# 有线通信网络时延问题分析及优化策略

刘少文
中国瑞林工程技术股份有限公司，江西 南昌 330000

DOI: 10.61369/TACS.2026070036

**摘　　要：** 随着工业互联网、算力网络、实时金融交易等低时延业务快速普及，传统有线通信网络尽力而为的传输机制已无法满足微秒级、确定性、低抖动的时延需求。有线网络时延不再仅由物理传输距离决定，而是受设备转发机制、网络拥塞、调度算法、虚拟化架构等多重因素耦合影响。

**关 键 词：** 有线通信网络；网络时延；确定性传输；TSN；AI 调度；时延优化

## Analysis and Optimization Strategies of Latency Issues in Wired Communication Networks

Liu Shaowen
China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330000

**Abstract:** With the rapid proliferation of low-latency services such as industrial internet, computing power networks, and real-time financial transactions, the best-effort transmission mechanism of traditional wired communication networks can no longer meet the requirements for microsecond-level, deterministic, and low-jitter latency. Wired network latency is no longer determined solely by physical transmission distance but is instead influenced by a combination of factors, including device forwarding mechanisms, network congestion, scheduling algorithms, and virtualized architectures.

**Keywords:** wired communication networks; network latency; deterministic transmission; TSN; AI scheduling; latency optimization

## 引言

在数字经济深度发展的当下，有线通信网络作为信息传输的核心载体，承担着数据中心互联、工业生产控制、金融实时交易、政务专网传输等关键业务，其传输时延性能直接决定业务服务质量与系统运行稳定性。不同于无线通信网络受信道干扰、多径衰落等不确定因素影响，传统认知中有线网络具备低干扰、高带宽、高稳定性的优势，但随着网络业务从传统的网页浏览、文件传输向实时交互、高精度控制、算力协同等场景迭代，现有有线网络的时延短板日益凸显。

## 一、有线通信网络时延构成与产生机理

有线通信网络端到端时延是数据包从发送端传输至接收端的总耗时，由物理传输时延、设备转发时延、队列排队时延、协议处理时延四大核心部分组成，各时延成分的产生机理与影响特性存在显著差异，具体分析如下：

### （一）物理传输时延

物理传输时延是数据包在光纤、网线等传输介质中传播产生的固有时延，属于不可消除的基础时延，仅与传输距离和介质传输速率相关。光在光纤中的传播速度约为20万公里/秒，以此计算，1000公里光纤传输的理论物理时延约5ms，该时延为有线网络传输的物理极限，无法通过算法优化消除。

在实际组网中，不合理的路由规划、冗余链路部署会大幅增加传输距离，导致物理时延被动增大。同时，光纤链路老化、接头损耗、线路干扰等问题会引发信号衰减，触发设备信号补偿机制，间接增加传输耗时，造成物理时延波动[1-2]。

### （二）设备转发时延

设备转发时延是交换机、路由器、网关等网络设备处理数据包产生的时延，是影响短途有线网络时延的核心因素。传统有线设备采用存储转发机制，需要完整接收一帧数据包后，再解析帧头、匹配路由、转发数据。以千兆以太网为例，完整接收1500字节MTU的数据包需要12μs，仅接收阶段的耗时就构成了主要转发时延。

同时，设备硬件性能、转发机制、固件配置直接影响转发时延大小。低端设备CPU、缓存性能不足，在高流量负载下转发处理效率下降；传统存储转发模式流程繁琐，而新兴的直通转发模式可仅接收前64字节帧头信息即可启动转发，大幅缩短转发耗时。此外，SDN、NFV虚拟化设备的多层虚拟转发架构，会

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

引入额外的虚拟化层处理时延，成为新型有线网络的时延新增来源[3-5]。

**（三）队列排队时延**

队列排队时延是数据包到达设备端口后，因端口资源被占用，进入缓存队列等待转发产生的时延，是有线网络时延抖动、时延波动的主要诱因。有线网络多业务混合传输场景下，不同带宽、不同优先级的数据包抢占端口资源，传统 FIFO 先来先服务调度算法无优先级区分，关键实时业务与普通业务排队优先级一致，易导致实时数据包长时间排队。

当网络带宽利用率超过70% 时，链路拥塞概率大幅提升，队列缓存溢出、数据包积压问题频发，排队时延会呈指数级增长。同时，传统队列管理机制缺乏动态调控能力，无法根据流量变化调整队列长度与调度优先级，进一步加剧时延不确定性。

**（四）协议处理时延**

协议处理时延是网络协议封装、解析、校验、重传等操作产生的时延。传统以太网 CSMA/CD 机制存在冲突检测与重传机制，在高并发场景下数据包冲突概率提升，重传操作会大幅增加传输时延。TCP 协议为保障传输可靠性，设置滑动窗口、拥塞控制、确认应答机制，传统 CUBIC、Reno 拥塞算法在动态流量场景下易出现窗口震荡、误判拥塞的问题，引发不必要的等待与重传，增加协议处理时延。

