



融合确定性网络与工业 AI 智能体的 云化 PLC 测试床

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

引言/导读

随着以信息技术为代表的第四次工业革命的到来，工业自动化系统将进一步提升全要素生产率，实现更高质量的产品、更低的成本和更高的效率。作为工业自动化系统核心组成部件的**可编程逻辑控制器**（Programmable Logic Controller, PLC）正经历着巨大的变革，从现场离散化的 PLC 转变为云端容器化的云化 PLC。云化 PLC 的优点有：1、云化 PLC 通过软硬件解耦，打破了传统工业自动化系统多层的约束，使系统的架构更加简单和扁平化。2、云化 PLC 通过软件的方式实现硬件资源配置和定义，便于实现软件复用和系统迁移，从而降低了成本。3、云化 PLC 将不依赖于设备硬件厂家的通信终端，可灵活地选择供应商，具有很强的扩展性。4、云化 PLC 建立在工业互联网平台之上，能够快速实现对异构数据（如图像、视频和音频等）的分析、挖掘与共享。同时，控制、数据分析和 AI 功能可以直接在云端上运行，符合工业自动化系统未来的发展方向。5、云化 PLC 使用多核处理器，并采用容器化技术构建出多个虚拟 PLC（vPLC），能够快速实现多个设备的高效协同控制。6、云化 PLC 不仅原生支持 IEC61131-3 标准语言编程，还支持主流的高级编程语言(如 C 语言)，用户可以自由地组合这些编程语言，从而加快应用开发的过程并快速稳定地实现在行业应用中的落地。综上所述，基于云化 PLC 可构建出融合互通、协同开放、统一管控、智能高效的新一代工业自动化系统，契合工业自动化系统未来的发展方向。

一、关键词

云化 PLC、容器化、vPLC、IEC61131、工业 AI 智能体、确定性网络、5G、TSN

二、测试床项目承接主体

2.1. 发起公司和主要联系人联系方式

浙大城市学院

浙江至控科技有限公司

联系人：刘泓，15988155567，邮箱 liuhong@hzcu.edu.cn

2.2. 合作公司

边缘智能技术与装备浙江省工程研究中心

浣江实验室

华为技术有限公司

三、测试床项目目标

云化 PLC 采用国产云平台软硬件技术，将 PLC 运行时部署在云平台的实时操作系统上，利用容器化技术实现工业控制系统中的软硬件解耦。通过 5G/TSN 等确定性网络技术，实现数据的高可靠实时传输，构建出新一代云边端架构的工业控制系统。在此基础上，依托大数据和人工智能技术，打造工业智能体，充分挖掘数据价值，提供设计、生产、物流、销售和服务等全链式智能服务。本项目的研制将加速云化 PLC 的发展，对探索具有智能化、高可靠和开放性等功能新一代工业控制系统具有重要意义。

本项目的具体目标有：

- 研制云化 PLC 控制器，采用国产云平台软硬件技术，实现 vPLC 运行时的多核 RTE 部署和冗余机制的实现，以及基于容器化的多 RTE 协同等功能；
- 云端集成开发环境（Integrated Development Environment，IDE）的开发，IDE 具有 IEC61131-3 编程系统，C 编程系统，AI 系统，具有远程编辑、协同开发、云端编译、在线调试，模块化控制、智能编排等功能；
- 面向 PLC 云化部署的端到端确定性网络的研究，包括确定性网络 TSN，免授权频段超高可靠低时延 5G 通信等研究内容；
- 工业智能体的搭建，结合大语言模型、多模态、人工智能等技术，搭建具有规划、执行、反思、长短期记忆的工业智能体。

四、测试床方案架构

4.1. 测试床应用场景

智慧化高端装备（设备中包含机器人、机械臂、图像视频等）。使用各类传感器（如摄像头等）获取环境、工况、加工等数据；利用人工智能技术对这些异构数据进行分析、挖掘与共享；通过自主学习和建模实现自主控制与执行，从而实现优质、高效、安全、可靠的运行。

钢铁等工作环境恶劣的行业。可以通过云端远程集中控制来减少危险作业环境对人的依赖，从而降低人员伤亡并提升工作环境。

集团型企业。通过集团统一控制，实现各个公司的工艺水平拉齐，确保工艺的一致性。同时对于特殊关键产品的工艺参数集中管控，实现工艺保密。

柔性生产、多轴加工等协同产线。通过云化 PLC 快速实现各类复杂协同功能，以满足现代柔性生产的需求。同时，云化 PLC 还可以增强系统的实时性和协同性，提升效率并降低成本。

各类工业智能体场景。如复杂质检，涵盖工业面阵/线扫相机、3D 相机、多相机和机械臂等的协同工作，以实现复杂异形件的高速高精度在线检测。

其他场景，如高速传输、确定性计算等。

4.2. 测试床架构

云化 PLC 系统架构如图 1 所示。在云端构建云化 PLC 集成开发环境，包括云工业组态、AI 组态、工业智能体组态、云编程、容器化配置、编译器等核心组件，符合 IEC61131-3 自动化编程语言标准，具有高级编程语言编程能力。在云边端，基于国产异构芯片，挂载高性能非易失性存储器，在国产操作系统的基础之上开展云化 PLC 软硬件研究工作，实现 vPLC 运行时，包括多核 RTE 部署和冗余机制的、基于容器化的多 RTE 协同等。在边侧，提供边侧云化 PLC，满足厂区云化 PLC 系统的私有化部署的需求。在端侧，提供端侧云化 I/O 控制器。端侧云化 I/O 控制器可以被云化 PLC 集成开发环境和边侧云化 PLC 直接控制，用于执行相关操作。

