

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.240119

# 数字孪生在工业工程领域应用的热点和趋势分析

林国义<sup>1</sup>, 郭慧妍<sup>1</sup>, 冷杰武<sup>2</sup>, 赵慧<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学 商学院, 广西 桂林 541000; 2. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 为了客观掌握国内外数字孪生技术在工业工程领域中的应用现状及研究进展, 本文以 Web of Science 和中国知网数据库中 2017—2023 年国内外相关文献为基础, 进行文献梳理并构建了科学知识图谱。通过发文量分析发现, 自 2017 年起, 国内外有关数字孪生在制造业应用的研究日益增多, 呈现出稳定的上升趋势, 且中文文献的发表数量超过了英文文献。通过发文机构分析发现, 北京航空航天大学、西安交通大学、西北工业大学, 以及国外的 University of Patras、SKKU 等高校在该领域的文献产出量位居前列, 说明国内外高校形成了对该领域的重要研究力量。通过关键词分析发现, 国内研究热点为智能制造、人工智能、元宇宙, 国外则更关注工业 4.0、数字孪生模型设计与系统优化。国内的前沿主题集中在数字孪生模型的建立、数字孪生车间和数据驱动的应用; 国外则集中在网络物理系统、制造系统和不确定性分析等主题。当前, 数字孪生技术在工业工程领域实现了较为成熟的应用, 但国内外研究侧重点不同, 国内侧重于技术的具体应用和实践探索, 而国外研究则偏向于模型与过程的优化。

**关键词:** 数字孪生; 工业工程; 制造业; 数字化转型; 可视化分析

中图分类号: F403.6; TP39

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2024)06-0013-13

## Hotspot and Trend Analysis of Digital Twin Application in Industrial Engineering

LIN Guoyi<sup>1</sup>, GUO Huiyan<sup>1</sup>, LENG Jiewu<sup>2</sup>, ZHAO Hui<sup>1</sup>

(1. Business School, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin 541000, China;

2. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** The study aimed to objectively assess the current status and research progress of digital twin technology in industrial engineering both domestically and internationally. It conducts a literature review based on relevant publications from the Web of Science and China National Knowledge Infrastructure (CNKI) databases from 2017 to 2023, and develops a scientific knowledge map. Findings reveal that research on the application of digital twins in the manufacturing field has increased significantly since 2017, with Chinese publications surpassing English ones in frequency. Analysis of contributing institutions identifies significant output from Beihang University, Xi'an Jiaotong University, Northwestern Polytechnical University, University of Patras, and SKKU, indicating a strong academic focus on this area. Keyword analysis distinguishes domestic interests in smart manufacturing, artificial intelligence, and the metaverse, while international research prioritizes Industry 4.0, digital twin design, and system optimization. Domestically, frontier topics revolve around the development of digital twin models, workshops, and data-driven applications. Internationally, the focus shifts to cyber-physical systems, manufacturing systems, and uncertainty analysis. Overall, digital twin technology has currently reached mature applications in industrial engineering, with domestic research concentrating on specific applications and practical exploration, in contrast

收稿日期: 2024-03-28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (62173253, 52272374); 国家社会科学基金资助项目 (19CJL048); 广西壮族自治区普通本科高校新工科研究与实践项目 (XGK202310); 广西壮族自治区普通本科高校教学改革工程项目 (2023JGB198); 广西壮族自治区普通本科高校教改项目 (JGT202302, JGKQ202309); 广西壮族自治区研究生教育创新计划项目 (YCSW2023311)

**作者简介:** 林国义 (1984—), 男, 台湾省人, 教授, 博士, 主要研究方向为智能制造与人工智能。

Email: kylink1008@hotmail.com

**通讯作者:** 赵慧 (1987—), 女, 广西壮族自治区人, 教授, 博士, 主要研究方向为企业管理、中国-东盟 (数字) 经济合作。

Email: aseanzhao@126.com

to international studies' emphasis on model and process optimization.

**Key words:** digital twin; industrial engineering; manufacturing; digital transformation; visual analysis

制造业不仅是国民经济发展的根基，也是科技应用的重要领域。随着大数据、人工智能、云计算等新兴数字技术的应用和发展，制造企业的数字化转型已经成为各国制造业发展的趋势。自党的十八大以来，我国极为重视数字经济的发展，并提出要将数字技术融入多个领域中，以促进经济的高质量发展<sup>[1]</sup>。党的二十大报告指出，要坚持把经济发展的重点落在实体经济上，推动制造业的智能化发展，加快建设制造强国<sup>[2]</sup>。我国进入工业 4.0 时代以来，制造业的数字化建设获得了一定的成就。然而在推进数字化转型的进程中，我国制造业还面临着对数字技术的应用程度不足，在多个环节应用数字技术时，存在部门之间的协同困难等问题。同时，制造企业数字化转型的转型路径与模式相对复杂，转型过程中涉及的利益方较多，在这样的背景下，制造企业的转型难度较大，转型速度也较缓慢。为应对这些挑战，制造企业需要逐步引入数字技术，加深数字技术的应用程度，以加快制造业的数字化改造进程。这不仅是提升制造业竞争力的关键，也是实现高质量发展的重要路径。

数字孪生技术的出现和应用，给制造企业在数字化转型的道路上开辟了新的视角，并为解决制造业所面临的诸多挑战提供了创新的思路。制造企业数字化转型中存在数据采集与分析、数据计算、数据传输等方面的问题，数字孪生可以对物理实体进行数字化描述，在企业实体运作过程中可以对制造生产的整个过程实现全过程、全时刻的监控，解决企业在数据方面的难题。在制造企业数字化和智能化的进程中，数字孪生作为重要前沿科学领域之一，其作用逐渐凸显。

当前，相关学者对数字孪生的研究尚未在工业工程领域进行系统深入分析。鉴于制造业作为我国的支柱产业且正面临关键的转型时期，采用科学计量方法全面剖析国内外工业工程领域中制造企业对数字孪生技术的应用情况，对国内制造业的数字孪生技术发展具有重要意义。基于此，本文围绕数字孪生在制造企业中的应用，采用科学计量的方法对比了国内外在该领域的不同实践与发展状况，分析了当前工业工程领域中制造业的研究热点、进程和

前沿，对国内外数字孪生技术在制造企业中的应用进行深入研究，以期为我国制造业在数字孪生技术的应用与发展提供有益的参考和现实依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本文以国内外工业工程领域数字孪生技术研究的相关文献为研究对象，分析了国内外制造企业应用数字孪生技术研究情况的不同。为最大程度涵盖制造企业应用数字孪生技术的研究状况，本文使用的中文文献来源于中国知网 (CNKI) 的北大核心、CSSCI、AMI 数据库，设定检索式“(数字孪生)\*(制造+生产)”进行检索。英文文献选自 Web of Science (WOS) 核心数据库，设定检索式“(digital twin)\*(manufacturing + production)”进行检索。检索时间截至 2023 年 12 月 31 日。除了关键词“制造”外，选取的关键词“生产”可以确保检索结果更全面，有利于深入研究数字孪生技术在整个制造环节中的应用。检查检索到的文献数据，根据研究方向与研究重点剔除无关文献，最终确定 337 篇中文文献和 500 篇英文文献为分析对象。

