

5G+TSN 融合部署场景与技术发展

白皮书

V1.0 版

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟（AII）

2021 年 12 月

编写说明

在全球第四次工业革命的浪潮下，人机物需要通过工业互联网彼此交互，相互协同，形成更为高效智能的运作系统。以5G、TSN、边缘计算、云计算、大数据、人工智能为代表的新一代信息通信技术将与工业自动化技术形成合力，实现工业企业在设计、采购、生产、仓储、物流、运营、销售各个环节的智能化运行。网络作为工业互联网基础，需要具备接入海量设备、异构系统互联互通、端到端确定性传输、网络资源智能调度等能力。5G与TSN作为无线和有线领域的关键网络技术，二者融合创新、协同部署，对于构建高质量的工业互联网企业内网至关重要。

本白皮书由工业互联网产业联盟组织，中国信息通信研究院牵头行业内相关单位编写，通过对5G与TSN融合部署的背景、需求及场景进行梳理，导引出二者融合部署目标架构、关键技术、技术融合等方面的研究方向，并就部署应用、集成方案做出分析展望、部署建议及应用参考，旨在为5G与TSN的融合部署落地提供全景视图。

在本白皮书的编写过程中，得到了联盟成员及国内外众多企业、研究机构、高校的大力支持，为白皮书的观点形成与编写提供了有力支撑。后续我们将根据业界的实践情况和各界的反馈意见，在持续深入研究的基础上适时修订和发布的新版本。

组织单位：工业互联网产业联盟

编写单位（排名不分先后）：中国信息通信研究院、中国移动研究院、中国电信集团公司、中国联通研究院、华为技术有限公司、中兴通讯股份有限公司、网络通信与安全紫金山实验室、北京邮电大学、重庆大学、北京科技大学、英特尔（中国）有限公司、广东省新一代通信与网络创新研究院、普天信息工程设计服务有限公司、北京智芯微电子科技有限公司、东方电气集团科学技术研究院有限公司

编写组成员（排名不分先后）：

张恒升、朱瑾瑜、朱海龙、李斌、周宏林、蔡岳平、孙雷、王丹、张敏、吴越、韦安妮、白钰、李永竞、陈昕、卢华、陈李昊、张宇、王虎文、陈洁、于青民、高腾、郑兴明，喻敬海、郭惠军、李果、蒲晓珉、刘勇、蔡磊、胡晓娟、龙容、刘珊、黄倩

目 录

一、	需求和场景.....	1
(一)	什么是 5G+TSN.....	1
1.	5G 与工业互联网.....	1
2.	时间敏感网络 (TSN) 技术.....	1
3.	5G+TSN.....	2
(二)	5G+TSN 需求.....	6
1.	业务需求.....	6
2.	技术需求.....	8
二、	5G+TSN 研究进展.....	10
(一)	标准进展.....	10
(二)	研究现状.....	11
三、	5G+TSN 关键技术.....	12
(一)	整体架构.....	12
(二)	时钟适配.....	13
(三)	QoS 映射.....	14
1.	QoS 指标的映射.....	14
2.	5G 和 TSN 策略协同.....	15
(四)	资源协同.....	16
四、	应用场景.....	17
(一)	智能制造领域.....	17
(二)	智能电网领域.....	20
(三)	智能网联汽车.....	23
(四)	智慧矿山领域.....	25

(五) 智慧港口领域.....	26
五、 5G+TSN 面临的挑战.....	28
六、 附录.....	29
(一) 引用文件列表.....	29
(二) 缩略语对照表.....	30

一、需求和场景

（一）什么是 5G+TSN

1. 5G 与工业互联网

工业互联网是新一代信息通信技术与工业经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态，网络作为工业互联网的基础，是实现人、机、物、系统等全要素互联互通，支撑生产制造、管理控制智能化发展的关键基础设施。

当前，5G 发展正处于向以工业互联网为代表的产业领域引用扩展延伸的关键时期，其万兆带宽的接入能力，千亿级别的终端连接能力以及毫秒级的高可靠传输能力，能为新的产业应用场景提供有力网络支撑，是工业互联网发展的关键使能技术。但面对工业互联网业务对于网络安全性、可靠性、确定性的严格要求，之前主要面向消费互联网的 5G 网络系统难以满足相关需求，这对 5G 网络架构和技术实现提出了新的挑战。

2. 时间敏感网络（TSN）技术

TSN 技术是基于标准以太网架构演进的新一代网络技术，其具有精准的时钟同步能力，确定性流量调度能力，以及智能开放的运维管理架构，可以保证多种业务流量的共网高质量传输，兼具性能及成本优势。

TSN 技术遵循标准的以太网协议体系，天然具备良好的互联

互通优势，可以在提供确定性时延、带宽保证等能力的同时，实现标准的、开放的二层转发，提升了互操作性，同时降低了成本。可以整合相互隔离的工业控制网络为原有的分层的工业信息网络与工业控制网络向融合的扁平化的架构演进提供了技术支撑。同时，TSN 技术体系中提出了包括时间片调度、抢占、流监控及过滤等一系列流量调度特性，支撑二层网络为数据面不同等级的业务流提供差异化承载服务，进而使能各类工业业务数据在工业设备到工业云之间的传输和流转的能力。可以保证全业务高质量的网络承载。

TSN 技术的互操作架构遵循 SDN 体系架构，可以实现设备及网络的灵活配置、监控、管理及按需调优，以达到网络智慧运维的目标。TSN 系列标准中已经制定或正在研制的控制面协议，将会大大增强二层网络的配置、动态配置与管理的能力，为整个工业网络的灵活性配置提供了支撑。

截止到 2020 年底，针对时间同步、流量调度、互操作等基础共性 TSN 标准已经基本成熟，业界正在开展针对垂直行业的应用部署，车载网络、工业网络、5G 等多个领域都将 TSN 作为重要的关键技术进行研究。

3. 5G+TSN

在本白皮书中，5G+TSN 研究范畴主要指 5G 系统与 TSN 网络系统在技术上的融合创新以及在方案上的协同部署。目前主要包含 TSN Over 5G uRLLC，5G 承载网 over TSN 以及 5G 作为 TSN 系统网桥三种技术方向。

1) TSN over 5G uRLLC

TSN 与 5G 网络系统拼接部署，即将原有已经具备时间敏感特性的业务系统（如工业控制网络、车载网络等）与 5G 系统进行网络对接，利用 5G uRLLC 实现 TSN 系统的拉远。流量调度协同，通过分段实现业务传输的确定性来提升端到端业务传送质量。

