

基于数字孪生的智能制造产线建模与PLC虚拟调试研究

王 衍, 韦佳豪, 耿金萍

江苏师范大学文学院电气与智能制造学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年6月22日; 录用日期: 2026年7月14日; 发布日期: 2026年7月24日

摘 要

为解决柔性制造中物理产线现场调试时间过长, 设备之间存在碰撞隐患以及难以对控制系统进行脱机测试等问题, 在SimReal智能制造与机器人工艺仿真平台上进行基于数字孪生技术的虚拟调试研究。该研究结合了四种技术: 机器人参数化建模、运动单元伺服驱动、产线工艺流程配置以及PLC虚拟联调等, 完成了机器人的建立及其运动校准、运动部件的编程控制、整条生产线的设计以及生产工艺流程的设计, 并实现了PLC与仿真环境之间的通信以及脱机调试等功能。测试结果显示, 所建立系统的运动限制合理, 生产线运行良好, 控制逻辑正确可靠, 能够大大减少现场调试时间, 避免设备之间的干涉以及程序出错等问题发生, 可以供类似柔性生产线进行数字化设计以及离线调试使用。

关键词

数字孪生, 智能制造产线, 机器人建模, 伺服控制, PLC虚拟调试

Research on Modeling and PLC Virtual Debugging of Intelligent Manufacturing Production Line Based on Digital Twin

Yan Wang, Jiahao Wei, Jinping Geng

School of Electrical and Intelligent Manufacturing, Jiangsu Normal University KeWen College, Xuzhou Jiangsu

Received: June 22, 2026; accepted: July 14, 2026; published: July 24, 2026

Abstract

To address the issues such as the long on-site debugging time of physical production lines in flexible

文章引用: 王衍, 韦佳豪, 耿金萍. 基于数字孪生的智能制造产线建模与 PLC 虚拟调试研究[J]. 动力系统与控制, 2026, 15(3): 291-298. DOI: 10.12677/dsc.2026.153030

manufacturing, potential collisions between equipment, and the difficulty of offline testing of control systems, this paper conducts a research on virtual debugging based on digital twin technology on the SimReal intelligent manufacturing and robot process simulation platform. This research integrates four technologies: robotic parametric modeling, servo drive of motion units, production line process flow configuration, and PLC virtual joint debugging. It completes the construction and motion calibration of robots, the programming control of moving components, the design of the entire production line and the production process, and realizes functions such as communication between PLC and the simulation environment, as well as offline debugging. The test results show that the motion constraints of the established system are reasonable, the production line operates well, and the control logic is correct and reliable. This system can greatly reduce on-site debugging time, avoid equipment interference and program errors, and can be used for the digital design and offline debugging of similar flexible production lines.

Keywords

Digital Twin, Intelligent Manufacturing Production Line, Robot Modeling, Servo Control, PLC Virtual Debugging

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着制造业向多品种、小批量柔性生产模式快速升级,传统智能制造产线高度依赖物理样机进行装配、接线与现场联机调试,普遍存在调试周期冗长、实施成本偏高、设备碰撞隐患无法提前预判、控制系统难以脱机测试等痛点,制约了产线快速迭代与柔性生产落地。数字孪生通过构建物理产线的高精度数字镜像,可在虚拟环境提前完成设备建模、运动仿真、工艺规划与控制逻辑验证,已成为智能制造离线调试与优化的核心技术支撑[1]。

目前国内外针对数字孪生与虚拟调试已有较多研究成果,但现有研究大多局限于单机器人建模、局部工序仿真或单纯 PLC 逻辑校验,缺乏机械结构、运动伺服、产线工艺与电气控制深度融合的一体化整体方案[2]。部分仿真仅做纯程序逻辑推演,无三维实体场景支撑,难以检测空间干涉与时序差错;另有半实物调试方式仍依赖实体 PLC 与硬件配套,现场布线繁杂、调试占用产能、安全风险突出[3]。

现阶段虚拟调试的主流技术路径可分为三类:

