

doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2025.05.023

引用格式:刘美慧,陈焱,沈彬,等.广域端到端确定性网络架构及应用验证[J].无线电通信技术,2025,51(5):1102-1112.

[LIU Meihui, CHEN Yan, SHEN Bin, et al. Architecture and Application Verification of Wide-area End-to-End Deterministic Network [J]. Radio Communications Technology, 2025, 51(5): 1102-1112.]

广域端到端确定性网络架构及应用验证

刘美慧¹, 陈焱², 沈彬³, 付韬³, 许方敏¹, 赵成林¹

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876;

2. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518100;

3. 中国信息通信研究院, 北京 100191)

摘要:在工业网络中,越来越多的智能化应用对网络端到端传输的确定性保障能力提出了新的要求。当前确定性技术的研究大多关注自身网络层级的确定性保障,忽略了需要多种确定性技术协同配合的端到端确定性。基于核电行业应用场景,提出了一种灵活以太网(Flexible Ethernet, FlexE)和时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)融合的广域端到端确定性网络架构,从控制面功能与数据面协同调度2个方面对该架构进行了详细阐述。在真实的广域网络环境中,基于双电机协同与工业机器视觉应用场景,对架构进行了性能测试与验证。结果表明,该架构能够满足应用对广域端到端确定性网络的需求,具有良好的应用价值。

关键词:广域端到端;确定性网络;灵活以太网;时间敏感网络;工业应用验证

中图分类号:TN91

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1003-3114(2025)05-1102-11



Architecture and Application Verification of Wide-area End-to-End Deterministic Network

LIU Meihui¹, CHEN Yan², SHEN Bin³, FU Tao³, XU Fangmin¹, ZHAO Chenglin¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. China Nuclear Power Design Co., Ltd. (Shenzhen), Shenzhen 518100, China;

3. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: In industrial networks, more and more intelligent applications put forward new requirements for deterministic guarantee ability of end-to-end transmission. Most of current research works on deterministic technologies focus on guarantee of their own network certainty, but ignore end-to-end determinism requiring cooperation of multiple deterministic technologies. Based on application scenario of nuclear power industry, a wide-area end-to-end deterministic network architecture with Flexible Ethernet (FlexE) and Time-Sensitive Networking (TSN) fusion is proposed, and an architecture is elaborated from two aspects of control plane function and data plane cooperative scheduling. In real wide area network environment, based on the dual-motor collaboration and industrial machine vision application scenario, the performance of the architecture is tested and verified. Results show that the architecture can meet the needs of applications for wide-area end-to-end deterministic networks, and offer good application value.

Keywords: wide-area end-to-end; deterministic network; FlexE; TSN; industrial application verification

0 引言

第四次工业革命的到来催生了新的生产模式和业务生态,各种时间敏感型应用不断涌现,对网络的

端到端确定性传输能力提出了新的要求。以核电行业为例,智能化核电厂中的自动化控制、远程辅助决策、可视化施工等业务,要求网络具备确定性时延和高可靠性。核电厂工业物联网平台从厂房中采集的智能核电相关数据需要输送至集团总部进行分析和模型训练,并实时反馈计算结果以实现辅助决策,要求核电厂与集团总部之间端到端传输时延在 20 ms

收稿日期:2024-12-16

基金项目:中国信通院 2024 工程课题(2024-GC-018)

Foundation Item: CAICT 2024 Project(2024-GC-018)

以内^[1]。在厂房中,对于专业性要求高的操作,现场人员需要佩戴增强现实眼镜在专家远程指导下进行作业,上述过程中视频流等信息的传输要求网络带宽不低于 1 Gb,丢包率不超过 0.5%^[2];核电基地厂房数量众多,同一业务可能分布在不同位置厂房中,不同厂房之间的关键业务通信要求端到端时延在 20 ms 内、端到端时延抖动在 10 μ s 内^[3]。此外,通信网络还需要具备对不同业务间进行有效隔离与带宽资源灵活分配的能力,以保障各类业务数据的独立传输与差异化服务质量。传统的 IP 网络通常只提供“尽力而为”的网络服务,容易受到网络拥塞、网络故障及突发流量等情况的影响,无法为实时应用提供有界的时延、抖动与零丢包的传输保障,因此无法满足核电厂中时间敏感型应用的需求。

确定性网络技术旨在保障关键业务传输的可预测性与确定性,近年来受到广泛关注。光互联网论坛于 2015 年推出了 FlexE 技术^[4],FlexE 凭借其灵活切片能力被广泛用于带宽预留与业务隔离。TSN 工作组基于时钟同步、流量调度和资源预留等机制制定了一系列标准,在局域网范围内实现了时间敏感型业务与普通业务的混合承载^[5-6]。国际互联网工程任务组的确定性网络工作组在 TSN 相关标准的基础上进行扩展,提出适用于 3 层网络的指定周期的排队和转发(Cycle Specified Queuing and Forwarding, CSQF)机制^[7],将确定性传输扩展至广域范围。由华为牵头提出的确定性 IP(Deterministic IP, DIP)技术同样专注与 3 层网络的确定性,旨在保障关键业务传输的低抖动与有界时延^[8]。然而,上述主流确定性网络技术的架构与机制设计通常受限于自身所处的网络层级,致使单一确定性网络技术在保障能力与覆盖范围方面存在局限性,无法满足业务端到端确定性传输的需求。因此,对多层确定性网络技术融合与跨域资源协同调度的研究具有重要意义。

当前的广域确定性网络技术,如 FlexE、DIP 和确定性网络等,可以有效保障业务在广域网络阶段的确定性传输。然而,在实际应用场景中,用户或设备往往并非直接与广域网络相连,而是遵循“本地应用-局域网-广域网-对端局域网-对端应用”的传输拓扑结构。鉴于局域网与广域网通常采用不同的确定性网络技术,探究如何实现异构确定性网络的协同部署,已成为实现端到端确定性传输的关键研究课题。依托智能核电场景中确定性传输需求,提

出了一种基于 TSN 技术与 FlexE 技术的广域端到端确定性网络融合架构,从控制面与数据面 2 个角度对该架构进行了详细介绍,并搭建了远程电机协同、工业机器人视觉 2 个测试床,对所提架构的端到端确定性保障能力进行了验证。

1 相关领域研究现状

1.1 FlexE 技术

FlexE 技术通过在标准以太网基础上引入 FlexE Shim 来实现物理层和链路层的解耦,从而实现网络业务带宽的动态灵活调整,可以提供捆绑、通道化和子速率 3 种功能^[9],常被用于网络硬切片以实现带宽分配和业务隔离,在 5G 网络切片和专网构建中有着广泛的应用^[10]。FlexE 技术一方面能够简化数据包在设备中的处理过程从而降低处理时延,另一方面,还能确保关键业务传输通道的专用性,即使在其他业务突发的情况下,也能保障关键业务的传输不受影响。此外,FlexE 支持网络设备之间的时间同步和频率同步,允许同步报文在 FlexE 通道中进行传输^[11]。FlexE 的上述特性使其能够满足确定性网络调度时对时钟同步的需求,为其与 TSN 技术的协同应用提供了关键支撑。

