

数字孪生技术在智能制造生产线优化中的应用

张厚田

魔观科技（杭州）有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】制造业数字化转型热潮里，智能制造成产业升级关键要素。数字孪生技术作为新兴数字化方式，借创建与物理实体极为契合的虚拟模型，给智能制造生产线优化赋予新思路、新办法。此文探讨数字孪生技术用于智能制造生产线优化情况，剖析其原理、应用场景及产生效益，展望未来发展走向，为制造业企业提高生产效率、削减成本、增强竞争力给予理论与实践方面参考。

【关键词】数字孪生技术；智能制造生产线；生产线优化；虚拟模型；工业互联网

Application of digital twin technology in optimization of intelligent manufacturing production line

Zhang Houtian

Maguan Technology (Hangzhou) Co., LTD. Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】In the wave of digital transformation in manufacturing, intelligent manufacturing has become a key element for industrial upgrading. Digital twin technology, as an emerging digital approach, creates virtual models that closely match physical entities, offering new ideas and methods for optimizing intelligent manufacturing production lines. This paper explores the application of digital twin technology in optimizing intelligent manufacturing production lines, analyzes its principles, application scenarios, and benefits, and looks ahead to future development trends. It provides theoretical and practical references for manufacturing enterprises to improve production efficiency, reduce costs, and enhance competitiveness.

【Key words】digital twin technology; intelligent manufacturing production line; production line optimization; virtual model; industrial Internet

引言

全球制造业竞争激烈，企业为求发展，亟需提升生产效率、降低成本、提高产品质量。传统生产模式在面对复杂多变市场需求时，弊端渐显，像生产流程灵活性欠佳、设备维护难以精准、生产过程难以全方位监控等。数字孪生技术横空出世，给制造业带来新契机。凭借数字化方式，构建和物理实体极为相像的虚拟模型，实时呈现物理实体状态，助力企业提前预估并解决生产问题，达成生产流程优化与智能化管理。深入探究数字孪生技术于智能制造生产线优化中的运用，对推动制造业高质量发展意义非凡。

一、数字孪生技术概述

（一）技术原理

数字孪生技术关键在于打造跟物理实体在几何、物理、行为等层面极为相似的虚拟模型。于物理实体上布设多种传感器，实时收集运行中的数据，诸如温度、压力、速度、位置之类，再把这些数据传至虚拟模型，让虚拟模型能同步展现物理实体实时状况。凭借仿真技术，在虚拟环境中对物理实体后续状态展开预测与模拟剖析。就拿半导体芯片制造来

说，运用高精度传感器采集光刻机工作参数、芯片加工工艺参数等数据，传至相应数字孪生模型。经模拟不同工艺参数对芯片性能的作用，给实际生产给出优化办法，保障芯片制造的高精度与高品质。

（二）技术构成要素

数字孪生技术大体由物理实体、虚拟模型、数据传输交互及服务系统等要素组成。物理实体包含生产线上设备、产品以及整个生产线体系；虚拟模型作为物理实体的数字化映射，有着和物理实体相仿的结构、功能以及行为特性；数据传输交互依靠传感器与网络通信技术，达成物理实体跟虚拟模型间实时数据传递；服务系统依据虚拟模型分析结果，为生产决策、故障诊断、优化控制等给予支撑^[1]。拿智能仓储物流系统来讲，仓库里货架、搬运设备、货物等组成物理实体，虚拟模型对其实施数字化建模。传感器采集设备运行数据、货物库存信息等，经网络传至虚拟模型。服务系统基于虚拟模型分析，给仓库管理人员提供货物调度、设备维护等决策建议。

（三）与其他相关技术的关系

数字孪生技术跟物联网、大数据、人工智能等技术关联紧密。物联网堪称数字孪生获取物理实体实时数据的根基，生产线上大量部署物联网传感器，实现数据广泛采集；大数

据技术承担存储、管理与分析数字孪生产海量数据之责,挖掘数据背后潜藏价值;人工智能技术给予数字孪生模型智能分析与决策能力,像运用机器学习算法对设备故障数据展开学习,达成故障智能诊断与预测。于智能制造生产线中,这些技术相互交融、协同运作,一同推动生产过程智能化升级。

二、智能制造生产线面临的挑战

(一) 生产过程复杂性高

智能制造生产线涵盖多样设备、繁杂工艺以及诸多环节,各部分彼此关联、相互牵制。自原材料采购、零部件加工、产品装配直至质量检测,每个环节皆需精准把控与协同协作。以高端装备制造范畴来说,航空发动机制造工艺极其繁杂,涉及高温合金材料加工、精密零部件制造、复杂装配工艺等诸多环节,对生产环境的温度、湿度、洁净度等要求极为严苛。只要某个环节出现偏差,便可能引发连锁反应,影响整个生产线运行效率与产品质量,传统管理及控制方式难以妥善应对这般复杂状况。

