# 5G TSN技术的创新研究

## 5G TSN Technologies and Innovation

张启明/ZHANG Qiming，郑兴明/ZHENG Xingming，
张寿勇/ZHANG Shouyong
（中兴通讯股份有限公司，中国 深圳 518057）
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202203013
网络出版地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220516.1028.002.html
网络出版日期：2022-05-16
收稿日期：2022-05-05

**摘要：**提出5G时间敏感网络（TSN）面临的主要技术挑战：高精度时间同步、低时延确定性转发、高可靠连接。围绕5G TSN的发展，中兴通讯研发出一系列创新技术，并且有多项提案被3GPP采纳，例如基于时间提前量（TA）和往返时间（RTT）方法的传播延迟补偿、配置授权（CG）/半持续调度（SPS）配置的增强、基于上行Survival time的方法等。在方案实现层面引入智能网卡技术，并且针对多样的工业互联网进行适配。这些技术和方案进一步促进了5G TSN的发展。中兴通讯联合运营商及工业合作伙伴在5G TSN端到端实践方面取得了一定进展。

**关键词：**高精度时间同步；低时延确定性转发；高可靠连接；智能网卡

**Abstract:** Main technical challenges faced by 5G TSN are proposed, including high-precision time synchronization, low latency and deterministic forwarding, and high reliability connection. ZTE Corporation develops a series of innovative technologies, and a number of proposals have been adopted by 3GPP, such as the propagation delay compensation based on timing advance (TA) and round-trip time (RTT), enhancement of configured grant (CG)/semi-persistent scheduling (SPS) configuration, and method based on uplink survival time. At the solution implementation level, the smart NIC technology is introduced, and the solution adaptable to various industrial Internet is also considered. These technologies and solutions have further promoted the development of 5G TSN. At the same time, ZTE Corporation has made some progress in the end-to-end practice with telecom operators and industrial partners in 5G TSN.

**Keywords:** high-precision time synchronization; low latency and deterministic forwarding; high reliability connection; smart NIC

## 1 5G 时间敏感网络(TSN)的概念及进展

### 1.1 TSN的基本概念

通过人、机、物、系统等的全面互联，工业互联网构建了全新的制造和服务体系。工业互联网不仅是工业4.0的基石，也是制造业升级转型的关键路径，为推动数字经济发展提供新动力。

由于直接涉及工业中最核心的控制部分，工业运营技术（OT）域对网络的要求很高，例如低时延、低抖动、高可靠性等。由于具有低时延、确定性传输、高可靠性等特点，TSN成为工业互联网OT域中重要的传输技术。TSN是开放的以太网标准，不同厂商的TSN设备可以更好地相互兼容，从而提高了工业设备的连接性和通用性，具有良好的互联互通能力。

TSN标准的制订由电气与电子工程师协会（IEEE）802.1工作组负责，相关研究主要面向对传输时延、丢包率等要求严苛的行业领域。TSN标准主要涉及时间同步、有界的低时延、高可靠传输和资源管理等。目前，IEEE已经发布IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1CB、IEEE 802.1Qcc等10余个TSN相关标准规范，相关标准规范已经比较成熟。此外，IEEE仍在持续完善TSN相关协议，以便TSN在各行业中得到更好的部署和管理。

### 1.2 5G与TSN融合的必要性

传统的TSN是有线网络，但是在很多应用场景中，有线网络存在成本高、灵活性差等局限性。例如，在电力行业的差动保护应用场景中，差动保护装置数量多、部署分散，如果铺设光纤，成本就会很高，施工难度也较大；在很多大型智能工厂的自动化生产线中，机械臂需要根据产品型号来调整位置，如果使用有线网络线缆，成本会很高，而且不灵活，同时频繁的移动会降低线缆的可靠性。在这些应用场景中，无线网络有着得天独厚的优点。在无线技术中，Wi-Fi切换时延较大，稳定性、抗干扰能力和安全性均较差，很难承担工业OT域中对时延、抖动等有很高要求的任务。随着5G技术的发展和边缘计算的成熟，5G网络的低时延、高可靠性使得5G与工业互联网（尤其是TSN）的结合越来越紧密[1-3]。目前，5G已应用于航空、矿业、港口、冶金、汽车、

