



工业网络体系架构的演进、关键技术及未来展望

王健全 马彰超 孙雷 张超一 李卫

Evolution, key technology, prospects, and applications of industrial network architecture

WANG Jian-quan, MA Zhang-chao, SUN Lei, ZHANG Chao-yi, LI Wei

引用本文:

王健全, 马彰超, 孙雷, 张超一, 李卫. 工业网络体系架构的演进、关键技术及未来展望[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(8): 1376–1389. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.08.01.003

WANG Jian-quan, MA Zhang-chao, SUN Lei, ZHANG Chao-yi, LI Wei. Evolution, key technology, prospects, and applications of industrial network architecture[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(8): 1376–1389. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.08.01.003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.08.01.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

5G超密集网络的能量效率研究综述

Survey of energy efficiency for 5G ultra-dense networks

工程科学学报. 2019, 41(8): 968 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.08.002>

基于安全传输策略的网络化预测控制系统设计

Design of networked predictive control system based on secure transmission strategy

工程科学学报. 2017, 39(9): 1403 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.09.014>

基于有限时间滤波控制的电机驱动系统结构/控制一体化设计

Plant/controller co-design of motor driving systems based on finite-time filtering control

工程科学学报. 2019, 41(9): 1194 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.011>

知识图谱的最新进展、关键技术和挑战

Recent advances, key techniques and future challenges of knowledge graph

工程科学学报. 2020, 42(10): 1254 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.02.28.001>

金属增材制造技术的关键因素及发展方向

Key factors and developmental directions with regard to metal additive manufacturing

工程科学学报. 2019, 41(2): 159 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.02.002>

基于强化学习的工控系统恶意软件行为检测方法

Reinforcement learning-based detection method for malware behavior in industrial control systems

工程科学学报. 2020, 42(4): 455 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.16.005>

工业网络体系架构的演进、关键技术及未来展望

王健全¹⁾, 马彰超¹⁾, 孙 雷¹⁾, 张超一¹⁾✉, 李 卫²⁾

1) 北京科技大学自动化学院, 北京 100083 2) 北京科技大学计算机与通信学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: zhangchaoyi@ustb.edu.cn

摘 要 基于工业互联网应具备的特征, 结合现有工业互联网总现状, 分析总结传统工业自动化封闭式五层架构存在的问题。首先, 提出支持数据高效流转的云、边端新型工业网络协同架构, 架构的变革对现有技术提出挑战, 同时也为传统自动化系统提供了新的机遇。其次, 在总体架构的基础上, 提出适配新型工业网络基础架构的两项关键技术。5G–时间敏感网络 (Time-sensitive networking, TSN) 协同传输技术, 包括 5G–TSN 异构网络融合架构、网络时钟适配机制以及基于软件定义网络 (Software defined network, SDN) 的融合管控和资源调度三部分技术内容; 基于确定性网络的云化可编程逻辑控制器 (Programmable logic controller, PLC) 技术包括工业控制虚拟化和 5G 云化工业控制技术两部分技术内容。基于此, 提出自主设计面向实时运动控制的 5G 云化 PLC 与 EtherCAT 融合系统, 以及面向实时运动控制的 EtherCAT 与 TSN 融合系统试验平台, 并验证了新型工业网络架构的科学性和合理性。最后, 对未来网络、控制、计算一体化工业自动化系统中的高效性、可靠性和安全性之间的融合问题及潜在解决方案进行了探讨。

关键词 工业互联网; 智能制造; 时间敏感网络; 5G; 工业控制虚拟化; 自动控制; 云化可编程逻辑控制器

分类号 TP393

Evolution, key technology, prospects, and applications of industrial network architecture

WANG Jian-quan¹⁾, MA Zhang-chao¹⁾, SUN Lei¹⁾, ZHANG Chao-yi¹⁾✉, LI Wei²⁾

1) School of Automation and Electronic Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Computer and Communication, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: zhangchaoyi@ustb.edu.cn

ABSTRACT Based on a summary of the characteristics of the industrial Internet, combined with the overall status of the existing industrial Internet, this paper analyzes the problems of the traditional industrial automation closed five-tier architecture and concludes that the current industrial Internet remains in a stage of technological development and maturation, which restricts the promotion and standardization of China's intelligent manufacturing level to some extent. In the future, the industrial Internet will break the original data hierarchy structure, break the data barrier, and realize the development of intelligent manufacturing toward intelligent, flattening, lightweight, and green. First, this paper proposes a new industrial network collaboration architecture on the cloud side that supports efficient data flow. The proposed architecture is a flat, platform-based structure that realizes cloud-side collaboration and the integration of control, computing power, and network. Second, on the basis of the overall architecture of the industrial network, two key technologies are proposed to adapt the new industrial network infrastructure. One is 5G–time-sensitive networking (TSN) collaborative transmission technology. TSN realizes the interconnection and integration of heterogeneous networks in the industrial field based on the data link layer, and 5G–TSN collaborative transmission has become an important evolution trend of the intelligent factory network.

收稿日期: 2022–08–01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFB1708800); 广东省重点领域研发计划资助项目 (2020B0101130007)

Three key technical contents are introduced: 5G-TSN heterogeneous network convergence architecture, network clock adaptation mechanism, and software defined network (SDN)-based integration management and resource scheduling. The other key technology is cloud PLC technology based on a deterministic network, and the virtualization and cloud control system is the basis for breaking the original closed industrial control system. On the one hand, cloud-based hardware resources can be used to achieve one-to-many control, saving a large amount of industrial control equipment deployment investment costs. More importantly, the centralized control system can achieve unified control and optimization of global resources. This paper introduces the virtualization 5G cloud chemical industry control technology with two parts: technical content and technical route. Third, this paper proposes a cloud-based allocation of control resources and a cloud-network integration collaboration scenario and designs the 5G cloud-based programmable logic controller (PLC) and EtherCAT fusion system and the EtherCAT and TSN fusion system for real-time motion control. Through the testing of the end-to-end delay and cross-network time synchronization accuracy of the actual system, the current end-to-end delay of network transmission is less than 5 ms, the cross-network time synchronization error is between 100–400 us, and the accuracy is less than 100 ns. These performance indicators reach the current industry-leading level. The test platform verifies the scientificness and rationality of the new industrial network architecture. Finally, the integration problems and potential solutions of efficiency, reliability, and security are discussed in the future industrial automation system integrating network, control, and computing.

KEY WORDS industrial internet; intelligent manufacturing; time sensitive network; 5G; industrial control virtualization; auto-control; cloud programmable logic controller

前三次工业革命分别是机械化、电气化和自动化的科技革命引发并推动的,目前正在经历的第四次工业革命的显著特征是工业的智能化,信息技术在推动工业智能化发展过程中发挥着重要作用^[1]。信息技术被赋予了推动现代工业转型升级的任务,在此过程中工业互联网是信息化和工业化交叉融合的典型代表,是对以往工业生产、产业升级和变革、实现智能制造的关键技术手段^[2]。

在工业互联网体系中,要求对系统中所有节点设备状态的全面感知,即网络的全面、动态、可靠连接和数据的高效流转,其本质是工业能力与信息通信技术(Information and communications technology, ICT)能力的集成、融合与创新。主要包括三方面^[3]:(1)制造企业全面数字化、网络化是基础。底层设备设施的数字化,形成串通工业全流程的数据流,为工业全要素的互联互通提供基础支撑。(2)制造能力的平台化是关键。将数据化的制造资源在平台进行模型化设计、推演,实现资源要素的重构、组合及创新,优化生产全流程,提升产品创新力。(3)工业知识与机器智能的融合创新是核心。通过大数据、人工智能等技术加速工业知识的沉淀、复用和迭代创新,加速先进工业知识的扩散及传播,提升各生产主体掌握和运用工业知识的能力。

从广义上讲,工业互联网是新一代信息通信技术与工业系统全方位深度融合所形成的产业和应用生态。工业互联网的主体是工业,工业基础是前提。在工业互联网系中,数字化是基础,负责将

物理信息转化为数字信息;网络化是核心,物理世界与数字世界的纽带;而智能化是目标,将数字化工业模型转化为智能的管理、决策和执行。从狭义的角度讲,工业互联网是适应工业向智能化变革的网络技术。当前5G与工业互联网的融合成为重要的网络支撑技术^[4-6]。

随着互联网技术(Internet technology, IT)、通信技术(Communication technology, CT)与运营技术(Operational technology, OT)技术走向融合,传统工业自动化瓶颈正在逐渐被打破,新技术不断涌现^[7],如时间敏感网络(TSN)、过程控制的对象连接与嵌入统一架构[OLE(Object linking and embedding) for process control unified architecture, OPC UA]等为工业网络互联互通提供了新基础^[8];5G、Wifi-6等为无线通信在工控领域的广泛应用提供了可能^[9];软件定义、虚拟化等为工业网络灵活管控提供了新方法^[10]。这些都为满足工业互联网中的“人-机-料-法-环”全要素智能互联与协同需求,重新构建融合互通、协同开放、统一管控、智能高效的新一代工业自动化系统架构提供了可能,将有力促进新一代工业革命的到来^[11]。本文将重点讨论传统工业自动化“金字塔”架构的升级转型方案,提出新型工业互联网的“云-边-端”协同新架构,探讨架构变革的关键技术及其带来的新机遇与挑战。

