

基于NX MCD的自动化生产线数字孪生协同设计及虚拟仿真系统研究

马阿娟, 朱凌宏, 杨小华, 马志新, 史磊, 周乐峰, 龙峰

丽水职业技术学院智能制造学院, 浙江 丽水

收稿日期: 2025年10月22日; 录用日期: 2025年11月13日; 发布日期: 2025年11月21日

摘要

在智能制造与工业4.0背景下, 数字孪生技术成为提升自动化生产线设计效率、降低试错成本的关键路径。传统的串行设计模式存在严重的“信息孤岛”现象, 各学科团队协作不畅, 设计错误往往直至物理样机调试阶段才被发现, 导致项目返工成本高昂、开发周期显著延长。为解决上述痛点, 本研究基于NX MCD平台, 构建了集机械建模、多学科协同、物理仿真与虚拟调试于一体的数字孪生系统; 通过运用机电一体化建模、协同管理以及虚实映射与实时通信等关键技术, 实现了虚拟碰撞检测、生产节拍分析与控制逻辑验证等功能, 显著缩短了项目开发周期, 优化了生产流程, 并为实现预测性维护奠定了坚实基础, 展现出显著的工程应用价值。

关键词

数字孪生, 自动化生产线, 协同设计, 虚拟仿真

Research on Collaborative Design and Virtual Simulation System of Digital Twin for Automated Production Line Based on NX MCD

Ajuan Ma, Linghong Zhu, Xiaohua Yang, Zhixin Ma, Lei Shi, Lefeng Zhou, Feng Long

School of Intelligent Manufacturing, Lishui Vocational and Technical College, Lishui Zhejiang

Received: October 22, 2025; accepted: November 13, 2025; published: November 21, 2025

Abstract

Under the background of intelligent manufacturing and Industry 4.0, digital twin technology has

文章引用: 马阿娟, 朱凌宏, 杨小华, 马志新, 史磊, 周乐峰, 龙峰. 基于 NX MCD 的自动化生产线数字孪生协同设计及虚拟仿真系统研究[J]. 人工智能与机器人研究, 2025, 14(6): 1532-1543. DOI: 10.12677/airr.2025.146143

become a key path to improve the design efficiency of automated production lines and reduce trial-and-error costs. Traditional serial design modes suffer from severe “information silos”, poor collaboration among multidisciplinary teams, and design errors that are often not discovered until the physical prototype debugging stage. This leads to high project rework costs and significantly extended development cycles. To address these pain points, this study constructs a digital twin system integrating mechanical modeling, multidisciplinary collaboration, physical simulation, and virtual commissioning based on the NX MCD platform. By leveraging key technologies such as mechatronic modeling, collaborative management, virtual-real mapping, and real-time communication, the system realizes functions including virtual collision detection, production cycle time analysis, and control logic verification. It significantly shortens the project development cycle, optimizes the production process, and lays a solid foundation for predictive maintenance, demonstrating considerable engineering application value.

Keywords

Digital Twin, Automated Production Line, Collaborative Design, Virtual Simulation

Copyright © 2025 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

在智能制造与工业 4.0 浪潮的推动下,制造业正经历着以数字化、智能化为核心的深刻变革。数字孪生技术作为实现信息物理系统深度融合的关键使能技术,通过构建物理实体与虚拟模型之间的动态映射与交互,为自动化生产线的设计与优化开辟了新路径[1]。然而,传统自动化生产线设计普遍采用机械设计-电气设计-软件编程-实物制造与调试的串行模式,存在各专业领域协同困难、设计缺陷发现滞后、物理调试周期长、成本高等突出问题[2]。

本研究基于西门子 NX MCD 平台,通过构建集机械建模、行为仿真、虚拟调试于一体的数字孪生系统,实现机械、电气、自动化等多学科协同设计,并利用物理属性仿真、信号逻辑处理和虚实交互等关键技术,在虚拟环境中完成生产线布局验证、运动干涉检测、节拍优化和控制逻辑验证等功能,有效缩短产品开发周期,降低试错成本,为自动化生产线的创新设计提供系统的解决方案,对推动制造业数字化转型具有重要的理论价值和工程应用意义[3]。

2. 相关研究综述与技术路线对比

2.1. 虚拟调试与数字孪生技术研究现状

随着智能制造的深入推进,虚拟调试与数字孪生已成为优化自动化产线开发流程、实现全生命周期管理的核心技术[4]。虚拟调试是数字孪生在产线建设阶段的先导应用,其构建的高精度模型是运维期数字孪生的基础。二者的融合,构成了贯穿设备全生命周期的技术体系[5]。

虚拟调试技术的发展大致经历两个阶段:早期研究主要聚焦于控制逻辑的验证,通过建立设备的几何运动学模型,并利用 OPC 等标准接口与 PLC 仿真软件连接,实现基本的动作序列测试[6]。近期研究则趋向集成化与高保真仿真,强调与机器人离线编程、物理引擎的深度融合,以模拟更为复杂的物理交互(如抓取、装配)并优化工艺参数,模型也向多物理场、高保真度方向发展[7]。数字孪生技术的内涵更为宽泛,核心特征是虚实映射、实时交互与闭环优化。当前研究热点从构建“静态三维模型”转向创建数