### 1.2 研究方法

美国科学历史主义学派的奠基者库恩指出，学术研究文献是窥探学科领域科学本质的窗口，透过对其中关键信息的提炼，能够有效预测特定学科领域的发展动态。鉴于 Citespace 在科学计量学中的广泛应用及其强大的知识图谱绘制能力<sup>[3]</sup>，本研究采用该工具对数字孪生技术领域的文献进行了深入、细致的分析。将选中的文献以 Refworks 格式导入 Citespace 软件，通过关键词词频分析、关键词聚类分析及时间线分析等多种方式，绘制出了直观且富有洞见的知识图谱。这一系列分析有助于更深入地理解数字孪生技术的发展脉络和未来趋势，为进一步分析数字孪生的研究热点和研究前沿提供依据。

## 2 文献描述性统计分析

### 2.1 发文特征

发文量的变化趋势可作为衡量某一主题研究热

度的有效指标。根据图1所示, 数字孪生的研究文献数量呈现逐年攀升的趋势, 说明这一领域的关注度正在逐步增强。尽管当前数字孪生领域的研究尚处于起始阶段, 但其发文量的增速却相当可观。如图1显示, 自2017年起, 国内外开始涌现出与数字孪生相关的核心论文, 这标志着该领域的研究逐渐走向深入。通过发文特征分析发现从2017年国内外对数字孪生应用在制造业的研究开始增多, 且一直呈现上升态势, 这说明国内外对数字孪生应用在制造业的研究持续升温。国内外总体趋势相同, 但可以看出中文发文速度领先国外, 并且差距逐渐增大, 表明国内对该领域的研究热度保持在较高的水平。

## 2.2 合作网络分析

### 2.2.1 发文机构合作网络

通过识别数字孪生领域的研究机构合作图谱, 可以发现高校与相关科研结构在该领域的研究成果显著, 尤其是国内高校和科研机构的贡献尤为突出。从国内发文机构的合作网络来看(见图2), 机构间的合作紧密, 形成了以北京理工大学、北京航空航天大学为核心的合作网络, 这体现了我国在该领域的研究深度和广度。北京航空航天大学、西安交通大学、北京理工大学、西北工业大学在数字孪生领域的文献发文量位居前列, 这充分说明了我国一些实力较强的高校对该领域的关注度较高, 并产出了一定的研究成果。相比之下, 如图3所示, 国

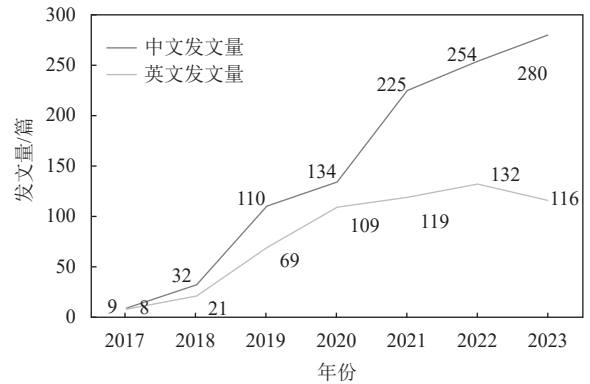


图1 中英文文献发文量

Figure 1 Number of publications in English and Chinese

外机构间的合作则显得较为分散, 值得注意的是国内外高校和研究所之间存在合作网络。国外 University of Patras 和 SKKU 等机构也积极开展合作研究, 并取得了一定的成果。

通过识别和分析数字孪生领域的研究机构合作图谱, 可以看到发文机构网络的构成对该领域研究具有重要作用。首先, 紧密的合作网络促进了学术交流与合作, 特别是国内高校和科研机构之间的密切协作, 如北京理工大学和北京航空航天大学等核心机构的合作, 提升了研究效率和质量。其次, 研究网络推动了跨学科融合, 通过高校与重点实验室、高校与企业之间的多元化合作模式, 引入新的视角和方法, 促进数字孪生技术的创新发展。同时, 国内院校通过与国外院校机构的合作, 推动了