1 工业互联网总体现状

德国2018年通过“5G strategy for Germany”、“National industrial strategy 2030”推进5G及工业互

联网在工业领域的应用^[12]。欧盟 2020 年公布了新的欧洲工业战略 (EU industrial strategy), 帮助欧洲工业向数字化转型, 其中 5G 和基于数据的服务被认为是欧洲工业价值链的重要引擎^[13]。日本发布“White paper on manufacturing industries 2020”推进 5G 及工业互联网技术在工业制造领域的应用。韩国 2019 年发布《实现创新增长的 5G+战略》, 明确 5G 及工业互联网是推进制造创新发展的重要方向^[14]。

当前, 我国工业已经全面迈入绿色低碳新时期, 2021—2023 年是我国工业互联网的快速成长期^[15]。为深入实施工业互联网创新发展战略, 推动工业化和信息化在更广范围、更深程度、更高水平上融合发展, 在基础设施建设、深化融合应用、强化技术创新、壮大产业生态和提升安全水平方面大力推动工业互联网融合创新发展^[16]。我国工业互联网在智能制造相关领域的发展现状:

(1) 在政策方面^[17-19], 总体思路是“构建体系、制定标准、遴选标杆、建设平台”。近两年中, 国家密集出台了一系列关于工业互联网创新发展的政策文件, 具体包括 2020 年 3 月《关于推动工业互联网加快发展的通知》; 2020 年 10 月《“工业互联网+安全生产”行动计划(2021—2023 年)》; 2020 年 12 月《工业互联网创新发展行动计划(2021—2023 年)》; 2021 年 12 月出台的《“十四五”智能制造发展规划》中明确指出, 遴选 500 个以上引领行业发展的示范工厂, 培育 150 家以上智能制造系统解决方案供应商, 建成 120 个以上具有行业和区域影响力的工业互联网平台; 同月出台的《“十四五”原材料工业发展规划》中指出, 到 2025 年, 在原材料领域建设 100 个以上智能制造示范工厂, 10 家以上重点行业工业互联网平台, 加快探索原材料工业与“5G+工业互联网”融合发展, 打造更多典型应用场景, 赋能企业提质降本增效, 制定“工业互联网+重点行业”行动方案, 打造具有原材料行业特色的工业互联网平台; 2022 年 1 月《关于推动钢铁工业高质量发展的指导意见》中指出, 开展钢铁行业智能制造行动计划, 推进 5G、工业互联网、人工智能等技术在钢铁行业的应用, 打造 30 家以上智能工厂。

(2) 标准化方面^[20-21]。工业互联网标准体系包括基础共性、网络、平台、边缘计算、安全和应用六大类。当前, 工业互联网标准体系包括 418 项标准项目, 已发布国家标准 57 项、行业标准 3 项, 制定中国国家标准 23 项、行业标准 84 项, 待制定标准

251 项。在工业互联网的垂直行业应用中, 尤其是钢铁行业的标准方面, 按照“共性先立、急用先行”的原则, 根据行业需求, 分阶段建立其行业智能制造标准体系; 截止 2022 年 4 月, 钢铁行业智能制造标准方面, 已发布 7 项, 已报批 20 项, 在研 68 项, 待立项 36 项, 制定了包括《钢铁行业智能制造术语》、《钢铁工业数据分类与编码》、《钢铁行业智能工厂评价通则》、《钢铁行业智能工厂评价方法》和《钢铁行业智能工厂参考架构》等一系列基础标准, 为行业在后续的产业数字化转型起到标杆的基准作用。这些标准都是针对流程行业中离散工序、工艺流程、自动化流水线的制造行业的特点, 根据工厂现场环境的网络化情况, 制定现场专有网络、平台、计算、安全等规范标准; 围绕智能工厂数字化转型, 制定数字化交付、个性化定制、数字孪生等规范标准。

目前我国的钢铁、冶金工业正处于数字化转型、低碳减排的发展阶段, 工业互联网和智能制造数字化平台是重要技术手段, 当前已经累计制修订 400 余项关于智能制造的相关标准, 但是这其中与工业互联网、5G 等先进网络技术相结合的通用标准还较少, 未来需要针对工业互联网在垂直行业的场景特点, 制定更有针对性的垂直行业应用标准体系^[22]。

(3) 技术转型方面——工业互联网体系架构演进^[23-24]。为推进工业互联网发展, 中国工业互联网产业联盟于 2016 年 8 月发布了《工业互联网体系架构(版本 1.0)》(以下简称“体系架构 1.0”), 如图 1(a) 所示。体系架构 1.0 基于物理系统, 围绕网络、数据、安全三大方面主体形成闭环结构, 网络是数据传输的基础支撑, 数据是多业务驱动来源, 安全是平台运行的保障机制。根据这三个体系, 形成整体工业互联网架构模型, 面向现场设备的运行、面向企业内部与外部协同的优化、面向管理运营的决策机制, 共同构成了智能制造的网络化协同平台的基础设施架构模型。

为了更好地解决工业互联网在垂直行业的落地运行问题, 支撑网络渗透生产领域的发展, 工业互联网产业联盟进一步提出了工业互联网体系架构 2.0, 旨在构建更系统、更具有实用性的总体性框架, 如图 1(b) 所示。

工业互联网体系架构 2.0 包括了业务视图、功能架构和实施框架三大模块。业务视图明确了应用工业互联网实现数字化转型的目标、方向、业务场景及相应的数字化能力; 功能架构明确了企

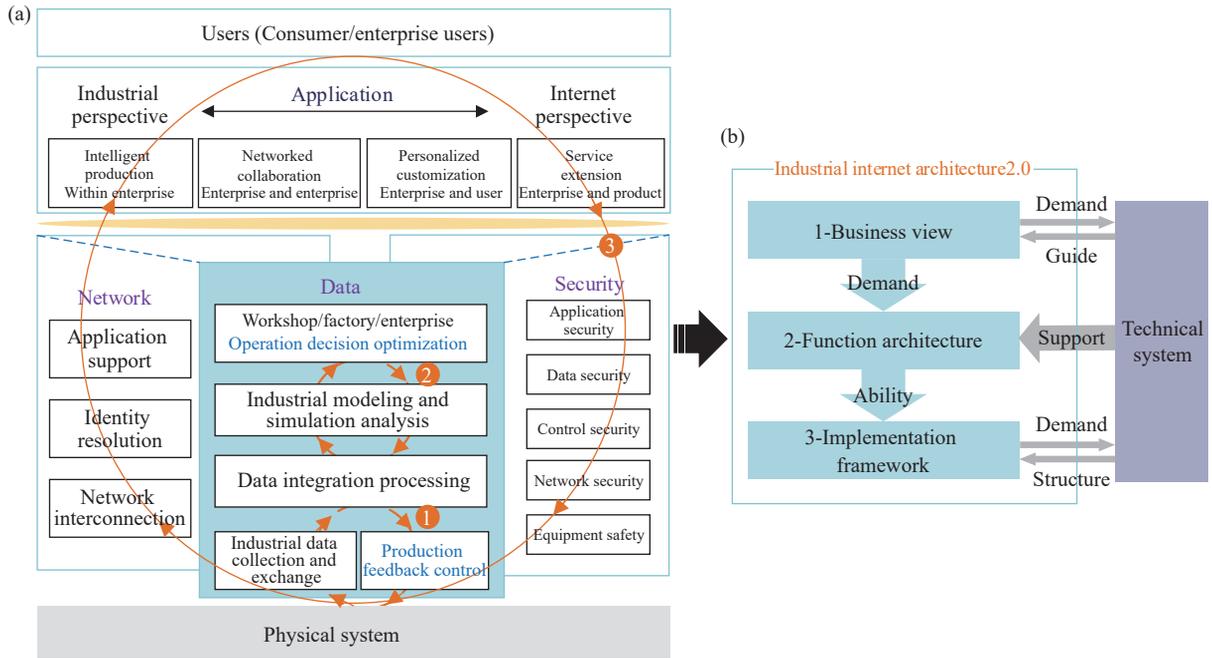


图 1 工业互联网体系架构演进: (a) architecture 1.0; (b) architecture 2.0

Fig.1 Evolution of industrial internet architecture: (a) architecture 1.0; (b) architecture 2.0

业支撑业务实现所需的核心功能、基本原理和关键要素;实施框架描述各项功能在企业落地实施的层级结构、软硬件系统和部署方式。

总而言之,随着国内大量的智能制造项目落地,但在数字化转型、节能减排、技术标准化等方面的工作还未完善,当前的工业互联网还处于技术发展和走向成熟的阶段,在一定程度上制约了我国智能制造水平的提升和规范化,效率还有待进一步提高^[25]。未来工业互联网将打破原有数据层级的结构,打通数据壁垒,实现智能制造向着智能化、扁平化、轻量化和绿色化的方向发展,在推动智能制造领域先进成熟技术方面起到引导和示范作用。

