

确定性承载技术和评测体系 研究报告

(2023 年)

中国信息通信研究院技术与标准研究所

2023年5月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

前 言

数字经济时代，行业数字化转型推动产业互联网加快发展，确定性承载需求渐增，网络连接从“尽力而为”加速向“确定性”演进。确定性网络具备端到端特性，确定性承载作为重要构成作用日趋凸显。

本报告研究了确定性承载的范畴、内涵和关键特性，分析提出了确定性承载的八类通用场景和 SLA 指标，构建了多层多域的确定性承载技术体系。在此基础上，聚焦剖析了分组队列、TDM 细粒度、智能编排、网络演算和异构协同等关键技术进展及标准发展现状。

基于对网络和业务维度分类分级的设计思路，本报告提出了两维五级的 D-cube 确定性承载评测体系，适用于 IP、以太网和光传输等多种类型设备和网络的确定性能力评测。在网络维度，分析提出了结合网络规模和技术能力映射的节点级、链路级、网络级、大规模高隔离和异构网络确定性的分级方法。在业务维度，探讨了性能建模分析、源宿端扣除和等效继承的端到端承载指标分解方法，为业务评估指标的分级提供支撑。

最后，本报告对于确定性承载技术的未来发展和产业应用进行了展望并提出了相关建议。希望本报告的研究成果为确定性承载技术和产业应用创新提供参考，助力支撑行业数字化转型的蓬勃发展。

目 录

一、概述.....	1
(一) 应用与技术双轮驱动, 确定性网络势在必行.....	1
(二) 建设高质量行业专网, 确定性成为重要支撑.....	1
(三) 构建端到端网络能力, 确定性承载作用凸显.....	2
二、确定性承载技术体系构建.....	2
(一) 聚焦服务和技术特性, 构建确定性承载体系化内涵.....	2
(二) 依托业务需求和网络能力,明确通用场景和 SLA 指标.....	5
(三) 分组和 TDM 技术融合演进, 打造多层多域技术体系.....	7
三、确定性承载技术进展分析.....	9
(一) 园区确定性逐步成熟, 广域确定性取得阶段性突破.....	9
(二) 技术标准化多层次推进, 不同技术成熟度存在差异.....	11
(三) 分组队列技术持续创新, 推动确定性能力逐步提升.....	16
(四) TDM 细粒度技术加速推动, 支撑高安全隔离应用.....	19
(五) 智能计算编排多维增强, 满足差异化确定性需求.....	21
(六) 网络演算技术有待推进, 实现确定性时延可承诺.....	24
(七) 异构协同调度未来可期, 助力端到端确定性承载.....	25
四、确定性承载评测方法研究.....	27
(一) 从场景到业务和网络, 逐步推进评测体系构建.....	27
(二) 立足业务端到端 SLA, 探索承载指标分解方法.....	27
(三) 围绕多层多域技术机制, 明确确定性技术指标特性.....	32
五、确定性承载评测体系 (D-cube) 构建.....	33
(一) 满足网络和业务评测需求, 构建两维五级评测体系.....	33
(二) 面向网络规模和技术能力, 提出五级网络维度分级.....	35
(三) 基于应用场景和业务指标, 给出五级业务维度分级.....	36
六、展望与建议.....	37
(一) 机遇与挑战并存, 未来五年成为发展关键期.....	37
(二) 凝聚行业技术共识, 构建统一标准化体系.....	38
(三) 汇聚产业各方力量, 突破共性关键技术瓶颈.....	39
(四) 构建评测服务体系, 促进技术完善服务提升.....	39

(五) 做好整体发展规划，持续推进技术演进发展.....39

图 目 录

图 1 端到端确定性网络构成.....	3
图 2 确定性承载的内涵.....	4
图 3 确定性承载 8 类通用场景.....	6
图 4 确定性承载技术图谱.....	7
图 5 确定性网络技术发展历程.....	9
图 6 OIF FlexE 系列标准研制历程.....	11
图 7 ITU-T MTN 系列标准研制.....	12
图 8 CCSA TC6 SPN 网络分层架构.....	12
图 9 IEEE 802.1 TSN 系列标准.....	14
图 10 CCSA TC3 确定性相关标准.....	14
图 11 IETF DetNet 系列标准.....	15
图 12 确定性网络系列标准对比分析.....	16
图 13 SPN 两级切片架构和行业应用方案.....	20
图 14 fgOTN 映射复用结构.....	21
图 15 确定性网络跨域管控系统结构图.....	23
图 16 确定性网络时隙动态编排系统.....	23
图 17 网络演算技术原理示意图.....	24
图 18 确定性承载测评体系构建.....	27
图 19 可靠性指标 (RBN) 分解公式.....	28
图 20 可靠性指标分解示意图.....	28
图 21 时延指标分解公式.....	29
图 22 时延指标分解示意图.....	29
图 23 时频同步指标分解公式.....	29
图 24 时频同步指标分解示意图.....	30
图 25 带宽指标分解公式.....	30
图 26 带宽指标分解示意图.....	30
图 27 承载网络时延分解示意图.....	31
图 28 确定性承载 D-cube 评测体系.....	34

图 29 确定性承载 D-cube 评测体系网络维度分级.....	36
图 30 确定性承载 D-cube 评测体系业务维度分级.....	37
图 31 确定性承载现状和问题分析.....	38
图 32 确定性承载阶段性发展预判.....	40

表 目 录

表 1 八类确定性通用场景的承载 SLA 指标	6
表 2 各类分组队列技术特性的对比分析表.....	16
表 3 各类硬软切片技术性能对比分析表.....	20
表 4 确定性业务的多维 SLA 承载需求表	21
表 5 不同承载技术 PE 和 P 节点时延表.....	31
表 6 承载网时延分配建议表.....	32
表 7 确定性承载典型技术的指标特性表.....	32

一、概述

（一）应用与技术双轮驱动，确定性网络势在必行

行业数字化转型为确定性网络提供广阔的应用前景。随着 5G、工业互联网、云计算、大数据等技术部署推广，许多行业的生产控制和视频应用等场景对带宽保障、业务隔离、低时延、低抖动和高可靠性等方面均提出了较高确定性要求。确定性网络成为支撑行业网络高质量发展的重要技术之一。

政策引导构建端到端确定性网络，保障行业专网业务高质量承载。2020年12月22日，工信部印发《工业互联网创新发展行动计划（2021-2023年）》，指出发展工业互联网的高质量网络需要开展企业外网建设，推动基础电信企业提供高性能、高可靠、高灵活、高安全的网络服务。探索云网融合、确定性网络、IPv6 分段路由等新技术的部署。

技术发展为确定性网络的实现奠定坚实基础。行业数字化转型加速 ICT 与 OT 深度融合，驱使移动通信网络向确定性网络演进。3GPP 从 R16 开始支持端到端 TSN 确定性能力，R17 和 R18 将进一步提供内生确定性连接能力，包括承载网的确定性。国内 IMT-2030 推进组发布的 6G 白皮书中，“确定性网络”成为 6G 十大潜在关键技术之一，并涉及接入、核心和传输网的系统性优化。

（二）建设高质量行业专网，确定性成为重要支撑

5G 行业虚拟专网加速发展，行业定制和业务保障成为演进重点。传统专网技术难以满足企业网络日新月异的信息化业务需求。5G 技术凭借通信性能指标的大幅提升，将在工厂、能源、矿山、电力、交通等领域发挥

重要作用。在当前阶段，用户对行业网络的需求呈现差异化和碎片化，通用化的网络产品已经无法完全满足需求，需针对行业用户提供量身定制的网络服务。截至 2022 年底，我国 5G 行业虚拟专网数已超过 10000 个。电力、铁路等行业已开展 5G 自建虚拟专网的尝试。深度适配行业需求，5G 行业专网已从通用走向行业定制。构建定制化网络架构和端到端业务保障体系，网络“确定性”成为重要支撑特性。

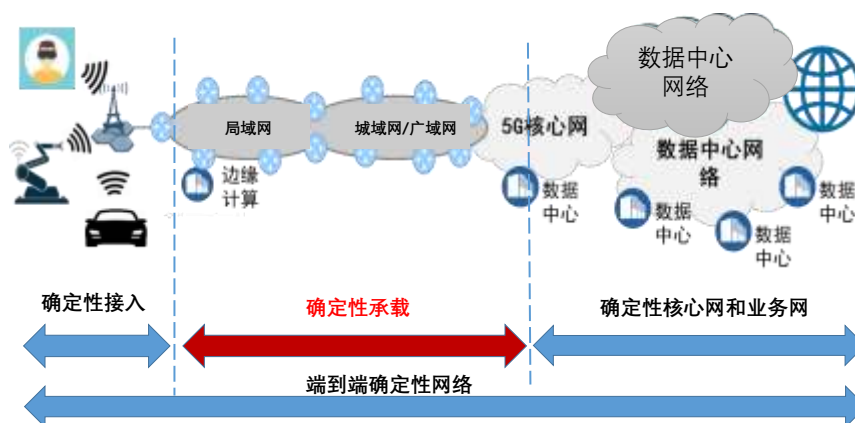
（三）构建端到端网络能力，确定性承载作用凸显

行业专网中的业务可大致包括生产控制类、生产采集类、生产检测类和信息管理类。不同类型的业务体现不同的流量特征和网络需求特征。在多业务混传和复杂业务流量流向场景下，需实现高安全、高优先等级业务的端到端质量保证。对于工业互联网、智能电网等行业，其生产类业务均提出了电信级高可靠性网络需求，需要实现端到端的网络保护机制和电信级运维能力。部署端到端确定性网络，确定性承载至关重要。

二、确定性承载技术体系构建

（一）聚焦服务和技术特性，构建确定性承载体系化内涵

端到端确定性网络主要包括确定性有线/无线接入网、确定性承载网、确定性核心网和业务网（见图 1）。其中，确定性承载网主要涉及了基于 L0~L3 确定性技术的 IP 网、以太网和光传输网，重点面向 5G 承载、算网融合/云网融合业务承载和行业专线专网场景。



来源：中国信息通信研究院

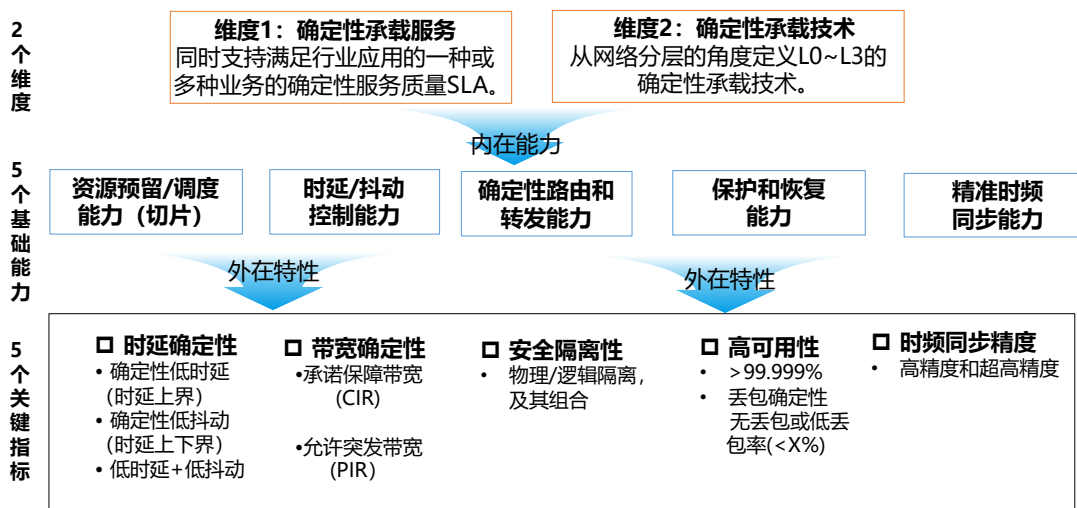
图 1 端到端确定性网络构成

确定性承载的内涵从技术和服务 2 个维度出发，定义了 5 个内部基础能力和 5 个外部关键指标（见图 2）。

首先，确定性承载本质提供的是网络确定性承载服务，并通过多层技术的组合实现确定性服务质量的保障。

（1）网络确定性承载服务：网络满足一种或多种业务对一项或多项确定性服务质量（SLA）要求。比如电力行业（虚拟）专网要满足工业远程控制对端到端确定性时延的承载服务质量要求，同时满足电力通信中差动保护业务对高可靠、低时延及确定性双向时延差的承载服务质量要求等。

