

Views & Comments

工业无线控制网络——从WIA向未来演进

于海斌^{a,b,c,#}, 曾鹏^{a,b,c,#}, 许驰^{a,b,c,#}^a State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China^b Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China^c Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China

1. 背景

信息、通信和运营技术的深度融合正在推动工业自动化的重大变革。其中，工业无线控制网络（industrial wireless control network, IWCN）由于可以帮助提高生产效率、降低成本、增强安全性，并最终实现智能制造，成为工业自动化的关键使能技术[1]。

为此，工业无线控制网络必须满足工业自动化的各种严苛通信要求，包括高可靠、强实时、低抖动、低成本、低功耗和高安全[2]。然而，本身资源极度受限的工业无线控制网络却经常工作在恶劣工业环境下，与WiFi、Bluetooth、ZigBee等网络共享免授权频段。因此，在过去几十年中，学术界和工业界付出了巨大的努力来研发工业无线控制网络，包括面向过程自动化的WirelessHART、ISA100.11a和WIA-PA，以及面向工厂自动化的WISA、WSAN-FA、WIA-FA等[3–5]。目前，国际电工委员会（IEC）正式发布的工业无线控制网络国际标准仅有WirelessHART、ISA100.11a、WIA-PA和WIA-FA四项。

近期，国际电信联盟和第三代合作伙伴计划（3GPP）也开始研发用于工业控制的超可靠低时延通信（ultra-reliable low latency communication, URLLC），并将其作为5G的三大场景之一[6]。由于URLLC是基于5G的远距离广域网络通信技术，这将使得云控制成为可能，并将彻底

打破现有工业无线控制网络主要基于短距离无线局域网或局域网的技术路线。然而，尽管URLLC已经完成标准化，但其在垂直行业中的应用仍处于不断测试和适配中，尚未大规模商用。其原因主要在于：不同的工业应用有不同的通信需求，而5G的工业应用并没有像工业以太网一样经历稳定的演进过程，缺少知识沉淀与积累。一方面，在缺少授权频段使用许可的情况下，大多数工业企业希望建立专用网络来增强安全性和隐私性，而商用5G网络却由移动运营商在授权频段进行管理和运营。另一方面，大多数工业控制应用仍停留在工业现场，并没有必要将所有工业数据均通过5G进行广域传输。综上，如何在恶劣的工业环境下实现免授权频段上的超可靠低时延通信，满足现场级工业控制的严格要求是最具挑战性的问题之一。最近，基于5G空口技术，WIA-NR在免授权频段实现了超可靠低时延的通信，可以支持现场级工业无线控制[7]。

目前，WIA-PA、WIA-FA和WIA-NR形成了一个完整的技术群（统称WIA），基本可以覆盖各类典型的工业应用，并将根据工业需求进一步演进。然而，来自垂直行业的多种需求持续推动着工业无线控制网络的创新发展，如同URLLC必将向6G演进。为此，3GPP建立了一个新的工作项目来研究增强的URLLC [8]。全球第一份6G白皮书也证实了URLLC将持续演进，其空口时延指标将提高到0.1 ms [9]。《自然·电子学》的前瞻观点提出了五种6G场景，并定义了安全URLLC [10]。与此同时，大规模

* These authors contributed equally to this work.

URLLC和超宽带URLLC也被进一步定义[11]。总之，现有观点一致认为6G时代的URLLC应实现小于0.1 ms的时延，以及高于99.9999999%的可靠性。这一性能指标将支持高精度工业控制，如微纳尺度遥操作和精密加工。随着URLLC的持续增强，WIA-NR也将朝着6G方向演进。考虑到WIA技术群是由同一团队采用相近技术路线研发，本文将介绍和比较该技术群，并讨论WIA在6G时代的发展方向。

2. WIA技术群概述

2.1. 系统架构

WIA定义了一组物理设备，包括主控机、网关设备、现场设备、手持设备以及路由设备、接入设备或基站。基于这些设备，WIA技术群构建了如图1所示的不同网络拓扑。具体来说，WIA-PA采用星状或星-网状层叠拓扑，其中星状拓扑是星-网状层叠拓扑的一种特殊情况。相应地，WIA-FA采用冗余星状拓扑，WIA-NR采用层叠星状拓扑，并支持设备到设备（D2D）和多点协作（CoMP）通信。

