



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

新型工业控制蓝皮书

工业互联网产业联盟（AII）

2024年9月



前 言

当前，新一代信息技术与工业经济深度融合演进，涌现出一批新兴业态与应用模式。在服务化、网络化、个性化的浪潮下，生产供应链协同、远程运维等通用方案及钢铁节能减排、石化安全监控等行业特色方案应运而生，极大地推动了工业经济的转型升级。然而，工业控制作为工业“灵魂”环节，目前难以满足工厂新的生产需求，例如如何促进不同系统间的高效协同，实现柔性生产制造；如何打破软硬件系统“烟囱”架构，以实现低成本高效的系统维护及软件升级等。

在此背景下，工业控制系统正处于从封闭走向开放、从功能单一专用走向算网控融合的关键变革期，新型工业控制架构以软硬解耦、开放互联、融合智能为核心特征，成为推动新型工业化目标实现的关键力量。本蓝皮书总结了新型工业控制内涵及四大核心特征，创新性提出了新型工业控制参考架构，深入分析了新型工业控制关键技术及演进趋势，梳理了新型工业控制在重点行业的应用模式及核心价值，分析了新型工业控制产业态势，希望为工业控制创新发展提供新视角、新思路。

编写组成员（排名不分先后）：

胡钟颢、王哲、黄颖、余思聪、朱瑾瑜、张文远、王元、蔡圣明、曾鹏、李栋、王福东、马帅、刘玮哲、吴晓、陈菲雨、赵孝武、束裕、胡浩、朱毅明、赵雅囡、阎新华、王勇、王强军、陈晟民、王彬、张凡、梁骁俊、张呈宇、张勋、杨晓英、张东、张腾飞、王迥波、申友志、陈冰冰、曹龙海、李秀琦、俞一帆、贺诗波、顾超杰、孟文超、肖辉、胡文山、周洪、魏毅、侯卫锋、陈昕、张宇、王虎文、王丽华、李信荣

参编单位：

中国信息通信研究院
华为技术有限公司
中国科学院沈阳自动化研究所
中国移动通信有限公司
中兴通讯股份有限公司
和利时科技集团有限公司
施耐德电气(中国)有限公司
北京东土科技股份有限公司
鹏城实验室
中国联合网络通信有限公司
中国电信集团有限公司
飞腾信息技术有限公司
曙光网络科技有限公司
深圳艾灵网络有限公司
浙江大学
武汉大学
中国寰球工程有限公司
浙江中智达科技有限公司
普天信息工程设计服务有限公司
英特尔（中国）有限公司
深圳市杉岩数据技术有限公司



工业互联网产业联盟公众号

目录

第 1 章 新型工业控制发展态势	1
1.1 工业控制是工业代际演进的内在驱动力	1
1.2 工业控制发展面临挑战	2
1.3 新型工业控制概念与演进方向	4
第 2 章 新型工业控制架构及关键技术	8
2.1 新型工业控制架构	8
2.2 新型工业控制技术体系清晰	10
第 3 章 新型工业控制行业应用价值	20
3.1 装备制造业	20
3.2 电子设备制造业	24
3.3 石油化工行业	28
3.4 新能源行业	33
第 4 章 新型工业控制产业洞察	38
4.1 新型工业控制产业组织活跃度不断提升	38
4.2 基于 5G 的算网控一体化成为工业控制新业态	39
4.3 开放化工业控制成为产业发展共识	39
4.4 人工智能与工业控制加速结合	40
第 5 章 发展建议	41
参考文献	42

第 1 章 新型工业控制发展态势

1.1 工业控制是工业代际演进的内在驱动力

工业对社会进步和文明发展起到重要的推动作用，是国民经济的重要组成。一般公认的工业演进历程分为四次工业革命，分别是第一次工业革命-机械化时代，第二次工业革命-电气化时代，第三次工业革命-自动化时代和第四次工业革命-信息化时代。伴随着四次工业革命，工业控制技术也在不断演进。

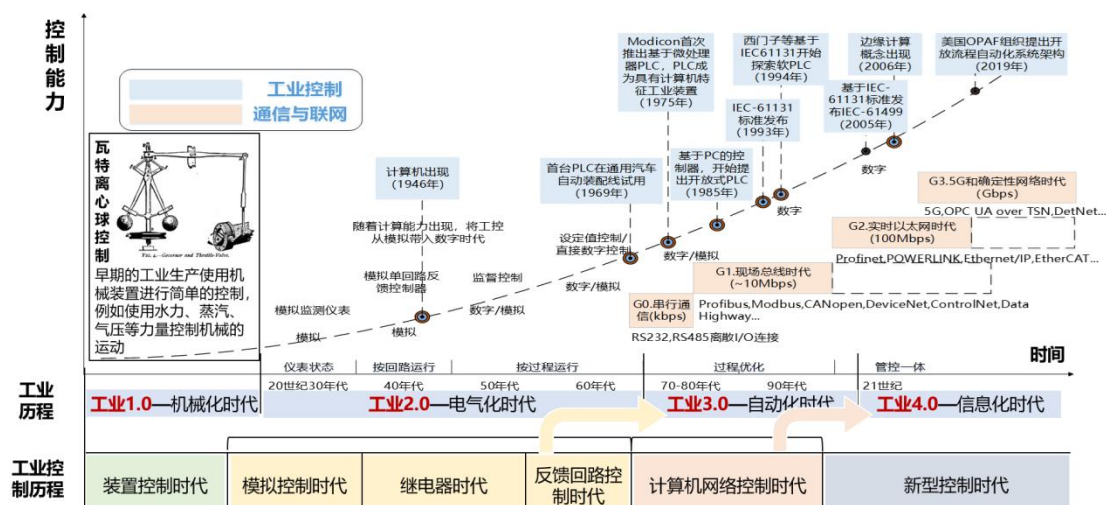


图 1.1 工业代际演进趋势

机械化时代。这一时期的工业生产主要依赖于机械设备，如蒸汽机、水轮机等，以蒸汽、水轮、气压等通过齿轮、皮带等传动机械装置将动力传递给各种工作机械装置，从而控制机械运动。装置控制推动了工业生产进入到了机械化时代。

电气化时代。20 世纪 30 年代开始，电气控制系统成为工业控制的主流方式。电动机的发明和应用这一时期的标志性事件，其将电能转化为机械能，为各种机械设备提供动力。此外，继电器、接触器等电气元件的出现，使得电气控制系统具有了更强大的功能及可靠性。

自动化时代。计算机控制系统逐渐取代了传统的电气控制系统，使工业控制更加精确化和数字化。其中，PLC（可编程逻辑控制器）、SCADA（监督控制和数据采集系统）、DCS（分散控制系统）与管理计算机、实时数据库和关系数据库的结合，实现复杂的算法和数据处理，提高生产效率和产品质量。

信息化时代。21 世纪初，工业领域发生全新技术革命，工业控制技术通过与物联网、大数据、人工智能、云计算、边缘计算、增强现实和虚拟现实等新兴

技术融合，演变为新型工业控制，推动工业变革和经济发展。信息化时代的显著特征是全面融合和智能化提升，使产业链各环节链通，生产效率及产品质量均得到极大提升。

综上所述，工业控制从装置控制到模拟控制、继电器控制、反馈回路控制，再到计算机网络控制、智能控制的不断演进过程，驱动着工业从机械化、电气化、自动化到信息化的更新换代发展，是工业代际演进的核心驱动力。当前，工业现场各类新需求不断涌现，对工业控制效率、部署、运维等提出更高要求。同时，5G、边缘计算等技术与工业控制加速融合，使工业控制发展正面处于变革关键时期。

1.2 工业控制发展面临挑战

自 20 世纪 70 年代工业领域迈入自动化时代以来，基于 ISA-95 架构的 L1 和 L2 层的制造控制层的软硬件结构未有变动，传统工业控制设备硬件、操作系统及运行时、编程组态平台及传输协议各成体系，终端用户被品牌深度锁定，一方面导致了工业控制生态的显著封闭性，体系烟囱式孤立，数据孤岛广泛存在，彼此间难以互联互通，另一方面使工业控制不具备供应链韧性，存在如芯片短缺导致供货价格飙升，供货周期拉长等问题。总体来说，工业控制目前面临挑战主要体现在以下几个方面：

1.2.1 挑战一：数据流转难，智能化升级无法支撑

制造业工厂虽已实现基于 DCS、PLC 等计算机控制系统的生产过程自动化控制，但是控制系统指令、运行工况监控和异常工况诊断等重要环节仍然需要依靠静态工艺模型及人工经验，一方面，某些行业领域工艺会受到环境、季节、传感器老化等因素影响使工艺模型具有时变性质，另外一方面，人工经验分析要素无法全面覆盖，且知识传承易产生断点从而形成技术壁垒。因此，工厂需要工业智能实现控制系统的自执行、自决策、自适应，从而适应不定的工业环境，完成多样化的工业任务。

以往工厂的数字化转型工作普遍围绕打通生产管理层和运营管理层的数据流，而现场装备层、传感与执行层、监测与控制层鲜有涉及，传统数据流转的瓶颈仍未根本解决，使工厂在运营效率上虽有提升，但生产效率并没有彻底改进。根据《2020 中国制造业痛点分析报告》，我国工业企业设备数字化率只有 50%，

其中设备联网率仅为 23.0%，可见大部分企业在工业生产自动化、智能化方面的准备度仍严重不足。同时，自动化装备缺乏获取运行状态数据的有效手段（如开放式接口提供给第三方），且随着工厂不断迭代更新，不同供应商不同时期上线的控制系统、监视系统、制造执行系统以及辅助业务系统间往往相互独立，数据不能有效地交换和共享。另外，在传统 ISA-95 架构下，信息在各层之间逐层传递而无法跨层直连，使底层设备对上层系统“不可视”，同时数据的跨层流转面临协议转换复杂度高、安全性差、研发成本高等问题，导致数据无法及时上传采集，无法满足“算力下得来，数据上得去”的需求。

工厂智能化升级的核心是通过数据采集交换、集成处理、建模分析、优化决策与反馈控制等实现机器设备、运营管理到商业活动的智能与优化。由此，数据采集和集成处理是实现工厂实现智能化升级的必要前提条件，只有在泛在连接、全面感知的基础上，通过深度集成和高效处理使基于计算和算法的工业智能高效应用，才能将传统以人工经验为主的决策和反馈转变为基于机器或系统自主建模、决策、反馈的模式智能化控制，而当前工厂数据在采集和流转等方面的阻塞，已严重阻碍了智能化升级的实现。

1.2.2 挑战二：信息互通难，柔性生产需求难以满足

随着市场需求向个性化、定制化和快速升级迭代的方向加速发展，多品种小批量的生产模式已成为制造业生产常态，要求工厂具备高度的灵活性与响应能力，能够通过生产过程中对工艺与设备配置的灵活调整，适应各工艺段间相对独立又紧密协作的生产流程。如何通过优化资源配置，提升生产效率与灵活性已成为企业竞相追求的目标，然而，在工业自动化领域由于控制系统的软硬件以及通信协议的品牌强耦合性与封闭性，成为行业发展的重大瓶颈。工业协议种类繁多，各厂商基于自身技术优势与市场地位，推行不同的工业总线和以太网协议，形成了复杂且难以统一的生态系统。新进厂商若想融入这一生态，需历经繁琐的协议认证与授权流程，无疑增加了市场准入的难度与成本。工业巨头在策略上展现出既“垄断”又“开放”的双重特性，一方面通过开放部分协议标准吸引更多参与者，促进生态繁荣；另一方面对核心关键技术保持封闭，以控制市场发展方向。此外，不同厂商间对设备与系统描述的异构化问题，导致了信息在设备系统间传递的障碍，严重制约了语义互操作性的实现，成为制约柔性制造发展的又一关键难题。