（2）网络确定性承载技术：网络支持满足确定性承载服务相应的承载技术能力。从网络分层的角度，通过 L0~L3 不同的层次技术及其组合满足确定性承载服务的需求。比如 L1 层 TDM 技术、L2 层 TSN 技术以及 L3 层 DetNet 技术等。



来源：中国信息通信研究院

图 2 确定性承载的内涵

基于服务和两个技术维度，确定性承载应该具备以下 5 个内在能力，以实现确定性网络的外在关键特性。

(1) **资源预留与调度能力**：具备路径计算与资源预留能力，从而实现转发路径和资源保障的确定性。

(2) **时延/抖动控制能力**：通过各类队列调度转发和时隙复用等机制实现业务时延和抖动的精准控制，从而保障时延和抖动的确定性。

(3) **确定性路由和转发能力**：通过各类分组隧道、TDM 通道和光波长等技术实现路由和转发的确定性。

(4) **精准时频同步能力**：通过全网精准的频率同步和时间同步技术，支撑“按时、准时”的确定性转发服务。

(5) **保护和恢复能力**：通过不同类型的保护和恢复能力，支持在多种网络故障情况下，提供高可用的业务承载服务。

确定性承载的 5 个内在能力最终支撑提供 5 个外在关键指标，包括时延确定性、带宽确定性、高可用性、时频同步精度和安全隔离性。

(1) **时延确定性**：具备确定性的时延（即时延的上界）和确定性的时延抖动（即时延的上界和下界），部分确定性业务要求低时延和低抖动特性。

(2) **带宽确定性**：应在轻载和拥塞的各种场景下均提供承诺的带宽特性，包括承诺保证带宽(CIR)和容许保证带宽（PIR）。

(3) **高可用性**：需具备大于 99.999%及以上的高可用性，甚至长期无丢包特性。高可用性涉及业务和网络两个层面指标，通常通过业务层面指标来验证网络层面指标。

(4) **时频同步精度**：同步业务和高等级时延敏感类业务需承载网络具备高精度和超高精度的时频同步能力。业界也在积极探索研究不依赖全网时频同步来实现 IP 网的确定性承载技术。

(5) **安全隔离性**：具备基于物理隔离或时隙隔离的硬切片能力，或基于分组标签逻辑隔离的软切片能力，适配不同程度的业务安全隔离需求。

(二) 依托业务需求和网络能力,明确通用场景和 SLA 指标

从行业承载需求出发，工业互联网、智能电网和云视频成为确定性需求程度较高的应用场景。针对不同的确定性业务分类、承载需求特性和网络应用范围定义了确定性承载的八类通用场景，包括现场生产控制、远程生产控制、生产监控、生产采集、视频 AI、AR/VR 高体验视频、关键控制类和精准测量定位类（见图 3 错误!未找到引用源。）。



来源：中国信息通信研究院

图 3 确定性承载 8 类通用场景

基于典型行业的确定性业务端到端 SLA 指标，从带宽、时延、抖动、可靠性、时频同步、隔离度等维度聚类分解了八类确定性通用场景的承载 SLA 指标如下表所示。

表 1 八类确定性通用场景的承载 SLA 指标

编号	通用场景	典型行业应用	承载特征	确定性承载SLA				
				承诺带宽	时延	抖动	隔离度	可靠性
1	园区生产控制	工业互联网 PLC等	局域：低抖动+低时延+低带宽	$\leq N*2M$ bps	$\leq 2ms$	$< 100\mu s$	TDM隔离(接口级)	99.99 99%
2	远程生产控制	工业互联网云化PLC等	局域/城域/广域：低抖动+低时延+低带宽	$\leq N*2M$ bps	$\leq 5ms$	$< 100\mu s$	TDM隔离(接口级)	99.99 99%
3	生产采集	行业场景物联网数据采集等	局域/城域/广域：确定性时延+大连接+低速	$\leq N*2M$ bps	$\leq 50ms$	—	软隔离	99.9%
4	生产监控	行业场景生产和安全视频监控等	局域/城域/广域：确定中等带宽+确定中等时延	$\leq N*50M$ bps	$\leq 20ms$	$< 5ms$	软隔离	99.99 9%
5	AR/VR高体验视频	行业AR/VR辅助、消费类AR/VR、高体验云游戏和云直播	局域/城域/广域：确定性大带宽+确定性低时延	$\leq N*100M \sim 1G$ bps	$\leq 3ms$ (高体验)	$< 10ms$	软隔离	99.99 9%
6	视频AI	行业场景机器视觉和高清质检等	局域/城域/广域：确定性大带宽+低时延抖动+高可靠	$\leq N*100M$ bps	$\leq 10ms$	—	软隔离	99.99 99%
7	关键控制类	电网物理隔离类：差动保护等，行业涉及生命安全的关键控制类	局域/城域/广域：超高可靠和隔离	$\leq N*100M \sim 1G$ bps	$\leq 3ms$ (高体验)	$< 10ms$	TDM隔离(通道级)	99.99 99%
8	精准测量定位	高精度基站室内定位、十米和米级定位和授时	超高精度时间同步	承载网为基站或业务系统提出百纳秒级超高精度时间同步，如电网PMU业务，承载网为基站提供1us备用时间同步，基站通过空口授时实现业务终端同步。				

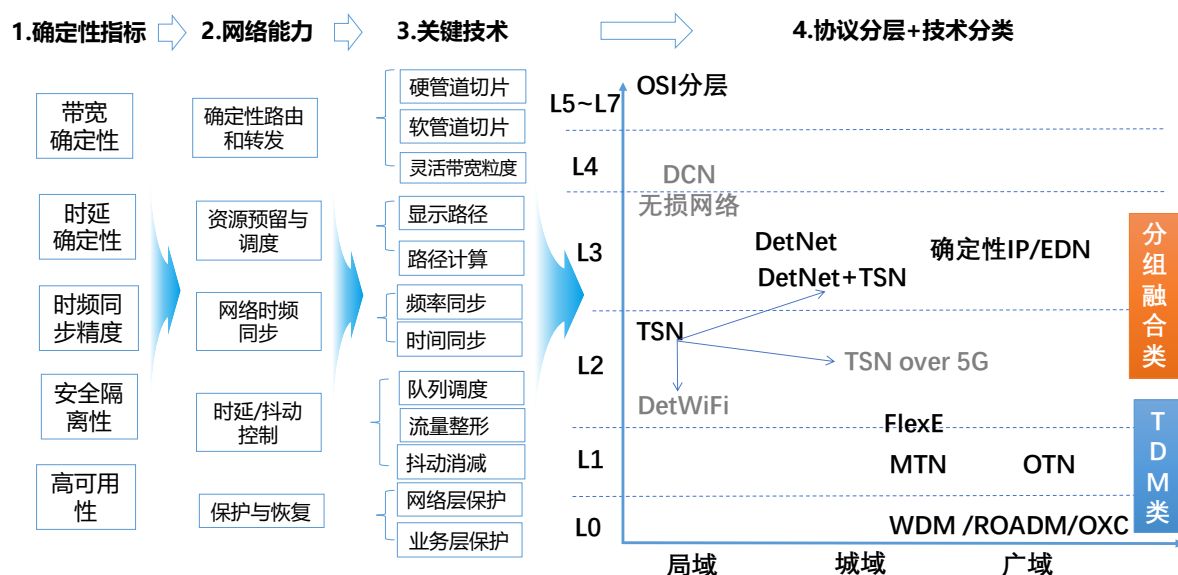
来源：中国信息通信研究院

总体分析，在云化应用和远程控制场景下，城域/广域确定性承载需求

初步呈现，时延/抖动确定性和高可靠性指标严苛。不同场景的确定性承载需求呈现差异。工业控制类场景对时延/抖动确定性和高可靠性需求显著；基于 AR/VR 高体验视频场景对带宽和时延确定性提出要求；针对电网生产控制大区 and 行业涉及安全生产的关键控制业务呈现了 TDM 硬隔离和超高可靠性需求；面向视频 AI 场景的机器视觉和高清质检应用提出了低时延抖动、大带宽和高可靠的确定性需求。

（三）分组和 TDM 技术融合演进，打造多层多域技术体系

L0~L3技术协同发展构建多层多域确定性承载技术体系。确定性承载技术以5个确定性关键指标需求为驱动，通过不同的技术机制和能力组合应用，最终实现了覆盖多层多域网络的确定性承载技术体系（见图 4）。基于不同技术实现机制，可分为分组融合类和TDM类；遵循协议分层架构涉及L0~L3层网络技术；依据网络覆盖能力包括面向局域、城域和广域的技术方案。

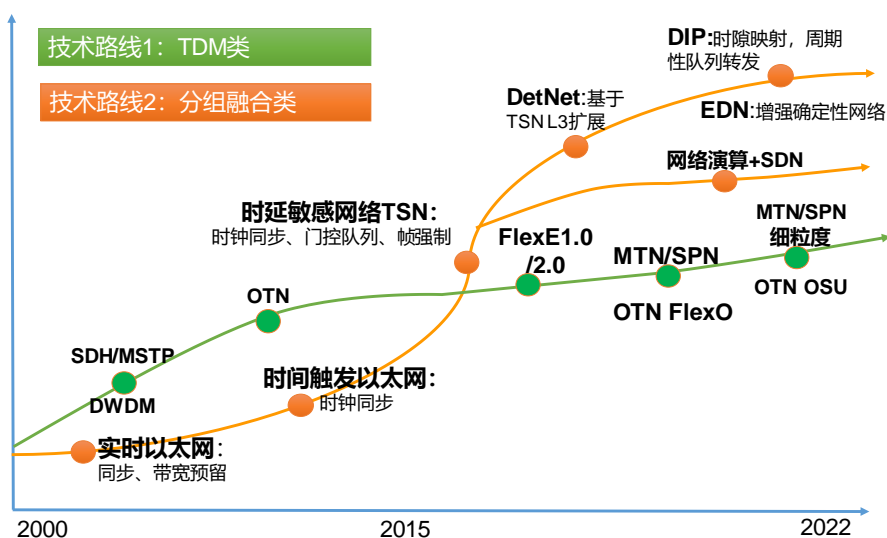


来源：中国信息通信研究院

图 4 确定性承载技术图谱

确定性承载按照 TDM 和分组融合两类技术不断演进，构建了多层多域的确**定性承载技术体系**（见图 5）。分组和 TDM 技术相互借鉴且不断融合，寻求资源利用率与网络性能间的平衡。

TDM 类技术主要包括了工作在 L0 层的 WDM/ROADM/OXC 光波长、L1 层的光传送网（OTN）的 ODU_{kj} 等各级通道、城域传送网（MTN）层网络（包括 MTNS 和 MTNP，属于切片分组网络（SPN）的一个层网络）和灵活以太网（FlexE）接口技术。其中，WDM/OTN 和 ROADM/OXC 主要是面向城域和广域的高速光互联场景；MTN 主要面向城域场景的 5G 回传和专线承载等应用，MTN 技术兼具分组转发灵活性和 TDM 通道隔离优势。FlexE 技术可应用于城域或广域场景提供以太网接口上的时隙硬隔离承载；**分组融合类技术**是在原有分组转发机制中引入 TDM 机制，实现确定性能力。最典型的技术包括工作在 L2 层 TSN 技术，其主要面向局域应用范围实现音视频、工业控制和移动前传等确定性承载。同时，L3 的 IP 网络也融合或借鉴 TSN 开展技术创新和应用扩展，已涌现出 DetNet、确定性 IP（DIP: Deterministic IP）和增强确定性网络（EDN: Enhanced DetNet）等技术。DetNet 是由 IETF 规范的可支持跨域 TSN 网络互联的技术架构，目前已发布了工作在 L3 层 IP/MPLS 等数据面的基础架构和技术要求。确定性 IP 技术通过采用循环周期调度等机制实现 IP 网络内确定性和非确定性业务的混合承载。EDN 通过 TDM 时隙化队列和调度等机制增强了大规模确定性网络能力。目前，确定性 IP 和 EDN 均在 CCSA 开展标准化工作。



