

引用格式: 张娴, 李嘉晖. 技术交叉主题特征识别研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2024(3): 386-408.

技术交叉主题特征识别研究进展*

张娴^{*,1,2} 李嘉晖^{1,2}

(1. 中国科学院成都文献情报中心, 成都 610299;
2. 中国科学院大学经济与管理学院信息资源管理系, 北京 100190)

摘要: 技术交叉主题识别研究对于技术创新研究意义重大。本文首先分析了技术交叉的内涵, 随后对技术交叉主题识别主要方法进行了系统调研、归纳与分析, 最后总结现有研究特点及优劣。研究发现, 当前技术交叉主题识别主要方法有信息计量、引文分析、网络分析、文本挖掘、知识图谱、机器学习, 涉及弱信号、突破性、颠覆性识别。主要特点包括: 1) 由形态特征层面的计量测度转向内容特征层面的文本主题挖掘; 2) 基于技术交叉特性的关联分析、文本挖掘方法等成为主流; 3) 多种方法与技术结合运用。技术交叉主题识别的未来研究方向包括: 深入微观层面主题特征识别; 多种方法的综合性创新运用; 多元数据融汇; 多领域异构大数据融合与应用关键技术。

关键词: 技术交叉; 主题识别; 技术融合; 网络分析; 文本挖掘

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2024.03.001

Research Progress on Identification Methods of Technology Crossing Topics*

ZHANG Xian^{*,1,2} LI Jiahui^{1,2}

(1. National Science Library (Chengdu), Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China;
2. Department of Information Resources Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The Identification of technology-crossing topics is of great significance. This paper analyzes the content of technology-crossing firstly, then reviews the main methods of technology-crossing topic identification. Finally, it summarizes the advantages and disadvantages of existing research. The current main methods for technology-crossing topic identification include informetrics, citation analysis, network analysis, text mining, knowledge graph, and machine learning, which involve identifications of weak signals, breakthrough technology and disruptive technology. There are three main characteristics in existing research: 1) transition from morphological metrics to text content analysis; 2) association analysis and text mining methods becoming mainstream; 3) comprehensive application of multiple methods and technologies. Future research should strengthen the identification of micro-level thematic features, integrate multiple research methods innovatively, enhance the integration of multivariate data, and develop key technologies for the fusion and application of heterogeneous bigdata in multiple fields.

Keywords: Technology Crossing; Topic Identification; Technology Integration; Network Analysis; Text Mining

* 国家自然科学基金“技术创新路径识别与预测的多元关系融合方法研究”(18BTQ067)

* * E-mail: zhangx@clas.ac.cn

当前科技发展日新月异,面临问题与挑战日益错综复杂,仅靠单一门学科或技术知识往往不足以应对,交叉性学科与技术应运而生^[1,2],不仅能解决复杂问题,还能促进科技重大突破、新增长点以及新学科与新技术产生^[3]。学科是科学精细化形成的,学科之间的边界随着人们认知的更新不断调整^[4,5],学科交叉研究受到学界高度关注。UZZI 等^[6]认为,学科知识的不同组合是交叉的特征之一,即交叉行为主要体现在知识上的交叉融合。根据 Porter 等^[7]的结论,跨学科研究的共同特征体现在学科之间的信息转移,有利于发现潜在学科交叉领域、引导新兴交叉学科发展。

与学科交叉研究相比,当前技术交叉相关研究还相对薄弱。技术是人工化的物质、能量和信息的转换^[8],现代技术是以科学为主要基础的技术^[9-11],因此技术交叉与学科交叉联系紧密而又复杂。技术交叉可以由学科知识交叉所产生的技术应用,例如医学影像学属于医学、物理学、生物学等多个学科交叉形成的学科,医学影像技术则属于不同学科技术交叉下产生的技术^[12];也可以是不同技术知识基于实践需求的交叉融合,如智能汽车的开发设计需要结合传感器技术、计算机技术、仿生技术等综合完成^[13]。

基于上述观点,本文认为技术交叉主要是指技术领域知识间的交叉组合。技术交叉主要内涵可从两个层面来理解:静态层面是使用不同知识进行交叉融合的一种技术研发模式;动态层面则是指技术研究领域间知识交叉整合的动态过程^[5,14,15]。本文将技术交叉具体行为归纳为技术会聚、技术融合、技术借鉴、技术集成 4 种形式,其内涵及特点如表 1、图 1 所示,其中, A、B 为两种不相关的知识, A'、B' 为知识交叉后仍属于 A 或 B 的部分, C 为产生的新知识,即知识交叉的产物。

四者关系密切,无绝对清晰边界,一些学者认为它们意义相同^[16-18]。

表 1 技术交叉四种形式含义

Tab.1 Meanings of Four Forms of Technology Crossing

形式	含义
技术会聚	强调知识的交互作用,形成不同于原有技术的新技术或新方向 ^[19,20] 。
技术融合	强调知识交互后产生新的知识,是基于现有知识基础上的突破 ^[21,22] 。
技术借鉴	知识内部有一部分新知识基于另一知识产生,但仍在原知识范围内 ^[23,24] 。
技术集成	强调知识的组合、搭配与协作,将互补的知识进行耦合,形成共同体,发挥更大价值与作用 ^[25,26] 。

随着新一轮科技和产业革命,技术交叉与融合现象日益普遍,尤其在新兴学科与前沿技术领域,科技发展呈现高度交叉和深度融合。技术交叉特征识别研究有利于发现最可能产生重大技术突破的线索,常与新兴主题、前沿技术、共性技术、颠覆性技术等主题识别关联^[27,28]。准确、及时识别出领域技术交叉主题,对于技术创新趋势研究具有重要意义。对此,本文对技术交叉的内涵、技术交叉主题识别主要方法进行了系统调研、归纳与分析,并比较了现有研究特点及优劣,以期对相关研究提供参考。

1 相关研究进展

1.1 研究主题分布

以 Web of Science、CNKI、谷歌学术为检索来源,将跨学科(interdisciplinary)、学科/技术(discipline/subject/technology)、交叉/会聚/融合/集成/借鉴(crossing/crossover/convergence/fusion/integration/reference)、主题(theme/topic)、特征识别(feature recognition/identify)等概念相关检索词进行逻辑与关系组配检索,检索式为

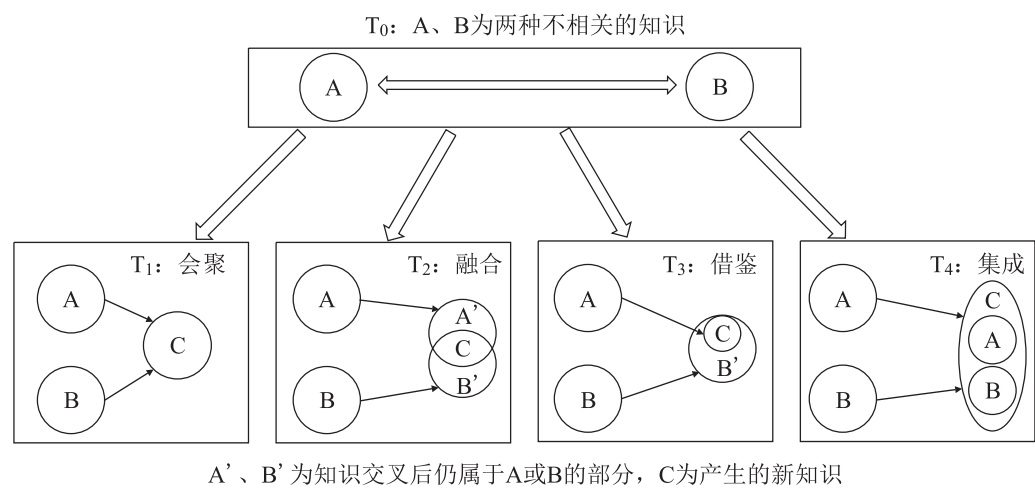


图 1 技术交叉四种形式关系

Fig.1 Relations of Four Forms of Technology Crossing

“SU = (((‘跨学科’ + ‘学科’ + ‘技术’) * (‘交叉’ + ‘会聚’ + ‘融合’ + ‘集成’ + ‘借鉴’)) * (‘主题’ + ‘特征’ + ‘识别’))” “TI = ((interdisciplinary or discipline or subject or technology) and (crossing or crossover or convergence or fusion or integration or reference) and (theme or topic) and (feature recognition or feature identify))”, 检索日期为 2023 年 12 月 18 日。对检索结果进行内容判读,遴选出与技术交叉主题特征识别具相关性的国内研究文献 863 篇,国外研究文献 1000 篇,共计 1863 篇。利用 VOSviewer 构建 1863 篇文献关键词共现网络(图 2),分析国内外相关研究概貌。

关键词共现图显示,现有中文文献主要聚焦于文本挖掘与主题识别、复杂网络分析、机器学习、引文分析、专利技术识别与分析、科学知识图谱等研究主题,其中部分研究从弱信号、突破性、颠覆性识别视角,关注多源信息、多元关系、多元融合主题,应用主题模型或机器学习方法进行技术交叉主题特征识别。英文文献方面,主要关注科学知识图谱(Scientific Knowledge Map)、复杂网络分析(Complex Network Analysis)、文本挖掘与主

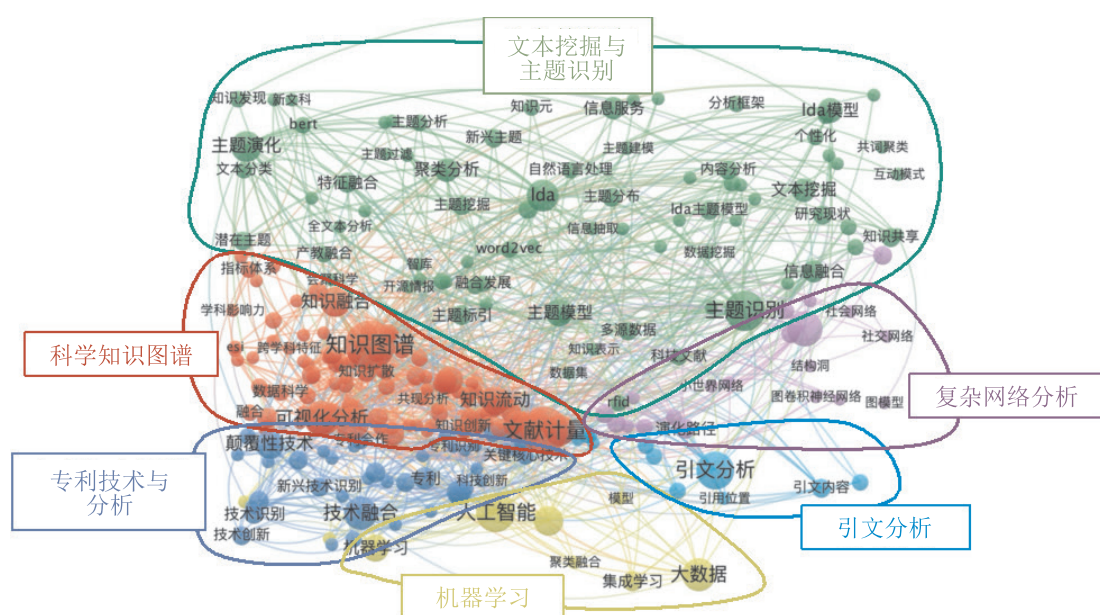
题识别(Text Mining and Topic Identification)等方法,部分研究与机器学习(Machine Learning)等方法结合,研究内容与视角更加多元化,不同方法主题之间的交叉与关联现象更明显。