(二) 设备故障与维护难题

生产线上设备长期高强度运转,极易故障,致使生产中断,既造成经济损失,又影响产品质量。而且设备多样、技术含量高,设备维护颇具难度。传统定期维护方式缺乏针对性,易出现过度或不足维护,难以准确把握设备实际运行状态。就像高速运转的自动化生产线,关键设备零部件磨损情况难以及时监测,若未能及时察觉并更换磨损部件,极有可能引发严重故障,影响生产的持续与稳定。

(三) 市场需求变化快速响应困难

市场需求快速变化,且愈发个性化、多样化,客户对产品定制需求持续攀升。智能制造生产线得有快速响应市场变动的本事,能及时变更生产计划与产品配置。但传统生产线灵活性与适应性欠佳,面对市场变化常常反应滞后^[1]。像市场对某产品功能、外观等有新要求时,生产线调整需耗费大量时间与成本,致使产品交付周期变长,难以契合客户对及时性的需求,进而削弱企业市场竞争力。

三、数字孪生技术在智能制造生产线优化中的应用

(一) 生产过程监控与优化

数字孪生技术可实时、全面监控生产过程,借虚拟模型直观展现生产状况。生产管理人员能于虚拟环境模拟分析生产流程,提前洞察潜在问题,优化生产参数。在化工生产环节,运用数字孪生模型模拟不同温度、压力、流量等条件下的化学反应进程,经多次模拟测试,探寻最佳生产参数组合,提升产品收率与质量。实时监测生产数据,一旦某个环节异

常,系统即刻发出预警,在虚拟模型中模拟故障影响范围与发展态势,为生产人员提供快速解决问题的决策支撑。

(二) 设备故障预测与维护

运用数字孪生技术实时监测生产设备并预测故障。收集分析设备运行数据,构建设备健康模型,预估设备故障发生几率与时间。以风力发电场为例,用数字孪生模型深度剖析风机叶片、齿轮箱、发电机等关键部件运行数据,预测部件磨损程度与故障风险。依据预测结果,拟定个性化维护规划,达成设备精准维护,削减维护成本,提升设备可靠性与使用寿命。设备一旦出现故障,数字孪生模型能迅速锁定故障原因,给出详尽维修指引,缩短设备维修时长,降低生产中断造成的损失。

(三) 产品设计与制造协同优化

于产品设计时期,数字孪生技术可打造产品虚拟模型,开展虚拟装配、性能测试等工作。模拟产品在多样工况下的运行状态,提前找出设计瑕疵,完善产品设计。制造进程里,数字孪生模型与实际生产环节紧密相连,达成设计和制造的协同改进^[2]。拿汽车制造来说,借助数字孪生模型模拟汽车零部件加工流程,优化加工工艺参数,保障零部件制造精度与质量。依据实际生产中的反馈信息,对产品设计动态调整、优化,促成产品设计与制造的良性循环,提升产品整体质量与市场竞争力。

四、数字孪生技术应用案例分析

(一) 案例背景介绍

一家知名电子制造企业,主要生产智能手机这类消费电子产品,设有多条高度自动化生产线。在市场竞争愈发激烈、消费者需求持续变动的形势下,企业遭遇提高生产效率、降低成本、提升产品质量,还有快速响应市场变化等诸多难题。为解决这些挑战,该企业引入数字孪生技术,对智能制造生产线实施优化升级。

(二) 数字孪生技术实施过程

企业先全面梳理生产线上的设备、工艺流程、物料配送等,构建起生产线的数字孪生模型。设备上安装众多高精度传感器,达成生产数据的实时采集与传输。运用大数据技术对采集到的数据存储、管理并分析,给数字孪生模型提供丰富数据支撑。借助虚拟模型,企业对生产过程实时监控且模拟分析,制定出优化方案。在手机主板贴片生产线上,企业通过数字孪生模型察觉部分贴片机工作效率不高,还存在贴片精度不稳定状况。企业采取调整贴片机参数设置、优化物料配送路径等举措,提升贴片生产的效率和质量。企业利用数字孪生技术对设备故障预测并进行维护管理,依据设备健康模型制定基于设备状态的维护计划,有效缩短了设备故障停机时长。

