DOI: 10.16725/j.1673-808X.2023115
引用本文: 郭雅楠, 何倩, 潘琪. 时间敏感网络及其工业互联网应用[J]. 桂林电子科技大学学报, 2026, 46(3): 252-262.
Guo Yanan, He Qian, Pan Qi. Time-sensitive networks and their industrial internet applications[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2026, 46(3): 252-262.

时间敏感网络及其工业互联网应用

郭雅楠[1,2]，何　倩[1,2]，潘　琪[1,2]

（1. 桂林电子科技大学 卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心, 广西 桂林　541004;
2. 桂林电子科技大学 广西密码学与信息安全重点实验室, 广西 桂林　541004）

摘　要： 工业互联网对实时通信的要求越来越高, 通过对以太网协议的补充, 时间敏感网络(TSN)实现了确定性通信, 可以满足工业互联网对通信的严苛要求。首先, 介绍 TSN 相关技术, 阐述一些关键技术的原理; 其次, 介绍工业互联网和 TSN 的融合框架, 并分析 TSN 中的流量调度问题以及传统工业终端设备接入 TSN 网络面临的系统时延问题; 然后, 从实时通信、网络拓扑结构优化、可靠性 3 个方面分析了 TSN 的具体应用案例; 接着, 探讨 TSN 在工业互联网中应用的优势和挑战; 最后, 总结了 TSN 技术在工业互联网中的应用前景, 并指出了未来的研究方向。

关键词： 时间敏感网络; 工业互联网; 实时通信; 系统时延; 以太网
中图分类号： TP393.1　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1673-808X(2026)03-0252-11

Time-sensitive networks and their industrial internet applications

GUO Yanan[1,2], HE Qian[1,2], PAN Qi[1,2]

（1. National and Local Joint Engineering Research Center of Satellite Navigation Positioning and Location Service, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Cryptography and Information Security, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China）

Abstract: With the rapid development of the industrial Internet, the demand for real-time communication has increased significantly. Time-Sensitive Networking (TSN) extends standard Ethernet to provide deterministic communication, meeting the stringent requirements of industrial applications. This paper reviews key TSN technologies and their underlying principles, and discusses the integration framework of TSN in industrial Internet systems. It further discusses critical challenges, including traffic scheduling, system latency and the integration of legacy industrial equipment into TSN-enabled networks. Typical applications of TSN in the industrial Internet are reviewed including real-time communication, network reliability, and industrial automation. Finally, future research directions and open challenges of TSN in the industrial Internet are discussed.

Key words: time-sensitive networking; industrial internet; real-time communication; system latency; Ethernet

工业互联网将生产物料、工具、设备、产品和人员等通过各种网络通信协议和技术连接起来[1], 实现人、机、物全要素的互联互通, 以便进行数据采集、分析和应用, 进而达到降本增效的目标, 提高产品质量和工业安全等。工业互联网已经成为 21 世纪的新基建, 各行各业转型升级都需要基于工业互联网。早在 2015 年 3 月 5 日, 国务院政府工作报告中就提出了“互联网+”行动计划, 旨在推动移动互联网、云

收稿日期: 2023-08-25
基金项目: 国家自然科学基金(62162018, 61967005); 广西自然科学基金(2019GXNSFGA245004); 中国电子科技集团航天信息应用技术重点实验室基金(HTWB210711441); 广西研究生教育创新计划(YCSW2022297)
通信作者: 何倩(1979—), 男, 教授, 博士, 研究方向为云服务、网络安全。E-mail: heqian@guet.edu.cn

计算、大数据、物联网等与现代制造业结合。《中国制造 2025》将大力推动信息化与工业化深度融合作为未来 10 年智能制造主攻方向[2]。《“十四五”国家信息化规划》提出深化工业互联网创新发展, 打造跨行业跨领域综合工业互联网平台。工业 4.0 对工业互联网的实时性和确定性有了更高要求, 通信不仅只是局限在控制器和传感器、执行器之间这种相对简单的场景下, 而是广泛存在于所有节点之间[3]。

目前已有一些实时通信协议被提出, 并广泛应用于有实时通信需求的领域, 例如用于车载网络实时通信的 FlexRay, 用于航电设备的 ARINC 664 P7, 以及工业自动化领域的 EtherCAT、Powerlink、PROFINET 等。尽管各种实时通信技术在物理层上是统一的, 但保障实时通信的技术路线各不相同。每种实时通信技术都形成了其独特的配置体系, 导致相互之间的互联性和互操作性较差, 限制了实时通信技术的扩展和普适性[4]。时间敏感网络(time sensitive network, 简称 TSN)的出现, 为工业互联网中实时通信技术的发展带来了新的机遇和挑战。

1　时间敏感网络及其相关标准

TSN[5] 是基于 IEEE 802.1Q 以太网[6] 的一个协议族, 包含众多协议, 旨在解决工业控制网络中实时性、可靠性和带宽等问题。AVB(audio video bridging)工作组最早在以太网中实现了时间同步、低时延和可靠数据传输, 主要面向专业音视频领域[7]。2012 年 AVB 工作组更名为 TSN 工作组, 对 AVB 已有的协议进行了补充, 使得应用范围更加广泛, 包括 4 个应用方向: 专业音视频(Pro AV)、汽车控制领域、商用电子领域和需要实时反馈的工业领域[8]。TSN 对于以太网的补充协议主要包括时钟同步(IEEE 802.1 AS[9]、IEEE 802.1 AS-Rev), 增强流量调度(IEEE 802.1 Qbv[10]), 帧抢占(IEEE 802.1 Qbu、IEEE 802.3br), 路径控制(IEEE 802.1 Qca), 资源预留(IEEE 802.1 Qcc)和冗余传输(IEEE 802.1 CB[11])等, 这些机制共同保证了以太网通信的实时性和确定性。表 1 为 TSN 协议族的相关标准及其主要功能。

1.1　时间同步

实时通信要求网络中的所有设备必须有一个基准时间作为参考, 以此来协商网络中传输行为发生的时间点, 从而达到确定性传输的目的。IEEE 802.1AS[9] 是 TSN 协议族中与时间同步相关的重要协议。该协议完全基于数据链路层, 不受限于特定的网络技术。在不超过 7 跳的网络环境中, IEEE 802.1AS 能够确保时间同步误差在 1 μs 内, 达到了纳秒级精度。IEEE 802.1AS 协议的主要 3 部分分别是路径延迟测量算法、最佳源时钟选择算法以及同步时间调整算法, 分别用于测量相邻 2 个节点的延迟, 确定时钟同步域内最佳时钟源以及修正时钟偏差[12]。IEEE 802.1 AS、IEEE 802.1 AS-Rev 的时间同步依赖于网卡的硬件时钟支持, 时间同步精度和硬件时钟频率相关, 时钟频率越高, 相应的时间同步误差越小[13]。对于不具备硬件时钟的网卡, 只能利用软件的方式进行时间同步。