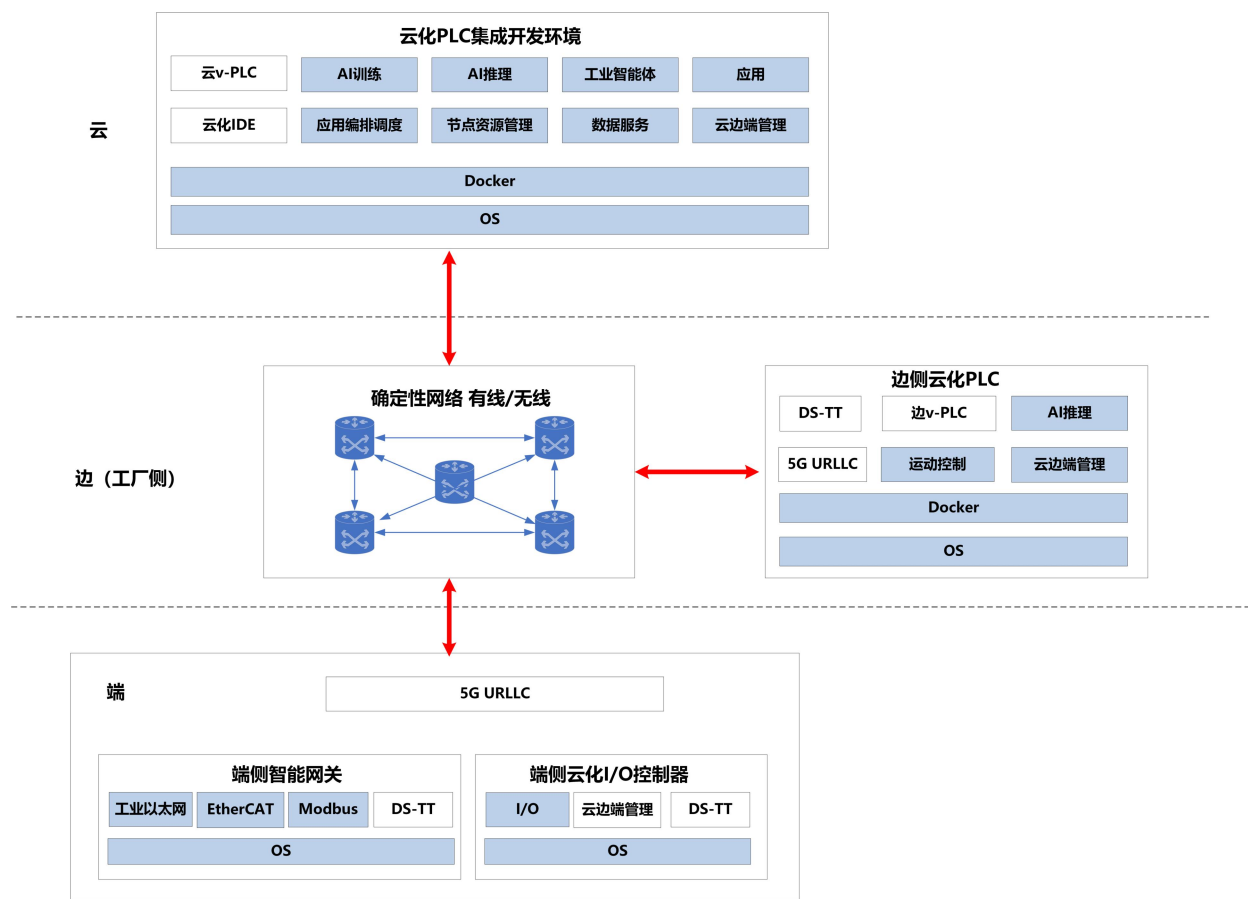


图 1 云化 PLC 架构图

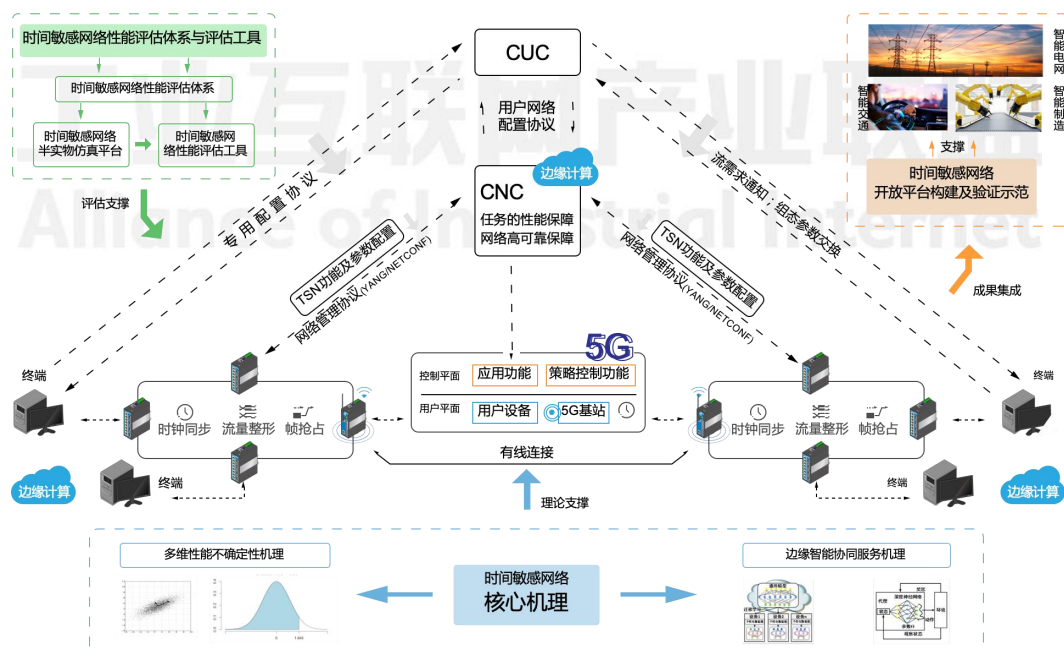


图 2 面向云化 PLC 的确定性网络架构

面向云化 PLC 的确定型网络以 5G 无线和时间敏感网络 TSN 为主要研究对象。有线 TSN 主要在时间同步、流量调度以及互操作三个方面对以太网技术协议进行了优化升级，包括利用 gPTP 技术提升时间同步机制的性能，利用时间分片、抢占、流过滤等技术扩展流量调度手段，以及利用路径控制、冗余备份以及 YANG 模型等技术增强网络的互操作功能。时间敏感网络（TSN）技术为以太网协议的 MAC 层提供一套通用的时间敏感机制，在确保以太网数据通讯的时间确定性的同时，为不同协议网络之间的互操作提供了可能。IEEE 802.1TSN 工作组目前已经完成基础共性协议的制定和发布，主要特性集中在时间同步、流量调度、网络管理以及安全可靠三大类。