## 二、有线通信网络时延现存核心问题及传统优化局限

**（一）现存核心时延问题**

1. 时延确定性差，抖动波动剧烈

传统有线以太网为尽力而为传输模式，无严格的资源预留与时隙调度机制，网络流量动态变化时，排队时延、转发时延随机波动，导致端到端时延稳定性差。普通办公网络时延抖动可忽略不计，但工业控制、精密测控等场景对时延抖动要求严格，微秒级抖动即可影响业务运行，现有网络机制难以满足确定性时延需求。

2. 多业务调度失衡，关键业务时延无法保障

当前有线网络普遍存在多业务混合传输场景，实时控制、金融交易等核心低时延业务，与视频下载、数据备份等大带宽非实时业务共用链路资源。传统 QoS 调度机制优先级划分粗糙，动态适配能力弱，高带宽业务抢占资源会导致核心实时业务排队时延激增，出现关键业务时延超标、服务质量下降的问题[6-8]。

3. 虚拟化架构引入新增时延，优化体系缺失

现代有线网络普遍采用 SDN/NFV 虚拟化架构，通过控制面与数据面分离实现网络灵活调度，但虚拟化层的报文封装、虚拟交换机转发、控制器交互等操作会引入额外时延。目前多数网络优化方案聚焦于物理设备与链路优化，忽略虚拟化层时延损耗，导致整体时延优化效果受限。

**（二）传统时延优化方案及局限性**

1. 硬件升级优化

传统硬件优化主要通过更换高性能交换机、升级千兆 / 万兆链路、扩容缓存空间降低时延。该方案可一定程度减少设备转发瓶颈，但存在成本高、优化上限低的问题，仅能解决硬件性能不足导致的时延问题，无法改善队列拥塞、协议缺陷、调度不合理引发的时延波动，且无法适配动态流量场景。

2. 静态 QoS 与队列调度优化

通过配置静态优先级队列、端口限速、VLAN 流量隔离等 QoS 策略，区分业务优先级、隔离广播域，缓解业务抢占问题。但该策略为静态配置，无法根据实时流量负载动态调整优先级与带宽分配，在突发流量场景下优化效果失效，且无法从根源解决时延不确定性问题。

3. 传统拥塞控制算法优化

主流 TCP 拥塞算法以 CUBIC、Reno 为主，通过调整传输窗口规避拥塞，但此类算法依赖丢包判断拥塞状态，存在判断滞后、窗口震荡的问题，在高带宽、低时延需求场景下适配性差，易引发时延波动与不必要重传[9-10]。

## 三、新型有线通信网络时延分层优化策略

针对有线网络时延的多维度成因与传统优化方案的局限性，本文结合 TSN 确定性传输、DetNet 广域保障、AI 智能调度、硬件转发革新等前沿技术，构建物理层、设备层、调度层、架构层、算法层五层协同的时延优化体系，实现端到端超低时延、确定性时延、低抖动传输。

**（一）物理层：链路优化与路由精简，压缩基础时延**

物理层优化核心是消除冗余物理时延，最大化贴近传输物理极限。首先，开展链路精细化整治，更换老化光纤、优化线路接头布局，减少信号衰减导致的时延波动；梳理组网拓扑，删减冗余路由链路，优化跨区域传输路径，减少路由跳数，避免人为增加传输距离。其次，大规模部署 WDM 波分复用技术，在单根光纤中实现多波长并行传输，提升链路带宽利用率，避免带宽瓶颈引发的间接时延损耗。

同时，针对长距离传输场景，合理部署中继设备，优化信号再生机制，在保障信号质量的前提下压缩信号处理耗时。通过物理层优化，可最大限度降低固有物理时延的额外损耗，为上层时延优化奠定基础。

**（二）设备层：转发机制革新与硬件性能调优**

设备层聚焦降低转发时延与硬件处理时延，突破传统存储转发机制瓶颈。一是推广直通转发（Cut-through）机制，替代传统存储转发模式，设备仅解析数据包前64字节帧头信息，确认目标端口后立即启动转发，将单帧转发时延从12μs压缩至5μs以内，大幅提升短途转发效率。二是启用设备硬件转发功能，关闭防火墙、交换机不必要的安全检测、日志记录等冗余功能，降低设备 CPU 与缓存负载，减少硬件处理耗时。

针对 SDN/NFV 虚拟化设备，优化虚拟转发架构，精简虚拟交换机转发层级，整合冗余虚拟化功能，减少虚拟层报文封装与解析时延。同时，合理扩容设备端口缓存，优化缓存分配机制，避免缓存不足引发的数据包丢弃与重传时延。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License. 

