



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业数字孪生白皮书 (2021)



工业互联网产业联盟 (AII)

2021年11月

A background image showing a blurred industrial scene with a robotic arm in the foreground on the right side, and various mechanical components and cables in the background.

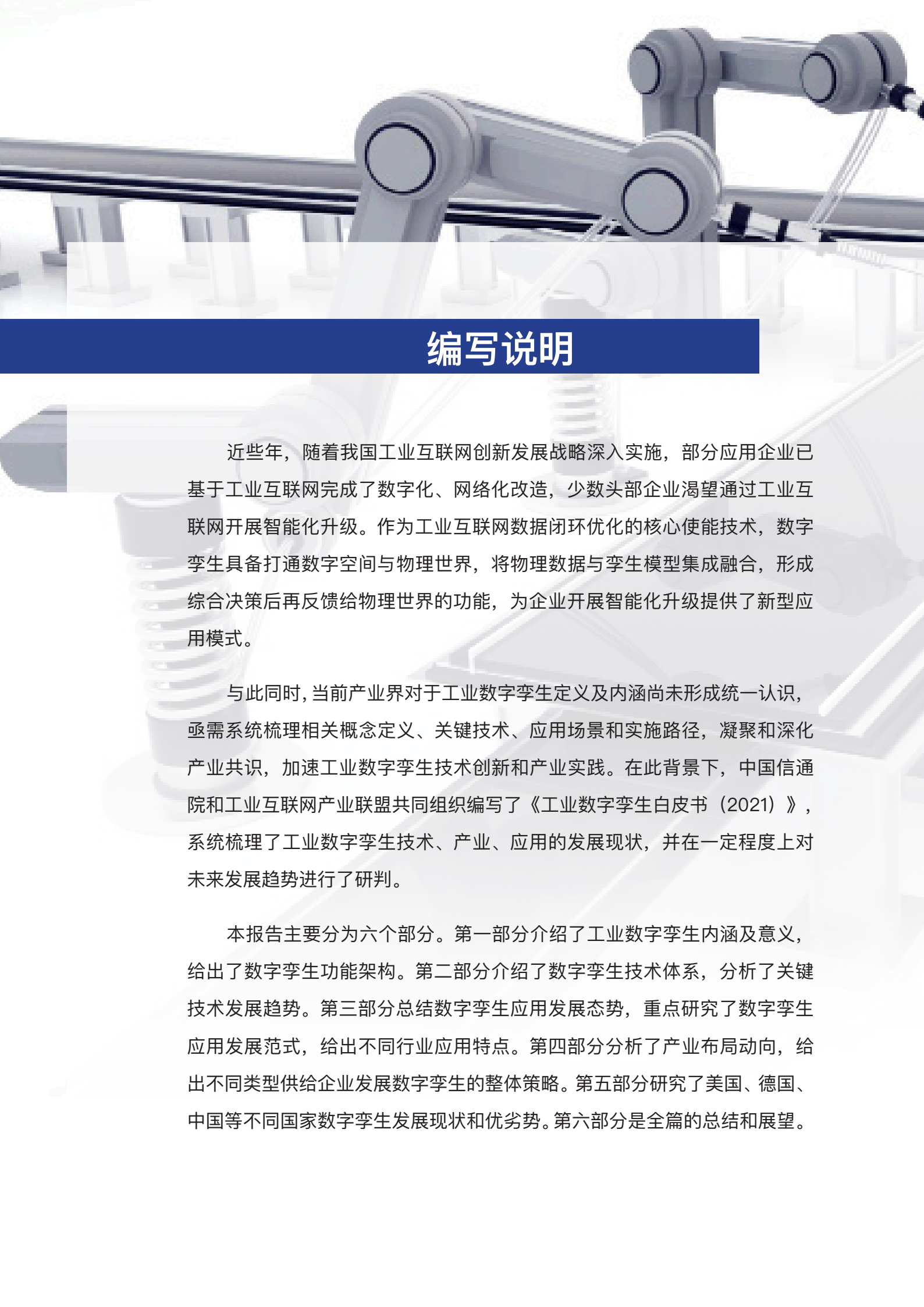
声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

A background image showing a close-up of industrial robotic arms in a factory setting, with blue and grey tones.

编写说明

近些年，随着我国工业互联网创新发展战略深入实施，部分应用企业已基于工业互联网完成了数字化、网络化改造，少数头部企业渴望通过工业互联网开展智能化升级。作为工业互联网数据闭环优化的核心使能技术，数字孪生具备打通数字空间与物理世界，将物理数据与孪生模型集成融合，形成综合决策后再反馈给物理世界的功能，为企业开展智能化升级提供了新型应用模式。

与此同时，当前产业界对于工业数字孪生定义及内涵尚未形成统一认识，亟需系统梳理相关概念定义、关键技术、应用场景和实施路径，凝聚和深化产业共识，加速工业数字孪生技术创新和产业实践。在此背景下，中国信通院和工业互联网产业联盟共同组织编写了《工业数字孪生白皮书（2021）》，系统梳理了工业数字孪生技术、产业、应用的发展现状，并在一定程度上对未来发展趋势进行了研判。

本报告主要分为六个部分。第一部分介绍了工业数字孪生内涵及意义，给出了数字孪生功能架构。第二部分介绍了数字孪生技术体系，分析了关键技术发展趋势。第三部分总结数字孪生应用发展态势，重点研究了数字孪生应用发展范式，给出不同行业应用特点。第四部分分析了产业布局动向，给出不同类型供给企业发展数字孪生的整体策略。第五部分研究了美国、德国、中国等不同国家数字孪生发展现状和优劣势。第六部分是全篇的总结和展望。



感谢工业和信息化部信息技术发展司的大力指导，行业专家提出的宝贵意见，以及各编写单位的共同参与，希望本研究成果能为从事工业数字孪生相关工作的各界同仁提供参考。

组织单位：

工业互联网产业联盟

牵头编写单位：

中国信息通信研究院

参与编写单位：（排名不分先后）

中国航空工业集团、中国科协智能制造学会联合体、中国科学院软件研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、中国石油天然气股份有限公司规划总院、北京航空航天大学、上海大学、北京理工大学、走向智能研究院、上海优也信息科技有限公司、恒力石化股份有限公司、华为技术有限公司、北京互时科技股份有限公司、苏州同元软控信息技术有限公司、上海飞机制造有限公司、深圳华龙迅达信息技术股份有限公司、安世亚太科技股份有限公司、北京世冠金洋科技发展有限公司、北京博华信智科技股份有限公司、北京索为系统科技股份有限公司、北京易智时代数字科技有限公司、北京智汇云舟科技有限公司、朗坤智慧科技股份有限公司、北京绥通科技发展有限公司、中兴通讯股份有限公司、山东捷瑞数字科技股份有限公司、参数技术（上海）软件有限公司、西门子（中国）有限公司、优美缔软件（上海）有限公司（unity）、迈斯沃克软件（北京）有限公司、艾默生过程控制有限公司、亚马逊通技术服务（北京）有限公司

目 录

一、工业数字孪生内涵及意义	1
(一) 发展脉络	1
(二) 定义及功能架构	1
(三) 发展数字孪生意义	2
二、技术体系及关键技术	4
(一) 技术体系架构	4
(二) 数字支撑技术体系	4
(三) 数字线程技术体系	5
(四) 数字孪生体技术体系	6
(五) 人机交互技术	8
三、应用发展态势	9
(一) 应用发展范式	9
(二) 典型应用场景	11
(三) 垂直行业应用特点	13
四、产业布局动向	22
(一) 产业体系分析	22
(二) 企业合作分析	25
(三) 巨头发展布局分析	26
五、主要国家发展态势分析	28
(一) 美国发展态势分析	28
(二) 德国发展态势分析	29
(三) 中国发展态势分析	30
(四) 其他国家分析	30
六、展望	31

一、工业数字孪生内涵及意义

(一) 发展脉络

工业数字孪生发展经历了三个阶段，其发展背后是数字化技术在工业领域的演进与变革。第一阶段，概念发展期。2003 年，美国密歇根大学 Michael Grieves 教授首次提出了数字孪生概念，概念提出的基础是当时产品生命周期管理（PLM）、仿真等工业软件已经较为成熟，为数字孪生体在虚拟空间构建提供支撑基础。第二阶段，应用于航空航天行业。数字孪生最早应用于航空航天行业，2012 年美国空军研究室将数字孪生应用到战斗机维护中，而这与航空航天行业最早建设基于模型的系统工程（MBSE）息息相关，能够支撑多类模型敏捷流转和无缝集成。第三阶段，向多类行业拓展应用。近些年，数字孪生应用已从航空航天领域向工业各领域全面拓展，西门子、GE 等工业巨头纷纷打造数字孪生解决方案，赋能制造业数字化转型。数字孪生蓬勃发展的背后与新一代信息技术的兴起、工业互联网在多个行业的普及应用有莫大关联。

(二) 定义及功能架构

工业数字孪生是多类数字化技术集成融合和创新应用，基于建模工具在数字空间构建起精准物理对象模型，再利用实时 IOT 数据驱动模型运转，进而通过数据与模型集成融合构建起综合决策能力，推动工业全业务流程闭环优化。

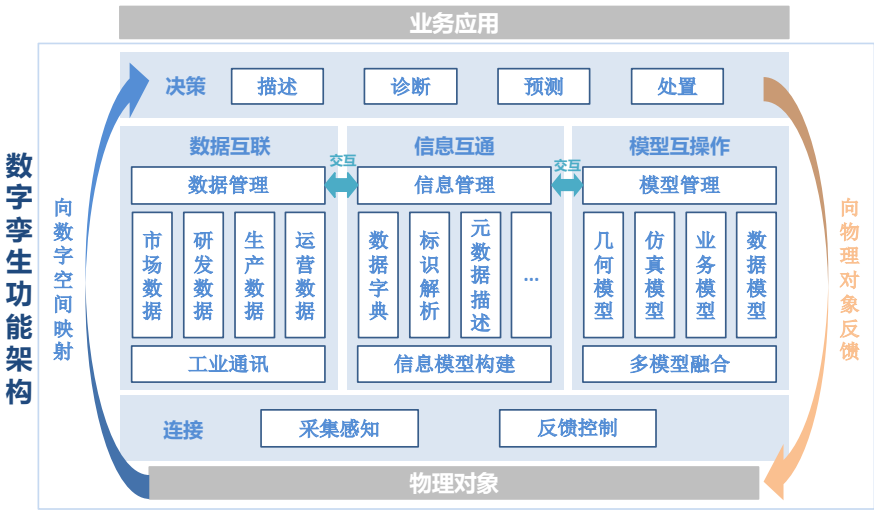


图 1 工业数字孪生功能架构

第一层，连接层。具备采集感知和反馈控制两类功能，是数字孪生闭环优化的起始和终止环节。通过深层次的采集感知获取物理对象全方位数据，利用高质量反馈控制完成物理对象最终执行。

