

7-15-2024

## Digital Twin Modeling and Control of Robots for Intelligent Manufacturing Scenarios

Ying Li

*School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China, iying123929@163.com*

Lan Gao

*School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China*

Zhisong Zhu

*School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China, zhu.zhs@ntu.edu.cn*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Digital Twin Modeling and Control of Robots for Intelligent Manufacturing Scenarios

## Abstract

**Abstract:** The introduction of Industry 4.0 and the Made in China 2025 development policy has accelerated the transformation of the manufacturing industry from automation to intelligence. Industrial robots, as the representative equipment of intelligent manufacturing, will also become more intelligent. Based on digital twin technology, digital modeling, and simulation debugging are conducted for such problems as interference and collision, tedious operation, and low efficiency of industrial robot spot welding debugging in production. Process Simulate from TECNOMATIX software is utilized to digitally model the robot spot welding station and define its motion, and TIA Portal and S7-PLCSIM Advanced are applied to build a virtual simulation and commissioning environment to realize multi-robot cooperative work at the processing station controlled by an external virtual PLC. The simulation results show that the robot can reach all working points during the motion and the joint speed is always kept within a reasonable range, which meets the requirements of safety and stability in the actual production process. At the same time, the robot spot welding station simulation by digital twin technology can find product defects in time, shorten the debugging cycle, and reduce the cost.

## Keywords

digital twin, virtual commissioning, Tecnomatix, TIA, simulations

## Recommended Citation

Li Ying, Gao Lan, Zhu Zhisong. Digital Twin Modeling and Control of Robots for Intelligent Manufacturing Scenarios[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1536-1545.

# 面向智能制造场景的机器人数字孪生建模与控制

李颖, 高岚, 朱志松\*

(南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 工业 4.0 及中国制造 2025 发展方针的提出, 加速了制造业从自动化向智能化的转型。工业机器人作为智能制造的代表性设备也将变得更智能化。针对在实际生产中工业机器人点焊调试存在的干涉碰撞、操作繁琐、效率低等问题, 基于数字孪生技术进行数字建模和仿真调试。利用 TECNOMATIX 系列软件中的 Process Simulate 进行机器人点焊工位的数字化建模与运动定义, 综合利用 TIA Portal 和 S7-PLCSIM Advanced 搭建虚拟仿真调试环境, 实现由外部虚拟 PLC 控制加工工位的多机器人协同工作。仿真结果表明, 机器人在运动过程中所有工作点均可达且关节速度始终保持在合理区间内, 满足实际生产过程中安全性和稳定性的要求; 通过数字孪生技术进行机器人点焊工位仿真可及时发现产品缺陷, 缩短调试周期, 降低成本。

**关键词:** 数字孪生; 虚拟调试; Tecnomatix; TIA; 仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)07-1536-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0481

**引用格式:** 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.

**Reference format:** Li Ying, Gao Lan, Zhu Zhisong. Digital Twin Modeling and Control of Robots for Intelligent Manufacturing Scenarios[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1536-1545.

## Digital Twin Modeling and Control of Robots for Intelligent Manufacturing Scenarios

Li Ying, Gao Lan, Zhu Zhisong\*

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** The introduction of Industry 4.0 and the Made in China 2025 development policy has accelerated the transformation of the manufacturing industry from automation to intelligence. Industrial robots, as the representative equipment of intelligent manufacturing, will also become more intelligent. Based on digital twin technology, digital modeling, and simulation debugging are conducted for such problems as interference and collision, tedious operation, and low efficiency of industrial robot spot welding debugging in production. *Process Simulate from TECNOMATIX software is utilized to digitally model the robot spot welding station and define its motion, and TIA Portal and S7-PLCSIM Advanced are applied to build a virtual simulation and commissioning environment to realize multi-robot cooperative work at the processing station controlled by an external virtual PLC.* The simulation results show that the robot can reach all working points during the motion and the joint speed is always kept within a reasonable range, which meets the requirements of safety and stability in the actual production process. At the same time, the robot spot welding station simulation by digital twin technology can find product defects in time, shorten the debugging cycle, and reduce the cost.

**Keywords:** digital twin; virtual commissioning; Tecnomatix; TIA; simulations

收稿日期: 2023-04-22

修回日期: 2023-06-13

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(220906517065911)

第一作者: 李颖(1999-), 女, 硕士生, 研究方向为先进生产机械及智能控制系统。E-mail: liying123929@163.com

通讯作者: 朱志松(1975-), 男, 高级实验师, 硕导, 硕士, 研究方向为机械电子工程。E-mail: zhu.zhs@ntu.edu.cn

## 0 引言

智能制造是当前制造业发展的重要趋势,以提高生产效率和质量、降低成本为目标,将制造业推向更高的水平<sup>[1]</sup>。工业机器人作为智能制造的重要组成部分,被广泛应用于装配、搬运、包装、点焊、喷涂等领域。随着机器人焊接工序的日益复杂,传统机器人编程方法所需的时间和人力成本高,可重复性和灵活性差,严重影响产品的可靠性和一致性<sup>[2]</sup>。因此,设计以智能化、数字化为主要元素的新型焊接机器人柔性服务系统,对提升产品质量及整体生产效率具有重要意义。

