

# 面向工业互联网的 算力网络技术研究及应用

## Research and Application of Computing Power Network Technology for Industrial Internet

许丽丽<sup>1</sup>,杨哲建<sup>1</sup>,张文博<sup>1</sup>,范斌<sup>2</sup>,安岗<sup>1</sup>,宋光敏<sup>3</sup>,刘超<sup>4</sup>[1. 中国联通研究院,北京 100176;2. 中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033;3. 联通(浙江)产业互联网有限公司,浙江 杭州 311199;4. 联通数字科技有限公司,北京 100033]

Xu Lili<sup>1</sup>,Yang Zhejian<sup>1</sup>,Zhang Wenbo<sup>1</sup>,Fan Bin<sup>2</sup>,An Gang<sup>1</sup>,Song Guangmin<sup>3</sup>,Liu Chao<sup>4</sup>[1. China Unicom Research Institute, Beijing 100176, China;2. China United Network Communications Group Co.,Ltd., Beijing 100033, China;3. China Unicom (Zhejiang) Industrial Internet Co.,Ltd., Hangzhou 311199, China;4. China Unicom Digital Technology Co.,Ltd., Beijing 100033, China]

### 摘要:

随着数字化智能工厂加速建设,工业运动控制、柔性生产、人机协作、工业数字孪生等算网融合应用场景持续扩大,算网融合成为必然趋势。工业算网是运营商服务制造业数字化、网络化、智能化转型升级的新型工业数字基础设施,是面向工业应用需求的全新一代工业互联网架构和服务体系。聚焦智能制造对运营商新型工业基础设施提出的新需求,研究工业算网融合技术体系,并介绍了工业算网在工业典型场景的应用实践。

### 关键词:

算网融合;云边协同;工业互联网

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2024.11.001

文章编号:1007-3043(2024)11-0001-06

中图分类号:TN915.1

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

With the acceleration of the construction of digital smart factories, the application scenarios of computing and network integration such as industrial motion control, flexible production, man-machine collaboration, and industrial digital twins continue to expand, and computing and network integration has become an inevitable trend. Industrial computing network is a new industrial digital infrastructure for operators to serve the digitization, networking and intelligent transformation and upgrading of the manufacturing industry, and is a new generation of industrial internet architecture and service system for the needs of industrial application. It focuses on the new needs of intelligent manufacturing for operators' new industrial infrastructure, studies the integration technology system of industrial computer network, and introduces the application practice of industrial computer network in typical industrial scenarios.

### Keywords:

Computing network convergence; Cloud-edge collaboration; Industrial internet

引用格式:许丽丽,杨哲建,张文博,等.面向工业互联网的算力网络技术研究及应用[J].邮电设计技术,2024(11):1-6.

## 0 引言

国家连续出台一系列政策,大力支持工业互联网与算力网络的发展,网络与计算融合发展和一体化服务成为重要趋势。随着工业数字化的深入和升级,工业应用对网络实时性提出了时延、抖动等确定性指标,对边缘及现场算力的需求日益旺盛。算网融合可

以为工业互联网提供强大的计算和网络支持,使工业互联网的各种应用能够更好地实现其价值。同时,工业互联网的发展也为算网融合提供了广泛的应用场景和实践基础。两者相辅相成,共同推动工业互联网技术创新和规模化应用,更好地服务支撑我国新型工业化<sup>[1-2]</sup>。本文首先分析了现阶段工业互联网融合发展面临的挑战;其次,选取工业典型业务及场景,分析其对网络、算力以及云边协同的迫切需求,并阐述了工业算网技术体系关键能力;最后,介绍了工业领域