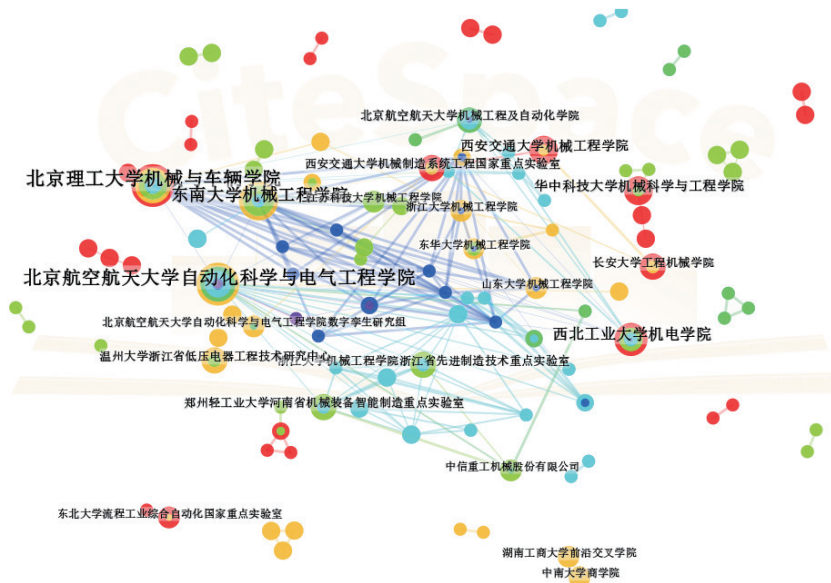


图2 国内发文机构合作网络

Figure 2 Collaboration network of domestic publishing institutions

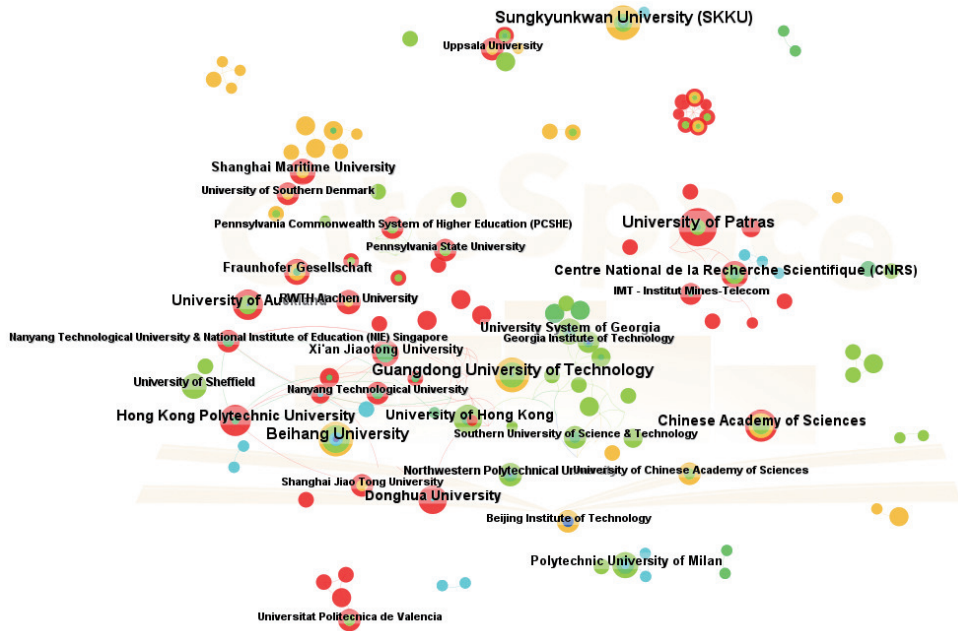


图 3 国外发文机构合作网络

Figure 3 Collaboration network of foreign publishing institutions

数字孪生学术成果的转化与应用。

### 2.2.2 作者合作网络

通过对文献发文作者图谱的深入分析，可以识别出在数字孪生领域发表文献数量众多且影响力显著的学者。从图 4 来看，国内陶飞、刘检华等学者已形成了核心的高密度研究群体，他们在该领域的研究活动极为频繁，不仅推动了数字孪生技术的发展，也为制造企业对数字孪生的应用做出了杰出贡献。与此同时，国外也涌现出了以 Strube 和 Park

等人为代表的研究群体，他们在国际数字孪生研究领域同样发挥着举足轻重的作用。进一步观察图 5，可以发现，国内外作者节点间存在广泛的合作连线，这表明在数字孪生领域已形成了多个研究团队，并积极开展相关研究。这一现象不仅体现了数字孪生技术在制造业中的广泛应用前景，也凸显了国内外学者对该领域研究的热切关注和持续投入。通过作者合作图谱可以看出，作者之间的合作对数字孪生研究成果的产生具有显著的推动作用，在合作网络

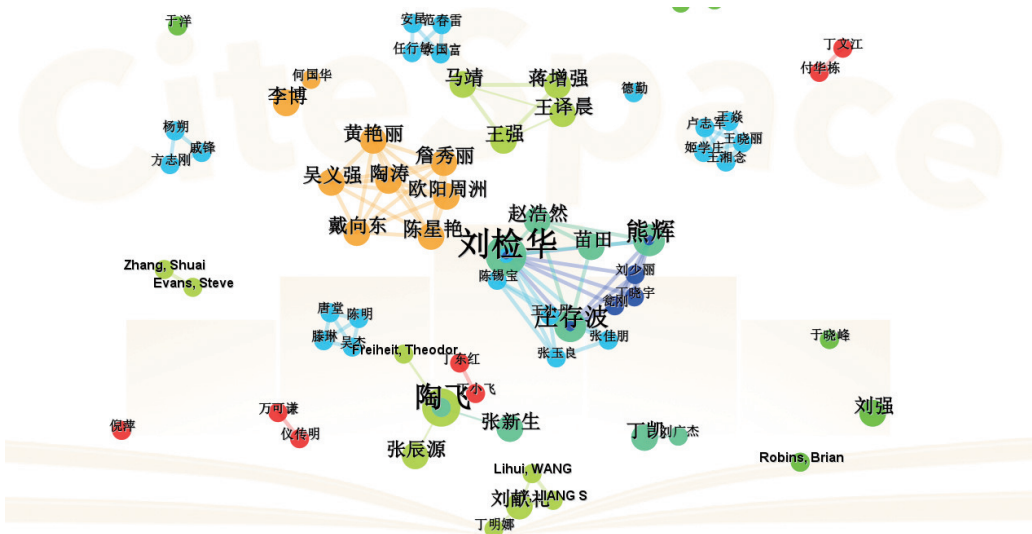


图 4 国内作者合作网络

Figure 4 Collaboration network of domestic authors

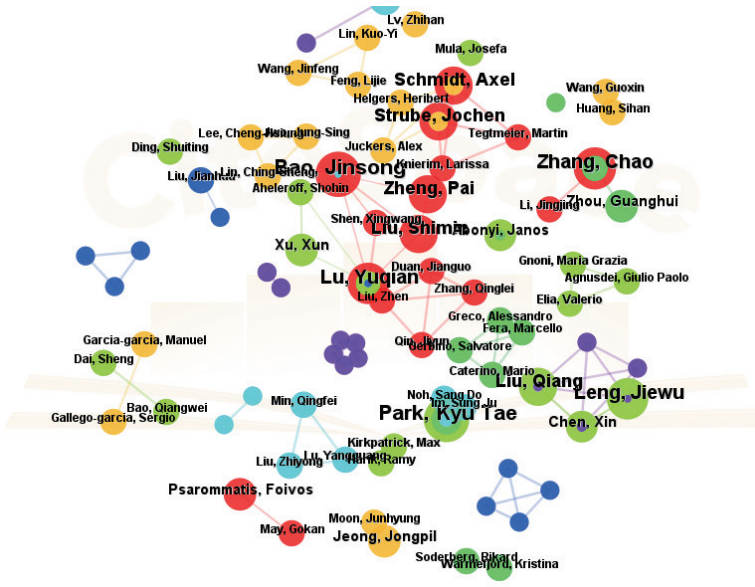


图 5 国外作者合作网络

Figure 5 Collaboration network of foreign authors

中发文量较高的作者可以带动合作网络中其他作者的学术成果产出, 这说明作者之间的合作为数字孪生研究的持续产出和发展提供了强有力的支持。

### 3 国内外数字孪生的研究热点和演进

#### 3.1 研究热点分析

国内外高频关键词如表 1 所示, 可以发现除数字孪生外, 智能制造、大数据、信息物理系统是比较受到关注的主题关键词, 国内外研究热点都比较广泛, 研究热点有重合但研究内容侧重点有所不同(见图 6~7)。将国内外高频关键词大致分为 3 个方

表 1 国内外文献高频词

Table 1 List of high frequency keywords in domestic and foreign literature

序号	CNKI		WOS	
	高频词	频次	高频词	频次
1	数字孪生	255	digital twin	363
2	智能制造	79	industry 4	234
3	人工智能	19	design	149
4	元宇宙	14	framework	84
5	数字孪生车间	14	smart manufacturing	77
6	全生命周期	12	system	71
7	薪资物理系统	11	big data	61
8	大数据	10	model	56
9	数字孪生技术	10	management	56
10	数字化转型	10	future	55

