

工业互联网研究热点及演化趋势

基金项目：国家社科基金青年项目（20CGL061）；教育部人文社科青年基金（19YJC790002）

白云朴，李果

（南京邮电大学管理学院，南京 210093）

摘 要：本文以 Web of Science 核心合集数据库为数据来源，运用科学知识图谱法，借助 CiteSpace 软件对工业互联网领域的文献产出情况、研究成果分布、研究热点及其演化趋势进行分析，以探究工业互联网研究现状。研究发现：一是工业互联网研究领域的文献数量呈不断上升趋势，按照年发文量可将工业互联网研究划分为起步探索期和快速发展期。二是中国和美国是开展工业互联网领域研究的主力国家，其中我国在工业互联网研究领域拥有较多的权威研究机构和高产作者。三是工业互联网的研究出现学科交叉融合发展趋势。四是工业互联网领域的研究热点可归为工业互联网的概念和架构体系研究、工业互联网核心技术和工业互联网落地应用研究三大类。五是工业互联网研究由最初与工业互联网紧密相关的基础技术研究以及技术研究中所面临的挑战向工业互联网应用研究、安全问题、资源分配和资源管理研究扩展。

关键词：工业互联网；文献计量；科学知识图谱法；研究热点；演化路径

中图分类号：G301

文献标识码：A

Research hotspot and evolution trend of industrial Internet

BAI Yunpu, LI Guo

(School of management, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210093)

ABSTRACT: This paper takes the web of science core collection database as the data source, uses the scientific knowledge map method, and uses CiteSpace software to analyze the literature output, research results distribution, research hotspots and their evolution trends in the field of industrial Internet, so as to explore the research status of industrial Internet. The research findings are as follows: first, the number of documents in the field of industrial Internet research is on the rise. According to the annual number of documents, the industrial Internet research can be divided into the initial exploration period and the rapid development period. Second, China and the United States are the main countries to carry out research in the field of industrial Internet. Among them, China has many authoritative research institutions and high-yield authors in the field of industrial Internet research. Third, there is a trend of interdisciplinary integration in the research of industrial Internet. Fourth, research hotspots in the field of industrial Internet can be divided into three categories:

Research on the concept and architecture system of industrial Internet, research on the core technology of industrial Internet and Research on the implementation and application of industrial Internet. Fifthly, the research on industrial Internet has expanded from the basic technology research closely related to industrial Internet and the challenges faced in technology research to the research on industrial Internet application, security issues, resource allocation and resource management.

KEY WORDS: industrial internet; bibliometrics; atlas of scientific knowledge; research hotspot; evolution path

2021 年 12 月 28 日, 我国工信部出台《“十四五”智能制造发展规划》, 强调加快工业互联网、物联网、5G 等新型网络基础设施规模化部署, 以新一代信息技术与先进制造技术深度融合为主线, 深入推进制造业数字化转型、智能化升级。工业互联网作为新一代信息通信技术与工业经济深度融合的全新工业生态、关键基础设施和新型应用模式, 已成为推动现代制造业数字化、网络化、智能化转型升级的重要突破口。

“工业互联网”概念是由美国通用电气公司 (GE) 于 2012 年 11 月首次提出的, GE 主张基于互联网技术实现人机协同和智能交互, 提高工业生产效率, 从而推动工业转型升级^[1]。随后, 通用电气公司联合另外四家 IT 巨头组建了工业互联网联盟 (IIC), 将这一概念大力推广开来。目前, 国内外学者已经围绕“工业互联网”展开了较为丰富和深入的研究, 但有关工业互联网研究进展分析尚为鲜见。因此, 为厘清工业互联网领域的研究现状, 有必要对工业互联网领域的现有研究进展进行全面系统的梳理。鉴于此, 本文采用文献计量研究对工业互联网领域的研究文献进行分析, 以探究工业互联网研究领域的文献产出情况、研究成果分布、研究热点及其演化趋势, 从而深刻把握工业互联网研究现状。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

由于“工业互联网”概念是由美国通用电气公司于 2012 年 11 月首次提出的, 因此本文将文献检索时间段设定为 2012 年 11 月 1 日至 2022 年 4 月 1 日。本研究文献数据来源于 Web of Science 核心合集数据库。以“Industrial Internet of Things”为主题词, 文献类型为“Article”和“Review”, 进行高级检索, 初步检索得到 5529 篇英文文献。为保证文献质量, 通过阅读相关文献的摘要和关键词, 剔除与工业互联网不相关的文献, 最终保留了 1105 篇英文文献。

1.2 研究方法

本研究运用科学知识图谱法, 科学知识图谱法是将某研究领域的科学知识进行可视化从而展示某研究领域的知识基础、研究热点、演化路径的一种分析方法。通过使用 Citespace 软件对国内外工业互联网相关文献进行合作网络、关键词共现和共被引分析, 以探索国内外工业互联网研究领域的文献产出情况、研究成果分布、主要研究作者和研究机构、研究热点及演化趋势。