- 1) 纯逻辑仿真缺乏三维实体场景映射,与实际现场工况偏差较大;
- 2) 硬件在环半实物调试依赖物理设备支撑,存在成本高、通用性不足的问题;
- 3) 基于 SimReal 等专用智能制造仿真平台的全虚拟调试,可一站式完成机器人建模、伺服脚本开发、产线工艺编排与 PLC 虚拟通信,无需实体硬件即可实现全流程验证,是柔性产线数字化调试的重要发展方向,目前其完整工程应用范式仍较为匮乏[4]。

在此背景下,本文依托 SimReal 智能制造仿真平台,搭建了设备建模层、运动控制层、工艺流程层、电气联调层四层数字孪生架构,融合机器人参数化建模、伺服驱动控制、产线工艺配置及 PLC 虚拟联调关键技术。具体而言,本文采用 Modified DH 参数完成机器人运动学标定,借助 Python 脚本实现运动单元精准控制,结合 TIA Portal 与 S7-PLCSIM Advanced 搭建虚拟 PLC 环境,建立仿真与控制系统双向信号联动链路。整体技术路线如图 1 所示,从机器人参数化建模出发,依次完成运动组件建模与伺服控制、

智能制造产线布局与工艺配置、PLC 虚拟调试与信号联动，最终通过仿真运行与结果验证完成全流程闭环。相较于现有单一局部仿真方案，本文形成了“设备建模 - 运动控制 - 工艺编排 - 电气联调 - 仿真验证”的全流程数字孪生建模与虚拟调试体系，可大幅缩减现场调试时间、规避设备干涉与程序漏洞，为同类柔性产线数字化设计、离线调试及实训应用提供参考依据[5]。

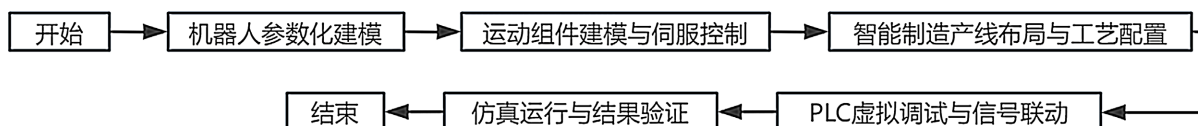


Figure 1. System technical route flowchart

图 1. 系统技术路线流程图

2. 系统总体方案

基于一般柔性加工生产线进行仿真，建立包含设备建模层、运动控制层、工艺流程层以及电气联调层四个层次结构，如图 2 所示。其中设备建模层用于导入机器人、输送机、加工机床、工装夹具等三维模型并对其进行相关设置；运动控制层用于进行关节驱动、伺服控制以及脚本执行；工艺流程层用于进行工位设定、产品组装以及生产顺序设置；电气联调层用于进行 PLC 与仿真软件间通讯和控制程序测试[1]。这四者之间存在一种“以模型带动控制，控制服务于工艺，工艺带动电气”的关系，保证整个生产线仿真实现完整性和一致性。该系统的目的在于：

- 1) 建立参数精准的机器人数字化模型；
- 2) 实现运动单元稳定可靠的伺服控制；
- 3) 搭建连续流畅的智能制造产线运行流程；
- 4) 完成 PLC 控制程序离线调试与信号联动；
- 5) 最终实现无干涉、无逻辑错误、可以连续运行的虚拟生产线。

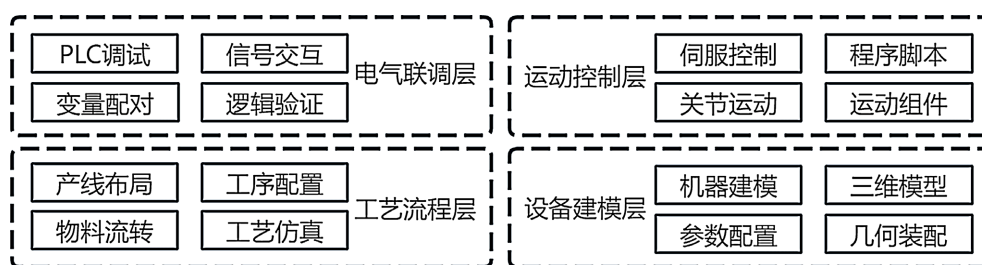


Figure 2. Schematic diagram of the four-layer digital twin architecture of intelligent manufacturing production line