进一步分析节点特征,结合 VOSviewer 共现图主题簇划分,本文将现有相关研究归纳总结为 9 类:信息计量(Informetrics Analysis)、引文分析(Citation Analysis)、网络分析(Network Analysis)、文本挖掘(Text Mining)、弱信号识别(Weak Signal Identification)、突破性识别(Radical Technology Identification)、颠覆性识别(Disruptive Technology Identification)、知识图谱(Knowledge Graph)、机器学习(Machine Learning)。这些研究各有侧重又联系紧密,涉及当前技术主题特征识别的主要方法、关联应用,本文对主要内容与特点进行了分析。

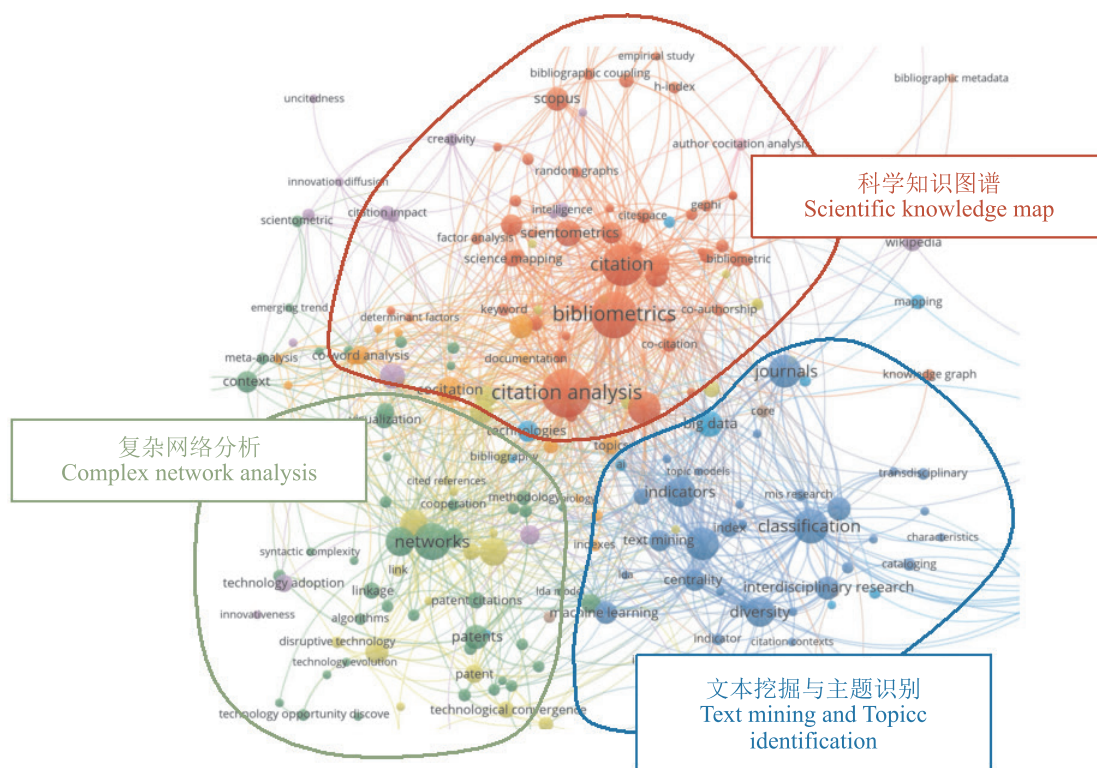
1.2 识别方法研究

1.2.1 信息计量

论文关键词共词分析是早期的主题交叉研究思路^[29]。从主题交叉特征测度视度出发构建交叉性特征测度指标体系,是最早研究思路并影响至今。指标测度值越高,交叉特征越明显,例如跨



(a) 中文文献



(b) 英文文献

图2 技术交叉主题特征识别研究主题分布

Fig. 2 Research Topics of Topic Identification of Technology Crossing

领域引用指数 (Citation Outside Category, COC)^[7]、
加权跨领域引用指数 (Weighted Citation Outside

Category, WCOC)^[30]、香农-威纳指数(Shannon-Wiener Index, SWI)^[31]和布里渊指数(Brillouin's

Index, BI)^[32]。这些跨类别评价思想为衡量学科交叉融合程度、识别学科技术交叉主题奠定了基础并发展至今。其中 Rao-Stirling 多样性指标应用较受关注,如 CASSI 等^[33]利用 Rao-Stirling 指数测度论文语料库中引用文献的多样性,由此探测跨学科合作; Leydesdorff 等^[34]使用基尼系数、信息熵以及 Rao-Stirling 指标测度期刊的学科交叉特征;郭婷等^[35]参考该成果,在 Rao-Stirling 指标、信息熵、中介中心度指标基础上加入了网络密度和网络核心度,测度期刊论文的学科交叉度。

上述方法易于理解且操作简便,但测度维度较单一,难以深度关联文本内容特征。交叉主题特征测度多倚重文献的外部结构性特征,因此许多学者从多维视角扩展测度指标。陈赛君等^[36]扩展了 Stirling 多样性公式,创建了综合多样性与聚合性来衡量领域交叉性的 Φ 指标,实验认为 Φ 指标可作为衡量领域交叉性的指标之一。许海云^[37]由此总结认为学科交叉性测度分为学科多样性、学科聚合性及综合属性测度,综合主题词的分布度与频次,提出了主题词学科交叉性(Term Interdisciplinary, TI)测度指标以及 TI-S、TI-Bet、Bet-TI 三类关联分析指标,结合社会网络分析法分析学科交叉主题。董坤等^[38]分析了学科交叉主题在学科多样性与主题核心性、奇异性及生长性方面的科学计量特征,由此构建基于科技文献内容的多维学科交叉主题识别方法及流程。黄菡等^[39]基于论文引证关系和学科引用网络结构,综合考察研究主题的学科多样性和学科凝聚性,提出 TIc 指标,认为可揭示宏观领域学科交叉态势、微观主题多学科知识融合程度、最具学科交叉发展潜力的研究主题。姚茹等^[18]基于学科交叉潜力及知识融合过程特征测度,提出了综合融合强度、广度、深度的潜在交叉主题特征测度指标与方法。

此外还有赫芬达尔—赫希曼指数(Herfindahl-Hirschman Index, HHI)、结构洞等综合指标的应用,从整体发展趋势和技术内部变化两方面展示技术领域不同发展阶段的融合动态特征^[40];计算关键词分布的 Kullback-Leibler 散度的时序变化来分析学科交叉情况^[41];基于 Glanzel-Schubert-Schoepflin 模型的随机模型预估未来引用频率,利用多样性指数预测未来跨学科性潜力(Interdisciplinary Research, IDR),从而预测与其他学科进一步交叉融合程度^[42]。总之,信息计量是测度技术交叉的基础方法之一,常与其它方法结合使用,主要方法对比见表 2。

1.2.2 引文分析

领域交叉的产生缘于知识在领域间的流动,文献引用是重要表征之一,因此跨领域引用文献成为交叉特点研究一个重要视角,通过分析引文类型、引文位置、引文内容、引文频次、引文关系等,总结不同知识转移类型与方式,为交叉性测度提供参考依据^[43-45]。本文将交叉性研究的引文分析方法分为 3 类:跨领域引用分析、共被引分析和知识元分析。

第一类跨领域引用分析相关研究最多,主要方法是通过分析不同学科的高共被引文献、采用聚类等方法划分主题簇,从中遴选高频词发掘交叉主题线索。代表性研究如:CHI 等^[46]基于文献共被引网络聚类,结合学科类别判断文献集学科属性,将其中高共被引文献主题视作学科交叉主题。另一种重要方法是对高被引论文标题项进行文本挖掘,抽取主题词开展特征分析。代表性研究如:陈红丽^[47]选取 ESI 数据库中 22 个学科的 14.6 万篇高被引论文,建立 22 个学科论文标题词表,比较词表之间重叠词序列的词频分布特点与相似程度,以此测度不同学科交叉程度;章成志

表 2 交叉性测度计量方法与指标比较

Tab. 2 Comparison of Measurement Methods and Indicators for Crossing

计量方法	指标	公式	含义	意义
基于交叉特征	Jaccard Index ^[29]	$J_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_i + C_j - C_{ij}}$	C_i 为特征 i 出现的频率, C_j 为特征 j 出现的频率, C_{ij} 为两种特征共同出现的频率。	两种特征间的关联强度。
	COC ^[7] /WCOC ^[30]	$COC = \frac{\sum_{i \in I \cap O} C_i}{\sum_{i \in I \cup O} C_i}$ $WCOC = \frac{ I \cap O }{ I \cup O } \cdot \frac{\sum_{i \in O} C_i}{\sum_{i \in I \cup O} C_i}$	I 表示对象领域集合, O 表示对象领域之外的集合, C_i 表示在 i 领域的引用文献数量。	跨领域引用的强度。
	基于交叉特征 SWI ^[31]	$H = - \sum_i p_i \cdot \ln p_i$	p_i 表示各特征的频率。	测度特征的多样性。
	BI ^[32]	$BI = \frac{\log N! - \sum \log n_i!}{N}$	N 表示观测值的数量, n_i 表示类别 i 中的观测值数量。在测量参考文献时, N 指代参考文献数量, n_i 指代 i 学科中的参考文献数量。在衡量合著者时, N 指代合著者数量, n_i 指代 i 学科的合著者数量。	考虑了观测的数量和观测值在类别之间的分布来衡量跨学科的程度。
	RAO-Stirling ^[33-35]	$ST = \sum_{ij} q_i q_j d_{ij}$	q_i 和 q_j 是类别 i 和 j 中引用的比例, d_{ij} 是两个类别之间的距离。	该指数基于加权距离测度跨学科性。
基于多维视角	Φ 指标 ^[36]	$\Phi = \sum_{ij(i \neq j)} (d_{ij})^\alpha \cdot (p_i \cdot p_j)^\beta \cdot (1 - \frac{d(i,j)}{N})^\gamma$	N 为领域数量, p_i 为领域 i 的比重, d_{ij} 表示领域 i 与领域 j 之间的差异, $d(i,j)$ 为领域 i 与领域 j 在领域交叉关系网络中的最短加权距离, 指数 α 、 β 和 γ 可分别取值 0 或 1, 它们的不同取值组合使得 Φ 有多种变体, 可用以衡量各种领域特征。	三个乘积因子分别体现两个相应领域间的平衡性、差异性和聚合性。
	TI-S、TI-Bet、Bet-TI ^[37]	$TI = d \cdot \log tf$ TI-S 指标: 共现网络中高 TI 值主题词数/高 TI 主题词总数; TI-Bet 指标: 两个网络共同的高 TI 和 Bet 值主题词数/共现网络中高 Bet 值主题词数量; Bet-TI 指标: 在两个网络共同的高 Bet 和 TI 值主题词数/共现网络中高 TI 值主题词数。	d 是主题词的分布度, 主题词出现的学科的数量。 tf 是主题词的频次。	TI 是对主题词交叉性的度量; TI-S、TI-Bet 与 Bet-TI 可表现三类指标的对比差异。
	TIc 指标 ^[39]	$TI_c = diversity \cdot coherence$ $= n_i \cdot (- \sum_{i \in C} p_i \log p_i) \cdot \frac{\sum_{i,j \in C} d_{ij}}{n} \cdot \frac{2L}{N(N-1)}$	n_i 表示该主题中属于学科 i 的引文数量, p_i 表示该主题的引文频率, d_{ij} 表示学科 i 与学科 j 的距离, n 表示主题中的学科数量, N 表示网络中的节点数量, 即包含的学科数目, L 表示网络中的连边数量, 即存在引用关系的学科对数量。	整合多样性和凝聚性指标用以测度交叉性。
	知识融合强度、广度、深度 ^[20]	融合强度: $C_s = \frac{N_\alpha}{N_c}$ 融合广度: $C_r = \frac{N_t}{N}$ 融合深度: $C_d = \frac{N_s(F_{In}, F_{2n})}{N_s(F_{In})}$	N_α 为源学科领域参考文献数量, N_c 为所有参考文献数量, N_t 为引用源学科领域参考文献大于 k 篇的目标文献数量 N 为主题中所有目标文献数量, $N_s(F_{In}, F_{2n})$ 表示目标领域 F_1 与源领域 F_2 中相同内容实体 S 的数量, $N_s(F_{In})$ 为目标领域 F_1 内容实体 S 的数量。	从融合强度、融合广度、融合深度进行交叉测度。

