

情报理论与实践
Information Studies: Theory & Application
ISSN 1000-7490, CN 11-1762/G3

《情报理论与实践》网络首发论文

题目：“科学—技术”关联视角下新兴技术的科技安全风险早期识别研究
作者：曹琨，吴新年，白光祖，靳军宝，李莉
网络首发日期：2025-02-06
引用格式：曹琨，吴新年，白光祖，靳军宝，李莉. “科学—技术”关联视角下新兴技术的科技安全风险早期识别研究[J/OL]. 情报理论与实践.
<https://link.cnki.net/urlid/11.1762.G3.20250206.1035.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

●曹 琨^{1,2}, 吴新年^{1,2}, 白光祖^{1,2}, 靳军宝^{1,2,3}, 李 莉³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省知识计算与决策智能重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国工程科技创新战略研究院, 北京 100088)

“科学—技术”关联视角下新兴技术的科技安全风险早期识别研究*

摘要: [目的/意义] 构建新兴技术的科技安全风险早期识别方法模型, 对于我国把握新一轮科技革命机遇, 抢占未来产业科技制高点具有一定的决策借鉴意义。[方法/过程] 从“科学—技术”关联的视角出发, 结合句子级别的科技文本内容及引文关系, 构建“科学—技术”知识与结构关联网络, 并运用图神经网络链路预测方法构建未来科技知识网络。根据节点的时序演变、网络拓扑结构和科技关联度等特征构建指标体系, 识别新兴技术, 并考虑其发展潜力、技术差距、可替代性等因素, 从创新链层面构建新兴技术的科技安全风险早期识别模型, 并在数控机床领域进行实证研究。[结果/结论] 在数控机床领域中遴选出 5 项新兴技术, 包括数控机床故障诊断技术、数控机床数字孪生技术、3D 打印数控机床、数控机床颤振抑制技术和云数控系统, 结果表明在数控机床颤振抑制和故障诊断技术方面存在较大的科技安全风险。结合当前市场调研情况, 通过与识别结果进行对比, 发现具有较好的一致性, 证明本方法具有科学性和前瞻性。

关键词: 新兴技术; “科学—技术”关联; 科技安全; BERTopic; 链路预测

Research on Early Identification of Science and Technology Security Risks in Emerging Technologies from the Perspective of “Science-Technology” Linkage

Cao Kun^{1,2}, Wu Xinnian^{1,2}, Bai Guangzu^{1,2}, Jin Junbao^{1,2}, Li Li³

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000; 2. Key Laboratory of Knowledge Computing and Intelligent Decision, Gansu Lanzhou 730000; 3. Chinese Academy of Engineering Innovation Strategy, Beijing 100088)

Abstract: [Purpose/significance] This paper presents a model for early identification of science and technology security risks in emerging technologies, offering valuable insights for strategic decision-making as China seeks to capitalize on the opportunities presented by the new wave of technological revolution and secure a leading position in future industries. [Method/process] Adopting a “science-technology” linkage perspective, the study integrates sentence-level scientific and technological text analysis with citation relationships to construct a knowledge and structural network linking science and technology. Using graph neural network-based link prediction methods, the paper builds a future technology knowledge network. Based on the temporal evolution of nodes, changes in network topology, and the linkage of science and technology, an index system is constructed to identify emerging technologies. Furthermore, the model considers factors such as development potential, technological gaps, and substitutability to construct an early warning system for science and technology security risks from the perspective of the innovation chain. This model is empirically validated within the domain of CNC machine tools. [Result/conclusion] Five emerging technologies are identified: CNC machine fault diagnosis technology, CNC machine digital twin technology, 3D printing CNC machines, CNC machine chatter suppression technology, and cloud-based CNC systems. Significant science and technology security risks were identified in CNC machine chatter suppression and fault diagnosis technology. By comparing the identification results with current market research, a good consistency was observed, demonstrating the scientific validity and forward-looking nature of this methodology.

Keywords: emerging technologies; science & technology linkage; science & technology security; BERTopic; link prediction

0 引言

党的二十届三中全会强调, 要“加强新领域新赛道制度供给, 建立未来产业投入增长机制”。新兴技术是新质生产力形成和发展的核心驱动力, 有望成为未来产业的关键核心技术并重塑产业结构^[1]。随着中美贸易摩擦不断加剧, 地缘政治风险日益凸显, 科技安全风险持续攀升, 并逐渐向新兴技术领域蔓延, 开展新兴技术的科技安全风险早期识别研究十分必要

*本文为国家社会科学基金项目“演化视角下新兴技术形成机制与识别方法研究”(项目编号: 20BTQ094)和 2023 年度中国科学院“西部之光”青年学者基金项目“西北战略金属矿产资源高值化利用突破性技术路线图研究”的成果。

[2]。现有研究多聚焦于主流技术轨道的科技安全风险量化评估^[3-4]，缺乏对未来新兴技术的科技安全风险早期识别研究。由于新兴技术发展初期具有较大的模糊性和不确定性^[5]，加之技术识别面临技术粒度难把握、语义歧义、语境缺失、主题解读等难题，如何客观、精准、量化地识别新兴技术，并构建科技安全风险早期量化评估模型成为当前研究的空白。

随着人类科技的飞速发展，科学和技术的融合程度不断加深，二者之间的关系呈现出耦合、共生、相互促进和共同发展等特征，通过二者的互动、传播和扩散不断催生出由科学原理驱动或交叉融合所产生的重要技术^[6]。基于“科学—技术”关联的视角不仅有助于前瞻地揭示这些对国家经济长远发展具有重要影响的新兴技术^[7]，也有利于更为客观、全面地评估全球主要竞争国家的技术创新能力，进而能更好地对新兴技术的科技安全早期风险进行精准量化识别。鉴于此，本文以科技文献数据作为研究对象，通过融合科技文本内容特征及引文关系，构建主题级别科技知识引文网络，从而对“科学—技术”之间关联关系进行刻画；运用 GCN 网络链路预测方法构建面向未来的科技知识网络，并根据这两个网络的拓扑结构以及时序演变特征构建指标体系，识别出具有显著发展潜力的新兴技术。最后，根据新兴分数、技术差距及可替代性因素，从创新链层面构建科技安全风险识别模型，旨在对处于早期阶段的新兴技术科技安全风险进行精准、量化识别与评估。

1 研究现状

1.1 新兴技术及识别方法研究

新兴技术的概念最早由 De George 等提出^[8]，学术界对于新兴技术的概念尚未完全达成一致，周萌等^[9]聚焦时间因素的“新”和效应层面的“兴”这两方面，认为新兴技术是具有根本创新性且目前正在兴起的技术，它们有望对未来经济结构或行业的演变产生深远影响。关于新兴技术的特征，A. L. Porter 等^[5]整合了美国情报高级研究计划署（IARPA）FUSE 项目的研究成果^[10]，认为新兴技术应当具备激进的新颖性、相对快速增长性、持久性、显著影响力以及不确定和模糊性，得到较多学者的认可。

