

# 数据驱动的生产线数字孪生系统构建与应用\*

黄涵钰<sup>①②</sup> 毛柯夫<sup>①②</sup> 苑明海<sup>①②</sup> 郑良<sup>①②</sup> 裴凤雀<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup>河海大学机电工程学院, 江苏常州 213022; <sup>②</sup>常州市智能制造技术与装备重点实验室, 江苏常州 213022)

**摘要:** 为满足生产线智能化的发展需求, 针对传统生产线现场调试周期长, 生产线三维可视化能力差, 生产数据不同步, 现场状态监控成本高等问题, 结合数字孪生技术, 以数据驱动为基础, 构建了生产线数字孪生系统。首先运用 **Process Simulate** 构建生产线上的各类设备的数字孪生模型, 根据数据通信网络和数据采集架构图, 利用 **OPC UA** 和 **Modbus** 通信, 读取生产线设备实时数据, 并存入相应的数据库中作为驱动生产线数字孪生模型的数据源, 从而实现数字孪生模型对物理实体的实时映射。最后, 通过搭建虚拟仿真环境, 对数字孪生系统进行虚拟调试, 并通过构建实例验证平台, 验证生产线数字孪生系统的有效性和可行性。

**关键词:** 智能制造; 数据驱动; 数字孪生; 虚拟调试

**中图分类号:** TH165      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.02.009

## Construction and application of a digital twin system for data-driven intelligent manufacturing line

HUANG Hanyu<sup>①②</sup>, MAO Kefu<sup>①②</sup>, YUAN Minghai<sup>①②</sup>, ZHENG Liang<sup>①②</sup>, PEI Fengque<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, CHN; <sup>②</sup>Changzhou Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology and Equipment, Changzhou 213022, CHN)

**Abstract:** In response to the demand for the intelligent development of production lines, a data-driven digital twin system for the production line has been constructed, addressing challenges such as lengthy on-site debugging cycles, limited three-dimensional visualization capabilities, asynchronous production data, and high on-site monitoring costs typically encountered in traditional production lines. Initially, the digital twin models for various equipment on the production line were constructed using Process Simulate. Real-time data from production line equipment was retrieved via OPC UA and Modbus communication protocols, based on the data communication network and data acquisition architecture diagram. This data was subsequently stored in the corresponding database, serving as the data source driving the digital twin model, thereby enabling the real-time mapping of physical entities by the digital twin model. Finally, a virtual simulation environment was established for the virtual commissioning of the digital twin system. Additionally, the effectiveness and feasibility of the production line digital twinning system were verified by constructing an example verification platform. This paper highlights the successful construction of the production line digital twin system and emphasizes the potential impact of digital twinning technology on the intelligent evolution of modern production lines.

**Keywords:** intelligent manufacturing; data-driven; digital twin; virtual commissioning

近年来, 随着物联网、人工智能等先进技术在智能制造成为制造业发展主要方向<sup>[1-2]</sup>。传统的数字化生产线具有现场调试周期长, 物理生产线实体

\* 江苏省自然科学基金面上项目 (BK20201162); 教育部人文社科规划基金项目 (21YJA630111); 常州市科技项目 (CJ20220207); 常州市科技计划项目 (CM20223014, CE20235052); 河海大学优秀研究生学位论文培育项目 (422003489); 江苏省研究生科研创新计划项目 (422003179)

与虚拟三维模型之间的交互能力较差，可视化能力差，现场状态监控成本高，数据传输能力较弱，生产数据不同步等问题，难以实现生产线信息实时可视化和远程管理。近年来，随着数字孪生（digital twin）的使用，打破了阻碍物理空间与信息空间交互的屏障，为实现生产线数字化、智能化、网络化提供了技术支持<sup>[3]</sup>。

数字孪生技术作为实现物理实体与虚拟空间交互的重要解决途径之一，被国内外相关研究人员广泛关注，陶飞等人首次提出了数字孪生车间（digital twin workshop），阐述了该系统的组成、特点、运行机制以及关键技术等<sup>[1,4]</sup>。西门子公司提出了“数字双胞胎”的概念，为制造企业提供一整套从产品设计到生产加工的全生命周期的系统模型<sup>[5]</sup>。在对数字孪生系统的构建与应用方面，Deac G C 等人开发了基于工厂数字孪生的协同虚拟现实应用程序，作为监控大数据的界面，并将虚拟机的运动与真实机器同步<sup>[6]</sup>。Aheleroff S 等人开发了数字孪生参考架构，并将其应用于工业案例，以确定合适的工业 4.0 技术<sup>[7]</sup>。魏一雄等人搭建了高保真映射的数字孪生车间仿真环境，采用基于开放性生产控制和统一架构（open platform communications unified architecture, OPC UA）服务器的数据采集方式，实现对物理实体实时镜像<sup>[3]</sup>。郭磊等人运用 OPC UA 通信实现数据采集，搭建 Restful 服务器以 JSON 数据串的形式将数据发送到数字孪生车间系统<sup>[8]</sup>。仇晓黎等人运用 Open Inventor 软件，通过映射物理对象的约束关系、运动方式等规律，来提高孪生模型的保真度<sup>[9]</sup>。蒋志超等人运用 Process Simulate（PS）软件建立了超级电容模组检测线虚拟调试模块，实现了可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）程序与机器人程序在运用到实体设备前的调试与优化<sup>[10]</sup>。