收稿日期:2024-09-10

的应用实践。

## 1 工业互联网融合发展面临的挑战

现阶段工业现场 ICT 融合边界仍未打破,工业互联网融合发展仍面临网络瓶颈、算力孤岛、工控安全等诸多挑战<sup>[3-4]</sup>。

在网络方面,需智能感知工业现场无线环境,在获取、处理多维感知信息的同时,满足高可靠、高带宽、低时延、精准定位等多种性能要求。在 IT/OT 融合趋势下,需要实现算网资源灵活供给,实现网络智能调度与配置,为差异化业务提供高速率、高可靠的端到端确定性保障服务。

在算力方面,需充分利用工厂内的各个算力节点能力,通过分布式算力感知、调度,实现算力资源下沉,建立算力节点协同机制,满足工业场景需求,实现对算力资源的高效调配管理。

在云边协同方面,要想更高效地采集和使用工业数据,需要网络空口与工业协议更深层次的兼容,为工业和软件应用建立云边端协同机制。

在安全方面,需加快提升自主创新能力,提高安全保障,构建自主、安全、可控的工业操作系统、工业平台、工业芯片等核心底座能力。

因此,亟需建立面向工业场景自主可控的,针对工业多样性算力具备高效调配、精细管理能力的,具备工业异构网络融合能力的新型工业互联网数字基础设施,打破行业壁垒,推动 IT 与 CT 融合发展。

## 2 工业互联网新型信息基础设施需求

工业上不同的业务和场景对网络、算力以及云边协同的需求差异很大,对运营商工业互联网新型信息基础设施的能力也提出了不同的要求。

### 2.1 运动控制业务

#### 2.1.1 场景需求

运动控制包含闭环控制和远程设备操控等细分场景,是工业生产领域难度最高、对通信要求最苛刻的场景。运动控制协同的运动部件通常在 8 轴以下,总体控制时延要求在 4 ms 以下;8 轴以上的运动部件往往要求总体控制时延低至 1 ms;单终端总线时延为 1~4 ms;多轴电机的同步协同要求具备终端授时功能。另外,离散制造行业的运动控制可接受一定的故障率,但应保障不连续丢包,避免不必要的停机。

#### 2.1.2 当前亟需解决的问题

在运动控制场景中,现有控制器与驱动器之间通信通常采用有线连接的方式,通过工业总线和工业以太技术保证业务稳定性,但是在 IT/OT 融合的大趋势下,存在大量的异构工业网络,严重制约着产品、服务的集成。同时,有线连接方式存在部署成本高、时间长、调整不方便等问题。

目前,采用 Wi-Fi 等无线通信技术替换光缆普遍存在切换时延较大,稳定性、抗干扰、安全性差等问题。5G 技术目前也尚无法兼容不同 PLC 控制器和伺服电机间的通信模式和通信协议,对于不同的采集数据通信模式,也无法进行统一纳管。另外,现阶段工业运动控制的计算单元也无法满足业务灵活调度的算力需求。

### 2.2 多机器人协同业务

#### 2.2.1 场景需求

工业机器人需具备高级 AI 环境识别能力和一定程度的自主决策能力,一般配备 6~8 个高清摄像头、激光雷达(选配)等以感知周围环境, MIC 阵列来聆听指令,多个具有 8 自由度以上的机械臂来完成各类灵巧性任务,可实现搬运、点胶、喷漆、焊接、打磨、质检等功能。机器人需要多种上下行带宽和时延组合来完成一系列功能和动作,并和云端资源、管控进行交互。

该场景对工业算网网络、算力、终端接入及数据安全等方面都有着较高的要求。在网络方面,需要工业算网低时延、网络 SLA 以及确定性网络能力,提供带宽灵活适配以及端到端时延 10 ms 以内的确定性网络,以满足高清图片及视频等大型并发数据的传输要求。在算力方面,进行 AI 图片数据处理和机器人行动轨迹控制时,需要同时调用 CPU、GPU 等异构算力进行大量计算。另外,还需考虑多终端接入问题,以及进行算力与数据传输成本之间的再平衡。