1.2.3 挑战三：升级运维难，IT-OT 融合遇到阻碍

传统工业控制系统因设计上的封闭性，使得后续的维护与服务不得不高度依赖原厂支持，导致日常维护成本高昂且效率低下。一旦供应商服务响应迟缓或技术支持不足，系统运维便面临重重困难。此外，随着信息与通信技术（ICT）与工业控制的深度融合，传统的 OT 工程师掌握的技能栈往往局限于特定品牌的控制系统和编程语言，难以快速吸收和掌握新兴的 ICT 技术，导致工程实施效率低下，无法有效应对工厂需求。同时，工业控制产品的市场流通多依赖于集成商渠道，而集成商在吸收和整合 ICT 技术方面速度相对较慢，直接影响到产品投产调试的效率，延长项目周期，用户的时间成本和额外成本倍增，进一步加重了企业的经济负担。

1.3 新型工业控制概念与演进方向

1.3.1 新型工业控制概念

新型工业控制具有网络化、开放化、协同化、智能化等特征，以先进网络组网融通，保障工业生产要素实时、可靠互联互通；以软硬件及协议的分层解耦和能力开放支持设备系统间灵活互换，降低部署成本、提升维护效率；以层级化、多样性算力为基座，深度融合人工智能技术，实现控制任务的自执行、自决策和自适应；以模块化、按需可重构的生产控制系统，促进系统和设备间的互操作。

1.3.2 新型工业控制演进方向

（1）网络化：从总线模式走向以扁平化、融合承载

工业控制网络面向复杂个性化的应用需求，连接种类多样的终端和异构网络等工业现场情况，从传统的分层网络构建，逐渐向扁平化、泛在连接的网络架构演进，按需自适应以满足工业互联网全场景应用网络需求的目标。随着确定性网络、5G、算网融合等新 ICT 技术的出现，新型工业控制网络以“智”促“简”，形成算网一体化的高确定性通信互联基础设施，使得企业运维更简单、业务整合更容易、资源调度更简洁。新型工业网络发展呈现以下的特点和发展趋势：

网络架构扁平化。原有严格分层网络体系被打破，形成新型扁平化网络架构，工业现场人、机、料、法、环等生产关键要素全连接和多模态接入，智能设备之间逐渐横向互联，可支撑快速实现资源灵活重构、互联互通。同时，数据将实现

跨层级传输，控制器将不再是数据流转的瓶颈，而是数据贯通的桥梁。

网算控一体。工业网络动态分布的计算资源互联形成层级化、多样性工业算力基座，为软件化的控制功能部署提供可靠承载，并集成 5G、确定性网络等连接能力，实现工厂、车间、产线的一网直达，提供低时延、高可靠、时延抖动有界的网络通信服务能力。

确定性网络深入拓展。随着生产流程走向全局优化控制，工业控制的可靠性更加依赖系统整体的可靠性，而工业网络作为系统中重要一环，对网络确定性保障提出了更高的要求，工业网络的确定性需求由工业生产业务本身诉求决定，确定性网络技术如 DetNet、TSN、DIP 等已有初步应用。

网络连接无线化。5G、WiFi6/WiFi7 等技术和工厂的广泛应用，允许在不改变物理位置的情况下，设备的可进行快速重新配置和移动，并可快速添加新的设备和传感器，移动性和可扩展性极大提升生产线对生产需求的适应性和柔性。同时，5G 等无线网络技术提供了高带宽、低时延和高可靠性，并催生出如远程监控诊断、远程设备操控等新场景，提升了企业安全生产能力并改善了工作环境。另外，新型的无线短距技术正在兴起，通过短距技术可实现设备直连，具有低延迟、低抖动、低成本优势。5G/5G-A 与新型短距技术的融合有望构建全无线的工业控制系统。

协议透明化。工业控制系统将从协议标准上形成分层解耦和互联互通，任意上层协议对下层协议的替换透明无感，即上层协议可以作为任意下层协议的载荷，如 IP 可以作为在 TSN 网络的载荷，也可以作为在 5G 网络的载荷，且协议可独立演进。

(2) 开放化：从封闭孤立走向软硬解耦、开放生态

传统工业控制系统软硬件紧耦合且通用性差，阻碍了工控技术进步和发展。寻求不同厂家之间的控制系统的可互操作、可互换以及应用程序和组态可移植，形成开放的工业控制系统，以进一步降低系统的硬件投资和维护成本，已逐渐达成业界共识。开放的工业控制系统具备以下特征：

硬件标准化。工业场景不断丰富，精益生产要求提升，导致生产现场设备激增，对控制器的数据处理、连接能力提出新要求。基于传统专有硬件的控制器算力扩展困难、成本居高不下。而基于通用硬件的控制器在可扩展性方面更具优势，

同时通过硬件标准化进一步推动跨厂家工业控制软件的移植和复用。

软件服务化。随着工业边缘计算技术的蓬勃发展，出现了基于虚拟化技术的控制系统集中化部署模式，在带来成本优势和管理便利的同时，集中化部署对工业控制软件提出了可互操作等服务化新要求。

开发生态开放。基于专用硬件的控制器、面向过程定制化的传统开发方式成本高、周期长、复用难，而控制软件的服务化将革新开发模式，形成开放的开发生态，通过采用面向对象软件开发方法、IT/OT 统一建模、工业控制应用商店等手段实现模块复用和能力复用。

(3) 协同化：从单机控制走向全流程、多工序协同控制

个性化需求的日益增长，使工业生产体系要求各生产工序间实现更高级别的协同优化，以促成系统间的融合与跨区域、跨工序的制造优化策略，驱动着工业自动化控制领域从传统的单元自动化控制系统向全流程、多工序协同优化的智能控制体系转型，从而实现个性化的高效定制生产。协同化的工业控制系统主要呈现以下几个方面特征和趋势：

系统高度集成和数据高效流转。工业控制系统正朝着更加集成化的方向发展，不同设备和系统之间的界限逐渐模糊，更加紧密地协同工作统一的整体，信息孤岛将逐渐减少，同时工业控制系统注重数据的无缝流转和共享，从而实现全流程、多工序的数据协同，系统能够更准确地掌握生产过程中的各种信息，为决策提供支持。

程序设计模块化和可互换。引入开放控制系统，模块化设计思路，将复杂应用功能细分为独立且可复用的模块单元。每个模块专注于特定功能，支持按需灵活配置与定制，实现独立运行、便捷升级与维护，从而快速响应并满足多样化的业务需求，促进生产系统的灵活性与效率提升。

基于信息模型的数据互操作逐步应用。采用信息模型作为核心，通过构建信息元素间的关联体系，提供标准化的信息交换格式，增强工业互联网环境下的信息交互效率。工业互联网信息模型横跨语法层与语义层，不仅解决了数据层面的互通问题，还实现了全要素、全价值链、全产业链间数据与信息的无缝传递，使异构的应用程序、系统能够在数据层面实现深度“对话”，促进数据互操作与信息集成的深度发展。

(4) 智能化：从依赖人工经验的专家系统控制走向基于数据分析自决策的智能控制

工业控制智能化是实现工厂数据优化闭环的关键，在全面感知、泛在连接、深度集成和高效处理的基础上，将传统依赖人工经验为主的决策和反馈转变为基于机器或系统自主建模、决策、反馈的模式。工业控制的智能化经历了基于统计的传统机器学习、基于复杂计算的深度学习，未来工业大模型将成为工业控制领域智能化的重要方向。

人工智能与工业控制深度融合。一是统计学、机器学习和神经网络等技术和工业控制深度结合，解决工业机理相对模糊的问题，如模糊控制、神经网络控制在工业过程控制的应用。二是将图像处理方法应用于产品视觉质量检测，使用机器学习进行工业数据的建模分析，形成工业数据模型并指导优化制造过程。三是基于深度学习等复杂多元的人工智能技术应用于工业控制领域，如基于数据驱动的优化与决策、深度视觉质量检测等，对于复杂问题的可解度显著提升，逐渐发展到可以解决实际问题并完全超越人类的程度。

工业大模型应用模式逐渐清晰。大模型是深度学习、知识图谱、自然语言处理等技术融合底座，同时整合工业多模态数据，全面提升感知与决策能力。边缘侧轻量化部署的工业大模型可通过多计算架构兼容、小数据微调、多模态数据处理等核心能力，助力工业现场实时数据分析，提高系统响应速度，降低计算能耗，提高能源利用效率，为工业控制系统提供实时、准确的决策依据。当前工业大模型仍在探索期，而其预期应用已覆盖工业生产全流程，包括产品研发设计环节的控制代码生成、工业流程自动化设计，生产制造环节的设备语义操控、生产过程优化，检测监测环节的通用型零样本质量检测，运营维护环节的智能化决策等。

虚实融合控制仿真广泛应用。通过将实际工业系统与虚拟仿真环境相结合，实现了对复杂工业过程的精确模拟与高效控制。工程师可以在虚拟环境中对控制系统进行反复测试与优化，而无需中断实际生产，有效降低了试错成本与时间，提升控制系统的可靠性与稳定性的同时，也加速了新产品研发进程。

第 2 章 新型工业控制架构及关键技术

2.1 新型工业控制架构

随着 ICT 技术在工业领域的深度融合与广泛应用，传统工厂 ISA-95 生产体系架构正经历着深刻变革，工业生产体系架构进一步扁平化，通过功能叠加和收编改造，从传统的 ISA95 的五层金字塔架构演变成为“以控制+计算+网络为中心”的云-边-端三层体系架构。L3（生产管理層）和 L4（经营管理層）的企业生产和管理系统如 ERP、MES 等，正逐步从传统的单机系统架构向云化架构转型，实现了 ERP、MES 等关键应用的中心云端部署。同时 L2（监测与控制层）系统也展现出新的发展趋势，部分需要大数据处理分析功能融合部署至中心云端，实现对生产过程的决策支持；另一部分需轻量化部署的如数据采集、推理等功能则向边缘侧延伸，逐渐以虚拟化、分布式形式部署于边缘侧。L1（控制层）功能同时也逐渐向边侧迁移，软硬件解耦合趋势使控制资源池化并灵活部署于通用边缘设备上。L0（工业装备层）装备的数字化与终端的智能化进程正在加速推进而形成智能终端。多模态传感器、智能仪表、智能装备、具身机器人等关键技术的研发取得显著进展，使得数据收集、处理与存储的门槛显著降低，同时，小型化、轻量级的实时操作系统与 IP 协议栈的产生，以极低的资源占用率与能耗，实现对工业终端的高效管理与控制。

总体上看，新型工业控制架构将实现设备硬件、操作系统、运行态组件、控制应用、网络协议等分层次的解耦合，使企业将精力放在自身核心工艺、算法等构建上，以提升产品竞争力，而对于底层的软硬件基础设施的承载无感。新型工业控制体系架构以“控制+计算”为核心，覆盖从工业现场的海量数据的采集，到工业边缘层的数据预处理，多维数据信息的融合，再到云端数据的智能化应用。