新兴技术的识别方法主要包括专家评价、多维度指标体系、文本挖掘、复杂网络、机器学习等方法。专家的定性评价是新兴技术识别的有效方法之一，然而存在主观认识偏差的可能。基于多维度指标体系的方法是新兴技术量化识别最常用的方法之一^[11-12]，但往往需要结合语义化方法提高识别结果的准确性和可解释性。近年来，从非结构化文本数据中捕捉高价值信息和知识的文本挖掘技术迅速发展，研究者运用 TF-IDF^[13]、SAO 结构^[14]、LDA 模型^[15-16]、词嵌入算法^[17]、BERTopic^[18]等方法进行语义表示，提高了新兴技术识别的准确性和可解读性。复杂网络的方法可有效挖掘技术主题在整个知识网络中的结构和位置特征，是新兴技术识别的重要手段^[19]。此外，机器学习^[20]和深度学习^[21]的方法也被引入到新兴技术识别研究，具有较高的准确性，但在模型的可解释性方面存在一定不足。

1.2 科技安全及风险识别研究

科技安全是指在全球化背景下，一个国家的科技体系在保持与外部环境的开放交流和内部协调运行的同时，确保其可持续发展，并能有效地防范和应对来自外部和内部的破坏性因素，维护国家利益和安全^[22]。科技安全是总体国家安全观的重要组成部分，在全球局势动荡复杂的背景下，地缘政治和科技革命加剧了我国的科技安全风险，包括外部与内部风险、传统及新兴等多重交织的风险^[4]。相关研究多运用指标体系来建立宏观层面的国家科技安全风险评估模型^[23]，复杂网络理论也常被应用于研究社会现象、结构以及各国和产业间的相互关联^[24]。然而，对于微观的技术领域，由于数据的可获取性和可操作性限制，难以对特定技术方向的科技安全风险进行全面、客观的量化，现有研究多关注技术层面的经济安全^[3]或技术链风险^[25]。

1.3 “科学—技术”关联方法研究

“科学—技术”体系中各知识单元之间存在错综复杂的关联互动关系。通过考虑“科学—技术”关联关系，有助于更为准确地把握科技创新规律^[6]、识别新兴技术^[7]、发现研究前沿^[26]和预测颠覆性技术^[27]。科技关联的方法主要包括：基于引文的关系^[28]、基于共现的关系^[29]、基于作者—发明人的关系^[30]、基于专利—期刊分类的关系^[31]、基于文本语义的关系^[32]等。当前研究的热点是将知识结构信息与文本语义相结合，能更好地衡量科技之间关联和互动关系^[33]，然而由于语言的多样性和复杂性，对语义的细粒度精准表征仍有待继续提高。

综上所述，全面和客观挖掘“科学—技术”知识体系中文本语义及结构关联关系，有助

于准确把握科技发展规律、实现新兴技术的科技安全风险早期预警，鲜有研究基于此开展研究。本文旨在基于“科学—技术”关联的视角下，从句子层面对文本建模，将细粒度文本信息与知识结构信息有效整合，从而在创新链层面构建一套较为全面、客观的新兴技术科技安全风险早期识别模型。

2 研究方法

本文提出的新兴技术科技安全风险早期识别方法的研究框架如图 1 所示。首先，运用 BERTopic 进行句子级别主题建模，结合引文网络构建当前的科技知识网络，以及运用图神经网络链路预测方法构建面向未来的科技知识网络；其次，根据节点的时序演变、拓扑结构和“科学—技术”关联距离等特征构建新兴技术识别多维指标体系；最后，根据新兴分数、技术差距及技术可替代性等因素构建新兴技术的科技安全风险识别模型。为验证识别方法的可行性，选择数控机床领域进行实证研究。

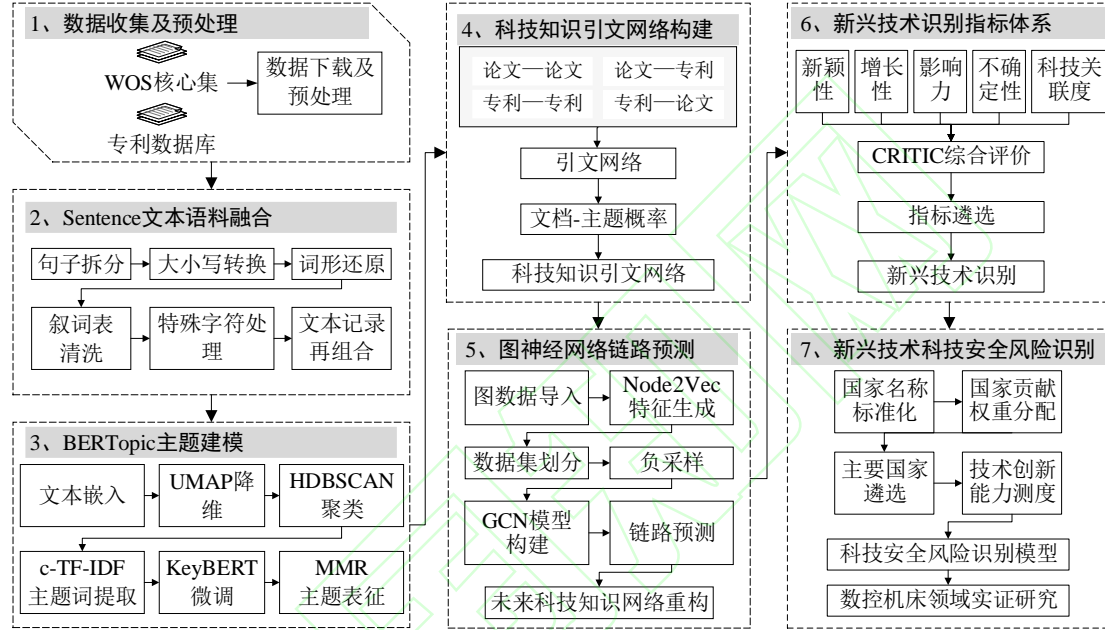


图 1 研究流程框架

Fig. 1 Flow Chart of the research process

2.1 “科学—技术”知识主题提取

本文从句子层面运用 BERTopic 模型^[34]进行科技文本知识主题建模，具有较为合适的技术粒度，并保留了较为完整的语境和语义信息。主要步骤包括^[35]：数据获取及预处理、科技文本句子语料融合、BERTopic 知识主题建模等步骤。采用“all-MiniLM-L6-v2”模型文本嵌入、UMAP 算法降维、HDBSCAN 算法自动聚类、CountVectorizer 和 TF-IDF 方法主题向量表示、c-TF-IDF 方法主题词提取，以及通过 KeyBERT 及最大边界相关法进行主题表示微调。

