

集团型工业企业 IT、OT和CT融合组网技术应用研究

Research on Application of IT, OT and CT Integrated Networking Technology for Group Industrial Enterprises

程景浩¹, 于咏钟², 丁亚杰¹, 韩明宇¹ (1. 中讯邮电咨询设计院有限公司, 北京 100048; 2. 中国联通苏州分公司, 江苏 苏州 215000)

Cheng Jinghao¹, Yu Yongzhong², Ding Yajie¹, Han Mingyu¹ (1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. China Unicom Suzhou Branch, Suzhou 215000, China)

摘要:

随着工业4.0和数字化转型的深化,集团型工业企业面临信息技术(IT)、运营技术(OT)与通信技术(CT)深度融合的迫切需求。从技术架构、关键挑战及解决方案出发,结合工业互联网典型场景,探讨三者组网技术、网络安全、统一管理等领域融合路径,并基于实际案例对未来的应用进行展望,为集团型工业企业的数字化转型、智能化升级提供理论支撑。

关键词:

工业互联网;融合组网;网络安全;人工智能
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.06.003
文章编号:1007-3043(2025)06-0012-06
中图分类号:TN914
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

With the deepening of Industry 4.0 and digital transformation, group-based industrial enterprises are facing an urgent need for the deep integration of IT (information technology), OT (operation technology) and CT (communication technology). Starting from the technical architecture, key challenges and solutions, and combining typical scenarios of the industrial Internet, this paper explores the integration paths of the three in the fields of networking technology, network security, unified management, etc., and proposes a future-oriented application outlook based on actual cases, providing theoretical support for the digital transformation and intelligent upgrade of group-type industrial enterprises.

Keywords:

Industrial internet; Converged networking; Network security; Artificial intelligence

引用格式:程景浩,于咏钟,丁亚杰,等.集团型工业企业IT、OT和CT融合组网技术应用研究[J].邮电设计技术,2025(6):12-17.

0 引言

在工业4.0背景下,全球制造业正经历以数据为核心的生产模式变革。集团型企业因多地协同、设备异构化及业务复杂化等特点,亟须通过IT、OT和CT融合构建统一、高效、安全的工业互联网架构^[1]。据预测,2030年全球工业4.0市场规模将突破3 773亿美元,而融合过程中暴露的协议异构、实时性冲突及安全风险成为阻碍企业升级的主要瓶颈。本文旨在系统梳理融合技术体系,提出适配集团型企业的组网方案。

收稿日期:2025-04-28

1 集团型企业网络现状

1.1 企业网络现状和困难

随着信息技术的飞速发展,集团型工业企业数字化转型进程不断加速,网络在企业的运营和发展中扮演着越来越重要的角色^[2],然而传统网络架构逐渐暴露出诸多问题(见图1),成为企业数字化转型的瓶颈。

a) 网络割裂与演进难题。IT、OT与CT网络因技术标准 and 架构不兼容,形成“烟囱式”架构,数据孤岛导致信息无法互通。传统网络层级复杂、扩展困难,需物理改造且成本高;网线升级依赖介质更换,生命周期短且耗时,严重制约网络的灵活性与技术迭代^[3]。

b) 网络安全威胁环境日趋复杂。攻击手段多元

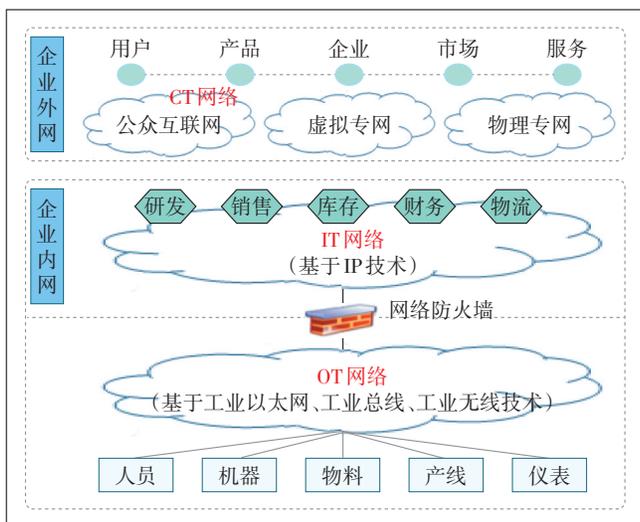


图1 传统企业内网络呈现烟囱式架构

化,新技术引入新风险漏洞。同时《数据安全法》等法规要求严格,企业面临高额违规成本与数据泄露风险。

c) 网络管理复杂、维护成本高。多平台策略割裂,设备管理难以统一;资源利用率低、故障定位困难,运维依赖人工且效率低下。传输线路质量差导致时延波动,设备老化需频繁更换,叠加版本冲突与安全漏洞,进一步推高维护成本。