家电、能源、电子等多个重点行业。

### 1.3 5G TSN架构及标准演进

为了支持5G与TSN的融合，第三代合作伙伴计划（3GPP）在2020年7月份发布的R16标准中增加了时间敏感通信（TSC）功能[4]。如图1所示，5G网络是一个TSN虚拟网桥，UE侧增加一个终端侧TSN转换器（DS-TT）模块，用户面功能（UPF）侧增加一个网络侧TSN转换器（NW-TT）模块。两个TSN转换器（TT）将5G网络连接到TSN网络。5G TSN网络拥有IEEE 802.1Qcc协议定义的全集中式模型网络架构，因此，5G控制面增加了TSN应用功能（AF）网元与集中式网络配置（CNC）交互，实现了CNC对5G TSN逻辑网桥的配置和管理。

作为一个TSN网桥，5G网络需要支持TSN网络相关的基础协议，包括时间同步协议IEEE 802.1AS、基于时间门控调度的协议IEEE 802.1Qbv、TSN网络管理配置协议IEEE 802.1Qcc以及网络拓扑管理发现协议IEEE 802.1AB。

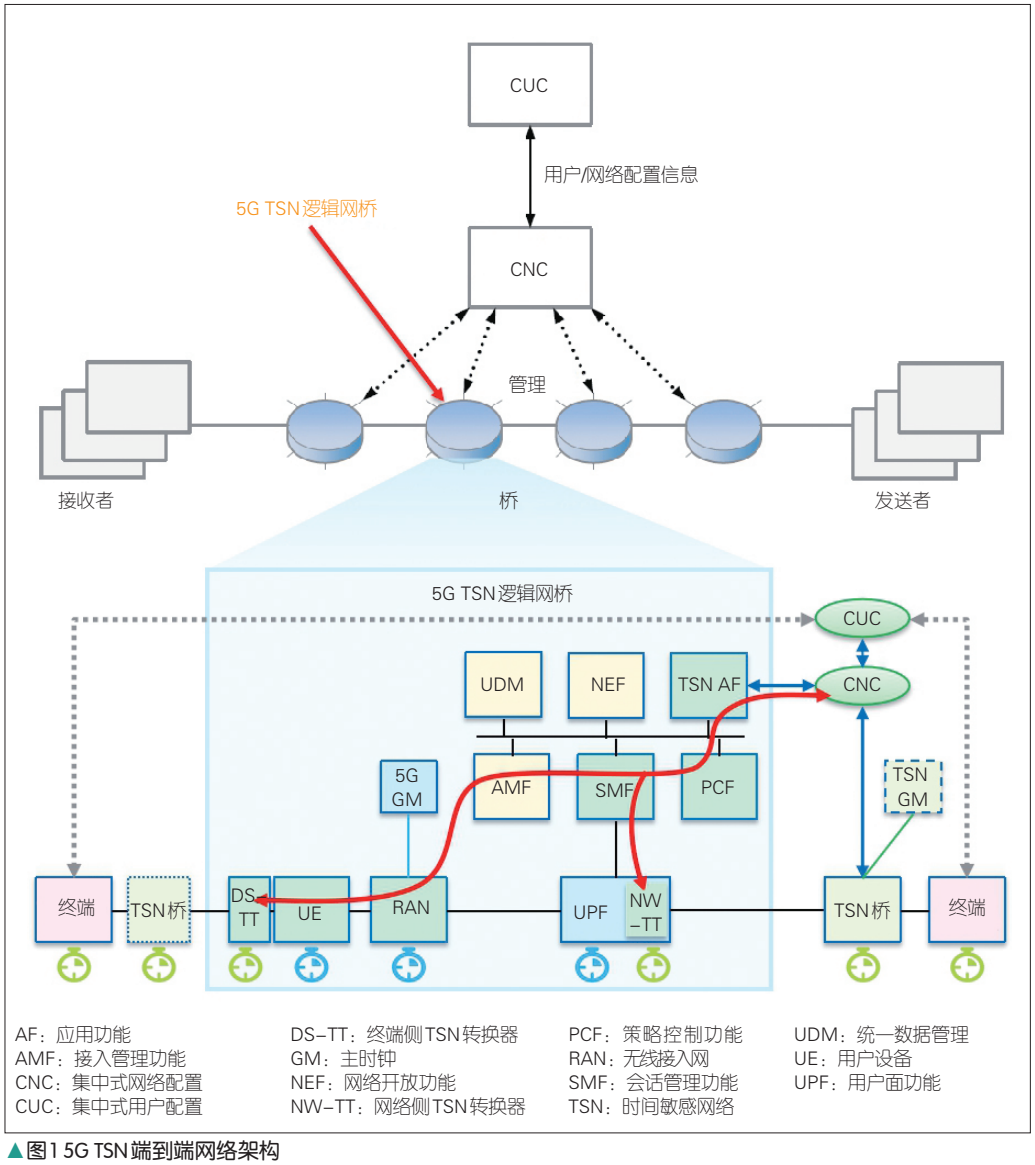
此外，3GPP R16还定义了5G作为TSN网桥必须支持的时间同步功能。如图2所示，在5G TSN网络中，存在两种不同的时间域：5G时间域和TSN时间域。5G主时钟（GM）和TSN主时钟（GM）可以各自独立，互不干扰。5G时间域包括UE/DS-TT、无线接入网（RAN）、UPF/NW-TT，各节点与5G GM保持同步；TSN时间域包括End Station、TSN Bridge、DS-TT、NW-TT等节点，各节点与TSN GM保持同步。DS-TT和NW-TT需要同时感知两个不同时间域的时间，而RAN无须感知TSN时间。