续表 2

计量方法	指标	公式	含义	意义
	HHI ^[40]	$HHI = \sum_{i=1}^n (X_i/X)^2$	X 表示融合网络的总规模, X_i 表示 i 技术的规模; n 表示技术总数。	测度领域内技术的集中度。
	结构洞 ^[40]	$C_{ij} = x(P_{ij} + \sum_q P_{iq}P_{qj})^2, (q \neq i, q \neq j)$	P_{ij} 表示 i 花费在与其直接连接的节点 j 的比例关系, $P_{iq}P_{qj}$ 表示与 i 与 j 之间的冗余度。	测度技术在融合过程中发挥技术连接作用的大小。
基于整体测度	KL 散度 ^[41]	$KL(p(x) q(x)) = \sum_x p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)}$	$p(x)$ 为已有的关键词概率分布, $q(x)$ 为一个新的关键词概率分布。	计算一个已有的关键词概率分布遇到一个新的关键词概率分布所经历的信息增益,用于量化分布间的差异。
	多样性指数 ^[42]	$S_{ij} = \frac{C_{ij} + C_{ji}}{\sqrt{TC_i + TR_i} \sqrt{TC_j + TR_j}}$ $diversity = \sum_i \left[\frac{1}{k} \sum_j (1 - S_{ij}) \right] p_i \ln \frac{1}{p_i}$	k 为特征总数, p_i 是第 i 个特征的引用比例, $C_{ij}+C_{ji}$ 是特征 i 和 j 之间的引用总数, TC_i 表示第 i 个特征接收的引用总数, TR_i 表示第 i 个特征给出的引用总数。	结合相似性综合测度多样性。

等^[48]采集 6 个学科的 1389 篇学术论文及其包含的 45496 条引文信息,提取内容中的名词,利用类间分布熵确定学科术语,根据分布情况来测度学科交叉情况。徐庶睿等^[49]基于学术论文引文内容,利用术语集抽取术语和主题,利用主题术语重复率,计算学科间主题学科交叉度,并结合交叉主题分布熵值,划分学科交叉类型。此外,引文分类思想应用于领域交叉评价研究近来也受到关注,如: Su 等^[50]从跨学科动力学视角出发,提出一种基于专利引文分析和负二项回归的技术交叉主题及其演化识别方法,探索跨学科知识如何影响技术发展。

第二类是共被引关系视角的交叉性研究,认为当共被引文献跨多个领域时说明施引文献具有跨领域特征。宋丽萍等^[51]对基于共引网络识别研究领域的相对引用率(Relative Citation Ratio, RCR)进行有效性分析,通过与基于先验分类的学科规范化的引文影响力(Category Normalized Citation Impact, CNCI)、期刊影响因子(Journal Impact Factor, JIF)指标对比,认为 RCR 在交叉学

科论文学术影响力评价方面具有一定的适用性与有效性,为交叉科学研究成果评价提供了新思路。

第三类从知识元视角对跨领域特征进行识别,相对前两类更深入分析文献内容。如 WANG 等^[52]通过挖掘施引和被引文献内容,提取共有的知识单元,进而分析跨学科领域的主题与知识集成特点。

1.2.3 网络分析

领域交叉往往会形成多种要素关系网络,因而网络分析方法在交叉性研究中有丰富应用,包括社会网络分析、复杂网络分析、异构网络分析等。网络分析多与主题聚类并结合运用。如:李长玲等^[53,54]利用复杂网络重叠社群可视化方法对文献关键词进行词频、k-clique 和社群可视化分析,挖掘学科交叉研究主题。孙海生^[55]利用社会网络派系分析,划分文献关键词共现矩阵形成 6 个类簇,作为交叉属性主题。Park 等^[56]提出一种基于专利信息的技术融合机会识别方法,通过有向网络链接预测,预测不同技术领域间潜在的技术知识流(Technological Knowledge Flows, TKFs)方

向与主题,探讨了生物技术与信息技术之间技术融合趋势。王燕鹏等^[57]通过知识聚类识别热点技术、构建复杂网络,利用链路预测方法预测技术结构网络中缺失连边产生连接的可能性,分析热点技术交叉融合促进创新技术形成的现象。

共现网络分析是交叉特性研究的一种重要手段,包括关键词共现、分类号共现、主题共现等,往往与文本挖掘、主题模型方法结合运用。如: Ba 等^[58]通过共词网络分析测度了计算机科学与医学信息学之间的知识集成强度和广度,挖掘两学科间交叉合作主题。陈琼等^[59]利用 LDA 主题模型划分领域主题,引入 DIV 指标比较交叉态势,通过构建学科共现网络识别出以工程学和计算机科学为核心学科的学科交叉主题。Kim 等^[60]基于共词网络节点中心性,分析了交叉主题间的连通性与趋势特点。

异构网络整合了更多相关主题,多模关系分析能挖掘主题间关联关系,从而实现对交叉主题的更精准识别。许海云等^[61]对比投影方法、非投影方法、扩展的多模网络分析和超网络分析,选择对应分析方法作为 2- 模网络社区识别方法,对情

报学异构网络的学科交叉主题进行识别和分析实验,认为实现了更少的信息遗漏。Miyashita 等^[62]以具高度跨学科性的研究项目“智能健康开放创新网络中心”为例,基于该项目 2013—2019 年 281 篇期刊与会议论文产出构建共著和共词网络,通过计算图熵分析了网络结构复杂性变化,通过静态与动态网络分析测度了学科交叉主题的结构特征和演化模式。

网络分析方法在交叉主题识别中的应用特点见表 3。其主要涉及的指标有:中心度^[55],衡量在网络中一个节点与所有其它节点直接相连的程度。

$$C_{Di} = \frac{\sum_{j=1}^g x_{ij}}{g-1}, (i \neq j)$$

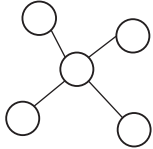
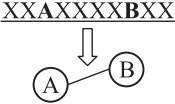
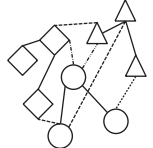
中介中心度^[55],衡量一个顶点出现在其他任意两个顶点之间的最短路径的次数,从而来刻画节点中介性。

$$C_{Bi} = \frac{\sum_{j,k=1}^g sd(j,k,i)}{\sum_{j,k=1}^g (j,k)}, (j \neq k)$$

Adiamic-Adar 指标^[57],用于预测社交网络中的链接。

表 3 网络分析方法应用于技术交叉主题特征识别

Tab.3 Applications of Network Analysis in Topic Identifications of Technology Crossing

方法	原理	主要思路	意义	图例
社会网络分析	通过抽取文献间的引用、合作、共现等关系,利用复杂网络方法对领域交叉进行识别。	分析网络中的路径长度、节点密度、节点连通性等结构性信息,探究网络社区结构。如 CPM 算法 ^[53] 、聚类 ^[57] 、链路预测 ^[56,57] 等。	通过网络结构识别主题节点(簇)间的交叉度、交叉关系、交叠程度,探测链接发生可能性,实现对技术交叉的识别与预测。	
共现网络分析	重点抽取文献中的各种共现关系,多结合文本挖掘方法综合运用,实现聚类、演化等分析。	结合文本挖掘方法,抽取文献中的关键词共现、分类共现、主题共现等各类共现关系构建关联网络,再利用复杂网络方法进行 ^[58-60] 。	从多种特征项共现的角度实现网络,进一步结合文本语义研究实现对技术交叉的识别。	XXXXXXXXBXX ↓ 
异构网络分析	节点以及节点间关系的类型不止一种,即将多元类型与结构的信息联系在一起进行分析。	利用多源异构数据对网络进行补充与链接,结合多模网络、超网络 ^[61] 、动态网络 ^[62] 分析方法探究信息交叉。	可以从多角度、多层次、动态地对网络进行分析,实现对更多隐藏交叉信息的识别。	

$$A(x, y) = \sum_{u \in N(x) \cap N(y)} \frac{1}{\log N(u)}$$

网络密度^[59], 可用于衡量网络中节点间的密集程度以及演化趋势, 网络密度越大, 整体的学科交叉越强。

$$ND = \frac{p}{n(n-1)/2}$$

图熵^[62], 用以衡量知识网络结构的复杂性。

$$H(G) = - \sum_{q_{k,l} \neq 0} q_{k,l} \log q_{k,l}$$

1.2.4 文本挖掘

文本挖掘方法能够深入分析文本内容, 已越来越广泛地应用于交叉主题研究。首先需对文本进行有效拆解, 即对语料进行抽取和再组织, 变成计算机可识别的形式。通常采用文本向量化的方式对文本进行转换, 常用方法如独热编码、词袋模型、TF-IDF 模型、Word2Vec 词向量、预训练词向量等^[63]。主题模型以非监督学习方式对文集的隐含语义结构 (Latent Semantic Structure) 进行聚类, 在交叉性主题挖掘研究中多有应用, 其中以 LDA (Latent Dirichlet Allocation) 主题模型应用研究案例最常见, 如 Feng 等^[64]基于 LDA 主题模型, 结合三维战略图构建交叉学科识别模型。LDA 主题模型应用中衍生了许多改进, 如张振青等^[65]通过主题的交叉特征分析, 构建学科交叉主题测度指标体系, 结合 PhraseLDA 模型识别领域学科交叉主题。基于主题模型, 学者们进一步分析主题演化规律, 开展技术交叉预测, 如 CHEN 等^[66]提出一种基于主题的技术预测方法, 利用主题建模揭示大规模专利权利要求蕴含的特定主题, 生成时间加权主题矩阵和基于主题的一系列趋势系数, 定量估测主题发展趋势、评估各主题对技术领域专利活动的贡献程度。除 LDA 外还有其它主题模型应用于交叉主题识别, 如 Rabitz 等^[67]使用相关主题模型 (Correlated Topic Models, CTMs) 进行文本