#### 2.2.2 当前亟需解决的问题

目前,云边协同架构在实现柔性生产场景的过程中存在许多挑战。UPF 等核心网下沉架构存在“网络条件要求高,配置复杂成本高”等问题;除了专享型 5G 专网,企业生产现场的数据需传输到企业园区之外,并且服务器的资产归运营商所有,无法满足企业“生产数据不出厂”的要求;传统 5G 工业网关与 MEC 的架构方式,难以满足柔性生产中工业控制对时延的要求,需在更贴近现场的地方完成数据融合与处理。

### 2.3 云化 PLC 自动化产线业务

#### 2.3.1 场景需求

在智能制造系统中,集中控制PLC不仅仅是机械装备和生产线的控制器,还是制造信息的采集器和转发器。PLC系统的主站周期性向分站及IO发送信息,并在收到回复信息后输入到工业控制程序。工业自动化领域对更高效率和更可靠控制的追求,推动了云化PLC的产生。云化PLC通过将控制逻辑和数据存储放在云端,实现了更高效的远程管理和控制。通过将物联接口标准化和应用云化,采用软件定义的PLC与工业互联网平台直接相通,实现PLC的远程控制,将APP和分析结果嵌入机器和云,实现智能化和自我感知,通过API和生态系统扩大工业互联网平台应用。

云化PLC自动化产线对网络有极高的要求,需要将端到端时延控制在微秒到几毫秒级,将时延抖动控制在微秒级,将可靠性控制在99.999 9%以上。例如,在某钢铁行业产线中,控制周期可低至4 ms,一旦出现信令丢失或者迟到,将导致控制系统停机。因此,可靠性要求高达99.999 9%。

### 2.3.2 当前亟需解决的问题

当前云化PLC在融合化、归一化过程中,依然存在严峻挑战。一方面云化PLC对云存在安全性、可靠性的需求,对离散分布的边缘及超边缘算力存在动态、弹性管理的需求;另一方面云化PLC在云端进行计算,IO设备作为不可虚拟化设备则保留在现场,通过5G、Wi-Fi或有线网络完成组网连接,而现场多种

业务在流量特征、QoS需求等方面均存在差异,OT业务云化需要与网络一体协同。因此,迫切需要建立一种可提供“准时、准确”数据传输服务质量的新一代网络,为行业提供确定性服务保障。

## 3 工业算网体系及关键技术

### 3.1 工业算网技术体系

工业算网是面向工业互联网的算网融合技术体系,是工业互联网和算力网络协同发展的新业态、新模式,是服务制造业数字化、网络化、智能化转型升级的新型工业数字基础设施。

工业算网以工业网络和计算为基础,以工业数据为核心,将工业算力资源、网络资源与业务应用深度融合,通过集中或分布式的方式对资源进行协同管理与调度,结合人工智能、大数据、数字孪生、工业控制、网络安全等技术,构建一个面向工业应用需求的全新一代工业互联网架构和服务体系,全面赋能工业数字化和智能化转型<sup>[5-9]</sup>。

