

数字孪生在智能制造领域的应用

戴祥 潘小锁

江苏凯惠电力工程有限公司 江苏 连云港 222248

摘要: 数字孪生在智能制造领域应用广泛。其技术体系涵盖数据感知与融合、模型构建与仿真、虚拟映射与交互层。核心应用场景包括产品设计优化、生产过程管控等。与工业互联网、人工智能、5G通信技术协同,分阶段实施,注重需求分析、技术选型等要素,建立持续优化机制,为智能制造发展提供有力支撑。

关键词: 数字孪生;智能制造;应用场景;协同机制;实施路径

引言:智能制造是制造业发展大势所趋,数字孪生作为关键技术,能构建物理实体虚拟映射,实现全生命周期管理。它凭借精准模拟、实时监控等能力,在产品设计、生产、运维、质量管控等多环节发挥重要作用。深入探讨数字孪生在智能制造领域的应用,对推动制造业转型升级具有重要意义。

1 数字孪生技术体系构建

1.1 数据感知与融合层

数据感知与融合是数字孪生技术体系的基础,为模型构建和虚拟映射提供准确数据支撑。数据采集需从多源异构环境获取信息,涵盖传感器实时物理数据、不同工业协议设备运行数据及业务系统管理数据。这些数据来源广泛、格式多样,能全面反映物理实体状态^[1]。原始数据常存在噪声、缺失值等问题,影响质量,因此数据清洗是关键,通过去除无效数据、填补缺失值、消除噪声提升准确性和完整性。数据标注与语义化处理挖掘数据价值,赋予数据明确含义和上下文,使其更易理解使用。实时数据与历史数据的关联分析同样重要。实时数据反映物理实体当前状态,历史数据记录其过去运行轨迹和规律。将两者关联分析,可发现潜在联系和趋势,为预测未来行为提供依据,例如根据设备历史故障数据和当前实时参数预测故障类型和时间。

1.2 模型构建与仿真层

模型构建与仿真层是数字孪生技术体系核心,旨在创建准确反映物理实体特性的虚拟模型。建模需从几何、物理和行为多个维度进行,几何模型精确描述外观和空间结构;物理模型融入物理属性模拟物理行为;行为模型刻画动态变化过程。高精度仿真算法是准确仿真的关键,有限元分析将复杂物理问题离散化求解,适用于结构力学、热力学仿真;多物理场耦合算法综合考虑多个物理场相互作用,更真实模拟运行环境。为提高模型运行效率和响应速度,模型轻量化与实时渲染优化技术不

可或缺,通过简化结构、减少计算量实现快速运行,实时渲染优化确保交互流畅显示,提升用户体验。

1.3 虚拟映射与交互层

虚拟映射与交互层实现物理实体与虚拟模型之间的紧密连接和有效互动。物理实体与虚拟模型的动态绑定机制确保两者在状态变化上保持同步,物理实体的任何变动都能及时反映到虚拟模型中。数据驱动模型参数实时更新策略根据实时采集的数据,动态调整虚拟模型参数,使模型始终与物理实体保持一致。人机协同的交互界面设计原则注重用户体验,以直观、便捷的方式呈现虚拟模型和相关数据,方便用户与数字孪生系统进行交互,实现对物理实体的监控、分析和控制。

2 数字孪生在智能制造中的核心应用场景

2.1 产品设计优化

在产品设计阶段,数字孪生技术展现出强大优势。虚拟样机的构建让产品迭代速度大幅提升,无需制作实体样机,即可在虚拟环境中对产品进行全方位测试与验证。通过不断调整虚拟样机的参数与结构,能快速探索多种设计方案,加速产品创新进程。设计参数动态调整功能使设计过程更加灵活高效。设计师可根据不同需求,实时改变产品尺寸、材料等参数,并立即观察对产品性能的影响。多方案对比分析功能则进一步辅助决策,将不同设计方案的关键指标进行量化对比,清晰呈现各方案优劣,为最终设计选择提供科学依据^[2]。基于仿真结果的缺陷预判与结构优化是数字孪生在产品设计中的关键应用。通过高精度仿真分析,提前发现产品潜在缺陷,如应力集中、疲劳损伤等问题。针对这些问题,对产品结构进行针对性优化,提高产品可靠性与耐用性,降低后期维护成本。

