

# 数字孪生技术深度解析与行业应用报告

## 摘要

本报告深入解析了数字孪生技术的核心概念、关键技术体系、行业应用现状、发展挑战与未来趋势。数字孪生作为物理世界与数字世界的动态桥梁，通过构建物理实体的虚拟模型，并利用实时数据驱动，实现虚实交互、融合与闭环优化。报告指出，数字孪生的核心价值在于提升效率、降低成本、优化决策、促进数字化转型和驱动数字经济与实体经济的融合。

报告详细阐述了数字孪生的四大关键技术体系：数字支撑技术、数字线程技术、数字孪生体技术和人机交互技术。其中，数字线程技术和数字孪生体技术是核心，人工智能在数据分析、预测、建模增强和智能控制等方面发挥着关键作用。此外，报告还探讨了数字孪生与CAD/CAM/CAE、PLM、BIM、IoT、云计算等相关技术的关系。

报告重点分析了数字孪生在智能制造、智慧城市、智慧能源、智慧医疗等领域的应用，并列出了国内外典型案例。中国企业在数字孪生应用方面呈现出积极态势，但仍面临技术、标准、人才、安全等多重挑战。报告最后对数字孪生技术的未来发展趋势进行了展望，包括更广泛的行业应用、更高级别的智能化、更强的互联互通、更易用的平台工具、更精细实时的模型以及虚实融合的深化等。

总之，数字孪生作为一项前沿技术，正在深刻改变各行业的运作模式。本报告旨在为读者提供一个全面、深入的数字孪生技术及应用图景，为相关领域的研究、实践和决策提供参考。

## 1. 引言：数字孪生概览

### 1.1. 数字孪生的定义与核心概念

#### 1.1.1. 核心定义：物理世界与数字世界的动态桥梁

数字孪生是在数字空间中构建的物理实体或过程的动态虚拟表示，它通过数据连接实现与物理实体的实时交互和同步。

1.1.2. 关键特征

- 物理实体：存在于现实世界的对象、系统或过程。
- 虚拟模型：在数字世界中对物理实体进行精确的建模和仿真。
- 数据连接：物理实体和虚拟模型之间存在实时的双向数据流。
- 融合与闭环：通过数据与模型的集成融合，实现描述、诊断、预测、决策等功能，并反馈优化物理实体。

1.1.3. 功能架构

层级	主要作用
物理对象层	现实世界的实体，如设备、产品、生产线等。
数据采集与互联层	连接和获取物理世界数据，包括传感器、IoT设备、控制系统等。
模型构建与仿真层	创建和运行虚拟模型，包括几何模型、物理模型、行为模型等。
数据管理与分析层	存储、处理和分析数据，包括数据清洗、整合、可视化等。
业务应用层	将数字孪生能力应用于实际业务场景，如预测性维护、流程优化、决策支持等。

1.1.4. 生命周期

数字孪生虚拟实体的生命周期包括起始、设计和开发、验证与确认、部署、操作与监控、重新评估和退役，并与物理实体的生命周期相互作用。

1.2. 数字孪生的价值与意义

1.2.1. 提升效率、降低成本、优化决策

- 缩短产品开发周期：
  - 在工业产品设计过程中，可以通过在虚拟的三维数字孪生空间中进行部件修改调整、产品尺寸装配等，以及在虚拟产线中进行设计优化和问题诊断，从而大幅降低产品验证工作量和装配可行性验证成本，并显著减少迭代过程中的设备制造工作量、工期及成本。

- 数字孪生能够通过虚拟调试加快推动产品研发的低成本试错。
- 降低生产成本：
  - 对于离散型工业，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，通过精益化设计等手段有效提升生产效率,降低成本。
  - 对于流程型工业，数字孪生通过优化物料配方、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和资源利用率，降低了能耗物耗。
  - 数字孪生制造系统通过将混乱无序的生产资源进行机器间关联，然后根据算法将关联设备按订单需求进行串联，形成有序化排列，利用优化仿真进行生产预测，构建出资源分配与生产效益之间的定性映射数学模型，最终形成有序化资源能源配置。
- 减少设备停机时间：
  - 数字孪生可以将仿真技术与大数据技术结合，不仅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。
  - 通过数字孪生提供物理实体的实时虚拟化映射，利用设备传感器输入的实时数据和环境数据，可以在设备出现状况前提前进行预测，以便在预定停机时间内更换磨损部件，避免意外停机。
- 优化资源配置：
  - 数字孪生制造系统通过将混乱无序的生产资源进行机器间关联,形成有序化排列,利用优化仿真进行生产预测。
  - 实现不同产品生产过程的资源能源优化是数字孪生制造系统的研究热点。
- 提升决策的准确性和效率：
  - 数字孪生通过提供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。
  - 基于既有海量数据信息，通过数据可视化建立一系列业务决策模型，能够实现对当前状态的评估、对过去发生问题的诊断，以及对未来趋势的预测，为业务决策提供全面、精准的依据，形成“感知—预测—行动”的智能决策支持系统。

### 1.2.2. 促进数字化转型与智能升级

- 实现物理世界与数字世界的深度融合：
  - 数字孪生通过构建物理实体在虚拟世界的精准映射，打破了物理世界和数字世界之间的壁垒，实现了两大世界的深度融合与互动。
- 推动企业从传统模式向智能化、数字化转型：

- 数字孪生作为一种前沿技术创新，可以帮助企业探索新的产品设计、生产方式和服务模式。
- 提升企业的核心竞争力：
  - 企业采用数字孪生技术也是响应国家战略、提升自身竞争力的重要举措。

### 1.2.3. 驱动数字经济与实体经济融合

- 为数字经济发展提供新的动力和引擎：
  - 用户对产品和服务的个性化、智能化需求不断提高，数字孪生技术与各行各业的深度融合可以更好地满足这些需求, 提供更优质的产品和服务。
- 促进实体经济的创新和升级：
  - 数字孪生作为一种前沿技术创新，可以帮助企业探索新的产品设计、生产方式和服务模式。