数字孪生作为一种新兴的技术手段,为解决上述问题提供了新的思路。数字孪生是以建模、仿真、虚拟现实等技术为基础,在虚拟世界中动态仿真模拟现实世界中的要素,实现虚拟世界对现实世界的监管和控制<sup>[3-4]</sup>。著名IT机构Gartner曾连续三年将数字孪生技术列为十大新兴技术之一<sup>[5]</sup>。由于传统数字孪生三维模型已无法满足现阶段技术发展和应用需求,文献[6]提出了数字孪生五维模型的概念,又在五维模型的基础上建立了一套数字孪生标准体系架构<sup>[7]</sup>,为后续数字孪生的标准研究起到了参考和推动作用。文献[8]基于OPC统一架构与数字孪生技术,提出一套面向生产车间的数字孪生车间信息物理融合系统方案。文献[9]针对飞机装配状态人工巡检存在的问题,提出了一种基于数字孪生的巡检机器人系统。现有研究主要集中在数字孪生的模型架构理论研究和案例研究两个方面,而数字孪生的具体建模方法和机器人运动规划的智能化仿真研究方面有较大发展空间<sup>[10]</sup>。

鉴于此,本文将数字孪生技术和机器人点焊工位的建模仿真相结合,研究并设计机器人点焊工位孪生系统架构,实现机器人点焊工位设备在未安装之前就已经完成运动规划和调试工作,从而提高机器人智能化水平和现场调试效率。

## 1 系统框架设计

机器人点焊加工是一种自动化焊接工艺,主要用于薄板结构及钢筋的焊接,通过工业机器人控制焊枪在预定的焊接路径上移动,并在工件连接部位施加压力和电流,使接触表面在电阻热的作用下熔化,冷却后形成焊点<sup>[11-12]</sup>。待焊工件为汽车车身组装件,如图1所示,包括6个焊点,分别为wp1, wp2, ..., wp6。搬运机器人负责将工件从待加工台夹取到夹具上,交由机器人点焊工作站焊接,焊接结束后搬运机器人再将工件从夹具夹取到成品台上。

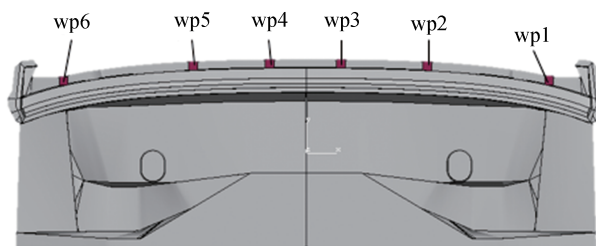


图1 焊接工件

Fig. 1 Welding workpiece

PDPS(process designer&process simulate)是西门子子公司Tecnomatix平台下的一套软件系统。PD的主要功能是数据管理和工艺规划,PS的主要功能是实现仿真验证和离线编程。本文将数字孪生技术与机器人点焊工作相结合,在PDPS虚拟环境下建立和物理模型相对应的虚拟模型,数模导入PS仿真环境后的三维布局如图2所示。数模资源包括两台点焊机器人(机器人2和机器人3),一台搬运机器人(机器人1),一个旋转焊台和两个放置台。通过旋转焊台,机器人1的上、下件操作和机器人2、3的焊接操作可以同步进行,提高了机器人点焊的工作效率。

系统总体框架如图3所示,以数字孪生的仿真应用为基础,在产品准备阶段,通过PDPS软件在虚拟空间中搭建实际产线中的工业机器人、自动化设备、传感器等设备模型,借助虚拟仿真技术实现机器人焊接路径规划、干涉检测、可达性



检测等,使得设计人员能够提前进行设备布局并对机器人运动规划进行精细的设计和管理,以确保产线的安全、高效运作。通过S7-PLCSIM Advanced和TIA软件,可实现PLC硬件组态并编写PLC程序控制机器人点焊模型运动,在虚拟空间中完成联合调试,从而缩短现场调试周期,降低调试成本。

## 2 机器人点焊工位孪生模型的建立

工业机器人在搬运、焊接过程中需不断感知周围环境,包括工件位置、障碍物、自身姿态等信息。在执行复杂任务及处理非结构化环境中,需进行高精度的运动控制,包括运动轨迹控制、速度控制、力控制等<sup>[13]</sup>。本文基于PDPS软件,在虚拟空间中搭建机器人点焊工位数字孪生模型,将孪生模型的建立过程划分为模型创建及导入、路径规划、干涉验证和仿真模式配置四个部分。

### 2.1 模型创建及导入

本文使用的机器人是六自由度KUKA工业机器人(KR2210-S C2 FLR ZH210),由基座、转台、

大臂、小臂和末端执行器等部分组成。首先,对产线设备的基本结构、尺寸、运动学和外观信息进行分析,利用Solidworks建立机器人、旋转焊台、夹具等资源的三维模型。其次,通过PS中的Convert and Insert CAD files功能将三维模型转换为jt格式,放置于资源库下构成PS可识别的模型数据库。最后,选择相应的组件原型,根据机器人点焊工位的布局图,调整模型位置,模拟真实环境下的生产资料部署。

