基于 5G 多接入边缘计算的云化 PLC 系统架构设计与应用

冯毅雄[1)], 杨晨[1,2)], 胡炳涛[1)*], 赖颢善[2)], 石莹[3)], 宋光敏[2)], 汪勇[1)], 谭建荣[1)]

[1)] (浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)
[2)] (联通(浙江)产业互联网有限公司 杭州 311199)
[3)] (浙江中控技术股份有限公司 杭州 310053)
(hubingtao@zju.edu.cn)

摘 要: 随着工业控制系统对柔性化、扁平化的要求不断提升, 以 PLC 为构建基础的传统工业控制网络在大规模接入、算力提升和部署灵活性方面均受到限制. 针对这些问题, 融合 5G 网络和边缘计算技术, 设计了基于 5G 多接入边缘计算的云化 PLC 系统架构, 阐述了该架构的运行机制和所涉及的关键技术; 在此基础上, 进行 PLC 系统的云化部署和调试, 实现了工业现场、企业数据中心、5G 网络和边缘网络的集成; 最后, 通过在某汽车制造公司产线改造过程中的应用, 验证了所提架构的有效性.

关键词: 5G; 边缘计算; 云化 PLC(可编程逻辑控制器); 架构设计
中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2024.19844

Architecture Design and Application of Cloud PLC System Based on 5G and Multi-Access Edge Computing

Feng Yixiong[1)], Yang Chen[1,2)], Hu Bingtao[1)*], Lai Haoshan[2)], Shi Ying[3)], Song Guangmin[2)], Wang Yong[1)], and Tan Jianrong[1)]

[1)] (*State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou* 310027)
[2)] (*China Unicom (Zhejiang) Industrial Internet Co., Ltd., Hangzhou* 311199)
[2)] (*Zhejiang Supcon Technology Co., Ltd., Hangzhou* 310053)

Abstract: With the continuous improvement of the requirements for flexibility and flattening of industrial control systems, the traditional industrial control network based on PLC is limited in the aspects of large-scale access, computing power enhancement and deployment flexibility. To address these problems, a cloud PLC system architecture based on 5G and multi-access edge computing was designed by integrating 5G network and edge computing technology, and the operating mechanism and key technologies involved were expounded. This architecture can make full use of the fast and stable data transmission capabilities of 5G networks and data processing capabilities of edge technologies to improve the security of data storage and transmission; On this basis, the cloud deployment and debugging of PLC systems can be realized, and thus the integration of enterprise data centers, 5G networks and edge networks is achieved; Finally, the validity of the proposed architecture is verified through the application in the production line upgrade project of an automobile manufacturing company.

Key words: 5G; edge computing; cloud programmable logic controller; system architecture design

收稿日期: 2022-07-17; 修回日期: 2022-12-28. **基金项目**: 国家重点研发计划(2019YFB1705000). **冯毅雄**(1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工智能、智能制造; **杨晨**(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为工业控制、智能制造; **胡炳涛**(1992—), 男, 博士, 论文通信作者, 主要研究方向为大数据分析、智能制造; **赖颢善**(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为工业控制、通信技术; **石莹**(1982—), 男, 学士, 副总工程师, 主要研究方向为智能制造; **宋光敏**(1981—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为 5G 网络; **汪勇**(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为工业控制; **谭建荣**(1954—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究方向为机械设计、智能制造.

控制系统是制造业生产过程中的运行中枢和安全壁垒，在全工艺流程的监测、控制和优化，以及保障产品质量等方面均发挥着重要作用，同时也是重大工程与装备安全运行不可或缺的关键组成部分[1-2]. 其中，可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)是控制系统的核心. 随着控制系统及 PLC 技术的不断完善与发展，其在工业互联网(industrial internet of things, IIoT)[3]、智能控制[4]、云制造[5]等领域的应用更加深入和广泛.

然而，随着工业控制系统向柔性化、扁平化方向的不断发展, PLC 在数据容量、程序容量和下挂设备数量方面的局限，已成为限制工业系统灵活性和扩展性的核心因素[6]. 传统工业控制网络解决这一问题的主要方法是增加 PLC 数量，并采用分布式部署的方法. 但这会显著增加用户采购成本和运维成本，而且硬件机柜体积成倍数增加、发生故障时难以及时定位，会增加网络复杂度，加大组态编程和调试工作量. 基于 5G 多接入边缘计算的控制技术为解决这些问题提供了新的途径. 5G 作为工业互联网络技术的发展方向之一，能够提供 10 倍于 4G 的峰值速率及用户体验速率、百万的连接数以及超低的空口时延[7]，不仅能够支持以用户为中心、垂直行业的工业信息系统，更能打造从线上到线下、从消费到生产、从企业到平台的全方位工业生态.

为推动工业控制系统加速高性能转变，构建支持算法程序灵活部署、快速执行的开放自动化平台，使企业能够在更大范围内实现控制逻辑的调度与优化，国内外专家学者对 5G 在工业互联网场景下的应用进行了大量研究. Rao 等[8]回顾了工业 4.0 的发展历程，认为 5G 技术能够与物联网、增材制造、机器人等技术集成，是“未来工厂”的关键推动技术. Sharma 等[9]对基于 5G 开发的工业互联网设备安全应用进行了全面综述，并评估了 5G、区块链和边缘计算等新兴技术在工业智能当中的应用前景. 陈晓江等[10]改进了云服务中传统集中器的设计，融合边缘计算功能提高了集中器的嵌入式和模块化水平. Khoshnevisan 等[11]针对工业车间自动化互联网络的端到端设计，提出了一种基于 5G 的时间敏感工业网络，并采用协调多点通信的技术提高传输可靠性. Lyu 等[12]提出了一种基于 5G 的分层传输估计方法，以提高工业物联网的传输可靠性和估计精度. 夏元清等[13]研究了面向智能电控的云控制系统，提出应当灵活应用 5G, WiFi 和线缆等多种连接方式构建边缘-转动安全管控系统. Ji 等[14]关注 5G 技术的安全性问题，总结了 5G 安全架构的发展趋势，以及物理层安全、轻量级加密和用户隐私保护等方面的研究进展. 此外，工业控制系统在智能制造环境下的应用也受到了大量关注. Wang 等[15]提出通过移动边缘计算为传感器网络提供所需的计算资源和存储空间，并通过智能服务布局算法寻找到全局最优协同卸载方法. 屈挺等[16-17]研究了物联网环境下高动态生产系统的优化运行方式，提出以物联网驱动企业和车间级的动态联动调度控制，并总结出了“理论优态-实际优态-实际状态”的动态控制机制. Gavlas 等[18]针对利用云平台对 PLC 远程控制 IIoT 设备进行了研究，实现了实验室级别的物联网机电一体化任务. Vadi 等[19]研究了 PLC 与过程现场总线的通信融合方式，无需加装额外传感器就可以通过变频器获得感应电机参数，避免了线缆与电子卡的混淆. 王佰玲等[20]综述了工业控制系统的安全仿真关键技术，认为 PLC 设备的虚拟化是控制设备虚拟化的重要组成部分，其虚拟化效果直接影响全系统的可靠性.

虽然 5G 技术及以其为基础的工业控制系统在工业互联和智能制造场景下应用前景十分广阔，但目前的理论研究距离实际应用仍有一定差距. 特别是在智能制造过程中，云平台与工厂生产设备的即时通信、工业控制器及系统对底层设备的实时稳定控制，以及在海量传感器和人工智能平台之间的人机交互、数据传递、资源匹配与调度等[21-22]，均对通信网络提出了苛刻的性能要求. 在实际应用中，作为工业控制系统核心组件的 PLC 尚未发生进一步的技术变革，主要表现在以下几个方面:

(1) PLC 数据容量、程序容量及下挂设备数量有限. 目前，大量的 PLC 程序容量低于 100 KB，数据容量也只有几十 KB，I/O 规模集中在 500~1 000 点，不利于分布式开放自动化的发展. 当控制场景的下挂需求较高时，通过增加 PLC 数量，采用多 PLC 分布式部署的方式，会显著增加场景中设备的购置、部署和维护成本，并造成网络复杂度的提升，增加组态编程与调试的工作量.