1.2 企业数字化转型需求

随着数字化转型的推进,企业对网络的高带宽、低延迟、灵活性和扩展性等需求日益增长,促使网络向更高效、智能的方向发展。集团型企业数字化转型的核心需求主要包括以下几点。

a) 灵活的网络架构与高效的数据共享。为适应快速变化的业务需求,企业必须具备迅速调整网络资源配置的能力。企业需支持大量设备的连接及数据传输,并确保不同业务系统间能够无缝共享数据。

b) 动态灵活的风险防护能力。企业需构建智能、弹性、内生的安全体系,通过零信任架构和云原生安全防护混合云与远程办公风险;以数据加密、隐私计算满足合规要求;借助AI驱动的威胁检测(XDR)和自动化响应(SOAR)实现动态防御;同时将安全融入业务全流程,确保安全与数字化发展同步演进,从被动防护转向主动免疫。

c) 智能化、一体化运营管理。构建支撑IT、OT、CT的全域网络管控平台,实现设备统一纳管与可视化,降低企业网络运营综合成本。通过应用人工智能和大数据技术,实现对设备的智能监控、故障预测以

及优化调度,提升运营效率。

通过推动IT、OT和CT三网融合发展,优化生产流程,提升生产效率,打破数据孤岛,确保数据能够实时交互和共享,为企业的智能化决策提供有力支持。

2 IT、OT和CT三网融合解决方案

2.1 面向企业的组网技术研究

2.1.1 IT组网技术

IT技术主要涉及企业内部的信息处理和数据管理,侧重于数据的存储、处理、传输和安全。其目标是构建高效、灵活且可扩展的网络架构,以支持企业的各种业务应用和数据处理需求,其典型技术包括:

a) 以太网。基于IEEE 802.3标准,通过物理层和数据链路层协议实现设备间的连接和数据包交换^[4]。它使用CSMA/CD机制管理多个设备共享同一物理介质时的数据传输。典型的架构采用核心层、汇聚层和接入层的树型结构,支持灵活扩展和冗余设计。

b) Wi-Fi。基于IEEE 802.11标准的无线局域网技术,通过无线电波实现设备互联,支持灵活部署与移动接入。主流标准包括Wi-Fi 6(802.11ax)和Wi-Fi 7(802.11be),这些标准引入了OFDMA、MU和多链路操作(MLO)等技术,显著提升了高密度场景下的吞吐量、能效和低时延性能。组网方式包括家庭单路由、企业级AC/AP架构和Mesh自组网,支持无缝漫游和负载均衡。

c) 软件定义网络(SDN)。SDN通过将网络的控制平面与数据平面分离,使网络管理更加灵活和高效。通过SDN控制器,管理员可以动态地配置网络资源,实现流量工程、负载均衡和故障恢复等功能^[5]。软件定义广域网(SD-WAN)是一种新型的WAN架构,旨在简化网络管理并提高性能^[6],它利用SDN概念,动态选择最佳路径发送流量。它允许企业更灵活地分配带宽资源,优化成本和性能。

d) 网络虚拟化(NFV)。NFV将网络功能从专用硬件设备中解耦出来,以软件形式运行在通用硬件上,并能动态部署和管理这些软件化的网络功能。

2.1.2 OT组网技术

OT技术直接监控并控制工业设备、资产和工艺流程,主要用于制造业、能源和其他工业领域,确保生产设备的高效运行和安全。其典型技术包括:

a) 工业以太网。基于标准以太网技术优化工业环境,提供增强的实时性、可靠性和确定性,支持高速

数据传输和精确控制,满足工业设备互联互通和数据共享的需求,助力企业实现高效、智能化生产^[7]。

b) 工业总线。用于工业自动化控制的数字化通信网络,通过串行通信方式连接各类现场设备,实现实时数据交换与分布式控制。采用标准化协议,具有高实时性和强抗干扰能力,能适应严苛的工业环境。

c) 工业无线传感网。工业无线传感网是一种用于工业环境中的无线通信技术,旨在实现工业设备之间的数据交换和控制信号传输^[8]。通过无线通信技术(如WirelessHART、蓝牙等)提供了更高的灵活性和可扩展性,减少了布线成本和维护工作量。

