

## 车载 TSN 平台中混合关键及应用的调度问题综述

**摘要：**IEEE802.1 时间敏感网络 (TSN) 是一组 IEEE 标准，它扩展了以太网的安全性和实时性。TSN 预计将广泛应用于多个应用领域，从工业自动化到虚拟网络。TSN 通过多个流量类支持混合关键性应用：时间触发 (TT) 通信、具有有限端到端延迟的音频-视频桥接 (AVB) 流以及最大努力 (BE) 消息。TT 流量通过为出口端口的每个队列指定的门控制列表 (GCLs) 进行调度。虽然研究人员已经开始提出 GCL 的合成方法，但目前大部分工作都忽略了 AVB 等低优先级实时流量，导致 GCLs 增加了 AVB 流量的最坏情况延迟，使其无法调度。

**关键词：**时间敏感网络 (TSN)、调度、TT 流、AVB 流、门控制列表 (GCL)

### 一、引言

IEEE 802.1 时间敏感网络 (TSN) 是 IEEE 802.1 标准的一组修订版，它使工业自动化和汽车领域的以太网安全关键和实时行为成为可能。时间敏感有两层含义，一是数据必须在指定的最大延迟之前通过特定窗口传送，二是连接的设别需要具有可用于同步、协调、锁相等的挂钟时间。首先，IEEE 802.1Q-2005 支持最佳努力 (BE) 通信流进行优先排序，从而使优先化的通信流具有更高的服务质量 (QoS)。随后，IEEE 音频视频桥 (AVB) [1] 任务组成立，以开发另一组增强的 IEEE 802.1BA，即 AVB。该标准引入了两个新的整形 AVB 流类型，具有有界的最坏情况端到端延迟 (WCD)。2012 年，AVB 任务组更名为时间敏感网络任务组，以反映重点转移到进一步向安全关键和时间敏感传输方向扩展协议，并引入了新的流量类型，如时间触发 (TT) [2]。

TSN 机制提供了模拟混合关键分布式系统中常见的流量类的可能性，流量通过全局网络调度得到保证，该调度存储在所谓的门控制列表 (GCLs) 中，并及时地控制出口端口的每个队列的帧的行为。很多研究人员已经开始提出 TT 流量调度的方法，以往的研究都忽略了较低优先级的实时流量，如 AVB 流，导致 TT 配置可能增加 AVB 流量的最坏情况延迟，使其不可调度。虽然 AVB 流属于软实时通信，TT 流属于硬实时通信，但是如果能在考虑 TT 流的同时将 AVB 流也考虑进去，使得 AVB 流和 TT 流都可以进行调度，那么实时通信会更好。而目前，只有 Paul Pop [3] 等人提出了一种调度方法来处理 TT 流量，该方法考虑了 AVB 流量，使得 TT 流量和 AVB 流量都是可调度的。

### 二、时间敏感网络

## 2.1 TSN 的定义

时间敏感网络指的是 IEEE802.1 工作组中的 TSN 任务组正在开发的一套协议标准。该标准定义了以太网数据传输的时间敏感机制，为标准以太网增加了确定性和可靠性，以确保以太网能够为关键数据的传输提供稳定一致的服务级别。它是基于实时以太网提出的。

## 2.2 TSN 的特点及优势

从字面上看，时间敏感网络最重要的就是“时间”。其在应用中的根本目标就是提供一种方法来保障信息在一个明确的、可以预测的时间范围内，从源节点传递到目的节点。IEEE802 工作组提出，时间敏感网络可以提供具备有界低延迟、低抖动、极低数据丢失率的数据传输能力。具体特点分为以下几点：