(2) 部署复杂及集中管理困难问题. 传统控制以有线网络为主的大规模部署，在某些工艺环节或设备布置方面缺乏柔性，对柔性生产具有极大的约束性. 同时，在对控制及网络相关设备进行调

试及维护等工作中, 由于缺乏远程集中控制的管理模式, 且在传统生产场景下存在设备数量多、布置分散等特点, 管理人员需要在不同位置对每一台设备进行手动配置或导入配置, 极大影响了设备部署及管理的效率, 也大大增加了人力成本.

(3) 控制系统网络化融合问题. 由不同厂商设计制造出来的各种 PLC 控制器设备拥有不同类型的通信协议, 造成主系统与各子系统间可能无法进行直接通信[23]. 而智能制造面临的大量柔性生产场景还要求 PLC 系统能够根据自身信道状态、网络负载状态等自主选择协议参数和功能, 从而提高系统整体的稳健性和适应性. 同时, 智能制造进程中, 工厂对数据的实时性、逻辑代码可复用性, 以及系统的模块化和可扩展性提出明确需求, 但目前 PLC 厂家协议不统一、开放性不足和无法自主选择协议、场景与优选设备进行绑定等适应性问题均已不满足智能制造要求, 阻碍了工业智能化水平的提升.

(4) 数据大规模联接及算力有限. 大多数制造企业在实现数字化转型的进程中, 会新增大量的实时数据采集, 原本局限于关键工艺数据的数据采集工作, 现在已经扩展到监控、诊断、能耗等产品全生命周期, 数据类型也由数值型增加到视觉、振动等多模态类型. 同时, 随着黑灯工厂、人工智能(artificial intelligence, AI)机器视觉、无人巡检等场景的丰富, 现有工业控制体系算力存在明显不足, 导致人工智能、大数据等创新技术难以赋能生产, 需提供高性能算力实现智能化控制, 这对常规 PLC 系统及控制网络提出了更高要求.

针对上述问题, PLC 系统的云化是一个潜在的有效技术手段. 云化 PLC 是将常规的专用 PLC 硬件进行功能解耦, 利用软件化的方式对控制系统进行架构构建和参数配置, 并对相应及组态套件进行软件化定义, 通过操作技术(operation technology, OT)和信息技术(information technology, IT)的融合, 实现 PLC 的软件化和智能化部署. 近年来, 云计算和边缘计算理念与相关技术的出现推动了多个领域产品与解决方案的发展[24-27], 但与传统 PLC 系统的结合还处在探索阶段. 基于上述考虑, 本文融合 5G 无线通信技术和边缘计算技术, 在总结 5G 边缘计算内涵的基础上, 提出了基于 5G 多接入边缘计算的云化 PLC 系统架构, 阐述了该架构的运行机制与关键技术, 并给出了一个系统实施案例, 为推动制造企业数字化与智能化转型、促进工业控制系统发展提供了可参考的解决方案.

1　基于 5G 多接入边缘计算的云化 PLC 技术的提出

1.1　5G 多接入边缘计算技术的内涵

5G 无线通信技术及边缘计算技术的出现为工业控制系统部署广域化、灵活化和高性能化提供了有效途径. 基于 5G 的多接入边缘计算(multi-access edge computing, MEC)能够将两者结合, 有效利用 5G 传输快速、稳定的优势, 在边缘节点提供用户所需服务环境和计算能力, 实现应用、服务的本地化以及各类控制器的分布式部署.

MEC 的基本思想主要是在核心网络的内部将计算平台节点进行迁移, 使计算节点下沉至边缘设备侧, 从而更加接近现场的设备, 并且可以通过在工业网络现场侧部署大量具有数据运算、存储、通信交换等功能的边缘节点, 为大量边缘设备节点提供了接入工业互联网的便利条件, 进而可以为终端用户提供带宽更高、时延更低、运算更快的数据服务, 并大大减轻核心网的网络负荷; 同时可依托 MEC 将外部应用接入移动网络内部, 使得内容和服务更贴近使用终端, 从而改善服务质量. 基于 5G 的 MEC 是构建在网络边缘基础设施之上的云平台, 可以有效地降低工业制造等控制场景下的传输时延、提升设备边缘侧的计算效率, 融合增强通信技术(communication technology, CT)增值服务、IT 增值服务能力以及平台应用能力, 可提供“开放、联动、弹性”的融合服务.

1.2　基于 5G MEC 的云化 PLC 技术优势

传统基于 PLC 的大型控制系统本身已经是一个分布式的计算系统, 但这种分布式仍基于现场总线和局域网, 本文已在前言部分总结了其局限性. 本文提出以 5G MEC 为技术支撑的云化 PLC 技术, 其主要思想是将真实存在的物理 PLC 设备转化为能够通过云端配置和部署的虚拟系统, 该系统能够充分利用云端网络的资源和计算能力, 通过与边缘端的实时通信, 增加系统整体融合性和可靠性.

基于 5G MEC 的云化 PLC 技术优势在于:

(1) 柔性的部署与运维. 基于 5G MEC 的云化 PLC 可利用 5G MEC 平台实现 PLC 的按需部署, 一方面, 通过减少有线网络束缚, 解决传统控制设备数据传输线路复杂的问题, 减少工业现场铺线, 使得随行夹具、机器人、可组合装备等设备更灵活;

另一方面, PLC 软件部分的组态、调试、运维均在云端进行, 可以有效地降低现场多设备、多车间联调难度, 并实现 PLC 系统的快速部署与远程集中管理[28].

(2) 开放的平台与扁平的架构. 5G MEC 为通用式的开发平台, 能够适用于各行业领域, 并支持第三方应用的快速上线, 软件定义的云化 PLC 可以在平台内进行灵活部署、迁移, 同时可以灵活地将不同规格的 PLC 在平台上进行集中云化部署, 并保证企业更换或添加新组件时, 生产、控制设备间的联动不受影响. 另外, 通过工业 5G 一网多业务的综合网络, 替代传统的分层分级网络网, 能够实现扁平化网络架构.

(3) 基于无线控制的低时延高可靠特性. 5G MEC 支持异构硬件组合, 可避免交换架构, 具有高性能、高集成、低功耗等特点. 此外工业控制场景对网络具有确定性需求, 包括时延确定性、带宽确定性以及安全管理的确定性[29]. 基于云化 PLC 数据的无线传输方式, 利用 5G 网络资源构建可预期、可规划、可验证的移动专网, 利用其广连接、低时延的特性, 能够在支持大规模设备接入的同时, 实现云化 PLC 控制信号的大规模低时延高可靠的传输.

(4) 智能化云边协同控制. 5G MEC 的连接将会提供上行监测反馈和下行控制的逻辑闭环, 让现场设备从本地单机变成云边端协同的智能设备, 通过网络资源的动态调整, 保证提供以应用、场景为中心的联接体验[30]. 同时, 云化 PLC 系统在智能化云边协同控制中起到承上启下的作用, 将 PLC 逻辑运算等功能移至云端, 与底层动作执行设备的分离, 实现更丰富的云化智能应用. 利用云平台提供的边缘智能算法资源, 实现上层应用的实时智能化控制, 可实现工艺生产的智能化检测与控制, 从而实现工艺精度的提升以及多工艺的智能协同.

(5) 低成本大算力配置与数据隐私. 基于 5G MEC 架构, 云化 PLC 能够为图形处理器、网络处理器等硬件按需提供加速能力, 使其具备较强的运算性能. 经过实际测试, 云化 PLC 在布尔运算、整数运算、浮点运算、混合运算等方面的性能均远优于中型、大型及高性能 PLC, 可以很好地应对边缘大流量、大数据运算等场景, 避免加装物理 PLC 硬件带来的高成本. 此外, 越来越多的制造企业已经将生产现场的工艺参数、控制参数等重点数据视为企业重要的数字资产, 云化 PLC 能够实现多个信息软件贯通和从订单到机台的端到端等多个维度的数据打通与集成, 同时结合 5G MEC 本地分流技术, 将用户面功能(user plane function, UPF)下沉至运营商边缘机房或用户侧机房, 保证用户生产、控制等核心业务数据不出企业园区, 回流至企业本地, 保证核心业务数据的隐私性.