图 2. 智能制造产线数字孪生四层架构示意图

3. 关键技术与实验实现

3.1. 机器人参数化建模

以六轴工业机器人 CAD 模型作为建模对象，使用模板替换的方法进行参数化工厂。整个过程见图 3。

首先导入机器人外部 CAD 几何模型，通过坐标平移与原点标定，实现模型姿态与世界坐标系精准对齐。本文选用 Epson C8-A701 六轴串联工业机器人为建模载体，采用 Modified DH 参数法开展运动学建模[5]，相关连杆结构尺寸、关节运动极限及性能参数详见表 1。

建模过程以同构型标准机器人为模板，保留原有运动学算法与控制器程序，仅替换模板几何外形为

导入的实体模型，并删减多余结构部件。依据机器人实际结构整定运动链连杆长度、关节旋转方向等关键参数，同时按照行业规范配置各关节的运动范围、最大运动速度及加减速指标。完成几何部件与各关节的关联装配，保证实体结构与运动链驱动规则相匹配。建模完成后通过正、逆运动学进行校验，分别从关节活动区间、姿态求解能力及三维可达空间等方面开展检测，验证机器人模型的运动合理性与可用性。

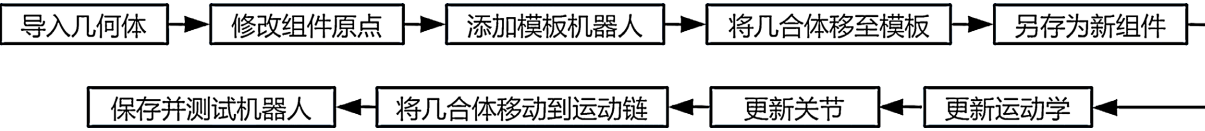


Figure 3. Robot modeling experiment process
图 3. 机器人建模实验流程

Table 1. Parameter table for Modified DH six-axis industrial robot
表 1. 六轴工业机器人 Modified DH 参数表

关节 i	α_{i-1}	α_i	d_i	θ_i
1	90°	0	d_1	θ_1 (变量)
2	0°	α_2	0	θ_2 (变量)
3	90°	0	0	θ_3 (变量)
4	-90°	0	d_4	θ_4 (变量)
5	90°	0	0	θ_5 (变量)
6	0°	0	d_6	θ_6 (变量)