Vilalta 等^[12]提出将 FlexE 网络集成到软件定义网络架构中,以实现承载网中的动态网络切片。Kouloughli 等^[13-15]将 FlexE 技术融入多层多域网络中,提高了网络整体的资源利用率和故障修复能力。Liang 等^[16]将 FlexE 与弹性光网络相结合,对跨层网络规划进行优化,并设计了一种启发式算法求解最优调度。然而,上述研究大多关注网络资源的充分利用,而忽略了对业务端到端确定性时延的保障。张朝^[17]将 TSN 端设备与 FlexE 网络结合,提出一种能够增强以太网承载能力的实时网络带宽资源重构机制,能够在降低数据传输时延的同时,对网络底层的带宽资源进行灵活分配,大大提升网络的业务承载能力。上述研究虽然尝试将 TSN 与 FlexE 进行融合,但是却局限于单一节点,缺乏整体架构的设计。

1.2 TSN 技术

TSN 技术工作于数据链路层,基于以太网进行扩展,在保障关键流量低时延低抖动传输的同时,能够对其他类型流量进行混合承载,解决了传统实时以太网带宽不足和布线复杂的问题,被认为是未来工业网络的重要演进方向。TSN 协议族主要从时钟同步、流量调度、资源预留和网络管控几方面进行规定,将网络中的流量按照重要程度划分成 8 个等级

(0~7,7 为最高优先级),与交换机出端口的 8 个队列一一对应。流量调度是 TSN 保障业务确定性传输的核心机制,根据是否需要全局的时钟同步,TSN 的流量调度机制可分为同步调度和异步调度两大类。时间感知整形^[18]和循环排队转发^[19]机制作为 2 种典型的同步调度机制,受到学术界和产业界的广泛关注。

Li 等^[20]提出了 TSN 中的联合路由调度算法,能够有效降低业务的端到端时延,加速了调度决策过程。Dürr 等^[21]采用无等待传输的方法调度 TSN 中的关键业务,并设计了流排序与压缩算法以提高网络的可调度性。然而,上述研究仍受限于局域网范围,无法应用于大规模网络。为了将 TSN 扩展至广域范围,汪硕等^[22]提出了基于软件定义的时间敏感网络跨域调度机制,利用 3 种广域时钟同步技术保障域间时钟同步,实现了不同 TSN 域的无缝对接与融合调度。Huang 等^[23]提出了 TSN 与 CSQF 网络融合架构,使用周期模型归一化的方法实现跨域互联。Peng 等^[24]进一步研究多 TSN 域多 CSQF 域的融合网络架构,并设计了基于周期映射的跨域调度算法以提高网络的整体性能。虽然上述研究基于循环排队转发机制实现了 TSN 在广域范围的应用,但是网络边界设备上跨域周期映射计算较为复杂,且循环排队转发和 CSQF 均侧重于降低业务传输抖动,在端到端时延方面几乎没有优势。

1.3 广域确定性传输

在广域确定性传输领域,研究的热点主要集中于 3 层网络的确定性传输。强鹞等^[25]提出了一种

适用于大规模网络部署的 3 层转发技术,可实现时延上界和抖动上界的严格保证;石鸿伟等^[26]提出了面向广域确定性网络的控制面关键技术及设计思想,详细阐述了实现确定性网络感知、业务规划和流量调度的具体方案;Wu 等^[27]基于 DIP 网络,将出端口的队列根据周期长度划分成多个组,从而满足不同的服务质量需求;Krolikowski 等^[28]基于 CSQF 机制,使用列生成和动态规划算法对大规模 KGR 网络的联合路由调度问题进行求解,提升了网络计算的效率。上述大规模确定性网络技术的研究均集中关注 3 层网络确定性机制的优化,忽略了多层确定性网络技术的协同配合与端到端的业务的确性传输保障。

2 广域端到端确定性网络架构

2.1 场景描述

在核电领域中,不同核电厂之间的跨域连接、集团总部与核电基地之间的通信,均为广域端到端传输的典型应用场景。如图 1 所示,核电厂、设计院与集团总部位于不同的局域网中,由于不同园区之间的地理位置相距较远,不同局域网内设备之间的数据传输可看作广域端到端通信。图中,切片 1 的带宽 W_1 和切片 2 的带宽 W_2 的大小均为 R ,集团总部对外传输速率为 $2R$,深圳设计院及电站配套设施 (Balance of Plant, BOP) 厂房的链路传输速率均为 R 。由于广域网与局域网带宽的不一致性,在网络边界节点处很容易发生跨域接口的拥塞或丢包,严重影响业务端到端传输性能。

