

## 基于随流检测的确定性网络混合时敏流量调度技术研究

蔡岳平, 王圣恺, 陈晨, 韩笑

(重庆大学微电子与通信工程学院, 重庆 400030)

**摘要:** 工业 4.0 和智能工厂的发展对网络传输的确定性低时延和低抖动提出了更高的要求。为解决大规模确定性网络中事件触发流和时间触发流混合传输的有界时延保证问题, 提出了一种面向混合时敏流量的基于随流检测的最早截止时间优先调度 (IFEDS, in-situ flow earliest deadline scheduling) 技术。利用随流检测技术实现网络测量和数据包的染色, 设计了一种基于截止时间的数据包概率染色算法和一种基于染色的半抢占式最早截止时间优先调度算法。最后使用 OMNeT++ 仿真验证了 IFEDS 方案的有效性。仿真结果表明, 在高负载情况下, IFEDS 的平均端到端时延比 Deadline-TSN 降低了 6.84%。在事件触发流占比为 40% 的情况下, IFEDS 比 Deadline-TSN 的丢包率减少了 0.37%。

**关键词:** 确定性网络; 时间敏感网络; 调度; 随流检测; 循环指定排队和转发

**中图分类号:** TN915.08

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00461

## Research on hybrid scheduling of time-sensitive flow in deterministic networking based on in-situ flow information telemetry

CAI Yueping, WANG Shengkai, CHEN Chen, HAN Xiao

School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

**Abstract:** The development of Industry 4.0 and smart factories places higher demands on deterministic low latency and low jitter for network transmission. To address the issue of hybrid transmission of event-triggered flows and time-triggered flows in large-scale deterministic network, an in-situ flow earliest deadline first scheduling (IFEDS) based on information telemetry for hybrid time-sensitive flows was proposed. The networking telemetry and packet coloring were achieved based on the in-situ flow information telemetry. A deadline-based probabilistic packet coloring algorithm and a coloring-based semi-preemptive earliest deadline first scheduling algorithm were designed. Simulation results based on the OMNeT++ show that the average end-to-end latency of IFEDS under high load is 6.84% lower than Deadline-TSN, and the packet loss rate is reduced by 0.37% compared with Deadline-TSN when the event-triggered flow ratio is 40%.

**Key words:** deterministic network, time-sensitive networking, scheduling, in-situ flow information telemetry, cyclic specified queuing and forwarding

### 0 引言

工业 4.0 和智能工厂的发展对工业通信网络提出了保证确定性时延和抖动的挑战。不可预测的时延

和抖动限制了工厂的制造能力, 甚至可能导致事故的发生<sup>[1-2]</sup>。因此, 工厂自动化、运动控制等产业都不再满足于传统分组交换网络通常采用的“尽力而为” (BE, best effort) 的传输服务<sup>[3-4]</sup>, 而是开始寻求

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2025-06-21

通信作者: 蔡岳平, caiyueping@cqu.edu.cn

基金项目: 四川省国际科技创新合作项目 (No. 2022YFH0022)

**Foundation Item:** Sichuan International Cooperation Project of Science and Technology Innovation (No. 2022YFH0022)

能提供高服务质量 (QoS, quality of service) 的技术。确定性网络 (DetNet, deterministic networking) 通过控制流量转发、报文复制消除和排序等技术, 实现了确定性时延、抖动、丢包率、带宽和可靠性等 QoS 保障, 提供了“准时、准确”的数据传输能力<sup>[5-6]</sup>, 为工业 4.0 的实现奠定了网络技术基础。

DetNet 的流量调度技术分隔了时敏流量和非时敏流量的带宽资源, 保障了时敏流量的可靠性传输。例如循环排队转发 (CQF, cyclic queuing and forwarding)<sup>[7]</sup>及其演进的循环指定排队转发 (CSQF, cyclic specified queuing and forwarding)<sup>[8-9]</sup>都利用队列的循环实现了对时间触发 (TT, time-triggered) 时敏流量时延和抖动的确定性控制<sup>[10]</sup>, 确保 TT 流不被低优先级流量阻塞。工业互联网流量分类与 QoS 需求见表 1, 实际的工业互联网中包含了周期性和非周期性的多种流量。例如在智能变电站<sup>[11-12]</sup>中, GOOSE 报文会周期性地测试发送以确保系统的完整性和通信链路的可靠性。但当监测的数据或系统状态发生变化时, 比如保护装置检测到故障, GOOSE 报文会被触发并以非周期发送。这是一种事件触发 (ET, event-triggered) 的时敏流量<sup>[13-14]</sup>。智能电网是典型的需要低时延、低抖动、低丢包、高可靠通信的大规模网络, 因此 ET 流的调度会极大地影响实际场景中流量的确定性传输。

ET 流的存在为 DetNet 的确定性通信目标带来了挑战。对可预知流量的调度技术计算是 NP 难问题, 需要复杂的离线运算, 但对于不可预知流量, 在线调度则更困难。在大规模确定性网络 (LDN, large-scale deterministic network) 中, 设备入网、设备故障等会导致网络规模和网络拓扑变化的情况时有发生, 因此需要研究 ET 和 TT 混合时敏流量在线调度技术。

本文贡献总结如下。

1) 在 LDN 中引入随流检测 (IFIT, in-situ flow information telemetry)<sup>[15-16]</sup>以监测网络状态与数据包信息。

2) 设计了一种基于截止时间的数据包概率染色算法。

3) 设计了一种基于染色的半抢占式最早截止时间优先 (EDF, earliest deadline first)<sup>[17-18]</sup>调度算法。

所提方案称为随流最早截止时间调度 (IFEDS, in-situ flow earliest deadline scheduling)。

## 1 相关工作

提供确定的低时延和时延抖动是 DetNet 的主要目标之一, 实现这一目标的核心原则是使流在每个节点有确定性的抖动, 不因跳数的增加而累积。微突发是抖动累积的直接原因<sup>[9]</sup>, 该现象主要发生在多个输入端口同时到达的数据包需要被同一输出端口发送的情况。

### 1.1 时间触发流调度技术

随着对确定性要求的不断提升, 针对 TT 流量的调度技术成为研究重点。CQF 及其演进的 CSQF 技术被相继提出。CSQF 根据时间单位进行资源预留、规划流量, 减少微突发的发生<sup>[20]</sup>。核心是引入周期调度和显式路由的概念, 根据整个网络的流量状态。控制器为每个流计算一条满足时延需求的路径以及流在每个路径节点的发送时间。通过配置分段路由扩展头 (SRH, segment routing header) 安排路径、各节点的调度周期和发送时间, 从而实现确定性时延。文献[21]针对 TT 流量实现了 CSQF 的全网调度。文献[22]提出了在航空航天分布式控制系统中, 依据各传感器、执行器数据传输周期与优先级, 离线计算时隙分配表, 保障飞行关键数据的稳

表 1 工业互联网流量分类与 QoS 需求

类型	优先级	周期性	典型周期	流量到达率(包·s <sup>-1</sup> )	数据大小/Byte	流量比例
网络控制(TT)	7	周期	50 ms ~ 1 s	50	50 ~ 500	2%
同步(TT)	6	周期	< 2 ms	500	30 ~ 100	6%
循环(TT)	5	周期	2 ~ 20 ms	50	50 ~ 1 000	6%
控制(ET)	4	非周期	—	50	100 ~ 200	5%
警报、命令(ET)	3	非周期	—	50	100 ~ 1 500	2%
配置、诊断	2	非周期	—	50	500 ~ 1 500	8%
视频	1	周期	帧速率	50 ~ 150	1 000 ~ 1 500	15%
音频	1	周期	采样速率	50 ~ 150	1 000 ~ 1 500	15%
BE	0	非周期	—	50 ~ 150	30 ~ 1 500	41%

定、低时延传输。实验显示,即使高负载下控制指令时延抖动控制在微秒级,满足飞行器实时控制精度要求,但网络拓扑或流量需求稍变就需重新规划时隙,灵活性受限。文献[23]提出了PB-HOA,使用基于预先计算路径的启发式在线算法,在路径级别使用流速率指标选择路由。这些技术通过精确的时间规划和资源分配,为TT流量提供了较好的确定性保障,但在处理ET流量时存在不足。

### 1.2 事件触发流调度技术

为实现ET流量的确定性调度,相关研究也逐渐开展。在车载通信领域,文献[24]提出的ED-Sched流量管理方案,针对车载通信系统中事件驱动实时流的特点,基于IEEE802.1Q-2018标准,实现了对事件驱动实时流的明确支持。在TSN领域,文献[25]提出的Deadline-TSN(D-TSN)机制,引入了基于EDF的在线调度,能够统一处理实时周期性和事件驱动流量。然而,这些研究在LDN中的应用存在局限性,未充分考虑LDN中网络规模扩大和拓扑变化带来的挑战。

### 1.3 大规模网络场景的流调度技术

在大规模网络环境中,高效的流调度对于保障QoS、优化资源利用和提升系统整体效能至关重要。TT流与ET流因触发机制差异,在调度上各具特性与挑战。

传统TT流常依赖预定义时隙规划,时间触发以太网按精确周期划分固定时隙给各TT流,确保数据传输确定性。文献[26]提出了基于可用队列信息的大规模网络演算路径规划方法。文献[27]设计了一种集中式动态时隙调度算法用于智能车联网场景。交通灯控制中心充当调度器,依据各路段车流量实时监测结果,周期性地微调TT流时隙,提升了路口通行效率的同时保障了车辆状态上报的及时性,可减少平均车辆排队长度20%以上。但集中式对调度中心算力、通信可靠性依赖大,一旦发生故障易引发系统波动。

而在ET流调度技术领域,抢占式优先级调度是最为简单有效的方案之一。在远程医疗监测网络,患者生命体征危急警报作为高优先级ET流,一旦触发,能抢占低优先级常规生理数据ET流带宽资源,确保医护及时响应。实验表明,危急状况下关键警报至医护端时延可缩至1s内,但可能使低优先级流“饥饿”,长期致部分数据丢失或时延严

重<sup>[28]</sup>。鉴于ET流的随机性,借助流量预测辅助调度已成趋势。文献[29]利用机器学习算法(如LSTM神经网络)对工业物联网传感器ET流数据量、发生时间预测,提前预留网络资源,提前配置传输路径与带宽,使ET流丢包率从传统无预测的约10%降至3%以下。但是模型训练开销大、需海量历史数据,且面对突发异常事件时预测精度受限。

文献[30]提出了分层混合调度架构,底层针对TT流确保确定性时隙,上层针对ET流用分布式令牌桶机制,依据各节点缓存状态、流量负载动态分配令牌管控ET流速率。在智能工厂网络测试中,既能稳定传输机床控制TT指令,又能灵活处理设备故障等突发ET消息,提升整体生产效率约15%,但是该架构复杂、参数调优难度高。

大规模网络通常两类流并存,协同调度是关键。ET流传输的微突发问题如图1所示。当LDN中存在TT和ET的混合时敏流量时,若ET流数据包和TT流数据包如图1(a)所示同时到达,且安排在同一周期内输出,会导致该周期后续所有数据包被延迟,并且可能进一步导致有的TT数据包无法在调度安排的时隙内被转发,打乱调度。若后续节点出现同样的现象,抖动会随跳数增多而累积,且在此之后到达的其他TT流数据包均会受此影响。若ET流数据包和TT流数据包如图1(b)所示同时到达,且安排ET流缓存后输出,则该过程导致ET流数据包在后续每一跳内都被延迟一个 $T_c$ ,该ET流数据包很可能因为无法满足端到端(E2E, end to end)截止时间要求而被丢弃。由此可见,ET流带来的不确定性会随着网络规模的增大而累积。

## 2 方案设计

为了更好地解决上述问题,本文提出了一种面向混合时敏流量的基于随流检测的最早截止时间优先调度技术,称为IFEDS。通过引入IFIT技术<sup>[15-16]</sup>来实现网络测量和数据包染色,设计基于截止时间的数据包概率染色算法和基于染色的半抢占式EDF<sup>[17-18]</sup>调度算法,旨在解决大规模确定性网络中ET和TT混合时敏流量的在线调度问题,提高网络在不同负载和流量比例情况下的性能表现,以满足工业4.0和智能工厂对网络传输确定性低时延和低抖动的要求。

IFEDS包含3个部分,分别是IFIT报文头扩

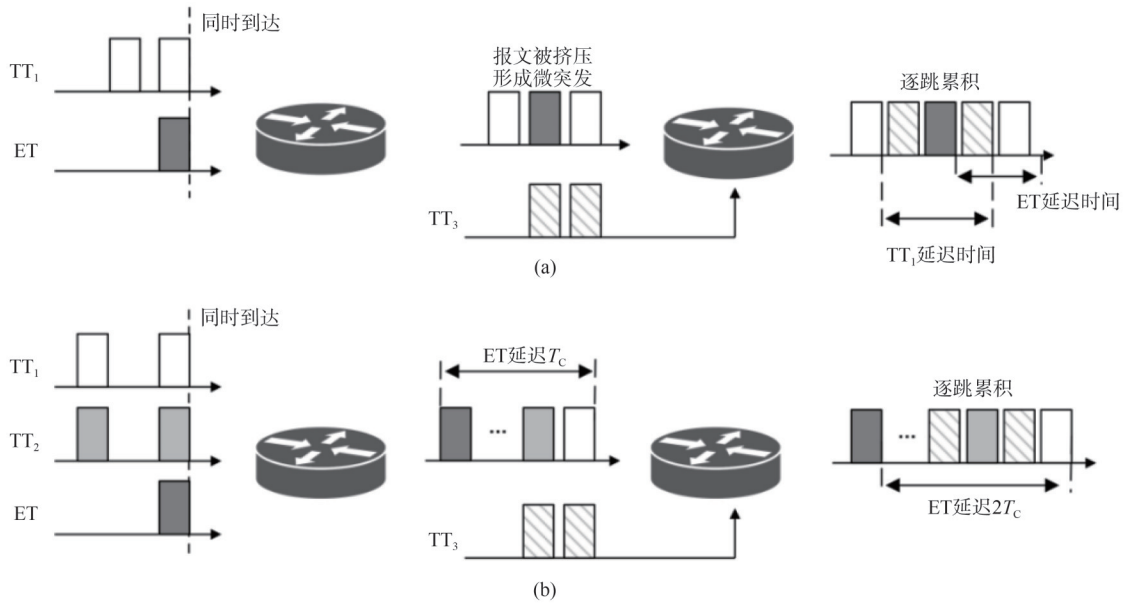


图1 ET流传输的微突发问题

展、基于截止时间的数据包概率染色算法以及基于染色的半抢占式EDF调度算法。IFEDS整体架构如图2所示。

CSQF工作在3层网络，不使用门控列表来管理队列。因此，为实现流量调度，需要对不同流进行区分，此外在线调度还需实时监测网络信息。本文提出使用基于IFIT的染色技术用以标记流量。

IFIT是一种随流检测技术，可以通过在真实数据包中插入IFIT报文头对数据包进行标记或在数据包中嵌入检测信息实现带内检测<sup>[31]</sup>。并且IFIT可以直接测量到具体流量的时延、丢包、抖动等性能指

标，并上报给控制器，不需要外部监控设备即可实现实时、准确的数据收集和分析。这种方法大大提高了网络管理的粒度和响应速度，有利于快速发现和解决问题，并支持基于实时流状况的动态网络优化。

### 2.1 IFIT 报文头扩展

可扩展性是构建大规模确定性网络的关键性能要求之一。分段路由（SR, segment routing）<sup>[32]</sup>技术支持利用SRH承载的信息实现网络编程，满足定制化的业务需求。CSQF利用SRH的段标识符（SID, segment identifier）维护流量每一跳的转发路

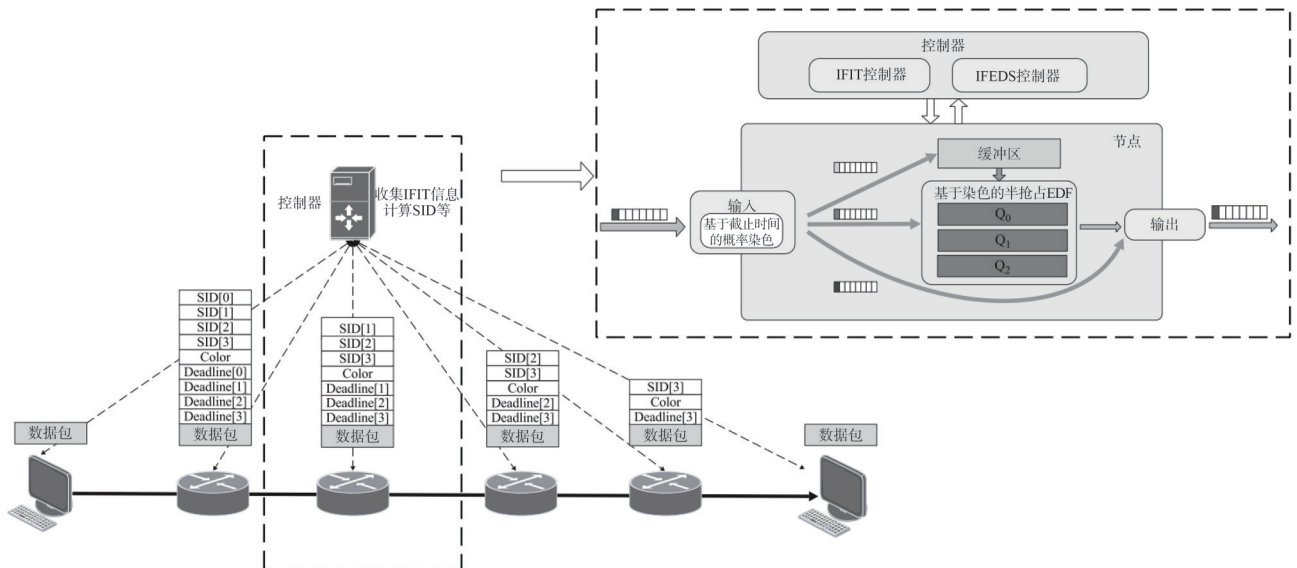


图2 IFEDS整体架构

径和出端口时间<sup>[33]</sup>。为专注于调度技术的研究，本文在源节点采用了基于 Dijkstra 的最短路径算法规划流量的传输路径，同样写入 SR 头部。IFIT 能够在不同的网络规模和复杂度中实现对实际业务数据的实时监控和分析。它同样利用 SRH 封装其头部，标识诸如数据包长度、流指令头、流指令扩展头等信息。IFEDS 将 IFIT 和 CSQF 相结合。因此，IFEDS 也可以在 IFIT 的基础上实现进一步扩展。

每个数据包的染色信息和各节点的截止时间信息将被存储到 SRH 中 IFIT 头的染色相关扩展位内，SRH 封装结构示意图如图 3 所示。Type 字段表示 IFIT 报文头的开端。Length 字段表示 IFIT 报文头的整体长度。Rsv 字段表示保留位，预留给未来扩展使用。Flow ID/Flow ID Ext 字段用于唯一标识一条业务流，在检测域内全网唯一。L 字段表示丢包测量染色标识。D 字段表示时延测量染色标识。R 字段表示保留位，预留给未来扩展使用。R/S 字段如果引导标签为栈底则为 R，置 1；如果引导标签为非栈底则为 S，置 0；缺省值为 1。Next Header Type 字段表示扩展数据类型，表明是否携带扩展头。E 字段表示统计模式，包括逐跳模式和 E2E 模式，置 1 时表示 E2E 模式。P 字段用于 IPv4 封装防止 Probe Marker 误匹配，置 1 时表示误匹配，此时无需统计。F 字段表示正向流标识，置 1 时表示正向流。Len 字段表示扩展长度。Trace Type 字段表示 Metadata 指示位，通过 bitmap 表示。Color 段表示当前数据包的染色信息。Time slot 字段用于收集各个节点各队列的时隙利用情况，利用这一信息在前序节点获知后续节点的信息，以便制定调度方

案。Deadline 字段保存了当前数据包在每个路径节点上的截止时间要求。

SRH 开销在当前网络环境中已成为一个严峻问题，过大的报文头开销会增加载荷占比的下降、影响网络兼容性，或导致超过网络最大传输单元限制而导致额外的管理成本、分片丢失和乱序风险<sup>[34]</sup>。IFIT 技术是一种相对低开销的技术。对本文所提方案而言，在支持 IFIT 扩展的数据包中增加染色相关报文头仅需增加 4 Byte 开销。相对于常见的控制类 ET 流量 100 ~ 200 Byte 的数据包和警报类 ET 流量 100 ~ 1 500 Byte 的数据包而言，仅带来 0.27%~4.00% 的额外开销。

基于对 SR 和 IFIT 扩展，本文定义流量的集合为  $F$ ，对于任意的流  $f_i$ ，可以表示为

$$\forall f_i \in F, i \in \{1, 2, \dots, k\},$$

$$f_i = \{C, v_s, v_d, T, S, N, D\} \quad (1)$$

其中， $C$  表示数据包的颜色， $v_s, v_d$  分别为流的源节点和目的节点编号， $T$  表示流的生成周期，若该流为 ET 流，则置 0， $S$  是该流路径信息的集合， $N$  是该流量到每个节点时所经历的周期数的集合， $D$  是该流量到每个路径节点的截止时间集合，单位为  $\mu s$ 。

例如，若  $f_i = \{1, 3, 40, \{1, 2, 3\}, \{0, 1, 4\}, \{50, 100, 200\}\}$ ，说明该流从节点 1 被发送，目的节点是节点 3，该流每 40  $\mu s$  生成一次，预计经过节点 1 → 节点 2 → 节点 3 链路传输，在 1 个  $T_c$  周期内到达节点 2，在第 4 个周期内到达节点 3，在节点 1、节点 2、节点 3 内的截止时间分别为 50  $\mu s$ 、100  $\mu s$  和 200  $\mu s$ 。

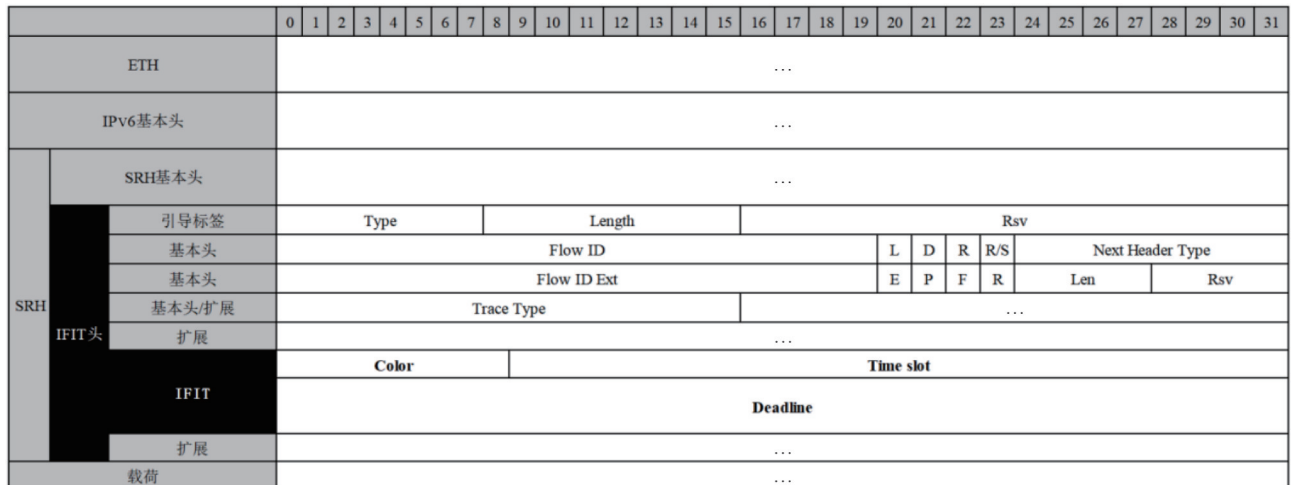


图 3 SRH 封装结构示意图

### 2.2 基于截止时间的数据包概率染色算法

基于IFIT技术，可以对数据包进行染色。且因为染色标记是随流的，所以可以被保留到后续节点继续使用，而非仅在当前交换机内有意义。

相较于只调度TT流的系统，包含ET流的混合时敏流量在到达时存在一定的不确定性。传统的严格时间划分的染色算法虽然简单易于部署，但灵活性较低，不能保证时间边界附近到达的数据包的调度。因此，本文基于这一点考虑了对DetNet流量在排队前基于截止时间进行概率染色。

基于截止时间的数据包概率染色算法如图4所示，表现了数据包在某节点可能的到达时刻时间轴，越靠右侧表示数据包的到达时间越晚。 $t_0$ 是数据包预期到达该节点的时间， $t_d$ 是数据包在该节点必须完成转发的时间限制。它是基于数据包所属流的整体端到端传输要求以及在各个节点的处理时间预算预先设定的。目的是确保数据包在每个节点都能按时完成处理转发，以满足业务对整个流传输的时间约束。 $t_1$ 到 $t_5$ 是从 $t_0$ 到 $t_d$ 这一时段内时间的6等分点，加上太早到达和太晚到达的两类数据包，刚好与传统的8级优先级划分对应，以便于该机制可以在不支持IFIT的节点透明传输。 $t_r$ 是综合考虑数据包从当前节点到目的节点剩余传输路径上的链路时延、目的节点的截止时间等因素后确定的数据包最晚能够到达当前节点的时间。如果数据包在 $t_r$ 时刻之后才到达当前节点，即使后续节点采用直通的转发策略，也不可能再在端到端截止时间前到达目的节点。

$t_d$ 到 $t_r$ 的时段称为可直通期，用变量 $t_{ct}$ 描述，定义为

$$t_{ct} = D_i^n - \left( \sum_n^k D_l \right) \quad (2)$$

其中， $D_i^n$ 表示数据包*i*在节点*n*处的剩余截止时间，*n*为当前节点号，*k*表示目的节点号。该式表示 $t_{ct}$ 等于数据包的剩余截止时间减去从该节点到数据包的目的节点之间所有链路的时延之和。

因为 $t_{ct}$ 取决于数据包在每个节点的剩余截止时

间以及到目的节点之间链路时延的变化，所以它的值会随着数据包在网络中的传输而动态变化。例如，在一个多跳网络中，数据包每经过一个节点，因为消耗了一定时间，剩余时间会减少，同时到目的节点的链路时延也会相应改变（取决于当前节点到下一跳节点的链路情况），这些改变会导致 $t_{ct}$ 的值发生变化。

具体的染色方案如下。

1) 在 $t_1$ 之前到达的数据包：按概率 $P_g$ 染为绿色，其余染为黄色，其中，绿色流集合表示为 $F_{temp}$

$$P_g = \frac{2t_1}{2t_1 - t} - 1 \quad (3)$$

2) 在 $t_1$ 到 $t_5$ 之间到达的数据包染为绿色，且根据具体的剩余截止时间对数据包做出标记，若一个数据包被标记为fg2，说明其被染为绿色，且在时段 $t_2$ 到 $t_3$ 内到达。

3)  $t_5$ 到 $t_{ct}/2$ 之间到达的数据包：按照概率 $P_r$ 染为红色，其余染为绿色

$$P_r = \frac{t - t_5}{t_d + \frac{1}{2}t_{ct} - t_5} \quad (4)$$

4) 到达时间晚于 $t_{ct}/2$ 但早于 $t_r$ 的数据包按照概率 $P_d$ 丢弃，未丢弃的染为红色

$$P_d = \frac{t - (t_d + \frac{1}{2}t_{ct})}{t_r - (t_d + \frac{1}{2}t_{ct})} \quad (5)$$

5) 晚于 $t_r$ 到达则直接被丢弃。

基于截止时间的数据包概率染色算法如算法1所示。其中，条件判断和集合操作都是常数时间操作，复杂度为 $O(1)$ 。且该算法所有操作均在主循环内部执行，因此该循环决定了算法总的复杂度为 $O(|F|)$ ， $|F|$ 表示流集合大小。算法的空间复杂度则主要取决于 $F_{buf}$ 、 $F_{sch}$ 和 $F_{ct}$ 这3个集合的大小。其中， $F_{buf}$ 表示缓存流集合、 $F_{sch}$ 表示调度流集合、 $F_{ct}$ 表示直通流集合，在最坏情况下，这3个集合可能会包含所有输入的流，因此算法的空间复杂度同样是 $O(|F|)$ 。

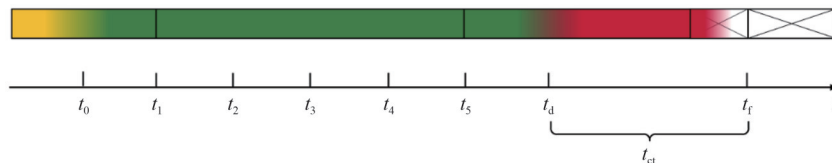


图4 基于截止时间的数据包概率染色算法

算法的计算开销在不同网络规模下主要受流集合大小 $|F|$ 的影响。在小规模网络中,流的数量通常较少,因此计算开销较低。随着网络规模的增大,时间和空间开销也随之增加。由于该算法具有线性的时间复杂度,计算开销随着网络规模的增大呈线性增长,因此在大规模网络中应用该算法是可行的。这种线性增长模式不仅在计算时间上更具优势,而且更容易扩展,适合在实际的大规模网络环境中应用。

**算法1** 基于截止时间的数据包概率染色算法

输入 流集合 $F$ , 当前时间 $t$

输出 缓存流集合 $F_{\text{buf}}$ , 调度流集合 $F_{\text{sch}}$ , 直通流集合 $F_{\text{ct}}$

```

for  $f_i \in F$ 
  if  $t \leq t_1$ 
    if  $P_g > 0.5$ 
       $f_i \cdot C \leftarrow$  绿色;
       $F_{\text{temp}} \leftarrow f_i$ ;
    else
       $f_i \cdot C \leftarrow$  黄色;
       $F_{\text{buf}} \cdot F \leftarrow f_i$ ;
       $F_{\text{buf}} \cdot T \leftarrow t$ ;
    else if  $t_1 < t \leq t_5$ 
       $f_i \cdot C \leftarrow$  绿色;
       $F_{\text{temp}} \leftarrow f_i$ ;
    else if  $t_5 < t \leq (t_5 + 0.5t_{\text{ct}})$ 
      if  $P_r > 0.5$ 
         $f_i \cdot C \leftarrow$  红色;
         $F_{\text{ct}} \leftarrow f_i$ ;
      else
         $f_i \cdot C \leftarrow$  绿色;
         $F_{\text{temp}} \leftarrow f_i$ ;
    else if  $(t_5 + 0.5t_{\text{ct}}) < t \leq (t_5 + 0.5t_{\text{ct}})$ 
      if  $P_d > 0.5$ 
        丢弃  $\leftarrow f_i$ ;
      else
         $f_i \cdot C \leftarrow$  红色;
         $F_{\text{ct}} \leftarrow f_i$ ;
    else
      丢弃  $\leftarrow f_i$ ;
return  $F_{\text{buf}}, F_{\text{sch}}, F_{\text{ct}}$ 

```

### 2.3 基于染色的半抢占式EDF调度算法

在生成流量的源节点内,首先需要将ET数据包周期化,这是为了能以一个确定的粒度规划调度。例如,若系统中可能存在 $n$ 种ET流,最坏可容忍端到端时延分别是 $D_1, D_2, \dots, D_n$ 。路径有 $m$ 跳,第 $i$ 跳的链路时延共计 $D_{ii}$ ,则每跳的最坏可容忍处理时延即ET周期为

$$T_e = \frac{\min(D_1, D_2, \dots, D_n) - \sum_1^m D_{ii}}{m} \quad (6)$$

基于截止时间周期化ET数据包如图5所示,显示了ET流的周期化处理,可以将任意ET流看作以 $T_e$ 为生成周期的TT流进行调度计算。在周期化处理过程中,ET流被赋予了确定的周期,这可能使在某些时刻多个ET流数据包同时到达节点,增加了节点的瞬时流量负载,导致拥塞的可能性上升。同时,由于周期化的限制,ET数据包可能因为无法及时获得传输资源而错过原本的截止时间。

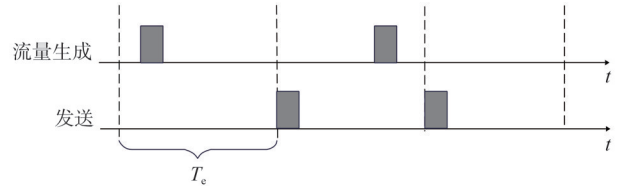


图5 基于截止时间周期化ET数据包

然而,在实际应用中这种情况发生的概率相对较小。一方面,ET流的产生通常具有一定的随机性,多个ET流同时到达节点且造成严重拥塞的情况并非频繁发生。另一方面,本文所提的IFEDS方案通过基于染色的半抢占式EDF调度算法等措施,可以进一步避免和消除这些问题。红色数据包的直通转发机制能够使紧急数据包快速通过,减少在节点的停留时间;而基于截止时间的数据包概率染色算法,也能使调度更加灵活,优先处理截止时间临近的数据包,从而降低错过截止时间的风险,整体上保障了网络的确定性传输。

在交换机节点内,不同染色的流量,使用不同的调度方案。

1) 红色数据包将被直通转发,显著缩短了其到达目的节点的时延。尽管数据包可能已经错过了在某个中间节点的截止时间,但仍有可能在最终的绝对截止时间前到达目的节点。不过,在数据包被染色并进行直通转发之前,需要先评估后续路径上交

换机的可用时隙，确保能够发送该数据包。这一过程需要借助IFIT机制来获取后续节点的队列状态。

2) 黄色数据包将在到达节点时被缓存一个周期 $T_c$ 并被更新为绿色。因为其到达时间早于 $t_0$ ，所以即使等待一个 $T_c$ ，数据包也不会在 $t_d$ 之后被调度发送。

3) 绿色数据包将根据染色标记进行调度。距离截止时间越近的数据包获得越高的优先级，实现EDF调度。

需要注意的是，传统抢占式EDF要求调度的任务相互无关、无次序约束，且所有任务均可抢占。但在DetNet中，不同时敏流量的重要性并不相同，因此在传统EDF算法的基础上，需要额外考虑信息的重要性，这通常如表1所示由流量的优先级表征。另外，对于同一染色标记的流量，流的到达时间同样需要被考虑，否则会导致调度冲突以及抖动的大幅增加。因此，将流量的优先级和到达时间纳入考虑。优先级越高则越早调度，若两个同一优先级和染色标记的数据包都有调度需求，则到达时间更早的数据包优先被调度，调度顺序可以综合为式(7)所示，其中， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为权重系数，根据流量特性和业务需求确定， $f_i \cdot \text{pri}$ 表示流量优先级， $f_i \cdot C$ 表示量化的流量染色标记， $t$ 表示数据包的到达时间。调度顺序是一个综合考虑优先级、染色标

记以及数据包到达时间的量化值，用于确定数据包在队列中的处理顺序，按照值由大到小调度对应数据包。本文将这种EDF称为基于染色的半抢占式EDF调度

$$\text{Sch} = \frac{\alpha f_i \text{pri}}{\beta f_i C + \gamma t} \tag{7}$$

基于染色的半抢占式EDF算法流程如图6所示。在该算法中，新到达的流按染色标记和到达顺序插入队列，优先处理截止时间最早的数据包，这一过程不发生抢占，类似于非抢占式EDF算法执行。如果处理某流量时，又有新流量到来，则比较两者染色标记。若新流截止时间更早，再根据双方的优先级进行比较，决定是否抢占。若新流优先级更高，则发生抢占，否则排队等待，这与传统抢占式EDF的即刻抢占不同。

IFEDS调度示例如图7所示，并将IFEDS与固定优先级的调度方案做对比。案例展示了一个节点接收到6个TT数据包和2个ET数据包的情况，其中，TT0到达时晚于其在这一节点的截止时间。在这个案例中，数据包TT0本应无法在该节点的截止时间到达之前完成传输而被直接丢弃，但由于IFEDS的染色与调度技术，在判断其可以直通转发后将其染为红色，并直接转发。ET1也是同理，在判断后续节点可以让流量在QoS要求时限内传输到

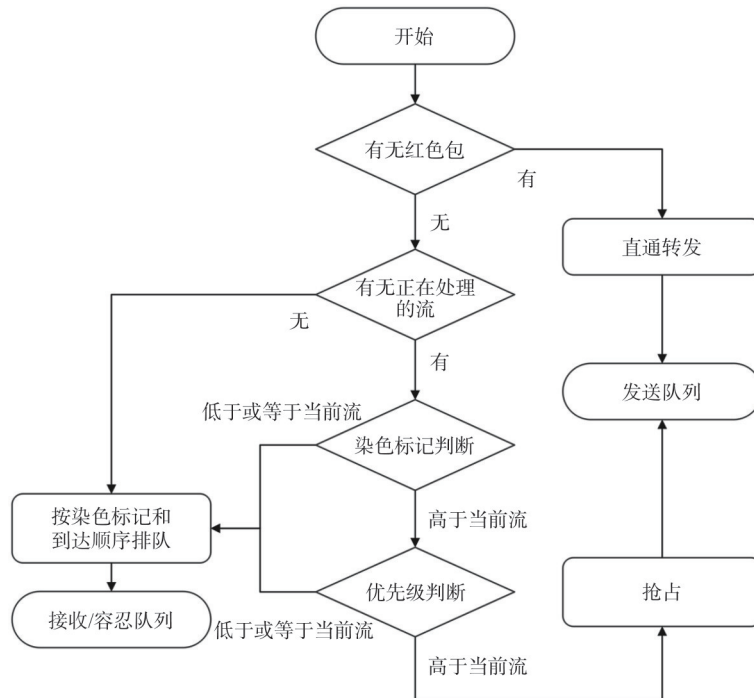


图6 基于染色的半抢占式EDF算法流程

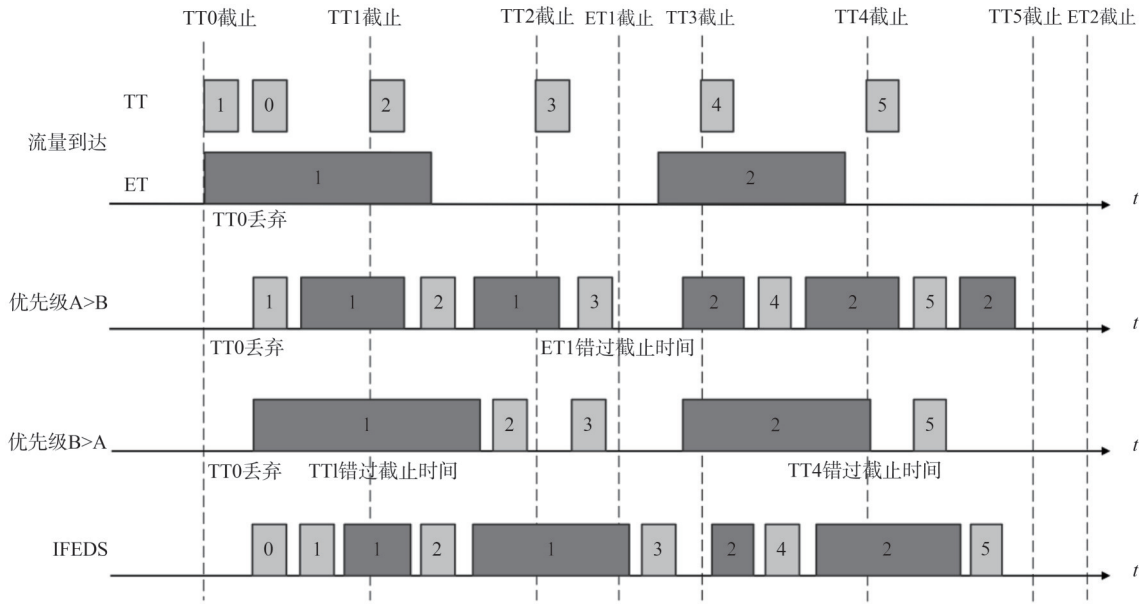


图7 IFEDS调度示例

目的节点后，允许数据包继续调度。其他数据包按照原定计划到达，染为绿色。但此时因流量汇聚产生了微突发，流量强度已经接近交换机负载，不论A与B哪种流量的优先级更高，按照固定优先级的传统方法排队时都会存在因错过截止时间而被丢弃的情况。但使用IFEDS，则可以在一定程度上放宽截止时间限制，实现所有数据包都在该节点完成转发。

与传统的基于优先级的调度方案不同，传统调度方法对同一优先级流量的处理是相同的，而染色能对每个数据包实现差异化的调度。特别是针对优先级相同但截止时间不同的多种流量时，优先级调度策略是一致的，而IFEDS调度策略是不同的。且因为染色是仅针对时敏流量的，因此，在同样确保非时敏流不影响时敏流的前提下，染色为时敏流提供了更细致的分类方法，且颜色可以随流在路径节点中根据实际情况改变。

此外，IFEDS有良好的网络兼容性，因为需要依托于支持IFIT功能的交换机和路由器等硬件设备，在当前的网络设备中直接实现数据包的染色和相应的调度策略是非常困难的。因此，硬件的升级或定制是必要的，但不支持IFEDS的设备可以仍使用传统调度方案将IFEDS流透明传输，不对染色信息进行处理。这样虽然损失了一定的性能，但确保了对大规模网络的适用性，使网络设备可以逐渐升级替换，降低了部署成本。

### 3 评估

#### 3.1 最坏端到端时延评估

在IFEDS中，对于采用存储转发模式传输的数据包，只有当数据包处于正确的周期时间内时才会被写入传输队列。因此黄色数据包会先被缓存等待 $T_c$ ，数据包需要被缓存的时间 $b_i$ 表示为

$$b_i = \begin{cases} T_c, & f_i \cdot C = \text{黄色} \\ 0, & f_i \cdot C = \text{绿色} \end{cases} \quad (8)$$

对任意非红色包，其端到端时延 $W_i$ 为数据包从源节点生成到传送到目的节点所需的时间，可以由式(19)计算得到

$$W_i = b_i + \text{num}(f_i \cdot S) \cdot (D_i + Q_i) + \sum_{j=0}^{\text{num}(f_i \cdot S)} (f_i \cdot N_j - f_i \cdot N_{j-1}) \cdot T_c \quad (9)$$

其中， $D_i$ 表示数据包的传输时延， $Q_i$ 表示排队时延，这与数据包在染色时标记的时段编号有关。上式的第二项表示数据包在传输路径中每个节点排队和发送时延之和。第三项表示数据包所在队列由接收转换为发送所需经历的周期时间。

对于数据包的最坏端到端时延，由于红色数据包在截止时间前都有可能通过紧急直通转发的方式到达目的节点。因此任意可调度数据包的最坏端到端时延等于数据包的截止时间，这是由具体业务需求定义的。

### 3.2 仿真评估

为评估所提机制的性能，选择将 IFEDS 与 CSQF<sup>[20]</sup>、D-TSN<sup>[25]</sup>方案相对比，比较它们的时延、抖动、丢包率等性能指标。本文基于 OMNeT++ 仿真平台<sup>[35]</sup>和开源框架 NeSting<sup>[36-37]</sup>，构建了生成确定性流量并部署调度方案的验证环境。使用严格时间划分染色和概率染色分别进行仿真，将得到的结果中时延抖动丢包表现好的一部分数据作为训练集，训练完成决策树的构建。

#### 3.2.1 构建仿真模型

##### 1) 网络模型

仿真网络模型是基于现实的 NSFNet<sup>[38]</sup>拓扑构建的真实结构，包含了 14 个节点和 21 条链路，基于 NSFNet 的网络拓扑结构如图 8 所示，图中的单位为  $\mu\text{s}$ 。这些节点是全双工的，并有多个输入输出端口。节点之间的连接全部为全双工链路，由两条单向链路组成。链路以固定数据速率传输数据。每台交换机都部署了流量调度和整形方案，以实现对流的控制。同时，利用 IFIT 对节点和路径状态进行测量、监控和感知，用于规划调度方案。该仿真框架将验证真实拓扑结构下各机制的确定性流量调度性能。链路带宽设置为 1 Gbit/s，每个队列的长度设置为 10， $T_c$  大小为 125  $\mu\text{s}$ 。

##### 2) 流量模型

按表 1 中工业场景中流量分类及 QoS 要求设置流量的产生。按式(3)定义流量携带的信息。通过调整到达率模拟工业场景产生流量，并在规定范围内随机生成数据包大小。对于每个流，源节点和目标节点都是从所有顶点集中随机选取而创建的。

#### 3.2.2 仿真结果与分析

端到端平均时延和最坏时延比较如图 9 所示，显示了 CSQF、D-TSN 和 IFEDS 机制分别在低负载 (0.2) 和高负载 (0.8) 情况下的 TT 流和 ET 流的平均端到端时延性能。可以观察到，D-TSN 和 IFEDS 都能以相对一致的性能处理 TT 流和 ET 流，CSQF 对 ET 流支持较差。低负载情况下，D-TSN 能提供最小的端到端平均时延，但最坏时延要大于 IFEDS。这是因为 D-TSN 仅在源节点将截止时间映射到优先级，减少了中间节点的处理时间，而 IFEDS 可随流动态调整。在高负载情况下，IFEDS 表现出了最好的平均时延和最坏时延。IFEDS 技术对 ET 包的 E2E 平均时延相较于传统 CSQF 降低了 7.14%，最大 E2E 时延相较于 D-TSN 降低了 6.84%。这是因为 IFEDS 能处理相当一部分晚于截止时间到达的数据包，这在高负载情况下保障确定性传输是更有利的。

TT 流抖动表现如图 10 所示，显示了固定 ET 帧占比为 20%，在不同网络负载下 CSQF、D-TSN 和 IFEDS 的 TT 流抖动变化趋势。仿真结果表明，随着网络负载的增加，3 种机制的 TT 流抖动均逐渐增加。这是因为随着流数目的增加，会造成流排队的时延增加。其中，CSQF 的抖动增加最显著，这是因为随着负载的增加会导致微突出现象的频率的增加，并导致抖动的累积。D-TSN 和 IFEDS 均能抑制抖动的增加，但 IFEDS 动态的染色机制带来了更好的灵活性，而 D-TSN 需要根据网络和流量的特性调整门控和周期参数，若选取不当，则会推迟数据包的发送。

随 ET 数据包的增多各机制丢包率对比如图 11

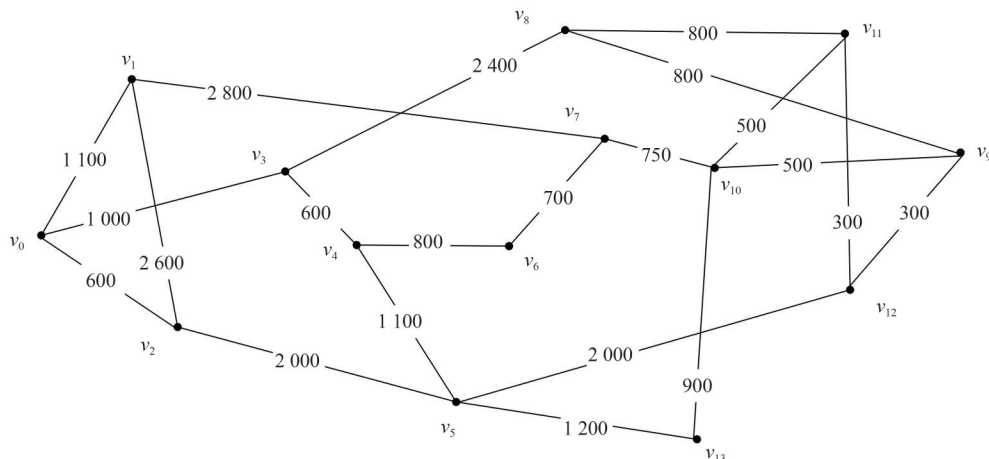


图 8 基于 NSFNet 的网络拓扑结构

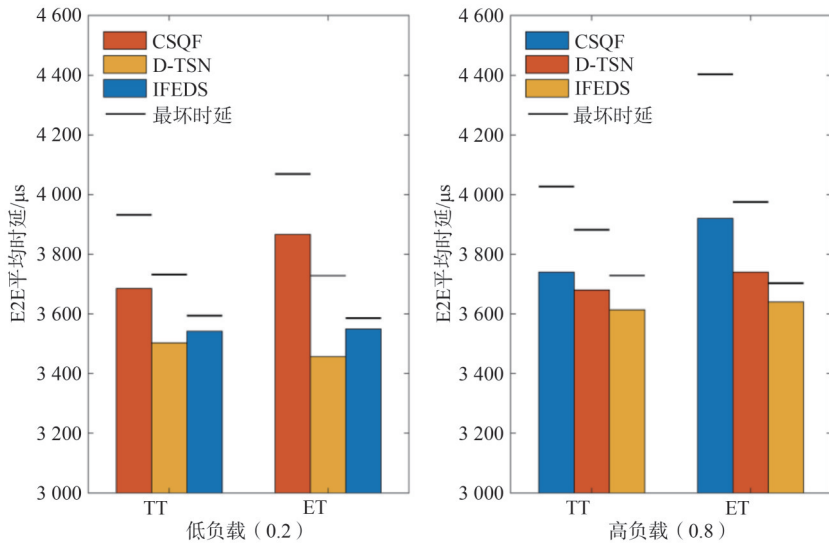


图9 端到端平均时延和最坏时延比较

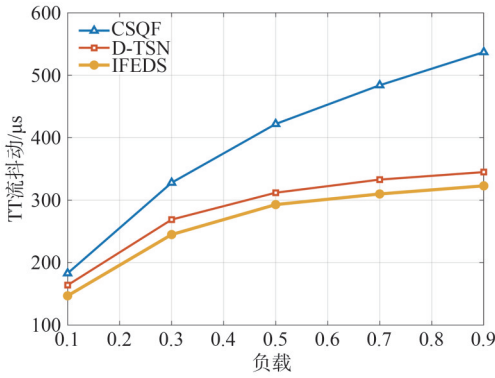


图10 TT流抖动表现

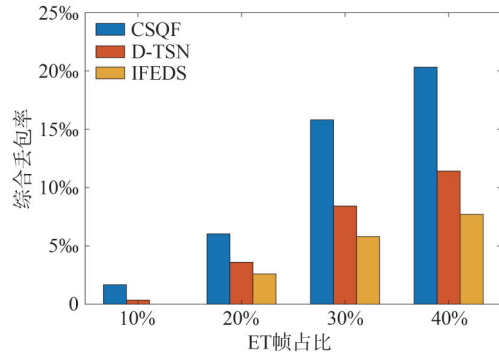


图11 随ET数据包的增多各机制丢包率对比

所示，给出了固定负载为0.6，在不同的ET数据包占比情况下，3种机制的丢包率对比。可以看出无论ET数据包占比多少，IFEDS都能表现出最低的丢包率。这是依靠IFEDS的紧急数据包直通转发机制实现的，这一机制令原本应被丢弃的数据包有了传输的机会。在ET数据包占比为40%的情况下，IFEDS的丢包率比CSQF降低了1.26%，比D-TSN降低了0.37%。

### 4 结束语

本文提出了一种面向大规模确定性网络的新型流量调度技术——随流最早截止时间调度，以应对工业4.0和智能工厂对非周期的事件触发流量的确定性传输需求。该方案通过引入基于随流检测和最早截止时间优先技术，有效地改善了传统方法在处理混合时敏流量时遇到的时延和抖动问题。通过OMNeT++仿真验证了IFEDS方案的有效性，仿真

结果表明，该方案能够在高负载情况下，最大E2E平均时延降相较于CSQF低7.14%，相较于D-TSN降低了6.84%。在ET数据包占比为40%的情况下，丢包率比CSQF降低了1.26%，比D-TSN降低了0.37%。证明该机制在不同网络条件和流量模式下保持较低的时延和抖动，显著地提高了网络的服务质量。

在混合时敏流量调度场景中，IFEDS展现出了有效的网络状态监测与调度能力。然而随着实际应用网络规模的持续扩大、流量类型愈发多样，要在保障高效性能的同时，实现IFEDS的可扩展性与适应性仍有待深入探究。尤其在超大规模网络环境中，数据包数量剧增、种类日益繁杂，会对现有的染色和调度算法的性能产生影响。基于机器学习或者自适应控制的增强手段，值得进一步摸索尝试。此外，IFIT所收集的网络状态信息具有瞬态特性。当网络处于快速变化状态时，依据这些信息计算得出的策略，未必能契合流量通过的实际要求。所

以，决策环节必须权衡测量信息与当前网络状态，可以引入联合路由调度、增量调度等方案以便灵活地调整调度策略，适应复杂多变的网络状况。

### 参考文献：

- [1] 王健全, 马彰超, 孙雷, 等. 工业网络体系架构的演进、关键技术及未来展望[J]. 工程科学学报, 2023, 45(8): 1376-1389.  
WANG J Q, MA Z C, SUN L, et al. Evolution, key technology, prospects, and applications of industrial network architecture[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8): 1376-1389.
- [2] FEDULLO T, MORATO A, TRAMARIN F, et al. A comprehensive review on time sensitive networks with a special focus on its applicability to industrial smart and distributed measurement systems[J]. Sensors, 2022, 22(4): 1638.
- [3] 蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(7): 1378-1397.  
CAI Y P, YAO Z C, LI T C. A survey on time-sensitive networking: standards and state-of-the-art[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(7): 1378-1397.
- [4] 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. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [5] LI Z M, PENG C, YU G, et al. DetNet: design backbone for object detection[C]//Proceedings of the Computer Vision - ECCV 2018. Cham: Springer, 2018: 339-354.
- [6] 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, 2019, 21(1): 88-145.
- [7] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Bridges and Bridged Networks - Amendment 29: Cyclic Queuing and Forwarding[S]. IEEE std. IEEE 802.1Qch-2017, 2017: 1-30.
- [8] HUANG Y, WANG S, FENG T, et al. Towards network-wide scheduling for cyclic traffic in ip-based deterministic networks[C]//Proceedings of the 2021 4th International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN). IEEE, 2021: 117-122.
- [9] 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.
- [10] WANG X L, YAO H P, MAI T L, et al. Joint routing and scheduling with cyclic queuing and forwarding for time-sensitive networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(3): 3793-3804.
- [11] GE X H, HAN Q L, DING L, et al. Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: a survey of trends and techniques[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(9): 3112-3125.
- [12] KANG W F, CHEN M Y, GUAN Y J, et al. Distributed event-triggered optimal control method for heterogeneous energy storage systems in smart grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 1944-1956.
- [13] 赵武智, 樊国盛, 郭小坤, 等. 基于 IEC 61850 的智能变电站二次回路安全隔离研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6): 141-145.  
ZHAO W Z, FAN G S, WU X K, et al. Research on safety isolation of secondary circuit in intelligent substation based on IEC61850[J]. Techniques of Automation and Applications, 2024, 43(6): 141-145.
- [14] GE X H, HAN Q L, ZHANG X M, et al. Dynamic event-triggered control and estimation: a survey[J]. International Journal of Automation and Computing, 2021, 18(6): 857-886.
- [15] WU Y Q, LV T T, ZHANG L. A network business quality intelligent assessment and fault location method based on IFIT[C]//Proceedings of the 2022 7th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 117-121.
- [16] WU W H, LIU J, LI S J, et al. AIIN: an APN-integrated approach toward reactive telemetry notification for IFIT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(4): 6253-6265.
- [17] QIAN G M. The earliest smooth release time for a new task based on EDF algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 220595-220605.
- [18] CHETTO M, EL OSTA R. Main results on earliest deadline first scheduling for energy neutral sensors[C]//Proceedings of the 2023 15th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). Piscataway: IEEE Press, 2023: 167-171.
- [19] ZHANG J H, SHEN D, DONG F, et al. Micro-burst aware ECN in multi-queue data centers: algorithm and implementation[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(3): 2384-2398.
- [20] CHEN M, LI Z, GENG X. Segment routing (SR) based bounded latency[J]. Internet Engineering Task Force, Internet-Draft draft-chendnet-sr-based-bounded-latency-00, 2019.
- [21] 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.
- [22] SANCHEZ-GARRIDO J, APARICIO B, RAMÍREZ J G, et al. Implementation of a time-sensitive networking (TSN) Ethernet bus for microlaunchers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(5): 2743-2758.
- [23] WANG M Y, ZHU S Y, ZHANG Y J. A heuristic online algorithm for routing in large-scale deterministic networks[C]//Proceedings of the 2023 24th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 189-194.
- [24] LO BELLO L, PATTI G, VASTA G. Assessments of real-time communications over TSN automotive networks[J]. Electronics, 2021, 10(5): 556.

- [25] PATTI G, BELLO L L, LEONARDI L. Deadline-aware online scheduling of TSN flows for automotive applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(4): 5774-5784.
- [26] MISEREZ J, SHARMA G P, TAVERNIER W. Routing protocols exploiting queue information for deterministic networks[C]//Proceedings of the 2023 19th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-8.
- [27] ALI SYED A, AYZAZ S, LEINMÜLLER T, et al. Dynamic scheduling and routing for TSN based in-vehicle networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [28] LEONARDI L, LO BELLO L, PATTI G. Combining earliest deadline first scheduling with scheduled traffic support in automotive TSN-based networks[J]. Applied System Innovation, 2022, 5(6): 125.
- [29] ZHAO Y, YANG Z, HE X W, et al. E-TSN: enabling event-triggered critical traffic in time-sensitive networking for industrial applications[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 42nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Piscataway: IEEE Press, 2022: 691-701.
- [30] NIE T Z, YAO H P, WANG Z L, et al. Hierarchical scheduling mechanism based on relaxed constraints for complex industrial scenes[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(3): 3237-3249.
- [31] 华为技术有限公司. IFIT技术白皮书[R]. 2021. Huawei Technologies Co., Ltd. IFIT technology white paper[R]. 2021.
- [32] VENTRE P L, SALSANO S, POLVERINI M, et al. Segment routing: a comprehensive survey of research activities, standardization efforts, and implementation results[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 182-221.
- [33] LI T C, CAI Y P. Joint routing and scheduling for deterministic networking: a segment routing approach[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 23rd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). Piscataway: IEEE Press, 2022: 189-194.
- [34] ADDANKI V, IANNONE L. Moving a step forward in the quest for deterministic networks (DetNet)[C]//Proceedings of the 2020 IFIP Networking Conference (Networking). Piscataway: IEEE Press, 2020: 458-466.
- [35] TULUMELLO A, MAYER A, BONOLA M, et al. Micro SIDs: a solution for efficient representation of segment IDs in SRv6 networks[C]//Proceedings of the 2020 16th International Conference on Network and Service Management (CNSM). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-10.
- [36] FALK J, HELLMANN D, CARABELLI B, et al. NeSTiNg: simulating IEEE time-sensitive networking (TSN) in OMNeT[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Networked Systems (NetSys). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-8.
- [37] 杜静. 时间敏感网络关键技术仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. DU J. Simulation research on key technologies of time-sensitive network[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [38] FANG H L, YU P, WANG Y, et al. A novel network delay prediction model with mixed multi-layer perceptron architecture for edge computing[C]//Proceedings of the 2022 18th International Conference on Network and Service Management (CNSM). Piscataway: IEEE Press, 2022: 191-197.

## [作者简介]



蔡岳平(1980-), 男, 博士, 重庆大学微电子与通信工程学院副教授, 主要研究方向为工业互联网、确定性网络、5G/6G网络、数据中心网络、算力网络等。



王圣恺(1999-), 男, 重庆大学微电子与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为时间敏感网络。



陈晨(1988-), 男, 博士, 重庆大学微电子与通信工程学院研究员, 主要研究方向为面向6G和物联网的智能无线光通信技术。



韩笑(2001-), 男, 重庆大学微电子与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为时间敏感网络。