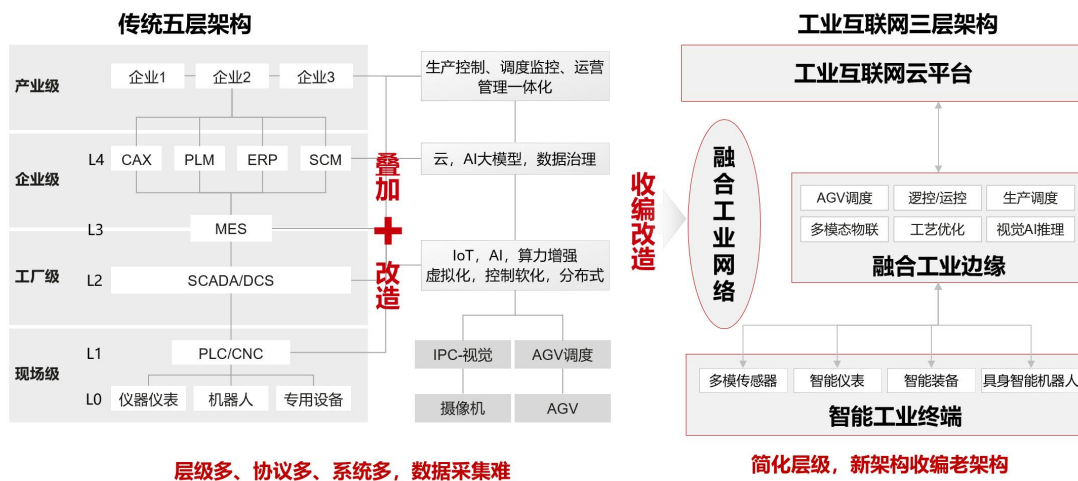


图 2.1 生产体系架构演进示意图

基于新型工业控制的智能化、开放化、网络化和协同化等特征，本蓝皮书提出新型工业控制总体功能架构，如下图所示：

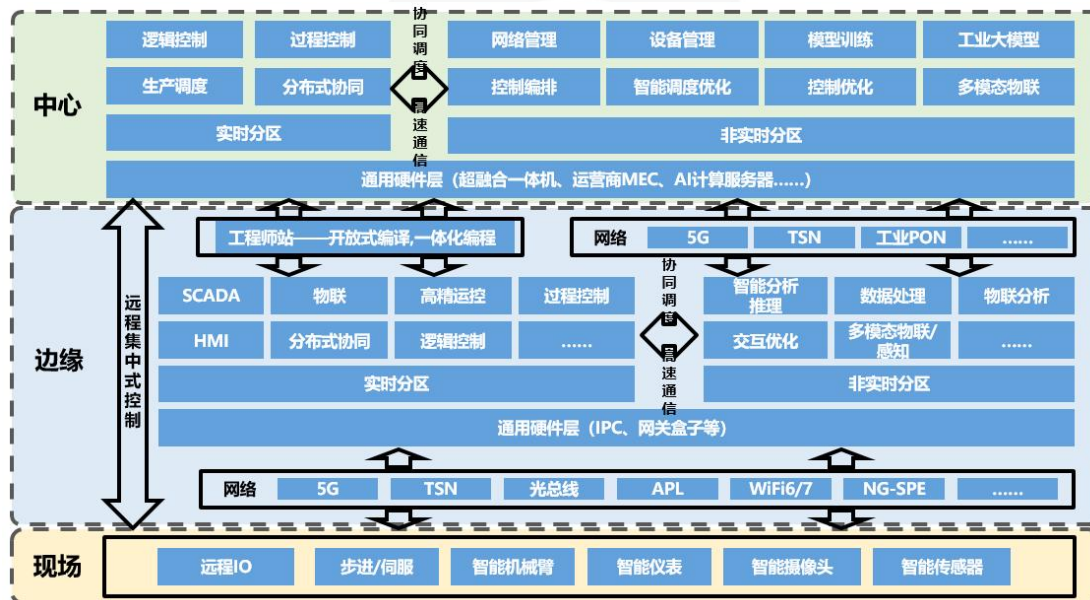


图 2.2 新型工业控制总体架构

现场层作为新型工业控制系统的感知与执行层，集成了智能阀门、伺服系统、机床 CNC 等执行设备以及多模态传感器等感知设备。这些设备通过 IO 接口实现数据采集和执行控制，为上层系统提供高精度、实时的生产过程信息，并执行来自上层的精确控制指令，有效解决了传统工业控制系统中数据获取滞后、控制精度低、设备互联互通难等问题。

边缘层采用虚拟化架构，部署非实时虚拟机（容器）执行数据处理、智能推理和人机交互任务，同时利用实时虚拟机（容器）实现逻辑控制、高精度运动控

制，协同实现灵活的资源管理和计算能力分配，交互界面系统为操作人员提供直观的操作界面、数据可视化工具和设备管理功能。边缘层的引入有效解决了传统工业控制系统数据传输延迟高、响应速度慢、数据处理能力不足等问题，显著提升了系统的实时性和灵活性，并降低了对云端服务的依赖程度。

中心层同样包含非实时分区和实时分区，按需承载系统的集中编排管理、决策优化、远程监控以及集中控制功能。而 IEC 61499 和 IEC 61131 编程环境则为开发和部署控制逻辑提供标准化平台。中心层有效解决传统工业控制系统中数据存储和分析能力不足的问题，为工厂提供更智能、更全面的决策支持，实现生产过程的优化和提升。

2.2 新型工业控制技术体系清晰

新型工业控制以工业控制网络连接、工业控制互操作、工业控制编译组态、工业智能控制、工业控制安全等技术为基础，形成开放协同、互联互通、融合承载、全面智能、安全可靠的工业控制模式，促进设备间的高效互动与数据共享，实现了从生产到管理、从决策到执行的全面智能化升级，提升工业生产灵活性与效率，确保系统运行的稳定性和数据的安全性。

2.2.1 工业控制网络连接技术

工业控制网络连接技术作为实现设备间高效、稳定通信的基石，提供工业控制系统的广泛互联与实时数据交换能力，是开放协同与互联互通特性的保障。

(1) 工业无线技术

工业无线技术是面向设备间短程、低速率信息交互的无线通信技术，适用于工业现场环境，并具有抗干扰能力强、能耗低、通信实时性等技术特征。工业无线技术包含工业 5G、工业 Wi-Fi 和星闪灯，根据通信距离、功耗、传输速率等特性，正在逐步应用于工业各个领域和各个场景。

5G 通信的高速率、低时延和大连接三大特性与工业互联网无线网络需求相契合，尤其可以承载控制类实时业务。作为工业互联网的关键使能技术，工业 5G 是指 5G 通信技术在工业环境中的应用，它利用 5G 网络的特点来提升制造业的自动化、智能化水平。工业 5G 不仅仅是传统的 5G 移动通信网络，而是结合了特定的行业需求和应用场景，以满足工厂自动化、物流、远程操作、机器间通信

等领域的严苛要求。工业 5G 起到创新聚合的引领作用，为工业控制带来的变革体现在三个方面：一是去掉有线束缚，解决不便于有线连接的移动类场景，减少移动造成的通讯物理故障，在产线频繁调整的场景下，可大幅缩减工期和流程，降低网络部署成本。二是智能融合组网，工业 5G 提供 IT 非实时与 OT 实时多业务共用一张网的能力，一网到底适合作为多业务融合的基础。同时，5G 在工业现场的部署以两层架构为主，是天然的主从式或边-端架构，与工业架构的融合演进方向相匹配。三是为工业控制提供 5G 工业模组/网关、5G 工业基站、5G 工业 UPF、5G 一体化设备等算网融合的底座，促进云化 PLC、云化机器人等新型工业控制应用落地。5G 工业模组/网关是现场设备接入 5G 通信的中介装置，同时具备工业协议转换（Profinet、Modbus、EtherNet/IP 等协议转换为上位机和云端应用的 OPCUA、MQTT 等协议）的能力，可灵活适配改造利旧、新建以及设备内置的部署场景。工业 5G 网络侧设备，视不同的部署场景需求，可以在基站和核心网网元分别实施两路的本地分流，灵活满足车间数据/工厂数据各自安全需求；也可以全部下沉到车间，一体化解决现场需求。同时依托 5G 网+端的网元，灵活提供不同层级的工业边缘算力，让现场解决方案更加紧凑，综合成本更低。

工业 Wi-Fi 主要用于实现设备之间的数据传输和控制。Wi-Fi6（IEEE 802.11ax）是最新的 Wi-Fi 标准，相较于之前版本，在传输速度、时延和网络容量方面都有显著提升。Wi-Fi6 的速度可以达到 10Gbps，时延可低至 17 毫秒，这对于工业环境中的实时控制和数据传输非常重要。

星闪技术是近距离无线连接技术，旨在满足智能汽车、工业智造等多场景下的技术需求，具有低时延、高可靠性、精准同步和多并发的特点，相较于传统的无线短距通信技术如蓝牙、Wi-Fi、ZigBee 等，星闪技术具有更低的功耗、更快的传输速度、更低的时延（20 微秒的超低延迟）、更稳定的连接、更广泛的覆盖范围、更大的组网能力（支持最大 4096 台设备互联）等特点。星闪技术在工业领域的应用可以极大提升生产效率和自动化水平，如用于实现机械臂之间的精准同步和通信等。此外，星闪技术的低时延和高可靠性对于实时控制和精确操作的工业应用也可起到赋能作用。

（2）工业确定性网络

确定性网络核心在于提供实时数据传输能力，保证确定的通信服务质量指标

（如超低上界的时延、抖动、丢包率、上下界可控的带宽以及超高下界）的可靠性，以满足高质量通信需求，可适用于工业现场控制的确定性网络技术包括时间敏感网络（TSN）、确定性 IP（D-IP）网络等。TSN 技术是基于标准以太网架构演进的新一代网络技术，其具有精准的时钟同步能力，确定性流量调度能力，以及智能开放的运维管理架构，可以保证多种业务流量的共网高质量传输，兼具性能及成本优势。DIP 通过边缘逐流整形、核心节点无状态周期映射和聚合周期调度核心技术，以及其他配套的相关技术，同时实现了规模 IP 网络中的确定性低时延、可扩展性和流间隔离性，具备端到端转发时延确定性、业务端到端抖动确定性。另外，随着近年 5G 的快速商用部署并逐步深入行业数字化，5G 确定性网络也在商业项目中得到验证，并反向推动 5G 技术的进一步升级。利用 5G 网络资源打造可预期、可规划、可验证，有确定性传输能力的移动专网，提供差异化的业务体验。5G 网络涉及到无线接入网、传输承载网、核心网，TSN、DIP、FlexE、DetNet 等技术也可逐步迭代并深入集成到 5G 确定性网络中，比如通过 DIP 周期与 5G 空口时隙之间的联合调度使能端到端的确定性，提升 5G 空口的接入能力。

（3）工业光网

工业光网主要包括工业 PON（Passive Optical Network）和工业光总线，均基于点到多点（P2MP）技术构建。通过 P2MP 架构，工业 PON 能够实现从单一的光线路终端（OLT）到多个光网络单元（ONU）的数据传输，无需复杂的布线，从而简化了工业现场的网络部署。同样，工业光总线利用 P2MP 技术，通过光纤介质在控制器与广泛分布的传感器、执行器等现场输入输出单元间建立高效连接，确保了控制指令与数据反馈的精准无误和高效传输。

工业 PON 采用点到多点（P2MP）结构，正突破传统时分复用上行机制的时延抖动限制，实现确定性网络传输能力，关键技术特性包括：确定性能力。确保系统建模精度和闭环决策系统稳定性，满足数据采集、传输与处理的确定性需求；智能化管理能力。满足复杂工业动态系统建模与闭环决策的网络要求，包括灵活的管理运维和超高的可靠性；时间同步能力。实现高精度时间同步，确保与业务周期的节拍一致，为时延测量、补偿等确定性技术提供基础；

工业光总线将光网络技术深度融合于工业数据传输体系之中，通过光纤介质在控制器与广泛分布的传感器、执行器等现场输入输出单元间建立高效连接，采

用 P2MP（点对多点）架构，实现了信息流的快速上传下达，主站 PLC 端集成高性能光头端模块，而从站设备如伺服驱动器、IO 模块、工业相机等则内置光终端模块，通过精心设计的星型光分配网络架构，确保了主站至各从站设备间控制指令与数据反馈的精准无误、高效传输。

（4）先进以太网

先进以太网一般指单对以太网（Single Pair Ethernet, SPE），通过单一对线缆实现数据传输和电源供应（PoDL），支持长距离、灵活速率，支撑工业多类型需求。Ethernet-APL（Advanced Physical Layer，双线以太网物理层）基于 SPE 技术，用于流程行业，通过使用两线制以太网来连接到现场设备，在 10MBit/s 的通信速率下，电缆长度可达到 1000m，作为一个物理层，支持 EtherNet/IP、HARTIP、OPC-UA、PROFINET 以及其他高层协议，从而使过程工业能够从 OT 和 IT 系统的融合中受益。Ethernet-APL 的主要优势是互操作性和灵活性（通过现场设备的无缝连接和信息层上的快速数据传输来实现），无论是在短距离的小型网络还是在长距离的大型网络中。对于过程工业而言，Ethernet-APL 还支持 Ex Zones 0、1 和 2 中的点燃保护（Ignition Protection）本质安全型“i”。通过使用 Ethernet-APL 技术，未来实现自动化网络的数字化将变得更加容易。

