

# 基于数字孪生技术的智能制造生产线设计与仿真调试

常萱萱 张越 周俊 沈浩杰 魏子卿 李永梅\*  
东南大学成贤学院

DOI:10.32629/acair.v3i4.17933

**[摘要]** 数字孪生作为智能制造的关键使能技术,通过构建物理实体与虚拟模型之间的双向动态映射,为生产系统的设计、调试与优化带来了革命性变革,具有缩短开发周期、降低试错成本、提升运维效率的巨大价值。然而,构建高保真、实时联动的数字孪生产线面临多源异构系统集成困难、虚实映射精度不足、控制逻辑复杂三大技术挑战。本文旨在解决上述难点,明确了数字孪生产线对建模、实时数据交互与智能协同控制的技术需求,构建了涵盖立体仓库、环形输送线、视觉检测台与总控系统的完整数字孪生产线。通过虚拟场景搭建实现产线的三维可视化,通过模块化控制逻辑设计实现PLC对产线流程的精确调度,通过多系统通讯集成打通了PLC、机器人及视觉软件之间的数据壁垒,并最终通过虚拟调试验证了产线的“虚实联动”与协同运行。系统识别准确率达98.5%,平均单周期作业时间44.8秒,有效满足了缩短开发周期、降低试错成本的技术需求。所提方法对解决中小型智能制造产线的快速部署与调试具有显著应用价值。

**[关键词]** 数字孪生; 智能制造; 立体仓库; 环形输送线; 视觉检测

中图分类号: TU249 文献标识码: A

## Design and Simulation Debugging of Intelligent Manufacturing Production Lines Based on Digital Twin Technology

Xuanxuan Chang Yue Zhang Jun Zhou Haojie Shen Ziqing Wei Yongmei Li\*  
Chengxian College, Southeast University

**[Abstract]** As a key enabling technology for smart manufacturing, digital twin revolutionizes the design, commissioning, and optimization of production systems by establishing a bidirectional dynamic mapping between physical entities and virtual models. It offers immense value in shortening development cycles, reducing trial-and-error costs, and enhancing operational efficiency. However, constructing a high-fidelity, real-time interconnected digital twin production line faces three major technical challenges: difficulties in integrating multi-source heterogeneous systems, insufficient accuracy of physical-virtual mapping, and complex control logic. This paper aims to address the aforementioned challenges by clarifying the technical requirements of digital twin production lines for modeling, real-time data interaction, and intelligent collaborative control. A complete digital twin production line is constructed, encompassing an automated stereoscopic warehouse, annular conveyor line, visual inspection station, and central control system. Three-dimensional visualization of the production line is achieved through virtual scene construction; precise scheduling of production processes by PLC (Programmable Logic Controller) is realized via modular control logic design; data barriers between PLC, robots, and vision software are eliminated through multi-system communication integration. Finally, the "physical-virtual linkage" and collaborative operation of the production line are verified through virtual commissioning. The system achieves a recognition accuracy of 98.5% and an average single-cycle operation time of 44.8 seconds, effectively meeting the technical requirements of shortening development cycles and reducing trial-and-error costs. The proposed method holds significant application value for solving the rapid deployment and commissioning of small and medium-sized smart manufacturing production lines.

**[Key words]** digital twin; Intelligent manufacturing; Three-dimensional warehouse; Circular conveyor line; visual inspection

## 1 研究背景与内容

智能制造结合了互联网、大数据、数字孪生等新一代信息技术和人工智能技术,是新一代信息技术与先进制造技术的深度融合。它贯穿于产品的设计、生产、管理、服务等整个制造领域的链条,核心目的是赋予制造更多的“智慧”<sup>[1]</sup>。