级主题关联, 然后采用 Louvain 社区划分识别学科交叉主题。

专利文本聚类也是发掘技术主题分布的有效方法, 根据相似度将文本划分为若干簇, 分析簇内主题之间关联, 进而探测技术交叉主题^[68]。魏建香^[69]利用改进的模糊 C-均值聚类融合算法对高频关键词和突现词进行聚类分析, 进而识别现有和潜在的学科交叉点。

一些学者在主题模型或聚类算法基础上, 进一步结合语义分析法提取识别交叉特征。苗红等^[70]利用主体-动作-客体 (Subject-Action-Object, SAO) 与技术-关系-技术 (Technology-Relationship-Technology, TRT) 结构, 结合 Doc2Vec 与 K-means 改进算法对技术功能进行聚类, 获取面向功能的融合技术解决方法, 结合专家知识界定技术方案、划分技术类别并分析技术融合趋势。王艳等^[71]采用结构主题模型 (Structural Topic Model, STM) 方法从在线评论中提取产品功能需求, 作为技术基因表达的性状特征, 结合语义分析方法, 从专利中提取多领域技术基因, 获取技术基因特征要素并完成基因库构建, 从中识别具有融合倾向的专利技术类别。文本挖掘方法丰富多样, 单靠一种难以完整挖掘文本内容, 因此实践中往往多种方法相结合, 如王雪原等^[72]综合运用网络分析、主题模型、聚类算法等识别具有融合突破趋势的专利群落。表 4 总结了主要方法的应用特点。

1.2.5 知识图谱

知识图谱是一种知识量丰富的异质信息网络, 专门被用来构建知识库并支持决策, 节点类型、关系类型、约束相较于网络都要更加丰富, 能更好地存储、抽取、推理知识, 能更直观地呈现学科与技术领域交叉的结构特征。近年, 知识图谱在交叉主题挖掘中的应用逐渐增多。饶雷振等^[73]

表 4 文本挖掘方法应用于技术交叉主题特征识别

Tab. 4 Applications of Text Mining in Topic Feature Identifications of Technology Crossing				
类型	特点	主要方法	原理	适用性
主题模型演化	主题模型丰富多样,研究成熟。但对数据预处理要求较高,对深层语义理解不足。	LDA ^[64-66]	基于词袋模型计算文档主题概率。	可以自动挖掘主题,原理简单,应用范围较广。
		CTM ^[67]	引入协方差矩阵。	可以挖掘主题间的相互关系。
		STM ^[71]	基于词向量的文本生成模型,结合协变量信息确定主题。	考虑了文档以外的元数据,更利于挖掘主题间相互关系,实现交叉主题的认识。
专利文本聚类	聚类算法较为丰富,依赖于相似度指标。只表征文本的相似特征,常与其它方法结合应用。	K-means ^[70]	将数据集划分为 k 个簇,使得每个数据点都属于最近的簇,并且簇的中心是所有数据点的平均值。	可基于样本直接进行聚类,具有迭代优化功能,聚类速度较快,较为依赖样本。
		FCM ^[69]	基于隶属度来确定每个样本所属类别的模糊聚类方法。	边界处理效果较好。但容易出现局部最优,收敛较慢。
		DSM ^[72]	基于矩阵中各指标依赖强度进行聚类。	可清晰展示、分析要素间依赖关系,能有效反映类内指标间的强依赖耦合关系。
结合语义分析	对语义和语境关注度较高。但运算效率较低,可读性较差。	SAO ^[70]	显示包含的技术主题及相互之间的关系。	考虑了技术属性间的内在联系。
		TRT ^[70]	分析提取两个技术间的关系。	考虑了技术之间的关系。

通过构建关键词共现聚类图谱与时序图谱,发现了环境科学、微生物学、生态学等相关领域学科的进一步交叉与融合。王思茗等^[74]基于领域知识图谱提取图情领域的学科交叉信息,构建领域学科交叉网络,结合地域信息分析学科交叉全貌和地区差异。商宪丽^[75]利用社会网络分析方法,基于交叉学科内部和相关基础学科构建主题引用网络,借助主题层次知识传播图谱,分析交叉学科间的知识流动性,为学科交叉主题识别提供了一定思路。曹树金等^[76]选取图书馆学与情报学、传播学、计算机科学、科学学领域的中文学术论文为样本,利用 SciAIEngine 平台抽取科研实体及实体关系,构建领域知识图谱,通过相似度计算发现不同学科之间潜在的知识关联,构建跨学科融合知识图谱,提供科研创新知识和情报。

1.2.6 机器学习

机器学习方法便于处理海量文本数据,近年在交叉主题研究中愈发受关注,机器学习多与主题挖掘、网络分析等方法结合运用,主要分为传统方法与深度学习方法两类。

应用传统机器学习方法的相关研究如:综合利用专利分类网络结构特征与文本语义特征,构建专利分类间多种相似性指标;利用随机森林模型学习不同指标的权重和贡献,计算技术融合概率,实现技术融合关系预测及其价值评估^[77];基于专利分类序列和文本语义表示,使用支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 对技术特征融合进行识别^[78];应用 k 近邻算法 (K-Nearest Neighbor) 与朴素贝叶斯 (Naive Bayes, NB) 以及 SVM 的组合模型对融合技术进行预测,对比分析不同模型的效果^[79]等。

应用深度学习方法开展的技术交叉识别研究如:马建红等^[80]利用卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN) 对专利功效特征进行提取,进而实现专利文本跨领域聚类;祝娜等^[81]结合技术共类与长短期记忆网络 (Long Short-Term Memory, LSTM) 模型,实现对技术融合的预测;He 等^[82]提出一个用于发现学科交叉的 Transformer 双向编码器表示 (Bidirectional Encoder Representations from Transformers for Interdisciplinary Research Discovery,

IRD-BERT)神经网络模型,用于发现基于预训练BERT模型的学科交叉研究,根据向量空间中的关键词分布,识别出具有语义异常的关键词进而识别学科交叉研究主题。两类方法各有优劣(表5),实践中应结合数据情况加以应用。

1.3 关联应用研究

1.3.1 弱信号识别

学科交叉或技术交叉初期,领域间联系可能较弱,受关注较少,因此有效探测弱信号、弱关系有助于及早识别交叉信号,相关研究逐渐受到学界重视,在学科交叉探测研究中常与网络方法结合运用,开展基于网络结构的弱信号识别^[83-85]。专利技术与产业分析中,弱信号研究主要应用于早期技术识别或规律探寻,很少用于技术交叉研究。如:翟东升等^[86]基于TRIZ理论,抽取专利功能、科学效应等特征,通过将“功能”与“科学效应”进行组合,根据专利数量评判信号强弱,再结合专利申请机构与功效等更多信息实现新兴技术弱信号识别;苗红等^[87]结合技术饱和度与相对度中心性构建产业融合弱信号识别模型,挖掘产业

融合弱信号的规律性特征;贾军等^[88]从知识流动视角提出新兴产业核心技术弱信号识别方法,识别太阳能发电核心技术弱信号。

1.3.2 突破性识别

突破性也是技术交叉过程中的特点之一,刘国巍等^[89]以生物医药产业发明专利数据为样本,结合社会网络分析发现跨学科知识成为突破技术演化后期主要扩散源。施锦诚等^[90]运用德温特专利网络分析方法,发现技术会聚视角下不同关键核心技术交叉的不同特点。一些学者也利用技术交叉特征反向寻找突破性技术。如陈虹枢等^[91]基于文本挖掘与复杂网络方法,综合突破性创新的新颖性、突变性、影响力和学科交叉性特征对突破性创新主题进行识别。

1.3.3 颠覆性识别

知识交叉打破了知识的边界,为新知识产生提供可能,奠定了突破性、颠覆性知识生成的基础,为解决复杂问题带来新思路、新方法^[92,93],因此颠覆性技术往往也具有交叉属性,并极大可能由突破性技术发展而来^[94]。储节旺等^[95]利用专利

表 5 机器学习方法应用于技术交叉主题特征识别

Tab.5 Applications of Machine Learning in Topic Feature Identifications of Technology Crossing				
类型	特点	主要方法	原理	适用性
传统机器学习	需要生成人工特征,对数据处理要求较高,使用较为灵活,对于复杂关系的挖掘有限,对特定样本效果较好。	SVM ^[78,79]	构建特征空间上间隔最大的线性分类器,转换为一个凸二次规划问题。	泛化能力较好,支持多种内核函数,适用于非线性,高维数等问题。
		KNN ^[79]	通过 K 个最邻近的样本进行分类。	原理简单,但在需要分类时才进行分类,依赖样本数量与参数。
		NB ^[79]	利用贝叶斯定理预测样本类别。	有较为坚实的理论基础和稳定的分类效率,但要求较强的独立性假设前提。
		随机森林 ^[77]	是决策树算法的迭代,以实例为基础的归纳学习推理出决策树表示形式的分类规则。	通过属性和类别间的关系,预测未知数据的类别。
深度学习	适用于复杂与大规模文本数据,不需要人工特征,对模型预训练要求较高,可以挖掘高维、非线性等复杂关系。	CNN ^[80]	使用卷积层提取特征,通过最大池化选择显著特征。	可以捕获文本中的不同特征,且可以并行处理文本,处理速度快,适用于大规模文本任务。
		LSTM ^[81]	结合 CNN 和循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)优点,使用两个独立的 LSTM 网络,各自从左到右和从右到左处理文本。	可以捕获更完整的上下文信息,处理长序列时更有效。
		BERT ^[82]	通过使用 Transformer 中的 Self-Attention 机制,使得每个单词都可以与其他单词进行交互。	可以捕获更丰富的上下文信息,在自然语言处理任务中表现较佳。

分析方法、主题模型识别颠覆性技术,发现未来新兴技术可能是多项关联技术的融合,并利用复杂网络方法预测技术之间潜在关联进而预测技术交叉颠覆性技术。王英等^[96]基于科技文献计量方法,发现数字孪生颠覆性技术全面及持续扩展表现为多学科技术融合发展的重要特征。

作为颠覆性技术的特点之一,一些学者将技术交叉也作为颠覆性技术识别的指标之一^[97],如白光祖等^[98]从学科知识交叉识别入手,识别外部潜在颠覆性技术,在纤维素生物降解预处理领域得到实证;Munan Li 等^[99]通过共引分析研究突破性技术跨学科性。

从技术发展进程来看,技术弱信号、技术突破、颠覆性技术三者之间存在一些必然联系(图3)。弱信号识别有助于及时发掘早期潜在交叉主题,部分潜在技术交叉形成小突破,多个小突破累积可能促使技术革新,形成突破性技术^[100,101]。突破性技术若具备对主流技术的替代性,则可能发展成为颠覆性技术,进而替代当前主流技术成为新的主流技术^[102,103];若具备对主流技术的补充性,则可能成为主流技术的一部分,发展为增强型

技术^[102];若与主流技术关联不大,则独自渐进发展为渐进式技术^[103]。因此可以通过探测弱信号、突破性、颠覆性等技术特点挖掘技术交叉特征,也可以将交叉特性作为突破性、颠覆性技术主题识别依据之一。

