DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2026.04.005

下一代列车通信网络TSN关键协议机制分析与一致性测试研究

黄　旺[1]，钟　涛[1]，刘中华[1]，李利平[2]，孟　晶[2]
（1.中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲 412001；
2.北京信而泰科技股份有限公司，北京 100071）

摘　要：随着列车控制系统向高速化、智能化与融合化方向持续演进，传统列车通信网络（基于WTB/MVB总线的TCN）架构已难以支撑多业务实时融合传输的严苛需求。时间敏感网络（time-sensitive networks，TSN）凭借微秒级时间同步、确定性调度与帧抢占核心机制，为下一代列车通信网络（next generation train communication network, NG-TCN）构建了统一以太网架构下的可预测实时性传输保障体系。尽管TSN已在工业自动化领域得到广泛研究，但其在轨道交通多业务融合场景下的适配性、一致性测试方法仍缺乏系统性探讨，现有研究多聚焦于协议原理介绍与功能仿真，尚未开展基于实测数据的性能边界量化分析与工程化配置研究，文章旨在填补这一研究空白。文章首先深度剖析TSN三大核心协议（IEEE 802.1AS时间同步、IEEE 802.1Qbv门控调度与IEEE 802.1Qbu帧抢占）的工作机制，揭示多协议间的耦合协同关系，并建立最坏情况时延（worst-case delay, WCD）评估模型；在此基础上，文章构建基于高精度测试仪的自动化一致性测试平台，针对3项关键协议开展系统性功能验证与性能边界量化分析。研究结果表明：被测ECNN-TSN（具备TSN功能的列车以太网交换机）在时间同步精度、门控调度确定性及帧抢占有效性等方面均满足IEEE 802.1系列标准要求，16跳级联拓扑下时间同步误差稳定在±450 ns以内，高负载场景下关键业务时延抖动仍控制在5 μs以内；帧抢占机制可将保护带开销从约12.00 μs压缩至1.85 μs，使关键业务带宽利用率提升约87%，实测最坏情况时延与理论模型预测值偏差在合理范围内。该文研究为列车通信网络中TSN技术的工程化部署提供了量化数据支撑，提出的保护带配置阈值建议对NG-TCN网络规划具有重要参考价值。

关键词：时间敏感网络(TSN)；列车通信网络(TCN)；下一代列车通信网络(NG-TCN)；IEEE 802.1AS；IEEE 802.1Qbv；IEEE 802.1Qbu；协议一致性测试

中图分类号：U292.91+4；TP393　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2026)04-0045-13

0　引言

列车通信网络（train communication network, TCN）是现代轨道交通系统的核心通信基础设施，其体系架构直接决定列车控制、状态监测、乘客服务及多媒体业务的融合传输效率与运行可靠性。传统TCN基于IEC 61375-1标准定义的WTB（wire train bus）与MVB（multifunction vehicle bus）两级总线架构[1]，尽管在数十年的工程实践中凭借安全完整性等级4（safety integrity level 4, SIL4）的功能安全等级得到了广泛应用，但受限于1.5 Mbit/s的带宽上限、静态拓扑结构及有限的扩展能力，已难以满足智能化列车对Gbit/s级融合业务传输及微秒级端到端确定性传输的需求。

IEC 61375-2-5标准[2]引入了以太网列车骨干网（Ethernet train backbone, ETB）与车辆组以太网（Ethernet consist network, ECN）技术架构，在此基础上，轨道交通行业正式启动向以太网融合通信架构的转型

通信作者：钟　涛，女，硕士，长期从事软件测试工作；zhongtao2@csrzic.com
引用格式：黄旺, 钟涛, 刘中华, 等. 下一代列车通信网络TSN关键协议机制分析与一致性测试研究[J]. 机车电传动, 2026(4): 45-57.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.04.005.
Citation：HUANG Wang, ZHONG Tao, LIU Zhonghua, et al. Analysis and conformance testing of TSN core protocols for next-generation train communication network[J]. Electric drive for locomotives,2026(4): 45-57.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.04.005.

进程。然而，当前列车通信系统仍依赖列车实时数据协议（train real-time protocol, TRDP）等专有协议，尚未形成全球统一的实时通信保障标准体系；与此同时，PROFINET、EtherCAT、TTEthernet、CC-Link IE 等多种工业以太网协议在轨道交通领域并行部署，导致网络体系碎片化、设备与系统间互操作性缺失，显著提升了系统集成复杂度与全生命周期运维成本。

在此技术发展背景下，TSN 已被国际铁路联盟（international union of railways, UIC）、IEC TC9 技术委员会、IEEE 802.1 工作组及中国城市轨道交通协会联合认定为 NG-TCN 的核心演进技术方向[3]。TSN 以 IEEE 802.3 标准以太网为底层承载，依托 IEEE 802.1AS（时间同步）、IEEE 802.1Qbv（门控调度）与 IEEE 802.1Qbu（帧抢占）等关键机制，实现控制类硬实时业务、音视频类软实时业务及其他非实时业务在同一物理网络中的确定性传输与共存，为构建一体化、安全可信的 NG-TCN 奠定核心技术基础[4]。

本文除了在具备 TSN 功能的列车以太网交换机（ECNN-TSN）上开展基础一致性测试外，还将重点完成以下 3 项核心研究工作：

①解耦多协议协同机制：分析 IEEE 802.1AS 时间同步误差对 IEEE 802.1Qbv 调度精度的量化影响；

②构建性能边界模型：通过极限压力测试推导 WCD，为 SIL4 级安全苛求系统提供性能理论上限；

③给出工程化配置建议：基于实测数据提出保护带（guard band）的优化配置阈值及多厂商设备互通的配置规范。

1 TSN 关键协议机制分析

基于 WTB/MVB 的传统 TCN 架构如图 1 所示。随着统一以太网架构成为轨道交通行业公认的技术发展方向，列车通信系统的技术需求已从传统的“带宽驱动”模式，逐步转向对“通信时间确定性”的系统性、全方位诉求。针对列车控制、编组重联、乘客信息系统（passenger information system, PIS）、闭路电视监控系统（closed-circuit television, CCTV）、车地通信及智能运维等多业务深度融合的现实需求，列车通信网络不仅需具备高吞吐能力，还需在复杂异构混合业务场景下，提供具备可预测性、可验证性及工程化部署可行性的确定性服务质量（quality of service, QoS）保障。此类需求正推动轨道交通通信行业摆脱依赖传统工业以太网扩展方案的分散的技术方案，转而采用以 TSN 为核心的 IEEE 802.1 标准体系[5]。在该标准体系中，IEEE 802.1AS 协议提供全网统一的高精度时钟基准，IEEE 802.1Qbv 协议实现调度窗口内的确定性资源调度与分配，IEEE 802.1Qbu 协议保障关键业务流的抢占式低时延转发；上述 3 项协议共同构成 NG-TCN 的核心能力框架，为实现跨厂商设备互操作与可扩展部署提供了标准化、统一的技术底座[4]。

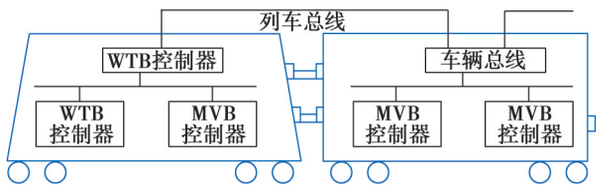


图 1 基于 WTB/MVB 的传统 TCN

Fig. 1 Traditional TCN based on WTB/MVB

1.1 IEEE 802.1AS 协议

IEEE 802.1AS 是 TSN 协议簇中承担全网时间同步功能的核心标准。IEEE 802.1AS 基于 IEEE 1588v2 精准时间协议（precision time protocol, PTP），在数据链路层定义了广义精准时间协议（generalized precision time protocol, gPTP）[5]，起初为音频视频桥接（audio video bridging, AVB）系统提供时间同步，后来成为 TSN 体系中唯一的时间同步机制[4]。在单个 TSN 域内，所有网络节点均属于时钟节点范畴，包含 1 个主时钟（grand-master clock, GMC）和若干从时钟（slave clock, SC）。时间信息通过 Sync、Follow_Up 与 Pdelay 报文沿最优主端口路径逐跳传递，最终构建起全网范围内亚微秒级的统一时间基准[5]。802.1AS 协议原理图如图 2。