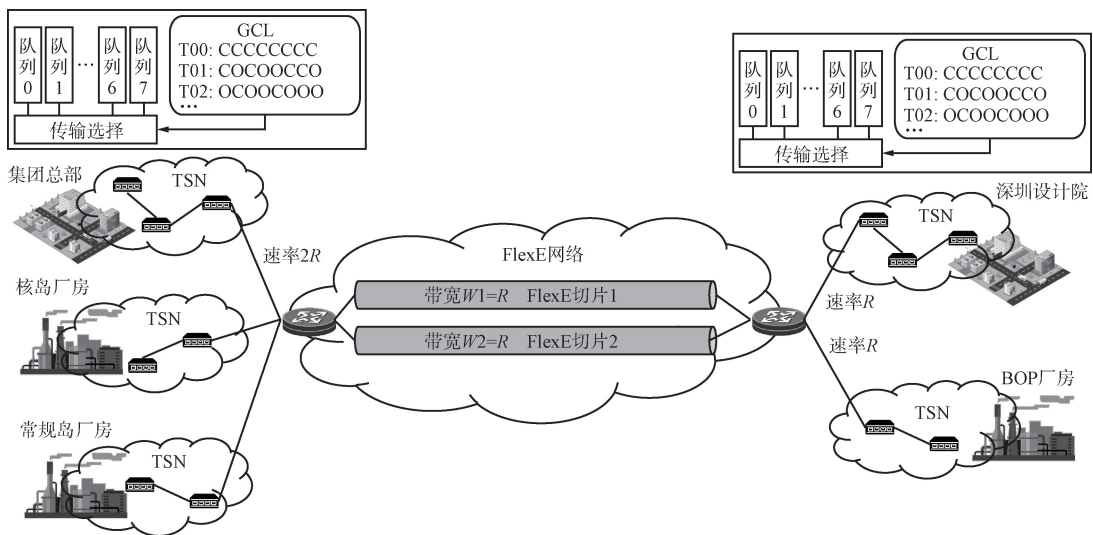


图 1 核电行业中的广域端到端传输场景

Fig. 1 Wide-area end-to-end transmission scenarios in nuclear power industry

为了满足智能化核电厂中远程辅助决策、可视化施工等业务的端到端确定性传输需求,设计了一种 TSN 与 FlexE 网络融合架构。该架构基于文献[22]中的广域时钟同步技术保障域间时钟同步,所有局域网内部署 TSN,使用 TAS 机制降低业务在 TSN 域内的传输时延,利用门控列表控制交换机出端口 8 个队列的传输,保障时间敏感流不受其他流的影响。不同 TSN 域之间使用 FlexE 网络相连, FlexE 按照业务需求对网络进行灵活切片,能够确保跨域互联传输路径上所有接口带宽的一致性。源 TSN(Source TSN, STSN)域中产生的时间敏感业务流量,在域内按照所规划的路径传输至边界交换机,随后映射至 FlexE 域中指定切片进行传输,到达对端 TSN 域后,根据对端 TSN 域的调度决策传输至目的节点。在上述过程中,控制器为业务规划传输路径并预留传输资源,以实现确定性时延和低抖动传输。

2.2 TSN 与 FlexE 融合网络架构

跨域资源的协同调度需要控制面的统一编排,以实现端到端路径上的资源预留。TSN 与 FlexE 融合网络架构如图 2 所示。控制面采用集中式架构,主要包含全局控制器、TSN 控制器和 FlexE 控制器三大模块,TSN 和 FlexE 控制器是逻辑上的控制模块,在实际应用中可以与全局控制器集中在一个物理实体上。转发面由 TSN 和 FlexE 网络中的各用户和网络设备组成。用户业务从 STSN 域出发,经过 FlexE 网络的承载传输至目的 TSN(Destination TSN, DTSN)域的网络设备。全局控制器用于监控全网状态信息和执行调度决策,具有拓扑管理、准入控制、时延预估、全局计算和资源预留等功能。TSN 和 FlexE 网络各自的逻辑控制器用于上报域内状态信息与计算域内调度配置,全局控制器统筹全网业务需求与资源状态,进行业务编排计算与决策下发。

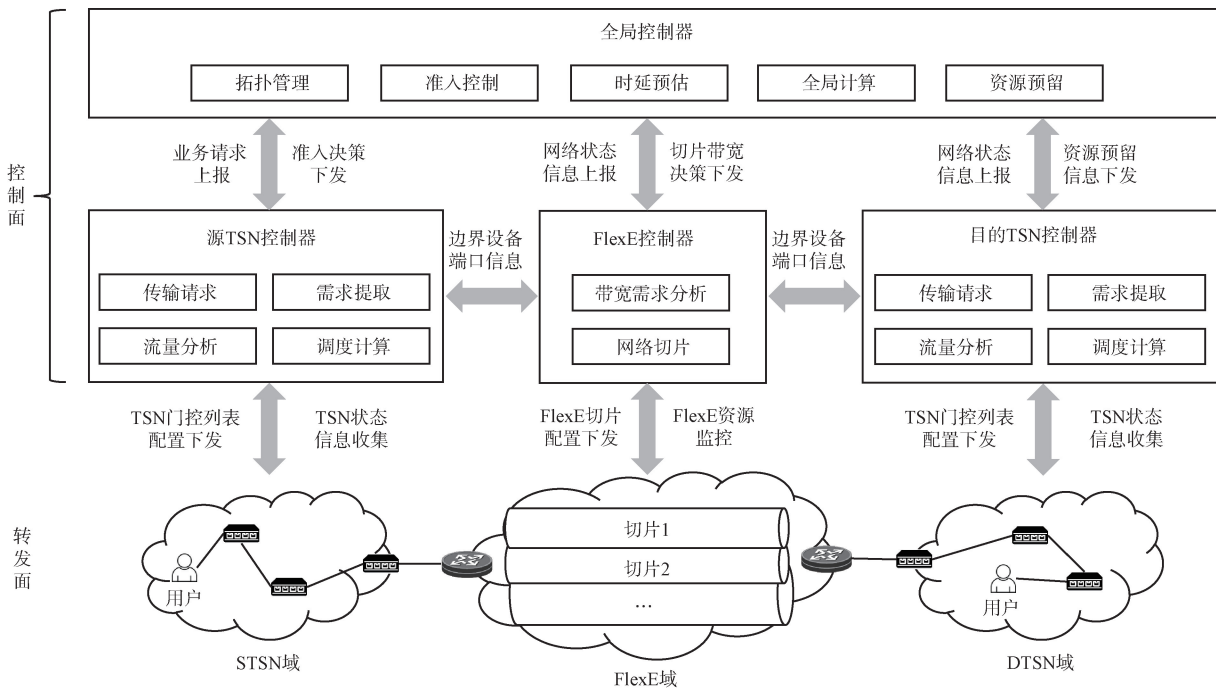


图 2 TSN 与 FlexE 融合网络架构

Fig. 2 TSN and FlexE converged network architecture

TSN 与 FlexE 融合网络架构的管控接口交互流程如图 3 所示。全局控制器周期性地收集各域内网络状态信息,实现对全网资源状态的实时掌控。当 STSN 中用户发起任务请求,该业务的基本信息(源、目的、周期、时延要求、带宽要求等)将被上报至全局控制器。全局控制器收到业务请求后,基于各网络域的剩余资源状态,对该业务的端

到端时延进行预估,若网络剩余资源能够满足业务的时延和带宽要求,则该业务调度成功,反之,调度失败。全局控制器将准入决策信息反馈至 TSN 控制器,当业务被接收时,STSN 控制器进行域内路径规划与门控计算,并将交换机门控列表等配置信息下发至 STSN 各设备中执行。同时, DTSN 域控制器根据业务信息提前进行路径规划

与资源预留,确保业务在 DTSN 域内能够低时延低抖动传输。全局控制器根据资源编排结果将切片需求信息返回至 FlexE 控制器, FlexE 控制器根据传输需求进行 TSN 流在 FlexE 边界设备上跨域映