工业算网技术体系主要包括工业终端、工业算网基础设施、工业应用以及工业算网安全体系,具体的体系架构如图1所示。

### 3.2 工业算网关键技术

#### 3.2.1 异构算力统一接入

工业算网体系中存在性能各异、物理位置分散、

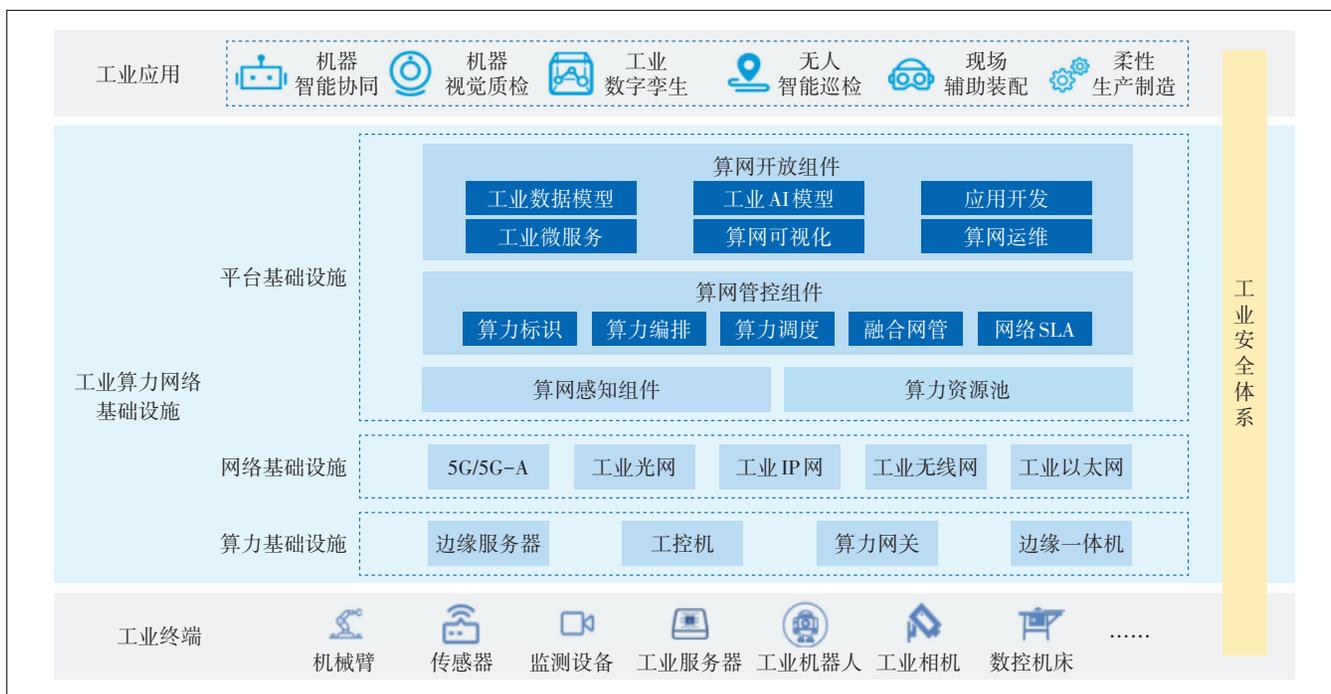


图1 工业算网体系架构

网络位置不同、厂家不同的算力基础设施。在将它们接入算网体系,实现统一管理、高效应用的过程中,代理技术、虚拟化技术以及算力标识技术发挥着重要作用。代理技术利用接入协议配合代理程序,为算力基础设施与平台之间建立双向通信通道与指令转换架构。通过硬件级别或者操作系统级别的虚拟化技术,将算力基础设施物理资源“切分”为较标准、同质化较强的虚拟机、容器;通过管控、感知组件中的指令对虚拟机、容器进行感知、管理、调度和应用。工业算力标识包括对算力资源存储、网络、类型、功能等能力的描述,也包括对物理位置、网络位置等连接的描述,可以作为算力资源的身份证,通过相应机构的验证。

### 3.2.2 工业算力的编排与调度

工业企业的算力基础设施在接入工业算网体系后,就成了可感知、管理、调度的算力节点。在结合业务对算力资源的需求、选择合适的算力节点完成计算任务时,算力的编排与调度发挥着重要作用。工业算力编排调度策略包括轮询、主备、CPU 优先、内存优先、加权轮询等。

### 3.2.3 容器及虚拟化

在工业算网体系中,工业终端及其南向控制设备、工业应用的虚拟化也可以在打通工业算网体系中发挥作用。将 PLC 虚拟化后,PLC 对工业设备的控制功能可以虚拟化成算力设备上运行的程序,通过控制程序实现控制实例的开启。应用虚拟化技术能将应用程序从操作系统中解耦,为不兼容的应用程序提供虚拟的运行环境。

