

我国数字孪生研究的进展、热点和前沿

——基于中国知网核心期刊数据库的知识图谱分析

赵亮^{1,2}, 许娜², 张维³

(1. 江苏建筑职业技术学院 信电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 智慧建造研究中心, 江苏 徐州 221000; 3. 江苏建筑职业技术学院 建筑智能学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了客观呈现我国数字孪生的研究进展和发展趋势, 以中国知网数据库 215 篇核心期刊文献作为数据源, 采用科学计量学的方法结合 Vosviewer 和 Citespace 工具构建了我国数字孪生研究知识图谱。研究表明, 从 2017 年起, 核心期刊发文量呈现上升趋势; 通过 Vosviewer 对发文机构和作者进行分析发现, 研究力量主要分布在高校和研究所, 形成了以北京航空航天大学、西安科技大学等为代表的 8 个机构群, 研究内容多元化且具有地域特色; 形成了数个领域高水平学术研究群体; 《计算机集成制造系统》《远程教育杂志》《中国机械工程》等刊物发文量较多, 标志着我国对数字孪生研究已经深入计算机、远程教育、机械等多个研究领域。通过 Citespace 对关键词进行共现、聚类 and 突现词分析发现, 智能制造、信息物理系统、人工智能、数智融合和智慧管网是该领域的热点问题, 并形成了以航空航天、未来教育、智能制造为代表的研究聚类; 数字孪生模型、虚拟车间、系统仿真等是我国数字孪生研究的前沿主题。

关键词: 数字孪生; 知识图谱; Vosviewer; 研究热点; 前沿演进

中图分类号: G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2021)11-0096-09

Progress, hotspot and frontier of digital twin research in China: Knowledge atlas analysis based on CNKI core journal database

ZHAO Liang^{1,2}, XU Na², ZHANG Wei³

(1. School of Information and Electronics Engineering, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou, 221116, China; 2. Smart Building Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221000, China; 3. Institute of Building Intelligence, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou, 221116, China)

Abstract: In order to objectively present the research progress and development trend of digital twin in China, and by taking 215 literatures in CNKI core journals database as the data source, the knowledge map of digital twin in China is constructed by using the method of scientometrics and the tools of Vosviewer and CiteSpace. The results show that since 2017, the number of articles published by core journals has shown an upward trend; Through Vosviewer's analysis of the publishing institutions and authors, it is found that the research forces are mainly distributed in universities and research institutes, forming eight institutional groups represented by Beihang University, Xi'an University of Science and Technology, etc., with diversified research contents and regional characteristics. High level academic research groups in several fields have been formed and there are a lot of papers published in *Computer Integrated Manufacturing Systems*, *Journal of Distance Education*, *China Mechanical Engineering* and other journals, which indicates that the research on digital twin has gone deep into

收稿日期: 2021-02-02 修改时间: 2021-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.71901206); 江苏省建设系统科技项目 (No. 2018ZD328); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目“基于知识图谱的建设项目节能驱动机理及 BIM 优化策略研究” (No. 21KJA560003); 徐州市科技项目 (KC19198)

作者简介: 赵亮 (1982—), 男, 江苏徐州, 副教授, 博士, 研究方向为科学计量学知识图谱、智慧建造、数字孪生等, godswish2006@126.com。

通信作者: 张维 (1983—), 女, 江苏徐州, 博士生, 副教授, 研究方向为遥感技术、高光谱遥感、无线传感网络等, 547113060@qq.com。

引文格式: 赵亮, 许娜, 张维. 我国数字孪生研究的进展、热点和前沿——基于中国知网核心期刊数据库的知识图谱分析[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(11): 96-104.

Cite this article: ZHAO L, XU N, ZHANG W. Progress, hotspot and frontier of digital twin research in China: Knowledge atlas analysis based on CNKI core journal database[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(11): 96-104. (in Chinese)

many research fields such as computer, distance education, machinery and so on. Through the analysis of keywords co-occurrence, clustering and emergent words by Citespace, it is found that intelligent manufacturing, information physical system, artificial intelligence, digital intelligence integration and intelligent pipe network are the research hotspots in this field, and research clusters represented by aerospace, future education and intelligent manufacturing have been formed; Digital twin model, virtual workshop and system simulation are the frontier topics of digital twin research in China.