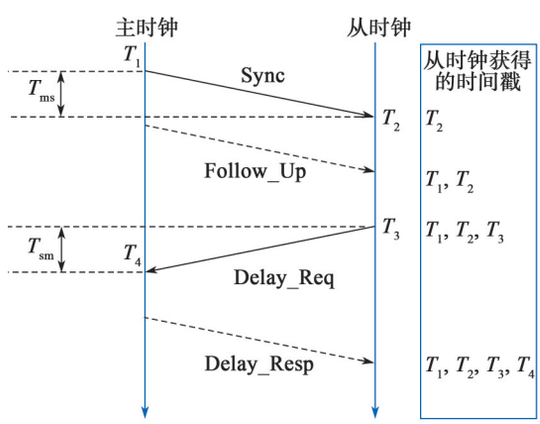


图 2 802.1AS 协议原理图

Fig. 2 Schematic diagram of 802.1AS protocol

802.1AS 采用经典的 Delay-Request-Response 机制（与 IEEE 1588v2 普通 PTP 完全一致），通过 4 次时间戳完成单跳链路的路径延迟（mean path delay）和主从时间偏移（slave ofset）的精确测量，其核心公式如下：

$$\mathrm{Offset}_{\mathrm{slave}}=\frac{(T_2-T_1)+(T_4-T_3-\mathrm{Delay}_{\mathrm{mean}})}{2}=\frac{(T_2-T_1)+(T_4-T_3)}{2} \tag{1}$$

1.2 IEEE 802.1Qbv 协议

IEEE 802.1Qbv（门控调度机制）是 TSN 体系内实现确定性数据传输的核心协议之一，亦是轨道交通领

域广泛认可的、用于替代传统WTB/MVB周期性实时总线的关键技术机制[6]。在NG-TCN规范中，802.1Qbv被明确列为强制性功能（Mandatory Feature），其在NG-TCN中的强制性地位凸显了其对确定性通信的关键作用。

802.1Qbv是一种基于时间触发的队列调度机制，通过在交换机端口划分周期性时间窗口以调控不同类型流量的转发时机，进而实现端到端传输时延的可预测性与时延抖动的可控性[6]。具体而言，交换机端口为不同优先级或业务类型配置独立转发队列，队列的转发使能状态由门控列表（gate control list, GCL）在单个调度周期内依据预设时间节点精确开启或关闭。当关键控制流对应的队列仅在指定开放时间窗口内被允许转发时，网络可确保关键业务在多类型业务混合负载场景下仍具备严格的时延确定性。借助这种时间门控调度机制，802.1Qbv使以太网具备了传统时间触发总线（如TTP、WTB/MVB）的确定性传输能力，同时保留了标准以太网的灵活性与高带宽优势。Qbv协议原理图如图3所示。

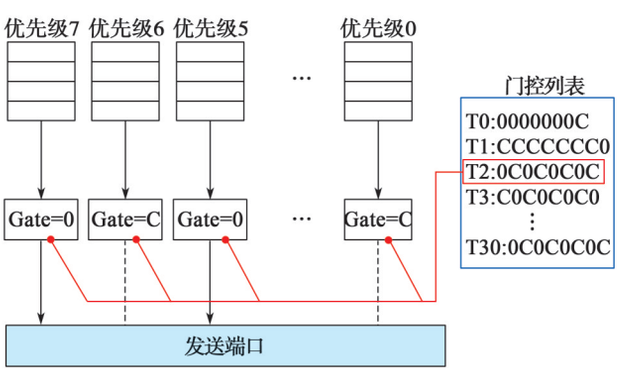


图3　Qbv协议原理图

Fig. 3　Schematic diagram of Qbv protocol

每个端口维护一个周期为C的周期性时间轮廓，并将周期划分为多个时间片$t_i \in [0, C)$。每个时间片对应一个GCL条目，指明在该时刻允许哪些队列发送数据，其中1表示队列开启，0表示队列关闭。假设端口上有N个队列，每个队列的发送窗口为W_jW_j，则队列j在周期C内的可发送时长可表示为$W_j = \sum_{i=0}^{C-1} GCL_j(t_i) \cdot \Delta t$，其中$\Delta t$为最小时间片长度。由此，队列$j$的平均延迟可近似表示为$D_j \approx \dfrac{C - W_j}{2}$，说明队列的发送窗口越长，其业务延迟越低。

1.3　IEEE 802.1Qbu协议

IEEE 802.1Qbu是TSN体系内用于削减关键业务端到端时延的核心机制，其目标是在多业务混合负载场景下，通过允许高优先级流中断低优先级流的传输过程，大幅压缩Class A/B类实时关键流的链路竞争时延[7]。不同于传统以太网“整帧传输”模式引发的非关键帧阻塞问题，IEEE 802.1Qbu在介质访问控制（media access control, MAC）子层引入可抢占传输机制，将链路竞争时延从“一个完整低优先级帧的传输时长”削减至“一个最小帧碎片的传输时长”。该机制在满足关键流实时性需求的同时，最大程度降低了对低优先级流吞吐性能的负面影响[8]。

IEEE 802.1Qbu的核心运作机制为低优先级帧的抢占中断与重组。当端口正在传输低优先级可抢占帧（preemptable frame, p-frame），高优先级抢占帧（express frame, e-frame）到达时，MAC合并子层（MAC merge sublayer）将立即暂停p-frame的传输，并将其拆分为多个最小长度为64~128字节的MAC协议数据单元（MAC protocol data unit, mPacket）碎片。高优先级e-frame可被立即调度传输，剩余的p-frame内容则以碎片形式在e-frame传输完成后继续发送。接收端通过MAC合并子层的帧重组逻辑，依据StartFragment、ContinueFragment与EndFragment的标志顺序还原原始帧，保障数据的完整性不受破坏。802.1Qbu协议原理如图4所示。

为了支持抢占与重组，IEEE 802.1Qbu规定MAC层需同时配置两类并行工作的逻辑接口：

①快速MAC接口（express MAC, eMAC）：承载不可抢占的高优先级关键业务流（e-frame），确保其整帧传输时延效果最优[8]；

②可抢占MAC接口（preemptable MAC, pMAC）：承载可抢占的低优先级业务流（p-frame），在其到达时允许被中断传输[8]。

帧抢占机制的启用需由链路两端设备通过IEEE 802.3br（MAC层快速穿插）定义的MAC Merge能力验证（SMD-V/SMD-R握手）完成双向支持确认，并可辅以LLDP发布抢占能力TLV以辅助管理平面感知。仅当链路双向均支持抢占时方可启用，以避免不支持设备接入引发分片解析失败、重组错误或链路异常。此外，IEEE 802.3br与IEEE 802.1Qbu标准明确规定仅支持单级抢占（single-level preemption），仅区分快速帧（express）与可抢占帧（preemptable）两类，保障链路层行为可预测、可验证[9]。当IEEE 802.1Qbv与IEEE 802.1Qbu协同运作时，低优先级帧占用链路的最大残留时延将受到严格约束，使得时间感知调度器（time-aware scheduler, TAS）的时间窗口管控精度得到提升，进而增强TSN在列车控制通信等极端严苛实时场景下的确定性通信性能。

抢占过程的时序可通过以下公式严格描述。设链路速率为R/(bit/s)，p-frame长度为L_p/bit，e-frame长度为L_e/bit，则单次抢占的总干扰时延D（Interference Delay）可表示为(1)。

$$T_{\text{interference}} = T_{\text{verify}} + \frac{L_{\text{min, mPacket}}}{R} + \frac{L_{\text{e}}}{R} + T_{\text{resume}} \tag{2}$$

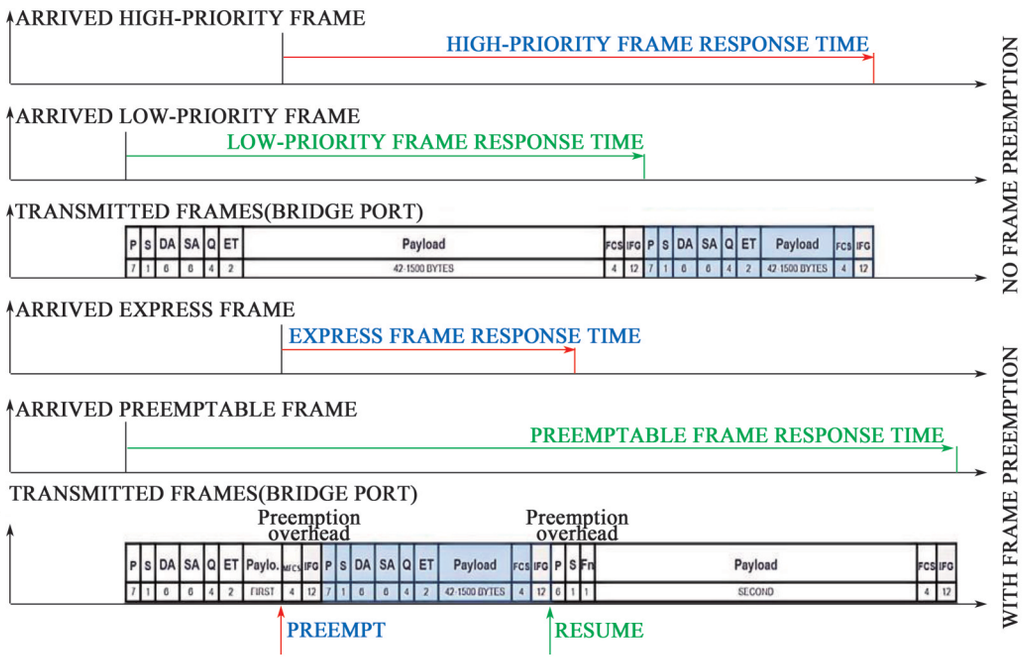


图4　802.1Qbu协议原理图

Fig. 4　Schematic diagram of 802.1Qbu protocol

式中：T_{verify}为验证阶段时延（接收方确认Start mPacket后～1 μs）；$L_{\text{min,mPacket}}$=64×8 bit（最小以太帧＋CRC）；T_{resume}为恢复阶段时间（End mPacket后~0.5 μs）。