## 2. 数字孪生的关键技术体系

### 2.1. 核心技术领域

#### 2.1.1. 建模与仿真技术：构建高保真虚拟模型

- 数字孪生的核心在于创建物理实体在虚拟空间中的精确映射，形成“数字双胞胎”。
- 利用建模技术建立物理对象的虚拟模型 (如使用CAD软件构建精确的几何模型)。
- 融入物理规律和机理，通过仿真技术来计算、分析和预测物理对象的未来状态。
  - 仿真技术对于诊断问题、预测系统性能和优化操作至关重要。
- 工业数字孪生的本质内涵包括数据与模型、模型与模型的集成融合，特别是仿真建模与数据科学的集成优化将成为未来的发展主线。
- 模型融合：涉及多物理场仿真、模型降阶、多尺度建模、机理模型驱动的深度学习以及模型修正等技术。
- 数据驱动的建模：利用机器学习和深度学习等人工智能方法, 直接从历史数据中学习。
- 模型降阶技术：用复杂度较低的模型近似高精度的原始模型。

### 2.1.2. 数据采集与管理技术：实时数据驱动与融合

- 数字孪生需要全面获取物理对象的数据, 包括利用各种传感器实时采集物理实体的状态数据 (如温度、振动、载荷等)。
- 涉及物联网 (IoT) 等技术, 以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。
- 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。
- 对采集到的多源异构数据进行整合、清洗、分类、编码、加标签和压缩等处理, 并建立时空数据库等数据基础设施。
- 通过 RFID 标签、二维码、传感器等技术识别物体及其位置, 利用 4G/5G 等网络上传数据到云平台。

### 2.1.3. 连接与互操作技术：数据无缝流转与集成

- 数字孪生的一个典型特征是互操作性, 即物理对象和数字空间能够双向映射、动态交互和实时连接。
- 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。
- 实现不同系统之间的互联互通互操作仍然是数字孪生面临的挑战。
- 工业互联网平台的建设是实现互联互通的重要支撑。

### 2.1.4. 可视化与人机交互技术：沉浸式体验与操作

- 数字孪生需要将虚拟实体实时动态映射物理实体的状态, 并通过虚拟/增强/混合现实 (VR/AR/MR) 等技术提供沉浸式体验。
- 自主研发的渲染引擎对于实现场景级实时修改至关重要, 可以大幅提升数字孪生的交互性和实时性。
- 人机交互是用户和数字孪生系统之间的交互, 使用者可以通过数字孪生系统迅速掌握物理系统的特性和实时性能, 并便捷地向系统下达指令。
- 支持大体量模型轻量化, 实现模型库、服务库与应用的快速组装。
- 实现对实时监控视频与三维模型配准融合, 生成大范围三维全景动态监控画面。
- 支持多种模型格式的大场景、海量、大体量数据的高逼真渲染。

### 2.1.5. 人工智能与分析技术：智能化决策与优化

- 人工智能 (AI) 是推动数字孪生技术不断完善的关键驱动力之一。
- AI技术被广泛应用于数字孪生中的数据分析、预测、优化和智能决策。
  - 例如，利用AI算法处理和分析大量数据，揭示其中的模式和关联。
  - 利用AI算法优化产品几何设计，产生多种设计选项。
  - AI技术也用于强化数字孪生预测建模能力，基于实时数据持续修正模型参数
- 仿真建模与数据科学的集成优化也是未来发展的主线。
- 智能诊断与预测。
- 知识图谱的构建和应用

### 2.1.6. 底层支撑技术：算力、网络、平台支撑

- 数字孪生的实施和发展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。
- 工业互联网平台可以作为数字孪生开发的重要方法，实现与IoT数据的有效结合。
- 云计算、边缘计算以及新一代通信技术 (如5G) 也为数字孪生技术的应用提供基础技术支撑，实现更好的交互体验和实时数据交互。
- 需要强大的计算设备和硬件发展作为支撑。

## 2.2. 工业数字孪生四大技术体系 (基于《工业数字孪生白皮书 2021.pdf》)

### 2.2.1. 数字支撑技术：数据获取、传输、计算、管理基石

- 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。

技术类型	描述
------	----

采集感知	传感器创新（微型化、嵌入式）、多传感融合。
------	-----------------------

执行控制	将数字孪生的决策反馈到物理实体进行控制。
------	----------------------



技术类型	描述
新一代通讯	如 5G 等，为数字孪生技术的应用提供基础技术支撑，实现海量设备通信和高可靠低延时的实时数据交互。
新一代计算	包括云计算、边缘计算和超计算等。边缘计算能够实现存算管一体和云边协同。
数据模型管理	用于对数字孪生中涉及的各种数据模型进行管理。

2.2.2. 数字线程技术：数据与模型无缝集成核心

- 数字孪生技术体系中最为核心的关键技术。
- 能够屏蔽不同类型的数据和模型格式，支持全类别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。
  - 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。
  - 逆向数字线程技术。

2.2.3. 数字孪生体技术：物理实体虚拟空间精确映射

- 也是核心技术。
- 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”。
- 其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。
- 涉及建模 (Modeling) 和 仿真 (Simulation)。
  - 建模是建立物理实体虚拟映像的过程。
  - 仿真则是基于模型进行分析和预测。

2.2.4. 人机交互技术：用户与系统高效互动桥梁

- 实现用户和数字孪生系统之间的交互。
- 数字孪生的交互包括物理-物理、虚拟-虚拟、物理-虚拟、人机交互等交互方式。
- 虚拟/增强/混合现实 (VR/AR/MR) 等 3R 技术是人机交互的重要组成部分。
- 使用者可以通过数字孪生系统迅速掌握物理系统的特性和实时性能，识别异常情况，获得分析决策的数据支持，并能便捷地向数字孪生系统下达指令。

## 2.3. 人工智能在数字孪生中的作用

- 人工智能是推动数字孪生不断完善的关键驱动力之一。
- 人工智能技术被广泛应用于数字孪生中的数据分析，预测，优化和智能决策。

### 2.3.1. 数据分析与模式识别：从海量数据中挖掘价值

- 人工智能算法，如机器学习和深度学习，能够处理和分析这些庞大的数据，揭示隐藏在其中的模式、关联性和趋势。
- 这有助于更深入地理解物理实体的运行状态和潜在规律。

