

“一带一路”工业机器人贸易网络特征及演化机制

贺胜兵^{1,2}, 许宸昊¹, 周华蓉^{1,2}

(1. 湖南科技大学商学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南省战略性新兴产业研究基地, 湖南 湘潭 411201)

摘要:基于2002—2019年双边贸易数据,分析“一带一路”工业机器人贸易网络特征及演化机制。研究发现:贸易网络存在区域异质性,呈现典型的“核心—边缘”空间结构。网络节点地位演化稳中有变,亚洲成为“一带一路”工业机器人贸易网络的核心,并形成以中国为枢纽的多极化格局。内生机制检验表明,互惠结构效应驱动节点对积极展开互惠贸易;负向扩张结构效应促使出度明星节点抑制依附节点数量的增加;传递闭合结构效应推动网络产生传递闭合三角,形成贸易集群;时间结构效应既保持贸易关系相对稳定,又促进新关系的形成。经济体量、工业就业占比、制造业技术水平和人力资本水平产生发送(接收)者效应,地理、语言和贸易组织邻近有利于促进贸易合作。“一带一路”倡议实施后,内生结构效应和节点趋同效应出现明显变化。

关键词:“一带一路”倡议;工业机器人;贸易网络结构;演化机制;TERGM

中图分类号:F062.9;F061.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2023)06-0043-13

Research on characteristics and evolution mechanism of industrial robots trade network among the Belt and Road countries

HE Shengbing^{1,2}, XU Chenhao¹, ZHOU Huarong^{1,2}

(1. School of Business, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Strategic Emerging Industries Research Base of Hunan Province, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the bilateral trade data from 2002 to 2019, this paper investigates the characteristics and evolution mechanism of the industrial robots trade network of the Belt and Road. The study finds that there exists regional heterogeneity in the trade network, showing a typical core-periphery structure. The node status of the network is evolving steadily while changing. Asia has developed into the “core” of the industrial robots trade network, and forms a multi-polarization pattern with China as the hub. The endogenous mechanism test shows that the reciprocity structure effect drives node pairs to actively engage in reciprocal trade; the negative expansion structure effect drives outdegree star nodes to inhibit the increase of dependent nodes; the transitive closure structure effect drives the network to produce transitive closure triangle, promoting the formation of trade clusters; the time dependence effect not only maintains the relative stability of trade relations, but also promotes the formation of new relations. The economy volume, industrial employment proportion, manufacturing technology level and human capital level have the sender (receiver) effect, Geographical, linguistic and trade organization proximity promote trade cooperation. Since the implementation of the Belt

收稿日期:2022-10-13 修回日期:2023-04-28

基金项目:国家社会科学基金重大招标项目“共生理论视角下中国与‘一带一路’国家间产业转移模式与路径研究”(17ZDA046);国家自然科学基金面上项目“中美贸易摩擦背景下‘一带一路’区域生产网络的演变机理、动态模拟及调控政策研究”(71973041)。

作者简介:贺胜兵(1977—),男,湖北枝江人,博士,湖南科技大学商学院教授,研究方向为区域经济、产业经济。

and Road Initiative, the endogenous structure effect and convergence effect of nodes have changed significantly.

Key words: the belt and road initiative; industrial robots; trade network structure; evolution mechanism; TERGM

工业机器人是智能制造的基础装备,是各国推动实体经济高质量发展的重要支撑。发达国家实施“再工业化”战略,把工业机器人作为推进制造业复兴和维持高科技产业垄断地位的重要抓手。对发展中国家而言,工业机器人是在产业升级的窗口期内实现制造业从人力密集型生产向自动化、智能化生产转型的关键装备。据国际机器人联合会(IFR)统计,2021 年全球工业机器人密度达到每万名工人 141 台,新安装数量同比增长 31%,达到 51.73 万台。近年来,“一带一路”沿线国家逐步深化工业机器人贸易合作,数据显示^①,2013—2020 年沿线国家工业机器人贸易额超过 670 亿美元。其中,中国对其他国家贸易额超过 280 亿美元,年均增长率达 10.3%。在当前中国加快构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局背景下,发展“一带一路”贸易合作对于打造更高质量、更有韧性、更加安全的外循环十分关键。“一带一路”工业机器人贸易网络具有怎样的特征?贸易网络演变的原因是什么?“一带一路”倡议对工业机器人贸易网络演进产生了怎样的影响?科学回答这些问题,对于促进“一带一路”工业机器人贸易,加强跨国产业链供应链合作具有十分重要的现实意义。

国内外学者围绕使用工业机器人所带来的提高生产效率^[1-2]、改进产品质量^[3-4]、降低生产成本^[2,5]、替代人力劳动^[6-7]等效应展开了大量研究。有学者考察了工业机器人进出口贸易问题^[8-9]。近年来,社会网络分析法被广泛运用于贸易网络研究。一类是从静态视角出发,描述网络拓扑结构特征,使用二次指派程序(QAP)分析网络演化的外生影响因素,以及使用指数随机图模型(ERGM)考察网络内生结构,研究不同区域、不同行业的贸易网络结构特征及其影响因素^[10-14]。李丫丫等^[15]使用 1998—2017 年世界工业机器人贸易数据,运用 QAP 方法研究贸易网络。

但是,这些静态分析方法忽视了网络间的相关性,难以准确分析网络的动态演化机制。另一类是从动态视角构建模型。其中,TERGM 将多期网络视为整体,考虑不同时期的网络相关性,克服了静态方法的局限性,提升了模型的解释能力,能够更好地揭示贸易网络的形成和演化机制^[16-18]。

工业机器人产业是发展势头强劲、规模迅速扩大的成长性产业,现有文献主要基于静态视角考察工业机器人贸易网络,具有明显的局限性。相比于已有研究,本文可能的边际贡献在于:一是运用社会网络分析法把加权重、聚类系数等整体网络统计指标与 Pagerank 指数等网络节点统计指标相结合,准确刻画“一带一路”工业机器人贸易网络的结构特征。二是将内生结构效应、节点属性和协变量网络置于同一分析框架,采用 TERGM 分析贸易网络演化的内生机制和影响因素,弥补了传统计量分析法忽视关系变量和静态 ERGM 忽视不同时期网络相关性的不足。在此基础上,提出促进“一带一路”工业机器人贸易合作的政策建议。

一、研究设计

(一)“一带一路”工业机器人贸易概况

2002—2020 年,“一带一路”国家间工业机器人贸易规模大幅增长^②。2002 年,区域工业机器人贸易总额仅为 11.42 亿美元,至 2020 年已经增长到 160.36 亿美元。其中,2002—2008 年的工业机器人贸易总额年均增长率达 35.46%。受全球金融危机影响,2009 年贸易总额大幅下滑,出现了 -19.10% 的负增长,在经过短暂调整后自 2010 年起恢复整体上升趋势。2013—2020 年,工业机器人贸易总额的年均增长率为 8.48%。

从贸易进口数据来看,中国是“一带一路”最大的工业机器人进口国,2013—2020 年进口贸易额从 12.3 亿美元增长到 25.57 亿美元,连续 8 年位居首位,韩国紧随其后。越南、新加坡、泰国、马

① 数据来源于 CEPII 数据库, <http://www.cepii.fr/>。

② 作者根据 CEPII-BACI 数据对 150 个共建“一带一路”国家的贸易数据进行整理分析。

来西亚、印度尼西亚等东南亚国家和意大利、俄罗斯、奥地利等欧洲国家常年位居“一带一路”工业机器人进口贸易额前10位。在贸易出口额方面,韩国是“一带一路”最大的工业机器人出口国,年均出口额超过16亿美元,其次是中国,年均出口额达到15.36亿美元,新加坡的年均出口额为10.55亿美元,位列第三。意大利、奥地利、波兰、卢森堡、捷克等欧洲国家也是“一带一路”区域重要的出口来源地,平均每年的出口总额超过区域出口总额的20%。