结合数字孪生技术，以数据驱动为基础，本文提出了一种生产线数字孪生系统，运用 PS 和 TIA Portal 软件构建生产线数字孪生模型以及控制系统，根据系统通信架构和数据采集架构，利用 OPC UA 和 Modbus 通信技术对底层生产线设备实时数据进行读取，并驱动生产线数字孪生模型的同步运动，从而实现虚拟生产线对物理生产线的实时映射。

## 1 生产线数字孪生系统的构建

根据数字孪生五维模型的概念<sup>[11-12]</sup>，生产线数

字孪生系统如图 1 所示，以物理生产线、虚拟生产线、生产线服务系统为基础，以生产线孪生数据为驱动，以工业互联网实现信息交互。与传统的生产线相比，生产线数字孪生系统具有高保真度仿真和虚拟调试<sup>[13-15]</sup>的能力，实现在脱离现场的实际设备和运行环境的情况下，对生产线数字孪生模型与控制系统进行联通调试<sup>[16]</sup>，降低现场调试的工作量和返工的风险；通过实时数据采集技术，对物理生产线底层数据实时采集，驱动虚拟生产线实时映射，进而实现生产线三维可视化，实时监测生产线运行情况，从而提高企业的经济效益，较好解决工程中的实际问题。

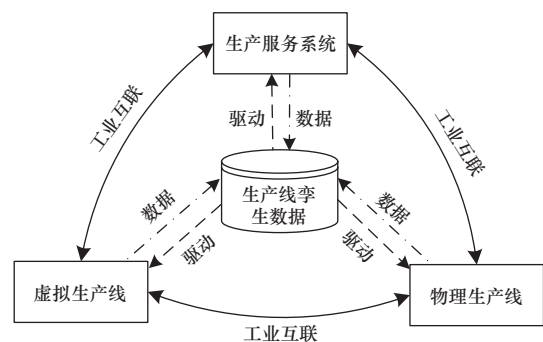


图 1 数字孪生生产线系统组成部分

### 1.1 生产线数字孪生系统架构

生产线的数字孪生系统架构可分为三层：物理实体层、数字孪生层和应用服务层，具体架构图如图 2 所示。

（1）物理实体层为车间生产线提供基本的生产条件，包括制造资源和资源感知，制造资源主要包含设备、软件、人员和物料等生产资源；资源感知主要负责设备接口与通讯协议的制定，对数据进行采集，并将采集到的数据进行清洗，最后把数据发送至数字孪生层，实现物理生产线向虚拟生产线的实时映射。

（2）数字孪生层是智能化生产线的核心部分，主要包括数字孪生模型层和数字孪生系统支撑层。首先，系统支撑层接收从物理车间中采集到的数据，对清洗后的数据进行协议转换，并对数据进行融合，存储在数据库中，驱动虚拟生产线的生产过程；然后，虚拟生产线产生的数据和用户层发送的数据又实时反馈到物理生产线中，指导物理生产线生产。

