

研究报告

(2024 年第 13 期 总第 45 期)

2024 年 7 月 2 日

中国数字孪生行业研究报告¹

科创金融研究中心

朱雅姝 胡杏

【摘要】 行业图谱研究是清华大学五道口金融学院科创金融研究中心科技成果转化研究的一项子课题，目标定位于清晰理解前沿科技成果的技术核心、科创企业的技术竞争力及科研工作者的研究进度，从而助力科技成果转化效率的提升。行业图谱研究将以系列形式展开，选取国家战略重点科技领域的商业应用场景逐一进行，时效性较强。

本报告为行业图谱研究之计算机科学系列中的课题：中国数字孪生行业研究报告。数字孪生技术，作为一种前沿技术，实现了将物理实体在虚拟空间中的精确映射，形成了一种被称为“数字双胞胎”的存在。这一技术利用物联网技术，实现了数据的实时双向交换，使得

¹ 感谢资本市场与公司金融研究中心的实习生许喜远同学对本报告的助研工作。许喜远同学是清华大学医学院 2022 级博士。

虚拟实体能够全面反映其对应物理实体的生命周期，从而在集成底层数据信息的基础上，支持仿真预测和优化决策。数字孪生技术起源于美国航天与军事领域，后被通用电气首次应用于工业生产。在西门子、达索等巨头的推动下，该技术从美国扩散到欧洲。随着人工智能、物联网、虚拟现实等技术进步和元宇宙概念兴起，数字孪生技术不断完善，在城市管理、智慧工业、自动驾驶测试及医疗等领域展现出巨大应用潜力，成为推动各行业数字化转型与升级的重要支撑技术。

根据技术复杂性，数字孪生分为五个等级，目前正处于由数字经济、工业互联网的发展、政策支持、技术进步及市场需求增长等因素驱动的快速成长阶段。数字孪生的关键技术主要包括建模、渲染和仿真三大方面。建模技术通过 3D 扫描、参数化建模和逆向工程等方法创建物理实体的数字模型，代表软件有 SolidWorks、CATIA 等。渲染技术则通过基于物理的渲染（Physically Based Rendering, PBR）、实时渲染和云渲染等手段实现逼真的视觉效果，主流平台有 Unreal Engine、Unity 等。仿真技术利用有限元分析（Finite Element Analysis, FEA）、多物理场耦合和实时仿真等方法模拟实体行为，主要软件包括 ANSYS、ABAQUS 等。以上技术需要计算机图形学、计算机辅助设计（Computer-Aided Design, CAD）、计算机辅助工程（Computer-Aided Engineering, CAE）和物理仿真等领域的协同，工业软件巨头如 Siemens、Dassault、Autodesk 等和 GPU 厂商如 Nvidia、AMD 等正在推动数字孪生技术的发展，未来这些技术的融合将驱动数字孪生走向成熟。

数字孪生行业的主要参与者分为技术服务商和集成方案供应商。

技术服务商包括计算机集成制造（Computer Integrated Manufacturing, CIM）、建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）、可视化平台厂商等，而集成方案供应商则包括运营商和互联网大厂。技术、业务和资源三方面共同构成了数字孪生厂商的竞争壁垒。随着技术的发展，数字孪生面临的挑战主要包括商业模式的成熟度、技术支持的高要求、缺乏统一的标准体系以及数据能力的不完善。

数字孪生技术在多个行业展现出显著应用价值，推动了城市管理、智慧工业、自动驾驶测试和智慧医疗的发展。在城市管理中，数字孪生城市通过物联网和地理信息系统实现实时监控和优化，应用于交通管理（如 Siemens 和 IBM 在新加坡的智慧交通系统）、零碳智慧园区（如微软的雷德蒙德园区）和应急管理（如通用电气的解决方案）。在智慧工业领域，数字孪生贯穿离散型和流程型工业的各个阶段，提升生产效率和设备可靠性，主要应用企业包括软通动力、GE、Siemens 和 IBM。自动驾驶测试方面，企业如 Waymo、Tesla、百度和 Aptiv 利用数字孪生进行大规模虚拟仿真测试，提高系统性能和安全性。智慧医疗领域，通过 IBM 的 Watson Health 和 GE Healthcare 的 Edison 平台等实现设备管理、手术模拟和个性化治疗，显著提升医疗服务质量和效率。总的来说，数字孪生技术为各行业提供了强大的创新驱动力和效率提升手段。

在数字孪生技术的高校研究方面，中外进度总体齐头并进，但研究方向存在侧重和差异。国际上，尤其是欧美高校，侧重于基础理论、高精度仿真和多物理场耦合研究，注重复杂系统建模与跨学科应用，代表高校有麻省理工学院、佐治亚理工学院和约翰霍普金斯大学医学

院。中国高校在应用导向和大规模系统集成方面表现突出，特别在智慧城市、交通管理和基础设施建设领域，代表高校有清华大学、北京航空航天大学 and 国防科技大学。中国高校还结合云计算、物联网和 5G 技术，推动数字孪生的实际应用。国际高校研究侧重技术深度和跨学科融合，中国高校研究侧重应用广度和系统效率，形成了既有竞争又有合作的研究生态。

数字孪生技术在发展过程中面临多重挑战，包括商业模式成熟度不足、初始投资高昂、用户需求不强、定制化解决方案难以复制、成本高昂等，这些问题限制了其推广和实施。此外，标准化困境也十分显著，目前在数据采集的尺度、参数、格式及周期等方面尚未形成统一标准，导致数据整合和接口对接难度大，技术框架和协议不统一也使项目集成和对接复杂。技术支持方面，数字孪生构建的模型和数据量大，要求计算机硬件具备强大的处理和计算能力，同时对终端设备的高互动、高沉浸和高清晰度展示提出了挑战。数据能力的不足也制约了数字孪生技术的发展，包括数据质量不高、不完整，数据格式和质量差异，以及数据安全和隐私保护等问题。解决这些挑战需要全行业的共同努力和协调。未来，行业内的参与者需共同努力，构建一个开放、共赢的数字孪生生态系统，推动数字孪生技术的健康发展。

Research Report

July 2, 2024

Atlas of China's Digital Twin Industry²

Research Center for Sci-Tech and Finance

Yashu Zhu, Xing Hu

Abstract:

The study of creating an Atlas of the Industry is a sub-project within our center's research on the transformation of scientific and technological achievements. The objective is to gain a comprehensive understanding of the core technologies behind cutting-edge innovations, the technological competitiveness of pioneering enterprises, and the progress of researchers, thereby enhancing the efficiency of technology transfer. This research will be conducted in a series, focusing on commercial application scenarios in key national strategic scientific and technological fields, with a strong emphasis on timeliness.

This report is part of the Computer Science series within the Atlas of the Industry research: The China Digital Twin Atlas. Digital twin technology, as

² Thanks to intern Khor Hee Guan of Research Center for Sci-Tech and Finance at PBCSF Tsinghua University for his research assistance in this report. Khor Hee Guan is PhD. student at School of Biomedical Engineering, Tsinghua University.

a cutting-edge innovation, enables the precise mapping of physical entities in virtual space, creating a "digital twin." This technology leverages the Internet of Things (IoT) for real-time bidirectional data exchange, allowing virtual entities to comprehensively reflect the lifecycle of their corresponding physical entities. It supports simulation, prediction, and optimization decisions based on integrated underlying data information. Originating in the U.S. aerospace and military sectors, digital twin technology was first applied to industrial production by General Electric (GE). Driven by giants like Siemens and Dassault, the technology spread from the U.S. to Europe. With advances in artificial intelligence, IoT, virtual reality, and the rise of the metaverse concept, digital twin technology has been continuously refined, demonstrating significant potential in urban management, smart industry, autonomous driving testing, and healthcare, thus becoming a crucial technology for driving digital transformation and upgrades across various industries.

Based on technological complexity, digital twins are categorized into five levels. The technology is currently in a rapid growth stage, driven by the development of the digital economy, industrial internet growth, policy support, technological advancements, and increasing market demand. Key technologies of digital twins include modeling, rendering, and simulation. Modeling technology creates digital models of physical entities through methods like 3D scanning, parametric modeling, and reverse engineering, with representative software including SolidWorks and CATIA. Rendering technology achieves realistic visual effects through Physically Based Rendering (PBR), real-time rendering, and cloud rendering, with

mainstream platforms like Unreal Engine and Unity. Simulation technology uses Finite Element Analysis (FEA), multiphysics coupling, and real-time simulation to model entity behavior, with major software including ANSYS and ABAQUS. These technologies require collaboration in fields such as computer graphics, Computer-Aided Design (CAD), Computer-Aided Engineering (CAE), and physical simulation. Industrial software giants like Siemens, Dassault, Autodesk, and GPU manufacturers like Nvidia and AMD are driving the development of digital twin technology, with future technological integration expected to mature digital twins.

The main participants in the digital twin industry are divided into technology service providers and integrated solution suppliers. Technology service providers include Computer Integrated Manufacturing (CIM), Building Information Modeling (BIM), and visualization platform manufacturers, while integrated solution suppliers include operators and large internet companies. The competitive barriers for digital twin companies consist of technology, business, and resources. As technology develops, digital twins face challenges such as business model maturity, high technical support requirements, lack of unified standard systems, and incomplete data capabilities.

Digital twin technology has shown significant application value across multiple industries, promoting urban management, smart industry, autonomous driving testing, and smart healthcare. In urban management, digital twin cities use IoT and Geographic Information Systems (GIS) for real-time monitoring and optimization, applied in traffic management (e.g.,

Siemens and IBM's smart traffic systems in Singapore), zero-carbon smart parks (e.g., Microsoft's Redmond campus), and emergency management (e.g., GE's solutions). In smart industry, digital twins cover all stages of discrete and process industries, improving production efficiency and equipment reliability, with major application companies including iSoftStone, GE, Siemens, and IBM. For autonomous driving testing, companies like Waymo, Tesla, Baidu, and Aptiv use digital twins for large-scale virtual simulation testing, enhancing system performance and safety. In smart healthcare, platforms like IBM's Watson Health and GE Healthcare's Edison realize equipment management, surgical simulation, and personalized treatment, significantly improving healthcare quality and efficiency. Overall, digital twin technology provides powerful innovation drivers and efficiency enhancement methods for various industries.

In the field of digital twin technology research in universities, progress between Chinese and foreign institutions is generally on par, but research focuses and directions differ. Internationally, especially in the U.S. and European universities, the emphasis is on fundamental theories, high-precision simulations, and multiphysics coupling research, focusing on complex system modeling and interdisciplinary applications, with leading universities including MIT, Georgia Tech, and Johns Hopkins University School of Medicine. Chinese universities excel in application-oriented and large-scale system integration, particularly in smart cities, traffic management, and infrastructure construction, with leading universities including Tsinghua University, Beihang University, and National University of Defense Technology. Chinese universities also promote the practical

application of digital twins by combining cloud computing, IoT, and 5G technology. International universities focus on technical depth and interdisciplinary integration, while Chinese universities focus on application breadth and system efficiency, creating a competitive yet cooperative research ecosystem.

Digital twin technology faces multiple challenges in its development, including immature business models, high initial investments, weak user demand, difficulty in replicating customized solutions, and high costs, limiting its promotion and implementation. The standardization dilemma is also significant; currently, there are no unified standards for data collection scales, parameters, formats, and cycles, leading to difficulties in data integration and interface docking. The lack of uniformity in technical frameworks and protocols also complicates project integration and docking. Technical support-wise, digital twin construction involves large models and data volumes, requiring powerful computing and processing capabilities in computer hardware, and poses challenges for high interaction, high immersion, and high-definition display on terminal devices. Insufficient data capabilities also restrict the development of digital twin technology, including low data quality, incompleteness, data format and quality differences, and data security and privacy protection issues. Addressing these challenges requires the concerted effort and coordination of the entire industry. In the future, industry participants need to work together to build an open and win-win digital twin ecosystem, promoting the healthy development of digital twin technology.

