

时间确定性网络技术与应用研究进展

宋克, 梁若愚, 张文建, 曹志鹏, 吕平

(网络空间部队信息工程大学国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450003)

摘要: 传统以太网采用尽力而为通信机制, 在网络流量较大的情况下会存在拥塞、丢包等情况。在此背景下, 如何通过精确控制网络数据转发行为, 将时延、抖动和丢包率控制在有限范围内成为学术界的研究热点。凭借出色的服务质量 (QoS) 保障能力, 时间确定性网络在工业 4.0、智慧建筑、5G/6G 等新兴领域发挥了极其重要的作用。首先对典型的时间确定性网络包括时间触发网络 (TTE)、时间敏感网络 (TSN) 和确定性 IP (DIP) 网络中关键技术进行对比总结, 进而选取 2 种典型应用场景进行需求分析并描述未来可能应用的场景, 最后就时间确定性网络未来发展趋势进行讨论。

关键词: 时间确定性网络; 时钟同步; 流量调度; 天地一体化; 智能电网

中图分类号: TP393.0

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025172

Advances in time-deterministic network technology and application research

SONG Ke, LIANG Ruoyu, ZHANG Wenjian, CAO Zhipeng, LYU Ping

National Digital Switching System Engineering & Research Center,
Cyberspace Force Information Engineering University, Zhengzhou 450003, China

Abstract: Traditional Ethernet employs a best-effort communication mechanism, which leads to congestion and packet loss under heavy network traffic. In this context, precisely controlling network data forwarding to confine delay, jitter, and packet loss rate within bounded limits has become a research focus in academia. Owing to its excellent quality of service (QoS) guarantee capability, time-deterministic networking has played an extremely important role in emerging fields such as Industry 4.0, smart buildings, and 5G/6G. Key technologies of typical time-deterministic networks—including time-triggered Ethernet (TTE), time-sensitive networking (TSN), and deterministic-IP (DIP)—were first compared and summarized. Subsequently, two representative application scenarios were selected for requirement analysis, and potential future application scenarios were described. Finally, future development trends of time-deterministic networking were discussed.

Keywords: time-deterministic network, clock synchronization, traffic scheduling, space-ground integration, smart grid

0 引言

时间确定性网络是指能够确保数据在网络中按照预定的时间约束进行传输和交付的网络, 具有可预测、低时延、低抖动以及高可靠等特

性^[1]。随着新兴行业的不断发展, 出现了无人机、自动驾驶、5G、未来工厂、4K/8K 视频传输等需要时间确定性网络服务的应用场景。目前, 时间确定性网络业务通常按照硬实时需求进行分类,

收稿日期: 2025-07-23; 修回日期: 2025-09-15

通信作者: 梁若愚, 2327577603@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2022YFB2901004)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2901004)

即亚秒级、毫秒级、微秒级等。这种分类方式虽然直观，却未能充分揭示不同业务在技术实现路径上的本质差异。因此，本文在硬实时分类的基础上，进一步提出以“传输距离-流量异构性”为核心特征的二维分类框架。第一类为中短距离、高异构性业务。此类业务传输范围通常局限于园区、工厂或数据中心内部，但其核心挑战在于需在同一网络内承载多优先级、多模态混合流量。典型应用场景为工业控制，例如，机械臂协同等闭环控制业务构成最高优先级的微秒级硬实时流量，要求传输截止时间严格小于 1 ms，抖动控制在 1 μs 以内，且实现零丢包^[2]；传感器数据上传、生产状态监控等毫秒级周期性业务，要求端到端时延在 1~10 ms^[3]；设备日志、参数配置等非关键任务则构成亚秒级的弹性流量，对时延容忍度较高。此外，其他典型场景还包括智慧建筑楼宇自动化系统中，毫秒级紧急安防报警与亚秒级温湿度环境调节^[4]，电网配网自动化中微秒级继电保护信号与秒级用电信息采集^[5]等。第二类为长距离、低异构性业务。此类业务通常表现为单一或少数几种数据流，但其核心挑战在于需跨越城域甚至广域距离，依然能提供极低且稳定的时延与抖动保障。典型应用场景为音视频传输：一方面，4K/8K 视频流量具有严格的周期性，60 frame/s 视频要求网络每 16.7 ms 提供一个均匀的传输窗口，120 frame/s 则需 8.3 ms，任何抖动都会导致画面卡顿或“忽快忽慢”；另一方面，为实现沉浸式体验，音画同步误差必须小于 2 ms，属于毫秒级硬实时需求^[6]。此外，其他典型应用场景还包括远

程医疗中微秒级手术机器人控制^[7]、金融高频交易中微秒级跨数据中心的数据同步^[8]等。为了更加系统并且直观地对比上述 2 类时间敏感业务的差异化特征，表 1 从业务类型、流量特性、确定性需求等关键维度进行了对比总结。

现有的以以太网为代表的网络技术虽然凭借其低成本、高带宽等优势被广泛应用，但其本质上仍采用尽力而为的通信机制，缺乏可靠性和实时性，在网络流量较大的情况下易造成网络拥塞和丢包，难以提供服务质量保证^[9]。为解决上述问题，在控制器局域网（CAN）、过程现场总线（PROFIBUS）等现场总线的基础上，一些企业、标准化组织推出了各自的方案机制来确保网络确定性。例如，罗克韦尔公司提出的 Ethernet/IP 技术，由开放式设备网络供货商协会（ODVA）负责管理与推广；西门子提出的 Profinet 技术，其标准化推进与生态建设由 Profibus 与 Profinet 国际组织（PI）主导；倍福公司提出的 EtherCAT 技术，技术规范的迭代及产业协作工作由 EtherCAT 技术协会（ETG）牵头实施；贝加莱公司提出的 Powerlink 技术，则由以太网 Powerlink 标准化组织（EPSG）承担技术维护与推广，如表 2 所示。

虽然上述 4 种技术标准占据超过 40% 的市场份额^[14]，但是各种网络协议独立的网络配置互不兼容，使标准以太网和以上各种协议无法直接通信。因此，标准化组织如电气电子工程师协会（IEEE）、国际自动机工程师学会（SAE）等组织相继开展了更通用的标准制定，旨在提供稳定、优质的时间确定性网络服务。

表 1 时间敏感业务特征对比

业务类型	流量特征	核心流量类型	时延要求	抖动	典型应用场景
中短距离 高异构性	多优先级 多模态混合	控制流（机械臂协同） 保护流（继电保护指令）	微秒级 (<1 ms)	≤1 μs（关键流） ≤100 μs（普通流）	工业控制 楼宇自动化 配网自动化
		报警流（紧急信号） 采集流（用电信息）	毫秒级 (1~10 ms)		
		调节流（温湿度控制） 传感流（温度/压力采集）	亚秒级 (>100 ms)		
长距离 低异构性	单一或少数几种周期性流量	主流量 (视频流、远程手术控制流)	微秒级 (<1 ms)	≤10 μs（主流量） ≤100 μs（常规流量）	4K/8K 音视频 远程手术 高频交易
		辅助流量 (音频流、体征数据流)	毫秒级 (1~10 ms)		
		单一流量 (跨中心数据同步流)	微秒级 (<1 ms)		

表 2 典型的企业网络技术

技术名称	企业/组织	工作组	协议基础	拓扑结构	时间精度	周期	抖动
Ethernet/IP ^[10]	罗克韦尔	ODVA	基于 TCP/IP 扩展 CIP	星形、环形、混合拓扑	微秒级	≥1 ms	≤100 μs
Profinet ^[11]	西门子	PI	标准以太网 Profinet IO 扩展	星形、总线形、树形	纳秒级	≤100 μs	≤1 μs
EtherCAT ^[12]	倍福	ETG	标准物理层 EtherCAT 协议	逻辑环形、混合拓扑	纳秒级	≤10 μs	≤10 ns
Powerlink ^[13]	贝加莱	EPSG	标准以太网 CANopen 扩展	星形、总线形、环形	微秒级	≤100 μs	≤1 μs

时间触发架构最早由 Hermann Kopetz 提出^[15], 核心思想是基于全局精确时钟同步, 预定义通信时刻表以消除网络竞争与不确定性。此架构陆续解决了许多高安全关键系统(航空航天、军工)中的实时性问题。2011年11月, SAE AS6802 标准正式发布全球首个时间触发网络(TTE, time-triggered ethernet)技术标准。与此同时, 在工业控制领域, IEEE 802.1 委员会于2005年成立了音频视频桥接(AVB, audio video bridging)任务组, 主要解决以太网中音频视频数据实时同步传输的问题。2012年, 在思科、英特尔等行业巨头的支持下, IEEE 802.1 工作组扩大了 AVB 的业务范围, 从音视频扩展到了车载、工业自动化领域, 更名为时间敏感网络(TSN, time-sensitive networking), 并将 TTE 核心机制(如时间感知整形)纳入 TSN, 成为 IEEE 802.1Qbv 等子标准基础。然而, 由于 TTE 与 TSN 协议主要工作在数据链路层, 仅解决局部网络域的时间确定性, 并且无法直接调度 IP 路由路径, 无法避免跨子网时出现的传统 IP 转发拥塞。并且传统 IP 统计复用转发方式的端到端时延上限极高, 在某些情况下甚至没有上限^[16]。链路最大利用率 $v < \frac{1}{h-1}$ 时

(h 是流经的最大跳数), 可以得到时延上限, 且时延上限随 h 增长很快; 当 $v \geq \frac{1}{h-1}$ 时, 则没有时延上限。华为和紫金山实验室于2020年提出确定性 IP (DIP, deterministic IP) 网络, 在 L3 重构转发机制, 通过全局软件定义网络(SDN, software defined network)控制器进行子网与骨干网络的时间确定性 IP 传输, 实现大规模可扩展的端到端确定性低时延网络系统, 填补了 TTE/TSN 的上层短板。典型的时间确定性网络协议的主要特性如表 3 所示。

近年来, 时间确定性网络的研究愈发成熟, 但很少有研究详细横向对比分析不同类型时间确定性网络关键技术及其相关应用场景。因此, 本文首先对比分析 TTE、TSN 与 DIP 这 3 种典型时间确定性网络的关键技术; 进而针对天地一体化与智能电网 2 种应用场景, 具体介绍了时间确定性网络的应用案例; 最后根据目前时间确定性网络的局限性, 从跨层技术融合、面向时间确定性的高性能嵌入式互连 2 个方面对未来可能的发展方向进行分析。

1 时间确定性网络研究现状

在时间确定性网络体系中, 时钟同步机制是实

表 3 典型的时间确定性网络协议的主要特征

协议	TTE	TSN	DIP
核心标准	SAE AS6802	IEEE 802.1Q 系列	确定性网络 (DetNet) 草案+华为私有扩展
层级	L2	L2	L3
设计原理	全局离线调度+时间触发	动态/静态调度+时间整形 (Qbv) +流量监管	全网 SDN 调度+L3 时隙化转发 (GSTS) +路径预留
时钟精度	≤100 ns	1 μs	1 μs
抖动	≤10 μs (域内)	≤50 μs (域内)	≤50 ms (跨子网)
调度模式	严格集中式 (离线配置)	集中式 (SDN) /分布式	全局集中式 (SDN 超级控制器)
应用场景	航天、核电	工业控制、车载网络	智能制造、广域网保护
代表厂商	时触电子技术、美国宇航局	英特尔、思科	华为
优势	故障零容忍、纳秒级确定性	低成本升级、标准开放	大规模组网、云网协同
局限	成本高、不易扩展	跨子网确定性需上层配合	依赖中心控制器、时延精度弱于 L2 协议

