

# 链长制提升产业链韧性的机理 与成效研究\*

——以人工智能产业链为例

李红锦 戎芳毅 李胜会

**内容提要：**链长制政策为产业链治理提供新路径。本文利用复杂网络分析方法，构建人工智能产业链复杂网络模型，在刻画其合作创新网络演化特征的基础上，将链长制这一政策因素纳入博弈模型，并采用实证手段验证政策有效性。研究发现：人工智能产业链跨领域合作渠道较为畅通，但相较于技术层和应用层，基础层还未形成创新主体集聚、技术集中涌现的态势。产业链韧性提升的重要环节是基础层以及基础层-技术层关联环节，且高密度合作或将引致冲击产生蝴蝶效应。链长制的实施不仅是产业链韧性提升的应急机制更是长效机制，且该作用存在马太效应。本研究对提升政府治理产业链韧性的能力以及提高人工智能产业链的韧性水平提供实证参考。

**关键词：**链长制；人工智能产业链；合作创新网络；仿真模拟

**DOI:** 10.19343/j.cnki.11-1302/c.2025.04.005

**中图分类号：**C93；F062.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1002-4565(2025)04-0063-11

## Research on the Mechanism and Effectiveness of the Chain Chief System to Improve the Resilience of the Industrial Chain: Take the Artificial Intelligence Industry Chain as an Example

Li Hongjin Rong Fangyi Li Shenghui

**Abstract:** The chain chief system policy provides a new path for industrial chain governance. This article makes use of the analysis method of complex networks to construct a complex network model of patent data of AI industry chain, and the policy factor of chain chief system is incorporated into the game model on the basis of describing the evolution characteristics of the cooperative innovation network, and the policy effectiveness is verified by empirical analysis. The study finds that: The cross-field cooperation channels of the artificial intelligence industry chain are relatively smooth, but the basic linkage has not yet formed a condition of innovation player agglomeration and technology concentration compared with the technology linkage and application linkage. The basic linkage and the basic -technology linkage are the target links for improving the resilience of the industrial chain, and high-density cooperation may lead to the impact of the butterfly effect. The implementation of the chain chief system is not only an emergency mechanism for improving resilience, but also a long-term mechanism, and there is a matthew effect in this

\*基金项目：国家社会科学基金重点项目“急性冲击与慢性压力叠加下产业链韧性提升的机制与政策研究”（21AGL027）；国家社会科学基金一般项目“粤港澳大湾区新兴产业的高质量发展研究”（21BJL044）。

role. This research provides empirical references for enhancing the capacity of government governance in improving the resilience of the artificial intelligence industry chain.

**Key words:** Chain Chief System; AI Industry Chain; Cooperative Innovation Networks; Simulation

## 一、引言及文献回顾

近年来,贸易保护、逆全球化等因素不断增加我国产业链断链风险,加之产业外迁和产能转移,使得产业链韧性不足与产业链现代化之间的矛盾日益凸显。为贯彻落实党的二十大精神以及“十四五”规划要求,提升产业链现代化水平并实现国家“增强产业链韧性、提升产业链水平”的战略目标,各地政府因势利导制定链长制这一产业链治理新政策。链长制通过建立“链长+链主”的工作体系<sup>①</sup>,以优化招商引资、打造产业链备份等手段来实现区域产业链的安全可控,逐步提升核心产业链韧性。人工智能产业作为战略性新兴产业通常被列为产业链的核心治理对象。人工智能产业链依托于人工智能创新链的发展,形成以合作创新网络为构架的产业链网络组织。然而,在美国签署《2022芯片与科学法案》等贸易保护政策以及我国基础研究能力相对不足的现实背景下,链长制能否有效提升人工智能产业链韧性,是现阶段提升产业链韧性并优化链长制治理模式和治理能力的一项重要议题。

现阶段学者们主要对链长制的实施背景、发展内涵、目标方向等进行梳理,并达成初步共识。在新发展格局下,弥补有限市场的不足,链长制及产业链链长分别作为一种中国特色的地方产业管理制度创新(刘志彪和孔令池,2021)和新型产业链协同治理机制(中国社会科学院工业经济研究所课题组和曲永义,2022)应运而生。该政策机制以弥补市场失灵和行政失效为关键抓手(余东华和李云汉,2021),通过政府协调引导的方式打通产业链上下游的堵点和痛点(林淑君和倪红福,2022),以责任分配机制、动员机制和要素保障机制(孟祺,2023)促进实现“强链”“补链”,同时不断贯彻“产业链、创新链两个围绕”<sup>②</sup>,发挥链长的激励功能、协调功能和公共品供给功能,由点到面再到体,全方位打造产业链集群生态,持续提升产业链基础能力和发展韧性(林淑君和倪红福,2022)。但链长制的实施还伴随着“全能政府”“选择性干预”“地方保护主义”等争议(刘志彪和孔令池,2021),该制度能否有效提升产业链韧性有待进一步探究,这也为本研究提供了探讨基点。

在人工智能领域,学者们对其技术赋能、政策影响、产业发展及合作网络等方面的研究较为关注。技术方面,学者们认为人工智能作为一种赋能型技术和使能型技术<sup>③</sup>,推动大规模制造向智能化制造跨越(肖静华等,2021)、实现产业链供应链安全可控(欧阳桃花和曾德麟,2021)、加速产业智能化发展(胡登峰等,2022)并引发全球价值链重构(何宇等,2021)。产业方面,部分学者从政策工具入手,认为增加需求侧政策工具以及商业化辅助政策(吕文晶等,2019)或有侧重地设计区域特色政策(单晓红等,2021),有助于优化人工智能产业发展。产业链方面,学者们的研究仍未脱离技术范畴,认为数字智能技术可以从供需两端、产品服务两头实现供应链向供应链生态系统的转化(陈剑和刘运辉,2021);智能机器人对于产业链上下游行业的劳动力产生挤出效应,但中间品市