无线 5G 是一种主要应用低时延、高可靠和大带宽性能的新一代无线通信技术。为了进一步适配工业场景，可以将 5G 无线通信技术应用于免授权频段，以降低运营成本。本项目将提供 TSN 网关、端侧智能网关、免授权频段 5G 网关及相关的 TSN 模块和 5G 模块。

4.3. 测试床方案

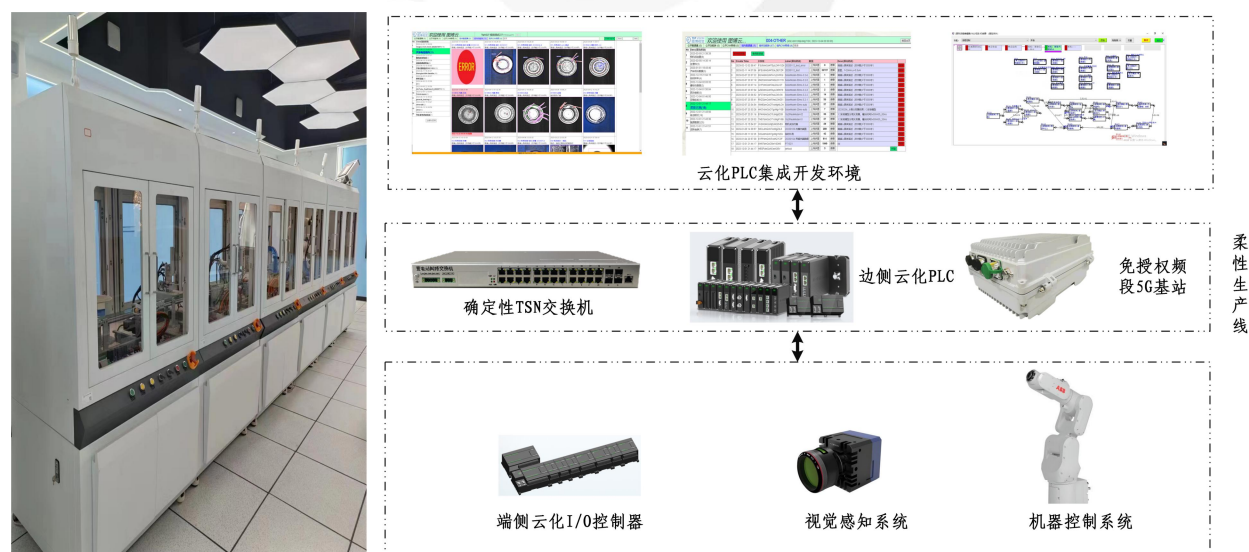
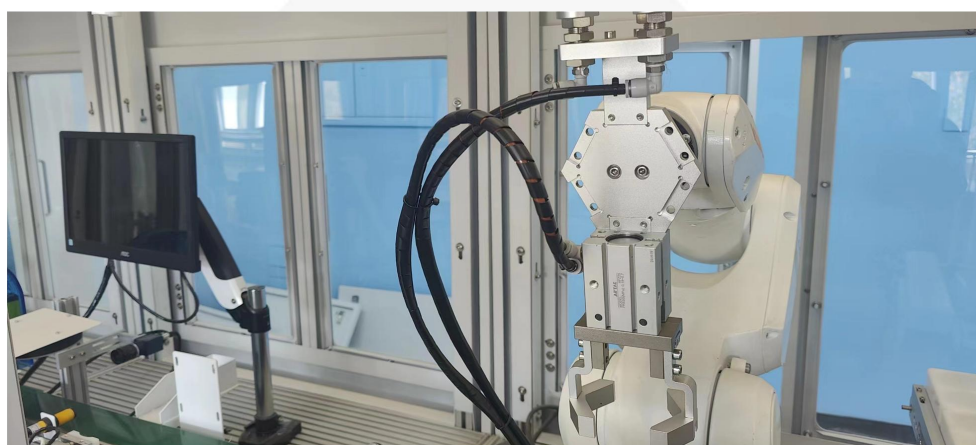


图 3 基于云化 PLC 的柔性生产线测试床

本项目将研制一套基于云化 PLC 的柔性生产线测试床（下简称为测试床）。测试床包含若干个柔性生产过程，部分柔性生产过程包含视觉感知系统和机器控制系统。测试床使用端侧云化 I/O 控制器进行控制，通过确定性网络与云端服务器通信，云端服务器运行 PLC 集成开发环境，实现 IEC61131-3 编程、AI 编程，远程编辑、协同开发、云端编译、在线调试，模块化控制、智能编排等功能。测试床内部情况如图 4 所示。