来源：中国信息通信研究院

图 5 确定性网络技术发展历程

三、确定性承载技术进展分析

（一）园区确定性逐步成熟，广域确定性取得阶段性突破

随着园区网络确定性技术的日趋成熟，TSN 和 5G 园区虚拟网逐步走向商用。园区确定性网络主要的应用场景是工业互联网中的设备内或车间级的集中/远程控制。TSN 作为 IEEE802.1 标准化的技术方案，用于解决以太网二层网络的确定性时延和丢包问题。TSN 通过一系列协议标准实现零拥塞丢包的传输，提供有上界保证的低时延和抖动。为了实现园区确定性网络，TSN 支持基于 IEEE802.1AS 规范的 gPTP 精确网络时间同步机制，具备调度不同优先级流量的整形控制、资源预留和时间敏感流量的配置能力。目前，面向园区的 TSN 交换机产品逐渐丰富，已经有多款交换机完成了工业互联网产业联盟（AII）组织的互通测试。

随着 5G 技术的发展，目前 5G+TSN 已成为业界研究的焦点。5G+TSN 主要指 5G 网络与 TSN 系统在技术方案上的融合创新以及在工业控制领

域的协同部署，主要包含 TSN Over 5G uRLLC、TSN 用于 5G 前传以及 5G 作为 TSN 系统网桥三种技术方案。国际上，高通、爱立信、英特尔和诺基亚等纷纷开展相关技术与部署方案的研究。国内三大运营商和中国信息通信研究院也积极开展 TSN Over 5G uRLLC 测试平台的建设与应用方案的验证。

广域确定性承载技术主要应用于工业远程控制、云化监控/检测以及政企专线等场景。以 OTN/WDM、SPN/MTN 为代表光传输网络技术天然具备广域和城域范围的确定性承载能力。以 DIP、DetNet 和 EDN 为代表的 L3 层 IP 技术正积极开展广域确定性的有益探索，并实现了广域确定性能力的阶段性技术突破。DIP 技术创新性的提出了基于 SRv6 的指定周期排队转发方案。该方案在调度上通过时隙映射、周期性排队转发方式实现了时延抖动的精准控制。DIP 技术可以保证在最差情况下的端到端时延的有界，且最差时延抖动仅为两倍转发周期。现阶段，典型的最小转发周期为 10us。确定性网络（DetNet）在架构层面为网络提供了一种低丢包率、有界端到端延迟的数据流传输能力，用于承载实时的单播或多播数据流。EDN 通过增强 DetNet 架构和方案支持大规模和跨域的确定性承载方案，目前已经在 CCSA 立项开展研究。综合分析，DIP/EDN 正处于标准研制和技术验证阶段，在应用方面尚无商用案例，已开展规模实验网的测试验证，但仍需在复杂流量模型和组网拓扑下，继续推动大规模、全场景的确定性业务承载能力的全面试验验证。

面向工业制造等场景，实时高可靠成为必选项。5G+TSN 工业控制等场景除了对确定性时延抖动有严格要求，还通常要求网络的高可靠性，即

要求网络提供实时高可靠能力。传统保障可靠性的方法是双发选收，然而此类技术在保证可靠性的同时，也引入了新的问题，即同一报文会通过两条路径发送，然后在出口网关（或者中间某些网络设备）上进行去重和排序。当路径较远或者跳数较多的时候，两条路径之间会存在较大时延差（ms级），因此需要占用网关设备较大的缓存资源来执行去重和排序。在缓存资源受限情况下，会极大影响网络的接入能力。基于 DIP 等技术，可以在短路径上进行主动的周期延迟以进行时延补偿，从而减小甚至消除双路径之间的时延差，减小网关设备的缓存压力。

（二）技术标准化多层面推进，不同技术成熟度存在差异

聚焦不同场景，多个标准化组织并行开展确定性承载技术研究。面向数据中心互连需求，OIF 拓展以太网物理接口支持 L1 的 TDM 时隙技术，提出 FlexE 系列标准。目前，FlexE IA 系列标准已覆盖 50GE/100GE/200GE/400GE 接口速率，并扩展支持时间同步、设备发现/管理功能及以太网/OTN 的互通模式（见

图 6）。



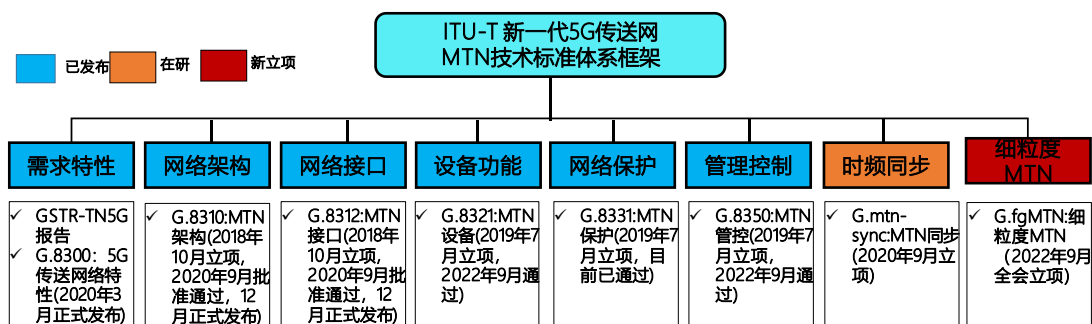
来源：中国信息通信研究院

图 6 OIF FlexE 系列标准研制历程

满足 5G 承载和行业专线确定性需求，MTN（城域传送网）成为 ITU-T SG15 的新型传送技术标准体系。目前已经完成 MTN 架构（G. 8310）、MTN 接

口（G. 8312）、MTN 设备功能（G. 8321）、MTN 管控（G. 8350）和 MTN 保护（G. 8331）系列标准的研制和发布。在 2022 年 9 月的 SG15 全会上,我国牵头推动的 MTN 细粒度到 MTNP 服务层的映射技术(G. fgMTN)已成功立项(见来源：中国信息通信研究院

图 7), 在 2023 年 4 月全会取得了技术方案的重大进展, 预计在 2023 年 11 月提交批准通过。

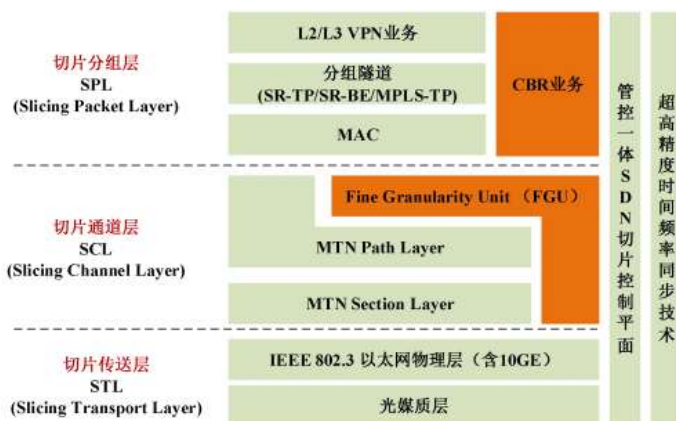


来源：中国信息通信研究院

图 7 ITU-T MTN 系列标准研制

MTN 是 SPN(切片分组网络)的切片通道层技术方案。MTN 技术扩展了 FlexE 接口的 N×5GbpsTDM 时隙复用机制, 将业务在 SPN 节点内部直接根据 L1 层的 TDM 时隙进行映射、复用、交叉和转发, 并增强了通道层的告警和性能检测等运营管理维护(OAM)能力、50ms 电信级网络保护机制, 提供类 SDH 安全隔离、低时延、低抖动和高可靠的确定性能力(见来源:切片分组网络(SPN)细粒度承载技术要求

图 8)。



来源：切片分组网络（SPN）细粒度承载技术要求

图 8 CCSA TC6 SPN 网络分层架构

OTN 技术具备高速率、大带宽、硬隔离和低时延抖动的确定性承载能力。目前，细粒度 OTN（fgOTN）技术正在 ITU-T SG15 开展技术标准化工作。通过将 PDH、SDH 和以太网等不同类型的低速率（Sub1G）客户业务封装映射到 fgOTN 容器，然后复用到 OTN 的 ODUkflex 服务层实现对多种业务的统一承载，并支持复用到单波长 100G/200G/400G 及以上速率实现高效传输。OTUCn 或 FlexO 技术通过特定的帧格式处理，用 N×100G 接口实现超 100G 信号的传输。fgOTN 技术突破了现有 OTN 的 1.25Gbps 时隙限制，采用新型帧结构对现有 ODUk 净荷进行划分，支持小于 1G 速率业务的确定性承载。

面向工业以太网场景，IEEE 802.1 标准任务组制定 TSN（时延敏感网络）技术标准。TSN 系列标准已基本成熟，2018 年已发布的 IEEE 802.1 标准体系中包含了时间同步、转发时延控制、业务可靠性及资源管理共四个 TSN 通用标准组件(见图 9)。目前，正在制定 802.1ASds 半双工以太网同步能力、802.1ASdm 时间同步主备保护、802.1Qdd 资源分配协议和 802.1Qdj 配置增强等技术标准。近期，IEEE 802 工作组正在结合 TSN 技术与典型应

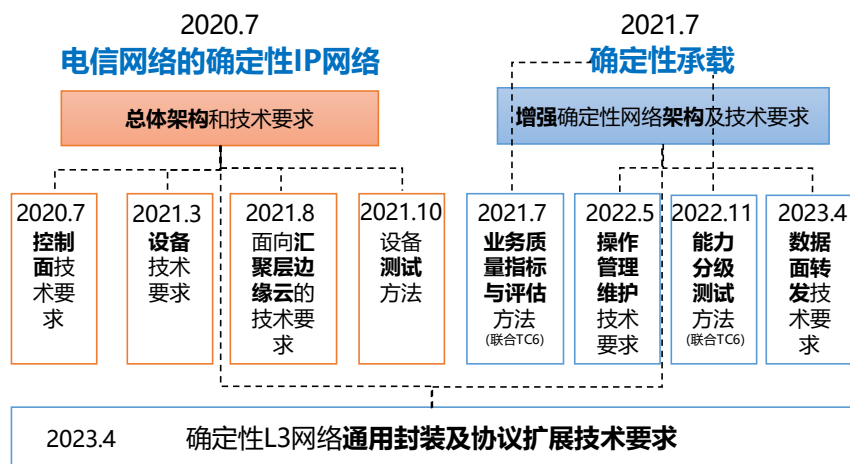
用场景制定相应的 TSN 应用配置, 包括 TSN 应用到前传场景的 IEEE 802. 1CM 2. 0、基于 TSN 车联网应用的 IEEE 802. 1DG 及针对航空应用的 802. 1DP/SAE AS6675 等。此外, IEEE 802 工作组与 3GPP、IETF 共同推进了 5G over TSN、TSN 和 DetNet 网络互通等技术方案的标准化工作。



来源：中国信息通信研究院

图 9 IEEE 802.1 TSN 系列标准

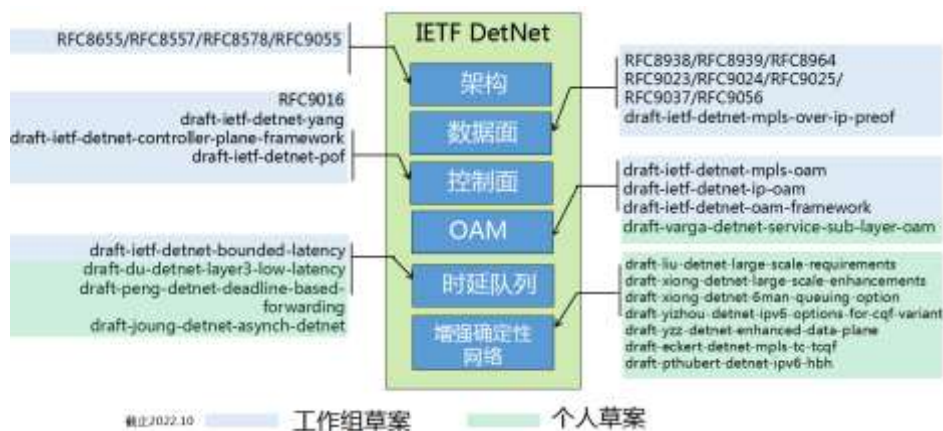
面向广域长距离确定性应用需求, CCSA TC3 开展了电信网络的确定性 IP 网络和确定性承载技术标准的研究。CCSA TC3 于 2020 年开始制定电信网络的确定性 IP 网络 (DIP) 系列行业标准。目前, 相关的标准涉及到 DIP 总体架构和技术要求、控制面技术要求、DIP 设备技术要求及设备测试方法等。近期, CCSA TC3 联合 TC6 开启了确定性承载相关标准研制工作, 包括确定性承载业务质量指标与评估方法以及测试方法等标准。现阶段, CCSA TC3 电信网络的确定性 IP 标准已陆续报批, 确定性承载标准仍处在起步阶段 (见图 10)。