<sup>①</sup>链长制由链长和链主两个部分组成。链长大多由政府部门的主要领导担任,通常是“一把手”挂帅,组成应对各类产业问题的工作专班。链主大多是所在领域的龙头企业。

<sup>②</sup>“强链”“补链”分别指锻长板和补短板,相关网址为[https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/21/content\\_5594190.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/21/content_5594190.htm)。“产业链、创新链两个围绕”指“围绕产业链部署创新链、围绕创新链布局产业链”,相关网址为[https://digitalpaper.stdaily.com/http\\_www.kjrb.com/kjrb/html/2020-04/27/content\\_443980.htm?from=singlemessage](https://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2020-04/27/content_443980.htm?from=singlemessage)。

<sup>③</sup>赋能型技术指通过提供工具、资源或能力,来提升效能、拓展功能边界并促进创新;使能型技术指为新的应用、业务模式或能力的产生创造条件,为技术发展奠定基础。

场可改善这一结果（王永钦和董雯，2020）。合作网络方面，部分学者探究人工智能产业技术标准或专利合作网络的演化态势（刘思薇等，2022），并以此为基础探究国际人才（朱桂龙等，2020）对组织协同创新的影响，分析资源异质性和知识流动对该产业协同创新的影响（薛澜等，2019）。

上述研究为本文的探讨奠定了基础，但有待进一步拓展。首先，现阶段链长制的研究多以内涵解构、发展态势及风险为主，但组织基础、实证分析及实施效果方面的研究仍存在进一步探讨的空间。其次，在人工智能产业链领域，有待将人工智能合作创新网络归置于产业链环节中探讨其韧性。基于此，本文以人工智能产业链为研究对象，采用复杂网络分析方法从合作创新网络视角，探讨链长制能否提升其韧性。本文的边际贡献主要体现在以下三个方面。第一，以人工智能产业链为例，搭建了链长制与产业链韧性的研究渠道，丰富了产业链韧性的研究，为优化链长制实施效果提供新思路。第二，采用复杂网络、博弈论及仿真模拟的分析方法，将合作创新网络嵌入人工智能产业链各环节中，透视其韧性并模拟链长制的实施效果。第三，辨析链长制在产业链整体网络与不同环节中的实施效果，比较分析政策效用异质性，丰富研究结果。

## 二、理论分析与研究假设

### （一）链长制影响产业链韧性的结果效应

全球产业链加速重构，给我国产业链安全可控、优化升级问题敲响了警钟。在以产业链基础再造和产业链功能提升为抓手推动实现产业链现代化的背景下，链长制应运而生。2017年，湖南提出“链长”一词<sup>①</sup>。2019年，浙江开始推行链长制<sup>②</sup>。自2020年以来，国务院颁布的对外贸易合作方案，以及广东、山东、河南等地接续发布的链长制相关政策，加速地区复工复产<sup>③</sup>。当前，全国31个省份已经全部开展链长制。链长制政策的制定，是产业政策和产业链治理模式的一次突破性创新，以“链长+链主”的工作机制、产学研的创新模式和政策补贴的支持方式等，不断协调高端创新资源，推动产业链与创新链的融合发展，合力实现产业链韧性的提升和产业链现代化发展。

归纳各地区链长制政策，发现具有以下特点。第一，强化产学研联合创新，促进“双链”融合发展。地方政府聚焦重点产业链，联通科研机构、高校及企业，形成创新合力协同技术攻关，着力解决研发与生产中的“卡脖子”问题，以期形成产业链与创新链融合发展的新局面，继而为企业创新、产业集聚赋能。第二，增强高端创新要素供给能力和政策奖补力度，优化产创环境、培育领航链主。地方政府以政府补贴、金融普惠等手段，多角度降低企业创新成本并为企业提供持续的高端创新资源供给；以链主企业为核心，吸纳、布局相关中小企业以形成产业集聚，加速形成产业集聚链式发展态势，实现产业链备份。

据此，提出假设H1：链长制能够提升人工智能产业链韧性。

### （二）链长制影响产业链韧性的过程效应

现代产业链是上下游企业之间基于生产关系、合作关系和经济技术关联形成的网络组织（芮明杰和刘明宇，2006）。产业链韧性被理解为在内外冲击下，能够适应环境变化并平稳运转的能力（张虎等，2022），是一种具有技术关联和较强创新能力、适应能力的网络组织（李胜会和戎芳毅，2022a，

①2017年，长沙召开全市产业链工作动员部署会，由20位市级领导担任链长。

②2019年，浙江省商务厅发布《浙江省商务厅关于开展开发区产业链“链长制”试点进一步推进开发区创新提升工作的意见》。

③2020年9月国务院颁布《中国（浙江）自由贸易试验区扩展区域方案》，指出建立产业链“链长制”责任体系，提升“补链”能力。2020年，河南省发布《河南省人民政府关于加强新形势下招商引资工作的意见》探索实行产业链“链长制”；2021年，广东省在《2021年省（政府工作报告）重点任务分工方案》中提出要制定实施链长制的若干措施；2021年，山东省工业和信息化厅发布《关于建立制造业重点产业链“链长制”工作推进机制（征求意见稿）》。