2.1.3 CT组网技术

CT技术是实现信息交换的技术手段,包括但不限于电信号、光信号、无线信号以及其他形式的数据传输方法。它旨在提供可靠、高效的通信渠道,支持各种应用需求。CT技术的典型技术主要包括:

a) 光传输网络(OTN)。OTN是一种基于光通道的传输技术,用于高效传输和管理数据。通过分层架构(光通道层、光复用段层和光传输段层),OTN提供灵活的光信号传输、复用、路由、管理和监控功能。它广泛应用于长距离、大容量的光通信网络,如骨干网和数据中心互联。fgOTN支持可变带宽的光通道,能动态调整频谱宽度,适应不同业务需求,优化资源利用率。

b) IP化无线接入网(IPRAN)工业环网。它基于IP/MPLS的电信级承载网络方案,形成高可靠、智能化的新一代工业环网。通过融合IP路由与MPLS标签交换能力,在工业场景中实现业务隔离、确定性传输和快速保护倒换(<50 ms),满足工业自动化对高可靠性和低时延的严苛需求。

c) 5G时间敏感网络(TSN)。5G TSN标准提供了更高的速度、更低的延迟和更大的容量^[9]。5G通过使用更高频率的无线电波段、先进的天线技术和新的编码方法,实现了比4G更快的速度和更低的延迟。它还支持增强型移动宽带(eMBB)、大规模机器类通信(mMTC)和超可靠低延迟通信(uRLLC)^[10]。

d) 无源光网络(PON)/无源光局域网(POL)。PON是一种基于光纤的网络技术,广泛应用于接入网和局域网中,通过无源分光器分配光信号,减少布线成本并提高网络可靠性^[11]。POL是PON技术在企业局域网中的应用,旨在通过全光网络实现从数据中心到终端设备的高效连接。

2.2 融合组网解决方案

随着数字化转型的深入,集团型工业企业需要构建高可靠、灵活扩展、安全可控的融合网络,以支撑跨地域、多业务的协同运营。

2.2.1 一网全融合——融合组网架构设计

采用“核心—汇聚—接入”三级架构,通过组网技术融合,为企业构建一张泛在互联、确定承载、集成控制与计算、开放智能且安全可控的网络(见图2),打通各层级和系统的数据流转,实现扁平开放、分层管控下的智能控制和管理^[12]。采用“一网到底、分域服务”确保网络连接的可靠性和确定性,同时通过“算力覆盖、分级赋能”实现智能功能的上下贯通,从而支持企业的创新、开放、协调发展。

a) 核心层(总部职能管理及数据中心)。利用SD-WAN、OTN、IPRAN等技术构建高可靠骨干环网,实现集团级业务承载、跨区域数据同步、安全管控等功能。

b) 汇聚层(区域/工厂级)。利用SD-WAN、工业PON、5G专网等技术构建工业环网,实现工厂内设备互联、视频监控、AR/VR远程运维、边缘计算等功能。

c) 接入层(产线/仓储/分支机构)。利用工业Wi-Fi、5G专网、PON、工业现场总线等技术,实现移动终端接入、物联网设备接入、灵活扩展等功能。

2.2.2 一体护安全——业务隔离及安全防护设计

在IT、OT和CT融合进程中,构建“隔离可控、防护可视、响应可溯”的安全基线,为企业数字化转型升级筑牢安全屏障。

a) 业务隔离安全域划分。将网络划分为管理域、生产域、办公域、安防域等不同区域。生产域细分为控制层、监控层、设备层,实施纵深防御。各安全域间部署工业防火墙,配置基于“白名单”的访问控制策略。企业一张网中灵活按需切片(见图3),满足不同用户/业务差异化服务要求。网络切片技术通过虚拟化手段在同一物理网络上创建多个独立的逻辑网络^[13]。其中软切片利用SDN和NFV动态分配网络资源,满足不同应用需求;硬切片则通过划分硬件资源,提供更强的业务隔离性,适用于高安全性和可靠性要求的场景。

b) 多维度安全防护。构建以防火墙为基础的边界防护,阻挡外部非法网络访问,对进出网络的流量进行深度包检测,识别并拦截常见的网络攻击。在内部网络中,各业务区域边界也设置防火墙,细化访问