目录

一、数字孪生的基本概念.....	1
二、数字孪生的发展历程.....	3
三、数字孪生的技术框架.....	5
四、数字孪生的关键技术.....	7
五、数字孪生的驱动因素.....	15
(一) 数字经济.....	15
(二) 工业互联网发展.....	16
(三) 政策标准.....	17
(四) 用户需求.....	18
六、数字孪生国内外主要研究机构及代表性成果.....	19
(一) 国外主流数字孪生解决方案概览.....	19
(二) 国内主流数字孪生解决方案概览.....	24
(三) 国内外主要研究机构及代表性成果.....	29
七、数字孪生产业链和产业图谱.....	31
八、数字孪生竞争壁垒.....	36
九、数字孪生现存挑战.....	37
十、数字孪生产业应用.....	39
(一) 城市管理.....	39
(二) 智慧工业.....	41
(三) 自动驾驶测试.....	43
(四) 智慧医疗.....	45
十一、数字孪生发展展望.....	48
十二、专业术语解析.....	49
参考文献.....	51

图表目录

图 1-1	数字孪生概念以及数字孪生等级划分.....	2
图 3-1	数字孪生系统架构.....	6
图 7-1	数字孪生产业链以及数字孪生实现流程概览.....	35
图 7-2	数字孪生产业图谱.....	35
图 10-1	数字孪生城市基本技术平台架构.....	40
图 10-2	数字孪生赋能工业实现四大价值.....	42
图 10-3	数字孪生下自动驾驶测试体系架构.....	44
图 10-4	医疗数字孪生技术平台架构.....	47
表 2-1	数字孪生发展历程.....	4
表 4-1	数字孪生关键技术.....	13
表 6-1	国际主流数字孪生厂商和解决方案.....	20
表 6-2	国际主流数字孪生厂商融资情况.....	23
表 6-3	国内主流数字孪生厂商和解决方案.....	25
表 6-4	国内主流数字孪生厂商融资情况.....	27
表 6-5	数字孪生研发技术国内外主要研究机构及代表性成果.....	31

数字孪生技术，作为一种前沿的技术创新，实现了物理实体在虚拟空间中的精确映射，形成了所谓的“数字双胞胎”。这一技术最初起源于美国的航天与军事领域，后来被通用电气首次应用于工业生产，并迅速扩展到欧洲和世界其他地区。随着物联网、人工智能、虚拟现实等技术的不断进步，数字孪生技术逐渐完善，并在城市管理、智慧工业、自动驾驶测试和医疗等多个领域展现出巨大的应用潜力。全球范围内，西门子、达索等科技巨头正积极推动这一技术的发展，带动了各行业的数字化转型和升级。

本报告将全面解析中国数字孪生行业的发展现状和未来趋势，解构数字孪生的关键技术、行业竞争壁垒和现存挑战；通过详细的案例分析，揭示数字孪生技术如何助力各行业实现数字化转型和创新发展，从而推动整个社会的进步与变革。

一、数字孪生的基本概念

数字孪生技术是将物理实体在虚拟空间中创建一个精准的“数字双胞胎”，这个过程涉及物理实体的全面数字克隆。这种技术的核心在于实现物理实体与其数字化克隆体之间的数据实时双向互联互通。这种连接不仅限于形态的复制，关键在于每个数字实体都是唯一的，并且具备与其对应物理实体实时交互的能力。这种互动可以超越传统的二维或三维空间的限制；即使只是一串数据，只要它能实现唯一映射和数据互通，也可视为数字孪生的一部分（如图 1-1 所示）。

数字孪生技术在诸多领域得到广泛应用，但其与元宇宙概念仍存在一定差异。数字孪生的核心在于高度还原并实时映射物理实体的状态，使数字模型与现实世界的对象达到同步，因此多见于 B 端行业，如工业制造、城市管理。相比之下，元宇宙更侧重于营造身临其境的沉浸式体验，满足用户在虚拟世界中的交互需求，更贴近 C 端消费场景，例如游戏、社交、娱乐等。尽管两者在构建数字空间方面有相通之处，但数字孪生技术实际上是实现元宇宙愿景的重要技术基石之一^[1]。通过将物理世界的对象、环境乃至过程精准映射到数字空间，数字孪生为元宇宙的实现提供了坚实的技术支撑，使虚拟世界能够与现实世界形成紧密联结，最终达到虚实共生、交互共融的理想境界。

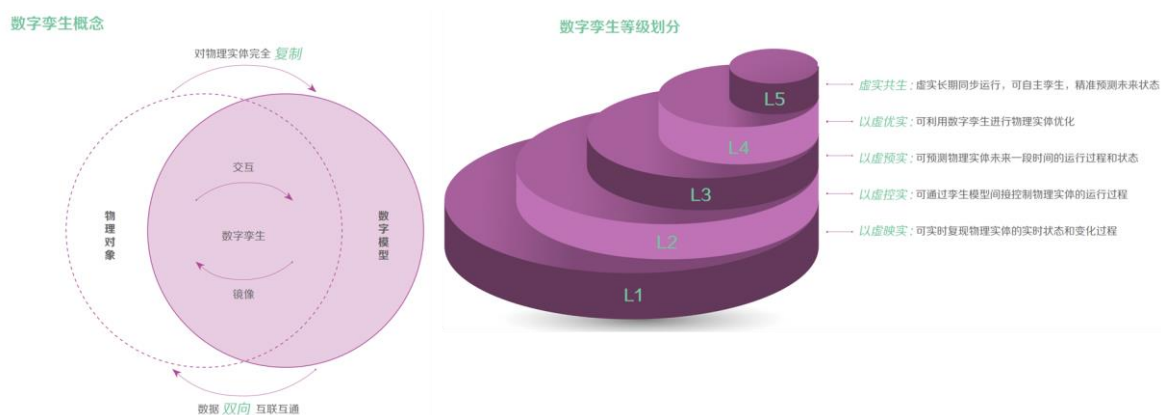


图 1-1 数字孪生概念以及数字孪生等级划分

本中心发布的行业图谱系列中已经包括了一份《空间计算》的报告，在此我们对这两个概念做一个区分，以更好地理解数字孪生技术的独特价值和应用前景。空间计算是一种侧重于在真实世界和虚拟世界之间进行无缝交互的技术，主要应用于增强现实

（Augmented Reality, AR）、虚拟现实（Virtual Reality, VR）和混合现实（Mixed Reality, MR）等领域，强调用户与环境的互动。相比之下，数字孪生则侧重于物理实体的数字化及其生命周期管理，更多地应用于工业制造、智慧城市和智能交通等领域。

数字孪生的实现可以根据其复杂程度分为五个等级（如图 1-1 所示）。这些等级从 L1 到 L5 逐渐提高，表示数字孪生的能力也在增强。L1 级别，即“以虚映实”，能实时复现物理实体的状态和变化过程。L2 级别的“以虚控实”则能通过数字模型间接控制物理实体的运行。L3 级别的“以虚预实”可预测物理实体未来一段时间的运行过程和状态。L4 级别的“以虚优实”允许通过数字生态进行物理实体优化。最高级别的 L5，“虚实共生”，意味着虚拟与现实长期同步运行，能自主发展，并精准预测未来状态。这些等级共同描绘了数字孪生技术从基础到高级的发展轨迹。

二、数字孪生的发展历程

数字孪生技术，作为一种先进的技术手段，其发展历程令人瞩目。它起源于美国，最初用于预防航天事故和空军战斗机的维护问题。随着时间的推移，美国通用电气公司率先认识到这一技术在生产制造领域的巨大价值，并将其推广至工业生产。紧随其后的西门子、达索等老牌制造企业也加入这一领域，数字孪生技术因此从美国传播到欧洲^[2]。

如图 2-1 所示，在 2002 年，美国密歇根大学教授 Michael Grieves 提出了“镜像空间模型”的概念，为数字孪生技术的发展奠定了理论基础。到了 2011 年，美国空军研究实验室在结构力学部门的一个演讲中正式提出了“数字孪生”（Digital Twin）这一术语，进一步明确了这一技术的定义和范畴。2014 年，通用电气（General Electric, GE）、参数技术公司（Parametric Technology Corporation, PTC）、西门子和达索等公司开始接受并使用“Digital Twin”这一术语，并在市场宣传中推广使用。

表 2-1 数字孪生发展历程

年份	描述	阶段	核心技术
2002	美国密歇根大学教授 Michael Grieves 提出“镜像空间模型”的概念	初生	镜像空间模型
2011	美国空军研究实验室在部分学部门广泛推广，并提出数字孪生 (Digital Twin) 这一术语	探索	数字孪生概念、虚拟仿真技术
2014	GE, PTC, 西门子, 还有赛曼赞扬 Digital Twin 方法并在市场宣传中使用	增长	工业物联网 (IIoT)、数据分析
2017	数字孪生被列为未来航空航天与自动化的 6 大顶尖技术之一	增长	航空航天与自动化技术、预测性维护
2022	元宇宙热兴起，数字孪生作为虚拟能力的支柱和真实世界的真身贯穿其中	增长	元宇宙、虚拟现实、增强现实、大数据分析
	步入增长期：Gartner 将数字孪生列入 2017-2019 年十大战略科技发展趋势	增长	战略技术规划、先进制造技术
	工业 4.0 后自 2013 年提出之后，数字孪生注重更高层次的虚拟能力，西门子推出数字孪生用模型	增长	工业 4.0、智能制造、系统建模与仿真

到了 2017 年，数字孪生被认为是未来航空航天与国防领域的六大顶尖技术之一。在同一年，Gartner 将数字孪生列入 2017 至 2019

年十大战略科技发展趋势。自 2013 年工业 4.0 概念提出后，数字孪生的关注度逐渐提升，西门子等公司推出了数字孪生应用模型。

进入 2022 年，随着元宇宙概念的兴起，数字孪生作为底层技术在多个领域都有了具体的实践应用，特别是在工业、医疗和城市管理等领域。这种技术的发展与人工智能、物联网、虚拟现实等技术的持续进步密切相关。随着技术的不断发展，数字孪生的概念得以进一步完善，适用范围也在不断拓宽^[3]。

三、数字孪生的技术框架

数字孪生技术的核心在于将物理世界的的数据引入数据层，通过构建一个精确的数字模型，即数字孪生体，以模拟和分析现实世界实体的全生命周期（如图 3-1 所示）。该技术的高效运作依赖于先进的数据处理能力和复杂的建模技术。数字孪生体的构建始于对物理实体（如人员、机械设备和生产流程）的数据采集，通常通过各种传感器和监测设备实现。这些设备能够捕捉从基础运行参数到复杂行为模式的数据，并通过物联网技术实时传输，提供实体的即时状态信息^[4]。

一旦数据被收集和传输，它们会在系统内部进行详细的标记和管理，形成一个结构化的底层数据池。这个数据池是数字孪生体建模和仿真的基础，允许系统创建一个与物理世界几乎一致的数字模型。该模型不仅反映实体的当前状态，还能模拟其行为和性能，甚

至预测未来的状态变化。这是通过采用先进的仿真技术和机器学习算法来实现的，能够处理和分析大量数据，揭示其中的模式和关联。

这种模拟和分析能力对于诊断问题、预测系统性能和优化操作至关重要。例如，在制造业中，数字孪生可以用于监控生产线的运作，通过对生产流程的模拟分析，预测设备故障并提前进行维护。在医疗领域，数字孪生可以模拟人体器官的功能，帮助医生更好地理解疾病的影响并制定治疗方案。

数字孪生技术不仅局限于制造业和医疗领域，其应用范围广泛，涵盖了城市规划、能源管理、航空航天等多个行业。在城市规划中，数字孪生可以模拟城市基础设施的运作和发展，优化交通流量和资源配置，提高城市管理效率。在能源管理中，数字孪生可以实时监测和优化能源系统的运行，降低能耗，提高能源利用效率。在航空航天领域，数字孪生可以模拟飞行器的运行状态，进行故障预测和维护管理，确保飞行安全。

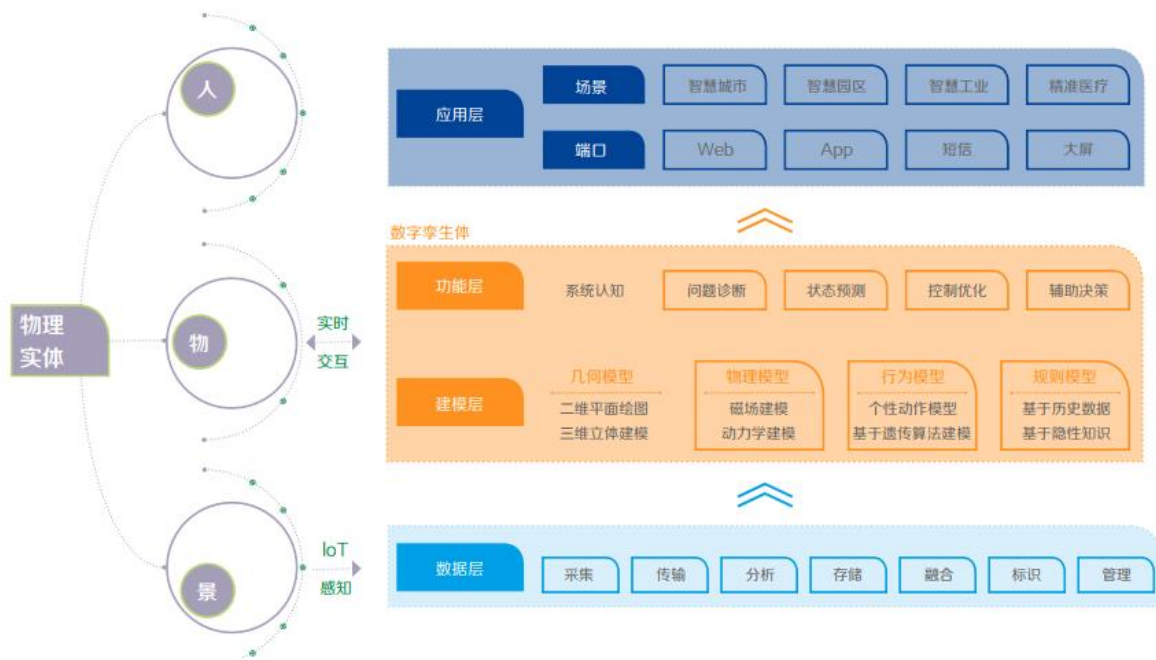


图 3-1 数字孪生系统架构

最终，数字孪生技术通过将这些深入的洞察和预测能力反馈给决策者，极大地提升了决策的效率和准确性。数字孪生技术的实施和发展不仅需要技术创新，还需要跨学科的知识融合，包括数据科学、工程学、计算机科学和行业特定知识。随着这些技术的不断进步和整合，数字孪生将在各行各业中发挥越来越重要的作用。

进一步扩展，数字孪生技术的未来发展趋势包括智能化、自主化和协同化。智能化指的是通过引入人工智能技术，使数字孪生体具有自我学习和自我优化的能力。自主化意味着数字孪生体能够在无人干预的情况下自主完成某些任务，如故障诊断和性能优化。协同化则是指多个数字孪生体之间能够相互协作，共同完成复杂任务，如智能制造系统中的多设备协同工作。

总之，数字孪生技术作为一种创新的技术手段，正在不断改变着各行各业的运营模式和管理方式。随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展，数字孪生必将在未来的发展中发挥更加重要的作用^[5]。

四、数字孪生的关键技术

数字孪生技术，一种将物理世界和数字世界相融合的前沿技术，正变得越来越重要。在这个领域，建模、渲染、仿真和物联网技术的融合构成了核心技术框架。这些技术不仅涉及前端设备如传感器，还包括了更为深入的技术层面^[6]。

