



研究与开发

时间敏感列车通信网络：架构设计与性能评估

李洪星¹, 姚辰龙¹, 赵晓宇², 赵东², 陈立², 寿国础¹

(1. 北京邮电大学, 北京 100876;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

摘要: 为满足列车实时数据协议 (train real-time data protocol, TRDP) 承载的时间关键型业务对通信确定性的严苛要求, 提出一种时间敏感网络 (time-sensitive networking, TSN) 与 TRDP 融合的时间敏感列车通信网络方案。该方案通过构建分层的时间敏感列车通信网络架构, 将多样化列车车载应用系统服务需求经过 TRDP 映射到 TSN, 并利用 TSN 的时间同步和流量调度能力保障时间敏感列车业务流量的端到端确定性。基于此架构, 设计了基于最早截止时间优先策略的门控列表生成算法, 以保障关键流量的可调度性。仿真实验结果表明, 该方案显著提升了 TRDP 周期性数据的发送时间准确性与周期稳定性, 并在混合背景流量下大幅降低了端到端时延抖动, 为构建下一代高可靠、高效率的列车通信网络提供了理论支撑。

关键词: 时间敏感网络; 列车实时数据协议; 流量调度; 下一代列车通信网络

中图分类号: TP393; TN915.02

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2026108

Time-sensitive train communication network: architecture design and performance evaluation

Li Hongxing¹, Yao Chenlong¹, Zhao Xiaoyu², Zhao Dong², Chen Li², Shou Guochu¹

1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China

Abstract: To meet the stringent requirements for communication determinism of time-critical services carried by the train real-time data protocol (TRDP), a time-sensitive train communication network scheme was proposed based on integration of time-sensitive networking (TSN) and TRDP. This scheme constructs a hierarchical time-sensitive train communication network architecture, in which diverse service requirements of onboard train application systems are mapped through TRDP onto the TSN. The time-synchronization and traffic-scheduling capabilities of TSN were employed to guarantee end-to-end determinism for time-sensitive train traffic. Based on this architecture, a deadline-aware gate control list (GCL) generation algorithm was designed to ensure the schedulability of critical traffic. Simula-

收稿日期: 2025-10-06; 修回日期: 2025-11-26

通信作者: 姚辰龙, xiaoshuai_yao@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFC3803700); 中国铁道科学研究院集团有限公司资助项目 (No. 2024YJ164)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3803700), Project Funded by China Academy of Railway Sciences Co., Ltd. (No. 2024YJ164)



tion results demonstrate that the proposed scheme significantly improves the transmission time accuracy and periodic stability of TRDP periodic data, while substantially reducing end-to-end delay jitter under mixed background traffic, thereby providing theoretical support for the construction of next-generation, highly reliable and efficient train communication networks.

Key words: TSN, TRDP, traffic scheduling, next-generation train communication network

0 引言

随着全球轨道交通向高速化、智能化方向快速发展,列车通信网络作为支撑列车安全、高效运行的基础设施,其性能正面临前所未有的挑战^[1]。现代列车作为一个复杂的分布式实时系统,集成了大量传感器、控制器与执行器,其控制系统高度依赖能够承载海量数据并保障关键指令确定性传输的通信网络^[2]。从列车运行姿态的实时监控、牵引与制动系统的精确控制等关键时序业务,到乘客信息系统提供的多媒体服务,不同类型的业务数据流对通信时延、抖动和服务质量的要求各不相同,构成了典型的混合业务场景^[3]。

然而,当前广泛应用的基于传统以太网和现场总线的车载通信技术,在面对上述挑战时已逐渐暴露出根本性瓶颈。传统以太网采用“尽力而为”的转发机制,当网络负载发生变化时,数据包的传输时延与抖动往往难以预测,无法满足安全关键型业务(如列车制动)对硬实时截止时间的严苛要求^[4-5]。尽管列车实时数据协议在应用层规范了周期性数据的交互方式,但其性能仍高度依赖底层网络的传输确定性^[6-7]。采用多网物理隔离的网络虽能在一定程度上保障关键业务,但带来了布线复杂、成本上升、扩展性受限等一系列问题^[8]。因此,设计一种统一的网络架构,为时间关键型数据流提供具有可预测、有界确定性时延保障的传输环境,已成为下一代列车通信网络发展的核心挑战。

时间敏感网络(time-sensitive networking,

TSN)^[9]技术的出现,为应对上述挑战提供了理想的技术路径。作为IEEE 802.1工作组制定的一系列标准化协议,TSN通过引入高精度时间同步、流量整形与调度等核心机制,使标准以太网具备了提供确定性服务的能力^[10]。特别是其基于门控列表(gate control list, GCL)的时间触发调度机制,可为关键数据流提供专属的、无冲突的传输时隙,从而在理论上消除排队延迟与抖动,保障其端到端时延的有界性。将TSN技术引入列车通信网络,有望在统一的以太网物理架构上,同时满足关键业务的确定性需求与普通业务的高带宽需求^[11]。