柔性产线内部设备



AI质检与机械臂

图 4 云化 PLC 的柔性生产线测试床内部情况

4.4. 方案重点技术

4.4.1. 云化 PLC 集成开发环境

云化 PLC 集成开发环境以核心功能模块为单元进行图形界面和业务数据的模块化组件设计开发，高内聚低耦合功能模块单元构建了可靠性高、拓展性强的云化 PLC 集成开发环境。

1) 核心编程：符合 IEC61131-3 标准，提供人机界面友好的文本语言(IL、ST)和图形语言（LD、FBD、SFC）编辑器，编程辅助组件提供变量的交叉引用查看、全局搜索替换等功能，为编程人员设计开发逻辑控制程序提供高效支撑；工程管理组件：提供全局变量申明管理功能，数据类型定义功能以及 POU 管理功能，方便用户快速工程组态。

2) 编译链接：通过对编程开发的 POU 文件进行词法分析、语法分析、语义分析、链接等操作，生成目标程序，下装至控制器运行。

3) 网络通讯：提供变量监视、联机调试、断点调试等功能，方便用户通过集成开发环境连接仿真器或者边缘控制器对控制逻辑程序进行调测。

4) 云化集成：面向云函数的库管理功能通过在云端开发部署行业常用的云函数算法库，提供云函数库的解析和边缘侧协同部署能力。AI 算法组态功能通过智能调度算法，将应用于模型训练或推理等的深度学习算法根据云边的资源情况分配部署至云端服务器或者边缘侧设备，为算法的开发测试和高效的落地于工业现场提供支撑。编译链接组件通过对编程开发的 POU 文件进行词法分析、语法分析、语义分析、链接等操作，生成目标程序，下装至控制器运行。同时网络通讯组件提供变量监视、联机调试、断点调试等功能，方便用户通过集成开发环境连接仿真器或者边缘控制器对控制逻辑程序进行调测。