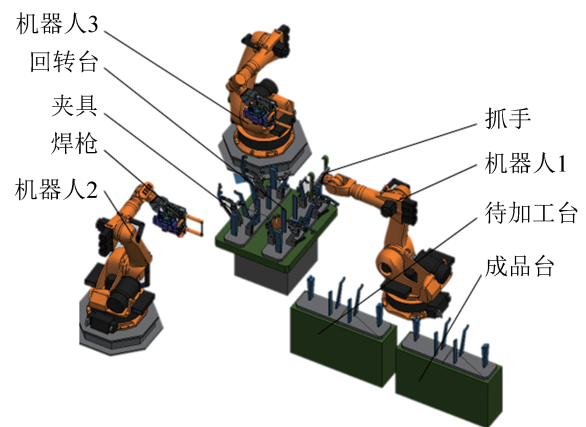


图2 机器人点焊工位数字孪生模型  
Fig. 2 Digital twin model for robotic spot welding stations

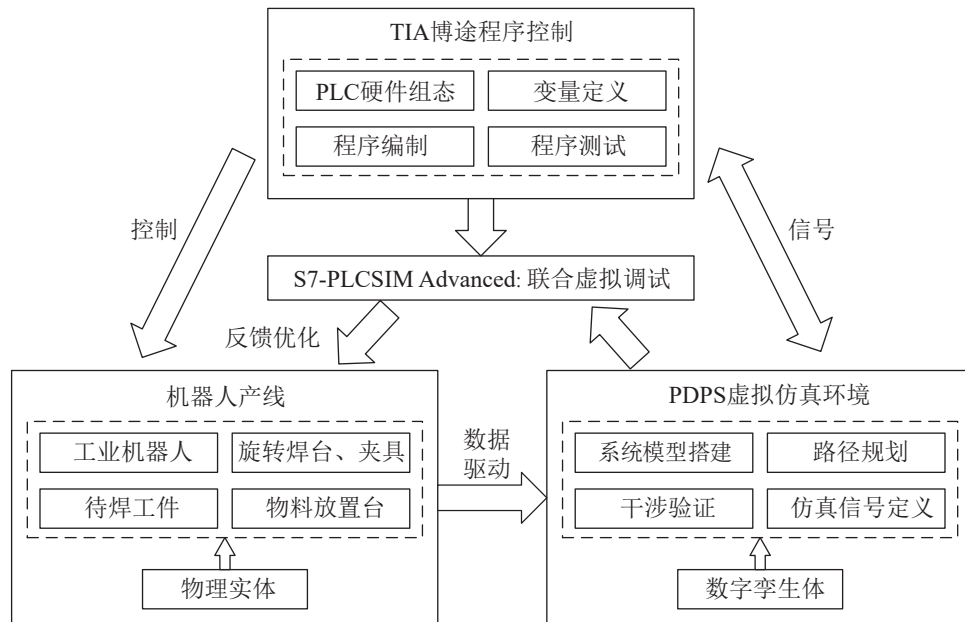


图3 机器人点焊工位数字孪生系统框架  
Fig. 3 Framework of a digital twin system for robotic spot welding stations

## 2.2 搬运、焊接路径规划

在 Process Simulate 中进行机器人焊接、搬运路径规划前, 需调整机器人关节到合适的位置, 将其位置作为机器人示教点<sup>[14]</sup>。

### 2.2.1 机器人搬运路径规划

搬运机器人包括两个工艺操作: 将零件从待加工台夹取到夹具上(上件), 焊接完毕后再将零件从夹具夹取到放置台上(下件)。建立搬运操作, 确定物料的位置、形状、尺寸等信息, 选择对应的机器人、抓手、示教拾取点(Pick)和示教放置点(Place)。根据搬运物料的要求, 调整机器人位姿, 在拾取点和放置点之间插入机器人运动过渡点, 确保搬运过程的稳定和精确。搬运机器人上件工艺路径规划如图4所示。

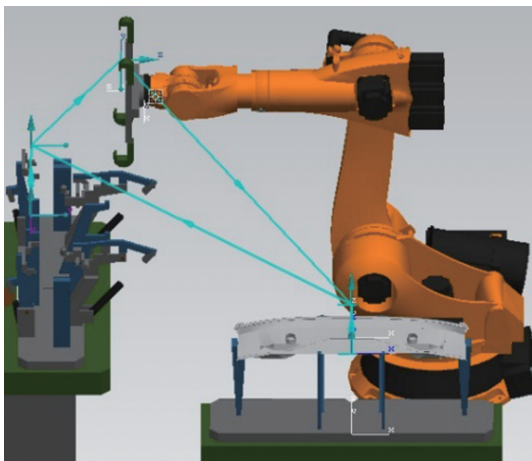


图4 搬运机器人工艺路径规划  
Fig. 4 Path planning of handling robot process

### 2.2.2 机器人焊接路径规划

待焊零件包含六个焊点, 由于两台焊接机器人同时工作, 焊接点距离太近会发生干涉碰撞, 所以机器人2的焊接顺序应为wp4-wp5-wp6, 机器人3的焊接顺序应为wp1-wp2-wp3。建立焊接操作, 选择对应的机器人、焊枪、焊点。根据待焊零件的几何形状和焊点位置规划焊接路径, 包括焊枪运动轨迹、速度和方向等, 添加机器人运

行过渡点以避免机器人在工作时和周边设备发生干涉碰撞和机器人怪异姿态。焊枪姿态直接影响焊接质量, 根据焊接工艺参数和路径规划结果来调整焊枪的角度和方向。焊接机器人2的工艺路径规划如图5所示。

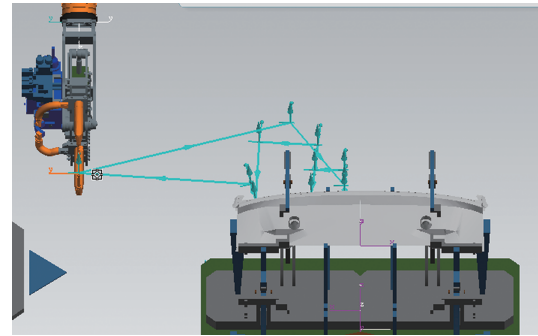


图5 焊接机器人工艺路径规划  
Fig. 5 Path planning of welding robot process

## 2.3 干涉检测与处理

由于焊接产品大多由许多复杂的曲面构成, 机器人在焊接时焊枪可能与工件、夹具及周边设备发生碰撞干涉。路径规划完成后, 通过 Process Simulate 提供的碰撞检测功能, 对机器人抓手、焊枪进行干涉检测。焊枪碰撞检测设置如图6所示, 当发生碰撞时, 主碰撞对象和与之发生碰撞的对象分别以红色和蓝色显示。图7为焊枪和夹具之间发生碰撞, 此时应先找准发生碰撞的位置, 重新规划路径, 也可通过在两点之间添加过渡点, 改变焊枪的局部运动路径来避免碰撞。通过虚拟碰撞检测, 设计人员能够及时发现设计方案中存在的缺陷, 做到提前预知、及时规避。