对应于不同的网络拓扑结构，WIA定义两种系统管理架构，即集中式管理以及集中式和分布式相结合管理。其中，WIA-PA两种架构均支持，而WIA-FA和WIA-NR分别只支持前一种和后一种架构。

2.2. 协议栈

基于开放系统互联参考模型（OSI），WIA定义了如图2所示的协议栈。具体来说，WIA-PA完全采用IEEE 802.15.4标准作为其物理层（PHY）和介质访问控制（MAC）子层，并定义了数据链路子层、网络层（NET）和应用层（APP）。其中，MAC子层和数据链路子层构成

数据链路层（DLL）。WIA-FA仅采用IEEE 802.11标准的物理层，并定义了数据链路层和应用层。相比之下，WIA-NR仅采用5G的物理层、介质访问控制层和无线链路控制层，并重定义了应用层，而没有采用其他用于广域通信的协议层。需要注意的是，只有WIA-PA定义了网络层。其原因在于：WIA-PA路由设备在网状拓扑中采用无线连接，必须在网络层定义寻址、路由等功能，而WIA-FA接入设备或WIA-NR基站采用有线连接，其功能并不在WIA标准范围内定义。

在物理层，WIA统一采用免授权频段，确保支持全球部署。其中，WIA-PA和WIA-FA工作在2.4 GHz频段，而WIA-NR工作在5 GHz频段。为此，WIA采用“先听后发”机制确保符合频谱使用规则。这也是WIA-NR区别于商用5G的关键特征之一。表1总结了WIA物理层的基本参数[4-5,7]。

在数据链路层，WIA定义了不同的超帧或时隙结构来实现时隙通信，并设计了多信道接入、自适应跳频和时间同步等方法，以增强可靠性和实时性，确保无冲突通信。

在应用层，WIA定义虚拟通信关系（VCR）来描述用户应用对象（UAO）的通信资源和路径。根据虚拟通信关系，多个用户应用对象可以执行分布式工业应用。同时，为实现异构工业协议通信（如PROFINET和Mod-Bus），WIA采用隧道技术或协议转换来进行协议适配。这大大增强了WIA与现有工业自动化系统的互操作性。

3. 关键技术

3.1. 确定性时隙通信

WIA采用时隙通信确保通信的确定性。时隙是数据包交换的基本单位，其长度可配置。如图3所示，基于时隙

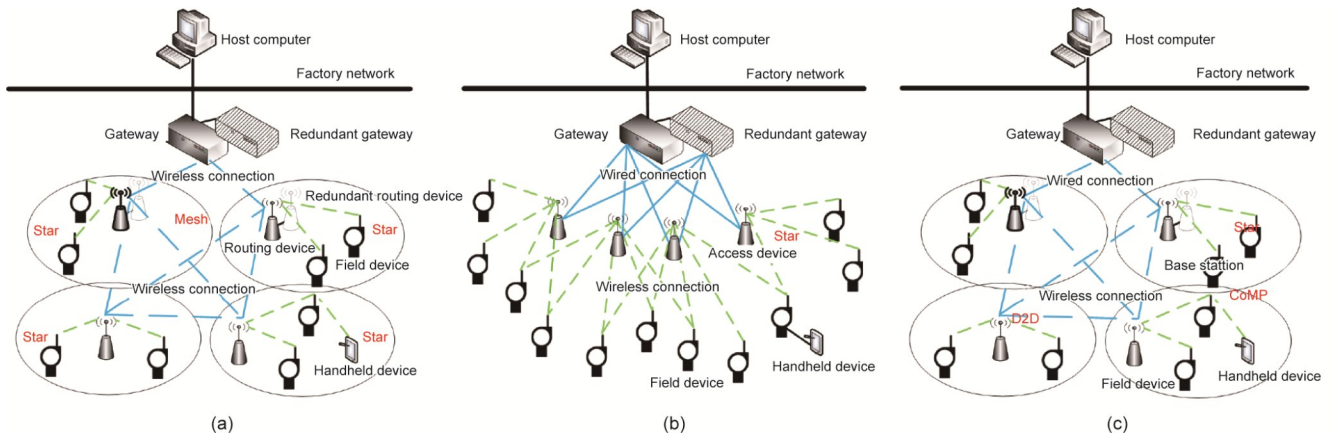


图1. WIA网络拓扑。(a) WIA-PA星-网状层叠拓扑；(b) WIA-FA冗余星状拓扑；(c) WIA-NR层叠星状拓扑。D2D：设备到设备；CoMP：多点协作。

