

数字孪生实现虚实结合优化生产管理

李 飞

天津美腾科技股份有限公司 天津 300000

摘要: 本文聚焦数字孪生实现虚实结合优化生产管理。先阐述其理论基石,包括数字孪生内涵、虚实结合原理及技术架构。接着探讨实践路径,涵盖物理实体数字化映射、数据交互同步、虚拟模型构建优化及协同控制决策。最后分析对生产管理的优化效应,如优化生产流程、提升效率、提高质量、降低成本。研究表明,数字孪生虚实结合为生产管理带来多方面积极变革,助力企业实现高效、优质、低成本生产。

关键词: 数字孪生; 虚实融合; 生产管理优化

引言: 在智能制造浪潮席卷之下,生产管理正面临从经验驱动向数据驱动的深刻变革。传统生产模式因物理系统与数字模型割裂,难以实现全要素、全流程的动态优化。数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟空间的双向映射机制,打破虚实边界,形成“数据感知-模型推演-决策反馈”的闭环体系,为生产管理提供了全生命周期动态优化能力,成为推动制造业高质量发展的关键技术支撑。

1 数字孪生与虚实结合的理论基石

1.1 数字孪生的内涵

数字孪生是借助数字化手段,构建与物理实体完全映射的虚拟模型,并实现二者全生命周期动态关联的技术理念与方法。它并非简单的数字建模,而是物理实体、虚拟模型、数据链路及服务应用的四维集成体系。本质上,它实现物理与虚拟空间的双向映射与实时交互,虚拟模型能精准复刻物理实体的几何、结构特征,同步运行状态、性能参数及环境交互关系。在全生命周期中,数字孪生贯穿实体从设计到报废的全过程,通过虚拟仿真提前预判问题、优化方案,再将结果反馈至物理实体,形成闭环。与传统建模相比,其动态、实时与交互性强,能随物理实体变化动态更新,为虚实结合应用奠定核心基础。

1.2 虚实结合的原理

虚实结合是通过技术实现物理与虚拟空间信息融合、行为联动及功能互补的核心原理,本质是构建“物理实体-数据传输-虚拟映射-决策反馈”的双向闭环机制。它以信息一致性为前提,要求虚拟空间对物理空间的描述在多维高度保真,精准反映实时状态。技术逻辑上,先通过感知设备采集物理实体数据,处理后传输至虚拟空间同步状态;接着在虚拟空间仿真分析、场景推演,生成优化决策;最后通过控制模块将指令下发至

物理实体精准调控^[1]。其关键是打破空间壁垒,使二者协同运作,物理实体为虚拟空间提供数据支撑,虚拟空间为物理实体提供优化路径与风险预判,构成核心原理与应用逻辑。

1.3 数字孪生实现虚实结合的技术架构

数字孪生实现虚实结合的技术架构呈现分层递进的金字塔结构,自下而上分为感知层、传输层、建模层、应用层四个核心层级,各层级协同保障虚实融合的精准与高效。感知层作为数据入口,通过物联网传感器、红外检测、RFID、工业相机等设备,实时采集物理实体的几何参数、运行状态、环境数据等多维度信息,为虚实映射提供原始数据支撑,其数据采集的精度与实时性直接决定映射质量。传输层依托5G、工业以太网、边缘计算等技术,构建低延迟、高可靠的数据传输通道,实现感知数据向虚拟空间的实时传输及决策指令向物理实体的精准下发,解决大规模数据传输的瓶颈问题。建模层是核心支撑,采用多物理场建模、参数化建模等技术,结合感知数据构建高保真虚拟模型,同时通过模型修正算法实现虚拟模型的动态优化,确保与物理实体的一致性。

2 数字孪生实现虚实结合的实践路径

2.1 物理实体数字化映射

物理实体数字化映射是数字孪生实现虚实结合的首要实践路径,其核心目标是将物理实体的多维度特征精准转化为虚拟空间的数字信息,构建虚实关联的基础。该过程并非单一的几何建模,而是涵盖几何、物理、行为、规则四大维度的全要素映射^[2]。在几何映射阶段,通过三维激光扫描、摄影测量等技术采集实体的外形尺寸、结构布局等几何信息,构建与实体1:1的几何模型,确保形态一致性。物理映射则基于材料力学、热力学等理论,将实体的材料属性、力学性能、热传导特性等物理参数融入模型,使虚拟模型具备与实体一致的物理

响应能力。行为映射通过采集实体运行过程中的动作轨迹、操作逻辑等数据,构建行为模型,实现虚拟模型对实体运行状态的精准复刻。规则映射则梳理实体的运行规则、约束条件、故障逻辑等,转化为虚拟模型的运行规则库。通过数据校准技术不断修正映射偏差,确保虚拟模型能真实反映实体的全维度特征,为后续虚实交互奠定坚实基础。