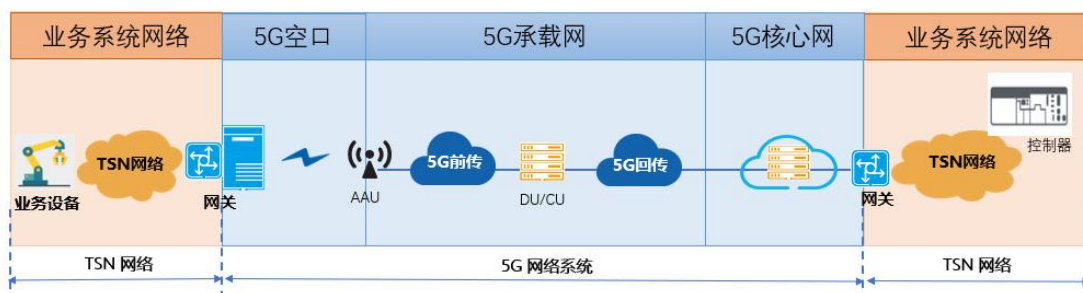


图 1 TSN over 5G uRLLC

在此类方案中，整个业务系统被看成一个 UE，时间敏感网络中的流量分类要与 5G 网络系统的业务类型建立映射关系，同时需要保留 TSN 对于流量配置的相关标记，在经过 5G 网络系统的远程传输后剥离 5G 封装，进入到协同业务系统中后，仍然按照 TSN 流量调度类型进行确定性传输。

2) 5G 承载网 over TSN

5G 网络系统除了提出新的空口 NR 标准及新的核心网架构以外，对于承载网络的重构也是一项重要研究方向，其中 5G 系统利用 TSN 网络实现承载网络的质量提升，是一个重要研究方向。

5G 网络系统中承载网络通常采用有线网络进行流量承载，在 DU 和 CU 合设的情况下，通常可以分为前传和回传两部分，如图 2 所示。

IEEE802.1CM “前传时间敏感网络”。

值得注意的是，当 CU 与 DU 分离部署真正实现后，前传的传输距离可能缩短，DU 与 CU 之间的中传网络采用包传输方式进行传输的可能性很大，因此 TSN 与 5G 中传网络的结合也将是融合部署的一个关键着力点。

不难看出 TSN 与 5G 承载网的融合，不仅存在利用 TSN 技术驱动承载网实现确定性传输的需求，也具备从回传到前传再到中传部署 TSN 技术的基本技术前提。TSN 与 5G 承载融合部署的实现，将确定性传输方案从业务系统 TSN 网络与 5G URLLC 的拼接模式向 5G 网络系统内部承载网融合方向演进。

3) 5G 作为 TSN 系统网桥

3GPP R16 23.501 中已经明确提将整个 5G 网络升级为具备时间敏感特性的逻辑桥接系统，承载业务系统流量的远程确定性传送，如图 3 所示

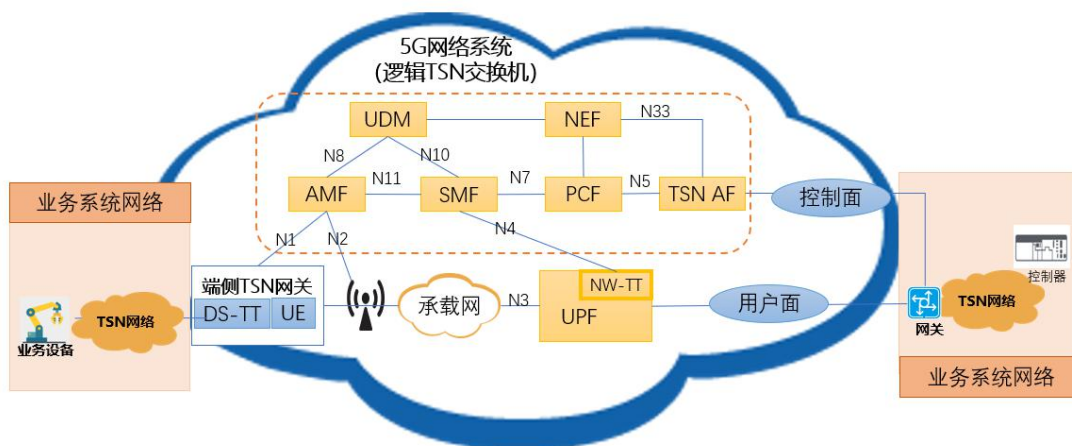


图 3 5G 系统作为 TSN 网桥

在这一框架下，5G 网络相对于业务系统被视为黑盒的 TSN 交换机，支持 TSN 集中式架构和时间同步机制，并通过定义新

的 QoS 模型（流方向、周期、突发到达时间）来实现精准的流量调度，实现 5GS 中 UE 到 UPF 之间的确定性多种业务流量的共网高质量传输。其中涉及的主要关键技术有如下几个方面：

- TSN技术与空口传输的融合：在uRLLC通信服务基础上增加了时间同步、时延和时延抖动有界性定义，将TSN技术思路应用于无线空口。
- DS-TT：UE侧部署设备侧TSN网关（DS-TT: Device-side TSN translator）对相关端口、协议数据单元以及QoS机制进行UE与业务系统之间的映射，并支持TSN相关流量调度特性。
- NW-TT：核心网侧TSN网关（NW-TT: Network-side TSN translator）对相关端口、协议数据单元以及QoS机制进行核心网与业务系统之间的映射，并支持TSN相关流量调度特性。
- AF-TSN：支持在同一UPF下的UE与UE之间实现确定性通信的能力开放。

（二）5G+TSN 需求

1. 业务需求

随着工业生产向数字化、网络化、智能化转型不断升级，以远程协同控制、数字孪生运维、智能工厂管理、智慧园区运营等为代表的工业互联网新业务层出不穷。新的业务形态对传统工业企业网络的通信模型产生深远影响。

1) 远程控制业务

在工业互联网的应用系统中,典型的闭环控制过程周期可能低至毫秒级别,同时对业务的传输有十分严格的可靠性和确定性要求。以智能工厂为例,工业增强现实可以通过音视频实现生产环境远程感知,并实现在线的生产监控及指导;远程控制可以用于实现远程人机交互及控制,在恶劣的环境下用机器人代替人员参与,实现安全生产。这需要整个 5G 网络系统中包括空口)、RAN(接入承载网)及核心网在内的各个环节进行性能的优化以及系统整体处理效率的提升,才可能实现端到端的极致高可靠低时延性能。

TSN 技术在现有的以太网 QoS 功能基础上增加了包括时间片调度、抢占、流控及过滤等一系列流量调度特性,并根据业务流量的特点配合使用相关特性,从而确保流量的高质量确定性传输。将 TSN 技术原理与 5G 网络的传输过程进行融合,可以更为有效地保证 5G 网络的端到端高可靠低时延传输要求。

2) 异构系统协同类业务

5G 网络系统将以业务为中心全方位构建信息生态系统,使能各类连接设备之间的全面连接和精密协作。以智能工厂为例,生产设备、移动机器人、AGV 小车等智能系统内部存在异构的网络连接,并且系统有可能通过不同的方式接入到 5G 网络中来。因此,为了需要实现这些设备系统之间的密切协同及无碰撞作业,就需要业务系统彼此之间能够做到互联互通。

TSN+OPC UA 的组合被认为是解决异构系统互联互通问题的最佳组合,可以同时达成网络的互联和数据层面的互通。TSN 技术基于标准以太网协议解决数据报文在数据链路层中确定性