1.4　协议协同机制与最坏情况时延(WCD)建模

TSN在列车通信网络中的确定性保障并非单一协议作用的结果，而是时间同步、流量整形与抢占机制紧密耦合的产物。

1.4.1　时间同步与门控调度的耦合关系

IEEE 802.1AS提供的全局时钟是802.1Qbv门控列表（GCL）执行的基准。若主从时钟偏差（Δ）超过保护带（guard band，GB）的保护带容限（GB_tol），将导致关键控制帧在门关闭瞬间被截断或错误丢弃。根据IEC 61375-2-5 Clause 7.3 Time synchronization（时间同步），列车控制业务通常要求时钟同步精度优于1 μs。

设T_{cycle}为调度周期，T_{offset}为相位偏移，实际开启时间T_{open}的不确定性可表示为

$$T_{\text{open_uncertainty}}=\Delta t_{\text{sync}}+\delta_{\text{jitter}} \tag{3}$$

其中δ_{jitter}为时钟抖动。若时钟抖动过大，则必须增大GB以补偿时钟不确定性，但GB的增大会减少有效传输窗口，从而牺牲有效带宽。因此，高精度的802.1AS是保障高带宽利用率802.1Qbv的前提。

1.4.2　帧抢占对调度效率的优化量化

传统802.1Qbv为防止低优先级长帧阻塞高优先级帧，需设置$T_{\text{guard}}\geqslant T_{\text{max_frame}}$（在1 Gbps下约12 μs）。采用引入IEEE 802.1Qbu/802.3br帧抢占后，低优先级帧可被分片传输，保护带仅需覆盖最小分片长度及恢复开销（约1.5 μs）。

设带宽利用率提升率η，则η可近似计算为

$$\eta=\frac{T_{\text{max_frame}}-T_{\text{preemption_overhead}}}{T_{\text{cycle}}}\times 100\% \tag{4}$$

式中：$T_{\text{max_frame}}$为保护带时长；$T_{\text{preemption_overhead}}$为帧抢占后的最小保护带时长；$T_{\text{cycle}}$为控制周期。

在典型列车控制周期（1 ms）[10]下，帧抢占机制理论上可缩短约10.5 μs的时间窗口，相当于在1 Gbps链路上额外增加了约1.3 KB的有效载荷空间，这对于视频流与控制流融合的混合业务场景具有显著的性能提升。

1.4.3　最坏情况时延(WCD)评估模型

为评估系统的实时性上限，本文基于IEEE 802.1Qbv标准附录A的时延计算框架，建立如下WCD模型。最坏情况时延由时间同步误差、队列调度等待时延、帧传输时延和抢占开销4部分独立叠加而成，各部分无重叠且分别对应不同协议层的边界时延：

$$T_{\text{WCD}}=T_{\text{sync_error}}+T^{\max}_{\text{queue_wait}}+T_{\text{transmission}}+T_{\text{preemption_overhead}} \tag{5}$$

式(5)中，$T_{\text{sync_error}}$为时间同步误差（时钟偏差带来的时延上限），由IEEE 802.1AS全网时间同步的最大时间误差决定，是门控调度执行的基准误差。理论依据是同步误差过大会导致门控列表（GCL）的开关时刻偏移，影响调度精度，因此必须计入最坏时延。

$T^{\max}_{\text{queue_wait}}$为队列最大等待时延（调度窗口阻塞上限），关键业务流在交换机队列中等待调度的最大时间，由IEEE 802.1Qbv门控周期与队列分配决定。理论依据是Qbv按周期窗口调度，关键队列需等下一个有效窗口。

$T_{\text{transmission}}$为帧发送时延（帧在链路上的发送时长），完整以太网帧从MAC层发出到链路发送完成的时间，由帧长度与端口速率决定。理论依据是1 Gbps端口下，

最大以太网帧发送时延约12 μs。

$T_{\text{preemption_overhead}}$为帧抢占开销（帧抢占带来的额外时延），IEEE 802.1Qbu 帧抢占时，分片校验、中断与恢复流程引入的最大额外开销。理论依据是帧抢占会将低优先级帧分片，并插入高优先级帧进行传输，产生约12 μs时延。该模型将作为后续测试结果分析的核心理论依据，用于验证实测数据是否满足理论边界。

2　基于TSN的列车通信网络体系结构

2.1　体系结构概览

传统列车通信网络（train communication network, TCN）遵循IEC 61375标准定义，普遍采用物理隔离的体系架构，例如以多功能车辆总线（multifunction vehicle bus, MVB）承载控制类业务，以以太网承载乘客信息系统（passenger information system, PIS）等非关键业务。通过“专网专用”模式保障通信安全性[1]。然而，该架构在带宽扩展能力、系统集成效率及运维一致性等方面存在显著局限性。面向以太网融合演进需求的NG-TCN，通过TSN技术完成“物理融合，逻辑隔离”的架构重构，其体系架构分为列车级骨干网（Ethernet train backbone, ETBN）与车辆级编组网（Ethernet consist network, ECN）两级：ETBN承担跨车厢数据传输任务，ECN负责车厢内部设备的互联通信[11]。

NG-TCN的核心架构特征为采用双冗余梯形拓扑（dual redundant ladder topology），其通过两个物理隔离的网络平面（A/B平面）搭建符合SIL4安全完整性等级要求的控制业务高可用通信基座，实现链路级与节点级的双重冗余机制。传统MVB总线带宽仅为1.5 Mbps，支持最大节点数32个，端到端时延不小于2 ms，无法满足高清视频传输需求；而NG-TCN基于千兆以太网，带宽提升超600倍，支持节点数扩展至256个，端到端时延可控制在25 μs以内。同时，依托TSN技术提供的时间同步、确定性调度、帧抢占等核心机制，NG-TCN可在统一的以太网物理介质上实现不同安全关键等级业务的融合承载，使列车控制与管理系统（train control and management system, TCMS）的控制数据、视频流、维护与诊断信息等多类型业务数据，在同一通信基础设施上以可预测时延与高可靠性完成协同传输。该体系从根本上解决了传统TCN依赖多网络、多协议的技术瓶颈，可将列车通信网络的部署成本降低约40%、运维复杂度降低35%；但实际部署中仍需应对多厂商设备互操作性、既有线路改造兼容性等挑战，未来需进一步完善跨厂商配置规范与现场调试工具链。基于TCN的列车通信网络如图5所示。

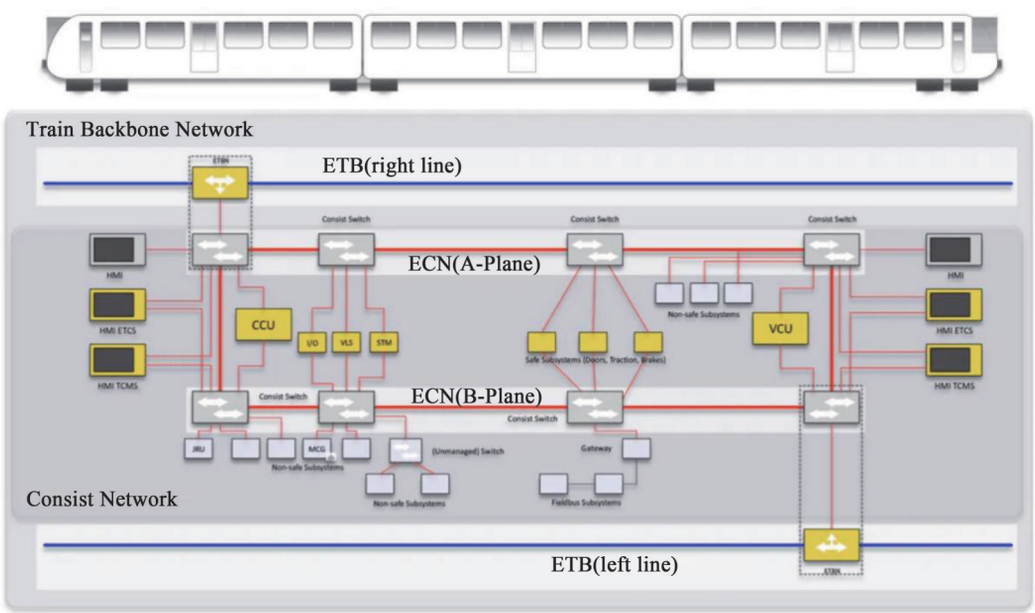


图5　基于TSN的列车通信网络（NG-TCN）

Fig. 5　TSN-based train communication network

2.2　分层协议栈模型

为实现跨车组、跨业务场景的确定性通信，NG-TCN基于开放式系统互联（open systems interconnection, OSI）参考模型，构建了面向实时控制需求的TSN扩展协议栈[11]。该协议栈通过物理层至应用层的多层面协同机制，构建了“物理融合，逻辑隔离”的体系架构，为未来列车控制、视频监控及乘客服务等多业务的统一承载提供核心技术支撑。