2.2 当前及未来科技知识网络构建

1) 当前科技知识引文网络构建。根据文献间的 4 种引用关系：“论文—论文”“论文—专利”“专利—专利”“专利—论文”关系构建文献引用关系网络。结合各主题与原始文献的对应关系以及概率，将其映射为主题引文网络，并进行删除自环、权重合并等操作^[35]。其中某一条文献的引用关系映射为主题间引用关系的概率如公式 (1) 所示：

$$P_{ij} = \sum p_i^a \times p_j^b \quad (1)$$

式中， P_{ij} 表示施引主题 i 和被引主题 j 之间引用关系的概率； a 和 b 分别是主题 i 和主题 j 对应的原始引文； p_i^a 和 p_j^b 分别表示各自的概率。

2) 未来科技知识网络链路预测。链路预测可在一定程度上预测网络未来结构和特征的变化趋势，从而有助于识别更为早期的前沿新兴技术。借鉴李慧等^[36]的方法，采用图卷积神经网络 (GCN)^[37]基于当前科技知识引文网络对未来的连接关系进行预测，主要步骤包括 (如图 2 所示)：数据准备与网络构建、Node2Vec 节点嵌入、数据集划分、负采样、GCN 模型设计、模型训练和优化、链路预测等。最后使用约登指数^[38]对预测结果阈值进行划分。

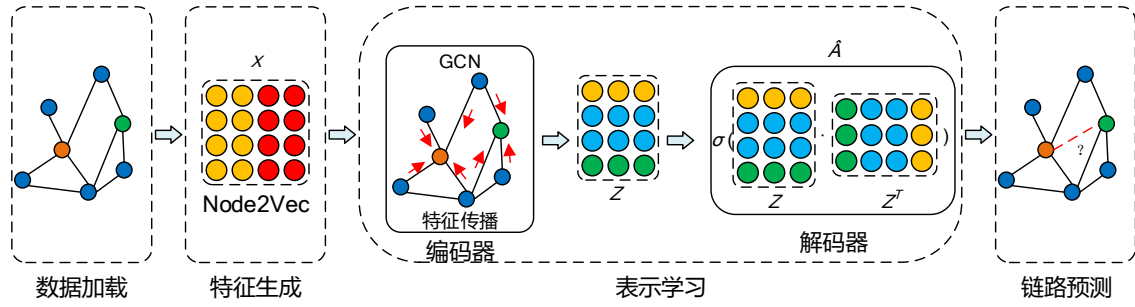


图 2 GCN 模型结构图

Fig.2 GCN model structure diagram

2.3 新兴技术识别指标体系构建

参考 A. L. Porter 等^[5]提出的新兴技术识别特征，选择新颖性、增长性、影响力、不确定性以及科技关联度作为新兴技术识别的特征，基于节点的时序演变、网络拓扑结构变化和科技关联度等特征对指标进行量化。

1) 新颖性。通过技术主题 i 所涉及文献的加权平均年龄来表征新颖性指标 (Novelty)，同时为避免数据分布过于离散，用平均值对技术主题 i 所涉及文献的加权平均年龄进行标准化，计算方法如公式 (2) 所示：

$$\text{Novelty}_i = (t_i - \bar{t}_i) / (t_{\text{current}} - \bar{t}_i) \quad (2)$$

式中， Novelty_i 表示技术主题 i 的新颖性； t_i 表示技术主题 i 所涉及文献的加权平均年龄； t_{current} 表示当前计算的年份； \bar{t}_i 表示 t_i 的平均值。 t_i 的计算方法如公式 (3) 所示：

$$t_i = \frac{\sum_{k=1}^N (A_k \times p_k)}{\sum_{k=1}^N p_k} \quad (3)$$

式中， k 表示技术主题 i 所涉及的文献 ($k = 1, 2, \dots, N$)； A_k 表示文献 k 发表后距离当前计算年份的年龄； p_k 为主题 i 属于该文献 k 的概率。

2) 增长性。用近 10 年范围内技术主题的增长率和近 3 年技术主题增长率的加权值来综合表征技术主题的增长性 (Growth)，计算方法如公式 (4) 所示：

$$\text{Growth}_i = \omega_1 \times \text{rate}_{i,3} + \omega_2 \times \text{rate}_{i,10} \quad (4)$$

式中， Growth 表示技术增长性； $\text{rate}_{i,3}$ 和 $\text{rate}_{i,10}$ 分别代表技术主题 i 在近 3 年和近 10 年内的增长率； ω_1 和 ω_2 分别是各自的权重。用近 Y 年时间范围内技术主题 i 所属概率逐年增长率之和来测度技术增长率 (rate)，计算方法如公式 (5) 所示：

$$\text{rate}_{i,Y} = P(i_Y, j) \times \sum_{y=2}^Y (\sum_{j=1}^n P(i_y, j) - \sum_{j=1}^n P(i_{y-1}, j)) / (\mu_i \times Y) \quad (5)$$

式中， $\text{rate}_{i,Y}$ 表示技术主题 i 在距离计算年份 Y 年内的增长率； $P(i_Y, j)$ 表示技术主题 i 在近 Y 年内公开的文献 j 的概率； y 表示距离计算年份 Y 年中的第几年 ($y = 1, 2, 3 \dots Y$)； $P(i_y, j)$ 表示技术主题 i 在第 y 年公开的文献 j 的概率； n 表示文献的数量； μ_i 表示技术主题 i 在 Y 年的时间范围内历年来相关文献出现概率之和的平均值。

3) 影响力。分别用技术主题所涉及论文和专利文献的年龄标准化被引次数的加权值来表征当前的技术影响力，用基于链路预测的未来网络中节点 PageRank 值来表征面向未来的潜在影响力，并以二者的标准化加权得分来测度技术主题的影响力指标 (Influence)，计算方法如公式 (6) 所示：

$$\text{Influence}_i = \omega_1 \times \text{NC}_i + \omega_2 \times \text{PageRank}_i \quad (6)$$

式中， NC_i 表示技术主题 i 的标准化被引次数； PageRank_i 表示技术主题 i 在链路预测网络中的 PageRank 值。 NC_i 的计算方法如公式 (7) 所示：

$$\text{NC}_i = \omega_1 \times \sum_{j=1}^S \left(P(i, j) \times \frac{\text{Cited}_j - \mu_j}{\sigma_j \times S} \right) + \omega_2 \times \sum_{j=1}^T \left(P(i, j) \times \frac{\text{Cited}_j - \mu_j}{\sigma_j \times T} \right) \quad (7)$$

式中， S 表示 i 技术主题涉及的相关论文的数量； T 表示 i 技术主题涉及的相关专利文献的数量； Cited_j 表示某一技术主题下文献 j 的被引次数； μ_j 表示领域内与文献 j 同年发表的文献被引次数平均值； σ_j 表示领域内与文献 j 同年发表文献的专利被引次数标准差。