Key words: digital twin; mapping knowledge; Vosviewer; hot topics; frontier evolution

数字孪生 (digital twin) 是通过数字化的方式建立物理实体的虚拟数字模型,其特征是集成多尺度、多学科、多物理量的方法并充分利用传感器、物理模型、运行历史等数据进行的全过程仿真,真实再现物理实体的全生命周期运行状态并兼具扩展功能。数字孪生是一种普适的理论技术体系,不局限于某个学科或专业,在航空航天、产品设计、工程建设等领域发挥着连接数字世界和物理世界的桥梁和纽带作用^[1-2]。2020年12月,中国工程院发布《全球工程前沿2020》,数字孪生驱动的智能制造和数字孪生仿真系统,分别入选机械领域的研究前沿和工程管理领域的开发前沿^[3]。作为《中国制造2025》中CPS体系(赛博物理系统)的关键技术,数字孪生在我国受到学术界和企业界的高度关注,相关研究内容主要集中在概念内涵、技术架构、工程建模、仿真预测等方面,以期通过数字孪生带来产业数字化转型解决智能制造、智慧建造等新兴研究领域的具体实际问题。

科学计量学方法通过可视化的方式对现有学术文献进行知识图谱分析,可以直观展示一个研究主题或者学科的研究概貌和聚焦,进而从宏观、中观和微观层面纵览该主题在各领域的发展脉络和演进趋势。在充分对比信息可视化软件的可读性、动态性和信息量基础上,本文采用Vosviewer和Citespace两种工具相结合,构建我国数字孪生研究知识图谱。通过发文机构和作者合作网络展示我国数字孪生的研究力量分布、高水平研究者和研究团队;通过关键词共现、聚类图谱和突现词分析,探究该领域的研究热点和前沿演进趋势。

1 发文特征与研究方法

中国知网(CNKI)提供了我国权威、覆盖学科广、内容完备且持续动态更新的综合性科研文献数据库,涵盖自然科学、社会科学、工程技术、教育管理等各种研究领域学术文献,本文研究选择核心期刊作为数据源具有较强的学术代表性。以“数字孪生”作为内容,采用的检索策略是:主题=数字孪生,限定期刊范围在SCI收录、EI收录、核心期刊、CSSCI期刊或CSCD期刊,发文时间分布在2017年1月至2020年12月,删除短评快讯、会议通知等,最终得到215条文献作

为论文基础数据。中国知网核心期刊数据库有关数字孪生研究的发文量和被引频次如图1所示。

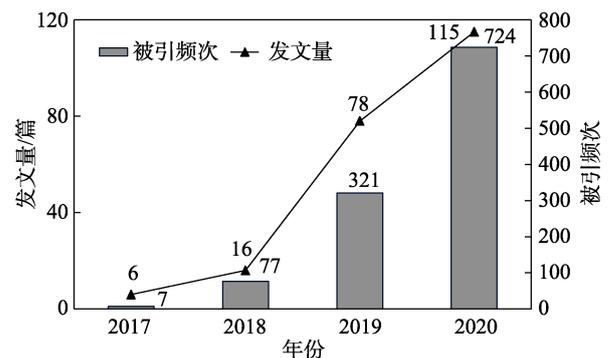


图1 数字孪生研究核心期刊发文量和被引频次

发文数量可以在一定程度上反映某一主题的研究热度,从图1可以看出数字孪生的研究文献逐年增加,被越来越多的研究者所关注,但每年的发文总量还相对较少,因此该领域的研究仍处于起步阶段。具体来看,2017年数字孪生相关的核心论文开始出现,发文数量为6篇;2018年发文量有小幅增加达到16篇;从2019年起发文量开始快速增长,相关研究迅速升温,达到78篇;2020年的发文量为115篇,继续保持增长态势。图1还可以看出,数字孪生研究文献的被引频次增幅显著,从2018年的77次增长到2019年的321次,进而到2020年724次,表明该领域研究的深度不断增加,相关文献的社会显示度和学术影响力越来越高。

2011年密歇根大学Michael Grieves教授明确提出数字孪生的概念^[4],我国数字孪生的核心期刊发文始于2017年,由北京航空航天大学的陶飞教授在《计算机集成制造系统》发文引入了数字孪生的概念。目前数字孪生在我国的研究和应用已经涉及机械、制造、建筑、自动化、计算机等多个学科,“基于数字孪生的仿真系统及其方法研究”更是入选了2020年中国工程院发布的Top10工程管理领域开发前沿,可以看出,数字孪生相关的理论、方法和应用正在成为跨领域、多学科交叉研究的热点。

使用Vosviewer和Citespace两种计量分析软件构建可视化科学知识图谱,可以直观展示某一新兴领域的研究热点、权威作者和前沿演进趋势。本文对215

条研究文献进行处理步骤为：①将中国知网研究文献导出生成 Excel 文件；②通过 Python 对数据进行处理生成 .net 文件；③通过 Citespace 将文献转换成 Web of Science 格式；④将处理后的数据导入 Citespace 和 Vosviewer 进行可视化分析。通过 Vosviewer 构建数字孪生研究机构的合作图谱和高产作者的密度分布图；通过 Citespace 构建热点关键词共现图谱并提取研究聚类，对各阶段的突现词进行识别。