列车实时数据协议(train real-time data protocol, TRDP)与TSN在协议栈上具备天然的兼容性:TRDP作为运行在UDP/IP之上的应用层协议,其数据报文最终被封装为以太网帧;TSN作为数据链路层技术,其核心机制正是针对以太网帧的转发进行管控。同时,两者在功能上高度互补:TRDP定义了上层应用的确定性需求,而TSN提供了底层网络实现该需求的工具。当前,TSN与TRDP的融合已成为研究热点。文献[12]通过TSN网关设备将TRDP映射为TSN的优先级,实现协议适配;文献[13]则重点关注终端设备的实时性,借助实时操作系统提高TRDP应用层的发包准确性。然而,这些研究局限于优先级映射或终端发送优化,并未在网络层面实现硬实时隔离与流量调度。同时,文献[14-15]虽已开展TSN流量调度优化的研究,但多集中于通用的调度算法理论,尚未系统性地解决TSN与TRDP之间的跨层协同问题,即如何将TRDP应用层的特

定时间需求（如周期、截止时间）精确建模并转换为 TSN 链路层的 GCL，并解决 TRDP 长期运行中的时间漂移问题。尽管 TSN 为列车确定性通信描绘了广阔前景，但其与 TRDP 的有效融合仍然面临着一系列核心挑战。这种融合不是简单的硬件替换和优先级映射，仅将 TRDP 优先级映射到 TSN 服务质量（QoS）队列，依然无法避免高优先级队列内部的竞争和排队抖动，难以满足时间关键型业务对硬实时截止时间的严苛要求。因此，亟须建立系统性的跨层协同机制，将上层 TRDP 应用的多样化时间确定性需求，精确映射并保障于底层 TSN 的调度机制中。若简单地将 TRDP 运行于 TSN 之上，不仅难以保证调度效率和网络资源的合理利用，甚至在复杂流量模式下无法为所有关键业务提供确定性保障。目前，针对这一跨层、多周期协同调度问题，学术界和工业界尚缺乏系统的建模与高效的求解方法。针对上述问题，本文提出一种 TSN 与 TRDP 融合的时间敏感列车通信网络方案，主要贡献概括如下。

(1) 构建了 TSN 与 TRDP 融合的时间敏感列车通信网络。通过分层设计，将列车车载应用系统的多样化服务需求，构建为 TRDP 的周期性和非周期性通信服务模型，并系统地映射至底层 TSN，利用 TSN 的时间同步和门控调度机制，保障 TRDP 时间敏感流量端到端的确定性传输。

(2) 提出了 TSN 与 TRDP 协同机制，并设计了 GCL 求解算法。通过分析 TRDP 时间敏感流量传输的时间误差来源，将 TSN 与 TRDP 协同建模为以最小化网络资源占用为目标的约束优化问

题，并提出基于最早截止时间优先策略的 GCL 生成算法进行求解。

(3) 通过实验验证了所提时间敏感列车通信网络方案的性能。实验结果表明，与传统基于以太网的列车通信网络方案相比，本文方案能够显著提升周期性时间敏感数据的发送时间准确性与周期稳定性，并在混合背景流量下大幅降低端到端传输时延抖动。

1 时间敏感列车通信网络架构

1.1 列车通信数据流量分类

列车通信网络主要承载监视数据、过程数据、消息数据、流数据和尽力而为数据 5 种类型的数据，具有显著的异构性与混合性^[16-17]。列车通信数据类型与服务参数典型值见表 1。根据数据的周期性特征可以分为以下两种流量类型。

(1) 周期性安全关键流量：主要包括监视数据与过程数据。这类流量以严格固定的周期产生，用于列车的实时控制与状态监控。它们必须在严格的硬实时截止时间内被确定性地传输，任何一次超时或丢失都可能直接影响列车运行安全。

(2) 事件驱动型关键流量：主要包括消息数据与流数据。这类流量虽不具备严格的周期性，但用于故障诊断、日志记录等重要功能，同样具有明确的截止时间要求。它们的产生具有突发性，对网络的动态响应能力和资源预留提出了挑战。

1.2 基于 TSN 与 TRDP 的时间敏感列车通信网络架构

TRDP 是专为列车通信设计的应用层协议，

表 1 列车通信数据类型与服务参数典型值

数据类型	主要特征	最小周期	最大时延	最大抖动	传输优先级
监视数据	列车通信网络运行需要的数据，如网络拓扑管理、网络冗余控制等	10 ms	10 ms	10 ms	最高
过程数据	列车控制和监视需要的实时数据，如牵引/制动控制、速度信号等	20 ms	10 ms	10 ms	高
消息数据	列车控制和监视需要的数据，如故障告警、诊断请求等	非周期	100 ms	—	中
流数据	视频和音频流数据，如批量日志传输	非周期	125 ms	25 ms	较低
尽力而为数据	块数据和其他网络数据，如文件传输、服务访问等	非周期	—	—	最低



