

文章编号: 2095-2163(2023)10-0115-06

中图分类号: TP391.1

文献标志码: A

基于主路径分析算法的中国数字技术扩散效率研究

周勇, 杨其锦

(西安建筑科技大学 管理学院, 西安 710055)

摘要: 数字技术向传统行业扩散已成为中国经济迈向高质量发展阶段的重要任务,明确当前数字技术扩散效率是数字技术扩散研究的关键。数字技术扩散效率能够反映各行业领域数字技术扩散现状,为政策制定者指导数字技术深入、广泛、快速向各行业扩散提供依据。本文通过 SPNP 算法识别中国数字技术扩散主路径,用扩散速度、广度、深度表征数字技术扩散效率,对数字技术进行扩散效率及扩散主路径分析。研究发现,数字技术在各主路径中扩散深度不足,但扩散速度、广度值较高;液晶显示设备制造业数字技术扩散效果最好,主路径中涉及的其他制造业领域的数字技术扩散速度、广度也保持在较高水平。

关键词: 主路径分析; SPNP 算法; 数字技术; 扩散效率

Research on diffusion efficiency of digital technology in China based on main path analysis algorithm

ZHOU Yong, YANG Qijin

(School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

[Abstract] The diffusion of digital technology to traditional industries has become an important task for China's economy to move into a stage of high-quality development. The clear understanding of the current diffusion efficiency of digital technology is the key to the research of digital technology diffusion. The diffusion efficiency of digital technology can reflect the current situation of digital technology diffusion in various industries, and provide guidance and basis for policy makers to guide the in-depth, extensive and rapid diffusion of digital technology to various industries. On the basis of identifying the main diffusion path, the diffusion speed, breadth and depth are used to characterize the diffusion efficiency of digital technology, and the diffusion efficiency of digital technology is analyzed in detail. It is found that the diffusion depth of digital technology is insufficient in each main path, but the diffusion speed and breadth are high, indicating that digital technology has great potential in the technological fields involved in the main path, which is the core field of digital technology diffusion in the future. Among them, the liquid crystal display equipment manufacturing industry has the best diffusion effect of digital technology, benefiting from the policy to promote the high-quality development of manufacturing industry, and the diffusion speed and breadth of digital technology in other manufacturing fields involved in the main path are also maintained at a high level.

[Key words] main path analysis; SPNP algorithm; digital technology; diffusion efficiency

0 引言

数字经济以数字技术为核心驱动力,通过数字产业化及产业数字化推动着全球产业数字化转型与高质量发展。加快发展数字经济,推动互联网、大数据、人工智能等数字技术同实体经济深度融合是中国发挥数字技术赋能经济发展作用的重要举措。根据《中国数字经济白皮书 2021》,2020 年中国数字经济规模

达到 39.2 万亿元,占 GDP 的比重达 38.6%。数字经济对传统经济产生的技术溢出效应是推动中国整体产业结构升级的“新引擎”。在此背景下,数字技术的应用已成为各行业未来发展的趋势,关乎行业的可持续发展,数字技术向传统产业的扩散更是中国经济迈向高质量发展阶段的重要任务^[1]。

数字技术向传统产业扩散过程中,面对的技术、市场环境更加多变且充满不确定性,使得政府、行业

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(21YJA630011);陕西省社会科学基金项目(2021D046)。

作者简介: 周勇(1969-),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:技术创新与管理;杨其锦(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:技术创新与管理。

收稿日期: 2022-11-03

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

决策者在促进数字技术扩散时面临着更大的投资决策风险。同时,数字技术仍处在扩散的早期阶段,即数字技术并未深度扩散到国民经济的各个行业,为促进数字技术的进一步扩散,有效实现其对经济增长的贡献,数字技术扩散的基本模式与效率是当前研究的基础与关键^[2]。数字技术的扩散效率对各传统行业的创新能力具有直接的影响作用,能有效促进传统行业的创新产出与产业转型高质量发展,明确数字技术扩散的基本模式与效率,对于决策者制定加速数字技术扩散的公共政策具有十分重要的意义。