2 研究现状述评

总体来看,当前技术交叉主题特征识别相关研究主要呈现如下特点。

一是从早期的形态特征层面计量测度转变到内容特征层面的文本主题挖掘。早期研究主要关注统计时间窗内的词频数量变化,结合学科或技术领域分类属性开展分析。这类方法简便易懂,但难以揭示领域的知识内容与关联关系,于是内容分析相关方法受到关注,并逐步发展成为研究重点。

二是基于技术交叉特性的关联分析、文本挖掘类方法成为研究主流。基于引文、主题等特征形成的多种关联关系,应用于对特征之间交叉作用的挖掘与识别。结合网络分析、文本挖掘、主题模型、知识图谱等相关方法的综合应用成为热点,

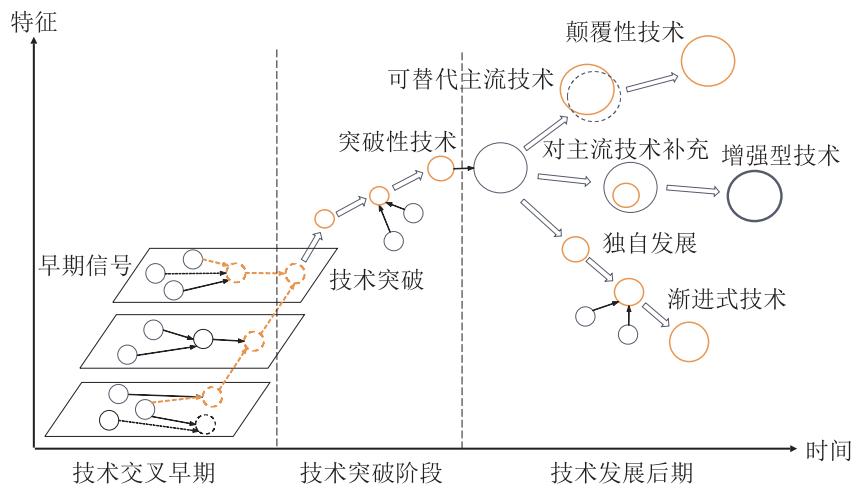


图3 基于技术交叉的技术弱信号、突破性与颠覆性识别

Fig. 3 Identification of Weak Signals, Breakthroughs and Disruptives Based on Technology Crossing

为技术交叉主题特征识别研究提供了更丰富的研究视角。近年,机器学习方法的应用引起关注,在大规模专利文本分类上取得一些有效应用,能够较好地识别出大规模数据中的复杂关系,为技术融合、交叉特征识别提供新思路新方法。

三是多种方法与技术的综合运用颇受学界关注。随着技术不断进步和发展,新的方法和工具不断涌现,一定程度上弥补了既往方法的不足,提高了研究效率与质量。但研究方法各有优劣,适用于不同需求目的和研究场景(表 6)。尽管新方法层出不穷,但传统方法基础扎实、实践检验丰富、可靠性强,在实际应用中仍发挥着不可替代作用,例如将传统计量指标融入新兴技术交叉性特征测度参数中,形成技术交叉测度识别的综合性方法框架。此外,大规模的技术交叉识别研究往往是一项复杂的系统工程,选择多种适宜的研究方法与工具进行综合运用,才能更好地获取有价值的情报。

3 未来研究展望

综合上述研究,本文对未来技术交叉主题识别研究发展方向提出 4 点思考。

研究视角层面,应深入微观层面的主题特征识别,尤其是针对文本的语法、语义、关系敏感度研究将受到学界日益关注。未来应进一步探究交叉主题识别精细度、精准性,研究如何更好地量化主题间交叉作用,实现对主题关联关系的深层揭示,提高识别结果的主题表征力。此外,关注早期交叉信号的捕捉力度,加强弱关系、弱信号、突破性与颠覆性识别研究,重点探究有效信息增强、杂音项剥离以及多元关系融合,构建高阶融合模型增强早期信号的融合汇聚,使弱关联关系显性化,提高弱信号识别精度,从而有效监测与捕捉早

期信号,尽早识别技术主题交叉苗头及预测发展趋势。

研究方法层面,多种方法的综合性创新运用是重要手段。在语料构建阶段,传统方法如关键词抽取、引文分析等仍发挥重要作用,基于这些语料进一步结合潜在语义、主题聚类、复杂网络、知识图谱、机器学习等方法提取交叉特征,实现语料库和技术交叉测度的方法融合。关于交叉测度方法,目前多关注主题间相互关系,未来可从主题贡献度视角进一步区分语料维度,增强识别方法的语义性,实现对词语深层次语义关系的挖掘,获得更立体的分析结果。此外,以关键词为核心的主题识别方式在语义表达上存在盲点和筛选及降维困难,机器学习方法有助于提升语义分析力和识别粒度。随着机器学习方法不断演化更新,可结合文本语义关系、内容语境实现更精确的关系挖掘和更细粒度的主题识别。同时,需改进这类方法对数据有一定假设要求、解释性不足、操作较复杂等缺陷,如采取多模型耦合结构、优化科技文本到数学向量的映射、提高模型解释性等,探索利用模式识别领域知识解决相关问题。

数据对象层面,多元数据融汇是研究热点与发展趋势。现有研究主要采用期刊论文、会议论文、专利和基金项目等白色与灰色文献数据,各类数据融合的维度、作用的时滞性是目前研究重点。多元异质数据如多维数据、多维数据融合、多模态数据分析研究及应用可进一步丰富文本特征项,增强对文本内容的表征力,进而为挖掘潜在技术交叉特征提供基础。多元异质数据分布往往具有不平衡性,多数情况下不同维度变量具有不同量纲,为变量间关系处理带来难度,在多模技术数据交叉融合时应结合具体计量分析问题中不同维度(模)之间的关联关系,进一步提高数据耦合度。

表 6 交叉主题特征识别方法比较

Tab.6 Comparison of Methods for Topic Feature Identification of Crossings

方法	原理	主要特点	优劣
词频分析	研究时间窗内的词频变化趋势及其词义特征。	· 划分时间片段,测度对比每个时间片的词频变化; · 构建突发性计算方法析出突发词集; · 侧重识别突发词的学科或技术属性,揭示近期研究热点。	· 操作简便,易于理解; · 词频阈值设定具有主观性;高低频关键词未必代表主题联系;不能从语法、语义层面揭示主题词重要性程度。
词权重	按照词对特定文本环境的主题贡献度赋以权重,获得词集。	· 建立文本集,确定词的特征权重, · 获得词的突发特征值并形成突发词集。	· 能综合多类型的突发特征; · 计算相对复杂,特征权重阈值设定需借助人为经验,研究结果存在不确定性。
引文分析	研究引文类型、引文内容、引文关系等特点,发掘交叉主题识别线索。	· 基于文献引文建立语料库; · 发掘高被引文献,基于引文关系进一步进行语义与内容挖掘; · 结合文本挖掘、主题聚类等方法,识别具有交叉属性的主题特征项。	· 操作简便,结果易理解; · 引文关系形成时间较长;引文动机影响主题关联关系的准确性与客观性;缺乏深层语义分析。
网络分析	基于关键词、技术、人员等要素间关系构建关联网络,分析结构特征与演化模式。	· 基于词共现、引用、合著等关系构建不同关联网络; · 与主题聚类、社区划分、链路预测、文本挖掘、可视化等方法结合应用,识别具有交叉、突发特性的主题。	· 便于耦合复杂关系,多元异质数据融合处理具有优势; · 要素共现未必代表主题之间存在语义联系;侧重结构性分析,容易忽视内容分析;容易忽略“孤立点”“离散点”。
主题模型	利用词语概率分布建模,识别大体量离散文档中词集视为主题表示。	· 建立主题词表形成语料库; · 建模获取主题分布和确定主题数量; · 确定最优主题与最优聚类。	· 利于数据分类与降维,可识别文本潜在语义关系; · 对于词间语义关系不敏感,需较强专业领域知识背景与大量人工干预;模型复用程度较低;主题识别结果准确性与精细度不足。
文本挖掘	基于文本特征挖掘内在语义关系,通过不同特征间的相互关联识别技术交叉。	· 在主题模型基础上分析语义结构,更深层次理解特征间关系; · 通常结合主题模型、聚类等多种方法综合运用。	· 无需依赖现有学科或技术分类标准,便于深层挖掘语义关联,识别相对细粒度主题; · 缺乏针对主题交叉特征的算法改进。
弱信号、弱关系识别	将基础集转化为离散信号,筛除周期性无价值词汇,探究其发生关联的可能。	· 基于非高频特征构建特征关联网络; · 对链路进行预测,识别可能发生的技术交叉。	· 排除了词频增量研究下词集的周期词; · 计算方法复杂,杂音消除有限,语义覆盖有局限。
突破性识别	重点关注短期内有突发趋势的特征,并对其趋势进行预测。	· 词频增量获得语料库; · 将词集的频域轨迹转化为离散信号,采用傅里叶变化和频域分析分离周期性不重要词; · 结合突发词项和突发时序,采用词共现和层次聚类方法获得突发词。	· 丰富了技术交叉视角,有助于发现新兴技术交叉主题; · 计算方法复杂,具有突破性不一定具有交叉性,杂音消除有限,语义覆盖有局限。
颠覆性识别	重点关注突破性技术交叉趋势,对颠覆性进行预测。	· 基于突破性技术交叉获取特征集; · 结合多种方法探究对当前技术的替代性,分析颠覆性趋势。	· 所识别的颠覆性技术交叉具有较强的现实意义; · 计算方法复杂,具有颠覆性不一定具有交叉性,杂音消除有限,语义覆盖有局限。
知识图谱	对数据进行知识抽取,构建跨学科知识图谱,基于实体属性间的关系发现技术交叉主题。	· 可基于大规模数据集进行知识抽取; · 知识间的相互关系可较好地可视化; · 特征间相互关系清晰,识别结果解释性强。	· 可结合数据库应用与较大规模数据,工具丰富,操作便捷,结构展示清晰; · 对数据抽取要求较高,不同方法的知识抽取结果可能不同,对多维复杂数据的处理效果可能较差。
机器学习	结合人工特征或预训练特征挖掘数据潜在关系,识别深层次的技术交叉特征。	· 抽取人工特征或利用大规模数据对模型进行预训练; · 将模型应用于样本数据,可以不断调参优化; · 对于大规模数据处理较快,可识别复杂关系。	· 方法丰富,较好利用了统计学相关原理,实现机器对交叉特征的主动发现,便于处理大规模复杂数据; · 部分方法原理解释性较差,对样本数据规模、特征、模型与样本的匹配度要求较高。