射计算,并将最终的配置信息下发至域内各网络设备中执行。上述交互流程实现了各网络域的资源规划与配置,保障了时间敏感业务端到端的确定性传输。

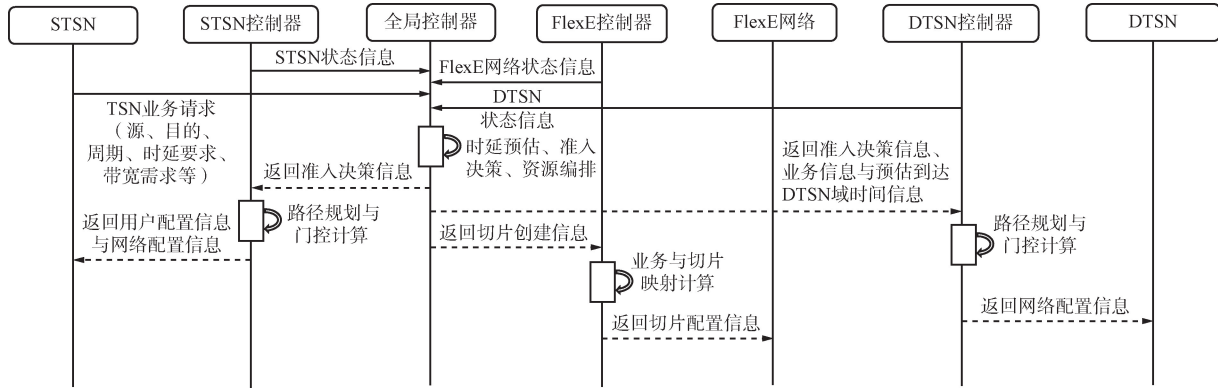


图 3 管控接口交互流程

Fig. 3 Interaction procedure of management interfaces

2.3 数据面调度

在 TSN 中,数据帧的格式为 IEEE 802.1Q 规定的以太网帧结构。如图 4 所示,TSN 基于以太网帧头中 IEEE 802.1Q 虚拟局域网(Virtual Local Area Network, VLAN)标签中的优先级代码点字

段和 VLAN 识别符进行 TSN 流的标识^[29]。由于 FlexE 网络中承载的数据帧同样使用以太网帧结构,因此 TSN 业务数据可直接接入 FlexE 网络进行承载转发,为 TSN 与 FlexE 网络融合提供了便利。

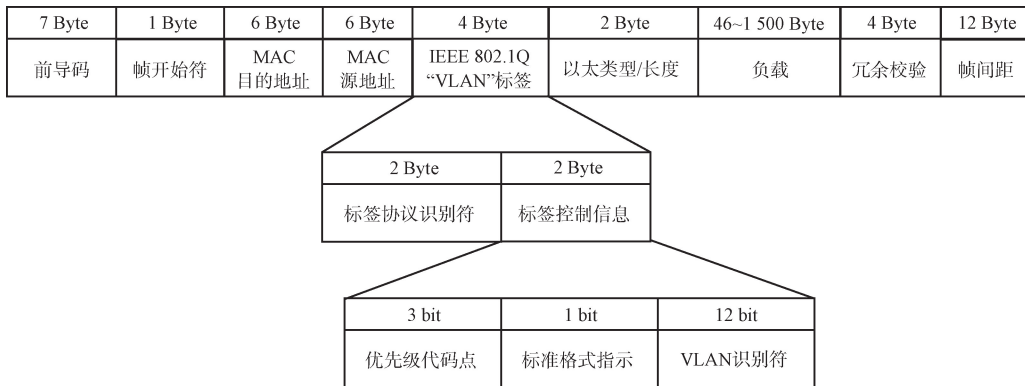


图 4 TSN 帧结构

Fig. 4 TSN frame structure

如图 5 所示,TSN 边界网络设备与 FlexE 边界网络设备相连时,通过配置 VLAN ID 引导 TSN 流量进入对应的 FlexE 切片通道,TSN 流会进入与自身 VLAN ID 相同的切片中进行传输。类似地,当业务数据从 FlexE 边界设备进入 TSN 边界设备时,通过合理配置边界端口的 VLAN ID 即可将业务数据正确地交付至目的网络设备。FlexE 网络基于 Shim 和 Calendar 机制进行切片带宽分配,TSN 业务作为 FlexE Client 数据流被传输至 FlexE Shim 层,此时所

有数据已完成 64 Byte/66 Byte 编码成为 66 Byte Block 流,Shim 层将 66 Byte Block 分发至 Calendar 中。Calendar 由多个 sub-calendar 组成,每个 sub-calendar 中有 20 个时隙,每个 66 Byte Block 承载在一个时隙中^[17]。Shim 层根据切片带宽需求为每个切片计算和分配时隙,并通过轮询的分配方式完成 TSN 业务数据到一个或多个时隙的映射。当业务或切片带宽改变时,Shim 层会重新计算业务数据和时隙之间的映射关系,以满足业务的传输需求。