### 2.3.2. 预测与诊断：实现状态预警与故障诊断

- 基于历史数据和实时数据，人工智能模型可以预测物理实体的未来状态、性能和潜在故障。
- 在制造业中，数字孪生可以通过对生产流程的模拟分析，利用人工智能预测设备故障并提前进行维护。
- 在医疗领域，人工智能可以帮助分析数字孪生人体器官的功能数据，更好地理解疾病的影响并辅助制定治疗方案。

### 2.3.3. 决策支持与优化：辅助智能决策与流程优化

- 数字孪生通过提供对物理世界的深入洞察和预测能力，最终服务于决策者。
- 人工智能技术可以构建智能决策模型，基于数字孪生提供的数据和分析结果，为业务决策提供依据，实现状态评估、问题诊断和未来趋势预测。
- 例如，在城市规划中，人工智能可以分析数字孪生城市的数据，优化交通流量和资源配置。在能源管理中，人工智能可以实时监测和优化能源系统的运行，降低能耗。
- 三维空间分析技术、动态单体仿真技术、空间流体分析、事件处置流程仿真技术等智能决策技术。

### 2.3.4. 仿真与建模增强：提升模型精度与效率

- 传统的数字孪生建模可能依赖于物理规律和专家知识。人工智能，特别是机器学习和深度学习，可以作为一种数据驱动的建模方法，将历史数据转化为物理模型的替代，或者优化现有的机理模型。



- 多模型融合技术也常借助人工智能方法将不同类型的模型进行关联和集成融合。
- 模型降阶：
  - 机理模型驱动的深度学习。这种方法可以利用已有的物理知识（机理模型）来指导深度学习模型的训练，从而在降阶的同时，保持模型一定的物理可解释性。
  - 数据驱动的降阶。

### 2.3.5. 人机交互智能化：提升用户体验与协同

- 为了更好地与数字孪生进行交互和协同，虚拟现实 (VR)、增强现实 (AR) 和混合现实 (MR) 等技术被应用。
- 人工智能可以增强这些沉浸式体验，例如，通过自然语言处理理解用户的指令，或者通过智能识别技术增强用户在虚拟环境中的交互能力。

### 2.3.6. 智能控制与自治：实现闭环优化与自主运行

- 在工业互联网等场景下，数字孪生不仅用于监控和分析，还可能参与到物理实体的控制过程中。
- 人工智能算法可以根据数字孪生提供的实时信息和预测结果，自主地调整控制策略，实现闭环优化。
- 虚拟实体通过仿真验证控制效果, 根据产生的洞察反馈至物理资产和数字流程, 形成数字孪生的落地闭环。

## 2.4 人工智能技术在数字孪生中的应用

不同的AI技术与算法在数字孪生领域有着广泛的应用，显著提升了数字孪生系统的智能化水平和应用能力。

### 2.4.1 数据分析与预测

- **机器学习 (Machine Learning) 和深度学习 (Deep Learning):**
  - 处理和分析来自传感器、仿真模型、业务系统等多源数据。
  - 实现故障诊断、预测性维护（预测设备故障）、预测系统性能、需求预测（如能源需求）。
- **时序预测算法：** 分析时间序列数据，预测设备未来状态或城市交通流量。
- **迁移学习：** 提升新资产设计效率，加快模型开发，保证虚实映射。

- **在线机器学习：** 基于实时数据持续完善数据模型精度。

### 2.4.2 模型构建与优化

- **AI驱动的建模方法：** 从历史数据中学习物理实体或过程的运行规律，构建仿真模型（如基于深度学习的机理模型构建）。
- **AI算法优化机理模型：**
  - 分析实际数据，识别和修正模型不足。
  - 调整模型参数，更准确反映物理实体行为。
  - 数据科学优化机理模型性能。
- **生成式设计技术：** 结合AI提升产品几何设计效率，优化零部件设计，产生多种设计选项。
- **多模型融合：** AI学习模型间映射关系，动态调整模型权重，构建更全面的仿真模型。

### 2.4.3 智能决策与优化

- **支持智能决策：** AI分析模型和数据，提供洞察和预测，优化生产计划、资源分配、能源管理。
- **智能城市应用：** AI处理城市信息模型，实现智能管理决策（如优化交通信号灯控制）。
- **智能优化算法：** 应用于生产过程优化、物流优化等。
- **知识图谱 (Knowledge Graph)：** 构建对象间逻辑关系，提供搜索和知识发现，辅助决策。

### 2.4.4 仿真与分析

- **AI与仿真技术集成：** 构建更精准映射的数字孪生（如达索收购Proxim）。
- **智能化信息分析：** AI模型和算法结合可视化技术，实现智能分析和辅助决策，监测物理实体指标，自动化运行模型算法。
- **神经网络：** 处理复杂系统数据中的复杂模式和不确定性，构建更鲁棒的仿真模型。

### 2.4.5 人机交互增强

- 结合 **虚拟现实 (VR)** 和 **增强现实 (AR)** 技术，AI提升数字孪生人机交互效果，提供更直观、沉浸式体验。

### 2.4.6 具体应用案例中AI技术的应用

- **智慧城市：**
  - AI算法分析碳排放数据，支持碳排放规划。
  - AI处理城市信息模型，实现智能管理决策。
- **智能制造：**
  - AI算法优化产品几何设计。
  - 知识图谱和机器学习优化装配工艺。
- **智慧能源：**
  - AI智能匹配最佳算法，自动执行数据准备、分析、融合，进行深度知识挖掘，生成服务。
- **产品远程运维：** AI分析与IoT实时数据结合，进行远程运维。
- **遥感影像解译：** 内置插件式AI组件（深度学习算法框架），用于遥感影像分析。
- **起重机安全：** 基于小波神经网络进行部件疲劳分析，基于智能混合算法进行故障诊断与检测。

## 2.5. 数字孪生与相关技术

### 2.5.1. CAX (CAD, CAM, CAE)：建模、设计、仿真基础

- **CAD (计算机辅助设计)：**
  - 数字孪生建模技术的关键组成部分。
  - 通过参数化建模等方法，使用如SolidWorks、CATIA和Creo等软件，直接构建物理实体的精确数字模型，实现对几何形状和尺寸的精确控制。
  - 这些CAD软件的核心技术和算法主要由Dassault Systèmes和PTC等公司掌握。
  - 在数字孪生的发展范式中，正向和逆向设计都依赖于CAD来构建数字化形状。