根据R16的定义，5G作为TSN的网桥，仅支持TSN的下行时间同步，即将NW-TT模块作为IEEE 802.1AS的Slaver，使其同步于上游的TSN网络，以获取TSN网络的时间同步信息，同时将TSN时间同步信息通过5G网络传递给DS-TT。作为IEEE 802.1AS的Master，DS-TT将TSN的时间同步到下游的TSN终端。

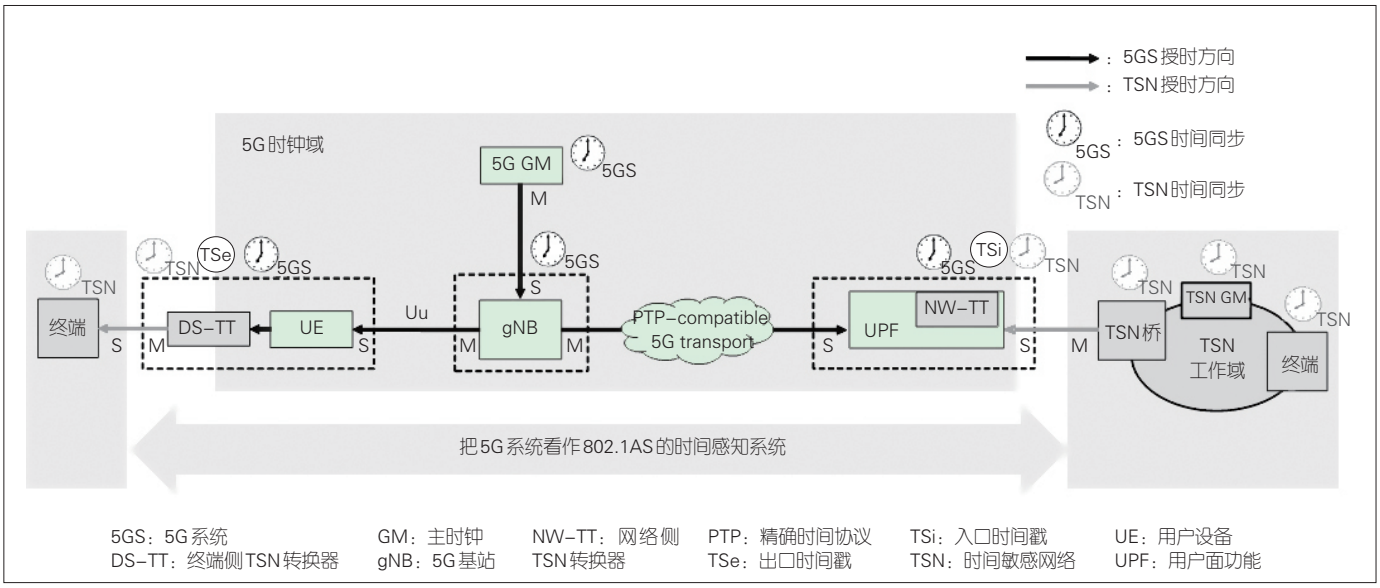
为了支持5G TSN的融合，3GPP R16还增加了一些功能[4]，包括以下几个方面：