据驱动的“活模型”，重点集中于支撑实时数据交互的架构，如基于工业物联网平台和 OPC UA(统一架构)信息模型的数据融合[3]。此外，将人工智能算法融入数字孪生，用于实现预测性维护、质量诊断等高级功能，是前沿探索的重要方向[2]。

2.2. 主流技术路线对比与分析

目前，基于不同软件平台与理论的技术路线各具特色。不同方案在开放性、保真度、成本与可靠性之间各有侧重。基于游戏引擎的方案长于可视化与灵活性，但在工业可靠性上存在挑战；开源方案强在开放性与标准化，但工程化成熟度不足；多品牌专业软件集成能力强大，但体系复杂且成本高昂。本研究基于西门子 NX MCD 平台的技术路线，集运动学、动力学、逻辑控制于一体，软硬件协同性好，技术成熟、工程可靠性高、从设计到调试的数据链无缝流转，适用于以 Siemens 自动化产品为核心的中大型自动化产线，特别是追求高可靠性的工程应用。

2.3. 技术路线优势与学术贡献定位

本研究采用的基于 NX MCD 的集成套件方案，其核心优势是在深入分析以西门子自动化技术为核心的产线工程实际需求后，所做出的一种在成熟度、集成度、工程可靠性之间取得最佳平衡的选择。实践并验证了一种基于统一数据源的“设计 - 仿真 - 调试”无缝集成范式。依托 NX 平台，实现了从三维 CAD 建模、机电一体化行为定义到虚拟调试的全流程数据同源。有效解决了多学科协同中的“信息孤岛”问题，为实现“设计即调试”的理想流程提供了经过工程验证的实践案例。通过 NX MCD 与 PLCSim Advanced 的原生深度集成，将虚拟调试的深度从“逻辑无误”提升至“性能最优”。

本研究构建了一套完整、可靠且可复用的技术体系，对于采用西门子自动化技术的制造企业而言，本文的系统架构设计、OPC UA 配置方法、协同流程管理等具体实践，具有较高的工程参考与借鉴价值。通过典型的工业案例，系统性地展示并验证了一种高度集成的、工程可信赖的技术路线如何在特定边界内最大化地发挥虚拟调试与数字孪生的应用效能，为追求高可靠性的工业应用提供了有别于通用或开源方案的、经过实践检验的路径选择。

3. 系统架构设计与关键技术

3.1. 自动化生产线虚拟仿真系统架构设计

本文构建的基于 NX MCD 的自动化生产线数字孪生协同设计及虚拟仿真系统，总体架构自下而上分为数据层、模型层、仿真层、协同层和应用层五个层次。

(1) 数据层

数据层是整个系统的基石，负责存储和管理所有与生产线设计相关的数据，并确保数据的唯一性、准确性和一致性。该层基于产品生命周期管理(PLM)系统(如 Teamcenter)构建[4]，管理的数据如表 1 所示。数据层实现了“单一数据源”，确保所有参与方基于同一版本的数据进行工作，从根源上避免数据不一致问题。

Table 1. Data layer types
表 1. 数据层类型

序号	数据类型	具体工作
1	几何模型数据	生产线中所有设备、部件的三维 CAD 模型
2	机电数据	传感器、执行器的 IO 列表、电气接线图
3	逻辑控制数据	PLC 程序(如 SCL、梯形图)、人机界面(HMI)组态
4	工艺数据	生产节拍、工艺流程卡、物料清单(BOM)

(2) 模型层

模型层是数字孪生体的构建层，将数据层中的静态几何模型“活化”，赋予其物理和逻辑生命[5]，模型层类型及具体工作如表 2 所示。

Table 2. Model layer types

表 2. 模型层类型

序号	模型类型	具体工作
1	机械系统建模	为三维模型添加刚体属性、碰撞体属性，并定义各运动部件之间的运动副关系
2	传感器/执行器建模	在模型的相应位置定义虚拟传感器，并将其映射为可被控制系统读写的布尔型或整型信号
3	基本行为定义	初步定义简单的运动序列，用于验证机械机构的可行性

(3) 仿真层

仿真层是系统的“发动机”，负责驱动数字孪生体运行，完成各种验证任务。该层提供多种仿真模式，如表 3 所示。

Table 3. Simulation layer types

表 3. 仿真层类型

序号	仿真模式	具体工作
1	MCD 内部仿真	不依赖外部控制器，利用 MCD 自带的逻辑工具测试设备的基本动作流程
2	软件在环仿真	连接 TIA Portal 中的 PLCSim (虚拟 PLC)，使用与真实 PLC 代码一致的逻辑程序来驱动虚拟模型，进行控制逻辑的初步验证
3	硬件在环仿真	虚拟模型接收真实 PLC 发出的控制信号并做出响应，同时将虚拟传感器的状态信号反馈给 PLC