它通过过程数据（process data, PD）消息和消息数据（message data, MD）消息为周期性数据和非周期性数据提供标准化通信服务。然而，TRDP的性能高度依赖于底层网络。当运行在传统以太网上时，网络的“尽力而为”特性使得TRDP流量的时延与抖动变得不可预测，难以满足时间关键型业务的严格时间要求。TSN作为新一代以太网技术，具有有界时延、零拥塞丢包和高可靠性的特点。将两者融合，在现有TSN能力基础上对列车应用的端到端确定性要求加以适配和优化，可以为TRDP上层定义的各类列车时间关键型业务（如周期性PD和非周期性MD）提供有界的端到端时延保障。TSN与TRDP融合的时间敏感列车通信网络架构如图1所示，该架构主要包括如下模块。

(1) 物理层：列车车载设备通过TSN网桥相互连接，利用TSN的确定性与实时性，保证数据在物理层面传输的可靠性。

(2) 数据链路层：主要依托TSN技术实现，包括时间同步管理、时间戳接口、时钟选择算法

和队列管理机制。TSN的时间同步机制能在整个网络中实现纳秒级的时间同步，确保所有设备之间的操作协调；TSN的调度机制通过GCL控制数据流，将其分配至不同优先级队列，以满足不同流量的传输延迟和带宽需求。

(3) 网络层和传输层：TRDP的数据传输通过TCP/UDP进行封装，确保在网络层面的数据传输效率和灵活性。同时，TRDP依托TSN提供的高精度时间同步和流量调度机制，实现列车控制和监控系统中高实时性的数据传输。

(4) 会话层和表示层：负责将TRDP的用户数据报协议（user datagram protocol, UDP）封装到TSN可识别的以太网帧中。在封装过程中，需要确保TRDP数据报文的结构完整性，使TSN能够识别和传输TRDP数据，且不会对数据内容进行不必要的修改。通过标准化的数据封装，TRDP数据得以在TSN中高效、无缝传输，进而实现两者的深度融合。

(5) 应用层：列车车载应用系统在架构的最顶层。列车控制系统、运营支持系统和乘客信息

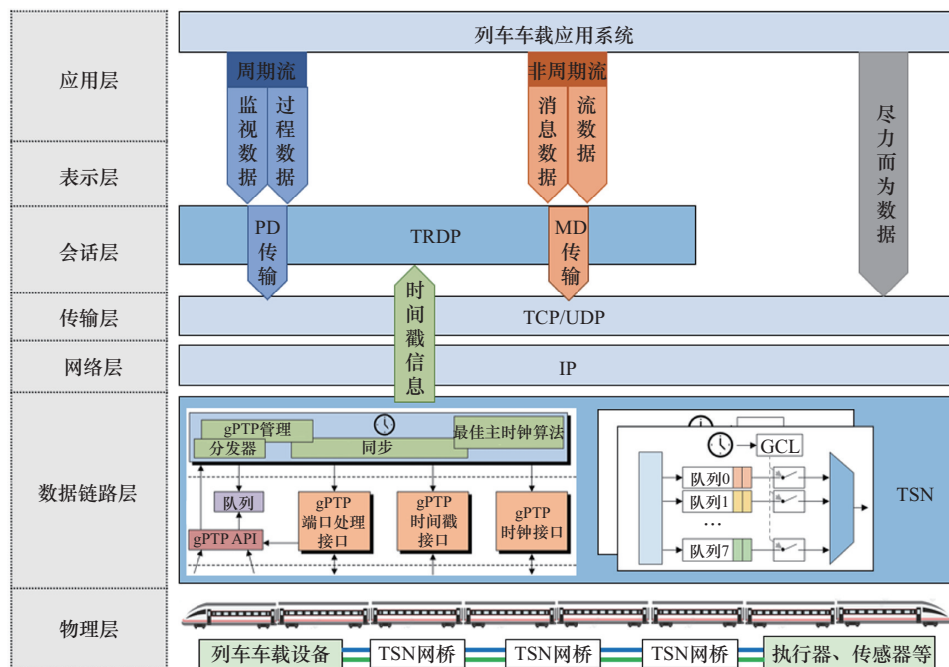


图1 TSN与TRDP融合的时间敏感列车通信网络架构

系统等应用通过标准化的接口调用 TRDP 和 TSN 功能，保证列车状态监控、控制指令发送和故障处理的实时性和稳定性。

该架构通过 TRDP 与 TSN 协同机制实现列车混合通信流量的全局调度。根据表1的分类，通过分析 TRDP 数据流的时延敏感度和重要性，利用 TSN 的时间触发调度机制处理周期性 PD 流量（如紧急制动指令、实时控制命令等高优先级的数据流），使其在传输过程中免受其他流量的干扰和拥塞，从而实现低抖动、零拥塞的确定性传输。针对事件驱动型 MD 流量（非周期，但仍需有界时延，如表1最大时延 100 ms 的特性），利用 TSN 基于信用的整形器处理为 MD 流量预留特定带宽并整形突发流量，确保其端到端时延被严格限制在可预测范围内，满足服务质量需求。针对尽力而为流量，使用最低的严格优先级队列。实现该架构的关键难点在于，为所有 PD 流计算出无冲突的 GCL 调度表，使 TSN 的流量管理功能与 TRDP 的实时性需求相结合，从而确保数据在复杂网络环境中的传输稳定性。具体协同机制将在下一节讨论。