建模技术通过多种方法创建物理实体的数字模型，主要包括 3D 扫描、参数化建模和逆向工程等。3D 扫描利用 3D 扫描仪如 Artec 和 Creafom 系列获取物体表面的点云数据，然后通过点云处理软件如 Geomagic Design X 进行数据处理和三角网格重建，生成高精度的 3D 模型。Artec 3D 和 Creafom 的核心技术由各自公司持有，前者位于卢森堡，后者属于加拿大 Ametek 集团，而 Geomagic Design X 软件的核心算法由美国公司 3D Systems 持有。参数化建模使用计算机辅助设计（CAD）软件如 SolidWorks、CATIA 和 Creo 等，根据设计参数直接构建数字模型，实现精确的几何形状和尺寸控制。这些主要 CAD 软件的核心技术和算法由 Dassault Systèmes 和 PTC 等公司持有，且均为商业产品，需要购买许可。虽然有一些开源的 CAD 工具如 FreeCAD，但其功能和用户体验与商业产品相比存在差距。逆向工程结合 3D 扫描和 CAD 技术，通过扫描获取实体的形状数据，再在 CAD 软件中进行曲面重建，生成可编辑的参数化模型。这一过程

通常使用软件如 Geomagic for SolidWorks 和 SpaceClaim, 其核心技术由 3D Systems 和 ANSYS 持有, 这些软件也为商业产品, 需要购买许可, 开源解决方案如 OpenSCAD 的功能和精度有限。建模过程中应用的关键算法包括三角网格化、曲面重建和点云处理。这些算法的具体实现细节和优化通常由各软件公司的研发团队持有, 并通过专利和版权保护。尽管核心算法的基础原理是公开的, 高效实现和优化通常是商业机密。开源库如 PCL (Point Cloud Library) 提供了点云处理的基本功能, 但商业软件在性能和稳定性上更有优势。在技术强度方面, 国外的 Artec 3D 和 Creaform 在高精度 3D 扫描领域处于领先地位, 尤其在工业、医疗和科学研究等领域, 而国内公司如深圳远标科技 (Shining 3D) 在中低端市场有一定竞争力, 但在高端市场上仍有差距。Dassault Systèmes 和 PTC 在参数化建模领域拥有深厚的技术积累和市场占有率, 国内公司如华天软件 (CAXA) 在本地市场有一定存在感, 但在全球市场上的影响力和技术深度上与国外巨头仍有差距。3D Systems 和 ANSYS 在逆向工程软件领域拥有强大的技术和广泛的应用案例, 国内部分企业如华天软件和 3D 数字化技术公司在本地市场有一定影响力, 但整体技术水平和市场渗透率较低。建模技术面临一些技术瓶颈和难点。首先, 高精度 3D 扫描设备成本高且操作复杂, 限制了其在一些应用场景中的广泛使用。其次, 点云数据处理涉及大量计算, 要求高性能计算资源支持, 且在处理过程中可能会丢失细节信息。此外, 对于复杂几何形状的精确建模, 现有的技术和算法仍难以完美还原, 特别是在处理细微曲

面和内部结构时。最后，建模的精度和细节还原度需要平衡计算效率，这对算法优化提出了更高的要求。这些问题需要通过不断的技术进步和创新来逐步解决，以提升数字孪生建模的效率和精度。

渲染技术通过多种方法实现数字模型的逼真视觉效果，主要包括基于物理的渲染（**Physically Based Rendering, PBR**）、实时渲染和云渲染等。基于物理的渲染使用渲染器如 **Arnold**、**V-Ray** 和 **Octane**，通过模拟光线与物体表面的物理互动，考虑材质的漫反射、镜面反射、次表面散射等特性，生成高真实感图像。**Arnold** 由 **Autodesk** 拥有专利权，**V-Ray** 由 **Chaos Group** 拥有专利权，**Octane** 由 **OTOY** 拥有专利权，均为非开源且需购买商业许可。实时渲染依赖于 **GPU**（图形处理单元）强大的计算能力，使用游戏引擎如 **Unreal Engine** 和 **Unity**，通过光栅化和光线追踪技术，在毫秒级时间内完成场景渲染，适用于虚拟现实和增强现实等交互式应用。**Unreal Engine** 的专利权由 **Epic Games** 拥有，源代码开放但需遵守终端用户许可协议（**EULA**）；**Unity** 由 **Unity Technologies** 拥有专利权，源代码不完全开放且需购买许可。云渲染利用云端的并行计算能力，使用如 **Nvidia** 的 **Iray** 和 **Chaos Group** 的 **V-Ray Cloud** 对复杂大场景进行分布式渲染，显著提升渲染效率，支持高分辨率和高质量图像生成。**Nvidia Iray** 和 **V-Ray Cloud** 均为非开源且需购买商业许可。渲染过程中，主要应用的算法包括光线追踪、全局光照、环境光遮蔽、阴影映射和次表面散射等。光线追踪通过模拟光线在场景中的路径来生成高度真实感的图像，全局光照考虑光线在场景中的多次反射和折

射，环境光遮蔽用于模拟光线在遮挡区域的衰减，阴影映射用于生成场景中的阴影效果，次表面散射用于模拟半透明材质（如皮肤）的光线散射效果。然而，渲染技术也面临一些技术瓶颈和难点。首先，高分辨率和复杂场景的实时渲染需求对 GPU 性能要求极高，特别是在实现光线追踪等高复杂度算法时。其次，渲染算法的复杂度高，导致计算开销大，尤其是在处理全局光照和次表面散射等高精度效果时。此外，在实时渲染中，如何平衡图像质量和渲染速度也是一大挑战，需要优化算法和硬件加速以提高效率和响应速度。最后，分布式云渲染需要解决数据传输和同步的问题，以确保渲染任务的高效执行和结果的一致性。在国内，阿里云和百度云在影视、动画制作和智能城市仿真等领域表现出色；国外，Nvidia 在 GPU 计算和云渲染，Epic Games 在实时渲染和虚拟现实应用，Autodesk 在建筑可视化和影视特效方面均处于领先地位。这些领先企业通过不断的技术创新和优化，为数字孪生应用提供了强大的支持，并大多持有相关技术的专利权，要求商业许可方可使用。这些问题需要通过硬件性能的提升、算法优化和创新来逐步解决，以满足数字孪生应用对高质量实时渲染的需求。

仿真技术仿真技术通过多种方法模拟物理实体的行为和状态，主要包括有限元分析（Finite Element Analysis, FEA）、多物理场耦合和实时仿真等。有限元分析使用软件如 ANSYS、ABAQUS 和 COMSOL，将连续区域离散为有限个单元，通过求解一系列偏微分方程来计算实体在力、热、电磁等条件下的响应。ANSYS、

ABAQUS 和 COMSOL 的专利权分别属于 ANSYS 公司、达索系统和 COMSOL 公司，均需购买许可证，但开源软件如 CalculiX 也能替代部分商业软件功能。在技术实力上，国外的 ANSYS 和 ABAQUS 在全球市场上占有率和技术领先性较高，而国内的 FEA 软件在功能和用户基础上仍有差距。多物理场耦合仿真考虑结构、流体、电磁、声学等多种物理场的交互影响，使用软件如 COMSOL Multiphysics 和 ANSYS Multiphysics 进行综合分析。COMSOL 和 ANSYS 在多物理场耦合仿真方面拥有强大的功能和广泛的应用，而国内技术在逐步提升但仍有差距。开源软件 OpenFOAM 广泛用于学术和工业应用，提供了多物理场耦合仿真的开源解决方案。实时仿真通过简化模型、降阶技术和 GPU 加速等手段提高计算效率，使用软件如 Ansys Discovery Live 和 Autodesk Fusion 360，实现实时交互的仿真分析。国外的 ANSYS 和 Autodesk 在实时仿真方面技术领先，国内企业也在积极开发实时仿真技术，但总体上仍需提升。一些基于开源库的实时仿真解决方案如 Bullet Physics 和 PhysX 也在不断发展。仿真过程中主要应用的算法包括有限元法（Finite Element Method, FEM）、有限体积法（Finite Volume Method, FVM）、离散单元法（Discrete Element Method, DEM）和多尺度建模等。这些算法通过数值方法求解复杂的偏微分方程，模拟物理现象的动态变化。有限元法和有限体积法作为经典算法，具体实现可能有专利保护，离散单元法的算法公开但具体实现可能受专利保护，多尺度建模的具体实现和应用场景可能有专利。硬件方面，高性能计算（High-Performance

Computing, HPC) 系统、GPU 集群和大规模并行计算架构是支持高精度仿真的关键。NVIDIA、IBM、Intel 在这些领域处于领先地位，中国的 HPC 系统如天河系列也有显著发展。硬件设计和架构可能受专利保护，但许多系统设计文档和标准是公开的。仿真技术也面临一些技术瓶颈和难点。首先，高精度仿真要求大量计算资源，对计算机硬件尤其是 HPC 系统和 GPU 性能有较高要求。多物理场耦合仿真需要同时处理多个物理场的复杂交互，计算复杂度高且求解时间长，这对算法优化和计算资源提出了巨大挑战。实时仿真需要在保证计算精度的同时大幅提高计算速度，简化模型和算法优化具有较高难度。此外，仿真模型的构建和验证需要大量高质量数据支持，数据不足或不准确会显著影响仿真结果的可靠性。数据获取、处理和管理的难度也是一大障碍。仿真结果的准确性和可靠性依赖于模型的精度和算法的稳定性，需要不断改进和验证以满足工业级应用的需求。总体来看，仿真技术在数字孪生领域的应用广泛，需要根据具体需求选择合适的软件和硬件方案。主要仿真软件如 ANSYS、ABAQUS、COMSOL 和 Autodesk 等需购买许可证，而开源软件如 CalculiX 和 OpenFOAM 提供部分替代功能。国际公司在仿真技术和硬件支持方面领先，国内企业在部分领域有所进展但仍需努力追赶。这些问题需要通过硬件性能提升、算法创新和数据质量改进来逐步解决，以满足数字孪生技术对高精度和高效率仿真的需求。

在数字孪生技术中，**建模、渲染和仿真**这三大关键技术与物联网 (Internet of Things, IoT) 技术密切关联，协同作用以实现物理

实体的全面数字化、可视化和智能化管理（如图 4-1 所示）。物联网设备通过传感器网络实时采集物理实体的几何形状、位置信息、环境参数等数据，为数字建模提供精确的基础信息，实现实时数据的动态更新。渲染技术则利用物联网采集的实时数据，通过基于物理的渲染（Physically Based Rendering, PBR）、实时渲染和云渲染等方法，将数据可视化呈现，支持增强现实和虚拟现实等应用，提供高真实感的沉浸式交互体验。仿真技术通过实时仿真、多物理场耦合等方法，利用物联网设备提供的实时监测数据作为输入条件，模拟物理实体在不同环境和操作条件下的行为，为预测和优化提供支持。物联网技术不仅确保了建模、渲染和仿真系统之间的数据互通，提供了统一的数据采集、传输和处理平台，还结合云计算和边缘计算，为数字孪生提供强大的计算和存储能力，支持大规模实时数据处理和高效仿真计算，从而提升数字孪生的智能管理和优化能力。

表 4-1 数字孪生关键技术

技术类别	方法	描述	主要工具和软件	全部开源	是否需要交费
建模技术	3D 扫描	利用 3D 扫描仪获取物体表面的点云数据，通过点云处理软件进行数据处理和三角网格重建。	Artec, Creaform, Geomagic Design X	否	是
	参数化建模	使用 CAD 软件根据设计参数直接构建数字模型，实现精确的几何形状和尺寸控制。	SolidWorks, CATIA, Creo	否	是
	逆向工程	结合 3D 扫描和 CAD 技术，通过扫描获取实体的形状数据，再在 CAD 软件中进行曲面重建。	Geomagic for SolidWorks, SpaceClaim	否	是
渲染技术	基于物理的渲染	使用渲染器模拟光线与物体表面的物理互动，生成高真实感图像。	Arnold, V-Ray, Octane	否	是

	实时渲染	依赖于 GPU 的计算能力，使用游戏引擎在毫秒级时间内完成场景渲染，适用于交互式应用。	Unreal Engine, Unity	否	是
	云渲染	利用云端的并行计算能力，对复杂大场景进行分布式渲染，提升渲染效率。	Nvidia Iray, V-Ray Cloud	否	是
仿真技术	有限元分析	将连续区域离散为有限个单元，通过求解偏微分方程计算实体在力、热、电磁等条件下的响应。	ANSYS, ABAQUS, COMSOL	否	是
	多物理场耦合	考虑多种物理场的交互影响，使用软件进行综合分析。	COMSOL Multiphysics, ANSYS Multiphysics	否	是
	实时仿真	通过简化模型、降阶技术和 GPU 加速提高计算效率，实现实时交互的仿真分析。	Ansys Discovery Live, Autodesk Fusion 360	否	是

技术类别	主要公司及专利	开源解决方案	主要算法	技术瓶颈
建模技术	Artec 3D 卢森堡, Creaform 加拿大, Ametek 集团, Geomagic Design X3D Systems, 美国	PCL-Point Cloud Library	三角网格化、曲面重建、点云处理	高精度 3D 扫描设备成本高，操作复杂；点云数据处理计算量大；复杂几何形状精确建模难。
	Dassault Syst è mes, PTC	FreeCAD	几何建模	
	3D Systems, ANSYS	OpenSCAD	曲面重建、点云处理	
渲染技术	Autodesk, Chaos Group, OTOY	None	光线追踪、全局光照、环境光遮蔽、阴影映射、次表面散射	高分辨率和复杂场景实时渲染对 GPU 性能要求高；渲染算法复杂，计算开销大。数据传输和同步问题。
	Epic Games, Unity Technologies	None	光栅化、光线追踪	
	Nvidia, Chaos Group	None	分布式渲染	
仿真技术	ANSYS, Dassault Syst è mes, COMSOL	CalculiX	有限元法	高精度仿真要求大量计算资源；多物理场耦合仿真计算复杂度高；实时仿真需平衡计算精度和速度。
	COMSOL, ANSYS	OpenFOAM	多物理场耦合	
	ANSYS, Autodesk	Bullet Physics, PhysX	降阶技术、GPU 加速	