来源：中国信息通信研究院

图 10 CCSA TC3 确定性相关标准

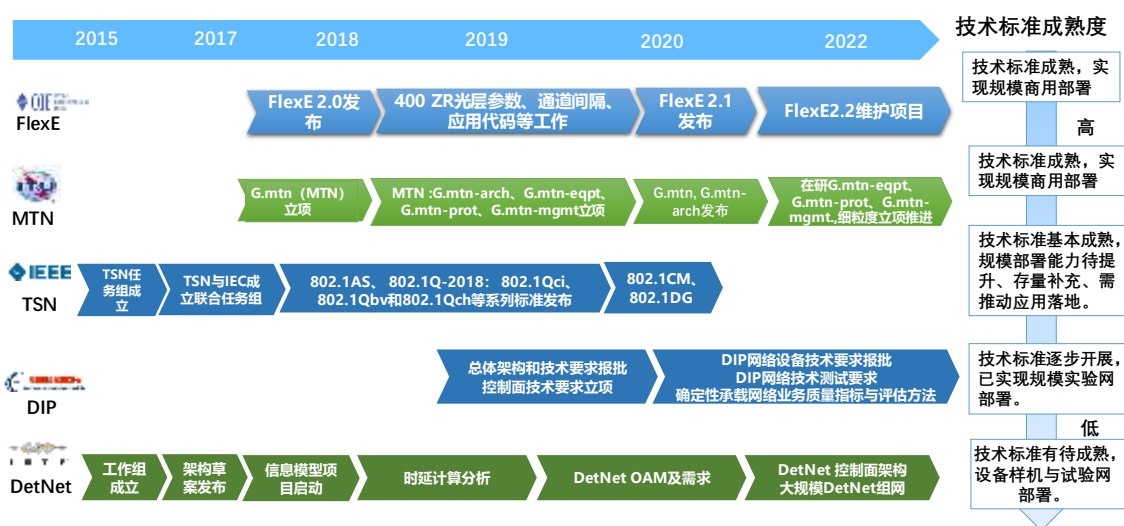
针对广域确定性场景，IETF DetNet 工作组研制 L3 层确定性网络技术。2015 年互联网工程任务组（IETF）创建了 DetNet 工作组。目前，DetNet 已确立标准体系框架，并制定完成架构、用例、安全、信息模型和 IP/MPLS 及 TSN 互通相关数据面等标准。现阶段，工作组重点开展 DetNet OAM 和管控面的标准化。近期，IETF DetNet 已将大规模组网需求及相应的队列技术增强内容列入工作组计划，DIP/EDN 架构、数据面和控制面技术相关标准将成为后续 IETF DetNet 工作组和 CCSA TC3 的新热点（见图 11）。



来源：中国信息通信研究院

图 11 IETF DetNet 系列标准

多个组织并行开展标准制定，不同确定性技术的标准化成熟度存在差异（见图 12）。TDM 时隙化是业界共识的确定性转发方案，包括 ITU-T 规范 SDH、OTN 和 MTN 技术以及 OIF 规范的 FlexE 接口技术。FlexE 和 MTN 技术标准发展成熟，在 5G 承载场景已实现规模商用部署；TSN 技术标准基本成熟，产业成熟度和规模部署能力仍有待提升。TSN 相关的芯片研发、设备测试、推广及产品认证工作正在有序开展；确定性 IP/EDN 技术正在 CCSA TC3 进行标准化，目前已开展了广域场景下的试验网测试，但无商用案例；IETF DetNet 的 L3 确定性技术标准有待深化研究，面向大规模场景的增强 DetNet 成为新兴热点。



来源：中国信息通信研究院

图 12 确定性网络系列标准对比分析

(三) 分组队列技术创新，推动确定性能力逐步提升

确定性网络应用场景的不断扩展，驱动分组队列技术持续演进。分组队列技术是分组架构基于排队服务模型的关键组件，是支持确定性时延和抖动的基础。按照是否需要时间同步机制划分，分组队列包括同步队列和异步队列两种类型。各类分组队列技术特性的对比分析如表 2 所示。

表 2 各类分组队列技术特性的对比分析表

队列技术	队列类型	技术特性	时延/抖动能力	时频同步要求	时隙/周期特性	网络范围	管理与配置复杂度
CBS	异步队列	<ul style="list-style-type: none"> 基于信用整形 平滑流量特征,降低突发拥塞 两类确定性流: classA和classB 	<ul style="list-style-type: none"> 结合网络演算,保障时延上界; 抖动不可控 	<ul style="list-style-type: none"> 无要求 	<ul style="list-style-type: none"> 无 	<ul style="list-style-type: none"> 局域(TSN) 	<ul style="list-style-type: none"> 一般
TAS	同步队列	<ul style="list-style-type: none"> 入口流量整形 出口门控队列 	<ul style="list-style-type: none"> 可实现“绿灯调度” 对极关键业务提供极低时延保障 	<ul style="list-style-type: none"> 802.1AS 全网时间同步 	<ul style="list-style-type: none"> 不等长时隙 	<ul style="list-style-type: none"> 局域(TSN) 忽略链路时延 	<ul style="list-style-type: none"> 复杂度大,需配置门控开关
CQF	同步队列	<ul style="list-style-type: none"> 基于时间周期转发, 前后跳周期映射, 	<ul style="list-style-type: none"> 网络时延由周期确定, 抖动受周期限制, 低时延特性较差 	<ul style="list-style-type: none"> 802.1AS 全网时间同步 	<ul style="list-style-type: none"> 等长周期 	<ul style="list-style-type: none"> 局域 忽略链路时延 	<ul style="list-style-type: none"> 简化调度和配置
TCQF	异步队列	<ul style="list-style-type: none"> 周期转发 邻居周期映射 	<ul style="list-style-type: none"> 网络时延由周期确定, 抖动受周期限制,理想情况为2倍周期 	<ul style="list-style-type: none"> 频率同步 异步队列 	<ul style="list-style-type: none"> 等长周期 	<ul style="list-style-type: none"> 局域/广域 	<ul style="list-style-type: none"> 简化调度和配置
CSQF	异步队列	<ul style="list-style-type: none"> 业务流与周期映射采用SRv6 SID 集中调度编排 	<ul style="list-style-type: none"> 网络时延由周期确定, 抖动受周期限制,理想情况为2倍周期 	<ul style="list-style-type: none"> 频率同步 异步队列 	<ul style="list-style-type: none"> 等长周期 	<ul style="list-style-type: none"> 局域/广域 考虑链路时延 	<ul style="list-style-type: none"> 控制器集中计算
帧抢占	异步队列	<ul style="list-style-type: none"> 降低非确定性流长帧阻挡时间 	<ul style="list-style-type: none"> 提升关键业务时延抖动 克服保护带影响 	<ul style="list-style-type: none"> 无 	<ul style="list-style-type: none"> 无 	<ul style="list-style-type: none"> 无 	<ul style="list-style-type: none"> 无

来源：中国信息通信研究院

聚焦局域确定性需求，信用整形（CBS）和时间感知整形（TAS）成为 TSN 交换机的主流队列技术。IEEE802.3Qav 规范了 CBS 技术机制，CBS 采用了基于信用整形队列机制，将需要优先调度的时间敏感业务分为 class A 和 class B 两类。由于 CBS 未涉及抖动控制机制，且时延随跳数累计，因此不适用在大规模网络中使用，也无法满足低时延低抖动确定性业务需求。为此，IEEE802.3Qbv 提出了适配工业互联网业务模型和承载需求的 TAS 队列技术。TAS 采用了基于严格时间同步的门控队列调度机制，实现对关键业务的“路灯转发”。为避免低优先级数据对高优先级数据帧传输的影响，TAS 引入了保护带（Guard Band）机制，即在高优先级业务数据帧窗口开启之前需要预留一段保护带时长。当保护带到达时，可以继续传输正在传输的数据帧，但不可以开始传输新的数据帧。为了简化 TAS 中门控开关和业务帧特性等配置的复杂度，CQF 技术机制应运而生。与 TAS 相同，CQF 需支持全网时间同步，但其提出了双队列的门控调度机制。不同于 TAS，CQF 仅对两个数据缓冲队列的出入口进行门控，控制两类流量的存储与

转发过程。因此，大大简化了队列控制和配置复杂度。

扩展城域和广域确定性应用，循环周期队列技术不断发展演进。TAS 和 CQF 均假设传输链路零时延，通过严格的全网时间同步实现不同站点的周期对齐。在大规模组网场景下，光纤链路的时延不容忽视。显然，TAS 和 CQF 均无法直接应用城域和广域网络。在现有队列技术的基础上，TCQF/CSQF 结合 IPv6/SRv6 封装提出了面向城域和广域网络的确定性技术方案。TCQF/CSQF 在队列机制上与 CQF 相同，但是放宽了对时间同步的要求，业务流与周期映射可采用 IPv6 扩展头部和 SRv6 SID。CSQF 在异步周期的情况下，通过增加额外的容忍队列来解决异步周期边界对齐的问题，但是会带来多周期队列管控的复杂性。EDN(Enhanced DetNet Network) 通过增强 DetNet 的部分管理和控制面功能，解决现有大规模确定性队列机制的问题。

面向城域和广域应用场景，纯异步确定性技术成为未来的研究方向。

上述 TCQF、CSQF 等以循环周期队列为核心的技术，仍然存在着对设备时钟特性的约束，要求设备间严格的高精度时间同步，通常需要基于 IEEE-1588v2 的 PTP 实现高精度时间同步或结合高精度同步以太等频率同步技术支撑。在面向城域和广域应用场景下，该约束在增加设备成本的同时，也引入了额外的系统复杂性。时钟系统的稳定性、安全性、高精度时频同步传输链路的规划设计和性能监测等都会影响确定性网络本身。为彻底消除对时钟系统的依赖和限制，业界开始探索纯异步的确定性调度机制，把沿途各站点面向周期映射的调度改为相邻节点时间差对齐的方式，可以弱化面向连接的弊端，典型如 TSN ATS、Damper 等技术。TSN ATS 技术在

设备上维护逐流状态，通过聚合队列调度，计算每个报文的发送时间，达到逐流整形的效果。但其需要逐报文的更新流状态信息，相对复杂。**Damper** 是学术界提出的一种思想，通过下游设备对报文进行时延补偿，来保证同一流内每个报文经历的时延逐跳严格相等，从而避免突发累积，实现端到端确定性。该技术无需核心设备维护主流状态，实现简单，前景更好。

针对不同网络规模和业务流量特性，目前有多多样化的队列技术，缺乏统一的指标体系衡量其功能和性能。随着确定性网络技术的发展，端到端确定性业务会涉及跨多域应用场景，存在不同域的确定性技术对接互通问题，目前缺乏相应的协同互通机制及相应的测试验证研究。

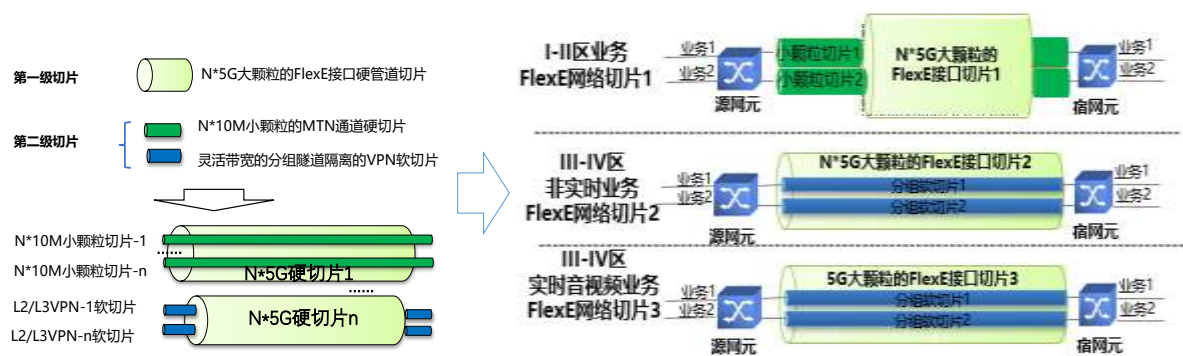
(四) TDM 细粒度技术加速推动，支撑高安全隔离应用

SPN 和 OTN 细粒度技术采用类 SDH 的 TDM 机制，实现确定性业务硬隔离承载。行业专网的确定性承载需求主要特征为小颗粒度、高可靠性和高安全隔离。通过在大颗粒通道内嵌小颗粒的多级切片，SPN 的 fgMTN 和 OTN 的 fgOTN 技术构建端到端高效、无损、灵活可靠承载方式，支撑金融、政企客户和行业专网对高安全隔离、带宽保障和低时延抖动的业务应用。

