

面向智能制造的数字孪生技术典型应用场景探析

左鹏*, 张欣, 崔文雅

中国电子技术标准化研究院, 北京, 中国

*通讯作者

【摘要】在物联网、大数据等新一代信息技术推动制造业数字化转型的背景下,数字孪生技术成为智能制造与工业 4.0 发展的关键支撑,受到各界高度关注。本文基于现有文献与技术报告,系统梳理数字孪生的多视角定义与发展历程,明确其核心为物理实体在虚拟空间的全生命周期动态映射,从技术目标、技术发展脉络、核心技术特性三个维度深度剖析数字孪生技术体系,提炼出物理实体、虚拟模型等五大核心要素,同时介绍 IEEE2025 年发布的工业数字孪生 L1-L5 五级成熟度模型,该模型为企业评估应用水平、制定升级策略提供统一量化标准。在此基础上,从工厂生命周期、产品生命周期及二者融合的生产制造环节三大维度,结合技术目标与特性分析数字孪生在各典型制造场景的应用现状,对比其对传统制造模式的升级优化效果,展现该技术在推动设计仿真化、施工智能化、运维预测化、生产透明化等方面的核心价值。研究旨在清晰呈现数字孪生技术在制造业的应用逻辑与实践路径,为制造企业的数字化、智能化升级提供参考。

【关键词】数字孪生; 制造业; 成熟度模型; 智能制造典型场景

1. 前言

随着物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术的飞速发展,制造业正经历着深刻的数字化转型。在此背景下,数字孪生技术作为一种实现信息世界与物理世界深度融合的有效手段,正逐渐成为推动智能制造和工业 4.0 发展的关键技术[1-2]。国际标准化组织(ISO)、各国政府、学术界及工业界均对数字孪生给予了高度重视,其在智能制造典型场景中的应用探索日益深入。

数字孪生并非简单的三维可视化建模,而是以实现物理实体全生命周期最优管控为核心目标的复杂技术体系,其技术发展从单一的虚拟映射逐步走向虚实共生的智能阶段,且具备精准映射、实时交互、闭环迭代等独特技术特性,是区别于传统仿真、建模技术的核心所在。本文基于现有文献与技术报告,系统性阐述数字孪生的定义,并重点从技术目标、技术发展、技术特性三个维度展开深度分析,明确其技术体系内核;同时结合 IEEE2025 五级成熟度模型,从工厂生命周期、产品生命周期及双生命周期融合的生产制造环节三大维度,剖析数字孪生技术在智能制造典型场景的应用落地逻辑,探讨其实施过程中面临的关键问题,为制造企业数字化转型提供技术参考与实践路径。

2. 数字孪生的技术体系核心分析

数字孪生技术的发展围绕明确的技术目标展开,历经多阶段技术演进,形成了区别于其他智能制造技术的独特核心特性,且五大核心要素为技术目标实现、技术特性落地提供了基础支撑,共同构成完整的数字孪生技术体系。

2.1 多视角定义

-国际标准化组织定义:根据 ISO/IEC JTC1 AG11 数字孪生咨询组的研究报告,数字孪生是具有数字连接的特定物理实体或过程的数字化表达,该数据连接可以保证物理状态和虚拟状态之间的同速率收敛,并提供生命周期的集成视图,有助于优化整体性能[3]。

-国家标准定义:根据 GB/T43441.1-2023,数字孪生被定义为“具有保证物理状态和虚拟状态之间以适当速率和精度同步的数据连接的特定目标实体的数字化表达”[4]。

-学术界定义:数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟实体,借助历史数据、实时数据以及算法模型等,模拟、验证、预测、控制物理实体全生命周期过程的技术手段[5]。

2.2 技术目标

基础目标:实现物理实体在虚拟空间的精准、实时、全要素映射,打破物理世界与信息世界的信息壁垒,解决传统制造过程中信息孤岛、数据滞后、可视化程度低等问题,为智能制造提供统一的数字底座。