**（三）调度层：确定性时隙调度与 QoS 动态优化**

调度层是解决时延抖动、保障时延确定性的核心，融合 TSN 与 DetNet 技术构建端到端确定性调度体系。在局域网场景中，部署 TSN 时间敏感网络机制，通过流量整形、时隙预留、帧抢占技术，为工业控制、实时交易等核心业务划分专属传输时隙，实现数据包无排队、无抢占传输，彻底消除随机排队时延。

在广域网场景中，引入 DetNet 确定性网络架构，通过全网资源统一预留、拥塞保护、路径锁定机制，实现三层网络端到端零拥塞、低抖动传输，解决传统广域网时延不确定问题。同时，优化 QoS 调度机制，摒弃静态优先级配置，基于业务时延需求划分多级服务等级，实时监控链路负载，动态调整核心业务带宽配额与队列优先级，保障关键业务时延稳定。

**（四）算法层：AI 时延预测与智能拥塞调控**

针对传统静态算法适配性差、响应滞后的问题，引入神经网络智能调控算法，实现时延动态优化。构建基于 BP 神经网络的时延预测模型，实时采集网络流量、链路负载、队列长度、路由跳数等多维数据，训练模型精准预测未来短时间内的网络时延变化趋势。基于预测结果设计动态 PID 控制器，实时调整网络调度参数、拥塞窗口大小与路由路径，提前规避拥塞与时延激增问题。

**（五）架构层：网络扁平化与虚拟化优化**

优化整体网络架构，推进网络扁平化改造，删减冗余组网层级，减少数据转发跳转次数，降低多层设备转发累积时延。重构 SDN 网络控制逻辑，优化控制器与转发设备的交互机制，缩短控制指令传输时延，提升全网调度响应速度。

针对虚拟化网络时延问题，优化 NFV 功能部署模式，将时延敏感型业务对应的虚拟功能节点下沉至边缘设备，减少跨节点数据交互时延；整合冗余虚拟网络功能，简化报文封装流程，降低虚拟化层处理损耗。同时，部署全网负载均衡机制，实现流量智能分流，避免单设备、单链路过载引发的时延激增。

## 四、优化方案效果分析与场景验证

**（一）仿真实验环境搭建**

为验证本文分层优化策略的有效性，基于 NS-3 仿真平台搭建典型有线混合网络场景，模拟工业专网、数据中心互联两大核心场景。网络拓扑包含核心交换机、汇聚交换机、边缘接入设备、虚拟化网关，配置实时控制业务、金融交易业务、大带宽数据传输业务三类混合流量，对比传统优化方案与本文分层优化方案的时延、时延抖动、丢包率三项核心指标。实验参数设置：链路带宽 10Gbps，传输距离 50-1000km，业务并发量 1000 路，仿真时长 300s。

**（二）实验结果与分析**

仿真实验结果如表 1 所示，相较于传统优化方案，本文分层协同优化方案的各项性能指标均大幅提升。在平均时延方面，传统优化方案平均时延为 18.6ms，本文方案优化后降至 6.2ms，时延降低 66.7%；在时延抖动方面，传统方案抖动幅度为 ±3.2ms，本文方案抖动控制在 ±0.4ms 以内，时延稳定性显著提升；在丢包率方面，优化后丢包率趋近于 0，彻底解决拥塞丢包引发的重传时延问题。

## 五、结论

本文针对新一代业务场景下有线通信网络时延高、抖动大、确定性差的问题，系统拆解了物理传输、设备转发、队列排队、协议处理四类时延的产生机理，深入剖析了传统时延优化方案的局限性。结合当下前沿网络技术，构建了物理层链路精简、设备层转发革新、调度层确定性保障、算法层智能调控、架构层网络扁平化的五层协同时延优化体系。

## *参考文献*

[1] 银健钧 .5G 时代下有线电视网络中数字通信技术的实践应用 [J]. 安家，2024(7):0022-0024.

[2] 赵廷钊，原生芾，李朝飞，等 .F5G 工业光环网通信技术及其在煤矿的应用与展望 [J]. 工矿自动化，2023，49(4):9-14.

[3] 金国钧 . 三网融合与有线电视网络改造 [C]// 全国城市有线电视技术研讨会 . 中国电子学会，2010.DOI:CNKI:SUN:YXDJ.0.2010-10-004.

[4] 俞涵 . 移动互联网切换关键技术的研究 [D]. 2011.DOI:http://dspace.xmu.edu.cn:8080/dspace/handle/2288/51382.

[5] 庄爱云 . 无线传感网络多信道 MAC 协议的研究 [J]. 2009.

[6] 王小龙 . 面向工业互联网场景的低时延高可靠传输机制研究 [D]. 北京工业大学 ,2023.

[7] 王华伟，高阳，李海龙，等 . 无线通信技术在高速列车网络控制系统中的应用 [J]. 城市轨道交通研究，2025，28(2):140-143.

[8] 邹艳芳 . 基于可见光通信的矿下光电混合网络组网关键技术研究 [D]. 战略支援部队信息工程大学 ,2016.

[9] 丁世来，乔郑荣 . 基于工业互联网的安全生产管理平台研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验，2024，42(6):21-26.

[10] 何江涛 . 基于 IEEE 802.15.4 的网络化控制系统的滤波与控制 [D]. 浙江工业大学 ,2020.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.