第二层，映射层。具备数据互联、信息互通、模型互操作三类功能，同时数据、信息、模型三者间能够实时融合。其中，数据互联指通过工业通讯实现物理对象市场数据、研发数据、生产数据、运营数据等全生命周期数据集成；信息互通指利用数据字典、元数据描述等功能，构建统一信息模型，实现物理对象信息的统一描述；模型互操作指能够通过多模型融合技术将几何模型、仿真模型、业务模型、数据模型等多类模型进行关联和集成融合。

第三层，决策层。在连接层和映射层的基础上，通过综合决策实现描述、诊断、预测、处置等不同深度应用，并将最终决策指令反馈给物理对象，支撑实现闭环控制。

全生命周期实时映射、综合决策、闭环优化是数字孪生发展三大典型特征。一是全生命周期实时映射，指孪生对象与物理对象能够在全生命周期实时映射，并持续通过实时数据修正完善孪生模型；二是综合决策，指通过数据、信息、模型的综合集成，构建起智能分析的决策能力；三是闭环优化，指数字孪生能够实现对物理对象从采集感知、决策分析到反馈控制的全流程闭环应用。本质是设备可识别指令、工程师知识经验与管理者决策信息在操作流程中的闭环传递，最终实现智慧的累加和传承。

（三）发展数字孪生意义

发展工业数字孪生意义重大。当前，全球积极布局数字孪生应用，2020 年美、德两大制造强国分别成立了数字孪生联盟和工业数字孪生协会，加快构建数字孪生产业协同和创新生态。市场研究公司 Global Industry Analysts 报告 2020 年全球数字孪生市场规模为 46 亿美元，并将于 2026 年达到 287 亿美元。Garner 也连续三年将数字孪生列为未来十大战略趋势。

从国家层面看，随着我国工业互联网创新发展工程的深入实施，我国涌现了大量数字化网络化创新应用，但在智能化探索方面实践较少，如何推动我国工业互联网应用由数字化网络化迈向智能化成为当前亟需解决的重大课题。而数字孪生为我国工业互联网智能化探索提供了基础方法，成为支撑我国制造业高质量发展的关键抓手。

从产业层面看，数字孪生有望带动我国工业软件产业快速发展，加快缩短与国外工业软件差距。由于我国工业历程发展时间短，工业软件核心模型和算法一直与国外存在差距，成为国家关键“卡脖子”短板。数字孪生能够充分发挥我国工业门类齐全、场景众多的优势，释放我国工业数据红利，将人工智能技术与工业软件结合，通过数据科学优化机理模型性能，实现工业软件弯道超车。

从企业层面看，数字孪生在工业研发、生产、运维全链条均发挥重要作用。在研发阶段，数字孪生能够通过虚拟调试加快推动产品研发低成本试错。在生产阶段，数字孪生能够构建实时联动的三维可视化工厂，提升工厂一体化管控水平。在运维阶段，数字孪生可以将仿真技术与大数据技术结合，不但能够知道工厂或设备“什么时候发生故障”，还能够了解“哪里发生了故障”，极大提升了运维的安全可靠性。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

二、技术体系及关键技术

(一) 技术体系架构

工业数字孪生技术不是近期诞生的一项新技术，它是一系列数字化技术的集成融合和创新应用，涵盖了数字支撑技术、数字线程技术、数字孪生体技术、人机交互技术四大类型。其中，数字线程技术和数字孪生体技术是核心技术，数字支撑技术和人机交互是基础技术。

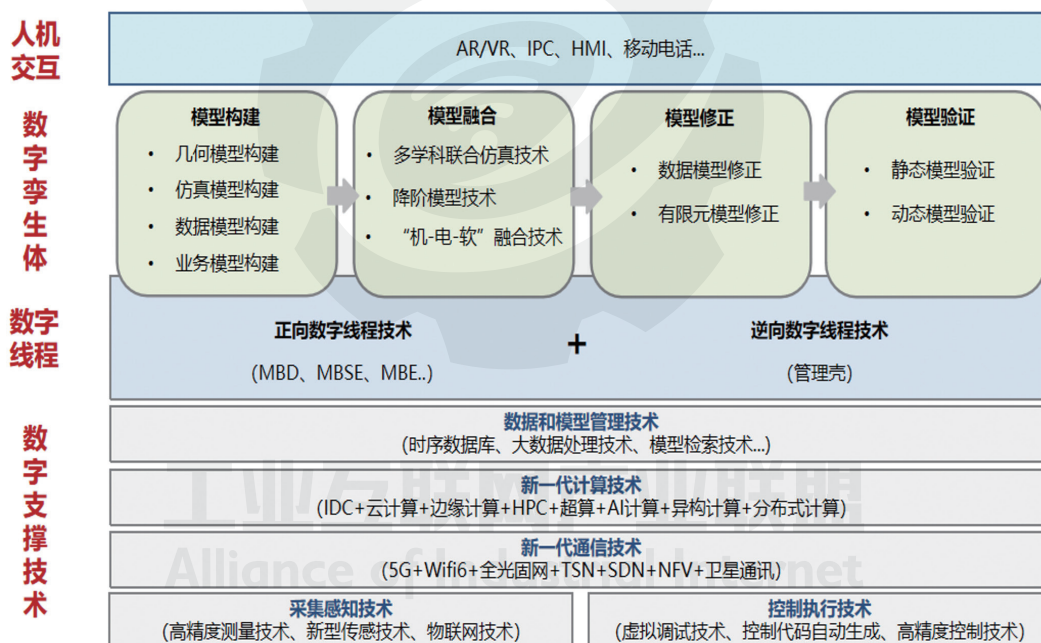


图2 工业数字孪生技术体系架构

(二) 数字支撑技术体系

数字支撑技术具备数据获取、传输、计算、管理一体化能力，支撑数字孪生高质量开发利用全量数据，涵盖了采集感知、执行控制、新一代通讯、新一代计算、数据模型管理五大类型技术。未来，集五类技术于一身的通用技术平台有望为数字孪生提供“基础底座”服务。

其中，采集感知技术的不断创新是数字孪生蓬勃发展的源动力，支撑数字孪生更深入获取物理对象数据。一方面，传感器向微型化发展，能够被集成到智能产品

之中，实现更深层次的数据感知。如 GE 研发嵌入式腐蚀传感器，并嵌入到压缩机内部，能够实时显示腐蚀速率。另一方面，多传感融合技术不断发展，将多类传感能力集成至单个传感模块，支撑实现更丰富的数据获取。如第一款 L3 自动驾驶汽车奥迪 A8 的自动驾驶传感器搭载了 7 种类型的传感器，包含毫米波雷达、激光雷达、超声波雷达等，保证汽车决策的快速性和准确性。

（三）数字线程技术体系

数字线程技术是数字孪生技术体系中最为核心的核心技术，能够屏蔽不同类型数据、模型格式，支撑全类数据和模型快速流转和无缝集成，主要包括正向数字线程技术和逆向数字线程技术两大类型。

其中，正向数字线程技术以基于模型的系统工程（MBSE）为代表，在用户需求阶段就基于统一建模语言（UML）定义好各类数据和模型规范，为后期全量数据和模型在全生命周期集成融合提供基础支撑。当前，基于模型的系统工程技术正加快与工业互联网平台集成融合，未来有望构建“工业互联网平台+MBSE”的技术体系。如达索已经将 MBSE 工具迁移至 3DEXPERIENCE 平台，一方面基于 MBSE 工具统一异构模型语法语义，另一方面又可以与平台采集的 IOT 数据相结合，充分释放数据与模型集成融合的应用价值。

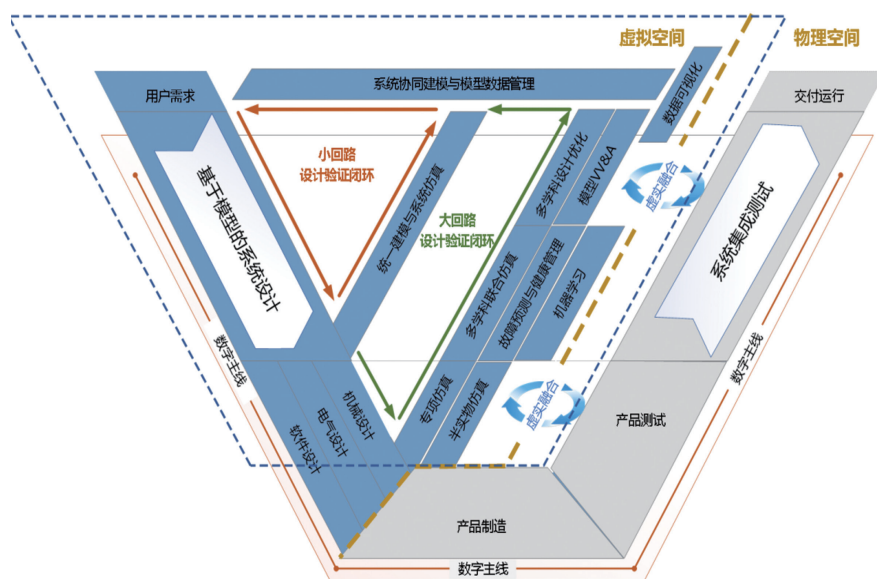
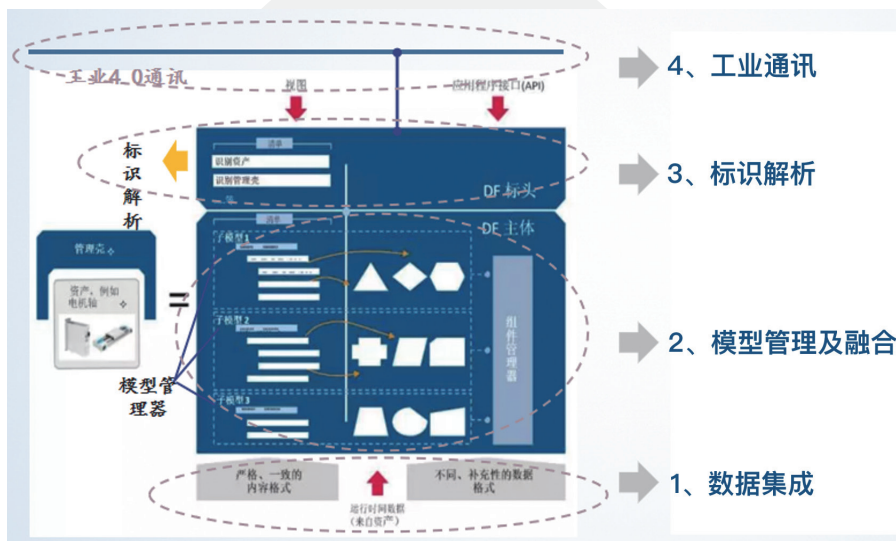


