

1 5G+TSN 融合技术测试床

1.1 引言/导读

中国信息通信研究院作为工业和信息化部直属科研事业单位，致力于工业互联网领域技术研究工作，坚持创新驱动，围绕制造强国、网络强国战略重点领域，积极推动新兴技术与工业互联网网络新技术深度融合和协同创新，中国信通院拥有工业互联网融合创新工业和信息化部重点实验室、工业互联网平台创新与测试验证重点实验室、工业互联网安全技术试验与测评工业和信息化部重点实验室等多个工信部重点实验室，为加快工业互联网产业发展和技术进步、支撑国内企业工业转型升级提供了有力保障。中国信通院在国内很早就开展了TSN技术与标准的研究，承担了多项工信部智能制造专项、工业转型升级专项和工业创新工程专项，最早在国内建设了TSN试验验证测试床并多次开展了TSN产品测试，多次发布TSN产业白皮书，有力的推动了国内TSN研究与产业发展。

工业互联网可以实现人、机、物全要素的网络互联。工业互联网平台则可以把设备、生产线、工厂、供应商、产品和客户紧密地连接且并融合起来。5G是工业互联网的关键使能技术，而工业互联网是5G的重要应用场景之一，5G+工业互联网是赋能智慧工厂数字化、无线化、智能化的重要方向。

5G网络的大带宽、低时延、高可靠特性，可以满足工业设备的灵活移动性和差异化业务处理能力需求，推动各类增强现实（AR）/虚拟现实（VR）终端、Robot、自动导引运输车（AGV）、场内产线设备等的无线化应用，助力工厂柔性化生产大规模普及。工业互联网给5G带来了广泛的应用场景，同时也带来了前所未有的挑战，尤其是5G URLLC业务对时延和可靠性提出了更高的要求，例如，远程驾驶要求在5ms用户面时延下实现 10^{-5} 的可靠性；电力分配系统的要求是2ms用户面时延下实现 10^{-6} 的可靠性；而工厂自动化场景的要求2ms用户面时延下实现 10^{-6} 的可靠性。

时间敏感网络（TSN）是工业互联实现低时延、高可靠和确定性传输的重要技术之一，时间敏感网络基于以太网，统一扩展时间同步、确定流调度、高可靠

无缝冗余、网络管控等功能，提供确定有界低时延、低抖动、高可靠流传输服务，支持多业务流高质量共网传输。时间敏感网络可应用至工业自动化系统、智能电网、车辆内通信、航空宇航系统、运营商网络等领域。时间敏感网络的标准化有望解决工业现场总线与工业以太网的异构性和兼容性问题，实现有线工业通信网络的统一与互联互通。

以工业为代表的垂直行业对5G网络提出了严苛的业务体验、效率及性能要求，TSN技术凭借其优势使能5G网络安全可靠的确定性数据传输，TSN与5G网络融合将成为5G网络系统向确定化演进的重要技术方向。目前，如何在工业互联网中，对5G和TSN技术进行融合部署，已经成为产业界、学术界、标准组织研究的热点之一，3GPP已经在R16/R17中开始了5G TSN的标准化工作，建立了基本的融合架构，R17 5G+TSN相关标准即将冻结。自2020年以来，国内大力推广5G网络的建设部署，5G在垂直行业的应用越来越广泛，工信部多次发文，将5G及TSN技术作为工业互联网重点发展技术，并相关专项扶植产业。

基于上述现状，5G TSN融合技术测试床旨在验证TSN架构与5G网络系统融合部署演进的关键技术，为TSN技术在5G网络中部署提供参考，为URLLC业务应用于垂直行业提供参考解决方案，并推动国际国内相关5G TSN标准的进展。

1.2 关键词

时间敏感网络（TSN）、5G、核心网、URLLC

1.3 测试床项目承接主体

1.3.1 发起公司和主要联系人联系方式

中国信息通信研究院，段世惠，18500465398，duanshihui@caict.ac.cn

中国信息通信研究院，朱瑾瑜，15313152798，zhujinyu@caict.ac.cn

1.3.2 合作公司

北京邮电大学
中国移动通信集团有限公司
中国电信集团有限公司
华为技术有限公司
新华三技术有限公司
上海诺基亚贝尔股份有限公司
高通(中国)控股有限公司
英特尔（中国）有限公司
深圳艾灵网络有限公司

