

第二届“汇川杯”全国智能自动化创新大赛
创新开发赛道——以新质生产力点燃制造业创新引擎
作品方案书

作品选题（请在对应的选题前面打勾）：

- ☐ 选题 1：传统制造业转型升级
- ☐ 选题 2：工业战略性新兴产业创新应用
- ☒ 选题 3：未来制造创新开发
- ☐ 选题 4：工业物联网解决方案设计
- ☐ 选题 5：制造企业制造执行系统（MES）设计

作品名称：_____ AI 驱动柔性制造——能“懂人话”的智能柔性生产系统 _____

团队名称：_____ 菜就多练 _____

参赛学校：_____ 云南机电职业技术学院 _____

指导老师：_____ 黄燕燕 、胡辛豪 _____

团队成员：_____ 罗成伟 、马官瑞 、刘先翱 _____

2025. 7

目录

摘要	4
一、 项目概述	4
1.1 项目背景	4
1.2 需求分析	4
(1) 工艺流程调整不够灵活且技术门槛高	4
(2) 智能化程度不高	5
(3) 生产线切换效率低	5
1.3 项目目标	5
(1) 用户自定义的工艺编程语言使工艺流程可灵活调整	5
(2) AI 自动生成工艺编程语言程序	6
(3) 数字孪生技术验证工艺编程语言程序正确性	6
1.4 预期成果和应用场景	6
(1) 多品种混线生产线	6
(2) 消费电子产品定制化装配	7
(3) 快消品季节性产线切换	7
(4) 中小型企业低成本柔性改造	7
二、 方案设计	7
2.1 柔性生产线硬件设计	7
(1) 模块化设计思路	7
(2) 整体设备模型	7
(3) 各单元简介	8
(4) 多模块组合功能示例	9
2.2 功能架构	10
2.3 技术架构	10
2.4 技术路线	11
(1) 总体技术方案	11
(2) 工业网络技术	12
(3) 工业相机技术	12
(4) PLC 标准化编程	13
(5) 用户自定义的工艺编程语言	13

(6) 工艺代码 AI 自动生成系统	15
(7) 虚拟仿真系统验证工艺编程语言	16
(8) 虚实联调技术结合在线诊断进行故障报警	17
(9) 权限管理与信息安全	18
(10) 云平台	18
三、 项目实施	19
3.1 设备选型	19
3.2 功能实现	19
3.3 性能测试	26
(1) 测试齿轮质量检测工序	26
(2) 测试椒盐研磨加工工序	27
3.4 技术难点及解决	29
四、 总结评价	29
4.1 设计目标达成度	29
4.2 投入产出比分析	31
4.3 推广/应用价值	33
4.4 改进计划	34
4.5 创新性/特色亮点总结	34
五、 团队成员介绍及分工	36
六、 参考文献	38

摘要

本项目以“AI 驱动柔性制造——能“懂人话”的智能柔性生产系统”为主题，聚焦柔性生产线中工艺流程调整依赖专业技术人员、程序智能化不足、产线切换效率低等痛点，结合模块化硬件设计思路、工业网络技术、工业相机技术、PLC 标准化编程、用户自定义工艺编程语言、人工智能技术、数字孪生、云平台等先进技术，打造一个集成化、智能化、高效灵活且适合多场景的柔性生产线系统，推动制造业向智能制造转型。

一、项目概述

1.1 项目背景

随着全球市场竞争加剧、消费需求个性化升级以及技术迭代加速，传统制造业正面临前所未有的挑战。传统生产模式往往产品种类单一、专用性强，依赖专用设备和固定工艺流程，存在柔性不足、难以适应日益多样化、个性化的市场需求等问题。在此背景下，柔性生产作为工业 4.0 和智能制造的核心方向，成为制造业转型升级的必然选择。柔性生产线通过动态调整设备配置、工艺参数和生产流程，支持多品种、小批量、定制化生产，能够快速响应市场需求变化。

1.2 需求分析

《“十四五”智能制造发展规划》提出“加快推动智能制造发展，建设基于柔性生产的智能车间和工厂”，推动制造业向智能化方向转型。随着工业 4.0 和智能制造的推广，工业互联网、人工智能、数字孪生、工业机器人、机器视觉等新质生产力技术的应用，大幅提升了制造系统的灵活性和适应性，为柔性生产提供了技术支撑。然而，当前柔性生产线仍面临着一些问题，亟需通过创新技术手段实现突破。

（1）工艺流程调整不够灵活且技术门槛高

某些柔性生产线为了实现多品种、定制化的生产，会将要生产的几种产品的工艺流程直接写入控制程序中，然后通过 HMI 界面的选择控件或输入控件进行固定的几种产品的选择和若干工艺参数的设置。这类柔性生产线只能做到固定的

几种产品的生产切换，若此时要让产线生产一种工艺流程不同的新产品，除非请专业工程师修改控制程序，否则无法快速实现。导致产线柔性不够且过渡依赖专业工程师，技术门槛高。

（2）智能化程度不高

人工智能技术正以前所未有的速度重塑全球产业格局，其在教育、医疗、金融、物流等领域的创新实践已成效显著。在制造业领域也有应用，但主要集中在机器视觉+AI 技术进行质量检测，或通过 AI 预测设备故障、智能运维、降低能耗等方面。在柔性生产线中对工艺流程进行调整方面，由于制造业工艺参数、设备状态等数据样本小、针对性强、实时性要求高等特点，AI 的应用程序不高。

（3）生产线切换效率低

在柔性生产模式下，当工厂接到新产品的生产需求时，需停机对生产线进行重新排布、修改程序、调整设备与工艺等，存在技术门槛高、耗时长、试错成本高、效率低等显著瓶颈。

1.3 项目目标

本项目以“AI 驱动柔性制造——能“懂人话”的智能柔性生产系统”为主题，聚焦柔性生产线中工艺流程调整不够灵活且技术门槛高、智能化程度不高、生产线切换效率低等痛点，结合用户自定义工艺编程语言、人工智能、数字孪生等先进技术，旨在打造一个集成化、智能化、高效灵活且适合多场景的柔性生产线系统，推动制造业向智能制造转型，实现以下目标：

（1）用户自定义的工艺编程语言使工艺流程可灵活调整

为了更好的实现灵活更改工艺过程，满足不断变化的生产需求，在设计控制系统的时候，根据生产线的特点建立一套由用户参与定义的简单易懂的工艺语言体系，用户不必了解过多的技术细节就可以根据自己掌握的相关工艺知识，灵活使用该语言体系，使之完成对设备动作的控制。这种表述工艺对象的语言体系我们称之为用户自定义的“工艺编程语言”。似于数控机床加工程序的 G 和 M 代码，如图 1 所示。对于某个产品生产流程，用户可以使用工艺编程语言自行编写动作程序和修改工艺参数，如图 2。



图 1 定义工艺编程语言

M01 10 //加入原料 1, 10%
M02 20 //加入原料 2, 20%
M06 100 60 //以 100%的速度搅拌 60 秒
M05 90 //加热至 90 度
M03 30 //加入原料 3, 30%
M04 40 //加入原料 4, 40%
M06 50 120 //以 50%的速度搅拌 120 秒
M07 //加盖
M08 //入库

图 2 使用工艺编程语言编写程序

(2) AI 自动生成工艺编程语言程序

通过 Spring Boot 技术开发软件后端，集成线上 DeepSeek 开放平台模型或 Ollama 本地化部署模型，在 AI 中对工艺编程语言进行训练。在由 Vue 制作的前端界面中，通过语音或文本输入用户需求的工艺流程和参数，实现能够由 AI 自动生成工艺编程语言代码的功能。并可以通过 TCP/IP 通讯将生成的工艺代码传送给虚拟仿真系统和实体产线设备，启动新工艺流程，提升生产线智能化水平。

(3) 数字孪生技术验证工艺编程语言程序正确性

将数字孪生技术与工艺编程语言相结合，搭建安全、高效的工艺编程语言测试环境。基于数字孪生技术虚拟仿真模型，设计一个与真实设备界面和功能一致的虚拟仿真系统。AI 自动生成的工艺代码首先传送到虚拟仿真系统中，测试程序是否符合需求，通过运行结果帮助用户快速调整和优化程序，提升修改工艺流程的工作效率。在虚拟仿真模型中验证动作正确后，再发送到真实设备中，减少在真实设备上的编程和调试时间，减少因为操作失误造成的设备损耗和维护成本，从而提高新产品切换效率。

1.4 预期成果和应用场景

本项目结合用户自定义的工艺编程语言、人工智能技术、数字孪生技术、PLC 标准化编程、工业网络控制技术、工业相机应用等多项技术，实现降本增效、柔性生产、流程优化以及提升应对市场需求变化的能力。并形成一套可复制、可推广、可适应多种场景的智能化柔性生产装配解决方案，为生产行业的转型升级提供示范和借鉴。适用的应用场景如下：

(1) 多品种混线生产线

如某生产线需生产多款型号，针对不同型号需要重新配置工序和工艺等。

(2) 消费电子产品定制化装配

消费电子行业需求波动大，客户常要求定制化功能（如颜色、接口配置等）。

(3) 快消品季节性产线切换

节日促销或新品上市时，需频繁切换包装规格（如大瓶装、礼盒装）。

(4) 中小型企业低成本柔性改造

中小企业受限于资金与技术，难以承担全自动化改造的高昂成本。可在现有设备基础上增加关键模块功能升级和工艺编程语言升级，除低成本。

二、 方案设计

2.1 柔性生产线硬件设计

(1) 模块化设计思路

本项目采用模块化设计思路，将生产线设备、软件功能按独立模块划分，支持按需组合与快速重组。对不同产品的生产过程，设备和程序可以共用，从而可以在实现降本增效的同时满足多样化产品的研发需求。同时可以实现以模块子系统的功能升级来带动产品整体性能的升级，从而解决以往更新换代时需要对产品整体进行重新设计的弊端，有效缩短了开发周期，降低了研发成本。