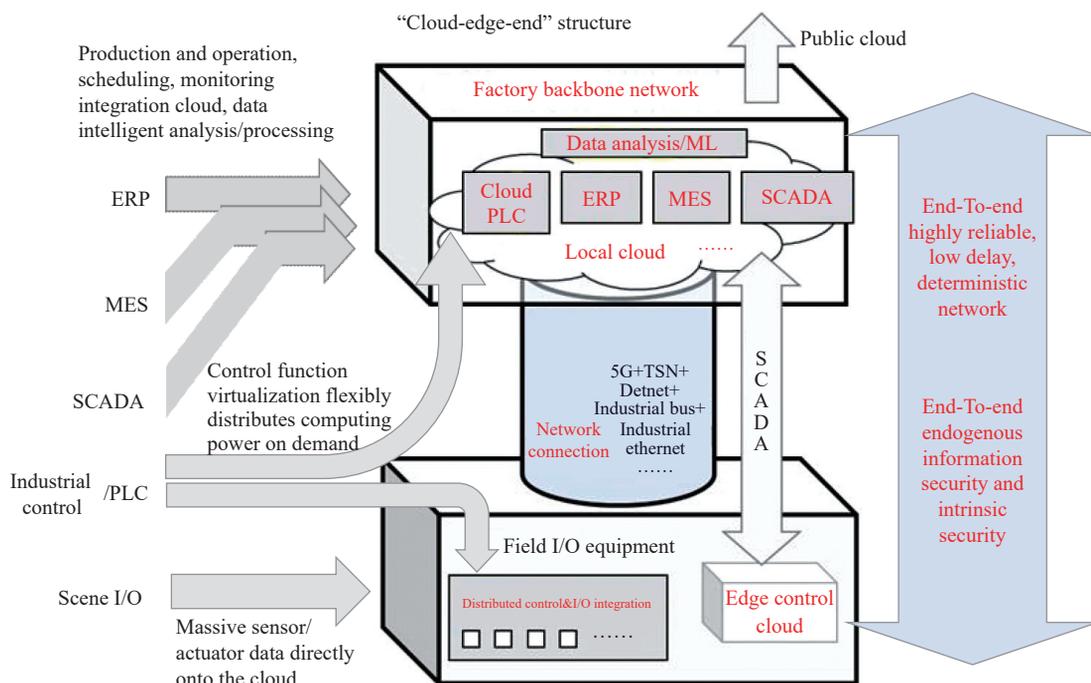
2 工业互联网体系架构

传统工业自动化“金字塔”架构限制了 OT 与 IT 之间的互通与协同,网络中数据无法跨层交互,数据无法高效流转;系统之间相互隔离、封闭、现场网络标准林立,国际电工委员会(International electrotechnical commission, IEC)确立的工业现场标准有 20 多种,这些标准无法统一起来;可编程逻辑控制器/分散控制系统(Programmable logic controller/Distributed control system, PLC/DCS)等计算资源有限,智能化发展空间受限。为了实现数据的高效流转,就必须打破传统封闭的金字塔架构,拉通现场级到工厂级的无线连接,实现传感/执行

器与云端控制器直接交互、生产要素间智能互联与协同能力,使得数据能够纵向跨层、横向跨系统和设备进行交互。这就要求有一张能够支撑数据高效流转的网络,此网络应具备综合承载工业自动化控制业务、安全生产、运行维护、物料调度和远程监控等多种业务的能力,并且能够实现与现存工业现场网络的互通,同时满足低时延、高可靠、确定性时延的要求。

封闭体系的打破,端到端的网络只是提供了基础条件,但是核心是要金字塔内部体系实现解耦。这种解耦分为两个层面:第一层面是体系架构的解耦,即不再是五层架构,数据无需跨层交互,在数据高效流转基础上,基于数据的智能化处理和应用,实现上层企业资源计划(Enterprise resource planning, ERP)、制造执行系统(Manufacturing execution system, MES)及数据采集与监视控制系统(Supervisory control and data acquisition, SCADA)的统一和融合,打破多层的约束,架构简单化和扁平化;第二层面是原金字塔内部控制系统的解耦,即分离 PLC/DCS 与被控设备,可以远程控制,同时实现 PLC/DCS 的软硬分离,PLC 可以根据被控设备时延要求按需配置,从局部控制过渡到整体控制,实现从自动化向智能化的发展。基于上述描述,金字塔架构向新的架构发展如图 2 所示。

结合参考文献[26],作者首创提出对现有工业网络架构变革的演进方向(图 1)。这种架构与工业

图 2 工业网络架构变革示意图^[26]Fig.2 Schematic of industrial network architecture change^[26]

互联网的云边协同架构相同之处都是一种扁平化、平台化的结构,实现云边端协同,IT/CT/OT的融合、控制、算力及网络的融合,达到网络和信息标准的统一。本文所提架构的变革将为工业自动化系统智能化升级提供了新机遇,也对相应支撑技术提出了挑战,新型工业互联网架构的实现需要解决控制虚拟化、网络融合协同、控制-网络一体化管控及数据智能处理等方面一系列的技术难点。

围绕这一新型架构,推出适用于工业互联网的第五代移动通信技术和时间敏感网络(5th generation mobile communication technology-time sensitive networking, 5G-TSN)协同传输关键技术。同时基于确定性网络的云化 PLC 技术,以及应用这些先进技术,构建自研的工业控制、算力与网络融合试验平台。通过该试验平台,可以将工业现场的复杂总线统一起来,满足人-机-物多要素灵活互联、柔性制造 IT/OT 多业务差异化 QoS 统一保障要求,按需实时调度工业网络通信资源、按需动态分配工控虚拟计算资源,支持实时变化的复杂工控业务,满足智能制造柔性生产需求。

3 适配新型工业网络架构的关键技术

3.1 5G-TSN 协同传输关键技术

在新的云边端架构上,PLC 资源可以根据按需云边端灵活部署,控制业务的及时性和可靠

性要求,工厂复杂场景多业务的共存就对支撑云边端数据传输的网络提出了更高的要求,需要有一张端到端低时延、高可靠、确定性的能支持多种业务需求的网络。该网络支持图 3 所示的三种业务模式:(1)D2Cmp,即现场设备数据可以直接上云;(2)C2D,即 PLC 到被控设备之间的数据传输;(3)C2C,即 PLC 之间的数据交互。除了这三种业务模式,还需要支持工业物联网相关业务,如监控数据上云、自动导引运输车(Automated guided vehicle, AGV)小车状态采集与控制等,这种可以归类到 D2Cmp 类业务。其中,C2D 分为两类:一类是传统的 PLC 与被控设备 device 之间的通信,即分布式控制;另一类是 PLC 放置在云端或者边缘云端后与被控设备的通信。除了分布式控制 C2D 业务是工业现场现存业务外,另一类 C2D 业务及 D2Cmp、C2C 业务都是新的架构下衍生出来新的模式。

由于工业现场异构网络标准各异,不同系统、设备、协议难以兼容互通,为了满足工业现场网络低时延、高可靠性、确定性要求的同时实现网络的互通,美国电气和电子工程师协会(Institute of electrical and electronics engineers, IEEE)提出了 TSN 的标准,TSN 基于数据链路层实现了工业现场异构网络的互通与融合。TSN 因能为强实时需求业务提供确定时延转发且兼容以太网协议,受

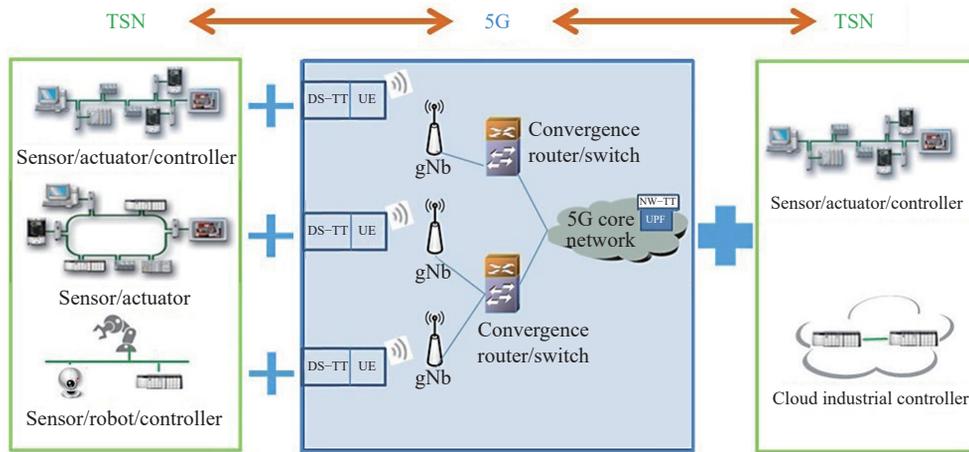


图3 基于5G-TSN的新一代工业网络

Fig.3 New generation industrial network based on 5G-TSN

到工控网络领域的青睐。然而，随着海量传感器及AGV等智能化设备的应用，工业终端无线接入及移动连接需求愈发迫切，有线TSN难以满足智能工厂数字化与智能化需求，5G-TSN协同传输成为智能工厂网络的重要演进趋势。

