

工业无线网络技术在 工业互联网中的应用研究

Research on Application of Industrial Wireless Network Technologies in Industrial Internet

赵兴龙, 陈姊昀, 王竑达 (中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033)

Zhao Xinglong, Chen Ziyun, Wang Hongda (China United Network Communications Group Corporation Limited, Beijing 100033)

摘要:

工业互联网体系融合了新一代信息通信技术与工业经济, 推动了工业数字化、网络化、智能化转型, 其中网络体系是基础。工业无线网络作为其重要组成部分, 具有灵活部署的特性, 能适应复杂的工业环境, 为工业互联网的构建提供基础。深入探讨了工业无线网络技术在工业互联网中的应用, 分析了工业无线网络技术的现状、优势、挑战, 阐述了其在工业互联网生态中的重要地位, 并探讨了其在提升生产效率、降低成本、增强安全性等方面的潜力及未来发展方向。

关键词:

工业网络; 5G; 无线网络技术; 工业互联网; 智能制造

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2024.11.003

文章编号: 1007-3043(2024)11-0012-07

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

The industrial internet system integrates the new-generation information and communication technologies with the industrial economy, promoting the digital, networking and intelligent transformation of industries, with the network system serving as its foundation. Industrial wireless networks, as a crucial component of it, possess the characteristic of flexible deployment, enabling them to adapt to complex industrial environments and providing a foundation for the construction of the industrial internet. It delves into the application of industrial wireless network technologies in the Industrial Internet, analyzes their current status, advantages, and challenges. It further elaborates on their pivotal role within the Industrial Internet ecosystem and explores their potential in improving production efficiency, reducing costs, strengthening security, as well as their future development directions.

Keywords:

Industrial networks; 5G; Wireless network technology; Industrial internet; Smart manufacturing

引用格式: 赵兴龙, 陈姊昀, 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.

0 引言

工业互联网体系是一个复杂而全面的系统, 旨在推动工业数字化、网络化、智能化转型, 主要包括网络、平台、数据、安全四大核心要素, 它们共同构成了工业互联网的基础设施和应用模式。其中, 网络体系是工业互联网的基础, 实现了人、机、物、系统等的全面连接, 以及采集、控制、生产、管理等全流程数据的贯通。典型的网络技术包括工业总线、工业以太网、

工业无线网等。

工业无线网络位于工业互联网体系的基础层, 因其灵活部署的特性, 能轻松适应各种复杂的工业环境, 打破了有线网络在布线、扩展和维护方面的限制, 使工业设备、传感器、控制系统等能够更加便捷地实现互联互通。近年来, 工业无线网络技术稳步增长, HMS Networks 最新研究表明, 工业网络市场继续扩张, 预计2024年将增长7%(见图1)。这种广泛的连接能力为工业互联网的构建提供了坚实的基础, 使得人、机、物、系统之间的信息交换更加高效、顺畅。本文旨在深入阐述工业无线网络在构建工业互联网生

收稿日期: 2024-09-13

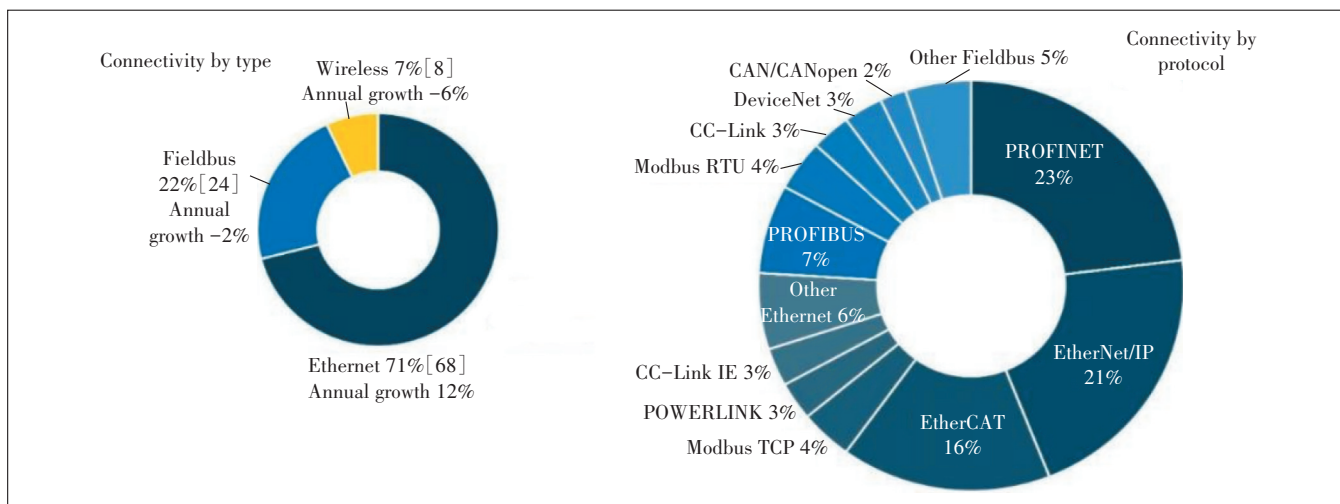


图1 2024年工业网络市场份额(数据来源:HMS Networks)