SPN 支持多颗粒硬切片，为行业提供切片分级应用。SPN 基于 MTN 接口 5G 时隙扩展 $N \times 10\text{Mbps}$ FGU 封装，实现两级颗粒的硬软切片能力（见来源：中国信息通信研究院

图 13)。第一级切片提供 $N \times 5\text{Gbps}$ 大颗粒的 FlexE 接口硬管道切片；第二级切片提供 $N \times 10\text{Mbps}$ 小颗粒的 MTN 通道硬切片和基于分组隧道隔离的 L2/L3 VPN 软切片（见图 13）。以电力行业专网方案为例，生产控制

类 I 区、非控制类 II 区、信息管理 III/IV 区业务间通过 N×5Gbps 硬管道切片实现大区业务大颗粒硬管道隔离。在电力 I/II 区内的各业务间采用 N×10Mbps 的专用 MTN 通道切片承载生产控制类业务。在电力 III/IV 区内的各业务间部署点到点以太网透传专线或基于 MPLS-TP 隧道的软切片专线。



来源：中国信息通信研究院

图 13 SPN 两级切片架构和行业应用方案

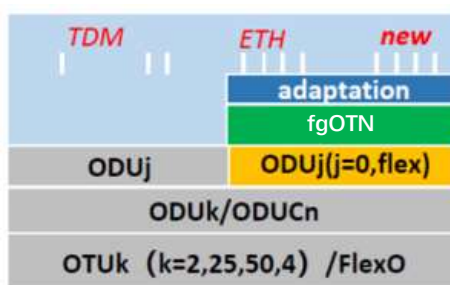
SPN 两级硬切片方案显著优化时延和抖动性能。适配工业场景控制类业务的确切性承载需求，SPN 设备已实现微秒级的时延和抖动、纳秒级高精度时间同步和 99.9999%可靠性保证能力。N×5Gbps 和 N×10Mbps 通道通过配置专用确定的时隙保证严格 TDM 隔离和带宽确定性。中间节点直接进行 TDM 时隙交叉，不感知业务报文信息，从而保证确定性的低时延和抖动。相较于传统分组网络的软隔离技术，MTN 通道硬切片的节点抖动都有 10 倍以上的优化（见表 3），并可同时满足电网关键控制类业务确定性低时延抖动和高安全隔离的需求。目前 SPN 已实现在电力、轨道交通、金融、医疗、港口、矿山等多行业应用示范项目。

表 3 各类硬软切片技术性能对比分析表

SPN网络切片的资源隔离类型	隔离机制	单跳时延 (不拥塞)	抖动 (拥塞)	切片带宽	资源隔离
VPN+QoS软隔离切片	隧道级和队列隔离	20~50us	100us~ms量级	带宽灵活可配置	中
FlexE/MTN接口硬隔离切片 +节点内分组交换	接口时隙隔离	20~50us	100us	N*5G	较高
MTN接口+节点内 MTN通道交叉的硬隔 离切片	端到端通道隔离	5G或1G颗粒 3~10us	10us	N*5G/1G	高
10M 小颗粒		~25us	10us	N*10	

来源：中国信息通信研究院

通过简化帧映射复用层级，fgOTN 实现小颗粒业务低时延和灵活高效承载。为了高效承载 1G 以下小颗粒业务，OTN 小颗粒（fgOTN）技术突破了现有 OTN 的 1.25Gbps 时隙限制，采用更小颗粒度的帧结构对现有 ODU_k 净荷进行划分，可支持小于 1G 业务速率的业务承载，支持到 Mbps 级别颗粒（见图 15）。fgOTN 技术引入以 10Mbps 为颗粒的帧结构，实现多种颗粒业务的接入和硬切片传输。



来源：中国信息通信研究院

图 14 fgOTN 映射复用结构

(五) 智能计算编排多维增强，满足差异化确定性需求

确定性业务的多维 SLA 承载需求推动多因子智能算路机制发展。根据不同确定性应用场景和不同等级 SLA 需求指标要求，确定性网络路径计算从单一的带宽、时延演进到支持基于业务类型、资源、时延、抖动、丢包和可靠性等多维 SLA 指标（见表 4）。确定性业务的多因子路径计算和编排，要求网络控制器必须具备智能化编程控制能力，支持多维算路因子的灵活组合，以满足确定性业务的多维 SLA 承载需求。

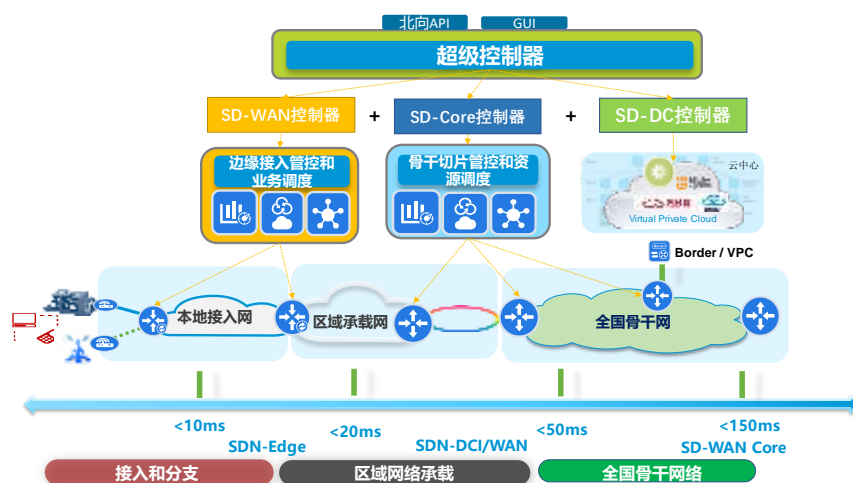
表 4 确定性业务的多维 SLA 承载需求表

服务类型	算路因子	算路规划
性能SLA	带宽	每条通过的链路的剩余带宽应大于或等于它，剩余带宽可以通过保留带宽或实时计算带宽
	时延	通过的所有链路的实时时延之和在时延约束范围之内，范围可以是最小时延、阈值等
	丢包	端到端路径的实时丢包率不应大于阈值。
	Cost	通过的所有链路的cost/TE Metric之和不应大于Cost限制
	跳数	通过的链路数不应大于跳数限制
	连接数	路径末端承载连接数不超过阈值
	负载分担	路径末端带宽使用率不超过阈值
可定制SLA	亲和属性	每条通过的链路admin group应与亲和性约束一致
	显式路径	LSP路径必须按顺序通过显式包含路径中的链路或节点，不能通过显式排除路径中的链路或节点
	规避路径	LSP路径必须不经过指定的链路或节点
	必经路径	LSP路径必须经过指定的链路或节点
	双向共路	当使能双向共路时，正反向两条LSP路径完全相同
	LSP路径锁定	灵活地控制LSP路径在链路断开/恢复时是否返回原始路径
	切片	LSP路径仅使用特定切片拓扑中的链路或节点，支持Flex-Algo
可靠性SLA	链路可用度	每条通过的链路的链路可用度不应大于阈值
	HSB	使能HSB时，同时创建主备LSP
	SRLG	使能分离路径时，主备LSP路径不应运行在同一组SRLG中的链路上
	分离路径	主备路径应尽可能在链路、节点和SRLG中分离

来源：中国信息通信研究院

算力网络和云原生架构的兴起打破云网边界，加速全域端到端算路能力提升。云原生架构的兴起导致了高度动态的应用程序网络环境，算力网络的出现打破了云网边界。新兴业务 SLA 需求不再局限于单个网络或单个云，确定性网络控制器必须具备端到端路径计算能力，支持跨云、跨网和跨域的全域路径计算和选路能力（见图 15）。域内控制器通过 BGP-LS、SNMP、Telemetry 协议实时搜集网络拓扑，采用 SR-TP、SR-TE 隧道和 SR Policy 实现域内路径的确定性。跨域的控制将路径计算任务按域分解映射到各域内控制器，通过粘连标签（BSID）实现端到端路径拼接。另一方面，复杂业务特性和多样化调度需求要求控制器具备云网资源动态优化和闭环控制能力。确定性网络中业务不断迭代发展，潮汐业务、突发业务、长时业务等多类型并发承载，资源调度的需求涉及网络拓扑、时隙队列、时延抖动、带宽等诸多变化因子。网络控制器需从时间、空间上持续评估

网络，支持从感知、计算、测量评估到优化的闭环控制，实现云网业务和时隙路径的全生命周期自动化控制和全局调优。

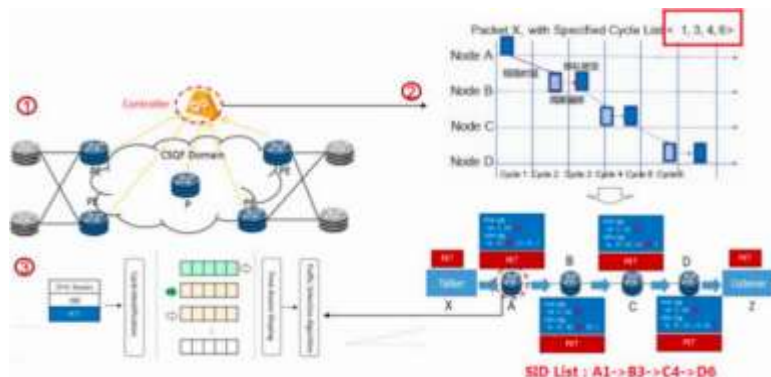


来源：中国信息通信研究院

图 15 确定性网络跨域管控系统结构图

时隙动态编排支撑实现多队列和时间周期约束条件下的路径确定性。

传统流量工程的路径计算支持基于时延、带宽、丢包等约束条件，确定性转发额外引入时间周期和多队列等约束条件。确定性网络控制器需感知全网拓扑，通过高性能带内 OAM 发起网络性能测量，实时获取时延抖动数据；基于网络拓扑、多级队列和队列深度计算转发路径，通过 SRv6 SID 编码时隙周期，SRv6 SID List 控制时隙路径，实现确定性时隙和路径资源的动态调度（见图 16）。



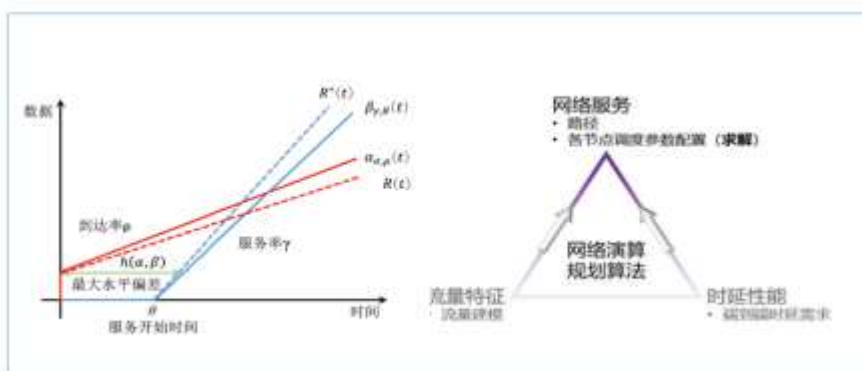
来源：中国信息通信研究院

图 16 确定性网络时隙动态编排系统

(六) 网络演算技术有待推进，实现确定性时延可承诺

网络演算通过业务时延上限仿真，可实现确定性 SLA 指标的闭环可承诺。网络演算是通过对业务流量特征（业务到达曲线）和网络服务能力（网络服务曲线）的建模，采用数学计算方式推导出业务流在网络中的端到端最大时延，最终输出网络对该业务所能承诺的确定性服务性能。因此，网络演算的 3 大关键机制包括流量建模、服务建模和上限计算/网络规划算法(见图 17 来源：中国信息通信研究院