2.2.2 工业控制互操作技术

工业控制互操作技术通过制定统一的标准与协议促进了不同工业控制系统间的无缝集成与数据共享，是开放协同与互联互通目标达成的关键技术保障。

（5）实时虚拟化

实时虚拟化技术将物理资源（如 CPU、内存、存储等）抽象化为多个虚拟资源，并注重提供稳定、高效的虚拟化解决方案，不仅实现了资源的最大化利用和灵活管理，还确保实时任务能够在规定的时间限制内得到处理，目前主要包括实时虚拟机和实时容器两类技术。

实时虚拟机通过为实时操作系统和通用系统提供虚拟运行环境，从而实现实时任务和非实时任务混合部署，可分为 Type-1 类型和 Type-2 类型虚拟化。Type-1 类型虚拟化软件直接运行在物理硬件上，为虚拟机提供资源抽象，支持虚拟通用

操作系统和虚拟实时操作系统，具有实时性高、可靠性好等特点，适用于高速、中高速控制场景或高可靠控制场景。Type-2 类型虚拟化软件运行在操作系统上，通过操作系统的资源分配和调度，保障任务的实时性和隔离性，具有轻量化、易扩展等特点，适用于中低速控制场景或集中化控制场景。

实时容器通过轻量化、无系统驻留的实时容器实现简洁、高效工控应用的集中容器化部署，容器共享主机操作系统内核，单个容器运行时对于系统本身的内存消耗降低至 MB 级，同时通过容器线程优先级限制，确保用于执行控制任务的高优先级实时线程不被抢占，有效保证响应能力，通过自动探测现代处理器高级特性并进行优化，保证容器间的切换时间降低到 us 级。同时，实时容器实现工业控制运行时环境隔离，包括容器间的内存空间隔离、文件系统隔离、私有设备隔离、环境变量隔离、进程间通信隔离等。

（6）统一通信架构

统一通信架构（Open Platform Communications Unified Architecture, OPC UA）是实现软硬解耦、开放标准、互通互操作的技术，用以解决传统工业控制中工业控制协议繁杂、互通困难等问题，通过提供统一通信架构的跨平台、开放通用的协议，可实现对不同通信协议的整合，并提供对对不同平台和操作系统的支持。同时，提供标准化的数据模型用以定义设备、变量和数据结构，使各种工业设备可通过统一的通信接口进行通信，实现设备之间的互通互操作。

（7）工控信息模型

工控信息模型以工控信息交互需求为导向，基于对象组成要素之间的关联关系，在一定要素框架下构建的表达实体信息的模型。工业控制中，功能块是信息资源的基本单元，通过事件流和数据流实现软件封装和重用。工业控制的功能块信息模型由标识、事件输入输出、数据输入输出组成。新型工业控制将采用通过基于事件触发的程序执行机制，其相较于传统的程序扫描机制的周期性执行代码，只有在需要时相关代码才被执行，避免不必要的程序代码对系统硬件资源的消耗，增加了设备的吞吐量的无效增加。面向新型工业控制的功能块信息模型，将采用统一的控制接口，所有功能块使用相同的设计接口。同时，在架构上将不再把所有控制功能限制在单一设备或装置中，复杂的控制程序将以模块化组合的功能块形式拆分，分配到网络上的各个设备节点，极大提升了系统灵活性。工控功能块

信息模型可与模块化管理、组装式生产相结合，实现工业生产系统的快速重构，是工业企业柔性化、智能化生产的便捷途径。

(8) 分布式软总线

分布式软总线为工业领域内广泛分布的设备提供了的统一分布式通信能力，不仅实现了设备间的无感发现与零等待传输，更通过高效的任务分发机制，促进了生产流程的智能化与协同化，其独特优势在于快速发现与无感连接能力，能够自动识别并安全连接可信设备，为用户带来无缝衔接的使用体验。同时，分布式软总线支持异构网络组网，自动构建逻辑全连接网络，轻松跨越不同协议壁垒，实现设备间的无缝通信。在数据传输方面，该技术以高带宽、低时延、高可靠为特点，确保了数据传输的实时性与准确性，为工业数字化转型奠定了坚实的基础。

2.2.3 工业控制编程组态技术

工业控制编程组态技术简化了工业控制系统的开发与配置过程，提高了系统的灵活性与可扩展性，为全面智能的实现提供了强有力的软件支撑。

(9) 跨平台编程技术

跨平台编程技术是指在一个平台（指体系架构或操作系统）上生成另一个平台的可执行文件过程，通过提供不限制于特定软硬件平台的编译方式，使得工业控制系统的运行时和程序开发环境具备了跨平台的特性，实现了工业控制系统软件与特定硬件装置的解耦，打破了传统工业自动化系统的局限性。跨平台编程通常提供面向工业控制系统的集成开发环境、运行时以及行业 know-how 库等部分功能，其运行时能够同时适配各类主流 ARM、X86 架构 CPU 的专用 PLC 硬件以及通用 PC，也可安装在满足最低运行要求的智能设备，如树莓派等。市场上的跨平台编程工具实例包括 Codesys、KW multiprog、ISaGRAF、Axel、Logic Lab 等。

(10) 开放自动化建模语言

开放自动化建模语言指遵循 IEC 61499 标准的工业控制系统程序建模开发语言规范，主要包含互操作、可配置、可移植等几个方面的特性。互操作是指不同设备之间的通信和交互；可配置是指使用不同供应商的软件工具调整、配置设备，包括运行时重构；可移植是指应用程序和功能块库能够被多个软件工具接受和正

确地解释。IEC 61499 是在 IEC 61131-3 标准基础上对其进行的扩充，将 IEC 61131-3 仅针对具体物理设备的概念，改变为系统级的、抽象的与硬件无关的模型，由此，系统或工业过程可统一模型实现。IEC 61499 定义了功能块的封装模式是自包含的独立设计，功能块基于事件触发机制执行，对应数据的输入输出也须与和事件相关。独立封装和自包含的特点使功能块具备重用、派生等特性，可支持软件功能与硬件功能的分离。同时，事件驱动和语言集成的灵活性又与计算机语言的习惯高度一致。

(11) 协同编排技术

协同编排技术可支持将虚拟化控制器以容器或虚拟机的方式部署到通用硬件设备如边缘控制器、工业网关、边缘服务器等。与 Kubernetes、Kubevirt 等编排系统不同，虚拟化控制器具有高实时性、高可靠性要求，普通容器或虚拟机的编排难以满足苛刻的工控周期要求。对虚拟化控制器的编排调度需要牺牲部分伸缩性，换取更高的实时性和可靠性，而其中虚拟化控制器冗余热备是编排调度的核心组成部分。

2.2.4 工业智能控制技术

工业智能控制基于机器学习、工业大模型等先进技术，实现了对工业过程的精准感知、智能决策与自动执行，是新型工业控制系统智能化的核心所在。

(12) 虚拟调试

虚拟调试（Virtual Commissioning）是虚拟现实技术在工业领域的应用，通过虚拟技术创建出物理制造环境的数字复制品，测试和验证产品和程序设计的合理性，避免问题隐患，也可以实现工程人员的提前培训、操作演练，从而节省时间成本、人工成本以及材料成本。虚拟调试可计算机上模拟整个生产过程，包括机器人和自动化设备、PLC、变频器、电机等单元。虚拟调试在机械设计完成之后，无需设备的现场安装即可开始调试，同时对方案进行提前编程和产品测试，避免了程序逻辑问题而导致的机械部件损毁，有效减少过程停机时间，降低将设计转换为产品的过程风险。虚拟调试技术适用于动用大型加工设备的行业，如汽车制造行业已经广泛应用，且在调试复杂的自动化项目中优势更加明显。

(13) 工业大模型

大模型已成为深度学习、知识图谱、自然语言处理等技术融合底座，通过整合工业多模态的海量数据，利用大模型强大的学习和泛化能力，优化工业控制系统性能，全面提升感知与控制决策能力。工业大模型在工业中应用正处于初期阶段，将在研发设计环节率先切入逐渐向生产控制核心环节渗透，目前已形成工业控制代码生成、设备语义操控、零样本质量检测、工业流程自动化设计等典型场景。工业控制代码生成场景通过自建函数库和文本提示自动生产控制代码和组态，经人工评价代码输出后自动生成任务执行，极大提升项目投产调试效率。设备语义操控场景，通过录入需求，由自动理解问题需求并分解为数据需求和模型需求后开始自动建模和编程，并结合系统数据自动取数过程后输出结果，同时结合人工判断自动理解并修改需求。

(14) 先进过程控制

在工业控制领域，先进过程控制（Advanced Process Control, APC）是一种高级的控制策略，旨在优化和改进复杂的工业过程，利用先进的数学模型、优化算法和实时过程信息的控制策略，实现对工业过程精确高效控制，提高生产效率、减少能源消耗和降低生产成本。APC 通常包括模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）、实时优化控制（Real Time Optimization, RTO）等先进技术。APC 目前已在工业尤其是在化工、石油、电力等领域广泛应用。通过实时监测和调整过程参数，APC 系统能够更好地应对变化、波动和不确定性，提高生产过程的稳定性和效率。许多大型工业企业已经采用了 APC 系统，以优化生产和降低资源消耗。MPC 结合了预测模型、滚动优化和反馈校正三个基本要素，通过建立一个预测模型来预测系统未来的动态行为，并基于该预测结果，在有限的时间域内通过优化算法求解最优控制序列，然后只实施当前时刻的控制作用，并在下一时刻重新进行预测和优化。这种滚动式的优化策略使得 MPC 能够处理复杂系统的动态特性和不确定性，实现更好的控制效果；RTO 实时优化是一种先进的控制方法，主要用于解决复杂流程工业过程中的优化与控制问题，通过结合回路控制与过程运行优化，采用两层结构实现：上层通过计划调度优化经济性能指标，产生底层控制回路的设定值；底层通过控制器使被控变量跟踪设定值，以使过程运行在经济优化状态。RTO 技术在提高装置的生产能力、产品优化方面效果

显著，并且能够结合动态实时区域优化模型和先进的在线模型增益更新技术。

(15) 云边协同控制

云边协同控制是指基于边缘侧的快速响应特性以及云侧的大算力、广连接特性，将系统的控制任务进行拆分，实现云边协同控制。云侧通过对整体运行状态采集上来数据进行汇聚和综合计算，得出面向整体控制系统的最优控制策略，实现基于最优策略下对工厂整体的场群控制及多设备的协同控制。边缘侧更靠近现场，特别是与现场的传感单元、执行单元直接连接，可快速获取现场运行数据和下达控制指令，侧重于执行高实时控制任务。

2.2.5 工业控制安全技术

鉴于工业控制系统的重要性与敏感性，**工业控制安全技术**专注于构建全方位的安全防护体系，确保系统在高可靠性与高安全性要求下稳定运行，是安全可靠特性的重要实现手段。

(16) 边界安全防护

边界安全防护技术可在边界上构建一道相对隔绝的保护屏障，在传统防火墙技术基础上全面提升和扩展了入侵防御、URL 过滤、病毒过滤、网络扫描防护、IP/MAC 绑定等功能，可识别和预防网络中病毒传播、恶意攻击等行为，避免其影响控制网络和破坏生产流程，提供流量带宽管理、NAT 及 IPv6 隧道等功能用于满足更多维度的网络环境需求，更加适应当前工业网络环境与信息化网络环境相融合的发展趋势。在工业协议方面，提供针对工业协议的指令级深度检测，实现对 Modbus、OPC 等主流工业协议和规约的细粒度检查和过滤以支持智能协议识别和辅助规则生成，并具备高可用性及全透明无间断部署功能，有效保证业务连续性。除工业控制防火墙机制之外，边界安全防护技术还包括入侵检测系统 (IDS)/入侵防御系统 (IPS)，可监测网络流量，识别异常行为和潜在攻击，并可以阻止可疑活动。虚拟专用网络 (VPN) 则可以提供加密的通信通道，确保远程访问的安全性等。