态中的重要地位及未来发展方向。

1 工业无线网络技术现状

长久以来,有线网络是工业环境的首选,以其高速、稳定和低时延的优势支撑整个产业运转。然而,随着工业互联网的快速发展,无线网络技术在工业领域的应用日益广泛,而有线网络的弊端逐渐显现,如布线困难,以及在一些不适合靠近的生产环境中进行有线部署和维护对安全性提出挑战等。为此,业界普遍开始考虑无线方案,德国“工业4.0研发白皮书”及“工业4.0实施战略及参考架构”都将无线技术作为工业4.0网络通信技术研究和创新中的重要组成部分。美国工业互联网联盟IIC也同样重视无线技术在工业中的应用。

1.1 现有工业无线网络技术概述

工业无线网络的相关标准主要包括ISA100.11a标准、WirelessHART标准以及WIA-FA或PA等^[1]。同时,工业无线网络技术融合了多种先进的无线通信技术,如5G、LoRa、Wi-Fi6、ZigBee、UWB等,专门为满足工业环境对高抗干扰性、极致可靠性及低延迟的特殊需求而设计。各无线通信特征原理的相互协调、共享,不仅能促使感知层和网络层互联互通,实现对采集传感器和数据识别、传输的控制,而且通过通信节点组网链接,还能实现互联网远程监控节点状态信息查询,数据信息安全传输等^[2]。这些技术拓宽了通信范围,增强了设备间大规模并行通信的能力,提升了数据传输的速度与效率,为工业领域的数字化转型、网络互联及智能化升级奠定了基础。

具体而言,工业WLAN(基于IEEE802.11标准)以高速率、广覆盖的优势,成为工厂内部办公网络及部分生产环境的核心基础设施,在工业4.0时代更是物联网(IIoT)通信的关键支撑。Bluetooth技术以短距离、低功耗的特点,在设备间低速率数据交换中展现价值,如手持设备与生产线的无缝对接。而WirelessHART、WIA-PA及WIA-FA等专为工业环境设计的无线通信技术标准,以其高可靠性、低功耗及本土化优势,在流程控制、过程自动化及工厂自动化领域大放异彩。5G的uRLLC与mMTC等特性,进一步打破了工业网络对无线技术的传统偏见,为工业控制带来革命性变化。uRLLC确保关键任务数据的即时传输与处理,mMTC通过广泛的设备连接,实现了工业现场的全面监控与维护。典型无线技术在工业领域的性能如表1所示。

1.2 工业无线网络的潜力与优势

虽然工业现场已经部署了许多有线数据网络,可以完成基本的信息采集和反馈,但要进一步提升生产和管理效率仍存在困难,如工业现场有线网络技术标准碎片化(包括EtherNet/IP、PROFINET、EtherCAT、Modbus、DeviceNet等)、布线改造时走线复杂、网络路由容量扩展受限以及各种改造动作会导致停机维护等^[3]。无线网络凭借快速部署、无需复杂布线及保护装置的便利性,降低了网络建设初期投资成本及后续维护费用,体现了相较于传统有线网络的优越性。

无线网络为工厂管理提供了高度的灵活性,采用无线组网方式可快速、低成本地建立起工作现场的网络^[4]。摆脱线缆束缚的无线网络,凭借多种灵活的网

表1 典型无线技术在工业领域的性能

类别	通信距离	通信速率	典型应用
UWB	<10 m	200 Mbit/s	人员与资产定位、设备监测维护、智能物流及安全管理等
Bluetooth	10 m	20 Mbit/s	设备互联与数据传输,用于无线传感器网络、设备监控及智能制造中的短距离通信
Wi-Fi	50 m	200 Mbit/s	设备联网、数据传输与远程监控等
ZigBee	200 m	250 kbit/s	设备组网、传感器数据采集和智能控制,实现低功耗、低成本的工业自动化应用
WirelessHART	200 m	250 kbit/s	用于过程自动化中的无线仪表监测与控制
LoRa	1~20 km	0.3~5 kbit/s	实现远距离数据传输,用于设备监测、智能抄表和工业物联网
NB-IoT	1~20 km	<250 kbit/s	设备远程监控、智能计量等,具有低功耗、广覆盖优势
4G	1~3 km	100 Mbit/s	高清视频监控、设备远程控制与数据传输
5G	500 m	1 Gbit/s	大规模设备连接、高速数据传输、远程操控设备及精准实时监控