目前关于数字技术扩散效率的研究较少,相关的研究主要集中在扩散效率与创新能力的关系、扩散效率的效应研究等方面,且多采用企业层面的技术扩散指标,数据来源与角度单一^[3]。对传统产业发挥颠覆性影响的往往是关键性数字技术,可能改变传统产业的原有布局,影响传统产业发展方向的选择^[4]。因此,对关键数字技术扩散效率的研究更有现实的指导意义,对于政府和企业把握数字技术扩散影响范围及扩散阶段、选择具有重要价值的发展、投资方向具有决策支持作用^[5]。

许多学者认为技术扩散主路径上的技术是该技术领域的关键技术,既能反映技术发展的轨迹又对技术进步具有决定性作用^[6]。本文提出在识别数字技术扩散主路径的基础上,研究其扩散效率,实现对数字技术跨领域扩散的基本模式的识别与趋势预测,又能真实反映当前数字技术扩散效率现状,对政府政策制定者、行业领导者促进数字技术扩散具有重要指导意义。

1 文献综述

1.1 数字技术扩散主路径

基于专利引文网络,Dosi^[7]提出了“技术扩散主路径”这一概念。技术扩散主路径能详实的反映技术的发展脉络与发展趋势,以及该技术领域的关键技术,这为识别数字技术扩散的基本模式及趋势提供了工具,更是分析数字技术扩散效率的基础。Hummon 与 Doreain^[8]最早提出了主路径分析的具体方法。本文以此为基础选择 SPNP 算法进行数字技术扩散主路径的分析。

技术扩散主路径的研究取得了丰硕成果,许多技术的演化过程与过程中的核心技术得到清晰的呈现,如激光显示技术的演化轨迹识别,富勒烯领域的引文主路径及核心专利的识别,光伏电池板领域的

技术轨道识别^[9]。数字技术扩散主路径的研究与其他技术扩散主路径研究相似,往往只研究某一数字技术的扩散主路径,孙冰等^[10]选择手机芯片技术为研究对象,根据 1990~2015 年的专利数据构建了手机芯片技术专利引文网络,依据网络拓扑参数确定了专利引文网络的核心专利,识别了手机芯片专利的技术扩散主路径,并基于随机游走的中介中心度(BCRW)算法完成了对专利权人网络中核心企业的甄别研究;王丽丽等^[6]以 3D 打印技术为例研究,绘制了技术发展的轨迹。不同数字技术间的作用是互补的,因此考虑全部类型的数字技术的扩散现状,能够更准确的识别数字技术的关键技术^[11]。

1.2 数字技术扩散效率

目前,国内数字技术处于扩散早期阶段,识别数字技术的扩散效率是研究数字技术扩散影响的基础^[2]。数字技术扩散效率是检验其扩散结果与现状的重要衡量标准,能够反映数字技术扩散的有效性。数字技术扩散效率的提高对传统技术的创新发展具有直接影响,有效的扩散能使传统产业在较短的时间内实现数字化转型与高质量发展^[12]。此外,对技术扩散效率的研究中,学者们多选择技术扩散速度、广度和深度 3 种指标进行测度^[13]。

对技术扩散速度的定量研究主要有两类方法:一种是以投入-产出模型为基础,针对企业的技术扩散速度的研究,这种方法无法反映变量随时间变化的关系,且针对企业的研究存在明显的局限性^[14];另一种方法是用“平均引用延时”或“平均扩散速度”指标测度技术向其他领域扩散的速度,这种方法是可行、有效的,但无法考虑部分技术因其重要性而被跨越较长时间引用的特殊情况,导致计算的扩散速度与实际情况存在差异,无法真实反映其扩散情况。在技术扩散广度、深度的定量研究中,通过专利的技术领域归属,将引用关系转化为技术领域间的关联,进而对其扩散广度、深度进行识别的方法得到了学者们的广范使用,但由于在计算过程中默认涉及的专利的重要性均等,存在单一性测量的问题^[15]。本文认为在识别数字技术扩散主路径的基础上,对技术扩散效率进行分析,有效避免扩散效率定量研究中存在的问题。从专利引文网络中提取的技术扩散主路径既能够反映技术扩散随时间发展的动态过程,又能够识别出关键专利技术,在此基础上进行数字技术扩散效率的分析能真实反映出数字技术跨领域扩散的现状,并且能够较好的预测传统技术领域数字技术扩散的潜力。