（3）应用服务层是服务的终端层，提供仿真、虚拟调试、可视化等功能。用户通过界面操作指令，指导虚拟生产线生产，从而完成对物理生产线的管

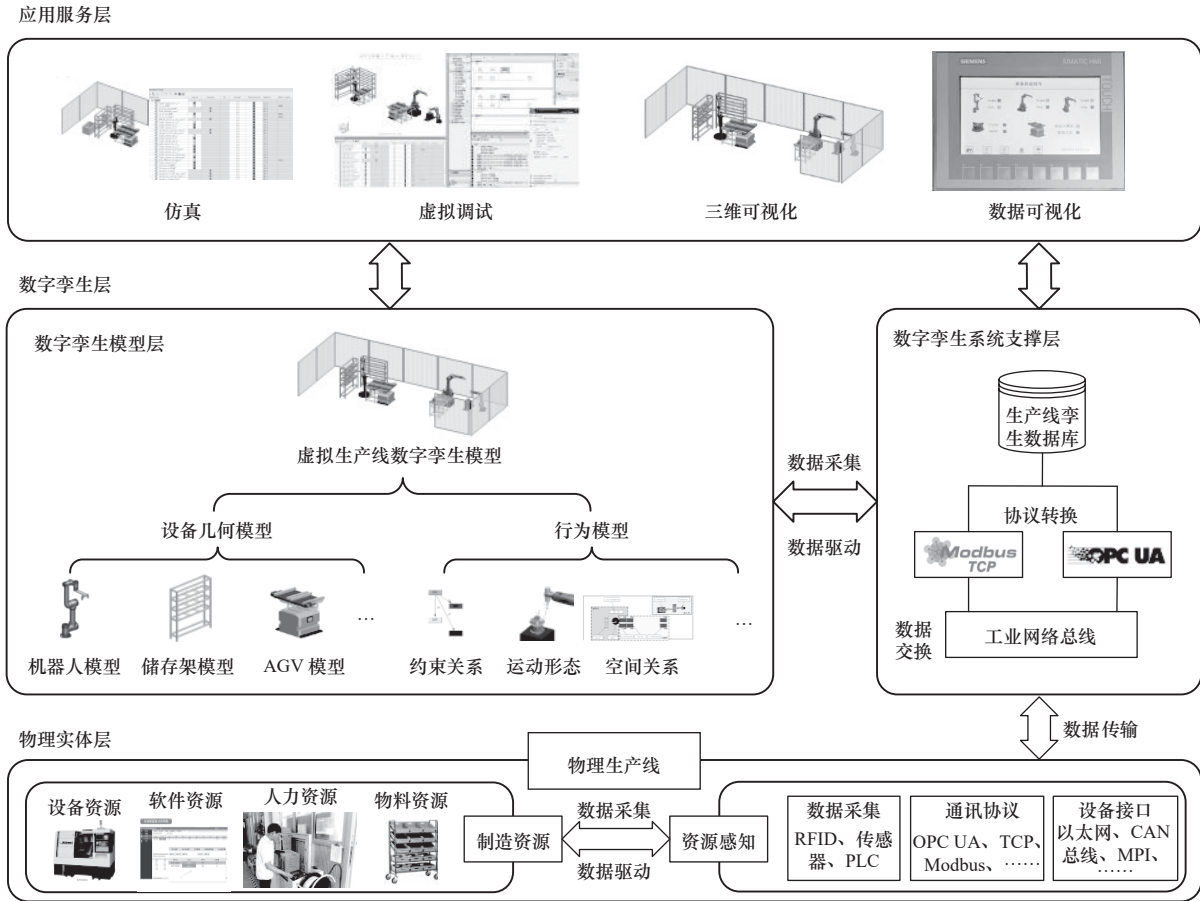


图2 生产线数字孪生系统架构

控，最终实现虚实生产线制造过程的实时映射和产品全制造智能化、透明化管控，提高生产线数字化管理水平。

### 1.2 虚拟生产线数字孪生模型的构建

生产线数字孪生模型的物理部分通过创建数字化三维模型体现，建模技术可以根据生产产品、加工设备与工艺和生产环境等，在计算机虚拟环境中对生产全过程进行设计，三维模型可以直观体现孪生模型物理部分的结构形状和空间位置<sup>[17-18]</sup>。

根据生产线数字孪生系统架构，虚拟生产线数字孪生模型 ( $DTM_{vpl}$ ) 主要包括设备几何模型 ( $GM_{equip}$ )、行为模型 ( $BehaviorM$ )、通信接口 ( $CI_{interface}$ )：

$$DTM_{vpl} = \{GM_{equip}, BehaviorM, C_{interface}\} \quad (1)$$

其中：行为模型 ( $BehaviorM$ ) 主要包括约束关系 ( $BindingR$ )、运动形态 ( $MP_{attens}$ )、空间关系 ( $SpatialR$ )。

$$BehaviorM = \{BindingR, MP_{attens}, SpatialR\} \quad (2)$$

设备几何模型 ( $GM_{equip}$ ) 即三维 CAD 模型，是构建数字孪生模型的前提条件，要求反映实际物理

生产线中各类设备的几何信息和拓扑信息，并将各类信息图纸化。行为模型 ( $BehaviorM$ ) 要求表达物理实体设备间的约束、装配和空间关系以及设备实时运行情况，根据需求设置可运动设备模型的运动学编辑器，创建内部逻辑块，添加运动副，定义抓手、夹具等设备的姿态和机器人的动作，并设置触发动作开始的驱动信号等。通信接口 ( $C_{interface}$ ) 是实现孪生数据信息交互的桥梁，从 PLC 中获取的大量驱动信号与传感器实时数据将通过通信接口传输给孪生模型，孪生模型与 PLC 通过图 3 的信号完成数据交换。