络架构,设备与终端的安装与移动更加自如,能适应各种复杂多变的工业场景,如野外钻探的现场设备组网。

在优化生产流程、保证正常运行和提升生产效率方面,无线网络实现了人与机器的无缝互联,高速稳定的数据传输能力确保了生产过程中信息的即时获取,使生产人员能借助手持设备实时追踪关键数据并接收设备预警信息,这加速了决策流程,减少了停机造成的损失。

在生产管理方面,工业无线网络借助位置服务与资产跟踪等功能,实现对生产现场人员、设备、物料的精准定位与实时监控。通过实时数据分析,企业能精准洞察生产过程细节,优化资源配置,提高资产与人员利用率,大幅提高生产效率。

综上所述,无线技术在降低成本、提供灵活性、适应广泛部署环境、提升生产效率与经济效益等方面表现卓越,在工业互联网领域中受到重视。这些优势加速了工业生产的数字化进程与智能化升级,为工业发展注入活力与创新动力,引领工业迈向更加高效、智能的未来。

2 工业无线网络应用趋势

德国工业4.0与美国工业互联网的无线技术探索与应用,对传统工业生产范式进行了重塑。这场变革不仅影响生产效率和成本结构,还赋予企业创新能力和市场敏锐度,使其能迅速响应市场变化。我国工业

和信息化部遴选的20个5G+工业互联网典型应用场景,涵盖了协同研发设计、柔性生产制造、智能理货、智能物流、设备预测维护、虚拟现场服务等生产经营活动,进一步拓宽了工业无线技术的应用边界,促进了企业数字化转型。工业3.0至工业4.0的工业自动化体系架构演进如图2所示(图片来源:《5G+PLC深度融合解决方案白皮书》施耐德电气5G+边缘计算系列白皮书)。

随着工业无线技术的成熟,无线技术使设备间能够自主沟通与协同工作,生产过程更加智能化、柔性化。通过数据分析与人工智能算法实现设备故障精准预测与预防性维护,提升了生产稳定性与效率。此外,工业无线技术在推动绿色生产方面具有巨大潜力,通过精细监控与调控工业设备能耗与排放,助力企业节能减排,提升可持续发展能力。

当前,以5G为核心的工业无线网络向生产核心控制环节渗透,构建新型工业互联网基础架构。通过升级或重构生产线、车间乃至工厂的网络布局,实现生产单元广泛互联、IT与OT深度融合、数据资源深度挖掘与创新应用高效赋能,为工业企业数字化转型和高质量发展注入强劲动力。展望未来,随着技术的持续进步和应用场景不断丰富,工业无线技术将在智能制造、能源管理、供应链协同等领域发挥更关键的作用,为企业开启发展空间,助力构建智能、绿色、高效的工业生态系统。

3 工业无线网络应用场景

在工业领域中,各行业生产经营环节对网络特性需求差异大,导致工业无线网络应用场景多元化、复杂化。工业领域对于无线网的要求主要有如下几个方面:上行大带宽、低时延高可靠、高可用系统零中断、隔离和安全、高精度定位以及移动性指标等^[5]。其中,网络带宽需求范围广,包括支持高清视频与大数据处理的高带宽,满足日常监控的中等带宽以及基本远程控制的低带宽。在时延控制上,实时控制系统与高精度定位应用追求低时延,环境数据采集则对时延容忍度较高。如视频监控与远程设备数据回传等上行密集型应用,重视高上行带宽与低时延;远程控制领域则关注下行带宽与低时延,满足精确指令传达与执行。工业领域5G技术主要应用场景如图3所示。