2 合作网络分析

2.1 发文机构合作网络

发文机构共现图谱可以直观反映某一领域的研究力量分布和研究群体之间的合作关系。通过 Python 处理文献数据，提取研究机构关键词生成 .net 格式文件，

导入 Vosviewer 后得到数字孪生的研究机构共现图谱，如图 2 所示。图中的节点代表研究机构，节点大小表示署名该研究机构的文献数量，节点之间的连接表示各机构之间的合作关系，相同颜色的节点表示这些机构的研究内容或方向相近。从图谱整体上看，节点的分布比较密集，表明进行数字孪生的研究机构较多。从节点的地域分布看，北京、西安、广东、苏州、上海、南京、沈阳等地的高校和研究所发文较多，且机构之间建立了一定合作关系，这有利于我国数字孪生研究向广度和纵深延伸。此外，图谱中还分布了大量的灰色单独节点，虽然它们之间的合作较少，但有些机构的发文量也比较显著，这预示了我国数字孪生的研究已经受到很多研究机构的关注，研究热度和参与度不断提升，后续持续发展潜力可期。

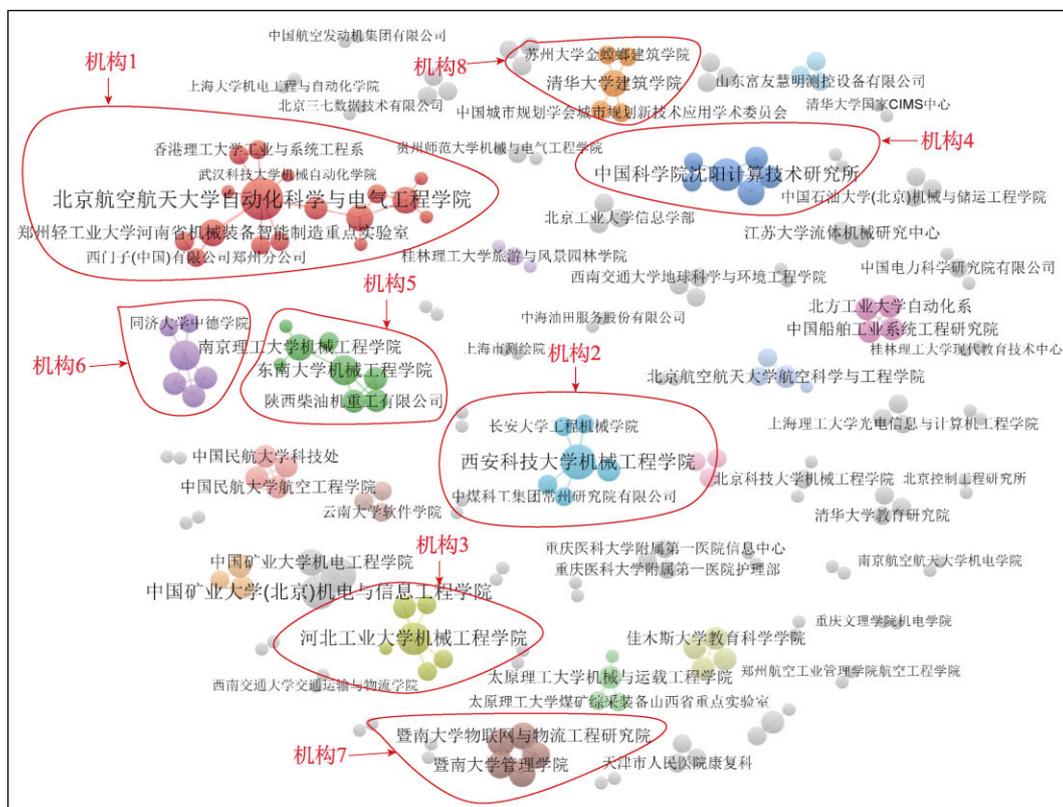


图 2 基于 Vosviewer 的研究机构共现图谱

对共现图谱中规模较大且颜色相同的研究机构进行划分，得到 8 个数字孪生研究方向相近的机构群。具体来看，机构 1 的节点规模最大，其中发文量最多的是北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院，共发文 10 篇，并与武汉大学、香港理工大学、郑州轻工业大学等高校保持合作关系。此外，机构 1 中还出现了西门子有限公司和智能制造重点实验室，他们和高校之间也建立了合作关系，表明该机构群中高校、研究所和企业协力推动了数字孪生的研究，有利于数字孪生的理论、技术和方法在产学研中的发展和

应用。机构 2 中发文最多的是西安科技大学机械工程学院，共发文 7 篇，和长安大学、中煤科工集团建立了合作关系，主要研究内容包括智能掘进机器人数字孪生系统、远程自动截割控制、虚拟悬臂式掘进机等数字孪生在煤矿行业的创新和应用。机构 4 中以中国科学院沈阳计算技术研究所为代表，与中国科学院大学、国家工业信息安全发展中心和沈阳高精数控智能技术有限公司等高校和企业建立合作，在数字孪生算法设计、建模方法和三维检测等计算机相关的研究方面成果丰富。