传输问题；OPC UA 则提供一套通用的数据解析机制，应用于业务系统端设备，解决数据交换及系统互操作的复杂性问题。

3) 采集及运维类业务

5G 网络全面使能垂直行业新业务模式，工业企业存在大量设备维护、原材料及产品数据需要通过传感器、RFID、智能终端等方式上传云端。信息系统与生产设备之间的数据交互量将较以往有指数级增长，上述业务涉及的音视频、控制信号、物联网数据的传输则采用不同的传输机制和质量要求。尤其是在部署了云平台 and 边缘计算节点的情况下，工业网络还将承担算力网络的流量冲击，对网络负载有较高要求。这就要求新一代工业网络可以实现高负载和确定性的高质量传送。

5G 应用切片技术来实现不同业务之间的差异化业务保证，然而目前的切片仅可以在空口及核心网实现，对于承载网部分则没有特定的技术方案。TSN 基于 SDN 架构实现网络资源的集中管理和按需调度，并配合精确时间同步、流量调度等核心特性，可为不同类型的业务流量提供智能化、差异化承载服务。将 TSN 技术与 5G 承载网融合部署，或许可以为 5G 端到端切片提供一种解决思路。

2. 技术需求

5G+TSN 在工业互联网的应用中，在端到端时延、通信服务可用性、抖动和确定性方面有严格要求。将工业互联网典型业务需求进行用例分解，可以进一步分析不同用例对于网络的不同需求，如表 1 所示。

表 1 5G+TSN 典型业务需求

	运动控制	控制器间通信	移动机器人	海量传感器连接	远程连接	增强现实	闭环过程控制	过程监控
远程控制	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
异构系统协同						✓	✓	
采集及运维				✓		✓		✓

以运动控制为例，运动控制是工业中最具挑战性和要求最高的闭环控制应用之一。运动控制系统负责以明确定义的方式控制机器组件的移动和/或旋转部件（例如印刷机、机床或包装机等），典型的流量特征如表 2。

表 2 运动控制典型流量特征

	传感器/执行器数量	消息包长	发送周期
印刷机	>100	20 字节	<2ms
机床	20 左右	50 字节	<0.5ms
包装机	50 左右	40 字节	<1ms

一般来说，运动控制在传输时延和服务可用性方面有最严格的要求，操作仅限于相对较小的服务区域，不需要与公共网络交互（例如，服务连续性、漫游）。基于 5G+TSN 的通信系统将构成了一种很有前途的方法。一方面，使用无线连接的设备、滑环、电缆托架等（目前通常用于这些应用）可以减少生产设备及产线建造限制，实现更为灵活的操作，从而减少磨损、维护工作和成本。另一方面利用 TSN 的周期门控调度特性，可以有效保证控制信号的确定性传输。因此，针对运动控制用例，应关注特定 UE 通信组容量下指定报文包长及循环周期的情况下控制信令的确定性传送，对此，3GPP 给出了部分技术要求：

- 5G 系统应支持循环流量，对于约 50 个 UE 的通信组和约 40 字节的有效负载下，循环周期为 1ms；
- 5G 系统应支持循环流量，对于约 20 个 UE 的通信组，循环时间为 0.5 ms，有效负载大小约为 50 字节；
- 5G 系统应支持循环流量，对于约 100 个 UE 的通信组，循环时间为 2ms，有效负载大小约为 20 字节；
- 5G 系统应支持 50 个 UE 到 100 个 UE 的通信组之间以 1 μ s 或以下的顺序进行非常高的同步；
- 5G 系统应支持数据完整性保护和消息认证，即使对于具有超低延迟和超高可靠性要求的通信服务也是如此；
- 5G 系统应支持通信服务可用性至少超过 999999%，理想情况下甚至超过 99999999%；
- 5G 系统应支持热插拔，即新设备可以动态添加到运动控制应用程序中或从中移除，而不会对其他节点产生任何可观察的影响；
- 5G 系统应支持高达 20 m/s 的 UE 速度，即使对于具有超低延迟和超高可靠性的通信服务也是如此。

二、5G+TSN 研究进展

（一）标准进展

3GPP 于 2018 年 7 月 R16 阶段开始 Vertical LAN 项目研究，针对工业互联网场景开展 5G 支持 TSN、5G LAN 以及 5G NPN 相关技术的研究及标准化工作；并在 2019 年 9 月开始的 R17 阶段，

持续开展 Industrial IoT 项目的研究，进一步完善支持 IEEE TSN 协议的 5G 网络系统，确立 5G 系统的确定性机制并进行标准化。

5G 相比 4G 将进一步提高终端的传输速率，其带宽消耗预计将为 4G 的 1000 倍，网络系统也将面临更大的数据传输压力，因此，利用以太网承载 5G 前传网络的技术方向受到广泛关注，而成立于 2012 年的 TSN 任务组（IEEE 802.1 TSN TG）则制定了 IEEE 802.1CM 协议用于解决以太网传输机制下的移动前传网络的确定性问题。

（二）研究现状

德国应用科学大学联合诺基亚贝尔实验室提出了融合 5G 与工业以太网的方案，并对相应的融合应用场景进行了分析以及对融合网络的配置管理技术进行了讨论。

高通公司研究组提出了面向工业互联网的利用 5G 实现 TSN 交换机功能的思想 and 原型系统，以实现与有线 TSN 网络的互联互通。

爱立信研究院于 2019 年 8 月在《Ericsson Technology Review article》发表文章，认为 5G 与 TSN 的融合可以满足工业领域的网络需求，明确 TSN 将是 5G 实现 uRLLC 场景高可靠低时延特性的重要标准。

英特尔公司研究组阐述了将 TSN 技术能力应用至无线网络面临的技术挑战，以及如何扩展现有无线网络包括 WiFi 与 5G 的可靠性与低时延能力的相关技术，并讨论了无线 TSN 与有线

TSN 网络融合面临的挑战。

诺基亚已经研发支持 TSN 的网络设备用于 5G 前传网络的传输，并在北美、日韩等地运营商实现商用部署。

中国移动正在建设 5G+TSN 测试系统，用于测试工业领域典型的 5G 与 TSN 融合场景中端到端的业务特性、网络的性能以及各个融合网络中包括终端、网关和平台等在内的设备和系统的功能性能。

中国信息通信研究院正在组织建设 5G+TSN 综合测试验证平台，该平台集成多厂商多系统，包括工业应用系统，5GC、网关、承载网等设备关注异构系统互通能力及端到端业务质量保障能力，建成后可全面用于 5G+TSN 相关技术试验，相关产品的检测以及应用方案的验证。

三、5G+TSN 关键技术

（一）整体架构

5G+TSN 融合部署将是构建未来高质量、安全可靠、智慧化工业互联网网络的重要技术方向，有助于端到端实现工业系统业务的确定性传输，差异化保证业务服务质量。5G+TSN 的目标架构将以通过二者的深度融合实现区域级确定性业务承载为最终目标。