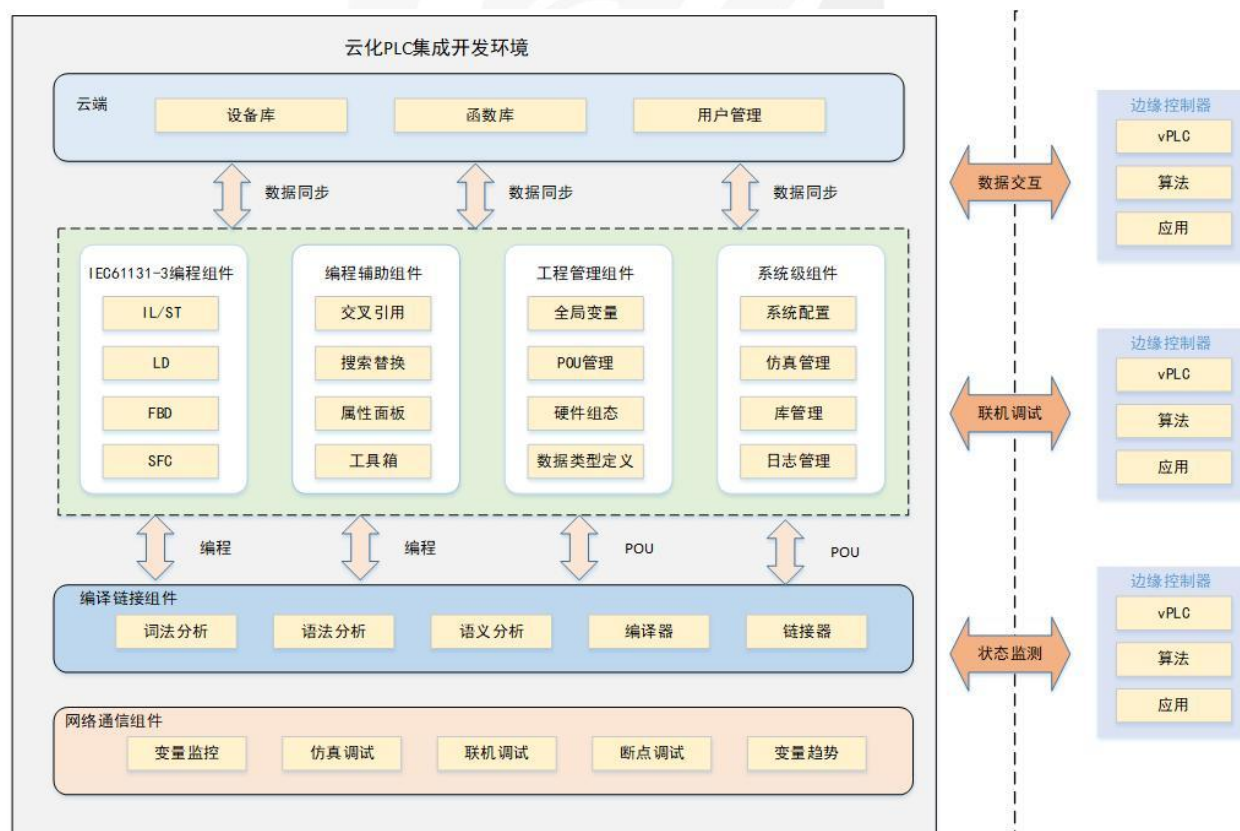


图 5 云化 PLC 集成开发环境系统架构

4.4.2. 云化 PLC 控制器

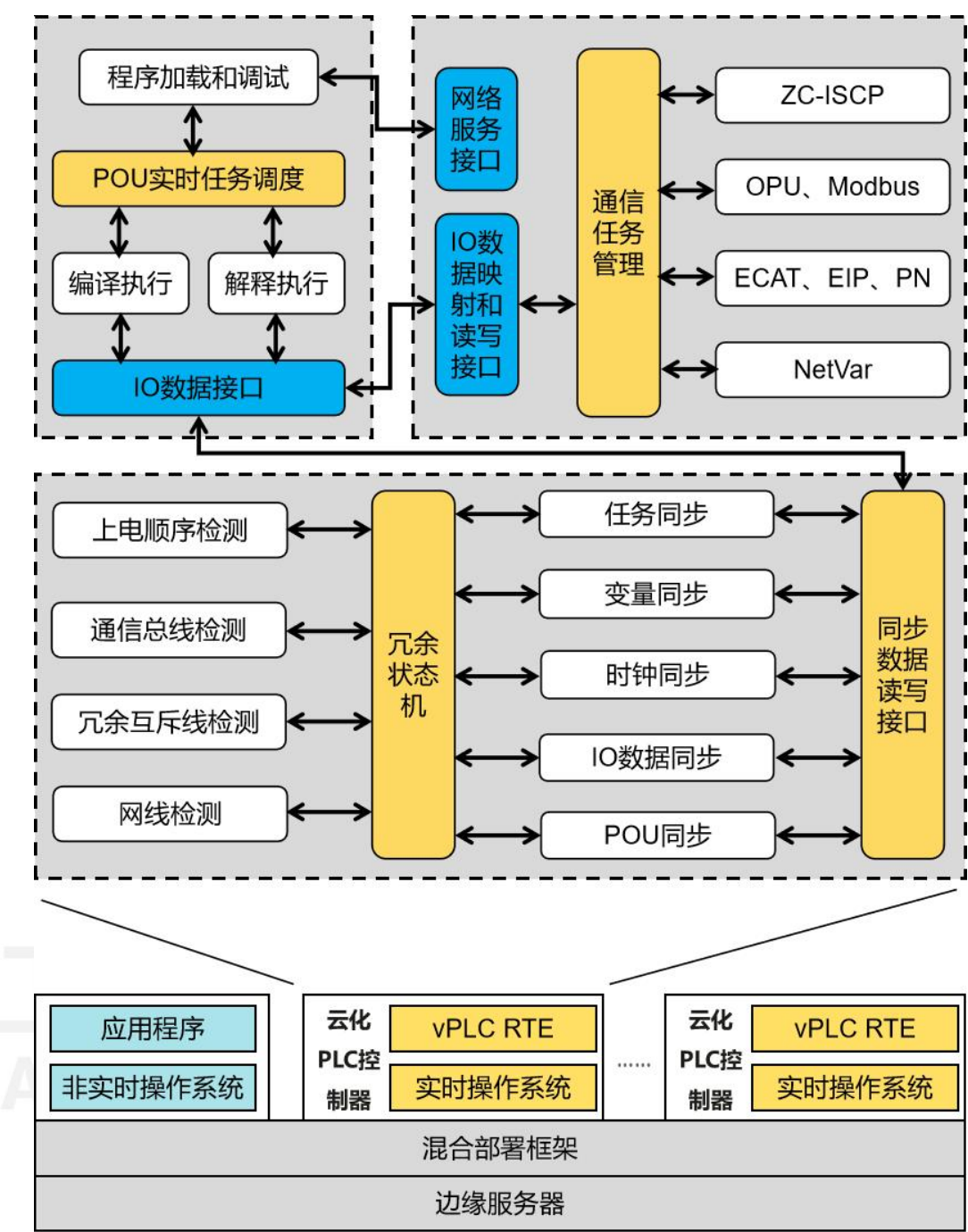


图 6 云化 PLC 控制器系统架构图

基于混合部署框架，单个或者多个云化 PLC 控制器部署在同一边缘服务器，其关键技术包括 POU 实时任务调度、多协议通信管理和热备冗余。

1)POU 实时任务调度：IEC 61131-3 程序的加载、编译/解释执行、多任务实时调度以及断点调试。

2) 多协议通信管理：基于私有通信协议 ZC-ISCP 的 IDE-RTE 交互技术；OPC UA/DA 和 Modbus TCP/RTU 等数采通信协议；EtherCAT、EtherNet/IP、Profinet 等工业以太网总线协议；vPLC 间的网络变量 NetVar 通信协议。

3) 热备冗余：基于上电顺序检测、通信总线检测、冗余互斥线检测和网线检测的低时延冗余状态切换；任务、变量、时钟、IO 数据和 POU 的实时同步。

4.4.3. 面向 PLC 云化部署的端到端确定性网络

时间敏感网络（Time Sensitive Networking, TSN）技术为以太网协议的 MAC 层提供了一套通用的时间敏感机制，在确保以太网数据通讯的时间确定性的同时，为不同协议网络之间的互操作提供了可能。IEEE 802.1TSN 工作组目前已经完成基础共性协议的制定和发布，主要特性集中在时间同步、流量调度、网络管理以及安全可靠三大类。本项目将研究 TSN 中时间同步、流量调度、网络管理以及安全可靠关键技术。具体的核心技术有：

