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

张景龙^{1,2,3}, 陈彩莲^{1,2,3*}, 许齐敏^{1,2,3}, 林美涵^{1,2,3}, 卢宣兆^{1,2,3}, 陈营修^{1,2,3}

1. 上海交通大学自动化系, 上海 200240;
2. 系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240;
3. 上海市工业智能管控工程技术研究中心, 上海 200240

* E-mail: cailianchen@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2021-08-22; 接受日期: 2021-11-22; 网络版发表日期: 2021-12-17

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFB1702100)、国家杰出青年科学基金项目(批准号: 62025305)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 61933009)资助

摘要 工业互联网需要实现IT (information technology)和OT (operation technology)的融合, 现场级工业网络的构建是真正实现从OT到IT产线数据无缝接入、从IT到OT实现产线智能运维的关键。对于OT来说, 工业系统中的数据具有高度的时间敏感特性, 感知数据和控制指令在时间上的确定性传输是实现工业系统可靠稳定运行的基础。然而工业现场仍面临感知数据异构、协议不兼容、传输性能需求不一致等问题, 给异构时间敏感数据流的确定性传输带来了巨大的挑战。设计统一的低时延低抖动时间感知门控机制, 从而精确地控制数据流的传输行为, 是解决这一问题的可行方案之一, 这也是时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)标准中的其中一项关键技术。本文主要研究多跳TSN网络中异构时间敏感数据流协同传输问题。首先, 将异构时间敏感数据流建模为两大类: 周期时间敏感(periodic time-sensitive, PTS)流和非周期时间敏感(sporadic time-sensitive, STS)流。然后, 本文分析了PTS流集合的可调度性和门控列表的设计方法, 给出了可调度性的充分条件和必要条件, 并设计了可调度性判别算法来判定任意决策集合的可调度性。接着, 提出了异构时间敏感数据流的协同传输框架, 并构建了异构数据调度的约束集合。为实现PTS流最小的端到端确定性时延, 并尽可能地降低PTS流调度机制对STS流传输的影响, 本文采用无等待时隙调度的设计方法, 以最小化调度单元中的最大的时隙占用为优化目标, 构建了异构时间敏感数据流调度优化问题。再次, 本文设计了均匀排布与填充(uniform arrangement and filling, UAF)算法, 通过对相同周期的流进行均匀排布以及填充前序周期调度时产生的空闲时隙, 实现调度单元时隙占用最小化。最后, 仿真和实验结果验证了两大类异构时间敏感数据流协同传输框架的有效性, 以及UAF调度算法在保证同等调度性能基础上求解的高效性。

关键词 工业互联网, 时间敏感网络, 确定性传输, 协同传输, 无等待时隙调度

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 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 (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 138–151, doi: [10.1360/SST-2021-0394](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0394)

1 引言

工业互联网是互联网与工业系统全方位深度融合所形成的产业和应用生态, 是工业智能化发展的关键综合信息基础设施^[1-4], 显著提升制造业数字化、网络化、智能化发展水平^[5-8]. 伴随着大量现场设备之间各类业务数据频繁交互的需求, 以及越来越多的数据分析、预测性维护等技术引入到工业控制系统中, 工业界由原来比较封闭的自动化/运营技术(operation technology, OT)领域, 逐渐向信息技术(information technology, IT)领域开放, 工业控制系统架构也正在向具有泛在感知、精准控制^[9]、优化反馈^[10]、实时决策等功能的智能工业网络系统演进, 这对工业网络提出了确定性传输需求^[11,12].

目前工业通信技术的发展主要经历了现场总线、工业以太网和工业无线网络三个阶段, 其发展呈现出由现场层和控制层专用网络向管理层通用网络延伸、有线到无线补充、新使能技术不断融合的新趋势. 与传统IT应用不同的是, 工业系统中的数据具有高度的时间敏感特性. 例如, 工业现场大量的感知终端需要将实时感知的数据传输到控制器中进行优化与控制决策^[1], 而网络诱导的时延、丢包等不确定性因素会严重扰乱控制系统的可靠运行, 给社会经济带来巨大的损失, 如生产事故等. 另一方面, 随着工业控制系统的智能化发展, 大量的视频、图像等感知数据参与到智能决策中, 工业界亟需构建现场级低时延低抖动的高速确定性网络技术, 以支撑工业控制系统的数字化智能化升级. 虽然传统的现场总线及工业以太网能够在各自生态下解决确定性传输问题, 但不同协议间的不兼容问题^[13,14], 使得传统碎片化的网络架构难以满足工业现场异构设备间高速且频繁的实时交互需求.

为解决工业制造领域网络和协议不兼容问题, IEEE 802.1时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)任务组正在通过定义一系列IEEE 802.1子标准来标准化IEEE 802网络上的时间敏感功能, 涵盖从时钟同步和帧抢占到冗余管理和预定的流增强. 虽然TSN标准中定义了基本的调度机制(基于门控列表(gate control list, GCL)的时间触发门控机制), 但如何设计有效的TSN网络调度算法实现异构时间敏感数据流的确定性的端到端时延并不在该标准的范围内.