2 基于 5G MEC 的云化 PLC 系统架构

当前大部分传统工业控制系统仍以 IEC 62264 标准的 5 层系统架构及其变体为主, 即企业层、管理层、操作层、控制层和现场层, 但各层级系统以及同层级不同工业应用系统之间存在数据标准不一致或者不互通的情况, 导致数据难以联动, 大大降低了工业数据的系统价值和应用价值. 因此, 工业控制网络的标准化和扁平化已成为发展的主流趋势. 本文基于 5G MEC 技术提出了云化 PLC 系统架构, 通过对虚拟 PLC 的云化部署, 构建了包含数据交互及执行层、5G 网络传输层、5G 边缘控制层和工业应用层的开放式工业控制与应用系统网络(如图 1 所示), 支持智能制造过程基于数据驱动的柔性化生产, 提高工业控制系统部署效率和灵活性.

相较于传统的 5 层系统架构, 本文所构建的 OT 和 IT 的扁平化 4 层系统架构的优势在于: 原有的 5 层架构通过网关实现了工业设备之间的互相连接, 实现网络联接与控制逻辑之间的解耦, 同时打通了自上而下的数据流. 然而基于有线网络实现扁平化架构会受限于组网配置与有线网关端口的物理绑定, 难以适应灵活快速的调整, 且实现全域的扁平化架构配置较为复杂. 基于本文 5G MEC 系统架构, 5G 支持终端基于无线方式接入, 自然提供全域一张网的基础架构, 摆脱了物理线路和端口的绑定约束, 可以灵活快速地进行组网配置等调整. 此外, 基于 MEC 技术, 在边缘侧提供了丰富的算力资源, 为边缘设备赋予了数据处理能力. 该系统架构使得工厂 IT 网络和 OT 网络信息能更加灵活地流转, 最大限度地满足了高层级系统向现场层延伸的需求, 实现了数据的实时回传与处理.

(1) 数据交互与执行层

数据交互与执行层包括生产、控制、质检、监控等多个不同种类的现场设备和控制系统, 实现车间运行现场各类传感器、设备和产线的数据实时采集、交互和上传. 此外还作为具体工艺动作信息

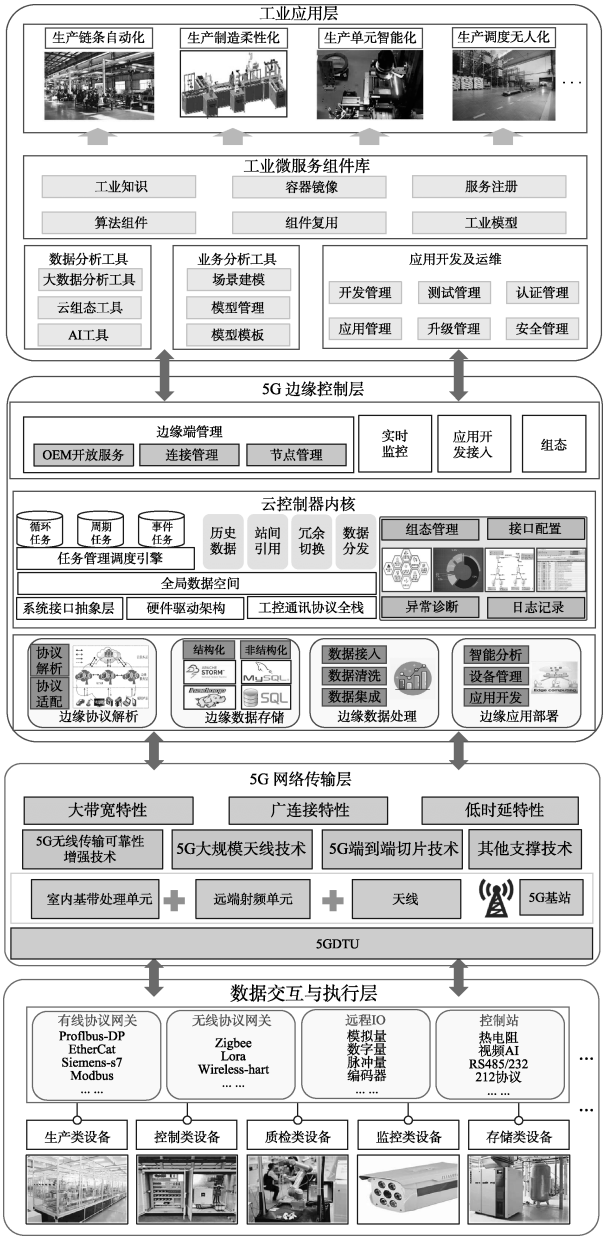


图 1　基于 5G MEC 的云化 PLC 系统架构

的反馈执行端，完成单机或系统决策的最终执行. 针对前文提到的控制系统网络化融合问题，如车间运行现场传感器、设备等种类众多带来的现场网络接入方式多样化，以及各传感器、设备之间协议难以统一等问题. 该层通过部署有线/无线协议网关、远程 I/O，PLC 控制器、智能控制器等部件或装备，通过 5G 网关、5G 模组等模块，实现现场多模态设备数据的接入与转换，执行本地回路控制，协议数据转换上传，同时接收上层控制数据，实现对现场多类型设备的主控/辅控业务，具体接入方式如表 1 所示. 数据交互及执行层能够面向多场景多任务，实现异构、多模态数据的采集，确保制造车间生产、物流、检测等过程多源信息能够实时、全面获取. 基于上层系统的分析决策，具体的机构、设备等物理实体从系统中获取执行指令，做出工艺动作的最终执行操作. 因此，数据交互与执行层既是整体系统控制的起点，也是系统操作执行的终点.

表 1　多样化工业现场网络接入方式

对象	有线接入	无线接入	远程 I/O	控制站
协议	proflbus-DP, profinet 等	ZigBee, Lora 等	模拟量、数字量、脉冲量等	热电阻、热电偶、视频 AI 等
设备	温控器、智能电机等	无线智能传感器等	空压机设备、智能泵阀等	智能开关、智能仪表等

(2) 5G 网络传输层

5G 网络传输层包括 5G 数据传输单元、5G 基站等. 该层主要解决传统网络部署复杂的问题，利用 5G 数据传输单元(data transfer unit, DTU)通过有线/无线的方式将串口数据与 IP 数据相互转换，其次通过 5G 基站及相关组件(室内基带处理单元、远端射频单元、天线)，结合 5G 无线传输可靠性增强技术、5G 大规模天线技术、5G 端到端切片技术以及其他支撑技术，利用 5G 网络传输广连接、低时延和大带宽的特性，保证大规模现场数据的低时延传输以及反向控制信号的高可靠下达，从而提高运动控制精度，满足制造场景数据采集量大、采集频次高等需求. 同时通过该层的构建，利用 5G 无线传输方式减少有线网络带来的束缚，解决部署复杂及集中管理困难问题，将传统的人与人通信拓展到人与机、机与机通信，更好地满足了物联网对多样化终端、通信设备的网络传输需求.

(3) 5G 边缘控制层

为解决 PLC 数据容量、程序容量及下挂设备数量有限和算力有限的问题，构建 5G 边缘控制层. 5G 边缘控制层主要包括边缘数据系统、云控制器内核及边缘端管理等相关组件与应用. 该层基于 5G MEC 平台进行搭建，各个组件部署于 5G MEC 平台之上. 作为云化 PLC 部署的核心层，其主要功能是针对开放自动化及算力需求，采用开放式的自动化工程设计和分布式部署，实现自动化应用程序与硬件分离.

其中，边缘数据系统由边缘协议解析、边缘数据存储、边缘数据处理和边缘应用部署组成，接收 5G 网络传输层数据，实现现场层数据的接入、协议的解析、数据预处理、边缘智能分析及边缘应用的部署与管理. 云控制器内核主要由系统对接模

块、任务模块、数据处理模块和管理配置模块组成，其中系统对接模块主要包括系统接口抽象层，硬件驱动架构、工控通信协议全栈、全局数据空间等组件，实现与边缘数据系统数据的对接和解析；任务模块包括循环任务、周期任务、事件任务和任务管理调度引擎，实现云控制器内核各类任务的管理与调度；数据处理模块包括历史数据、站间引用、冗余切换和数据分发，负责数据的保存、备份及分发；管理配置模块包括组态管理、配置接口、异常诊断、日志记录等组件，实现云控制器内核的运行诊断，保证内核正常运行. 通过对云控制器内核各个组件的构建，保证云化 PLC 上层组态的敏捷运行. 针对前文提到的集中管理困难问题，提高云控制器的统一化、自动化远程集中管理的需求，该层在 MEC 平台上部署了边缘端管理系统相关组件，以提高云控制器集中管理及运维的效率. 边缘端管理组件主要包括原始设备制造商(original equipment manufacturer, OEM)开发服务、连接管理、节点管理、APP 分发、组态、监控等组件. 同时为了实现云控制器覆盖不同场景应用的需求，边缘端管理系统架构了应用开发组件，支持多种高级语言开发与虚拟化容器化的封装与部署.