图 3 MBSE 技术分析视图（来源：苏州同元软控）

逆向数字线程技术以管理壳技术为代表，依托多类工程集成标准，对已经构建完成的数据或模型，基于统一的语义规范进行识别、定义、验证，并开发统一的接口支撑进行数据和信息交互，从而促进多源异构模型之间的互操作。管理壳技术通过高度标准化、模块化方式定义了全量数据、模型集成融合的理论方法论，未来有望实现全域信息的互通和互操作。中科院沈自所构建跨汽车、冶金铸造、3C、光伏设备、装备制造、化工和机器人七大行业的管理壳平台工具，规范定义元模型等标准，可支撑进行模型统一管理、业务逻辑建模及业务模型功能测试。



(四) 数字孪生体技术体系

数字孪生体是数字孪生物理对象在虚拟空间的映射表现，重点围绕模型构建、模型融合、模型修正、模型验证开展一系列创新应用。

1. 模型构建技术

模型构建技术是数字孪生体技术体系的基础，各类建模技术的不断创新，加快提升对孪生对象外观、行为、机理规律等刻画效率。

在几何建模方面，基于AI的创成式设计技术提升产品几何设计效率。如上海及瑞利用创成式设计帮助北汽福田设计前防护、转向支架等零部件，利用AI算法优化产生了超过上百种设计选项，综合比对用户需求，从而使零件数量从四个减少到一个，

重量减轻 70%，最大应力减少 18.8%。

在仿真建模方面，仿真工具通过融入无网格划分技术降低仿真建模时间。如 Altair 基于无网格计算优化求解速度，消除了传统仿真中几何结构简化和网格划分耗时长的的问题，能够在几分钟内分析全功能 CAD 程序集而无需网格划分。

在数据建模方面，传统统计分析叠加人工智能技术，强化数字孪生预测建模能力。如 GE 通过迁移学习提升新资产设计效率，有效提升航空发动机模型开发速度和更精确的模型再开发，以保证虚实精准映射。

在业务建模方面，业务流程管理（BPM）、流程自动化（RPA）等技术加快推动业务模型敏捷创新。如 SAP 发布业务技术平台，在原有 Leonardo 平台的基础上创新加入 RPA 技术，形成“人员业务流程创新—业务流程规则沉淀—RPA 自动化执行—持续迭代修正”的业务建模解决方案。

2. 模型融合技术

在模型构建完成后，需要通过多类模型“拼接”打造更加完整的数字孪生体，而模型融合技术在这过程中发挥了重要作用，重点涵盖了跨学科模型融合技术、跨领域模型融合技术、跨尺度模型融合技术。

在跨学科模型融合技术方面，多物理场、多学科联合仿真加快构建更完整的数字孪生体。如苏州同元软控通过多学科联合仿真技术为嫦娥五号能源供配电系统量身定制了“数字伴飞”模型，精确度高达 90%–95%，为嫦娥五号飞行程序优化、能量平衡分析、在轨状态预示与故障分析提供了坚实的技术支撑。

在跨类型模型融合技术方面，实时仿真技术加快仿真模型与数据科学集成融合，推动数字孪生由“静态分析”向“动态分析”演进。如 ANSYS 与 PTC 合作构建实时仿真分析的泵孪生体，利用深度学习算法进行流体动力学（CFD）仿真，获得整个工作范围内的流场分布降阶模型，在极大缩短仿真模拟时间基础上，能够实时模拟分析泵内流体力学运行情况，进一步提升了泵安全稳定运行水平。安世亚太利用实时仿真技术优化空调节能效果，将 IOT 采集数据作为仿真计算的边界条件和控制变量，大大降低了空调用电消耗。

在跨尺度模型融合技术方面，通过融合微观和宏观的多方面机理模型，打造更复杂的系统级数字孪生体。如西门子持续优化汽车行业 Pave360 解决方案，构建系统级汽车数字孪生体，整合从传感器电子、车辆动力学和交通流量管理不同尺度模型，构建汽车生产、自动驾驶到交通管控的综合解决方案。

3. 模型修正技术

模型修正技术基于实际运行数据持续修正模型参数，是保证数字孪生不断迭代精度的重要技术，涵盖了数据模型实时修正、机理模型实时修正技术。

从 IT 视角看，在线机器学习基于实时数据持续完善数据模型精度。如流行的 Tensorflow、Skit-learn 等 AI 工具中都嵌入了在线机器学习模块，基于实时数据动态更新机器学习模型。

从 OT 视角看，有限元仿真模型修正技术能够基于试验或者实测数据对原始有限元模型进行修正。如达索、ANSYS、MathWorks 领先厂商的有限元仿真工具中，均具备了有限元模型修正的接口或者模块，支持用户基于试验数据对模型进行修正。

4. 模型验证技术

模型验证技术是孪生模型由构建、融合到修正后的最终步骤，唯有通过验证的模型才能够安全的下发到生产现场进行应用。当前模型验证技术主要包括静态模型验证技术和动态模型验证技术两大类，通过评估已有模型的准确性，提升数字孪生应用的可靠性。

（五）人机交互技术

虚拟现实技术（AR/VR）发展带来全新人机交互模式，提升可视化效果。传统平面人机交互技术不断发展，但仅停留在平面可视化。新兴 AR/VR 技术具备三维可视化效果，正加快与几何设计、仿真模拟融合，有望持续提升数字孪生应用效果。如西门子推出 Solid Edge 2020 产品新增增强现实功能，能够基于 OBJ 格式快速导入到 AR 系统，提升 3D 设计外观感受。将 COMOS Walkinside 3D 虚拟现实与 SIMIT 系统验证和培训的仿真软件紧密集成，缩短工厂工程调试时间。PTC Vuforia Object Scanner 可扫描 3D 模型并转换为 AR 引擎兼容的格式，实现数字孪生沉浸式应用。

三、应用发展态势

（一）应用发展范式

孪生精度、孪生时间和孪生空间是评价数字孪生发展水平的三大要素。孪生精度指数字孪生反映真实物理对象外观行为、内在规律的准确程度,可以划分为描述级、诊断级、决策级、自执行级等。孪生时间指孪生对象和物理对象同步映射的时间长度,如可划分为设计孪生、设计制造一体化孪生、全生命周期孪生等。孪生空间指单元级孪生对象在通过组合形成系统级孪生对象过程中,所占用实际物理空间的大小,也从侧面反应了孪生对象的复杂程度,如可划分为资产孪生、产线孪生、车间孪生、工厂孪生、城市孪生等。

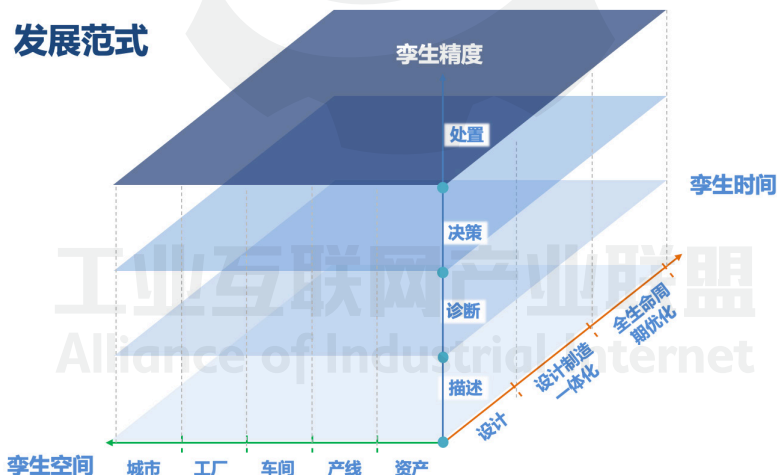


图 5 理想数字孪生发展范式图

从孪生精度发展范式看,数字孪生由对孪生对象某个剖面描述向更精准数字化映射发展。如果对一个物理对象进行解构,其包含了对象名称、外观形状、实时工况、工程机理、复杂机理等不同组成部分,而每一部分均可通过数字化工具在虚拟空间进行重构。如对象名称可以通过信息模型表述,外观形状可以通过 CAD 建模表述,实时工况可以由 IOT 数据采集进行表述,工程机理可以通过仿真建模进行模拟,人类尚未认识的复杂机理可通过人工智能进行“暴力破解”。而传统数字化应用更多仅仅在描述物理对象某个剖面特点,数字孪生基于多类数据与模型的集成融合实现对

物理对象更精准、更全面的刻画。

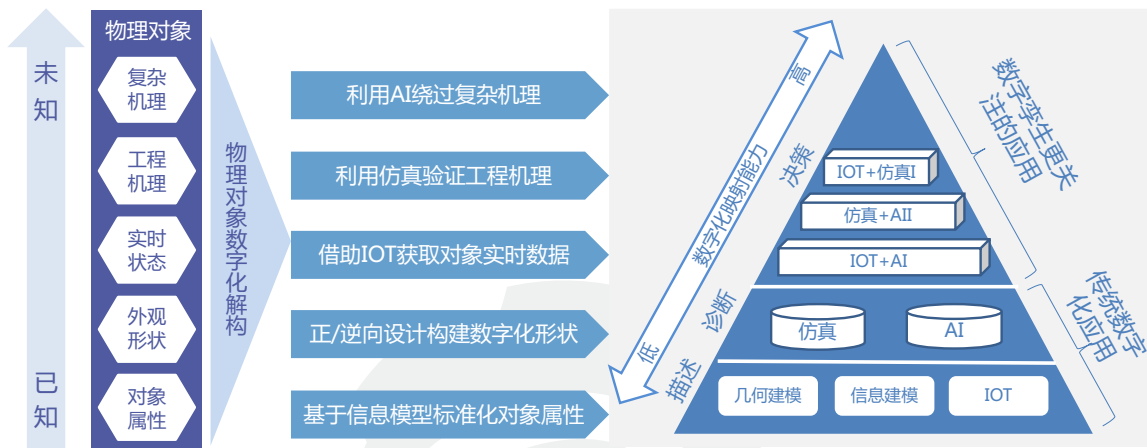


图6 孪生精度发展范式分析

从孪生时间发展范式看，数字孪生由当前从孪生对象多个生命时期切入开展“碎片化”应用，向自孪生对象诞生起直至报废的“全生命周期”应用发展。由于不同企业数字化发展水平不均衡，仅有少数企业自产品研发阶段便开始积累孪生数据和孪生模型，更多的企业仅仅在批量生产阶段和运维阶段才开始碎片化的打造数字孪生解决方案，这使数字孪生并未有效结合研发阶段的孪生模型开展分析，难以发挥出数字孪生的潜在价值。从长远来看，随着企业日益重视数据资产价值，未来会有越来越多的企业自产品研发阶段便开始打造数字孪生解决方案，直至应用到产品报废的全生命周期过程。