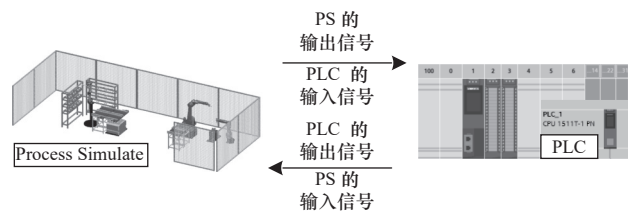


图3 Process Simulate 与 PLC 信号关系图

### 1.3 系统通讯架构

在生产线数字孪生系统中，数据通信网络是实

现数据驱动的基础，打破了物理实体与虚拟空间信息交互的壁垒。本文提出了一种基于数字孪生的数据通信网络架构图，如图4所示。

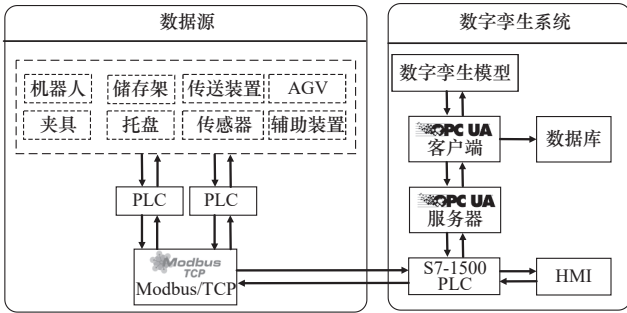


图4 数据通信网络架构图

数据通信网络架构主要分为两个部分：数据源和数字孪生系统。数据源中的实际生产线设备与型号为S7-1500的PLC（S7-1500 PLC）基于以太网TCP/IP的Modbus协议进行信息交互，Modbus/TCP有RS485和以太网接口。S7-1500 PLC与数字孪生模型之间通过OPC UA建立通信连接。OPC UA服务器集成在S7-1500 PLC上，与实际物理设备间采用以太网相连，OPC UA客户端集成于虚拟空间PS之上，与服务器建立可靠的连接，OPC UA客户端可访问服务器节点变量，并进行对该变量的读取、写入，实时获取服务器中的信号数据，这些信号数据驱动数字孪生空间中的虚拟生产线模型对物理生产线进行实时映射。

#### 1.4 系统数据采集架构

生产线数字孪生系统要求从底层实际物理生产线中实时采集数据。在RS485通信网络中，物理实体设备之间可以实现以一主多从的方式进行数据通信，即一个主站（master）可以访问多个从站（slave）。

本文构建了数据采集框架图，如图5所示，Modbus串口服务器是RS485通信网络中的主站，作为从站的设备可以是多个，例如从站1选用生产线现场的温湿度传感器和从站2选用汇川H2U PLC。主站设备和从站设备之间采用应答式机制，通过传送Modbus数据帧实现数据交互，主站设备主动发送设备请求数据帧给所有从站设备，所有从站设备都会收到指令，但只有指令地址相同的从站设备会执行指令并返回响应数据帧给主站设备。

## 2 实例搭建与应用

本文选取的生产线为一个端面铣产线，包括3

个自由度机器人、2个零件储存架、传送装置、自动导引运输车（automated guided vehicle, AGV）、工作台、托盘、三爪卡盘、铣刀、抓手和其他辅助设备等等。

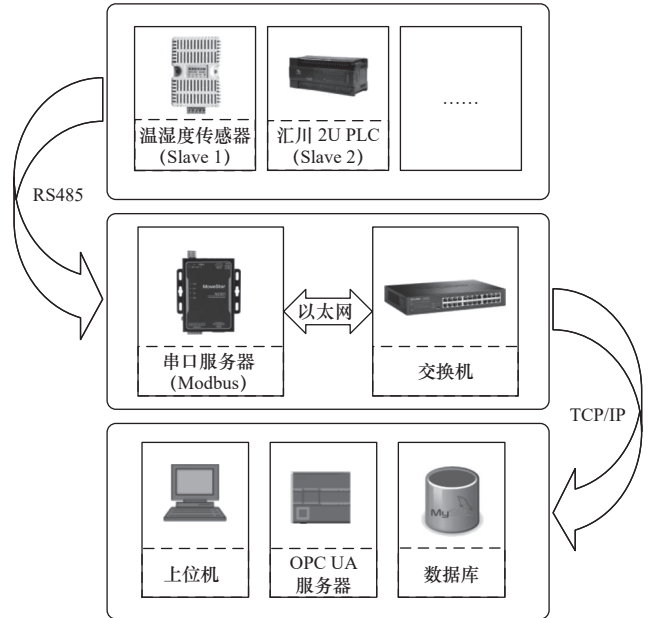


图5 数据采集框架图

本章以此生产线为例，详细阐述了生产线数字孪生生产线系统的构建过程，并对实例进行虚拟调试与应用。

### 2.1 基于 Process Simulate 数字孪生模型重构

根据实际生产线设备，运用SolidWorks对设备三维建模，结合现场测量所得的布局数据，运用PS软件进行整体装配与布局，整体布局主要分为储存区、运输区和加工区3个基本区域，重新定义与分类设备模型，设置可运动设备模型的运动学编辑器，创建内部逻辑块，添加运动副，并设置限位参数，定义抓手、夹具等设备的姿态，具体示意图如图6所示。定义机器人的动作，对机械臂的运动路径进行规划，并设置触发动作开始的驱动信号及信号类型，图7以i5\_r1机器人抓取托盘tray1\_1出库为例，给出路径、过程图和对应的信号定义。