为了实现不同工业场景下时间敏感数据流的传

输, 在TSN框架下研究具有冲突约束的时间敏感流的调度问题及算法, 近年来得到了广泛的关注. 最近的工作集中在基于时间感知整形(time-aware shaping, TAS)的调度问题上, 其中TSN交换机中每个端口的调度通常都是离线计算^[13-17]的. 文献[13]引入了TSN中调度建模的无等待调度问题, 并将其映射到无等待作业车间调度问题^[18]中, 设计了基于禁忌搜索的启发式算法来求解无等待调度问题. 文献[19]研究并刻画速率受限流的路径规划算法对速率受限流的可调度性的影响, 即不再假设数据受限流的路径已知, 而是找出路径和调度之间的影响关系. 此外, 该文基于路径和调度两者之间关系提出基于禁忌搜索的路径规划算法, 提高了速率受限流的可调度性. 文献[16]针对多跳TSN网络的确定性传输调度问题, 分析了影响实时通信确定性行为的关键功能参数, 提出流隔离约束和帧隔离约束来避免冲突. 该文基于关键参数的配置, 将确定性传输调度问题映射为可满足性模理论(satisfiability modulo theories, SMT)问题^[20], 进而利用SMT/OMT求解器求出静态确定性传输调度方案. 文献[21]提出了一个路径和调度联合的启发式调度算法, 不再是分离设计路径规划和传输调度, 而是构造了速率受限流的路径和调度联合约束, 与固定路径的调度方案相比, 该算法提高了可调度性. 上述文献基于时间感知调度的工作从不同的方面研究了针对周期性时间敏感(periodic time-sensitive, PTS)流的调度问题. 但很少有研究在多跳TSN网络下计算门控列表同时考虑高优先级PTS对非周期时间敏感流(sporadic time-sensitive, STS)的影响. 文献[17]提出了一种综合时间触发流的门控列表的方法, 但它未考虑到对非周期的时间敏感流的影响. 然而, PTS流的调度决策会影响STS流的排队延迟和网络的可调度性.

因此, 本文针对多跳固定网络拓扑的TSN网络中包含周期性和非周期性的异构时间敏感数据流的调度问题, 研究了异构时间敏感数据流的协同传输机制. 本文的主要贡献如下:

(1) 为了快速判定给定PTS流集合的可调度性, 本文给出了可调度性的充分条件和必要条件, 并设计了可调度性判别算法判定任意决策集合下的可调度性;

(2) 为了实现周期性流的最小的端到端确定性时延, 本文提出了异构时间敏感数据流的协同传输框架, 融合两种确定性传输机制, 并构建了协同传输框架下

的异构时间敏感数据流调度的约束集合和优化问题;

(3) 为了高效求解异构时间敏感数据流的调度问题, 本文设计了均匀排布与填充(uniform arrangement and filling, UAF)算法, 通过对相同周期的流进行均匀排布以及填充前序周期调度时产生的空闲时隙, 极大地降低了问题求解的复杂度.

本文组织结构如下: 第2章介绍系统模型和问题描述; 第3章介绍异构数据可调度性分析和门控列表的设计; 第4章介绍了异构时间敏感数据流的协同传输框架和调度约束集合, 给出UAF算法的流程; 第5章结合工业信息物理综合测试平台, 对协同传输机制和异构时间敏感数据流调度算法进行了仿真和实物验证. 最后, 第6章对全文作了总结, 并讨论了UAF算法在增量调度场景下的应用潜力.

2 系统模型和问题描述

2.1 面向OT/IT融合的扁平化工业互联网传输架构

本文基于图1所示的扁平化工业互联网的网络架构, 主要聚焦于底层OT的网络互联, 以支撑边缘计算侧和IT层的工业互联网应用. 网络互联由现场层的工业网络如工业以太网、现场总线、工业无线、TSN网关、TSN交换机等网络基础设施组成. 在该架构中, 大

量底层分布式现场设备产生的数据经过现场网络向上传至支持TSN的网关中, 经过网关的协议转换后, 传递到TSN交换机网络内, 再向上传至上层的边缘计算单元, 以生成控制序列或分析设备行为, 保障控制系统的稳定运行. 边缘计算单元通过对数据的分析和处理后, 将控制指令经TSN交换机网络后下发至底层现场设备, 来调节执行器的运行.

在这个架构中, OT/IT融合的核心在于中间层的TSN交换网络, 用以实时传送包含控制指令、设备状态、加工工艺数据等实时过程数据和现场音视频监控数据等. 在靠近现场级的TSN网络边缘, 利用TSN网关将两个或多个异构的网络相连, 将工业现场的多种总线协议与要求的通信协议之间进行协议转换, 实现不同协议之间的数据交互. 本文聚焦于OT层的网络构建, 为工业现场异构时间敏感数据构建确定性的协同传输通道.

2.2 时间敏感网络技术

时间敏感网络技术包含一系列保证网络确定性和实时性服务的技术, 其中提供确定性、实时性传输功能的核心技术是由IEEE 802.1AS标准定义的时间同步机制^[22]和由IEEE 802.1Qbv定义的TAS机制, 如图2所示, 它将每个TSN交换机的通信划分为固定长度不断

图1 (网络版彩图)面向OT/IT融合的工业互联网架构

Figure 1 (Color online) Industrial Internet architecture for OT/IT convergence.

图 2 (网络版彩图)TSN交换机的时间感知整形机制

Figure 2 (Color online) Time-aware shaping mechanism of TSN switch.

重复的时间片, 称为周期, 将每个周期划分为多个细粒度的时间槽, 每个时间槽可以根据需求分配给8个以太网优先级队列中的一个或多个^[23]。在每个周期结束前设置规定一个时间段, 称之为保护带, 通过这一操作来确保在周期切换中不存在有帧正在传输的现象。此外, IEEE 802.1Qch标准定义了循环排队转发(cyclic queuing and forwarding, CQF)机制, 是目前TSN规范给出的一个实现模型, 它的配置和计算相对简单, 并且可以保证分组端到端交换的确定性时延上界。

2.3 问题描述

2.3.1 多跳时间敏感网络模型

网络模型: TSN网络由交换机、链路和终端站组成。终端站通常分为源节点和目的节点。在本文的网络架构中, 源节点主要由工业现场的设备构成, 它们是产生数据的主体。目的节点为远端的计算节点(比如边缘计算单元等), 主要负责数据的收集、处理和存储等。为了方便描述, 本文将多跳TSN网络建模成有向图 $G = (L, V)$, 如图3所示, 其中, $L = \{l_{ij}\}$ 是边的集合, $V = \{v_i\}$ 是节点的集合, $l_{ij} = v_i \rightarrow v_j \in L$ 。每条链路 l_{ij} 的数据传输速度用 R_{ij} 表示。

2.3.2 异构时间敏感数据流和传输模型

时间敏感数据流在周期性、截止时间等流属性上

的异构性, 给协同传输机制的设计带来了挑战。本文将异构时间敏感数据流依据周期性建模为两类。

(1) PTS流: PTS流普遍应用在工业现场的控制应用中, 比如工业现场的循环控制指令、同步信息等。通常, PTS流具有非常严格的周期和确定性时延的约束, 以便产生精准的控制决策, 保障控制系统的安全可靠运行。对于PTS流的处理, 本文假设所有的周期都是最

图 3 (网络版彩图)多跳TSN网络模型

Figure 3 (Color online) Multi-hop TSN network model.

小时隙粒度的正整数倍, 采用TAS进行细粒度的无等待调度, 以便实现最优的端到端确定性时延。

假设有 n 个PTS流的工业应用, 每个应用的数据流 f_i 的大小为 b_i 字节, 周期为 T_i 。本文采用二元组 $\langle b_i, T_i \rangle$ 来描述周期性应用的属性。定义集合为所有PTS流的集合。

(2) STS流: STS流一般指的是非周期的零星流(例如工业现场的故障报警信息)或者抖动较大的周期时间敏感数据流(例如无线传感器采集的数据)等。由于STS流没有严格的采样周期约束, 因此无法直接应用TAS做细粒度的调度。对于这类流的处理, 本文将采用CQF机制进行传输, 实现端到端确定性上界约束, 并与TAS机制在队列和门控列表的设计上实现协同。

对于STS的属性, 本文使用测量间隔 T_s 来描述, 测量间隔的选取需要满足以下条件: 在测量间隔的时间内, 最差的数据传输的时间不能超过测量间隔。一般测量间隔会选择大一点, 以满足STS流的确定性时延上界需求。

传输模型: 为了简化分析, 本文假设整个多跳TSN网络内, 交换机间的链路速度 R 均相同, 则每个应用 i 在交换机上需要分配的时隙大小为

$$t_i = b_i / R + \delta, \quad (1)$$

其中, δ 为交换机的补偿项, 取决于最坏情况下的时钟同步误差、链路传输抖动、交换机的处理时延等。

2.3.3 问题描述

本文主要聚焦于异构时间敏感数据流的协同传输问题, 包含两个部分, 一是PTS流集合的可调度性分析和门控列表的设计, 二是异构时间敏感数据流协同传输机制设计和异构时间敏感数据流调度问题的构建与求解。

在TSN中, 时隙的精细化控制是通过门控列表来实现的, 它是一段驱动程序控制的并且是周期性运行的。由于PTS流的周期多样, 因此本文将采取超周期的方式, 选取所有周期的最小公倍数作为整个周期性数据流集合的周期, 即

$$T = LCM(T_1, T_2, \dots, T_n). \quad (2)$$

而调度单元则选取所有PTS流周期的最大公约数, 即

$$T_u = GCD(T_1, T_2, \dots, T_n). \quad (3)$$

定义调度问题的决策变量 α_{ij} , $\alpha_{ij}=1$ 表示调度流 i 分配到了第 j 个子时隙, $\alpha_{ij}=0$ 则相反。本文使用集合 $\mathcal{A}$ 来表示所有的调度决策,

$$\mathcal{A} \triangleq \{\alpha_{ij} \in \{0, 1\} \mid 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m\}. \quad (4)$$

在第 j 个子时隙中, 调度流占用的时隙大小为

$$S_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} t_i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

本文的调度目标是寻找使得PTS流在整个超周期内尽可能分布均匀的决策集合。这样设计的好处是每个调度单元中都能够预留出更多的时隙, 降低对STS流和其他流的影响, 进而提升网络的可调度性。如图4所示, 周期为4 ms的流如果安排在第一个调度单元中, 将使得第一个调度单元中剩余的时隙相比于其他时隙要小, 同时导致在第一个调度单元中到达的其他时间敏感数据流产生更大的排队时延。并且当流增加时可调度性降低, 门控列表也会增多。若将第一个调度单元中周期为4 ms的流安排在第二个调度单元中, 则所有调度单元中的最大长度要小于之前的调度方案, 门控列表的数目也会相应变少。

因此本文选择的优化目标是使得所有的调度单元中最大的时隙占用最小, 即

$$\min_{\alpha_{ij} \in \mathcal{A}} \max_j S_j. \quad (6)$$

3 异构数据流可调度性分析与门控列表设计

3.1 可调度性分析

PTS流具有严格的周期和截止时间约束, 可调度性是刻画PTS流集合在带宽、周期等约束下, 调度问题可行解存在情况的指标。满足可调度性是实现确定性传输的前提, 影响可调度性的主要因素是PTS流的

图4 (网络版彩图)PTS时间敏感数据流调度示例

Figure 4 (Color online) An example of PTS time-sensitive data flow scheduling.

数量、周期、帧长等。

3.1.1 PTS流的无等待调度特性

无等待调度是指流在经过每一跳时均没有(或者可以忽略)排队时延。这种特性的好处是, 对于任意一个PTS流, 调度结果所得到的端到端确定性传输时延都是最小的, 即最优的调度性能:

$$d_i = (r_i - 1)d_0 + r_i t, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

其中, d_0 为最坏情况下的传播时延、处理时延以及链路抖动之和, r_i 为流 i 从源节点到目的节点经过的跳数。

另一个优点则是节约存储和队列资源, 因为没有排队时延, 所以缓存队列的长度可以最短, 节约出来的队列资源可以用来缓存STS流或者尽力而为流。无等待的实现方法是利用对每个流的细粒度的调度, 规划好每次PTS流的到达时刻, 提前预留好足够大的时隙, 让PTS流实现到达即转发。本文假设所有连接到TSN交换机的设备都具备精准的时钟同步, 并且所有周期性调度流都能以精确的时间戳生成系统的状态信息。

3.1.2 可调度性的判别

在经典的任务调度问题中, 对于一组独立的周期性任务来说, 如果CPU资源利用率 $U < 1$, 那么任务就是可调度的。但对于流调度的情形, 即便满足了这个条件, 也可能不存在可行解(必要条件)^[24]。因为本文假设了无等待的特性, 以实现周期性任务的最小确定性时延保障。这就意味着, 数据包到达交换机的队列时需立即转发, 这种情形下的排队时延为0。

由于PTS流不能将整个时隙占满, 其他非周期的速率受限流、突发性流等需要占用一定的时隙来保障必要的服务质量, 即 $U < 1$ 。因此本文给出了可调度性的必要条件:

$$t \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \leq U, \quad (8)$$

其中, $t = \max t_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。

另一方面, 将PTS流的周期集合 $\{T_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ 进行周期合并得到 $\{h_k\}_{k=1,2,\dots,p}$, 其中, $h_k \in \{T_i\}_{i=1,2,\dots,n}$, 每个周期 h_k 出现的次数为 n_k , 则可以得到可调度性的充分条件:

$$t \sum_{k=1}^p \left(\left\lfloor \frac{n_k - 1}{h_k} \right\rfloor + 1 \right) \leq T_u. \quad (9)$$

需要指出的是, 满足了式(9)即可判定PTS流集合是可以调度的。但若是只满足了式(8), 而不满足式(9), 并不一定存在可行的调度解, 因此仍然需要一个可调度性判别算法, 对调度结果进行判定, 如果不可调度, 则需要调整网络结构, 或者改变数据流的传输周期等。

本文定义可调度性指示变量 γ , $\gamma=1$ 表示该数据集可以调度, $\gamma=0$ 则无法调度。可调度性的判别算法的思路是首先验证式(8), 如果不满足, 则直接返回 $\gamma=0$ 。然后验证式(9), 如果满足式(9), 则直接返回 $\gamma=1$ 。如果不满足式(9), 则根据算法1计算每个周期中每个流的结束发送时刻 $slotEnd$, 如果存在结束发送时刻超出调度单元的情况, 那么该数据集 $\mathcal{F}$ 将不可调度。具体的算法流程如算法1所示。

3.2 交换机间的门控协调

本文的调度分析针对固定网络拓扑(如图3所示)

算法 1: 可调度性验证算法

输入 PTS流集合 $\mathcal{F}$, 偏移集合 $\mathcal{D}$, 时隙利用率 U

过程

1. 初始化参数: 结束发送时刻 $slotEnd \leftarrow 0$, $unitNum \leftarrow T/T_u$
2. if $t \sum_{i=1}^n 1/T_i > U$ then return $\gamma=0$;
3. if $t \sum_{k=1}^p \left(\left\lfloor (n_k - 1)/h_k \right\rfloor + 1 \right) \leq T_u$ then return $\gamma=1$;
4. for $i \leftarrow 1$ to n do
5. for $j \leftarrow D_i + 1$ to $unitNum$ do
6. $w \leftarrow i - 1$;
7. while $slotEnd(j, w) = 0$ do
8. $w \leftarrow w - 1$;
9. $slotEnd(j, i) = slotEnd(j, w) + T_i$;
10. if $slotEnd(j, i) > maxEnd$ then
11. $maxEnd = slotEnd(j, i)$;
12. if $maxEnd > T_u$ then
13. return $\gamma=0$;
14. end for
15. for $j \leftarrow D_i + 1$ to $unitNum$ step T_i do
16. $slotEnd(j, i) \leftarrow maxEnd$;
17. $slotEnd(j, i) \leftarrow maxEnd - T_i$;
18. end for
19. return $\gamma=1$;
20. end for

输出 $\gamma, slotEnd$

的协同传输问题, 主要解决面向单个目的节点的多类异构时间敏感数据流的调度问题. 为了实现端到端确定性, 还需要每个流在确定的时间内到达路径上的每个交换节点. 因此交换机间的门控协调是必要的.

流在从一个交换机到达另一个交换机发送前, 会经历一定的时延, 其大小主要由传播时延、处理时延以及链路的抖动决定. 该值在式(7)中已经考虑, 则任意相邻路径上的交换机的门控列表相差 d_0 .

对于单个目的节点的固定网络拓扑, 本文将在后续的部分给出针对目的节点的无等待异构时间敏感数据流的调度方法, 如果对于目的节点是可调度的, 那么整个TSN网络均是可调度的, 且门控列表的起始时间相差一个固定的偏移量 d_0 . 由于本文研究的周期性流的调度是无等待的情形, 排队时延为0, 那么只需要确定 d_0 的值, 就可以沿着数据流传输的路径, 计算路径上所有交换机上的门的打开和关闭时间.

3.3 单个交换机门控列表设计

基于3.2节中的分析, 只要能够计算出目的节点的门控列表, 则整个网络中的门控列表可以根据网络拓扑信息依次计算出来, 如下文中的半实物仿真拓扑实例所示, 只需要确定交换机 v_3 的门控列表即可.

针对无等待异构时间敏感数据流调度的门控列表设计有两种方法. 第一种较为简单, 但容易造成较多的网络资源浪费. 具体的思路是采用每个调度单元中的第一个数据流的开始时间和最后一个数据流的结束时间, 这样的门控计算较为紧凑, 但是易于实现, 适用于网络资源较多的情况. 第二种思路是利用UAF算法中的剩余空闲时隙来判断每一个流的开关门时刻, 从而得出精确的门控列表, 但这种方法会导致门控列表数量增加. 本文将采用第一种设计方法, 对调度结果进行门控列表的分析与计算.

需要注意的是, 在TSN中每个交换机的门控列表的个数是有限的, GCL中的门事件序列定义为八位字节字符串值的有序条目, 每个八位字节编码为类型长度值(type-length-value, TLV). 八位字节控制TLV的长度字段. 根据该定义, 当长度八位字节的所有8位均为1(即 $2^8=256$)时, GCL的个数最大. 即每个交换机最多可以有256个门事件. 因此, PTS流的周期的选择优先选择已有周期的整数倍, 否则将导致大量门事件, 从而影响可调度性.

4 异构时间敏感数据流调度机制

4.1 异构时间敏感数据流协同传输框架

为了支持时间敏感数据流确定性的交换, TSN对802.1Q-2014标准进行了扩充. 其中单流过滤和管控机制(per-stream filtering and policing, PSFP)中的时间门控逻辑控制了时间敏感分组进入缓存队列的时间, 而TAS中的输出门控机制控制了分组离开输出队列的时间. 基于对PSFP和TAS机制的不同配置, TSN交换机可以实现多样的确定性转发, 满足不同场景的需求.

如图5所示, $Q_0, Q_1, \dots, Q_7$ 为8个队列, 优先级大小为 $Q_1 < Q_0 < Q_2 < \dots < Q_7$. 本文将PTS流和STS流在队列设置上实现隔离, 并在门控列表上实现两种机制的融合, 部署在所有的TSN交换机上, 从而在多跳TSN网络下实现异构时间敏感数据流的协同传输. 在协同传输框架下, PTS流设置为最高优先级, 并且只占用一个队列即可. 而STS流由于采用CQF机制, 则至少需要占用两个队列进行传输. 本文将选择 Q_7 实现PTS流的缓存传输, Q_5 和 Q_6 作为一组奇偶队列(如图6所示)用来实现STS流的传输. 则对于任意一类STS流, 假设传输经过的跳数为 r , 则STS流的端到端传输时延上界是确定性的, 即 $d_s < (r+1)T_s$. 其余的队列用于传输非时间敏感流, 例如视频流、尽力而为流等.

4.2 异构时间敏感数据流调度机制与算法设计

4.2.1 无等待调度约束

下面给出实现无等待时间敏感网络调度的必要约束.

图5 (网络版彩图)TSN交换机出口端口队列配置

Figure 5 (Color online) Egress port queue configuration for TSN switch.

图 6 (网络版彩图) STS流队列设置

Figure 6 (Color online) STS flow queue configuration.

等时性约束: 由于周期性的时间敏感数据流具有严格的周期, 则调度决策应该在每个超周期内是等间隔排列的, 即

$$\sum_{j=q+1}^{q+T_i} \alpha_{ij} = 1, \quad q = 0, 1, \dots, m - T_i. \quad (10)$$

偏移约束: 偏移约束要求注入时隙偏移小于流周期. 数据流中第一个周期的报文在第二个周期产生之前已经被转发. 如果不满足该约束, 多个时间段的数据包会同时占用主机中有限的存储资源. 并且该约束将偏移量限制在合理范围内, 减少了数据流偏移量的搜索空间^[25].

$$D_i < T_i, i = 0, 1, \dots, n. \quad (11)$$

时隙约束: 该约束主要描述STS流的测量间隔选取. 偏移的粒度是一个时隙, 这意味着所有的时间段都应该被预定义的时隙所分割. 由于时隙已经被PTS流分成了一系列的调度单元. 因此, 最小时隙需要保证CQF队列中的所有报文在同一时隙内从上游节点发送到下游节点, 并且是 T_u 的整数倍, 这样才能实现与PTS流的门控列表协同.

$$T_s = gT_u, g \in N^+. \quad (12)$$

截止时间约束: 延迟数据流的注入时隙会影响其到达目的地的时间. 该约束保证了每个流的所有数据包能够在指定的截止时间之前到达. 本文假设所有的调度流的截止时间为各自的数据产生周期.

$$d_i < T_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

4.2.2 均匀排布与填充算法设计

由于工业网络中网络流类型多样, 需要预留一定

的带宽分配给其他的流(STS流、尽力而为流等)传输, 因此整个时隙的利用率要小于某个界限 $U < 1$. 为了使每个PTS调度流均能够实现最短的确定性时延, 我们设计的调度流将遵循无等待特性. 那么, 一个可行的调度解的必要条件就是对于任意一个调度单元 j , 调度流占用的时隙都不能超出调度单元的长度, 即调度时隙的利用率不能超过 U , 即

$$S_j / T_u \leq U, j = 1, 2, \dots, m. \quad (14)$$

由式(1)~(14), 可以得到如下的异构时间敏感数据流调度问题:

$$\begin{aligned} \min_{\alpha_{ij} \in A} \quad & \max_j S_j \\ \text{s.t.} \quad & t_i = b_i / R + \delta, \\ & D_i < T_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ & S_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} t_i, j = 1, 2, \dots, m, \\ & S_j / T_u \leq U, \quad j = 1, 2, \dots, m, \\ & T_s = gT_u, \quad g \in N^+, \\ & \sum_{j=q+1}^{q+T_i} \alpha_{ij} = 1, \quad q = 0, 1, \dots, m - T_i. \end{aligned} \quad (15)$$

该调度问题是一个整数线性规划问题, 可以证明无约束的式(15)是一个NP-Hard问题. 因此, 为了高效求解式(15), 本文设计了UAF算法, 可以实现按周期性进行时隙分配和门控列表的设计. UAF算法的思路如下: 首先, 将数据流按周期大小从小到大排列, 这样的好处是周期小的数据流在排列之后会产生空闲时隙, 这些空闲时隙可以被周期大的整数倍的数据流进行填充, 而不增加调度代价. 如图4所示, 周期为2 ms的周期产生的空闲时隙可以被周期为4 ms的两个数据流填充.

UAF算法的主体是对所有周期性数据流进行一次循环遍历, 如果当前循环的周期和上一个周期相同, 则会自动排布当前的周期, 即偏移量自增1个调度单元. 当偏移量等于当前周期, 那么偏移将重置为0, 继续从0开始排布. 如果当前循环的周期和上一个周期不相同, 说明切换到了另一个周期, 这时需要先判断空闲时隙集合是否为空. 如果为空, 则新数据流的偏移直接重置为零. 如果空闲周期不为零, 则判断是否有符合条件的空闲时隙可以填充, 如果有则设置偏移进行填充. 算法的具体流程见算法2.

算法 2: 均匀排布与填充算法

输入 数据流集合 $\mathcal{F}$

过程

1. $Q \leftarrow$ 集合 $\mathcal{F}$ 中的数据流实例按照周期 T_i 从小到大排列
2. 初始化空闲集合 $C \leftarrow \emptyset$, 偏移集合 $\mathcal{D} \leftarrow \emptyset$
3. 求所有周期的最小公倍数, 赋值给循环周期 T
4. 求所有周期的最大公约数, 赋值给调度单元 T_u
5. **for** $i \leftarrow 2$ **to** $n-1$ **do**
6. **if** $T_i = T_{i-1}$ **then**
7. $D_i = D_{i-1} + 1$;
8. **if** $T_i = D_i$ **then**
9. $D_i = 0$;
10. **else**
11. **if** $C = \emptyset$ **then** $D_i = 0$;
12. **else**
13. **for all** $C_{p_j} \in V$
14. **if** T_i, C_{p_j} 不互质 **then**
15. 遍历所有空闲时隙;
16. 记录填充位置 $tcpos$;
17. **end for**
18. **if** $T_i \neq T_{i+1}$ **then**
19. **if** $T_i - D_i > 1$ **then**
20. 记录空闲时隙;
21. **end for**
22. 根据 $tcpos$ 调整流的调度顺序;
23. **for** $i \leftarrow 1$ **to** n **do**
24. **for** $j \leftarrow D_i + 1$ **to** $unitNum \text{ step } T_i$ **do**
25. $\alpha_{ij} = 1$;
26. **end for**
27. **end for**

输出 调度决策集合 $\mathcal{A}^*$, 偏移集合 $\mathcal{D}$

UAF算法的特点是只需一次遍历, 通过同周期的自动序列排布以及空闲周期的填充优化来最优化调度决策, 这样极大地降低了算法的复杂度。

5 算法仿真及实验验证

本节基于作者所在实验室自主设计和研发的TSN测试床, 如图7所示, 采取半实物仿真的方法, 对工业离散自动化制造过程的流进行了模拟, 虚拟工业流的要求^[11]见表1, 在TSN交换网络中进行协同传输方法的仿真验证。

本节的半实物仿真实验模拟了5种16个不同周期工业PTS流和1类STS流, PTS流的参数如表2所示, STS流的测量间隔 T_s 设置为2 ms。模拟的流及半实物仿真拓扑如图8所示, 流的路径分别为 $[v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3]$,

图7 (网络版彩图)工业信息物理综合测试平台——TSN测试床

Figure 7 (Color online) Industrial cyber-physical comprehensive test platform—TSN test bed.

图8 (网络版彩图)半实物仿真拓扑

Figure 8 (Color online) Semi-physical simulation topology.

$[v_6 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3]$, $[v_5 \rightarrow v_4 \rightarrow v_3]$. 本次仿真环境在四核2.4 GHz CPU和16 GB RAM的计算机上进行, 算法仿真软件为Matlab2019b. 实物验证平台为工业信息物理测试平台, TSN交换机芯片型号为LS1028A.

在算法仿真环节, 首先利用仿真拓扑和模拟的流参数设置来验证UAF算法以及可调度性判别算法的有效性, 在MATLAB中计算出调度决策集合 $\mathcal{A}^*$, 然后由 $\mathcal{A}^*$ 判别流集合的可调度性, 根据返回值计算每个交换机的GCL. 然后, 评估了UAF算法在不同数量调度流下的性能, 并与其他算法进行了比较. 最后针对

根据UAF算法得出的调度决策和GCL门控,在半实物仿真平台上进行了实验验证。

5.1 UAF算法的验证

为了验证UAF算法的有效性,在MATLAB中进行了算法的实现,并为表2中的所有数据流进行了时隙规划,时隙利用率 $U=0.8$ (预留20%的时隙资源给其他数据流),队列设置如图5所示,调度结果如图9所示。

由图9可知,UAF算法给出了一种最优的调度结果,调度决策集合见表3,最大的调度单元时隙占用为 $\max S_f=0.6$ ms,且满足式(9)的可调度性充分条件.本文设置的调度目标是最大化最小的调度单元中时隙的占用,最大的时隙占用可能存在于任何一个调度单元中.而且,数据流的调度顺序也可以灵活改变,而不影响调度结果的最优性.本文采取的均匀排布方法,只求解了其中一种调度顺序,极大降低了搜索空间。

由图9可以看出,周期为4, 6, 12 ms的数据流大量填充到了周期为2, 3 ms的数据流产生的空闲时隙中.由此可以看出,UAF算法中设计的空闲时隙填充机制,可以更充分地节约时隙资源,增加整个流集合的可调度性.同时,其他未被占用的时隙可以用来传输其他不同类型的数据流。

5.2 UAF算法的可扩展性

通过分别改变PTS流的数量,本文比较了UAF、OMT和穷举法(brute force method, BFM)之间的性能.由于OMT采用的是一阶逻辑的建模方法,建模比较容易,但是求解较为复杂,因此算法的执行时间较长.BFM因为要循环遍历所有可能的解,因此BFM的执行时间会随着流数目的增加而急剧增加.如图10所示,UAF算法的执行时间最短,由于UAF算法舍弃了求取整个最优调度集,只需要进行一次遍历即可得到一个

表 1 工业离散自动化制造过程数据流属性

Table 1 Data flow attributes of industrial discrete automated manufacturing process

数据流类型	周期	抖动	可靠性	说明
PTS流	1~20 ms	<1 us	99.9999%	实时工业控制数据
STS流	1~20 ms	<1 ms	99.999%	无线、报警数据等
其他流	无	无	低	配置、监控数据等

表 2 不同周期PTS数据流的仿真参数设置

Table 2 Simulation parameters setting of PTS data flow in different periods

PTS数据流序号	周期 T_i (ms)	数据包长度 b^a (kb)	链路速度 R (Mbps)	时隙补偿 δ (us)
1~3	2	50	100	36
4~7	3	50	100	36
8~12	4	50	100	36
13~15	6	50	100	36
16	12	50	100	36

a) 单个以太网最大的帧长为1522 byte,数据包长度过长时会分成多个连续帧进行发送。

图 9 (网络版彩图)PTS流调度结果

Figure 9 (Color online) PTS flow scheduling result.

表 3 调度决策集合 $\mathcal{A}^*$ Table 3 Scheduling decision set $\mathcal{A}^*$

流序号	时隙序号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
3	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
14	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
5	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
6	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
7	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
8	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
9	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
10	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
11	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1

图 10 (网络版彩图)算法执行时间对比

Figure 10 (Color online) Comparison of algorithm execution time.

最优的调度解, 在调度流数目上具有较好的可扩展性.

5.3 门控列表的计算及实验验证

在本节中, 首先根据5.1节中的调度结果计算每个交换机的GCL, 然后将GCL的配置信息写入到每个TSN交换机中, 最后进行实验验证.

在基于linux内核实时操作系统的TSN网络交换机中, 可以使用流控制(flow control, tc)指令实现时间敏感控制, 而GCL主要通过排队规则(queueing discipline,

qdisc)来控制. qdisc是实现流控制的基础, 内核如果需要通过某个网络接口发送数据包, 它都需要按照为这个接口配置的qdisc把数据包加入队列. 然后, 内核会尽可能多地从qdisc里面取出数据包, 把它们交给网络适配器驱动模块进行数据的发送. 使用tc指令对图9的调度结果进行门控列表的设置, 由于CQF采用奇偶队列模式, 那么STS流的门控列表循环周期应该是测量间隔 T_s 的两倍, 即4 ms, 则门控列表的循环周期为4 ms. 图11展示了同一路径下交换机间的部分调度结果, 交换机 v_3 在一个循环周期内的门控列表参数设置如表4所示, 由于篇幅限制, 其余交换机的门控列表不再列出.

6 结论与讨论

本文针对多跳固定网络拓扑的TSN网络提出了一种确定性异构时间敏感数据流的协同传输框架, 用于在同一共享以太网上传输不同类型的工业异构时间敏感数据流. 在该框架下, 本文首先得出了可调度性判别条件及门控列表的设计方法. 然后给出了协同传输架

图 11 (网络版彩图)同一路径下交换机间的部分调度结果
Figure 11 (Color online) Partial scheduling results between switches under the same path.

表 4 交换机v3的门控列表
Table 4 GCL for switch v3

GCL参数	sched-entry 1	sched-entry 2	sched-entry 3	sched-entry 4	sched-entry 5	sched-entry 6	sched-entry 7	sched-entry 8
队列数目	8	8	8	8	8	8	8	8
基准时间	0	0	0	0	0	0	0	0
持续时间	600 us	400 us	600 us	400 us	600 us	400 us	600 us	400 us
时间感知门控	1100 0000	0101 1111	1100 0000	0101 1111	1010 0000	0011 1111	1010 0000	0011 1111

构下的队列映射模型以及无等待调度的约束集合，构建了异构时间敏感数据流的调度优化问题。最后，本文设计了UAF调度算法来求解异构时间敏感数据流的调度问题。仿真和实验结果表明了协同传输框架和UAF算法的有效性。UAF算法能够实时存储剩余的时隙资源，对于新增加的流可以优先选择使用剩余的时

隙资源，能够极大地提升网络的利用率。
由于UAF算法只需要一次遍历，新的调度结果并不影响已经调度的流的最优性，因此大大降低了搜索空间，未来可以尝试应用于在线增量调度的场景中，以增强工业现场设备应对灵活多变的柔性业务需求能力。

参考文献

1 Guan X, Chen C L, Yang B, et al. Towards the integration of sensing, transmission and control for industrial network systems: Challenges and recent developments (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2019, 45: 25–36 [关新平, 陈彩莲, 杨博, 等. 工业网络系统的感知-传输-控制一体化: 挑战 and 进展. *自动化学报*, 2019, 45: 25–36]

2 Guan X P, Lyu L, Yang B. Perception, communication and control of intelligent factory (in Chinese). *ZTE Tech*, 2017, 23: 6 [关新平, 吕玲, 杨博. 智能工厂的感知、通信与控制. *中兴通讯技术*, 2017, 23: 6]

3 Yuan Y, Zhang Y, Ding H. Research on key technology of industrial artificial intelligence and its application in predictive maintenance (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2020, 46: 2013–2030 [袁烨, 张永, 丁汉. 工业人工智能的关键技术及其在预测性维护中的应用现状. *自动化学报*, 2020, 46: 2013–2030]

4 Huang T, Wang S, Huang Y D, et al. Overview of deterministic network research (in Chinese). *J Commun*, 2019, 40: 160–176 [黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述. *通信学报*, 2019, 40: 160–176]

5 Xie J G, Qi C, Zhu J J. Architecture and deployment progress of identifier resolution system for industrial Internet (in Chinese). *Infor Commun Tech Policy*, 2020, 46: 10 [谢家贵, 齐超, 朱佳佳. 工业互联网标识解析体系架构及部署进展. *信息通信技术与政策*, 2020, 46: 10]

6 Yan J L, Kong D J. Study on “Industrial Internet” and “Industrie 4.0” (in Chinese). *Strategic Study CAE*, 2015, 17: 4 [延建林, 孔德婧. 解析“工业互联网”与“工业4.0”及其对中国制造业发展的启示. *中国工程科学*, 2015, 17: 4]

7 Sisinni E, Saifullah A, Han S, et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Trans Ind Inf*, 2018, 14: 4724–4734

8 Chai T Y. Development directions of industrial artificial intelligence (in Chinese). *Acta Autom Sin*, 2020, 46: 8 [柴天佑. 工业人工智能发展方

- 向. 自动化学报, 2020, 46: 8]
- 9 Wu J Q, Kang G H, Hua Y M, et al. Research on intelligent cooperative attitude control of assembled spacecraft (in Chinese). Chin Space Sci Tech, 2020, 40: 44–53 [吴佳奇, 康国华, 华寅淼, 等. 组合体航天器智能协同姿态控制研究. 中国空间科学技术, 2020, 40: 44–53]
 - 10 Yang T, Chai T Y. Research status and prospect of distributed collaborative optimization (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1414–1425 [杨涛, 柴天佑. 分布式协同优化的研究现状与展望. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1414–1425]
 - 11 Wang S, Wang J S, Cai L, et al. Research on the development of deterministic network technology for industrial manufacturing strategic (in Chinese). Strategic Study CAE, 2021, 23: 22–29 [汪硕, 王佳森, 蔡磊, 等. 面向工业制造的确定性网络技术发展研究. 中国工程科学, 2021, 23: 22–29]
 - 12 Li J Q, Yu F R, Deng G, et al. Industrial internet: A survey on the enabling technologies, applications, and challenges. IEEE Commun Surveys Tutorials, 2017, 19: 1504–1526
 - 13 Dürr F, Nayak N G. No-wait packet scheduling for IEEE time-sensitive networks (TSN). In: Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. Brest, France, 2016. 203–212
 - 14 Dai X, Zhao S, Jiang Y, et al. Fixed-priority scheduling and controller co-design for time-sensitive networks. In: Proceedings of the 39th International Conference on Computer-aided Design. Electr Network, 2020. 1–9
 - 15 Atallah A A, Hamad G B, Mohamed O A. Routing and scheduling of time-triggered traffic in time-sensitive networks. IEEE Trans Ind Inf, 2020, 16: 4525–4534
 - 16 Craciunas S S, Oliver R S, Chmelik M, et al. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1qbv time sensitive networks. In: Proceedings of the 24th International Conference on Real-time Networks and Systems. Brest, France: ACM, 2016. 183–192
 - 17 Gavriluț V, Pop P. Scheduling in time sensitive networks (TSN) for mixed-criticality industrial applications. In: 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Imperia, Italy: IEEE, 2018. 1–4
 - 18 Niu G G, Sun S D, Lafon P, et al. Decomposition method of job-shop scheduling problem with discretely controllable processing times (in Chinese). Sci Sin Tech, 2011, 41: 347–355 [牛刚刚, 孙树栋, Lafon P, 等. 加工时间离散可控作业车间调度问题分解方法. 中国科学: 技术科学, 2011, 41: 347–355]
 - 19 Nayak N G, Dürr F, Rothermel K. Routing algorithms for IEEE 802.1qbv networks. SIGBED Rev, 2018, 15: 13–18
 - 20 Barrett C, Tinelli C. Satisfiability modulo theories. In: Handbook of Model Checking. Springer, 2018. 305–343
 - 21 Pahlevan M, Tabassam N, Obermaisser R. Heuristic list scheduler for time triggered traffic in time sensitive networks. SIGBED Rev, 2019, 16: 15–20
 - 22 Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE draft standard for local and metropolitan area networks-timing and synchronization for time-sensitive applications. IEEE P802.1AS-Rev/D8.3, 2019. 1–516
 - 23 Thiele D, Ernst R. Formal worst-case timing analysis of ethernet TSN's burst-limiting shaper. In: 2016 Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE). Dresden, Germany: IEEE, 2016. 187–192
 - 24 Ansah F, Abid M A, de Meer H. Schedulability analysis and gcl computation for time-sensitive networks. In: 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Aalto Univ, Finland: IEEE, 2019. 1: 926–932
 - 25 Xu L, Xu Q, Zhang Y, et al. Co-design approach of scheduling and routing in time sensitive networking. In: Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems. Tampere, Finland: IEEE, 2020. 1: 111–116

Design of coordinated transmission mechanism of heterogeneous time-sensitive data flow for industrial internet

ZHANG JingLong^{1,2,3}, CHEN CaiLian^{1,2,3}, Xu QiMin^{1,2,3}, LIN MeiHan^{1,2,3}, LU XuanZhao^{1,2,3} & CHEN YingXiu^{1,2,3}

¹ Automation Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

² Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education, Shanghai 200240, China;

³ Shanghai Engineering Research Center of Intelligent Industrial Control and Management, Shanghai 200240, China

Industrial internet needs to realize the integration of IT (information technology) and OT (operation technology). The construction of the field-level industrial network is key to truly realizing seamless access of production line data from OT to IT and the intelligent operation and maintenance of the production line from IT to OT. For OT, the data in the industrial system is highly time-sensitive, and the deterministic behavior of perceived data and control instructions in time is the foundation for reliable and stable industrial system operation. However, the industrial field is plagued by problems such as heterogeneous perceived data, incompatible protocols, and varying transmission requirements, which pose significant challenges to the deterministic transmission of heterogeneous time-sensitive flow. One feasible solution to this problem is to design a unified time-aware gating mechanism with low delay and jitter, allowing precise control of data flow transmission behavior; this is one of the key technologies in the time-sensitive networking (TSN) standard. This paper mainly studies the coordinated transmission of heterogeneous time-sensitive flow in multi-hop TSN networks. First, heterogeneous time-sensitive traffic is modeled into two categories: periodic time-sensitive (PTS) flow and sporadic time-sensitive (STS) flow. Then, the schedulability of the PTS flow set and the design method of the gate control lists are analyzed, the sufficient and necessary conditions of schedulability are defined, and a schedulability discriminant algorithm is designed to determine the schedulability of any decision set. Then, a coordinated transmission framework of heterogeneous time-sensitive flow is proposed, followed by the construction of the constraint set of heterogeneous data scheduling. This paper employs the design method of no-wait slot scheduling and constructs the heterogeneous time-sensitive flow scheduling problem with the optimization goal of minimizing the maximum slot occupation in the scheduling unit to achieve the minimum end-to-end deterministic delay of PTS flow and to reduce the impact of PTS scheduling mechanism on STS flow transmission as much as possible. Then, a uniform arrangement and filling (UAF) algorithm is developed to minimize slot occupation of scheduling units by uniformly arranging the flow of the same period and filling the idle time slots generated during pre-period scheduling. Finally, simulation and experiment results corroborate the effectiveness of the two kinds of heterogeneous time-sensitive flow coordinated transmission framework and the efficiency of the UAF scheduling algorithm based on ensuring the same scheduling performance.

industrial internet, time-sensitive networking, deterministic transmission, coordinated transmission, no-wait time-slot scheduling

doi: [10.1360/SST-2021-0394](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0394)