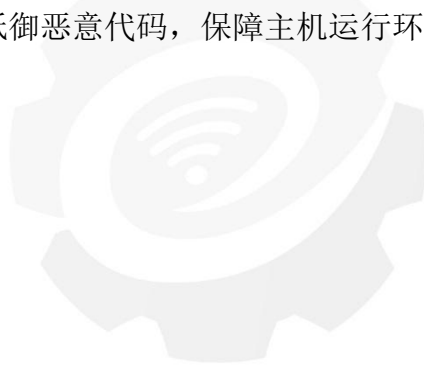
(17) 威胁全面感知

威胁全面感知技术是对工控网络进行脆弱性分析和评估的综合管理系统，全面发现系统中存在的安全漏洞、安全配置问题、弱口令，收集系统不必要开放的

账号、服务、端口，形成整体安全风险报告。通过漏洞库，对工业控制系统等进行已知漏洞的识别和检测，及时发现安全漏洞，客观评估工控网络风险等级。

（18）终端安全防护

工控终端的安全关乎整个工业控制系统的安全，一旦工控终端感染病毒或恶意程序，将对工业控制系统形成严重的安全威胁，其攻击手段包括诸如“震网”、HAVEX、沙虫病毒等都属于 APT（高级可持续性威胁）等，传统的防病毒手段、终端安全管理手段无法直接适应于工控环境，且“专网”、“隔离网络”同样能够被侵入，因工业控制系统缺乏有效防护而造成的数据丢失、业务停摆的影响和损失巨大。终端安全防护技术适用于对 SCADA、DCS、PCS、PLC 等工业控制系统中的各类终端设备，提供安全加固服务，通过采用白名单机制，拦截未知程序和脚本的执行，从而有效抵御恶意代码，保障主机运行环境的安全。



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

第3章 新型工业控制行业应用价值

3.1 装备制造业

装备制造行业为国民经济各部门提供工作母机，是国之重器，是国家工业化和现代化进程中的“基石”，具有技术密集、资金密集、附加值高、成长空间大、产业链条长、带动作用强等突出特点。我国正大力发展高端装备制造业，推动装备制造业优化升级，加快新能源汽车、工业母机、医疗装备、农机装备、船舶与海洋工程装备、电力装备等产业高质量发展。

装备制造属于典型的离散制造，生产流程主要包括切割与成型、加工、装配与焊接、表面处理（涂装）、质量控制、仓储物流等流程。为提高生产效率，装备生产通常采用流水线作业方式。针对不同工艺环节，相关的工控设备与生产现场的机器人、生产装备等组成具备某一生产能力的工位。各工位之间通过传送带、物料架等连接，并通过自动化协同控制完成生产流程的闭环。

3.1.1 装备制造业痛点

装备制造业的高精度、高可靠自动化生产对工控控制环节要求很高，目前主要存在数据传输路径复杂、设备互通困难、柔性生产不足等痛点问题：

（1）现场网络层级复杂为数据可靠传输及运维带来挑战

为满足装备制造业生产过程中的数据采集及分析、顺序控制、过程控制、运动控制、人机界面控制等多种业务场景，生产现场通常部署由多个工控机、PLC及多种交换机设备级联组成的多层工控网络。网络的层级越多，数据传输路径就越复杂，业务可靠性就越低，扩容涉及的设备就越多，给运维带来巨大挑战。而工控数据传输要求极高的确定性和可靠性，对网络减少层级和复杂度等提出刚性需求。

（2）终端设备类型庞杂，设备间难以互联互通。

工厂不仅需要工业控制系统对设备、生产线实现分布式控制，同时也需要将各种生产设备和系统进行连接和集成，实现信息的共享和互联互通以达到协作的目的。然而当前工业现场设备类型和数量庞大，工控协议类型复杂，相互之间难

以做到开放和兼容，使工业设备间互联互通成为一大难题。工厂当前虽然通过绑定单一工业自动化厂家来规避，但带来供应商不自由，忍受货期变动，数据开放难等约束。同时随着企业研发和管理业务向车间工业现场的延伸，需要采集大量生产和设备数据进行实时监控和智能处理，IT 与 OT 之间的融合已成为当务之急。

(3) 车间高效协同和柔性生产不足问题亟待解决

装备制造业产品定制化程度高、种类繁多，面向小批量多批次生产需求逐渐增多，因此产线需要频繁调整，需要不同产线间的高效协同，对灵活多变的生产需求进行合理匹配以实现柔性生产。而传统产线以有线网络连接为主，多级交换机汇联和级联，产线调整需要重新布线和大量的参数配置。同时，因传统工业自动化系统的专用性和封闭性使控制程序不具备可复用性，导致换线成本高、工作量大、周期长，无法适应新需求。

3.1.2 装备制造业新型工业控制应用案例

(1) 应用背景

汽车制造企业正在向用户驱动制造 C2M(Customer-to-Manufacturer) 的转型，因此对于汽车制造产线建设提出了柔性化需求。汽车制造企业希望利用“5G+工业互联网”技术，推动生产过程数字化转型，提高产线柔性化水平、降低制造成本，促进行业高质量发展。汽车生产核心工艺领域涉及数采、PLC 控制、节点控制变频、伺服、移动机器人等多类型工控终端。车间产线普遍采用 C2IO 控制系统，主站为安全型 PLC，远程站为柜内远程 IO、阀岛、现场级总线 I/O 模块和人机界面 HMI 等。此外，车间内存在多种物料运送方式，通过辊床滑撬输送、移动机器人搬运、工业机器人搬运的方式完成工件输送。新能源汽车制造涉及不同工艺环节及诸多场景，这导致对工控网络的需求日趋复杂；而传统层次化的有线网络扩展性较差，适配新场景的改造和调试过程复杂，严重制约生产进度。汽车制造企业迫切需要架构更为简化且扩展性良好的工控网络，以快速支撑产线数字化升级，降低网络运维成本及停线概率，提高设备运行效率及产线柔性程度，进一步改善订单及时交付率。

(2) 应用方案

焊装车间生产线是汽车自动化产线的关键组成部分之一，其控制系统采用集

中式控制方式，具体形式为主站加远程站，主站采用安全型 PLC，远程站采用柜内远程 IO、阀岛、现场级总线 IO 模块和人机界面 HMI(Human-Machine Interface) 等。



图 3.1 焊装车间产线集中式控制示意图

焊装车间内存在多个不同类型的 OT 应用。其中，安全型 PLC 对业务稳定性要求最高，需保证它与现场分离式 IO 之间保持时延高确定性的数据传输。数采平台需支持包括视频采集在内的多数量级异构数据采集，需要上行大带宽支持。现场物流 AGV 及在车间广泛分布的 HMI 依赖 5G 专网的大覆盖能力，可在整个作业区域中与调度系统随时保持连接。负责执行夹具和工装动作的远程 IO 由集中化部署的 PLC 实现远程控制。

为了满足焊装车间产线柔性化改造需要，并确保车间原有生产设备的稳定运行和数据的可靠传输，可以利用 5G 专网+集中式控制建立车间产线系统，现场除伺服/变频器之外的所有设备均可以通过 5G 工业网关接入 5G 专网，大大节省线缆与现场空间成本。

系统架构如下图所示，主要包括终端层、网络层和应用层。终端层通过外接 5G 网关方式接入 5G 专网；网络层采用专网设备独立组网模式，满足焊装车间的专网需求；应用层包括数采平台、摄像头服务器及安全型 PLC 等业务系统。



图 3.2 汽车制造焊装车间系统方案架构图

(3) 应用成效

以 60JPH（每小时生产 60 台整车）新能源汽车制造工厂为参考，可取得以下成效：

- 提高设备运行效率和产线柔性化效率0.05%，增产70余台车，增值约2940万。
- PLC在机房集中化部署，PLC数量减少70%。
- 降低因网络问题引发的停线时间，每年停线时间减少约70.5分钟。
- 节约工厂网络建设施工周期约25%。
- 减少网络基础设施投资费用500余万元。
- 每年降低网络相关设备能耗30万余KW/H，减排28万余吨。

3.1.3 装备制造业新型工业控制应用价值

以无线传输方式替代多层级部署的有线网络，关键汇聚点以 5G 工业终端或网关取代有线交换机，可以将多层级联的工控网络调整为单层网络连接，简化工控网络架构。

以通用硬件实体承载虚拟化控制功能控制系统逐渐进入工业现场。虚拟化工控系统通过网络进程间通信、设备控制器、逻辑控制等进行集中化部署，通过 5G

网元（如工业现场基站、边缘计算平台 MEC、园区 UPF 等）与工控系统的集成部署与协同优化，进一步简化工业现场组网，实现控制功能基于统一底座内部的互联互通。

另外采用基于 IEC-61499 标准的开放自动化编译系统，其基于面向对象方法，允许将自动化系统分解为多个功能块。这种标准化、模块化特性设计，使程序具备可移植性，并极大提高了工程师的系统开发和集成效率，使得企业可以选择最适合其需求的硬件和软件组件，而不必担心互操作性问题，降低了设备的投资成本。同时，通过云边协同的 PLC 或虚拟 PLC 来控制不同的设备和控制节点，可以动态地调整工控系统的结构和功能，并实现更高级别的控制和协同。这种新型模式使得设备制造商能够根据不同的客户需求，提供高度可定制化的功能模块和开发环境，能够更加灵活地构建和定制自动化系统，为适应经常变化的市场需求而进行柔性生产，从而提高开发效率和降低生产成本。

3.2 电子设备制造业

电子设备制造业是指计算机、通信和消费电子三个领域，根据市场研究公司 IDC 的报告，全球电子设备制造业市场规模在 2020 年达到了 5,124 亿美元，预计到 2025 年将达到 6,011 亿美元。电子设备制造业市场规模在国内外都非常庞大，且已进入存量竞争时代，对于电子设备制造企业来说，如何在行业竞争中脱颖而出，提高产品质量和创新能力，是关键的成功因素。

3.2.1 电子设备制造业痛点

当前电子设备制造业可以说是“危”“机”并存。从外部说，全球整体经济低迷，再加上政治因素影响，疫情防御造成的隔离，运输成本上升，电子设备制造产品对外销售受到很大影响；从内部看，国内人口红利在消失，用工难，年轻工人流动率高，外资工厂迁移到成本更低的国家，内资工厂向二三线城市转移等。内外环境逼迫工厂或者搬迁，或者采用新型技术驱动工厂智能化改造，产线升级，实现更柔性生产，更少工人（自动化提速），更低制造成本，更快物流及市场相应，练内功，进而抢占更多的市场份额。

面向工厂智能化改造，柔性及自动化生产，痛点问题如下：

(1) 行业产品更迭迅速，调整产线花费时间长

电子产品近年来逐渐趋于轻薄化和定制化，产品迭代周期显著缩短，对柔性产线的需求日益迫切，在柔性生产模式下，工厂对智能装备在不同生产域间移动性、即插即用、布线规划、精简架构等方面提出了更高要求，需要保障全局实时动态优化的前提下成本投入最优，但当前每次调整产线都需要频繁进行拆装与重组作业，耗费大量调试配置时间，成为提升生产效率的一大瓶颈。

(2) 数据利用、智能应用水平有待提升

为提高产线生产精确度和效率，适应多变生产环境，工厂逐步要求控制系统需能够实现自适应、自监测、自维护、自主学习等功能，同时需要结合先进算法和人工智能技术，为企业决策提供准确信息支持，然而当前工厂的控制系统水平不能满足上述要求。同时，工厂目前缺乏产线、车间或工厂级的数据、计算中心节点，无法利用统一的存储、算力、智能资源进行智能化升级。

(3) 新技术的实时性和可靠性保障能力需加强

工业现场环境错综复杂，融合了电磁干扰、振动、腐蚀、极端温度等多重不利因素，这对新技术的引入及实施提出了更高要求，需确保与原工控系统相当的可靠性水平，包括增强自诊断与自恢复机制，设计灵活可变的拓扑结构等，以适应不断变化的工业现场需求。

高速实时以太网可实现局域网规模的高实时性，但大规模网络传输效率低，无法确保高实时性，同时，不同工艺段之间不同子网之间的传输较难保证实时性。另外虚拟化的灵活资源调度与实时确定性从技术上较难同时保障。工业现场通常处于复杂电磁、振动、腐蚀、高低温等环境中，而新技术带来的变革方案更加复杂，需要在保障与原工控系统可靠性持平的基础上，进一步提升对复杂环境适应性、自诊断自恢复机制、灵活可变的拓扑结构等。