五、数字孪生的驱动因素

（一）数字经济

数字经济是指利用数字技术和信息通信技术（Information and Communication Technology, ICT）推动经济活动的创新和转型的经济形态。它涵盖了基于互联网、移动设备、云计算、大数据、人工智能、物联网等技术的生产、分配、交换和消费行为。数字经济不仅包括电子商务、数字金融、在线服务等新兴行业，还渗透到传统行业，通过数字化改造提升效率 and 创新能力。其核心在于数据作为关键生产要素，通过数据驱动的商业模式和智能化决策，促进经济增长和社会发展。数字经济的特点包括高效连接、无缝协作、实时互动和跨界融合，形成了新的经济形态和商业生态系统。

数字经济是驱动数字孪生技术发展的关键因素之一。随着数字化技术的迅猛发展，全球经济正从传统的工业经济向数字经济转型，企业和政府对数据驱动的智能决策和管理需求日益增长。数字孪生技术通过创建物理实体的数字化副本，能够实现对实体全生命周期的实时监控、预测和优化，从而提升生产效率、降低运营成本和改善产品质量。数字经济的发展带来了大规模的数据生成和传输需求，这为数字孪生提供了丰富的数据资源和应用场景。同时，信息通信技术、物联网（Internet of Things, IoT）、云计算、大数据分析和人工智能（Artificial Intelligence, AI）等数字技术的融合应用，进一步增强了数字孪生技术的实时性、准确性和智能化水平。此外，政策

支持和市场需求的不断增加也推动了数字孪生技术在智能制造、智慧城市、医疗健康、交通运输等领域的广泛应用。总之，数字经济的发展不仅为数字孪生技术提供了坚实的基础和广阔的应用前景，也为其在各行各业的推广和实施提供了强大的驱动力^[7]。

（二）工业互联网发展

工业互联网是指将先进的传感器、控制系统和软件与传统工业设备和生产系统相结合，通过互联网技术实现设备、数据、流程和人员的互联互通，从而提高生产效率、优化资源配置和增强工业系统的智能化水平。它涵盖了物联网（Internet of Things, IoT）、云计算、大数据分析、人工智能（Artificial Intelligence, AI）、边缘计算和网络安全等技术，通过实时数据采集和分析，实现对设备状态、生产过程和供应链的精准监控和管理。工业互联网的核心目标是推动制造业的数字化转型，促进工业系统的全面连接和智能化运作，提升生产灵活性和产品质量，同时降低运营成本和能源消耗，从而实现更高的经济效益和可持续发展。

工业互联网是驱动数字孪生技术发展的重要因素之一。作为物联网、云计算、大数据分析和人工智能等技术在工业领域的综合应用，工业互联网实现了设备、系统、流程和人员的全面互联与智能化管理。数字孪生技术在工业互联网的推动下，通过对物理实体的数字化复制和实时仿真，实现了对生产过程、设备状态和运营效率的精准监控和优化。这种技术能够在设备维护、生产调度、质量控制和供应链管理等方面提供智能化的解决方案，显著提升了工业生

产的灵活性、效率和可靠性。工业互联网的发展带来了海量的数据流，这为数字孪生提供了丰富的实时数据来源，增强了其预测和决策能力。此外，工业互联网的广泛应用和政策支持，促进了数字孪生技术在智能制造、智慧工厂等领域的落地与扩展。通过工业互联网与数字孪生的深度融合，企业能够实现更加精准的生产管理和资源配置，推动工业体系向数字化、智能化方向转型，提升整体竞争力^[8,9]。

（三）政策标准

2019年11月至2023年1月，中国在推动制造业、服务业及互联网深度融合方面取得了显著进展。首先，国家发展改革委员会在2019年11月发布《关于推动先进制造业和现代服务业深度融合发展的实施意见》，旨在通过发展“互联网+”模式，刺激经济发展活力与潜力，重点突破了工业机理建模、数字孪生与信息物理系统等关键技术。随后，2020年4月该委员会推出《关于推进‘上云用数赋智’行动培育新经济发展实施方案的通知》，进一步推动数字孪生技术的创新应用。2020年12月，工业和信息化部发布的《工业互联网创新发展行动计划（2021-2023年）》支持云仿真、数字孪生等技术的平台建设，加速信息技术在工业中的应用。

到了2021年，国家层面对数字经济与数字孪生技术的支持进一步加强。6月，国务院发布《“十四五”数字经济发展规划》，提出构建数字孪生城市以提升城市管理服务能力。11月，工业和信息化部发布《“十四五”大数据产业发展规划》，强调数字孪生技术在

制造、跨系统及产业链分析中的应用。2022年初，国家发展和改革委员会和水利部共同推出《“十四五”水安全保障规划》，提出构建数字孪生流域以优化水资源管理。同年10月，国家能源局发布《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》，加速能源领域数字化转型。2023年初，中共中央和国务院发布《数字中国建设整体布局规划》，提出以数字孪生技术推动生态环境的智慧治理与保护。

综上所述，中国在推动数字孪生技术及其应用方面已经形成了一套完整的政策框架，从制造业、城市管理到自然资源与环境保护，数字孪生技术被视为重要的技术手段，旨在通过技术创新推动社会经济发展与环境保护的深度融合。

（四）用户需求

用户需求的不断增长是数字孪生技术快速发展的重要驱动力。在数字经济的大背景下，数字孪生技术与各行各业的深度融合不断加深，特别是在工业、城市管理、能源电力、医疗和水利等领域的全生命周期管理中展现出广泛的应用前景^[10]。例如，在智慧工业领域，数字孪生技术贯穿产品设计、生产验证的各个阶段，极大提升了制造效率和周期管理。在城市管理方面，数字孪生城市的构建实现了对城市运行的全面监控和优化管理，提高了城市的运行效率和服务质量。新型电力系统、数字医疗和数字流域管理等领域的应用也展现了数字孪生技术在提升效率、优化资源管理和决策制定方面的巨大潜力。随着技术进步的不断深入，预期数字孪生的应用场景将更加广泛，对更多行业产生深远影响。

六、数字孪生国内外主要研究机构及代表性成果

（一）国外主流数字孪生解决方案概览

在当今全球化的高科技环境中，数字孪生技术已成为推动工业和商业数字化转型的关键力量。各领先企业如 GE Digital、西门子、PTC、Ansys、达索系统等，正通过推出创新的数字孪生解决方案，定义这一领域的未来。这些解决方案不仅涵盖了综合性平台，还包括与其他企业合作提供的全面解决方案，旨在满足不同行业对数字化升级的需求（如表 6-1 所示）。

特别是，像 GE、西门子和 PTC 等企业，凭借其强大的技术基础，开发了如 Predix、COMOS Platform 和 ThingWorx 等综合性平台，为客户提供从设备监测到整个生产流程管理的全方位解决方案。同时，企业间的合作也显得尤为关键，如达索系统与 ABB、Ansys 与微软等的合作，通过整合各自的专长，共同提供了包含模型建模、验证到部署的完整数字孪生服务。

例如，Ansys 的 Twin Builder 是一款具备模型建模、验证和部署三大核心功能的解决方案。它通过结合物理和虚拟传感器，实现了跨学科多领域的系统仿真与数字孪生，特别适用于生产设备、设计阶段和运维阶段的数字孪生。AVEVA 则提供了涵盖工程、运营和绩效管理的数字孪生产品组合，支持从设计到维护的全生命周期管理。Altair 与 ACROME 的合作突出了数字孪生在教育及产品优化方面的

应用，而 Bentley 的 iTwin Platform 则侧重于基于数据的决策支持和业务服务。表 6-2 总结了国外主流数字孪生厂商融资情况。

这些领先企业的解决方案体现了数字孪生技术的广泛应用前景。从工程设计、生产制造到运营维护，数字孪生正在成为企业数字化转型和创新发展的关键推动力。通过模拟、分析和优化实体对象的虚拟副本，企业能够在虚拟环境中预测和解决现实问题，从而实现效率提升和成本降低。随着技术的进一步发展和应用深化，数字孪生无疑将在未来的工业革命中扮演更加重要的角色。

表 6-1 国际主流数字孪生厂商和解决方案

厂商名称	解决方案	应用领域	应用行业	技术来源	网址
Ansys	Ansys Twin Builder	数字生产设备、设计阶段的数字孪生、运行维护阶段的数字孪生、基于经验公式的数字孪生、基于仿真的数字孪生	汽车、装备、航空航天与国防等	自主研发	www.ansys.com
AVEVA	Unified Engineering, Unified Operations Center, Asset Performance Management, PI System, Process Simulation	工厂设计、采购、施工、工艺仿真优化、安全生产运营	化工、能源、海事、电力等流程行业	自主研发	www.aveva.cn
Altair	Altair Activate	产品开发和运营	汽车、消费电子、航空航	自主研发	www.altair.com.cn

			天、能源等		
Bentley	iTwin Platform	设计、规划、施工、运营等	数字城市、制造、发电、公用事业和通讯、轨道交通、采矿和海洋工程等	自主研发	www.bentley.com
Dassault Systemes	3DEXPERIENCE	设计、生产、制造、交付、运营等	航空航天与国防、船舶与海洋工程、工业设备、生命科学与医疗保健等	自主研发	www.3ds.com
ESI Group	Hybrid Twin	预测性物理模型和虚拟样机	航空航天与国防、汽车、能源、重型机械	自主研发	www.esi-group.com
GE Digital	Predix	零件、资产和系统整个生命周期内的多级数据和信息:设计、构建、运行、操作和服务	航空、电力、石油和天然气、制造业	自主研发	www.ge.com
Microsoft	Azure IoT, Azure Digital Twins, Azure Functions 等	面向企业开发者的云服务	制造业、楼宇、医疗、农业、教育、能源等	自主研发	www.microsoft.com

Maplesoft	MapleSim	虚拟调试	机器制造商、重型机械、能源生产、医疗器械等	自主研发	www.maplesoft.com
PTC	Creo, Windchill PLM, ThingWorx, Vuforia 等	工程、运营和服务	航空行业和国防、汽车、电子和高科技、工业机械等	自主研发	www.ptc.com
Rockwell Automation	Emulate3D	虚拟仿真、虚拟调试、虚拟培训等	汽车、物流、材料处理等	自主研发	www.rockwellautomation.com.cn
Siemens	Plant Sight, COMOS Platform, Xcelerator	设计工具、虚拟仿真、制造运营管理、工业自动化、物联网平台等	工业、楼宇、电网、交通等	自主研发	new.siemens.com
SAP	Ariba Network, SAP Asset Intelligence Network, SAP Logistics Business Network 和 SAP Fieldglass 等	产品设计、工业计划、生产制造、运输物流以及运维	石油天然气、汽车、航空与国防、铁路、机械制造等	自主研发	www.sap.cn
Unity	Unity Reflect, Unity Manufacturing Toolkits	三维数字化及智能仿真、工业级数据采集分析等	制造业、高校	自主研发	unity.cn

数据来源：作者整理

表 6-2 国际主流数字孪生厂商融资情况

厂商名称	融资情况
Ansys	2020 年 12 月 9 日，ANSYS 在首次公开募股后进行了一轮融资，筹集了 2.068 亿美元。1994 年 6 月 1 日，ANSYS 进行了私募股权融资，但具体金额未披露。
AVEVA	AVEVA 在过去几年里进行了多项收购：OSIsoft 于 2020 年 8 月 25 日以 50 亿美元收购；Schneider Electric Software 于 2017 年 9 月 5 日被收购；FabTrol Systems 于 2015 年 6 月 1 日以 650 万美元收购；8over8 于 2015 年 1 月 5 日以 2690 万英镑收购；Global Majic Software 于 2012 年 12 月 17 日被收购；Bocad Group of Companies 于 2012 年 5 月 23 日被收购；Z+F UK 于 2011 年 10 月 3 日被收购；Logimatic - MARS 于 2010 年 6 月 7 日被收购；ADB Systemer - Oil & Gas 于 2010 年 6 月 3 日被收购；iDesignOffice Pty Ltd 于 2009 年 3 月 30 日被收购。
Altair	2023 年 12 月 7 日，英国研究与创新组织授予 Altair 一个资助项目。2004 年 10 月 6 日，General Atlantic 在 Altair 的私募股权轮中投资了 3000 万美元。
Bentley	2023 年 10 月 27 日，Bentley 完成了一轮由 Keensight Capital 领投的风险投资。
Dassault Systemes	2021 年 10 月 15 日，Bloom 在种子轮融资中获得 1100 万欧元；2021 年 4 月 18 日，Rosaly 在种子轮融资中获得 150 万欧元；2019 年 6 月 19 日，BioSerenity 在 B 轮融资中获得 6500 万欧元；2019 年 2 月 14 日，Rize 在 B 轮融资中获得 1500 万美元；2018 年 12 月 31 日，NuoDB 在风险投资轮融资中获得 3060 万美元；2015 年 3 月 17 日，NuoDB 在 B 轮融资中获得 950 万美元；2014 年 2 月 26 日，NuoDB 在 B 轮融资中获得 1620 万美元；2011 年 12 月 6 日，Gehry Technologies 在 B 轮融资中获得 1050 万美元；2010 年 12 月 31 日，Gehry Technologies 在 A 轮融资中获得 410 万美元；2009 年 6 月 1 日，blueKiwi software 在 B 轮融资中获得 700 万美元。
ESI Group	ESI 集团在多个时间点收购了多家公司，包括 Scilab Enterprises（2017 年 2 月 27 日）、Mineset（2016 年 2 月 9 日）、ITI GmbH（2016 年 1 月 6 日）、Picviz Labs SAS（2015 年 4 月 1 日）、Civitec（2015 年 3 月 27 日）、ESI Services Vietnam Co., Ltd.（2013 年 12 月 1 日）、CyDesign Labs（2013 年 10 月 24 日）、OpenCFD（2012 年 9 月 19 日）、Efield（2011 年 12 月 14 日）以及 ESI Software Germany GmbH（2011 年 8 月 16 日）。