(2) 整体设备模型

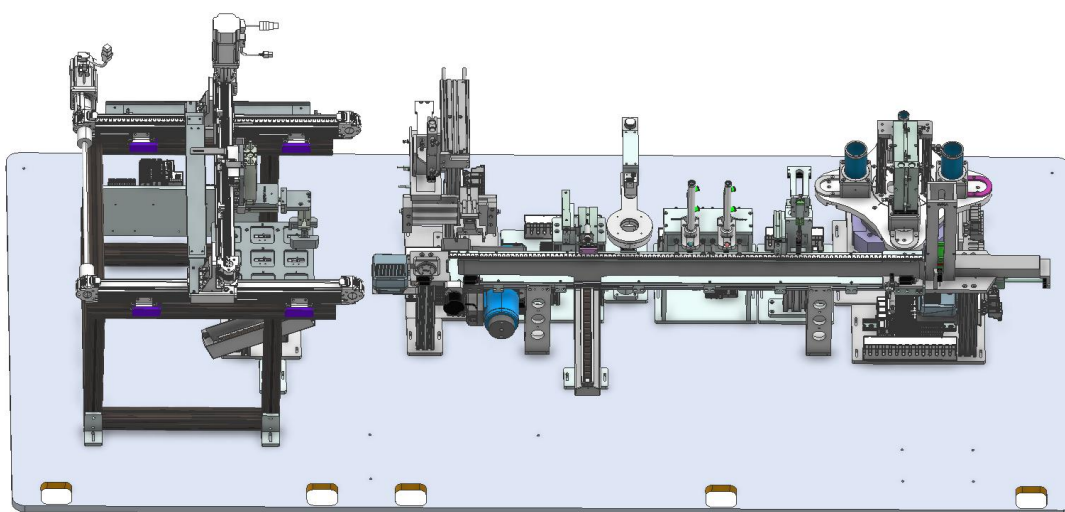


图 3 系统整体设备模型

系统以模块化设计为原则，其中的每一个单元模块，都代表着一个子系统。

各单元工作台为可自由移动的独立台架，工作台四面都可以与其它单元进行拼接，拆卸组装灵活方便，同一平台下不同产品的设计方案，可根据工艺流程仅做局部修改，自由组合成适合不同功能要求的布局形式，满足系统集成设计过程中空间规划的灵活性要求。

(3) 各单元简介

硬件按功能划分为供料单元、旋转供料单元、高度检测单元、钢珠装配单元、检测分拣单元、搬运装配单元、称重单元、RFID 检测、龙门搬运单元、仓储单元、传输带输送单元和导轨搬运系统。

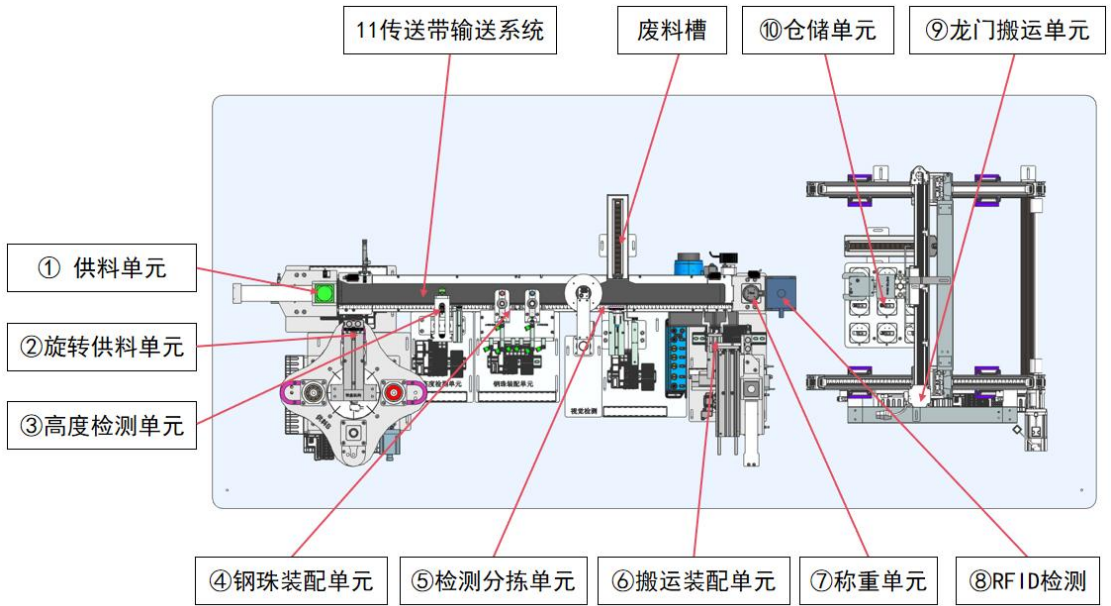


图 4 系统各单元分布图

- ① 供料单元：通过气缸从料仓中推出料盒，完成供料后启动输送流程。
- ② 旋转供料单元：通过旋转料仓定位至取料位置，由气缸推出料芯至指定供料台，并能由气缸及吸盘对料芯进行装配，为装配提供基础物料。
- ③ 高度检测单元：通过挡停机构固定物料，使用传感器检测物料高度或装配深度，判定合格性并将结果上传至数据系统。
- ④ 钢珠装配单元：通过挡停机构固定瓶体，按订单需求完成大、小钢球的定量灌装。
- ⑤ 检测分拣单元：通过工业相机视觉检测或颜色传感器对物料进行信息验证或质量判定，触发分拣动作（如剔除不合格品）。

- ⑥搬运装配单元：通过机械手复合抓取机构将物料从供料台搬运至指定装配位置，及完成料盒与料盖间的装配。
- ⑦称重单元：对物料进行重量测量，同步数据至管理系统。
- ⑧RFID 检测：独立读写或校验物料 RFID 标签信息，确保数据准确性并更新至系统，支持全流程追溯。
- ⑨龙门搬运单元：通过龙门式机械手抓取物料，按指令搬运至指定坐标位置（如仓储库位），实现精准定位投放。
- ⑩仓储单元：通过 RFID 绑定最终产品信息，按预设编号规则将物料分类存储至对应库位，支持自动化管理。
- ⑪传输带输送单元：通过电机驱动皮带输送物料，配合启停控制实现物料的连续或节拍式传输。

（4）多模块组合功能示例

当运用这条产线实现不同的功能时，可用不同单元进行组合。如某产品自动装配的生产流程如图 5，产业模块布局时钢珠装配单元和导轨搬运系统可不用。而当实现某产品灌装和分拣流程时，其模块布局如图 6。

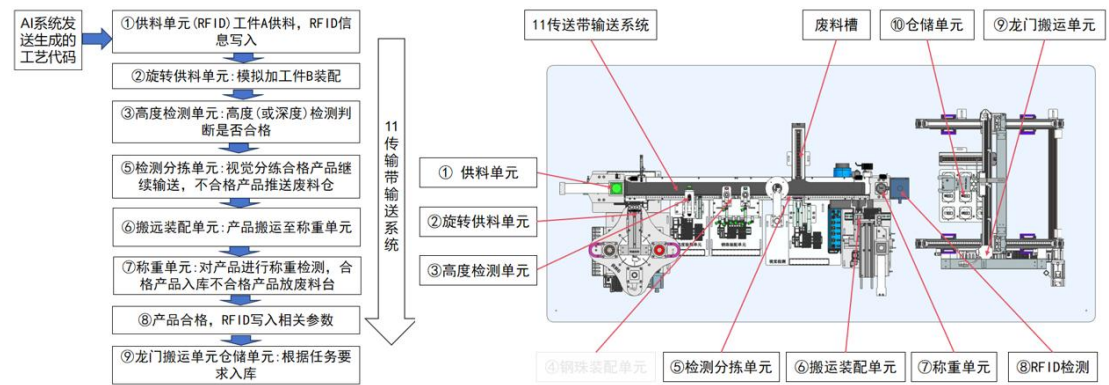


图 5 某产品自动装配生产流程及模块布局

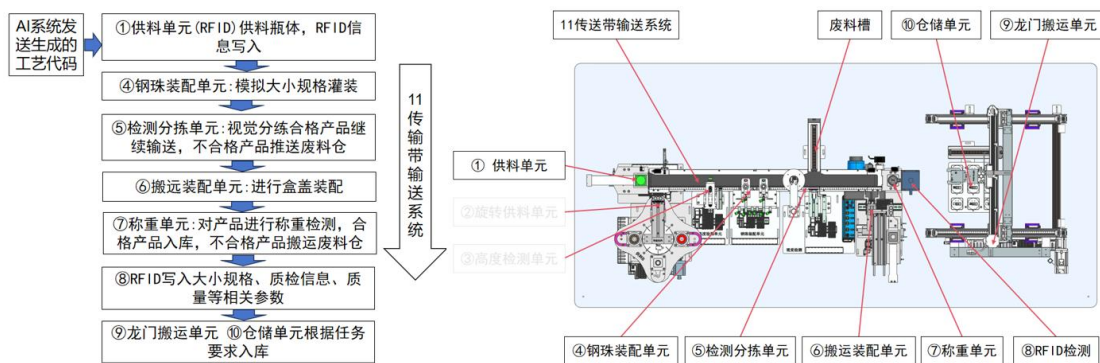


图 6 某产品灌装和分拣生产流程及模块布局

2.2 功能架构

项目以“用户自定义的工艺编程语言+AI 系统根据用户需求生成工艺代码+数字孪生虚拟验证”三大核心技术，实现“用户设计→AI 生成→虚拟验证→实体执行”的柔性生产功能。