3.2.2 电子设备制造业新型工业控制应用案例

(1) 应用背景

在某 5G 网络设备生产车间，为提高产线生产效率、满足柔性生产的需求以及新品的快速导入量产，对部分产线进行自动化和数智化相结合的升级改造。5G 设备 QCELL 生产自动化测试线实现了基于云化 PLC 的数字孪生改造，并逐步扩展

到相关协作工序，针对智能电批锁付、机器人控制以及机器视觉等操作进行数智化改造，将传统 PLC 从现场侧转移至边侧。

(2) 应用方案

为了能够利旧已有产线、不同生产工艺和制造部门协同开发和调试、运维支撑，项目结合开放自动化系统和数字孪生相结合的架构。

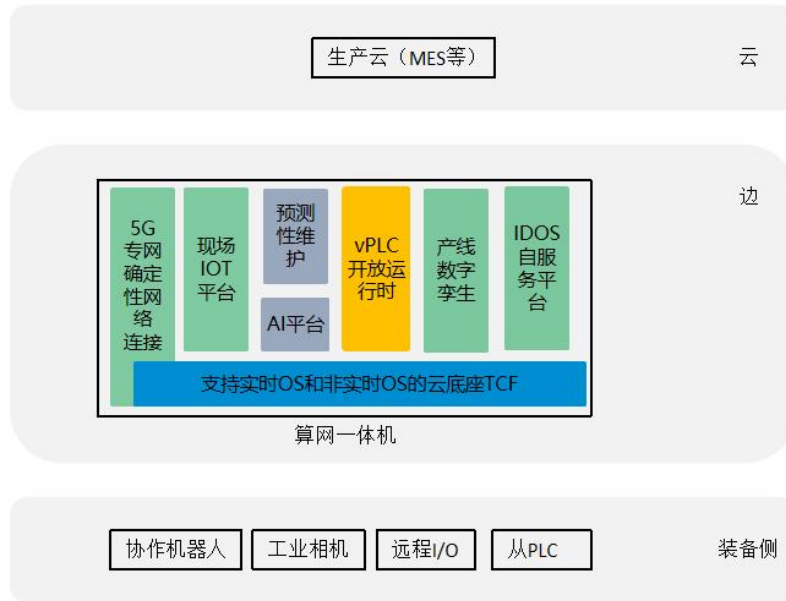


图 3.3 基于开放自动化系统的控制架构

针对产线线边工业环境部署算网一体机设备，可提供高集成度 5G 专网能力、基于 TSN 的内生确定性网络能力等。其中对算力集成进行特殊设计，包括满足开发自动化运行的实时 OS，其他非实时 OS 的云底座 TCF 平台，在平台上可集成多种产线线边必备工业应用，联合专业 OT 自动化厂家部署的 vPLC 虚拟化控制，同时部署中兴数字星云 inOne 功能优化现场 IoT 数据采集并面向现场生产制造部门运管的企业自服务平台 IDOS，基于工业产线 3D 可视、工业模型化的产线数字孪生系统；

在车间现场部署的极简 5G 现场网算网一体机，将原先产线的 PLC 控制进行集中云化（vPLC）改造。这是利用虚拟化控制，部署多个 vPLC 实例，实例之间实现资源隔离，可对多个螺钉机机台的控制。通过专建 10ms@99.99%量级确定性网络 5G 核心网，完成高实时性要求的运动控制以及快速产线锁付，满足当前开放式自动化系统的柔性化改造以及云化 PLC 改造的预期。

此外，通过在车间现场部署的极简 5G 现场网算网一体机，结合数据采集 IOT

平台前置机应用，统一数据和控制流。5G 现场网数据统一获取、联合制造部门统一工艺模型作可组装的 3D 可视化数字孪生模拟实际物理环境。

对现场的开放自动化+数字孪生，辅构虚拟孪生环境，在虚拟孪生环境中可提供新品导入前进行模拟排程、虚拟调试等功能。模拟验证通过后，再同步部署 vPLC 开放自动化控制到实际物理孪生环境。



图 3.4 云化 PLC 整机测试线

(3) 应用成效

结合开放式自动化系统实现了螺钉机产线柔性产线改造，解决了在柔性改造过程中硬件设备交付、接线、调试、运维等一系列问题。通过虚拟化控制以及云化 PLC 改造的方式，使得柔性产线调整时间相比于传统方式缩短 50%、减少现场运维工程师工作量 40%、柔性产线建设成本降低 30%，从而可以减少停产时间以及降低实施成本。

同时，开放自动化系统结合数字孪生的应用，有效地解决了原先新品导入时，相关产品、工艺、制造部门必须现场人员长期驻守而引发的效率低下等问题。通过提前并行安排虚拟现实环境的试产验证，使产品导入时间直接缩短三个月。此外，项目更为充分地利用原有量产产线，减少量产产线停产时间。此实例可以作为开放式自动化系统以及虚拟化控制的典型案例。

3.2.3 电子设备制造业新型工业控制应用价值

在电子设备制造业的加速发展中，新型工业控制系统的部署与实施正展现出其不可估量的现场应用价值。这一创新举措首先显著降低了对单一自动化控制供应商的依赖，推动了国产工控与自动化技术的替代与集成，不仅增强了供应链

的韧性，还大幅削减了自动化设备的采购与改造成本，为企业降本增效开辟了新路径。

新型工业控制的引入促使工厂自动化工程师更深入地参与到产线的规划与设计之中，通过提升参与度与协作效率，显著缩短了自动化装备的上线周期。从以往动辄数月的调试时间缩短至一个月乃至几周，这一转变极大地加速了生产线的响应速度，提升了整体运营效率。

针对现代工厂对柔性制造的高需求，新型工业控制系统以其卓越的迭代开发能力与快速变更上线的特性，为工厂灵活应对市场变化提供了有力支撑。同时，统一的运维平台简化了传统应用中工艺、质量、生产等多领域工程师的适配流程，降低了对专业运维人员的依赖，使得普通 IT 工程师即可胜任运维工作，有效降低了运维成本，并实现了对生产中断风险的快速响应与解决。

此外，新型工业控制还实现了更为严密的安全管控，通过将原本分散的控制点位与工控机点位统一纳入管理，实施统一的安全策略、接口管控及软件分发，极大地提升了系统的安全防护水平，为电子设备制造工厂的稳定运行保驾护航。综上所述，新型工业控制在电子设备制造业的现场应用，正以前所未有的方式推动着行业的智能化、高效化与安全化发展。

3.3 石油化工行业

石油化工行业是指以石油和天然气为原料，通过物理、化学方法加工生产各种石油产品和化工产品的工业部门。这个行业是全球经济中极其重要的一环，因为它不仅为能源需求提供支持，还生产了广泛的化工产品，这些产品是许多其他工业和消费品的基础。

工业控制系统在石油化工行业中扮演着重要角色，一方面工业控制系统通过测量和调节生产过程参量，保证了生产过程平稳高效和低污染排放；另一方面，工业控制系统在生产过程偏离正常工况可能发生事故的情况下安全停止生产，保障人员和设备安全。

3.3.1 石油化工行业痛点

仪表控制系统一般包括现场测量仪表、控制器、上位机和执行机构。现场仪表测量生产流程状态参量，并且将状态参量信号传送给控制器。控制器根据生产流程状态参量和操作员从上位机发出的指令，计算出控制命令数据。执行机构接

受命令数据，并且采取相应的动作，调整生产流程，保证生产流程的安全平稳。上位机有人机界面、系统编程配置、报警管理、历史数据处理、仪表设备管理和复杂控制等功能。

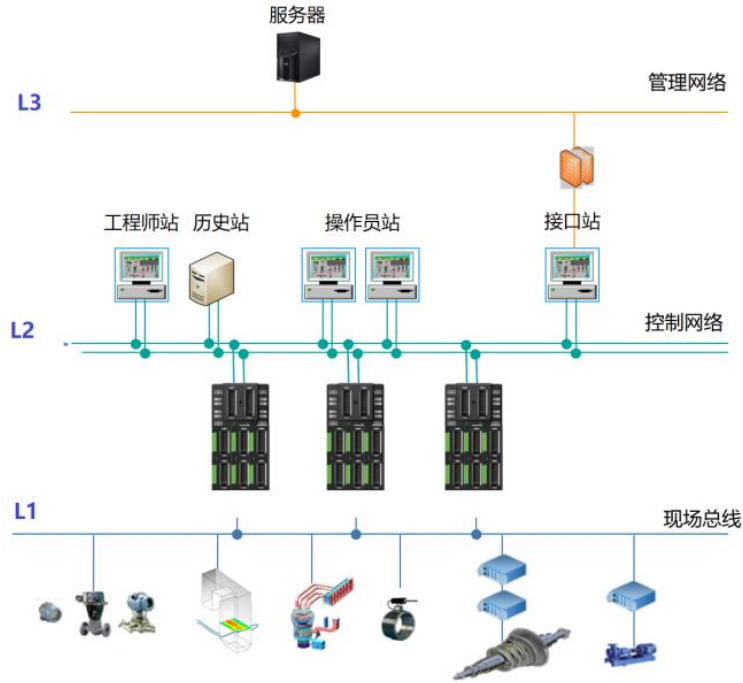


图 3.5 石油化工业仪表控制系统

现场仪表测量参量包括温度、压力、物位、流量、组分等。现场仪表一般由传感器和变送器组成。传感器测量流程参量，将参量转换为电压、电流、电容、电感等一次电信号。变送器通过 A/D 电路将一次电信号变换为数字信号，进一步将数字信号进行计算转换为标准的参量信号，并且通过电缆将参量信号传送到控制系统。不同的仪表采用不同原理的传感器，一次电信号也不尽相同。一次电信号经过处理后，转换为 4-20mA、HART、FF、PROFIBUS PA、MODBUS 等信号，传送到控制器和上位机。执行机构接收控制器发来的控制信号，并且将控制信号转换为机械动作，从而控制工艺装置平稳运行或者在紧急情况下安全停车。执行机构一般为调节阀、开关阀、马达保护器、变频器等设备。

考察目前石化工业控制系统，可以发现存在如下痛点：

(1) 仪表智能化程度低

目前仪表上只有通过低速现场总线上报的简单的配置和报警信息，仪表的其他大量数据难以通过上传。除了仪表测量和控制数据以外，仪表的传感器一次信号、内部运行状态数据对仪表运行维护同样重要。尤其是在仪表发生故障需要维

修的情况下，这些数据对判断仪表故障原因和快速修复仪表有重要作用。目前仪表智能化程度低，不支持大量数据上传。

（2）数据传输效率低

当前仪表设备普遍采用 4-20mA+HART 及现场总线等老旧低速数据传输技术，这些技术在数据传输效率上存在明显瓶颈，严重制约了远程实时数据监控、精准故障诊断及预测性维护等工业控制应用的实现。随着工业互联网规模化应用推进，工厂对数据传输速度、实时性和准确性的要求日益提升，现有技术已难以满足高效管理的需求，迫切需要进行技术升级与优化，以释放更大的生产潜能与效率提升空间。

（3）上位机数据利用率低

当前上位机数据利用率低下，问题主要集中在两个方面：一是数据孤岛现象严重，控制系统的关键控制数据与管理数据均封闭于 DCS 系统中，数据访问权限高度集中且跨厂商间数据互不联通，严重阻碍了数据的流通与共享；二是数据格式缺乏统一标准，缺乏跨生态系统或厂商间的通用数据格式，加之数据缺乏明确的时间戳与位号标识，使得数据难以被有效整合与分析，进而限制了数字孪生、人工智能等先进技术在工业领域的深度应用与发展。

3.3.2 石油化工行业新型工业控制应用案例

（1）应用背景

当前石油化工生产工况类别急剧增加，需要结合装置运行数据识别工况切换的进度，从而确定合适的控制方案。同时，受到生产工况变换影响，全流程多装置的协调控制需要各个装置在多工况下的配合切换，变量间存在优先级冲突，导致传统的协调控制难以跳出局部最优。针对上述问题，某石油化工企业从复杂工况自主识别和全流程全工况智能控制系统等方面进行了持续的研发和产业化，成功研发了复杂化工过程全工况自主优化运行关键技术，形成了智能动态优化控制系统和零手动操作系统等新型工业控制系统。