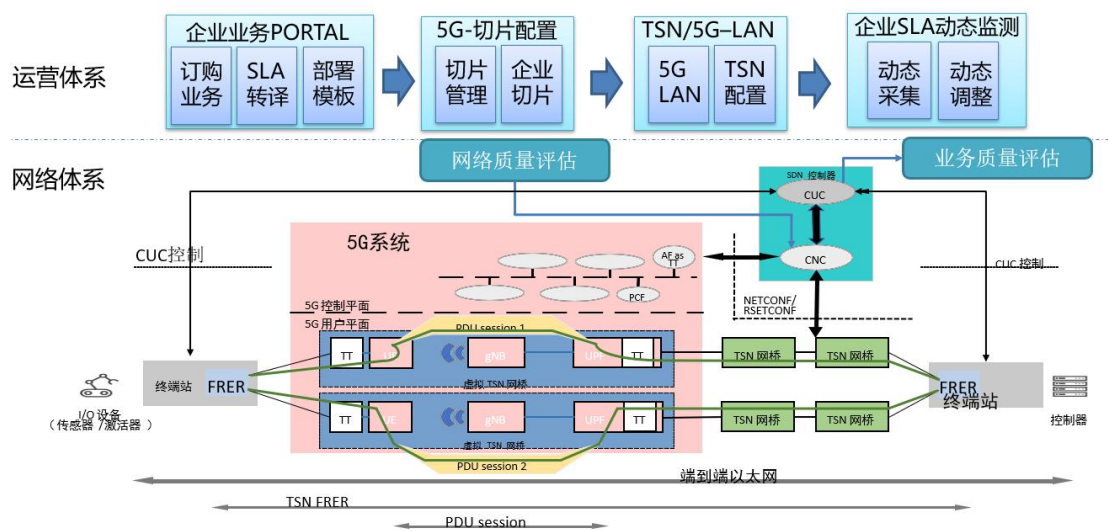


图 4 5G 与 TSN 融合部署总体参考架构

不仅网络体系内部需要实现 TSN 与 5G 网络系统的无缝融合，网络体系与运营体系也要实现对接，用业务质量指导网络资源分配，用网络质量约束业务部署。因此，5G 及 TSN 系统的时钟同步适配，QoS 策略的映射对接以及资源的协同管理将成为 5G+TSN 需要解决的关键技术问题。

应用功能模块 (Application Function, AF), 代表异构应用系统与 5G 核心网交互的接口网元, 包括提供 QoS 策略需求、路由策略需求等;

策略控制功能 (Policy Control Function, PCF), 负责 UE 接入策略和 QoS 流控策略的生成。

(二) 时钟适配

在 5G 时钟域中, gNB 从 5G GM (例如: GPS 卫星) 获取时钟后, 可以将时钟传递给 UE 和 UPF, 实现 5G 系统内的高精度时钟同步。其中, UE 可通过与 gNB 之间的 Uu 口的 RRC 消息实现时钟同步, UPF 通常可采用 IEEE 1588 规范实现与 gNB 之间

的时间同步；在 TSN 时钟域中，TSN 时钟域内网元同步于 TSN GM，并基于 IEEE 802.1AS 规范来实现域内的时间同步。不难看出，5G 网络系统和 TSN 网络系统分别遵从于两种时钟域（即 5G 时钟域及 TSN 时钟域），且两种时钟域分别跟随 5G GM 时钟源及 TSN GM 时钟源。

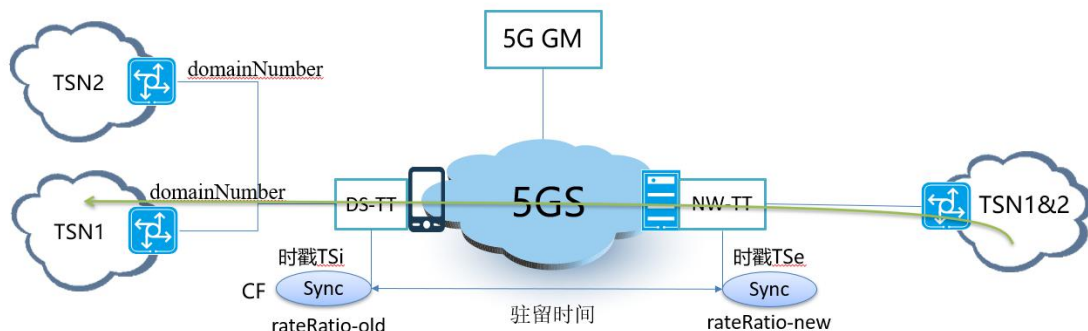


图 5 5G 与 TSN 系统的时钟同步机制协同

5G+TSN 系统需要两个网络系统实现时钟同步机制的协同，必须解决两个方面问题：一是时钟源的协同，二是时钟消息传递机制的协同。时钟源的协同可以通过归一化处理或者指标映射的方式实现；消息传递机制则可以采用逐跳传递或者隧道穿透的方式实现。值得注意的是，处于 5G 与 TSN 系统边缘的两个网关设备（DS-TT、NW-TT）是实现时钟协同的关键功能模块。

（三）QoS 映射

TSN 网络系统和 5G 网络系统的 QoS 机制相互独立，在 5G+TSN 系统中，两个系统的 QoS 机制需要彼此对齐，包括 QoS 指标的映射和策略下发的协同。

1. QoS 指标的映射

5G 和 TSN 网络间的 QoS 映射涉及两个过程：

(a) 5G 系统中的 TSN AF 将本地配置或来自 TSN 网络控制器 CNC 的 QoS 信息映射为 TSN QoS 参数。TSN AF 可以本地配置 QoS 映射表，用于查询 PDU 会话所对应的 TSN QoS 参数，TSN AF 还可以接收来自 TSN CNC 的 PSFP 信息和传输门控调度参数，并将其映射为 TSN QoS 信息。