### 3.2.4 工业网络 SLA

网络 SLA 技术<sup>[10]</sup>作为工业业务确定性服务保障的抓手,可面向工业算网服务提供方、行业用户等,提供归一化的网络 SLA 指标体系、网络 SLA 指标分级规范,以及从行业业务需求到网络 SLA 指标的转译方法等能力保障。

### 3.2.5 工业应用感知

应用感知能力为 IP 网络承载工业应用服务提供了强有力的支撑,它利用 IPv6 扩展头将应用信息及其需求传递给网络,通过业务的部署和资源调整在网络中提供丰富的 SLA 保障能力,如确定性的时延、基于业务链的灵活访问等能力。通过应用感知能力,不同的垂直业务可以灵活便捷地选择自己的网络服务,从而在 SLA 保障以及对带宽的有效利用上取得平衡;随着算网一体化调度机制的成熟,未来还可以进一步为不

同垂直业务提供差异化的计算服务支持<sup>[11-12]</sup>。

### 3.2.6 确定性网络

确定性网络是提供确定性服务质量保障的新型网络技术,具有大带宽、低延时、低抖动、高可靠等优点。确定性网络主要包括 FLeX、TSN、DetNet、DIP 等技术,可以有效解决传统以太网数据传输的拥堵、延迟、抖动等问题。在工业算网体系中,将从网络确定性和业务确定性 2 个方面为行业关键应用提供确定性服务保障。

## 4 工业算网技术的典型应用实践

### 4.1 工业智能机器人

开坡口、切割、焊接、喷涂等沿轨迹执行加工的工艺流程,是制造业生产中的重要环节<sup>[13]</sup>。在传统模式下,工业机器人执行上述生产时往往需要人工示教点位并编写机器人程序,生产效率较低。基于机器视觉技术,为工业机器人装上“双眼”,不仅可以有效识别并匹配工件、快速生成工业机器人轨迹,还能够实时跟踪工艺信息,纠正路径偏差,实现智能化生产。然而,为满足机器视觉任务的复杂计算要求,视觉伺服机器人在应用过程中,往往需要在现场配备独立的算力终端。异构终端设备的引入进一步加剧了厂区的算力孤岛、数据孤岛效应,也带来了高成本、高捆绑、维护难/贵、知识重复付费等问题。工业算网对算力资源的高效管理与调度,能够有效满足这类新型工业生产应用的需求。

#### 4.1.1 基于工业算网的切割机器人智能化改造方案

基于工业算网的切割机器人智能化改造方案为 5 台切割机器人配备了独立的视觉采集模块,通过设置工作节拍,确保影像错峰地通过 5G 网络传输至 MEC,由 MEC 为视觉检测系统提供高质量、高可靠的算力支持,保证自动化切割业务的实时执行(见图 2)。

#### 4.1.2 基于工业算网的船板质量检测方案

图 3 给出了 3D 机器视觉瑕疵质检案例示意。该方案配置了船板缺陷实时在线检测设备,对船板开展缺陷检测管理,能够及时监测和判定船板表面的缺陷问题,提高船板检测效率和精度,降低后道工序损失率。通过基于工业算网的 3D 机器视觉质检系统,船板预处理流程全面实现了自动化和智能化,业务流程由原来的清洗→人员质检→堆积,升级成为了清洗→自动化智检→标注。通过对接质检系统与钢板修复管理系统,进一步打通了该车间的数字化生产流程,极