4) 不确定性。分别根据技术主题在当前和未来科技知识网络之间信息熵变化值来测度不确定性指标 (Uncertainty)，计算方法如公式 (8) 所示：

$$\text{Uncertainty}_i = H_{i,\text{future}} - H_{i,\text{current}} \quad (8)$$

式中, $H_{i,\text{future}}$ 和 $H_{i,\text{current}}$ 分别表示技术主题 i 在未来和当前网络中的信息熵 (H), 信息熵的计算方法如公式 (9) 所示^[39]:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (9)$$

式中, n 表示技术主题 i 在网络中与其他节点存在引用关系的数量; p_i 为节点 i 与其相连的节点之间存在引用关系的概率。

5) 科技关联度。首先, 根据 M. Ahmadpoor 等^[28]提出的方法, 提取文档级别引文网络中“专利—论文边界”, 并递归地确定其他论文或专利到该边界的最小引用距离, 从而获得每个节点的科技关联距离 (负向指标); 其次, 通过技术主题 i 所涉及文献概率除以科技关联距离的加权累计值来表征在当前领域的内部科技关联度; 然后, 根据技术主题 i 所涉及专利引用的外部论文数量、论文引用的外部专利数量来测度外部科学关联度和外部技术关联度指标; 最后, 以这三个二级指标的标准化加权得分来测度技术主题的科技关联度 (Linkage), 计算方法如公式 (10) 所示:

$$\text{Linkage}_i = \omega_1 \times \sum_{j=1}^N (P(i,j)/D_j) + \omega_2 \times \sum_{j=1}^N (P(i,j) \times \text{Cite}_j^{\text{paper}}) + \omega_3 \times \sum_{j=1}^N (P(i,j) \times \text{Cite}_j^{\text{patent}}) \quad (10)$$

式中, N 表示 i 主题下所涉及的文档数量; D_j 表示文档 j 的科技关联距离; $\text{Cite}_j^{\text{paper}}$ 表示文档 j 为专利时引用的领域外部论文数量; $\text{Cite}_j^{\text{patent}}$ 表示文档 j 为论文时引用的领域外部专利数量。

运用 CRITIC 法^[40]计算各测度指标的权重和新兴分数 (Scores)。通过对各指标进行初步筛选来遴选新兴技术主题, 新兴技术主题应满足以下遴选条件: $\text{Novelty} > 0.5$, $\text{Rate}_{i,3} > 0$, $\text{Rate}_{i,10} > 0$, $\text{Influence} > 0$, $\text{Uncertainty} > 0$, $\text{Linkage} > 0$ 。并且, 由于本研究重点关注存在科技关联、有望对未来产业发展产生重大影响的新兴技术, 需要将相关论文和专利的数量也纳入遴选范围 (相关论文数量 > 5 , 相关专利数量 > 5 , 可根据不同领域调整)。

2.4 新兴技术科技安全风险识别模型

从统筹发展与安全的战略来看, 发展是安全的保障^[41], 创新链是实现自主可控的重要基础, 在新兴技术发展的早期阶段, 应以鼓励和培育为主。因此, 暂未考虑外部风险、技术本身的风险等因素, 重点从科技关联的视角出发, 对创新链层面的新兴技术科技安全风险进行量化。主要步骤如下。

1) 国家名称标准化及贡献权重分配。提取论文和专利文献中来源国家名称, 通过构建中英文国家名称字典将其进行标准化和清洗。根据 C. H. Sekercioglu 等^[42]优化后的调和分配法将论文中不同合作国家的贡献权重进行分配, 计算方法如公式 (11) 所示:

$$C_i = \frac{1/i}{1 + 1/2 + \dots + 1/n} \quad (11)$$

式中, C_i 为每篇论文的排名第 i 位次的国家所做出的贡献; n 为所有参与的国家数量。根据专利法, 除非另有约定, 一般情况下专利文献中所有专利权人的权利都是平等的, 因而通过平均分配的方式对其进行赋权。

2) 主要竞争国家遴选。为减少低频数据对分析结果的干扰, 将某个国家在这些新兴技术主题领域发文数量超过 10 篇的国家纳入研究范围 (可根据不同数据集适当调整)。

3) 国家技术创新能力测度。综合考虑各国在相关领域发表的期刊论文及申请专利的数量和质量, 对其技术创新能力水平进行测度, 计算方法如公式 (12) 所示:

$$L_{i,c} = \sum_{j=1}^S \text{NC}_j \times P(i,j) \times C_j + \sum_{j=1}^T \frac{V_j}{10} \times P(i,j) \times C_j \quad (12)$$

式中, $L_{i,c}$ 表示 c 国家在 i 技术主题下的技术创新能力; S 表示 c 国家在 i 技术主题发表的相关论文的数量; T 表示 c 国家在 i 技术主题申请的相关专利文献的数量; NC_j 表示 j 文献的标准化被引次数; V_j 表示 j 文献在 incopat 专利库中的合享价值度 (0~10); $P(i,j)$ 为 j 文献属于 i 技术主题的概率; C_j 表示 c 国家对文献 j 的贡献值。

4) 新兴技术科技安全风险识别模型构建。

①技术差距。根据各国家在特定技术方向的技术创新能力来测度技术差距。计算思路为：如果待计算国家 c 不是排名第一的国家，则计算 c 国家和排名第一国家间技术创新能力差距；如果 c 国家排名第一，则计算 c 国家领先其他国家的技术优势，计算方法如公式（13）所示：

$$TG_{i,c} = \begin{cases} (L_{i,c} - L_{i,1})/L_{i,1}, & L_{i,c} < L_{i,x} < L_{i,1} \\ \sum \frac{(1-L_{i,x}/L_{i,c})^2}{n-1}, & L_{i,x} < L_{i,c} = L_{i,1} \end{cases} \quad (13)$$

式中， $L_{i,1}$ 表示在 i 技术方向排名第一国家的技术创新能力； $L_{i,x}$ 表示在 i 技术方向除 c 国家外的某个 x 国家的技术创新水平； n 表示 i 技术方向的主要创新国家数量。

②技术可替代性。通过其他国家与排名第一国家间技术创新能力对比情况的累加值来计算，计算方法如公式（14）所示：

$$Replace_{i,c} = \begin{cases} \sum L_{i,x}/L_{i,1}, & L_{i,c} < L_{i,x} < L_{i,1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

③新兴技术科技安全风险指数。根据待计算国家 c 在 i 技术方向与其他国家间的技术差距、技术可替代性，以及技术本身的新兴分数来对其新兴技术科技安全风险进行量化。计算方法如公式（15）所示：

$$Risk_{i,c} = \frac{TG_{i,c}}{1+Replace_{i,c}} \times Scores_i \quad (15)$$

式中， $Risk_{i,c}$ 表示 c 国家在 i 技术方向的科技安全风险指数； $Risk_{i,c} < 0$ 表示 c 国家在 i 方向处于劣势地位，值越低表示科技安全风险也越大； $Risk_{i,c} > 0$ 则表示 c 国家在 i 方向存在技术优势，值越大，优势也越大； $Scores_i$ 表示 i 技术方向的新兴分数。