2.2 生产过程管控

数字孪生为生产过程管控带来全新模式。虚拟生产线布局规划与工艺仿真让生产筹备工作更加科学合理。

在虚拟环境中模拟生产线布局,优化设备摆放位置与物料流动路径,减少物料搬运时间与成本。工艺仿真则对生产流程进行细致模拟,提前发现工艺瓶颈与潜在问题,为实际生产提供优化方案。生产节奏动态平衡与资源优化配置是保障生产高效运行的关键。数字孪生系统实时监测生产进度与资源使用情况,根据实际需求动态调整生产节奏,确保各生产环节紧密衔接。同时,合理分配人力、物力资源,提高资源利用率,降低生产成本。异常工况预测与生产预案自动生成功能增强了生产过程的稳定性。通过对历史数据与实时数据的分析,预测可能出现的异常工况,如设备故障、物料短缺等。一旦预测到异常,系统自动生成应对预案,指导生产人员迅速采取措施,减少生产中断时间。

2.3 设备运维管理

设备运维管理是数字孪生在智能制造中的重要应用领域。设备健康状态实时监测与故障预警功能让设备维护从被动维修转变为主动预防。通过传感器实时采集设备运行数据,数字孪生模型对设备状态进行实时评估,一旦发现异常及时发出预警,避免设备故障扩大。维修策略智能推荐与备件库存管理功能提升设备维护效率。根据设备故障类型与历史维修数据,系统智能推荐最佳维修方案,指导维修人员快速解决问题。同时,结合设备运行情况与备件使用频率,优化备件库存管理,确保备件供应及时,降低库存成本。剩余寿命预测与维护周期动态调整功能延长设备使用寿命。通过对设备运行数据的长期分析,预测设备剩余寿命,根据预测结果动态调整维护周期,避免过度维护或维护不足,提高设备综合效益。

2.4 质量管控提升

数字孪生为质量管控提供有力支持。虚拟质量检测与缺陷模式分类功能实现产品质量快速检测与分类。在虚拟环境中模拟质量检测过程,对产品缺陷进行精准识别与分类,提高检测效率与准确性。质量波动根源追溯与工艺参数优化功能帮助企业找出质量问题的根源。当产品质量出现波动时,通过数字孪生系统追溯生产过程中的各项参数,分析导致质量波动的原因,并针对性地优化工艺参数,稳定产品质量。质量预测模型构建与预防性控制功能实现质量管控的前瞻性。利用历史质量数据与生产过程数据构建质量预测模型,提前预测产品质量趋势,采取预防性控制措施,将质量问题消灭在萌芽状态,提升产品整体质量水平。

3 数字孪生与智能制造生态的协同机制

3.1 与工业互联网平台的融合

数字孪生与工业互联网平台的深度融合,是构建智能制造生态的关键。数据互通是基础,设计协议标准化接口打破不同设备、系统数据壁垒,实现各类数据自由流通共享。传感器采集的实时生产数据、业务系统存储的管理信息,都能在统一框架整合,为数字孪生模型提供全面准确数据支撑^[1]。边缘计算与云端协同的分布式架构,提升数据处理效率与系统响应速度。边缘计算节点靠近数据源,快速初步处理实时数据,减轻云端压力。云端凭借强大算力进行复杂运算与数据分析,为数字孪生提供深度洞察。二者协同工作,确保系统快速响应局部变化且能从全局优化决策。微服务化应用开发与部署模式,增强系统灵活性与可扩展性。将数字孪生功能拆分为多个独立微服务,每个专注特定业务逻辑,可独立开发、部署与升级。便于根据需求灵活组合,快速构建应用,降低开发成本与维护难度。

3.2 与人工智能技术的结合

数字孪生与人工智能技术结合,为智能制造注入智能决策与自主优化能力。基于机器学习的模型自适应优化,使数字孪生模型能依实时数据动态调整参数,提升精度与预测能力。通过学习新数据,模型自动适应生产环境变化,减少人工干预,提高生产效率与产品质量。智能决策支持系统构建方法,借助人工智能算法分析挖掘数字孪生产生的海量数据,为生产决策提供科学依据。系统综合考虑生产进度、资源状况、市场需求等因素,生成最优决策方案,辅助管理者选择。自主优化控制算法开发路径,赋予数字孪生系统自主调节能力。算法根据实时监测数据与预设目标,自动调整生产参数、设备运行状态,实现生产过程自主优化,提高生产稳定性与资源利用率。