现流量调度与时延保障的基础前提。由于绝大多数调度协议（如时间触发、时隙分配）依赖于全网设备的微秒级乃至纳秒级时间对齐，同步精度直接决定了流量调度的可实现时延边界。此外，为确保极端工况下的服务确定性，需在基础时钟同步之上叠加可靠性传输机制（如冗余路径）及容错机制（如故障快速隔离）。因此，本节将从时钟同步、流量调度 2 个方面来展开对比分析，并结合“传输距离-流量异构型”等业务需求来明确 TTE、TSN、DIP 的应用场景边界。

1.1 时钟同步

时钟同步作为时间确定性网络实现流量调度与时延保障的核心基础，其技术路径需适配不同网络拓扑、应用场景及精度需求。例如，航天领域需要严格时序，工业领域需要平衡时间确定性与灵活性，广域 IP 网络需跨域协同。不同场景的多样化需求逐渐催生了 3 种典型同步方法：分布式时钟同步、主从架构时钟同步以及 IP 协同时钟同步。以下将从 3 种同步方法的技术原理与实现机制展开详细分析。

1.1.1 分布式时钟同步

TTE 基于 AS6802 协议来实现分布式时钟同步。网络中将设备分为 3 类，分别为同步主机（SM, synchronization master）、同步客户端（SC, synchronization client）以及压缩主机（CM, compression master）。端与端之间通过互相交换协议控制帧（PCF, protocol control frame）来实现精确时间同步^[17]。具体同步算法流程如图 1 所示。

SM 首先根据本地时钟向 CM 发送包含精确时间的 PCF 帧，控制帧在路径上经过各个节点排队等候的时间以及在链路上传播的时延会累积起来记录在 PCF 帧的透明时钟（TC, transparent clock）字段。由于网络情况不可控，PCF 帧的接收顺序与发

送时间顺序不一致，因此 CM 接收到 PCF 帧之后会首先进行固化，确定一个固化时间点以便于对接收到的 PCF 帧按 SM 的发送时间进行排序^[18]。固化时间点可通过式(1)计算。

$$PCF_{pt} = PCF_{Crt} + (D_{max} - T_{tc}) \quad (1)$$

其中， D_{max} 代表传播过程中可能会出现的最大时延， PCF_{pt} 代表固化的时间点， PCF_{Crt} 代表 CM 接收到 PCF 的时间点。

固化结束后，CM 会通过容错平均的方式进行压缩，计算出压缩完成时刻 PCF_{ct} 。接着基于压缩完成时刻进行时钟矫正并向 SM/C 发送处理后的 PCF 帧。压缩完成时刻可以通过式(2)计算。

$$PCF_{ct} = PCF_{pt} + T_{ow} + T_{co} + T_{cor} \quad (2)$$

其中， T_{ow} 为观察窗口长度，在观察窗口内必然能收集齐所有 PCF 的固化点； T_{co} 为进行压缩计算所需要的时间； T_{cor} 表示计算阶段结束后进行的一段时延。

计算出压缩完成时刻后再经过一段调度时延后就可以将 PCF 帧重新发回 SM/C。调度时延具体由 CM 节点内部调度算法决定。

SM/C 会在 PCF_{Srt} 时刻周围打开一个接收窗口，使用在此窗口内接收到的 PCF 帧进行偏移量计算，如式(3)所示。

$$T_{adj} = \text{median} \{ SMC_{resp} - SMC_{best} \} \quad (3)$$

其中， median 表示取中位值， SMC_{resp} 表示 SM/C 预计接收到 PCF 的时间点， SMC_{best} 表示 SM/C 接收到的最佳 PCF 帧的固定点。最后，各个 SM/C 可以根据 T_{adj} 调整设备的本地时钟。

1.1.2 主从架构时钟同步

在 TSN 中，用于时钟同步的是 802.1 AS 标准，其在 IEEE 1588-2019 标准的精确网络时间协议（PTP, precision time protocol）时间同步机制的基

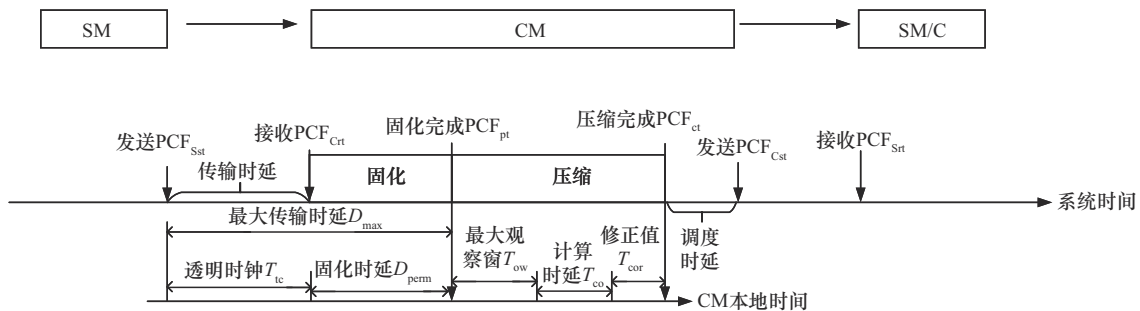


图 1 TTE 同步算法流程

基础上提出了广义精确时间同步协议 (gPTP, generalized precision time protocol) 时间同步模型。gPTP 采用主从同步方式, 通过最佳主时钟算法 (BMCA, best master clock algorithm) 形成 gPTP 域。网络中分为主时钟节点 (GM, grand master) 和从时钟节点 (slave) [19]。GM 向 slave 广播时间, slave 按照广播进行时间同步。具体的同步算法流程如图2所示。

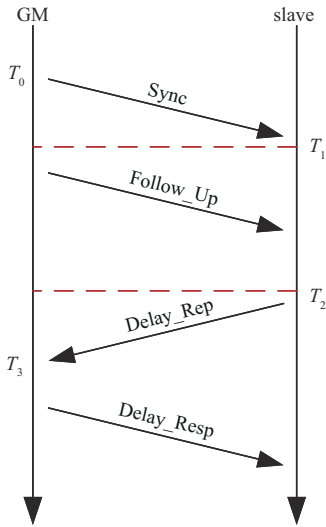


图2 TSN同步算法流程

首先, GM在 T_0 时刻发出同步报文 Sync, 但报文里面通常不会携带 T_0 时间戳, 因为 T_0 实际上为从物理层发出报文的时间。报文从物理层发出去, 还需按照 TCP/IP 逐层向下封装, 物理层发出的时间会比报文生成时间延迟几纳秒。此时 Sync 报文里面携带的时间戳为产生报文的时间, 而不是报文发送的时间[20]。

因此需要先把 Sync 报文发送出去的 T_0 时刻的时间戳封装在 Follow_Up 报文中进行发送。接着 slave 发送一个 Delay_Req 报文, 并记录发送 T_2 , GM再记录 Delay_Req 报文的接收时间 T_3 , 并把 T_3 封装在 Delay_Resp 报文中再发给 slave。此时, slave 就获得了4个时间, 分别是 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 , 其中, T_0 为GM发送 Sync 报文的时刻, T_1 是 slave 接收到 Sync 报文的时刻, T_2 是 slave 发送 Delay_Req 报文的时刻, T_3 是GM接收到的时刻。将收到 Sync/Follow_Up 报文记作 T_{in} , 转发前记录出口时间为 T_{out} , 则可通过式(4)计算驻留时间为 residence_Time。

$$\text{residence_Time} = (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

GM 到 slave 的单向时延 MS_delay 和 slave 到 GM 的单向时延 SM_delay 可分别由式(5)和式(6)计算得出。

$$\text{MS_delay} = (T_1 - T_0) - T_{\text{resSync}} \quad (5)$$

$$\text{SM_delay} = (T_3 - T_2) - T_{\text{resDelay}} \quad (6)$$

其中, T_{resSync} 代表 Sync 报文从进入第一个交换机到抵达从设备的总驻留时间, T_{resDelay} 代表 Delay_Req 报文从进入交换机到抵达主设备的总驻留时间。接着可以通过式(7)和式(8)计算出路径时延 Path_Delay 和时钟偏移量 T_{offset} 。

$$\text{Path_Delay} = \frac{\text{MS_delay} + \text{SM_delay}}{2} \quad (7)$$

$$T_{\text{offset}} = T_1 - T_0 - \text{Path_Delay} - T_{\text{resSync}} \quad (8)$$

最后 slave 可根据 T_{offset} 调整本地时钟 T_{local} , 从而实现与 GM 的时钟同步, 如式(9)所示。

$$T_{\text{local}} = T_{\text{local}} - T_{\text{offset}} \times K_{\text{filter}} \quad (9)$$

其中, K_{filter} 代表滤波因子 ($K_{\text{filter}} = 0.7 \sim 1.0$), 避免时钟调整时出现过冲振荡。此外, TSN 时钟同步还有一种方法, 利用硬件取代了 Follow_Up 报文的功, 但是基本原理相似, 在此不过多赘述。

1.1.3 IP协同时钟同步

DIP 采用 SDN 集中式全局调度与分布式动态补偿相融合的架构, 其原理是通过控制器对全网传输时延实时建模、边界路由器硬件级时间戳修正以及终端自适应驯服算法3层协同, 实现微秒级同步精度, 为广域时间确定性通信提供了理论完备的时钟同步式[21]。

第一阶段, 为适配 IP 网络的路由动态性, SDN 控制器在构建时延矩阵时, 会针对 IP 路由的逐跳转发特性进行优化, 通过边界网关-路由状态 (BGP-LS) 协议实时获取各 IP 链路的路由度量, 并且与 TSN 类似, 选出一个 GM, 并构建时延矩阵, 如式(10)所示。

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & d_{22} & \cdots & \delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{m1} & \delta_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, δ_{ij} 表示链路时延与队列调度时延之和, d_{ii} 为节点驻留时延。由于路由调度问题, 每对通信节点 (i, j) 在同一条路径双向传输也会存在时延差 Δ_{asym} ,

如式(11)所示。

$$\Delta_{\text{asym}} = \frac{|\delta_{i \rightarrow j} - \delta_{j \rightarrow i}|}{2} \quad (11)$$

Δ_{asym} 与 IP 路由表绑定, 当路由发生切换时, 控制器可在 50 ms 内更新对应节点的 Δ_{asym} 参数, 确保 IP 转发路径变化时仍能维持同步精度。同时, 控制器通过网络配置协议 (NETCONF, network configuration protocol) 将 IP 层的同步策略下发至边界路由器, 使同步报文在 IP 网络中获得优先转发权, 避免被尽力而为 (BE, best-effort) 流量挤占带宽。

第二阶段, 边界路由器会根据时延差进行报文级修正。修正后的时间可以通过式(12)计算得到。

$$T_{\text{adj}} = T_0 + \Delta_{\text{router}} + \Delta_{\text{asym}} + \Delta_{\text{temp}} \quad (12)$$

其中, T_0 为 Sync 报文从 GM 发出的时间, 由 GM 硬件记录并直接写入 Sync 报文; Δ_{router} 与上文 TSN 同步机制中 residence_Time 相同, 都为节点驻留时间; Δ_{temp} 为温度漂移补偿, 由板载传感器实时校准。边界路由器的核心作用在于实现 L2 与 L3 的时间同步协同, 对于来自 TSN 域的 gPTP 同步报文, 路由器会将其封装为 IP 数据包并保留物理层时间戳在 IP 选项字段, 通过 IP 路由转发至广域网络; 对于来自 IP 骨干网的同步报文, 则会剥离 IP 头部, 提取时间信息并转换为 TSN 兼容的硬件时间戳, 传递至本地 TSN 交换机。这种跨层协议转换机制, 解决了 TTE/TSN 仅能在 L2 域内同步、无法穿透 IP 子网的局限, 实现了“IP 广域网+本地 TSN 局域网”的协同同步。

