

数字孪生赋能智能制造产线自动化管控技术

晏睿姗

太原理工大学, 中国·山西 太原 030024

摘要: 本文先对数字孪生技术的主要内容及其运行机理做了系统的梳理,厘清了它在工业环境下所对应的映射关系;其次从可视化水平提高、异常预测能力加强、试错成本降低这三个方面来论述数字孪生给产线自动化控制带来的价值增加;最后提出了包含数据融合同步、虚拟预验证调试、动态自适应排产和设备预测性维护这四个方面的一个完整的控制策略体系,使物理产线和虚拟模型之间可以互相驱动、互相优化。

关键词: 数字孪生; 智能制造产线; 自动化管控

Digital Twin Empowers Automated Control Technology for Smart Manufacturing Production Lines

Yan Ruishan

Taiyuan University of Technology, China Shanxi Taiyuan 030024

Abstract: This paper first systematically reviews the main content and operational mechanism of digital twin technology, clarifying its corresponding mapping relationships in industrial environments. It then discusses the value-added benefits of digital twins for automated production line control from three perspectives: enhanced visualization levels, improved anomaly prediction capabilities, and reduced trial-and-error costs. Finally, a comprehensive control strategy framework is proposed, encompassing data fusion and synchronization, virtual pre-validation and debugging, dynamic adaptive scheduling, and predictive equipment maintenance, enabling mutual driving and optimization between physical production lines and virtual models.

Keywords: Digital twin; Intelligent manufacturing production line; Automated control

0 引言

数字孪生技术依靠它所具有的全部要素映射、全部过程仿真以及全部生命周期联动的特点,给制造系统虚实互动赋予了新的技术根基。把物理产线的几何、机理和运行状态共同投影到虚拟空间里,制造企业可以从更高的角度去观察生产过程。在这种趋势之下,探寻数字孪生同产线自动化控制体系的深度融合之路,既是适应新一轮科技革命和产业变革的必然要求,又是重新塑造制造竞争优势、创建新型工业化体系的重大问题。

1 数字孪生技术概述

数字孪生是以数字化的方式建立物理实体的虚拟模型,用传感器的数据、通信协议和计算引擎完成物理对象在信息空间里全生命周期的动态再现。对于技术构成而言,它的底层依靠的是高精度三维建模以及几何重构,中间层依靠的是物联网来实现各种状态数据的及时接入,而上层则是用仿真算法和逻辑规则去模拟出物理行为并加以表述。数字孪生在智能制造环境之下已经由原来的静态的可视化呈现转变为一个包含几何模型、物理模型、行为模型以及

数据模型的综合性技术平台。它冲破了传统信息化系统里的数据孤岛以及模型割裂状况,让虚拟空间有了和物理产线同步振动的基本条件。目前由于边缘算力下沉、工业协议标准化等原因,数字孪生在制造领域的发展越来越成熟,从概念验证阶段向工程级常态化的应用迈进,是推动制造业数字化转型的重要基础技术^[1]。

2 智能制造产线自动化管控中数字孪生技术的作用

2.1 提高生产过程的可视化与透明度

传统的控制方式下,产线运行状况常常被分割到各个上位机以及孤立的系统当中,管理者很难在短时间内对整个作业场景有一个全面的认识。数字孪生技术把所有的要素变成一个完整的虚拟世界,把设备的开停、物料的流动、工装的状态和环境参数全部展现出来,将隐藏的生产过程变成可以看见、连续的可视化画面。透明化地呈现出来之后消除了物理车间信息的遮蔽作用,各个工序之间的衔接情况、节拍是否协调、资源的占用状况等等都能清晰地看到。管控人员不用来回跑动可以了解生产线实际的运行节

奏,很大程度上减少了由于信息不对称而产生的管理盲区。更为重要的是,可视化不是简单的静态报表电子化,而有时间轴属性的动态映射,使生产过程由原来的“黑箱”变成了可以被全局审视、被全员理解的透明系统^[2]。

2.2 增强异常工况的预测预警与响应能力

制造产线在持续运转时,会遇到设备老化、参数偏移以及物流堵塞这些可能的干扰,依靠人工巡查或者设定警报值的传统办法常常存在明显的滞后现象。数字孪生技术把物理实体在虚拟空间里即时再现出来,它的受力状况、温度变化、振动情况和耗能状况等都会被记录下来,并且可以用数据形式表现出来,进而找出那些已经出现却未能及时察觉的小问题。根据孪生模型对历史规律和当前态势的交叉比较,可以提前发出物理故障或者工艺失稳即将发生的预警信息。由此产生的“事后察觉”到“事前洞察”的能力转移,大幅缩短了异常被察觉的时间。虚拟空间对于异常演化路径的同步显示,也给控制端给予了直观的态势感知参照,从而使得反应举措不是凭个人的经验去推测,而是依照孪生回馈的客观情形展开,使整个系统的抗扰动韧性得到了实质性的提升。