3 实验结果与分析

3.1 科技知识主题发现

1) 数据获取及预处理。本文以数控机床技术领域作为实证研究对象，制定检索式^[43]（检索时间为 2023 年 8 月 31 日），通过 WOS 核心集数据库下载期刊论文数据，文献类别为 Article 及 Proceeding Paper，共获得 12100 篇论文。通过 incopat 下载发明专利数据，只选择 2021 年及以前的数据（专利数据存在 18 个月以上的滞后性），共获得 22724 个专利家族数据。通过 Python 对数据进行合并及预处理，最终得到 34526 条文本记录。

2) 句子级别 BERTopic 科技知识主题提取。

将论文和专利文本数据按照句子进行拆分、数据清洗和处理，得到 242487 条文本数据。运用 BERTopic 模型对文本内容进行主题建模，超参数为：top_n_words=5, min_topic_size=15, n_gram_range=(1,3), calculate_probabilities=True。通过计算共获得 844 个主题，考虑到部分主题存在高相似度或者不属于技术主题，对这些主题进行了合并或删除，最终得到 632 个技术主题。

3.2 科技知识引文网络构建

根据文献间 4 种引用关系构建引文网络，分别获得 23669 对“论文—论文”引用关系、132 对“论文—专利”引用关系、13828 对“专利—专利”引用关系，以及 59 对“专利—论文”引用关系数据。将这些图数据合并，根据文献与其对应主题之间的概率，将引文网络映射为主题级别科技知识网络。

3.3 图神经网络链路预测

运用图卷积神经网络（GCN）进行链路预测，为对比模型的效果，分别使用基于节点相似性进行链路预测的 AA、JC、PA、CN、RA 模型，以及 GAT、GraphSAGE、GAE、VGAE 图神经网络作为基线模型进行对比。根据训练集比例在 60%~90%之间范围，按照 5%的间隔，计算链路预测结果的 AUC 值，结果如表 1 所示。

表 1 链路预测算法性能对比

Tab. 1 Performance comparison of link prediction algorithms

训练集比例	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%
AA	0.8350	0.8367	0.8350	0.8361	0.8342	0.8317	0.8344
JC	0.8016	0.8038	0.8047	0.8007	0.8023	0.8022	0.8028
PA	0.8365	0.8352	0.8367	0.8359	0.8340	0.8354	0.8360
CN	0.8310	0.8312	0.8299	0.8328	0.8320	0.8308	0.8310
RA	0.8301	0.8344	0.8313	0.8370	0.8367	0.8348	0.8334

GAT	0.7278	0.7281	0.7081	0.7489	0.7118	0.7679	0.7154
GraphSAGE	0.8624	0.8703	0.8693	0.8592	0.8778	0.8558	0.8642
GAE	0.6748	0.6989	0.8036	0.7575	0.8723	0.8823	0.8809
VGAE	0.8744	0.8680	0.8683	0.8744	0.8763	0.8687	0.8754
GCN	0.8860	0.8928	0.8876	0.8886	0.9019	0.8960	0.8933

可以看出，基于节点相似性指标方法的最优预测结果 AUC 值较为接近，约为 0.8~0.84 之间。而在图神经网络模型中 GCN 模型的表现最好，该模型在测试数据集中的 ROC 和 PR 曲线如图 3 所示，可以看出 GCN 模型的 AUC 值为 0.87，AP 值为 0.89，表明该模型在测试集上的性能表现良好。采用约登指数进行测量，表明最优的阈值为 0.61，经统计，GCN 模型预测的网络结构中中共有 552 个节点和 33173 条边。

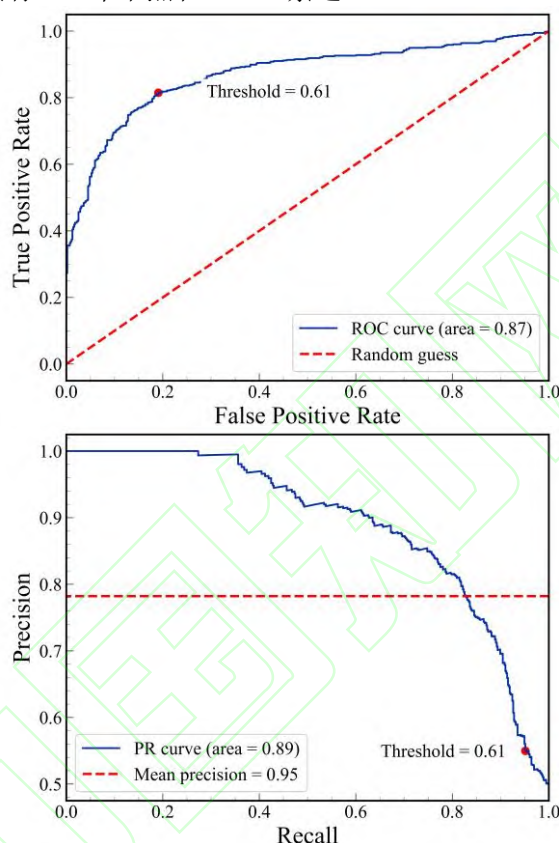


图 3 GCN 模型 ROC/PR 曲线评估

Fig. 3 GCN model evaluation with ROC/PR curves

3.4 新兴技术识别

1) 指标计算及权重确定。对各科技知识主题的指标进行计算，根据 CRITIC 法确定各指标间的权重，结果如图 4 所示。可以发现不确定性指标的权重最高，而科技关联度指标的权重最小（0.12），意味着科技关联度和其他指标间的相关性很高，这可能是因为科技关联在推动整个科技知识体系的发展中起到基础性和协同性的作用。

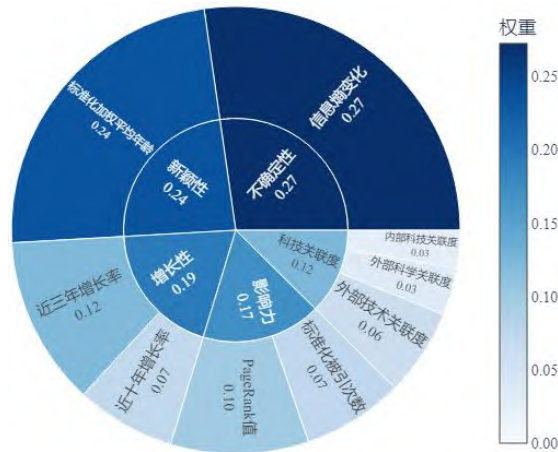


图 4 新兴技术识别指标权重分布

Fig. 4 Weight of emerging technology identification indicators

2) 新兴技术主题遴选。按照本文提出的方法遴选出 5 项新兴技术，结合主题词确定这些技术方向的名称，结果如表 2 所示。可以看出，数控机床领域的新兴技术方向包括数控机床故障诊断技术、数控机床数字孪生技术、3D 打印数控机床、数控机床颤振抑制技术和云数控系统。