5G 边缘控制层将传统工业自动化控制软硬件分离，通过打造开放式的云化工业控制核心系统、云控制器内核、边缘端管理系统等相关组件及应用，向上集成IT应用，向下集成OT工业控制系统，贯通整个基于 5G MEC 的云化 PLC 系统架构体系，是该体系架构的核心层.

(4) 工业应用层

工业应用层包括数据开发工具、业务分析工具、应用开发及运维、工业微服务组件库等组件，通过搭建应用层相关组件，封装现场与边缘侧数据，提供可操作接口，在此基础上按照使用目的与应用场景进行软件构建开发与集成.

数据分析工具包括大数据分析工具、云组态工具和 AI 工具，为现场工业应用提供数据分析相关工具，驱动应用智能化；业务分析工具包括场景建模、模型管理和模型模板等模块，为应用场景提供模型模板，可实现业务场景的快速建模；应用开发及运维组件主要包括开发管理、测试管理、认证管理、应用管理、升级管理和安全管理等模块，可实现现场应用从开发到应用以及安全的全生命周期管理与运维，实现视觉检测、诊断、智能控制等相关应用高效、安全的开发；工业微服务组件库，主要包括工业知识、容器镜像、服务注册、算法组件、组件复用、工业模型等模块，该组件是以单一功能组件为基础，通过模块化相互组合的方式实现“松耦合”式的应用开发.

将上述工具、组件等部署在云端，可摆脱传统 PLC 网络控制器大量接入、存储与运算能力不足、部署复杂且成本高的问题，实现行业应用的快速开发、部署，并依靠云端提供海量数据存储、高算力支持，实现云化 PLC 系统与应用场景的直接交互，打造生产链条自动化、生产制造柔性化、生产单元智能化、生产调度无人化的工业应用场景.

3 系统运行机制与关键技术

3.1 系统运行机制

基于 5G MEC 的云化 PLC 系统主要包括从企业现场到 5G 基站的数据传输、从 5G 基站到 MEC 平台的数据集成分析、从 MEC 平台到企业数据中心的数据上传及反馈、从企业数据中心到企业现场的决策下发与执行，如图 2 所示.

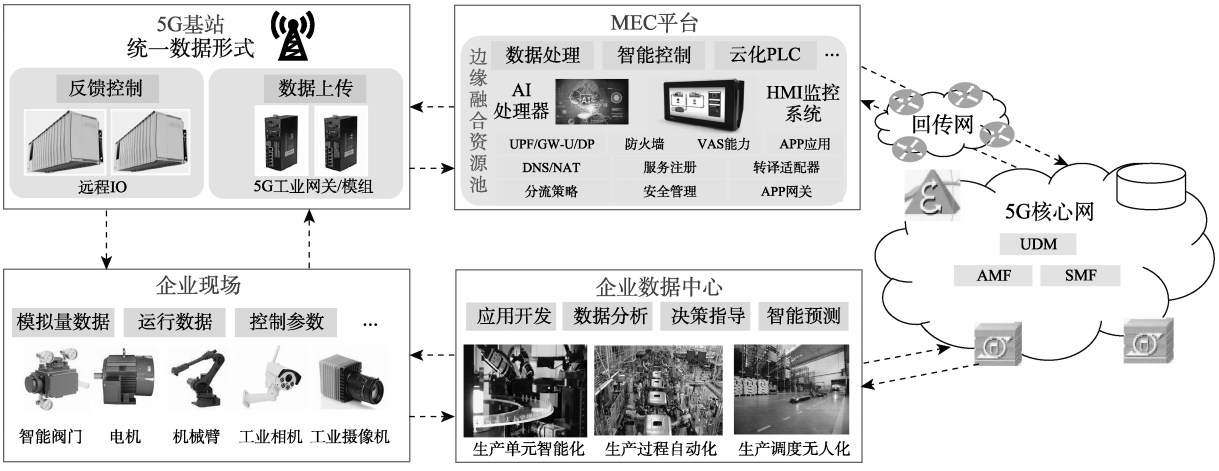


图 2 系统运行机制

(1) 从企业现场到 5G 基站的数据传输. 现场传感器、执行机构与设备、仪器仪表等产生的控制、温度、视频等各类数据, 通过协议网关、远程 I/O、传统 PLC 控制器、智能控制器等通信设备, 完成现场控制参数、运行状态、模拟量等的接入与传输; 这些采集的现场数据通过 5G 网关、模组等统一输出形式后, 通过 5G 无线网络传输至 5G 基站.

(2) 从 5G 基站到 MEC 平台的数据集成分析. 5G 基站将数据传至 MEC 平台, MEC 平台负责数据的边缘端集成处理. 数据依靠 MEC 平台丰富的边缘算力资源、大数据容量、大规模控制任务并发处理、大并发网络连接处理等能力, 实现数据的清洗、存储和运算, 实现现场数据在边缘侧的实时处理与集成分析. 数据分析结果作为上层工业视觉、先进控制、设备预测性维护等应用的依据, 反向作用于企业现场控制、生产等业务. 当数据上传至 MEC 平台后, 经分流网元 UPF/GW-U(gateway for user plane, 用户面网关)、分流策略组件以及下沉数据转发平面软件(data plane, DP)功能模块, 实现关键数据的本地回流, 保证工厂生产控制数据不出厂区, 并通过安全管理模块对数据的处理, 保证其数据安全性. 常规公网数据通过分流后, 流向 5G 核心网, 保证公网业务数据的正常传输. 并且, 在 MEC 平台中, 通过网络地址转换(network address translation, NAT)等模块对数据进行感知和流量控制, 通过域名解析系统(domain name system, DNS)模块实现域名解析, 以及通过应用程序接口(application programming interface, API)网关、增值服务(value added service, VAS)等模块实现服务的分发. 同时, 在 MEC 平台上部署了人机界面监控、AI 处理系统和云化 PLC 等系统, 实现了现场数据的智能监控、智能处理及智能控制, 利用云化 PLC 中循环任务、周期任务、事件任务、调度引擎、全局数据空间、硬件驱动框架、工控通信协议全栈、组态管理、配置接口等组件, 实现云化 PLC 上层组态的敏捷运行.

(3) 从 MEC 平台到企业数据中心的数据传输及反馈. 数据在 MEC 平台经过处理后, 通过 5G 核心网传输至企业数据中心, 其中 5G 核心网主要包括统一数据管理功能(unified data management, UDM)、接入和移动性管理功能(access and mobility management function, AMF)以及会话管理功能(session management function, SMF). 在网络传输中 AMF 模块是终端和无线的核心网控制面接入点, 为终端接入提供认证; SMF 模块可以实现 IP 地址的分配, 收集计费数据, 连接计费中心; UDM 模块实现终端用户识别以及数据传输的访问与授权. 数据经过 5G 核心网传输至企业中心后, 在企业数据中心, 主要实现数据的计算分析、多维展示、优化决策等. 同时, 运用云计算、分布式存储、软件定义网络、智能运维等技术大大提升数据中心服务水平, 提升业务、控制等数据的算力服务水平, 为终端应用提供数据驱动服务.

(4) 从企业数据中心到工业现场的决策下发并执行. 数据通过网络从边缘计算平台上传至私有云, 通过私有云丰富的资源进行数据的快速处理及大规模存储, 实现应用数据的智能预测、决策反馈, 将反馈指令通过回传网络下传至边缘计算平台, 在 5G 边缘控制层进行控制指令信息的反馈传输, 控制指令信息数据信号经由 5G 基站至 5G 网关或模组, 再通过协议网关、远程 I/O 等进行数据信号的转换, 回传至设备控制单元, 实现设备的反馈控制和执行, 最终实现基于 5G 多接入边缘计算云化 PLC 系统的整体闭环.