2022b)。而产学研合作创新网络正是基于技术纽带链接而成的具有较高创新性能的网络组织（袁剑锋和许治，2017），且其通过合作耦合和功能互补来发挥分散风险的作用（Rohrbeck等，2009）。因此，基于产学研合作创新网络来研究产业链韧性兼具创新性和客观性，尤其是对于基于技术链条而形成产业链条的人工智能产业链而言，一方面人工智能产业链是围绕创新链布局产业链的典型例证，探究其合作创新网络是研究其产业链网络组织的重要手段；另一方面人工智能产业链的网络组织恰与其技术合作形成的网络组织相对应，两种网络组织具有一定的呼应性和匹配性。这表明，研究人工智能产业链合作创新网络是研究其产业链韧性的有效切入口。换言之，合作创新网络的特征值在一定程度上能够反映其韧性水平，且网络效率的变化水平也能映衬产业链韧性水平的变化趋势。同时，当合作创新网络受到外部攻击时，其网络效率的降低也代表韧性水平的降低。外部冲击或有针对性地破坏合作水平较高的链主企业，或成为行业制裁提高中小企业的发展壁垒。这都将造成企业合作的间断，导致合作创新网络效率的下降，从而对产业链韧性水平产生消极影响。美国持续制裁中兴、华为等芯片制造企业的发展，造成大量芯片应用场景受限，为该现象提供有力证据。

据此，提出假设H2：人工智能产业链合作创新网络受到冲击将降低其韧性。

人工智能产业链是由技术向产业延伸，具有高技术集聚特征，其产业链架构离不开基础层、技术层和应用层的科技研发（见表1），是知识与技术关联整合以及技术产品的层层递推直至运用于现实场景而逐步形成的技术型产业链。技术型产业链的创新过程不仅包括同一环节内部的联合创新，还包括不同环节之间的合作创新。具体地，在同一环节中，利用相近的知识与技术模块进行联合研发和技术升级；在不同环节中，利用异质性知识推动技术整合，并通过技术产品的跨环节应用实现各环节的创新涌现。这种交织错杂的创新合作形成基于产业链的合作创新网络。而链长制政策强化产学研联合创新，促进产业链供应链融合发展的特点恰好有助于人工智能产业链的发展，同时不断弥补人工智能产业链合作创新网络的缺口，连接结构洞<sup>①</sup>与其产业链形成合作创新网络。不仅如此，链长制也将从链主出发完善合作创新的内生驱动力，进一步围绕产业链布局合作创新链并加快创新网络的形成。这将巩固人工智能产业链的发展，形成具有技术稳定性和利益关联性的强韧性链条。

据此，提出假设H3：链长制通过修复人工智能产业链合作网络来提升其韧性。

因此，本文以人工智能产业链的合作创新网络作为分析产业链韧性的切入点，一方面以合作创新网络透视其产业链韧性，另一方面以其内嵌于产业链的各环节来反映不同环节合作创新网络的特征以及链长制政策作用效果。

表1 人工智能产业链技术分布表

产业链环节	一级技术领域	二级技术领域
上游	基础层	AI芯片（CPU、GPU、FPGA、ASIC、类脑芯片、其他）、传感器、服务器、云计算、大数据
中游	技术层	计算机视觉、语义识别、自然语言处理、机器学习、知识图谱、算法模型
下游	应用层	智能安防、智能医疗、智能教育、智能金融、智能驾驶、智能制造、智能零售、智能助理、智能家居、智能防疫……

资料来源：Wind数据库、前瞻产业研究院及作者整理。

### 三、研究设计

#### （一）框架设计

本文以人工智能产业链为对象，按“先攻击后恢复”的思路探究链长制能否提升人工智能产业链的韧性。首先，利用复杂网络的分析方法，基于人工智能产业链的专利数据构建整体合作创新网

<sup>①</sup>结构洞指网络中两个不直接连接的节点之间的间隙或空白。

络和内嵌于产业链上游、中游和下游三个环节的子合作创新网络（以下简称子网络）以及上-中游、中-下游构成的二分型合作创新网络（以下简称二分网络），通过计算网络的特征值来刻画该合作创新网络的演化特征。其次，采用蓄意攻击和随机攻击的方法，模拟合作创新网络受到内部结构性冲击和外部环境风险冲击后的抗毁性，以攻击后的网络效率来透析人工智能产业链整体及各个环节的韧性水平。最后，将链长制的效用纳入演化博弈模型，分别对冲击前和冲击后的网络进行仿真模拟，以显示常态化恢复期链长制的作用效果。同时，采用多时点双重差分的方法实证检验链长制对产业链韧性的提升效果。研究框架如图1所示。

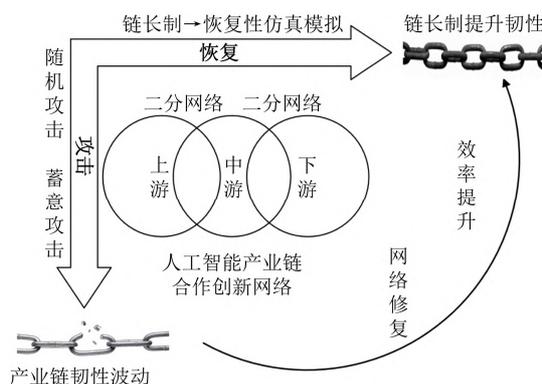


图1 链长制能否提升产业链韧性研究框架

## （二）模型构建

### 1. 合作创新网络。

产学研合作创新网络  $G(V, N)$ ， $V$  为产学研合作创新网络的节点集， $N$  为该网络的连边集。本文根据人工智能产业链的上、中、下游三个环节，将整体合作创新网络分为三个子网络，分别表示为  $G_1(V_1, N_1)$ 、 $G_2(V_2, N_2)$ 、 $G_3(V_3, N_3)$ 。其中， $V = V_1 + V_2 + V_3$ ； $N \geq N_1 + N_2 + N_3$ 。同时，本文将技术关联较为密切的环节划分为上-中游和中-下游二分网络，分别记为  $G_4(V_1, V_2, N_4)$ 、 $G_5(V_2, V_3, N_5)$ ，以表示不同环节网络的合作关联度，其中  $N_4$  表示上游与中游合作网络之间的连边， $N_5$  表示中游与下游合作网络之间的连边。