2 工业互联网领域的文献发文量及研究成果分布

2.1 工业互联网领域的文献发文量

文献数量变化反映了学术界对工业互联网领域的关注变化情况。为了解工业互联网研究领域的发文量变化趋势，以时间为横轴，以每年发表论文的篇数为纵轴，绘制出近 10 年的发文量变化趋势图（图 1）。从年度论文发表数量来看，2012 年 11 月 1 日至 2022 年 4 月 1 日期间，工业互联网领域发文量总体上呈上升趋势。按照每年发文量情况可以把近 10 年工业互联网研究分为两个时期，即“起步探索期（2012-2017 年）”和“快速发展期（2018-2022 年）”。自 2012 年 11 月美国通用电气公司在白皮书《工业互联网：打破智慧与机器的边界》中首次提出“工业互联网”概念，工业互联网研究就进入了“起步探索期”，此阶段工业互联网领域的发文量较少，但呈逐年上升趋势。2018 年是一个重要的转折点，随着工业互联网政策的推动和工业互联网潜在价值的挖掘，工业互联网已经开始在多领域落地应用，学术界对工业互联网领域的关注度持续攀升，发文量首次突破一百，工业互联网领域研究从“起步探索期”过渡到“快速发展期”，并且“快速发展期”内发文量呈现爆发式增长趋势，说明工业互联网领域有较大的研究突破。

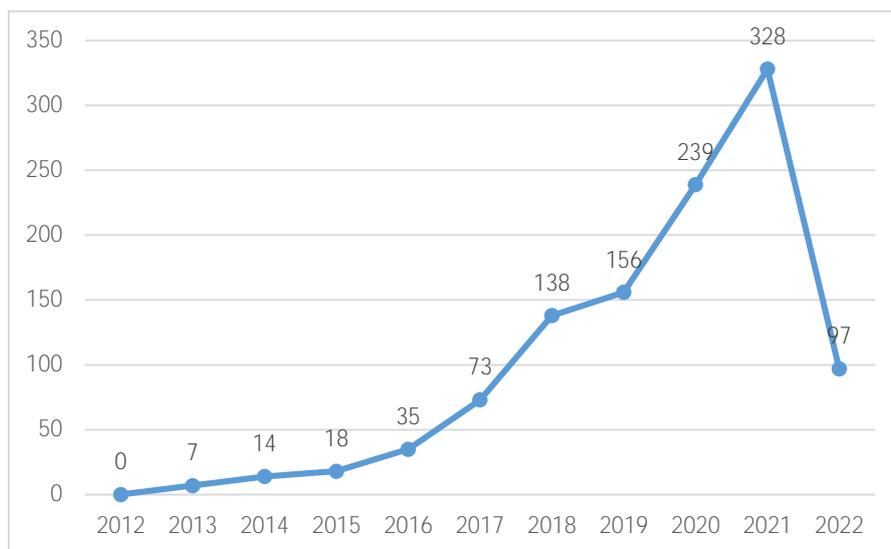


图 1 年文献发表数量图

2.2 工业互联网领域的研究成果分布

(1) 国家合作分析

运用 CiteSpace 软件得到工业互联网研究文献的国家共现知识图谱（见图 2），可以发现中国是工业互联网领域发文量最多的国家，共计 475 篇，占有所有发文量的 42.99%，是工业互联网研究领域的先锋。美国以 179 篇位居第二，说明美国在工业互联网研究领域也处于相对领先的地位。此外，英国、印度、韩国、加拿大、德国、西班牙、沙特阿拉伯、澳大利亚和意大利等国家发文量相对较多。可以看出，工业互联网研究领域形成了以中国为中心，其他国家为周边的研究

网络。在网络中，各国之间联系特别密切，尤其是中国和美国于其他国家之间的联系。

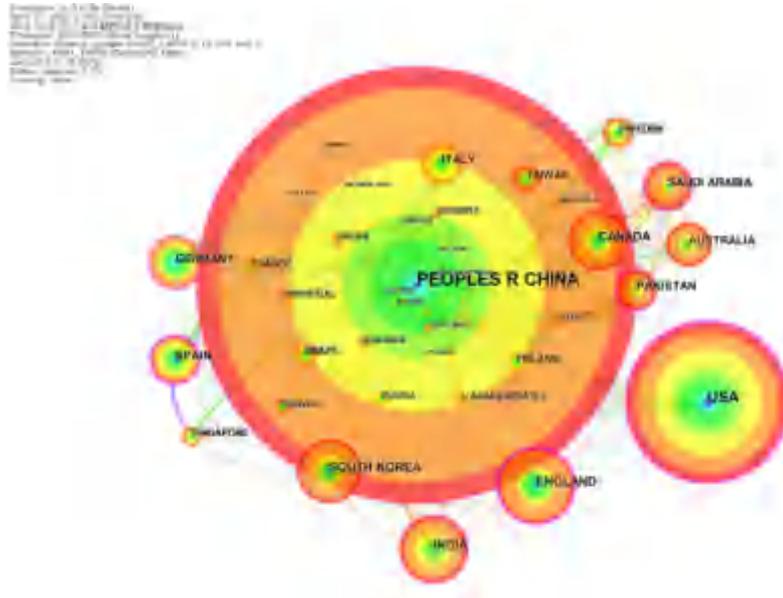


图2 国家合作知识图谱

(2) 主要作者分析

通过对工业互联网领域论文发表的高产作者分析（见图3），发现发文量最多的是印度学者 NEERAJ KUMAR 和中国学者 FEI TAO，均发表工业互联网相关论文 11 篇。其次，发文量在 3 篇及以上的作者共 51 位，发表论文共 224 篇，占样本的 20.27%。此外，工业互联网领域主要以合作团体研究为主，但各团体之间合作较少。