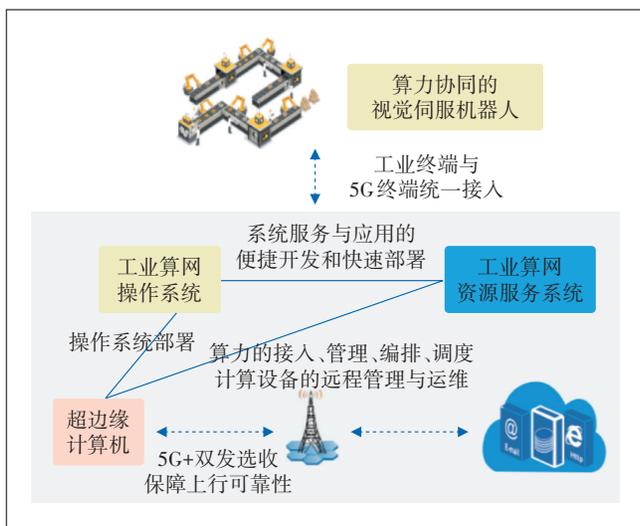


图2 切割机器人智能化改造案例示意

大地缓解了相关质检人员的工作压力,提升了企业智能制造水平。

#### 4.2 工业数字孪生

工业数字孪生将实际工厂、设备或产品的物理模型与其数字化模型相结合,以模拟、预测和优化工厂的运营和生产过程。工业数字孪生技术被用于产品设计、生产线优化、设备维护、故障预测等多个方面,为企业带来了巨大的价值和发展机会<sup>[14]</sup>。

基于工业算网的数字孪生方案将收集到的数据进行云边端协同处理,有效解决了工业现场边缘侧对时延和算力的需求。云端利用三维视频融合、大数据、AI、模拟仿真等创新技术,针对工厂智慧化业务管理,构建了实景透明智慧工厂管理体系,提升了工厂管理效率。

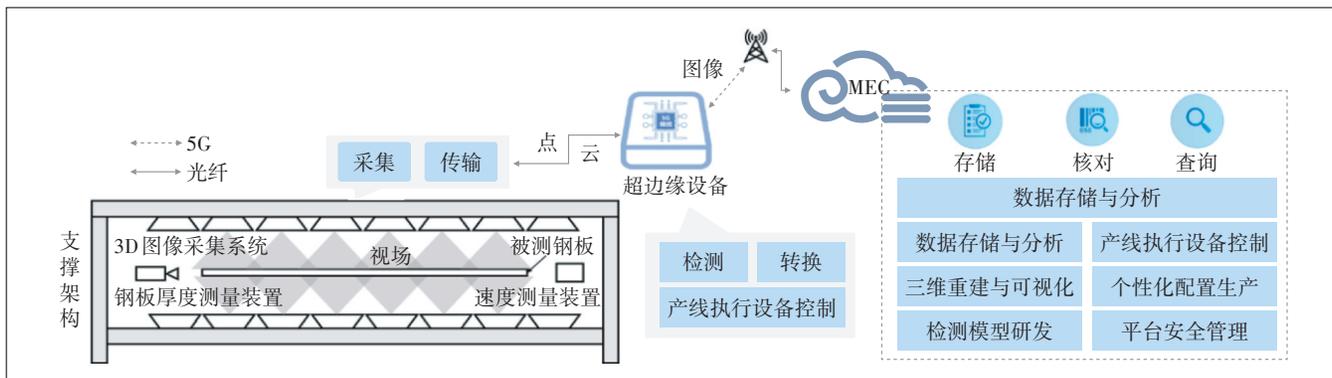


图3 3D机器视觉瑕疵质检案例示意

图4给出了工业数字孪生案例示意。在工业算网边缘侧,通过对摄像头、工业监控器、传感器等设备的管控,实现对边缘端数据的实时采集。MEC为人员识别、行为检测等提供低时延、高可靠的算力支持,实时分析处理数据。通过云端高性能三维渲染引擎,综合

多源数据,重构三维虚拟地理环境,形成大规模三维实时广域动态视频场景平台。该平台可对安全、生产、运维等管理领域的关键指标进行综合监测分析,辅助管理者全面掌控工厂生产运行态势。