从机构共现图谱可以发现,我国数字孪生的研究力量主要分布在理工类高校和制造、机械类企业,机构群内部实现了以高校为中心辐射重点实验室和企业的有机结合,研究成果丰富且具有代表性。其次,我国数字孪生的研究具有多学科交叉融合的特点,图谱中的研究机构涵盖航空航天、机械、自动化、计算机、建筑、管理等多个学科,呈现学术研究的跨领域和多元化趋势。最后,研究机构的形成具有地域特色,如地处政治经济中心的北京航空航天大学 and 清华大学(机构8);长三角地区的同济大学(机构6)、东南大学(机构5)和苏州大学(机构8);以及地处西部和

东北老工业基地的西安科技大学和沈阳计算技术研究所等高校和研究机构。

2.2 作者合作网络

研究文献的发文作者图谱,可以直观反映某一研究领域影响力、发文量和权威性排在前列的作者和研究团队。图3是基于Vosviewer的数字孪生核心刊物发文作者密度图谱,图中姓名大小表示共现频次,颜色冷暖色表示作者之间合作关系的疏密。可以看出图谱中形成了以陶飞、刘蔚然、李浩、张贺、易旺民、刘检华、张旭辉、熊辉、毛清华等人为代表的高密度研究群体。

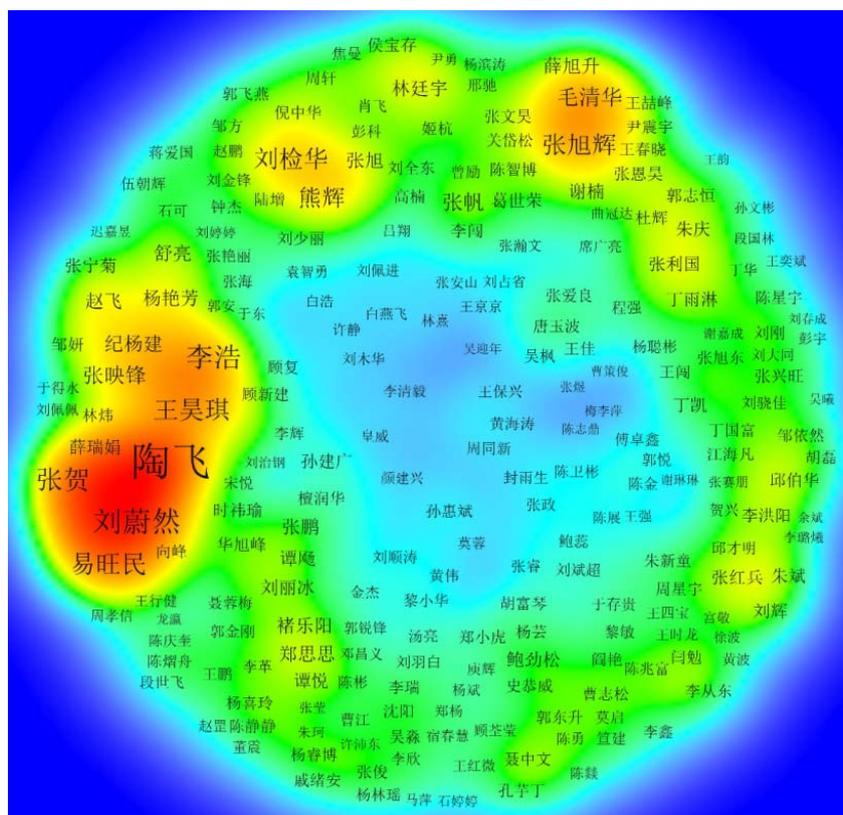


图3 数字孪生发文作者共现密度图谱

表1 2017—2020年数字孪生研究高被引文献

序号	作者	标题	年份
1	陶飞、刘蔚然、刘检华等	数字孪生及其应用探索	2018
2	陶飞、张萌、程江峰、戚庆林	数字孪生车间——一种未来车间运行新模式	2017
3	庄存波、刘检华、熊辉	产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势	2017
4	张旭辉、张雨萌	数字孪生驱动的设备维修MR辅助指导技术	2020
5	张超、张旭辉、毛清华	煤矿智能掘进机器人数字孪生系统研究及应用	2020

图2中共现频次较高作者的研究文献和发文时间如表1所示,可以看出,虽然我国数字孪生研究起步较晚,但也形成了一定规模的学术群体和研究团队,如图谱中较为明显的3个研究团队分别以陶飞、刘检华和张旭辉等人为代表。图2左侧陶飞、刘蔚然、张贺、李浩等人的研究团队处于最显著的位置,2017年

北京航空航天大学陶飞教授在《数字孪生车间——一种未来车间运行新模式》一文中提出数字孪生车间的概念,阐述了其概念、系统组成、运行机制和关键技术,这是我国核心刊物首次对“数字孪生”进行发文研究;2018年陶飞教授又在《数字孪生及其应用探索》一文中分析了企业应用和理论研究层面数字孪生技术