第三阶段 slave 会根据 T_{adj} 进行最后的时钟同步。首先通过式(13)计算 slave 的时钟偏差 T_{offset} 。

$$T_{\text{offset}} = (T_1 - T_{\text{adj}}) - \frac{(T_3 - T_2)}{2} - e_{\text{cal}} \quad (13)$$

其中, T_1 、 T_2 、 T_3 , 以及式(11)中的 T_0 都可参照 TSN 同步原理中相同变量, e_{cal} 为校准误差补偿量, 用来进行误差修正。

然后 slave 根据时钟偏移量进行时钟频率调整, 具体计算如式(14)所示。

$$\begin{cases} u_p = K_p \cdot T_{\text{offset}} \\ u_i = K_i \cdot \int_0^t T_{\text{offset}} dt \\ \Delta f = \alpha u_p + \beta u_i \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\alpha = 0.6$ 、 $\beta = 0.4$, 2 个权重因子由华为专利

规定; K_p 、 K_i 通过 Lyapunov 稳定性理论自适应调整。此时 slave 可以通过总调频量 Δf 调整时钟频率, 从而实现时钟同步。

1.1.4 时钟同步小结

综上所述, 3 种时钟同步对比如图 3 所示。

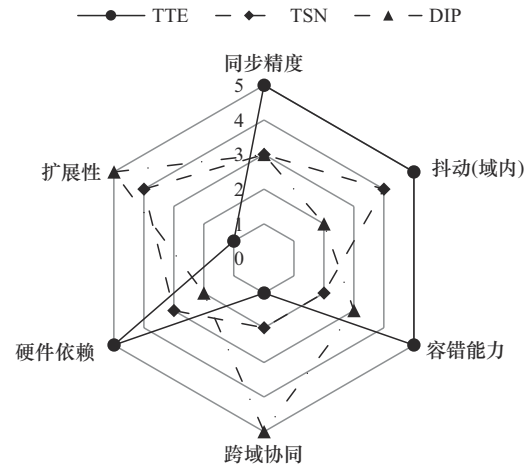


图 3 3 种时钟同步对比

从同步原理来看, TSN 和 DIP 都基于 4 个时间戳的偏差计算这一共同范式。范式目标是消除网络传输时延的影响, 计算出主从设备间的绝对时钟偏差。2 种协议产生分化的原因主要是如何处理网络中的非理想因素。例如, TSN 通过 BMCA 算法选举最佳时钟, 并且假设端与端双向路径对称; DIP 通过 SDN 指定主时钟, 在路径不对称性方面则通过 SDN 动态测量并且通过下发 Δ_{asym} 进行时钟补偿。与这 2 种同步逻辑不同的是, TTE 的时钟同步并不是依赖单向主从授时, 而是在最后通过取中值函数进行多节点共识校准, 要求所有节点对等参与误差计算。

从同步精度上来看, TTE 通过固化、压缩等同步算法, 再结合专用集成电路 (ASIC, application-specific integrated circuit) 硬件提供的硅时间戳, 可以将时间同步精度控制在 100 ns 以内。相比之下, TSN 和 DIP 改进 PTP, 基于主从架构的时间同步存在路径非对称性、时钟级联误差等问题, 同步精度存在微秒级别的物理瓶颈。研究表明, TTE 在同步精度、可靠性方面优势明显, 为航空航天任务提供了充分保障, TSN 与 DIP 牺牲部分精度换来了一定程度灵活性, 在工业控制领域应用更为广泛。

从容错方面来看, TTE 采用混合时钟同步架构^[22], SM 与 CM 均采用 3 层冗余配置。每个节点

通过周期性交换PCF实现全局同步,即使多个节点故障,仍能通过固化功能恢复同步帧顺序,确保时间偏差控制在±50 ns内。当主从架构的时钟同步在主时钟失效时,需通过BMCA重新选举,可能导致数十毫秒同步中断。即使提前做好双主时钟的冗余结构,在切换主时钟后仍需要重新进行同步,可能会导致数十毫秒的同步时延。

从“传输距离-流量异构性”二维分类来看,TTE的分布式同步凭借纳秒级精度与硬件级容错,适配中短距离-高异构性业务中零容错业务,但其静态配置与单域局限无法满足长距离需求;TSN的主从同步支持动态节点接入与重同步,能应对中短距离-高异构性业务的设备增减,是工业场景的主流选择;DIP的IP协同时钟同步通过SDN动态补偿路径不对称性,解决了长距离-低异构性业务的跨子网同步问题,虽精度不及前两者,但可满足单一数据流的长距离传输要求。

1.2 流量调度

从优先级来看,时间确定性网络中大致将流量分为3类,分别为时间触发(TT, time-triggered)流量、速率约束(RC, rate constrained)流量和BE流量^[23]。从生成周期来看,通常分为周期流量和非周期流量。其中,TT流量大多属于周期流量,可以直接用门控调度列表(GCL, gate control list)分配微时隙进行调度,RC和BE流量通常需要额外的流量整形策略来将非周期流量转化为准周期流量再进行调度^[24]。因此,本节将从流量分类模型、GCL生成机制、非周期流量协同策略3个方面详细介绍时间确定性网络的流量调度。

1.2.1 流量分类模型

周期流量指发送时刻序列满足确定性周期关系的流量^[25],如式(15)所示。

$$\exists \Delta T > 0, \forall k \in N^+, t_{k+1} - t_k = \Delta T \quad (15)$$

其中, t_k 表示第 k 个帧的发送时间; ΔT 为固定值,在工业控制领域通常为1~100 ms。

非周期流量又可以分为低突发强度流量和高突发强度流量,其中低突发强度流量(如设备上报、低频时间告警等)通常采用累积分布函数,如式(16)所示。

$$P(\Delta T \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (16)$$

其中, λ 为时间平均到达率,决定流量密度。

高突发强度流量通常采用帕累托分布,如

式(17)所示。

$$\text{Burst_Size} \sim \text{Pareto}(\alpha, x_m) \quad (17)$$

其中, $\alpha > 0$, 决定突发强度,当 $\alpha \leq 1$ 时,表示无限方差,常用于极端突发,当 $\alpha > 2$ 时,表示有限方差,在工业控制上较为常见; x_m 为最小突发规模。

为了界定当前流量是否为周期流量,通常还会引入周期性指标(PI, periodicity index)^[26],核心公式为

$$\text{PI} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} \left| \frac{\Delta t_k - \overline{\Delta t}}{\overline{\Delta t}} \right| \quad (18)$$

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} \Delta t_k \quad (19)$$

其中, Δt_k 为第 k 个相邻事件的实际时间间隔; $\overline{\Delta t}$ 为所有间隔的算术平均值; N 为事件总次数; $\left| \frac{\Delta t_k - \overline{\Delta t}}{\overline{\Delta t}} \right|$ 为单次间隔的相对偏差,反映该间隔偏离平均值的程度; $\frac{1}{N-1}$ 为归一化系数,计算相对偏差的平均值,避免数据量影响结果。

根据PI的值区分流量类别,通常标准如表4所示。

表 4	流量分类	
PI	周期性	典型场景
PI ≤ 0.05	强周期性	工业控制指令
0.05 < PI ≤ 0.3	弱周期性	生产调度指令
PI > 0.3	非周期性	突发性数据流

1.2.2 GCL生成机制

在研究时间确定性网络的流量调度的过程中发现,虽在整形策略(如TTE的固定时隙分配、TSN的异步流量整形、DIP的SDN带宽预留)上存在差异,但存在一个共有的核心调度范式——GCL^[27]。这表明GCL在时间确定性网络中扮演承担着调度策略的硬件执行层角色,其将抽象的时间约束转化为硬件的确定性行为,如式(20)所示。

$$G(t) = \sum_{k=1}^n \prod_{[t_k^{\text{start}}, t_k^{\text{end}}]} \cdot \text{gate_state}_k \quad (20)$$

其中, $G(t)$ 表示在 t 时刻的门控状态(0表示关,1表示开); n 表示总的门控状态由 n 个独立的调度时间窗叠加组合而成,是门控列表中的条目数量;

t_k^{start} 与 t_k^{end} 表示第 k 个门控时间窗的开始与结束时间； Π_{interval} 为指示函数；符号 \cdot 表示在特定时间让 gate_state_k 生效。式(20)表明，在给定的任何时刻 t ，门控状态 $G(t)$ 是由当前时间 t 落在哪个门控时间区间内决定的。如果 t 落在第 k 个条目的时间区间内，那么 $G(t)$ 就等于 gate_state_k （通常为 1，表示门打开），否则为 0。下面将从 GCL 生成机制、门控精度保证、故障处理策略 3 个方面对上述时间确定性网络的 GCL 机制进行分析。

GCL 的生成大体上分为 2 类，一类是静态 GCL，典型的代表为 TTE；另一类是动态 GCL，代表为 DIP。在实际应用中 TSN 支持混合模式，即基础框架静态与部分队列动态相结合。

无论是动态 GCL 还是静态 GCL，超周期构建结合微时隙分配是共同范式。超周期构建如式(21)所示。

$$T_{\text{hypercycle}} = \text{LCM}(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n) \quad (21)$$

其中，LCM 函数为求最小公倍数， $(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n)$ 分别为不同 TT 流量的周期。

微时隙分配的目标函数和约束如式(22)和式(23)所示。

$$\min \sum (t_{\text{slot_end}}^{(k)} - t_{\text{slot_start}}^{(k)}) \quad (22)$$

$$(t_{\text{send}}^{(i)} \notin [t_{\text{start}}^{(j)}, t_{\text{end}}^{(j)}]) \quad (23)$$

其中，式(22)为目标函数， $t_{\text{slot_end}}^{(k)}$ 表示第 k 个时隙结束， $t_{\text{slot_start}}^{(k)}$ 表示第 k 个时隙开始，目标为尽可能缩小微时隙；式(23)为约束，表示流量互不冲突。

在拥有共同范式的基础上，2 种 GCL 生成方式不同的地方在于算法和优化目标的选择。TTE 常用于航空航天等要求高可靠的场景，其 ASIC 芯片只能存储固定大小的调度表，因此其必须采用静态算法，同时也可避免在线实时计算 GCL 的高复杂度和潜在时延，一般 TTE 中的 GCL 生成之后便不能在运行中更改^[28]。静态 GCL 在算法上的选择通常追求全局最优解，在约束方面采用硬约束，即零抖动、物理链路隔离等约束，以提高系统的实时性和可靠性。

目前，生成静态 GCL 常用算法主要包括整数线性规划 (ILP, integer linear programming)、可满足性模理论 (SMT, satisfiability modulo theories)、强化学习 (RL, reinforcement learning)、遗传算法 (GA, genetic algorithm)、模拟退火 (SA, simu-

lated annealing) 算法等。文献[29]在 TTE 综合调度研究中首次引入 SMT 求解器，提出增量式时间触发帧调度方法。该方法创新性地将调度计算时间与网络数据帧数量之间的复杂度关系约束为指数级增长模式，并通过融合 ILP 优化框架，显著提升了网络调度的求解效率。然而在求解过程中，ILP 和 SMT 需预先定义完整的约束条件。随着网络规模增大，约束条件呈指数级增长，会导致调用的商用求解器 CPLEX、Gurobi 或 Z3 等工具内存消耗激增，甚至导致求解失败。针对此现象，文献[30]提出一种 GA 与 SA 的混合调度技术，该技术通过惩罚函数将时间消息传输约束集成至目标函数以此构建含可配置参数的适应度函数，实现了调度约束与优化目标的统一建模，并在优化基因编码、算子的基础上，引入基于 SA 的个体更新机制，显著增强了算法收敛性。实验表明，相较于 GA，该混合策略的静态调度表生成求解速度提升 32%~68%，时间触发消息的端到端时延降低 19%~41%，有效解决了大规模 TTE 的调度优化问题。