中国一贯高度重视发展机器人产业,《中国制造2025》明确将机器人作为重点发展领域。工业机器人已广泛应用于汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电器行业等领域。近年来,在需求牵引、技术突破、政策引导的共同作用下,中国机器人产业发展取得了长足进步。一方面,发那科、ABB、安川、库卡等国际机器人龙头企业加强部署中国本地化研发和生产,更加深度地融入中国市场;另一方面,埃夫特、埃斯顿、极智嘉、新松等国产机器人企业快速发展并积极进行全球化布局,减速器、伺服电机等核心零部件企业成功进入国际龙头企业供应链体系。在贸易进口方面,2013—2020年,韩国、新加坡和意大利是中国在“一带一路”区域内排名前三位的工业机器人进口来源地。近年来,由于产业链成本优势叠加工程师红利的驱动,中国机器人产业已逐渐从国产替代阶段发展到海外拓展阶段。在贸易出口方面,越南、韩国、新加坡、泰国、俄罗斯、马来西亚、印度尼西亚是同期中国工业机器人出口额较大的国家。

根据应用场景的不同,可将工业机器人划分为3类^[15]:面向生产的工业机器人(HS编码842489、851521、851531、848640、851580),服务生产的工业机器人(842890)和其他多功能机器人(847950)。总的来看,中国在服务生产的机器人和其他多功

能机器人贸易方面保持着较大的进出口优势,但是在面向生产的工业机器人市场表现较弱,存在较大贸易逆差。2020年,“一带一路”服务生产的机器人贸易总额达15.37亿美元,中国的出口额为4.27亿美元,接近韩国和意大利的总额,此类工业机器人的前5位进口国分别是俄罗斯、中国、泰国、印度尼西亚、波兰;其他多功能机器人贸易总额为6.7亿美元,中国(1.62亿美元)、意大利(1.07亿美元)、越南(1亿美元)、韩国(0.87亿美元)是主要出口国;面向生产的工业机器人贸易总额58.12亿美元,其中中国的区域内进口额为22.18亿美元,出口额为13.44亿美元,出口额低于韩国(15.68亿美元)和新加坡(14.9亿美元)。

(二) 贸易网络构建

由于部分国家工业机器人贸易数据缺失,为确保数据的完备性、连续性、一致性,这里提取2002—2019年贸易总额在2000万美元以上的84个国家^③的双边贸易数据,其贸易额超过150个共建“一带一路”国家贸易总额的95%,具有较好的代表性。

工业机器人贸易网络是由84个节点国家及其贸易关系所构成,用 $G=(V,A,E,W)$ 表示。 G 表示有向加权的复杂网络。 $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ ($n=1,2,\dots,84$)是每个时期的节点集合,表示参与工业机器人贸易的国家。 $A=\{a_{i,j}\}$ ($i=1,2,\dots,84;j=1,2,\dots,84$)是每个时期的邻接矩阵,表示两国间的贸易关系存在与否。为了排除过于细小的、不重要的贸易关系干扰,更准确地抓住工业机器人贸易的主要特征,对贸易矩阵设置阈值,仅保留每年各国大于5万美元贸易额的贸易关系。因此,当 i 国对 j 国的出口额大于5万美元时, $a_{i,j}=1$;反之 $a_{i,j}=0$ 。 E 是每个时期国家的边集合,表示存在的贸易关系,发出连边的国家为“出口国”,被指向

③ 84个“一带一路”国家分别是:安哥拉,科特迪瓦,喀麦隆,刚果布,阿尔及利亚,埃及,埃塞俄比亚,加纳,肯尼亚,利比亚,摩洛哥,莫桑比克,纳米比亚,尼日利亚,塞内加尔,突尼斯,坦桑尼亚,乌干达,南非,赞比亚,津巴布韦,阿尔巴尼亚,奥地利,保加利亚,塞浦路斯,捷克,爱沙尼亚,希腊,克罗地亚,匈牙利,意大利,立陶宛,卢森堡,拉脱维亚,摩尔多瓦,马耳他,波兰,葡萄牙,罗马尼亚,俄罗斯,斯洛伐克,斯洛文尼亚,乌克兰,阿联酋,亚美尼亚,孟加拉国,巴林,文莱,中国,印度尼西亚,伊朗,哈萨克斯坦,吉尔吉斯斯坦,柬埔寨,韩国,科威特,老挝,斯里兰卡,缅甸,蒙古,马来西亚,巴基斯坦,菲律宾,卡塔尔,沙特阿拉伯,新加坡,叙利亚,泰国,土耳其,越南,也门,哥斯达黎加,古巴,巴拿马,萨尔瓦多,阿根廷,玻利维亚,智利,厄瓜多尔,秘鲁,乌拉圭,委内瑞拉,新西兰,巴布亚新几内亚。

的国家为“进口国”。 $W = \{w_{i,j}\} (i = 1, 2, \dots, 84; j = 1, 2, \dots, 84)$ 是每个时期的边权重矩阵,用 i 国和 j 国之间的进出口贸易额表示。

(三) 贸易网络分析框架

1. 整体网络指标

为了更好地诠释整体网络结构的演化情况,本文选取的指标包括:密度、节点平均度、平均加权重度、全局聚类系数、平均路径和网络直径。其中,密度是网络中实际存在的边数与可能容纳的边数上限的比值,节点平均度是各节点的度数平均值,二者均表示节点关系的疏密程度。平均加权重度是各节点的加权重度总和与两倍节点数的比值,表示网络中的节点联系强度。平均路径是各节点间最短路径之和的平均值,表示某节点“抵达”其他节点的平均距离。全局聚类系数是网络中闭合三元组数量和所有连通三元组数量的比值,表示网络节点的集聚程度。网络直径是任意两个节点间所有连通路程中距离最长的一条,当直径不超过 6 时,表示网络具有“小世界”特征^[19],各节点较容易产生联系。

2. 网络节点指标

在分析网络节点地位演化方面,选取的指标包括:Pagerank 指数、中介中心度、接近中心度。Pagerank 指数在计算节点地位时纳入边权重,因此一国的贸易地位不仅体现出贸易伙伴国的数量,也包括伙伴国自身的网络地位和往来的贸易规模,相比传统的度数中心度可以进行更客观全面的分析。Pagerank 指数越大表明该节点在网络中越重要。中介中心度表示节点能够在多大程度上控制其他节点之间的联系,体现节点的“中介”和“桥梁”作用。接近中心度衡量某一节点与其他节点产生“直接联系”的程度,用一个节点到所有其他节点的最短路径累加后的倒数表示。

(四) TERGM 模型

ERGM 可用马尔可夫链蒙特卡洛极大似然估计法(MCMC MLE)估计模型参数,并通过诊断、仿真、拟合检验等步骤不断对模型进行修正,使得模拟网络无限趋近于观测网络。ERGM 的一般形式可以用概率分布函数表示:

$$P(N = n | \theta) = \frac{\exp(\sum_1^q \theta_q h_q(n))}{C} \quad (1)$$

假设存在一个复杂网络,其代表网络中所有节点关系的邻接矩阵集合为 $N, n = [n_{ij}]$ 表示集合中的任一邻接矩阵, $P(N = n | \theta)$ 表示在 θ 条件下, n 在集合 N 中出现的概率; C 是标准化常数,以确保网络格局的形成符合概率分布特征; q 表示影响网络关系形成的相关结构效应和属性; $h_q(n)$ 是用以表示 q 的代理变量,包括内生结构变量、节点属性、外生网络协变量等; θ_q 则是各项变量所对应的估计参数。

