供应链的脆弱性及对外部冲击的高度敏感性，制约了我国半导体产业的自主可控能力。因此，如何提升半导体芯片供应链的韧性，降低供应链脆弱性，提高其应对突发风险的能力，已成为学术界和产业界广泛关注的热点问题。

供应链本质上是一个复杂网络系统，由多个供应商、制造商、分销商及终端客户构成。近年来，复杂网络理论在金融系统稳定性分析、电网可靠性研究、传染病传播模型等领域取得了重要进展。将复杂网络理论应用于国内半导体芯片供应链韧性研究，有助于揭示供应链的拓扑结构特征，量化不同节点的关键性，并为优化供应链结构提供理论支撑。

本研究拟基于复杂网络理论，构建中国半导体供应链网络模型，分析其拓扑结构特征，识别关键节点，并分析研究网络的韧性。通过该研究，可以为政府、企业制定供应链韧性提升方案提供理论依据，助力构建更加稳定、高效的国内半导体产业链体系。

2. 文献综述

复杂网络理论为研究供应链结构特征及其脆弱性提供了重要的分析工具。周涛等人(2005) [1]指出，真实世界网络普遍具有小世界效应和无标度特性，为理解供应链网络中节点的重要性与连通机制奠定了理论基础。杨康(2014) [2]利用复杂网络中的相继故障模型与传播动力学理论，探讨了供应链风险的传导过程，为企业制定风险控制策略提供了新思路。盛昭瀚等人(2022) [3]则从复杂系统管理理论出发，揭示了供应链作为社会型多中心复杂适应系统的本质特征，强调了系统韧性的形成机制。在供应链韧性研究方面，学者们从多维度探讨了其影响因素与提升路径。Soni 等(2014) [4]基于解释结构模型识别了供应链

韧性的关键影响因素，认为企业的敏捷性与协同能力对韧性提升至关重要。石建勋等人(2023) [5]提出动态评估机制以提升产业供应链的安全性及韧性水平。朱永光等(2023) [6]利用指标障碍度模型和贡献度模型，分析了中国铜资源产业链韧性的主要制约因素，发现抵御能力不足是关键瓶颈。陶锋等人(2023) [7]结合数字化转型政策，从纵向关系理论出发，系统阐释了产业链韧性的内涵与形成机制，指出供需匹配优化、关系维持与质量提升是韧性增强的核心路径。

半导体供应链作为一个复杂的网络系统，其网络特性、韧性提升策略以及影响因素等方面已经得到了广泛的研究。然而，现有研究针对中国半导体供应链内部结构特征与关键节点脆弱性的系统定量研究仍较为有限。因此，本研究在综合复杂网络理论与供应链韧性研究成果的基础上，构建了中国半导体供应链网络模型，采用介数中心性识别关键节点，并通过随机与蓄意攻击模拟分析系统脆弱性。与现有研究相比，本研究在微观层面揭示了中国半导体供应链的结构性风险特征，为产业链安全治理与政策优化提供了新的实证依据。

3. 数据收集及供应链网络构建

3.1. 数据收集

半导体供应主要可以分为五个环节，第一个环节为硅片等原材料和光刻机等设备的提供，第二个环节为 IC 设计，第三个环节为 IC 制造，第四个环节为封装测试，第五个环节为最终产品的交付，主要的应用领域为汽车电子、计算机、网络通信等。其中，第一个环节属于产业的上游，第二环节到第四环节属于产业中游，第五环节属于产业的下游(见图 1)。