随着 RL 的不断发展，其在处理复杂环境中资源分配问题方面的优势愈发显著，传统 SMT 求解器通过严格遵守 TTE 约束来生成可行的时间表，存在缺乏优化能力的问题，这会导致密集 TT 消息分配，从而只为 RC/BE 消息留下极少量的空闲时隙。因此，事件触发消息通常会经历较高的端到端时延和抖动。针对上述问题，文献[31]提出了一种基于 SMT 经验初始化的多智能体深度确定性策略梯度 (MADDPG, multi-agent deep deterministic policy gradient) 混合调度算法，该算法将 SMT 求解器得到的可行解作为算法训练的初始积累经验，将 SMT 得到的调度方案转化为 MADDPG 中的权重，并根据算法训练的效果调整权重比。通过集中训练和分布式执行，结合全局信息引导策略网络训练，优化事件触发消息的调度。实验表明，该算法在 A380 交换架构和扩展星形网络拓扑结构下调度 RC 和 BE 消息方面的时延明显低于 SMT 调度算法的。文献[32]提出基于 RL 与马尔可夫决策过程 (MDP, Markov decision process) 的联合优化框架，以同步降低 TT 消息与 RC 消息的端到端时延为优化目标。该方法利用 <状态, 动作, 奖励>三元组建模增量调度过程，增强局部搜索的信息支撑能力；并通过 RL 与树搜索的协同优化，逼近时延最

小化的近似最优解。在大规模 TTE 中, 其计算效率较 SMT 算法提升 10~15 倍。针对现有不同类型静态 GCL 生成方法侧重于优化 TT 流量而较少考虑 RC 流量这一问题, 文献[33]提出了一种混合强化学习算法 (HYRL, hybrid reinforcement learning algorithm), 该算法将 TTE 调度问题转化为二维装箱问题, 利用启发式算法进行装箱操作, 并结合强化学习算法优化调度策略。实验结果显示, 在处理 TT 消息与 RC 消息时, HYRL 生成高质量调度表的速度比 SMT 与遗传算法 GA 快数十倍; 此外, TT 消息的等待时间与 RC 消息的传输时延均提升超过 10%。

动态 GCL 本质是“软件决策+硬件执行”的实时流水线, 控制器解决策略计算问题, 交换机解决纳秒级执行问题, 而 TTE 的局限性恰恰在于没有解耦这两点。DIP 和 TSN 的协议架构都存在一个集中控制器, TSN 中为集中用户配置器 (CUC, centralized user configuration) 与集中网络配置器 (CNC, centralized network configuration), DIP 网络中为 SDN 控制器。集中控制器是动态生成 GCL 的核心, 因为感知设备状态、动态优化算法、获取拓扑结构等功能都需要集中控制器实现。此外, DIP 和 TSN 还有控制平面与数据平面的标准接口协议用来支持控制器决策的下发, 硬件级的双缓冲机制支持无缝切换^[34]。GCL 生成对比如表 5 所示。

表 5 GCL 生成对比

维度	TTE	TSN/DIP
控制平面	无集中控制	CUC/CNC 或 SDN
配置方式	JTAG 物理烧录	NETCONF 协议
硬件执行	ASIC 固化电路	现场可编程门阵列

与静态 GCL 相似, 如何提升 TT 流与 AVB、BE 流的整体可调度性并降低计算开销同样是动态 GCL 研究中的重点。目前, 生成动态 GCL 常用的算法有禁忌搜索 (TS, tabu search)、贪心随机自适应搜索 (GRASP, greedy randomized adaptive search procedure)、可 SMT/优化模理论 (OMT, optimization modulo theories)。文献[35]针对现有路由调度算法仅优化 TT 流量而忽视 BE 流量的问题, 提出一种联合优化框架。该方案融合 K-最短路径算法与 GRASP, 在确保 TT 流量可调度性的同时, 显著降低 BE 流量的时延上限。实验结果表明, 当

且仅当显式建模 BE 流量时, 可实现 TT 与 BE 流量的协同可调度性。文献[36]针对 IEEE 802.1Qbv 协议的 GCL 计算问题, 提出基于一阶数组理论的约束形式化方法。该方法将调度优化问题转化为 SMT 与 OMT 的联合求解框架, 通过形式化验证保障调度表无冲突特性。实验表明, 该方法在中小规模网络拓扑中可高效生成最优 GCL, 其计算复杂度较传统方法降低 40%~65%, 为时间敏感网络提供可证明的确定性调度保障。文献[37]提出了一种 ILP 和 TS 算法来计算 TT 流的无等待调度, 用车间作业调度来模拟此问题。通过测量禁忌搜索的求解时间, 得出结论: 网络拓扑结构和大小对求解时间没有影响。接着最小化流跨度, 从而计算在调度结束时为 BE 流量构建大的时间片。随后, 提出了一种压缩算法作为调度的后处理, 旨在减少部署调度所需的 GCL 条目的数量。研究表明, 此方法减少了保护频带的数量, 增加了 BE 流量的可用带宽, GCL 条目的数量平均可以减少 24%。此外, 目前传统的 TSN 调度仍然存在一些局限, 如依赖固定路由 (如生成树、最短路径等)、未考虑流的差异化性能需求。仅优化路由或 GCL 单一维度, 忽略二者的耦合关系, 导致路径过长会造成 GCL 调度无法满足时延要求。针对这一问题, 文献[38]提出基于 TS 的联合路由与 GCL 调度算法 (Tabu-RG, the joint routing and GCL scheduling algorithm based on tabu), 该算法构建联合路由与 GCL 调度模型, 以最小化反映流可调度性的成本函数为目标。其核心设计包括邻域移动、邻域选择与多样化函数, 避免局部最优。实验显示, Tabu-RG 在各类场景下调度成功率为 100%, 较 SMT-Z3 等求解器节省 75% 时间成本。

表 6 列举了近年来关于时间确定性流量调度的相关研究, 并从采用的调度策略及其最优解范围、求解速度、优势、局限性、适用场景几个方面进行整体分析对比。

1.2.3 非周期流量协同策略

对于非周期性流量, GCL 无法直接为其分配微时隙, 因此需要额外的流量整形机制进行预处理。TTE 受限于航天级安全认证要求 (如 DO-178C 的确定性验证) 与硬件固化架构, 其流量调度机制高度收敛于静态 GCL, 未定义额外整形策略。TSN 与 DIP 为适应柔性工业场景 (如汽车产

表 6 时间确定性流调度策略

类型	文献	调度策略	最优解范围 (相对全局最优)	求解速度 (相对 SMT)	优势	局限性	适用场景
静态 GCL	文献[29]	SMT+ILP	全局最优	相当	硬实时保障强	大规模网络内存激增, 易失败	航空电子 (小节点控制)
	文献[30]	GA+SA	≤10%	快 30%~60%	适配大规模网络	非全局最优, 依赖参数调优	大规模 (工业控制)
	文献[31]	SMT+MADDPG	≤8%	快 10~15 倍	兼顾 RC/BE, 计算效率高	依赖 SMT 初始解, 训练成本较高	航天多设备协同
	文献[32]	RL+MDP	≤12%	快 10~15 倍	局部搜索能力强, 时延最小化	需构建 MDP 模型, 适配性受限	医疗硬实时设备 (接受模型适配)
	文献[33]	HYRL	≤15%	快数十倍	求解速度极快, 平衡多流量类型	非全局最优, 依赖装箱策略	智能电网 需平衡 TT 与 RC
动态 GCL	文献[35]	k-最短路径+GRASP	≤12%	快 5~8 倍	协同优化 TT 与 BE, 动态适应性强	随机扰动易陷入局部最优	工业物联网 (需优化 BE 流)
	文献[36]	SMT+OMT	全局最优	快 40%~65%	中小规模高效, 无冲突	大规模网络扩展性差	局域工业控制
	文献[37]	ILP+TS	≤15%	快 3~5 倍	BE 带宽高, 部署成本低	ILP 初始建模复杂, 需后处理压缩	工厂 TSN (减少 GCL 条目)
	文献[38]	Tabu-RG	≤10%	快 75%	联合优化路由, 无局部最优	依赖邻域设计, 动态拓扑适配弱	跨车间 TSN (动态调整路由)

线重组) 并兼容异步流量渗透 (视频监控、物联网突发数据), 衍生出多维度调度机制。本节分别选取 TSN 和 DIP 中比较具有代表性的异步流量整形 (ATS, asynchronous traffic shaping) 和边缘整形进行介绍。

1) 异步流量整形

为了将非周期的流量进行准周期化, 减弱对时间同步的依赖以及将端到端时延分割为每一条的时延总和, TSN 在基于紧急度的调度器 (UBS, urgency-based scheduler) 和速率控制的静态优先级 (RCSP, rate control with static priority) 队列模型的基础上提出了 ATS 机制^[39]。

ATS 规定 TT 流量优先级高于其他类型流量从而平滑整体的流量传输。目前, ATS 大多采用聚合

流先入先出 (FIFO, first in first out) 队列模型, 如图 4 所示, 每个输出接口将来自相同输入接口并具有相同优先级的流汇聚成一条聚合流, 并计算队列头部帧的合规时间, 合规调度模块会比较处于队列头部的帧的合规时间, 若合规时间小于当前时间, 则将该帧调度输出。因此, 整个 ATS 整形的核心是合规时间的计算。

合规计算过程中, 将流用二元组 $\langle \text{FrameSize}, \text{CIR} \rangle$ 表示, 其中, FrameSize 表示突发的流大小, CIR 表示信息速率, 即长期平均带宽。当前帧合规时间 T_{elig} 可以表示为

$$T_{\text{elig}} = \max \left(T_{\text{arr}}, T_{\text{pre_elig}} + \frac{\text{FrameSize}}{\text{CIR}} \right) \quad (24)$$

其中, T_{arr} 为当前帧到达时间, $T_{\text{pre_elig}}$ 为上一个帧

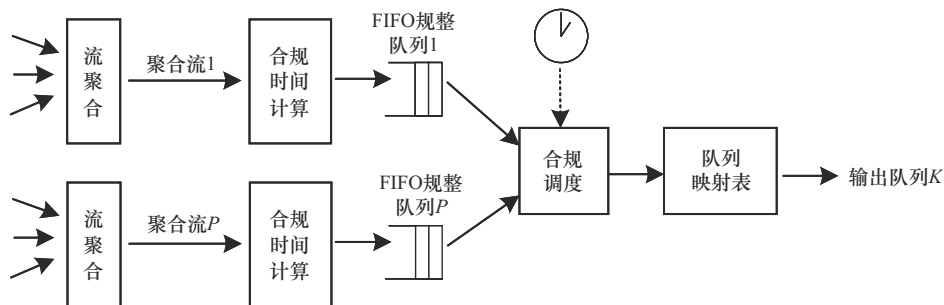


图 4 ATS 聚合流 FIFO 队列模型

的合规时间。ATS使用虚拟令牌桶的方法来计算合规时间，在上一个帧出队之后就以速率CIR增加虚拟令牌，在当前帧到达时，只需通过预计算合规时间对比即可完成出队判断。

2) 边缘整形

周期流量的随机到达会抢占门控列表，导致周期流（如控制指令）发生队列阻塞或超时违约。边缘整形的流程如图5所示。

报文到达时，流分类引擎提取五元组 < SrcIP, DstIP, SrcPort, DstPort, Protocol >，通过匹配流规则表（TCAM, ternary content addressable memory）输出目标子桶组ID（如报文0对应子桶0~3）。接着通过子桶仲裁器判断当前是否有合适的令牌桶。判断条件一般有2个：一是子桶令牌数目是否大于报文所需令牌数；二是当前时间与预测时延之和是否小于报文截止时间。子桶被锁定后会立即通过原子操作扣除所需数量的令牌数，并将报文写入子桶FIFO的尾部^[40]。