GE Digital	2017年3月29日，Alchemist Accelerator 宣布完成了一轮 200 万美元的风险投资。
Microsoft	2024年1月2日，微软进行了一轮融资；2022年12月9日，微软进行了 IPO 后股权融资；1981年9月1日，微软在技术风险投资者的支持下进行了风险投资，筹集了 100 万美元。
Maplesoft	暂无公开融资信息
PTC	2018年6月11日，Rockwell Automation 以 10 亿美元的价格收购了 PTC 公司，作为其上市后股权的一部分。
Rockwell Automation	2018年6月11日，Rockwell Automation 以 10 亿美元的价格收购了 PTC 公司，作为其上市后股权的一部分。
Siemens	2021年5月25日，西门子医疗获得了安大略省联合基金的 250 万美元拨款。2021年3月25日，西门子医疗在上市后获得了 23 亿欧元的股权融资。
SAP	2019年4月24日，Elliott Investment Management 以 13 亿美元投资 SAP 的 Post-IPO Equity。2015年6月1日，SAP 获得了一笔 130 万欧元的资助。
Unity	自 2018 年 6 月 15 日至 2023 年 11 月 10 日，Unity 经历了多次重要的融资活动。2023 年 11 月 10 日，Unity 通过 Silver Lake 获得了 10 亿美元的 IPO 后债务融资。2021 年 2 月 3 日和 2020 年 9 月 23 日，Unity 分别进行了两次二级市场交易和一轮融资。2020 年 5 月 27 日和 2020 年 5 月 1 日，Unity 进行了二次市场交易和风险投资。2019 年 7 月 25 日，Unity 通过二级市场筹集了 5.25 亿美元。同年 7 月 1 日和 5 月 1 日，Unity 分别完成了一轮私募股权融资和 E 轮融资，E 轮融资金额为 1.5 亿美元。2018 年 9 月 30 日，Unity 通过 Altimeter Capital 进行了二次市场交易，而在 2018 年 6 月 15 日的 D 轮融资中，Unity 筹集了 1.45 亿美元。

数据来源：作者整理

（二）国内主流数字孪生解决方案概览

在中国，数字孪生技术的应用与发展正吸引越来越多企业的关注与投入。众多解决方案供应商如美云智数、华龙迅达、寄云科技、力控科技、精航伟泰等，均致力于在特定应用场景或行业中提供创新的数字孪生服务。尽管该领域在国内尚处于成长初期，并面临建

模、仿真和基于数据融合技术的挑战，这些企业仍不断探索和突破技术瓶颈，以满足市场需求（如表 6-3 所示）。

具体来说，触角科技借助其感知 MRNR 数字孪生协同平台，融合了 MRR 人机交互技术、5G 网络和 AI 技术，打造了一个适用于工业 4.0 和智慧城市的高效、低成本的远程三维可视化协同工作环境。华龙迅达通过其木星数字孪生平台，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真技术，实现了在虚拟空间中对产品数据的精准映射，帮助企业优化资源配置、提高生产过程控制、保障均质生产并实现柔性制造。华力创通的数字孪生工程解决方案则侧重于利用数字技术和创新集成，服务于企业的数字经济和数字化转型需求，通过实现全域运行数据的实时汇聚、监测、治理和分析，构建了一个通用的数字生态系统。寄云科技提供了一套基于数据智能的数字孪生开发方案，包括工业数据采集、边缘计算能力以及故障诊断和预测能力，帮助企业实现了更精准全面的状态监测和关键指标性能预测。这些企业及其解决方案展示了数字孪生技术在促进企业运营效率、资源配置、生产控制和决策支持方面的强大潜力，为中国乃至全球的数字化转型与创新开辟了新的道路。表 6-4 总结了国内主流数字孪生厂商融资情况。

表 6-3 国内主流数字孪生厂商和解决方案

厂商名称	解决方案	应用领域	应用行业	技术来源	网址
触角科技	感知 MR/VR 数字孪生协同平台	三维可视化	工业、教育	自主研发	www.chu-jiao.com

华龙迅达	木星数字孪生平台	数字孪生设备、数字孪生车间、数字孪生工厂等	烟草、汽车、制药、能源、加工等	自主研发	www.hualongxunda.co
华力创通	基于数字孪生体的数字工程解决方案	数字化工厂、装备一体化测试、虚拟现实等	国防军工、科研院所、飞机、高铁等	自主研发	www.hwacreate.com.c
寄云科技	基于数据智能的完整数字孪生、基于仿真模型+物联网监测的数字孪生解决方案	智能控制、数据采集、设备接入、数据分析建模、可视化开发等	电力行业、高端制造、油气行业、轨道交通等	未查询到相关信息	www.neucloud.cn
精航伟泰	Model Studio	数字化产品集成开发及仿真验证	航空航天	自主研发	www.ijianmo.cn
卡奥斯	D3OS	工业数字孪生	电机、钢铁、化工家具等	未查询到相关信息	www.cosmoplat.com
力控科技	力控科技数字孪生工厂解决方案	生产监控与管理、数字化车间、智能工厂等	石油石化、公用事业、工业能源等	未查询到相关信息	www.sunwayland.com
美云智数	Mlo T.VC	数字化工业仿真	汽车汽配、电子半导体、装备制造等	自主研发	www.meicloud.com
摩尔元数	Wis3D 数字孪生系统	数字孪生三维可视化	工业、能源、水务、智慧地球、城市、园区等	自主研发	www.morewis.com

木棉树软件	数字孪生引擎 MMS3D	工业数字孪生的生产管控、智慧城市的监控运维等可视化应用	装备、冶金、能源等	未查询到相关信息	www.mms3d.cn
同元软控	M WORKS 平台	复杂装备系统数字孪生体的构建、评估、管理、应用过程	航天、航空、数控机床等	自主研发	www.tongyuan.cc
51 world	WDP 数字孪生 PaaS 平台	数字孪生创作平台	智慧城市、园区、交通等	自主研发	www.51aes.com
优也科技	Things wisdom iDOS	能效管理、生产过程管理、设备智能维护等	钢铁、有色、燃煤等	未查询到相关信息	www.yo-i.com.cn
优诺科技	Thing JS 低代码开发平台、Thing JS 零代码开发平台、Thing Studio 森工厂数字孪生工具链	数字孪生可视化化管理	银行、金融、政府机关、能源、制造业等	自主研发	www.uino.com
易知微	Easy V 数字孪生可视化搭建平台	数字孪生可视化	水利、能源、城市、工业、文旅、园区、港口等	自主研发	easy v.cloud
子虔科技	数字孪生协同平台、数字孪生云平台	企业数字化转型与协同	制造、交通运输、基建等	自主研发	www.zixel.cn

数据来源：作者整理

表 6-4 国内主流数字孪生厂商融资情况

厂商名称	融资情况
------	------

触角科技	暂无公开融资信息
华龙迅达	2023年5月7日，宣布完成由鼎晖百孚和龙芯中科参与的A轮融资，实现了底层控制技术的自主可控。早在2019年1月1日，深圳高新投曾参与其天使轮融资。
华力创通	在2023年3月31日，中信证券和光大银行参与了一笔未披露金额的定向增发交易。此前，达风投资、紫光股份和创金合信在2018年2月13日参与了一笔3.94亿人民币的定向增发。而在2010年1月20日，公司通过公开发行人成功上市，融资金额达到5.22亿人民币。
寄云科技	暂无公开融资信息
精航伟泰	暂无公开融资信息
卡奥斯	在2022年2月25日，德阳产业投资参与了卡奥斯的B+轮融资，具体金额未披露。2021年9月1日，卡奥斯在B轮融资中获得超过10亿人民币，估值达到150亿人民币，参与投资方包括国寿投资、青樾基金、上海国盛投资集团等多个机构。2020年7月28日，卡奥斯完成了2亿人民币的A+轮融资，投资方有国开制造业转型升级基金、国开金融和北京中翔运达。同年4月1日，卡奥斯在A轮融资中获得9.5亿人民币，投资方包括国调基金、诚鼎创投和招商致远资本等。早在2019年10月14日，卡奥斯的天使轮融资由海尔智家战略投资部、海尔电器、海智汇赢和华宸资本等参与，但具体金额未披露。
力控科技	暂无公开融资信息
美云智数	在2016年12月1日，美的集团参与了一笔未披露金额的股权融资。
摩尔元数	在2021年6月8日，完成了近亿元人民币的B+轮融资，由华业天成资本投资。此前在2021年3月3日，获得了启明创投投资的亿元人民币B轮融资。2019年12月22日，晨山资本参与了数千万元人民币的A+轮融资，旨在打造低代码工业应用开发平台。2018年8月24日，获得了软银中国资本、坚果资本和思佰益投资的数千万元人民币A轮融资。最早在2017年11月15日，完成了由坚果资本参与的天使轮融资，但具体金额未披露。
木棉树软件	暂无公开融资信息

同元软控	在 2022 年 3 月 15 日，中网投、钟鼎资本、元禾控股和深创投参与了一笔未披露金额的 A 轮融资。
51 world	暂无公开融资信息
优也科技	暂无公开融资信息
优诺科技	暂无公开融资信息
易知微	暂无公开融资信息
子虔科技	在 2021 年 3 月 5 日，获得了创世资本的天使轮融资，具体金额未披露。创世伙伴为其 A 轮领投方。

数据来源：作者整理

（三）国内外主要研究机构及代表性成果

数字孪生技术在全球高校研究领域的进展大体保持同步，但中外院校的研究重点和方向却呈现出明显差异（如表 6-5 所示）。国际高校，尤其是欧美顶尖院校，侧重于基础理论探索、高精度仿真模型构建以及多物理场耦合机理研究，强调复杂系统的建模方法与跨学科应用拓展。麻省理工学院、斯坦福大学和剑桥大学等世界一流院校在上述方面颇有建树，代表了国际前沿水平。相比之下，中国高校在数字孪生技术的应用导向和大规模系统集成方面表现突出，研究成果在智慧城市、交通管理和基础设施建设等领域得到广泛应用。清华大学、北京航空航天大学 and 国防科技大学等国内顶尖院校在这些方面取得了一系列原创性成果，展现了中国特色和优势。此外，中国高校还积极将数字孪生技术与云计算、物联网和 5G 等新兴信息技术深度融合，加速推动其在工程实践中的规模化应用。总体而言，国际高校侧重于数字孪生技术的深度研究和跨学科融合，中国高校则更注重技术的应用广度和系统实施效率。这种差异形成了

既有竞争又有合作的良性研究生态，为数字孪生技术的创新发展提供了多元动力。

在国外，麻省理工学院的 **Michael Kapteyn** 教授致力于开发统一的数学表示法，以构建通用的数字孪生模型。这种方法旨在实现数字孪生技术在复杂系统中的大规模应用，如航空舰队、风力涡轮机群和心脏病患者群体。通过精确建模和高效管理，数字孪生技术有望在这些领域带来显著的效率提升和成本节约。佐治亚理工学院的 **Dimitri Mavris** 教授与西门子公司合作，重点研究数字工程和数字孪生技术在优化复杂基础设施系统中的应用。这些研究成果有望在能源、交通、建筑等行业得到广泛应用，提高基础设施的运行效率和可靠性。约翰霍普金斯大学医学院的 **Mohamed Rehman** 教授领导的人类数字孪生项目，通过收集患者的实时生理数据，为每个个体创建数字孪生体。这一尝试旨在实现精准医疗，为患者提供个性化的诊疗方案，提高医疗质量和患者满意度。

在国内，北京航空航天大学的陶飞教授在智能制造和航天领域的数字孪生技术研究与应用方面取得了卓越成就。他的研究成果得到了国际同行的高度认可，并成功应用于卫星管理和控制，提高了航天器的可靠性和运行效率。国防科技大学的徐凯教授专注于利用数字孪生技术实现智能工业控制软件的自动化。通过构建工业系统的数字孪生模型，并与实际系统进行实时交互，可以显著提高工业控制软件的自动化水平和效率，推动工业领域的数字化转型。北京理工大学的翁东东教授探索高逼真数字人构建与智能驱动技术，将

数字孪生与虚拟现实相结合，开拓了数字孪生技术在虚拟现实领域的应用前景，为虚拟现实技术的发展注入了新的活力。清华大学的李勇教授致力于将数字孪生技术与人工智能相结合，开展 AI 驱动的无线网络孪生研究。通过构建无线网络的数字孪生模型，并利用人工智能算法进行优化和预测，有望实现无线网络性能的显著提升，推动下一代无线通信技术的发展。

表 6-5 数字孪生研发技术国内外主要研究机构及代表性成果

国内/ 国外	单位	研究方向和成果
国外	麻省理工学院： Michael Kapteyn	与数字孪生技术相关的研究，专注于通过统一的数学表示法开发可大规模应用于航空舰队、风力涡轮机群或心脏病患者群体的数字孪生模型
	佐治亚理工学院： Dimitri Mavris	通过与西门子公司的合作，领导数字工程和数字孪生研究，尤其是在优化复杂基础设施系统方面的应用
	约翰霍普金斯大学医学院： Mohamed Rehman	领导人类数字孪生项目，通过收集实时生理数据和其他信息，创建每个患者的数字孪生，以个性化和精确医疗为目标。
国内	北京航空航天大学： 陶飞教授	数字孪生技术的研究与应用，特别是在智能制造、航天等领域的应用。陶飞教授团队在数字孪生技术方面的研究被国际同行广泛认可，并成功应用于卫星领域
	国防科技大学： 徐凯教授	基于数字孪生的智能工业控制软件自动化。徐凯教授的工作重点在于将数字孪生技术应用于工业控制软件，提高其自动化水平和效率
	北京理工大学： 翁东东教授	高逼真数字人构建与智能驱动。翁东东研究员通过数字孪生技术，探索在虚拟现实构建高逼真数字人的方法及其在多种场景下的应用
	清华大学： 李勇教授	研究方向包括 AI 驱动的无线网络孪生：理论与实践。通过数字孪生技术与人工智能的结合，李勇教授致力于在无线网络领域内实现理论研究与实际应用的深度融合，推动网络技术的发展与创新