图 17)。相较于传统排队论，网络演算侧重于端到端性能描述，非常适用于确定性的时延和抖动保障需求；相比机器学习，网络演算模型更具解释性。网络演算的应用主要包括两类场景：一是确定性业务 SLA 指标预评估，该场景基于现有的网络能力和配置参数，仿真出确定性业务上限后的最差性能指标；二是基于 SLA 指标给出 QoS 参数配置和队列调度策略建议，该场景是一个反过程，是基于业务指标去推导出满足业务 SLA 的配置和策略；通过正向评估和反向建议，可支撑实现确定性业务 SLA 的闭环可承诺。



来源：中国信息通信研究院

图 17 网络演算技术原理示意图

网络演算技术发展仍处在实验仿真阶段，业务精准建模和仿真算法优化面临挑战。精准业务建模是影响网络演算应用效果的关键因素。现阶段，高精度现网流量监测和建模仍是业界的难题。现网业务流量流向复杂、流量监测颗粒度和海量监测数据处理分析等都制约了高精度实时监测系统的应用发展。在算法方面，网络演算包括随机网络演算和确定性网络演算两大类。确定性网络演算采用了确定性排队理论。通常情况下，通过预留冗余网络资源实现性能保障，因此网络利用率不高（低于 20~30%）；随机网络演算引入概率论，可提升网络利用率，但 SLA 保障不是 100% 覆盖。如何实现在网络成本与服务质量保障间的均衡成为网络演算规划算法优化的方向。目前，业界已开展了网络演算结合队列调度策略的应用尝试，但基于大规模和在线业务建模的网络演算仍处在实验仿真阶段。可以预见，网络演算技术未来可期，它将成为大规模确定性网络和高等级自治网络实现的使能技术之一。

(七) 异构协同调度未来可期，助力端到端确定性承载

构建端到端确定性需网络架构和协同技术的联合创新。跨域流标识匹配、异构队列转发协同、端到端网络调度架构和资源编排等机制成为重点研究方向。端到端确定性承载将会涉及局域、城域和广域的多层异构组网。在工业互联网应用场景下，工业内网和工业外网的异构确定性技术需要协同对接。由于局域和广域确定性网络在队列门控、周期映射、时隙周期大小及队列数、时钟同步等技术和设计上的异构性，不具备端到端调度的可行性，无法满足工厂互联、远程工控等跨域确定性应用的需求；此外，多

层确定性架构设计和跨域资源协同调度等问题还未得到充分研究，融合局域和广域网络以实现跨域资源调度的确定性存在巨大挑战。

分层分域管控架构成为目前相对简单有效的跨域调度方案。分层分域的确定性调度架构可包括多域控制器、单域控制器和局域网控制器组成。局域控制器处理局域网中（如 TSN）的时间敏感流量，并负责时间敏感流量的门控转发控制和计算；单域控制器完成广域网（如 DIP/DetNet/EDN/MTN）的单域内 FlexE/MTN 切片、SRv6 策略、SID 标签计算和带宽预留分配。多域控制器主要实现跨域业务的时延指标分解预估、全局路径计算及资源编排等。多域控制器不仅收集全局信息，还实现单域控制器之间特定指令的传输和控制。**为满足中长期技术演进需求，建议构建异构资源抽象建模、确定性路由和确定性业务感知的系统化跨域管控架构。**资源抽象层完成 L0~L3 技术和资源的确定性关键能力抽象建模；确定性路由层根据业务确定性承载需求匹配不同域、不同层的确定性技术；确定性业务感知层实现业务确定性 SLA 需求感知，并映射为承载网能识别的转发标识和优先级等策略配置。

跨域流标识和周期对齐机制实现异构网络时隙周期的映射匹配。局域确定性网络（如 TSN）采用时间同步，广域确定性网络（如异步 TCQF/CSQF）采用频率准同步（基于高精度节点时钟和相邻节点间的相位差信息）。通过在跨域边缘设备进行流量整形，通过控制器配置时隙绑定策略或转发设备自动偏移映射实现跨域流标识匹配，将二层链路层的标识信息封装为三层 IPv6 标识，把局域网的到达时隙转换到广域的周期调度标识，解决跨域确定性流调度标识匹配问题。

四、确定性承载评测方法研究

（一）从场景到业务和网络，逐步推进评测体系构建

确定性承载测评方法的研究遵循了从“典型场景”推导“业务和承载指标”、再匹配“技术和网络能力”的研究思路，最终构建了适配确定性业务需求和技术特性的评测体系（见图 18）。2020 年，依托 IMT-2020 5G 承载工作组的研究项目，重点梳理了 5G+垂直行业的典型确定性承载场景和业务端到端 SLA 指标。2021 年，系统化提出了确定性承载内涵和技术体系，并基于业务 SLA 指标制定了承载指标的分解原则，初步形成了一维五级的承载 SLA 分类分级方法。2022 年，深入开展了确定性承载共性关键技术研究，结合确定性技术、网络能力特性和试验网测试数据，最终形成了面向业务和网络的二维五级确定性评测体系。



来源：中国信息通信研究院

图 18 确定性承载评测体系构建

针对确定性承载评测体系研究中的难点问题，本报告重点开展了承载指标分解方法和典型确定性技术指标特性的研究工作。

（二）立足业务端到端 SLA，探索承载指标分解方法

1. 承载指标分解方法

目前，确定性承载技术典型应用主要在5G回传场景。因此，本研究方
法参考了5G移动网络的研究基础和技术标准开展研究。

● 可靠性指标分解原理

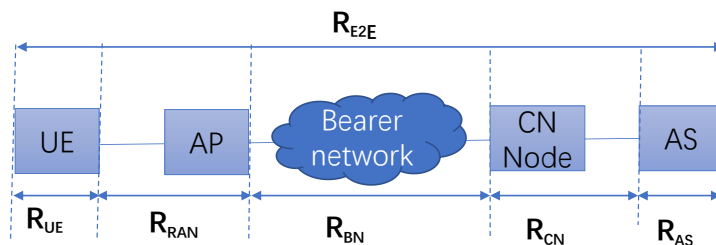
端到端的5G通信网络由无线终端（UE）、基站设备（AP）、承载网络（BN）、核心网设备（CN）和应用系统（AS）构成。整个系统的可靠性等效为一个串行子系统，端到端的可靠性等于多个子节点或子链路可靠性的乘积（见图 20）。在串行子系统中，中间任何一个环节失效，整个系统就会失效。因此，承载网可靠性指标（ R_{BN} ）分解见下图 19公式定义：

$$R_{E2E} = R_{UE} * R_{RAN} * R_{BN} * R_{CN} * R_{AS}$$

$$R_{BN} = R_{E2E} / (R_{UE} * R_{RAN} * R_{CN} * R_{AS})$$

来源：NGMN:5G Requirements End-to-End Considerations

图 19 可靠性指标（ R_{BN} ）分解公式



来源：NGMN:5G Requirements End-to-End Considerations

图 20 可靠性指标分解示意图

● 时延指标分解原理

端到端的5G通信网络的时延特性同样可等效为一个线性累加的串行
子系统，端到端的时延等于多个子节点或子链路时延的累加（见图 22）。

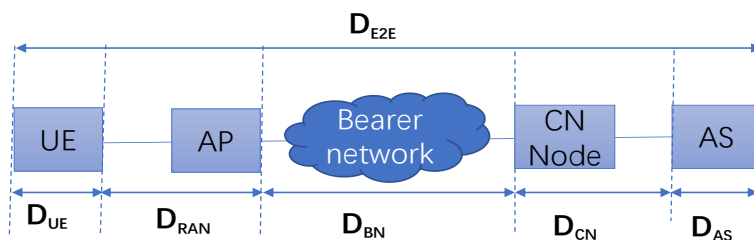
承载网指标（ D_{BN} ）分解见下图 21公式定义：

$$D_{E2E} = D_{UE} + D_{RAN} + D_{BN} + D_{CN} + D_{AS}$$

$$D_{BN} = D_{E2E} - D_{UE} - D_{RAN} - D_{CN} - D_{AS}$$

来源：NGMN:5G Requirements End-to-End Considerations

图 21 时延指标分解公式



来源：NGMN:5G Requirements End-to-End Considerations

图 22 时延指标分解示意图

● 时频同步指标分解原理

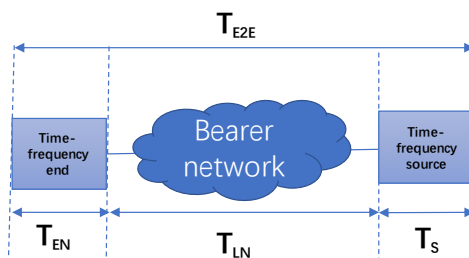
典型通信网络中端到端时频同步指标包括时频同步源、同步传递链路、业务终端三部分的累加，其中同步传递链路主要涉及了承载网的指标（见图 24）。因此，承载网的时频同步指标通过扣除时间源和业务终端部分的指标得出。承载网指标（T_{LN}）分解见下图 23 公式定义：

$$T_{E2E} = T_s + T_{LN} + T_{EN}$$

$$T_{LN} = T_{E2E} - T_s - T_{EN}$$

来源：中国信息通信研究院

图 23 时频同步指标分解公式



来源：中国信息通信研究院

图 24 时频同步指标分解示意图

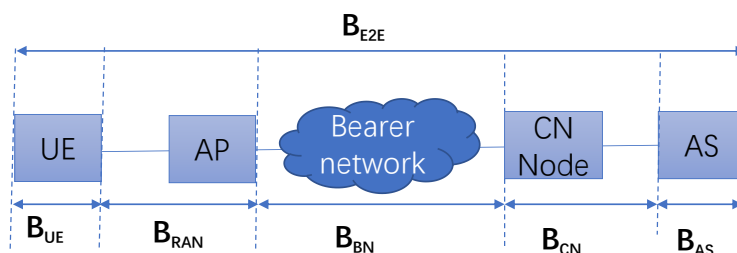
● 带宽指标分解原理

对于带宽指标，网络的性能瓶颈直接影响端到端业务性能，即终端、无线接入网、承载网和核心网及其每个节点均需满足端到端指标(见图 26)，承载网直接继承业务端到端指标，公式定义见下图 25。

$$B_{E2E} = \text{MIN}(B_{UE}, B_{RAN}, B_{BN}, B_{CN}, B_{AS})$$

来源：中国信息通信研究院

图 25 带宽指标分解公式



来源：中国信息通信研究院

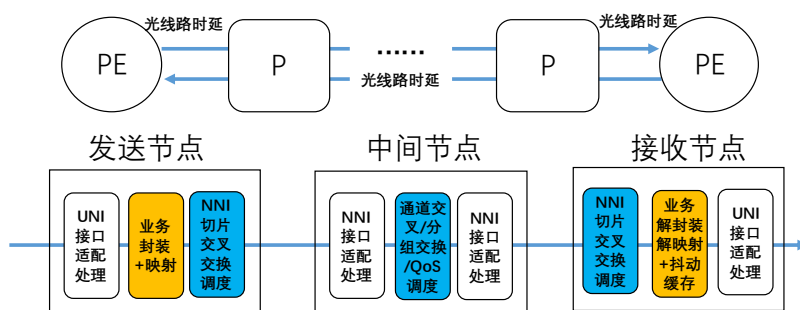
图 26 带宽指标分解示意图

2. 承载SLA指标分解原则建议

基于上节理论研究可知，端到端确定性承载SLA指标分解需精确计算和测量系统中每个网元和链路的指标，在实际操作中存在困难。本报告结合了确定性业务指标需求和确定性技术特性，探索了工程性简化指标分解方法。针对各类指标构成和特性的不同，采用了性能建模分析、源宿端扣除和等效继承三类方法实现承载指标的分解。具体的分解原则如下：

● 时延指标分解原则

5G 网络包括无线、承载网和核心网三大部分，无线和核心网的时延受空口质量、覆盖距离和上下行时隙配比等因素影响。承载网的时延分为光纤线路传输时延和设备转发时延，其中设备分为源宿 PE 节点和中间 P 节点，设备内部的转发时延包括 UNI 接口适配处理时延、业务封装映射到 TDM 通道或分组隧道的（解）映射和（解）复用时延、NNI 接口的交换调度时延等（见图 27）。承载网的时延分配会影响业务需要终结的位置，现阶段承载网分解时延需综合考虑承载网络时延特性、传输距离和应用组网等因素进行评估。



