

数字孪生技术在工业自动化产线状态监测中的应用探讨

陈强 陈涛 叶东顺

斯泰必鲁斯(浙江)有限公司 浙江 嘉兴 314200

【摘要】：数字孪生技术能够搭建工业自动化产线的虚拟镜像，达成物理与虚拟产线的实时联动，为产线状态监测开辟全新技术路径，核心价值体现在突破传统监测模式桎梏。实现产线状态的实时捕捉、精准研判与高效处置，助力工业自动化产线达成安全稳定高效运转，解读数字孪生技术与工业自动化产线状态监测的适配特性，剖析技术应用的核心要点与实施流程，探究应用阶段各类现存问题并给出对应解决办法，结合实际应用场景明晰技术应用价值，为相关领域实践应用提供可行参照。

【关键词】：数字孪生；工业自动化；产线状态监测；虚拟镜像；状态感知

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.023

引言

工业自动化产线作为现代制造业高效生产的核心载体，运行状态稳定性直接关联生产进度、产品质量与运营成本，传统产线状态监测依赖人工巡检与单点设备监控，存在感知滞后、研判偏差、处置迟缓等短板，难以匹配自动化产线集群化、工艺复杂化的运行诉求，数字孪生技术依托精准复刻物理产线的结构、参数与运行逻辑。搭建虚实交互监测体系，可实现产线全流程全方位状态管控，破解传统监测模式的局限，立足工业自动化产线实际运行诉求，探索数字孪生技术在状态监测中的应用路径，挖掘技术应用价值，衔接后续应用要点、现存问题及解决举措的深入探讨，推动技术与产线监测深度融合。

1 工业自动化产线状态监测的核心需求与现存困境

1.1 工业自动化产线状态监测的核心需求

工业自动化产线由各类设备、管线及控制系统协同组成，覆盖原料输入、工序加工至成品输出的全流程，状态监测需满足多维度核心诉求，产线运行连续性要求监测体系捕捉设备运行状态细微变化，及时排查潜在隐患，规避设备故障引发的生产中断。运行安全性要求监测覆盖高危设备及关键工序，精准甄别安全风险，防范安全事故，运行高效性要求监测数据为设备维护、工艺优化提供支撑，降低无效损耗，提升整体运行效能，规模化与复杂化特性还要求监测体系具备全局管控能力，实现多设备、多工序协同监测，保障产线整体运行协调有序

1.2 工业自动化产线传统监测模式的不足

传统产线状态监测多采用人工巡检与单点设备监控相结合的方式，存在诸多难以规避的短板，人工巡检依靠工作人员经验判断，无法实现24小时连续监测，易因人为疏忽遗漏设备运行细微异常。监测精度也受个人经验制约，单点设备监控仅能针对单个设备采集数据，无法实现设备间关联监测，难以捕捉产线整体运行协同异常，无法精准锁定故障根源，传统监测模式多为事后监测，缺乏提前预警能力，往往在设备故障、产线中断后才发现问题，造成损失扩大，粗放维护模式也会引发资源浪费，无法匹配自动化产线精细化管理诉求

1.3 数字孪生技术应用的必要性

数字孪生技术特性与工业自动化产线状态监测核心需求高度契合，应用具备不可替代的必要性，数字孪生可构建与物理产线1:1匹配的虚拟镜像，实现物理产线运行状态实时映射，突破传统监测时空限制，实现全流程、无死角状态监测，依托虚拟镜像可对产线运行状态动态模拟，提前排查潜在隐患，完成从被动维修向主动防控的转变^[1]。数字孪生技术可整合产线各设备、各工序运行信息，实现数据集中管理与关联分析，为产线状态研判、维护优化提供全面支撑，有效破解传统监测模式短板，推动产线监测向智能化、精细化转型。

2 数字孪生技术与工业自动化产线状态监测的适配性分析

2.1 数字孪生技术的核心特性

数字孪生技术以虚实融合、实时同步、动态交互为核心特质，可精准复刻物理产线全部细节，涵盖设备结构、运行参数、工艺流程及环境条件，具备实时数据交互能力。依托各类感知设备采集物理产线运行数据，同步反馈至虚拟镜像，达成物理与虚拟产线的双向联动，还拥有动态仿真能力，可基于虚拟镜像模拟产线不同工况下的运行状态，还原故障发生过程，为状态研判与处置提供直观支撑，同时具备可扩展性，能根据产线升级改造，灵活调整虚拟镜像结构与参数，匹配产线动态变化诉求