OSI	Function	WIA-PA	WIA-FA	WIA-NR
Application layer	User applications	UAOs, VCR, industrial protocol adaption, and aggregation/disaggregation	UAOs, VCR, industrial protocol adaption, and aggregation/disaggregation	UAOs, VCR, industrial protocol adaption, and aggregation/disaggregation
Presentation layer	Data format conversion	↑	↑	↑
Session layer	Connection management services	↑	↑	↑
Transport layer	Transparent message transfer	↑ or ↓	↑ or ↓	↑ or ↓
Network layer	Addresses resolving and end-to-end routing	Addressing, routing, and fragmentation/reassembly	↑ or ↓	↑ or ↓
Data Link layer	Data structure, framing, error detection, and bus arbitration	Retransmission, adaptive channel hopping, time synchronization, TDMA/FDMA, and CSMA Extended IEEE 802.15.4 MAC	Retransmission, adaptive channel hopping, time synchronization, fragmentation/reassembly, aggregation/disaggregation, and TDMA/FDMA	Retransmission, adaptive channel hopping, time synchronization, fragmentation/reassembly, multiplexing/semultiplexing, industrial data priority scheduling, deterministic multi-channel access, channel mapping, and adaptive listen-before-talk
PHY	Mechanical/electrical connection and raw bit stream transmission	IEEE 802.15.4 PHY DSSS 2.4 GHz unlicensed band	IEEE 802.11 PHY DSSS/FHSS/OFDM/CCK/PBCC 2.4 GHz unlicensed band	5G PHY OFDM-MIMO and flexible numerology 5 GHz unlicensed band

图2. WIA协议栈。↑和↓表示当该层功能存在时，其功能将包含在箭头指示方向的协议层。OSI：开放系统互联参考模型；UAO：用户应用对象；VCR：虚拟通信关系；TDMA：时分多址；FDMA：频分多址；CSMA：载波监听多路访问；MAC：介质访问控制；PHY：物理层；DSSS：直接序列扩频；FHSS：跳频技术；OFDM：正交频分复用；CCK：补码键控；PBCC：分组二进制卷积编码；MIMO：多输入多输出。

表1 物理层基本参数

Parameters	WIA family		
	WIA-PA	WIA-FA	WIA-NR
Spectrum	2.4 GHz band	2.4 GHz band	5 GHz band
Bandwidth (MHz)	5	20, 40	20, 40, 80, 100, 120, 140, 160
Transmission mode	DSSS	DSSS, FHSS, OFDM, CCK, PBCC	OFDM
Modulation	O-QPSK	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Maximum rate	250 kbps	54 Mbps	100 Mbps
Antenna	Single antenna	Single antenna	Multiple antennas

BPSK: binary phase shift keying; QPSK: quadrature phase shift keying; O-QPSK: offset-QPSK; QAM: quadrature amplitude modulation; kbps: kilobit per second; Mbps: megabit per second.

的循环重复，WIA-PA和WIA-FA进一步定义超帧，而WIA-NR定义帧和子帧。具体来说，WIA-PA定义了基于IEEE 802.15.4信标的超帧，包括信标、活跃期和非活跃期。其中，活动期包括竞争访问时隙和非竞争访问时隙，而非活动期包括簇内通信、簇间通信以及休眠等时隙。WIA-FA的默认超帧由信标、上行链路共享时隙和下行链路时隙组成，用于管理信息和数据的传输。相应地，基于5G的灵活参数集(numerology)，WIA-NR通过将子载波间隔设置为 $2^\mu \times 15$ kHz来实现多种帧，其中， $\mu = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ 即是参数集。WIA-NR的帧长度固定为10 ms，可以

由不同数量的时隙组成，形成下行/上行信道时隙、下行/上行信道自包含时隙或灵活时隙。

3.2. 可自适应跳频的多信道接入

WIA采用多信道接入与信道跳频相结合的方式来提高容量和可靠性。具体而言，WIA-PA采用频分多址(FDMA)进行多信道接入，并结合时分多址(TDMA)提升系统容量。WIA-PA定义了三种信道跳频方式，即自适应频率切换、自适应跳频和时隙跳频，其相对于盲信道跳频的优势在文献[12]中得到了验证。WIA-FA将多个接入设备