①物理层与数据链路层提供了时间同步与高可靠传输的基础支撑能力。基础标准遵循IEEE 802.3千兆以太网标准；时钟同步遵循IEEE 802.1AS协议，通过通用精确时间协议（generalized precision time protocol, gPTP）实现全列车范围内不长于500 ns（典型16跳场

景下短于300 ns）的亚微秒级时间同步[5]，可为牵引、制动、车门、防滑及车地无线自动列车运行（automatic train operation, ATO）越区切换等系统提供统一物理时钟，是所有跨车组协同控制功能实现的基础。

②网络层与传输层提供基于标准协议的差异化分级承载机制。

实时业务主要采用用户数据报协议/网际协议（user datagram protocol/internet protocol, UDP/IP）承载，并结合IEEE 802.1Q协议的虚拟局域网（virtual local area network, VLAN）与优先级代码点（priority code point, PCP）标签实现业务隔离与等级划分。NG-TCN通常采用如下优先级映射策略：

a.PCP 7：网络控制（network control, NC）及时间同步相关业务流。

b.PCP 5~PCP 6：列车控制与管理系统（train control and management system, TCMS）关键控制业务流。

c.PCP 3~PCP 4：高清视频监控（closed-circuit television, CCTV）等软实时业务流。

d.PCP 0~PCP 2：乘客Wi-Fi、维护日志等尽力而为业务流。

基于标准以太网的分级承载机制，确保了不同关键等级业务在统一网络架构下的可控共存，同时为后续TSN调度提供清晰的优先级语义支撑。

③应用层与安全层提供基于SDTv4的“黑通道通信”安全防护机制。

在标准UDP/IP协议之上，NG-TCN引入安全数据传输协议版本4（safe data transmission version 4, SDTv4）作为安全传输层，为跨车组控制数据提供独立于物理网络的安全完整性保护[11]。SDTv4通过安全校验码、序列号、时间戳等多重机制，实现对“黑通道”（black channel）传输环境的端到端安全防护，实现系统安全性与网络可靠性解耦，满足EN 50159、EN 50126等铁路行业安全标准的严苛要求。

④TSN调度与隔离提供融合通信的核心实现机制。

TSN协议族通过IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv及IEEE 802.1Qbu协议提供的互补能力，实现不同关键等级业务在同一物理网络中的确定性并行传输[4]。

a.时间门控调度（IEEE 802.1Qbv）：时间感知整形器（time-aware shaper, TAS）采用周期性门控，为SIL4业务分配专用窗口，从而消除竞争。TAS采用周期性门控调度机制，为安全完整性等级4级控制业务分配高优先级专用时间窗口，实现业务流的无竞争、无抖动传输[7]。该机制的最坏情况端到端时延可精确计算并被控制在25 μs以内，实时性能显著优于传统列车总线（wire train bus, WTB）/多功能车辆总线（multifunction vehicle bus, MVB），是NG-TCN实现确定性控制的核心技术路径。

b.帧抢占（IEEE 802.1Qbu）：帧抢占机制作为TAS调度机制的重要补充，在突发控制帧到达或门控列表（gate control list, GCL）存在偏差的场景下，可实现对低优先级视频/Wi-Fi业务流的中断，且最坏情况下干扰时延不长于1.5 μs[8]；该机制可将传统防护带宽（guard band）从约16 μs压缩至1.5 μs，并使1 Gbit/s链路的利用率从约65%提升至95%以上。

c.通过将IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv及IEEE 802.1Qbu等TSN核心机制深度融入列车通信体系，NG-TCN首次实现了标准以太网在统一物理基础设施上，同时承载SIL4级控制业务、高清视频与乘客信息服务及Wi-Fi/设备诊断等多类型业务的确定性传输需求[11]，具备端到端时延可预测、抖动严格受控及带宽高效利用的融合通信能力。该技术体系已被国际电工委员会（international electrotechnical commission, IEC）标准IEC 61375-2-6定义为NG-TCN的唯一强制性规范，成为中国CR450智能动车组及欧洲下一代列车控制系统的核心技术路线。

3 TSN协议一致性测试与验证

在NG-TCN的构建过程中，协议一致性测试是保障系统可用性与可验证性的核心基础环节。TSN协议族由IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu等多项核心标准组成，任一协议的实现偏差都可能在跨厂商组网场景下引发时间同步漂移、调度冲突或冗余流误消除等严重问题。因此，一致性测试不仅是验证设备在多协议协同环境下互操作性的唯一有效手段，更是保障SIL4级关键控制流量具备高可靠性、可预测时延与强确定性的必要环节[12]。

3.1 一致性测试方案与测试结果分析

TSN协议一致性测试环境由测试仪、被测ECNN-TSN交换机及TSN终端3部分构成。测试仪表采用BigTao-V系列网络分析仪，该设备为支持TSN全协议栈分析的高精度设备，时间戳分辨率达纳秒级，能够精准捕获报文交互过程与队列调度时序。搭配Renix测试软件，BigTao-V系列测试仪能够实现对网络设备与网络系统的L2~L7层流量测试及协议仿真，在功能、性能与安全性维度提供多元化测试解决方案，覆盖研发、试验及质量控制等全流程的测试需求[13]。

被测设备为面向NG-TCN的TSN交换机（ECNN-TSN），硬件配置包括4个1 Gbps前面板电网口、16个100 Mbps前面板电网口及2个1 Gbps背板网口；支持通过自协商机制与对端设备协商端口速率及双工模式；兼容IEEE 802.1AS、802.1Qbv、802.1Qbu等TSN核心标准；支持精准时间协议（PTP）参数配置、门控列表管理、帧抢占功能及抢占策略设置，可实现TSN终端与普通以太网终端的混合接入[13]。

测试时先配置被测 ECNN-TSN 交换机开启 IEEE 802.1AS 时间同步、IEEE 802.1Qbv 门控调度及 IEEE 802.1Qbu 帧抢占功能；然后由测试仪向被测交换机注入 TSN 流量，流量经被测交换机转发后，由测试仪的接收端口捕获并开展流量分析，从而完成 TSN 协议一致性测试[13]。测试拓扑结构如图 6 所示。

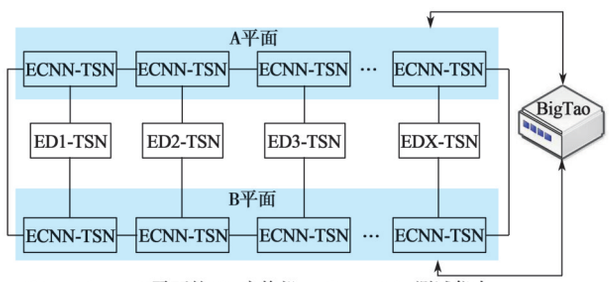


图 6　TSN 一致性测试拓扑（系统测试总图）

Fig. 6　TSN conformance testing topology

3.2　测试场景设计

针对 TSN 关键协议（IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qbv、802.1Qbu）一致性测试的详细场景设计，覆盖功能性、兼容性及边界条件，确保全面验证协议实现的一致性。

3.2.1　IEEE 802.1AS 时间同步协议一致性测试场景设计

IEEE 802.1AS 时间同步协议测试，测试内容主要包含基本测试、信令测试、主时钟选取测试、通告报文一致性测试、以太网环境下的协议一致性测试。通过测试仪与 ECNN-TSN 交换机进行时间同步后，抓包分析，验证 ECNN-TSN 交换机发送的 PTP 报文各字段的值、报文类型是否符合标准，以及时间同步报文是否携带 VLAN。

A/B 平面的 ECNN-TSN 交换机连接成环网，测试仪连接 ECNN-TSN 交换机前面板网口，TSN 终端 ED-TSN 分别连接 A/B 平面的 ECNN-TSN 交换机前面板网口。P1 为测试仪流量发送端和接收端。测试拓扑如图 7 所示。