TERGM 在式(1)的基础上加入时间依赖性,综合考虑第 t 期的观测网络 n^t 、滞后 1 期到 k 期的观测网络 $n^{t-1} \dots n^{t-k}$, 得到基于离散时间的 k 阶马尔可夫相关的模型,即网络格局在第 t 期形成的概率:

$$P(N^t = n^t | N^{t-k} \dots N^{t-1}, \theta) = \frac{\exp[\sum_1^q \theta_q h_q(n^t \dots n^{t-k})]}{C(\theta, n^{t-k} \dots n^{t-1})} \quad (2)$$

式(2)表明第 t 期的网络格局是在前 k 期的网络演化基础上形成的。通过计算联合概率,可以确定 k 阶马尔可夫相关的网络时间序列的概率分布:

$$P(N^{k+1} \dots N^t | N^1 \dots N^k, \theta) = \prod_{t=k+1}^T P(N^t | N^{t-k} \dots N^{t-1}, \theta) \quad (3)$$

二、工业机器人贸易网络结构特征及其演变情况

(一) 贸易网络可视化

图 1 是基于 Gephi 软件的 2002 年与 2019 年“一带一路”工业机器人贸易网络,线条表示存在贸易关系,线条粗细、节点大小和颜色深度与加权重度成正比,箭头源于出口国、指向进口国。贸易网络在空间格局上大致可以分成欧洲板块、东亚与东南亚板块、其他板块。对比两个网络可以发现,工业机器人贸易具有明显的区域异质性,具有典型的“核心—边缘”结构特征。2002 年,贸易额居前列的依次是意大利、中国、奥地利、韩国、新加坡、波兰。欧洲板块是贸易网络“核心”区域,以意

大利为首的欧洲国家将工业机器人广泛出口到其他国家或地区。东亚与东南亚板块是贸易网络“次核心”区域,中国、韩国和新加坡构成板块主体部分。随着“中国制造”逐渐崛起,欧美等地区的3C产业向中国转移,中国产生大量的工业自动化解决方案需求,从包括韩国、新加坡在内的国际市场进口产品满足国内需要。其他板块处于贸易网络的“边缘”区域,主要由非洲、中亚、拉丁美洲和大洋洲的众多国家组成,进出口贸易额较小,贸易联系不紧密。

与2002年相比,2019年“一带一路”工业机器人贸易额居于前列的国家出现较大变化,依次为中国、韩国、新加坡、意大利、越南、马来西亚。中

国是贸易规模最大的国家,不仅进口规模进一步增加,而且向其他国家出口了大量工业机器人产品。泰国、越南、马来西亚等国的贸易增幅较大。东亚和东南亚板块内部联系更加紧密,整体贸易额超过欧洲板块,亚洲已经成为“一带一路”工业机器人贸易网络的“核心”区域。无论在整体还是个体层面,欧洲板块均已不占贸易规模优势,内部贸易联系也有所弱化,但仍与大多国家保持着较为密切的贸易往来,是贸易网络“次核心”区域。其他板块相比前两者处于网络“边缘”区域,但与其他国家尤其是贸易大国的联系增多,贸易规模明显扩大,其中土耳其、俄罗斯、南非、阿联酋等国较为突出。

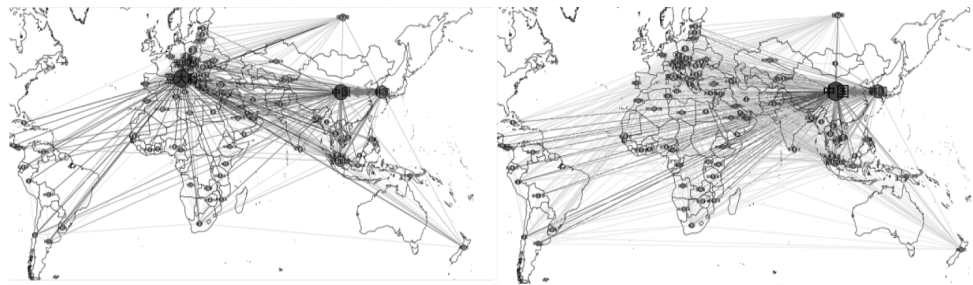


图1 2002年(左)与2019年(右)“一带一路”工业机器人贸易网络

(二) 整体网络结构特征

根据整体网络指标计算统计特征参数,结果如表1所示。样本区间内贸易网络密度从0.074上升到0.150,节点平均度从5.667上升到12.488,说明各国的贸易伙伴明显增多,贸易往来更加密切。2002年平均加权重度仅为7.026百万美元,至2019年已经达到82.939百万美元,各国间的联系强度在波动中逐渐提高,反映出工业机器人贸易持续发展,贸易网络不断调整和演化。2009年,全球金融危机对制造业造成不利的供需冲击,使得平均加权重度大幅下降。2018年,美国政府挑起中美贸易争端,中美经贸关系受到极大冲击,多边贸易体制和自由贸易原则受到严重损害,工业机器人贸易也受到波及,2019年的平均加权重度再次下降。平均路径为1.995~2.315,网络直径多为4~6,表明任意国家可以通过平均约2个伙伴国实现与其他国家贸易关系的传递,具有“小世界”特征。2014年平均路径从2.415下降到2.106,网络直径从7

大幅下降到4,显示“一带一路”倡议可能有效缩短了各国的贸易距离。聚类系数为0.343~0.476,表明区域贸易网络呈现出“多边集聚”特征。

表1 “一带一路”工业机器人贸易网络整体结构特征

年份	密度	节点平均度	平均加权重度	平均路径	聚类系数	网络直径
2002	0.074	5.667	7.026	2.315	0.343	5
2003	0.084	6.570	10.789	2.274	0.367	5
2004	0.088	6.950	15.371	2.260	0.376	5
2005	0.089	7.313	16.665	2.170	0.380	5
2006	0.099	8.226	18.364	2.224	0.393	5
2007	0.099	8.214	28.547	2.048	0.392	4
2008	0.116	9.595	32.323	2.061	0.425	5
2009	0.113	9.345	25.372	2.123	0.404	5
2010	0.116	9.667	39.385	2.184	0.404	4
2011	0.125	10.405	49.394	2.162	0.436	5
2012	0.131	10.845	48.315	2.191	0.440	5
2013	0.140	11.595	54.699	2.415	0.455	7
2014	0.144	11.952	62.237	2.106	0.446	4
2015	0.146	12.131	62.717	2.175	0.463	5
2016	0.141	11.679	66.531	2.150	0.456	6
2017	0.147	12.167	79.797	2.068	0.454	5
2018	0.152	12.595	89.965	2.039	0.474	4
2019	0.150	12.488	82.939	1.995	0.476	4

图 2 是根据 2002 年、2013 年、2019 年各国的入度和出度分布,使用 R 软件绘制的频率分布直方图,每个直方图的横坐标表示各国的入度数(Idegree)和出度数(Odegree),纵坐标表示度数所对应的国家数。入度分布直方图显示,2002 年入度峰值为 0~5,表明大多数国家较少进口工业机器人。工业机器人的本质是资本对劳动的替代,“一带一路”区域的大多数国家经济发展水平不高,劳动力资源充沛,企业为实现利润最大化,通常会最大限度发挥劳动力成本