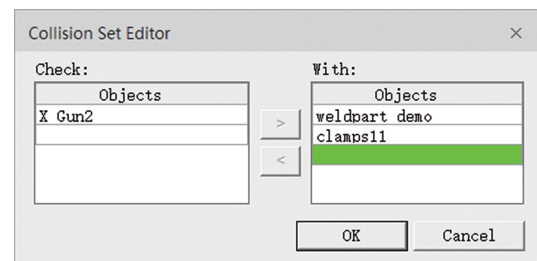


图6 碰撞检测设置  
Fig. 6 Collision detection settings

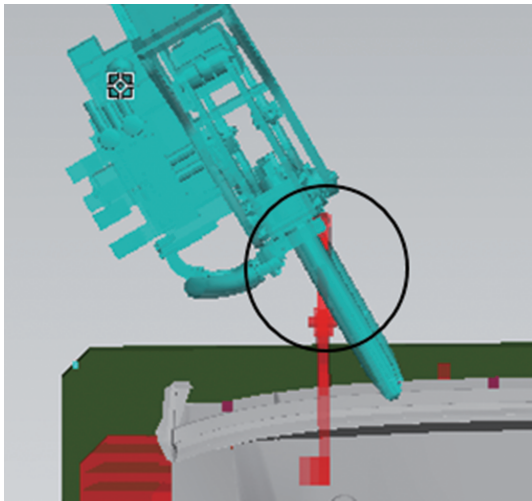


图 7 焊枪干涉检查  
Fig. 7 Welding torch interference check

## 2.4 仿真模式配置

PDPS 支持的虚拟仿真模式有标准仿真模式和生产线仿真模式，前者通过时间控制，相关设备按照预设的时序，依次参与到仿真流程中。后者通过信号控制，实际生产中，机器人产线都是通过信号交互来控制设备投入运行的时机。本文以西门子 S7-1500 系列(CPU 1511-1 PN)PLC 作为控制中心，该 PLC 具备高性能和灵活性，被广泛应用于控制和监控各种工业应用。仿真流程如下：在 PS 中创建物料流、传感器及设备逻辑块，定义仿真信号及机器人 OLP(off-line programming)指令，和 PLC 控制中心进行信号交互。

### 2.4.1 创建物料流

当虚拟仿真从标准模式切换到生产线模式时，关联的零件会消失，需通过创建物料流来实现零件在仿真过程中的显示和隐藏，模拟真实生产过程。

图 8 为机器人点焊工位模型的物料流视图，Init、GenerateParts、Kill 为创建的空操作，用于触发零件产生和消失。零件产生后，由机器人 1 搬运至夹具(PNP\_part in to fixture)，夹具夹紧后焊台旋转 180°至 FWD 位置，焊接机器人 2、3 开始焊接(Weld\_op\_rob2, Weld\_op\_rob3)，焊接完毕后

焊台旋转 180°至 HOME 位置，机器人 1 将零件搬运至放置台(PNP\_from fixture to part out)。

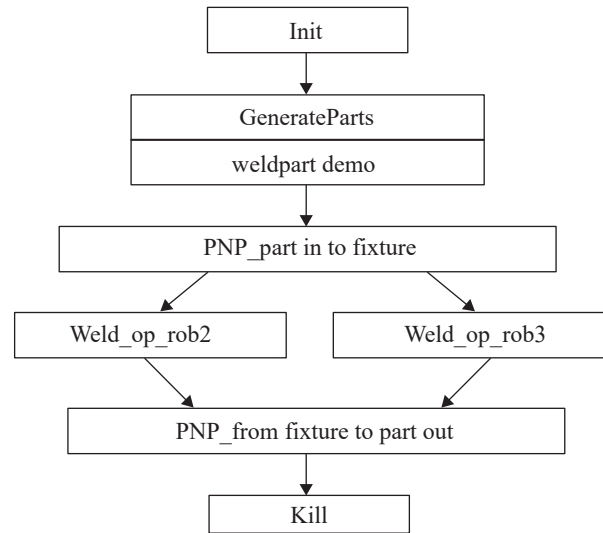


图 8 物料流视图  
Fig. 8 Material flow view

### 2.4.2 创建传感器

在适当位置放置传感器，将传感器的检测结果作为机器人等设备的触发信号，以控制设备投入运行的时机。

### 2.4.3 创建逻辑块

逻辑块是定义有输入输出和内部逻辑计算能力的逻辑设备，通过信号通信，实现预期运动。逻辑块包括入口、出口、参数、常量和操作五个部分，图 9 为夹具的逻辑块总览图。其输入/输出信号和 PLC 输入/输出信号的关系为逻辑块的输入信号是 PLC 的输出信号，逻辑块的输出信号是 PLC 的输入信号<sup>[15]</sup>。