核心目标:依托虚拟模型与孪生数据,实

现对物理实体运行状态的实时监控、精准预测、主动控制，将传统制造的“事后响应”模式转变为“事中调控、事前预测”模式，提升制造过程的可控性与前瞻性。

终极目标：通过虚实闭环迭代与智能优化，实现物理实体全生命周期的最优管控与价值挖掘，同时推动制造模式从“经验驱动”向“数据驱动”“智能驱动”转型，助力智能制造体系的构建与工业 4.0 的落地。

2.3 数字孪生技术发展脉络

数字孪生技术的概念最早可追溯至 20 世纪 80 年代的数字镜像思想，历经数十年发展，随着新一代信息技术的迭代与制造业需求的升级，其技术发展从初级的虚拟建模逐步走向高级的虚实共生，整体可分为四个关键发展阶段，且与智能制造的发展需求高度契合：

雏形阶段（20 世纪 80 年代-21 世纪初）：核心为静态数字化建模，主要通过 CAD、BIM 等技术构建物理实体的几何模型，仅实现物理实体的外形与结构数字化，无实时数据交互，模型与物理实体相互独立，主要应用于设计环节的静态仿真，是数字孪生技术的基础雏形。

发展阶段（21 世纪初-2010 年）：引入数据连接与简单交互，通过传感器采集物理实体的少量运行数据，实现虚拟模型与物理实体的基础状态同步，能够对物理实体的运行状态进行简单监控，技术应用从设计环节延伸至生产、运维环节，但数据处理能力弱，无预测与优化能力。

成熟阶段（2010 年-2020 年）：依托物联网、大数据、云计算技术，实现虚实双向实时交互与仿真预测，构建了包含物理实体、虚拟模型、连接通道、孪生数据的完整技术框架，能够通过多源数据融合与算法模型，对物理实体的运行状态进行预测，并通过虚拟模型对物理实体进行间接控制，成为智能制造的重要技术手段。

智能阶段（2020 年至今）：融合人工智能、边缘计算、数字孪生体协同等技术，向虚实共生、自主优化发展，数字孪生模型具备自主学习、自主决策能力，能够实现物理实体的智能优化与全生命周期管理，且从单一实体的孪生向产线、工厂、产业链级孪生延伸，IEEE2025 年发布的五级成熟度模型正是对该阶段技术发展的标准化与量化。

2.4 技术体系五大核心要素

数字孪生作为实现物理世界与虚拟空间精准映射、实时交互、闭环迭代的核心技术体

系，其核心特征体现为五大要素，如图 1 所示：即物理实体、虚拟模型、连接通道、孪生数据与服务应用[6-7]。五大要素相互依存、缺一不可，共同构成虚实融合的完整技术闭环，为技术目标的实现提供基础支撑。