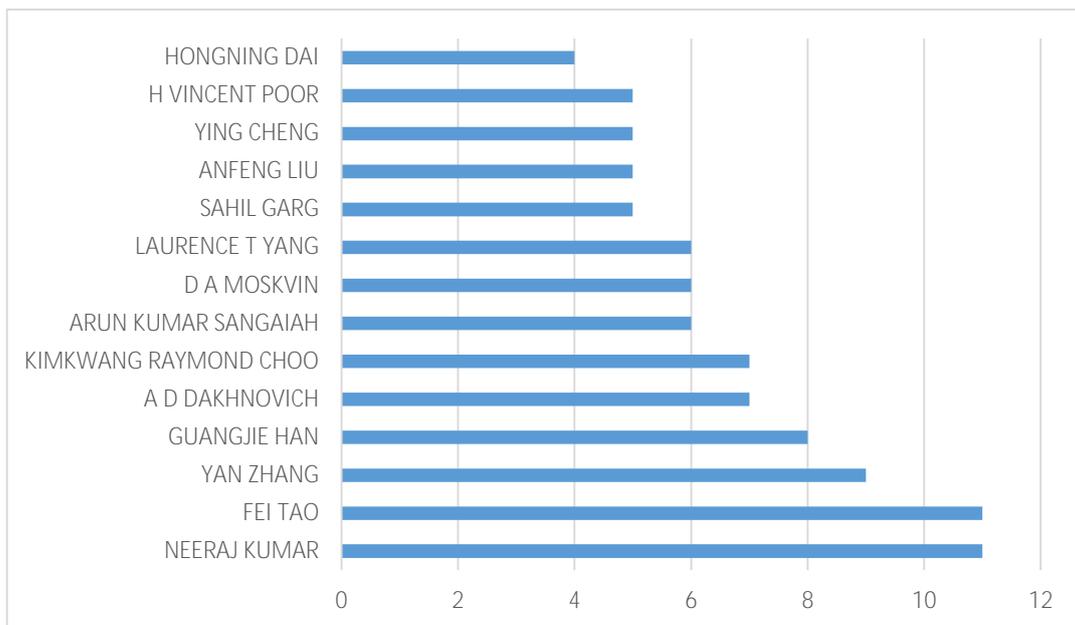


图3 工业互联网研究领域高产作者 TOP15

（3）核心科研机构分析

进一步对工业互联网研究领域发文量前十的科研机构进行统计，如图 4 所示。可以发现中国研究机构在工业互联网研究领域中具有较高的学术影响力。其中，北京邮电大学以 27 篇发文量位列第一，西安电子科技大学和中国科学技术大学以 25 篇并列第二位。在排名前十的研究机构中，中国有 8 所，韩国 1 所，沙特阿拉伯 1 所，这表明我国在国际工业互联网研究领域参与度较高，拥有较多高产的权威研究机构，并且高度重视工业互联网领域研究。此外，中国各研究机构之间的联系非常紧密，相互协作，已形成了国内工业互联网研究网络。