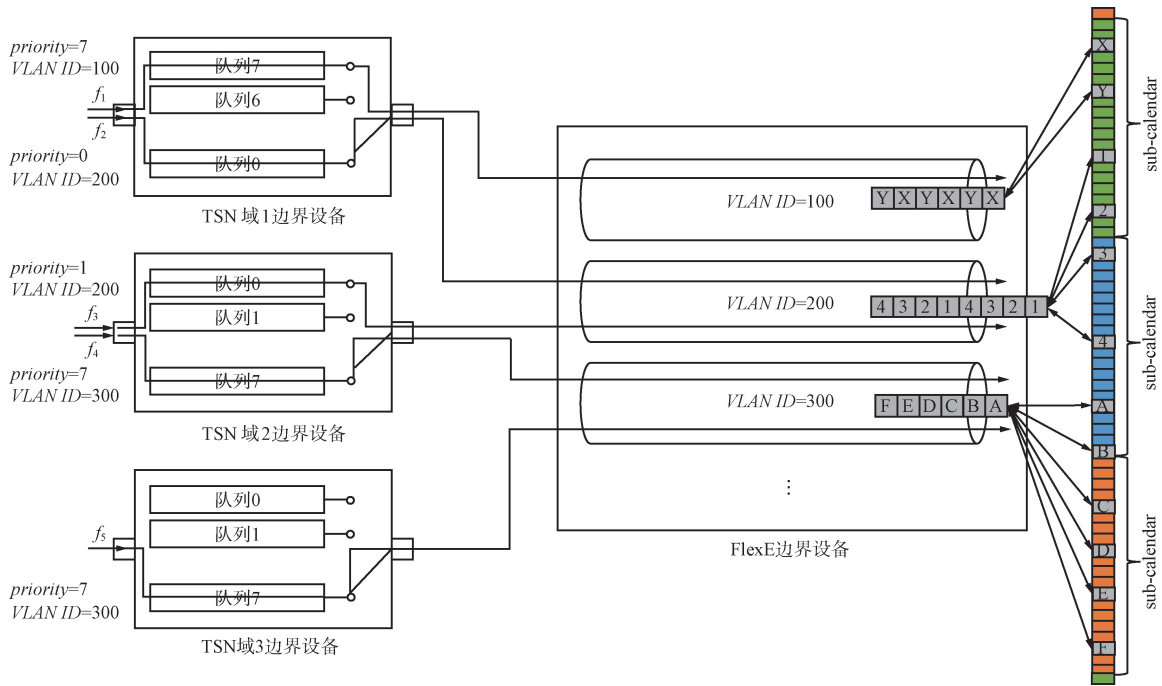


图5 TSN流与FlexE切片映射示意
Fig. 5 Mapping between TSN flows and FlexE slices

2.4 调度模型

无向图 $G = (V, E)$ 表示网络整体的拓扑, V 表示网络中所有节点, E 表示所有链路。设有 K 个 TSN 域通过 FlexE 网络互联, TSN 域的集合表示为 $A_{\text{TSN}} = \{A_1, A_2, \dots, A_K\}$, F_k 为 TSN 域 A_k 中所有 TSN 业务流的集合, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, TSN 域 A_k 的边界设备的端口速率为 R_k 。每一条 TSN 流 $f_i^k \in F_k$ 可以用六元组 $\{s_i, d_i, p_i, c_i, b_i, t_i\}$ 表示, 其中 s_i 为源地址, d_i 为目的地址, p_i 为流周期, c_i 为业务大小, b_i 表示带宽需求, t_i 表示时延要求, $f_{ij}^{k[v_a, v_b]}$ 表示流 f_i^k 在链路 $[v_a, v_b]$ 上的第 j 个帧传输实例, $\phi_{ij}^{k[v_a, v_b]}$ 表示该实例相对于超周期起始的传输时刻, $l_{ij}^{k[v_a, v_b]}$ 表示该实例的传输时长。FlexE 网络可使用的总带宽为 W , 切片配置细粒度为 g , 单个切片的最大带宽为 G 。假设所有 TSN 域具有相同的超周期 T (网络中所有流的周期的最小公倍数)。

当下列传输约束被满足时, TSN 控制器判断域内资源符合传输需求。

① 帧约束。要求 $\phi_{ij}^{k[v_a, v_b]}$ 非负, 且保证 $f_{ij}^{k[v_a, v_b]}$ 在周期内完成传输。对 $\forall f_i^k \in F_k, [v_a, v_b] \in A_k$, 有:

$$\begin{cases} \phi_{ij}^{k[v_a, v_b]} \geq 0 \\ \phi_{ij}^{k[v_a, v_b]} \leq T - l_{ij}^{k[v_a, v_b]} \end{cases} \quad (1)$$

② 链路约束。要求同一链路任意两帧传输无重叠。对 $\forall f_i^k, f_j^k \in F_k, [v_a, v_b] \in A_k$, 有:

$$\begin{cases} \phi_{im}^{k[v_a, v_b]} + \alpha p_i \geq \phi_{jn}^{k[v_a, v_b]} + \beta p_j + l_{jn}^{k[v_a, v_b]} \\ \phi_{jn}^{k[v_a, v_b]} + \beta p_j \geq \phi_{im}^{k[v_a, v_b]} + \alpha p_i + l_{im}^{k[v_a, v_b]} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: α 和 β 均为整数, $\alpha \in \left[0, \frac{T}{p_i}\right], \beta \in \left[0, \frac{T}{p_j}\right]$ 。

当 STSN 域 A_k 的用户发起请求时, STSN 域控制器判断是否存在满足上述传输约束的到达 STSN 域边界交换机的路径。若不存在, 则拒绝该任务; 若存在多条满足条件的路径, 则控制器计算每条路径的时延, 并选择时延最短的路径 P_{STSN} , 该路径的传输时延记为 D_{STSN} , 任务传输的起始时刻为 t_{start} 。

STSN 域控制器初步判断域内资源满足传输需求后, 将 D_{STSN} 上报至全局控制器用于后续端到端时延估计。此时, 全局控制器为新增的业务规划网络切片。设当前 FlexE 域中存在 N 个网络切片, 切片集合为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, 任意切片 $S_i \in S$ 的带宽为 $B_i = k_i \cdot g$, k_i 为正整数, 则有: $\sum_{i=1}^N B_i \leq W$ 。假设当前连接 STSN 域和 DTSN 域的网络切片数量为 x , 为了最小化切片带宽的占用, 网络切片的规划如下:

① 若 $x = 0$, 则为业务流 f_i^k 新增一个切片 S_{N+1} , 其带宽 $B_{\text{FlexE}}^i = B_{N+1}$ 满足:

$$\begin{cases} (k_{N+1} - 1) \cdot g \leq b_i \leq B_{N+1} = k_{N+1} \cdot g \leq G \\ \sum_{i=1}^{N+1} B_i \leq W \end{cases}, \quad (3)$$

式中： k_{N+1} 为正整数，上式为业务流 f_i^k 规划了一个满足业务传输的最小切片。

② 若 $x \neq 0$ ，设当前连接 STSN 域和 DTSN 域的网络切片的集合为 $S_{sd} = \{S_{sd}^1, S_{sd}^2, \dots, S_{sd}^M\}$ ，由于所有切片的带宽是切片粒度 g 的整数倍，因此并非所有切片带宽均被占满，任意切片 $S_{sd}^i \in S_{sd}$ 的切片带宽为 B_{sd}^i ，所承载的业务带宽为 w_{sd}^i 。将业务流 f_i^k 并入切片 S_{sd}^i 中，同时将切片 S_{sd}^i 的带宽大小增大 $\alpha \cdot g$ ，满足：

$$\begin{aligned} \min_{i, \alpha} \sum_{i=1}^M B_{sd}^i + \alpha \cdot g \\ \text{s. t. } w_{sd}^i + b_i \leq B_{sd}^i + \alpha \cdot g \leq G_0 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)表示将业务流 f_i^k 并入合适的切片中使得切片占用的总带宽最小，若所有现存的切片均无法并入，则根据式(3)创建新的切片。

最终，全局控制器为业务流 f_i^k 规划带宽为 B_{FlexE}^i 的切片进行传输，传输时延为：

$$D_{FlexE} = \frac{c_i}{B_{FlexE}^i} \quad (5)$$

业务流 f_i^k 到达 DTSN 域的时刻相对于超周期

起始的传输时刻为：

$$t_{arrive} = (t_{start} + D_{STSN} + D_{FlexE}) \bmod H \quad (6)$$

类似地，DTSN 域控制器获取 t_{arrive} 与业务流 f_i^k 的信息，根据式(1)、式(2)计算是否存在满足约束的传输路径。若不存在上述路径，则拒绝该任务；若存在，则选择时延最短的路径 P_{DTSN} ，该路径的传输时延记为 D_{DTSN} 。因此，业务的端到端时延 D_{E2E} 为：

$$D_{E2E} = D_{STSN} + D_{FlexE} + D_{DTSN} \quad (7)$$

若 $D_{E2E} \leq t_i$ ，则满足业务传输的时延要求，全局控制器下发业务准入决策，各区域控制器将配置信息(包括 STSN 域传输路径 P_{STSN} 及路径上各交换机门控配置，FlexE 切片配置，DTSN 域传输路径 P_{DTSN} 及路径上各交换机门控配置等)下发至各网络设备。