2 数据来源与方法

2.1 数据收集与处理

本文根据国家统计局 2021 年发布的《数字经济及其核心产业统计分类(2021)》,将 4 大类数字经济核心行业所包含的 125 种技术定义为数字技术,非数字经济行业按国民经济行业代码前 4 位进行行业划分;收集了智慧芽专利数据库 2000~2019 年之间公开的专利数据。数字技术专利的检索式为:TI=数字技术国民经济行业经济代码,设置检索时间为:申请日2000~2019 且检索被引用次数 ≥ 1 的数字技术专利,截止到 2019 年 12 月 31 日。非数字技术专利为 2000~2019 年公开的专利数据剔除数字技术专利后引用专利量和被引用专利量 ≥ 1 的所有专利,经过过滤和剔除等数据清洗后,共收集到技术专利 2 006 908 条。

2.2 扩散主路径分析

目前,最主要的扩散主路径分析算法有 3 种: Search Path Count (SPC)、Search Path Node Pair (SPNP)、Search Path Link Code (SPLC)。SPNP 算法相较于另外两种算法更易于区分技术发展过程中的主要脉络,更适合本文对数字技术扩散主路径的识别^[10]。因此,本文采取 SPNP 算法确定数字技术扩散主路径,通过源节点出发的所有路径来计算相邻两节点之间的链接在所在路径上连接的所有的遍历次数,计算方法如式(1)所示:

$$SPNP(u, v) = L^-(u) \times L^+(v) \quad (1)$$

其中, (u, v) 表示专利 u 指向专利 v 的有向链接; $L^-(u)$ 表示专利 u 直接或间接引用的所有专利节点数,包括专利 u 本身; $L^+(v)$ 表示所有直接或间接引用专利 v 的专利节点数,包括专利 v 本身。

2.3 扩散效率测量

随着技术扩散理论研究的不断深入,许多学者

构建了多种指标研究技术扩散效率,利用处理后的专利引文数据,基于数字技术扩散主路径,本文选择了以往学者广泛使用的 3 种指标测量数字技术扩散效率:数字技术扩散速度、广度和深度。

数字技术扩散速度:本文选择了贵淑婷^[16]提出的基于主路径角度构建的扩散速度指标,结合主路径对数字技术的扩散速度进行分析,可以更准确的把握作为关键节点的数字技术的扩散规律。单位时间内经历的关键节点越多,说明主路径上的技术扩散速度越快。因此,将主路径上的技术扩散速度 TDS_M 用式(2)表示:

$$TDS_M = \frac{N_d}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (2)$$

其中, N_d 是主路径上的节点数量; T_{\max} 为主路径上各节点中的最大节点值; T_{\min} 为主路径上各节点中的最小节点值。

数字技术扩散广度:Liu^[17]提出对于一组论文,施引论文所属的 ESI 学科数量即为该组论文的“学科扩散广度”,专利文献的扩散广度即为施引专利所包含的类别。本文利用公开号区分引用专利,进行指标测度,主路径中的数字技术扩散广度为该路径包含节点的扩散广度的均值。

数字技术扩散深度:根据乔铮^[18]的方法,扩散深度表示某一技术领域向其他技术领域释放知识的能力。本文将数字技术在某一条技术领域的主路径中的技术占比表示为其技术扩散深度。