### 2.2 基于 Process Simulate 数字孪生模型重构

硬件组态是控制系统搭建的基础，即选用合适型号的硬件设备并对设备的参数进行配置。在TIA Portal选用1511T-1PN CPU，S7-1500系列的PLC支持高效组态。人机界面（human machine interface, HMI）选用型号为KTP700 Basic PN的7寸玻璃基板显示屏，硬件设备组态如图8所示。

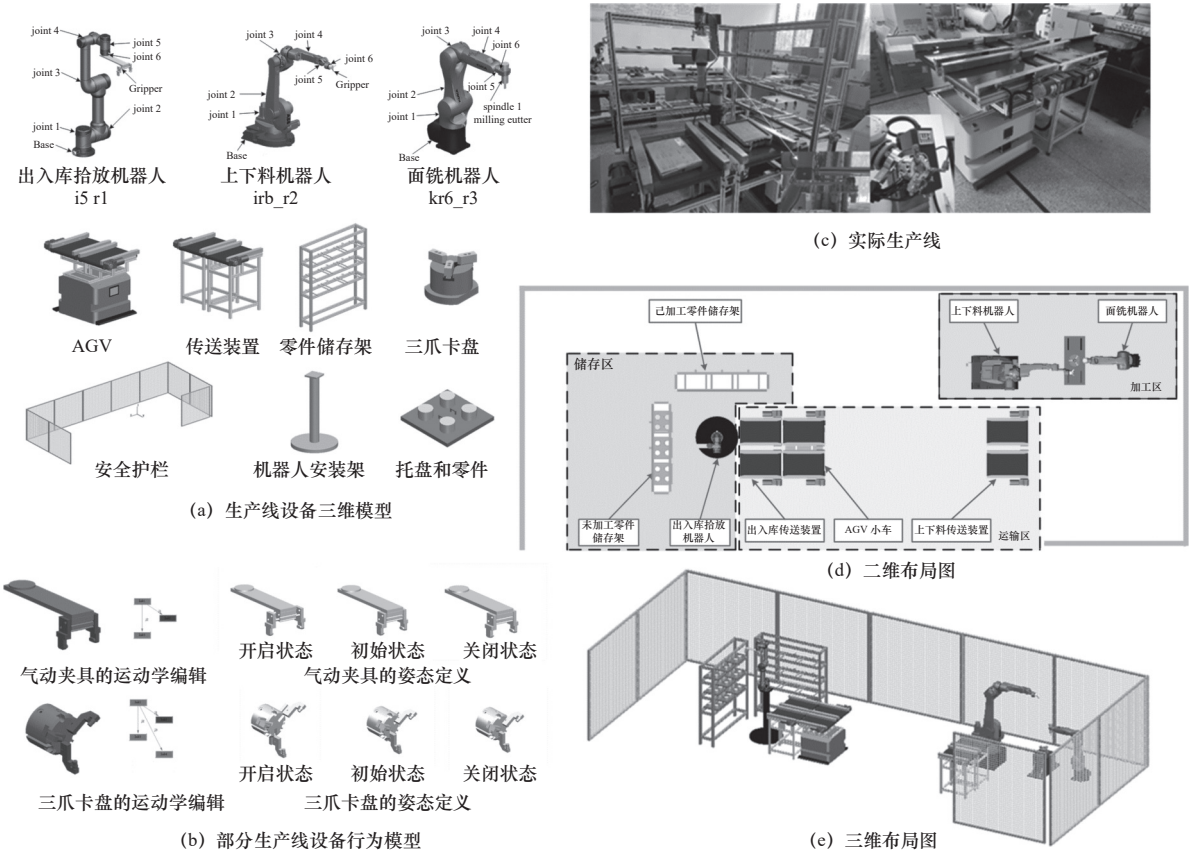


图6 数字孪生模型重构

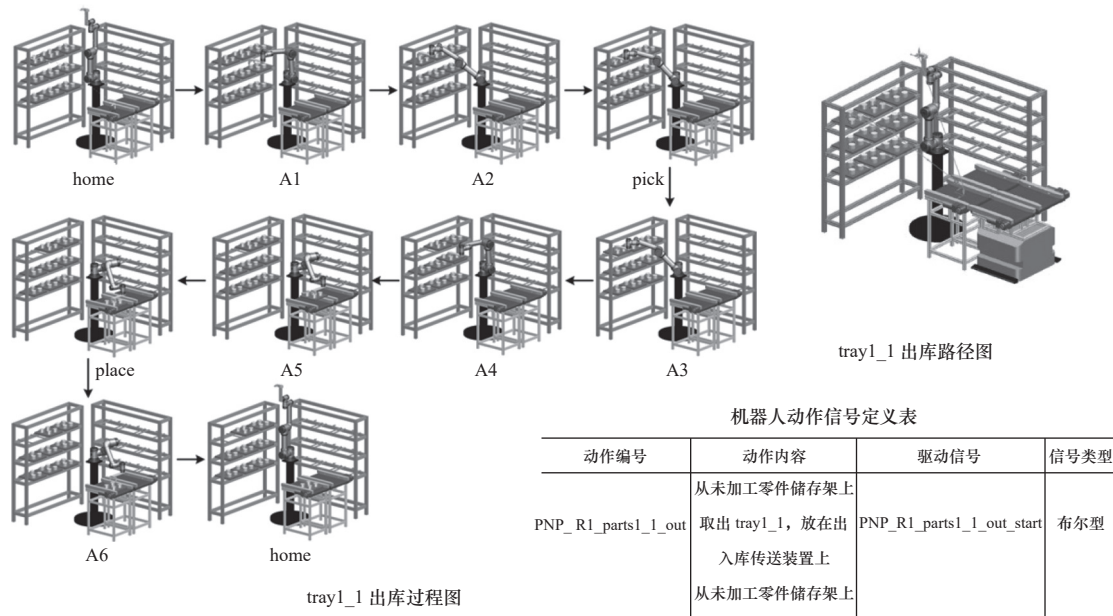


图7 tray1\_1 出入库路径规划

HMI是数字孪生的生产线模型与用户之间信息交互的媒介。使用者能够在如图9所示的HMI界面中直接读出信息，通过界面上设置的按钮，操控实际生产线及虚拟生产线的各个动作。

本文采用模块式程序编写方法，运用梯形逻辑

LAD语言，创建了数字孪生系统电气控制程序，程序主要分为3个模块：自动运行模式、手动运行模式和手动上下料模式。

### 2.3 物理实体通信与数据采集

根据在TIA Portal中建立的组态关系，上位机

(PC)、PLC\_1、HMI\_1、PS 等均与以太网交换机连接，系统设备连接如图 10 所示。PC 端与物理实体设备应处于同一网段，按照表 1 所示的参数，通过 PC 端给物理实体设备分配 IP 地址、子网掩码和 MAC 地址。Modbus 串口服务器的 IP 地址设置为 192.168.3.253，处于同一网段，OPC UA 服务器的地址为“opc.tcp://192.168.3.200:4840”，集成 OPC UA 客户端的虚拟空间可根据此地址与服务器创建连接。