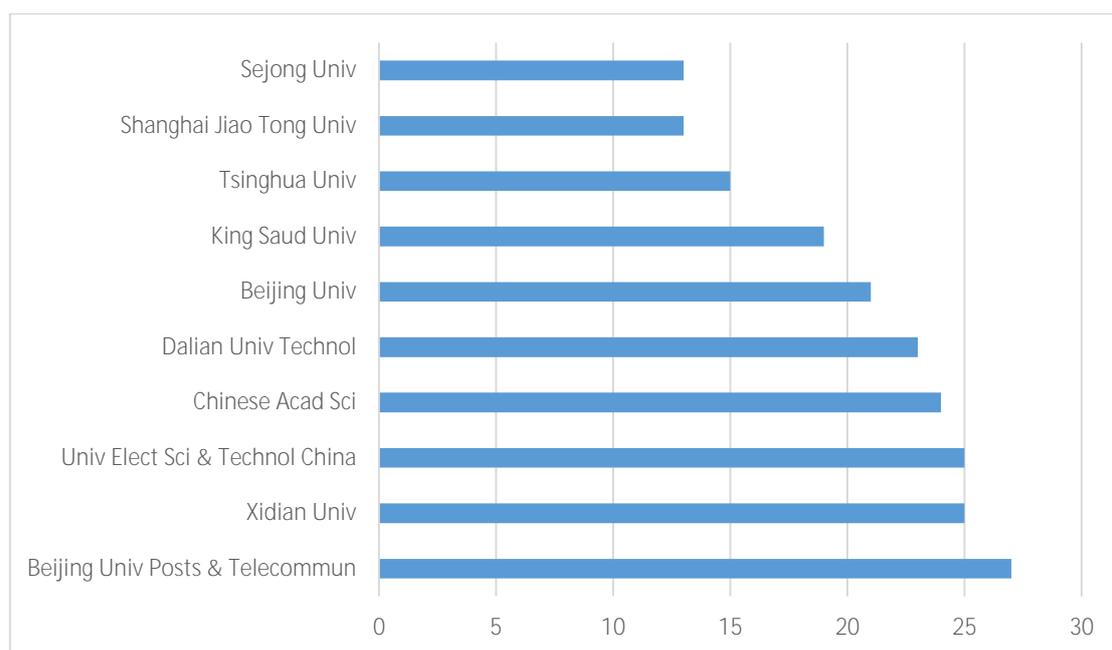


图 4 工业互联网领域排名前十的高产机构

（4）主要期刊统计分析

进一步分析工业互联网领域期刊共被引频次排名前十的期刊（见图 5），发现《IEEE Transactions on Industrial Informatics》以被引频次 664 次位居第一，同时还是工业互联网领域发文量最多的期刊，共计发表论文 162 篇，该期刊的影响因子为 10.25，是工程领域和计算机科学领域的顶级期刊，因此该期刊为工业互联网领域提供了坚实的知识基础。其次，《IEEE Access》、《IEEE Internet of Things Journal》和《IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE》的共被引频次分别为 517、500、355，影响因子分别为 3.367、9.471、9.619，均是计算机科学领域、工程领域和通信领域的顶级期刊，这也表明工业互联网是一个集计算机科学、工学和通信学的综合性交叉学科。

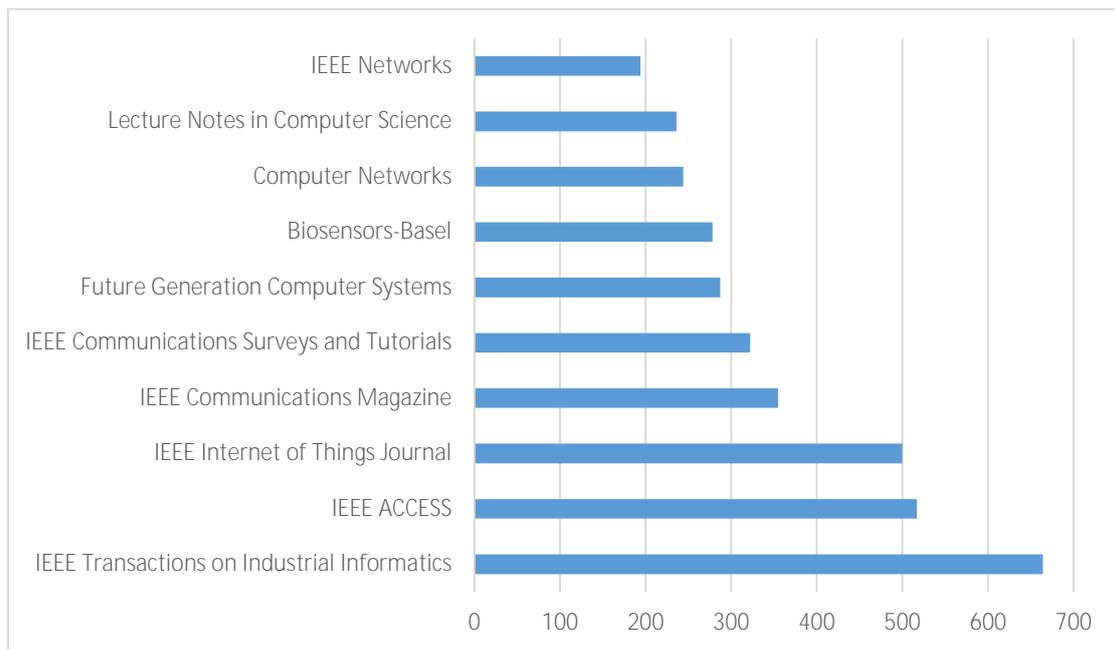


图 5 工业互联网领域被引频次排名前十的期刊

3 工业互联网领域的研究热点

本文对工业互联网研究热点进一步分析，得到关键词共现知识图谱（见图 6）。文献中的关键词通常高度凝练和概括了文献研究主题，因此，高频关键词集中反映了该领域的研究热点。为了确定工业互联网国际研究领域出现的高频关键词，本文借鉴 Donohue 提出的高频低频词模型，如式（1）所示，其中 n 是研究领域高频关键词的临界值， I 是指研究领域中出现过 1 次的关键词数量。通过对关键词进行梳理，最后确定工业互联网研究领域一共有 494 个关键词，其中只出现过一次的关键词有 99 个，算出临界值为 13.57，因此最终确定工业互联网研究领域的高频关键词一共有 78 个，本文列出排名前 15 的高频关键词，如表 1 所示。

$$n = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 8I}) \quad (1)$$

表 1 工业互联网研究领域所发表文献出现的高频关键词（top15）

序号	关键词	词频	中介中心性
1	Industrial internet of thing	517	0.04
2	Internet of thing	370	0.06
3	System	145	0.05
4	Security	141	0.03
5	Blockchain	100	0.02
6	Network	87	0.03
7	Industrial 4.0	72	0.03
8	Cloud computing	71	0.02
9	Wireless sensor network	69	0.06
10	Optimization	68	0.03

学习等先进技术优化工业生产过程,提升制造业的竞争力。在工业互联网架构体系研究领域,目前缺乏统一的标准,尚未达成共识。工业物联网架构的设计需要突出使用不同技术的异构设备之间的可扩展性、可扩展性、模块化和互操作性,工业互联网联盟提出了工业互联网的通用框架,即工业物联网设备和工业数据源在第一层生成连续的数据流,而边缘服务器和云计算系统分别在第二层和第三层为工业物联网应用提供了能力^[2]。Khan 等人(2017)提出了一种基于物联网的体系结构,该体系结构由智能对象、网关和控制中心三个模块组成,每个模块执行特定的功能,由应用层、网络层和传感层三层组成^[3]。Campobello 等人(2017)提出了一种工业物联网解决方案,称为“无线自动化演进”(WEVA),它基于开源软件和通信协议,架构包括传感器、执行器板、尘埃和操作系统、协议、接入网关、服务和应用程序^[4]。Tao 等人(2017)基于工业物联网的 hub 提出了 IIHub,它由 ca 模块、a-Hub 模块和智能终端三个模块组成^[5]。