TSN 跨域资源调度示意如图 6 所示。图中 H 表示超周期， t_{starti} 表示业务 i 的传输起始时刻， $t_{arriveij}$ 表示业务 i 到达 TSN 域 j 的时间相对于超周期起始的时刻，控制器通过全网的资源编排为每个任务精确规划了互不重叠的传输时隙，避免了任务冲突带来的额外时延。

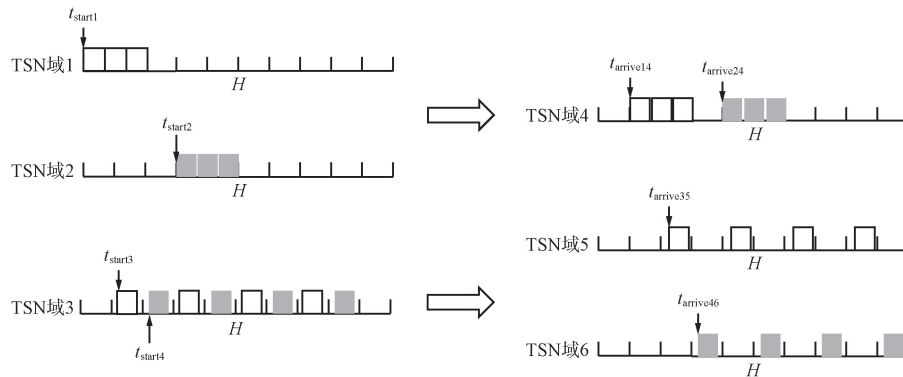


图 6 TSN 跨域资源调度示意
Fig. 6 TSN cross-domain resource scheduling diagram

3 测试验证

3.1 测试环境

为验证所提架构的有效性，搭建了一个跨越 1 000 km 的广域端到端确定性网络测试床，对 TSN 与 FlexE 融合网络进行测试验证。上述广域确定性网络由位于 A、B 两地的 TSN 交换机、NE1~NE3 三台 FlexE 设备构成，A、B 地之间的直线距离超过了

1 000 km。测试验证从网络性能测试和应用验证两方面展开。

网络性能测试的拓扑如图 7 所示，将测试仪的发送端和接收端分别与 STSN 域和 DTSN 域的 2 台 TSN 交换机相连，构成一个跨越广域网的环路，以模拟业务跨域端到端传输。FlexE 设备之间的链路速率为 100 Gb/s，TSN 交换机的端口速率为 1 Gb/s。测试仪的发端发出的流量经过 STSN 域

交换机的转发与 FlexE 网络的承载,最终跨越广域网络到达 DTSN 域被测试仪的收端接收。测试仪配套软件能够实时测量时延、抖动和丢包率等性能参数。

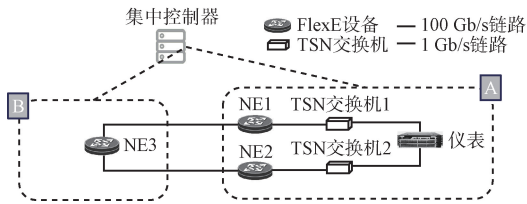


图 7 网络性能测试拓扑

Fig. 7 Network performance test topology

为契合未来远程协作及其他场景的需求,应用验证测试部分选取了主从电机协同与工业机器视觉 2 个应用场景,测试拓扑分别如图 8 和图 9 所示。在主从电机测试中,可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)产生的控制信号一方面直接传输至主电机,另一方面经过广域网的传输到达从电机,测试过程中观察主从电机的运行情况和同步状况。在工业机器视觉测试中,机器视觉系统的相机将需要处理的图像经过广域网传输到对端的服务器上进行计算,服务器再将计算结果返回至机器视觉系统控制端,以控制机械臂在指定位置进行作业。

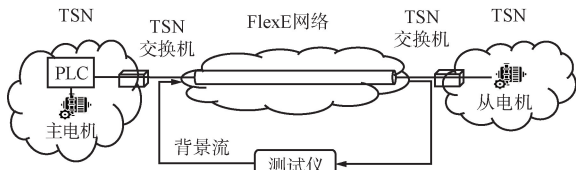


图 8 主从电机应用测试拓扑

Fig. 8 Master-slave motor application test topology

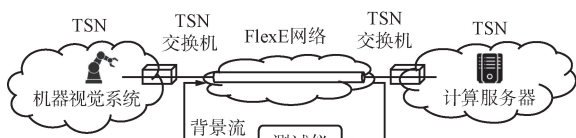


图 9 工业机器视觉应用测试拓扑

Fig. 9 Industrial machine vision application test topology

测试仪在测试过程中向广域网中注入背景流,以测试网络的确定性保障能力。主从电机协同业务流的带宽需求约为 20 Mb,测试仪生成的背景流的带宽设置为 50~70 Mb, VLAN ID 设置为 100。机器视觉业务流的带宽需求约为 500 Mb,测试仪生成的

背景流的带宽设置为 500~700 Mb, VLAN ID 设置为 100。

主从电机测试与工业机器视觉测试过程中的 FlexE 网络切片参数配置分别如表 1 和表 2 所示。所有的业务流均无 VLAN,测试中通过改变背景流的 VLAN ID 来控制背景所注入的切片。测试中所有 TSN 交换机的门控队列均配置为打开状态,以确保业务流到达交换机时能够被立即转发。

表 1 主从电机测试切片参数

Tab. 1 Slice parameters for master-slave motor test

网络功能	切片类型	切片带宽/Mb	切片 VLAN ID
无确定性保障	混合	40	无 VLAN
TSN-over-FlexE	业务	20	无 VLAN
确定性保障	背景	40	100

表 2 工业机器视觉测试切片参数

Tab. 2 Slice parameters for industrial machine vision test

网络功能	切片类型	切片带宽/Mb	切片 VLAN ID
无确定性保障	混合	500	无 VLAN
TSN-over-FlexE	业务	500	无 VLAN
确定性保障	背景	400	100

3.2 测试结果

测试仪满带宽(速率 1 Gb/s)发送数据,广域端到端确定性网络的性能测试结果如图 10 和图 11 所示。可以看出帧长度在 128~1 518 Byte 时,网络端到端时延可以始终保持在 17 ms 以内。随着数据帧大小的增加,其端到端平均时延也不断增加,端到端最大抖动逐渐减小,平均抖动始终保持在 5 μs 以内。