面, 分别是数字孪生内涵和模型的研究、数字孪生相关数字技术的研究和在制造过程中各环节的研究。以下是关于国内外数字孪生研究热点在 3 个方面的对比分析。

#### 3.1.1 数字孪生内涵和模型研究

随着工业 4.0、中国制造 2025、数字化转型等理念的涌现, 数字孪生技术的应用范畴和深化程度均面临了更为严格的挑战<sup>[4]</sup>。从数字孪生诞生之日起, 学术界对数字孪生的基础理论便展开了大量的研究。庄存波等<sup>[5]</sup>首先系统地提出了数字孪生技术的概念, 对产品数字孪生体的内涵进行了系统地阐述并建立了数字孪生体的体系结构。传统的三维数字孪生模型在面对复杂的实际场景时, 没有办法发挥理想的作用。因此数字孪生五维模型应运而生, 北京航空航天大学的陶飞团队<sup>[6]</sup>提出了在动态场景中仍然实用的五维模型, 并结合该模型与应用数字孪生模型的企业进行合作, 构建出相适应的数字孪生评价标准, 这一研究成果为制造企业应用数字孪生技术提供了可靠的保障。向峰等<sup>[7]</sup>进一步基于绿色特征提出了关于产品全生命周期的绿色制造模型。江海凡等<sup>[8]</sup>根据企业实际应用数字孪生技术的过程构建出了数字孪生演进模型, 演进模型将制造企业使用数字孪生模型的过程推演为 3 个阶段, 通过对 3 个严谨有序的阶段的细节研究, 为制造企业在生产过程中应用数字孪生提供了理论支撑。从这方面看出, 国内对数字孪生开展了大量的理论研



场景中的复杂需求。国内外在数字孪生模型建立中的不同之处反映了各自研究的侧重点和方法路径,但都为数字孪生技术的发展和應用奠定了坚实的基础。

### 3.1.2 数字孪生技术研究

数字孪生的有效利用需要得到各种算法技术的支持,大数据、信息物理系统、人工智能等数字技术都是数字孪生的运行保障,国内外涌现出很多对数字孪生相关技术的研究成果。戴晟等<sup>[12]</sup>认为数字孪生在应用中数字孪生模型本身运行、模拟仿真、预测等步骤必然得到巨大的数据集,对数据的处理必然要应用大数据技术。李浩等<sup>[13]</sup>提出在进行复杂产品设计过程中,利用大数据进行用户行为收集形成大数据集,并给予数字孪生的大数据平台管理孪生数据。任保平等<sup>[14]</sup>指出企业需要加强数字孪生与工业大数据的匹配程度,将生产过程中的各类模型和数据进行集成管理,实现对实体产品全过程的控制和决策。数字孪生加入人工智能算法后可以通过机器学习的方式不断完善仿真模型,使模型更加适配企业制造过程。蒲天骄等<sup>[15]</sup>提出在数字孪生系统中加入人工智能算法模型后,系统中的预测模块可以计算出业务中的不确定性的问题,进一步开展更多方面预测功能。元宇宙的应用场景与数字孪生相似,现阶段在数字孪生方面国内学者对元宇宙的讨论集中在与数字孪生的对比上,由于元宇宙的实现硬件要求很高,目前的技术水平还难以实现。但基于目前学者对元宇宙的研究热度,数字孪生与元宇宙的结合相信会在未来得到实现。

国外学者在此方面也涌现出很多成果:Herakovic等<sup>[16]</sup>同时考虑数字孪生和大数据技术,从产品生命周期的角度提出基于信息管理系统的能源密集型产业(EII)可持续智能制造战略,设计了数字孪生为驱动的运营机制和大数据清洗整合的整体框架,以解释和说明可持续智能制造。Shen等<sup>[17]</sup>为了解决数据共享问题,提出了一种创新的BDTD安全共享框架,该框架在基于区块链技术的基础上操作,可以实现保障数据安全性的同时,实现数据的有效共享,为相关领域的研究和实践提供了新的思路和方法。同时,国外学者在工业4.0的背景下深入探讨了信息物理系统、物联网和数字孪生等数字技术,旨在通过这些先进技术推动传统制造向智能制造的转型。Ma等<sup>[18]</sup>提出在工业4.0背景下大数据技术与

数字孪生的结合可以使智能制造更有持续性,例如大数据与数字孪生的融合为能源密集型生产环境的实时预测、控制提供了关键技术。

国内研究强调理论与应用的结合,注重具体应用场景和技术实用性,提出了多种数字孪生模型和解决方案,支持制造企业的数字化转型。国外研究侧重于先进技术架构的设计和综合应用,通过结合大数据、人工智能和信息物理系统等技术,提出了实践数字孪生技术的框架和新的方法。

### 3.1.3 数字孪生在各环节的应用研究

数字孪生技术在制造过程的多个关键环节,比如产品设计、生产制造、数字孪生车间以及产品全生命周期管控等领域,均实现了广泛而深入的应用。随着小批量、个性化及定制化制造模式的盛行,产品研发设计的周期要求日趋紧凑,市场对响应速度的渴求也日益迫切。因此,将数字孪生技术融入产品设计研发流程之中,不仅成为提高产品设计效率与质量的关键举措,更为产品设计的创新与进步注入了强大动力。白仲航等<sup>[19]</sup>提出的产品概念设计流程中,运用数字孪生技术,实现了对庞大用户数据的高效处理、对产品功能状态的实时追踪与监测,以及对目标产品特性的细致剖析。通过这种方式,不仅提升了设计的精准度,还确保了产品开发的效率与质量。李雪瑞等<sup>[20]</sup>以数字孪生五维模型构建理论为指导,通过深入分析数字孪生数据模式的特性,精心设计并构建了一种可以提供给工业产品的CMF设计服务模型框架。这一框架不仅体现了数字孪生技术在工业产品设计领域的创新应用,而且为提升设计服务的效率和质量提供了有力支持。在数字孪生技术早期应用于制造企业生产流程时,数字孪生车间的概念就被学者提出。陶飞团队首次提出数字孪生车间是未来车间运行新模式的这一理念<sup>[21]</sup>。郭安等<sup>[22]</sup>在应用数字孪生车间系统时,探讨了其在加工深度分析中的聚类应用,强调了车间中每个实体及其状态、关系和事件与信息域的一一对应映射。刘娟等<sup>[23]</sup>对车间数字孪生体的内在特质及其运作机理进行了深入探讨,通过建造数字孪生体实现对制造车间的监控并加入实时数据的融合应用,成功实现了基于持续瞬态仿真的车间在线预测。邓文顺等<sup>[24]</sup>基于数字孪生模型对生产线进行调试,改善了车间生产过程中的验证调试过程。郭飞燕等<sup>[25]</sup>认为数字孪生模型是物理实体在数字世界的