2 TSN 与 TRDP 协同机制

2.1 时间同步模型与误差分析

TRDP 运行的周期准确性，是保障列车控制系统安全、稳定的基石。传统以太网由于缺乏统一的时间基准，无法从根本上保障 TRDP 的长期周期准确性。TRDP 和 TSN 的协同，可以有效解决 TRDP 消息长期时间失准问题。对于一个周期为 T 的 TRDP 数据流，其第 k 个数据包的理论发送时刻应为 $t_k^{\text{theory}} = (k-1)T$ 。然而，由于 TRDP 终端的本地时钟存在误差，实际发送时刻 t_k^{act} 会偏离理论值。在基于以太网的列车通信网络中，每个终端 i 的本地时钟 $C_i(t)$ 是自由运行的，其与理想全局时间 t 的关系可建模为：

$$C_i(t) = (1 + \rho_i) \cdot t + \theta_i(0) \quad (1)$$

其中， ρ_i 是时钟频率漂移率， $\theta_i(0)$ 是初始相位偏移。

由此可推导出，TRDP 发包时间的累积误差 $E_i(t_k^{\text{act}})$ 与运行时间呈线性关系，可表示为：

$$E_i(t_k^{\text{act}}) = t_k^{\text{act}} - t_k^{\text{theory}} \approx \rho_i \cdot t_k^{\text{act}} + \theta_i(0) \quad (2)$$

利用 IEEE 802.1AS 中的时间同步机制，可以周期性地校正 TRDP 终端的本地时钟。假设时间同步周期为 T_{sync} ，在每个时间同步周期末尾，TSN 的时间同步机制会将因漂移而累积的误差重置，重置后的时间同步残余误差为 ϵ_n ，即：

$$E_i(n T_{\text{sync}}^+) = \epsilon_n \quad (3)$$

TRDP 发包时间在任何时刻 t 的最大误差 E_{max} 将被限制在一个极小的边界内：

$$E_{\text{max}} \leq \rho_i \cdot T_{\text{sync}} + \max(|\epsilon_n|) \quad (4)$$

由于 ρ_i 和 T_{sync} 都是微秒或者更小量级的值，因此最大误差将被严格限制在一个极小的边界内，且不会随时间累积。

全局时间基准是实现 TSN 时间触发调度的前提，确保了 TRDP 终端（发布者）的本地时钟与网络中所有 TSN 网桥的时钟保持高精度同步（误差有界）。这种时间上的严格对齐，避免了时钟漂移导致 TRDP 数据错过 TSN 网桥为其预留的 GCL 门控窗口的问题，是保障所提调度机制可靠运行的基础。

2.2 时间触发的 TRDP 流量调度机制

在全局时间一致的基础上，为实现 TRDP 周期性流量与 TSN 的高效协同，避免资源冲突并最大化利用率，将 TRDP 周期性流量与 TSN 时间触发门控的协同建模为以最小化网络资源占用为目标的约束优化问题进行流量调度机制设计。假设 TRDP 周期性数据流集合 $\mathbf{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$ 。对于集合中的任一数据流 $s_i \in \mathbf{S}$ ，其特征由一个四元组表征：

$$s_i = (T_i, L_i, D_i, q_i) \quad (5)$$



其中： T_i 表示数据流 s_i 的发送周期，该参数与表1中各类业务的最小周期要求直接对应，如监视数据的周期为10 ms； L_i 表示数据流 s_i 的最大帧长度； D_i 表示数据流 s_i 的端到端最大可容忍时延，即其截止时间，为保证系统的实时响应能力，通常要求 $D_i \leq T_i$ ； q_i 表示该数据流所映射的TSN优先级队列，且 $q_i \in \{0, 1, \dots, 7\}$ ，该映射关系依据表1中业务的传输优先级。

假设网络链路的传输速率为 R （如1 Gbit/s），则数据流 s_i 的单帧最大传输时间 C_i 可表示为：

$$C_i = \frac{L_i \times 8}{R} \quad (6)$$

TSN调度的基本单位是GCL，它以固定的周期 T_{GCL} 循环执行。为保障调度周期的确定性和无死锁，GCL的周期应设置为所有周期性数据流周期的最小公倍数（least common multiple, LCM），以确保在一个周期内，每个数据流的实例都呈现整数次重复，即

$$T_{GCL} = \text{LCM}(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (7)$$

根据IEC 61375，TRDP周期性流量通常是一个基本周期（如10 ms）的整数倍（如10 ms、20 ms、50 ms、100 ms）， T_{GCL} 最大为TRDP应用中的最长周期流周期。

在多跳网络拓扑中，为所有TRDP周期性数据流（集合 S ）计算出一套全局一致、无冲突且满足每个数据流 s_i 的端到端截止时间 D_i 的GCL调度表，已被证明是一个NP难约束优化问题^[18]。鉴于该问题的计算复杂性和TRDP所承载周期性业务的时间关键属性，寻求计算上的精确最优解往往难以实现，而采用启发式算法寻找一个可行的调度解则更高效。协同机制需要在保障100%可调度性（即确保所有周期性业务的硬实时截止时间均被满足）的前提下，实现资源占用最小化。假设TRDP周期性业务队列的集合为 Q_{crit} ，最小化所有TRDP数据流预留的门控总时长，其