由于5G和TSN在通信机理、协议机制、承载资源和管控模式方面存在不同，所以要实现网络的融合和协同，需要解决异构网络统一融合架构、异构网络时钟同步机制和软件定义网络(Software defined network, SDN)融合管控和资源调度技术等多方面的技术难题。

(1) 5G-TSN异构网络融合架构。

5G网络对TSN是透明性的，通过终端侧TSN转换器(Device-side TSN translator, DS-TT)和网络侧TSN转换器(Network side TSN converter, NW-TT)提供TSN的入口和出口端口，两个TSN转换器(TT)将5G网络连接到TSN网络，如图4所示。为了不对5G现有网元及功能造成影响，在用户面除了DS-TT和NW-TT外，5G系统及网元将不会感知到TSN网络及功能，因此，5G-TSN的资源协同及联合配置发生在DS-TT及NW-TT中，主要在用户面和控制面进行了机制增强。5G-TSN网络拥有IEEE 802.1Qcc协议定义的全集中式模型网络架构，因此，5G控制面增加了TSN应用功能(AF)网元与集中式网络配置(CNC)交互，实现了CNC对5G-TSN逻辑网桥的配置和管理。

在用户面，主要是在UPF中扩展支持网络侧的NW-TT设备，在终端侧增加DS-TT功能，这两个转换器支持IEEE802.1AS、802.1AB和802.1Qbv协议，可以在不对现有5G内部网元造成影响的前提下，将TSN域的功能透明传输给5G网络。此

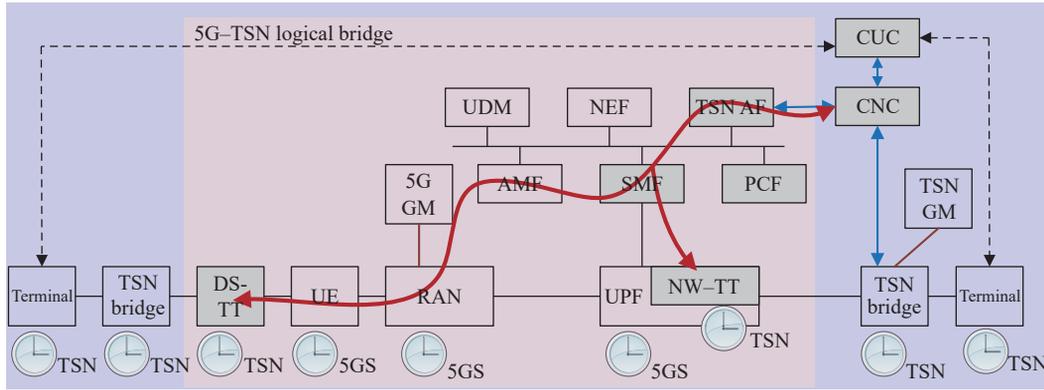
外，5G和TSN域保持时间同步，用户面UPF可以对TSN域的数据进行精准时间调度和转发，5G作为TSN域中端到端的透明传输通道，由NW-TT和DS-TT提供数据的转发和传输。

在控制面，增加了TSN-AF，专门用来做控制层面的功能实体转换，实现TSN业务流参数在5G主时钟下的修正和传输，5G域中对TSN业务流的时延精准控制，以及5G基站对TSN域业务确定性传输需求。此外，TSN-AF还与UPF、DS-TT交互，满足5G-TSN透明传输的网桥配置与管理功能。

(2) 5G-TSN网络时钟适配机制。

5G和TSN系统分属于两个独立的时钟域，即5G时钟域和TSN时钟域，这两个时钟域分别同步于5G主时钟(Master clock, GM)原子钟和TSN GM原子钟。由于TSN网络的复杂性，它可以兼容不同的工业现场协议(Profibus、Modbus、CAN等)，也就是说按照这些工业现场总线类型的划分，TSN网络可以有多个工作域，每个工作域采用各自的TSN时钟源或者原子钟，所以5G系统在与TSN网络融合时，不可能做到时间在物理上的完全“同步”，但可以“适配”多个不同的TSN时钟源，5G-TSN的时钟适配机制如图5所示。

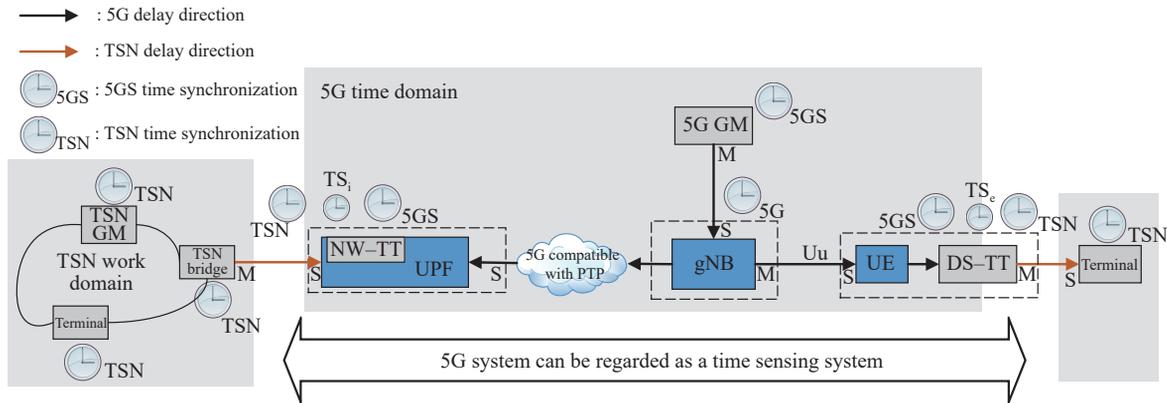
首先，5G系统中的NW-TT和DS-TT需要支持IEEE802.1AS协议，并与TSN保持时钟同步，执行与IEEE 802.1AS相关的所有功能，如通用精确时间协议(gPTP)、时间戳和最佳主时钟算法(BMCA)等，所以DS-TT和NW-TT需要同时支持5G网络和TSN两种时钟源，并需要计算两种时钟的偏差。其次，得到这种偏差计算值后，两种异构网络的时钟源协同可以通过归一化处理、指标映射和相互关联的技术路线实现。最后，通过这种时钟补



Notes: AF represents application function; AMF represents access management function; CNC represents centralized network configuration; CUC represents centralized user configuration; DS-TT represents TSN converter at terminal side; GM represents master clock; NEF represents network open function; NW-TT represents network side TSN converter; PCF represents policy control function; RAN represents wireless access network; SMF represents session management function; TSN represents time sensitive network; UDM represents unified data management; UE represents user equipment; UPF represents user plane function

图 4 5G-TSN 端到端网络架构^[27]

Fig.4 5G-TSN end-to-end network architecture^[27]



Notes: gNB represents 5G base station; M represents master; PTP represents precision time protocol; S represents slave

图 5 5G-TSN 网络的时钟适配机制^[27]

Fig.5 Clock adaptation mechanism between 5G and TSN networks^[27]

偿方法形成异构网络协同节点的时钟建模。

当 TSN 域中的业务需要 DS-TT 和 NW-TT 通过门控进行流量调度以消除 5G 网络的时延抖动时, 通知给 5G 网络的报文达到时间和周期时间将以 TSN 域的时钟为基准。因此, 5G 网络收到调度设置请求后, 调度周期需要先转化为以 5G 时钟为基准的时间, 然后进行流量门控的调度, 这一过程中时钟消息的传递可以采用专有通道、时间隧道和逐跳传递等关键技术来实现。

(3) 基于 SDN 融合管控和资源调度技术。

考虑到 5G-TSN 在遵从的标准、时间同步方式、资源维度、调度模式和 QoS 管控模式等方面的差异性, 为实现两者的协同融合, 本文构建基于 SDN 融合管控和资源调度的 5G-TSN 技术路线, 如图 6 所示。

此技术路线利用了 SDN 具有承载与控制分离的特点, SDN 控制模型支持与多种接入网络的对接。针对 5G-TSN 系统传输及实时调度需求, 面向工业业务多样化特征的接口与控制策略配置及管理模型, 实现跨网跨域全局信息采集, 感知工业环境、工业业务特征、5G-TSN 网络资源与负载、TSN 业务队列等关键信息, 支撑异构信息间的关联分析, 从而进行资源及配置优化决策。

通过软件定义网络配置 (Software defined network configuration, SDNC) 集成 CNC 功能, 定义 SDN-C/CNC 与 5G-TSN 和 AF、SDNC/CNC 与 5G-TSN 新型网关中的管理实体间等新接口, 实现承载 TSN 业务发现、TSN 网络拓扑、TSN 队列与优先级、5G 资源及负载等管理与控制信息, 进而实现 5G 与 TSN 两种异构网络的信息和管控模式的互通, 从