（1）为5G空口增加授时增强功能，将授时粒度提高到10 ns；同时增加时钟质量字段表征由5G基站（gNB）提供的时钟信息的精度；提高基站根据授时能力通知终端授时的可靠性，进而提高业务可靠性。

（2）针对超可靠低时延通信（URLLC）场景，引入Mini-slot、免调度、1D1S帧结构、低码率传输等一系列增强技术；可针对业务需




▲图1 5G TSN端到端网络架构




▲图2 5G TSN时间同步框架图

求，进行帧结构、调度请求（SR）周期等算法参数和功能开关的联动配置；借助多种技术的灵活组合，形成分级的空口时延和可靠性传输能力。

（3）引入TSC辅助信息（TSCAI），gNB能够利用TSCAI信息，并结合上行免授权、半静态调度、预调度及SR周期等算法参数和功能开关的联动配置，使得无线调度行为能够更有效地匹配业务流特征，从而降低业务流无线传输时延，提升无线调度效率。

在3GPP R16的基础上，针对5G TSN应用场景中出现的问题及新需求，3GPP R17也增加了一些新的功能[5]：

（1）引入5G局域网（LAN）机制，可实现UE与UE间的确定性转发，不需要UPF N6接口外接TSN网络；

（2）引入时间敏感通信和时间同步功能（TSCTSF）网元，实现5G系统内的确定性转发管理能力，无须外接TSN CNC管理系统；

（3）通过网络开放功能（NEF）连接第三方AF，实现确定性能力开放；

（4）引入Survival time，确保网络糟糕时能满足业务最低时延保障需求；

（5）TSN GM可以部署在网络侧或者终端侧，也可以由NW-TT/DS-TT承担。5G系统的授时功能与能力开放相结合，可供第三方调用，并支持IEEE 1588（以太网或用户数据报协议）、IEEE 802.1AS多种时间同步协议，适应更多场景。

目前，3GPP R18中有关5G TSN的议题主要包括：增强5G网络的韧性能力，并在全球导航卫星系统（GNSS）异常时，继续保持精确授时能力；加强5G网络与回传/业务网络的协同联动能力，进一步降低端到端（E2E）时延；与DetNet互通，增强L3确定性能力。

### 1.4 5G TSN面临的挑战

目前，大型智能工厂OT域对5G与TSN的融合已经提出明确的需求，并且对相关技术指标要求很高：时间同步小于1 us，端到端时延小于4 ms（在某些场景下甚至小于1 ms），可靠性不低于99.999%。

5G网络的空口无线传输受环境影响很大。5G网络要实现与TSN的融合，还需要应对3个技术挑战：高精度时间同步、低时延确定性的数据转发、高可靠的传输。

由于工业互联网目前还没有统一的标准，因此5G TSN如何与现有的工业互联网进行适配也是在实际应用中需要考虑的。

## 2 中兴通讯5G TSN技术创新

中兴通讯围绕5G TSN开展了一系列深入研究，目前已经拥有多项技术创新。其中，有些技术创新已被3GPP标准组织采纳，有些技术创新已经在实际产品中落地应用。

### 2.1 5G TSN高精度时间同步技术创新

针对5G TSN业务对时钟同步精度的需求，提高5G空口的时钟同步精度是亟待解决的问题。DS-TT和NW-TT需要在指定的时间点将TSN业务报文转发出去，如果时间不一致，将不能满足TSN业务的转发要求。因此，在5G网络中