全生命周期的复刻，可以基于历史和实时数据，模拟全生命周期的状态并进行预测。在数字化转型进程中，数字孪生提供的平台有利于建立数字化服务生态，帮助企业更好地面对信息不确定性以及迅速适应环境<sup>[26-27]</sup>。

国外学者在应用层面的研究成果偏向于对数字孪生的使用管理：Zhuang 等<sup>[28]</sup>人提出了一种全新的方法框架，该框架以数字孪生技术为基础，旨在实现复杂产品装配车间的智能生产管理与控制。Kherbache 等<sup>[29]</sup>设计了一个用于 IIoT 的数字孪生网络，其中传感器、执行器和通信基础设施在数字孪生中复制，可以实现这些网络的实时智能管理。

国内学者在数字孪生在各环节应用的研究中，主要集中于实现产品设计的精准性和开发效率，以及对数字孪生车间使用和全生命周期管理的研究。而国外学者侧重于数字孪生技术在制造过程中的管理，如通过建造网络 and 平台来实现对数字孪生的管理需求。

### 3.2 研究演进探索

从图 8 国内时间演进图来看，在 2017 年国内对工业工程领域数字孪生的研究开始增加，研究主题主要集中在研究数字孪生本身和智能化方面。学者在构造数字孪生车间、发展数字孪生技术及应用和实现制造过程智能化等方面的研究成果比较突出，这表明学者开始关注数字孪生的理论模型、技

术开发等方面。陶飞等<sup>[21]</sup>此时提出了数字孪生车间的概念，并对该具有创造性概念进行了深入剖析。研究者对数字孪生车间的系统构成、运作机理、显著特性以及核心技术要素进行了细致深入的研究。进一步地，他们基于车间孪生数据，探讨了如何实现车间这一物理实体，在数字孪生构造的信息数据世界中交互的理论，并提出了实现这一理论的具体方法。这些研究不仅丰富了数字孪生领域的理论体系，也为实际应用提供了重要的指导。

近三年伴随着智能制造发展的新需求，以及国家对制造业的更加重视，数字孪生作为实现制造企业数字化转型和在数字技术方面更新升级的重要途径，使得更多学者开始进一步研究数字孪生对制造业数字化转型的影响。学者们基于数字孪生的政策制度支持，针对制造企业人才储备、转型路径、创新生态等转型挑战，提出了借助数字孪生体工具的培育来推动制造企业数字化转型的新策略，为制造企业的转型发展提供有力支撑。江小涓等<sup>[30]</sup>通过数据的全面纳入，实现数字空间与现实物理实体的深度融合，这种全景式的融合能够促进数字孪生技术的叠加效率，进一步推动制造企业数字化转型的进程。随着对制造企业的数字孪生成熟度进行了研究，设计出制造企业数字孪生成熟度模型，为数字孪生未来的发展奠定了基础。从时间线的尽头看，当前国内已开始对数字孪生系统、制造企业生产线

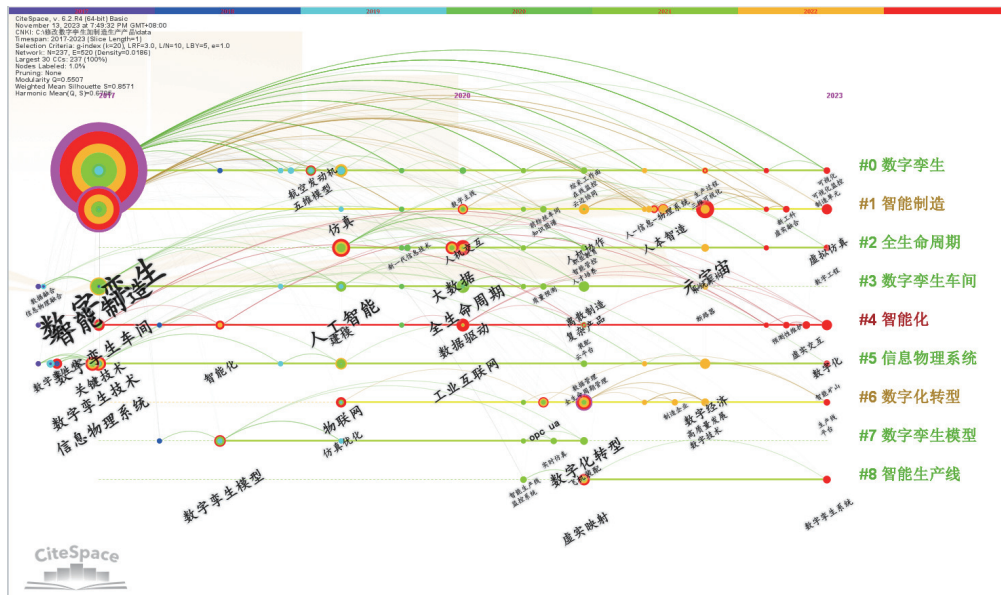


图 8 国内时间演进图

Figure 8 Timeline view of the domestic module evolution

以及更多的领域展开研究。

从图 9 国外时间演进图来看, 国外在 2017 年的同期研究主要集中在智能制造中的大数据领域, 这体现了国外研究对大数据这一技术的重视。大数据分析为企业提供了在数字世界中进行数据分析的方法, 帮助实现现实世界到数字世界的融合交互。2019—2020 年, 研究主要集中在零缺陷制造这一领域中的模型和系统上。Zhang 等<sup>[31]</sup>针对零缺陷制造中的质量难以控制的现象, 通过对生产过程中大量数据的分析, 建立了与质量相关的数据模型, 实现了对缺陷的早期检测和预防, 从而降低了制造过程中的质量问题。2021 年之后研究的方面主要在物联网和预测性维护领域。Heidel 等<sup>[32]</sup>深入探讨了在物联网技术支持下, 将数字孪生以及应用过程中产生的信息作为数据类型的应用场景, 这一研究对于理解数字孪生在物联网中的角色和潜力具有重要意

义。Kim 等<sup>[33]</sup>通过考虑制造和测试条件的不确定性, 基于统计模型校准和概率元素更新技术, 提高了数字孪生方法的预测能力。

国内数字孪生技术的研究自 2017 年起逐渐增热, 主要集中在技术本身和智能化的应用, 如数字孪生车间和制造过程智能化, 随后转向支持制造业的数字化转型和实际应用方面的研究。从国内 2017—2020 年的演进图来看研究热点集中在理论模型构建、技术发展以及生产效率提升等方面, 并关注于数字孪生技术与实际制造过程的结合。国外在同一时间段内, 研究更侧重于大数据在智能制造中的应用, 同时更侧重于数字孪生技术与其他先进技术的融合。总结来说, 国内的研究更侧重于数字孪生技术的理论发展和生产过程的应用, 而国外研究更倾向于探索数字孪生与其他高新技术结合的应用模式, 以及在特定领域如质量控制、物联网中的实践。