来源：中国信息通信研究院

图 27 承载网络时延分解示意图

承载网络时延主要包括了光纤线路、PE 和 P 节点设备处理时延组成，具体可采用以下公式表示： $\text{承载网时延} = 2 \times \text{PE 节点} + N \times \text{P 节点} + \text{光线路长度（公里）} \times 5\mu\text{s/公里}$ ，不同承载技术节点时延有所差异（见表 5）。

表 5 不同承载技术 PE 和 P 节点时延表

PE节点时延的分类分析			P节点转发时延的分类分析		光纤传输时延的分类		
	PE的业务处理	源+宿节点时延 (us)	P节点转发机制	单P节点时延 (us)	传输距离	光纤单向传输时延 (ms)	
PE节点业务处理时延分类	L1 N*5G/1G管道	20~50us	L1 N*5G/1G MTN 通道交叉	≤3(接入设备); ≤10(核心汇聚设备)	光纤传输时延分类	局域≤1km	≤0.005
	L2 TSN	N*125us	L1 ODU交叉	30~50		接入≤10km	≤0.05
	L3 DIP	50-100us	L2 TSN	N*125us		城域≤100km	≤0.5
	L3 纯QoS调度	100us (轻载)	L3 DIP	50-100us (试验)		本地≤200km	≤1.0
			L3 纯QoS调度	100us (轻载), ms 级别 (拥塞)	大区≤500km	≤2.5	
					骨干≤1000km	≤5	

来源：中国信息通信研究院

基于以上确定性承载技术的时延能力、传输距离和应用组网等因素，承载网建议按如下表 6 规则进行时延指标的分解和评估：

表 6 承载网时延分配建议表

项目	业务端到端双向时延	承载网双向时延	传输距离	线路双向时延	典型应用范围	备注
1	<10ms	1~2ms	不超过10km	0.1ms	园区	超过传输距离时，需通过UPF/MEC下沉满足性能指标
2	<20ms	2~5ms	不超过100km	1ms	城域	
3	20~50ms	5~10ms	不超过250km	2.5ms	城域	
4	50~100ms	10ms~30ms	不超过500km	5ms	城域	
5	100ms以上	30ms~50ms	不超过1000km	10ms	广域	

来源：中国信息通信研究院

● 时频同步指标分解原则

5G 端到端时频同步指标包括时钟源、传递链路、业务终端三部分。目前承载网可支持百纳秒级超高精度、微秒级高精度两个级别时间同步能力。在此基础上，可通过提升时间源精度、控制承载网节点跳数、业务终端同步方式和同步源位置来满足端对端时间同步性能需求。

● 可用性、安全隔离和带宽指标分解原则

端对端业务的可靠性、安全隔离和带宽指标和承载网的相关指标具备相同概率特性，因此端到端业务指标与承载网指标保持一致。

(三) 围绕多层多域技术机制，明确确定性技术指标特性

确定性承载涉及了 L0~L3 的多层多域网络技术，不同技术的应用场景、技术特性和能力指标方面存在差异。下面分别从接口能力、安全隔离、时延/抖动性能等方面对多种确定性承载技术进行分析（见表 7）：

表 7 确定性承载典型技术的指标特性表

技术类型	网络范围/接口类型	安全隔离	时延/抖动特性	可靠性特性	同步特性	成熟度	
分组类融合技术	L2层IEEE TSN	(1)局域, 7跳限制 (2)以太网接口	分组软隔离(队列)+时间片硬隔离	(1) 时延: $N \times$ 门控周期(典型周期125us) (2) 抖动: 802.1Qav为ms级; 802.1Qbv/Qch为 $\pm N \times$ 门控周期(典型周期125us)	可通过业务层复制消除机制支持0丢包	要求时间同步精度1us	技术标准成熟, 产业链成熟
	L3层IETF DetNet	(1)城域IP/MPLS, 单一管理域 (2)以太网接口	未定义	未定义, 依赖底层技术	可通过业务子层复制消除机制支持0丢包	未定义	技术标准较成熟, 产业链不成熟
	L3层CCSA DIP	(1)城域/广域IP (2)以太网接口	分组软隔离(队列和VPN)+周期硬隔离	(1) 时延: $N \times D$ (转发典型周期10us, 节点单节点时延30~50us级别) (2) 抖动: 端到端20~30us级别(简单流量环境下, 实验网数据)	未定义	要求时间同步精度us级别	行标正在制定, 产业链待发展
TDM类通道技术	L1层FlexE接口/MTN	(1)城域 (2)以太网/MTN接口	TDM通道硬隔离, 10M/5G颗粒	(1) 时延: 5G颗粒, $N \times D$ (D为节点转发时延, 典型5~20us), (2) 抖动: 5G颗粒, 1~10us	支持50ms保护倒换, 支持逃生路由保护	以太网频率+100ppm IEEE 1588v2 : 1us	技术标准成熟, 产业链成熟
	L1层OTN/FlexO接口	(1)城域/骨干光网络 (2)OTN接口	ODUk容器硬隔离, 1.25G颗粒	(1) 时延: 节点时延约20~50us, 具体与承载业务ODUk容器大小有关	支持50ms保护倒换, 支持控制器重路由	支持, 同步精度ns级别	技术标准成熟, 产业链成熟

来源：中国信息通信研究院

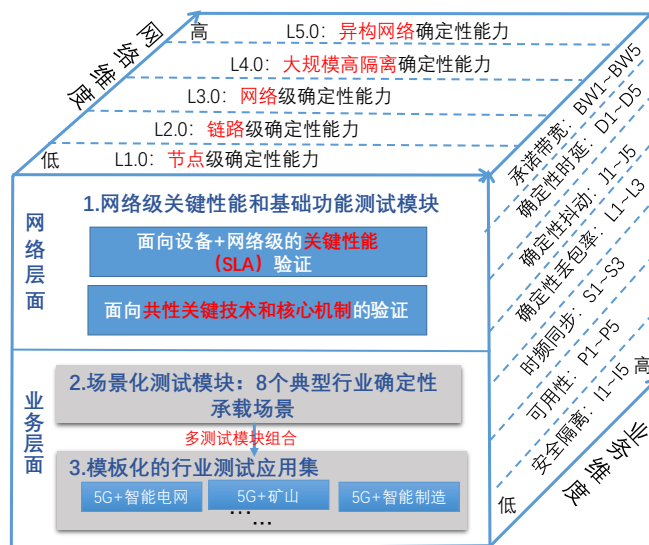
总体分析, 在确定性能力实现方面, 各类技术基本实现了带宽确定性, 确定性时延和抖动需优化提升。从技术实现机制上, 采用时隙/周期调度机制、全网时间/频率同步、SDN集中或集中计算+分布式路由的资源预留/调度成为多种确定性网络技术共性特征。TDM增强分组能力, 分组融合TDM机制, 寻求资源利用率和隔离特性间的技术平衡点成为多种确定性网络技术探索方向。

在确定性指标方面, 以时延抖动为例, DIP试验网在简单组网和单一流量模型下, 端到端确定性抖动可控制在20~30us级别, 但在复杂组网和复杂流量环境下的抖动性能仍面临挑战; SPN/MTN的 $N \times 5\text{Gbps}$ 颗粒通道的单节点抖动小于10us, $N \times 10\text{Mbps}$ MTN细粒度切片方案及其应用部署成为近期研究重点。

五、确定性承载评测体系(D-cube)构建

(一) 满足网络和业务评测需求, 构建两维五级评测体系

通过对确定性承载技术应用场景、业务SLA指标和确定性技术能力的分析, 创新性提出确定性承载D-cube评测体系, 分为网络和业务两个维度, 每个维度又细分为3~5个分级(见图28)。



来源：中国信息通信研究院

图 28 确定性承载 D-cube 评测体系

网络维度主要面向设备商或运营商，开展确定性承载的网络整体特性和关键机制自评。基于网络规模和技术能力划分了节点级、链路级、网络级、大规模高隔离和异构网络确定性能力五个等级；其中，L1.0 是针对设备单机功能和性能开展评估，L2.0~L5.0 是面向广域确定性能力的综合性能验证。针对不同网络场景的确定性 SLA 指标和周期队列、控制面时隙周期调度、网络演算、同步/异步队列等确定性承载关键技术进行测试验证。

业务维度重点面向运营商和行业专线/专网的确定性业务的开通验收和日常运维测试，提出 8 大应用场景和多行业测试应用集。针对每个场景和每类业务的承诺带宽、确定性时延抖动、确定性丢包率、时频同步和安全隔离特性又划分了 3~5 个等级。

面向生产控制、生产环境监测、云化视频、高体验视频、生产采集等典型的行业确定性承载场景，进行典型场景业务流量建模，形成 8 类场景化

测试模块，多模块结合构成模板化的行业测试应用集，将实现 5G+智能电网、5G+矿山、5G+智能制造等 5G 行业的确定性承载测试。

(二) 面向网络规模和技术能力，提出五级网络维度分级

在网络维度，结合确定性网络规模和确定性技术能力特性的分析，给出 L1.0~L5.0 的五个确定性网络分级。其中，技术能力分级重点考察了实现资源、时延和路由确定性的关键技术机制，包括安全隔离、队列/时隙调度、路径计算、时延抖动优化等；网络能力分级重点验证了影响确定性关键性能的网络因素，包括网络规模、组网复杂度、网络轻载率、确定性和非确定性混流转发能力、非确定性流干扰特征等。同时，每个分级对时延、抖动和丢包等确定性指标都提出了等级要求（见图 29）。

□ 技术能力

L1.0: 节点级确定性能力	L2.0: 链路级确定性能力	L3.0: 网络级确定性能力	L4.0: 大规模高隔离确定性能力 (广域)	L5.0: 异构网络确定性能力 (跨域)
<ul style="list-style-type: none"> □ 接口硬隔离+业务软隔离 (共享) □ 优先级队列调度 □ 显式路径 	<ul style="list-style-type: none"> □ 固定路径计算 □ 周期/时隙/波长等编排 □ 周期循环转发等 (分组) □ TDM时隙和波长转发 (光传输) □ 接口硬隔离+业务软隔离 (专用) □ 优先级队列调度 	<ul style="list-style-type: none"> □ 混合业务调度 □ 周期/时隙内抖动优化 □ 策略路径计算 □ 周期/时隙/波长等编排 □ 周期循环转发等 (分组) □ TDM时隙和波长、光通道转发 (光传输) □ 接口硬隔离 (专用)+业务软隔离 (专用) □ 优先级队列调度 	<ul style="list-style-type: none"> □ 管控确定性增强 (离线网络演算、光电协同等) □ 算网、行业确定性承载 □ 混合业务调度 □ 周期/时隙内抖动优化 □ 策略路径计算 □ 周期/时隙/波长等编排 □ 周期循环转发等 (分组) □ TDM时隙和波长、光通道转发 (光传输) □ 端到端硬隔离 (专用) □ 优先级队列调度 	<ul style="list-style-type: none"> □ 异构转发面协调 □ 控制面统一编排 □ 意图驱动的管控确定性增强 (在线网络演算等) □ 算网、行业确定性承载 □ 混合业务调度 □ 周期/时隙内抖动优化 □ 意图路径计算 □ 周期/时隙/波长等编排 □ 周期循环转发等 (分组) □ TDM时隙和波长、光通道转发 (光传输) □ 业务端到端硬隔离 (跨域) □ 优先级队列调度
<ul style="list-style-type: none"> □ 抖动确定性: 1~3级 □ 丢包率确定性: 1级 □ 可靠性: 1级 等 	<ul style="list-style-type: none"> □ 抖动确定性: 4级 □ 丢包率确定性: 2级 □ 可靠性: 2级 等 	<ul style="list-style-type: none"> □ 抖动确定性: 4~5级 □ 丢包率确定性: 3级 □ 可靠性: 3级 等 	<ul style="list-style-type: none"> □ 抖动确定性等级: 5级 □ 丢包率确定性: 4级 □ 可靠性: 4级 等 	<ul style="list-style-type: none"> □ 抖动确定性等级: 5级 □ 丢包率确定性: 5级 □ 可靠性: 5级 等