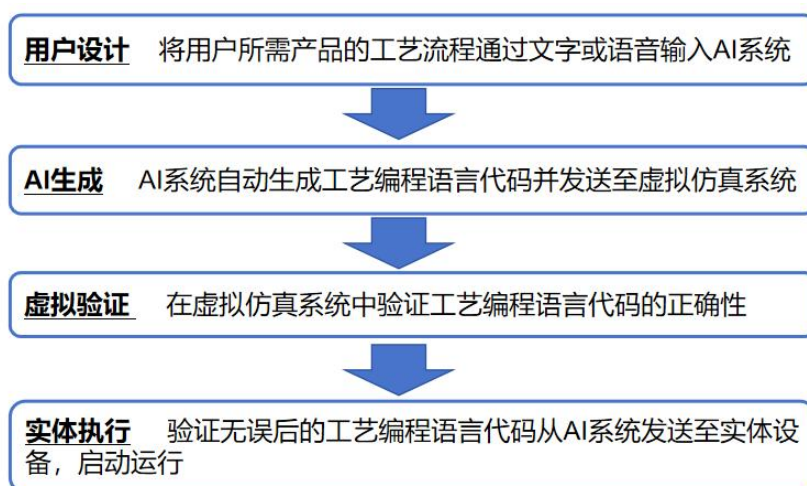


图 7 系统功能架框

2.3 技术架构

硬件层面：采用汇川技术国产化方案，构建 11 个功能单元，支持按需组合与快速重组。关键硬件包括：AM521 PLC、ITS7100E 触摸屏、SV660N 伺服、STD60N 步进、GL20 远程 I/O 子站、IPT210 总线阀岛等。

网络层面：使用了 EtherCAT 总线技术（设备间实时通信）、OPC UA（NX MCD 虚拟仿真系统）、TCP/IP 协议（AI 用户需求输入软件）、MQTT（云平台）。

工艺编程语言：在 PLC 上使用 FB 块封装设备各模块功能，并编写工艺代码（包括 if、while 语句）的语法解释器，使 PLC 能识别并执行工艺代码。

AI 技术：开发“Vue（前端）+ Spring Boot（后端）”架构，构建前后端分离的 Web 应用。可采用线上 DeepSeek 模型，也可在没有网络的情况下使用 Ollama 本地化部署模型。

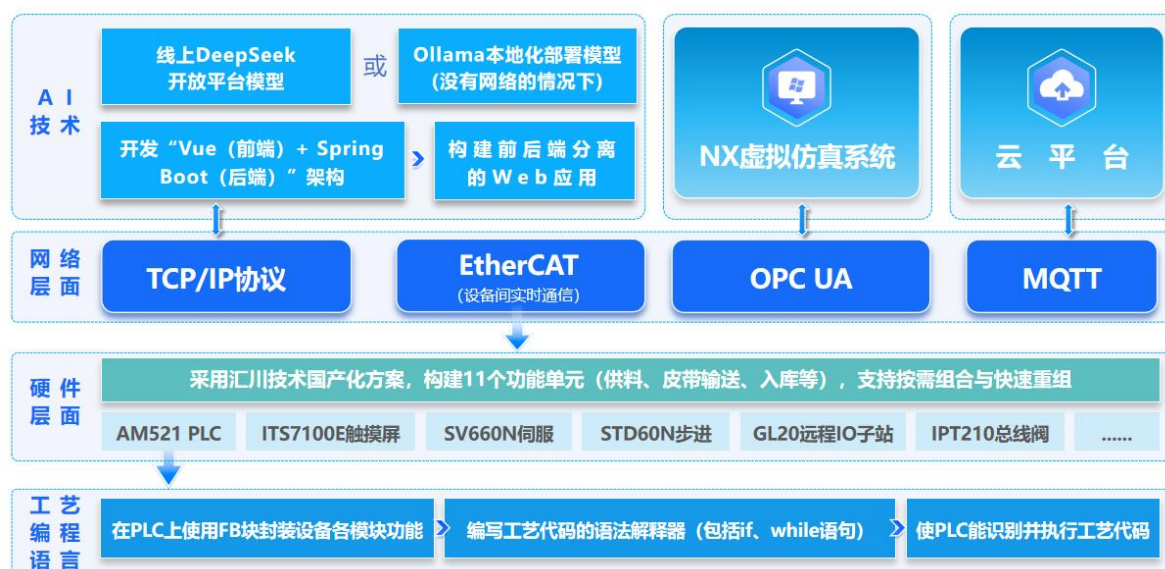


图 8 系统技术架框

2.4 技术路线

(1) 总体技术方案

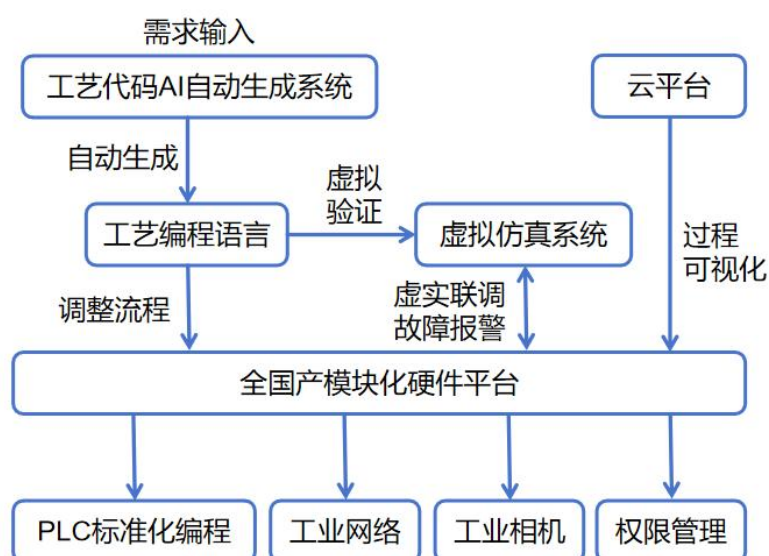


图 9 系统总体方案

(2) 工业网络技术

本项目在 AI 系统、虚拟仿真系统、云平台、相机及硬件平台的各模块单元之间，使用了 EtherCAT、OPC UA、TCP/IP、MQTT 等协议，构筑了一条安全、稳定、低时延的通讯链路，整体分布式结构设计如图 10 所示。

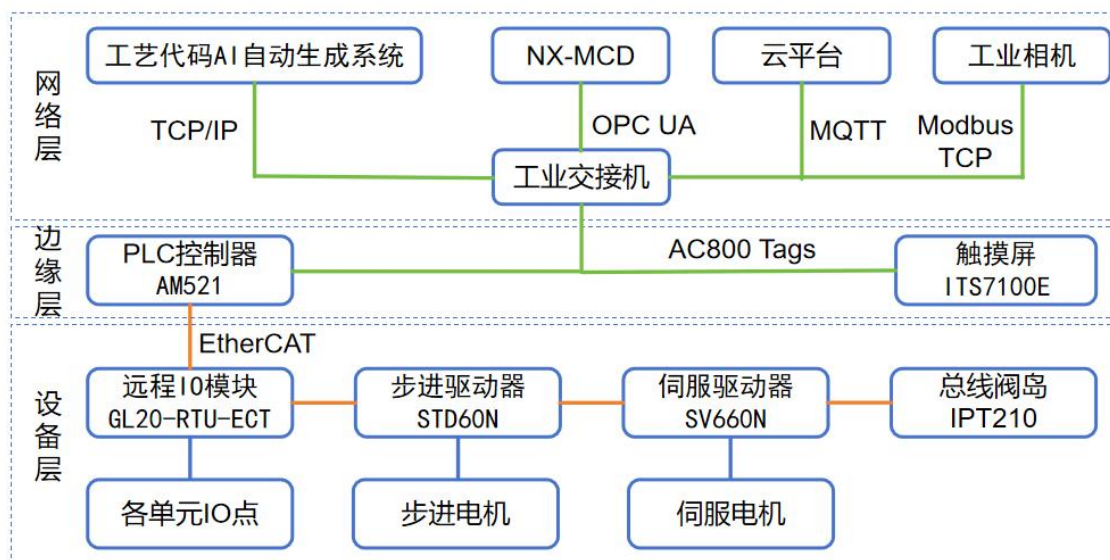


图 10 系统网络拓扑图

(3) 工业相机技术

在柔性生产线的质量检测、工件定位、装配引导等环节中应用工业相机技术。通过视觉识别技术，实现高精度、高效率的自动化检测和调度，提升生产质量与生产线灵活性。

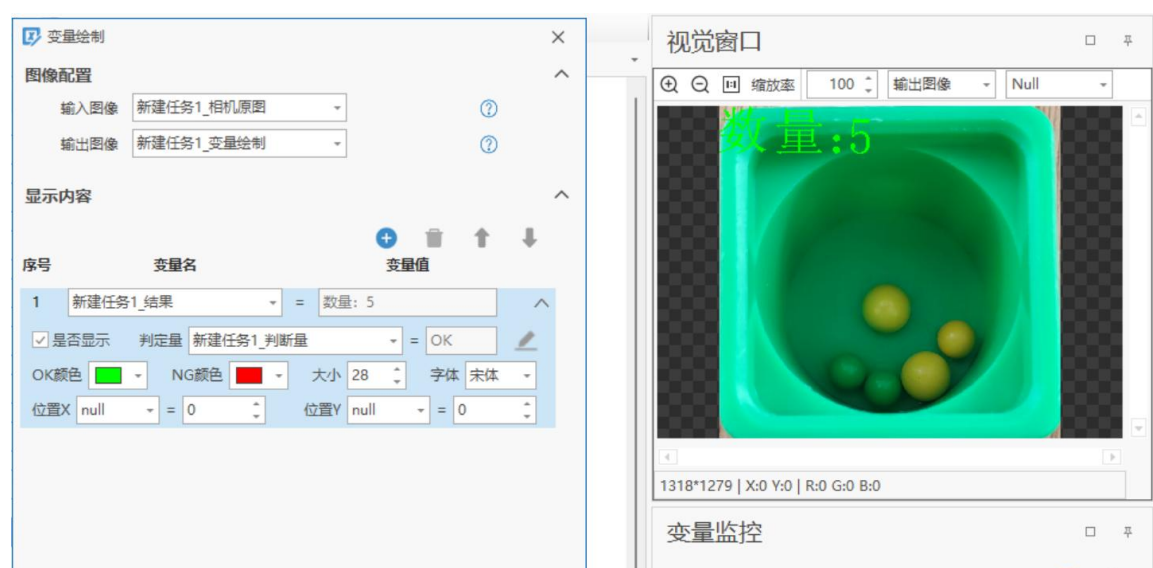


图 11 产品质量和数量检测

(4) PLC 标准化编程

PLC 标准化编程是指通过建立统一的程序开发规范，实现代码可读性、可维护性与可复用性的系统化方法。PLC 编程标准化方法包括：对程序和变量规范命名、使用 IO 点映射进行信号隔离、设备的物理模型层级清晰、控制模式和状态模式切换、程序构架明确、报警错误诊断和处理、编码风格统一等方面。