3 结果分析

3.1 中国数字技术的发展趋势

本文将 2000~2019 年中国专利数据进行了整理,并绘制了中国数字技术及所有技术专利申请趋势如图 1 所示。

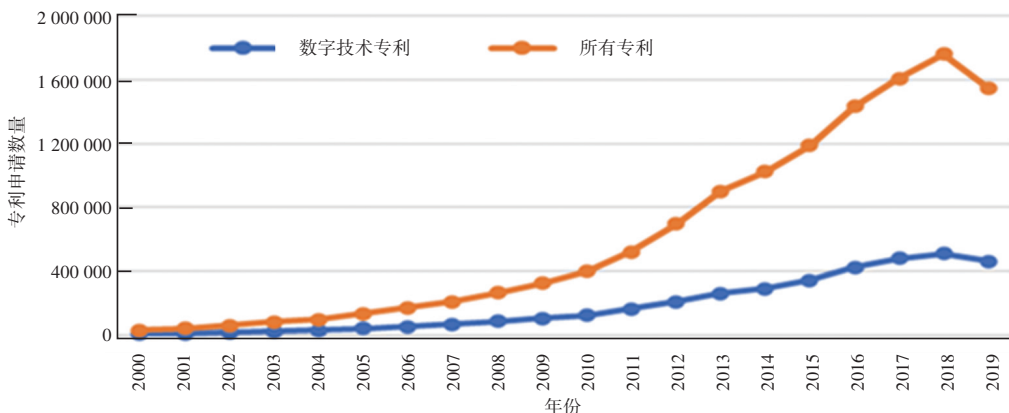


图 1 2000-2019 年中国专利申请趋势

Fig. 1 Trend of patent applications in China, 2000-2019

从图1可见,数字技术同其他技术专利申请趋势相似:2000~2009年,数字技术相关专利申请量相对较少,曲线较为平缓,是中国数字技术的起步阶段;2009~2015年,数字技术相关专利每年的申请数量均超过100 000条,且以每年2~4万条速度平稳增长;2015年后,数字技术相关专利申请量以每年超过6万条的增长量高速发展,并在2018年达到巅峰值,是中国数字技术高速发展的重要阶段。

3.2 数字技术扩散主路径分析

本文将2000~2019年筛选处理后的所有专利数据文件及引用关系导入Pajek软件中,构建专利引文网络并根据SPNP算法计算每个节点的SPNP值,通过关键路径法删除次要节点,最终提取出数字技术扩散主路径如图2所示。由图2可知,在众多

传统行业中,仅出现13条数字技术扩散主路径,涉及13个行业领域,说明中国的数字技术向传统行业扩散不均匀,有些行业数字技术扩散深度不足,未识别出相应的数字技术扩散主路径;同时,在数字技术扩散过程中也并未像其他技术仅在本技术所处领域内扩散,而更多的是向传统行业扩散,说明数字技术更多的是作为一种驱动要素,与传统技术进行融合扩散,驱动行业转型发展。在中国提出数字战略的当下,数字技术扩散不足的行业应根据13条主路径展现的特征,引导数字技术向本行业扩散、融合,促进该行业传统技术的创新发展,进而促进该行业高质量发展,释放行业经济活力。数字技术扩散主路径的识别为研究数字技术扩散效率奠定了基础。