表 1　TSN 协议相关标准

标准	主要功能
IEEE 802.1Qav	增强转发和队列
IEEE 802.1AS	时钟同步
IEEE 802.1AS-Rev	时间敏感应用的定时和同步
IEEE 802.1Qbu	帧抢占
IEEE 802.1Qbv	预定流量的增强
IEEE 802.1Qca	路径控制和预留
IEEE 802.1Qcc	流预留协议增强
IEEE 802.1CB	帧复制和消除
IEEE 802.1Qci	按流进行过滤和控制
IEEE 802.1Qch	循环排队和转发

1.2　增强流量调度

IEEE 802.1Qbv 协议[10] 主要定义了时间感知整形器(time-aware shape, 简称 TAS)算法, 以提高时间触发(time-triggered, 简称 TT)流传输的确定性。每个网口包含 8 个缓存队列, 缓存队列存放的流量优先级从 0 到 7 依次递增。通过控制队列传输状态可以保证高优先级 TT 流的确定性传输。如图 1 中设置门控状态部分所示, 每个网口都有一个门控列表(gate control list, 简称 GCL), 每个 GCL 表项包含 8 个状态, 用于设置队列传输状态以及状态维持时间, C 和 O 分别表示关和开。

支持增强流量调度标准的交换机对数据帧的处理过程: 交换机输入端口的数据帧通过交换结构的过滤后, 基于提前配置好的路由表, 进入期望的输出网口缓存队列中, 其中 PCP[14] 标志位或 IEEE 802.1Qci 中定义的流标识决定数据帧进入哪个队列。在每个输出网口, 缓存队列按照先进先出原则缓存数据帧, 对应队列的门控开启后, 缓存的数据帧就可以进行传输。TAS 算法可以根据事先定义的 GCL 不停地改变每个队列的传输门控状态, 在确定时间点开启相应队列的传输门控并发送数据帧。为了管理 GCL, IEEE

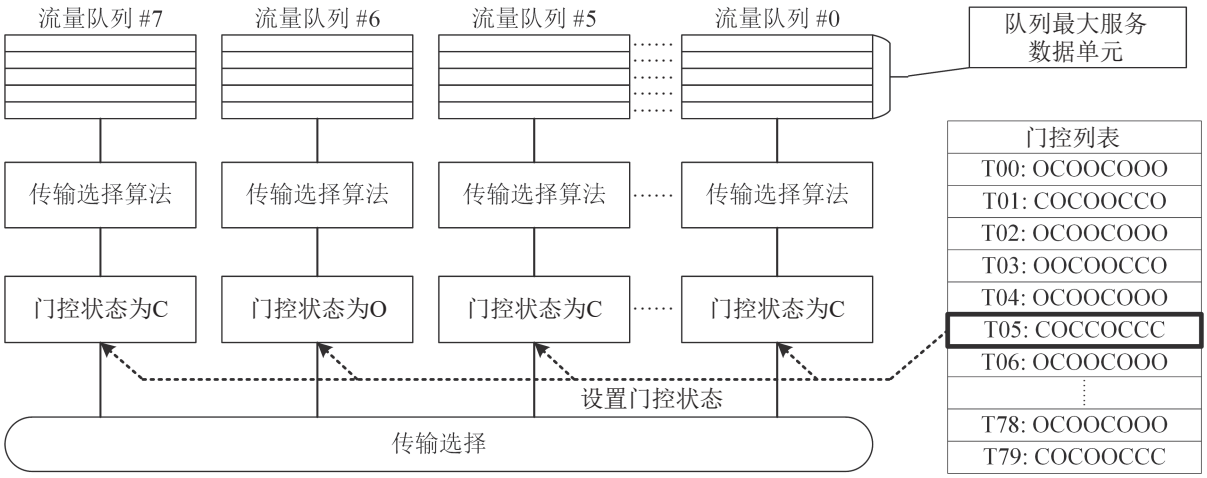

图 1　TAS 门控列表执行

802.1 Qbv 中定义了 3 个状态机配合 GCL 使用，分别是循环计时器状态机、列表执行状态机、列表配置状态机。

循环计时器状态机用于初始化 GCL 的执行，维护网口定义的门控周期时间；列表执行状态机用于按序执行门控操作，确定每次门控操作之间合适的延迟；列表配置状态机用于更新当前执行的 GCL，更新过程中中断其他 2 个状态机的操作，更新操作完成后立即重启。

增强流量调度在保障高优先级流量确定性传输的同时，也为交换机缓存带来了额外压力。IEEE 802.1Qbv 中定义了 AdminControlListLength，用来指示 GCL 的最大长度，数据类型为 32 位的无符号整数，但在实际应用中，可用于保存 GCL 的缓存空间，通常只有几兆字节。在组网时，可根据网络拓扑规模和通信容量需求混合使用多种规格的交换机。此外，调度算法的设计也需要考虑网络负载的均衡，避免出现链路空载或满负荷的情况。

1.3　冗余传输

IEEE 802.1CB[11] 协议中定义了帧复制与消除（frame replication and elimination for reliability，简称 FRER）机制，旨在减轻工业应用中由于传输错误导致的数据丢失，以提高网络传输的可靠性。在工业环境中，设备之间的通信至关重要，然而通信可能会由于电磁干扰、温度和振动等各种因素的作用而出现传输错误。为解决这些问题，FRER 机制通过引入冗余来提高通信的可靠性。

对可靠性要求极高的业务流，可靠传输可通过 FRER 机制得到保障。首先，源节点根据配置的策略识别需要复制的数据帧；然后，源节点复制这些数据帧并在多条独立的链路上发送，中间的路由节点接收这些数据帧并转发到下一跳；最后，目的节点接收这些数据帧并抛弃无用的副本。源节点通常可以基于以下方式识别有可靠性需求的 TT 流：1) 优先级，例如复制所有高优先级包含控制信息的数据帧；2) 目的节点，例如复制所有发送到某个远程控制节点的数据帧；3) 内容，例如包含了敏感数据信息的数据帧。

复制的数据帧沿独立于原始帧所采用的主要路径的冗余路径发送，可靠性极大提高。若原始帧未能被成功接收，则可以使用复制帧在接收端重构原始消息[15]。当原始帧成功被目的节点接收后，通过发送方与接收方之间的协调机制消除复制的数据帧，以避免不必要的网络流量。该协调机制确保只有在成功接收到原始帧后才会消除复制帧。