(1) 时间同步。在运行应用和控制应用的设备上维持端到端的同步时间，预期最坏情况会达到 -500ns 到 500ns。这一特点属于时间敏感网络的根本内容。

(2) 有界低延时。依据多种调度与管理机制提出的有界低延迟，最终实现零拥塞的丢失率。

(3) 低抖动。依据时间同步与数据流调度机制控制数据传递阶段的抖动。

(4) 高可用。结合数据帧复制、主从时间等机制提供网络的高可用性。

(5) 汇聚网络。时间敏感网络技术支持需求迥异的大量负载的同时传递。

(6) 兼容性。依据引用标准化技术，兼容不同引用场景与既有协议。

在上述特点的支持下，时间敏感网络可以展现出下面几点优势：

(1) 交换网络中的数据传递时延得到保障。

(2) 关键负载与非关键负载可以在相同网络中混合传递，非关键负载的并行传递不会影响关键负载的传递时延。

(3) 大量上层协议的实时负载可以在网络中一起传递。

(4) 网络错误可以及时被修复和研究。

## 2.3 车载时间敏感网络

通过网络数据传输的最大响应时间来划分，车载时间敏感网络是一种弱实时性网络。它可以传输不同应用的数据，例如高级驾驶员辅助系统（ADAS），CD 音频，DVD 视频娱乐，跨区域流量等。关于上述应用，CAN、FlexRay 等传统网络都受到带宽的制约。车载多媒体和娱乐方面，MOST 是目前比较流行的车载总线，支持的多媒体流数据传输。虽然 MOST150 标准的最大带宽为 150Mbps，但由环形拓扑结构中的各个节点共享，节点的数量将会受到制约。即使带宽在一定程度上可以满足目前的技术要求，但是在 ADAS 应用和跨区域网络连接时，其效率并不可观。并且由于单一供应商和传输介质的限制，其成本也一直居高不下。

车载时间敏感网络主要有以下几个特点：

(1) 可扩展性

车载网络以以太网为基础,可以较好地实现与车内各个网络、移动无线设备、外部网络等的连接,使用于各个车载平台,具有较好地通用性。

### (2) 高带宽

就 Ethernet AVB 技术而言,目前可以通过以太网交换机为每一条以太网链路提供 100Mbps 的带宽,具有很强的网络传输能力。

### (3) 低成本

一方面以太网设备成本比较低廉,另一方面是博通公司开发了一种非屏蔽单对双绞线实现 100Mbps 的全双工通信技术。

所以,车载时间网络是大势所趋。但是有网络就意味着存在调度问题,车载时间敏感网络中的调度问题也是一个新的挑战。

## 三、TSN 在混合关键应用中的调度问题

随着工业互联网的发展速度越来越快,促使其对通信网络提出了全新要求,此时革新的制造工艺、逐渐完善的控制流程都需要提出一个可以快速、及时通信的网络作为保障,传统意义上的以太网无法满足当前工业发展需求。时间敏感网络技术作为新时代发展提出的重要内容,是当前工业互联网实现预期发展目标的关键。

一些实时通信协议已经被提出并应用于不同的领域中,例如, FlexRay 用于汽车[4], ARINC 664 p7 用于航空电子设备[5], EtherCAT 用于工业自动化[6]。然而,新兴的应用,如先进的驾驶员辅助系统(ADAS)、自动驾驶或工业自动化,对带宽和实时性的要求越来越高。例如,自动驾驶需要至少 100Mbps 的数据速率来进行基于摄像机、雷达和光探测与测距数据的图形计算,而 CAN 和 FlexRay 分别只能提供高达 1Mbps 和 10Mbps 的数据速率。著名的网络标准 IEEE 802.3 以太网[7]满足了广泛应用领域的带宽需求,同时保持了可伸缩性和成本效益。但是,它确实缺乏实时和可靠的[8]性能。许多扩展,如 EtherCAT、PROFINET、ARINC 664p7[9]和 TTEthernet[10],已经被建议并在业界中使用。虽然满足时序要求,但彼此并不相容,进而阻碍实时以太网的发展。因此,在不失去实时[11]保证的情况下,同一网络中的互操作性是不可能的。此时,IEEE802 工作组[12]提出了“时间敏感网络”的理念,想要构建一个统一且完善的物理层和数据链路层协议,促使其可以在标准化的状态下,在各个区域都能有序工作,进而为系统提供实时数据信息。