低廉的比较优势,因此应用工业机器人相对较少。2013 至 2019 年,入度分布更加均匀,表明随着信息技术革命的广泛渗透,工业机器人在发展中国家的应用场景大幅增加,制造业自动化、智能化转型加快,区域内各国的机器人进口贸易需求也随之不断增加。出度分布直方图显示,出度峰值均为 0~10,呈现明显“右偏”,2013 年以后出度高于 40 的国家虽然有所增多,但大多数国家的出度仍然较小,贸易出口的“富人俱乐部”特征明显。

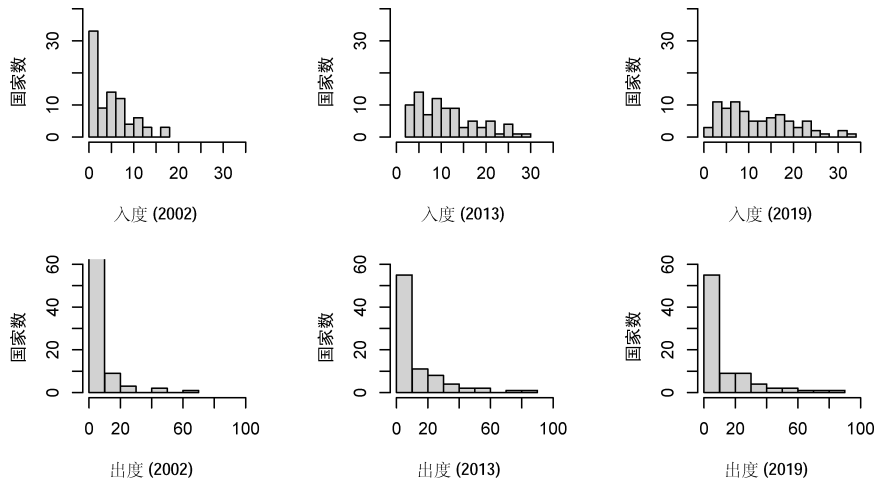


图 2 “一带一路”工业机器人贸易网络入度与出度分布

(二)网络节点特征

2002 年、2013 年、2019 年 Pagerank 指数、中介中心度、接近中心度排名前 10 位的国家如表 2 所示。从整体上看,各国的贸易地位稳中有变,但贸易网络形成的以中国为枢纽的多极化格局进一步强化。Pagerank 指数显示,2002 年排名位居前列的国家主要来自东亚、东南亚和欧洲。2013 年,排名前列的国家中未出现欧洲国家,显示“一带一路”欧洲国家的工业机器人产业发展趋缓,贸易影响力下降。至 2019 年,除俄罗斯和意大利外,指数排名前列的均为亚洲国家,显示亚洲已发展成为“一带一路”工业机器人贸易网络的核心。以“一带一路”倡议、中国—东盟自由贸易区、中韩自由贸易协定等双多边贸易机制为依托,亚洲国家间的工业机器人贸易往来日益紧密。古巴、阿根廷、新西兰等拉丁美洲与大洋洲国家指数排名靠后,主要是由于其产业结构多以轻工业、农业为主,工

业机器人的应用场景相对较少。

从部分国家的 Pagerank 指数排名变化来看,中国在 3 个时间截面上的排名稳居首位。2006 年,国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》首次把机器人产业列为前沿制造业,《“十四五”机器人产业发展规划》又提出 2025 年发展“成为全球机器人技术创新策源地、高端制造集聚地和集成应用新高地”,中国工业机器人产业进入蓬勃发展的新阶段,本土工业机器人企业的市场份额快速提升。俄罗斯近年来积极参与国际贸易,扩大工业机器人应用范围,大力发展工业机器人相关产业,指数排名不断攀升。意大利在初期的指数排名较高,作为最早发展工业机器人的国家之一,拥有较为完整的产业链,在欧盟产业分工体系中占据重要地位,经过金融危机后的较长时间调整,2019 年意大利再次进入前 10 位。新加坡的指数排名虽居前列,但近年来重

点发展信息技术、金融等服务业,贸易地位未有较大的向上突破。韩国的工业机器人密度较大,工业机器人利用率居世界前列,但是核心部件进口依赖度较高,产业综合竞争力不强^④,Pagerank 指数有所下降。此外,南非、哈萨克斯坦等国加速发展人工智能产业,与贸易大国尤其是中国的工业机器人贸易联系日益紧密。

中介中心度计算结果显示,中国、意大利、新加坡和俄罗斯在 3 个时间截面上的排名均位列前 10 名,中国和意大利尤为靠前,表明两国的网络控制能力较强,能够对其他国家间的贸易往来产生较大影响。土耳其、南非、阿联酋、赞比亚等国家

的中介中心度排名居前列,表明即便是经济发展水平相对较低的国家,依靠优越的地理位置,也可以发挥重要的“桥梁”和“中介”作用,在区域贸易中有效串联起周边国家,促进贸易不断发展。接近中心度计算结果显示,中国、意大利、韩国、奥地利、土耳其均排名靠前,表明这些国家在工业机器人贸易中的对外依赖程度较低,可以较快地与其他国家产生直接联系,贸易通达性较好。中国自 2013 年后排名稳居首位,扮演着“中心枢纽”角色。南非、马来西亚的接近中心度排名位居前十位,表明在资源、劳动力、市场等方面具有比较优势的发展中国家能够以较高的效率开展对外贸易。

表 2 Pagerank 指数、中介中心度、接近中心度排名前十的国家

排名	Pagerank 指数			中介中心度			接近中心度		
	2002 年	2013 年	2019 年	2002 年	2013 年	2019 年	2002 年	2013 年	2019 年
1	中国	中国	中国	意大利	南非	意大利	意大利	中国	中国
2	新加坡	南非	俄罗斯	中国	中国	中国	中国	意大利	意大利
3	意大利	俄罗斯	新加坡	波兰	意大利	南非	奥地利	韩国	土耳其
4	马来西亚	新加坡	哈萨克斯坦	韩国	赞比亚	土耳其	韩国	奥地利	奥地利
5	俄罗斯	科特迪瓦	越南	新加坡	新加坡	俄罗斯	新加坡	土耳其	韩国
6	韩国	赞比亚	意大利	俄罗斯	肯尼亚	捷克	卢森堡	波兰	波兰
7	泰国	哈萨克斯坦	马来西亚	泰国	韩国	阿联酋	捷克	马来西亚	捷克
8	奥地利	马来西亚	韩国	奥地利	俄罗斯	罗马尼亚	波兰	新加坡	罗马尼亚
9	土耳其	沙特阿拉伯	阿联酋	阿根廷	阿联酋	新加坡	南非	捷克	新加坡
10	波兰	韩国	土耳其	土耳其	加纳	奥地利	匈牙利	罗马尼亚	马来西亚

三、工业机器人贸易网络动态演化机制

(一) 贸易网络动态演化的内生机制

网络关系可以通过自我组织形成不同模式,这些模式源自网络内部结构的不断自我演化,被称为“内生结构效应”,能够揭示网络形成与演化的结构依赖特征。在工业机器人社会网络分析领域,已有研究主要侧重于贸易网络拓扑结构特征及贸易网络演化的外生影响因素,对于工业机器人贸易网络演化内生结构效应的研究相当有限。鉴于此,这里利用 TERGM 模型实证检验“一带一路”工业机器人贸易网络可能存在的内生结构效应,并探明它们对贸易网络动态演化的作用机制。

1. 互惠结构效应。在贸易网络形成初期,网络结构较为松散,节点对之间可能并不存在贸易关系,或仅存在单方指向关系,随着节点间联系的不不断深化,节点对开始互相接收来自对方所发出