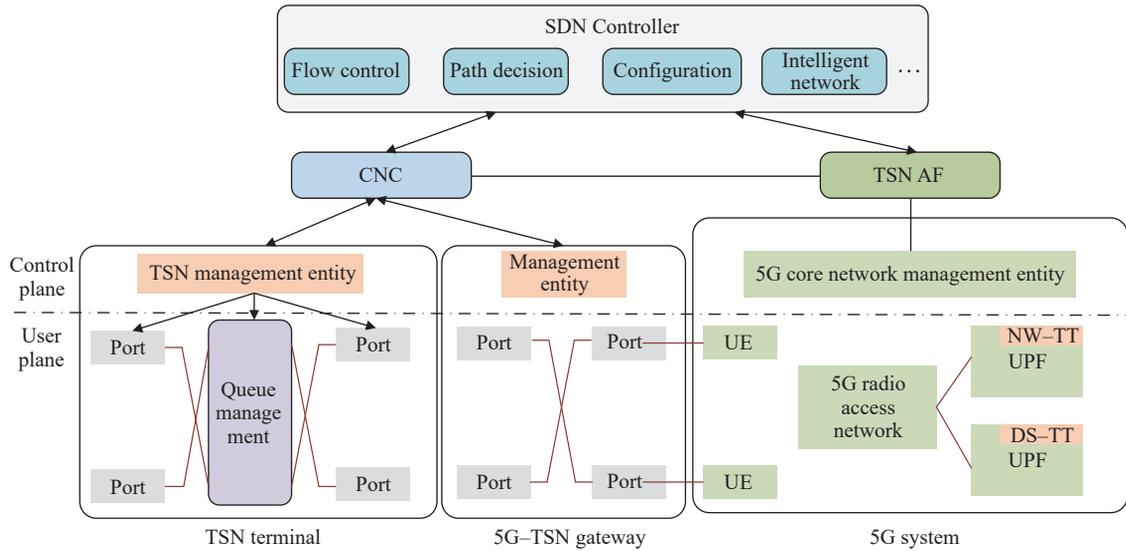


图6 基于SDN融合管控和资源调度的5G-TSN技术路线

Fig.6 5G-TSN technical route based on SDN integration management and resource scheduling

而达到跨5G-TSN的端到端低时延、确定性业务传递控制。

3.2 基于确定性网络的云化PLC技术

3.2.1 工业控制虚拟化

将ISA-95标准定义的金字塔式模型结构中的各层进行详细分析。第一层是各类传感器、执行器等仪器设备，这层对应扁平化网络架构中的感知层，其所需做的仅需要将原先数据化能力弱的设备进行数字化改造即可；第二层是生产现场设备操控的可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)，该层对上实现数据感知层数据的汇总、处理与转发，对下实现设备控制信息的传递，对数据传递起承上启下的作用，是影响数据高效流转的关键；第三层是生产过程监控及数据采集的SCADA(Supervisory control and data acquisition)系统及人机接口(Human-machine interface, HMI)，这一层是运维管理层；第四层是产品制造调度排程的MES(Manufacturing execution system)、APS(Advanced planning system)等；第五层企业管理业务系统，包括ERP、PLM、SCM等。第四、五层已经属于IT层次，第三层虽然是工厂内设备的运营管理层，但主要是数据的监管和处理，从技术角度上讲，与第四、五层可以通过统一的云平台来实现，从第三层到第一层比较容易实现。

第二层中原有的PLC/DCS系统工业自动化的核心，对上负责下层设备(I/O、伺服器、变频器等)状态数据上报的转发，对下实现被控设备信息的传递和控制，原有PLC/DCS与被控设备之间不解耦，且其实现中软硬一体化，限制了数据的高效流

转。要打破工业体系的封闭体系架构，PLC/DCS的虚拟化是关键，首先要将PLC/DCS的软硬分离，基于通用的硬件设备来代替专用的PLC/DCS，实现软硬分离基础上，继而就实现了PLC/DCS与被控设备的解耦。然后将PLC处理功能虚拟化、可扩展的软件对象实例来实现；在虚拟化的基础上依据被控实体要求，在云边端灵活、合理地分配PLC/DCS所需的计算、通信、存储等软硬件资源，在满足工控业务执行服务质量要求的前提下，实现系统资源的优化配置，从而实现了封闭跨层体系的扁平化。

如图7所示，控制系统的虚拟化/云化是打破原有封闭式工业控制系统的基础。一方面可以充分利用云化硬件资源实现一对多的控制，节约大量工控设备部署投资成本；另一方面可以通过控制系统的集中化，实现全局资源的统一控制和优化，为智能化决策提供依据，为实现真正的智能生产奠定基础。

3.2.2 5G云化工业控制系统架构及技术路线

在控制虚拟化的基础上，结合图2的工业互联网整体架构，引入适合工业场景的5G云化PLC控制技术。基于5G云化工业控制系统架构如图8所示，该系统基于通用处理器与实时操作系统实现，云端由PLC IDE开发环境和PLC Runtime运行环境构成，云化PLC RTE通过5G/TSN网络和工业现场传感器、执行器进行通信与控制，在现场部署本地PLC并通过协议转换可实现云化PLC与本地PLC切换。云化PLC系统上层涵盖PLC编程、运动控制和机器视觉等功能的统一运行管理，

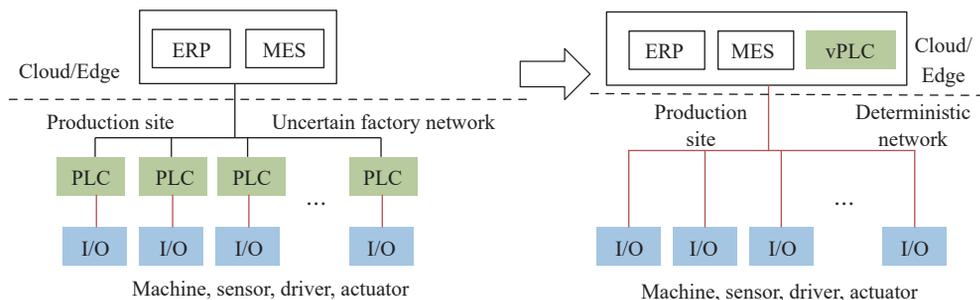


图 7 PLC 虚拟化/云化示意图
Fig.7 Schematic of the PLC virtualization/cloud

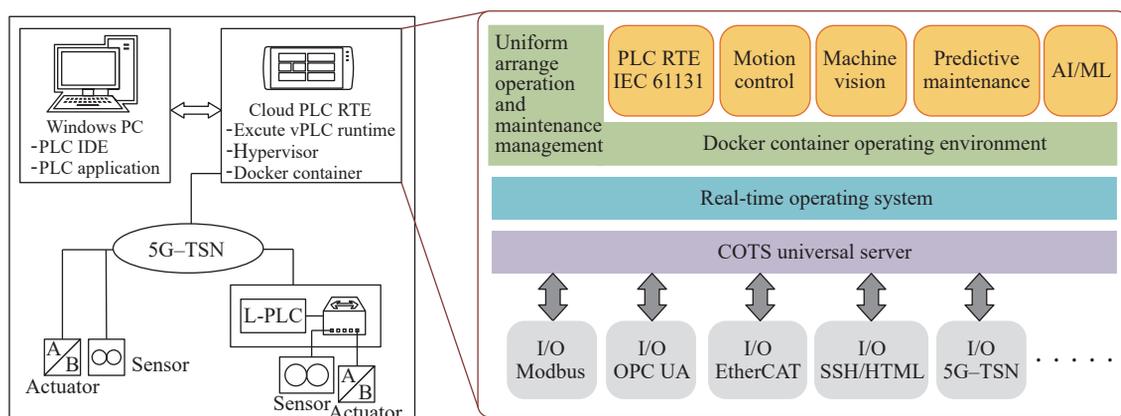


图 8 5G 云化工业控制系统
Fig.8 5G cloud industry control system

PLC 运行环境通过 Docker 容器实现并运行于实时操作系统, 通过现场总线协议实现现场设备管理。

5G 云化工业控制系统选择“CODESYS Control for Linux”软 PLC 作为 PLC 运行时系统, 能够支持 EtherCAT 和 Modbus 等多种工业总线协议, 满足操作系统及控制要求。云、边端 PLC 系统架构如图 9 所示, 云化 PLC 采用容器化方式实现, 进而达到 PLC runtime 在通用 x86 平台灵活部署的要求。

5G 云化工业控制系统技术路线包括: (1) 云化 PLC 原型系统研究。①结合 Soft PLC、实时操作系统 (RTOS) 和虚拟化环境 (Docker 或 VM) 等技术, 构建云化 PLC 系统架构; ②基于云化 PLC 系统架构, 分析 PLC 实时控制和 I/O 处理性能指标, 进一步基于 x86 通用服务器, 设计云化 PLC 功能模块与实现; ③研究面向云化 PLC 的实时虚拟化运行环境、基于实时静态分区的虚拟机管理程序, 设计实时虚拟机托管方案, 实现实时虚拟机管理功能; ④针对 x86 服务器运行环境, 基于 Docker 和 VM 虚拟化技术, 加载虚拟化 PLC 运行实例, 实现 PLC 多实例可扩展云化部署。