优化目标可表示为：

$$\text{Minimize } G_{total} = \sum_{q \in Q_{crit}} \sum_{k=1}^{N_q} \Delta t_{q,k} \quad (8)$$

其中， N_q 表示在一个 T_{GCL} 周期内队列 q 的门开启事件总次数， $\Delta t_{q,k}$ 表示第 k 次门开启事件的持续时间。

该优化问题必须在满足截止时间、调度无冲突和资源充足条件下进行求解。传统严格优先级调度机制并不直接利用TSN提供的时间信息，因此难以对具有严格截止时间约束的TRDP数据流提供确定性时延保障。为解决此问题，并考虑列车网络业务配置的静态特性，设计了一种基于最早截止时间优先策略的GCL生成算法（deadline-aware GCL scheduling algorithm, DAGS），用于计算满足所有TRDP周期性流量硬实时约束的可行GCL调度表。具体实现如算法1所示。

算法1 DAGS算法

输入：数据流集合 S ，链路速率 R

输出：调度表 $gcl_schedule$ 或调度失败

- (1) 根据式(7)计算门控周期， $T_{GCL} \leftarrow \text{LCM}(\{s.T | s \in S\})$
- (2) 生成 T_{GCL} 内所有数据流的实例集合 $instance_set$ ，并计算每个实例的绝对截止时间
- (3) 初始化GCL调度表 $gcl_schedule \leftarrow \emptyset$ 和当前时间 $current_time \leftarrow 0$
- (4) 生成待处理优先队列（按截止时间排序） $pending_set \leftarrow \emptyset$
- (5) while $instance_set$ 非空 or $pending_set$ 非空 do
 - (6) while $instance_set$ 中实例的到达时间 $\leq current_time$ do
 - (7) 将所有已到达的实例移入待处理队列 $pending_set$
 - (8) end while
 - (9) if $pending_set$ 为空 then

- (10) current更新到下一个实例continue;
 - (11) end if
 - (12) 从pending_set的实例best_instance
 - (13) 根据式(6)计算其传输时间C
 - (14) if current_time + C > best_instance
- 的截止时间 then
- (15) return 调度失败
 - (16) end if
 - (17) 在gcl_schedule中为best_instance
- 分配从current_time开始,时长为C的时隙
- (18) current_time ← current_time + C
 - (19) end while
 - (20) return gcl_schedule

DAGS采用一种构造性的时间驱动调度方法生成门控列表。算法先根据所有TRDP流量周期计算出门控周期 T_{GCL} ,并生成有限时间窗口内的所有待调度的数据流实例、当前时间和待处理优先队列。随后,将所有已到达的实例从instance_set移入pending_set。如果待处理队列为空,则快进到下一个实例的到达时间。在每个调度点,算法从所有已到达且未完成的实例中,依据最早截止时间优先策略选择当前最紧迫的实例进行分配,通过迭代逐步完成所有实例的流量调度。在分配时隙前,算法会进行可调度性检查,以满足截止时间要求。由于所有分配均在单一的串行时间线上进行,调度无冲突得到了隐式满足。该过程持续至

所有实例均被成功调度,最终构造出一个确保所有TRDP关键流量满足其硬实时截止时间的可行调度表。

DAGS算法需要生成在一个 T_{GCL} 内的所有流量实例(数量为 N_{inst}),实例总数为 $\sum(T_{GCL}/T_i)$,算法使用基于最早截止时间的优先队列管理pending_set,每次选择best_instance的时间复杂度则为 $O(\log N_{inst})$,整体时间复杂度为 $O(N_{inst} \cdot \log N_{inst})$ 。由于实例数量固定,且GCL为离线计算,因此该算法在拓扑固定、流量已知的列车静态网络中具有良好的时间复杂度和可扩展性。

3 实验验证与分析

3.1 实验设计

为在真实环境中验证基于TSN与TRDP融合的时间敏感列车通信效果,构建了一个模拟典型列车通信网络场景的实验床,其配置如图2所示。实验床包括1个由6台TSN交换机级联组成的线性拓扑骨干网,用以模拟列车车厢间的通信链路;2台工业计算机分别作为TRDP发布者和TRDP订阅者,负责PD消息的收发。时间敏感网络的时钟基准由1台通过北斗卫星信号获取高精度UTC时间的网络服务器提供。此外,网络控制器负责运行本文设计的DAGS算法,为整个TSN计算并下发GCL配置。为模拟真实列车网络中混合业务共存的复杂环境,实