3.2　基于 5G MEC 的云化 PLC 系统关键技术

本文将基于 5G MEC 的云化 PLC 系统关键技术分为 2 类: 基础支撑关键技术和核心应用关键技术. 其中基础支撑关键技术的作用是解决前文提到的部署复杂及集中管理困难和控制系统网络化融合问题, 实现从底层基础保证基于 5G 网络的数据实时稳定传输; 核心应用关键技术的作用是针对前文提到的 PLC 数据容量、程序容量及下挂设备数量有限和数据大规模联接及算力有限的问题, 在底层基础技术的基础上实现 PLC 的云化部署, 同时利用边缘计算等核心技术, 满足不同场景业务的应用实现需求, 保证生产、控制的实时化、智能化, 以及在工业应用层通过云边协同的分布式智能应用技术实现应用的敏捷部署和云边协同.

3.2.1　基础支撑关键技术

(1) 5G 无线传输增强技术

工业现场大量的金属构建和复杂环境对空口传输的影响非常大, 所以对于 5G 端到端系统可靠性而言, 提升无线通信链路的鲁棒性是关键. 从场景角度分析, 指定时延下的可靠性要求一般是从 90.000%~99.999%. 对于 99.99%以下的可靠性要求可以通过保守调度来实现; 针对 99.999%及以上的可靠性要求, 可以采用一系列增强技术, 对 5G 空口进行增强设计升级, 以实现冗余资源换取数据传输的高可靠性, 在物理层通过采用低信道质量指示(channel quality indicator, CQI)/MCS 表格,

提高调制解调的容错性和数据传输的可靠性，分组数据汇聚协议(packet data convergence protocol, PDCP)层通过引入 PDCP 复制等技术提高数据的冗余，从而提高数据传输的可靠性. 利用重复传输、PDCP 复制等冗余传输技术的结合以及低 CQI/MCS 表格等降低编码效率的关键核心技术，向各行各业应用提供不同层级的可靠性能力.

(2) 5G 大规模天线技术

5G 大规模天线技术是 5G 具备大规模机械通信特性的关键技术之一. 在工业自动化场景下，具有较多的控制、传感器等设备，设备布置密度较大，且应用场景复杂丰富. 因此通过 5G 大规模天线技术能够获得更多的频谱，从而实现物联网场景所需的大规模连接，保证工业设备的大规模接入.

应用 5G 大规模天线技术，基于多用户波束成形的原理，配置几十级和数百级天线端口的大规模天线阵列，并通过多用户多输入多输出技术，保证更多终端运行时的空间复用传输，使 5G 系统的信号频谱利用效率大幅提升，以及扩充其网络容量，在设备密集的高容量场景，如工厂大规模集中控制场景，可大幅提升用户体验，保证设备大量数据、信息的稳定传输与交互.

同时，任何一条天线通道的发射(或接收)信号的相位和幅度能够利用大规模多天线系统进行调控，使波束产生方位的指向性，进而增强波束方位的信号，使无线网信息传递流程中的损失得以补偿，达到赋形增益，赋形增益可以增强区域覆盖范围，满足在工业情境下的广域覆盖、深度覆盖，满足工业现场稳定的网络传输信号和设备数据采集要求.

(3) 5G 端到端切片技术

5G 端到端网络切片能够在统一的物理基础建设上满足不同互联网服务需求的应用场景并实现多层级的屏障防护与安全防护，在降低建网成本的同时满足低时延、连接密度、流量容量等不同特性下多种工业应用现场按需、敏捷设置网络的要求. 5G 端到端网络切片技术可以实现网络资源的灵活分配以及按需选择，基于一个 5G 网络虚拟出多个具有特性差异的、独立的逻辑子网. 无线网、传输网和核心网子切片构成了端到端切片的整体网络，且由端到端切片管理系统统一管理，确保任何一个虚拟网络发生故障均不会影响到其他虚拟网络.

5G 端到端切片技术分为无线网切片、承载网络切片和 5G 核心网切片. 无线网切片是端到端网络切片中的关键组成部分，其根据不同业务场景的不同服务等级协议(service-level agreement, SLA)需求，可以进行灵活的子切片资源配置. 针对工业场景下不同的切片需求，如智能控制场景下网络的低时延需求、集群控制场景下设备大规模连接的需求，可以采用不同的资源配置或调度方式来实现. 不同的参数配置和调度是无线侧的切片能力的重要体现；承载网络切片技术可分为软、硬隔离 2 种. 软隔离技术是通过数据复用的第 2 层或更高层技术来实现的. 硬隔离技术是基于物理刚性管道的 Layer1 或光层切片技术实现的，例如，灵活以太网技术、光传送网络和波分复用技术；5G 核心网切片采用云原生和微服务等虚拟化技术，进行如广连接、低时延、大带宽等各种类型切片的组建和配置. 同时，需要支持切片的签约和选择，隔离不同场景下的切片，针对未授权的设备终端，进行访问切片网络的限制. 5G 核心网支持通过统一数据管理功能为不同用户设备终端签约不同的切片，支持基于网络切片选择功能(network slice selection function, NSSF)智能化选择切片. NSSF 可通过设备终端请求的网络切片获取辅助信息(network slice selection assistance information, NSSAI)和签约的 NSSAI、位置区域、切片容量、切片当前负荷等信息，实现切片的灵活选择. 工业行业由于场景丰富，应用类型多样，对网络需求具备不同的需求，可通过网络切片技术提供场景业务的隔离保障，根据需要部署多个切片实现不同的 SLA. 例如，实现数据不出园区，以及安全性、可靠性高的工业控制网络切片，以保证云化 PLC 系统在工业控制场景下的精准、可靠控制.

(4) 5G 高可靠低时延连接技术

5G 高可靠低时延连接(ultra reliable low latency communication, URLLC)技术主要面向无人化控制、运动控制、远程操控等工业生产、物流、质检方面的控制场景研究与应用，由于工业控制场景下的应用对网络时延和数据传输的可靠性具有较高的指标要求，需要实现毫秒级的端到端时延和高可靠性的技术能力保障. URLLC 关键技术包括子时隙、上行免授权、下行资源抢占等. 受限于研发进度及终端支持情况，主要在实验室中验证技术方案，目前现网低时延保障主要使用的是增强移动宽带低时延相关技术功能.

工业企业场景类型繁多，对时延的要求也各不相同，尤其在嵌入生产环节的控制类场景，对网络时延的要求极高，如行车的无人化控制场景，其

PLC 控制指令下达要求时延小于 10 ms. 从实现时延的技术手段来看，可通过开启上行预调度、设置调度请求周期、关闭非连续接受功能等功能参数，降低调度时间来满足端到端时延要求在 10~50 ms 的场景需求；针对时延在 5~10 ms 的场景需求，需要使用 mini-slot 等 URLLC 技术，而针对时延要求在 1~5 ms 的场景需求，则在 URLLC 的基础上还需要在帧格式、子载波间隔和双工模式等方面进行考虑，来确保控制的低时延.

3.2.2　核心应用关键技术

(1) 图形化组态编程技术

针对软件定义的工业系统、PLC 控制器以及一些边缘运算装置，可利用该技术实现图形化的快速开发，并进行控制组件编程组态的一体化平台的搭建，使用该技术构建的控制组件程序及设计平台都包含了满足 IEC61131-3 的开发工具环境条件(integrated development environment, IDE)及执行环境条件(run-time environment, RTE). 通过使用图形化编程技术，工业服务器虚拟化 PLC 的设定、通信接口设置、I/O 配置、第三方的标准化装置(如伺服电机轴)设置，以及算法设计、可视化的控制系统设计等，都可以通过图形拖拽实现操作，从而降低了工程师控制编程门槛，实现控制系统、组态在云端的快速设计及配置.

(2) 控制器云化技术

控制器云化技术结合了网络化控制系统和云计算系统中虚拟化、海量数据管理、分布式海量数据存储等技术优势，通过各种传感器感知汇聚工业现场不同类型的大规模数据，利用虚拟化技术实现软件应用部分与底层控制器硬件的分离，将控制器内核等部分部署云端，实现控制器的云化部署.