此外,多模数据交叉共现的可视化也有很大改进空间,目前多以网络形式展现,未来可通过多种可

视化方式展示更多维度的信息及关联。

数据规模层面,现有研究多面向小规模数据,

难以识别潜在复杂的技术交叉关系,未来可进一步关注多领域异构大数据的融合与应用关键技术。大数据具备体量庞大、类型繁多、多源异构、质量不一、动态变化等特点,导致数据统一表示缺乏、冲突频繁出现。如何准确高效地利用海量的多源异构数据,从中挖掘丰富知识资源并加以深度分析应用,是当前大数据背景下的难题,亟需能够集成多源数据、消除结构差异、提升数据质量与完整性、挖掘数据有效关联、提高数据可分析性的解决方案。多领域异构数据融合将数据进行统一表示,通过融合过程的追溯、检索和推理产生新知识,是人工智能特别是自然语言处理领域的重要研究内容,是构建知识库、推进知识库自主学习和扩充的重要手段,具有广泛的应用需求。未来重点研究的关键技术主要包括异构数据的统一表示与融合过程追溯、数据冲突解决及真值发现、融合数据的分析和处理等。

参考文献

- [1] NEWELL W H, WENTWORTH J, SEBBERSON D. A Theory of Interdisciplinary Studies [J]. Issues in Interdisciplinary Studies, 2001, 19(1): 1-25.
- [2] COY W. Between the Disciplines [J]. ACM SIGCSE Bulletin, 2004, 36(2): 7-10.
- [3] 樊春良, 樊天. 国外学科交叉研究的发展趋势及启示[J]. 中国科学基金, 2019, 33(5): 446-452. (FAN Chunliang, FAN Tian. The Trends of Development Interdisciplinary Research Abroad and Its Inspiration [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(5): 446-452.)
- [4] 路甬祥. 学科交叉与交叉科学的意义[J]. 中国科学院院刊, 2005(1): 58-60. (LU Yongxiang. The Significance of Interdisciplinary and Interdisciplinary Science [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2005 (1): 58-60.)
- [5] CHETTIPARAMB A. Interdisciplinarity: a Literature Review [R]. Southampton: The Interdisciplinary Teaching and Learning Group, Subject Centre for Languages, Linguistics and Area Studies, School of Humanities, University of Southampton, 2007.
- [6] UZZI B, MUKHERJEE S, STRINGER M, et al. A Typical Combinations and Scientific Impact [J]. Science, 2013, 342(6157): 468-472.
- [7] PORTER A, CHUBIN D. An Indicator of Cross-Disciplinary Research [J]. Scientometrics, 1985, 8(3-4): 161-176.
- [8] 陈红兵, 陈昌曙. 关于“技术是什么”的对话[J]. 自然辩证法研究, 2001(4): 16-19. (CHEN Hongbing, CHEN Changshu. Dialogue on “What is Technology” [J]. Studies in Dialectics of Nature, 2001(4): 16-19.)
- [9] 钱学森. 现代科学的结构——再论科学技术体系学[J]. 哲学研究, 1982(3): 19-22. (QIAN Xuesen. The Structure of Modern Science: Rediscussing the Systematics of Science and Technology [J]. Philosophical Research, 1982 (3): 19-22.)
- [10] 钱学森. 论技术科学[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 511-519. (QIAN Xuesen. Discussing the Technical Science [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(6): 511-519.)
- [11] 张华夏, 张志林. 从科学与技术的划界来看技术哲学的研究纲领[J]. 自然辩证法研究, 2001(2): 31-36. (ZHANG Huaxia, ZHANG Zhilin. The Research Program of Philosophy of Technology from the Point of View of Demarcation between Science & Technology [J]. Studies in Dialectics of Nature, 2001(2): 31-36.)
- [12] 张爱宏. 二十一世纪医学影像学科的发展需要理、工、医紧密结合[J]. 中国医学影像技术, 2000(1): 1. (ZHANG Aihong. The Development of Medical Imaging Disciplines in the 21st Century Requires the Close Integration of Science, Engineering

- and Medicine [J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2000(1): 1.)
- [13] 张丽. 智能汽车带来的新技术、新业态和新模式 [J]. 现代雷达, 2021, 43(12): 109-110. (ZHANG Li. New Technologies, New Business Formats and New Models Brought by Intelligent Vehicles [J]. Modern Radar, 2021, 43(12): 109-110.)
- [14] 李佳蕾, 安培浚, 肖仙桃. 学科交叉主题识别方法研究综述 [J]. 数据分析与知识发现, 2023, 7(4): 1-15. (LI Jialei, AN Peijun, XIAO Xiantao. Review of Interdisciplinary Topic Identification Methods [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2023, 7(4): 1-15.)
- [15] 许海云, 尹春晓, 郭婷, 等. 学科交叉研究综述 [J]. 图书情报工作, 2015, 59(5): 119-127. (XU Haiyun, YIN Chunxiao, GUO Ting, et al. Interdisciplinary Research Review [J]. Library and Information Service, 2015, 59 (5): 119-127.)
- [16] 李姝影, 方曙. 测度技术融合与趋势的数据分析方法研究进展 [J]. 数据分析与知识发现, 2017, 1(7): 2-12. (LI Shuying FANG Shu. Review of Data Analysis Methods in Measuring Technology Fusion and Trend [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2017, 1(7): 2-12.)
- [17] 陈亮, 张志强, 尚玮姣. 技术融合研究进展分析 [J]. 情报杂志, 2013, 32(10): 99-105. (CHEN Liang, ZHANG Zhiqiang, SHANG Weijiao. A Review of Research on Technological Convergence [J]. Journal of Intelligence, 2013, 32 (10): 99-105.)
- [18] 姚茹, 王晋飞, 邬金鸣, 等. 潜在学科交叉主题识别方法研究 [J]. 图书情报工作, 2023, 67(15): 80-93. (YAO Ru, WANG Jinfei, WU Jinming, et al. Research on Potential Interdisciplinary Topic Identification Method [J]. Library and Information Service, 2023, 67 (15): 80-93.)
- [19] 张琳, 彭玉杰, 杜会英, 等. 技术会聚: 内涵、现状与测度——兼论与学科交叉的关系 [J]. 图书情报工作, 2021, 65(1): 91-101. (ZHANG Lin, PENG Yujie, DU Huiying, et al. Technology Convergence: Connotation, Status, Measurement, and the Relationship with Interdisciplinary Science [J]. Library and Information Service, 2021, 65 (1): 91-101.)
- [20] 苗红, 秦立芳, 黄鲁成, 等. 基于专利交叉影响法的NBIC会聚趋势研究 [J]. 科技进步与对策, 2013, 30(20): 94-98. (MIAO Hong, QIN Lifang, HUANG Lucheng, et al. Study on the Converging Trend of NBIC Based on Patent-Based Cross Impact Analysis [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30 (20): 94-98.)
- [21] 汤文仙. 技术融合的理论内涵研究 [J]. 科学管理研究, 2006(4): 31-34. (TANG Wenxian. Exploration on Theory of Technology Convergence [J]. Scientific Management Research, 2006, (4): 31-34.)
- [22] KODAMA F. MOT in Transition: from Technology Fusion to Technology-service Convergence [J]. Technovation, 2014, 34(9): 505-512.
- [23] 孙吉胜, 何伟. 跨学科借鉴与国际关系理论的发展和创新 [J]. 国际关系研究, 2019(4): 49-66. (SUN Jisheng, HE Wei. The Development and Innovation of Interdisciplinary Reference and International Relations Theory [J]. Journal of International Relations, 2019 (4): 49-66.)
- [24] 刘五景, 金林南. 借鉴还是移植: 思想政治教育学科建设之思 [J]. 探索, 2012(1): 122-126. (LIU Wujing, JIN Linnan. Learning or Transplanting: Thoughts on the Construction of Ideological and Political Education Disciplines [J]. Probe, 2012 (1): 122-126.)
- [25] 彭志国. 技术集成的实证研究——以Iansiti对美日半导体行业的研究为例 [J]. 中国软科学, 2002(12): 95-100. (PENG Zhiguo. The Empirical Study of Technology Integration-Based on the Lansiti's Study of the Semiconductor Industries of U.S. and Japan [J]. China Soft Science, 2002(12): 95-100.)

- [26] FAN Jianmin, HOU Guangming, WANG Zhaohua. Study on Risk Governance of Core Technology Integration in High-tech Enterprises [C]//LI J L. Proceedings of 2008 International Conference on Risk and Reliability Management, Vols I and II. Toronto: Universe Academic Press Toronto, 2008: 447-452.
- [27] KOSTOFF R N, BOYLAN R, SIMONS G R. Disruptive Technology Roadmaps [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2004, 71(1): 141-159.
- [28] 赵建, 梁爽. 关键核心技术识别方法研究进展 [J]. 情报杂志, 2024, 43(4): 68-77. (ZHAO Jian, LIANG Shuang. Research Progress on Identification Methods of Key Core Technologies [J]. Journal of Intelligence, 2024, 43(4): 68-77.)
- [29] RIP A, COURTIAL J. Co-word Maps of Biotechnology: An Example of Cognitive Scientometrics [J]. Scientometrics, 1984, 6(6): 381-400.
- [30] CHEN Kuanghua, LIANG Chiungfang. Disciplinary Interflow of Library and Information Science in Taiwan [J]. Journal of Library and Information Studies, 2004, 2(2): 31-55.
- [31] STIRLING A. Diversity and Ignorance in Electricity Supply Investment: Addressing the Solution Rather Than the Problem [J]. Energy Policy, 1994, 22(3): 195-216.
- [32] CHANG Yuwei, HUANG Muhsuan. A Study of the Evolution of Interdisciplinarity in Library and Information Science: Using Three Bibliometric Methods [J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2012, 63(1): 22-33.
- [33] CASSI L, CHAMPEIMONT R, MESCHEBA W, et al. Analysing Institutions Interdisciplinarity by Extensive Use of Rao-stirling Diversity Index [J]. PLOS ONE, 2017, 12(1): 1-21.
- [34] LEYDESDORFF L, RAFOLS I. Indicators of the Interdisciplinarity of Journals: Diversity, Centrality, and Citations [J]. Journal of Informetrics, 2011, 5(1): 87-100.
- [35] 郭婷, 许海云, 岳增慧, 等. 情报学学科交叉态势可视化研究 [J]. 情报理论与实践, 2015, 38(9): 94-99. (GUO Ting, XU Haiyun, YUE Zenghui. Research on Visualization of Interdisciplinary Development Status in Information Science [J]. Information Studies: Theory & Application, 2015, 38(9): 94-99.)
- [36] 陈赛君, 陈智高. 领域交叉性分析指标与方法新探及其实证研究 [J]. 情报学报, 2013, 32(11): 1184-1195. (CHEN Saijun, CHEN Zhigao. New Exploration and Empirical Research on the Indicator and Methods for Analyzing Interdisciplinarity in Scientific Research [J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2013, 32(11): 1184-1195.)
- [37] 许海云, 郭婷, 岳增慧, 等. 基于TI指标系列的情报学学科交叉主题研究 [J]. 情报学报, 2015, 34(10): 1067-1078. (XU Haiyun, GUO Ting, YUE Zenghui, et al. Study on the Interdisciplinary Topics of Information Science Based on TI Index Series [J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2015, 34(10): 1067-1078.)
- [38] 董坤, 许海云, 罗瑞, 等. 基于科技文献内容分析的多维学科交叉主题识别方法研究 [J]. 情报理论与实践, 2018, 41(5): 131-136. (DONG Kun, XU Haiyun, LUO Rui, et al. Research on Multi-dimensional Interdisciplinary Topics Identification Method Based on Scientific Literature Contents Analysis [J]. Information Studies: Theory & Application, 2018, 41(5): 131-136.)
- [39] 黄菡, 王晓光, 王依蒙. 复杂网络视角下的研究主题学科交叉测度研究 [J]. 图书情报工作, 2022, 66(19): 99-109. (HUANG Han, WANG Xiaoguang, WANG Yimeng. Research on the Interdisciplinary Measurement of Research Topics from the Perspective of Complex Networks [J].