的关系,关系指向节点也接收被指向节点反馈回的关系。这种双向的互惠关系不仅可以深化节点对之间的联系,支撑网络结构更加稳定,还可以弱化节点对之间的等级关系。工业机器人作为高端装备制造的代表性产业,长期以来世界市场份额被欧美及日本等工业强国垄断,随着全球分工体系演变,近年来工业机器人全球贸易发展呈现新特征,尤其是人口众多、制造业发展迅速的南亚、东南亚和拉美等地区,已经成为新的供需增长点。为优化产业布局和强化自身战略地位,传统工业机器人强国倾向于深化与新兴国家的贸易联系,逐步形成对对方市场的贸易依赖,从而弱化“边缘国家只进口,核心国家只出口”的网络等级关系。同时,为了促进优势互补和优化产业发展环境,网络中的边缘国家也倾向于借助“一带一路”倡议带来的政策优势更多地展开工业机器人互惠贸易。因

^④ 资料来源于 2018 年 3 月韩国机器人产业协会发布的《2017 机器人产业竞争力调查》。

此,贸易网络中可能存在互惠结构效应,促使节点对积极展开互惠贸易,强化自身的被依赖性和对其他节点的依赖,推动贸易网络结构更加稳定和紧密。互惠结构效应的代理变量是互惠性(Mutual)。

2. 扩张结构效应。随着新一轮科技革命和产业变革的不断深入,“一带一路”工业机器人贸易规模迅速扩大。扩张结构效应刻画了网络出度分布的中心势倾向,即促进或抑制以节点自身为中心向外扩张影响力的倾向,展现的是节点在出度分布中的“被依附”程度。当贸易网络存在正向扩张结构效应时,出度明星节点会依靠在网络中的强大地位吸引更多节点对自身产生依附,持续扩大网络影响力。出度明星节点从工业机器人核心零部件生产,到本体制造和系统集成,再到规模出口销售,整体上较其他节点拥有更完备的产业链供应链,促使其他节点对其产生进口依赖。但是,随着依附于明星节点的其他节点数量不断增加,明星节点出口工业机器人的贸易风险也随之增加,包括“一带一路”欠发达国家政治不稳定带来的国家风险,交易过程中产生的信用风险、汇率风险和运输风险等,从而导致明星节点在出口贸易中反而可能处于劣势地位^[20]。此外,“一带一路”国家多处于工业机器人应用与发展的初级阶段,即便是出口影响力较大的明星节点也难以形成垄断。因此,贸易网络中可能存在负向扩张结构效应,使得出度明星节点吸引依附节点的同时,又控制其自身的依附节点数量。扩张结构效应的代理变量是扩张性(Gwdegree)。

3. 传递闭合效应。传递闭合三角在形成节点依赖关系和网络集群的过程中发挥了重要作用,网络中可能存在多个中介节点,它们既接收来自*i*的贸易依赖关系,又向*j*发出贸易依赖关系,从而促进它们建立直接贸易关系,在图形结构上表现为从“连通三角”转变为“闭合三角”。贸易网络中节点对未形成直接联系的重要原因在于“信息不对称”,导致搜寻贸易对象、了解贸易产品会明显增加信息成本^[21-22],中介节点的存在不仅可以减少信息成本,规避不确定性风险,还可能带来关税和非关税优惠,降低跨境贸易政策壁垒。因此,贸易网

络中可能存在传递闭合结构效应,推动潜在贸易节点对利用中介节点传递间接关系,导致连通的贸易关系趋于闭合,从而形成贸易集群。传递闭合结构效应的代理变量是多重2路径(Gwdsp)和传递性闭合(Gwesp)。

4. 时间结构效应。在TERGM中,一般以稳定性(Stability)和变异性(Variation)为代理变量表征时间结构效应。前者是指本期贸易网络中的节点关系在后期网络中保持稳定存续的倾向,后者则是本期贸易网络中的节点关系在后期网络中出现结构性中断,并形成新节点关系的倾向。首先,社会网络拓扑结构具有较高的稳定性,并不因为外部环境的变化轻易出现结构性转变。在工业机器人贸易网络中,核心节点在制造技术水平、信息收集能力、进口需求和出口能力等方面占据优势,使得它们的贸易主导地位不易被撼动。其次,如果贸易关系发生结构性改变,贸易节点对需要进行重新匹配,在增加相关成本的同时会带来不确定性风险。最后,随着外部环境的演变与节点自身的发展变化,不同节点的地位和作用也相应发生变化,边缘节点逐渐向网络中心靠近,已有的节点关系也可能发生断裂和重构。因此,贸易网络中可能存在时间结构效应,推动贸易格局动态演进。

(二) 贸易网络动态演化的外在影响因素

TERGM模型纳入节点属性和外生二元协变量网络作为控制变量。其中,前者包括贸易规模(Trade)、所属大洲(Continent)、经济体量($\ln_GDP$)、工业就业占比(Labors)、制造业技术水平(MHT_{ad})、人力资本水平(Edu_{year})和市场开放程度(IF, TF, FF),不同节点国家的个体属性存在差异,驱动个体做出不同选择。后者包括“一带一路”国家的地理邻近性(Geo_distance)、语言邻近性(Geo_distance)和组织邻近性(RTA_distance),刻画节点国家在其他网络中的关系对贸易合作的影响。

具体而言,贸易规模用2002—2019年每一年各国的工业机器人贸易总额表示,把贸易额高于75%分位数的国家称为高规模组(high),在25%到75%分位数之间的国家称为中等规模组(mid),低于25%分位数的国家称为低规模组(low)。经

济体量用一国 GDP 取对数来表示。所属大洲用一国所在的大洲表示。工业就业占比是一国工业就业人员占就业总数的比例,是衡量工业生产能力的指标。制造业技术水平用中高技术制造业附加值在制造业总附加值中所占比例来衡量,由于创新是提高附加值的根本途径,中高技术制造业产生的附加值越高,表明国家的技术创新能力越强,制造业技术水平也相应越高。人力资本水平由各国劳动力接受教育的平均年限来衡量。市场开放程度包括投资自由度 (*IF*)、贸易自由度 (*TF*) 和金融自由度 (*FF*),以此衡量市场化的制度质量。二元协变量网络分别表示领土是否接壤、官方语言是否相同、是否加入共同的区域贸易协定。贸易规模和二元协变量网络数据来源于 CEPII 网站,经济发展水平、工业就业占比、制造业技术水平数据来源于 WDI 数据库,人力资本数据来源于 Penn World Table 数据库,市场开放程度数据来源于 Heritage Foundation 数据库。

(三) TERGM 实证结果

表 3 展示了 TERGM 实证分析结果。模型 1 仅包括边和节点属性变量。趋同效应表示具有某种相同属性的节点之间倾向于发展贸易关系。*Homophily*(*Trade_high*) 和 *Homophily*(*Trade_mid*) 在 1% 的水平上分别呈正向显著和负向显著,表明同为高贸易规模组的国家倾向于选择彼此作为贸易伙伴建立贸易关系,而同为中等规模组的国家间则未展示出这样的倾向,这是由于网络中贸易规模高的国家,经济体量较大、技术水平较高、市场需求较大,有利于发挥比较优势,通过扩大贸易合作实现互利共赢。*Homophily*(*Continent*) 在 1% 的水平上显著为正,表明隶属于同一个大洲的国家之间倾向于发生贸易关联。发送(接收)者效应表示具有某种属性的节点比其他节点发送(接收)更多贸易关系的倾向。*Sender*(*ln_GDP*)、*Sender*(*Labors*)、*Sender*(*MHT_{ad}*)、*Sender*(*Edu_{year}*) 均在 1% 的水平上显著为正,表明经济体量、工业就业占比、制造业技术、人力资本水平越高的国家,越可能对外发送贸易出口关系。工业就业占比越高,国家的工业生产能力越强,生产体系更加健全,具