云计算系统中分布式海量数据存储技术采用分布式存储的方法将大量工业数据放置于云端，并运用集权计算、数据冗余和分布式数据存储等冗余存储的方式，保障数据挖掘、存储的安全可靠性，结合海量数据管理技术实现现场大规模数据的安全性和访问高效性管理. 采集的现场控制器数据在云端利用深度学习等智能算法，实现系统的在线辨识与建模，结合网络化预测控制、数据驱动控制等方法实现系统的自主云化控制. 通过控制器云化技术，将可编程控制器运行在云端，融合信息化技术，采用软件定义的 PLC 实现与现场设备的实时交互，帮助现场工程师完成对于 PLC 的云端远程运维、全局集群管控、数据处理与分析等功能，同时利用云计算技术，实现控制器相关 APP 的开发以及分析结果的嵌入，实现智能化、自我感知以及 PLC 的云端升级，实现工业控制从有线到无线、从本地到云端的转移.

(3) 边缘计算技术

在云化 PLC 应用过程中，边缘计算关键技术主要包括计算卸载技术和边缘控制技术等. 上述关键技术是 MEC 系统进行计算处理即时化、数据处理本地化、边缘控制及管理智能化和高效化的前提和基础条件.

计算卸载技术是边缘计算系统满足工业终端实时化信息处理现场场景的重要技术手段，能够确保控制系统数据及信息的实时运算和处理. 计算卸载是指将部分计算功能由现场设备转移到边缘端或云端，从而解决 PLC 数据容量、程序容量有限的问题. 由于边缘层服务器资源和计算能力有限，计算复杂的任务应卸载到云层进行处理. 利用 MEC 服务器的资源可以减少终端设备自身计算负担，将终端设备的计算任务卸载到边缘层可以降低自身能耗、加快计算速度. 其主要过程包括卸载决策、卸载执行、结果回传 3 部分. 其中，卸载决策是针对某项运算任务用来识别和决策应该如何实现有效、高效卸载；卸载执行则是对计算能力在 MEC 服务器和终端的运行进行分配考量，该部分也是计算卸载的核心部分；结果回传是将计算任务处理结果下传到终端设备. 计算卸载首先需要对本地设备的请求服务进行判断，当 MEC 服务器还具备可用资源时，根据设计的算法进行资源分配、更新资源库，并利用计算卸载技术，通过将传统 PLC 等控制设备涉及的相关运算和数据分析、处理及时卸载到边缘计算服务器完成相关运算、分析的处理，解决了设备在信息资源储存、计算性能以及能效等方面存在的问题，有效拓展设备的实时计算性能，降低计算延迟，并提高终端设备的使用寿命.

边缘控制是实现在边缘端智能数据处理、智能信息反馈以及智能控制决策的一种控制手段，边缘控制主要面向现场控制器本身，而非被控对象. 单纯的数学模型解析型已不能满足对控制器的刻画及分析，取而代之的是由数学解析方法以及知识体系相融合的更为泛化的广义模型，控制器成为多学科多知识相融入的控制系统. 边缘控制是建立被控动态过程的技术特性模式辨识，其控制过程的基础特征是对专业知识、积累经验的推理和智能决策，并根据被控动态过程特征识别、学习和组建自身的控制管理模式，通过改变控制器结构

和调节自身参数, 从而形成具有模式多样化、结构与控制参数多变等特点的边缘控制模式. 当现场控制器数据被上传至 MEC 边缘服务器平台后, 通过其边缘数据智能分析组件, 以及神经网络、模糊逻辑、遗传算法等人工智能技术实时分析现场采集到的数据, 实现现场设备参数的智能整定和自适应调整, 反馈数据至控制机构, 实现控制机构控制模式、动作的智能切换, 从而实现云化控制指令的实时传达, 保证现场设备智能运行.

(4) 云边协同的分布式智能应用技术

云边协同的分布式智能应用技术, 结合了云化部署、容器化、云边协同等技术优势, 通过将应用软件云化部署, 采用纯软件的方法在现有的物理平台上实现访问的截获和模拟, 通过模拟实现软件的解码和执行, 扩大硬件容量并简化软件重新配置过程. 通过软件的云化部署, 可减少软件虚拟机相关开销, 支持更广泛的操作系统, 从而提高服务效率. 通过容器化技术, 将单个操作系统的资源划分到组中, 实现对单个应用的标准封装, 简化应用的分发和部署以便平衡有冲突的资源使用需求. 容器具备可移植的特性使其可在任何基础架构上的任何位置运行. 开放容器标准(open container initiative, OCI)作为开放设计标准, 确保任何符合 OCI 的容器在任意基础设施上都能以相同的方式运行. 运行应用程序时, 容器会加载容器镜像, 以静态文件的形式在 IT 基础架构上运行进程的可执行代码. 针对不同用例, 容器镜像有不同种类, 包含数据库、Web 服务器、操作系统等. 容器镜像存储库是容器镜像的公共访问点, 这使得容器可供开发人员使用; 容器也是独立的计算环境, 容器化将应用程序转换为可运行的容器. 通过云边协同技术, 可实现边缘端与云端基础设施即服务(infrastructure as a service, IaaS)、平台即服务(platform as a service, PaaS)、软件即服务(software as a service, SaaS)各层面的协同. 边缘 IaaS 与云端 IaaS 之间可实现对网络、虚拟化资源、安全等的资源协同; 边缘 PaaS 与云端 PaaS 之间可实现数据协同、智能协同、业务编排协同、应用管理协同; 边缘 SaaS 与云端 SaaS 之间可实现服务协同.

此外, 基于 5G MEC 的系统架构中, 其 5G MEC 边缘计算平台也具备原生云网能力, 支持与企业私有云、行业产业云、互联网公有云的云间协同, 为工业现场(如工业视觉、工业智能控制等场景)提供所需的高密算力和安全运行平台, 利用 5G MEC 特质将算力上移至运营商边缘计算节点, 降低综合算力成本, 同时确保满足工厂对于工业数据的高安全要求. 整合计算、网络、存储、平台和应用, 赋能垂直行业, 实现高效无极化边业协同.

4 案例分析

浙江某汽车制造公司原有自动化产线使用了多套西门子 S1500 系列 PLC, 分别控制执行焊接、冲压、清洗等生产工艺过程. 由于行业对汽车的品质要求逐渐高端化, 汽车供应企业间竞争日渐激烈, 对工厂的生产效率、能耗水平、设备管理等提出了更高的要求. 为了满足这些要求, 该公司目前自动化产线上的 PLC 控制器除了承担主要的自动化生产所需的逻辑控制外, 还承担了大量的设备管理、汽车运行模拟、数据整合/清洗、故障诊断等 IT 业务, 其性能、数据容量、内存等已渐渐难以满足生产需求. 因此该公司希望利用具有高性能、大内存容量、大规模数据存储、大规模逻辑编程特性的云化 PLC, 来替代多条产线上的 PLC 控制器, 整合控制和数据处理业务, 达到节省设备采购成本、提升生产效率和管理水平的目的.

针对上述需求, 开展了自动化产线改造项目, 基于本文所提的 5G MEC 云化 PLC 控制架构, 建设以数据中台、云平台控制为核心的新型智慧汽车制造厂. 项目于 2021 年 8 月开始对公司原有的 3 条汽车制造生产线实施改造, 通过控制器云化技术, 在 5G MEC 边缘计算平台上结合 5G 相关技术实现数据的实时、稳定传输(5G 云化 PLC 现场运行数据如表 2 所示), 以及利用图形化组态编程技术、控制器云化技术实现云化控制系统的部署, 其中云化控制器部署在该公司私有云内, 产线上采用 G3-SMART 系列远程 I/O 和 GW 系列 5G 无线网关接入现场信号和伺服等总线型设备, 通过园区 5G 专网实现现场控制器相关设备数据接入云化控制器(如图 3 所示), 并结合相关算法, 优化现场设备运行性能, 保障其安全智能控制.