通过 PLC 标准化编程方法，提升项目团队整体技能水平，提高团队的协作效率，减少错误，降低开发成本，确保系统的稳定性、可靠性，并能减少现场调试的时间和难度、便于后期的维护和升级；提高了自动化集成系统的设计效率、调试效率和维护升级效率，从而缩短了项目周期。标准化文档和示例代码，促进知识的积累与分享，促成了项目的成功实施，并为未来的项目奠定坚实基础。

(5) 用户自定义的工艺编程语言

工艺编程语言编制的基本思路是：

- 1) 把各单元的设备控制程序封装成模块，为其设置不同的模块编号。
- 2) 提取出各模块需要调整的工艺参数，封装成固定的功能。
- 3) 工艺发生变化时，用户使用工艺编程语言修改工艺流程和工艺参数，编写的代码以字符串形式存储在 PLC 的存储块中。

序号	变量名	数据类型	当前值
1	数据储存	STRING[21]	
2	数据储存[0]	STRING	S100
3	数据储存[1]	STRING	S110 R001 C001 G003
4	数据储存[2]	STRING	S130 R002 B002 C002
5	数据储存[3]	STRING	S140 R003 B002 C002
6	数据储存[4]	STRING	S150 R002 B002 C002
7	数据储存[5]	STRING	S160 B001 C002
8	数据储存[6]	STRING	S180 A002
9	数据储存[7]	STRING	S120
10	数据储存[8]	STRING	S190
11	数据储存[9]	STRING	S220 A002
12	数据储存[10]	STRING	
13	数据储存[11]	STRING	

图 12 在 PLC 中存储工艺编程语言代码

4) 通过按顺序查找读取字符串的方式，将工艺编程语言代码关联到 PLC 封装好的各功能程序中，就能按工艺编程语言代码执行，从而实现将工艺编程语言代码翻译成 PLC 能执行的命令。

如在使用工艺编程语言的某生产线中，对生产线上各个模块各个功能进行分

析，以尽可能简单、友好为原则，编制以下工艺编程语言代码表。

表 1 工艺编程语言代码表

字母编号	S	A	R	B	C	G	P
中文编号	模块编号	动作模式	重复次数	阻拦模式	皮带模式	抓取位	放置位
料盒供料模块	S100						
料芯供料模块	S110		R00X		C001不用/C002反转	G001-G004	
料盖封装模块	S120						
测高模块	S130		R00X	B001不用/B002使用	C001不用/C002正转/C003反转		
小物料装配模块	S140		R00X	B001不用/B002使用后阻挡/B003使用后阻挡	C001不用/C002正转/C003反转		
大物料装配模块	S150		R00X	B001不用/B002使用后阻挡/B003使用后阻挡	C001不用/C002正转/C003反转		
分拣视觉模块	S160			B001不用/B002使用	C001不用/C002正转/C003反转		
废料处理模块	S170			B001不用/B002使用	C001不用/C002正转/C003反转		
物料称重搬运模块	S180	A001不用/A002搬运至称重位/A003搬运至皮带末端					
物料称重模块	S190						
料瓶搬运模块	S200	A001抓料复位/A002抓料不复位				G001-G008(1料芯供料/2压实/3小物料/4大物料/5分拣视觉/6废料处理/7料瓶搬运/8物料称重)	P001-P008(1料芯供料/2压实/3小物料/4大物料/5分拣视觉/6废料处理/7料瓶搬运/8物料称重)
成品储存仓库模块	S220	A001移料/A002入库/A003出库				G001-G011(A1与A3模式可用)G1-G9为库位/G10为称重位/G11为废料位	P001-P011(A1与A3模式可用)P1-P9为库位/P10为药品称重位/P11为废料位

在 HMI 界面上设计工艺编程语言界面, 用户可在此界面上编写和查看工艺编程语言代码：



图 13 工艺编程语言 HMI 界面

以上工艺编程语言代码运行启动后，此生产线的工作流程如下：

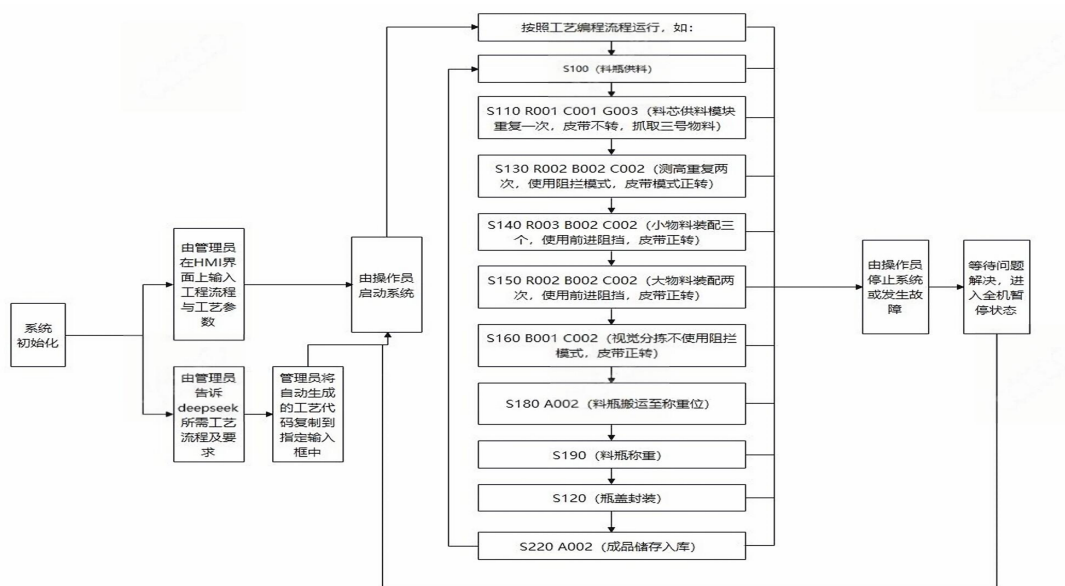


图 14 系统总体工作流程

工艺步数可根据需要增加或减少。一般顺序流程工艺不必设计循环语句；对有过重复执行多次的设备可设计循环语句 while。根据工艺的复杂性和灵活性需求可设计条件转移语句 if。

友好的工艺编程语言鼓励用户参与到生产流程的优化中，促进了创新思维的形成。用户可以根据实际情况不断调整和优化工艺参数，实时监测生产效果，从而实现持续改进，促进新工艺和新技术的发展，为企业的智能制造转型提供强有力的支持。

(6) 工艺代码 AI 自动生成系统

使用线上 DeepSeek 开放平台模型，或在没有网络的情况下使用 Ollama 本地化部署模型，并使用 Spring Boot 技术将 AI 模型集成到工艺代码 AI 自动生成系统中。在工艺代码 AI 自动生成系统中，对工艺编程语言进行训练，使其能根据用户需求自动生成工艺代码，并且通过 TCP/IP 协议发送给虚拟仿真系统或产线 PLC。前端利用 Vue 技术开发 Web 页面，用户的需求可通过语音或文本方式输入，形成“Vue（前端）+ Spring Boot（后端）”的开发架构，构建前后端分离的 Web 应用。



图 15 工艺代码 AI 自动生成系统页面



图 16 工艺代码 AI 自动生成系统框图

(7) 虚拟仿真系统验证工艺编程语言

在 NX MCD 软件中创建与设备完全一致的虚拟仿真模型，进行虚拟仿真设计，结合系统实际功能，对各个部件进行属性定义，包括刚体、碰撞体、运动副等机械属性和电气属性的设置，建立动作信号，通过 OPC UA 通信与 PLC 的全局变量建立映射连接；编写 PLC 程序和虚拟 HMI 界面，实现与真实系统完成一致的功能。



图 17 虚拟仿真系统验证工艺编程语言的方案框图

运用虚拟仿真系统，将 AI 系统生成的工艺代码先传输到虚拟仿真系统中仿真运行，验证其流程的可行性，确保无误后再运用到实际设备上，可防止设备发生故障，减少生产过程中的损失，提高生产线切换的效率，也减少了不必要的损失和浪费。

(8) 虚实联调技术结合在线诊断进行故障报警

运用虚实联调技术，与真实设备进行数据通讯，在设备运行期间，当设备某一部件发生故障时，虚拟仿真系统中对应的部件模型通过颜色转换的方式报警，如图 18 所示，维护人员可优先观察虚拟仿真模型的状态，快速定位故障位置和故障类型，以助快速排故，提高维护效率。