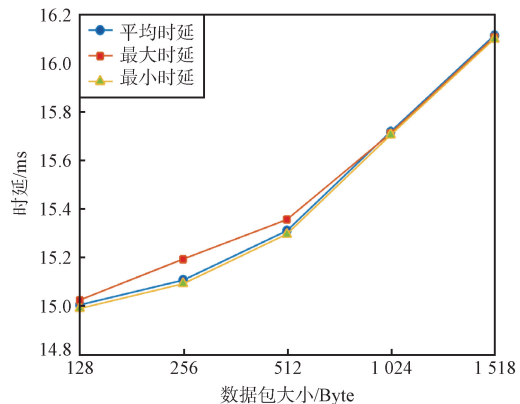


图 10 端到端时延测试结果

Fig. 10 End-to-end latency test results

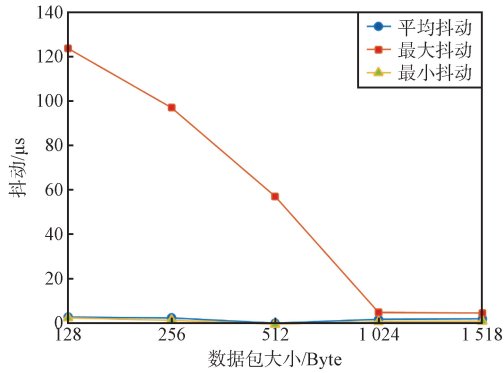
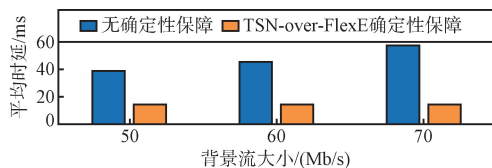


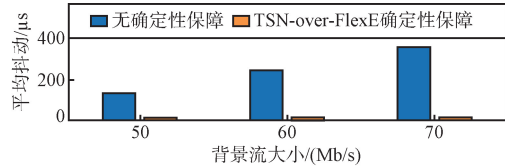
图 11 端到端抖动测试结果

Fig. 11 End-to-end jitter test results

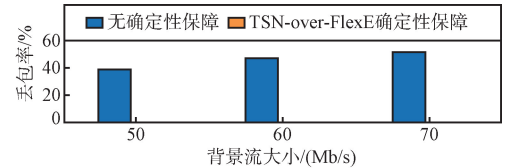
远程电机协同和工业机器视觉的测试验证结果如图 12 和图 13 所示,分别对模拟业务流量的传输性能和实际设备运行状态在不同情况下进行了对比。在远程电机协同测试中,分别向广域网注入负载为 50、60、70 Mb/s 的背景流。由图 12 可以看出,无不确定性保障时随着背景流负载的增加,业务流平均时延、抖动逐渐和丢包率不断增加。当背景流为 70 Mb/s 时,平均时延接近 60 ms,平均抖动超过 200 μs,业务数据的丢包率超过 40%。此时,观察设备运行状态,发现主从电机逐渐开始同步失败,直至最终无法正常启动。开启 TSN-over-FlexE 确定性保障后,由于提前进行了调度规划与切片隔离,业务的平均时延和抖动不受背景流的影响,平均时延始终保持在 20 ms 以内,平均抖动与无不确定性保障相比降低至原先的 1% 以内,业务数据的丢包率始终为 0。此时,电机不受背景流影响,始终能正常运行,主从电机始终能够保持同步。类似地,在工业机器视觉测试中,分别向广域网注入负载为 500、600、700 Mb/s 的背景流。由图 13 可以看出,在无不确定性保障的情况下,业务传输性能受到背景流的严重影响。观察实际设备运行状态,发现随着背景流负载的增加,图片传输质量逐渐变差,严重影响了服务器对图片内容的识别与计算。开启 TSN-over-FlexE 确定性保障后,业务传输的时延、抖动和丢包率性能提升显著,观察实际设备运行状态,发现工业机器视觉系统始终保持正常运行。



(a) 平均时延随背景流变化



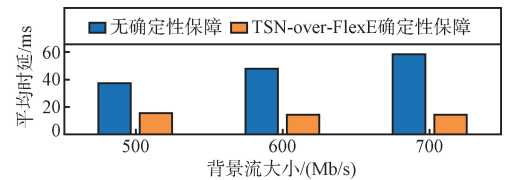
(b) 平均抖动随背景流变化



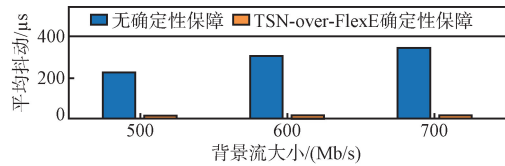
(c) 丢包率随背景流变化

图 12 主从电机协同测试结果

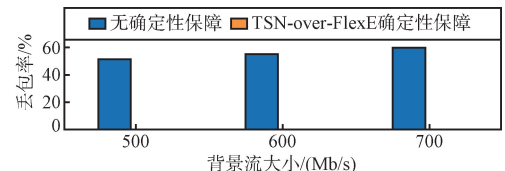
Fig. 12 Master-slave motor collaboration test results



(a) 平均时延随背景流变化



(b) 平均抖动随背景流变化



(c) 丢包率随背景流变化

图 13 工业机器视觉测试结果

Fig. 13 Industrial machine vision test results

上述测试结果说明,所提 TSN 与 FlexE 融合的不确定性广域网络能够通过资源预留、切片隔离等方法保障业务端到端传输时延、抖动的稳定性,提供零丢包的业务承载能力,在未来广域端到端确定性传输场景有着良好的应用前景。

3.3 适用性与局限性分析

常用的工业 TSN 交换机支持多种时钟同步协议,能够与 FlexE 设备良好兼容。TSN 能够提供精确的时间同步和确定性的网络延迟, FlexE 可以实现灵活的带宽分配和网络切片,二者结合可以满足

工业自动化控制、智能电网等应用场景对实时性和可靠性的需求。随着网络业务的不断丰富,TSN+FlexE 解决方案可以实现混合优先级业务流量的一体化传输,满足不同业务的服务质量要求。此外, FlexE 能够动态调整网络带宽,适应业务与流量的动态变化,大大提高网络的灵活性。

然而,该方案也存在一些局限性。首先,该方案基于物理层与数据链路层技术,对于高层协议的支持不够完善,限制了其在复杂网络环境中的应用范围;其次,该方案需要在网络中部署大量的设备及控制器,且对控制器之间的交互与计算能力要求较高,导致了较高的实施成本,不太适合预算有限的小型企业使用;最后,业务的传输性能与流量大小、周期和 TSN 门控列表之间的适配程度密切相关,这意味着一些非周期性的业务可能难以实现最佳的传输效果。