1.4 测试床项目目标

结合国际上最新的研究进展，本测试床主要研究5G与TSN融合技术的发展路线、关键技术以及在垂直行业应用中的痛点问题，模拟现有网络的各种真实情况，对5G与TSN融合的关键技术及解决方案进行验证测试，对各种新算法、新技术、新设备、新方案进行测试，对多厂家设备进行互联互通测试以评判组网性能，旨在于为5G技术在确定性要求严格的垂直行业场景中的应用提供解决思路或者解决方案，为5G技术的应用推广提供必要的理论依据和标准依据。

1.5 测试床方案架构

1.5.1 测试床应用场景

本测试床主要应用于以下两种场景：

1. TSN作为5G网络的承载网络，即利用TSN保证5G网络系统的数据传输确定性，TSN网络连接5G基站与UPF构建高可靠低时延承载网络，满足TSN终端设备间确定低时延通信业务需求，同时实现移动承载网络中同相流的时间同步需求。

现阶段考虑把TSN应用于5G RAN部分，尤其是前传部分。

2. 5G作为TSN网桥/交换机互联多TSN域，即利用5G网络实现TSN网络系统的拉远传输，5G系统作为一个TSN桥，集成在TSN系统中。此“逻辑”TSN桥包括TSN转换器，用于TSN系统和5G系统之间用户面的交互。5GS TSN转换器功能由终端侧TSN转换器（DS-TT）和网络侧TSN转换器（NW-TT）组成。