网络特征值是产学研合作创新网络演化特征的主要表征，本文从节点层面（点度中心度、接近中心度、中介中心度）（高小强等，2009）和网络层面（网络密度）（赵炳新等，2011）来测度人工智能产学研合作网络拓扑结构的特征值，据此来探明其产业链各环节合作网络的演化态势（计算方式见表2）。

### 2. 攻击策略。

外部急性冲击和内部慢性压力是影响产业链韧性的两种不稳定因素，对产业链现代化带来一定威胁（李胜会和戎芳毅，2022a）。外部急性冲击包括国际政治角力、突发性公共卫生事件以及重大自然灾害等不可预料的突发性事件，在产学研合作创新网络中表现为合作体系重构以及政策干预下的技术研发风险和产业链外移内缩导致的合作中断风险。内部慢性压力包括因核心技术依赖、价值低端锁定以及知识同质化现象等导致的路径依赖（李胜会和戎芳毅，2022b），在产学研合作网络中表现为资源、渠道的单向集聚和固化，中心节点的超负荷过载和外围节点的资源短缺造成的低创新性风险和低适应性风险。

表2 产业链合作创新网络拓扑结构规模与特征的测度

名称	指标	含义	计算公式
网络规模	网络节点数	节点数量越多，表示网络规模越大。	$V、V_1、V_2、V_3$
	网络连边数	连边数量越多，表示网络中合作越密集。	$N、N_1、N_2、N_3、N_4、N_5$
网络特征	点度中心度	指与该节点直接相连的节点总量，值越大表明该节点在网络中越重要，处于网络的中心位置。	$C_D(V_i) = \frac{d(V_i)}{V-1}$ ，其中 $d(V_i)$ 为节点 $V_i$ 的连边数， $(V-1)$ 为节点最多可与网络中多少节点相联系。
	接近中心度	指节点与其他节点的接近程度，值越大表明该节点可以快速到达其他节点，反映节点的独立性和反依赖性。	$C_C(V_i) = \frac{V-1}{\sum_j L(V_i, V_j)}$ ，其中 $L(V_i, V_j)$ 为两节点 $i$ 与 $j$ 之间的最短路径长度。
	中介中心度	指节点的连接要依靠该节点的传递，值越大表明该节点对其他节点的影响和控制力越强，同时具有较强的知识交流效率。	$C_B(V_i) = \frac{2\sum_j \sum_k g_{jk}(V_i)}{g_{jk}(V^2-3V+2)}$ ，其中 $g_{jk}(V_i)$ 表示节点 $j$ 到 $k$ 之间最短路径中经过节点 $i$ 的途径数， $g_{jk}$ 表示节点 $j$ 到 $k$ 的最短途径数。
	网络密度	衡量网络整体连通度，值越大表明网络越集聚。	$D_i = \frac{N_i}{V_i(V_i-1)}$ ，其中 $N$ 为网络的连边数， $V$ 为节点数， $i=1、2、3、4、5$ 。

资料来源：作者整理。

外部急性冲击将以不确定的概率无差别攻击网络中的任一个体，最终造成网络的大规模瘫痪，而内部冲击则以一定的概率针对网络中影响力较大、控制力较强的节点进行优先攻击（郭卫东等，2022）。通常使用网络效率、最大联通子图比率或最大联通子图数来表示网络的连通性<sup>①</sup>（Lee等，2021），随着攻击频数的增加，网络效率和最大联通子图比率将趋于减小，直至网络彻底瘫痪。因此，本文采用随机攻击的方式来模拟外部急性冲击，采用蓄意攻击的方式来模拟内部慢性冲击。一是在随机攻击中以随机概率对点进行攻击性模拟<sup>②</sup>。二是在蓄意攻击中以节点的点度中心度的大小排序，依次对点度中心度较大至较小的节点进行攻击，以显示节点的脆弱性；同时以边介数<sup>③</sup>为攻击对象，依次对边介数较大至较小的边进行攻击，来反映连边的脆弱性。在随机攻击和蓄意攻击后用网络效率和最大联通子图比率来表示网络的抗毁性。

### 3.恢复策略。

将链长制政策作用纳入博弈模型，并利用节点收益择优机制（曹霞和刘国巍，2015）判断是否持续参与合作<sup>④</sup>。一是计算合作创新网络初始的网络效率和最大联通子图比率；二是随机抓取两个节点进行博弈，在合作收益大于背叛收益时建立连边，并根据节点收益的变化进行个体策略的调整，同时以新的策略参与下一次博弈，再次计算网络效率和最大联通子图比率，循环该过程直至达到设置的博弈次数；三是输出随博弈次数变化的网络效率图和最大联通子图比率图，结束程序。

### 4.实证检验。

采用多时点双重差分方法，验证链长制提升产业链韧性的效用<sup>⑤</sup>。核心解释变量为2018—2021年间省级层面链长制实施与否。被解释变量为产业链韧性（Industrial Chain Resilience, ICR）。利用

①网络效率、最大联通子图比率以及最大联通子图数是衡量网络连通性的重要指标，网络连通性越高表明网络崩溃的概率越小，即网络越稳定且抗毁性越强。网络效率可以用两节点间最短距离的倒数来表示，采用网络中所有节点的平均网络效率来指代整个网络的效率。

②随机攻击是指，随机选取并剔除网络中的任一节点，以达到破坏网络的目的，随机攻击作为对比的基线，以展示蓄意攻击的特定效果；蓄意攻击是指，按照网络中节点的重要程度（节点点度中心度、连边的边介数）顺序，有目的地依次剔除对应节点。