(2) 工业互联网的核心技术研究

“Internet of thing”、“Blockchain”、“Cloud computing”、“Wireless sensor network”、“Big data”、“edg computing”、“cyber-physical system”、“machine learning”、“deep learning”、“artificial intelligence”等高频关键词集中反映了与工业互联网密切相关的核心技术领域研究。通过梳理相关文献,发现工业互联网核心技术主要包括三个主要部分,一是信息提取和数据收集技术。物联网设备有助于实时数据收集和驱动,通过与智能基础设施构建了一个 CPS 系统,将互联网和用户结合在一起,实时监控从原材料到最终产品的整个过程,以实现劳动力成本和人工系统管理的显著降低^[6]。二是进行数据处理、分析、储存和管理的数据管理技术。工业物联网数据的大量增长需要高度分布式的高性能计算系统来管理、处理、分析和存储数据,雾计算、边缘计算和云计算等数据管理和处理技术可以处理传感器附近、边缘服务器和云数据中心的大数据,大数据等数据分析技术为工业物联网系统中不同层次的数据挖掘、机器学习、深度学习和统计数据分析提供了不同的工具^[7]。三是确保数据接入安全和控制访问安全的核心技术。由于现有的工业互联网系统容易受到单点故障和恶意攻击的影响,无法提供稳定的服务。区块链技术具有更好的互操作性、隐私性、安全性、可靠性和可扩展性,被广泛认为是一种解决大规模工业互联网数据安全和效率问题的技术,能够以安全高效的方式实现工业互联网系统中数据存储、处理和共享^[8]。许多学者基于区块链技术提出了一系列确保数据接入安全和控制访问安全的核心技术^[9]。

(3) 工业互联网应用研究

高频关键词“energy consumption”、“energy efficiency”、“smart factory”、“platform”、“resource management”和“resource allocation”等反映了工业互联网的落地应用研究。其应用行业涉及金融行业、医疗行业、能源行业、交通行业、智能工厂、智慧城市、食品加工和农业系统等领域^{[10]-[12]}等,以探究各行业中工业互联网的应用现状和应用水平。此外,还发现资源分配和资源管理是工业互联网应用中要解决的最大的挑战之一^[11]。关键词“platform”是指工业互联网平台,工业互联

网平台可以在产品生命周期的所有阶段提供数据和信息的实时管理，目前，相关研究主要集中在平台的构建^[13]和工业互联网平台的开放性研究^[14]两方面。

4 工业互联网研究的演化路径

为厘清工业互联网研究热点的演化路径，对文献进行关键词时区图谱分析（见图 7）。由图 7 可知，工业互联网相关文献关键词之间的连接密度较高，说明工业互联网领域研究具有较高的相关性和继承性。为便于后续更加精准地对工业互联网研究的演化路径进行分析，结合文献发表的年度变化趋势以及上述分析结果，本文将根据工业互联网研究的两个阶段将工业互联网研究划分为两个相应的知识群，然后分析每个知识群基础知识网络架构中关键节点文献及高频关键词，能够了解一定时期内工业互联网研究基础和研究热点，进一步揭示该研究领域在近 10 年来的研究演化趋势和阶段特征。