表 2 新兴技术遴选结果

Tab. 2 Selection results of emerging technologies

主题	技术方向	主题词	新颖性	增长性	影响力	不确定性	科技关联度	新兴分数
143	数控机床数字孪生技术	twin virtual machine digital twin machine digital twin manufacturing	0.89	0.62	2.00	0.09	0.41	0.79
75	3D 打印数控机床	machine tool printer printing machine tool control machine printer	0.66	0.29	5.00	0.08	0.44	0.78
34	数控机床颤振抑制技术	tool chatter vibration; suppress chatter vibration chatter vibration machine	0.50	0.38	3.00	0.10	0.45	0.73
60	数控机床故障诊断技术	detect abnormality machine tool abnormality detection tool abnormality detect	0.50	0.57	2.00	0.03	0.25	0.69
74	云数控系统	machine tool cloud machine tool resource cloud manufacturing service	0.68	0.24	3.00	0.04	0.42	0.69

3.5 科技安全风险识别

研究发现，数控机床新兴技术领域主要竞争国家包括中国、日本、韩国等 9 个国家，各国新兴技术科技安全风险指数计算结果如图 5 所示。可以看出，我国在数控机床颤振抑制技术（34）和数控机床故障诊断技术（60）上存在较大的科技安全风险（Risk < - 0.5），在云数控系统（74）、3D 打印数控机床（75）和数控机床数字孪生技术（143）方面表现出显著的技术优势（Risk 均 > 0.5）。

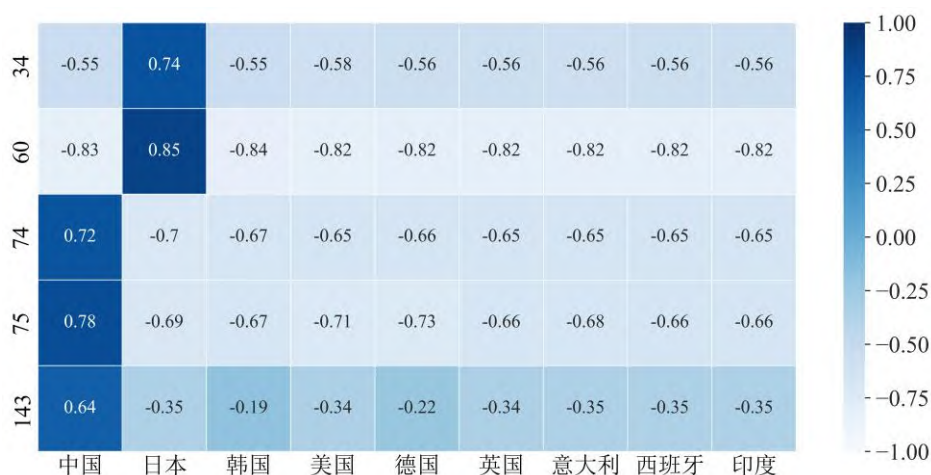


图 5 主要国家新兴技术科技安全风险指数

Fig. 5 Science & technology security risk index for emerging technologies in major countries

3.6 识别结果验证

通过对当前国内外相关文献、市场等方面资料进行多方调研，重点从产业链层面来验证基于“科学—技术”关联视角识别结果的可靠性，从而证明本方法的科学性和前瞻性。

1) 数控机床数字孪生技术。通过在虚拟世界中对数控机床进行仿真加工，打造数字化双胞胎，能够实现虚拟仿真和现实加工的高度统一，是未来重要的发展方向之一^[44]。在 2023 年的 CIMT 展览会上，广数系统、北京 KND 系统、上海维宏等系统制造商和工业互联网公司都推出了各自的数字孪生应用产品，促进了整个产业链的发展。因此综合来看，我国在该技术方面不存在科技安全风险。

2) 3D 打印数控机床。3D 打印数控机床能够简化制造工艺，缩短产品制造周期，是增材制造技术大规模工业化量产的关键^[44]。洛克希德·马丁公司以及我国国家增材制造创新中心等诸多机构推出了各自的增减材混合制造数控机床系统^[45]，美国商务部已将该技术添加到《出口管理条例》中进行管控，我国也将其纳入“限制出口目录”清单进行管理，表明我国在该技术方向不存在科技安全风险。

3) 数控机床颤振抑制技术。颤振是影响高端数控机床工件加工质量和精度的关键因素之一，尤其在切削、铣削等工序中尤为显著，智能化的颤振抑制技术成为当前领域相关研究的热点和重要趋势^[46]。国外诸多机构已开发出各自的颤振抑制主轴或控制系统^[47]，但我国在该领域的基础研究方面仍然存在较大差距，仅 2023 年国家自然科学基金就资助了“基于毫米波传感的大型薄壁工件铣削颤振在线感知与有限频带主动控制研究”等 3 项相关研究。

4) 数控机床故障诊断。数控机床故障诊断系统是近年来研究的热点和新兴技术方向^[48]，西门子、海德汉、发那科等国际先进企业的数控机床多具备智能化的故障诊断技术，数控机床可靠性时间为 30000 小时，而国内的华中数控和广州数控等公司生产的设备只具备在线诊断功能，机床的可靠性时间只有 10000 小时，生产效率和作品质量较低^[49]。因此我国高端数控机床的故障诊断系统仍存在一定科技安全风险。

5) 云数控系统。“云制造”的理念从 2010 年以来逐渐成为领域内研究的热点和焦点^[50]。目前全球各主要数控机床生产企业均已推出了各自的云系统，国内的诸多企业也进行了跟进，2021 年华中数控在 CIMT 展览会上就已正式推出其集成了 AI 芯片的 iNC-Cloud 云管家系统，因此我国在该技术方面不存在科技安全风险。

综上所述，总体来看本研究的识别结果基本符合当前产业发展的趋势和面临的竞争形势，证明了本研究方法的有效性及其合理性。

4 总结

本文从“科学—技术”关联的视角出发开展新兴技术的科技安全风险早期识别研究。首先，对句子级别科技文本进行语义表示和 BERTopic 主题建模，并结合引用关系构建主题级别科技知识网络，能够较好地刻画当前科学和技术之间知识和结构特征；其次，通过图神经网络链路预测的方法构建面向未来的科技知识网络，并根据节点的时序演变特征、网络拓扑结构变化及科技关联关系构建多维度新兴技术识别指标体系，能够较为精准地识别早期的新兴技术；再次，从科技层面对各国在各新兴技术方向的创新能力进行测算，以此来表征其在

未来产业发展过程的潜力；然后，根据新兴分数、技术差距及技术可替代性等因素对科技安全风险进行量化，从而提出了一套系统的新兴技术领域科技安全风险早期识别模型；最后，在数控机床领域进行了实证研究，共识别出 5 项新兴技术，结果表明我国在数控机床颤振抑制技术和故障诊断技术方面还存在较大的科技安全风险。结合多方调研验证了本研究所提方法的可靠性和可行性，可以为相关领域的科技规划提供一定参考。