领域复杂产品设计和制造中信息和物理融合的重要抓手,为智能制造落地提供了有效途径^[19-20]。在建筑领域有智慧城市、智慧建造、建筑信息模型、城市信息物理系统等内容,数字孪生正逐渐涉及智慧城市建设、城市智能预测、智能化建筑平台以及下一代建筑信息模型技术等前沿问题^[21-22]。在信息技术领域,分布着人工智能、人机交互、云平台、遗传算法等关键词,新一代信息技术、工业互联网的迅猛发展为各领域数字孪生的实践和应用提供了技术支持,人工智能、云服务和算法等关键技术将进一步深化数字孪生的应用^[23-24]。在石油天然气领域,数字孪生管网为真实管道系统和虚拟管道系统之间的信息交互和融合提供了新的技术手段,对我国智慧管网建设具有重要的参考价值^[25]。

表2还统计了图谱中节点的中心性,中心性较高的节点在图谱中串联起不同研究领域,对构成整个图谱网络起到较强的中介作用^[26]。可以看出,图5中数字孪生、智能制造、信息物理系统等关键词共现频次和中心性都排在前列,表明这些内容一直受到业界学者的关注,研究热度继续保持。值得注意的是,表2中物联网关键词的共现频次并不高,但中心性指标较强,表明该节点位于教育、人工智能、智能制造、建筑信息化等研究聚类之间,在连接各领域、跨学科和

多学科交叉方面发挥了重要的枢纽作用。

表2 高共现频次和中心性关键词

序号	关键词	频次	中心性	序号	关键词	频次	中心性
1	数字孪生	233	0.68	6	关键技术	12	0.04
2	智能制造	17	0.15	7	虚实映射	11	0.05
3	信息物理系统	15	0.14	8	大数据	10	0.11
4	断路器	15	0.03	9	体系结构	10	0.02
5	人工智能	12	0.05	10	物联网	6	0.15

3.2 研究领域的知识结构

Citespace 的聚类功能可以对联系密切的关键词进行识别,揭示所在研究领域的知识结构,反应已经形成的研究主题。本文通过 log-likelihood ratio (LLR) 算法进行聚类分析,经调整后得到航空发动机、教育应用、油气管道、光电探测系统等9个较为明显的研究聚类。聚类图谱的 modularity Score 值为 0.671 31, mean silhouette 值是 0.937 8,根据聚类参数^[26],图谱网络被划分成多个耦合集群,且各集群中成分的同质性也满足要求。

表3列出了排在前列的8个聚类结构,包括聚类ID、大小、Silhouette 值和通过 LLR 算法分析得到的部分特征关键词。从表3可以看出,我国当前对数字孪生的研究可以分为三个研究主题。

表3 高耦合聚类结构

研究主题	聚类ID	聚类大小	Silhouette 值	Label (LLR 算法分析)
航空 航天	0	24	0.950	信息物理系统;智能制造;随机有限集;产品全生命周期管理;遗传算法;动态数据驱动仿真;建模;机电一体化;虚拟调试;信息物理融合等
	8	4	0.914	光电探测系统;动态贝叶斯网络;数字孪生模型;退化建模;数字孪生;信息物理系统;智能制造;大数据;数字主线;人工智能;设备维修;智慧管网;设计工作量预测;智能采矿系统;产品设计;人机交互;信息模型;复杂机电设备等
未来 教育	1	19	0.865	大数据;全寿期保障;教育应用;动力装置;智能教育;全息课堂;5G;学习空间;区块链;图形化数据;脑机技术;5G+AI;虚实共生;智能技术;智能生态;数据科学等
	5	12	0.925	数字孪生图书馆;数字孪生城市;未来图书馆;虚实映射;虚实融合;未来学习;以虚控实;全息技术;地物要素提取;学习图景;全周期管理;多源数据融合;三维模型重建;学习场域;智能化全息测绘;信息物理系统;智能制造;大数据等
智能 制造	2	18	0.986	数字主线;数字孪生车间;设备维修;设计工作量预测;智能采矿系统;产品设计;人机交互;信息模型;复杂机电设备;混合现实;物联网;应用场景;虚实融合;数字孪生体;智能采煤工作面等
	3	16	0.952	油气管道;智慧管网;物联网;数字孪生体;云平台;智能决策;人工智能大脑;知识库;工业互联网;智能管道;数字管道;智慧管道;设备维修;设计工作量预测;智能采矿系统;产品设计等
	4	15	0.945	数字孪生车间;应用场景;智慧图书馆;逻辑 petri 网;交互与共融;生产车间;犹豫模糊语言;虚拟车间;车间孪生数据;三维可视化监控;逻辑关系模型;owa 算子;质量评价;实时信息;航天产品;断路器;流程行业等
	7	5	0.965	人工智能;工业机器人;航空器;预测性维修;phm;“智能+”校园;智能教室;教育生态;教育信息化 2.0;新业态;数字孪生;信息物理系统;智能制造;大数据;数字主线;设备维修等