1) TSN 跨网络高精度时间同步关键技术：时钟同步与流量整形和调度技术是网络保证实时应用端到端确定性时延的关键。TAS 机制作为一种流量整形和调度技术，目标是允许时间触发（TT）流量和标准尽力而为（BE）流量在同一网络中共存，并且能够满足 TT 流的确定性通信需求，同时为 BE 流提供尽力而为的服务。为实现确定延迟，TSN 利用帧抢占和流量整形机制在以太网链路中实现确定的传输路径，流量整形机制通过为高优先级流量提供确定的传输时隙来提供确定的传输时延，避免突发流量造成的重传和丢包的影响。针对 PLC 终端独立参与任务导致的资源分配不均匀的问题，将任务分配问题表述为重叠联盟形成博弈。该方法将重叠联盟问题转化为非重叠的联盟形成问题，以简化联盟形成的复杂性。在该方法中，虚拟终端可以通过选择不同的联盟来加入并分配感知资源，从而最大化系统的效用。

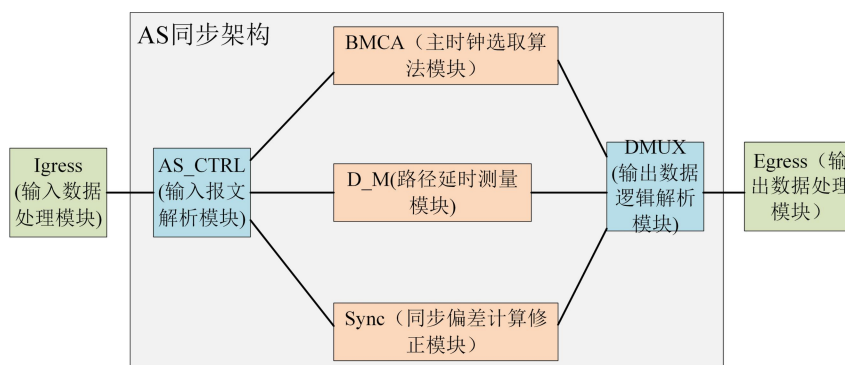


图 7 TSN 网络时钟同步总体架构

2) 工业网络协议与 TSN 协议适配：分析将现有工业通信设备升级为 TSN 网络设备的融合方案，在时间同步、流量调度、网络管理以及安全可靠三大类上完善 IEEE 802.1 TSN 工作组的基础共性项目研究；将现有工业通信设备升级为 TSN 网络设备的融合方案，设计相应的软硬件架构。

3) 面向 PLC 云化部署的 TSN 交换机开发：在工业互联网领域中，业务流量模型相比传统工业控制网络的流量更为复杂，即从单一的产线内部的控制流量，转变为产线内部、产线之间、控制网络与信息网络之间的多种业务流量类型并存。有线无线融合传输节点需要完成不同链路类型之间的数据转换，模块中的数据流向与子模块功能如下图所示。数据需要通过有线无线融合链路进行传输，数据在有线链路传输至无线输出端口时，各节点的无线数据发送时刻由时隙分配算法的计算结果所决定。在每个有线无线融合传输节点中的重要模块有：数据转发分析模块、门控列表计算模块。通过通用硬件平台和 TSN 芯片实现设计架构，并搭建相应测试环境测试相关性能指标。

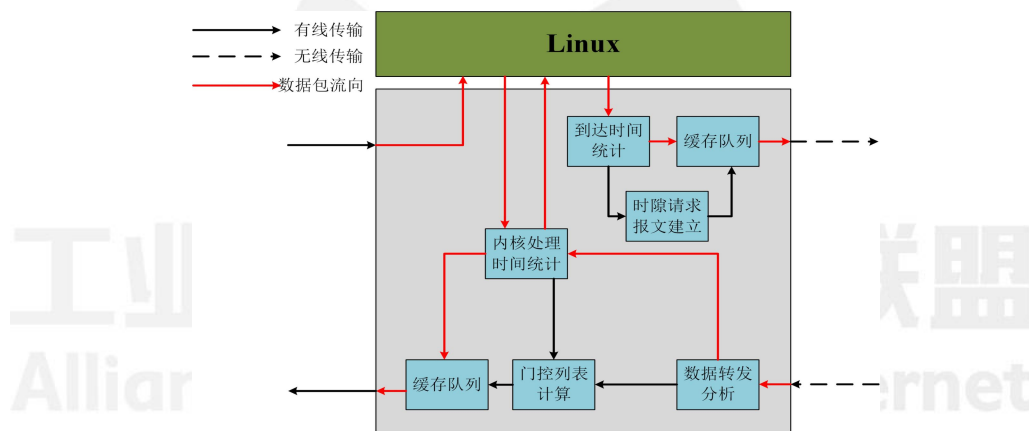


图 8 有线无线融合模块

4) 免授权频段超高可靠低时延通信：应用免授权频段可以解决授权频段资源不足以及成本高的缺点，但同时带来信道干扰以及安全性的问题。本项目将从信道介入、安全性机制设计、数据增强传输等方面，进一步提高免授权频段通信系统的性能，满足工业互联网异构业务的需求。