- Library and Information Service, 2022, 66(19): 99-109.)
- [40] 苗红, 赵润博, 黄鲁成. 老年可穿戴技术融合演化特征研究[J]. 情报杂志, 2019, 38(6): 64-71. (MIAO Hong, ZHAO Runbo, HUANG Lucheng. Research on the Convergence Evolution Characteristics of the Elderly Wearable Technology [J]. Journal of Intelligence, 2019, 38(6): 64-71.)
- [41] 李丽霞, 任卓明, 张子柯. 基于关键词的知识图谱挖掘信息技术学科演化趋势[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(5): 780-787. (LI Lixia, REN Zhuoming, ZHANG Zike. Trend of Information Technology Discipline Based on Mining the Keywords of Knowledge Graph [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(5): 780-787.)
- [42] JANG W, KWON H, PARK Y, et al. Predicting the Degree of Interdisciplinarity in Academic Fields: the Case of Nanotechnology [J]. Scientometrics, 2018, 116(1): 231-254.
- [43] 索传军, 王春明. 基于引文的知识转移类型与方式分析[J]. 情报理论与实践, 2023, 46(4): 114-121. (SUO Chuanjun, WANG Chunming. Analysis of Knowledge Transfer Types and Modes Based on Citations [J]. Information Studies: Theory & Application, 2023, 46(4): 114-121.)
- [44] 刘冬东. 新兴交叉主题识别与引文扩散影响研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021. (LIU Dongdong. The Identification and Citation Diffusion Impact of the Emerging Interdisciplinary Topics: A Case Study of Computational Biology [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.)
- [45] ZHANG Lin, ROUSSEAU R, GLÄNZEL W. Diversity of References as an Indicator of the Interdisciplinarity of Journals: Taking Similarity between Subject Fields into Account [J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2016, 67(5): 1257-1265.
- [46] CHI R, YOUNG J. The Interdisciplinary Structure of Research on Intercultural Relations: a Co-citation Network Analysis Study [J]. Scientometrics, 2013, 96(1): 147-171.
- [47] 陈红丽, 张自然, 叶佳鑫, 等. 基于ESI数据的学科交叉宏观态势测度研究[J]. 情报科学, 2021, 39(1): 96-103. (CHEN Hongli, ZHANG Ziran, YE Jiaxin, et al. Research on the Measurement in Interdisciplinary Macro Situation Based on ESI Data [J]. Information Science, 2021, 39(1): 96-103.)
- [48] 章成志, 徐庶睿, 卢超. 利用引文内容监测多学科交叉现象的方法与实证[J]. 图书情报工作, 2016, 60(19): 108-115. (ZHANG Chengzhi, XU Shurui, LU Chao. Using Citation Content for Interdisciplinary Phenomenon [J]. Library and Information Service, 2016, 60(19): 108-115.)
- [49] 徐庶睿, 章成志, 卢超. 利用引文内容进行主题级学科交叉类型分析[J]. 图书情报工作, 2017, 61(23): 15-24. (XU Shurui, ZHANG Chengzhi, LU Chao. Using Citation Contents for the Interdisciplinary Type Analysis at a Topical Level [J]. Library and Information Service, 2017, 61(23): 15-24.)
- [50] SU H N, MOANIBA I M. Investigating the Dynamics of Interdisciplinary Evolution in Technology Developments [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2017, 122: 12-23.
- [51] 宋丽萍, 王建芳, 付婕, 等. 以共引网络识别研究领域的引文评价方法有效性分析[J]. 图书情报工作, 2021, 65(23): 100-105. (SONG Liping, WANG Jianfang, FU Jie, et al. Analysis on that Effectiveness of Citation Evaluation Methods in the Research Field Identification by Co-citation Network [J]. Library and Information Service, 2021, 65(23): 100-105.)
- [52] WANG Shiyun, MAO Jin, CAO Yujie, et al. Integrated Knowledge Content in an Interdisciplinary Field: Identification, Classification, and Application

- [J]. *Scientometrics*, 2022, 127(11): 6581-6614.
- [53] 李长玲, 刘非凡, 郭凤娇. 运用重叠社群可视化软件CFinder分析学科交叉研究主题——以情报学和计算机科学为例[J]. *图书情报工作*, 2013, 57(7): 75-80. (LI Changling, LIU Feifan, GUO Fengjiao. Analysis on Interdisciplinary Research Topics with Cinder of Overlapping Communities Visualization Software: Taking the Information Science and Computer Science for Example [J]. *Library and Information Service*, 2013, 57(7): 75-80.)
- [54] 李长玲, 郭凤娇, 魏绪秋. 基于时序关键词的学科交叉研究主题分析——以情报学与计算机科学为例[J]. *情报资料工作*, 2014(6): 44-48. (LI Changling, GUO Fengjiao, WEI Xuqiu. Timing Keywords: Based Interdisciplinary Research Topics Analysis: A Case Study of Information Science and Computer Science [J]. *Information and Documentation Services*, 2014(6): 44-48.)
- [55] 孙海生. 情报学跨学科知识引用实证研究[J]. *情报杂志*, 2013, 32(7): 113-118, 100. (SUN Haisheng. Empirical Study on Knowledge Citations of Other Disciplines to Information Science [J]. *Journal of Intelligence*, 2013, 32(7): 113-118.)
- [56] PARK I, YOON B. Technological Opportunity Discovery for Technological Convergence Based on the Prediction of Technology Knowledge Flow in a Citation Network [J]. *Journal of Informetrics*, 2018, 12(4): 1199-1222.
- [57] 王燕鹏, 韩涛, 陈芳. 融合文献知识聚类 and 复杂网络的关键技术识别方法研究[J]. *图书情报工作*, 2020, 64(16): 105-113. (WANG Yanpeng, HAN Tao, CHEN Fang. Identification of Key Technologies Based on Literature Knowledge Clustering and Complex Network [J]. *Library and Information Service*, 2020, 64(16): 105-113.)
- [58] BA Zhicao, CAO Yujie, MAO Jin, et al. A Hierarchical Approach to Analyzing Knowledge Integration Between Two Fieldsa Case Study on Medical Informatics and Computer Science [J]. *Scientometrics*, 2019, 119(3): 1455-1486.
- [59] 陈琼, 朱庆华, 闵华, 等. 基于领域主题的学科交叉特征识别方法研究——以医学信息学为例[J]. *现代情报*, 2022, 42(4): 11-24. (CHEN Qiong, ZHU Qinghua, MIN Hua, et al. Research on Method of Recognizing Interdisciplinary Features Based on Domain Topics [J]. *Journal of Modern Information*, 2022, 42(4): 11-24.)
- [60] KIM H, PARK H, SONG M. Developing a Topic-Driven Method for Interdisciplinarity Analysis [J]. *Journal of Informetrics*, 2022, 16(2): 101255.
- [61] 许海云, 董坤, 刘昊, 等. 基于异构网络的学科交叉主题发现方法[J]. *情报科学*, 2017, 35(6): 130-137, 153. (XU Haiyun, DONG Kun, LIU Hao, et al. Interdisciplinary Topics Discovery Method Based on Heterogeneous Networks [J]. *Information Science*, 2017, 35(6): 130-137, 153.)
- [62] MIYASHITA S, SENGOKU S. Scientometrics for Management of Science: Collaboration and Knowledge Structures and Complexities in an Interdisciplinary Research Project [J]. *Scientometrics*, 2021, 126(9): 7419-7444.
- [63] 汪大锬, 化柏林. 政策文本量化研究综述[J]. *科技情报研究*, 2023, 5(1): 92-105. (WANG Dakun, HUA Bolin. Review of Quantitative Research on Policy Texts [J]. *Scientific Information Research*, 2023, 5(1): 92-105.)
- [64] FENG Jia, MU Xiaomin, WANG Wei, et al. A Topic Analysis Method Based on a Three-Dimensional Strategic Diagram [J]. *Journal of Information Science*, 2021, 47(6): 770-782.
- [65] 张振青, 孙巍. 基于特征测度和PhraseLDA模型的领域学科交叉主题识别研究——以纳米技术的农业环境应用领域为例[J]. *数据分析与知识发现*, 2023, 7(7): 32-45. (ZHANG Zhenqing, SUN Wei. Interdisciplinary Subject Recognition Based on Feature Measure and PhraseLDA Model-Case Study

- of Nanotechnology in Agricultural Environment [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2023, 7(7): 32-45.)
- [66] CHEN Hongshu, ZHANG Guangquan, ZHU Donghua, et al. Topic-based Technological Forecasting Based on Patent Data: A Case Study of Australian Patents from 2000 to 2014[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2017, 119: 39-52.
- [67] RABITZ F, OLTEANU A, JURKEVIČIENĖ J, et al. A Topic Network Analysis of the System Turn in the Environmental Sciences [J]. Scientometrics, 2021, 126(3): 2107-2140.
- [68] 胡阿沛, 张静, 雷孝平, 等. 基于文本挖掘的专利技术主题分析研究综述[J]. 情报杂志, 2013, 32(12): 88-92, 61. (HU Apei, ZHANG Jing, LEI Xiaoping, et al. A Review of Technical Topic Analysis Based on Text Mining [J]. Journal of Intelligence, 2013, 32(12): 88-92, 61.)
- [69] 魏建香. 学科交叉知识发现及其可视化研究[D]. 南京: 南京大学, 2012. (WEI Jianxiang. Interdiscipline Knowledge Discovery and Its Visualization Research [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.)
- [70] 苗红, 王艳, 黄鲁成, 等. 面向功能的技术融合趋势研究[J]. 情报杂志, 2020, 39(5): 51-58. (MIAO Hong, WANG Yan, HUANG Lucheng, et al. Research on Function-oriented Technology Convergence Trend [J]. Journal of Intelligence, 2020, 39(5): 51-58.)
- [71] 王艳, 苗红, 李欣, 等. 知识基因视角下的技术融合机会发现研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2021, 42(7): 18-34. (WANG Yan, MIAO Hong, LI Xin, et al. Research on Technology Convergence Opportunity Discovery from the Perspective of Knowledge Genes[J]. Science of Science and Management of S.& T., 2021, 42(7): 18-34.)
- [72] 王雪原, 孙美霞. 双层嵌套聚类下的专利群落确定及技术布局策略研究[J]. 情报杂志, 2023, 42(3): 110-116, 150. (WANG Xueyuan, SUN Meixia. Research on Patent Community Determination and Technology Layout Strategy Under Double-layer Nested Clustering [J]. Journal of Intelligence, 2023, 42(3): 110-116.)
- [73] 饶雷振, 吴宇澄, 曾军, 等. 基于文献计量分析的污染物共代谢研究态势及发展趋势[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(3): 775-782. (RAO Leizhen, WU Yucheng, ZENG Jun, et al. Current Status and Future Directions of Pollutant Cometabolism Research Based on Bibliometrics [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(3): 775-782.)
- [74] 王思茗, 魏玉梅, 滕广青, 等. 图书情报学领域中的学科交叉现象及其地区差异[J]. 情报理论与实践, 2019, 42(12): 8-15. (WANG Siming, WEI Yumei, TENG Guangqing, et al. Interdisciplinary Phenomena and Their Regional Differences in Library and Information Science [J]. Information Studies: Theory & Application, 2019, 42(12): 8-15.)
- [75] 商宪丽. 基于主题引用网络的交叉学科知识传播研究——以数字图书馆为例[J]. 情报科学, 2018, 36(8): 53-59, 66. (SHANG Xianli. Research on Knowledge Dissemination in Cross-Disciplines Based on Topic Citation Network-An Example of Digital Library [J]. Information Science, 2018, 36(8): 53-59, 66.)
- [76] 曹树金, 曹茹烨. 基于知识图谱支持科研创新的跨学科知识发现研究[J]. 情报理论与实践, 2022, 45(11): 10-20. (CAO Shujin, CAO Ruye. Research on Interdisciplinary Knowledge Discovery Based on Knowledge Graph to Support Scientific Research Innovation [J]. Information Studies: Theory & Application, 2022, 45(11): 10-20.)
- [77] 张金柱, 韩永亮. 基于多特征的技术融合关系预测及其价值评估[J]. 数据分析与知识发现, 2022, 6(Z1): 33-44. (ZHANG Jinzhu, HAN Yongliang. Predicting Values of Technology