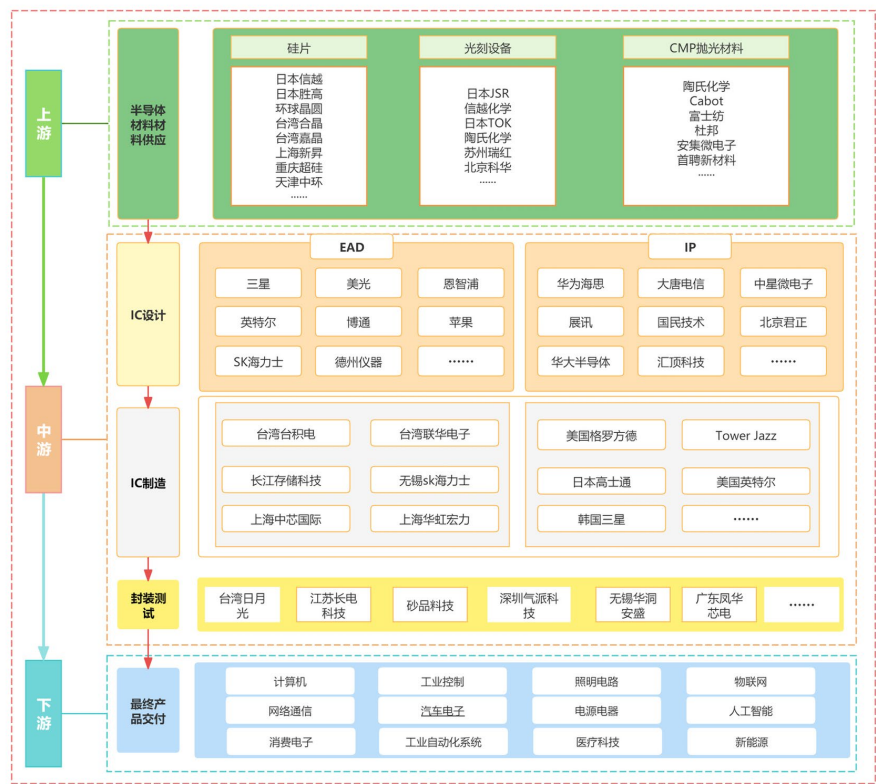


Figure 1. Diagram of semiconductor industry chain
图 1. 半导体产业链图

查找半导体供应链数据的主要流程如下：第一步，选择一个国内半导体行业的龙头企业作为核心企业，选择的依据为半导体企业 A 股市值，最终选择了中芯国际(SEMICONDUCTOR MANUFACTURING INTERNATIONAL CORPORATION, SMIC)作为核心企业[3]，SMIC 是国内最大的晶圆代工厂，与多家企业都有交易关系。第二步，查找 SMIC 的供应商名单与客户名单，筛选出与半导体相关的名单数据。第三步，针对新增的企业，找到这些企业的供应商与客户名单，将其加入网络中，直至不再出现新增企业。为了保证企业与半导体行业的相关性，将主营业务与半导体无关的企业进行了排除。最后，通过企业的年报与行业报告，对数据进行了补充。

3.2. 供应链网络建模

最终筛选出了 108 家半导体行业相关企业作为网络的节点，根据它们的供应商与客户名单，构建了一个有向无权的半导体供应链网络。该网络模型可以表示为 $G=(V,E)$ ，其中 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$ 指节点的集合， $E=\{e_{i,j} \mid i,j \in V, i \neq j\}$ 是边的集合，表示企业 i 与企业 j 之间的供需关系， $e_{i,j}$ 表示企业 i 指向企业 j 的供需关系。边的方向性代表了企业之间的资金流、物流关系，在网络图中以有向箭头来表示(见图 2)。