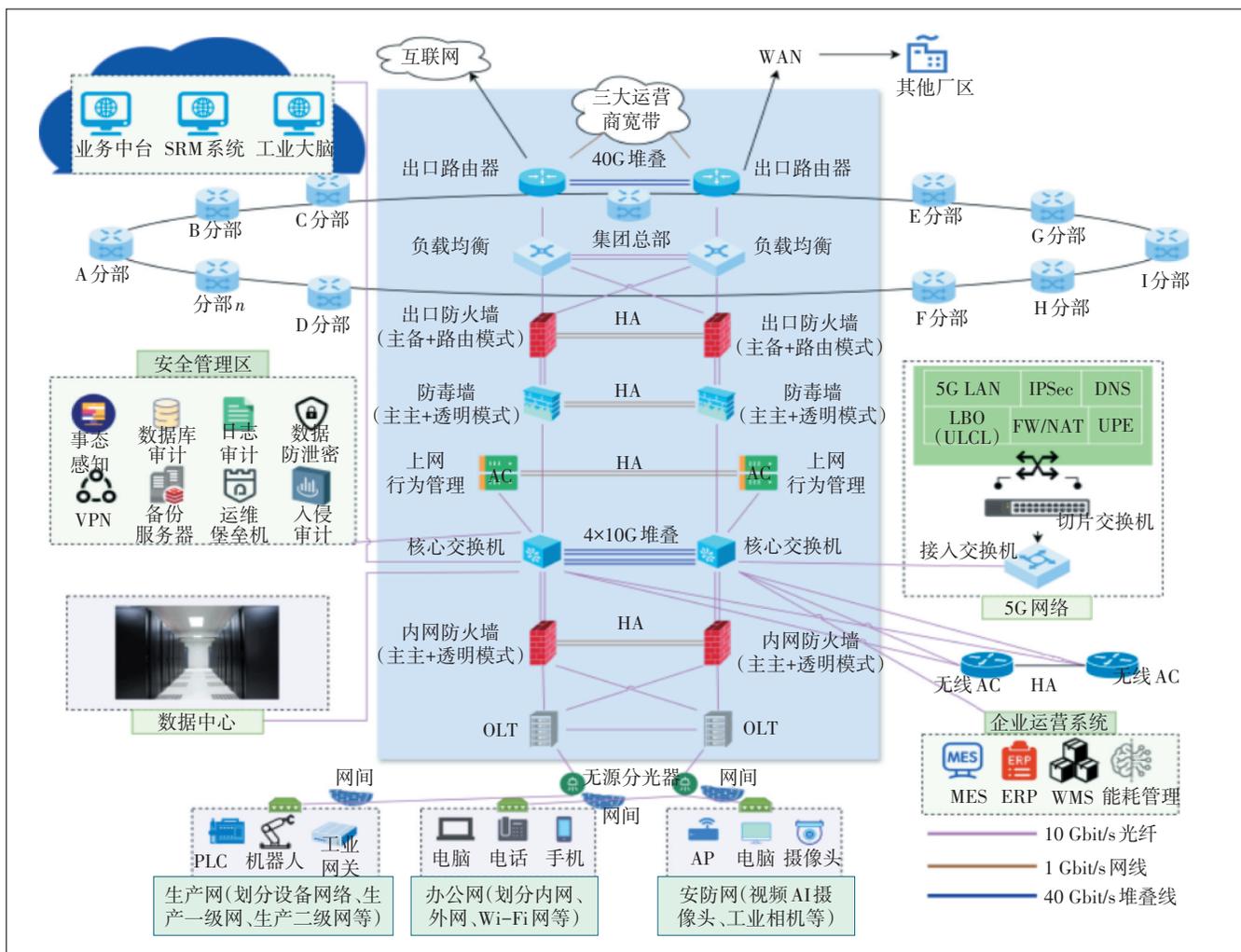


图2 企业一张网架构设计

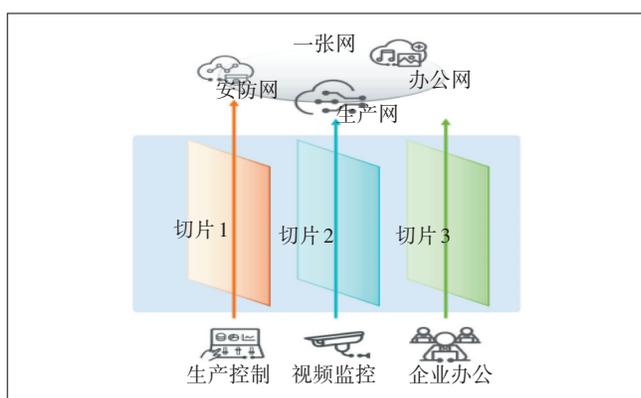


图3 一张网灵活按需切片

控制策略,限制不同业务系统之间的非法访问。入侵检测系统(IDS)和入侵防御系统(IPS)作为补充,形成立体防护。

c) 终端安全防护。对于IT终端,安装防病毒软件、终端管理系统,定期进行病毒查杀、系统漏洞扫描

与修复,管控终端外设使用,防止通过移动存储设备传播病毒或数据泄露。在OT终端方面,采用白名单机制控制软件安装与运行,只允许经过认证的工业软件在设备上运行,防止恶意软件入侵。仅开放必要的OT终端通信端口,并进行实时监测,确保通信安全。

d) 工业级主动防御型安全防护。在工控协议安全增强方面,通过Modbus TCP加密、S7comm认证增强、工业防火墙策略,在确保实时性的同时提升安全性,实现双向身份认证、数据加密以及细粒度的访问控制。在工业网络安全防护层面,构建三级防护体系:在边界防护层,部署支持EtherNet/IP等协议深度解析的工业防火墙,配置状态化的动态包过滤规则。纵深检测层,利用工业IDS和设备指纹识别技术,在OT网络中建立正常行为为基线,对偏离阈值30%以上的流量触发分级告警。在应急响应层,采用SOAR系统自动执行防火墙策略封禁和异常设备端口的远程锁定,

确保响应时间不超过10 s。

e) 网络安全技术演进。利用SDN实现业务流量的实时按需隔离;将安全功能直接嵌入到工业芯片/协议中,构建深层次的安全防护机制;遵循“永不信任,始终验证”的原则,对每一次设备通信和数据交互进行动态认证与授权,消除传统网络边界的概念,确保每个访问请求都经过严格验证。

2.2.3 一点一平台——网络全域融合管控平台

构建覆盖IT、OT和CT网络全域融合管控平台,从而应对集团企业复杂的网络环境,加速赋能企业数字化转型。

a) 全域融合管控。通过深度整合SDN控制器、5G切片管理和工业防火墙策略,构建全方位网络管控体系。利用SDN控制器统一调度有线和无线网络资源,实现跨厂区的高效运营。设备统一纳管与可视化管理平台支持对各类物联网设备集中管理,通过网络切片硬隔离,确保生产网时延 ≤ 10 ms,保障业务稳定运行。