2.3 降低试错成本并提升管控决策效率

产线控制牵涉排程调整、工艺转换以及资源重新安排等诸多决定,在传统的操作环境下,诸多的决定要经由不断尝试并加以改进后才有可能接近最佳结果,造成了大量的时间以及材料上的耗费,并且很容易打乱现有的生产节奏。数字孪生给决策赋予了一个没有风险的平行试验环境,管控逻辑的改变以及策略的推演可以在虚拟产线上先行完成闭环检验,没有产生新的矛盾之后再反馈到物理端去执行。该种机制可以避免由于实体试错而造成的废件损失和非计划停线的代价,从根本上降低管控迭代的隐形成本。另外,孪生体把分散的运行指标汇聚成高维的综合态势,让决策者在面对繁杂的变量时能迅速抓住重要的因果联系,从而提升决策的可信度以及流转的速度。对于管理效率而言,数字孪生实际上把管控行为由依靠经验来实施的缓慢摸索转变成了依靠模型来进行判断的快速反应,整个指挥链条也因此变得更加简洁高效。

3 基于数字孪技术的智能制造产线自动化管控策略

3.1 建立多源异构数据的实时融合与同步机制

数字孪生应用到产线控制上首先要破除 OT 和 IT 之间数据的隔阂,让虚拟模型同物理实体时刻保持同步的状态。具体的实现方法是在产线边缘处设置协议转换网关,把 Modbus TCP、Profinet、OPC UA 以及 MQTT 这些不

同的制式设备报文转变成标准的 JSON 数据流,并且按照 1 秒到 5 秒的时间间隔把它们发送给孪生中台。对于结构化的业务数据和半结构化的日志数据,用基于时间戳的滑动窗口拼接法来对同一个物理节点在不同的系统中字段做主键绑定,从而去除由于传输抖动造成的数据断层。在此基础上,使用轻量级 ETL 管道把数据按照设备、物料、工艺三个主题域写入时序数据库里,在孪生引擎里配置差分校验模块,当物理端的状态发生跳变时,立刻发出局部强制刷新的指令,而不是全部重新加载,从而保证虚拟产线镜像更新及时并且不会造成过多的带宽消耗^[3]。

同时,在数据层建立主数据字典以及语义映射表,确定温度、转速、良品率等 32 个主要指标的计量单位和精度等级,避免由于不同的源头换算造成的孪生模型失真。对视觉检测位和点云扫描的数据采用边缘端特征提取加重心坐标回传的方式处理,原始的大文件不离开工位,将结构化的偏差值灌入孪生体里。每天凌晨零点由后台调度任务来完成当天数据链路的断点自检和偏移校准,并将校准系数反向固化到边缘采集脚本当中。整个系统依靠数据血缘追踪作为最后的保障,任何一个时刻的孪生画面状态出现偏差都可以追溯到它最初被采集的节点和使用的协议通道上,从而保证孪生体不会成为孤立无援的摆设品,而会是同实体生产线一起呼吸的动态数字基座。

3.2 推行基于虚拟仿真的产线预验证与调试

新工艺导入或者换型排产前,在虚拟空间中完成产线逻辑的闭环走查,不能直接在物理端开动机模。操作人员在孪生平台里调出预先设定好的产线机理模型,把待投产的 BOM 清单、工序节拍表以及工装参数以接口的形式批量输入进去,从而促使虚拟 AGV、机械臂和加工中心按照新的逻辑来展开全流程的空载仿真工作。仿真过程中,系统用 5 毫秒作为一个步进粒度来记录各个工位之间干涉区重叠率和节拍空耗时间,一旦发现相邻工位的动作包络面相交或者缓存位溢出,立刻在虚拟看板上标红并冻结后续的逻辑触发,让工艺人员在线拖拽修改 PLC 梯形图之后再热启动仿真,直到连续跑通 72 个虚拟批次并且没有出现逻辑错误为止,才可以输出准许物理下发的验证签核单。

对于电气和控制信号之间的耦合调试,在孪生环境下挂载软 PLC 运行时容器,把实体控制柜的逻辑程序镜像烧录到虚拟控制器上,从而完成 IO 点位和孪生运动机构的硬线级绑定测试。调试阶段人为插入急停触发、托盘卡死、扫码失败这三种典型的异常指令,观察虚拟产线互锁响应顺序以及报警树触发层次,从而去掉实际控制程序里缺少的防错条件。经过虚拟调试确定的控制程序用版本哈希值

加密固定,通过单向摆渡通道传送到物理产线主控柜,不允许现场工程师在调试成功之后擅自添加临时补丁。采用先虚后实的串行验证途径,使产线换型预备时间从原来的现场不断碰磨变成纯粹的线上模型级收敛。