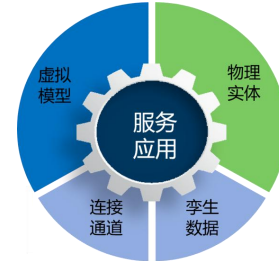


图 1. 数字孪生系统五大要素

在图 1 中，五大要素具体如下：

物理实体：是数字孪生技术的服务对象与现实运行载体，是所有数据与模型的来源，其全生命周期的运行状态与特性是数字孪生技术的核心研究对象。

虚拟模型：是物理实体在虚拟空间的数字化载体，通过几何、物理、行为、机理等多维度建模，实现对物理实体的精准映射，是仿真推演、预测分析的核心平台。

连接通道：是虚实交互的“桥梁”，通过物联网、5G、工业以太网等技术，实现物理实体与虚拟模型之间的双向实时数据传输，保障技术实时性与闭环性的落地。

孪生数据：是数字孪生技术的“血液”，涵盖物理实体的设计、生产、运行、运维等全生命周期数据，以及虚拟模型的仿真、分析、决策数据，为智能分析与决策提供数据支撑。

服务应用：是数字孪生技术价值落地的载体，面向智能制造的具体场景，将虚拟模型的分析结果转化为实际的监控、预测、控制、优化服务，实现技术目标与制造需求的对接。

3. 数字孪生能力成熟度等级

随着数字孪生技术在制造企业各业务环节的融合应用，展现出了提升效率、降低成本的潜力。但是由于工业数字孪生领域相关标准的缺失，不同主体对数字孪生技术应用水平的认知存在显著差异，相关方难以准确评估数字孪生的应用水平，这在一定程度上阻碍了该技术向更高层次发展。为此，电气与电子工程师协会（IEEE）于 2022 年启动相关项目，并于 2025 年正式发布《工业数字孪生成熟度模型和评价方法》标准[8]。标准中明确了数字孪生应用水平的发展路径，如图 2 所示：从低到高依次是 L1 以虚映实、L2 以虚控实、L3 以虚预实、L4 以虚优实、L5 虚实共生等 5 个等级

[8-9]。该成熟度模型与数字孪生的技术发展脉络、技术目标高度匹配，是对数字孪生技术发展阶段的标准化量化，为制造企业提供了清晰的数字化转型路径，助力企业精准评估当前数字孪生技术的应用水平与发展阶段，通过识别

技术特性与要素的短板制定分阶段优化策略，推动技术从单点可视化向系统优化升级；同时为各方协作提供统一规范，促进跨企业技术对标与生态协同，引导数字孪生技术按照既定技术目标有序发展。

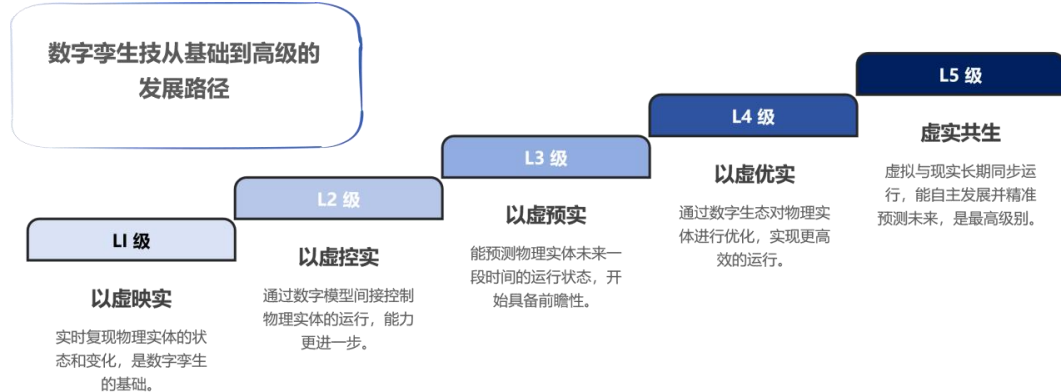


图 2.数字孪生能力成熟度等级

4. 数字孪生技术在制造典型场景中的应用现状分析

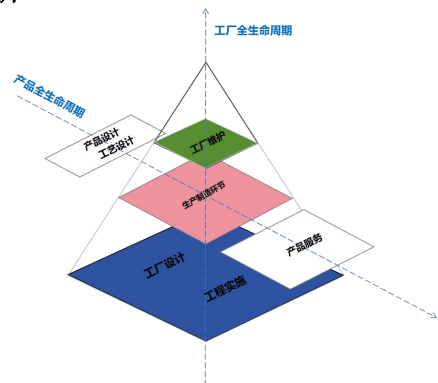


图 3.产品与工厂双生命周期融合的数字孪生制造体系模型

数字孪生技术已建立了以技术目标为导向、以技术特性为核心、以五大要素为支撑的普遍适应的理论技术体系[10-11]，其在制造业的应用围绕工厂生命周期、产品生命周期两大维度展开，并在二者融合的生产制造环节实现技术特性的综合落地，成为连接虚拟设计与实

体生产的核心枢纽，如图 3 所示。在各典型应用场景中，数字孪生技术均以全生命周期最优管控为核心技术目标，充分发挥精准性、实时性、闭环性等核心技术特性，针对传统制造模式的痛点实现技术升级与模式优化，推动智能制造的落地实施。