2.2 数据实时交互与同步

数据实时交互与同步是保障数字孪生虚实结合动态性的关键实践路径,其核心是构建物理与虚拟空间之间持续、高效的数据流通机制,实现二者状态的实时联动。该路径以数据全生命周期管理为核心,涵盖数据采集、传输、处理、反馈四个关键环节。在数据采集环节,采用分布式感知网络部署多类型传感器,实现对物理实体运行参数、环境变量等数据的高频采集,确保数据的全面性与时效性。传输环节依托5G+边缘计算技术,构建低延迟、高带宽的专用传输通道,解决工业场景中大规模实时数据的传输瓶颈,同时通过数据加密技术保障传输安全。数据处理环节采用云计算与边缘计算协同架构,对采集的数据进行清洗、融合、降噪处理,提取有效信息并转化为虚拟模型可识别的格式,实现数据标准化。反馈环节则将虚拟空间的仿真结果、优化指令等数据实时下发至物理实体的控制模块,驱动实体执行相应操作,同时将实体执行结果回传至虚拟空间完成状态更新,形成“采集-传输-处理-反馈”的实时闭环,确保虚实状态高度同步。

2.3 虚拟模型构建与优化

虚拟模型构建与优化是数字孪生虚实结合的核心实践路径,其核心是通过技术手段构建高保真虚拟模型,并结合实时数据实现动态迭代优化,确保模型与物理实体的持续一致性。模型构建采用“多源数据融合+多学科建模”的方式,在几何建模基础上,融入物理、行为、规则等多维度数据,通过多物理场耦合建模技术,构建能精准反映实体运行特性的综合虚拟模型。例如在工业设备建模中,不仅复刻设备外形,更融入设备的机械结构、电气特性、运行损耗规律等,使虚拟模型能模拟设备在不同工况下的运行状态^[3]。模型优化则采用“实时反馈+算法修正”的动态机制,通过对比虚拟模型与物理实体的运行数据,利用机器学习、自适应修正等算法,实时调整模型参数。同时结合实体全生命周期数据,在设计阶段优化模型结构,在运行阶段修正性能参数,在维护阶段更新损耗模型,实现虚拟模型的全生命周期动态优化。另外,通过模型轻量化技术,在保证精度的前提

下提升模型运行效率,为后续仿真分析与协同控制提供高效支撑。

2.4 虚实结合的协同控制与决策

虚实结合的协同控制与决策是数字孪生虚实结合的价值落地路径,其核心是依托虚实联动机制,实现对物理系统的精准控制与科学决策。该路径以虚拟仿真为核心手段,构建“虚拟推演-决策生成-物理执行-效果反馈”的协同闭环。在协同控制方面,通过虚拟模型模拟不同控制策略下物理实体的运行状态,例如在生产线调度中,先在虚拟空间仿真不同调度方案的产能、能耗等指标,筛选最优方案后,通过实时控制通道下发至物理生产线,实现精准调度。利用虚拟模型实时监控物理实体运行状态,当检测到异常数据时,立即在虚拟空间进行故障仿真定位,快速生成维修方案并指导物理维修,减少停机时间。在决策支持方面,基于虚拟模型构建多场景仿真环境,例如新产品研发中,通过虚拟仿真测试产品在不同工况下的性能,为设计优化提供决策依据;在生产规划中,仿真不同产能配置的效益,辅助制定生产计划。这种“虚拟预判+物理执行”的协同模式,大幅提升了控制精度与决策科学性,实现虚实结合的价值转化。

3 数字孪生虚实结合对生产管理的优化效应

3.1 优化生产流程

数字孪生虚实结合对生产流程的优化效应体现在全流程的可视化、仿真化与精益化管控,彻底改变传统生产流程依赖经验规划的模式。在流程设计阶段,通过虚拟模型构建全流程仿真环境,将订单接收、物料采购、生产加工、成品检测等各环节数字化,模拟不同流程方案的运行效果,例如通过仿真分析物料运输路径的合理性,优化车间布局与物流路线,减少物料搬运时间。在流程执行阶段,依托虚实实时同步机制,实现生产流程的全链路可视化监控,管理人员可通过虚拟模型实时查看各工序进度、设备运行状态、物料库存等信息,精准掌握流程瓶颈。当出现订单变更或设备故障等异常情况时,在虚拟空间快速仿真流程调整方案,例如重新分配工序任务、调度备用设备,确定最优调整策略后直接同步至物理生产系统,避免传统流程调整中的试错成本。通过分析生产流程的历史数据与实时数据,识别流程中的冗余环节,例如合并重复检测工序、优化工序衔接时间,实现生产流程的精益化优化,提升流程整体运行效率。