分为不同组，采用FDMA实现并行接入。类似地，WIA-FA也支持自适应跳频。对于WIA-NR，每个基站配备多个天线进行多输入多输出（MIMO）通信，并且多个基站进行多点协作通信。同时，WIA-NR根据丢包或重传情况定义了三级自适应跳频，分别是基于时隙、子帧、帧的自适应跳频。

3.3. 聚合和解聚

为提高网络资源利用率，WIA在不同的协议层定义了不同的聚合和解聚方式，如图2所示。WIA-PA定义的是两级聚合机制，包括网络层的数据聚合和应用层的包聚合。WIA-FA在数据链路层定义了帧聚合，并支持在应用层处对过程数据进行聚合和解聚。WIA-NR在应用层也定义两级数据聚合机制，用于上行和下行数据传输。

3.4. 工业数据优先级调度

为满足不同的工业应用，WIA定义了表2所示的工业

数据优先级（按从高到低降序排列），以进行通信调度。为此，WIA进一步定义了三种通信模式，即客户端/服务器（C/S）、发布者/订阅者（P/S）、报告/汇聚（R/S）。其中，C/S主要用于动态、非周期、非实时数据的单播通信，P/S主要用于周期、实时数据的单播或多播通信，R/S主要用于报警、警报或事件等非周期性数据的单播或多播通信。进一步，可以使用C/S VCR、P/S VCR和R/S VCR完成通信调度。