b) 智能运维中枢。采用AI驱动故障自愈系统,具备强大的故障定位与自动修复能力,准确率 $\geq 95\%$,大幅缩短平均故障修复时间。数字孪生技术实时呈现全网拓扑、流量负载等,辅助决策制定。

c) 安全合规闭环。内置等保合规模板的安全管理平台,简化复杂的安全审计流程,一键生成符合等保标准的安全审计报告。平台与内部安全防护体系深度联动,当检测到潜在威胁时,立即告警并自动阻断威胁源,防止攻击扩散,确保网络安全。

3 应用场景与案例分析

3.1 应用场景

本文所提方案的主要应用场景如下。

a) 远程操控与无人化作业。通过5G专网和TSN技术提供低时延(≤ 10 ms)与高带宽,支撑矿山挖掘机、海上平台等设备的实时操控与视频回传;SD-WAN动态优化跨地域连接路径,工业PON保障光纤长距离传输可靠性。安全层面可采用零信任网络动态认证终端,工业防火墙隔离控制域与数据域,防止恶意指令注入。统一管理平台整合设备状态与操作日志,实现跨区域协同管控,提升作业效率。

b) 设备全生命周期管理。结合传感器OT数据、大数据分析及机器学习算法,提前预测设备故障,优化维护计划,降低停机时间并延长设备寿命^[14]。工业

无线传感网(WirelessHART)与5G mMTC实现传感器数据实时采集,边缘计算节点预处理数据降低云端负载。统一平台融合OT振动数据与IT维护记录,AI生成设备健康画像并联动MES系统,优化维护计划。

c) 能源优化。工业PON与5G支持智能电表高密度接入,SDN动态调度网络资源优先传输能耗告警数据^[15]。区块链与可信执行环境确保碳数据不可篡改,网络切片隔离业务流量防泄露。数字孪生建模分析设备空载能耗,联动ERP优化排产,提升能效。

d) 安全生产。5G uRLLC(时延 ≤ 50 ms)支撑AI摄像头实时识别危险行为,边缘计算快速触发告警。SOAR系统联动应急机制,在发生火灾时,自动隔离危险区域网络并广播撤离通知,响应时间 ≤ 10 s。统一平台整合安全事件与生产数据,数字孪生模拟应急预案,降低事故率,并快速生成合规报告。