3.2 提升生产效率

数字孪生虚实结合通过多维度赋能实现生产效率的显著提升,其核心逻辑是减少生产过程中的非增值时间、提升设备利用率与人员作业效率。在设备管理方

面,通过虚拟模型实时监控设备运行状态,基于数据分析预判设备潜在故障,提前制定维护计划,避免突发性停机造成的生产中断,同时通过虚拟仿真优化设备运行参数,提升设备单位时间产能。选煤厂洗选工艺借助数字孪生构建三维全要素虚拟模型,融合物联网传感器与高清工业相机,实现数据毫秒级采集与虚拟映射。通过虚实数据孪生计算,能在虚拟界面实时监控生产工况、动态复盘全流程并智能分析,精准预判生产瓶颈。出现管路卡阻时,虚拟模型同步多类监测数据,自动定位故障点并触发连锁反应,使维修响应时间缩短60%、故障率降低30%、综合效率提升25%。人员管理上,构建沉浸式虚拟培训场景,缩短培训周期40%,提升操作熟练度,减少人为失误。生产调度时,虚拟模型融合动态数据,仿真不同方案,自动生成最优排程并同步至物理系统。此外,三维虚拟厂区实现可视化管控,设备监控页面直观展示信息,点击图标可调取相关数据,为调度决策提供精准支撑。

3.3 提高产品质量

数字孪生虚实结合从全生命周期维度构建产品质量管控体系,实现质量问题的提前预判、过程严控与精准追溯,大幅提升产品质量稳定性。在设计阶段,通过虚拟仿真对产品结构、性能进行多场景测试,例如在航空零部件设计中,模拟零部件在高温、高压环境下的力学性能,提前发现设计缺陷并优化,从源头减少质量隐患。在生产过程中,依托实时数据采集与虚拟模型联动,对关键工序的质量参数进行实时监控,当参数偏离标准范围时,虚拟模型立即发出预警并自动调整生产设备参数,实现质量的实时管控。例如在电子元件生产中,通过虚实结合技术实时监控焊接温度、压力等参数,将焊接缺陷率降低40%。在质量检测阶段,采用虚拟检测与物理检测相结合的方式,通过虚拟模型模拟检测流程,优化检测方案,同时利用数字孪生实现质量数据的全生命周期追溯,当出现质量问题时,可通过虚拟模型快速定位问题工序、责任人员及物料批次,精准分析问题原因并制定改进措施,形成质量管控的闭环优化,持续提升产品质量^[4]。

3.4 降低生产成本

数字孪生虚实结合通过精益化管控、资源优化配置等方式,从多个维度实现生产成本的有效降低,为企业提升盈利空间。在研发成本方面,通过虚拟仿真替代传统物理样机测试,大幅减少样机制作数量与测试周期,例如在汽车研发中,采用数字孪生技术后,样机制作成本降低60%,研发周期缩短40%。在物料成本方面,通过虚拟模型精准计算物料需求量,优化物料采购计划,避免过量采购造成的库存积压,同时通过仿真优化产品结构与生产工艺,减少物料损耗,例如在机械加工中,通过虚拟仿真优化切削路径,降低材料浪费率达15%。在能耗成本方面,通过虚拟模型分析生产过程中各设备的能耗数据,优化设备运行参数与生产调度方案,减少无效能耗,例如化工企业通过数字孪生技术实现生产能耗降低12%。在维护成本方面,通过预测性维护替代传统事后维护,提前发现设备故障隐患并进行精准维护,减少维护材料浪费与设备大修成本,同时延长设备使用寿命。多维度成本降低形成叠加效应,显著提升企业成本竞争力。

结束语

数字孪生实现虚实结合为生产管理开辟新路径。从理论到实践,其技术架构与实践路径为虚实融合筑牢根基,在优化生产流程、提升效率、保障质量、降低成本等方面成效显著。随着技术发展,数字孪生虚实结合将更深入应用于生产管理各环节,持续推动生产模式变革。企业应积极拥抱该技术,充分发挥其优势,提升核心竞争力,在激烈市场竞争中实现可持续发展。

参考文献

- [1]刘娟,雷翔霄,袁佳俊,王宏彦.基于数字孪生的智能分拣装配生产线设计[J].电子制作,2024,32(19):64-67.
- [2]周高伟,沙杰,刘梦园,鲁庆洋.基于数字孪生的加工生产线虚实交互技术研究[J].机电工程,2024,41(02):337-344.
- [3]王红彦;阮兵;.数字孪生技术在汽车行业中的应用[J].科技创新与应用,2023(04):172-175.
- [4]杨伟新;樊小伟;孙荣富;孙雅旻;丁然;.数字孪生驱动的风电机组三维可视化监控与故障预警方法[J].弹箭与制导学报,2023(02):100-108.