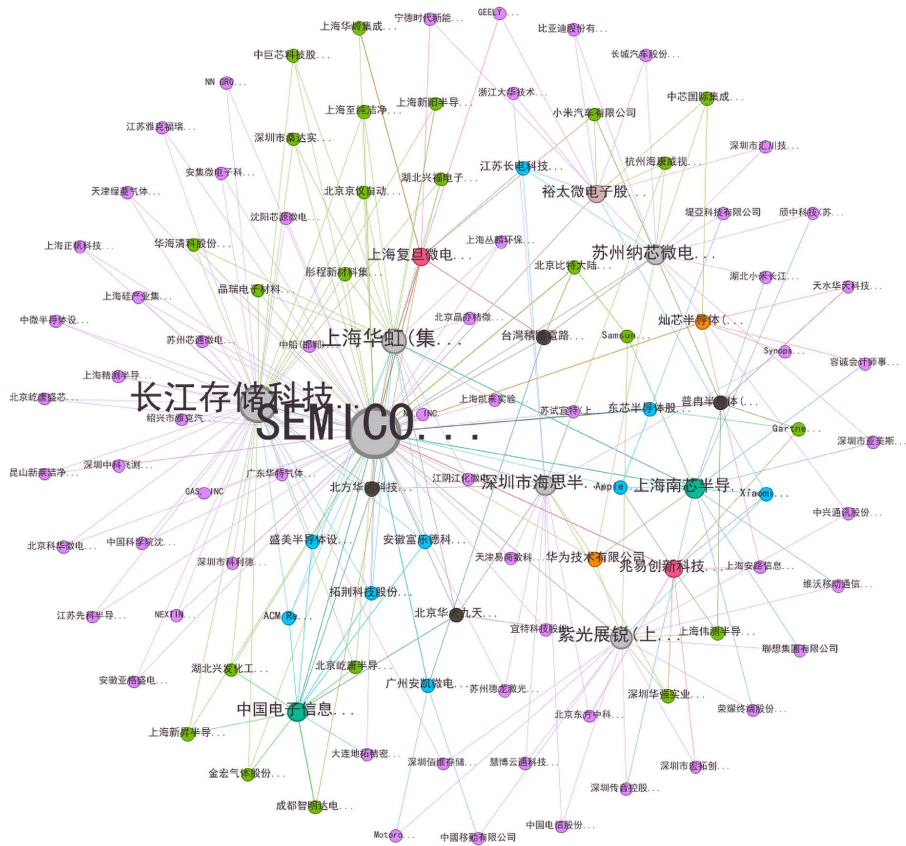


Figure 2. Diagram of the national semiconductor supply chain network
图 2. 全国半导体供应链网络图

4. 网络拓扑特征分析

本节从度与度分布、平均路径长度、聚类系数、介数四个角度分析半导体供应链网络的网络拓扑特征。对网络拓扑特性的分析，可以支撑后续的关键节点识别与脆弱性分析。

4.1. 平均路径长度

平均路径长度是指两节点之间的距离指连接两者的最短路径上所包含的边的数目[8], 网络的平均路径长度 L 即为网络中任意两节点之间距离的平均值。它的大小反映了网络中节点的分离程度, L 越小则网络越小, L 越大则网络越大。

在构造的半导体供应链网络中, 平均路径长度 $L \approx 2.453$ 。在随机网络中, L 的理论值为 $\ln N / \ln D$, 其中, N 为节点数, D 为平均度数, 得到随机网络的理论值为 5.578, L 明显小于该理论值, 因此, 该网络具有较小的平均路径长度, 网络之间的传递效率很高。

平均路径长度有其重要的实际意义。 L 越小, 代表网络之间信息传递效率越快, 产品交付周期越短, 但同时也代表了网络过度依赖核心节点, 相对来说有较高的风险。目前, 缩短平均路径长度是提升供应链效率、更快地响应客户需求的关键问题, 对提升企业的核心竞争力、促进半导体行业的发展都有重要意义。

4.2. 聚集系数

节点的聚集系数用于衡量一个节点的邻居之间彼此相连的程度。对于一个节点 i , 假设它有 m_i 个邻居节点, 这些邻居节点之间最多可能有 $m_i(m_i - 1)/2$ 条边, 若这些邻居节点之间实际存在的边数为 E_i , 则它与 $m_i(m_i - 1)/2$ 的比值即为节点 i 的聚集系数。而网络的聚集系数 C 就是网络中所有节点的聚集系数的平均值, 它反映了网络的紧密程度。聚集系数越接近于 1, 节点的邻居之间高度连接, 越接近于 0, 节点的邻居之间几乎不直接连接。