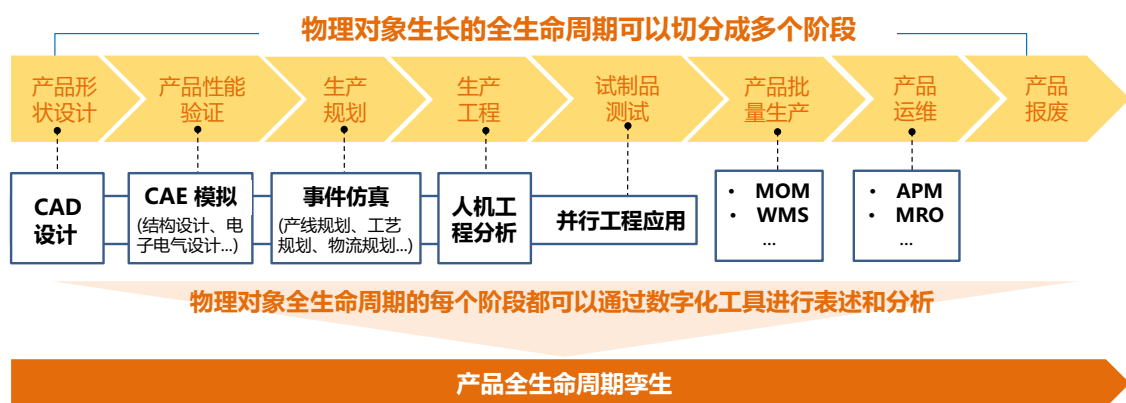


图7 孪生时间发展范式分析

从孪生空间发展范式看，数字孪生由少量孪生对象简单关联向大量孪生对象智能协同的方向发展，打造复杂系统级孪生解决方案。任何一个复杂的孪生对象都是由简单孪生对象组合而成，比如设备是由机械零部件组成的，车间是由不同设备组

成的，不同类型的车间又组成了工厂。在由单元级数字孪生向复杂系统级数字孪生演进的过程中，不同类型、不同尺度的独立孪生对象持续加快信息关联和行为交互，共同构建起一个复杂的孪生系统。

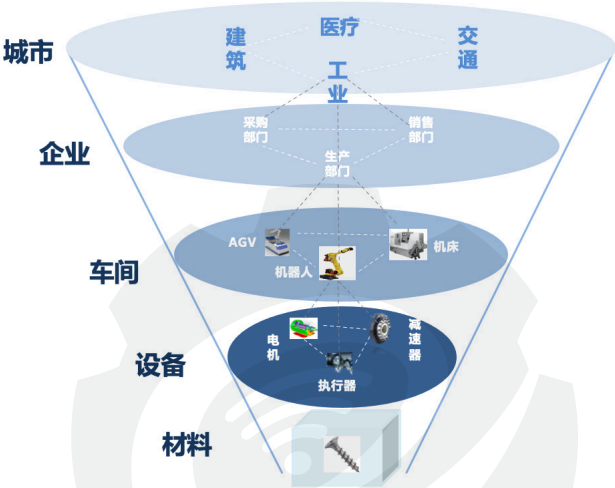


图 8 孪生空间发展范式分析

（二）典型应用场景

在提升孪生精度、延长孪生时间、拓展孪生空间三大类数字孪生应用模式中，提升孪生精度的应用比例达到 87%，远超过延长孪生时间和拓展孪生空间的应用比例。这也隐含说明，当前数字孪生应用仅处于初级阶段，更多是“点状场景”能力提升的简单应用，而在全生命周期应用、复杂系统应用等方面稍显不足。

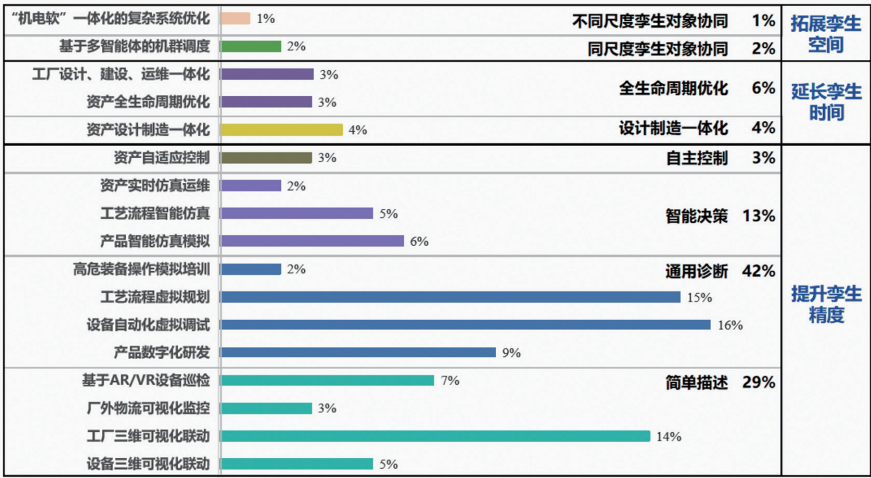


图 9 数字孪生典型应用场景分析图

（数据来源：工业互联网产业联盟案例征集及互联网案例整理，共 300 个）

在提升孪生精度应用中，依次涵盖了“简单描述级”、“通用诊断级”、“智能决策级”、“自主控制级”四大层级。当前，数字孪生应用更多停留在“简单描述”和“通用诊断”阶段，二者应用比例之和达到了 71%，智能决策类应用相对较少，自主控制类应用比例最少。其中，简单描述类数字孪生应用涵盖了设备虚实联动、三维可视化工厂监控、物流可视化监控、基于 AR/VR 设备巡检等；通用诊断类应用除了包含基于 CAE 的产品研发外，还涵盖了大量虚拟制造应用，如设备自动化虚拟调试、工艺流程虚拟规划、仿真虚拟操作培训等；智能决策类应用指将仿真建模与数据科学融合后产生的综合决策应用，如基于 IOT 数据驱动的实时仿真，基于人工智能技术优化的智能仿真等；最后，自主控制类应用指将智能决策结果形成控制指令，自主控制物理对象行为，形成闭环优化的应用。

在延长孪生时间应用中，少数企业围绕设计制造一体化、全生命周期优化等数字孪生应用开展积极探索，二者应用比例加和达到 10%。如在产品设计制造一体化方面，达索将产品三维设计与增材制造结合，用户自行设计产品后可以直接下发到增材制造设备，打印出 3D 产品。在全生命周期优化方面，机械工业第九设计研究院有限公司帮助红旗 HE 焊装车间打造数字孪生工厂，先通过事件仿真工具进行产线规划，再将前期规划阶段的建模成果再利用，与物理产线实时数据连接，构建工厂级数字孪生监测体系，实现工厂全生命周期管理。

在拓展孪生空间应用中，主要涵盖同尺度孪生对象协同和不同尺度孪生对象协同两类应用。同尺度孪生对象协同应用的典型代表是基于多智能体的机群调度应用，如民用机场的飞机航班调度、无人战斗机群的作战调度等。不同尺度孪生对象协同应用的典型代表是“机 - 电 - 软”一体化的复杂系统优化，如西门子基于数字孪生技术开发自动驾驶汽车产品 PAVE，集成了从芯片设计到软硬件系统、整车模型以及交通流量等不同领域和尺度下的模型，形成跨尺度数字孪生构建能力。

(三) 垂直行业应用特点

1. 流程行业分析

流程行业具备数字化基础好、生产过程连续、安全生产要求高等特点。目前，数字孪生应用重点聚焦于提升设备管理、工厂管控和安全管理水平。

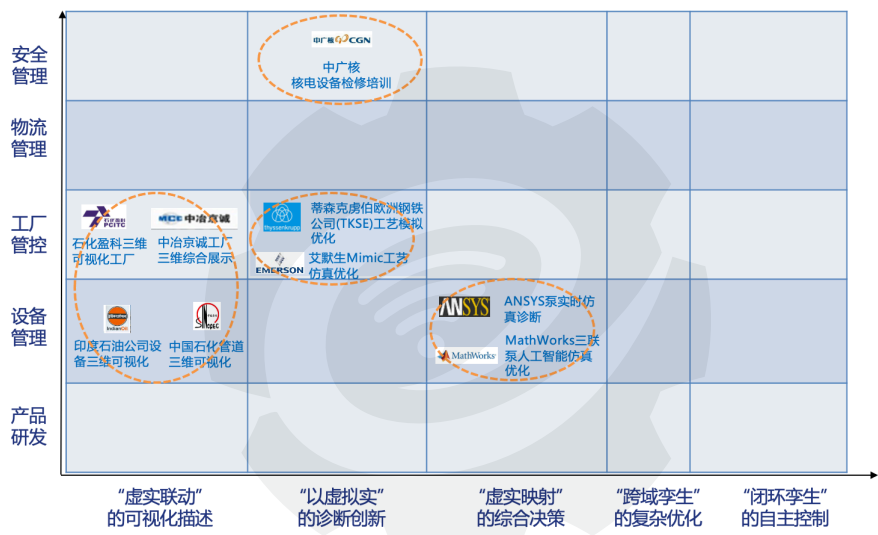


图 10 流程行业数字孪生重点应用图

一是基于数字孪生的全工厂三维可视化监控。当前以石化、钢铁、核电为代表的流程行业企业已经具备了较好的数字化基础，很多企业全面实现了对全厂设备和仪器仪表数据采集。在此基础上，多数企业涌现出对现有工厂进行三维数字化改造的需求。通过构建工厂三维几何模型，为各个设备、零部件几何模型添加信息属性，并与对应位置 IOT 数据相结合，实现全工厂行为实时监控。

案例 1 基于数字孪生的全工厂三维可视化监控

恒力石化通过三维组态可视化的技术，实现生产全局的信息集成，提升可视化监控水平



二是基于数字孪生的工艺仿真及参数调优。工艺优化是流程行业提升生产效率的最佳举措，但由于流程行业化学反应机理复杂，在生产现场进行工艺调参面临安全风险，所以工艺优化一直是流程行业的重点和难点。基于数字孪生的工艺仿真为处理上述问题提供了解决方案，通过在虚拟空间进行工艺调参验证工艺变更的合理性，以及产生的经济效益。