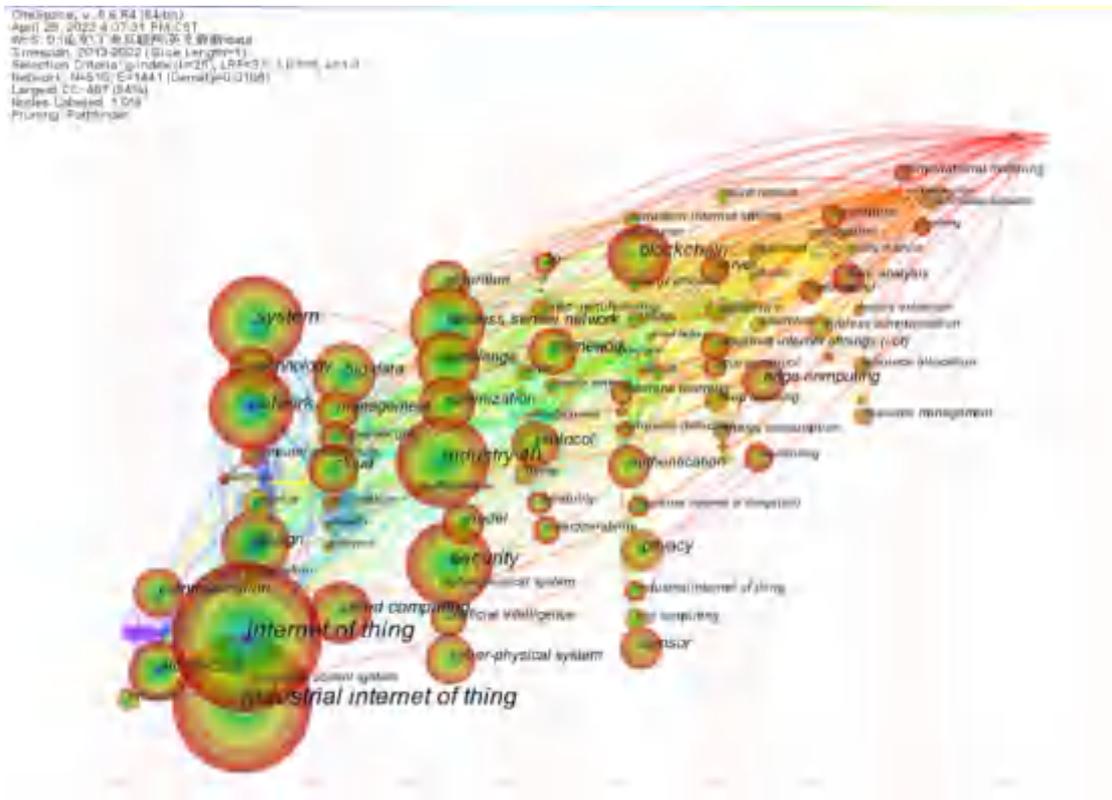


图 7 工业互联网领域相关文献关键词时区图谱

4.1 起步探索期（2012-2017 年）

对工业互联网研究文献进行文献共被引分析，以探究工业互联网研究的“前因”。本阶段共发表相关文献 147 篇，其中关键文献有 5 篇，如表 2 所示。《Internet of Things in Industries: A Survey》回顾了物联网的研究现状、关键实现技术、体系架构、物联网在工业中的主要应用，并指出了物

联网的研究趋势和面临的技术挑战^[15]。《Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions》提出了在全球范围内实现物联网的以云为中心的愿景，讨论了推动物联网研究的关键使能技术和应用领域^[16]。《A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems》提出了信息物理系统（CPS）实现的 5C 体系架构，即智能连接层、数据-信息转换层、网络层、认知层和配置层^[17]。《Internet of things: Vision, applications and research challenges》研究了物联网的技术、应用以及带来的安全挑战^[18]。《Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook》研究了智能工厂的垂直集成，以实现灵活、可重构的智能工厂，提出将工业无线网络、云、固定或移动终端与智能工件(如机器、产品和传送带)结合起来，使即智能工件形成一个自组织的系统，并在云上实现基于大数据分析的反馈和协调块^[19]。

通过对这 5 篇文献进行分析，发现起步探索期工业互联网研究主要承接了物联网和信息物理系统领域相关研究。物联网(IoT)是一个计算概念，其背后的关键思想是通过部署数十亿甚至数万亿智能对象实现无处不在的互联网连接，这些对象能够感知周围环境，传输和处理获取的数据，然后反馈给环境^[20]。一般来说，物联网通信可以归类为机器对用户，并以客户机-服务器交互的形式进行。而工业物联网是一个由网络化智能对象、网络物理资产、相关通用信息技术和可选的云或边缘计算平台组成的系统，使过程、产品和/或服务信息的实时、智能和自主访问、收集、分析、通信和交换成为可能^[21]。它是物联网的一个子集，专门用于工业应用，工业互联网中的通信是面向机器的。物联网和工业物联网的最普遍的通信需求是相似的，比如，使用低成本、资源受限的设备和网络可伸缩性支持互联网生态系统。但服务质量(QoS)(在确定性、延迟、吞吐量等)、可用性和可靠性、以及安全性和私密性等方面通信需求有所不同。与物联网相比，工业物联网更应该被视为一种进化，而不是一场革命。包括传感器、数据处理单元和执行器在内的信息物理系统(Cyber-Physical Systems)是工业物联网的技术核心，实现了实时数据传输和真实世界与虚拟世界的融合，有利于生产设备的状态监测、预测维护、远程诊断和控制^[22]。

表 2 2012-2017 年工业互联网研究领域的关键基础文献（中介中心性大于 0.01）

序号	文献名称	被引频次	发表年份	中介中心性
1	Internet of Things in Industries: A Survey	22	2014	0.02
2	Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions	8	2013	0.03
3	A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems	8	2015	0.12
4	Internet of things: Vision, applications and research challenges	7	2012	0.01
5	Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook	5	2016	0.04

进一步对本阶段的高频关键词进行挖掘（见图 7），发现尽管工业互联网一词在 2012 年就已经提出，但直到 2016 年，才进入“工业互联网”研究热潮。这一阶段工业互联网领域文献较少

且增长缓慢，关键词相对聚焦，出现频次最多的关键词包括物联网、网络、工业物联网、系统、无线传感网络、工业 4.0、大数据、结构框架、挑战等。通过分析高频关键词背后的研究文献，发现此阶段工业互联网相关研究主要集中在以下三方面：一是工业互联网基础技术研究，涉及物联网技术、云计算、大数据技术、无线传感网络技术、Wi-Fi 后向散射技术、LP-WAN 技术等；二是工业互联网架构研究，涉及基于软件定义的工业互联网体系架构、分布式面向服务的体系架构；三是技术集成方面面临的挑战，主要涉及实现企业内部与企业间连接的现代信息技术基础设施挑战。