除了引入IEEE 802.1AS、IEEE 1588等时间同步机制外，还需要增强高精度的空口授时机制，提高向UE终端授时的精度。

为了解决上述问题，中兴通讯从两方面提出改进方法：

（1）增强基站发送参考时钟的精度和发送方式

基站可以选择在广播或专用信令中携带参考时钟信息，并且将参考时钟信息的粒度提升至10 ns。上述参考时钟将全球定位系统（GPS）的开始时间（1980年1月6日0时0分0秒）作为起始时间，或者采用Clock Type域来指示本地时钟类型。UE与基站同步后便可获取时间信息，并将其作为自身的时钟基准，通过计算通用精确时间协议（gPTP）在TSN网络入口、出口的时间差，可计算出gPTP时钟消息的补偿值。通过这种方式，空口时钟粒度可以达到纳秒级别。中兴通讯提出多个相关创新技术，目前已被3GPP采纳的创新技术包括：

• 广播方式采用SIB9传递时钟信息；

• 单播方式采用DL Information Transfer传递时钟信息。其中，gNB集中式网元（CU）可以请求gNB分布式网元（DU）通过periodical或on-demand方式上报时钟信息，gNB DU基于所述请求上报时钟信息给gNB CU，以用于单播时钟传递。

（2）对参考时钟进行传播延迟补偿

为了进一步提高时钟同步的精度，中兴通讯在上述传递的时钟信息中引入了传播延迟补偿。当终端到基站的距离较近时，不需要Uu口传输时延补偿就能满足1 us的同步需求；当终端到基站的距离较远时，需要进行Uu口传输时延补偿才能满足1 us的同步需求。此外，在控制对控制的场景中，时钟同步误差应满足小于等于900 ns的需求。也就是说，两个终端的时钟是同时从核心网或者同时从GPS获取的，因此，核心网到终端或GPS到终端的单向时钟同步误差应小于等于450 ns。

为了满足空口时钟同步的精度需求，可采用两种方法进行补偿：基于时间提前量（TA）的传播延迟补偿和基于往返时间（RTT）的传播延迟补偿。其中，基于TA的传播延迟补偿适用于一般时钟精度的场景，基于RTT的传播延迟补偿适用于高时钟同步精度的场景。为了解决空口时间同步的相关问题，中兴通讯提出诸多相关创新技术，其中有些已经被3GPP采纳。

• 基于TA的传播延迟补偿：UE和gNB都可以执行基于TA的传播延迟补偿操作，UE侧的补偿则通过gNB发送的无线资源控制（RRC）信令和广播SIB9来进行激活和去激活操作。

• 基于RTT的传播延迟补偿：UE和gNB都可以执行基于RTT的传播延迟补偿操作，gNB侧在执行补偿操作时，可向UE发送一个显式请求来激活UE，并使其发送UE Rx-Tx time difference。该请求可以是一次性的，也可以是周期性的。UE侧需要补偿时，可通过DLinformation transfer signaling来承载gNB Rx-Tx time difference信息。

• 基于TA的传播延迟补偿和基于RTT的传播延迟补偿的选择：基站根据核心网提供的当前业务的UU接口时钟同步误差预算，来决定选择哪种方法来进行传播延迟补偿。同时，在切换过程中，源基站向目标基站通知UU接口的时钟同步误差预算信息。

此外，在5G TSN系统的实现方案中，中兴通讯在NW-TT侧和DS-TT侧通过采用硬件实现了IEEE 802.1AS的报文处理和时间戳标记，确保了5G TSN的高精度时间同步。

### 2.2 5G TSN低时延确定性技术创新

在空口、核心网和终端的各个环节，中兴通讯提出如下创新技术以保证5G TSN的低时延及确定性转发。

在空口方面，传统的配置授权（CG）/半持续调度（SPS）有各自的周期，导致数据包大多数是在延迟的情况下发出的，无法保证TSN业务流的时延和抖动。为了解决CG/SPS周期与业务周期不匹配的问题，基站可依靠配置多套CG/SPS等方法来进行周期调度和低时延调度，并增强固定TSC业务模式的服务质量（QoS），从而降低TSN业务流在空口传输的时延和抖动。中兴通讯提出多个相关创新点，其中部分创新点已被3GPP采纳。