下一步边缘整形器为报文打上的DipLabel是目标发送时间戳，它可以使报文随机到达时间对齐到最近的周期起点。门控列表调度器在每个周期起点都会扫描所有报文，若有报文的DipLabel等于当前时间，则在当前周期按子桶编号顺序发送。

从技术角度来看，二者整形的核心思想与令牌桶类似，都是通过某种容器来驯服突发流量，以时空资源来换取确定性，为后续的门控列表做准备。从实现思路来看，ATS是“以时间换确定性”的流量平滑，令牌桶按固定速率CIR生成令牌，将突发流平滑为速率可控的类周期流，而边缘整形是以空间换确定性的物理隔离，DipLabel将报文固定到周

期起点，将随机到达事件转化为相位对齐的离散事件；在控制机制方面，ATS每一跳都在本地节点进行整形，相邻节点互相独立，并且通常以流类别为整形粒度，而边缘整形通常以SDN控制器为中心，SDN掌握全网拓扑与时延并且整形粒度小于ATS，通常是以流为粒度；在局限性方面，TSN和DIP都采用主从时钟的同步方式，随着跳数增加会产生时钟漂移的现象，从而导致令牌生成速率失效或者GCL相位错位的问题。

1.2.4 流量调度小结

3类协议均构建于周期流量分类与GCL调度的协同框架之上。周期流量通过时间可预测性建模，被赋予GCL的独占时隙保障硬实时；非周期流量则依赖协同策略（TSN ATS/DIP 边缘整形）抑制随机性干扰，形成“刚性分配+柔性填充”的调度范式。这一架构本质是时间资源离散化，将连续时间轴切割为微时隙、周期窗或路径时标，通过集中式决策（SDN控制器/CNC）实现确定性调度。在安全、灵活、广域3个方面的不同抉择推动实现细节和优化方向的差异。TTE为满足航天/核电SIL4认证，采用离线SMT求解全局调度表，GCL烧录至ASIC不可更改，适配中短距离-高异构性零容错场景，通过物理链路隔离保障多优先级流量无冲突。TSN面向柔性产线需求，支持GCL热更新，适配中短距离-高异构性业务的柔性场景。DIP优先广域的映射延伸支撑千千米级确定性，代价是牺牲局部精度，适配长距离-低异构性业务的“跨域场景”。

1.3 研究现状总结

本节系统分析了时间确定性网络的核心技术。

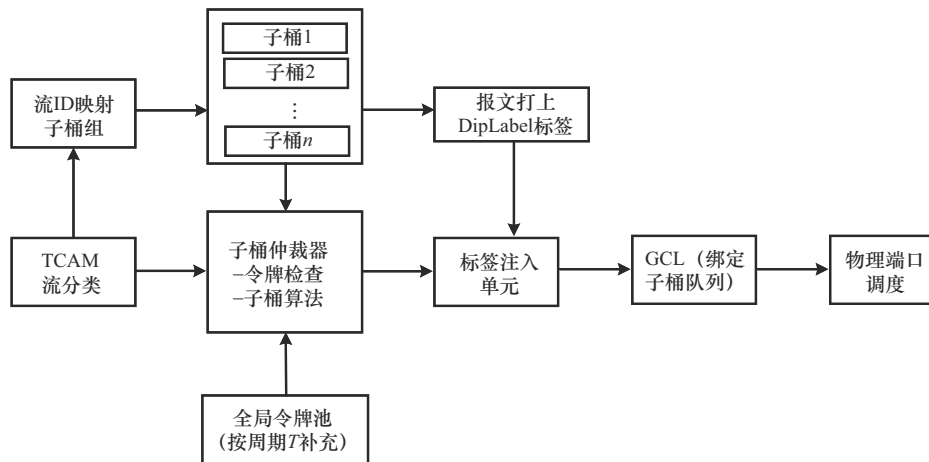


图5 边缘整形的流程

在时钟同步方面，TTE、TSN的纳秒级同步适配中短距离-高异构性业务的零容错需求，DIP的跨域同步填补长距离-低异构性业务的技术短缺；在流量调度方面，TSN的动态GCL适配中短距离多流量协同，DIP的全局调度支撑长距离跨域传输。通过“传输距离-流量异构性”二维分类框架，可以明确TTE、TSN、DIP的场景适配边界。即大部分中短距离-高异构性业务优先选择柔性低成本的TSN或高可靠的TTE，长距离-低异构性业务优先选择跨域能力DIP（星间长距离传输通常会采用TTE静态调度），为后续应用场景的技术选型提供核心依据。

2 时间确定性网络应用场景

时间确定性网络凭借其低时延、低抖动、高可靠等特点在电力系统、工业自动化、天地一体化网络、智慧城市等多个领域均展现出了显著的优势，其部署需要与业务的种类以及需求相匹配。依据“传输距离-流量复杂度”分类框架，本节选取天地一体化与智能电网2种场景详细介绍确定性网络的实际部署应用，并对未来确定性网络存在的应用场景进行分析。通过对这2种场景的剖析，全面反映时间确定性网络在不同维度下的技术适配逻辑与融合趋势。

2.1 天地一体化

天地一体化网络主要分为3个部分^[41]：地基网

络主要依托蜂窝网络、移动自组网及无线局域网等地面基础设施，为城市等高密度区域提供高速接入服务；空基网络以无人机、飞机、平流层飞艇等飞行平台为载体，构建可动态重构的空中移动通信系统，具备部署灵活、覆盖范围广、成本效益高等优势；天基网络由地球静止轨道（GEO，geostationary earth orbit）、中地球轨道（MEO，medium earth orbit）、低地球轨道（LEO，low earth orbit）卫星系统及其相应的地面基础设施组成，多层卫星网络协作实现全球覆盖、泛在连接、宽带接入等功能。天地一体化时间确定性网络架构如图6所示^[42]。

天地一体化网络通过天基、空基、地基的立体融合，旨在实现全球无缝覆盖与随遇接入。然而，该架构也引入了显著的异构性与动态性，对全端到端传输提出了严峻挑战。为保障跨域协同任务中数据的时效性与确定性，必须解决星间高速移动组网、空基平台精准协同与地基异构协议融合等核心问题。下面将分别从星间动态拓扑管理、空基时序控制与跨域传输保障3个方面，分别阐述时间确定性网络技术在应对这些挑战中的关键作用与实现路径。

2.1.1 星间动态拓扑

由于GEO卫星与地球表面距离较远，且具有

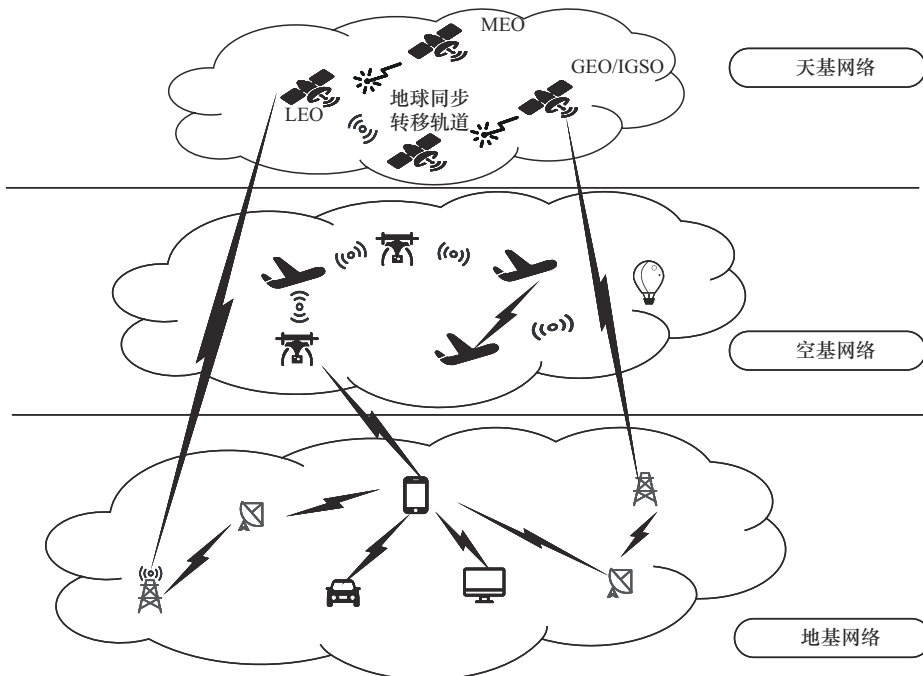


图6 天地一体化时间确定性网络架构

较高的链路损耗与通信时延,不适合传递时间敏感流量。因此,对于卫星间时间敏感流量传输调度的研究一般都聚焦在LEO卫星上,由于星间传输距离较远并且数据种类较少,因此星间传输可以划分为“长距离-低异构性”业务。然而与第1节中业务划分不同的是,由于星间网络对时延以及抖动的严格要求,其一般星间采用TTE,平台内部采用TSN来进行数据传输。与地面网络常用的有线组网不同,星间网络中不同级别的节点通常采用微波或者激光通信等无线组网方式。这类无线组网方式易受复杂空间环境影响,如大气湍流、空间电磁辐射、多普勒偏移以及星间同频等干扰。同时由于LEO卫星运动速度并不相同,不同卫星之间网络的拓扑结构与链路总是在动态变化。而随着卫星数量的快速增加和网络规模的扩大,传统路由协议以及可靠性传输手段难以适应动态且复杂的拓扑结构。例如中间系统到中间系统(IS-IS, intermediate system to intermediate system)等地面路由协议即使启用快速收敛机制,其路由由计算与链路状态协议数据单元(LSP, link state protocol data unit)扩散仍需毫秒级时间,当拓扑变化频率超过协议收敛速度时,会引发路由振荡,导致数据包丢失率上升30%以上^[43]。传统前向纠错(FEC, forward error correction)等手段在提升可靠性的同时,其引入的编码冗余与潜在重传机制会导致不可控时延,难以满足微秒级、零丢包的时间敏感业务需求。因此,传统路由只能保证最基本的连通性与正确性。但是在实际应用中,时变网络时常承载对时延、抖动与可靠性存在严格阈值要求的时间敏感业务。例如,航天发射器的时变网络中姿态控制(GNC, guide navigation control)指令要求微秒级的时延并且零丢包等^[44]。

因此,时变网络的时间确定性需求与传统路由协议性能落后、无线信道干扰加剧传输不确定性的双重矛盾,促进了国内外研究人员逐渐将研究重点放在了TSN、TTE等时间确定性网络与时变网络的融合上。一方面,针对星间时变网络的动态拓扑,主要解决方法为“虚拟节点+流量调度”双重机制^[45],虚拟节点技术将实时变化的星座拓扑转化为逻辑固定的格网结构,通过将卫星轨道按经纬度划分成静态网格单元,每个单元对应一个虚拟节点,卫星物理位置移动时仅需更新物理节点与虚拟

节点的映射关系,大幅简化拓扑动态性带来的路由复杂度。对于流调度,由于TAS生成GCL是一个NP难问题,其复杂性会随着网络规模和流量的增加而增加,因此通常采用IEEE802.1 Qch规定的循环队列转发(CQF, cyclic queuing and forwarding)机制与之相结合。另一方面,针对无线信道在干扰环境下的不确定性,不再依赖FEC等传统手段去消除干扰,而是通过强时序约束、拓扑抽象以及预测性资源预留相结合,将无线干扰的影响限制在局部、可预测范围内。目前研究人员将无线信道的时变特性显式建模为调度约束,利用LEO卫星轨道高度可预测的优势,提前生成接触计划,并将链路可用窗口与信道质量预测(Ka波段雨衰、激光链路大气闪烁概率等)作为CQF时隙分配的输入条件,实现干扰感知的确定性资源预留^[46]。这种协同机制确保关键流仅在高可靠链路窗口内传输,从根本上规避了无线干扰对端到端确定性的破坏。在此基础上,CQF通过125 μs固定周期的奇偶队列交替工作模式,构建了“传输-缓冲-转发”的时序闭环,将突发干扰的影响严格限制在单个周期内以防止抖动传播。例如,在OneWeb星座中,20 ms波束切换周期被细分为160个CQF子周期,通过粒子群优化算法动态调整队列长度^[47],使平均排队时延从2.12 ms降至1.07 ms,减少50.47%。更重要的是,由于切换时刻与目标链路已在接触计划中已知,当卫星从一个波束覆盖区移动到相邻区域时,CQF机制已提前完成时隙资源预留,结合数字视频广播-卫星回传信道第二代(DVB-RCS2)协议的前向对齐技术,避免了传统切换流程中长达十几秒的重新登录过程,使业务中断时间控制在100 μs内,在动态且受干扰的无线环境中实现了端到端时间确定性保障。