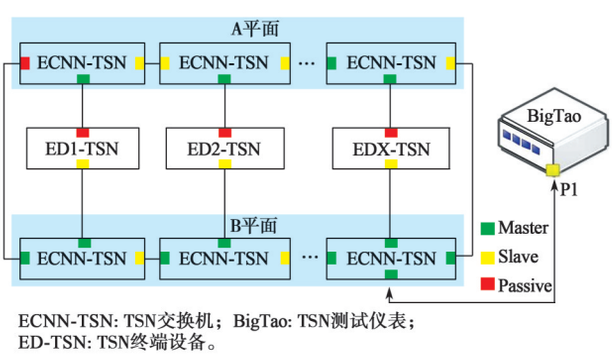


图 7　IEEE 802.1AS 一致性测试拓扑

Fig. 7　IEEE 802.1AS conformance testing topology

测试步骤如下：

①配置 ECNN-TSN 交换机与测试仪的 PTP 优先级，指定二者分别作为时钟主设备（grand master）或时钟从设备（slave）。

②启动测试仪的报文捕获功能。

③由测试仪表开启时钟同步协议，向 ECNN-TSN 交换机发送模拟 Pdelay 报文，静置 10 s 后停止报文捕获并开展报文分析。

④核查 'clockIdentity' 字段是否满足标准 IEEE 802.1AS 第 8.5.2.2 节的规定，'domain number'字段是否符合 IEEE 802.1AS 标准第 8.1 节的要求。

⑤解析 PTP 信令报文中的'targetPortIdentity'参数，校验信令报文格式与类型长度值（TLV）的合规性。

⑥验证最佳主时钟算法（BMCA）模拟选举过程的合规性。

⑦校验 Announce 报文的报头、报文体、标志位及保留字段的合规性。

⑧验证以太网链路的一致性和合规性。

⑨最后，将各测试项的通过情况汇总，与标准 IEEE 802.1AS 要求逐项比对，形成一致性测试报告。

3.2.2　802.1Qbv 协议一致性测试场景设计

802.1Qbv 协议一致性测试涵盖门控开关有效性验证、超大帧丢弃测试、默认门状态测试、窗口违规测试等核心内容。通过测试仪向 ECNN-TSN 交换机注入差异化 TSN 流量，验证被测设备出口端配置的门控参数（如门控周期、门控列表等）的有效性。

测试拓扑如下：测试仪与 ECNN-TSN 交换机通过以太网实现互联，测试仪表端口 P1 发送归属 VLAN10 的 Qbv 数据流，端口 P3 发送归属 VLAN10 的非门控队列流量，端口 P2 接收 VLAN10 的 Qbv 数据流；端口 P4 发送归属 VLAN20 的 Qbv 数据流，端口 P6 发送归属 VLAN20 的非门控队列流量，端口 P5 接收 VLAN20 的 Qbv 数据流。测试拓扑如图 8 所示。

测试步骤如下：

①在 ECNN-TSN 交换机出口处配置门控列表、门控周期、每个门控列表的时长以及基准时间，使门控功能生效。

②配置测试仪发送端 P1 处的 TSN 流量参数，如 MAC、流量优先级、流量大小、VLAN。完成上述配置后，启动测试仪发送 TSN 流量。

③测试仪接收端 P2 和 P3 开启抓包并分析报文。

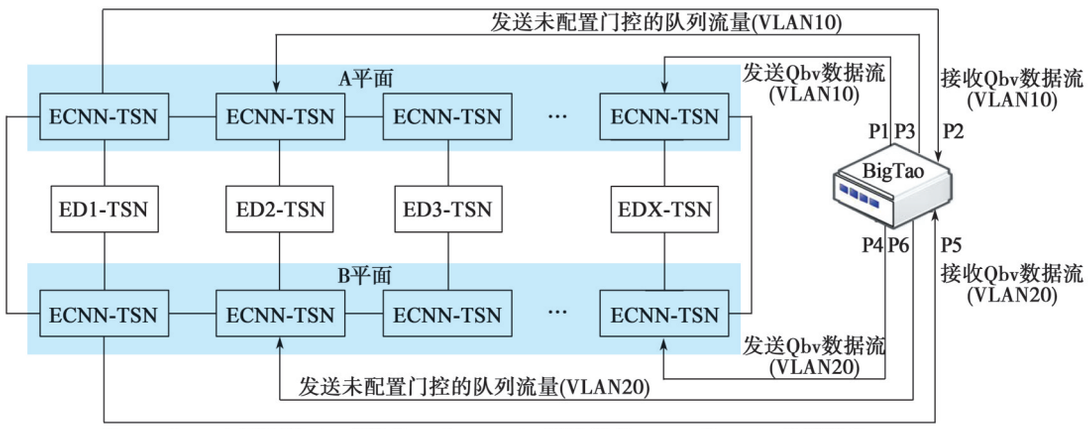
④根据测试规范，验证测试结果是否符合预期，并记录通过/失败状态。

3.2.3　802.1Qbu 的协议一致性测试场景设计

802.1Qbu 协议一致性测试内容包含可抢占帧分片与重组、错误报文与异常处理、链路协商与控制报文等。测试仪通过发送不同的帧，验证 ECNN-TSN 交换机的抢占帧的优先级中断与重组正确性，测试设备异常分片纠错能力，验证 ECNN-TSN 交换机是否可通过 SMD-V/R 报文与对端进行功能协商，确保双方能力

一致。

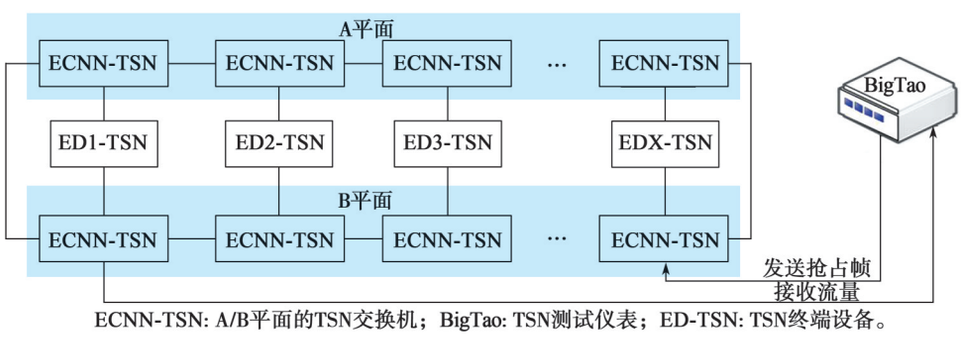
测试仪和ECNN-TSN交换机以太网互联，P1为测试仪流量发送端，P2为流量接收端。测试拓扑如图9所示。



ECNN-TSN: A/B平面的TSN交换机；BigTao: TSN测试仪表；ED-TSN: TSN终端设备。

图8 IEEE 802.1Qbv一致性测试拓扑

Fig. 8 IEEE 802.1Qbv conformance testing topology



ECNN-TSN: A/B平面的TSN交换机；BigTao: TSN测试仪表；ED-TSN: TSN终端设备。

图9 IEEE 802.1Qbu一致性测试拓扑

Fig. 9 IEEE 802.1Qbu conformance testing topology

测试步骤如下：

①将P1和P2连接到ECNN-TSN交换机；

②配置ECNN-TSN交换机流量出端口，并开启抢占功能；

③从测试仪P1向ECNN-TSN交换机发送4种可抢占帧，带有VlanID和不同VLAN优先级；

④测试仪P1再创建几条高优先级帧，所有流量一起发送；

⑤在测试仪P2口抓包并分析报文；

⑥验证测试结果是否通过。

3.3 测试结果

IEEE 802.1AS、802.1Qbv及802.1Qbu协议的一致性测试严格遵循IEEE 802.1系列测试规范与参考模型。测试目标为验证TSN设备在时间同步、时间调度及帧抢占机制上是否符合标准，以及跨厂商设备间的互操作能力。测试采用黑盒测试方法，在严格受控的标准化测试平台上开展。该平台涵盖全双工点对点链路仿真器、高精度流量生成与捕获系统、协议语义分析工具等核心组件，旨在保障测试结果的可复现性与可比性。测试内容全面覆盖协议报文格式合规性、核心状态机行为一致性、时间戳精度、调度执行同步性、抢占触发条件有效性及帧片段重组正确性，同时纳入异常场景与边界条件下的处理能力验证，为评估设备是否满足TSN工程化部署要求提供定量与定性相结合的判定依据。以下将分析基于上述测试方案的3项协议的一致性测试结果。

3.3.1 802.1AS协议一致性测试结果

802.1AS协议一致性测试旨在验证通用精确时间协议（generalized precision time protocol, gPTP）在设备中的实现精度与一致性，同时评估IEEE 802.1AS时间同步精度及其对TSN调度机制的影响。测试范围覆盖从基础报文格式合规性到最佳主时钟算法（best master clock algorithm, BMCA）决策逻辑的全流程验证。测试结果如表1。