3.2. 运动组件与伺服控制

建立三轴直角坐标系运动执行机构，然后进行基座、滑台、执行端等机械部分装配如图 4。

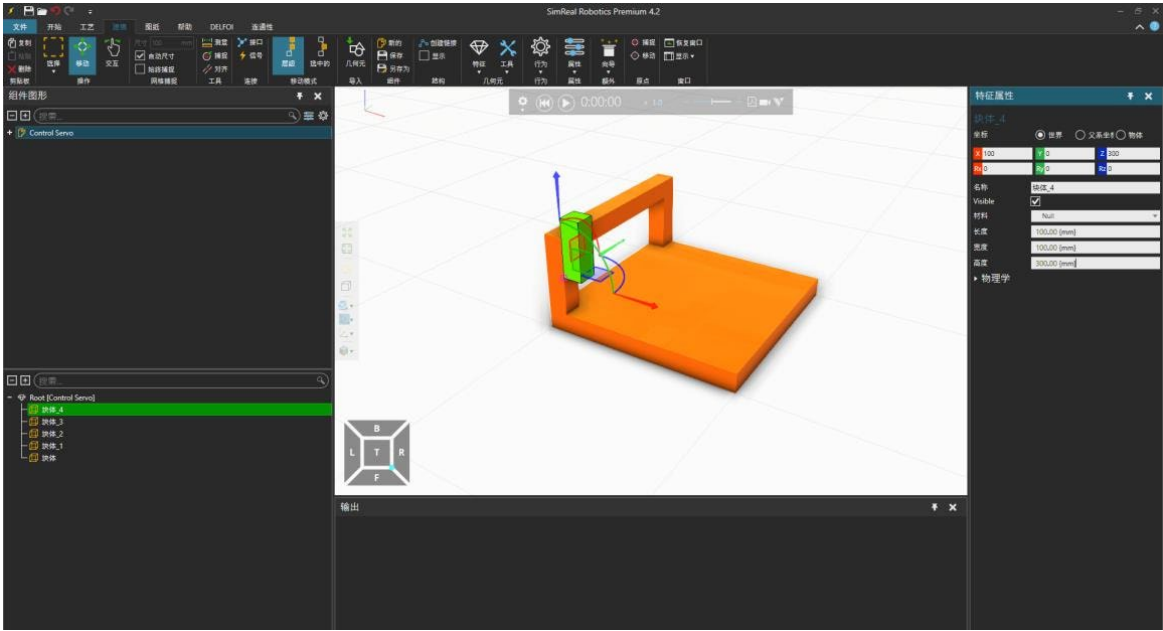


Figure 4. Modeling structure of the three-axis motion component
图 4. 三轴运动组件建模结构

在行为模块中添加伺服控制器，将控制器连接到相应的运动单元，添加自定义控制关节并设置各个轴限值，在 Python 脚本中实例化一个伺服控制器对象，设置关节的目标位置、运动时间以及触发条件等进行顺序运动、逻辑判断以及运动周期计算。该脚本可以单独使某个关节运动也可以让多个关节同时运动或心跳模式下工作，在仿真过程中可以随时获取关节的状态并且改变其目标位置。从运动效果来看，各个方向上运行都没有超程也没有出现卡滞的情况，发送给控制器的信息和控制器实际做出的动作是吻合的，可以达到生产线上的使用标准[2]。

3.3. 智能制造产线搭建与工艺配置

根据上料、输送、加工、转运、码垛等生产工艺要求进行虚拟产线布置，整个生产线布置情况见图 5。

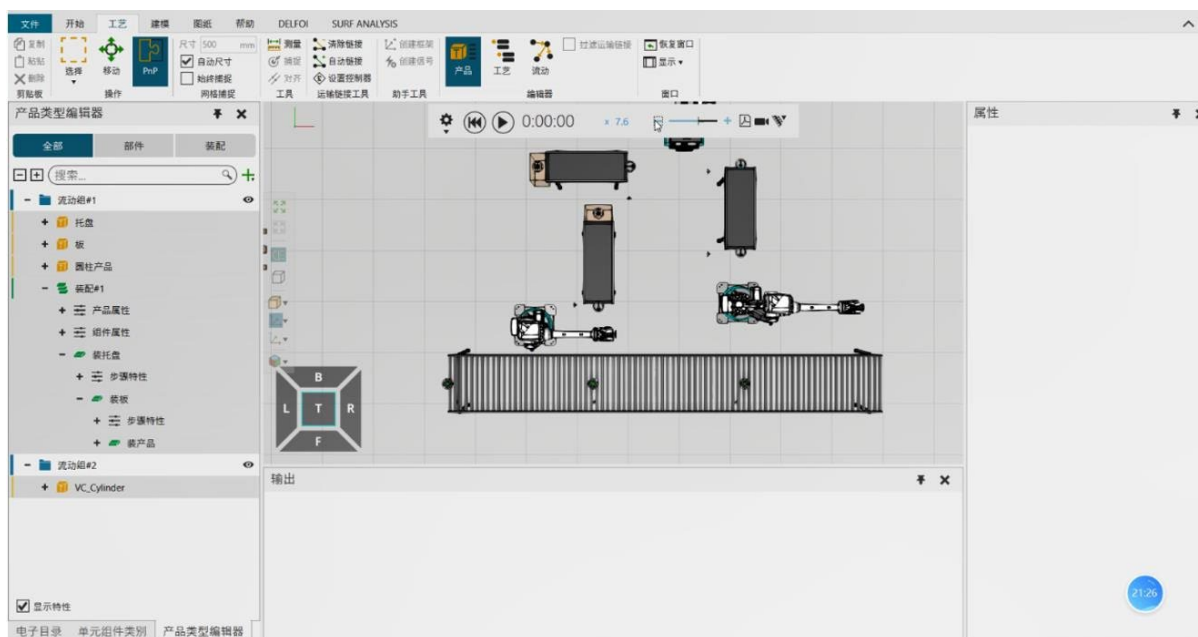


Figure 5. Overall design of intelligent manufacturing production line

图 5. 智能制造产线总体设计

从模型库加载上料器、输送机、加工设备、工业机器人以及定位装置，在工位上正确放置这些设备，使机器人的工作范围能够到达所有工位同时留有足够的余量。在工艺配置中确定产品的种类，定义托盘、隔板和工件之间的装配关系，设定其装配顺序以及排列方式。