- CAM (计算机辅助制造):
  - 数字孪生在制造业的应用旨在优化包括设计、工程、制造在内的整个生产过程。
  - CAM作为制造环节的关键技术，其数据和模型可以被集成到数字孪生中，以实现生产过程的虚拟仿真、优化和监控。
- CAE (计算机辅助工程):
  - 数字孪生的重要组成部分，尤其在仿真技术方面。
  - 涵盖了有限元分析（FEA）、多物理场耦合和实时仿真等方法，利用ANSYS、ABAQUS和COMSOL等软件包来模拟物理实体的行为。
  - 数字孪生建模通常基于仿真技术，CAE软件能够对产品研发进行仿真，并应用于虚拟制造，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。
  - ANSYS等CAE软件还可以与物联网平台和数字孪生平台进行数据访问和协同。
  - 中国CAE软件市场目前主要被外资产品占据。

### 2.5.2. PLM: 产品全生命周期数据管理

- PLM (产品生命周期管理):
  - PLM系统如西门子的Teamcenter、达索的ENOVIA和PTC的Windchill等，在数字孪生的构建和应用中扮演着重要角色。
  - PLM系统用于管理产品从设计、制造到运维等全生命周期的数据和信息。
  - 数字孪生可以集成PLM系统中的数据，形成对产品的全方位数字化描述，实现从产品全生命周期管理到资产健康的软件解决方案组合。
  - 例如，西门子基于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。
  - 达索也构建云化平台整合业务能力，将ERP、MES等软件与设计、仿真、PLM工具集成整合，构建全生命周期服务。

### 2.5.3. BIM: 建筑信息模型，智慧城市基石

- BIM (建筑信息模型):
  - 一种应用于建筑项目的设计、建造和运维过程中管理建筑和基础设施信息的3D建模技术。

- 它是数字孪生在智慧城市和智慧建筑领域的重要基础。
- 通过整合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，并借助人工智能技术进行深度建模分析，数字孪生技术实现了对医疗机构物理空间的数字化转化，形成了医院孪生模型，其中就融合了BIM和CIM等辅助技术。
- 在建筑行业，BIM模型可以作为数字孪生的理想基础，通过合并实时数据进行实时分析，支持设施的整个生命周期。
- 国内建筑信息化模型（BIM）软件市场仍以国外厂商为主导，但本土软件厂商也在积极发展。

#### 2.5.4. 物联网 (IoT): 数据采集与实时感知

- 物联网 (IoT) 技术:
  - 在数字孪生应用中扮演着连接物理世界和数字世界的桥梁的角色。
  - 通过各种传感器、设备和网络，实时采集物理实体的数据，并将这些数据传输到数字孪生系统中，为虚拟模型的更新和仿真提供数据基础。
  - 数字孪生依赖于跨一系列维度的大规模、累积、实时、真实世界的测量。

#### 2.5.5. 云计算与边缘计算: 提供算力与数据处理能力

- 云计算、边缘计算以及新一代通信技术 (如5G):
  - 为数字孪生技术的应用提供基础技术支撑，实现更好的交互体验和实时数据交互。
  - 云计算提供数字孪生所需的强大计算能力。
  - 边缘计算可以将计算能力推向网络边缘, 实现存算管一体和云边协同。
  - 5G等技术，为数字孪生技术的应用提供基础技术支撑，实现海量的设备通信和高可靠低延时的实时数据交互。

## 3. 数字孪生的行业应用与实践

### 3.1. 工业数字孪生应用实例

- 产品设计与研发：虚拟验证、加速迭代、提升效率
  - 在虚拟的三维数字孪生空间中进行部件修改、尺寸装配、设计优化和问题诊断。
  - 通过虚拟调试实现低成本试错。
  - 基于产品原型库和设计机理库建立虚拟模型。
- 生产制造过程优化：产线优化、资源配置、故障预测
  - 在高度集成化的工业生产线设计中，基于数字孪生进行优化协调。
  - 数字孪生制造系统通过机器间关联，形成有序化资源能源配置。
  - 在虚拟空间中进行设备诊断、化学过程模拟和结果预测。
- 设备运维与管理：预测性维护、生命周期管理、远程运维
  - 结合仿真技术与大数据技术，实现故障预测和定位。
  - 构建设备生命周期管理系统，建立全厂级设备台账。
  - 构建运维监视中心，包括视频监控和生产看板。
- 虚拟培训与智能决策支持
  - 建立虚拟培训模式，利用仿真技术对车间设备建模。
  - 提供深入的洞察和预测能力反馈给决策者。
  - 基于海量数据，通过数据可视化建立业务决策模型。

### 3.2. 典型行业应用领域

- 智能制造：精益生产、质量提升、柔性制造
  - 广汽三菱的物流配送优化
  - 钢铁行业的质量大数据系统
  - 智能复合工艺产线
  - 医药制造数字化工厂
- 智慧城市：城市规划、交通优化、公共安全
  - 智慧滨海城市数字大脑
  - 雄安新区面向智能城市的数字孪生框架体系
  - 南京市江北新区CBD智慧城市指挥中心
  - 深圳市智慧海绵管理系统



- 数智花果园项目
- 智慧能源：电厂优化、管网监控、新能源管理
  - 智慧火电厂
  - 能源介质智能管理平台
  - 智能热电管理系统
  - 管道数字孪生
- 智慧医疗：精准医疗、健康管理、远程医疗
  - 疾病理解和治疗方案制定
  - 健康监测与管理
  - 远程医疗
- 其他行业：航空航天、建筑、交通运输等
  - 数字汽车风洞技术研究
  - 高铁列车运行优化
  - 数字孪生自动驾驶测试系统
  - 三维数字铁路
  - 基于BIM的数字孪生建筑应用

### 3.3. 中国企业数字孪生应用与价值评估

#### 3.3.1. 不同行业与规模企业的应用侧重

行业/企业类型	应用侧重
流程行业大型企业（恒力石化、中广核）	优化生产工艺、提高资源利用效率、降低能耗物耗、环保检测预警。
工业自动化企业（华龙迅达）	将数字孪生融入产品和服务，提供智能解决方案（状态监测、故障预测、远程维护）。
汽车行业企业	研发验证、运行状态监测、故障诊断、虚拟仿真测试（自动驾驶）。
科技型企业 and 解决方案提供商	技术研发和应用，提供解决方案和平台（智慧城市）。
工程建设领域和基础设施运营商	管道运行管理、风险预测、设备诊断、事故应急、全生命周期管理。
智慧城市建设相关单位	城市规划、建设、管理，智能城市建设。