本研究围绕“如何高效构建并验证一条数字孪生智能制造生产线”展开,旨在解决其中的三个关键难点:(1)多源异构系统(PLC、机器人、视觉)的集成与通信壁垒;(2)虚拟模型与物理实体间高精度、低时延的虚实映射;(3)复杂控制逻辑的模块化设计与协同调度。主要研究内容为:(1)面向集成与映射的数字孪生生产线构建:以X-Simulation平台为枢纽,研究多系统集成接口与信号映射方法,完成虚拟产线搭建;(2)基于模块化与信号编码的控制系统设计:研究PLC、机器人与视觉系统之间的协同控制逻辑,设计基于二进制编码的指令集与模块化的程序架构,以有限的I/O资源实现复杂的设备协同;(3)虚实联动验证与效能评估:在虚拟环境中对产线进行全流程联调,验证所提方案在控制逻辑正确性、工艺流程顺畅性以及系统实时性方面的有效性。

## 2 关键技术与实验平台

为构建高保真、实时交互的数字孪生系统并完成后续的实验验证,本文所涉及的关键技术有数字孪生技术和通讯技术,实验平台为X-Simulation数字孪生平台。本研究的核心是解决虚实空间的精准映射与数据无缝流动问题。研究的起点是数字孪生技术,它为物理对象创建了动态更新的虚拟镜像,是实现深度洞察与智能决策的基础。为确保虚实空间数据的无缝流动,通讯技术提供了关键的低时延、高可靠连接保障。这些技术要素被集成并应用于X-Simulation数字孪生平台之中<sup>[2]</sup>。

### 2.1 数字孪生技术

系统拥有丰富的模型库,包含机器人、机床、AGV、输送带、机械零件、传感器等来自不同厂家的标准模型。所有的模型在场景中都有自己的属性,可通过虚拟或虚实方式实现仿真控制。具有丰富的模型库,用户自定义程度高,可适应多种使用环境。基于强大的物理引擎和算法,可任意调整机器人的位置和角度,且能够模拟现实中的运动。

### 2.2 系统集成通讯技术

系统集成的核心在于建立稳定可靠的通讯连接,本文通过应用TIA Portal V15.1与X-Simulation连接实现功能。首先打开连接驱动,再打开PLC程序并启动PLC虚拟仿真,接着在驱动中添加PLC设备,添加后连接成功。

### 2.3 实验平台

本研究构建了一个完整的数字孪生实验平台,集成了多个子系统以实现高效协同作业。控制中枢采用西门子TIA Portal与S7-1500 PLC,确保系统控制的精确性与可靠性。在机器人集成方面,结合ABB RobotStudio与ESTUN Editor两种编程环境,为不同类型工业机器人的调试与集成提供了便利。机器视觉系统基于LabVIEW平台开发,借助其视觉开发模块(VDM),实现了对

工件颜色的准确识别。该系统通过相机采集工件图像,并依次进行色彩空间转换、阈值分割和特征提取等一系列处理步骤,最终输出工件的颜色信息。

## 3 智能制造生产线建模与场景构建

### 3.1 产线需求分析与整体设计

基于智能制造发展趋势和教学研究需求,本研究设定产线功能目标:实现工件自动化出库、智能检测和按类入库完整流程。具体功能需求有4点。

(1)仓储管理:立体仓库设12个标准库位(6个出库位、6个入库位),各库位配光电传感器检测状态。出库位放带物料工装板,入库位按视觉检测结果接收不同颜色工件。(2)物料流转:环形输送带负责工装板输送,实现正反转控制,关键工位设阻挡气缸、顶升气缸和光电传感器,运行速度可调以适应不同生产节拍。(3)视觉检测:专用视觉检测台配工业相机和照明系统,准确识别工件颜色(黄、红两种),并实时传输识别结果给控制系统。(4)机器人作业:配置两台六轴工业机器人,分别负责出入库及视觉检测位上下料作业,需具备精确轨迹规划和与外围设备协同控制能力。