4.1 工厂生命周期维度分析

在工厂生命周期的数字孪生应用框架中（图 4），工厂设计、工程实施、工厂维护三大场景依次承接，数字孪生技术以实现工厂全生命周期的精准规划、智能建设、高效运维为技术目标，充分发挥精准性、动态性、闭环性等核心技术特性，通过五大核心要素的协同，为工厂全生命周期管理提供数字支撑[12-13]。工厂设计场景构建高精度虚拟模型与全要素数据集，奠定技术应用的基础；工程实施场景实现施工过程的实时监控与智能调度，保障技术的实时性与闭环性落地；工厂维护场景实现运维的预测优化，发挥技术的智能性与动态性，最终保障实体工厂的高效、安全与可持续运维。

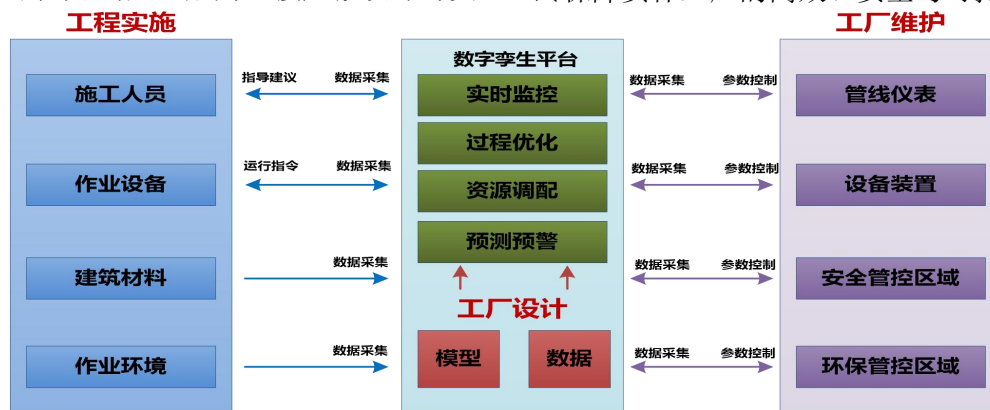


图 4: 工厂生命周期的数字孪生应用框架

4.1.1 工厂设计场景—从“二维图纸”到“三维仿真驱动”

传统工厂设计模式依赖 CAD 二维图纸和局部三维建模，存在信息传递失真、协同困难、布局优化经验驱动等痛点，难以实现工厂设计的精准规划。数字孪生技术以工厂全要素精准建模、设计方案仿真验证、布局优化数据驱动为技术目标，充分发挥精准性、动态性核心技术特性，通过 BIM+三维 CAD 融合建模技术，构建包含工厂几何结构、设备布局、材料信息、工艺参数的高精度静态模型，形成数字孪生的物理基础和初始数据；同时集成多学科、多物理量、多尺度的仿真过程，对工程施工、产线布局、物流路径等进行动态模拟仿真，提前预见空间干涉、物流瓶颈等问题，实现工厂厂房建设和车间产线规划的一体化精准设计，从源头上避免后期设计变更，降低设计成本。

4.1.2 工程实施场景—从“物理试错”到“智能调度”

传统施工模式依赖现场安装与调试，试错成本高、周期长，且施工过程监控滞后、资源调配不合理，难以实现工厂工程的智能建设。数字孪生技术以施工过程实时监控、工艺工序动态优化、物料资源精准调配、安全风险提前预警为技术目标，充分发挥实时性、闭环性、智能性核心技术特性，将 BIM 技术与数字孪生技术融合构建数字孪生平台：以 BIM 模型为基础实现工厂几何结构与静态信息的精准映射，通过传感器动态采集施工人员、作业设备、建筑材料和作业环境的全要素数据，构建物理现场的数字镜像；依托模型算法对镜像数据进行实时分析、仿真推演和智能决策，形成“物理现场 - 数字孪生体”的双向数据闭环，实现施工全过程的智能化管理和决策支持，大