鉴于此,选择并设计合适的通信协议至关重要。按照网络规模与应用需求选用合适的通信协议,如

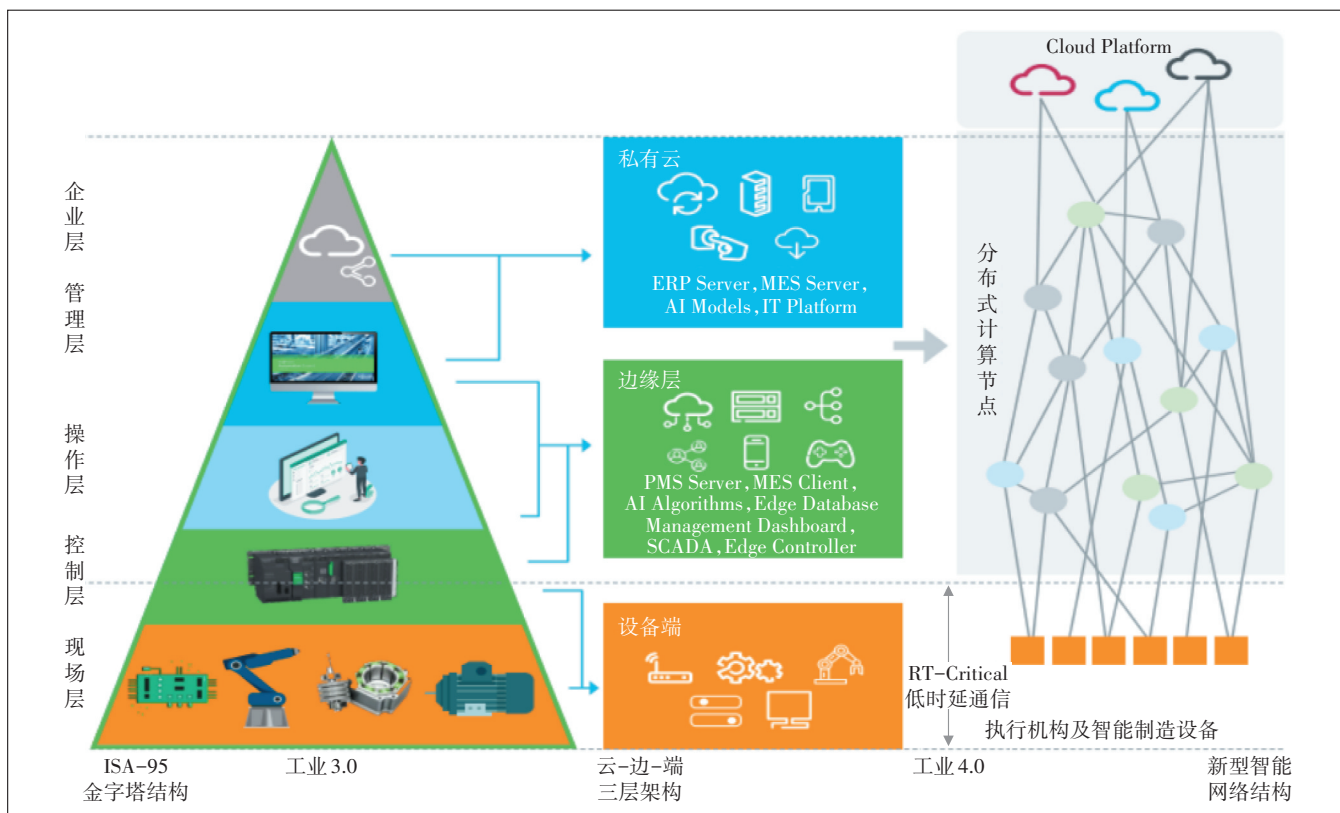


图2 工业3.0至工业4.0的工业自动化体系架构演进

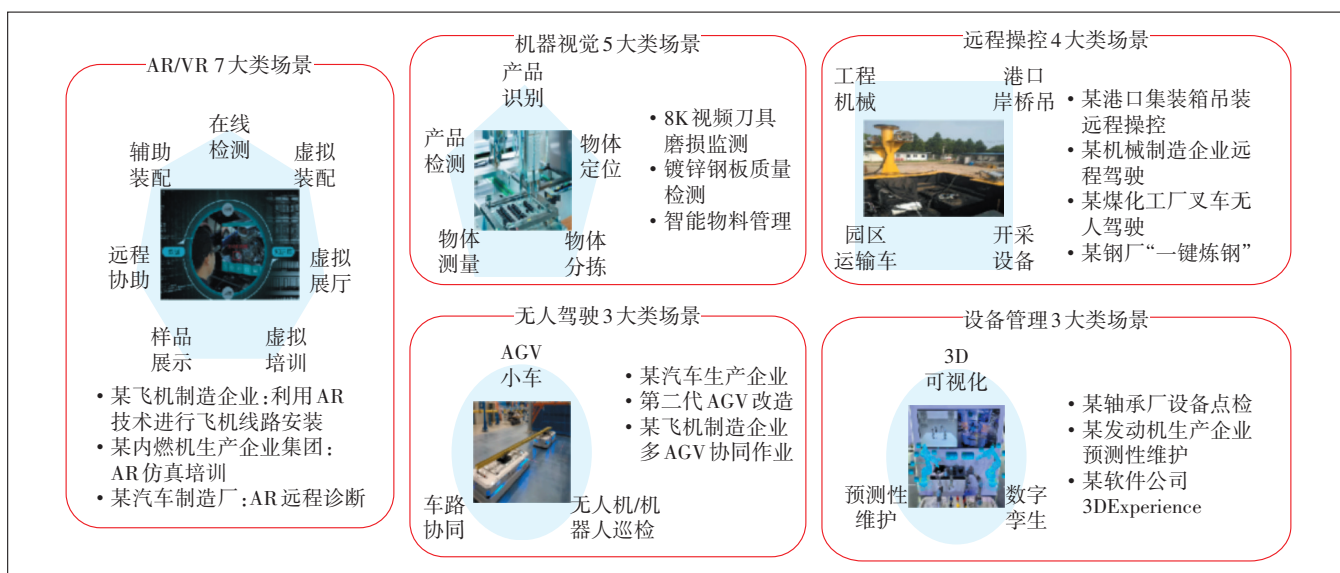


图3 工业领域5G技术主要应用场景

5G、LoRa、Wi-Fi、ZigBee等^[6], 必要时需重新设计通信协议, 并考虑能耗、通信距离、安全及数据传输速率等因素。工业无线网络部署需高度定制化, 精准对接具体应用场景的网络需求。只有这样, 才能确保工业无线网络性能与实际应用需求匹配, 为工业生产智能

化、高效化转型提供支撑。

3.1 数据采集类场景

工业数据是工业互联网的核心资产, 而数据采集是基础。数据采集的本质是利用泛在感知技术对多源设备、异构系统、运营环境等要素进行实时高效的

采集和云端汇聚^[7]。数据采集与分析类场景是工业无线网络技术应用最为广泛的场景,涵盖生产过程实时数据采集与传输、环境监控、设备状态监测、能源管理以及位置跟踪等核心环节。

在环境数据监测方面,高灵敏度、低功耗的无线传感器网络技术能精准捕捉生产环境中的温度、湿度、气体浓度等关键参数,并通过NB-IoT、Cat.1或Cat.4等无线技术实时将这些数据传输至数据中心,为环境保护和治理提供数据支持。

设备监控数据采集依赖如5G等高可靠性、低时延的工业无线技术,来确保生产线和设备运行状态的实时监控,包括性能参数、故障预警等信息的准确捕获,为设备预防性维护和故障预测奠定数据基础。如中国联通助力愉悦家纺实现1100多台设备、11.5万个点位的数据采集,良品率增长13%,生产周期和原材料损耗大幅下降。物料与产品位置数据管理借助RFID、GPS及室内定位技术(如蓝牙信标、UWB超宽带)实现物品全程追踪与管理。