③边介数指网络中所有最短路径中经过该边的路径的数目占最短路径总数的比例，边介数越大表明其在网络中的影响力和重要性越强。

④因篇幅所限，恢复策略的具体分析过程以附录1展示，见《统计研究》网站所列附件。下同。

⑤因篇幅所限，多时点双重差分模型构建以附录2展示。

2018—2021年上市企业及省级层面的数据进行实证分析，以此佐证仿真模拟的分析结果。

### （三）数据来源与预处理

专利数据为人工智能产业链合作创新网络提供了研究样本，专利数据检索词的选取和时间跨度将直接影响研究的实验效果。因此，在检索词方面，本文基于智慧芽专利数据库按照特有的人工智能产业专栏作为检索词，直接获取人工智能产业门类所属的全部专利数据；在时间跨度方面，以我国人工智能产业链初步形成的时间为界<sup>①</sup>，将检索的时间设置为2018年1月1日至2021年12月31日。同时在检索栏专利权人一栏中机构使用“（厂or集团or公司）and（大学or研究所or研究院）”进行搜索，剔除仅有一个专利权人的专利，最终保留1929条专利数据<sup>②</sup>，其中2018年647条，2019年609条，2020年409条，2021年264条。鉴于每年的专利权人的数量众多、合作网络复杂，且出现次数较多的前30名专利权人所拥有的专利占专利总数的比例约为75.53%，因此，为满足研究需要，对人工智能产业链合作创新网络进行简化，选取具有代表性的前30个专利权人进行分析，从而以小见大地探寻该网络的一般特征和规律。此外，根据人工智能产业链技术领域<sup>③</sup>，将专利权人所属的产业链位置进行划分（刘国巍和邵云飞，2020），实现专利数据与产业链的上、中、下游各环节的匹配。首先，对可以直接判断所属环节的专利权人进行划分；其次，按照专利权人在产业链不同环节中专利技术出现较多的领域进行归属；再次，根据专利权人名下专利的国际专利（IPC）分类号出现次数最多的领域进行归属；最后，搜索专利权人在人工智能技术领域的专攻方向或特色类型，对上述分类进行复查和检验。

## 四、实证结果与分析

### （一）结构：合作创新网络态势分析

根据人工智能产业链的专利数据，本文使用Itginsight工具，绘制了2018—2021年人工智能产业链的合作创新网络图，以研究该产业链专利权人合作的演化态势。以2021年为例，图2展示了2021年人工智能产业链基于专利权人（前30名）的合作创新网络图。

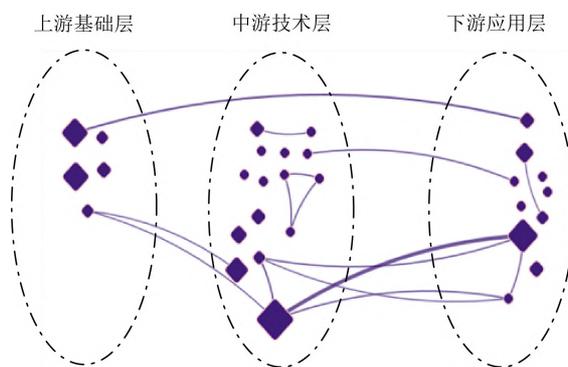


图2 2021年人工智能产业链合作创新网络结构图

①国务院于2017年7月印发《新一代人工智能发展规划》，工业和信息化部于2017年12月发布《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划（2018—2020年）》。因此，本文以2018年为节点，视为人工智能产业链的形成期。

②专利检索日期截至2022年4月28日，最终共保留2018—2021年共1929条专利数据。

③人工智能产业链技术领域及IPC分类号表格备案，专利权人与产业链各环节的匹配参考学者刘国巍和邵云飞（2020）的方法并对其进行优化。

图2中从左到右三个部分分别表示人工智能产业链的上游基础层、中游技术层和下游应用层三个环节,可以发现人工智能产业链合作创新网络在节点分布、各环节内部合作以及各环节间的联通合作呈现如下特征。一是在节点数量分布上,位于中游和下游的节点数量较多,而上游相对较少。表明现阶段企业和科研机构等创新主体在人工智能产业链的技术层和应用层集聚,以技术层的机器感知和应用层的技术延伸作为主攻方向不断深化和更迭技术创新,形成技术簇集聚涌现的态势,同时也暗指技术层和应用层的技术创新难度较基础层低,基础层核心技术的研发还未形成技术引领和技术反制之势。二是在各环节内部合作方面,技术层和应用层内部合作交流相对频繁,基础层的内部合作还不够充分。该结果表明技术层和应用层内部的技术壁垒较低且共性知识较多,有助于创新主体之间进行知识整合和技术联合研发,继而能够持续优化知识共享和交流的渠道;而基础层异类技术门槛跨度较大且技术联合研发渠道阻塞,不利于环节内部的知识整合和创新,难以形成技术集群化和内部一体化发展趋势。三是在各环节间的跨领域合作方面,上-中游、中-下游、上-下游以及上-中-下游各类型的跨领域联合研发并存,中-下游的合作最为频繁,其次是上-中游的联合研发。这就表明人工智能产业链跨环节、跨领域和跨技术的知识交换和流通较为顺畅,且创新主体对异质类知识的整合创新能力较强,这将有助于带动人工智能产业链实现整链创新,并以不断增强各环节之间的合作黏性、弥合合作创新网络结构洞的方式优化产业链韧性。