（1）gNB可以给UE配置每小区的每个子带宽（BWP）：最多8个SPS、12个CG，SPS周期单位最小可支持1 Slot。

（2）针对SPS/CG的配置方式包括：

• 独立配置SPS/CG。

• 为每套SPS/CG引入索引号来进行区分。

• 针对同时去激活多套CG配置的需求，在RRC配置中引入一个状态表。该状态表与下行链路控制信息（DCI）的码点一一对应，例如0000、0001、0100等。

• 同一个BWP上可以同时进行Type1、Type2的半静态配置。

• 针对CG/SPS的周期性配置，支持以Slot为单位的周期配置（周期为1个Slot的连续整数倍）。例如，子载波带宽为15 kHz时，$N$最大值为640，子载波带宽为30 kHz时，$N$最大值为1 280，以此类推。

• 为每套CG/SPS配置混合自动重复请求（HARQ）Offset。

（3）在R16中，同时引入了新的CG Confirmation媒体接

入控制层控制单元（MAC CE）来支持多套CG配置。通过配置多套CG/SPS来解决CG/SPS周期与TSC业务周期不匹配的问题。

此外，核心网UPF/NW-TT侧和终端DS-TT侧均采用智能网卡技术。TSN的业务报文处理及转发全部采用硬件来实现，不需要使用软件，保证了TSN报文的低时延及确定性转发。

### 2.3 5G TSN高可靠连接技术创新

在5G TSN网络中，可以通过双路径的冗余传输机制来防止由网络故障、丢包等导致的网络服务中断和数据丢失。这些双路径的冗余传输机制包括分组数据汇聚协议（PDCP）复制、双N3/N9隧道、双协议数据单元（PDU）会话。为了解决PDCP复制和双PDU冗余传输受限于终端产业链、短期难以落地应用的问题，可采用双UE冗余双活技术来提高端到端传输可靠性。

垂直行业对业务可靠性要求较高，5G控制面（5G-C）断链业务保持技术可用于对业务可靠性要求高的面向业务（ToB）场景，例如井下作业掘进机、工业园区可编程逻辑控制器（PLC）和自动导引车（AGV）、医院查房车，铁路编组站等。在控制面网元与用户面网元间连接中断时，该技术可依然保障5G网络的正常使用。

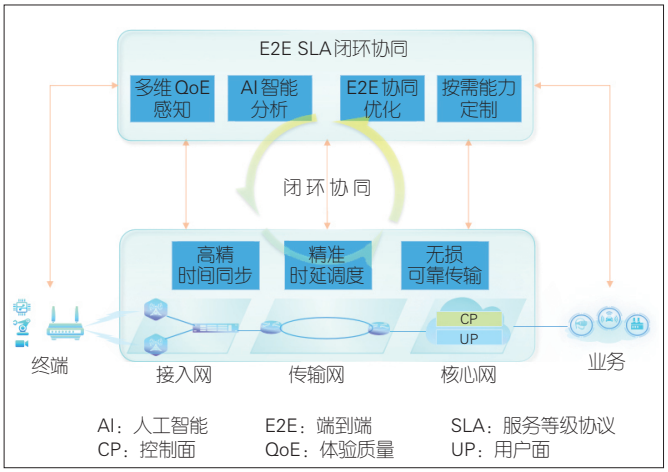
除了通用的高可靠连接技术，中兴通讯提出在空口侧基于上行Survival time增强的提案。在触发进入Survival time状态的情况下，UE可以自主激活PDCP复制，保障业务的QoS，提高空口的可靠性。该方案目前已经被3GPP采纳。

### 2.4 5G TSN闭环协同管理技术创新

确定性网络保障离不开网络资源的精细管理和协调。如图3所示，5G TSN网络需要构建从终端到网络再到业务的全方位监控机制[6]：

- 提供端到端切片管理服务，为业务服务等级协议（SLA）提供保障；
- 通过终端-网络-业务的端到端协同，实现按需定制网络；
- 获取网络状态、业务体验、调度效果等相关数据，实时调整业务的调度策略，构建“感知-决策-优化”的端到端闭环控制。