由于发送多个关键数据帧的副本带来了额外的网络带宽消耗，可能导致低优先级流量的端到端时延增加以及潜在的网络拥塞。一种解决方法是在传输过程中通过主动丢弃一些副本来降低某些关键节点的负载[16]，具体做法是若复制帧会导致排队交换机内部的排队行为，则将其丢弃或者将其移动到队列末尾。这在一定程度上避免了潜在的网络拥塞。

2　工业互联网与 TSN 融合

2.1　工业互联网及其流量

工业互联网联盟 2019 年发布了一份白皮书[17]，基于 IEEE 802.1Q 标准详细分析了工业自动化和控制系统中流量的特性，这些特性覆盖了 80% 的应用场景，如表 2 所示。其中具有截止时间保证（deadline，简称 DDL）的实时同步流量和具有时延保证的循环流量，周期范围从 100 μs 到 20 ms，最大相差 200 倍，帧长固定且不会超过以太网最大传输单元（maximum transmission unit，简称 MTU）。上述两类流量一般统称为

TT 流量(调度流量)。

在层级结构的工业以太网中, 通信可划分为垂直通信和水平通信[18]。水平通信主要为实时通信, 产生实时流量, 包括实时同步类流量和循环流量, 如图 2 中 PLC 控制器内的传感器与执行器之间的通信以及 PLC 控制器彼此之间的通信。垂直通信主要是控制器、工厂管理服务器和云服务器之间的通信, 如图 2 中从 PLC 控制器与网络管理员的通信以及监视器与管理员的通信。除了表 2 中的实时同步流量和循环流量, 其他类型的流量均可认为是垂直通信类型的流量。

表 2　流量类型[17-18]

流量类型	周期性	典型周期	数据传输保证	抖动容限	数据分组丢失容限	典型数据大小/Byte	优先级
实时同步	是	0.1~2 ms	截止时间	0	0	固定 30~100	6
循环	是	2~20 ms	时延	≤时延	1~4 帧	固定 50~1 000	5
控制事件	否	—	时延	≤时延	可容忍	可变 100~200	4
报警和操作命令事件	否	—	时延	≤时延	可容忍	可变 100~1 500	3
网络控制	是	0.05~1 s	带宽	可容忍	可容忍	可变 50~500	7
配置诊断	否	—	带宽	—	可容忍	可变 500~1 500	2
视频	是	帧率	无	—	可容忍	可变 1 000~1 500	1
音频/语音	是	采样率	时延	—	可容忍	可变 1 000~1 500	1
尽力而为	否	—	时延	—	可容忍	可变 30~1 500	0

2.2　融合 TSN 的工业互联网

现有的实时通信技术存在设备复杂、协议众多、技术保密等问题, 不同厂家设备方案兼容性差, 这使得广泛部署与升级传输设备变得困难[12], TSN 相关标准的出现使得严格遵守标准的不同厂商的设备可以相互之间无需协议转换就能直接通信, 降低了设备采购和网络升级的成本。TSN 是工业互联实现低时延、高可靠和确定性传输的重要技术之一, 是未来普及工业互联网的重要基础[1]。TSN 在工业互联网中网络通信的总体架构如图 2 所示。在运营技术(operating technology, 简称 OT)层面, 利用 TSN 交换机替换普通交换机, 将 OT 网络转变成 TSN 网络, 并利用边缘网关和信息技术(information technology, 简称 IT)网络实现互联。OT 网络中主要进行水平通信, 传输工业生产相关的实时同步流量、循环流量等。

在工业互联网中, 传统网络技术难以满足实时性和可靠性的要求, 而随着 TSN 技术的出现, 这些问题可以得到解决。TSN 的时间同步机制和高精度控制可以提高控制系统的响应时间和精度, 从而使控制系

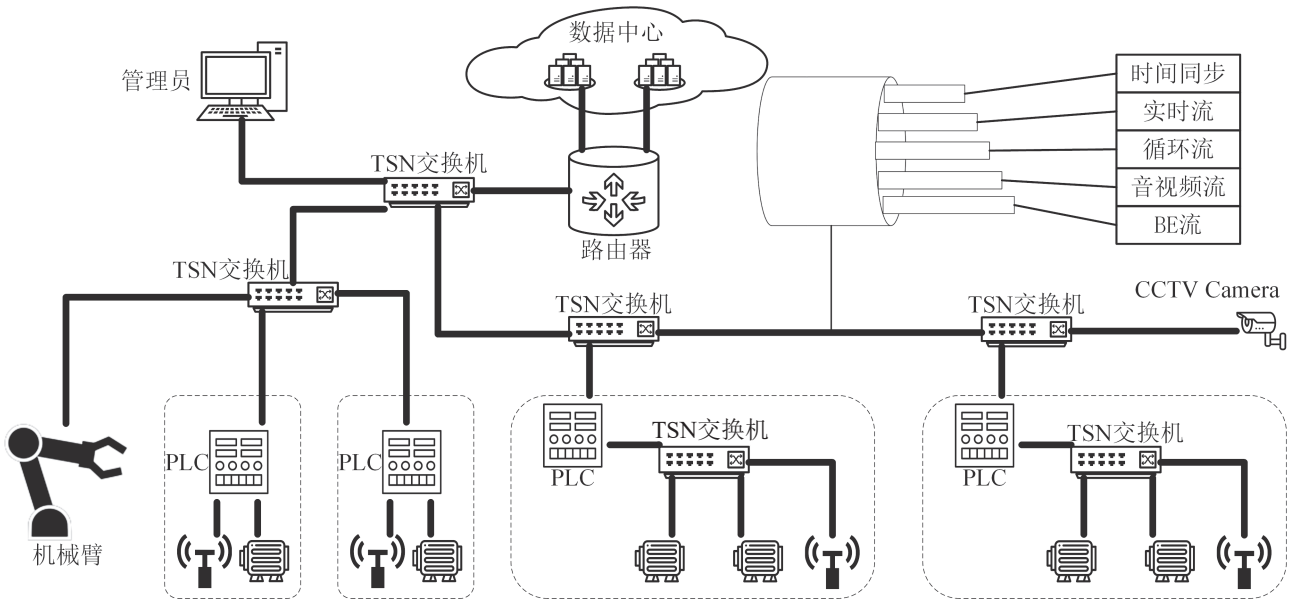

图 2　TSN 网络通信总体架构

统更加稳定可靠。在网络拓扑结构优化方面，TSN 可以优化网络带宽的使用，减少通信延迟和冲突，并且支持多种拓扑结构，如星型、环形和总线型。基于 TSN 技术的工业互联网的体系结构包括以下六部分。