定义每个工位工艺节点，在工艺流动中添加进入、离开、获取装配等操作命令，设置工件在各个工位的操作方式。用工艺流动编辑器把所有工序链接起来，工艺流动编辑器如图 6 所示，规划毛坯流动以及成品码垛路线，协调上料频率、加工时间和运输速率以保证生产线顺畅进行[1]。在模拟时发现设备之间存在碰撞、物料过多造成堵塞或者流动问题，调整运动轨迹及生产顺序。

3.4. PLC 虚拟调试与信号联动

本研究采用“S7-PLCSIM Advanced + TIA Portal”构建虚拟 PLC 控制系统，并通过 SimReal 平台的 PLC 通信插件实现与仿真环境的双向数据交互。首先，在 TIA Portal 中完成 PLC 程序的编写与编译，定义传感器输入、执行器输出等控制变量，并将控制变量导出为标签表；随后在 SimReal 平台中加载该标

签表, 将仿真端的传感器信号、设备控制信号与 PLC 变量进行一一映射, 建立“仿真端→PLC 端→仿真端”的闭环通信链路[3]。PLC 虚拟调试架构与变量配对界面如图 7 所示。

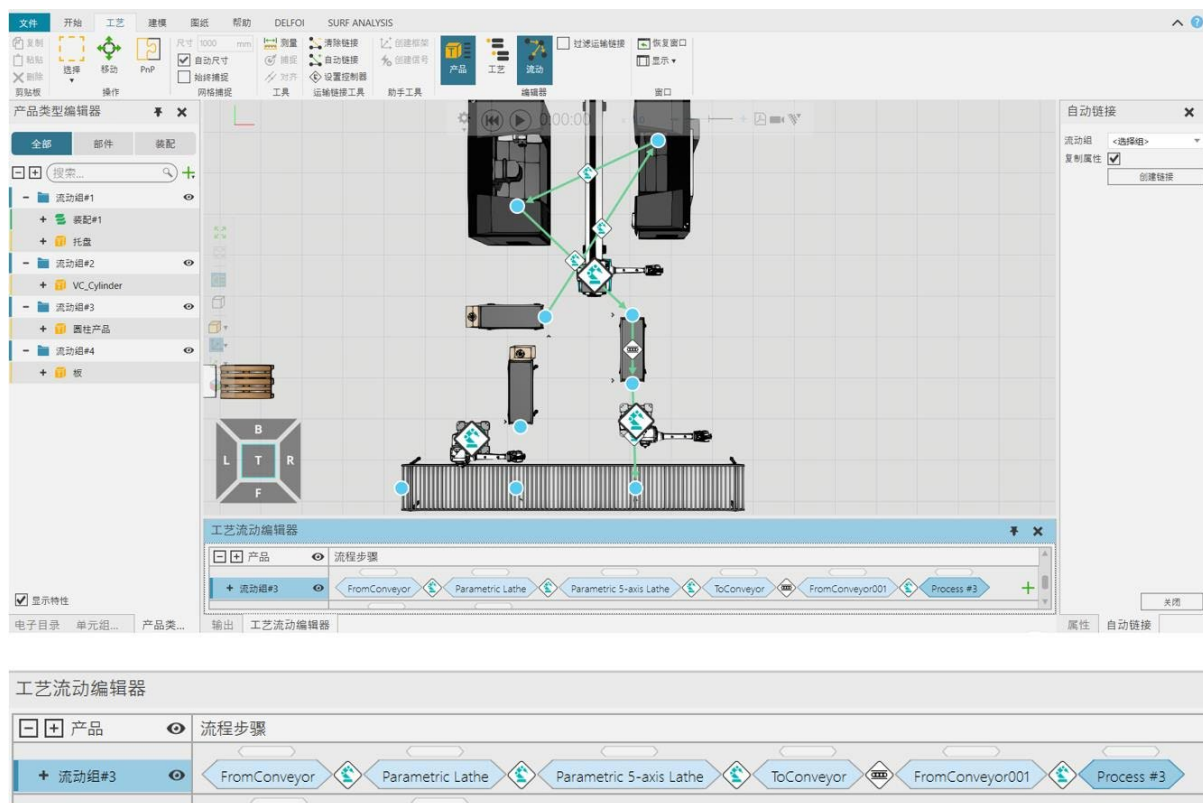


Figure 6. Process flow editor and flow lines
图 6. 工艺流动编辑器以及流程连线

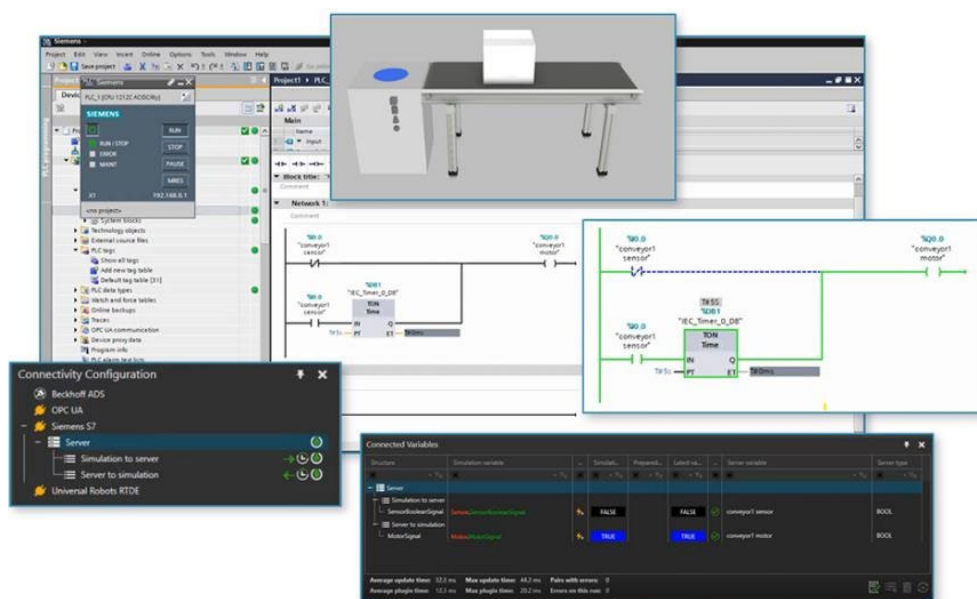


Figure 7. PLC virtual debugging architecture and variable pairing interface
图 7. PLC 虚拟调试架构与变量配对界面

为验证控制逻辑的有效性，本研究以产线物料输送工位为例，设计了基于 PLC 的物料检测与输送机启停控制逻辑，其流程如图 8 所示：

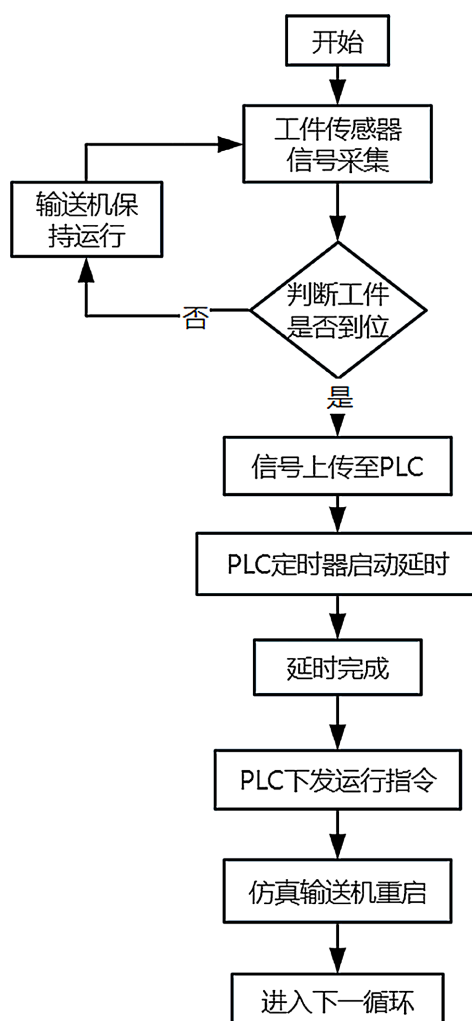


Figure 8. Flowchart of PLC logic judgment for material detection on the production line
图 8. 产线物料检测 PLC 逻辑判断流程图