测试床适用于园区内的工厂内网与外网的TSN域之间使用5G连接、工厂外网使用5G桥接TSN域进行广域连接、5G RAN与CN使用TSN作为承载的多种场景。

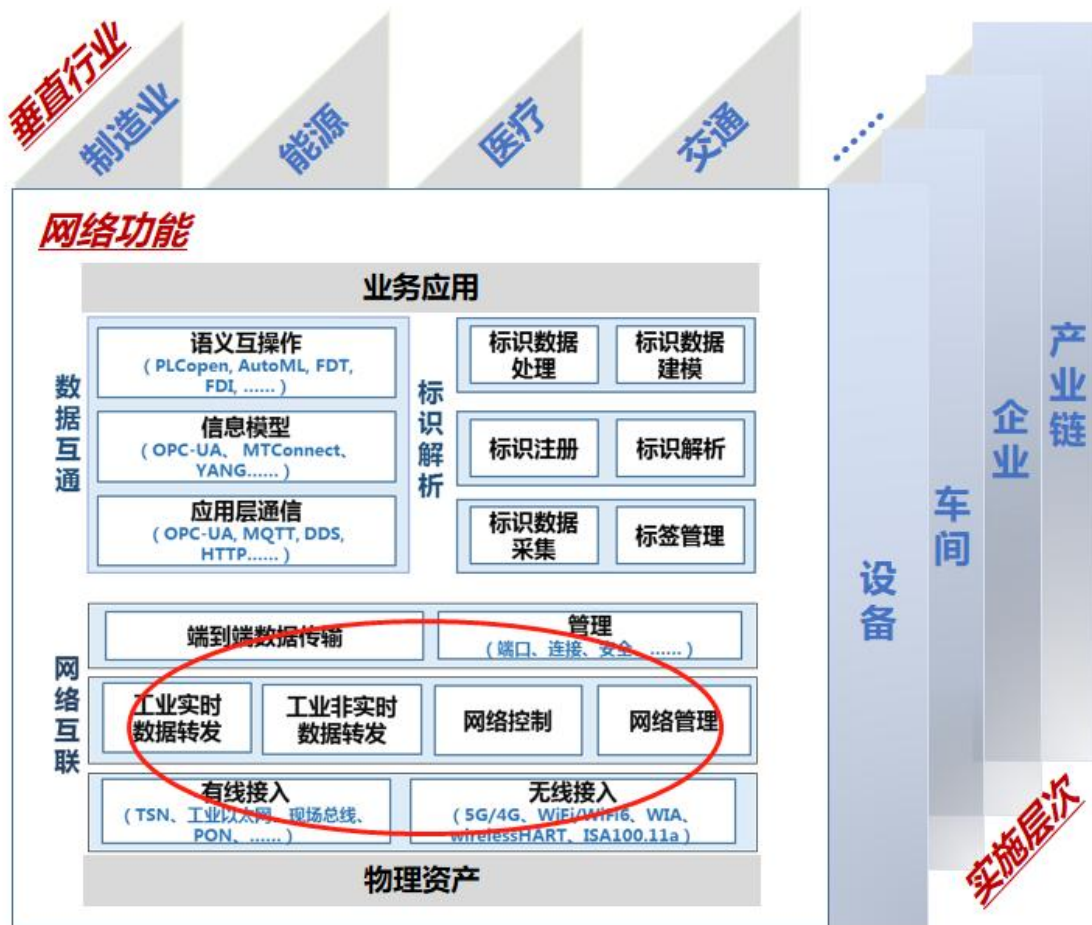
1.5.2 测试床架构

在工业互联网体系架构的位置

本测试床是为了验证5G与TSN融合技术的结合，以保证5G网络确定性技术的实现。在AII总体架构中属于网络视图中的网络互联部分，即通过有线、无线方式，将工业互联网体系相关的人机物料法环以及企业上下游、智能产品、用户等全要素连接，支撑业务发展的多要求数据转发，实现端到端数据传输。网络互联根据协议层次有底向上可以分为多方式接入、网络层转发和传输层传送。

多方式接入包括有线接入和无线接入，通过现场总线、工业以太网、工业PON、TSN等有线方式，以及5G/4G、WiFi/WiFi6、WIA、WirelessHART、ISA100.11a等无线方式，将工厂内的各种要素接入工厂内网，包括人员（如生产人员、设计人员、外部人员）、机器（如装备、办公设备）、材料（如原材料、在制品、制成品）、环境（如仪表、监测设备）等；将工厂外的各要素接入工厂外网，包括用户、协作企业、智能产品、智能工厂以及公共基础支撑的工业互联网平台、安全系统、标识系统等；网络层转发实现工业非实时数据转发、工业实时数据转发、网络控制、网络管理等功能；传输层基于TCP、UDP等实现设备到系统的端到端数据传输功能。

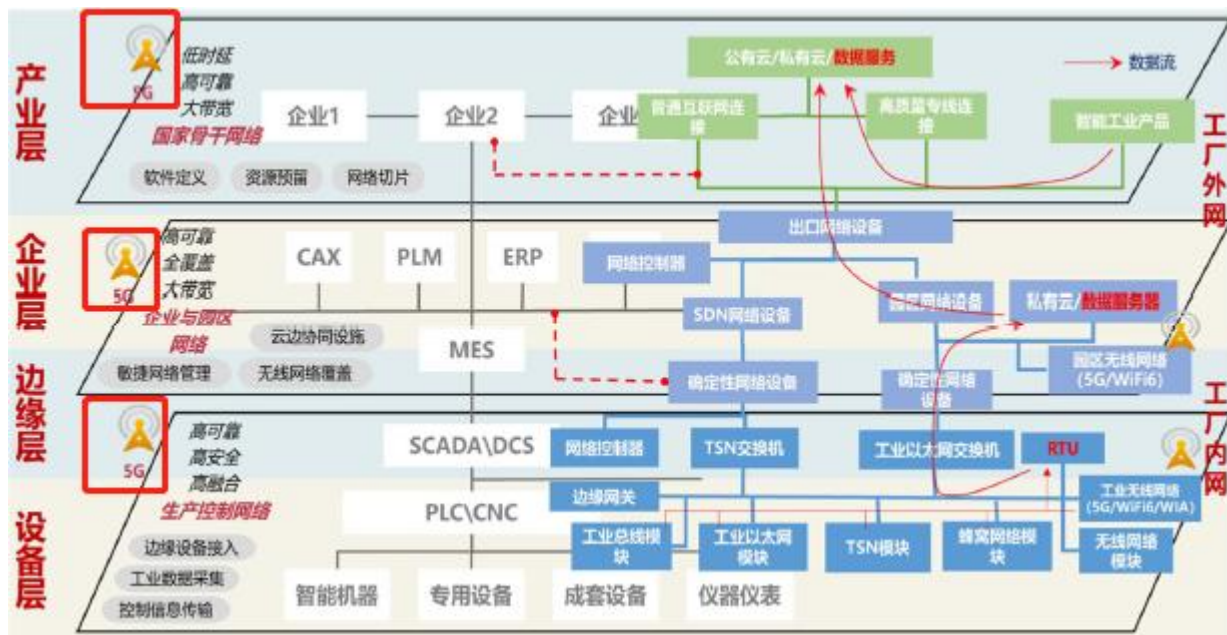
5G TSN融合技术测试床将网络体系中的实现多方式接入、网络转发和端到端数据传输功能，5G TSN融合技术测试床的在AII工业互联网功能视图网络体系框架中的位置如图 1所示。