在完全随机网络中, 聚类系数为 N^{-1} , 几乎接近于 0, 在每个节点都与其他节点相连的全连通网络中, 聚类系数等于 1。经过计算, 该半导体供应链网络的聚类系数为 0.219, 虽然远小于 1, 但远高于 N^{-1} , 这表明供应链网络中的企业倾向于聚集在一起, 企业之间存在一定的合作关系, 但未形成高度密集的集群。

4.3. 度与度分布

度与度分布是复杂网络中最基础的拓扑特征, 直接反应网络中节点的连接模式及其异质性。在半导体供应网络中, 度与度分布的分析能够揭示关键企业的枢纽性、供应链的集中化程度等特征。在网络 $G=(V, E)$ 中, 节点 $i \in V(G)$, 则节点 i 的度 k_i 即为网络中与节点 i 相连的边数, 即 $k_i = \sum_{j \in N_i} e_{i,j}$, N_i 是邻接点集。在该有向网络图中, 节点 i 的度 k_i 是入度 k_i^- 和出度 k_i^+ 的和, 节点的入度代表指向该企业节点的边数, 也就是客户的数量。入度越大反映其接受的客户订单越多。而出度则代表从该企业节点出发的边数, 也就是供应商数量。出度越大反映该企业需要向更多的代工厂分发订单。

半导体供应链网络的度分布公式为:

$$P(k) = \frac{n(k)}{N} \quad (1)$$

其中, N 代表供应链网络中的企业数量, $n(k)$ 是供应链中度数为 k 的企业数量。

在该有向网络中, 需分别定义入度分布和出度分布。

入度分布:

$$P_{in}(k^-) = \frac{n(k^-)}{N} \quad (2)$$

其中, $n(k^-)$ 是供应链中入度为 k^- 的企业数量。

出度分布:

$$P_{out}(k^+) = \frac{n(k^+)}{N} \quad (3)$$

其中, $n(k^+)$ 是供应链中入度为 k^+ 的企业数量。

供应链网络的度分布、入度分布以及出度分布图如下(图 3):