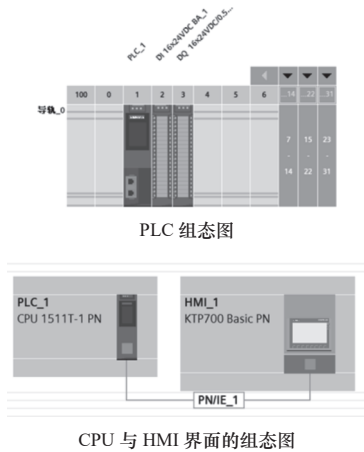


图 8 硬件设备组态图



图 9 HMI 界面图

本文选用的信息传输协议和技术为 OPC UA 和 Modbus，可以有效减少信息传递过程中的失真和误差，确保数据的可靠传输。

本文采用的数据采集传输速率为 9 600 bps。这一指标通常用于衡量数据传输的速度和效率，尤其适用于串行通信。选择合适的比特率可以在数据采集过程中平衡采集速度和传输效率的需求。同时，通过更新和升级硬件设备，优化 python 读写代码，优化算法和数据结构的选择，避免不必要的循环和递归，减少内存占用和计算量，以提高程序的执行效率。最终，将信息传递周期维持在 200 ms 以下，降低通信延迟，提高系统响应实时性。

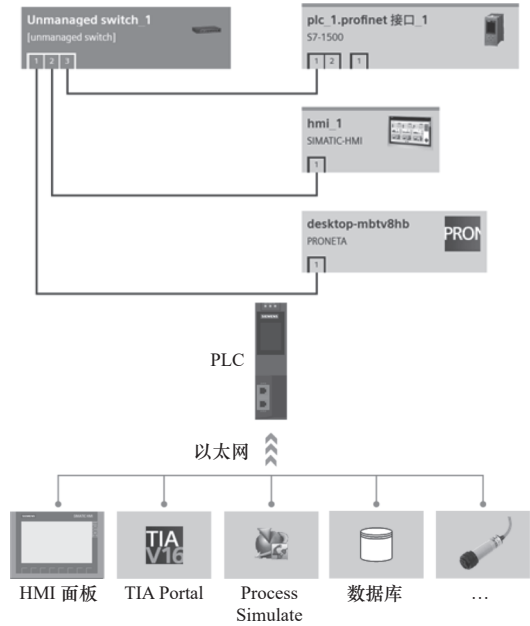


图 10 设备连接图

表 1 数字孪生系统设备在线表

设备名称	设备类型	IP地址	子网掩码	MAC地址
plc_1	S7-1 500	192.168.3.200	255.255.255.0	ac:64:17:d0:bd:df
hmi_1	SIMATIC-HMI	192.168.3.52	255.255.255.0	8c:f3:19:4e:33:71
switch_1	TP_LINK	192.168.3.100	255.255.255.0	