幅降低试错成本，缩短施工周期。

4.1.3 工厂维护场景—从“被动响应”到“预测优化”

传统工厂运维模式依赖人工巡检与定期保养，效率低、滞后性强，易导致生产中断、安全事故，难以实现工厂运维的高效可控。数字孪生技术以设备状态实时监控、故障风险提前预测、安全环保智能管控、运维策略自主优化为技术目标，充分发挥实时性、智能性、闭环性核心技术特性，以工程设计施工阶段的数字孪生平台为系统底座，集成工艺、设备、安全和环保等业务系统，与实体工厂的管线仪表、设备装置、安全管控设备和环保排放设备实现实时数据互联互通；通过对运行数据的智能分析，实现装置人员定位、厂区综合安防、环保信息、现场报警等信息的高精度可视化呈现，为安全作业、应急联动、设备检修提供智能决策，形成“数据采集-状态分析-故障预警-运维执行-数据反馈”的运维闭环，实现企业级全工作场景的智能运维，降低运维成本，提升工厂运行的安全性与可持续性。

4.2 产品生命周期维度分析

在产品生命周期的数字孪生应用框架中（图 5），产品设计、工艺设计、产品服务三大场景形成闭环协同，数字孪生技术以实现产品全生命周期的精准开发、高效制造、智能服务为技术目标，充分发挥精准性、实时性、动态性、智能性等核心技术特性，通过五大要素的有机协同，构建“设计-工艺-服务”的全生命周期数字孪生体系：产品设计场景构建产品数字化模型与性能基准，发挥精准性与动态性；工艺设计场景实现工艺方案的迭代优化，发挥闭环性与智能性；产品服务场景实现预测性维护与数据反馈，发挥实时性与闭环性，最终实现产品全生命周期的智能管控与性能优化。

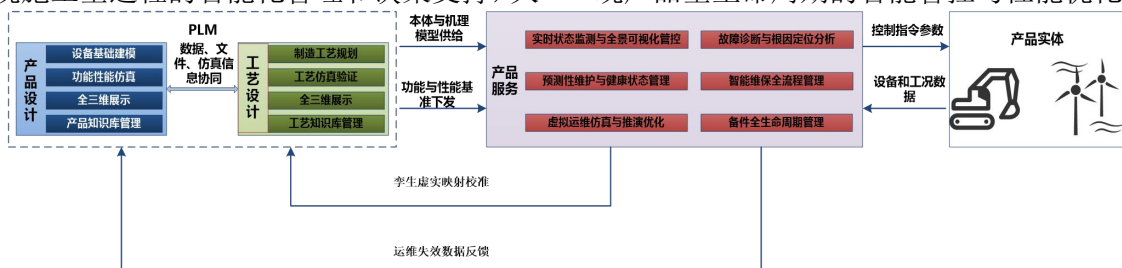


图 5：产品生命周期的数字孪生应用框架

4.2.1 产品设计场景—从“试错式开发”到“数字样机设计”

传统产品设计依赖物理样机和经验判断，设计变更频繁、成本高昂，且仿真与实际运行数据脱节，难以实现产品的精准开发。数字孪

生技术以产品多维度精准建模、多方案并行仿真、性能提前预测、设计持续优化为技术目标，充分发挥精准性、动态性、智能性核心技术特性，在虚拟环境中建立与物理产品实时同步的全要素数字模型，涵盖几何、物理、行为、机

理等多个维度；支持多方案并行仿真与复杂工况性能预测，例如在汽车设计中，模拟碰撞、热力学、空气动力学等工况，提前验证结构强度与可靠性；同时设计模型能够与后续生产、运行数据联动，实现设计方案的持续优化，显著提升设计准确性与适应性，大幅降低物理样机成本。

4.2.2 工艺设计场景—从“经验驱动”到“数据驱动”