另外,质量追溯系统可通过RFID、NFC或二维码等无线标识技术实现产品全生命周期追溯,确保产品质量安全与可追溯性。

3.2 机器视觉类场景

工业无线网络在视觉检测与行为识别场景中至关重要,通过融合无线摄像头、高精度传感器及边缘计算单元等,可打造智能监控网络。

在机器视觉质检领域,工业无线网络结合高清无线摄像头与人工智能算法,可实现产品质量的精准监控。摄像头依托5G或Wi-Fi等无线技术灵活部署在生产线关键节点,捕捉产品表面瑕疵、尺寸偏差及色彩变化,通过深度学习算法识别并分类缺陷,可提升质检效率与精确度。如在烟草行业,5G网络对小盒外观检测设备进行数据采集,并连接读取小包外观检测设备的数据库,可监测数据的完整性^[8]。另外,工业无线网络结合无线摄像头与OCR技术,可实现产品包装信息识别的自动化检测流程。通过捕捉和识别产品外观细节,包括标签、条形码、二维码及印刷质量等,加快了检查速度,降低了人为错误率。

在人员行为识别领域,工业无线网络结合无线穿戴设备、环境感知传感器及高清监控摄像头,实现对工人操作行为的实时监测与分析。无线穿戴设备通过蓝牙、Wi-Fi等通信技术传输工人体态与动作数据至后端平台。高清监控摄像头结合深度学习模型,识

别危险作业、违规操作及疲劳状态,发出预警,预防安全事故,优化生产流程。

3.3 移动作业类场景

工业无线网络是移动作业与协作类场景中的核心引擎,5G、Wi-Fi6、LoRaWAN等无线网络技术的成熟与应用,提升了通信速度、降低了延迟、增强了网络覆盖与稳定性,为移动作业与远程操控提供可靠通信保障。

在自动驾驶车辆(AGV)领域,无线网络技术为智能制造和仓储物流带来变革。基于5G低时延解决方案,AGV小车和移动机器人能实时接收并执行指令,实现低时延响应速度,实现自主导航、高效搬运与精准分拣,提升物料处理效率与精确度。