为探究人工智能产业链合作创新网络近几年的发展趋势,本文依据上述网络拓扑结构规模与特征的计算方法,分别计算了2018—2021年的合作网络的网络特征值<sup>①</sup>。结果表明,2021年的产业链合作创新网络的发展环境较为严峻,加之自身还存在抵抗力低和敏感性高的特点,造成其抵御冲击的能力相对于2018年与2019年较弱。上游子网络相对于中游和下游子网络来说,存在节点影响力不强及网络集聚度不高的特点,不利于发挥头部带动、规模经济等效应,这将削弱上游子网络的稳定性,为产业链韧性埋下隐患。上-中游二分网络相较于中-下游二分网络而言,前者的网络集聚度高于后者,但节点独立性较弱,表明前者在受到冲击后更易出现连锁反应,进而威胁整个产业链韧性。

## (二) 攻击:合作创新网络抗毁性分析

为进一步观测人工智能产业链的结构特征,本文通过MATLAB软件,对其进行攻击模拟,以明晰整体网络及各子网络的脆弱性和抗毁性。网络效率和最大联通子图的比率可以用来表示网络的连通性,其值越大表明网络的运行效率越高,网络具有较强的抗毁性<sup>②</sup>。对2018—2021年人工智能产业链合作创新网络的节点进行随机攻击的网络效率的变化趋势,可以发现随机攻击致使网络瘫痪的速度较为缓慢,即该合作创新网络抵御外生性风险的能力较强,而内生性的慢性压力是网络失效的主要成因。据此,验证了假设H2,即外部冲击将破坏人工智能产业链的合作创新网络,体现为其产业链韧性的降低。进一步的,本文着重对网络的蓄意攻击进行分析,并基于网络效率图的仿真结果进行阐释。

在对节点的蓄意攻击中,可以发现以下结论。一是在时间维度上,2018年和2019年两个年度节点攻击的比例达到0.2~0.4之间时,网络已经基本失去活力,而2020年和2021年中,节点攻击的比例接近0.2时,网络已经开始部分失效,表明在新冠疫情冲击前的产业链韧性要高于新冠疫情影响下的产业链韧性,该结论在最大联通子图中也有所体现。二是从子网络的表现来看,虽然上游和下游子网络对攻击的敏感程度并非最高,但一旦遭受攻击就会陷入彻底瘫痪,尤其是当上、中游子网络遭到冲击后,下游子网络将随之失效。而中游子网络相对稳健,在冲击后一段时间内依然能够保持一

<sup>①</sup>因篇幅所限,合作网络的网络特征值分析以附录3展示。

<sup>②</sup>因篇幅所限,攻击下的网络效率图以附图1展示;攻击下的最大联通子图比率图以附图2展示。

定的免疫力。说明人工智能产业链基础层的优化是提升其全产业链韧性的关键环节，且提高应用层的独立性是从市场角度弥补技术断链的有效思路。三是上-中游和中-下游两个二分网络相比，前者的敏感度虽然较低，但其整体性能劣于后者，表现为持续抵御冲击的能力不足，且整体上呈现二分网络抗毁性优于单个子网络的态势。这就表明，优化上-中游二分网络的运行效率是提升产业链韧性的重要方向，且中游子网络对于提升整个网络的连通度和效率起到了关键的桥梁作用和稳定器作用，也即维稳技术层是提升人工智能产业链环境适应性的有效环节。

在对连边的蓄意攻击中，首先，从整体来看，当边介数攻击的比例达到0.4之后，整体网络才逐渐趋于失效，表明连边的抵御冲击能力和环境适应能力优于节点，即产学研合作创新模式有助于提升产业链韧性。纵向维度，2021年网络的整体效能优于前三年度，表明新冠疫情影响下产业链的联合研发总数虽然有所降低，但保留了实力强、能力优的创新主体形成的强关联关系，致使其合作研发呈现量少而质优的特征。其次，从子网络来看，各子网络的网路效率发展趋势相似且都具有较强的抗毁性，尤其是下游子网络，且子网络的抗毁性优于整体网络。揭示了在人工智能产业链中，各环节内部的联合研发是抵御其遭受系统内部风险冲击的有效手段，效果在应用层的效用尤为突出。同时，系统内部冲击在子网络到整体网络的辐射过程中呈现蝴蝶效应，即产业链各环节遭受冲击的创伤将沿着全链条的合作创新在整个网络中蔓延，最终引致产业链失效。最后，从二分网络来看，两者的网络效率在起伏交错中逐渐下降，二者的抗毁性不分伯仲，表明网络之间的两两联合创新仍具有较好的抗毁性。同时也说明，产业链中局部的而非全局的合作创新将有效缓解风险在全链的快速传播与蔓延，也为产业链韧性提供更好的抵御能力和适应能力。需要说明的是，2019年和2021年缺失上游子网络边介数攻击的趋势线，可能的原因是2019年和2021年上游子网络的合作状态呈现一致性，即各节点连边之间的最短路径不需要经过另一条连边，导致边介数为零，将不存在上游对应的网络效率变化趋势线。简言之，上游子网络节点的合作具有直接高效的特征，且该合作不依赖任何中介节点。例如，清华大学与国家电网在智能电网、大数据监测等方面的直接合作就不需要通过中介公司来传递信息或资源，该种合作状态相对分散、灵活。另外，2020年中上下游网络效率的变化趋势线重合，可能的原因因为这两种子网络连边的构成形态和合作模式较为相似，边介数保持持平。

### （三）恢复：链长制有效性分析

在对人工智能产业链进行冲击后，为验证假设H1和H3，并以政策引导带来的高涨合作意愿和市场稳定性为前提，按照恢复策略步骤并设置相关参数<sup>①</sup>，分别对冲击后和冲击前的网络进行恢复和优化，对比显示出链长制对于恢复期和常态化的产业链韧性的恢复能力及优化能力<sup>②</sup>。