(b) PCF 将来自 TSN AF 的 TSN QoS 参数映射为 5G QoS 参数

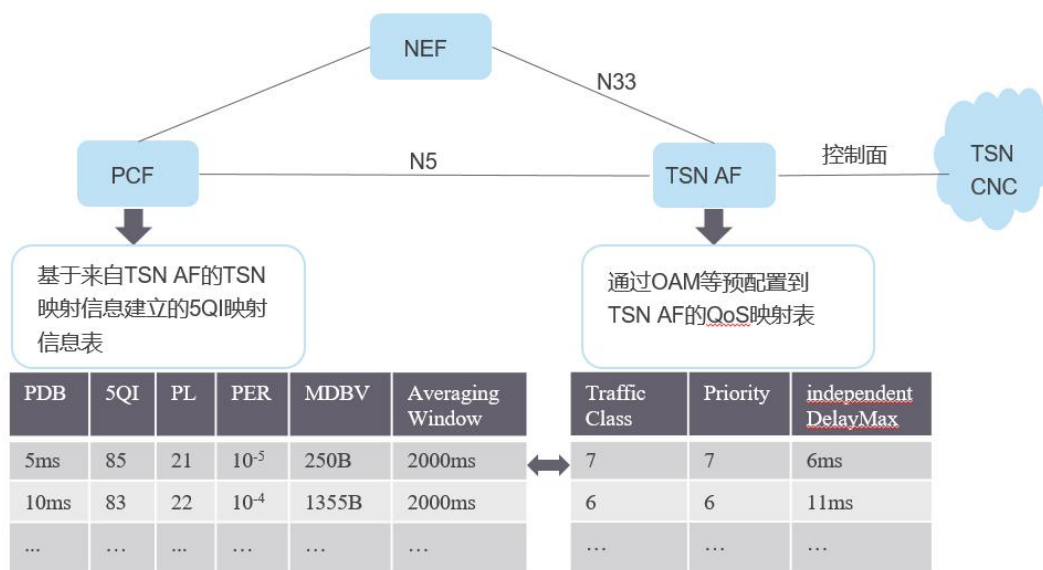


图 6 5G PCF 和 TSN AF 之间的 QoS 映射功能示意图

PCF 提供从 TSN QoS 信息到 5GS QoS 配置文件的映射功能，即将 TSN QoS 信息映射为合适的 5G 5QI、GBR、MBR 等参数。进而，5G 系统可以根据 PCF 决策的 QoS 策略来触发 PDU 会话修改过程，以建立适合该 TSN 业务流的 5G QoS 流通道，实现 TSN 业务流在 5G 系统内的低时延传输。

2. 5G 和 TSN 策略协同

TSN 业务的 QoS 需求（例如：TSN 业务流特征、TSCAI 突发时间、周期、流向、优先级、时延、带宽等）通常通过 TSN AF 传递给策略控制功能 PCF (Policy Control Function)，然后

PCF 基于用户的签约和业务流的需求，为不同等级的用户/业务分配合适的 5G QoS 策略，例如：针对 TSN 业务流、TSN 时钟同步消息流分别指定满足各自传输需求的 QoS 流策略。

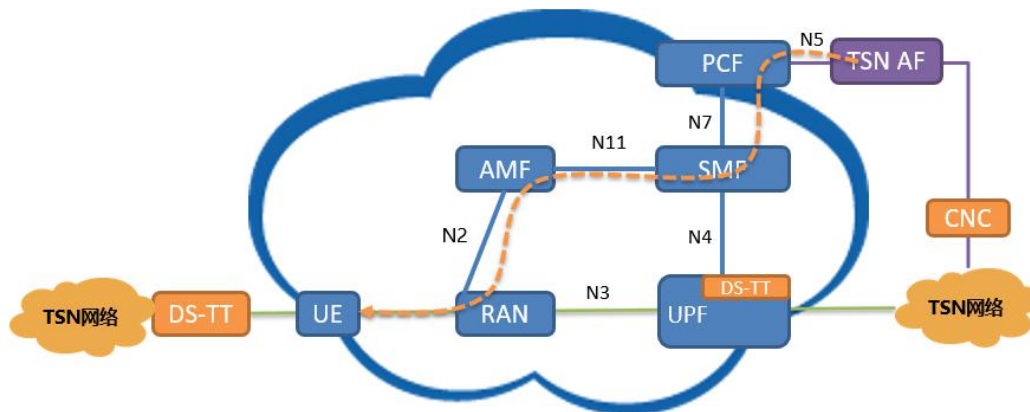


图 7 5G TSN QoS 策略管理架构

5GC SMF 和 AMF 网元通过控制面信令交互，获取 PCF 下发的业务 QoS 需求（例如：5QI），一方面由 AMF 通过 N2 接口将其携带给 RAN，另一方面由 SMF 通过 N4 接口将其携带给 UPF，由 UPF 和 UE 将不同 QoS 需求的业务流映射到合适的 PDU 会话和 QoS 流中，实现 5G 系统区分不同业务流的差异化 QoS 调度。

（四）资源协同

5G 与 TSN 在网络架构、通信机理、协议机制、数据格式等各方面均存在明显的差异，而 5G+TSN 的协同融合的本质就是实现实时或强实时业务的跨网确定时延转发，关键在于两张异构网络资源的映射与配合，所以只有高效的资源协同，才能实现柔性的异构网络适配及无缝的跨网高可靠承载。为了实现 5G 与 TSN 的资源协同，5G 系统从系统架构、控制面及用户面都进行了相应的机制适配及相关的机制增强。

控制面的主要工作就是支持 5G 对 TSN 网络的感知、TSN 集中网络控制器 (CNC) 对于 5G 系统存在性的感知以及统一的调度控制，具体包括 5G DS-TT 对于 TSN 网络链路和拓扑的发现、5G 网桥信息在 CNC 的注册和管理。具体流程主要包括：网络拓扑发现 (LLDP)、5G TSN 网桥配置管理、统一的调度控制。

用户面主要是针对 5G UPF 精准时延的驻留与转发机制的增强。实现 TSN 基于精准时间的调度转发机制，是 5GS 支持 TSN 功能最核心功能。5GS 作为 TSN 网络中的透明桥梁，由 DS-TT 和 NW-TT 提供 TSN 数据流的驻留和转发机制，遵循 IEEE 802.1Qbv 标准。在 5GS 系统内，例如 UE 与 gNB、gNB 与 UPF 之间，只需要实现低时延调度，保障数据包在其预定的传输时间之前到达 NW-TT 或 DS-TT 出口即可。

四、应用场景

(一) 智能制造领域

场景一：基于 5G+TSN 的远程控制

工业控制领域是 5G+TSN 的重要应用场景，结合未来智能工厂中跨产线、跨车间实现多设备协同生产需求，集中控制需求将变得更为迫切，原先分布式的控制功能将集中到具有更强大计算能力的控制云中，一方面更加有利于生产协同，另一方面是智能化发展的需要。

少人化、无人化是未来智能工厂的典型特征，随着机器视觉等人工智能技术的发展和成熟，大量的重复性劳动将会由机

械臂、移动机器人来承担。在复杂生产环境中，需要多个机械臂及移动机器人间相互配合才能完成产品的装配及生产。然而，传统的工业控制大多在设备边缘进行直接控制，竖井式特征导致多设备间的协同协作难以实现，不能满足智能工厂的生产需求。借助 5G+TSN 协同传输技术，网络不仅能支持移动类型智能工业设备，并且还能实现工业数据的确定性低时延传输与高可靠保障，以及实现感知、执行与控制的解耦与控制决策的集中，为大规模设备间的协同协作提供了有力的技术支撑，具体场景如图 8 所示。

此外，由于设备间无需进行有线组网，能够较好的根据生产需求进行设备组合，从而实现跨车间、跨产线的生产协同，为智能工厂柔性生产提供了扎实的网络基础支撑条件。



图 8 基于 TSN 和 5G 技术的机械臂、移动机器人

场景二：基于 5G+TSN 的园区网络

在装备智能制造的园区内部署 5G 网络，通过 5G+MEC 实现数据不出园区。同时，在园区内构建 5G+TSN 网络，确保网络的低时延和确定性。基于该 5G+TSN 网络，实现生产装备制造过程中的精准远程控制。