测试现象：在16跳级联拓扑下，被测设备（DUT）末端节点的时间同步偏差为391 ns，最大时间误差（maximum time error, MTE）稳定在±450 ns以内。

深度分析：测试数据显示，亚微秒级的同步精度完全满足IEC 61375-2-6对SIL4级业务的时钟要求（≤1 μs）。

耦合效应验证：试验中人为注入时钟漂移，模拟长期运行后的同步劣化。当Δt_{sync}超过800 ns时，观察

表 1　802.1AS 协议一致性测试结果汇总

Table 1　Summary of 802.1AS protocol conformance testing results

测试类别	关键验证点	测试结果
基本测试	验证核心字段和时间基准是否符合标准（如 ClockIdentity 基于 MAC）	通过
		ClockIdentity 前 3 字节与 MAC 一致；domain number 在 [0-127]
信令测试	检查信令报文格式和 TLV（如 targetPortIdentity 全 FF）	通过
		MssageType=0xC；EtherType=0x88F7；TLV 类型=0x3
主时钟选举测试	通过 BMCA 模拟选举，比较 SystemIdentity（如 priority1）	通过
		较低 priority1 节点选为 Master；clockClass 在 [0-255]
通告报文一致性	检验 Announce 报文头/体、标志和保留字段	通过
		目标 MAC=01:80:C2:00:00:0E；序列号递增；currentUtcOffset=37
以太网一致性	媒体层要求，如无 VLAN tag、EtherType=0x88F7	通过
		报文无 VLAN；EtherType=0x88F7
时间同步偏差	时间同步偏差为亚微秒级	通过
		16 跳内时间同步偏差为 391 ns

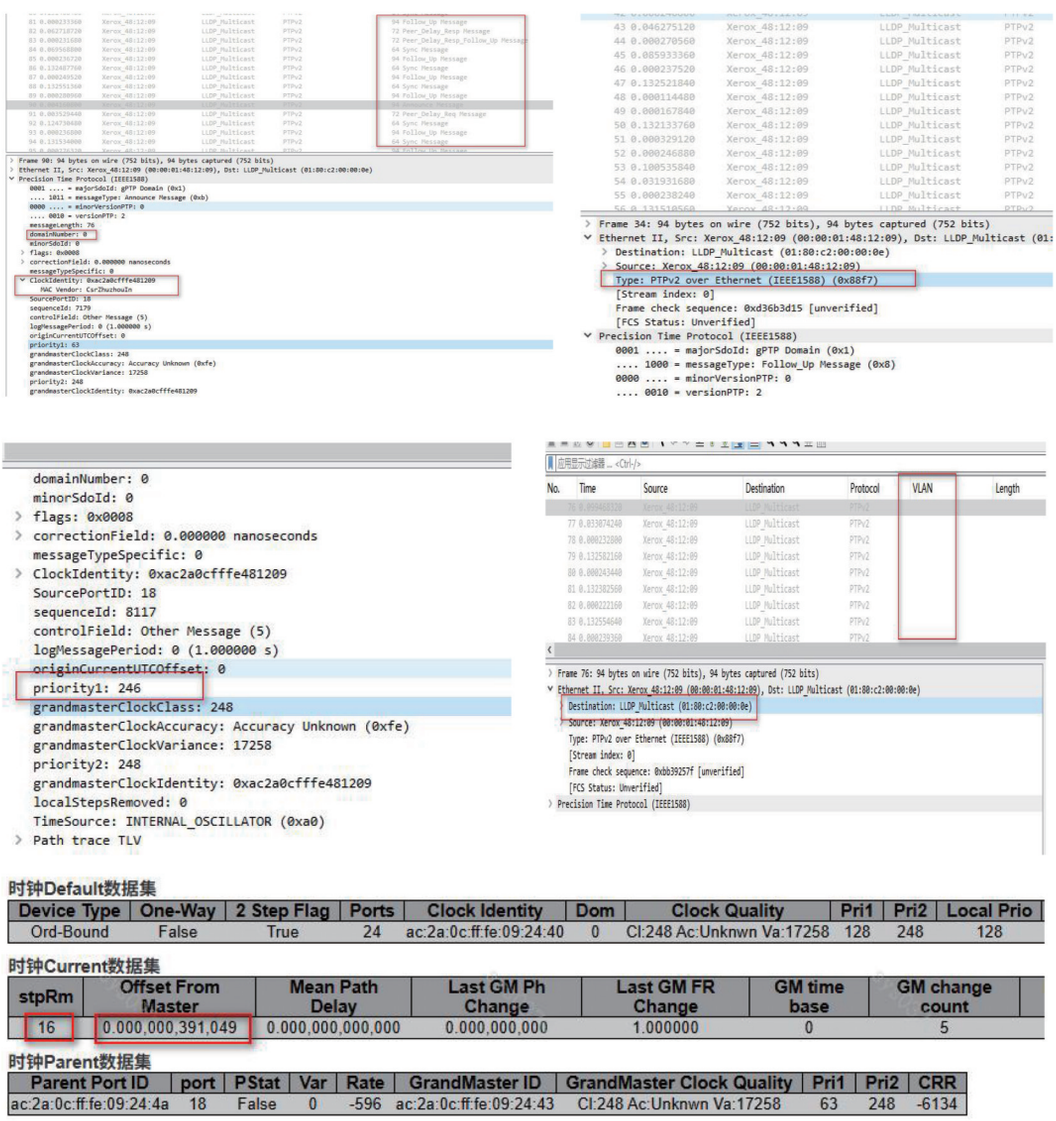


图 10　802.1AS 协议一致性测试结果图

Fig. 10　Results of 802.1AS protocol conformance testing

到 802.1Qbv 调度出现偶发的帧丢弃现象。该现象证实了 1.4.1 节理论模型的预测：实测数据表明，当保护带设置为 2 倍 MTE 时，可有效避免时钟漂移引发的帧丢弃，同时带宽损失控制在可接受范围内，建议在 NG-TCN 设计中采用此配置。

3.3.2 802.1Qbv 协议一致性测试结果

IEEE 802.1Qbv 协议通过门控列表（GCL）实现流量的确定性调度。本测试的核心目标为验证调度窗口的时间精度、不同优先级队列间的业务隔离性，同时考察 IEEE 802.1Qbv 门控调度机制在高负载场景下的稳定性，测试结果如表 2 和图 11 所示。

由图 11 所示的测试结果可知，对于优先级为 7 的流量，同一调度周期内首个至末个报文的传输时长差小于 125 μs。

表 2 IEEE 802.1Qbv 协议一致性测试汇总

Table 2 Summary of IEEE 802.1Qbv protocol conformance testing results

测试类别	关键验证点	测试结果
传输门测试	验证 GCL 配置精确性，queue6 开启时仅允许 priority=6 流量通过	通过 queue6 流量周期 1 ms，误差小于 1 μs；priority=6 帧通过，其他队列被阻止
门关闭状态测试	确保全关闭状态下无流量通过，部分关闭时验证预期丢包率（如 queue6 70%，queue7 50%），确认调度隔离性	通过 全关闭无报文通过；部分关闭下 queue6/7 丢包率符合预期；抓包验证隔离性
超大帧丢弃测试	检查 queueMaxSDU（200 字节）限制，验证 128 字节帧通过，300 字节帧丢弃	通过 在 128 字节帧长条件下，所有测试帧均成功传输；而在 300 字节帧长条件下，所有帧均被丢弃。通过抓包分析，确认该现象与帧大小过滤机制及门控列表（GCL）的周期性配置相关
默认门状态测试	验证默认 AdminGateStates 全开，400 字节帧无丢包，验证所有队列流量通过	通过 优先级 priority=0~7 的 400 字节帧无丢包；抓包验证所有队列流量正常传输
窗口违规测试	测试 8 个队列 125 μs 窗口，确认无超窗传输，验证周期性（1 ms）符合标准	通过 各队列传输时间短于 125 μs，周期 1 ms；抓包确认无窗口违规，间隔符合预期