在移动巡检领域,传统的巡检机器人通信方式主要有有线、近距离无线等,其工作范围、数据回传、实时控制操作都受到一定的限制^[9]。目前智能巡检系统通过5G结合无线巡检机器人、无人机等,利用图像识别算法对生产设施进行全面精准巡检,提升了巡检效率与质量,降低了人工巡检的劳动强度与风险。如在油气行业,通过机器人搭载高清摄像头和红外等传感器,检查采集现场图像、温度、污秽、六氟化硫泄露等信息。智能机器人通过5G无线网络接入,支撑智能机器人巡检视频回传^[10]。

3.4 实时控制类场景

工业控制是工业生产过程中的核心技术。工业控制系统经历了数字化、网络化阶段,正朝着智能化的方向发展。其中,集散式控制系统、现场总线控制系统是数字化和网络化阶段最典型的代表,催生了Modbus、Profinet、EtherCat等近百种现场总线及工业以太网协议^[11]。尽管传统通信协议如PROFINET、ModbusTCP/IP或EtherNet/IP等依托铜介质网络电缆构建了稳固的连接体系,但其存在传输距离较短、数据在传输过程中会出现一定衰减、不能及时控制长距离的运动部件等问题^[12]。工业无线网络如果要进入工业生产的核心环节,就要满足工业控制对现场总线或工业以太网的要求。工业网络时延需求如图4所示。

在对控制时延要求相对不高的生产环境中,多台设备通过无线网络传输状态信息和生产数据,确保了设备间的无缝协同与高效运作,大幅提升了整体作业效率和生产力。如在某钢铁企业,PLC根据人工智能模型输出的控制参数发送反控信息,经过5G网关与远程IO控制液压纠偏轮、机械臂完成纠偏与堵料疏通操

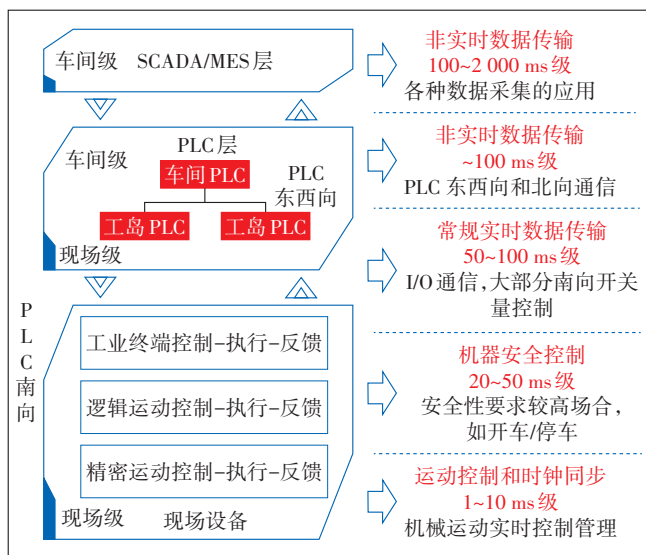


图4 工业网络时延需求

作,实现无人防堵料、无人自动纠偏功能。

但在大多数现场级网络,涉及工业控制C2IO的控制层和执行层通常承载实时业务,单节点要保证4 ms的时延和99.999%的可靠性,绝大多数工业无线网络都难以满足现场级网络如此高的时延和稳定性的要求。5G技术的引入,尤其是其超高可靠低延迟通信(uRLLC)特性的不断成熟,为解决上述问题提供了创新方案。中国联通和多家合作伙伴积极探索5G在工业控制领域的深度应用,探索工业无线网络如何进入工业控制的核心环节。以某车企的车后门焊装产线

为例,结合其对于工业无线网络的能力要求,开展了5G uRLLC在汽车柔性产线创新应用的相关工作。该产线由4台机器人通过切换工具,配合完成抓件、焊接、涂胶、滚边等多种工艺,并结合立体库随行夹具,支持多种车型后车门的混线生产。利用5G网络替代传统的工业有线控制网络后,该产线实现了5G网络4 ms时延和99.999%的稳定性,达到了工业控制领域对网络性能的要求,采用5G后的组网方案如图5所示。

本文对5G-A uRLLC样机进行了测试。PLC到DEVICE总发包数为2 000 000个,多数都在4 ms内正确送达,即看门狗为1的包数为1 996 353,少数出现超时或丢包,但没有宕机。看门狗为2的包数为2 642,总计包可靠性=(1 996 353+3 642)/2 000 000=99.999 75%;同理,DEVICE到PLC的包可靠性=(1 998 304+1 690)/2 000 000=99.999 7%。