(4) 协同层

协同层定义了多学科团队基于该系统的协作流程与规范，打破了传统的部门壁垒，实现了并行工程[6]。协同模式及具体工作如表 4 所示。

Table 4. Collaboration layer types

表 4. 协同层类型

序号	协同模式	具体工作
1	角色定义	为机械工程师、电气工程师、自动化工程师提供不同的工作视图和权限
2	变更管理	当机械工程师修改模型后，系统会自动通知电气和自动化工程师。后者可立即获取最新模型，并验证其设计的兼容性，实现快速迭代
3	问题追踪	在仿真过程中发现的任何问题(如干涉、逻辑错误)都可以在协同平台上被记录、分配和跟踪，直至问题关闭

(5) 应用层

应用层是系统功能的价值输出端，为不同用户提供交互界面，如表 5 所示。

Table 5. Application layer types

表 5. 应用层类型

序号	应用模式	具体工作
1	虚拟调试平台	为自动化工程师提供的 HIL 仿真操作界面

续表

2	3D 可视化看板	基于轻量化技术发布的 Web 版三维模型, 用于设计评审、人员培训和实时监控
3	报告生成器	自动生成仿真报告、干涉检查报告、设计优化建议等

3.2. 基于信号映射的机电行为耦合技术

机械系统与控制系统的耦合是实现数字孪生的核心, 本系统采用“信号映射”机制作为连接的桥梁[7]。在 PLC SIM Advanced 中启用 OPC UA 服务器功能。在 NX MCD 中配置 OPC UA 客户端, 连接到该服务器地址。使用“信号适配器”功能, 将 MCD 模型中定义的信号与虚拟 PLC 中的对应变量进行一一映射。完成信号映射后, 启动 NX MCD 的仿真和 PLCSIM Advanced。此时, 在 TIA Portal 中对 PLC 程序进行的操作会实时传递到虚拟生产线模型, 模型会像真实设备一样做出响应。可以全面测试 PLC 程序的每一种逻辑情况, 包括正常流程、异常处理(如急停、缺料)等, 并在零风险的数字空间中观察结果, 发现并修正逻辑错误、时序问题。这种基于信号的解耦设计, 使得机械模型和控制程序可以相对独立地开发和测试, 极大增强了系统的灵活性[8]。

3.3. 逻辑闭环的软件在环虚拟调试技术

软件在环虚拟调试技术是一种在虚拟环境中对自动化系统进行提前测试和优化的方法, 其核心在于将真实的控制程序(如 PLC 代码)与设备的数字化双胞胎模型相连接, 从而在物理设备制造完成之前, 就能形成一个完整的闭环仿真系统[9]。软件在环虚拟调试技术的流程始于创建高保真的设备数字化双胞胎模型与编写真实的控制程序, 并通过 OPC UA 等通信协议将二者连接, 形成一个虚拟的闭环系统。在此虚拟环境中分步执行测试, 从单个部件的动作验证到整个自动化生产流程的集成运行, 并可主动模拟各种异常工况以验证安全联锁逻辑。待所有控制逻辑在虚拟世界中被充分验证和优化后, 最终将成熟的程序一键部署到物理设备上, 从而将现场调试工作量和风险降至最低[10]。

4. 应用案例与验证分析

4.1. 案例背景介绍

本案例针对精密制造车间中“丝杠粗加工后的磨削精加工”环节, 构建一个自动化上下料工作站, 该单元包括六轴工业机器人、伺服驱动的往复搬运机构、气动夹爪、传送带及视觉检测系统, 如图 1 所示。工作站核心功能是将待加工的丝杠毛坯从原料库搬运至磨床加工区, 待加工作业完成后, 再将成品从磨床搬运至成品库。丝杠装夹至磨床需达到 $\pm 0.1\text{ mm}$ 的定位精度, 机器人、磨床、输送线等设备需严格按时序协同工作, 平衡机器人上下料时间与磨床加工时间, 实现最高设备利用率, 确保机器人与磨床运动无干涉, 避免碰撞事故[1]。

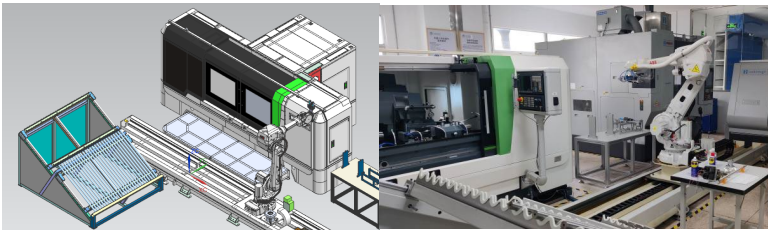


Figure 1. Virtual and real joint debugging of the handling workstation
图 1. 搬运工作站虚实联调

在软件在环虚拟调试环境中, 可对该丝杠磨削全流程进行高仿真验证, 搬运工作站工序内容如表 6

所示。其流程始于机器人取工具后，经上料点移动至磨床安全点；随后虚拟 PLC 逻辑触发磨床开门、三爪卡盘松开，引导机器人携丝杠进入卡盘点。夹紧与手爪松开动作的逻辑互锁关系可获得充分验证，确保信号时序准确。机器人退出后磨床关门并开始加工，待完成后，机器人再次进入执行吹屑、抓取丝杠、卡盘松开等协同操作，最终将工件移送至放料点完成检测。在此虚拟闭环中，所有运动轨迹、设备联动逻辑及异常工况均可提前测试与优化，从而大幅提升现场调试效率与可靠性[2]。