图：5G TSN 融合技术测试床在 AII 体系架构 2.0 中的位置

在工业互联网实施框架的位置

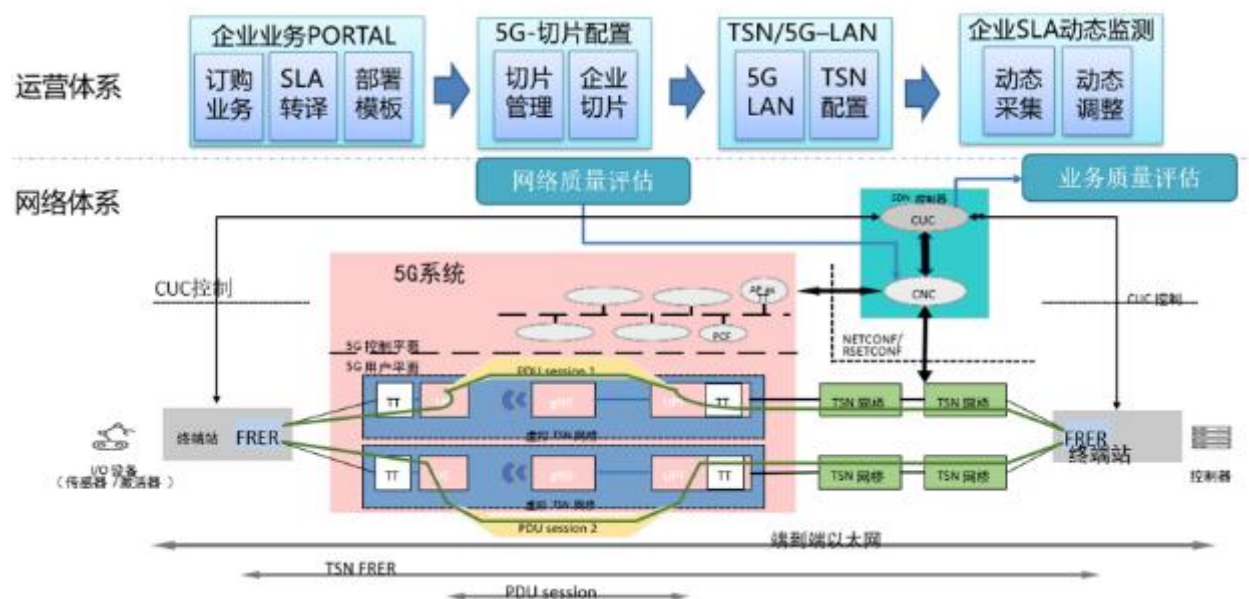
在工业互联网网络实时框架中，本测试床内容包含设备层的5G终端、5G RAN、边缘和企业层的5G无线网络、本地私有云等，如下图所示：



图：5G TSN 融合技术测试床在 AII 体系架构 2.0 中实施框架中的位置

1.5.3 测试床方案

5G TSN融合技术测试床尝试建立一个具备端到端确定性的测试床。在本测试床中，按照网络实际运营的模式，仿真运营体系和网络体系，运营体系负责对用户业务进行端到端的配置和监测，网络体系负责对用户业务进行端到端的实现。从用户角度来看，用户并不关注网络体系的技术实现细节，用户对其业务给出具体需求后，由运营体系将用户的需求进行SLA转译并配置对应的业务模板，该业务模板最终通过网络体系进行全网端到端的下发和配置，在业务运行过程中，运营体系收集网络体系的网络之类评估信息和业务质量评估信息，根据所收集的信息进行网络动态调整。