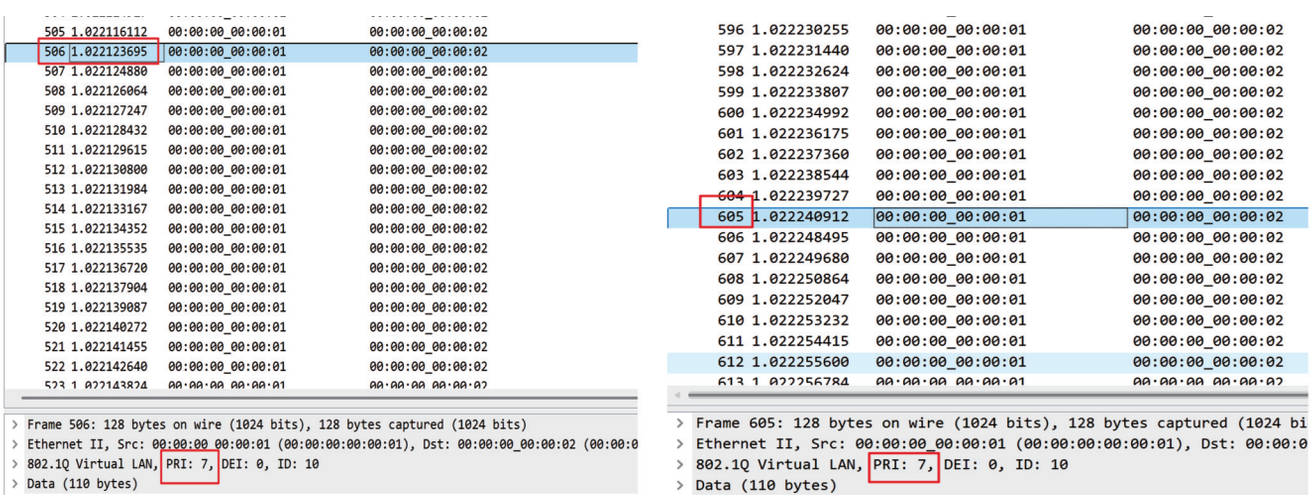


图 11 IEEE 802.1Qbv 协议一致性测试结果

Fig. 11 Results of IEEE 802.1Qbv protocol conformance testing

3.3.3 IEEE 802.1Qbv 门控调度机制在高负载场景下的鲁棒性

测试场景设置是背景流量以突发模式注入，强度达到端口线速的 95%，同时周期性关键控制流也被注入。

测试结果与分析如下：

①常规测试：关键控制流的端到端时延抖动小于 5 μs，且无报文丢失，所有测试项均通过。

②边界测试：当背景流量突发持续时长超过调度周期的 80% 时，关键控制流的端到端时延出现峰值，但该峰值仍未超出理论计算最坏情况延时(WCD)的上限值（125 μs）。

被测设备在极端高负载条件下仍能严格执行 GCL 表的调度规则，验证了其硬件队列调度逻辑的强确定性（刚性）。实测最大时延抖动主要源于物理层编码开销与微弱的时钟相位噪声，而非调度算法失效，这进一步证明了 GCL 调度机制的可靠性。

3.3.4 802.1Qbu 协议一致性测试结果

802.1Qbu 旨在通过将背景流量分片（mPacket），确保高优先级 Express 流量的极低时延传输。测试结果如表 3 和图 12。

优先级为 6 的报文由 5 个 mPacket 合并为一个完整帧，其他可抢占帧完整转发。

测试了 DUT 开启帧抢占功能后，主动向对端发送 SMD-V 报文进行功能协商的流程正确性，如图 13 所示。

表3　802.1Qbu协议一致性测试汇总

Table 3　Summary of 802.1Qbu protocol conformance testing results

测试类别	关键点验证	测试结果
可抢占帧分片与重组	将低优先级帧拆分为多个 mPacket，并与高优先级 Express 帧竞争传输，验证ECNN-TSN是否能正确重组报文	通过 实测说明：mPacket 正确合并为完整帧；分片处理符合预期；长间隔（>60 s）分片后重组符合预期；无序分片的重组符合预期
错误报文与异常处理	向分片中注入错误SMD或CRC，检验ECNN-TSN是否具备健壮的异常检测与处理机制	通过 实测说明：错误SMD被正确丢弃/忽略；错误CRC报文被丢弃；修复CRC后恢复正常重组
链路协商与控制报文	ECNN-TSN 在启用抢占功能时，应通过SMD-V/R报文与对端进行功能协商，确保双方能力一致	通过 实测说明：ECNN-TSN 主动发送 SMD-V 报文；收到对端 SMD-V 后正确回应 SMD-R；严格遵循握手机制完成链路协商

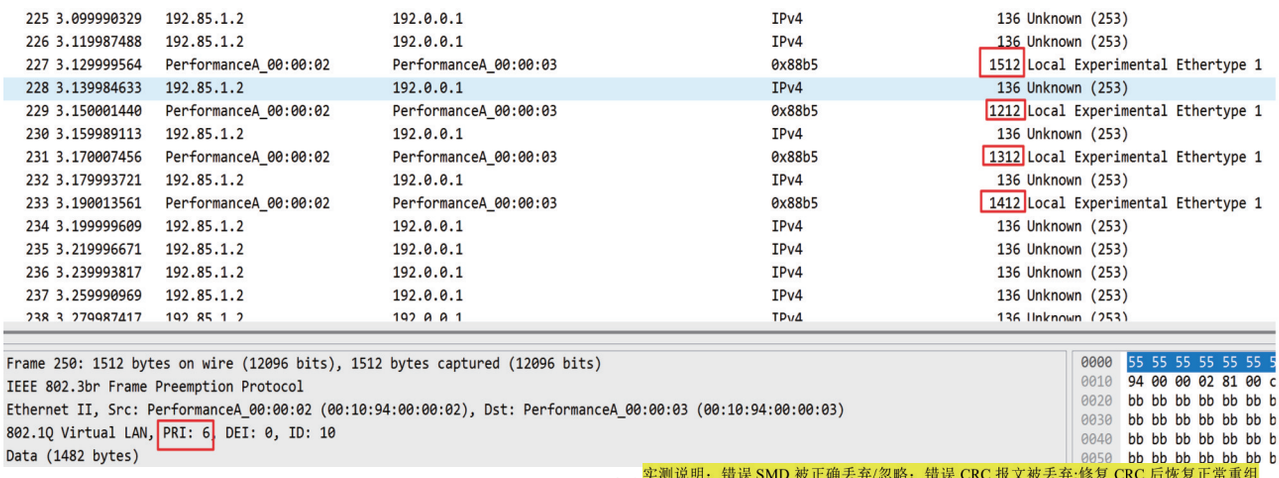


图12　可抢占帧

Fig.12　Analysis of preemptable frame transmission

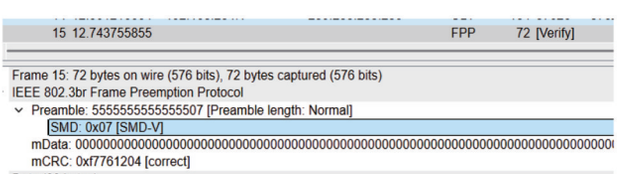


图13　SMD-V功能

Fig. 13　SMD-V function

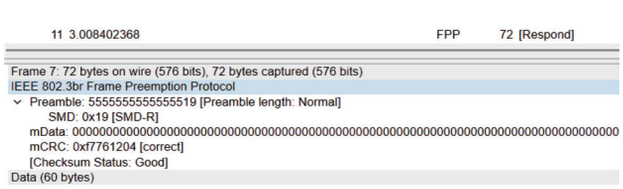


图14　SMD-R响应确认

Fig. 14　SMD-R response confirmation

表4　IEEE 802.1Qbu 帧抢占效率与开销量化测试结果

Table 4　Testing Results of Frame Preemption Efficiency and Overhead (IEEE 802.1Qbu)　　μs

测试项	理论开销	实测平均开销	实测最大开销	保护带的压缩率
非抢占模式保护带	12.0	12.1	12.5	基准
抢占模式保护带	1.5	1.62	1.85	+86.5%

验证DUT开启帧抢占功能后，收到对端发送的SMD-V时会发送SMD-R进行响应，如图14所示。

3.3.5　IEEE 802.1Qbu 帧抢占效率与开销量化

实测数据显示，帧抢占引入了约0.12 μs的额外处理延迟（主要用于分片校验与恢复），但成功将保护带压缩至1.85 μs。

在连续高频次抢占场景下（高优先级帧间隔小于5 μs），低优先级帧的重组错误率为0。验证了DUT的分段重组缓冲区设计的合理性，未出现因资源竞争导致的逻辑错误。

从工程角度看，对于承载高清视频监控（大帧）与牵引控制（小帧）混合业务的列车网络，启用802.1Qbu可使视频流的吞吐量在不影响控制流实时性的前提下提升近15%，验证了其在多业务融合场景中的核心价值。

最坏情况时延(WCD)T_{WCD}验证：

结合3.2.1 ~ 3.2.3节的实测参数，代入1.4.3节最坏情况时延（WCD）评估模型，计算如下：

$$T_{\text{WCD calc}} = 0.45(T_{\text{sync_error}}) + 100(T^{\max}_{\text{queue_wait}}) + 12(T_{\text{transmission}}) + 1.85(T_{\text{preemption_overhead}}) = 114.3\ \mu s \quad (5)$$

实测最大端到端时延为 118.2 μs，较理论计算值高约 2.7%，该差异主要归因于物理链路传播延时（约 2.1 μs）及测试仪器固有误差（约 1.0 μs）。该偏差在可接受范围内，从而验证了模型的准确性，证明了该 ECNN-TSN 设备在极端工况下的确定性时延是可预测、可管控的，满足列车控制要求。