传统工艺设计基于固定参数和标准化流程，灵活性差、缺陷识别滞后，难以应对定制化生产需求，且问题追溯困难，影响产品良品率。数字孪生技术以工艺过程精准模拟、工艺参数动态优化、缺陷提前预测、生产柔性化适配为技术目标，充分发挥精准性、实时性、智能性核心技术特性，集成传感器数据与制造过程模型，构建工艺设计的数字孪生平台，实现对加工流程的全面模拟与动态优化；以发动机缸体铸造为例，通过数字孪生模拟金属流动、凝固过程，精准预测缩孔、气孔等缺陷，并根据仿真结果优化浇铸温度、速度等参数，提升良品率；同时平台能够快速响应订单变化，支持柔性化与个性化生产，实现工艺设计的数智化升级。

4.2.3 产品服务场景—从“被动维修”到“预测性维护”

传统产品售后服务依赖用户报修或定期巡检，故障发现滞后、停机时间长、维护成本

高，且服务数据无法反哺设计制造，难以实现产品的全生命周期价值挖掘。数字孪生技术以产品状态实时监控、故障风险提前预警、维护策略智能制定、服务数据反哺优化为技术目标，充分发挥实时性、智能性、闭环性核心技术特性，通过传感器将产品运行数据实时上传至云端数字孪生模型，持续监控温度、振动、压力等关键指标；结合历史数据与算法模型，挖掘数据与设备故障的内在联系，预测潜在故障并提前预警，例如智能工厂中的机床可通过数字孪生判断轴承磨损趋势，自动安排维护计划，大幅减少非计划停机；同时服务端的运行数据与故障数据能够反哺产品设计与工艺设计环节，形成“使用-反馈-优化”的产品全生命周期迭代闭环，推动产品持续改进。

4.3 产品与工厂双生命周期融合环节分析

生产制造环节是产品与工厂双生命周期融合的核心枢纽，是连接虚拟设计与实体生产的关键环节，也是数字孪生技术所有核心技术特性综合落地、全技术目标集中实现的场景。该环节的数字孪生应用以实现生产过程透明化、协同化、柔性化、智能化，保障产能最大化、质量最优化、成本最低化为核心技术目标，充分发挥精准性、实时性、闭环性、动态性、智能性五大核心技术特性，从设备级、产线级两个层级实现生产制造全流程的数字孪生管控（图6）[14-15]，推动生产模式从“经验驱动、静态管控”向“数据驱动、动态协同”转型。

物理实体	孪生数据	虚拟模型	业务目标
设备级	电流电压数据 噪声震动数据 温度湿度数据 运行状态数据 工况环境数据	几何模型 物理模型 行为模型 规则模型 机理模型	运维知识沉淀 设备性能优化 远程监控与诊断 设备健康与预测性维护
产线级	人员状态数据 设备运行数据 物流状态数据 工艺参数数据 生产时序数据 产品质量数据 能源能耗数据 安全环保数据	几何模型 行为模型 工艺模型 计划调度模型 物流配送模型 能源管控模型 安环管控模型	产能最大化 工序协同与流程优化 质量闭环与追溯 生产调度优化

图 6. 生产制造环节中各层级的数字孪生内容和目标

4.3.1 设备级孪生—以设备全生命周期最优运维为目标，发挥精准与智能特性

传统设备管理依赖人工巡检，维护策略粗放，存在“过度维护”或“维护不足”的问题，运维成本高、设备可靠性低。设备级数字孪生以设备状态精准映射、故障提前预测、运维策略智能优化、设备性能持续提升为技术目标，

充分发挥精准性、实时性、智能性核心技术特性，构建设备全要素数字孪生体：通过传感器采集设备的振动、温度、电流电压、噪声等实时运行数据，精准映射物理设备的几何参数、运行状态、性能指标、损耗规律等核心信息；构建机理模型与算法模型，挖掘数据与设备状态之间的内在联系，结合运维知识库开展故障

预警、状态评估以及运维优化；同时形成“数据采集-状态分析-运维执行-性能反馈”的设备运维闭环，实现设备运维的可视化、精准化与智能化，降低运维成本，提升设备运行可靠性。