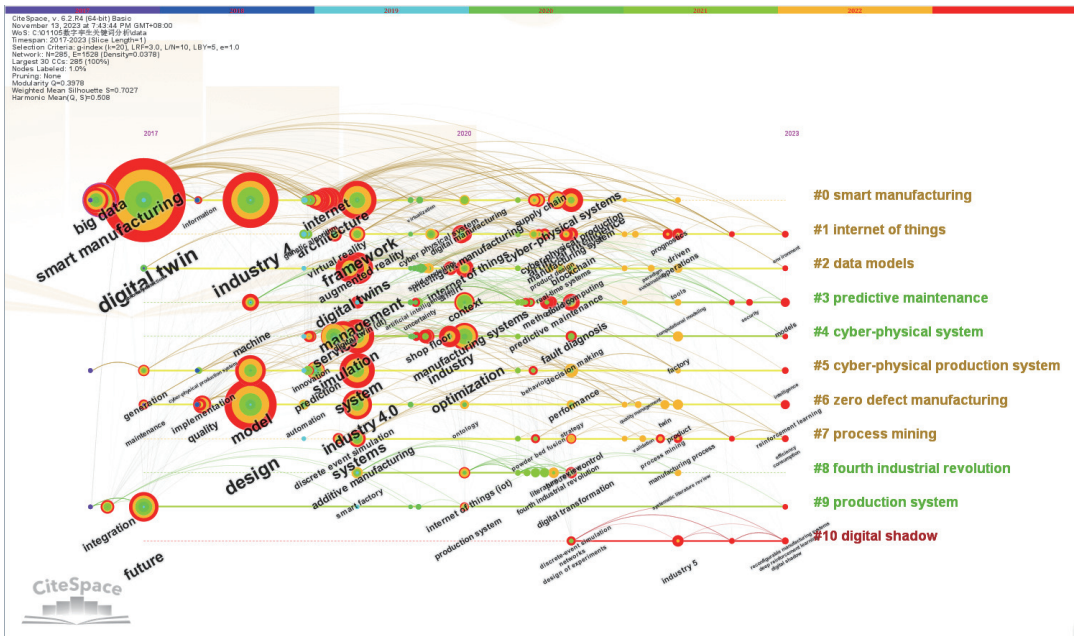


图 9 国外时间演进图

Figure 9 Timeline view of the foreign module evolution

近几年, 国内研究主要聚焦于数字孪生技术在制造业的深度整合与实际应用, 强调其在支持数字化转型和生命周期管理中的作用。基于数字化的制造系统设计利用实时数据和数字模型, 提高了全过程的可见性, 促进了数字孪生系统的优化<sup>[34]</sup>。国外研究则更侧重于探索数字孪生与先进技术如物联网、大数据的融合, 以及在质量控制和预测性维护

等领域的应用。

### 3.3 研究前沿分析

突现词 (burst word) 是指在短时间内频率发生显著变化的关键词, 能够在一定程度上反映研究主题的发展前沿趋势, 突现词的强度则表示该关键词在短期内频次迅速增加的程度。通过对国内外相同时段突现词进行分析, 可以得出国内外学者在该

领域的研究热点的不同,进一步启发国内学者在工业工程领域对数字孪生的探索。通过 Citespace 对文

献进行突现词分析,选取了国内外研究中最主要的 10 个的突现词,如表 2~3 所示。

表 2 国内突现词统计

Table 2 Domestic burst words statistics

突现词	开始时间	结束时间	强度	各个年份变化情况					
				2017	2018	2019	2020	2021	2022
产品全生命周期管理	2017	2019	1.57						
信息物理系统	2017	2020	1.43						
数据融合	2017	2018	1.28						
数字孪生体	2017	2018	1.17						
信息物理融合	2017	2019	1.05						
数字孪生模型	2018	2019	1.63						
建模	2019	2021	1.48						
五维模型	2019	2020	1.31						
数据驱动	2020	2021	2.55						
数字孪生车间	2020	2021	2.32						

表 3 国外突现词统计

Table 3 Foreign burst words statistics

突现词	开始时间	结束时间	强度	各个年份变化情况					
				2017	2018	2019	2020	2021	2022
big data	2017	2020	4.24						
future	2017	2020	3.43						
internet	2019	2020	2.45						
things	2019	2020	2.18						
service	2019	2020	1.78						
cloud	2019	2020	1.53						
big data analytics	2019	2021	1.45						
cyber-physical system	2020	2021	2.25						
manufacturing systems	2020	2021	2.12						
uncertainty	2020	2021	1.51						

1) 初始阶段: 如表 2 所示,通过对国内突现词进行分析,发现产品全生命周期管理、信息物理系统、数据融合和数字孪生体是最早引起国内学者关注的研究焦点。这表明自 2017 年以来,国内学者已开始对数字孪生技术关注,开始思考数字孪生技

术的应用场景,并提出了产品全生命周期管理与数字孪生技术的融合。李乐飞<sup>[35]</sup>首次提出可以在数字世界中形成产品全生命周期的数字孪生。之后学者们从产品全生命周期的角度对数字孪生体的组成、实现方法和作用进行了思考,并进一步提出产品数

字孪生体的结构。有些学者对数据融合的问题展开了思考, 陶飞等<sup>[36]</sup>认为虽然企业已经初步开始探索数字孪生的应用, 但是在数字孪生信息融合的研究仍然空白。如表3所示, 同期国外的研究关键词主要集中在大数据上, 强调了大数据技术与数字孪生应用之间的相互关系, 数字孪生应用过程中对数据处理、数据计算传输等方面有更高的要求, 国外学者对大数据与数字孪生的融合应用进行了长期且深入的研究, 旨在更有效地推动制造业的数字化进程。Angrish等<sup>[37]</sup>介绍了如何将物理机器流入的数据进行存储, 使模型可以近乎实时地反映物理空间的变化, 这对数字孪生技术的应用开辟了最初的可能性。

2) 在2018年至2020年期间, 随着企业对生产效率的要求进一步提高, 此阶段企业对应用数字孪生技术有了更大的需求。如何建立符合企业自身制造流程的数字孪生模型是本阶段的研究重点, 建模流程和数字孪生五维模型的研究主题在这个时期进行了广泛讨论。北航数字孪生团队在三维模型的基础上进一步提出五维模型, 为数字孪生的标准应用提供了基础。而国外则侧重于服务、云、大数据分析 and 网络物理系统等数字孪生应用的支持技术。研究内容主要聚焦在如何为数字孪生提供更强大的支持。Jochen<sup>[38]</sup>在工业生产环境下, 基于地面激光扫描和摄影测量获得的点云来获得制造工厂的竣工模型, 以便为数字孪生提供重要决策信息。