### 3.3.2. 中国企业评估数字孪生价值的方式

- 提升效率和降低成本： 减少研发迭代、缩短上市时间、降低停机风险、优化资源配置、减少能耗和人工成本。
- 提高产品质量和可靠性： 精益化设计、智能化制造、智能维护、精准预测。
- 优化运营管理和决策： 实时映射、数据分析、预测趋势、明智决策。
- 实现创新和新业务模式： 探索新产品设计、生产方式、服务模式。
- 提升安全性和风险管理能力： 模拟危险场景、安全预警、应急预案。
- 满足用户需求： 个性化、智能化需求。
- 响应政策和标准： 响应国家战略、提升竞争力。

### 3.3.3. 国内主流数字孪生厂商及解决方案案例 (简述)

厂商	主要解决方案/产品	应用领域
AVEVA	统一工程、统一运营中心、资产绩效管理	化工、能源等流程行业
Altair	Altair Activate	汽车、消费电子、航空航天等
Bentley	iTwin Platform	数字城市、制造、发电等
Dassault Systemes	3DEXPERIENCE 平台	航空航天与国防、工业设备、生命科学与医疗保健等
GE Digital	Predix 平台	航空、电力、油气、制造业等
Microsoft	Azure IoT、Azure Digital Twins	制造业、楼宇、医疗等
PTC	Creo、Windchill PLM	柔性制造
华力创通	基于数字孪生体的数字工程解决方案	国防军工、科研院所等
寄云科技	基于数据智能的数字孪生开发方案	电力、高端制造等
51WORLD	通用数字孪生平台	
华龙迅达		烟草，汽车等
其他	触角科技、精航伟泰、卡奥斯、力控科技、美云智数、摩尔元数、木棉树软件、同元软控、优也科技、优诺科技、易知微、子虔科技等	

## 4. 中国数字孪生行业发展分析

### 4.1. 中国数字孪生行业发展现状与进展

- 智慧工业领域的应用与创新
  - 全生命周期管理应用。
  - 生产效率和效能提升。
  - 设备故障预测与维护。
  - 虚拟工厂建设。
  - 装配环节优化。
- 智慧城市领域的应用与探索
  - 城市规划与管理。
  - 精细化管理与决策。
  - 智慧交通。
  - 智慧海绵城市建设。
- 自动驾驶测试领域的应用与突破
  - 虚拟仿真测试。
  - 提高测试效率和降低成本。
  - 解决测试难题。
- 智慧医疗等新兴领域的应用拓展
  - 疾病理解和治疗方案制定。
  - 健康监测与管理。
  - 远程医疗。
- 政策标准与研究机构的推动
  - 形成政策框架，将数字孪生视为重要技术手段。
  - 积极开展相关标准研究和制定。
- 标准化工作的推进与不足
  - 积极推进，但具体应用标准仍不足。

### 4.2. 中国数字孪生行业发展挑战

- 与国外先进水平差距与应用深度不足
  - 缺乏基于复杂机理建模的深入应用。
- 缺乏统一标准体系与行业规范

- 阻碍技术规模化复制推广。
- 多系统融合与互联互通挑战
  - OT与IT融合仍是核心问题，数据孤岛、数据关联性不明确。
- 数据相关问题：一致性、共享、歧义
  - 多维度、多尺度数据采集的一致性较难实现。
  - 数据分享的挑战。
  - 数据歧义。
- 模型构建与仿真挑战：精度、机理模型
  - 难以建立精确数理模型，可解释性不足。
- 交互与协同挑战：人机交互技术融合
  - 如何将虚拟/增强/混合现实等以沉浸式体验为特征的人机交互技术结合到数字孪生架构中。
- 知识库建设与商业价值不确定性
  - 各类知识库之间存在孤立的情况。
  - 基础知识库作为公共资源与个别团体知识产权之间存在利益冲突。
- 安全相关挑战：网络安全、数据安全
  - 面临网络安全挑战，包括数据传输与存储安全以及网络攻击等问题。
- 政策体系与产业生态待完善
  - 标准化工作处于起步阶段，涉及领域众多，工作协调难度大。
  - 优质行业企业与数字孪生头部企业协同创新不足。
- 人才培养挑战：复合型人才匮乏
  - 需要培养数字孪生标准化研究相关的专业人才。
  - 缺乏具备数字孪生与其他领域知识储备的交叉复合型人才。
- 可靠性测试与验证挑战
  - 如何有效地融合仿真数据与物理试验数据进行整体评价。
  - 在不完全物理模拟的场景下如何检验和修正数字孪生模型的准确性。
  - 如何利用数字孪生实现产品可靠性增长。

## 5. 未来展望与发展趋势

### 5.1. 数字孪生技术发展趋势

- 更广泛的行业应用与渗透
  - 数字孪生将渗透到更多行业和领域。
- 更高级别的智能化与自主化
  - 人工智能和机器学习将更深入地集成到数字孪生中。
- 更强的互联互通与数据生态
  - 数字孪生系统之间的互联互通将更加顺畅。
- 更易用普及的平台与工具
  - 数字孪生平台的开发将更加注重用户友好性。
- 更精细实时的高保真模型
  - 数字孪生模型将更加精细化和实时化。
- 虚实融合的深化与沉浸体验
  - AR/VR/MR等技术将更广泛地应用于数字孪生的可视化和交互。
- 标准化规范化体系逐步建立
  - 行业将逐步形成更完善的数字孪生标准和规范。
- 数据安全与隐私保护日益重要
  - 数字孪生系统的数据安全和隐私保护将得到更多重视。

### 5.2. 数字孪生面临的挑战与应对策略

- 技术层面挑战与突破方向
  - 持续研发，攻克关键技术难题。
- 标准规范制定与行业协同
  - 加快标准制定，推动行业协同。
- 人才培养与生态建设
  - 加强人才培养，构建完善的产业生态。
- 商业模式创新与价值实现
  - 探索新的商业模式，实现数字孪生技术的商业价值。