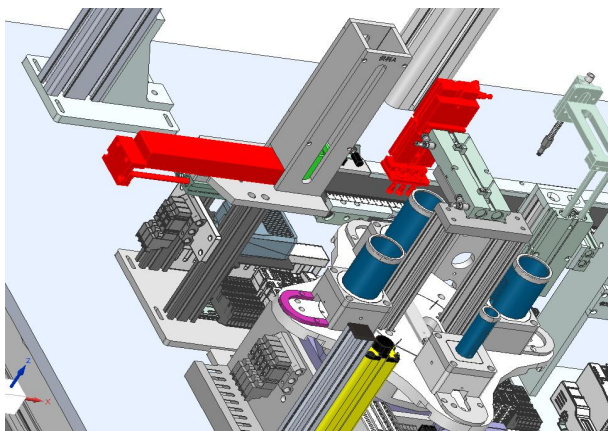


图 18 虚拟仿真模型的部件故障报警功能

同时，系统具备详尽的故障历史报警记录功能，设备维护人员可根据实际需求查询历史报警信息，为后续的故障预测和设备优化提供依据，形成闭环反馈机制。

（9）权限管理与信息安全

在工业生产中，安全机密性是不容忽视的重要环节。本项目通过严格的权限管理机制，确保了设备数据的安全性与机密性。按照企业的权限级别，系统登录界面分为操作员登录和管理员登录两个级别。操作员登录后，仅可查看设备的运行状态及报警信息，对涉及流程等敏感数据则无查看与写入权限。而管理员登录后，则拥有对工艺数据的全面访问权限，能够根据需要进行查看、修改等操作。此外，为了进一步提升系统的安全性与可靠性，系统还对程序进行了加密处理、对密码错误次数进行了限制。



图 19 系统登录界面与用户权限管理

另外，对于一些工艺和配方保密的产品生产线中，如何在产品生产设备设计制造过程中，保障产品生产工艺流程绝对保密，在与设备制造方签订保密协议之外，还可以使用基于工艺编程语言的柔性生产线，设备工程师的主要工作是针对设备构建工艺编程语言，工艺工程师只要掌握了工艺编程语言，就可以根据生产的实际需求编制工艺流程和参数，杜绝了设备制造过程中泄密的可能。

（10）云平台

云平台在产品生产中实现数据监控、效率提升与问题溯源。通过实时数据监控生产设备的环境数据、能耗数据和生产过程数据（如产线不合格率）等关键数

据；当发现产品不合格率偏高时，可通过云平台的维保工单和用户日志、操作日志进行溯源，便于快速找到产品生产过程中存在的问题，快速溯源。

三、项目实现

3.1 设备选型

为满足柔性生产线对高效能、模块化及成本控制的需求，提出了两套方案：西门子方案和汇川技术方案，并对两套方案进行了详细对比。

表 2 硬件选型方案对比

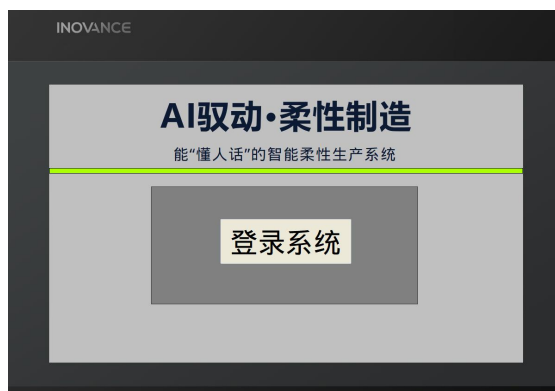
设备名称	西门子方案选型 (型号/单价)	汇川技术方案选型 (型号/单价)	技术参数对比
PLC	S7-1200 1214C DC/DC/DC ¥3200	AM521-0808TN ¥2585	<ul style="list-style-type: none">• 类型：小型PLC vs 中型PLC• 协议：Profinet vs EtherCAT• 编程软件：TIA Portal vs InoProShop• 支持轴数：4轴 vs 8轴同步
触摸屏	KTP700 Basic ¥4800	IoT物联网屏 ITS7100E 10寸 ¥800	<ul style="list-style-type: none">• 屏幕：7寸电阻屏 vs 10寸电容屏• 远程访问：无 vs 内置云网关• 接口：PN口 vs 双网口+4G模块
步进系统	驱动器：STD60 (6SL3210-1SE31-1UA0) ¥1,350 电机：1FL3044-2AF21 ¥880	驱动器：STD60N (EtherCAT总线型) ¥680 电机：MHS1A57 50B23B ¥520	<ul style="list-style-type: none">• 控制方式：脉冲信号 vs 总线型• 细分精度：51200 vs 102400• 同步误差：±0.02mm vs ±0.005mm
伺服系统	SINAMICS V90 400W ¥5,200	驱动器SV660N 750W 电机：MS1H1-75B30CB-A331R ¥4,300	<ul style="list-style-type: none">• 编码器：23bit vs 25bit• 过载能力：150% vs 200%• 振动抑制：基础 vs AI自适应算法
远程IO模块	ET200SP (6ES7134-6GF00-0AA1) ¥2800/站	GL20-RTU-ECT、GL20-1600END、 GL20-0016ETN、GL20-4AD ¥1200/站	<ul style="list-style-type: none">• 扩展距离：100m+ vs 200m直连• 温度范围：-20~60℃ vs -40~75℃

西门子方案以国际品牌成熟生态见长，通过上表技术参数对比，汇川技术方案凭借高度集成化设计、国产化优势及显著成本效益脱颖而出，主要体现在：

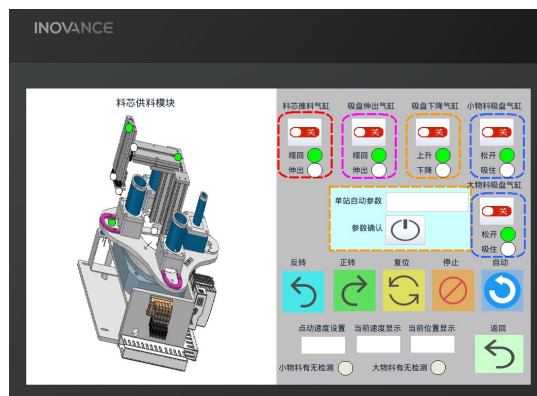
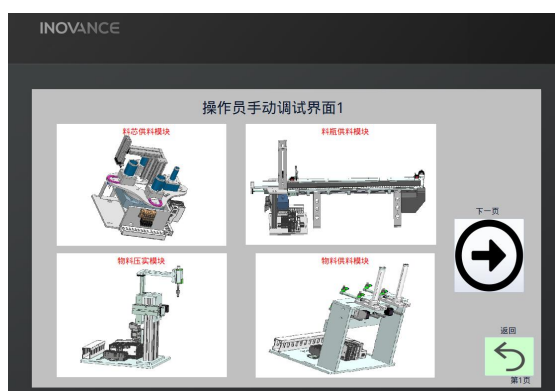
- （1）硬件采购成本降低至 57%，运维成本同步减少，软件授权费用全免，全生命周期优化成本。
- （2）技术性能提升：接口集成度高、EtherCAT 总线布线简洁、性价比显著提升；
- （3）国产品牌供货稳定、交付便捷、售后服务快速高效，大大缩短了产线建设周期；
- （4）技术自主可控、打破“卡脖子”困境，推动产业从“国产替代”到“创新引领”迈进，为全球智能制造发展提供 “中国方案”。