4.4.4. 工业智能体

针对高精度模具、汽车零配件等异形件的视觉检测需求，开展工业智能体关键技术研究，主要包括：

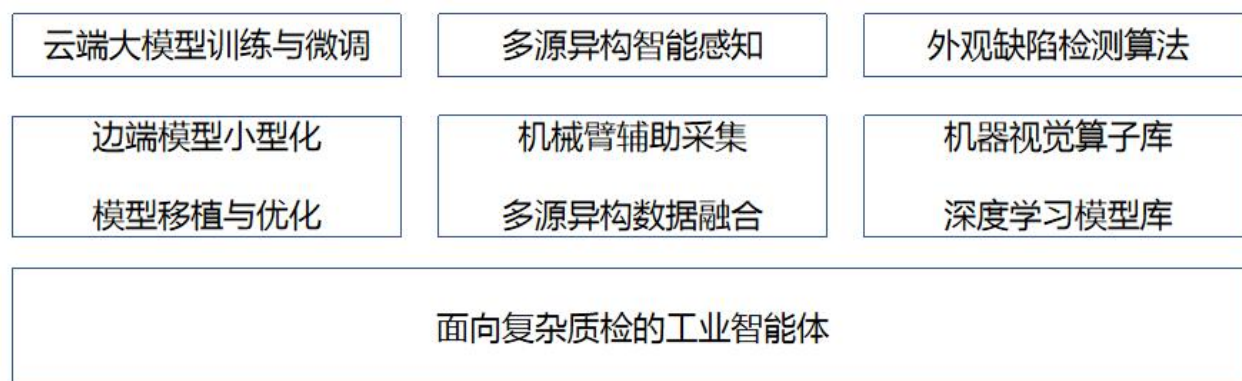


图 7 工业 AI 智能体框图

1) 工业大模型开发与小型化技术。主要包括两个方面，一是云端工业大模型的构建，包括采用大语言模型作为通用底座，提炼行业知识图谱，采集场景样本，在云端大算力平台进行微调训练，得到行业大模型。二是行业大模型小型化，通过压缩、蒸馏、量化、优化等手段形成边端模型，将其移植到边端嵌入式系统，作为边端核心 AI 引擎。

2) 多源异构智能感知技术。本项目开发的工业智能体的感知来源涵盖工业面阵/线扫相机、3D 相机、激光轮廓仪、多相机阵列等，通过感知单元在云边端平台系统里面的模块化，实现产线开发过程中的快速智能编排。同时，机械臂也作为一个模块辅助配合视觉传感器，实现复杂异形件的全方位图像采集。此外，多源数据融合算法的开发，包括早期融合、晚期融合、中期融合等三种思路。

3) 外观缺陷检测算法技术。以融合传统机器视觉算法和深度学习算法为主，既保持了深度学习的开放性，特别是缺陷种类多或不可预测的场景，又保持了传统视觉算法的灵活性，在产线上可以快速进行算子的智能编排以满足新出现的瑕疵识别需求。逐步构建多种常用算法模型与算子库，方便第三方进行模块化的开发、编排、测试与部署，快速灵活地搭建特定产线的复杂质检软件系统。

4.5. 项目自主研发性、创新性及先进性

本项目基于昇腾、瑞星微等国产生态圈，研制具有自主知识产权的云化 PLC 软硬件技术，研发符合工业控制系统的确定性网络，结合大数据技术和人工智能技术，构建工业

智能体，具备自主性、创新性，引领新一代工业控制系统的发展和升级。项目所涉及的核心技术在全球范围内具备相同的起点和基础，有望通过核心技术攻坚和产品研制实现弯道超车，在工业控制领域打造具有中国特色的完善解决方案。

4.6. 方案安全风险控制

本项目基于国产软硬件方案，硬件系统使用国产高性能多核芯片满足自主可靠要求，软件系统依赖于自主研发的国产软件系统，确定性网络系统中使用 AI 安全芯片来实现数据加密与安全传输技术。上述工作，确保了云化 PLC 的安全性、稳定性和实时性。

五、测试床实施部署

5.1. 测试床实施规划

序号	阶段名称	时间	主 要 工 作 内 容
1	可行性研究阶段	2023.10-2023.12	(1) 沟通交流，行业调研； (2) 深度对接，达成初步意向； (3) 与行业客户明确战略合作框架，确定价值场景范围(可签署战略合作框架协议)。
2	设计阶段	2024.1-2024.3	(1) 需求对接，联合创新，积极探索示范试点项目； (2) 在实验室，完成与测试床搭建相关的准备工作； (3) 联合供应商，进一步完善平台设计及设备选型。
3	施工部署阶段	2024.4-2024.7	设备入场施工部署调测
4	运行验收阶段	2024.8-2024.9	实现平台相关功能，并相关稳定性测试

5	宣传推广阶段	2024.10-2024.12	(1) 输出白皮书，引导行业水平参考架构设计； (2) 建设标准体系，扩大产业可复制空间； (3) 营造生态体系，构筑商业粘性； (4) 打造产业样板间，进一步构筑商业粘性。
---	--------	-----------------	--

5.2. 测试床实施的技术支撑及保障措施

使用产学研多方合作模式开展工作，依托浙大城市学院成立开放合作实验室，联合浙江至控科技有限公司、浣江实验室和边缘智能技术与装备浙江省工程研究中心为整体方案的部署实施提供技术支撑，由华为技术有限公司为整体方案提供完备自主知识产权的软硬件支撑。在研究内容满足部署的情况下，通过行业客户提供的应用场景去进行试点应用和落地，并最终为 AII 联盟提供案例反馈，形成完整闭环机制。

5.3. 测试床实施的自主可控性

基于国产昇腾、瑞星微生态圈和浙江至控科技有限公司在 PLC 多年的技术积累，依托浙大城市学院，开展云化 PLC 软硬件系统研制。基于浣江实验室和边缘智能技术与装备浙江省工程研究中心自研的图博云，开展工业 AI 智能体的研发。因此本测试床具有完备的自主可控性。

六、测试床预期成果

6.1. 测试床的预期可量化实施结果

- TSN 网络和无线通信网络的时延满足工业控制的实时性；
- 基于国产化操作系统的云化 PLC RTE；
- 国产自主可控的云化 PLC 集成开发环境，支持 IEC-61131-3 标准自动化编程语言编程、调试和下载，支持轻量化容器和云函数管理，支持云组态和 AI 组态；