#### 4.3 设备智能运维

制造企业传统运维设备管理数字化水平低,大多以点检维修为主,存在人员劳动强度大、数据在线率低、维修模式陈旧、维修成本居高不下等问题<sup>[15]</sup>。算力网络云边协同基于状态监测和故障诊断技术实现预知维修,可进行实时监测与故障预警,确定关键设备故障发生部位和严重程度,预测设备劣化趋势,避免非计划停机,进而降低人员劳动强度,提高运维效率,降低运维成本。

基于工业算网的工业设备智能运维方案通过边缘设备采集工业机组实时数据,调用边缘侧算力进行数据预处理及异常数据检测,分析工业机组实时运行

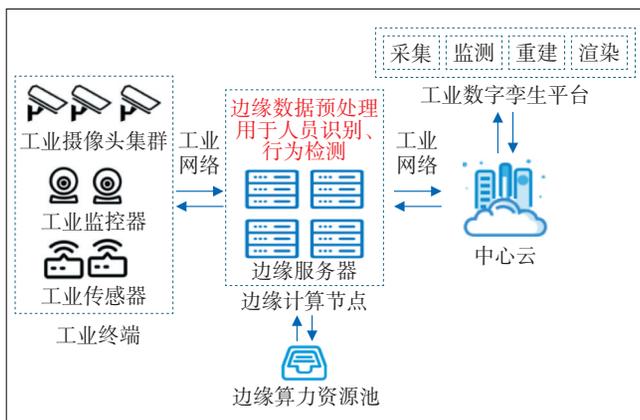


图4 工业数字孪生案例示意

状态,进而实时上报工业机组的故障信息,在边缘侧实现故障定位(见图5)。云端对边缘侧处理后的数据进行汇总,并调用大数据、AI模型、模拟仿真等创新技

术对数据进行建模分析,实现对设备使用异常的预测性维护。云端通过云平台专家库,实现设备疑难问题的远程诊断。

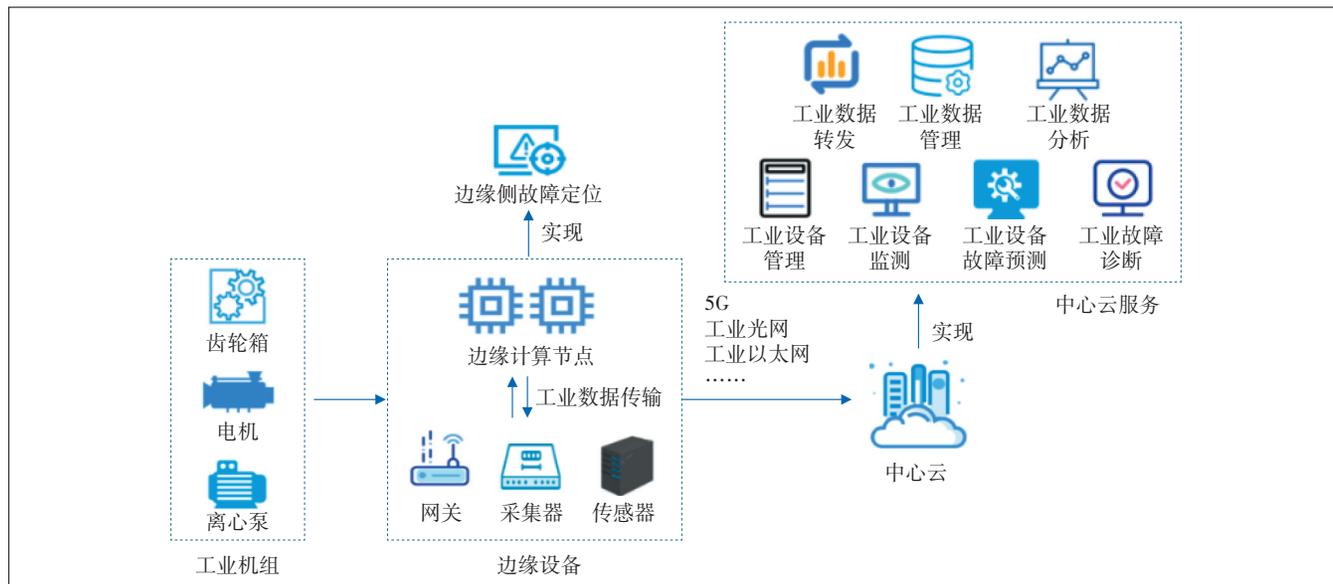


图5 工业设备智能运维案例示意

## 5 结语

工业互联网算力网络技术体系在算力网络框架下,通过工业内外网将工业计算与存储资源在工业数据中心、工业边缘计算和工业现场之间进行协同管理与调度编排,结合人工智能、大数据、网络安全等技术,满足新型工业应用需求,具有广阔的发展前景,但也面临诸多挑战。通过加强基础设施建设、完善技术标准、提升安全性、优化运营模式以及促进产业协同等手段,可以有效推动工业互联网算力网络的健康发展,助力产业转型升级和科技创新进步。

### 参考文献:

[1] 付韬,张恒升,王哲. 工业互联网环境下工业算力发展现状与趋势分析[J]. 自动化博览,2024,41(2):15-18.  
 [2] 吕廷杰,刘峰. 数字经济背景下的算力网络研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版),2021,20(1):11-18.  
 [3] 何涛,杨振东,曹畅,等. 算力网络发展中的若干关键技术问题分析[J]. 电信科学,2022,38(6):62-70.  
 [4] 刘鹏,陆璐,李志强. 工业互联网技术发展分析及算网融合的趋势思考[J]. 自动化博览,2023,40(2):29-31.  