Table 6. Process contents of handling workstation
表 6. 搬运工作站工序内容

序号	工序内容	要点	序号	工序内容	要点
1	机器人取工具	动作	12	机器人移动到磨床安全点	动作
2	机器人移动到上料点	动作	13	磨床开门	逻辑
3	机器人移动到磨床安全点	动作	14	机器人移动到上料点	动作
4	磨床开门	逻辑	15	机器人吹屑操作	逻辑
5	三爪卡盘松开	逻辑	16	机器人手爪夹紧丝杠	逻辑
6	机器人移动到磨床卡盘点	动作	17	三爪卡盘松开	逻辑
7	三爪卡盘夹紧	逻辑	18	机器人移动到磨床安全点	动作
8	机器人手爪松开丝杠	逻辑	19	机器人移动到丝杠放料点	动作
9	机器人移动到磨床安全点	动作	20	机器人手爪松开丝杠	动作
10	磨床关门	逻辑	21	相机进行检测	相机
11	磨床开始加工	磨床	22	机器人回到安全点	动作

智能制造产线通信结构以西门子 S7-1500 系列 PLC (CPU 1511-1 PN)为核心控制单元，PLC 作为主站，通过 PROFINET IO 工业以太网实时网络，集中连接并控制着五个关键设备从站：负责物料搬运的机器人、执行磨削加工的磨床(SK7432)、进行复杂铣削的五轴加工中心(XT630 SAK)、完成车削任务的车床 (FANUC CNC)，以及用于操作与监控的 HMI 人机界面(KTP1200 Basic PN)，构成了一个高度集成、协同工作的智能制造单元，如图 2 所示。

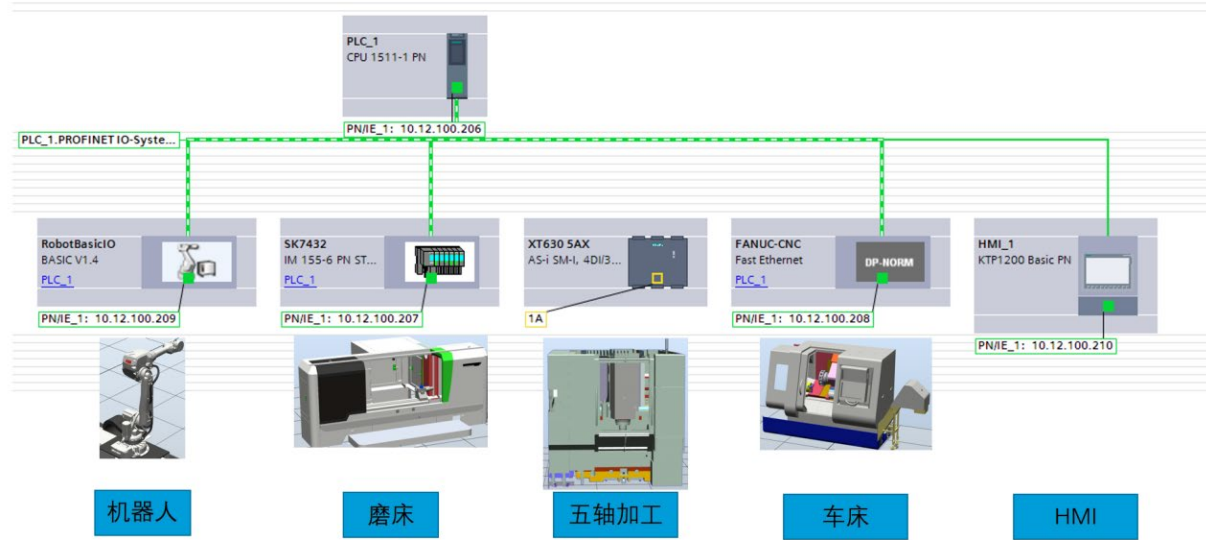


Figure 2. Intelligent manufacturing production line communication structure diagram
图 2. 智能制造产线通信结构图

4.2. 基于本系统的数字孪生体构建

(1) 模型布局装配

在 NX MCD 中构建工作站的设备三维建模, 创建机器人、磨床、丝杠等精确的三维几何模型, 如图 3 所示。其中, 六轴工业机器人负责丝杠的抓取、搬运和放置, 数控磨床用于丝杠的精加工, 原料库与成品库分别用于存放待加工丝杠和加工完成的丝杠, 机器人夹爪工具可以适应不同规格丝杠的抓取, 安全防护系统包括安全围栏、光栅等[3]。