### 2.4.4 信号定义

机器人点焊工位仿真信号主要有设备信号、机器人信号、传感器信号、按钮信号等。多机器人协同工作中，信号使不同机器人之间的通信更加高效和精确，部分信号如表 1 所示。在仿真调试中，PS 中的信号通过地址和博途中的信号进行交互，实现 PLC 程序来控制 PS 中模型的仿真运动。

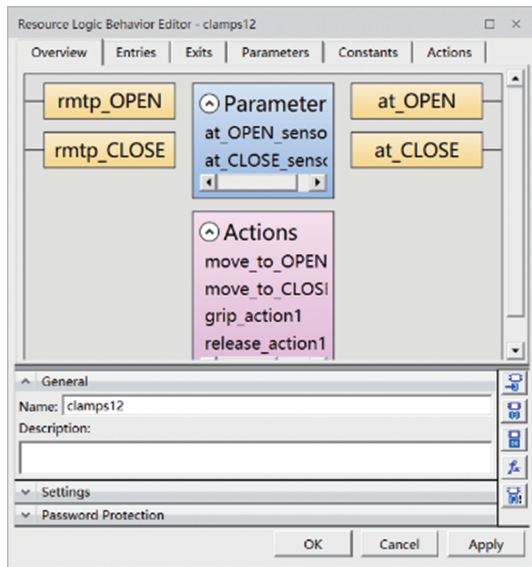


图9 夹具逻辑块

Fig. 9 Fixture logic block

#### 2.4.5 机器人 OLP 指令

OLP 包括运动指令、任务指令、输入/输出指令和参数设置指令。在 Process Simulate 生产线模式下, 将机器人任务逻辑、参数设置等信息进行虚拟离线编程, 生成机器人控制程序并将其上传到实际生产现场的机器人控制器中执行, 从而提高编程的灵活性和效率。

搬运机器人在上件和下件时, 夹具打开, 等待上、下件完毕后再关闭, 这一系列动作通过 OLP 指令联合 PLC 程序来完成。驱动夹具打开、关闭的 OLP 指令如下:

```
# Send ReqClamps12_open 1
# Send ReqClamps11_open 1
(发送机器人信号给 PLC, 作为夹具 12、夹具
11 打开的触发信号)
# WaitSignal Clamps_Ready1 1
(等待夹具全部打开完毕的信号)
# Send ReqClamps12_open 0
# Send ReqClamps11_open 0
(发送机器人信号给 PLC, 将夹具 12、夹具 11
打开的触发信号复位)
```

### 3 机器人点焊工位联合调试

#### 3.1 联合调试

通过 S7-PLCSIM Advanced 搭建虚拟 PLC 与 Process Simulate 中的数模进行信号交互, 实现 PLC 程序控制 PS 中模型的仿真加工。虚拟仿真调试环境搭建过程如下:

(1) 配置 S7-PLCSIM Advanced。选择 PLCSIM (通过软件) 的连接方式, 创建项目名称并执行连接。

(2) 配置博途。选择 1500 系列 PLC 以及合适的输入输出设备, 将项目下载到设备, 实现博途和 S7-PLCSIM Advanced 的连接。

(3) 配置 Process Simulate。选择 PLCSIM Advanced 的外部连接方式, 连接步骤(1)中创建的项目, 实现 PS 和 PLCSIM Advanced 的连接。

表 1 信号表  
Table 1 Signals

| 信号名称                      | 信号类型 | 信号地址       | IEC 标准信号地址 | 外部链接          | 关联资源        |
|---------------------------|------|------------|------------|---------------|-------------|
| clamps12_mtp_OPN          | Bool | 0.4        | Q0.4       | test_advanced | clamps12    |
| clamps12_mtp_CLS          | Bool | 0.5        | Q0.5       | test_advanced | clamps12    |
| clamps12_at_OPN           | Bool | 0.4        | I0.4       | test_advanced | clamps12    |
| clamps12_at_CLS           | Bool | 0.5        | I0.5       | test_advanced | clamps12    |
| turntable11_HME           | Bool | 1.0        | I1.0       | test_advanced | turntable11 |
| turntable11_FWD           | Bool | 1.1        | I1.1       | test_advanced | turntable11 |
| kr2210_rob1_startProgram  | Bool | 5.0        | Q5.0       | test_advanced | kr2210_rob1 |
| kr2210_rob1_programNumber | Bool | No Address |            | test_advanced | kr2210_rob1 |



在 PS 中启动仿真，在博途中置位开始信号 M0.0，触发全局启动信号，运行仿真。仿真过程中可随时修改程序并重新启动仿真，实现预期动作。

### 3.2 PLC 变量

夹具信号的 PLC 变量表如图 10 所示。为实现 PLC 程序和 PS 中数模的信号交互，PLC 变量必须和 PS 中的信号一一对应。

| clamps |                    |      |       |
|--------|--------------------|------|-------|
|        | 名称                 | 数据类型 | 地址    |
| 1      | clamps12_at_OPEN   | Bool | %I0.4 |
| 2      | clamps12_at_CLOSE  | Bool | %I0.5 |
| 3      | clamps12_mtp_OPEN  | Bool | %Q0.4 |
| 4      | clamps12_mtp_CLOSE | Bool | %Q0.5 |
| 5      | clamps11_at_OPEN   | Bool | %I0.6 |
| 6      | clamps11_at_CLOSE  | Bool | %I0.7 |
| 7      | clamps11_mtp_OPEN  | Bool | %Q0.6 |
| 8      | clamps11_mtp_CLOSE | Bool | %Q0.7 |

图 10 夹具信号的 PLC 变量表

Fig. 10 PLC variables for fixture signals

### 3.3 PLC 程序

采用模块化编程方式和梯形图语言编写机器人点焊工位仿真控制程序，创建了机器人 1 上件程序块、机器人 1 下件程序块、机器人 2、3 焊接程序块，每个块都包含了相应设备的控制指令，在主程序中按顺序调用这些控制程序模块。