1) 控制器：负责控制系统的逻辑和运算。

2) 传感器和执行器：分别用于采集现场信息和执行控制命令。

3) 网络：用于传输控制信息和现场数据。

4) 时钟同步单元：用于同步系统中所有设备的时钟。

5) TSN 交换机：用于保证网络实时性和可靠性，支持流量调度和优先级控制。

6) 系统管理单元：用于监控和管理整个系统，实现对系统的远程配置和故障诊断。

在基于 TSN 的工业互联网中，各种设备通过 TSN 交换机连接到网络中，TSN 交换机支持不同等级的服务质量，对于不同类型的数据流进行流量调度和优先级控制，确保关键数据的实时传输和可靠性。时钟同步单元用于保证系统中所有设备的时钟同步，避免因时钟不同步而引起数据传输延迟和数据一致性问题。系统管理单元负责对整个系统进行监控和管理，包括对设备状态、性能和故障进行实时监测和诊断，以及对系统的远程配置和升级等。

2.3 TSN 流量调度

传统以太网中的网络传输行为完全依赖于简单的转发原则，缺乏对流量的调度和管理。TSN 应用在工业互联网中时，面临的一个重要问题就是流量调度。通过接入 TSN 交换机，可以实现对网络流量传输行为的精确管控。IEEE 802.1Q 定义了一些 TSN 交换机的传输选择算法(图 1 中的“传输选择算法”部分)，如严格优先级(strict priority，简称 SP)算法、基于信用的整形器(credit-based shaper，简称 CBS)算法、时间感知整形器(time-aware shaper，简称 TAS)算法等。TAS 算法定义了类似于时分复用的机制，通过分析 TT 流的特征及路由信息，为网络中 TSN 交换机的每个网口生成特定的 GCL，所有 GCL 共同确保了 TSN 中各个节点的实时通信。

TSN 中的流量调度问题是 NPC 问题[19-22]，合理的 GCL 可以使 TT 流的数据帧在传输过程中无需在各个 TSN 交换机网口的缓存队列中排队，相当于数据帧从源节点到目的节点的传输过程中独占整条路由线路，且路由线路上所有存放该数据帧的队列都在该数据帧通过时处于开启状态，极大地降低了 TT 流的时延和抖动。TAS 算法的关键在于如何生成合理的 GCL，GCL 长度和数据帧的缓存时间都应该尽可能短，更短的 GCL 占用的内存资源更少，更短的缓存时间降低了网口缓存队列溢出而导致的丢包概率。

目前 TSN 调度问题的研究主要集中在构建通用 TT 流调度机制。通用调度机制利用各种约束条件构造求解系统，通过优化诸如端到端时延、总缓存时间、总传输时长等目标[23]来提高实时性，降低时延和抖动。由于真实网络中存在乱序、丢包、延迟等不可预知的行为，为保证 TT 流传输的确定性和可靠性，需要通过一些约束条件规范和控制 TT 流的传输。常用约束包括帧约束、链路约束、流传输约束、端到端时延约束、帧隔离约束。

1)帧约束：要求数据帧的发送时间必须为非负整数，且必须在 TT 流的周期内完成传输，确定了发送时间的可选取值范围。

2)链路约束：无冲突约束的核心，可概括为通过同一条链路的任意 2 个数据帧发送时间段不能重叠，重叠即视为存在冲突。

3)流传输约束：规定了数据帧在路由线路上某链路的转发时间必须大于前一链路上的传输完成时间、传播时延和当前链路源节点的系统处理时延之和。

4)端到端时延约束：端到端时延定义为数据帧最后一个分片到达目的节点的时间与第一个分片在源节点的发送时间之间的差值(对于只有一个分片的数据帧，就是其仅有的一个分片接收与发送的时间差)，端到端时延必须在一个给定范围内。

5)帧隔离约束：对于任意 2 条共享某链路进行传输的 TT 流，若 2 条 TT 流至少有一条消息包含多个分片，则这 2 条数据流的数据帧不能同时进入交换机缓存队列。这是因为会存在潜在的队列交叉行为，从而引起传输的不确定性。

基于一些经典的调度算法，目前主要的 GCL 求解方法有整数线性规划(integer linear programming，简称 ILP)、启发式算法、可满足性模理论(satisfiability modulo theories，简称 SMT)/优化模理论(optimization modulo theories，简称 OMT)、禁忌搜索(tabu search，简称 TS)和贪心随机自适应搜索(greedy randomized adaptive search procedure，简称 GRASP)[23]。ILP 方法通过遍历整个解空间获得最优解，但是求解时间与 TT 流的规模呈指数关系，适用于小规模网络；启发式算法具有多项式求解时间，适用于 TT 流量负载较低的大规模网络；SMT/OMT、TS 以及 GRASP 方法求解时间和速度介于 ILP 和启发式算法之间，无需搜索整个解空间，适用于大规模网络。

此外，还需要考虑不同场景下的流量特性，例如

在车载网络中一些辅助驾驶系统可能需要传输大量视频流量, 用于实时分析道路情况, 并且需要为这类流量赋予较高的优先级, 可利用 TAS 作为传输选择算法, 以保障数据的确定性传输。这类实时流量数据帧的大小可能超过 MTU, 每个周期内需要将数据帧拆分为多个分片顺序发送。在多条消息长度超过 MTU 的高优先级 TT 流共享同一条传输链路的情况下, 需要保证一个队列中只能缓存一条流的多个数据帧, 并且这些数据帧的先后传输顺序也应该得到保证, 可通过帧隔离约束和流传输约束来实现。而在工业自动化与控制系统中, 通常高优先级的 TT 流是一些实时控制类的流量, 实际的控制信号通常只有几十字节[24], 有些甚至只是一些指示开关状态的简单信号变量[25], 消息长度远小于 MTU, 甚至还需要填充到最小发送单元才能满足以太网对数据帧的发送要求, 这种情况下多条共享同一链路传输的数据帧只需满足链路约束即可。因此, 实际部署 TSN 网络时, 需要根据不同场景下的流量特征权衡约束条件的组合, 从而提高求解效率, 保障求解质量。

2.4　TSN 终端接入时延分析

TSN 在工业互联网应用中的一个关键问题是如何保障控制终端设备的接入及其时延。工业互联网中连接着大量终端控制设备, 其中一些传统的终端控制设备无时间同步能力[26]。目前已有的局域网时间同步协议有网络时间协议(network time protocol, 简称 NTP)、精密时间协议(precision time protocol, 简称 PTP)、简单网络时间协议(simple network time protocol, 简称 SNTP)等[27], 可以在软件层面进行时间同步, 虽然精度可以达到微秒级, 能够满足一些时间精度要求在毫秒级、秒级的应用, 但是无法满足精度要求更高的应用。这主要是因为系统任务调度存在不确定性。