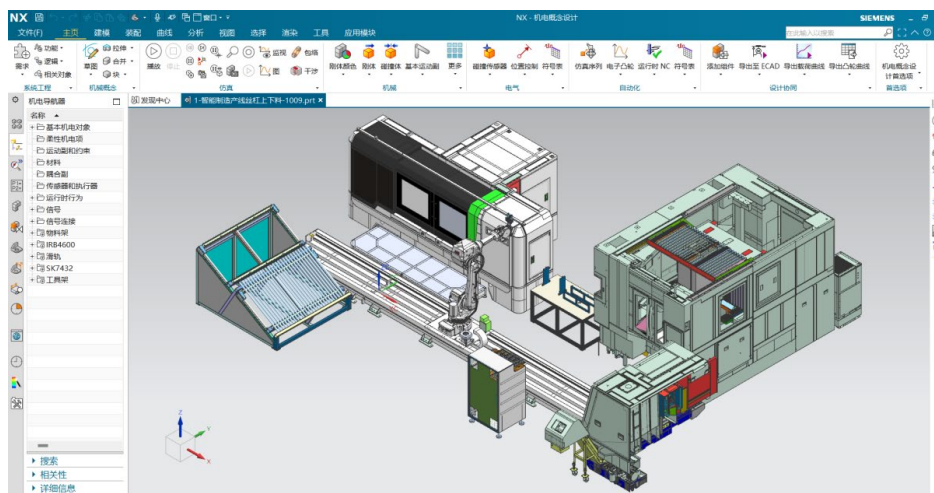


Figure 3. Model layout assembly diagram
图 3. 模型布局装配图

(2) 机电对象设置

① 运动副设置

为机器人定义运动学模型,基座铰链副设置如图4所示,通过选择连接体、基本体,并指定轴矢量方向,进行基本运动副设置,同理为磨床门、刀架等定义运动副[4]。

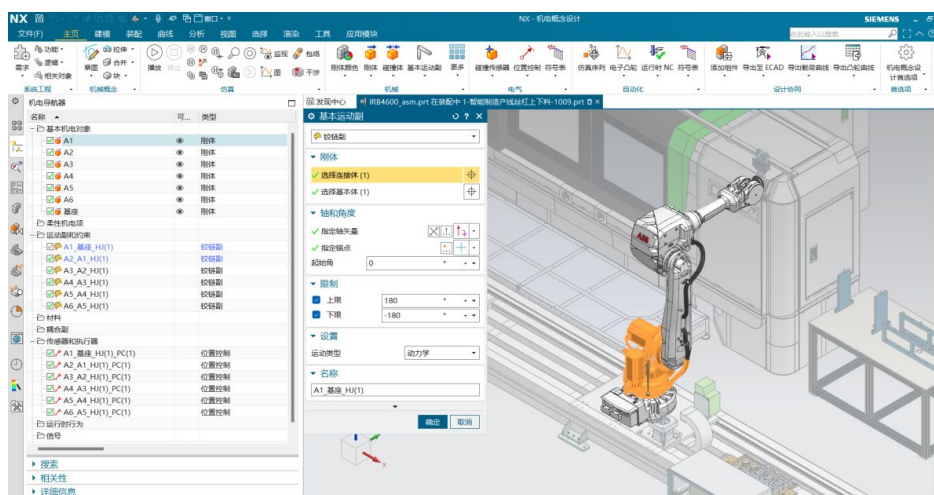


Figure 4. Base hinge pair setting interface

图 4. 基座铰链副设置界面

② 运行时行为设置

为了实现夹爪取放动作，设置运行时行为握爪参数如图 5 所示，选择手指体并指定矢量方向，检测区域位于夹爪中心位置，当检测到丝杠位于检测区域时执行抓取动作[5]。

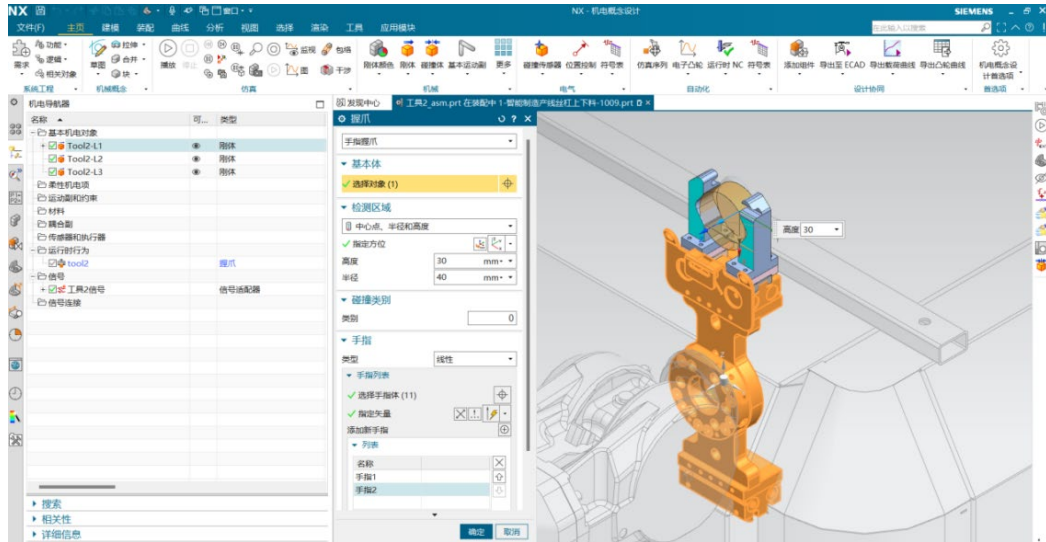


Figure 5. Grip parameter setting interface
图 5. 握爪参数设置界面

③ 机器人程序设置

在 RobotStudio 软件中通过程序定义完整的上下料工艺流程：机器人从原料库取料→等待磨床就绪→磨床门开→机器人上料→机器人退出→磨床门关→加工开始→加工完成→磨床门开→机器人下料→机器人放料至成品库，如图 6 所示。