 [5] 雷波,刘增义,王旭亮,等. 基于云、网、边融合的边缘计算新方案:算力网络[J]. 电信科学,2019,35(9):44-51.  
 [6] 段晓东,姚惠娟,付月霞,等. 面向算网一体化演进的算力网络技术[J]. 电信科学,2021,37(10):76-85.

[7] 杨帆,宋闻萱,许方敏,等. 工业互联网算网一体技术研究[J]. 无线电通信技术,2023,49(1):63-71.  
 [8] 张文博,李森,杨哲建,等. 基于工业算网的汽车制造业数字化转型研究与应用[J]. 新型工业化,2023,13(6):58-67.  
 [9] 姚惠娟,陆璐,段晓东. 算力感知网络架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术,2021,27(3):7-11.  
 [10] 刘博文,梁晓晨,张桂玉,等. 算力网络场景下SLA约束的能耗优化微服务调度策略[J]. 邮电设计技术,2023(2):31-36.  
 [11] 王宇舟,黄俭,俞志豪. 面向典型工业应用场景的5G SLA指标研究[J]. 电信快报,2023(5):29-34.  
 [12] 何林,况璐,王士诚,等. 基于“IPv6+”的应用感知网络(APN6)[J]. 电信科学,2020,36(8):36-42.  
 [13] 王诗宇. 智能化工业机器人视觉系统关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2021.  
 [14] 赵巍,刘宪,季睿康,等. 5G+数字孪生技术在工业互联网中的应用[J]. 长江信息通信,2023,36(7):17-19.  
 [15] 金毅然,蒋家驹,蒲志远,等. 面向算力网络基础设施的智能运维与管理实践研究[J]. 江苏通信,2024,40(3):105-110.

### 作者简介:

许丽丽,工程师,硕士,研究方向为工业互联网、物联网、算力网络;杨哲建,工程师,硕士,研究方向为工业算网及工业互联网人工智能技术;张文博,工程师,硕士,研究方向为工业互联网、算力网络;范斌,工程师,学士,研究方向为工业互联网;安岗,高级工程师,硕士,研究方向为通信网络、算力网络、工业互联网有关研究及管理工作;宋光敏,高级工程师,学士,研究方向为5G通信技术演进以及工业互联网应用技术研究;刘超,高级工程师,硕士,研究方向为工业大数据技术、工业数字孪生应用研究。