4. 性能及应用

随着技术的进步和标准化，WIA正在深入到不同的工业应用。图4对比了WIA技术群可达到的性能指标情况[4-5,7,12-14]。

WIA-PA作为最早研发的WIA技术，已成功应用了十余年，其产品成熟，已占据部分中国市场。目前，WIA-

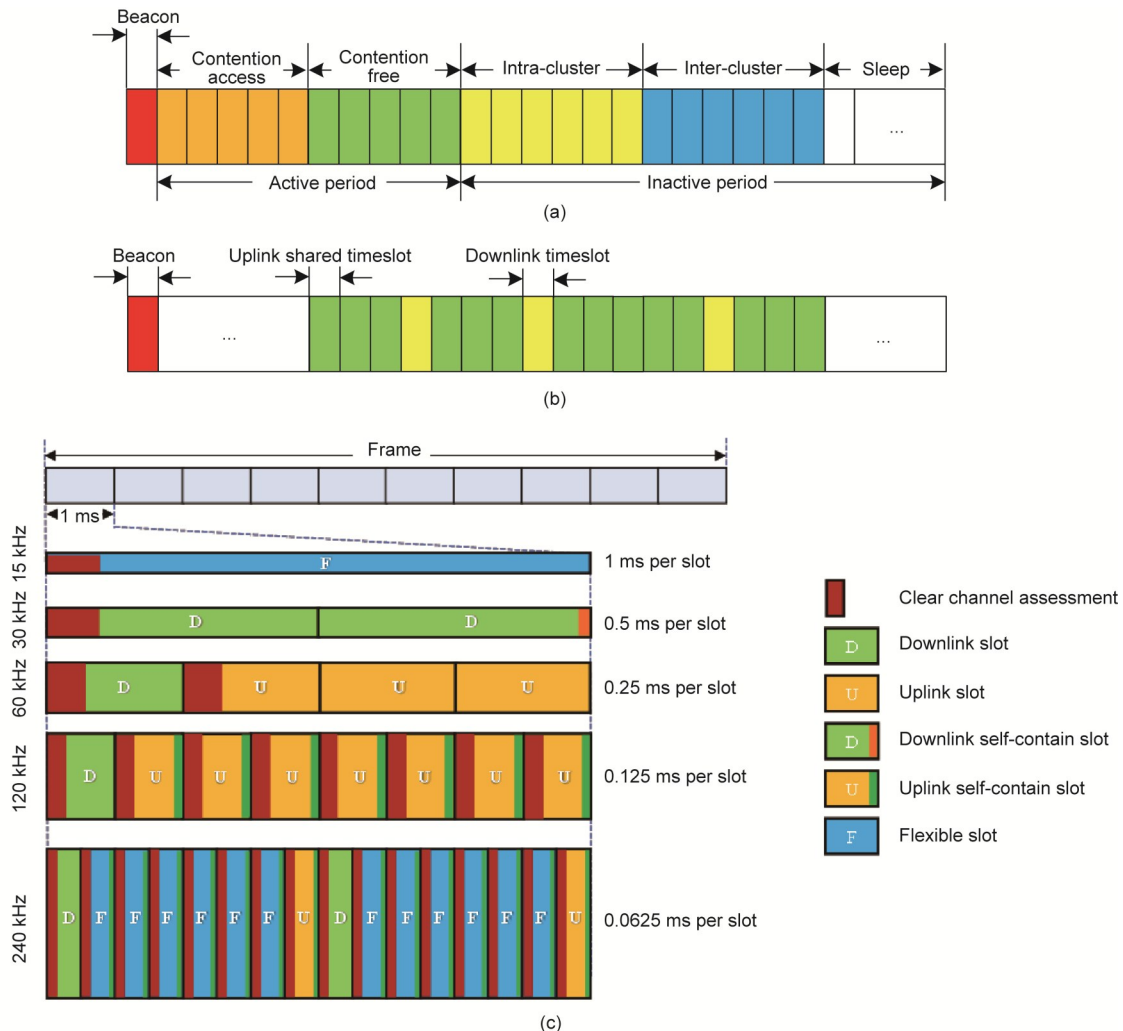


图3. WIA 帧结构。(a) WIA-PA 超帧；(b) WIA-FA 超帧；(c) WIA-NR 帧。

表2 WIA工业数据优先级

Scheduling mechanism	WIA family		
	WIA-PA	WIA-FA	WIA-NR
Data priority	Command, process data, normal, alarm	Urgent data, periodic process data, a periodic non-urgent data, periodic management data, and non-real-time data	Aperiodic critical data, periodic critical data, aperiodic non-critical data, and periodic non-critical data
Communication mode	C/S, P/S, and R/S	—	—

C/S: client/server; P/S: publisher/subscriber; R/S: report source/sink.

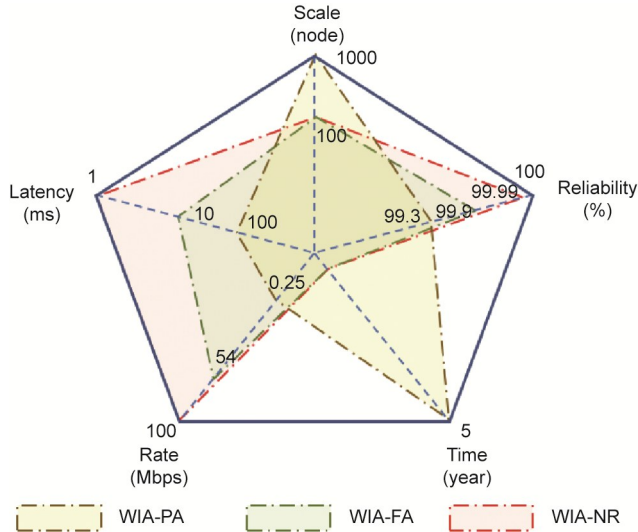


图4. WIA技术群性能对比。

PA最多可支持千点规模组网，典型速率为250 kbps，其中占比为0.18%的路由设备的平均功率可低至0.63 mW [13]。同时，WIA-PA实现了大于99.3%的可靠性和小于100 ms的端到端时延。基于多源高精度时钟同步技术，WIA-PA甚至可以将接入时延从1 s降至10 ms，进而支持实时闭环控制。WIA-PA已在石油、石化、冶金、电网等多个行业规模部署，主要用于工业测量、监控和过程控制。

WIA-FA于2017年完成标准化，已通过产品测试，并正在进行实际应用部署。目前，WIA-FA可实现大于99.99%可靠性和小于10 ms的时延，速率达到54 Mbps，可支持百点级高并发接入。WIA-FA已用于工业多媒体通信、离散制造的闭环控制等，如数字化车间的机器人监视与控制、物流分拣系统中的自动导引车（AGV）互联调度等[5,14]。

相比之下，WIA-NR随着5G的研发启动，仍在研究和测试中，尚未得到实际部署。但是，系统级仿真和原型实验测试表明，WIA-NR可以达到99.999%以上的可靠性和小于1 ms的时延[7]，基本达到5G URLLC的性能指标，可以支持运动控制。但是，对于更加严苛的工业控制，实