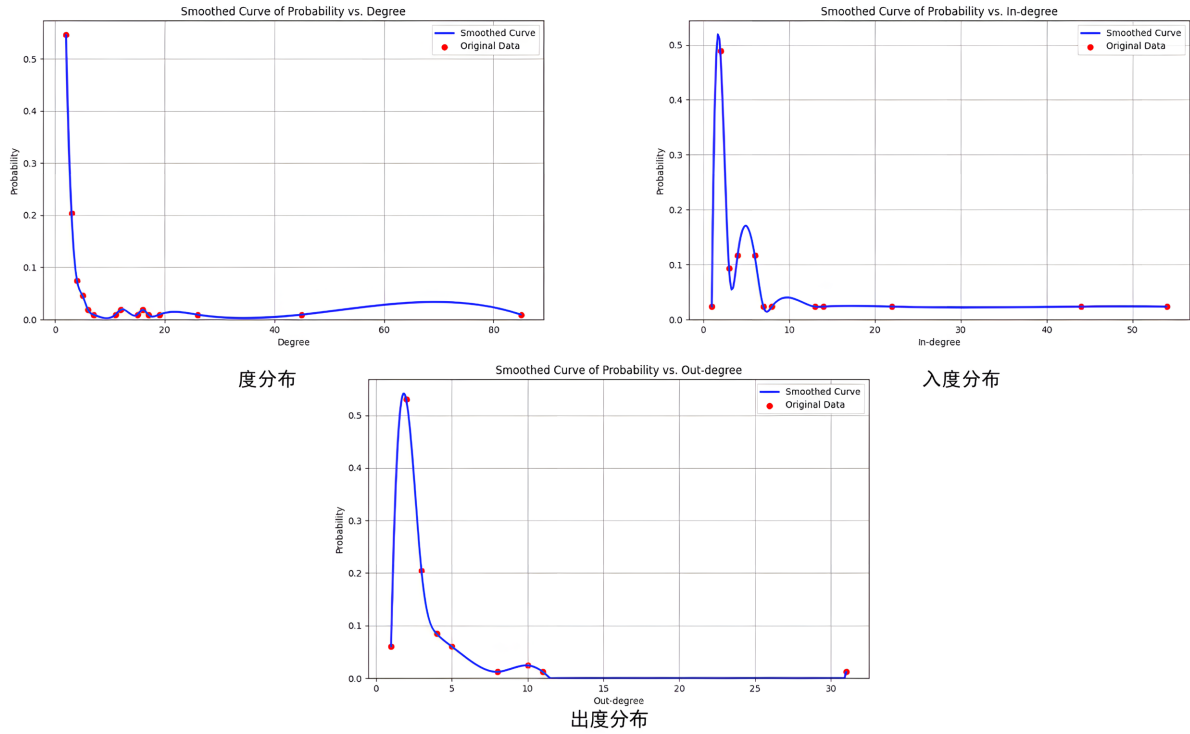


Figure 3. Diagram of the in-degree, out-degree, and degree distributions
图 3. 度、入度、出度分布图

对供应链网络的度数据进行幂律分布拟合, 得到幂律指数 $\gamma = 2.39$, 并对度分布的拟合情况进行 Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验, 得到统计量 $D = 0.1$, 小于显著性水平为 0.05 时的临界值, 因此可以认为该网络的度分布服从幂律分布, 幂律分布表明, 大部分的企业节点具有较少的连接, 而少数企业节点具有大量连接, 这符合无标度网络的特征。

4.4. 介数

介数是衡量节点在网络中的重要性的指标。节点介数的计算公式为:

$$B(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (4)$$

其中, $\sigma_{st}(v)$ 是节点 s 到节点 t 的最短路径中经过节点 v 的最短路径数量, σ_{st} 是节点 s 到节点 t 的最短路径总数。介数越大, 说明该节点在半导体供应链网络中越具影响力。

边介数的计算公式为:

$$B(e) = \sum_{s \neq t} \frac{\sigma_{st}(e)}{\sigma_{st}} \quad (5)$$

其中， $\sigma_{st}(e)$ 是节点 s 到节点 t 的最短路径中经过边 e 的最短路径数量。通过计算分析边介数，可以识别供应链网络中关键的物流通道。

为了完成网络的关键节点识别和脆弱性分析，我们计算出了样本企业节点的介数，介数排名前十的数据如下表(见表 1)：

Table 1. Betweenness centrality table of the top ten enterprises
表 1. 前十企业介数表

企业名称	节点介数
SMIC	0.693
紫光展锐(上海)科技股份有限公司	0.116
苏州纳芯微电子股份有限公司	0.095
长江存储科技有限责任公司	0.088
上海南芯半导体科技股份有限公司	0.087
深圳市海思半导体有限公司	0.066
裕太微电子股份有限公司	0.063
兆易创新科技集团股份有限公司	0.049
上海复旦微电子集团股份有限公司	0.037
灿芯半导体(上海)股份有限公司	0.035

计算结果显示，SMIC 在本研究构建的半导体供应链网络中表现出较高的介数中心性，这意味着其在整个网络的最短路径中被频繁经过，是信息或物资流动中的关键“中转站”。SMIC 的高介数值说明它不仅本身拥有较多的连接，还在多个企业之间起到了连接和协调的中枢作用，具有较大的结构影响力和战略地位。

5. 关键节点与韧性分析

5.1. 关键节点识别

进行关键节点的识别分析是研究网络时不可或缺的一个环节。关键节点在供应链网络中影响全局，一旦失效可能引发级联反应，致使整个供应链受到破坏，通过识别这些节点，可以为决策提供依据，提升网络的鲁棒性，增强抗风险能力。

目前，关于关键节点识别的研究中，学者们采用了多种中心性指标与综合方法。度中心性衡量节点的直接连接数量，能够反映节点的局部影响力，但忽略了网络的全局结构特征。K-shell 方法通过迭代剥离外围节点以定位网络核心，兼顾了全局性，但分辨率较低，且不适用于有向网络。特征向量中心性能够捕捉节点与高重要性邻居之间的关联，但在异质性强的供应链网络中，结果可能受到高层节点主导的影响。为克服单一指标的局限，不少研究尝试融合多项指标如度、介数等进行综合评价，以提升识别结果的稳健性和科学性。