(1) 航空发动机和光电探测系统。数字孪生概念真正引起关注源于 2011 年美国 NASA 提出的面向飞行器的数字孪生体模型, 该模型同时定义了数字孪生的实体功能、实时状态和演变趋势, 通过分析 LLR 算法提取出的各模块关键词可以看出, 上述聚类都是从航空航天领域的应用出发, 并融合信息物理系统、智能制造、光电探测、大数据、深度学习等新技术进行数字孪生的研究。例如, 建立了数字孪生航空发动机装配的流程、工艺技术、装机物料和关联分析模型, 并对数字孪生驱动的装配执行过程控制、零件选配、装配间隙控制等关键技术进行了实例验证^[27]; 试图解决光电探测系统装机状态性能可量化评价, 建立光电探测系统性能退化的数字孪生模型, 并通过仿真验证该模型的有效性^[28]。

(2) 教育应用和数字孪生图书馆。通过分析这两个模块中的关键词内容, 将这两个模块归类为数字孪生驱动下的未来教育主题, 该主题聚焦大数据、5G+AI、区块链等新兴信息技术背景下数字孪生驱动的教育应用、全息课堂、虚实融合未来图书馆等内容。例如, 基于 5G+AI+大数据构建了数字孪生赋能下的全息课堂, 集虚拟、交互和动态一体, 为智能时代的

教学变革和学习场域构建提供了参考。面向全生命周期管理构建了数字孪生图书馆五维模型, 通过知识服务生命周期环、数字孪生模型周期环和知识服务内容周期环实现了全周期管理。

(3) 数字主线、数字孪生车间、工业机器人和油气管道。从聚类的内在结构看, 他们均属于数字孪生在智能制造主题下的研究和发展, 涵盖数字制造、工业互联网、DTW、油气管道数字孪生体等内容。如数字主线通过先进建模和仿真工具, 实现覆盖产品全生命周期的数字化数据流, 构建煤炭开采的全生命周期数字主线^[29]; 基于数字孪生的工业机器人实现航空器预测性维修技术的应用态势; 在油气管道方面实现了在役管道的数字孪生体构建, 为真实管道和虚拟管道的信息互融提供技术支持^[30]。

3.3 研究前沿和演进

突现词 (burst word) 是指短时间内出现频次发生较大变化的关键词, 可以在一定程度上反映研究主题发展的前沿趋势, 突现词的强度则表示该关键词在短时间出现频次骤增的程度。通过 Citespace 的 Burst detection 对关键词共现图谱进行突现性分析, 共得 8 个突现词, 如图 6 所示。

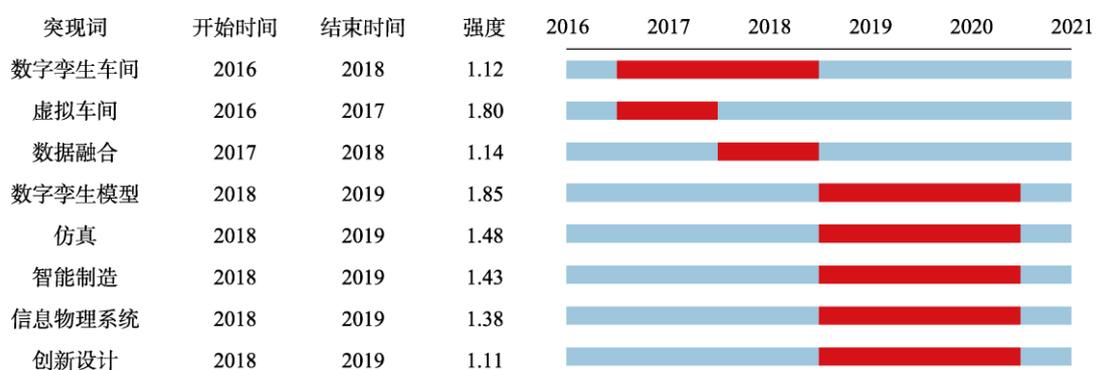


图 6 我国数字孪生研究突现词

图 6 中开始时间表示关键词首次出现突现性增长趋势, 结束时间表示在哪一年结束了突现性增长, 红色线段表示突现延续的时长。从突现词的时间维度看, 数字孪生车间、虚拟车间是最早出现的突现词。2017 年陶飞等^[8]提出数字孪生车间的概念, 详细论述了数字孪生的概念、内涵、特点和发展趋势, 以及数字孪生车间的系统架构, 对我国相关领域的研究起到奠基性作用。2018 年的突现词数据融合持续了 1 年时间, 在数字孪生概念框架的基础上, 从异构要素融合、现实和虚拟融合、物理和信息融合、服务和应用融合等方面, 对数字孪生中多源数据融合进行了深层次的研究^[31-32]。2019 年突现词有数字孪生模型、仿真、智能制造、信息物理系统和创新设计等, 反映了数字孪生