基于上述需求,采用U型产线布局。该布局将立体仓库、输送带、视觉检测台和控制台紧凑排列在U型区域,节省空间且便于物料流转和人员操作。

### 3.2 虚拟产线建模

虚拟产线建模是数字孪生技术在制造业的核心体现,它通过集成几何、物理、行为及规则等多维度,在虚拟空间中构建一个与物理产线实时同步、虚实映射的动态数字镜像。该建模过程不仅涵盖设备、物料、仓库等静态资源的数字化,更关键的是对生产工艺、控制逻辑、物流节拍、机械手动动作等动态行为的仿真与模拟<sup>[3]</sup>。本实验系统包括立体仓库模型、工件模型、ESTUN机器人模型、环形输送带模型和主控制台模型。

### 3.3 虚实映射关系建立

建立准确的虚实映射关系是实现数字孪生的核心。在环形输送线中,X-Simulation控制台界面为各执行机构分配对应PLC信号地址,这种一对一映射确保控制指令准确传至虚拟设备(图1所示)。

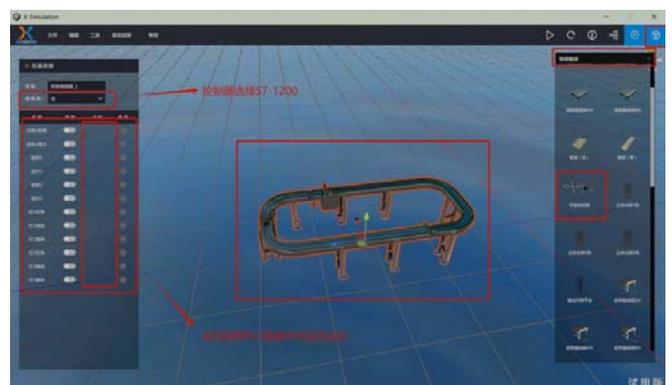


图1 虚实映射关系设置

## 4 控制系统设计

### 4.1 集成化控制系统架构设计

采用分层分布式控制架构,构建了基于PLC的多设备协同的智能控制系统。系统架构自上而下分为三个层次:决策层、控制层和执行层。决策层(HMI/上位机)负责生产订单管理与状态监控;控制层(S7-1500 PLC)作为中枢,执行模块化程序,调度全线设备;执行层(机器人、输送线、视觉系统)接收指令并反馈状态。

### 4.2 PLC控制程序模块化设计

基于结构化编程思想,我们将PLC程序分解为多个模块,提高了程序可读性和可维护性。主控程序模块是核心,用顺序功能图(SFC)组织生产流程。设备控制模块含多个功能块(FC)对应不同执行设备。信号处理模块负责系统I/O信号管理,包括输入信号滤波、输出信号保护和信号映射等功能,还实现了PLC与机器人、视觉系统信号的转换与映射。数据处理模块负责与视觉系统通信和数据交换,通过TCP/IP协议接收视觉系统颜色识别结果并转换为PLC内部标志位,同时管理出库、入库计数统计以及生产数据的记录与分析。

### 4.3 机器人轨迹规划与程序逻辑

机器人运动控制是自动化生产关键<sup>[4]</sup>。两台机器人分别设计专用运动程序和通信逻辑。运动执行阶段,解析PLC发的4位二进制指令确定目标库位和操作类型。轨迹规划采用分段优化策略,长距离用关节运动提高效率,接近目标点时切换直线运动确保精度。视觉检测机器人程序逻辑较简单,重复定位精度高,运动轨迹为“取件-放置-检测-回传”四步循环。通信逻辑上,两台机器人采用相同应答机制,完成动作后向PLC发出确认信号,等下一步指令。

### 4.4 视觉检测与智能决策

视觉检测系统是智能分拣核心,设计重点为准确性、实时性和可靠性<sup>[5]</sup>。图像采集系统固定式安装,确保拍摄视角一致。经实验确定最佳光照参数为环形LED光源、亮度等级4、色温5500K,相机曝光时间设为8ms,保证图像亮度且避免运动模糊。为消除环境光干扰,加装遮光罩并设置自动白平衡。