4.2 快速发展期（2018-2022 年）

快速发展期工业互联网相关发文量急剧增加，共发表相关文献 958 篇，其中关键文献有 17 篇，如表 4 所示，本部分主要对前十篇文献展开具体分析。《Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions》阐明了物联网、工业物联网和工业 4.0 的概念，研究了工业互联网带来的机遇以及与能源效率、实时性能、共存、互操作性、安全和隐私需求相关的挑战^[23]。《The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0》研究了工业 4.0 背景下物联网和 cps 对工业自动化的影响，并阐明第五代(5G)电信网络在自动化中的作用^[24]。《The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework》给出了工业物联网(IIoT)的定义，并分析了相关的物联网分类，为工业物联网开发了一个分析框架，可用于在研究系统架构和分析安全威胁和漏洞时枚举和描述工业物联网设备^[25]。《Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0》研究了雾计算在工业物联网中提供本地计算支持，以及工业物联网的核心元素和构建模块^[26]。《Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0》分析了工业物联网的体系结构，包括物理层、IWNs、工业云和智能终端，描述了不同设备之间的信息交互，提出了一个软件定义的工业物联网架构来管理物理设备，讨论了软件定义工业物联网的突出问题和可能的解决方案^[27]。《Industrial Internet: A Survey on the Enabling Technologies, Applications, and Challenges》介绍了工业互联网系统的 5C 架构，重点从工业网络、工业智能传感、云计算、大数据、智能控制和安全管理等各个层面研究了使能技术，探讨了由工业互联网技术逐步改变的应用领域，包括能源、医疗保健、制造、公共部门和交通运输，提出了目前在开发工业互联网系统方面的技术挑战。《A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective》介绍了工业物联网架构、工业物联网应用(即工厂自动化和过程自动化)及其特点，并从控制、网络和计算这三个关键系统方面综述了现有的研究成果^[28]。《Green industrial Internet of Things architecture: An energy-efficient perspective》提出了一种高效节能的工业物联网(IIoT)架构，该架构由感知实体域、RESTful 服务托管网络、云服务器和用户应用程序组成，包括三层:感知层、网关层和控制层^[29]。

通过对关键节点文献进行分析，发现快速发展期的工业互联网研究的知识基础主要承接了起

步探索期的物联网、CPS 以及工业互联网相关研究和此阶段新出现的雾计算、区块链、智能工厂等相关研究。此外，还可看出此阶段工业互联网技术的安全问题是研究的重中之重。

表 2 2018-2022 年工业互联网研究领域的关键基础文献（中介中心性大于 0.01）

序号	文献名称	被引次数	发表年份	中介中心性
1	Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions	117	2018	0.05
2	The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0	60	2017	0.15
3	The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework	58	2018	0.14
4	Internet of Things in Industries: A Survey	54	2014	0.04
5	Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0	52	2018	0.11
6	Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0	50	2016	0.04
7	Industrial Internet: A Survey on the Enabling Technologies, Applications, and Challenges	41	2017	0.08
8	A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective	32	2018	0.04
9	Green industrial Internet of Things architecture: An energy-efficient perspective	32	2016	0.14
10	Consortium Blockchain for Secure Energy Trading in Industrial Internet of Things	31	2018	0.06
11	Towards Secure Industrial IoT: Blockchain System with Credit-Based Consensus Mechanism	24	2019	0.04
12	Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems	24	2017	0.19
13	Cloud-assisted Industrial Internet of Things (IIoT)- enabled framework for health monitoring	24	2016	0.14
14	Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications	24	2015	0.12
15	A comprehensive survey on attacks, security issues and blockchain solutions for IoT and IIoT	21	2020	0.08
16	Manufacturing Analytics and Industrial Internet of Things	17	2017	0.12
17	Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges	13	2018	0.13

进一步对本阶段的高频关键词进行挖掘（见图 7）。研究的广度和深度逐渐扩大，成果呈现多元化发展趋势，涌现出大量新的关键词，如：机器学习、深度学习、雾计算、传感器技术、数字孪生技术、边缘计算、区块链技术、供应链、智能工厂、隐私问题、资源分配、资源管理等。这表明工业互联网核心技术体系研究有所深化，从原来的物联网、大数据等基础技术扩展到机器学习、深度学习、雾计算、边缘计算、数字孪生技术、区块链技术、人工智能技术等。此外，得益于工业互联网相关核心技术的快速发展，工业互联网与具体场景结合（如：智能工厂、智慧城市）的应用实践和安全问题也是此阶段的研究热点，其中应用实践中涉及到了工业互联网中的资源分配和资源管理研究。

5 研究结论

本文运用科学知识图谱方法对 web of science 核心数据库所收录 2012-2022 年间工业互联网领域 1105 篇文献进行了全面梳理和总结, 主要得出以下结论: 一是自“工业互联网”概念提出以来, 工业互联网研究领域的文献数量呈不断上升趋势, 按照年发文量情况可以把近 10 年工业互联网研究分为两个时期, 即起步探索期(2012-2017 年)和快速发展期(2018-2022 年)。二是中国和美国是开展工业互联网领域研究的主力国家, 近十年, 中国在工业互联网领域发表的论文数量几乎占世界各国所有发文量的一半; 此外, 我国在工业互联网研究领域拥有较多的权威研究机构和高产作者, 这体现了我国对于工业互联网领域研究的重视和取得的成就。三是从学科和期刊分布上看, 工业互联网领域被引频次较高的期刊均是计算机科学领域、工程领域和通信领域的顶级期刊, 这也表明工业互联网的研究出现学科交叉融合发展的趋势。四是工业互联网领域的研究热点可归为工业互联网的概念和架构体系研究、工业互联网核心技术研究 and 工业互联网落地应用研究三大类。五是根据工业互联网研究的两个阶段对研究热点演化情况做进一步分析, 发现: 起步探索期的工业互联网研究主要承接物联网和 CPS 相关研究, 研究热点主要集中在与工业互联网紧密相关的基础技术研究以及技术研究中面临的挑战; 快速发展期知识基础已经扩展到了工业互联网计数研究。此外, 研究的广度和深度逐渐扩大, 成果呈现多元化发展趋势, 研究热点由原来的基础技术研究扩展到工业互联网与具体场景结合的应用实践和隐私问题、工业互联网中的资源分配和资源管理研究。