的研究已经开始涉及智能制造、计算机、设计等多个研究领域, 呈现从宏观到微观、从单一到多元化的变化趋势。近年来剧增的突现词在持续时间上具有延续性, 在一定程度上反映了未来几年数字孪生研究的前沿问题, 是我们值得重点关注的技术分支。从突现词的突现强度维度看, 数字孪生模型、虚拟车间、仿真、智能制造分别排在前列, 它们代表了数字孪生在相关领域应用的重要方向, 如智慧矿山、数字图书馆、工程机械等领域的数字孪生建模, 制造车间的三维可视化管控, 复杂天基体系效能仿真等^[18,29,33-34], 这些突现词受到了研究者的广泛关注, 并有潜力成为极具影响力的研究热点。

4 研究结论和展望

本文以中国知网核心期刊数据库作为数据源,检索获得数字孪生领域的215篇文献作为基础数据,通过科学计量学的方法对我国数字孪生的发文趋势、研究力量、研究热点、知识结构和演进趋势进行了可视化图谱分析,获得以下结论:

(1)从研究发展趋势看,我国数字孪生的研究起步于2017年,随后发文数量呈现快速增长的态势,文献被引频次逐年递增,社会显示度和学术水平越来越高。产品全生命周期管理、航天飞行器运维模型和物理-虚拟车间交互等理念和思想,推动了我国数字孪生的发展,数字孪生关键技术正成为我国工程管理领域研究的前沿主题。

(2)从发文机构的合作关系看,数字孪生的研究在我国呈现高校、科研院所和企业密切合作的发展态势,形成了一定数量的研究团队。研究团队的学科结构涵盖航空航天、机械、计算机、建筑等多个领域,呈现出高校之间、高校和重点实验室、高校和企业多种合作形式,并形成了北京、长三角地区、西部和东北老工业基地等具有地域特色的研究机构群体。

(3)从发文研究团队构成看,我国数字孪生研究形成了一定规模的学术群体,涉猎多个学科和专业。北京航空航天大学的陶飞团队提出了数字孪生的概念模型、运行机制和关键技术等内容,对该领域的发展起到引领作用;北京理工大学刘检华团队在基于数字孪生的产品制造和装配方面成果丰富;西安科技大学张旭辉团队在智能掘进、设备运维方面取得较新的研究进展。《计算机系统集成制造系统》《远程教育杂志》《中国机械工程》《油气储运》等期刊发文量排在前列,折射出我国数字孪生的研究已经深入计算机、教育、机械等多个研究领域,具有跨学科、多学科融合的特点。

(4)从关键词共现频次看,我国数字孪生的研究热点主要分布在5个研究领域:教育、航空机械、建筑、信息技术和石油天然气。大数据、工业互联网、5G技术、人工智能等高速发展的新一代信息技术促进了数字孪生在我国各行业的落地和应用。智能制造、物联网、信息物理系统等关键词在数字孪生的跨学科和多学科交叉融合方面发挥了中介和桥梁功能。从关键词的聚类图谱可知,我国数字孪生的研究成果形成了航空航天、未来教育和智能制造3个较明显的研究主题,各聚类包含的关键词也揭示了该领域潜在的知识结构。

(5)从突现词出现的时间和强度维度看,数字孪生车间、虚拟车间等内容对我国数字孪生的发展起到

奠基性作用。数字孪生模型、智能制造、仿真、信息物理系统等突现词代表了近年来数字孪生研究的前沿问题,而且它们有潜力成为未来的研究热点。

总体来看,我国数字孪生的研究和应用尚处于起步阶段,虽然在航空航天、机械制造等领域出现了一些研究成果,但应用的深度和广度还比较有限。得益于物联网、云计算、大数据、机器学习等信息技术的飞速发展,数字孪生正逐渐延伸至智慧矿山、智能建造、智慧城市、机电运维等社会各领域的应用,与我国大力发展先进制造业,推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合的目标契合紧密。从图5关键词共现频次可知,数字孪生的实现依赖于诸多先进信息技术的发展和应用,其技术体系从数据保障、建模计算,到功能实现、沉浸式体验,每一层的实现都离不开高性能计算、先进的传感器采集、数字仿真、虚拟现实等技术的支撑。因此,本文从高性能计算和数据-物理模型融合两个方面,结合关键词共现图谱和突现词分析(图5和图6),对我国数字孪生的研究进行展望。

(1)实时性是数字孪生应用于复杂产品制造的重要性能指标,在很大程度上依赖于高性能计算平台。图5所示的关键词共现图谱也出现了云平台、遗传算法等高性能计算研究的关键词。因此,如何综合权衡系统负载、建设成本、数据传输延迟以及云平台的计算能力,通过算法云化、深度神经网络等技术设计最优的高性能系统架构,满足数据孪生体的实时分析和运算,是智能制造领域数字孪生落地的关键。

(2)数字孪生技术通过建立机理结构复杂的物理模型反映目标系统的真实运行情况,融合实时运行数据对物理模型进行更新、修正和补充,充分体现了数字孪生的智能化和自主性的特征。图6所示的突现词在2018年出现了数据融合、2019年出现了仿真和数据孪生模型,都反映出数据-物理模型融合正成为我国数字孪生研究的前沿问题。而经由高精度传感器获得的数据与物理模型的有机结合,完全再现目标系统的运行特性和机理,是构建目标数字孪生系统的难点。因此,未来借助机器学习、深度学习等高性能算法,有效融合数字化设计、过程仿真和运行机理等因素进行目标系统的数据-物理建模,是推动各领域数字孪生应用的研究重点之一。

参考文献 (References)

- [1] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
- [2] 陶飞,张贺,戚庆林,等.数字孪生十问:分析与思考[J].计算机集成制造系统,2020,26(1):1-17.