调度是一个永恒的话题,TSN 中自然也少不了对流量调度的研究。查阅资料,发现已经有很多关于任务和消息[13]调度表的研究工作。对于 TTEthernet,人们提出了许多在网络链路上调度帧的策略[14]。然而,尽管 TSN 和 TTEthernet 有相似之处,但它们在重要方面有所不同:TTEthernet 中的消息由单个帧

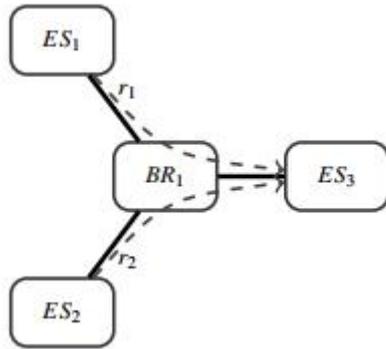
组成，而 TSN 消息可能具有多个帧。此外，TTEthernet 调度表是为单个帧指定的，而 TSN 为输出端口队列指定调度。因此，共享同一队列的所有帧都受到相关 GCL 的影响。因此，TTEthernet 调度的工作并不直接适用于 TSN。对于 TSN 中的 GCL 综合问题，研究者们已经开始提出几种方法，例如整数线性规划（ILP）公式[13]、可满足性/优化模理论（SMT/OMT）[15]、[16]和启发式[17]。

注意，对于实现实时应用程序，TT 和 AVB 流都提供有界的延迟。TT 流的延迟由 GCLs 决定，TT 流比 AVB 具有更高的优先级。AVB 的最新时序分析工作[18]展示了如何在考虑 GCL 的情况下确定 AVB 流的最坏情况端到端延迟（WCD）。然而，到目前为止，所有用于 GCL 合成的方法都是孤立地看待 TT 流量，完全忽略 AVB。Paul Pop 团队通过实验结果证明，这将导致 GCLs 在牺牲 AVB 流量的情况下为 TT 优化，这将导致 AVB 的非常大的 WCD。

确定流的路由也是一个重要的问题，可以更好地来调度流量类型。TSN 标准提出了动态路由和保留机制，如 IEEE 802.1Qca 和 IEEE 802.1Qcc。这种动态路由适合非关键流量。然而，实时和安全关键的流使用静态路线，在设计时决定。因此，Pop 团队的研究人员还解决了确定 TT 和 AVB 流量静态路由的问题。研究人员还解决了联合路由和调度问题，提出了基于整数线性规划[13]和基于列表调度的启发式的解决方案。然而，之前提出的在 TSN 中路由或 GCL 合成完全确定的 TT 传输的所有方法中都单独考虑 TT 流量，完全忽略了对 AVB 流量的影响。到目前为止，在[19][20]的工作是目前解决混合关键性应用在 TSN 的 GCL 合成。该文[19]中的实验，忽略为 TT 优化的路由和 GCL 中的 AVB 流量结果，以牺牲 AVB 流量为代价，这会导致 AVB 的 WCD 非常大。在这篇论文中，提出了一种考虑 AVB 流量的 TSN 中 TT 流量的联合路由和调度。这是处理 AVB 流量与 TT 路由和调度之间相互依赖关系的第一项工作。考虑 TT 路由和调度对 AVB 流量结果的影响，优化的解决方案保证了 TT 流量的可调度性，同时降低了 AVB 流量的 WCD，满足了其端到端时延要求。为了解决这个问题，开发了一个解决方案，将 k-最短路径（KSP）[21]的启发式路由与 GRASP[19]的元启发式调度相结合。

## 四、系统模型

TSN 的系统模型分为体系结构模型和程序应用模型。体系结构模型也即物理 TSN 网络的抽象表示，包括终端系统、交换机和物理链路，并且消息在终端系统之间作为帧（frames）进行传输，如图一。