(2) 基于 5G 的云化 PLC 远程控制。①针对云化 PLC 实际应用场景, 分析明确虚拟 PLC 组网互

通技术要求, 包括虚拟化 PLC 闭环控制所需的稳定性、扫描周期和传输速率等技术指标; ②研究适配云化 PLC 的通信网络 (5G、工业总线、工业以太网) 配置方案, 明确云化 PLC 场景下的网络性能指标要求, 提出云化 PLC 工控网络配置方法; ③基于实际控制应用场景, 给出适配现场 5G、工业总线和以太网环境的虚拟 PLC 组网方案, 扩展云化 PLC 的网络支持能力, 实现云化 PLC 与远程 I/O 设备的高性能网络连接; ④设计无线网络故障检测机制, 实时监测网络质量, 一旦出现故障实时切换至本地 PLC 控制模式。

4 控制资源云化分配及云网一体化协同场景

为了验证基于图 2 中工业网络架构变革下的云网一体化技术路线, 北京科技大学搭建了控制资源云化分配及云网一体化协同应用场景, 该场景基于前述智能新型工业网络架构, 依据业务需求, 实现控制资源在云、边端的灵活分配。具体分为: (1) 面向实时运动控制的 5G 云化 PLC 与 EtherCAT 融合系统; (2) 面向实时运动控制的 EtherCAT 与 TSN 融合系统。

4.1 面向实时运动控制的5G云化PLC与EtherCAT融合系统

设计了一种多天车协同控制系统，该系统基于云化PLC的多天车协同控制思路，如图10所示。

使用云化PLC取代工厂中的传统硬件PLC作为系统的控制器，系统采用上下级协同的控制方式，上级云化PLC部署在5G移动边缘计算(Mobile edge computing, MEC)服务器上，模拟真实生产车间中的多天车调度系统；下级本地PLC部署在工控机上接收云化PLC的调度命令，控制天车完成物料吊运工作，上下级之间采用UDP协议进行数

据传输，通过5G MEC网络通信架构实现上级PLC对下级PLC的远程控制。

“C-vPLC”作为上级云化PLC，一方面负责接收目标检测系统识别的传送带上的物料信息，另一方面接收下级PLC反馈的天车各个轴实时位置、状态、速度等信息，对接收到的信息进行逻辑处理和计算后，将产生的控制命令下传给下级PLC。

“L-vPLC-1”作为下级本地PLC控制1号天车运行，通过EtherCAT总线与1号天车对应的三个伺服驱动器相连，实现对1号天车X轴、Y轴、Z轴三个电机的运动控制。在每个通信周期内，

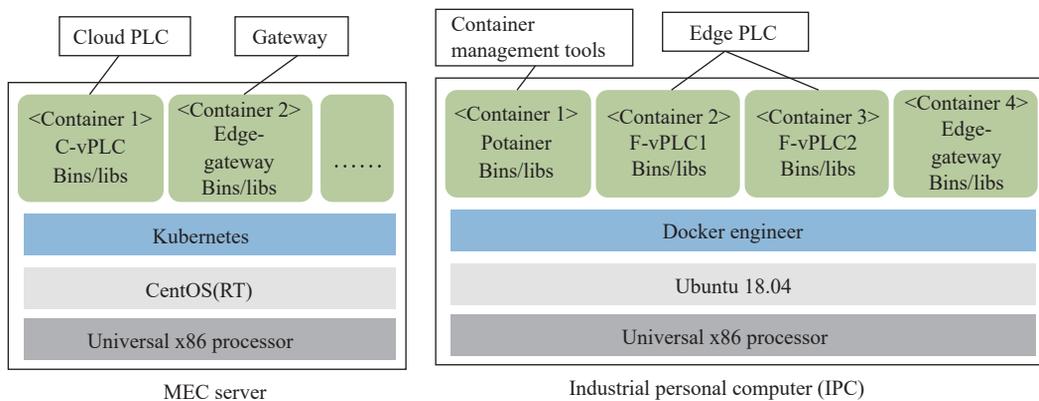


图9 云、边端 PLC 系统架构

Fig.9 Cloud and edge PLC system architecture

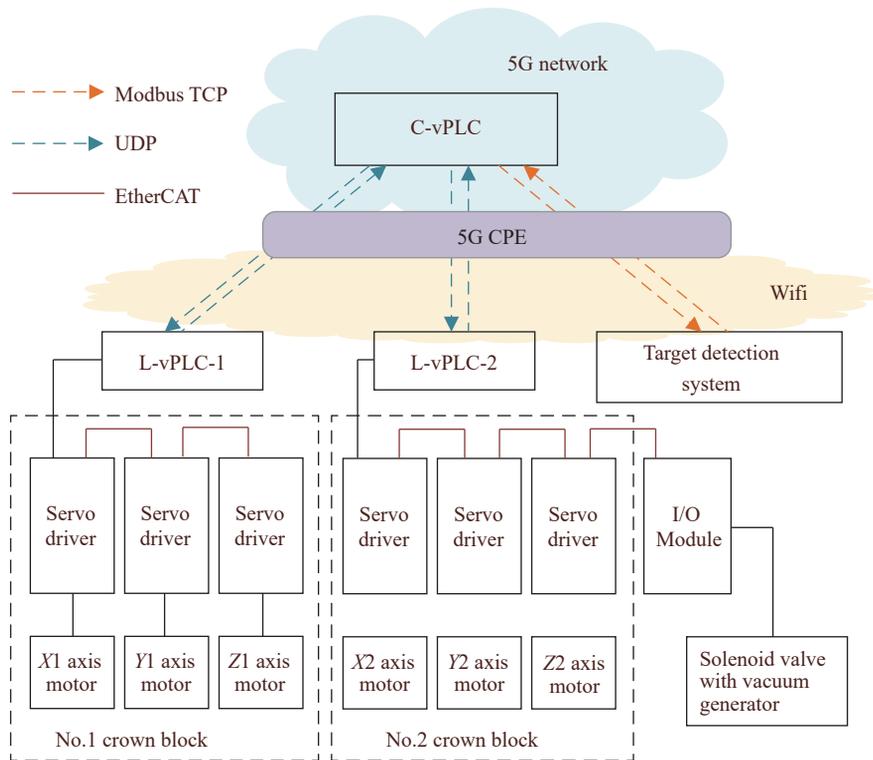


图10 基于云化PLC的多天车协同控制系统

Fig.10 Cloud-based PLC multi-crane collaborative control system

“L-vPLC-1”将 1 号天车三个轴的当前状态、位置、速度和加速度等信息反馈给“C-vPLC”,同时接收“C-vPLC”下发的控制命令,根据控制命令执行相应的动作。

与“L-vPLC-1”类似,“L-vPLC-2”作为下级 PLC 控制 2 号天车的运行,并在每个通信周期内与“C-vPLC”互相传输数据。除此之外,“C-vPLC”还通过 EtherCAT 总线协议控制 I/O 模块,进而控制真空发生器的接通和关断。

在基于云化 PLC 的多天车协同控制原型系统中,云化 PLC 需要分别与两个本地 PLC 进行双向的数据传输,因此需要配置四对网络变量用于它们之间的数据传输。云化 PLC 传给本地 PLC 的网络变量包括:各个轴上电势能信号、绝对移动激活信号、各个轴移动的目标位置、速度、加速度、减速度和吸盘势能信号。下级 PLC 传给上级 PLC 的网络变量包括:各个轴上电完成信号、各个轴实时位置信号、绝对移动完成信号和各个轴实时状态信号。系统原型试验床构建及验证如图 11 所示。

原型试验床模拟两台无人天车,可在 X-Y-Z

这三个方向进行运动控制,本地 PLC 通过 EtherCAT 与伺服器通信。基于初步构建的网络试验平台,开展端到端时延、跨网时间同步精度的测试,如图 11(b)所示。目前网络的端到端时延小于 5 ms,跨网时间同步精度小于 100 ns,相关性能指标均达到当前业界领先水平。

4.2 面向实时运动控制的 EtherCAT 与 TSN 融合系统

针对多天车协同控制系统,重新引入 TSN 网络,如图 12 所示。在 EtherCAT 和 TSN 融合组网的场景下,其融合组网实现方式为:设置 TSN 交换机,使 EtherCAT 报文经过 TSN 交换机时,在其以太网帧头中插入 4 个字节的 VLAN 字段,使 EtherCAT 报文到达 EtherCAT 从站之前去掉 VLAN 标签,从而使之互相识别。

该场景下,全局的时间同步实现分为三个步骤:(1)TSN 网络内部以 GrandMaster 时钟为参考,通过 gPTP 同步方式,实现 TSN 域的时间同步;(2)EtherCAT 主站作为从节点,TSN 交换机作为主节点,通过 gPTP 同步方式,实现 EtherCAT 主站与 TSN 域的时间同步;(3)EtherCAT 主站作为参考时