操作系统(operation system, 简称 OS)在静默状态下一般还会进行任务调度、定时器处理、中断处理、资源管理、电源管理等后台任务。在有用户态任务执行时, 由于在实际处理时间与预定处理时间之间任务调度存在延迟, 造成潜在的通信不确定性, 降低了通信实时性。当这些终端设备上的网络传输行为由软件控制时, OS 调度器导致的时延变化是通信抖动的主要来源[28]。

图 3 说明了 OS 主要的时延来源: 应用时延是实时任务本身的一些时间触发指令受应用程序其他部分影响的时延; 调度时延是由于 OS 多任务调度而实时任务在未获得 CPU 时间不得不阻塞等待的时延; 硬件时延是指由于硬件限制而引起的时延, 如系统管理中断(system management interrupt, 简称 SMI)可能引起无法预测的时延。另外, 为了平衡性能和节能, CPU 通常具有基于使用情况动态调节频率的能力, 这些都降低了实时任务的实时性。因此, 估计系统处理时延(operating system processing delay, 简称 OSPD)(或称为任务调度时延)是设计工业控制类应用的一个关键环节。

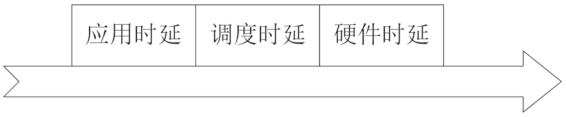

图 3　OS 时延

在工业互联网终端控制设备中, 数据传输相关的实时任务 OSPD 定义为: 从应用层执行相关发送数据包的函数开始到网卡实际开始将网卡队列中数据发出去为止的时间差。数据包发送流程[29] 如图 4 所示。

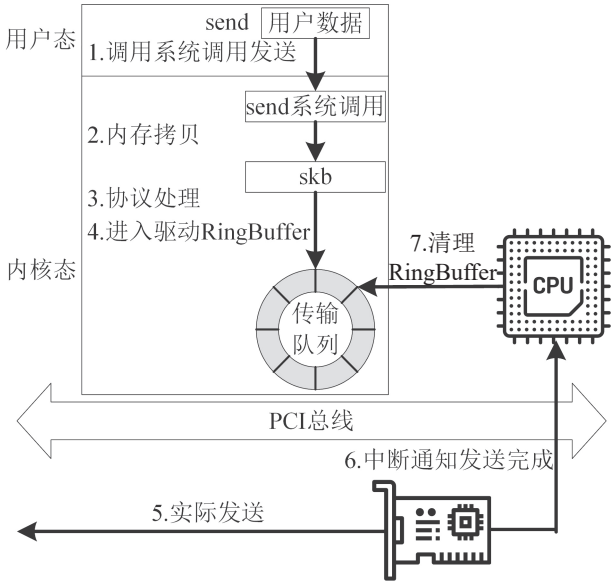

图 4　数据包发送流程

数据包发送流程中的每步都可能存在由 OS 的任务调度引起的不连续。即使终端控制设备具有时间同步能力, 但 OS 任务调度固有的时延仍会引起发送的不确定性。因此, 对于这些设备, 必须对任务调度时延进行分析和估算, 以确保系统能够满足实时性要求。时延测量方法一般可分为两类: 一是基于传统时延测量方法, 如基于 Internet 控制报文协议(internet control message protocol, 简称 ICMP)的时延测量方法、基于 TCP 的时延测量方法等; 二是基于新兴技术的时延测量方法, 如基于时钟同步的时延测量方法、基于机器学习的时延测量方法等。

在基于传统时延测量方法中, ICMP 是最为常用

的时延测量方法之一。ICMP 是 TCP/IP 协议族中的一部分，主要用于网络故障排除和诊断。借助 ICMP 协议，网络管理员可以对网络中的设备进行 ping 操作，通过检测源节点和目的节点之间的往返时延，评估网络的性能[30]。此外，基于 TCP 的时延测量方法也得到了广泛的研究和应用，其主要通过记录 TCP 报文的发送时间和接收时间，计算出数据包的往返时延。在实际应用中，基于 TCP 的时延测量方法具有很强的实用性[31]。这些方法通过端到端整体的测量结果去优化源节点的发送。传统时延测量方法存在一定局限性，例如，ICMP 报文在网络中传输不稳定，可能会受其他因素的影响而出现误差。同时，在大规模网络环境中，TCP 时延测量方法的可扩展性也面临着挑战，而且这种方法测量的时延精度较低，无法满足实时网络应用的精确时延要求。

目前，很多调度算法的研究都将端系统视为支持 TSN 功能的节点，然而实际中端系统大多不支持 TSN 的功能。Barzegaran 等[26]在设计调度算法时就将端系统认为是不支持时间同步和 TSN 调度，通过引入最坏时延分析[32]确定流的最大端到端时延，并通过将其考虑进约束条件来保持实时性，模拟实验结果显示，系统计算的调度所产生的最坏平均时延比流的 DDL 小 14%。将终端设备视为不支持 TSN 功能的节点，并将系统时延考虑到调度算法的设计中，未对 OSPD 进行测量和补偿，该方法虽可依靠理论分析完成调度、在一定程度上满足实时需求，但整体性能存在明显短板：需要为调度窗口或时隙引入误差来确保数据帧可以被传输，这造成了带宽资源的浪费。

Jiang 等[33]提出了 Frame-Task Co-Scheduling 调度机制，并且提出了 Co-Scheduled Delay(CSD) 的概念，在一定时间点（当 OS 中无其他任务在运行时）将 TT 流的发送任务提交给 OS，此时不管 OS 基于何种调度策略，都只有一个可调度的发送任务，然后执行发送任务，以此来提高发送的确定性。然而，这样做会导致 OS 利用率低，对于传统的终端设备而言存在性能方面的压力，只适用于负载低的终端设备。Farzaneh 等[34]详细介绍了对 IEEE 802.1Qbv 标准的测试实验，通过软件来同步端系统的时间，通过测量端系统平均 OSPD，将数据帧的发送时间提前，使之在相对精确的时间点从端系统发出，忽略端系统网络栈调用的不确定性导致的极个别异常，整体的平均时延和抖动都极小，但是这种方法只适合实时任务量极少的场景，不适用多任务同时执行的场景。

终端设备的 OSPD 属于时间序列数据，并且终端设备上的实时传输行为具有周期性特征，因此，可行的方法是利用时间序列分析算法对 OSPD 进行预测，从而对终端系统的发送时间做出补偿，提高终端设备发送时间的确定性。文献 [35] 提出了一种基于 ARIMA-LSTM 的混合预测算法，用于时间同步，通过历史值预测端系统随时间的偏移量，从而修正系统时钟，保持与主时钟时间同步。