图一：TSN 的体系结构模型

程序应用模型：实时应用程序被建模为一组消息， $(v_s, v_t, r, T, D, P)$ ，这组消息可以作为 TT 或 AVB 流传输。每一个流都可以用这样的元组属性来形容。其中  $v_s$  表示发送端系统， $v_t$  表示接收端系统， $r$  表示  $v_s$  到  $v_t$  的路由， $T$  是周期， $D$  是 deadline，也就是最大延迟， $P$  是负载，如图二。

flow	type	$v_s$	$v_t$	$r$	$T$	$D$	$P$
$f_1 \cdots f_4$	TT	$ES_1$	$ES_3$	$r_1$	$150 \mu s$	$150 \mu s$	$750 B$
$f_5 \cdots f_8$	AVB	$ES_2$	$ES_3$	$r_2$	$150 \mu s$	$150 \mu s$	$1500 B$

图二：TSN 的程序应用模型

直到现在，大部分研究者的工作很多都只考虑了在 TSN 中 TT 流的调度问题，而忽略了 AVB 流。这使得 AVB 流的传输时间超过了它的最坏端到端延迟（WCD），从而无法调度。而 Paul Pop 团队发表的相关 TSN 调度文章，根据该系统模型，提出了贪心随机自适应搜索过程（GRASP）算法，该算法考虑了 AVB 流，使得 AVB 流和 TT 流都可以调度，算是实时性通信中的一项重大突破。

## 五、TSN 协议

### 5.1 TT 流

IEEE 802.1Qbv 定义了一个时间感知整形（TAS）[22]。所有的出口端口都有一个 TAS 控制，通过建立完全独立的时间窗口来实现 TT 流量的低延迟。TAS 根据 GCL 控制每个队列的门，使用 GCLs 来调度从开始 ES 到目标 ES 的路由中的帧的转发，使 TT 流具有极低的延迟和抖动。

TSN 使用两种集成模式：（1）非抢占式[23]，即在 TT 帧的每个时间窗口之前使用一个“保护带”：在保护带期间，与 AVB 和 BE 流量相关联的门被提前关闭，以确保当 TT 队列打开进行传输时链路处于空闲状态；（2）抢占式[23]，AVB 帧将被 TT 帧中断，并且一旦 TT 帧的传输完成，其传输将从停止点恢复。

所以非抢占式的方式会浪费 AVB 流的有效带宽，在一般情况下如果硬件条件允许，抢占式方式会更好。

## 5.2 AVB 流

AVB 队列的可传输是由基于信用的整形器（CBS[24]）决定的。CBS 的目的是防止低优先级流的突发和中断。允许排列的 AVB 帧传输的三个条件（1）队列门是打开的（2）CBS 允许（3）没有其他更高优先级 AVB 帧传输。例如有两个队列被赋予较高的优先级，这两个队列依据 Credit 进行数据的交替传输，例如你是 A 队列，如果没有在传输你的信用会以空闲的速率增加，当你的队列正在传输数据时，你的信用会以发送的速率下降，当你的队列传输完成时，你的信用就清 0，你的信用低于 B 队列，你等待时间越长你的信用越高，因此，不会因为别人优先级高就轮不到你了。

GCL 方法中一次只打开一种流量类型的门，TT 流打开，则 AVB 流关闭；TT 流关闭，则 AVB 流打开，AVB 流中 A 类和 B 类的门开关状态相同（其中 AVB 流 A 类流量比 AVB 流 B 类流量的优先级高，AVB 的流量优先级又低于 TT 流）。

# 六、调度方法

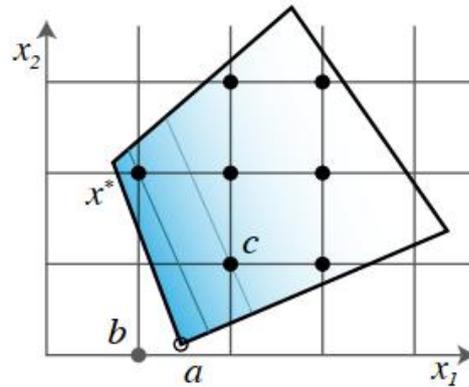
综合之前的研究，主要有以下三个解决 TT 调度问题的方法。这三种代表了可伸缩性和解决方案质量之间的不同折衷。第一种是 ILP 方法，具有最坏情况下的指数运行时间，但具有公认的最优性。第二种是启发式方法，它具有多项式运行时间，但不能保证解决方案的质量。第三种是元启发式方法，填补了其他两种方法之间的空白。