控制夹具打开的 PLC 程序如图 11 所示。当旋转焊台位于 HOME 位置且接收到搬运机器人发来的 OLP 置位指令时，夹具 12 打开；当旋转焊台位于 FWD 位置且接收到搬运机器人发来的 OLP 置位指令时，夹具 11 打开。夹具打开后触发信号使搬运机器人发来的 OLP 指令复位。

### 3.4 仿真结果分析

从机器人可达性和关节运动速度两个方面来

验证仿真结果。机器人可达性方面要确保所有工作点位置均可达，且有一定的关节行程余量。为避免现场安装累积误差导致超出机器人可达范围，一般预留 5%~10% 的行程余量<sup>[16]</sup>。通过 PDPS 提供的可达性测试功能(reach test)，对搬运机器人 1，焊接机器人 2、3 进行检测，检测结果如图 12 所示，由图可知 3 个机器人的工作点均可达。选取机器人运行过程中 3 个典型点位进行关节行程余量分析，机器人关节旋转角度如图 13 所示，其最小行程余量为 20%，符合预留标准，工作站整体位置布局合理。

对机器人关节运动速度进行监控分析，可避免因机器人运动速度超过其上限而造成的冲击、损伤。通过机器人查看器(robot viewer)来监视整个生产过程中机器人各关节速度及关节极限，3 个机器人的关节速度变化曲线如图 14 所示。机器人关节的极限速度为 130(°)/s<sup>[17]</sup>，由图可知 3 个机器人的 6 个关节的最大关节速度都不超过 100(°)/s，机器人关节速度符合要求。

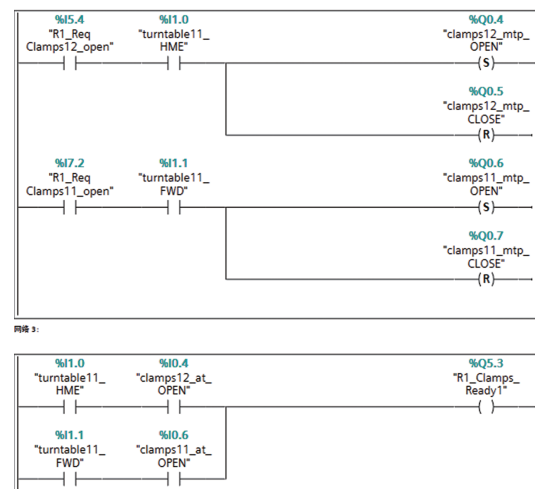
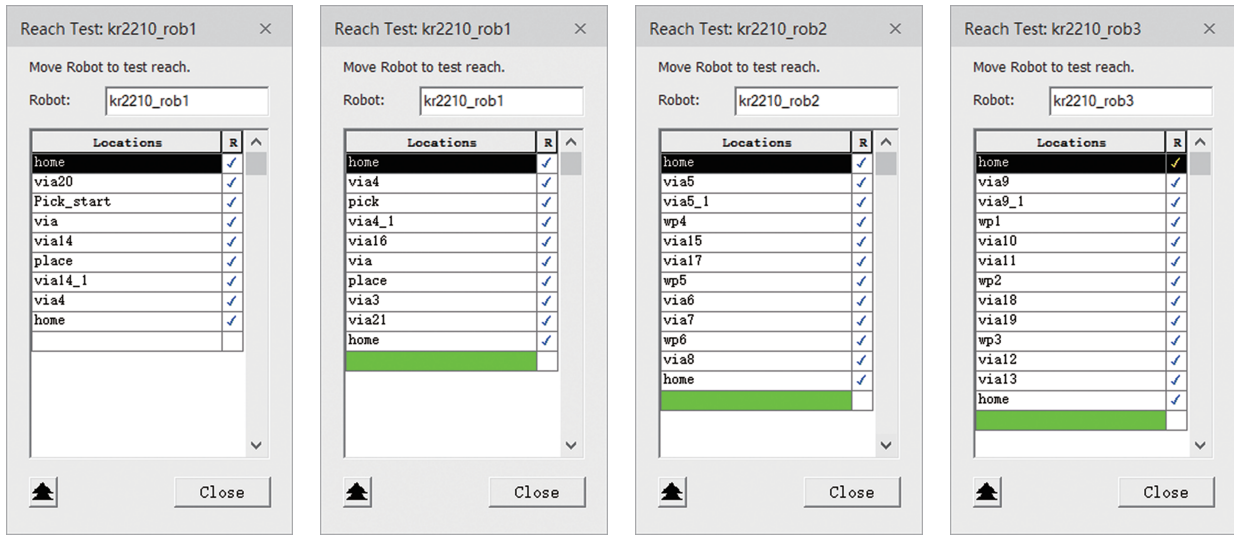