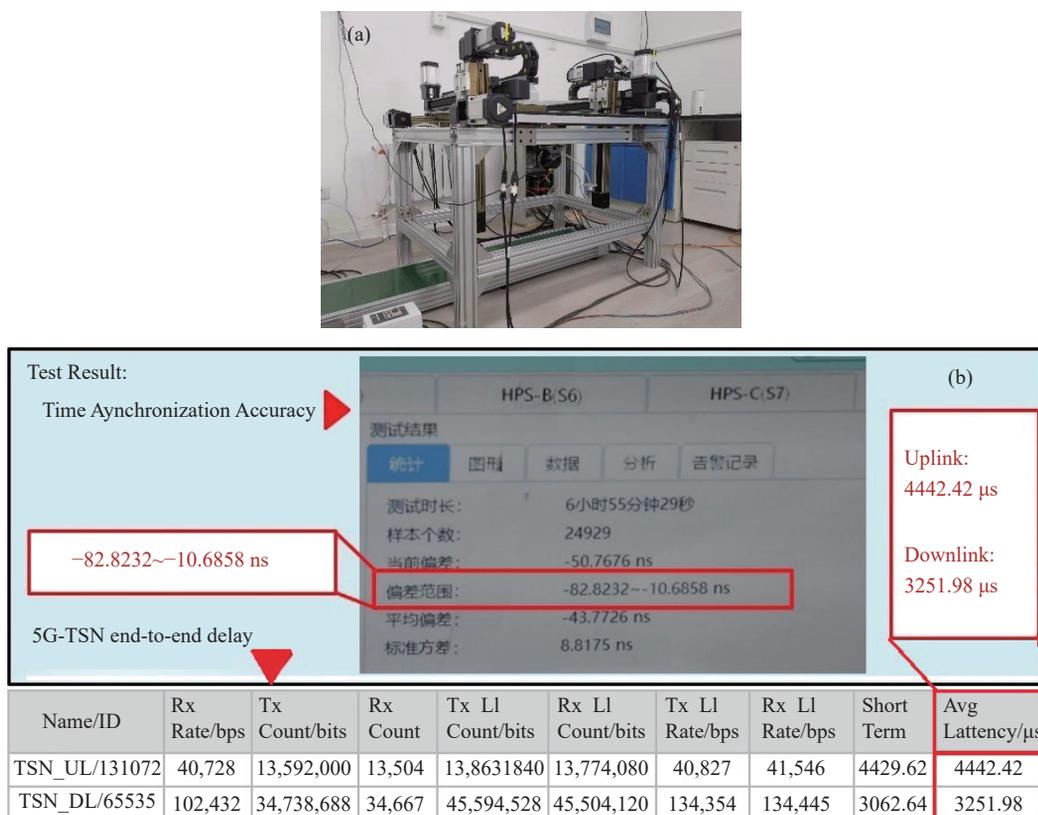


图 11 多天车协同控制系统原型试验床构建及验证。(a) 多天车协同控制系统原型试验床;(b) 5G 云化 PLC 与 EtherCAT 融合系统指令端到端传输测试结果

Fig.11 Construction and verification of the prototype testbed for multi-crown block collaborative system: (a) prototype testbed for the multi-crown block collaborative control system; (b) end-to-end test results of 5G cloud PLC and EtherCAT integration system commands

钟,通过 DC 同步方式,实现 EtherCAT 域的时间同步。

在网络开始运行之前,集中用户配置(CUC)会向网络集中控制器(CNC)发起检索网络物理拓扑请求,CNC 遍历网络拓扑后将结果返回至 CUC。CNC 在一个 TSN Domain 内,实现设备监控管理、网络拓扑发现、流量监控及调优、业务建模及调度模型下发等功能;CUC 负责用户对网络需求的翻译及网络信息和设备配置的 Domain 间协同。TSN 设备(终端、网桥)除了支持 TSN 相关转发特性,还支持相关在线测量协议,实时将相关状态上传给管理单元。本系统通过 CNC 与 CUC 对 TSN 网络链路进行周期性监测,并根据链路变化触发传播时延测量机制,保证了 EtherCAT 与 TSN 融合组网场景下端到端的高精度时间同步,保障整个系统的正常运行。

同样地,在图 11(a)的多天车协同控制系统原型试验床上,结合图 12 的组网原理,再次引入 TSN

网络,实现面向实时运动控制的 EtherCAT 与 TSN 融合系统,由于传播时延和场景中端到端高精度时间同步是该系统的重要测量指标。对 TSN 网络时间同步和跨网时间同步两项指标的测试结果如图 13 所示。

EtherCAT 和 TSN 融合组网测试,由人机交互界面、数据采集模块、计算模块、显示模块和数据存储模块组成,能够对 TSN 网络、EtherCAT 与 TSN 网络间的时间同步机制进行验证。由于 TSN 采用现有的标准协议,因而图 13(a)显示,不管是一跳还是两跳 TSN 交换机,其时间同步的误差均在 20 μs 以内,这也符合 TSN 协议的规范要求;而 EtherCAT 和 TSN 跨网的时间同步机制测试则表明,随着系统同步时间的延长,其同步误差在 100 ~ 400 μs 之间震荡,也就是跨网协议的时间同步和时延在微秒级转换(图 13(b)),充分表明 EtherCAT 和 TSN 融合组网方案的有效性,可以在一些实时运动控制的场景中应用。

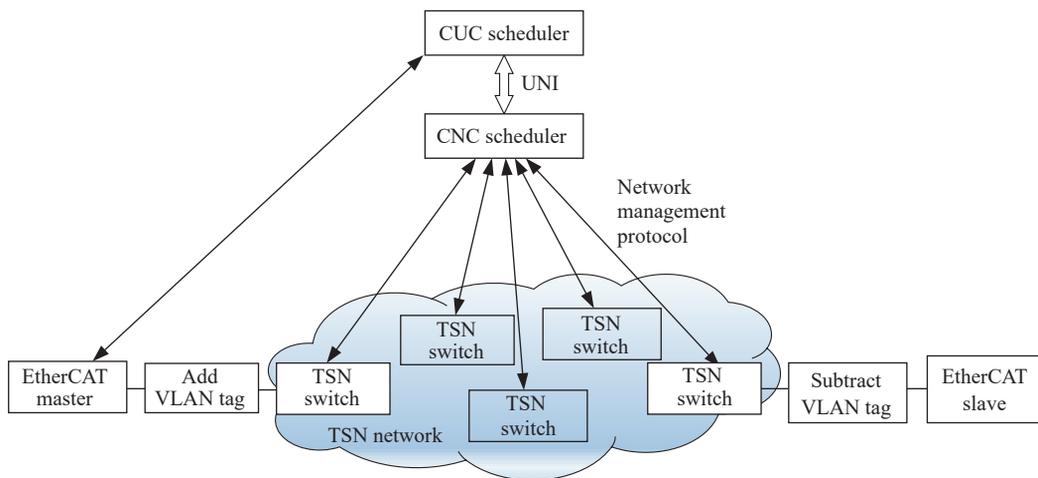


图 12 EtherCAT 和 TSN 融合组网

Fig.12 Integrated networking of EtherCAT and TSN

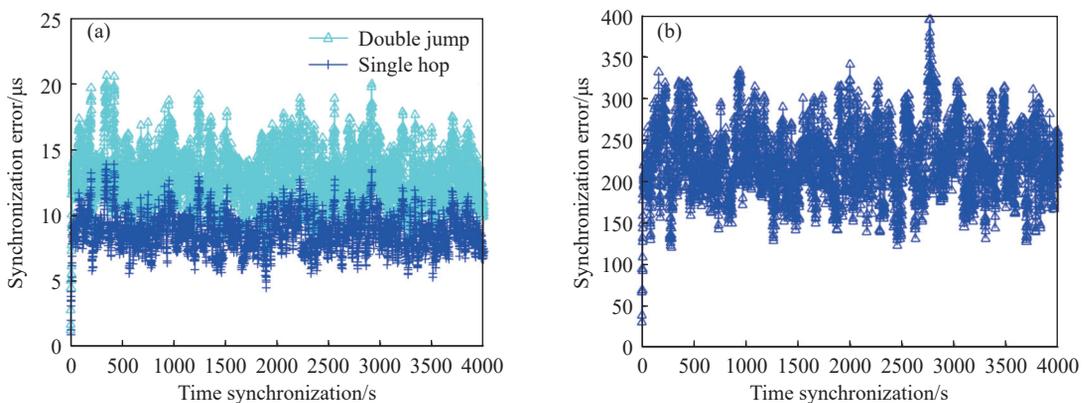


图 13 端到端高精度时间同步机制测试。(a) TSN 网络时间同步; (b) EtherCAT 和 TSN 跨网时间同步

Fig.13 End-to-end high-precision time synchronization mechanism test: (a) TSN network time synchronization; (b) cross network time synchronization between EtherCAT and TSN