2.2 产线状态监测对技术的核心要求

工业自动化产线状态监测对技术的核心诉求聚焦于实时性、精准性、全面性与协同性四大维度，实时性诉求技术快速采集、传输产线运行数据，及时反馈设备及工序运行状态，保障隐患及时排查，精准性诉求技术准确捕捉设备运行细微异常，明确故障类型与位置，为故障处置提供可靠支撑。全面性诉求技术覆盖产线所有设备、工序及环境因素，实现无死角监测，规避局部监测缺失引发的安全隐患与生产损失，协同性诉求技术整合产线各环节监测数据，完成多设备、多工序协同分析，精准把控产线整体运行状态

2.3 二者适配性的核心体现

数字孪生技术核心特质与产线状态监测技术诉求高度契合, 适配性集中体现在三个维度, 数字孪生的实时同步特质可满足监测实时性诉求, 借助感知设备与数据传输通道, 实现物理产线状态向虚拟镜像的即时映射, 保障监测数据时效性, 其精准复刻与动态仿真特质可满足监测精准性诉求, 能精准捕捉设备运行异常, 模拟故障场景, 提升状态研判准确性^[2]。数字孪生的全局整合特质可满足监测全面性与协同性诉求, 整合产线各环节数据, 实现多维度、全流程协同监测, 精准把控产线整体运行态势, 为产线状态管控提供全方位技术支撑。

3 数字孪生技术在工业自动化产线状态监测中的应用路径

3.1 产线虚拟镜像的精准构建

虚拟镜像搭建是数字孪生技术落地的基础前提, 需以物理产线为核心原型, 完成全细节、高精度的复刻工作, 构建阶段需全面梳理产线各类设备参数、结构布局、工艺流程及周边环境条件, 系统采集各类设备的几何尺寸、运行参数、性能指标等核心信息, 确保虚拟镜像与物理产线在结构组成、功能特性上完全吻合。搭建虚拟镜像与物理产线的关联机制, 明确二者间的数据映射规则, 保障物理产线运行状态能够实时、精准反馈至虚拟镜像, 为后续状态监测、仿真分析工作筑牢基础, 虚拟镜像构建需兼顾精准度与实用性, 剔除冗余无效信息, 保障镜像运行流畅稳定, 既满足监测分析需求, 又避免资源浪费, 确保技术应用的可行性与高效性。

3.2 产线运行状态的实时感知与映射

实时感知与映射是数字孪生技术实现产线有效监测的核心环节, 需依托各类感知设备与高效数据传输技术, 完成产线运行数据的全面采集与实时传输, 在产线关键设备、核心工序及高危区域合理部署温度、振动、压力等多类型感知设备, 全面捕捉设备运行参数、工序执行状态及环境变化数据。借助工业网络将采集到的各类数据实时传输至虚拟镜像系统, 实现物理产线运行状态向虚拟镜像的同步映射, 让虚拟镜像能够实时模拟物理产线的运行态势, 直观呈现设备运行状态、工序推进进度及潜在安全隐患, 为监测人员提供清晰、直观的监测依据, 助力监测工作高效开展, 提升监测的及时性与全面性。

3.3 产线状态的精准研判与异常处置

精准研判与异常处置是数字孪生技术应用价值的核心体现, 依托虚拟镜像与高效数据交互能力, 实现产线状态的动态分析与高效处置, 借助虚拟镜像的动态仿真功能, 对产线运行数据进行实时分析, 研判设备运行趋势, 识别潜在故障隐患, 提前发出预警信号^[3]。当产线出现异常状态时, 虚拟镜像可快速还原异常发生全过程, 精准锁定异常位置与根本原因, 为工作人员提供针对性处置方案, 通过虚拟镜像模拟处置过程, 优

化处置流程、精简处置步骤, 缩短处置时间, 降低异常状态对产线运行的影响, 最大限度减少生产损失, 确保产线快速恢复正常运行状态, 保障产线连续稳定高效运转。

4 数字孪生技术在产线状态监测应用中的问题及解决举措

4.1 应用过程中存在的核心问题

数字孪生技术在工业自动化产线状态监测中的应用, 仍有诸多亟待破解的难题, 部分产线设备趋于老旧, 缺少标准化数据接口, 使得感知设备采集的数据无法高效传输至虚拟镜像系统, 进而影响数据完整性与实时性, 虚拟镜像构建难度偏高, 对技术人员专业素养要求严苛, 部分企业因技术储备薄弱, 难以搭建高精度、高适配性的虚拟镜像, 直接影响技术应用成效, 技术应用成本偏高, 涵盖感知设备部署、虚拟镜像搭建、系统日常维护等多方面投入, 给部分企业尤其是中小企业带来不小负担, 进一步限制技术的普及推广与规模化应用。