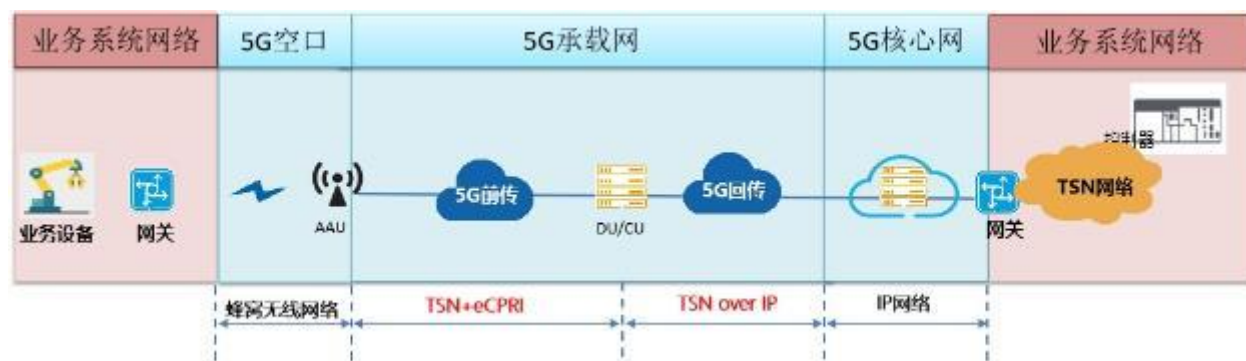


图：5G TSN 融合技术测试床体系架构

随着3GPP R16/R17/R18以及IEEE 802.3 TSN等系列标准的发展以及相关设备的研发，本测试床将在现有基础上不断进行补充完善，最终实现用户业务驱动的端到端确定性网络。基于现有设备的成熟度和研发进度（目前上市的设备基本上都是R15阶段的设备），本测试床拟分为两个阶段，两个阶段对应于前述的两个应用场景。

（1）第一阶段

第一阶段，本测试床主要考虑利用TSN保证5G网络系统的数据传输确定性，尤其是在5G承载网部分，最终实现从RRU到核心网端到端的5G TSN融合，实现高可靠性，高精度，低延迟的确定性网络传输。测试床计划部署方案如下图所示：

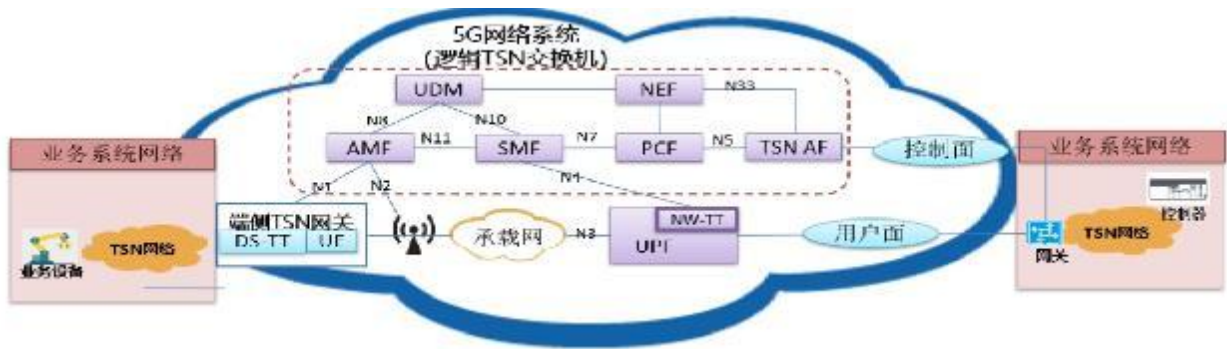


图：第一阶段架构图

在第一阶段中，本测试床主要以5G承载网在各个部分和TSN的融合。主要可划分为：5G前传+TSN的结合；5G回传+TSN的结合；5G核心网+TSN的结合。

（2）第二阶段

在第二阶段中，5G系统作为一个TSN桥，集成在TSN系统中，具体架构参见下图。此“逻辑”TSN桥包括TSN转换器（TT），用于TSN系统和5G系统之间用户面的交互。5GS TSN转换器功能由终端侧TSN转换器（DS-TT）和网络侧TSN转换器（NW-TT）组成，当前市面上尚无成熟的TSN转换器产品。



图：第二阶段架构图

5GS网元可作为TSN网络的一个或多个TSN网桥。5GS网桥由单个UPF（即PSA）侧的端口、UE和UPF之间的用户平面隧道以及DS-TT侧的端口组成。对于TSN网络的每个5GS网桥，NW-TT上的端口都支持与TSN网络的连接，DS-TT侧的端口与PDU会话相关联，从而提供了与TSN网络的连接。

1.5.4 方案重点技术

1. 5G系统与TSN系统时钟同步

TSN采用gPTP协议实现时间同步，5G系统有自身的时钟同步技术，5G网络和TSN有各自的主时钟（GM）。5G网络中的各网元设备，包括用户设备（UE）、5G基站（gNB）、UPF、NW-TT和DS-TT与5G GM同步（即5G内部系统时钟）。如何实现5G与TSN融合系统的跨域时间同步是关键技术挑战之一。目前的时间