4.3.2 产线级孪生—以产线全流程最优生产为目标，融合五大核心技术特性

产线级数字孪生是设备级孪生的协同升级，针对流程型制造与离散型制造的不同痛点，以产线全要素动态映射、工序协同智能优化、生产资源动态配置、产品质量闭环追溯为技术目标，充分融合精准性、实时性、闭环性、动态性、智能性五大核心技术特性，实现产线全流程的智能化管控。

针对流程型制造生产工艺连续、物料流转工序耦合性高的特点，解决过程控制参数滞后、工艺扰动传导放大、多工段协同调控困难等问题，通过构建全流程多物理场耦合数字孪生模型与动态协同控制技术，形成产线级的虚实闭环，从单一过程的参数控制转变为整个生产过程的联动管控和协同优化，实现在安全环境下连续生产质量稳定的产品；

针对离散型制造生产工序离散、产品结构层级多的特点，解决工序衔接难度大、生产资源静态配置适配性不足、装配质量追溯碎片化等问题，通过构建产线级数字孪生模型，实现生产资源的动态配置与全工序的联动管控，从单一工序的独立管控、静态调度转变为全工序的协同管控、动态调度，优化工序衔接效率、提升生产资源利用率、缩短产品生产周期，同时保障产品装配精度与质量稳定性，实现离散生产过程的柔性化、高效化管控。

5. 结语

当前，数字孪生技术在制造业的应用已从单点场景向全流程、全生命周期延伸，但制造企业在落地实践中仍需结合自身发展实际，理性评估技术适用性与实施节奏。未来，制造企业需把握数字孪生技术的发展趋势，逐步解决技术融合、数据治理、成本控制等问题，充分挖掘技术特性与要素的协同价值，以技术目标为导向推动数字孪生技术在智能制造场景的深度落地，以技术创新驱动生产模式与管理模式变革，助力制造业向更智能、更高效、更可持续的方向发展。

参考文献

- [1]刘飞, 鄢萍, 贺德强. 智能制造模式、技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 45-89.
- [2]吴重光. 工业 4.0 与智能制造系统[J]. 控制与决策, 2018, 33 (1): 1-8.
- [3]国际标准化组织, 国际电工委员会. ISO/IEC 30173: 2023 数字孪生 — 概念与术语[S]. 日内瓦: ISO, 2023.
- [4]国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 43441.1-2023 数字孪生第 1 部分: 术语[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [5]陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其在智能制造中的应用[J]. 中国机械工程, 2017, 28 (11): 1273-1282.
- [6]刘日良, 张承瑞, 李建刚. 智能制造中的数字孪生技术体系 [J]. 制造业自动化, 2020, 42 (5): 1-5.
- [7]陶飞, 程颖, 徐文君, 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.
- [8]IEEE Standards Association. IEEE 2025 Industrial Digital Twin Maturity Model and Evaluation Method [S]. New York: IEEE, 2025.
- [9]周源, 朱胜, 孔祥泽. 数字孪生成熟度模型及其在制造企业中的应用路径[J]. 中国设备工程, 2024 (1): 18-21.
- [10]李伯虎, 柴旭东, 王鹏, 等. 智能制造的新一代建模仿真技术 —— 数字孪生[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (1): 1-18.
- [11]王爱民, 孟凡超, 唐承统. 面向产品全生命周期的数字孪生技术研究 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (2): 141-150.
- [12]张霖, 罗永亮, 陶飞, 等. 数字孪生工厂构建与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26 (1): 1-16.
- [13]李军, 赵罡, 于勇. 基于数字孪生的智能工厂构建方法[J]. 航空学报, 2020, 41 (5): 122-134.
- [14]王春喜, 梅发国, 李丽娟. 数字孪生在生产制造环节的融合应用[J]. 智能制造, 2023 (2): 30-34.
- [15]王成恩, 王颖. 数字孪生驱动的智能制造车间运行管控技术[J]. 机械工程学报, 2020, 56 (17): 1-12.