3.5 特殊环境类场景

工业无线网络在各类极端与特殊环境中展现出强大的应用潜力和价值,在危险或难以接近的环境,如化工园区、煤矿深井及高温高压的工业现场,操作人员通过工业无线网络远程操控无人机、挖掘机及机器人等设备,极大地提升了作业的安全性和效率,同时显著扩展了作业范围。如和尚桥采场5G+边缘计算技术在无人驾驶矿车项目投运,首开国内冶金露天矿山多台矿车无人驾驶与有人驾驶混编运行的先河^[13]。而在高温高压工业现场,工业无线网络可精确控制生

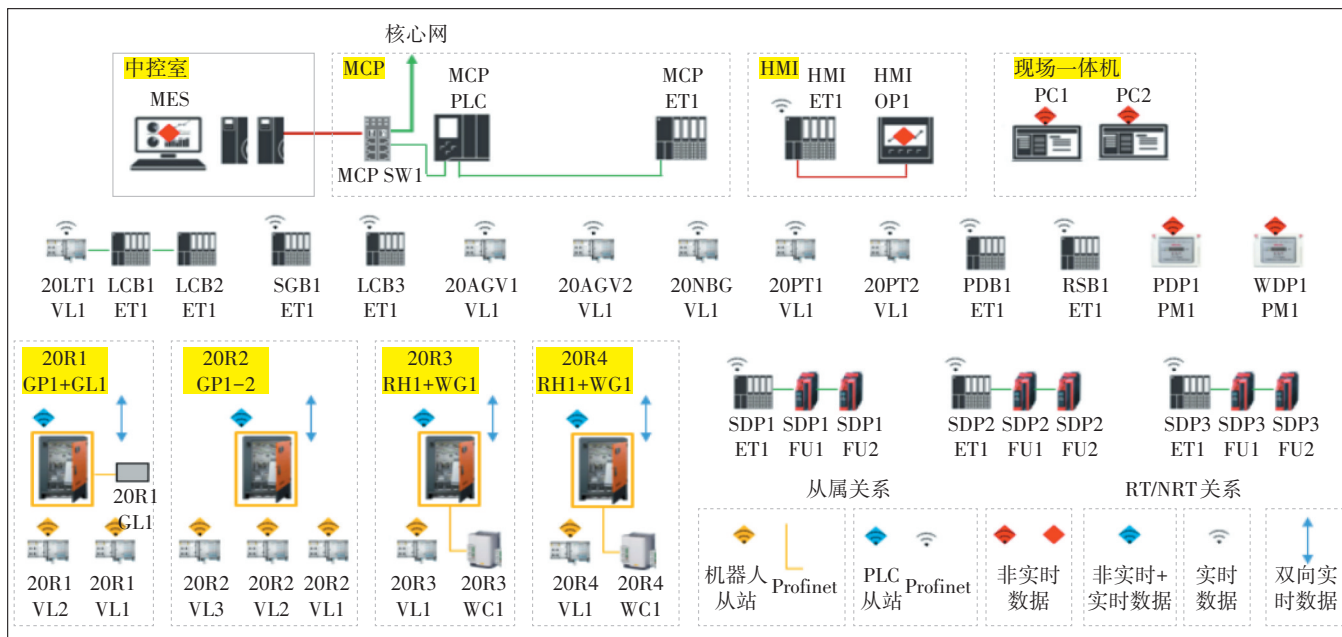


图5 汽车柔性产线5G uRLLC组网

产过程,提高产品质量,同时将现场生产数据及时传输到控制中心以便分析决策。

当前影响无线系统广泛应用的主要障碍是工业环境和无线技术的状态。工业环境对无线通信的挑战包括:工作环境温度从-40℃到+70℃,高湿度(当温度为40℃、湿度为95%时不结露),本质安全防爆要求等^[14]。相较于普遍的工业无线网络应用场景,这些特殊工业现场需要特殊的网络设备。如本安型设备具有本质安全特性,在正常工作或规定故障状态下,产生的电火花或热效应均不能点燃规定的爆炸性混合物,该设备被广泛应用于化工园区、煤矿等易燃易爆场所。如在矿山行业,山东联通携手山东能源集团北斗天地、中兴通讯三方联合打造的2 100 MHz本安型矿用5G基站是针对煤矿井下安全生产特殊需求研发的专门的矿用5G基站产品。

防高温设备能在高温环境下正常工作,具有良好的耐热性能,在冶金、化工等高温高压行业中,可保证网络设备的稳定运行。如在钢铁行业,5G炉前机器人在防高温方面采取了多种综合措施,包括耐高温材料的应用、散热与冷却系统的设计、隔热与绝缘处理、智能温控与保护机制等。