鉴于本研究关注供应链中信息与物资流通的关键控制路径，节点在网络中承担的“中介”作用尤为重要，因此选取介数中心性作为识别关键节点的主要指标。介数中心性以最短路径经过频次为基础，能够有效刻画节点在整体网络中的传导与控制能力，特别适用于分析半导体供应链中可能成为“瓶颈”或“断点”的企业节点。

表 1 显示了半导体供应链网络中介数前十的企业，这表明它们在网络中较为关键。

根据企业的主营产品，将企业划分到供应链的不同环节，如若主营产品为光刻机、刻蚀机、特殊气体、硅片等，就将其划分为上游企业；若为存储芯片、晶圆测试、晶圆代工等，就将其划分为中游企业；若为通信设备、汽车、手机等，就将其划分为下游企业。经过去除缺省值与排除外国企业后，统计所有企业所处的位置，并对比全部企业与关键企业(介数排名前十)的供应链位置分布(见图 4)。

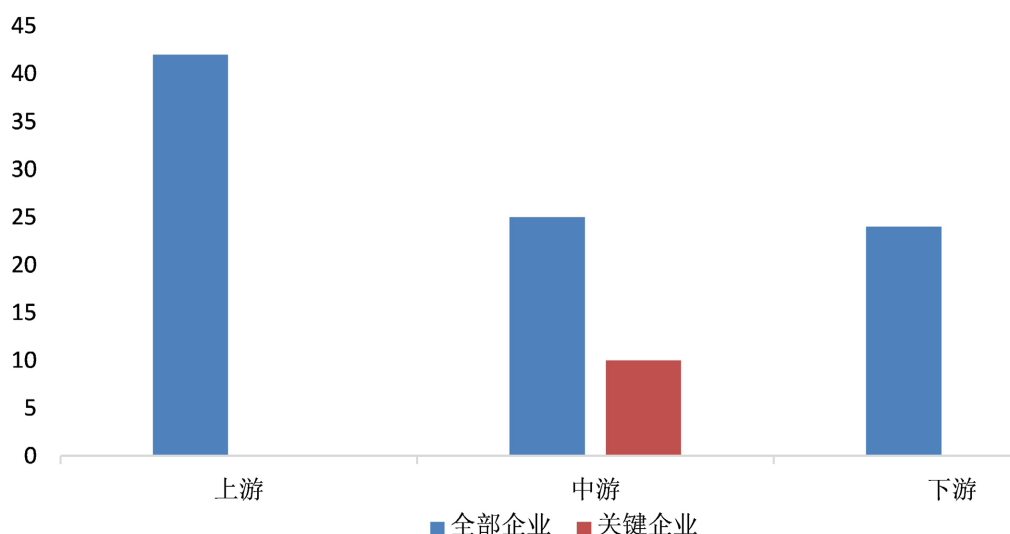


Figure 4. Diagram of the enterprise supply chain position distribution

图 4. 企业供应链位置分布图

总体来看，全部企业中，多数企业位于产业链上游，而关键企业都处于产业链中游，通常在多个上下游路径之间发挥协同和转化作用。这类节点在保障网络流通性方面具有举足轻重的作用，是网络中不可或缺的核心角色。识别出这些关键节点，为后续对供应链脆弱性的分析工作奠定了重要基础。

从地理位置上看，核心企业大多分布于长三角、珠三角以及京津冀地区，倾向于集中在已形成完整生态的区域。究其原因，发展水平较高的地区具有较为完善的基础设施、高素质人才储备和科研创新能力，还具备资本集中等优势，因此更容易孕育出具有高竞争力的龙头企业，这些核心企业往往也会反过来强化这些区域在产业链中的枢纽作用，进一步增强这种集中趋势。因此核心企业所处的地区往往是整个网络中信息流、资金流、技术流最为密集的地带。