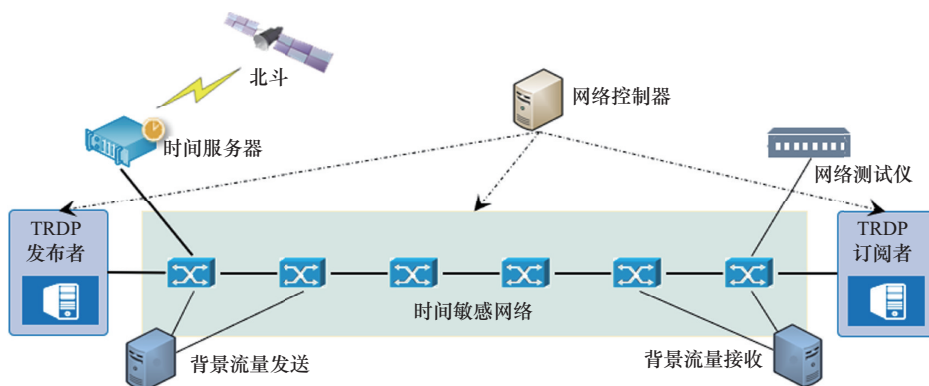


图2 实验床配置



验床还包括专门的背景流量发送和接收端。网络中的数据包由一台网络测试仪进行捕获与分析。

实验过程中, 首先将所有 TSN 交换机的时间同步和门控调度功能关闭, 使其退化为普通的以太网交换机, 用于模拟基于传统以太网的列车通信网络方案并将其作为对比基线; 然后, 根据本文所提时间敏感列车通信网络方案, 启用完整网络功能, 时间服务器提供全局同步, 网络控制器下发 GCL 至所有交换机, 交换机严格执行时间触发调度, 与基于传统以太网的列车通信网络方案进行性能对比。

实验流量按照列车通信网络中同时存在多类业务的情况进行设置, 包括周期性的 PD 流量 (发送周期为 20 ms)、非周期性的 MD 流量 (突发大小为 68 byte, 占用系统带宽 10%) 以及尽力而为流量 (占系统带宽 70%)。实验中, 周期性 PD 流量作为测试流量, 其他流量作为背景流量, 主要测试 PD 流量在混合流量场景下的端到端时延。此外, 为验证系统的长期稳定性, 进行了 12 h 的连续测试。在订阅者端, 通过网络测试仪捕获所有到达的 TRDP 数据包, 并记录其高精度的时间戳, 用于后续的发包时间准确性和周期稳定性分析。

3.2 TRDP 发包时间准确性分析

基于传统以太网的列车通信网络和时间敏感列车通信网络的 PD 消息发送时间累积误差对比如图 3 所示。在基于传统以太网的列车通信网络方案中, PD 消息发送时间的累积误差随着测试时间的推移呈现显著的线性增长, 与式 (2) 的理论分析相符。这说明在缺乏全局时间基准的网络中, 终端本地时钟频率漂移会产生微小误差, 并在长时间运行中不断累积, 最终导致 TRDP 的周期性行为发生严重退化, 使其发包时刻与理论时间之间出现巨大且不可接受的偏差。

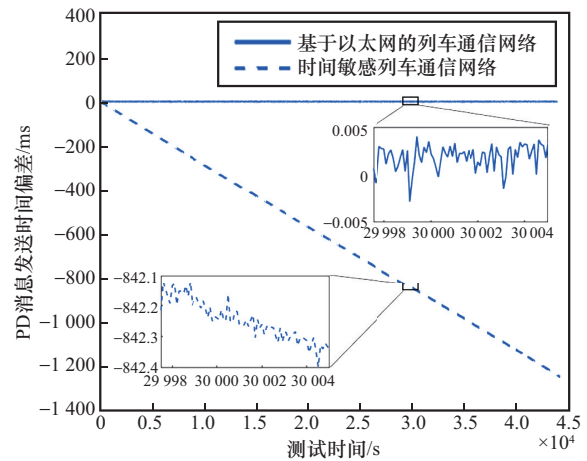


图3 PD消息发送时间累积误差对比

相比之下, 本文提出的时间敏感列车通信网络方案表现出了稳定的时间准确性。在整个测试期间, PD 消息的发送时间误差始终被控制在一个极小的范围内 ($\pm 5 \mu\text{s}$), 并未出现明显的累积效应。这与式 (4) 中误差有界性模型的理论分析相符。

实验结果表明, TSN 和 TRDP 的融合机制可以周期性地本地时钟与全局主时钟进行校正, 消除本地时钟相位误差的无限累积问题, 从而确保 TRDP 的发送行为在长时间维度上始终与全局时间基准保持高度一致。

3.3 TRDP 发包周期稳定性

两种方案的 PD 消息周期稳定性对比如图 4 所示。从图 4 (a) 中可以看出, 基于传统以太网的列车通信网络方案的 PD 消息周期波动范围明显大于本文所提时间敏感列车通信网络方案。图 4 (b) 进一步揭示了两种方案在统计分布上的差异, 基于传统以太网的列车通信网络方案的 PD 消息周期数据分布更为分散, 其箱体更长, 上下虚线覆盖的范围更广, 表明其发送周期抖动更大, 存在更多的极端偏离值。相比之下, 本文所提方案的测试数据在 19.8 ms 附近更集中, 箱体更短, 数据分布更紧凑。