数据来源：作者整理

七、数字孪生产业链和产业图谱

数字孪生产业链通常包括数据采集与处理、模型构建与仿真、分析与优化以及应用与服务等环节。首先，数据采集与处理阶段涉及获取现实世界中的数据，可能包括传感器数据、图像数据、声音数据等，然后通过处理和清洗这些数据，使其能够被用于建模和仿真。接着，在模型构建与仿真阶段，利用获取到的数据构建数字孪生模型，并通过仿真技术模拟真实世界中的物理实体或系统的行为。在分析与优化阶段，利用数字孪生模型进行数据分析和优化，以帮助企业优化决策、提高效率和降低成本。最后，在应用与服务阶段，将数字孪生技术应用到具体的场景中，提供相应的服务，满足客户需求（如图 7-1 所示）。数字孪生产业链可分为上游、中游和下游三个部分。

上游：基础技术与数据采集：上游部分包括传感器和设备制造商、数据通信与存储技术等。传感器和设备制造商提供数据采集的基础硬件，如传感器、物联网设备等。数据通信与存储则涉及数据传输与存储的技术和服务，如 5G 通信、云计算平台等。代表企业有：国内的华为（5G 通信设备）、大华股份（安防传感器）、中兴通讯（通信设备）；国外的思科（网络设备）、博世（工业传感器）、西门子（工业自动化）。

中游：数字孪生平台与模型开发：中游部分主要集中在软件平台开发和人工智能与数据分析。软件平台开发企业提供数字孪生建模与仿真的软件平台，人工智能与数据分析企业利用 AI 技术进行数据处理与分析，建立预测模型。代表企业有：国内的阿里云（云计算平台）、腾讯云（云服务）、海康威视（智能视频分析）；国外的 GE 数字（Predix 平台）、IBM（Watson 物联网）、PTC（ThingWorx 平台）。

下游：应用与解决方案：下游部分主要包括数字孪生技术在具体行业的应用和提供服务与维护。行业应用涉及智能制造、智慧城市、医疗健康等领域，服务与维护则提供数字孪生系统的定制化开发、集成与维护服务。代表企业有：国内的京东（智能物流）、美的集团（智能制造）、平安科技（智慧城市）；国外的西门子（工业 4.0 解决方案）、ABB（工业自动化）、飞利浦（数字健康）。

国内企业如华为、阿里云等在通信设备、云计算、大数据等方面具有全面的技术积累和产业布局，能够提供从数据采集、传输到分析、应用的全产业链解决方案（如图 7-2 所示）。此外，政府积极推动数字化转型，出台多项政策支持数字孪生技术的发展和應用。中国拥有庞大的市场需求，特别是在智能制造、智慧城市等领域，为数字孪生技术的应用提供了广阔的空间。国外企业在基础技术研发和高端制造方面具有较强的优势，尤其是在工业传感器、智能硬件等领域。此外，欧美企业在工业 4.0、智慧城市等方面已有较为成熟的应用案例，积累了丰富的经验。国外企业如西门子、GE 等拥有

广泛的国际市场布局和影响力，能够在全球范围内推广其数字孪生解决方案。

华为在 5G 通信和物联网领域拥有大量专利，涵盖从设备制造、网络传输到系统集成的全方位解决方案。其技术优势包括自主研发的 5G 芯片、端到端的网络解决方案以及基于 AI 的智能管理系统，这些专利技术使其在全球通信市场占据领先地位。西门子在工业自动化和数字化领域的核心专利众多，尤其在工业 4.0 的应用方面处于领先地位。西门子的专利技术包括数字化双胞胎（Digital Twin）、智能制造系统以及工业物联网平台，这些技术在全球范围内广泛应用，提升了制造业的智能化水平。IBM 通过其 Watson 平台，在人工智能与物联网结合的专利技术上占据重要位置。Watson 平台利用自然语言处理、机器学习和人工智能计算技术，能够高效处理海量数据，提供智能化解决方案。IBM 的专利技术涵盖从数据分析、智能诊断到自动化决策支持，广泛应用于医疗、金融、制造等领域。阿里云在云计算、大数据处理及 AI 算法方面积累了大量专利技术，支持其数字孪生平台的发展。阿里云的专利包括分布式计算架构、大规模数据处理技术和高效的 AI 模型训练方法，这些技术为其数字孪生平台提供了强大的计算能力和智能分析功能，广泛应用于电商、金融、智能城市等领域。

数字孪生产业链涵盖了从基础技术、平台开发到应用解决方案的各个环节，国内外企业在不同环节各具优势。国内企业在全产业链覆盖和政策支持方面具有明显优势，而国外企业则在技术领先和

国际市场拓展方面表现突出。综合来看，数字孪生技术的应用前景广阔，各级企业在各自领域的不断创新将推动整个产业链的持续发展。

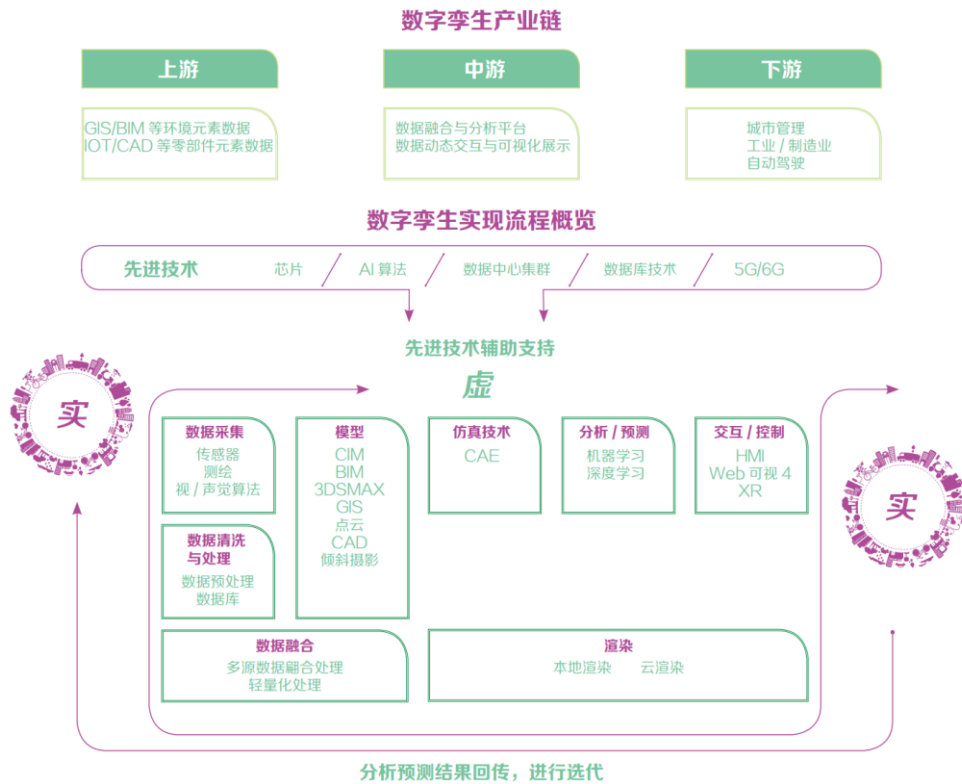


图 7-1 数字孪生产业链以及数字孪生实现流程概览



图 7-2 数字孪生产业图谱

八、数字孪生竞争壁垒

在数字孪生行业中，构建竞争壁垒是一项复杂而系统的工程，涉及技术、业务和资源等多个层面。企业要想在激烈的市场竞争中脱颖而出，必须全面提升自身实力，打造难以复制的核心竞争力。

从技术层面看，数字孪生的核心在于构建精准的物理模型和丰富的标准化资源库，这对制造商的数据处理和分析能力提出了极高要求。首先，制造商需要具备处理异构多维时空数据的能力，能够有效整合来自不同来源、不同格式的海量数据。其次，制造商需要运用先进的人工智能算法，如机器学习、深度学习等，实现数据的自动化识别、挖掘和三维重建，从而构建高精度、高仿真度的数字孪生模型。此外，制造商还需要建立一个支持数据统一接入、交换

和高效共享的时空数据库，为数字孪生的应用提供坚实的数据基础。在“云边协同”时代，拥有自主研发的渲染引擎对于实现场景级实时修改至关重要。这不仅可以大幅提升数字孪生的交互性和实时性，还能够推动企业从项目制向产品化转变，实现规模化发展。

从业务壁垒角度看，制造商必须深入理解不同行业的具体业务场景和需求，这需要通过不断的项目实践来积累专业知识。只有对行业痛点和需求有着深刻洞察，制造商才能够开发出切实满足客户需求的数字孪生解决方案。同时，制造商的服务能力也是构建业务壁垒的关键因素。这包括对客户需求的快速响应、资源的充分投入以及问题解决能力等。优秀的服务能力不仅可以提升客户满意度，还能够建立起良好的口碑，为企业赢得更多的市场机会。

资源壁垒则涉及到与渠道的良好关系和成功案例的展示。数字孪生项目往往需要对客户的整体业务流程进行优化改造，因此客户在选择合作伙伴时非常谨慎。他们倾向于选择那些拥有稳定渠道关系、安全可靠的制造商，以确保项目的顺利实施和交付。同时，制造商的历史标杆案例和过往合作伙伴也是客户评估合作风险的重要参考。一个拥有丰富成功案例和优质客户资源的制造商，往往更容易赢得客户的信任和青睐。

综上所述，技术壁垒、业务壁垒和资源壁垒是数字孪生行业竞争壁垒的三大支柱。它们相互促进、相互补充，共同构筑起企业在市场竞争中的护城河。

九、数字孪生现存挑战

数字孪生技术在其发展进程中遭遇了诸多挑战（如图 9-1 所示），其中包括商业模式的成熟度不足，这一点成为了其推广和实施的一大障碍。具体来说，数字孪生的部署要求企业对其研究开发、生产及供应链等关键流程进行根本性的改革，这不仅需要巨额的投资，还需依靠强大的团队来打造一套完整的技术和服务体系。由于初始投资高昂，用户对此的需求并不强烈。而且，鉴于不同行业客户的需求存在显著差异，通常需要提供定制化的解决方案，这就使得方案的可复制性较差，难以广泛推广。加之，成熟的方案需要经过长时间的迭代和优化，进一步提高了成本，从而使盈利成为了一项挑战。

在标准化方面，数字孪生技术同样面临着不小的困境。目前，该领域内尚未形成关于数据层面的统一标准，如数据采集的尺度、参数、格式及周期等，这些差异为数据的整合和接口对接带来了难题。同时，技术框架和协议的不统一也使得数字孪生项目的集成和对接变得更加复杂。由于缺乏统一的互联互通标准，项目的建设 and 交付要求也各不相同，这直接影响了项目落地的质量，进而限制了数字孪生技术的发展。

技术支持方面的要求也是数字孪生发展中不容忽视的一环。数字孪生构建的模型和数据量巨大，这就要求计算机硬件具备强大的处理和计算能力。除此之外，数字孪生在可视化展示上也有较高要求，需要终端设备支持高互动、高沉浸和高清晰度的展现，这对终

端的传输和显示技术提出了挑战。同时，关键软件的自主可控性不强，对外部软件和渲染引擎的依赖度高也是数字孪生技术需要解决的难题之一。

数据能力的不足也是制约数字孪生技术发展的一个重要因素。数字孪生的运作依赖于大量数据的支持，包括但不限于传感器数据、图像数据和语音数据等。这些数据可能存在质量不高或不完整的问题，这直接影响了数字孪生的准确性和可靠性。而且，所需数据的格式和质量可能存在差异，需要在数据处理阶段进行大量的标准化和清理工作。此外，考虑到数字孪生技术涉及大量敏感信息，如产线布局、设备详情等，确保数据安全和隐私保护也是需要紧密关注和解决的关键问题。

十、数字孪生产业应用

（一）城市管理

数字孪生城市的概念在现代城市管理中发挥着至关重要的作用。通过将物理城市映射为虚拟数字模型，并结合物联网技术、地理信息系统及智能建筑技术，实现了数字与现实世界的互动交流。与传统的智慧城市概念相比，数字孪生城市在顶层设计上实现了虚拟与现实的深度融合，通过数字化和信息化手段，实现物理实体及其数字孪生之间的覆盖和交互，从而达到实时监控、预测、分析和优化城市运营的更高层次功能。数字孪生城市在交通管理、园区运营以及城市应急响应等多个领域展现了其成熟的应用案例（如图 10-1 所示）。

在交通管理方面，数字孪生技术通过创建基于虚拟空间的交通信息数据和高精度地图，建立了一个实时、可模拟、可预测和可控的智慧交通系统，为交通管理的痛点提供解决方案，推动智慧交通系统的进一步升级。在智慧城市交通领域，数字孪生技术可被应用于全息路口、高速公路和交通枢纽等场景，以提高交通流的效率。全球领先企业如 **Siemens** 和 **IBM** 已经在智慧交通管理方面取得显著成果，实际应用如新加坡的智慧交通系统，通过实时监控和分析交通数据，有效缓解了交通拥堵问题。

此外，数字孪生技术在推动零碳智慧园区的建设中也展现出其独特的价值。通过为智慧园区赋能，数字孪生不仅帮助管理者优化园区的运营、安全和业务流程，提升管理效率和员工工作生活质量，还能通过传感技术和 **AI** 算法收集和分析碳排放数据，支持碳排放规划、碳计算和能效监控，助力实现中国的双碳目标。典型的应用案例包括微软的雷德蒙德园区，该园区通过数字孪生技术实现了全方位的能效管理和碳排放控制，成为全球零碳园区的典范。