3 TSN 工业互联网应用案例

TSN 通过各种机制可以满足工业互联网对实时性、可靠性和安全性的高要求，其应用主要集中在以下 4 个领域。

3.1 基于 TSN 的轨道交通网络

在轨道交通中，列车通常部署多个通信网络，包括用于列车控制的网络、用于铁路信号的网络、用于视频安全和乘客信息系统的网络，有些列车还会有供乘客使用的 Wi-Fi 网络。一方面，这些通信网络大多使用诸如 MVB、CAN 和 PROFIBUS 等遗留接口，带宽被限制并且需要专用的网关进行整合；另一方面，这些网络通常进行物理隔离，明确区分了安全域和非安全域。这种多网络并存的解决方案增加了列车控制和监测系统架构的复杂性和成本[36]。

在铁路应用中，将关键列车控制网络汇聚到以太网上可以节省空间、重量和功耗，并提高系统可靠性[37]。为了实现多网络的混合通信，“CONNECTA-2”和“Safe4RAIL-2”项目[38]引入了“Drive-by-Data”概念，通过数字信号传输列车控制与监测系统（train control and monitoring system，简称 TCMS）子系统的所有控制参数。为此，“CONNECTA-2”和“Safe4RAIL-2”联盟一直致力于定义并开发基于 IEC 61375 的下一代列车通信网络，以实现来自不同厂商生产的列车之间的真正互操作性，并引入了 TSN 作为主要的技术支持。

3.2 基于 TSN 的车载网络

现今的汽车包括多个需要相互通信的复杂系统，彼此传输多种类型的数据，主要可划分为关键数据、非关键数据和多媒体数据。高级驾驶辅助系统（advanced driver assistance systems，简称 ADAS）就是这样的系统[39]。汽车还包含多个电子子系统、传感器和微处理器[40]，需要与其他关键系统进行交互，如刹车和转向系统。为了控制汽车并使其正常工作，所有关键数据都需要在其规定的时间间隔内发送，并确保关键性能达到要求[41]。同时，汽车还有其他一些不太重要但需要实时响应的输入输出接口供用户使用。

汽车信息娱乐系统一般都连接到 ADAS 系统上, 也可能连接到后排座椅上。为了获得良好的音视频质量, 多媒体数据也必须被及时发送出去。与此同时, 非关键数据也应该被及时发送出去, 以提高驾驶体验。因此, 汽车网络必须具有高可靠、低延迟的特点。为了实现这些要求, TSN 骨干网络可以将汽车控制通信汇聚到一个解决方案中, 以提供安全、低成本的解决方案[42-43], 为自动驾驶等应用提供支持。

对于汽车内时间敏感的应用程序, TSN 可为其提供有保证的时延, 例如制动和转向, 有助于防止由于数据延迟导致的交通事故。TSN 可以为数据可靠传输提供冗余保障, 即使在网络拥堵或链路故障的情况下也能保证接收方可以收到控制信号, 这对需要高可用性的应用程序而言至关重要, 例如 ADAS 和自动驾驶。随着汽车工业的发展, 汽车内的系统通信业务将会爆发式增长, TSN 的强大扩展性意味着其可以适应不断增长的网络规模和不断提高的网络吞吐量。

3.3　基于 TSN 的智能电网控制系统

当前电力网络面对诸多挑战, 例如可再生能源增加、分布式资源扩展、需求增长或优化供应等。这些都需要一个更智能的系统, 未来可在电力设施的关键位置部署数据采集和电力调节控制设备, 在整个网络中扩展数据采集、监控和控制功能, 以便更好地应对这些挑战。Cuerva 公司正在进行的项目“TSN for Smart grids”[44] 旨在开发与 TSN 标准兼容的可用于智能电网的分组交换机, 评估和测试 TSN 技术作为智能电网网络通信总线的应用。5G-TSN 集成是满足大规模智能电网应用的广覆盖、低延迟和高密度要求的关键, 同时还要确保电网的安全和稳定性。2022 年 3 月 1 日, 中兴公司和高通公司在深圳展示了其合作项目“E2E 5G TSN based on smart grid”的原型系统, 可以通过 5G 远程精确控制可再生能源更高效地并入电网, 并为大规模电网提供精准负荷控制, 实现风能、太阳能、水能、热能等多种能源在不同气候条件下的高效协调和存储[45]。

3.4　基于 TSN 的航空航天电子系统网络

航空航天系统的通信也正在迅速转向基于 IEEE 802.3 的以太网。这种转变是因为这些航空航天系统所依赖的传统航电系统已经达到性能、网络吞吐量和设计复杂度方面的极限[46]。在航空航天中, TSN 可取代基于 ARINC 664 的传统航电网络。ARINC 664 是一组定义航空电子网络物理层和逻辑层的标准。但是 ARINC 664 无法提供确定性的网络传输服务, 无法满足航空电子网络中日益增长的实时通信需求。

随着业务的不断增加, 航空航天电子系统的主要需求包括带宽增加、冗余、可靠性和系统集成。航空航天系统的网络通常包含地面站网络、发射台网络、航天器内部网络以及卫星网络。这些网络对通信的要求也各有差异[47], 只有基于以太网的通信技术才能将不同的网络聚合, 实现混合传输, 同时满足各个网络对通信的需求。TSN 的时间同步可达到微秒级精度, NASA 猎户座飞船[19] 使用了 TTEthernet 作为通信方案。文献 [48] 描述了基于 TSN 定制的总线平台在 Miura 1 微型运载火箭上的成功应用。TSN 也已经用于一些商用飞机, 包括波音 787 Dreamliner[19] 和空中客车 A350 XWB。随着 TSN 的不断发展, 预计将在未来的航空电子设备中发挥越来越重要的作用。

4　TSN 工业互联网的优势和挑战

4.1　TSN 的优势

TSN 在工业互联网中应用主要具备以下优势。

1) 高实时性: TSN 能够提供高精度的时间同步, 并通过各种传输选择算法的控制最大限度地降低网络延迟, 保证实时数据的传输和处理。

2) 网络拓扑结构优化: TSN 能够优化网络拓扑结构, 通过将多个物理网络整合, 将不同优先级流量隔离, 实现流量的混合传输, 降低网络拓扑的复杂度和管理难度。

3) 灵活性: TSN 基于以太网技术, 具有可扩展性和灵活性, 可随着业务需求不断提高传输容量, 能够适应不同的应用场景和需求。

4) 可靠性: TSN 对于关键的流量可以利用 FRER 机制, 通过复制一些数据帧, 利用不同的路由传输, 保证接收端至少能接收到来自源节点的一个消息副本。

5) 统一标准: TSN 技术是由 IEEE 标准化组织制定的国际标准, 为不同厂商和系统提供了一个统一的标准, 促进了工业互联网设备之间的互操作性和互联性。

4.2　面临的挑战

TSN 作为一项新兴技术, 也面临以下挑战。

1) 部署和维护成本: 部署和维护 TSN 技术前期需要投入大量人力、物力和财力, 增加了成本。

2) 兼容性问题: 虽然 TSN 提供了统一的技术标准, 但是由于以太网技术的开放性, 很多技术的实现并未完全遵循相关标准, 不同厂商的产品有些特性像一个黑盒, 只对用户开放了很少权限, 虽然满足了传