## 6.1 ILP 方法

整数线性规划（ILP）是一种数学优化程序，由整数变量，线性目标函数和线性不等式组成。线性不等式组成一个多面体，为问题实例定义了完整的求解空间  $X$ 。可行的解决方案是将值分配给整数变量，从而满足所有不等式。对于最小化问题，最优解  $x^*$  是具有最小目标值的可行解。

图三阐述了定义两个整数变量  $x_1$  和  $x_2$  的解空间的有界多面体（多面体）的原理。仅多面体内部的标记整数解是可行的。渐进显示多面体内不同位置的目标值。颜色越深，目标值越小，因此，相应的最小化问题是在最暗的位置确定整数

解  $x^*$ 。这里  $x^* = (1,2)$ 。



图三：ILP 最小值问题的二维多面体

从直观上看，在多面体内求最小的实值解是一种合理的解决策略，它可以在多项式时间内求出最接近整数的解。然而，如图三所示，这是一个有缺陷的策略。点  $a$  表示最小实值解，即所谓线性松弛的最优解。将  $a$  四舍五入到最接近的整数解，得到  $b = (1,0)$ ；因为不在多面体内，所以不可行。四舍五入到一个解决方案内的多面体，如  $c = (2,1)$ ；如图所示，并不保证最优性。

许多 NP[25] 完全问题可以表述为 ILP 问题并作为 ILP 问题来解决，因此 ILP 本身就是 NP-hard 问题。商用的最先进的解决方案，如 CPLEX[26] 和 Gurobi[27]，旨在解决具有数千个变量和约束的复杂 ILP 问题。求解器利用许多不同的技术(如分支和边界)来限制搜索空间的探索，从而提高性能。但是，这并没有改变这样一个事实，即在最坏的情况下，解决 ILP 问题需要对所有可行解进行完整的枚举。对于 NP 完全问题，包括 TT 调度问题，可行解的总数随着输入的大小呈指数增长。

TT 调度问题中最终目的是使 TT 流的多余队列数  $K$  和额外端到端延迟时间  $\Lambda$  最小化。ILP 优化单个目标值，因此可以通过分别引入  $K$  和  $\Lambda$  的权重  $c_1$  和  $c_2$ ，将这两个度量组合为一个目标函数  $z = c_1 \cdot K + c_2 \cdot \Lambda$ 。例如，可以将  $c_1$  设置得足够大，并且  $c_2 = 1$ ，那么该模型配置会优先队列最小化而不是端到端延迟。

## 6.2 启发式方法

启发式方法是一个贪心调度算法。它从一个空调度开始，并每次一个流地迭代地扩展该调度。对每个流进行调度，以最小化队列数量和端到端延迟。当所有流都已调度后，或者当前迭代未能在其期限内调度流时，该算法终止。这种方法

的优点是，每次迭代都探索非常有限的搜索空间，并且迭代次数有限。因此，它可以很好地扩展到具有许多流的大型实例。缺点是每次迭代都不会考虑仍在计划中的流，因此可能会做出错误的选择，导致解决方案不理想，或者可能无法解决某些情况。

启发式策略的主要优点是它的多项式运行时间，这意味着它可以在 ILP 策略难以处理的情况下生成可行的调度。但是，它不能保证找到解决方案或解决方案的质量。它根据特定问题的观察进行多项式时间的、最佳努力的尝试。在宽敞的调度中，在最后期限不是很紧，每个链路的帧数是合理的，它可以预期其性能和扩展性。在非常拥挤的调度中，即使存在解决方案，它也可能不会成功，而且质量可能很差。