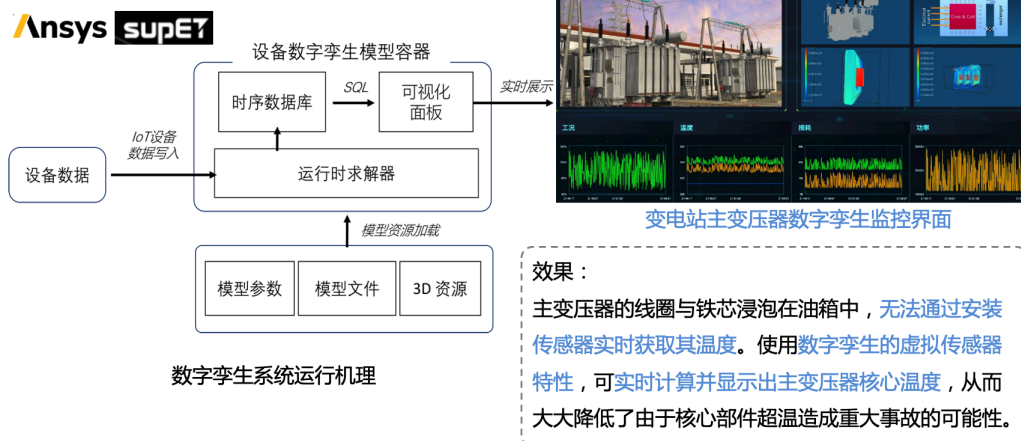
案例 2 基于数字孪生的工艺仿真及参数调优



三是基于实时仿真的设备深度运维管理。传统设备预测性维护往往只能预测“设备什么时间坏”，不能预测“设备哪个关键部位出现了问题”。而基于数字孪生实时仿真的设备监测将离线仿真与 IOT 实时数据结合，实现基于实时数据驱动的仿真分析，能够实时分析设备哪个位置出现了问题，并给出最佳响应决策。

案例 3 基于实时仿真的设备深度运维管理

ANSYS与supET联合开发主变压器数字孪生系统，实时监控传感器无法直接测量的核心部件温度

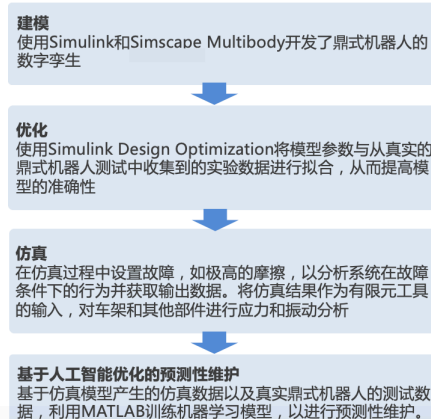


四是基于智能仿真的设备运行优化。基于数字孪生的智能仿真诊断分析，将传统仿真技术与人工智能技术结合，极大提升了传统仿真模拟准确性。

案例 4 基于智能仿真的设备模拟优化

KRONES
MATLAB&SIMULINK

KRONES利用数字孪生优化设计鼎式机器人并实现预测性维护

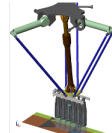


CAD文件

关节机制信息

时间相关的模型参数

动力学信号



鼎式机器人

基于Simulink和Simscape-Multibody 构建数字孪生

效果：

1. **机器人性能提升**：Robobox T-GS 鼎式机器人每小时可对多达 500 个垛层进行分组，并且只需要一个模块
2. **产品开发时间缩短**：在仿真系统中添加和调整组件，分析部件对整个装配的影响无需进行大量实体试验。
3. **测试时间显著减少**：可以在更短的时间内进行参数研究和运行更多的仿真

五是基于数字孪生虚拟仿真的安全操作培训。由于流程行业生产连续、设备不能停机、安全生产要求等特点，导致无法为新入职的设备管理、工厂检修等技术工程师提供实操训练环境。基于数字孪生的仿真培训为现场工程师提供了模拟操作环境，能够快速帮助工程师提升技术技能，为其真正开展实际运维工作提供基础训练。

案例 5 基于数字孪生虚拟仿真的安全操作培训

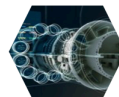
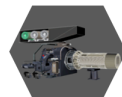
1001
易智时代

易智时代建立卷烟厂空压机设备的数字孪生，并与AR技术结合，搭建烟草行业培训仿真交互系统



实时数据

交互操作



效果：**结合数字孪生、XR和工业生产大数据能力**，实现工厂的虚拟构建，建立**平行系统**，使用XR技术融合行业应用，**建立虚实混生的新型人机交互培训模式**。降低企业培训成本、提升企业培训安全性。

2. 多品种小批量离散行业分析

多品种小批量离散行业具备生产品种多、生产批量小，产品附加价值高、研制周期长，设计仿真工具应用普及率高等特点。当前，以飞机、船舶等为代表的行业数字孪生应用重点聚焦于产品设计研发、产品远程运维、产品自主控制等方面。可以说，在基于数字孪生的产品全生命周期管理方面，多品种小批量离散行业应用成熟度高于其他行业。

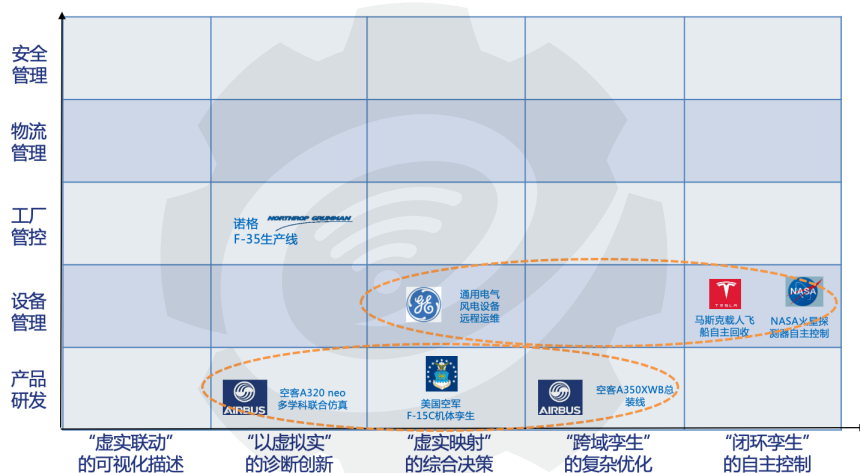
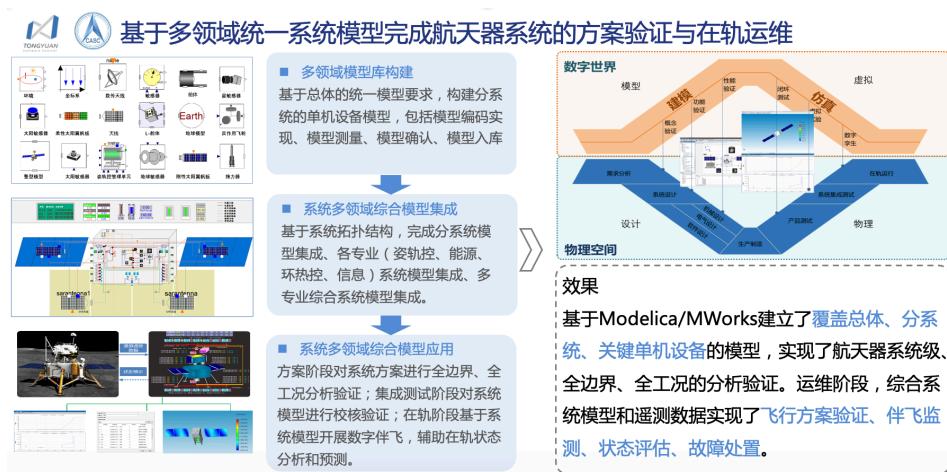


图 11 多品种小批量离散行业数字孪生重点应用图

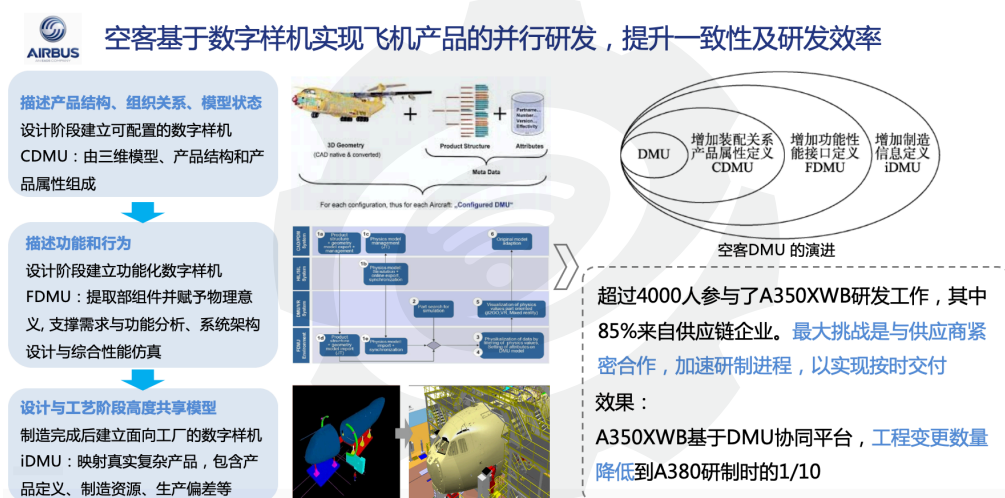
一是基于数字孪生的产品多学科联合仿真研发。多品种小批量离散行业产品研发涉及力学、电学、动力学、热学等多类交叉学科领域，产品研发技术含量高、研发周期长，单一领域的仿真工具已经不能满足复杂产品的研发要求。基于多学科联合仿真研发有效将异构研发工具接口、研发模型标准打通，支撑构建多物理场、多学科耦合的复杂系统级数字孪生解决方案。

案例 6 基于数字孪生的产品多学科联合仿真研发



二是基于数字孪生的产品并行设计。为了更好的提升产品整机设计效率，需要通过组织多个零部件研发供应商协同开展设计。同时，为了保证设计与制造的一致性，需要在设计阶段就将制造阶段的参数设定考虑其中，进而为产品设计制造一体化提供良好支撑。总之，产品并行设计的关键在于在研发初级就定义好每一个最细颗粒度零部件的几何、属性和组织关系标准，为全面构建复杂系统研发奠定基础。

案例 7 基于数字孪生的产品并行设计



三是基于数字样机的产品远程运维。对于飞机、船舶等高价值装备产品，基于数字孪生的产品远程运维是必要的安全保障。而脱离了与产品研发阶段机理算法相结合的产品远程运维，很难有效保证高质量的运维效果。而基于数字样机的产品运维将产品研发阶段的各类机理模型与 IOT 实时数据，并与人工智能分析相结合，实现更加高可靠的运维管理。