### 2.4 虚拟调试

虚拟调试的通信媒介是建立在 S7-PLCSIM Advanced V3.0 创建的虚拟 PLC 之上，选用 PLCSIM Virtual Ethernet Adapter 的连接方式，IP 地址为 192.168.0.1，子网掩码为 255.255.255.0。

追踪 TIA Portal 每一条程序段与 PS 中数字孪生模型的动作和信号面板中各个信号状态是否匹配，如图 11 所示，正在进行抓起 tray1\_1 上的一号位零件，放到处于 open 状态的夹具上，右边 TIA Portal 的显示该动作驱动的程序段接通，左边的上下料机器人模型正在进行此动作，从 PS 的信号面板上显示此动作信号已接通。

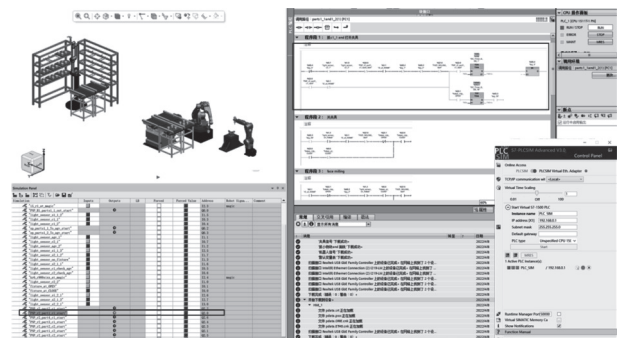


图 11 自动模式下某一动作调试图

## 2.5 应用于实际生产线设备

本文选取的生产线为一个端面铣生产线，生产线具体加工流程为：（1）出入库拾放机器人从储存区将待加工零件抓取至运输区。（2）传送装置与 AGV 将待加工零件运输至加工区。（3）上下料机器人将待加工零件抓取至三爪卡盘上。（4）端面铣机器人开始加工，加工结束后上下料机器人进行下料操作。（5）由传送装置与 AGV 将已加工零件运输至储存区。（6）出入库拾放机器人将已加工零件放入零件储存架。

如图 12 所示的是虚拟生产线数字孪生模型的同步过程图，在图 12a 情况下，数字孪生模型正在进行对 tray1\_1 的动作，待加工零件储存架 1\_1 储存仓是空仓，出入库拾放机器人处于运行状态，AGV 小车处于储存区；在图 12b 情况下，数字孪生模型正在进行对 tray1\_1 四号位零件加工的动作，待加工零件储存架 1\_1 和 1\_2 储存仓是空仓，面铣机器人处于运行状态，AGV 小车处于加工区；在图 12c 情况下，以数字孪生生产线模型对实际生产现场储物架实时映射为例，当操作人员按该情况对未加工零件储存架摆放物料时，数字孪生系统会接收到储存仓内传感器的数据，使得数字孪生模型做出相应动作。在 3D 储存仓状态页面，可以读取实时实际生产线生产现场环境的温度与湿度数值。与此同时，通过运行数据采集的 python 程序，完成对 OPC UA 服务器访问，采集各类信号实时状态数据，并储存在相应的数据库中。

采用数字孪生方法后，对生产线进行了全面的实时监测与映射。这种方法使得生产线的整个加工流程得以精准而高效地模拟和监控。通过数字孪生模型，生产线的各项动作和状态得以实时记录和反映，包括零件的抓取、运输、加工、上下料和储存等关键环节。在图 12a 和图 12b 情况下，数字孪生模型清晰地展示了待加工零件储存架和机器人的运行状态，为运输和加工阶段的实时监控提供了可靠的基础。在图 12c 情况下，数字孪生系统能够实时响应实际生产现场的操作，从而在生产过程中保持数据的同步性和准确性。此外，通过数字孪生方法，可以实时获取生产现场环境的温度与湿度等关键数据，为生产过程的环境监测提供了重要支持。综上所述，数字孪生方法使得生产线的实时监测和数据采集变得更加精准和可靠，为生产线的智能化管理和优化提供了有力的技术支持。