4 工业无线网络的发展前景

无线通信网络技术在工业现场中的应用并不是简单的化有线为无线,它延伸了原有工业网络的控制范围,并提供了极高的灵活性,成为有线网络、现场总线的有效补充^[15]。工业无线网络的发展前景极为广阔,随着与物联网、大数据、人工智能等技术的融合,工业无线网络日益完善,构建起一个全面协同的智能制造生态系统。在工业4.0浪潮和“新型工业化”战略的推动下,工业无线网络技术迎来黄金发展期。

展望未来,工业无线网络技术呈现六大发展趋势。技术标准统一化:多种工业无线标准将融合优化,形成国际标准,降低系统集成难度与成本;5G深度融合:5G技术的高带宽、低时延特性将深刻改变工业自动化格局,实现对生产过程的精细化控制与管理,提升生产效率与质量;低功耗技术突破:低功耗芯片、节能算法及电源管理技术的创新应用将延长工业无线网络设备的续航时间,减少对现场环境的依赖;安全性强化:通过数据加密、认证技术升级及智能化网络监测系统的部署,确保数据传输的安全性与保密性;应用场景拓展:工业无线网络的应用边界将不断

拓展,逐步进入工业生产的核心环节;智能化与自组织能力增强:未来的工业无线网络将具备高度智能化与自组织能力,能够自动感知环境、调整通信参数、优化网络配置并实现自我修复,结合AI技术预测并预防网络故障,确保网络的高稳定性和可靠性。

综上所述,工业无线网络作为智能制造的核心基础设施,正步入快速发展与广泛应用的黄金时期,其技术创新与应用拓展将持续推动全球工业行业的转型升级与可持续发展。

参考文献:

- [1] 杨振宇. 基于区块链技术的无线网络通信数据聚合隐私保护算法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2021, 23(4): 89-93.
- [2] 王敏. 面向工业互联网的无线通信技术研究[J]. 长江信息通信, 2022, 35(10): 227-229.
- [3] 周晋, 李建军, 王锐. 工业物联网无线化趋势浅析[J]. 物联网技术, 2021, 11(6): 84-86.
- [4] 顾小洪, 吴秋峰. 无线网络在工业企业中应用的一些探讨[J]. 工业控制计算机, 2006, 19(11): 1-2.
- [5] 王强, 刘海林, 黄杰, 等. 5G无线网络优化[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
- [6] 崔健, 欧宇钧, 许丽洁, 等. 浅析基于工业自动化的无线传感器网络设计[J]. 中国设备工程, 2024(16): 163-165.
- [7] 程景浩, 王燕伟, 徐滨阳. 5G+工业互联网在大型石化项目中的应用实践[J]. 邮电设计技术, 2021(7): 40-44.
- [8] 胡鸿宣, 丁亮. 基于卷烟工业生产场景的融合5G无线网络建设思路探讨[J]. 互联网周刊, 2023(19): 33-35.
- [9] 杨鑫, 赵慧玲. 多接入边缘计算MEC技术及业务发展策略[J]. 移动通信, 2019, 43(1): 29-33.
- [10] 蔡权. 基于智慧油气5G应用建设的探讨[J]. 新型工业化, 2021, 11(7): 79-80.
- [11] 于海斌, 曾鹏, 梁炜, 等. 无线化工业控制系统: 架构、关键技术及应用[J]. 自动化学报, 2023, 49(3): 540-549.
- [12] 车桂瑶, 胡建华. 无线通讯在工业控制中的应用[J]. 现代工业经济和信化, 2021, 11(6): 122-123, 128.
- [13] 王旭. 浅谈“5G+MEC无人驾驶矿车”工业互联网应用案例[J]. 长江信息通信, 2024, 37(5): 22-24.
- [14] 彭瑜. 工业自动化和控制环境下实现无线通信的新近动态和标准进展[J]. 自动化博览, 2008(z1): 47-51.
- [15] 高汉荣, 冯冬芹. 工业无线网络的现状及发展趋势[J]. 中国仪器仪表, 2008(z1): 87-89, 95.

作者简介:

赵兴龙, 毕业于英国莱斯特大学, 中国人民大学MBA, 高级工程师, 硕士, 主要从事5G、工业互联网、工业网络以及5G+工业互联网在汽车制造、纺织服装等方面的研究工作; 陈姊昀, 毕业于北京航空航天大学, 硕士, 主要从事工业互联网、工业物联平台等方面的研究工作; 王屹达, 毕业于华北电力大学, 工程师, 硕士, 主要从事新一代信息技术与能源行业融合应用研究工作。