案例 8 基于数字样机的产品远程运维



此外，以航天为代表的少数高科技领军行业，除了利用数字孪生开展综合决策之外，还希望基于数字孪生实现自主控制。特斯拉 SpaceX 飞船、我国嫦娥五号、NASA 航天探测器等均基于数字孪生开展产品自主控制应用，实现由“数据采集 – 分析决策 – 自主执行”的闭环优化。

3. 少品种大批量离散行业分析

少品种大批量离散行业以汽车、电子等行业为代表，产品种类少、规模大、生产标准化，对生产效率和质量要求高，多数企业基本实现自动化。当前，少品种大批量离散行业数字孪生应用场景较多，涵盖了产品研发、设备管理、工厂管控、物流优化等诸多方面。

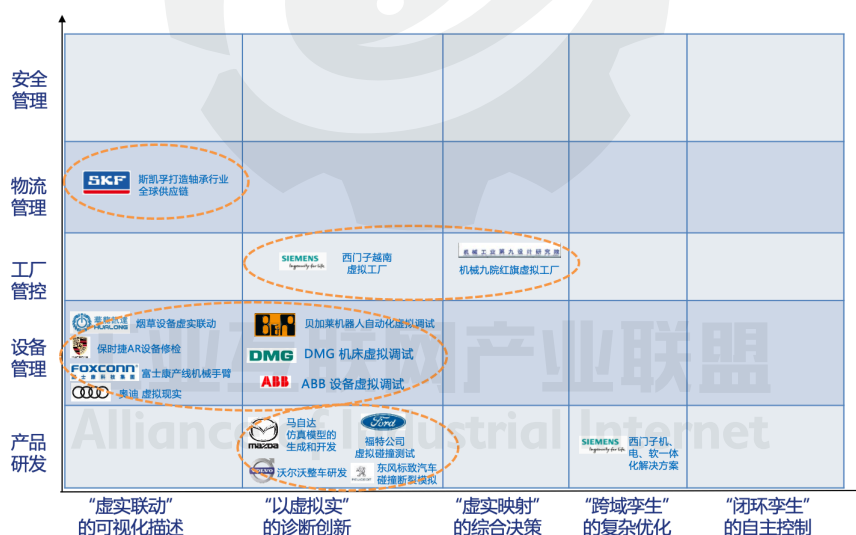


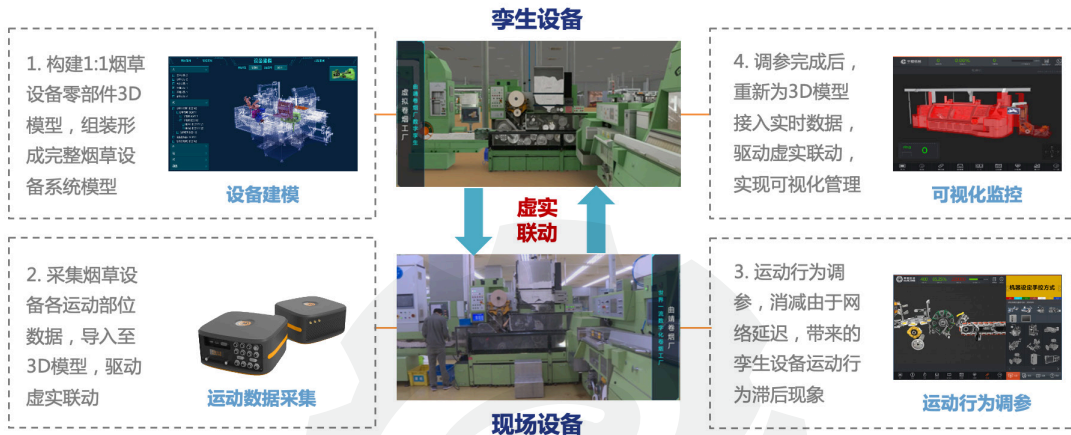
图 12 少品种大批量离散行业数字孪生重点应用图

一是基于虚实联动的设备监控管理。传统的设备监控仅是显示设备某几个关键工况参数的数据变化，而基于数字孪生的设备监控需要建立与实际设备完全一致的三维几何模型，在此基础上通过数据采集或添加传感器全方位获取设备数据，并将各个位置数据与虚拟三维模型一一映射，实现物理对象与孪生设备完全一致的运动行为，更加直观的监控物流对象实时状态。

案例 9 基于虚实联动的设备监控管理



华龙讯达打造虚实联动的设备数字孪生，实现更直观的远程监控管理



二是基于设备虚拟调试的控制优化。汽车、电子等多品种小批量离散行业在修改工艺时均需要进行设备自动化调试，传统设备自动化调试多数为现场物理调试，这提升了设备停机时间，降低了生产效率。而基于数字孪生的设备控制调试能够在虚拟空间开展虚拟验证，有效降低了传统物理调试时间，减少了物理调试费用开销。

案例 10 基于设备虚拟调试的控制优化

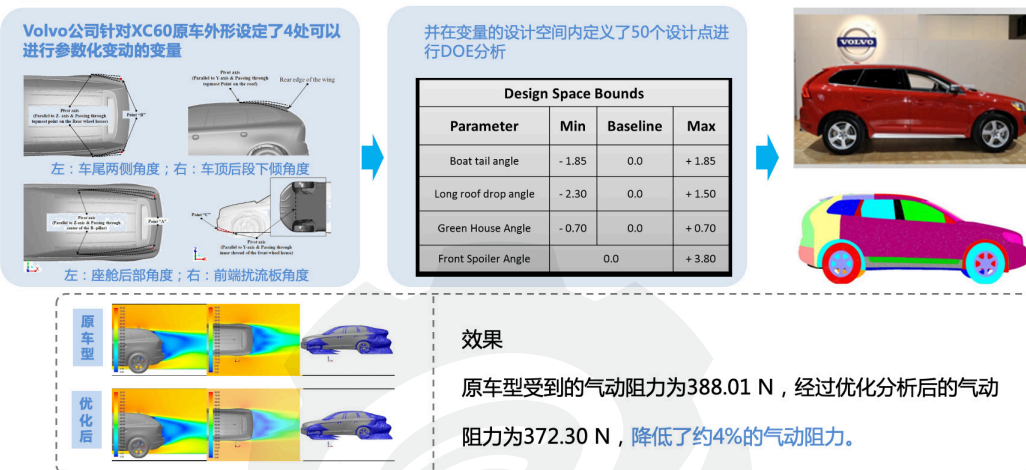
DMG MORI DMG通过数字孪生技术实现机床虚拟调试



三是基于 CAE 仿真诊断的产品研发。传统 CAE 仿真是数字孪生产品设计的最主要方式，通过仿真建模、仿真求解和仿真分析等步骤评估产品在力学、流体学、电磁学、热学等多个方面的性能，在不断的模拟迭代过程中设计更加高质量的新型产品。

案例 11 基于 CAE 仿真诊断的产品研发

 Volvo将数字孪生技术应用于汽车整车研发，提升汽车的可靠性、安全性及舒适性



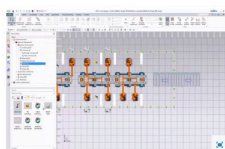
四是基于离散事件仿真的产线规划。在传统新建工厂或产线过程中，各个设备摆放的位置、工艺流程的串接均凭借现场工程师的经验开展，为产线规划准确性带来不小的隐患。而基于数字孪生的产线虚拟规划大大提升了产线规划准确率，通过在虚拟空间以“拖拉拽”的形式不断调配各个工作单元（如机器人、机床、AGV等）之间摆放位置，实现产线规划达到最佳合理性。此外，在基于数字化产线进行虚拟规划后，部分领先企业还将数字化产线与生产实时数据相结合，实现工厂规划、建设、运维一体化管理。

案例 12 基于离散事件仿真的产线规划



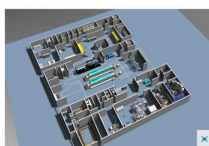
越南Vinfast汽车厂依托西门子产线规划数字孪生解决方案实现快速建厂，在破土动工后的21个月后就完成了汽车批量生产，将建厂时间缩短了50%

设备、产线选型



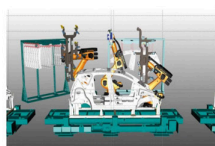
借助Line Designer工具，客户可以在虚拟空间自主选择设备型号，放置产线位置

生产流程模拟



通过Tecnomatix进行生产过程模拟，为前期布置产线位置试错，优化生产工艺

生产控制调试



基于虚拟控制器SIMATIC PLC SIM Advanced测试生产单元或机器控制代码是否准确

批量生产



利用全集成自动化TIA平台连接物理工厂实时数据，并提供反馈控制服务，实现真实生产

五是基于数字孪生的供应链优化。少数少品种大批量离散行业企业构建了供应链数字孪生应用，通过打造物流地图、添加物流实时数据、嵌入物流优化算法等举措，打造供应链创新解决方案，持续降低库存量和产品运输成本。

案例 13 基于数字孪生的供应链优化

SKF 世界最大轴承制造企业SKF利用数字孪生实现全球供应链管理

1. 创建供应链网络地图

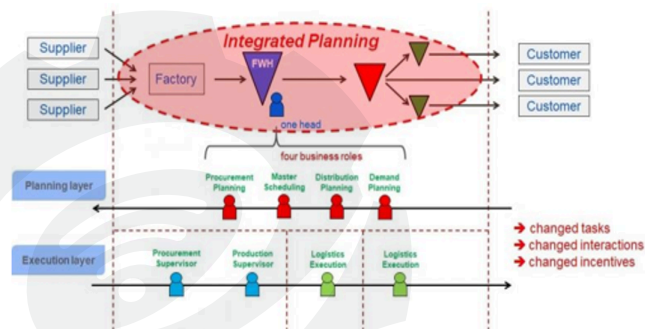
从5个ERP系统的40多个实例中提取约50万个库存单元数据
建立产品制造、存储、移动和销售的关系模型

2. 建立数字孪生

向网络地图中添加用户订单、物流运输、库存水平等实时运营数据
洞察当前全球供应链运行状态和存在的问题

3. 用数字孪生进行供应链集成管理

优化供应链中所有位置的需求，库存和计划；更轻松感知需求偏差并更积极地解决它们。



效果

基于数字孪生提供的**数据可视性和完全性**，供应链规划人员能从本地运营转变为**全球化决策**，从而降低存储，运输成本，缩短供应周期。

六是基于“机－电－软”一体化的综合产品设计。如以汽车为代表的产品，正在由传统个人交通工具朝着智能网联汽车方向发展。在这一发展趋势下，新型整车制造除了需要应用软件工具和机械控制工具外，还需要融入电子电气的功能，进而支撑汽车发展朝着电动化、智能化方向演进。随着智能网联汽车发展愈发成熟，基于“机－电－软”一体化的产品综合设计解决方案需求有望不断加大。