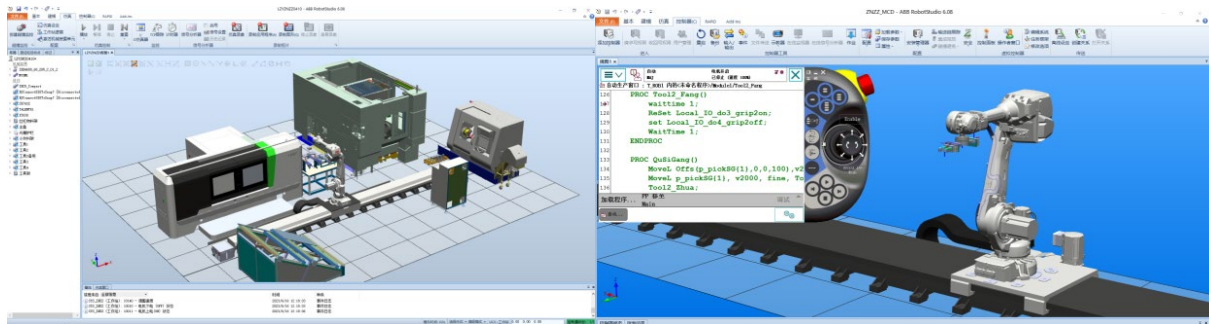


Figure 6. Robot program setting interface
图 6. 机器人程序设置界面

④ OPC UA 通信设置

通过创建 OPC UA 通信服务器，连接 OPC UA 通信服务器，选择所需信号，映射对应数据，建立机器人控制器与磨床数控系统间的信号交互逻辑，如图 7 所示。搭建一个双向、实时的数据桥梁，使得机器人的动作流程能够安全、准确地触发磨床的相应操作，并实时接收其状态反馈，为整个上下料工作单元的自动化流程虚拟调试奠定了坚实的通信基础[7]。

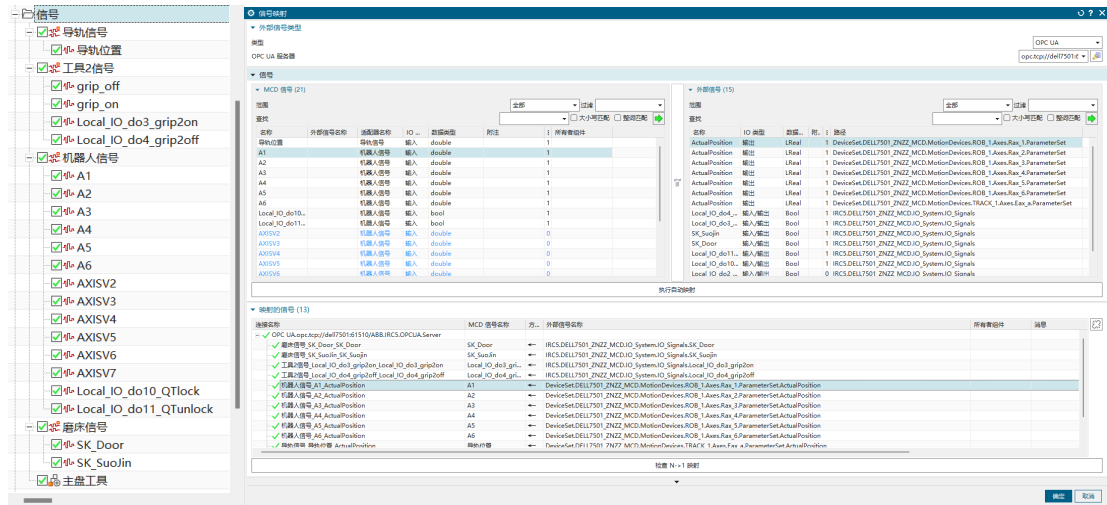


Figure 7. Data mapping interface
图 7. 数据映射界面

⑤ 工作站运行调试仿真

通过机器人编程软件,可运用线性运动(用于长距离、高效率的路径移动)与重定位运动(用于末端工具在点位附近的精细姿态调整)对机器人轨迹上的关键点进行精确示教,如图 8 所示。重点优化抓取点、安全点以及过渡点的位姿,从而生成一条既安全又节拍最优的示教轨迹。在虚拟环境中完整模拟并验证机器人执行“取放工具”与“丝杠上下料”的整个工作流程,实现程序逻辑与机械动作的完美协同,为后续的硬件在环调试及现场部署奠定了坚实基础[8]。