3.3 实现扰动场景下的动态排产与自适应调度

当产线上出现物料短缺、设备小故障或者紧急订单插入时,控制系统的即时反应是激活孪生体内隐藏的离散事件仿真模块,并且把目前的在制品分布状况当作背景,进而展开滚动式的重新安排计算工作。算法模块先将剩余未完工单拆解成最小标准工时单元,再根据各个工位实时可用率矩阵,在虚拟空间里并行产生出8到12条候选调度分支,每一条分支对应一个工单调拨和队列重组方案。仿真引擎用30秒时间完成所有分支的虚拟跑批,按照交付达成率权重0.5、设备综合利用率权重0.3、换型频次惩罚项权重0.2来计算综合评分,把得分最高的调度拓扑自动映射成物理MES的派工指令,同时更新每个工位HMI上当前作业指导信息,省去人工审核步骤直接进入执行状态。

为了应对频繁出现的小幅波动,系统每隔15分钟对孪生体的产能情况进行一次静默拉取,如果发现实际节拍比基准模型持续偏离了10%以上时,会立刻做出轻量级的再调度工作,不会影响到主要的任务。对于有工序间回流的复杂干扰,用孪生引擎在虚拟缓存区预演瓶颈工位的动态暂存容量,如果判断原队列会导致全线倒灌,自动拆分后置订单并平移到备用支线虚拟验证通过之后再行实体切流。所有的调度决策执行轨迹以及虚拟预演偏差值都被记录下来,并且作为后续排程算法奖惩函数迭代的样本输入。整个动态调度过程用孪生预演代替人工权衡,在扰动成为常态的情况下保证产线计划执行的刚性兑现。

3.4 完善虚实联动的设备预测性维护闭环

设备维护的基点是将孪生端的劣化推演结果准确地转换成物理端的工单行动。每天凌晨从孪生平台中提取出各个主轴、伺服电机和传动模组最近720小时内振动频谱、温度曲线以及电流波动带的数据,并将其输入内置的退化量回归模型里,从而得到该台设备在未来168小时内出现故障的概率热力图。按照系统的概率区间把设备分成绿色、黄色、红色三种状态,黄色预警的设备会在孪生端产生润滑保养提醒单并且避开当前生产的波次排入空闲时段的维护槽位中去,红色高危设备会先由孪生体计算出单个机器停机机会对哪些相关工位造成波及范围以及影响程度,然后自动生成一份维修工单并发送到移动端派工池里代替定时的预防性保养。

维护人员到达现场处理后,在孪生终端里填写实测磨

损量、更换件序列号以及修复前后振动特征值,孪生引擎接收到这些数据之后会反向调节原有机理退化曲线的斜率参数,从而实现一次维护经验的反馈。对于已经完成大修的主要部件,在虚拟空间中单独拉出一个该部件的平行寿命线程,将实体装机后的实际衰减速率和线程推演值进行比较,误差大于15%时自动发出模型参数自修正。另外,将历史触发过的每次预测性干预最终的实际失效时间之间的差距加入KPI看板当中去,把它当作衡量孪生体维护置信度的一个量度。

具体的执行方面,还要创建维护指令的强制闭环校验机制。物理端完成红色预警工单处置之后,系统会要求在孪生终端上扫描二维码进行核销,并且上传三个轴向正交方向的振动时域图谱,用算法比较修复前后包络峰值的变化情况,如果降幅没有达到标定阈值的60%以上,则会自动退回此次的维修结案任务,并且重新下发给高级技师去复检。对于长期使用的易损件,把装机时间戳和额定寿命里程固化到孪生体里,在运行了500小时后,后台会无声地产生虚拟拆解工单,不会影响到物理上的停线时间。

4 结语

本文主要研究数字孪生技术和智能制造产线自动化控制之间的耦合关系,对数字孪生在全要素镜像、状态可视、风险预判、决策提效等方面的作用做了系统的总结,并在此基础上提出建立多源数据融合机制、推行虚拟预验证、实施动态自适应调度、健全设备预测性维护闭环等一系列具体的措施,可以初步形成一个虚实共生的产线精益管控体系,给企业缩减非计划停机时长、加强柔性交付水平赋予可行的技术途径。今后相关人员要加深机理模型同工业AI算法的嵌套运用,促使数字孪生体由“几何—状态对应”迈向“自主演化决策”,进而推进我国离散制造和流程制造全方位进入自感知、自决策、自执行的高阶智能管控时期。

参考文献:

- [1] 姜渭鹏. 自动化产线与数字化管控融合的无级变速器冲压配件智能制造模式构建[J]. 信息记录材料, 2026, 27(7):157-159.
- [2] 王爱民. 面向智能生产管控的数字孪生技术[J]. 人工智能, 2021(2):12-20.
- [3] 柴再先, 王毅, 张嘉等. 基于数字孪生技术的钛合金管件智能制造与质量管控的数字线程[J]. 铸造技术, 2023, 44(2):161-168.

作者简介: 晏睿珊(2005.05-), 女, 汉族, 陕西商洛人, 大三在读, 学生, 研究方向: 从事机械设计制造及其自动化研究。