表 2 5G 云化 PLC 现场运行数据稳定性示例

指标名称	指标值
平均上传速率	32.91 Mbit/s
平均下载速率	91.28 Mbit/s
平均通信时延(端到端)	13 ms
最小通信时延(端到端)	8 ms
平均响应时延(端到端+PLC 响应)	18 ms
最小响应时延(端到端+PLC 响应)	9 ms
最长通信连续无故障	全天 24 小时无故障

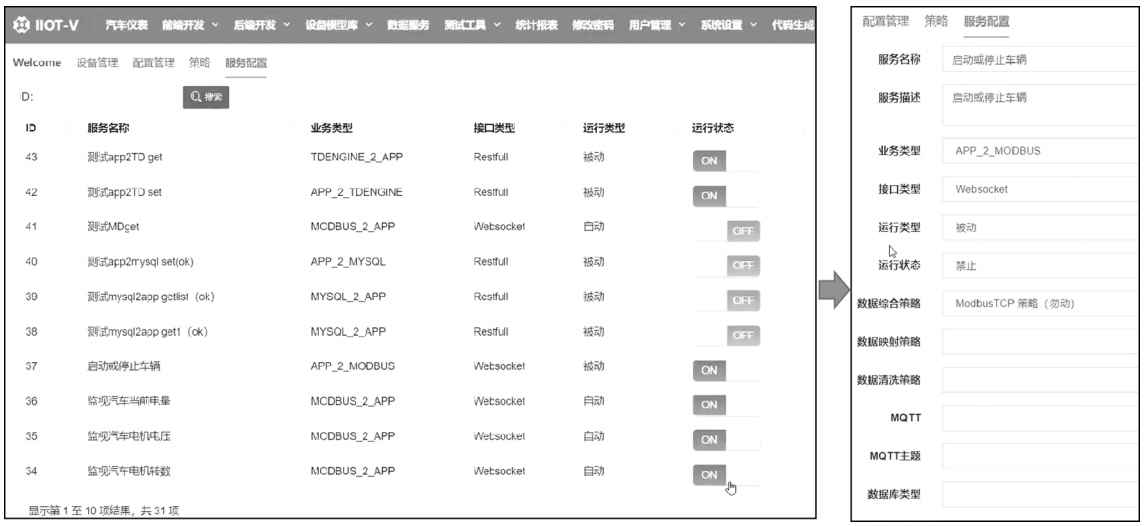


图 3　设备数据云端化

本文利用 5G 大规模天线、5G 无线传输可靠性增强等技术，将现场数台设备(整体点数 300 点左右，被控设备 43 台)的数据实时、稳定地上传至 MEC 平台中的云化控制器，利用软件定义其控制内核，通过符合 IEC 61131 的开发环境 IDE，RTE 以及图形化编程工具及相关技术，实现对 PLC 控制器控制系统，以及设备组态、虚拟化配置、算法组态、SCADA 画面组态、编译调试等核心组件的编程. 利用图形化编程工具，添加了冲压、清洗、车辆表盘模拟等设备的 PLC 控制器、工业总线以及远程 I/O 设备，配置其总线关联控制器，物理端口和 IP 信息，以及 I/O 设备，自动生成 I/O 变量；随后，利用虚拟化技术，云化 PLC 物理核心配置，图形化创建了云化 PLC 及分配接口资源、冗余设置，实现云化 PLC 的运行控制及状态监测，以及通过 SCADA 画面组态组件，自动获取 PLC 全局变量等信息. 并结合算法组态，配置多个云化 PLC 多达 10 个不同优先等级和周期实例任务变量声明的导入导出，最终实现云化控制内核相关图形化组态的搭建，如图 4 所示.

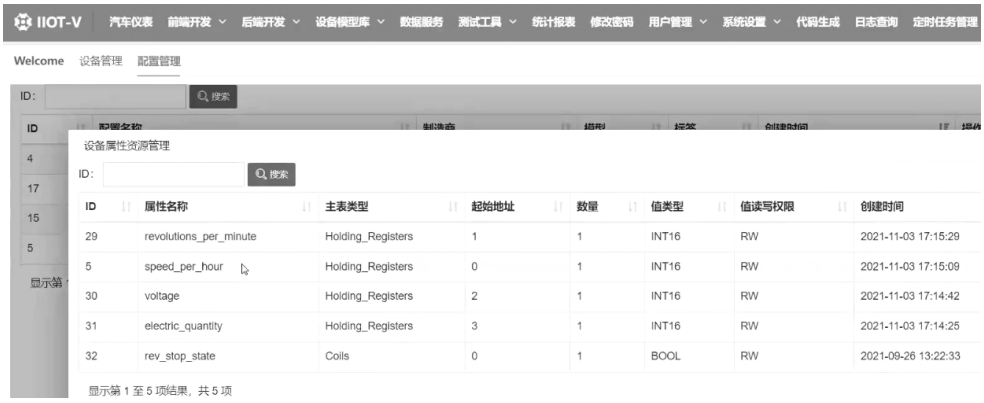


图 4　云化内核与组态搭建

完成云化 PLC 系统的搭建后，进行现场 PLC 等控制器件的实时控制，例如，在汽车模拟测试场景中，利用云化 PLC 系统，远程实时控制汽车模拟测试踏板等控制器件，控制测试设备运行，控制汽车加速、减速，其数据实时在云端系统进行展示，设备运行设置一键推送与部署，最大限度保证生产、测试等场景的实时稳定控制，如图 5 所示. 同时，利用 MEC 平台，通过其计算卸载技术，将现场部分自动化产线控制设备的计算功能由设备迁移到边缘端平台，扩展控制设备的即时计算能力，降低设备计算延迟，解决现场设备性能低下、数据容量和内存不足等问题. 并结合 MEC 平台的本地回流技术，通过将 UPF 下沉至用户侧机房，减少数据传输时延，实现数据的本地分流，保证企业生产现场控制数据不出厂区，提高了用户数据流转的安全性. 通过 MEC 云边协同技术，整合计算、

网络、存储、平台和应用，实现企业现场高效无极化的边业协同，为现场工业智能控制场景提供所需的算力需求，利用 5G MEC 特质将算力上移至运营商边缘计算节点，降低综合算力成本，同时确保工厂对于工业数据的高安全要求得以满足．基于 5G MEC 的云化管理技术实现大规模控制器云端的远程集中管理，使生产车间大量的控制器在云端集中部署、协同工作，方便进行现场生产等相关业务的运行．同时，通过云化部署技术，实现现场高算力、高带宽等场景的云化应用部署，结合容器技术保证其在云端运行的安全性．通过智能控制技术，将采集到的现场数据在云端进行实时智能处理，实现控制设备相关信号的智能反馈，实现焊接、冲压等生产工艺的云端智能控制．

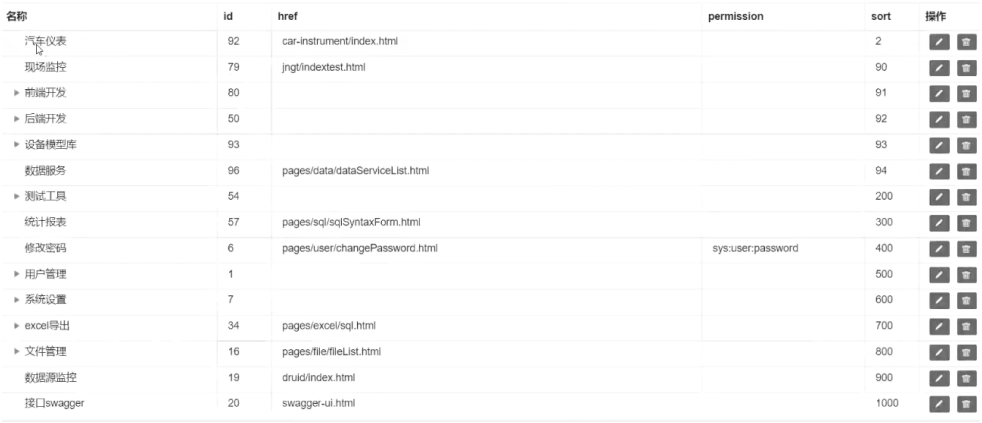


图 5　云化部署与智能控制推送

通过基于 5G MEC 的云化 PLC 系统部署，本文取得了以下的成效:

(1) 实现了多条产线和设备的统一管理．原本分散在 3 条产线的设备难以实现联动控制，通过项目实施，扩大了统一管理规模，并通过升级算法克服了现场设备问题引发的转速不稳的控制难题．

(2) 实现了车间现场的减人增效．全部控制回路实现了无人化稳定运行，系统开停机一键实现，并能够为管理人员提供智能化操作提示，最大限度地确保了工艺平稳生产，降低了操作人员的劳动强度．