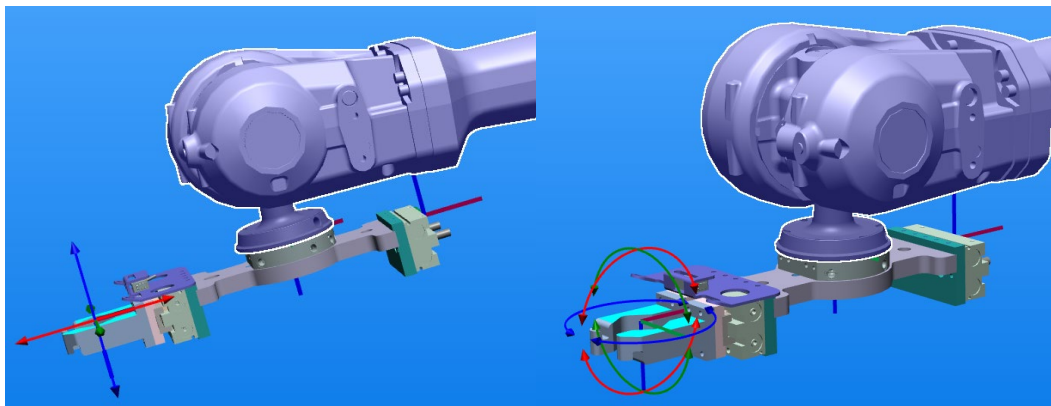


Figure 8. Linear motion and repositioning motion
图 8. 线性运动与重定位运动

4.3. 系统运行与效能验证分析

4.3.1. 虚拟调试过程问题解决与机理分析

(1) 运动干涉检查与消除

在虚拟调试阶段,通过三维仿真运动学分析,精准暴露了物理调试中难以发现的潜在风险,机器人第六轴法兰盘与半开状态的磨床安全门之间存在仅 2 mm 的最小间隙。这一发现不仅规避了一次潜在的碰撞事故,更触发对机器人路径规划的深度优化[9]。

① 优化机理

传统的解决方式是简单地让机器人等待门完全打开后再行动，本研究通过机理分析，认识到干涉的根本原因是路径姿态并非最优。因此，通过重新规划路径，在关键区段设置额外的经由点，使机器人工具端以更优化的姿态绕行。这实质上是将问题从“被动等待”转化为“主动优化”，在保证安全的前提下，为后续的时序并行优化创造了条件[10]。

② 控制逻辑强化

在 PLC 程序中，将机器人的运动许可信号与磨床门开度进行更严格的互锁，将触发条件从“门完全开启”改为“门开启至足以保证绝对安全通过的预定位置(85%开度)”。这一改进体现了虚拟调试对控制逻辑精细化的推动作用。

(2) 生产节拍与时序优化

初始流程中，机器人需等待磨床门完全开启(耗时约 1.5 秒)后才行动，造成单次循环损失 0.8 秒。虚拟调试环境可以对此瓶颈进行无风险的深度优化。

① 量化效益分析

假设优化前节拍时间 $T_{old} = 60.0$ 秒，优化后 $T_{new} = T_{old} - 0.8 = 59.2$ 秒，那么：

优化前日产能： $72000 / 60.0 = 1200$ 件

优化后日产能： $72000 / 59.2 \approx 1216$ 件

日产能提升： $\Delta Q_{daily} = 1216 - 1200 = 16$ 件/日

假设，年工作 250 天，则年产能提升： $\Delta Q_{annual} = \Delta Q_{daily} \times 250 \approx 4000$ 件

这意味着，仅通过节省 0.8 秒的节拍时间，该生产线每天就能多生产 65 件产品，每年可额外多生产 4,000 件合格产品，可直接转化为额外的利润，而无需增加任何设备、人力或能耗成本。此外，虚拟调试避免的物理调试周期缩短，节省的人工、设备停滞成本同样可观，显著提升了项目投资回报率[3]。

② 优化机理

节拍提升的本质在于将串行流程并行化，通过虚拟调试验证了“门体运动”与“机器人上料轨迹”在时间上的可重叠性。如图 8 所示的机器人轨迹优化方法，确保了在门开启至安全位置时，机器人能以最优路径行动，消除了不必要的空闲等待时间，体现了数字孪生作为“时序优化沙盘”的核心价值[4]。

(3) 安全逻辑验证：基于 FMEA 的系统性测试方法

为超越“经验式”测试，本研究引入故障模式与影响分析(FMEA)方法论，系统性地构建测试用例，验证虚拟调试对安全风险的覆盖能力。以核心安全组件(如急停按钮、安全光栅、双手启动按钮)为例，系统分析其潜在故障模式、影响及在虚拟环境中的验证方法，覆盖了正常、异常、紧急三种典型工况。虚拟调试的优势在于能安全模拟物理世界中难以复现的极端故障(如传感器失灵、信号干扰)，实现“前馈”式安全设计，而非事发后的“反馈”。例如，不仅验证了急停后设备能否停止，更验证了停止的时序和姿态是否最优，避免了设备或工件的二次损伤，提升了整个系统的可靠性与安全性[5]。