## 6. 附录

### 6.1. 数字孪生关键术语 Glossary

术语 (中文)	术语 (英文)	定义 (中文)
数字孪生	Digital Twin	物理实体、系统、过程或服务的动态数字表示，通过数据连接实现与现实世界实体的实时交互和同步。
物理实体	Physical Entity	存在于现实世界的具体对象、设备、资产、系统或过程。
虚拟模型	Virtual Model	在数字空间中创建的对物理实体的精确数字化描述和表示，包括其几何、物理、行为等特性。
数据连接	Data Connectivity	物理实体和虚拟模型之间建立的实时或近实时的信息数据流动通道，通常是双向的。
模型构建	Model Building	创建数字孪生虚拟模型的过程，涉及几何建模、物理建模、行为建模和数据建模等。
仿真	Simulation	利用虚拟模型在数字空间中模拟物理实体在不同条件下的行为和性能，用于预测、分析和优化。
物联网	Internet of Things (IoT)	通过网络连接物理设备、车辆、建筑物和其他物品，使其能够收集和交换数据。在数字孪生中，IoT 提供数据采集和实时感知能力。
人工智能	Artificial Intelligence (AI)	使计算机能够模拟人类智能的功能的技术，如学习、推理、问题解决等。在数字孪生中，AI 可用于数据分析、模型优化和智能决策。
智慧城市	Smart City	利用信息技术和通信技术来提高城市运行效率、改善居民生活质量的城市发展理念和实践。数字孪生是智慧城市建设的重要组成部分。
预测性维护	Predictive Maintenance	基于设备状态监测和数据分析，预测设备可能发生的故障，并在故障发生前采取维护措施，以减少意外停机和维护成本。数字孪生为此提供强大的数据分析和仿真能力。
BIM	Building Information Modeling	一种包含建筑物完整生命周期信息的数字化模型技术，常用于建筑和工程领域。BIM 模型可以作为数字孪生建筑的基础。
数字主线	Digital Thread	在整个产品或资产生命周期内，连接不同信息系统和数据孤岛的集成化数据框架，实现数据的无缝流动和共享。数字孪生是数字主线的重要载体。
边缘计算	Edge Computing	将计算和数据存储推向网络边缘，靠近数据源，以减少延迟、节省带宽并提高响应速度。在数字孪生中，边缘计算可以处理来自物理实体的实时数据。



术语 (中文)	术语 (英文)	定义 (中文)
增强现实/ 虚拟现实/ 混合现实	AR/VR/MR	将虚拟信息叠加到现实世界（AR），创造完全沉浸式的虚拟体验（VR），或将虚拟和现实环境融合在一起（MR）的技术。在数字孪生中，这些技术可用于可视化和人机交互。

## 6.2. 数字孪生知识测验与答案

题号	问题	答案
1	请简述数字孪生的核心定义，并概括其至少两个关键特征。	数字孪生是物理实体或过程在数字空间中的动态虚拟表示。其关键特征包括物理实体与虚拟模型之间的实时数据连接，以及通过数据与模型的融合实现分析、预测和优化，并反馈给物理实体。
2	工业数字孪生的功能架构通常包含哪些主要层级？每一层级的主要作用是什么？	工业数字孪生的功能架构通常包含：物理对象层（现实世界的实体），数据采集与互联层（连接和获取物理世界数据），模型构建与仿真层（创建和运行虚拟模型），数据管理与分析层（存储、处理和分析数据），以及业务应用层（将数字孪生能力应用于实际业务场景）。
3	列举三个在中国数字孪生行业中具有代表性的厂商，并简要说明其主要解决方案和应用领域。	AVEVA 提供工厂设计等解决方案，应用于化工等流程行业；Bentley 的 iTwin Platform 用于数字城市等领域；华力创通提供基于数字孪生体的数字工程解决方案，服务于国防军工等。
4	在数字孪生的生命周期中，虚拟实体与物理实体之间存在怎样的相互作用？	在数字孪生的生命周期中，虚拟实体与物理实体通过持续的数据流进行相互作用。物理实体产生的数据驱动虚拟模型的运行和更新，而虚拟模型的分析、预测和优化结果则可以反馈给物理实体，指导其运行、维护和改进。
5	数字孪生在智能制造领域有哪些典型的应用场景？请列举至少两个。	数字孪生在智能制造领域的典型应用场景包括：产品设计和仿真验证；设备维护和故障预测。
6	构建一个有效的数字孪生系统，数据集成和管理的重要性体现在哪些方面？	数据集成和管理在构建数字孪生系统中至关重要，因为它提供了模型运行和分析所需的基础信息，保证了数据的质量和一致性，并实现了跨系统的数据共享和利用。

题号	问题	答案
7	请解释物联网 (IoT) 技术在数字孪生应用中的作用。	物联网 (IoT) 技术在数字孪生应用中扮演着连接物理世界和数字世界的桥梁的角色。它通过各种传感器、设备和网络，实时采集物理实体的数据，并将这些数据传输到数字孪生系统中。
8	智慧城市是数字孪生的重要应用领域，请举例说明数字孪生在智慧城市管理中的一个具体应用。	在智慧城市管理中，数字孪生可以应用于城市交通管理。例如，通过构建城市道路、车辆和交通流的数字孪生模型，可以实时监测交通状况、进行交通流量预测、优化信号灯控制策略。
9	在实施数字孪生解决方案时，企业可能会面临哪些主要的挑战？	企业在实施数字孪生解决方案时可能面临的主要挑战包括：不同系统和数据源之间的互操作性问题，构建高精度和实时性虚拟模型的难度，整合和应用复杂技术的挑战，缺乏具备相关技能的专业人才，以及缺乏统一的行业标准和规范。
10	结合至少一个案例，简要说明数字孪生技术如何为企业带来价值或解决实际问题。	以智能热电管理系统数字孪生应用为例，通过建立数字孪生体，系统可以实时跟踪能源需求和价格变化，自动生成最优决策，并快速发现用能异常，从而降低综合能源成本，提高生产效率。