3.2 典型案例

某钢铁集团原网络架构存在多个亟待优化的问题。网络层次划分混乱,导致扩展难度增大;串联节点过多,不仅网络稳定性受到影响,还出现了高时延和高成环率的问题;大量使用无法有效管理的以太网交换机,故障排查与定位异常困难;办公、生产和监控网络之间缺乏必要的隔离措施,整体安全性低。

设计要点:将核心网络架构规划设计为以工业IPRAN环网为核心,实现双环冗余备份,构建包含有线、无线全厂全覆盖的高速网络。网络设备采用适配工业环境设计的工业级设备,提供高可靠网络安全和高效、高带宽的运行保障。通过骨干环网完成多个场所、多种业务的接入。一张网络完成生产类、办公类、安防类等业务的综合接入,实现一网多业。无线、有线业务统一承载。通过切片技术将一张物理网络硬隔离为办公网、生产网、监控网等网络切片(见图4)。

改造成效:采用基于PON技术的全光接入网,每端口上下行带宽均达到10 Gbit/s,通过1:8分光比分配,确保每个光网络单元(ONU)实现超过1 200 Mbit/s的并发带宽。全域融合管控、智能运维中枢和安全合规闭环等功能使企业运维成本降低30%。

4 总结与展望

IT、OT和CT的融合组网技术是集团型工业企业数字化转型的关键支撑。随着人工智能技术的持续进步,未来的融合网络将变得更加智能高效。例如,利用机器学习算法实现网络的自动优化与故障预测,