(3) 实现了 PLC控制的快速部署与调试．在原有 PLC 网络的基础上进行整合升级，通过云端实现批量化部署与调试，降低现场线路、硬件布置难度，减少所需时间，扩大安全操作空间．

通过实施，最终实现机组的全自动控制与无人值守运行，实施优化控制算法以后，代表性能耗指标每小时蒸汽消耗量降低了 5 吨，年经济效益可达 1000 万元，有效提升了现场设备的自动化运行率，促进了企业向智能工厂的升级转型．

5　结　语

本文基于 5G 及多接入边缘计算技术，针对当前工业控制系统设计了一套开放式的云化 PLC 系统架构，将传统工业自动化控制软硬件分离，实现 PLC 的云化部署，并在某汽车制造工厂进行了实践，对本系统架构进行了验证，证实了本文架构与技术的有效性．

但是，目前云化 PLC 的相关理论和技术较为前沿，虽然在先进制造业中有广阔的应用前景，但由于实际场景的复杂性及越来越高的工业安全要求，云化控制器的部署落地、数据的流转等方面仍需要进一步的完善和拓展．本文所提架构涉及 5G、边缘计算、云化 PLC 等多种先进信息化技术，这些技术本身也处于快速迭代之中，在这些技术发生变化时，本文架构应当随之适应性微调．此外，本文架构虽然具备较高的通用性，但是面向不同的应用场景，5G 基站安装、云化 PLC 部署等环节仍需要进行针对性适配，因此开发具备更广泛适用性的软件工具和平台是未来重要的发展方向．

参考文献(References):

[1] Goodwin G C, Graebe S F, Salgado M E. Control system design[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001

[2] Ang K H, Chong G, Li Y. PID control system analysis, design, and technology[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 559-576

[3] Luis C J, Alba A G, Washington T G, *et al*. Development of network system for connection PLC to cloud platforms using

IIoT[M] //Antipova T. Advances in Digital Science. Heidelberg: Springer, 2021: 433-443

[4] Guan Shouping, Wang Liang. Uncertainty analysis of cloud control system with its controller design [J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(11): 2677-2687(in Chinese)
(关守平，王梁. 云控制系统不确定性分析与控制器设计方法[J]. 自动化学报, 2022, 48(11): 2677-2687)

[5] Wu D Z, Greer M J, Rosen D W, *et al*. Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2013, 32(4): 564-579

[6] Hadi H H, Sallom M Y. Pneumatic control system of automatic production line using SCADA implement PLC[C] //Proceedings of the 4th Scientific International Conference Najaf. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2019: 37-42

[7] Varga P, Peto J, Franko A, *et al*. 5G support for industrial IoT applications—challenges, solutions, and research gaps[J]. Sensors, 2020, 20(3): Article No.828

[8] Rao S K, Prasad R. Impact of 5G technologies on industry 4.0[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 100(1): 145-159

[9] Sharma P, Jain S, Gupta S, *et al*. Role of machine learning and deep learning in securing 5G-driven industrial IoT applications[J]. Ad Hoc Networks, 2021, 123: Article No.102685

[10] Chen Xiaojiang, Wu Jiangyao, Shen Guiquan, *et al*. Design of novel smart concentrator architecture with edge computing function[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(5): 99-104(in Chinese)
(陈晓江，伍江瑶，沈桂泉，等. 具备边缘计算功能的新型智能集中器架构设计[J]. 电力系统及其自动化学报，2020, 32(5): 99-104)

[11] Khoshnevisan M, Joseph V, Gupta P, *et al*. 5G industrial networks with CoMP for URLLC and time sensitive network architecture[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 947-959

[12] Lyu L, Chen C L, Zhu S Y, *et al*. 5G enabled codesign of energy-efficient transmission and estimation for industrial IoT systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2690-2704

[13] Xia Yuanqing, Gao Runze, Lin Min, *et al*. Green energy complementary based on intelligent power plant cloud control system[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(9): 1844-1868(in Chinese)
(夏元清，高润泽，林敏，等. 绿色能源互补智能电厂云控制系统研究[J]. 自动化学报, 2020, 46(9): 1844-1868)

[14] Ji X S, Huang K Z, Jin L, *et al*. Overview of 5G security technology[J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(8): Article No.081301

[15] Wang T, Zhang Y L, Xiong N N, *et al*. An effective edge-intelligent service placement technology for 5G-and-beyond industrial IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 4148-4157

[16] Qu Ting, Zhang Kai, Yan Mian, *et al*. Synchronized decision-making and control method for opti-state execution of dynamic production systems with internet of things[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 24-33(in Chinese)
(屈挺，张凯，闫勉，等. 物联网环境下面向高动态性生产系统优态运行的联动决策与控制方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 24-33)

[17] Qu Ting, Zhang Kai, Luo Hao, *et al*. Internet-of-things based dynamic synchronization of production and logistics: mechanism, system and case study[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 36-44(in Chinese)
(屈挺，张凯，罗浩，等. 物联网驱动的“生产-物流”动态联动机制、系统及案例[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 36-44)

[18] Gavlas A, Zwierzyna J, Koziorek J. Possibilities of transfer process data from PLC to Cloud platforms based on IoT[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(6): 156-161

[19] Vadi S, Bayindir R, Toplar Y, *et al*. Induction motor control system with a Programmable Logic Controller (PLC) and Profibus communication for industrial plants—an experimental setup[J]. ISA Transactions, 2022, 122: 459-471

[20] Wang Bailing, Liu Hongri, Zhang Yaofang, *et al*. Review on key technologies of industrial control system security simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1466-1488 (in Chinese)
(王佰玲，刘红日，张耀方，等. 工业控制系统安全仿真关键技术研究综述[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1466-1488)

[21] Jing Shikai, Jiang Hao, Xu Wenting, *et al*. Cloud manufacturing service composition considering execution reliability[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(3): 392-400(in Chinese)
(敬石开，姜浩，许文婷，等. 考虑执行可靠性的云制造服务组合算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2014, 26(3): 392-400)

[22] Gao Yicong, Feng Yixiong, Tan Jianrong, *et al*. Research on coupled mapping and service matching technology of cloud manufacturing based on fuzzy integral[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3): 290-298(in Chinese)
(高一聪，冯毅雄，谭建荣，等. 制造资源耦合映射与模糊匹配技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 290-298)

[23] Zhang Yue. Research on the adaptive mechanisms of PLC communication protocol[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016(in Chinese)
(张月. PLC 通信协议自适应机制研究[D]. 北京：华北电力大学(北京), 2016)

[24] Li Bohu, Zhang Lin, Wang Shilong, *et al*. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7+16(in Chinese)
(李伯虎，张霖，王时龙，等. 云制造——面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-7+16)

[25] Zhang Lin, Luo Yongliang, Fan Wenhui, *et al*. Analyses of cloud manufacturing and related advanced manufacturing models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 458-468(in Chinese)
(张霖，罗永亮，范文慧，等. 云制造及相关先进制造模式分析[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 458-468)

[26] Li Ke, Zhang Qian, Jia Jinyuan. CEB-collaboratively multi-granularity interest scheduling algorithm for loading large WebBIM scene[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(9): 1388-1397(in Chinese)
(李柯，张乾，贾金原. 云边页协同的 WebBIM 大场景多粒度

兴趣加载调度算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(9): 1388-1397)

[27] Huang Ying, Lu Bingheng, Zhao Wanhua. Application of cloud computing in intelligent machine tool control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 210-216(in Chinese)
(黄莹, 卢秉恒, 赵万华. 云计算在智能机床控制体系中的应用探析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 210-216)

[28] Jia Zixiang, Zhai Chunhui, Jia Jie. Design and implementation of 5G cloud-based industrial automation monitoring system[J]. Information and Communications Technologies, 2021, 15(3): 35-41+54(in Chinese)
(贾子翔, 翟春辉, 贾捷. 5G 云化工业自动化监控系统的设计与实现[J]. 信息通信技术, 2021, 15(3): 35-41+54)

[29] Küpper C, Rösch J, Winkler H. Use of real time localization systems (RTLS) in the automotive production and the prospects of 5G–A literature review[J]. Production & Manufacturing Research, 2022, 10(1): 840-874

[30] Tran T X, Hajisami A, Pandey P, *et al*. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: new paradigms, scenarios, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(4): 54-61