- Convergence with Multi-Feature Fusion [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2022, 6(Z1): 33-44.)
- [78] 张金柱,李溢峰. 专利分类序列和文本语义表示视角下的技术融合预测研究[J]. 情报学报, 2022, 41(6): 609-624. (ZHANG Jinzhu, LI Yifeng. Technology Convergence Prediction by the Semantic Representation of Patent Classification Sequence and Text [J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2022, 41(6): 609-624.)
- [79] 魏明珠. 面向新兴技术追踪预测的专利数据组织与知识发现研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023. (WEI Mingzhu. Research on Patent Data Organization and Knowledge Discovery for Tracking and Predicting Emerging Technologies [D]. Changchun: Jilin University, 2023.)
- [80] 马建红,曹文斌,刘元刚,等. 基于功效特征的专利聚类方法[J]. 计算机应用, 2021, 41(5): 1361-1366. (MA Jianhong, CAO Wenbin, LIU Yuangang, et al, Patent Clustering Method Based on Functional Effect [J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(5): 1361-1366.)
- [81] 祝娜,尹俊华,翟羽佳. 一种专利共类与深度学习模型结合的技术融合预测方法研究[J]. 情报理论与实践, 2024, 47(1): 145-153. (ZHU Na, YIN Junhua, ZHAI Yujia. Research on a Patent Technical Convergence Prediction Combining Patent Co-Classification and Deep Learning Model [J]. Information Studies: Theory & Application, 2024, 47(1): 145-153.)
- [82] HE Tao, FU Wei, XU Jianqiao, et al. Discovering Interdisciplinary Research Based on Neural Networks [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 908733.
- [83] 隗玲,许海云,郭婷,等. 基于弱共现和突发监测的情报学学科研究主题及交叉性分析[J]. 图书情报工作, 2015, 59(21): 105-114. (WEI Ling, XU Haiyun, GUO Ting, et al. Study on the Interdisciplinary Topics of Information Science Based on Weak Co-occurrence and Burst Detecting [J]. Library and Information Service, 2015, 59(21): 105-114.)
- [84] 牌艳欣,李长玲,徐璐. 弱引文关系视角下跨学科相关知识组合识别方法探讨——以情报学为例[J]. 图书情报工作, 2020, 64(21): 111-119. (PAI Yanxin, LI Changling, XU Lu. Discussion on the Method of Interdisciplinary Related Knowledge Combination Identification on the Perspective of Weak Citation Relationship: Taking Information Science for Example [J]. Library and Information Service, 2020, 64(21): 111-119.)
- [85] 李长玲,牌艳欣,荣国阳,等. 基于社交媒体弱关系的跨学科相关知识组合识别[J]. 情报理论与实践, 2022, 45(3): 125-132. (LI Changling, PAI Yanxin, RONG Guoyang, et al. Discussion on Interdisciplinary Related Knowledge Combination Identification Based on Weak Relationships in Social Media [J]. Information Studies: Theory & Application, 2022, 45(3): 125-132.)
- [86] 翟东升,夏军,张杰,等. 基于专利新兴技术弱信号识别方法研究[J]. 情报杂志, 2015, 34(8): 31-36. (ZHAI Dongsheng, XIA Jun, ZHANG Jie, et al. Research on Weak Signal Identification Method of Emerging Technology Based on Patent [J]. Journal of Intelligence, 2015, 34(8): 31-36.)
- [87] 苗红,郭鑫,吴菲菲. 产业融合弱信号识别研究——以老年智能家居领域为例[J]. 情报杂志, 2020, 39(11): 54-60, 89. (MIAO Hong, GUO Xin, WU Feifei. Research on Weak Signal Identification of Industrial Convergence: Taking the Field of Elderly Smart Home as an Example [J]. Journal of Intelligence, 2020, 39(11): 54-60, 89.)
- [88] 贾军,魏洁云. 新兴产业核心技术早期识别方法与应用研究[J]. 科学学研究, 2018, 36(7): 1206-1214. (JIA Jun, WEI Jieyun. Study on the Method and Application of Early Identification of Core Technology

- in Emerging Industry [J]. Studies in Science of Science, 2018, 36(7): 1206-1214.)
- [89] 刘国巍,李明昊,邵云飞,等. 新兴产业突破性创新网络动态演化特征及知识扩散规律——以我国生物医药产业为例[J]. 科技管理研究, 2023, 43(13): 134-144. (LIU Guowei, LI Minghao, SHAO Yunfei, et al. Dynamic Evolution Characteristics and Knowledge Diffusion Laws of Radical Innovation Networks in Emerging Industries: Based on China's Biomedical Industry [J]. Science and Technology Management Research, 2023, 43(13): 134-144.)
- [90] 施锦诚,朱凌,王迎春. 会聚视角下关键核心技术研发特征与突破路径[J]. 科学学研究, 2024, 42(3): 571-582, 672. (SHI Jincheng, ZHU Ling, WANG Yingchun. R&D Characteristics and Breakthrough Paths of Key Core Technologies from the Perspective of Convergence [J]. Studies in Science of Science, 2024, 42(3): 571-582, 672.)
- [91] 陈虹枢,宋亚慧,金茜茜,等. 动态主题网络视角下的突破性创新主题识别:以区块链领域为例[J]. 图书情报工作, 2022, 66(10): 45-58. (CHEN Hongshu, SONG Yahui, JIN Qianqian, et al. Radical Innovative Topic Identification from a Perspective of Dynamic Topic Network: Taking the Field of Blockchain as an Example [J]. Library and Information Service, 2022, 66(10): 45-58.)
- [92] 郭丽娜,李星琛,左文革,等. 颠覆性研究文献计量识别方法述评[J]. 数字图书馆论坛, 2020(3): 17-24. (GUO Lina, LI Xingchen, ZUO Wenge, et al. A Review of Disruptive Work and Its Bibliometric Identification Methods [J]. Digital Library Forum, 2020(3): 17-24.)
- [93] 杜宇飞. 论文颠覆程度与学科交叉程度之间的因果研究[D]. 太原:山西财经大学, 2023. (DU Yufei. The Causal Research between the Disruption Degree of the Thesis and the Interdisciplinarity Degree: Taking Physics Field for Example [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance and Economics, 2023.)
- [94] 许佳琪,汪雪锋,雷鸣,等. 从突破性创新到颠覆性创新:内涵、特征与演化[J]. 科研管理, 2023, 44(2): 1-13. (XU Jiaqi, WANG Xuefeng, LEI Ming, et al. From Breakthrough Innovation to Disruptive Innovation: Their Connotations, Characteristics and Evolution [J]. Science Research Management, 2023, 44(2): 1-13.)
- [95] 储节旺,李佳轩,安怡然. 基于专利分析的颠覆性技术演化与预测研究——以量子信息技术为例[J]. 科技进步与对策, 2023, 40(22): 130-140. (CHU Jiewang, LI Jiaxuan, AN Yiran. The Evolution and Prediction of Disruptive Technologies Based on Patent Analysis: An Example of Quantum Information Technology [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2023, 40(22): 130-140.)
- [96] 王英,庞弘燊. 基于科技文献计量的颠覆性技术发展过程特征识别研究——以数字孪生技术为例[J]. 情报探索, 2023(7): 70-77. (WANG Ying, PANG Hongshen. Research on Characteristic Recognition of Disruptive Technology Development Process Based on Science and Technology Bibliometrics: Case Study of Digital Twin Technology [J]. Information Research, 2023(7): 70-77.)
- [97] 冯倩倩,张光宇,戴海闻,等. 颠覆性技术遴选的指标体系与流程设计——基于扎根理论的多案例研究[J]. 科技管理研究, 2021, 41(24): 50-59. (FENG Qianqian, ZHANG Guangyu, DAI Haiwen, et al. Index System and Process Design of Disruptive Technology Selection: A Multi-Case Research Based on Grounded Theory [J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(24): 50-59.)
- [98] 白光祖,郑玉荣,吴新年,等. 基于文献知识关联的颠覆性技术预见方法研究与实证[J]. 情报杂志, 2017, 36(9): 38-44. (BAI Guangzu, ZHENG Yurong, WU Xinnian, et al. Research on Patent Community Determination and Technology Layout Strategy Under Double-Layer Nested Clustering [J].

- Journal of Intelligence, 2017, 36(9): 38-44.)
- [99] LI Munan, PORTER A L, SUOMINEN A. Insights into Relationships between Disruptive Technology/Innovation and Emerging Technology: A Bibliometric Perspective [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2018, 129: 285-296.
- [100] SMALLHEISER N R. Rediscovering Don Swanson: The Past, Present and Future of Literature-Based Discovery [J]. Journal of Data and Information Science (Warsaw, Poland), 2017, 2(4): 43-64.
- [101] 刘亚辉, 许海云, 武华维, 等. 基于多元弱关系融合的科学突破主题早期识别研究 [J]. 情报学报, 2023, 42(1): 19-30. (LIU Yahui, XU Haiyun, WU Huawei, et al. Scientific Breakthrough Topics Identification in an Early Stage Using Multiple Weak Linkage Fusion [J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2023, 42(1): 19-30.)
- [102] TUSHMAN M L, ANDERSON P. Technological Discontinuities and Organizational Environments [J]. Administrative Science Quarterly, 1986, 31(3): 439-465.
- [103] 熊焰, 张凌恺, 陈旭, 等. 基于“突变—演化”模型的颠覆性技术识别方法及应用 [J]. 情报杂志, 2023, 42(12): 119-126, 152. (XING Yan, ZHANG Lingkai, CHEN Xu, et al. Disruptive Technology Identification Method and Application Based on the “Mutation-Evolution” Model [J]. Journal of Intelligence, 2023, 42(12): 119-126, 152.)

作者贡献说明

张 娴: 论文选题, 框架设计, 论文修改与定稿;
李嘉晖: 资料调研, 初稿撰写。