3.2 功能实现

第一步：操作员或管理员用相应身份和密码登录触摸屏：

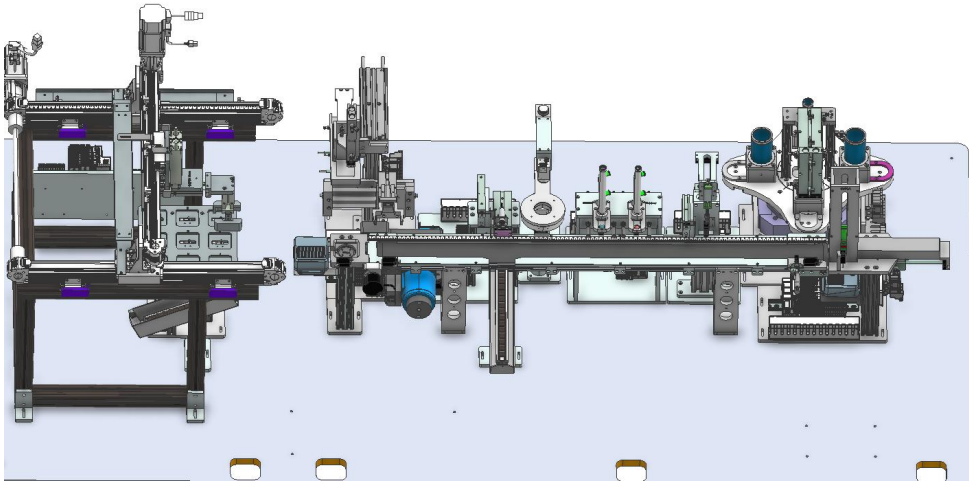


第二步：登录后，进入操作员手动调试界面检查设备各部分是否正常：



第三步：检查完毕后启动 AI 系统和虚拟仿真系统：





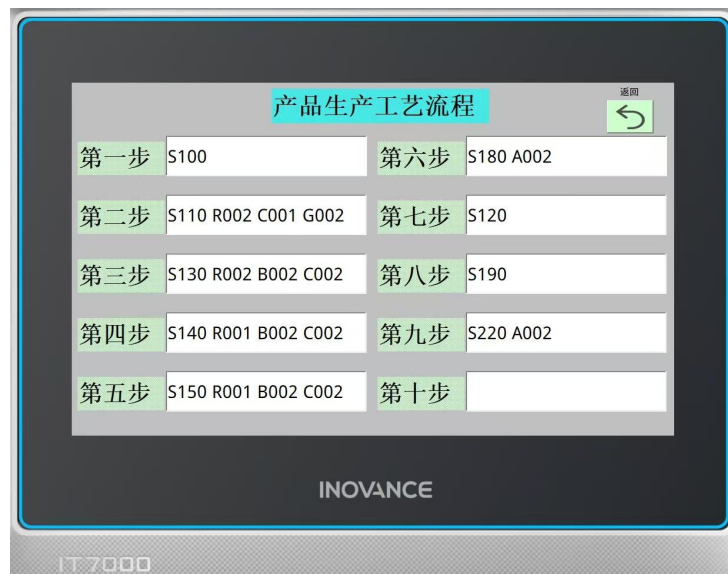
第四步：将用户需求用语音或者文字的方式输入给 AI 系统：



第五步：将命令 AI 将生成的工艺编程代码发送至虚拟仿真系统的 PLC 进行代码的可行性验证：



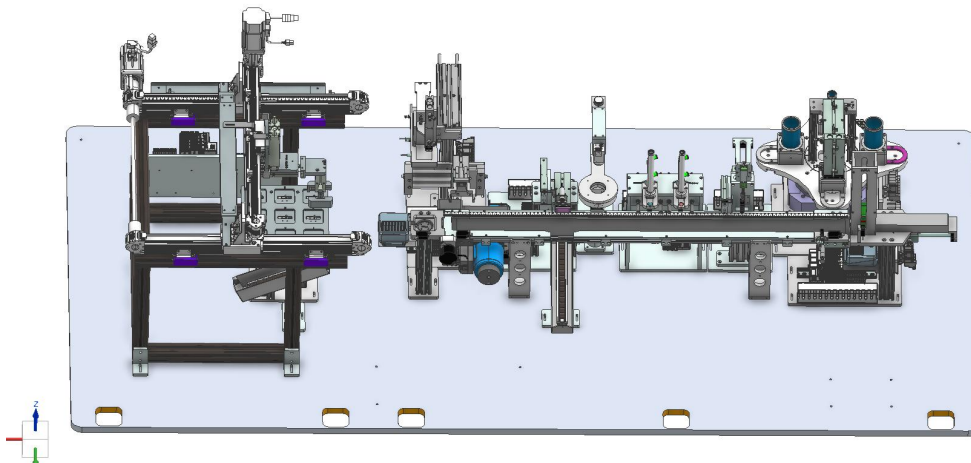
触摸屏上显现 AI 生成的工艺编程语言代码，说明 AI 发送成功：



第六步：在虚拟 HMI 界面上切换为自动模式，按下启动按钮，虚拟仿真系统开始进行工艺代码的流程验证：



正在进行工艺编程代码的正确性验证：



第七步：工艺代码流程验证成功确保无误后，命令 AI 将验证成功后的代码发送至实体设备的 PLC，开始执行生产流程：



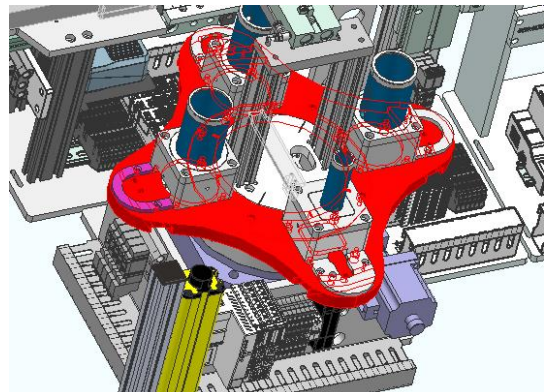
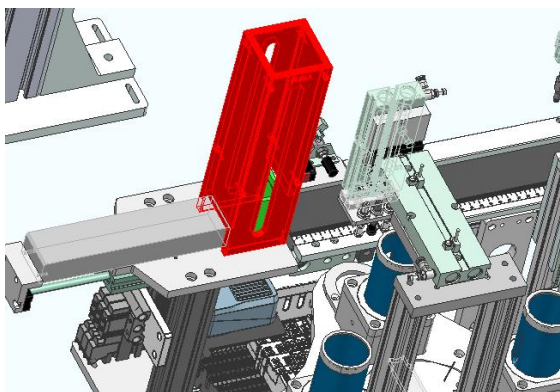
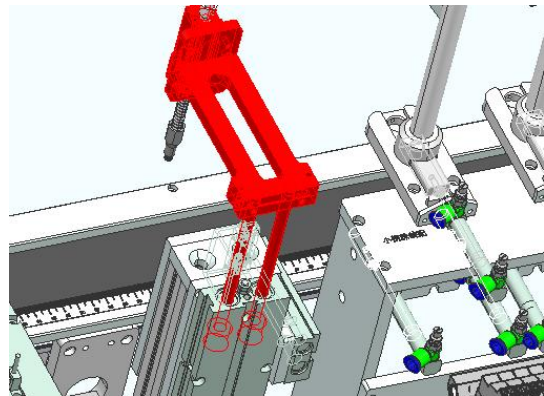
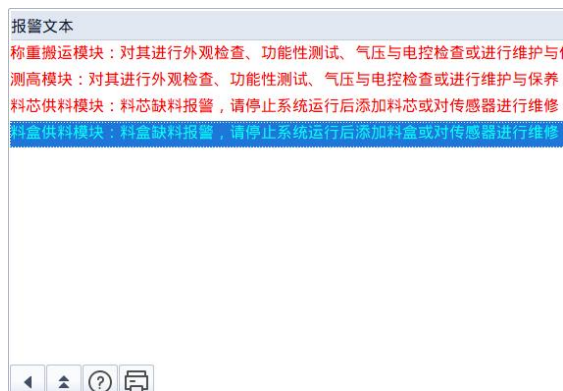
实体设备成功接收:



第八步: 按下启动按钮开始执行:



当设备发生故障或者缺料停止运行时，HMI 界面上弹出报警信息的同时，虚拟仿真模型中对应故障或缺料的模块模型同步变色闪烁报警：



设备运行过程中，云平台界面上会实时显示一些重要的数据：



3.3 性能测试

(1) 测试齿轮质量检测工序

测试流程描述：齿轮工件经 2#供料工位装入料盒后，由输送皮带先传送至测高工位进行高度测量，如果高度在 $5 \pm 0.1\text{mm}$ 范围内，判定为合格，否则为不合格品传输至废料槽。高度合格的继续传输至视觉检测工位，通过工业相机检测齿面划痕及结构损伤，实时判定产品状态：合格品输送至成品库自动入库；缺陷品则分拣至废料槽回收，实现质量管控。根据客户需求制作成简易流程图如下：

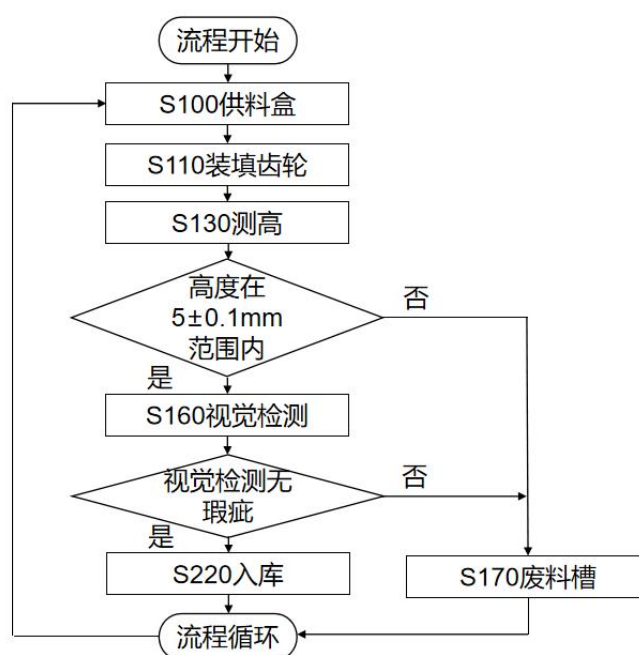


图 20 齿轮质量检测工序流程图

在工艺代码 AI 自动生成系统页面上输入需求：齿轮质量检测的流程是料盒一个，2 号料芯一个，测高，if 高度在 5mm 左右，去视觉检测，否则入废料槽。if 视觉检测合格，入库，否则入废料槽。

工艺代码 AI 自动生成系统根据训练规则自动生成了工艺代码，如图所示。



图 21 齿轮质量检测工序工艺代码生成及验证

将代码发送至虚拟仿真系统中进行验证，验证无误后再发送至实体设备运行，流程与需求描述一致。

(2) 测试椒盐研磨加工工序

测试流程描述：椒盐中的 3 种原料：花椒从 3#工位供料，盐从小钢珠装配模块供料，小茴香从大钢珠装配模块供料；3 种原料按客户需求配比混合后，送至研磨区域进行精细研磨；完成研磨后，执行自动封装加盖，实时校验重量，将配比、重量等参数写入料盒 RFID 中，最后输送至成品仓库。

针对原系统中并无研磨功能、而新产品有研磨工艺要求的问题，可通过模块化快速切换实现功能重构：将原测高模块拆卸下来，并快速替换为研磨装置。

根据客户需求制作成简易流程图如下：

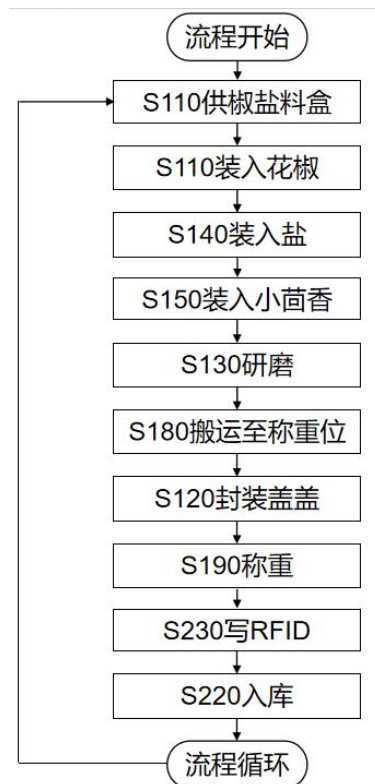


图 22 椒盐研磨加工工序流程图

在工艺代码 AI 自动生成系统页面上输入需求：椒盐研磨加工的流程是料盒一个，3 号料芯 2 个，小钢珠 3 个，大钢珠 4 个，研磨 5 秒，盖盖，称重，写 RFID，入库。