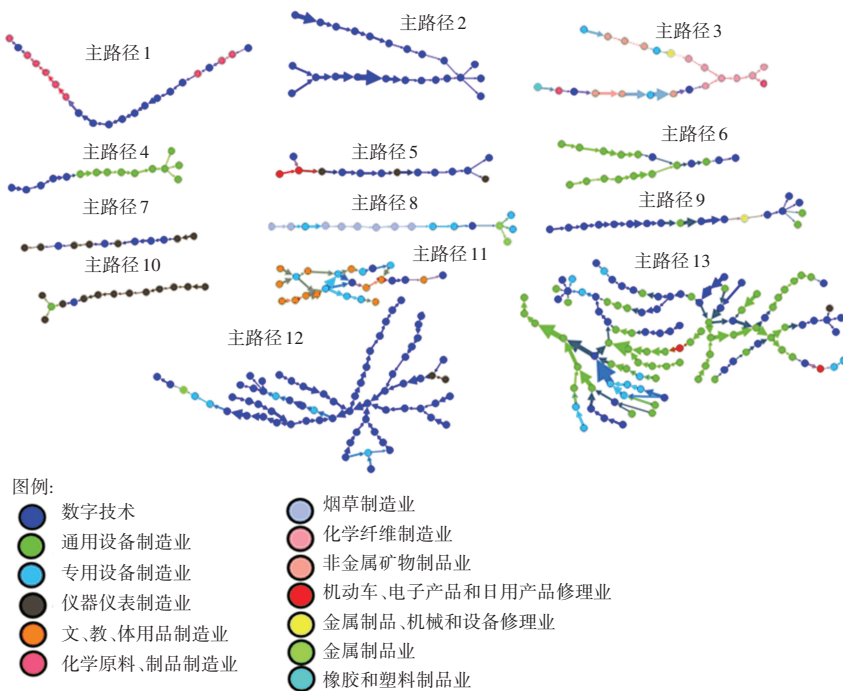


图2 数字技术扩散主路径

Fig. 2 Main path of digital technology diffusion

3.3 数字技术扩散效率分析

基于主路径分析的数字技术扩散效率分析见表1,数字技术扩散效率在不同领域达到了不同的效果。在数字技术各个扩散主路径中,数字技术扩散速度均已超过1.0,扩散广度也保持在较高水平,反映出数字技术以其渗透性、协调性和替代性特征已快速、广泛地渗透到传统行业中。但数字技术扩散深度普遍较低,仅有4条主路径中的扩散深度超过0.5,也从侧面反映出中国虽已认识到数字技术扩散的必要性与紧迫性,但在各技术领域内的扩散仍处

于早期阶段,扩散深度不足,需要行业决策者根据各行业发展特征促进数字技术在本行业深度扩散。

扩散速度最快的是主路径12,该主路径的扩散深度也最大,数字技术在该主路径中扩散效果最好。主路径12涉及领域为液晶显示设备制造业,具体应用场景如手机、电视、电脑、车载仪表盘等,数字技术的扩散使得该技术领域取得了重大技术突破,满足人民对高质量显示面板的需求。同时,数字技术的扩散使得液晶显示设备制造实现了数字化转型,数字化研发设计普及率已远超全国各行业整体水平。

主路径 10 的扩散广度值最高,但其扩散深度值处于最低水平,仅为 0.07,该主路径涉及定位、导航仪器仪表专用设备制造业,具体应用场景如无人驾驶汽车、无人机等先进设备的定位系统,较低的扩散深度与较高的扩散广度,说明了数字技术在该技术领域初步扩散,但未来在该领域影响范围较大,是有潜力的数字技术应用领域。主路径 3、6、11、13 的数字技

术扩散深度值较低,但扩散速度、广度值均处于较高水平,未来化学纤维制造业、通用设备制造业、医学康复、检测器材制造业将迎来数字技术快速、大范围扩散的契机。主路径二反映出仍有部分数字技术处于本领域内扩散的阶段,需要技术研发者寻找其跨领域扩散的“引爆点”。

表 1 数字技术扩散效率分析

Tab. 1 Diffusion efficiency analysis of digital technology

| 名称 | 涉及技术领域 | 节点数量 | 扩散速度 | 扩散广度 | 扩散深度 |
|--------|-----------------|------|------|-------|------|
| 主路径 1 | 化学原料、制品制造业 | 21 | 1.31 | 12.35 | 0.57 |
| 主路径 2 | 数字技术领域 | 23 | - | - | - |
| 主路径 3 | 化学纤维制造业 | 22 | 2.75 | 25.83 | 0.09 |
| 主路径 4 | 变化检测、遥感等通用设备制造业 | 15 | 1.67 | 15.81 | 0.33 |
| 主路径 5 | 机动车、电子和日用产品修理业 | 14 | 1.07 | 38.50 | 0.64 |
| 主路径 6 | 分类、云服务通用设备制造业 | 17 | 2.13 | 29.54 | 0.24 |
| 主路径 7 | 仪器仪表制造业 | 12 | 1.33 | 24.45 | 0.42 |
| 主路径 8 | 烟草制品业及其专用设备制造业 | 16 | 1.07 | 9.64 | 0.06 |
| 主路径 9 | 机器检测优化设备制造业 | 18 | 1.80 | 34.06 | 0.78 |
| 主路径 10 | 定位、导航仪器仪表制造业 | 14 | 1.75 | 41.74 | 0.07 |
| 主路径 11 | 康复机器人制品业 | 20 | 2.50 | 31.87 | 0.25 |
| 主路径 12 | 液晶显示专用设备制造业 | 68 | 4.86 | 32.43 | 0.88 |
| 主路径 13 | 医学检查设备制造业 | 111 | 7.4 | 28.30 | 0.38 |