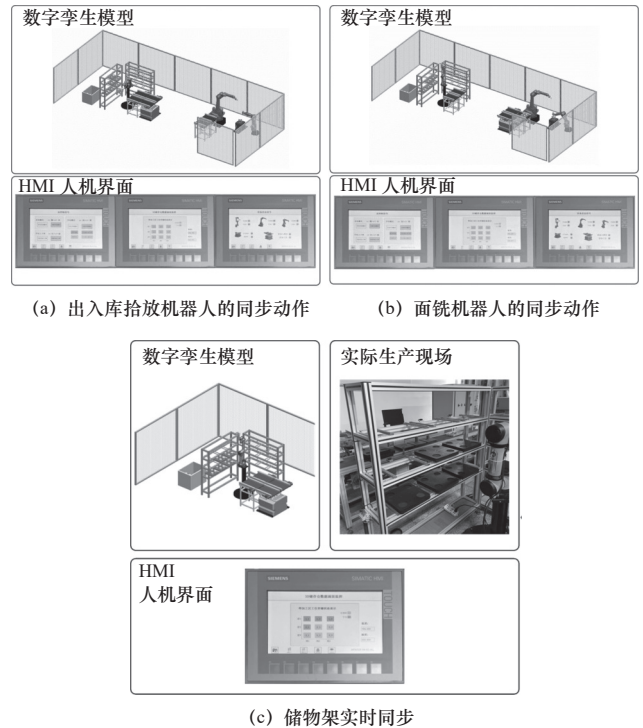


图 12 数字孪生模型同步图

## 3 结语

在全球信息技术快速发展的背景下，传统意义上的生产线构建过程受到巨大冲击，数字孪生作为实现物理生产线与虚拟生产线相互交融的重要途径，成为大势所趋。本文完成了数据驱动的生产线数字孪生系统的构建，提出了一种生产线数字孪生系统架构，基于此架构构建了基于数字孪生的生产线模型与控制系统。利用 OPC UA 和 Modbus 通信技术，进行了基于数据驱动的生产线数字孪生系统实时数据通信网络和数据采集框架的构建，基于此对数字孪生系统物理实体设备进行连接，搭建实例验证平台，实现了物理生产线对虚拟模型的实时驱动，验证数据驱动的生产线数字孪生系统构建的可行性。

### 参 考 文 献

- [1] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 9.
- [2] 林健. 第四次工业革命浪潮下的传统工科专业转型升级 [J]. 高等教育研究, 2018(4): 7-16, 60.
- [3] 魏一雄, 郭磊, 陈亮希, 等. 基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 352-363.
- [4] Tao F, Zhang M, Nee A. Cyber-physical fusion in digital twin shop-floor [J]. Digital Twin Driven Smart Manufacturing, 2019: 125-139.
- [5] Siemens A G. Digitalization in industry: Twins with potential [J/OL]. The Digital Twin-Industry-Siemens Global. <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/industry/the-digital-twin.html> (visited on 01/04/2021),

- 2018.
- [6] Deac G C, Deac C N, Popa C L, et al. Virtual reality digital twin for a smart factory[J]. International Journal of Modeling and Optimization, 2020, 10: 220-228.
- [7] Aheleroff S, Xu X, Zhong R Y, et al. Digital twin as a service (DTaaS) in industry 4.0: An architecture reference model[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 47: 101225.
- [8] 郭磊, 陈兴玉, 张燕龙, 等. 面向智能制造终端的车间生产数据采集与传输方法 [J]. 机械与电子, 2019, 37(8): 21-24.
- [9] 仇晓黎, 朱睿, 幸研, 等. 螺线管装配生产线数字孪生建模技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(6): 1696-1703.
- [10] 蒋志超, 李腾誉. 基于 Process Simulate 的超级电容模组检测线虚拟调试 [J]. 计算机科学与应用, 2021, 11(9): 2315-2323.
- [11] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- [12] Gaikwad A, Yavari R, Montazeri M, et al. Toward the digital twin of additive manufacturing: Integrating thermal simulations, sensing, and analytics to detect process faults[J]. IISE Transactions, 2020, 52: 1204-1217.
- [13] Schamp M, Hoedt S, Claeys A, et al. Impact of a virtual twin on commissioning time and quality[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51: 1047-1052.
- [14] Mortensen S T, Madsen O. A virtual commissioning learning platform[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 23: 93-98.
- [15] Scheifele C, Verl A, Riedel O. Real-time co-simulation for the virtual commissioning of production systems[J]. Procedia CIRP, 2019, 79: 397-402.
- [16] 朱国良. 数字化双胞胎之虚拟调试技术应用 [J]. 中国仪器仪表, 2020(6): 19-23.
- [17] Li S, Wang Y E, Chen B, et al. Study on modeling and simulation of digital factory technology in complex production development; proceedings of the advanced materials research[J]. Advanced Materials Research, 2012, 383: 2383-2389.
- [18] Melesse T Y, Di Pasquale V, Riemma S. Digital twin models in industrial operations: State - of - the - art and future research directions[J]. IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2021, 31: 37-47.
- 第一作者/通信作者: 黄涵钰, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 研究方向为智能制造。E-mail: 221319010039@hhu.edu.cn
- (编辑 高扬)
- (收修改稿日期: 2023-11-02)
- 文章编号: 20240210  
如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。