4.3.2. 综合效能对比分析

与传统串行调试方法相比，基于 NX MCD 的数字孪生系统展现出显著优势，如表 7 所示。

Table 7. Comparison between debugging methods based on digital twins and traditional methods

表 7. 基于数字孪生的调试方法与传统方法对比

对比维度	传统调试方法	数字孪生方法	优势体现
问题发现阶段	物理设备安装后，滞后且被动	设计阶段，提前且主动	从根源避免返工，缩短周期 > 60%

续表

节拍优化能力	依赖现场试错, 风险高、周期长	虚拟环境中无风险并行仿真与优化	量化提升产能(年化提升率达 30%)
安全验证深度	基于经验的抽查, 覆盖不全面	基于 FMEA 的系统性测试, 覆盖各种故障场景	实现系统性风险管控, 奠定运维高可靠性基础
调试成本	高昂的差旅、人工、设备停滞成本	主要集中于前期建模, 后期调试成本极低	降低总体成本, 提高投资回报率
知识沉淀	经验依赖个人, 难以复用	模型、仿真过程、FMEA 案例可数字化保存与复用	形成企业核心知识资产, 支持持续优化

5. 总结与展望

5.1. 研究工作总结

本文围绕自动化生产线设计调试中的痛点, 对基于 NX MCD 的数字孪生协同设计及虚拟仿真系统进行了深入研究和实践。构建了基于 NX MCD 的数字孪生协同设计方法论, 提出了从“设计 - 制造 - 调试”串行模式到“设计即调试”并行模式的转变路径, 并通过 FMEA 引导的系统化安全验证方法, 提升了虚拟调试的严谨性和完备性。开发了一套完整的虚拟仿真与虚实联动系统: 以 NX MCD 为核心, 集成 TIA Portal 与 PLCSIM Advanced, 通过 OPC UA 通信协议, 构建了一个能够实现高保真虚拟仿真和虚实联动的系统。该系统不仅能够进行运动学分析、干涉检测和节拍优化, 更关键的是实现了与真实 PLC 控制程序的深度集成, 完成了虚拟调试这一核心功能。

通过典型工业案例验证了系统的有效性与优越性, 以“机器人上下料搬运工作站”为应用对象, 成功实施了从数字孪生体构建到虚拟调试的全过程。案例表明, 本系统能提前发现并解决机械干涉、控制逻辑错误等关键问题, 将物理调试周期缩短了 60%以上, 实现了高价值部件的“零碰撞”风险, 显著提升了调试效率与一次性成功率, 具有显著的工程应用价值。

5.2. 研究展望

尽管本研究取得了阶段性成果, 但数字孪生技术的深度应用仍有广阔的发展空间。未来的研究工作可从以下几个方面进一步深化: 与工业物联网(IIoT)及人工智能(AI)的深度融合, 当前系统主要聚焦于设计调试阶段。未来可将虚拟模型与生产现场实时数据(如设备振动、温度、刀具磨损)深度融合, 利用 AI 算法对模型参数进行自校正, 并实现预测性维护、工艺参数自适应优化等更高级的智能应用; 目前系统依赖于高性能工作站, 未来可探索基于云平台的数字孪生系统, 实现模型的轻量化渲染与计算, 支持 Web 端跨平台访问, 便于生产管理人员在移动端实时监控和交互, 提升系统的可及性与协同范围[1]; 将数字孪生体的应用从设计调试阶段, 向制造执行、运维服务等产品全生命周期延伸, 构建一个持续演进、不断优化的数字孪生闭环体系, 最大化其长期价值[2]。

基金项目

丽水市科学技术局 2024 年自筹类公益性技术应用研究项目(2024SJZC044)。

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(9): 70-72.
[2] 刘飞, 张映锋, 姜春华, 等. 数字孪生车间现状与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17.
[3] 王晓军. 基于 Teamcenter 和 MCD 的自动化生产线数字孪生协同设计及虚拟仿真试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
[4] 张洁, 汪惠芬, 刘艳华. 协同制造与智能制造[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 1-10.

-
- [5] 肖志军, 韩建达, 刘成良. 智能制造装备与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
 - [6] 王爱民, 刘飞, 张洁. 智能制造系统理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
 - [7] 邵新宇, 郭朝, 王磊, 等. 数字孪生驱动的智能制造服务理论与方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(10): 2613-2625.
 - [8] 苏建, 慕存强, 任善剑, 等. 基于 NX MCD 的工业机器人视觉分拣数字孪生系统设计[J]. 机床与液压, 2023, 51(23): 73-79.
 - [9] 徐维, 吴加林, 张婷婷, 等. 基于 NX MCD 的数字孪生虚拟实践平台仿真设计[J]. 智能制造, 2025(5): 77-83.
 - [10] 赵永豪, 陈杏妹. 基于数字孪生的生产线虚拟实践平台仿真设计[J]. 机电工程技术, 2024, 53(12): 202-206.