从企业的产业结构来看，关键企业大多处于晶圆代工环节。介数值最高的中芯国际作为中国大陆最大的集成电路制造企业，其生产能力与工艺水平直接影响下游设计企业的产品交付，使其在网络中成为典型的“瓶颈型”枢纽节点。这种中介性特征源于半导体产业的高度分工、技术集中与资本密集等结构性特征。

5.2. 网络脆弱性分析

网络遭受的不确定性风险事件的攻击方式分为两种：随机攻击和蓄意攻击[9]。关键节点更有可能被蓄意攻击，如受到经济制裁等恶意攻击。为了了解半导体供应链网络在面对不确定风险事件时的稳定性与抗风险能力，本文基于复杂网络理论，采用仿真分析的方法对该网络的脆弱性进行了评估。

在网络的脆弱性研究中，常使用连通性来体现脆弱性[10]，网络的连通性越强，更容易保持结构功能的稳定性。本研究通过移除供应链网络中的节点来模拟特定的攻击方式。实验中，分别设计两类节点移

除方式：(1) 基于介数中心性的蓄意攻击[11]，模拟针对网络关键节点的集中冲击；(2) 随机移除节点，模拟地震、洪水等突发性、不可预测的随机攻击事件。每移除一个节点，实时计算网络中最大连通子图的节点数量，并以其占原始网络总节点数的比例作为当前连通性的衡量指标，即最大连通子图比例：

$$LCC = \frac{m}{N} \tag{6}$$

其中， m 是最大连通子图的节点数， N 是网络原始的节点总数。该指标反映了网络中仍保持有效连接的节点比例，是衡量网络连通性的常用指标。在网络的脆弱性研究中，常使用连通性来体现脆弱性[3]，网络的连通性越强，越容易保持结构功能的稳定性。LCC 比率快速下降至较低值，说明网络在遭受攻击后迅速瓦解，表现出高度的脆弱性；若其变化较缓慢，说明网络具备一定的鲁棒性。

为了便于连通性计算，分析时将该网络转换成无向图形式。网络的构建与分析均使用 Python 的 NetworkX 库来完成，随机失效实验重复运行 10 次以降低偶然性影响，取均值作为结果。在蓄意攻击实验中，节点按照介数从高到低依次移除，模拟现实中核心企业受到经济制裁、技术封锁等打击的场景。在随机失效实验中，节点的移除顺序完全随机，反映自然灾害等偶发因素造成的结构扰动。最终的模拟结果如图 5 所示：