这一结果表明, 上层 TRDP 应用的周期发送

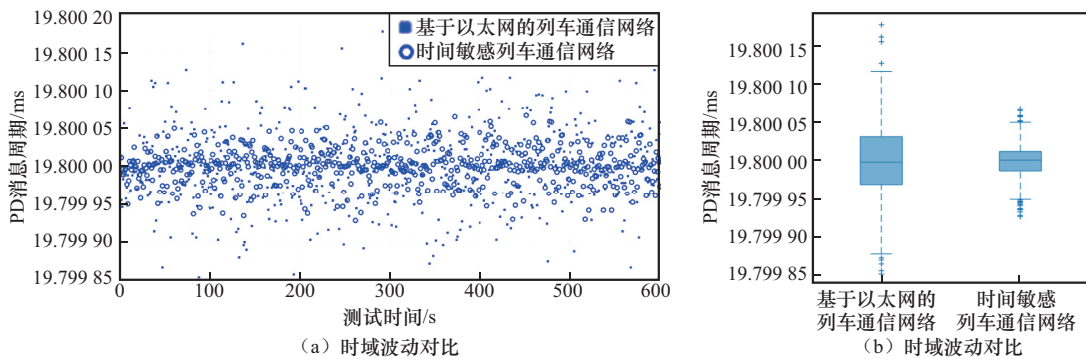


图4 PD消息周期稳定性对比

行为依赖自由运行的本地时钟进行周期计数。本地时钟的微小抖动和频率不确定性会直接转化为发送周期的不稳定性，导致PD消息周期呈现出较大的波动。通过TSN和TRDP的融合，利用TSN的时间同步能力提升终端本地时钟的频率准确度，可显著增强TRDP业务的周期稳定性，为列车控制等需要精确节拍的应用提供可靠的通信保障。

3.4 TRDP流量端到端时间确定性分析

为进一步验证TRDP与TSN融合对系统性能提升的效果，进行了TRDP流量端到端传输时延及抖动特性测试与分析。PD消息的端到端时延对比如图5所示。在基于传统以太网的列车通信网络环境下，受背景流量的影响，PD流量的端到端时延呈现出剧烈的、大幅度的随机波动，端到端时延峰值接近300 μs，时延抖动超过200 μs。这表明在缺乏有效调度机制的情况下，PD消息在网络传输过程中会持续受到其他流量不可预测的干扰和拥塞影响，导致端到端时延出现不确定性的抖动，无法满足时间关键型业务的硬实时通信需求。相比之下，在时间敏感列车通信网络环境下，PD流量的端到端时延被严格稳定在110 μs附近极窄的范围内，最大时延抖动差仅为6.89 μs。该结果证明，本文所提方案采用的时间触发流量调度机制通过为TRDP时间关键流量预留专属的、无冲突的传输窗口，有效隔离了来自其他流量的干扰，将随机排队过程转化

为可预测的、确定性的传输过程，为列车时间关键型业务的可靠传输提供了具备确定性保障的通信基础。

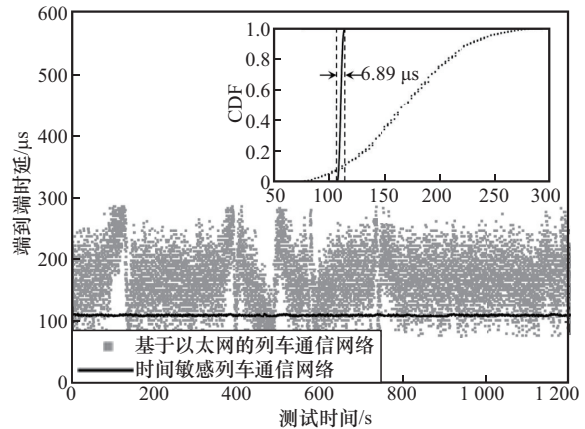


图5 PD消息端到端时延对比

4 结束语

本文提出了一种融合TSN与TRDP的时间敏感列车通信网络架构，通过分层设计将多样化列车车载应用系统服务需求经过TRDP映射到TSN网络，实现对列车混合关键性业务的确定性承载。在此基础上，设计了TSN与TRDP协同机制，该协同机制能够有效缓解由终端本地时钟漂移导致的时间累积误差，并通过时间触发调度机制为关键流量预留无冲突的传输窗口，从而消除网络拥塞带来的排队延迟与抖动。最后，通过仿真实验进行了性能分析与验证。结果表明，本文



所提方案显著提升了 TRDP 周期性数据的发送时间准确性与周期稳定性,大幅降低了端到端时延抖动,为构建下一代高可靠、高效率的列车通信网络提供了支撑。

参考文献:

- [1] Arriola A, MüNzer M, Geven A, et al. Safe4RAIL-2: advanced architectures and components for the next-generation train control and monitoring system [C]//Proceedings of 8th Transport Research Arena (TRA 2020). Helsinki: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2020:1-8.
- [2] Bao F, Yu H Y, Wang H. TSN-based backbone network of train control management system[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022: 5789444.
- [3] 杜振环,王欣立,周钧.基于时间敏感网络的智慧列车通信网络架构研究[J].*智慧轨道交通*, 2022, 59(1): 16-19.
Du Z H, Wang X L, Zhou J. Research on communication network architecture of smart train based on time-sensitive network[J]. *Smart Rail Transit*, 2022, 59(1): 16-19.
- [4] 张玉琢,曹源,闻映红.基于交换式以太网的列车通信网络建模与性能分析[J].*通信学报*, 2015, 36(9): 181-187.
Zhang Y Z, Cao Y, Wen Y H. Modeling and performance analysis of train communication network based on switched Ethernet[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(9): 181-187.
- [5] 韩冰倩,张楠乔.无人值守全自动运行系统远程控制方案研究[J].*铁道通信信号*, 2023, 59(8): 15-22.
Han B Q, Zhang N Q. Research on remote control scheme of unattended automatic operation system[J]. *Railway Signalling & Communication*, 2023, 59(8): 15-22.
- [6] Ludicke D, Lehner A. Train communication networks and prospects[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(9): 39-43.
- [7] 程艳丽,尤新,乔长亮. TRDP 协议在列车控制管理系统中的应用[J].*通讯世界*, 2017(23): 332-333.
Cheng Y L, You X, Qiao C L. Application of TRDP protocol in train control and management system[J]. *Telecom World*, 2017(23): 332-333.
- [8] 赵辰阳,王立德,简捷,等.基于列车实时数据协议的以太网高速通信技术[J].*城市轨道交通研究*, 2019, 22(3): 85-89, 126.
Zhao C Y, Wang L D, Jian J, et al. Ethernet high-speed communication technology based on train real-time data protocol[J]. *Urban Mass Transit*, 2019, 22(3): 85-89, 126.
- [9] Liu T X, He D Q, Jin Z Z, et al. Research on flow scheduling of train communication based on time-sensitive network[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2024, 130: 102859.
- [10] Nasrallah A, Thyagaturu A S, alharbi Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(1): 88-145.
- [11] 董衡,王婵.时间敏感网络及其在轨道交通领域的应用探讨[J].*控制与信息技术*, 2021(1): 95-98, 105.
Dong H, Wang C. Time-sensitive network and its application in rail transit[J]. *Control and Information Technology*, 2021(1): 95-98, 105.
- [12] 齐玉玲,黄涛,张军贤,等.基于时间敏感网络的列车通信网络研究及应用[J].*城市轨道交通研究*, 2024, 27(5): 184-189.
Qi Y L, Huang T, Zhang J X, et al. Research and application of train communication network based on time sensitive network[J]. *Urban Mass Transit*, 2024, 27(5): 184-189.
- [13] 王欣立,张立斌,杜振环,等.基于实时 Linux 的端设备 TRDP 与 TSN 在列车通信网络的融合技术研究[J].*铁道机车与动车*, 2024(5): 15-18.
Wang X L, Zhang L B, Du Z H, et al. Research on fusion technology of terminal equipment TRDP and TSN in train communication network based on real-time linux[J]. *Railway Locomotive and Motor Car*, 2024(5): 15-18.
- [14] 贺德强,王亚松,陈彦君,等.基于分层调度算法的列车通信网络实时性研究[J].*铁道学报*, 2020, 42(11): 102-109.
He D Q, Wang Y S, Chen Y J, et al. Research on real-time performance of train communication network based on hierarchical scheduling algorithm[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(11): 102-109.
- [15] 梁晨,贺德强,任子阳,等.基于时间敏感网络的列车通信网络实时流量调度优化[J].*铁道科学与工程学报*, 2024, 21(1): 58-69.
Liang C, He D Q, Ren Z Y, et al. Real-time traffic scheduling optimization of train communication network based on time-sensitive network[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(1): 58-69.
- [16] IEC 61375-1:2012 Electronic railway equipment—Train communication network(TCN)—Part 1: General architecture[S]. 2012.
- [17] IEC 61375-2-3:2015/COR2:2016 Electronic railway equipment—Train communication network (TCN)—Part 2-3: train real-time data protocol (TRDP)[S].
- [18] Craciunas S S, Oliver R S, Chmelik M, et al. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1Qbv time sensitive networks[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. New York: ACM Press, 2016: 183-192.

[作者简介]



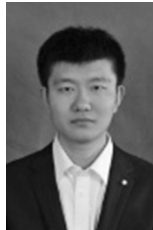
李洪星 (1990-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室博士后, 主要研究方向为时间同步、时间敏感网络和下一代列车通信网络。



赵东 (1989-), 男, 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所工程师, 主要研究方向为列车车载系统、轨道交通安全计算机和时间敏感网络。



姚辰龙 (2000-), 男, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为时间敏感网络和网络时间同步。



陈立 (1989-), 男, 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所助理研究员, 主要研究方向为列车车载系统、安全计算机平台和时间敏感网络。



赵晓宇 (1990-), 女, 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所副研究员, 主要研究方向为轨道交通安全计算机、列车控制系统和时间敏感网络。



寿国础 (1965-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院教授, 主要研究方向为接入网络与边缘计算、光纤与无线网络虚拟化、网络构建与路由和移动互联网与应用。