图像处理算法采用多级处理流程,先对原始图像高斯滤波消除噪声,再转换到HSV色彩空间,用色调分量阈值分割,最后经形态学操作去除噪点、提取工件区域。颜色识别阶段,统计目标区域HSV均值,按预设阈值范围分类,阈值参数可调整以适应光照变化,经实验确定黄色工件 $H \in [20, 35]$ ,红色工件 $H \in [0, 10] \cup [160, 180]$ 。

系统设计了自诊断功能,定期检查相机连接、光源稳定性和算法运行状态。发现异常时,立即向PLC发送报警信号并记录故障信息,便于维护排查。

## 5 应用验证与可迁移性方法论

为全面评估数字孪生生产线的性能,设计了系统的测试方案,涵盖功能、性能和可靠性三个维度。

功能验证通过标准作业流程测试完成。测试数据显示,系统

识别准确率达到98.5%,其中黄色工件识别率99.2%,红色工件识别率97.8%;在连续8小时的压力测试中,系统完成了576个标准作业周期,平均单周期时间44.8秒;机器人重复定位误差小于 $\pm 0.1\text{mm}$ ,输送线速度波动控制在 $\pm 2\%$ 以内,视觉系统处理时间稳定在1.2-1.5秒。这些指标共同印证了虚实映射的精确性和系统协同的稳定性。

尽管解决方案较好地满足了主要技术需求,但仍存在不足。首先,虚拟模型的物理逼真度与仿真计算效率之间存在固有矛盾,为保障实时性,部分复杂的物理特性(如柔性体动力学)被简化,这可能导致虚拟调试与极端物理工况下存在偏差。其次,所采用的信号编码方法虽然高效,但其指令集是预先静态定义的,面对动态调整生产工艺的柔性需求时,灵活性稍显不足。最后,中心化的PLC控制架构在应对未来更大规模设备集成时,可能在数据处理能力和响应速度上遇到瓶颈。

## 6 总结

通过系统性的理论探索和工程实践,在数字孪生技术领域取得了一定的创新性成果,针对数字孪生生产线构建中的集成、映射与控制难点,提出并验证了一套行之有效的解决方案。成功搭建了基于X-Simulation的多源异构系统集成框架,提出了基于信号编码的设备协同控制方法,基于信号编码的设备协同控制方法,借助有限的I/O资源实现了复杂的控制逻辑,化解了多系统集成的通信瓶颈难题。提出分层渐进式虚拟调试方法,经单设备、子系统、系统联合调试三阶段,提升调试效率与系统可靠性。实验结果显示,该方法使调试周期缩短40%,问题发现率提高60%。

将继续探究机器学习算法在数字孪生系统的应用,包括基于深度学习的视觉检测优化、基于强化学习的控制参数自整定和基于数字孪生数据的预测性维护,以提升系统智能化程度。

校企合作大学生创新项目:“基于数字孪生技术的智能制造生产线设计与仿真调试”(项目号:XCX2025056)。

### [参考文献]

- [1]张心旺,闫朝阳,郭文嘉,等.基于数字孪生的增材机器人实时监控与仿真系统[J].焊接,2025(10):31.
- [2]田丽萍,王俊峰,张慧贤,等.数字孪生系统开发中虚实参数准确的同步技术[J].机床与液压,2025(10):22.
- [3]王好柱.数字孪生技术在智能机械制造中的应用[J].模具制造,2025,25(07).
- [4]曹锦旗,韩雪松.工业机器人轨迹规划的研究方法综述[J].信息与控制,2024,53(04).
- [5]施敏,邹建华,卢伟健,等.基于机器视觉的流控元件气密性检测设备的研发[J].机电工程技术,2023,52(11).

### 作者简介:

常莹莹(2004--),汉族,江苏省徐州市贾汪区人,本科,智能制造。

### \*通讯作者:

李永梅,东南大学成贤学院。