4 结束语

本文在扩散主路径的基础上分析了数字技术在不同技术领域的扩散效率情况,更加细化地描述数字技术的扩散现状,为技术研发者与企业决策者更有针对性的制定企业数字化转型方案提供了指导。随着技术的发展,数字技术在各技术领域的扩散效率呈现多样化并有很强的相似性,即多数技术领域数字技术扩散深度有待提高,但由于保持着较高的扩散速度与广度,数字技术相比其他技术的扩散,可以有效缩短技术的扩散周期,能以较短的时间实现与各传统产业部门的深度融合,使传统产业形成新的技术范式与经济活动。此外,从各主路径涉及技术领域可知制造业是目前数字技术扩散的核心行业,受益于国家对制造业高质量发展的推动,数字技术能够在制造业广泛且深度扩散。其他数字技术扩散不充分的传统行业应积极借鉴制造业数字化发展的经验,助推本行业数字化转型,以期迎来新的行业发展机遇。

数字技术正以其独特的渗透性、协调性和替代性经济-技术特征改变着传统行业技术发展格局与

方向,探索数字技术向传统行业扩散的效率特征是当前数字技术研究的重点与关键,反映各行业数字技术扩散的现状与规律,明确数字技术在各行业扩散所处的阶段,对于政府制定加速数字技术扩散的公共政策具有重要意义。各行业应把握数字技术扩散的发展契机,建立良好的行业环境、培养专业的技术人才,以通过行业数字化转型实现高质量发展。

本文通过引文网络进行了路径识别,在此基础上,结合网络特征理论与技术扩散理论深入剖析数字技术扩散效率的影响机制,构建相应的理论模型,更有利于推进数字技术的扩散。

参考文献

- [1] 王瑞荣,陈晓华. 数字经济助推制造业高质量发展的动力机制与实证检验——来自浙江的考察[J]. 系统工程, 2022, 40(1): 1-13.
- [2] 陈维宣,吴绪亮. 通用数字技术扩散的模式、特征与最优路径研究[J]. 经济研究参考, 2020, 2962(18): 5-17.
- [3] 许治,焦秀焕,朱桂龙. 国家中心城市技术扩散与区域经济增长——以北京、上海为例[J]. 科研管理, 2013, 34(4): 16-23.
- [4] ROBINSON D K R, HUANG L, GUO Y, et al. Forecasting Innovation Pathways (FIP) for new and emerging science and technologies [J]. Technological Forecasting and Social Change,