3.3 与5G通信技术的联动

数字孪生与5G通信技术的联动,为智能制造带来高速、稳定的数据传输与广泛连接能力。低时延数据传输保障机制,确保数字孪生系统能实时获取设备状态、生产进度等关键信息,实现精准控制与快速响应。即使面对复杂生产环境与大量数据传输需求,也能保证数据传输的及时性与准确性。5G通信下数据传输时延降低至10毫秒以内。大规模设备并发接入能力,使众多生产设备能同时接入数字孪生系统,实现全面互联互通。这为构建大规模智能制造场景奠定基础,促进生产设备协同工作,提升整体生产效能。可支持同时接入1000台以上设备。移动场景下的实时监控应用拓展,让管理人员能通过移动终端随时随地查看生产现场数字孪生模型,实时掌握生产动态。无论身处何地,都能及时发现问题并做

出决策,提升生产管理灵活性与便捷性。

4 数字孪生应用实施路径

4.1 分阶段实施策略

数字孪生应用需循序渐进,分阶段推进。试点探索阶段,聚焦单点场景开展技术可行性验证。选取生产流程中具有代表性、问题较为突出的环节,如关键设备运行监测或特定工艺优化,搭建简易数字孪生模型。通过小范围实践,检验数据采集、模型构建、仿真分析等核心技术能否有效解决实际问题,为后续推广积累经验、奠定基础^[4]。局部推广阶段,将成功试点经验拓展至产线级应用。在一条完整生产线上构建数字孪生体系,实现产线设备、工艺、物流等要素的全面映射与动态监控。此阶段注重形成标准模板,对数据接口、模型结构、应用功能等进行规范化设计,确保不同产线间数字孪生应用的可复制性与兼容性,提升推广效率。全面集成阶段,着眼于企业级平台构建与生态对接。将各产线数字孪生系统集成至企业统一平台,实现数据共享与业务协同。同时,与供应链上下游企业、外部服务提供商等建立数字孪生生态连接,实现跨企业、跨行业的资源整合与价值共创,提升企业整体竞争力。

4.2 关键实施要素

需求分析与目标设定是数字孪生应用起点。运用科学方法论,深入调研企业生产运营痛点与数字化转型需求,结合行业发展趋势与技术能力,明确数字孪生应用目标。目标设定应具体、可衡量、可实现,为后续实施提供清晰方向。技术选型与系统架构设计关乎应用成败。依据需求目标,综合考虑技术成熟度、成本效益、扩展性等因素,选择合适的数据采集、建模、仿真、可视化等技术。系统架构设计遵循模块化、松耦合原则,确保各模块间独立运行又协同工作,便于后期维护与升级。组织变革与流程再造是应用落地保障。数字孪生应用往往伴随组织架构调整与业务流程优化。建立跨部门项目团队,打破部门壁垒,促进信息流通与协作。对生产管

理、设备维护、质量控制等流程进行再造,使其与数字孪生应用相适配,充分发挥技术优势。

4.3 持续优化机制

模型迭代更新与版本管理流程保障数字孪生模型准确性。随着生产数据积累与技术发展,定期对模型进行更新优化,提升模型精度与预测能力。建立严格版本管理流程,记录模型变更历史,便于追溯与回滚,确保模型稳定性。应用效果评估与改进闭环推动应用持续优化。制定科学评估指标体系,从生产效率、质量提升、成本降低等方面对数字孪生应用效果进行量化评估。依据评估结果,分析存在问题,制定改进措施并形成闭环,不断提升应用价值。知识沉淀与复用体系建设促进企业知识传承与创新。将数字孪生应用过程中积累的经验、技术、模型等知识进行系统整理与存储,建立知识库。通过知识共享与复用,避免重复劳动,加速新项目实施,推动企业数字化转型持续深入。

结束语

数字孪生在智能制造领域的应用已取得成效,从技术体系构建到核心场景应用,再到与多种技术的协同,都展现出强大优势。通过分阶段实施策略、把握关键要素、建立持续优化机制,能确保数字孪生在智能制造中稳定发挥作用。持续探索创新,将进一步挖掘数字孪生潜力,推动智能制造迈向更高水平。

参考文献

- [1]刘恩伟,陈健,孔祥鹏,等.数字孪生在智能制造领域的应用及发展趋势[J].今日自动化,2021(6):56-57.
- [2]谭展.数字孪生在智能制造领域的应用及研究进展[J].电子元件与信息技术,2022,6(12):110-115.
- [3]范帅,相茂利,张恩亮.数字孪生技术在智能制造领域中的应用[J].造纸装备及材料,2024,53(4):86-88.
- [4]夏丹.数字孪生技术在智能制造领域的发展与应用[J].现代农机,2023(5):118-120.