在对攻击后的网络进行恢复。首先，当博弈次数在20~40次之间时，整体网络就已经开始恢复活力；当博弈次数达到100次时，网络效率达到0.5左右且呈现持续上升的趋势。说明在链长制施行的初期已经能够有效提升产业链的网络效率，且随着实施时间的增加而持续提升产业链活力，即链长制通过优化创新模式和政策奖励的方式将外部政策效能内部化，进而有效恢复并提升产业链韧性，假设H1和H3得到验证。其次，从子网络的恢复情况可以看出，中游、下游和上游的恢复难度依次增大，且链长制对作为人工智能产业链稳定器的中游技术层创新网络的巩固和提升作用具有持续爬升特性，对下游应用层联合研发的促进作用呈现出稳步提升、持续发力的趋势，对上游基础层的恢复作用表现为持久蓄力、厚积薄发的特征，这同时也映衬出人工智能产业链的基础层较为薄弱，在瘫痪后将较长时间处于萎靡状态，恢复速度缓慢。最后，在二分网络中，二者的恢复状态近似，在政

①因篇幅所限，恢复策略参数设置以附录4展示。

②因篇幅所限，恢复和优化下的网络效率图以附图3展示；恢复和优化下的最大联通子图比率图以附图4展示。

策实施过程中表现为中-下游的恢复效果略好于上-中游，再次印证了上游网络的脆弱性和中游网络的稳定性和支撑性。说明在人工智能产业链中，中游技术层对于网络的支撑作用和带动作用将有效放大链长制提升韧性的效果，而上游基础层是掣肘产业链韧性的突出环节。

在原合作创新网络的基础上通过链长制进行优化。首先，纵观全局，在博弈初始即能有效提升网络效率，且随着博弈次数的增加其网络效率呈现稳步爬坡的态势。表明在产业链没有受到攻击时，链长制的制定与实施也将持续高效地优化产业链韧性，是提升产业链韧性的长效机制。其次，对于网络的优化状况与网络冲击后的恢复情势基本一致，优化效果表现为中游>下游>上游。这说明产业链各个环节的韧性存在马太效应，即表现为韧性较强的中游技术层拥有势头较强的高质量发展与恢复再造态势，而下游应用层和上游基础层次之。最后，上-中游和中-下游二分网络的网络效率随着博弈次数的增加出现阶梯式的持续爬升，且后者的优化状态优于前者，这与恢复期的表现结果类似。这表明，在人工智能产业链的常规维护中应着重关注上-中游二分网络的运行状况，侧重强化上游基础层的合作创新效率来提升环节间及全链的合作效率和韧性。

本文还采用多时点双重差分对链长制的作用效果进行实证分析<sup>①</sup>。在回归前，进行平行趋势检验，结果显示该模型通过平行趋势检验。基准回归可以发现，链长制能够有效提升产业链韧性，且该提升作用不受控制变量的影响，该结论不仅验证了假设H1，而且还从实证视角验证了仿真模拟分析结论的有效性。同时，采用反事实趋势进行稳健性检验，将实施链长制政策的时间提前1期进行回归，检验结果显示核心解释变量的估计系数显著为正，表明链长制政策能够显著提升产业链韧性的结论具有稳健性。

## 五、研究结论与启示

本文以人工智能产业链为例，将其合作创新网络内嵌于产业链的各环节，考察产业链韧性的初始水平、攻击后韧性的变化态势以及链长制在产业链网络恢复期和常态化下的作用效果，得到如下结论。第一，专利视角下的人工智能产业链的基础层还未形成技术领先之势，但技术层和应用层已经形成创新主体集聚、技术涌现的态势。产业链中跨领域的知识交换渠道较为畅通，产业链韧性水平整体上表现出中游与下游优于上游、中-下游优于上-中游的格局。第二，人工智能产业链基础层以及基础层-技术层构成的合作创新网络抵御冲击的能力较弱，这是提升产业链韧性的重要环节。过密的合作研发将促使冲击产生蝴蝶效应。第三，链长制的实施将有效恢复并持续优化产业链韧性，且该作用存在马太效应。

基于本文研究得到以下启示。一是链长制为产业链韧性的修复和优化提供了长效机制。应积极发挥链长制优化资源配置、强化合作创新、奖励招商补贴等的功能和作用。二是强化关键环节、壮大支撑环节、延伸链尾环节，实现人工智能产业链韧性的根本提升。链长制在上游应设计专门的招商引资、专项补贴政策，鼓励企业等创新主体在基础层形成集聚效应；在中游应组织配套高效的合作治理机制、信任评价机制以及利益分配机制等，以强关系的建立稳定技术层的营商环境，发挥技术层的结构效应；在下游应优化客户反馈机制和消费者投诉机制，以行政监管的方式督促下游企业以客户需求为导向更新和优化产品。三是个体优化与团体合作并存，组内合作与组间协作并进，实现人工智能产业链韧性的整链优化。在优化政产学研合作创新模式的同时，鼓励企业加强自主研发以带动形成链上多中心增长极；完善政策监督和绩效评价机制，将产业链主体合作的频次、范围和标的金额等纳入考评机制，以衡量并优化主体合作效率，全面提升产业链韧性。