将用于装备制造的自动化设备（如机床、机械臂、流水线等）的控制器核心算法、算力部署在园区内部的云端或 MEC 平台上，完成制造过程的全面控制，而自动化设备的执行单元和智能传感单元（如电机驱动器、继电器、开关、传感器等）部署在各个车间现场，通过无线网络，完成制造过程的控制指令的实施和反馈。

由于采用 TSN 技术，使得更大范围各类设备的传感数据能够在云端融合，在融入更加全面的信息后，基于专家经验、大数据或人工智能的算法，能够完成远程的闭环控制，大大提升自动化设备和产线控制的协同性和协调性。

由于采用 5G 无线网络，使得自动化设备、产线等的部署更加柔性，能够充分适应柔性制造的发展要求，同时也使得产线能够更加容易地与不断演进的各类智能的辅助监测系统融合，使得产线的智能升级改造更加便捷。

场景三：基于 5G+TSN 的广域精准时间同步

针对装备在现场的服役运行，需要综合多种手段对数据进行传感和采集，以满足预测性维护的需求。但装备在地理上的分散性往往很强，例如发电机组、汽车、工程机械等等，分布在全市、全省甚至全国。广域分布的不同装备数据采集往往不同步，并且相同设备的子系统，由于数据采集传感方式不同，其数据的时间戳也不相同。基础数据的低质量往往导致基于数据的分析挖掘手段产生的结果不可靠，也不可能形成远程协同控制。

采用 5G+TSN 将使得广域分布的装备的时间精准同步变为可

能，这为装备的价值挖掘以及广域协调控制带来新机遇。例如，对于广域范围内发电机组，通过精准掌握其发电状态，如有功、无功的状态，可以实现广域的控制调度；也可以结合电网情况，对大范围的装备运行趋势作出预测，防止局部发电机组因为调度问题出现过载等问题；还可以将广域的传感器进行数据同步，实现更加高级、高性能的多源数据融合，从而形成对局部发电机组运行状态的校验和观测。

（二）智能电网领域

智能电网包括清洁友好的发电、安全高效的输变电、灵活可靠的配电、多样互动的用电、智慧能源与能源互联网等五大领域。电力通信网作为支撑智能电网发展的重要基础设施，需要满足各类电力业务的安全性、实时性、准确性和可靠性要求。

由于配用电网点多面广，海量终端设备需要实时监测或控制，信息双向交互频繁，而采用光纤网络建设成本高、运维难度大，公网承载能力有限，难以有效支撑配用电网各类终端可观可测可控。随着大规模配电网自动化、高级计量、分布式能源接入、用户双向互动等业务快速发展，各类电网设备、电力终端、用电客户的通信需求爆发式增长，5G 无线通信技术逐渐成为构建安全可信、接入灵活、双向实时互动的“广连接、全覆盖”配用电通信网重要组成部分。



图 9 智慧电网

配用电网中适用于 5G 通信的业务可分为控制和采集两大类。各类业务通信需求如表 3 所示：

表 3 各类业务通信需求

业务名称	业务类别	通信需求				
		时延	带宽	可靠性	安全隔离	连接数
控制类	智能分布式配电自动化	≤15ms	≤2Mbps	99.999%	安全生产I区	X*10个/km ²
	精准负控	≤200ms	10kbps~ 2Mbps	99.999%	安全生产I区	
	分布式能源调控	采集类≤3s 控制类≤1s	≥2Mbps	99.999%	综合包含I、II、III区业务	
采集类	低压集抄	≤3s	1~ 2Mbps	99.9%	管理信息大区 III	集抄模式X*100个/km ² 下沉到用户后翻50~ 100倍
	电站巡检机器人	≤200ms	4~ 10Mbps	视频<200ms 控制<100ms 99.9%	管理信息大区 III	集中在局部区域1~2个
	配电线路无人机巡检					
	配电房视频综合监控					
	移动现场施工作业管控					
应急现场自组网综合应用		20~ 100Mbps			局部区域内5~10个	

上表中的智能分布式配电自动化、精准负荷控制、分布式能源调控以及移动现场施工作业管控等关键业务对 5G 通信系统的确定性、实时性和可靠性提出了极高的要求。采用 5G+TSN 融合技术，可满足 5G 通信系统在多种配用电业务数据混合传输时关键业务的实时需求。

场景一：基于 5G+TSN 的配用电网精准时钟同步授时

基于 5G+TSN 融合技术，可以为配用电智能终端提供微秒级的精准时钟同步授时，一方面解决了电力业务高精度授时需求，另一方面间接降低了网络抖动的严苛要求。

通过 5G 与 TSN 系统的时钟同步机制的协同处理，整个端到端 5G 通信系统可视为一个 IEEE 802.1AS 时间同步系统。

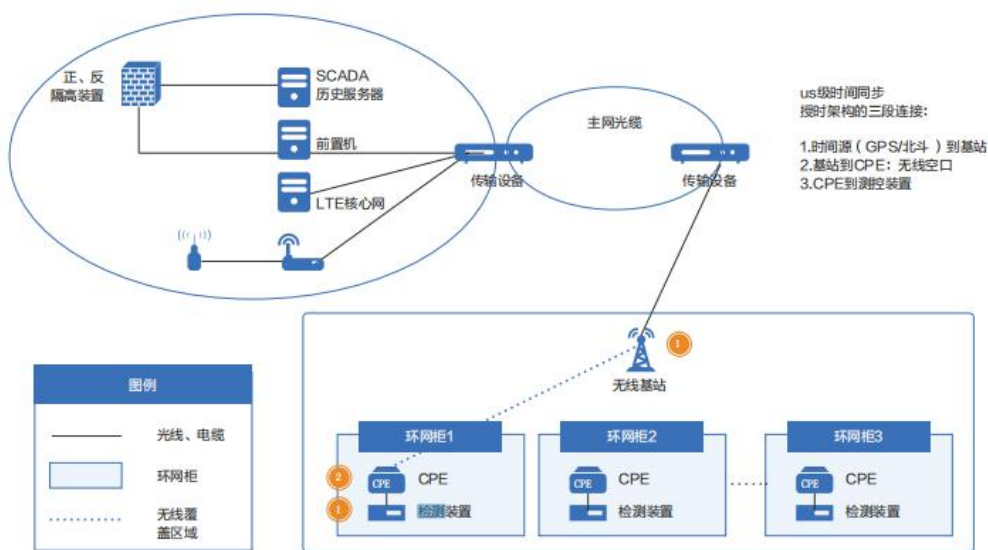


图 10 基于 TSN 和 5G 技术的端到端时间同步系统

源时钟可取自北斗/GPS 或系统高精度守时时钟，基于 5G+TSN 的配电网精准时钟同步授时系统可采用 IEEE 802.1AS 网络授时系统或北斗/GPS 授时异构组网，实现天地互备，大幅提高网络授时的安全可靠；5G 基站可通过承载网的 gPTP 网络授时或北斗/GPS 授时获取时钟，同时将时钟信息通过空口广播（带内 SIB16）或单播（携带 SFN 指示时钟参考点）方式传递给 5G CPE；5G CPE 将时钟信息通过 IRIG-B 码接口方式传递给配电终端，实现配单终端间微秒级的高精时钟同步需求。