同步方法主要有透明时钟法,整个端到端的5G系统可视为IEEE 802.1AS “时间感知系统”,只有NW-TT和DS-TT需要支持IEEE 802.1AS协议,并与工业互联网保持时钟同步,执行与IEEE 802.1AS相关的所有功能,例如gPTP、时间戳、最佳主时钟算法(BMCA)、rateRatio等。针对大规模网络中数量繁多的交换设备往往会带来较大的时间积聚误差问题,基于透明时钟法不需要维持主从时钟状态,也不需要进行时钟同步操作。TSN作为主时钟,通过UPF/UE预测5G入口和出口的时间延迟,将消息的时间戳填入gPTP事件消息的修正字段,TSN网络设备时钟收到gPTP消息后可根据驻留时间对积聚误差进行误差补偿,从而实现5G系统与TSN跨网时间同步。5G系统各组成部分使用5G系统内部时钟,通过NW-TT与DS-TT实现5G系统时钟与TSN系统时钟的转换。因此,DS-TT和NW-TT需要同时支持5G网络和TSN两种时钟,并需要计算两种时钟的偏差。当TSN业务需要DS-TT和NW-TT通过门控进行流量调度以消除5G网络的时延抖动时,通知给5G网络的报文达到时间和周期时间将以TSN的时钟为基准。因此,5G网络收到调度设置请求后,调度周期需要先转化为以5G时钟为基准的时间,然后进行流量门控的调度。

2. 数据平面QoS映射

5G QoS机制主要负责从网络的角度进行业务管理和提供业务的差异性,网络实体根据不同的质量需求来处理不同业务,涉及QoS的主要参数有资源类型(GBR、delay critical GBR和Non-GBR)、优先级、分组时延、分组错误率、平滑窗大小、最大数据量等,和URLLC密切相关的是时延关键GBR(delay critical GBR)。

如何将TSN网络业务流量QoS准确的映射至5G流量QoS,进行相应处理并保证时间敏感流量的性能尤为关键。在5G系统中,通过时延关键GBR(DC-GBR),结合时间敏感通信辅助信息(TSCAI)对无线资源进行预约,保证时延性能需求。5QI(5G QoS indicator)是5G系统定义的服务质量QoS指标。对于工业网络中高实时周期性同步流,如运动控制,将采用5QI提高在无线侧调度的优先级,降低传输时延。同时,采用TSCAI来描述流量特征,包括:通信模式(周期与非周期)、流量方向(上行与下行)、流量的时间(到达与上界)等。根据业务流特征和模型,采用相应协同的流量调度策略,减少时延抖动,同时保证时间同步。5G TSN

支持IEEE 802.1Qbv中定义的流量调度的保持和转发机制，其数据包仅需在预定的周期上，打开门控以进行数据传送，就可以控制报文经过5G TSN的时延。

3. 网络管控与资源协同

5G系统控制平面的网络暴露功能(NEF)通过应用功能AF模块与TSN集中网络配置器(CN)实现通信。通信可以基于802.1AB的数据链路层发现协议(LLDP)实现邻居发现与链路信息交互。

TSN流的需求信息将映射为5G的流量QoS信息，通过配置5G系统以满足流量需求。因此，为了确保5G系统与时间敏感网络无缝融合，网络管理系统也需要融合。5G虚拟TSN网桥需要支持SNMP代理功能，通过连接UE和UPF的DS-TT和NW-TT以太网端口，收集连接设备与端口的相关状态信息，特别是端口状态的管理。同时，5G虚拟TSN网桥通过端口和LLDP收集网络拓扑与网络状态信息，保存至SNMP MIB库，任何端口状态变化或端口间连接变化，都需通知集中网络配置器CNC，以便重新配置该虚拟网桥。

5G TSN网络体系中TSN AF除了受TSN系统集中管理控制，对上还可承接网络运维所需的配置管理，对下能通过能力开放NEF与5G系统通信实现QoS参数协同。结合终端侧的业务质量评估数据和网络侧的网络指标进行大数据分析和研判，进一步优化系统QoS策略，实现由业务体验驱动的网络和流量调度。

1.5.5 方案自主研发性、创新性及先进性

本测试床方案是中国信息通信研究院基于5G+工业互联网融合体系架构，将TSN技术应用于5G网络中以实现5G网络实现全程端到端的确定性为目标开展的研究和技术验证。测试床的实施方案经过需求分析、关键技术验证和可行性分析后得出。相关软硬件系统由联合体单位自主研发，以上工作均体现了本测试床方案的自主研发性。