图 11 夹具控制的 PLC 程序

Fig. 11 PLC program for fixture control



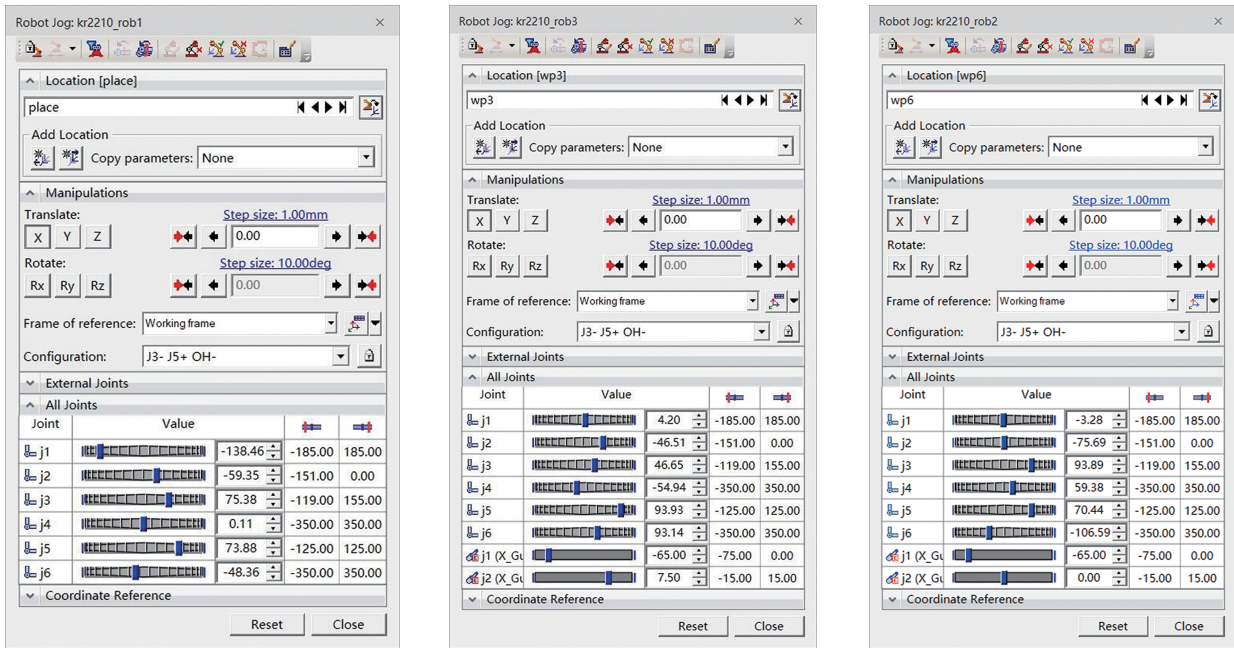
(a) 搬运机器人1上件

(b) 搬运机器人1下件

(c) 焊接机器人2

(d) 焊接机器人3

图 12 机器人可达性检测结果  
Fig. 12 Robot reachability test results



(a) 工件放置点

(b) 焊点3

(c) 焊点6

图 13 机器人关节旋转角度  
Fig. 13 Robot joint rotation angle



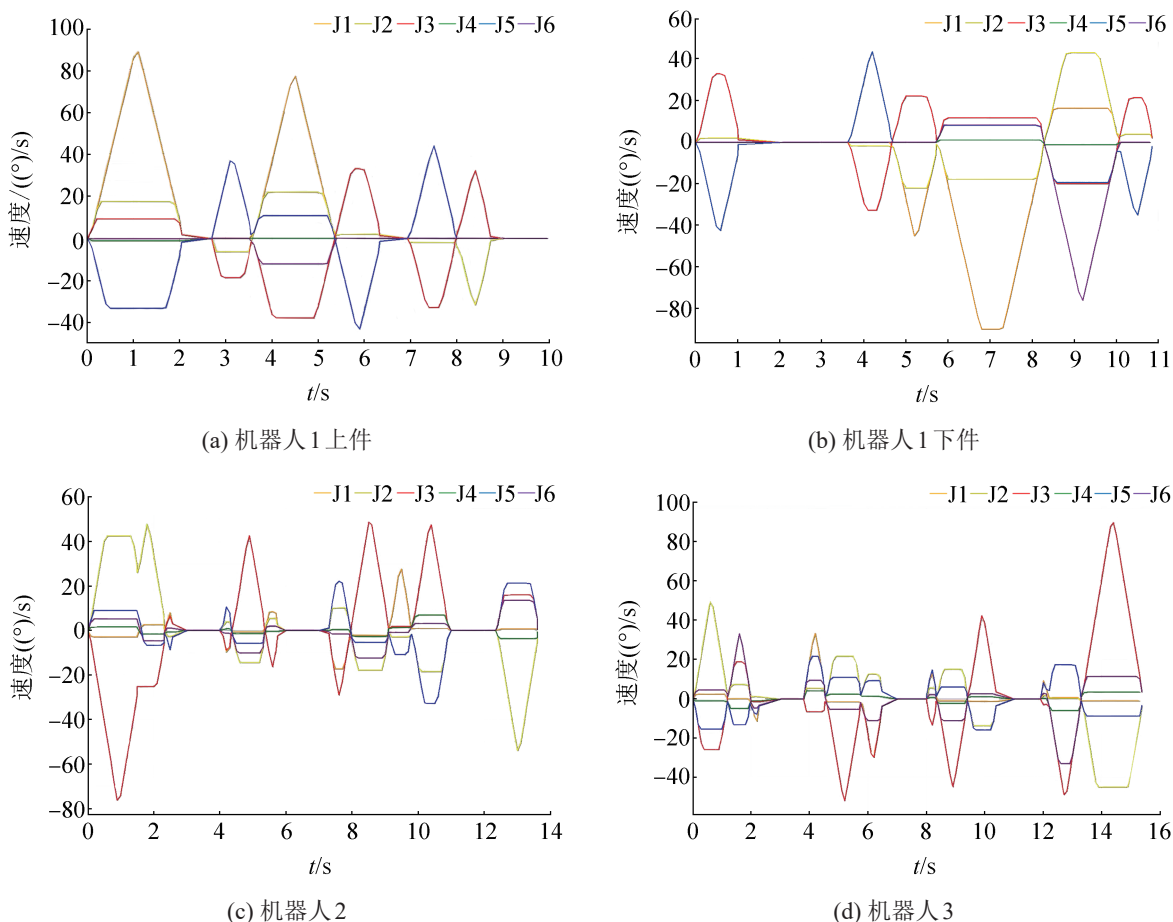


图 14 机器人关节速度图  
Fig. 14 Robot joint speed graph

## 4 结论

本文在数字孪生的基础上对机器人进行点焊工位的数字建模和仿真，通过 TIA、PS 和 S7-PLCSIM Advanced 搭建虚拟仿真调试环境，在虚拟环境中搭建孪生模型并进行机器人运动规划，在产线建立前即可完成 PLC 程序调试和生产线仿真验证。相较于传统调试方式，基于数字孪生的联合虚拟调试有如下几点优势：

(1) 在虚拟环境中进行路径规划、碰撞检测、可达性检测等，可提高机器人轨迹质量，避免产线建立后可能出现的设备布局不合理、设备干涉等问题；

(2) 通过机器人控制器，可以将 Process Simulate 中的机器人程序直接用于实体机器人，

简化了程序编写过程，降低现场工程师的技能要求，体现孪生优势；

(3) 完成计算机联合调试后，可以将 PLC 程序下载至实体 PLC 中，降低了实机调试的工作量和风险，从而缩短现场调试周期，降低调试成本。

## 参考文献：

- [1] 陈玉娇, 曾诗雨, 和红杰, 等. 工业机器人码垛数字孪生系统的研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(6): 1930-1940.  
Chen Yujiao, Zeng Shiyu, He Hongjie, et al. Research and Implementation of Digital Twin System for Industrial Robot Palletizing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(6): 1930-1940.
- [2] Adel Olabi, Mohamed Damak, Richard Bearee, et al. Improving the Accuracy of Industrial Robots by Offline Compensation of Joints Errors[C]//2012 IEEE

- International Conference on Industrial Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 492-497.
- [3] Zhong Dong, Xia Zhelei, Zhu Yian, et al. Overview of Predictive Maintenance Based on Digital Twin Technology[J]. *Heliyon*, 2023, 9(4): e14534.
- [4] 吴雁, 王晓军, 何勇, 等. 数字孪生在制造业中的关键技术及应用研究综述[J]. *现代制造工程*, 2021(9): 137-145.  
Wu Yan, Wang Xiaojun, He Yong, et al. Review on the Technology and Application of Digital Twin in Manufacturing Industry[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2021(9): 137-145.
- [5] 黄培. 数字孪生在制造业的应用[J]. *中国工业和信息化*, 2020(7): 20-26.
- [6] 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.  
Tao Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.
- [7] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(10): 2405-2418.  
Tao Fei, Ma Xin, Hu Tianliang, et al. Research on Digital Twin Standard System[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(10): 2405-2418.
- [8] 王剑, 王好臣, 李学伟, 等. 基于OPC UA的数字孪生车间信息物理融合系统[J]. *现代制造工程*, 2023(4): 43-50.  