时性和可靠性仍有待提高。同时，现有性能指标与6G的目标仍相去甚远，从而促使我们进一步提升WIA-NR，推动其向6G演进。

5. WIA向6G演进分析

考虑到尚没有一种工业网络技术可以同时满足多种工业要求，因此，短期内现有的工业无线控制网络（如WirelessHART、WIA-PA）和工业以太网（如PROFINET、ModBus）并不会被5G或6G取代。也就是说，多种工业网络技术将长期共存，并相互融合。因此，本文面向工业现场，提出建立层叠异构的工业无线控制网络新架构，如图5所示。WIA-NR为工厂提供粗粒度的广覆盖，而WIA-PA等现有工业网络继续在工厂局部区域提供细粒度的深覆盖。其中，与工厂骨干网相连的WIA-NR进一步与制造执行系统（MES）或企业资源规划（ERP）系统相连。这样，超可靠、强实时的WIA-NR负责关键工业控制任务，而低成本、低功耗的WIA-PA负责大规模的工业测控。为实现上述网络架构，我们仍面临以下挑战，并期望在6G时代得以解决。

(1) **异构互连**。为了通过WIA-NR实现异构工业网络互联及统一接入，首先需要解决异构工业网络的通信协议适配问题。主要挑战在于：工业企业已经开发了数百种工业有线或无线网络协议，采用了不同的协议栈、数据格式和传输速率，互通性差，导致工厂内通信“七国八制”。一种可行的方法是通过网关直接解析不同的工业通信协议。为此，可以建立每种工业通信协议与WIA-NR的虚拟映射关系，并执行协议转换。但是，部分工业通信协议并不对外开放，难以分析。对于这种情况，可以采用隧道技术进行透明传输。总之，如何保证协议解析和转换的实时性是最重要的问题。为提高实时性，可以在工业网络边缘分布式地部署服务器，进行边缘计算和缓存，增强工业网络的计算能力。通过这种方式，WIA-NR可以支持具有强实时性要求的复杂协议操作，进而满足时间敏感型工业