<sup>①</sup>因篇幅所限，基准回归结果、平行趋势检验与稳健性检验结果以附录5展示。

## 参考文献

- [1] 曹霞, 刘国巍. 产学研合作创新网络规模、连接机制与创新绩效的关系研究——基于多主体仿真和动态系统论视角[J]. 运筹与管理, 2015, 24(2): 246-254.
- [2] 陈剑, 刘运辉. 数智化使能运营管理变革: 从供应链到供应链生态系统[J]. 管理世界, 2021, 37(11): 227-240, 14.
- [3] 单晓红, 何强, 刘晓燕, 等. “政策属性—政策结构”框架下人工智能产业政策区域比较研究[J]. 情报理论与实践, 2021, 44(3): 194-202.
- [4] 高小强, 赵星, 陶乃航. 网络中心度用于期刊引文评价的有效性研究[J]. 大学图书馆学报, 2009, 27(5): 61-65.
- [5] 郭卫东, 钟业喜, 冯兴华. 基于脆弱性视角的中国高铁城市网络韧性研究[J]. 地理研究, 2022, 41(5): 1371-1387.
- [6] 何宇, 陈珍珍, 张建华. 人工智能技术应用与全球价值链竞争[J]. 中国工业经济, 2021(10): 117-135.
- [7] 胡登峰, 黄紫薇, 冯楠, 等. 关键核心技术突破与国产替代路径及机制——科大讯飞智能语音技术纵向案例研究[J]. 管理世界, 2022, 38(5): 188-209.
- [8] 李胜会, 戎芳毅. 产业链现代化的渐进逻辑: 破解锁定与韧性提升[J]. 广东社会科学, 2022a(5): 37-47.
- [9] 李胜会, 戎芳毅. 知识产权治理如何提升产业链韧性?——基于国家知识产权示范城市政策的实证检验[J]. 暨南学报(哲学社会科学版), 2022b, 44(5): 92-107.
- [10] 林淑君, 倪红福. 中国式产业链链长制: 理论内涵与实践意义[J]. 云南社会科学, 2022(4): 90-101.
- [11] 刘国巍, 邵云飞. 产业链创新视角下战略性新兴产业合作网络演化及协同测度——以新能源汽车产业为例[J]. 科学学与科学技术管理, 2020, 41(8): 43-62.
- [12] 刘思薇, 周立军, 杨静, 等. 人工智能产业技术标准合作网络演化与主体识别: 基于社会网络分析法与TOPSIS熵权法[J]. 科技管理研究, 2022, 42(6): 143-152.
- [13] 刘志彪, 孔令池. 双循环格局下的链长制: 地方主导型产业政策的新形态和功能探索[J]. 山东大学学报(哲学社会科学版), 2021(1): 110-118.
- [14] 吕文晶, 陈劲, 刘进. 政策工具视角的中国人工智能产业政策量化分析[J]. 科学学研究, 2019, 37(10): 1765-1774.
- [15] 孟祺. 链长制与产业链韧性: 基于多期DID的实证检验[J]. 新疆社会科学, 2023(1): 55-64.
- [16] 欧阳桃花, 曾德麟. 拨云见日——揭示中国盾构机技术赶超的艰辛与辉煌[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 194-207.
- [17] 芮明杰, 刘明宇. 网络状产业链的知识整合研究[J]. 中国工业经济, 2006(1): 49-55.
- [18] 王永钦, 董雯. 机器人的兴起如何影响中国劳动力市场?——来自制造业上市公司的证据[J]. 经济研究, 2020, 55(10): 159-175.
- [19] 肖静华, 吴小龙, 谢康, 等. 信息技术驱动中国制造转型升级——美的智能制造跨越式战略变革纵向案例研究[J]. 管理世界, 2021, 37(3): 161-179, 225, 11.
- [20] 薛澜, 姜李丹, 黄颖, 等. 资源异质性、知识流动与产学研协同创新——以人工智能产业为例[J]. 科学学研究, 2019, 37(12): 2241-2251.
- [21] 余东华, 李云汉. 数字经济时代的产业组织创新——以数字技术驱动的产业群生态体系为例[J]. 改革, 2021(7): 24-43.
- [22] 袁剑锋, 许治. 中国产学研合作网络结构特性及演化研究[J]. 管理学报, 2017, 14(7): 1024-1032.
- [23] 张虎, 张毅, 韩爱华. 我国产业链现代化的测度研究[J]. 统计研究, 2022, 39(11): 3-18.
- [24] 赵炳新, 尹翀, 张江华. 产业复杂网络及其建模——基于山东省实例的研究[J]. 经济管理, 2011, 33(7): 139-148.
- [25] 中国社会科学院工业经济研究所课题组, 曲永义. 产业链链长的理论内涵及其功能实现[J]. 中国工业经济, 2022(7): 5-24.
- [26] 周国华, 李施瑶, 夏小雨. 基于利益分配的复杂产品协同创新网络合作行为演化研究[J]. 技术经济, 2020, 39(3): 10-19, 29.
- [27] 朱桂龙, 李兴耀, 杨小婉. 合作网络视角下国际人才对组织知识创新影响研究——以人工智能领域为例[J]. 科学学研究, 2020, 38(10): 1879-1887.
- [28] Lee J, Lee Y, Oh S M, et al. Betweenness Centrality of Teams in Social Networks[J]. Chaos, 2021, 31(6): 061108.
- [29] Rohrbeck R, Holzle K, Gemünden H G. Opening up for Competitive Advantage—How Deutsche Telekom Creates an Open Innovation Ecosystem[J]. R&D Management, 2009, 39(4): 311-316.
- [30] Szabo G, Hauert C. Phase Transitions and Volunteering in Spatial Public Goods Games[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11): 118101.

## 作者简介

李红锦, 华南理工大学经济与金融学院副教授。研究方向为区域经济与产业经济。

戎芳毅(通讯作者), 郑州大学政治与公共管理学院讲师。研究方向为政府治理、科技创新与产业发展。电子邮箱: ppar@zzu.edu.cn。

李胜会, 华南理工大学公共管理学院教授、院长。研究方向为科技创新与产业发展、科技政策与科技评价。

(责任编辑: 葛雪凝)