Wang Jian, Wang Haochen, Li Xuewei, et al. Digital Twin Workshop Information Physical Fusion System Based on OPC UA[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2023(4): 43-50.
- [9] 侯正航, 何卫平. 基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(4): 981-989.  
Hou Zhenghang, He Weiping. Modeling and Control of Digital Twin-based Aircraft Assembly State Inspection Robot[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(4): 981-989.
- [10] 李幸刚, 张亚萍, 杨雨薇. 一种基于邻域扩展聚类的去噪算法[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(11): 2663-2669, 2677.  
Li Xinggong, Zhang Yaping, Yang Yuwei. Denoising Algorithm Based on Neighborhood Expansion Clustering[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(11): 2663-2669, 2677.
- [11] 吴金保, 孙晶晶. 工业机器人点焊系统解析[J]. *日用电器*, 2018(9): 88-92.  
Wu Jinbao, Sun Jingjing. Analysis on Spot Welding System of Industrial Robot[J]. *Electrical Appliances*, 2018(9): 88-92.
- [12] Stefania Pellegrinelli, Nicola Pedrocchi, Lorenzo Molinari Tosatti, et al. Multi-robot Spot-welding Cells for Car-body Assembly: Design and Motion Planning[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 44: 97-116.
- [13] Jacopo Aleotti, Matteo Saveriano, Riccardo Monica. Editorial: Learning, Perception, and Collaboration for Robots in Industrial Environments[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2022, 9: 888971.
- [14] 杨雨婷. 基于虚拟仿真的焊接机器人无碰撞路径及轨迹优化研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.  
Yang Liting. Research on Collision-free Path and Trajectory Optimization of Welding Robot Based on Virtual Simulation[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [15] 成正勇, 黎亮, 李小灿, 等. 基于TIA与TECNOMATIX的联合虚拟调试研究[J]. *汽车工艺与材料*, 2020(2): 66-71.  
Cheng Zhengyong, Li Liang, Li Xiaocan, et al. Joint Virtual Debugging Research Based on TIA and TECNOMATIX[J]. *Automobile Technology & Material*, 2020(2): 66-71.
- [16] 伍佳, 黄西利, 陈快. 浅议机器人仿真的可达性和通过性[J]. *装备制造技术*, 2022(5): 105-108, 118.
- [17] 吕文壮. 汽车车身焊接机器人路径规划与虚拟仿真研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020.  
Lü Wenzhuang. Research on Path Planning and Virtual Simulation of Automobile Body Welding Robot[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.