工艺代码 AI 自动生成系统根据训练规则自动生成了工艺代码，如图所示。



图 23 椒盐研磨加工工序工艺代码生成及验证

将代码发送至虚拟仿真系统中进行验证，验证无误后再发送至实体设备运行，流程与需求描述一致。

3.4 技术难点及解决

（1）本项目结合了 PLC、工业网络、工业相机、数字孪生、云平台、AI 等多项先进技术，需要团队对所有技术都有较深入的掌握，对团队成员技术技能水平有较大的要求。自区域赛后，项目成员多方请教企业及其它学院计算机相关专业的老师，解决了项目难点。

（2）本项目提出的使用面向用户的工艺编程语言的柔性生产线可用在多个行业中，需要对不同行业、不同应用场景的工业现场进行充分的研究和详细地分析，并设计出满足企业需求的解决方案是本项目需要进行调研的重点和难点。

（3）为了让用户能更好地理解和应用工艺编程语言，工艺编程语言需要足够简单和友好。要将这样的工艺编程语言翻译成 PLC 能执行的命令，需要用 PLC 编写一个语法解释器，并关联 PLC 对设备控制的程序中，此部分的程序逻辑复杂，编程工程量大。

（4）根据生产线工艺流程的不同，工艺编程语言中可能需要条件判断 if 和循环指令 while，而对有循环、条件判断指令或者语法复杂有可能出现编程错误的工艺编程语言，在执行程序前还需设计语法检查，以避免在程序执行过程中发现语法错误导致程序中断。

（5）项目要求在 AI 系统中训练出一个能将自然语言描述的用户需求转化为正确的工艺编程语言代码的模型，为了不让 AI 生成类似计算机编程语言的代码，需要深度思考和联网搜索都关掉，同时向 AI 强调不参照任何计算机语言语法，只对接工艺代码表的功能。

四、 总结评价

4.1 设计目标达成度

结合技术方案与实施细节，各目标达成度分析如下：

1、用户自定义的工艺编程语言使工艺流程可灵活调整

（1）目标描述：建立用户参与定义的简单易懂工艺语言体系，让用户无需

深入技术细节，即可根据工艺代码规则灵活编写动作程序和修改工艺参数，实现工艺流程的灵活调整。

（2）达成情况：

语言体系构建：通过模块化设计思路，将各单元设备控制程序封装为独立模块并设置编号，提取关键工艺参数封装为固定功能，形成了以字母编号（如 S、A、R 等）对应不同模块与功能的工艺编程语言体系，代码规则清晰易懂（如 S100 代表料盒供料模块、S110 代表料芯供料模块）。

执行机制实现：开发了 PLC 解释器（将复杂的 PLC 程序封装成固定的模块，由模块代码进行控制），通过顺序读取字符串的方式，将工艺编程语言代码关联到封装的功能程序中，实现代码到 PLC 执行命令的翻译，确保用户输入的代码可被设备执行。

操作便捷性保障：设计了 HMI 界面，用户可直接在界面上按步骤编写、查看和修改工艺代码，无需依赖专业工程师即可完成流程调整。

（3）达成度：完全达成。工艺编程语言体系已形成完整的“定义-编写-翻译-执行”闭环，且通过实际示例验证了其灵活性，满足用户自主调整工艺流程的需求。

2、AI 自动生成工艺编程语言程序：

（1）目标描述：将本地化部署或者线上开放的 AI 模型与工艺编程语言结合，通过训练使 AI 掌握代码规则后，可基于语音或文本输入的工艺流程需求，自动生成合规的工艺编程语言指令代码，并能够将生成的工艺代码提供 TCP/IP 协议直接发送至 PLC，实现从“需求输入”到“代码执行”的智能化闭环，大幅提升生产线的智能化水平与响应速度。

（2）达成情况：

AI 平台集成与训练：利用 Vue、Springboot 软件开发技术形成“Vue（前端）+ Spring Boot（后端）”的开发架构，构建前后端分离的 Web 应用。将 AI 平台集成并引入到产线系统中，基于工艺编程语言代码表对 AI 平台进行训练，使其掌握代码规则与逻辑。实现 AI 根据用户需求自动生产工艺编程代码。

传输机制建立：自动生成工艺编程语言指令代码后，可通过 TCP/IP 通讯协议一键发送至目标 PLC 等待产线开始执行。

（3）达成度：完全达成。AI 自动生成流程已实现端到端贯通，生成的代码准确率 $\geq 95\%$ ，并可一键发送至 PLC，有效提升了生产智能化水平。

3、数字孪生技术验证工艺编程语言程序正确性

（1）目标描述：搭建与真实设备界面和功能一致的虚拟仿真系统，使 AI 自动生成的工艺程序先在虚拟环境中测试验证，确保程序符合需求后再导入真实设备，减少调试时间与设备损耗。

（2）达成情况：

虚拟仿真系统构建：基于 NX MCD 软件创建了与真实设备完全一致的虚拟仿真模型，定义了刚体、碰撞体、运动副等机械与电气属性，建立了动作信号与 PLC 全局变量的映射连接。

验证流程落地：AI 生成的工艺代码先传输至虚拟仿真系统运行，通过模拟生产过程验证流程可行性（如装配、分拣、入库等环节的动作逻辑），验证无误后再运用到实体设备上，用户可根据运行结果快速调整优化程序。

效益实现：虚拟验证机制减少了真实设备上的编程调试时间，降低了因操作失误导致的设备损耗和维护成本，提升了新产品切换效率。

（3）达成度：完全达成。数字孪生技术已成功应用于工艺程序的虚拟验证，形成了“虚拟测试-优化-真实执行”的可靠流程，产线切换时间缩短 50%以上，达成了减少试错成本、提升效率的目标。

4、整体达成结论

本项目三大核心设计目标均通过具体的技术方案和实际应用示例得到有效实现，技术路线完整、功能闭环清晰，为柔性生产线的灵活调整、智能生成与安全验证提供了全面支撑，整体设计目标达成度为 100%。

4.2 投入产出比分析

本项目通过技术创新与优化设计，在投入成本控制与产出效益提升方面形成了显著优势，结合文档中技术方案与应用场景的描述，投入产出比分析如下：

1、投入分析

（1）硬件投入优化 项目在硬件选型上采用汇川技术全国产方案，相比传统西门子方案实现了显著成本节约：硬件采购成本降低至原来的 57%，运维成本减少，且软件授权费用全免。此外，模块化设计思路使生产工艺和设备得以大幅

度共用，避免了传统产线更新换代时整体重新设计的高昂投入，有效缩短开发周期、降低研发成本。

（2）技术投入聚焦核心价值 技术投入主要集中在用户自定义工艺编程语言体系构建、本地化 DeepSeek AI 平台部署、数字孪生虚拟仿真系统搭建三大核心领域。这些投入通过标准化与模块化设计实现复用：PLC 标准化编程提升代码复用率，减少重复开发成本；虚拟仿真系统通过前期虚拟验证，降低真实设备调试的时间成本与操作失误导致的设备损耗、维护成本，间接减少技术投入的浪费。

2、产出分析

（1）直接成本节约效益 运维与调试成本降低：虚拟仿真系统的应用减少了真实设备的编程调试时间，降低因操作失误造成的设备损耗和维护成本，尤其在新产品切换时，产线切换时间缩短 50%以上，数字孪生验证通过率 $\geq 95\%$ ，试错成本显著下降。人工成本优化：用户自定义工艺编程语言使非专业人员可自主调整工艺流程，减少对专业工程师的依赖；AI 自动生成工艺代码进一步降低人工编程工作量，提升人均效能。

（2）效率与收益提升 生产灵活性提升：模块化硬件支持多品种混线生产、消费电子产品定制化装配、快消品季节性产线切换等场景，生产线切换效率显著提高，减少停机时间，提升设备利用率。市场响应能力增强：通过 AI 自动生成代码与虚拟验证的快速闭环，企业可快速响应市场需求变化，缩短新产品投产周期，在定制化与小批量生产场景中抢占市场先机，间接提升营收潜力。中小企业转型收益：低成本柔性改造方案使中小企业以较低投入实现生产线智能化升级，提升生产效率与抗风险能力，为其拓展业务场景、增加产能提供技术支撑。

3、投入产出比结论

项目通过“低成本投入+高效益产出”的模式形成正向投入产出比：初期在模块化硬件、AI 平台与数字孪生系统的投入，通过长期的硬件成本节约（采购、运维、研发）、效率提升（切换效率、人均效能）、风险降低（设备损耗、试错成本）实现收益覆盖。尤其在多品种混线、定制化生产等场景中，柔性生产能力带来的市场响应优势与成本节约效益，使项目投入在短期（如产线切换周期缩短）与长期（如设备复用率提升、维护成本下降）均能形成显著的正向回报，具备较高的投入产出性价比。

4.3 推广/应用价值

本项目围绕“AI 驱动柔性制造”打造的柔性生产线系统，通过技术创新与模式优化，在制造业转型升级中具有显著的推广意义和应用价值，具体如下：

1、技术推广价值

（1）低成本柔性改造方案的可复制性：项目创新性地提出用户自定义工艺编程语言体系，结合模块化硬件设计与国产化技术选型，形成了一套低成本、易实施的柔性生产线改造方案。该方案无需对企业现有设备进行大规模替换，可通过关键模块升级与工艺语言适配实现柔性化转型，尤其适用于资金和技术实力有限的中小型企业，为制造业柔性改造提供了可复制的标准化路径。