4.2 针对性解决举措

针对设备接口不兼容难题, 需对老旧设备实施适应性改造, 加装标准化数据接口, 保障感知数据顺畅传输, 同时搭建统一数据传输协议, 实现不同设备、不同系统间的数据互通共享, 针对虚拟镜像构建难度大的问题, 可加强与专业技术机构的协作, 引进成熟技术与专业人才, 开展针对性技术培训, 提升企业技术人员专业能力, 同时依托轻量化技术, 简化虚拟镜像构建流程, 降低构建门槛与难度, 针对应用成本偏高问题, 可推动技术轻量化应用, 按需部署感知设备与系统功能, 避免过度投入造成浪费, 同时加强技术推广与产业化落地, 降低技术应用整体成本, 让更多企业能够承担并顺利应用该技术^[4]。

4.3 技术应用的保障措施

为确保数字孪生技术在产线状态监测中稳定落地应用, 需建立完善的配套保障体系, 建立健全技术应用管理制度, 明确各环节责任分工, 规范技术应用全流程, 确保技术应用有序推进、落地见效, 加强技术维护与更新升级, 定期对感知设备、虚拟镜像系统及数据传输通道开展检修与优化, 及时排查并解决技术应用中的各类故障, 保障系统稳定运行, 加强专业人才培养, 搭建高素质技术团队, 重点培育兼具工业自动化与数字孪生技术知识的复合型人才, 为技术持续应用与优化升级提供坚实人才支撑, 推动技术与产线监测深度融合、高效落地。

5 数字孪生技术在产线状态监测中的应用价值与实践落地

5.1 技术应用的核心价值体现

数字孪生技术在工业自动化产线状态监测中的落地应用, 可释放多维度核心价值, 有效提升产线监测的智能化层级, 突破传统监测模式的桎梏, 实现产线状态的实时捕捉、精准研判

与全面覆盖，减少人为操作干预，大幅提升监测效率与监测质量，提前识别产线运行过程中的各类隐患，完成故障的提前预警与高效处置，缩短故障停机时长，降低生产损耗，保障产线运行的连续性与稳定性。为产线设备维护、工艺优化提供全方位数据支撑，优化维护流程与工艺参数设置，减少各类资源无效消耗，降低企业运营成本，进一步提升产线整体运行效能与市场核心竞争力。

5.2 不同行业的实践落地场景

数字孪生技术在各行业工业自动化产线中，均有着广泛的实践落地案例与应用场景，在汽车制造行业，可搭建整车生产线的虚拟镜像，实时监测焊接机器人、冲压设备等关键设备的运行态势，提前预警设备潜在故障，优化生产节奏排布，保障生产流程连续推进^[5]。在化工行业，可针对反应釜、压缩机组等高危设备构建专属虚拟镜像，实时捕捉设备运行参数变化，防范各类安全事故发生，实现产线安全、稳定运转，在电子制造行业，可通过虚拟镜像实时监测贴片、测试设备等的运行状态，精准把控各环节工艺参数，提升产品质量一致性，减少因质量不达标造成的各类损失。

5.3 技术应用的优化方向

数字孪生技术在产线状态监测中的应用仍有广阔优化空

间，需进一步提升虚拟镜像的构建精度与实时响应能力，优化数据采集与传输技术，降低数据延迟与误差，确保虚拟镜像能够精准、实时映射物理产线的实际运行状态，加强多技术融合应用，推动数字孪生技术与工业网络、感知技术等深度衔接，丰富监测功能维度，提升监测的智能化与精细化水平。结合不同行业产线的个性化运营需求，优化技术应用方案，实现技术的个性化适配，推动技术应用向精细化、多元化方向迭代，充分释放数字孪生技术的应用价值。

6 结语

本文围绕数字孪生技术在工业自动化产线状态监测中的应用展开深入探讨，明确该技术可有效破解传统监测模式的局限，实现产线状态的实时捕捉、精准研判与全面管控，梳理产线监测的核心诉求与现存困境、技术适配特性及应用路径，探究应用过程中的各类问题并给出对应解决办法，阐述技术应用价值与实践落地场景，构建起完整的应用探讨体系，数字孪生技术与工业自动化产线状态监测的深度融合，是制造业智能化转型的关键方向，可推动产线运行更为安全、稳定、高效，后续需持续优化技术应用方案，降低应用成本，推动技术规模化落地，为工业自动化产业高质量发展提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 张拓.数字孪生技术在工业自动化生产线中的应用研究[J].造纸装备及材料,2025,54(09):70-72.
- [2] 李欣旷.数字孪生技术在工业智能化制造中的应用及发展趋势探析[J].现代工业经济和信息化,2025,15(07):50-52.
- [3] 张珏慧.数字孪生与虚拟现实技术在工业智能化中的融合应用[J].大众标准化,2025,(08):155-157.
- [4] 刘墨迪,刘鑫宇.数字孪生技术在工业生产中的应用研究[J].中国机械,2024,(31):71-75.
- [5] 郑若楠.数字孪生技术在工业数字化转型领域的应用进展[J].新一代信息技术,2024,7(01):29-35.