备大规模生产并出口工业机器人的条件;制造业技术水平和人力资本水平越高,意味着国家可以依靠高素质人才和相对完整自立的科技创新体系为出口工业机器人提供有力支撑。*Receiver*(*ln_GDP*) 和 *Receiver*(*Labors*) 在 1% 的水平上显著为正,表明越是经济体量较大或工业就业占比较高的国家,其接收贸易进口关系的可能性也越大。经济体量越大的国家一般工业生产规模越大,需要更多应用工业机器人促进经济发展,以中国为例,作为全球经济总量排名第二的经济大国,不仅是制造业第一大国,也是最大的工业机器人进口国。*Receiver*(*MHT_{ad}*) 和 *Receiver*(*Edu_{year}*) 在 1% 的水平上显著为负,表明如果一国的中高技术制造业附加值占比较低或人力资本水平较低,接收贸易进口关系的概率将会较高,此时可以通过

表 3 “一带一路”工业机器人贸易网络 TERGM 实证结果

变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
<i>Edges</i>	-45.655 *** (1.152)	-43.745 *** (1.056)	-32.529 *** (0.637)	-33.697 *** (0.772)	-34.763 *** (1.470)
<i>Mutual</i>	—	0.434 *** (0.036)	0.299 *** (0.033)	0.256 *** (0.052)	0.301 *** (0.041)
<i>Gwodegree</i>	—	-0.955 *** (0.164)	-0.736 *** (0.151)	-0.730 *** (0.182)	-1.004 *** (0.090)
<i>Gwesp</i>	—	0.317 *** (0.060)	0.277 *** (0.054)	0.197 ** (0.062)	0.397 *** (0.086)
<i>Guedsp</i>	—	-0.035 *** (0.004)	-0.022 *** (0.003)	-0.017 *** (0.004)	-0.034 *** (0.004)
<i>Stability</i>	—	—	1.414 *** (0.015)	1.405 *** (0.022)	1.399 *** (0.023)
<i>Variation</i>	—	—	-0.046 *** (0.006)	-0.075 *** (0.016)	-0.072 ** (0.024)
<i>Homophily</i> (<i>Trade_high</i>)	0.938 *** (0.051)	0.641 *** (0.054)	0.350 *** (0.064)	0.371 *** (0.076)	0.258 ** (0.091)
<i>Homophily</i> (<i>Trade_mid</i>)	-0.415 *** (0.056)	-0.613 *** (0.063)	-0.319 *** (0.070)	-0.270 ** (0.092)	-0.353 *** (0.091)
<i>Homophily</i> (<i>Trade_low</i>)	-0.128 (0.167)	0.135 (0.178)	-0.010 (0.125)	0.199 (0.225)	-0.116 (0.143)
<i>Homophily</i> (<i>Continent</i>)	1.589 *** (0.025)	0.861 *** (0.025)	0.616 *** (0.028)	0.648 *** (0.042)	0.606 *** (0.038)
<i>Sender</i> (<i>ln_GDP</i>)	0.972 *** (0.017)	0.924 *** (0.014)	0.664 *** (0.014)	0.706 *** (0.020)	0.656 *** (0.021)
<i>Sender</i> (<i>Labors</i>)	0.019 *** (0.002)	0.017 *** (0.002)	0.008 *** (0.002)	0.004 (0.003)	0.013 *** (0.004)
<i>Sender</i> (<i>MHT_{ad}</i>)	0.008 *** (0.001)	0.011 *** (0.002)	0.008 *** (0.002)	0.011 *** (0.002)	0.002 (0.003)
<i>Sender</i> (<i>Edu_{year}</i>)	0.172 *** (0.009)	0.133 *** (0.008)	0.107 *** (0.006)	0.114 *** (0.009)	0.095 *** (0.008)
<i>Receiver</i> (<i>ln_GDP</i>)	0.514 *** (0.013)	0.528 *** (0.015)	0.412 *** (0.012)	0.429 *** (0.015)	0.441 *** (0.025)
<i>Receiver</i> (<i>Labors</i>)	0.020 *** (0.002)	0.016 *** (0.001)	0.005 ** (0.002)	0.004 * (0.002)	0.005 * (0.002)
<i>Receiver</i> (<i>MHT_{ad}</i>)	-0.008 *** (0.001)	-0.005 *** (0.001)	-0.003 * (0.001)	-0.005 * (0.002)	-0.002 (0.002)
<i>Receiver</i> (<i>Edu_{year}</i>)	-0.046 *** (0.006)	-0.053 *** (0.006)	-0.031 *** (0.009)	-0.031 * (0.013)	-0.038 *** (0.010)
<i>Nodecov</i> (<i>IF</i>)	0.017 *** (0.001)	0.013 *** (0.001)	0.009 *** (0.001)	0.007 *** (0.002)	0.010 *** (0.002)
<i>Nodecov</i> (<i>TF</i>)	0.005 (0.005)	0.001 (0.004)	0.008 ** (0.003)	0.006 * (0.003)	0.021 *** (0.003)
<i>Nodecov</i> (<i>FF</i>)	0.003 (0.002)	0.003 * (0.002)	0.001 (0.001)	0.004 *** (0.001)	-0.005 ** (0.002)
<i>Edgecov</i> (<i>Geo_distance</i>)	—	2.204 *** (0.074)	1.491 *** (0.070)	1.406 *** (0.093)	1.677 *** (0.102)
<i>Edgecov</i> (<i>Lag_distance</i>)	—	0.545 *** (0.062)	0.460 *** (0.070)	0.580 *** (0.115)	0.310 *** (0.053)
<i>Edgecov</i> (<i>RTA_distance</i>)	—	0.895 *** (0.029)	0.631 *** (0.033)	0.674 *** (0.037)	0.588 *** (0.064)

注:***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 有统计学意义;括号中为标准误。

“机器换人”来降低人工成本、提高生产效率、提升产品质量^[23]。节点协变量方面,投资自由度通过 1% 的显著性检验且估计系数为正,表明国家的投资环境越开放,越能促进网络整体贸易关系的建立。

接下来,对模型添加内生结构效应代理变量,以进一步考察贸易网络动态演化的内生机制。模型 2 在模型 1 基础上加入互惠性、扩张性、多重 2 路径和传递性闭合变量,回归结果显示,互惠性的估计系数在 1% 的水平上显著为正,表明贸易网络中存在互惠结构效应,对于各国积极开展互惠贸易具有推动作用。扩张性、多重 2 路径和传递性闭合的估计系数均在 1% 的水平上显著。其中,扩张性的估计系数为 -0.955,表明贸易网络存在负向扩张结构效应,使得出度明星节点在吸引依附节点的同时又控制依附节点的数量,抑制其通过出口与其他节点建立贸易关系;多重 2 路径的估计系数为 -0.035、传递性闭合的估计系数为 0.317,共同表明贸易网络存在的传递闭合结构效应会促使网络节点积极寻求与多个中介节点建立联系,以群体结构形式开展贸易,并形成贸易集群。在模型 3 中加入稳定性和变异性代理变量。回归结果显示,二者的估计系数分别为 1.414 和 -0.046,均在 1% 的水平上显著,表明贸易网络存在时间结构效应,贸易关系总体上具有稳定性,但是随着时间推移,贸易关系可能在未来呈现出新的变化趋势。