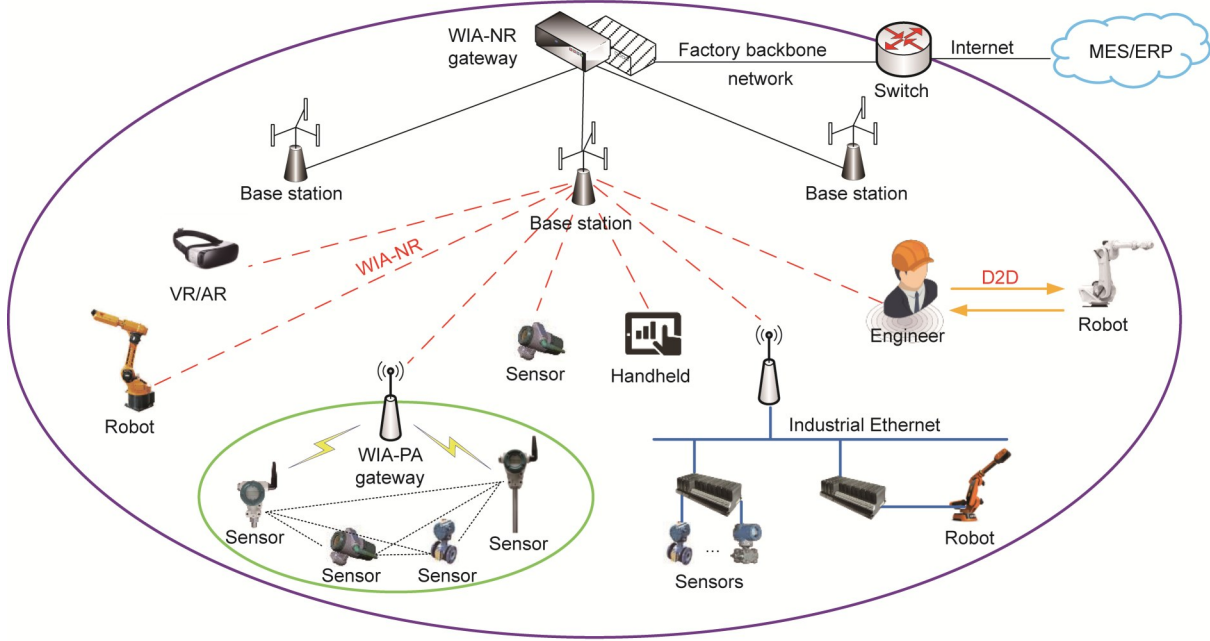


图5. 未来工业现场无线控制网络。MES：制造执行系统；ERP：企业资源规划；VR：虚拟现实；AR：增强现实。

应用。

(2) **和谐共存**。WIA-NR工作在免授权频段，故必须深入研究异构工业网络的抗干扰通信及和谐共存问题，确保通信的实时性和可靠性。一般来说，资源分配和功率控制是降低干扰、提高可靠性的基本方法。然而，如何精准评估信道状态，并实现实时接入控制是最重要的问题。认知无线电由于具有动态频谱接入能力，一直被视为实现工业无线控制网络超可靠、强实时通信的关键技术[15]。随着人工智能的快速发展，智能无线电[16]可以进一步增强工业无线控制网络对免授权频段的认知能力。未来，智能无线电赋能的WIA-NR，将可以有效克服工业环境中的随机干扰，与免授权频段中的WiFi等其他无线网络和谐共存。

(3) **能量效率**。智能无线电及其他新技术应用，将显著提高网络能耗。因此，下一个问题就是如何提高WIA-NR的能效。能量收集技术通过不断地从周围环境中捕获能量，是进行可持续能源供应的有效方式。因此，能量收集型认知无线网络得到了广泛关注，并用于异构网络共存[17]。最近，智能共生无线电被提出[18]，可以同时提高频谱和能量效率，成为6G的关键技术之一，因此也是未来工业无线控制网络的一个重要研究课题。基于该关键技术，可以帮助WIA-NR实现大规模URLLC通信，支持网络的长时间稳定运行。

(4) **绝对时间同步**。具有超低抖动的绝对时间同步是确保工业协同控制的关键。例如，多台机器人相互协作

来同步完成一个操作任务，显然需要多个机器人之间的绝对时间同步。这与5G中用户设备与基站之间的时间同步存在明显差别。绝对时间同步这一议题在3GPP第16版标准之前并未被研究，目前仍然面临诸多挑战。因此，我们在3GPP中提出了建立异构层叠工业无线控制网络，并开展绝对时间同步研究的议题[19–20]。在实际应用中，为了保证同步操作的鲁棒性，必须深入研究如何提高时间同步精度，降低抖动。

(5) **多优先级调度**。对于异构层叠的工业无线控制网络，由于控制器通常与大量隶属于不同网络的传感器和执行器进行交互，故联合调度必不可少。在这种情况下，WIA-NR集中式和分布式相结合的系统管理架构显然更有效。由于不同的工业无线控制网络采用不同的调度方法，网络间的联合调度必然比网络内的联合调度更复杂。为了支持多个工业数据优先级，混合关键性调度[21]是保证实时性和可靠性的有效方法之一，应在未来的工业无线控制网络中进行深入研究。同时，有必要在网关处部署实时队列分类器以简化调度。当然，不同协议之间的跨层调度和联合优化也将有助于解决调度问题。此外，由于不同的工业网络定义了不同的数据优先级，重新定义统一的工业数据优先级也未尝不可。

除了前面讨论的挑战和研究热点外，实现异构层叠工业无线控制网络还面临着诸多挑战，应在6G时代进行有针对性地突破。无论如何，升级现有工业无线控制网络，乃至从头研发一个全新的工业无线控制网络，来积极地拥

抱垂直行业，始终优于被动地等待垂直行业使用现有的工业无线控制网络。

6. 结论

本文介绍了WIA技术群，包括WIA-PA、WIA-FA和WIA-NR的现状和未来前景。首先阐述了工业无线控制网络的背景，包括工业网络的关键通信要求和研发挑战，并讨论6G时代工业无线控制网络技术创新的重要意义。然后，通过对比系统架构和协议栈，对WIA进行了详细介绍和比较。接下来，我们总结了WIA的关键技术、性能和应用情况。最后，我们提出了未来工业无线控制网络层叠异构架构，并讨论了WIA向6G演进所面临的挑战和亟待突破的难题。