4 结束语

基于上述分析，本文针对工程实践提出若干建议：

①协议协同：确定性传输的核心支撑。IEEE 802.1AS、802.1Qbv 与 802.1Qbu3 类协议具有强耦合关联特性：精度优于 500 ns 的高精度时间同步是 802.1Qbv 门控调度机制高效运行的前置保障，而 802.1Qbu 帧抢占机制则是应对突发流量、优化保护带配置的关键冗余支撑手段。单一协议的合规性不足以保障整网的确定性传输能力，需通过系统级协同测试实现全网确定性的有效验证。

②针对工程配置阈值建议。基于实测获得的时钟漂移与帧抢占开销数据，建议在 NG-TCN 的网络规划阶段，将 802.1Qbv 保护带参数配置为 2.0~2.5 μs。该取值可覆盖绝大多数工业级晶振的漂移区间，同时最大化挖掘帧抢占机制的带宽利用潜力。

③互操作性风险警示。IEEE 802.1AS 协议中最佳主时钟算法（BMCA）的可选参数（如 domainNumber、priority1）配置不一致，是导致时间同步失效的主要诱因。多厂商设备组网测试结果表明，建议行业层面制定统一的《轨道交通 TSN 配置规范（Railway TSN Profile）》，对标准中的可选参数实施强制性约束，规避跨厂商设备的互操作性风险。

与此同时，本研究仍存在一定局限性：①测试验证工作主要聚焦于有线场景下 TSN3 类核心协议的一致性与性能边界分析，尚未覆盖无线 TSN（IEEE 802.11BE）及 TSN 与 5G-R 融合组网等下一代列车通信网络的重点研究方向；②当前测试主要针对单设备协议实现合规性开展验证，尚未在大规模多厂商设备组网环境下进行长期稳定性与可靠性测试，极端拓扑条件下的协议协同行为有待进一步观测。

综上，本文提出的测试方案与分析方法，不仅验证了被测设备的国际标准合规性，更为 NG-TCN 的架构设计、参数优化配置及全生命周期运维保障提供了兼具理论价值与工程可行性的技术依据与数据支撑。后续研究将进一步围绕 NG-TCN 的工程化落地需求，开展 IEC 61375-2-6 等 TSN 配置规范（TSN Profile）下的系统级一致性验证测试，并探索 TSN 与 5G-R、车地协同控制等技术的跨域互操作性测试方法，为智能列车控制系统的网络化演进提供更为全面的技术支撑。

参考文献：

[1] GB/T 28029.13—2025 轨道交通电子设备 列车通信网络 (TCN) 第 4-1 部分: 基于绞线式列车总线 (WTB) 的列车通信网络试验方法[S].
GB/T 28029.13—2025 Electronic railway equipment—train communication network(TCN) -Part 4-1: the test method of train communication network based on wire train bus(WTB)[S].

[2] IEC 61375-2-5:2014 Electronic railway equipment - train communication network (TCN) - Part 2-5: Ethernet train backbone [S].

[3] 陈三伟, 赵伟, 方震, 等. TSN 时间敏感网络帧抢占的研究与电路实现[J]. 电子技术应用, 2024, 50(4): 29-32.
Chen Sanwei, Zhao Wei, Fang Zhen, et al. Research and circuit implementation of frame preemption for TSN time-sensitive network[J]. Application of Electronic Technique, 2024, 50(4): 29-32.

[4] 卓兰, 张弛, 韩丽. 基于 ISO/IEC/IEEE 8802-1AS 广义精确时间协议的时间同步仿真方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(8): 129-137.
Zhuo Lan, Zhang Chi, Han Li. Time synchronization simulation method based on ISO/IEC/IEEE 8802-1AS generalized precision time protocol[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(8): 129-137.

[5] 赵国锋, 危瑞鹏, 邢媛, 等. 基于 IEEE802.1AS 的多跳时钟同步算法与系统实现[J]. 电子学报, 2024, 52(3): 814-823.
Zhao Guofeng, Wei Ruipeng, Xing Yuan, et al. Multi-hop clock synchronization algorithm and system implementation based on IEEE 802.1AS[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(3): 814-823.

[6] 杨明亮, 吴春明, 沈丛麒, 等. 基于 IEEE 802.1 的 TSN 交换机队列调度技术研究[J]. 电子学报, 2022, 50(9): 2090-2095.
Yang Mingliang, Wu Chunming, Shen Congqi, et al. Research on queue scheduling strategy on IEEE 802.1 based TSN switch[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(9): 2090-2095.

[7] 黄韬, 鲁京京, 朱海龙, 等. 车载时间敏感网络: 现状与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(6): 46-54.
Huang Tao, Lu Jingjing, Zhu Hailong, et al. Automotive in-vehicle time-sensitive networking: the state of the art and prospect[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(6): 46-54.

[8] Jia W K, Liu G H, Chen Y C. Performance evaluation of IEEE 802.1Qbu: experimental and simulation results [C]// Proceedings of the 38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, 2013: 659-662.

[9] 802.3br-2016 IEEE standard for Ethernet amendment 5: specification and management parameters for interspersing

express traffic[S].

[10] T/CITSA 60—2025　城市轨道交通车辆时间敏感网络(TSN)应用技术规范[S].
T/CITSA 60—2025　Urban rail transit vehicles-technical specification for time-sensitive networking (TSN) application[S].

[11] 杨莉华, 吴瀚, 黎晒, 等. 基于精确时钟协议的多时钟源时钟同步实现[J]. 光电技术应用, 2021, 36(6): 60-65.
Yang Lihua, Wu Han, Li Bing, et al. Implementation of multi-clock source clock synchronization based on precision time protocol[J]. Electro-optic Technology Application, 2021, 36(6): 60-65.

[12] IEC 61375-2-6: 2025　Electronic railway equipment - train communication network (TCN) - Part 2-6: train-to-ground communication[S].

[13] 北京信而泰科技股份有限公司. BigTao-V 系列网络测试仪技术手册[Z]. 北京: 北京信而泰科技股份有限公司, 2024.
Beijing Xinertai Technology Co., Ltd.. Technical manual of BigTao-V series network tester[Z]. Beijing: Beijing Xinertai Technology Co., Ltd., 2024.

Analysis and conformance testing of TSN core protocols for next-generation train communication network

HUANG Wang[1], ZHONG Tao[1], LIU Zhonghua[1], LI Liping[2], MENG Jing[2]

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. Beijing Sinertel Technology Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: As train control systems continuously evolve toward higher speed, intelligence and integration, traditional train communication network (TCN) architectures based on WTB/MVB buses can no longer meet stringent requirements for real-time converged transmission of multiple services. Leveraging core mechanisms including microsecond-level time synchronization, deterministic scheduling and frame preemption, time-sensitive networks (TSN) have established a predictable real-time transmission guarantee system within a unified Ethernet architecture for the next-generation train communication network (NG-TCN). Although TSN has been extensively studied in the field of industrial automation, systematic research on its adaptability and conformance testing methods for multi-service converged scenarios in rail transit remains underexplored. Most previous studies focus on protocol principles and functional simulation, having not yet conducted quantitative analysis of performance boundaries and engineering configuration research based on measured data. This paper aims to fill this research gap. It begins with an in-depth analysis of the operating mechanisms of three core TSN protocols, namely IEEE 802.1AS for time synchronization, IEEE 802.1Qbv for gated scheduling, and IEEE 802.1Qbu for frame preemption, which reveals their coupling and coordination relationships, and establishes a worst-case delay (WCD) evaluation model. On this basis, this paper constructs an automated conformance testing platform equipped with high-precision test instruments to conduct systematic functional verification and quantitative analysis of performance boundaries for the three key protocols. Experimental results showed that the tested ECNN-TSN (Ethernet consist network switch with TSN functions) met the requirements of the IEEE 802.1 series standards for time synchronization accuracy, gated scheduling determinism and frame preemption efficiency. Specifically, time synchronization errors remained within ±450 ns under a 16-hop cascaded topology, and delay jitter for critical services was kept within 5 μs even under high-load conditions. The frame preemption mechanism can reduce guard band overhead from approximately 12 μs to 1.85 μs, thereby improving bandwidth utilization for critical services by around 87%. Measured worst-case delays deviated from the theoretical model predictions within a reasonable range. This study provides quantitative support for engineering deployment of TSN technology in train communication networks, and the proposed thresholds for guard band configuration offer important reference value for NG-TCN planning.

Keywords: time-sensitive networking (TSN); train communication network (TCN); next-generation train communication network (NG-TCN); IEEE 802.1AS; IEEE 802.1Qbv; IEEE 802.1Qbu; protocol conformance testing

收稿日期：2025-12-28；修回日期：2026-07-01
责任编辑：钟　锋