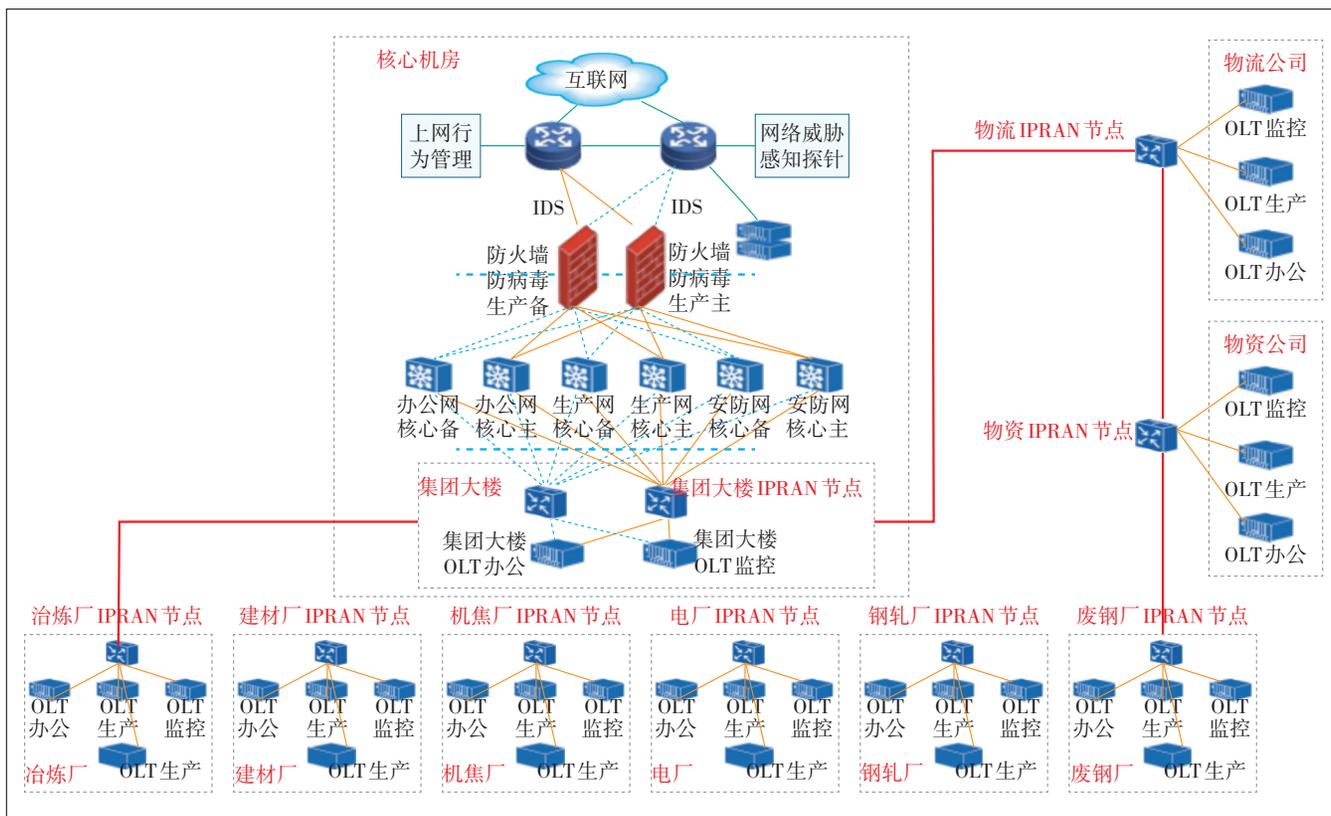


图4 智能工厂5G+全光网架构

从而增强网络自愈能力。此外,新一代通信技术(如6G)的应用将进一步提升融合网络的性能与效率,其中太赫兹通信能够提供工厂环境下的微秒级全覆盖连接,而软PLC逐渐替代传统硬件控制器成为发展趋势。同时,万兆光纤网络结合人工智能技术将在工业场景中开拓新的应用领域,比如在工业自动光学检测(AOI)、生产流程监控及安全管理等方面,显著提高质量和安全性。

参考文献:

[1] 吕金虎,任磊,谭少林,等.工业互联网层级架构与安全:复杂网络新视角[J].中国科学(技术科学),2024,54(10):2042-2052.
 [2] 李岩峰.企业网络数字化转型的策略分析[J].集成电路应用,2024,41(8):55-57.
 [3] 郑宁.大型制造类集团型企业数字化转型探索与思考[J].冶金自动化,2024,48(S1):1-5.
 [4] 李文嵩.钢铁企业工业以太网安全技术研究与应用[J].中国高科技,2023(6):119-121.
 [5] 张俊.软件定义网络(SDN)技术分析[J].数字通信世界,2024(6):115-117.
 [6] 陆明典.基于SD-WAN组网的中小企业数智化应用研究[J].中国信息界,2024(7):76-78.
 [7] 张超逸,钱雪平.工业以太网在自动化领域中的发展应用分析

[J].冶金管理,2023(1):18-19.
 [8] 赵兴龙,陈姊响,王竑达.工业无线网络技术在工业互联网中的应用研究[J].邮电设计技术,2024(11):12-18.
 [9] 李兴林,辛荣寰,程景浩.5G+工业互联网市场发展特征与发展路径[J].邮电设计技术,2021(7):6-9.
 [10] 李斌.“5G+工业互联网”助力企业数字化转型[J].通讯世界,2025,32(1):32-34.
 [11] 曾涛,蒋铭,张德智,等.工业PON的技术演进及应用创新[J].电信科学,2024,40(12):136-145.
 [12] 李晨阳,蔡冬,凌立,等.5G工业互联网智能制造平台方案的搭建研究与数据应用[J].智能制造,2024(4):71-76.
 [13] 韩冬,张晶.5G端到端网络切片标准化演进研究[J].现代传输,2024(4):60-63.
 [14] 戴怡雯.基于工业互联网的电气设备全生命周期管理平台开发策略研究[J].自动化应用,2025,66(5):274-277.
 [15] 胡宏涛.钢铁企业多工况下能源介质优化调度研究与应用[D].无锡:江南大学,2023.

作者简介:

程景浩,工程师,学士,主要从事工业互联网、企业数字化转型咨询和项目管理;于咏钟,工程师,学士,主要从事5G工业互联网、AI+智能制造;丁亚杰,工程师,硕士,主要从事智慧园区、智能工厂解决方案规划支撑工作;韩明宇,助理工程师,硕士,主要从事智能工厂、安全生产解决方案规划支撑工作。