仿真端的工件传感器实时采集物料位置信号，判断工件是否到达指定工位；若未到位，输送机保持运行并持续检测；若检测到工件到位，则向 PLC 发送触发信号。PLC 接收信号后启动定时器进行延时，延时结束后下发运行指令，控制仿真端输送机重启，实现物料输送的连续运行。

通过上述虚拟调试流程，可在无实体硬件的条件下对 PLC 控制程序进行全流程验证，及时修正信号映射错误与逻辑时序偏差，有效规避现场布线不当或设备碰撞带来的安全风险，为后续产线实体调试提供可靠依据[4]。

4. 仿真结果与分析

将机器人模型、运动单元、产线布局及 PLC 控制系统联调之后，多次循环仿真运行。结果表明：机器人模型运动参数与实际相符，关节运动流畅，逆运动学求解正确，末端姿态精准，工作范围能够覆盖所有工作站所需；运动部件伺服响应灵敏，脚本时间安排恰当，位置准确性高；生产线各个工作站之间

物料流动顺畅,不存在设备之间相互影响、物料堵塞或者生产停滞的情况,装配以及码垛操作均符合生产工艺规定;PLC 与仿真软件之间通信正常,在传感器被激活时相应的工作站能及时开始工作,停止时机也是正确的,控制程序运行良好。

调试优化中对于局部点位姿态干涉情况,移动机器人基座位置及安全点姿态;对于生产线节拍不平衡问题,调整上料间隔以及工序等待时间;对于信号匹配错误的情况,检查变量地址然后重新绑定变量。经过上述处理之后,系统可以正常持续运行,能够用于柔性生产线仿真实验室验证。

相比于传统的在现场进行调试的方式,本文所提出的虚拟调试的方法可以在虚拟环境中对整个过程进行仿真测试,大大减少在工厂中调试的时间,减少了发生碰撞以及故障的可能性,可以满足多种产品换线调试的需求[3] [4]。

5. 结论

本文利用 SimReal 仿真软件开发一个集机器人参数化建模、运动组件伺服控制、智能制造生产线工艺设计、PLC 虚拟调试等功能于一体的数字孪生测试环境。该系统能够实现对机器人机械部分建模、运动精确控制以及生产线工艺过程、电气控制系统之间的全方位虚拟验证,机器人模型参数正确、运动控制良好、生产线正常运作、PLC 之间通讯无误。

本论文提出的解决方案全部基于数字仿真及建模仿真进行,具有良好的规范性和可重复性,可以大大提高生产线的设计以及调测的工作效率,在此基础上还可以增加视觉定位、多机器人之间的协调工作、生产的数据采集与分析等更多的功能来提高系统的智能化程度以及工程实用性[2] [5]。

参考文献

- [1] 惠记庄,王帅,朱斌.面向智能制造仿真实验的产线数字孪生建模[J].实验技术与管理,2024,41(1):150-157.
- [2] 李颖,高岚,朱志松.面向智能制造场景的机器人数字孪生建模与控制[J].系统仿真学报,2024,36(7):1536-1545.
- [3] 张耀武,刘宇,马付建,等.虚拟 PLC 驱动的生产线调试系统设计[J].机械与电子,2024,42(4):39-44.
- [4] 郝明,孙凯明,张建平,等.基于 FACTORY IO 的工业场景仿真虚拟调试[J].自动化技术与应用,2023,42(12):139-142.
- [5] 张旭,郑泽龙,祁勇.6 自由度串联机器人 D-H 模型参数辨识及标定[J].机器人,2016,38(3):360-370.