（三）实施效果评估

应用数字孪生技术一段时间后，企业收获明显成效。生产效率增长 30%，产品质量合格率提高 20%，设备故障停机时长缩短 40%，生产成本下降 15%。借助数字孪生技术，企业能更迅速地回应市场需求变动，缩短产品研发及生产周期，提升客户满意度。企业在生产过程中的数字化管理水准大幅跃升，为自身智能化发展筑牢坚实根基。

五、数字孪生技术应用面临的挑战与应对策略

（一）技术挑战与应对

数字孪生技术需要大量数据支撑，数据质量优劣直接关系到虚拟模型的精准度与可靠性。数据安全同样是关键所在，涵盖生产数据、企业机密等敏感信息。可采取的应对方法有运用先进的数据清洗和预处理技术来提升数据质量；强化数据安全防护，借助加密传输、访问控制、数据备份等技术措施，保障数据的安全性及完整性。

构建高精度虚拟模型并确保它和物理实体实时同步，是数字孪生技术的难点之处。要是模型精度不够，模拟结果或许会与实际状况有较大偏差，进而影响决策的准确性；而实时性不佳，就不能及时呈现物理实体的变化^[4]。企业为解决这些问题，需持续优化建模算法，以此提高模型的精度和实时性，还得加大对硬件设备的资金投入，增强数据处理和传输的能力。

（二）管理挑战与应对

引入数字孪生技术，企业需调整组织架构，破除部门间的壁垒，推动跨部门协作。并且，对员工技能要求有了改变，员工须具备数据分析、数字孪生模型应用等能力。企业要强化组织架构调整，组建跨部门数字化团队，还要加强员工培训，提升员工数字素养与技能水平。应用数字孪生技术要投入大量资金，用于设备改造、软件研发、人员培训等方面。企业要合理规划投资，保障投资成本与收益平衡。项目实施前，做好充分可行性研究和成本效益分析；实施过程中，逐步推进项目，依据实际效果调整优化，提高投资回报率。

参考文献

- [1] 邹传航. 浅谈工业机器人及数字孪生技术的应用[J]. 仪器仪表与分析监测, 2025, (01): 38-42.
- [2] 刘源. 悖论视角下制造企业数字化转型的模块化治理研究[D]. 吉林大学, 2024.
- [3] 刘永刚, 姚立权, 朱虹. 数字孪生虚拟仿真在智能制造生产线技术课程中的实践[J]. 科技资讯, 2023, 21 (04): 203-207.
- [4] 王煜龙, 吕冲冲, 吴金文. 基于数字孪生技术的农用车皮带轮智能制造生产线设计与研究[J]. 粮油与饲料科技, 2024, (11): 155-157.
- [5] 刘佳雁. 基于数字孪生的汽车连杆生产线虚拟仿真调试与优化[D]. 上海应用技术大学, 2023.

六、数字孪生技术的未来发展趋势

（一）与新兴技术的深度融合

今后数字孪生技术会和 5G、人工智能、区块链等新兴技术深度交融。5G 技术具备高速率、低延迟特点，这能进一步提高数据传输的效率与实时性，让数字孪生模型更精确地呈现物理实体的状态。人工智能技术持续进步，会给予数字孪生模型更强的智能分析和决策本领，达成更为智能化的生产优化。区块链技术的运用则会增强数据的安全性及可信度，保障数字孪生数据的完整性以及可追溯性。

（二）应用领域的拓展

未来数字孪生技术于智能制造领域的应用范畴会持续拓展，从当下聚焦的生产线优化，逐步拓展至产品全生命周期管理、供应链协同等领域^[5]。产品全生命周期管理进程里，数字孪生技术可全程覆盖产品设计、制造、使用、维护等各阶段，为产品不断优化升级助力。设计环节，借模拟产品性能完善设计方案；使用期间收集用户反馈，推动产品迭代。至于供应链协同层面，数字孪生技术能够打造供应链虚拟模型，达成供应链各环节实时监控与协同改进，提升供应链整体效能与竞争力。依靠虚拟模型，企业可提前预估供应风险，合理配置资源，例如提前预测原材料短缺情况，及时调整生产计划，确保生产平稳连续。

结语

数字孪生技术在智能制造生产线优化时，彰显出强大优势与潜力。凭借对生产过程的实时监控、设备故障的预测性维护，还有产品设计与制造的协同式优化，切实解决了智能制造生产线所面临的众多难题，极大地提高了企业的生产效率、产品品质以及市场竞争力。虽说在实际应用中存在一些技术和管理上的挑战，可随着技术的持续进步以及企业应对措施的日益完善，这些问题会逐步得到化解。展望今后，数字孪生技术与新兴技术的深度融合，加上应用领域的不断扩大，将为制造业的智能化发展增添新的活力，助力制造业朝着更高水平前行，达成可持续发展的目标。