- [3] 中国工程院战略咨询中心.《全球工程前沿 2020》报告发布土木、水利与建筑工程领域 Top10[J].隧道建设(中英文), 2020, 40(12): 1741.
- [4] GRIEVES M. Virtually perfect: Driving innovative and lean Products through product lifecycle management[M]. USA: Space Coast Press, 2011.
- [5] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间:一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
- [6] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 110-132.
- [7] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
- [8] 张旭辉, 张超, 王妙云, 等. 数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟操控技术研究[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-18 [2021-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20201026.1618.050.html>.
- [9] 张旭辉, 张雨萌, 王岩, 等. 数字孪生驱动的设备维修 MR 辅助指导技术[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 1(20): 1-13.
- [10] 郑思思, 陈卫东, 徐铷忆, 等. 数智融合: 数据驱动下教与学的演进与未来趋向:兼论图形化数据智能赋能教育的新形态[J]. 远程教育杂志, 2020, 38(4): 27-37.
- [11] 张艳丽, 袁磊, 王以宁, 等. 数字孪生与全息技术融合下的未来学习: 新内涵、新图景与新场域[J]. 远程教育杂志, 2020, 38(5): 35-43.
- [12] 刘强. 智能制造理论体系架构研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 24-36.
- [13] 李浩, 王昊琪, 程颖, 等. 数据驱动的复杂产品智能服务技术与应用[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 757-772.
- [14] 肖通, 江海凡, 丁国富, 等. 五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J/OL]. 系统仿真学报: 1-13[2020-10-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20201029.1655.002.html>.
- [15] 伍朝辉, 刘振正, 石可, 等. 交通场景数字孪生构建与虚实融合应用研究[J/OL]. 系统仿真学报: 1-10[2021-01-20]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0754>.
- [16] 刘潇翔, 汤亮, 曾海波, 等. 航天控制系统基于数字孪生的智慧设计仿真[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 377-384.
- [17] 朱珂, 张莹, 李瑞丽. 全息课堂: 基于数字孪生的可视化三维学习空间新探[J]. 远程教育杂志, 2020, 38(4): 38-47.
- [18] 王璐, 张兴旺. 面向全周期管理的数字孪生图书馆理论模型、运行机理与体系构建研究[J]. 图书与情报, 2020(5): 86-95.
- [19] 李浩, 陶飞, 王昊琪, 等. 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1320-1336.
- [20] 舒亮, 张洁, 杨艳芳, 等. 考虑节拍约束的断路器孪生车间模型动力学控制[J/OL]. 系统仿真学报: 1-11[2021-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20200723.1646.006.html>.
- [21] 韩冬辰, 张弘, 刘燕等. 从 BIM 到 BDT: 关于建筑数字孪生体(BDT)的构想研究[J]. 建筑学报, 2020(10): 95-101.
- [22] 顾建祥, 杨必胜, 董震, 等. 面向数字孪生城市的智能化全息测绘[J]. 测绘通报, 2020(6): 134-140.
- [23] 张映锋, 张党, 任杉. 智能制造及其关键技术研究现状与趋势综述[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(3): 329-338.
- [24] 颜晓莲, 章刚, 邱晓红, 等. 工业物联网的工业边缘云部署算法[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-17[2021-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20201026.1107.042.html>.
- [25] 李柏松, 王学力, 王巨洪. 数字孪生体及其在智慧管网应用的可行性[J]. 油气储运, 2018, 37(10): 1081-1087.
- [26] 陈超美, 陈悦, 侯剑华, 等. CiteSpace II: 科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化[J]. 情报学报, 2009, 28(3): 401-421.
- [27] 孙惠斌, 颜建兴, 魏小红, 等. 数字孪生驱动的航空发动机装配技术[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 833-841.
- [28] 任涛, 于劲松, 唐荻音, 等. 基于数字孪生的机载光电探测系统性能退化建模研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(2): 75-80.
- [29] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925-1936.
- [30] 熊明, 古丽, 吴志锋, 等. 在役油气管道数字孪生体的构建及应用[J]. 油气储运, 2019, 38(5): 503-509.
- [31] 林述涛. 面向多源数据融合的交通基础设施数字化架构研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(9): 122-127, 145.
- [32] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
- [33] 皇威, 王通, 李清毅, 等. 一种构建高性能仿真基础数据资源池的方法[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(1): 120-126.
- [34] 周成, 孙恺庭, 李江, 等. 基于数字孪生的车间三维可视化监控系统[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-18[2021-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200817.0917.008.html>.