目前，国内并没有完整的5G TSN的融合系统的测试床，大部分对于5G TSN融合的应用还停留在部分承载网部分或理论和模拟仿真中，作为当前5G确定性技术研究的热点方向之一，5G TSN融合测试床可以有效验证该方向技术融合的成熟度，为5G确定性技术提供必要的实验数据和理论依据，并推动5G确定性技术在工业互联网中的落地应用，具有较大的创新性和先进性。

1.5.6 方案安全风险控制

在建设初期，本测试床将在封闭的实验环境中运行，不接入公共互联网，使用各种仪表来仿真真实的网络环境，以确保本测试床设备和数据运行的安全性。

在建设后期，本测试床将形成特定的解决方案，后续将考虑在现网运行过程中遇到的各种安全问题并采用5G网络中成熟的安全技术来保障本测试床特定解决方案在现网中应用的安全性。

1.6 测试床实施部署

1.6.1 测试床实施规划

时间	任务	具体工作	输出内容
2021. 1-2021. 2	第一阶段需求分析	确认第一阶段测试床的具体需求	第一阶段测试床建设需求表
2021. 2-2021. 3	第一阶段方案制定	完成第一阶段测试床建设方案	第一阶段测试床建设方案
2021. 3-2021. 4	第一阶段测试床建设	完成测试床的第一阶段网络建设	第一阶段的测试床
2021. 5-2021. 12	第一阶段测试床验证	对第一阶段测试床开展各种技术验证	第一阶段技术验证报告
2021. 7-2021. 8	第二阶段需求分析	确认第二阶段测试床的具体需求	第二阶段测试床建设需求表
2021. 9-2021. 10	第二阶段方案制定	完成第二阶段测试床建设方案	第二阶段测试床建设方案
2021. 11-2021. 12	第二阶段测试床建设	完成测试床的第二阶段网络建设	第二阶段的测试床
2022. 1-2022. 6	第二阶段测试床验证	对第二阶段测试床开展各种技术验证	第二阶段技术验证报告

2022. 7-2022. 12	解决方案验证 及测试床总结	针对特定行业形成特定的 行业解决方案并验证 梳理并总结测试床	特定解决方案 测试床总结报告
------------------	------------------	--	-----------------------

1.6.2 测试床实施的技术支撑及保障措施

本测试床参与方分工协作，共同支撑与保障本测试床的实施工作：

中国信息通信研究院负责与各家联合体成员单位协商完成测试床的设计、部署和验证方案，由中国信息通信研究院完成测试床的部署实施。

本测试床由中国信息通信研究院及各家联合体成员单位提供技术支撑，并联合行业客户进行应用场景落地及验证。

1.6.3 测试床实施的自主可控性

本测试床所涉及的网络软硬件设施均由联合体成员单位自主生产和提供，具有自主可控性。

1.7 测试床预期成果

1.7.1 测试床的预期可量化实施结果

1.关键技术验证

针对5G与TSN融合过程中的时钟同步、QoS映射、网络管控与资源协同、网络拓扑协同等关键技术进行验证并形成技术验证报告以及相关国际标准草案、国内标准、专利和软著。

2.端到端确定性实施方案

针对工业互联网中不同业务对于确定性的差异化要求，给出具体实施方案，包括网络架构、业务模板、网络资源配置等方面，最终形成可实施的方案。

1.7.2 测试床的商业价值、经济效益

目前TSN技术及其标准已经基本上较为成熟，5G系统从3GPP R14开始到目前的R17,基本框架也基本上已经确定，R15设备已经在市场上销售了，因此，未来1-2年时间内不存在频繁更新软硬件带来复杂高昂的设备及维护成本。然而，在两项技术已经比较成熟的情况下，相关产业领域却并没有对两者结合进行商业应用。建成本测试床将有效加速该融合技术在相关产业落地的速度。

本测试床构建后，将积极开展5G TSN融合技术方面的研究和验证工作，在各个联合体成员单位的合作之下，一方面大力推动5G TSN融合技术标准化进程，另一方面加速5G技术在工业互联网中对于确定性要求严苛场景的落地实施应用，促进5G+工业互联网在工业企业深度应用。