致谢

本文得到了国家重点研发计划（2020YFB1710900）、国家自然科学基金项目（62173322, 61803368）、中国博士后科学基金（2019M661156）、兴辽人才计划（XLYC1801001）和中国科学院青年创新促进会（2019202）的资助。

References

- [1] Zhou J, Zhou Y, Wang B, Zang J. Human – cyber – physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. *Engineering* 2019;5 (4):624–36.
- [2] Wolschlaeger 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):17–27.
- [3] Huang VKL, Pang Z, Chen CJA, Tsang KF. New trends in the practical deployment of industrial wireless: from noncritical to critical use cases. *IEEE Ind Electron Mag* 2018;12(2):50–8.
- [4] Liang W, Zhang X, Xiao Y, Wang F, Zeng P, Yu H. Survey and experiments of WIA-PA specification of industrial wireless network. *Wirel Commun Mob Comput* 2011;11(8):1197–212.
- [5] Liang W, Zheng M, Zhang J, Shi H, Yu H, Yang Y, et al. WIA-FA and its applications to digital factory: a wireless network solution for factory automation. *Proc IEEE* 2019;107(6):1053–73.
- [6] Study on communication for automation in vertical domains. Technical Report. 3rd Generation Partnership Project; 2018.
- [7] Xu C, Zeng P, Yu H, Jin X, Xia C. WIA-NR: ultra-reliable low-latency communication for industrial wireless control networks over unlicensed bands. *IEEE Netw* 2021;35(1):258–65.
- [8] Enhanced industrial Internet of Things (IIoT) and ultra-reliable and low latency communication (URLLC) support for NR. Report. 3rd Generation Partnership Project; 2020.
- [9] Matti L, Kari L. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence. Report. Oulu: University of Oulu; 2019.
- [10] Dang S, Amin O, Shihada B, Alouini MS. What should 6G be? *Nat Electron* 2020;3(1):20–9.
- [11] Saad W, Bennis M, Chen M. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Netw* 2020;34 (3): 134–42.
- [12] Zheng M, Liang W, Yu H, Xiao Y. Performance analysis of the industrial wireless networks standard: WIA-PA. *Mob Netw Appl* 2017;22(1):139–50.
- [13] Verhappen I. WIA-PA and WIA-FA to be added to IEC wireless standards [Internet]. Schaumburg: Control Global; 2016 Apr 12 [cited 2020 Oct 30]. Available from: <https://www.controlglobal.com/articles/2016/wia-pa-and-wia-fa-to-be-added-to-iec-wireless-standards/>.
- [14] Liang W, Zhang J, Shi H, Wang K, Wang Q, Zheng M, et al. An experimental evaluation of WIA-FA and IEEE 802.11 networks for discrete manufacturing. *IEEE Trans Ind Inform* 2021;17(9):6260–71.
- [15] Chiwewe TM, Mbuya CF, Hancke GP. Using cognitive radio for interferenceresistant industrial wireless sensor networks: an overview. *IEEE Trans Ind Inform* 2015;11(6):1466–81.
- [16] Qin Z, Zhou X, Zhang L, Gao Y, Liang YC, Li GY. 20 years of evolution from cognitive to intelligent communications. *IEEE Trans Cogn Commun Netw* 2020;6(1):6–20.
- [17] Xu C, Zheng M, Liang W, Yu H, Liang YC. End-to-end throughput maximization for underlay multi-hop cognitive radio networks with RF energy harvesting. *IEEE Trans Wirel Commun* 2017;16(6):3561–72.
- [18] Liang YC, Zhang Q, Larsson EG, Li GY. Symbiotic radio: cognitive backscattering communications for future wireless networks. *IEEE Trans Cogn Commun Netw* 2020;6(4):1242–55.
- [19] SIA. RI-1714175: URLLC for heterogeneous industrial networks with time synchronization requirement [presentation]. In: 3GPP TSG RAN WG1 Meeting 90; 2017 Aug 21–25; Prague, Czech Republic; 2017.
- [20] Huawei, HiSilicon, SIA. RI-1713753: Discussion on over-the-air time synchronization for URLLC [presentation]. In: 3GPP TSG RAN WG1 Meeting 90; 2017 Aug 21–25; Prague, Czech Republic; 2017.
- [21] Xia C, Jin X, Kong L, Zeng P. Bounding the demand of mixed-criticality industrial wireless sensor networks. *IEEE Access* 2017;5:7505–16.