案例 14 基于“机－电－软”一体化的综合产品设计

SIEMENS 西门子Pave360数字孪生自动驾驶解决方案

基于“机械-电子-软件”交叉学科深度集成应用，优化从传感器/执行器硬件芯片设计到工控系统软件代码编程，再到机械结构运动的一体化研发流程



四、产业布局动向

(一) 产业体系分析



图 13 国内外数字孪生产业视图

目前工业数字孪生产业体系划分成三类主体：数字线程工具供应商提供 MBSE 和管理壳两大模型集成管理平台工具，成为数字孪生底层数据和模型互联、互通、互操作关键支撑。建模工具供应商提供数字孪生模型构建必备软件，涵盖描述几何外观、物理化学机理规律的产品研发工具，聚焦生产过程具体场景的事件仿真工具，面向数据管理分析的数据建模工具以及流程管理自动化的业务流程建模工具。孪生模型服务供应商凭借行业知识与经验积累，提供产品研发、装备机理、生产工艺等不同领域专业模型。此外，标准研制机构为推动数字孪生理论与落地应用提供基础共性、关键技术以及应用等准则。

1. 数字线程工具供应商围绕模型集成融合呈现两极分化特点

MBSE 工具供应商聚焦模型“正向”集成，依托工业互联网平台将整套工具向云端迁移，打造“云平台 +MBSE”的模型管理系统，实现敏捷，高效的产品数字孪生

全生命周期管理。如达索发布面向云端客户的 3DEXPERIENCE 2021x 平台，助力 MBSE 工具云化迁移，大大简化传统 MBSE 工具需要本地部署运行的过程，加快企业应用实施效率。

管理壳工具供应商聚焦模型“反向”集成，正逐渐提升自身数据格式兼容能力，打造工厂设备、软件与企业信息系统集成的一体化管理模式。如菲尼克斯打造电气管理壳平台工具，遵循 IEC61360 的数据定义格式规范，使用标准化的数字描述语言，来实现设备资产的统一数字化描述。

2. 建模工具供应商聚焦自身业务优势加快布局

产品研发工具服务商聚焦从模型外观形状到内部多类物理化学规律的精准建模能力进行综合升级。一方面 CAD/CAE 企业致力于集成多类模型，构建产品网络化协同研发能力。如 PTC 推出集成设计环境 Creo Elements/Direct，可合并多渠道 CAD 模型并附加开发验证模块，显著提高协同设计效率。另一方面图形渲染工具商专注打造高效的数据逻辑处理平台。如 Unity 打造 Unity 3D 实时创作平台，能够对模型数据、传感器数据以及点云数据进行实时传输和渲染，并支持跨平台的模型 AR/VR 交互。

事件仿真工具服务商一方面横向集成多行业、多领域模型，增加场景覆盖范围；另一方面聚焦工厂产线规划、设备虚拟调试等先进领域进行纵向深耕，持续加强自身场景化赋能能力。在场景横向拓展方面，通过不断积累模型库中的事件仿真模型，逐渐将应用场景延伸到不同行业、不同领域中。如 Mevea 拥有强大的物理计算引擎，同时不断积累面向工程机械、矿业、船舶等事件仿真模型，实现在驾驶舱上的事件模拟和培训。在场景纵向深耕方面，持续深化事件仿真与数据科学相结合，优化事件仿真的精准度。如 Simio 打造专业模型库，将大数据分析的学习能力与模拟分析的预测功能相结合，实现流程计划仿真决策预测的便捷性和准确性。

数据建模服务商依托自身优势不断打造新型数据管理及分析工具。一方面，数据管理平台企业立足传统数据库优势，叠加智能分析算法服务，提供集数据管理和分析为一体的数字孪生工具。如 OSIsoft 推出数据管理平台 PI System，其针对数

字孪生的产品组件 Asset Framework 可实现将数据与 SAP HANA 中预测分析和机器学习算法结合在一起，提供针对复杂数据的处理与管理。另一方面，数据分析企业依托数据分析工具优势，并与自研仿真软件形成组合，提供数据建模和仿真建模一体化工具。如 MathWorks 将旗下数学软件 MATLAB 和仿真软件 SIMLINK 打通集成，构建数据模型和仿真模型统一操作环境，打造机理模型和数据模型融合的数字孪生体。

业务流程建模工具服务商重点聚焦数据集成，以独立研发或合作的方式打造业务流程管理软件，同时提升数据可视化能力，构筑部门协同运作优势。如 iGrafx 与 myInvenio、UiPath、BP3 Global 进行核心功能整合，形成流程挖掘和组织数字孪生（DTO）功能的产品。

3. 孪生模型服务供应商凭借专业知识与经验积累，持续构筑创新型数字孪生应用模式

产品研发模型供应商围绕产品研发设计过程提供模型服务。一方面，产品研发服务商结合自身多年几何建模、设计仿真经验，根据用户需求为用户提供产品研发模型。如上海及瑞借助 Autodesk 建模工具，利用创成式设计帮助北汽福田设计前防护、转向支架等零部件，实现产品重量减轻 70%，最大应力减少 19%。另一方面，产品制造类服务商通过与第三方合作，自身提供产品模型，共同推进新型产品研发。如上海飞机制造有限公司基于华龙讯达数字孪生平台，将飞机模型与建模平台结合，加快大飞机结构研发进程。

装备机理模型服务商从单纯卖设备向提供“物理设备 + 孪生体”模式演进，提升产品的市场占有率和企业自身的产业技术升级。总的来看，可分为以下三种模式。一是装备企业依托自身对产品的深入理解，自行构建产品孪生模型。如 ABB 依托深厚的设备制造经验，在 ABB Ability 软件系统基础上，推出了 PickMaster Twin 产品，尝试打造完整的数字孪生体系。二是借助信息技术企业支持，共同构建产品孪生模型。如 DMG MORI 以自身产品技术特点为背景，与咨询公司 HEITEC 进行合作，有针对性的向数字孪生解决方案提供商演进。三是提升产品开放程度，辅助用户构建产品孪生模型。如 chiron、康明斯与 KUKA 从自身产品功能出发，根据场景需要，对

设备数据接口进行模块化集成，完善数字孪生体构建的边缘条件。

生产工艺模型服务商持续扩大与行业场景及业务需求结合的深度，因地制宜为不同用户、场景提供差异化孪生模型及服务。一类是生产运营类服务商基于自身长期生产经验支撑提供工艺优化模型，如贝加莱基于 Automation Studio 内嵌的经验模型，对车间的产线设计和物流规划进行虚拟调试，可提前发现错误。另一类是咨询服务商立足大量的项目规划设计经验，提供生产工艺优化模型，如埃森哲凭借多年咨询服务经验，可构建面向特定行业领域的数字孪生解决方案。

（二）多类主体优势互补，相互合作，构建深层次数字孪生应用

1. 建模工具服务商与平台企业合作，立足自身软件基础优势，叠加平台能力，实现数据和模型的汇聚打通

一方面，建模工具服务商与 IOT 平台厂商进行合作，强化模型的数据接入，提升孪生对象实时仿真能力。例如 ANSYS 与 PTC 合作，共同构建泵数字孪生体，将泵实时数据不断录入仿真环境，促进数据识别和分析诊断，能够快速预测泵的损坏时间，此外还能实时诊断泵损坏的机理。另一方面，建模工具服务商与数字线程平台企业进行合作，打造模型一体化管理环境，实现孪生对象全流程仿真。例如西门子基于自身的产品生命周期管理系统 Teamcenter，与建筑信息建模软件 Bentley 合作，推出 PlantSight 产品，实现工厂工程各系统的一体化设计，提高整体建模仿真的兼容性。

2. 建模工具服务商与新一代信息技术企业合作，借助通用使能工具优化数字孪生建设及应用

一是建模工具服务商与 AR/VR 企业合作，打造可视化建模解决方案。例如 Autodesk 与微软合作，将产品模型设计过程从 Autodesk 的传统软件环境转移到微软 HoloLens 的虚拟现实环境，支持在产品开发前期阶段以数字化方式查看完整模型，实现全息设计。二是建模工具服务商与云计算厂商合作，共同提供数字孪生云

化仿真解决方案。例如 ANSYS 与微软进行合作，推动传统本地化建模仿真软件向云端迁移，降低用户部署及使用数字孪生产品门槛。三是建模工具服务商与数据管理企业合作，推动构建资产数据集成与分析优化解决方案。例如海克斯康利用 SDx Connector 平台结合 OSIsoft 的 PI 数据管理系统，成功打造集资产设计、施工、运营的综合工程管理服务解决方案。

3. 建模工具服务商与垂直行业合作，将通用建模软件与各类孪生模型融合，提升数字孪生解决方案实施能力

一方面，聚焦行业特定生产环节及场景，行业专有模型与仿真工具融合提升单点优化能力。例如 ABB 和建模仿真工具企业 CORYS 合作，双方针对能源和过程行业工厂控制系统进行模型验证和测试，减少控制过程调试和启动时间。另一方面，面向行业生产全流程，融合数字线程、仿真工具与行业模型，打造覆盖产品全生命周期的一体化解决方案。例如施耐德与 AVEVA 及 Doris 合作，基于统一的模型管理平台，融合异构数据与行业模型，为石油和天然气行业提供结构化的产品与业务流程服务，提高工程项目实施效率。

（三）巨头企业立足自身优势综合布局， 打造数字孪生核心竞争力

1. 西门子立足工业自动化优势，持续收并购工业软件，独自构建虚实互动的工厂级数字孪生解决方案

西门子是全球领先的工业自动化厂商，拥有从工业控制到工业软件的完整产品谱系。在仿真设计方面，西门子持续收并购多类产品设计和工厂虚拟制造软件，如 NX CAD/CAE 等机械设计软件、电子设计软件 Mentor 和 Z Circuit、工厂工程设计 COMOS 等，能够在数字空间实现工厂工艺模拟、物流模拟、自动化虚拟验证等数字孪生解决方案。在产品生命周期管理方面，西门子打造产品生命周期管理（PLM）系统 Teamcenter，实现多类工业软件的数据打通和业务协同。在数据分析方面，西门子收并购数据分析软件 Omneo，提升数字孪生虚实映射精度。此外，西门子基于工业互联网平台 Mindsphere，将全类工业软件云化迁移，构建综合数字孪生产品