6.2. 测试床的商业价值、经济效益

基于云化 PLC 控制器、云化 PLC 集成开发环境、确定性网络和工业 AI 智能体，加速国产替代，大幅度增强国家工控领域的安全性和可靠性。运用云化 PLC 控制器进一步改善工厂生产条件、降低危险作业；使用云化 PLC 集成开发环境，实现远程云端开发、编程、组态、调试、任务编排和 AI 等功能；通过 AI 技术的引入，进一步降低人力成本；结合工业 AI 智能体，自动适配各类复杂工业质检场景的需求。

6.3. 测试床的社会价值

我国作为世界上制造业规模最大的国家，产业门类齐全、产业链完整、发展层次多样，产业数字化发展具有广阔的市场空间和丰富的应用场景。数字经济加快推进实体企业价值链、供应链各环节的数字化改造，加快企业“上云用数赋智”，打通各部门、各环节的数据连接。促使云化 PLC 的应用将趋于无边界化，市场规模庞大。基于本项目的成果，在示范应用领域进行推广。

6.4. 测试床初步推广应用案例

暂无

七、测试床成果验证

7.1. 测试床成果验证计划

测试床成果验证计划包括对云化 PLC 控制器、云化 PLC 集成开发环境、确定性网络和工业 AI 智能体进行验证。具体计划如下，使用端侧云化 I/O 控制器、边侧云化 PLC 和云服务器，通过确定性网络连接，构建出符合柔性制造和 AI 质检特性的工业测试床。使用云化 PLC 集成开发环境，实现云化 PLC 的编程、调试、下载和执行；应用容器化技术在云端/边端构建出 vPLC；使用 vPLC 实现对端侧云化 I/O 控制器进行直接控制；数据通信依赖与确定性网络；工业 AI 智能体完成负责工业质检任务。

7.2. 测试床成果验证方案

测试床成果验证计划主要针对云化 PLC 控制系统整体功能进行测试。

测试项目：云化 PLC 控制系统整体功能测试

测试目的：验证基于确定性网络的云化 PLC 控制系统进行柔性制造、AI 质检等能力和云化 PLC 集成开发环境的软件功能
预置条件： a) 确定性网络完成网络流量编排及部署； b) 云化PLC控制系统完成架设及部署。 c) 工业质检AI智能体已训练完毕； d) 云化PLC集成开发环境通过容器化技术创建vPLC，完成测试床所需的程序编写、AI组态、任务编排等编写。
测试步骤： a) 云化PLC集成开发环境下发控制任务。 b) 由云端/边端云化PLC完成具体的任务，如创建vPLC、实现控制任务和组态任务等。 c) 由端侧云化I/O控制器执行对应的控制任务，采集相关的数据。 d) 由运行在云端/边端的工业AI智能体实现工业质检任务。
预期结果： a) vPLC可以对端侧云化I/O控制器进行直接控制。 b) 确定性网络通讯符合控制系统的实时性。 c) 工业智能体能正确高效地完成复杂质检任务。 d) 能快速地对生产任务进行柔性编排，能方便地修改系统控制节拍。
测试结果：
结论：

八、与已存在 AII 测试床的关系

暂无

九、测试床成果交付

9.1. 测试床成果交付件

云化 PLC 控制器；

云化 PLC 集成开发环境；

确定性网络设备；

相关技术文档；

9.2. 测试床可复制性

本测试床提供标准化的云化 PLC 控制器、云化 PLC 集成开发环境、确定性网络设备和工业 AI 智能体，基于此可以快速复制出其他功能的工业控制系统。

9.3. 测试床开放性

本测试床基于国产软硬件解耦的开放式框架，具备良好的开发和兼容性能。它可以与相关企业的软件系统进行平滑对接，方便地扩展到相关场景中。部分核心软硬件功能将在后期通过开源接口向客户开放。

十、其他信息

10.1. 测试床使用者

欢迎第三公司参与本测试床建设。

10.2. 测试床知识产权说明

参与方各自负责不同部分的研发工作。对于独立研发的知识产权，归研发方所有；对于合作研发的知识产权，由合作各方自行协商决定归属。

10.3. 测试床运营及访问使用

建设初期，浙大城市学院和浙江至控科技有限公司牵头，联合浣江实验室、边缘智能技术与装备浙江省工程研究中心和华为技术有限公司，开展云化 PLC 系统的建设、测试和验证。建设后期，行业客户可基于测试床搭建自有系统，相关技术难点及攻关由浙大城市学院和浙江至控科技有限公司进行跟踪支撑及解决。

10.4. 测试床资金

单位：万元（人民币）

概算科目名称	经费预算
(一) 直接费用	568
1、设备费	83
2、材料费	248
3、测试化验加工费	30
4、燃料动力费	0
5、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	60
6、会议/差旅/国际合作交流费	30
7、劳务费	117
(二) 间接费用	32
8、管理费	27
9、激励科研人员的绩效支出	5
合计	600

10.5. 测试床时间轴

序号	措施	10月	12月	次年1月	次年3月	次年5月	次年7月	次年9月	次年10月	次年11月	次年12月
1	沟通交流，行业调研										
2	深度对接，达成初步意向										
3	确定价值场景范围										
4	需求对接，联合创新，积极探索示范试点项目										
5	完善平台设计及设备选型，完成测试床搭建										
6	实现平台相关功能，并进行相关稳定性测试										
7	输出白皮书，引导行业水平参考架构设计										
8	建设标准体系，扩大产业可复制										

	空间										
9	营造生态体系， 构筑商业粘性										
10	打造产业样板间，进一步构筑商业粘性										

10.6. 附加信息

暂无



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet