

一种结合入队整形的 TSN 流量调度算法

韩文璇¹, 朱海龙², 何欣欣¹, 李妍珏¹, 尹长川¹

(1. 北京邮电大学先进信息网络北京实验室, 北京 100876; 2. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 时间敏感网络 (TSN, time-sensitive network) 中混合流量调度的研究目前主要关注如何保证流预留 (SR, stream reservation) 流的有界低时延传输, 然而 SR 流长时间阻塞尽力而为 (BE, best-effort) 流, 易导致 BE 流时延过大, 影响网络的状态维护及系统管理。为了减小 BE 类消息的最大端到端时延, 提出了一种结合入队整形的流量调度算法, 通过减少 SR 流的预留带宽降低了它对 BE 流的阻塞程度。首先, 在 SR 队列前增加入队缓存区; 然后, 通过设置入队整形时每个入队缓存区中数据帧进入 SR 队列的数目调整相同优先级流量间的预留带宽比; 最后, 联合出口整形为每条 SR 流预留与其时延要求相匹配的带宽资源。实验结果表明, 结合入队整形可以将 BE 类消息的最大端到端时延减小 9.66%~75.76%。

关键词: 入队整形; 流量调度; 预留带宽; 端到端时延; 时间敏感网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00296

A TSN traffic scheduling algorithm combined with enqueue shaping

HAN Wenxuan¹, ZHU Hailong², HE Xinxin¹, LI Yanjue¹, YIN Changchuan¹

1. Beijing Laboratory of Advanced Information Networks, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Most of the existing studies on the scheduling of mixed traffic in time-sensitive network (TSN) focus on how to ensure low-latency of stream reservation (SR) traffic. However, SR traffic blocks best-effort (BE) traffic for a long time will lead to excessive delay in BE traffic, which is not conducive to the state maintenance of network and the management of system. In order to reduce the maximum end-to-end delay of BE messages, a traffic scheduling algorithm which combines with enqueue shaping was proposed. It reduced the blocking of BE traffic by reducing the reserved bandwidth of SR traffic. The algorithm first added enqueue buffers in front of SR queues. Then, the reserved bandwidth ratio among the same priority traffic was adjusted by setting the number of frames in each enqueue buffer entering the SR queue during enqueue shaping. Finally, it jointed egress shaping to reserve bandwidth resources for each SR flow to match its latency requirement. Simulation results showed that combining enqueue shaping can reduce the maximum end-to-end delay of BE messages by 9.66%~75.76%.

Key words: enqueue shaping, traffic scheduling, reserved bandwidth, end-to-end delay, TSN

0 引言

当前, 包括工业自动化网络和车载网络在内的许多行业应用需要具有时延上界的毫秒级低时延^[1]。传统以太网缺少确定性传输机制, 只能提供尽力而为

的传输服务^[2]。因此, 时间敏感网络 (TSN, time-sensitive network) 工作组应运而生, 提出了一系列以时间感知整形器 (TAS, time-aware shaper) 和基于信用的整形器 (CBS, credit-based shaper) 为代表的流量整形机制^[3-6]。

收稿日期: 2022-01-26; 修回日期: 2022-07-30

通信作者: 韩文璇, wenxuanhan315@163.com

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2020YFB1805302)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1805302)

在多类型流量混合传输的网络中，为保证时间敏感流的有界低时延，通常依据时延要求将其映射为计划流量（ST, scheduled traffic）流和流预留（SR, stream reservation）流^[7]。除此之外，TSN 标准还支持无实时保证的尽力而为（BE, best effort）流，以定期软件更新、诊断和数据记录为代表的 BE 流虽然没有明确的截止时间，但是系统中的许多功能都依赖于它的成功交付，BE 类消息的时延过大将会严重妨碍网络的状态维护及系统管理^[8]。混合流量调度时，应通过合理分配带宽资源，在满足 ST 流和 SR 流时延要求的同时，尽可能地减小 BE 类消息的最大端到端时延。

文献[9]提出了一种在 BE 队列的门打开期间，基于队列的动态权值调度多个 BE 队列的调度算法。实验表明它可以增加每个 BE 队列在单位时间内的最小调度次数。文献[10]提出了一种将 TAS 与加权轮询调度（WRR, weighted round-robin）结合的流量调度算法。它首先利用 TAS 隔离 ST 流与 BE 流，然后利用 WRR 在 BE 队列的门打开期间调度 BE 流。此外，SR 流不受队列的门状态约束，除在 ST 流的发送间隔内传输外，亦可抢占 BE 流的传输时隙。文献[9-10]虽然减少了 BE 流间相互阻塞对消息端到端时延的影响，但是未能尽可能地降低高优先级数据帧传输对 BE 类数据帧传输的阻塞程度。

文献[11]研究了高优先级流量的抢占模式和偏移量对 BE 流传输的影响，实验表明合理配置参数有助于减小 BE 类消息的最大端到端时延。文献[12]提出了在每个 ST 类数据帧传输完成之后为 BE 类数据帧预留传输时隙的概念，避免 ST 类数据帧背靠背传输导致 BE 类数据帧长时间无法传输。然而，将时间敏感流不加区分地均映射为 ST 流将造成带宽资源浪费，减少 BE 流的可用带宽。文献[13]将时间敏感流分别映射为 ST 流和 SR 流后联合使用 TAS 和 CBS 进行出口整形，建立了以最小化 SR 流的预留带宽为目标，网络中消息的时延要

求为约束的优化模型。TAS+CBS 调度算法在一定程度上降低了 SR 类数据帧传输对 BE 类数据帧传输的阻塞程度，但是在 TSN 交换机内为优先级相同而时延要求不同的流量提供质量相同的粗粒度服务，不利于最大限度地减少网络可调度时 SR 流所需要的预留带宽。

为了减少 SR 流的预留带宽以进一步降低其对 BE 类数据帧传输的阻塞程度，从而减小 BE 类消息的最大端到端时延，本文设计了一种结合入队整形的流量调度算法。该算法首先在出口队列前增加入队缓存区；然后，通过设置加权轮询调度时每个入队缓存区中数据帧进入 SR 队列的数目，调整相同优先级流量间的预留带宽比；最后，应用基于 TAS+CBS 的出口整形为每条 SR 流预留与其时延要求相匹配的带宽资源，即为优先级相同但时延要求不同的流量提供质量不同的细粒度服务。

1 系统模型

1.1 网络与流量模型

TSN 拓扑如图 1 所示，时间敏感网络由终端系统、TSN 交换机和物理链路 3 个部分组成，终端系统和 TSN 交换机之间利用物理链路连接^[14]。

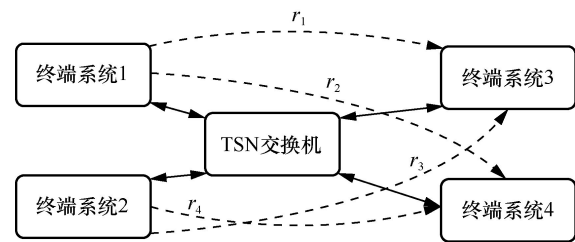


图 1 TSN 拓扑

在单播的时间敏感网络中，消息由源终端产生，经 TSN 交换机转发后到达目的终端，网络中的消息均以帧为单位传输，TSN 数据帧结构如图 2 所示。其中，IEEE 802.1Q 虚拟局域网（VLAN, virtual local area network）标签中的协议标识标签用于标识

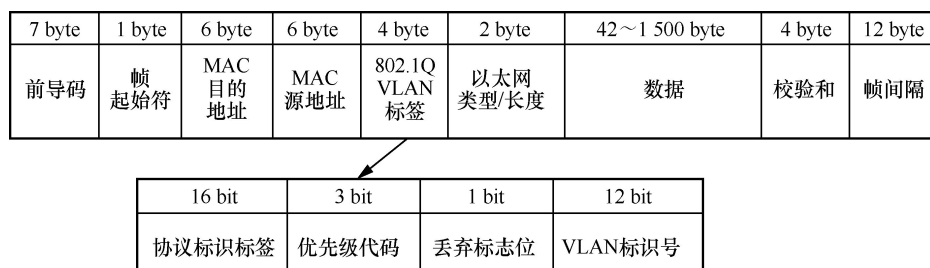


图 2 TSN 数据帧结构

帧的类型，优先级代码指示帧的优先级，丢弃标志位指示帧是否为标准格式，VLAN 标识号为虚拟局域网识别字段^[15]。

TSN 中存在 ST 流、SR_A 流、SR_B 流和 BE 流，传输优先级依次降低。ST 流是由时间触发的周期性流量，具有严格的时间约束，要求消息的端到端时延极小；SR_A 流和 SR_B 流均为 SR 流，是由事件触发的周期性流量，相比 ST 流，其时间约束较为宽松，消息需要在截止时间内到达目的终端；BE 流没有明确的截止时间，但消息的端到端时延不宜过大^[16]。

在终端系统中，将消息切分封装成若干个数据帧以便灵活、高效地转发并减少 SR 流和 BE 流传输对 ST 流的影响^[17]。为了便于缓存管理和交换控制，封装时应统一网络中 SR 类数据帧和 BE 类数据帧的长度。终端系统中相同优先级数据帧遵循先进先出原则，不同优先级数据帧依据优先级从高到低依次输出。

1.2 交换机模型

TSN 交换机的内部结构如图 3 所示，本文在 TSN 交换机内的 SR_A 队列和 SR_B 队列前增加了入队缓存区，交换结构依据目的终端地址确定数据帧的输出端口，队列选择器依据数据帧的优先级和流标识选择相应的出口队列及入队缓存区^[18]。

数据帧进入 TSN 交换机后在输出端口前进行缓存，其中，ST 类数据帧缓存于 ST 队列，BE 类数据帧缓存于 BE 队列，SR_X 流 $f_{X,i}$ 中的数据帧首先缓存于入队缓存区 X_i ，然后经入队整形进入 SR_X 队列^[19] ($X \in \{A, B\}$)。

TAS 机制在 TSN 交换机内部利用门控列表 (GCL, gate control list) 控制出口队列的门状态，从而为 ST 队列分配固定的输出时间片^[20]。当 ST 队列的门开启时，SR 队列 (包括 SR_A 队列和 SR_B 队列) 的门和 BE 队列的门闭合；ST 队列的门闭合时，SR 队列的门和 BE 队列的门开启。

配置门控列表时，对于 ST 队列而言，门的闭合时刻应与其后的开启时刻间隔 $c \cdot t_{SR}$ ，以避免 SR 类数据帧和 BE 类数据帧阻塞 ST 类数据帧的传输，其中， c 为任意正整数， t_{SR} 为一个 SR 类数据帧或 BE 类数据帧在 TSN 交换机输出端口处的传输时延。

在 ST 队列的门打开期间，ST 类数据帧在预先分配好的传输时隙中输出 TSN 交换机；在 ST 队列的门关闭期间，SR_A 队列、SR_B 队列和 BE 队列中的数据帧受信用值调控交错输出。CBS 模块基于 SR_X 队列中数据帧的输出情况计算 SR_X 队列的信用值。SR_X 队列的空闲斜率为 $idleX$ ，发送斜率的绝对值为 $sendX$ 。将 SR_X 队列的门的打开时段划分为若干个长度为 t_{SR} 的传输时隙，在每个时隙的起始时刻，若 SR_X 队列向输出选择器输出数据帧，则其信用值减少 $sendX \cdot t_{SR}$ ；反之，信用值增加 $idleX \cdot t_{SR}$ 。在 SR_X 队列的门关闭期间，SR_X 队列的信用值保持不变^[21]。

2 调度算法

为了满足时间敏感网络中 ST 流和 SR 流的时延要求，并尽可能地减小 BE 类消息的最大端到端时延，本文提出了一种结合入队整形的流量调度算

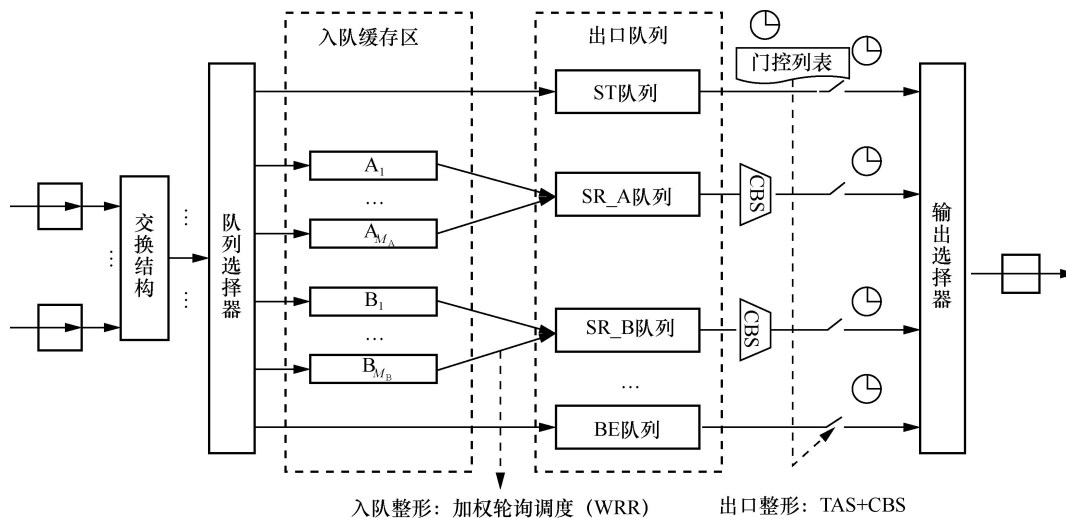


图 3 TSN 交换机内部结构

法, 该算法包括流量在 TSN 交换机内调度流程和 TSN 交换机参数设计。

2.1 流量在 TSN 交换机内调度流程

在 TSN 交换机内应用 TAS+CBS 调度算法进行流量调度时, 数据帧进入 TSN 交换机后在出口队列中缓存, 相同优先级的数据帧进入同一个出口队列, 遵循先进先出原则, 不同优先级数据帧的输出顺序由出口队列的门状态、信用值和优先级决定^[22]。因为相同优先级数据帧的输出顺序仅由入队时间决定, 且 SR 类数据帧的入队时间受相应事件不可预知的触发时间影响, 所以计算每个 SR 类消息在 TSN 交换机上的最大响应时间时应考虑最坏情况, 即其尾帧到达 TSN 交换机的时间略晚于相同优先级的其他消息。为满足 SR 流的时延要求, 以 SR 类消息在 TSN 交换机上的发送时限为约束条件计算预留带宽时, 需要考虑相同优先级流量间相互干扰对最大响应时间的影响。

利用 TAS+CBS 进行出口整形时, 随着 SR 流预留带宽的增加, SR 类数据帧传输对 BE 类数据帧传输的阻塞程度逐渐提高^[23]。因此, 为减小 BE 类消息的最大端到端时延, 应在满足 SR 流时延要求的同时, 尽可能地减少其预留带宽。

为此, 本文提出了一种结合入队整形的流量调度算法, 在 TAS+CBS 前加入基于 WRR 的入队整形, 通过调整数据帧进入出口队列的顺序避免相同优先级流量间的相互干扰, 将 SR 流在 TSN 交换机内的调度粒度由基于优先级降低至基于消息流, 从而确保为每条 SR 流预留的带宽资源不会被其他 SR 流优先使用。

入队整形的具体过程如下: 当 SR_X 队列为空时, 该出口队列立即生成编号为 $1 \sim M_X$ 的请求帧, 并将其依次发往入队缓存区 $X_1 \sim X_{M_X}$, 入队缓存区 X_k 接收到请求帧后, 向 SR_X 队列发送 $w_{X,k}$ 个数据帧。 M_X 表示 SR_X 队列前入队缓存区的数目。通过设置加权轮询调度时每个入队缓存区中数据帧进入出口队列的数目即可调整相同优先级流量间的预留带宽比, 从而在 TSN 交换机内为优先级相同但时延要求不同的流量提供质量不同的细粒度服务。将入队整形机制与 TAS+CBS 结合可以为每条 SR 流预留与其时延要求相匹配的带宽资源。

为在不影响 SR 流服务质量的同时提高 BE 流的服务质量, 本文引入空闲数据帧的概念^[24]。加权轮询调度时, 入队缓存区中的 SR 类数据帧优先进

入 SR 队列, 当 SR 类数据帧的数目不足时, 空闲数据帧替补进入。

输出选择器判断来自出口队列的数据帧是否为空闲数据帧, 若为空闲数据帧则将其丢弃并改为发送 BE 类数据帧, 经输出选择器确认的数据帧从 TSN 交换机的输出端口输出。调度 BE 类数据帧代替空闲数据帧输出有助于将预留给某条 SR 流但未被其使用的带宽资源优先分配给 BE 队列中的数据帧, 减小 BE 类消息的端到端时延。

综上, 应用本文所提算法时, 流量在 TSN 交换机内的调度流程如图 4 所示。

2.2 TSN 交换机参数设计

当流量在 TSN 交换机内的调度流程如第 2.1 节所述时, 为尽可能地降低 SR 类数据帧传输对 BE 类数据帧传输的阻塞程度, 本节建立并求解了式(1)所示的 TSN 交换机参数设计模型, 通过调整空闲斜率 $idleA$ 、 $idleB$ 和入队整形参数 $w_{A,k}$ ($k=1, \dots, M_A$)、 $w_{B,k}$ ($k=1, \dots, M_B$), 保证每条 SR 流在 TSN 交换机内的最大响应时间均小于其发送时限, 同时最小化 SR 流的预留带宽 RB。

$$\begin{aligned} \min_{\substack{idleA, w_{A,k} \\ idleB, w_{B,k}}} RB &= (idleA + idleB) \frac{T_{SR}}{T_{GCL}} \\ \text{s.t.} \quad & idleA + idleB \leq R; \\ & r_{A,i} \leq s_{A,i}; \quad r_{B,i} \leq s_{B,i}; \\ & w_{A,k} \in \mathbf{N}; \quad w_{B,k} \in \mathbf{N}; \\ & 0 \leq idleA \leq 0.75R; \quad idleB \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, TSN 交换机输出端口的传输带宽为 R (单位为 Mbit/s), T_{GCL} 为门控列表的循环周期, T_{SR} 为在一个循环周期内 SR 队列的总开门时长, $s_{A,i}$ 和 $s_{B,i}$ 分别为 SR_A 流 $f_{A,i}$ 和 SR_B 流 $f_{B,i}$ 在 TSN 交换机内的发送时限, $r_{A,i}$ 和 $r_{B,i}$ 分别为 $f_{A,i}$ 和 $f_{B,i}$ 在 TSN 交换机内的最大响应时间。

一个 SR 类消息在 TSN 交换机内的响应时间是指它的尾帧从到达离开 TSN 交换机所经过的时间, 由处理时延、排队时延和传输时延组成^[25]。因此, $r_{A,i}$ 和 $r_{B,i}$ 表示为

$$r_{A,i} = t_d + q_{A,i} + t_{SR} \quad (2)$$

$$r_{B,i} = t_d + q_{B,i} + t_{SR} \quad (3)$$

$$t_{SR} = \frac{l_{SR}}{R} \quad (4)$$

其中, 处理时延 t_d 和传输时延 t_{SR} 由 TSN 交换机属

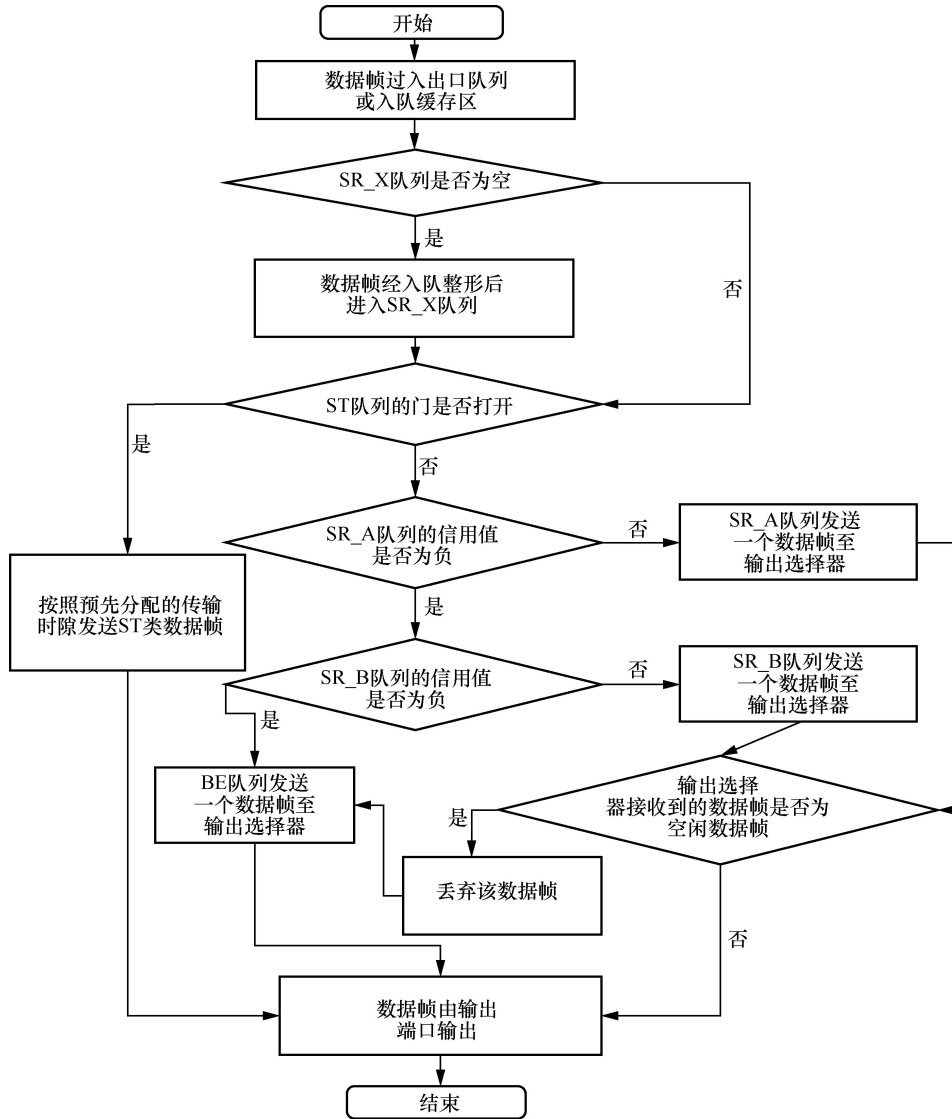


图 4 流量在 TSN 交换机内的调度流程

性和 SR 类数据帧的帧长 l_{SR} 决定。 $q_{A,i}$ 表示 $f_{A,i}$ 中任意一个消息 $m_{A,i}$ 的尾帧在 TSN 交换机内的最大排队时延, $q_{B,i}$ 表示 $f_{B,i}$ 中任意一个消息 $m_{B,i}$ 的尾帧在 TSN 交换机内的最大排队时延。

分别分析在 SR 队列的门关闭和打开期间流量调度对数据帧传输的影响, 可以得到 $q_{A,i}$ 和 $q_{B,i}$ 。

$$q_{A,i} = c_{A,i} + o_{A,i} \quad (5)$$

$$q_{B,i} = c_{B,i} + o_{B,i} \quad (6)$$

其中, $c_{A,i}$ 和 $c_{B,i}$ 分别表示 $m_{A,i}$ 和 $m_{B,i}$ 的尾帧在 TSN 交换机内因 SR 队列的门关闭产生的最大排队时延, $o_{A,i}$ 和 $o_{B,i}$ 分别表示 $m_{A,i}$ 和 $m_{B,i}$ 的尾帧在 SR 队列的门打开期间受流量调度影响产生的最大排队时延。

在 SR 队列的门关闭期间, SR_A 队列和 SR_B 队列的信用值保持不变且不输出数据帧。因此, $c_{A,i}$ 等于在消息 $m_{A,i}$ 的发送时限内 SR 队列的最大总关门时长, $c_{B,i}$ 等于在消息 $m_{B,i}$ 的发送时限内 SR 队列的最大总关门时长。

在 SR 队列的门打开期间, SR_A 流相较于 SR_B 流和 BE 流优先级更高, 当 SR_A 队列的信用值非负时, SR_A 队列中的数据帧优先进入输出选择器, 由此得到 SR_A 队列的最大信用值 hiCreditA 和最小信用值 loCreditA

$$hiCreditA = idleA \cdot t_{SR} \quad (7)$$

$$loCreditA = -sendA \cdot t_{SR} \quad (8)$$

idleA 和 sendA 的关系满足^[26]

$$\text{idleA} + \text{sendA} = R \quad (9)$$

当 SR_A 队列的信用值为负数，且 SR_B 队列的信用值非负时，SR_B 队列中的数据帧进入输出选择器。由此可得，SR_B 队列的最大信用值 hiCreditB 和最小信用值 loCreditB 分别为^[27]

$$\text{hiCreditB} = \text{idleB} \cdot \left(t_{\text{SR}} + \frac{R \cdot t_{\text{SR}}}{\text{sendA}} \right) \quad (10)$$

$$\text{loCreditB} = -\text{sendB} \cdot t_{\text{SR}} \quad (11)$$

idleB 和 sendB 的关系满足

$$\text{idleB} + \text{sendB} = R \quad (12)$$

当 SR_X 队列的门打开时，对于每个传输时隙，SR_X 队列只有输出数据帧信用值减少和等待输出数据帧信用值增加两种状态，因此可以估计 SR_X 队列中数据帧的最大输出数目，依据该数目推算信用值减少的时隙数和信用值增加的时隙数从而为某个阶段的持续时间提供安全上界。

在由 $n_{A,i}$ 个数据帧组成的消息 $m_{A,i}$ 的尾帧排队期间，SR_A 队列最多输出 $g_{A,i}$ 个数据帧。

$$g_{A,i} = (a_{A,i} + 1) \sum_{k=1}^{M_A} w_{A,k} + b_{A,i} + \sum_{k=1}^{i-1} w_{A,k} \quad (13)$$

$$a_{A,i} = \left\lfloor \frac{n_{A,i}}{w_{A,i}} \right\rfloor - 1 \quad (14)$$

$$b_{A,i} = n_{A,i} - w_{A,i} \cdot a_{A,i} \quad (15)$$

结合式(7)和式(8)可得，在此期间 SR_A 队列信用值减少的最大时隙数 $d_{A,i}$ 和信用值增加的最大时隙数 $u_{A,i}$ 分别为

$$d_{A,i} = g_{A,i} \quad (16)$$

$$u_{A,i} = 1 + \frac{\text{sendA}}{\text{idleA}} \cdot g_{A,i} \quad (17)$$

因此， $o_{A,i}$ 表示为

$$o_{A,i} = t_{\text{SR}} + \frac{R \cdot t_{\text{SR}}}{\text{idleA}} \cdot g_{A,i} \quad (18)$$

与 SR_A 类消息类似，在由 $n_{B,i}$ 个数据帧组成的消息 $m_{B,i}$ 的尾帧排队期间，SR_B 队列最多输出 $g_{B,i}$ 个数据帧。

$$g_{B,i} = (a_{B,i} + 1) \sum_{k=1}^{M_B} w_{B,k} + b_{B,i} + \sum_{k=1}^{i-1} w_{B,k} \quad (19)$$

$$a_{B,i} = \left\lfloor \frac{n_{B,i}}{w_{B,i}} \right\rfloor - 1 \quad (20)$$

$$b_{B,i} = n_{B,i} - w_{B,i} \cdot a_{B,i} \quad (21)$$

结合式(10)和式(11)可得，在此期间 SR_B 队列信用值减少的最大时隙数 $d_{B,i}$ 和信用值增加的最大时隙数 $u_{B,i}$ 分别为

$$d_{B,i} = g_{B,i} \quad (22)$$

$$u_{B,i} = 1 + \frac{R}{\text{sendA}} + \frac{\text{sendB}}{\text{idleB}} \cdot g_{B,i} \quad (23)$$

因此， $o_{B,i}$ 表示为

$$o_{B,i} = t_{\text{SR}} + \frac{R \cdot t_{\text{SR}}}{\text{sendA}} + \frac{R \cdot t_{\text{SR}}}{\text{idleB}} \cdot g_{B,i} \quad (24)$$

通过分析 TSN 交换机参数设计模型的优化目标可知，门控列表计算完成后，最小化 SR 流的预留带宽 RB 等价于最小化 idleA 与 idleB 之和。对于给定的网络拓扑和流量模型，idleA 的最小值仅与 $w_{A,k} (k=1, \dots, M_A)$ 有关，idleB 的最小值与 $w_{B,k} (k=1, \dots, M_B)$ 和 idleA 有关，固定 $w_{B,k} (k=1, \dots, M_B)$ ，idleB 的最小值随 idleA 的减小而减小。因此，为了便于求解，可以将 TSN 交换机参数设计模型拆分为以下两个子模型。

子模型 1

$$\begin{aligned} \min \text{idleA} &= \max_{i \in Q_A} \{ \text{idleA}_i \} \\ \text{s.t. } w_{A,k} &\in \mathbf{N}; 0 \leq \text{idleA} \leq 0.75R \end{aligned} \quad (25)$$

其中， idleA_i 是方程 $r_{A,i} = s_{A,i}$ 的解， Q_A 表示流经 TSN 交换机的 SR_A 流的集合。

子模型 2

$$\begin{aligned} \min \text{idleB} &= \max_{i \in Q_B} \{ \text{idleB}_i \} \\ \text{s.t. } w_{B,k} &\in \mathbf{N}; \text{idleB} \geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

其中， idleB_i 是在 idleA 等于子模型 1 的优化结果时方程 $r_{B,i} = s_{B,i}$ 的解， Q_B 表示流经 TSN 交换机的 SR_B 流的集合。

设计 TSN 交换机的参数时，首先利用粒子群优化 (PSO, particle swarm optimization) 算法求解子模型 1，通过调整 SR_A 流的入队整形参数最小化空闲斜率 idleA 的值。然后基于子模型 1 的优化结果，利用 PSO 算法求解子模型 2，通过调整 SR_B 流的入队整形参数最小化空闲斜率 idleB 的值。

粒子群优化算法的具体求解过程如下^[28-29]：

步骤 1 随机初始化一群粒子，评估每个粒子并得到全局最优；

步骤 2 更新每个粒子的速度和位置，评估每

个粒子的函数适应值；

步骤 3 更新每个粒子的历史最优位置及群体的全局最优位置；

步骤 4 重复步骤 2 和步骤 3，直至达到优化终止条件。

3 仿真实验和结果分析

以如图 5 所示的车载 TSN 为例^[30]，验证本文提出的结合入队整形的流量调度算法，并与 TAS+CBS 调度算法进行对比。网络中存在 6 个高清摄像机、6 个激光雷达、6 个毫米波雷达和若干个检测设备。中央控制器聚合处理摄像机和雷达采集到的信息并将其用于高级驾驶员辅助系统 (ADAS, advanced driver assistance system)，检测设备执行网络状态检测和系统故障检测等功能。

消息流参数见表 1。电子控制单元 (ECU, electronic control unit) 和 TSN 交换机的传输带宽均为 1 Gbit/s，数据帧在 TSN 交换机内的处理时延为 1 μs，在链路上的传播时延忽略不计。高清摄像机、激光雷达和毫米波雷达作为 ECU 的外设将采集到的信息传输至 ECU，在 ECU 中切分封装成不超过 354 B 的数据帧后经 TSN 交换机转发至中央控制器。

表 1 消息流参数

消息流 ID	消息来源	消息大小	周期	截止时间	优先级
1	高清摄像机 1	86 KB	16 ms	16 ms	SR_A
2	激光雷达 1	1 248 B	310 μs	310 μs	ST
3	毫米波雷达 1	200 KB	60 ms	60 ms	SR_B
4	高清摄像机 2	120 KB	33 ms	33 ms	SR_A
5	激光雷达 2	1 248 B	310 μs	310 μs	ST
6	毫米波雷达 2	240 KB	40 ms	40 ms	SR_B
7	高清摄像机 3	120 KB	16 ms	16 ms	SR_A
8	激光雷达 3	1 248 B	310 μs	310 μs	ST
9	毫米波雷达 3	200 KB	40 ms	40 ms	SR_B
10	高清摄像机 4	86 KB	33 ms	33 ms	SR_A
11	激光雷达 4	1 248 B	310 μs	310 μs	ST
12	毫米波雷达 4	240 KB	60 ms	60 ms	SR_B
13	高清摄像机 5	86 KB	16 ms	16 ms	SR_A
14	激光雷达 5	1 248 B	310 μs	310 μs	ST
15	毫米波雷达 5	200 KB	60 ms	60 ms	SR_B
16	高清摄像机 6	120 KB	33 ms	33 ms	SR_A
17	激光雷达 6	1 248 B	310 μs	310 μs	ST
18	毫米波雷达 6	240 KB	40 ms	40 ms <td SR_B	
	检测设备	100 KB	—	—	BE

时间敏感流的最大端到端时延对比如图 6 所示，第 2.2 节中的时延计算式 (式(2)和式(3)) 为消息的端到端时延提供了安全上界，且利用本文所提

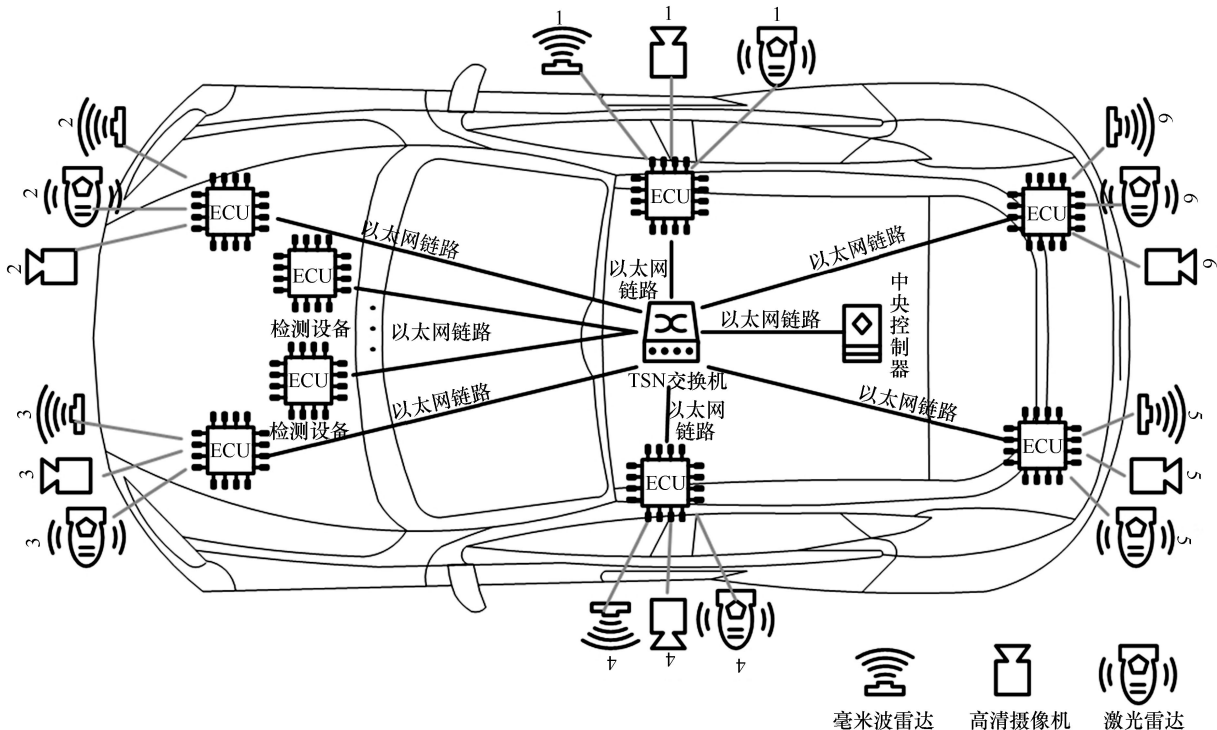


图 5 车载 TSN 示例

算法计算并配置 TSN 交换机参数可以保证网络的可调度性,即所有 ST 类消息和 SR 类消息均能在其截止时间内到达中央控制器。对于 ST 类消息和 SR 类消息而言,端到端时延小于或等于网络所规定的截止时间即可,受限于实际场景需求及中央控制器的处理频率,在此基础上进一步降低时延不会为高级驾驶员辅助系统带来性能上的提升。

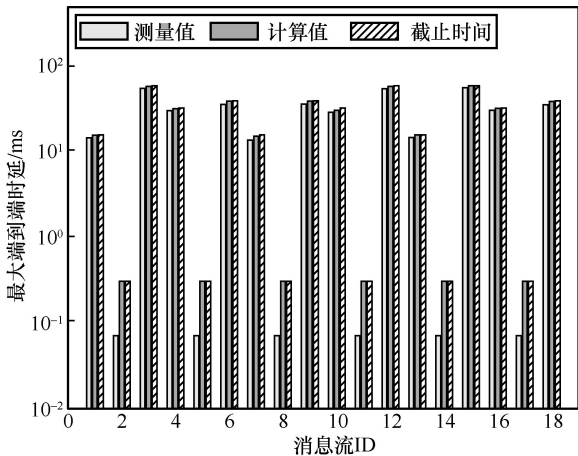


图 6 时间敏感流的最大端到端时延对比

SR 流在 TSN 交换机上的最大响应时间对比如图 7 所示,应用 TAS+CBS 调度算法时,来源不同的 SR_A 类消息在 TSN 交换机上的最大响应时间近似相等且均小于 SR_A 类消息在 TSN 交换机上的最小发送时限;同样地,来源不同的 SR_B 类消息在 TSN 交换机上的最大响应时间也近似相等且均小于 SR_B 类消息在 TSN 交换机上的最小发送时限。应用本文所提算法时,来源不同的 SR_A 类消息在 TSN 交换机上的最大响应时间有所不同,且略小于其在 TSN 交换机上的发送时限,SR_B 类消息的性能与之类似。

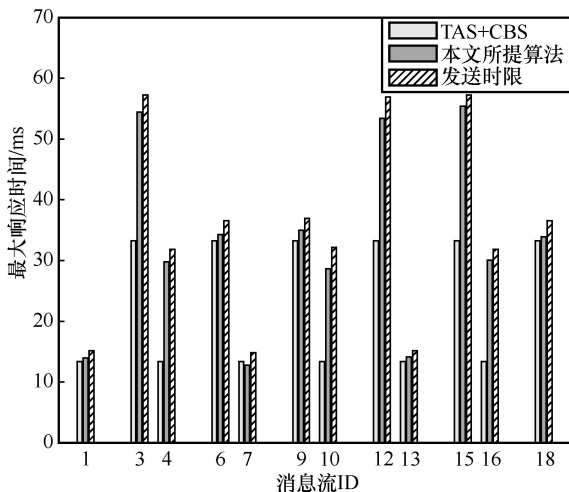


图 7 SR 流在 TSN 交换机上的最大响应时间对比

由上述对比可知,与应用 TAS+CBS 调度算法时,为相同优先级流量提供质量相同的粗粒度服务不同,在 TSN 交换机内应用本文所提算法可以为优先级相同但时延要求不同的流量提供质量不同的细粒度服务。因此,在以 SR 流的发送时限为约束条件计算预留带宽时,相较于 TAS+CSB 调度算法,本文所提算法需要的预留带宽更小,SR 流的预留带宽对比如图 8 所示。

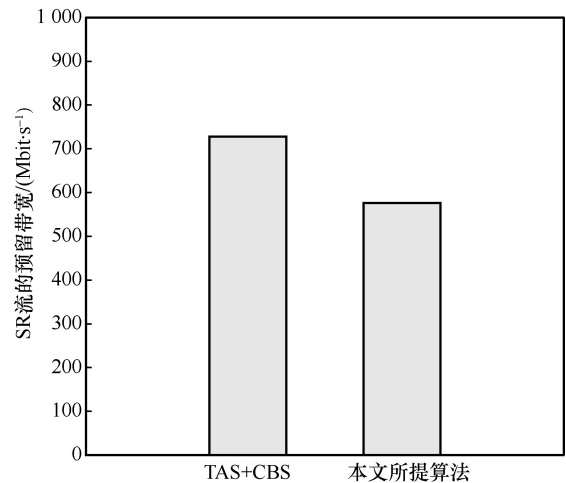


图 8 SR 流的预留带宽对比

当车载 TSN 中的检测设备以 80 ms 为周期,周期性产生 BE 类消息并将其发往中央控制器时, BE 类消息的最大端到端时延变化趋势如图 9 所示。可以看出,在 TSN 交换机内应用本文所提算法相较于 TAS+CBS 调度算法可以将 BE 类消息的最大端到端时延减小 16.52%~75.76%。

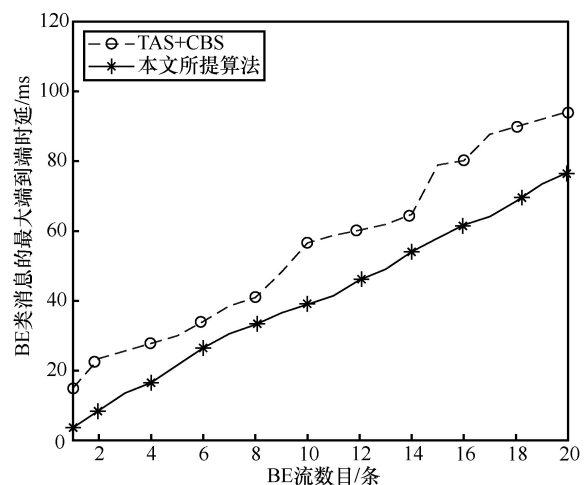


图 9 BE 类消息的最大端到端时延变化趋势

当检测设备以 60~100 ms 为间隔,随机产生 BE 类消息时, BE 类消息的最大端到端时延变化趋势如图 10 所示。可以看出,在 TSN 交换机内应用

本文所提算法相较于 TAS+CBS 调度算法可以将 BE 类消息的最大端到端时延减小 9.66%~67.45%。

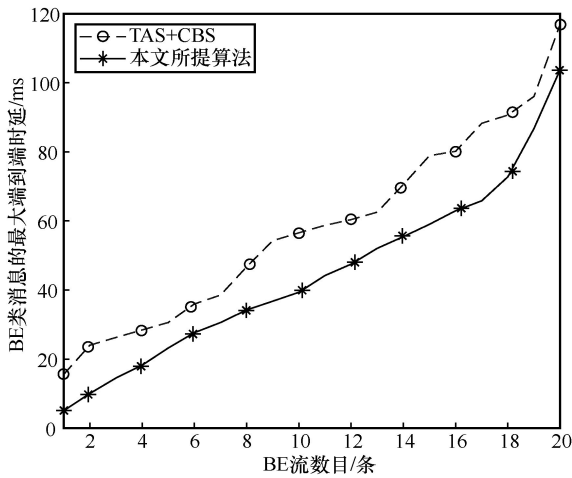


图 10 BE 类消息随机产生时的最大端到端时延变化趋势

综合上述实验结果可以看出，应用本文所提算法减少 SR 流的预留带宽在一定程度上降低了 SR 类数据帧传输对 BE 类数据帧传输的阻塞程度，从而减小了 BE 类消息的最大端到端时延。

在未来的车载 TSN 中，随着车内功能的多样化，SR 流的数目将逐渐增加。调度成功率与 SR 流数目的关系如图 11 所示。对于给定的 SR 流数目，随机生成 1 000 个合成案例后得到网络的调度成功率。每个合成案例均包含若干个源终端和一个目的终端，其中一个源终端生成周期为 310 μs、消息大小为 1 248 B、截止时间为 310 μs 的 ST 流，其他源终端生成周期为 15~50 ms、截止时间与周期一致、消息大小为 38~128 KB 的 SR 流。可以看出，当网络中的 SR 流数目较多时，应用本文所提算法将网络的调度成功率提高了 51.4%。

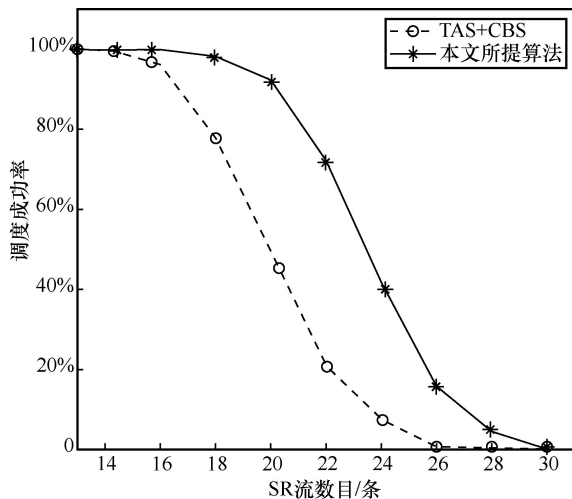


图 11 调度成功率与 SR 流数目的关系

4 结束语

为了在满足 ST 流和 SR 流时延要求的同时尽可能地减小 BE 类消息的最大端到端时延，本文提出了一种结合入队整形的流量调度算法。在 TSN 交换机内应用该算法可以避免相同优先级流量间的相互干扰，为每条 SR 流预留与其时延要求相匹配的带宽资源，从而减少网络可调度情况下 SR 流所需要的预留带宽，并降低其对 BE 流的阻塞程度。