Xcelerator，打造工厂级端到端数字孪生解决方案。

2. 达索立足数字空间全链条软件优势，通过与 OT 企业合作，构建闭环优化的产品数字孪生解决方案

达索诞生于几何设计软件公司，多年来聚焦产品研发业务，持续提升数字孪生服务水平，在整个布局进程中，达索策略可划分四个阶段。第一阶段，通过收并购补齐虚拟空间全类工业软件。达索最早提供 2D CAD 建模软件服务，随后收购 SolidWorks，向 3D 设计迁移，提升几何建模直观性；收购 ABAQUS 建立仿真分析能力，与几何设计能力结合打造数字样机。第二阶段，构建云化平台整合业务能力，构建全生命周期服务。达索收购 IBM PM，自研 PLM 产品 ENOVIA，并打造 3DEXPERIENCE 平台，并持续将收购的 ERP（IQMS）、MES（Apriso）等软件与设计、仿真、PLM 工具集成整合。第三阶段，与 OT 企业合作打造虚实映射的闭环解决方案。达索与 ABB 合作补齐 OT 领域短板，ABB 的工业自动化能力帮助达索实现由仅在虚拟空间进行诊断，向可利用自动化执行实现虚实联动的方向发展。第四阶段，基于 AI 持续优化数字孪生解决方案性能。达索收购 Proxem 公司，将 AI 工具集成到平台中，加快 AI 技术与仿真技术集成融合，构建更精准映射的数字孪生。

3. 施耐德立足能源领域自动化实施基础，持续优化工业仿真设计能力，打造行业专属的全套解决方案

施耐德是全球能效管理与自动化领域龙头，长期聚焦能源电气领域进行数字孪生布局，整体战略规划大致可分为“三步走”。第一步，通过收并购提升自身在能源管理、优化、调度等方面的服务水平。施耐德早在 2006 年就陆续收购能源管理软件 Summit Energy、规划调度软件 SolveIT、InStep、Invensys 等，丰富强化能源管理领域工业软件能力。第二步，布局流程模拟与仿真设计领域，构建全套数字孪生运营管理解决方案。2018 年，施耐德反向收购 AVEVA，补强自身工厂流程模拟、电气设计等领域能力；收购 CAD 企业 IGE+XAO，强化在 CAD、PLM、仿真领域的产品研发能力。第三步，面向能源电力领域，持续深耕行业专属解决方案。2020 年，施耐德收购电力系统仿真软件平台 ETAP，打造新型数字孪生解决方案，基于 ETAP Digital Twin 平台，改善电力系统的资产运营以及整个电力网络运营的优化。

五、主要国家发展态势分析

（一）美国从战略规划、应用实践、产业创新等方面全方位布局数字孪生发展

一是“政产学研”合力推动数字孪生上升为国家战略。自密歇根大学教授格里芬于 2002 年提出数字孪生概念后，美国航空航天局（NASA）于 2010 年在太空技术路线图中将数字孪生列为重要技术，并首次进行了系统论述。此后，美国国防部、美国海军开始加大数字孪生资金投入，美国海军计划在未来十年投入 210 亿美金支持数字孪生发展。同时，龙头企业也将数字孪生作为重点布局方向，如洛克希德马丁将其列为 2018 年顶尖技术之首，2020 年 5 月 ANSYS、微软、戴尔等组建数字孪生联盟开展合作和布局，该组织将推动数字孪生体系架构、安全和互操作性方面的一致性，以帮助从航空航天到自然资源等诸多行业中数字孪生技术的使用。

二是依托航空航天基础优势，探索形成了成熟的应用路径。第一阶段，基于系统级的离线仿真分析进行资产运维决策。如早在 1970 年，当阿波罗 13 号宇宙飞船在太空发生了氧气罐爆炸时，美国利用系统仿真进行模拟诊断，及时给出处置方案，使得宇航员安全返回地球。第二阶段，在第一阶段的仿真基础上，完善了系统仿真的工程规范和路径（即在仿真模型构建初，给定每一个模型标识及属性关系，为后面研发、制造时模型集成融合奠定基础），形成了一套复杂基于模型系统工程（MBSE）。如洛马公司采用 MBSE 统一的企业管理系统需求架构模型，并向后延伸到机械、电子设备和软件的设计和分析，极大提升了复杂产品设计效率。第三阶段，在第二阶段的基础上推动数字孪生应用拓展到全生命周期。如今年 5 月底，特斯拉 SpaceX 发射载人龙飞船升空，基于数字孪生实现飞船的研发、生产、运维、报废全生命周期管理，首次实现飞船报废回收，极大降低了下一代飞船生产成本。

三是供给侧企业加快技术创新，利用新一代信息技术优化数字孪生应用效果。如在“IOT+ 仿真”方面，ANSYS 和 PTC 合作构建泵数字孪生体，实现实时数据驱动的仿真诊断，相较于传统离线仿真，大大提升了诊断的及时性和准确性。在“AI+

仿真”方面，MathWorks 将数据分析工具 Matlab 和仿真产品 Simulink 打通，将 Matlab 人工智能训练数据集输入 Simulink 进行仿真及验证分析，极大优化了仿真结果。

基于此，美国数字孪生综合优势体现在三个方面：一是构建了基于模型的系统工程方法论，通过统一语义和语法标准、给定系统集成路径，为数字孪生应用提供理论指导。二是拥有强大的仿真产业，ANSYS、MathWorks、Altair 等企业为数字孪生应用提供基础建模工具。三是拥有丰富的应用数据和模型，空客、洛克希德马丁、特斯拉等应用在产品研制过程中积累了大量机理模型，持续优化数字孪生精度。

（二）德国立足标准体系基础，加快打造数字孪生竞争优势

德国立足标准制定基础优势，面向数字孪生打造了数据互联、信息互通、模型互操作的标准体系（即管理壳理论），实现各类数字化资产（数据、信息、模型）之间的无缝集成融合，提升物理实体在虚拟空间映射精准度。如在数据互联和信息互通方面，德国在 OPC-UA 网络协议中内嵌信息模型，实现通讯数据格式一致性。在模型互操作方面，德国依托戴姆勒 Modolica 标准开展多学科联合仿真，目前已经是仿真模型互操作全球最主流标准。同时，2020 年 9 月，德国 VDMA、ZVEI、Bitkom 联合 20 家欧洲龙头企业（ABB、西门子、施耐德、SAP 等）成立“工业数字孪生协会”（IDTA），目标是通过统一各个企业数字化工具标准提升数字孪生体并行开发效率。

此外，相较于美国更多开展“装备级”数字孪生，德国具有西门子单点优势，是全球极少数能够提供“工厂级”数字孪生的工业服务商。工业自动化巨头西门子近 10 年花费 100 多亿美元收购了几乎全类工业软件，涵盖了产品生命周期管理（Teamcenter）、计算机辅助设计（NX）、电子设计自动化（Mentor）、事件仿真（Simcenter）、制造运营管理系统（Opcenter）等，并持续将各类工业软件集成至 Mindsphere 工业互联网平台。在此基础上，西门子能够基于平台构建全工厂数字孪生，不但能够实现虚实映射，还能基于工业自动化优势完成闭环控制。

（三）中国数字孪生市场活跃，多主体参与但创新有待提升

中国多类主体积极参与数字孪生实践，在理论研究、政策制定、产业实践等方面开展探索，但整体上应用深度、广度还需进一步拓展，更多工业应用场景尚待挖掘。

在理论研究方面，中国关于数字孪生思想的研究由来已久，1978 年钱学森提出系统工程理论，由此开创国内学术界研究系统工程的先河。2004 年，继美国提出数字孪生概念，中国科学院王飞跃聚焦解决复杂系统方法论，首次提出平行系统的概念，将系统工程与新一代信息技术结合。

在政策制定方面，2021 年我国各部委和地方政府开始纷纷出台数字孪生相关政策文件。国家发改委“上云用数赋智”、科协“未来十大先进技术”、工信部“智能船舶标准”均将数字孪生列为未来发展关键技术，上海和海南在城市规划中也提出要打造数字孪生城市。

在产业实践方面，我国多类主体均开展数字孪生探索，如恒力石化、中广核等流程行业应用企业积极构建三维数字化工厂，湃睿科技、摩尔软件等企业利用 AR/VR 提升数字孪生人机交互效果，工业自动化企业华龙迅达构建虚实联动的烟草设备数字孪生。尽管我国多类主体探索数字孪生热情高涨，但产业实践大多数停留在简单的可视化和数据分析，与国外基于复杂机理建模的分析应用还存在一定差距。

（四）其他国家呈现点状应用探索，尚未形成体系布局

英国、法国、韩国等其他国家也开展了数字孪生探索，实践各有特色，但尚未形成“政产学研”综合优势。英国是首个在国家层面发布数字孪生政策（《英国国家数字孪生体原则》）的国家，但在产业实践方面探索较少。法国依靠龙头企业引领，以达索为核心，基于 3D Experience 平台打造的数字化创新环境，在数字孪生领域进行单点突破。韩国积极开展数字孪生标准制定，提出《面向制造的数字孪生系统框架》等，有望成为数字孪生领域最早的国际标准。

六、展望

1. 工业数字孪生创新与发展的大幕刚刚拉开，产业界、学术界对工业数字孪生的认识日渐统一，数据与模型、模型与模型的集成融合是工业数字孪生本质内涵，尤其是仿真建模与数据科学的集成优化将成为未来发展主线。

2. 工业数字孪生应用仅处于初级阶段，真正成熟的数字孪生应用还需要较长期探索实践。短期来看，四类关键场景有望成为重点应用方向。一是存量工厂三维可视化改造要实现“应用普及”，二是全场景虚拟制造诊断要实现“能力提升”，三是实时仿真 / 智能仿真分析要实现“单点突破”，四是大国重器系统工程建设要实现“科技攻坚”。

3. 理想工业数字孪生开发需要基于统一建模语言和多类建模工具，同时需要与底层物联网实时数据相结合。“工业互联网平台 + MBSE”、“工业互联网平台 + 管理壳”等组合方式在有效统一异构数据、模型的一致性基础上，实现与 IOT 数据的有效结合，有望成为工业数字孪生开发的重要方法。

4. 资产数字化是数字孪生发展源头，工业厂商对孪生数据、孪生模型的积累意识，间接决定了数字孪生未来发挥价值大小。尤其工业装备制造商是整个工业产业链中的关键环节，由传统物理装备售卖向“物理装备 + 孪生装备”的售卖方式转变，不但实现了装备级数字孪生应用，还将有效提升工厂级数字孪生建设的效率，为数字孪生产业整体发展带来良好前景。



工业互联网产业联盟（AII）公众号

地址：北京市海淀区花园北路52号 100191

电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

网址：<http://www.aia-alliance.org>