（2）应用方案

复杂化工过程全工况自主优化运行关键技术包括基于多模态特征融合的复杂化工过程工况智能自主识别技术、基于数据和模型混合驱动的多稳态工况全流

程协同优化控制技术、基于“调度-控制”双层结构的化工过程全工况“零手动”操作运行技术，具体如下图所示：



图 3.6 基于“调度-控制”双层结构的化工过程全工况“零手动”技术方案

基于复杂化工过程全工况自主优化运行关键技术研发的智能动态优化控制系统是实现石油化工复杂装置大规模控制器设计、运行、维护全周期闭环优化的新一代先进控制系统，其功能架构图如下所示：

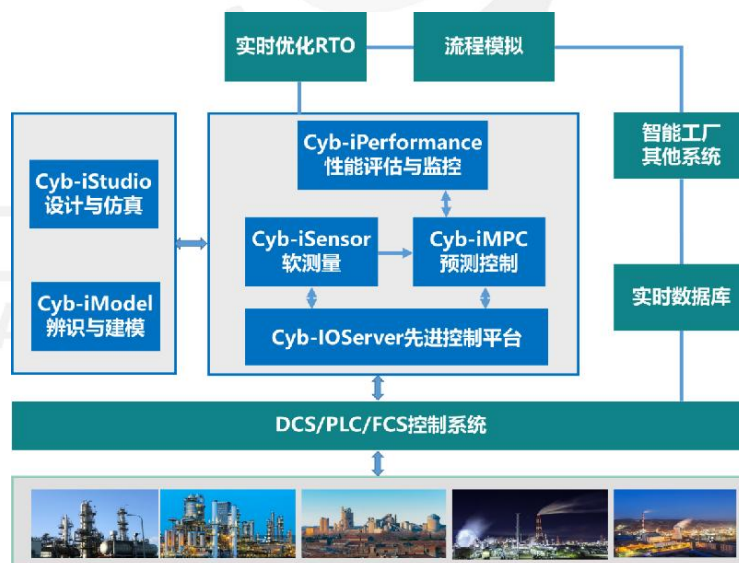


图 3.7 智能动态优化控制系统

IDPC 自动采集石油化工装置运行数据，驱动新一代智能动态优化控制算法，给出石油化工装置全流程、多工况下的最优控制方案，自动下达控制指令，实现石油化工装置在多个工况变化情况下的自主优化运行。在设计阶段，IDPC 基于自主的数据模态分析和闭环系统辨识技术，可以基于历史数据建立系统模型，实现在线闭环测试；在运行阶段，IDPC 内置多变量回路自学习性能评估算法，可

以自动给出先进控制器运行质量的评估结果；在运维阶段，IDPC 结合控制器性能评估结果，基于控制器在线诊断序列生成技术，实现装置回路自动测试和模型优化更新，从而支撑在线运维，提高系统的使用寿命和效果。

基于复杂化工过程全工况自主优化运行关键技术研发的零手动操作系统是国内首创产品，其深度集成了 PID 性能评估与自整定、智能动态优化控制、一键自动启停、自动升降负荷、生产工况智能识别、异常智能语音预警、设备异常在线诊断等智能应用，可以自动采集石油化工装置运行数据，驱动全工况自主优化运行系列算法，给出石油化工装置在开停车、大范围负荷调整、牌号切换等宽范围多工况下的最优控制方案，自动下达控制指令，实现化工生产装置全流程、全工况零手动操作和自主优化运行。

(3) 应用成效

智能动态优化控制系统和零手动操作系统等新型工业控制系统在多个石油和化工企业的 300 多套装置上成功应用，取得了显著的经济效益和社会效益。具体成效包括：

1) 关键被控参数控制性能提高30%以上；

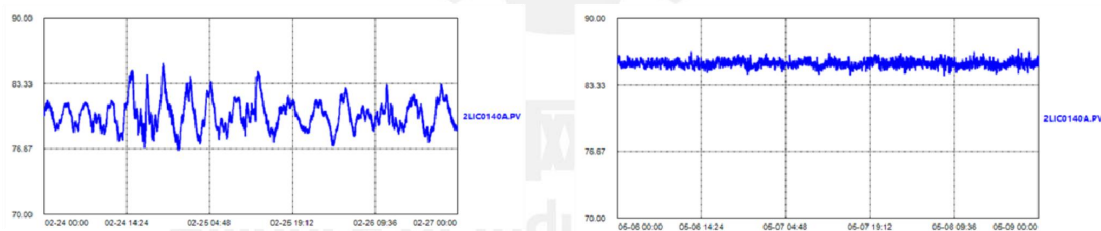


图 3.8 IDPC 和零手动投用前后关键参数控制效果对比

2) 操作人员劳动强度降低70%以上，减员50%以上，代替人脑，实现零手动操作；



图 3.9 操作人员劳动强度对比

3) 提高了装置的安全性，确保装置安稳长满优运行；

4) 通过卡边操作逼近最优工况，能耗降低2%以上，物耗降低1.5%以上，提高产品产量2%以上，提高产品优等率10%以上。

以某化工企业全产业链化工装置全流程“零手动”操作智能化创新工程为例，在两年时间内完成全部 148 套装置的零手动操作，物耗降低 1.6%，能耗降低 2%，产品不良品率降低 22%，劳动生产率提升 53.26%，员工劳动强度下降 70%，节能降耗效益达 3.2 亿元/年。

3.3.3 石油化工行业新型工业控制应用价值

新型工业控制在石油化工行业的深入应用，不仅革新了传统生产模式，更显著提升了行业的智能化与效率水平。首先，实现现场仪表的全面智能化，极大地增强了设备监测与诊断能力。智能化仪表能够实时捕捉设备运行状态的细微变化，配合高速数据传输技术，实现了远程诊断和预测性维护的精准实施。不仅有效提高了设备的运行稳定性和可靠性，还大幅减少了因非计划停车造成的生产损失，为石油化工行业的连续稳定生产提供了坚实保障。

同时，新型工业控制的引入还推动了生产过程的深度优化。依托机理模型与 AI 大模型的深度融合，构建出精准高效的工艺优化体系。一方面，基于精细的机理模型，构建出详尽的反应网络，为工艺参数的动态调整提供了科学依据；另一方面，AI 技术的加入，极大地提升了系统对复杂工况变化的响应速度和应对能力，有效降低了数据波动与噪声干扰的影响，实现了跨厂、跨装置的泛化协同与智能决策。上述系列优化措施，不仅显著提升了产品质量和生产效率，还促进了能源的高效利用与节能减排，助力石油化工行业向绿色、低碳、可持续的方向转型升级。

3.4 新能源行业

新能源行业是一个快速发展的领域，涵盖了多种新型能源形式及其相关产业链。主要包括：风能、光能、生物质能、地热能、核能等。近年来，全球新能源行业快速发展，市场规模不断扩大。中国作为全球最大的新能源市场之一，在风电、光伏等领域取得了显著成就。同时，新能源汽车、储能技术等新兴领域也呈现出强劲的发展势头。

3.4.1 新能源行业痛点

控制系统在新能源行业具有重要作用。由于在不同能源形式的生产场景差异较大，以风能、新能源电池生产为例，风能控制系统的场景主要包括风力电机控制和风场管理控制。风力电机控制场景包括塔内的轮毂控制、机舱环控、塔底控制等，普遍需要通过高精度的传感器和执行机构，实现对风力发电机组各部件的精准控制，如叶片的变桨角度、发电机的转速和功率等，以确保机组在复杂多变的风况下仍能稳定高效运行。风场管理控制包括风能控制，风能控制系统需要能够根据风速、风向等气象条件以及机组的运行状态，实时调整控制策略，确保风力发电机组始终运行在最佳状态，从而最大限度地捕获风能，提高发电效率。

新能源电池生产特别是锂电池的生产流程，是一个复杂且精细的过程。主要场景包括：原材料制备、电极制备、电芯组装、注液充电、模组组装等。其中锂电前工序类似精密化工，具有流程工业特性，后工序类似离散制造，因而对控制系统的精密性、自动化水平具有较高要求。

新能源行业对新型工业控制需求包括：

(1) 通信与控制集成需求

以风能为例，由于风机处于野外环境，风能控制系统应支持远程监控功能，通过光纤、以太网、5G 等通信手段将机组的运行数据实时传输至主控室或远程监控中心，实现对整个风电场的集中监控和管理。以新能源电池生产为例，由于工序长、移动设备多、产线距离远，需要 5G 等广域无线网络提供大速率、高可靠连接实现数据回传、告警、生产协同。

(2) 安全保护和故障预测需求

以风能为例，系统应设计有完善的安全保护机制，如紧急停机、过载保护、短路保护等，以确保在机组出现严重故障或异常情况时能够迅速切断电源，保护机组和人员安全。风能控制系统应具备强大的故障检测和预警功能，能够实时监测机组的运行状态，及时发现并预警潜在故障，避免故障扩大对机组造成损害。

3.4.2 新能源行业新型工业控制应用案例

(1) 应用背景

动力电池作为新能源行业的核心部件，由众多精密电池模组通过复杂工序组

装而成，需要依赖高度的自动化流程，而传统软硬一体化 PLC 控制解决方案，在新能源动力电池组装中面临难以与 IT 系统对接、有线网络局限性限制难以快速响应时长需求变化等问题，而通过引入算网控一体化网关系统，可以有效解决上述问题。

（2）应用方案

在新能源行业的产线升级中，创新性地引入了 5G 虚拟化工业控制网关，实现了对传统 PLC 与数据采集网关的双重替代与整合，核心优势在于其高度集成的“二合一”设计，不仅作为智能 PLC 直接控制机械臂、拧紧枪、摄像头等关键设备，精准执行如电池模组标签识别、机械臂精准定位、拧紧枪稳固锁紧等自动化作业，还同时担当起工业网关的角色，依托 5G 高速网络，无缝采集关键生产参数并实时上传至部署于 5G 边缘的集成信息系统。



图 3.10 电池模组自动化组装

通过在工业网关内部署先进的虚拟化工控系统，实现了“5G 连接+边缘计算+PLC 控制”的深度融合，不仅简化了控制架构，降低了总体工控成本，支持灵活的资源配置与动态扩展，充分满足新能源行业快速变化的生产需求。相较于传统的 PLC 与数据采集网关组合方案，显著解决了成本高企、供应链风险大、系统层级冗余复杂及部署灵活性不足等问题，应用效果明显。

具体生产流程中，当 AGV 小车装载着电池模组进入组装区域时，虚拟化控制器即刻通过 Profinet 协议精准控制气缸动作，稳固夹持小车。同时，控制器利用 Modbus 协议与 HMI（人机界面）建立高效通信，迅速响应并执行来自 HMI 的

工作指令。随后，控制器无缝衔接拧紧枪等作业设备，精准完成电池模组的组装任务。在此过程中，控制器还通过 DI/DO 等丰富接口，精细管理照明系统、激光雷达、急停按钮等现场外设，确保生产安全与效率。

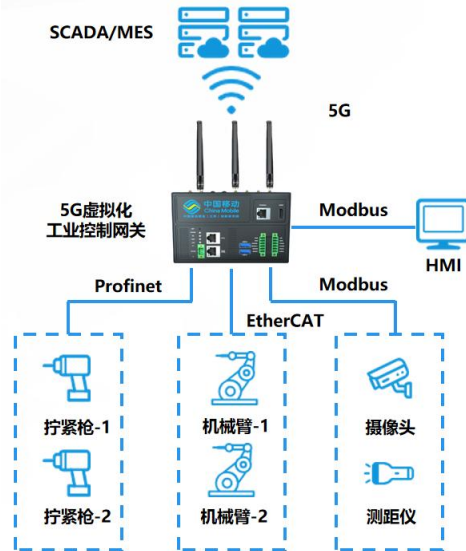


图 3.11 基于虚拟化工控的电池模组自动化组装架构

尤为值得一提的是，在生产作业的同时，虚拟化控制器依托 5G 网络的低时延、高带宽特性，实时向信息系统回传详尽的作业数据，包括但不限于气缸工作循环次数、当前拧紧枪的工作序列号等关键信息，为生产管理与优化决策提供了坚实的数据支撑。这一系列创新实践，不仅提升了新能源动力电池产线的自动化与智能化水平，更为行业的可持续发展注入了强劲动力。