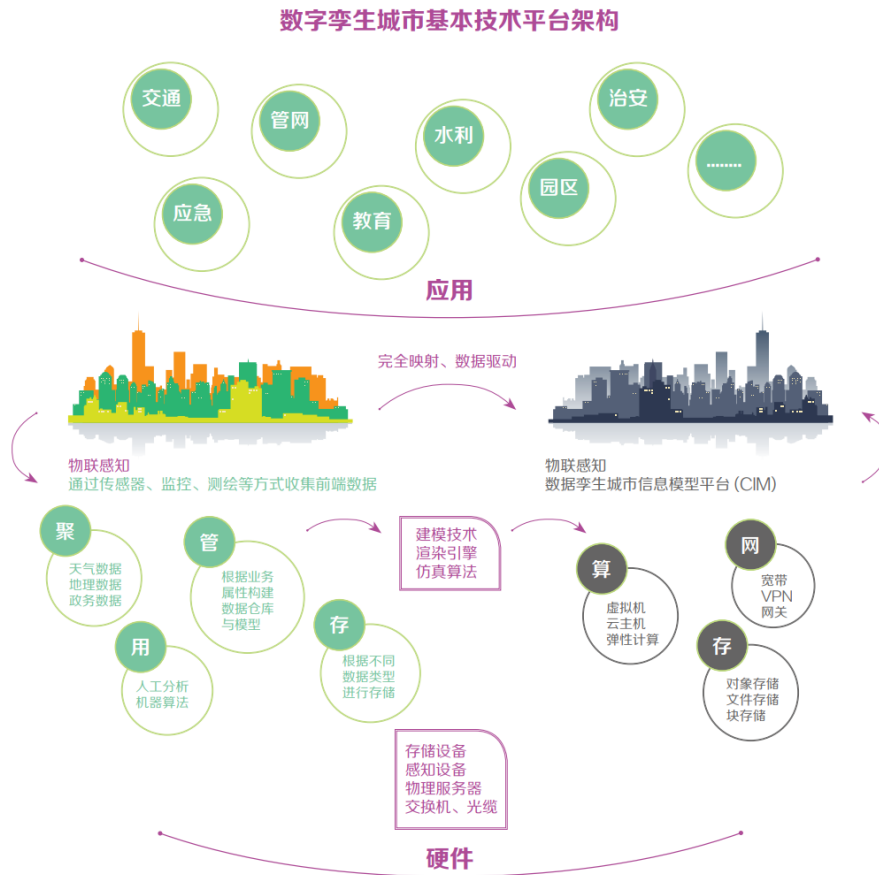


图 10-1 数字孪生城市基本技术平台架构

在城市应急管理领域，数字孪生技术的应用同样不可或缺。它能够通过对实时数据和信息的监控与分析，应用于城市应急演练、灾害预警、决策支持、环境监测和危险品管理等场景，增强城市的安全防线，提高应急响应和救援的效率，减少潜在的损失。例如，通用电气公司（General Electric）在其智慧城市解决方案中，利用数字孪生技术为城市应急管理提供实时数据支持和模拟演练，提高了应急决策的准确性和及时性。随着技术的进步和应用场景的不断扩展，数字孪生技术预计将为城市管理者提供一个更加智能化和高效

的城市应急管理体系，这不仅具有深远的人文意义，也具有重要的经济价值。

当前，数字孪生城市的应用已进入落地实施阶段，并在全球范围内取得显著成效。越来越多的城市和企业开始认识到数字孪生技术的巨大潜力，并积极投入资源进行开发和应用。未来，随着技术的不断进步和创新，数字孪生城市将在更广泛的领域内发挥更大的作用，为城市管理和发展提供更强有力的支持。

（二） 智慧工业

数字孪生技术作为一项革命性的技术，为工业领域带来了前所未有的变革机遇。在离散型和流程型工业的应用中，这项技术展现出了其独特的价值和潜力。对于离散型工业而言，数字孪生技术贯穿于产品生命周期的各个阶段，从研发设计到生产制造，再到设备运维。通过精益化设计、智能化制造与调试、智能维护及精准预测等手段，有效提升了生产效率，降低了成本，并显著提高了生产效能。这不仅解决了研发设计效率低下、生产制造控制难度大、设备运维过度依赖人工等行业挑战，还通过全过程仿真验证、虚拟试验和动态映射、模拟复现故障场景等技术手段，加强了产品的适应性和系统性表现，提高了设备的可靠性和稳定性，并实现了对环境影响的最小化。

流程型工业的复杂性，由于其涉及的物理化学反应复杂性以及高耦合度的工序特点，常面临着高能耗物耗、低资源利用效率、高生产成本和环境污染等问题。在这方面，数字孪生技术通过优化物

料配方、工艺参数调整及环保检测预警等功能，显著提高了生产效率，降低了成本，减轻了环境污染，为流程型工业的可持续发展提供了强有力的技术支持。

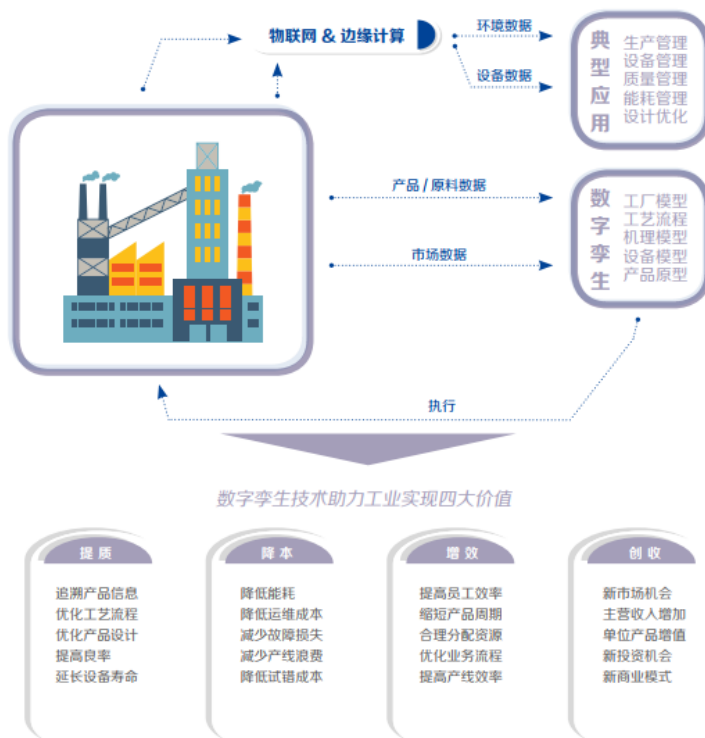


图 10-2 数字孪生赋能工业实现四大价值

全球领先企业如软通动力，凭借其在数字孪生领域的深厚技术积累和丰富经验，推出了 iSSMeta 数字孪生平台，在水泥、电解铝等工业领域的应用实践中取得了显著成效。通过云端三维场景构建、全要素数据融合和场景效果设计等先进工具，iSSMeta 平台为工业企业提供了强大的数字孪生探索能力，成功推动了传统工业企业的数字化和智能化管理升级，有效提升了生产效率和产品质量，加速了企业的数字化转型进程（如图 10-2 所示）。

软通动力的 iSSMeta 平台已经在多个工业应用场景中实现了落地实施。这些实际应用案例表明，数字孪生技术不仅具有理论上的巨大意义，更在现实中展现了其强大的实际应用价值。全球范围内，其他领先企业如通用电气、西门子和 IBM 等也在积极推进数字孪生技术在工业领域的应用。这些公司通过不断创新和优化技术，进一步推动了数字孪生技术在智慧工业中的应用深度和广度，预示着未来更多实际落地的应用将持续涌现。

（三） 自动驾驶测试

在自动驾驶技术的研究与开发过程中，数字孪生技术的应用愈发受到业界重视，为实现自动驾驶技术的快速落地提供了强有力的支持。数字孪生技术通过将实际测试车辆收集的即时数据传输至数字孪生平台，驱动虚拟车辆模型进行动态数据的实时处理与分析。依托于综合的多维度评估体系和庞大的数据库，该技术能够对车辆的各项行为进行深入全面的评估（如图 10-3 所示）。

数字孪生平台不仅能够向真实测试车辆的控制器下发场景数据，还能使汽车依据内置算法自行判断与响应，实现虚拟与现实的高效融合。这样不仅简化了虚拟车辆模型的构建和测试场景的搭建工作，还显著提升了自动驾驶测试的效率。

在自动驾驶测试领域，领先企业如 Waymo、特斯拉(Tesla)、百度(Apollo)和安波福(Aptiv)等已经积极采用数字孪生技术。这些企业利用数字孪生平台，进行大规模的虚拟仿真测试，以提高自动驾驶

系统的性能和安全性。例如，Waymo 通过其模拟城市 "Carcraft" 进行每日数百万英里的虚拟测试，显著加速了算法的迭代和改进。

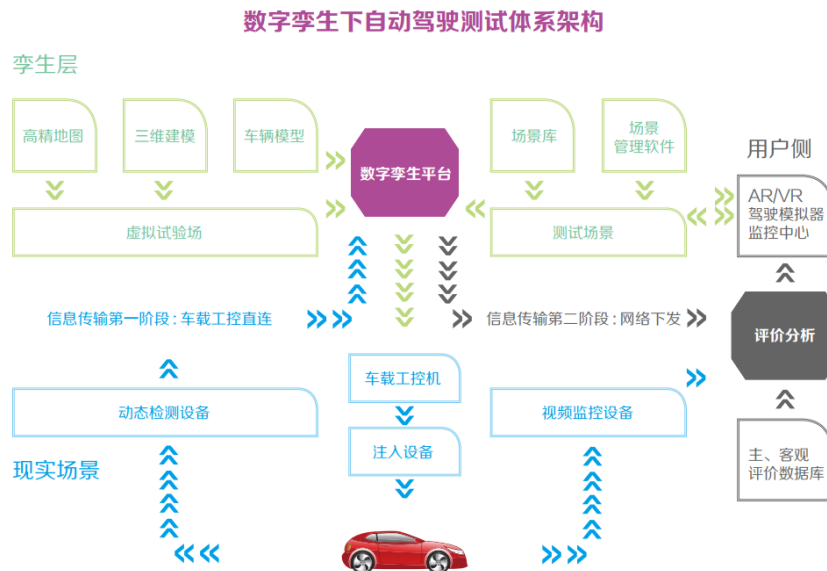


图 10-3 数字孪生下自动驾驶测试体系架构

目前，数字孪生技术在自动驾驶测试中的应用已经进入实际落地阶段，不再仅限于理论研究。Waymo、特斯拉和百度等企业已经在实际测试和部署过程中取得了显著进展。这些企业通过数字孪生平台进行大量虚拟测试，减少了传统里程测试的时间和资金成本，提升了自动驾驶系统的开发效率。然而，尽管数字孪生技术在自动驾驶测试中展现出巨大的潜力，仍存在一定的挑战和未来发展空间。例如，如何进一步提高虚拟测试场景的真实性和复杂性，如何更好地融合不同的数据源以提升评估准确性等，都是未来需要解决的问题。随着技术的不断进步和应用经验的积累，数字孪生技术在自动驾驶领域的应用前景将更加广阔。

数字孪生技术在应对自动驾驶测试中常见的诸多难题方面提供了有效的解决策略。例如，测试场景的碎片化、高额成本及复现困难等问题，通过数字孪生技术得以连续化、低成本化和可复现化。该技术允许根据实际需求定制环境条件，适应真实的连续行驶场景。此外，数字孪生技术能够在孪生平台中进行大规模的仿真测试，复现测试场景，提高测试的效率和准确性，从而大幅度提升测试结果的可靠性。

总的来说，数字孪生技术在自动驾驶测试中的应用，不仅加速了自动驾驶技术的研发进程，还大幅度降低了测试成本和风险。随着技术的不断发展和成熟，数字孪生技术将在自动驾驶领域发挥越来越重要的作用。

（四）智慧医疗

医疗数字孪生技术代表着一种创新的模型构建方法，它依托于复杂的多维度医疗数据，旨在精准复制现实世界中的医疗场景。这项技术深度整合了实时采集的医疗设备数据和医疗信息系统中的多样化信息，并借助先进的人工智能技术进行深度建模分析。通过融合建筑信息模型（**Building Information Modeling, BIM**）及城市信息模型（**City Information Modeling, CIM**）等辅助技术，数字孪生技术实现了对医疗机构物理空间的数字化转化，形成了所谓的医院孪生模型。这种高度仿真的模型不仅能够进行精准的预测和分析，还能在医务管理、门诊流程以及设备维护等领域发挥重要作用（如图 10-4 所示）。此外，依托于数字影像和通信医疗影像学（**Digital**

Imaging and Communications in Medicine, DICOM) 数据重建技术, 数字孪生技术能够创建出高度精确的人体模型, 为手术规划和治疗方案的制定提供重要支持。尽管医疗数字孪生技术的应用为经济和社会发展带来了正面影响, 但其发展过程中仍面临数据安全、隐私保护及伦理道德等多方面挑战。

在智慧医院构建过程中, 数字孪生技术的应用为医院管理提供了强有力的技术支撑。通过利用建筑和环境数据进行高度仿真建模, 管理者可以高效地进行医疗设备维护、资源优化配置、医疗安全风险控制以及能效监测等关键任务。实时的医疗设备监控和维护系统不仅提升了设备使用和维护的效率, 还大幅降低了设备故障和维修成本。通过对业务指标的可视化监控, 管理者能够快速响应医疗资源紧张的情况, 实现资源的即时调度。此外, 医院能效的实时监控和分析帮助揭示能耗变化趋势, 为能效改进提供数据支持。

数字孪生技术在提升医疗服务质量和加速医药研发方面也显示出其不可或缺的价值。在临床医疗实践中, 该技术能够辅助医生进行手术模拟和规划, 显著提高手术成功率和医生操作技能。同时, 基于患者特定情况构建的个性化孪生模型能够为患者提供量身定制的治疗方案, 显著提升治疗效果和医疗效率。在医药研发领域, 数字孪生技术为药物设计、药物代谢及毒理预测、临床试验等环节提供了强大的仿真和预测能力, 极大地提高了研发效率, 降低了成本和风险, 确保了药品的高质量和安全性。