本研究还存在一定的不足：随着大国博弈和竞争的加剧，有些国家可能将技术创新成果按照商业秘密的形式进行管理，在一定程度上可能影响本模型的准确性。此外，本研究重点聚焦于创新链层面的新兴技术科技安全风险早期识别，未考虑外部风险、技术本身的风险，所提出的方法与模型还需要通过多领域、多场景问题的实证实验与持续改进，来提高方法与模型的可靠性。□

参考文献

- [1] 周文, 许凌云. 论新质生产力: 内涵特征与重要着力点[J]. 改革, 2023(10): 1-13. (ZHOU Wen, XU Lingyun. On new quality productivity: connotative characteristics and important focus[J]. Reform, 2023(10): 1-13.)
- [2] 郭秋怡, 游光荣. 深刻认识科技安全与经济安全互动关系建立科技安全监测预警体系[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(4): 553-561. (GUO Qiuyi, YOU Guangrong. Understand interactive relationship between S&T security and economic security, establish S&T security monitoring and early warning system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(4): 553-561.)
- [3] 陈捷, 吴仲琦, 代涛. 未来技术风险识别框架研究——基于技术经济安全视角. 中国科学院院刊, 2023, 38(4): 570-579. (CHEN Jie, WU Zhongqi, DAI Tao. Research on risk identification framework of future technology—Based on perspective of techno-economic security[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(4): 570-579.)
- [4] 刘晓峰, 胡高强, 范兆媛, 等. 科技安全风险监测预警体系构建研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 186-195. (LIU Xiaofeng, HU Gaoqiang, FAN Zhaoyuan, et al. Construction of a technological security risk monitoring and early warning system[J]. Engineering, 2024, 26(3): 186-195.)
- [5] POTER A L, GARNER J, CARLEY S F, et al. Emergence scoring to identify frontier R&D topics and key players[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 146: 628-643.
- [6] 许海云, 王超, 陈亮, 等. 颠覆性技术的科学—技术—产业互动模式识别与分析[J]. 情报学报, 2023, 42(7): 816-831. (XU Haiyun, WANG Chao, CHEN Liang, et al. Recognition and analysis of science-technology-Industry interaction patterns of disruptive technologies[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2023, 42(7): 816-831.)
- [7] 张凯, 吕璐成, 韩涛, 等. “论文—专利”关联视角下的新兴技术识别研究[J]. 情报理论与实践, 2024, 47(9): 183-191. (ZHANG Kai, LU Luchen, HAN Tao, et al. Research on Emerging Technology Identification from the Perspective of “Paper-Patent” Correlation[J]. Information Studies: Theory & Application, 2024, 47(9): 183-191.)
- [8] DE GEORGE S D, PAUL J H, GUNTHER S R E. Wharton on managing emerging technologies[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000: 4-10.
- [9] 周萌, 朱相丽. 新兴技术概念辨析及其识别方法研究进展[J]. 情报理论与实践, 2019, 42(10): 162-169. (ZHOU Meng, ZHU Xiangli. Discrimination of the concept of emerging technologies and research progress on its identification methods[J]. Information Studies: Theory & Application, 2019, 42(10): 162-169.)
- [10] ROTOLO D, HICKS D, MARTIN B R. What is an emerging technology?[J]. Research Policy, 2015, 44 (10): 1827-1843.
- [11] XU Haiyun, WINNINK J, YUE Zenghui, et al. Multidimensional scientometric indicators for the detection of emerging research topics [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 163: 120490.
- [12] GUO Hanning, WEINGART S, BÖRNER K. Mixed-indicators model for identifying emerging research areas[J]. Scientometrics, 2011, 89(1): 421-435.
- [13] JOUNG J, KIM K. Monitoring emerging technologies for technology planning using technical keyword based analysis from patent data[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2017, 114: 281-292.
- [14] MA Tingting, ZHOU Xiao, LIU Jia, et al. Combining topic modeling and SAO semantic

analysis to identify technological opportunities of emerging technologies[J]. *Technological forecasting and social change*, 2021, 173: 121159.

[15] XU Shuo, HAO Liyuan, YANG Guancan, et al. A topic models based framework for detecting and forecasting emerging technologies[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 162: 120366.

[16] RANAEI S, SUOMINEN A, PORTER A, et al. Evaluating technological emergence using text analytics: two case technologies and three approaches[J]. *Scientometrics*, 2020, 122(1): 215-247.

[17] 孙蒙鸽, 王燕鹏, 韩涛, 等. 新兴技术的多指标量化识别研究——基于向量表征方法的探索[J]. *图书情报工作*, 2022, 66(3): 130-139. (SUN Mengge, WANG Yanpeng, HAN Tao, et al. Research on multi-index quantitative recognition of emerging technologies: exploration based on vector representation method[J]. *Library and Information Service*, 2022, 66(3): 130-139.)

[18] 郑德俊, 程为. 基于三维主题特征测度的新兴主题识别研究[J]. *情报学报*, 2024, 43(2): 167-180. (ZHENG Dejun, CHENG Wei. Emerging topic recognition based on three-dimensional topic feature measurement[J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2024, 43(2): 167-180.)

[19] 黄璐, 朱一鹤, 张巍. 基于加权网络链路预测的新兴技术主题识别研究[J]. *情报学报*, 2019, 38(4): 335-341. (HUANG Lu, ZHU Yihe, ZHANG Yi. Research on identification of emerging topics based on link prediction with weighted networks[J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2019, 38(4): 335-341.)

[20] CHOI Y, PARK S, LEE S. Identifying emerging technologies to envision a future innovation ecosystem: a machine learning approach to patent data[J]. *Scientometrics*, 2021, 126: 5431-5476.

[21] ZHOU Yuan, DONG Fang, LIU Yufei, et al. Forecasting emerging technologies using data augmentation and deep learning[J]. *Scientometrics*, 2020, 123: 1-29.

[22] 连燕华, 马维野. 科技安全: 国家安全的新概念[J]. *科学学与科学技术管理*, 1998, 19(11): 20-22. (LIAN Yanhua, MA Weiye. Technological security: a new concept of national security[J]. *Science of Science and Management of S. & T.*, 1998, 19(11): 20-22.)

[23] 蔡劲松, 马琪, 谭爽. 科技安全风险评估及监测预警系统构建研究[J]. *科技进步与对策*, 2022, 39(24): 100-108. (CAI Jinsong, MA Qi, TAN Shuang. Risk assessment and early warning system of science and technology security[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2022, 39(24): 100-108.)

[24] 刘江会, 卢海燕, 黄国妍. “双循环”格局演进过程中的风险产业识别研究[J]. *中国软科学*, 2022(12): 153-164. (LIU Jianghui, LU Haiyan, HUANG Gguoyan. Research on risk industry identification in the evolution of “dual circulation” pattern[J]. *China Soft Science Magazine*, 2022(12): 153-164.)