本文以车载 TSN 为例进行仿真实验，结果表明本文推导的时延计算式可以为 SR 类消息的端到端时延提供安全上界，并且在 TSN 交换机内应用本文所提算法相较于 TAS+CBS 调度算法可以在满足 ST 流和 SR 流时延要求的同时将 BE 类消息的最大端到端时延减小 9.66%~75.76%。本文重点关注了如何调度周期性流量，下一步将考虑周期性流量与非周期性流量的混合调度问题。

参考文献：

- [1] KINABO A B D, MWANGAMA J B, LYSKO A A. An overview of time-sensitive communications for the factory floor[C]//2021 IST-Africa Conference (IST-Africa). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-9.
- [2] 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.
- [3] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- bridges and bridged networks amendment 25: enhancements for scheduled traffic: IEEE Std 802.1Qbv-2015[S]. 2015.
- [4] IEEE. IEEE Standard for local and metropolitan area networks -- virtual bridged local area networks amendment 12: forwarding and queuing enhancements for time-sensitive streams: IEEE Std 802.1Qav-2009[S]. 2009.
- [5] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- bridges and bridged networks amendment 34: asynchronous traffic shaping: IEEE Std 802.1Qcr-2020[S]. 2020.
- [6] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- bridges and bridged networks amendment 29: cyclic queuing and forwarding: IEEE Std 802.1Qch-2017[S]. 2017.
- [7] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- bridges and bridged networks: IEEE Standard 802.1Q-2018[S]. 2018.
- [8] HOUTAN B, ASHJAEI M, DANESHTALAB M, et al. Schedulability analysis of best-effort traffic in TSN networks[C]//2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Auto-

- mation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-8.
- [9] CAO Z P, LIU Q R, LIU D P, et al. Enhanced system design and scheduling strategy for switches in time-sensitive networking[J]. IEEE Access, 2021(9): 42621-42634.
- [10] 尹震宇, 刘浩林, 张飞青, 等. 一种基于时间感知整形器的 TAS-WRR 调度算法研究与实现[J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(5): 1077-1081.
- YIN Z Y, LIU H L, ZHANG F Q, et al. Research and implementation of TAS-WRR scheduling algorithm based on time awareness shaper[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2021, 42(5): 1077-1081.
- [11] HOUTAN B, ASHJAEI M, DANESHTALAB M, et al. Work in progress: investigating the effects of high priority traffic on the best effort traffic in TSN networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Real-Time Systems Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2019: 556-559.
- [12] HOUTAN B, ASHJAEI M, DANESHTALAB M, et al. Synthesising schedules to improve QoS of best-effort traffic in TSN networks[C]//Proceedings of RTNS'2021: 29th International Conference on Real-Time Networks and Systems. [S.l.:s.n.], 2021: 68-77.
- [13] 王跃飞, 黄斌, 吴源, 等. 面向智能汽车的 Ethernet AVB 网络设计与优化[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 166-177.
- WANG Y F, HUANG B, WU Y, et al. Design and optimization of Ethernet AVB network for intelligent vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 166-177.
- [14] 张景龙, 陈彩莲, 许齐敏, 等. 面向工业互联网的异构时间敏感数据流协同传输机制设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(1): 138-151.
- ZHANG J L, CHEN C L, XU Q M, et al. Design of coordinated transmission mechanism of heterogeneous time-sensitive data flow for industrial Internet[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(1): 138-151.
- [15] 张磊, 王盼盼. 时间敏感网络流量整形技术综述[J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(1): 46-53.
- ZHANG L, WANG P P. Survey of traffic shaping and scheduling in time-sensitive network[J]. Microelectronics & Computer, 2022, 39(1): 46-53.
- [16] 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.
- [17] PATTI G, BELLO L L. Performance assessment of the IEEE 802.1Q in automotive applications[C]//2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [18] LI C, ZHANG C Y, ZHENG W, et al. Joint routing and scheduling for dynamic applications in multicast time-sensitive networks[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [19] SHALGHUM K M, NOORDIN N K, SALI A, et al. Worst-case latency analysis for AVB traffic under overlapping-based time-triggered windows in time-sensitive networks[J]. IEEE Access, 2022, 10: 43187-43208.
- [20] REUSCH N, ZHAO L X, CRACIUNAS S S, et al. Window-based schedule synthesis for industrial IEEE 802.1Qbv TSN networks[C]//Proceedings of 2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [21] LI E S, HE F, LI Q, et al. Bandwidth allocation of stream-reservation traffic in TSN[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(1): 741-755.
- [22] GAVRILUT V, POP P. Scheduling in time sensitive networks (TSN) for mixed-criticality industrial applications[C]//2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [23] NAVET N, MIGGE J, VILLANUEVA J, et al. Pre-shaping bursty transmissions under IEEE 802.1Q as a simple and efficient QoS mechanism[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2018, 11(3): 1-5.
- [24] JOUNG J. Regulating scheduler (RSC): a novel solution for IEEE 802.1 time sensitive network (TSN)[J]. Electronics, 2019, 8(2): 189-206.
- [25] GRIGORJEW A, BAIER C, METZGER F, et al. Distributed implementation of deterministic networking in existing non-TSN ethernet switches[C]//2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [26] CAO J, ASHJAEI M, CUIJPERS P J L, et al. An independent yet efficient analysis of bandwidth reservation for credit-based shaping[C]//2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-10.
- [27] ZHAO L X, POP P, ZHENG Z, et al. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus[C]//Proceedings of 2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2018: 25-36.
- [28] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [29] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Piscataway: IEEE Press, 1995: 39-43.
- [30] LO BELLO L, PATTI G, VASTA G. Assessments of real-time communications over TSN automotive networks[J]. Electronics, 2021, 10(5): 556.

[作者简介]



韩文璇 (1998-), 女, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为工业互联网、时间敏感网络和车载网络等。



朱海龙（1987- ），男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院讲师，主要研究方向为工业互联网、确定性网络、工业以太网、软件定义网络、时间敏感网络和车载网络等。



李妍珏（1997- ），女，北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生，主要研究方向为时间敏感网络和工业互联网等。



何欣欣（1987- ），女，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院讲师，主要研究方向为车联网和车载通信等。



尹长川（1968- ），男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院教授，主要研究方向为软件定义网络、物联网、边缘计算以及机器学习、大数据等智能技术在通信网络中的应用等。