### 6.3. 重点案例分析 (精简版)

案例名称	行业	应用场景	关键技术	成效/价值
智能复合工艺产线数字孪生应用	制造业	复合材料生产过程监控、优化	多物理场仿真、实时数据采集、机器学习	提高生产效率、降低废品率、优化工艺参数
钢铁行业质量大数据系统数字孪生应用	制造业	钢材质量预测、缺陷分析、工艺优化	大数据分析、机器学习、可视化	提高产品质量、降低生产成本、缩短交货期
智能热电管理系统数字孪生应用	能源	热电联产系统运行优化、负荷预测、异常诊断	模型预测控制、优化算法、实时数据分析	降低能源消耗、提高运行效率、减少排放
智慧滨海城市数字大脑	智慧城市	城市运行监测、交通管理、公共安全、环境治理	数据融合、可视化、仿真模拟、人工智能	提升城市管理效率、改善公共服务、优化资源配置

案例名称	行业	应用场景	关键技术	成效/价值
雄安新区数字孪生框架体系	智慧城市	城市规划、建设、管理	BIM、GIS、物联网、云计算	实现城市全要素数字化、智能化管理
南京江北新区CBD智慧城市指挥中心	智慧城市	城市运行监测、应急响应、决策支持	数据可视化、大数据分析、人工智能	提高城市管理效率、增强应急响应能力
深圳市智慧海绵管理系统	智慧城市	城市内涝监测、预警、排水系统优化	水文模型、水力模型、实时数据采集、可视化	降低城市内涝风险、提升排水系统效率
数智花果园项目	智慧城市	城市更新、社区管理、公共服务	BIM、GIS、物联网、大数据分析	提升社区管理水平、改善居民生活体验
数字孪生驱动的列车运行系统	交通运输	列车运行状态监测、故障诊断、预测性维护	传感器、数据分析、机器学习、仿真	提高列车运行安全性、可靠性，降低维护成本
自动驾驶数字孪生测试评价系统	交通运输	自动驾驶车辆行为测试、安全评估、算法优化	场景仿真、传感器模拟、行为预测、虚拟测试	加速自动驾驶技术研发、降低测试成本、提高测试安全性
三维数字铁路	交通运输	铁路规划、设计、建设、运维	BIM、GIS、三维建模、仿真	提高铁路建设效率、降低成本、优化运营维护
智慧交通数字孪生应用	交通运输	交通流量预测、信号控制优化、拥堵预警	数据采集、交通模型、仿真、人工智能	缓解交通拥堵、提高道路通行效率、减少交通事故
管道数字孪生系统	能源	管道运行状态监测、泄漏检测、风险评估、维护计划优化	传感器、数据分析、水力/热力模型、机器学习	提高管道运行安全性、可靠性，降低维护成本，延长管道寿命

案例名称	行业	应用场景	关键技术	成效/价值
廊坊电厂数字孪生热电厂	能源	电厂设备监控、运行优化、故障诊断、虚拟巡检	三维建模、实时数据采集、仿真、VR/AR	提高电厂运行效率、降低能耗、减少排放、提升安全性
51VR 智慧楼宇运营管理平台	建筑	楼宇设备监控、能耗管理、空间管理、安全管理	BIM、IoT、数据分析、可视化	降低楼宇运营成本、提升管理效率、改善用户体验
基于 BIM 的数字孪生建筑应用	建筑	建筑设计、施工管理、运营维护、能耗分析	BIM、传感器、数据分析、仿真	提高建筑设计质量、优化施工流程、降低运营成本、提升建筑性能
基于数字孪生的社区居家健康管理	医疗健康	居民健康监测、疾病预警、个性化健康指导、远程医疗	可穿戴设备、健康数据分析、人工智能、远程通信	提升居民健康水平、降低医疗成本、改善医疗服务体验

### 6.3 数字线程技术 (Digital Thread)

数字线程技术是工业数字孪生技术体系中最为核心的关键技术之一。它旨在屏蔽不同类型的数据和模型格式，支持全类别数据和模型快速流转和无缝集成。

#### 核心作用

- 实现不同来源、不同格式的数据和模型之间的有效连接和融合。
- 构建全面、实时的数字孪生，连接市场数据、研发数据、生产数据、运营数据等多种类型数据，以及几何模型、仿真模型、业务模型、数据模型等。

#### 数据和模型集成

- 集成物理对象的全生命周期数据。
- 打通各种异构的研发工具接口和研发模型标准。
- 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。

## 双向性

- 支持物理实体和数字实体之间以及数字实体之间的互动。
- 物联网实现物理对象和数字对象之间的互动，数字线程实现数字对象之间的互动。

## 核心机制

- 能够实现多视图模型数据融合的机制或引擎是数字线程技术的核心。
- 数字线程需要在不同数字模型之间转换、合并和建立“表达”等同性，实现数据同步和融通联动。

## 类型

- 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。
  - 为后期全量数据的快速流转和无缝集成奠定基础。
- 逆向数字线程技术：（资料中未详细展开，但从定义上可以推断，是指将物理实体产生的数据反馈到数字模型，更新和校准模型。）

总结：数字线程技术是构建和应用工业数字孪生的基石。它连接和整合各种数据和模型，使得数字孪生能够准确反映物理实体的状态和行为，为分析、预测和决策提供可靠数据基础。缺乏有效的数字线程技术，将难以充分发挥数字孪生的潜力。

## 6.5 动力学在数字孪生中的应用

动力学在数字孪生领域有着重要的应用，主要体现在模拟物理实体的运动、受力以及随时间变化的物理行为，从而实现分析、预测和优化。其具体应用如下。

- 设备运行状态分析与预测：
  - 模拟生产线的运作。
  - 模拟设备运动部件、受力情况、振动特性。
  - 分析起重机在不同载荷和工况下的动力学行为。
  - 监测关键部件的应力、形变等动力学参数。
  - 预测设备故障并提前维护。