3) 从2020年到2021年, 国内研究的热点转向了数据驱动和数字孪生车间, 表明国内已开始将数字孪生应用于制造业, 并通过数字孪生车间的落地来推动企业数字化转型升级。国内研究者开始考虑如何将数字孪生的应用效果提高, 陈川等<sup>[39]</sup>提出只有模型和数据的共同驱动, 才能将企业数字孪生模型的仿真效果提高。数字孪生车间的概念在初期已经提出, 此阶段关于数字孪生车间的成果开始涌现。陈未然等<sup>[40]</sup>探讨了在数字孪生车间的生产线的算法, 新算法的实现降低了实体车间与数字车间匹配环节的难度。与此同时, 国外研究关注网络物理系统、制造系统和不确定性分析, 显示国外研究者开始思考系统属性、操作参数和环境等方面的不确定性, 并尝试提出解决方案。蒋红飞等<sup>[41]</sup>提出通过数字孪生的实时映像和仿真, 可以实现生产系统的联动和决策, 使系统在高干扰下更好运作。Park<sup>[42]</sup>在个性化生产的条件下, 提出了基于网络物理生产系统(CPPS)的架构框架, 为个性化生产提供了解

决方案, 研究者提出了五步法来规划制造系统的数据驱动型数字孪生, 该方法提高了数字孪生技术对工业环境的适用性。Chen等<sup>[43]</sup>结合不确定性分析和数字孪生技术构建通用调度框架, 提出一种在不确定因素下模糊柔性作业车间的多目标调度策略, 该策略可以协调多重不确定性对离散制造过程中模糊柔性作业车间调度的影响。

对比国内外的研究前沿, 发现目前国外研究对网络物理系统、制造系统的集成及其不确定性分析给予了较多关注。进一步启发国内可以探索网络物理系统与现有工业系统的集成, 实现企业更高效的资源管理和生产调度。国外研究者对不确定性分析的研究强调了在设计和生产过程中考虑各种变量和条件的重要性, 在这个方面国内可以进一步研究如何构建更为灵活的数字孪生系统, 包括对生产变量的预测模型、风险评估和应对策略的开发等, 以应对更复杂的产品需求。

## 4 研究结论和展望

本文通过考察数字孪生在工业工程领域的应用文献发表状况、学者分布、科研合作、研究热点和前沿趋势等最新动态, 对比了国内外在工业工程领域中对数字孪生应用的研究成果。研究发现, 国内关于制造企业应用数字孪生技术的研究已取得了显著的成果, 研究成果聚焦于数字孪生体的构建以及其实际应用的实现上, 并且数字孪生技术在制造业中已经实现了广泛的应用。与此同时, 国外对数字孪生在制造业的应用研究, 更多地集中在数字孪生模型与应用流程的优化之上。国外学者深入探索数字孪生的核心技术, 同时将其与其他先进技术以及新兴理念相融合, 推动制造业的转型升级。国外对模型的维护和控制研究相对较为深入, 这为国内在制造领域对数字孪生的研究提供了新的视角。当前国际上已经建立了一些数字孪生的标准和规范, 以促进技术的互操作性和应用, 国内在这方面也做出了具有中国特色的标准体系, 在标准的应用阶段需要更多的努力来确保标准与企业的对标。

总体来说, 我国在数字孪生领域的学术研究表现出一定的深度和广度, 在数字化的进程中, 数字孪生发挥了重要作用。随着数字技术的不断发展, 数字孪生在工业工程领域的研究应聚焦于以下几方面: 首先, 需进一步拓展数字孪生在制造业企业中的实现场景, 实现从理论到实践的全面覆盖。在此

基础上, 强化底层技术的研发, 深度融合数字孪生技术与各类数字技术, 构造覆盖全生命周期、全价值链的数字化模型。这将有助于实现设备、工厂、供应链的高度互联互通, 推动制造业的智能化、网络化升级。其次, 为提升数字孪生技术在不同制造企业间的互操作性, 应尽快统一数字孪生建模标准。这有助于降低数字孪生技术的集成难度, 提升制造业整体的生产效率与质量。此外, 随着数字孪生的广泛应用, 数据安全以及产生隐私保护问题日益凸显。因此, 制定并完善相关法规与标准, 建立健全的数字孪生数据安全管理体系, 确保企业和个人信息的合法、安全使用, 将对进一步推动并实现我国制造企业的数字化转型具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 徐宏潇. 习近平关于发展数字经济重要论述的生成脉络、内在逻辑与时代价值[J]. 经济学家, 2022(10): 5-13.  
XU Hongxiao. The generation context, internal logic and contemporary value of Xi Jinping's important exposition on the development of digital economy[J]. Economist, 2022(10): 5-13.
- [2] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[J]. 党的生活(黑龙江), 2022(11): 4-23.  
XI Jinping. Holding high the great banner of socialism with Chinese characteristics and uniting to build a modern socialist country in all respects — report at the 20th national congress of the communist[J]. Party of China, 2022(11): 4-23.
- [3] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.  
CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-353.
- [4] 高盛, 卢健松. 数字孪生城市建设的实践探索及推进建议[J]. 建筑经济, 2024, 45(2): 5-12.  
GAO Sheng, LU Jiansong. Practical exploration and suggestions for promoting the construction of digital twin cities[J]. Construction Economy, 2024, 45(2): 5-12.
- [5] 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.  
ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768.
- [6] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.  
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [7] 向峰, 黄圆圆, 张智, 等. 基于数字孪生的产品生命周期绿色制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1505-1514.  
XIANG Feng, HUANG Yuanyuan, Zhang Zhi, et al. New paradigm of green manufacturing for product life cycle based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1505-1514.
- [8] 江海凡, 丁国富, 肖通, 等. 数字孪生演进模型及其在智能制造中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2021, 57(6): 1386-1394.  
JIANG Haifan, DING Guofu, XIAO Tong, et al. Digital twin evolution model and its applications in intelligent manufacturing[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 57(6): 1386-1394.
- [9] ALAM K M, EL SADDIK A. C2PS: a digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 2050-2062.
- [10] SCHROEDER G N, STEINMETZ C, PEREIRA C E, et al. Digital twin data modeling with automation ML and a communication methodology for data exchange[J]. IFAC-Papers On Line, 2016, 49(30): 12-17.
- [11] MARIANA S, JOAQUIN G. Design, modeling and implementation of digital twins[J]. Sensors, 2022, 22(14): 5396.
- [12] 戴晟, 赵罡, 于勇, 等. 数字化产品定义发展趋势: 从样机到孪生[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(8): 1554-1562.  
DAI Sheng, ZHAO Gang, YU Yong, et al. Trend of digital product definition: from mock-up to twin[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2018, 30(8): 1554-1562.
- [13] 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.  
LI Hao, TAO Fei, WANG Haoqi, et al. Integration framework and key technologies of complex product design-manufacturing based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1320-1336.
- [14] 任保平, 宋文月. 新一代人工智能和实体经济深度融合促进高质量发展的效应与路径[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2019, 49(5): 6-13.  
REN Baoping, SONG Wenyue. The path of integrating new generation artificial intelligence and real economy to promote high quality development[J]. Journal of Northwest University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2019, 49(5): 6-13.
- [15] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2029.  
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 41(6): 2012-2029.
- [16] HERAKOVIC N A. Five-step approach to planning data-driven digital twins for discrete manufacturing systems[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3639.
- [17] SHEN W, HU T, ZHANG C, et al. Secure sharing of big digital twin data for smart manufacturing based on blockchain[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 61: 338-350.
- [18] MA S, ZHANG Y, LV J, et al. Big data driven predictive production planning for energy-intensive manufacturing industries[J]. Energy, 2020, 211: 118320.
- [19] 白仲航, 孙意为, 许彤, 等. 基于设计任务的概念设计中产品数字孪生模型的构建[J]. 工程设计学报, 2020, 27(6): 681-689.  
BAI Zhonghang, SUN Yiwei, XU Tong, et al. Construction of product digital twin model based on design task in conceptual design[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(6): 681-689.
- [20] 李雪瑞, 侯幸刚, 杨梅, 等. 数字孪生驱动的工业产品 CMF 设计服务模型构建与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 307-327.