### 6.3 元启发式方法

Glover 和 Laguna 定义的元启发式一次定义为指导和修改其他启发式的主策略，以产生超出在寻求局部最优时通常产生的解。

元启发式算法包括禁忌搜索算法、模拟退火算法[28]、遗传算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法、人工鱼群算法、人工蜂群算法、人工神经网络算法[29]等。

这种主策略非常适合 TT 调度问题。用于调度单个流的多项式时间启发式算法有两种变体，一种是尽快(as soon as possible, ASAP[30])，另一种是尽可能晚地(as late as possible, ALAP[30])，每一种都可以以不同的方式后处理。同样的启发法有许多修改，例如，调度每个流的不同方法。为每个流寻找最佳方法需要对所有将流与启发式变体组合在一起的不同方法进行全面枚举。组合的数量随着流的数量成指数增长，这使得多个流的问题变得棘手。因此设计一个元启发式算法，在不同的组合中进行引导搜索，在合理的时间内找到接近最优的解。

大多数元启发式算法的基本原则是邻域搜索，检查与当前解决方案相似的解决方案。如果在附近找到了一个改进的解决方案，那么在下一个迭代中，搜索将从这里继续下去，希望在这个区域找到更多高质量的解决方案。这就是所谓的强化。强化的问题在于，搜索往往陷入局部最优，而这可能与全局最优相差甚远。因此，大多数元启发式算法都有逃避局部最优的技术，以便在全局范围内探索搜索空间。这就是所谓的多元化。元启发式的成功依赖于强化和多元化之间的良好平衡，以确保搜索收敛到全局最优[31]。

随机化在强化和多样化过程中都扮演着重要的角色，即使搜索在先前的地方结束，也要确保不同的路径被利用。当满足指定的停止条件时，元启发式终止。它可能基于执行时间、迭代次数，或者在一段重要的时间内没有改进。

## 七、结束语

通过阅读多篇有关时间敏感网络的调度问题，可以体会到随着工业互联网的发展速度越来越快，传统意义上的以太网已经无法满足发展需求，特别是带宽和实时性方面。随着先进的驾驶员辅助系统，自动驾驶或工业自动化，他们对带宽和实时性要求越来越高，这时候时间敏感网络就要派上重要作用，它保证了带宽和实时性问题，日后必将大范围应用在其他领域，尤其是车联网领域。

而一旦涉及网络，必将存在调度问题。时间敏感网络中的调度问题也深受很多研究者的关注。但是从目前的研究来看，很多研究者都忽略了 AVB 流，只考虑了 TT 流，使得 AVB 流无法进行调度。丹麦科技大学的 Paul Pop 等人走在前列，提出了贪心随机自适应搜索过程（GRASP）算法，该算法考虑了 AVB 流，使得 AVB 流和 TT 流都可以调度。

未来的研究要着眼于考虑 AVB 流，通过改进 Paul Pop[32]提出的 GRASP 算法，使得 AVB 流和 TT 流都可以进行调度，同时 AVB 流的最坏端到端延迟变得更小，并将其实际应用到车载平台上。

## 参考文献

- [1] Nayak N G, Dürr F, Rothermel K. Routing algorithms for IEEE802. 1Qbv networks[J]. ACM SIGBED Review, 2018, 15(3): 13-18.
- [2] Laursen S M, Pop P, Steiner W. Routing optimization of AVB streams in TSN networks[J]. ACM Sigbed Review, 2016, 13(4): 43-48.
- [3] Gavriliuț 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). IEEE, 2018: 1-4.
- [4] FlexRay Consortium. FlexRay communications system protocol specification version 3.0. 1, 2010[J].
- [5] AEE Committee. ARINC specification 664P7: Aircraft Data Network, part 7: Avionics Full-Duplex Switched Ethernet (AFDX) network[J]. Aeronautical Radio Inc, 2005.
- [6] Jansen D, Buttner H. Real-time Ethernet: the EtherCAT solution[J]. Computing and Control Engineering, 2004, 15(1): 16-21.
- [7] Bisson K. Sae as6802 deterministic ethernet network solution[J]. Avionics Interface Technologies, 2011.
- [8] Decotignie J D. Ethernet-based real-time and industrial communications[J].

Proceedings of the IEEE, 2005, 93(6): 1102-1117.

[9] Network A D. Part 7, Avionics Full-Duplex Switched Ethernet Network[J]. AERONAUTICAL RADIO, INC, 2009, 2551: 21401-7435.

[10] Bisson K. Sae as6802 deterministic ethernet network solution[J]. Avionics Interface Technologies, 2011.

[11] 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. ACM, 2016: 203-212.

[12] Craciunas S S, Oliver R S, Chmelík M, et al. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1 Qbv time sensitive networks[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. ACM, 2016: 183-192.

[13] Schweissguth E, Danielis P, Timmermann D, et al. ILP-based joint routing and scheduling for time-triggered networks[C]//Proceedings of the 25th International Conference on Real-Time Networks and Systems. ACM, 2017: 8-17.

[14] Tămaş-Selicean D, Pop P, Steiner W. Design optimization of TTEthernet-based distributed real-time systems[J]. Real-Time Systems, 2015, 51(1): 1-35.

[15] Craciunas S S, Oliver R S, Chmelík M, et al. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1 Qbv time sensitive networks[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. ACM, 2016: 183-192.

[16] Oliver R S, Craciunas S S, Steiner W. IEEE 802.1 Qbv gate control list synthesis using array theory encoding[C]//2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). IEEE, 2018: 13-24.

[17] 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. ACM, 2016: 203-212.

[18] Zhao L, Pop P, Zheng Z, et al. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus[C]//2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). IEEE, 2018: 25-36.

[19] Gavriluț 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). IEEE, 2018: 1-4.

[20] Gavriluț V, Zhao L, Raagaard M L, et al. AVB-aware routing and scheduling of time-triggered traffic for TSN[J]. Ieee Access, 2018, 6: 75229-75243.

- [21]Yen J Y. Finding the k shortest loopless paths in a network[J]. *management Science*, 1971, 17(11): 712-716.
- [22]Weiss M, Chandhoke S, Melvin H. Time signals converging within cyber-physical systems[C]//2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum. IEEE, 2015: 684-689.
- [23]Baruah S K. The non-preemptive scheduling of periodic tasks upon multiprocessors[J]. *Real-Time Systems*, 2006, 32(1-2): 9-20.
- [24]Mohammadpour E, Stai E, Mohiuddin M, et al. Latency and Backlog Bounds in Time-Sensitive Networking with Credit Based Shapers and Asynchronous Traffic Shaping[C]//2018 30th International Teletraffic Congress (ITC 30). IEEE, 2018, 2: 1-6.
- [25]Bonfante G, Cichon A, Marion J Y, et al. Algorithms with polynomial interpretation termination proof[J]. *Journal of Functional Programming*, 2001, 11(1): 33-53.
- [26]Optimizer I B M I C.url<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer>[J]. 2010.
- [27]“Gurobi Optimizer,” <http://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer>, [Online; accessed 17-December-2016].
- [28]Selim S Z, Alsultan K. A simulated annealing algorithm for the clustering problem[J]. *Pattern recognition*, 1991, 24(10): 1003-1008.
- [29]Sarle W S. *Neural networks and statistical models*[J]. 1994.
- [30]Chetto H, Chetto M. Some results of the earliest deadline scheduling algorithm[J]. *IEEE Transactions on software engineering*, 1989 (10): 1261-1269.
- [31]Blum C, Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison[J]. *ACM computing surveys (CSUR)*, 2003, 35(3): 268-308.
- [32]Raagaard M L, Pop P. ‘Optimization algorithms for the scheduling of IEEE 802.1 time-sensitive networking (TSN)’[J]. Tech. Univ. Denmark, Lyngby, Denmark, Tech. Rep, 2017.

程文