□ 网络能力

<ul style="list-style-type: none"> • 点到点组网; • 混流规格, 节点确定性流规格, 干扰流 1518B; • 带宽利用率30% 	<ul style="list-style-type: none"> • 多跳单链/单环形组网; • 混流规格, 节点确定性流规格; 干扰流 4096B; • 带宽利用率50% • SDN管控能力; 	<ul style="list-style-type: none"> • 多链状/多环形+流量汇聚组网 • 混流规格, 节点确定性流规格; 干扰流 9000B; • 带宽利用率超70%, 中间节点拥塞; • SDN管控能力; 	<ul style="list-style-type: none"> • 复杂链状/环形/不规则组网+流量汇聚组网 • 混流规格, 节点确定性流规格; 干扰流9000B; • 带宽利用率超90%, 中间节点拥塞; • SDN管控能力; 	<ul style="list-style-type: none"> • 覆盖空口、承载、数据中心至少2个异构网络; • 复杂链状/环形/不规则组网+流量汇聚组网; • 混流规格, 节点确定性流规格; 干扰流9000B; • 带宽利用率超100%, 中间节点拥塞; • SDN管控能力;
--	---	--	---	--

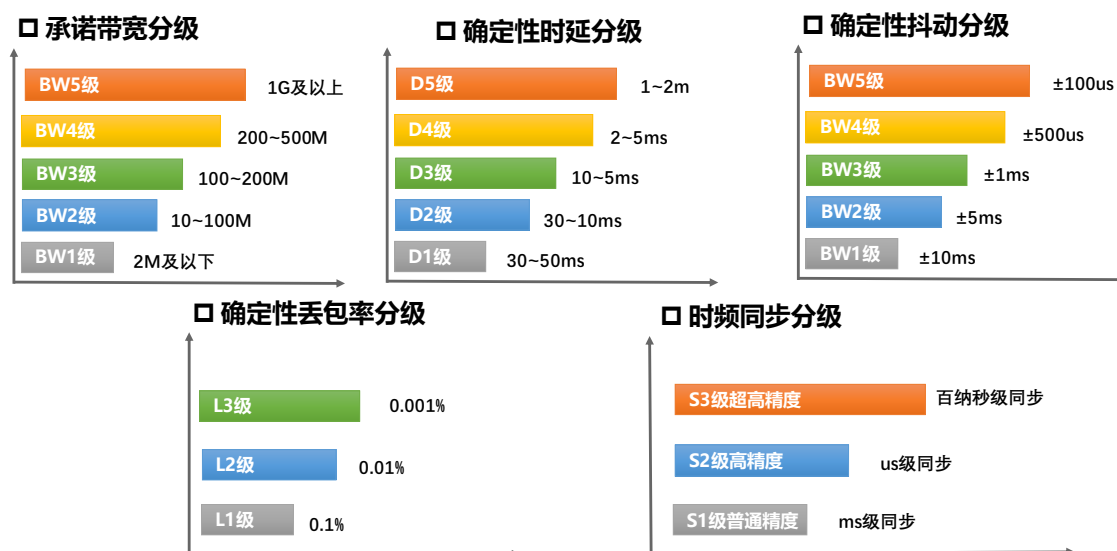
来源：中国信息通信研究院

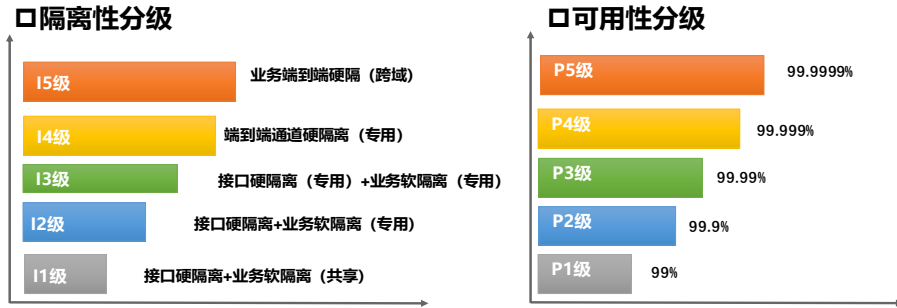
图 29 确定性承载 D-cube 评测体系网络维度分级

该分级设计适用于 IP、光传输和以太网等多种类型的确定性承载设备。在五类分级中，L1.0 主要考察支持端口隔离、队列和 SR 技术的节点确定性能力；L2.0 体现了周期队列能力、多跳路径的确定性能力；L3.0 更强调复杂、多点汇聚组网下确定性能力；L4.0 是真正的广域确定性能力，在混流规格、网络规模和复杂度上提出更高要求，并需满足管控面智能化和端到端硬隔离的要求；L5.0 为异构端到端确定性能力，需实现多种异构网络的确定性协同，支持高等级的自治网络能力。初步预测，目前的承载设备基本可实现 L1.0~L2.0，L3.0~L4.0 级别为 3 年内的能力，L5.0 可能需要 3-5 年以上深入研究和突破才能达到。

(三) 基于应用场景和业务指标，给出五级业务维度分级

在业务维度，确定性承载 SLA 指标分类严格遵循了确定性承载定义的业务指标和技术能力两个维度展开，包括带宽、时延、抖动、丢包率、可用性、时频同步和安全隔离共七类确定性指标的 3-5 个分级（见图 30）。





来源：中国信息通信研究院

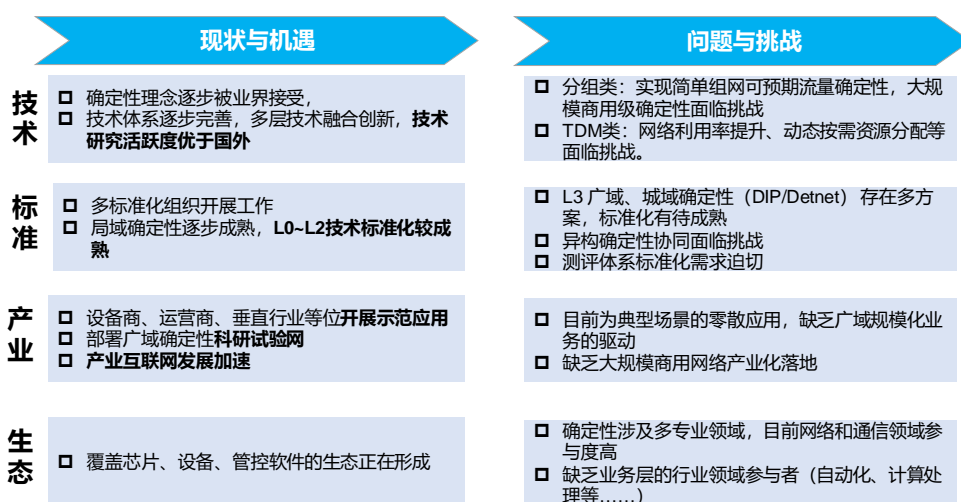
图 30 确定性承载 D-cube 评测体系业务维度分级

六、展望与建议

（一）机遇与挑战并存，未来五年成为发展关键期

总体来看，确定性承载技术与产业的发展挑战与机遇并存，未来五年成为发展关键期。随着各类确定性技术的不断涌现，确定性网络理念逐步被业界接受，技术体系逐步完善。国内设备商、运营商和行业用户相继开展核心技术攻关研发和应用示范项目，但在技术和产业化应用方面仍面临挑战。一是目前分组融合类技术仅实现简单组网和可预期流量的确定性能力，大规模组网的商用级确定性面临挑战。DetNet 和 DIP/EDN 推动了分组技术在广域确定性场景的应用探索和尝试，还需继续在大规模、长距离、全场景的组网拓扑和复杂流量模型下，针对资源预留、业务路径优化及时延队列调度算法等方面开展充分的试验验证。二是端到端确定性承载能力仍面临挑战。确定性网络具备端到端异构组网特性，涉及园区、城域、骨干网中不同网络技术方案协同。现阶段的技术发展，尚无一种技术可实现“一网到底”，如何提供跨域的端到端确定性承载能力面临挑战。三是目前的产业应用多为典型场景的零散业务，缺乏广域规模化的业务需求，最终是业务场景驱动应用侧快速迭代，从而促进整个确定性承载技术创新、产业生态的整体健壮发展。确定性网络涉及多专业领域，目前网络和通信领域参与度高，但是缺乏云网/算网对端到端业务确定性 SLA

指标和协同机制的研究，并且亟需高性能超级计算和智能计算处理等研究机构及 AI 应用领域参与者提供更多应用场景需求。国家东数西算战略工程实施和算力网络深化应用将催生更多的广域确定性业务场景，未来两年是确定性承载技术创新和产业发展的关键期，需实现大规模确定性网络核心技术和应用场景的突破，才能真正推动确定性产业的加速发展（见图 31）。



来源：中国信息通信研究院

图 31 确定性承载现状和问题分析

（二）凝聚行业技术共识，构建统一标准化体系

面向广域、城域和局域场景的确定性承载技术不断涌现，但在标准成熟度和产业应用方案研究方面存在差异，需整体推动标准化体系建设。一是要加速推动广域、城域确定性技术收敛，尽快形成统一的确定性技术标准体系。由于广域确定性技术研究启动较晚，目前处在 DetNet 和 DIP/EDN 多技术方案共存阶段。尽管采用周期循环队列优化和 SRv6 技术机制已基本达成共识，但在同步还是异步方案、多周期映射方式等方面均存在显著差异，无法实现基于标准化方案的设备互通组网。二是面向端到端确定性网络的多域组网互通需求，开展异构确定性协同组网架构研究和标准化工

作。异构转发面的多域协同组网和控制面管控架构及其关键技术尚处于预研阶段，缺乏系统性架构方案，建议加快异构协同技术研究，启动标准化制定工作。

(三) 汇聚产业各方力量，突破共性关键技术瓶颈

现阶段的广域确定性网络在简单组网、轻载流量、可预期业务模型场景下，可实现时延和抖动确定性的基本保障。复杂组网和流量模型的确定性保障仍面临诸多挑战。建议重点聚焦智能路径计算、异构协同编排、在线网络演算应用、周期循环队列优化等共性关键技术，汇聚产业各方研发力量，开展关键技术协同攻关，最终实现广域确定性技术的整体突破。

(四) 构建评测服务体系，促进技术完善服务提升

目前，确定性承载技术研究不断推进，但缺乏可指导技术研究和落地的服务评测体系。因此，有必要面向确定性技术现状和典型应用场景，开展分级定量的技术指标研制，形成统一的评测指标体系，指导确定性技术完善和设备研发，减少产业应用发展的不一致性。

(五) 做好整体发展规划，持续推进技术演进发展

基于对确定性网络承载技术、挑战和技术发展情况的综合分析，本报告给出了确定性承载技术发展的阶段性预判。



来源：中国信息通信研究院

图 32 确定性承载阶段性发展预判

确定性网络将整体按照**重点业务确定性、单域网络确定性、大规模广域确定性和跨域异构确定性**四个阶段发展（见图 32）。

阶段一：以 4G 和消费互联网业务为代表，网络采用尽力而为的 SLA 保障机制，仅能通过 QoS 和 TE 实现对重点业务的带宽保障，不涉及时延、抖动和可靠性的确定性保障。

阶段二：近期 1~2 年，以 5G+垂直行业为代表的融合应用不断涌现，确定性网络技术成为业界关注重点。以 FlexE/MTN、TSN、DetNet、DIP/EDN 等单域确定性技术逐步演进发展。在确定性能力方面可提供 10ms 级的时延、100us 级的抖动、硬隔离、可靠性的 SLA 保障。

阶段三：中期 3~5 年，随着行业数字化转型的深度推进，大规模广域确定性将逐步实现技术和产业突破。云网融合、算力网络也将推动算力确定性的新需求。5G-A 标准和技术研究将进一步推进网络在 L2~L3 确定性

的融合发展。

阶段四：远期 5~10 年，可以预见随着 6G 技术标准和产业应用的推进，覆盖空口、广域、局域和数据中心的跨域异构确定性网络基本形成，并构建覆盖云、网、边、端的确定性应用+网络的生态体系，全面支撑全产业互联时代的到来。

编制说明

本报告由中国信息通信研究院技术与标准研究所牵头撰写。在报告撰写过程中，得到了确定性承载领域多家单位与专家的支持和帮助，在此表示感谢。

参编单位：中兴通讯股份有限公司、华为技术有限公司、新华三技术有限公司、山东未来网络研究院（排名不分先后）。

中国信息通信研究院 技术与标准研究所

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62300112

传真：010-62300123

网址：www.caict.ac.cn