模型 2 和模型 3 都加入了二元协变量网络。回归结果显示, $Edgecov(Geo_distance)$ 、 $Edgecov(Lag_distance)$ 、 $Edgecov(RTA_distance)$ 均在 1% 的水平上显著为正,表明地理邻近、语言相同、签署共同贸易协定可以有效促进各国间建立贸易关系,且地理邻近的促进作用更大。 $Nodecov(IF)$ 、 $Nodecov(FF)$ 和 $Nodecov(TF)$ 分别在 1%、10% 和 5% 的水平上显著为正,表明国家间更加宽松便利的投资和贸易环境有利于增进工业机器人贸易网络关系的建立。

(四)“一带一路”倡议实施前后对比

参考已有研究^[16],在前述分析基础上将样本区间划分为 2002—2013 年和 2014—2019 年两个

时段,考察“一带一路”倡议实施前后的内生结构效应和节点趋同效应的变化,表 3 中模型 4 和模型 5 分别展示了两个时间段的 TERGM 分析结果。

从估计结果来看,各内生结构变量系数估计值的符号和显著性都没有发生变化。互惠性系数从 0.256 上升到 0.301,表明贸易网络中的互惠结构效应有所增强。扩张性系数从 -0.730 下降到 -1.004,表明贸易网络的负向扩张结构效应有所增强,工业机器人出口并未随着网络演化出现被核心节点垄断的格局。在传递闭合结构效应的检验中,传递性闭合估计系数从 0.197 上升到 0.397,多重 2 路径估计系数从 -0.017 下降到 -0.034,表明传递闭合结构效应在倡议实施以后进一步加强,驱动节点国家更多地通过第三方国家进行工业机器人贸易,贸易集聚有所加强。稳定性系数从 1.405 下降到 1.399,变异性系数从 -0.075 上升到 -0.072,表明贸易关系在演化进程中保持着相对稳定的结构,但是随着“一带一路”倡议的深入实施,已有的贸易关系可能趋于消减,并发展出新的贸易关系。

此外, $Homophily(Trade_high)$ 系数从 0.371 下降到 0.258, $Homophily(Trade_mid)$ 系数从 -0.270 下降到 -0.353,节点贸易规模的趋同效应有所减弱,表明与“一带一路”倡议前相比,不同贸易规模组的国家间贸易壁垒有所弱化。 $Homophily(Continent)$ 系数从 0.648 下降到 0.606,表明隶属同一大洲的趋同效应减弱,造成这种现象的可能原因是随着“一带一路”贸易便利化水平上升,节点国家不只局限于在同一区域展开贸易,地理位置对各国建立与深化贸易联系的阻碍有所减少。

(五)拟合优度检验

利用基于仿真的 TERGM 拟合优度检验判断模型对各项观测数据的拟合程度。在观测网络的基础上选取合适的键网络特征作为模型参数,对观测网络进行多次模拟,再将模拟仿真得到的网络特征与观测网络进行对比,比较二者间的差异。本文选用最短路径距离(Geodesic distances)、二元共享伙伴数(Dyad-wise shared partners)、边共享伙伴数(Edge-wise shared partners)、出度(Outdegree)、三

元组 (Triad census) 作为关键的网络特征, 基于模型 3 对每一年的贸易网络分别进行 500 次模拟, 再把模拟网络与观测网络的特征做对比, 以图 3 的箱线图形式呈现出来。图中粗黑色的线条代表的是

观测网络的计算结果, 灰色线条代表的是模拟网络在 95% 置信区间时的计算结果, 可以看到黑色线条基本落在箱体内部, 这表明模拟网络可以较好地代表观测网络的结构特征。

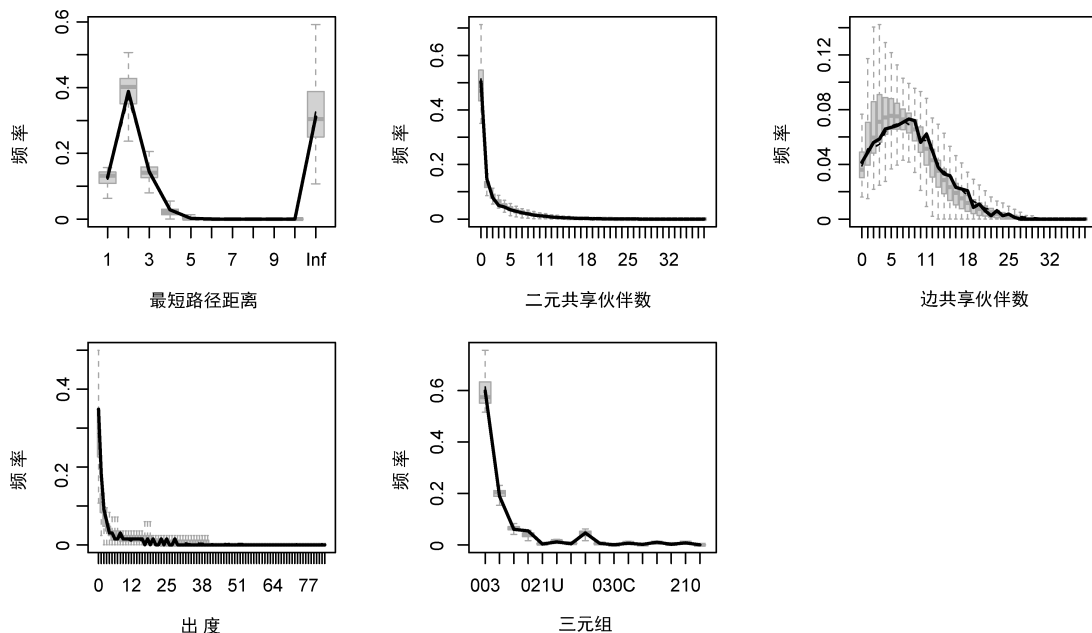


图3 模型拟合优度检验

(六) 稳健性检验

为验证“一带一路”工业机器人贸易网络动态演化机制分析结果的稳健性, 分别采取两种方法进行检验。一是将动态网络的时间间隔从 1 年调整到 2 年; 二是将 TERGM 参数估计的 MCMC MLE 方法更换为极大伪似然估计法 (MPLE)。通过对比时间间隔调整前后和估计方法变更前后的模型估计结果可以发现, 无论是系数的估计值还是显著性均高度一致, 表明得到的实证分析结果具有较好的稳健性。

四、结论与建议

(一) 结论

本文基于 2002—2019 年“一带一路”国家工业机器人贸易的双边流量数据构建贸易网络, 采用统计指标分析网络整体结构特征和节点地位演变情况, 建立 TERGM 模型考察贸易网络的动态演化机制, 得到以下主要结论。

(1) 整体网络特征方面, 2002—2019 年, “一带一路”工业机器人贸易网络的贸易联系强度整体

上升, 贸易关系日益紧密, 呈现“小世界”和“多边集聚”特征。贸易网络在空间格局上分为欧洲板块、东亚与东南亚板块和其他板块, 存在明显区域异质性; 网络“核心—边缘”结构特征突出, 核心区域逐渐东移, 贸易重心从欧洲转向亚洲。网络的入度分布更加均匀表明各国的贸易进口需求逐步扩大, 出度分布持续右偏表明贸易出口的“富人俱乐部”特征明显。