作为TSN逻辑网桥，5G系统将与TSN网络的CNC管理系统协同工作，可实现5G网络的状态、能力和组网拓扑等信息的上报，以及TSN业务流的资源需求和调度策略的接收等。当5G网络状态改变或者发生异常时，系统可以及时通知CNC进行策略调整。



▲图3 5G时间敏感网络闭环协同管理架构

此外，为了更进一步地优化网络，我们还可通过多维体验质量（QoE）感知、人工智能（AI）智能分析、E2E协同优化、按需能力定制等方式，来实现包括TSN终端和业务、传输网络、RAN、UPF等端到端各节点间的协同优化，打造业务流端到端畅通无阻的最优网络。

### 2.5 5G TSN适配不同工业网络技术创新

目前的工业网络标准比较多，并没有统一到TSN，但是对高精度时间同步、低时延、低抖动的要求是比较一致的。中兴通讯联合业界合作伙伴，采用5G TSN架构对工业领域非标准TSN网络进行适配，目前已经取得一定成果。

电力行业通常采用B码对设备进行时间同步。中兴通讯的UE/DS-TT支持B码输出，能够对差动保护装置配网终端单元（DTU）进行授时。UE/DS-TT通过IEEE 802.1AS获得高精度的TSN时钟，然后通过B码对差动保护装置进行授时。同时UE/DS-TT侧启用基于时间的精准门控管理，实现报文的低抖动传输。

工业PLC大都采用IEEE 1588进行时间同步。中兴通讯增强方案实现了IEEE 802.1AS与IEEE 1588的互通，满足了基于EtherNet/IP工业标准以太网对网络授时的精度需求。

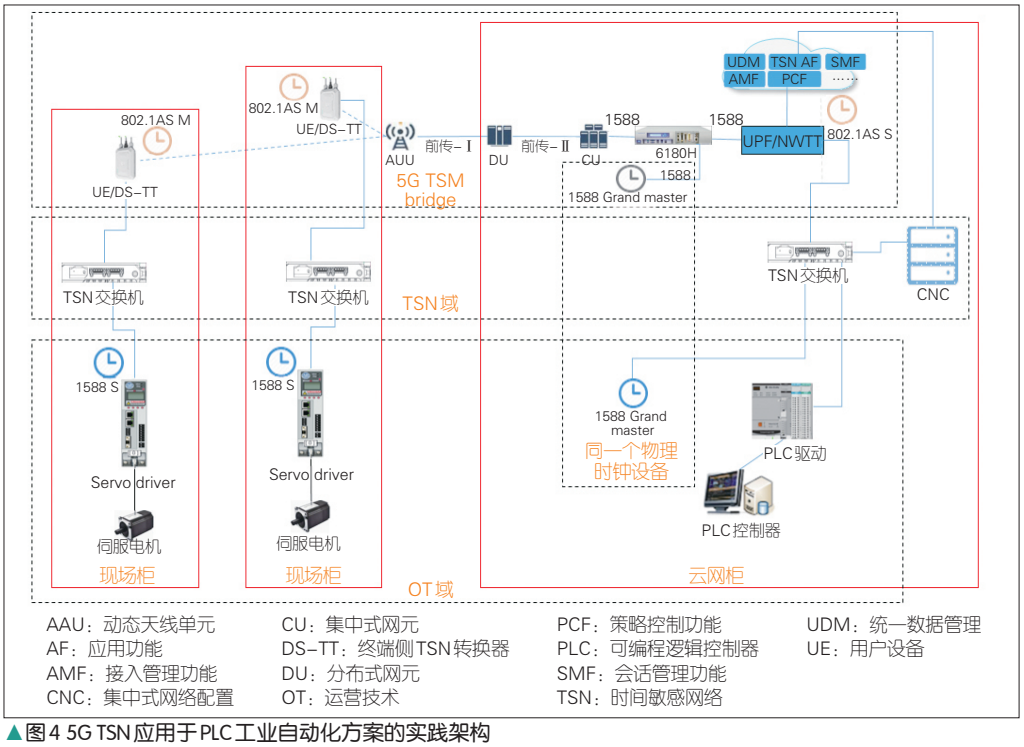
## 3 中兴通讯5G TSN端到端实践[6]