5 结论

基于现有工业控制体系架构, 在 5G、人工智能等技术的推动及其与工业知识的融合下, 工业智能化在平台化、智能化方面已经有示范工程, 特别是在产业链、供应链协同和预测性维护方面, 可以有效地提升整体效率, 降低运维成本。但现有这种方式, 相当于将产业互联网的思路用于工业领域, 利用大数据处理的方式来提高效率, 对于工业自动化封闭的金字塔架构还没有触及, 确切的说, 应该还是工业+互联网技术, 并不是真正的融合。在智能工厂全要素互联及 IT、CT 与 OT 融合趋势驱动下, 需要打破传统的封闭体系架构, 实现工业控制系统内部的扁平化、设备及软件的国产化和专有设备的通用化, 以支持内部数据的高效流转, 控制功能的全局化, 由预测性维护转向制造过程的智能决策和柔性控制, 实现工业与互联网的真正融合。

由于新架构完全颠覆了传统的封闭式体系架构, 其必然会面临不少技术难点, 同时也会带来新的挑战 and 机遇。其中, 控制功能的虚拟化和云化、多域异构网络的高效互通及融合、管控安全及端到端的信息安全是必须攻克的难关。原封闭体系内数据的高效流转、控制的云化和网络的一体化, 使得控制及网络数据也参与到数据处理中, 数据呈现多维化、系统化趋势, 数据处理方面多了很多新的机遇, 同时网络、控制及计算资源可以一体化分配和融合, 使得工业系统整体上更为高效和灵活, 也为柔性管控提供了基础。目前这一理论体系还不完善, 关键技术也需要逐个突破, 是工业互联网下一阶段研究和发展的重点。

参 考 文 献

- [1] Qi J, Wang W, Chen M X, et al. Concept, architecture and key technologies of industrial internet. *Chin J Internet Things*, 2022, 6(2): 38
(亓晋, 王微, 陈孟玺, 等. 工业互联网的概念、体系架构及关键技术. 物联网学报, 2022, 6(2): 38)
- [2] Jagatheesaperumal S K, Rahouti M, Ahmad K, et al. The Duo of artificial intelligence and big data for industry 4.0: Applications, techniques, challenges, and future research directions. *IEEE Internet Things J*, 2022, 9(15): 12861
- [3] Javaid M, Haleem A, Singh R P, et al. Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study. *J Ind Intg Mgmt*, 2022, 7(1): 83
- [4] Yuan C X, Li G Y, Kamarthi S, et al. Trends in intelligent manufacturing research: A keyword co-occurrence network based review. *J Intell Manuf*, 2022, 33(2): 425
- [5] Wan J F, Tang S L, Shu Z G, et al. Software-defined industrial Internet of Things in the context of industry 4.0. *IEEE Sens J*, 2016, 16(20): 7373
- [6] Ma N F, Yao X F, Wang K S. Current status and prospect of future internet-oriented wisdom manufacturing. *Sci Sin (Technol)*, 2022, 52(1): 55
(马南峰, 姚锡凡, 王柯赛. 面向未来互联网的智慧制造研究现状与展望. 中国科学:技术科学, 2022, 52(1): 55)
- [7] Wollschlaeger M, Sauter T, Jasperneite J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. *IEEE Ind Electron Mag*, 2017, 11(1): 17
- [8] Pop P, Zarrin B, Barzegaran M, et al. The FORA fog computing platform for industrial IoT. *Inf Syst*, 2021, 98: 101727
- [9] Sun L, Wang J Q, Lin S J, et al. Research on 5G-TSN joint scheduling mechanism based on radio channel information. *J Commun*, 2021, 42(12): 65
(孙雷, 王健全, 林尚静, 等. 基于无线信道信息的5G与TSN联合调度机制研究. 通信学报, 2021, 42(12): 65)
- [10] Liu Q, Shao X, Yang J P, et al. Multiscale modeling and collaborative manufacturing for steelmaking plants. *Chin J Eng*, 2021, 43(12): 1698
(刘青, 邵鑫, 杨建平, 等. 炼钢厂多尺度建模与协同制造. 工程科学学报, 2021, 43(12): 1698)
- [11] Zhang L. Application of 5G network in iron and steel industry equipment data fast access platform. *Metall Ind Autom*, 2021, 45(4): 1
(张丽. 5G网络在钢铁行业设备数据快速接入平台中的应用. 冶金自动化, 2021, 45(4): 1)
- [12] Alonzo M, Baracca P, Khosravirad S R, et al. Cell-free and user-centric massive MIMO architectures for reliable communications in indoor factory environments. *IEEE Open J Commun Soc*, 2021, 2: 1390
- [13] Briglauer W, Stocker V, Whalley J. Public policy targets in EU broadband markets: The role of technological neutrality. *Telecommun Policy*, 2020, 44(5): 101908
- [14] Zhu P K, Yoshida Y, Kanno A, et al. High-fidelity indoor MIMO radio access for 5G and beyond based on legacy multimode fiber and real-time analog-to-digital-compression. *Opt Express*, 2021, 29(2): 1945
- [15] Li B H, Chai X D, Liu Y, et al. Intelligent manufacturing enabled by information and communication technology in industrial environment. *Strateg Study CAE*, 2022, 24(2): 75
(李伯虎, 柴旭东, 刘阳, 等. 工业环境下信息通信类技术赋能智能制造研究. 中国工程科学, 2022, 24(2): 75)
- [16] Tian H, He S, Lin S J, et al. Survey on cooperative fusion technologies with perception, communication and control coupled in industrial Internet. *J Commun*, 2021, 42(10): 211
(田辉, 贺硕, 林尚静, 等. 工业互联网感知通信控制协同融合技术研究综述. 通信学报, 2021, 42(10): 211)
- [17] Ren L, Jia Z Z, Lai L Y J, et al. Data-driven industrial intelligence:

- Current status and future directions. *Comput Integr Manuf Syst*, 2022, 28(7): 1913
(任磊, 贾子翟, 赖李媛君, 等. 数据驱动的工业智能: 现状与展望. 计算机集成制造系统, 2022, 28(7): 1913)
- [18] Cai Y P, Yao Z C, Li T C. A survey on time-sensitive networking: Standards and state-of-the-art. *Chin J Comput*, 2021, 44(7): 1378
(蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述. 计算机学报, 2021, 44(7): 1378)
- [19] Chai T Y, Liu Q, Ding J L, et al. Perspectives on industrial-internet-driven intelligent optimized manufacturing mode for process industries. *Sci Sin (Technol)*, 2022, 52(1): 14
(柴天佑, 刘强, 丁进良, 等. 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望. 中国科学:技术科学, 2022, 52(1): 14)
- [20] An M Y, Wang X Y. Boosting the high-quality development of China's steel industry with intelligent manufacturing. *Metall Economy Manag*, 2022(2): 30
(安梦越, 王兴艳. 以智能制造助力中国钢铁行业高质量发展. 冶金经济与管理, 2022(2): 30)
- [21] Zhang B, Wang F Z, Xu L Q. Brief analysis on the current situation and demand of standardization of industrial Internet platform in China. *China Qual Stand Rev*, 2022(1): 59
(张斌, 王法中, 许立前. 我国工业互联网平台标准化现状及需求浅析. 中国质量与标准导报, 2022(1): 59)
- [22] Zang J Y, Liu Y F, Wang B C, et al. Technology forecasting and roadmapping of intelligent manufacturing by 2035. *J Mech Eng*, 2022, 58(4): 285
(臧冀原, 刘宇飞, 王柏村, 等. 面向2035的智能制造技术预见和路线图研究. 机械工程学报, 2022, 58(4): 285)
- [23] Industrial Internet Industry Alliance. Industrial internet architecture (2.0) [R/OL]. Report Online (2020-04) [2022-08-01]. http://www.ii-alliance.org/upload/202004/0430_162140_875.pdf
(工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构(版本2.0)[R/OL]. 在线报告 (2020-04) [2022-08-01]. http://www.ii-alliance.org/upload/202004/0430_162140_875.pdf)
- [24] Industrial Internet Industry Alliance. Industrial intelligence white paper [R/OL]. Report Online (2020-04) [2022-08-01]. <https://tech.sina.com.cn/roll/2020-07-06/doc-iircuyvk2170592.shtml>
(工业互联网产业联盟. 工业智能白皮书 [R/OL]. 在线报告 (2020-04) [2022-08-01]. <https://tech.sina.com.cn/roll/2020-07-06/doc-iircuyvk2170592.shtml>)
- [25] Zheng Z, Zhang K T, Gao X Q. Human-cyber-physical system for production and operation decision optimization in smart steel plants. *Sci China Technol Sci*, 2022, 65(2): 247
- [26] 5G Alliance for Connected Industries and Automation. Integration of 5G with time-sensitive networking for industrial communications [EB/OL]. Report Online (2021-01-19) [2022-08-01]. <https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications/>
- [27] Zhang Q M, Zheng X M, Zhang S Y. 5G TSN technologies and innovation. *ZTE Technol J*, 2022, 28(3): 78
(张启明, 郑兴明, 张寿勇. 5G TSN技术的创新研究. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 78)