- 产品设计与仿真验证：
  - 创建产品虚拟模型。
  - 动力学仿真分析产品在实际使用中可能遇到的动态载荷和运动。
  - 测试产品性能和可靠性。
  - 模拟汽车在不同环境下的行驶过程（车辆动力学模型和环境动态交互）。
- 工艺流程优化：
  - 工业生产线设计中，优化各设备协调。
  - 动力学仿真分析物料输送、机器人运动轨迹，优化流程，提升效率。
- 自动驾驶测试与评估：
  - 构建虚拟交通环境。
  - 模拟车辆动态行为以及与其他交通参与者交互。
  - 动力学模型是虚拟车辆仿真的核心（加速、制动、转向等）。
  - 评估自动驾驶系统性能和安全性。
- 能源系统优化：
  - 实时监测和优化能源系统运行。
  - 建立设备动力学模型，分析运行效率和潜在风险。
- 航空航天领域：
  - 飞行器设计、维修和故障预测。
  - 模拟飞行器运行状态，进行故障预测和维护管理。
- 建筑性能评估：
  - 评估建筑物性能，包括能耗分析、内外部气流模拟等。
  - 动力学原理模拟气流、结构受力。
- 管道运行管理：
  - 建立管道数字孪生系统。
  - 流体动力学分析管道内流体流动、压力变化。
  - 优化管道运行，预测缺陷，评估寿命。
- 列车运行系统：
  - 基于数字孪生的运行控制平台实时采集列车运行数据。
  - 求解节能运行控制序列（运动学和动力学模型）。

总结： 动力学是数字孪生实现高保真度模拟和预测的关键技术之一，使得数字孪生能够更准确地反映物理世界的动态行为，为各行业提供更可靠的分析、决策和优化支持。



## 6.5 数字孪生对动力学仿真的新要求

数字孪生作为一种新兴技术，对动力学仿真发展提出了若干新的且更为严苛的要求，旨在实现物理实体在虚拟空间的更精确、实时的映射和更深度的应用。数字孪生的发展对动力学仿真所提出的主要新要求如下。

### 1. 实时性与在线仿真能力：

- 传统动力学仿真通常是离线进行。
- 数字孪生强调物理实体和虚拟模型之间的实时数据双向互联互通。
- 动力学仿真需要接收物理实体实时运行的数据（力、位移、速度等）。
- 实时更新仿真模型的状态，反映物理实体的当前行为。
- 要求动力学仿真具备在线运行和快速响应的能力。

### 2. 高保真度与多物理场耦合：

- 数字孪生追求物理实体在虚拟空间中的精确映射。
- 需要建立高保真度的动力学模型。
- 准确反映物理实体的运动规律、受力特性以及与其他物理现象的相互作用。
- 需要考虑动力学与热力学、流体动力学等多物理场的耦合作用。

### 3. 数据驱动模型优化与自适应：

- 数字孪生系统收集大量的实时运行数据和历史数据。
- 这些数据为优化和校准动力学仿真模型提供资源。
- 动力学仿真需要利用数据修正模型参数、提高模型精度。
- 实现模型的自适应，随物理实体状态和环境变化而动态调整。

### 4. 与多尺度、多类型数据的集成：

- 数字孪生涉及来自不同来源、不同尺度和不同类型的数据。
- 动力学仿真需要与这些多样化的数据进行有效的集成和融合。
- 将宏观设备运行数据与微观材料属性数据相结合。
- 数字线程技术解决不同数据和模型格式之间的集成问题。

### 5. 支持预测性维护和故障诊断：

- 数字孪生的重要应用是预测设备故障并提前维护。
- 动力学仿真需要模拟当前运行状态，并预测未来可能发生的故障。
- 预测设备部件的疲劳寿命、失效模式等。

### 6. 面向决策支持和优化控制：

- 数字孪生最终目的是提升决策的效率和准确性。
- 动力学仿真需要为决策者提供有价值的洞察和预测信息。

- 模拟不同操作策略下的系统响应，帮助选择最优控制方案。

#### 7. 可扩展性和复杂系统建模能力：

- 数字孪生可能需要模拟非常复杂的系统（工厂、城市交通网络等）。
- 动力学仿真技术需要具备良好的可扩展性。
- 处理大规模、多组件的动力学模型，并有效管理模型复杂性。

总结：数字孪生对动力学仿真的发展提出了更高的要求，不仅需要提升仿真的实时性、保真度和精度，更强调与真实数据的闭环反馈、多物理场的耦合以及对复杂系统的建模和分析能力，最终服务于智能决策和优化控制。

## 6.6 数字孪生仿真模型构建与降阶的人工智能方法

人工智能（AI），特别是机器学习和深度学习，在数字孪生仿真模型的构建和降阶方面发挥着越来越重要的作用。

### 一、仿真模型构建

- 数据驱动的建模：
  - 机器学习和深度学习可以直接从历史数据中学习物理实体或过程的运行规律，构建仿真模型。
  - 例如：基于深度学习的机理模型构建，利用数据学习潜在的物理机制。
- 优化现有模型：
  - AI优化基于物理规律的机理模型。
  - 数据科学优化机理模型性能。
  - 使用机器学习算法调整模型参数。
  - 分析实际数据识别和修正模型不足。
- 多模型融合：
  - AI帮助实现多模型之间的关联和集成。
  - 机器学习学习不同模型之间的映射关系。
  - 根据实际数据动态调整不同模型的权重。
- 考虑复杂性和不确定性：
  - 对于复杂系统（非平稳随机振动机械、高度耦合工序流程工业）。
  - AI方法（如神经网络）更好地处理复杂模式和不确定性。
- 逆向建模：
  - 针对多物理、多源数据问题。

- 利用AI从观测数据反推出模型参数或结构。

## 二、仿真模型降阶

- **模型降阶技术 (Model Order Reduction Technology):**
  - AI，特别是深度学习，构建降阶模型。
  - 用复杂度较低的模型近似高精度原始模型。
  - 保证精度的同时，提高仿真效率。
- **机理模型驱动的深度学习:**
  - 利用已有的物理知识（机理模型）指导深度学习模型训练。
  - 降阶的同时，保持模型一定的物理可解释性。
- **数据驱动的降阶:**
  - 直接从高精度仿真数据或实际运行数据中学习构建降阶模型。
  - 机器学习识别系统主要动态特性，用低阶模型近似。

**总结：** 人工智能方法（机器学习和深度学习）正成为构建和降阶数字孪生仿真模型的有力工具。它们通过数据驱动的方式，优化现有模型，实现多模型融合，处理复杂性和不确定性，并提供模型降阶的技术手段。这些方法的应用有助于提升数字孪生仿真的精度、效率和适用性。