1.7.3 测试床的社会价值

本测试床建成后，将有力推动5G TSN融合应用技术的发展，积极响应国家大力推广5G的战略部署，在网络层面自主拓展前沿技术研究，助力工业及通信行业蓬勃发展。

1.7.4 测试床初步推广应用案例

本测试床初步建成后，首先考虑将联合体各个成员单位的网络设备接入到测试床，结合发起单位采购的各种网络测试仪表，充分模拟各种网络运行环境，对测试床各项指标和所涉及的关键技术进行充分测试，输出成果将考虑转化为国内外标准。

其次，本测试床后续将陆续接入国内其他厂家的5G相关设备，结合各个成员单位的行业实践和经验，在本测试床基础上搭建各种行业特色模拟网络，对行业典型5G应用场景进行验证，输出成果将考虑转化为行业典型解决方案并向企业进行宣传推广。

1.8 测试床成果验证

1.8.1 测试床成果验证计划

本测试床部署在中国信息通信研究院内，根据3GPP、IEEE、IETF等国际标准组织的最新进展，并结合现有的在售5G和TSN产品，按照两个阶段搭建测试床，并进行关键技术验证，具体时间计划见测试床实施规划时间表。

1.8.2 测试床成果验证方案

测试床成果验证主要分为基础技术验证、第一阶段验证、第二阶段验证、整体网络验证，相关验证内容如下：

1. 基础技术验证
 - 时钟同步技术验证
 - 网络 QoS 映射技术验证
 - 网络协同管理技术验证
 - 其他技术验证
2. 第一阶段验证
 - 前传网络确定性验证
 - 5G RAN 确定性验证
 - 5G 核心网确定性验证
 - 端到端业务确定性的验证
3. 第二阶段验证
 - 5G 内生确定性验证
 - TT 设备功能和性能验证
 - 端到端业务确定性验证
4. 整体网络验证
 - 特定场景确定性验证

1.9 与已存在 AII 测试床的关系

本测试床和之前已经审批的测试床无关联。

1.10 测试床成果交付

1.10.1 测试床成果交付件

最终交付成果应包含：

1. 一套5G TSN融合技术试验验证平台，验证的成功标准是可以在平台中实现两个阶段的5G TSN融合方案并通过系统的测试来验证平台的各项指标。
2. 3份以上测试报告，包括两个阶段的整体测试报告以及各种关键技术、关键设备的测试报告。
3. 形成2项以上专利，基于5G TSN融合技术及实际应用方面的专利。
4. 形成2项以上行业/团体标准，基于5G TSN融合技术及实际应用方面的标准，考虑在CCSA、AII、中国通信学会等组织开展标准研究。
5. 形成1项以上的行业解决方案。

1.10.2 测试床可复制性

本测试床可以应用于5G+工业互联网的多个场景中，尤其是对于端到端确定性有明确要求的场景，例如工厂生产线控制、AGV控制、自动驾驶等场景，也可以用于5G作为工业无线传输网络连接多个车间的园区网络内。随着5G在工业互联网领域的深入应用，本测试床可以应用的场景将进一步拓展扩大。

1.10.3 测试床开放性

本测试床是对5G TSN技术融合方案的一种测试验证，与现有的企业内部系统，如ERP、MES等完全独立，没有耦合性。可以在各企业部署并完成测试验证，因此具有很高的开放性。目前，本测试床现在已经包含多设备商的设备，后续将

继续开放给更多设备商、运营商和制造企业共同参与测试床验证与推广工作。

1.11 其他信息

1.11.1 测试床使用者

中国信息通信研究院负责具体组织测试床方案设计与部署、后续运营技术支持等工作。欢迎所有的AII成员企业参与和使用本测试床项目，需要参加单位对测试床的建设提供必要的验证设备或必要的验证场景，这些企业可以基于测试床开展相关研究工作。在初始阶段，由于试验站点的访问权限有限，本测试床将仅限于现有的联合体成员单位。之后，本测试床将逐步开放给更多AII成员企业使用。

1.11.2 测试床知识产权说明

中国信息通信研究院与联合体成员对测试床的建设、运营以及使用拥有权。

1.11.3 测试床运营及访问使用

本测试床将部署于中国信息通信研究院内，由中国信息通信研究院运营，并提供相关技术支持。对测试床的访问使用需经过申请同意，并通过付费、知识产权共享等多种方式有条件使用。

1.11.4 测试床资金

测试床的资金将来自于测试床参与单位。

1.11.5 附加信息

本测试床的建设面向5G在工业互联网中应用，计划逐步应用5G URLLC的典型场景，未来将考虑推广至工业专网中，为5G在确定性要求明确的场景中应用提供

全新的解决方案，充分促进5G在工业互联网中的应用。