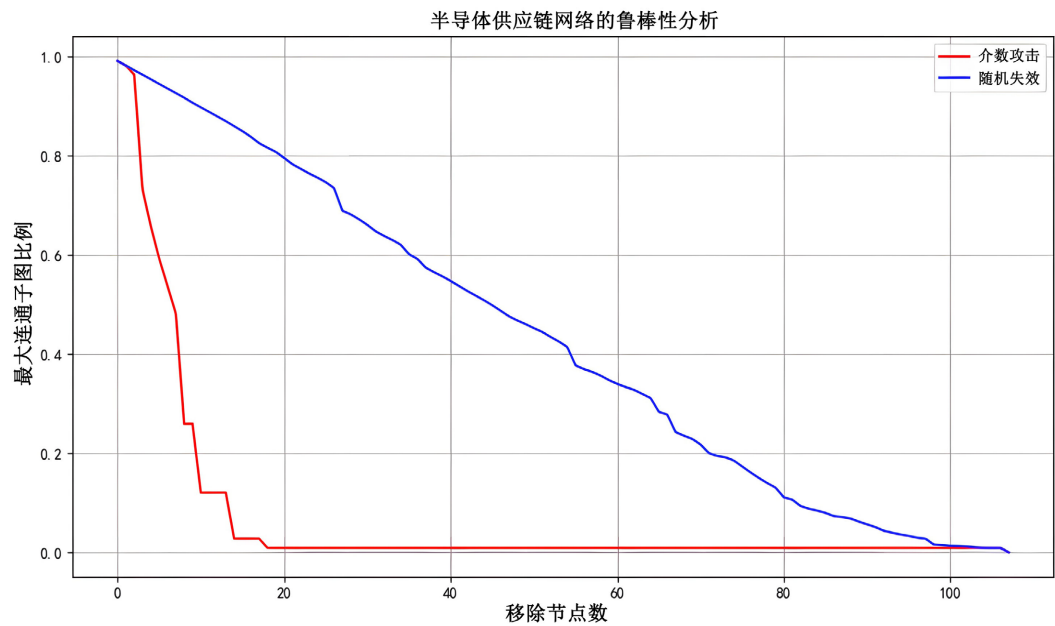


Figure 5. Diagram of network connectivity changes under random and deliberate attacks
图 5. 随机与蓄意攻击下网络连通性变化图

实验结果表明，网络在面临蓄意攻击时呈现出明显的脆弱性：当移除前 10 个高介数节点时，LCC 比率从初始的 100% 快速下降至几乎接近于 0，表明网络在结构上高度依赖于少数核心节点。这些节点在前文的关键节点分析中已被识别为供应链网络中连接上下游的桥梁型企业，其失效容易引发网络的结构断裂，导致整体网络功能严重受损。相较而言，在随机攻击场景下，LCC 比率随节点的移除下降趋势较为缓慢，这说明网络对非结构性扰动具有一定的鲁棒性。

6. 结论

根据网络拓扑特征的分析，发现此半导体供应链网络整体呈现出典型的“小世界”特征。网络的平

均路径长度较小,节点之间具有较高的连接效率,意味着信息或风险可在短时间内在整个网络中传播。这一特性虽然有助于提高协同效率,但也表明当关键节点遭受攻击或失效时,网络可能迅速遭受影响,受破坏风险较大。从度分布分析来看,网络的度分布大致符合幂律分布,表明网络具有一定的无标度特征。根据网络的介数中心性,分析出了供应链中的核心企业。最后,通过模拟蓄意攻击与随机攻击的方式,研究网络在不同扰动下的鲁棒性表现,最终发现,半导体供应链网络在面对关键节点的蓄意攻击时,最大连通子图比例迅速下降,网络解构速度快,表现出较强的脆弱性;而在随机节点失效情境下,网络整体连通性下降较为缓慢,具有一定的抗扰能力。这表明该类网络对结构性风险更为敏感,需高度警惕外部因素对核心企业的冲击。

通过以上研究分析,揭示了国内半导体供应链网络的主要特征,为政策制定以及企业战略调整提供了一定的理论支撑。

参考文献

- [1] 周涛,柏文洁,汪秉宏,等. 复杂网络研究概述[J]. 物理, 2005, 34(1): 31-36.
- [2] 杨康. 基于复杂网络理论的供应链网络风险管理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [3] 盛昭瀚,王海燕,胡志华. 供应链韧性: 适应复杂性——基于复杂系统管理视角[J]. 中国管理科学, 2022, 30(11): 1-7.
- [4] Soni, U., Jain, V. and Kumar, S. (2014) Measuring Supply Chain Resilience Using a Deterministic Modeling Approach. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.04.019>
- [5] 石建勋,卢丹宁. 着力提升产业链供应链韧性和安全水平研究[J]. 财经问题研究, 2023(2): 3-13.
- [6] 朱永光,张伍丰,王迪,等. 中国铜资源产业链供应链韧性评价[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1761-1777.
- [7] 陶锋,王欣然,徐扬,等. 数字化转型、产业链供应链韧性与企业生产率[J]. 中国工业经济, 2023(5): 118-136.
- [8] 刘涛,陈忠,陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程, 2005, 23(6): 1-7.
- [9] 崔俊英,徐舒琪,那旭,等. 基于复杂网络理论的供应链研究[J]. 物理学报, 2024, 73(19): 161-183.
- [10] 任环宇. 电动汽车锂电池供应链网络结构风险与中断影响传播研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [11] 段佳勇,郑宏达. 基于节点重要度的复杂网络脆弱性分析方法[J]. 控制工程, 2020, 27(4): 692-696.