（2）多技术融合的示范效应：项目深度整合用户自定义工艺编程语言、AI 自动生成技术、数字孪生虚拟验证、工业网络与 PLC 标准化编程等多项技术，构建了“需求输入-工艺生成-虚拟验证-产线执行”的全流程智能化闭环。这种多技术融合的创新模式，为制造业智能化升级提供了技术融合示范，推动工业互联网、人工智能等新质生产力技术在柔性生产场景的落地应用。

（3）国产化技术替代的推广价值：在硬件选型中，项目通过对比验证选择汇川技术方案，凭借集成化设计、国产化自主可控优势、成本效益及技术性能优势，实现了对传统国际品牌方案的替代。这一实践为制造业设备国产化替代提供了参考，有助于提升产业链供应链韧性，降低对国际品牌的依赖。

2、场景应用价值

（1）适配多品种、小批量生产需求：项目打造的柔性生产线支持多模块自由组合与工艺通过工艺编程语言可快速调整，可满足多品种混线生产场景（如汽车制造中多款车型的装配工序切换）。通过用户自定义工艺编程语言与 AI 自动生成技术，企业能快速响应不同产品的生产需求，解决传统产线切换效率低、依赖专业工程师的痛点。

（2）赋能定制化与动态化生产场景：在消费电子产品定制化装配（如颜色、接口配置调整）、快消品季节性产线切换（如包装规格变更）等场景中，项目通过虚拟仿真验证与模块化布局调整，实现了生产流程的快速适配。无需停机进行大规模设备改造，即可完成产线切换，大幅缩短响应周期，提升企业对市场需求变化的应对能力。

(3) 降低中小企业转型门槛：针对中小企业资金与技术有限的特点，项目通过低成本柔性改造方案（如现有设备基础上的模块升级与工艺语言适配），帮助企业以较低投入实现生产线的柔性化与智能化升级。无需承担全自动化改造的高昂成本，即可提升生产灵活性与效率，推动中小企业向智能制造转型。

3、经济与社会价值

(1) 降本增效与资源优化：通过虚拟仿真验证减少设备调试时间与损耗、模块化设计降低设备复用成本、AI 与工艺编程融合提升生产效率，项目有效帮助企业降低研发、运维与生产切换成本。同时，全流程可视化与智能化管理减少了人工依赖与流程冗余，实现资源优化配置。

(2) 推动制造业智能化转型：项目通过技术创新解决了传统制造业柔性不足、智能化程度低等痛点，为制造业向智能制造转型提供了切实可行的解决方案。其应用场景覆盖多行业、多规模企业，可带动产业链上下游的技术升级，助力构建以新质生产力为核心的现代化制造体系。

(3) 提升生产安全与数据安全：项目通过权限管理机制（操作员与管理员分级登录）、程序加密与操作日志追溯等措施，保障了生产数据与工艺机密的安全性。尤其在高保密需求的定制化生产中，避免了设备制造过程中的泄密风险，为企业生产安全提供保障。

4.4 改进计划

1、工艺编程语言功能增强：当前工艺编程语言主要支持顺序流程，未来可优化语法规则，增强对复杂逻辑（如多层嵌套循环、多条件分支）的支持，以适配更复杂的生产场景（如精密仪器多步骤装配、化工行业批次反应流程）。

2、AI 自动生成技术优化：当前 AI 基于预设代码表训练，未来可接入实时生产数据（如设备运行参数、工艺执行效果），通过强化学习动态优化代码生成逻辑，减少语法错误率，提升复杂工艺的生成准确性。

3、数字孪生系统升级：从单一工艺验证扩展到产线全生命周期仿真，包括设备安装调试、产能规划、老化模拟等，为企业提供“虚拟试产-优化-实体落地”的全流程决策支持。

4.5 创新性/特色亮点总结

本项目围绕“AI 驱动柔性制造”主题，在柔性生产线智能化改造中融合多项创新技术，形成了独特的技术优势与应用价值，通过“工艺语言低代码化、AI 生成零门槛化、数字孪生零风险化”的三化创新，打造了一个支持“说人话调产线”的国产柔性制造系统，为制造业转型升级提供“低成本、高智能、快响应”的中国方案。核心创新性与亮点如下：

1、用户自定义工艺编程语言体系的构建：突破传统生产线依赖专业工程师编程的局限，创新性地设计了一套简单易懂的用户自定义工艺编程语言。通过模块化封装设备控制程序与工艺参数，建立标准化代码规则，用户无需深入掌握 PLC 编程技术，仅通过基础工艺知识即可编写、修改生产流程代码，实现工艺流程的灵活调整，显著降低技术门槛。

2、AI 与工艺编程的深度融合：将人工智能平台与工艺编程语言结合，通过训练使 AI 掌握代码规则后，可基于语音或文本输入的工艺流程需求，自动生成合规的工艺编程语言指令代码，并将生成的代码通过 TCP/IP 协议直接发送至虚拟仿真系统或目标 PLC 等待执行，实现从“需求输入”到“代码执行”的智能化闭环，大幅提升生产线的智能化水平与响应速度。

3、数字孪生驱动的虚实协同验证机制：依托 NX MCD 软件构建与真实设备完全一致的虚拟仿真模型，创新性地将数字孪生技术应用于工艺程序验证环节。AI 生成的工艺代码先在虚拟系统中模拟运行，通过验证动作逻辑、流程可行性后再导入真实设备，有效减少真实设备的调试时间、降低操作失误导致的设备损耗与维护成本，显著提升新产品切换效率。

4、模块化硬件的高柔性适配能力：采用模块化设计思路，将生产线划分为独立单元模块，各单元可自由拼接、组合，支持按需重组布局以适配不同产品生产需求。

5、国产化集成方案的成本与性能优势：在硬件选型上，选择汇川技术方案，相比传统西门子方案具有显著优势：系统架构简化；规避供应链风险；硬件采购与运维成本更低，且总线控制等关键技术指标更优，为中小型企业低成本柔性改造提供可行性。

五、团队成员介绍及分工



校内指导老师：黄燕燕

工程师，副教授，在工业机器人，集成控制系统相关领域具有较强的设计与工程经验。工业大数据算法赛项全国三等奖、机器人系统集成赛项全国三等奖。

选手选拔
资源整合
答疑解惑



企业指导老师：胡辛豪

昆明央龙电气有限公司 通用产品事业部
汇川工程师认证渠道机器人应用工程师、从事相关电气工程工作，具有丰富的设计与工程经验。国家奖学金，优秀毕业生，“机器人系统集成”全国三等奖。

选型指导
技术支持
经验传授



队长：罗成伟

组织能力强，擅长组态触摸屏和虚拟仿真系统的模型搭建、机电属性设计、编程与调试。曾获“工业 4.0”省赛二等奖。

关注赛事
整合思路
界面设计



队员：马官瑞

执行能力强，熟练使用 PLC 软件编程，是团队的编程小能手。曾获“工业 4.0”省赛二等奖、工业互联网智能控制技术全国二等奖。

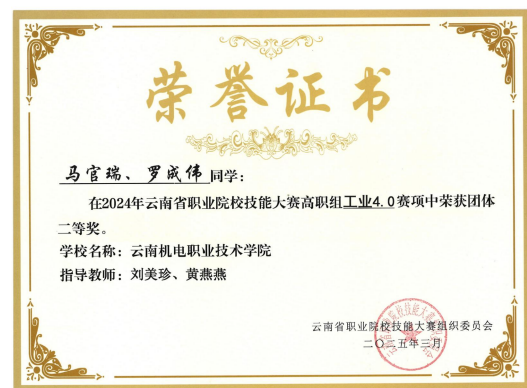
编写程序
模型搭建
测试调试



队员：刘先翱

逻辑思维能力强，擅长编写 C 语言程序，开发界面，数据连接与传输。曾获“工业视觉开发与编程”全国二等奖。

AI 开发
数据传输
测试调试



六、参考文献

- [1]肖泽晓, 黄自成. 新质生产力引领柔性生产[J]. 中国电信业, 2024, (10): 28-31.
- [5]任明杰, 彭思雨. 应对行业周期波动柔性生产成“杀手铜”[N]. 中国证券报, 2023-08-19 (A04).
- [1]叶爱山, 梁爽, 邓洋阳. 新质生产力赋能制造业产业链韧性提升路径研究 [J]. 江苏科技信息, 2024, 41 (17): 11-14.
- [2]任明杰, 彭思雨. 应对行业周期波动 柔性生产成“杀手铜”[N]. 中国证券报, 2023-08-19 (A04). DOI:10.28162/n.cnki.nczjb.2023.004082.
- [1]李玮, 沈勇. 中间工艺语言在自动化控制系统中的应用[A] 第二十七届中国控制会议论文集[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会 (Technical Committee on Control Theory, Chinese Association of Automation), 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2008: 3.
- [2]张岚, 武保锭. 类高级语言解释器的设计与实现[J]. 内蒙古科技与经济, 2009, (17): 68-69.
- [6]武岳. 基于多品种小批量生产的模块化与柔性化管理模式研究——以 A 企业为例[J]. 企业改革与管理, 2024, (09): 61-62.
- [7]郭廷山. 面向产线的智能机器人柔性生产远程维护系统研发[J]. 今日制造与升级, 2024, (05): 127-129.
- [8]黄丹, 李林, 梁国山. 多品种自动化门盖线的自主集成开发研究[J]. 汽车与驾驶维修 (维修版), 2024, (09): 54-56.
- [10]林星烨, 谭伟美, 凌海全. 浅析基于 PLC 控制系统的智能柔性生产线设计[J]. 中国设备工程, 2024, (20): 40-43.