2.1.2 空基时序控制

大规模自然灾害不仅给人类生命财产造成重大损失,也严重破坏地面通信基础设施。由此导致的通信中断,常会使受灾人员与外界失去联系。考虑到地面网络难以快速恢复,灵活的空中网络与现有卫星网络成为应急通信的理想选择。同时,整合高空平台(HAP, high altitude platform)、低空平台(LAP, low altitude platform)等空中平台组成的空基网络^[48],可有效降低卫星网络的传输时延,并缓解地面应急通信网络的容量瓶颈。

空基网络作为天基与地基的中间节点, 主要负责动态环境下的协同作业与跨域数据转发, 需同时传输无人机状态数据、三维建模数据等多优先级流量, 因此属于“中短距离-高异构性”业务, TSN 技术的动态调度特性可适配此类需求。无人机与卫星的通信链路存在多普勒频偏, 在高速移动时甚至可以达到 ± 50 kHz, 此时便需要通过时间同步修正载波频率补偿值, 否则会因同步偏差导致解调误码率上升 10 倍以上^[49]。例如, 单架无人机的位置测量依赖全球导航卫星系统 (GNSS) 与惯性导航融合, 但若机群内时钟同步误差超过 $2 \mu\text{s}$, 多机点云数据拼接会出现厘米级偏差, 导致三维建模形变、分析失真。此外, 编队转向指令的执行时差若超过 50 ms , 则可能引发无人机碰撞。针对上述问题, 空基网络主要通过 TSN 实现, 核心是 IEEE 802.1AS-Rev 协议构建的动态同步架构。无人机搭载的 TSN 网关通过 5G 空口接收地面基站的同步信号, 结合惯导数据进行卡尔曼滤波, 将本地时钟与基站的同步误差控制在 $\pm 2 \mu\text{s}$ 内, 这一精度可满足点云拼接对时间基准的要求^[50]。在数据传输层面, IEEE 802.1 Qbv 协议为不同类型流量划分时间窗口: 每 20 ms 周期内, 5 ms 分配给无人机状态数据 (高优先级), 10 ms 用于三维建模数据 (中优先级), 5 ms 留给非实时指令 (低优先级)。时间感知整形器通过 GCL 严格控制各窗口的开启/关闭时刻, 确保信号在 $100 \mu\text{s}$ 内从一架无人机转发至另一架, 避免因队列拥塞导致的时延。

2.1.3 跨域传输保障

由于地基网络需处理卫星遥感数据、无人机视频等多模态混合流量, 因此地基跨域传输属于“中短距离-高异构性”业务, 对时间确定性的需求主要体现在多源数据融合与指令闭环控制的可靠性上^[51]。地面控制中心需对卫星遥感数据、无人机视频、地面传感器信息进行实时关联。例如, 在森林火灾应急场景中, 从星载红外传感器识别热源到生成火情态势图, 再到指挥无人机集群精准投掷灭火弹, 整个端到端流程的时延需被严格控制在 100 ms 内。因此, 为快速遏制火势, 系统必须满足此严苛的时延要求, 否则每延迟 1 s 就可能造成火势扩大 100 m^2 。此外, 地基网络需兼容不同协议的设备 (如工业以太网、5G、光纤传输), 为了避免因协议差异导致的协同断裂, 地基网络中的时间同

步需具备跨域适配能力。

针对上述问题, 近几年 5G-A (5G-Advanced) 与时间确定性网络的深度融合基本已经能够提供完善的解决方案。传统 TSN 依赖于有线网络, 其在移动性和覆盖灵活性上存在局限性。5G-A 及其先进的 6G 技术凭借原生支持的超可靠低时延通信 (URLLC, ultra reliable low latency communication)、高精度空口同步等特性, 成为 TSN 在无线网络领域的理想载体。通过 5G 系统与 TSN 的协同调度机制, 无线空口传输被集成到端到端的时间确定性路径中, 将 TSN 的门控调度机制延伸至 5G 空口时隙与微时隙的资源分配上, 使得移动终端 (如巡检无人机、机器人) 在接入地基网络时, 也能享受到与有线连接等同的确定性服务等级协定 (SLA, service-level agreement), 时延和抖动被控制在微秒级, 为移动控制闭环提供了可能^[52]。在跨域协同传输时, 利用 IEEE 802.1CB 协议在双链路复制关键数据帧, 接收端则根据时间戳剔除时延超过 50 ms 的冗余帧, 从而将丢包率控制在 0.001% 以下。此外, 5G-A/6G 的网络切片技术为时间确定性提供了关键支撑。CUC/CNC 可为应急指令、高精度同步帧等关键业务创建专用的 URLLC 切片^[53]。该切片在无线、传输和核心网层面独占被预留的带宽和计算资源, 确保其传输通道永远不会被 BE 的大流量数据所影响, 从而实现流量的“硬隔离”和确定性保障。在异构协议转换方面, 面对地基网络中工业以太网、5G、光纤等多种协议并存的现状, DIP 的协议转换模块可智能识别并转换来自天基网络 (如卫星 TTE 帧) 或其他异构网络的协议格式并将其转换为 TSN 兼容格式, 同时修正因大气层传输时延导致的时间偏差, 最终将所有数据流统一到由北斗/全球定位系统 (GPS, global positioning system) 提供的时间基准下处理^[54]。

2.2 智能电网

随着时间确定性网络与能源技术进一步融合, 可以利用更加精确可靠的网络来实现能源精密化的调度。在双碳的目标下, 国家发展和改革委员会^[55]指出“配电网正逐步由单纯接受、分配电能给用户的电力网络转变为源网荷储融合互动、与上级电网灵活耦合的电力网络, 在促进分布式电源就近消纳、承载新型负荷等方面的功能日益显著”。因此, 亟待建立一个安全可靠、接入便捷、能够实

现双向实时交互的通信接入网络，并借助先进、稳定、高效的新一代通信技术及系统来提供有力支持。智能电网网络架构如图7所示。

根据电力业务的分布特点和安全防护保障要求，形成面向广域和区域枢纽网场景的2套组网架构。时间同步基础设施为智能电网整体提供统一的时间基准，是整个通信网络的“时间锚点”。无论是广域调度的跨区域数据对齐、区域枢纽网内变电站的微秒级保护动作，还是配电网的故障自愈，都依赖其提供的精准时间戳，否则会因时间偏差导致数据混乱或控制失误^[56]。

2.2.1 广域电网协同调度

广域电网调度覆盖范围最广，该架构适用于配网差动保护、精准负荷控制、计量自动化等需要基于时间同步实现跨区域全局协同的电力业务^[57]，属于“长距离-低异构型”业务。其核心矛盾是海量分布式能源接入与电网稳定控制的协同问题。当风电、光伏等波动性电源渗透率超过30%时，传统监视控制与数据采集（SCADA，supervisory control and data acquisition）系统数据刷新周期会达到2~5 s，响应时延会导致低频振荡扩散并且无法捕捉电网暂态变化。因此，为了确保不同区域的相量数据能在同一时间基准下分析，智能电网要求全

网同步相量测量单元（PMU，phasor measurement unit）的时间戳误差小于或等于1 μs。

针对上述问题，时间确定性网络通过“北斗授时+IEEE 1588v2协议”构建广域同步架构，在此基础上，通过引入5G-A网络，构建了“固移融合”的确定性传输通道。在华东电网部署的广域测量系统中，PMU设备通过接收北斗1PPS（one pulse per second）信号与通过光纤传输的PTP同步报文实现二次校准，将区域间同步误差控制在500 ns内。同时，对于光纤难以覆盖的分布式新能源场站（如山区风电、分布式光伏），则通过部署支持5G-A的终端，利用5G-A网络原生支持的微秒级高精度空口授时（如5G NTN-assisted positioning）特性，将其无缝接入统一的广域同步体系。例如，江西移动联合国网江西电力，发挥双方有关云、网、终端及研发优势，建设了江西国网系统首个基于“5G RedCap+SPN+5G TSN”端到端确定性网络技术的数智电力项目^[58]，通过5G解决新型电力系统“最后一千米”网络接入问题，缺陷处理流程缩短35%，作业效率提升8倍以上。对于接入5G-A的场站，其PMU数据则通过5G-A与TSN的协同调度器进行联合规划。5G-A网络在无线侧通过预留专用的URLLC空口资源，并将传输周期与TSN的

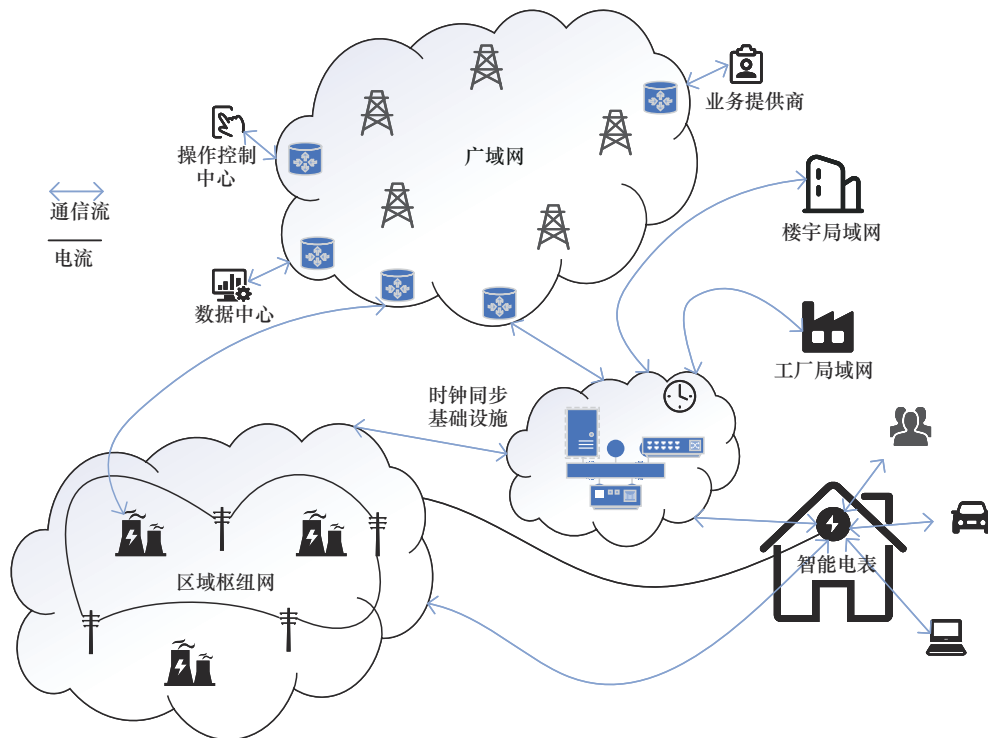


图7 智能电网网络架构

调度周期对齐,确保了无线段传输的确定性,实现了端到端的统一调度。例如,中兴提出的5G-TSN创新网络可以实现时间同步小于 $1\ \mu\text{s}$,端到端时延小于 $4\ \text{ms}$ (某些场景下甚至小于 $1\ \text{ms}$),可靠性不低于99.999%^[59]。

2.2.2 枢纽网微秒级控制

枢纽网中的智能变电站是电网的“神经节点”,该架构适用于大型变电站、发电站内智能机器人巡检、智能视频监控等园区本地业务,属于典型的“中短距离-高异构性”业务。其继电保护、采样值传输等核心功能对时间确定性的要求精确到微秒级。例如,220 kV线路的光纤差动保护需要两侧装置的采样时刻偏差小于或等于 $5\ \mu\text{s}$,否则会因相位差误判区内故障;采样值(SV, sampled value)报文若传输时延超过 $10\ \mu\text{s}$,可能导致合并单元与保护装置的数据失配从而引发误动。在枢纽网中,时间确定性网络通过TSN协议栈实现站内“测量-控制-通信”的时间绑定。

1) 同步层:采用IEEE 802.1AS-Rev协议构建站内时钟树,北斗双模授时装置通过硬件时间戳(精度 $\pm 5\ \text{ns}$)向保护装置、智能终端广播同步报文,使全站设备时间偏差小于或等于 $100\ \text{ns}$ 。例如,深圳110 kV雷东变电站,通过该机制将合并单元的采样同步误差从传统方案的 $2\ \mu\text{s}$ 降至 $300\ \text{ns}$ 。

2) 传输层:基于TSN的IEEE 802.1CB帧复制机制,将通用面向对象变电站事件报文通过双链路并行传输,接收端根据时间戳自动丢弃时延超过 $5\ \mu\text{s}$ 的冗余帧^[60]。在河南220 kV变电站试验中,该技术使保护装置的动作时间从 $35\ \text{ms}$ 缩短至 $18\ \text{ms}$,区外故障误动率从0.3%降至0.02%。

3) 调度层:利用IEEE 802.1Qbv的门控列表,为SV报文分配专属时间槽,如每个 $1\ \text{ms}$ 周期的 $0\sim 200\ \mu\text{s}$,避免与制造报文规范(MMS, manufacturing message specification)等非实时数据冲突。例如,三菱电机为国家电网定制的TSN交换机,实测端到端时延抖动小于或等于 $500\ \text{ns}$,满足IEC61850对保护动作时间小于 $40\ \text{ms}$ 的硬性要求^[61]。

2.3 未来应用场景展望

2.3.1 面向AI训练和推理的时间确定性网络

在AI模型的训练和推理过程中,核心瓶颈是通过精准控制数据传输的时间稳定性来解决跨地域

算力节点间梯度同步的难题。从时延需求来看,AI训练和推理存在显著的阶段差异性:在参数更新阶段,图形处理器(GPU, graphics processing unit)集群的梯度数据传输要求抖动严格控制在 $50\ \mu\text{s}$ 以内,单向传输时延需小于或等于 $10\ \text{ms}$,否则会因陈旧梯度问题导致模型收敛周期延长20%以上^[62];相比之下,数据预处理等非关键阶段对时间敏感度较低,允许上百毫秒的弹性波动^[63]。

时间确定性网络能从传输底层建立统一的时间基准,让不同地域的算力节点在数据交互时保持微秒级的时间对齐。这种对齐不是简单的速度提升,而是通过稳定的传输节奏,避免梯度数据因到达时间不一致导致排序混乱,从根本上减少模型训练中的无效迭代^[64]。同时,时间确定性网络还能根据训练过程中的实时需求动态调整资源。当模型进入参数更新的关键阶段,网络能够自动为梯度传输预留专用通道,优先保障这类核心数据的传输稳定性;在数据预处理等对时间敏感度较低的环节,则灵活分配资源给其他任务。这种按需调度的能力,既能保证训练关键步骤的效率,又能提高整体资源的利用率。这种时间层面的确定性,能够让不同地区的算力节点像在同一机房内协同工作,不仅缩短了模型训练的整体周期,还能减少因数据传输不稳定导致的精度损失。

2.3.2 面向多模态网络环境中的时间确定性网络

不断扩展的垂直行业分众化、个性化应用场景与单一的、端到端的网络体制或转发模式的矛盾已成为制约网络技术突破的天花板。从系统论视角看,单一网络体制因其固定架构无法适配工业控制、远程医疗等场景的差异化需求,实现基础设施统一性与应用场景多样性的平衡,正是一个极具前景的研究方向^[65]。

在空间维度上,支持TSN、5G/6G等多种网络体制共生,比如工业车间可同时承载机械臂控制的低时延流与设备状态监测的大带宽流;在时间维度上,多模态网络能让不同网络随业务需求独立演进,比如5G网络升级时不需要中断TSN控制链路。这种弹性架构从根本上突破了单一网络的功能局限。作为多模态网络的核心支撑,时间确定性网络承担着提供稳定服务的关键角色。它需要实现与无线网络、有线网络及各类协议的深度融合,既要解决5G与TSN的时钟同步难题,也要突破协议壁

垒,让工业总线协议与IP网络无缝互操作^[66]。

随着智能制造、智能交通等场景的发展,确定性网络的应用边界不断拓展。例如,远程手术要求200 km链路时延抖动小于10 μs ^[67],自动驾驶需要车路协同数据零丢包传输。这些需求也逐渐促使时间确定性网络在跨域协同等方面持续创新,推动多模态网络从技术验证走向规模化落地。

2.4 应用场景总结

时间确定性网络在天地一体化与智能电网等领域的应用中取得了极大的成功。但随着应用范围扩大和需求日渐多样,一些局限性也逐渐显现。例如,在天地一体化网络中,协议异构性导致时间同步精度在域间边界出现明显波动,并且由于域间链路时延的动态特性使静态调度策略难以满足时间确定性需求;在智能电网中,层级化架构引发端到端确定性保障的边缘衰减现象,面对动态负荷与分布式能源的随机接入,现有资源重新配置的响应速度不够快,经常需要更长时间才能调整到位。上述局限既指明了时间确定性网络向全域化演进的核心瓶颈,也为未来时间确定性网络发展趋势提供了方向。

3 时间确定性网络发展趋势分析

为了突破时间确定性网络在实际应用中遇到的瓶颈,推动技术从特定场景走向大规模落地,未来时间确定性网络的发展可以从2个方面进行突破:一是通过跨层技术融合打破异构网络的协议壁垒;二是依托高性能嵌入式互连技术增强动态场景适配能力。下面将从这2个方面详细展开说明。

3.1 跨层技术融合

在5G向6G演进过程中,时间确定性网络的部署需要突破局域网及专用网络的局限,当前多数业务面临跨域接入场景,需要适配多样化接入方式。因此应该积极探索异构网络的融合方法,打破网络域间壁垒,通过整合不同时间确定性机制的技术优势来构建协同架构。

DIP周期与Qch调度周期存在内在一致性,可实现异构TSN网络的跨IP互连^[68];DIP中长距离链路的大时延特性导致逐跳调度策略难以适配,将L2层ATS集成至DIP模型进行优化,可实现平滑流量传输;随着L2、L3层逐步定义基于时延的调度与拥塞管理机制,其与FlexE技术的融合已成为研究焦点,旨在为确定性业务提供时延保障与零丢

包承载能力。

为提升网络资源利用率并降低部署成本,学术界与产业界正致力于多维度技术的有效整合,尤其注重引入深度增强学习技术构建预测模型,以优化网桥资源预留与路由查询机制。此类模型可实现数据包队列管理与调度的高效化,进而确保网络资源的精准配置与充分利用。

3.2 面向时间确定性的高性能嵌入式互连

以太网通过引入时间分段、规划调度、循环队列转发等技术,发展出了DIP、TTE和TSN等时间确定性网络,实现了“类嵌入式高性能互连”的功能。然而,伴随而来的是物理层的复杂度、面积和功耗越来越大,高昂的网络配置成本等代价^[69]。

相比以太网、PCIe等协议,嵌入式高性能互连协议RapidIO的分层协议结构支持多种物理层技术,灵活且易于扩展的同时还支持点对点通信,在嵌入式系统、电信基础设施和高性能计算领域应用广泛。在协议层面,可以利用请求/响应数据包中预留字段来扩展RapidIO协议以支持时间确定性。将PTP集成到RapidIO协议栈中,确保所有节点之间的时间同步精度达到纳秒级别,即使在网络分区或主时钟失效的情况下,节点也能保持相对稳定的时间参考^[70]。在硬件层面,利用现场可编程门阵列或ASIC来加速时间同步协议IEEE802.1AS的执行,通过在RapidIO交换芯片中嵌入专门处理时间敏感数据包的功能模块,可以保证某些数据包得到优先处理,从而保证RapidIO包的确定性时延和抖动的需求。通过与时间确定性网络的流量调度机制相结合,能够为需要确定性通信的嵌入式协议提供更强大的技术支持。

4 结束语

时间确定性网络标准经过不断的迭代,目前已经能够利用网络资源以及特殊的调度机制,提供一个大带宽、低时延、低抖动、高确定性的网络环境,为各行各业的数字化转型提供了有力的支撑。由于篇幅所限,本文仅对比分析目前典型的时间确定性网络技术。当前该领域仍面临异构协议互操作、动态资源弹性调度、跨域时间同步精度衰减等核心挑战。未来其技术演进将持续以精度跃迁、生态协同、场景泛化为核心,最终实现全面突破,为万物互联时代的时间确定性需求提供支撑。

参考文献:

- [1] FINN N. Time-sensitive and deterministic networking whitepaper[R]. 2017.
- [2] LARRAÑAGA-ZUMETA A, LUCAS-ESTAN M C, GOZÁLVEZ J, et al. 5G configured grant scheduling for seamless integration with TSN industrial networks[J]. *Computer Communications*, 2024, 226/227: 107930.
- [3] ZHANG T Y, WANG G, XUE C Y, et al. Time-sensitive networking (TSN) for industrial automation: current advances and future directions[J]. *ACM Computing Surveys*, 2025, 57(2): 1-38.
- [4] LI G W, REN L Y, FU Y Y, et al. A critical review of cyber-physical security for building automation systems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2023, 55: 237-254.
- [5] PIROUZI S, ZADEHBAGHERI M, BEHZADPOOR S. Optimal placement of distributed generation and distributed automation in the distribution grid based on operation, reliability, and economic objective of distribution system operator[J]. *Electrical Engineering*, 2024, 106(6): 7899-7912.
- [6] WANG M, LU Y Q, WANG H H, et al. Load-balanced routing heuristics for bandwidth allocation of AVB flow in TSN[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2024, 23(5): 1-19.
- [7] MOUSTRIS G, TZAFESTAS C, KONSTANTINIDIS K. A long distance telesurgical demonstration on robotic surgery phantoms over 5G[J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2023, 18(9): 1577-1587.
- [8] DUTTA C, KARPMAN K, BASU S, et al. Review of statistical approaches for modeling high-frequency trading data[J]. *Sankhya B*, 2023, 85(1): 1-48.
- [9] BADUE C, GUIDOLINI R, CARNEIRO R V, et al. Self-driving cars: a survey[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 165: 113816.
- [10] LINDNER S, HÄBERLE M, MENTH M. P4TG: 1 Tb/s traffic generation for Ethernet/IP networks[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 17525-17535.
- [11] DIAS A L, SESTITO G S, TURCATO A C, et al. Panorama, challenges and opportunities in PROFINET protocol research[C]//*Proceedings of the 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 186-193.
- [12] AKPINAR K O, OZCELIK I. Analysis of machine learning methods in EtherCAT-based anomaly detection[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 184365-184374.
- [13] POWERLINK E. Ethernet powerlink[R]. 2023.
- [14] SAMDANIS K, ABBOU A N, SONG J, et al. AI/ML service enablers and model maintenance for beyond 5G networks[J]. *IEEE Network*, 2023, 37(5): 162-172.
- [15] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. *通信学报*, 2019, 40(6): 160-176.
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. A survey of deterministic network research[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(6): 160-176.
- [16] 曹志鹏, 刘勤让, 刘冬培, 等. 时间敏感网络研究进展[J]. *计算机应用研究*, 2021, 38(3): 647-655.
CAO Z P, LIU Q R, LIU D P, et al. Survey of time-sensitive networking[J]. *Application Research of Computers*, 2021, 38(3): 647-655.
- [17] RODRIGUES S, LV J F. Synchronization in time-sensitive networking: an introduction to IEEE std 802.1AS[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2022, 6(4): 14-20.
- [18] LIU S J, HAMDULLA A. The issues on time synchronization technology in time triggered Ethernet[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1673(1): 012015.
- [19] ERGENÇ D, BRÜLHART C, NEUMANN J, et al. On the security of IEEE 802.1 time-sensitive networking[C]//*2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [20] MUSLIM A B, TÖNJES R, BAUSCHERT T. Synchronizing TSN devices via 802.1 AS over 5G networks[J]. *Electronics*, 2024, 13(4): 768.
- [21] 郑晓亮, 邵蔚, 赵风华, 等. 确定性IP网络白皮书[R]. 2021.
ZHENG X L, SHAO W, ZHAO F H, et al. Deterministic IP network white paper[R]. 2021.
- [22] WANG J H, ZHOU Y P, XU Y D. Deterministic network[C]//*Fundamentals of 6G Communications and Networking*. Berlin: Springer, 2023: 633-665.
- [23] STÜBER T, OSSWALD L, LINDNER S, et al. A survey of scheduling algorithms for the time-aware shaper in time-sensitive networking (TSN)[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 61192-61233.
- [24] STÜBER T, EPPLER M, OSSWALD L, et al. Performance comparison of offline scheduling algorithms for the time-aware shaper (TAS)[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(7): 9736-9748.
- [25] MÁTÉ M, SIMON C, MALIOSZ M. Asynchronous time-aware shaper for time-sensitive networking[J]. *Journal of Network and Systems Management*, 2022, 30(4): 76.
- [26] SOO D, BHIN O, JEONG L, et al. Approach to improving asynchronous traffic shaping performance using a combination of shaper[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [27] LO BELLO L, STEINER W. A perspective on IEEE time-sensitive networking for industrial communication and automation systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 1094-1120.
- [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] POZO F, RODRIGUEZ-NAVAS G, HANSSON H, et al. SMT-based synthesis of TTEthernet schedules: a performance study[C]//*Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [30] 王昱晨. 时间触发以太网建模及优化调度技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2022.
WANG Y C. Research on modeling and optimal scheduling technology of time-triggered Ethernet[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022.
- [31] CHEN C S, ZHAO A R, ZHANG Z H, et al. Research on multi-agent collaborative scheduling planning method for time-triggered networks[J]. *Electronics*, 2025, 14(13): 2575.
- [32] HE F, XIONG L, ZHOU X, et al. Scheduling pattern of time triggered Ethernet based on reinforcement learning[J]. *Chinese Journal of Elec-*

- tronics, 2023, 32(5): 1022-1035.
- [33] LIU Y C, HUA G X, PENG Y, et al. Research on TTE scheduling algorithm based on hybrid method[C]//Proceedings of the 2025 4th International Conference on Cyber Security, Artificial Intelligence and the Digital Economy. New York: ACM Press, 2025: 146-151.
- [34] WU B W, WANG S, WANG J S, et al. Flexible design on deterministic IP networking for mixed traffic transmission[C]//Proceedings of the ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 4360-4365.
- [35] GAVRILUȚ V, ZHAO L X, RAAGAARD M L, et al. AVB-aware routing and scheduling of time-triggered traffic for TSN[J]. IEEE Access, 2018, 6: 75229-75243.
- [36] SERNA OLIVER R, CRACIUNAS S S, STEINER W. IEEE 802.1Qbv gate control list synthesis using array theory encoding[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 13-24.
- [37] 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 Press, 2016: 203-212.
- [38] WANG Y, CHENG Y F, ZHUANG Z H, et al. Joint routing and GCL scheduling algorithm based on tabu search in TSN[C]//Proceedings of the 2023 19th International Conference on Network and Service Management (CNSM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [39] CHAHED H, KASSLER A. TSN network scheduling: challenges and approaches[J]. Network, 2023, 3(4): 585-624.
- [40] ANGILELLA V, KRASNIQI F, MEDAGLIANI P, et al. High capacity and resilient large-scale deterministic IP networks[J]. Journal of Network and Systems Management, 2022, 30(4): 71.
- [41] 梁浩, 陈福才, 季新生, 等. 天地一体化信息网络发展与拟态技术应用构想[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(7): 799-818.
LIANG H, CHEN F C, JI X S, et al. Development status and applied research on mimic technologies for space-ground integration information network[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(7): 799-818.
- [42] 彭国宇, 汪硕, 李桂珍, 等. 空天地一体化确定性网络研究[J]. 电信科学, 2023, 39(11): 13-26.
PENG G Y, WANG S, LI G Z, et al. Research on space-air-ground integrated deterministic networking[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(11): 13-26.
- [43] CAO H, CHEN Y, ZHOU Y Q, et al. Deterministic service of space-air-ground integrated networks: architecture, challenges and key technologies[J]. Journal of Xidian University, 2023, 50(3): 1-18.
- [44] FIORI T, LAVACCA F G, VALENTE F, et al. Proposal and investigation of a lite time sensitive networking solution for the support of real time services in space launcher networks[J]. IEEE Access, 2024, 12: 10664-10680.
- [45] CAO B Y, FAN X W, HONG Y M, et al. Research on time-sensitive service transmission routing and scheduling strategies based on optical interconnect low earth orbit mega-constellations[J]. Applied Sciences, 2025, 15(7): 3843.
- [46] 徐川, 张汝凤, 何熊文, 等. 卫星编队流调度的门控对齐策略研究[J]. 通信学报, 2024, 45(8): 51-61.
XU C, ZHANG R F, HE X W, et al. Research on gating alignment strategy for flow scheduling in satellite formation[J]. Journal on Communications, 2024, 45(8): 51-61.
- [47] ZHANG Z Y, DONG T, YIN J, et al. A particle swarm optimization-based queue scheduling and optimization mechanism for large-scale low-earth-orbit satellite communication networks[J]. Sensors, 2025, 25(4): 1069.
- [48] CHEN K, ZHANG L, ZHONG J H. Space-air-ground integrated network (SAGIN) in disaster management: a survey[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2025, PP(99): 1.
- [49] 中国移动. 面向6G的天地一体融合网络技术白皮书[R]. 2023. China Mobile Communications Corporation. White paper on space-air-ground integrated network technology for 6G[R]. 2023.
- [50] 徐霞艳. 基于5G的非地面网络关键技术与标准化进展[J]. 移动通信, 2020, 44(9): 44-48.
XU X Y. Key technologies and standardization of 5G-based non-terrestrial networks[J]. Mobile Communications, 2020, 44(9): 44-48.
- [51] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 21(1): 88-145.
- [52] ALQUDAH M, OBERMAISSER R, DANIEL K. Research demand and review on deterministic communication in hybrid 5G networks based on TSN[M]. Würzburg: Universität Würzburg, 2025.
- [53] XU H, MIAO D S, KANG S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 2-10.
- [54] 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.
- [55] 国家发展改革委. 国家能源局关于新形势下配电网高质量发展的指导意见[R]. 2024. National Development and Reform Commission. Guidance on high-quality development of distribution networks in the new era by the national energy administration[R]. 2024.
- [56] 中国电力科学研究院有限公司. 电力5G标准体系白皮书[R]. 2023. China Electric Power Research Institute Co., Ltd. White paper on the 5G standard system for power[R]. 2023.
- [57] PENG G Y, WANG S, HUANG Y D, et al. Traffic shaping at the edge: enabling bounded latency for large-scale deterministic networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [58] 中国移动通信集团江西有限公司. 江西首个5G RedCap项目落地加速5G电网规模商用进程[J]. 通信世界, 2025, 5(9): 40. China Mobile Communications Group Jiangxi Co., Ltd. Jiangxi's first 5G RedCap project implemented: accelerating the large-scale commercialization of 5G in power grids[J]. Communications World, 2025, 5(9): 40.
- [59] 张启明, 郑兴明, 张寿勇. 5G TSN技术的创新研究[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 78-83.
ZHANG Q M, ZHENG X M, ZHANG S Y. 5G TSN technologies and innovation[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(3): 78-83.

- [60] SONG F, LI L T, YOU I, et al. Enabling heterogeneous deterministic networks with smart collaborative theory[J]. IEEE Network, 2021, 35(3): 64-71.
- [61] MEI X, WANG J, LIU C, et al. Development of traffic scheduling based on TSN in smart substation devices[J]. Applied Sciences, 2024, 14(22): 10135.
- [62] CHEN T J, TANG Q Q, LIU G Y. Efficient task scheduling and resource allocation for AI training services in native AI wireless networks[C]// Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2023: 637-642.
- [63] MENG Y, YUN S N, ZHAO Z N, et al. Short-term electricity load forecasting based on a novel data preprocessing system and data reconstruction strategy[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 77: 107432.
- [64] HUANG X, CHEN J, GUO K, et al. CQCF: a cyclic queuing cluster forwarding based transmission mechanism for large-scale deterministic network[C]//Emerging Networking Architecture and Technologies. Berlin: Springer, 2023: 557-569.
- [65] ZHANG Y J, XU Q M, GUAN X P, et al. Wireless/wired integrated transmission for industrial cyber-physical systems: risk-sensitive co-design of 5G and TSN protocols[J]. Science China Information Sciences, 2021, 65(1): 110204.
- [66] ZHANG W C, DANG F, WANG X. Low-latency deterministic forwarding for multi-modal connection using time-sensitive networking[C]// Proceedings of the ACM Turing Award Celebration Conference - China 2023. New York: ACM Press, 2023: 57-58.
- [67] LI Y, RAISON N, OURSELIN S, et al. AI solutions for overcoming delays in telesurgery and telementoring to enhance surgical practice and education[J]. Journal of Robotic Surgery, 2024, 18(1): 403.
- [68] DENG L B, XIE G Q, LIU H, et al. A survey of real-time Ethernet modeling and design methodologies: from AVB to TSN[J]. ACM Computing Surveys, 2023, 55(2): 1-36.
- [69] KLINKOWSKI M, JAWORSKI M. Cost-aware optimization of optical add-drop multiplexers placement in packet-optical xHaul access networks[J]. Applied Sciences, 2023, 13(8): 4862.
- [70] HOUTAN B, ASHJAEI M, DANESH TALAB M, et al. Supporting end-to-end data propagation delay analysis for TSN-based distributed vehicular embedded systems[J]. Journal of Systems Architecture, 2023, 141: 102911.

[作者简介]



宋克 (1976-), 男, 河南许昌人, 博士, 网络空间部队信息工程大学研究员、硕士生导师, 主要研究方向为集成电路设计技术与高性能计算。



梁若愚 (2000-), 男, 河南洛阳人, 网络空间部队信息工程大学硕士生, 主要研究方向为时间确定性网络、高性能嵌入式互连协议。



张文建 (1987-), 男, 河南商丘人, 博士, 网络空间部队信息工程大学副研究员, 主要研究方向为软件定义互连、集成电路设计。



曹志鹏 (1996-), 男, 陕西西安人, 博士, 网络空间部队信息工程大学研究实习员, 主要研究方向为晶上系统、计算机体系结构。



吕平 (1977-), 女, 河南商丘人, 博士, 网络空间部队信息工程大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为新型网络架构和网络交换芯片设计。