医疗数字孪生技术平台架构

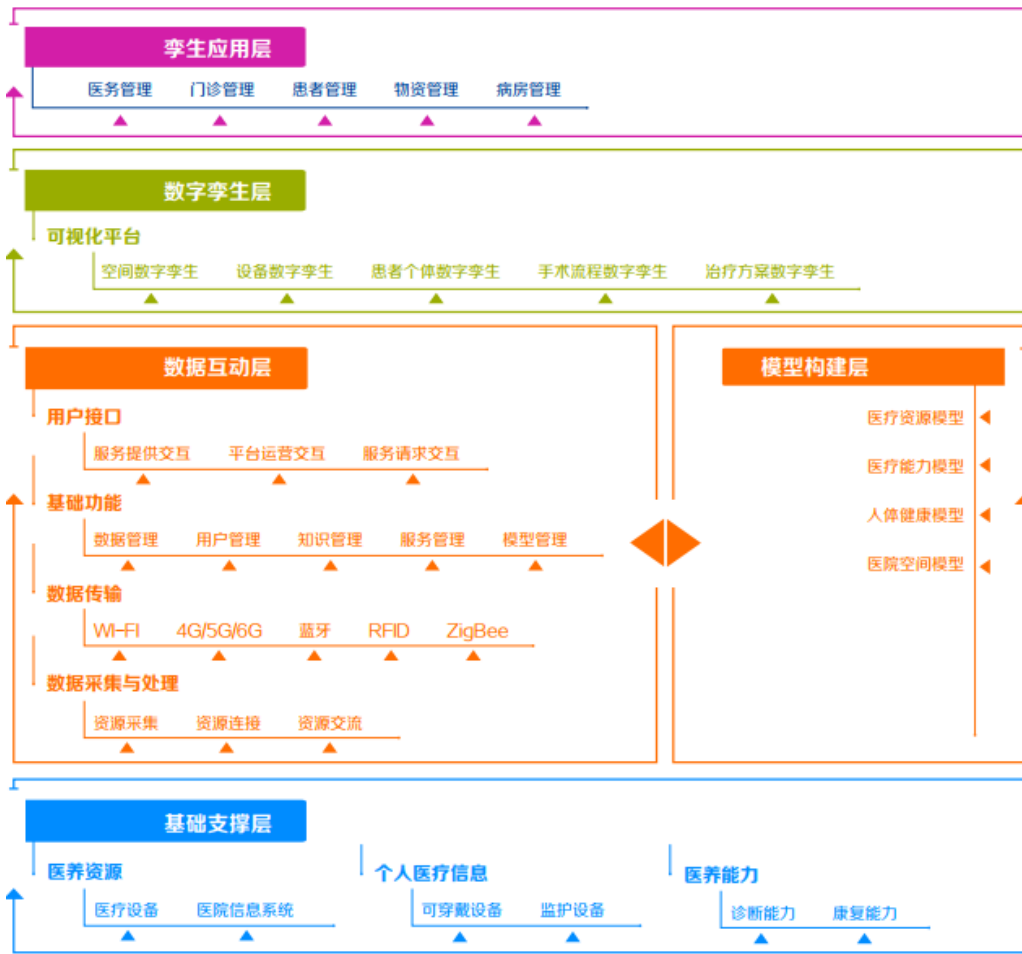


图 10-4 医疗数字孪生技术平台架构

在全球范围内，几家领先的企业已经在智慧医疗领域实现了显著的突破。例如，IBM 通过其 Watson Health 平台，利用数字孪生技术对肿瘤患者进行个性化治疗方案的制定和优化，显著提升了治疗效果。此外，GE Healthcare 的 Edison 平台整合了 AI 和数字孪生技术，为医院提供了高效的设备管理和诊断支持系统，已经在多个国际知名医疗机构中得到了应用。

目前，医疗数字孪生技术正处于快速发展和实际应用的阶段。部分医院和医疗机构已经开始将其应用于日常管理和医疗服务中，取得了良好的效果。例如，梅奥诊所（Mayo Clinic）通过数字孪生技术对其手术室进行优化布局和管理，显著提升了手术效率和资源利用率。虽然技术的全面普及仍需时日，但其在临床和管理中的初步应用已经显示出了巨大的潜力和价值。未来，随着技术的进一步成熟和数据安全、隐私保护等问题的逐步解决，数字孪生技术将在更大范围内得到推广和应用，为智慧医疗的发展带来更多可能性。

十一、数字孪生发展展望

在数字孪生技术的推进过程中，构建一个统一且全面的标准体系显得尤为关键。这一体系的建立，为各行各业的数字化转型提供了坚实的支撑和保障，特别是在工业、能源和医疗等关键领域内。数字孪生技术的飞速发展，使得标准体系的构建不仅要覆盖数据、安全、信任、互操作性以及管理等多个层面，还需依靠跨领域专家的共同参与与合作，形成一种全方位的标准框架。这种标准化工作是一项长期且持续的努力，它要求来自各方面的专家和组织不断地投入和参与。

与此同时，打造一个协作共赢、基于开源创新的数字孪生产业生态，同样是推动技术进步的一项核心策略。考虑到数字孪生本质上是一个跨学科、多环节的复杂系统工程，它的发展依赖于不同行业间的广泛合作与创新。这样的产业生态旨在促进物理世界与数字世界的深度整合，激发更多行业采纳数字孪生技术，加速整体社会

的数字化转型。为实现这一目标，产业生态的构建应当涵盖激励开源创新、加强产业链间的沟通、创新商业模式、共建双赢的基础设施以及人才培养机制等关键元素。只有在这样健康发展的生态环境中，数字孪生技术才能广泛应用，并持续推动其自身的进步与创新。

十二、专业术语解析

人工智能（Artificial Intelligence, AI）

AI 是指由计算机系统执行的任务或解决问题的能力，这些任务通常需要人类智能，如学习、判断和解决问题等。它包括机器学习、自然语言处理和机器视觉等领域。

建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）

建筑信息模型是一种 3D 建模技术，用于在建筑项目的设计、建造和运维过程中管理建筑和基础设施的信息。它使项目参与者能够在整个项目生命周期内共享数据和信息，从而提高工作效率，减少成本和时间延误。

计算机集成制造（Computer Integrated Manufacturing, CIM）

计算机集成制造是指利用计算机技术来控制整个生产过程的自动化和集成，从设计、工程、制造到库存管理。CIM 系统整合了生产的各个方面，以提高效率、减少错误并增强生产灵活性。

数字成像和通信医学（Digital Imaging and Communications in Medicine, DICOM）

数字成像和通信医学是一个国际标准，用于存储、传输、检索和显示医学成像信息。它使医疗影像设备（如 CT、MRI 和 X 光机）及相关信息系统能够交换影像及患者信息，从而提高了医疗影像的兼容性和交换性，支持医疗保健提供者更有效地诊断和治疗疾病。

通用电气（General Electric, GE）

GE 是一个多元化的技术和金融服务公司，涉及航空、电力、可再生能源、医疗影像设备和资本金融等领域。在此上下文中，如果 GE 是指特定的技术或术语，请提供更多信息以便准确解释。

微电子机械系统（Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS）

微电子机械系统是一种将微型机械元件和电子元件集成在一起的技术。这些系统能够感应环境变化并对其做出反应，广泛应用于汽车、智能手机、医疗设备和消费电子产品中。

参数技术公司（Parametric Technology Corporation, PTC）

参数技术公司是一家提供软件和服务以支持产品开发过程的公司，专注于计算机辅助设计、产品生命周期管理、应用生命周期管理、供应链管理和服务管理领域。

扩展现实（Extended Reality, XR）

扩展现实是一个总称，涵盖了虚拟现实、增强现实和混合现实。XR 技术通过在真实和虚拟世界之间创造交互式体验，扩展了我们对现实世界的感知。

参考文献

1. Q. Qi et al., “Enabling technologies and tools for digital twin,” *J Manuf Syst*, vol. 58, pp. 3–21, 2021.
2. A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, “Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research,” *IEEE access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020.
3. A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, “Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective,” *IEEE access*, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020.
4. F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, and P. Ji, “Digital twin modeling,” *J Manuf Syst*, vol. 64, pp. 372–389, 2022.
5. C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti, “Digital twin paradigm: A systematic literature review,” *Comput Ind*, vol. 130, p. 103469, 2021.
6. E. VanDerHorn and S. Mahadevan, “Digital Twin: Generalization, characterization and implementation,” *Decis Support Syst*, vol. 145, p. 113524, 2021.
7. D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review,” *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 29, pp. 36–52, 2020.
8. F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, “Digital twin in industry: State-of-the-art,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2018.
9. M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, “Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications,” *J Manuf Syst*, vol. 58, pp. 346–361, 2021.

10. M. Singh, E. Fuenmayor, E. P. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, and D. Devine, “Digital twin: Origin to future,” *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 2, p. 36, 2021.

行业图谱研究项目

一、项目目标和定位

行业图谱是科创金融研究中心基于科技成果转化研究的一项子课题，聚焦于科技成果这一核心要素，从技术链视角切入展开的研究项目。科技成果的转化需要对科技成果有清晰、准确、深刻的认识和理解，能够解析科技成果所包含的学术价值、社会价值、经济价值和人文价值等，从而探索科技成果的未来应用场景，以跨越从 0 到 1 的商业性转化，通过不断理解优化实现社会产业化，并最终成为科技推动社会发展的历史进程。

然而，由于科技天然具有强大的认知壁垒，其先进性、创新性的特点，使得科技成果面临非专业人士看不懂、不敢判断的知识窘境。在成果转化的操作路径中，执行者可分类为三方：成果供给方、成果接收方及连接双方的中介服务机构。除了成果供给方之外，成果接收方和中介服务机构都面临着知识窘境。成果供给方是科技成果的发明人、创造者，对科技成果的学术价值拥有深度认知，但缺乏商业经验和分析社会需求的能力，很难独立实现成果的成功转化；成果接收方是进行成果商业化、产业化的企业，对社会需求敏感，善于进行商业价值的探索，但由于不具备深厚的科研基础，不能对科技成果进行技术层面的准确分析和判断，影响执行效率；中介服务机构虽然具备政策分析、法律服务等领域的专业能力，但同样面临看不懂技术的知识窘境，导致出现无效推介、不合理的专利布局、未来的专利纠纷等潜在危机。这一需求的断层也间接性地影响经济学称之为成果转化“死亡之谷”时期的存在。因此，如何准确认识科技成果，正确判断科技成果的技术领先度，理解科技成果所处的行业地位和产业链发展格局，对于提高科技成果转化具有极其重要的价值。

本研究以国家十四五规划为导向，重点关注与国家战略需求发展相关的重大创新领域。集中在人工智能、量子信息、集成电路、生命科学、生物育种、空天科技、深

地深海、现代能源等前沿领域。对基础科研方向进行应用场景的细分，将相关可转化/转化中的科技成果进行技术链条的梳理，通过专业性的技术解构和解析，形成高逻辑性、易理解性的技术图谱；并在此基础上，对科技成果产业化应用现状进行行业研究和分析，以全球视野定位领先梯队中的科创企业和学术团队的技术实力。通过行业图谱的研究，不仅可以清晰定位高新技术企业的技术竞争力，而且能够对我国相关行业现状和未来方向有更准确的认识。既为科技成果转化提供了专业性知识体系支撑，也有助于指导城镇产业化发展布局、推动产业链融通创新、引导创业投资基金对“硬科技”的积极性及鼓励金融支持创新体系的建设。

二、研究方法

方法学上，行业图谱研究将进行学科领域分级细化，再对技术在应用场景方向上进行详细分级和解构：

（一）一级分类：从应用产业所属学科的角度，以国家十四五规划为导向，重点关注影响国家安全和全局的基础核心领域，包括人工智能、量子信息、集成电路、生命科学、生物育种、空天科技、深地深海、现代能源等。

（二）二级分类：对技术对象进行分类。比如生命科学中包括疫苗、新生物材料、细胞治疗、人工智能、基因技术等技术对象，择一进行技术应用方向分析和流程解析。数字孪生的关键技术：涵盖物联网、大数据、人工智能、机器学习、高级仿真模型等技术领域，选择人工智能技术进行深入分析。

1、应用方向的技术流程全景

首先，深入探讨人工智能在数字孪生技术中的应用，包括它如何通过算法和数据分析，提高数字孪生系统的准确性和效率。分析 AI 技术在数字孪生的架构设计、数据处理、模拟仿真和预测分析中的关键作用，同时研究 AI 如何帮助优化数字孪生的动态更新和决策支持过程。

2、应用方向的技术产品细分类

细分人工智能在数字孪生领域的具体应用场景，例如在制造业中的生产线优化、在城市管理中的智慧城市建设、以及在健康医疗中的个性化治疗计划等。通过案例分析，展示 AI 技术在这些领域中如何提高操作效率、减少成本和增强系统的智能化水平。

3、领先级国际科创企业及学者团队定位

对全球范围内在数字孪生技术，尤其是人工智能领域内取得显著成就的科技创新企业和学术团队进行分析。评估他们的技术创新、产品性能以及在行业内的影响力，进而将这些实体定位在技术发展和应用的前沿。此外，探讨他们的研究成果如何促进数字孪生技术的进步和普及，以及对未来技术趋势的预测和影响。

三、研究报告形式

行业图谱以结构化脑图为基础形式，辅以文字报告进行解释说明。文字报告的内容框架包括：

概览：概述图谱传递的信息内容、解答的技术问题和目的。

科学背景简述：描述图谱行业背景、技术流程、关键技术平台和竞争点的细节、技术应用的例证及国内外行业发展现状，对图谱做详细内容的补充说明。

专业术语解析：针对重点专业术语进行概念解释。

参考文献。

免责声明

本报告由清华大学五道口金融学院科创金融研究中心（以下简称“研究中心”）编写。本报告仅供研究使用，并非为提供咨询意见而编写。本报告中的信息均来源于本研究中心认为可靠的已公开资料，但研究中心及其关联机构对信息的准确性及完整性不做任何保证。本报告的版权仅为研究中心所有，如需转载，请注明本文为本研究中心的著作。