(2) 网络节点特征方面, PAGERANK 指数显示各国的网络地位演化稳中有变, 呈现以中国为枢纽的“多极化”格局。中介中心度表明: 中国和意大利具有较强的控制能力, 对其他国家间的工业机器人贸易往来产生较大影响; 土耳其、南非、阿联酋、赞比亚等发展中国家的间接影响力上升较快, 在区域贸易中发挥重要的“桥梁”和“中介”作用。接近中心度表明: 中国、意大利、韩国、奥地利和土耳其的网络直接影响力较强; 南非、马来西亚等在资源、劳动力、市场等方面具有比较优势的发展中国家能够以较高的效率开展贸易。

(3)TERGM 分析表明,内生结构效应是“一带一路”工业机器人贸易网络结构形成与演化的重要因素。互惠结构效应促使区域内国家积极开展互惠贸易,推动贸易网络结构更加稳定和紧密;负向扩张结构效应促使出度明星节点在吸引依附节点的同时,又控制其自身依附节点的数量;传递闭合结构效应推动潜在贸易节点对利用多重路径上的中介节点传递间接关系,促进形成贸易集群;时间结构效应在保持贸易关系稳定性的同时,促使贸易关系在未来展现新的变化特征。节点属性中,较高贸易规模和隶属同一大洲的国家具有趋同效应;经济体量、工业就业占比、制造业技术水平和人力资本水平具有发送者效应;制造业技术水平和人力资本水平产生接收者效应;地理、语言和贸易组织邻近性以及市场开放在不同程度上促进贸易关系。“一带一路”倡议实施以后,互惠结构效应、负向扩张结构效应和传递闭合结构效应有所增强,贸易规模和同一大洲的趋同效应有所减弱。

(二)建议

在实证分析结论的基础上,本文提出促进“一带一路”工业机器人贸易合作的建议。

第一,打造高水平开放贸易环境,强化中国在区域贸易网络中的优势地位。“一带一路”工业机器人贸易格局演化是各国共同参与和发挥各自差异化优势的结果,贸易网络的稳定运行离不开贸易伙伴国家的通力协作。为此,各国应持续优化产业发展环境,以自由贸易协定为抓手,厚植共同的经济利益,扩大工业机器人“朋友圈”,打造合作新平台,拓展合作新领域,提高机器人产业投资和贸易自由化便利化水平。对中国而言,要结合自身工业机器人产品技术特点,确定“一带一路”出口细分市场,对每个国家制订具体的出口战略计划,逐步形成以我为主、对外辐射、多方共赢的工业机器人贸易网络体系。

第二,深化区域产业链合作,建设开放稳定安全的机器人产业链。在互惠结构效应、传递闭合结构效应等因素的推动下,“一带一路”国家不断深化工业机器人互惠贸易,呈现出更加稳定、更加紧密的贸易网络形态。应推动区域内企业建立机

器人供应链伙伴关系,深化优势互补和互惠合作,建立国际化、开放型的“一带一路”机器人利益共同体,提升产业链供应链韧性。发挥我国超大规模市场优势,吸引国外企业在中国投资创业兴业,加强本地化研发和生产,同时鼓励中国企业设立海外研发中心,支持有条件的企业通过海外并购、产品外销、技术合作等方式加紧布局海外市场。

第三,增强自主创新能力,推动工业机器人产业高质量发展。一是打造良性产业生态环境,避免低水平重复建设和无序竞争,重点培育两三家具备全球竞争力的世界级机器人龙头企业,以及一批在细分领域具备领先优势的专精特新机器人企业。二是建立和完善与国际接轨的工业机器人技术标准体系,积极抢占机器人优势技术领域的国际标准制高点。三是聚力破解机器人产业发展的难点痛点问题,加快突破智能感知、深度学习、自主决策等关键核心技术。四是推动创新链、产业链、资金链、人才链深度融合,支撑中国机器人产业自立自强和创新发展,推动产业迈向全球价值链中高端。

参考文献:

- [1] GRAETZ G, MICHAELS G. Robots at work: the impact on productivity and jobs [J]. Review of economics and statistics, 2018, 100(5): 753-768.
- [2] 杨光,侯钰. 工业机器人的使用、技术升级与经济增长[J]. 中国工业经济, 2020(10): 138-156.
- [3] MAITE A, ALESSIA L T, INMACULADA M Z. Robot adoption and export performance: firm-level evidence from Spain[J]. Economic modelling, 2022(114): 105912.
- [4] 蔡震坤, 綦建红. 工业机器人的应用是否提升了企业出口产品质量: 来自中国企业数据的证据[J]. 国际贸易问题, 2021(10): 17-33.
- [5] YANG H. The impact of industrial robots on the Skill-Based Wage Gap [J]. American journal of industrial and business management, 2022, 12(4): 571-602.
- [6] 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.
- [7] 孔高文, 刘莎莎, 孔东民. 机器人与就业: 基于行业与地区异质性的探索性分析[J]. 中国工业经济, 2020(8): 80-98.

- [8]董桂才. 中国工业机器人出口贸易及其影响因素研究[J]. 国际经贸探索, 2015, 31(11): 30-40.
- [9]李丫丫, 潘安. 工业机器人进口对中国制造业生产率提升的机理及实证研究[J]. 世界经济研究, 2017(3): 87-96, 136.
- [10]FAGIOLO G, REYES J, SCHIAVO S. The evolution of the world trade web: a weighted-network analysis[J]. Journal of evolutionary economics, 2010(20): 479-514.
- [11] SQUARTINI T, FAGIOLO G, GARLASCHELLI D. Rewiring world trade. Part II: a weighted network analysis[J]. Giorgio fagiolo, 2011, 84(4): 4547.
- [12]陈银飞. 2000—2009 年世界贸易格局的社会网络分析[J]. 国际贸易问题, 2011(11): 31-42.
- [13]许和连, 孙天阳, 成丽红. “一带一路”高端制造业贸易格局及影响因素研究: 基于复杂网络的指数随机图分析[J]. 财贸经济, 2015(12): 74-88.
- [14]李敬, 陈旒, 万广华, 等. “一带一路”沿线国家货物贸易的竞争互补关系及动态变化: 基于网络分析方法[J]. 管理世界, 2017(4): 10-19.
- [15]李丫丫, 罗建强. 工业机器人贸易网络结构及其影响机制研究[J]. 中国科技论坛, 2021(7): 76-85.
- [16]唐晓彬, 崔茂生. “一带一路”货物贸易网络结构动态变化及其影响机制[J]. 财经研究, 2020, 46(7): 138-153.
- [17]刘林青, 闫小斐, 杨理斯, 等. 国际贸易依赖网络的演化及内生机制研究[J]. 中国工业经济, 2021(2): 98-116.
- [18]徐建军, 安辉, 杨晓伟. “一带一路”跨国金融对出口贸易网络的影响研究: 基于指数随机图模型的实证检验[J]. 中国软科学, 2022(6): 146-157.
- [19]DUNCAN J W, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998(393): 440-442.
- [20]庄德林, 李嘉豪, 陈紫若, 等. 全球稀土贸易网络的动态演变与影响机制: 基于产业链的视角[J]. 地理科学, 2022, 42(11): 1900-1911.
- [21]JAMES E R, TRINDADE V. Ethnic Chinese networks in international trade[J]. The review of economics and statistics, 2002(84): 116-130.
- [22]施炳展. 中国与主要贸易伙伴的贸易成本测定: 基于改进的引力模型[J]. 国际贸易问题, 2008(11): 24-30.
- [23]宋旭光, 左马华青. 工业机器人投入、劳动力供给与劳动生产率[J]. 改革, 2019(9): 45-54.

(本文责编: 王延芳)