（3）应用成效

经过严格的生产验证，部署的虚拟化控制器展现出了较高性能与兼容性。该系统全面支持多种工业以太网通信协议，可应对复杂多变的工业环境，同时提供超过 300 个 I/O 点位，充分满足大规模生产线的精细控制需求。同时，系统能够高效处理多个 PLC 任务并行执行的情况，其中拧紧枪控制任务实现了最小 10ms 的工控周期，确保了高速生产下的精准控制与稳定运行，可靠性得到了充分验证。

通过将虚拟化工控系统直接集成于 5G 工业网关中，实现了对传统 PLC 与独立 5G 数据网关方案的颠覆性优化。这一创新设计不仅简化了系统架构，减少了设备数量与布线复杂度，更在成本控制上取得了显著成效。相比传统的 PLC+5G 数据网关组合方案，总体成本实现了约 50% 的大幅降低，为新能源企业带来了显著的经济效益。

3.4.3 新能源行业新型工业控制应用价值

一方面，新能源行业作为新兴产业，为新型工业控制提供了良好的应用空间。另一方面，由于大量的 OICT 新技术的应用，新能源行业呈现工业控制与 ICT 技术快速融合的趋势。其中，控制与通信的融合给新能源生产带来广域、扁平的无线网络，数据采集、远程连接、无线控制等业务大量普及。控制与计算的融合为生产现场提供了控制与计算融合设备，提升生产自动化同时，推动 AI 质检、边缘计算等新兴业务的发展。



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

第 4 章 新型工业控制产业洞察

4.1 新型工业控制产业组织活跃度不断提升

全球各主要国家和地区各产业联盟、标准组织正在加紧布局新型工业控制方向，构建产业新生态。

国际电工委员会、开放流程自动化论坛、国际过程工业自动化用户协会组织等以标准先行，重点布局工业控制系统、组态及应用移植等开放自动化标准。国际电工委员会（IEC）在 2005 年第一次发布 IEC 61499 系列标准定义了开放自动化系统的可执行建模语言，适用于功能封装、基于图形化组件的设计、事件驱动执行和自动化应用程序的分发和部署。开放流程自动化（OPA）持续发布开放自动化标准 O-PAS 及应用指南，以实现工控系统的互操作性、互换性、组态的移植性和应用程序的移植性为目标。国际过程工业自动化用户协会（NUMUR）于 2020 年正式发布 NE175 NOA 原型系列文件，解决在工业自动化领域中，不同厂商的设备之间存在不兼容的问题，主要聚焦对现有方法改进，在不影响现有系统的可用性和安全性，通过开放式数据架构实现系统监控和优化。

5G 互联产业与自动化联盟、开放自动化国际组织、工业互联网产业联盟等组织积极推动测试床工作，组织成员单位合作建设 5G、边缘计算等技术与工业控制融合验证测试床，促进跨领域合作。5G 互联产业与自动化联盟（5G-ACIA）开启面向工业自动化确定性 5G uRLLC 测试床，首次对用于工业自动化的 5G uRLLC 性能参数进行探索。开放自动化国际组织（UAO）在 2022 年发布其第一个测试床 demo，实现了来自不同供应商的产品间基于 IEC-61499 的开放性互操作，通过这种新型 PLC 编译开发平台提供互操作性、可配置性、便携性、复用性等新特性。工业互联网产业联盟（AII）2023 年启动“新型工控启航行动”，旨在推动新型工业控制技术创新发展，促进产业生态建设。2024 年发布新型工业控制测试床，国内首次基于统一的算、网、控一体化底座技术，实现跨厂家、跨编程标准的虚拟化工业控制器间的互联、互通，并创新性地引入基于共享内存的虚拟化控制器间通信机制，使控制指令、视觉采集数据的高效流转，实现对产线的分工协同控制。

4.2 基于 5G 的算网控一体化成为工业控制新业态

工业控制领域正从网络、计算与控制三大要素互不关联，逐步向算网控一体化的方向迈进。在这一趋势下，工业网络内的动态计算资源实现高效互联，共同构建起强大的工业算力底座，为控制功能的软件化部署提供了强有力的支撑和灵活的承载平台。

基础电信运营商以 5G 基础设施为契机，探索融合应用模式。中国联通推出 5G 云化工业控制系统，基于 5G 网络技术与新一代工控技术的融合创新，构建了整套 5G 智能化工业控制体系。其中控制器、组态套件、协议网关均实现了 5G 云化，并通过高实时虚拟化操作系统同平台承载 PLC、DCS 及智能业务应用，在钢铁、电子、装备、家电等行业的已落地典型应用，稳定支撑生产环节，大幅提高企业生产效率；中国电信推出基于 5G 的云化 PLC 控制系统，以 5G 云网能力为基础的分布式部署工业控制系统，实现跨硬件设备、跨操作系统的工业软件统一编程、部署、测试与管理，通过系统的实施，简化体系架构。

信息通信设备厂商以信息通信技术为抓手深入布局。中兴通讯针对现场工控场景，推出了基于 5G 网络的算网平台底座，支持多家生态伙伴的虚拟化 PLC 部署和编排，实现了算网控一体化解决方案。算网平台底座包括集成算力的面向端侧的 5G 工业网关，以及面向边侧的 NodeEngine 算力基站和 UniEngine 算网一体机方案，实现了 5G 核心网、无线网、算力引擎、业务运维的合一部署。通过虚拟化 PLC 边端灵活部署的一体化设备，可以减少现场设备，提升可靠性。

工业自动化厂商着重自身优势产品及解决方案与 5G 技术的结合，深入应用实践。西门子自成体系地布局工业 5G，深耕自有品牌的 5G 产品组合，通过 5G 网络承载工业控制系统和工业现场 I/O 模块的 PROFINET RT 通信，其 5G 路由器目前在欧美实现规模化量产，并已迅速形成产业生态；东土推出工业控制操作系统 Intewell，融合 PLC 系统与 IPC 系统的架构优势，实现软件定义控制。

4.3 开放化工业控制成为产业发展共识

软硬件解耦使低成本的通用设备可集成先进的自动化控制系统，并使终端用户可自由在不同品牌和产品间选型，而不受软硬件迁移成本的限制，目前已在工业自动化厂商中达成共识。

西门子在汉诺威展发布的虚拟化 PLC 方案 SIMATIC S7-1500v，可将 PLC 功

能容器化部署于其工业边缘平台从而实现软硬件解耦合，希望通过开放化获取更高市场份额扩大垄断规模；施耐德打造基于 IEC61499 的工控新底座 EcoStructure 开放自动化平台，支持 PLC 功能的硬件兼容和虚拟化分布式部署，以推动开放自动化为抓手重塑工控市场格局；英特尔发布基于通用 x86 硬件架构的工业边缘控制平台，通过打造实时虚拟化控制平台实现分布式节点架构，以软硬件解耦的虚拟化工控底座产品为切入工业领域。

4.4 人工智能与工业控制加速结合

工业自动化厂商正布局智能化工业控制，通过集成人工智能技术的控制系统，并作为边缘设备连入云，使控制系统扩展为智能化、连通性的新型控制系统，保障实时性同时可承载更多的数据智能分析处理功能，不断重塑生产流程与管理模式。

欧姆龙 AI 控制器在工业生产流水线加入 Think 算法，基于实时数据自主做出响应，实现机器人的柔性搬送和自主学习能力；罗克韦尔推出了 LogixAI 人工智能模块，通过内嵌的运算模型向控制程序学习，可对系统运行过程中异常情况进行预测分析，通过集成基础级的工业智能应用，强化 PLC 的运算能力以应对工业现场的智能化需求，从而提升用户粘性；横河电机推出基于强化学习的边缘控制产品，通过强化学习人工智能算法创建工业控制模型，以优化工厂中超出 PID 控制和 APC 控制覆盖的人工干预领域；浙江中控出全流程智能运行管理与控制系统 i-MOC 系统，深度融合智能算法、专家经验和工艺机理知识，将自主研发的回路自整定、预测控制全面应用，通过海量运行数据的 AI 智能分析，实现工业装置智能决策，提升大幅降低装置操作频次，实现装置生产全过程的自主协同运行。

另外，生成式人工智能正在工业控制领域深度应用，通过自然语言输入自动编写/生产代码，提升工程实施效率。工业自动化巨头厂商分别与 AI 厂商深度合作，快速布局模块化设计及生成式人工智能方向，已发布众多前沿解决方案，但推广应用方面尚需时日。西门子、施耐德、倍福、贝加莱等分别与微软合作发布用于工业控制的生成式 AI 工具，自动化工程师可通过自然语言输入生成包括应用程序架构、从相关库创建资产、PLC 代码/文档/测试用例等来显著减少时间和错误率。

第5章 发展建议

新型工业控制体系致力于打造以开放、标准、统一的智能计算+控制为核心的全栈融合技术框架，而当前发展正面临技术指标差距、应用积累不足、产业路径分散等问题。在技术方面，新型工业控制软硬解耦和算网控集成等理念为工厂提供了全新高效的控制解决方案，但在面向工业严苛的实时性、可靠性指标要求上与传统工业控制系统仍存在差距；在应用方面，新型工业控制技术未经受长期稳定的应用考验，终端用户对新型工业控制在保障稳定生产和保护现有投资等方面仍存顾虑；在产业方面，主体厂商各自选择不同路径发力，尚未建立产业链上下游深层次合作机制，产业碎片化现象存在。为推动新型工业控制规模化应用与产业化进程，建议产业各方从以下三个方面协同推进：

一是加速技术攻关。面向新型工业控制技术演进趋势分领域展开集智攻关，聚焦关键场景业务需求，重点关注实时虚拟化、开放自动化、5G云化控制等关键技术领域的基础理论攻关及研发投入，完善新型工业控制标准体系，制定核心设备、测试规范、应用指南等重点标准，筑牢新型工业控制应用基础。加速市场优势向技术创新优势转化，依托当前数字化转型需求旺盛特点，以应用侧拉动供给侧创新投入。

二是扩大应用规模。紧抓工业设备更新改造契机，充分发挥我国工业应用场景丰富的空间优势，精准把握终端用户对新型工业控制的实际需求，面向新型工业控制统一底座特点，围绕工业控制通用硬件产品、工业控制应用商店研发模块化、可灵活配置的解决方案，各行业龙头企业在重点行业树立可复制、可推广的典型应用案例，利用测试床、试制线等形式加速技术成果的转化与应用。

三是加强产业协作。充分发挥产业联盟组织的汇聚能力，推动设备供应商、基础电信厂商、工业企业等多方力量共同构建新型工业控制产业生态，推动产业链上下游主体面向解决方案、生态构建等层面的深层次合作，搭建新型工业控制生态合作适配验证平台，建立厂商间软硬件、应用服务交叉适配，探索“联合交付+应用分成”等权责清晰的新型服务形式，建立新型工业控制认证机制与产品名录，加速产品化与规模化应用进程。

参考文献

- [1] 中国移动通信研究院. 面向新型工业化的全无线工控技术白皮书[R], 2024
- [2] 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所&施耐德电气(中国)有限公司. 开放自动化白皮书[R], 2021
- [3] 彭瑜. 流程工业开放自动化的重要发展趋势(上)[J]. 今日制造与升级, 2019(03):24-25.
- [4] 彭瑜. 流程工业开放自动化的重要发展趋势(下)[J]. 今日制造与升级, 2019(04):26-27.
- [5] 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所&施耐德电气(中国)有限公司. 开放自动化白皮书[R], 2021
- [6] 工业互联网产业联盟. 工业智能白皮书[R], 2020
- [7] 西门子(中国)有限公司. 西门子工业 5G 全连接工厂白皮书[R], 2023
- [8] 王哲. 边缘计算发展现状与趋势展望[J]. 中国信息通信研究院, 2021
- [9] 工业互联网产业联盟. TSN 解决方案白皮书[R], 2022
- [10] 工业和信息化部装备工业发展中心&华为技术有限公司. 面向智能化时代的新一代工业控制体系架构白皮书[R], 2022

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