[25] 项丽瑶, 赵一智, 俞荣建. 芯片产业技术链风险及其演化[J]. *科学学研究*, 2024, 42(2): 278-288. (XIANG Liyao, ZHAO Yizhi, YU Rongjian. Chip industrial technology chain risk and evolution[J]. *Studies in Science of Science*, 2024, 42(2): 278-288.)

[26] YU Dejian, YAN Zhaoping. Combining machine learning and main path analysis to identify research front: from the perspective of science-technology linkage[J]. *Scientometrics*, 2022, 127(7): 4251-4274.

[27] 梁镇涛, 毛进, 李纲. 融合“科学—技术”知识关联的高颠覆性专利预测方法[J]. *情报学报*, 2023, 42(6): 649-662. (LIANG Zhentao, MAO Jin, LI Gang. Integrating science-technology knowledge linkage to predict disruptive patents[J]. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2023, 42(6): 649-662.)

[28] AHMADPOOR M, JONES B F. The dual frontier: patented inventions and prior scientific advance[J]. *Science*, 2017, 357(6351): 583-587.

[29] NOYONS E, VAN RAAN A. Bibliometric cartography of scientific and technological developments of an R & D field: the case of optomechatronics[J]. *Scientometrics*, 1994, 30(1): 157-173.

[30] LI Xian, ZHAO Dangzhi, HU Xiaojun. Gatekeepers in knowledge transfer between science and technology: an exploratory study in the area of gene editing[J]. *Scientometrics*, 2020, 124(2): 1261-1277.

[31] HAN Fang, MAGEE C L. Testing the science/technology relationship by analysis of patent citations of scientific papers after decomposition of both science and technology[J].

Scientometrics, 2018, 116: 767-796.

[32] CHEN Xiang, YE Peifeng, HUANG Lu, et al. Exploring science-technology linkages: a deep learning-empowered solution[J]. Information Processing & Management, 2023, 60(2): 103255.

[33] MENG Kai, BA Zhichao, MA Yaxue, et al. A network coupling approach to detecting hierarchical linkages between science and technology[J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2024, 75(2): 167-187.

[34] GROOTENDORST M. BERTopic: neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure[EB/OL]. [2023-12-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.05794>.

[35] 曹琨,吴新年,白光祖,等.基于“科学-技术”复杂网络的关键核心技术识别研究——以数控机床领域为例[J/OL]. 数据分析与知识发现,1-18[2024-06-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1478.G2.20240506.1342.002.html>. (CAO Kun, WU Xinnian, BAI Guangzu, et al. Identification of key core technologies based on the “science-technology” complex network: a case study in the field of CNC machine tools[J/OL]. Data Analysis and Knowledge Discovery,1-18[2024-06-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1478.G2.20240506.1342.002.html>.)

[36] 李慧, 庞经纬, 孟玮. 基于专利知识流网络和图表示学习的技术机会链路预测研究[J]. 情报理论与实践, 2023, 46(7): 107-114. (LI Hui, PANG Jingwei, MENG Wei. Research on technology opportunity link prediction based on patent knowledge flow network and graph representation learning[J]. Information Studies: Theory & Application, 2023, 46(7): 107-114.)

[37] KIPF T N, WELING M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks[J]. arxiv preprint arxiv:1609.02907, 2016.

[38] WANG Boyu, PINEAU J. Online bagging and boosting for im-balanced data streams [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering: 2016, 28(12): 3353-3366.

[39] LUCIO-ARIAS D, LEYDESDORFF L. An indicator of research front activity: measuring intellectual organization as uncertainty reduction in document sets[J]. Journal of the American Society for information Science and Technology, 2009, 60(12): 2488-2498.

[40] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method[J]. Computers and Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.

[41] 习近平. 习近平谈治国理政: 第四卷[M]. 北京: 外文出版社, 2022: 196-203. (XI Jinping. Xi Jinping: The governance of China (IV)[M]. Beijing: Foreign Languages Press, 2022: 196-203.)

[42] SEKERCIOGLU C H. Quantifying coauthor contributions[J]. Science, 2008, 322(5900): 371.

[43] ZHOU Yuan, DONG Fang, LIU Yufei, et al. A deep learning framework to early identify emerging technologies in large-scale outlier patents: an empirical study of CNC machine tool[J]. Scientometrics, 2021, 126: 969-994.

[44] 西门子数字化工业集团. 机械加工数字化技术白皮书[R]. 北京: 西门子数字化工业集团, 2021: 26-28. (Siemens Digital Industry Group. White paper on machining digital technology[R]. Beijing: Siemens Digital Industries Group, 2021: 26-28.)

[45] 武滢, 李进冬. 集增减材复合功能的机床结构设计[J]. 制造技术与机床, 2023(2): 109-113. (WU Ying, LI Jindong. Machine-tool structure design with composite function of adding and subtracting materials[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(2): 109-113.)

[46] 张兴武. 智能主轴高速铣削颤振抑制[M]. 北京: 科学出版社, 2022. (ZHANG Xingwu. Intelligent spindle high speed milling chatter suppression[M]. Beijing: Science Press, 2022.)

[47] MONNIN J, KUSTER F, WEGENER K. Optimal control for chatter mitigation in milling: part 2 experimental validation[J]. Control Engineering Practice, 2014, 24: 167-175.

[48] YE Yingxin, HU Tianliang, YANG Yan, et al. A knowledge based intelligent process planning method for controller of computer numerical control machine tools[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31: 1751-1767.

[49] 郭远东, 袁祎博, 沈航. 中外高端数控系统差距分析及对策[J]. 机械工业标准化与质量, 2022(9): 19-25. (GUO Yuandong, YUAN Weibo, SHEN Hang. Analysis and countermeasures of the gap between Chinese and foreign high-end numerical control systems[J]. Machinery Industry Standardization & Quality, 2022(9): 19-25.)

[50] 孟博洋, 李茂月, 刘献礼, 等. 机床智能控制系统体系架构及关键技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(9): 147-166. (MENG Boyang, LI Maoyue, LIU Xianli, et al. Research

progress on the architecture and key technologies of machine tool intelligent control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(9): 147-166.)

作者简介: 曹琨, 男, 1993 年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 知识发现与技术识别。
吴新年 (通信作者, Email: wuxn@lzb.ac.cn), 男, 1968 年生, 博士, 二级研究员, 博士生导师。研究方向: 情报分析理论与方法, 区域创新战略等。
靳军宝, 男, 1986 年生, 博士, 硕士生导师, 副研究馆员。研究方向: 产业竞争情报。
白光祖, 男, 1984 年生, 博士, 博士生导师, 研究馆员。研究方向: 产业发展战略与区域创新体系研究。
李莉, 女, 1990 年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 颠覆性技术创新、技术经济及管理。

作者贡献声明: 曹琨, 完成实验, 文章撰写。吴新年, 选题指导, 设计研究方案。靳军宝, 文章修改。白光祖, 选题拟定, 文章修改。李莉, 识别结果分析。

录用日期: 2025-01-23