4 结束语

端到端确定性传输保障是所有确定性网络技术的最终目标,当前的确定性网络技术百花齐放,如何实现不同层级确定性技术的协同配合是实现确定性网络应用落地的关键。本文提出了一种 FlexE 与 TSN 融合的确定性网络架构,为工厂或园区的跨广域网络的确定性通信提供解决思路。搭建了测试床模拟实际工业应用场景,对该架构进行了测试验证,结果表明所提出的广域端到端确定性网络能够满足上述应用对网络的确定性保障需求。确定性网络技术的融合已成为一种必然趋势,未来将探索更多类型确定性技术的协同配合方案,以丰富广域端到端确定性网络架构。

参考文献

- [1] 梁杰恒. 基于深度学习的核电厂运行状态智能诊断及预测方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- [2] 李峰. 核电厂智能型开关柜和智能专家诊断系统的应用分析[J]. 科技与创新,2024(22):64-66.
- [3] 宗树枫. 核电厂数字化反应堆控制系统可靠性分析[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [4] GUO Q Z, MING Z, YU H, et al. Profit-aware Proactive Slicing Resource Provisioning with Traffic Uncertainty in Multi-tenant FlexE-over-WDM Networks[C]//ICC 2024-IEEE International Conference on Communications. Denver; IEEE, 2024:3059-3064.
- [5] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Timing and Synchronization for Time Sensitive Applications; IEEE 802. 1AS-2020 [S/OL]. (2020-06-19) [2024-12-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9121843>.
- [6] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network — Bridges and Bridged Networks; IEEE Std 802. 1Q-2018[S/OL]. (2018-05-07) [2024-12-14]. <https://1.ieee802.org/maintenance/802-1q-2018/>.
- [7] YANG X T, SCHOLZ D, HELM M. Deterministic Networking (DetNet) vs Time Sensitive Networking (TSN) [J/OL]. (2019-10-01) [2024-12-14]. https://www.net.in.tum.de/fileadmin/TUM/NET/NET-2019-10-1/NET-2019-10-1_15.pdf.
- [8] 郑晓亮, 邵蔚. 确定性 IP 网络 [DB/OL]. (2021-11-11) [2024-12-14]. <https://support.huawei.com/enterprise/zh/doc/EDOC1100209090>.
- [9] 高方方, 陈焱, 刘美慧, 等. 确定性网络技术研究[J]. 电子技术应用, 2024, 50(2):10-16.
- [10] 田晨景, 谢钧, 曹浩彤, 等. 5G 网络切片研究进展[J]. 计算机科学, 2023, 50(11):282-295.
- [11] 方子衿. 5G 承载网超高精度时间同步技术的研究与实现[D]. 武汉:武汉邮电科学研究院, 2019.
- [12] VILALTA R, MARTÍNEZ R, CASELLAS R, et al. Network Slicing Using Dynamic Flex Ethernet over Transport Networks[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). Gothenburg; IEEE, 2017:1-3.
- [13] KOULOUGLI D, NGUYEN K K, CHERIET M. Hierarchical Path Computation with Flexible Ethernet in Multi-layer Multi-domain Networks[C]//2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Rennes; IEEE, 2020:1-6.
- [14] KOULOUGLI D, NGUYEN K K, CHERIET M. Efficient Routing Using Flexible Ethernet in Multi-layer Multi-domain Networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 39(7):1925-1936.
- [15] KOULOUGLI D, NGUYEN K K, CHERIET M. Flexible Ethernet Traffic Restoration in Multi-layer Multi-domain Networks[C]//ICC 2021-IEEE International Conference on Communications. Montreal; IEEE, 2021:1-6.
- [16] LIANG H, DA FONSECA N L S, ZHU Z. On the Cross-Layer Network Planning for Flexible Ethernet over Elastic Optical Networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020, 18(3):3691-3705.
- [17] 张朝. 基于 TSN 和 FlexE 的实时网络带宽资源重构机制研究与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020.
- [18] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks; IEEE 802. 1Qbv[S/OL]. (2016-05-18) [2024-12-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8613095>.
- [19] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Bridges and Bridged Networks—Amendment 29: Cyclic Queuing and Forwarding; IEEE 802. 1Qch [S/OL]. (2017-06-28) [2024-12-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7961303>.

- [20] LI Y, JIANG J, HONG S H. Joint Traffic Routing and Scheduling Algorithm Eliminating the Nondeterministic Interruption for TSN Networks Used in IIoT [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(19): 18663–18680.
- [21] DÜRR F, NAYAK N G. No-wait Packet Scheduling for IEEE Time-Sensitive Networks (TSN) [C] // Proceedings of the 24th International Conference on Real-time Networks and Systems. New York: ACM, 2016: 203–212.
- [22] 汪硕, 黄玉栋, 黄韬, 等. 基于软件定义的时间敏感网络跨域调度机制[J]. 通信学报, 2021, 42(10): 1–9.
- [23] HUANG Y D, WANG S, HUANG T, et al. Cycle-based Time-sensitive and Deterministic Networks: Architecture, Challenges, and Open Issues [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(6): 81–87.
- [24] PENG G Y, WANG S, LI Z Q, et al. Deterministic Cognition: Cross-domain Flow Scheduling for Time-sensitive Networks [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2024, 10(4): 1481–1495.
- [25] 强鹏, 刘冰洋, 于德雷, 等. 大规模确定性网络转发技术[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 12–19.
- [26] 石鸿伟, 陈庆强, 程智炜, 等. 面向广域确定性网络的控制面技术研究[J]. 电信科学, 2023, 39(11): 27–38.
- [27] WU B W, WANG S, WANG J S, et al. Flexible Design on Deterministic IP Networking for Mixed Traffic Transmission [C] // ICC 2022-IEEE International Conference on Communications. Seoul: IEEE, 2022: 4360–4365.
- [28] KROLIKOWSKI J, MARTIN S, MEDAGLIANI P, et al. Joint Routing and Scheduling for Large-scale Deterministic IP Networks [J]. Computer Communications, 2021, 165: 33–42.
- [29] 许方敏, 伍丽娇, 杨帆, 等. 时间敏感网络(TSN)及无线TSN技术[J]. 电信科学, 2020, 36(8): 81–91.

作者简介:

刘美慧 女, (1999—), 博士研究生。主要研究方向: 时间敏感网络、确定性网络。

陈焱 男, (1988—), 工程师。主要研究方向: 核电、电力工程领域的通信网络业务及信息化、数字化、智能化业务的研究、规划及设计。

沈彬 女, (1983—), 高级工程师。主要研究方向: 信息通信技术与工业互联网领域的研究、规划、标准等。

付韬 男, (1988—), 博士, 高级工程师。主要研究方向: 工业互联网中的确定性网络、工业算力及其融合理论与应用。

许方敏 男, (1982—), 博士, 副教授。主要研究方向: 物联网、未来网络技术。

赵成林 男, (1964—), 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 短距无线电传输技术、认知无线电技术、毫米波技术、工业互联网。