输需求，但只能对同系列产品保持兼容，对其他厂商的设备兼容性差。例如，对于增强流量调度标准的支持，某个厂商同系列交换机组成的 TSN 网络内部通过各种协商消息进行组网，接入该 TSN 网络的所有终端设备通过配置调度表可实现彼此之间确定性通信，然而其交换机本身并未完全实现增强流量调度标准的所有技术细节，而是使用了基于软件定义网络（software-defined networking，简称 SDN）[49] 的相关技术，通过一些转换实现 TSN 功能，与其他厂商的设备组网时可能无法兼容，需要进一步转换。

3) 安全性问题：由于工业互联网涉及重要的生产和设备信息，网络安全问题成为一个重要的关注点。TSN 基于以太网技术，因此以太网中存在的安全问题也存在于 TSN 中。TSN 在工业互联网中的安全问题主要包括网络安全、设备安全和数据安全。文献[50] 总结了 TSN 应用于智能电网时可能存在的安全性问题，如针对时间同步（IEEE 1588）的攻击，从安全角度看，这种协议非常容易受到攻击，针对时间同步的攻击可能导致 TSN 设备的时钟错乱；还有针对实时流量的攻击等，针对实时流量的攻击会导致一些具有时延或 DDL 保证的 TT 流传输失败，从而引起严重事故。为了保证 TSN 网络的安全性，可以采用一些安全措施，如加密、认证、访问控制等。

4) TSN 技术标准的周期：许多 TSN 标准处于演进阶段，这些标准还在修订且在不断更新[8]，相关标准和协议还需要进一步完善和统一，并可能因此受到不同解释和实现的影响。因此，在设计预期寿命较长的系统时，通常只考虑经过市场认可的成熟协议[51]。

因此，在采用 TSN 技术的过程中，需要全面考虑其优势和挑战，并综合评估其实际应用效果和成本效益。

5 结束语

TSN 的出现为工业互联网提供了一种新思路，通过以太网的各种补充协议保障了通信的高实时性和高可靠性。TSN 在工业互联网中具有广阔的应用前景，可以实现高效的实时通信和网络带宽的优化，降低网络结构的复杂度和成本，使工业互联网实时控制系统更容易构建和维护。此外，TSN 技术还具有较高的兼容性，可以与现有的以太网协议无缝集成，这使得其在实际工业应用中更容易普及。

尽管 TSN 技术已经在一些公开应用中证明了其卓越的性能，但仍面临许多挑战。未来的研究方向包括：

1) 在实际工业应用中，探索传统工业终端设备接入 TSN 的架构，简化配置，进一步优化 TSN 技术的实施流程，降低应用的难度和成本。现阶段，SDN 技术已经相对成熟，具备较强的集中式控制和管理能力，将 SDN 引入 TSN 的网络配置和管理，可有效地优化 TSN 技术的实施流程。

2) 在相关标准的研究中，可进一步统一和细化 TSN 的相关标准及其关键功能点，为支持 TSN 功能的交换机应该对外提供的最小 API 集合制定统一规范，最大程度降低不同设备之间的组网难度，提高不同厂商设备之间的兼容性。

3) 优化高优先级流量的网络安全问题，开发更加安全可靠的标准化流程。在互联网中，一些基于密码学的安全机制，如 IPsec（网络层）和 TLS（传输层），已经在 BE 流量的传输中被广泛应用，可有效防范各种网络攻击。通常 TSN 中的实时通信都发生在范围有限的局域网内部，因此可以根据不同应用场景建立不同等级的安全保护机制，从而更好地保障 TSN 中的网络安全。

4) 研究基于软硬件协同的交换机设计。目前已经合并到 IEEE 802.1Q 的 TSN 部分协议中，基础功能利用硬件实现，而还处于更新中的协议则通过软件的方式实现。这种设计既能保证实验性功能的应用和推广，又能随着 TSN 标准的演化共同发展，从而将标准演化对 TSN 交换机的负面影响降到最低。

参考文献：

[1] 张强，王卫斌，陆光辉. 工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究[J]. 中兴通讯技术，2020，26(6)：21-26.

[2] 周济. 智能制造是“中国制造 2025”主攻方向[J]. 企业观察家，2019(11)：54-55.

[3] Fuchs S，Gercikow A，Schmidt H P. Monitoring of real-time behavior of industrial ethernet for industry 4.0[C]// International Electrical Engineering Congress (iEECON). Piscataway，NJ：IEEE Press，2017：1-4.

[4] Xia Dan，Jiang Chun，Wan Jiafu，et al. Heterogeneous network access and fusion in smart factory：a survey[J]. ACM Computing Surveys，2023，55(6)：1-31.

[5] 802.1 WG. Time-sensitive networking (TSN) task group [EB/OL]. (2023)[2023-04-14]. https://1.ieee802.org/tsn/.

[6] 802.1 WG. 802.1Q-2018 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network--Bridges and Bridged Networks[S]. New York：IEEE Press，2018.

[7] Jeffree T. 802.1BA - audio video bridging (AVB) systems[EB/OL]. (2021-12-17)[2023-04-14]. https://www.ieee802.org/1/pages/802.1ba.html.

[8] 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.

[9] 802.1 WG. 802.1AS-2020 IEEE standard for local and metropolitan area networks-timing and synchronization for time-sensitive applications[S]. New York: IEEE Press, 2020.

[10] 802.1 WG. 802.1Qbv-2015 IEEE standard for local and metropolitan area networks—bridges and bridged networks—amendment 25: enhancements for scheduled traffic[S]. New York: IEEE Press, 2016.

[11] 802.1 WG. 802.1CB-2017 IEEE standard for local and metropolitan area networks—frame replication and elimination for reliability [S]. New York: IEEE Press, 2017.

[12] 曹志鹏, 刘勤让, 刘冬培, 等. 时间敏感网络研究进展[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(3): 647-655.

[13] Weng Ying, Zhang Yiming. A survey of secure time synchronization[J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3923.

[14] 802.1 WG. 802.1D-2004 IEEE standard for local and metropolitan area networks: media access control (MAC) bridges [S]. New York: IEEE Press, 2004.

[15] Hofmann R, Nikolić B, Ernst R. Challenges and limitations of IEEE 802.1 CB-2017[J]. IEEE Embedded Systems Letters, 2020, 12(4): 105-20108.