- LI Xuerui, HOU Xinggang, YANG Mei, et al. Construction and application of CMF design service model for industrial products driven by digital twins[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 307-327.
- [21] 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.  
TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(1): 1-9.
- [22] 郭安, 于东, 胡毅, 等. 基于FFSM的数控机床加工状态建模方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 71-80.  
GUO An, YU Dong, HU Yi, et al. Fuzzy finite state machine based processing state modeling method for computer numerical control machine tools[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 71-80.
- [23] 刘娟, 庄存波, 刘检华, 等. 基于数字孪生的生产车间运行状态在线预测[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 467-477.  
LIU Juan, ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, et al. Online prediction technology of workshop operating status based on digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 467-477.
- [24] 邓文顺, 刘强, 赵荣丽. 基于数字孪生的生产线分布式近物理集成调试方法[J]. *工业工程*, 2023, 26(5): 124-130.  
DENG Wenshun, LIU Qiang, ZHAO Rongli. A distributed approximate physical integrated commissioning method for production lines based on digital twins[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2023, 26(5): 124-130.
- [25] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状 & 关键实现技术研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(17): 110-132.  
GUO Feiyan, LIU Jianhua, ZOU Fang, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(17): 110-132.
- [26] LIN Y, HU L, ZHANG K. Unison framework of data-driven tripartite evolutionary game-based knowledge sharing decision for digital servitization[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 189: 109935.
- [27] 丁超, 苏政, 许城瑜. 基于数字孪生的建筑全生命周期管理平台构建[J]. *建筑经济*, 2023, 44(8): 73-79.  
DING Chao, SU Zheng, XU Chengyu. Construction of the whole life cycle management platform based on digital twin[J]. *Construction Economy*, 2023, 44(8): 73-79.
- [28] ZHUANG C, LIU J, XIONG H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96: 1149-1163.
- [29] KHERBACHE M, MAIMOUR M, RONDEAU E. Digital Twin Network for the IIoT using Eclipse Ditto and Hono[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2022, 55(8): 37-42.
- [30] 江小涓, 靳景. 数字技术提升经济效率: 服务分工、产业协同和数实孪生[J]. *管理世界*, 2022, 38(12): 9-26.  
JIANG Xiaojuan, JIN Jing. Digital technology promotes economic efficiency: labor division of service, industrial synergy and digital-real twins[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(12): 9-26.
- [31] ZHANG L, ZHOU L F, HORN B K P. Building a right digital twin with model engineering[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021(59): 151-164.
- [32] HEIDEL R. The digital twin as data type in the Internet of Things[J]. *At-Automatisierungstechnik*, 2021, 69(11): 995-1007.
- [33] KIM W, LEE G, SON H, et al. Estimation of fatigue crack initiation and growth in engineering product development using a digital twin approach [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 226: 108721.
- [34] LENG J, GUO J, XIE J, et al. Review of manufacturing system design in the interplay of Industry 4.0 and Industry 5.0 (Part I): design thinking and modeling methods[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, 76: 158-187.
- [35] 李乐飞. 浅谈智能制造与系统工程的融合创新[J]. *中国培训*, 2017, (16): 36-37.  
LI Lefei. Talking about the integration and innovation of intelligent manufacturing and system[J]. *China Training*, 2017, (16): 36-37.
- [36] 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.  
TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theory and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(8): 1603-1611.
- [37] ANGRISH A, STARLY B, LEE Y S, et al. A flexible data schema and system architecture for the virtualization of manufacturing machines (VMM)[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, 45: 236-247.
- [38] JOCHEN M, THOMAS U, KARSTEN S. Obtaining as-built models of manufacturing plants from point clouds[J]. *at-Automatisierungstechnik*, 2018, 66(5): 397-405.
- [39] 陈川, 陈岳飞, 曾麟, 等. 数字孪生在智能制造领域的应用及研究进展[J]. *计量科学与技术*, 2020(12): 20-25.  
CHEN Chuan, CHEN Yuefei, ZENG Lin, et al. Application and research progress of digital twin in the field of intelligent manufacturing[J]. *Metrology Science and Technology*, 2020(12): 20-25.
- [40] 陈末然, 邓昌义, 张健, 等. 基于数字孪生的生产线三维检测与交互算法研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(5): 979-984.  
CHEN Moran, DENG Changyi, ZHANG Jian, et al. Research on 3d detection and interaction algorithm of production line based on digital twin[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(5): 979-984.
- [41] 蒋红飞, 屈挺, 张凯, 等. 基于数字孪生的高动态生产系统联动决策方法[J]. *工业工程*, 2021, 24(2): 57-67.  
JIANG Hongfei, QU Ting, ZHANG Kai, et al. A synchronized decision-making method for highly dynamic production system based on digital-twin[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2021, 24(2): 57-67.
- [42] PARK H J S. Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106: 1787-1810.
- [43] CHEN Z, WANG W. Digital twin-oriented collaborative optimization of fuzzy flexible job shop scheduling under multiple uncertainties[J]. *Sādhanā: Academy Proceedings in Engineering Science*, 2023, 48: 78.