- 2013, 80(2): 267-285.
- [5] ÉRDI P, MAKÓVI K, SOMOGYVÁRI Z, et al. Prediction of emerging technologies based on analysis of the US patent citation network[J]. *Scientometrics*, 2013, 95(1): 225-242.
- [6] WANG L, JIANG S, ZHANG S. Mapping technological trajectories and exploring knowledge sources: A case study of 3D printing technologies [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020; 1-12.
- [7] DOSI G. Technological paradigms and technological trajectories; a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change [J]. *Research Policy*, 1982, 11(3): 147-162.
- [8] HUMMON N P, DEREIAN P. Connectivity in a citation network: The development of DNA theory [J]. *Social Networks*, 1989, 11(1): 39-63.
- [9] 彭爱东, 黎欢, 王洋. 基于专利引文网络的技术演进路径研究——以激光显示技术领域为例[J]. *情报理论与实践*, 2013, 36(8): 57-61.
- [10] 孙冰, 徐晓菲, 苏晓. 技术扩散主路径及核心企业的识别研究——以手机芯片专利引文网络为例[J]. *情报学报*, 2019, 38(2): 201-208.
- [11] BARTELSMAN E, VAN LEEUWEN G, POLDER M. CDM using a cross-country micro moments database [J]. *Economics of Innovation and New Technology*, 2017, 26(1-2): 168-182.
- [12] 王斌, 郭清琳. 孵化器“内网络”中知识扩散效率影响机制的实证研究[J]. *贵州商学院学报*, 2021, 34(1): 57-68.
- [13] 王亮, 张庆普, 于光, 等. 基于引文网络的知识扩散速度测度研究[J]. *情报学报*, 2014, 33(1): 33-44.
- [14] 段利忠, 刘思峰. 技术扩散场技术扩散速度模型的理论研究 [J]. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2003(3): 45-48.
- [15] 杨宁, 张志强. 科学数据集知识扩散特征探析——以基因表达数据集为例[J]. *图书情报工作*, 2022, 66(12): 1-10.
- [16] 贵淑婷, 彭爱东. 基于专利引文网络的技术扩散速度研究[J]. *情报理论与实践*, 2016, 39(5): 40-45.
- [17] LIU Y, ROUSSEAU R. Knowledge diffusion through publications and citations: A case study using ESI-fields as unit of diffusion [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2010, 61(2): 340-351.
- [18] 乔铮, 黄鲁成, 吴菲菲, 等. 跨领域视角的新技术扩散特征研究——以石墨烯技术为例[J]. *情报学报*, 2015, 34(4): 339-351.

(上接第114页)

4 结束语

本文提出了一种基于 MATSAC-LSTM 的综合能源系统自动发电控制算法。一个修改的 IEEE 标准两区域负荷频率控制系统模型和一个五区域综合能源系统模型的仿真结果表明, 与传统 PID、Q、TD3、SAC 算法相比, 本文算法在 $CPS1$, $|ACE|$, $|\Delta f|$, 稳态误差, 超调量等控制性能指标均表现较优。此外, 有以下几点发现:

(1) 本文用 LSTM 网络将采集的区域控制误差等环境状态量进行时序特征提取, 并作为 MATSAC 算法的输入, 使智能体能结合历史信息进行快速的有功功率分配决策;

(2) 本文采用集中训练分散执行框架, 将一个智能体和环境的交互信息, 以及其他智能体的动作信息作为相应智能体 Critic 网络的输入, 实现了多智能体之间的信息共享;

(3) 通过迁移学习将旧任务训练的 Critic 和 Actor 网络模型参数转移到新任务相应模型参数中, 可以提高智能体的训练效率。

参考文献

- [1] JIN T. The evolutionary renewable energy and mitigation impact in

- OECD countries [J]. *Renewable Energy*, 2022, 189: 570-586.
- [2] 陈庆超, 韩松, 毛钧毅. 采用多层次特征融合 SPP-net 的暂态稳定多任务预测[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1279-1288.
- [3] 马喜平, 沈渭程, 甄文喜, 等. 基于低碳目标的电气综合能源系统优化调度策略研究[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(12): 116-122.
- [4] 席磊, 孙梦梦, 陈宋宋, 等. 面向分布式电网的多区域协同控制方法研究[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(12): 75-86.
- [5] 胡亚平, 聂涌泉, 何宇斌, 等. 基于 ELM 预测模型的高比例新能源电网改进频率控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(7): 98-106.
- [6] NAYAK J R, SHAW B, SAHU B K, et al. Application of optimized adaptive crow search algorithm based two degree of freedom optimal fuzzy PID controller for AGC system [J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, 32: 101061.
- [7] 余涛, 周斌, 陈家荣. 基于 Q 学习的互联电网动态最优 CPS 控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(19): 13-19.
- [8] 李嘉文, 余涛, 张孝顺, 等. 基于改进深度确定性梯度算法的 AGC 发电功率指令分配方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(21): 7198-7212.
- [9] 范士雄, 李立新, 王松岩, 等. 人工智能技术在电网调控中的应用研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(2): 401-411.
- [10] XI L, CHEN J, HUANG Y, et al. Smart generation control based on multi-agent reinforcement learning with the idea of the time tunnel [J]. *Energy*, 2018, 153: 977-987.