[16] Ayub Q, Ngadi M A, Rashid S, et al. Correction: priority queue based reactive buffer management policy for delay tolerant network under city based environments[J]. PLoS one, 2019, 14(10): e0224826.

[17] Industrial Internet Consortium. Time sensitive networks for flexible manufacturing testbed haracterization and mapping of converged traffic types V1.0[R]. 2019.

[18] 蔡岳平, 李栋, 许驰, 等. 面向工业互联网的 5G-U 与时间敏感网络融合架构与技术[J]. 通信学报, 2021, 42(10): 43-54.

[19] Craciunas S S, Oliver R S. Combined task-and network-level scheduling for distributed time-triggered systems[J]. Real-Time Systems, 2016, 52(2): 161-200.

[20] Gavriluţ V, Pop P. Traffic-type assignment for TSN-based mixed-criticality cyber-physical systems[J]. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 2020, 4(2): 1-27.

[21] Arestova A, Hielscher K S J, German R. Design of a hybrid genetic algorithm for time-sensitive networking [C]//Measurement, Modelling and Evaluation of Computing Systems. Cham: Springer International Publishing, 2020: 99-117.

[22] Pahlevan M, Obermaisser R. Genetic algorithm for scheduling time-triggered traffic in time-sensitive networks[C]//2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018: 337-344.

[23] 张彤, 冯佳琦, 马延滢, 等. 时间敏感网络流量调度综述[J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(4): 747-764.

[24] Laki S, Györgyi C, Pető J, et al. In-network velocity control of industrial robot arms[C]// Proceedings of the 19th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. Washington: USENIX, 2022: 995-1009.

[25] Yang Y, Hanzo L. Permutation-based TCP and UDP transmissions to improve goodput and latency in the Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 14276-14286.

[26] Barzegaran M, Reusch N, Zhao L, et al. Real-time guarantees for critical traffic in IEEE 802.1 Qbv TSN networks with unscheduled and unsynchronized end-systems[PP/OL]. arXiv (2021-05-04)[2023-04-14]. https://arxiv.org/abs/2105.01641.

[27] 李培基, 李卫, 朱祥维, 等. 网络时间同步协议综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(3): 30-38.

[28] Coleman J, Almalih S, Slota A, et al. Emerging cots architecture support for real-time TSN ethernet[C]//Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing. New York: ACM Press, 2019: 258-265.

[29] Chimata A K. Path of a packet in the linux kernel stack[EB/OL]. (2005-03-25)[2023-04-14]. https://www.cs.dartmouth.edu/~sergey/me/netreads/path-of-packet/Network_stack.pdf.

[30] Chin T, Rahouti M, Xiong K. Applying software-defined networking to minimize the end-to-end delay of network services[J]. ACM SIGAPP Applied Computing Review, 2018, 18(1): 30-40.

[31] Chen Xiaoqi, Kim H, Aman J M, et al. Measuring TCP round-trip time in the data plane[C]//Proceedings of the Workshop on Secure Programmable Network Infrastructure. New York: Association for Computing Machinery, 2020: 35-41.

[32] Zhao L, Pop P, Craciunas S S. Worst-case latency analysis for IEEE 802.1 Qbv time sensitive networks using network calculus[J]. IEEE Access, 2018, 6: 41803-41815.

[33] Jiang Xuyan, Fu Wenwen, Yang Xiangrui, et al. Steal task scheduling from OS: enabling task-network coschedule for time-critical traffic[C]//Proceedings of the SIGCOMM'21 Poster and Demo Sessions. New York: ACM Press, 2021: 53-55.

[34] Farzaneh M H, Knoll A. Time-sensitive networking (TSN): an experimental setup[C]//IEEE Vehicular Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 23-26.

[35] Cui Guang, Xu Zhe, Gao Xiang, et al. Offset estimation based on ARIMA-LSTM for time synchronization in single twisted pair Ethernet[C]//2022 IEEE 20th Internation-

al Conference on Industrial Informatics (INDIN). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2022: 489-494.

[36] 王欣立, 于泽人, 周钧, 等. 基于时间敏感网络的列车通信网络时间同步与流量整形技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 51-55,61.

[37] Bao Feng, Yu Haoyang, Wang Hao. TSN-based backbone network of train control management system[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 5789444.

[38] Larrañaga A, Arriola A, Martinez I, et al. 5G technology for next-generation wireless consist networks in railways[M]// Communication Technologies for Vehicles. Cham: Springer International Publishing, 2021: 83-94.

[39] Tigadi A, Gujanatti R, Gonchi A, et al. Advanced driver assistance systems[J]. International Journal of Engineering Research and General Science, 2016, 4(3): 151-158.

[40] 赵晓敏, 王腾, 李宗辉, 等. 下一代车载时间敏感网络架构设计与调度评估[J]. 电讯技术, 2023, 63(1): 77-84.

[41] Sabry A, Omar A, Hammad M, et al. AVB/TSNprotocols in automotive networking[C]//15th Internation-al Conference on Computer Engineering and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2020: 1-7.

[42] Lee J, Park S. Time-sensitive network (TSN) experiment in sensor-based integrated environment for autonomous driving[J]. Sensors, 2019, 19(5): 1111.

[43] Ashjaei M, Bello L L, Daneshtalab M, et al. Time-sensitive networking in automotive embedded systems: state of the art and research opportunities[J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 117: 102137.

[44] Rueda J. TSN for smart grids[EB/OL]. (2023-09-19)[2023-10-16]. https://cuervaenergia.com/en/innovation-people/research-and-development/tsn-smart-grids/.

[45] ZTE. ZTE, Qualcomm jointly demonstrate end-to-end 5G TSN for smart grid applications[EB/OL]. (2022-03-01)[2023-04-21]https://www.zte.com.cn/global/about/news/20220301e7.html.

[46] Li Meng, Zhu Guchuan, Savaria Y, et al. Reliability enhancement of redundancy management in AFDX networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2118-2129.

[47] Przybylski T, Sugunaraj N, Ranganathan P. Aircraft communication systems-topologies, protocols, and vulnerabilities[EB/OL]. Journal of Network and Computer Applications, (2023-01-17)[2023-04-16]. https://commons.und.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=ee-stu.

[48] Sanchez G 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.

[49] 刘金娣, 李栋, 曾鹏. 基于 SDN&TSN 的未来工业网络架构探究[J]. 自动化博览, 2018, (10): 56-59.

[50] Lázaro J, Astarloa A, Rodríguez M, et al. A survey on vulnerabilities and countermeasures in the communications of the smart grid[J]. Electronics, 2021, 10(16): 1881.

[51] Hallmans D, Ashjaei M, Nolte T. Analysis of the TSN standards for utilization in long-life industrial distributed control systems[C]//25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2020: 190-197.

编辑：张所滨