2021年中国移动、中兴通讯联合业界知名工业自动化厂商，通过引入5G TSN网络为智能PLC的实时控制提供低时延、低抖动的确定性连接，进一步验证了5G TSN在工业互联网中的应用前景，具体架构框图如图4所示。

网络侧部署的集成化云网柜可集中部署5G主时钟与1588主时钟、基带单元（BBU）、传输设备（SPN）、核心网

控制面设备、UPF/NW-TT、TSN交换机以及CNC。通过网络改造，分布在现场的PLC控制器被集中部署到云网柜中。马达可通过5G TSN网络控制远程的伺服控制器来驱动。UE/DS-TT和NW-TT侧启用基于时间的精准门控管理，可实现报文的有界传输，防止网络出现抖动现象。

高精度时钟授时满足了EtherNet/IP的精准授时需求，授时精度的偏差在300 ns以内。基于时间的精准门控管理保证了运动控制通用工业协议（CIP）/CIP Motion业务报文的有界传输，网络抖动在1 ms以内，验证了通过5G TSN网络进行实时运动控制的可行性。




▲图4 5G TSN应用于PLC工业自动化方案的实践架构

## 4 结束语

虽然5G TSN在工业领域的全面落地尚需时日，但是中兴通讯一直在持续创新，与运营商和行业客户的合作日益深化。随着端到端产业链的逐渐成熟，5G TSN技术也将逐步深入工业互联网领域，在万物互联时代创造不可估量的价值。

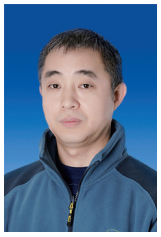
## 致谢

本文得到中兴通讯股份有限公司周建锋、熊先奎、戴博、谈杰、侯晓辉、郝育鹏、徐龙的帮助，向他们表示感谢！

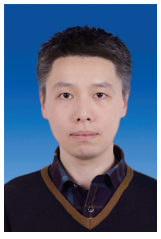
**参考文献**

[1] 雷波, 赵倩颖, 赵慧玲. 边缘计算与算力网络综述 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(3): 3-6. DOI: 10.12142/ZTETJ.202103002
[2] WU H. Ten reflections on 5G [J]. ZTE communications, 2020, 18(1): 1-4. DOI: 10.12142/ZTECOM.202001001
[3] 朱瑾瑜, 张恒升, 陈洁. TSN与5G融合部署的需求和网络架构演进 [J]. 2021, 27(6): 47-52. DOI: 10.12142/ZTETJ.202106009
[4] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS): 3GPP TS 23.501 v16.11.0 [S]. 2021
[5] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS): 3GPP TS 23.501 v17.3.0 [S]. 2021
[6] 中兴通讯, 中国移动研究院. 面向工业互联网的5G TSN实践与展望白皮书 [EB/OL]. [2022-03-03]. https://www. zte. com. cn/china/about/news/20220303C2.html

### 作 者 简 介



**张启明**，中兴通讯股份有限公司无线架构团队资深系统架构师；主要从事MEC及异构计算的研究工作。



**郑兴明**，中兴通讯股份有限公司电信云与核心网产品线产品综合方案架构师；主要从事NFV/SDN、5G/6G移动核心网技术和行业应用的研究工作。

**张寿勇**，中兴通讯股份有限公司无线TDD产品总监；长期从事无线通信系统的研发工作，先后负责CDMA EVDO系统、TD-SCDMA 3G系统、TD-LTE 4G系统和5G系统的研制；曾多次参与和主持国家“863”计划、国家科技支撑计划等项目，在“警用数字集群（PDT与TD-SCDMA）通信系统关键技术研究与应用示范”“基于TD-LTE公网集群业务系统研发与验证”等一系列国家重大科技项目研究工作中，完成了一系列创新研究和系统开发工作；拥有发明专利10余项。