场景二：基于 5G LAN 的智能分布式配电自动化业务

智能分布式配电自动化业务采用 IEC61850 GOOSE 协议通信，该协议基于二层组播方式进行通信。不同组播组不仅组播 MAC 相互有区别，同时也携带不同的 VLAN。5G LAN 技术，可支持 VLAN+组播 MAC 的组播通信方式，在 5G 通信网络实现配电终端

间的 GOOSE 通信。

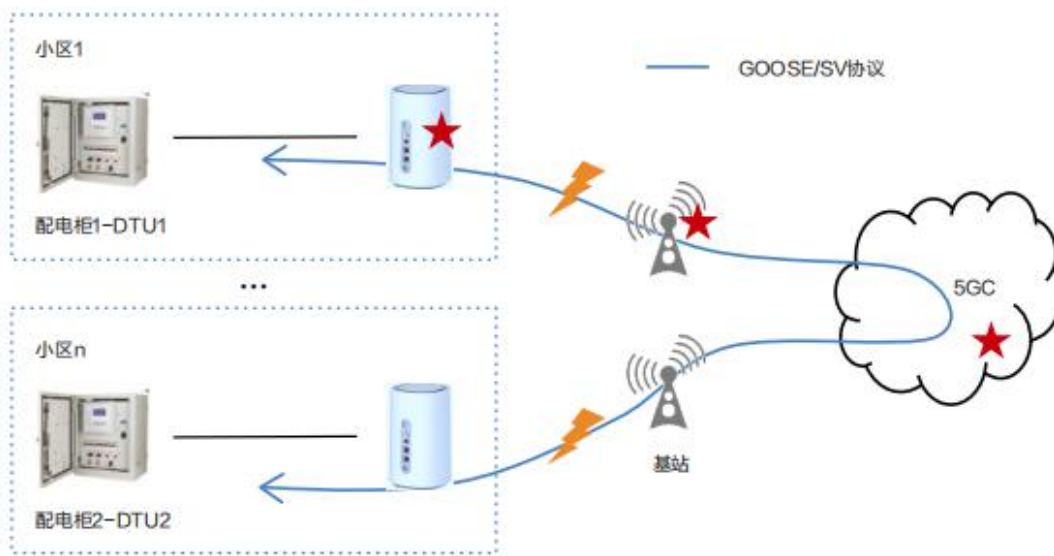


图 11 基于 5G LAN 的智能分布式配电自动化业务

场景三：基于 5G+TSN 的冗余电力通信网

智能分布式配电自动化、精准负荷控制、分布式能源调控等智能电网关键业务要求电力通信网采用冗余双网来保障通信可靠性。为满足冗余双网的需求，5G 通信网需要在核心网、承载网、MEC、NR 支持冗余部署或配置。这种冗余传输部署模式，需要应用层支持 TSN 的 IEEE 802.1CB 冗余传输协议。

(三) 智能网联汽车

如图 12 为智能汽车的网络需求，其中远程自动泊车场景的端到端时延需求低至 5ms。

Requirements	Lane merge	See-through	Network assisted vulnerable pedestrian protection	High definition local map acquisition	Remote driving for automated parking
Availability	V2I/V2N 99% and for V2V 99.9%	99%	99% to 99.99%	99% to 99.99%	100.00%
Communication range	>350 meters	50 to 100 meters	>70 meters	>1 km	Several kms
Data rate	0.350 to 6.4 Mbps	15 to 29 Mbps	128 kbps	960 to 1920 kbps	6.4 to 29 Mbps
Latency	<30 ms	50 ms	<60 ms	<30 ms	5 to 30 ms
Reliability	99.90%	99%	99% to 99.99%	99% to 99.99%	100.00%
Service data unit size	1200 to 16000 bytes per frame	41700 bytes per frame	1600 bytes per frame	60 bytes per frame	16000 up to 41700 bytes per frame

图 12 智能网络汽车联网需求

同时，在 3GPP TS 22.261 V15.8.0 (2019-09) 定义了 5G 用于智能交通系统的 5G 回传网络需求，IEEE TSN 尝试定义该场景下的车内 TSN 网络需求，如图 13 所示：

Scenario	Max-allowed E2E Latency	Reliability	User experienced Data rate
ITS Infrastructure backhaul	30ms	99.999%	10Mbps

图 13 3GPP 智能交通回传网络需求

随着自动驾驶等级的提升，车内 ECU(电控单元)需要通过云端升级服务等，该场景需考虑端到端时延等网络挑战；未来，TSN 可作为车内网络的主要通信技术，5G 可作为 V2X 的重要支撑。通过 TSN 与 5G 融合，可构建从车内到车外的端到端确定性网络，实现单车自动化与车联网。



图 14 智能汽车=单车自动化+网联 (V2X)

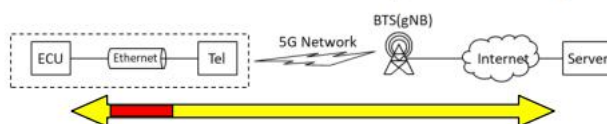


图 15 面向智能汽车的 TSN 与 5G 融合参考架构

(四) 智慧矿山领域

煤矿行业从安全生产、高效生产、招工难等实际情况出发，需求利用 5G 等先进技术加快向井下作业的远程化控制、智能化、少人化、无人化方向演进。通过远程控制、机器人控制、智能化控制等新技术，尤其利用 5G 的高性能网络，可显著提升数据回传质量、可靠性并降低时延，加快智能化发展，有助于减少井下高危岗位工人数量，是推进无人、少人的重要手段。

其中，智慧矿上领域中的工程机械远程控制场景主要通过 在采矿机械上安装远程操控系统和监控与感知设备，对采矿机械进行远程控制改造，使工程机械能够将矿山的实时状况回传到远程控制平台，并通过控制台实现对工程机械的远程操作控制。

工程机械远程控制对网络的需求如表 4 所示：

表 4 工程机械远程控制对网络的需求

业务场景	典型业务	带宽	传输时延
工程机械远程控制场景（、凿岩车、电铲车、挖机等）	车载监控（2-4 路 4K 摄像头）	上行：12-40Mbps /每路（压缩后） 下行：控制级 100Kbps/每路	<100ms
	远程操控	下行：控制级 100Kbps/每台 上行：车辆传动、定位、感知信息 上传 1-2Mbps/每台	<20ms
	全方位立体监控（4K 摄像头）	下行：控制级 100Kbps/每台 上行：12-40Mbps /每路	<20ms

如下图 16 所示，高带宽、低时延的 5G+TSN 网络，集成了 5G 的移动性和 TSN 的低时延高可靠特性，利用 5G+TSN 网络可实现高可靠低延时的工程机械远程控制，满足矿区无人化采掘场景需求。