参考文献

- [1] 谢琳灿, 吴沁沁. 美德工业互联网发展经验及借鉴[J]. 宏观经济管理, 2022(03): 83-90.
- [2] Serpanos D, Wolf M. Industrial internet of things[M]//Internet-of-Things (IoT) Systems. Springer, Cham, 2018: 37-54.
- [3] Khan W Z, Aalsalem M Y, Khan M K, et al. A reliable Internet of Things based architecture for oil and gas industry[C]// 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2017.
- [4] Campobello G, Castano M, Fucile A, et al. WEVA: A complete solution for industrial Internet of Things[C]//International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless. Springer, Cham, 2017: 231-238.
- [5] Tao F, Cheng J, Qi Q. IIHub: An industrial Internet-of-Things hub toward smart manufacturing based on cyber-physical system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(5): 2271-2280.
- [6] Zhang K, Zhu Y, Maharjan S, et al. Edge intelligence and blockchain empowered 5G beyond for the industrial Internet of Things[J]. IEEE network, 2019, 33(5): 12-19.
- [7] Khan W Z, Rehman M H, Zangoti H M, et al. Industrial internet of things: Recent advances,

enabling technologies and open challenges[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2020, 81: 106522.

[8] Dai H N, Zheng Z, Zhang Y. Blockchain for Internet of Things: A survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8076-8094.

[9] Li Z, Kang J, Yu R, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2017, 14(8): 3690-3700.

[10] Bibri S E, Krogstie J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review[J]. *Sustainable cities and society*, 2017, 31: 183-212.

[11] Basir R, Qaisar S, Ali M, et al. Fog computing enabling industrial internet of things: State-of-the-art and research challenges[J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4807.

[12] Younan M, Houssein E H, Elhoseny M, et al. Challenges and recommended technologies for the industrial internet of things: A comprehensive review[J]. *Measurement*, 2020, 151: 107198.

[13] Menon K, Kärkkäinen H, Wuest T, et al. Industrial internet platforms: A conceptual evaluation from a product lifecycle management perspective[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019, 233(5): 1390-1401.

[14] Menon K, Kärkkäinen H, Wuest T. Industrial internet platform provider and end-user perceptions of platform openness impacts[J]. *Industry and Innovation*, 2020, 27(4): 363-389.

[15] Da Xu L, He W, Li S. Internet of things in industries: A survey[J]. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 2014, 10(4): 2233-2243.

[16] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions[J]. *Future generation computer systems*, 2013, 29(7): 1645-1660.

[17] Lee J, Bagheri B, Kao H A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. *Manufacturing letters*, 2015, 3: 18-23.

[18] Miorandi D, Sicari S, De Pellegrini F, et al. Internet of things: Vision, applications and research challenges[J]. *Ad hoc networks*, 2012, 10(7): 1497-1516.

[19] Wang S, Wan J, Li D, et al. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook[J]. *International journal of distributed sensor networks*, 2016, 12(1): 3159805.

[20] Sisinni E, Saifullah A, Han S, et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2018, 14(11): 4724-4734.

[21] Boyes H, Hallaq B, Cunningham J, et al. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework[J]. *Computers in industry*, 2018, 101: 1-12.

[22] Kiel D, Müller J M, Arnold C, et al. Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0[M]//*Digital Disruptive Innovation*. 2020: 231-270.

[23] Sisinni E, Saifullah A, Han S, et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2018, 14(11): 4724-4734.

[24] Wollschlaeger M, Sauter T, Jasperneite J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0[J]. *IEEE industrial electronics magazine*,

2017, 11(1): 17-27.

[25] Boyes H, Hallaq B, Cunningham J, et al. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework[J]. Computers in industry, 2018, 101: 1-12.

[26] Aazam M, Zeadally S, Harras K A. Deploying fog computing in industrial internet of things and industry 4.0[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10): 4674-4682.

[27] Wan J, Tang S, Shu Z, et al. Software-defined industrial internet of things in the context of industry 4.0[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(20): 7373-7380.

[28] Li J Q, Yu F R, Deng G, et al. Industrial internet: A survey on the enabling technologies, applications, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1504-1526.

[29] Wang K, Wang Y, Sun Y, et al. Green industrial Internet of Things architecture: An energy-efficient perspective[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(12): 48-54.

作者简介

白云朴, 男, 南京邮电大学副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 数字经济、分享经济及信息产业战略研究, 通讯地址: 江苏省南京市鼓楼区新模范马路南京邮电大学三牌楼校区 300 信箱, 邮箱: baiyunpu@njupt.edu.cn, 联系电话: 18851178707。李果, 女, 南京邮电大学硕士研究生, 研究方向: 科技资源共享与创新。