图 16 面向矿山工程机械远程控制的 TSN 与 5G 融合参考架构

（五）智慧港口领域

港口作为连接海路运输和内陆运输的关键枢纽，在船舶在进港之后，典型卸货作业流程（船-岸方向）为：岸桥将集装箱从船舶吊起、运送至岸边场内水平运输车辆；在吊箱和运输过程中，需要对集装箱进行理货；通过水平运输车辆，如集卡、AGV 等，将集装箱从岸桥下运送至码头堆场；在堆场指定位置由轮胎吊或轨道吊完成集装箱搬运、堆叠；整个作业流程中，各单位可通过对讲系统进行作业协同调度指挥。

岸桥、龙门吊、集卡车等在内的几百台重型机械设备密集部署，具备典型的工业作业环境。港口生产的作业效率和自动化水平，是决定港口未来竞争力和经济效益的重要因素。在“工业 4.0”、“互联网+”大发展的时代背景下，港口也在进行数字化、全自动的转型升级。港口的数字化与自动化发展不仅将降低码头用工成本，最大限度地减少人机接触，保障人员安全，同时也将实现港口的高效、安全生产运营。

当前 90%以上的岸桥、场桥为人工现场高空作业，有远程控制需求：

1) 部分新建港口支持光纤远程操控，但光纤存在移动性差，易磨损，施工维护困难，改造升级成本高难度大等问题。

2) 少数信息化港口采用 LTE 或 Wifi 方式, LTE 带宽低、可靠性、时延、速率等性能欠佳; WiFi 在稳定性、网络带宽等方面不能完全满足整个堆场和码头龙门吊远控的需求。

单台龙门吊远控对网络的需求如表 5 所示:

表 5 工程机械远程控制对网络的需求

场景描述	网络需求			
	整体需求描述	时延	带宽	可靠性
龙门吊远程操作场景 (控制部分)	超低时延, 高可靠	<18ms	50-100kbps	99.999%
龙门吊远程操作场景 (视频部分)	低时延, 高可靠, 大带宽	50ms	30-100Mbps	99.9%

如下图 17 所示, 高带宽、低时延的 5G+TSN 网络, 集成了 5G 的移动性和 TSN 的低时延高可靠特性, 集装箱装卸桥、轮胎吊等大型集装箱作业机械的自控系统状态信号、视频监控图像信号等信息, 都可以实时传到后方机房服务器上; 后方调度人员下达的作业指令, 也可以迅速回传到机械, 从而使得生产调度人员更加合理地调配生产机械, 同时大型机械自动化改造的成本和难度也大大降低。

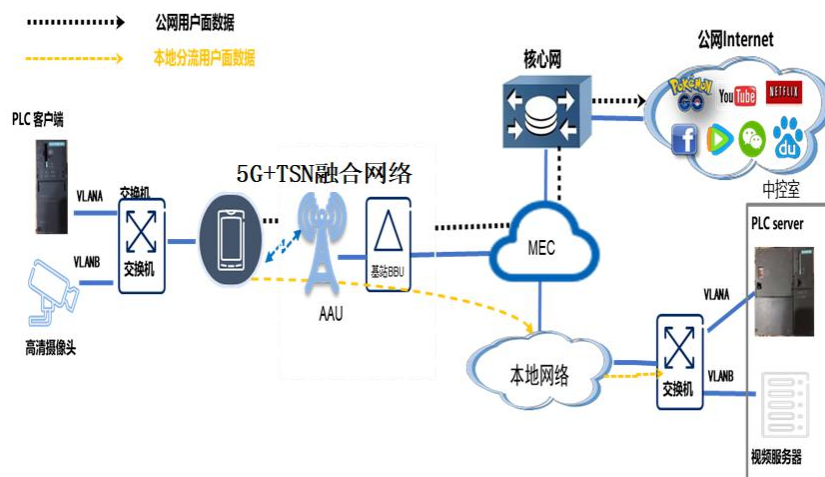


图 17 面向港口远程控制的 TSN 与 5G 融合参考架构

五、5G+TSN 面临的挑战

基于 5G 和 TSN 的技术特点及优势，可以判断工业互联网是 5G 与 TSN 的融合应用的重点领域，但是截至到目前为止，5G+TSN 在技术成熟度、标准化和产业化等方面还面临挑战。

1) 技术不成熟

TSN 与 5G 技术各自的系统特性尚不成熟，相关关键特性所涉及的标准都还没有完全冻结。5G 系统新技术层出不穷，但性能的提升还依赖于资源的深度复用和网络功能的深度智能化，TSN 技术亦是如此，需要智能化的全网资源管控，目前二者的智能化程度尚处于较低水平，相关研究工作仍在继续。

2) 技术融合障碍

5G+TSN 是一个支撑多业务传送的多技术融合网络，包括：多种接入技术，多个业务网络和多种网络架构的融合。在此过程中还要考虑存量工业网络的兼容问题，功耗问题，都尚需深入探讨。

六、附录

(一) 引用文件列表

序号	标准编号	标准名称	发布单位
1	38.801	Study on New Radio Access Technology, Radio Access Architecture and Interfaces	3GPP
2	eCPRI Transport Network V1.2 (06/2018)	Requirements for the eCPRI transport network	CPRI
3	eCPRI Specification V1.0	Common Public Radio Interface: eCPRI Interface Specification	IEEE
4	802.1CM-2018 (06/2018)	Time-Sensitive Networking for Fronthaul	IEEE
5	ORAN-WG4.CUS.0-v03.00	O-RAN Fronthaul Working Group Control, User and Synchronization Plane Specification	O-RAN
6	ORAN-WG4.MP.0-v03.00	O-RAN Fronthaul Working Group Management Plane Specification	O-RAN

(二) 缩略语对照表

序号	缩写	名称	中文
1	TSN	timesensitive networking	时间敏感网络
2	NR	New Radio	新无线
3	RAN	Radio Access NetWork	无线接入网
4	AGV	Automated Guided Vehicle	自动化导航小车
5	OPC UA	OLE for Process Control Unified Architecture	用于过程控制的OLE的统一架构
6	5G NPN	5G Non-public network	5G非公众网络
7	CPS	Cyber-Physical Systems	信息物理系统
8	mMTC	Massive MachineType Communication	大规模机器类型通信
9	uRLLC	Ultra reliable and low latency communication	超可靠低延迟通信
10	eMBB	Enhanced Mobile Broadband	增强移动宽带
11	TSC	Time Sensitive Communication	时间敏感通信
12	UE	User Equipment	用户设备
13	AF	Application Function	应用功能
14	NW-TT	Network-side TSN translator	网络侧TSN转换器
15	DS-TT	Device-side TSN translator	终端侧TSN转换器
16	GM	Grand Master	根时钟
17	eCPRI	Enhanced Common Public Radio Interface	增强公共无线接口
18	RFID	Radio Frequency Identification	射频识别